令和 2 年度

高レベル放射性廃棄物等の
地層処分に関する技術開発事業

地層処分施設閉鎖技術確証試験

報告書

令和 3 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、令和２年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業「地層処分施設閉鎖技術確証試験」の事業報告書である。

目次

1. 緒言 1
1.1 本事業の背景と目的 1
1.2 本事業における研究開発、技術開発の全体フレーム 2
1.3 本年度の実施概要 3
1.3.1 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備 3
1.3.2 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発 5
2. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリングの設計・評価技術の整備- 7
2.1 シーリングシステム長期性能評価技術開発 7
2.1.1 背景・目的・研究アプローチ 7
2.1.2 実施概要 8
2.1.3 令和 2 年度の成果 9
2.1.4 今年度成果のまとめ 102
2.2 埋め戻し材の再冠水挙動、ベントナイトの流出・侵入 105
2.2.1 背景・目的 105
2.2.2 令和 2 年度の実施内容 105
2.2.3 令和 2 年度の成果 106
3. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリング技術の性能確認- 136
3.1 膨潤挙動評価試験 136
3.1.1 背景・目的・実施内容 136
3.1.2 膨潤基礎試験 137
3.1.3 膨潤挙動相互作用試験 140
3.1.4 まとめ 166
3.2 EDZ シーリング試験 168
3.2.1 背景・目的・実施概要 168
3.2.2 ベントナイトの吹付け施工に係る文献調査 169
3.2.3 地上におけるベントナイト系材料の吹付け施工性確認試験 178
3.2.4 EDZ シーリング原位置試験 231
3.2.5 まとめ 239
3.3 掘削影響領域の連続性等に関わる調査技術開発 242
3.3.1 EDZ(Excavastion damaged Zone) の物理特性の取得 244
3.3.2 EdZ(Excavation disturbed Zone)の連続性調査技術の高度化 268
3.3.3 EdZ の長期変遷に関する調査 298
3.4 ボアホールシーリング試験 348
3.4.1 背景・目的・実施内容 348
3.4.2 海外事例の文献調査 349
3.4.3 施工方法の検討 351
3.4.4 予備試験 355
3.4.5 まとめ 370
4. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリングに関わる施工技術の整備-. 372
4.1 背景及び目的 372
4.2 施工技術オプション整備のための研究開発計画 372
4.3 プロセス管理による埋め戻しの品質管理 374

4.3.1 プロセス管理手法が備えるべき要件 374
4.3.2 段階的プロセス管理 374
4.3.3 各施工技術のプロセス管理手法 376
4.3.4 各施工技術のプロセス管理の特徴 392
4.3.5 プロセス管理の手法の構築に向けた課題と開発の方向性 398
4.4 試験による性能目標管理指標と解析評価情報の整備 406
4.4.1 室内試験による埋め戻し材の材料特性データの拡充 406
4.4.2 施工試験及び要素試験によるプロセス管理の実践 414
4.4.3 埋め戻し材の浸透流解析の適用性確認に向けたデータ取得 466
4.5 まとめ 471
4.5.1 プロセス管理による埋め戻しの品質管理 471
4.5.2 試験による性能目標管理指標と解析評価情報の整備 471
4.5.3 埋め戻し材の浸透流解析の適用性確認に向けたデータ取得 472
5. 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発 -製作・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備- 475
5.1 背景及び目的 475
5.2 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備に向けた調査研究方針 475
5.3 品質保証プログラムの具体化 476
5.3.1 品質保証プログラムの整備に向けた調査研究方針 476
5.3.2 地下構成要素の製造・施工プロセス管理手法の構築に資する情報の整理 478
5.4 性能確認プログラムの具体化 500
5.4.1 性能確認プログラムの整備に向けた調査研究方針 500
5.4.2 地下構成要素に対する性能評価の実施内容 501
5.4.3 性能確認プログラムで取得すべき情報の分析 513
5.5 人工バリアを含む地下構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化 517
5.5.1 品質保証プログラム及び性能確認プログラムにおける計測技術の位置付け 517
5.5.2 埋め戻し材の乾燥密度に関する計測技術の研究開発 518
5.5.3 坑道天端の隙間に関する計測技術の研究開発 530
5.5.4 埋め戻し材の膨潤により発生する圧力に関する計測技術の研究開発 541
5.5.5 処分環境を想定した無線給電技術の研究開発 557
6. 結言 568
6.1 令和２年度の主な成果 568
6.2 おわりに 569

付録 1 シーリングシステム長期性能評価技術開発 ..... 付 1-1
付録 2 EDZ シーリング試験 ..... 付 2-1
付録 3 掘削影響領域の連続性等に関わる調査技術開発 ..... 付 3-1
付録 4 ボアホールシーリング試験 ..... 付 4-1
付録 5 埋め戻し材の材料データ ..... 付 5-1
付録 6 埋め戻し材の施工試験結果 ..... 付 6-1
付録 7 KBS-3H の概要 ..... 付 7-1
付録 8 フィンランドの性能評価 ..... 付 8-1
付録 9 人工バリアを含む地下構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化 ..... 付 9-1

図目次

図 1.2-1　本事業の到達目標と進め方 3
図 2.1-1　処分場の設計フロー 8
図 2.1-2　シーリングシステムが卓越した移行経路となりうる構造・要因 8
図 2.1-3　（a）埋め戻し材の変質に係る状態変遷オプションの概念（上図）および（b）各解析ケースにおける対象範囲のイメージ（下図） 11
図 2.1-4　ケース 1～12 の解析体系 14
図 2.1-5　坑道支保工の流れが拡散場における上部間隙の有無およびコンクリート材料の違いが埋め戻し材の変質に及ぼす影響 18
図 2.1-6　坑道支保工の流れが移流場における坑上部間隙の有無およびコンクリート材料の違いが埋め戻し材の変質に及ぼす影響 19
図 2.1-7　埋め戻し材上部間隙の大きさが埋め戻し材の変質に及ぼす影響 20
図 2.1-8　埋め戻し材上部の間隙の大きさ坑道支保工の材料の違いが埋め戻し材の変質に及ぼす影響 21
図 2.1-9　反応輸送解析モデルおよび周期的境界条件 23
図 2.1-10　解析モデルの概要 24
図 2.1-11　モンモリロナイト残存量、間隙率および pH の変遷（ケース 13） 25
図 2.1-12　鉱物組成の変遷（ケース 13） 26
図 2.1-13　pH 分布の変遷（ケース 13） 27
図 2.1-14　モンモリロナイト残存量、間隙率および pH の変遷（ケース 14） 28
図 2.1-15　鉱物組成の変遷（ケース 14） 29
図 2.1-16　pH 分布の変遷（ケース 14） 30
図 2.1-17　モンモリロナイト残存量、間隙率および pH の変遷（ケース 15） 31
図 2.1-18　ケース 15 の最上流セルにおける鉱物体積分率の 10 万年時点での比較 32
図 2.1-19　ケース 15 の最上流セルにおける pH 分布の経時変化 33
図 2.1-20　10 万年時点でのモンモリロナイト残存量および pH 分布（ケース 16） 34
図 2.1-21　埋め戻し材ー坑道支保工境界部における間隙率分布の変遷 35
図 2.1-22　埋め戻し材中の鉱物組成（10 万年時点） 36
図 2.1-23　モンモリロナイト残存量の変遷 37
図 2.1-24　昨年度モデルと本年度モデルの詳細度の差異 41
図 2.1-25　処分坑道埋め戻し材領域の区画分け　（①上部、②側部、③中央部） 41
図 2.1-26　3 次元モデル概念図 42
図 2.1-27　3 次元モデル外観図（4 本の立坑は ON/OFF が可能） 43
図 2.1-28　3 次元モデル各部位詳細図 44
図 2.1-29　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異 48
図 2.1-30　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異　（深成岩類、平行流動　２／２） 49
図 2.1-31　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異　（深成岩類、平行流動、支保目詰まり　１／２） 51
図 2.1-32　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異　（深成岩類、平行流動、支保目詰まり　２／２） 52
図 2.1-33　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異　（新第三紀堆積岩類、平行流動、粒子発生箇所：左下処分孔） 57

図 2.1-34　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異　（新第三紀堆積岩類、平行流動、粒子発生箇所：右上処分孔） 58
図 2.1-35　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異（新第三紀堆積岩類、平行流動、支保目詰まり、粒子発生箇所：左下処分孔） 60
図 2.1-36　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異　（新第三紀堆積岩類、平行流動、支保目詰まり、粒子発生箇所：右上処分孔） 61
図 2.1-37　第三紀堆積岩類、シーリングシステム劣化時、直交流動、立坑対角配置の各処分孔からの核種の移行挙動（上図における括弧内の数字は、岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除いた割合） 66
図 2.1-38　新第三紀堆積岩類、シーリングシステム劣化時、立坑片側配置の各処分孔からの核種の移行挙動（上図における括弧内の数字は、岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除いた割合） 68
図 2.1-39　新第三紀堆積岩類、シーリングシステム劣化時、立坑片側配置および止水プラグ処分パネル出入口設置ケースの各処分孔からの核種の移行挙動（上図における括弧内の数字は、岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除いた割合） 69
図 2.1-40　ボウタイ分析の概念 73
図 2.1-41　昨年度作成したボウタイモデル 73
図 2.1-42　本研究の進捗を踏まえたボウタイモデル 74
図 2.1-43　ESL における信頼性評価の算法（Evidence theory） 75
図 2.1-44　命題「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」についての Decision tree 78
図 2.1-45　信頼性の算法 79
図 2.1-46　構築した ESL モデル 84
図 2.1-47　エビデンスに基づく区間確率設定の考え方 85
図 2.1-48　主要命題「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」の評価結果 86
図 2.1-49　岩盤不均質性と廃棄体との位置関係 88
図 2.1-50　シーリングシステム劣化時の物質移行への影響（深成岩） 89
図 2.1-51　シーリングシステム劣化時の物質移行への影響（新第三紀堆積岩） 90
図 2.1-52　深成岩（坑道と地下水主流動方向直交レイアウト）の場合のレファレンスケースとシーリングシステム劣化ケースの水理解析結果の比較 91
図 2.1-53　深成岩（坑道と地下水主流動方向直交レイアウト）の場合のレファレンスケースとシーリングシステム劣化ケースの物質移行解析結果の比較 91
図 2.1-54　立坑配置を変更した場合における地下水流動解析結果 92
図 2.1-55　物質移行解析結果（上図：立坑片側配置図、下図：粒子軌跡） 93
図 2.1-56　立坑片側配置に加え止水プラグの有無を考慮した場合の地下水流動解析結果 94
図 2.1-57　立坑片側配置に加え止水プラグの有無を考慮した場合の物質移行解析結果 95
図 2.1-58　止水プラグの昨年度配置と今年度配置 96
図 2.1-59　本研究の進捗を踏まえたリスクマトリクス（新第三紀堆積岩） 97
図 2.1-60　本研究の進捗を踏まえたリスクマトリクス（深成岩） 98
図 2.1-61　本研究の進捗を踏まえた予防や影響緩和策に関する多角的な問題解決の連鎖（Project Issue Management） 101
図 2.2-1　埋め戻し材と緩衝材のパイピング・浸食の発生状況の模式図 106

図 2.2-2　予備試験に使用する容器 109
図 2.2-3　予備試験に使用する容器の寸法 110
図 2.2-4　通常の透水試験 110
図 2.2-5　ペレットを用いた浸潤試験（流出を考慮） 111
図 2.2-6　ブロックとペレットを用いた浸潤試験（流出を考慮） 111
図 2.2-7　通過流量確認試験の概要 112
図 2.2-8　ベントナイトペレット浸潤試験の結果（1mm ペレット、イオン交換水） 114
図 2.2-9　ベントナイトペレット浸潤試験の結果（10mm ペレット、イオン交換水） 115
図 2.2-10　ベントナイトペレット浸潤試験の結果（10mm ペレット、人工海水） 116
図 2.2-11　ベントナイトペレットのイオン交換水と人工海水の時の膨潤挙動の差 117
図 2.2-12　ベントナイトペレットのイオン交換水と人工海水の時の膨潤挙動の差 117
図 2.2-13　流出試験装置の構成 119
図 2.2-14　ペレットの充てん状況（左）および充てん後の状態（右） 120
図 2.2-15　累計注水量および区間注水量の経時変化（ケース 1：ペレット、イオン交換水） 122
図 2.2-16　定点カメラによるペレットの膨潤状況（ケース 1：ペレット、イオン交換水） ... 122
図 2.2-17　圧力の経時変化（ケース 1：ペレット、イオン交換水） 123
図 2.2-18　排水流量とベントナイト流出濃度（ケース 1：ペレット、イオン交換水） 123
図 2.2-19　ペレットおよびブロックの充てん状況（左）および充てん後の状態（右） 124
図 2.2-20　累計注入量および区間流入量の経時変化（ケース 2：ペレット＋ブロック，精製水） 125
図 2.2-21　定点カメラによるペレットの膨潤状況（ケース 2：ペレット＋ブロック、イオン交換水） 125
図 2.2-22　圧力の経時変化（ケース 2：ペレット＋ブロック，精製水） 126
図 2.2-23　排水流量とベントナイト流出濃度（ケース 2：ペレット＋ブロック，精製水） ... 126
図 2.2-24　ペレットおよびブロックの充てん状況（左）および充てん後の状態（右） 127
図 2.2-25　累計注入量および区間流入量の経時変化（ケース 3：ペレット，人工海水） 128
図 2.2-26　定点カメラによるペレットの膨潤状況（ケース 3：ペレット、人工海水） 128
図 2.2-27　ケース 3 で確認された水みち 129
図 2.2-28　圧力の経時変化（ケース 3：ペレット，人工海水） 129
図 2.2-29　排水流量とベントナイト流出濃度（ケース 3：ペレット，人工海水） 130
図 2.2-30　ペレットおよびブロックの充てん状況（左）および充てん後の状態（右） 131
図 2.2-31　累計注入量および区間流入量の経時変化（ケース 4:ペレット＋ブロック，人工海水） 131
図 2.2-32　定点カメラによるペレットの膨潤状況（ケース 4：ペレット＋ブロック，人工海水） 132
図 2.2-33　圧力の経時変化（ケース 4：ペレット＋ブロック，人工海水） 132
図 2.2-34　排水流量とベントナイト流出濃度（ケース 4：ペレット＋ブロック，人工海水） 133
図 3.1-1　膨潤圧試験装置の概要 138
図 3.1-2　供試体縦横比と最大膨潤圧の関係 139
図 3.1-3　有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係 139
図 3.1-4　人工バリア性能確認試験の概要 141
図 3.1-5　縮尺模型試験装置の概要 141
図 3.1-6　縮尺模型試験装置の組み立て状況 143

図 3.1-7　縮尺模型の解体状況 145
図 3.1-8　小規模模型試験の概要 147
図 3.1-9　小規模模型試験の解体作業の状況 149
図 3.1-10　縮尺模型試験における上方への変形率の経時変化 151
図 3.1-11　縮尺模型試験における注水量の経時変化 151
図 3.1-12　縮尺模型試験におけるリバウンドによる変形率の経時変化 152
図 3.1-13　土圧計およびロードセルの設置位置 153
図 3.1-14　土圧計により測定した土圧の経時変化 153
図 3.1-15　ロードセルにより計測した土圧の経時変化 154
図 3.1-16　縮尺模型試験における含水比の計測位置 155
図 3.1-17　縮尺模型試験における緩衝材の含水比分布 156
図 3.1-18　ひずみセンサの設置状況 158
図 3.1-19　曲げひずみの経時変化 158
図 3.1-20　ある時間断面における曲げひずみの計測値 159
図 3.1-21　リン青銅板の形状計測の方法 159
図 3.1-22　リン青銅板の形状計測結果 159
図 3.1-23　計測器無ケースにおける緩衝材と埋め戻し材の境界面の状況 160
図 3.1-24　小規模試験における上方への変形率の経時変化 161
図 3.1-25　小規模試験における注水量の経時変化 162
図 3.1-26　小規模試験におけるリバウンドによる変形率の経時変化 162
図 3.1-27　小規模模型試験における含水比の計測位置 163
図 3.1-28　小規模模型試験における緩衝材の含水比分布 164
図 3.1-29　小規模模型試験における緩衝材と埋め戻し材の境界面の状況 165
図 3.2-1　EDZ シーリング原位置試験の概要図 169
図 3.2-2　混合土の粒径分布 179
図 3.2-3　締固め試験結果 180
図 3.2-4　吹付け試験 1 における使用機械の配置図 181
図 3.2-5　強制二軸ミキサー（W-500） 182
図 3.2-6　ふるい（目開き 25 mm） 183
図 3.2-7　吹付け機（ニードガン 2000） 184
図 3.2-8　コンプレッサー外観 185
図 3.2-9　アーム付き吹付け機械（minimec2） 186
図 3.2-10　吹付けノズルの形状 186
図 3.2-11　木製型枠の外観 187
図 3.2-12　木製型枠の寸法 187
図 3.2-13　吹付け試験 1 の作業フロー 188
図 3.2-14　材料調整の実施状況 189
図 3.2-15　吹付け施工の作業状況 190
図 3.2-16　出来高の計量状況 190
図 3.2-17　サンプリングの実施状況 191
図 3.2-18　吹付試験 1 のサンプリング位置 191
図 3.2-19　吹付けの出来形の状況 196
図 3.2-20　V1-70 乾燥密度分布 197

図 3.2-21　V1-70 含水比分布 197
図 3.2-22　V1-50 乾燥密度分布 198
図 3.2-23　V1-50 含水比分布 198
図 3.2-24　GX-100 乾燥密度分布 199
図 3.2-25　GX-100 含水比分布 199
図 3.2-26　GX-70 乾燥密度分布 200
図 3.2-27　GX-70 含水比分布 200
図 3.2-28　V1-100 乾燥密度分布 201
図 3.2-29　V1-100 含水比分布 201
図 3.2-30　含水比と乾燥密度の関係 202
図 3.2-31　乾燥密度の平均値および最大値、最小値 203
図 3.2-32　含水比の平均値および最大値、最小値 203
図 3.2-33　吹付け試験 2 における使用機械の配置図 207
図 3.2-34　フレコンサイロ外観 207
図 3.2-35　模擬型枠の寸法の考え方 208
図 3.2-36　模擬型枠の外観 209
図 3.2-37　模擬型枠の寸法 209
図 3.2-38　吹付け試験 2 の作業フロー 210
図 3.2-39　1 ケースの吹付けの作業手順 211
図 3.2-40　型枠設置の状況 212
図 3.2-41　材料製造の状況 213
図 3.2-42　吹付け試験 2 のノズルの向き 214
図 3.2-43　出来形の計測状況 215
図 3.2-44　吹付け試験 2 のサンプリング位置 216
図 3.2-45　炉乾燥法による混合土の含水比測定結果 219
図 3.2-46　ふるい前とふるい後の含水比の比較 219
図 3.2-47　V1-70 の吹付け状況 221
図 3.2-48　天端部での材料の剥離状況 222
図 3.2-49　天端部への吹付けの際のノズルの動き 222
図 3.2-50　GX-70 の吹付け状況 222
図 3.2-51　V1-70　乾燥密度の測定結果 224
図 3.2-52　GX-70　乾燥密度の測定結果 225
図 3.2-53　含水比分布 226
図 3.2-54　含水比と乾燥密度の関係 227
図 3.2-55　乾燥密度の最大値、最小値および平均値 227
図 3.2-56　3 次元計測の計測結果 229
図 3.2-57　EDZ シーリング試験における試験領域の概要 232
図 3.2-58　透水試験におけるパッカーの設置位置 232
図 3.2-59　Jacob and Lohman の方法における Derivative plot（区間①） 235
図 3.2-60　パルス試験（差圧 0.0015MPa）における Cooper の方法（区間②） 235
図 3.2-61　孔壁展開画像（EDZ-1 孔） 236
図 3.2-62　浸透流解析における 3 次元解析モデル 238
図 3.3-1　試験装置の概念図 244

図 3.3-2　調査の削孔位置と削孔状況 245
図 3.3-3　圧電素子の概要図（上）キャップ（左下）と圧電素子（右下） 246
図 3.3-4　電磁ソレノイド 247
図 3.3-5　相互相関の概念図 247
図 3.3-6　超音波探査試験装置の試作機 248
図 3.3-7　超音波試験装置の概略図 248
図 3.3-8　データ取得方法の概念図 249
図 3.3-9　超音波探査測定概略図 249
図 3.3-10　測定状況 250
図 3.3-11　比抵抗探査装置 251
図 3.3-12　比抵抗測定概念 252
図 3.3-13　浸水脱気状況 253
図 3.3-14　密度試験状況 254
図 3.3-15　超音波速度測定の測定概念図 254
図 3.3-16　超音波速度測定状況 255
図 3.3-17　比抵抗測定の模式図 256
図 3.3-18　比抵抗測定状況 257
図 3.3-19　反射時間断面図 258
図 3.3-20　深度変換後の反射断面図 259
図 3.3-21　ニアトレースの波形記録（左）ニアトレースの拡大波形記録（右） 260
図 3.3-22　初動振幅の評価グラフ 260
図 3.3-23　試験装置の設置カメラの映像 261
図 3.3-24　見掛比抵抗分布図 262
図 3.3-25　比抵抗分布図 263
図 3.3-26　地下施設の深度 350m 調査坑道平面図 268
図 3.3-27　ボーリング位置図 269
図 3.3-28　トモグラフィ調査概念図 271
図 3.3-29　弾性波トモグラフィの測定概念図 272
図 3.3-30　主要機器図 273
図 3.3-31　発受振位置のイメージ 273
図 3.3-32　弾性波の波動経路のイメージ 274
図 3.3-33　解析のフローチャート 275
図 3.3-34　解析モデルのメッシュおよびセル 276
図 3.3-35　比抵抗トモグラフィの測定概念図 277
図 3.3-36　比抵抗の解析概要図 278
図 3.3-37　BTV によるコア画像 279
図 3.3-38　き裂の 3D モデル 280
図 3.3-39　孔径検層結果とき裂位置 281
図 3.3-40　岩石コアの弾性波速度と比抵抗グラフ 283
図 3.3-41　P 波速度の分布断面 284
図 3.3-42　P 波速度の 3D 分布モデル 285
図 3.3-43　P 波速度の深度スライス断面 286
図 3.3-44　P 波速度の 3D 深度分布モデル 287

図 3.3-45　S 波速度の分布断面 288
図 3.3-46　S 波速度の 3D 分布モデル 289
図 3.3-47　S 波速度の深度スライス断面 290
図 3.3-48　S 波速度の 3D 深度分布モデル 291
図 3.3-49　ボーリング孔の弾性波速度とき裂位置 292
図 3.3-50　比抵抗の分布断面 293
図 3.3-51　比抵抗の 3D 分布モデル 294
図 3.3-52　透水試験の 3D イメージ 295
図 3.3-53　トモグラフィ結果 296
図 3.3-54　深度 250 で実施した弾性波トモグラフィの調査位置および送受信配置 300
図 3.3-55　今回実施分とこれまで実施されてきた弾性波トモグラフィ調査結果 300
図 3.3-56　深度 350 試験坑道 2 および 4 の場所およびで実施した弾性波および比抵抗トモグラフィの送受信配置 302
図 3.3-57　深度 350 試験坑道 2 および試験坑道 4 で実施した弾性波トモグラフィの結果 302
図 3.3-58　P 波速度と飽和度の関係 304
図 3.3-59　深度 350 試験坑道 2 および試験坑道 4 で実施した比抵抗トモグラフィの結果 305
図 3.3-60　比抵抗と飽和度の関係 305
図 3.3-61　深度 250 で実施した弾性波トモグラフィの送受信点配置 306
図 3.3-62　ボーリング孔内受信点(2004,2006)および壁面受信点(2016,2017,2018)で取得された距離と走時の関係 307
図 3.3-63　EdZ の厚さが 0.5m で吹付コンクリートの影響を考慮した場合の破線 309
図 3.3-64　EdZ の厚さが 1.5m で吹付コンクリートの影響を考慮した場合の破線 309
図 3.3-65　EdZ の厚さが 0.5m で吹付コンクリートの影響を考慮しない場合の破線 310
図 3.3-66　EdZ の厚さが 1.5m で吹付コンクリートの影響を考慮しない場合の破線 310
図 3.3-67　吹付コンクリートの影響を考慮した場合のモデル計算結果と実測データの走時比較 312
図 3.3-68　吹付コンクリートの影響を考慮しないモデル計算結果と実測データの比較 313
図 3.3-69　孔内受信機における直達走時と吹付コンクリートを迂回する走時の比較 314
図 3.3-70　送受信間の距離と送受信間を直線で結んだ経路と EdZ と健岩部の地層境界がなす角の分布 315
図 3.3-71　送受信点間の距離と送受信間を直線で結んだ経路と EdZ と健岩部の地層境界がなす角の関係 315
図 3.3-72　EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化 316
図 3.3-73　EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化 317
図 3.3-74　EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化 318
図 3.3-75　EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化 319
図 3.3-76　2011 年 5 月 30 日を基準とした走時の変化 320
図 3.3-77　2011 年 5 月 30 日を基準とした走時の変化を、送受信点と坑道壁面のなす角で分類した結果 321
図 3.3-78　2011 年 5 月 30 日を基準とした走時の変化を、送受信点と坑道壁面のなす角で分類した場合のその平均の時系列変化 322
図 3.3-79　ある時点における 2011 年 5 月 30 日を基準とした走時の変化と、送受信点と坑道壁面のなす角の関係を示したグラフ 323

図 3.3-80　試験坑道 2 で実施した弾性波トモグラフィの走時を解析するために仮定した初動の伝播経路 324
図 3.3-81　試験坑道 2 周辺の送受信点配置および解析に使用したデータの受信点配置 325
図 3.3-82　解析する送受信点間の直線経路（左図)、吹付コンクリートの影響を考慮した場合の波線（中図)、吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合の波線（右図） 326
図 3.3-83　EdZ 内部の弾性波速度が変化した場合の波線の変化の比較 326
図 3.3-84　EdZ の厚さが変化した場合の波線の変化の比較 327
図 3.3-85　吹付けコンクリートの影響を考慮した場合の走時の順計算結果と観測データの比較 329
図 3.3-86　吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合の走時の順計算結果と観測データの比較 330
図 3.3-87　解析に使用した送受信点間距離と極座標における送受信点間の角度のヒストグラム 331
図 3.3-88　解析に使用した送受信点間距離と送受信点間の角度の関係 331
図 3.3-89　吹付コンクリートの影響を考慮した場合に EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を送受信点間距離を横軸として示した結果 333
図 3.3-90　吹付コンクリートの影響を考慮した場合に EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を送受信点間のなす角度を横軸として示した結果 333
図 3.3-91　吹付コンクリートの影響を考慮しない場合に、EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を送受信点間距離を横軸として示した結果 334
図 3.3-92　吹付コンクリートの影響を考慮しない場合に、EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を送受信点間のなす角度を横軸として示した結果 334
図 3.3-93　吹付コンクリートの影響を考慮した場合に EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を送受信点間距離を横軸として示した結果 336
図 3.3-94　吹付コンクリートの影響を考慮した場合に EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を送受信点間の角度を横軸として示した結果 337
図 3.3-95　吹付コンクリートの影響を考慮しない場合に EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を送受信点間距離を横軸として示した結果 338
図 3.3-96　吹付コンクリートの影響を考慮しない場合に EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を送受信点間の角度を横軸として示した結果 339
図 3.3-97　2014 年 3 月 3 日を基準とした全送受信ペアにおける走時の差分 341
図 3.3-98　送信点群とその送信点から発信した弾性波が通過する EdZ の領域の分割 341
図 3.3-99　坑道下部左下付近の EdZ の経時変化 342
図 3.3-100　坑道下部左下付近の EdZ の経時変化 342
図 3.3-101　坑道下部付近の EdZ の経時変化 343
図 3.3-102　坑道下部付近の EdZ の経時変化 343
図 3.3-103　坑道下部右下付近の EdZ の経時変化 344
図 3.3-104　坑道下部右下付近の EdZ の経時変化 344
図 3.4-1　検討されているベントナイトの施工方法（Pusch et al., 2007） 350
図 3.4-2　ベントナイトブロックを用いた充填方法の概要図（残留物がある方式） 352
図 3.4-3　ベントナイトブロックを用いた充填方法の概要図（残留物がない方式） 353
図 3.4-4　ベントナイトペレットを用いた充填方法の概念図 354
図 3.4-5　ブロックとペレットを併用した充填方法の概念図 355

図 3.4-6　ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係（NUMO, 2021 に加筆）..... 356
図 3.4-7　予備試験装置の概要図..... 356
図 3.4-8　予備試験の実施状況 357
図 3.4-9　ベントナイトブロックの外観..... 357
図 3.4-10　ベントナイトブロックの試験装置への設置状況 358
図 3.4-11　ベントナイトペレットの外観..... 358
図 3.4-12　ベントナイトペレットの設置状況 359
図 3.4-13　ブロックとペレットの設置状況..... 359
図 3.4-14　コアサンプリングの実施位置..... 360
図 3.4-15　試験体のコアサンプリング状況..... 360
図 3.4-16　ベントナイトブロックの膨潤状況 362
図 3.4-17　ペレット（0.8 Mg/m³）の膨潤状況..... 364
図 3.4-18　ペレット（0.8 Mg/m³）における含水比の経時変化 365
図 3.4-19　ペレット（0.8 Mg/m³）における乾燥密度の経時変化..... 365
図 3.4-20　ペレット（1.1 Mg/m³）の膨潤状況..... 366
図 3.4-21　ペレット（1.1 Mg/m³）における含水比の経時変化 367
図 3.4-22　ペレット（1.1 Mg/m³）における乾燥密度の経時変化..... 367
図 3.4-23　ブロックとペレットの併用の場合の膨潤状況 369
図 4.4-1　模擬掘削土の粒度分布..... 408
図 4.4-2　透水係数と有効粘土密度の関係 413
図 4.4-3　G60CS40 の締固め曲線..... 415
図 4.4-4　模擬坑道の外観..... 416
図 4.4-5　締固め曲線と透水試験結果の関係 416
図 4.4-6　施工試験に使用した転圧機械..... 417
図 4.4-7　平面位置の違いによるエリア区分 418
図 4.4-8　施工試験における品質確認の実施位置 420
図 4.4-9　施工試験の状況..... 421
図 4.4-10　練混ぜ製造後のベントナイト混合土の含水比 422
図 4.4-11　材料製造後の粒度試験結果..... 423
図 4.4-12　現場密度試験の結果 424
図 4.4-13　施工位置と乾燥密度の関係 424
図 4.4-14　砂置換法の実施位置を示す座標 425
図 4.4-15　ブロックサンプリング試料を用いた透水試験結果..... 425
図 4.4-16　層上下の乾燥密度の測定結果..... 426
図 4.4-17　層上下の乾燥密度の測定方法..... 426
図 4.4-18　乾燥密度とキャスポル測定値の関係..... 427
図 4.4-19　3D 計測の例..... 428
図 4.4-20　施工試験におけるサイクルタイム（13 層の平均時間） 429
図 4.4-21　埋め戻し材材料の粒度分布 431
図 4.4-22　吹付け工法の概要..... 432
図 4.4-23　吹付け箱への吹付け状況..... 432
図 4.4-24　吹付け材の含水比と付着材の乾燥密度の関係 434
図 4.4-25　吹付けた材料とリバウンド材の粒度分布の例 434

図 4.4-26　含水比と材料ロスの関係（最大粒径 5 mm） 435
図 4.4-27　材料供給量と乾燥密度の関係 435
図 4.4-28　小規模模擬坑道（アーチカルバート）の外観 436
図 4.4-29　小規模模擬坑道試験の試験フロー 437
図 4.4-30　小規模模擬坑道での吹付け試験の状況 437
図 4.4-31　乾燥密度試験の採取位置 440
図 4.4-32　試験位置と乾燥密度の関係 441
図 4.4-33　三次元スキャナと測定結果の一例 441
図 4.4-34　沈下量計測の計測位置と計測方法（クラックスケール） 442
図 4.4-35　埋め戻し材の含水比と施工性の関係 444
図 4.4-36　各材料の粒度試験結果 446
図 4.4-37　混合土（青線）の粒度分布 447
図 4.4-38　有効粘土密度と透水係数の関係 448
図 4.4-39　スクリューフィーダー本体及びホッパー 449
図 4.4-40　試験装置本体・土層の構造 449
図 4.4-41　ミキサによる混錬状況及び混錬後の埋め戻し材（砕石 2005 使用のケース） 450
図 4.4-42　試験中のスクリュー先端付近の状況 451
図 4.4-43　土層の断面積測定例（ケース 8　充填完了時（試験時間 37 分） 454
図 4.4-44　充填試験前後の粒度分布（自由落下ケース 3 及びケース 4） 454
図 4.4-45　位置毎の粒度分布の比較（先端密着ケース 7 及びケース 8） 455
図 4.4-46　ケース 7 における充填後の試料採取位置及び 2 mm 以下ふるい通過重量比（%） 455
図 4.4-47　模擬掘削土（玄武岩）の砕石と砕砂 459
図 4.4-48　模擬掘削土の粒度分布 459
図 4.4-49　ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係 460
図 4.4-50　製作した鋼製モールドと押込み軸 461
図 4.4-51　成型圧力をパラメータとした乾燥密度と含水比の関係 463
図 4.4-52　乾燥密度と粒度分布の関係（成型圧力 20MPa） 464
図 4.4-53　供試体表面の凹凸と角部の欠け 465
図 4.4-54　定常透気試験の試験システム 468
図 4.4-55　マトリックポテンシャルの測定結果（試験溶液の種類の影響） 469
図 4.4-56　マトリックポテンシャルの測定結果（模擬掘削土の種類の影響） 469
図 4.4-57　飽和度と浸透率の関係 470
図 5.3-1　品質保証プログラムの具体化に関する研究方針 477
図 5.3-2　KBS-3 概念図 479
図 5.3-3　KBS-3H の各部位の構成 489
図 5.4-1　性能確認プログラムの具体化に関する調査研究方針 500
図 5.5-1　使用したキャパシタンス式土壌水分計（米国 METER 社製 EC-5） 520
図 5.5-2　加熱式光ファイバセンサの構造※ 521
図 5.5-3　混錬後の使用材料 522
図 5.5-4　誘電式土壌水分計による乾燥密度計測の試験体の例 523
図 5.5-5　加熱式光ファイバによる計測試験装置 523
図 5.5-6　加熱式光ファイバ法による乾燥密度計測試験の概要（その１） 525

図 5.5-7　試験土層の充填状況 525
図 5.5-8　加熱式光ファイバ法による乾燥密度計測試験の概要（その２） 525
図 5.5-9　誘電式土壌水分計（EC-5）の出力と埋め戻し材の乾燥密度の関係 526
図 5.5-10　測定ケーブル全長の時間－温度上昇量 527
図 5.5-11　土層密度区間毎の平均温度上昇量の時間（対数）変化 527
図 5.5-12　加熱式光ファイバ法で得られた乾燥密度と熱伝導率の関係 528
図 5.5-13　平衡型 200Ω 平行フィーダー線 531
図 5.5-14　TDR 計測装置（TDR200：米国 Campbell Scientific 社製） 532
図 5.5-15　隙間計測要素試験用土層の埋め戻し材充填状況 533
図 5.5-16　計測機器の接続及び埋め戻し土層内の計測ケーブルの配置 534
図 5.5-17　土層隙間設置状況 534
図 5.5-18　ケーブル式 TDR による計測結果 536
図 5.5-19　加熱式光ファイバによる計測結果 538
図 5.5-20　研究開発計画の全体フロー 542
図 5.5-21　分布型光ファイバによる圧力計測の概念 543
図 5.5-22　光ファイバケーブルへの加圧イメージ 544
図 5.5-23　計測システム概要 546
図 5.5-24　圧力試験時の光ファイバの配置と加圧装置試験状況 546
図 5.5-25　光ファイバケーブルの結線順序 547
図 5.5-26　ケーブル設置位置の違いによる計測値の比較（第 1 層 φ0.90 mm 昇圧時） 548
図 5.5-27　加圧シートの材質の違いによる計測値の比較（φ0.90 mm 昇圧時） 549
図 5.5-28　加圧シートの材質の違いによる計測値の比較（φ0.15 mm 昇圧時） 550
図 5.5-29　層の違いによる計測値の比較（φ0.90 mm、ケーブル第 4 列、昇圧時） 551
図 5.5-30　昇圧過程（左）と降圧過程（右）での計測値の比較 552
図 5.5-31　ケーブルの違いによる計測値の比較（第 3 層シリコーンゴム･昇圧時） 553
図 5.5-32　光ケーブル相互のひずみ値の差分と圧力の関係（昇圧時、シリコーンゴムシート） 556
図 5.5-33　光ケーブル相互のひずみ値の差分と圧力の関係（昇圧時、初期ひずみを 0 とした場） 556
図 5.5-34　無線給電システムのブロック図及び測定機器 558
図 5.5-35　ヘリカル型コイル（左）及びスパイラル型コイル（右）（巻き数は 20） 558
図 5.5-36　要素試験に使用したヘリカル型コイル（巻き数は 15） 558
図 5.5-37　配筋図及び鉄筋に対するコイルの配置 559
図 5.5-38　コイルと鉄筋との位置関係（間隔:100, 200, 300㎜） 559
図 5.5-39　鉄筋間隔 100mm、200mm、300mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（パターン(i)） 561
図 5.5-40　鉄筋間隔 100mm、200mm、300mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（パターン(iv)） 561
図 5.5-41　鉄筋間隔 100mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（鉄筋無し含む） 563
図 5.5-42　鉄筋間隔 100mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（拡大図） 563
図 5.5-43　鉄筋間隔 200mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（拡大図） 564
図 5.5-44　鉄筋間隔 300mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（拡大図） 564

表目次

表 2.1-1　2 次元軸対象モデルによる水理－化学連成解析ケース 12
表 2.1-2　コンクリート初期水和物組成(OPC) 15
表 2.1-3　コンクリート初期水和物組成(HFSC) 15
表 2.1-4　セメント二次鉱物 15
表 2.1-5　埋め戻し材初期鉱物組成 16
表 2.1-6　ベントナイト二次鉱物 16
表 2.1-7　地下水組成および初期間隙水組成 17
表 2.1-8　実効拡散係数 17
表 2.1-9　物質移行解析ケース一覧 40
表 2.1-10　透水係数の設定値 45
表 2.1-11　深成岩の亀裂パラメータ 45
表 2.1-12　新第三紀堆積岩の亀裂パラメータ 46
表 2.1-13　実効拡散係数の設定値 46
表 2.1-14　深成岩類、平行流動ケースの各シーリングシステム劣化度合いにおける 各処分孔から発生した粒子の下流側立坑地表面への到達割合 54
表 2.1-15　深成岩類、平行流動ケースの各シーリングシステム劣化度合いにおける 各処分孔から発生した粒子の下流側立坑地表面への到達割合（岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除外） 55
表 2.1-16　新第三紀堆積岩類、平行流動ケースの各シーリングシステム劣化度合いにおける 各処分孔から発生した粒子の下流側立坑地表面への到達割合 63
表 2.1-17　新第三紀堆積岩類、平行流動ケースの各シーリングシステム劣化度合いにおける 各処分孔から発生した粒子の下流側立坑地表面への到達割合 （岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除外） 64
表 2.1-18　安全評価に有意な影響をもたらす条件の整理 71
表 2.1-19　主要命題「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」の下位命題の重みの設定（1/2） 82
表 2.1-20　主要命題「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」の下位命題の重みの設定（2/2） 83
表 2.1-21　シーリングシステム劣化時の影響の大きさの区分 87
表 2.2-1　SKB における埋め戻し材の流出・侵入に係る主な検討事例 108
表 2.2-2　通過流量確認試験結果 112
表 2.2-3　試験ケースおよび条件 119
表 2.2-4　人工海水組成 120
表 3.1-1　使用したクニゲル V1 の基本的性質 137
表 3.1-2　ケイ砂の土粒子密度 137
表 3.1-3　試験用水の水質分析結果 138
表 3.1-4　イオン交換水の水質分析結果 145
表 3.1-5　塩水（0.2mol/L NaCl 水溶液）の水質分析結果 149
表 3.1-6　縮尺模型試験における最大土圧および最終土圧 154
表 3.1-7　埋め戻し材の含水比計測結果 156
表 3.1-8　小規模模型試験における埋め戻し材の含水比計測結果 164
表 3.2-1　ベントナイト系材料の吹付け施工に関する調査結果一覧 177

表 3.2-2　使用材料の基本物性 178
表 3.2-3　混合土の混合割合 178
表 3.2-4　各材料の有効粘土密度 1.2 Mg/m³ を達成する乾燥密度 180
表 3.2-5　各材料の設定含水比と最大乾燥密度 181
表 3.2-6　強制二軸ミキサーの仕様 182
表 3.2-7　吹付け機の仕様 184
表 3.2-8　コンプレッサーの仕様 185
表 3.2-9　アーム付き吹付け機械 186
表 3.2-10　吹付試験 1 の材料投入量 189
表 3.2-11　吹付け試験 1 の品質管理項目 193
表 3.2-12　混合土の含水比測定結果 194
表 3.2-13　乾燥密度および含水比の測定結果 203
表 3.2-14　クニゲル V1 およびクニゲル GX 単体のメチレンブルー吸着量 204
表 3.2-15　ベントナイト混合率 204
表 3.2-16　吹き付けの施工品質と施工能力（吹付け試験 1） 205
表 3.2-17　吹付け試験 2 のベントナイト混合土の仕様 206
表 3.2-18　吹付け試験 2 の品質管理項目 217
表 3.2-19　含水比計測結果 218
表 3.2-20　ふるい後の混合土のベントナイト混合率 220
表 3.2-21　サンプリング位置ごとの乾燥密度と含水比の平均値 227
表 3.2-22　吹付け前後のベントナイト混合率 228
表 3.2-23　吹き付けの施工品質と施工能力（吹付け試験 2） 230
表 3.2-24　模擬地下水組成 232
表 3.2-25　原位置透水試験の結果 234
表 3.2-26　解析モデルの各要素の透水係数設定値 237
表 3.2-27　EDZ を対象とした定圧注水試験の結果 237
表 3.2-28　浸透流解析の結果 238
表 3.3-1　実施項目の工程 243
表 3.3-2　圧電素子（圧電振動板）の仕様表 246
表 3.3-3　超音波測定使用機器一覧 255
表 3.3-4　室内試験の使用機器一覧表 256
表 3.3-5　速度解析結果表 258
表 3.3-6　逆解析の繰り返し回数と RMS 残差 263
表 3.3-7　室内試験結果の一覧表 264
表 3.3-8　ボーリング孔の座標 268
表 3.3-9　き裂位置の一覧表 279
表 3.3-10　室内試験結果の一覧表 282
表 3.3-11　電気伝導度一覧表 293
表 3.3-12　透水試験区間一覧表 295
表 3.3-13　シミュレーションで使用した入力値 325
表 3.4-1　250m 調査坑道の地下水組成 355
表 3.4-2　ベントナイトブロックの初期乾燥密度および予備試験結果 361
表 3.4-3　ブロックとペレット併用の予備試験結果 368

表 3.4-4　予備試験における試験体重量 370
表 4.3-1　撒き出し転圧工法における製造・施工プロセス管理（開発段階） 379
表 4.3-2　撒き出し転圧工法における製造・施工プロセス管理（製造段階） 380
表 4.3-3　撒き出し転圧工法における製造・施工プロセス管理（施工段階） 381
表 4.3-4　吹付け工法における製造・施工プロセス管理（開発段階） 382
表 4.3-5　吹付け工法における製造・施工プロセス管理（製造段階） 383
表 4.3-6　吹付け工法における製造・施工プロセス管理（施工段階） 384
表 4.3-7　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理（開発段階） 385
表 4.3-8　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理（製造段階） 386
表 4.3-9　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理（施工段階） 387
表 4.3-10　ブロック工法における製造・施工プロセス管理（開発段階） 388
表 4.3-11　ブロック工法における製造・施工プロセス管理（ブロック製造段階その１） 389
表 4.3-12　ブロック工法における製造・施工プロセス管理（ブロック製造段階その２） 390
表 4.3-13　ブロック工法における製造・施工プロセス管理（施工段階） 391
表 4.3-14　撒き出し・転圧工法における製造・施工プロセス管理上の特徴 394
表 4.3-15　吹付け工法における製造・施工プロセス管理上の特徴 395
表 4.3-16　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理上の特徴 396
表 4.3-17　ブロック工法における製造・施工プロセス管理上の特徴 397
表 4.3-18　先行事例（Nagra）の調査結果のうちプロセス管理手法構築に関連した事項 400
表 4.3-19　転圧工法の製造・施工プロセス管理における要求事項と既往の成果・課題・開発の方向性 401
表 4.3-20　吹付け工法の製造・施工プロセス管理における要求事項とその既往の成果・課題・開発の方向性 402
表 4.3-21　スクリュー工法の製造･施工プロセス管理における要求事項とその既往の成果･課題･開発の方向性 403
表 4.3-22　ブロック工法の製造・施工プロセス管理における要求事項とその既往の成果・課題・開発の方向性 404
表 4.3-23　プロセス管理に関する本研究での課題に対する開発計画（スクリュー工法の例） 405
表 4.4-1　試験に使用した材料 407
表 4.4-2　ベントナイトの基本特性試験 407
表 4.4-3　骨材の基本特性試験 407
表 4.4-4　ベントナイトの基本特性試験結果 407
表 4.4-5　骨材の基本特性試験結果 407
表 4.4-6　模擬掘削土・締固め試験・透水試験のケース表示例 407
表 4.4-7　締固め試験結果 408
表 4.4-8　使用した人工海水（マリンアート SF-1）の成分 409
表 4.4-9　透水試験ケース及び試験結果（その１；イオン交換水） 410
表 4.4-10　透水試験ケース及び試験結果（その２；人工海水） 411
表 4.4-11　ベントナイト混合土の混合率 414
表 4.4-12　埋め戻し材料の物理試験結果 414
表 4.4-13　ベントナイト混合土の配合条件 415
表 4.4-14　転圧施工試験における埋め戻し材の施工目標値 416

表 4.4-15　施工試験の施工仕様 417
表 4.4-16　材料製造及び施工試験の各段階で取得するデータ 419
表 4.4-17　各施工層におけるサイクルタイム 429
表 4.4-18　埋め戻し材料の物性値 431
表 4.4-19　埋め戻し材に要求する透水係数の目標値 431
表 4.4-20　吹付け箱試験の試験ケース 433
表 4.4-21　小規模模擬坑道試験の試験ケース 436
表 4.4-22　小規模模擬坑道試験での品質管理項目 438
表 4.4-23　埋め戻し材の含水比（最大粒径 2.5 mm ケース） 438
表 4.4-24　埋め戻し材の含水比（最大粒径 5 mm ケース） 438
表 4.4-25　小規模模擬坑道試験の結果まとめ 439
表 4.4-26　3 次元スキャナによる施工体積の測定結果 442
表 4.4-27　各試験ケースにおけるかさ密度の比較 442
表 4.4-28　60 時間残置後の沈下量計測結果 443
表 4.4-29　透水試験に用いた供試体の諸元 443
表 4.4-30　スクリュー工法の検討に用いる埋め戻し材の基本仕様 445
表 4.4-31　各材料の土粒子密度と含水比 446
表 4.4-32　ベントナイト混合土の配合率 446
表 4.4-33　埋め戻し材の締固め試験結果 447
表 4.4-34　透水試験結果 448
表 4.4-35　最終製造配合表（砕石 2005 最大粒径 20mm） 450
表 4.4-36　スクリュー要素試験ケース 451
表 4.4-37　要素試験における測定項目 452
表 4.4-38　試験前後の含水比（自由落下ケース） 452
表 4.4-39　試験前後の含水比（先端密着ケース） 453
表 4.4-40　単位時間当たりの充填量及び乾燥密度（自由落下ケース） 453
表 4.4-41　単位時間当たりの充填量及び乾燥密度（先端密着ケース） 453
表 4.4-42　試験に使用した埋め戻し材の材料構成 458
表 4.4-43　土粒子密度と初期含水比 458
表 4.4-44　ベントナイト（クニゲル V1）メチレンブルー吸着量試験結果 458
表 4.4-45　模擬掘削土の粒度試験結果 459
表 4.4-46　ベントナイト混合土の突き固めによる土の締固め試験結果（C-c 法、4.5Ec） 460
表 4.4-47　透水係数、有効粘土密度、乾燥密度の目標値 460
表 4.4-48　静的締固め試験の試験ケース 461
表 4.4-49　静的締固め試験結果（最適含水比、最大乾燥密度） 462
表 4.4-50　今年度の取得データと試験ケース 466
表 4.4-51　各混合土の締固め試験結果と室内試験の供試体仕様 467
表 4.4-52　試験方法及びその概要 467
表 4.5-1　各施工技術に関するまとめ 473
表 5.3-1　品質保証プログラムの具体化に資する情報収集の調査対象 478
表 5.3-2　廃棄体に関するわが国の竪置きブロック方式と KBS-3V 方式の比較 480
表 5.3-3　緩衝材に関するわが国の竪置きブロック方式と KBS-3V 方式の比較 481
表 5.3-4　KBS-3V における緩衝材の品質管理項目と管理方法 481

表 5.3-5　緩衝材に関するわが国の横置き PEM 方式と KBS-3H 方式の比較 482
表 5.3-6　埋め戻し材に関するわが国の概念と KBS-3V 方式の比較 483
表 5.3-7　覆土の技術的要件と品質管理項目の例 485
表 5.3-8　品質管理項目及び管理方法の例 486
表 5.3-9　土質遮水工の品質管理項目とその管理方法及び管理値 487
表 5.3-10　埋め戻し材に関するわが国の概念と KBS-3V 方式の比較 489
表 5.3-11　プラグに関するわが国の概念と KBS-3 概念の比較 491
表 5.3-12　SKB によるプロトタイプ処分場プロジェクトの概略 494
表 5.3-13　SKB による「Åskar」プロジェクトとそれにかかわる要素試験の概略 496
表 5.3-14　実規模定置試験（FE 試験）の概略 498
表 5.4-1　KBS-3 概念における性能評価期間と調査対象期間 501
表 5.4-2　フィンランド KBS-3V における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（キャニスタ） 503
表 5.4-3　フィンランド KBS-3V における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（緩衝材） 505
表 5.4-4　フィンランド KBS-3V における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（埋め戻し材） 507
表 5.4-5　フィンランド KBS-3V における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（閉鎖材） 508
表 5.4-6　フィンランド KBS-3H における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（スーパーコンテナ） 509
表 5.4-7　フィンランド KBS-3H における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（キャニスタ） 510
表 5.4-8　フィンランド KBS-3H における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（緩衝材） 511
表 5.4-9　フィンランド KBS-3H における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（埋め戻し材、閉鎖材） 512
表 5.4-10　わが国に適用可能な性能確認プログラムにおける必要なデータを取得する取組み 515
表 5.5-1　計測技術と品質保証及び性能確認の関係 517
表 5.5-2　乾燥密度の計測技術の要素技術開発計画案 519
表 5.5-3　誘電式土壌水分計 EC-5 の仕様 520
表 5.5-4　埋め戻し材の配合比率（質量 100 kg あたり） 522
表 5.5-5　OFDR※計測システム機器の主な仕様 524
表 5.5-6　連続 FBG ファイバの仕様 524
表 5.5-7　各土層区間で得られた熱伝導率 528
表 5.5-8　坑道界面の隙間の計測技術の要素技術開発計画案 531
表 5.5-9　TDR 計測機器（TDR200）の主な仕様 532
表 5.5-10　試験で使用する光ファイバーケーブル 544
表 5.5-11　試験で使用する加圧面シート 545
表 5.5-12　使用機器 545
表 5.5-13　ケーブル設置位置の違いによる計測値の比較（第 1 層 φ0.90 mm 昇圧時） 548
表 5.5-14　昇圧過程と降圧過程での計測値の比較 552

表 5.5-15　鉄筋コンクリートを透過する無線給電技術の研究開発計画 557
表 5.5-16　コイル間給電効率のピーク値..... 562
表 5.5-17　システム間給電効率のピーク値..... 562
表 5.5-18　システム間給電効率がピークを示した時の抵抗値..... 562

1. 緒言

1.1 本事業の背景と目的

本事業は、令和 2 年度高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術開発事業（地層処分施設閉鎖技術確証試験）として、経済産業省資源エネルギー庁（以下、資源エネルギー庁）から国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）および公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）が受託したものである。本事業の背景と目的を以下に示す。

高レベル放射性廃棄物の地層処分場の閉鎖後長期の安全性の確保においては、埋め戻した坑道や掘削影響領域（以下、EdZ）が、放射性物質の生活圏に至る移行経路となり得る有意な水みちとならないことが重要である。第 2 次取りまとめでは、地下施設の閉鎖技術に関して、人工バリアの設置環境に有意な影響を与えない、坑道そのものが有意な水みちとならないといった観点から、これらに対処するための技術としての概念検討が進められた。プラグや埋め戻し材などの物理的および化学的安定性に関しては、例えばコンクリート製プラグの変質（溶脱に伴う Ca 濃度や pH の上昇など）による緩衝材や埋め戻し材への影響や、埋め戻し材の膨潤圧による堆積岩系岩盤における坑道周辺岩盤の長期的な力学的安定性の保持などについて概略的な評価がなされている（核燃料サイクル開発機構，1999a，1999b）。また、安全評価においては、プラグや埋め戻し材などの閉鎖に関連する構成材料にはバリア機能を期待しないこととして、処分システムの評価が行われていた（核燃料サイクル開発機構，1999b）。

その後、平成 28 年 9 月に原子力委員会決定された「最終処分関係行政機関等の活動状況に関する報告書」では、国、関係研究機関による基盤研究開発に関する全体計画を原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）が実施する技術開発計画と一体化し、NUMO による一層のリーダーシップのもと「真の全体計画」を策定することが指摘され、これらを受け、平成 30 年度以降の次期全体研究計画の枠組みと進め方が、「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度）」（以下、「全体計画」という）として公表された（地層処分研究開発調整会議，2019）。この計画の中で整理された、地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化、処分場の設計と工学技術、閉鎖後長期の安全性の評価及び中長期的に研究開発を進める上での重要事項に関連する研究開発課題のうち、処分場の閉鎖後に坑道や EdZ が水みちとなることを防止するためのプラグや埋め戻しといった坑道シーリング技術の整備に向けた前身の研究開発事業（地層処分施設閉鎖技術確証試験）を平成 30 年度、令和元年度に実施した。同事業では、瑞浪超深地層研究所（結晶質岩）の深度 500m 研究坑道を利用し、国内外でも事例がほとんどない全断面吹付け工法による実際の地質環境下での埋め戻し試験を実施し、同工法の適用性や適用時の品質管理手法を実証的に提示するとともに、幌延深地層研究所（新第三紀堆積岩）深度 350m 坑道を利用し、水みちを防止する技術開発として、粘土止水壁を構築し、それにより EDZ(Excavation Damage Zone:掘削損傷領域)領域の透水性が数オーダー低下することを確認した。一方、ジェネリックな地質環境を想定した緩衝材や埋め戻し材を製作・施工するための基礎的データの取得を室内試験等で実施するとともに、施工品質確認のためのモニタリング技術の検討等を進めた。また、地層処分システムの安全性評価の高度化を指向した技術開発も平行して進めた（原子力機構・原環センター, 2019、原子力機構・原環センター，2020）。

全体計画は、2020 年に見直しが行われたが、処分場の閉鎖後に坑道が有意な水みちとなることを防止するためのプラグや埋め戻し材などの坑道シーリング技術について、その重要性は引続き示されていたことから、令和 2 年度から令和 4 年度までの 3 ヵ年事業として同事業を継続実施することとなった。

なお、NUMO は、第 2 次とりまとめ以降に実施されてきた様々な研究開発成果も踏まえ、事業者の観点から、わが国において高レベル放射性廃棄物の地層処分を安全に行うための技術的な拠り所となる包括的技術報告書を令和 3 年 2 月 24 日に公開した。この中でも、今後の取組みの一つとして、「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」が挙げられており（NUMO, 2021）、基盤研究としてもその技術開発への寄与が期待されていることを付記しておく。

1.2 本事業における研究開発、技術開発の全体フレーム

本事業では、平成 30 年度からの 2 ヵ年の成果に基づき、それまでの事業の目標設定や技術開発の枠組み等は踏襲しつつ研究開発・技術開発を進める。具体的には、①処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備、②高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発を令和 2 年度から 4 年度までの 3 ヵ年計画として実施していく。

前者については、建設・操業期間中の坑道の維持に必要なコンクリート覆工の化学的な劣化や地質環境の長期的な変遷などの長期的影響も視野に入れつつ、閉鎖後に埋め戻した坑道や EDZ が、水みちとなり地下施設と地上を直結する卓越した水みち（物質移行経路）となり得る可能性について、緩衝材や埋め戻し材を対象とした室内試験や原位置試験などの実施によって検証するとともに、多様な地質環境条件を考慮した上で坑道シーリングに期待される性能の具体化のため、その設計評価技術の改良・高度化を進める。坑道内から掘削されたボーリング孔が水みちとならないように閉塞するための技術開発にも着手する。また、シーリングシステムを設置する地質環境の非破壊調査技術（物理探査技術）の高度化、併せて、埋め戻し材の施工技術オプション（転圧締固め、吹付け、スクリュー、ブロック）を整備するとともに、施工技術に応じた製造・施工プロセス管理手法の素案を整備する。

後者については、人工バリアの設計で想定される短期・長期的な状態に対して、目標とする施工品質が達成され、処分場が閉鎖された後に期待した性能が発揮されてことを確認・評価するための考え方と具体的な方法の検討を行う。また、そのような取り組みに必要となると考えられるハード技術として、埋め戻し材を先行検討対象に光ファイバセンサを主体とした要素技術開発やモニタリングに関する共通基盤技術として無線給電技術による給電効率の向上に関する開発などを進める。

全体計画と本事業における研究開発課題との関連および全体の目標を図 1.2-1 に示す。

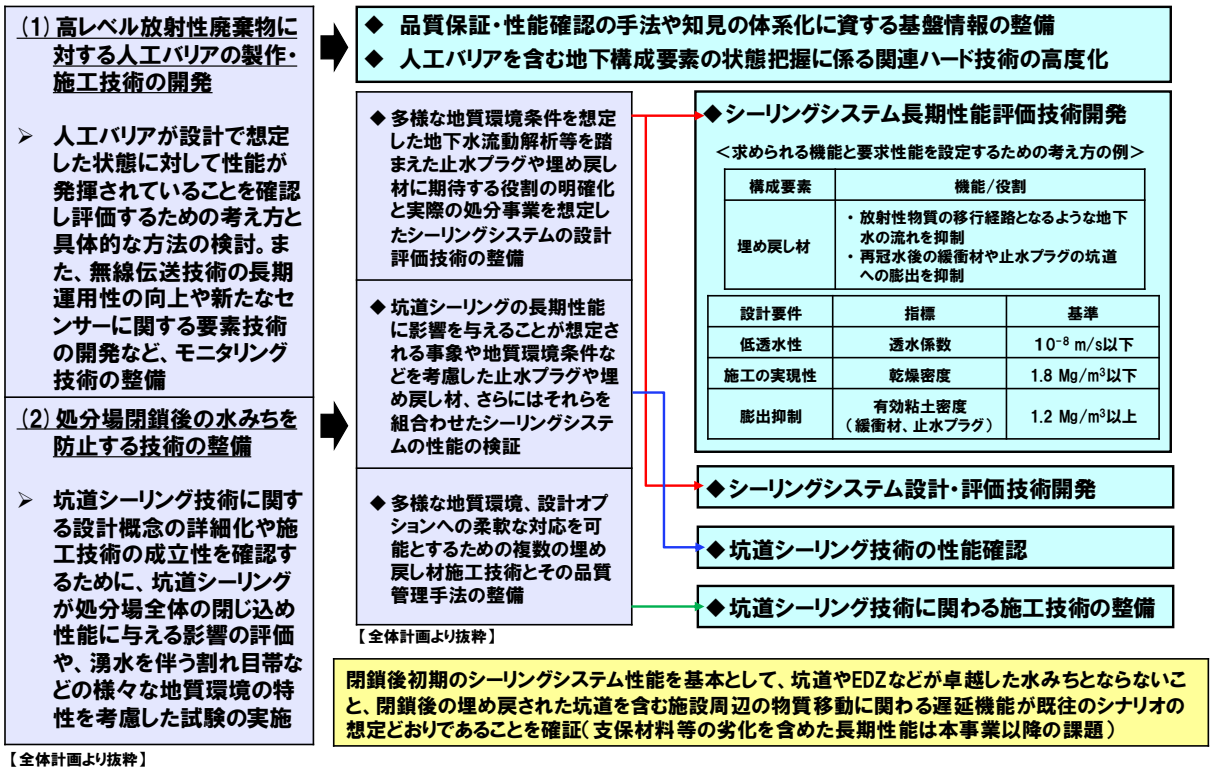


図 1.2-1　本事業の到達目標と進め方

1.3 本年度の実施概要

1.3.1　処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備

1)　坑道シーリングの設計・評価技術の整備

処分場の閉鎖後に坑道やその周辺岩盤が生活圏に至る移行経路となり得る水みちとなることを防止するために検討されている埋め戻し材やプラグなどのシーリングシステムについて、これらが有する安全機能が長期的に変化すると仮定した場合、それが地層処分システム全体の閉じ込め性能へ与える影響を評価するための技術を整備する。

具体的には、ジェネリックな地質環境条件に基づくケーススタディーを通じ、地層処分システムの安全評価への影響という観点からシーリングシステム性能の考え方を整理するため、主に以下の 4 つの検討を進める。

・シーリングシステムの長期性能を考慮したシナリオ解析
・シーリングシステムの安全機能に対する影響要因評価
・シナリオ解析に基づく物質移行経路および閉じ込め性能の評価
・シーリングシステムに求められる要件の具体化

また、これらの成果を踏まえ、後述する b）坑道シーリング技術の性能確認、c）坑道シーリングに関わる施工技術の整備における成果を体系的に整理・統合し、ジェネリックな観点から多様な地質環境において適用可能なシーリングシステム設計評価技術を提示する。

令和 2 年度は長期変遷によって埋め戻し材やプラグの安全機能を変化させる可能性のある要因と考えられる、坑道支保工からのセメント溶出に伴うモンモリロナイトの変質や、埋め戻し材の施工後に生じる可能性のあるモンモリロナイトの乾燥密度の不均質性などの現象・状態が埋め戻し材の長期的な変質へ与える影響を評価する。また、昨年度提示した埋め戻し材やプラグの安全

機能が低下を想定した際の予防策あるいは影響緩和策の効果を検討する。さらに、これらの検討結果を踏まえ、各シナリオの安全評価への影響度や蓋然性の整理を行う。なお、シーリングシステムの安全機能は人工バリアのみならず、地質環境も相互に補完しあうことで長期にわたり維持されることから、今年度の検討結果を踏まえ、シーリングシステムの安全機能を担保する上で今後必要と考えられる分野毎の課題も併せて提示する。また、今年度あらたに、埋め戻し材やプラグの安全機能を変化させる要因と考えられる、流出・侵入現象について、発生条件や詳細メカニズムを整理するために、文献調査や予備的な試験を実施する。

2)　坑道シーリング技術の性能確認

止水プラグや埋め戻し材それぞれの構成要素、さらにはそれらを組み合わせたシーリングシステムの性能を室内試験や工学規模の試験を通じて検証する。具体的には、坑道シーリング（坑道、立坑、ボーリング孔等）の構成要素として考えられる埋め戻し材、止水プラグ等に着目し、それらの性能に影響を与えることが想定される事象などを抽出・整理するとともに、研究事例の調査や解析的検討を実施する。また、それらの結果を踏まえ、シーリング要素に期待する機能／役割に対して明らかにすべき課題の解決に向けた試験計画の立案ならびに試験設計や予備試験等を実施する。

令和元年度までに、緩衝材と埋め戻し材を対象とした膨潤基礎試験と力学的相互作用下における膨潤挙動相互作用試験を実施した。また、これらの膨潤変形挙動に影響を及ぼすと考えられる地下水の水質などの化学的事象について整理した。また、止水プラグに関し、原位置環境下での要素試験を実施し、ベントナイト系材料を使用した EDZ を遮断する遮水壁の透水性について定量的な評価を行った。さらに、物理探査技術を適用することにより、ＥＤＺの連続性に関する評価を行った。

令和 2 年度は、緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用下における緩衝材の膨潤挙動を評価するための室内試験を継続するとともに、化学的事象が緩衝材の膨潤挙動や埋め戻し材の膨出抑制機能におよぼす影響を考慮した特性データを取得する室内試験を実施する。また、止水プラグに関しては、坑道の天端部や側壁部におけるベントナイト系材料の施工方法として、吹付け工法を対象として、材料仕様に応じた品質（乾燥密度など）やそのばらつきの幅を確認するとともにその適用性を検討する工学規模の施工試験を実施する。さらに、ボアホールシーリングに関する研究事例を調査し考慮すべき事項や課題点を整理するとともに、閉塞材料として用いられるベントナイトの材料特性を取得するための予備的な試験を実施する。坑道周辺に発達するＥＤＺについては、その連続性等を定量的に評価するために、原位置試験および要素試験を実施し、ＥＤＺの調査技術の高度化を図る。

3)　坑道シーリングに関わる施工技術の整備

サイト選定プロセスの進展に伴い具体化される地質環境や処分概念に応じてシーリングの構成材料や施工技術を適切に選定するには、材料バリエーションや施工技術オプションに応じた施工特性および再冠水に至る過渡期の状態変化ならびに施工手順や時間などにも留意し、多様な地質環境条件等を踏まえた施工技術オプションや品質管理方法の具体化に資する基盤情報を整備するとともに、施工試験等を通じた施工方法の適用性を確認しておく必要がある。

これらを踏まえ、平成 30 年度、令和元年度は以下の項目を実施した。

・小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験

・埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備

小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験については、平成 30 年度、令和元年度に実際の地下研究施設（瑞浪超深地層研究所）において深度 500mに掘削されていた坑道を利用し、

吹付けによる埋め戻し材の施工試験等を実施し、全断面吹付け施工技術に関する品質管理・施工管理体系を整備した。令和2年度は本試験に関する国際学会での発表などを実施する。

また、埋め戻し材の材料特性を踏まえた施工技術オプションの整備では、令和元年度までに多様な地質環境条件や要求性能等に対応できる埋め戻し材の材料バリエーションや施工技術オプションを整備するために、ベントナイトの種類・混合率、模擬掘削土の種類・粒径などをパラメータとした室内試験ならびに撒き出し・転圧工法と吹付け工法による小規模施工試験を実施し、埋め戻し材の材料特性や施工品質に関するデータを取得した。令和2年度は、埋め戻し材の構成材料や締固めエネルギー等をパラメータとした透水試験、撒き出し・転圧工法及び吹付け工法に関する工学規模の施工試験、スクリュー工法とブロック工法に関する要素試験を実施する。更に、埋め戻し材の施工後の品質確認のための計測技術の高度化に取り組むとともに、埋め戻し材の性能確認に資する水の浸潤挙動に関するデータを取得する。撒き出し・転圧工法に関する施工試験については、実規模スケールでの試験を行い、埋め戻し材の施工後の非破壊検査やサンプリング等により施工位置と乾燥密度等の関係を詳細に把握し、品質管理手法や施工プロセス管理手法に反映する。

1.3.2　高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発

1)　製作・施工技術に係る品質保証体系およびモニタリング技術の整備

諸外国における地下構成要素の品質保証や性能確認に関する先行検討事例の調査を行い、わが国の人工バリアを含む地下構成要素を対象とした品質保証プログラム及び性能確認プログラム（それぞれ必要なモニタリングを含む）の構築に向けた知見やデータ等の基盤情報を整備する。また、上記プログラムに関連する地下構成要素の状態把握に係る技術について（無線関連技術及び原位置での状態把握に係る計測・モニタリング技術など）、地下環境を想定した室内試験等をとおして適用性等を確認しつつ技術の高度化を進める。

令和元年度までに、人工バリアを含む地下構成要素の品質保証プログラムと性能確認プログラムに関する海外先行事例の調査結果を整理・分析し、これらのプログラムに関する今後の研究開発の方向性などについて取りまとめた。また、無線関連技術については、無線伝送技術に関する幌延ＵＲＬでの実証試験の継続及び地層処分場に適用する場合のシステム構成例の具体化を行うとともに、無線給電技術に関する装置の概念設計手法の構築を進めた。さらに、原位置での状態把握に係る新たなセンサ技術として、光ファイバの適用事例等を調査した。

令和2年度は、わが国の品質保証及び性能確認プログラムの開発・構築において参考となる海外先行事例を調査し、地下構成要素の品質保証の考え方、性能評価に必要なパラメータの設定根拠等を整理する。また、埋め戻し材を先行検討対象として、原位置等での状態把握に係る計測・モニタリング技術の高度化を進める。

参考文献

核燃料サイクル開発機構，わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－　分冊 2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022，1999a.

核燃料サイクル開発機構，わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－　分冊 3 地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-023，1999b.

地層処分研究開発調整会議, 地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度），2019.

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業　地層処分施設閉鎖技術確証試験　報告書，2019.

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業　地層処分施設閉鎖技術確証試験　報告書，2020.

原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現 －適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03，pp.4-159～4-164，2021.

2. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリングの設計・評価技術の整備-

2.1 シーリングシステム長期性能評価技術開発

2.1.1 背景・目的・研究アプローチ

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分坑道やアクセス坑道といった地下空間とその周辺部が主要な核種の移行経路とならないよう、埋め戻し材やプラグ、グラウトなどなどの工学的対策（以下、シーリングシステム）を講ずることが考えられている。NUMO は、地層処分の長期的な安全性を確保するための基本概念である放射性廃棄物の「隔離」と「閉じ込め」を実現するために、処分システムの構成要素が有すべき具体的な安全機能を定めている。このうち、埋め戻し材や止水プラグに対しては、処分場閉鎖後にシーリング部が放射性物質の移行経路とならないよう、「坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制」を安全機能として定めている（NUMO, 2021）。また、これら安全機能を確保するために図 2.1-1 に示す設計フローに従い、処分システムに求めるべき要件を定めることとしている（NUMO, 2021）。したがって、埋め戻し材や止水プラグに求める安全機能が長期的に維持されるかについては、安全機能の変化に影響を与える現象の整理やその影響度を評価することは、地層処分の長期安全性を確保する観点から重要である。坑道およびその周辺岩盤が卓越した移行経路となりうるかや、その要因となる現象については、これまでに広く研究がなされてきており（図 2.1-2）、例えば、設計上の欠陥やシーリング材料の流出（例えば、杉田ほか, 2004、核燃料サイクル開発機構, 1999）、岩盤あるいは地下水との相互作用による機能劣化（例えば、原子力機構, 2018）などの検討がなされてきている。また、主に掘削損傷領域（EdZ）に起因した、処分坑道沿いあるいは止水プラグ周囲の岩盤などが短絡経路と成りうる可能性もあり、このような短絡経路の評価（例えば、杉田ほか, 2005、NUMO, 2006）も行われてきている。しかし、いずれの検討においても、シーリングシステム個別の機能変化に係る現象理解に特化しており、その結果として生じ得るシーリングシステムの機能変化によって、坑道が卓越した移行経路となることで地層処分システムの長期安全性にどの程度影響を及ぼしうるかについては十分に検討がなされていないのが現状である。すなわち、処分システムの長期安全性を確保するために、シーリングシステム全体が有すべき性能に焦点をあてた検討は十分になされていない。また、仮に個々のシーリングシステムの安全機能が低下した場合であっても、他の処分システムの構成要素の安全機能が維持される結果、処分システム全体の長期安全性への影響は小さいことも想定される。このような場合、個別のシーリングシステムに対し、安全機能が低下を前提としたような設計要件を求めることは、過度に保守的な設計となる可能性も否定できない。このように、シーリングシステムの長期性能を評価する上では、処分システム全体の長期安全性に対する、個々のシーリングシステムの性能の影響を検討するだけでなく、他のシーリングシステムや処分システム全体の構成要素との相互補完的な視点で、処分システムへの長期安全性に与える影響を検討することが必要となる。また、このような観点で検討された個々のシーリングシステムの性能の考え方は、今後処分事業の進展により、具体化される処分場のレイアウトや設計要件にも反映されうるものであり、上述のような視点で検討される処分システムの長期安全性へ影響を与えうる条件は可能な限り詳細化されていることが好ましいと考えられる。

そこで、本節では我が国の地質環境条件や処分概念などをベースに、シーリングシステムが卓越した移行経路となった場合を仮定したシナリオ解析を行い、シーリングシステムの安全機能が変化する要因となる現象、プロセスあるいはシナリオを整理する。また、整理したシナリオに基づき、処分システムの長期安全性への影響評価を行う。さらにこれらの検討を通じて、シーリングシステムに求める安全機能や性能の考え方を提示する。

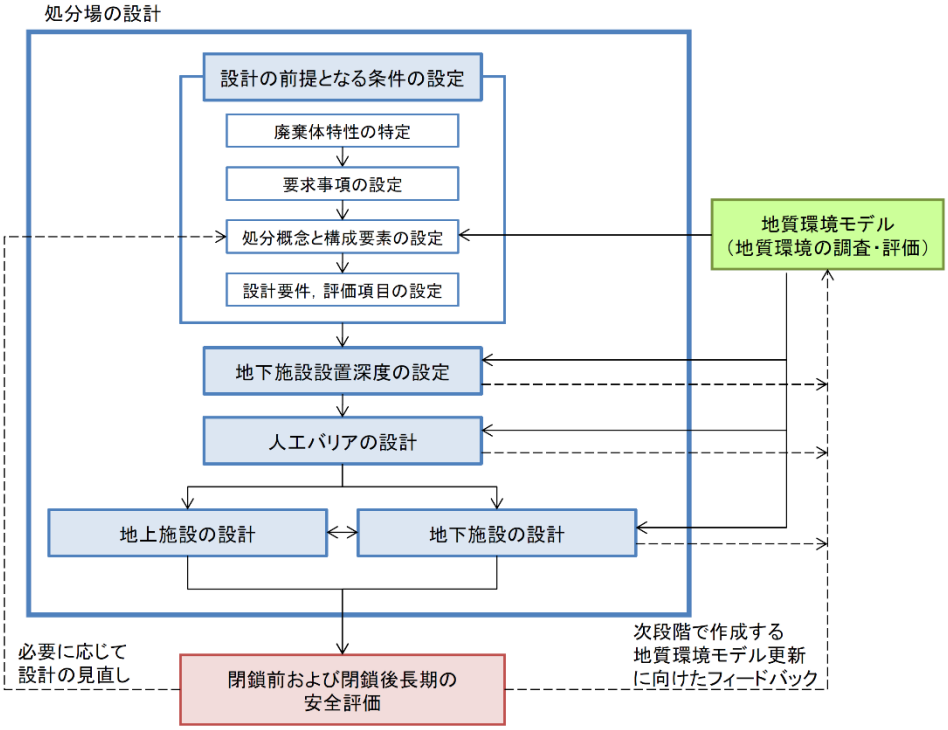


図 2.1-1　処分場の設計フロー
（NUMO, 2021）

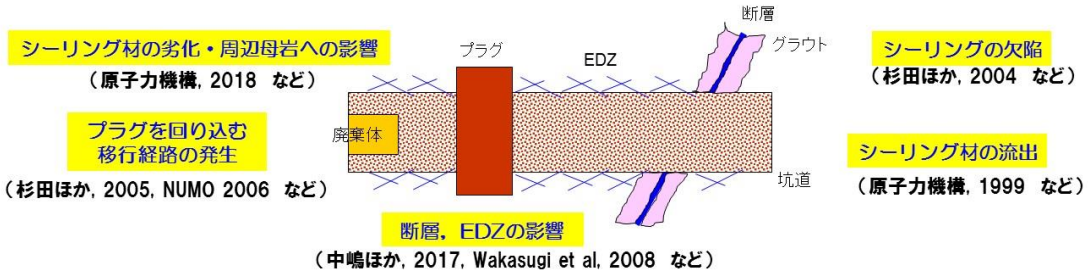


図 2.1-2　シーリングシステムが卓越した移行経路となりうる構造・要因

2.1.2　実施概要

平成 30 年度は、諸外国のシーリングシステムの長期性能評価に関する取り組み状況を参照しつつ、本事業において設定するシーリングシステムに求める安全機能の具体化を図るとともに、安全機能に影響を及ぼす可能性のある因子・プロセスを網羅的に抽出・整理した。その結果、諸外国においては、「隔離」、「閉じ込め」といった処分システム全体に関わる安全機能に関連し、特に埋め戻し材に対しては、「放射性核種の移行の制限」に関する安全機能が設定されていることから、本事業においてシーリングシステムに求める安全機能として、「シーリング部において移流を抑制すること」、「シーリング部において遅延性能を有すること」を設定することとした。

平成 31 年度は平成 30 年度に設定したシーリングシステムに求める安全機能を軸としたシナリオ解析を実施し、シーリングシステムの安全機能が長期的に維持される場合を基本シナリオとした上で、仮に埋め戻し部（坑道埋め戻し、プラグ等）やその周辺岩盤が卓越した移行経路となる可能性を想定したシナリオを抽出した。また、坑道／立坑およびその周辺岩盤が卓越した移行経

路となることへの影響を概括的に把握するために、各シナリオが生起した場合に生じるシーリングシステムおよびその周辺岩盤の状態が人工バリアから天然バリアに放射性核種が移行した時点で生じることを仮定した条件での水理・物質移行解析を実施した。その結果、基本シナリオに加え、抽出したシナリオが処分システムに及ぼす影響を物質移行解析等により評価した。その結果、安全機能にこれら評価結果に基づきこれら評価結果に基づき、設計・施工および安全評価の観点からのシーリングシステムの性能の考え方を整理した。

令和 2 年度は長期変遷によって埋め戻し材やプラグの安全機能が変化する可能性のある要因として考えられる、坑道支保工のセメント溶出に伴うモンモリロナイトの変質や埋め戻し材の施工の結果生じる可能性のあるモンモリロナイトの乾燥密度の不均質性が埋め戻し領域の水みちになることへの影響を評価する。また、埋め戻し材やプラグの安全機能が低下した場合を想定した際の予防策あるいは影響緩和策の効果について検討するとともに、その結果を踏まえ、各シナリオの安全評価への影響度や蓋然性の整理を行う。なお、シーリングシステムの安全機能は安全評価、設計・施工、地質環境調査の分野での知見が相互に関連しあうことで維持されることが望まれることから、今年度の検討結果を踏まえ、シーリングシステムの安全機能を担保する上で今後必要と考えられる分野毎の課題についても提示する。

2.1.3　令和 2 年度の成果

2.1.3.1　シーリングシステムの長期変遷に関する現象理解

シーリングシステムの劣化・変質により安全機能が低下しうるシナリオを検討する上では、安全機 能に重大な影響を及ぼし得る現象の現象理解が不可欠であり、シナリオの蓋然性を評価する上でも重要である。昨年度の検討において、坑道が卓越した移行経路となり得る重要な現象として、コンクリートおよび埋め戻し材境界部における変質やベントナイトのゾル化による流出・侵食が抽出された。また、埋め戻し材の施工時に生じ得るモンモリロナイト乾燥密度の不均質性により、特に坑道上端部にモンモリロナイトの乾燥密度の低密度層が形成されることに起因した埋め戻し材の変質も同様に抽出された。コンクリート系材料とベントナイト系材料との相互作用については、緩衝材を対象とした化学物質輸送解析の検討事例（例えば、原子力機構, 2019）は存在するものの、埋め戻し材のように、緩衝材と比べてモンモリロナイト密度が低い場合や砂礫等が含有されている場合を想定した解析事例は少ない。また、施工時に、主として坑道上端部にモンモリロナイトの乾燥密度の低密度層が形成されることを想定した評価は行われていないのが現状である。前者においては、TRU 廃棄物処分における検討事例と同様にコンクリートと埋め戻し材の境界部において、コンクリート溶脱成分による二次鉱物等の保護的な変質層が形成されるかについて評価する必要があるとともに、後者については、埋め戻し材の施工方法（ペレット充填、ブロックおよびこれらの併用）の違いによって生じる得る可能性のあるモンモリロナイトの乾燥密度の不均質性等を考慮しつつ、埋め戻し材の低密度部分に発生し得る流れ（移流もしくは拡散）の影響を取り込んだ反応輸送解析等が必要となる。また、ベントナイト流出・侵食については、処分場選定の段階で行われる地下水流動系の評価等により、塩分濃度が相対的に薄い地表水が地下深部に到達するような流動系が生じる可能性のある場を回避することは可能である一方で、閉鎖後長期において、隆起・侵食や海水準変動といった、広域的な地下水の流れが変化する場合を想定すると、地表水が地下深部へ到達するような地下水流動系を仮定した検討（例えば、SKB, 2010）が行われる可能性も考えられる。このような場合、地表水が地下深部へ到達する要因を分析した上で、その移行過程で生じる水－岩石反応もしくは、シーリング材との反応により、ベントナイトがゲル化するような地下水水質領域に至る可能性を調査するとともに、ベントナイ

トゲル化による流出・侵食の影響を評価する必要があると考えられる。上記を踏まえ、今年度は坑道支保工および埋め戻し材の長期変遷（埋め戻し材の上部間隙の形成を含む）が埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質及ぼす影響評価と合わせて、地表水が地下深部へ流入した場合の影響評価を実施する

(1) 坑道支保工および埋め戻し材で生じ得る状態変遷の整理

検討に先立ち、坑道支保工と埋め戻し材およびこれらの境界で生じうる状態変遷のオプションの整理を行った。坑道支保工においては、施工初期に生じる割れ目や応力再配分によって生じうるひび割れ、あるいは打ち継ぎ目に地下水が流入することが想定される。この時、コンクリート溶脱成分に起因した二次鉱物（カルサイトやセピオライト等）により割れ目の間隙が閉塞し、坑道支保工全体の透水係数が低下するオプションが考えられる。この時、坑道支保工に使用されるセメント材料が OPC（普通ポルトランドセメント）もしくは HFSC（低アルカリ性セメント）によって、コンクリート溶脱成分に起因した地下水中の水質や pH が異なることから、使用材料の違いもオプションとして考慮する必要がある。一方で、地震動や岩盤クリープ等の外力による影響で、割れ目の閉塞箇所の破壊あるいは新たな亀裂の発生が二次鉱物による間隙閉塞と、繰り返し発生することにより､坑道支保工の透水性が高くなる状態に変遷するオプションも考えられる。埋め戻し材については、所定の乾燥密度で均質に施工されるオプションや、坑道上部に乾燥密度の低密度領域が存在する場合や、自重沈下等により、坑道上部に間隙が存在するオプションが考えられる。前者については、地下坑道における埋め戻し材の小断面吹付試験において、局所的に乾燥密度や含水比が小さくなったことが報告されているものの、施工時の吹付けエネルギーが部分的に不足していたことが原因であることが示されている（原子力機構・原環センター, 2019)。後者については、転圧および吹付け工法によるベントナイト混合土（乾燥質量比でクニゲル V1：砂=15：85）の充填試験において、坑道上部に最大 6mm の沈下量が計測されたとの報告がされている（秋山ほか, 2016)。ただし、この沈下量は施工した混合土が膨潤する前に生じたものであり、再冠水後に地下水浸潤に伴うベントナイトの膨潤によって閉塞する可能性も考えられる。このように、ベントナイト系材料を坑道埋め戻しに使用した際に、坑道上部に乾燥密度の低密度領域が形成されることや、空隙が生じることを示した直接的な検討事例や、施工試験等における観測事例が十分ではないことから、本検討ではあえて悲観的にこれらオプションが埋め戻し材の施工において生じうることを考慮した。上記を踏まえた上で、本解析で着目する変遷オプションの概念を図 2.1-3（a）に示す。すなわち、①坑道と交差する割れ目等を介して坑道の最上流部から坑道支保工および埋め戻し材（上部に間隙がある場合はその間隙中に）地下水が流入（移流もしくは拡散）する。地下水は坑道支保工や埋め戻し材の上部間隙などを介して移行するとともに、セメント成分が溶出する。②地下水は上流⇒下流に流れる途中でセメント成分を消費しながら、坑道支保工もしくは埋め戻し材の上部間隙中を移行、③一部の地下水は坑道と交差する割れ目を介して岩盤中に流出し､さらにアルカリ成分を消費しながら坑道下流側へ移行する｡図 2.1-3（a）の概念を踏まえ、始めに種々の変遷オプションのモンモリロナイトへの影響を概括的に把握するために埋め戻し部の一部を対象とした解析を行い、その結果を踏まえ、①～③の現象を考慮した解析を実施することとした図 2.1-3（b)。表 2.1-1 に示す全解析ケースを示す。

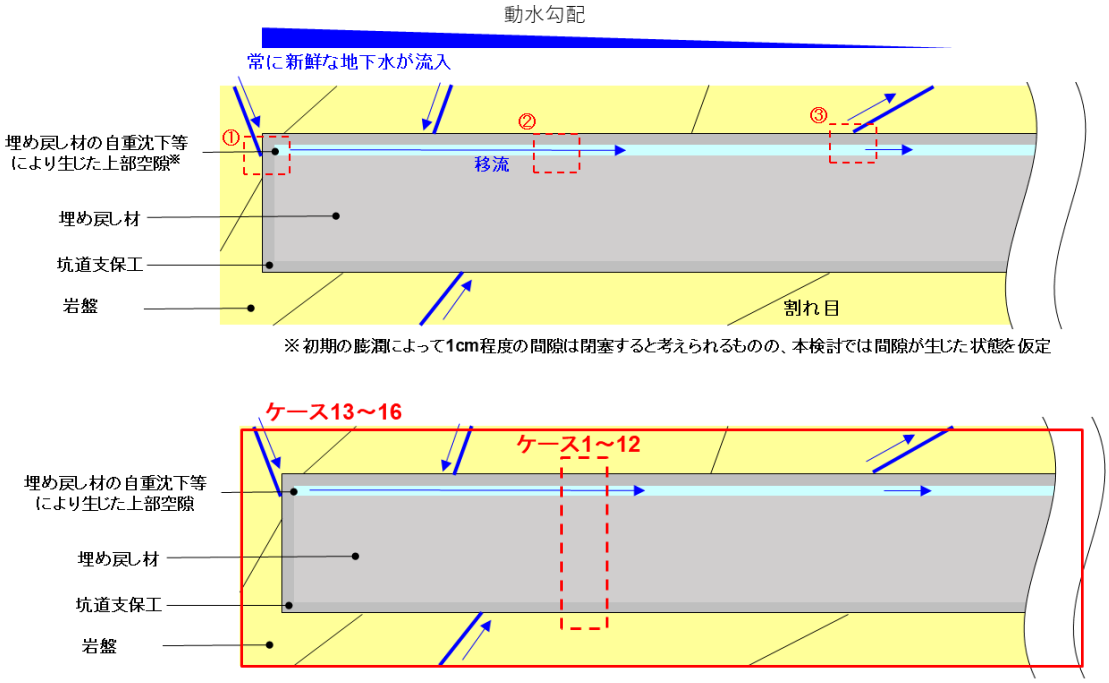


図 2.1-3　（a）埋め戻し材の変質に係る状態変遷オプションの概念（上図）および（b）各解析ケースにおける対象範囲のイメージ（下図）

表 2.1-1　2 次元軸対象モデルによる水理－化学連成解析ケース

ケース名	解析体系	支保工の材質	支保工の流れ	埋め戻し材上部	埋め戻し材上部に流入する水	結果概要
1	2 次元軸対象モデル	OPC	拡散支配	均一	地下水（FRHP）濃度固定	Na 型モンモリロナイトの大部分が残留、間隙閉塞あり
2			移流支配			モンモリロナイトが Mg 型に変化して一部は溶解、間隙閉塞なし
3				低密度（12cm）		ケース 2 とほぼ同様、モンモリロナイト溶解量が若干増加
4					セメント間隙水濃度固定	10 万年時点でモンモリロナイトが完全に溶解
5			拡散支配	空隙（1cm）	地下水（FRHP）濃度固定	ケース 1 とほぼ同様
6			移流支配			ケース 2 とほぼ同様
7						ケース 3 とほぼ同様
8					セメント間隙水濃度固定	ケース 4 とほぼ同様
9		HFSC	拡散支配	均一	地下水（FRHP）濃度固定	ケース 1 よりモンモリロナイト溶解量が若干増加、間隙閉塞なし
10			移流支配			ケース 2 よりモンモリロナイト溶解量が若干低下、間隙閉塞なし
11				低密度（12cm）	地下水（FRHP）濃度固定	ケース 3 よりモンモリロナイト溶解量が若干低下、間隙閉塞なし
12					セメント間隙水濃度固定	ケース 4 と異なり 10 万年時点でモンモリロナイトが多く残留
13	3 次元モデル（周期境界条件適用）	OPC	拡散支配	空隙（1cm）	周期境界条件（支保工や埋め戻し材と反応した地下水が流入	Na 型モンモリロナイトの大部分が残留、間隙閉塞あり
14			移流支配			Na 型モンモリロナイトの大部分が残留、間隙閉塞あり
15				空隙（10cm）		Na 型モンモリロナイトの大部分が残留、間隙閉塞あり
16	2 次元モデル			低密度（1cm）	支保工や埋め戻し材と反応した水が流入	坑道上流部や亀裂交差部近傍が変質、10 万年じてんで、埋め戻し材－支保工の境界部から 10cm 程度の領域で変質、間隙閉塞あり

(2)　反応輸送解析

1)　解析条件（ケース 1～12）

図 2.1-4 に一次元円筒座標系の解析体系を示す。本解析では、処分孔を含めずに、処分坑道の埋め戻し部および坑道支保工をモデル化した。なお、ケース 4 のみ、計算負荷を低減するために、坑道支保工のモデル化を省略している。全ケース共通の設定として、坑道支保工の外側境界は、ミキシングセルを設けず、地下水組成の濃度固定境界とした。また、モデル内のセルの間隙率が計算過程で 1%に達した場合は、鉱物の沈殿速度を 0 とし、そのセルの透水係数を低い値（1.0×10^{-12}(m/s)）に設定した。鉱物等の反応速度式については、既往文献で示されている式の適用範囲が室温に限られることから、温度条件はすべて 25℃とした。地下水やセメント間隙水（地下水が坑道支保工と接触し、コンクリート溶脱成分と平衡に達した地下水）が流入する場合は、上流端を濃度固定境界、下流端をゼロ濃度境界とし、拡散によって埋め戻し材や坑道支保工に地下水やセメント間隙水が直接侵入しないように設定した。コンクリートの劣化を想定したケース（ケー

ス 2、3、6、7）では、保守的に坑道支保工の透水係数を 1.0×10^{-5}(m/s)とし、0.01 の動水勾配を与えた。ケース 3 では、埋め戻し材の一部に乾燥密度の低密度領域が生じていることを仮定したが、現時点では発生し得る低密度領域の透水性に関する知見がないため、埋め戻し材の健全な状態において設定した透水係数より高い値（1.0×10^{-6}(m/s)）を設定した。また、ケース 3 の低密度領域にも 0.01 の動水勾配を与えた。さらに、低密度領域の発生メカニズムや鉱物組成に関する検討事例が少ないことから、本解析では健全な埋め戻し材の鉱物組成を設定した。ケース 7 では、埋め戻し材の自重沈下によって埋め戻し材上部に間隙が発生することを想定し、既往の検討例（原環センター，2016）において、最大 6mm の間隙が生じたことを踏まえ、保守的に 1cm の間隙を設定した。なお、別途実施した力学解析により、ベントナイトの膨潤により 1cm 程度の間隙であれば、十分に閉塞する可能性があることを確認したが（付録 1 の 1 章）、ここではあえて保守的に間隙の存在を仮定することとした間隙部分の透水係数については、ケース 3 における低密度領域と同様に、透水性に関する知見がないことから、保守的に 1.0×10^{-6}(m/s)を設定した。

地球化学モデルの設定条件については、コンクリートの初期水和物組成を表 2.1-2、表 2.1-3 に、セメント二次鉱物については、OPC、HFSC で同様とし、**表** 2.1-4 に示す。埋め戻し材の初期鉱物組成については、JAEA 熱力学データベース（JAEA-TDB_2014ß(v0104)）のモル体積およびモル質量を用いて換算・算出した（**表** 2.1-5）。算出方法は JAEA（2001）および NUMO（2021）を参照した。なお、上記の報告書で考慮しているプラジオクレイス（アルバイト・アノーサイト）とパイライトは本解析では不活性として取り扱った。埋め戻し材において設定した二次鉱物を表 2.1-6 に示す。地下水組成については、表 2.1-7 に示す。コンクリート中の初期間隙水組成については、OPC、HFSC ともに地下水組成（HFSC）と表 2.1-2 および表 2.1-3 に示す初期水和物と反応させたのち平衡状態に達したときの組成を設定した。坑道支保工および埋め戻し材中の実効拡散係数については、**表** 2.1-8 に示す値をそれぞれ設定した。なお、設定した各鉱物の反応速度式については、付録 1 の 2 章を参照のこと。

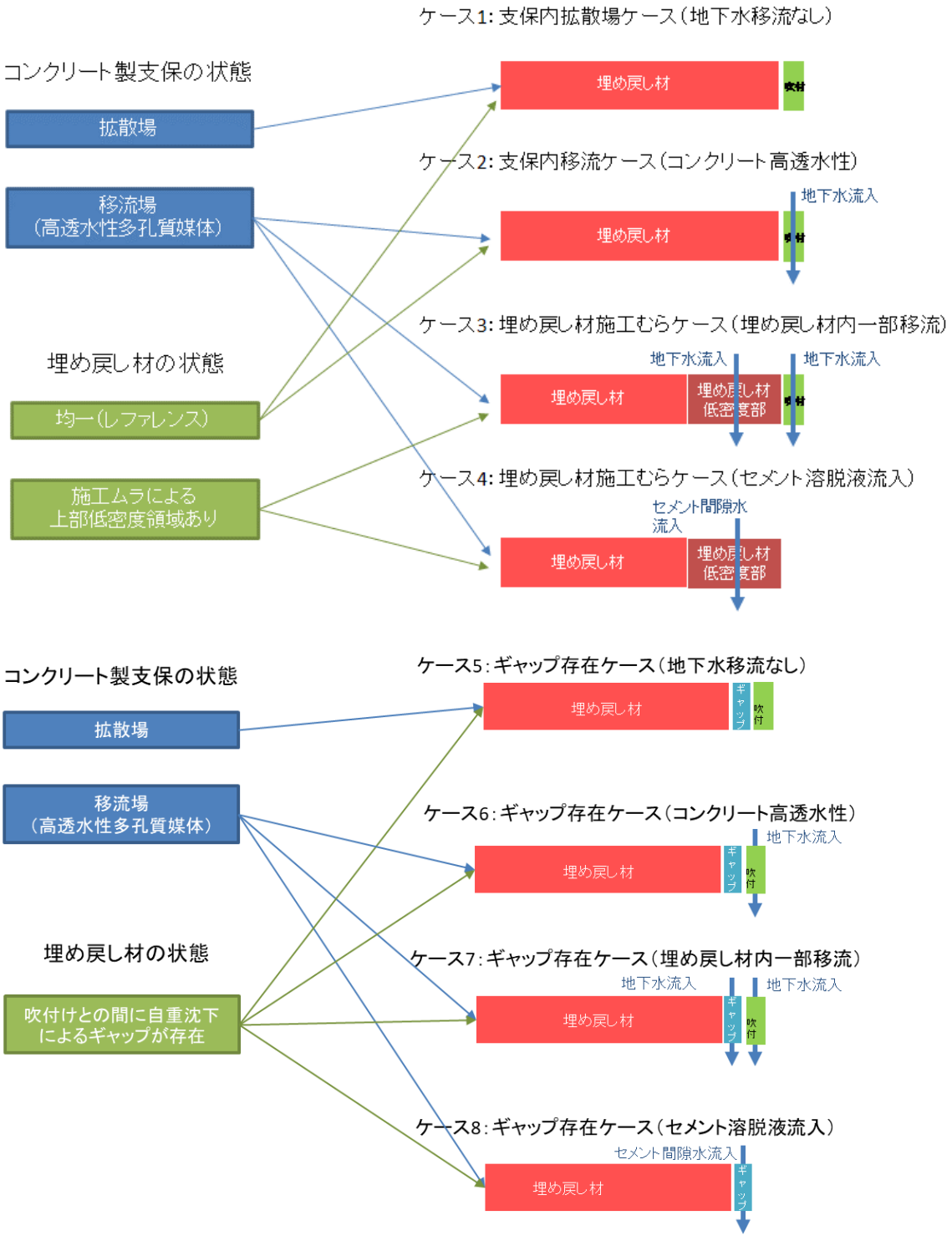


図 2.1-4　ケース 1～12 の解析体系
（ケース 9～12 はケース 1～4 の坑道支保工を OPC→HFSC に変更している）

表 2.1-2　コンクリート初期水和物組成(OPC)

	OPC (W/C=45%)	
	濃度[%]	モル濃度 [mol m^{-3}]
Portlandite	4.92	1488.20
CSH165	9.17	1184.66
Monosulfate-Al	1.91	61.81
Katoite-AlSi080	1.48	104.07
Katoite-FeSi084	0.94	63.17
Hydrotalcite-M6A	0.67	30.43
Calcite	0.11	29.78
Aggregate	67.41	
Porocity	13.39	
Total	100	

表 2.1-3　コンクリート初期水和物組成(HFSC)

	HFSC (W/C=30%)	
	体積比[%]	モル濃度[mol/m^3]
CSH095	16.65	2791.36
CSH105	2.150	352.98
Ettringite-Al	1.426	20.17
Katoite-AlSi080	2.592	182.30
Brucite	0.4949	200.94
Quartz	0.9215	406.16
Aggregate	60.11	
Porocity	12.29	
Total	100	

表 2.1-4　セメント二次鉱物

鉱物群	**二次鉱物**
ゼオライト	Analcime、 Laumontite-Ca、 Laumontite-dia
粘土系	Pyrophyllite
C(A)SH	CSH055 -CSH165、 Katoite-Al、 Katoite-AlSi040、 Katoite-AlSi080、 C4AH13、 C4AH19、 Stratlingite-Al
セメント系	Monocarbonate-Al、 Hemicarbonate-Al、 Friedel_Salt、 Gypsum、 Monosulfate-Al、 Ettringite-Al
その他	Portlandite、 Calcite、 Brucite、 Doromite、 Sepiolite、 Hydrotalcite-M4A、 Hydrotalcite-M6A、 Hydrotalcite-M4Ac、 Hydrotalcite-M6Ac
除外	NaOH(s)、 KOH(s)

表 2.1-5　埋め戻し材初期鉱物組成

	埋め戻し材 （乾燥密度 = 1.8 [g/cc]） (クニゲル v1：ケイ砂 = 15：85)	
鉱物名	モル濃度[mol/m^3]	体積比[%]
Montmor-Na	353.1171	4.796848
Quartz	25491.18	57.8344
Chalcedony	1707.601	3.874205
Calcite	64.74354	0.239124
Dolomite	35.14073	0.226183
Analcime	40.47169	0.39298
Albite	24.19696	0.242575
Anorthite	22.80673	0.229869
Pyrite	13.50394	0.032328
間隙率		32.13149

表 2.1-6　ベントナイト二次鉱物

鉱物群	セメント-ベントナイト
ゼオライト	Analcime(I) 、 Phillipsite(alk 、 dia) 、 Clinoptilollite(alk 、 dia) 、 Heulandie(dia) 、 Laumontite(Ca)
粘土鉱物系	Illite、 K-Feldspar
C(A)SH	CSH05-16、 Portlandite、 Katoite-AlSi080
セメント系	Ettringite-Al、 Friedel_Salt-Al
その他	Chalcedony 、 Calcite 、 Dolomite 、 Brucite 、 Sepiolite、 Hydrotalcite-Al
除外	

表 2.1-7　地下水組成および初期間隙水組成

	地下水組成	埋め戻し材間隙水組成	OPC 間隙水組成	HFSC 間隙水組成
Temp.(℃)	25	25	25	25
pH	8.46	9.88	12.49	10.78
pe	-4.76	-6.43	-9.28	-7.19
(mol/kg)				
Na	3.55E-03	9.22E-03	9.22E-03	9.24E-03
K	6.15E-05	4.07E-05	4.07E-05	4.08E-05
Mg	5.00E-05	4.77E-07	7.87E-10	2.88E-02
Ca	1.09E-04	1.11E-05	1.77E-02	1.07E-03
Fe	9.73E-10	9.68E-10	9.68E-10	9.71E-10
Al	3.43E-07	8.21E-07	2.62E-06	6.06E-02
Cl	1.46E-05	1.46E-05	1.46E-05	1.46E-05
S	1.11E-04	1.11E-04	9.62E-04	3.13E-03
C	3.54E-03	6.22E-03	8.25E-06	7.94E-06
Si	3.39E-04	4.81E-04	1.05E-05	2.76E-03

表 2.1-8　実効拡散係数

部材	拡散係数 [m^2/s]
コンクリート	$De = D^*$　（自由水中の De）
	$De = 1.0\times10^{-11}$
	$De = D^* \times \varepsilon^{3.05}$
埋め戻し材	$De = D^*\times \varepsilon^n$ $n = 2.22\times fs^{0.13}+1$ fs：モンモリロナイト含有率

※ ε :間隙率[-]

2)　解析結果（ケース 1～12）

OPC では、埋め戻し材と坑道支保工の境界部の坑道支保工側に二次鉱物が沈殿し、間隙閉塞が生じることでセメント成分の埋め戻し材領域への流入が抑制され、モンモリロナイトの大部分が残る結果となった（図 2.1-5：ケース 1、図 2.1-5：ケース 5)。HFSC でも埋め戻し材と坑道支保工の境界部坑道支保工側に二次鉱物が沈殿し、間隙率の低下が確認できるものの、閉塞には至らず、埋め戻し材へのセメント成分の流入が継続するが、低アルカリ性であるため、埋め戻し材が顕著に変質することはなく、結果として OPC と同様にモンモリロナイトの大部分が残る結果となった（図 2.1-5：ケース 9)。このことから、坑道支保工の割れ目が二次鉱物によって閉塞し、埋め戻し材とともに拡散場となる場合、坑道支保工と埋め戻し材境界部に二次鉱物が沈殿することで埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質は抑制させる可能性が示唆される。

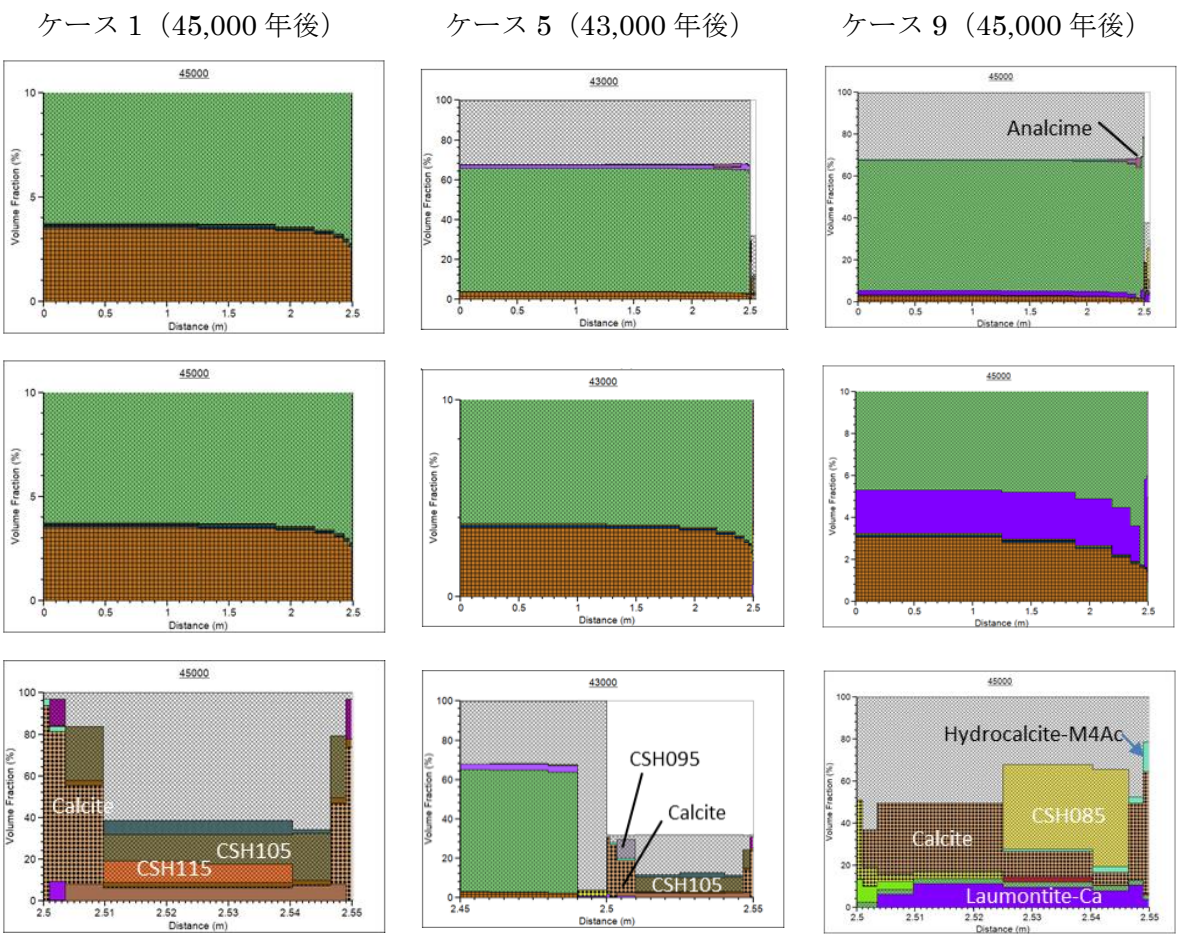


図 2.1-5　坑道支保工の流れが拡散場における上部間隙の有無およびコンクリート材料の違いが埋め戻し材の変質に及ぼす影響

坑道支保工の割れ目が外力によって継続的に破壊され、結果として坑道支保工が高透水性となる場合、セメント成分が地下水によって坑道支保工内を流れる一方で、拡散で埋め戻し材近傍に達したセメント成分により、モンモリロナイトが 1 万年以降に溶解し、ローモンタイト（Ca 型）への変質が見られた。埋め戻し材全体でみると、モンモリロナイトの大部分は残っているものの、Na 型から Mg 型に変質していた（図 2.1-6：ケース 2、6、10）。坑道支保工の割れ目が外力によって継続的に破壊されるとともに、埋め戻し材上部にモンモリロナイトの乾燥密度の低密度領域が生じることを仮定した場合、OPC では低密度領域にセメント間隙水が流入し続けた場合に変質領域が拡大し、10 万年時点ではモンモリロナイトが完全に溶解している（図 2.1-7：ケース 4、8）。HFSC では流れるセメント間隙水が低アルカリ性であることから、モンモリロナイトの変質が OPC に比べて進行せず、大部分が残る結果となった。

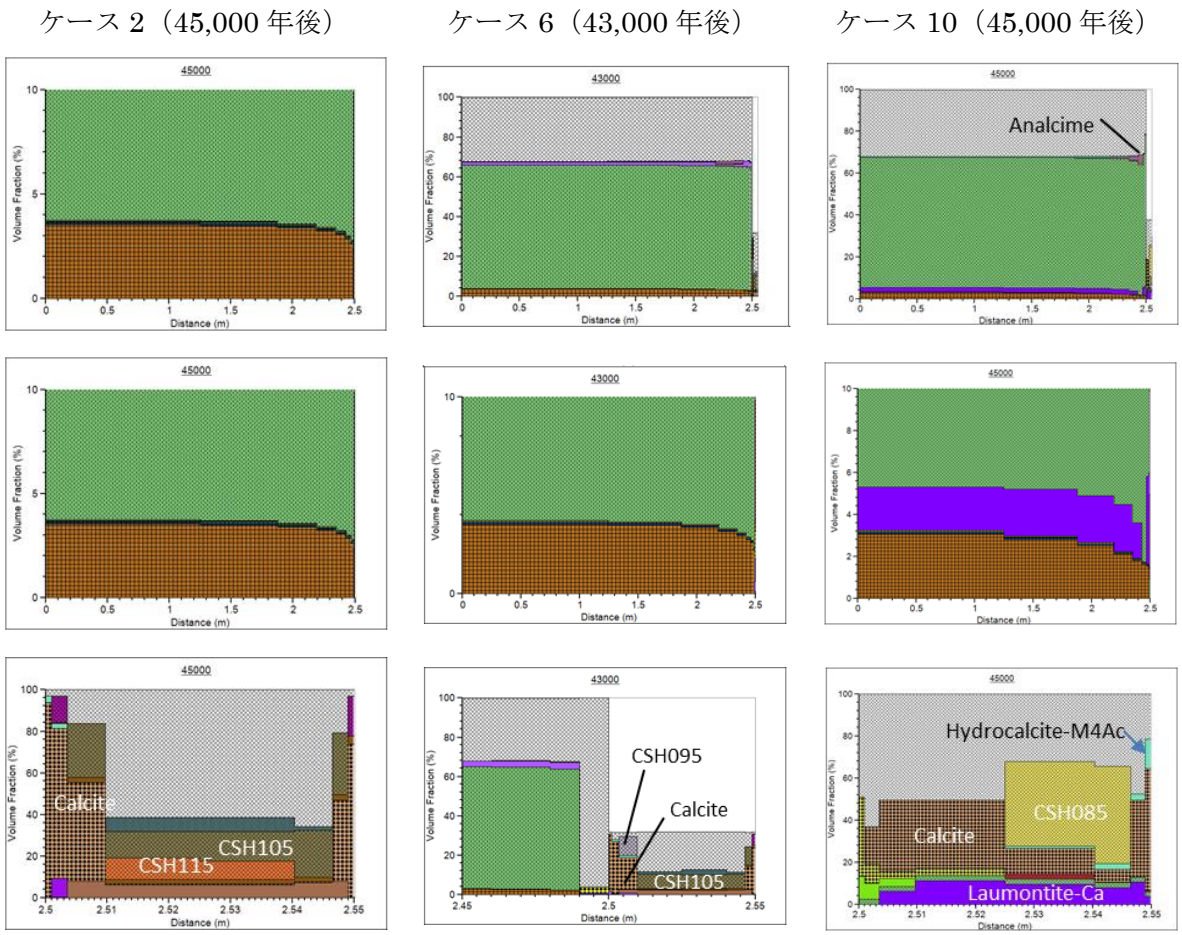


図 2.1-6　坑道支保工の流れが移流場における坑上部間隙の有無およびコンクリート材料の違いが埋め戻し材の変質に及ぼす影響

ケース 4（100,000 年後）　　ケース 8（100,000 年後）

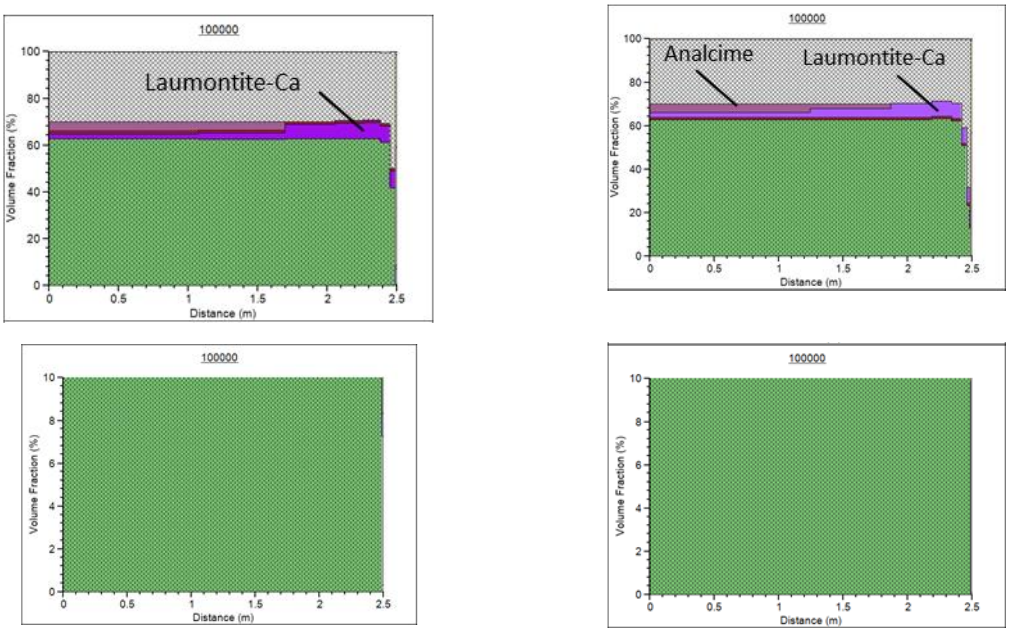


図 2.1-7　埋め戻し材上部間隙の大きさが埋め戻し材の変質に及ぼす影響

埋め戻し材上部に低密度領域が生じることを仮定した場合、1 万年以降に低密度領域との境界近傍でモンモリロナイトが溶解するとともに、Na 型から Mg 型への変質（図 2.1-8：ケース 3 および 7)、ローモンタイトへの変質（図 2.1-8：ケース 11）が見られた。

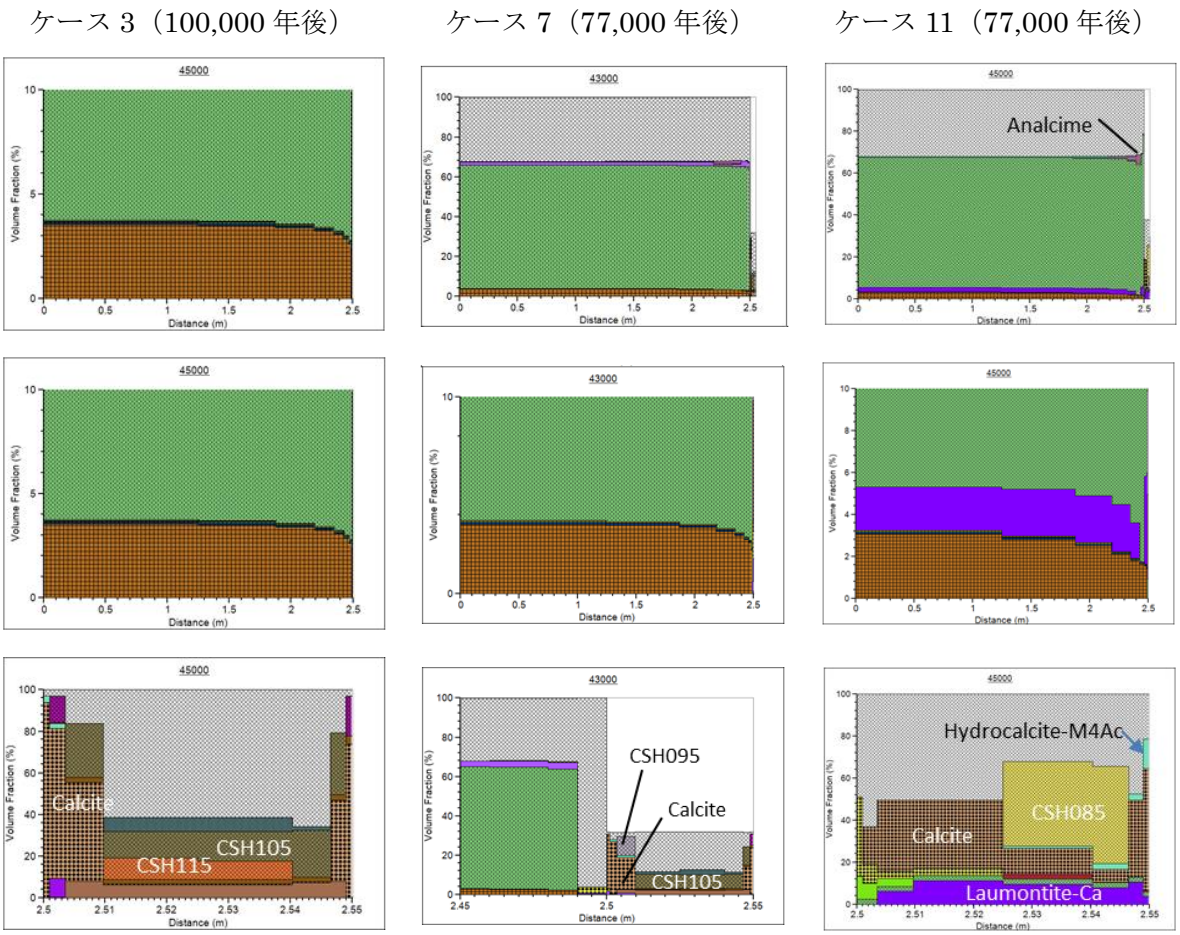


図 2.1-8　埋め戻し材上部の間隙の大きさ坑道支保工の材料の違いが埋め戻し材の変質に及ぼす影響

上記の結果から、埋め戻し材が一様に所定の密度で施工された場合、坑道支保工の割れ目の閉塞の有無によってモンモリロナイトの溶解、変質の程度に違いはあるものの、大部分は保存されることがわかる。一方、埋め戻し材上部にモンモリロナイトの乾燥密度の低密度領域が生じた場合、埋め戻し材上部の低密度領域が移流場となる場合、少なくとも局所的にはモンモリロナイトの変質が進行する可能性が示唆される。また、坑道支保工が外力等による継続的な破壊のため、高透水性領域となる場合は少なくとも局所的にはセメント溶出成分の移流によるモンモリロナイトの溶解および溶解成分の散逸が起こり、結果としてモンモリロナイトの大半が溶解する可能性が示唆された。

3)　解析条件（ケース 13～16）

ケース 1～12 までの解析結果を踏まえると、埋め戻し材中のモンモリロナイトが変質し埋め戻し材の安全機能に影響を及ぼす可能性のある状態は以下の条件の組み合わせであると考えられる。

・坑道支保工が外力等による継続的な破壊のため、時間とともに透水性が上昇

・自重沈下や埋め戻し材のモンモリロナイトの乾燥密度の不均質性に起因した、埋め戻し材上部の間隙あるいは低密度領域が発生。

・埋め戻し材の上部間隙および低密度領域の流れは移流、かつ、流れる地下水組成は常に一定

そこで、ケース 13～15 では、解析モデルは水平坑道の代表断面を切り出すものの、地下水組成

が時間とともに変化する条件（周期境界条件）を設定し、上部間隙や低密度領域を地下水が流れる過程で坑道支保工との接触によって溶出したアルカリ成分が時間とともに消費される場合に、埋め戻し材の変質がどの程度生じ得るかの評価を行った。ケース 16 では、ある程度長い水平坑道をモデル化し、水平坑道の長手方向に地下水が流れる際のアルカリ成分の消費に加え、岩盤中の割れ目分布の不均質性も考慮した際に、埋め戻し材の変質に与える影響を評価した。

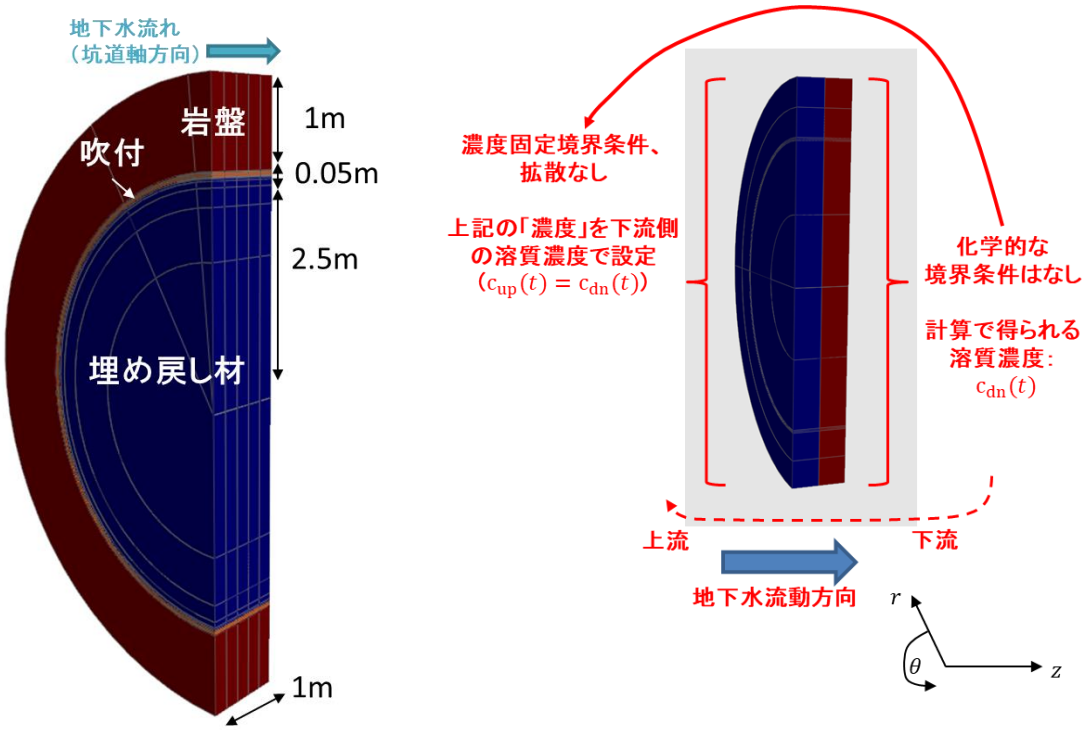
ケース 13～15 は図 2.1-9 に示すモデルで解析を行った。解析コードは QPAC を使用した。坑道断面に対し、片側半分をモデル化し、構成要素として、埋め戻し材（一部間隙領域を設定）、坑道支保工および岩盤を考慮した。ただし、岩盤領域の鉱物の溶解・沈殿反応は考慮していない。解析メッシュについては、今回の解析では埋め戻し材上部の空隙近傍での変質挙動に着目することとしたため、空隙近傍のメッシュを細かくしている。具体的には以下のように設定した。

・θ 方向には、0～5°、5°～30°、30°～180°の 3 領域に分割し、空隙部分は 0～5°の領域のみ設定

・r 方向のメッシュは 8 つに分割し。坑道支保工側の最小セルを 1mm とし、中心に向かうに従い等比級数的に大きくなるように設定

・z 方向（地下水の流れの方向）はケース 13 では 5 セル、ケース 14 および 15 では 3 セルに等分割

水理・化学境界については、昨年度実施した物質移行解析における水理条件（原子力機構・原環センター，2019）を踏襲し、坑道軸方向に動水勾配 0.01 を設定するとともに、濃度境界条件として、周期境界条件を設定した。周期境界条件とは、モデル下流側出口の水質を上流側入り口の水質として設定する境界条件であり、これにより、十分に長い坑道を溶存成分を消費しながら地下水が流動するという、実際の埋め戻し部で生じると考えられる現象を担保した。モデル上流側は濃度固定境界条件であるが、設定される固定値が下流で計算された溶質濃度に逐次更新されるようになる（図 2.1-9（b））。

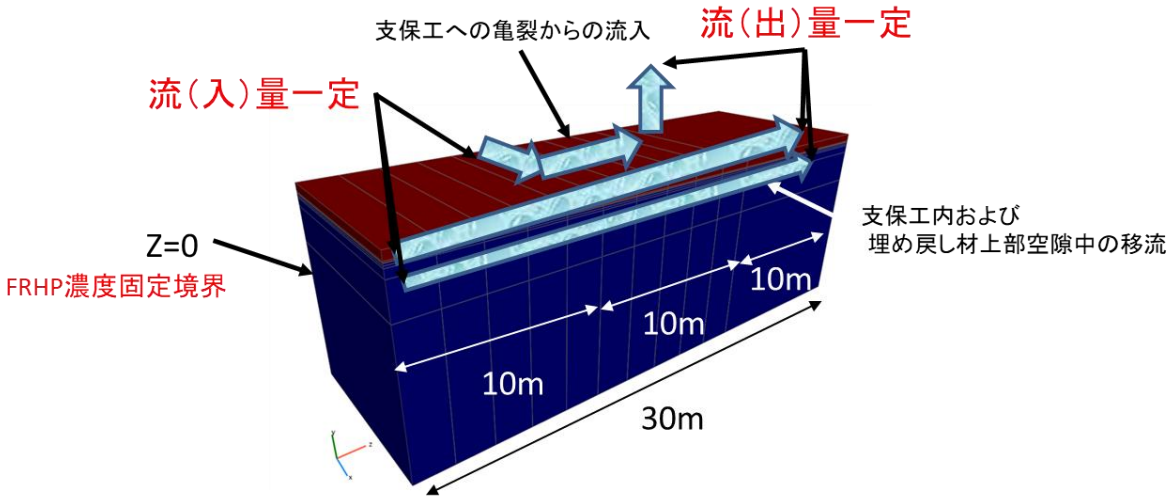


(a)反応輸送解析モデル　　(b)周期的境界条件

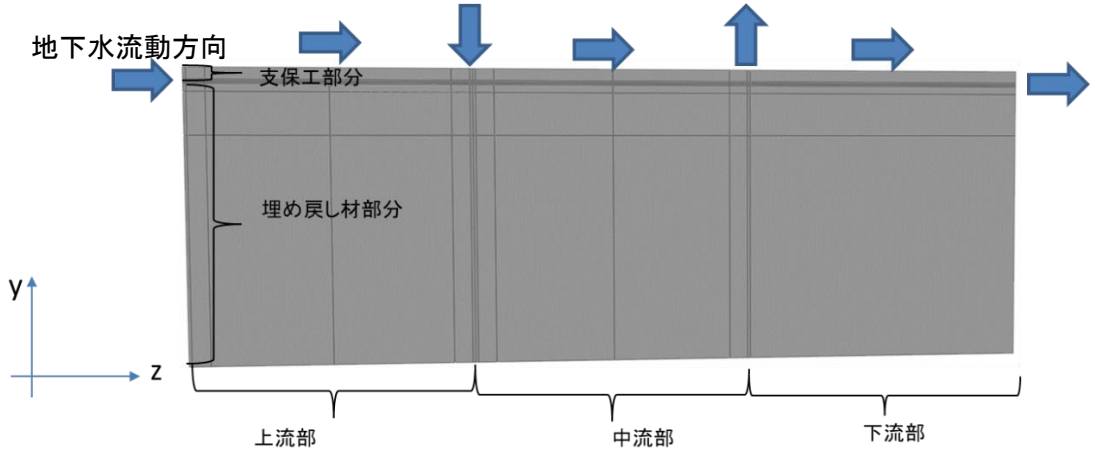
図 2.1-9　反応輸送解析モデルおよび周期的境界条件

ケース 16 の解析モデルを図 2.1-10 に示す。ケース 13～15 の解析モデル（図 2.1-9）との違いは軸方向の長さ（坑道の長さ）を 30m とし、亀裂交差部の影響を考慮するための地下水流出入点を設けるとともに、坑道端部を濃度固定境界条件に設定した点である。地下水流入部の水理境界条件は定流量としたが、坑道上流部および亀裂交差部を模擬した箇所の流入点における流量はそれぞれ、1.9×10^{-10} m³/s、0.2×10^{-10} m³/s とした（付録 1 の 3 章）。

ケース 13～15 およびケース 16 の解析におけるその他の地球化学条件は、ケース 1～12 の設定と同様であるが、ケース 16 における上部間隙は埋め戻し材と同様の鉱物組成を設定し、透水係数のみを高くするように設定した。



(a)ケース 16 の解析モデル体系



(b)解析メッシュ

図 2.1-10　解析モデルの概要

4)　解析結果（ケース 13～16）

ケース 13 の解析結果の概要（モンモリロナイト残存量、間隙率、pH の分布と時間変遷）を図 2.1-11 に示す。モンモリロナイト残存量は、10 万年までの期間において、坑道支保工側の境界から徐々に低下するが、埋め戻し材最外部でも半分以上は残存するという結果になった。また、埋め戻し材部分の間隙率に大きな変化はなかった。埋め戻し材中の pH は一時的に上昇するが、坑道支保工境界の間隙率低下により地下水相当に復帰する。次に、鉱物組成の変遷を示す。図 2.1-12 に示すように、境界部のコンクリート側に二次鉱物（カルサイトおよび C-S-H ゲル）が沈殿し、間隙閉塞が起こっているが、ギャップ部分への鉱物の沈殿はなかった。また、埋め戻し材中のモンモリロナイトは Na 型を主として大部分が残っていることがわかる。図 2.1-13 に最上流セルにおける pH 分布の経時変化を示す。なお、図 2.1-11 に示すように、最上流セルとそれ以外のセルでの差はほとんどない。埋め戻し材の境界に近い部分で一時的に pH=12 付近まで上昇しているが、100 年以内には初期 pH 程度まで低下し、最終的には地下水程度の pH まで低下することがわかる。また、埋め戻し材中の初期の pH は坑道支保工との平衡を経ているため、通常の地下水 pH よりやや高くなっている。

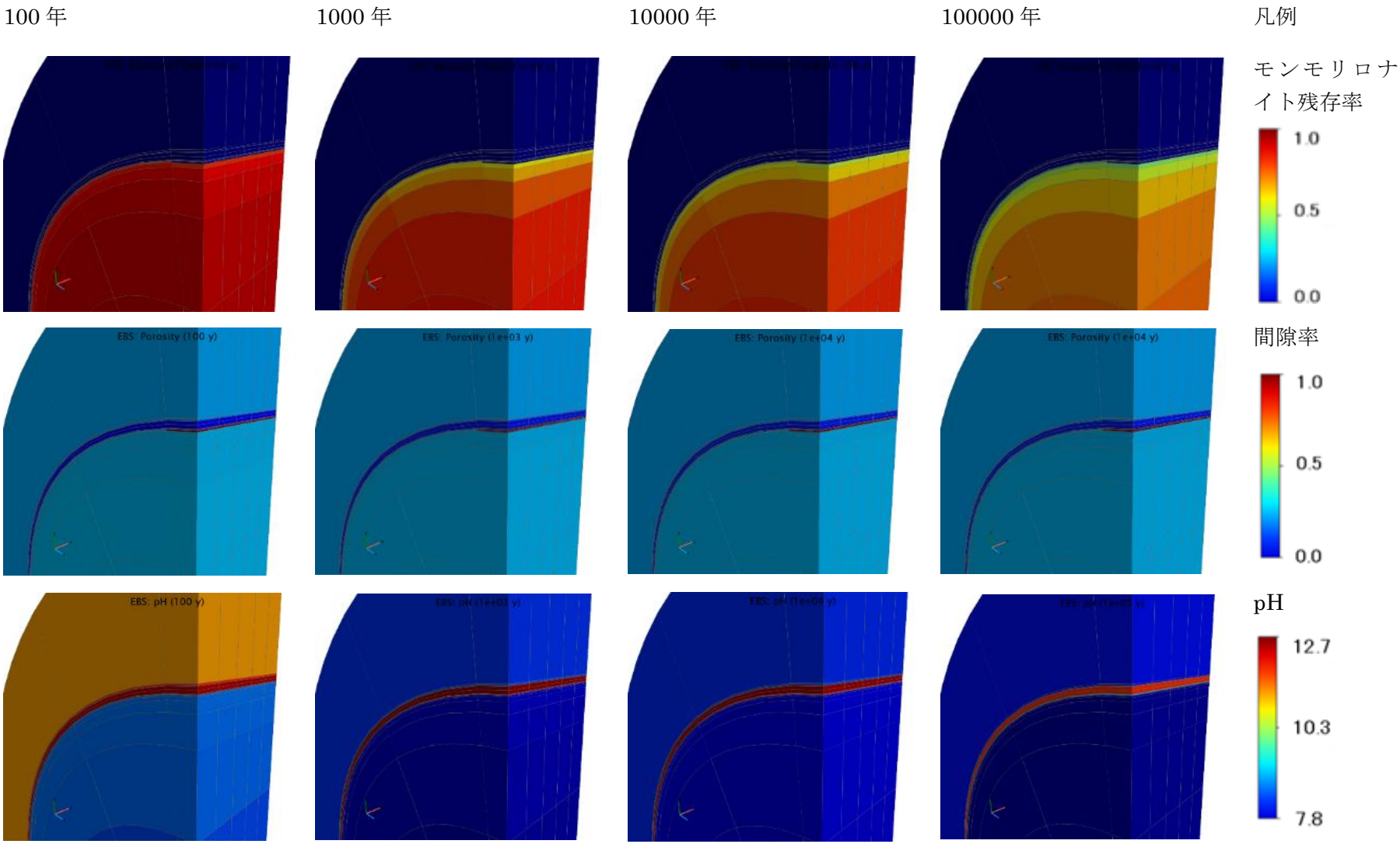


図 2.1-11　モンモリロナイト残存量、間隙率および pH の変遷（ケース 13）

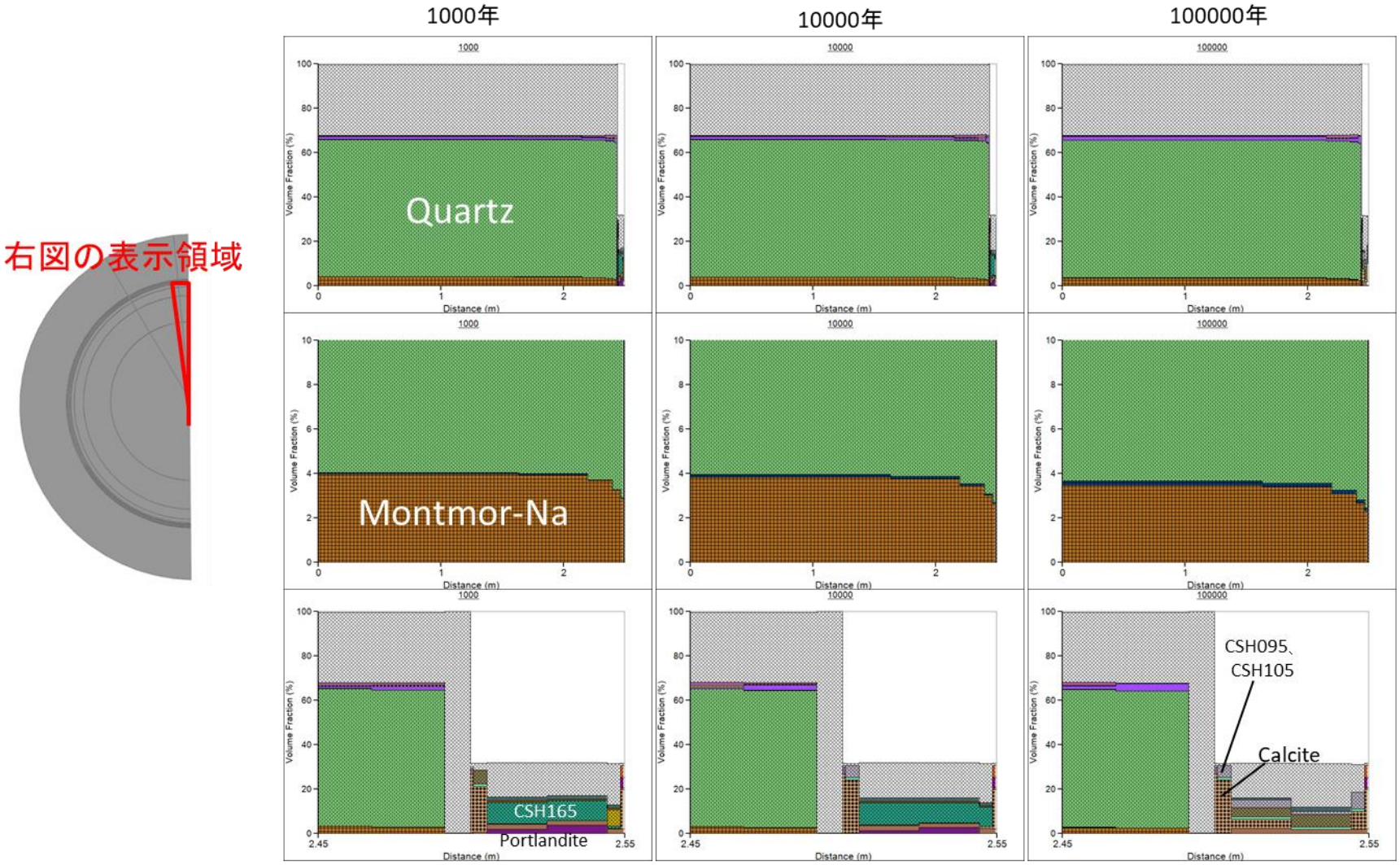


図 2.1-12　鉱物組成の変遷（ケース 13）

（上段：全体図、中段：埋め戻し材拡大図、下段：坑道支保工拡大図）

26

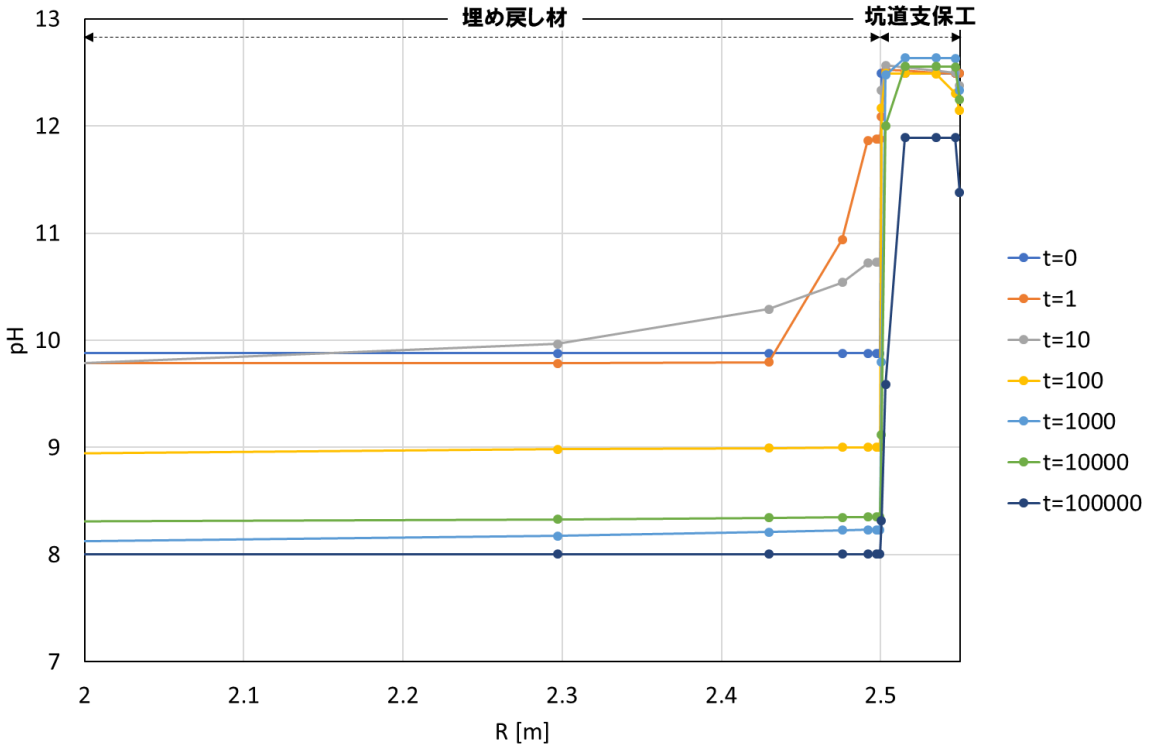


図 2.1-13　pH 分布の変遷（ケース 13）

ケース 14 の解析結果の概要（モンモリロナイト残存量、間隙率、pH の分布と時間変遷）を図 2.1-14 に示す。ケース 13 とほぼ同様の結果であり、坑道支保工の流れを移流支配とした影響はほとんど認められなかった。モデル体系以外は同等の条件設定としているケース 7 では坑道支保工と埋め戻し材境界部で間隙が閉塞せずにモンモリロナイトの溶解が一定程度進展しているのに対し、本ケースでは境界部で間隙が閉塞したことで、モンモリロナイトの溶解が抑制されていることがわかる。図 2.1-15 および図 2.1-16 に鉱物組成の変遷、pH の変遷を示すが、どちらもケース 13 の結果を同様であった。

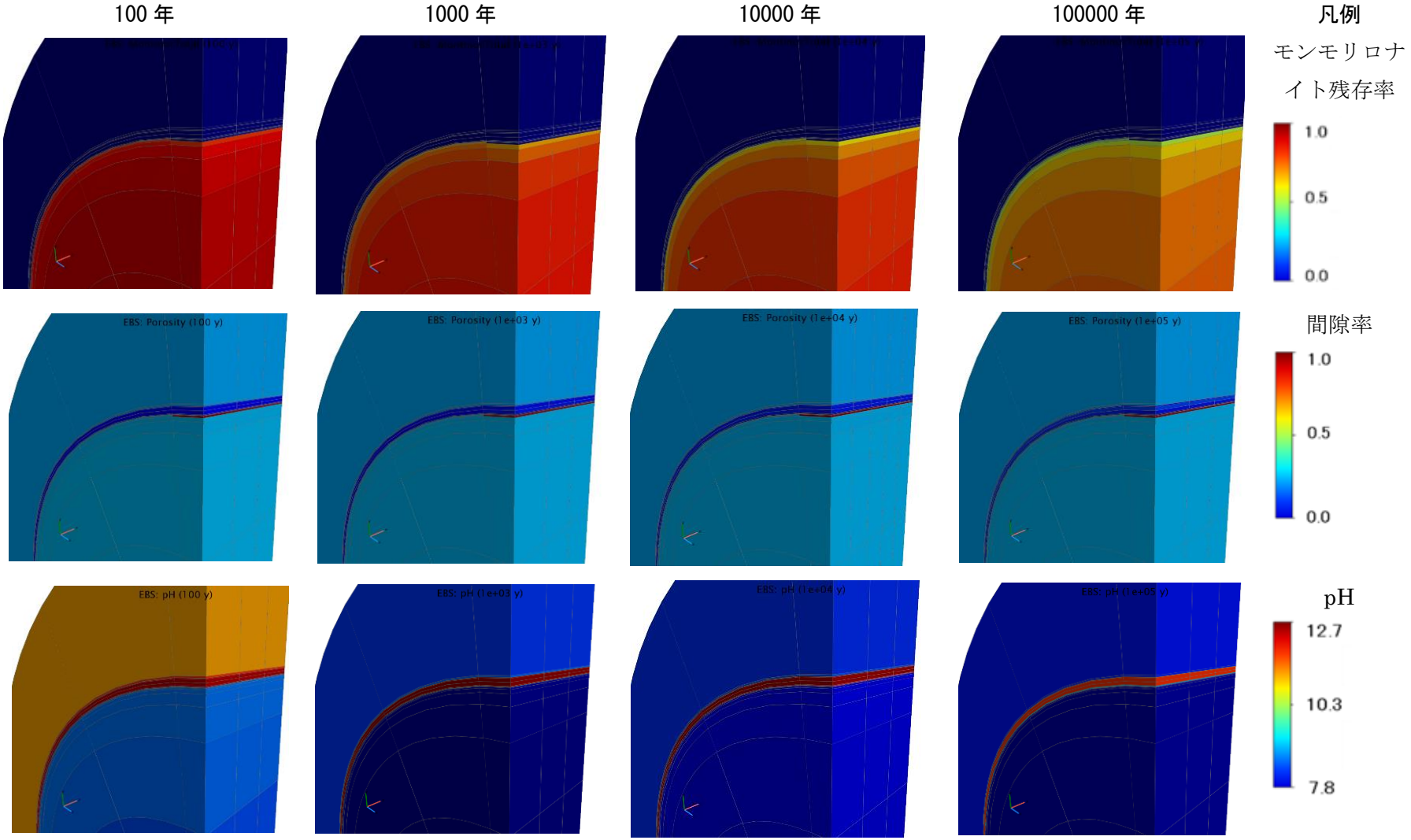


図 2.1-14　モンモリロナイト残存量、間隙率および pH の変遷（ケース 14）

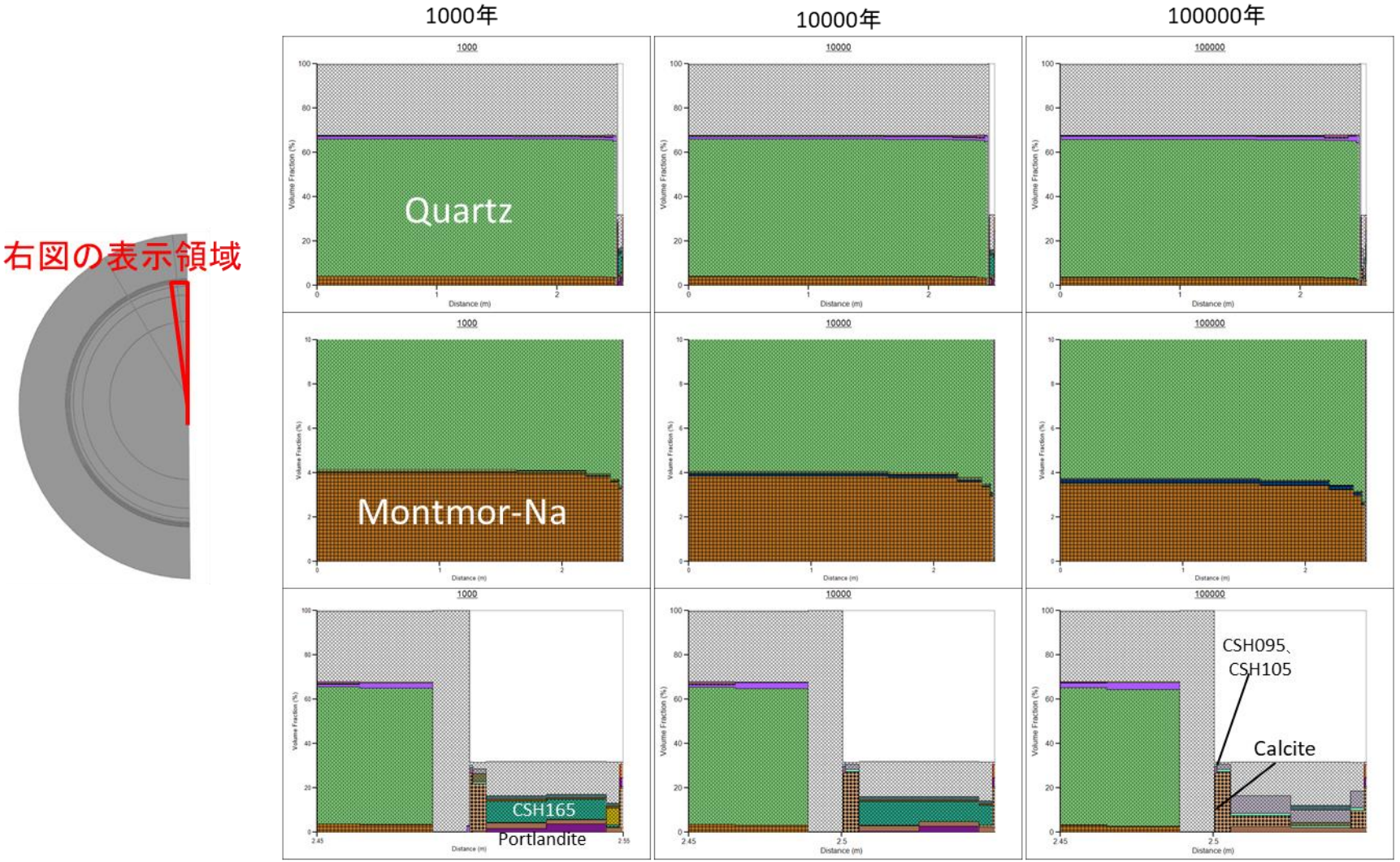


図 2.1-15　鉱物組成の変遷（ケース 14）

（上段：全体図、中段：埋め戻し材拡大図、下段：吹付コンクリート拡大図）

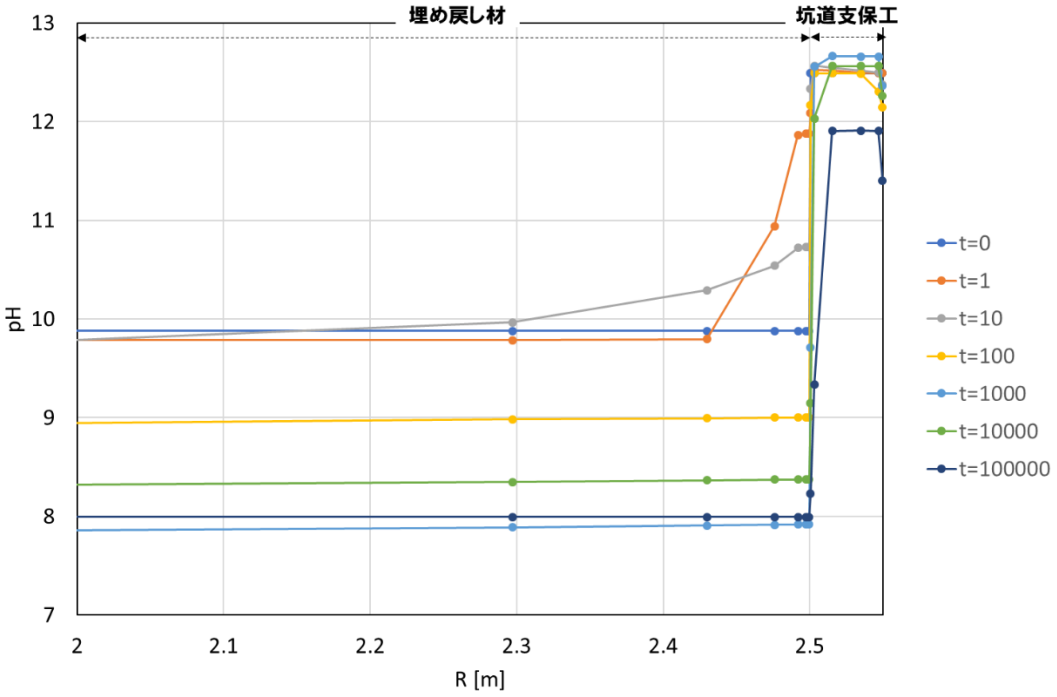


図 2.1-16　pH 分布の変遷（ケース 14）

ケース 15 の解析結果の概要を図 2.1-17 に示す。上部間隙領域が大きくなっても（10cm）モンモリロナイトの変質がより進展する傾向にはない。図 2.1-18 および図 2.1-19 にそれぞれ鉱物組成および pH 分布を示す。埋め戻し材の上部間隙部分とそれ以外ではわずかに鉱物組成が異なるとともに、上部間隙部分の初期（10 年程度）に pH が高くなっているものの、全体としてはケース 13 および 14 とほぼ同様のであった。このことは、ケース 13、14 と同様に、100 年程度で境界の支保工側の間隙が閉塞することで、埋め戻し材領域への流入が低下していることと、周期的境界条件を採用したことで坑道支保工および上部間隙において、上流で反応した組成の水が流入していることが理由と考えられる。

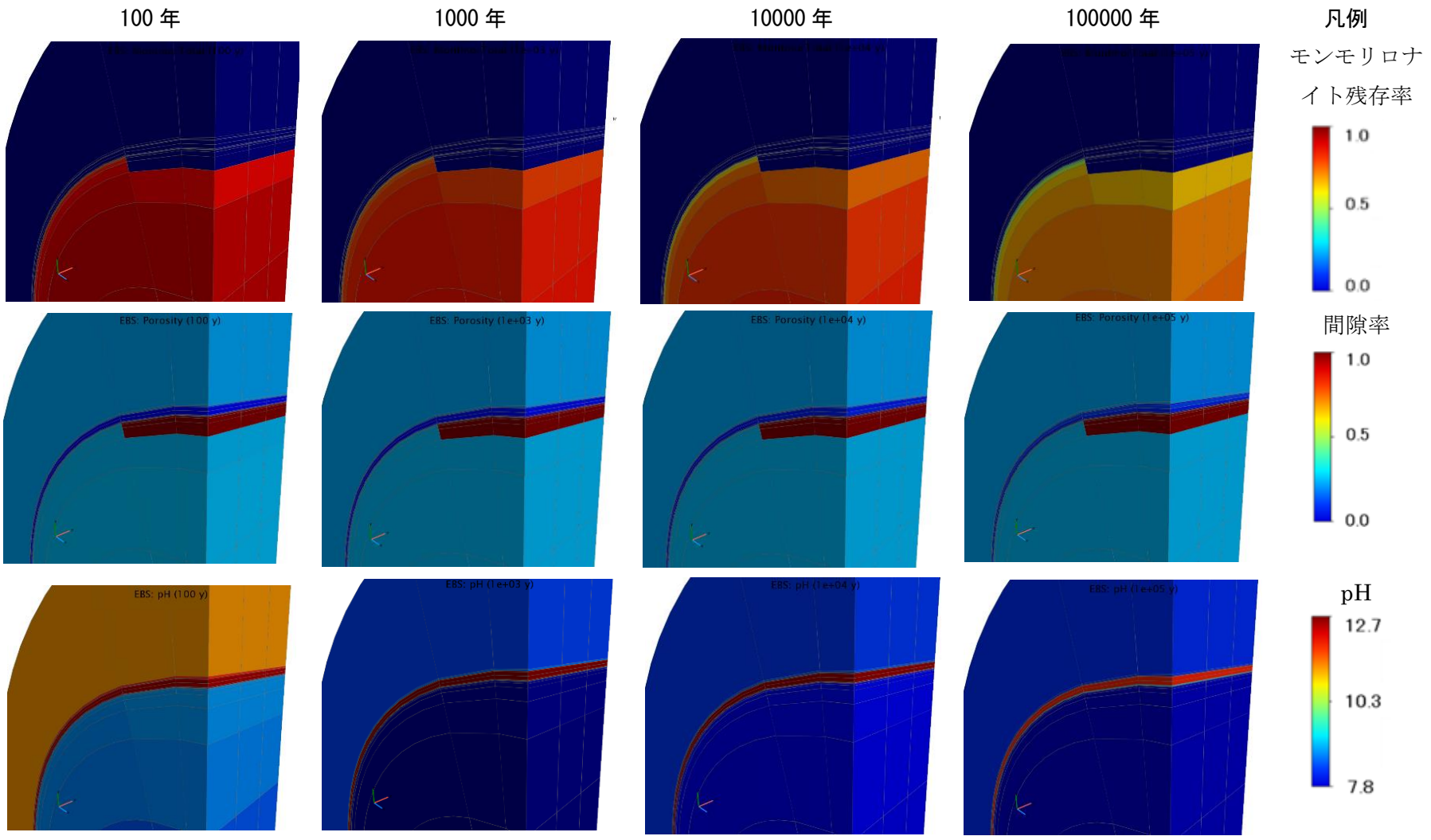


図 2.1-17　モンモリロナイト残存量、間隙率および pH の変遷（ケース 15）

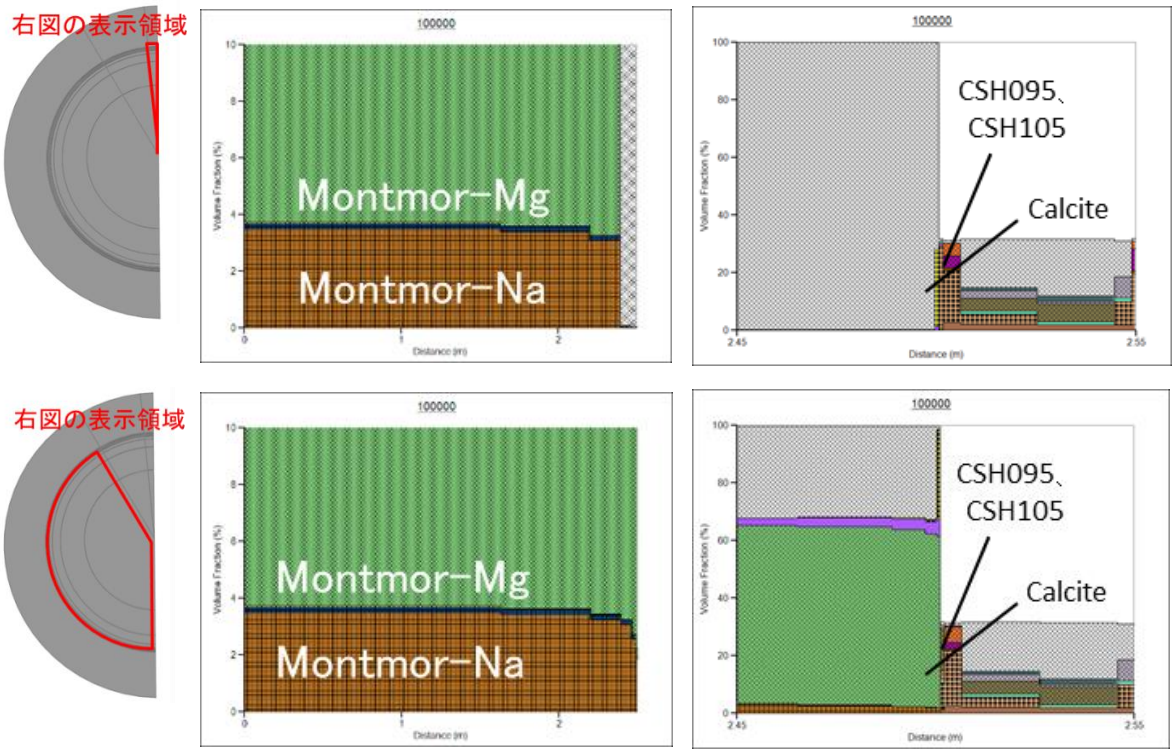


図 2.1-18　ケース 15 の最上流セルにおける鉱物体積分率の 10 万年時点での比較
（左：表示領域、中：埋め戻し材拡大図、右：吹付コンクリート拡大図）

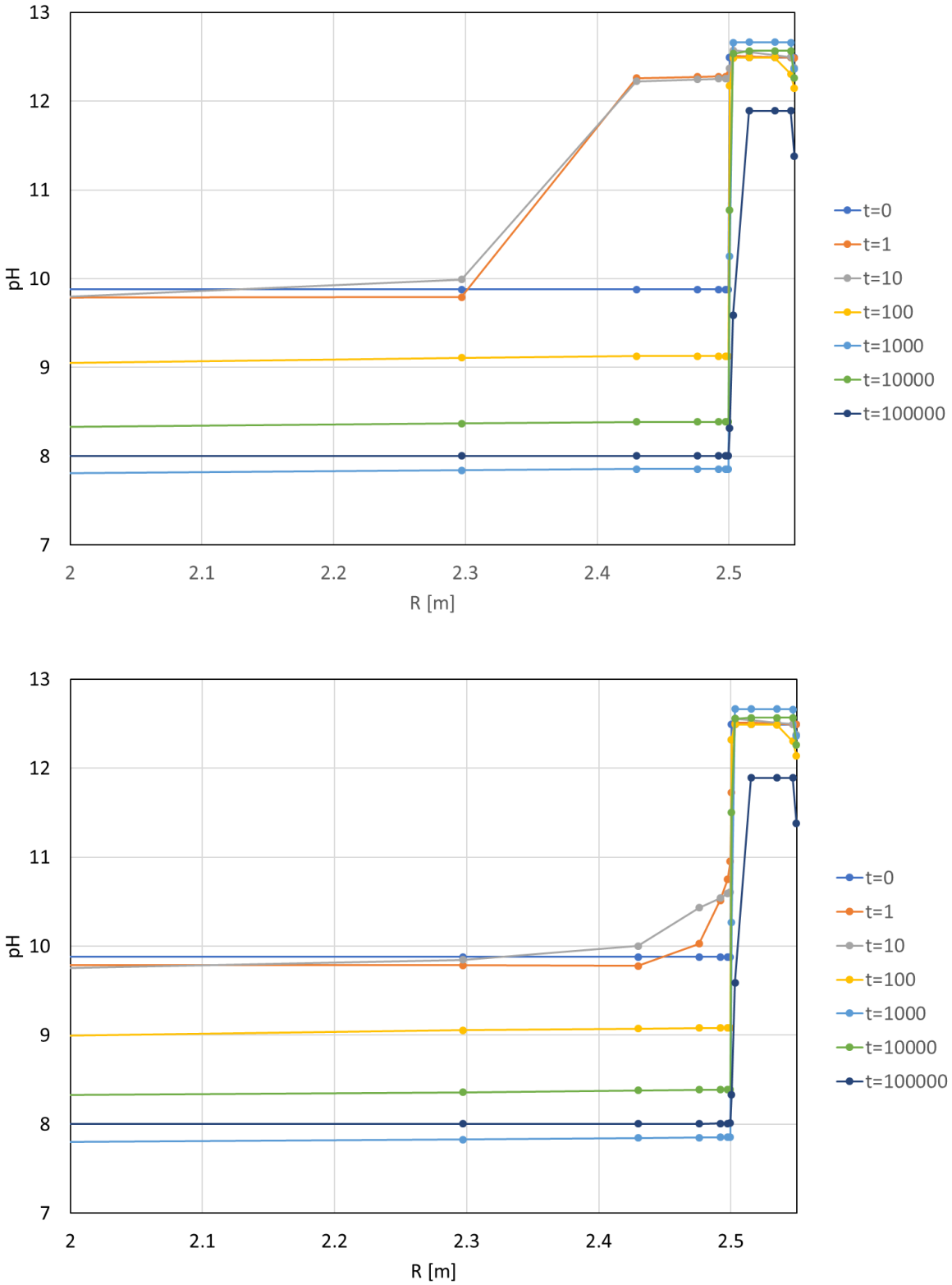


図 2.1-19　ケース 15 の最上流セルにおける pH 分布の経時変化
（上：空隙のある領域、下：空隙のない領域）

図 2.1-20 にケース 16 の 10 万年時点でのモンモリロナイト残存量および pH 分布を示す。坑道上流部および割れ目からの地下水流入箇所の近傍（坑道支保工との境界から埋め戻し材側に向かって 10cm 程度）でモンモリロナイトの変質が進行しているものの、変質は限定的であり、大部分のモンモリロナイトは残存する結果となっている。また、pH については、坑道支保工内におけるもっとも高い箇所においても、10.4 程度（Region III～IV）である。坑道支保工と埋め戻し材の境界部における間隙率分布においては、坑道支保工側は一度低下した後、10 万年時点で再度高くなっている（図 2.1-21 (a)）。これは、埋め戻し材側からのカルシウム濃度や炭酸濃度が比較的低い水の流入によりカルサイトが溶解したことに起因すると考えられる。埋め戻し材側の境界部では、地下水流入箇所で間隙率が低下している図 2.1-21(b)。これは、地下水流入箇所からの流量が増加したことに起因すると考えられる。図 2.1-22 に埋め戻し材の鉱物組成（10 万年時点）を示す。図 2.1-23 に埋め戻し材の坑道支保工からの距離に応じたモンモリロナイト残存量の分布を示す。モンモリロナイトは基本的に坑道支保工との境界部から変質が進行するとともに、初期は坑道上流部においても変質が進む。また、坑道上流側および割れ目からの地下水流入箇所を除き、埋め戻し材－坑道支保工境界部から 10cm 程度（埋め戻し材第 5 セル）の位置では 70%程度のモンモンモリロナイトが残存している。

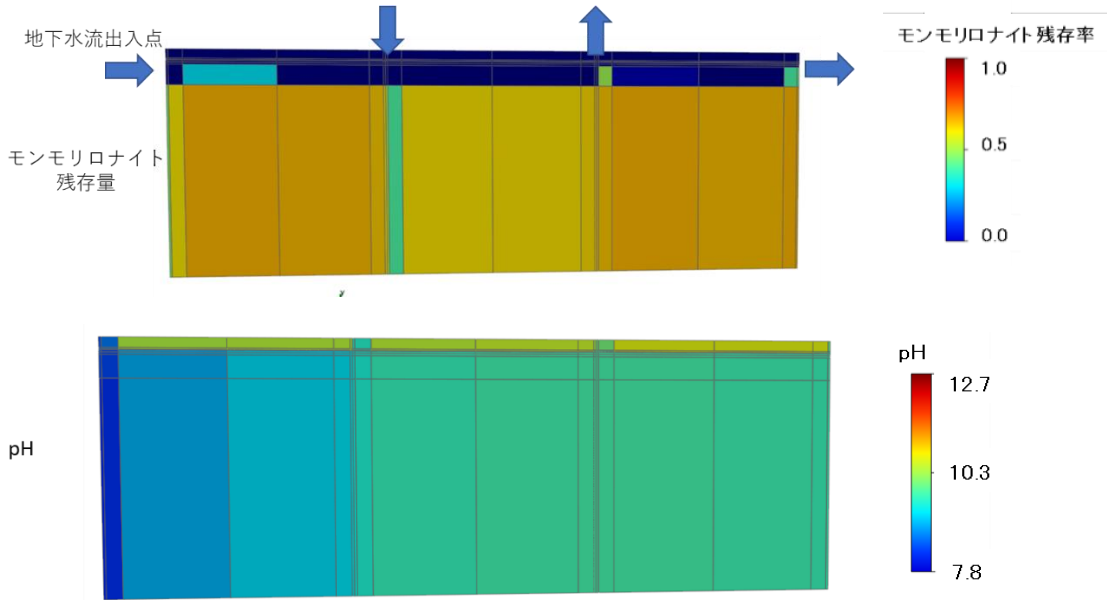
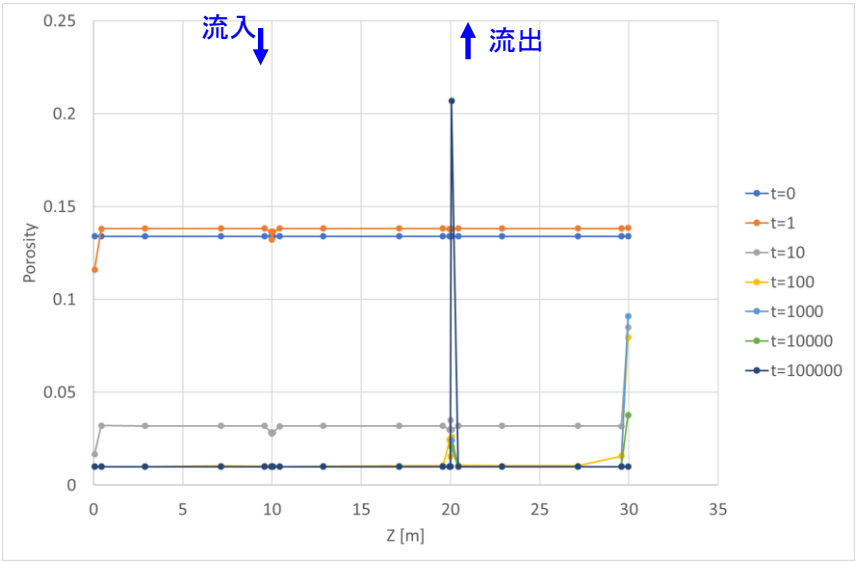
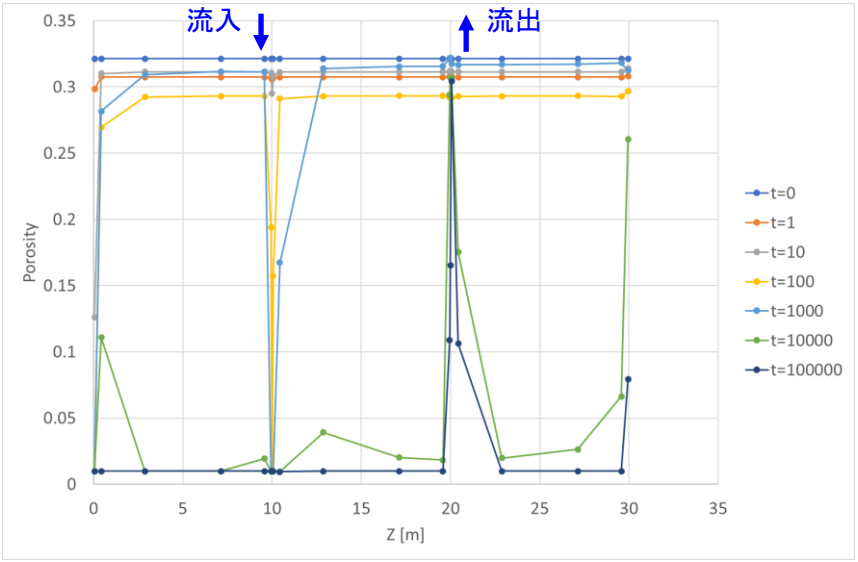


図 2.1-20　10 万年時点でのモンモリロナイト残存量および pH 分布（ケース 16）



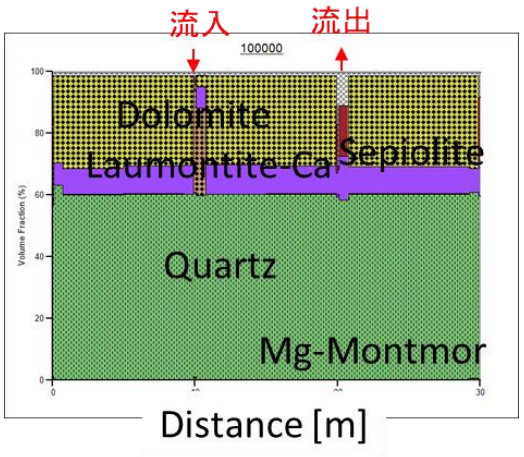
(a) 坑道支保工側境界



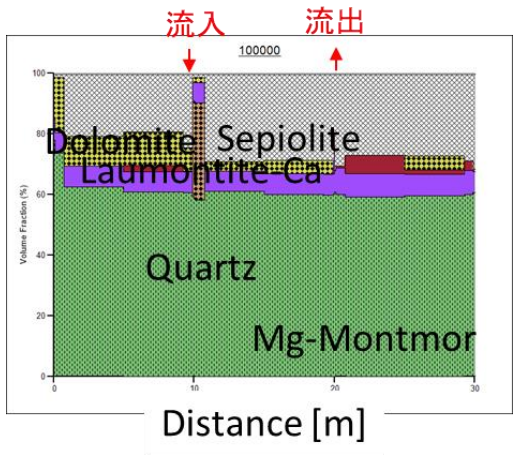
(b) 埋め戻し材側境界

図 2.1-21　埋め戻し材－坑道支保工境界部における間隙率分布の変遷

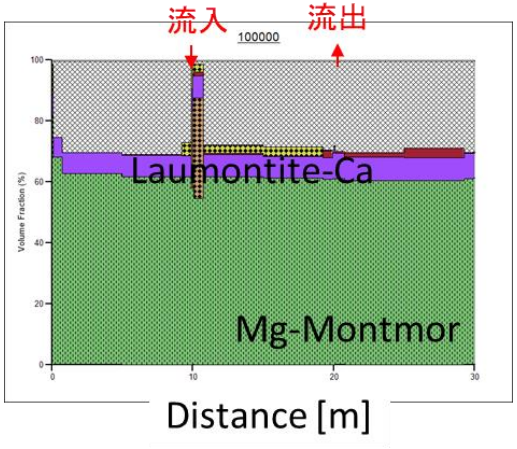
坑道支保工境界から 1mm



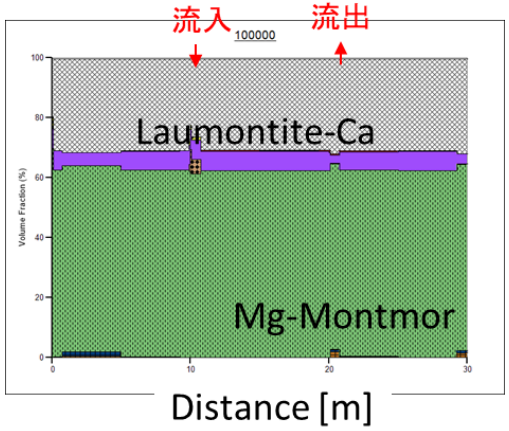
坑道支保工境界から 1cm



坑道支保工境界から 2cm



坑道支保工境界から 10cm



坑道支保工境界から 1m

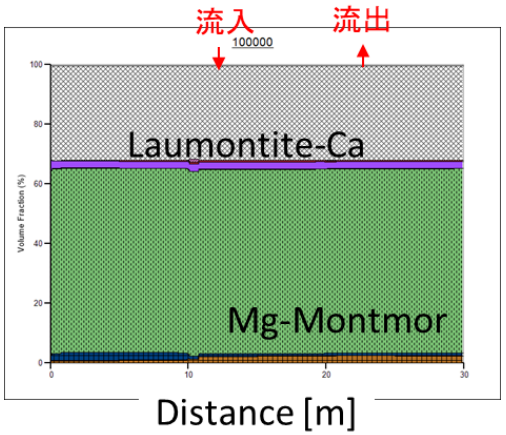


図 2.1-22　埋め戻し材中の鉱物組成（10 万年時点）

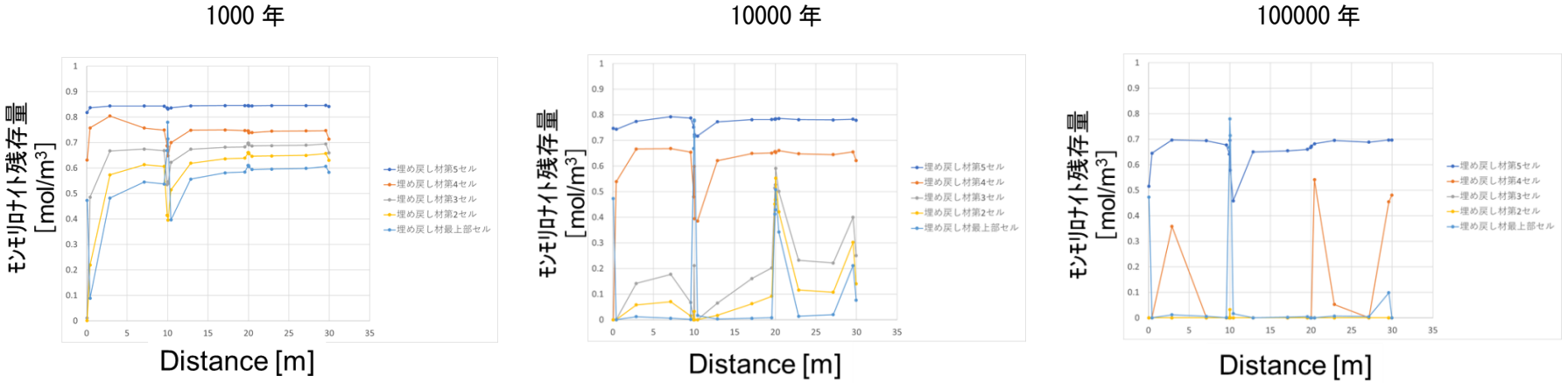


図 2.1-23　モンモリロナイト残存量の変遷

(3) まとめ

既往の反応輸送解析の事例を整理し、特に支保工の状態設定について検討した。その結果、支保に関して考慮すべき状態変遷のオプションとして以下の 2 点を抽出した。

- 割れ目内の二次鉱物による閉塞のため支保全体の透水係数が低下し、支保を含む坑道領域全体が拡散場となる
- 地震動や岩盤クリープ等の外力による割れ目閉塞部の破壊あるいは新たな割れ目の形成が繰り返されることにより破壊を誘引とした化学的変質と劣化が継続的に進展し、支保は多孔質の高透水性領域へと変遷する

また、坑道上部に低密度領域が生じる要因については既往文献での報告例はなかったものの、「地下空洞型処分施設機能確認試験」において、坑道上部に埋め戻し材の自重沈下に伴う天端部の間隙発生（最大 6mm 程度）の事例が報告されている（原環センター，2016）とともに「地層処分施設閉鎖技術確証試験」においても自重沈下による天端部の間隙発生が課題とされている（原子力機構・原環センター，2019）ことがわかった。このような間隙は、埋め戻し材再冠水後の膨潤によって閉塞する可能性も高いと考えられるが、本検討では、上記の結果から、埋め戻し材天端部に最大 1cm 程度の空隙が生じる可能性を考慮して、後段の反応輸送解析等の検討を実施していくこととした。なお別途実施した力学解析では埋め戻し材の膨潤により 1cm 程度の間隙は閉塞する可能性が高いことも示された。

さらに、シーリングシステムが卓越した移行経路となる可能性のあるプロセスや対応する状態変遷（シナリオ）を具体化し、埋め戻し部の代表的断面における水理-化学連成解析と地下水接触部近傍の水理-化学連成解析を実施した。その結果、埋め戻し材が顕著に変質する可能性が高いのは、坑道と新鮮な地下水が接触し続けるような坑道最上流部や、岩盤亀裂との交差部のような領域のみである可能性が示唆された。なお、今回検討した解析ケースの条件においては、埋め戻し材と接触する地下水水質条件がベントナイトのゾル化領域にあるケースは存在しなかった。

2.3.1.2　シーリングシステムの劣化が安全評価に有意な影響を及ぼす条件の把握

昨年度の解析では、人工バリアから天然バリアへ核種が到達した時点からすべてのシーリングシステムの安全機能が失われるという過度に保守的な仮定を設定していた。2.1.3.1 の検討結果から、特に埋め戻し材に着目し、坑道支保工の劣化に起因した、埋め戻し材の変質について検討を行った結果、少なくとも埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質によって埋め戻し部の透水性の上場が早期に起こることは考えにくく、また、変質が生じる場所は地下水の流入点（坑道上流端や割れ目交差部）の近傍に限定される可能性が示された。そこで、今年度は、シーリングシステムの安全機能が解析初期から失われるという仮定は踏襲しつつも、反応輸送解析の結果から示された、部分的に埋め戻し部の透水性が上昇するという条件での物質移行解析を行い、同条件がシーリングシステムの安全機能が維持される場合や悲観的にすべての安全機能が喪失することを仮定した場合との影響度を比較検証することとした。また、昨年度の検討において提示した、シーリングシステムの安全機能が変化することへの予防策あるいは影響緩和策の効果についても、検証することとした。

(1)　シーリングシステムの安全機能が低下することを想定した物質移行解析

1)　解析ケース

昨年度と同様に、割れ目頻度が比較的高いことが想定される深成岩類と相対的に割れ目頻度や割れ目の透水性が低い新第三紀堆積岩の 2 岩種で検討をおこなうこととした。NUMO は、処分坑道の方向は岩盤からの最大主応力方向と地下水流動方向に応じ、坑道安定性という設計の観点と放射性核種の遅延という安全評価の観点を総合的に勘案して決定することとしている（NUMO, 2021）、ことから、昨年度実施した処分坑道に対して水平方向に動水勾配をかける条件に加え、今年度は直交方向のケースを加えることとした。また、諸外国においては、立坑を一か所に集中配置ことにより、立坑を介した水の流れを抑制する対策が検討されていることもある（ANDRA, 2005）ことから、立坑の配置（片側配置、対角配置）を変更したケースも加えることとした。さらに、2.3.1.1 の反応輸送解析の結果を踏まえ、昨年度設定した埋め戻し部全域で透水性が上昇するケースに加え、埋め戻し部の一部がモンモリロナイトの変質によって高透水性になるというケースを加えた。なお、反応輸送解析の結果からは、処分坑道上流端や坑道と交差する割れ目からの流入点近傍でモンモリロナイトの変質が進行する可能性が示唆されたが､流入点からの流量(あるいは流速）と変質の度合い（変質範囲）との関連性が現時点では明確ではないとともに、すべての割れ目交差部に対し、変質／未変質箇所を区分することは現実的ではないことから、今回はある程度保守性を持たせ、埋め戻し箇所を上部、側方部、底部に区分し、それぞれに対し異なる透水性を設定できるようにメッシュを分割することで、部分的な埋め戻し材の劣化の影響を評価することとした。表 2.1-9 に全解析ケースを記す。

表 2.1-9　物質移行解析ケース一覧

<table>
<tr><th>ケース名</th><th>シーリングシステムの状態</th><th>岩種</th><th>地下水流動方向
（対処分坑道）</th><th>立坑
配置</th><th>坑道支保工</th><th>止水プラグ</th></tr>
<tr><td>深成岩類_平行_Case1</td><td>健全</td><td rowspan="8">深成岩</td><td rowspan="16">平行</td><td rowspan="16">対角</td><td rowspan="4">劣化（砂並み）</td><td rowspan="15">－</td></tr>
<tr><td>深成岩類_平行_Case2</td><td>埋め戻し材上部劣化</td></tr>
<tr><td>深成岩類_平行_Case3</td><td>埋め戻し材側部劣化</td></tr>
<tr><td>深成岩類_平行_Case4</td><td>埋め戻し材全劣化</td></tr>
<tr><td>深成岩類_平行_Case1（支保目詰まり）</td><td>健全</td><td rowspan="4">目詰まり
（やや低透水）</td></tr>
<tr><td>深成岩類_平行_Case2 支保目詰まり）</td><td>埋め戻し材上部劣化</td></tr>
<tr><td>深成岩類_平行_Case3 支保目詰まり）</td><td>埋め戻し材側部劣化</td></tr>
<tr><td>深成岩類_平行_Case4 支保目詰まり）</td><td>埋め戻し材前劣化</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_平行_Case1</td><td>健全</td><td rowspan="12">新第三紀堆積岩</td><td rowspan="4">劣化（砂並み）</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_平行_Case2</td><td>埋め戻し材上部劣化</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_平行_Case3</td><td>埋め戻し材側部劣化</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_平行_Case4</td><td>埋め戻し材全劣化</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_平行_Case1（目詰まり）</td><td>健全</td><td rowspan="4">目詰まり
（やや低透水）</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_平行_Case2（目詰まり）</td><td>埋め戻し材上部劣化</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_平行_Case3（目詰まり）</td><td>埋め戻し材側部劣化</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_平行_Case4（目詰まり）</td><td>埋め戻し材全劣化</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_直交</td><td>埋め戻し材全劣化</td><td rowspan="3">直交</td><td>対角</td><td rowspan="3">劣化（砂並み）</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_立坑片側</td><td>埋め戻し材全劣化</td><td>片側</td></tr>
<tr><td>新第三紀堆積岩類_立坑片側_止水プラグ</td><td>埋め戻し材全劣化</td><td colspan="2">出入口設置</td></tr>
</table>

2)　解析モデル

前年度構築した解析モデルに対し、下記の通り変更・更新を行った。

●処分坑道の詳細な表現

埋め戻し材領域､吹付コンクリート(および EDZ の分離)を独立してモデル化(図 2.1-24)

埋め戻し材領域の局所的な劣化を表現するために、領域を区分けする（図 2.1-25）

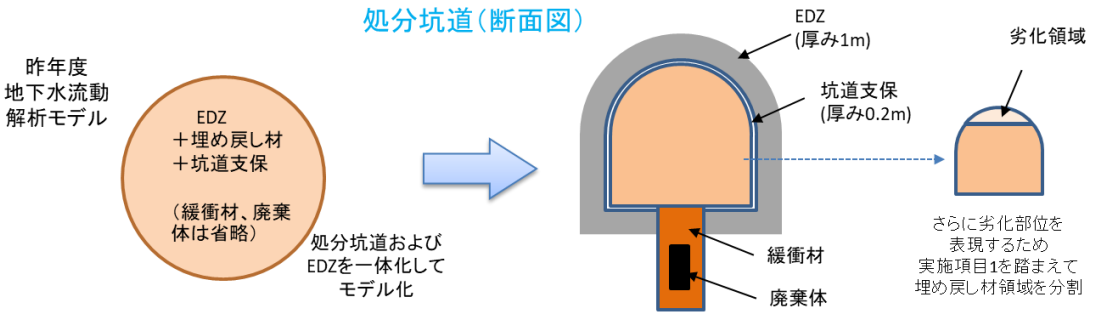
●処分坑道から主要坑道および立坑への物質移行の評価が可能

処分坑道から立坑までの距離による影響を考慮するため、主要坑道および立坑をモデル化

立坑に近い/遠い位置にそれぞれ処分坑道を配置する（図 2.1-26）

構築した、3 次元モデルを図 2.1-27 および図 2.1-28 に示す。

■　処分坑道の詳細な表現



■　処分坑道から主要坑道および立坑への物質移行の評価が可能

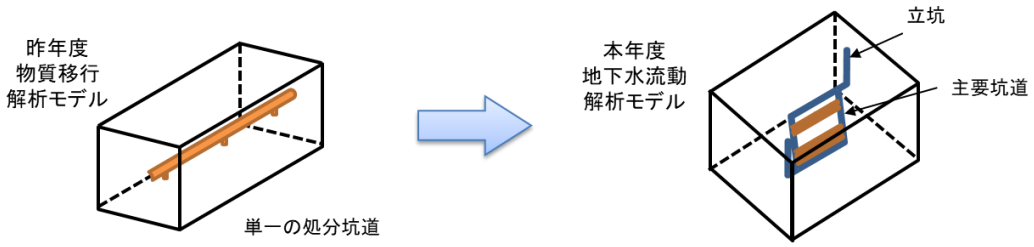


図 2.1-24　昨年度モデルと本年度モデルの詳細度の差異

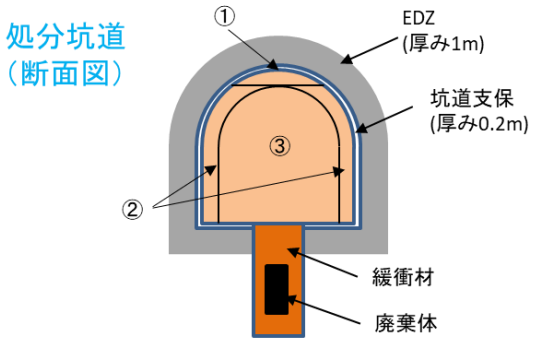


図 2.1-25　処分坑道埋め戻し材領域の区画分け

（①上部、②側部、③中央部）

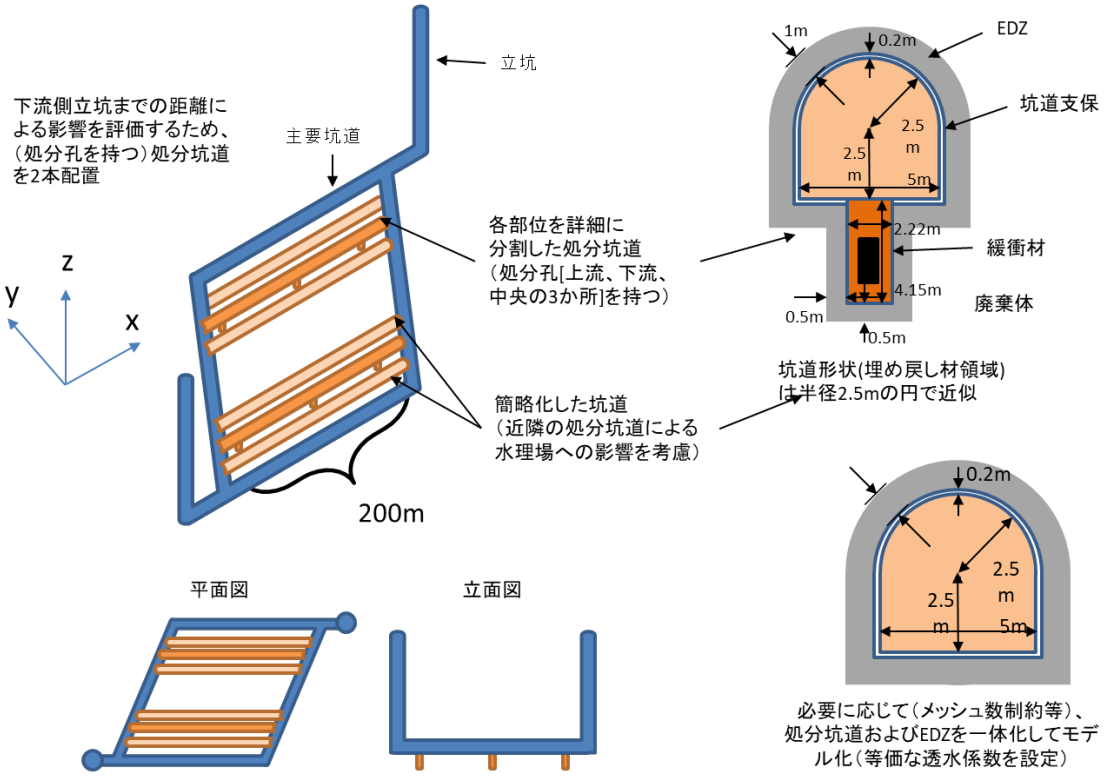


図 2.1-26　3 次元モデル概念図

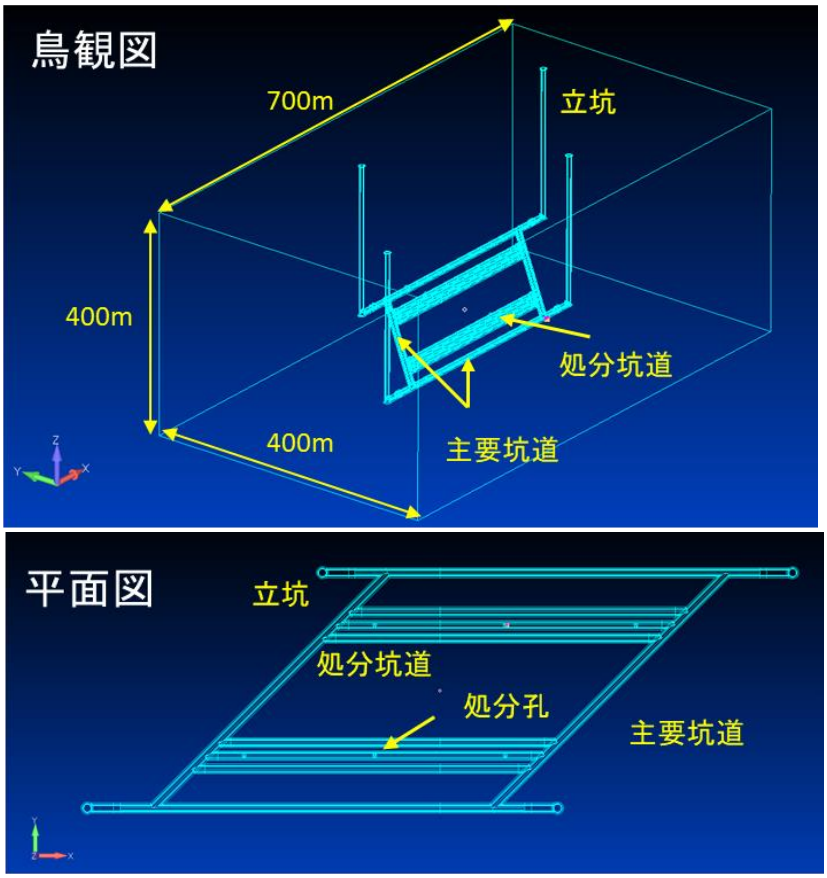


図 2.1-27　3 次元モデル外観図（4 本の立坑は ON/OFF が可能）

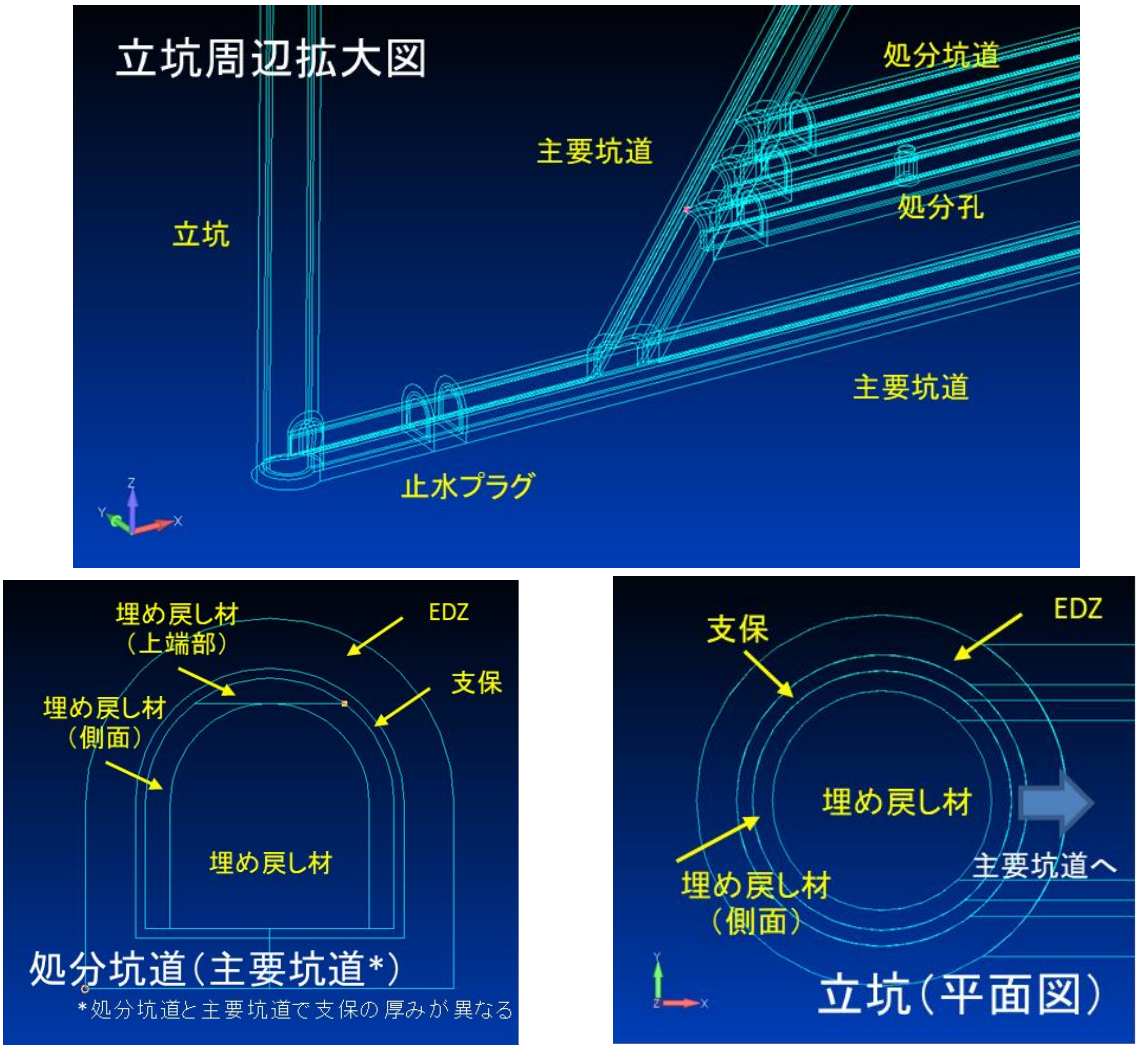


図 2.1-28　3 次元モデル各部位詳細図

3)　解析条件

(i)　透水係数

透水係数の設定値を表 2.1-10 に示す。設定した値は昨年度と同様であるが、新第三紀堆積岩のケースにおける健全時の埋め戻し材の透水係数を昨年度は保守的に 2.6×10^{-6}(m/s)を用いていたが、今年度は竪置き方式における、埋め戻し材の施工方法として考えられている締固め工法での仕様（NUMO, 2021）に基づき、有効粘土密度 0.6Mg/m^3 に対する透水係数 5.0×10^{-12}(m/s)を設定した。坑道支保工については、二次鉱物の沈殿等により、コンクリート割れ目が閉塞（以下、目詰まり）する効果を反映するが、現状では割れ目が閉塞した状態のコンクリート材料の透水係数に関する知見がないため、目詰まりが生じない状態の坑道支保工の透水係数より 2 オーダー高い値を設定した。

表 2.1-10　透水係数の設定値

	透水係数（m/s）	
	シーリングシステムの状態が健全である場合を想定したケース	シーリングシステムの状態が劣化した場合を想定したケース
坑道支保工	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
坑道支保工（目詰まり）	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}
埋め戻し材	5.0×10^{-12}	1.0×10^{-5}
止水プラグ	4.0×10^{-13}	1.0×10^{-5}
緩衝材	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}
廃棄体	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}

(ii)　亀裂パラメータ

岩盤の亀裂分布およびその透水量係数については包括的技術報告書（NUMO, 2021）の地下深部の特徴を考慮した地質環境モデルの構築におけるパネルスケールでの地質構造モデルの各岩種のデータを用いた。具体的なパラメータをそれぞれ表 2.1-11 および表 2.1-12 に示す。

表 2.1-11　深成岩の亀裂パラメータ

（NUMO, 2021）

断層・割れ目セット	方位分布			長さ分布 べき乗数 最小長さ[m] 最大長さ[m]	三次元密度 [m^2/m^3]	透水量係数・分布 対数平均値[m^2/s] 対数標準偏差
	傾斜方位 [°]	傾斜 [°]	Fisher 係数			
1（NE 系）	171	85	7.8	40	1.9	
2（NW 系）	80	87	7.5	1	1.4	1.0×10^{-9}
3（低角度）	203	1	8.4	1000	0.5	2.0

表 2.1-12　新第三紀堆積岩の亀裂パラメータ

（NUMO, 2021）

断層・割れ目セット		方位分布			長さ分布 べき乗数 最小長さ[m] 最大長さ[m]	三次元密度 [m²/m³]	透水量係数・分布 対数平均値[m²/s] 対数標準偏差
		傾斜方位 [°]	傾斜 [°]	Fisher 係数			
上部泥岩層	1	323	52	9.8	3.3	0.53	
	2	203	42	52	0.15	0.06	1.0×10^{-9}
	3	118	11	3.1	1000	0.44	2.0
下部泥岩層	1	341	57	16	3.3	0.63	
	2	215	34	20	0.15	0.26	7.8×10^{-8}
	3	69	26	51	1000	0.22	0.52
	4	227	12	3.1		0.79	

(iii)　拡散係数

拡散係数については、昨年度と同様の設定値を用いた。設定した実効拡散係数の値を**表** 2.1-13 に示す。

表 2.1-13　実効拡散係数の設定値

	実効拡散係数［m²/s］	間隙率	設定根拠
坑道支保工	8e-10（深成岩） 6e-10（新第三紀堆積岩）	0.46	NUMO 包括的技術報告（NUMO, 2021）の 6 章　付録 6-12、13（修正対応表）に基づき設定。間隙率については、TRU 廃棄物 2 次レポートの表 4.4.4-1 を参照
埋め戻し材	3e-10	0.4	NUMO 包括的技術報告（NUMO, 2021）の 6 章　付録 6-12、13 に基づき設定
止水プラグ	3e-10	0.4	
緩衝材	3e-10	0.4	
廃棄体	4e-9	1	自由水中の拡散係数を設定
岩盤	9e-13（深成岩） 1e-11（新第三紀堆積岩）	0.008 0.245	NUMO 包括的技術報告（NUMO, 2021）の 6 章　表 6.4-1 および、付録 6-18、19 に基づき設定

(iv)　動水勾配および水理境界

昨年度と同様に、第２次とりまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）に示されている低地、台地および丘陵地の動水勾配の平均値と全国を対象として実施された地下水流動解析の結果（山下ほか、1999）に基づき、保守的な動水勾配である 0.05（NUMO, 2021）が図 2.1-27 示す三次元モデルの x 方向もしくは y 方向にかかるように設定した。境界条件は上部および下部境界面を

不透水境界、残りの側方面を水頭固定境界として設定した。

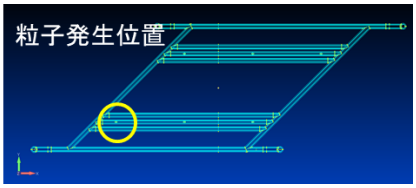
4) 解析結果：深成岩類

(i) 平行流動ケース

シーリングシステム劣化の度合いを多段階に変化させた設定で、地質環境が深成岩類、地下水流動方向に対して処分坑道を平行に配置した解析結果について、下流側立坑に最も近い点（図 2.1-29）、上流側立坑に最も近い点（図 2.1-30）の核種の移行挙動を示す。なお、埋め戻し材の側面が劣化したことを仮定したケースについては、埋め戻し材の上部が劣化したケースとほとんど変化がなかったことから、本報告では割愛する。

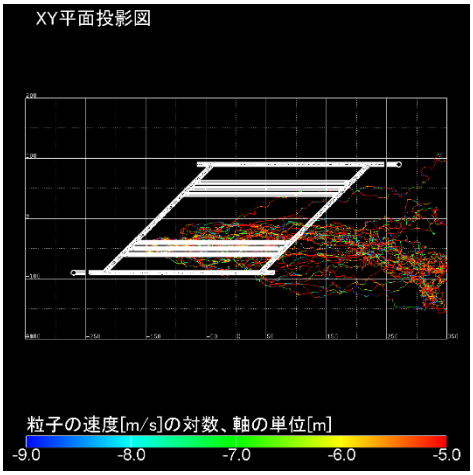
上流側立坑から最も近い位置を粒子発生位置とする粒子軌跡において、Case1~2（シーリングシステムが健全あるいは上部が劣化）においては、廃棄体から放出された粒子は、処分坑道にはほとんど移行せず、周囲の岩盤へ移行している。一方、Case4 の埋め戻し材が全て劣化したケースでは、処分坑道全体が高透水となるため、坑道に向かった地下水流動により粒子も集められ、しばらく処分坑道中を下流側へ移行する割合が増えるが、その後は岩盤に移行している。いずれのケースにおいても下流側立坑の地表面まで到達する粒子は存在しない。

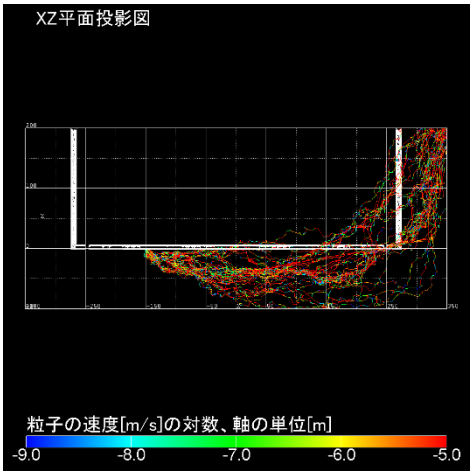
一方、下流側立坑に最も近い処分孔から粒子を発生させた場合、Case1、2、4 のいずれのケースでも、粒子は、処分坑道あるいは処分坑道下流端付近の主要坑道から母岩へ移行している。ただし、一部の粒子が、下流側立坑入口に到達あるいは岩盤に移行後、立坑に収集され地表面まで到達している。



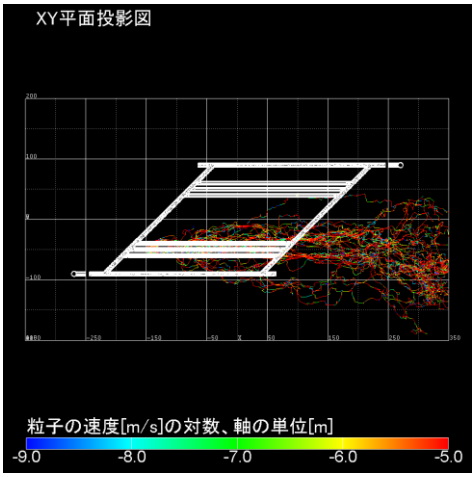
水平投影図　　鉛直投影図

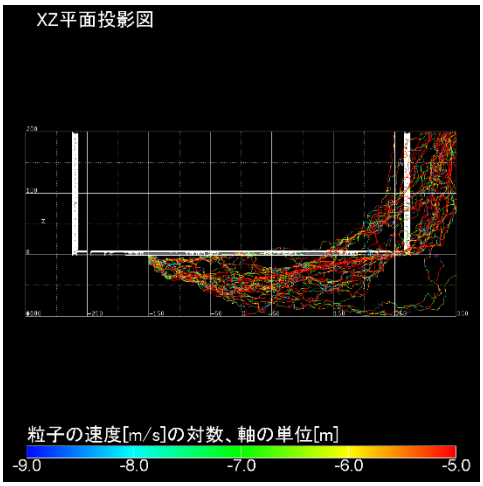
Case1
施設健全



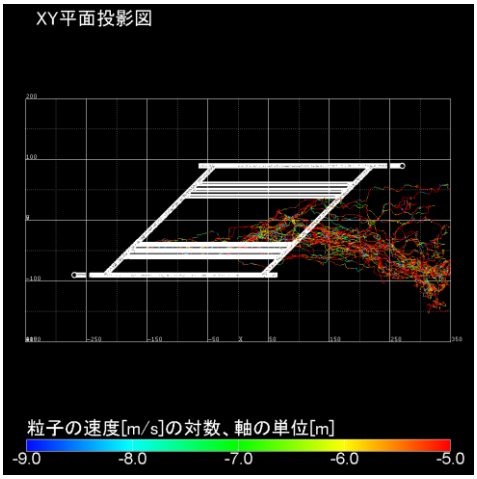


Case2
埋め戻し
上部劣化





Case4
埋め戻し
全劣化



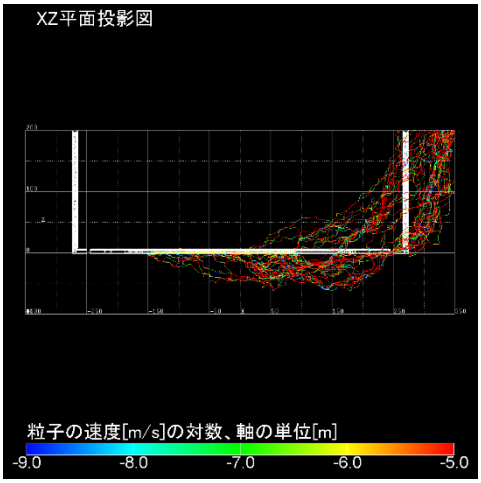
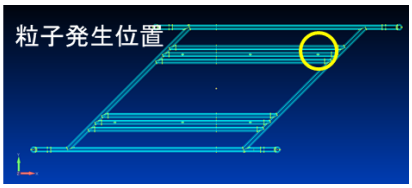
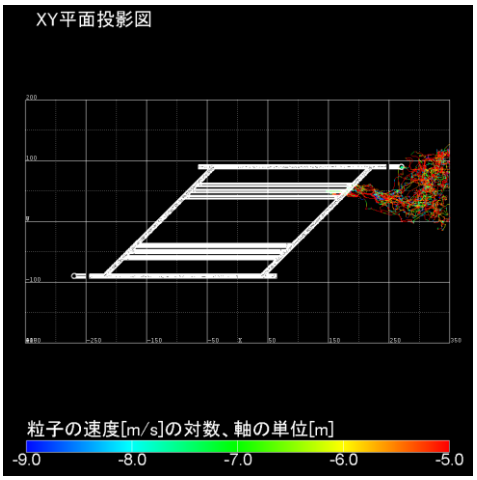


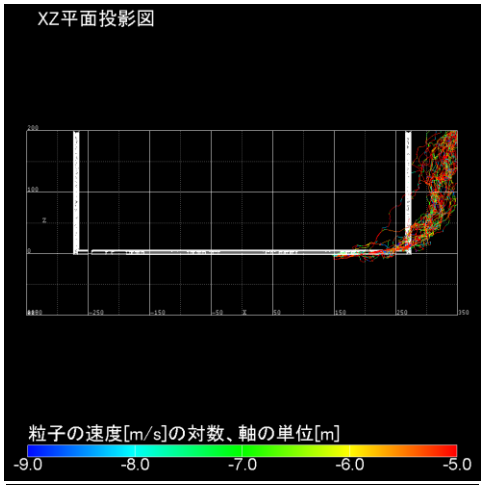
図 2.1-29　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異
（深成岩類、平行流動　１／２）



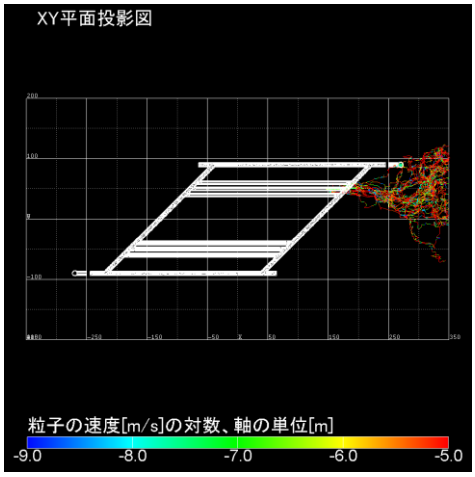
水平投影図　　鉛直投影図

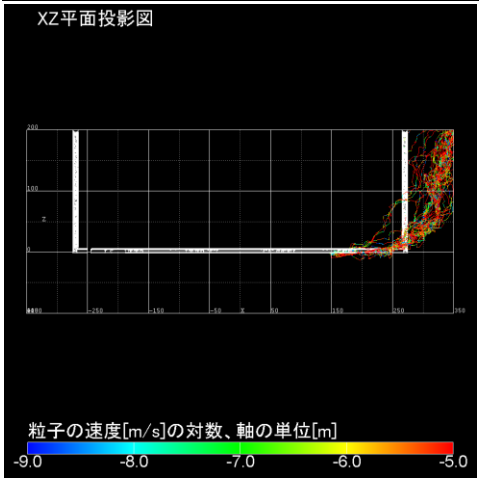
Case1
施設健全



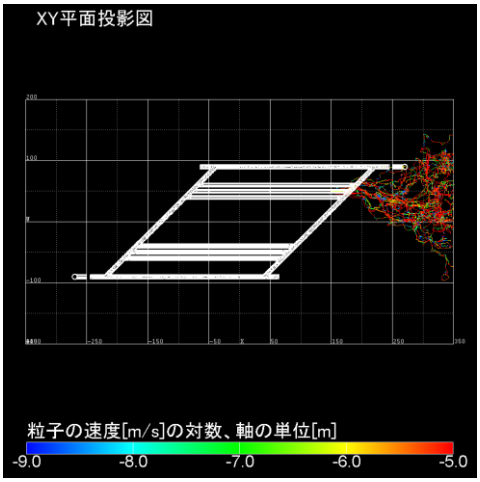


Case2
埋め戻し
上部劣化





Case4
埋め戻し
全劣化



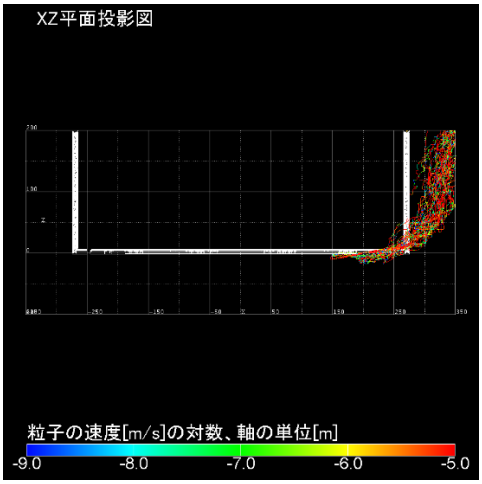
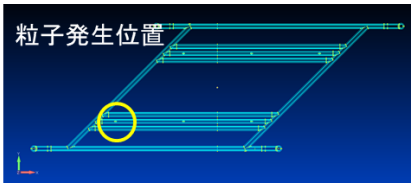


図 2.1-30　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異
（深成岩類、平行流動　２／２）

(ii)　深成岩類、平行流動ケース、支保目詰まり

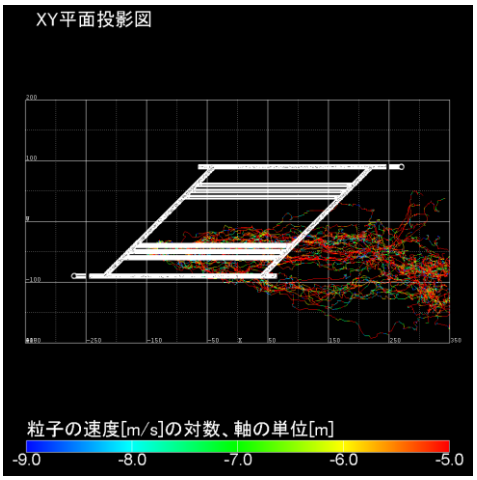
(i)のケースに対し坑道支保工が二次鉱物の沈殿により目詰まりが生じた場合の解析結果を図 2.1-31 および図 2.1-32 示す。図 2.1-29 および図 2.1-30 と同様に、埋め戻し材の側面が劣化したことを仮定したケースについては、埋め戻し材の上部が劣化したケースとほとんど変化がなかったことから、本報告では割愛する。

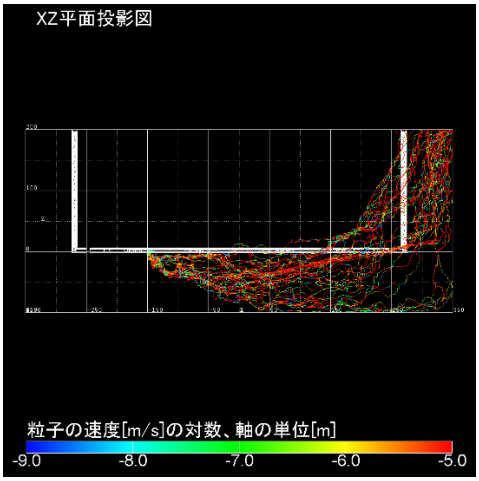
解析の結果は(i)の結果とほぼ同様であり、下流側立坑から最も近い処分孔を発した一部の粒子が、下流側立坑入口に到達あるいは岩盤に移行後、立坑に収集され地表面まで到達している。



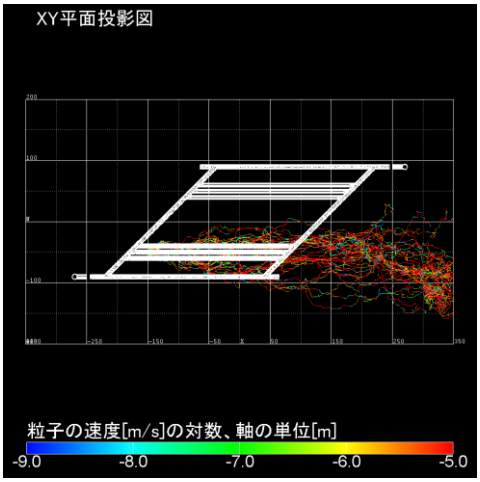
水平投影図　　鉛直投影図

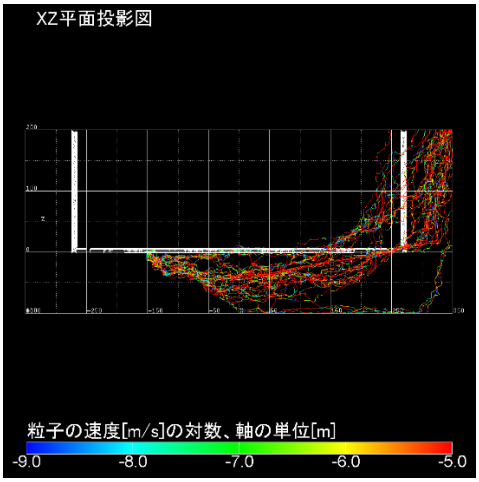
Case1
施設健全



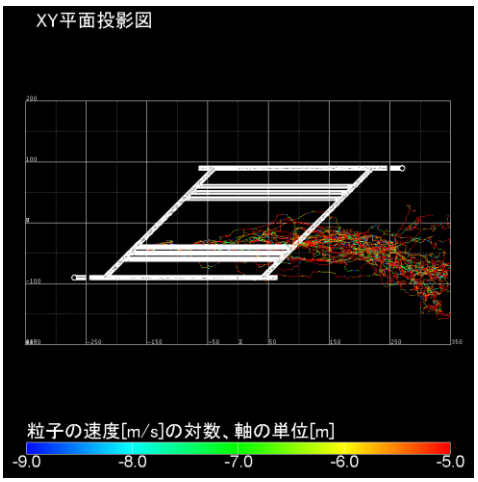


Case2
埋め戻し
上部劣化





Case4
埋め戻し
全劣化



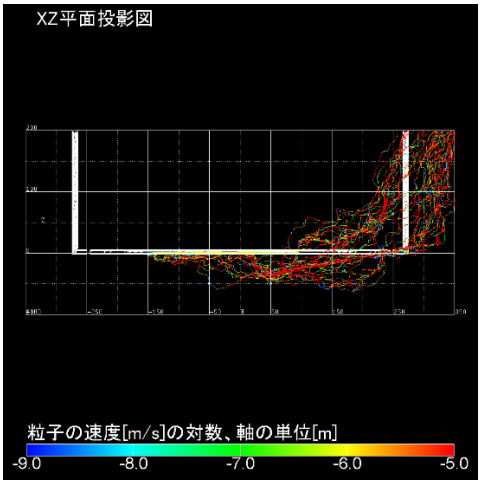
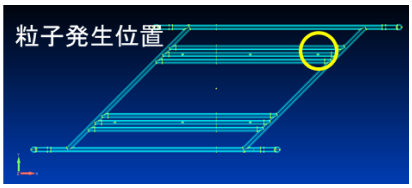
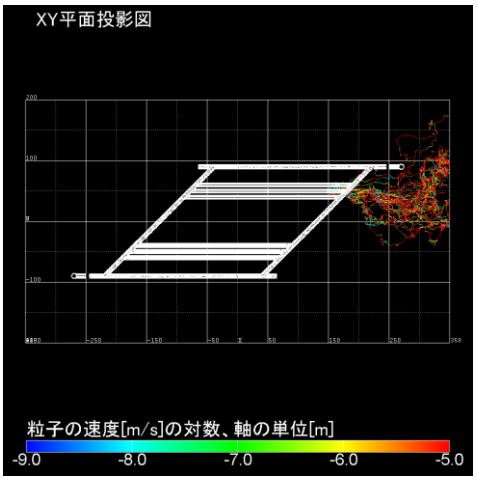


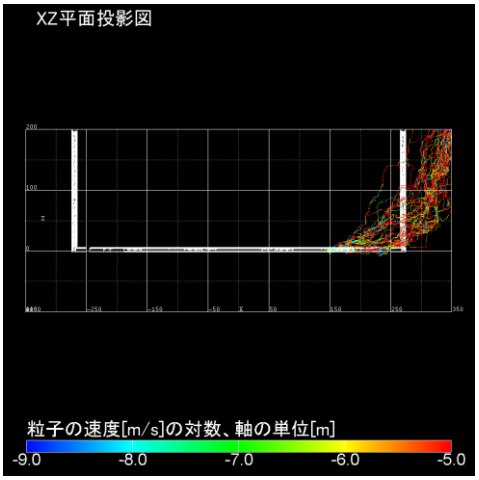
図 2.1-31　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異
（深成岩類、平行流動、支保目詰まり　１／２）



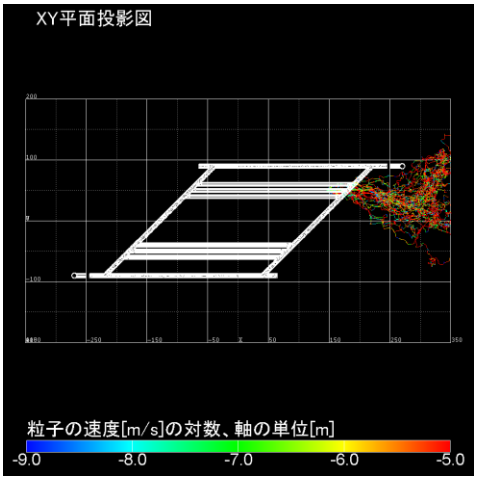
水平投影図　　鉛直投影図

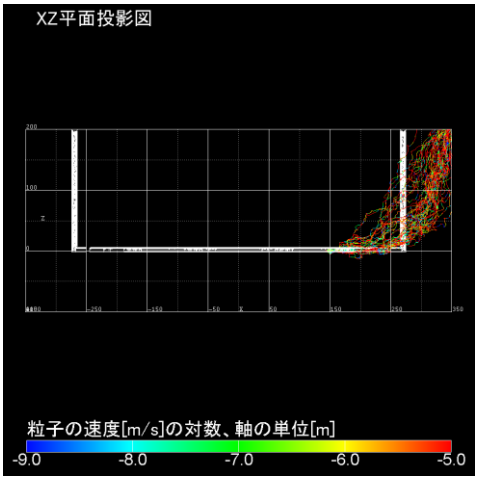
Case1
施設健全



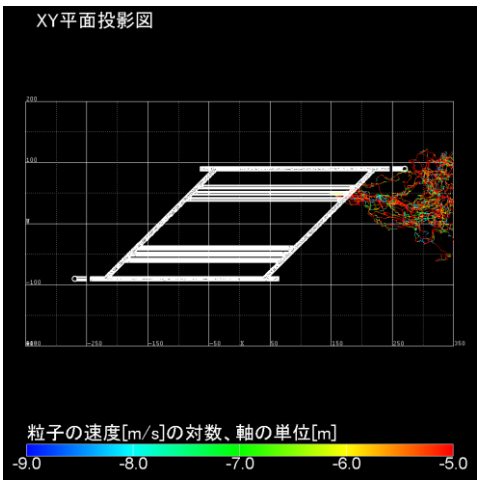


Case2
埋め戻し
上部劣化





Case4
埋め戻し
全劣化



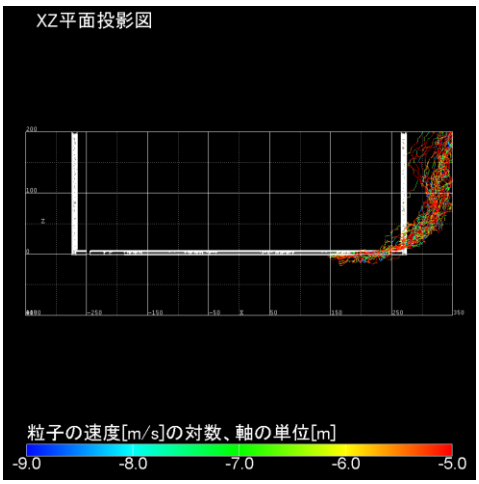


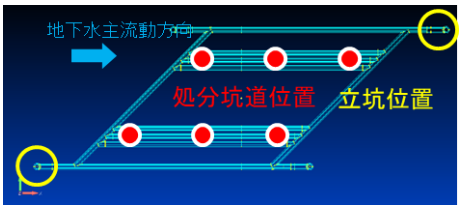
図 2.1-32　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異
（深成岩類、平行流動、支保目詰まり　２／２）

(iii)　深成岩類、平行流動ケースにおける支保工目詰まりの有無による差異

(i)および(ii)の解析結果に基づき、下流側立坑の地表面まで到達する粒子の割合を算出した。表 2.1-14 に示すように、坑道支保工の目詰まりがないケースの方が、目詰まりのあるケースよりも、下流側立坑の地表面まで到達する粒子の割合が小さい傾向がある。これは、坑道支保工が目詰まりすると坑道内部から岩盤方向への移行は抑制される可能性があるが、粒子の初期位置である処分孔は坑道支保工よりも外側にあること、また坑道支保工が目詰まりし透水性が低くなる場合、坑道への地下水の流れが緩慢になることが原因と考えられる。したがって、case1～3 では、全体的に坑道試行の目詰まりがない方が粒子の到達率が低いが、case4 のように埋め戻し材全部が高透水性となった場合は、坑道への地下水の流れが支配的となり、その結果坑道から岩盤への粒子の移行は抑制される効果が生じると考えられる。一方で、立坑地表面まで到達した粒子については、一度岩盤に移行した後に、立坑へ集積された粒子が含まれる。このような粒子は岩盤中の移行距離が十分に確保される、すなわち天然バリアの安全機能が発揮されれば、結果として処分システムの安全性が担保されると考えられる。そこで、第二次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999）における岩盤中の核種移行評価で仮定された移行距離である 100m を指標とし、岩盤中を 100m 以上移行した粒子を排除した割合を算出した（表 2.1-15）。その結果、立坑地表面まで到達する粒子はほとんど存在しないことが確認された。

表 2.1-14　深成岩類、平行流動ケースの各シーリングシステム劣化度合いにおける各処分孔から発生した粒子の下流側立坑地表面への到達割合

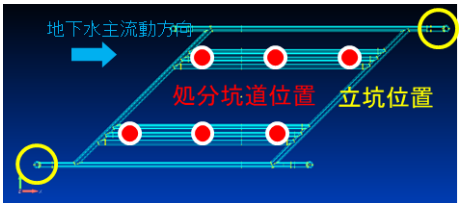
地表面 到達割合	処分孔_上段左	処分孔_上段中央	処分孔_上段右
case01	5.6%	0.7%	0.0%
case02	2.8%	1.4%	0.7%
case03	3.4%	7.6%	4.8%
case04	4.8%	10.5%	6.7%
	処分孔_下段左	処分孔_下段中央	処分孔_下段右
case01	0.0%	0.0%	0.0%
case02	0.0%	0.0%	0.0%
case03	0.0%	0.0%	0.0%
case04	0.0%	0.0%	0.0%



地表面 到達割合	処分孔_上段左	処分孔_上段中央	処分孔_上段右
case01(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case02(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case03(支保目詰まり)	2.1%	2.2%	1.3%
case04(支保目詰まり)	6.7%	9.1%	3.9%
	処分孔_下段左	処分孔_下段中央	処分孔_下段右
case01(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case02(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case03(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case04(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%

表 2.1-15　深成岩類、平行流動ケースの各シーリングシステム劣化度合いにおける各処分孔から発生した粒子の下流側立坑地表面への到達割合
（岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除外）

地表面 到達割合	処分孔_上段左	処分孔_上段中央	処分孔_上段右
case01	0.0%	0.0%	0.0%
case02	0.0%	0.0%	0.0%
case03	0.0%	0.0%	0.0%
case04	0.0%	1.0%	1.0%
	処分孔_下段左	処分孔_下段中央	処分孔_下段右
case01	0.0%	0.0%	0.0%
case02	0.0%	0.0%	0.0%
case03	0.0%	0.0%	0.0%
case04	0.0%	0.0%	0.0%



地表面 到達割合	処分孔_上段左	処分孔_上段中央	処分孔_上段右
case01(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case02(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case03(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case04(支保目詰まり)	0.0%	1.0%	1.0%
	処分孔_下段左	処分孔_下段中央	処分孔_下段右
case01(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case02(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case03(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case04(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%

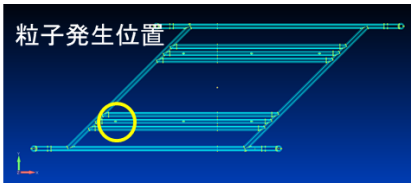
5) 解析結果：新第三紀堆積岩類

(i) 新第三紀堆積岩類、平行流動ケース

深成岩と同様に、下流側立坑に最も近い点（図 2.1-33）、上流側立坑に最も近い点（**図 2.1-34**）の核種の移行挙動を示す。なお、埋め戻し材の側面が劣化したことを仮定したケースについては、埋め戻し材の上部が劣化したケースとほとんど変化がなかったことから、本報告では割愛する。

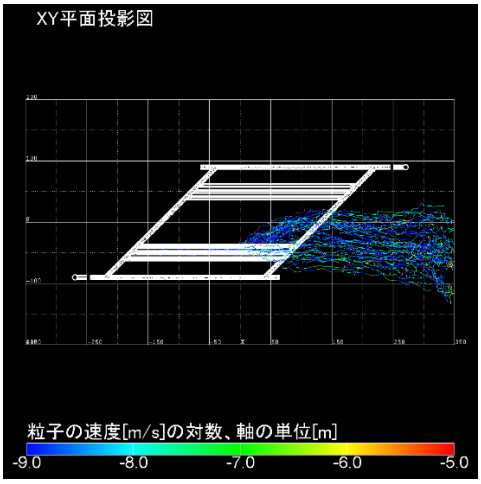
上流側立坑に最も近い位置を粒子発生位置とする粒子軌跡において、Case1~2 においては、廃棄体から放出された粒子は、処分坑道の中央付近までは坑道中を下流側へ移行し、その後岩盤へ移行している。Case4 では、さらに岩盤へ移行後も、下流側立坑に近い処分坑道（坑道支保）に集水される水の流れに引き寄せられ、一部が立坑に到達しそのまま地表面まで移行している。

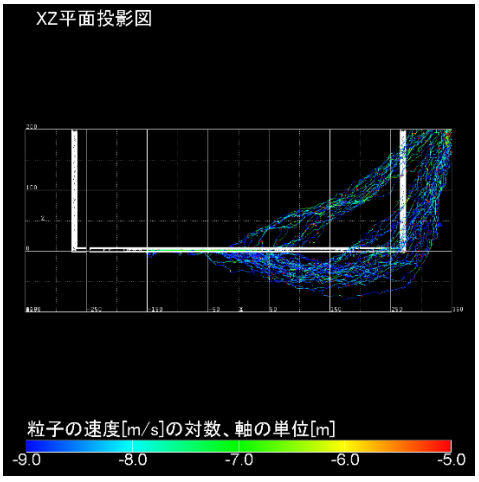
一方、下流側立坑に近い処分坑道の最下流の処分孔から粒子発生を発生させた解析において、すべてのケースにおいて、廃棄体から放出された粒子は、処分坑道にはあまり移行せず周辺の岩盤へ移行している。しかし、その後、下流側立坑（坑道支保）に集水され、大部分の粒子が立坑を上昇し地表へ到達している



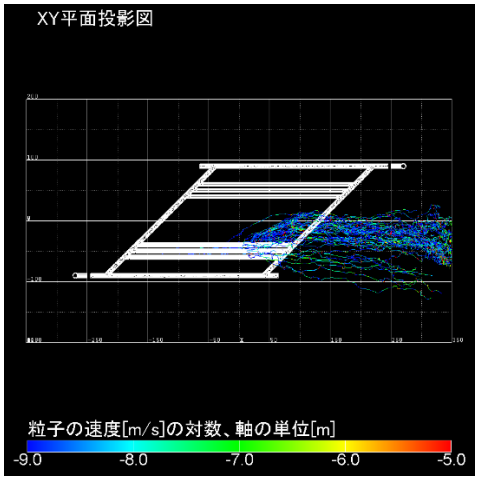
水平投影図　　鉛直投影図

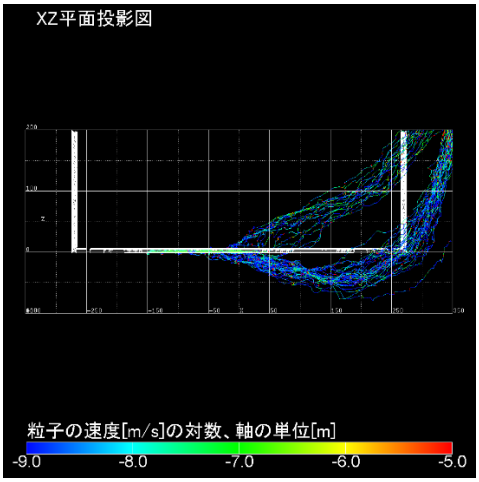
Case1
施設健全



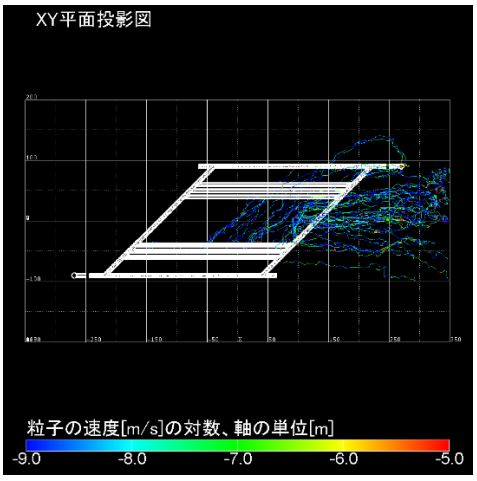


Case2
埋め戻し
上部劣化





Case4
埋め戻し
全劣化



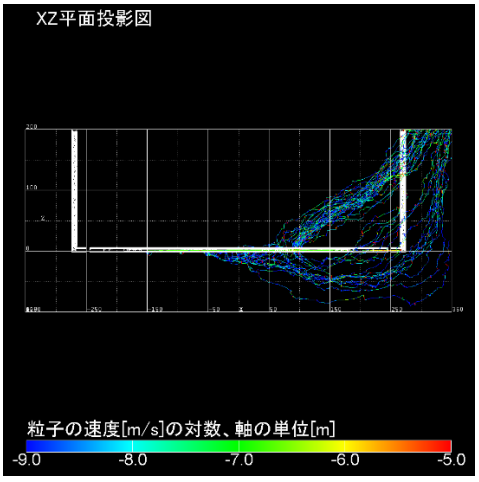
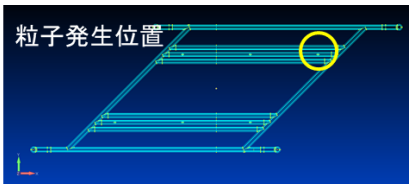
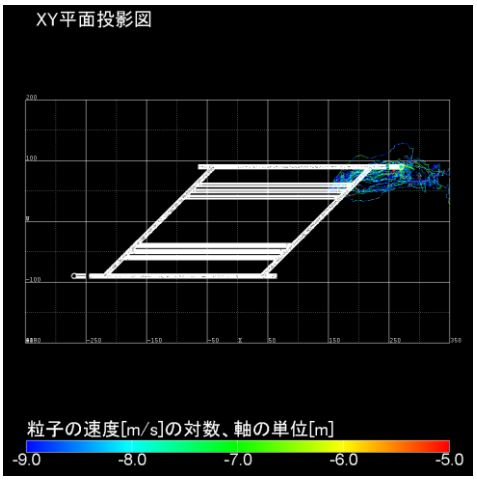


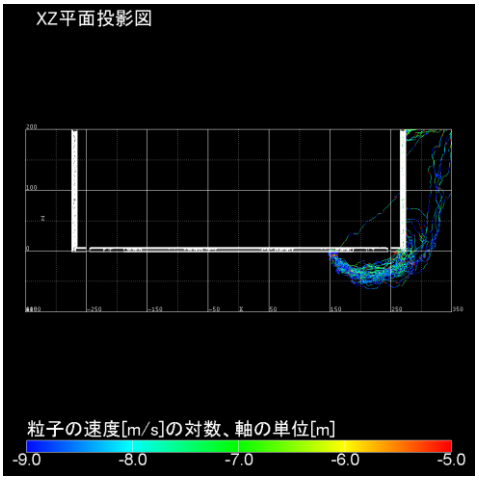
図 2.1-33　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異
（新第三紀堆積岩類、平行流動、粒子発生箇所：左下処分孔）



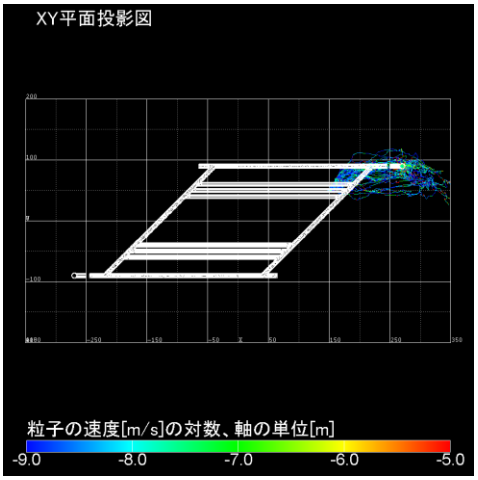
水平投影図　　鉛直投影図

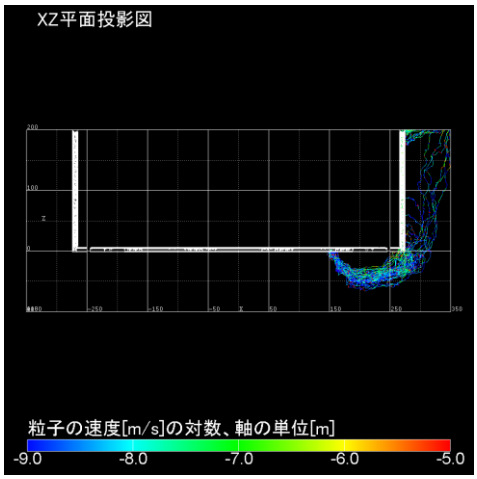
Case1
施設健全



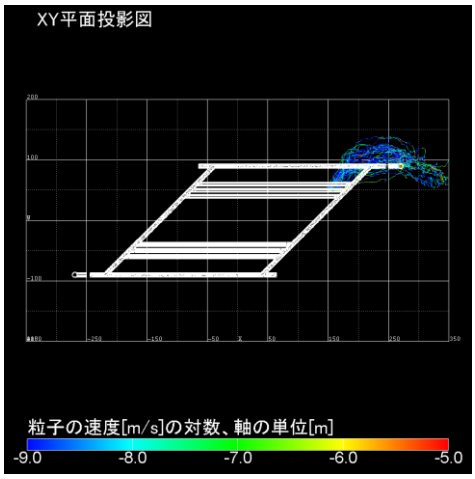


Case2
埋め戻し
上部劣化





Case4
埋め戻し
全劣化



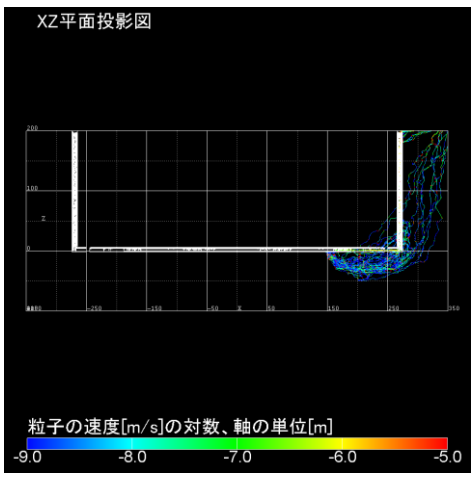
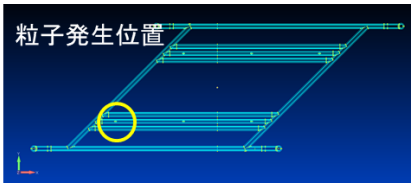


図 2.1-34　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異
（新第三紀堆積岩類、平行流動、粒子発生箇所：右上処分孔）

(ii)　新第三紀堆積岩類、平行流動ケース、支保目詰まり

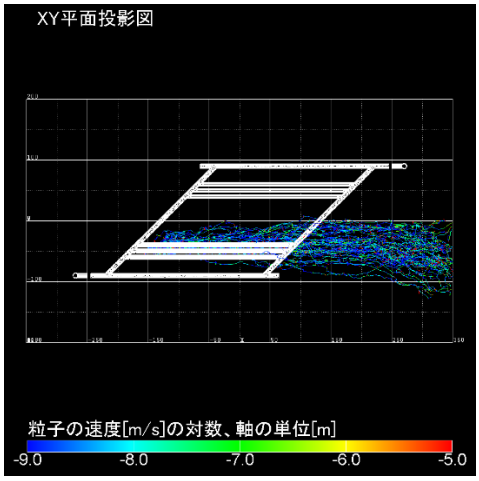
(i)のケースに対し坑道支保工が二次鉱物の沈殿により目詰まりが生じた場合の解析結果を図 2.1-35 および図 2.1-36 に示す。図 2.1-33 および**図 2.1-34** と同様に、埋め戻し材の側面が劣化したことを仮定したケースについては、埋め戻し材の上部が劣化したケースとほとんど変化がなかったことから、本報告では割愛する。

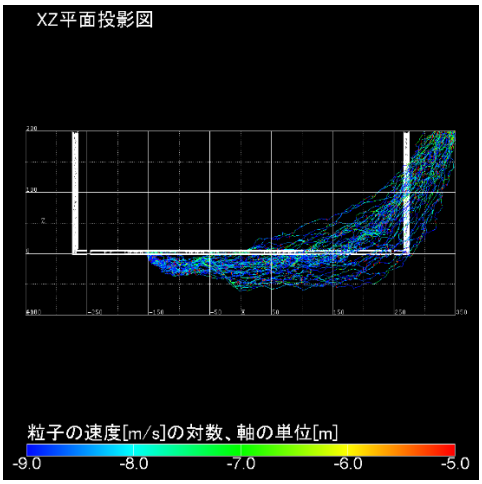
深成岩で確認された傾向と同様に、坑道支保工の目詰まりのないケースとほぼ同様の結果となり、下流側立坑から最も離れた位置を粒子発生位置とする粒子軌跡において、Case1~3 においては、廃棄体から放出された粒子は、処分坑道の中央付近までは坑道中を下流側へ移行し、その後岩盤へ移行している。Case4 では、さらに岩盤へ移行後も、下流側立坑に近い処分坑道（坑道支保）に集水される水の流れに引き寄せられ、一部が立坑に到達しそのまま地表面まで移行している。ただし、下流側立坑に近い処分坑道の最下流の処分孔から粒子発生を発生させた解析において、坑道支保工の目詰まりのないケースと異なり、Case1～2 では岩盤移行後に立坑へ粒子が移行する挙動が起きておらず、Case4 では、下流側立坑へ粒子が移行し、その後大部分の粒子が立坑地表面へ到達している。



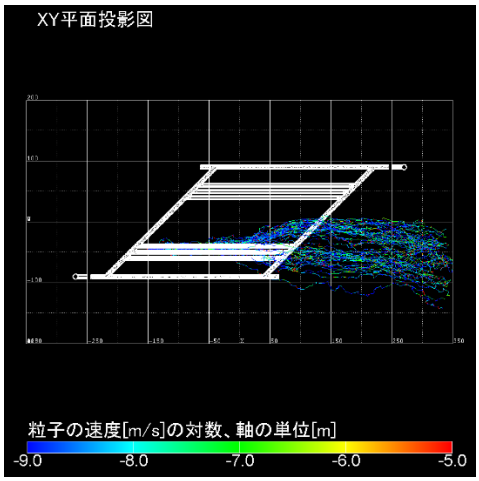
水平投影図　　鉛直投影図

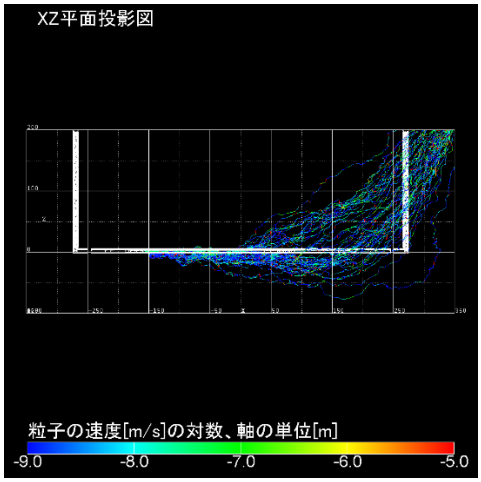
Case1
施設健全



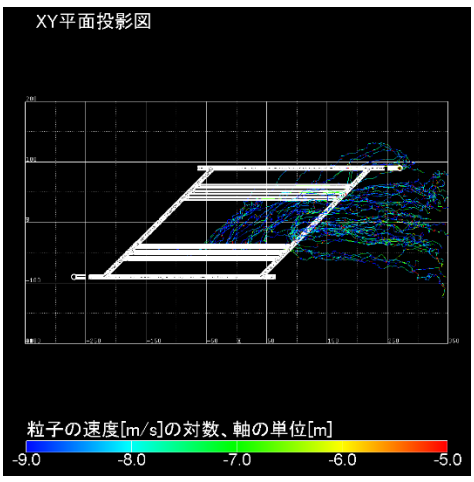


Case2
埋め戻し
上部劣化





Case4
埋め戻し
全劣化



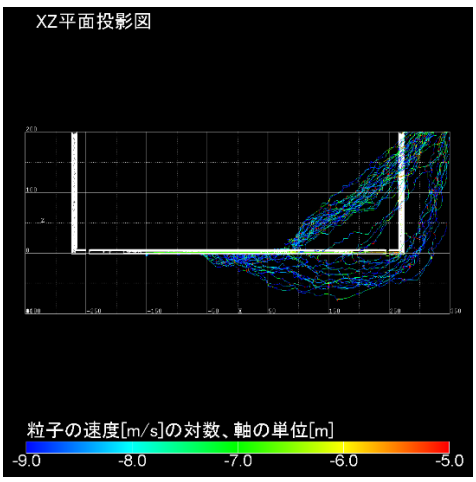
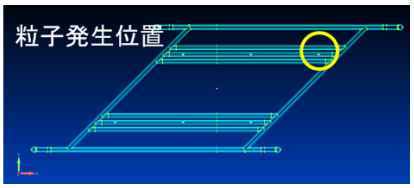
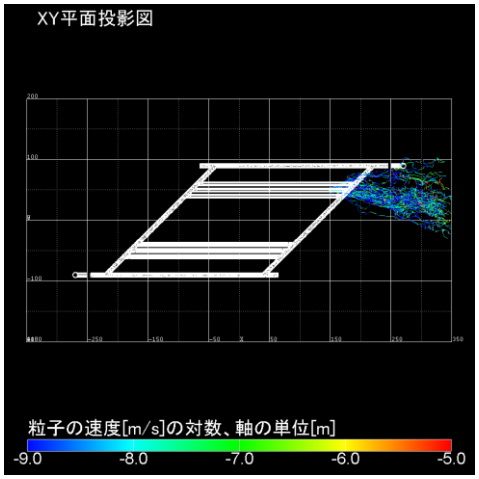


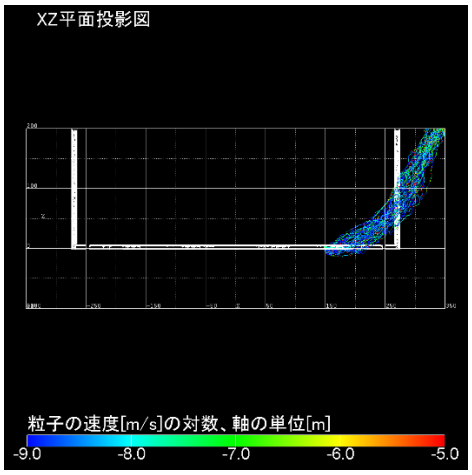
図 2.1-35　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異（新第三紀堆積岩類、平行流動、支保目詰まり、粒子発生箇所：左下処分孔）



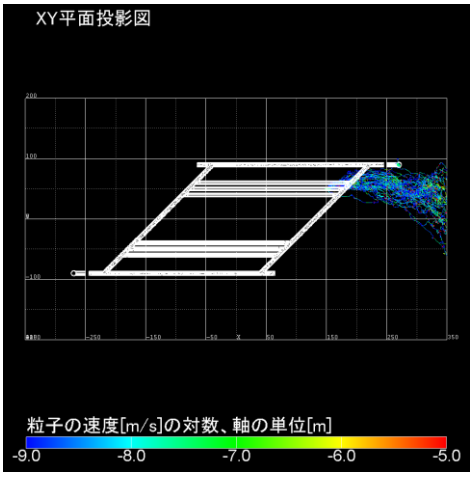
水平投影図　　鉛直投影図

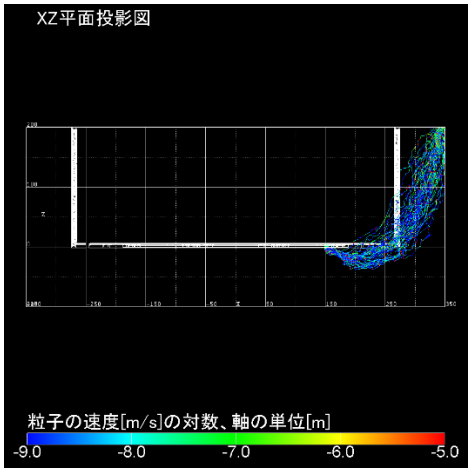
Case1
施設健全



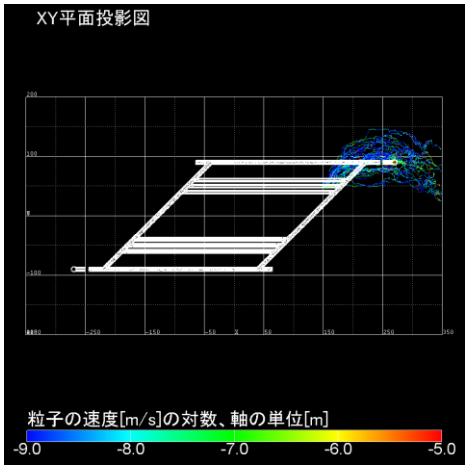


Case2
埋め戻し
上部劣化





Case4
埋め戻し
全劣化



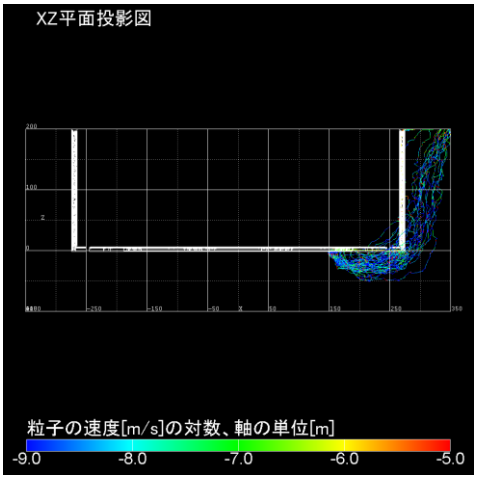


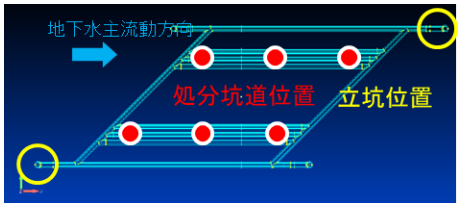
図 2.1-36　シーリングシステム劣化度合いによる処分孔からの核種の移行挙動の差異
（新第三紀堆積岩類、平行流動、支保目詰まり、粒子発生箇所：右上処分孔）

(iii) 新第三紀堆積岩類、平行流動ケースにおける支保工目詰まりの有無による差異

深成岩と同様に下流側立坑の地表面まで到達する粒子の割合を算出した。表 2.1-16 に示すように、坑道支保工の目詰まりがないケースの方が、目詰まりのあるケースよりも、下流側立坑の地表面まで到達割合が小さい傾向がある。これは 4)（iii）で記載した要因と同様であると考えられる。また、深成岩と同様に、岩盤中を 100m 以上移行した粒子を排除した割合を算出したところ、Case4 以外のケースにおいては立坑地表面まで到達する粒子がほとんど存在しない一方で、Case4 のように、埋め戻し材の安全機能が全て喪失した場合を仮定したケースにおいては、下流側立坑に近い処分坑道を発した粒子の一部が立坑地表面まで到達することが分かった（表 2.1-17）。

表 2.1-16　新第三紀堆積岩類、平行流動ケースの各シーリングシステム劣化度合いにおける各処分孔から発生した粒子の下流側立坑地表面への到達割合

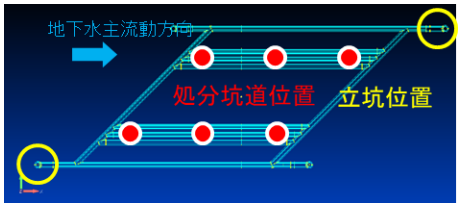
地表面 到達割合	処分孔_上段左	処分孔_上段中央	処分孔_上段右
case01	56.7%	69.3%	84.0%
case02	45.3%	64.0%	79.3%
case03	68.7%	74.7%	93.3%
case04	90.7%	86.0%	79.3%
	処分孔_下段左	処分孔_下段中央	処分孔_下段右
case01	0.7%	1.3%	0.0%
case02	0.0%	1.3%	0.0%
case03	1.3%	2.7%	0.0%
case04	24.7%	53.3%	1.3%



地表面 到達割合	処分孔_上段左	処分孔_上段中央	処分孔_上段右
case01(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case02(支保目詰まり)	0.7%	0.0%	0.0%
case03(支保目詰まり)	53.3%	64.0%	88.0%
case04(支保目詰まり)	89.3%	86.7%	72.0%
	処分孔_下段左	処分孔_下段中央	処分孔_下段右
case01(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case02(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case03(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case04(支保目詰まり)	18.0%	55.3%	2.0%

表 2.1-17　新第三紀堆積岩類、平行流動ケースの各シーリングシステム劣化度合いにおける各処分孔から発生した粒子の下流側立坑地表面への到達割合
（岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除外）

地表面 到達割合	処分孔_上段左	処分孔_上段中央	処分孔_上段右
case01	0.0%	0.0%	0.0%
case02	0.0%	0.0%	0.0%
case03	0.0%	0.0%	0.0%
case04	41.0%	23.0%	4.0%
	処分孔_下段左	処分孔_下段中央	処分孔_下段右
case01	0.0%	0.0%	0.0%
case02	0.0%	0.0%	0.0%
case03	0.0%	0.0%	0.0%
case04	0.0%	0.0%	0.0%

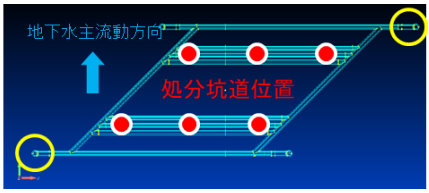


地表面 到達割合	処分孔_上段左	処分孔_上段中央	処分孔_上段右
case01(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case02(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case03(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case04(支保目詰まり)	37.0%	17.0%	3.0%
	処分孔_下段左	処分孔_下段中央	処分孔_下段右
case01(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case02(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case03(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%
case04(支保目詰まり)	0.0%	0.0%	0.0%

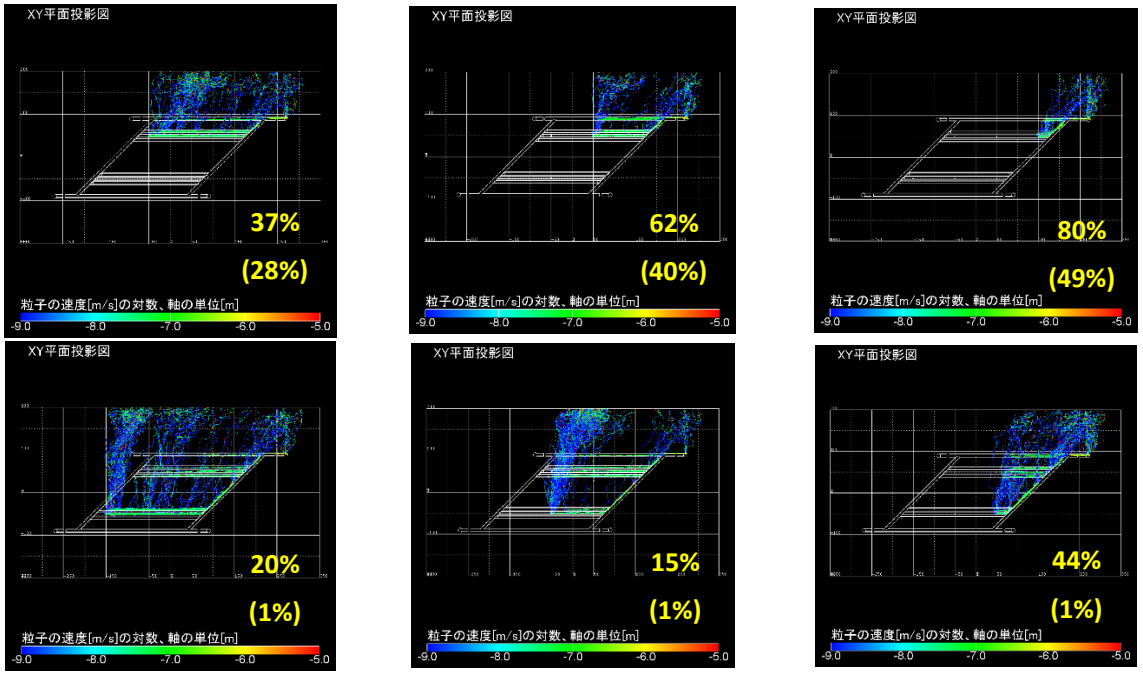
(iv)　新第三紀堆積岩類、直交流動ケース

図 2.1-37 に示すように、処分坑道に対する地下水流動の方向を直交方向にしたケースでは、6 か所の処分孔の平均で 43%の粒子が下流側立坑やその地表面に到達している。これは、処分孔から発生した粒子が上部処分坑道へ移行後、透水性が上昇した坑道を優先的に移行するためと考えられる。岩盤中の移行距離が 100m 以上の粒子を除外した場合は、上記の割合は 21%まで低下する。

このことから、大局的な地下水流動に対し処分坑道を直交して配置することは必ずしも核種の移行の観点で有利になるとは限らないことを示唆している。



水平投影図



鉛直投影図

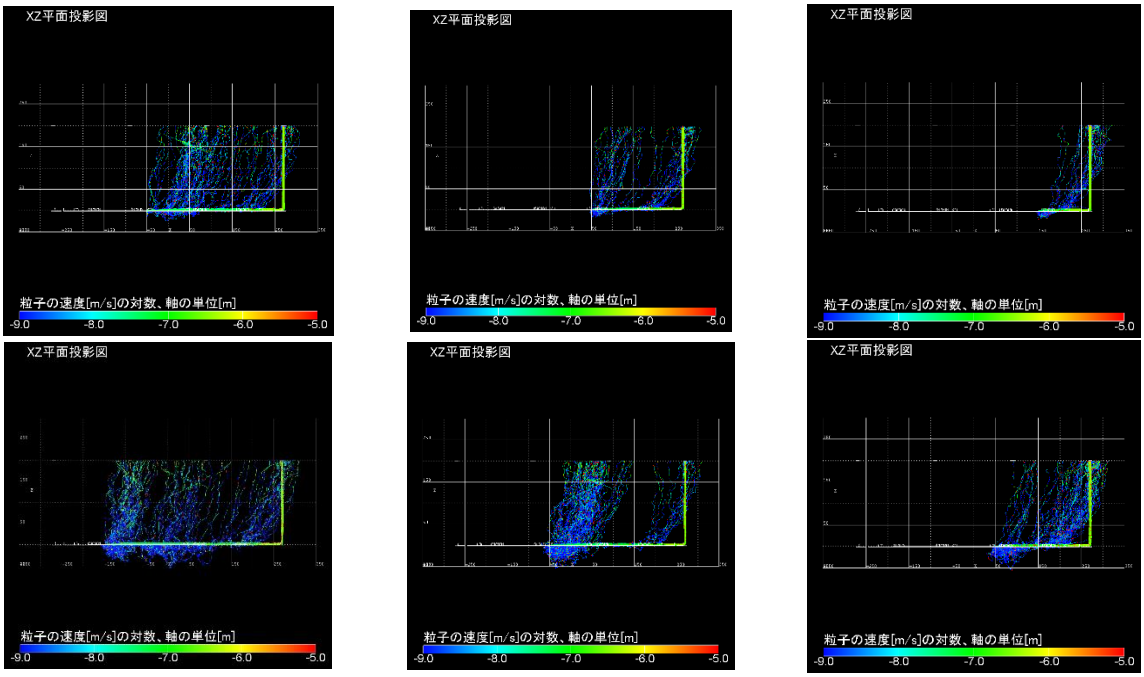


図 2.1-37　第三紀堆積岩類、シーリングシステム劣化時、直交流動、立坑対角配置の各処分孔からの核種の移行挙動

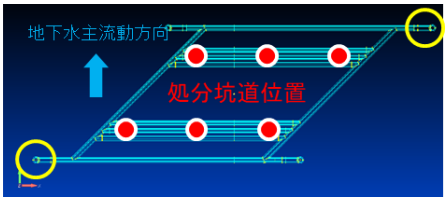
(上図における括弧内の数字は、岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除いた割合)

(v)　新第三紀堆積岩類、対処バリアを施したケース

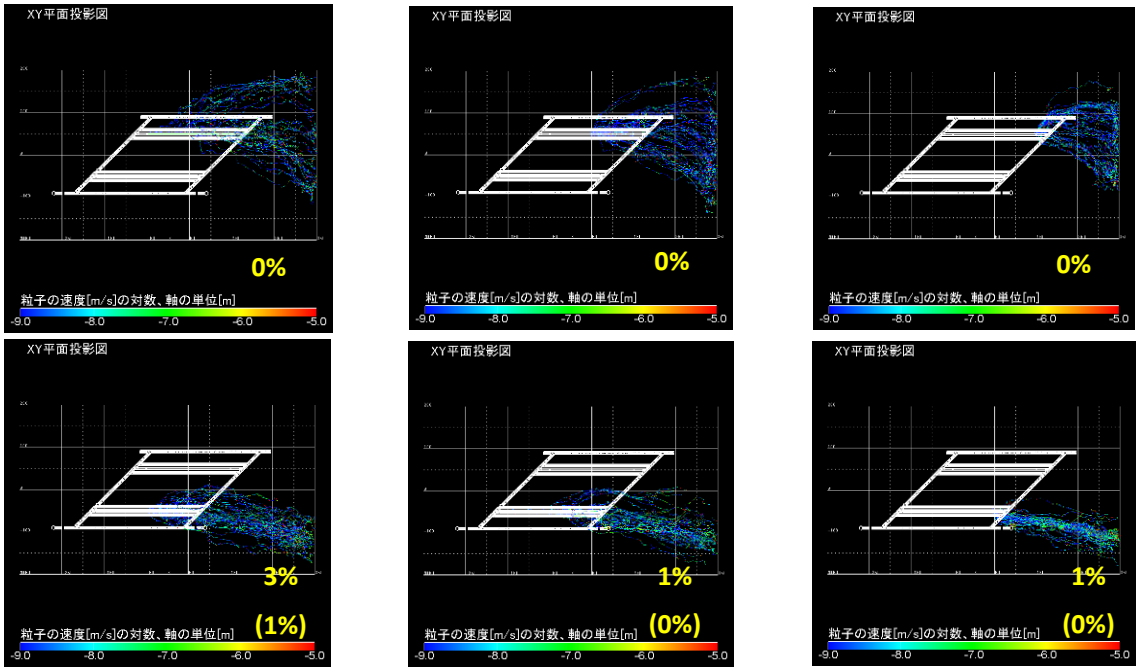
(iii)および(iv)の結果から、新第三紀堆積岩において、埋め戻し材の安全機能が全て喪失することを仮定した場合、粒子の一部が立坑地表面まで到達する可能性が示された。ここでは、本仮定において、立坑地表面まで到達する粒子の割合を低減することが必要になる場合を想定し、立坑を片側配置および止水プラグの設置の効果を確認するケースについて解析を行った。

図 2.1-38 に示すように、上流/下流側の立坑を片側に配置したケースでは、ほとんどの粒子が下流側立坑やその地表面に到達していない。一部到達した粒子については、岩盤を 100m 以上移行した粒子を排除した場合、全体(6 か所の処分孔)の平均で 0.2%となった。

さらにこのケースに加え、止水プラグを配置したケースの解析結果を図 2.1-39 に示す。立坑を片側配置したケースにおける粒子の割合がさらに低下し、岩盤を 100m 以上移行した粒子を排除した場合、全体(6 か所の処分孔)の平均で 0.1%となった。



水平投影図



鉛直投影図

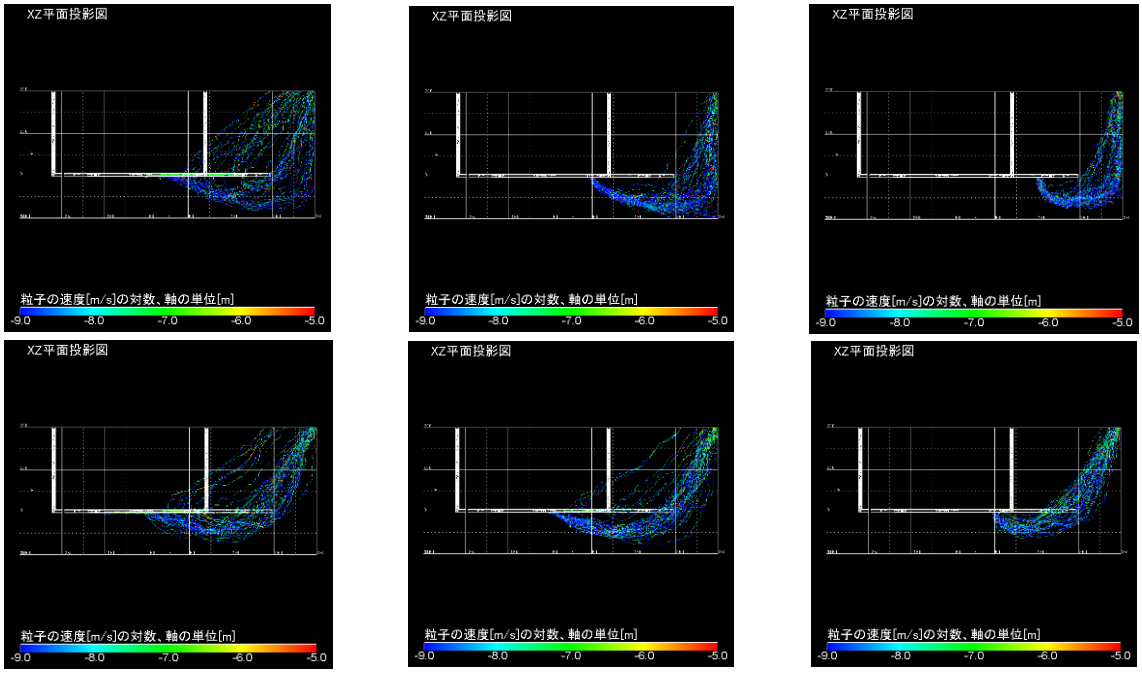
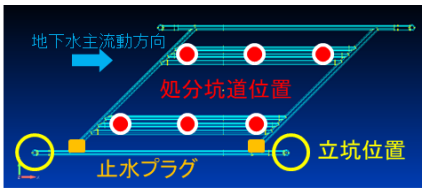
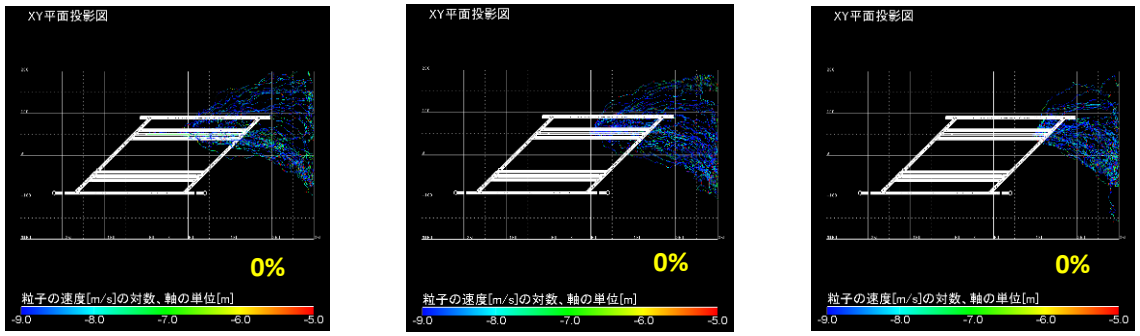


図 2.1-38　新第三紀堆積岩類、シーリングシステム劣化時、立坑片側配置の各処分孔からの核種の移行挙動

(上図における括弧内の数字は、岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除いた割合)



水平投影図



鉛直投影図

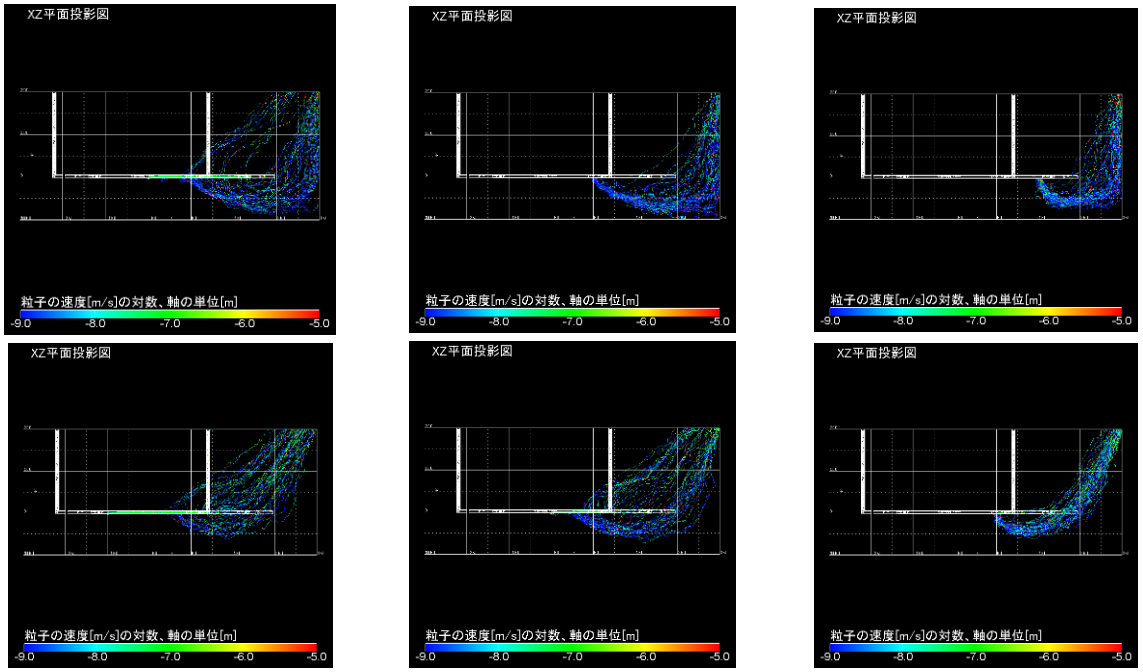


図 2.1-39　新第三紀堆積岩類、シーリングシステム劣化時、立坑片側配置および止水プラグ処分パネル出入口設置ケースの各処分孔からの核種の移行挙動
(上図における括弧内の数字は、岩盤移行距離 100m 以上の粒子を除いた割合)

(2)　シーリングシステムの劣化が安全評価に有意な影響をもたらす条件の整理

ここでは、物質移行解析の結果を整理し、シーリングシステムの劣化が安全評価に有意な影響をもたらす条件を整理する。

処分場が建設される場所の地質環境が、深成岩類のように低透水の基質部に高透水性の割れ目が高頻度で生じる岩盤であれば、シーリングシステムが劣化し安全機能が低下することを想定した場合でも、核種は処分坑道や主要坑道と交差する高透水性割れ目から岩盤に移行すると考えられる。また、岩盤に移行した一部の粒子は立坑地表面に到達するものの、天然バリアが有する安全機能が発揮されることにより、処分システムの安全性には影響を及ぼさないと考えられる。

一方、新第三紀堆積岩類のように深成岩と比べて割れ目頻度の低い岩種の場合、シーリングシステムが劣化し安全機能が喪失することを仮定すると核種の一部は劣化した坑道や立坑を介して立坑地表面まで到達する可能性がある。ただし、この割合が安全評価結果を直接示すものではないことに留意する必要があるものの、(1) (v)で述べたように、立坑を片側に集中して配置する、止水プラグを設置するなどの対策を講じることで、この核種の割合を十分に低減することが可能であると考えられる。

上記を踏まえ、表 2.1-18 に安全評価に有意な影響をもたらす条件を整理した。このうち、特に以下の条件が安全評価上、重要な条件であると考えられる。

① 岩盤の地質環境特性（高透水性割れ目頻度）

処分場建設地の地質環境に新第三紀堆積岩類を想定すると、劣化したシーリングシステムよりも岩盤基質部が低透水性で、岩盤における高透水性割れ目頻度が小さいため、処分坑道を起点とする流線が、坑道と交差する割れ目から岩盤へ流出することなく、シーリングシステムの各箇所を連続的に移行し卓越した移行経路となり、一定程度の割合で核種が下流側立坑地表面まで移行する可能性がある。一方、深成岩類のように高透水性割れ目頻度が高い場合、処分坑道を起点とする流線は、坑道と交差する高透水性割れ目から岩盤へ移行し、核種も同様に岩盤へ移行し、立坑地表面まで直達するものがなくなる。

② 上流側立坑から処分パネル、および処分パネルから下流側立坑への経路以外の迂回路の存在

処分場パネルを挟んで上流/下流側の立坑を配置すると、上流側立坑からの地下水は処分パネルを通り、下流側立坑入口まで移行する。ここに止水プラグを配置しても、到達した地下水は行き場を失い、止水プラグを回り込んで下流側立坑へ移行する。

一方、上流/下流側の両立坑を処分パネルの片側側面に配置した場合、上流側立坑からの地下水はパネル側面の主要坑道を経由して（処分パネルを経由せず）下流側立坑へ移行できる。さらに、処分パネルと立坑をつなぐ主要坑道に止水プラグを配置することで、上流側立坑からの処分パネルへの地下水の流入の阻止（パネル入口に配置）や、下流側立坑へ地下水の合流の阻止（パネル出口に配置）が可能となる。

表 2.1-18　安全評価に有意な影響をもたらす条件の整理

岩種	シーリングシステムの状態	地下水流動方向と処分坑道の向き		上流／下流側の立坑配置		処分パネル出入口の止水プラグの有無		物質移行解析結果（立坑地表面到達・岩盤中移行距離 100m 以下の割合）
	劣化	直交	平行	対角	片側	入口配置	出口配置	
深成岩	●	●		●				坑道と交差する亀裂から岩盤へ移行するため、処分坑道を起点とする粒子のうち立坑地表面へ到達するものはない（0%）
	●		●	●				坑道と交差する亀裂を介して岩盤へ移行するため、立坑地表面への到達割合は低く、このうち岩盤中を 100m 以上移行する核種を除くと、地表面に到達する粒子はない（0%）
新第三紀堆積岩	●		●	●				下流側立坑に近い処分坑道から発した粒子は一定程度立坑地表面まで到達するが、その多くは岩盤中を 100m 以上移行（11%）
	●	●		●				下流側立坑に近い処分坑道から発した粒子は一定程度立坑地表面まで到達するが、その多くは岩盤中を 100m 以上移行（43%）
	●		●		●			処分坑道上流側／中央の処分孔から発した粒子は上部の処分坑道を移行し、下流側まで移行するが、ほぼすべての粒子が下流側における岩盤ン方向への地下水流れに乗って岩盤へ移行（0 2%）
	●		●		●	●	●	処分坑道上流側／中央の処分孔から発した粒子は上部の処分坑道を移行し、下流側まで移行するが、ほぼすべての粒子が下流側における地下水流れに乗って岩盤へ移行（0 2%）

2.3.1.3　シーリングシステムの性能劣化の影響回避や緩和策の検討を踏まえた性能の考え方の整理

昨年度においては、シーリングシステムの劣化・変質によって坑道が卓越した移行経路となりうるシナリオが仮に生起した場合に取りうる予防策・回避策として、下流側および上流側立坑を連絡するバイパス孔の設置（地表水の地下深部への流入回避）、地下水流動方向と直交させた処分坑道配置（処分坑道の水平流れの回避）、地表へのアクセス坑道の上流側集中配置（アクセス坑道を介した循環経路の回避）等が提案された。本章ではこれらの回避・予防策としての有効性を検証するとともに、シーリングシステムの安全機能を確保する上での施工との連携の在り方について検討を行う。また 2.1.3.1 および 2.1.3.2 の検討結果を踏まえシナリオの成立条件、個別プロセスの起こりやすさ、安全機能へのインパクトなど複数の軸を考慮しつつ、シナリオの蓋然性や重要度を評価する。さらに、シナリオの蓋然性、シナリオの重要度、シナリオの回避・予防策の 3 つの観点からシーリングシステムの安全機能の考え方について整理し、シーリングシステムの長期的性能確保の観点から、設計・施工、安全評価の分野で今後検討すべき課題について整理を行う。

検討の具体的なアプローチを以下に示す。

① シーリングシステムの性能劣化を回避するための予防策及び仮に生起した場合の影響緩和策の有効性の検証及びシーリングシステムの安全機能を確保する上での施工との連携の在り方についての検討

- 前章までの検討成果を踏まえて昨年度作成したボウタイモデルを見直す。

② シナリオの成立条件、個別プロセスの起こりやすさ、安全機能へのインパクトなど複数の軸を考慮した、シナリオの蓋然性や重要度の評価

- 近年のリスク評価において標準となりつつあるリスクマトリクスを用いてシナリオの重要度

を生起することの蓋然性及び生起した場合の影響の大きさの両者を勘案して分類する。

- シーリングシステムの劣化に関する反応輸送解析や化学・力学連成解析の成果に基づき予防策に関する施工技術の効果を定量化するとともに改善すべき点等の課題を抽出して施工技術開発にフィードバックできる点を示す。
- シーリングシステム劣化時を想定した物質移行・核種移行解析の成果に基づき影響緩和策に関する施工技術の効果を定量化するとともに改善すべき点等の課題を抽出して施工技術開発にフィードバックできる点を示す。

③ シナリオの蓋然性、シナリオの重要度、シナリオの回避・予防策の 3 つの観点からのシーリングシステムの安全機能の考え方の整理

- 無対策の場合のリスクが、種々の対策を講ずることによってどのように低減されるかを①～③の定量的評価等の結果を踏まえつつリスクマトリクスを用いて評価・視覚化することにより、対策に応じたリスクの低下を指標としてシーリングシステムの種々の安全機能を整理する。
- 講ずる対策の種類によって異なるリスク低減の経路が考えられるため、費用－便益の比較から効率的と考えられる対策の組み合わせ及び ALARA（As low as reasonably achiecable）の観点から合理的と考えられる対策の範囲等を決定するための考え方を提案する。

④ シーリングシステムの長期的性能確保の観点からの設計・施工、安全評価の分野で今後検討すべき課題についての整理

- シーリングシステムの性能劣化の回避や影響緩和の方策は多様な構成要素に関連するとともに、設計・施工、安全評価及び地質環境調査の諸分野を横断した取り組みが必要となる。また、あるリスクへの対策は他の構成要素・分野における新たな問題を派生させる、という問題解決の連鎖が必要となる場合も考えられる。このような背景を踏まえて、学際的なプロジェクト管理手法である Project Issue Management を用いて網羅的に課題を抽出するとともに、抽出された個々の課題について、目標及び期待される成果、候補となる技術、具体的な検討のアプローチなどを背景となる問題認識とともに整理する。

(1) シーリングシステムの性能劣化を回避するための予防策及び仮に生起した場合の影響緩和策の有効性の検証及びシーリングシステムの安全機能を確保する上での施工との連携の在り方についての検討

1) ボウタイモデルの見直し

シーリングシステムの性能劣化を回避するための予防策・影響緩和策の有効性の検証及びシーリングシステムの安全機能を確保する上での施工との連携の在り方検討にあたり、昨年度作成したボウタイモデルを見直す。ボウタイモデルは各リスク要因の誘因となる事象から影響が生ずる道筋を整理し、予防策や緩和策を具体化する手法の 1 つである。損害等の影響を生じさせるトップ事象を中心として左右にそれぞれ原因となる影響因子及び結果として生ずる影響を展開する。

そして、抽出されたそれぞれの因子がトップ事象に繋がってしまうことを避けるための防止策を左側に記載し、右側にはトップ事象が実際に生じた後に影響が顕在化するまでの間に影響緩和のための修復や改善措置をとるといった対策を具体化する（図 2.1-40）。

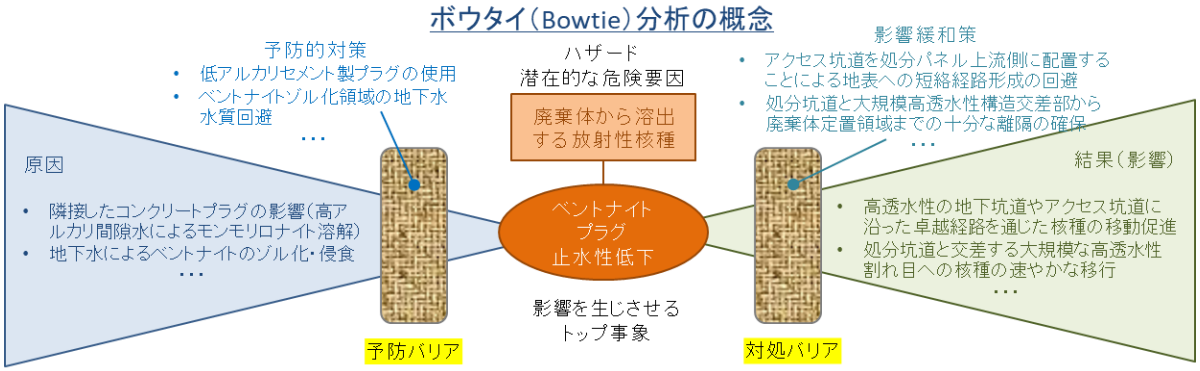


図 2.1-40　ボウタイ分析の概念

昨年度実施した検討においては、ボウタイ分析を通じて、シーリングシステムの止水性低下に関する影響因子や予防策・緩和策を整理し、シーリングシステムの長期性能評価に関する課題抽出を行った（図 2.1-41）。

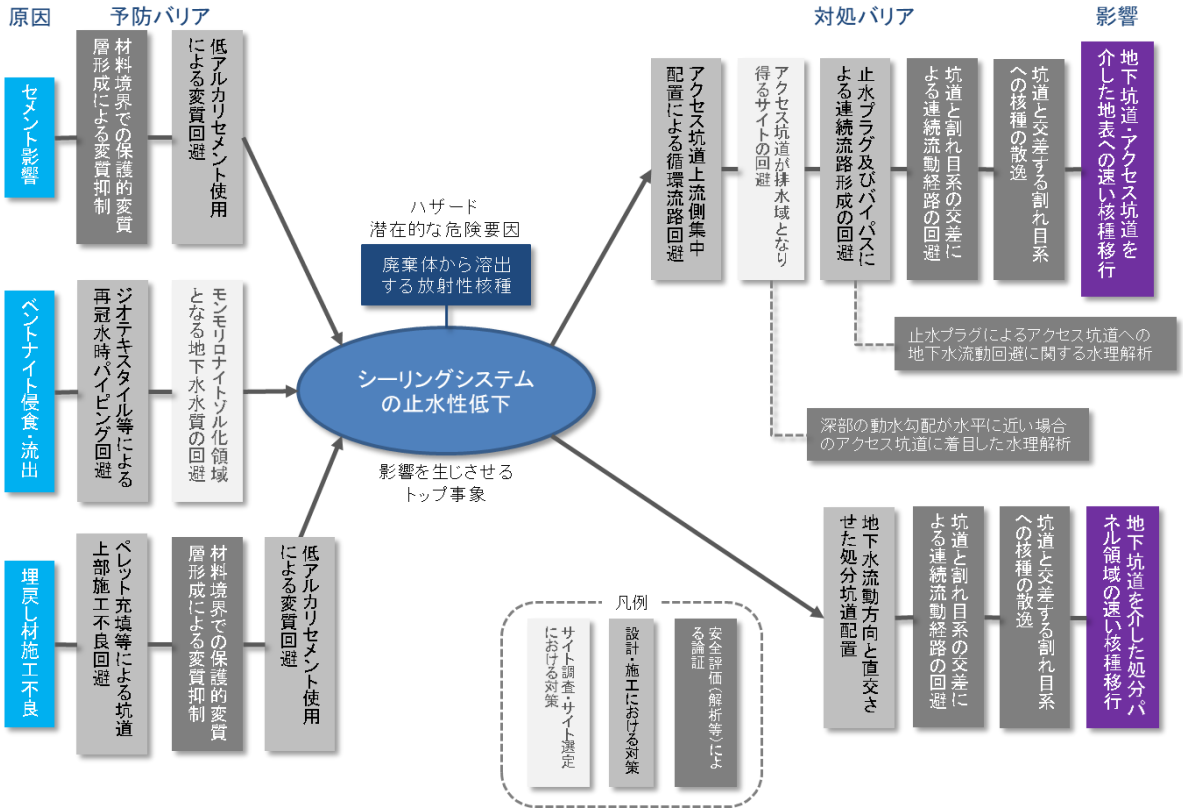


図 2.1-41　昨年度作成したボウタイモデル

前章までの検討成果を踏まえて見直しを行ったボウタイモデルを図 2.1-42 に示す。本年度はシーリングシステムの止水性低下をもたらす可能性のある影響因子として、埋め戻し材上部に生じた間隙への予防策の効果と、シーリングシステムの止水性低下を仮定した場合の影響緩和策の効果について重点的に検討を行った（図 2.1-42 の赤枠内）。

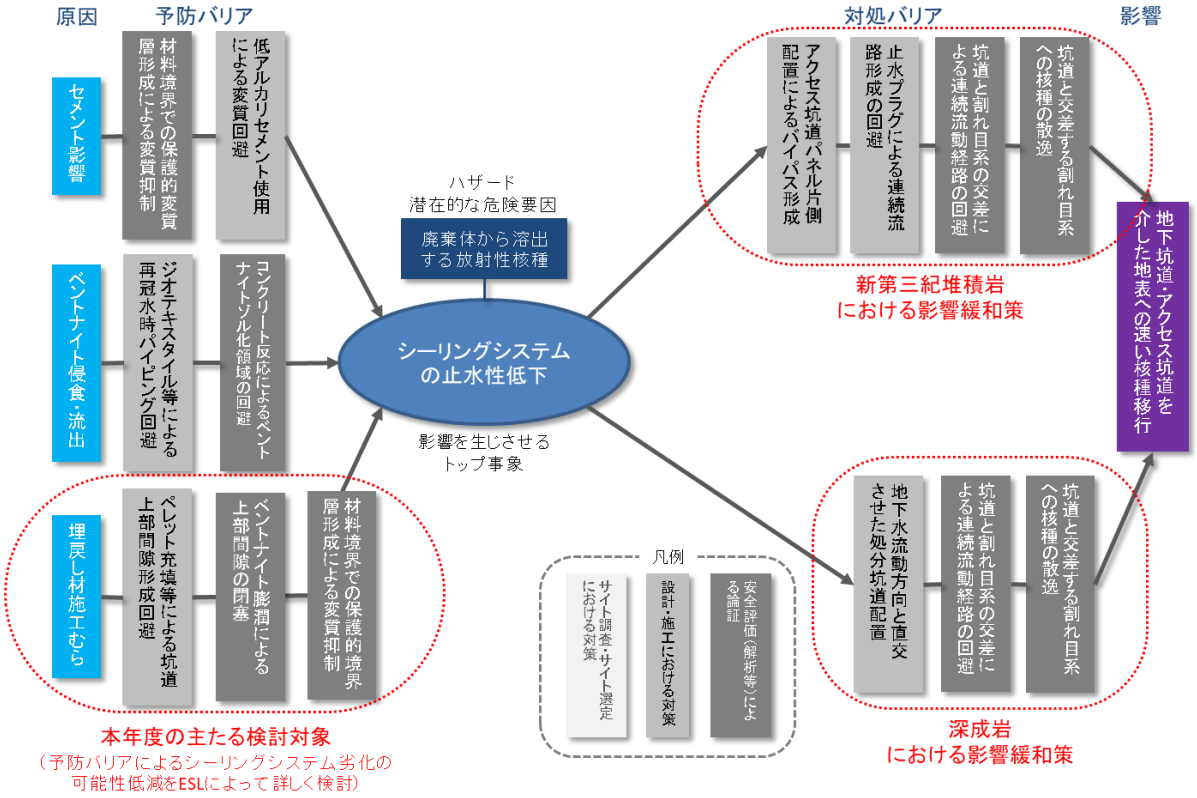


図 2.1-42　本研究の進捗を踏まえたボウタイモデル

2)　シナリオの蓋然性及び重要性の評価

埋め戻し材の上部に間隙が生じた場合の予防策の効果に関する蓋然性について、ESL（Evidence Support Logic）を用いた定量的な評価を試行した。本項では、一般論としての ESL の考え方や手法の使い方を含めて、埋め戻し材の上部に乾燥密度の低密度領域が形成することへの予防策の効果に関する蓋然性評価の試行結果を記載する。

(i)　ESL（Evidence Support Logic）の概要

ESL（Evidence Support Logic）は、不確実性の存在する状況において、多様な証拠に基づき、検討の対象とする命題が真であることをどの程度の確信を持って主張することができるか、という意思決定問題を支援するための手法の一つである。図 2.1-43 に示すように、区間確率の理論に基づくものであり、推論結果を真か偽に二分するのではなく、「どちらとも言えない」という不確実性を許容する点が特徴（特に、入手可能なデータが限定される状況で有用）である。

ESL では検討の対象とする命題とそれを支持（否定）する種々の証拠との対応関係をその論理関係に応じて構造的に整理する。各証拠に対しては、検討の対象とする命題への支持（否定）に

対する重要度に応じて「重み」が付与される。ESL では個々に見れば不完全あるいは不確実な多様な証拠が検討の対象とする命題をどの程度支持（否定）するかを専門家の主観確率により評価し、デンプスターシェーファーの証拠理論（Evidence theory）に基づいて組み合わせることで、検討の対象とする命題が真であることを全体としてどの程度の確信を持って主張することができるかを定量的に評価する。本手法では上記のようにエビデンスと検討の対象となる命題との対応付け、命題間の論理関係、エビデンスの重要度の考え方などを可視化することができ、検討の対象となる命題の成否の判断について透明度や追跡性を持たせることができる。末端命題はその成否を判断するための証拠（エビデンス）が入手できるようになるまで細分化されるため、複数分野の専門家等の間で本手法を共通のフレームワークとして用いて、細分化した個々のエビデンスに対する各専門家の判断を組み合わせるという使い方も考えられる。

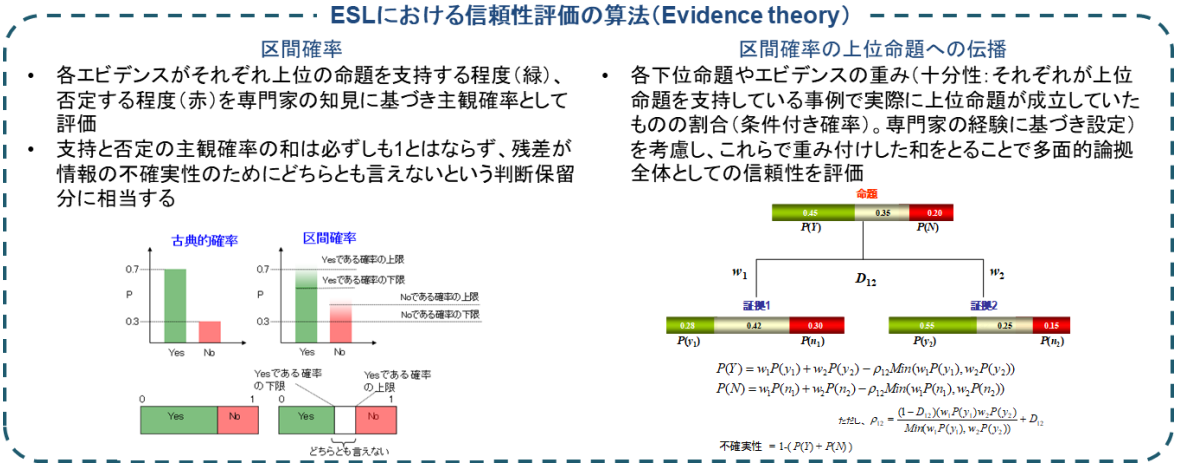


図 2.1-43　ESL における信頼性評価の算法（Evidence theory）

ESL による評価は以下の手順からなる。

① ESL モデル構築
　(ア) Decision tree の構築
　(イ) エビデンスへの「重み」の付与
② Decision tree の末端命題（エビデンス）の評価
③ Ratio plot による評価結果の可視化

(ii)　埋め戻し材の上部に乾燥密度の低密度領域が形成することへの予防策の効果についての Decision Tree の構築

Decision tree は、意思決定を要する問題（主要命題）の内容を細分化して以下のような相互の論理的な関係の明確な階層構造で表現したものである。

- 下位の命題が全て成立すると（あるいは否定されると）上位の命題が成立する（否定される）
- 下位の命題が一つでも成立すると（あるいは否定されると）上位の命題が成立する（否定される）

- 下位の命題が成立すると（あるいは否定されると）それに応じて上位命題の成立（あるいは否定）の信頼性が高まる

主要命題の細分化は、末端の命題の成否を判断するための証拠（エビデンス）が入手できるようになるまで続ける。

埋め戻し材の上部に間隙が形成され、坑道埋め戻し材が止水性を失うというシナリオについては、1)で述べたボウタイ分析においてペレット充填等による坑道上部施工不良回避、ベントナイト膨潤による上部間隙の閉塞、材料境界での保護的変質層形成による変質抑制に関する安全評価の 3 つの予防バリアが抽出された。そこで、埋め戻し材の上部に間隙が形成されることへの予防策の効果についての Decision tree では、まず、主要命題を「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」とし、主要命題の下位命題（第 2 階層の命題）として、上記の 3 つの予防バリアに対応して、「坑道最上部をベントナイトペレットで充填することにより間隙形成を回避することができる」、「施工時あるいはその後の沈下等によって坑道最上部に間隙が生じてもベントナイトの膨潤によって閉塞される」、「坑道最上部に間隙が残っても埋め戻し材の変質が促進されて止水性を失うことはない」を挙げた。

第 2 階層の命題「坑道最上部をベントナイトペレットで充填することにより間隙形成を回避することができる」の成否の判断には、ベントナイトペレットによる坑道最上部充填試験の結果やパイロット処分等における施工実績が重要なエビデンスとなると考えられる。そこで、第 2 階層の命題「坑道最上部をベントナイトペレットで充填することにより間隙形成を回避することができる」の下層に、「ベントナイトペレットによる坑道最上部充填試験」、「パイロット処分等における施工実績」を対応付けた。

第 2 階層の命題「施工時あるいはその後の沈下等によって坑道最上部に間隙が生じてもベントナイトの膨潤によって閉塞される」の成否の判断には、最上部に間隙がある場合の埋め戻し材冠水試験の結果や膨潤を想定したベントナイトの弾塑性変形解析によって確からしさを示すことが重要なエビデンスとなると考えられる。そこで、第 2 階層の命題「施工時あるいはその後の沈下等によって坑道最上部に間隙が生じてもベントナイトの膨潤によって閉塞される」の下層に、「最上部に間隙がある場合の埋め戻し材冠水試験」、「膨潤を想定したベントナイトの弾塑性変形解析」を対応付けた。

第 2 階層の命題「坑道最上部に間隙が残っても埋め戻し材の変質が促進されて止水性を失うことはない」の成否の判断には、坑道支保の割れ目が自己シールすることにより間隙が残っても埋め戻し材の変質が顕著に進まないことを示すことのできるエビデンスと、坑道支保が移流場になっても埋め戻し材の変質が顕著に進まないことを示すことのできるエビデンスが必要である。そこで、第 2 階層の命題「坑道最上部に間隙が残っても埋め戻し材の変質が促進されて止水性を失うことはない」の下層には、2 つの第 3 階層の命題「坑道支保の割れ目が自己シールすることにより間隙が残っても埋め戻し材の変質は顕著に進まない」及び「坑道支保が移流場になっても埋め戻し材の変質は顕著に進まない」を置いた。

上記の第 3 階層の命題の前者（「坑道支保の割れ目が自己シールすることにより間隙が残っても埋め戻し材の変質が顕著に進まない」）が成立するためには、コンクリート割れ目が二次鉱物に

より閉塞し、かつ、坑道支保が低透水性である場合に埋め戻し材の変質が顕著に進まないことが必要である。そこで、第 3 階層の命題「坑道支保の割れ目が自己シールすることにより間隙が残っても埋め戻し材の変質は顕著に進まない」の下層には、さらに 2 つの第 4 階層の命題「コンクリート割れ目が二次鉱物により閉塞する」及び「坑道支保が低透水性である場合に埋め戻し材の変質は顕著に進まない」を置いた。第 4 階層の命題「コンクリート割れ目が二次鉱物により閉塞する」の成否の判断には、割れ目のあるコンクリート試料の通水試験の結果や割れ目のあるコンクリートに対する反応輸送解析が重要なエビデンスとなる。また、もう一方の第 4 階層の命題「坑道支保が低透水性である場合に埋め戻し材の変質は顕著に進まない」の成否の判断には、坑道支保及び埋め戻し材が拡散支配である場合の反応輸送解析や拡散場における坑道支保及び埋め戻し材の長期接触試験の結果が重要なエビデンスとなる。それぞれ第 4 階層の命題の下層には、上記のエビデンスをそれぞれ対応付けた。

もう一方の第 3 階層の命題「坑道支保が移流場になっても埋め戻し材の変質は顕著に進まない」の成否の判断には、坑道と交差する透水性割れ目を考慮した軸方向二次元断面の反応輸送解析、周期境界条件（坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に沿った流動）を仮定した坑道直交断面の二次元反応輸送解析、及び悲観的な想定として坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に常にセメント平衡水が流入し続けることを仮定した一次元反応輸送解析の結果が重要なエビデンスとなる。そこで、第 3 階層の命題「坑道支保が移流場になっても埋め戻し材の変質は顕著に進まない」の下層には、「坑道と交差する透水性割れ目を考慮した軸方向二次元断面の反応輸送解析」、「周期境界条件（坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に沿った流動）を仮定した坑道直交断面の二次元反応輸送解析」、「坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に常にセメント平衡水が流入し続けることを仮定した一次元反応輸送解析」を対応付けた。

上記に述べた各命題と下層命題、各命題とエビデンスとの対応関係を、Decision tree に整理したものを図 2.1-44 に示す。

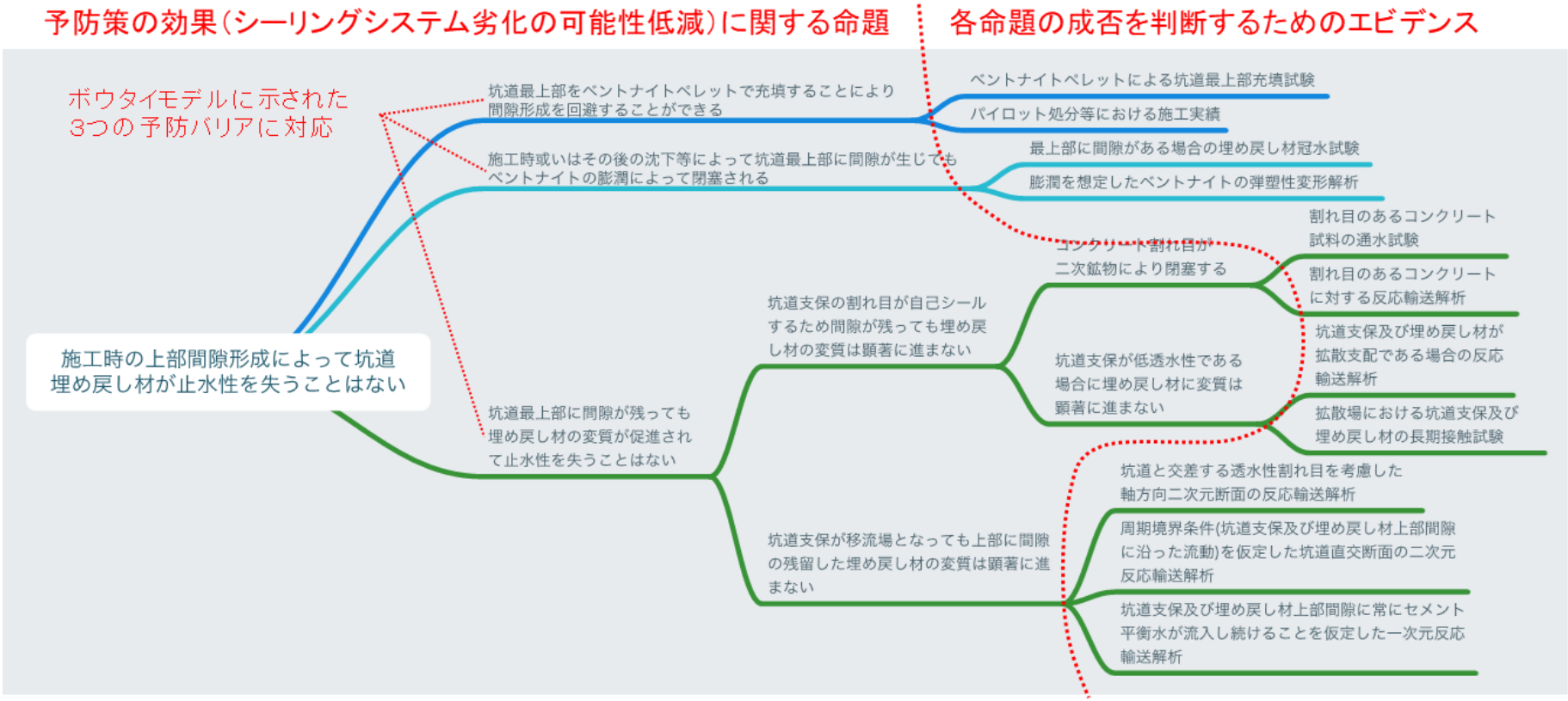


図 2.1-44　命題「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」についての Decision tree

(iii)　埋め戻し材の上部に乾燥密度の低密度領域が形成することへの予防策の効果についてのESL モデルの構築

ESL モデルとは、構築された Decision tree に含まれる命題・エビデンスに対して、その重要度に応じて「重み」のパラメータを設定したものである。下位命題の「重み」は、一つの下位命題が支持（否定）する場合に、上位命題が成立する（否定される）ことの条件付き確率であり、上位命題との相関関係の強さを示す指標である。例えば、ある気象シミュレーション手法に基づく予報が「明日は晴れ」といった場合に実際に翌日が晴れであった確率であり、可能であれば過去の統計データに基づき設定される。過去のデータがないような新たな問題については、類似分野のデータや専門家の判断によって設定する（Blackford et al., 2014）。下位命題の評価に基づく上位命題の成否の確からしさの算出に当たっては、図 2.1-45 の考え方を用いる。

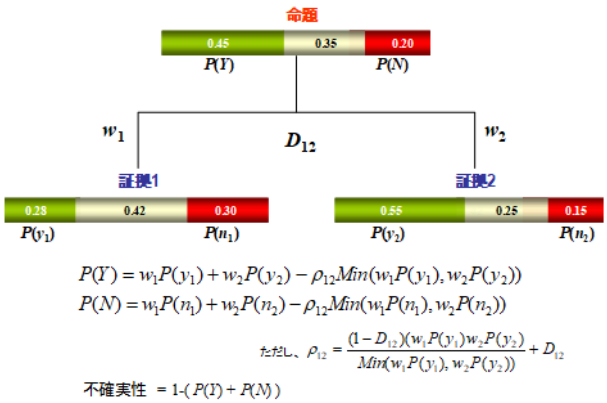


図 2.1-45　信頼性の算法

ESL では、上位下位の命題の論理的な関係性に応じて、論理演算子を用いることもできる。代表的な論理演算子として、all と any がある。論理演算子 all は、上位命題を肯定（否定）するために、その下位の命題のすべてが肯定（否定）されることが必要である場合に用いる。上位命題の成否の確からしさの算出に当たっては、同じ上位命題を共有する下位の命題（通常複数あり、兄弟命題とも呼ぶ）のうち最小値を上位命題の成否の確からしさとして用いる。一方論理演算子 any は、上位命題を肯定（否定）するために、その下位の命題のいずれか一つが肯定（否定）されれば十分である場合に用いる。上位命題の成否の確からしさの算出に当たっては、兄弟命題のうち最大値を上位命題の成否の確からしさとして用いる。

ESL では、上記の考え方を用いて、一つの命題（エビデンス）に対して、上位命題を支持するための重要度としての「重み」（または論理演算子）及び上位命題を否定するための重要度としての「重み」（または論理演算子）の 2 つのパラメータを付与する。

主要命題「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」について、各命題の「重み」を表 2.1-19 及び表 2.1-20 のように設定した。なお、既往の事例を参考に、下位命題の重みは、以下のような言語スケール（Linguistic scale）を用いて表現することとした。

とても高い（0.9）、高い（0.7）、中程度（0.5）、低い（0.3）、とても低い（0.1）

原則として、解析のエビデンスはモデルの設定等における不確実性を含むため、現地の試験や実験データのエビデンスよりも重要度は小さい（原則として前者は高い（0.7）以上、後者は中程度（0.5））とした。

まず、主要命題と第 2 階層の命題の関係について述べる。主要命題を肯定するためには、第 2 階層の命題「坑道最上部をベントナイトペレットで充填することにより間隙形成を回避することができる」は、施工後の検査で確認できるため論拠としての確実性が高い。そこで、本命題は、主要命題を支持する「重み」をとても高い（0.9）とした。「施工時あるいはその後の沈下等によって坑道最上部に間隙が生じてもベントナイトの膨潤によって閉塞される」は、坑道閉鎖後に地下水が侵入し、埋め戻し材が水分飽和・膨潤した時点での現象であるため確認が容易ではないことから、主要命題を支持する「重み」は中程度（0.5）とし、「坑道最上部に間隙が残っても埋め戻し材の変質が促進されて止水性を失うことはない」は、長期予測として専門家のコンセンサスが必要であることから、主要命題を支持する「重み」は中程度（0.5）とした。一方で、上記の命題はいずれも単独では主要命題を否定できないことから、主要命題を否定する「重み」はすべて中程度（0.5）とした。

第 2 階層の命題「坑道最上部に間隙が残っても埋め戻し材の変質が促進されて止水性を失うことはない」とその下位の第 3 階層の命題との関係性については、長期予測として専門家のコンセンサスが必要であることから、いずれの命題についても第 2 階層の命題に対する「重み」を肯定・否定共に中程度（0.5）とした。

第 3 階層の命題「坑道支保の割れ目が自己シールすることにより間隙が残っても埋め戻し材の変質が顕著に進まない」とその下位の第 4 階層の命題との関係性については、第 3 階層の命題を肯定するためには下位の 2 つの第 4 階層の命題が両者ともに成立する必要があることから、論理演算子の all を用いることとした。一方、第 4 階層のいずれかの命題が否定されれば第 3 階層の命題が否定されることから、否定については論理演算子 any を用いることとした。

第 2 階層の命題「施工時あるいはその後の沈下等によって坑道最上部に間隙が生じてもベントナイトの膨潤によって閉塞される」の下位のエビデンスについては、最上部に間隙がある場合の埋め戻し材冠水試験の肯定の重みを高い（0.7）、否定の重みをとても高い（0.9）とし、ベントナイトの弾塑性解析は肯定の重み・否定の重みを共に中程度（0.5）とした。前者は試験による確認のためエビデンスとしての確度は基本的に高い。特に、実作業に近い状況下での冠水試験においてベントナイトの膨潤によって上部空隙が閉塞されないことが示された場合、上位命題が否定される確度はとても高い。一方、実作業に比べて理想的な条件で行われる可能性があることから、悲観的に考慮するために肯定の重みは否定の重みよりも 1 段階下げている。

第 4 階層の命題「コンクリート割れ目が二次鉱物により閉塞する」の下位のエビデンスについては、割れ目のあるコンクリート試料への通水試験及び割れ目のあるコンクリートに対する反応輸送解析の両者を、肯定の重み・否定の重みを共に中程度（0.5）とした。前者については、実験によるエビデンスであるため基本的には確度が高いが試験条件と実際の環境との差異がある可能性を考慮して中程度（0.5）とした。

第 4 階層の命題「坑道支保が低透水性である場合に埋め戻し材の変質は顕著に進まない」の下

位のエビデンスについては、坑道支保及び埋め戻し材が拡散支配である場合の反応輸送解析及び拡散場における坑道支保及び埋め戻し材の長期接触試験の両者の肯定の重み・否定の重みを共に中程度（0.5）とした。後者の長期接触試験については、試験によるエビデンスであり基本的には確度が高いが、試験条件と実際の環境との差異がある可能性を考慮して中程度（0.5）とした。

第 3 階層の命題「坑道支保が移流場になっても埋め戻し材の変質は顕著に進まない」の下位のエビデンスには、「坑道と交差する透水性割れ目を考慮した軸方向二次元断面の反応輸送解析」、「周期境界条件（坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に沿った流動）を仮定した坑道直交断面の二次元反応輸送解析」、「坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に常にセメント平衡水が流入し続けることを仮定した一次元反応輸送解析」の 3 つが挙げられている。坑道と交差する透水性割れ目を考慮した軸方向二次元断面の反応輸送解析は、解析の含む不確実性を考慮して肯定の重み・否定の重みを共に中程度（0.5）とした。周期境界条件（坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に沿った流動）を仮定した坑道直交断面の二次元反応輸送解析は、解析の含む不確実性を考慮して肯定の重みを中程度（0.5）とした一方で、周期境界条件は液相が平衡に近い傾向になるにも関わらず上位命題が否定された場合にはその結果を重要視する必要があることから否定の重みは高い（0.7）とした。3 つ目のエビデンスである、坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に常にセメント平衡水が流入し続けることを仮定した一次元反応輸送解析については、解析の含む不確実性を考慮して否定の重みを中程度（0.5）とした一方で、セメント平衡水の流入が継続する環境がベントナイト変質に対して過酷環境となるにもかかわらず上位命題を肯定する結果が得られた場合にはその結果を重要視する必要があることから肯定の重みは高い（0.7）とした。上記の Decision tree 及び各命題への「重み」の付与により、ESL モデル構築ソフトウェア TESLA を用いて構築した ESL モデルを図 2.1-46 に示す。

表 2.1-19　主要命題「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」の下位命題の重みの設定（1/2）

		支持の重み	否定の重み	備考
上位命題	施工時の上部間隙形成によって坑道埋め戻し材が止水性を失うことはない			
下位命題	坑道最上部をベントナイトペレットで充填することにより間隙形成を回避することができる	とても高い	中程度 いずれも単独で上位命題を否定できるものではないため中程度とした	施工後の検査で確認できるため論拠としての確実性が高い
	施工時或いはその後の沈下等によって坑道最上部に間隙が生じてもベントナイトの膨潤によって閉塞される	中程度		坑道閉鎖後に地下水が浸入し埋め戻し材が水分飽和・膨潤した時点での現象であるため確認が容易ではない
	坑道最上部に間隙が残っても埋め戻し材の変質が促進されて止水性を失うことはない	中程度		長期予測として専門家のコンセンサスがあれば一定の信頼性を持つが不確実性が含まれる

		支持の重み	否定の重み	備考
上位命題	坑道最上部に間隙が残っても埋め戻し材の変質が促進されて止水性を失うことはない			
下位命題	坑道支保の割れ目が自己シールするため間隙が残っても埋め戻し材の変質は顕著に進まない	中程度	中程度	長期予測として専門家のコンセンサスがあれば一定の信頼性を持つが不確実性が含まれる
	坑道支保が移流場となっても上部に間隙の残留した埋め戻し材の変質は顕著に進まない	中程度	中程度	長期予測として専門家のコンセンサスがあれば一定の信頼性を持つが不確実性が含まれる

		支持の重み	否定の重み	備考
上位命題	坑道支保の割れ目が自己シールするため間隙が残っても埋め戻し材の変質は顕著に進まない			
下位命題	コンクリート割れ目が二次鉱物により閉塞する	all	any	・上位命題成立のためには二つの下位命題が同時に成立する必要がある ・上位命題否定のためには二つの下位命題のどちらかが否定されれば良い
	坑道支保が低透水性である場合に埋め戻し材に変質は賢慮に進まない			

表 2.1-20　主要命題「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」の下位命題の重みの設定（2/2）

		支持の重み	否定の重み	備考
上位命題	施工時或いはその後の沈下等によって坑道最上部に間隙が生じてもベントナイトの膨潤によって閉塞される			
証拠	最上部に間隙がある場合の埋め戻し材冠水試験	高い	とても高い	試験による確認はエビデンスとしての確度が高い。ただし、試験は実作業に比べて理想的な条件での作業となる可能性があるため支持に関しては慎重に判断すべき
	膨潤を想定したベントナイトの弾塑性変形解析	中程度	中程度	長期予測として専門家のコンセンサスがあれば一定の信頼性を持つが不確実性が含まれる

		支持の重み	否定の重み	備考
上位命題	コンクリート割れ目が二次鉱物により閉塞する			
証拠	割れ目のあるコンクリート試料の通水試験	中程度	中程度	試験による確認はエビデンスとして一定の信頼性を持つが試験条件と実際の環境との差異があることに留意する必要がある
	割れ目のあるコンクリートに対する反応輸送解析	中程度	中程度	長期予測として専門家のコンセンサスがあれば一定の信頼性を持つが不確実性が含まれる
	コンクリートの割れ目の閉塞に関するナチュラルアナログ	中程度	中程度	ナチュラルアナログはエビデンスとして一定の信頼性を持つが人工物のコンクリートと全く同じではないことに留意する必要がある

		支持の重み	否定の重み	備考
上位命題	坑道支保が低透水である場合に埋め戻し材に変質は顕著に進まない			
証拠	坑道支保及び埋め戻し材が拡散支配である場合の反応輸送解析	中程度	中程度	長期予測として専門家のコンセンサスがあれば一定の信頼性を持つが不確実性が含まれる
	拡散場における坑道支保及び埋め戻し材の長期接触試験	中程度	中程度	試験による確認はエビデンスとして一定の信頼性を持つが試験条件と実際の環境との差異があることに留意する必要がある

		支持の重み	否定の重み	備考
上位命題	坑道支保が移流場となっても上部に間隙の残留した埋め戻し材の変質は顕著に進まない			
証拠	坑道と交差する透水性割れ目を考慮した軸方向二次元断面の反応輸送解析	中程度	中程度	長期予測として専門家のコンセンサスがあれば一定の信頼性を持つが不確実性が含まれる
	周期境界条件（坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に沿った流動）を仮定した坑道直交断面の二次元反応輸送解析	中程度	高い	長期予測として専門家のコンセンサスがあれば一定の信頼性を持つが不確実性が含まれる。ただし、周期境界条件は液相が平衡に近い傾向となるにもかかわらず命題が否定される場合はその結果を重要視する必要がある
	坑道支保及び埋め戻し材上部間隙に常にセメント平衡水が流入し続けることを仮定した一次元反応輸送解析	高い	中程度	長期予測として専門家のコンセンサスがあれば一定の信頼性を持つが不確実性が含まれる。ただし、セメント平衡水の流入継続はベントナイト変質に対して過酷な条件となるにもかかわらず命題が支持される場合はその結果を重要視する必要がある

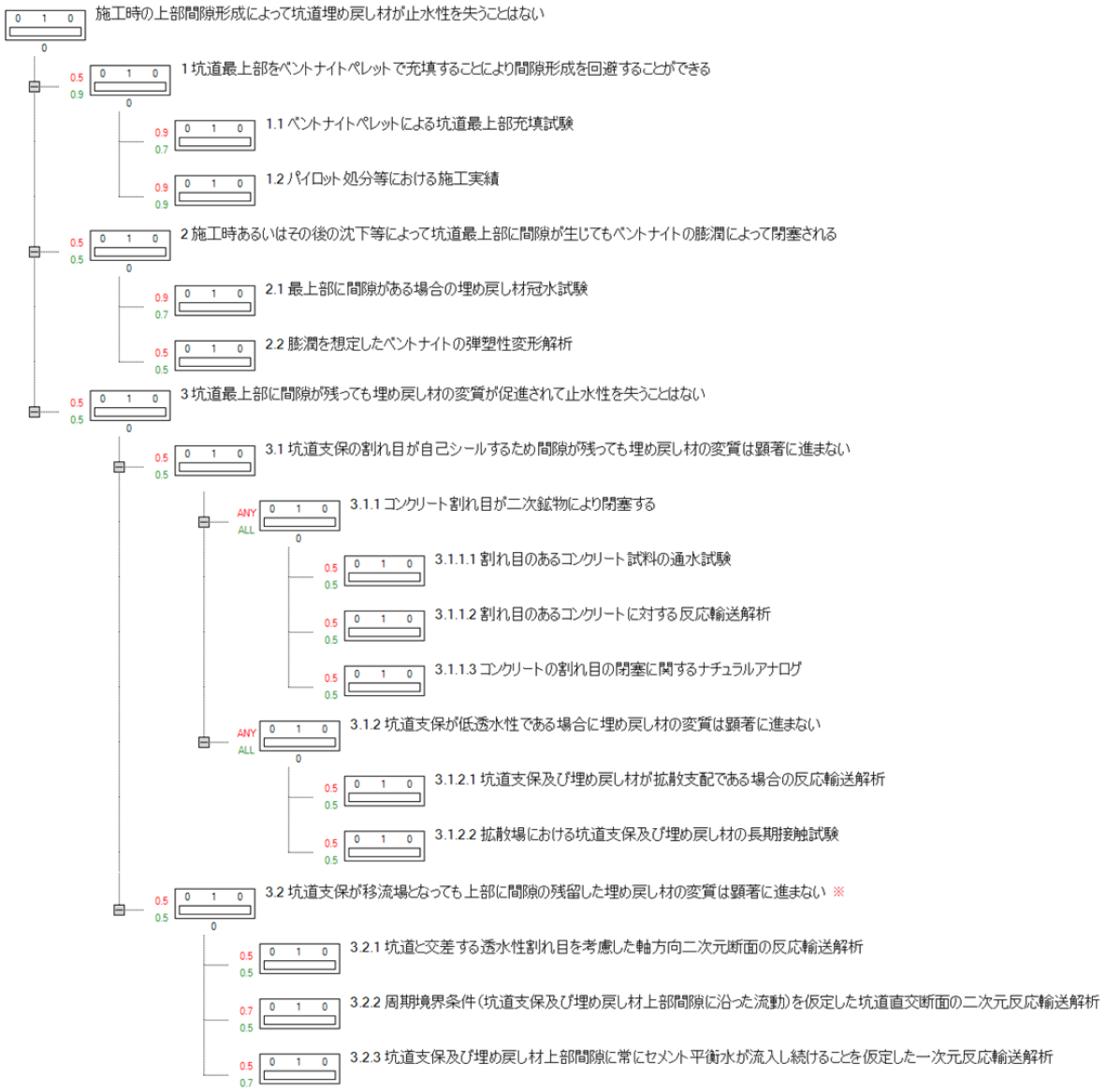


図 2.1-46　構築した ESL モデル

3)　シナリオの蓋然性の評価

(i)　エビデンスに基づく各末端命題の評価

ESL モデルの末端にあたる各命題に対して、入手可能なエビデンス（一つの命題に対して複数存在し得る）がそれを支持（肯定）あるいは否定する程度をそれぞれ Yes あるいは No の主観確率を入力する。情報が不足している等の理由で判断が困難な場合は「保留（どちらとも言えない：白）」を適用する（図 2.1-47）。

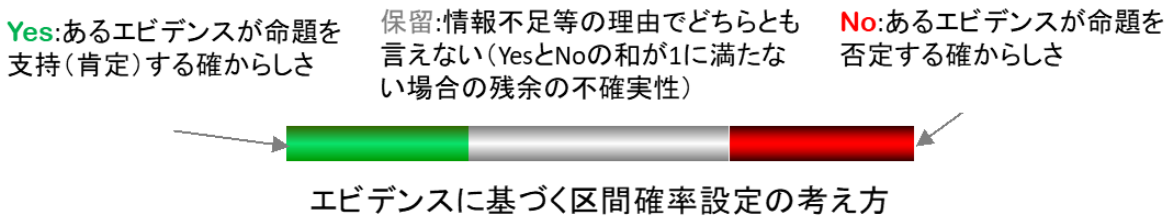


図 2.1-47　エビデンスに基づく区間確率設定の考え方

一般論として、各エビデンスによる末端命題の支持あるいは否定の程度を決めるにあたっては、試験結果や解析結果あるいは観察事実等が命題に対してどのような意味を持っているかという観点に加えて、これらのエビデンス自体の「品質」に留意する必要がある。例えば、以下の点に注意が必要である。

- 解析結果に関しては、使用したモデルの理論的基盤の有無や専門家間のコンセンサスの有無あるいは入力パラメータの精度などに留意する必要がある。
- 試験や測定結果の場合には、実際の環境と実験条件の差異や測定精度あるいは再現性の有無などに配慮することが必要である。
- 統計的なデータや状況依存性のある結果等については、これらを網羅する統計的に有意な数のデータが得られているかと言った点に注意が必要である。

ESL では、各エビデンスに基づく末端命題の支持あるいは否定の程度は、エビデンスの品質に応じて較正を行う（Funtowicz and Ravetz, 1990）。ESL モデルの末端命題の評価においては、エビデンスの品質、肯定（成立）の確からしさ、否定の確からしさの 3 つのパラメータを入力していく。

(ii)　構築した ESL モデルの末端命題の評価

本検討で実施してきた解析結果や既往の研究事例等、現状で入手可能な証拠に基づいて前項で構築した ESL モデルの下位命題の成否の判断およびエビデンスの品質の評価を試行した。個々の評価の詳細は付録 1 の 4 章に示すこととし、ここでは評価結果のみを示す（図 2.1-48）。個々のエビデンスに付与した「重み」及び上述した既存のエビデンスに基づく評価より、主要命題「施工時の時上部間隙形成によって坑道埋め戻し材が止水性を失うことはない」を工程する確からしさは 0.48、否定する確からしさは 0.09、保留分は 0.43 と算出された。

図 2.1-48　主要命題「施工時の上部間隙形成によって埋め戻し材が止水性を失うことはない」の評価結果

(2)　シーリングシステム劣化時の影響の大きさの区分

本項では、仮にシーリングシステムが劣化した場合の対処バリアによる影響緩和効果について評価する。想定される状況における 3 次元物質移行解析等の結果を多重バリアシステムの安全機能の有無に着目して、その影響レベルを表 2.1-21 に示す 5 つの段階に区分することとした。

影響レベル 4 は人工バリア、天然バリア、そしてそれらのインタフェイス（次項で詳述）の安全機能がいずれも期待できない状況を表す。この場合、廃棄体から溶出する核種が速やかに生活圏に至る。影響レベル 3 は人工バリアの安全機能（容器の閉じ込め、緩衝材の止水性や移行遅延）は期待できるが、天然バリアやインタフェイスの安全機能は期待できず、人工バリアから外部に移行する核種のうちアクセス坑道を介して速やかに地表に至るものの割合が 10%以上ある状況

を表す。影響レベル 2 は、レベル 3 と同様に人工バリアの安全機能（容器の閉じ込め、緩衝材の止水性や移行遅延）が期待でき、人工バリアから外部に移行する核種の大半は天然バリアに進入するが、アクセス坑道を介して速やかに地表に至る割合が 1%オーダーとなり、無視できない状況を表す（天然バリアの安全機能が全く期待できないとは言い切れないものの核種が 1%オーダーで地表に達することから期待できる機能は低いと想定し、表中の天然バリアの箇所を▲で示す）。影響レベル 1 は人工バリアの安全機能（容器の閉じ込め、緩衝材の止水性や移行遅延）が期待でき、人工バリアから外部に移行する核種の大半は天然バリアに進入するが、インタフェイスの安全機能が期待できず、パネル内での短絡や坑道と交差する大規模透水性構造に集中する等のために天然バリア性能が影響される可能性がある状況を表す（天然バリアに期待することのできる安全機能は高くないものの影響レベル 2 よりは高いことから表中の天然バリアの箇所を△で示す）。影響レベル 0 は人工バリア及び天然バリアの安全機能が期待でき、また、パネル内の短絡や大規模な透水性構造が卓越した移行経路となることを避けてより低透水性・小規模な割れ目ネットワークを移行する状況を表す。

表 2.1-21　シーリングシステム劣化時の影響の大きさの区分

影響レベル	安全機能			備考
	人工バリア	インタフェイス※	天然バリア	
4	×	×	×	多重バリアシステムの安全機能はいずれも期待できず、廃棄体から溶出する核種が速やかに生活圏に至る
3	○	×	×	人工バリアの安全機能（容器の閉じ込め、緩衝材の止水性や移行遅延）は期待できるが、人工バリアから外部に移行する核種のうちアクセス坑道を介して速やかに地表に至るものの割合が多い（10%のオーダー）
2	○	×	▲	人工バリアの安全機能（容器の閉じ込め、緩衝材の止水性や移行遅延）が期待でき、人工バリアから外部に移行する核種の大半は天然バリアに進入するがアクセス坑道を介して速やかに地表に至る割合が無視できない（1%オーダー）
1	○	×	△	人工バリアの安全機能（容器の閉じ込め、緩衝材の止水性や移行遅延）が期待でき、人工バリアから外部に移行する核種の大半は天然バリアに進入するが、坑道と交差あるいは近傍にある大規模透水性構造に集中するため天然バリア性能が影響される可能性がある
0	○	○	○	人工バリア及び天然バリアの安全機能が期待でき、また、不均質な天然バリア中の大規模な透水性構造が卓越した移行経路となることを避けてより低透水性・小規模な割れ目ネットワークを移行する

※人工バリアー天然バリア間のインタフェイス機能：人工バリアから外部への核種移行率が不均質な天然バリア中の大規模な透水性構造に集中して進入することを妨げ、より低透水性・小規模な割れ目ネットワークに導くような「分配器」としての機能（後述）

従来の人工バリア中核種移行解析において主たる対象としていた緩衝材中の核種の拡散や収着に加えて、近年の性能評価では、人工バリアや処分坑道から不均質岩盤へ移行する際にどのような経路に進入するかという点（インタフェイス＝分配器としての機能）が着目されている。

SR-Site の事例（Joyce et al., 2010）では、ニアフィールド放射性核種輸送モデルの核種の放出経路として、 Q1 パス（処分孔と交差する比較的小さな割れ目への輸送）、Q2 パス（トンネルの床下にある EDZ への輸送）、Q3 パス（埋め戻されたトンネル内および坑道と交差する高透水

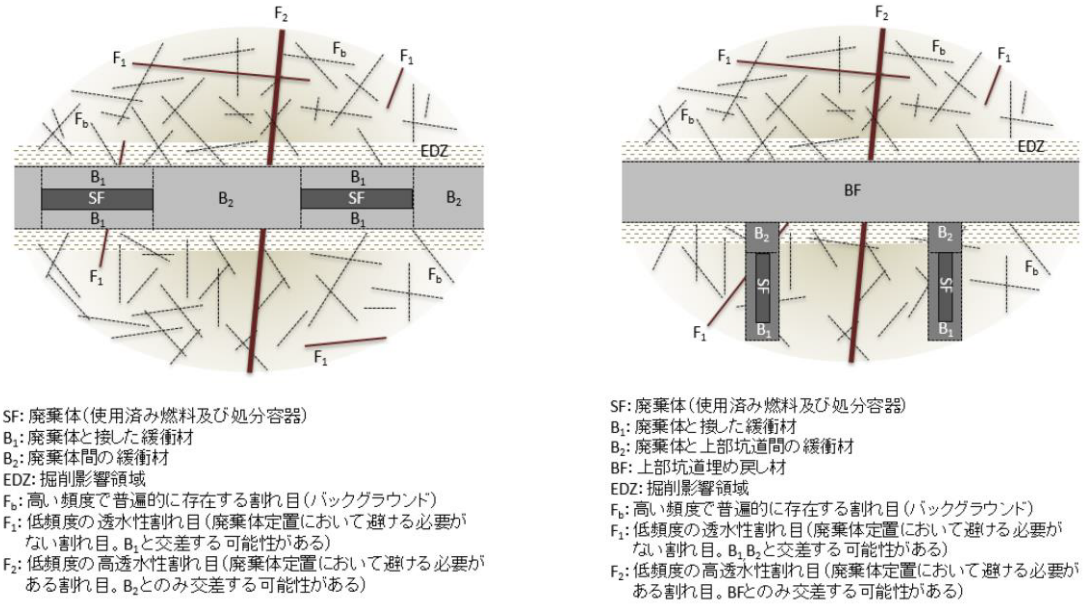
性の割れ目への輸送）と区分して定義している（Joyce et al., 2010）。

これは、廃棄体を定置する処分孔を比較的良好な位置（規模が大きいあるいはネットワークとして連続した透水性割れ目と交差しない位置など）に配置することを前提とすれば、処分孔から直近の岩盤割れ目に進入する経路（Q1 パス）は、上部坑道あるいは EDZ を経由してより大規模で透水性の割れ目に進入する経路（Q2 あるいは Q3 パス）よりも高い天然バリアが期待できるためである。坑道の配置や埋め戻し材の施工方法等により Q1、Q2、Q3 に侵入する割合は変動することが知られており、その機能を分配器と呼ぶ。

一方、実際の処分場サイトでは、規模や透水性の大きく異なる多数の割れ目が地下水流動経路のネットワークを構成するものと考えられる。このような不均質性を呈する岩盤領域中の処分場レイアウトとしては、以下のような不均質性のスケールに応じた方策を採ることにより廃棄体をより適切に配置できることとなる。

- サイト内に低頻度（例えば数 100 m 毎）で分布するような大規模の高透水性構造を避け、比較的良好（低透水性）な岩盤領域に処分パネルを配置する（従って、これらの構造と処分坑道とは交差しない）
- パネル設置領域の中に低頻度（例えば数 10m 毎）で分布するような小規模の断層や破砕帯等と坑道の交差部を避けることによりパネル内でより良好な部位を廃棄体定置領域とする
- 廃棄体定置領域の中でも、廃棄体定置間隔と同等以上の離隔をもって分布するような高透水性の割れ目との交差部は避けて廃棄体を定置する

上記のような方策に従い坑道及び廃棄体を配置した場合、岩盤不均質性と廃棄体との位置関係は図 2.1-49 のようになるものと考えられる。



SF: 廃棄体（使用済み燃料及び処分容器）
B_1: 廃棄体と接した緩衝材
B_2: 廃棄体間の緩衝材
EDZ: 掘削影響領域
F_b: 高い頻度で普遍的に存在する割れ目（バックグラウンド）
F_1: 低頻度の透水性割れ目（廃棄体定置において避ける必要がない割れ目。B_1と交差する可能性がある）
F_2: 低頻度の高透水性割れ目（廃棄体定置において避ける必要がある割れ目。B_2とのみ交差する可能性がある）

SF: 廃棄体（使用済み燃料及び処分容器）
B_1: 廃棄体と接した緩衝材
B_2: 廃棄体と上部坑道間の緩衝材
BF: 上部坑道埋め戻し材
EDZ: 掘削影響領域
F_b: 高い頻度で普遍的に存在する割れ目（バックグラウンド）
F_1: 低頻度の透水性割れ目（廃棄体定置において避ける必要がない割れ目。B_1 B_2と交差する可能性がある）
F_2: 低頻度の高透水性割れ目（廃棄体定置において避ける必要がある割れ目。BFとのみ交差する可能性がある）

図 2.1-49　岩盤不均質性と廃棄体との位置関係
（原子力機構，2015）

核種移行の観点からは、高い天然バリアの安全機能を期待するためには、図 2.1-49 の破線に示されているような避けることのできない頻度で存在する比較的小さな亀裂に核種が侵入する割合（SR-Site の例では Q1 パスに侵入する割合）が高いことが重要である。このような背景から、インタフェイス（分配器）の機能に着目することは重要であると考えられる。

1)　シーリングシステムが劣化した場合の物質移行への影響

(i)　深成岩

シーリングシステムが劣化し、処分坑道や主要坑道および止水プラグ、立坑のすべての透水性が上昇した場合（特に処分坑道が地下水主流動方向と平行なレイアウト）、深成岩では、最上流側の廃棄体では 16%、中央部の廃棄体では 0.1%、最下流側廃棄体では 7%の粒子が坑道内を下流端まで到達する。ただし、埋め戻し材劣化により透水性となったパネル最下流の主要坑道では比較的透水性の高い割れ目の集水効果が生じると考えられることから、シーリングシステム劣化の影響レベルは 1 （人工バリアの安全機能が期待でき、人工バリアから外部に移行する核種の大半は天然バリアに進入するが、坑道と交差あるいは近傍にある大規模透水性構造に集中するため天然バリア性能が影響される可能性がある）と考えられる（図 2.1-50）。

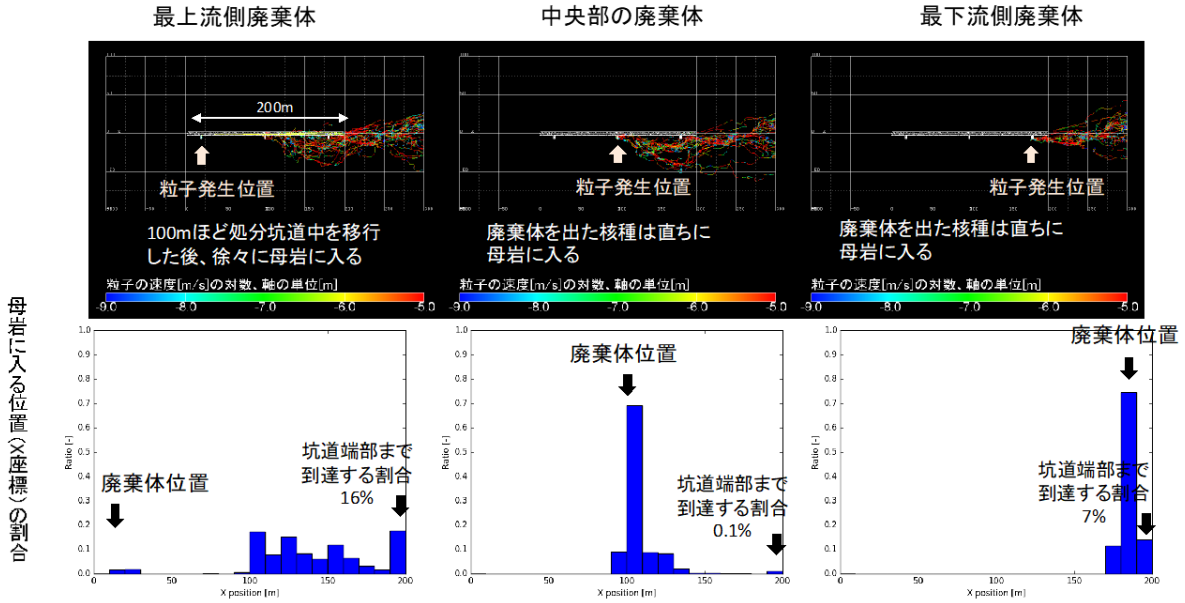


図 2.1-50　シーリングシステム劣化時の物質移行への影響（深成岩）
（原子力機構・原環センター，2019）

(ii)　新第三紀堆積岩

シーリングシステムが劣化し、処分坑道や主要坑道および止水プラグ、立坑のすべての透水性が上昇した場合（特に処分坑道が地下水主流動方向と平行なレイアウト）新第三紀堆積岩では最上流側の廃棄体では 18%、中央部の廃棄体では 11%が坑道内を 200m 下流側まで到達する（最下流側廃棄体の粒子は廃棄体から出て直ぐに母岩に入る）。また、深成岩とは異なり、新第三紀堆積

岩では、下流側立坑を経て地表に至る流線が確認されていることから、これらの粒子は立坑を介して速やかに地表に至る可能性がある。そこで、この場合の影響レベルは 3（人工バリアの安全機能は期待できるが、人工バリアから外部に移行する核種のうちアクセス坑道を介して速やかに地表に至るものの割合が多い（10%のオーダー））と考えられる（図 2.1-51）。

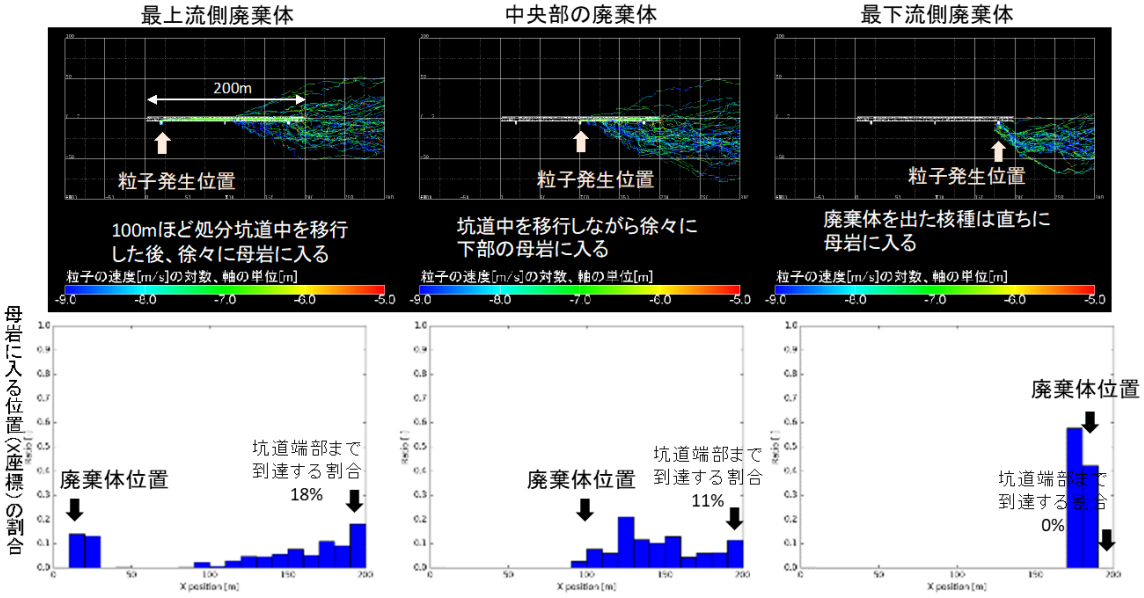


図 2.1-51　シーリングシステム劣化時の物質移行への影響（新第三紀堆積岩）
（原子力機構・原環センター，2019）

2)　影響緩和策の効果

(i)　深成岩

深成岩の場合、NUMO 包括的技術報告（NUMO, 2021）におけるパネルレイアウトと同様、処分坑道を地下水主流動方向と直交する方向に掘削することによって、上部坑道埋め戻し材が劣化し高透水性となった場合（シーリングシステム劣化ケース）でもこれが流動経路となって下流側立坑に至る短絡経路となることは回避することができる（図 2.1-52）。

上記の傾向は、シーリングシステムが健全であることを仮定したケース（図 2.1-52 左図）と同様であるが、上部坑道内を一定の距離移行してから岩盤中に至る流線が多くみられる。これらは、上部坑道が高透水性の流路となったことによって、坑道と交差する透水性の比較的高い割れ目の集水効果が顕著となっている可能性を示唆するものと考えられる。

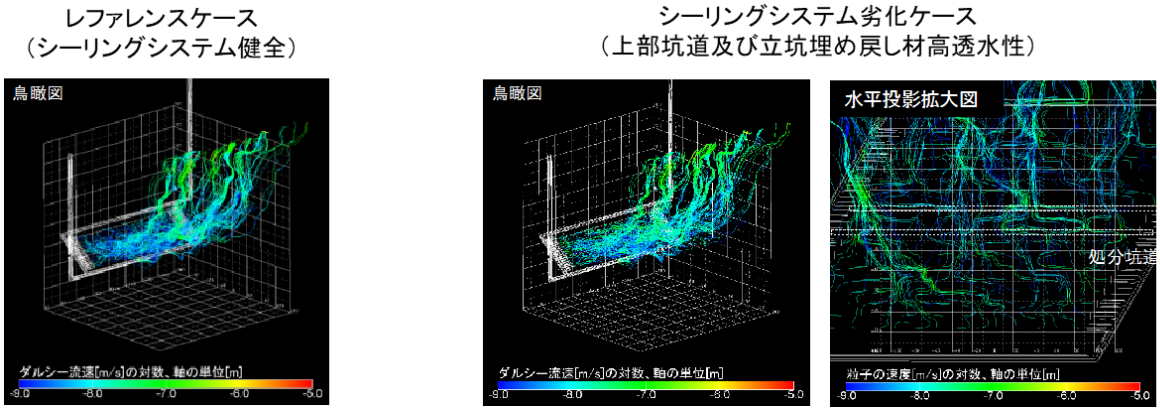


図 2.1-52　深成岩（坑道と地下水主流動方向直交レイアウト）の場合のレファレンスケースとシーリングシステム劣化ケースの水理解析結果の比較

物質移動解析においても水理解析結果と同様、処分坑道を地下水主流動方向と直交する方向に掘削した場合、上部坑道埋め戻し材が劣化し高透水性となった場合（シーリングシステムが劣化したことを仮定したケース）でもこれが移行経路となって下流側立坑に至る粒子はみられない。ただし、本ケースでは上部坑道内が移流場となっており（坑道内での遅い（緑青色）の粒子軌跡がレファレンスに比べて少ない）、水理解析結果において示唆されているように、処分孔内の廃棄体から移行する核種は坑道と交差する比較的透水性の高い割れ目の集水効果によって上部坑道を移流してこれらの岩盤割れ目に進入しているものと考えられる（図 2.1-53）。

以上のことから、深成岩における影響緩和策（坑道の地下水主流動方向との直交配置）の効果を考慮した場合も、シーリングシステム劣化の影響レベルは１（人工バリアの安全機能が期待でき、人工バリアから外部に移行する核種の大半は天然バリアに進入するが、坑道と交差あるいは近傍にある大規模透水性構造に集中するため天然バリア性能が影響される可能性がある）と考えられる。

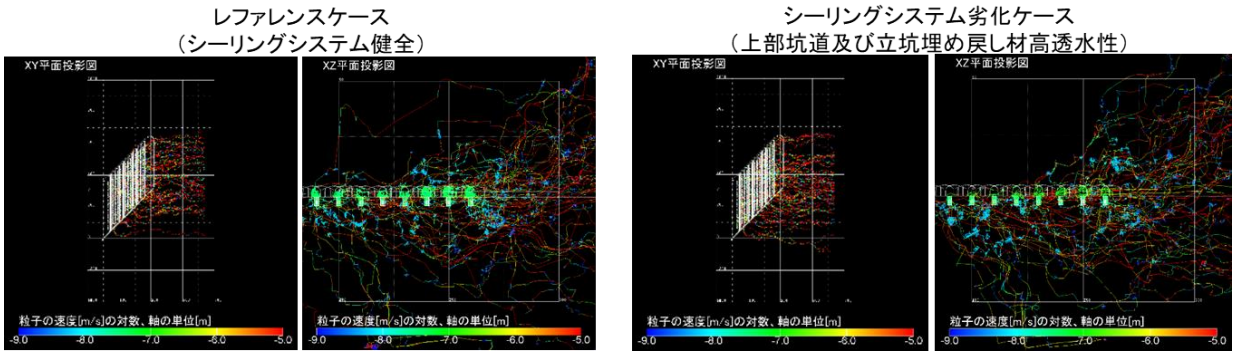


図 2.1-53　深成岩（坑道と地下水主流動方向直交レイアウト）の場合のレファレンスケースとシーリングシステム劣化ケースの物質移行解析結果の比較

(ii)　新第三紀堆積岩

上流/下流側の両立坑を処分パネルに対して同じ片側側面に配置した場合、処分パネル内を起点とする流線のうち、立坑を介して地表に至るものは 23%であった（図 2.1-54）。物質移行解析の結果から、立坑上端地表面に到達する粒子は、下流側立坑に近い処分坑道の処分孔を発生源とする粒子のうちのわずか数%程度である（図 2.1-55）。

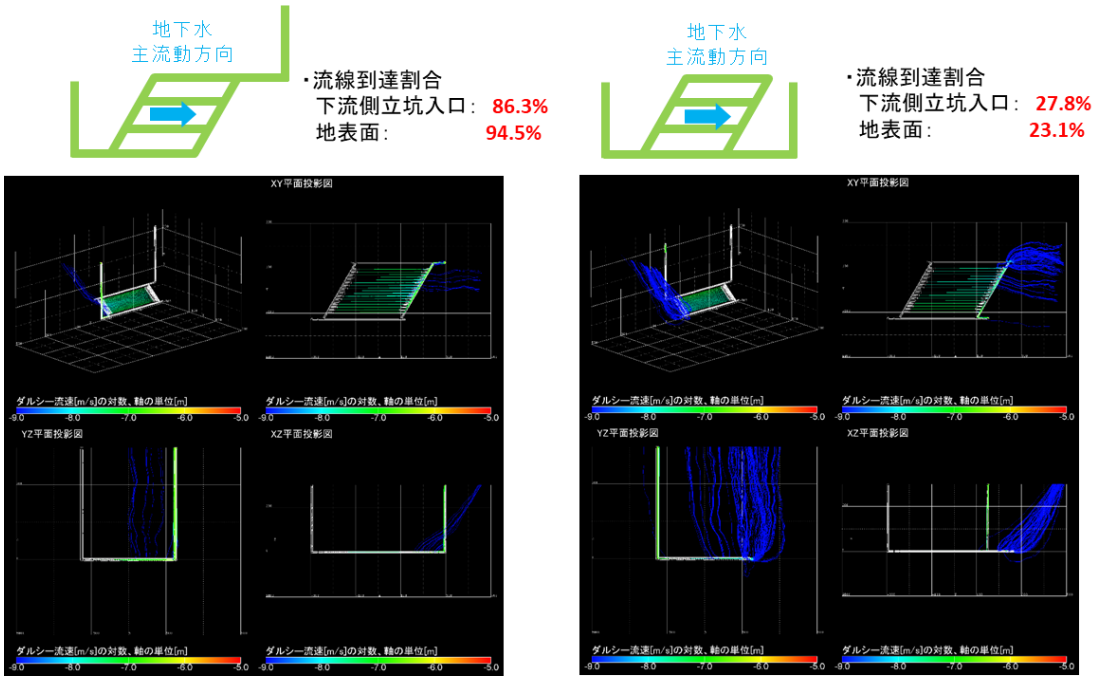
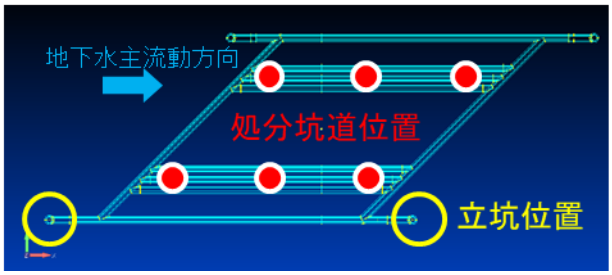
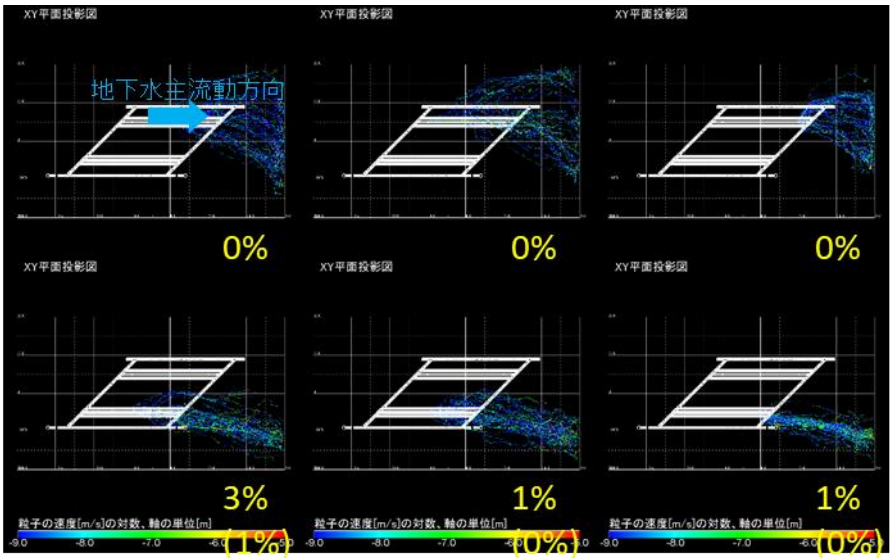


図 2.1-54　立坑配置を変更した場合における地下水流動解析結果





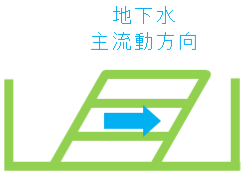
物質移行解析結果　*黄色の数字は、立坑上端の地表面到達粒子割合

図 2.1-55　物質移行解析結果（上図：立坑片側配置図、下図：粒子軌跡）

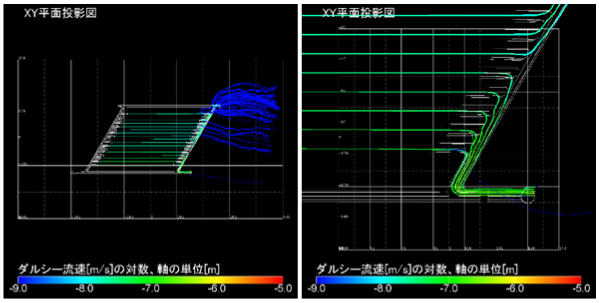
以上から、立坑片側配置という影響緩和策によって、シーリングシステム劣化の影響レベルは 2 ないし 1 と考えられるが、上記の通り、地下水流動としては立坑を経由して地表に至る流線が 20%程度あることから、影響レベル 2 とする。

上流/下流側の両立坑を処分パネルに対して同じ片側側面に配置し、さらに両立坑を結ぶ主要坑道とパネルの間に止水プラグを設定した場合（図 2.1-56）、処分パネル内を起点とする流線のうち立坑を介して地表に至るものは 1.6%であり大きく改善される。物質移行解析を行うと、立坑上端地表面に到達する粒子は、下流側立坑に近い処分坑道の処分孔を発生源とする粒子のうちのわずか 1%以下である（図 2.1-57）。

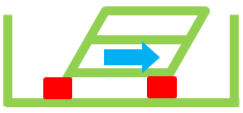
止水プラグなし



・流線到達割合
下流側立坑入口： 27.8%
地表面： 23.1%



止水プラグあり
（上流側入り口＆
下流側出口）



・流線到達割合
下流側立坑入口： 2.8%
地表面： 1.6%

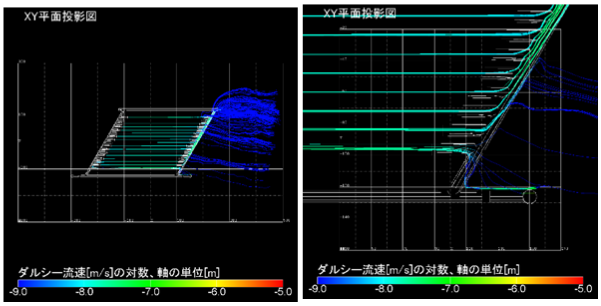
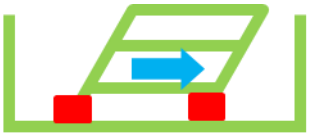
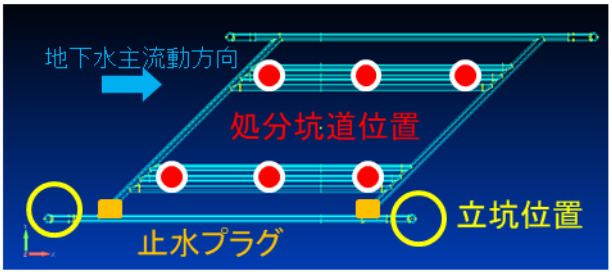
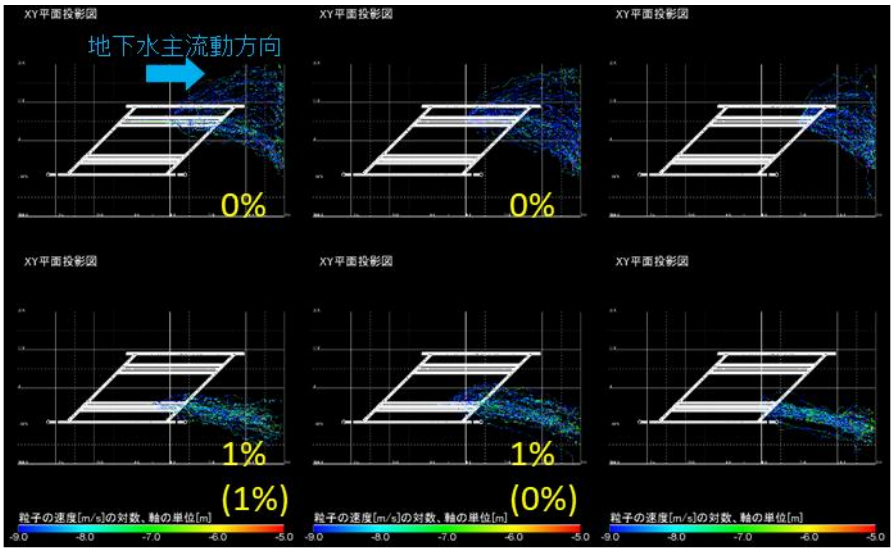


図 2.1-56　立坑片側配置に加え止水プラグの有無を考慮した場合の地下水流動解析結果







物質移行解析結果　*黄色の数字は、立坑上端の地表面到達粒子割合

図 2.1-57　立坑片側配置に加え止水プラグの有無を考慮した場合の物質移行解析結果
（上図：立坑片側配置図、下図：粒子軌跡）

以上から、立坑片側配置という影響緩和策によって、シーリングシステム劣化の影響レベルは 1 と考えられる。

上記の通り、立坑を経由して地表に至る流線が 1%程度しかないことからも立坑片側配置のみの対策よりも影響緩和効果が頑健なものになると期待できるが、埋め戻し材の劣化した処分坑道によるパネル内の短絡があるため健全時と同じ影響レベル 0 までには至らないものと考えられる。

なお、昨年度解析のモデルとの差異として、本年度の解析における止水プラグの配置は、主流から分岐した処分パネルを通る支流に対して堰き止めるように配置しており、かつ支流は別の経路に流れることができるため止水プラグの効果が高いと考えられる（図 2.1-58）。

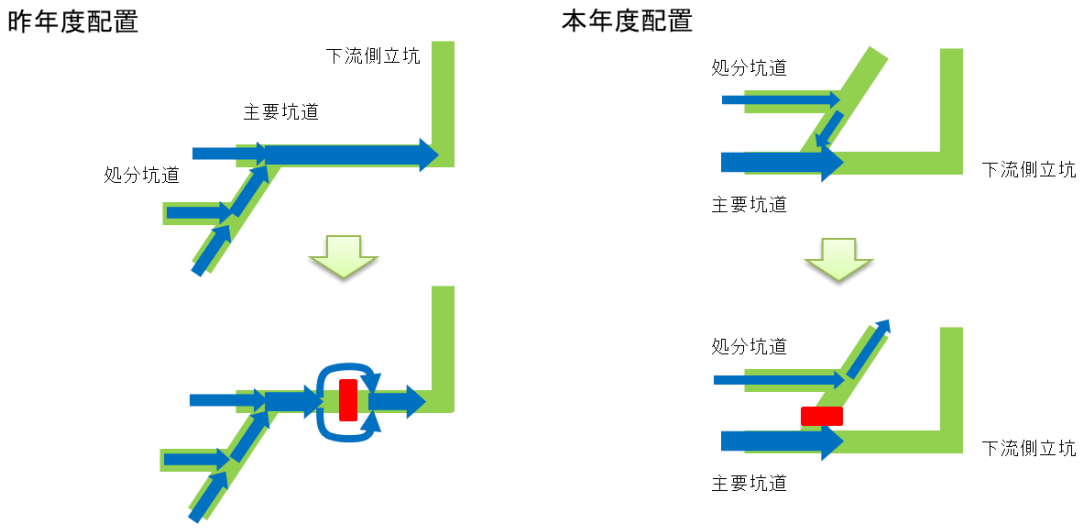


図 2.1-58　止水プラグの昨年度配置と今年度配置

(3)　シーリングシステムの安全機能の考え方の整理

近年のリスク評価において標準となりつつあるリスクマトリクスを用いてシナリオ（シーリングシステムの劣化による卓越移行経路形成等）の重要度を、生起することの蓋然性及び生起した場合の影響の大きさの両者を勘案して分類する。

無対策の場合のリスクが、種々の対策を講ずることによってどのように低減されるかを前項までの ESL モデルを用いた定量的評価等の結果を踏まえつつリスクマトリクスを用いて評価・視覚化することにより、対策に応じたリスクの低下を指標としてシーリングシステムの種々の安全機能を整理する。そして、講ずる対策の種類によって異なるリスク低減の経路が考えられるため、費用一便益の比較から効率的と考えられる対策の組み合わせ及び ALARA の観点から合理的と考えられる対策の範囲等を決定するための考え方を提案する。

1)　リスクマトリクスの概要

リスクマトリクスはリスク（何らかの望ましくない現象が発生した場合、それが影響を及ぼす確率）をマトリクス形式で表したものである。一般的には以下のように縦横軸を取る（HSE, 2006）。

- マトリクスの行（または列）は、生起確率を表し、事象が発生する確率に従ってラベル付けされ、生起確率が高いほど高い行（または右側の列）に配置される。
- マトリクスの列（または行）は、影響程度を表し、それが発生した場合に現象によって生じる影響の重大性に従ってラベル付けされ、潜在的な影響程度が大きいほど右側（または高い行）に配置される。

リスクアセスメントについて紹介している英国 HSE（Health and Safety Executive）のガイダンス（HSE ガイダンス，HSE, 2017）では、「リスクマトリクスは、よく知られている半定量的なリスク評価アプローチであり、COMAH（Control of Major Accident Hazards）レポートの作成を求めるオペレーターの間で広く使用されている」との記載がある。

2)　本研究の進捗を踏まえたリスクマトリクス

本項では、無対策の場合のリスクが、種々の対策を講ずることによってどのように低減されるかを前項までの ESL モデルを用いた定量的評価等の結果を踏まえつつリスクマトリクスを用いて評価・視覚化することにより、対策に応じたリスクの低下を指標としてシーリングシステムの種々の安全機能を整理するフレームワークを示す。なお、前項示したように、本来リスクマトリクスは事象の生起確率と影響の重大性を整理するものであるが、現時点では生起確率を論じることが可能なほど、十分なエビデンスがそろっていないことから、本検討では縦軸をエビデンスの充足性として整理することとした。

(i)　新第三紀堆積岩

図 2.1-59 に示すように、無対策の場合（What-if として埋め戻しをしない場合を想定）、影響レベルは人工バリア機能が発揮されず 3 となる。立坑及び地下坑道のベントナイト系材料による埋め戻しという対策を取る場合、ベントナイトの変質がないことが確かであれば卓越移行経路形成が回避される可能性がある。さらに、影響緩和策としてアクセス坑道をパネル片側配置とすれば、バイパス効果が期待できることから影響レベルは 2 に低減され、さらにバイパスと処分パネル間の止水プラグを設置することにより影響レベルが 1 まで低減する。結果として、リスクは相対的に低くなる可能性がある。

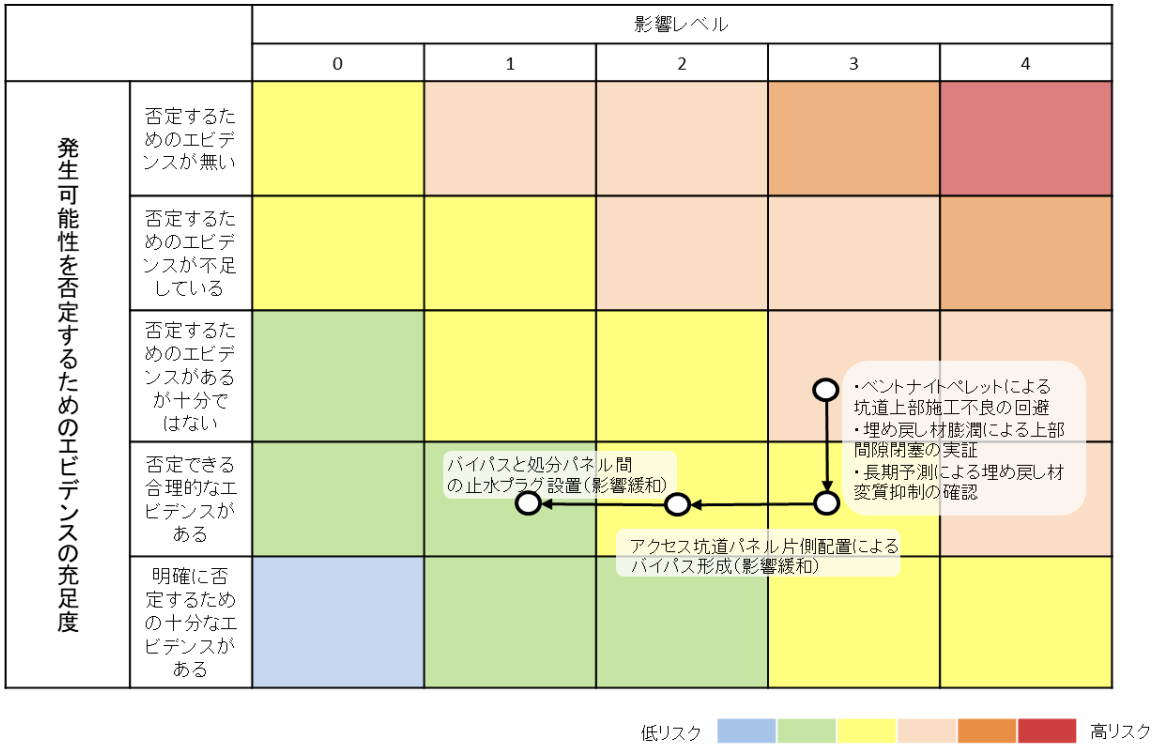


図 2.1-59　本研究の進捗を踏まえたリスクマトリクス（新第三紀堆積岩）

(ii)　深成岩

図 2.1-60 に示すように、無対策の場合（What-if として埋め戻しをしない場合を想定）、新第

三紀堆積岩とは異なり深成岩の場合には岩盤に核種が移行することから影響レベルは 1 となる。立坑及び地下坑道のベントナイト系材料による埋め戻しという対策を取る場合、ベントナイトの変質がないことが確かであれば卓越移行経路形成が回避される。さらに、前項までに ESL で評価した予防策、すなわちベントナイトペレットによる坑道上部施工不良の回避、埋め戻し材膨潤による上部間隙閉塞の実証、長期予測による埋め戻し材変質抑制の効果を確認することで、リスクは相対的に低くなる可能性がある。

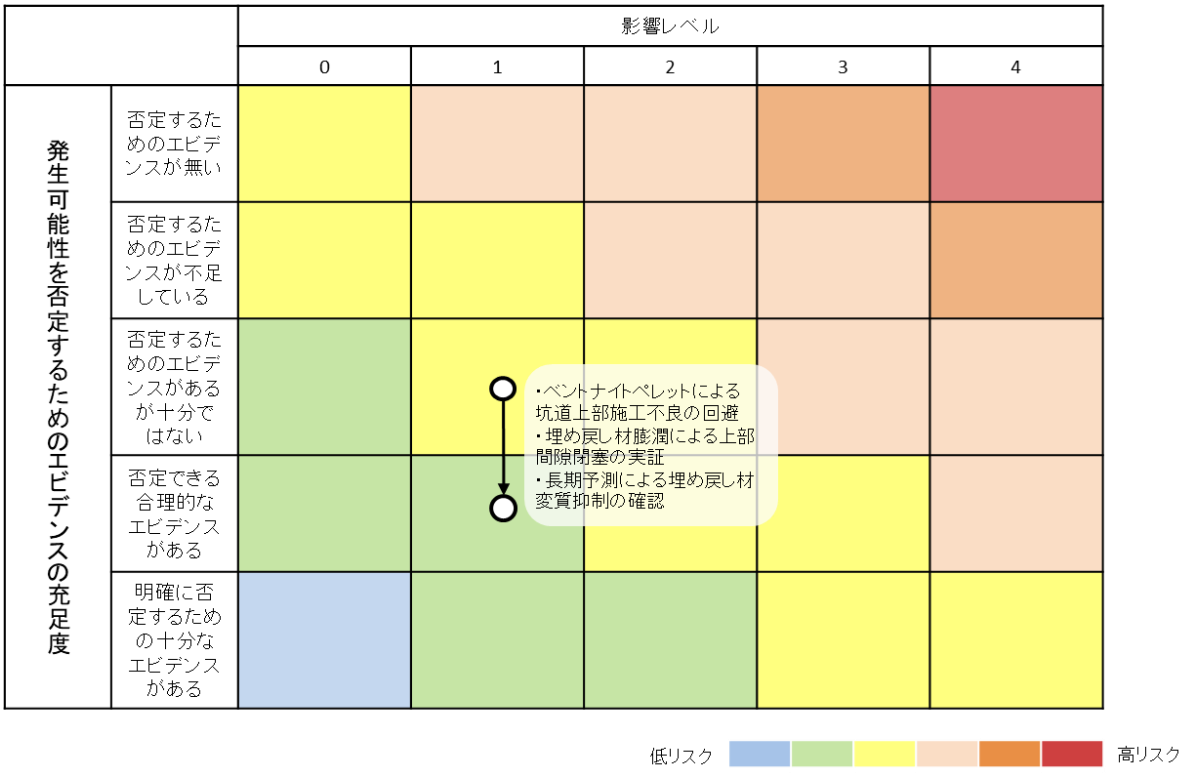


図 2.1-60　本研究の進捗を踏まえたリスクマトリクス（深成岩）

(4)　シーリングシステムの長期性能評価確保の観点から今後検討するべき課題の整理

シーリングシステムの性能劣化の回避や影響緩和の方策は多様な構成要素に関連するとともに、設計・施工、安全評価及び地質環境調査の諸分野を横断した取り組みが必要となる。また、あるリスクへの対策は別の構成要素や他の分野における新たな問題を派生させる、という問題解決の連鎖を考慮することが必要となることから、学際的なプロジェクト管理手法である Project issue management を用いて網羅的に課題を抽出するとともに、抽出された個々の課題について、目標及び期待される成果、候補となる技術、具体的な検討のアプローチなどを背景となる問題認識とともに整理する。

Project Issue Management (PIM)手法とは、プロジェクトのライフサイクルの中で生ずる様々な問題あるいは改善の機会等を issue として認識するとともに、それぞれの issue の生ずる領域（工程、作業、専門分野、担当部署等）に留まらず、影響の波及する可能性のある他の領域や問題解決の糸口を与える可能性のある他の領域を含めてプロジェクト全体で横断的に問題解決や改

善に取り組むための手法である。通常、Issue Management Template と呼ばれる表形式の整理表を用いることが多いが、ここでは英 NDA の TBURD（Technical Baseline Underpinning Documents）において用いられている Wiring diagram と呼ばれるモデル（Hamblin et al., 2013）を参考とした PIM ダイアグラムを作成することで、設計・施工、安全評価の分野で今後検討すべき課題について整理する。

シーリングシステムの性能劣化の回避や影響緩和の方策は多様な構成要素に関連するとともに、設計・施工、安全評価及び地質環境調査の諸分野を横断した取り組みが必要となる。このような背景から、本検討における PIM ダイアグラムでは、横軸にアクセス坑道、地下坑道、埋め戻し材、坑道支保・吹付、止水プラグといった処分場システムの構成要素および追加的対策の項目を挙げ、縦軸には設計・工学技術や安全評価といった分野を取ることとした。そして、問題（リスク要因）、ニーズ（対策の必要性）及びこれにこたえるための技術や評価研究等の対策を挙げて、個々のタスクの流れを矢印で示して可視化した。

例えば「地表水が処分パネルを横断する循環流路が形成される」という問題に対しては、その問題の予防あるいは緩和策として、パネルを横断する流動を回避することや地下坑道の止水性を確保するというニーズが生じる。パネルを横断する流動を回避するためにはこれまでに述べてきたように立坑のパネル片側配置によるバイパスという設計上の対策が考えられ、この対策の効果については、安全評価分野において地下水流動解析や物質移行解析による評価により裏付けていくことが必要になると考えられる。これらの解析結果から新たなニーズとして、両立坑を結ぶ坑道から処分パネルへの地下水流入を抑制するというニーズが抽出された場合には、両立坑を結ぶ主要坑道と処分パネル間の接続部への止水プラグの設置が有効な対策として挙げられる可能性がある。この対策に対して安全評価分野においては、地下水流動解析や物質移行解析によってその効果を評価することが必要になる。さらにこの安全評価を踏まえて追加的対策として処分孔から上部行動への物質移動を制限するというニーズが生じた場合には、前項までに述べてきたような処分孔の延長や処分孔上部への低拡散プラグの設置といった設計･工学技術的な対策が考えられ、安全評価分野においては、さらにその対策の有効性を物質移行解析等で評価することが必要になると考えられる。

一方で、地表水が処分パネルを横断する循環流路が形成されるという問題に対して、パネルでの流動を回避するために立坑の片側配置という対策を取る場合には、パネル内部の坑道の一部のカーブが鋭角になる可能性があることから廃棄体等定置車両の円滑な移動経路の確保というニーズが新たに生じ得る。このニーズに対しては、両立坑を結ぶ主要坑道と処分パネルの取付き部の鋭角な交差の回避（アールをつける等）あるいは車両の後退を含めた操業といった対策が考えられる。

地表水が処分パネルを横断する循環流路が形成されるという問題に対して、地下坑道の止水性を確保するためには、埋め戻し材にベントナイト系材料を用いることで止水するという対策が考えられるが、この場合、本検討で着目したように、坑道上部の乾燥密度の低密度領域が形成することへの対策のニーズが生じることが考えられる。このニーズに対しては、ベントナイトペレットによる施工により十分に埋め戻し材を充填できることを試験によって示すことや、上部間隙を残した埋め戻し材冠水試験・膨潤試験をおこない埋め戻し材の膨潤によって上部間隙が充填され

ることを確認する必要があると考えられる。さらに、セメント影響によるベントナイトの変質・劣化が回避できるか否かについては、安全評価分野にて反応輸送解析によって埋め戻し材の長期健全性評価を行って裏付けていくことが考えられる。

上述の内容を含む、PIM ダイアグラムを図 2.1-61 に示す。なお、図 2.1-61 は現時点での整理結果を示したものであり、今後の検討結果を踏まえた上で、適宜修正・更新されるものである。

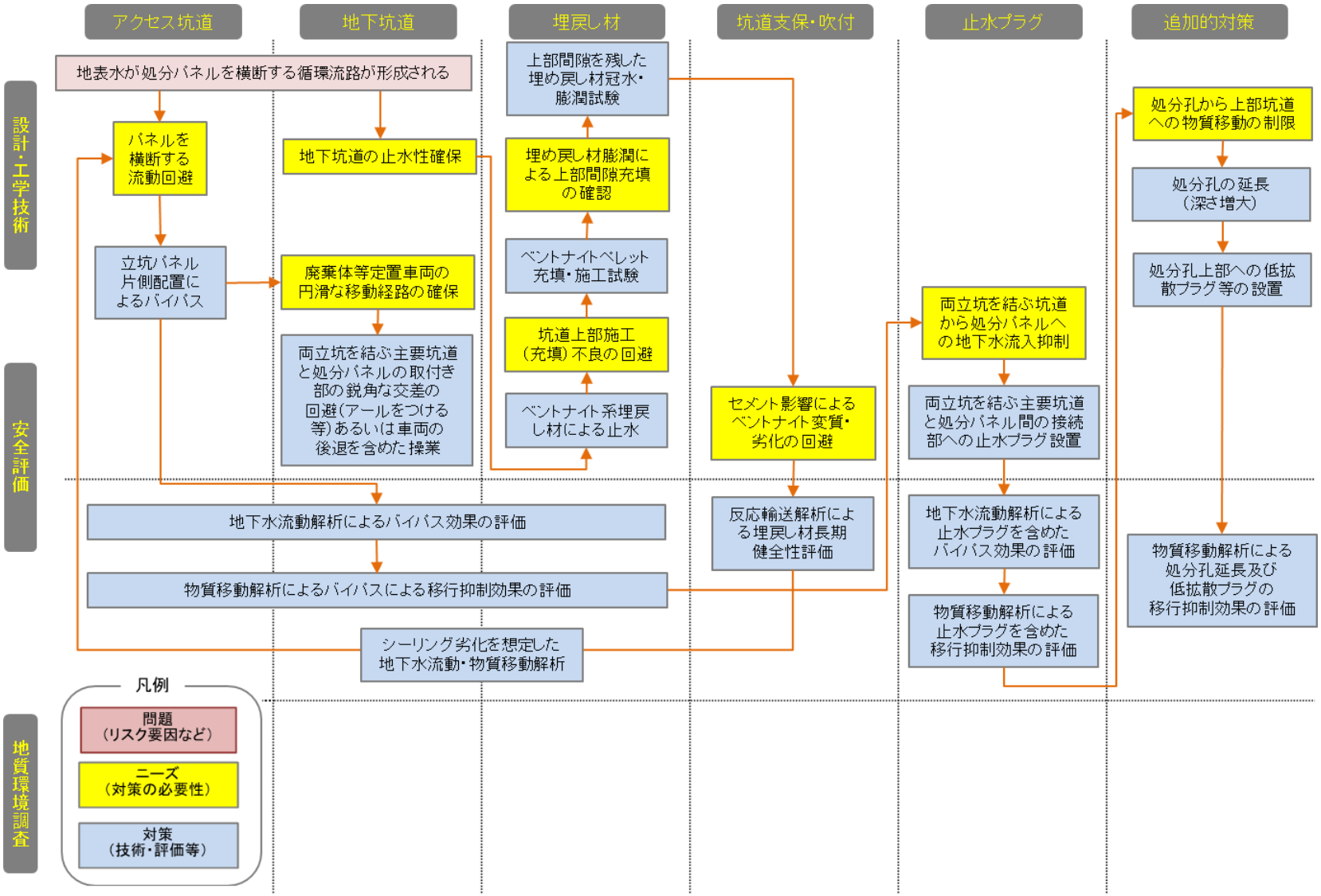


図 2.1-61　本研究の進捗を踏まえた予防や影響緩和策に関する多角的な問題解決の連鎖（Project Issue Management）

(5) まとめ

本章ではシーリングシステムの劣化回避・予防策としての有効性を検証するとともに、シーリングシステムの安全機能を確保する上での施工との連携の在り方について検討を行った。

埋め戻し材の施工に関連する予防策の効果に関する蓋然性について、ESL（Evidence Support Logic）を用いた定量的な評価を試行した。本手法ではエビデンスと検討の対象となる命題との対応付け、命題間の論証関係、エビデンスの重要度の判断などを可視化し、検討の対象となる命題の成否の判断について透明度や追跡性を持たせることができる。今回検討した主命題「施工時の上部間隙形成によって坑道埋戻し材が止水性を失うことはない」については、評価結果が Ratio plot 上で「命題が成立することの方が確からしいが不確実性が残っており確言できない」という領域に位置づけられたことから、シーリング劣化の蓋然性は「低い」と判断された。今回 ESL モデルの個々のエビデンスの判断は可能な限り客観的な評価に基づいて実施したが、今後 ESL モデルを適切に拡充することや他分野の専門家との協働等によってエビデンスを拡充することにより、より判断の確度が上がるものと考えられる。

多重バリアシステムの安全機能の有無に着目した影響レベルを設定し、シーリングシステムの劣化時の緩和策の効果について検討した結果、深成岩の場合、処分坑道を地下水主流動方向と直交する方向に掘削することによって、上部坑道埋め戻し材が劣化し高透水性となった場合（シーリングシステム劣化ケース）でもこれが流動経路となって下流側立坑に至る短絡経路となることは回避することができることが示された。新第三紀堆積岩の場合は、立坑片側配置及び止水プラグの設置により影響緩和効果が頑健なものになると期待できるが、埋め戻し材の劣化した処分坑道によるパネル内の短絡があるため健全時と同じ影響レベル 0 までには至らないことが示された。また、発生可能性を否定するためのエビデンス充足性と影響レベルを縦横軸としたリスクマトリクスによって上記の予防策・緩和策の効果について整理を行った。

最後にシナリオの蓋然性、シナリオの重要度、シナリオの回避・予防策の３つの観点からシーリングシステムの安全機能の考え方について PIM ダイアグラムを用いて整理し、シーリングシステムの長期的性能確保の観点から、設計・施工、安全評価の分野で今後検討すべき課題について整理を行った。

2.1.4 今年度成果のまとめ

以下に、今年度の成果について示す。

・シーリングシステムの長期変遷に関する現象理解

埋め戻し材が顕著に変質する可能性が高いのは、坑道と新鮮な地下水が接触し続けるような坑道最上流部や、岩盤亀裂との交差部のような領域のみであることが示唆された。ただし、本解析は主にモデルの最適化や計算時間の点で課題が残るため引き続き検討を実施することが必要と思われる。なお、ベントナイトのゾル化に関する検討についても、予察解析の結果を用いて検討しており、今回検討したケースにおいては、埋め戻し材間隙水の条件がベントナイトのゾル化領域にあるケースは存在しなかった。

・シーリングシステムの安全機能が低下することを想定した物質移行解析

深成岩については、シーリングシステムが劣化し安全機能が喪失することを仮定した場合であっても、立坑地表面に到達する粒子はごくわずかである可能性が示唆された。一方、新第三紀堆積岩の場合、上記の過程において、一部の粒子が立坑地表面に到達する可能性が示唆された。た

だし、立坑をパネルに対し片側に配置することや、止水プラグの効果によって、上記地表面に到達する粒子の割合を低減することが可能であることが示唆された。

・シーリングシステムの性能劣化の影響回避や緩和策の検討を踏まえた性能の考え方の整理

シナリオの成立条件、個別プロセスの起こりやすさ、安全機能へのインパクトなど複数の軸を考慮した、シナリオの蓋然性や重要度の評価を ESL(Evidence Support Logic)やリスクマトリクスを用いて試行し、シナリオの蓋然性、シナリオの重要度、シナリオの回避・予防策の 3 つの観点からのシーリングシステムの安全機能の考え方を整理した。また、シーリングシステムの性能劣化の回避や影響緩和の方策は多様な構成要素に関連するとともに、設計・施工、安全評価及び地質環境調査の諸分野を横断した取り組みが必要となることから、学際的なプロジェクト管理手法である PIM（Project Issue Management）を用いてシーリングシステムの長期的性能確保の観点からの設計・施工、安全評価の分野で今後検討すべき課題について整理した。

参考文献

秋山吉弘，寺田賢二，山田淳夫，地下空洞型処分施設施工技術の確証試験の概要，RWMC-TRJ-15001，2016.

ANDRA, Dossier 2005 Argile Tome Architecture and management of a geological repository, 2005.

電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構，TRU 廃棄物処分技術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ―，JNC TY 1400 2005 013，2005.

原子力発電環境整備機構，包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03，2021.

原子力発電環境整備機構，処分システムに求められる閉鎖性能の考え方－処分場パネル規模の水理に関する試解析－，NUMO-TR-06-01，2006.

原子力環境整備促進・資金管理センター，原環センター2015 年度技術年報，2016.

Hamblin et al, NDA-RWMD Support for NDA RWMD GDF Programme, Upstream Optioneering: Optimised Management of Orphan Wastes, 2013.

HSE, A Simplified Approach to Estimating Individual Risk, https://www.hse.gov.uk/research/misc/vectra300-2017-r03.pdf

HSE, Guidance on Risk Assessment for Offshore Installations, https://www.hse.gov.uk/offshore/sheet32006.pdf

J., Blackford, S., Beaubien, E., Foekema, V., Gemeni, S., Gwosdz, D., Jones, K., Kirk, J., Lions, R., Metcalfe, C., Moni, K., Smith, M., Steven, J., West, F., Ziogou, RISCS Project: A guide to potential impacts of leakage from CO_2 storage. F. British Geological Survey, 2014.

核燃料サイクル開発機構，わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－分冊 2　地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.

日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　地層処分施設閉鎖技術確証試験　報告書，2019.

日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書，2019.

日本原子力研究開発機構，平成 26 年度　地層処分技術調査等事業　使用済燃料直接処分技術開発　報告書，2015.

日本原子力研究開発機構，平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　処分システム評価確証技術開発 5 ヵ年成果報告書，2018.
杉田裕，川上進，油井三和，牧野仁史，澤田淳，三原守弘，栗原雄二，断層に至るまでの核種移行に着目した処分場の閉鎖性能についての検討，原子力バックエンド研究，10，No.1-2，pp102-112，2004.
杉田裕，高橋美昭，浦上学，北山一美，藤田朝雄，川上進，梅木博之，油井三和，宮本陽一，処分システムに求められる閉鎖性能の考え方－坑道交差部における水理解析－，JNC TN8400 2005-016，2005.
S., joyce, T., Simpson, L., Hartley, D., Applegate, J., Hoek, P., Jackson, D., Swan, Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark, SKB R-09-20, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010.
SKB, Groundwater flow modelling of an abandoned partially open repository, R-10-41, 2010.
S. O., Funtowicz and J. R., Ravetz, Uncertainty and Quality in Science for Policy, Dordrecht, Kluwer, 1990.
山下亮，今井久，雨宮清，我が国を対象とした地下水流動解析，JNC TJ7440 99-024，1999.

2.2 埋め戻し材の再冠水挙動、ベントナイトの流出・侵入

2.2.1　背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分坑道やアクセス坑道といった地下空間が卓越した放射性核種の移行経路とならないように、ベントナイト系材料である埋め戻し材で埋め戻すことが検討されている（例えば、NUMO, 2021）。埋め戻し材はベントナイト系材料が有する膨潤性や低透水性などが発揮されることにより、放射性核種の移行を妨げることが期待されている。既往の研究（原子力機構・原環センター，2019）では、埋め戻し材やプラグといったシーリングシステムが長期変遷によってその安全機能が失われる状態に至る際の現象・メカニズムの整理を行っており、その中で、埋め戻し材中のベントナイトがパイピング（piping）や浸食（erosion）によって流出し、その結果ベントナイトの乾燥密度の低下が生じることが、埋め戻し材に期待する安全機能を損なう可能性のある現象として抽出されている。スウェーデンの SKB では、特に施工初期から再冠水までの期間における、パイピングや浸食のメカニズムや発生条件（湧水量、材料等）を把握するための検討がなされており、そのメカニズムには不確実性が多分に含まれることから継続した検討が必要としつつも、坑道の再冠水により埋め戻し（Backfill）全体の動水勾配が解消されることで、最終的にパイピングや浸食によって生じた間隙は閉塞することが指摘されている（例えば、SKB, 2010）。また、パイピングや浸食が生じる要因の一つとして施工方法や手順に係る事象についても指摘されている。SKB では埋め戻し材の施工に関し、ベントナイトのブロックとペレットを併用して充填する方法がとられており、特に湧水量が 0.25L/min～1.0L/min である場所については、ジオテキスタイルによる湧水の分散（Sandén and Börgesson, 2014）や排水対策を講じる必要があることが指摘されている。一方、わが国でも、主に緩衝材を中心にパイピングやエロ―ジョンに関する検討が進められており（例えば、原子力機構・原環センター，2019）、湧水量との関係性などの評価が原位置試験等を通じて進められてきている。しかし、埋め戻し材については、日本における具体的な処分環境およびそれに応じた埋め戻し方法（材料仕様や施工方法等）が決定していない状況もあり、パイピングや浸食に関する検討が十分になされていない。このような状況を踏まえると、現状でとり得る埋め戻し方法毎に、埋め戻し材のパイピングや浸食現象の発生条件や詳細メカニズムを把握し安全機能に与える影響を評価しておくことは、今後、処分事業の進展によって具体化される埋め戻し材の施工概念はもとより、埋め戻し材の設計要件等の決定や、長期的な埋め戻し材の性能を評価する際の初期条件を設定するための重要な知見となり得る。

以上のことから、本検討では、日本で想定し得る地質環境条件を考慮した上で、材料仕様や施工方法に応じたパイピングや浸食の発生条件を把握するとともに、埋め戻し材の安全機能への影響度の評価に基づき、懸念すべき事象を整理する。なお、本検討では、パイピング（piping）や浸食（erosion）によって主にベントナイトが間隙や亀裂へ物理的に流される現象を流出・侵入と定義する。

2.2.2　令和 2 年度の実施内容

今年度はパイピングや浸食が生じ得る条件の絞り込むために、主に SKB における検討事例の調査を行い、懸念すべき状態・因子の整理を行った。また、事例調査の結果と国内で想定される地質環境条件を踏まえた上で、着目すべき条件のうち、水質および材料形態の 2 条件を考慮した。

2.2.3　令和 2 年度の成果

2.2.3.1 海外事例調査

SKB では竪置き（KBS-3V）と横置き（KBS-3H）の 2 つの処分概念が検討されているが、ここでは、竪置き方式における処分坑道の埋め戻しを前提とした検討事例について以下の 3 項目に着目して、調査を行った。

・流出・侵入の発生メカニズムと Key となる現象や条件について
・流出・侵入に起因した安全機能の低下（変化）の考え方
・日本と海外の違いを踏まえた埋め戻し材の流出・侵入に係る試験の課題

(1)　流出・侵入の発生メカニズムについて

SKB では埋め戻し材におけるパイピング・浸食のプロセスを以下のように考えており（SKB, 2010）、埋め戻し材におけるパイピングと浸食の発生状況について、図 2.2-1 のように整理している。

・処分トンネルへの水の流入は、主に亀裂を介して行われ、埋め戻しの湿潤化に寄与する。
・亀裂から流れる水が、埋め戻し材が吸収できる水量よりも多い場合、亀裂内に水圧が生じ、その結果、埋め戻し材全体に動水勾配が作用する。
・岩盤表面に近い埋め戻し材は、ペレットの充填材で構成されており、隙間が大きい。したがって 、埋め戻し材は亀裂内からの高い水圧による水の流入を止めることができない。ペレットの表面はゲル状であり、水がベントナイトの中に深く入るにつれて時間とともに大きくなるため、最初のうちはゲルが柔らかすぎて水の流入を止めることができない。ペレットの製造過程で生じたベントナイトの粉末は、強度の小さなゲルになる。
・その結果 、パイピングが形成され、流路が形成され、水流が継続し、ペレット間の空間に水が充填され、柔らかいゲル状のペレット表面やベントナイト粉末が浸食される。
・時間の経過とともに発生する可能性のあるプラグとプラグ内の漏水のシーリングは、流量を減少させ、埋め戻し材からプラグへ向かう動水勾配を移動させ、埋め戻し材が膨潤するする時間を与える。
・発生したパイピングは、ブロックが十分に湿潤してペレットの膨張および圧密を引き起こし、それによって浸食に対する十分な抵抗をもたらされたときに閉鎖する。

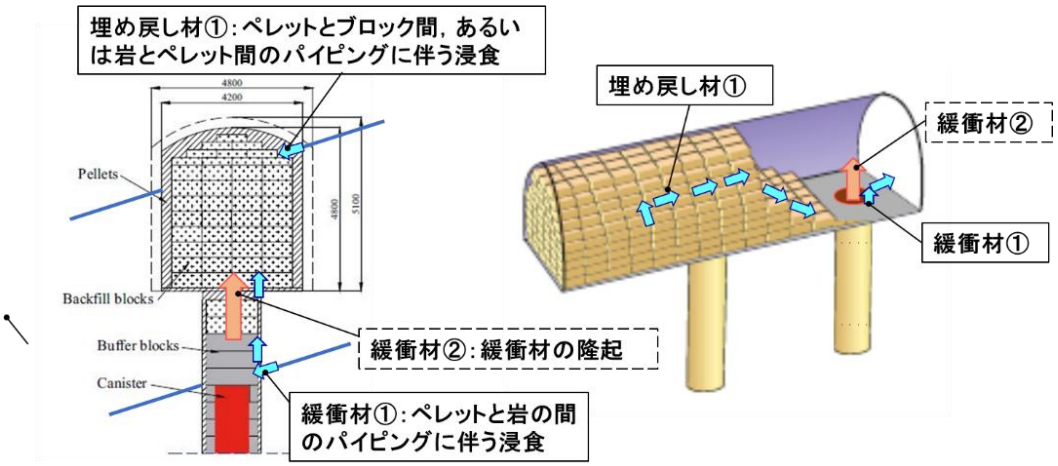


図 2.2-1　埋め戻し材と緩衝材のパイピング・浸食の発生状況の模式図

埋め戻し材で発生し得るパイピングや浸食は処分孔に施工される緩衝材の膨潤による鉛直方向の膨潤圧の影響や、埋め戻しの施工サイクルによって大きく変わるものの、処分坑道端部へのプラグの設置によってパイピングは閉塞へと向かい、それに応じて浸食も生じなくなると考えられている。SKB (2010)では現時点でパイピングや浸食に関する知見が十分であるとしつつも、いくつかの不確実性が挙げられており、この不確実性を低減するための検討が引き続き必要であることが指摘されている。

(2) 流出・侵入に起因した安全機能の低下（変化）の考え方

SR-Site における安全評価では、パイピングおよび浸食は埋め戻し材が完全に飽和し均質化する前にのみ起きるとしており、この期間生じたパイピングについては使用する埋め戻し材（IBECO RWC-BF）の膨潤性能によって閉塞するとしている（SKB, 2011）。したがって、パイピングおよび浸食に起因した埋め戻し材の安全機能の低下は短期であり、長期的な影響は考慮していない。一方で、緩衝材を含め、化学的浸食（chemical erosion）については、処分システムの長期安全への影響という観点で重要な現象と考えられている（SKB, 2011）。

(3) 日本と海外の違いを踏まえた埋め戻し材の流出・侵入に係る試験の課題

SKB ではベントナイトブロックとベントナイトペレットを併用して埋め戻しが行われることを受け、多様な規模・条件での試験が行われてきている。このうち、主な検討事例を表 2.2-1 に示す。表 2.2-1 には、室内規模の検討事例を整理しているが、さらに大きな実規模スケールの埋め戻し試験も行われている（例えば、Keto et al., 2009）。このような検討事例を踏まえた上で、日本の坑道埋め戻しを考した場合に、流出・侵入現象に影響を及ぼしうる条件の違いは下記であると考えられる。

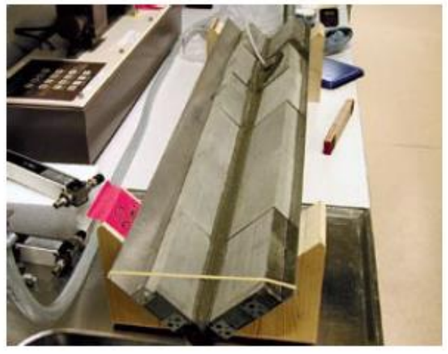
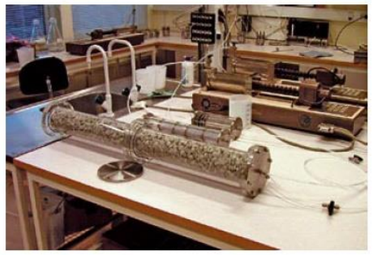
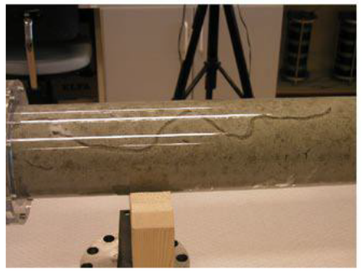
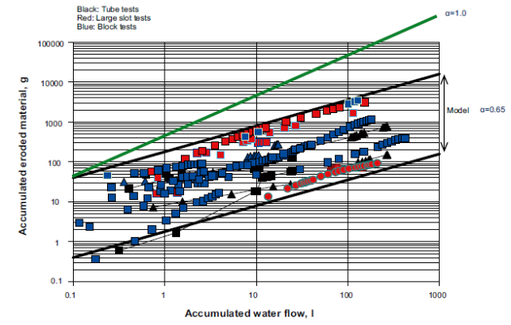
- 埋め戻し材の設計：SKB はプレキャスト材（ブロックおよびペレット）を使用することが計画されているが、日本では具体的な工法を検討中
- 坑道の構成要素の違い：日本においては坑道を展開するにあたり、支保工の設置は前提と考えられ、その際コンクリート材料を使用
- 地下水の流入量の違い：海外と比較し、相対的に坑道掘削時の湧水量が多いことが想定される

これらを踏まえ、日本の地質環境条件を考慮した上で、埋め戻し材の流出・侵入現象を把握するための試験においては下記の課題があると考えられる。

- 埋め戻しの設計断面（構造仕様、施工方法）を定め、これを試験条件として反映する。
- 施工プロセスがパイピング・浸食の発生有無や程度に影響を及ぼすことが考えられることから施工プロセスを考慮した条件設定が必要
- コンクリート材料との境界部で発生することが想定されることから、材料境界の状態を再現可能な試験系を構築する必要
- 亀裂からの湧水は局所的に発生することが考えられることから、このような状態を考慮可能な試験系を構築する必要
- SKB が用いた浸食の解析モデル（経験モデル）の適用範囲は、流入量 0.1l/min～0.01 であり、上記の試験系における試験結果を解析可能なモデル化／解析手法を整備する必要性。
- コンクリート材料の長期変遷に伴い、埋め戻し材施工後に再度パイピングや浸食が発生し得るかを確認する試験の必要性

なお、化学的浸食（chemical erosion）については、SKB で想定している「氷床の融解に伴う地表水の涵養」が生じ得る場所は日本においては限定されると考えられることから、本検討では取り扱わないこととした。

表 2.2-1　SKB における埋め戻し材の流出・侵入に係る主な検討事例

	ブロック浸食試験	アクリルチューブを用いたペレット浸食試験	大型スロットテスト	解析
目的	ベントナイトブロックの浸食特性の確認 累積流量と浸食量の評価	ベントナイトペレット中の微粒子が浸食特性に与える影響の把握	埋め戻しの傾斜箇所における浸食現象の理解	浸食モデルの構築
実施条件等	・長さ 1mの鋼製溝にベントナイトブロックを入れ、ブロックの表面に水を流入。 ・材料として、Friedland clay、IBECO-RWC-BF、Asha を章 ・使用した水の流入量（0.01、0.1、1L/min）および塩分濃度（1%および 3.5%）を変化	・プレキシガラス製のチューブ（内径 0.1m、長さ 0.5m）を使用した通水試験を実施。通水はポイントインフローが適用されたともに、塩分濃度を変えた試験を実施 ・材料として、MX-80、Cebogel QSE、Minelco（以上は Keto et al, 2009）、IBECO-RW-BF(Johannesson et al, 2010)を使用。 ・水道水および塩水（1%および 3.5%）を使用 ・地下水流入量は 4 パターン（0.001、0.01、0.1、1L/min）で実施	・2m×1m×0.1m の人工スロットにベントナイトペレット（MX-80,Cebogel QSE）を充填。その際に、傾斜部分を構築、一定流量で注水 ・スロットの側面（底から 0.5 m、端から 0.3m）から一定の流入量（0.01, 0.1, 1 l/min）で注水 ・試験時間：8～70hr	地下水の流入による埋め戻し材の浸食を対象とし、埋め戻し施工中～間隙が閉塞、もしくは試錐プラグの止水によって埋め戻し部の間隙が飽和した後、埋め戻し内の高差圧が解消するまでの期間を取り扱う。経験モデル（$m_s=\beta\cdot(m_w)^{\alpha}$, m_s:浸食されるベントナイトの累積量, m_w:浸食する水の累積量, β:ある累積流量における浸食量の範囲から決定される定数, α:両対数軸の傾き）に基づき、浸食速度を算出
主な成果	・浸食速度は塩分濃度の影響を受け、水道水、1～3.5%塩分濃度の水で浸食水中のベントナイト含有量がそれぞれ 0.1%～0.4%、0.6%～2.7%であった。 ・ブロックの密度が大木ほど浸食量は小さい。 ・試験条件（試験時間 8，24，55 時間）により浸食速度が時間とともにわずかに減少する傾向が見られた  事前圧縮ブロックの浸食試験（SKB, 2008）	・主に通水初期にベントナイトの微粒子の影響により強い直速度が増加。ただし、浸食現象は塩分濃度、流速、流動分布、空隙の大きさなどの因子の組み合わせに依存している可能性   チューブ浸食試験（上図：SKB, 2008、下図：Keto et al 2009）	・水みち（パイピング）が発生した時間と、この時間までに試験片が吸収した水量は、材料の種類（粒度分布など）と時間当たりの流入量によって異なる。小さい流入量（≤0.1l/ min）でのベントナイの吸水と濡れのパターンは異なった。 ・MX-80 ペレットと Cebogel ペレットの濡れパターンを比較するとより高い流入速度（1 L/min）では、最初の水の透過時間は MX-80 と Cebogel ペレットの両方で同じ（20 分）であったが、テストの終わりに Cebogel ペレットは MX-80 ペレットより多量の水を吸収した。また MX-80 ペレットには明確な流出水みち（パイピング）が形成された。 ・ペレットの摩擦角（目視による充填斜面の角度）は設置時約 45°でありテスト中に変化しなかった、つまり、ペレット充填後の部分的な飽和はペレットの傾斜角に影響を与えなかった。 大型スロット試験	・300m の処分トンネルを模擬し、ベントナイトブロックの充填率 80%で施工した状況において、流入速度 1L/min を仮定した場合、水で空隙を満たすのに要する時間が 1.43 年、浸食速度 0.01～1.0g/L と算出された。  SKB で実施した浸食結果をプロットした図。下側の境界線は β=0.02、上側の境界線は β=2.0 に対応する。α=0.65 に対応する境界線の傾きは図の動機付けになっている。α=1.0 は、一定の浸食速度（旧モデル）に該当する。
参考文献	Keto et al (2009), Johannesson et al (2010), Sandén et al (2008), SKB (2008)	Keto et al (2009), Johannesson et al (2010), Borgesson et al (2006), Sandén et al (2008), SKB (2008)	Keto et al (2009), Sandén et al (2008), SKB (2008)	Keto et al (2009), SKB, (2008)

2.2.3.1 予備試験

(1) 試験装置

水平坑道や立坑の埋め戻し材を対象にコンクリート支保工と埋め戻し材境界部における埋め戻し材の流出発生条件を把握するための試験に先立ち、試験概念、試験方法、試験条件、取得するデータなどを詳細に検討するための予備試験を行った。

予備試験には、図 2.2-2 に示す試験容器を用いた。試験容器の内径は図 2.2-3 に示すように、縦 200mm、横 200mm、深さ 80mm である。また、側面に膨潤圧を測定するための圧力計を 2 箇所設置している。このような試験容器を用いて透水試験を実施する場合、通常は図 2.2-4 に示すように、供試体の上下に金属焼結フィルターを設置し、材料の流出を防ぐために供試体と金属焼結フィルターとの間に濾紙やメンブレンフィルターを設置する。今回の予備試験では、ペレットへの浸潤に伴う流出を確認することを目的とするため、図 2.2-5 に示すように下流側の金属焼結フィルターのメッシュを粗くし、ベントナイトが流出できるような構造とした。また、ブロックとペレットを併用した試験を行う場合、図 2.2-6 に示すように下流側の金属焼結フィルターを分割設置し、材料毎に排水を行える構造となっている。金属焼結フィルターは 32 メッシュの金属焼結フィルター（目開き 500μm）を使用することとした。

図 2.2-2 予備試験に使用する容器

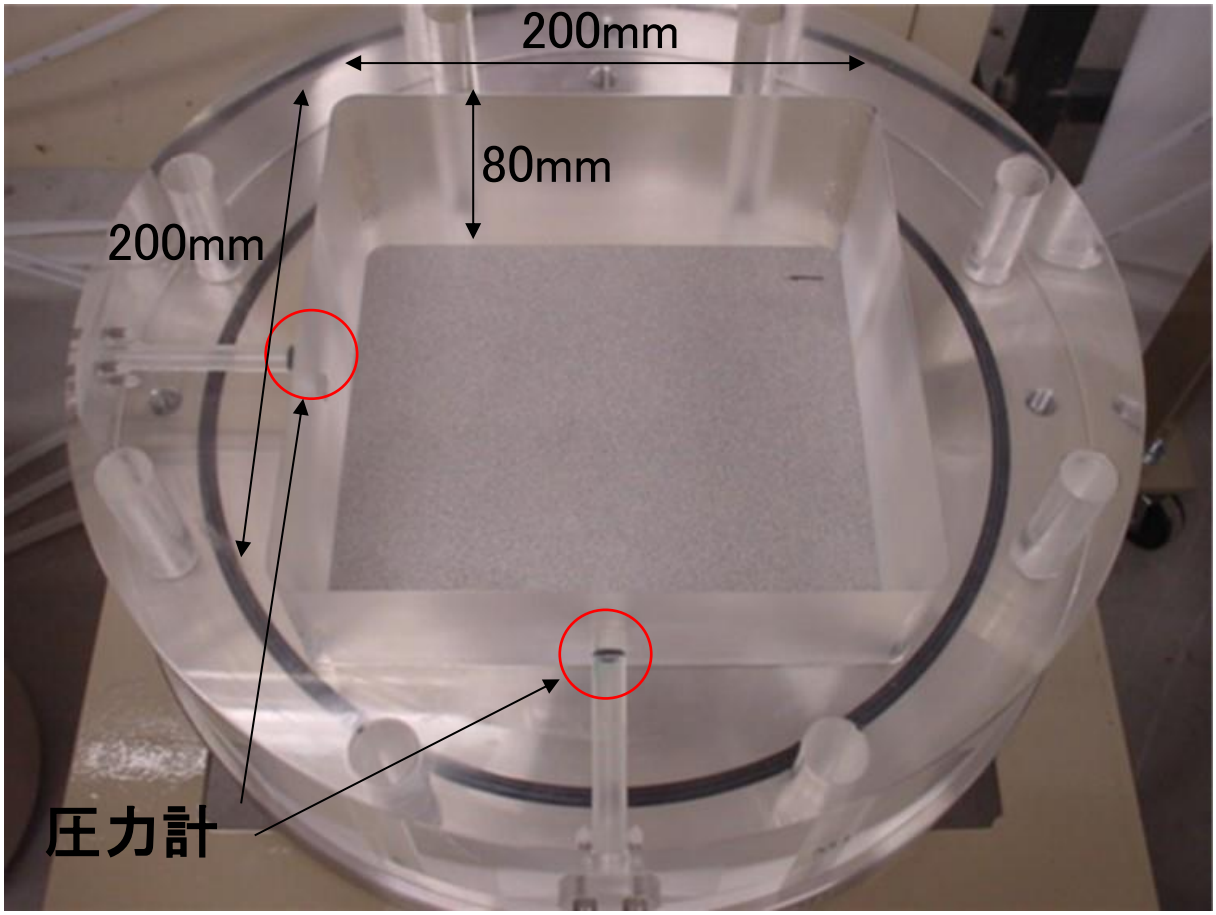


図 2.2-3　予備試験に使用する容器の寸法

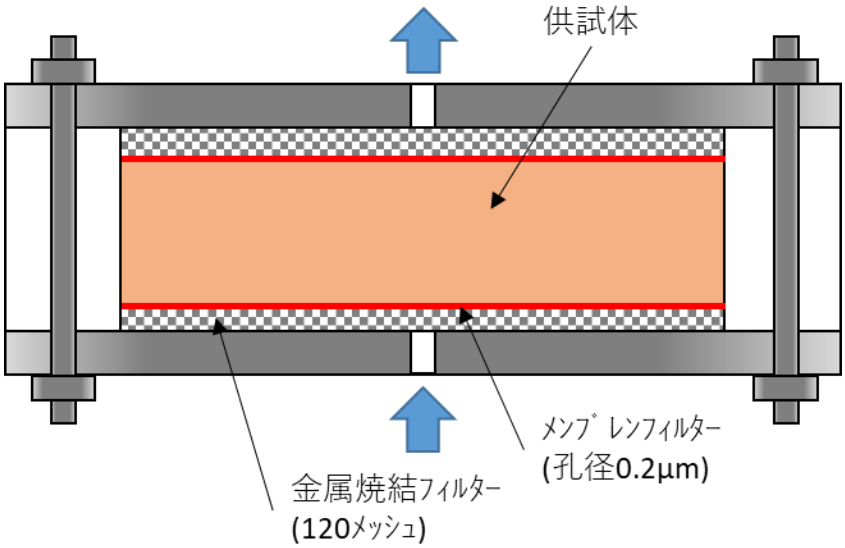


図 2.2-4　通常の透水試験

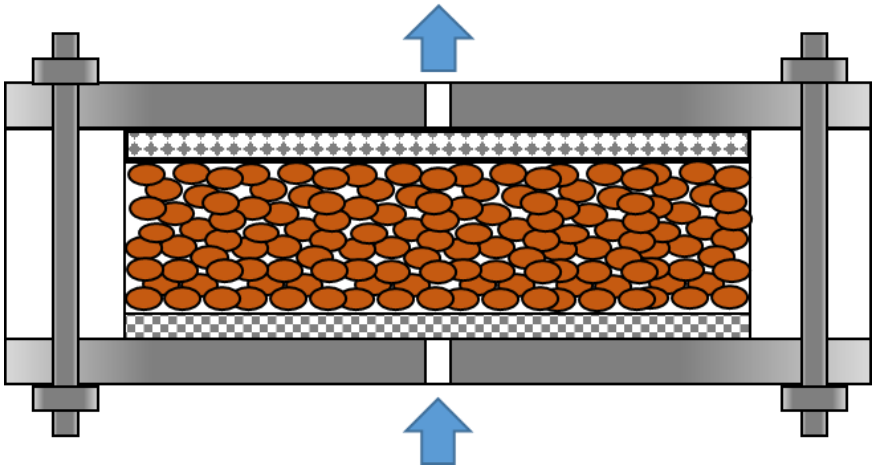


図 2.2-5　ペレットを用いた浸潤試験（流出を考慮）

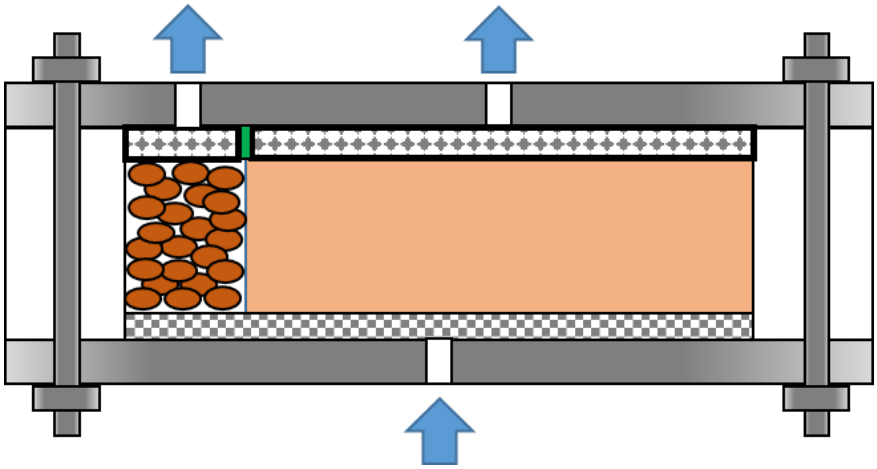


図 2.2-6　ブロックとペレットを用いた浸潤試験（流出を考慮）

(2)　通過流量の確認試験

予備試験における上流側の境界条件としては、1）流量固定、2）水頭固定の 2 種類が考えられる。ペレットを用いた試験においては、流入初期はペレット間の空隙が大きく、浸潤に伴うベントナイトの膨潤により流入と共に通過流量は減少していくため流量固定で試験を行うことは難しいと考えられた。そこで、水頭固定にした場合、どの程度の水頭差が適切かを確認するための試験を実施した。図 2.2-7 に示すように、金属焼結フィルターを通過した流量を計測し、試験装置が満水になるまでの時間から時間当たりの通過流量を算出した。水頭は 20cm、50cm および 100cm の条件とした。試験結果を表 2.2-2 に示す。水頭が 100cm の時の通過流量が約 1L/min であった。

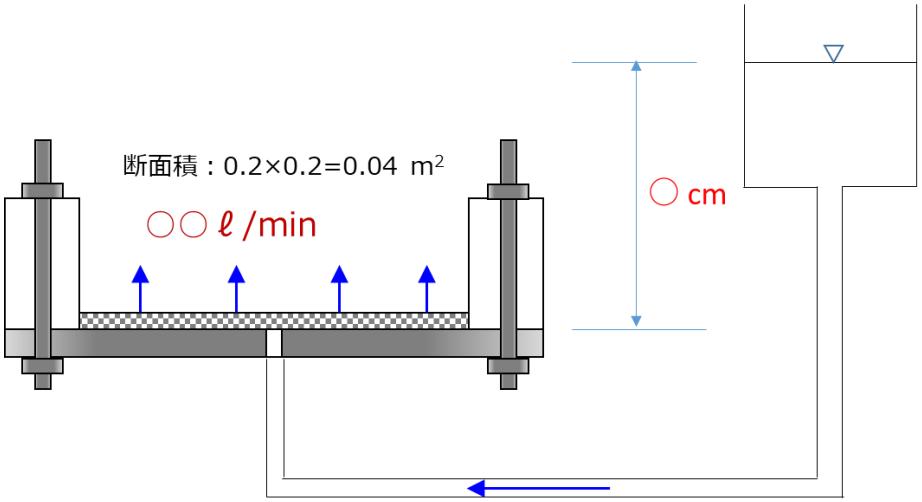


図 2.2-7　通過流量確認試験の概要

表 2.2-2　通過流量確認試験結果

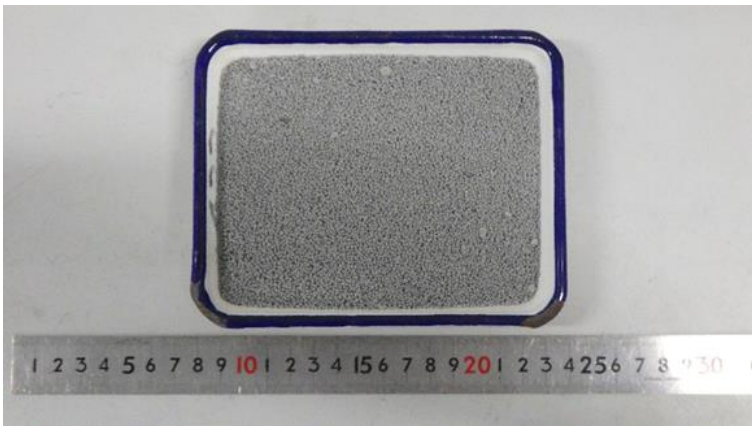
水頭(cm)	満水までの経過時間	満水時の水量 L	通過流量	
			L/min	L/min/m²
H=20	12 分 56 秒	3.433	0.265	6.6
H=20	12 分 55 秒	3.417	0.265	6.6
H=50	5 分 57 秒	3.402	0.572	14.3
H=50	6 分 03 秒	3.417	0.565	14.1
H=100	3 分 43 秒	3.417	0.919	23.0
H=100	3 分 43 秒	3.417	0.919	23.0

(3)　ベントナイトペレットを用いた浸潤試験

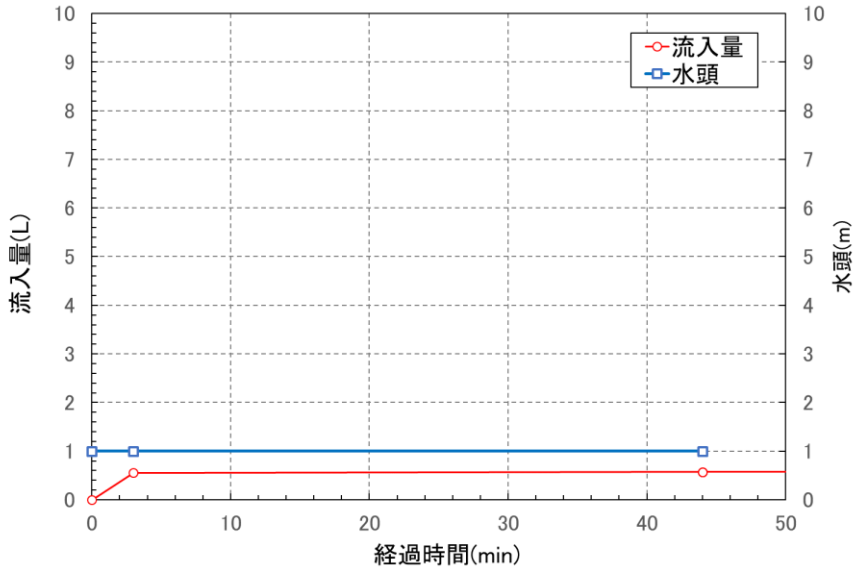
図 2.2-7 に示す試験容器内にベントナイトペレットを充填し、浸潤試験を実施した。使用したベントナイトペレットは粒径 1mm（清水建設製球形ペレット：クレイパール）（中島ほか, 2014）と粒径 10mm（ブリケット法によるペレット）の 2 種類である。なお、浸潤にはイオン交換水と人工海水を用いた。

図 2.2-8 に 1mm ペレットを用い、イオン交換水を浸潤させた試験結果を示す。水頭を 1m とした場合、浸潤開始から 3 分ほどで閉塞し試験装置への注入が止まった。その後、水頭を 5m、10m と上げることにより、注入は観測できたが、下流側からの排水は観察されなかった。これは、ペレットの粒径が小さい場合、負荷される圧力が低いとベントナイトペレットの膨潤による閉塞が通水初期から速やかに生じたためと考えられる。図 2.2-9 に 10mm ペレットを用い、イオン交換水を浸潤させた試験結果を示す。1mm ペレットの時のように数分で閉塞することはなかったものの、最終的には 35 分程度で下流側からの排水が止まる結果となった。図 2.2-10 に 10mm ペレットに人工海水を浸潤させた試験結果を示す。イオン交換水と比べると人工海水を用いた時の方がベントナイトの膨潤が小さく、閉塞は遅くなると考えられたが、結果としては、人工海水を浸潤させた時の方が、閉塞が早かった。この原因を確認するために、膨潤圧試験を参考とした類似の試験をイオン交換水と人工海水それぞれに対して実施した。図 2.2-11 および図 2.2-12 に試験結果を示す。図 2.2-11 より膨潤性はイオン交換水の時の方が高いことが分かる。一方、図

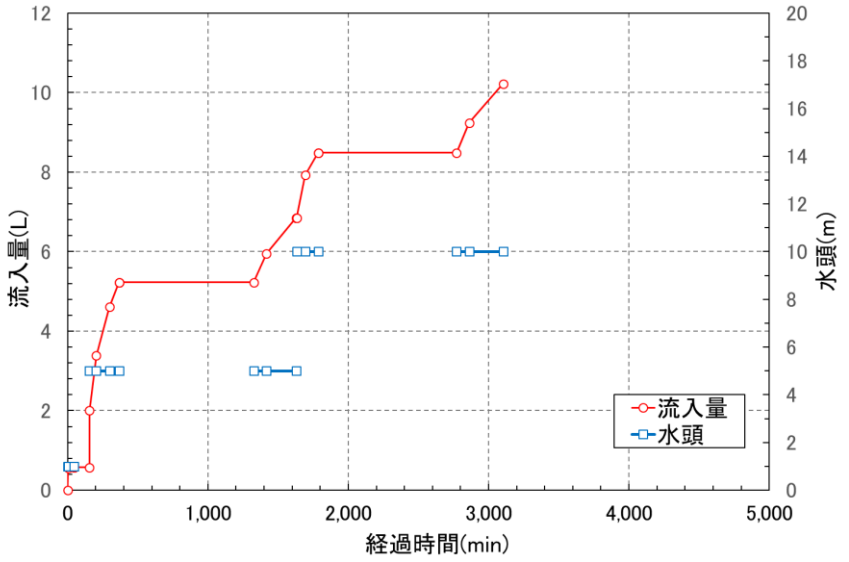
2.2-12 は、シャーレにおいてベントナイトペレットにイオン交換水および人工海水を入れた時の結果である。イオン交換水の場合はベントナイトペレットが吸水しているが、人工海水の場合はベントナイトペレットが吸水するのではなく、崩壊するという事象が生じていた。このことから、容器にベントナイトペレットを充填し人工海水を浸潤させた場合もベントナイトペレットの崩壊が生じ、その結果としてペレット間の空隙の閉塞がイオン交換水よりも早期に生じたと考えられる。



(a)1mm ペレット



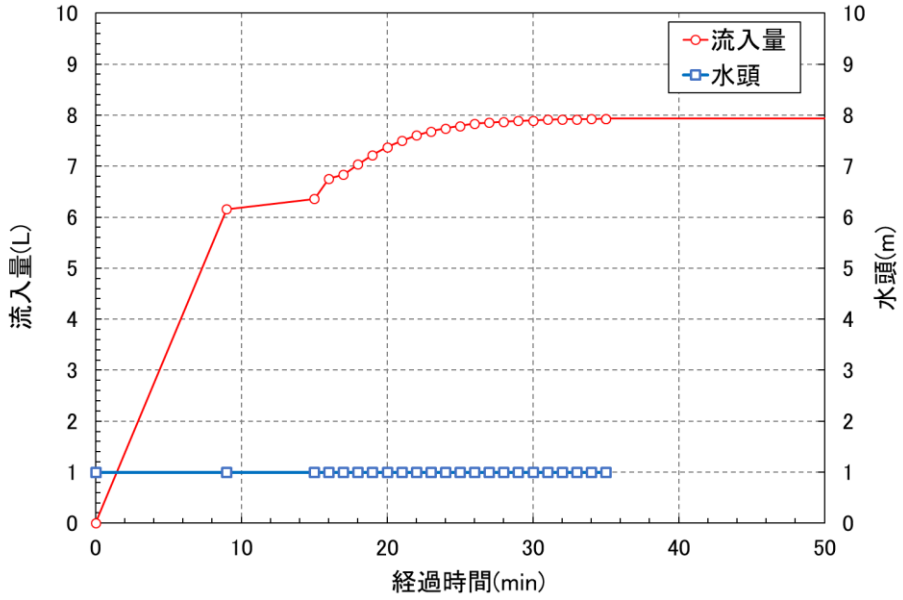
(b)流入量の経時変化（50min まで）



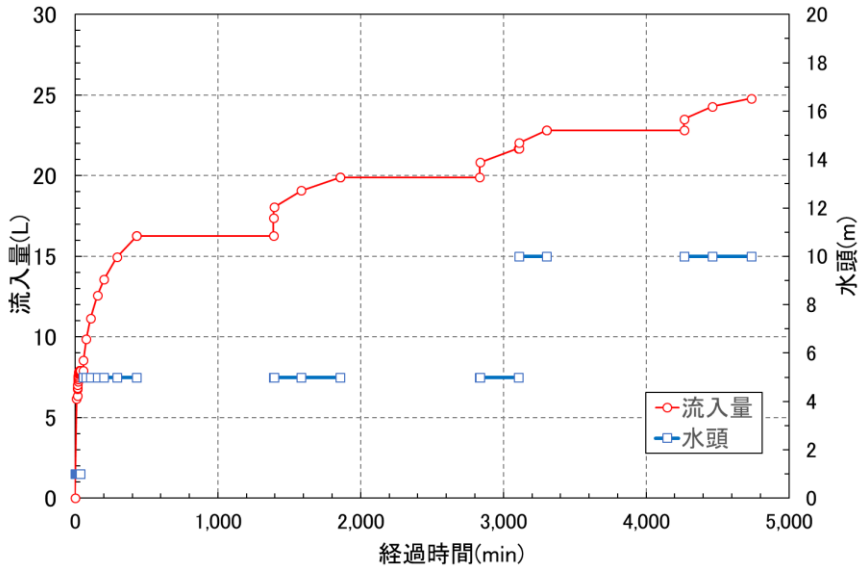
(c)流入量の経時変化

図 2.2-8　ベントナイトペレット浸潤試験の結果（1mm ペレット、イオン交換水）

(a)10mm ペレット

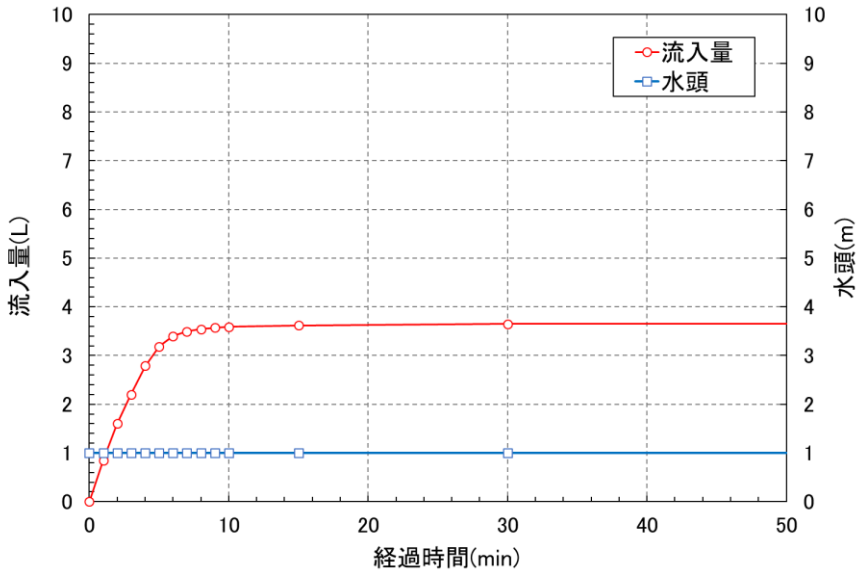


(b)流入量の経時変化（50min まで）

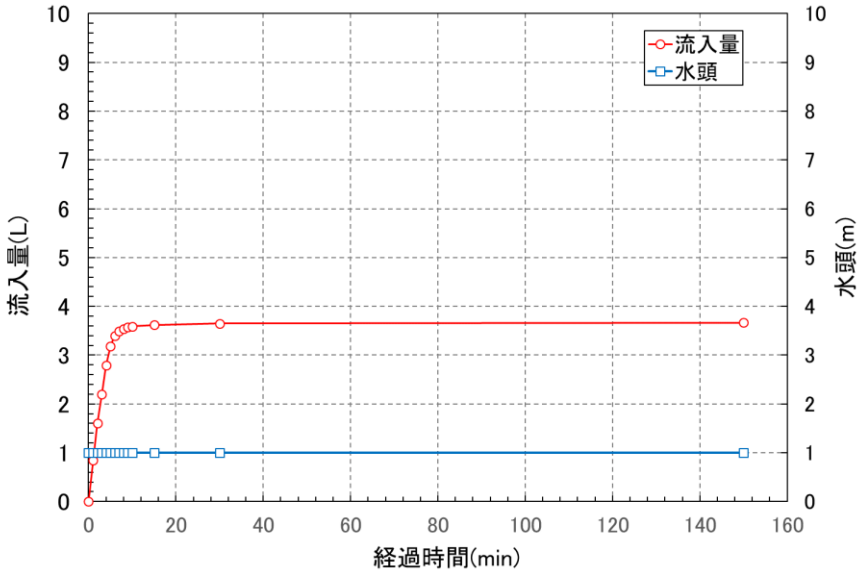


(c)流入量の経時変化

図 2.2-9　ベントナイトペレット浸潤試験の結果（10mm ペレット、イオン交換水）



(a)流入量の経時変化（50min まで）



(b)流入量の経時変化

図 2.2-10　ベントナイトペレット浸潤試験の結果（10mm ペレット、人工海水）

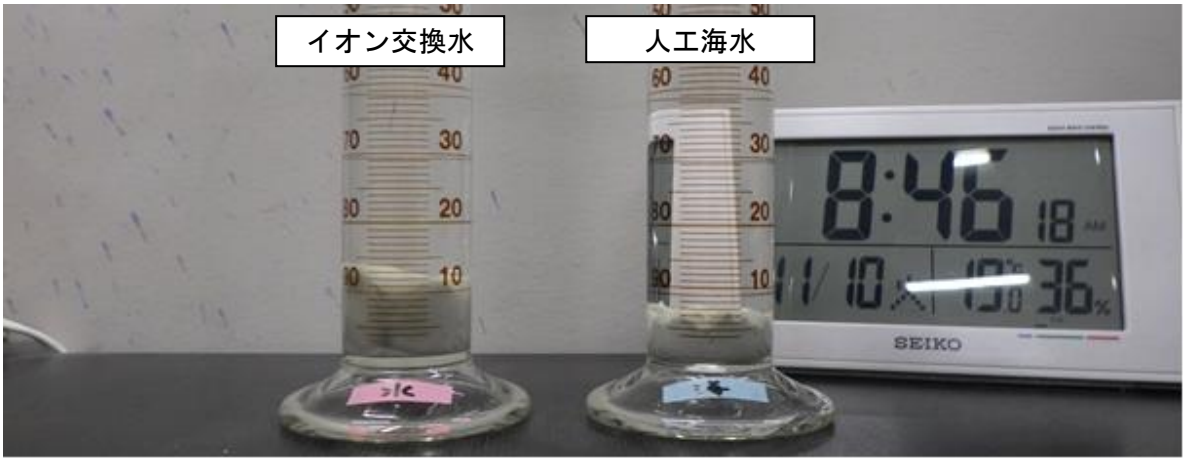
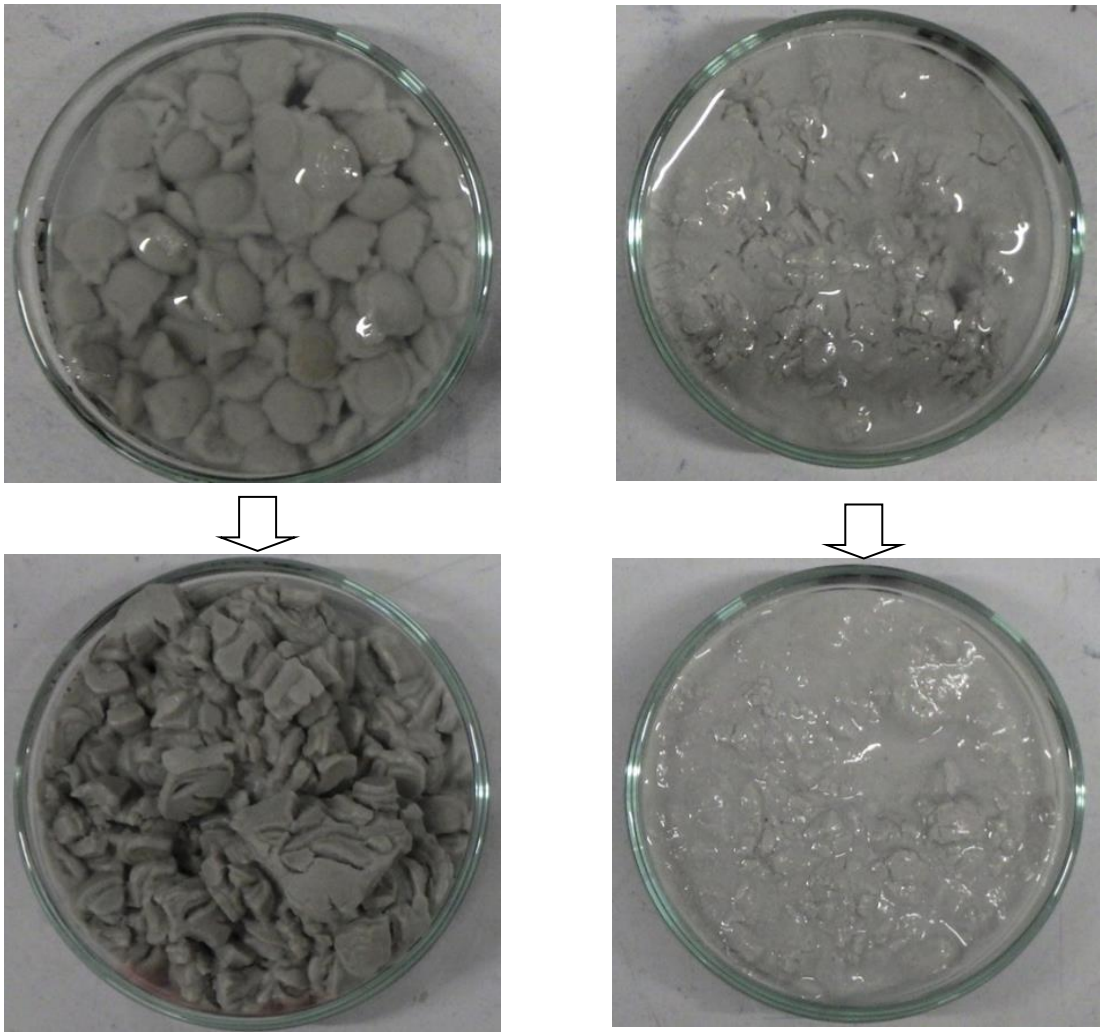


図 2.2-11　ベントナイトペレットのイオン交換水と人工海水の時の膨潤挙動の差



(a)イオン交換水　　(b)人工海水

図 2.2-12　ベントナイトペレットのイオン交換水と人工海水の時の膨潤挙動の差

(4)　流出・侵入予備試験

(2)および(3)の試験結果から、粒径 10mm のベントナイトペレットを用い、水頭差 1m をかけた試験では、ベントナイトの膨潤による間隙閉塞が比較的早期に起こり、ベントナイトの流出挙動が十分に確認できない可能性が考えられた。そこで、流出・侵入予備試験は粒径 15mm のベントナイトペレットを用い、水頭差を 1.2～1.5m になるような条件で実施することとした。粒径 15mm のベントナイトペレットについては、ブリケットマシンを用いて制作した。制作したベントナイトペレット単体の平均の乾燥密度は 1.90Mg/m^3（含水比 8.7%として計算）であった。また、後述するベントナイトブロックについては、乾燥密度が 1.2Mg/m^3 となるように、ベントナイト（クニゲル V1）と泥岩（稚内層：幌延深地層研究センターの地下施設、深度 350m 坑道で採取）を 40：60 の混合率とし、含水比を 36%に調整（含水比 36%）して圧縮成形した。図 2.2-13 に試験装置の構成を示す。試験容器への注水はマリオットタンクを用いて一定水位で注入した。マリオットタンクを床上に置いているため､圧力差を生じさせるために空気圧による加圧を行い、設定した水頭差がかけられていることを、配管途中に設置したマノメータで確認した。また、マリオットタンクの水位変化 1cm あたり、0.366L の水が注水されることを事前に確認した上で、マリオットタンクに貼り付けたメジャーで水位を記録した。なお、今回用いたマリオットタンクは 120cm の水位変化が可能であり、1 回の連続注水はタンクの有効容積の約 44L となる。排水量については、定期的にメスシリンダーを用いて一定量の水を採水し、採水時間から排水流量を求めた。これとは別にベントナイトの流出量を確認するための試料は、ある程度の時間間隔で必要量をボトルに採取した。ベントナイトの流出量の同定には、電気伝導度、濁度、イオンクロマトグラフィー分析の 3 種類を試行した。

本試験では、2.2.3.1 での文献調査結果を踏まえ、流出・侵入現象に影響を及ぼす可能性のある条件のうち、水質（イオン交換水、人工海水)、材料形態（ペレットのみ、ペレットとブロック併用）に着目した試験を実施した。試験ケースと条件を表 2.2-3 に示す。また、使用した人工海水の組成を表 2.2-4 に示す。

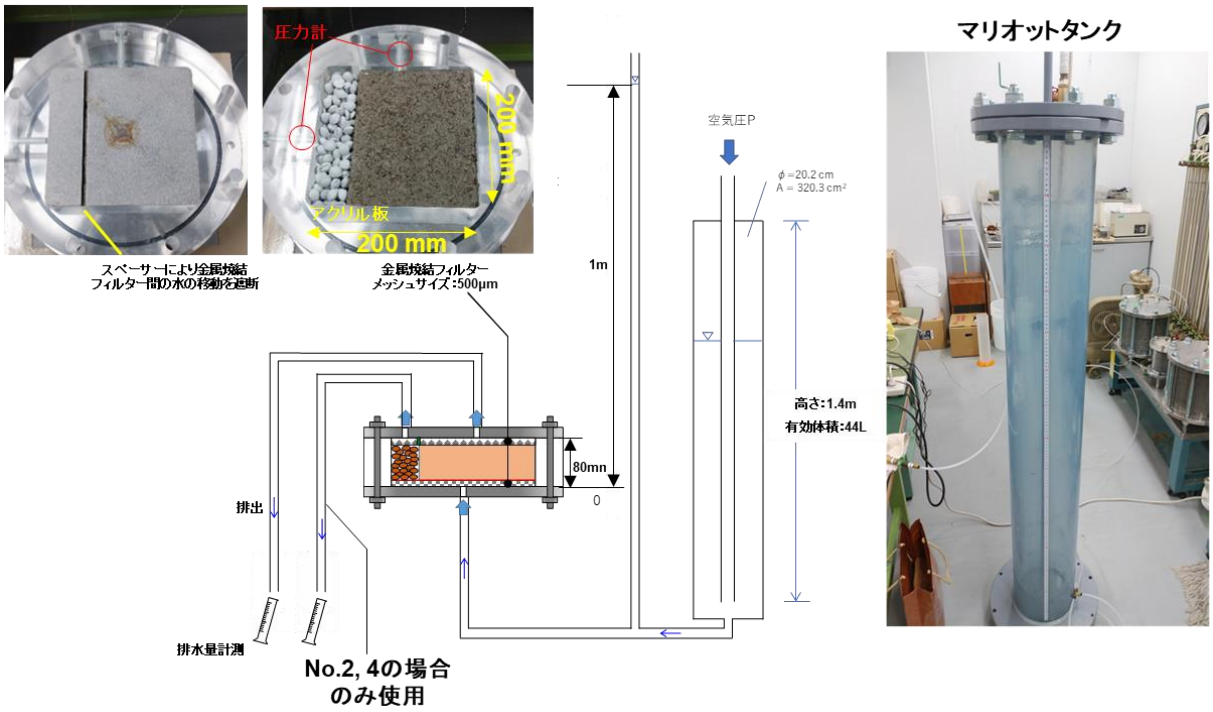


図 2.2-13　流出試験装置の構成

表 2.2-3　試験ケースおよび条件

	材料形態		水質	
	ブロック ベントナイト：クニゲル V1 掘削ズリ：泥岩（稚内層） 混合率；ベントナイト 40%、掘削ズリ 60% 含水比：36% 乾燥密度：1.2Mg/m^3	ペレット（粒径 15mm） ベントナイト：クニゲル V1 含水比：8.7% 乾燥密度：1.9Mg/m^3（平均）	イオン交換水※1	人工海水※2
ケース 1		●	●	
ケース 2	●	●	●	
ケース 3		●		●
ケース 4	●	●		●

※1 AQUA PURIFICATA（正起薬品工業会社）を使用

※2 MARINE ART SF-1（富田製薬株式会社を※1 の精製水に溶解して作成

表 2.2-4　人工海水組成

原料	含有量（/L）
塩化ナトリウム	22.1 g
塩化マグネシウム	9.9 g
塩化カルシウム	1.5 g
無水硫酸ナトリウム	3.9 g
塩化カリウム	0.61 g
炭酸水素ナトリウム	0.19 g
臭化カリウム	96 mg
ホウ砂	78 mg
無水塩化ストロンチウム	13 mg
フッ化ナトリウム	3 mg
塩化リチウム	1 mg
ヨウ化カリウム	81 μg
塩化マンガン（II）	0.6 μg
塩化コバルト（II）	2 μg
塩化アルミニウム（III）	8 μg
塩化鉄（II）	5 μg
タングステン酸ナトリウム	2 μg
モリブデン酸アンモニウム	18 μg

1)　ケース 1（ペレット、精製水）

ペレットは試験容器上部よりスコップを用いて流し込んだあと、突き固めない程度に均質になるように手作業で均した。図 2.2-14 にペレットの充てん状況および充てん後のペレットの状態を示す。ペレット充填部分の乾燥密度は、ペレット単体の含水比 8.2%を用いて算定し、1.03 Mg/m^3 となった。

図 2.2-14　ペレットの充てん状況（左）および充てん後の状態（右）

図 2.2-15 に注水開始からの累計注水量および区間注水量を示す。水頭差は 1.5m 程度とした。試験開始から、1.7 時間後、3.5 時間後、5.5 時間後に 10 分間程度の注水停止を挟みながら、7.7 時間後まで連続注水を行った。この間、わずかながら流量の低下が確認された。マリオットタンクの水位低下から換算した注入流量の変化は、注入開始から 1.7 時間の間は 28.7 L/h、その後 1.8～3.5 時間で 26.3 L/h、3.6～5.5 時間で 22.9 ℓ/h、5.7～7.7 時間で 20.7 L/h となった。マリオットタンクの容量（44L）の関係で、夜間に無人で連続注水することが困難であったため 7.7 時間後に注水を停止した。注水開始から 22.8 時間後に再度、同様の水頭差を与え、注水を開始したところ試験容器への通水ができなかった。この状態から約 30 分間、水の動きがないことを確認し、試験を終了した。図 2.2-16 に、定点カメラの画像から抜粋したベレットの膨潤状態の変化を示す。3 分程度でセル内が水で満たされた後、時間の経過とともにペレットが膨潤し、徐々に一体化していく様子が確認された。試験終了時の 22 時間 40 分後の画像では、一部水みちの形成が見られる。7 時間 40 分後（通水停止時）の区間注入量が 20 L/h 程度である一方で、22 時間 40 分後の区間注入量が 0 L/h であることから、画像で確認できる水みちは少なくとも供試体の下流から上流にかけて連続してない可能性が考えられる。

図 2.2-17 に試験容器内に設置した圧力計の測定結果を示す。各圧力計のＡ点およびＢ点の圧力は、大きさも挙動も異なることがわかる。Ａ点では、注水とともに圧力が増加した。ペレットが膨潤することで発生する膨潤圧を圧力計が測定できていることが確認できる。また、注水停止後も膨潤による圧力の上昇が確認できる。Ｂ点の圧力がＡ点よりも小さいのは、圧力計の検出箇所とペレットとの間隙の大きさ（または距離）が異なることが要因として考えられる。

図 2.2-18 に排水流量と排水中に含まれるベントナイト濃度の経時変化を示す。ベントナイト濃度については、排水中の濁度を計測して算出した。濁度からベントナイト濃度の換算は、既知量のベントナイト濃度と濁度（FTU）から導出した検量線を用いて行った。なお、濁度計は HANNA instruments 社製のポータブル濁度計（HI 93703）を使用した。ベントナイト流出濃度が通水初期に上昇しているものの、その後は排水流量の低下とともに、減少していることが確認できる。この傾向は図 2.2-14 に示した注水量の経時変化とも整合的である。夜間の注水停止後、注水を再開した時点で、排水量が 0 L/h であったため再開後のベントナイト流出濃度は計測できなかった。

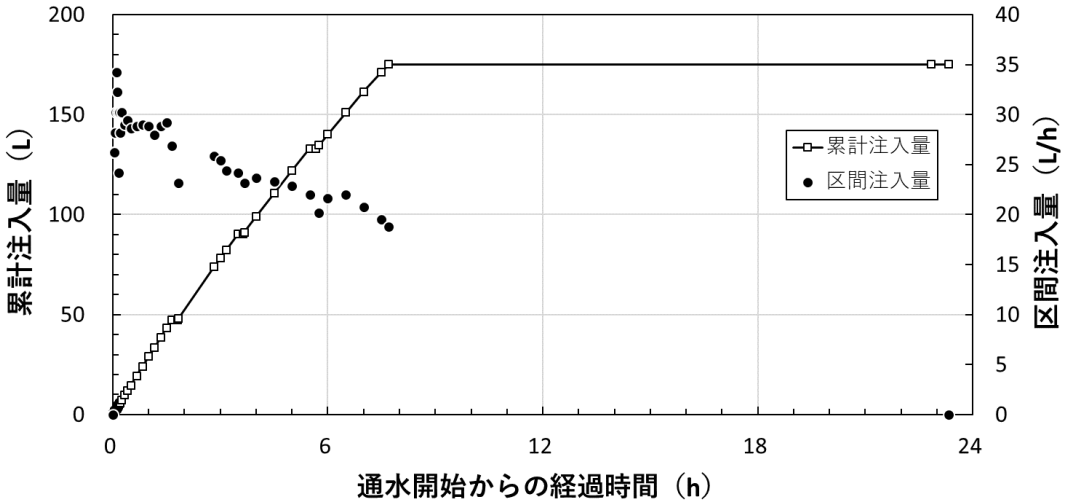


図 2.2-15　累計注水量および区間注水量の経時変化（ケース 1：ペレット、イオン交換水）

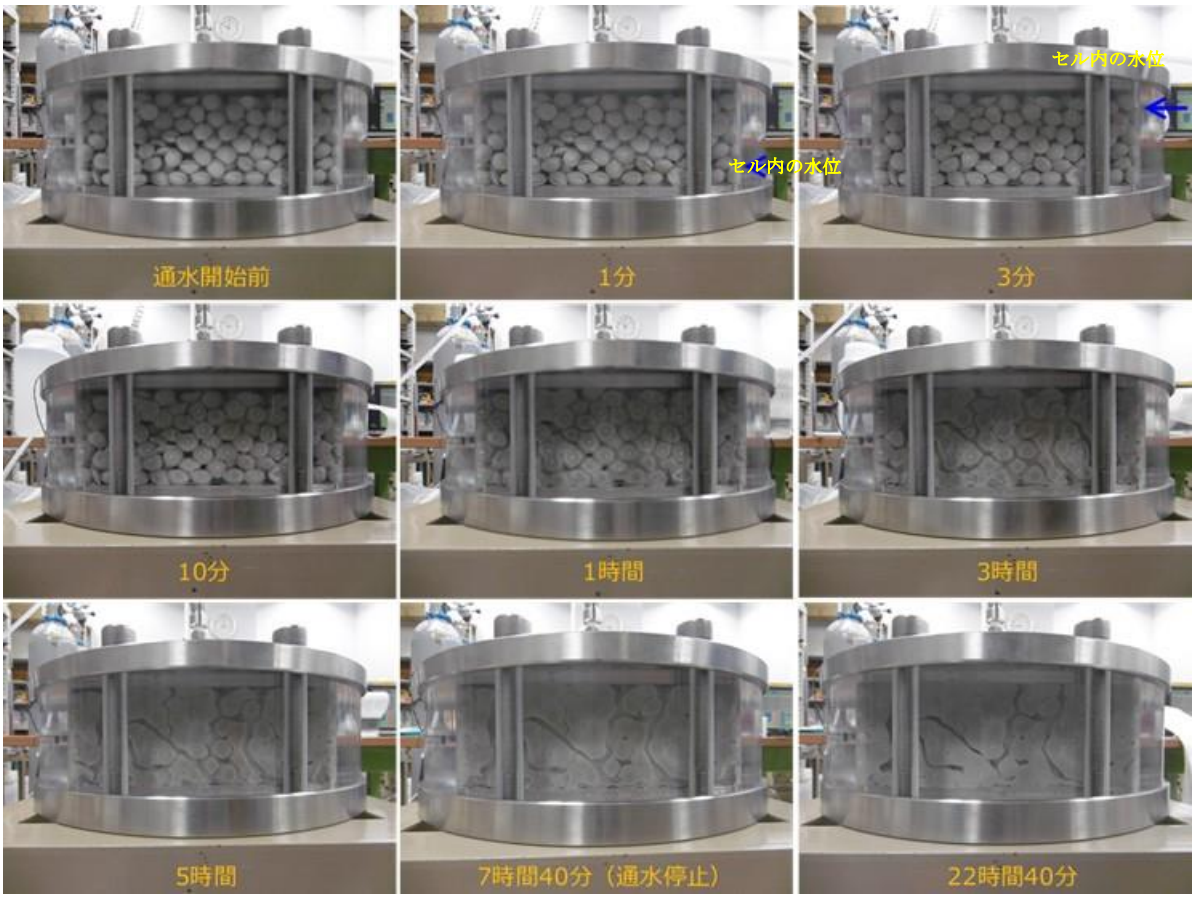


図 2.2-16　定点カメラによるペレットの膨潤状況（ケース 1：ペレット、イオン交換水）

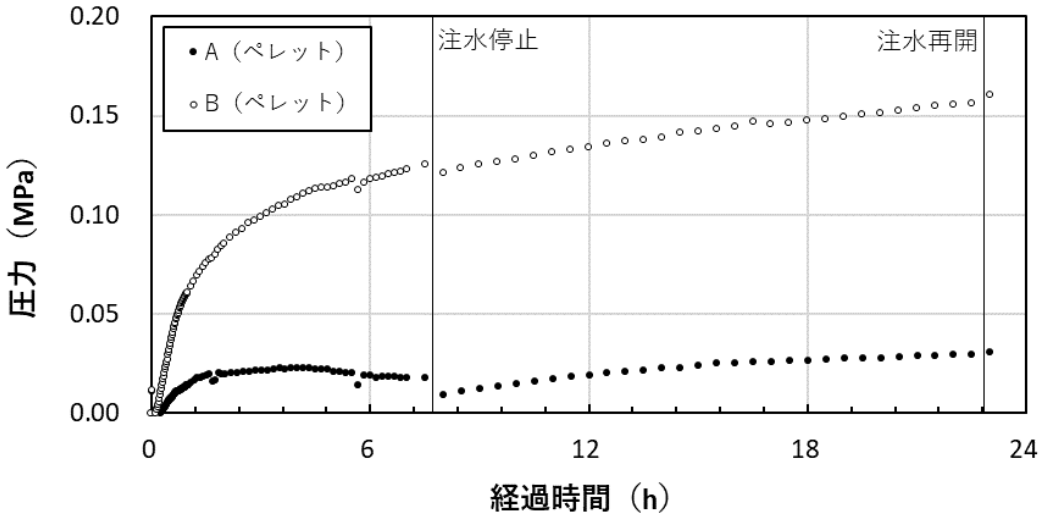


図 2.2-17　圧力の経時変化（ケース 1：ペレット、イオン交換水）

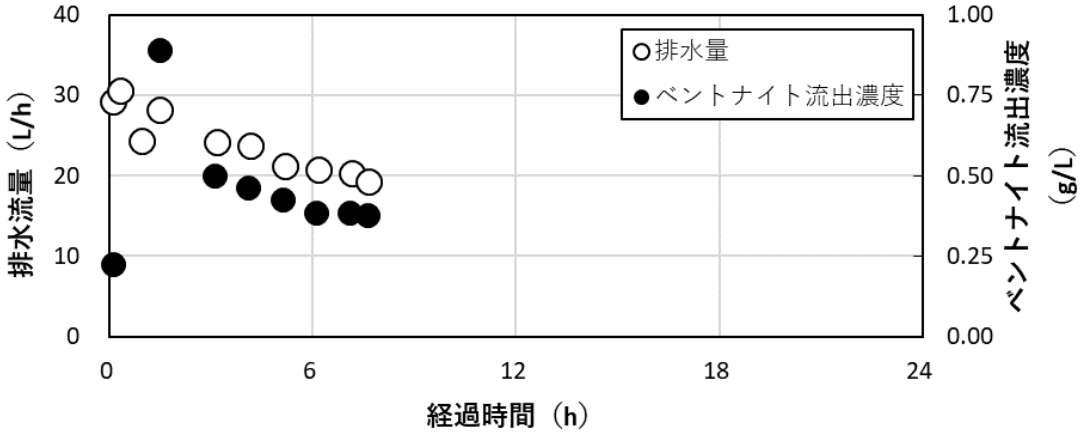


図 2.2-18　排水流量とベントナイト流出濃度（ケース 1：ペレット、イオン交換水）

2)　ケース 2（ペレット+ブロック、精製水）

ペレットおよびベントナイトブロックの設置状況を図 2.2-19 に示す。圧縮成型したベントナイトブロックを所定の大きさ（20 cm× 15 cm、高さ 8cm）にカットし、セル内に手動にセットするとともに、セル内に残ったすき間（20 cm×5 cm、深さ 8.5 cm）にベントナイトペレットを手動で充填した。ベントナイトブロックおよびペレットの上部にポーラスメタルを設置し、蓋を締めて試験セルを用意した。ペレット充填部分の乾燥密度は 0.95 Mg/m^3 となった。

図 2.2-20 に注水開始からの累計注入量および区間注入量を示す。1.6 時間後、4.3 時間後に合計 2 回の注水停止でタンクへの水の補充を行ったのちに 9.8 時間後にも同様の水の補充を行い、その後、夜間の無人連続注水を行った。注水流量は、1.6 時間までが 25.5 L/h、1.7～4.3 時間が 15.4 L/h、4.4～9.8 時間が 5.2 L/h となり、ケース 1 と比べて注水流量の低下が速かった。11.1 時間後に累計注入量 108.9L を計測したのちに、19.6 時間後に累計注入量 110.5L をした段階で、試験容器への注水が停止した。

図 2.2-21 に定点カメラによる膨潤状況を示す。ペレット部分についてはケース 1 と同様な傾向を示した。ブロックの部分では、アクリルセルとの境界部に水みちなどは確認できなかった。

図 2.2-22 に圧力の経時変化を示す。ペレットにセットされている A 点の圧力は、ケース 1 で計測された低い方の圧力と同程度であり、ペレットの均質化が進んでいないため、十分な膨潤圧が発揮できていないと考えられる。一方、B 点のブロックの方の圧力は、初期に 0.5MPa 程度を示しており、その後低下傾向を示した。初期に高い圧力を示したのはブロックを設置する際、圧力計の検出部に接触したことが原因と考えられる。

図 2.2-23 に排水流量と排水中に含まれるベントナイト濃度の経時変化を示す。ブロック側は注水初期こそ水の排水が確認されたが、すぐに水の流れが遅くなった。これはブロックがセルと密着するようにセットされていることに加えて、直後にブロックとセルとのすき間に回った水でブロックが膨潤したことによると考えられる。ベントナイト流出濃度については通水直後に検出されたもののその後は計測に必要な十分な採水が不能であった。ペレット側は、ブロック側の流量の低下に併せて一旦、流量が増加するものの、ペレットの膨潤が進み、次第に流量が低下した。一方でベントナイト流出濃度については、排水量の低下傾向に追従せず、夜間通水停止までは継続して濃度が検出された。注水再開後は、排水が停止したこともあり、ベントナイトの流出濃度は検知不能であった。

図 2.2-19　ペレットおよびブロックの充てん状況（左）および充てん後の状態（右）

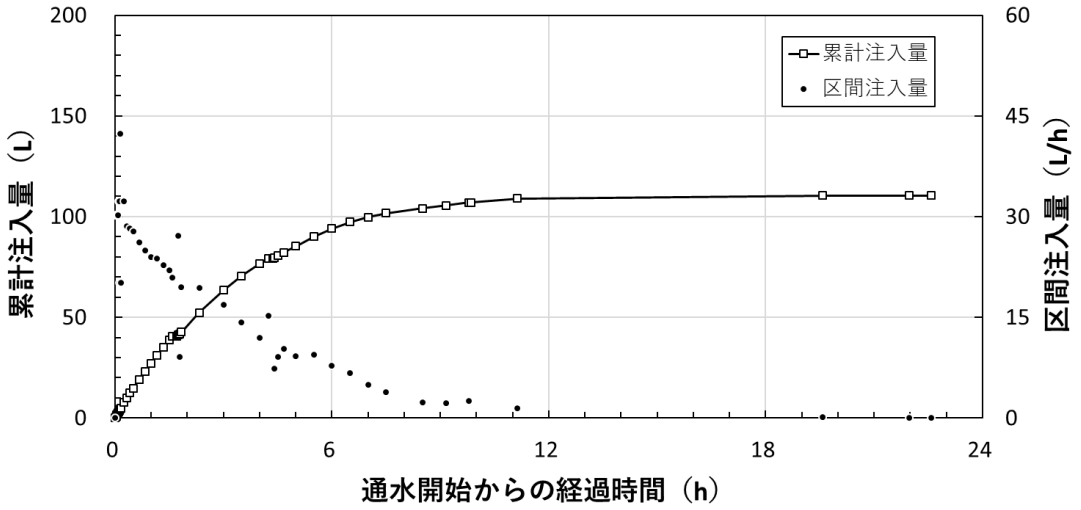


図 2.2-20　累計注入量および区間流入量の経時変化（ケース 2：ペレット＋ブロック，精製水）

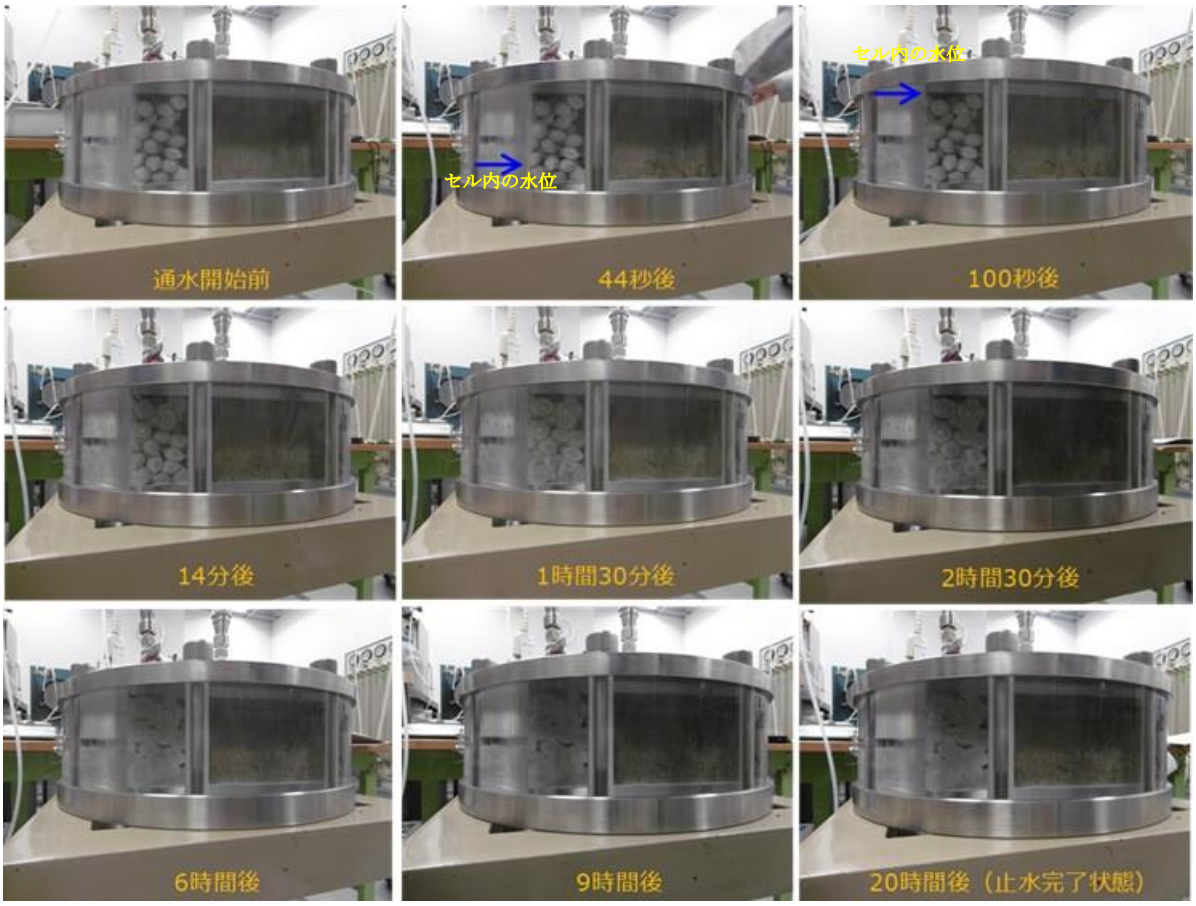


図 2.2-21　定点カメラによるペレットの膨潤状況（ケース 2：ペレット＋ブロック、イオン交換水）

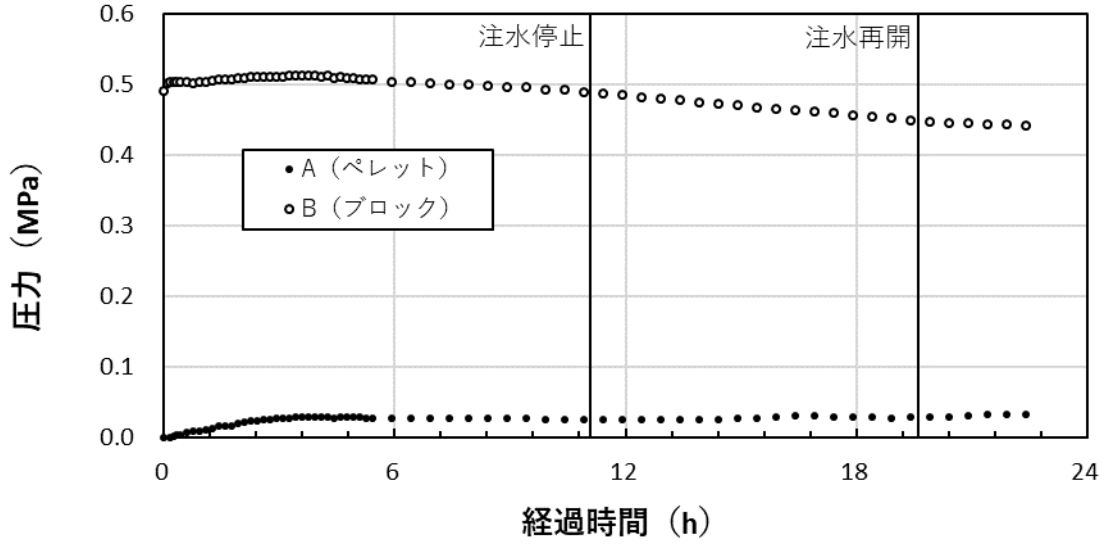


図 2.2-22　圧力の経時変化（ケース 2：ペレット＋ブロック，精製水）

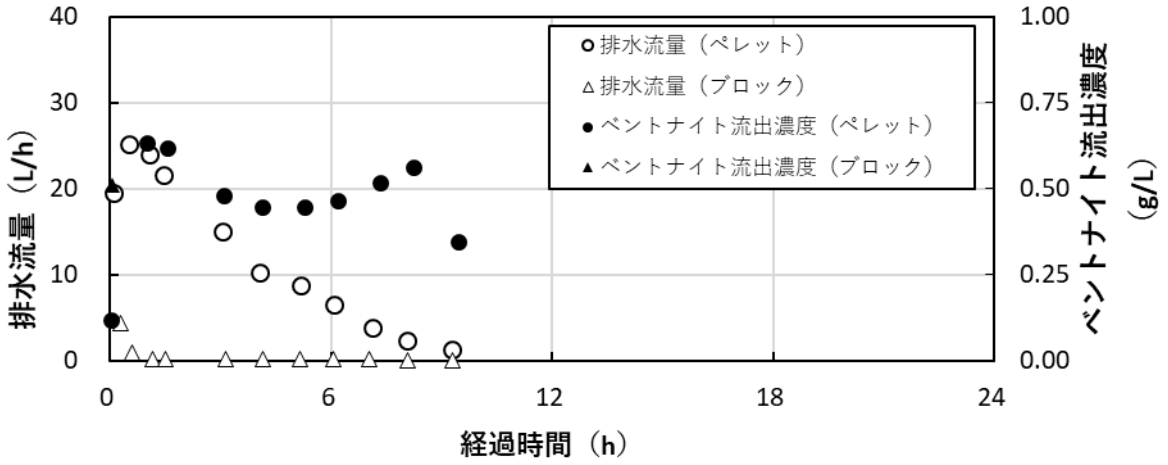


図 2.2-23　排水流量とベントナイト流出濃度（ケース 2：ペレット＋ブロック，精製水）

3)　ケース 3（ペレット、精製水）

ペレットの設置状況を図 2.2-24 に示す。充てん方法はケース 1 と同様である。ペレット充填部の乾燥密度は 1.03 Mg/m^3 でありケース 1 と同様であった。

図 2.2-25 に注水開始からの累計注水量および区間注水量を示す。水頭差はケース 1 と同様である。試験開始から、1.8 時間後、4.0 時間後、6.0 時間後に 10 分間程度の注水停止を挟みながら、7.0 時間後まで連続注水を行った。注水初期の 1.8 時間までは流量の低下が確認できたが、その後はほとんど流量低下が起きなかった。7.0 時間後に注水を停止し、21.7 時間後に通水を再開したところ、ケース 1 とは異なり、継続した注水が可能であった。21.7～23.8 時間の約 2 時間で得られた注入流量は、20.0 L/h であり、注水停止前との変化はわずかであった。

図 2.2-26 に定点カメラによる膨潤状況を示す。ケース 1（精製水）で見られたような明瞭な水みちは確認できないが、90°横の面には、図 2.2-27 に示すような明瞭な水みちが形成されていた。さらにこの水みちにおいて、間隙中を水が流れる様子が目視でき、凝集したベントナイト片が舞

っているのが確認できた。圧縮成型したベントナイトブロックを所定の大きさ（20 cm× 15 cm、高さ 8cm）にカットし、セル内に手動にセットするとともに、セル内に残ったすき間（20 cm×5 cm、深さ 8.5 cm）にベントナイトペレットを手動で充填した。ベントナイトブロックおよびペレットの上部にポーラスメタルを設置し、蓋を締めて試験セルを用意した。ペレット充填部分の乾燥密度は 0.95 Mg/m^3 となった。

図 2.2-28 に圧力計の測定値を示す。A 点、B 点ともにケース 1 に比べ低い圧力を示した。また､圧力の増加は両地点ともに､通水初期に限定されその後はほぼ一定値を示していることから、試験期間中においては膨潤がほとんど進行していない可能性が考えられる。ペレットにセットされている A 点の圧力は、ケース 1 で計測された低い方の圧力と同程度であり、ペレットの均質化が進んでいないため、十分な膨潤圧が発揮できていないと考えられる。一方、B 点のブロックの方の圧力は、初期に 0.5MPa 程度を示しており、その後低下傾向を示した。初期に高い圧力を示したのはブロックを設置する際、圧力計の検出部に接触したことが原因と考えられる。

図 2.2-29 に排水流量と排水中に含まれるベントナイト濃度の経時変化を示す。注入量と整合しており、注水開始から 1～2 時間で流量低下が収束し、その後はほぼ一定の流量で流れ続けることが確認できる。ベントナイト流出濃度については、注水開始から 1～2 時間の期間においてベントナイトの流出が顕著であることが確認された。これは、人工海水を通水したことで、初期にベントナイトの崩壊が生じ、且つベントナイトの膨潤が進行していないため、よりベントナイトの流出がしやすい状態であったと考えられる。

図 2.2-24　ペレットおよびブロックの充てん状況（左）および充てん後の状態（右）

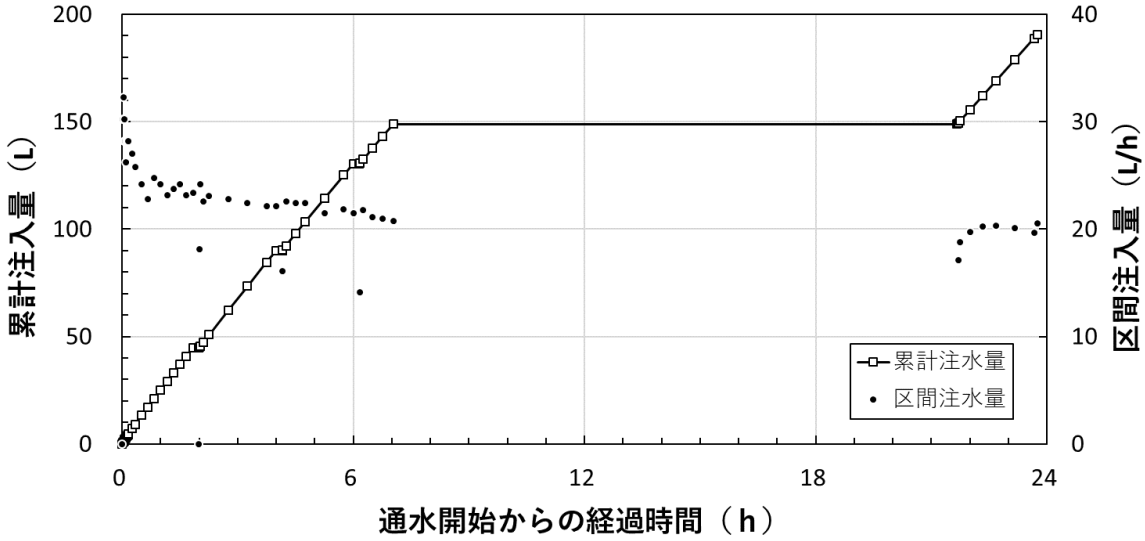


図 2.2-25　累計注入量および区間流入量の経時変化（ケース 3：ペレット，人工海水）

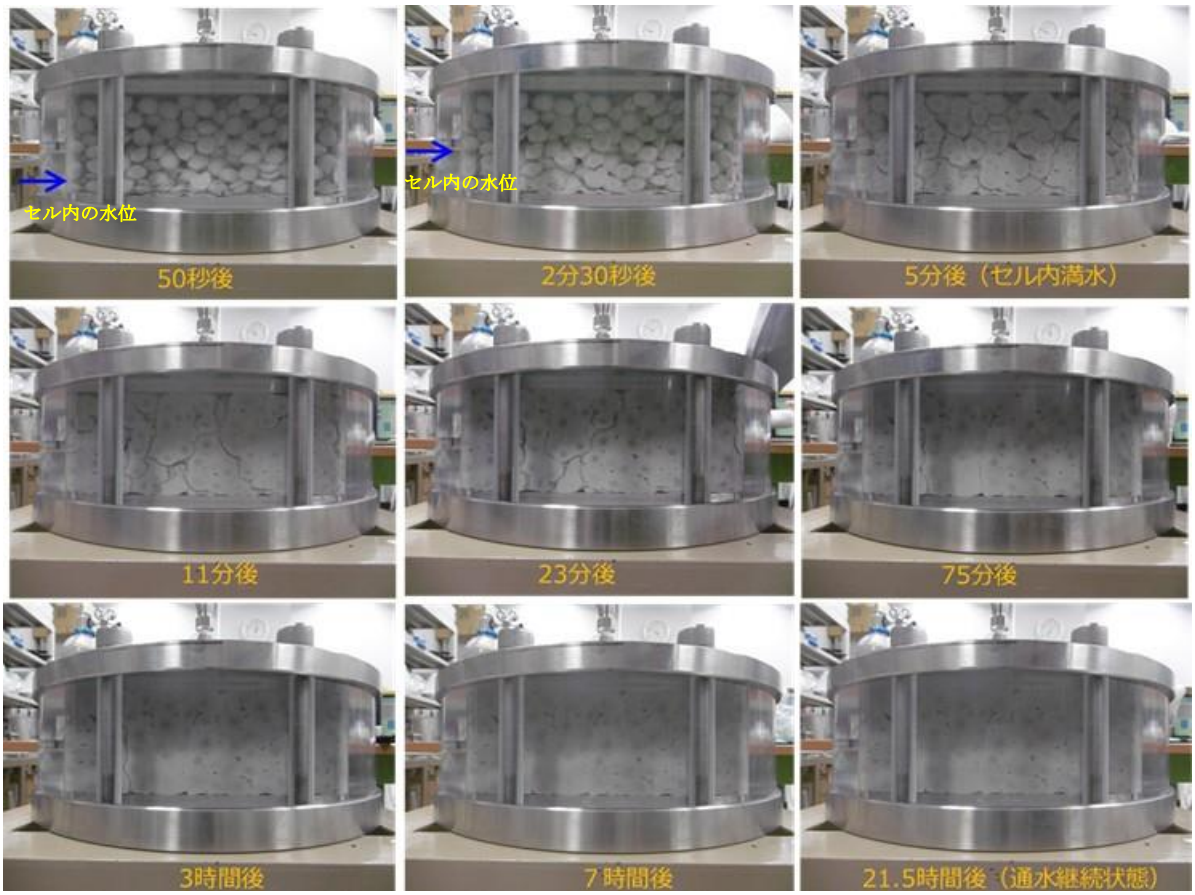


図 2.2-26　定点カメラによるペレットの膨潤状況（ケース 3：ペレット、人工海水）

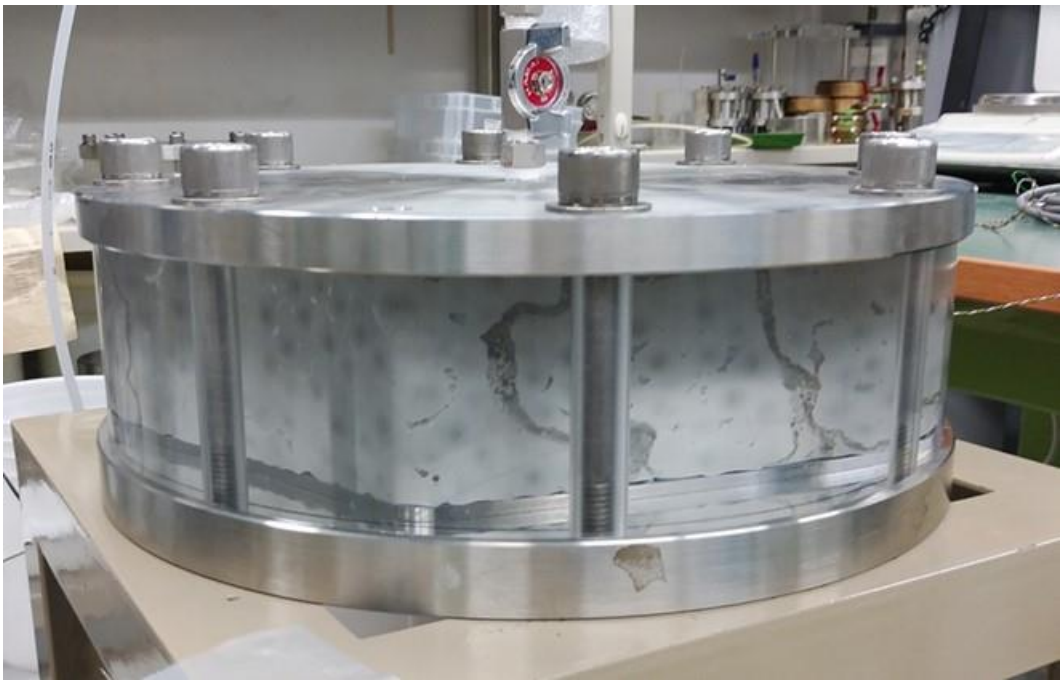


図 2.2-27　ケース 3 で確認された水みち

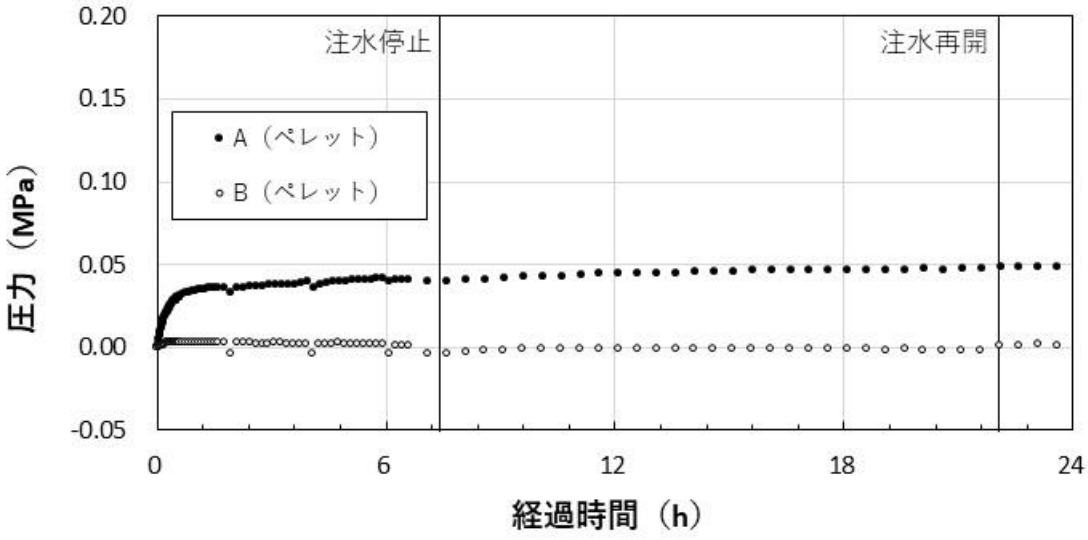


図 2.2-28　圧力の経時変化（ケース 3：ペレット，人工海水）

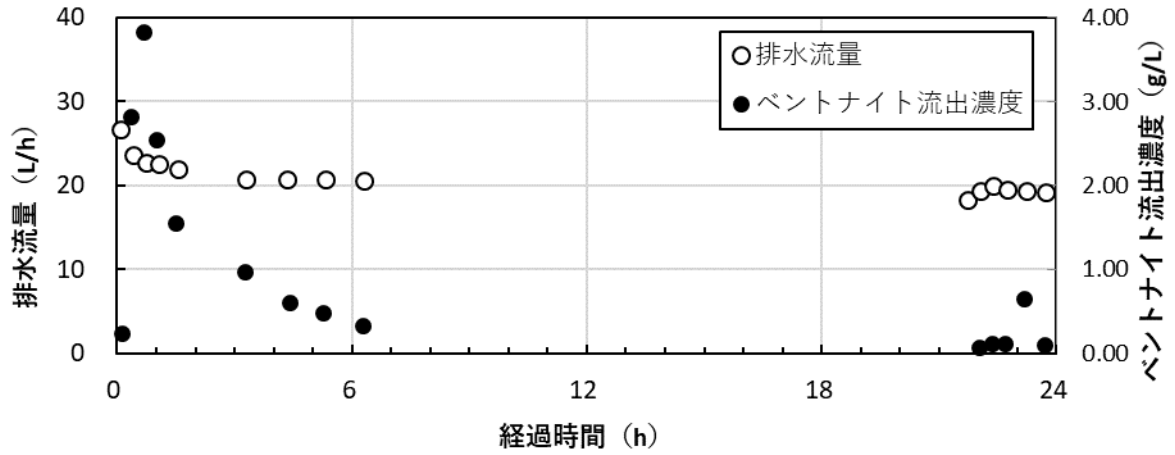


図 2.2-29　排水流量とベントナイト流出濃度（ケース 3：ペレット，人工海水）

4)　ケース 4（ペレット＋ブロック、人工海水）

ペレットおよびベントナイトブロックの設置状況を図 2.2-30 に示す。充てん方法はケース 2 と同様である。ペレット充填部の乾燥密度は 0.95 Mg/m^3 でありケース 1 と同様であった。

図 2.2-31 に注水開始からの累計注水量および区間注水量を示す。ケース 3 と同様に、流量の低下は初期の極短い時間にのみ確認され、試験終了時（22 時間後）の時点でも、1.5 L/h 程度の流量が確認された。水頭差はケース 1 と同様である。試験開始から、1.8 時間後、4.0 時間後、6.0 時間後に 10 分間程度の注水停止を挟みながら、7.0 時間後まで連続注水を行った。注水初期の 1.8 時間までは流量の低下が確認できたが、その後はほとんど流量低下が起きなかった。7.0 時間後に注水を停止し、21.7 時間後に通水を再開したところ、ケース 1 とは異なり、継続した注水が可能であった。21.7～23.8 時間の約 2 時間で得られた注入流量は、20.0 L/h であり、注水停止前との変化はわずかであった。

図 2.2-32 に定点カメラによる膨潤状況を、図 2.2-33 に圧力計の測定値を示す。ケース 2 と同様にベントナイトブロックの圧力は高く、ペレット側の圧力は低い結果となった。ブロック側の圧力は、2)で言及したように通水初期の圧力は高かったが、水の浸潤とともに圧力は低下し、この低下傾向はケース 2 と比べて速かった。

図 2.2-34 に排水流量と排水中に含まれるベントナイト濃度の経時変化を示す。ケース 2 においてはブロック側からの排水はほとんどなく、排水の大半はペレット側によるものだったが、ケース 4 ではブロック側からの排水の方が多い結果となった。この原因はベントナイトブロックとアクリルセルが十分には密着せず、その箇所を選択的に人工海水が通過しているためと考えられる。ただし、ブロック側の圧力計の値が 0.3MPa 以上を示していることから、境界部の全域を水が流れているわけではないと考えられるとともに、図 2.2-32 の定点カメラの画像からもアクリル境界部に水みちと認識できるようなところは確認できない。ベントナイト流出濃度については、ブロック側はケース 2 と同様に排水量の低下とともに、流出濃度も低下する傾向であった。一方、ペレットについては、通水後 4.5 時間の時点でベントナイト流出濃度が一時的に上昇するものの、ケース 2 と異なり、夜間通水停止直前までは低下傾向であった。

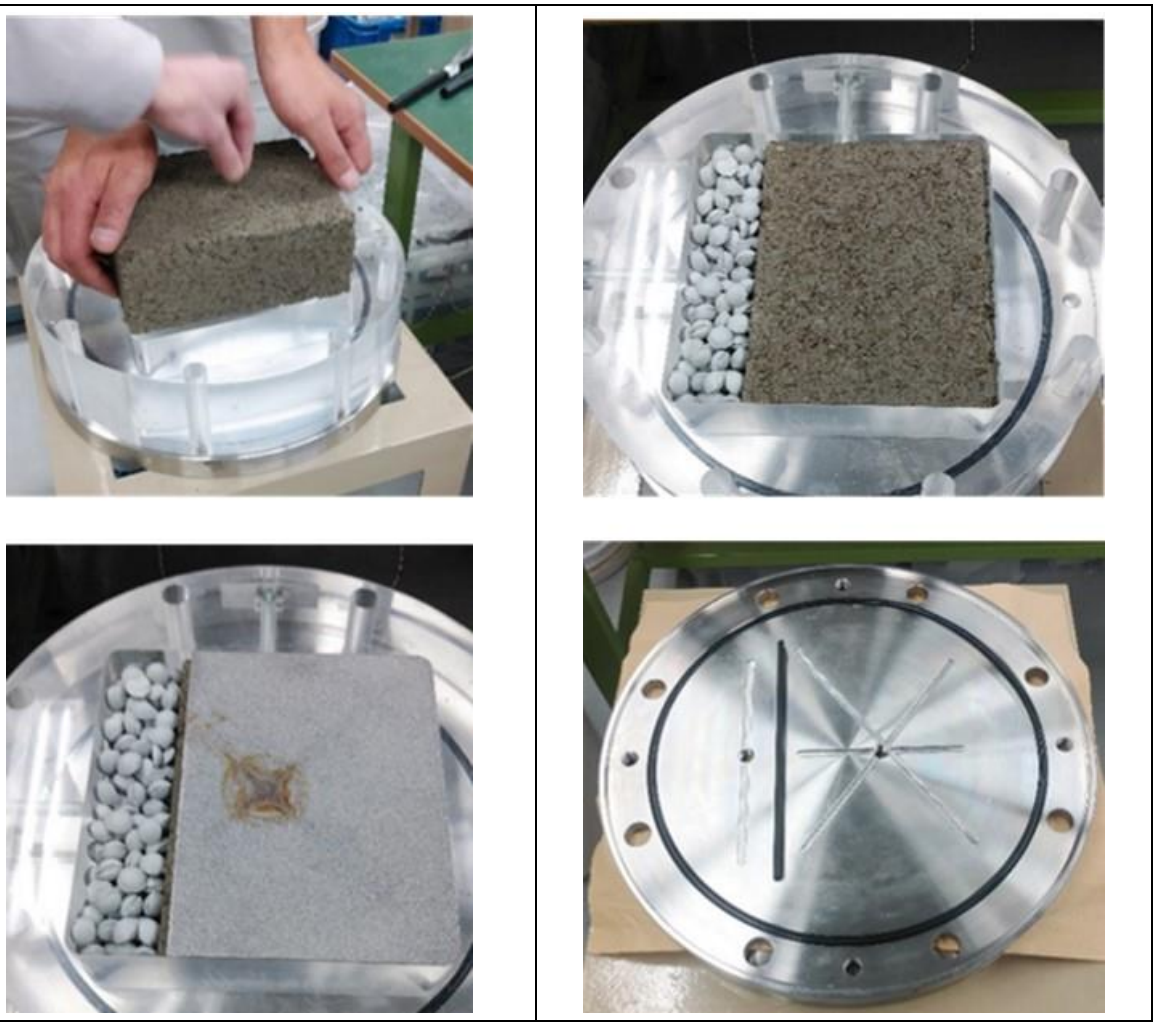


図 2.2-30　ペレットおよびブロックの充てん状況（左）および充てん後の状態（右）

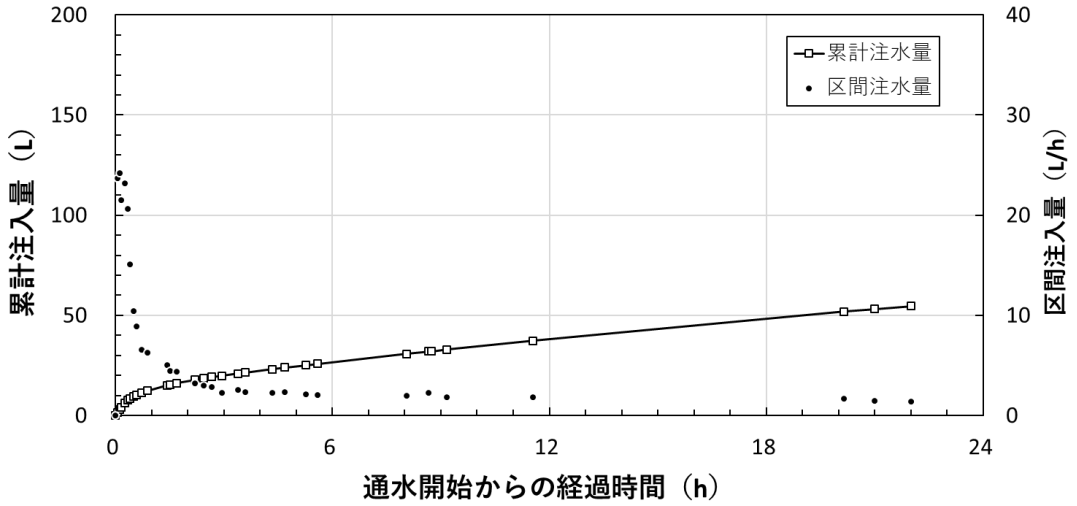


図 2.2-31　累計注入量および区間流入量の経時変化（ケース 4：ペレット＋ブロック，人工海水）

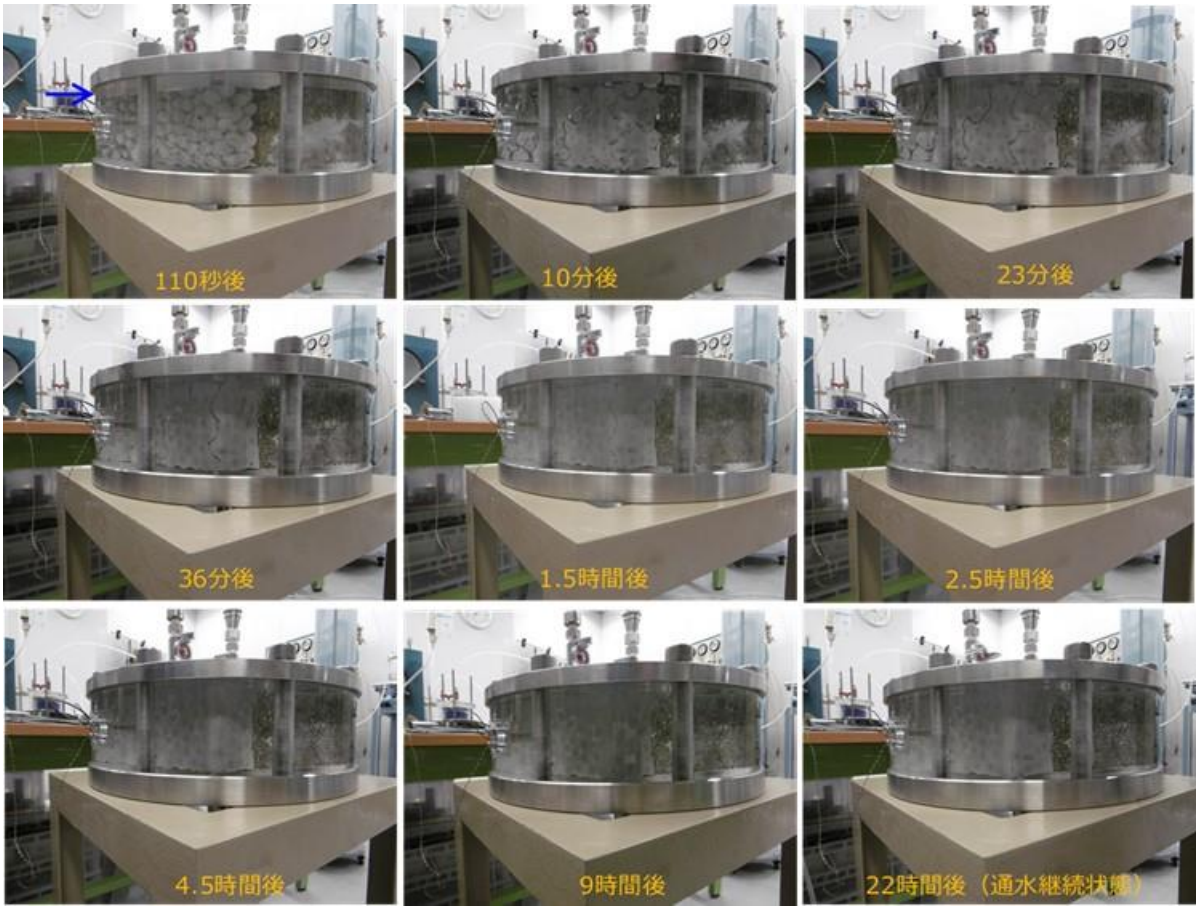


図 2.2-32　定点カメラによるペレットの膨潤状況（ケース 4：ペレット＋ブロック，人工海水）

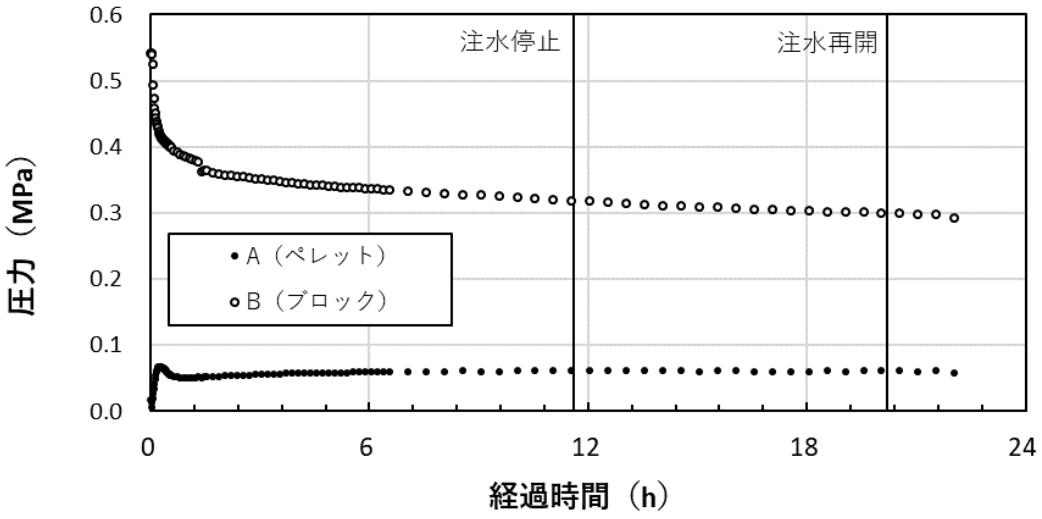


図 2.2-33　圧力の経時変化（ケース 4：ペレット＋ブロック，人工海水）

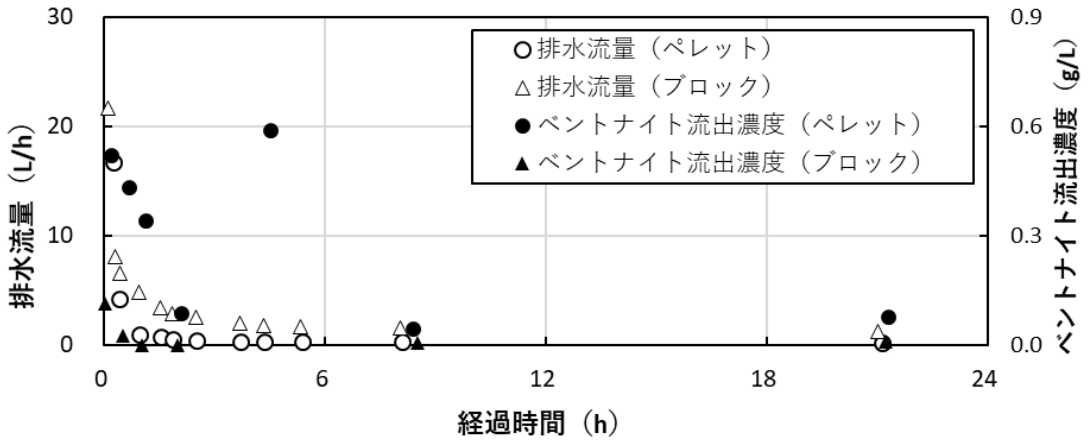


図 2.2-34　排水流量とベントナイト流出濃度（ケース 4：ペレット＋ブロック，人工海水）

5)　予備試験のまとめ

ケース 1～ケース 4 までの予備試験の結果得られた知見は以下の通りである。

- ベントナイトペレットに精製水を一定圧力で通水した No.1 試験では、水の流れがあってもペレットは膨潤し、次第に流量が小さくなることがわかった。しかし、予備試験の装置では水が止まるまで継続的に実験を続けることができず、流量が停止する状態は確認できなかった。
- ベントナイトブロックを併用したケースでは、ペレットのみを設置したケースより流量が低下する速度が速く、流量が停止する状態まで確認できた。すなわち、水を流し続けても、長時間通水を行なえば、閉塞が確認できることがわかった。
- 人工海水を通水した場合、イオン交換水と異なり、膨潤しにくいため今回実施した試験期間内においては十分な閉塞がされなかったとともに、比較的明瞭な水みちがアクリルとの境界部分に生じる場合があることがわかった。

2.2.3.2 まとめと今後の課題

予備試験で得られた結果から、ペレットへ一定圧力で連続的に通水した場合でも、ベントナイトペレットは膨潤し、次第に流量が小さくなることがわかった。また、ブロックを並置し、断面積を小さくしたケースでは最終的に止水されることまでを実験で確認できた。しかし、流量が低下する現象や閉塞に至る現象は、様々な条件に依存している。例えば、ペレットの粒径や充てん率に関しては、粒径 1mm のすき間の形状が小さいペレットの場合は速く、15mm ペレットのように粒径が大きいペレットは流量低下も遅く、連続注水では閉塞が確認できなかった。また、ペレットの閉塞挙動は通水時の圧力（水頭差）にも影響される。今回の予備試験では、予備検討の結果を踏まえ流量低下が容易な水頭差 1m 程度で試験を行ったため一部のケースでは流量低下や閉塞が確認できたが、予備検討では水頭差が大きい場合はペレットが膨潤してすき間を閉塞する速度よりも流出によりベントナイトが運び去れる現象のほうが卓越し、流量低下や流れが停止しない現象も確認された。また、ペレットや水頭差が同じ条件で試験をしても、精製水では流量低下が確認でき、少しずつ閉塞が進行していることが認められたが、人工海水を通水した試験では、あるところから流量が低下せず、永遠に流出が続くと思われる結果も確認された。しかし、現時点では限られた条件での試験にとどまっているため、ペレットの粒径、水頭差および水質などが

流出・侵入に与える影響の閾値を明らかにはできていない。したがって、引き続き幅広い条件での実験を行う必要があると考えられる。ペレットについては、密度の高いペレットや当初計画していたなめらかな粒度を持ち、充てん性がよいペレットなど、複数を対象にすることが想定される。通水条件に関しては、より高い圧力での通水が望まれる。また、水質に関しても精製水と海水の両極端だけでなく、一般的な地下水の水質を対象とする、もしくは希釈した人工海水での試験を行うことなどが考えられる。

このような試験を行う上で、今回の予備試験では連続注水可能な時間に制限があったことは課題の一つとして挙げられる。今回使用したマリオットタンクは 44L 程度の連続注水しかできず、それ以上になると注水を中断し、水の補充を行う必要があった。したがって、今後の試験においては、オーバーフロー型のタンクを採用することが対策として考えられる。次に、試験セルの形状は予備試験に使用した円筒に正方形の試料設置領域を有するものから、円筒パイプなどの形状に変更することが、パラメータを振って試験数を多くすることに有効であると考えられる。今回の予備試験ではブロックとペレットの 2 材料系の試験を想定して、セル形状を決定したが、特にペレット単体で試験を行う際は、目視画像確認の視認性も考慮すると円筒パイプ使用が適切であると考えられる。円筒パイプを使用する場合は、断面積も現状より小さくし、試験に使用する水を低減することも有効であると考えられる。特に、連続注水を数日間にわたって行うことを考えると、試験容器の大きさはペレットの最大粒径の 10 倍程度で十分であると考えられる。

また、流路方向を長くすることも有効であると考えられる。流出現象の評価は流量変化や閉塞の視点のみでなく、ベントナイトの流出量にも着目している。流路方向を長くすることは通水によって試験セル外に運び出されるベントナイトを分析しやすくなるだけでなく、スケール効果の検証により、実際の埋め戻し材で生じ得る現象へより適切に反映可能であると考えられる。

流出したベントナイトの同定方法はより有効な方法を検討する必要がある。海外では流出水の全量を炉乾燥し重量計測によってベントナイトの流出量を同定している事例があるものの、流出水を乾燥させた場合、海水条件での試験では、乾燥重量のなかにイオン成分の析出物も含まれ、必ずしもベントナイトだけとは限らない。このような課題を解決するために、予備試験ではベントナイト流出量の同定に、濁度を用いたがベントナイトに含まれる微粒分と随伴鉱物などが分離して、微粒成分のみが流出するような現象が生じる可能性を考慮すると正確な流出量が取得できない可能性も考えられる。

次年度以降は、上述した課題を踏まえた上で、多様な条件設定での試験を継続し、流出・侵入現象の発生メカニズムの解明や発生に至る条件を整理していく必要がある。

参考文献

Börgesson, L., Sandén, T., Piping and erosion in buffer and backfill materials. Current knowledge, SKB R-06-80, 2006.

原子力発電環境整備機構，包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03，2020.

Johannesson, E., Sandén, T., Dueck, A., Characterization of a backfill candidate material, IBECO-RWC-BF Baclo Projec, SKB TR-10-44, 2010.

Keto, P., Dixon, D., Jonsson, E., Gunnarsson, D., Börgesson, L., Hansen, J., Assessment of backfill design for KBS-3V repository, SKB R-09-52, 2009.

中島均，齋藤亮，石井卓，乾燥収縮を利用したベントナイトペレットの製造方法，原子力バックエンド研究，vol.21，No.2，pp.83-93，2014.

日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業　地層処分施設閉鎖技術確証試験　報告書，2019.

Sandén, T., and Börgesson, L., System design of backfill Methods for water handling, R-14-09, 2014.

Sandén, T., Börgesson, L., Deep repository-engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill Laboratory tests to understand processes during early water uptake. SKB R-06-72, 2008.

SKB, Buffer, Backfill and closure process report for the safety assessment SR-site, TR-10-47, 2010.

SKB, Deep repository-Engineered barrier system; Erosion and sealing processes in tunnel backfill materials investigated in laboratory, SKB, R-08-135, 2008.

SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project (Volume II), TR-11-01, 2011.

SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project (Volume III), TR-11-01, 2011.

3. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリング技術の性能確認-

3.1 膨潤挙動評価試験

3.1.1 背景・目的・実施内容

人工バリアの竪置き方式の場合には、処分孔に定置した緩衝材が再冠水により処分坑道側へと膨出しその乾燥密度が低下すると、「低透水性」や「コロイドろ過性」などの緩衝材に要求する性能が低下し、緩衝材の安全機能が確保できなくなることが懸念される。そのため、処分孔の上部に位置する処分坑道においては、埋め戻し材を充填することにより緩衝材が坑道側へ膨出することを抑制する。埋め戻し材の設計においては、乾燥密度や材料配合を埋め戻し材に設定し、設定した仕様が評価項目である「緩衝材の膨出抑制」に対して適切であることの確認が求められている（NUMO, 2021）。そのため、埋め戻し材の仕様に対する緩衝材の膨出量や膨出に伴う乾燥密度の変化を評価することが必要となる。

緩衝材と埋め戻し材の間では、緩衝材の膨潤圧や埋め戻し材の自重相当の荷重が相互に作用しており、緩衝材の膨出挙動はこれらの力学的な相互作用の影響を受ける。そこで、力学的相互作用を踏まえた緩衝材の膨出挙動を把握して埋め戻し材の設計・評価手法へ反映することを目的とした膨潤挙動相互作用試験を実施している。

平成 30 年度から 2 年間にわたり、緩衝材と埋め戻し材のそれぞれについて膨潤変形量や膨潤圧などの膨潤変形挙動に係る基礎的な特性を取得した。また、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型を用いた室内試験により力学的相互作用下の膨潤挙動に関する現象を整理した。令和 2 年度以降は、力学的相互作用下における膨潤挙動の理解を進めるとともに、緩衝材や埋め戻し材に供給される水の水質などの化学的事象が緩衝材の膨潤挙動や埋め戻し材の膨出抑制機能におよぼす影響を考慮に入れた検討を実施する。また、緩衝材と埋め戻し材の膨潤変形量や膨潤圧、乾燥密度の変化などの計測可能な項目により埋め戻し材の膨出抑制機能を評価する方法を検討する。

令和 2 年度は、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型を用いた室内試験を継続し、膨潤変形量や膨潤圧の計測、緩衝材と埋め戻し材の境界部における膨潤変形挙動の理解などに取り組む。また、緩衝材や埋め戻し材に供給される水の塩分濃度が膨潤挙動におよぼす影響を把握するために、塩水条件における緩衝材の膨潤圧計測を実施するとともに、緩衝材と埋め戻し材の小規模模型を組み合わせた予備試験を実施した。

3.1.2　膨潤基礎試験

3.1.2.1 膨潤圧試験

膨潤圧試験における緩衝材の供試体は、高さが 5 mm、10 mm、20 mm の 3 条件、直径はいずれも 20 mm である。材料は、クニゲル V1 とケイ砂を重量比で 70%と 30%の割合で混合した混合材料とし初期乾燥密度 1.80 Mg/m^3、初期含水比 10.5%と設定した。ケイ砂は、3 号ケイ砂と 5 号ケイ砂を重量比でそれぞれ 50%の割合で混合した。本試験で使用したクニゲル V1 とケイ砂の基本的性質を表 3.1-1、表 3.1-2 に示す。

図 3.1-1 に試験装置を示す。試験装置は、変位拘束条件で供試体に給水し、膨潤により発生した膨潤圧を計測できるものである。供試体は、圧密リング（SUS316L 製）内に圧縮成型した。圧密リングは上板と底板で拘束する構造である。供試体への給水は二重管ビュレットより底板に設置したポーラスメタルを通じて行った。供試体内に入った注水量は二重管ビュレット内の水位の変化を最大容量 10 kPa、最小目盛 0.0033 kPa の差圧計により測定した。供試体の給水膨潤に伴って発生する膨潤圧は底板に設置しているロードセル（最大容量 20 kN、最小目盛 0.005 kN）により計測した。

試験は、室温を 20°C に設定した試験室で実施した。供試体へ給水する試験用水は、イオン交換水と塩水の 2 種類を用いた。塩水には、0.2 mol/L の NaCl 水溶液を使用した。試験用水を水質分析した結果を表 3.1-3 に示す。

表 3.1-1　使用したクニゲル V1 の基本的性質

	クニゲル V1
土粒子密度（Mg/m^3）	2.743
液性限界（%）	488.6
塑性限界（%）	26.0
塑性指数（-）	462.6
モンモリロナイト含有量（%）	64.8
陽イオン交換容量（meq/g）	0.731
交換性 Na イオン量（meq/g）	0.629
交換性 Ca イオン量（meq/g）	0.152
交換性 K イオン量（meq/g）	0.008
交換性 Mg イオン量（meq/g）	0.012

表 3.1-2　ケイ砂の土粒子密度

	3 号ケイ砂	5 号ケイ砂
土粒子密度（Mg/m^3）	2.637	2.639

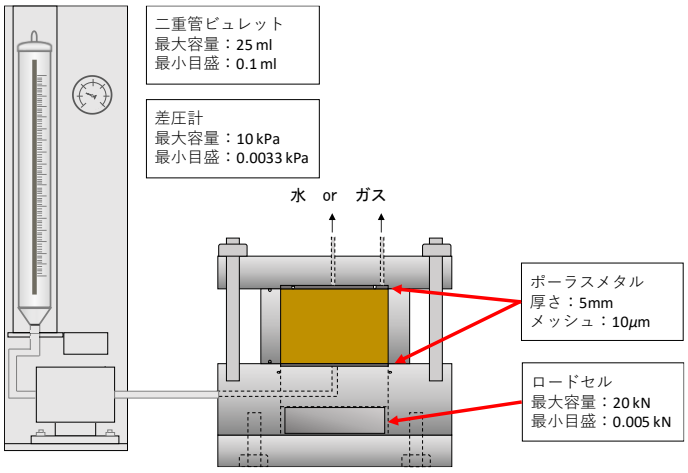


図 3.1-1　膨潤圧試験装置の概要

表 3.1-3　試験用水の水質分析結果

試験用水	Na^{+} (mg/L)	K^{+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)
イオン交換水	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1
塩水 (NaCl aq.: 0.2 mol/L)	4400	<0.1	0.01	<0.1

※表中の<印は、定量下限未満を示す。

3.1.2.2 膨潤圧試験結果

膨潤圧試験の結果を図 3.1-2 に示す。縦軸に最大膨潤圧を、横軸に供試体の縦横比を示している。イオン交換水条件では、最大膨潤圧は 1.4 MPa～2.1 MPa の値を示した。塩水条件では、1.1 MPa～1.9 MPa の値を示した。塩水条件における膨潤圧は、イオン交換水条件よりも 0.2 MPa 程度低い値を示した。図 3.1-3 に、有効粘土密度と膨潤応力の関係について既往データ（菊池ほか, 2005）との比較を行ったものを示す。本試験で用いた緩衝材供試体の有効粘土密度は 1.58 Mg/m^3 程度である。既往データでは、有効粘土密度が 1.5 Mg/m^3 より大きい場合には試験用水の水質による膨潤圧の差がないことが報告されている。本試験における膨潤圧の計測値は同程度の有効粘土密度において、ほとんど同じかやや大きい程度の値を示した。

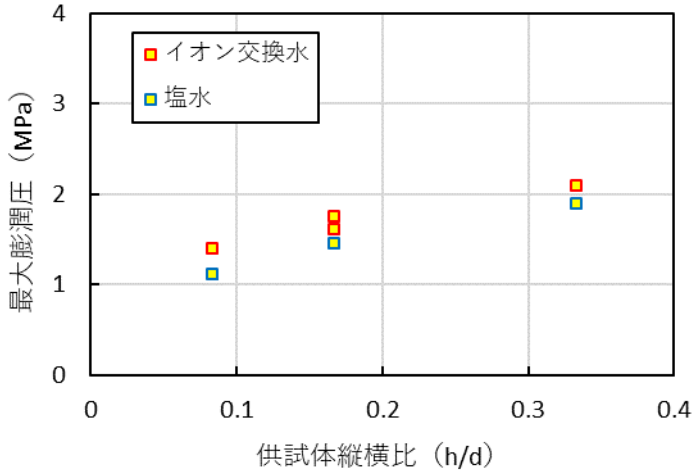


図 3.1-2　供試体縦横比と最大膨潤圧の関係

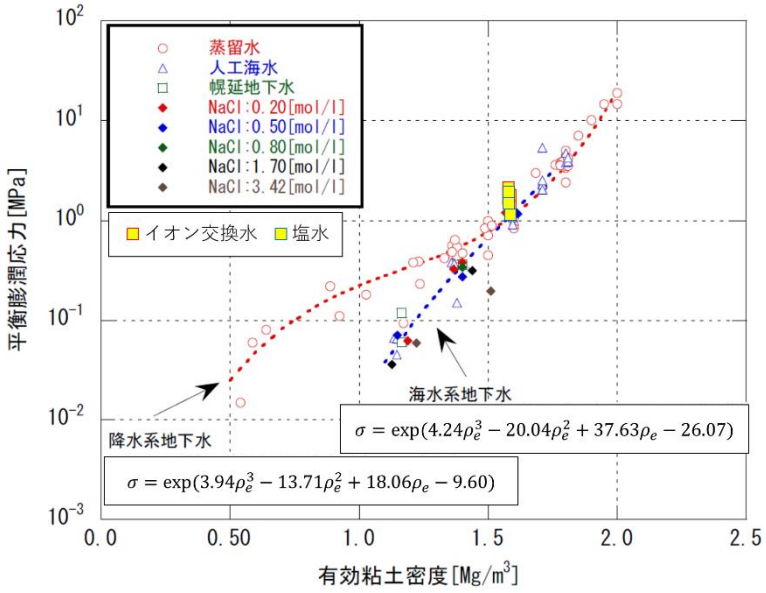


図 3.1-3　有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係
（菊池ほか, 2005 に加筆）

3.1.3　膨潤挙動相互作用試験

3.1.3.1 縮尺模型試験

(1)　縮尺模型の仕様

人工バリアの竪置き方式を対象とした人工バリア性能確認試験（以下、原位置試験）では、図 3.1-4 に示すように、処分孔に直径 2.4 m、高さ 4.2 m の人工バリア（ベントナイト緩衝材＋模擬オーバーパック）を設置し、処分孔内の人工バリア直上の領域と坑道部分は埋め戻し材により埋め戻している。本試験では、原位置試験における人工バリアとその直上の埋め戻し材の領域を緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型により模擬した。縮尺模型試験装置を図 3.1-5 に示す。縮尺模型で原位置試験の状況を模擬する、あるいは原位置試験と異なる点は以下の通りである。

- 縮尺模型の寸法は、原位置試験の 1/20 スケールとした。
- 人工バリアは緩衝材のみを模擬し、模擬オーバーパックは設置しない。
- 原位置試験では原位置地下水を注水しているが、縮尺模型試験ではイオン交換水を注水する。
- 緩衝材と試験容器の間には隙間を設け、その隙間にはケイ砂を充填する。試験容器下部より注水した試験用水はケイ砂層を通じて緩衝材の側面より浸潤する構造とする。
- 埋め戻し材は緩衝材との境界面近傍の部分のみ縮尺模型で再現するとし、本試験においては緩衝材に作用している坑道埋め戻し材の自重に相当する荷重を埋め戻し材の縮尺模型上部より作用させる。

緩衝材の縮尺模型は直径 113 mm、高さ 210 mm である。材料は、クニゲル V1 とケイ砂を重量比で 70%と 30%の割合で混合した混合材料とし初期乾燥密度 1.80 Mg/m^3、初期含水比 10.5%と設定した。ケイ砂は、3 号珪砂と 5 号ケイ砂を重量比でそれぞれ 50%の割合で混合した。緩衝材と試験容器の隙間は 3.5 mm とし、隙間には 8 号ケイ砂を充填した。埋め戻し材の縮尺模型は直径 120 mm、高さ 105 mm とした。材料は、クニゲル V1 と幌延の掘削ズリを重量比で 40%と 60%の割合で混合した混合材料とし、初期乾燥密度 1.20 Mg/m^3、初期含水比 35.0%と設定した。

試験装置は、一定の上載荷重を作用させながら給水を行い、緩衝材や埋め戻し材の縮尺模型への水の浸潤に伴い生じる変形や圧力などの経時変化を把握するものである。試験装置上部に設置した載荷板を介してベロフラムシリンダの制御により上載荷重を作用させた。試験装置の底部にはポーラスメタルを設置しており、二重管ビュレットより自然水頭で給水した試験用水はポーラスメタルおよびケイ砂を通じて縮尺模型の底部と側面より供給される。試験装置には、変位計、荷重計、土圧計、ひずみセンサおよびリン青銅板を設置した。縮尺模型の膨潤による上方への変形量を計測するために、試験装置上部に最大容量 50 mm、最小目盛り 0.005 mm の変位計を設置した。鉛直下向きに発生する圧力を計測するために、試験装置の最下部に最大容量 19.61 kN、最小目盛り 0.0049 kN のロードセルを設置した。試験装置の側面には、縮尺模型の膨潤によって生じる側圧を計測するために、最大容量 5 MPa、最小目盛り 0.0018 MPa の土圧計を設置した。土圧計は、緩衝材の縮尺模型の下端から 52.5 mm、122.5 mm、192.5 mm、227.5 mm の位置にそれぞれ 2 か所ずつ設置している。ひずみセンサおよびリン青銅板は緩衝材と埋め戻し材の縮尺模型の境界面に設置し、境界面の膨潤変形挙動の計測を行うものである。ひずみセンサは、長さ 65 mm、幅 7 mm、厚さ 0.1 mm の基板の両面に 8 枚のひずみゲージを貼付したものである。1 枚のひずみゲージの寸法は、幅 1.4 mm、長さ 4.2 mm、厚さ 0.1 mm であり、最大容量 50000×10^{-6}、最小目盛り 1×10^{-6} である。ひずみセンサは、コーティング剤とテフロンテープにより防水処理を施している。防水処理後のセンサの厚みは中央部で 4mm となった。

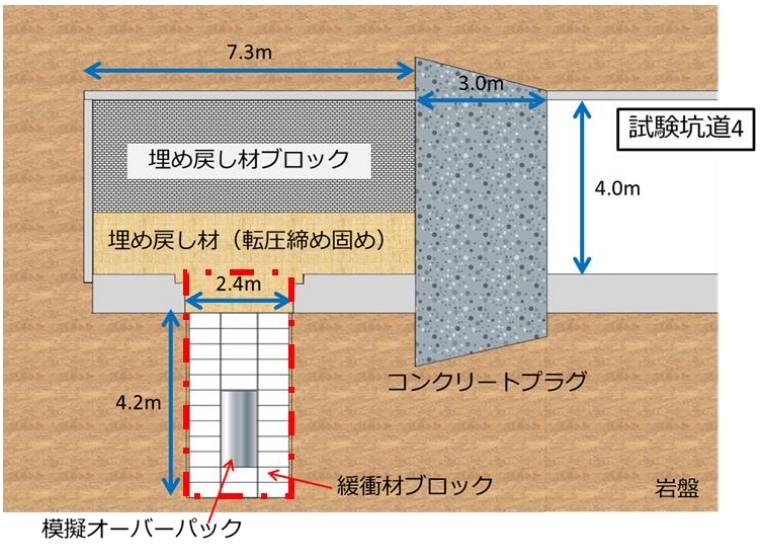


図 3.1-4　人工バリア性能確認試験の概要

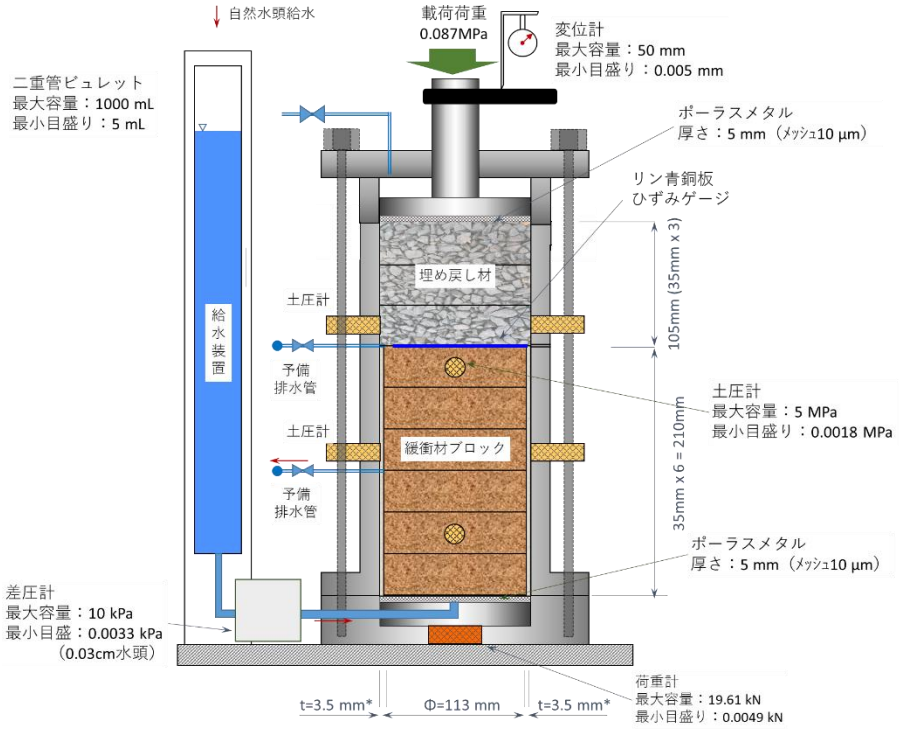


図 3.1-5　縮尺模型試験装置の概要

(2) 縮尺模型の作製

1) 緩衝材

緩衝材の縮尺模型は、6 個の緩衝材ブロックに分割して作製した。1 個のブロックは直径 113 mm、高さ 35 mm である。クニゲル V1、3 号ケイ砂および 5 号ケイ砂を乾燥密度 1.80 Mg/m^3、初期含水比 10.5%の緩衝材ブロックの作製に必要な重量を計量した。3 号ケイ砂と 5 号ケイ砂をビニール袋の中で混合した後に、初期含水比となるように霧吹きよりイオン交換水をケイ砂に加えた。その後、ビニール袋にクニゲル V1 を投入し、十分に混合した後 1 日程度養生した。含水比を調整した材料は、圧縮成型用のモールドに投入し、圧縮成型装置に設置した。圧縮成型装置では、ブロックの高さが 35 mm となるまで静的載荷（圧縮速度：1 mm/min）を行った。ブロックが所定の高さとなったことを確認した後、20 分程度その状態を保持した。

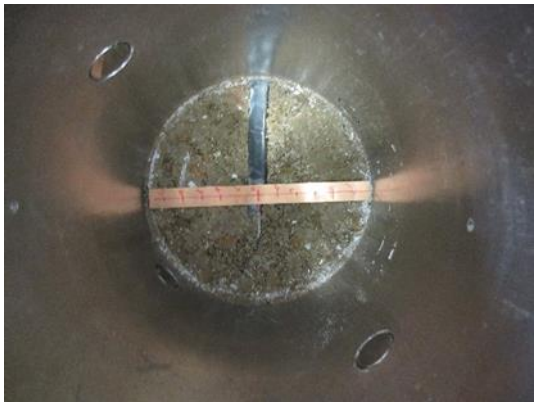
2) 埋め戻し材

埋め戻し材の縮尺模型は、直径 120 mm の試験容器内に 3 層に分割して静的に圧縮することにより作製した。1 層あたりの高さは 35 mm である。まず、クニゲル V1 と掘削ズリのそれぞれについて乾燥密度 1.20 Mg/m^3、初期含水比 35.0%の埋め戻し材の 1 層分に必要な重量を計量した。ビニール袋に掘削ズリを投入し、初期含水比となるように霧吹きよりイオン交換水を掘削ズリに加えた。その後、ビニール袋にクニゲル V1 を投入し、十分に混合した後 1 日程度養生した。圧縮成型装置では、1 層分の高さが 35 mm となるまで静的載荷（圧縮速度：1 mm/min）を行った。所定の高さとなったことを確認した後、10 分程度その状態を保持した。以上の手順を、3 層分、すなわち埋め戻し材の高さが 105 mm となるまで繰り返し実施した。

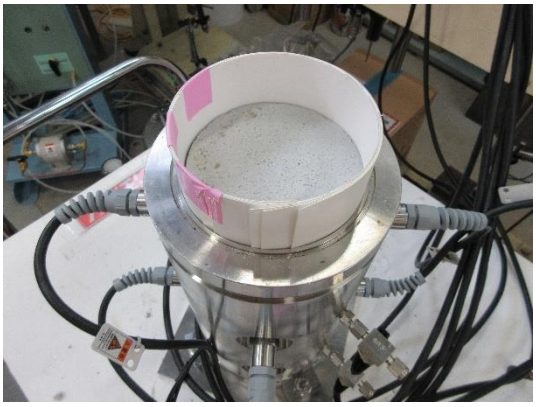
3) 試験装置の組み立て

試験装置の組立状況を図 3.1-6 に示す。埋め戻し材の縮尺模型を作製後、ひずみセンサを設置した。埋め戻し材にひずみセンサを設置するための溝を加工し、溝に沿ってひずみセンサを設置した。ひずみセンサのケーブルは試験容器の側面にあけた穴より取り出した。その後、リン青銅板をひずみセンサと直交するように埋め戻し材の上に設置した。

緩衝材ブロックの設置の際には、試験容器との間に 3.5 mm の厚さを確保するために試験容器内側に厚紙を巻いた。緩衝材ブロックを 1 個ずつ埋め戻し材の上に設置し、6 個の緩衝材ブロックを設置した後に厚紙を取り外した。その後、緩衝材ブロックと試験容器の間の隙間に直径 3 mm 程度のスペーサーを設置し、隙間に 8 号ケイ砂を充填した。作業完了後に、スペーサーを取り外し、試験装置底版を取り付けた。試験容器の上下を入れ替え、埋め戻し材の上部に載荷板を設置した。ひずみセンサのケーブル取り出し用の穴は、注水した試験用水が漏れ出てこないようにシリコンシーラントで止水した。



(a) ひずみセンサとリン青銅板の設置状況

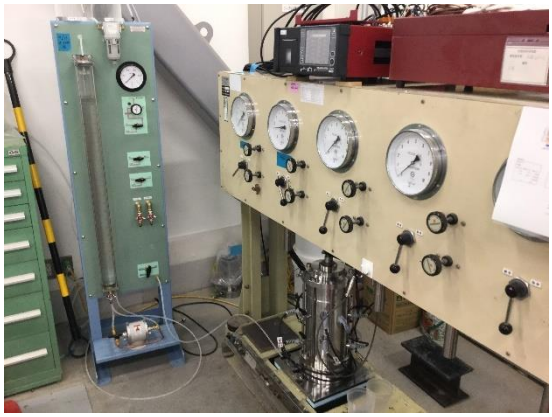


(b) 緩衝材ブロックの設置状況

(c) ケイ砂層の充填状況

(d) ケーブル取り出し穴の状況

(e) 試験装置組み立ての状況



(f) 試験実施の状況

図 3.1-6　縮尺模型試験装置の組み立て状況

(3) 試験方法・試験条件

本年度は、縮尺模型を 2 体作製して試験を実施した。試験では、緩衝材と埋め戻し材の境界面に設置したひずみゲージとリン青銅板が膨潤挙動におよぼす影響を把握するために、ひずみゲージとリン青銅板を設置した条件（計測器有ケース）と設置しない条件（計測器無ケース）の 2 条件とした。試験用水は、イオン交換水を使用した。イオン交換水の水質分析結果を表 3.1-4 に示す。

試験は室温を 20°C に設定した実験室で実施した。試験装置をベロフラムシリンダ制御の載荷装置内に設置した。まず、試験孔直上の埋め戻し材の自重に相当する 0.087 MPa の荷重を作用させた。荷重を作用させた状態を 20 分保持した後に、試験用水の注水を行い、試験を開始した。試験中の変位計や土圧計の計測値はデータロガーにより収集した。

試験は 90 日間実施し、試験終了後にはサンプリングにより縮尺模型の含水比分布を計測した。緩衝材と埋め戻し材の境界面においては、計測器有ケースではリン青銅板の形状計測を、計測器無ケースでは境界面の顕微鏡観察を行った。縮尺模型の解体手順を以下に示す。

図 3.1-7 に縮尺模型の解体状況を示す。まず、ベロフラムシリンダによる荷重を除荷した後のリバウンド量を変位計により計測した。その後、試験容器を載荷装置から取り外し、埋め戻し材側が下になるように押し出し機に設置した。緩衝材の解体は、押し出し機を用いて緩衝材を上方に 10 mm 程度押し出し、押し出した分をカットした。カットした緩衝材の中央部を長さ 30 mm、幅 10 mm の大きさで 12 個の小ブロックに分割した。分割した小ブロックは寸法を計測した後に、炉乾燥法による含水比計測を行った。緩衝材の押し出しと小ブロックへの分割を緩衝材と埋め戻し材の境界面が現れるまで繰り返した。計測器有ケースでは、リン青銅板の形状計測とひずみセンサの取り外し作業を行った。計測器無ケースでは、緩衝材と埋め戻し材の境界面が一体化した状態でサンプリングし光学顕微鏡による境界面の観察を実施した。最後に、埋め戻し材を試験容器から全て押し出し、高さを 3 等分にして分割した。埋め戻し材では、中央部と外周部の含水比を計測した。

表 3.1-4　イオン交換水の水質分析結果

Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)
0.16	<0.1	0.01	<0.1

※表中の<印は、定量下限未満を示す。

(a) 緩衝材の押し出し　(b) 緩衝材のカット

(c) 緩衝材の分割　(d) 埋め戻し材の取り出し

図 3.1-7　縮尺模型の解体状況

3.1.3.2 小規模模型試験

(1) 小規模模型の仕様

縮尺模型試験においては試験用水としてイオン交換水を注水していたが、原位置試験では幌延の塩水系地下水を注水している。そこで、緩衝材や埋め戻し材に浸潤する試験用水の水質が緩衝材と埋め戻し材の相互作用下における膨潤挙動におよぼす影響を把握するために、縮尺模型をさらにスケールダウンした小規模模型を用いた試験を実施した。小規模模型試験装置を図 3.1-8 に示す。小規模模型試験の概要を以下に示す。

- 小規模模型の寸法は、縮尺模型の約 5/6 スケールである。
- 人工バリアは緩衝材のみを模擬し、模擬オーバーパックは設置しない。
- 小規模模型試験では、イオン交換水を注水するケースと塩水を注水するケースの 2 ケースを実施する。

緩衝材の小規模模型は、直径 93 mm、高さ 174 mm である。緩衝材と試験容器の隙間を 3.5 mm 確保することとしたため、小規模模型の直径は縮尺模型の 5/6 よりも若干小さくなっている。隙間には 8 号ケイ砂を充填した。材料は、縮尺模型と同様にクニゲル V1 とケイ砂を重量比で 70%と 30%の割合で混合した混合材料とし初期乾燥密度は 1.80 Mg/m^3、初期含水比は 10.5%である。ケイ砂は、3 号珪砂と 5 号ケイ砂を重量比でそれぞれ 50%の割合で混合した。埋め戻し材の小規模模型は、直径 100 mm、高さ 87 mm である。材料は、クニゲル V1 と幌延の掘削ズリを重量比で 40%と 60%の割合で混合した混合材料であり、初期乾燥密度 1.20 Mg/m^3、初期含水比 35.0%と設定した。

小規模模型試験装置は、一定の上載荷重を作用させながら給水を行い、緩衝材や埋め戻し材の小規模模型への水の浸潤に伴い生じる変形の経時変化を把握するものである。試験装置上部に設置した載荷板を介してベロフラムシリンダの制御により上載荷重を作用させた。試験装置の底部にはポーラスメタルを設置しており、フロート式ビュレット管より自然水頭で給水された試験用水はポーラスメタルおよびケイ砂を通じて小規模模型の底部と側面より供給される。フロート式ビュレット管は、最大容量 2500 mL、最小目盛 0.011 mL であり、ビュレット管内のリニアセンサによって計測した水位変化より注水量を算出した。小規模模型の膨潤による上方への変形量は、試験装置上部設置した最大容量 50 mm、最小目盛り 0.005 mm の変位計で計測した。

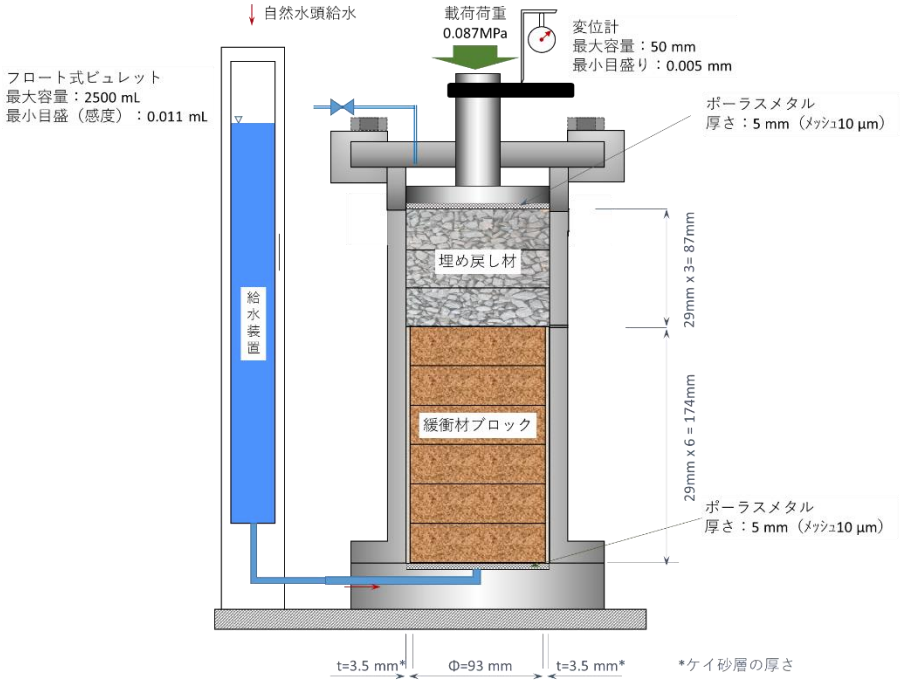


図 3.1-8　小規模模型試験の概要

(2)　小規模模型の作製

小規模模型は、緩衝材ブロックを作製・設置した後に、埋め戻し材を作製した。その手順を以下に示す。

1)　緩衝材

緩衝材の小規模模型は、6 個の緩衝材ブロックに分割して作成した。1 個のブロックは直径 93 mm、高さ 29 mm である。クニゲル V1、3 号ケイ砂および 5 号ケイ砂を乾燥密度 1.80 Mg/m^3、初期含水比 10.5%の緩衝材ブロックの作製に必要な重量を計量した。3 号ケイ砂と 5 号ケイ砂をビニール袋の中で混合した後に、初期含水比となるように霧吹きよりイオン交換水をケイ砂に加えた。その後、ビニール袋にクニゲル V1 を投入し、十分に混合した後 1 日程度養生した。含水比を調整した材料は、圧縮成型用のモールドに投入し、圧縮成型装置に設置した。圧縮成型装置では、ブロックの高さが 29 mm となるまで静的載荷（圧縮速度：1 mm/min）を行った。ブロックが所定の高さとなったことを確認した後、20 分程度その状態を保持した。

緩衝材ブロックの設置の際には、試験容器との間に 3.5 mm の厚さを確保するために試験容器内側に厚紙を巻いた。緩衝材ブロックを 1 個ずつ試験容器内に設置し、6 個の緩衝材ブロックを設置した後に厚紙を取り外した。その後、緩衝材ブロックと試験容器の間の隙間に直径 3 mm 程度のスペーサーを設置し、隙間に 8 号ケイ砂を充填した。

2)　埋め戻し材

埋め戻し材の小規模模型は、直径 100 mm の試験容器内に 3 層に分割して静的に圧縮することにより作製した。1 層あたりの高さは 29 mm である。まず、クニゲル V1 と掘削ズリのそれぞれについて乾燥密度 1.20 Mg/m^3、初期含水比 35.0%の埋め戻し材の 1 層分に必要な重量を計量した。ビニール袋に掘削ズリを投入し、初期含水比となるように霧吹きよりイオン交換水を掘削ズリに加えた。その後、ビニール袋にクニゲル V1 を投入し、十分に混合した後 1 日程度養生した。埋め戻し材の 1 層目は、試験容器内に設置した緩衝材ブロックの上に材料を投入し、平坦になる

ように敷き均した。2 層目および 3 層目は前の埋め戻し層の上に材料を投入し圧縮成型した。試験容器を圧縮成型装置に設置し、1 層分の高さが 29 mm となるまで静的載荷（圧縮速度：1 mm/min）を行った。所定の高さとなったことを確認した後、10 分程度その状態を保持した。以上の手順を、3 層分、すなわち埋め戻し材の高さが 87 mm となるまで繰り返し実施した。

(3) 試験方法・試験条件

小規模模型は 2 体作製して試験を実施した。試験では、試験用水の水質が膨潤挙動に及ぼす影響を把握するために、イオン交換水と塩水の 2 条件とした。塩水には、0.2 mol/L の NaCl 水溶液を使用した。試験用水の水質分析の結果を表 3.1-5 に示す。小規模模型試験の手順を以下に示す。

試験は室温を 20°C に設定した実験室で実施した。試験装置をベロフラムシリンダ制御の載荷装置内に設置した。まず、試験孔直上の埋め戻し材の自重に相当する 0.087 MPa の荷重を作用させた。荷重を作用させた状態を 20 分保持した後に、試験用水の注水を開始した。試験中の変位計の計測値はデータロガーにより収集した。

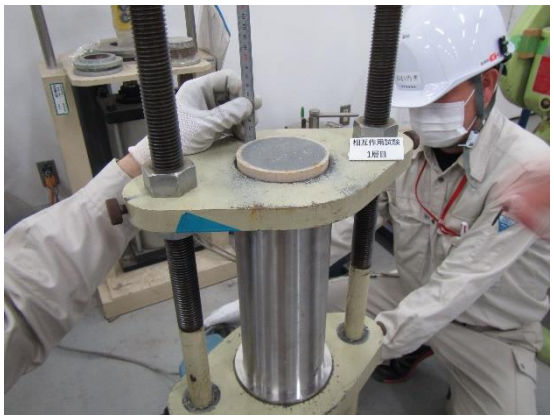
試験は 50 日程度継続し、試験終了後にはサンプリングにより小規模模型の含水比分布を計測した。小規模模型の解体手順を以下に示す。

図 3.1-9 に小規模模型試験の解体作業の状況を示す。まず、ベロフラムシリンダによる荷重を除荷した後のリバウンド量を変位計により計測した。その後、試験容器を載荷装置から取り外し、埋め戻し材側が下になるように押し出し機に設置した。緩衝材の解体は、押し出し機を用いて緩衝材を上方に 10 mm 程度押し出し、押し出した分をカットした。カットした緩衝材の中央部を長さ 30 mm、幅 10 mm の大きさで 9 個の小ブロックに分割した。分割した小ブロックは寸法を計測した後に、炉乾燥法による含水比計測を行った。緩衝材の押し出しと小ブロックへの分割を緩衝材と埋め戻し材の境界面が表れるまで繰り返した。その後、緩衝材と埋め戻し材の境界面が一体化した状態でサンプリングし光学顕微鏡による境界面の観察を実施した。最後に、埋め戻し材を試験容器から全て押し出し、高さを 3 等分にして分割した。埋め戻し材では、中央部と外周部の含水比を計測した。

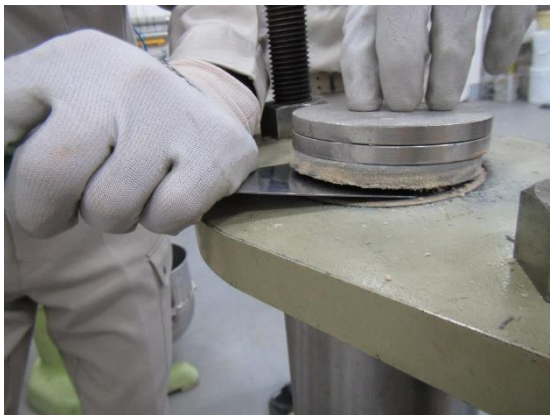
表 3.1-5　塩水（0.2mol/L NaCl 水溶液）の水質分析結果

Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)
4400	<0.1	0.07	0.27

※表中の<印は、定量下限未満を示す。

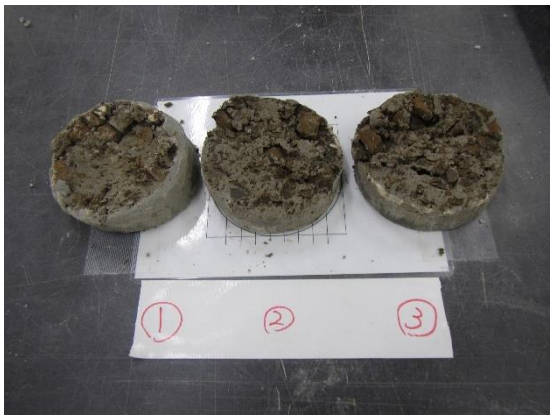


(a) 緩衝材の押し出し



(b) 緩衝材のカット

(c) 緩衝材の分割



(d) 埋め戻し材の分割

図 3.1-9　小規模模型試験の解体作業の状況

3.1.3.3 縮尺模型試験の結果

(1) 上方への変位量

縮尺模型の上方への変位量は試験装置上部に設置した変位計で計測した。膨潤変形率は、試験開始時の緩衝材と埋め戻し材の縮尺模型全体の高さである 315 mm に対する上方への変位量の割合として算出した。図 3.1-10 に膨潤変形率の経時変化、図 3.1-11 に試験時の注水量を示す。注水量は、試験開始時からの累積値である。

計測器有ケースでは、注水量が 40 日程度で一定の値へと収束し、最終的な注水量は 673 mL となった。試験開始後、注水量の増加とともに膨潤変形率が増加した。その後、20 日を経過したころからその増加が緩やかになる傾向を示し、注水量が一定の値に収束した 40 を日経過したころには膨潤変形率も一定の値へと収束している。試験終了時には、変位量が 10.57 mm で膨潤変形率が 3.36%となった。

計測器無ケースにおいても、注水量は 40 日程度で一定の値へと収束し、試験終了時の注水量は 714 mL であった。また、注水量の増加に伴い膨潤変形量が増加しており、20 日を経過したころから増加が緩やかになる傾向を示し、注水量が一定の値に収束した 40 日を経過したころには膨潤変形率も一定の値へと収束した。試験終了時には、変位量が 15.01 mm、膨潤変形率が 4.76%となった。境界面にひずみセンサとリン青銅板を設置していない計測器無ケースでの上方への変位が大きい結果となった。

平成 31 年度に実施した埋め戻し材の膨潤変形試験の結果より、埋め戻し材では膨潤による変形がほとんど生じないことから、縮尺模型試験で上方への変位は緩衝材の膨潤変形によるものと考えられる。

両ケースにおいて、試験開始 40 日を経過したあたりで自然水頭条件による縮尺模型への給水が停止し、膨潤による上方への変位がそれ以上は生じていないと考えられる。両ケースともに、試験終了時の注水量から算出した縮尺模型全体の飽和度はそれぞれ約 96%となり、飽和が完了していない結果となった。縮尺模型への注水量を増加させて飽和度を高めるためには、加圧注水が必要になると考えられる。

また、上載荷重を除荷した際のリバウンドによる上方への変位量を計測した。計測は、上載荷重の除荷後 10 分間実施した。リバウンドにより生じた変形率は、試験開始時の緩衝材と埋め戻し材の縮尺模型全体の高さである 315 mm に対するリバウンドによる変位量の割合として算出した。図 3.1-12 にリバウンドによる変形率を示す。計測器有ケースでは、除荷後に変形率は急激に増加し、20 秒を経過した時点で 0.154%に達し、10 分後のには 0.227%となった。計測器無ケースにおいても、除荷後に変形率が急激に増加し、30 秒を経過した時点で 0.131%に達し、10 分後には 0.184%となった。

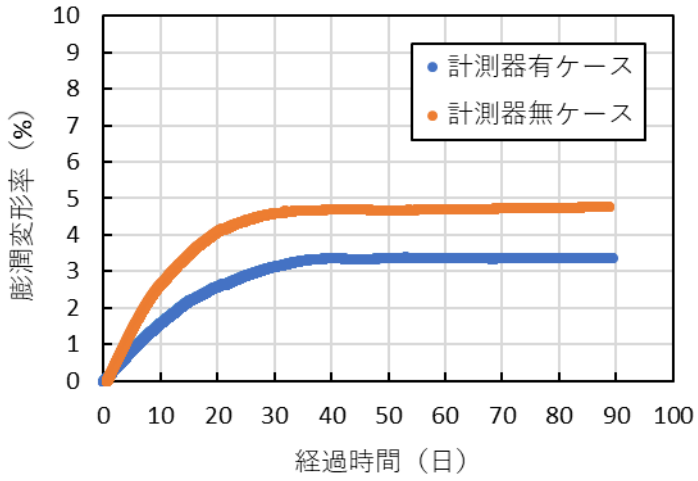


図 3.1-10　縮尺模型試験における上方への変形率の経時変化

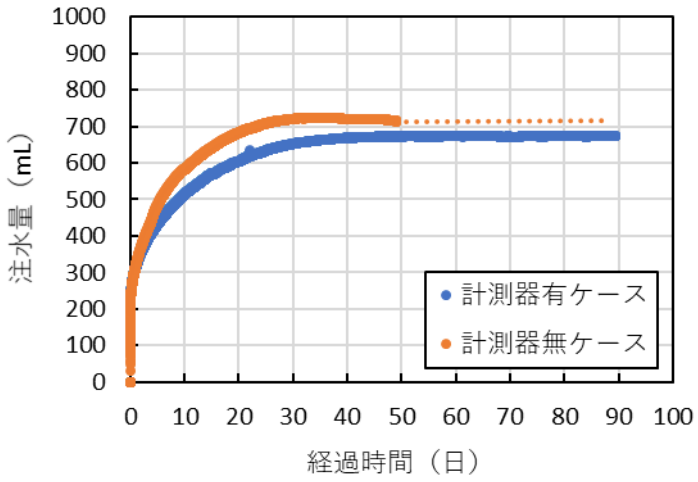


図 3.1-11　縮尺模型試験における注水量の経時変化

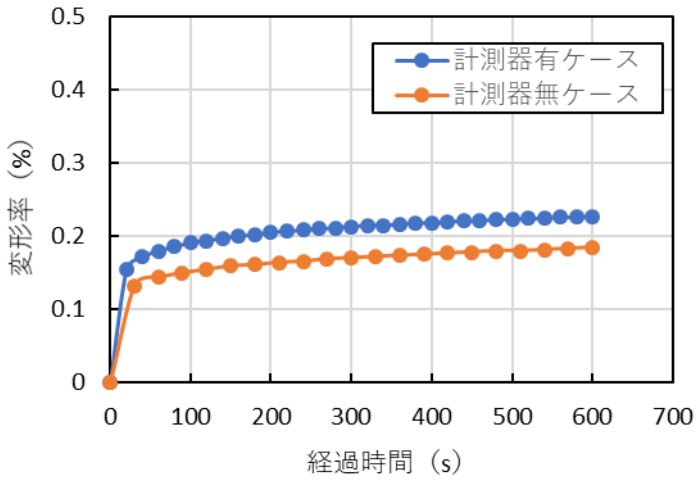


図 3.1-12　縮尺模型試験におけるリバウンドによる変形率の経時変化

(2)　鉛直下向きおよび側方の圧力

図 3.1-13 に土圧計およびロードセルの設置位置を示す。図 3.1-14 に土圧計による側方圧力の経時変化を、図 3.1-15 にロードセルによる鉛直圧力の経時変化を、表 3.1-6 に各計測器で得られた圧力の最大値を示す。緩衝材の部分に設置した土圧計は、土圧計 1、2 が下段、土圧計 3、4 が中段、土圧計 5、6 が上段に位置する。土圧計 1～6 では、試験開始直後に急激に圧力が増加した後、1～2 日経過したころに最大値を示すピークが現れ、その後減少傾向に転じた。ピークを示すまでの時間は、緩衝材の上段、中段、下段の順番に早かった。15～20 日を経過するころまでは、圧力は減少傾向を示していたが、その後緩やかに増加する傾向に転じ最終的に一定の値へと収束する傾向を示した。計測した圧力の最大値および最終値は、緩衝材の下段、中段、上段の順に高い値を示した。下段では最大値が 1 MPa 程度の値であるのに対して、上段では 0.5～0.6 MPa 程度とおおよそ半分ほどの大きさであった。また、試験装置底部に設置しているロードセルの経時変化は、緩衝材下段に設置した土圧計 1、2 と同様の傾向を示しており、最大値はおおよそ 1 MPa であった。

埋め戻し材に設置した土圧計 7、8 については、試験開始直後に圧力が増加している場合が確認された。また、最終的な圧力も最大で 0.2 MPa 程を示した。平成 31 年度に実施した試験（原子力機構・原環センター, 2020）において埋め戻し材の膨潤圧は約 0.03 MPa であったことから、土圧計 7、8 で計測した圧力は埋め戻し材の膨潤によるものではなく、埋め戻し材が上方へ変位した際に、埋め戻し材の中に含まれる粒径の大きな掘削ズリが接触し、圧力の増加が計測された可能性が考えられる。

計測器有ケースと計測器無ケースを比較すると、緩衝材下段において、ピークを迎えた後の圧力の減少が大きく、最終的な圧力の値も 0.2 MPa 程度低い値を示した。

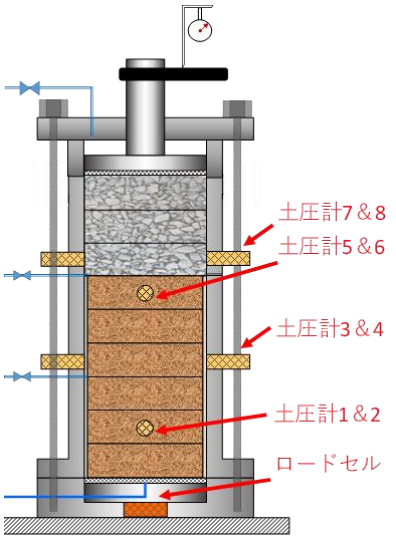
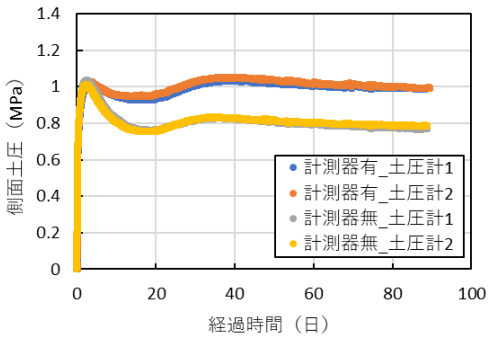
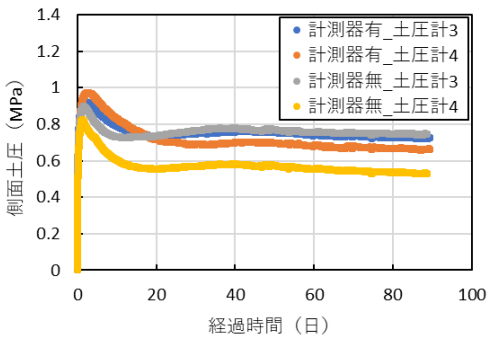


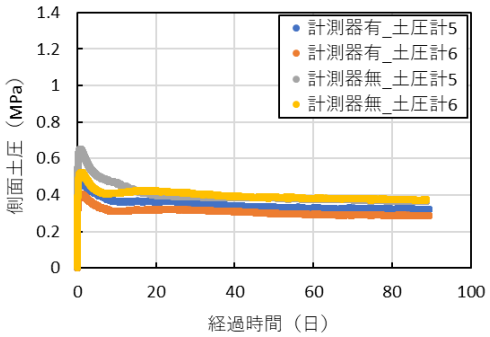
図 3.1-13　土圧計およびロードセルの設置位置



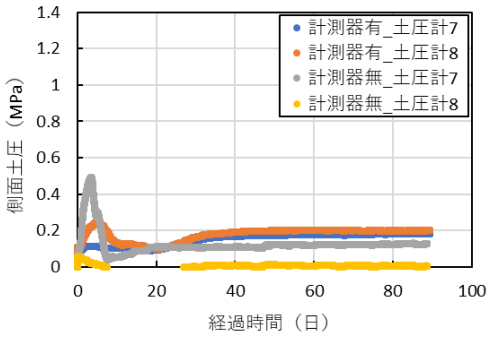
(a) 土圧計 1，2



(b) 土圧計 3，4



(c) 土圧計 5，6



(d) 土圧計 7，8

図 3.1-14　土圧計により測定した土圧の経時変化

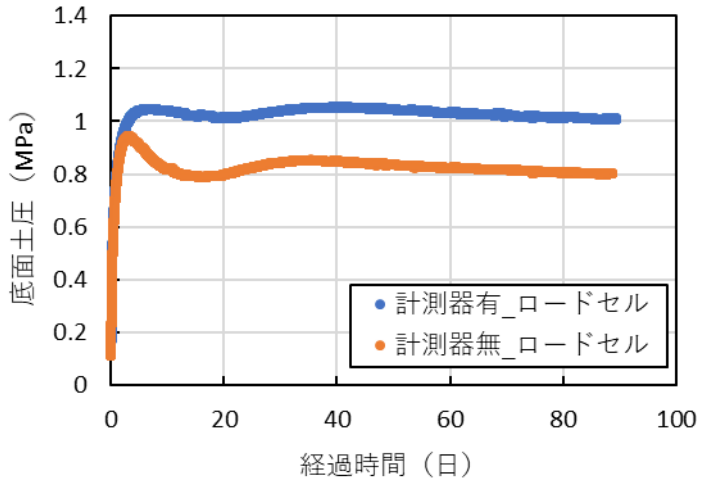


図 3.1-15　ロードセルにより計測した土圧の経時変化

表 3.1-6　縮尺模型試験における最大土圧および最終土圧

計測器	最大土圧（MPa）		最終土圧（MPa）		計測器位置
	計測器有	計測器無	計測器有	計測器無	
土圧計 8	0.24	0.06	0.20	0.00	埋め戻し材
土圧計 7	0.18	0.49	0.18	0.13	
土圧計 6	0.40	0.52	0.29	0.37	緩衝材上段
土圧計 5	0.48	0.65	0.32	0.36	
土圧計 4	0.97	0.82	0.66	0.53	緩衝材中段
土圧計 3	0.92	0.90	0.72	0.74	
土圧計 2	1.05	1.01	0.99	0.78	緩衝材下段
土圧計 1	1.03	1.04	0.99	0.77	
ロードセル	1.05	0.94	1.05	0.80	試験装置底部

(3)　含水比計測

試験終了後に、縮尺模型を試験容器から取り出して含水比を計測した。緩衝材の高さ方向は、計測器有ケースで 18 層（1 層の平均厚さは 9.56 mm～16.53mm）に、計測器無ケースで 16 層（10.67 mm～18.42 mm）に分割した。その後、各層の中央を長さ 30 mm、幅 10 mm の 12 個のブロックに分割し、炉乾燥法により含水比を計測した。計測器有ケースの含水比測定のための分割位置を図 3.1-16 に示す。計測器有ケースでは、緩衝材の底部から 1 層目とし、埋め戻し材に最も近い側を 18 層目とした。埋め戻し材は、緩衝材に最も近い側を 1 層目とした。また、埋め戻し材の外周部は、外周①のブロックと外周②のブロックを合わせて含水比計測を行った。計測器無ケースも緩衝材の高さ方向の分割数は 16 層と異なるが計測器有ケースと同様の方法で含水比を整理した。

炉乾燥法により計測した緩衝材の含水比の分布を図 3.1-17 に示す。水平方向の含水比は、縮尺模型への給水のために設けたケイ砂層と接している外周部の含水比が高く、中央部の含水比が低い傾向を示した。高さ方向の含水比分布を見ると埋め戻し材との境界面に近い上部の含水比が高く、中央部や下部には含水比が低い領域が残っていることが確認できる。計測器有ケースでは、

ひずみセンサを設置するために加工した溝やリン青銅板を設置した際の隙間が水みちとなっている可能性も考えられる。一方で、計測器無ケースでも同様の含水比分布の傾向がみられることから、緩衝材ブロックと埋め戻し材の境界面から試験用水が浸潤している可能性も考えられる。縮尺模型試験においては、試験容器内で圧縮成型した埋め戻し材の上に別途圧縮成型した緩衝材ブロックを設置しているため、試験開始時には緩衝材と埋め戻し材は一体化していない。そのため、緩衝材と埋め戻し材の境界面が水みちとなった可能性が考えられる。

埋め戻し材の含水比計測の結果を表 3.1-7 に示す。埋め戻し材は、高さ方向に 3 層に分割し、各層の中央部と外周部に分けて含水比を計測した。計測器無ケースについては、試験装置を解体作業の中で、上部の載荷板を取り外す際に、埋め戻し材が載荷板に張り付き割れてしまったため、残った部分を 2 分割とした。高さ方向の含水比は、1 層目、2 層目、3 層目の順に大きく、緩衝材との境界面に近いほど高い値を示した。中央部と外周部で比較すると、計測器有ケースの 2 層目と 3 層目で中央部の含水比が外周部よりも高い値を示した。

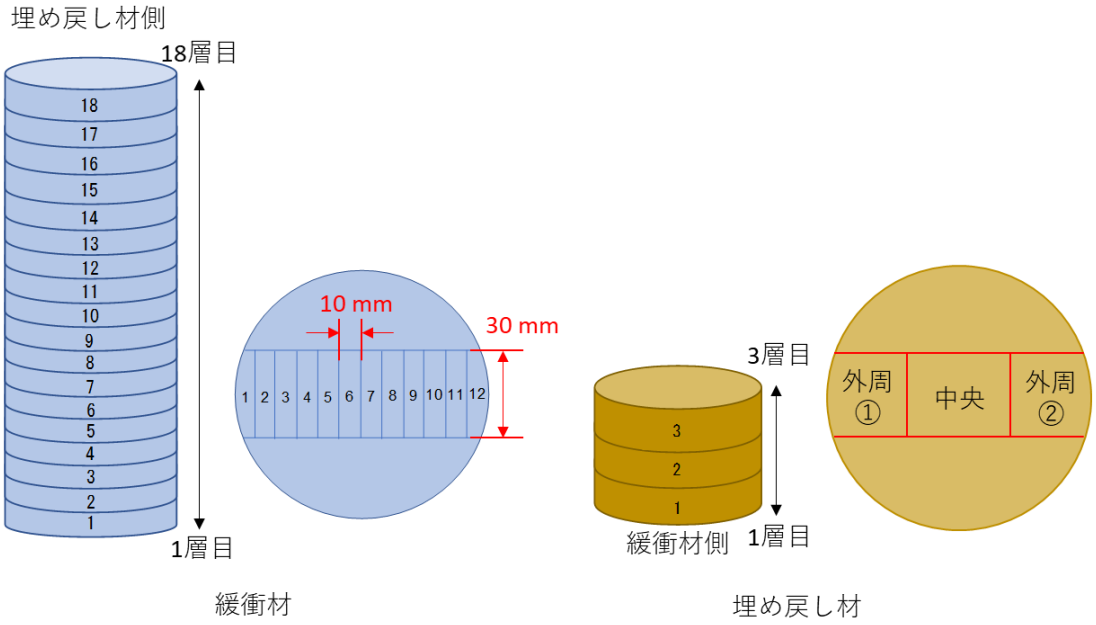
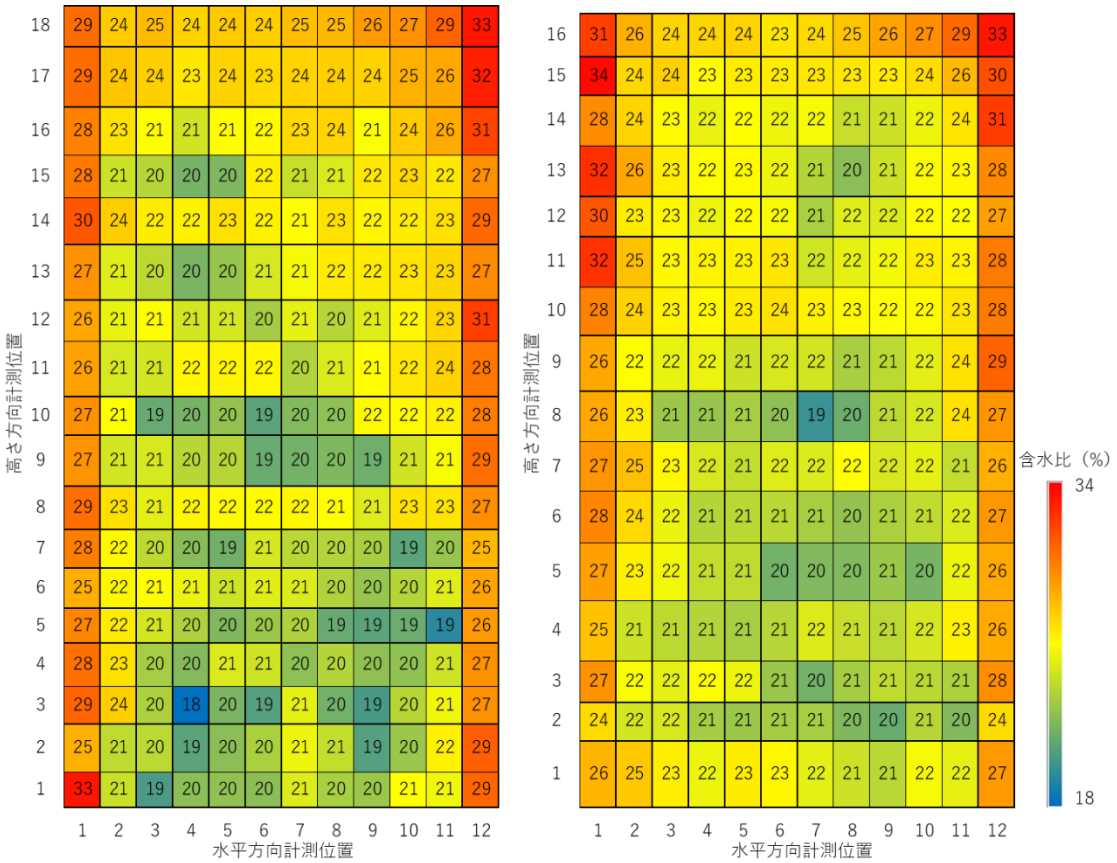


図 3.1-16　縮尺模型試験における含水比の計測位置



計測器有ケース　　計測器無ケース

図 3.1-17　縮尺模型試験における緩衝材の含水比分布

表 3.1-7　埋め戻し材の含水比計測結果

		含水比（%）	
		計測器有	計測器無
中央部	3 層目	38.02	-
	2 層目	38.77	38.1
	1 層目	38.94	38.3
外周部	3 層目	36.94	-
	2 層目	37.84	38.2
	1 層目	39.30	38.5

(4)　境界面形状計測

1)　ひずみセンサ

緩衝材と埋め戻し材の境界面に設置したひずみセンサの設置状況を図 3.1-18 に示す。ひずみセンサは縮尺模型の中心から外周に向かって設置している、ひずみセンサを設置する際に固定点は設けていないが、ケーブルを試験容器側面に設けた穴から取り出しており、穴には止水のためにシリコンシーラントを塗布している。ひずみセンサには、リン青銅板の長手方向の 4 か所の位置にひずみゲージを取り付けている。各位置において、リン青銅板の表裏に 1 枚ずつ、計 8 枚のひずみゲージを取り付けている。ひずみゲージ①と②が縮尺模型の中心に一番近く、ひずみゲー

ジ⑦と⑧が外周に一番近い。緩衝材の膨潤によりひずみセンサが変形した時に生じたひずみを計測した。ひずみセンサにより計測した曲げひずみの経時変化を図 3.1-19 に示す。

曲げひずみの値は、各センサ位置において緩衝材側のひずみゲージの計測値と埋め戻し材側のひずみゲージの計測値の差分（例えば、①の計測値-②の計測値）を求めることにより算出した。個々のひずみゲージは、引張ひずみが生じたときに正の値を出力する。そのため、緩衝材側の計測値から埋め戻し材側の計測値の差分とした曲げひずみの値が負の値、すなわち、圧縮ひずみを示したときに、ひずみセンサは上向きに凸の形状を示し、緩衝材の上方への変位によりひずみセンサが変形していると考えられる。曲げひずみの経時変化を見ると、まず緩衝材の外周部に最も近いひずみゲージ⑦の位置で圧縮ひずみが計測され､その絶対値が急激に増加している｡その後、やや遅れて外側から二番目の位置にあるひずみゲージ⑤の位置で圧縮ひずみが出力された。中心に二番目に近いひずみゲージ③の位置では、試験開始初期は、引張ひずみを計測していることから下に凸の形状を示していると考えられるが、最終的に計測値は圧縮ひずみとなり上に凸の形状を示している。最も中心に近いひずみゲージ①の位置では、試験終了まで引張ひずみが計測された。これらの結果をまとめると、ひずみセンサの変形挙動は次のように考えることができる。まず、縮尺模型外周部からの水の浸潤に伴い外周部から上方への変位が生じると、ひずみセンサの先端（供試体外周部）が上方へと持ち上がることにより、ひずみゲージ⑦、⑤の位置では上に凸の形状をひずみゲージ③、①の位置では下に凸の形状を示す。その後、時間経過に伴い緩衝材外側の変形量が大きくなるとともに、縮尺模型の中心に向かって浸潤が進むことでひずみゲージ③の位置においても上方への変位が生じ最終的に上に凸の形状を示したと考えられる。

図 3.1-20 には、ある経過時間における各位置での曲げひずみの値を示す。本測定では、固定点を設けていないため、ある経過時間における曲げひずみの量は、定性的かつ相対的なひずみセンサの形状を示していると考えられる。

2)　リン青銅板

リン青銅板は緩衝材の 18 層目に埋まった状態で取り出した。リン青銅板の形状が変わらないように注意を払いながらリン青銅板の表面を露出させた。緩衝材に埋まった状態のリン青銅板の形状計測の方法を図 3.1-21 に示す。リン青銅板を含む緩衝材の 18 層目のブロックの左右に L 字型角パイプを設置した。さらに、高さ L 字型角パイプの上に角パイプを設置し、角パイプの上面を基準面とした。この時、基準面から緩衝材ブロックの底面までの距離が 80.04 mm となった。基準面からリン青銅板表面までの距離をノギスにより計測して求めた供試体の厚さを差し引くことでリン青銅板の変形量を測定した。図 3.1-22 に測定した形状を示す。図 3.1-22 では、横軸はリン青銅板の長手方向、すなわち、水平方向の計測位置を示しており、リン青銅板の中央を基準とした。また、縦軸をリン青銅板の中央を基準とした変形量で示しており、この場合には、正の方向が埋め戻し材側の方向を負の方向が緩衝材側の方向を示す。図 3.1-22 より、緩衝材の膨潤による変形は一様ではなく、水平方向の位置によって異なることが分かる。これは、試験用水が縮尺模型の外周から徐々に浸潤しており、ある位置における膨潤変形がその位置の浸潤の進展状況に依存することと整合的である。水平位置の正の側では埋め戻し材側に、負の側では緩衝材側に変形しているように見えるが、リン青銅板の中央を計測位置および変形量のゼロ点としたためであり、実際には緩衝材の上方への膨潤変形によりリン青銅板も上方へ変位しているものと考える。また、変形量の絶対値については、リン青銅板を緩衝材ブロックに埋まった状態で取り出したため、切り出したブロックの底面の向きが水平ではなく、計測時のリン青銅板が試験時の水平から傾いていた可能性が考えられ、基準面からの距離を測定し変形量を算出したことを考慮すると参考値にとどまると考えられる。

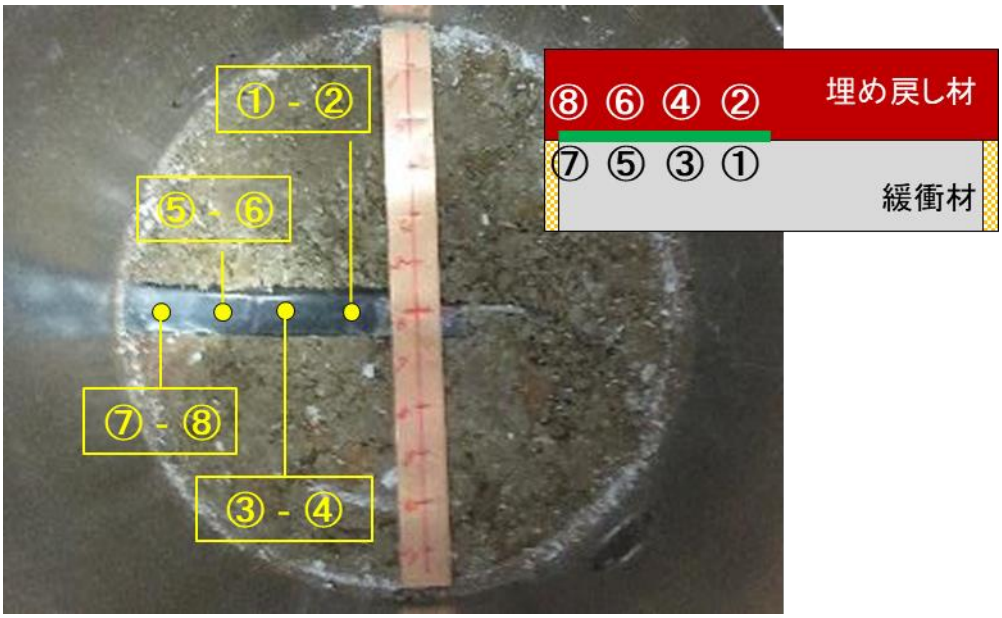


図 3.1-18　ひずみセンサの設置状況

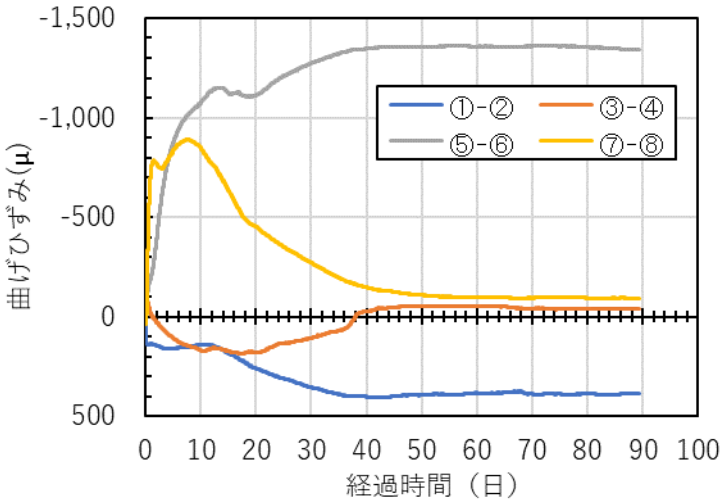


図 3.1-19　曲げひずみの経時変化

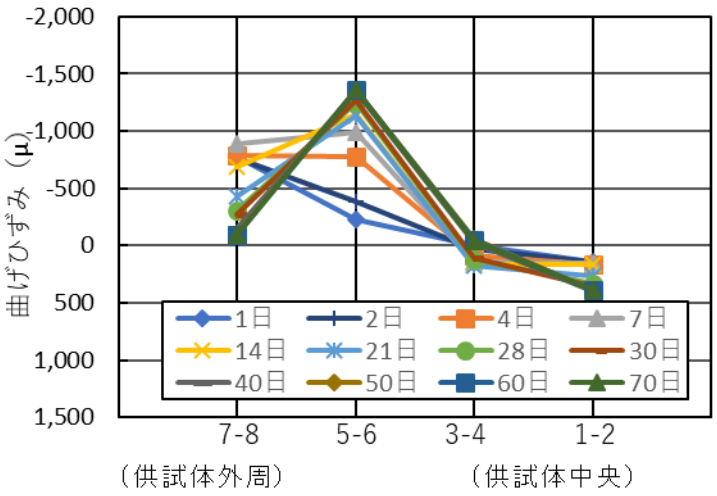


図 3.1-20　ある時間断面における曲げひずみの計測値

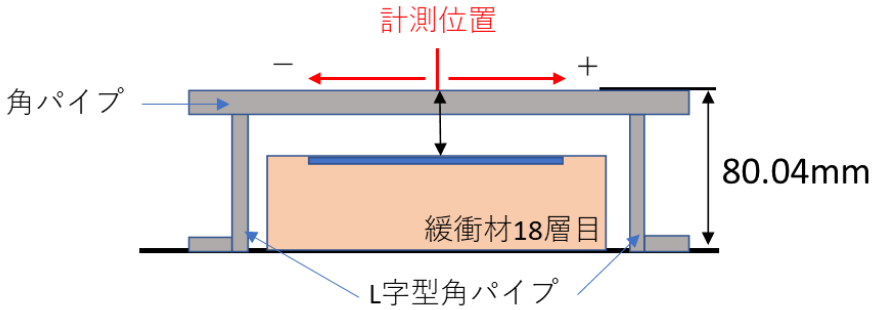


図 3.1-21　リン青銅板の形状計測の方法

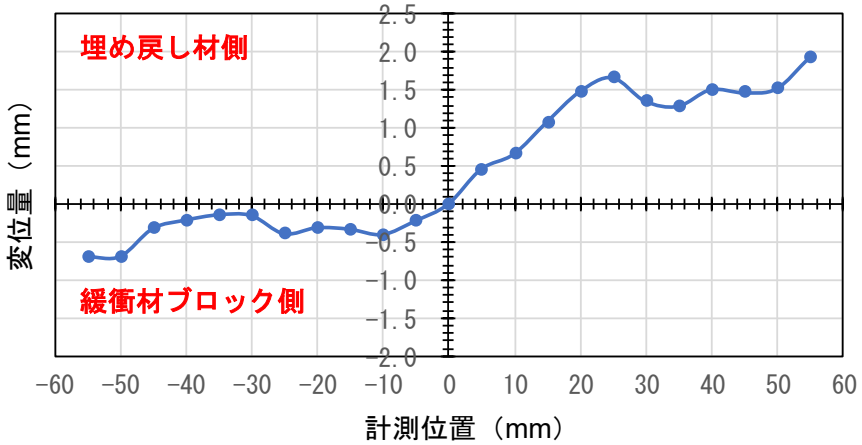


図 3.1-22　リン青銅板の形状計測結果

(5) 境界面観察

計測器無ケースにおいて試験終了後の緩衝材と埋め戻し材の境界面の状況を把握するために、光学顕微鏡を用いて境界面の状態を観察した。光学顕微鏡の倍率は 20 倍とした。図 3.1-23 に緩衝材委と埋め戻し材の境界面の状況を示す。緩衝材ブロックと埋め戻し材の境界面には隙間がなく、一体化していることが確認できる。試験用水の浸潤に伴い緩衝材と埋め戻し材のそれぞれに含まれるベントナイトの吸水膨潤により、隙間が塞がったと考えられる。粒径の大きな掘削ズリと緩衝材もしくは埋め戻し材の間には隙間があるが、これは、縮尺模型の解体の際に試験容器より取り外したことで縮尺模型の拘束が解除されたことや境界面のサンプリング作業の際に生じたものと考えられる。

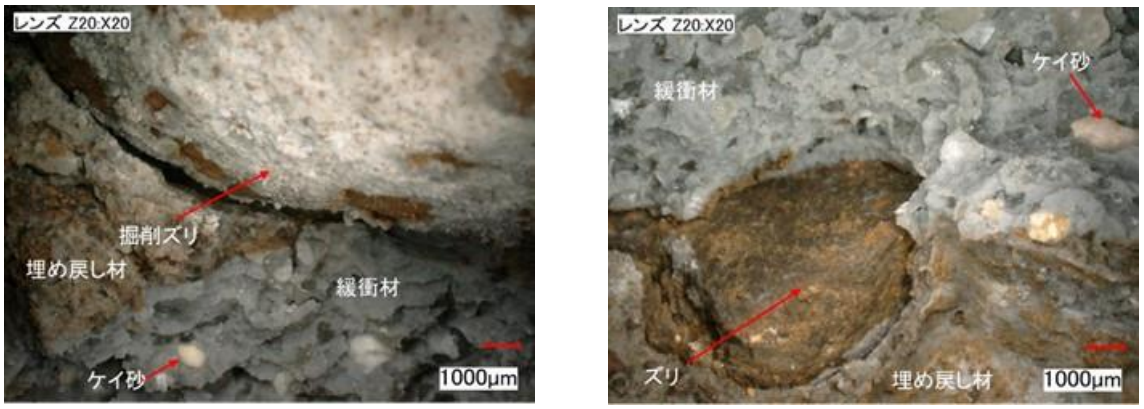


図 3.1-23 計測器無ケースにおける緩衝材と埋め戻し材の境界面の状況

3.1.3.4 小規模模型試験の結果

(1) 上方への変位量

試験装置上部に設置した変位計で小規模模型の上方への変位量を測定した。膨潤変形率は、試験開始時の緩衝材と埋め戻し材の縮尺模型全体の高さである 261 mm に対する変位量の割合として算出した。図 3.1-24 に膨潤変形率の経時変化、図 3.1-25 に試験時の注水量を示す。注水量は、試験開始時からの累積値である。

イオン交換水条件では、試験開始後から注水量が増加し、25 日を経過したころから収束傾向を示し、最終的な注水量は 473 mL であった。膨潤変形率の経時変化は、注水量が収束傾向となった 25 日を経過したころにはほぼ一定の値へと収束している。試験終了時には、変位量が 13.08 mm で膨潤変形率は 5.01%となった。

塩水条件では、フロート式ビュレット管内の水位の変化をリニアセンサによって計測していたが、試験開始後 3～5 日の期間はフロート部の不具合によりデータが欠損している。注水量は 10 日を経過したころから収束傾向を示しており、試験終了時の注水量は 402 mL であった。注水量の増加に伴い膨潤変形量も増加していたが、5 日を経過したころからは増加が緩やかになる傾向となった。試験終了時には、変位量が 3.87 mm、膨潤変形率が 2.12%となり、塩水条件の変位量が小さい結果となった。

また、上載荷重を除荷した際のリバウンドによる上方への変位量を計測した。計測は、イオン交換水条件で除荷後 10 分間、塩水条件では除荷後 20 分間実施した。図 3.1-26 にリバウンドによる変形率を示す。リバウンドによる変形率は、試験開始時の緩衝材と埋め戻し材の小規模模型全体の高さである 261 mm に対するリバウンドによる変位量の割合として算出した。イオン交換水条件では、除荷後に変形率は急激に増加し、90 秒を経過した時点で 0.133%と最大値に達した後、緩やかに減少する傾向に転じた。10 分後の変形率は 0.116%であった。塩水条件では、除荷後に変形率は急激に増加し 10 秒を経過した時点で 0.158%に達した。その後も変形率は増加する傾向を示し、20 分後の変形率は 0.316%であった。

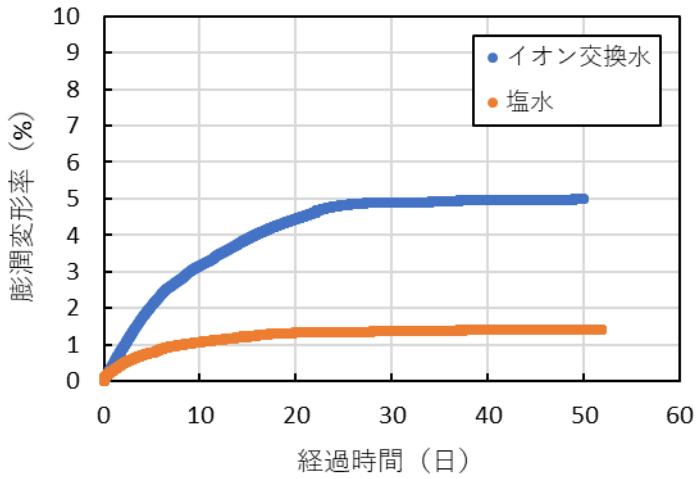


図 3.1-24 小規模試験における上方への変形率の経時変化

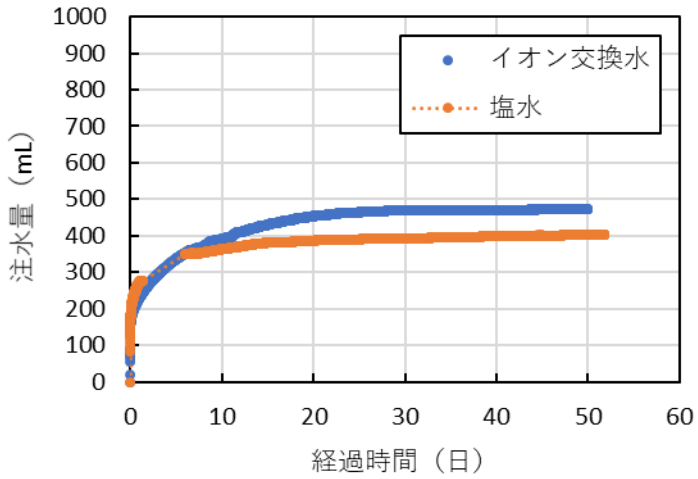


図 3.1-25　小規模試験における注水量の経時変化

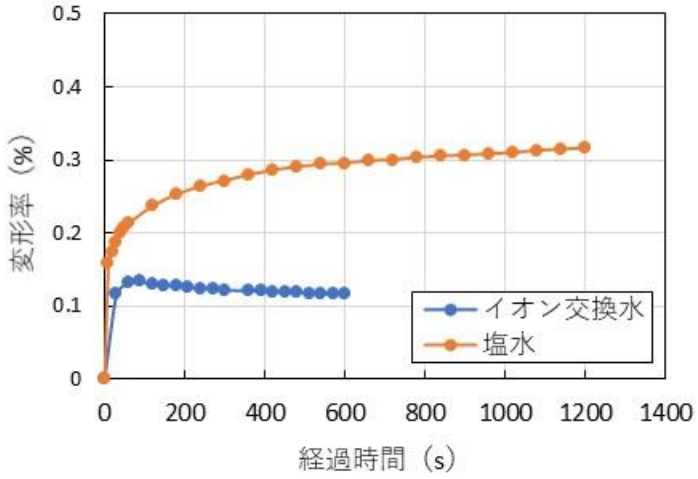


図 3.1-26　小規模試験におけるリバウンドによる変形率の経時変化

(2)　含水比計測

試験終了後に、小規模模型を試験容器から取り出して含水比を計測した。緩衝材の高さ方向は、イオン交換水条件で 15 層（1 層の平均厚さは 9.35 mm～16.47 mm）に、塩水条件で 16 層（1 層の平均厚さは 9.43 mm～12.48 mm）に分割した。その後、各層の中央を長さ 30 mm、幅 10 mm の 9 個のブロックに分割し、炉乾燥法により含水比を計測した。イオン交換水条件の含水比測定のための分割位置を図 3.1-27 に示す。イオン交換水条件では、緩衝材の底部から 1 層目とし、埋め戻し材に最も近い側を 15 層目とした。埋め戻し材は、緩衝材に最も近い側を 1 層目とした。また、埋め戻し材の外周部は、外周部のブロックを合わせて含水比計測を行った。塩水条件では緩衝材の高さ方向の分割数が 16 層であったがイオン交換水条件と同様の手順で含水比を整理した。

緩衝材の含水比の分布を図 3.1-28 に示す。水平方向の含水比は、両条件ともに小規模模型への給水のために設けたケイ砂層と接している外周部の含水比が高く、中央部の含水比が低い傾向を示した。高さ方向の含水比分布についても、両条件で埋め戻し材との境界面に近い上部の含水

比が高く、中央部や下部には含水比が低い領域が残っていることが確認できる。塩水条件では、4 層目から 8 層目の中央部に特に含水比が低い領域が残っている。これは、塩水条件での注水量がイオン交換水条件に比べて 70 mL 程度少なく、飽和が進んでいないためと考えられる。

小規模模型試験においては、試験容器内に緩衝材を設置した上に直接埋め戻し材の材料を投入し圧縮成型している。縮尺模型試験と小規模模型試験では緩衝材とブロックの設置の方法が異なるが、高さ方向では上部の含水比が高く、水平方向では外周部の含水比が高くなる類似の傾向を示している。

埋め戻し材の含水比計測の結果を表 3.1-8 に示す。埋め戻し材は、高さ方向に 3 層に分割し、各層の中央部と外周部に分けて含水比を計測した。イオン交換水条件および塩水条件ともに高さ方向の含水比は、1 層目、2 層目、3 層目の順に大きく、緩衝材との境界面に近いほど高い値を示した。

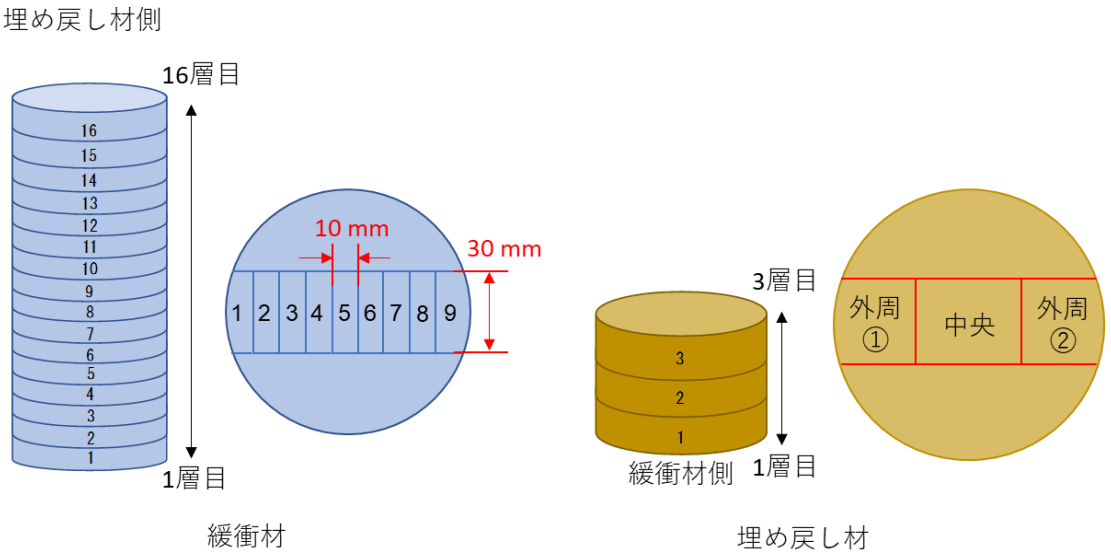
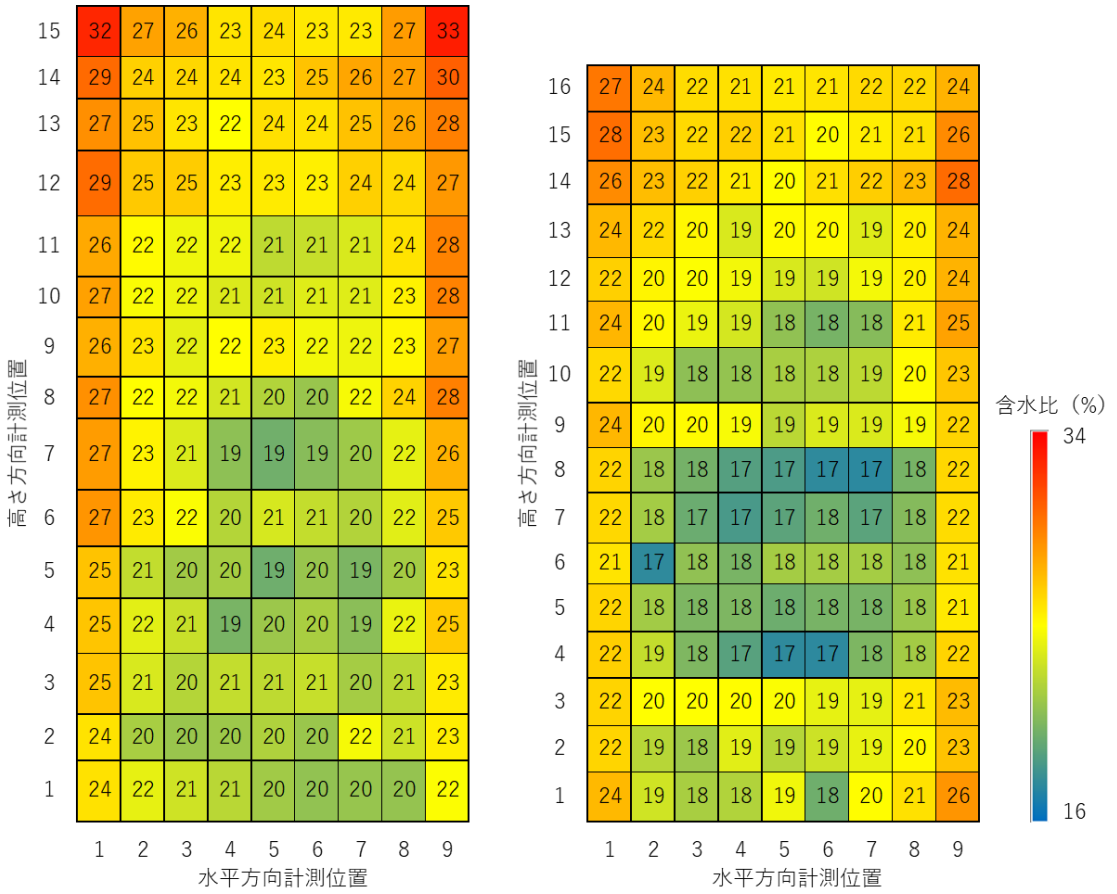


図 3.1-27　小規模模型試験における含水比の計測位置



イオン交換水　　**塩水**

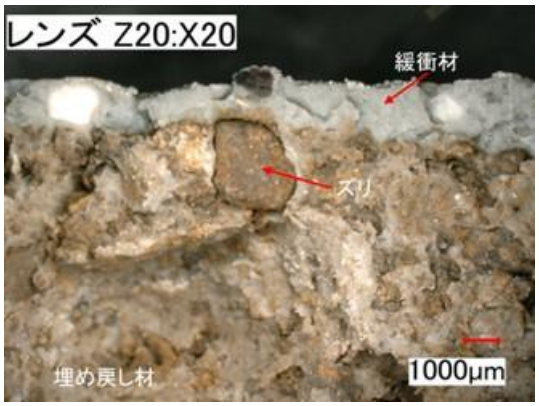
図 3.1-28　小規模模型試験における緩衝材の含水比分布

表 3.1-8　小規模模型試験における埋め戻し材の含水比計測結果

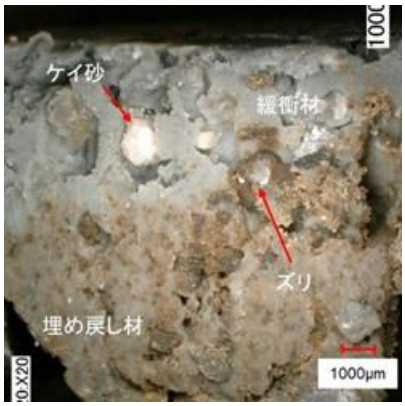
		含水比（%）	
		イオン交換水	塩水
中央部	3 層目	36.33	38.36
	2 層目	37.37	39.11
	1 層目	37.59	39.63
外周部	3 層目	36.64	36.27
	2 層目	37.22	39.74
	1 層目	37.82	39.90

(3)　境界面観察

小規模模型試験においても試験終了後の緩衝材と埋め戻し材の境界面の状況を把握するために、光学顕微鏡を用いて境界面の状態を観察した。光学顕微鏡の倍率は 20 倍とした。図 3.1-29 に境界面の状況を示す。イオン交換水条件と塩水条件の両ケースにおいて、緩衝材ブロックと埋め戻し材の境界面には隙間がなく、一体化していることが確認できる。試験用水の浸潤に伴い緩衝材と埋め戻し材のそれぞれに含まれるベントナイトが吸水膨潤し、隙間が閉塞したと考えられる。試験用水の水質が異なることによる状態の違いは確認されなかった。



(a) イオン交換水条件



(b) 塩水条件

図 3.1-29　小規模模型試験における緩衝材と埋め戻し材の境界面の状況

3.1.4　まとめ

本年度は、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験および塩水を用いた緩衝材の膨潤圧試験、小規模模型試験を実施した。本年度主な成果を以下に示す。

- 塩水を用いた緩衝材の膨潤圧試験
  - イオン交換水条件では、最大膨潤圧は 1.4 MPa～2.1 MPa の値を示した。塩水条件では、1.1 MPa～1.9 MPa の値を示した。また、既往の成果と整合的な値であることを確認した。
- 緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験
  - 境界面にひずみセンサとリン青銅板を設置していない計測器無ケースでの上方への変位が大きい結果となった。境界面に設置した計測器が膨潤変形に対する抵抗となっている可能性が考えられる。
  - 緩衝材の側方圧力は、下段、中段、上段の順に高い値を示した。計測器有ケースで緩衝材下段において、ピークを迎えた後の圧力の減少が大きく、最終的な圧力の値も 0.2 MPa 程度低い値を示した。
  - 埋め戻し材との境界面に近い緩衝材上部の含水比が高く、中央部や下部には含水比が低い領域が残っていることを確認した。計測器有ケースと計測器無ケースの両方で同様の傾向が確認されており、緩衝材と埋め戻し材の境界面が水みちとなった可能性が考えられる。一方で、計測器無ケースで試験終了時に境界面を観察したところ緩衝材と埋め戻し材の境界面には隙間がなく、一体化していることが確認された。
- 塩水を用いた小規模模型試験
  - 膨潤変形率はイオン交換水条件で 5.01%、塩水条件で 2.12%となり、塩水条件の変形率水条件での注水量がイオン交換水条件に比べて 70 mL 程度少なく、塩水条件では緩衝材の中央部に特に含水比が低い領域が残っている。
  - イオン交換水条件と塩水条件の両ケースにおいて、緩衝材ブロックと埋め戻し材の境界面には隙間がなく、一体化していることを確認した。また、試験用水の水質が異なることによる境界面の状態の違いは確認されなかった。

令和 3 年度以降に検討が必要な事項について以下に示す。

- 塩水条件における縮尺模型試験を実施し、側方土圧計測や境界面の膨潤挙動計測を実施し、塩水が力学的相互作用下における緩衝材と埋め戻し材の膨潤挙動におよぼす影響
- 縮尺模型試験において試験終了後の乾燥密度分布計測を実施し、膨潤変形に起因する乾燥密度の変化
- ひずみセンサなどの縮尺模型内部の設置物が膨潤変形挙動に与える影響の定量的な評価

参考文献

原子力発電環境整備機構，包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－本編および付属書，NUMO-TR-20-03，2021.

菊池広人, 棚井憲治, 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験, JNC TN8430 2004-005，2005.

3.2 EDZ シーリング試験

3.2.1　背景・目的・実施概要

坑道周辺の掘削損傷領域（Excavated Damaged Zone; EDZ）においては、割れ目の発達に伴い透水性が増大することで卓越した物質の移行経路となることが懸念されている。卓越した移行経路となることを回避するための一つの手法として低透水性材料である粘土系材料を用いたプラグ（止水プラグ）の設置が考えられており、国内外の関連機関において検討が進められている。例えば、止水プラグの設計例として、EDZ の幅を上回るように岩盤に切り欠きを設けることで坑道周辺の EDZ の連続性を遮断し、切欠き部にベントナイト系材料による粘土プラグを構築することが検討されている（NUMO, 2021）。また、止水プラグに係る施工技術の適用性や性能評価については、これまでに結晶質岩（硬岩）を対象とした原位置試験が実施されている（杉田ほか, 2002、戸井田ほか，2005 など）。

止水プラグの設計や施工の考え方を提示する上では、ベントナイト系材料からなる止水プラグが岩盤の種類や地下水の組成などの地質環境条件に応じてどの程度の地下水移行抑制機能を有するか把握しておくことが重要となる。そこで、堆積岩かつ塩水系地下水が分布する幌延深地層研究センターの地下施設において、止水プラグの有する地下水移行抑制機能をより明確化することを目的とした EDZ シーリング原位置試験を平成 30 年度より 2 年間にわたり実施してきた（原子力機構・原環センター，2019、原子力機構・原環センター，2020）。EDZ シーリング原位置試験では幌延深地層研究センターの地下施設の 350m 調査坑道において、図 3.2-1 に示すように、止水プラグの切り欠き部分の規模を縮小して模擬した粘土止水壁を構築した。粘土止水壁を対象に透水試験を実施し透水係数を算出することで、EDZ を含む領域における粘土止水壁の構築前後の透水性の変化を調査した。その結果、EDZ を含む区間の透水係数は、粘土止水壁施工前の 10^{-6} m/s オーダーから施工後には 10^{-9} m/s オーダーへと低下することを確認している。

止水プラグが、上記で述べたように EDZ の連続性を遮断する構造物として成立するためには、要求する性能を発揮できる品質（乾燥密度）で確実に施工できる方法が必要となる。例えば、締固め工法で施工する場合には、坑道の天端部や側壁部で岩盤と止水プラグの境界部やその近傍において締固め不足による乾燥密度の低下が生じる可能性があり、ブロック工法の場合では、岩盤と止水プラグの境界部において空隙が生じる可能性があることから施工方法に起因する事象により、要求する透水係数が確保できる乾燥密度が達成できないことが懸念される。そこで本事業では、止水プラグの切り欠き部のように狭隘かつ上部に位置する空間に対するベントナイト系材料の施工方法として、吹付け施工の適用性を検討することとした。

上記を踏まえ、令和 2 年度は、具体的に以下の項目について実施した。

- ベントナイトの吹付け施工に係る文献調査
- ベントナイト系材料の吹付け施工性確認試験
  - ベントナイトの配合割合や材料形態に応じた吹付け施工に係る特性データの取得のための地上吹付け試験
  - 止水プラグの切欠き部を模擬した小規模な型枠に対する地上吹付け試験
- EDZ シーリング原位置試験
  - 粘土止水壁を対象とした透水試験を実施し、EDZ を含む区間の透水性の経時変化を調査
  - 透水試験を再現する浸透流解析により粘土止水壁の透水係数を推定

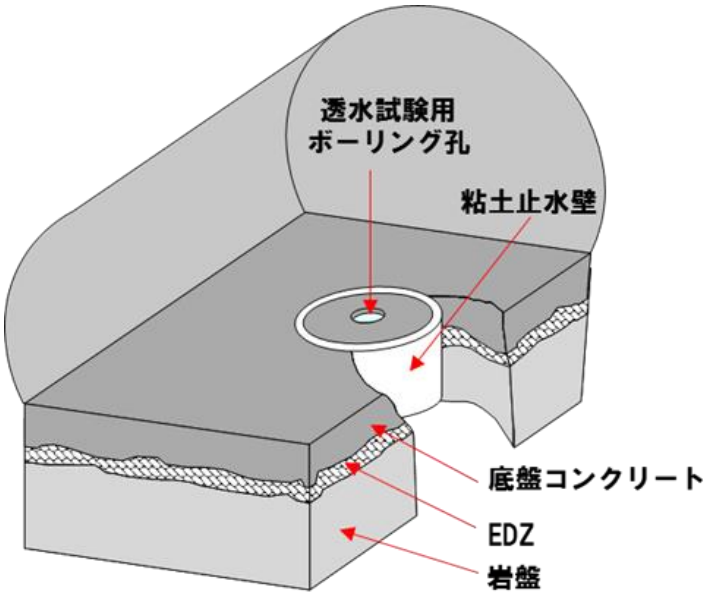


図 3.2-1　EDZ シーリング原位置試験の概要図

3.2.2　ベントナイトの吹付け施工に係る文献調査

3.2.2.1 調査の目的

ベントナイトの吹付け技術については、放射性廃棄物処分の分野では緩衝材や埋め戻し材などの施工方法のひとつとして、国内外の機関において検討が進められている。止水プラグの切欠き部における施工方法の適用性検討の一環として、既往の検討事例について材料仕様や施工方法、品質管理についての調査を実施した。具体的な調査項目は以下の通りである。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様
- 吹付けの方法
- 吹付け対象の形状
- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

本調査では、実規模試験スケールで実施された試験について整理した。

3.2.2.2 ベントナイトの吹付け施工に係る材料仕様や施工方法、品質管理についての整理

(1)　地下空洞型処分施設性能確証試験

原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）では平成 19 年度～平成 24 年度にわたり低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る共通的な基盤技術の確立を目的とした地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験を実施した。平成 19 年度には、ベントナイト材料特性測定（原環センター，2008）を平成 21 年、平成 23 年および平成 24 年には側部緩衝材施工確認試験（原環センター，2010a、原環センター，2012、原環センター，2013）を実施している。それらの試験について、以下に示す。

1)　ベントナイト材料特性測定

本試験は余裕深度処分を想定して実際の地下環境下に構築された実規模大の模擬施設で、ベントナイト吹付施工特性に関する基礎的なデータの取得を目的に吹付け試験を実施したものである。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  吹付け材料は、クニゲル GV100%であり、緩衝材の施工目標は 1.6±0.1 Mg/m^3 であった。含水比調整には、添加水を凍結・破砕したうえで混合する凍結混合方法を用いていた。含水比の目標値は記載がなかったが、吹付け後の含水比は 20～22%程度であった。
- 吹付けの方法

  吹付け方法は、湿式方式で実施した。吹付けは人力によるハンドリングを行っており、ハンドリングの障害がない限り吹付けたベントナイトの品質を確保するためにノズルの角度を施工対象に対して直角としていた。
- 吹付け対象の形状

  吹付け対象は、底部緩衝材施工確認試験（原環センター，2008）において大型振動ローラ等を使用して現場締固めをした底部緩衝材の上面褄部とし、吹付けベントナイトの仕上がり面を平滑に処置するための型枠を用いて吹付けを実施した。
- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  ベントナイト吹付け施工時には施工速度、跳ね返り率（リバウンド率）等の施工特性を測定している。跳ね返り率の定義は明記されていないが、跳ね返り率の測定結果より、リバウンド重量÷投入重量と推察される。また、吹付け後の緩衝材について、サンプリングと局所切り取りにより密度測定を実施している。密度の測定方法は、シリコンオイル比重法とノギス法、パラフィン法により実施している。
- 得られた知見
  - 他の施工方法のベントナイトやコンクリートに対しても問題なくベントナイトが吹付けられることを確認している。
  - 吹付け対象に直交して吹付けることの重要性の確認している。
  - 投入材料の重量 6.58 t に対して吹付け時間は約 80 分であり、吹付け速度は 4.75 t/hr であった。

2) 側部緩衝材施工確認試験

余裕深度処分における側部緩衝材は幅 1 m と非常に狭隘な空間での施工となることから、大型重機を使用することが困難であり、様々な施工方法が検討される中で、吹付けによる施工が検討されている。平成 21 年度の試験では、ベントナイトの含水比調整方法、吹付け工法の適用性や最適な品質管理技術について検討している。平成 23 年度、平成 24 年度にはそれまでの施工確認試験の課題を踏まえた吹付け工法の実施工への適用性を検証した試験を実施している。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  吹付け材料は、最大粒径 5 mm のクニゲル GX100%であった。緩衝材の透水係数として 5×10^{-13} m/s を確保すべき値として定め、これを達成できる乾燥密度として 1.5 Mg/m^3 を設定したうえで施工中のばらつきを考慮して、施工目標を 1.6±0.1 Mg/m^3 としていた。

  含水比調整方法は、平成 21 年度は凍結混合方法および水添加方式の両方式を検討しており、平成 23 年以降は水添加方式であった。設定含水比は 21%±2%であった。

  また、吹付けにより発生したリバウンド材を回収しフレッシュな材料と混合して再利用することを試みている。
- 吹付けの方法

  吹付方式は、湿式方式であった。平成 21 年度は人力でのノズル操作により水平吹付による施工試験を実施しており、平成 23 年度および平成 24 年度は吹付けロボットによる水平吹付試験を実施している。

- 吹付け対象の形状

  吹付け対象は幅 1 m の狭隘な空間である。
- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  含水比調整時の含水比計測方法として、炉乾燥法、電子レンジ法、赤外線水分計を検討している。

  吹付け時のコンプレッサー出力、材料供給量、吹付け機の回転速度などの吹付け機械の設定を確認している。また、施工時の材料ロス量（飛散して回収できなかった材料）やリバウンド率を評価している。リバウンド率の定義はリバウンド重量÷吐出重量であった。

  また、吹付け後の緩衝材について、サンプリングと局所切り取りにより密度測定を実施している。密度の測定方法は、シリコンオイル比重法とノギス法、パラフィン法により実施している。
- 得られた知見
  - 平成 23 年度の試験では幅 1 m の狭隘空間について、隅角部と中央部の乾燥密度を比較しており、両者に有意な差はないとの評価をしている。
  - リバウンド材が団粒化しノズルに流入することにより閉塞が生じた。
  - 吹付け施工時に吹付け面に凹凸が生じないようにできるだけ薄い層を重ねるノズルワークに変更することでリバウンド率が平成 23 年度の 37.5%から平成 24 年度の 28.5%へと低減された。
  - 人力による吹付け試験時にはシリコンオイル法による乾燥密度の平均値は 1.639 Mg/m^3 であった。吹付けロボットによる吹付け試験時には、コアサンプルをノギス法により乾燥密度測定し、その平均値は 1.614 Mg/m^3 であった。
  - 吹付け速度は、平成 21 年度の試験では、施工体積 10.5 m^3 に対して吹付け時間が 8.55 hr であり、吹付け速度は 1.23 m^3/hr であった。また、平成 23 年度は 1.8 m^3/hr、平成 24 年度は 1.4 m^3/hr であった。

(2) 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験

原環センターは、平成 25 年度と 26 年度において、発電所廃棄物や長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）等の余裕深度処分のための処分施設として検討が進められていた地下空洞型処分施設について、処分施設の閉鎖に係わる確証的な試験を実施した。その中で、平成 25 年度に上部緩衝材隅角部施工確認試験（原環センター，2014）を、平成 25、26 年度に上部埋め戻し材施工確認試験（原環センター，2014、原環センター，2015）を実施している。それらの試験について、以下に示す。

1) 上部緩衝材隅角部施工確認試験

余裕深度処分における側部緩衝材上部の空洞天井との間の空間（上部緩衝材隅角部）における緩衝材の施工は、狭隘かつ上部が空洞天井のアーチの曲面であるという状況であることから、人力による吹付け工法の適用性を検討するための試験を実施している。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  吹付け材料は、最大粒径 5 mm のクニゲル GX100%であった。乾燥密度の施工目標値は 1.6±0.1 Mg/m^3 としている。含水比調整の方法は水添加方式であり、設定含水比は 21%±2%であった。また、吹付けにより発生したリバウンド材を回収しフレッシュな材料と混合して再利用している。
- 吹付けの方法

吹付方式は、湿式方式であった。吹付は人力にて実施し、吹付け面から 1 m ほどの離隔を取り、吹付け面に対してノズルが極力直角となるように位置した。

- 吹付け対象の形状

  幅 1.0 m および 1.5 m、高さ 1.69 m、奥行き 5.25 m の隅角部を対象に試験を実施している。

- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  吹付け時には、吹付け圧を管理している。また、施工性能の評価として、リバウンド率やサイクルタイム計測を実施している。吹付け後の緩衝材について、サンプリングと局所切り取りによる乾燥密度測定や 3D スキャナによる出来形計測を実施している。

- 得られた知見

  ・ 吹付けは任意の形状に施工可能であるため隅角部の施工において有効な施工方法であるが、試験ではリバウンド率が 37.8%と高い値を示した。これは、人力の吹付け施工ではノズルを吹付け面に垂直に当てることが難しいことが要因の一つとして挙げられている。

2) 上部埋め戻し材施工確認試験

余裕深度処分における上部埋め戻し材は、対象となる場所が上部緩衝材の上部であり、狭隘かつアーチ状の形状をした面を含む空間の閉塞を行うこととなるため吹付け工法の施工性を確認するために上部埋め戻し材施工確認試験を実施している。ここでは、平成 26 年度に実施された内容について記載する。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  埋め戻し材料として、クニゲル V1：砂＝15:85 の割合で混合した混合土を選定している。設定含水比は最適含水比である 13.5%であった。ベントナイト混合土の製造には、連続式二軸強制ミキサーを使用し、練り混ぜと加水の 2 工程の混合方式を採用している。

- 吹付けの方法

  吹付方式は、湿式方式であり、コンクリート吹付けなどに利用される圧力釜式吹き付け機を使用している。吹付は人力にて実施し、吹付け面から 1 m ほどの離隔を取り、吹付け面に対してノズルが極力直角となるように位置した。

- 吹付け対象の形状

  吹付け対象は、試験空洞上部の空洞アーチ部分の高さ 1979 mm、体積 25.5 m^3 の空間であった。

- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  施工性能の評価として、リバウンド率、材料ロス率やサイクルタイム計測を実施している。吹付け施工後には、サンプリングを実施し、含水比と乾燥密度を計測している。また、ベントナイト混合率および 3D スキャナによる出来形体積の計測も実施している。

- 得られた知見

  ・ 吹付け施工後のベントナイト混合率が 17.4%であり、施工前の 15.3%よりも高い結果となった。吹付け時に生じた材料分離により砂分が選択的にリバウンドし、結果として吹付けた材料のベントナイトの割合が大きくなったと考えられている。

  ・ ①材料を圧送するホース長の短縮、②圧送ホース途中における再加圧、③団粒化した材料をほぐせるような材料供給機の使用によりリバウンド率の低減を図ることができた、と評価している。

  ・ 吹付け速度は 2.3 t/hr であった。

(3) 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発

原環センターでは、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業にかかわる工学技術及び回収可能性に関して技術の整備、および回収可能性を維持する技術的な根拠を提示することを目的とした可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発を平成 27 年度から平成 31 年度にわたり実施している。平成 30 年度には、PEM と坑道壁面の間の空間に存在する上部開放部について、吹付方式による充填技術の実証試験を幌延深地層研究センターの地下施設において実施している（原環センター，2019）。以下に試験の内容を示す。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  吹付け用の隙間充填材として、ベントナイト配合率 50%のベントナイトーケイ砂混合土を使用している。乾燥密度の施工目標値は 1.6 Mg/m^3 としている。設定含水比は 15.8%±2.0%であった。

- 吹付けの方法

  吹付方式は、湿式方式であり、ロータリー式吹付け機を使用している。吹付けのハンドリングは吹付けロボットにより実施し、吹付け面までの距離は 1.2 m 以内を確保し、吹付け面に対してノズルが極力直角となるようにロボットを操作した。

- 吹付け対象の形状

  吹付け対象は､350m 試験坑道 2 に設置された模擬 PEM と坑道間の上部解放部である。坑道は内径 4000 mm の円形断面を有しており、模擬 PEM は直径 2316 mm の円柱形である。模擬 PEM 上部の最大幅約 1.3 m、模擬 PEM 側部の最大幅約 0.7 m、奥行き 4 m の空間に対して約 20 m^3 の吹付け体積であった。

- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  施工性能の評価として、リバウンド率やサイクルタイム計測を実施している。吹付け後の隙間充填材について、コアサンプリングによる乾燥密度や含水比、ベントナイト混合率の計測や 3D スキャナによる出来形体積の計測を実施している。

- 得られた知見
  - 模擬 PEM 側部の隅角部および坑道天端付近で乾燥密度が低下する傾向にある。
  - コアサンプリングから算出した乾燥密度は 1.39 Mg/m^3～1.83 Mg/m^3 でばらつき、その平均値は 1.66 Mg/m^3 であった。一方、3D スキャナ計測より算出した乾燥密度は 1.48 Mg/m^3 であった。
  - リバウンド率は、リバウンド重量÷ノズルより吐出した全重量と定義しており、その値は 33%を示していた。
  - 出来形体積 2.8 m^3 に対して吹付け時間は約 15.3 時間であり､吹付け速度は 0.18 m^3/hr であった。

(4) 処分システム工学要素技術高度化開発

原環センターでは、平成 19 年度から平成 24 年度にわたり地層処分における処分システムのうち人工バリアの構築を担う操業システムを構成する各工学要素技術の信頼性やシステム成立性等の向上に向けた開発である処分システム工学要素技術高度化開発を実施していた。この中で、平成 21 年度には、人工バリアを構成する緩衝材の構築を対象に実規模試験等を通して技術的実現性を提示している（原環センター，2010b）。その内容を以下に示す。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  吹付け材には、ベントナイト 70%、ケイ砂 30%で混合した混合土を使用し、ベントナイトにはクニゲル V1 をケイ砂には 3 号ケイ砂と 5 号ケイ砂を使用している。また、リバウ

ンド材の一部を再利用し吹付けを実施していた。設定含水比は 21%±2%であった。

- 吹付けの方法

  吹付方式は、湿式方式であり、ローター式吹付け機を使用している。吹付は人力にて実施し、吹付け面までの距離に関する記載はないが、吹付け状況の写真から 1 m 程度と推察される。

- 吹付け対象の形状

  吹付け対象は、模擬処分孔に相当する直径 2.22 m、高さ 3.5 m の円筒形の型枠である。型枠内には、直径 0.84 m、高さ 1.73 m の模擬廃棄体が設置されており、型枠と模擬廃棄体の間の空間に対して鉛直下向きに吹付けを実施している。

- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  施工中の品質管理として、地盤硬度計およびシリコンオイル比重法により湿潤密度を、近赤外線水分計および電子レンジ法により含水比を計測している。また、施工後には、コアサンプリングした試料を用いてパラフィン法により乾燥密度を炉乾燥法により含水比を計測している。

(5) トンネルシーリング試験（TSX 試験）

TSX 試験（杉田ほか, 2002、戸井田ほか, 2005）は、核燃料サイクル開発機構（現原子力機構）がカナダ原子力公社（AECL）の地下研究施設（URL）において実施した実規模試験であり、力学的な閉鎖機能が期待されるコンクリートプラグならびに水理学的な閉鎖機能が期待される粘土プラグの両方を対象とした閉鎖技術の検証を目的としている。試験の具体的な目的は次の通り設定されている。

- 粘土プラグおよびコンクリートプラグに対して既存の施工技術の適用性の確認
- 施工したプラグの性能を評価
- 性能に影響する要因の抽出・示すこと

ここで検討された粘土プラグでは、プラグ設置のために施工する切欠きにより、坑道沿いに発生する EDZ の連続性を分断することが求められている。また、粘土プラグ自体には膨潤により岩盤との境界部における遮水性を確保することを求めている。TSX 試験では、プラグ本体はベントナイトブロックを積み上げることにより施工しているが、岩盤とブロックの間はベントナイト材料を吹付けることにより処置している。以下に、吹付け予備試験で実施された内容について示す。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  TSX 試験では、クニゲル V1 が 70%、ケイ砂が 30%の混合土を用いて乾燥密度 1.9 Mg/m^3 のブロック製作しており、吹付け材にはブロックの製作に失敗した材料を直径 10 mm 以下に砕いたものを用いている。

- 吹付けの方法

  吹付けは、ノズルの吹き出し口で水を加える乾式方式により実施している。吹付け機械には在来のコンクリート吹付け機を用いている。

- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  予備試験では吹付けた材料の乾燥密度と含水比を計測している。

- 得られた知見

  吹付けた材料の乾燥密度は、1.3 Mg/m^3、含水比が 18.5%であった。この時の有効粘土密度は 1.1 Mg/m^3 であり、透水係数が 10^{-11} m/s、膨潤圧が 0.1～0.2 MPa に相当すると評価している。

(6) その他の吹付け試験事例

1) Posiva BACEKO II 試験

フィンランドの Posiva 社は、2008 年に BACEKO プロジェクト（BAckfilling in EKOkem-project）を開始し、2010 年より BACEKO II プロジェクトを実施した。同試験は、処分坑道の 1/4 スケールの試験坑道を対象とし、ベントナイトブロックおよびペレットを用いた埋め戻しを実施し、透過試験や飽和試験などの 9 つの試験を実施している（Keski-Kuha et al., 2013）。その中で、ブロックと坑道壁面との間の空間がベントナイトペレットの吹付けにより充填された。以下にその内容を示す。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  吹付けに使用されたペレットは、Na 型ベントナイト（Cebogel pellets）と Ca 型ベントナイト（IBECO-RXC-BF pellets）の 2 種類である。Cebogel pellets は、乾燥密度が 2.1 Mg/m^3 で含水比が 18.9%であり、IBECO-RXC-BF pellets は、乾燥密度が 1.05 Mg/m^3 で含水比が 14.8%であった。
- 吹付けの方法

  吹付方式は、乾式吹付けであり、吹付け機械である MEYCO Piccola（現 Normet Piccola）が使用された。カタログ情報より、最大吐出風量は 5 m^3/min、最大吐出圧は 0.6 MPa である。吹付けのハンドリングは人力で行われており、吹付け対象までの距離は、吹付け状況の写真より 1.5～2 m と推察される。
- 吹付け対象の形状

  面に対して吹付けを形成するのではなく隙間空間への吹付けであり、孔壁とブロックのなす隙間の方向と平行に吹付けを実施している。
- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  隙間空間全体へのペレットの投入重量と空間体積から密度を換算しており、乾燥密度として 0.8～1.0 Mg/m^3 程度であった。ただし、ペレットの投入重量は一部人力でペレットを投入した分を含んでいる。

  リバウンド率は、吹付け量とリバウンド量より算出すると 10%～37%程度であった。

2) The test of a splayed Bentonite Sealing Layer

チェコ工科大学では、チェコ共和国に数多く存在する伝統的な養魚池の漏水防止のためシーリング層構築する工法として吹付けベントナイトの適用性に焦点を当てたプロジェクトを 2016 年より実施している。この試験では、実規模大の養魚池モデルにおいてシーリング層をベントナイト吹付により構築しその適用性の確認を行っている（Stastka et al., 2018）。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  吹付け材料は、チェコ産の Ca-Mg 型ベントナイトである Bentonite75 を 100%とし、ロールプレスにより造立したペレットであった。ペレットは、粒度分布が異なる 2 種類（B75 REC MIX I、B75 REC MIX II）が使用された。設定含水比は 20%～30%であった。
- 吹付けの方法

  吹付方式は乾式方式であり、ハンドリングは人力で行われた。
- 吹付け対象の形状

  吹付け対象は、養魚池を模擬した実規模のアースフィルダムのダム上面および側面のリブ部（幅 300 mm、高さ 2500 mm）であった。
- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  吹付け後の材料の乾燥密度を計測している。乾燥密度は、1.2～1.5 Mg/m^3 程度であった。

Bentonite75 の乾燥密度と透水係数の関係より、要求性能である 10^{-11} m/s を満たす乾燥密度であると評価している。

3) CTU EPSP プロジェクトにおけるベントナイト吹付け施工

チェコ工科大学により放射性廃棄物最終処分におけるプラグと閉鎖に係わる原位置試験として Experimental Pressure and Sealing Plug（EPSP）が実施された（Svoboda et al., 2016）。同試験で設計、構築したプラグは、チェコにおける将来の地層処分のプラグのプロトタイプと位置付けられている。同試験では、コンクリートで構築されたプラグ躯体に挟まれた空間を充填してシールするためにベントナイトが使用されており、大半はペレットを使用した転圧締固めにて施工されており、プラグ頂部付近はペレットを吹付けることで施工されている。その概要について、以下に示す。

- 吹付けるベントナイトの配合や形態などの材料仕様

  試験に使用されたペレットは、B75 PEL12 material と B75 REC material の 2 種類であった。B75 REC material は、高圧縮ペレットの破砕物であり、粒状体としての土粒子密度が 1.70～1.98 Mg/m^3 を示していた。この B75 REC material が主に吹付け施工に使用された。
- 吹付けの方法

  吹付け機械である SSB 14 DUO（Filamos Ltd.）により吹付けが実施され、吹付け状況の写真よりハンドリングは人力で行われている。吹付け時のエアー量が約 5.8 m^3/min、吹付け圧力が 10 bar であった。
- 吹付け対象の形状

  面に対して吹付けを形成するのではなく隙間空間への吹付けであり、孔壁とブロックのなす隙間の方向と平行に吹付けを実施している。吹付け体積は、1.5 m^3 であった。
- 吹付けた材料の品質確認項目およびその確認手法

  吹付け後の材料の乾燥密度を計測している。乾燥密度は、目標の 1.4 Mg/m^3 に対して、1.427 Mg/m^3 であった。ただし、算出した乾燥密度は、転圧締固め部分と吹付け部分を合算した値である。
- 得られた知見
  - リバウンドについての定量的な記述はないものの、スループットが低い原因としてリバウンドの除去が課題として挙げられている。
  - 吹付け工法は、限定された不規則な空間に対応可能との評価がなされている。

3.2.2.3 文献調査のまとめ

文献調査を実施した各試験における使用材料やベントナイト混合率、施工後の乾燥密度などを表 3.2-1 に示す。調査結果より、吹付けの品質を管理する項目としては吹付け後の乾燥密度、含水比、ベントナイト混合率が計測されている。また、施工性能の評価としては、リバウンド率や吹付け速度、サイクルタイムが計測されている。吹付けベントナイトの乾燥密度としては最大で 1.6 Mg/m^3 程度の値が施工可能であり、リバウンド率はおおむね 10～40%の範囲にあった。

リバウンドを低減する方法として、吹付け施工時に吹付け面に凹凸が生じないようにできるだけ薄い層を重ねるノズルワークに変更することが挙げられている。

幅 1 m の狭隘な空間に対する吹付けでは、隅角部と中央部で吹付けた後の材料の乾燥密度に差がないことが報告されている一方で、模擬 PEM 側面の空間のように曲面付近で吹付けた場合には乾燥密度が低下することが報告されている。

表 3.2-1　ベントナイト系材料の吹付け施工に関する調査結果一覧

		使用材料	ベントナイト混合率（%）	混合材料	吹付方式	ノズルの向き	吹付け面との距離	リバウンド率（%）	形状の影響	品質確認項目		
										乾燥密度（Mg/m^3）	含水比（%）	備考
実規模試験	ベントナイト材料特性測定（平成19年度）	GV	100	なし	湿式	吹付け面に対して直角	数十cm	30	-	1.57* 1.53** 1.55***	21.3	*シリコンオイル比重法 **ノギス法 ***パラフィン法
	側部緩衝材施工確認試験（平成21年度）	GX（最大粒径：5mm）	100	なし	湿式	水平	-	13	-	1.63 1.67	19.71 18.79	
	側部緩衝材施工確認試験（平成23年度）	GX（最大粒径：5mm）	100	なし	湿式	水平 下向き	1m -	37.5	隅角部と中央部の乾燥密度に差なし	1.70 1.62	18.2 18.7	
	側部緩衝材施工確認試験（平成24年度）	GX（最大粒径：5mm）	100	なし	湿式	水平	-	28.5		1.612	19.1	
	上部緩衝材隅角部施工確認試験（平成25年度）	GX（最大粒径：5mm）	100	なし	湿式	水平	-	37.8	-	1.588* 1.629**	19.8	*シリコンオイル比重法 **ノギス法
	上部埋め戻し材施工確認試験（平成25年度）	V1	15	コンクリート用細骨材	湿式	-	-	14.8		1.718	14.5	
	上部埋め戻し材施工確認試験（平成26年度）	V1	15	コンクリート用細骨材	湿式	-	1m	12.7	-	1.694	13.2	
	可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発（平成30年度）	V1	50	ケイ砂3号 ケイ砂5号	湿式	法面に対して直角	1.2m	33	隅角部・天端付近で乾燥密度が低下	1.661	17.0	
	処分システム工学要素技術高度化開発（平成21年度）	V1	70	ケイ砂3号 ケイ砂5号	湿式	下向き	1m	-	-	1.662*	19.94	
	トンネルシーリング試験（TSX試験）	V1	70	ケイ砂	乾式	-	-	-	-	1.300	18.5%	ブロックの製作に失敗した試料を破砕し直径10mm以下に調整
	Posiva BACEKO II試験	Na型、Ca型	100	なし	-	-	1.5～2m	10～37	-	0.799～0.974		
	The Testing of a Sprayed Bentonite Sealing Layer	bentonite75	100	なし	-	-	1.5～2m	-	-	1.200～1.500		
	CTU EPSPプロジェクト	B75 PEL12 B75 REC	100	なし	-	-	2m	-	-	1.427*		*転圧部と吹付け部の合算値

-：文献に記載なし

3.2.3　地上におけるベントナイト系材料の吹付け施工性確認試験

3.2.3.1　吹付け試験 1

吹付け試験 1 はベントナイトの配合や材料形態（粉体、粒状体）に応じた吹付け施工に係る特性データの取得を目的として実施した。また、吹付け試験 1 の結果から切欠き部を模擬した小規模な型枠に対する吹付け試験（吹付け試験 2）で使用する材料を選定する。

(1)　使用材料

吹付け試験 1 で使用したベントナイトは、粉体ベントナイトであるクニゲル V1 と粒状ベントナイトであるクニゲル GX とし、ベントナイト単体もしくはケイ砂と混合した材料として吹付けを実施した。ケイ砂は 3 号および 5 号を使用し、その割合は 3 号：5 号＝50：50 とした。使用した材料の基本物性を**表** 3.2-2 に示す。

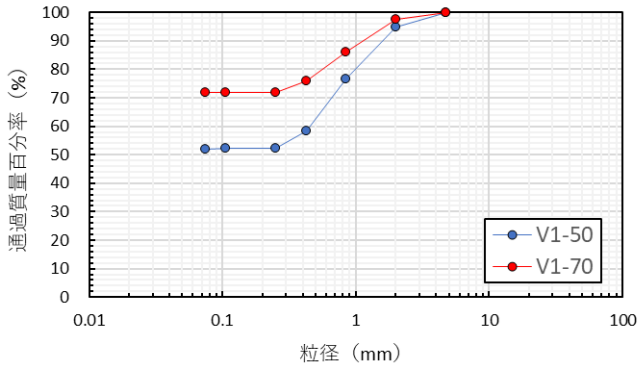
吹付け試験はクニゲル V1 についてベントナイト混合率 70%（V1-70）およびベントナイト混合率 50%（V1-50）の 2 ケース、クニゲル GX についてクニゲル GX 単体（GX-100）およびベントナイト混合率 70%（GX-70）の 2 ケースの合計 4 ケースの材料について実施した。また、クニゲル V1 単体（V1-100）についても吹付けの可否の確認を目的として別途実施した。吹付けを実施した材料のケイ砂との混合割合を表 3.2-3 に示す。V1-70、V1-50、GX-100 および GX-70 の粒径分布を図 3.2-2 に示す。

表 3.2-2　使用材料の基本物性

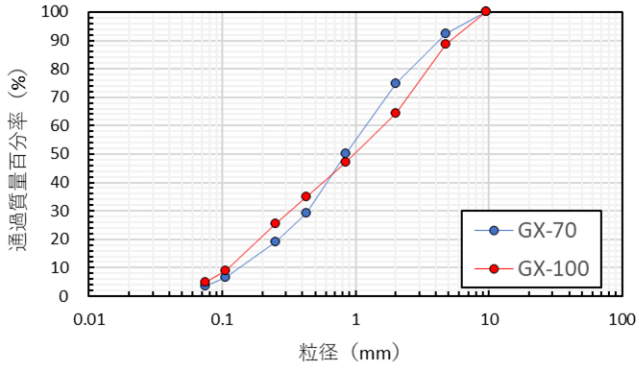
項目	クニゲルV1	クニゲルGX	ケイ砂（3号，5号）
土粒子密度（Mg/m^3）	2.74	2.65	2.64
自然含水比（%）	8~10程度	8~10程度	0.1

表 3.2-3　混合土の混合割合

ケース	混合土の混合割合 (%)		
	クニゲル V1	クニゲル GX	ケイ砂
V1-70	70	-	30
V1-50	50	-	50
GX-100	-	100	-
GX-70	-	70	30
V1-100	100	-	-



(a) クニゲル V1



(b) クニゲル GX

図 3.2-2　混合土の粒径分布

(2)　試験条件

1)　乾燥密度の設定

平成 31 年度に実施した EDZ シーリング試験では、止水プラグに期待する透水係数の値として設置箇所の周辺岩盤と同程度の透水係数である 10^{-10} m/s を設定し、施工のばらつきを考慮して 10^{-11} m/s オーダーの透水係数を施工目標とした。この透水係数を達成できる有効粘土密度として乾燥密度の施工目標を 1.2 Mg/m^3 としている。この 1.2 Mg/m^3 は、ベントナイト単体を使用する場合には乾燥密度そのものであり混合土を使用する場合では有効粘土密度に相当する。本年度の吹付け試験においても吹付けたベントナイトの有効粘土密度の施工目標値は、昨年度と同様の考えに基づき、1.2 Mg/m^3 と設定した。

有効粘土密度ρ_eは次の式(1)で定義される。

$$\rho_e = \frac{\rho_d(100 - R_S)}{100 - \frac{\rho_d R_s}{\rho_s}} \quad (1)$$

ここで、ρ_dは混合土の乾燥密度、ρ_sはケイ砂の土粒子密度、R_sはケイ砂の混合率を示す。上式より、表 3.2-3 に示す材料について、有効粘土密度 1.2 Mg/m^3 を達成する乾燥密度を算出した。各混合土の乾燥密度を**表** 3.2-4 に示す。

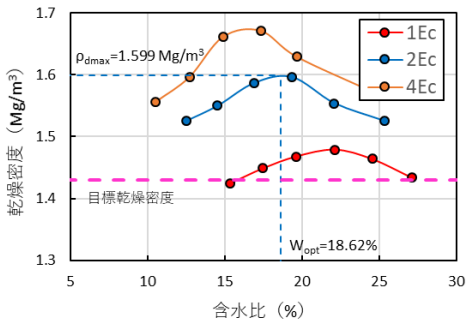
吹付け試験 1 では、各材料について吹付けにより目標乾燥密度が達成できるかを確認することを目的とする。

表 3.2-4　各材料の有効粘土密度 1.2 Mg/m³ を達成する乾燥密度

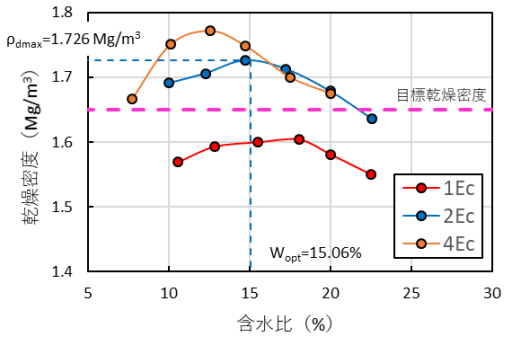
ケース	ベントナイト混合率 (%)	乾燥密度 (Mg/m³)
V1-70	70	1.43
V1-50	50	1.65
GX-100	100	1.20
GX-70	70	1.43
V-100	100	1.20

2)　含水比の設定

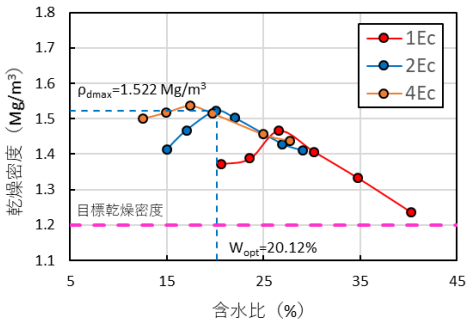
混合土の含水比の設定を目的として、各材料の最適含水比を求めるために締固め試験を実施した。締固め試験は突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）に則り実施した。締固めエネルギーは 1Ec、2Ec、4Ec とした。締固め試験の結果を図 3.2-3 に示す。各材料の設定含水比は、締固めエネルギーが 2Ec の場合の最適含水比とした。V1-100 については吹付けの可否の確認を目的としてそのほかの 4 ケースとは別途実施し、設定含水比は 20%を目標としたが材料調整時の状況を確認しながら加水量を調整し含水比を決定した。各材料の設定含水比を**表** 3.2-5 に示す。



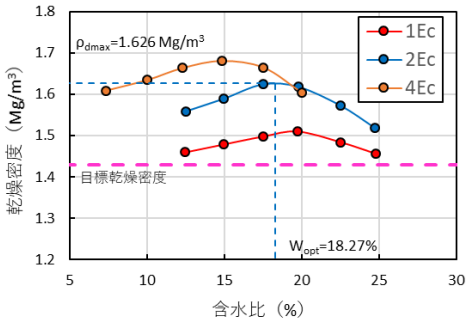
(a) V1-70



(b) V1-50



(c) GX-100



(d) GX-70

図 3.2-3　締固め試験結果

表 3.2-5　各材料の設定含水比と最大乾燥密度

ケース	設定含水比 (%)	最大乾燥密度 (Mg/m^3)
V1-70	18.62	1.599
V1-50	15.06	1.726
GX-100	20.12	1.522
GX-70	18.27	1.626
V1-100	20.0	-

(3)　使用機械

吹付け試験 1 では吹付け施工のための機械として、吹付け機、コンプレッサー、アーム付き吹付け機械、ふるい機、強制二軸ミキサーを用いた。吹付けの対象は木製型枠とした。図 3.2-4 に吹付け試験 1 における使用機械の配置図を示す。各機械の詳細を以下に示す。

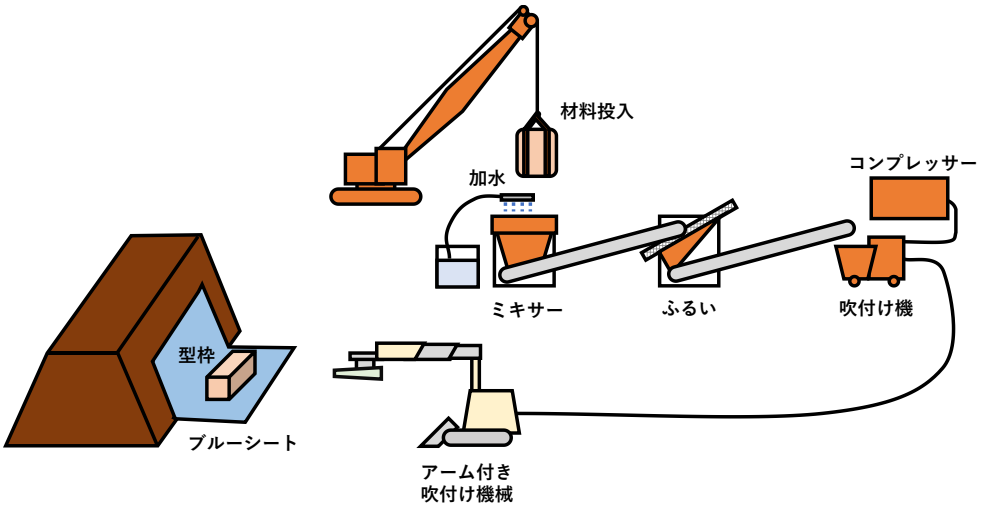


図 3.2-4　吹付け試験 1 における使用機械の配置図

1)　強制二軸ミキサー

材料の混合（空練り）および含水比の調整のための混錬に強制二軸ミキサー（北川鉄工所 W-500）を使用した。ミキサーの仕様を表 3.2-6 に、外観を図 3.2-5 に示す。

表 3.2-6　強制二軸ミキサーの仕様

メーカー		㈱北川鉄工所
型式		W-500
混錬容量（m^3/B）		0.5
電動機		2×7.5kW
使用最大粗骨材系（mm）		60
排出方式		プラグゲート（エアシリンダー駆動方式）
重量（kg）		2800
寸法(mm)	全長 L	1480
	全幅 W	2040
	全高 H	1530

図 3.2-5　強制二軸ミキサー（W-500）

2)　ふるい

本試験では、ミキサーにより含水比調整した材料はベルトコンベアで運搬し、目開き 25 mm のふるいにかけて団粒化した含水比が高い材料（ダマ材）を取り除いた。ふるいの外観を図 3.2-6 に示す。

図 3.2-6　ふるい（目開き 25 mm）

3)　吹付け機

吹付け機にはニードガン 2000（AGC プライプリコ）を使用した。この吹付け機は乾式吹付けおよび湿式吹付けの両工法に対応可能であり、安定かつ連続的な材料供給が可能である。本吹付け機は、ベントナイト系材料の吹付け施工において使用実績がある。吹付け機の仕様を表 3.2-7 に、外観を図 3.2-7 に示す。

表 3.2-7　吹付け機の仕様

メーカー		日本プライブリコ
機種		ニードガン 2000
材料ホース内径（mm）		63.5
材料吐出量（m^3/hr）		20
所要空気量（m^3/mi）		20
所要空気圧力（MPa）		0.74
材料送り最大距離（m）		水平 200 垂直 100
吹付け可能最大粒径（mm）		15
駆動		220V 3 相 7.5kw インバーターモーター
回転数（rpm）		5～16.5（常用使用回転数）
質量（kg）		約 1200
寸法（mm）	全長 L	1845
	全幅 W	990
	全高 H	1175

図 3.2-7　吹付け機（ニードガン 2000）

4)　コンプレッサー

吹付け用のコンプレッサーとして、190HP（北越工業）を使用した。コンプレッサーの仕様を**表** 3.2-8 に、外観を図 3.2-8 に示す。

表 3.2-8　コンプレッサーの仕様

呼称		190HP
タイプ		トレーラ
メーカー		北越工業
型式		PDS655S
吐出空気量（m^3/min）		18.5
吐出圧力（MPa）		0.7
潤滑油量（L）		80
エアコックサイズ・数量		20A･2 ヶ 50A･1 ヶ
燃料タンク容量（L）		270
燃料消費量（L/h）		22
エンジンオイル量（L）		23
寸法	全長 L	3650
	全幅 W	1685
	全高 H	2070
乾燥質量［整備質量］（kg）		2850[3190]

図 3.2-8　コンプレッサー外観

5)　アーム付き吹付け機械

本試験では、吹付けノズルをアーム付き吹付け機械（Normet minimec2）に取り付け、オペレーターの操作により吹付け位置の制御を行った。吹付け機の仕様を表 3.2-9 に示す。吹付け機械の外観を図 3.2-9 にノズルの形状を図 3.2-10 に示す。ノズルは円形の断面をもつ形状であり、入口の内径が 75 mm、吐出口の内径が 30 mm、長さが 500 mm である。

表 3.2-9　アーム付き吹付け機械

メーカー		Normet
型式		Minimec 2
寸法（mm）	全長 L	3170
	全幅 W	1100
	全高 H	2250
	アーム長さ	4500
質量（kg）		1720

図 3.2-9　アーム付き吹付け機械（minimec2）

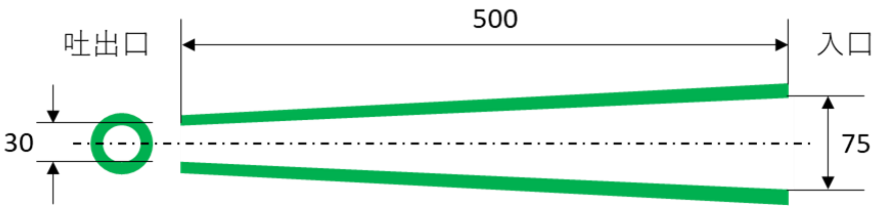


図 3.2-10　吹付けノズルの形状

6)　木製型枠

本試験では、木製の型枠を対象に吹付けを実施した。型枠の寸法は幅 1 m、高さ 50 cm、奥行き 48cm であり天面に板が張られていない。図 3.2-11 に型枠の外観を、図 3.2-12 に寸法を示す。

図 3.2-11　木製型枠の外観

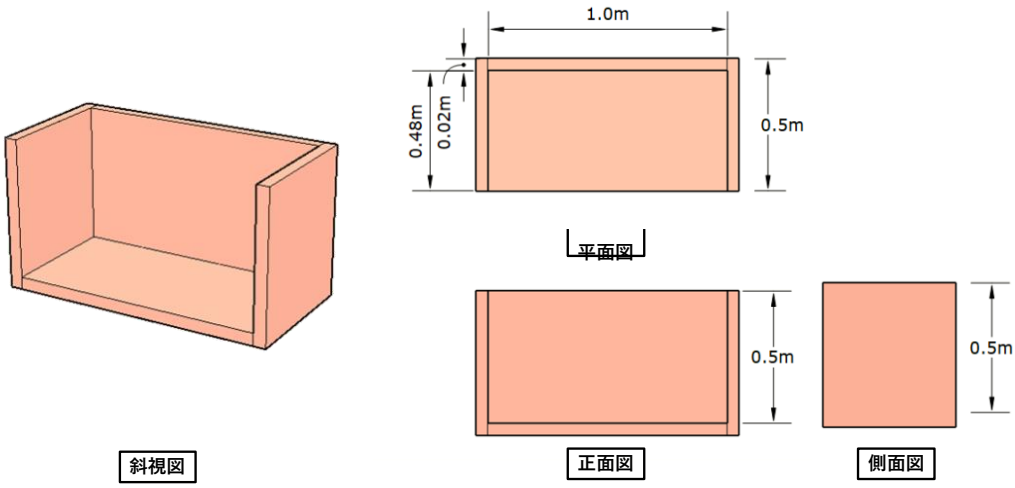


図 3.2-12　木製型枠の寸法

(4)　試験内容

吹付け試験 1 の作業フローを図 3.2-13 に示す。以下に各作業の手順と実施内容について示す。

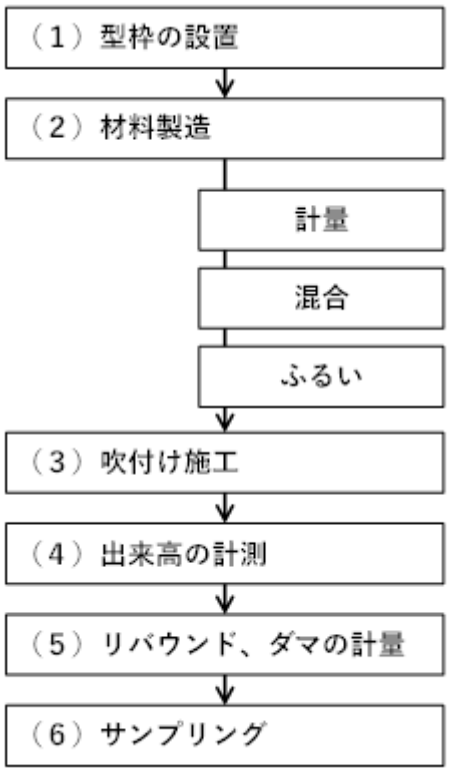


図 3.2-13　吹付け試験 1 の作業フロー

1)　型枠の軽量・設置

型枠は設置の際にクレーンスケールで重量を計測の上、リバウンド回収用のブルーシート上に配置した。

2)　材料製造

ベントナイトおよびケイ砂についてはそれぞれのケースで所定の重量となるように計量し 1 バッチ毎にフレコンバックに収納した。ベントナイトとケイ砂の自然含水比は赤外線水分計で測定し、設定含水比に必要な加水量を算出した。材料の混合および含水比調整は強制二軸ミキサーにより実施した。材料の調整は、①ベントナイト及びケイ砂をミキサーに投入し混合、②シャワー式の水添加装置を用いてミキサー内に加水すると同時に材料を混練という手順を取った。材料の投入状況及び加水状況を図 3.2-14 に示す。

ミキサーで含水比を調整した材料は、ベルトコンベアでふるいまで運搬し目開き 25 mm のふるいにかけることにより、水を多く吸収し団粒化した高含水比の材料（ダマ材）を取り除いた。取り除いたダマ材はフレコンバックに収納した。各材料について 2 バッチずつの製造を基本としていたが、吹付けの際にリバウンドが多く十分な体積が吹付けられなかった V1-50 と GX-70 の 2 ケースは 3 バッチの材料を製造した。また、V1-100 は 1 バッチのみ製造した。各材料ケースの材

料の投入重量を**表** 3.2-10 に示す。

(a) ミキサーへの材料投入状況

(b) 材料への加水状況

図 3.2-14　材料調整の実施状況

表 3.2-10　吹付試験 1 の材料投入量

ケース	バッチ	投入重量（kg）		
		ベントナイト	ケイ砂 3 号	ケイ砂 5 号
V1-70	1	232	45	45
	2	229	45	45
V1-50	1	177	80	80
	2	176	80	80
	3	174	80	80
GX-100	1	226	0	0
	2	226	0	0
GX-70	1	205	40	40
	2	206	40	40
	3	77	15	15
V1-100	1	300	0	0

3)　吹付け施工

ふるいにかけた材料はベルトコンベアで運搬し、ニードガンへ投入した。ニードガンへの材料投入が過多になると吹付け機が閉塞する可能性があったため、材料吐出状況を見ながらオペレーターがニードガンへの投入量を調整した。コンプレッサーからの圧縮空気を原動力にニードガンに投入された混合土をホース内に圧送し、伸縮アーム式吹付け機械の先端に取り付けた吹付けノズルより噴射し木製型枠への吹付けを行った。吹付けの際にはニードガンに 1 名、吹付け機械に 1 名のオペレーターを配置した。ニードガンのオペレーターは、ニードガンへの材料投入量の調整およびエアー量の調整を行った。コンプレッサーのエアー量は 12～13 m^3/min に設定し、ニー

ドガンの回転数は 5 rpm とした。また、吹付け機械のオペレーターは吹付けノズルの位置や角度の調整を行った。吹付けノズルの先端と吹付け面との距離は 1.2 m 以内としてオペレーターの目視により制御した。吹付けノズルの角度は吹付け面に対して直角となるように操作した。吹付け施工の作業状況を図 3.2-15 に示す。

(a) ニードガンへの材料投入　　(b) 材料の吹付け状況

図 3.2-15　吹付け施工の作業状況

4)　出来高の計測

各材料のケースで、所定のバッチ数の吹付けが終了した後にクレーンスケールにより型枠ごと重量を計量し、吹付け前に実施した型枠重量との差を取ることにより出来形重量を求めた。吹付けの際に生じたリバウンド材は、型枠周囲に敷設したブルーシートごと回収し、クレーンスケールにより重量を計量した。また、ふるいで取り除いたダマ材およびミキサー内部に残存した材料を回収しそれぞれ重量を計量した。出来形の計量状況とリバウンド材の計量状況を図 3.2-16 に示す。

(a) 出来形重量の計量　　(b) リバウンド材の計量

図 3.2-16　出来高の計量状況

5)　サンプリング

吹付け供試体から容積 50 ml のステンレス試料円筒を使用してサンプリングを行った。サンプリングは吹付け施工と同日に実施したが、作業を翌日に持ち越す場合はラップとブルーシートを用いて型枠全体を養生した。サンプリングの実施状況を図 3.2-17 に示す。サンプリングは図 3.2-18 に示すように、型枠正面から見て 1 断面につき 9 点の場所を選び、1 ケースあたり奥行方向に 3 断面を実施した。採取したサンプルを用いて乾燥密度および含水比を測定した。含水比は土の含水比試験方法（JIS A 1203：2020）に従って測定を実施した。また、乾燥密度の測定とは別にベントナイト混合率の測定用にサンプルを採取した。ベントナイト混合率はメチレンブルー吸着量試験（JIS Z 2451：2020）に則り測定した。

(a) サンプリングの作業状況　　(b) 型枠の養生状況

図 3.2-17　サンプリングの実施状況

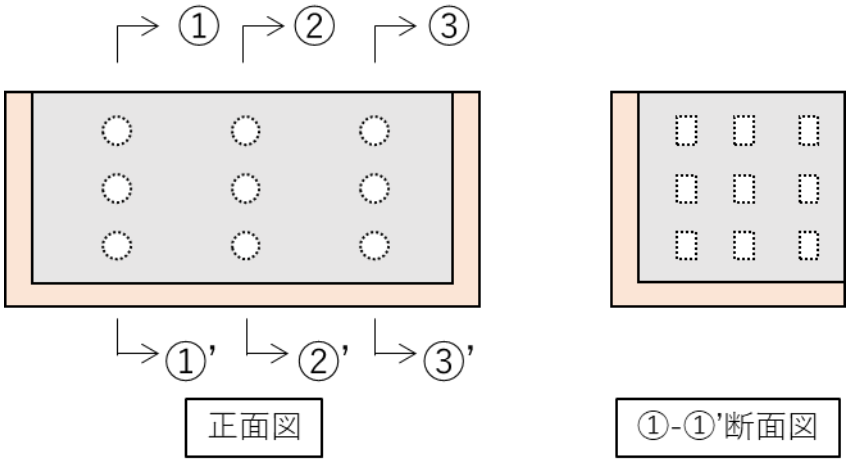


図 3.2-18　吹付試験 1 のサンプリング位置

(5)　品質管理項目

吹付け試験 1 における品質管理項目を**表** 3.2-11 に示す。

試験終了後には、材料毎の吹付け性能を評価するためにリバウンド率、ロス率および吹付け速度を整理した。各評価指標の算出方法を以下に示す。

・　リバウンド率

リバウンド率は、吹付け重量に対するリバウンド量として定義しており、試験では以下の式より算出した。

$$\text{リバウンド率}(\%) = \frac{\text{リバウンド量}}{\text{吹付け重量}} \times 100 = \frac{\text{リバウンド量}}{\text{出来形重量} + \text{リバウンド量}} \times 100$$

・　ロス率

材料製造時にミキサーに付着した材料やニードガンやホース内に残存した材料の量はロス量として計量した。ロス率は、材料投入量に対するロス量の割合として定義しており、試験では以下の式より算出した。

$$\text{ロス率}(\%) = \frac{\text{材料投入量} - (\text{出来形重量} + \text{リバウンド量} + \text{ダマ除去量})}{\text{材料投入量}} \times 100$$

・　吹付け速度

吹付け速度は、出来形体積と吹付けの施工時間より単位時間当たりの吹付け体積として算出した。本試験では材料を吹付けるのに要した時間のみを考慮しており、材料製造や閉塞時のホースの清掃などの時間は考慮していない。

表 3.2-11　吹付け試験 1 の品質管理項目

分類	項目	規準・確認方法	基準値	実施時期	基本数量
品質管理（材料）	締固め特性	JIS A 1210		室内試験	
	含水比（ベントナイト）	赤外線水分計		混合前	1 点/バッチ
	含水比（ケイ砂）	赤外線水分計		混合前	1 点/ケース
	含水比（混合土）	赤外線水分計 JIS A 1203	Wopt±2% 以内	混合後	3 点/ケース
施工管理	材料重量	クレーンスケール、計量器等	-	吹付け時	1 点/フレコン
	吹付け距離	目視	1.2m 以内	吹付け時	
	吹付け角度	目視		吹付け時	
	吹付け機械回転数		5rpm	吹付け時	
	コンプレッサーエアー量		10~12m^3/min	吹付け時	
	リバウンド率	クレーンスケール	-	吹付け後	1 ケースごと
	ロス率			吹付け後	1 ケースごと
	吹付け速度			吹付け後	1 ケースごと
品質管理（施工後）	乾燥密度	コアサンプリング試料による試験	有効粘土密度 1.2Mg/m^3	吹付け後	27 点/ケース
	含水比	コアサンプリング試料による試験 JIS A 1203		吹付け後	27 点/ケース
	ベントナイト混合率	コアサンプリング試料による試験 JBAS 107-91	50% or 70%	吹付け後	3 点/ケース ※混合材料のみ

(6) 実施結果

1) 混合土の含水比

ふるいにかける前と後の各材料の含水比の計測結果を**表** 3.2-12 に示す。V1-70 と V1-50 の場合はふるい後の含水比が 2、3%程度低下している。一方の GX-100 と GX-70 の場合はふるいの前後で含水比はほとんど変わらない結果となった。また、これらの 4 ケースでは、ふるい後の含水比が設定含水比よりも低い値を示した。

表 3.2-12 混合土の含水比測定結果

ケース名	対象	含水比 (%)	設定含水比 (%)	ベントナイト混合率 (%)
V1-70	ふるい前	18.9	18.62	71
	ふるい後	16.8		
V1-50	ふるい前	13.9	15.06	50
	ふるい後	11.0		
GX-100	ふるい前	18.7	20.12	-
	ふるい後	18.8		
GX-70	ふるい前	15.7	18.27	78
	ふるい後	15.7		
V1-100	ふるい前	28.5	30.00	-
	ふるい後	31.3		

2) サンプリングによる乾燥密度および含水比の測定

吹付け後の出来形の状況を図 3.2-19 に示す。吹付けは、V1-50、V1-70、GX-70、GX-100、V1-100 の順に実施した。GX-100 については、他のケースに比べて型枠上部の吹付け量が少なかったため、型枠上段のサンプリングは最も背面に近い断面のみを実施し合計 21 点のサンプリングを実施した。V1-100 については、6 か所からサンプリングを実施した。計測した含水比と乾燥密度の分布を図 3.2-20～図 3.2-29 に、含水比と乾燥密度の関係を図 3.2-30 に、含水比と乾燥密度の平均値、最大値および最小値を表 3.2-13 と図 3.2-31、図 3.2-32 に示す。

V1-70 では、乾燥密度の目標値が 1.43 Mg/m^3 であるのに対してサンプリング試料の乾燥密度の平均値は 1.40 Mg/m^3 であった。型枠上部および中部では目標値の 1.43 Mg/m^3 に近い乾燥密度を示した。一方で、型枠下部では 1.20 Mg/m^3 以下の値を示し、型枠背面に近い部分では 1.07 Mg/m^3 であり目標値に大きく達しない値であった。含水比については、目標値の 18.6%に対して平均値が 20.5%と上回り、吹付けの直前に計測したふるい後の混合土の含水比よりも大きな値を示した。

V1-50 では、乾燥密度の目標値が 1.65 Mg/m^3 であるのに対してサンプリング試料の乾燥密度の平均値は 1.44 Mg/m^3 となり、ほとんどのサンプリング箇所において乾燥密度が目標値を下回る結果となった。型枠下部では 1.30 Mg/m^3 以下の値も示し、最も低い場所で 1.15 Mg/m^3 を示し

た。含水比については、目標値の 15.1%に対して平均値が 15.9%と上回り、ふるい後の混合土の含水比よりも 5%ほど大きな値を示した。

GX-100 では、乾燥密度の目標値が 1.20 Mg/m³ であるのに対してサンプリング試料の乾燥密度の平均値は 1.33 Mg/m³ であったが、全ケース中で乾燥密度が最も低い値を示した。サンプリング試料の乾燥密度は一か所を除いて目標値よりも大きな値を示しており、唯一目標値に達しなかった場所は型枠下部で 1.18 Mg/m³ の値を示した。含水比については、目標値の 20.1%に対して平均値が 20.6%と上回り、ふるい後の混合土の含水比よりも大きな値を示した。

GX-70 では、乾燥密度の目標値が 1.43 Mg/m³ であるのに対してサンプリング試料の乾燥密度の平均値は 1.54 Mg/m³ であり、全ケース中で乾燥密度は最も高い値を示した。他のケースで乾燥密度が低い傾向にあった型枠下部においても高い乾燥密度の値が得られている。含水比については、目標値の 18.3%に対して平均値が 17.1%と下回ったものの、ふるい後の混合土の含水比よりも大きな値を示した。

V1-100 では、材料製造時の状況を確認したところ最適含水比では、水分量が少なく型枠に付着しないおそれがあったため、加水量を増やし、含水比 30.0%を目標に含水比調整を行った。乾燥密度の目標値が 1.20 Mg/m³ であるのに対してサンプリング試料の乾燥密度の平均値は 1.33 Mg/m³ となった。含水比については、目標値の 30.0%に対して平均値が 28.3%と下回った。

各ケースの乾燥密度の平均値、最大値および最小値を比較すると、クニゲル V1 はクニゲル GX に比べて乾燥密度のばらつきが大きい結果となった。また、V1-70 と GX-70 を比較するとクニゲル GX の方が高い乾燥密度で施工されている。クニゲル GX の吹付け供試体の乾燥密度が高くなる結果は、既往の事例と整合的である（並木ほか，2007）。含水比の平均値、最大値および最小値を比較すると、クニゲル V1 はクニゲル GX に比べて含水比のばらつきが大きい結果となった。

型枠下部の乾燥密度が低い値となった要因として、リバウンドによる影響と吹付け時のノズル操作の影響の 2 つが考えられる。まず、リバウンドの影響については、吹付けのリバウンドが型枠下部に堆積し、それを巻き込みながら吹付けることにより乾燥密度が低い結果となったことが考えられる。また、ノズル操作の影響としては、吹付け面の仕上がりに凹凸が生じたことで吹付け対象の面に対してノズルを垂直の向きに保てなくなり乾燥密度が低下したことが考えられる。

(a) V1-70

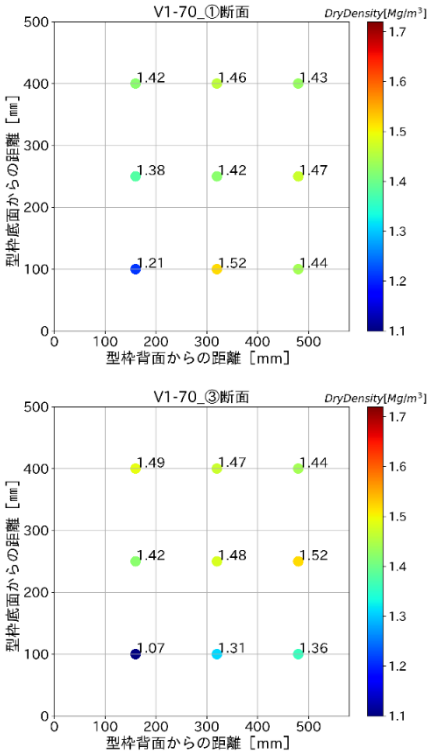
(b) V1-50

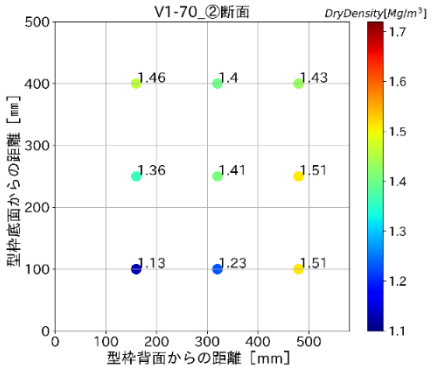
(c) GX-100

(d) GX-70

(e) V1-100

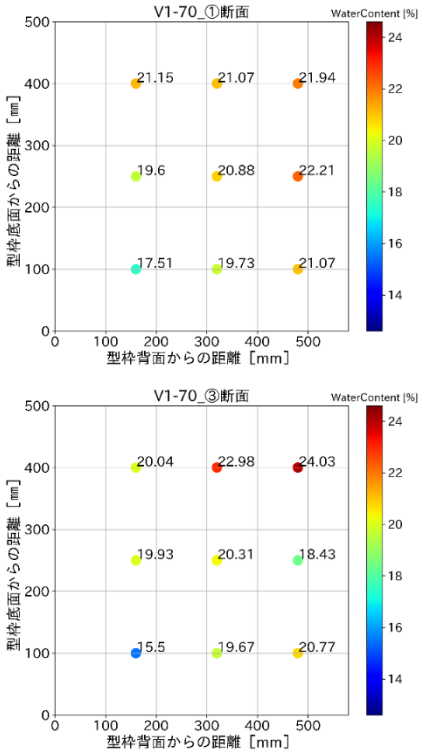
図 3.2-19　吹付けの出来形の状況

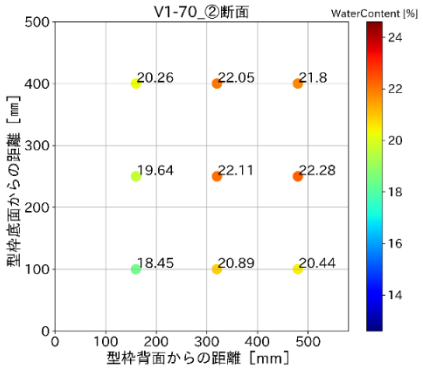




V1-70	乾燥密度（Mg/m³）
目標値	1.43
平均値	1.40

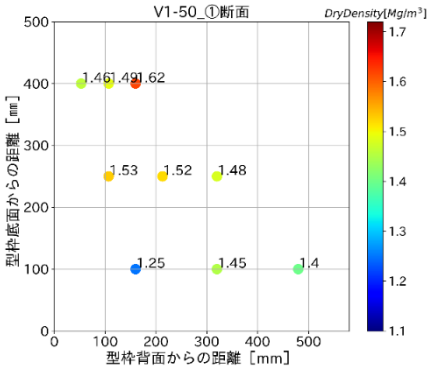
図 3.2-20　V1-70 乾燥密度分布

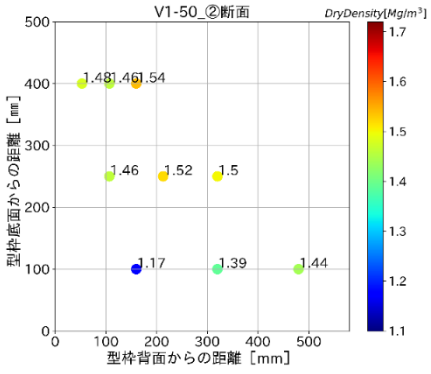


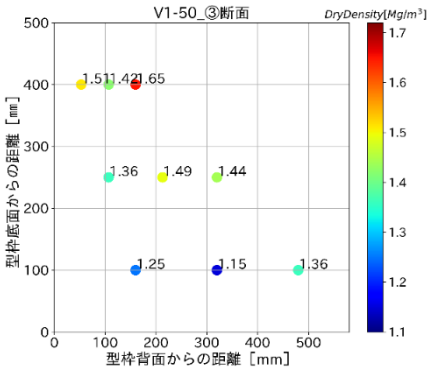


V1-70	含水比（%）
目標値	18.6
平均値	20.5

図 3.2-21　V1-70 含水比分布

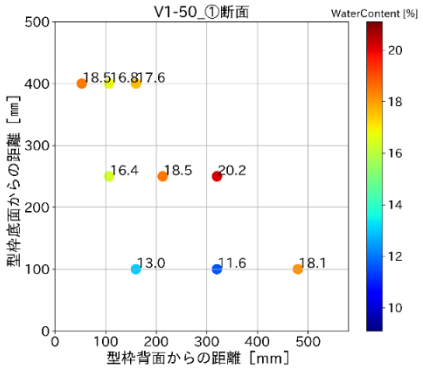


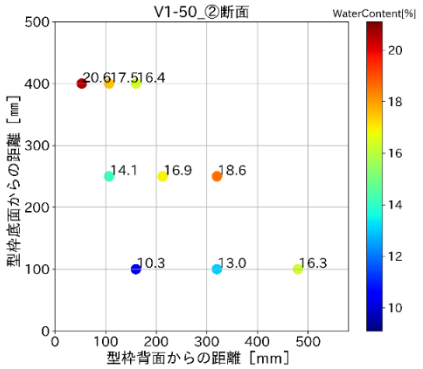


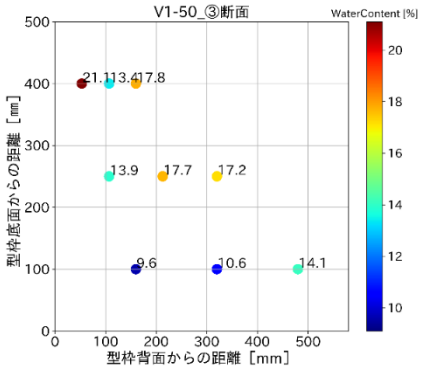


V1-50	乾燥密度（Mg/m³）
目標値	1.65
平均値	1.44

図 3.2-22　V1-50 乾燥密度分布

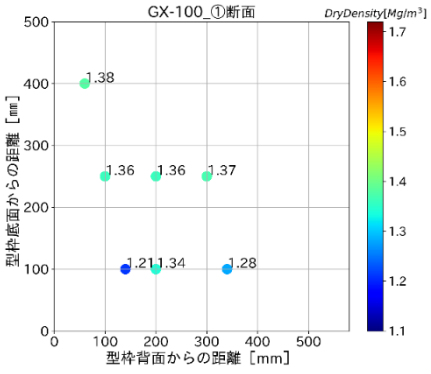


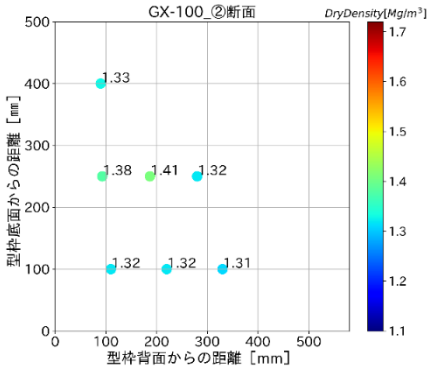


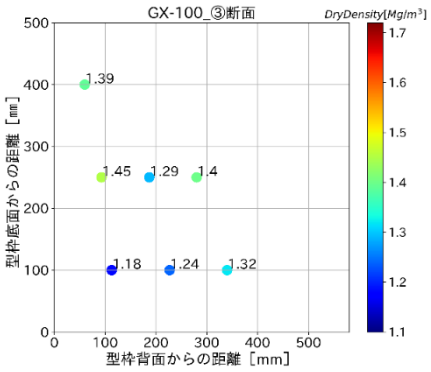


V1-50	含水比（%）
目標値	15.1
平均値	15.9

図 3.2-23　V1-50 含水比分布

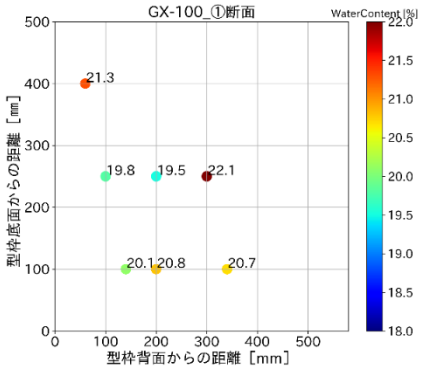


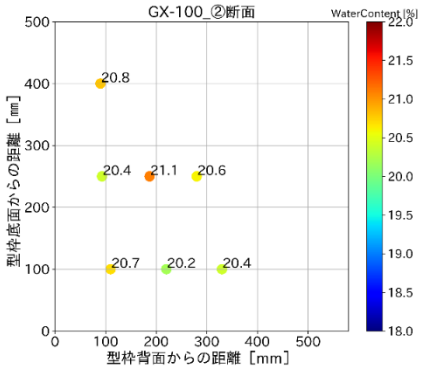


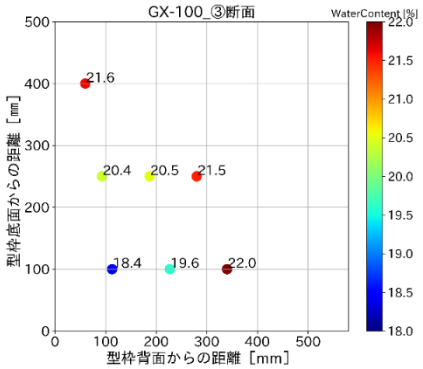


GX-100	乾燥密度（Mg/m³）
目標値	1.20
平均値	1.33

図 3.2-24　GX-100 乾燥密度分布

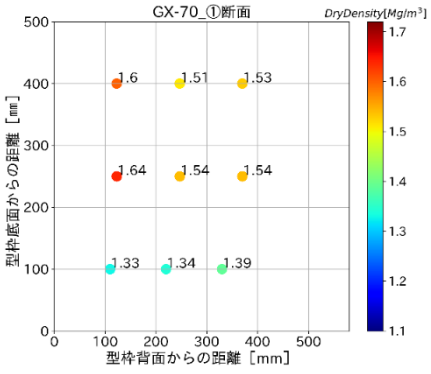


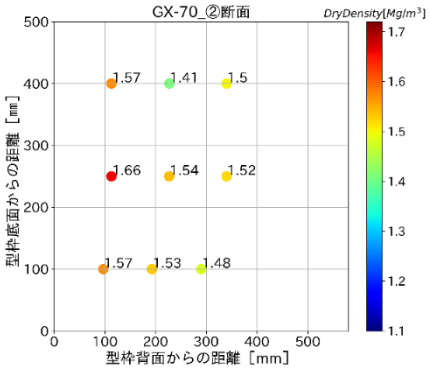


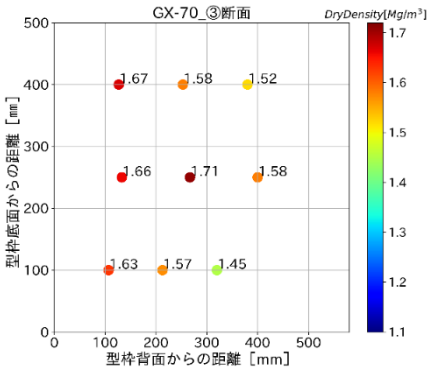


GX-100	含水比（%）
目標値	20.1
平均値	20.6

図 3.2-25　GX-100 含水比分布

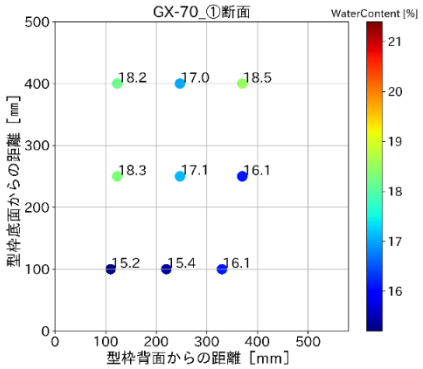


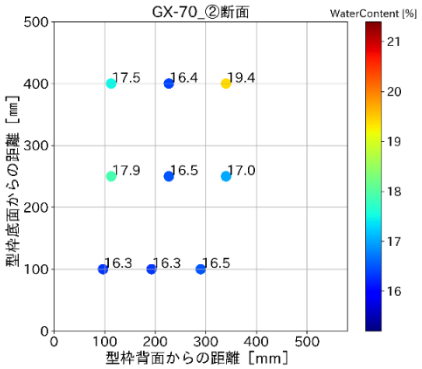


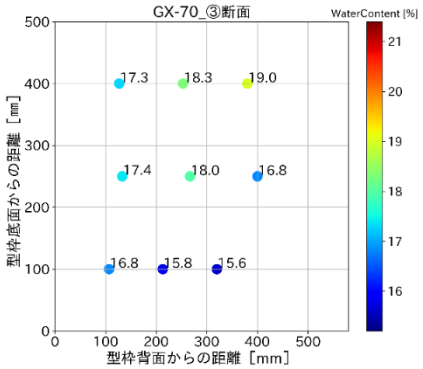


GX-70	乾燥密度（Mg/m³）
目標値	1.43
平均値	1.54

図 3.2-26　GX-70 乾燥密度分布

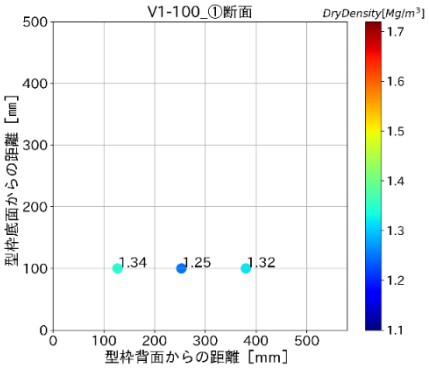


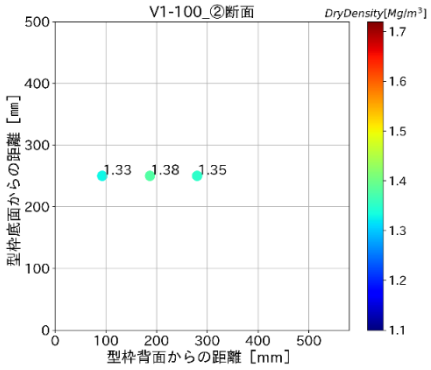




GX-70	含水比（%）
目標値	18.3
平均値	17.1

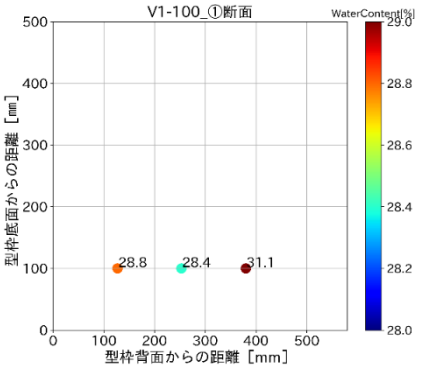
図 3.2-27　GX-70 含水比分布

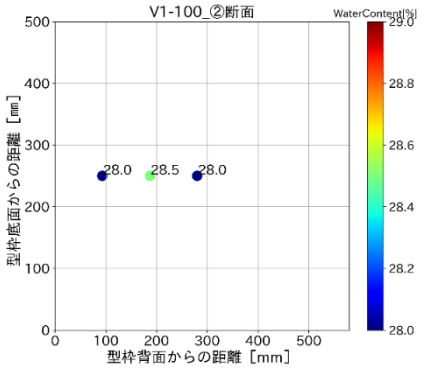




V1-100	乾燥密度（Mg/m³）
目標値	1.20
平均値	1.33

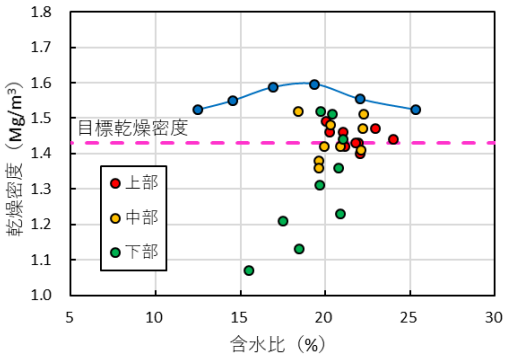
図 3.2-28　V1-100 乾燥密度分布



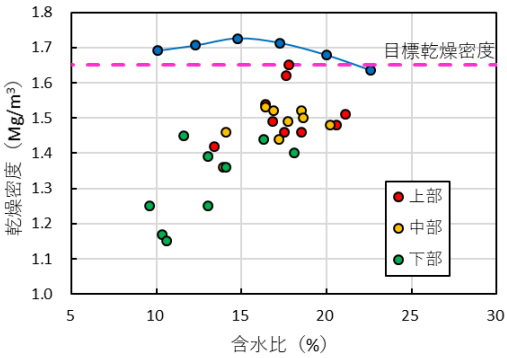


V1-100	含水比（%）
目標値	-
平均値	28.3

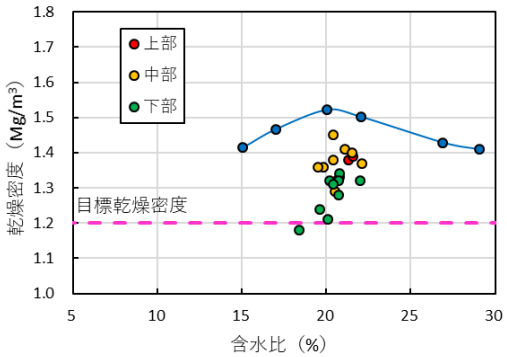
図 3.2-29　V1-100 含水比分布



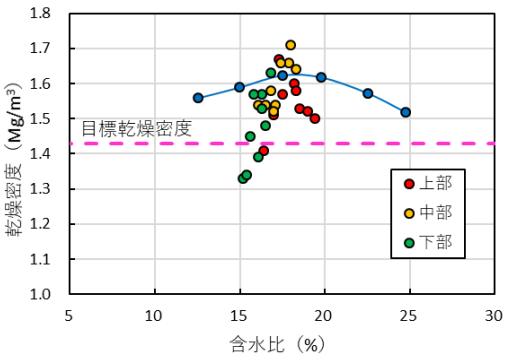
(a) V1-70



(b) V1-50



(c) GX-100



(d) GX-70

図 3.2-30　含水比と乾燥密度の関係

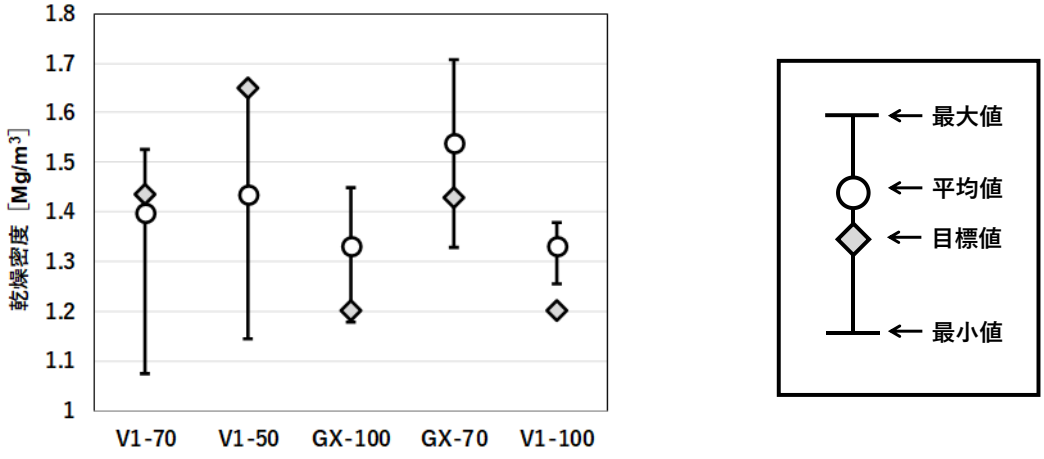


図 3.2-31　乾燥密度の平均値および最大値、最小値

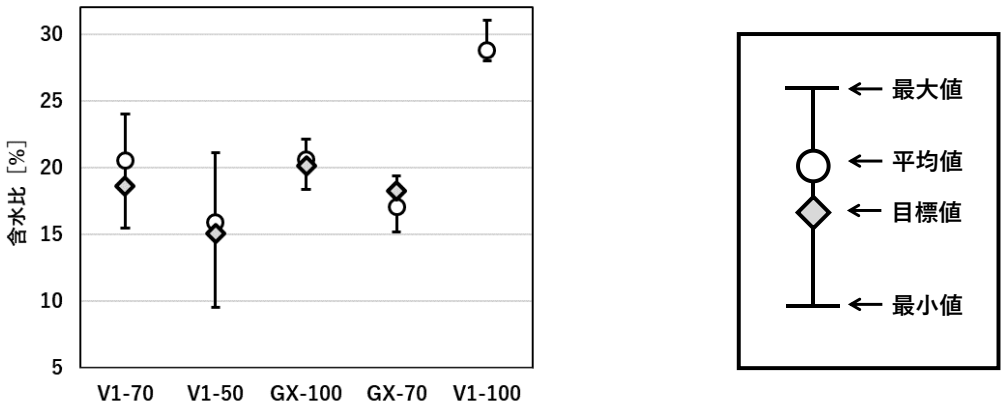


図 3.2-32　含水比の平均値および最大値、最小値

表 3.2-13　乾燥密度および含水比の測定結果

ケース	標本数	乾燥密度（Mg/m³）				含水比（%）			
		目標値	平均値	最大値	最小値	設定値	平均値	最大値	最小値
V1-70	27	1.43	1.40	1.52	1.07	18.6	20.5	24.0	15.5
V1-50	27	1.65	1.44	1.65	1.15	15.1	15.9	21.1	9.6
GX-100	21	1.20	1.33	1.45	1.18	20.1	20.6	22.1	18.4
GX-70	27	1.43	1.54	1.71	1.33	18.3	17.1	19.4	15.2
V1-100	6	1.20	1.33	1.38	1.25	-	28.8	31.1	28.0

3)　ベントナイト混合率の測定

表 3.2-14 に示すクニゲル V1 とクニゲル GX の単体（混合率 100%）のメチレンブルー吸着量を基準とし、各材料ケースにおけるメチレンブルー吸着量よりベントナイト混合率を算出した。ベントナイト混合率の計測結果を表 3.2-15 に示す。ベントナイト混合率は、V1-70 で 82%、V1-50 で 74%、GX-70 で 75%を示し、ケイ砂混合した材料においてはベントナイト混合率が設定し

た混合率よりも増加していた。クニゲル V1 では、ベントナイト混合率が材料製造時よりも大幅に増加している。これは、粉末状のクニゲル V1 に比べて粒径の大きなケイ砂がリバウンドで多く跳ね返り、吹付け供試体中のクニゲル V1 の割合が高くなっていると考えられる。

表 3.2-14　クニゲル V1 およびクニゲル GX 単体のメチレンブルー吸着量

材料	混合率 (%)	ﾒﾁﾚﾝﾌﾞﾙｰ吸着量 (mmol/100g)
クニゲルV1	100	82
クニゲルGX	100	69

表 3.2-15　ベントナイト混合率

ケース	ベントナイト混合率 (%)
V1-70	82
V1-50	74
GX-100	100
GX-70	75
V1-100	100

4)　吹付け試験 1 の施工品質管理

吹付けの可否を確認するために実施した V1-100 以外の 4 ケースの施工品質や施工能力について、表 3.2-16 にリバウンド率、ロス率および吹付け速度を示す。リバウンド率は、V1-70 が最も低く 40%を示し、V1-50 で最も高く 60%となり、既往の研究事例と比較して全体的にリバウンド量が多い結果となった。ロス率については、13～17%となり材料による差異は見られなかった。吹付け速度については、0.6～1.0 m^3/hr となり、大きな差異はみられなかった。ただし、V1-70 と V1-50 では吹付け中にニードガンの閉塞が生じたため、実際にはその整備のための時間がかかっており、実際の材料製造から吹付けまでの時間はクニゲル GX よりも多くなっている。クニゲル V1 の 2 ケースで発生した吹付け機の閉塞は、吹付け機への材料投入と吹付け機からの材料吐出のバランスが崩れた時に生じた。

表 3.2-16　吹き付けの施工品質と施工能力（吹付け試験 1）

ケース	品質			施工能力	（参考）施工性	
	平均 乾燥密度 (Mg/m³)	リバウンド率 (%)	ロス率 (%)	吹付け速度 (m³/hr)	ノズル、ホースの閉塞有無	吹付け機閉塞有無
V1-70	1.40	40	13	0.8	無	有
V1-50	1.44	60	16	0.7	無	有
GX-100	1.33	55	13	1.0	無	無
GX-70	1.54	55	17	0.6	無	無
V1-100	1.33	18	10	1.8	無	無

(7)　吹付け試験 1 のまとめ

吹付け試験 1 では、クニゲル V1 の単体およびケイ砂と混合した材料である V1-100、V1-70、V1-50 とクニゲル GX の単体およびケイ砂と混合した材料である GX-100、GX-70 について木製型枠への吹付け試験を実施した。

吹付けの可否の確認のために実施した V1-100 以外の結果を比較すると、吹付けた後の材料をコアサンプリングして計測した乾燥密度の平均値は、V1-70 が 1.40 Mg/m³、V1-50 が 1.44 Mg/m³、GX-100 が 1.33 Mg/m³、GX-70 が 1.54 Mg/m³ であり、V1-70 と V1-50 では目標乾燥密度に達しなかった。クニゲル V1、クニゲル GX ともに既往の事例で得られている乾燥密度 1.60 Mg/m³ よりも低い値を示した。また、リバウンド率は、いずれのケースにおいても 40%～60%の値を示し、既往の事例よりも高い値を示した。この理由としては、複数ケースを横並びに比較するためなるべく施工条件を一定にするという考えのもと、基本としてノズル角度を地面に対し水平にし、ノズルをあまり細かく動かさずに吹付けを行ったため型枠中心が大きく盛り上がるような山型に吹付けが形成されたことや吹付けの表面に凹凸が生じたため、吹付けの際に吹付け面に対してノズルが垂直に向けることが難しく、リバウンド率が高くなるとともに型枠の下部ではリバウンドを巻き込み乾燥密度が低下したと考えられる。

吹付け試験 2 の材料は、粉末ベントナイトと粒状ベントナイトの形態の違いを把握することを目的としてクニゲル V1 とクニゲル GX から 1 つずつ材料を選ぶこととした。クニゲル V1 では、V1-50 が吹付け後の乾燥密度が施工目標を大きく下回ったことやリバウンド率が全ケースで最も大きかったことから除外し、V1-70 を吹付け試験 2 の材料とした。クニゲル GX では、施工後の乾燥密度の平均値が、GX-100 と GX-70 のどちらも目標値を上回っており、また、リバウンド率にも差がなかったことから、V1-70 とベントナイト混合率をそろえることとし、GX-70 を吹付け試験 2 の材料とした。

3.2.3.2　吹付け試験 2

吹付け試験 2 では、止水プラグの側壁部および天端部の切欠き部へのベントナイト混合土の吹付け施工を想定し、切欠き部の形状を模擬した型枠への吹付け施工試験を実施した。試験では吹付けた混合土の品質および工法の施工性の確認を目的とした。そこで、以下の観点より試験結果の評価を実施した。

- 吹付け施工による目標乾燥密度（1.43 Mg/m^3）の確保
- 天端部（模擬型枠上部）を対象とした吹付けの施工性の確認

(1)　使用材料

吹付け試験 2 では粉体ベントナイトであるクニゲル V1 と粒状ベントナイトであるクニゲル GX を使用し、それぞれベントナイト混合率を 70%としたベントナイトとケイ砂の混合土を吹付け材料とした。ケイ砂には 3 号および 5 号を使用し、その割合は 3 号：5 号＝50：50 とした。材料の設定含水比は吹付け試験 1 と同様に、締固め試験の結果より締固めエネルギーが 2Ec の場合の最適含水比とした。V1-70 では試験時の吹付け機の材料閉塞やリバウンドの発生状況を踏まえて、ケースごとに加水量を増やした結果、最終的な設定含水比は最適含水比よりも高くなった。吹付け試験 2 における材料仕様を**表** 3.2-17 に示す。

表 3.2-17　吹付け試験 2 のベントナイト混合土の仕様

ケース名	混合率（%）			設定含水比（%）	目標乾燥密度（Mg/m^3）
	V1	GX	ケイ砂		
V1-70	70	-	30	18.62	1.43
				23.00	
				30.00	
GX-70	-	70	30	18.27	1.43

(2)　使用機械

吹付け試験 2 では吹付け施工のための機械として、吹付け機、コンプレッサー、アーム付き吹付け機械、ふるい機、強制二軸ミキサー、フレコンサイロを用いた。吹付けの対象は切欠き部を模擬した鋼製型枠とした。図 3.2-33 に吹付け試験 2 における使用機械の配置図を示す。各機械の詳細を以下に示す。

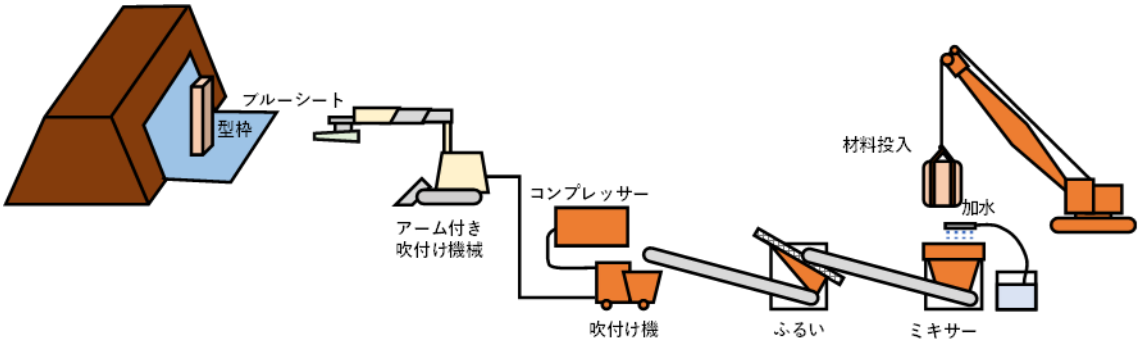


図 3.2-33　吹付け試験 2 における使用機械の配置図

1)　フレコンサイロ

クニゲル V1 の計量およびミキサーへの材料投入のためにフレコンサイロ（近江機工 OFK-1.5）を使用した。フレコンサイロでは、材料の重量を予め設定した値まで計量し自動で排出する。フレコンサイロの外観を図 3.2-34 に示す。

図 3.2-34　フレコンサイロ外観

2)　強制二軸ミキサー

吹付け試験 1 と同様に材料の混合（空練り）および含水比の調整のための混錬に強制二軸ミキサー（北川鉄工所 W-500）を使用した。

3)　ふるい

吹付け試験 1 と同様に、ミキサーにより含水比調整した材料はベルトコンベアで運搬し、目開き 25mm のふるいにかけて団粒化した含水比が高い材料（ダマ材）を取り除いた。

4)　吹付け機

吹付け試験 1 と同様に、吹付け機にはニードガン 2000（AGC プライプリコ）を使用した。

5)　コンプレッサー

吹付け試験 1 と同様に、吹付け用のコンプレッサーとして、190HP（北越工業）を使用した。

6)　アーム付き吹付け機械

吹付け試験 1 と同様に、吹付けノズルはアーム付き吹付け機械（Normet minimec2）に取り付け、オペレーターの操作により吹付け位置の制御を行った。

7)　模擬型枠

半径 2 m の円形坑道に対して坑道全周に 1 m の切欠きを設ける場合を想定し止水プラグの切欠き部の寸法を設定した。図 3.2-35 に赤枠で示す坑道の側壁から天端にかかる範囲の形状を模擬型枠で再現した。型枠は鋼板を組み合わせて作製し、幅 1 m、高さ 3 m、奥行き 1.3 m とした。型枠の背面の曲率は、切欠き部の背面の曲率（R=3.0 m）を再現した。また、型枠の左側面の鋼板が取り外し可能な構造となっており、サンプリングは鋼板を取り除いて実施した。模擬型枠の外観を図 3.2-36 に、寸法を図 3.2-37 に示す。

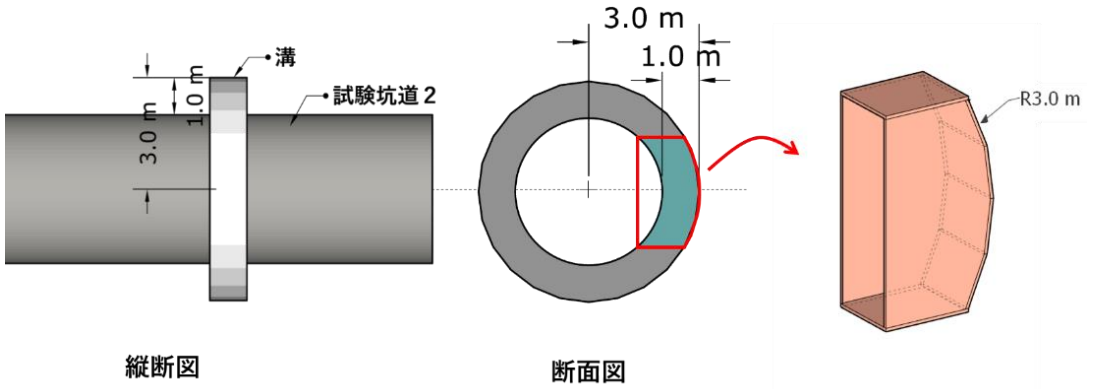
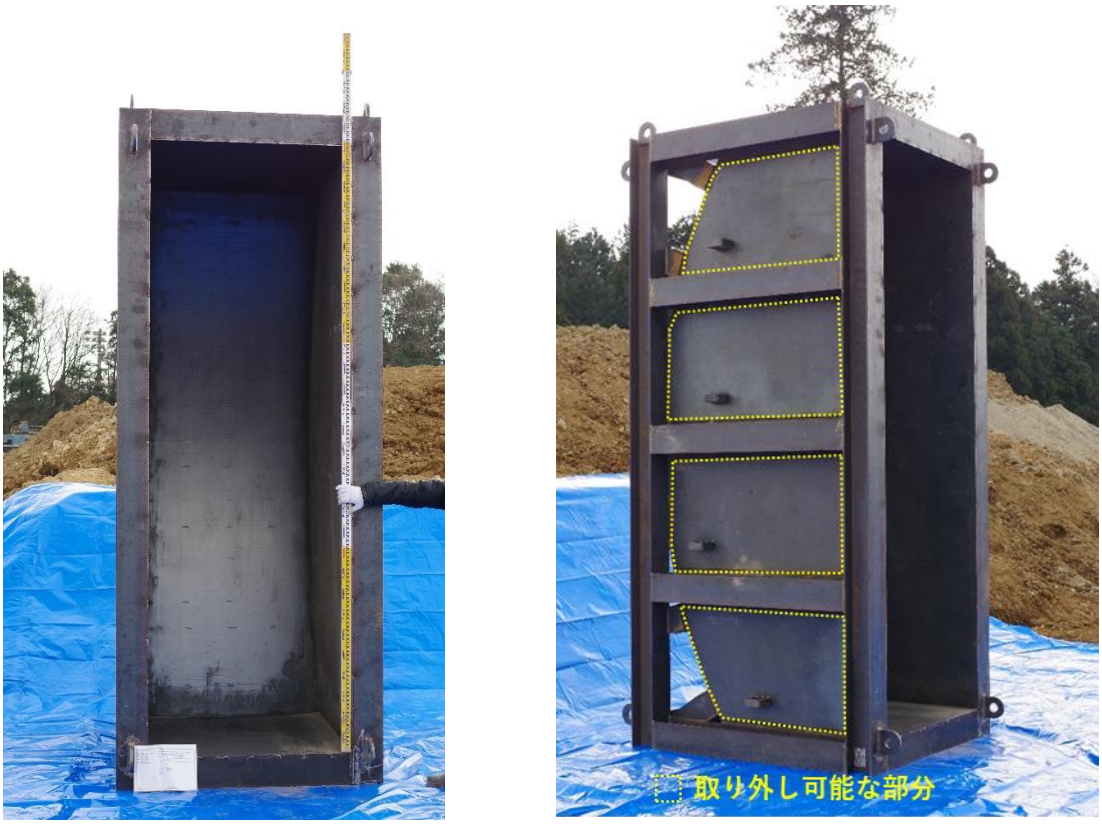


図 3.2-35　模擬型枠の寸法の考え方



(a) 正面　　(b) 左側面

図 3.2-36　模擬型枠の外観

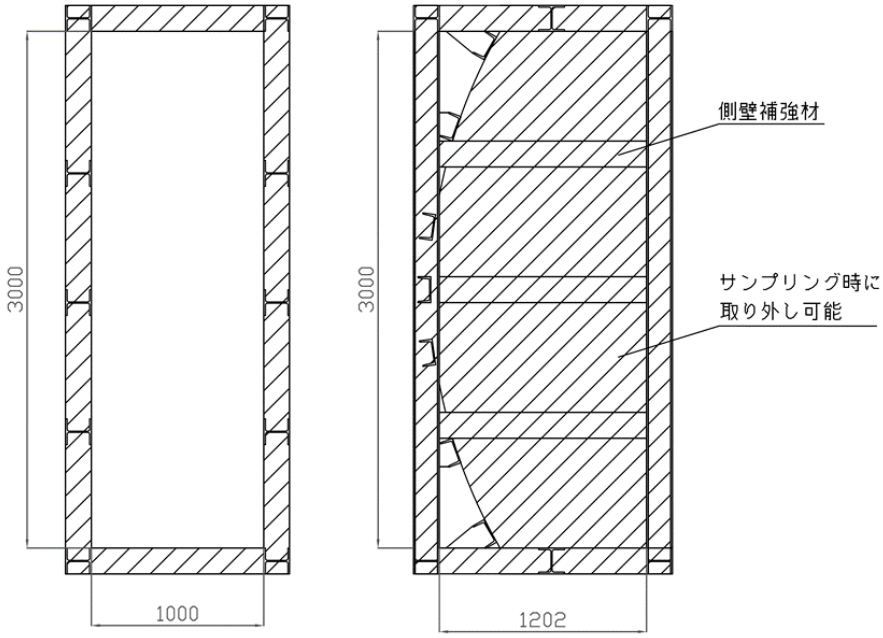


図 3.2-37　模擬型枠の寸法

(3)　試験内容

吹付け試験 2 の作業フローを図 3.2-38 に示す。1 ケースの作業手順を図 3.2-39 に示す。吹付けは 1 ケースあたり二日間実施した。次項より各作業の手順と実施内容について示す。

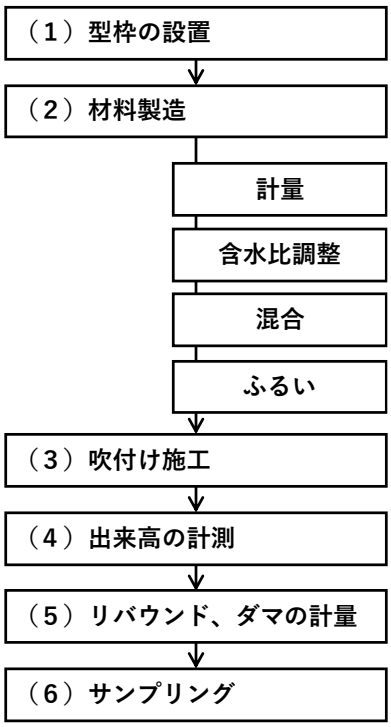


図 3.2-38　吹付け試験 2 の作業フロー

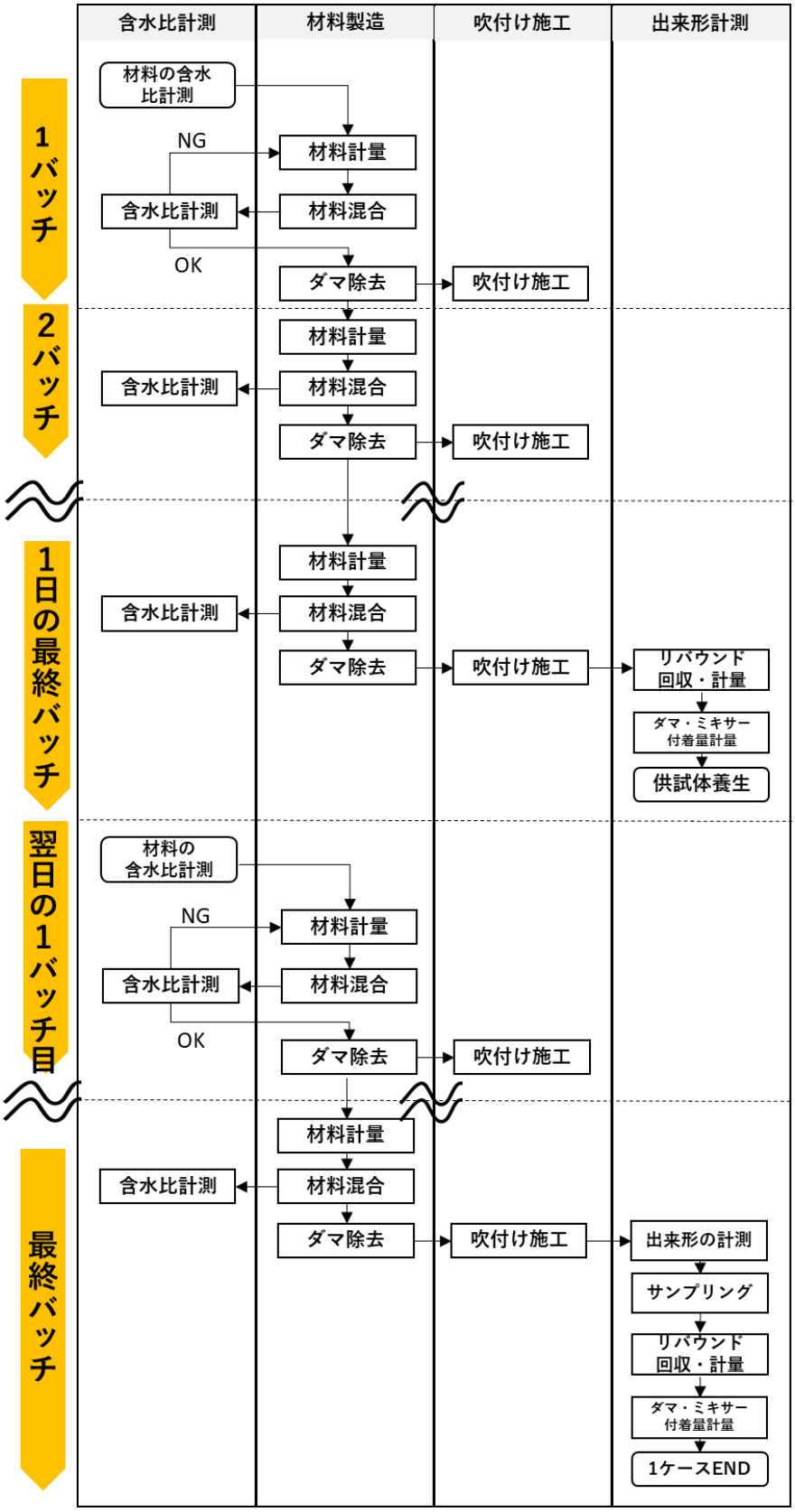


図 3.2-39　1 ケースの吹付けの作業手順

1)　型枠の計量・設置

型枠は設置の際にクレーンスケールで重量を計測の上、リバウンド回収用のブルーシート上に配置した。型枠設置の状況を図 3.2-40 に示す。

(a) 型枠の計量

(b) 型枠の設置

図 3.2-40　型枠設置の状況

2)　材料製造

クニゲル GX とケイ砂は 1 バッチの投入重量となるように計量しフレコンバックに収納し、クニゲル V1 はフレコンサイロに投入した。ベントナイトとケイ砂の自然含水比は赤外線水分計で測定し、設定含水比に必要な加水量を算出した。材料の混合および含水比調整は、①ベントナイト及びケイ砂をミキサーに投入し混合、②シャワー式の水添加装置を用いてミキサー内に加水すると同時に材料を混練という手順を取った。V1-70 では 17 バッチ、GX-70 では 22 バッチを製造した。材料製造の状況を図 3.2-41 に示す。

V1-70 では、ケイ砂をクレーンを用いて強制二軸ミキサーに投入後にクニゲル V1 をフレコンサイロよりあらかじめ設定した重量を投入した。含水比は最適含水比の 18.62%を目標として加水・混合しが、リバウンドが多く発生したため、2 バッチ目からは含水比 23%を目標に、9 バッチ目からは含水比 30%を目標に加水量を増やして混合した。

GX-70 では、クニゲル GX とケイ砂をクレーンによりミキサーに材料を投入した。含水比は最適含水比を含水比の設定値とした。ただし、吹付け試験 1 において混合後の含水比が設定含水比よりも低くなる傾向がみられたため、水の投入重量を 5%程度多くした。

ミキサーで含水比を調整した材料は、ベルトコンベアでふるいまで運搬し目開き 25 mm のふるいにかけて、水を多く吸収し団粒化した高含水比の材料（ダマ材）を取り除いた。取り除いたダマ材はフレコンバックに収納した。1 バッチにつき 1 点の頻度でふるい前とふるい後の材料の含水比を測定した。また、5 バッチ毎に 1 点の頻度でベントナイト混合率を測定した。

(a) クニゲル V1 投入状況

(b) クニゲル GX 投入状況

(c) 含水比調整状況

(d) 材料混合状況

図 3.2-41　材料製造の状況

3)　吹付け施工

ふるいにかけた材料はベルトコンベアで運搬し、ニードガンへ投入した。ニードガンへの材料投入が過多になると吹付け機が閉塞する可能性があるため、材料吐出状況を見ながらオペレーターにより吹付け機への投入量を調整した。コンプレッサーからの圧縮空気を原動力にニードガンに投入された混合土をホース内に圧送し、伸縮アーム式吹付け機械の先端に取り付けた吹付けノズルより噴射し鋼製型枠への吹付けを行った。吹付けの際にはニードガンに 1 名、吹付け機械に 1 名のオペレーターを配置した。ニードガンのオペレーターは、ニードガンへの材料投入量の調整およびエアー量の調整を行った。コンプレッサーのエアー量は 12～13 m^3/min に設定し、ニードガンの回転数は 5 rpm とした。また、吹付け機械のオペレーターは吹付けノズルの位置や角度の調整を行った。吹付けノズルの先端と吹付け面との距離は 1.2 m 以内としてオペレーターの目視により制御した。吹付けノズルの角度は吹付け面に対して直角となるように操作した。型枠の背面上部や背面下部ではノズルは斜めに型枠天端部ではノズルは直上に向けて吹付けを実施した。吹付け時のノズルの向きを図 3.2-42 に示す。

(a) 水平

(b) 斜め（仰角 45°）

(c) 直上（仰角 90°）

図 3.2-42　吹付け試験 2 のノズルの向き

4)　出来形の計測

吹付け終了後にクレーンスケールにより型枠ごと重量を計量し、吹付け前に実施した型枠重量との差を取ることにより出来形重量を求めた。また、タブレット端末を用いた 3 次元計測により出来形体積を計測した。3 次元計測には 3D Scanner App を、体積算出には Cloudcompare を用いた。出来形の計測状況を図 3.2-43 に示す。

(a) 出来形重量の計量

(b) 出来形体積の測定

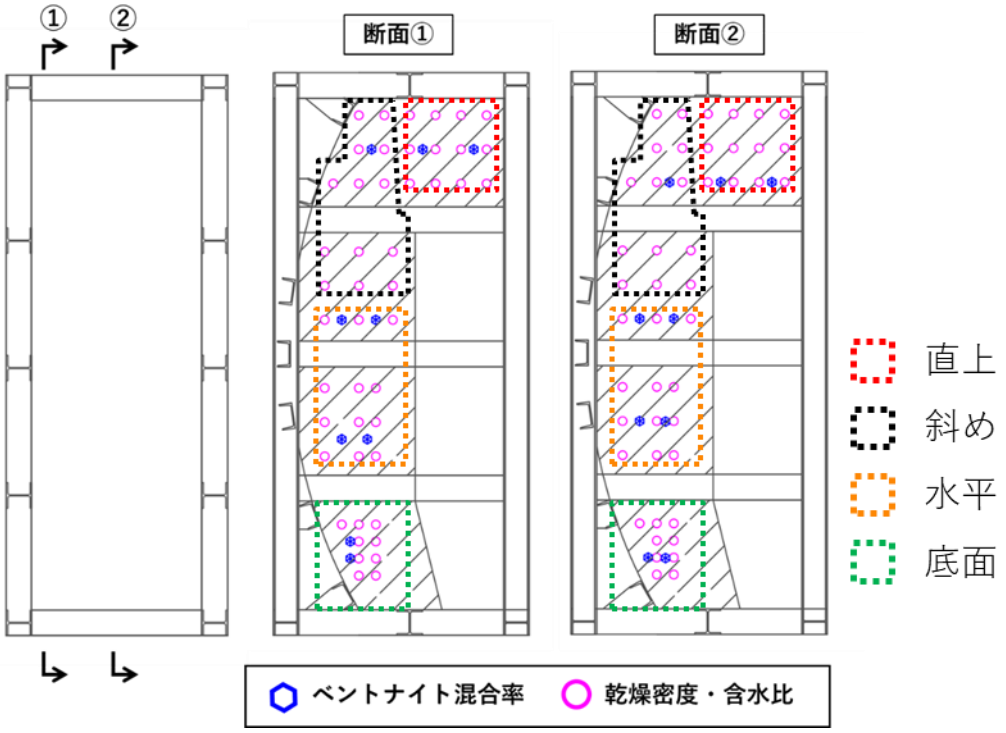
図 3.2-43　出来形の計測状況

5)　リバウンド・ダマの計量

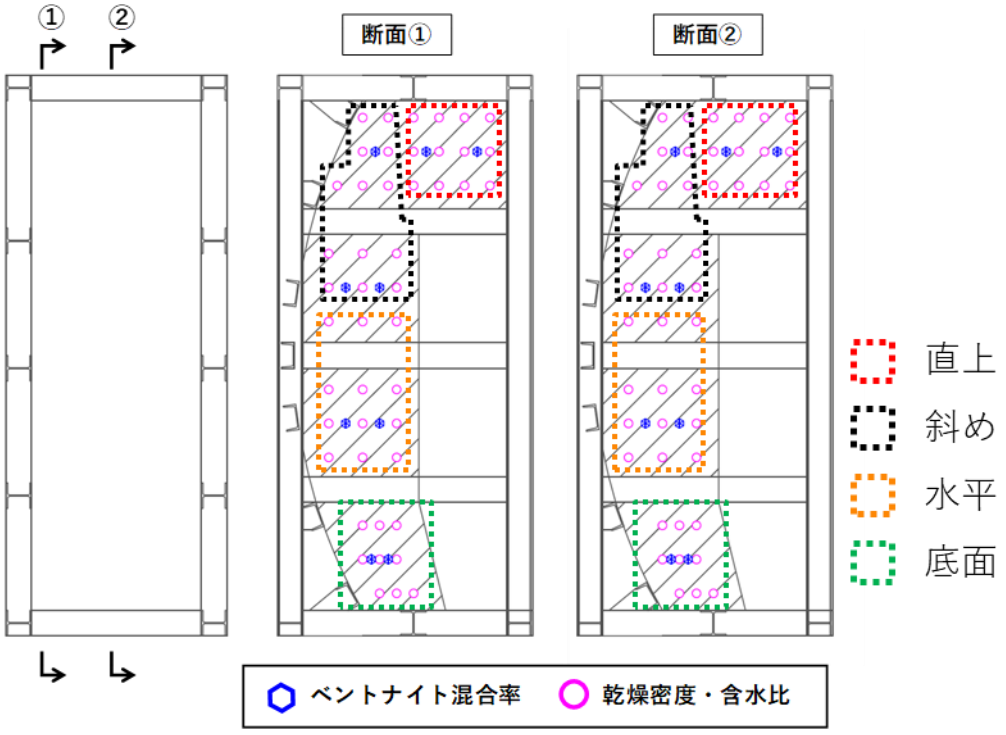
吹付けの際に飛散したリバウンド材はシャベル等で回収してフレコンバックに収集し、クレーンスケールにより重量を計量した。また、ふるいで取り除いたダマ材およびミキサー内部に残存した材料を回収しそれぞれ重量を計量した。

6)　サンプリング

吹付け供試体から容積 50 ml のステンレス試料円筒を使用してサンプリングを行った。サンプリング作業を翌日に持ち越す場合はラップとブルーシートを用いて型枠全体を養生した。サンプリングは図 3.2-44 に示すように、型枠の左側壁に近い断面（側方断面）と型枠の中央付近の断面（中央断面）の 2 断面で実施した。ノズルの向きによってサンプリングした位置を直上、斜め、水平および底面の 4 つのグループに分類した。含水比と乾燥密度の測定用に 1 断面あたり 46 点、ベントナイト混合率の測定用に 1 断面あたり 9 点のサンプリングを実施した。含水比は土の含水比試験方法（JIS A 1203）に、ベントナイト混合率はメチレンブルー吸着量試験（JIS Z 2451）に則り測定した。



(a) V1-70



(b) GX-70

図 3.2-44　吹付け試験 2 のサンプリング位置

(4) 品質管理項目

吹付け試験 2 における品質管理項目を表 3.2-18 に示す。

表 3.2-18 吹付け試験 2 の品質管理項目

分類	項目	規準・確認方法	基準値	実施時期	基本数量
品質管理（材料）	含水比（ベントナイト）	赤外線水分計		混合前	3 点程度/ケース
	含水比（ケイ砂）	赤外線水分計		混合前	1 点/ケース
	含水比（混合土）	赤外線水分計 JIS A 1203	Wopt±2% 以内	混合後	ふるい前：1 点/バッチ ふるい後：1 点/バッチ
	ベントナイト混合率	サンプリング試料 JIS Z 2451	70%	吹付け後	1 点/5 バッチ
施工管理	材料重量	クレーンスケール、フレコンサイロ等	-	吹付け時	1 点/バッチ
	吹付け距離	レーザー距離計	1.2m 以内	吹付け時	
	吹付け角度	目視		吹付け時	
	吹付け機械回転数		5rpm	吹付け時	
	コンプレッサーエアー量		10~14m^3/min	吹付け時	
	リバウンド率	クレーンスケール	-	吹付け後	1 ケースごと
	ロス率			吹付け後	1 ケースごと
品質管理（施工後）	乾燥密度	サンプリング試料	有効粘土密度 1.2Mg/m^3	吹付け後	92 点/ケース
	含水比	サンプリング試料 JIS A 1203		吹付け後	92 点/ケース
	ベントナイト混合率	サンプリング試料 JIS Z 2451	70%	吹付け後	18 点/ケース
		リバウンド材 JIS Z 2451	-	吹付け後	3 点程度/ケース
その他	吹付け速度	-	-	吹付け時	

(5) 実施結果

1) 混合土の含水比

試験時には赤外線水分計によりふるい前の混合土の含水比を測定した。また、試験後には炉乾燥法によりふるい前およびふるい後の混合土の含水比を測定した。各材料ケースの含水比計測結果を表 3.2-19 に示す。炉乾燥法で求めたふるい前とふるい後の混合土の含水比を図 3.2-45 に示す。

ふるい前の V1-70 では、1 バッチ目（設定含水比 18.6%）の含水比は 20.4%、2～8 バッチ目（設定含水比 23%）の含水比は 18.6%～21.9%で平均値は 20.4%、9～17 バッチ目（設定含水比 30%）の含水比は 24.1%～31.2%で平均値は 27.7%であった。ふるい後の V1-70 では、1 バッチ目の含水比は 16.1%、2～8 バッチ目の含水比は 16.9%～22.9%で平均値は 20.2%、9～17 バッチ目の含水比は 24.0%～30.1%で平均値は 27.3%であった。

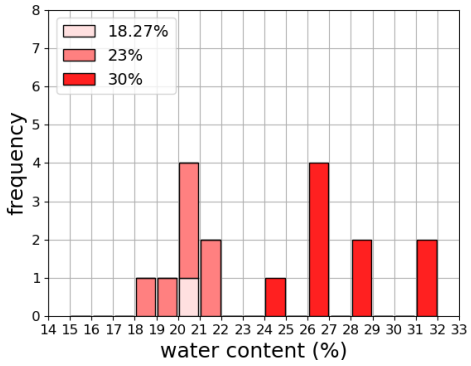
ふるい前の GX-70（設定含水比 18.3%）の含水比は 15.7%～19.2%で平均値は 17.5%であり、ふるい後の GX-70 の含水比は、13.3%～18.0%で平均値は 17.5%であった。

設定含水比とふるい後の混合土の含水比を比較すると、V1-70 では平均で 3.0%程度、GX-70 では平均で 1.3%程度低い値となる傾向がみられた。含水比低下の要因の一つとして、含水比調整時にミキサーの羽や軸への材料の付着が考えられる。V1-70 の 11 バッチ目～15 バッチ目（設定含水比 30%）の材料製造が終了した時点で軸に付着していた材料をサンプリングして測定した含水比が 60%であった。このことから、添加した水の一部が軸や羽に付着し高い含水比の材料がミキサー内に残留することで、吹付け材料に設定した水の量が添加できなかったことと考えられる。

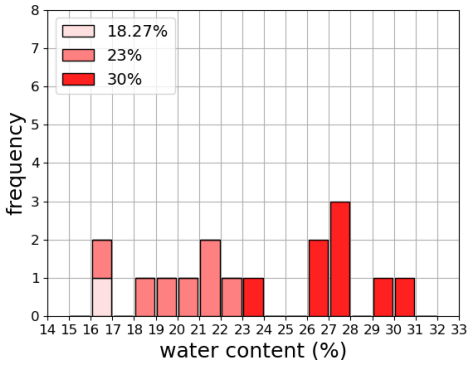
ふるい前とふるい後の含水比の比較結果を図 3.2-46 に示す。ふるい前とふるい後での含水比変化の範囲は、V1-70 で-2.6%～1.9%、GX-70 で-3.12%～1.1%であった。

表 3.2-19 含水比**計測**結果

ケース	バッチ	設定含水比	平均含水比（%）		
			ふるい前		ふるい後
			赤外線水分計	乾燥炉法	乾燥炉法
V1-70	#1	18.6	18.0	20.4	16.1
	#2-8	23	20.4	20.4	20.2
	#9-17	30	28.6	27.7	27.3
GX-70	#1-22	18.3	17.2	17.5	17.0

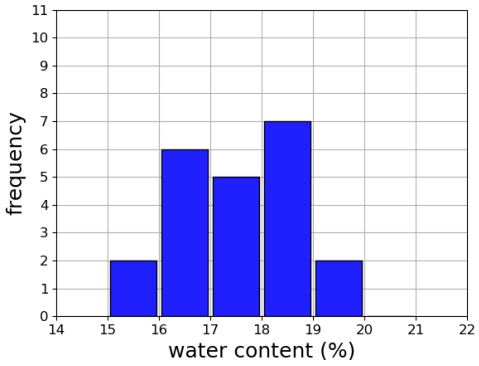


ふるい前

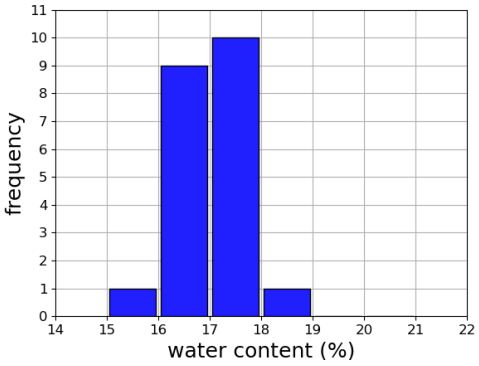


ふるい後

(a) V1-70



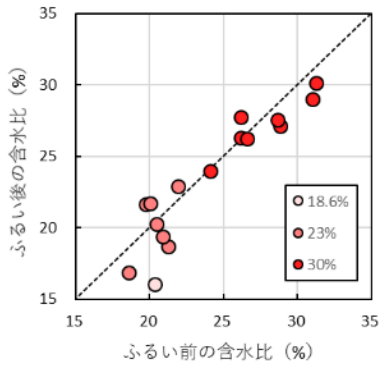
ふるい前



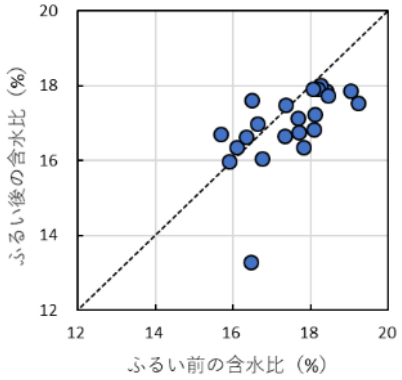
ふるい後

(b) GX-70

図 3.2-45　炉乾燥法による混合土の含水比測定結果



(a) V1-70



(b) GX-70

図 3.2-46　ふるい前とふるい後の含水比の比較

2) ベントナイト混合率

ふるい後の混合土のベントナイト混合率を表 3.2-20 に示す。V1-70 のベントナイト混合率は 68%～76%で、その平均は 72%であった。GX-70 の場合は 67%～70%で、その平均は 68%であった。

表 3.2-20 ふるい後の混合土のベントナイト混合率

ケース	バッチ	混合率 (%)	平均混合率 (%)
V1-70	1	73	72
V1-70	6	68	
V1-70	11	71	
V1-70	16	76	
GX-70	1	67	68
GX-70	6	70	
GX-70	11	70	
GX-70	16	67	
GX-70	21	70	

3) 吹付け状況

吹付け状況を図 3.2-47 に示す。V1-70 では、1 バッチ目の吹付けを実施したところ、粉状のリバウンドが発生しオペレーターが吹付け面を確認できない状況となった。そこで、2 バッチ目以降はリバウンドの発生を防ぐため加水量を増やし含水比 23%を目標に調整した。結果としてリバウンドの量は 1 バッチ目よりも抑えられたものの粉状のリバウンドにより吹付け面を確認できない状況が続いた。また、ニードガンとホースの閉塞が 3 回発生した。この状況を踏まえて、9 バッチ目以降は、吹付け試験 1 において V1-100 が良好に吹付けられたことから、その際の設定含水比を参考に含水比の目標を 30%に調整した。この結果、9 バッチ目以降ではホース等の閉塞は発生せず、粉状のリバウンドの発生も抑制することができた。

V1-70 の型枠天端部への吹付け施工時には図 3.2-48 に示すように、天端に吹付けた部分が自重により剥離し、吹付け部分と型枠の間に隙間が生じていた。吹付け部分が落下するおそれがあったため試験を中断して天端部の混合土を除去した。吹付け部分と型枠に隙間が生じた理由としては、図 3.2-49 に示すように、天端に対して一度に吹付けを形成したため自重に耐えられなくなったためと考えられ、除去後に試験を再開した際には、すでに型枠背面に吹付けられている混合土と連続するように天端部へと吹付けを形成することで吹付け部分の剥離を回避することができた。

GX-70 の吹付け状況を図 3.2-50 に示す。GX-70 では、リバウンドが V1-70 に比べて多い結果となった。また、リバウンド材に粒径の大きな材料が多く含まれていた。一方で、V1-70 で生じた天端部の吹付け部分の剥離は GX-70 では見られなかった。

(a) 吹付け状況（1 バッチ目）

(b) リバウンド材の状況（1 バッチ目）

(c) 吹付け状況（7 バッチ目）

(d) リバウンド材の状況（7 バッチ目）

(e) 吹付け状況（10 バッチ目）

(f) リバウンド材の状況（10 バッチ目）

図 3.2-47　V1-70 の吹付け状況

図 3.2-48　天端部での材料の剥離状況

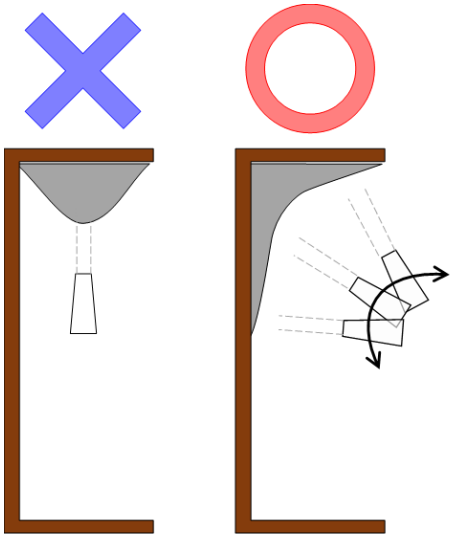


図 3.2-49　天端部への吹付けの際のノズルの動き

(a) 吹付け状況（5 バッチ目）

(b) リバウンド材の状況（5 バッチ目）

図 3.2-50　GX-70 の吹付け状況

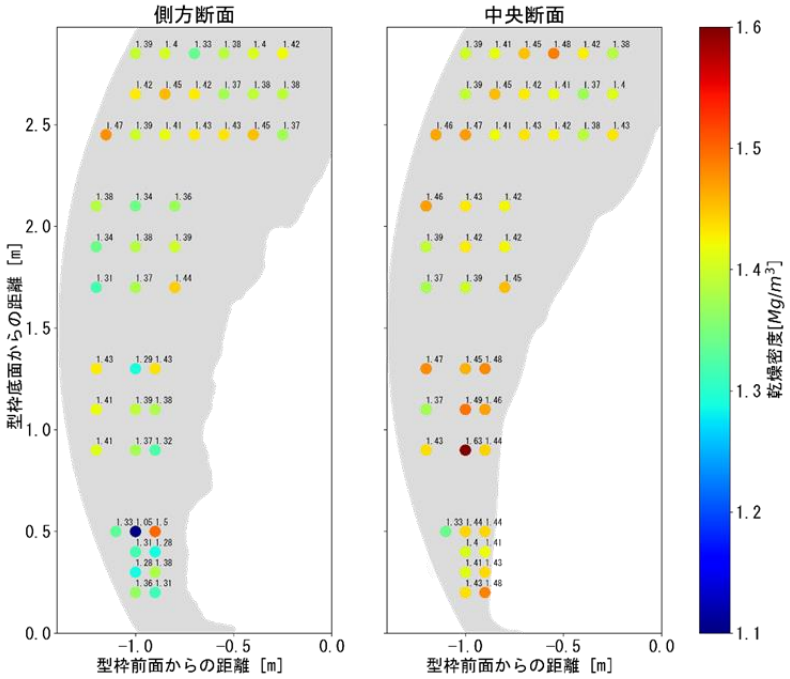
4) サンプリングによる乾燥密度および含水比、ベントナイト混合率の測定

サンプリング試料から得られた乾燥密度分布を図 3.2-51 と図 3.2-52 に示す。また、含水比分布を図 3.2-53 に、含水比と乾燥密度の関係を図 3.2-54 に、サンプリングの位置でグループ分けをした乾燥密度の平均値を図 3.2-55 と表 3.2-21 に示す。

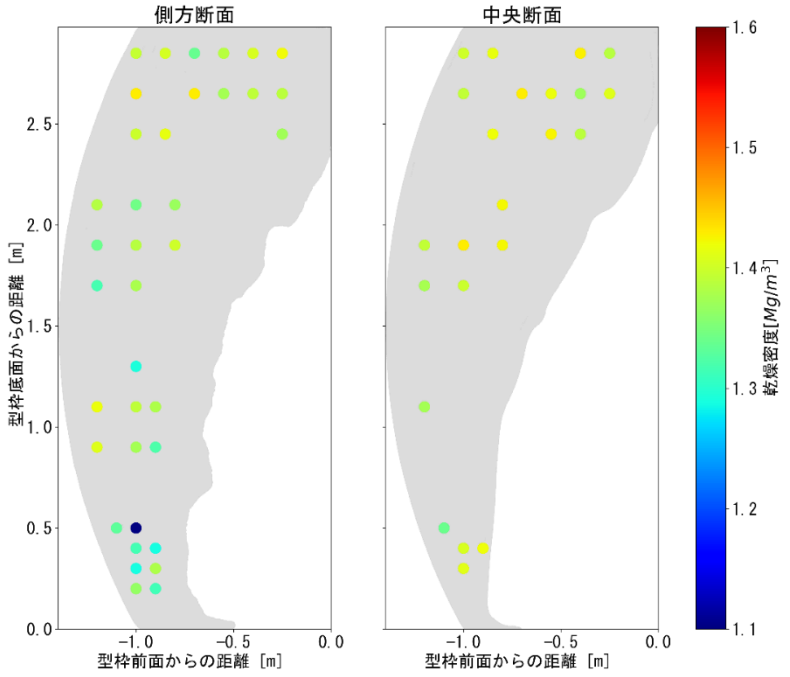
V1-70 では、サンプリング試料の乾燥密度の平均値が 1.41 Mg/m^3 となり、目標乾燥密度よりもわずかに低い値を示した。目標乾燥密度に達しなかった場所は、側方断面で 37 点/46 点、中央断面で 23 点/46 点であり、ノズルの向きに関わらず吹付け全体に分布している。乾燥密度の平均値はサンプリング位置ごとの違いはほとんどみられないが、型枠下部の底面の領域の乾燥密度のばらつきが大きくなっている。これは、吹き付けの際に型枠の下部に堆積したリバウンドを巻き込み極端に乾燥密度が低下した箇所が含まれるためである。ノズルを直上に向けた天端部や斜め上方に向けた背面上部においても水平に向けた場合と同等の乾燥密度で施工できていることが分かる。含水比については、リバウンドの状況と踏まえて条件を変えているため 20%～30%の間にほぼ分布しており。その平均値は 25.20%であった。

GX-70 では、サンプリング試料の乾燥密度の平均値が 1.5 0Mg/m^3 となり、目標乾燥密度を上回る値を示した。目標乾燥密度に達しなかった場所は、側方断面で 8 点/46 点、中央断面で 2 点/46 点であり、そのほとんどが天端の隅角部もしくは天面の隅角部であった。乾燥密度の平均値はサンプリング位置ごとの違いはほとんどみられないが、型枠下部の底面の領域の乾燥密度のばらつきが大きくなっている。V1-70 と同様に GX-70 でも型枠の下部では堆積したリバウンドを巻き込みながらの吹付けとなるため乾燥密度が低下したと考えられる。含水比については、平均値が 18.64%であり、そのほとんどが目標値である 18.3%±2.0%の範囲内であった。また、吹付け後の供試体を観察したところ、白い粒状の材料が分布していることが確認できた。これは、水を十分に吸収していないクニゲル GX であると考えられる。

吹付け前後のベントナイト混合率を表 3.2-22 に示す。V1-70 では吹付けの前後でベントナイト混合率の平均値が 72%から 80%まで増加しているのに対して GX-70 では 68%と変化がなかった。V-70 では、粉末状のクニゲル V1 に比べて粒径の大きなケイ砂がリバウンドで多く跳ね返り、吹付け供試体中のクニゲル V1 の割合が高くなっていると考えられるが、リバウンド材のベントナイト混合率は 68%と若干の減少を示していた。

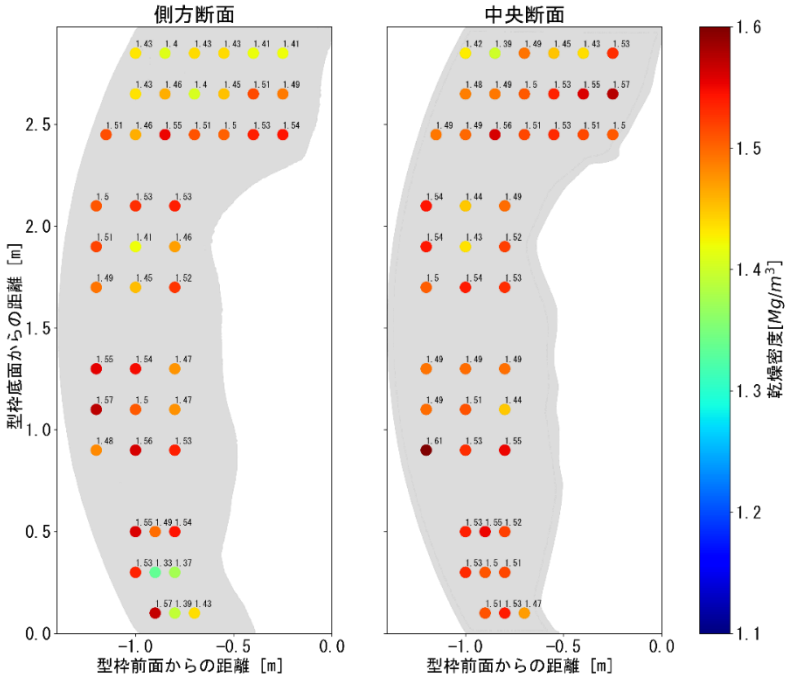


(a) 乾燥密度分布

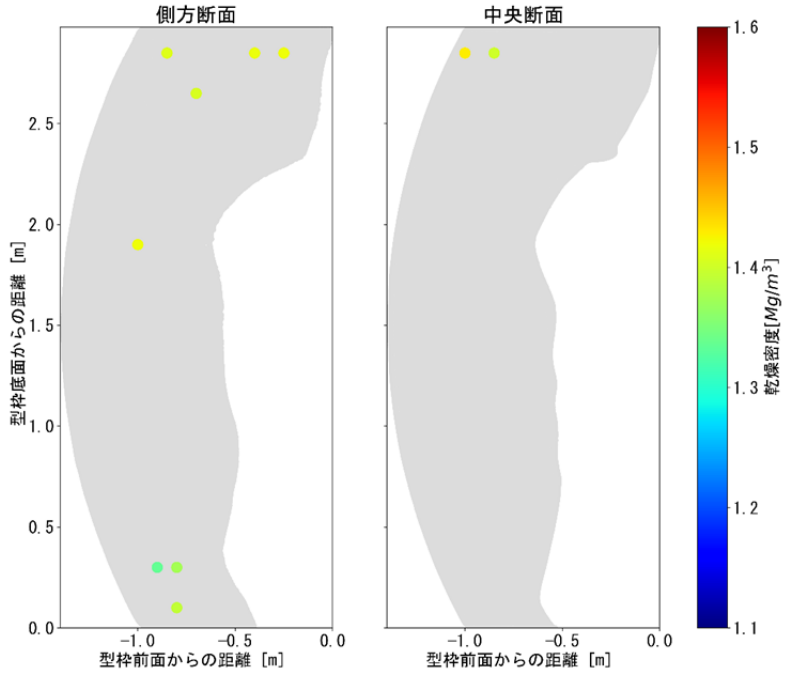


(b) 目標乾燥密度（1.43 Mg/m^3）以下の測定点

図 3.2-51　V1-70　乾燥密度の測定結果

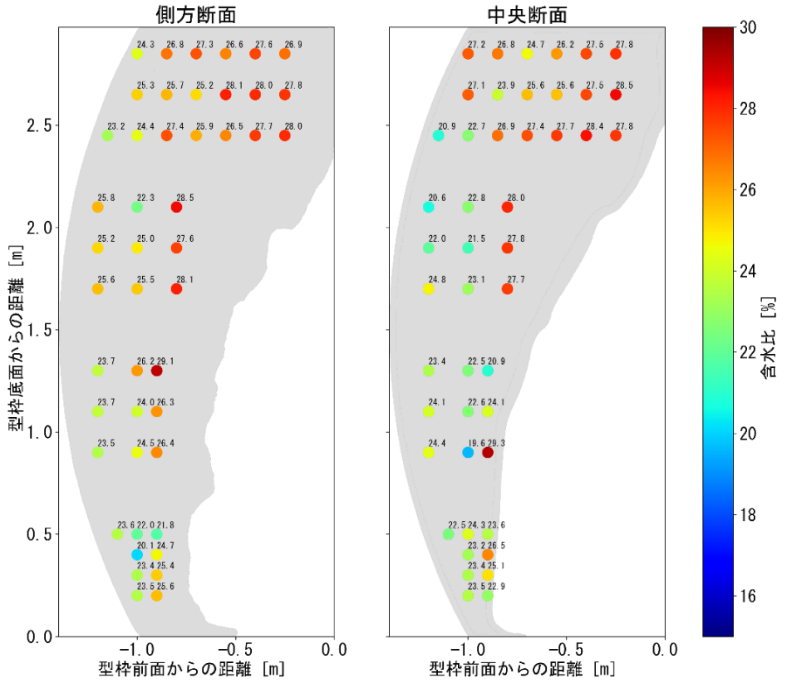


(a) 乾燥密度分布図

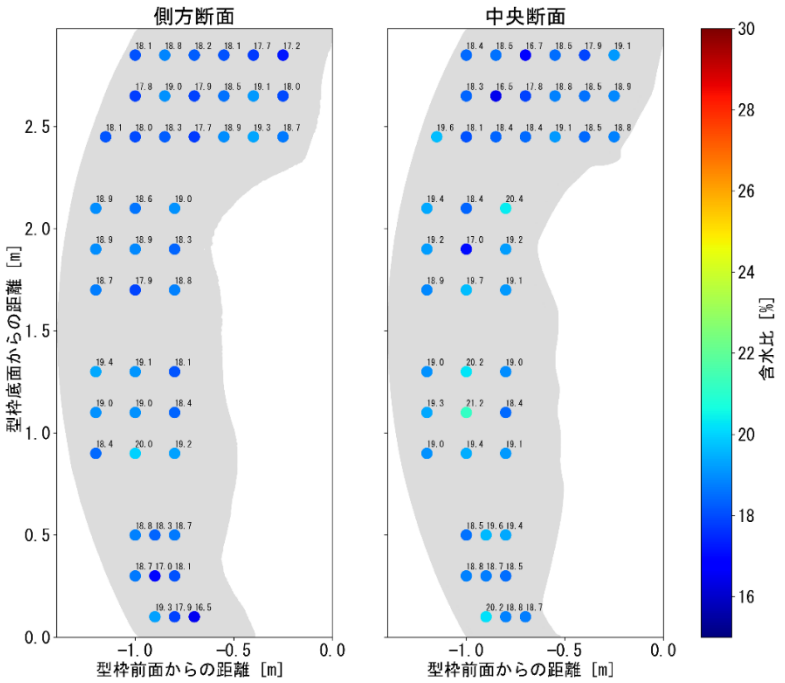


(b) 目標乾燥密度（1.43 Mg/m^3）以下の測定点

図 3.2-52　GX-70　乾燥密度の測定結果

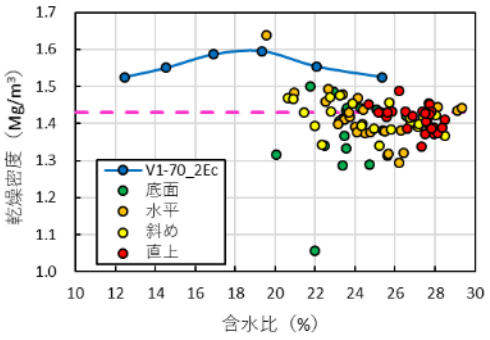


(a) V1-70

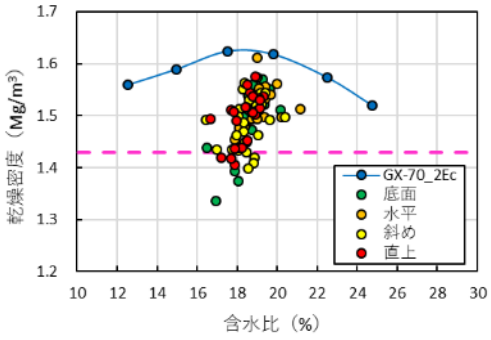


(b) GX-70

図 3.2-53　含水比分布

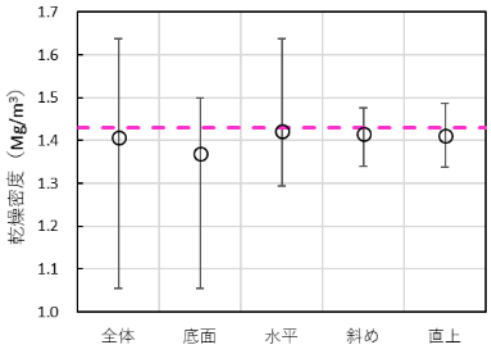


(a) V1-70

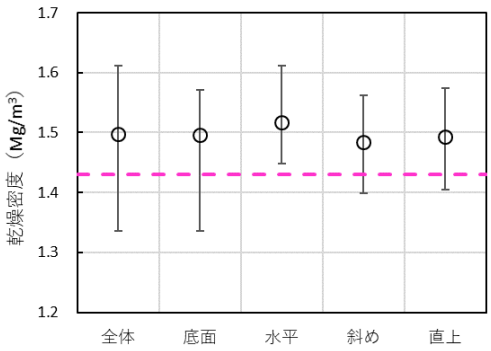


(b) GX-70

図 3.2-54　含水比と乾燥密度の関係



(a) V1-70



(b) GX-70

図 3.2-55　乾燥密度の最大値、最小値および平均値

表 3.2-21　サンプリング位置ごとの乾燥密度と含水比の平均値

ケース	位置	標本数	乾燥密度 (Mg/m³)	含水比 (%)
			平均値	平均値
V1-70	全体	92	1.41	25.20
	直上	24	1.37	23.61
	斜め	26	1.42	24.72
	水平	24	1.41	24.99
	底面	18	1.41	27.09
GX-70	全体	92	1.50	18.64
	直上	24	1.50	18.58
	斜め	26	1.52	19.10
	水平	24	1.48	18.55
	底面	18	1.49	18.35

表 3.2-22　吹付け前後のベントナイト混合率

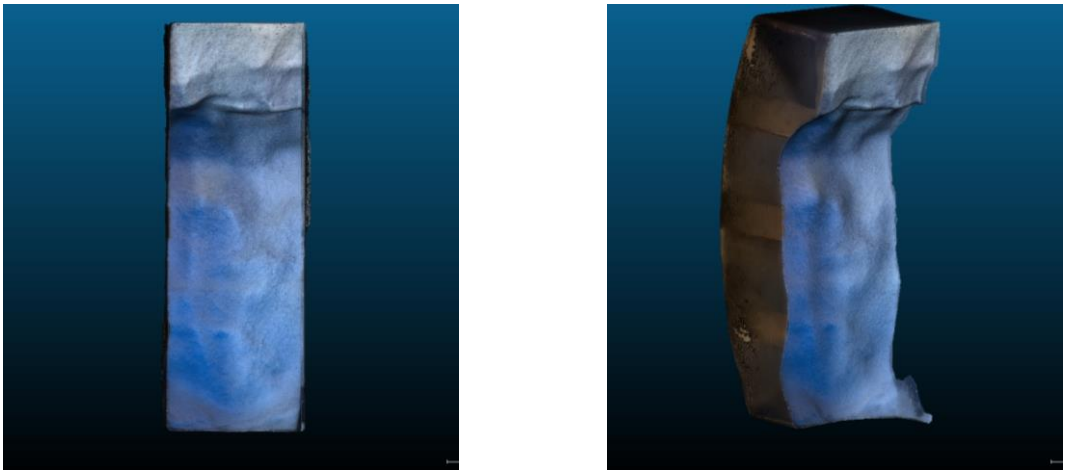
	ベントナイト混合率の平均値（%）		
	吹付け前 （ふるい後）	吹付け後 （コアサンプル）	リバウンド材
V1-70	72	80	68
GX-70	68	68	69

5)　出来形の計測結果

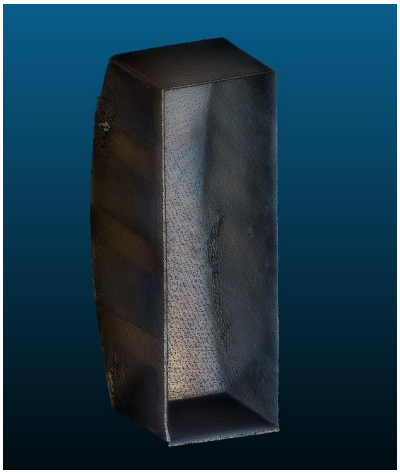
LiDAR スキャナを搭載したタブレットを用いて出来形体積の 3 次元計測を行った。3 次元計測の結果を図 3.2-56 に示す。吹付け前の型枠の 3 次元計測による体積は 3.7305 m^3、設計寸法より求めた体積は 3.7743 m^3 であり誤差は約 1%であった。出来形体積は V1−70 で 2.2 m^3、GX-70 で 2.4 m^3 であった。クレーンスケールを用いて計測した出来形重量は V1-70 が 3836 kg、GX-70 が 4186 kg であった。

これらの結果とサンプリングで求めた含水比の平均値から乾燥密度を算出した。3 次元計測による乾燥密度は V1-70 が 1.40 Mg/m^3、GX-70 が 1.49 Mg/m^3 でありコアサンプリングにより算出した乾燥密度の平均値とほぼ同じ値が得られた。

(a) V1-70



(b) GX-70



(c) 型枠

図 3.2-56　3 次元計測の計測結果

6) 吹付け試験 2 の施工品質管理

吹付け試験 2 で実施した V1-70 と GX-70 の施工品質や施工能力について、表 3.2-23 にリバウンド率、ロス率および吹付け速度を示す。リバウンド率は V1-70 で 22%、GX-70 で 37%を示し、吹付け試験 1 の場合よりも低下した。ロス率も V1-70 で 11%、GX-70 で 7%となり、吹付け試験 1 より低下している。吹付け速度では、両ケースで 1.5 m^3/hr と差は生じなかったが、V1-70 では、ニードガンの閉塞が生じたため、その整備のための時間が必要であった。

表 3.2-23 吹き付けの施工品質と施工能力（吹付け試験 2）

ケース	品質			施工能力	（参考）施工性	
	平均 乾燥密度 (Mg/m^3)	リバウンド率 (%)	ロス率 (%)	吹付け速度 (m^3/hr)	ノズル、ホースの閉塞有無	吹付け機閉塞有無
V1-70	1.41	22	11	1.51	無	有
GX-70	1.50	37	7	1.53	無	無

7) 吹付け試験 2 のまとめ

吹付け試験 2 では、クニゲル V1 とクニゲル GX のそれぞれでベントナイトの混合率を 70%としてケイ砂と混合した材料である V1-70 と GX-70 を用いて、止水プラグの切欠き部を模擬した型枠に対する吹付け試験を実施した。

吹付け施工後の乾燥密度の平均値は、V1-70 で 1.41 Mg/m^3、GX-70 で 1.50 Mg/m^3 の値を示した。V1-70 ではわずかに目標乾燥密度である 1.43 Mg/m^3 を達成することができなかった。V1-70 では、型枠下部に堆積したリバウンド材を巻き込みながら吹付けている様子がみられ、型枠下部で極端に乾燥密度が低い場所が計測された。また、吹付け機の閉塞が生じたため含水比を最適含水比よりもかなり高く設定したため、締固め度が高くならなかった可能性がある。

ノズルの操作の点ではリバウンド率が吹付け試験 1 に比べて低減していることから改善されていると考えられる。一方で、乾燥密度を高く施工するためにもノズルの操作方法についてさらに改善する必要があると考える。例えば、吹付けの密度を向上させるため吹付け面に対してノズルの向きが垂直になるように細かく調整することや吹付け面が平らになるように薄い層を重ねるように吹付けるなどハンドリングの面での工夫も必要となる。

また、乾燥密度を高くする手段の一つとして、ノズルの形状を変更することが考えられる。本試験で使用したノズルは、内部がストレートの形状をしているものを使用していた。ノズルの形状を検討した事例（小林ほか，2006）によれば、ノズル内部に圧縮部とその後に鋭く拡張部がある超音速ノズルを使うことで乾燥密度を安定して高く施工できることが報告されている。

V1-70 で型枠天端に一度に吹付けを形成した際には、自重に耐えきれず剥離する状況もみられたが、型枠背面に吹付けられている材料と連続するように天端部へと吹付けを形成することで天端部に新たに吹付けた材料の剥離を回避することができた。GX-70 では、吹付けた材料の剥離もみられなかった。結果として、両材料において天端部へのベントナイトの吹付けによる施工の適用性を確認した。

3.2.4　EDZ シーリング原位置試験

3.2.4.1　目的・実施内容

平成 30 年度と平成 31 年度にわたり幌延深地層研究センターの 350m 試験坑道 3 にて実施した EDZ シーリング試験においては、EDZ を遮断するように掘削した切欠き部にベントナイト系材料を充填した粘土止水壁を構築することで、EDZ の透水係数が低下することを確認した。本年度は、粘土止水壁の施工から 1 年以上経過した後で EDZ の区間を対象とした透水試験を実施し、同区間の透水係数の経時変化を調査することを目的とした。透水試験で得られた結果を用いた浸透流解析を実施し、粘土止水壁自体の透水係数を推定することで評価を試みているが、昨年度は EDZ よりも深い位置の岩盤の透水係数の計測値が得られていなかったため、解析による推定値を用いていた。そこで、本年度は浸透流解析による推定の精度向上を目的として、EDZ よりも深い位置の岩盤の透水係数を取得するための透水試験も実施した。さらに、これらの透水試験で得られた結果を用いた浸透流解析を実施し、粘土止水壁自体の透水係数を推定した。

3.2.4.2　透水試験

(1)　試験手順

図 3.2-57 に示すように、試験坑道 3 の底盤には長さ 3.23m のボーリング孔（EDZ-1 孔）が鉛直下向きに掘削されている。EDZ-1 孔を中心とした半径 0.5m の円周上に幅 10 cm、深さ 2.0 m のスリットを掘削しており、そのスリットにクニゲル V1 のペレットを充填することで粘土止水壁を構築している。粘土止水壁によって区切られた領域を対象に EDZ-1 孔を用いた原位置透水試験を実施し透水係数を評価した。

本年度は、図 3.2-58 に示すように EDZ を対象とした区間（区間①）と EDZ よりも深い場所の岩盤を対象とした区間（区間②）において透水試験を実施した。

区間①についてはダブルパッカー方式の定圧注水試験を実施した。EDZ-1 孔においては、BTV 観察の結果より 1.40 mabh の深さまで掘削影響により生じたと思われる亀裂を確認しており、試験区間は EDZ の領域を含むようにパッカーを設置した。上部パッカーの下端の深度を 0.31 mabh、下部パッカー上端の深度を 1.70 mabh として試験区間の長さは 1.71m であった。

区間②についてはシングルパッカー方式のパルス試験および定圧注水試験を実施した。パッカーは区間①の下部パッカーと同じ位置に設置することにより、パッカー下端の深度が 2.25 mabh となった。また、EDZ-1 の掘削長は 3.23m であるが孔底にがれきが堆積していることから、孔底の深度を 2.8 mabh として試験区間の長さは 0.55 m となった。

透水試験では、350m 調査坑道付近の地下水の水質を模擬した模擬地下水を注水した。模擬地下水の組成を表 3.2-24 に示す。定圧注水試験では、約 0.05 MPa の一定圧力で注水を行い、一定期間注水した後、注水を停止して回復試験を実施した。パルス試験では、注水期間を 10 秒前後とし、ボーリング孔内の初期圧より 0.05 MPa ほど上昇した時点でバルブを閉鎖した。

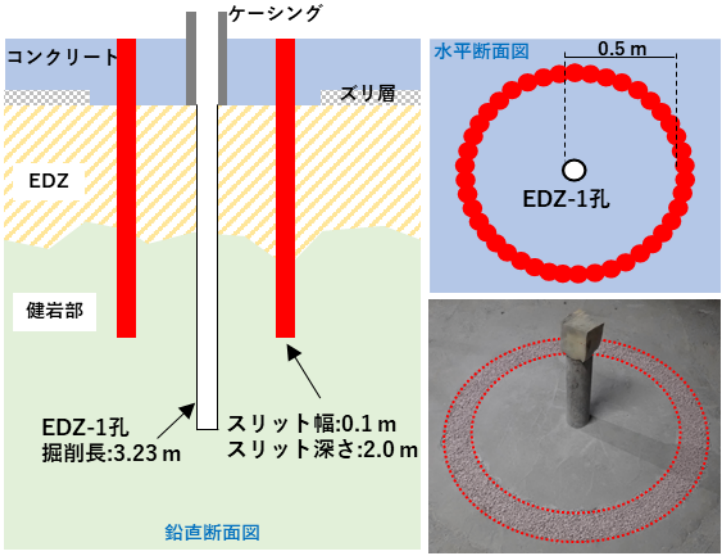
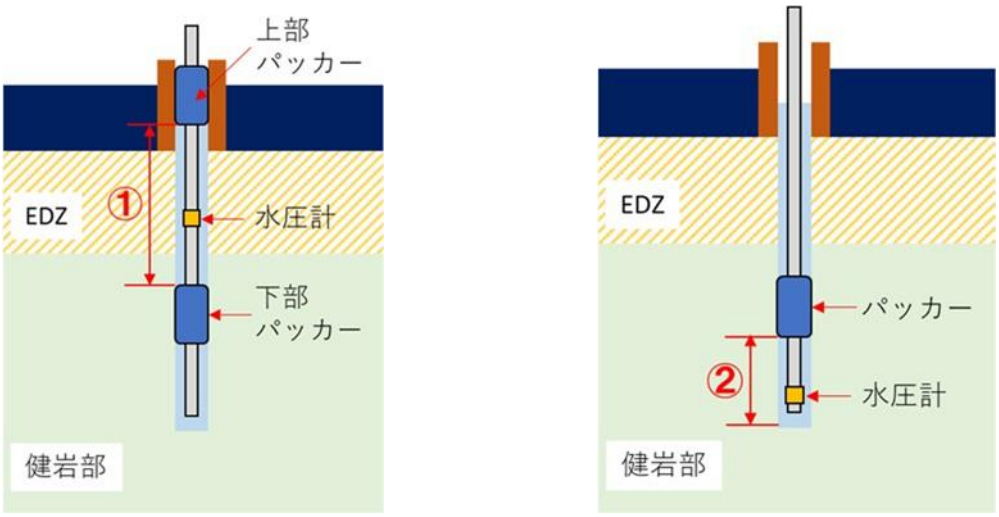


図 3.2-57　EDZ シーリング試験における試験領域の概要



(a) 区間①　　(b) 区間②

図 3.2-58　透水試験におけるパッカーの設置位置

表 3.2-24　模擬地下水組成

Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Li^+ (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	TIC (mg/L)
3400	65	79	54	8.7	4000	0.15	580

(2) 試験結果

平成 31 年度と本年度に実施した透水試験の結果を表 3.2-25 に示す。定圧注水試験における定常状態の解析は、Hvorslev の式（Hvorslev, 1951）を用いた。また、非定常状態の解析は、Jacob and Lohman の方法（Jacob et al., 1946）を用いた。非定常解析の例として、EDZ 区間を対象とした定圧注水試験における derivative plot を図 3.2-59 に示す。パルス試験においては、定常状態の解析は Hvorslev の式より、非定常状態の解析は Cooper らの式（Cooper et al., 1967）より透水係数を算出した。

EDZ（区間①）を対象とした定圧注水試験の結果より算出した透水係数は、定常解析で 2.00×10^{-9} m/s、非定常解析で 1.61×10^{-9} m/s であった。昨年度実施した粘土止水壁構築後の透水試験により得られた同区間の透水係数は、定常解析で 2.70×10^{-9} m/s、非定常解析で 1.47×10^{-9} m/s であった。1 年経過した時点においても同等の透水係数が得られており、EDZ 領域については粘土止水壁による止水性能が維持されていると考えられる。

区間②を対象とした透水試験では、透水係数が低く難透水性が想定されたことから、まずパルス試験を実施した。パルス試験は初期圧からの差圧が 0.015 MPa と 0.05 MPa となる 2 条件で実施した。定常解析より得られた透水係数は、それぞれ 3.40×10^{-9} m/s、1.81×10^{-9} m/s であった。非定常解析では、Cooper らの方法を用いたが、図 3.2-60 に示すように標準曲線とのフィッティングが困難であり、解析困難と判断した。パルス試験の定常解析より得られた透水係数が 10^{-9} m/s のオーダーと比較的高い透水性を示したことから、定圧注水試験を実施した。区間②を対象とした定圧注水試験の結果より算出した透水係数は、定常解析で 4.44×10^{-9} m/s、非定常解析で 2.57×10^{-9} m/s でありパルス試験で得られた透水係数と同等のオーダーを示した。区間②を対象とした透水試験で得られた透水係数は 10^{-9} m/s のオーダーであり、幌延の地下施設が位置する稚内層の岩盤基質部でこれまでに得られている透水係数（Kurikami et al., 2008）と比較して、1～4 オーダーほど高い値を示している。本試験で対象とした区間には、図 3.2-61 に示す BTV 観察による孔壁展開画像では 2.43 mabh、2.53 mabh、2.81 mbah の深度に割れ目が観察されている。区間②を対象とした試験区間にこれらの割れ目が含まれていることにより透水性が上昇している可能性が考えられる。

表 3.2-25　原位置透水試験の結果

試験対象	試験時期	試験方法	試験区間長（mabh）		初期圧 (MPa)	最大圧 (MPa)	差圧 (MPa)	定常解析	非定常解析		
			上端	下端				Hvorslev	Jacob	Cooper	Agarwal
EDZ（区間①）	止水壁施工前 2019 年 11 月 1 日	定流量	1.39		0.0104	0.0655	0.0551	1.80×10^{-6}	1.72×10^{-6}	-	解析困難
			0.31	1.7							
EDZ（区間①）	止水壁施工後 2020 年 1 月 27 日	定圧	1.39		0.0131	0.0624	0.0492	2.70×10^{-9}	1.47×10^{-9}	-	解析困難
			0.31	1.7							
EDZ（区間①）	止水壁施工後 2021 年 1 月 28 日	定圧	1.39		0.0864	0.1556	0.0692	2.00×10^{-9}	1.61×10^{-9}	-	1.72×10^{-9}
			0.31	1.7							
区間②	止水壁施工後 2021 年 2 月 3 日	パルス	0.55		0.1025	0.1168	0.0143	3.40×10^{-9}	-	解析困難	-
			2.25	2.8							
区間②	止水壁施工後 2021 年 2 月 3 日	パルス	0.55		0.1066	0.1548	0.0482	1.81×10^{-9}	-	解析困難	-
			2.25	2.8							
区間②	止水壁施工後 2021 年 2 月 4 日	定圧	0.55		0.1099	0.1769	0.0670	4.44×10^{-9}	2.57×10^{-9}	-	1.89×10^{-9}
			2.25	2.8							

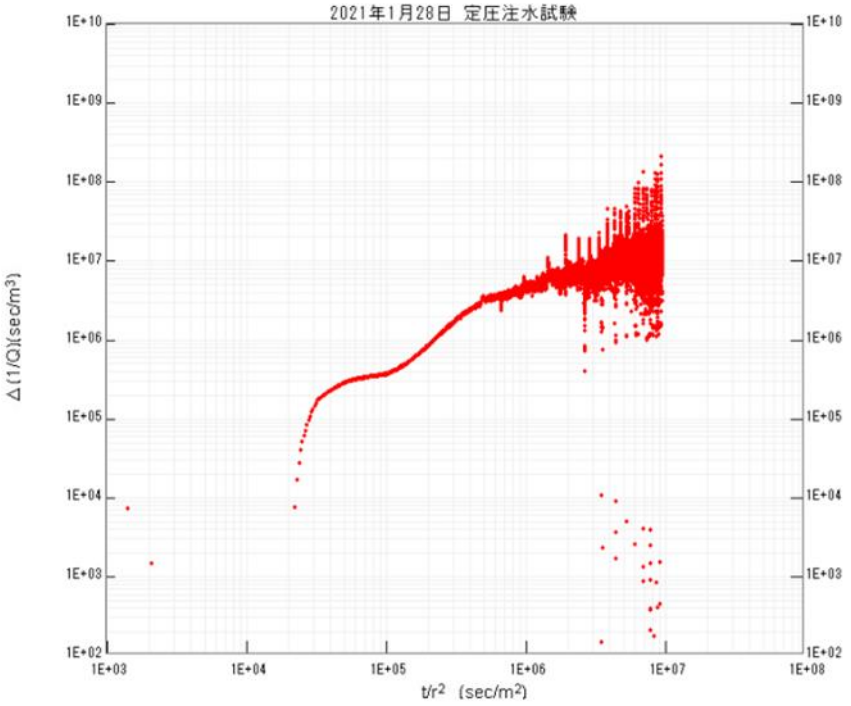


図 3.2-59　Jacob and Lohman の方法における Derivative plot（区間①）

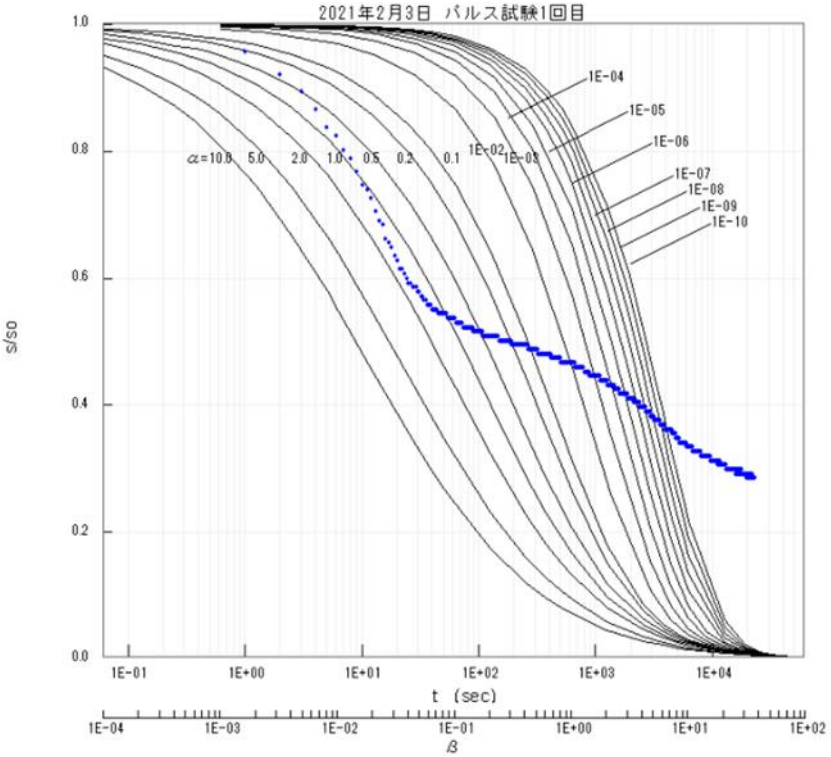


図 3.2-60　パルス試験（差圧 0.0015MPa）における Cooper の方法（区間②）

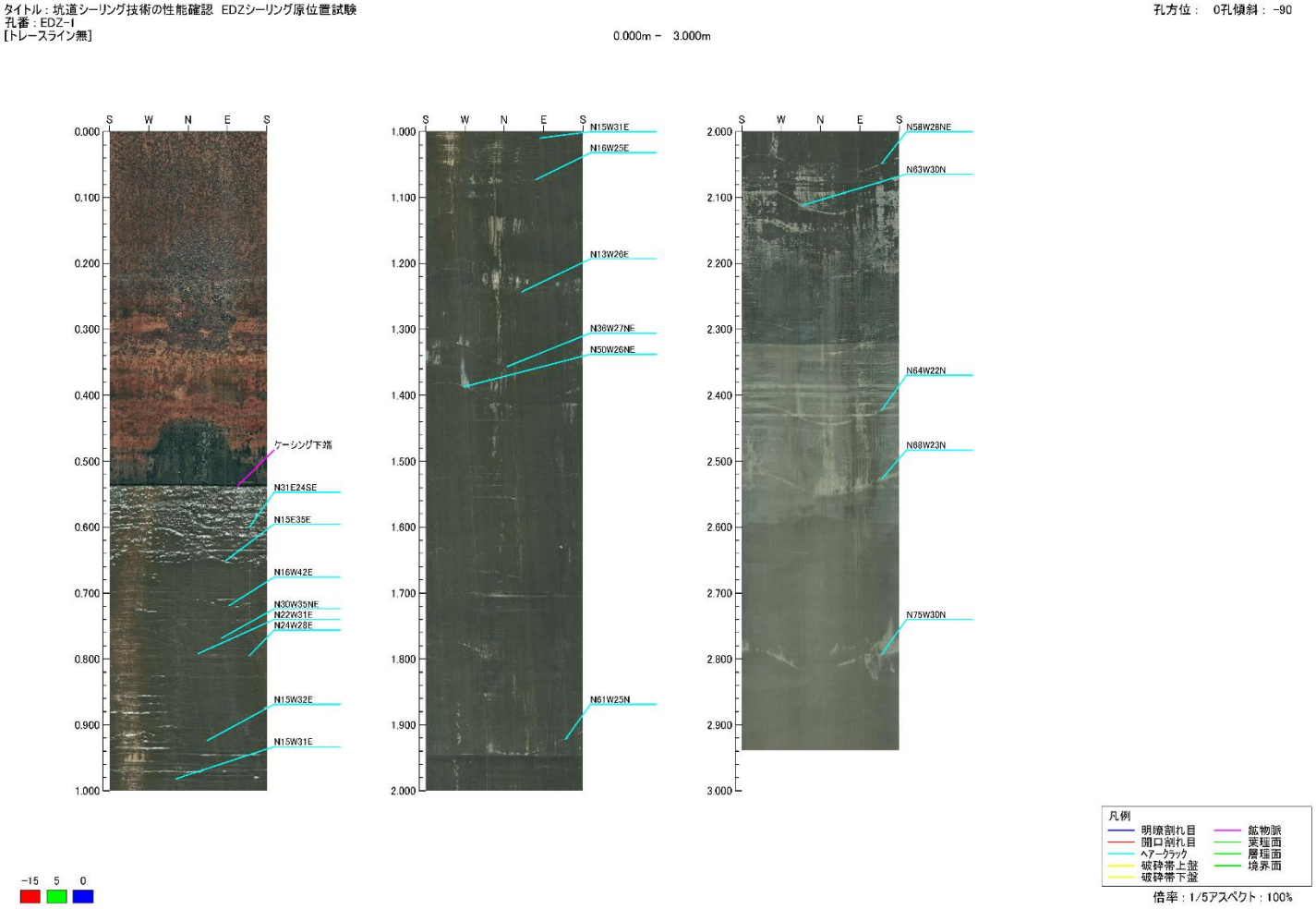


図 3.2-61　孔壁展開画像（EDZ-1 孔）

3.2.4.3　浸透流解析による粘土止水壁の評価

昨年度と同様に、粘土止水壁の止水性評価を目的とした浸透流解析を実施した。浸透流解析は、試験坑道底盤のコンクリート、コンクリート下のズリ層、ボーリング孔、EDZ、健岩部および粘土止水壁を含む領域を 3 次元でモデル化し Dtransu-3D・EL を用いて実施した。3 次元解析モデルを図 3.2-62 に示す。ボーリング孔の孔径は削孔径より 76 mm とし、長さは定圧注水試験の試験区間に合わせて 1.39 m とした。解析モデルの各要素の透水係数を表 3.2-26 に示す。路盤コンクリートは、コンクリート標準示方書（土木学会，2002）に記載の水セメント比ー透水係数の関係より、水セメント比を 46.9%として透水係数を 3.3×10^{-11} m/s と設定した。ズリおよび EDZ の透水係数は、平成 31 年度の EDZ シーリング試験の中で実施した解析（原子力機構・原環センター，2020）と同様の値をそれぞれ設定した。ただし、健岩部の透水係数については、今年度実施した区間②を対象とした定圧注水試験の結果に基づき、2.57×10^{-9} m/s を設定した。

本浸透流解析では、表 3.2-27 に示す EDZ を対象とした定圧注水試験の結果を再現できる粘土止水壁の透水係数を推定した。粘土止水壁の透水係数を変更して浸透流解析を繰り返し、EDZ を対象とした定圧注水試験での試験開始時との水圧差である 7.061 m を再現する粘土止水壁の透水係数を探索した。

解析結果を表 3.2-28 に示す。粘土止水壁の透水係数を 1.750×10^{-10} m/s とした場合、領域全体の透水係数が 2.0×10^{-9} m/s となるとともに、水位低下量は 7.049 m となり透水試験の結果に対して 0.01 m の精度で水位低下量が一致した。これより粘土止水壁の透水係数は、1.750×10^{-10} m/s と推定した。

表 3.2-26　解析モデルの各要素の透水係数設定値

材料	透水係数 （m/s）
路盤コンクリート	3.30×10^{-11}
ズリ	4.80×10^{-4}
EDZ	2.98×10^{-6}
健岩部	2.57×10^{-9}
粘土止水壁	今回推定

表 3.2-27　EDZ を対象とした定圧注水試験の結果

透水係数 （m/s）	試験開始時との水位差 （m）
2.00×10^{-9}	7.061

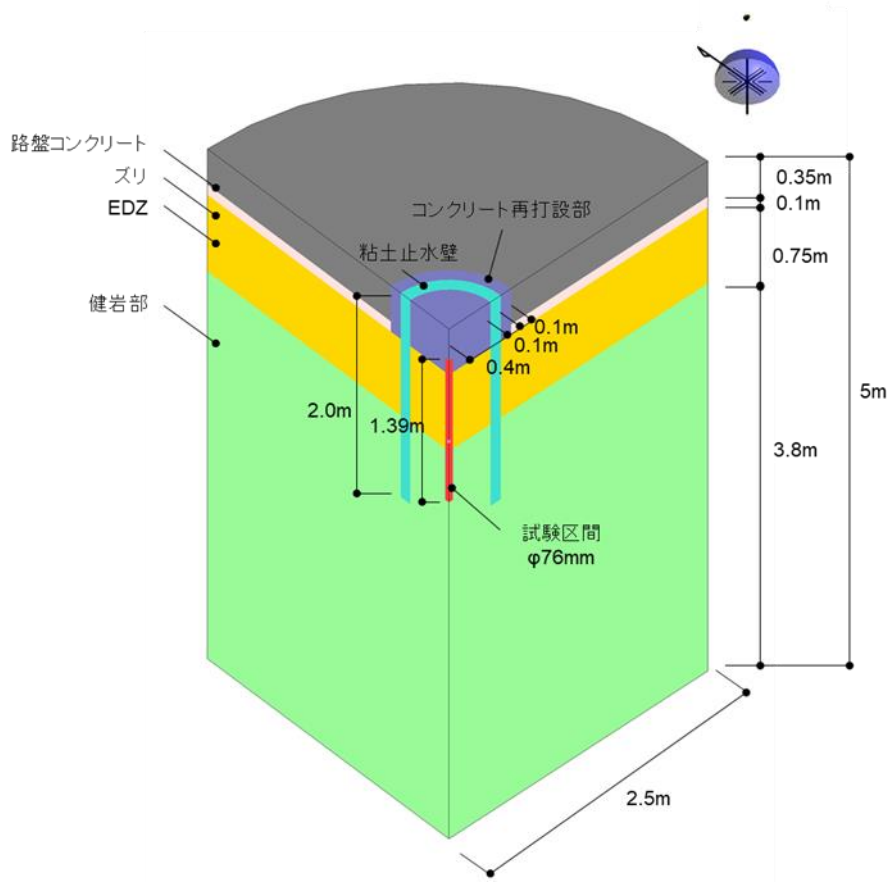


図 3.2-62　浸透流解析における 3 次元解析モデル

表 3.2-28　浸透流解析の結果

ケース	粘土止水壁 透水係数 (m/s)	解析結果		実測値	
		水位 低下量 (m)	透水係数 (m/s)	水位 低下量 (m)	透水係数 (m/s)
case1-1	1.000×10^{-10}	9.283	1.5×10^{-9}	7.061	2.0×10^{-9}
case1-2	1.700×10^{-10}	7.170	2.0×10^{-9}		
case1-3	1.750×10^{-10}	7.069	2.0×10^{-9}		
case1-4	1.755×10^{-10}	7.049	2.0×10^{-9}		
case1-5	1.760×10^{-10}	7.049	2.0×10^{-9}		
case1-6	1.780×10^{-10}	7.010	2.0×10^{-9}		
case1-7	1.881×10^{-10}	6.825	2.1×10^{-9}		
case1-8	1.957×10^{-10}	6.688	2.1×10^{-9}		
case1-9	2.500×10^{-10}	5.949	2.4×10^{-9}		
case1-10	5.000×10^{-10}	4.375	3.2×10^{-9}		

3.2.5　まとめ

本年度は、坑道の天端部及び側壁部におけるベントナイトの吹付け施工の適用性確認のための文献調査および吹付け試験と EDZ シーリング原位置試験における透水試験を実施した。

- ベントナイトの吹付け施工に係る文献調査
  - 吹付けの品質を管理する項目としては吹付け後の乾燥密度、含水比、ベントナイト混合率が計測されている。また、施工性能の評価としては、リバウンド率や吹付け速度、サイクルタイムが計測されている。
  - 吹付けベントナイトの乾燥密度としては最大で 1.6 Mg/m^3 程度の値が施工可能であり、リバウンド率はおおむね 10～40%の範囲にあった。
  - リバウンドを低減する方法として、吹付け施工時に吹付け面に凹凸が生じないようにできるだけ薄い層を重ねるノズルワークに変更することが示されている。
  - 幅 1m の狭隘な空間に対する吹付けでは、隅角部と中央部で吹付けた後の材料の乾燥密度に差がないことが報告されている。一方で、模擬 PEM 側面の空間のように曲面付近で吹付けた場合には乾燥密度が低下することが報告されている。
- ベントナイト系材料の吹付け施工性確認試験
  - V1-70 については、型枠下部に堆積したリバウンド材を巻き込みながら吹付けている様子がみられ、型枠下部で極端に乾燥密度が低い場所が計測されたこともあり、型枠全体の乾燥密度の平均値は目標乾燥密度をわずかながら下回る結果となった。
  - 乾燥密度を高く施工するためにもノズルの操作方法について検討し、施工の際の手順を定める必要があると考える。例えば、吹付けの密度を向上させるため吹付け面に対してノズルの向きが垂直になるように細かく調整することや吹付け面が平らになるように薄い層を重ねるように吹付けるなどハンドリングの面での工夫も必要となる。
  - また、乾燥密度を高くする手段の一つとして、ノズルの形状についても検討する必要があると考えられる。
  - 型枠背面に吹付けられている材料と連続するように天端部へと吹付けを形成することで天端部に吹付けた材料の剥離を回避することができ、天端部や側壁部などの切欠き上部へのベントナイトの吹付け施工の適用性を確認した。
- EDZ シーリング原位置試験
  - EDZ を含む区間の透水係数は、定常解析で 2.70×10^{-9} m/s、非定常解析で 1.47×10^{-9} m/s であった。1 年経過した時点においても同等の透水係数が得られており粘土止水壁による止水性能が維持されていると考えられる。
  - 健岩部を対象とした定圧注水試験の結果より算出した透水係数は、定常解析で 4.44×10^{-9} m/s、非定常解析で 2.57×10^{-9} m/s であった。幌延深地層研究センターの地下施設深度 350m 付近の健岩部でこれまでに取得されている透水係数と比較して高い値を示しているが、BTV 観察による孔壁展開画像において、試験区間内の 3 箇所に割れ目が観察されており、この影響で透水性が上昇している可能性が考えられる。
  - 浸透流解析を実施し、EDZ を対象とした定圧注水試験の結果を再現できる粘土止水壁の透水係数を 1.750×10^{-10} m/s と推定した。

参考文献

Cooper, H.H.JR., Bredehoeft J. D. and Papadopulos, I. S., Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, Water Resource Research, Vol. 3, No.1, pp.263-269, 1967.

土木学会，2002 年版 コンクリート標準示方書 改定資料，2002.

原子力発電環境整備機構，包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－本編および付属書，NUMO-TR-20-03，2021.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 19 年度管理型処分調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書，2008.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 21 年度管理型処分調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書，2010a.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 23 年度管理型処分調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書，2012.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 24 年度管理型処分調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書，2013.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 25 年度管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2014.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 26 年度管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2015.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書，2019.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 分システム工学要素技術高度化開発報告書，2010b.

Hvorslev, M. T., Time lag and soil permeability in ground-water observations, U.S. Army Waterways Experiment Station, Bull No.36, 50p, 1951.

Jacob, C. J. and S. W. Lohman, Nonsteady floe to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, Trans. American geophysical Union, vol.33, no.4, pp.559-569, 1952.

小林一三，中嶌誠門，戸井田克，田中俊行，ベントナイト吹付け技術の開発（その 1）－高密度吹付け工法の室内試験と混合方法の検討－，鹿島技術研究所年報，第 54 号，2006.

Keski-Kuha, E., Nemlander, R. and Koho, P., BACEKO II Flow-Through, Open-Front and Saturation Tests of Pre-Compacted Backfill Blocks in a Quarter-Scale Test Tunnel, Posiva, Working Report 2012-41, 2013.

Kurikami, H., Takeuchi, R. and Yabuuchi, S., Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, Phys Chem Earth, 22, pp.537-544, 2008.

並木和人，武内邦文，高橋真一，新村亮，田島孝敏，金田勉，吹付け工法によるベントナイト混合埋戻し土の実用規模施工実験，土木学会第 62 回年次学術講演会，CS5-012，2007.

日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2019.

日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2020.

杉田裕，升元一彦，トンネルシーリング性能試験におけるプラグの設計・施工技術，JNC TN8400 2002-005，2002.

Stastka, J. and David, V., The Testing of a Sprayed Bentonite Sealing Layer, Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings, vol. 2, no. 11, pp. 666, 2018.

Svoboda, J., Hausmannová, L., Vašíček, R., Smutek, J., Stastka, J., Nádherná, D., Pacovská, D., Dvorakova, M., Hanusova, I., Belickova, L., Havlová, V., Večerník, P. and Trpkošová, D., DOPAS Deliverable no. D4.7 EPSP summary report, Contract Number: EP7 - 323273, 2016.

戸井田克，笹倉剛，渥美博行，升元一彦，田中俊行，須山泰宏，小林一三，シーリング性能挙動に関する評価研究，JNC TJ8400 2004-023，2005.

3.3 掘削影響領域の連続性等に関わる調査技術開発

処分場の閉鎖後に坑道や掘削影響領域（EdZ、掘削損傷領域（EDZ）を含む）が水みちとなることを防止するためのプラグや埋め戻しといった坑道シーリング技術開発においては、実際の処分場での設計や安全性評価の基盤情報となる EdZ の特性およびその空間的連続性等に係る調査技術が重要となる。

上記のためには、原位置の岩盤を広範囲で非破壊で調査できることが望ましく、その手法として物理探査技術がある。幌延の堆積岩を対象とした EdZ（EDZ 含む）については、力学・水理・物理学的特性等を把握するために、物理探査について様々な調査技術が適用され多くの事例が報告されている（杉田ほか，2012、杉田ほか，2018、青柳ほか，2013、青柳ほか，2014、青柳ほか，2017、青柳ほか，2018、窪田ほか，2013、窪田ほか，2018)。しかし、従来の物理探査結果で示されるものは、平均的な弾性波速度や比抵抗の分布であり EDZ のような坑道周辺の局部的な領域の力学的・水理学的物性値と定量的に結びつける総合的な調査技術として整備するためには、物理探査自体の高度化が重要と考えられる。また、弾性波速度や比抵抗は、割れ目の形成や温度などといった様々な要因に伴い時空間的に変化することから、そのような経時変化を定量的に評価するためには、概ね同じ箇所、同じ時点における温度や飽和度、割れ目の分布や形成等に関する情報が存在する箇所で物理探査を行うことが重要である（例えば、杉田ほか，2018、青柳ほか，2014)。

令和元年度は、幌延深地層研究施設深度 350m の試験坑道 4 を活用し、坑道周辺の EDZ の拡がりや経時変化を把握し、グラウト注入による EDZ の改善効果を評価することを指向して、弾性波（S 波）や比抵抗を用いたトモグラフィ調査、検層、室内試験を実施しそれら調査手法の適用性を確認した。一方で、「物理探査結果の精度の検証」および「地質情報、原位置や要素試験結果、知見等からの EDZ の連続性評価」が課題として抽出された。

令和 2 年度は、上記課題を踏まえ、幌延の堆積岩を事例とし EDZ(Excavation damaged zone)・EdZ(Excavation disturbed zone)の物性や連続性を高精度に探査する技術の構築のため、Mini-seismic 装置（Schuster et al, 2017）のプロトタイプを製作し幌延の地下施設を利用して堆積軟岩へ適用した。また、水理調査・物理探査、地質調査を同一のエリア内で実施し、EDZ を含む EdZ の範囲や損傷状態、地質性状を空間的に高精度に把握する 3 次元トモグラフィの結果と比較検討した。また、幌延深地層研究施設深度 350m の試験坑道を対象としたトモグラフィ調査を実施し、掘削後 10 年程度の同一領域での物性の経時変化に関するデータを蓄積するとともに、坑道周辺の EDZ の拡がり等についても評価した。表 3.3-1 に 3 か年の事業期間中の実施工程表をしめす。

1.EDZ(Excavastion damaged Zone）の物理特性の取得

EDZ の物性や連続性を高精度に探査する技術の構築のため、EDZ によるき裂の空間分布をセンチメートルオーダーで特定する物性値調査を実施

2.EdZ(Excavation disturbed zone)の連続性調査技術の高度化

水理・物理特性調査を同一の調査範囲で実施する実験サイトを構築し、EDZ の範囲や損傷状態、性状を空間的に評価する技術の高度化を図る

3.EDZ(Excavation disturbed zone)の経時変化に関する調査

掘削による割れ目の発達を把握し，その経時変化を捉えることにより，EDZ の長期的な挙動を空間的に検討

表 3.3-1　実施項目の工程

実施項目	R2				R3				R4			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
1.EDZ の物理特性の取得												
・試作適用性確認												
・改良・高度化												
・適用性評価												
2.EdZ（EDZ）の連続性調査技術の高度化												
・サイト構築												
・初期値の取得												
・グラウトの可否検討※												
・グラウト注入・サンプリング※												
・注入後の変化値の取得												
・適用性評価												
3.EdZ(EDZ)の経時変化に関する調査												
・経時変化の調査												
・解析手法の調査・検討												
・経時変化の評価												

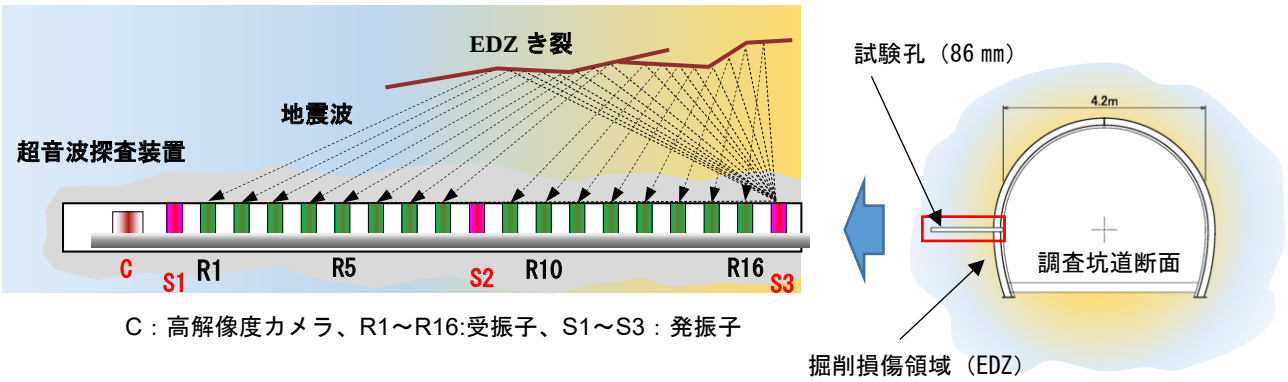
※調査結果に基づく検討事項

3.3.1　EDZ(Excavastion damaged Zone）の物理特性の取得

3.3.1.1　調査の概要

幌延の堆積岩を事例とし EDZ(Excavation damaged zone)・EdZ(Excavation disturbed zone)の物性や連続性を高精度に探査する技術の構築のため、Mini-seismic 装置のプロトタイプを製作し幌延の地下施設を利用して堆積軟岩へ適用した。

試験装置は、EDZ のき裂位置を特定し、損傷状態、性状を空間的に評価するために、超音波（周波数の高い弾性振動波）を地震探査の手法に適用して、岩石中の物性変化をセンチメートルオーダーの高い空間解像度で測定することを目的に開発した。試験装置の概念を図 3.3-1 に示す。



※試験装置の発振子（S1～S3）から放出される地震波は、試験孔の壁に沿って異なる深さの屈折波として受振子に伝わり、これらの深さは、坑道壁周りの掘削損傷による亀裂・微小亀裂の程度に依存する。

図 3.3-1　試験装置の概念図

3.3.1.2　物理特性のデータ取得方法

EDZ が発生していると想定される箇所に試験孔を削孔し、製作した装置を使用して物性値データを取得するために、地下施設の深度 250m 大型試錐座（西）の坑道壁にコアドリルを用いて試験孔 1 孔（φ3.5in，L2.5m）を削孔し、超音波・比抵抗試験装置（ボアホール探査装置）のプロトタイプを用いて EDZ の物性値を測定するとともに、採取コア（1 試料）の室内試験（密度試験、超音波伝播速度測定、比抵抗測定）を実施した。図 3.3-2 に調査の削孔位置と削孔状況写真を示す。

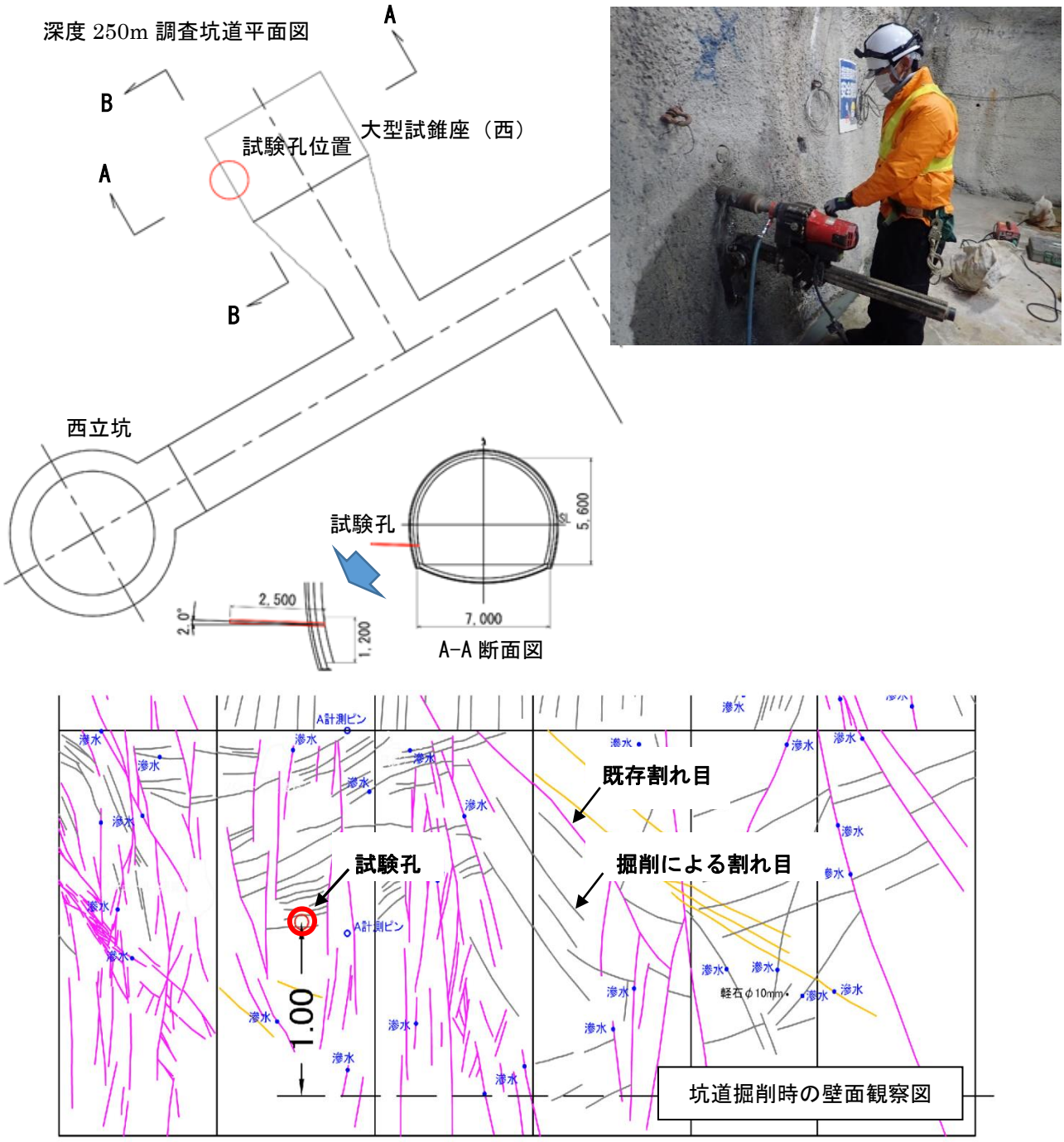


図 3.3-2　調査の削孔位置と削孔状況

3.3.1.3　弾性波調査

(1)　受振素子

探査の対象となる EDZ き裂の大きさ（長さ、幅）は、数ミリ～センチメートルオーダーと予想されることから、測定する受振子の周波数は数 kHz 程度の高周波となる。試験孔内に水がある場合は水が振動の媒体となり、一般的な圧力センサ（ハイドロホン）で高周波数に対応できるが、水平孔内に水を貯留することが困難なことから、受振子には小型の圧力センサ(Micro Electro Mechanical System：MEMS)を検討した。圧力センサで、音を検知するタイプ（マイクロホン）

は高周波（数 KHz 以上）に対応するが、孔壁からの空気振動を検知することは困難である。また、高感度な加速度センサには、重力加速度（静的加速度）を計測するタイプは DC（直流）成分つまり周波数が 0Hz まで検知できるが、一般的に物体の傾斜や姿勢を検知する用途に用いられ、フィルター機能により高周波数が除去されることや感度の調整が難しい。反射法地震探査で一般的に使用するジオフォン（速度型電磁式地震計、振動センサ）に比べ高感度な加速度センサ（MEMS）は基板が大きく高密度に配置できない。よって、一般的な市販品の中で共振周波数が高く薄型・軽量で電気的ノイズが少なく、消費電力の少ない電圧駆動型の圧電素子（圧電振動板 7BB-27-4L0/村田製作所製）を使用した。圧電素子の概要を図 3.3-3 に示し、表 3.3-2 に圧電素子の仕様を示す。

表 3.3-2　圧電素子（圧電振動板）の仕様表

共振周波数	4.6kHz
共振周波数公差	±0.5kHz
共振抵抗（R1）	300Ω
静電容量	20nF
静電容量公差	±30%
静電容量規定条件	[1kHz]
使用温度範囲	-20℃ ～ 70℃
保存温度範囲	-30℃ ～ 80℃
形状	リード線タイプ
金属径	27mm
セラミック径	19.7mm
金属板材質	黄銅板
リード線規格	AWG32
リード全長	50mm
振動タイプ	他励振
JEITA 形名	PD-SU2-C27-46
質量	2055mg

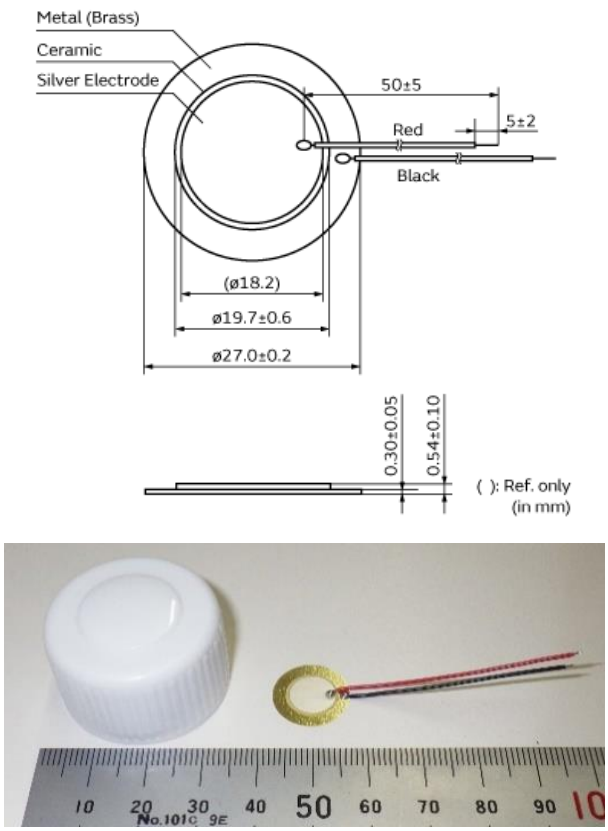


図 3.3-3　圧電素子の概要図（上）キャップ（左下）と圧電素子（右下）

試験孔壁には R があるため、直径が約 20 ㎜の素子を直接孔壁に当てると圧着力で素子が壊れることから、圧電素子を円筒形のガラスまたは樹脂の筐体に入れ、油や樹脂で充填する方式を検討したが、樹脂充填により周波数特性が低くなることから充填せずに R のついた樹脂キャップの内側に素子を接着して孔壁に押し付ける方式とした。また、素子の直径に合う筐体（樹脂キャップ）の直径は 40mm 程度が必要となることから受振間隔が 10cm に制限された。

(2)　発振素子

発振機構は、打撃エネルギーの高いソレノイド方式（電磁石で鉄芯を動かす）を検討したが、受振子と同列に配置することから 40mm 程度の寸法では十分なストローク長が得られずに打撃エネルギーが小さくなる。また、電磁石を起動する時の強い電流により誘導電流が発生して受振記録にノイズとして重なる（インパルスにならずリンギングするため、数 10ms の間他の信号が見えない）ことから別の方法とした。使用したソレノイドを図 3.3-4 に示す。

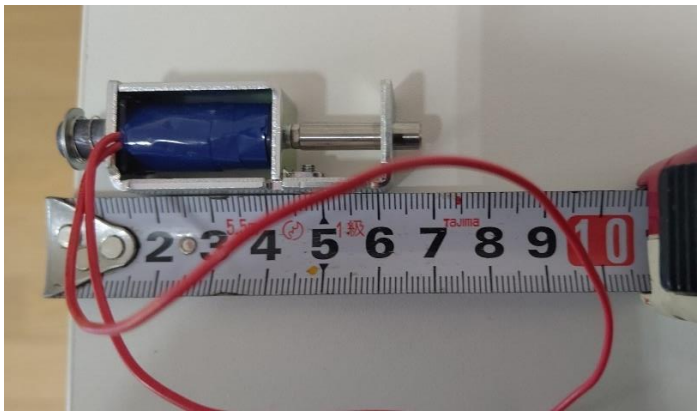
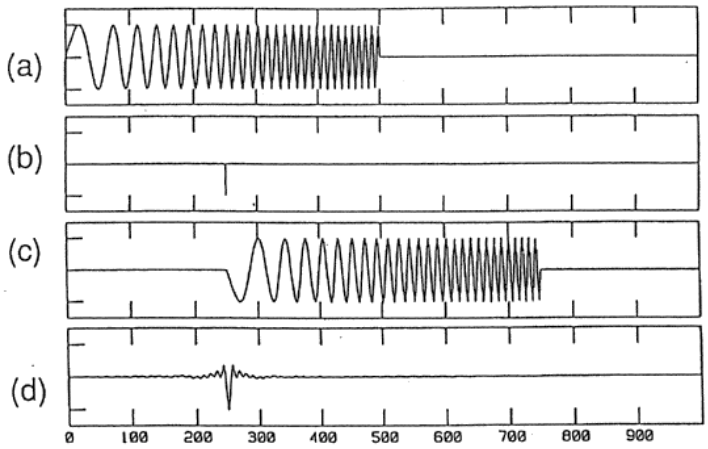


図 3.3-4　電磁ソレノイド

圧電素子（受振素子）は変形すると電圧を発生させるが、逆に電圧をかけると変形するため、これを発振素子として使用することにした。ただし、これも変形するほどの電圧をかけると、近くにある受振素子の信号線に誘導電流が生じるため､対策として信号線はシールド加工品とした。発振方式は、発振子と受振子を 20cm 程度離してコンクリート面に押し付け、パルス波を発生させるインパルスまたはバースト方式によるテストを行った結果、発振エネルギーが弱く、受振記録に初動が確認できないことから、振幅が一定で周波数を連続的に変化させたスイープ波形（振幅が一定で周波数を変調する方式）を発生させ、取得データとスイープ波形の相互相関を計算することでパルス波と同等の波形記録を得るものである。スイープ波形は、ファンクションジェネレータ（任意の周波数と波形を持った交流電圧信号を生成）により周波数を、周波数は 1kHz～6kHz に変調した波形を発生させた。図 3.3-5 に相互相関の概念を示す。



（a）スイープ波形、（b）反射係数列、（c）取得記録の反射波形（d）a と c の相互相関波形

図 3.3-5　相互相関の概念図

(3)　試験装置の筐体（プローブ）と圧着構造

受振子や発振子を配置する筐体（プローブ）は、受振子や発振子を孔壁に圧着させる加圧により変形が予想されることから変形に強い金属製の筐体とし、受振子類を収めるスペースが確保できる H 型の金属の筐体とした。

筐体（プローブ）の受発振素子を孔壁に圧着（接触）させるには、発受振素子を個別に制御して押し付けるけるか、プローブ全体を押し付ける方式がある。独立した素子をそれぞれ垂直に押し付けるには、素子の個々にシリンダか発条が必要で、構造が複雑となり制御も難しい。しかし後者は、水圧やガス圧でパッカー（ゴムやホースなど）の膨張で容易に圧着できること、注入圧の調整で圧着加減の制御や構造が簡単なことからプローブ全体を押し付ける方式とした。パッカーには、空気弁（0.3-5MPa 程度を想定）を取付ける必要があることから、空気の注入が容易に制御できるゴムチューブを使用した。図 3.3-6 に超音波探査試験装置の試作機を示す。

図 3.3-6　超音波探査試験装置の試作機

(4)　弾性波測定方法

超音波探査装置は、100 cm 間隔の 16 個の受振素子 R1～R16 を挟み両側と中程に発振素子 S1,S2,S3 がある。S1 で発振してデータ取得を行い、次に S2、S3、S4 で発振してデータ取得を行う。その後プローブを 5cm 移動して同様の測定を繰り返した。発振信号はスイープ信号（1～6 kHz を 3.6 秒）である。図 3.3-7 に超音波試験装置の概略を示し、図 3.3-8 にデータ取得方法の概念を示し示し、図 3.3-9 に測定装置の概略を、図 3.3-10 に測定状況を示す。

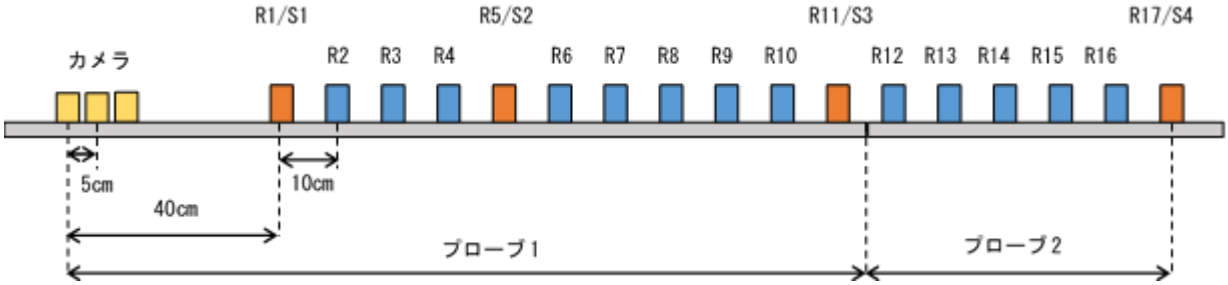


図 3.3-7　超音波試験装置の概略図

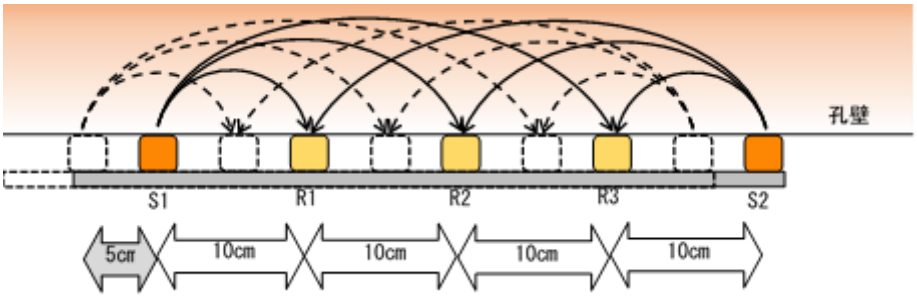


図 3.3-8　データ取得方法の概念図

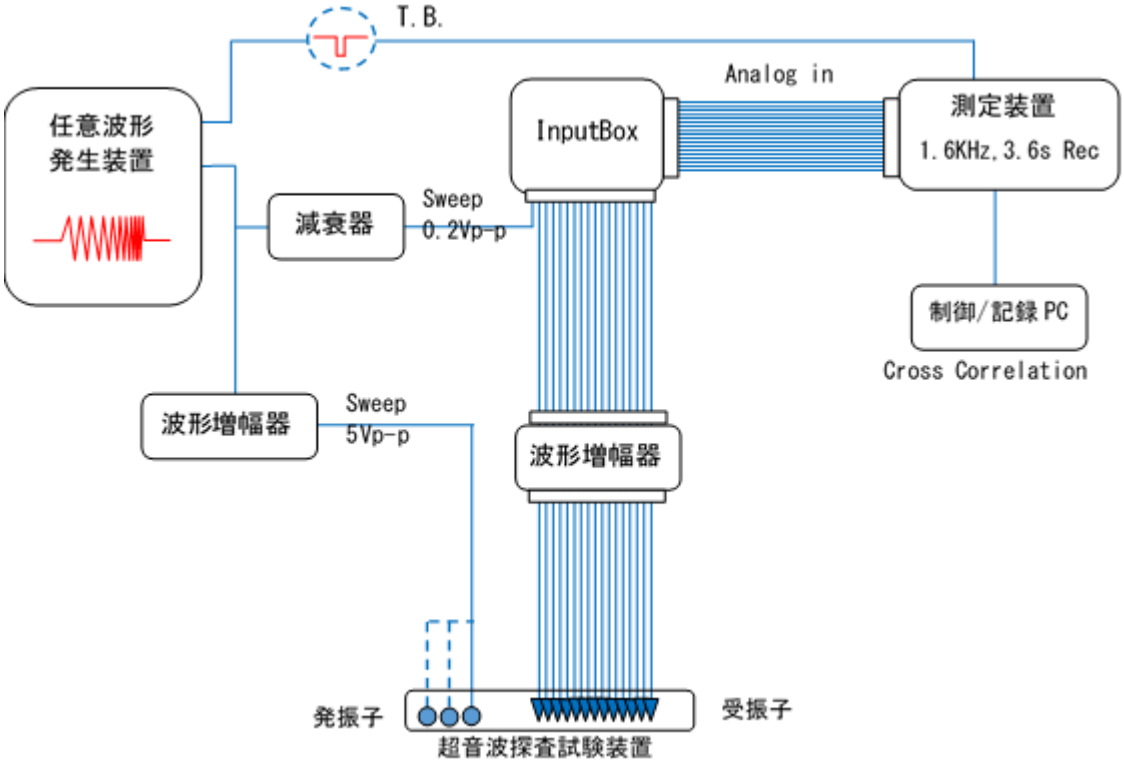


図 3.3-9　超音波探査測定概略図

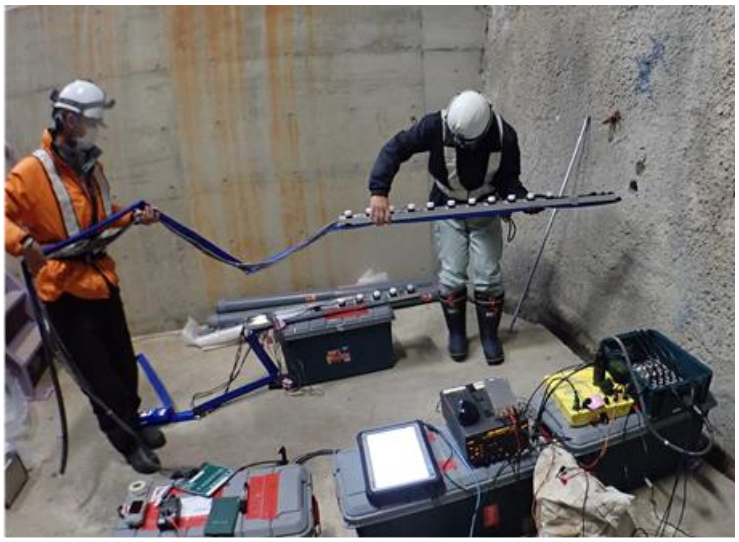


図 3.3-10　測定状況

(5)　解析方法

弾性波測定データは、地震反射法の解析を次に示す手順で実施した。

1）データ編集

発振位置、受振位置のまとめ、トレースの並べ替え。

2）相関処理

発振波形との相互相関を計算してパルス発振と同等の記録とした。

3）NMO 補正

発振・受振間のオフセット距離を補正してゼロオフセットと同等の記録とした。

4）CMP 重合

発振・受振点の中点が共通するデータを重合（足し合わせ）することで反射波を強調した。

※CMP 重合法

反射記録は震源点と受震点の中点が共通で、振央距離（振動点から受震点までの距離）が様々である反射記録の集まり（CMP アンサンブル）。この共通の中点を CMP(Common Middle point : 共通反射点）と呼ぶ。このような振動距離が零の記録を、normal time の記録と呼ぶが、各地層の弾性波速度が分かれば、振央距離が零でない記録を補正して normal time 記録に戻すことが出来る。この補正を NMO 補正（Normal Move Out correction）と呼ぶ。

3.3.1.4　比抵抗調査

(1)　比抵抗探査試験装置

一般的にボーリング孔内の比抵抗探査には、孔内水が必要であるが、試験孔は水平孔で媒体となる水が無いことから一般的な電気探査の手法と同様に坑内壁に電極を接触させる必要がある。電極の間隔を狭く（5cm）して高密度な測定を実施するには、棒状電極を接触させる方法が有利であるが、孔壁の微妙な凹凸に追従できず折れたり曲がったりして高さを揃えられない。また、接触面積が小さすぎて安定した送信ができないことから、半円状の孔壁に大きく接触できて配線が容易な既製品の金属バンドを使用し 16 極とた。試験装置の筐体は、電極点（金属バンド）部分に通電させる必要があることから電気を通さない木製とし、金属バンド製の電極との間を発泡樹脂で遮断した。また、電極の圧着方法は、超音波探査プローブと同様にプローブの下面に装着し

たゴムチューブに空気を注入し、膨張させて孔壁に圧着させた。図 3.3-11 に比抵抗探査装置を示す。

図 3.3-11　比抵抗探査装置

(2)　比抵抗測定方法

試験孔内の比抵抗測定は、電極間隔が 5 cm、電極数 16 点の試験装置を用いて 2 極法による二次元比抵抗探査を行った。試験孔長は 250cm であるが、試験装置 1 回の測定による孔内の探査長は 75cm である。よって、試験装置の移動測定（オーバーラップ 10 測点分を含む）を繰り返し合計 54 測点（孔内長 265cm）で測定を実施した。遠電極は試験孔長（250cm）の十倍以上離れた調査坑道内の側溝に設置し、電流電極（C1・C2）と電位電極（P1・P2）の組み合わせにより電位差を測定して記録した。図 3.3-12 に比抵抗測定概念を示す。

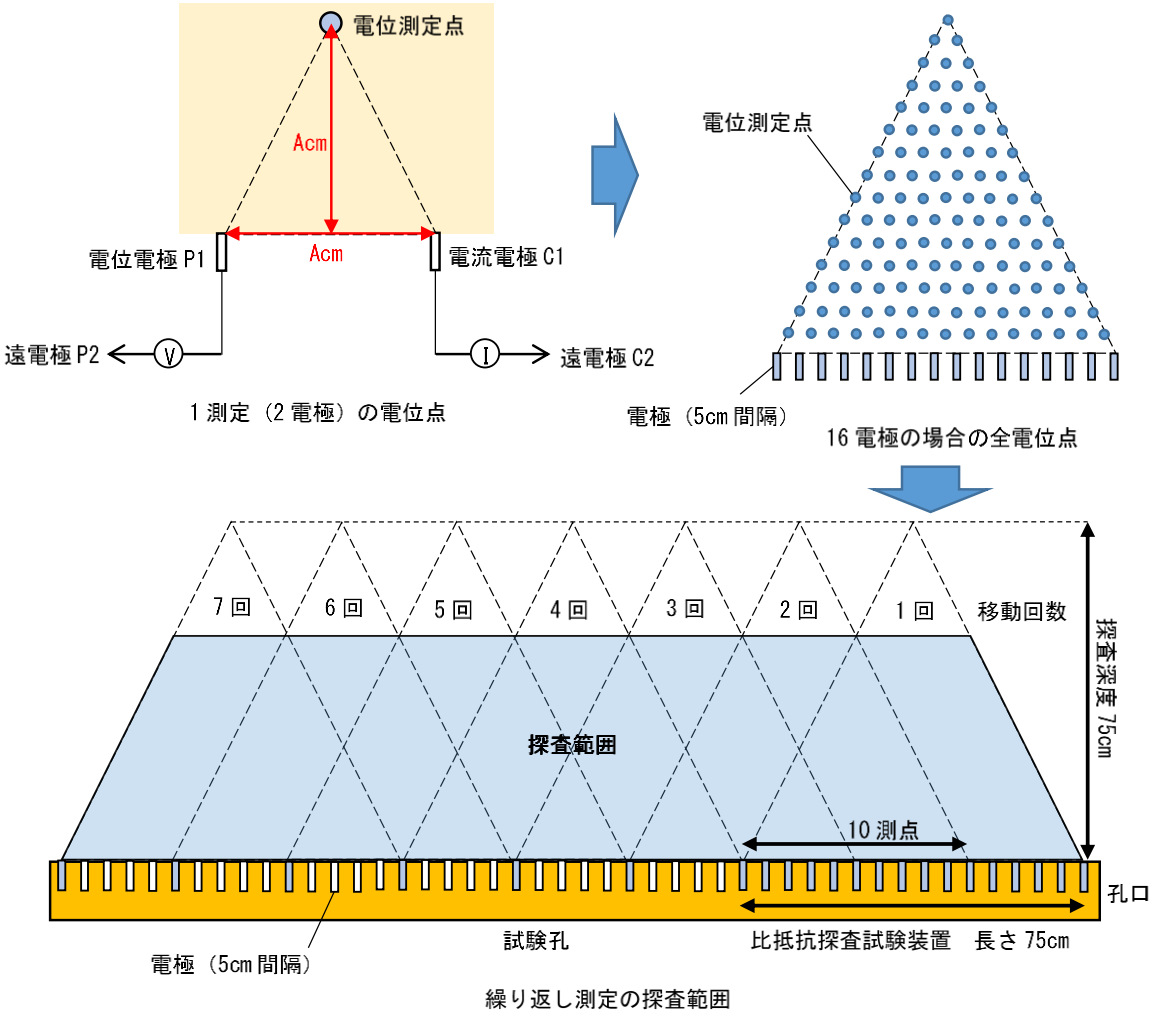


図 3.3-12　比抵抗測定概念

(3)　解析方法

比抵抗試験装置で取得したデータを使用して、FEM（Finite Element Method :有限要素法）を用いた 2 次元トモグラフィ解析を次に示す手順で実施した。

1）見掛比抵抗値の計算
2）解析メッシュモデルの作成
3）初期モデルの作成
4）有限要素法による理論見掛比抵抗値の計算
5）測定値と理論値との残差の計算
6）モデルの修正　（逆解析）
7）比抵抗分布図の作成

3.3.1.5　室内試験

試験孔の深度 1.8m～1.9m 間を直径 80mm、長さ 100mm に成形して供試体試料とし、自然状態と原位置の地下水に浸水させて真空脱気（24 時間以上を行った飽和状態で、ノギス法による密度試験、超音波（P 波、S 波）速度測定、比抵抗測定を実施した。浸水脱気の状況を図 3.3-13 に示す。

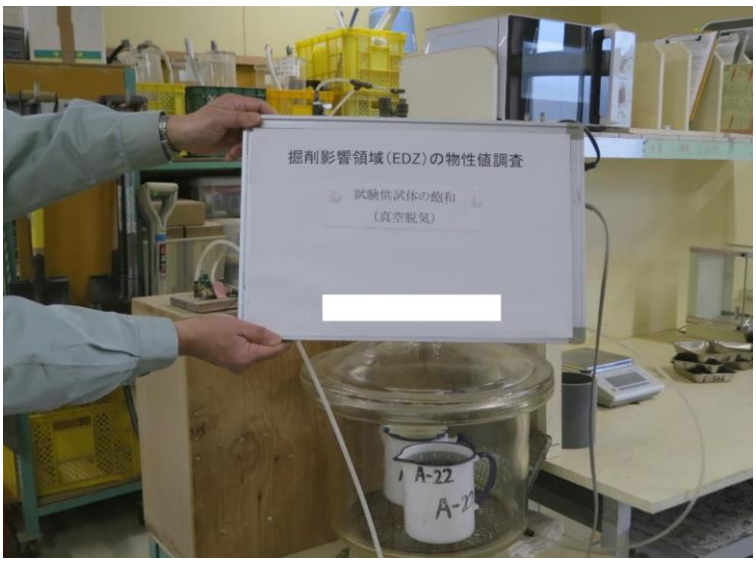


図 3.3-13　浸水脱気状況

(1)　ノギス法による密度試験

地盤工学会基準「岩石の密度試験方法　ノギス法」（JGS2132）に準拠して測定を実施した。供試体の質量の測定は、試験体の質量 m(g)をはかりの最小表示まで測定し、供試体の直径 D(cm)、高さ H(cm)、をノギスの最小表示まで測定した。また、直径は供試体の上、中、下のそれぞれの位置で直交する 2 方向を、高さは円周を等分した 2 箇所以上のそれぞれの位置をノギスで測定し、それぞれの平均値を求め小数点以下 2 桁に丸めた。試験状況を図 3.3-14 に示す。

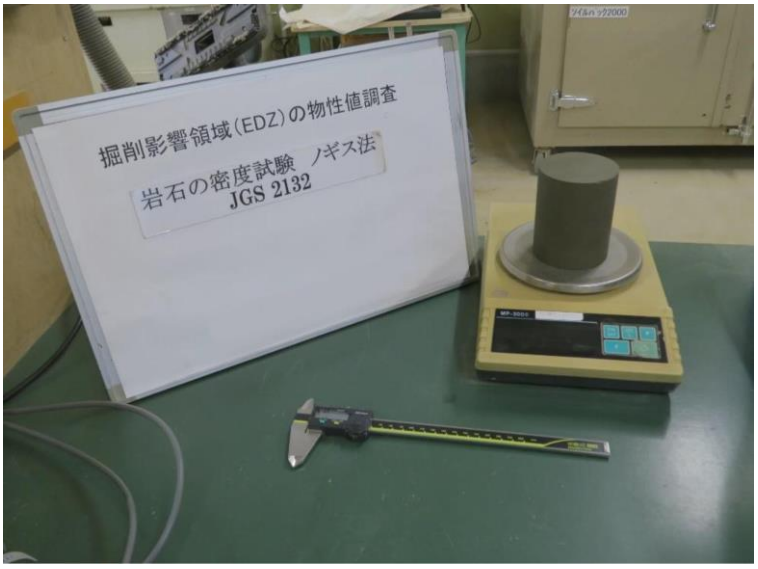


図 3.3-14　密度試験状況

(2)　超音波速度試験

地盤工学会基準「岩石の超音波速度測定方法」(JGS2110) に準拠して測定を実施した。超音波速度測定は、発受振子で供試体を挟み、パルス発振子により発生した振動の伝播時間を読みとることで、弾性波速度を算出する方法である。P 波、S 波それぞれの実体波にあわせた発受振子を使用した。図 3.3-15 に測定概念図を示し、表 3.3-3 に使用機器の一覧に示し、試験状況を図 3.3-16 に示す。

長さ L（cm）の供試体の伝播時間が T（μs）の場合、弾性波速度は以下の式で算出される。

・V=104×L/T (m/s)

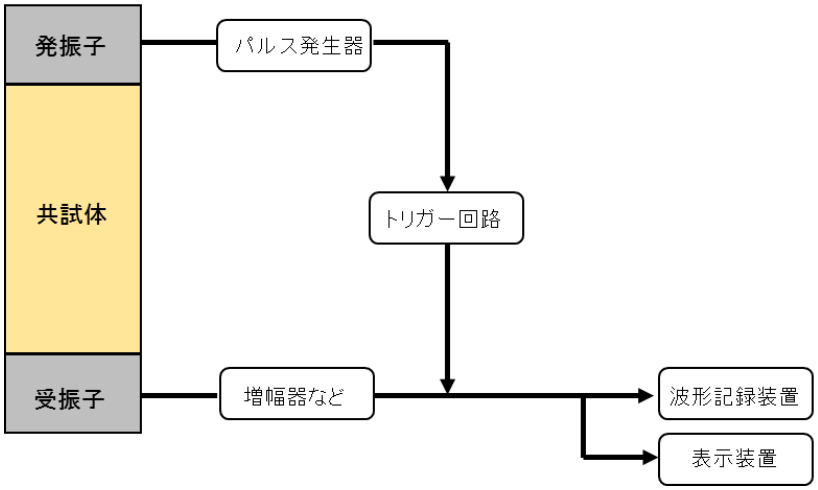


図 3.3-15　超音波速度測定の測定概念図

表 3.3-3　超音波測定使用機器一覧

機器/型式	仕　様	数量
超音波速度 測定装置 SonicViewer 2i （OYO 製）	成分：1 成分 入力インピーダンス：1MΩ 利得：1,2,5.10,20,50,100,200 倍 周波数帯域：100kHz～1000kHz ローパスフィルター：カットオフ周波数 Fc=200kHz,1000 kHz A/D コンバータ：16bit サンプリングレート：100,200,500,1000,2000nsec メモリ長：1024,2048 ワード 画面：10.1 インチ TFT カラーLCD（1920×1200） OS：Windows10 Professional 64bit 記録媒体：SSD128GB データフォーマット：専用フォーマット 電源：AC100～240V	1 台
振動子 （OYO 製）	駆動電圧：600V 振動パルス幅：6μsec	P 波、S 波 各 2 個

図 3.3-16　超音波速度測定状況

(3)　比抵抗試験

岩石資料の比抵抗測定は規格化されていないため、千葉ら，1993.を参考に測定を実施した。測定原理は以下のとおりである。ある物質の電気抵抗を R（Ω）、長さを L（m）、断面積を S（m2）とし、単位体積あたり（=1m3）の物体を想定した場合、物体の比抵抗ρは次式で与えられる。

・ρ=R×S/L　（Ω-m）

実際の測定は円柱形に成形した試料の両端面に電圧をかけ電流 I（A）を流し、軸方向の電位差 V（V）を測定した。前述の式をもとに、試料の比抵抗を次式によって算出した。

・ρ=V/I×S/L　（Ω-m）

電極には銅板を使用した。電極間や試料との間には、原位置の地下水を浸み込ませた濾紙を挟んで測定した。表 3.3-4 に使用機器の一覧を示し、図 3.3-17 に測定の模式図を示し、図 3.3-18 に測定状況を示す。

表 3.3-4　室内試験の使用機器一覧表

機器/型式	仕　様	数量
比抵抗測定装置 MCOHM Mark-2	出力電圧：1 0 ～400V 出力電流：1mA～200mA 出力波形：矩形波 測定電位：最大 5V 分 解 能：1μV 入力 ｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ：10MΩ	1 台
電極	銅板　厚さ 1mm、直径 80mm	2 枚

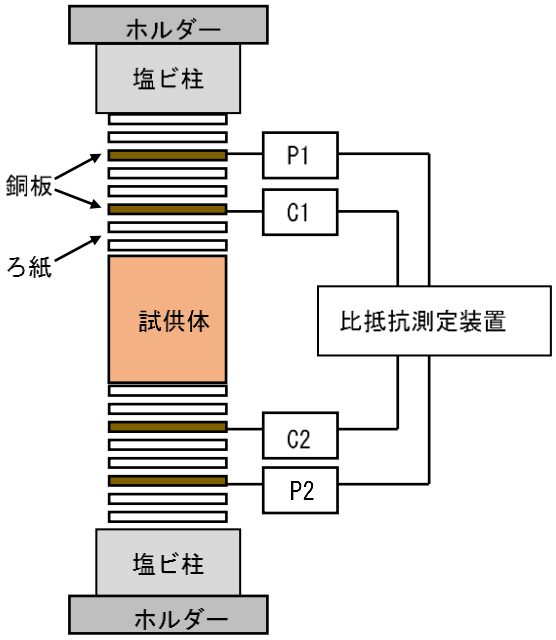


図 3.3-17　比抵抗測定の模式図

図 3.3-18　比抵抗測定状況

3.3.1.6　調査結果

(1)　弾性波の速度解析

掘削コアの室内試験結果を基に、一様な弾性波速度（P＝1.75km/s）と仮定して NMO 補正、CMP 重合を行う定速度重合を、速度を変えながら実施して時間ごとに反射波が強調される速度を求めた結果、屈折波の傾き、重合速度的からこれらの反射波は S 波によるものと思われる。

速度解析の結果を**表 3.3-5** に示し、これらの速度構造を用いて反射法解析を行った反射時間断面図を図 3.3-19 に示し、深度変換後の反射断面図を図 3.3-20 に示す。

表 3.3-5　速度解析結果表

計算時間 (ms)	RMS 速度※ (m/s)	区間速度 (m/s)	平均速度 (m/s)	層厚 (m)	深度 (m)
1.7	500	500	500	0.43	0.43
3.0	700	896.57	671.85	0.58	1.01
5.2	1100	1480.48	1013.96	1.63	2.64

※Root Mean Square velocity(2 乗平均速度)の略。多層構造において Vrms＝√Σvi2ti/Σti で与えられる速度。

Vi は各層の区間速度、ti は各層の垂直往復走時。Vrms 速度を用いることで水平多層モデルは Vrms を区間速度とする 2 層モデルに近似することができる。重合速度は、任意の反射面を境界とする 2 層モデルに対してデータから推定される区間速度であり、RMS 速度に近似できる。また、RMS 速度から区間速度 Vi を求めることができる。

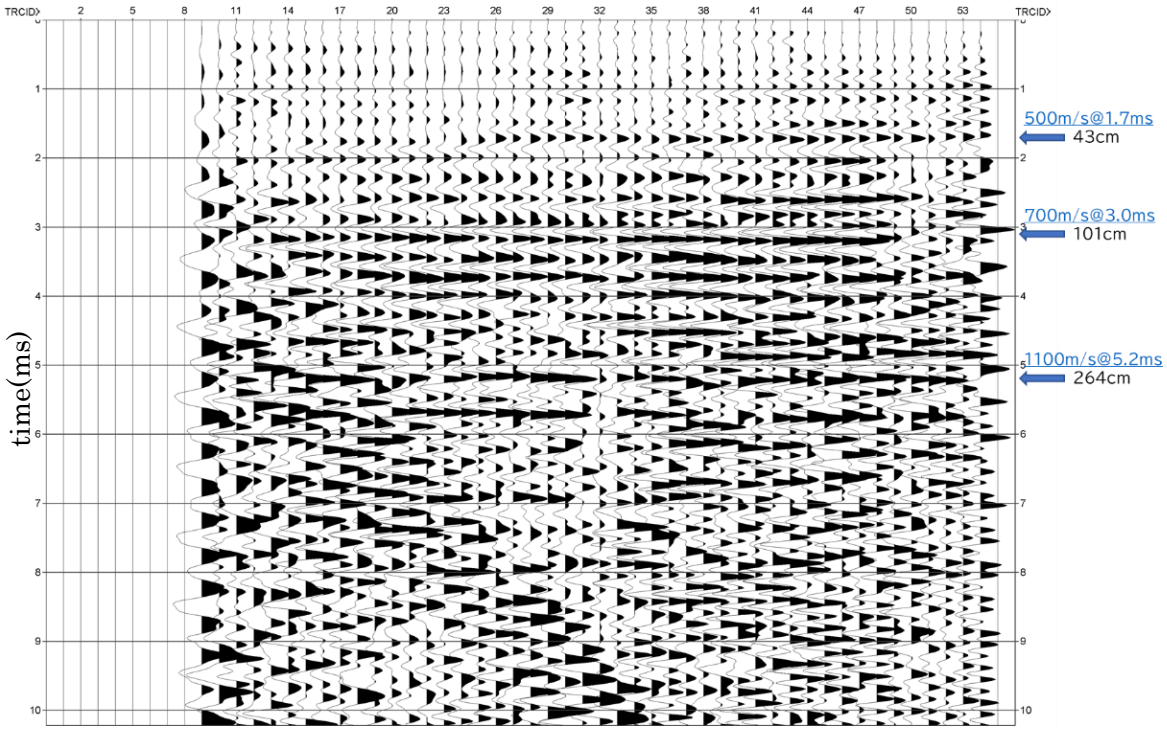


図 3.3-19　反射時間断面図

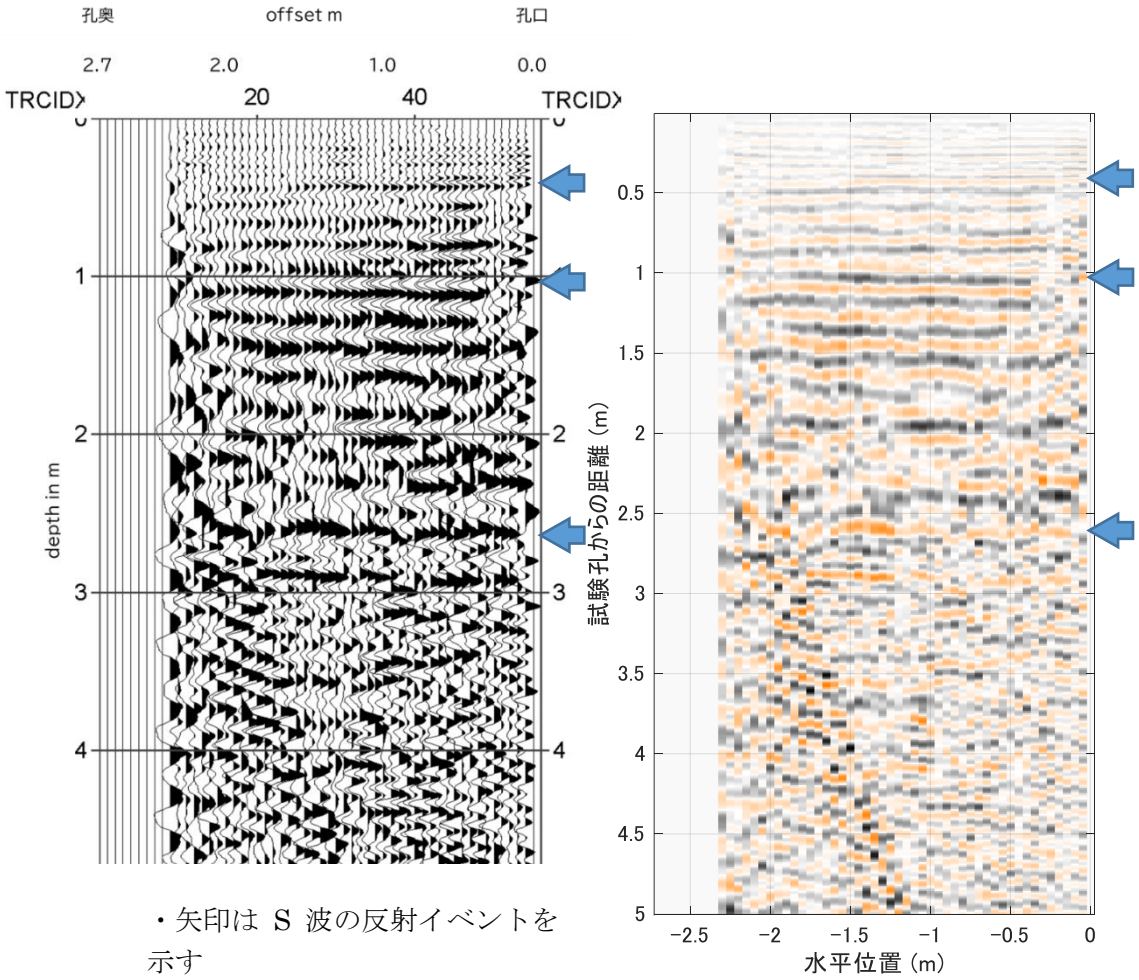


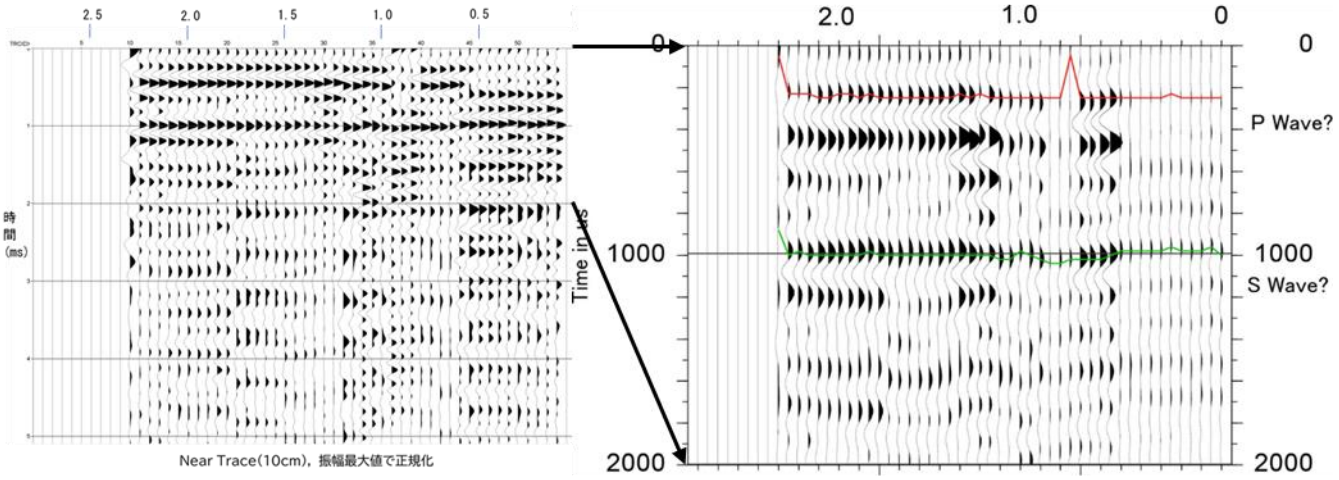
図 3.3-20　深度変換後の反射断面図

※カラー表示は白黒の反射断面図で黒く表示されている部分が振幅に応じて橙色、白く表示されている部分が黒で表示されている。

(2)　弾性波の初動振幅評価

直達波の振幅を評価するために、発振から近いオフセット距離 10 cm の受振点における波形である振幅を最大値で正規化したニアトレースの波形を用いて初動の振幅値を評価した結果、初動振幅と試験装置に設置したカメラで確認したき裂箇所との相関がみられる。

図 3.3-21 にニアトレース波形記録とニアトレースの拡大波形記録（最初の 2 ms を拡大）を示し、初動振幅を評価したグラフを図 3.3-22 に示した。また、図 3.3-23 に試験装置に設置したカメラの映像を示す。



赤線がＰ波、緑線がＳ波と推定

図 3.3-21　ニアトレースの波形記録（左）ニアトレースの拡大波形記録（右）

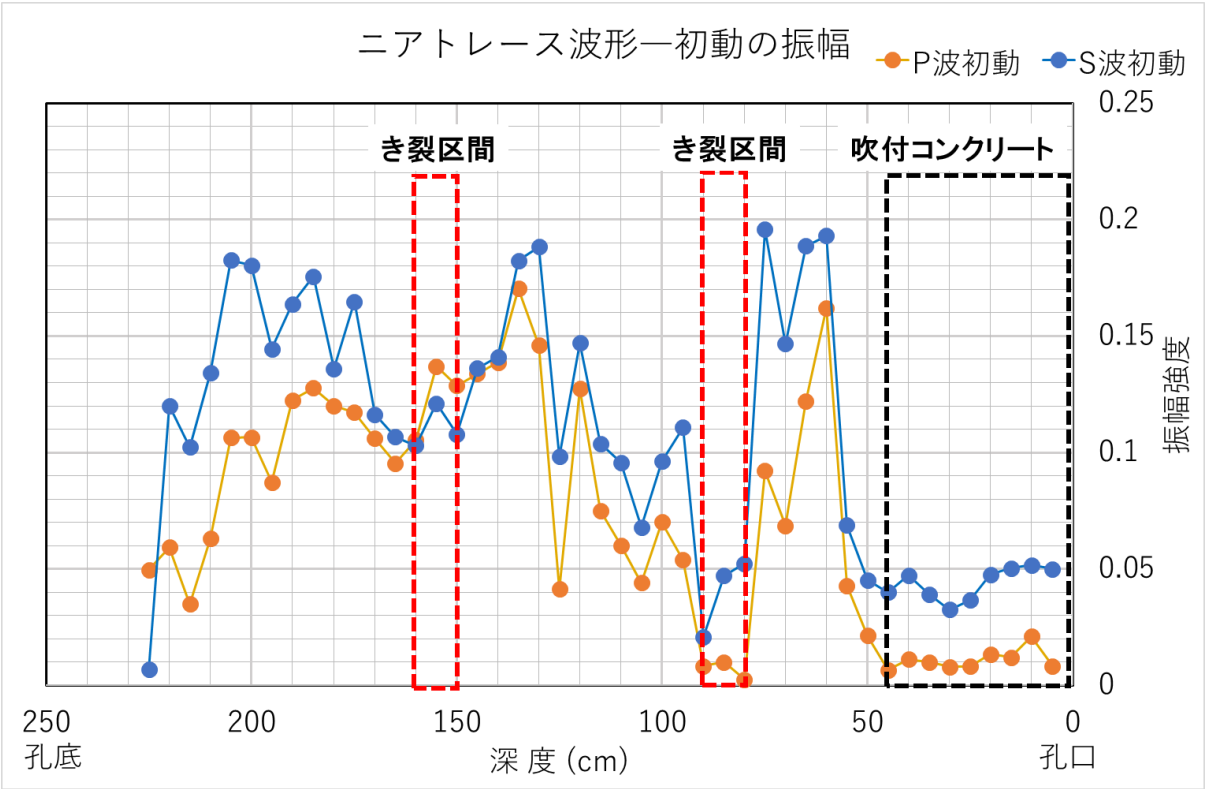


図 3.3-22　初動振幅の評価グラフ

孔壁左　　孔壁上　　孔壁右

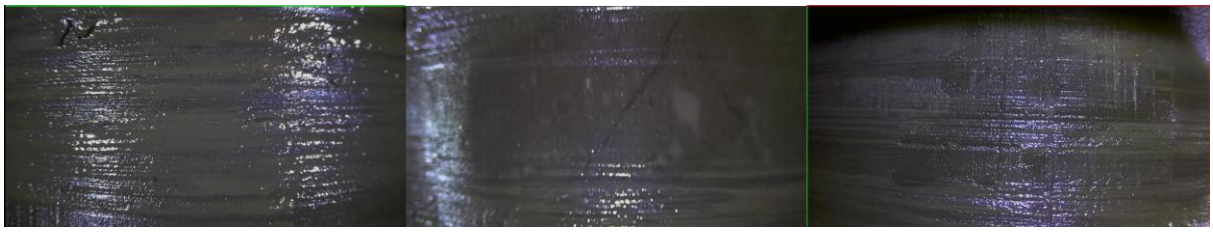
孔口からの距離 0.85m

孔壁左　　孔壁上　　孔壁右

孔口からの距離 0.90m

孔壁左　　孔壁上　　孔壁右

孔口からの距離 0.95m



孔壁左　　孔壁上　　孔壁右

孔口からの距離 1.55m

※カメラは試験孔の奥に向かって孔壁の右、上、左面を撮影している。

図 3.3-23　試験装置の設置カメラの映像

(3)　比抵抗解析

電極位置と電流・電位差の測定値から、各電極ペアについての見かけ比抵抗値を計算し、電極間隔を深度に換算した見かけ比抵抗の分布を図 3.3-24 に示す。

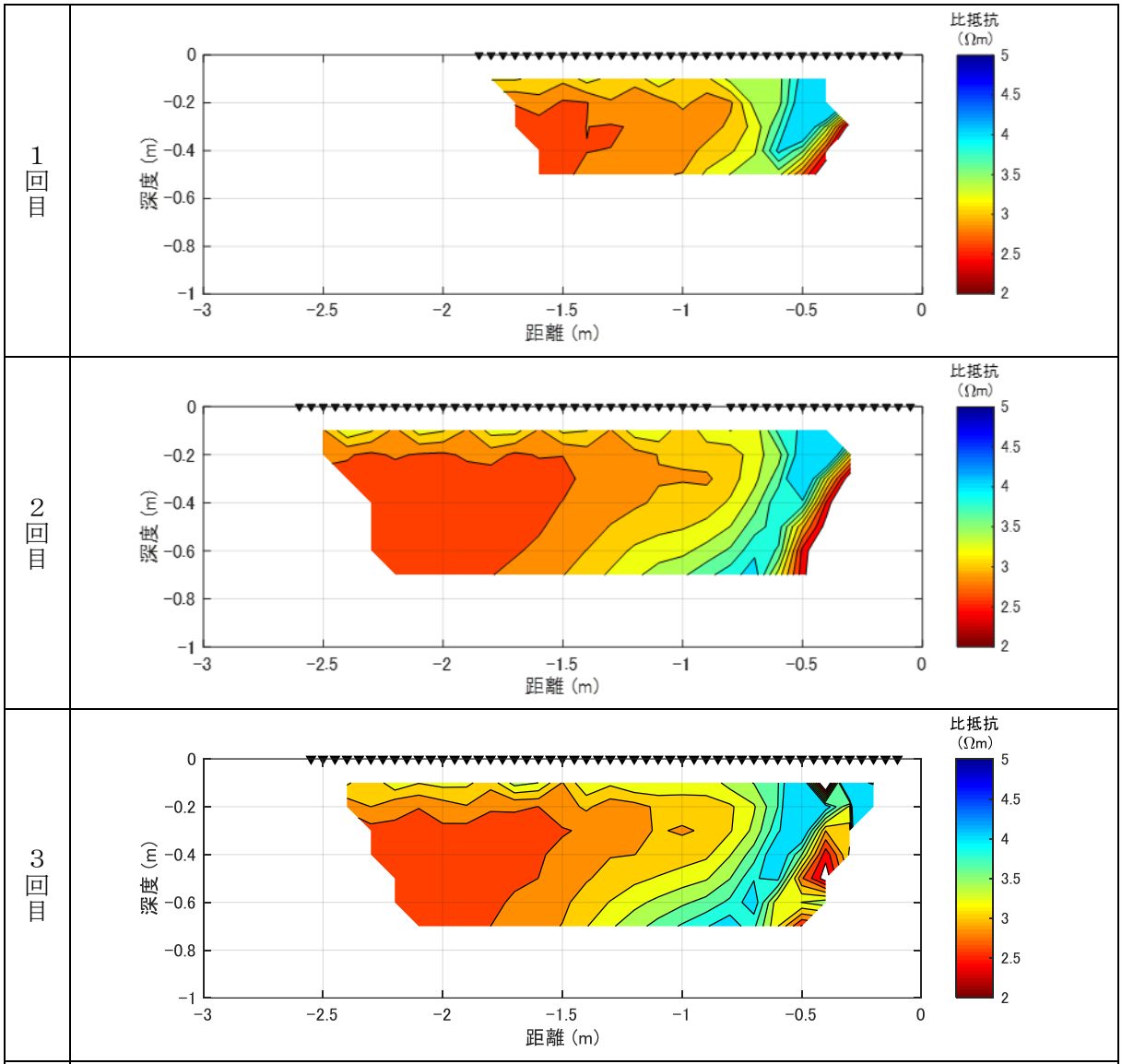


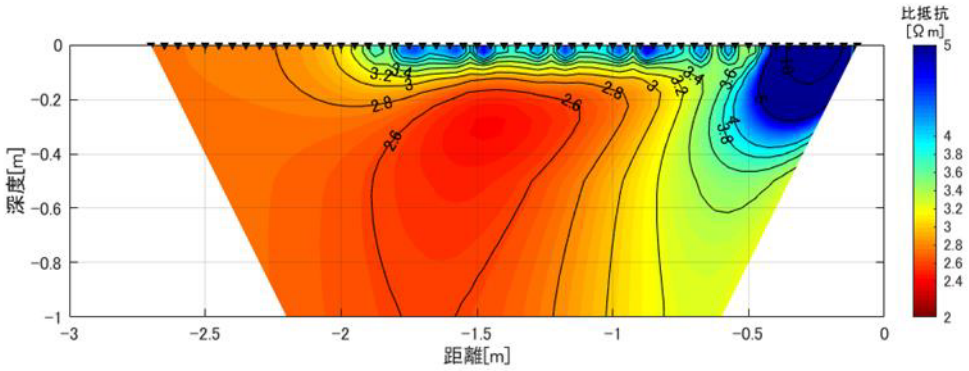
図 3.3-24　見掛比抵抗分布図

測定データから、逆解析によって比抵抗 2 次元分布を推定した。解析には FEM（有限要素法）による逆解析プログラムを用いた。初期モデルには見掛比抵抗値の平均値を用いた一様構造とし、有限要素法によって計算される理論値と測定値の残差が小さくなるようにモデルの修正を繰り返した。各測定データにおける逆解析の繰り返し回数と RMS 残差の一覧を**表 3.3-6** に示し、比抵抗の分布を図 3.3-25 に示す。

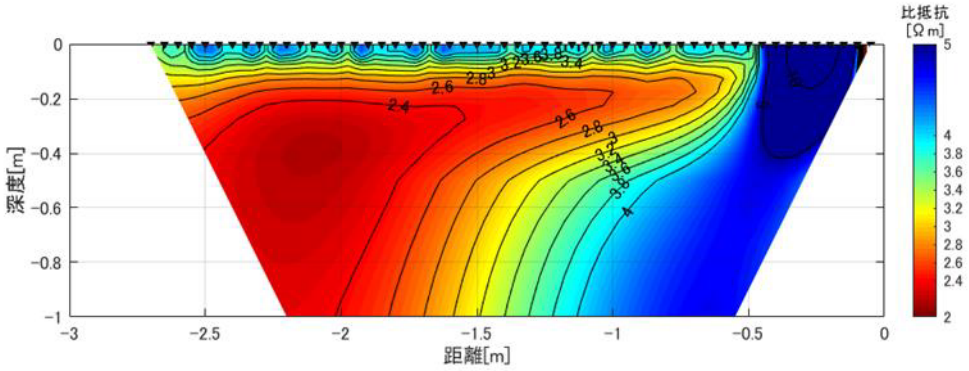
表 3.3-6　逆解析の繰り返し回数と RMS 残差

測定回数	測定日	繰返し回数	RMS 残差 (%)
1 回目	2020 年 12 月 2 日	1	5.036
2 回目	2020 年 12 月 25 日	3	4.481
3 回目	2021 年 1 月 26 日	5	11.04

1 回目



2 回目



3 回目

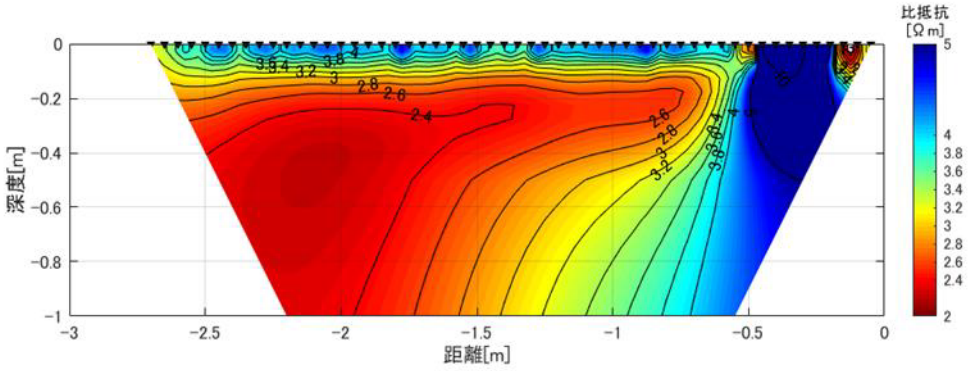


図 3.3-25　比抵抗分布図

(4) 室内試験結果

試験孔の深度 1.8m～1.9m 間を直径 80mm、長さ 100mm に成形して供試体試料とし、自然状態と原位置の地下水に浸水させて真空脱気（24 時間以上を行った飽和状態で、ノギス法による密度試験、超音波（P 波、S 波）速度測定、比抵抗測定を実施した。試験結果の一覧を表 3.3-7 に示す。

表 3.3-7　室内試験結果の一覧表

採取深度 1.8-1.9m	単位	湿潤状態 （自然状態 ）	飽和状態 （浸水脱気）
直 径	cm	8.01	8.01
高 さ	cm	10.06	10.06
質 量	g	854.04	847.86
断面積	cm2	50.37	50.43
密度ρt	g/cm3	1.67	1.67
抵抗値	Ω	30.40	29.60
比抵抗ρ	Ω・m	7.56	7.37
Vp	km/s	1.75	1.73
Vs	km/s	0.63	0.57
動ポアソン比	νd	0.43	0.44
動剪断弾性定数	Gd:MN/m	663	543
動弾性係数	Ed:MN/m	1890.	1560

3.3.1.7　調査のまとめと課題

(1)　弾性波

発振用と受振用の圧電素子を並べたプローブを用いてスイープ発振の測定を行った。取得した波形記録により反射法解析を行い、深度断面図には複数の反射波（イベント）が見られる。速度解析に結果から、反射波がS波と見られる反射面が水平な3層の速度構造を推定した。また、反射波のニアトレース記録によりP波とS波の振幅の評価により、EDZ内の亀裂が見られる区間は相対的に振幅が小さい領域として検知できる可能性がある。

反射法処理の結果は水平構造を表しているが、初動振幅は測線上の位置により大きな変化が見られた。このことから水平方向の速度変化は小さく、今回の調査で判別できる変化は見られなかったと推測される。き裂による微小な速度の差異を判別するためには、P波とS波を分離してより詳細な解析を実施する必要がある。振幅の情報から原位置の物理特性を定量的に把握することが課題である。

(2)　比抵抗

比抵抗分布図から、試験孔の孔口付近に分布する 10Ωm 以上の比抵抗値は吹付けコンクリートの影響によるもの思われる。試験孔奥の部分の 2Ωm 程度の比抵抗値は、深度 250mの堆積岩の比抵抗値と調和的である。弾性波の振幅が小さい範囲（き裂部分）に比抵抗の変化は見られない。一般的な岩石の比抵抗は、間隙水の比抵抗が低い場合や有効間隙率が高い場合は、主に間隙率とそこに含まれる水の比抵抗に依存することから、解析結果の評価には、計測箇所および計測手法、解析手法等を検討するためのデータを取得する必要がある。

(3)　室内試験

試験孔の採取深度 1.8~1.9mのコアを成形して、密度試験、超音波速度測定、比抵抗測定を実施した結果、密度は湿潤状態、飽和状態ともに 1.67 g/cm3、P 波速度は 1.75 km（湿潤）、1.73 km/s（飽和）、S 波速度は 0.63 km/s（湿潤）、0.57 km/s（飽和）、比抵抗は湿潤状態で 7.6Ωm、飽和状態で 7.4Ωm を示し、深度 250m の堆積岩の一般的な値を示す。

(4)　試験装置の問題点と改良

・発受振素子

同一の素子で発振と受振を行う切替え方式とし、分解能を高くするために受振器間隔は 5cm とする。

・振源と発振方式

孔内で発受振するために、素子の大きさに制限があることから、スイープ型発振方式にして素子の発振能力を補う本調査の方式を採用する。ただし、小電力で効率よく発振させるために、インピーダンスマッチング回路の導入を検討する。測定データと発振波形の相互相関による取得データの良否判定に計算能力の高い PC を使用する。

・発振周波数

インパルス型の震源は発振周波数を制御できないことから、制御が可能なスイープ方式とする。スイープ 40KHz サンプリングとした場合、ナイキスト周波数は 20KHz になり、波形を正しく扱える周波数はその 7 割程度となる。よって、測定の分解能向上のために共振周波数の高い受振素子を検討する。

・発振パラメータ

本調査では相互相関処理後にリンギングが大きくなったことから、周波数帯域が足りない可能性がある。発振時間は 3.5 秒としたが、周波数帯域と発振時間を最適化する必要がある。周波数を高くした場合、岩盤中の減衰も大きくなると考えられるため、複数回の発振を行うスタッキングによる測定を検討する。

・データ収録

短いサンプリング間隔で長い記録長のデータは、データ転送にエラーが出たり、トリガーずれが発生する。また、十分なデータ分解能を確保するために、高速サンプリング可能な収録装置の選定と収録方法の検討が必要である。

・プローブの圧着方式

ゴムパッカー（ゴムチューブ）は、擦れると空気が漏れることからサニーホースによる保護を追加した。空気圧を解放する弁を使用した小型コンプレッサやボンベから空気を注入する方式を検討する。

・装置類

S/N を向上させるための、発受振素子の多重化およびプリアンプの導入、送信制御器（任意波形発生装置）、増幅器、切り替え器などにより配線が煩雑となった。これらを一体化させ、取扱いやパラメータ設定を簡略化する。

・電極プローブ

孔内電極に使用した半円型の金具は、変形の余地がほとんどなく、孔壁の凹凸に応じて変形させて圧着させることが難しい。本調査では、き裂箇所での電極の接地状態が悪く、計測が中断する不都合が生じた。今後の課題として、孔壁と電極との接地を良くするために、材料や形状および接地方法を検討する必要がある。

参考文献

青柳和平, 津坂仁和, 窪田健二,, 常盤哲也, 近藤桂二, 稲垣大介, 幌延深地層研究所の 250m 調査坑道における掘削損傷領域の経時変化に関する検討, 土木学会論文集,C(地圏工学)(インターネット), 70(4), p.412 - 423, 2014.

青柳和平, 津坂仁和, 常盤哲也, 近藤桂二, 稲垣大介, Geomechanical assessment of excavation damaged zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), p.905 - 910, 2013.

青柳和平, 窪田健二, 中田英二, 末永弘, 野原 慎太郎, 幌延深地層研究施設における掘削影響領域の評価,深度 250m を対象とした試験(共同研究), JAEA-Research 2017-004, p.91, 2017.

青柳和平, 宮良信勝, 石井英一, 中山雅, 木村駿, Evolution of the excavation damaged zone around a modelled disposal pit, Case study at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of 13th SEGJ International Symposium (USB Flash Drive), 5 Pages, 2018.

千葉昭彦, 熊田政弘, 岩石試料の比抵抗測定について, 物理探査学会第 88 回学術講演会論文集, 4, pp.221-226, 1993.

Schuster, K., Amann, F., Yong, S., Bossart, P. and Connolly, P., High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland) , Swiss Journal of Geosci, pp. 213-231, 2017.

窪田健二, 青柳和平, 杉田 裕, 水平坑道掘削に伴う掘削影響領域の調査, 幌延深地層研究施設における検討, 公益社団法人物理探査学会第 138 回(平成 30 年度春季)学術講演会講演論文集, pp.51 - 54, 2018.

窪田健二, 近藤 桂二, 榊原 淳一, 物理探査法による掘削影響領域のモニタリング, 深度 140m, 250m 水平坑道の掘削時における調査, 社団法人物理探査学会第 128 回(平成 25 年度春季)学術講演会講演論文集, pp.62 - 65, 2013.

杉田裕, 青柳和平, 窪田健二, 中田英二, 大山隆弘, 幌延深地層研究施設における掘削影響領域の評価,1, 深度 140m を対象とした試験(共同研究), JAEA-Research 2018-002, 72 Pages, 2018.

杉田裕, 真田祐幸, 相澤隆生, 伊東俊一郎, 簡易型弾性波トモグラフィ調査システムの開発, JAEA-Research 2011-043, 25 Pages, 2012.

3.3.2　EdZ(Excavation disturbed Zone)の連続性調査技術の高度化

3.3.2.1　調査の概要

(1)　実験サイトの選定

水理・物理特性調査を同一の調査範囲で実施する実験サイトを構築し、EDZ の範囲や損傷状態、性状を空間的に評価する技術の高度化を図ることを目的として、地下施設の深度 350m調査坑道に実験サイトを選定した。坑道掘削時のグラウト止水工事資料からグラウト範囲を除いた後に、坑道掘削時の壁面観察資料から物理探査による物性値のコントラストが期待できるすべり面や断層等の近傍を候補とし、その中から、既存の割れ目が無い場所で、ボーリング掘削時の湧水や地下施設の整備事業の規制等を考慮して試験位置を選定した。図 3.3-26 に地下施設 350m調査坑道の壁面観察およびグラウト止水範囲を示す。

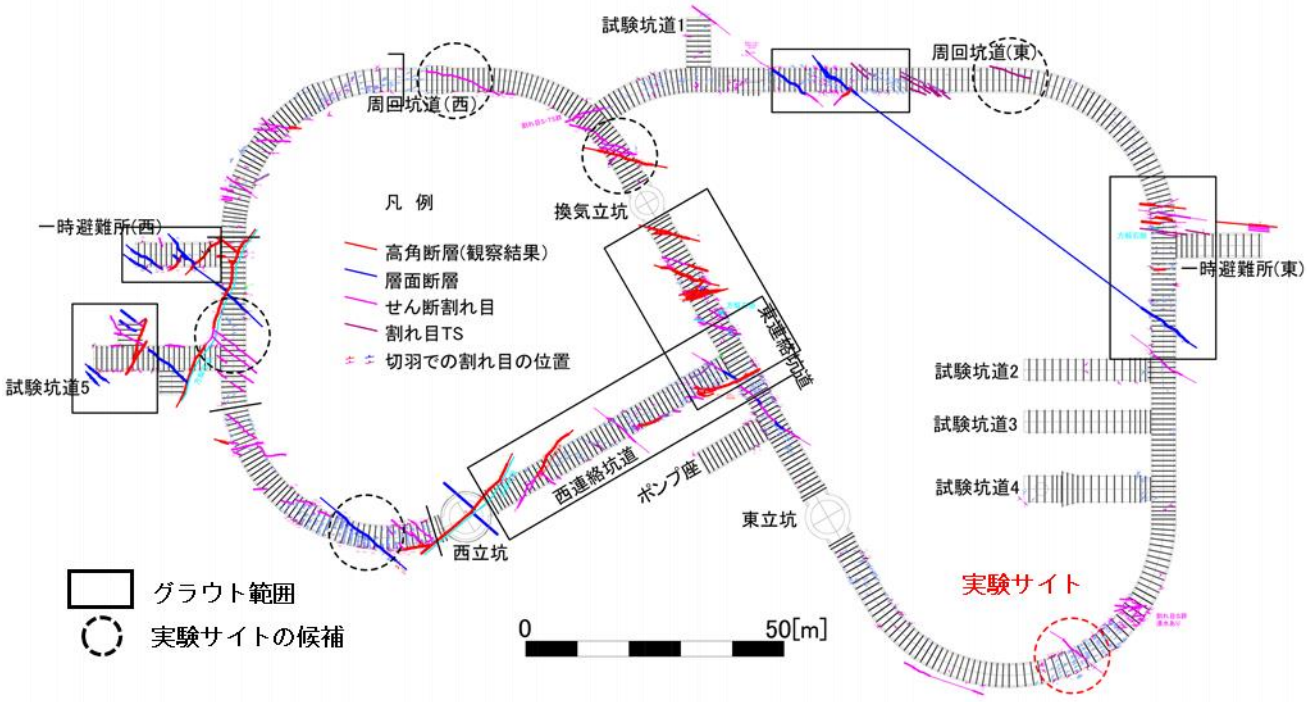


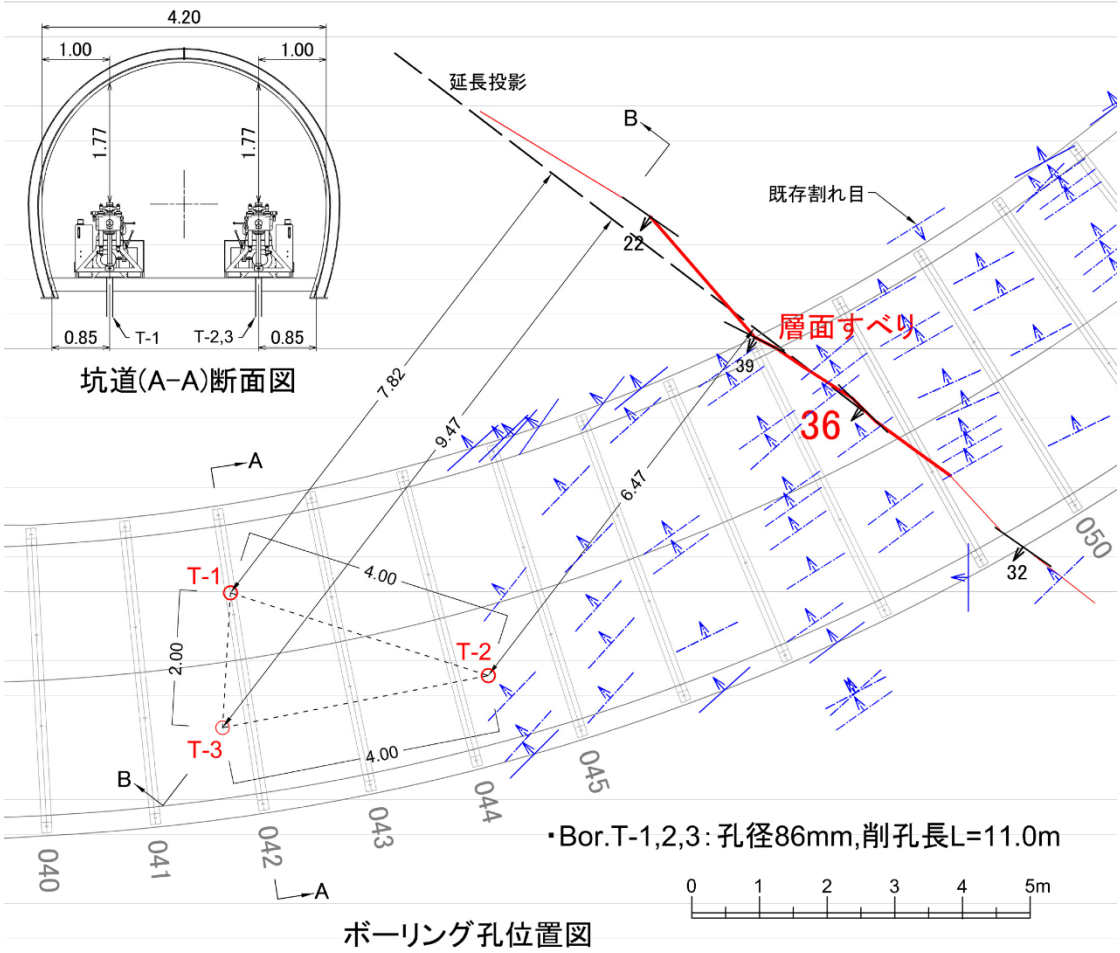
図 3.3-26　地下施設の深度 350m 調査坑道平面図

実験サイトで実施する物理探査や透水試験等の原位置調査の手法と断層およびすべり面の傾斜角度、ボーリング作業の施工性等を検討してボーリング孔の配置や掘削深度を決定した。表 3.3-8 にボーリング孔の座標示し、図 3.3-27 にボーリング位置図を示す。

表 3.3-8　ボーリング孔の座標

Bor.No.	X	Y	Z
T-1	116133.518	-30688.075	-349.528
T-2	116132.293	-30684.267	-349.497
T-3	116131.522	-30688.192	-349.527

＊座標系：JGD200,GSR80



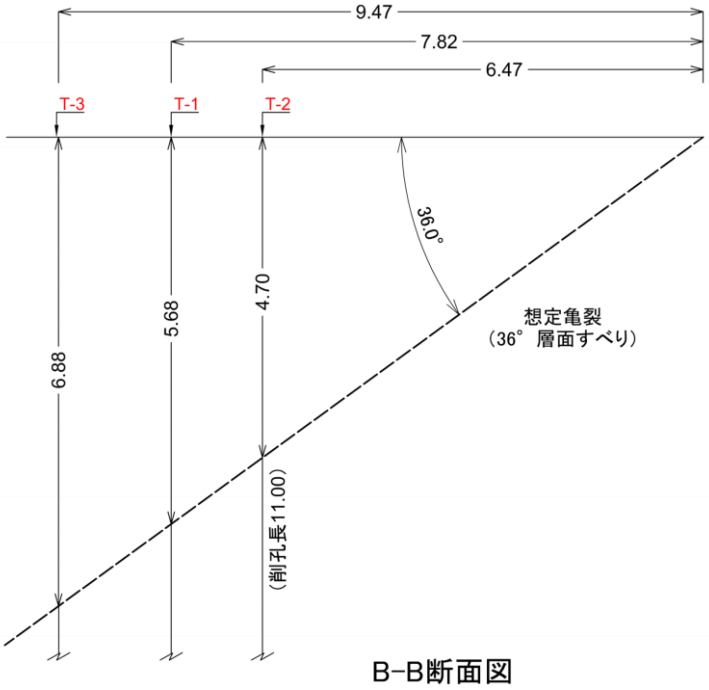


図 3.3-27　ボーリング位置図

(2) 原位置調査の方法

原位置調査は、坑道の床盤下の環境特性や物理特性を把握するためにボーリング 3 孔とコア観察および室内試験、BTV 観察、孔径検層等の原位置試験を実施するとともに、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィ調査を実施した。

トモグラフィ調査の概念図を図 3.3-28 に示す。

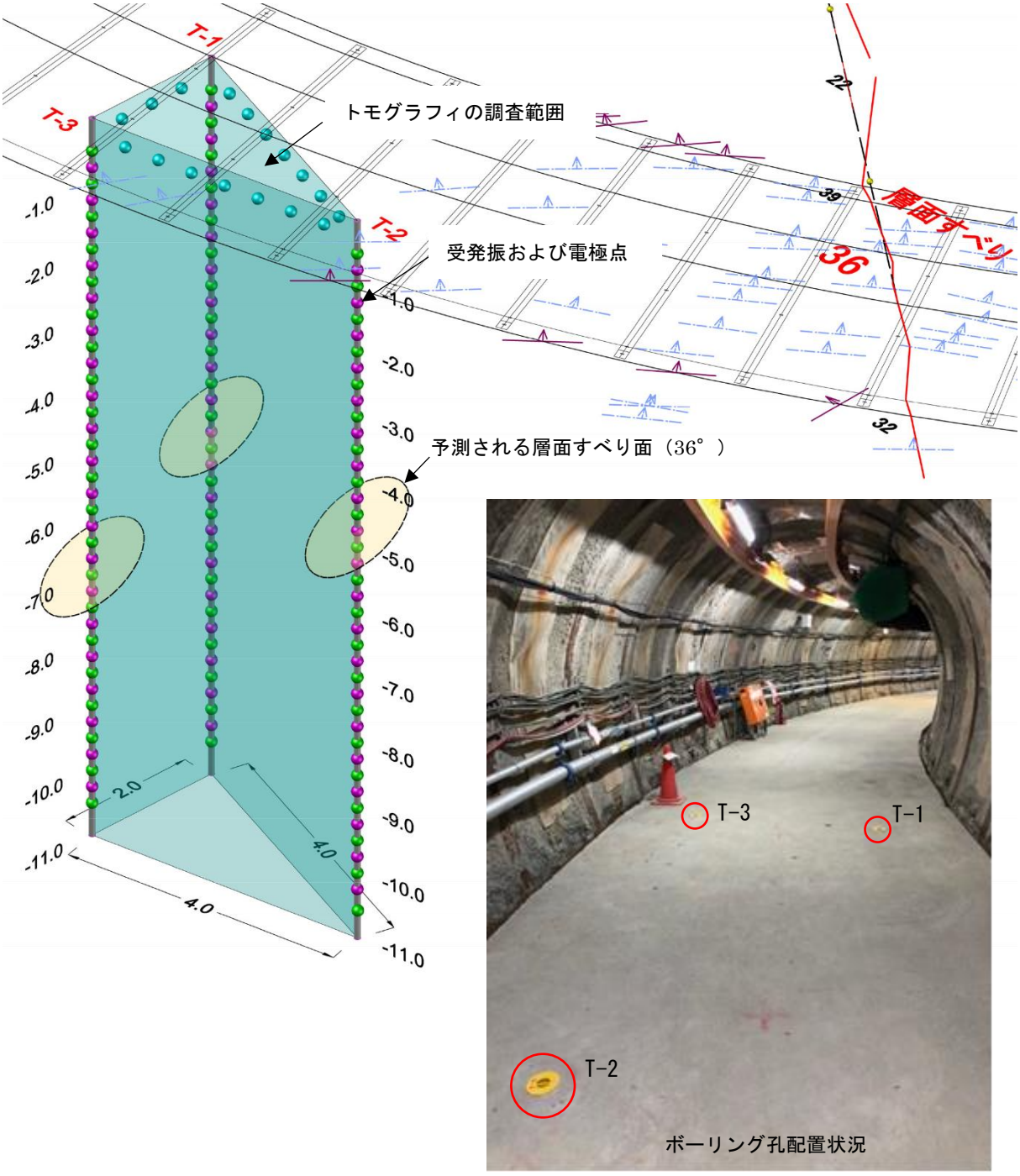


図 3.3-28　トモグラフィ調査概念図

(3)　弾性波トモグラフィ調査

弾性波トモグラフィ調査は、ボーリング孔内に起振点と受振点を対象領域の周囲に配置して、領域内を伝播する P 波および S 波の弾性波を観測することにより領域内の弾性波の伝播特性を画像化する調査である。

3 孔のボーリング孔の 1 孔で発振し、残りの 2 孔の孔内受振器と坑道床面の受振器（ジオオフォン）を対象領域の周囲に配置して弾性波（P・S 波）の伝播時間を観測した。ボーリング孔内の受振・発振間隔は分解能を高くするために 0.5m を基本とした。また、孔内の受振点は床面から 0.5mに設置し、3 孔内の発振位置を受振器の設置位置から 0.25m に深度を変えて発振することにより、調査対象範囲を透過する弾性波の伝播経路を多くして三次元による観測を実施した。発振装置には、高電圧のスパークにより高周波を発生する震源を使用した。収録記録のサンプリング時間を細かく設定することで生じる発振と受振の同期の遅延（ズレ）を防ぐために、測定データの記録開始時間と発振制御装置の発振信号（トリガー）の同期を確認して観測記録とした。弾性波トモグラフィの測定概念を図 3.3-29 に示し、使用した主要機器を図 3.3-30 に示し、弾性波トモグラフィ調査の発受振位置の概念を図 3.3-31 に示し、弾性波の波動経路のイメージを図 3.3-32 に示す。

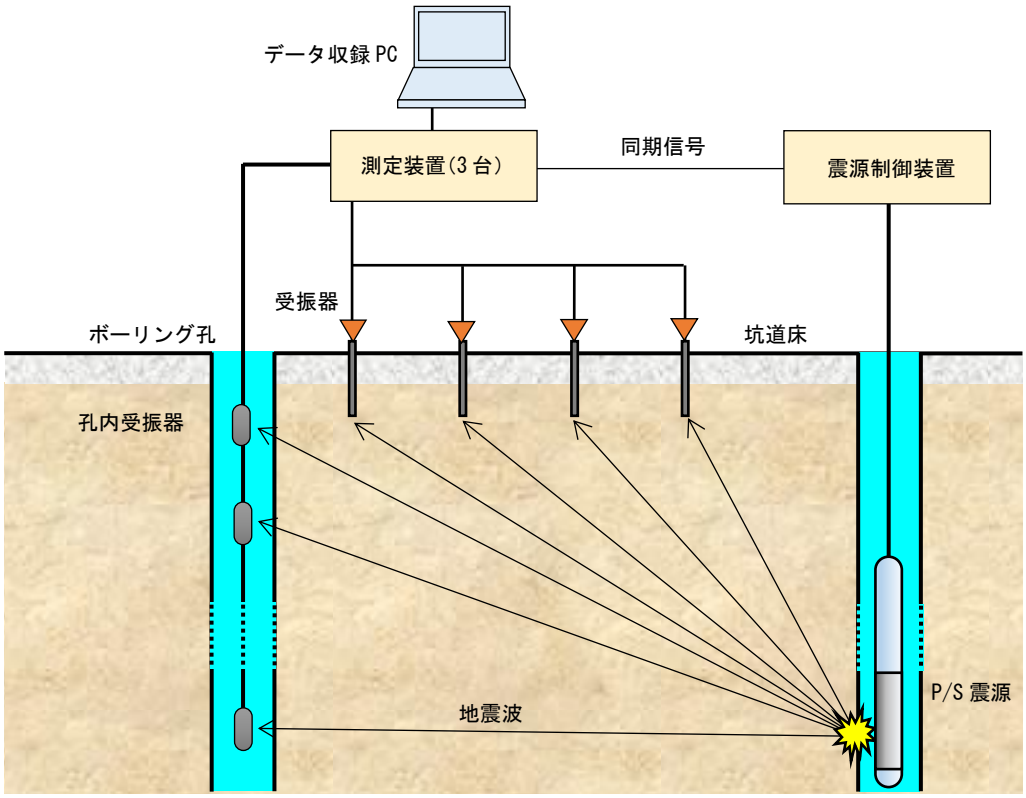


図 3.3-29　弾性波トモグラフィの測定概念図

<table>
<tr><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>P 波孔内震源（P-wave Sparker probe SBS 42）</td><td>S 波坑内震源（S-Wave Sourse BIS-SH-DS）</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>高圧電源装置（Impulse Generater IPG 1005）</td><td>地震探鉱機器（DAQlink4 Seismograph）</td></tr>
</table>

図 3.3-30　主要機器図

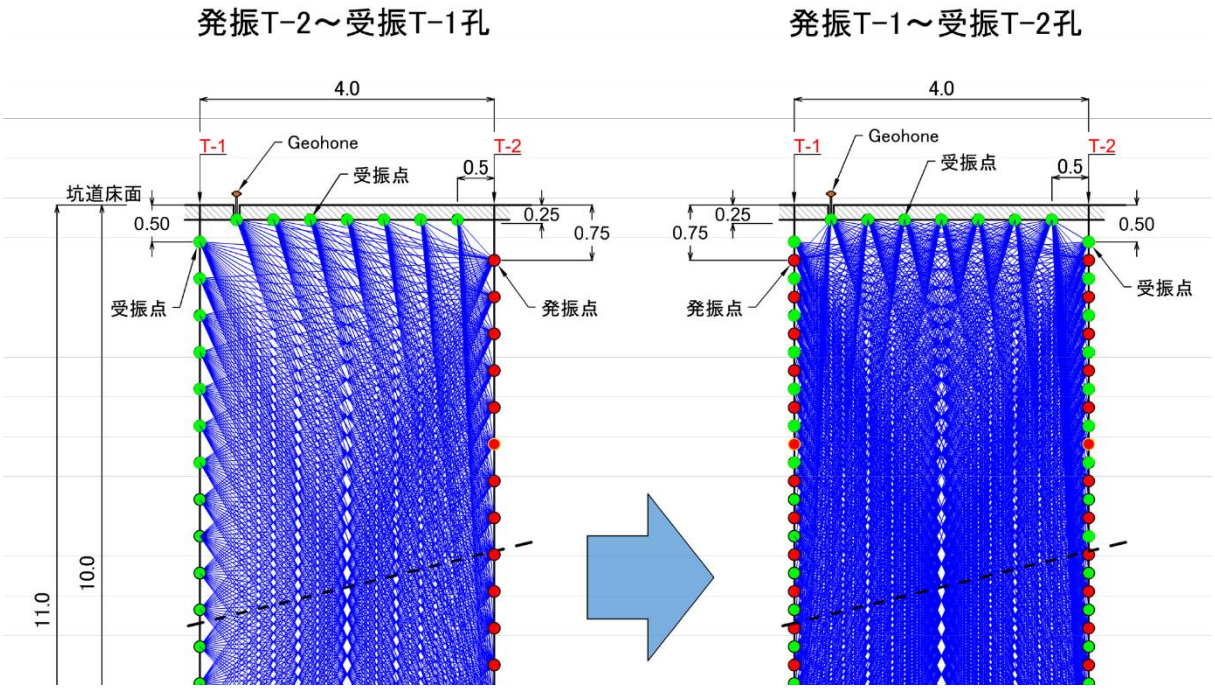


図 3.3-31　発受振位置のイメージ

・発振点：孔内深度 0.75m~10.25m を 0.5 m 間隔で発振
　　20 点／孔×3 孔＝60 点、全発振点数 60 点
・受振点：孔内深度 0. 5m~10. 5m を 0.5 m 間隔、孔間の床面を 0.5m 間隔で受振
　　孔内＝21 点／孔×3 孔＝63 点、床面＝17 点、全受振点数 80 点
　　1 測定（1 孔内発振－2 孔内+床面で受振）の受振点数 69 点
・波線数：受振 69 点×発振 60 点＝全波線数 1,140 本

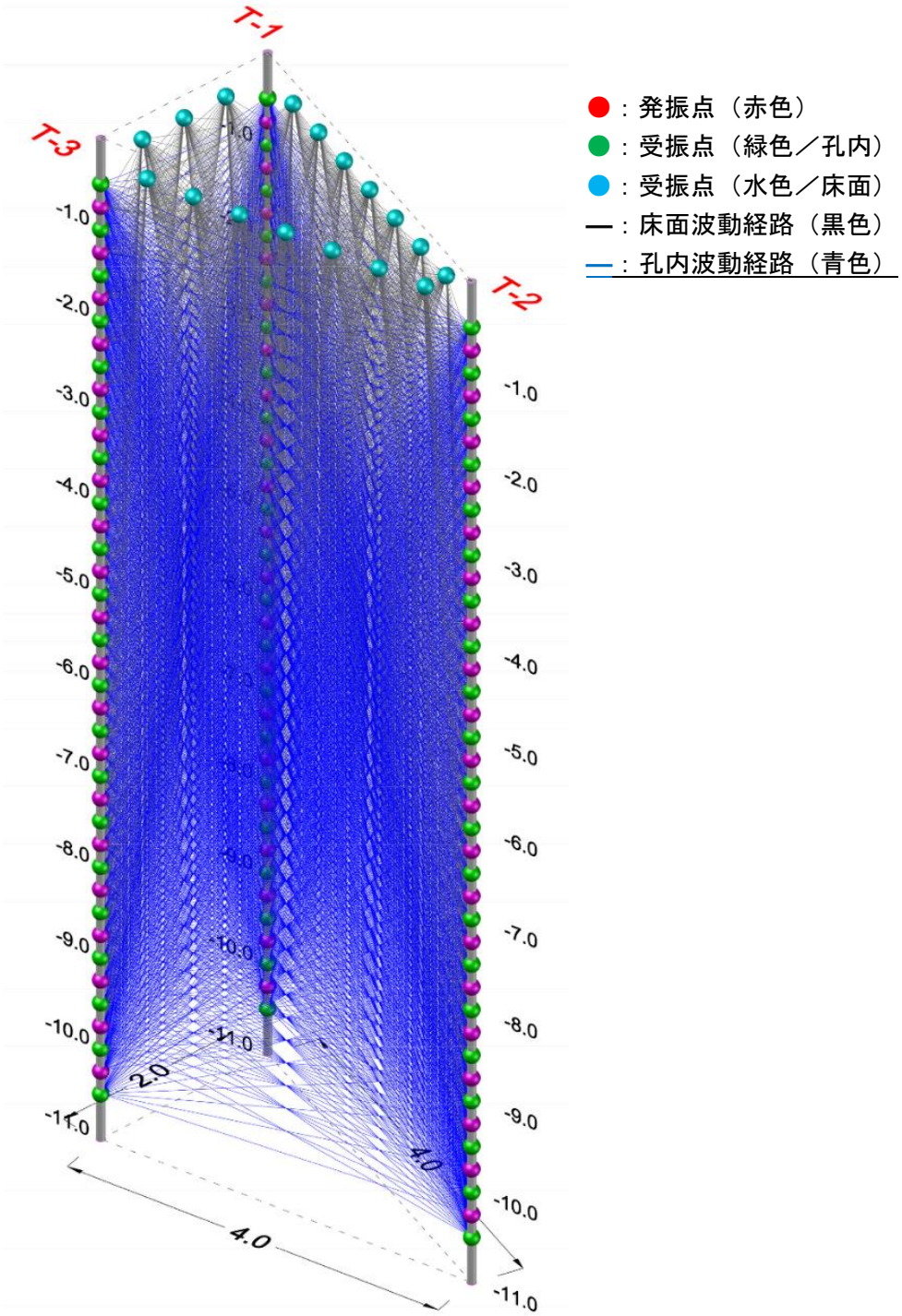


図 3.3-32　弾性波の波動経路のイメージ

【解析方法】

弾性波トモグラフィの解析は、3 次元解析ソフトウエア GeoTomCG（Geotomographie GmbH 社）を使用した。セルの大きさを 0.25m とし、初期モデルを用いた SIRT（Simultaneous Iterative Reconstruction Technique，同時反復法 : Lytle et al., 1978、 Peterson et al.，1985、Lehmann, 2007）の計算により、モデル移動時間の順方向計算、残差の計算および速度補正の適用というステップの逆計算を繰り返すことで初期速度モデルを修正し、セルの中心の速度を計算した。また、座標は T-1 孔を原点として計算した。

弾性波トモグラフィ解析の解析フローチャートを図 3.3-33 に示し、解析モデルのメッシュおよびセルを図 3.3-34 に示す。

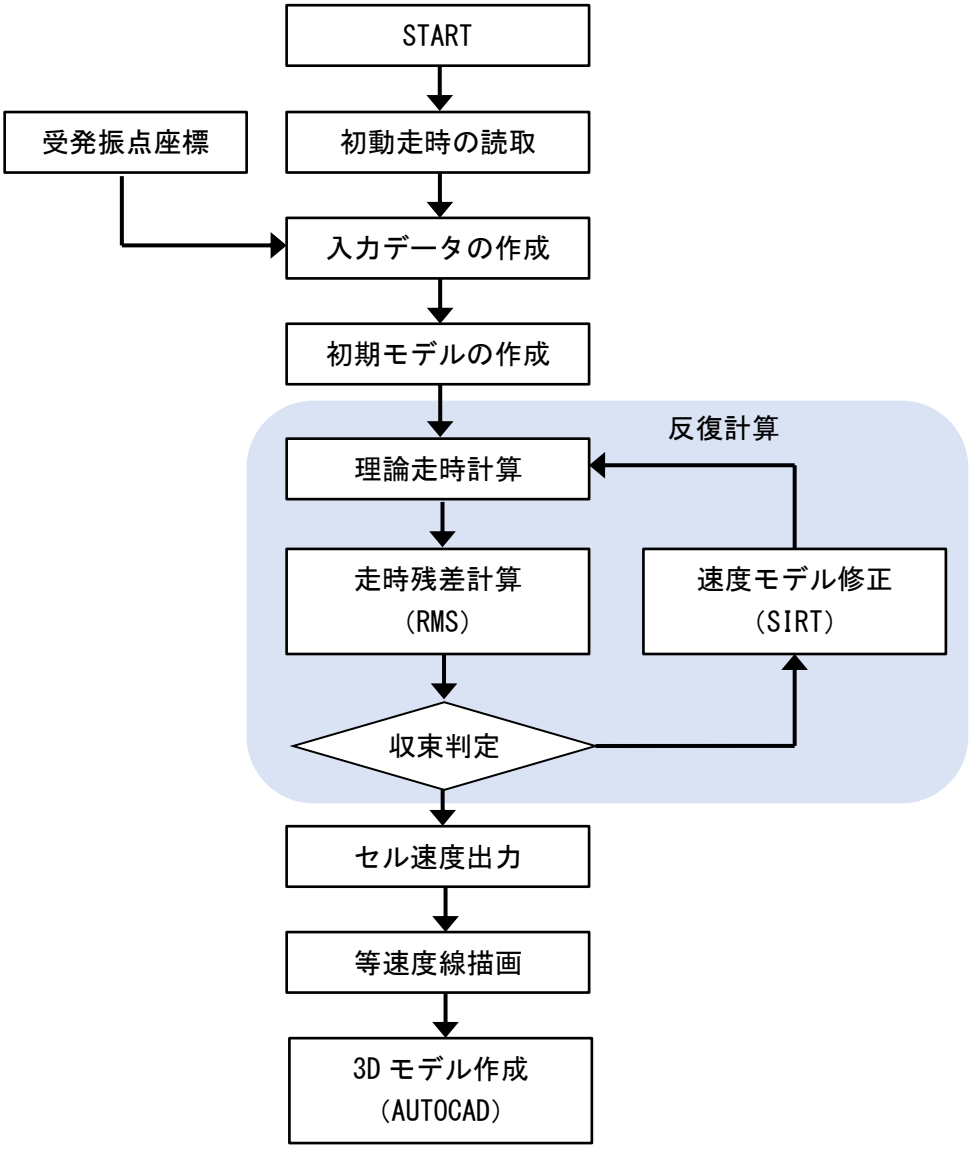


図 3.3-33　解析のフローチャート

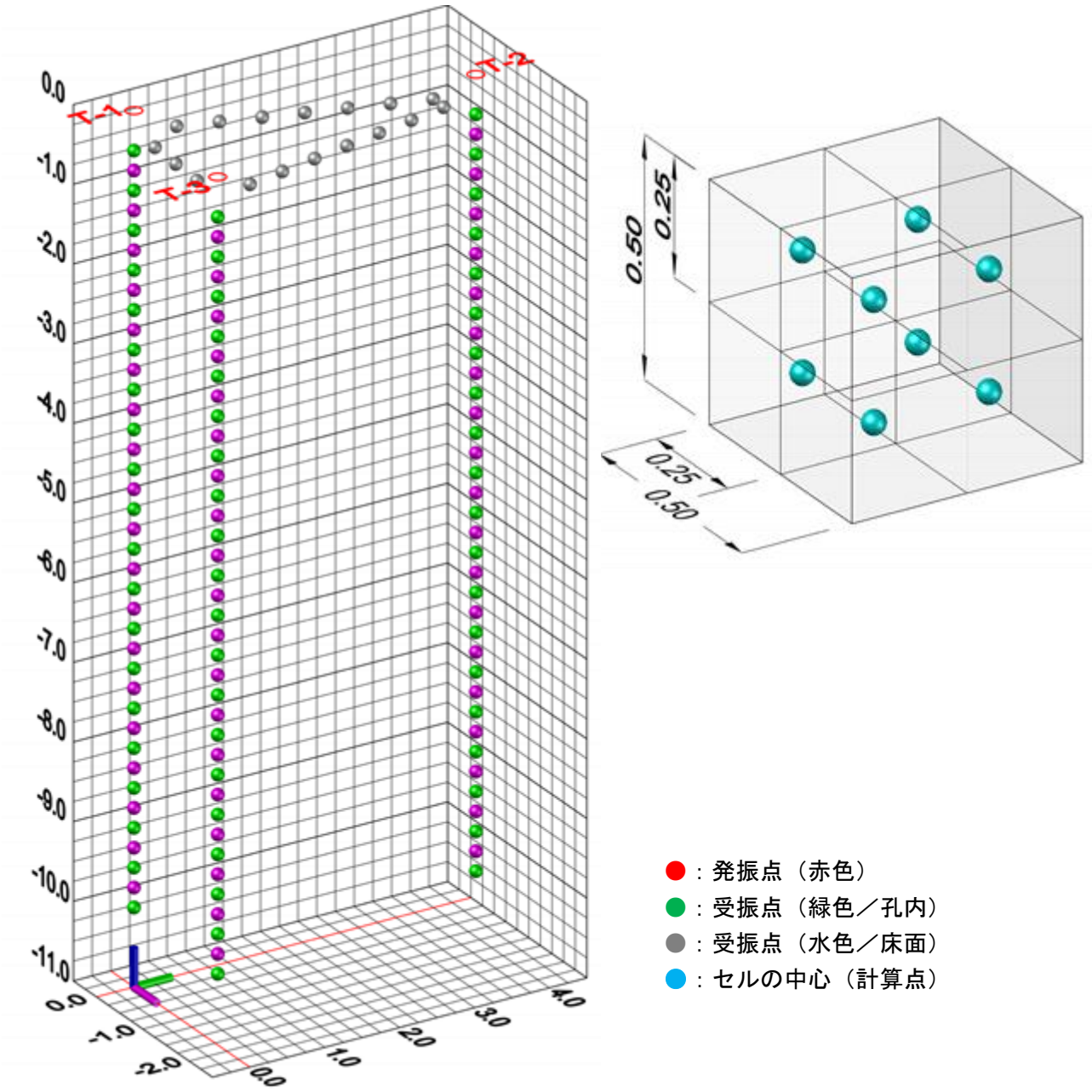


図 3.3-34　解析モデルのメッシュおよびセル

(4)　比抵抗トモグラフィ調査

比抵抗トモグラフィ調査は、3 孔のボーリング孔内にの多連の電極ケーブルと、坑道床面に設置した電極棒で対象領域を囲むように電極を配置し、ボーリング孔内と坑道床面の電極の組み合わせによる 2 極法で測定した。孔内と床面電極の間隔は 0.5m である。また、ボーリング孔内の多連電極ケーブルの電極間隔は 0.5mであるが最初の測定深度から 0.25m に深度を変えて再度測定し、ボーリング孔内電極と床面電極を使用し、0.25m 間隔で 2 回の測定を行った。遠電極は深度 350m調査坑道の既設の電極点を使用した。

比抵抗トモグラフィ調査の測定概念を図 3.3-35 に示す。

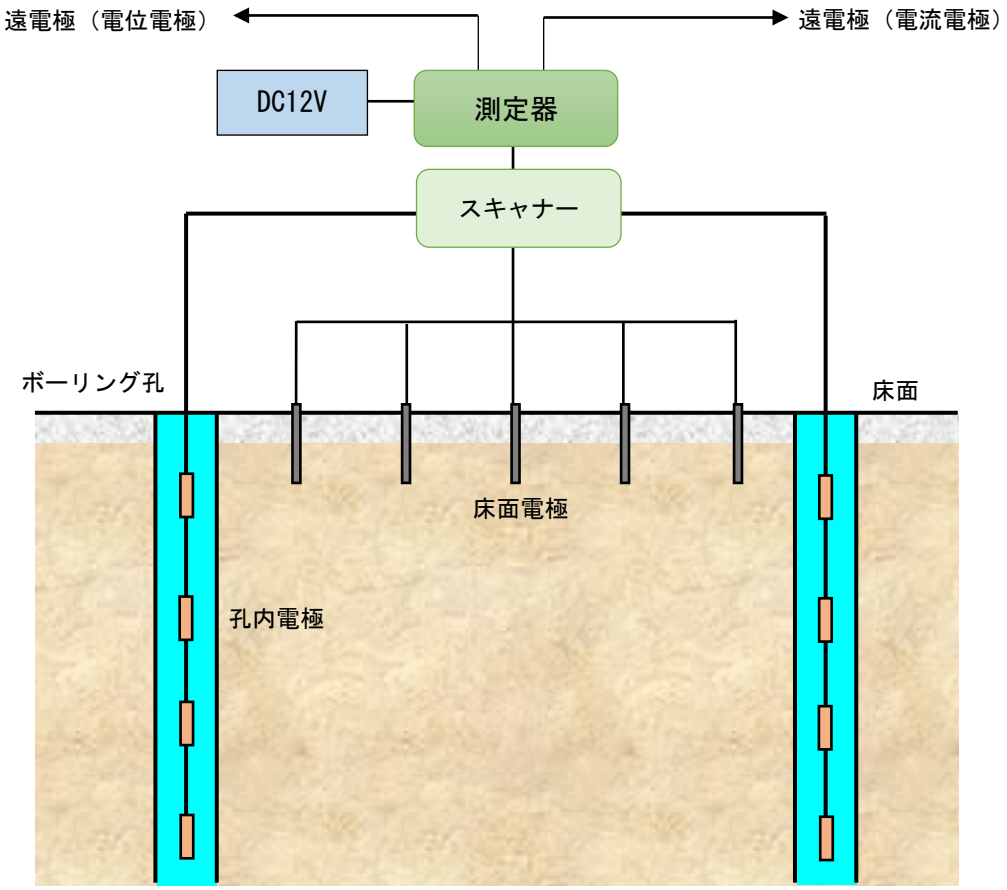


図 3.3-35　比抵抗トモグラフィの測定概念図

【解析方法】

解析には FEM（有限要素法）による逆解析プログラムを用いた。初期モデルには見掛比抵抗値の平均値を用いた一葉構造とし、有限要素法によって計算される理論値と測定値の残差が小さくなるようにモデルの修正を繰り返した。比抵抗の解析概要を図 3.3-36 に示す。

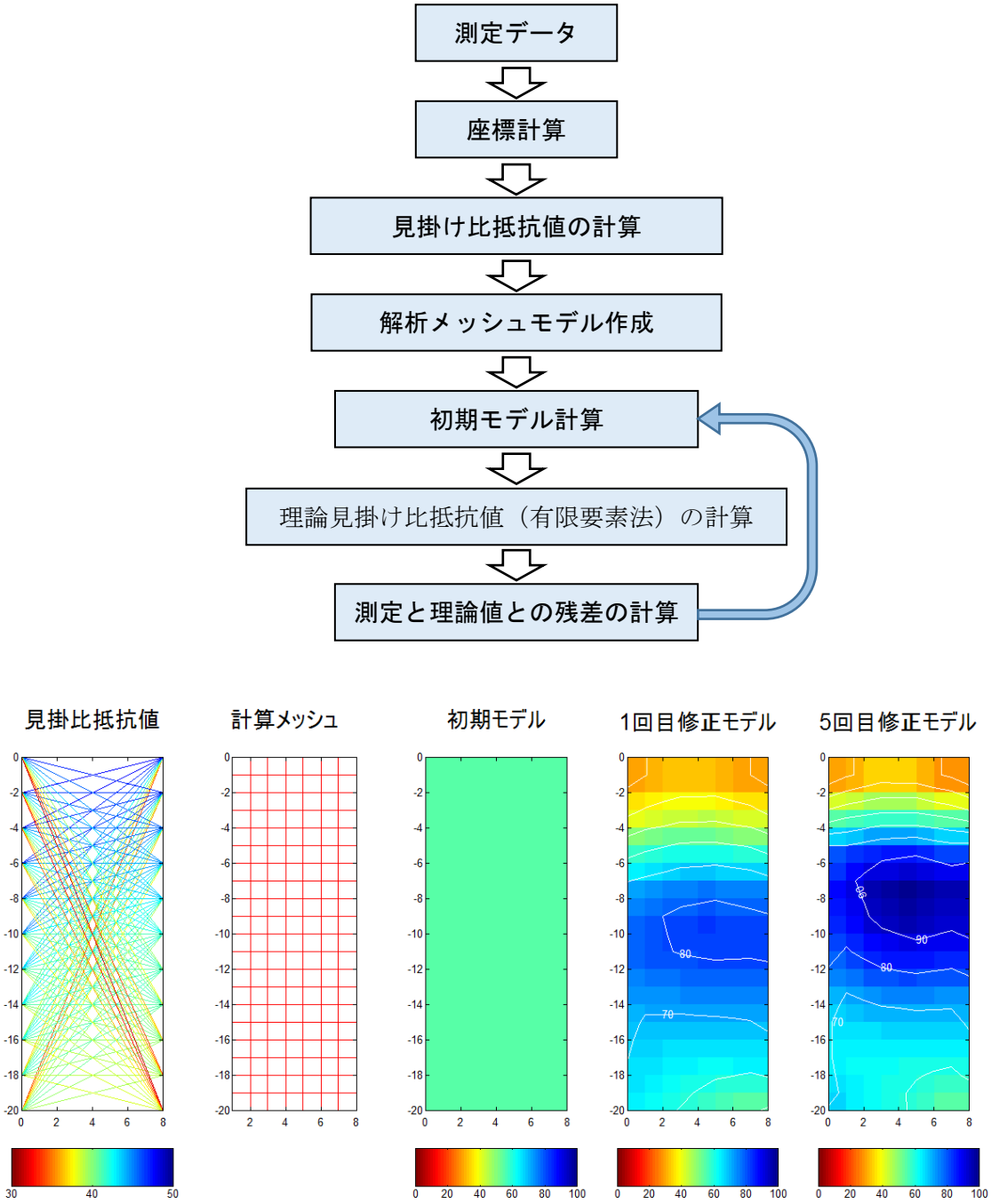


図 3.3-36　比抵抗の解析概要図

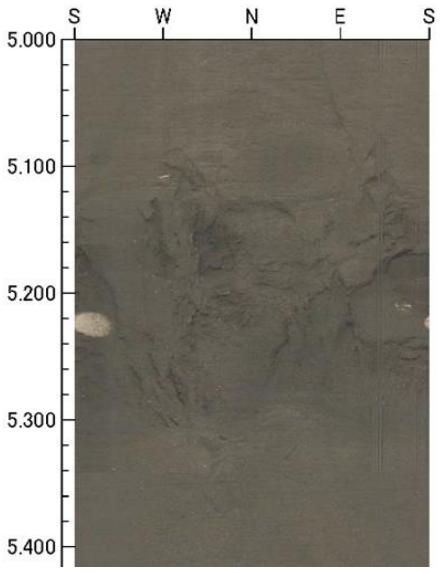
3.3.2.2　原位置調査の結果

(1)　コア観察と BTV

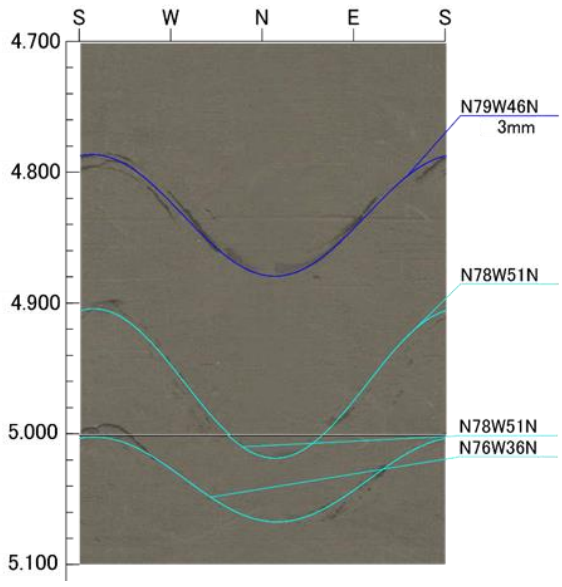
ボーリング 3 孔の孔壁のき裂や損傷状態を確認するため、ボアホールテレビカメラ（BTV）と孔径検層を実施した。BTV およびコア観察によるき裂位置の一覧を表 3.3-9 に示し、代表的なコアの画像を図 3.3-37 に示す。また、BTV 観察によるき裂の走行傾斜の情報を基に作成したき裂の 3D モデルを図 3.3-38 に示し、孔径検層結果と BTV のき裂位置を図 3.3-39 に合わせて示す。

表 3.3-9　き裂位置の一覧表

孔 No.	層面すべり予想深度	コア観察結果	BTV 観察結果
	(mabh)	(mabh)	(mabh) -（走行傾斜）
T-1	5.68	①4.17～4.23 ②5.05～5.35 ③6.00～6.07	①4.13 （N89E61N, ヘアークラック） ②5.10～5.30 区間（読取不可） ③7.75（N89W40S, ヘアークラック）
T-2	4.70	①4.30～4.35 ②6.28～6.34	①3.10（N35W35SW, ヘアークラック） ②3.57（N58W70SW, ヘアークラック） ③3.70（N24W61W, ヘアークラック） ④5.99（N16W38W, ヘアークラック）
T-3	6.90	①4.84～5.17 ②6.34～6.62 ③7.43～7.55	①4.84（N79W46N, 開口幅 3 mm） ②4.96（N78W51N, ヘアークラック） ③5.03（N76W36N, ヘアークラック） ④7.38（N85W63N, ヘアークラック）



T-1 孔②の BTV 画像



T-3 孔①, ②の BTV 画像

図 3.3-37　BTV によるコア画像

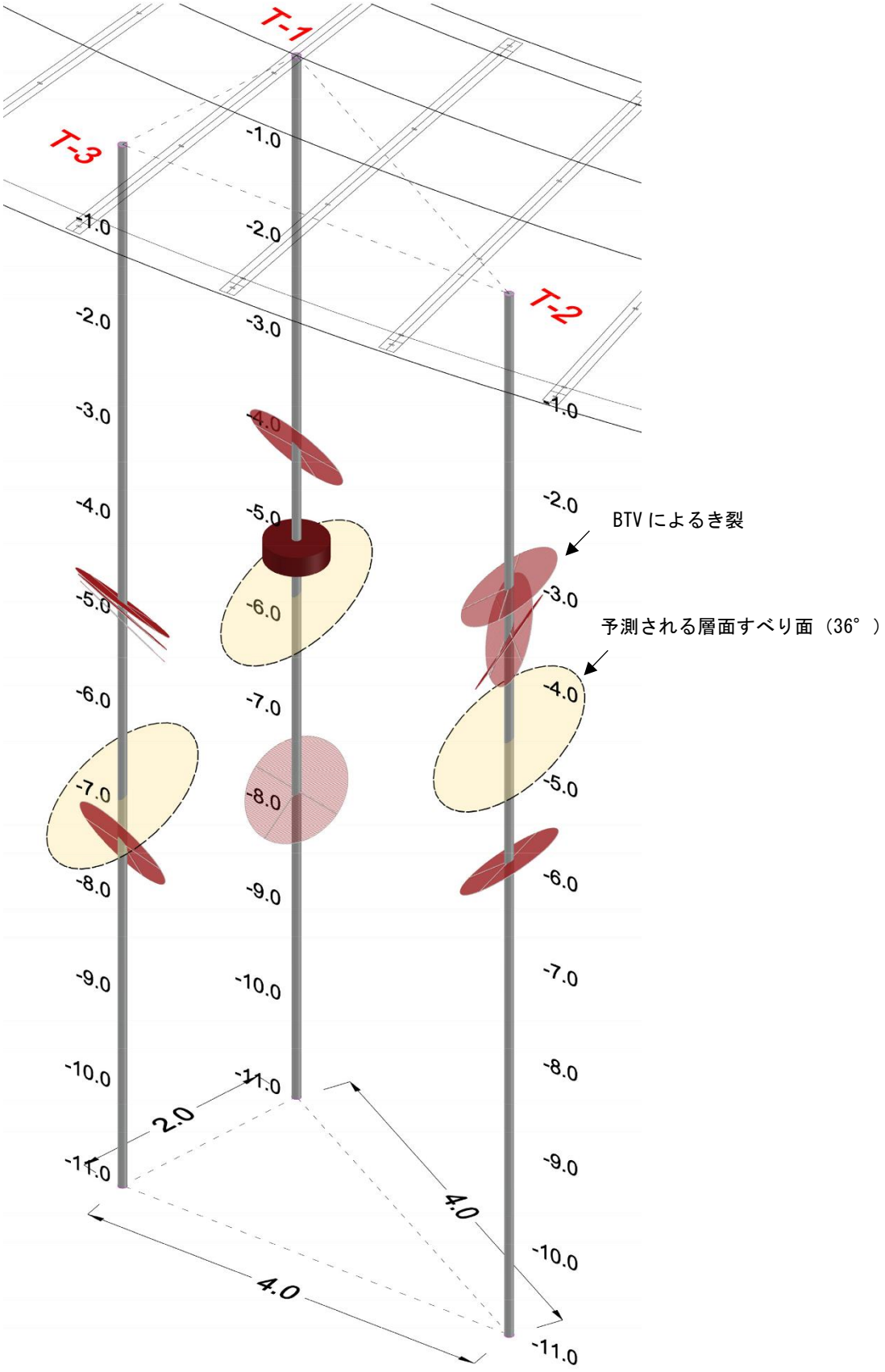


図 3.3-38　き裂の 3D モデル

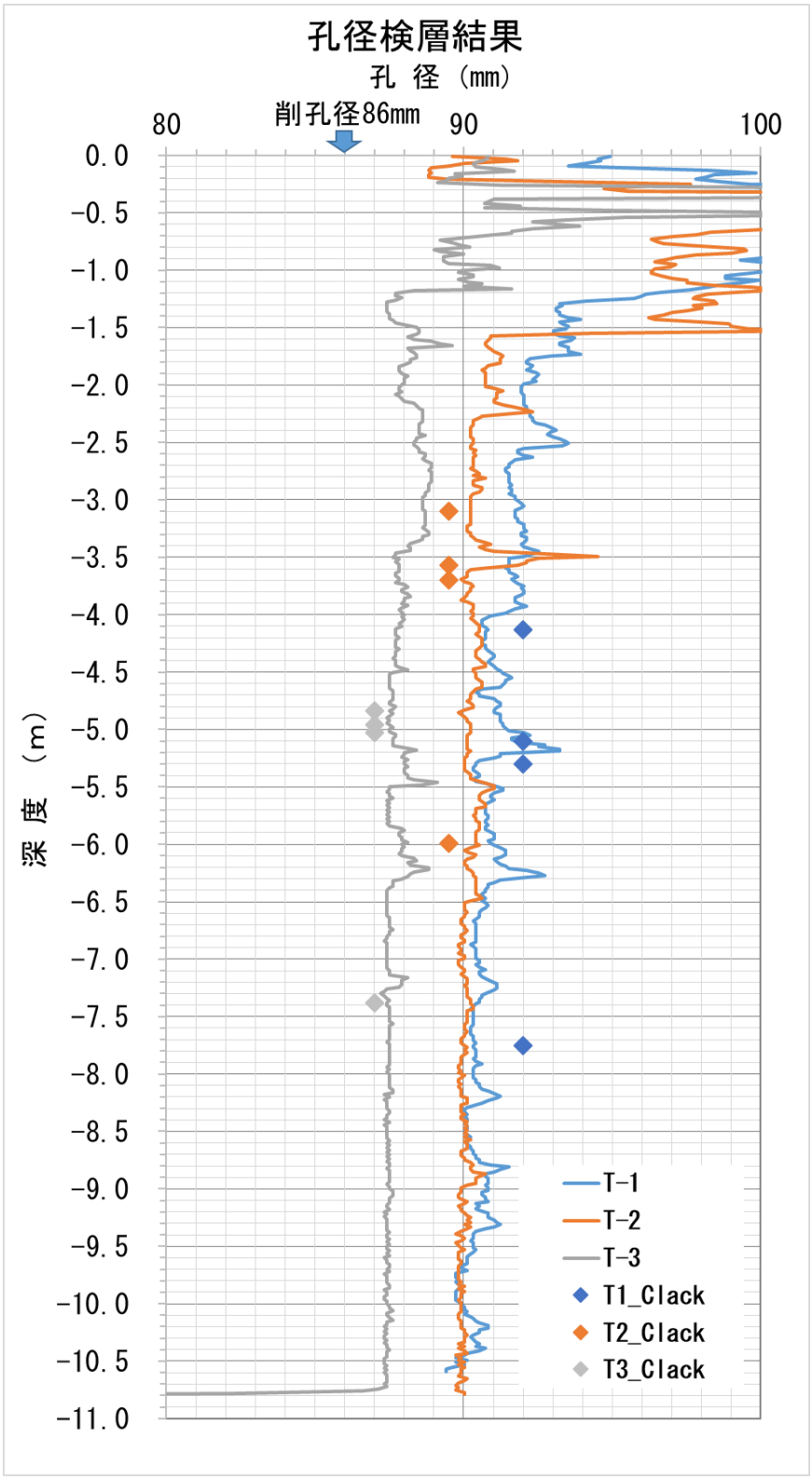


図 3.3-39　孔径検層結果とき裂位置

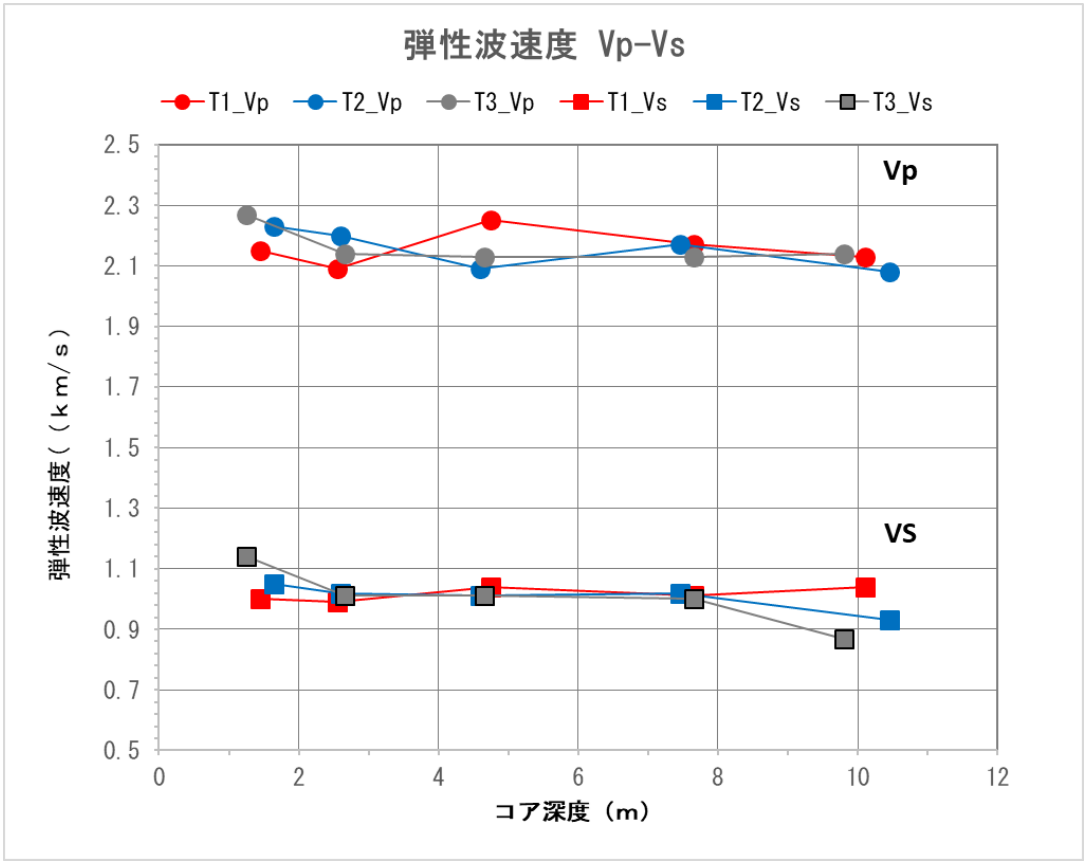
(2)　室内試験

ボーリングコアで実施した密度試験、超音波速度測定、比抵抗測定の結果をとりまとめて表 3.3-10 の試験結果一覧表に示し、ボーリング孔におけるコアの弾性波速度と比抵抗をグラフにして図 3.3-40 に示す。

表 3.3-10　室内試験結果の一覧表

試料番号	採取深度	湿潤状態(自然状態)				飽和状態（浸水脱気）			
		試験日		2021/2/2		試験日		2021/2/4	
	G.L.-m	密度 ρt	比抵抗 ρ	Vp	Vs	密度	比抵抗 ρ	Vp	Vs
		g/cm3	Ω･m	km/s	km/s	g/cm3	Ω･m	km/s	km/s
T1-C1	1.40～1.50	1.79	5.64	2.15	0.99	1.79	5.32	2.15	1
T1-C2	2.50～2.60	1.83	5.14	2.09	0.99	1.83	5.11	2.09	0.99
T1-C3	4.70～4.80	1.80	6.15	2.27	1.01	1.80	5.67	2.25	1.04
T1-C4	7.60～7.70	1.82	5.35	2.18	1.02	1.82	5.12	2.17	1.01
T1-C5	10.05～10.15	1.82	6.43	2.14	1.01	1.82	5.61	2.13	1.04
T2-C1	1.60～1.70	1.82	8.24	2.23	1.08	1.82	5.90	2.23	1.05
T2-C2	2.55～2.65	1.83	6.21	2.2	1.04	1.83	5.58	2.2	1.02
T2-C3	4.65～4.75	1.85	5.31	2.1	1.02	1.85	5.19	2.09	1.01
T2-C4	7.40～7.50	1.83	5.66	2.16	1.02	1.83	5.61	2.17	1.02
T2-C5	10.40～10.50	1.76	6.13	2.09	0.94	1.76	5.16	2.08	0.93
T3-C1	1.20～1.30	1.77	5.40	2.29	1.14	1.77	5.65	2.27	1.14
T3-C2	2.60～2.70	1.80	4.89	2.15	1.01	1.80	5.29	2.14	1.01
T3-C3	4.60～4.70	1.81	6.28	2.13	1.02	1.81	5.66	2.13	1.01
T3-C4	7.60～7.70	1.81	7.33	2.13	1.02	1.81	5.28	2.13	1
T3-C5	9.75～9.85	1.84	6.08	2.16	0.87	1.84	5.65	2.14	0.87

※岩石試料の比抵抗測定方法は、（千葉ほか，1993）を参考に測定を実施した。



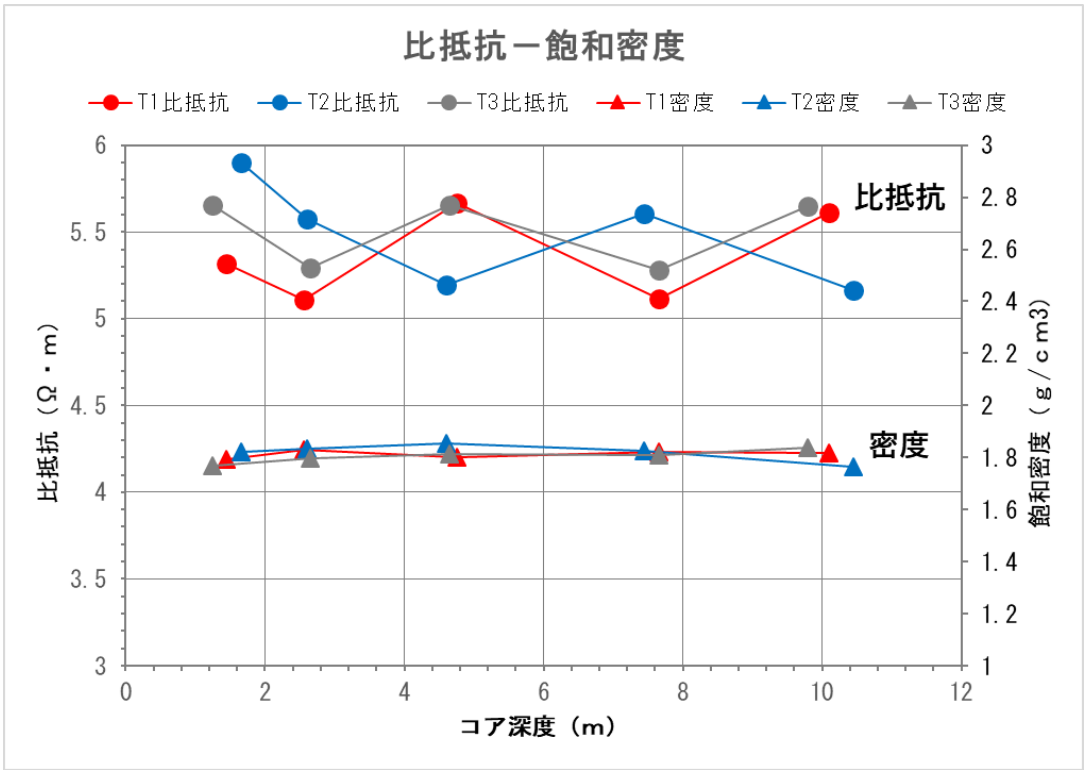


図 3.3-40　岩石コアの弾性波速度と比抵抗グラフ

(3)　弾性波トモグラフィ調査

弾性波トモグラフィ調査（P 波）の 3 次元解析結果から、速度の分布範囲をコンターで表現した。ボーリング孔間の P 波速度の分布断面を図 3.3-41 に示し、各断面を合わせた 3D モデルを図 3.3-42 に示す。また、調査範囲を深度 3.5m まで 0.5m 間隔にスライスした断面を図 3.3-43 に示し、3D モデルを図 3.3-44 に示す。

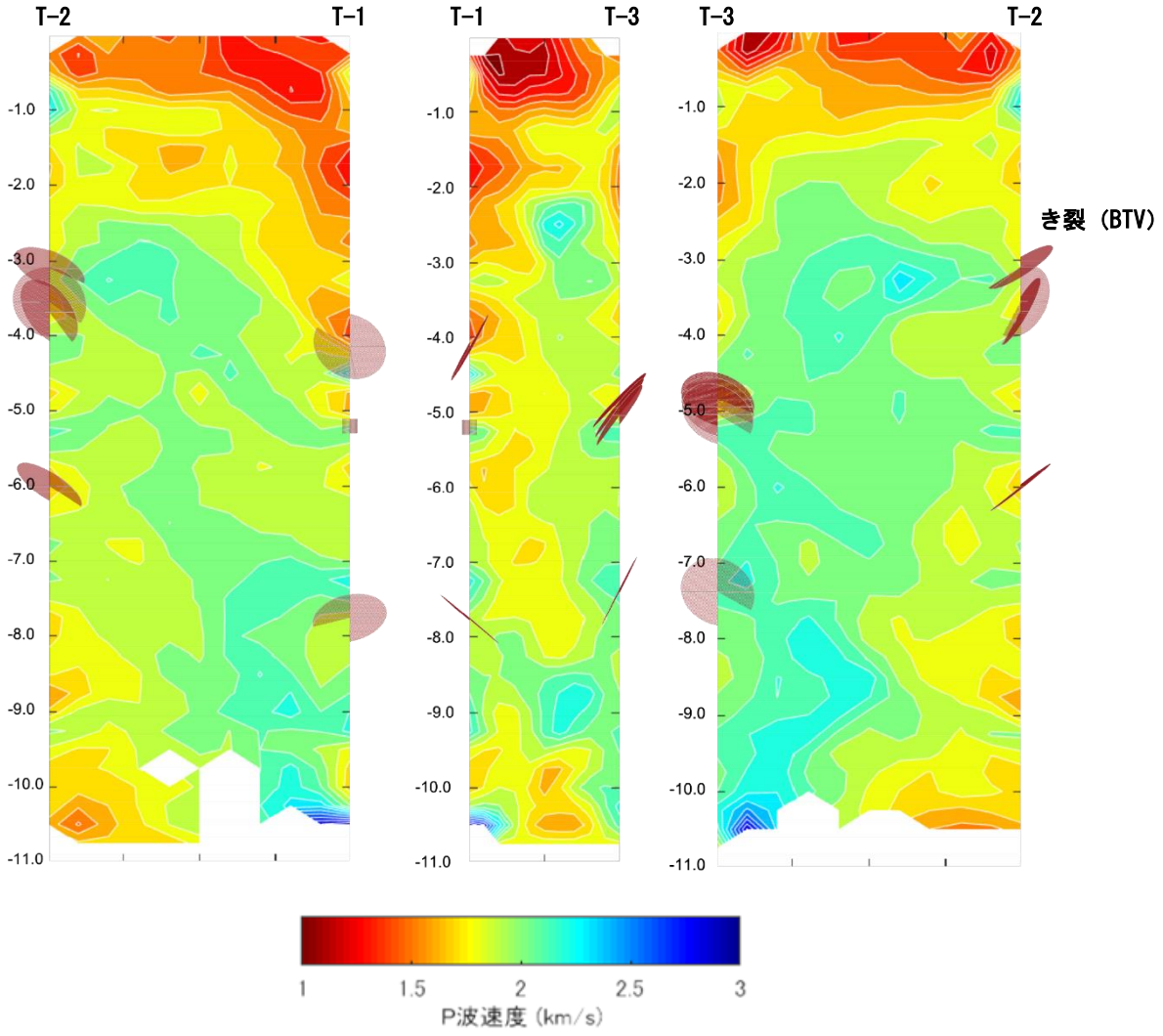


図 3.3-41　P 波速度の分布断面
(坑道床面から深度 1m付近の低速度部分は EdZ 部分に対応する)

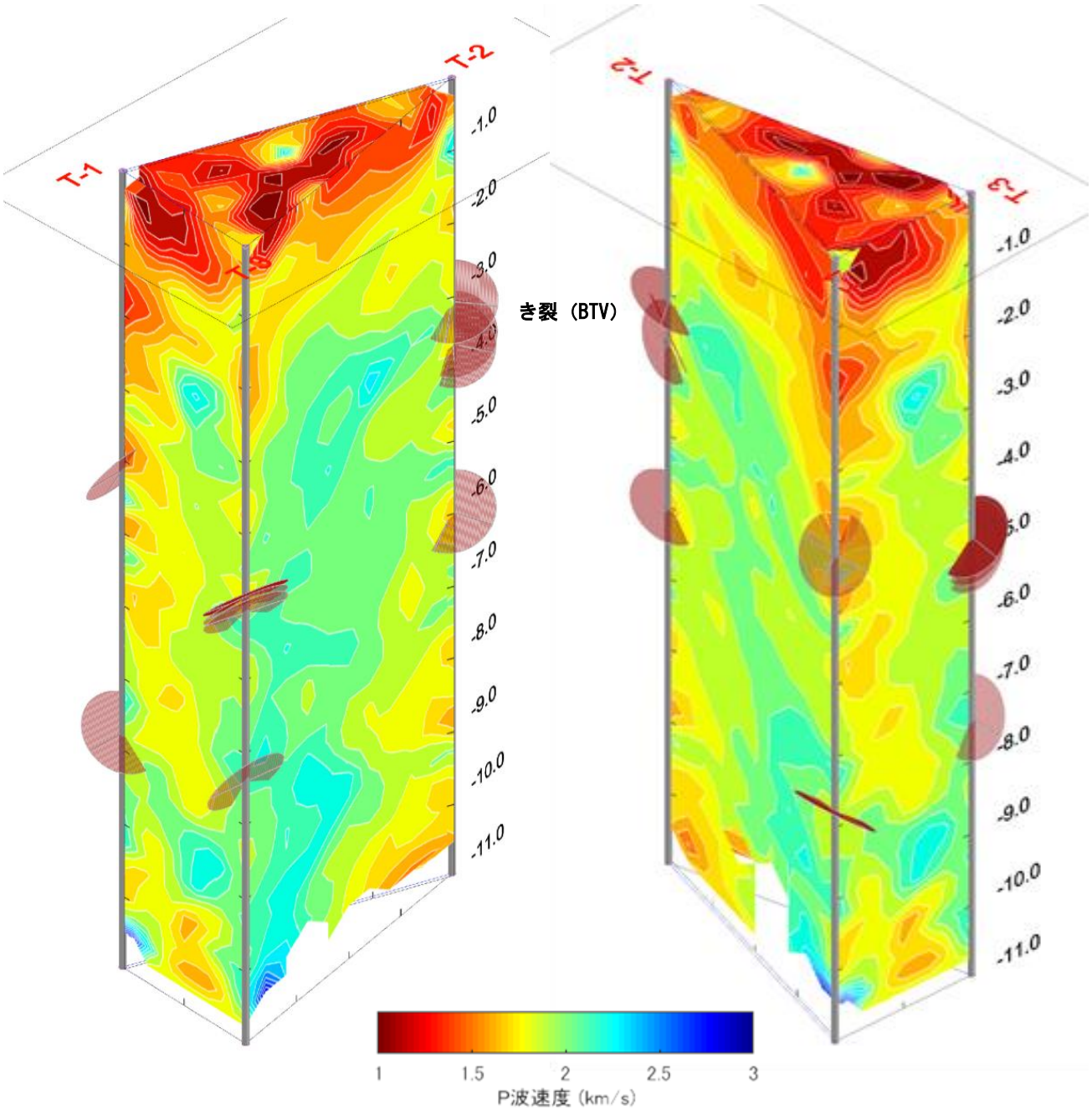


図 3.3-42　P 波速度の 3D 分布モデル
(P・S 波の坑道床面から深度 1m付近の低速度部分は EdZ 部分に対応する)

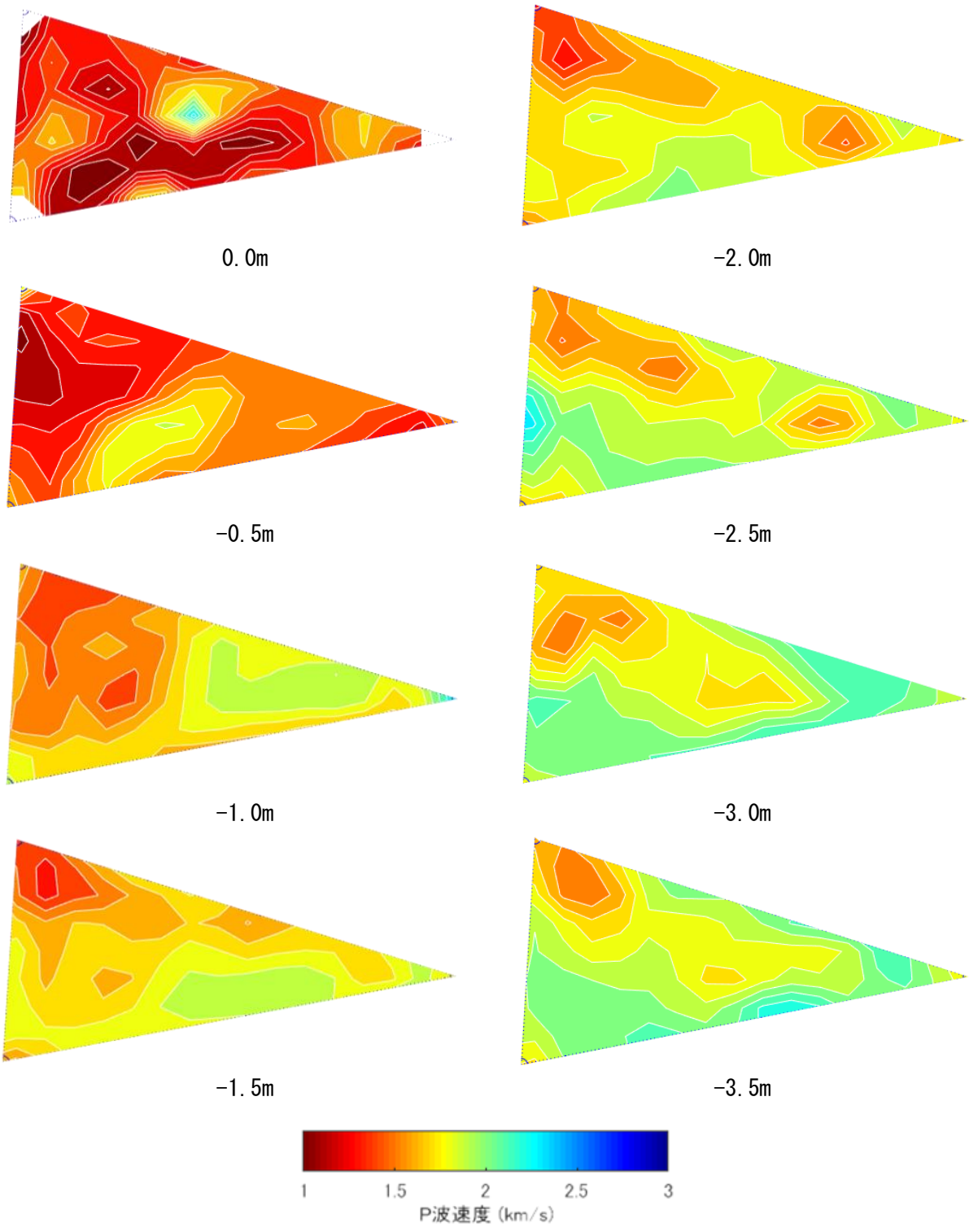


図 3.3-43　P 波速度の深度スライス断面

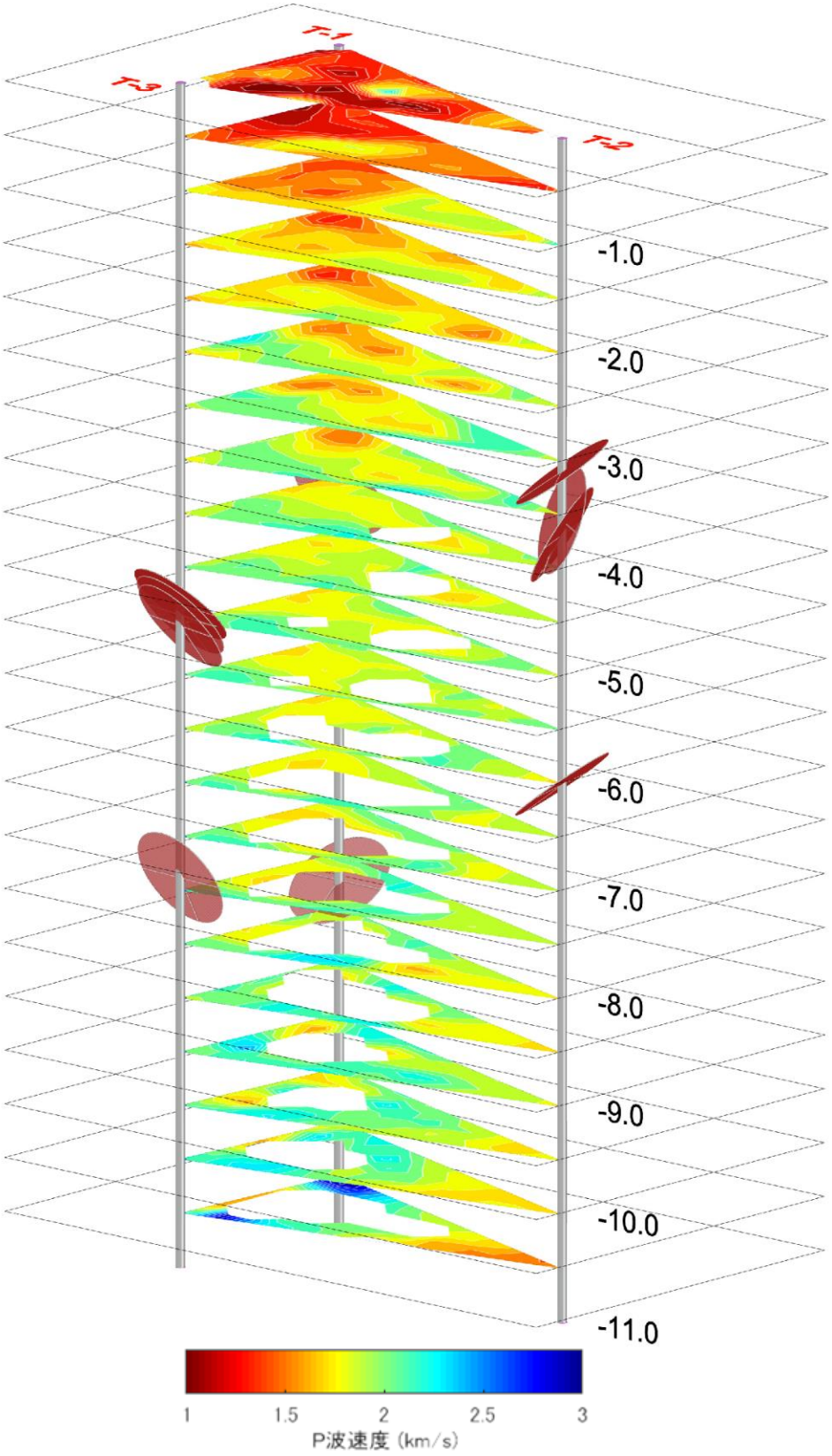


図 3.3-44　P 波速度の 3D 深度分布モデル

弾性波トモグラフィ調査（S 波）の 3 次元解析結果から、速度の分布範囲をコンターで表現した。ボーリング孔間の S 波速度の分布断面を図 3.3-45 に示し、各断面を合わせた 3D モデルを図 3.3-46 に示す。また、調査範囲を深度 3.5m まで 0.5m 間隔にスライスした断面を図 3.3-47 に示し、3D モデルを図 3.3-48 に示す。

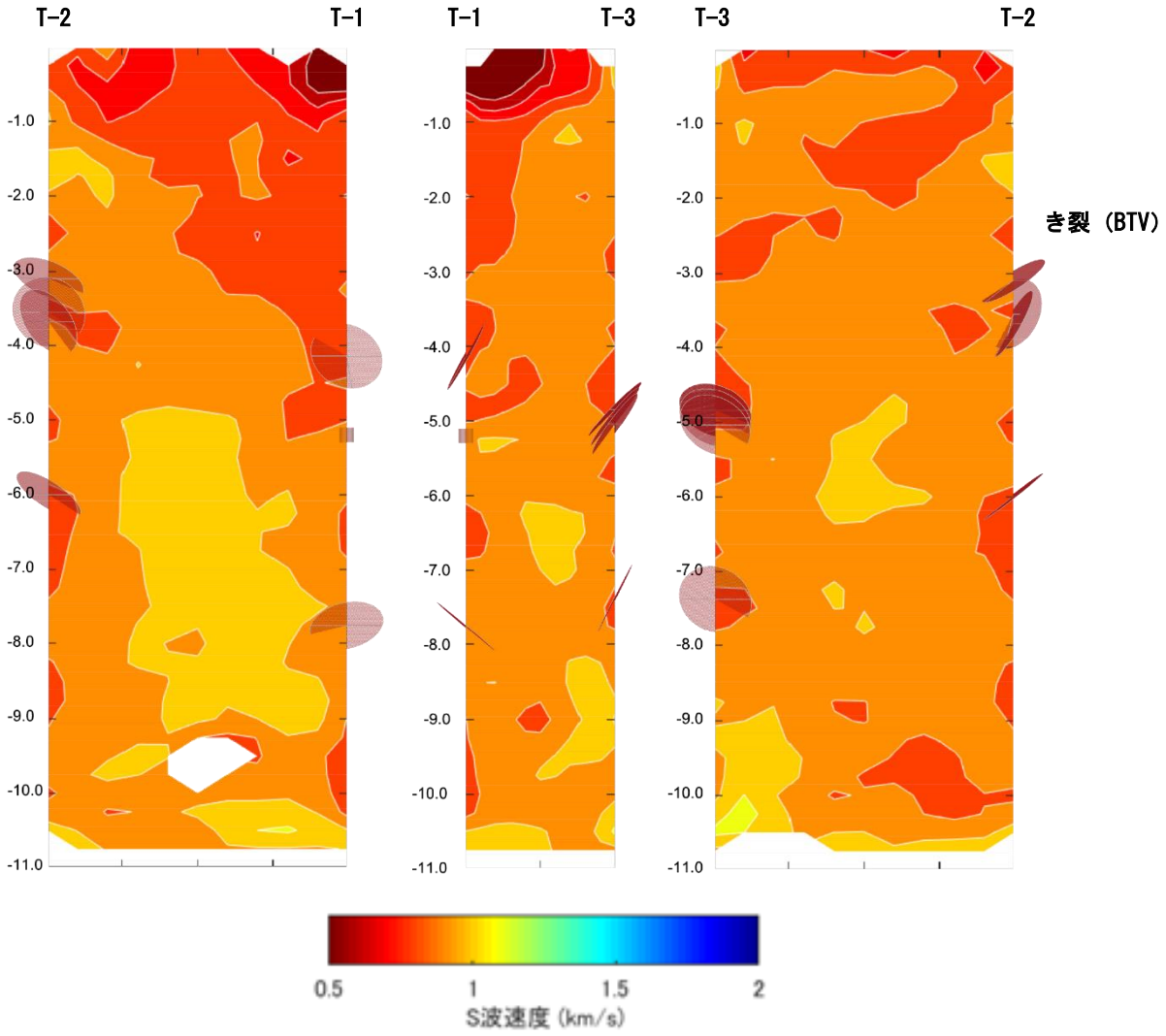


図 3.3-45　S 波速度の分布断面

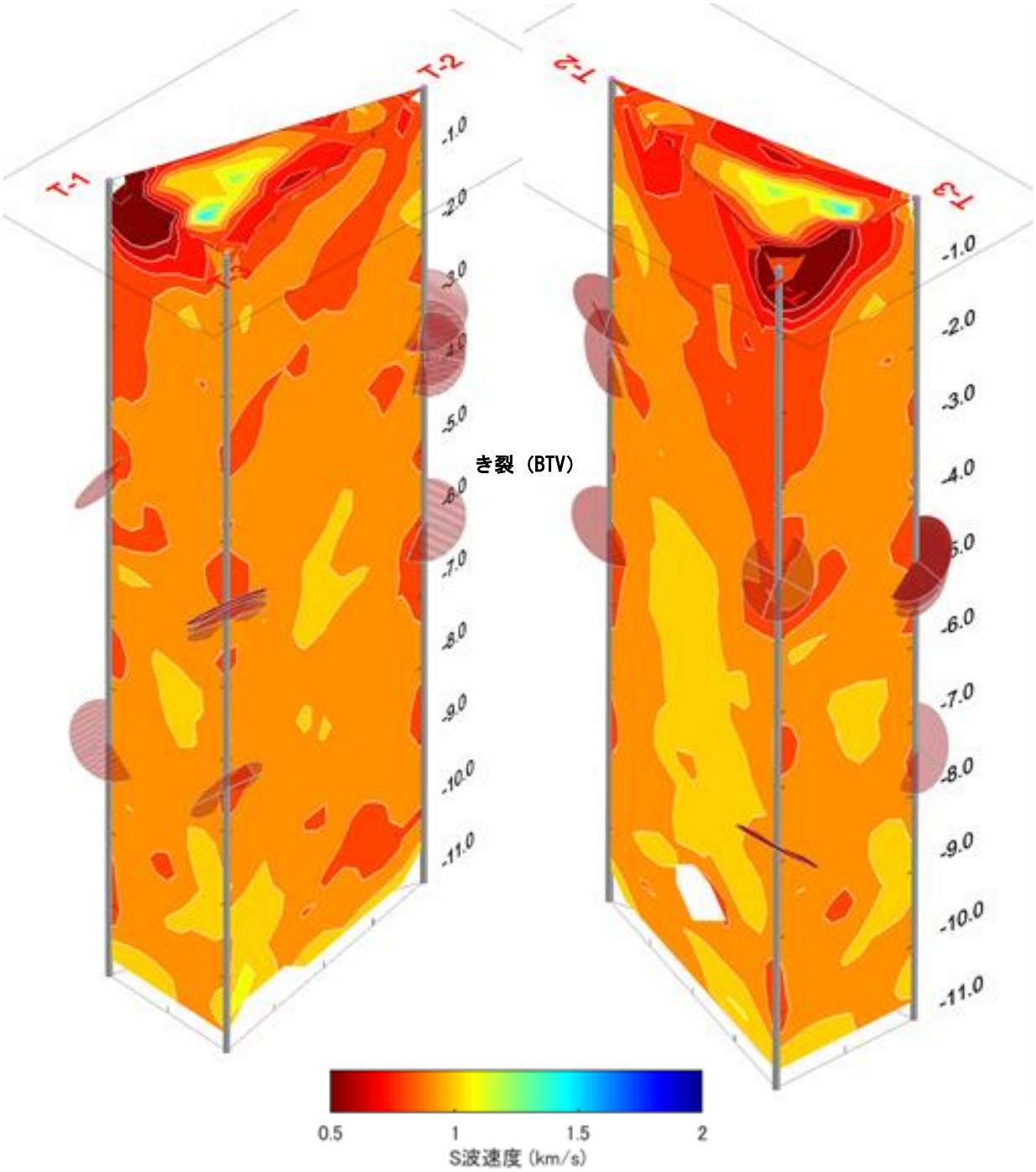


図 3.3-46　S 波速度の 3D 分布モデル
(坑道床面から深度 1m付近の低速度部分は EdZ 部分に対応する)

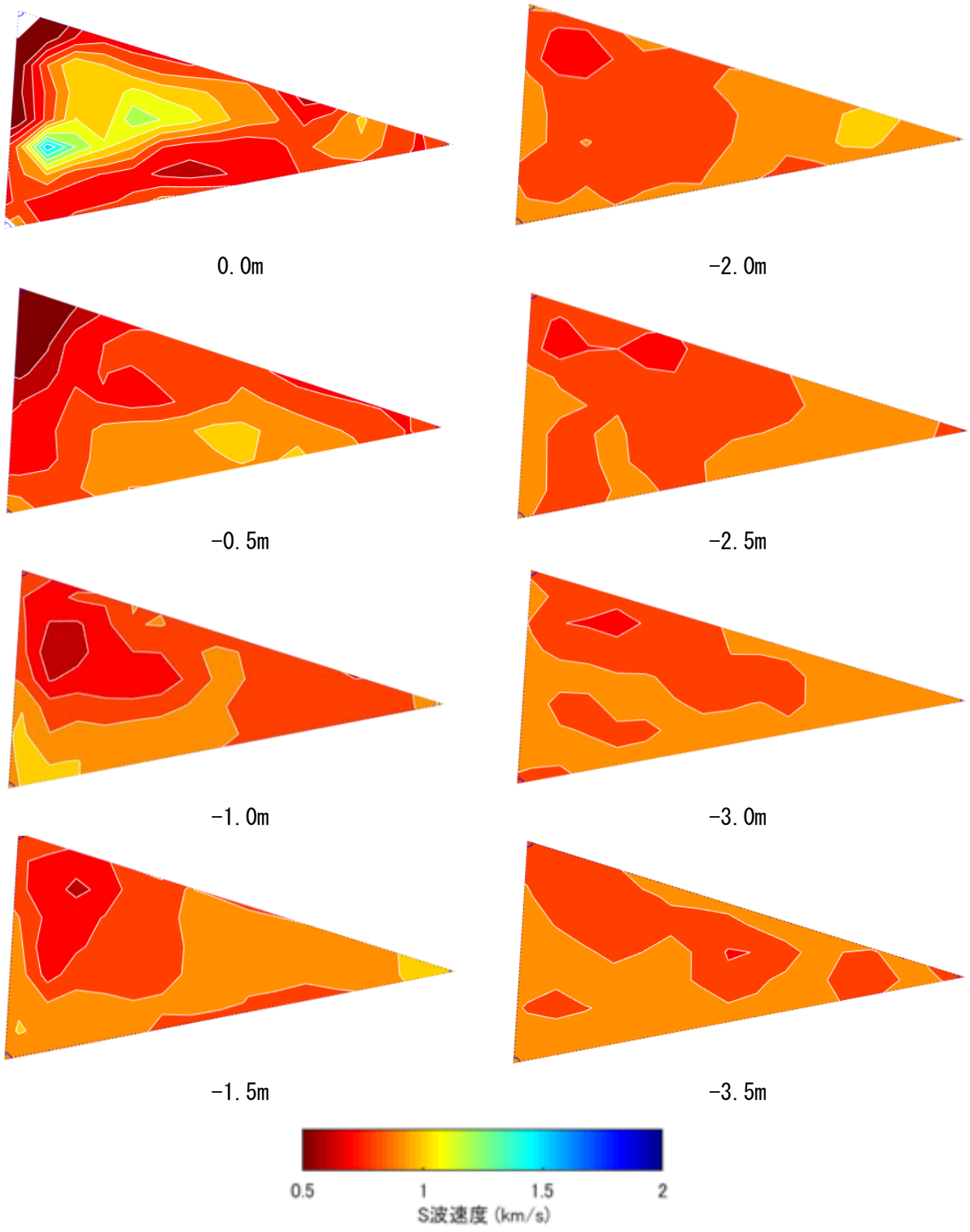


図 3.3-47　S 波速度の深度スライス断面

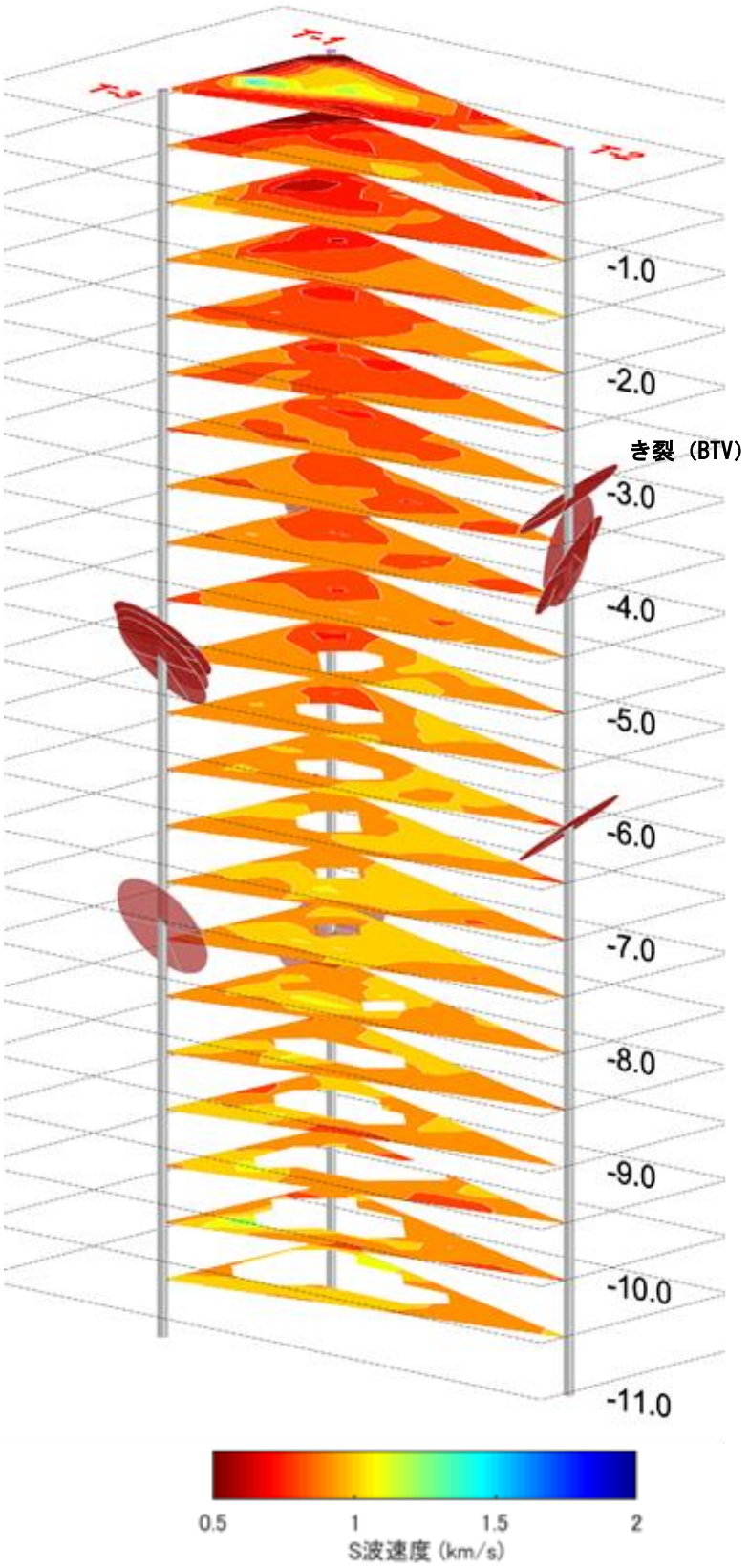


図 3.3-48　S 波速度の 3D 深度分布モデル
（坑道床面から深度 1m付近の低速度部分は EdZ 部分に対応する）

ボーリング孔の弾性波速度を 3D 解析結果より抽出し、き裂の位置と合わせてグラフにして図 3.3-49 に示す。き裂の位置と弾性波速度の低下範囲は調和的である。

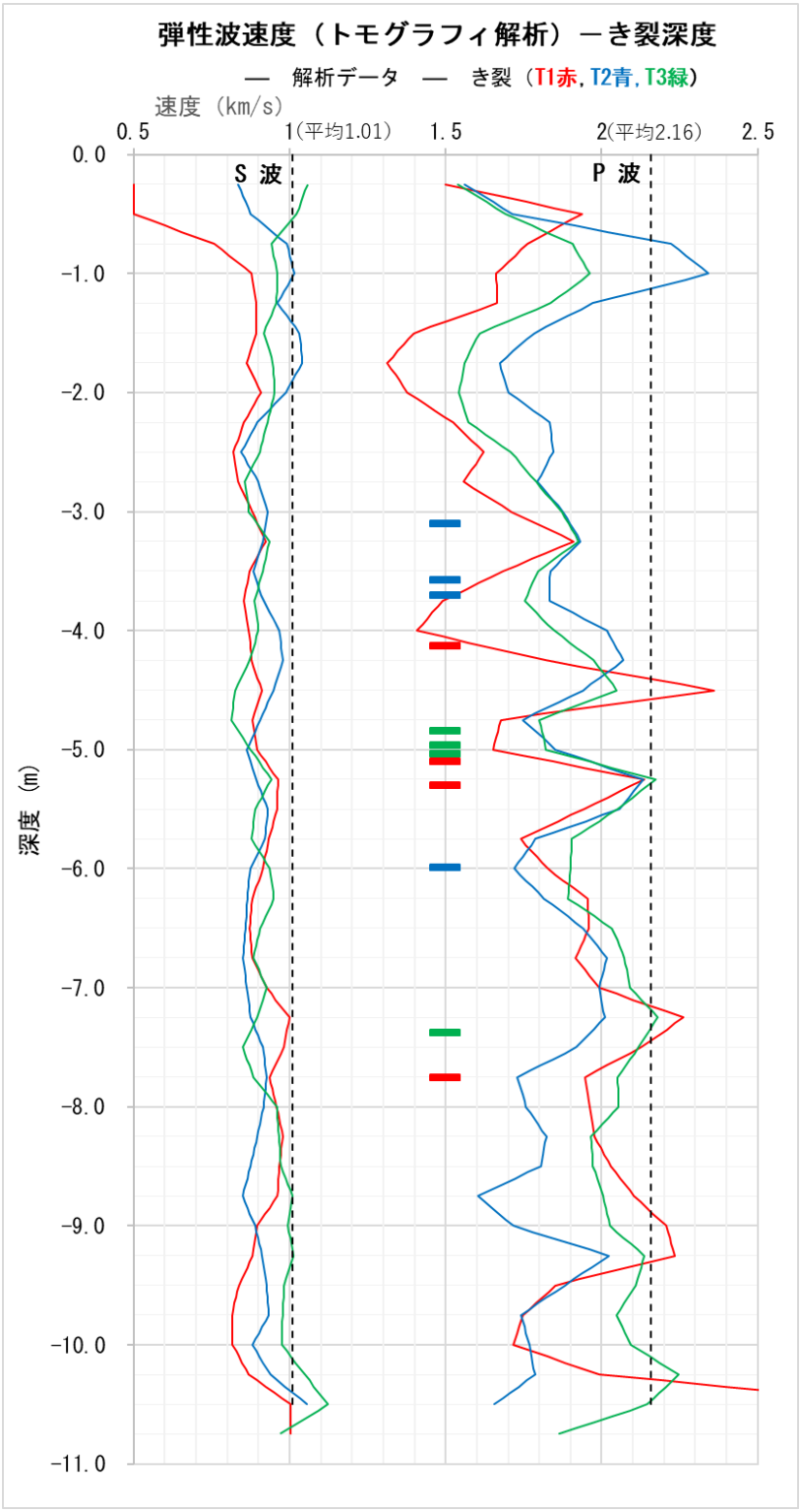


図 3.3-49　ボーリング孔の弾性波速度とき裂位置

(4)　比抵抗トモグラフィ

比抵抗トモグラフィ調査の 2 次元解析結果から、速度の分布範囲をコンターで表現した。ボーリング孔間の比抵抗の分布断面を図 3.3-50 に示し、各断面を合わせた 3D モデルを図 3.3-51 に示す。また、ボーリング孔内水および調査で使用した工事用水と地下水の電気電導度を測定し表 3.3-11 に示す。なお、ボーリング孔間の 2D 解析（クロスホール）を実施しているために、各孔間の断面で比抵抗のコンターは繋がらない。

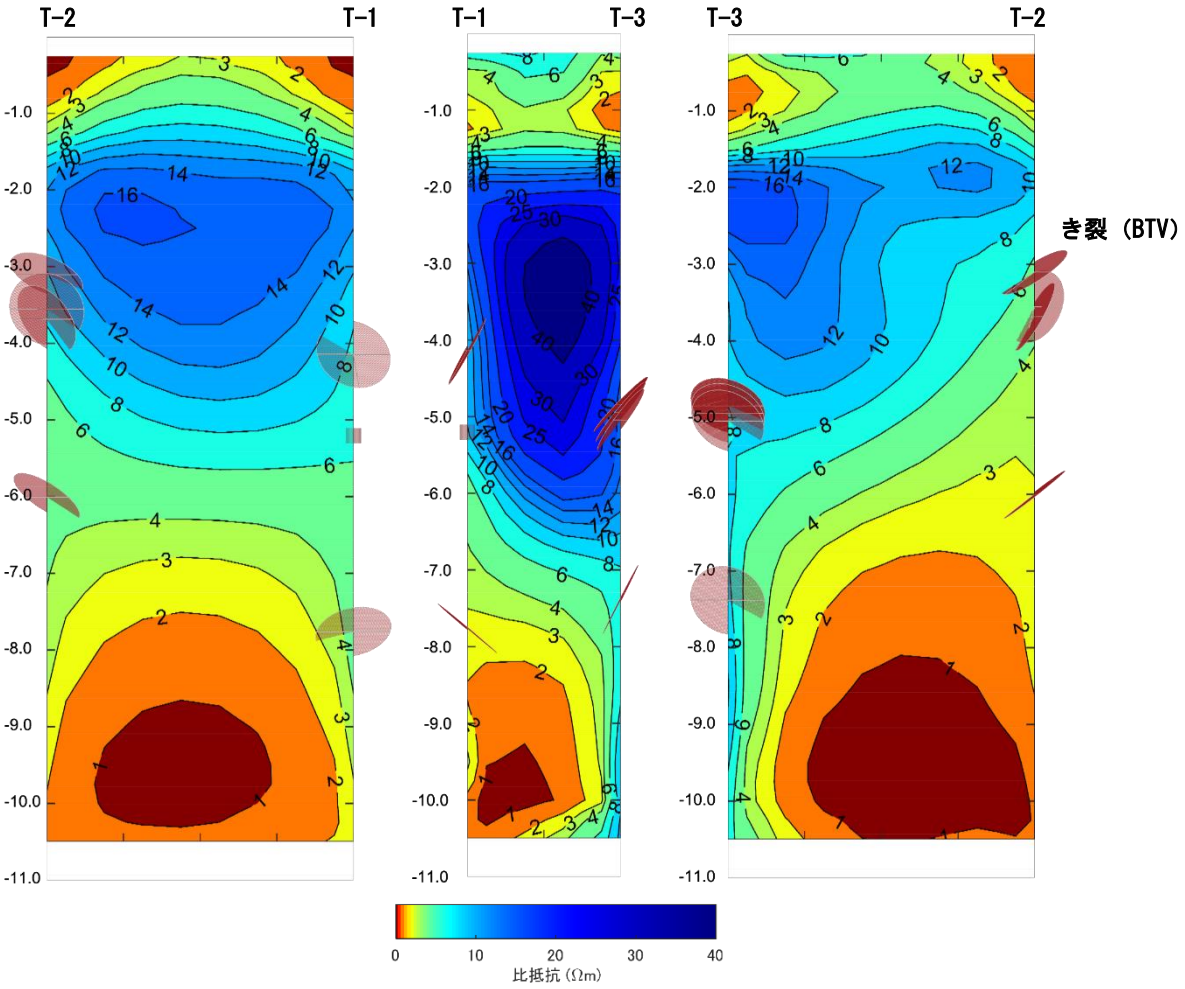


図 3.3-50　比抵抗の分布断面

表 3.3-11　電気伝導度一覧表

測定水	電気伝導率 (S/m)	比抵抗 (Ω・m)	備考
ボーリング孔	1.3	0.8	孔の平均値
地下水	1.5	0.7	350m 水平坑道
工事用水	0.014－0.022	70－45	調査で使用

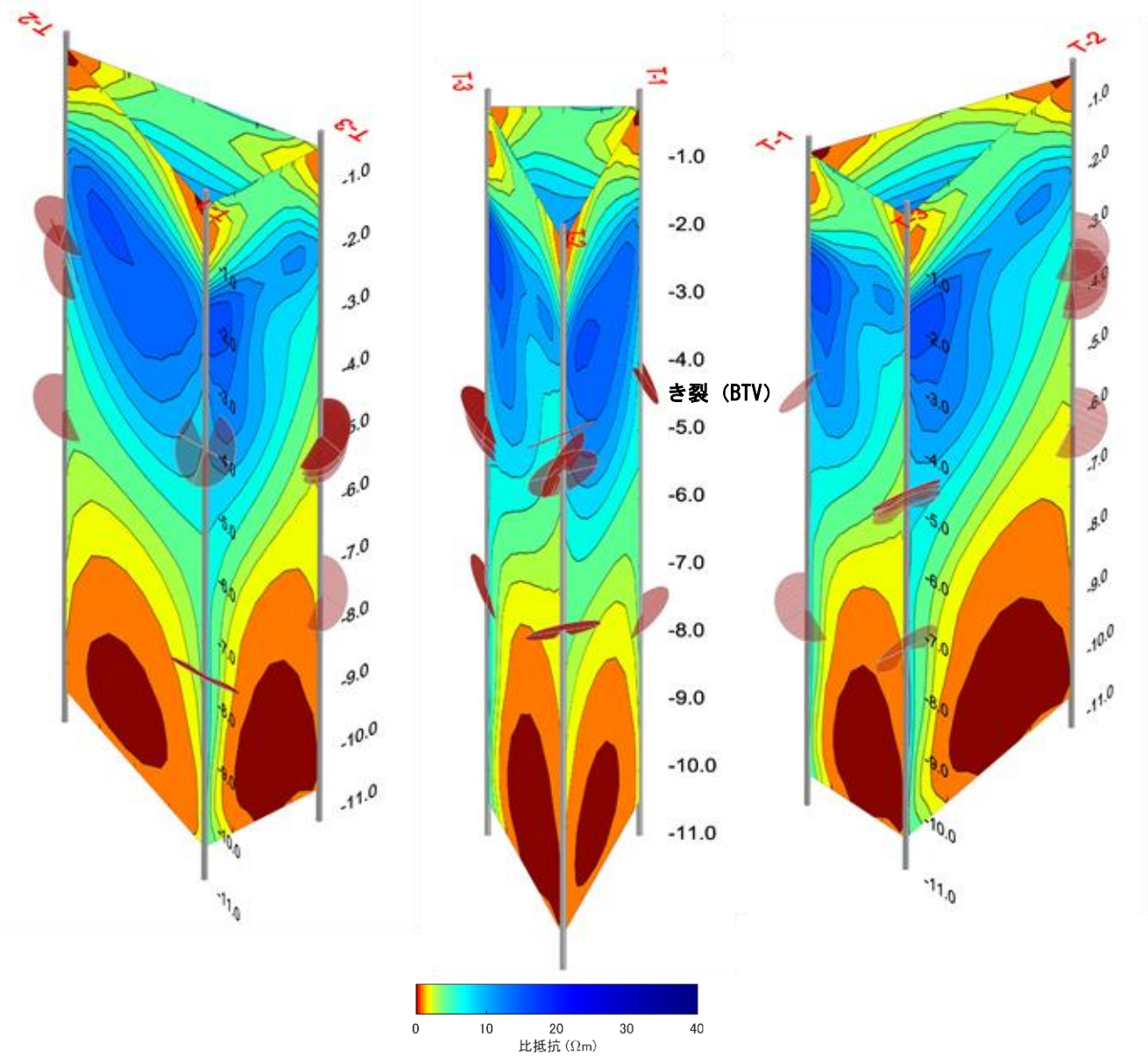


図 3.3-51　比抵抗の 3D 分布モデル

(5)　透水試験結果（本受託事業外の試験）

T-2 孔を発信孔、T-1 および T-3 孔を受信孔として、定流量注水による孔間透水試験を実施した。注水流量はパターン①40mL/min、パターン②10mL/min の 2 パターンで試験を実施した。

解析の結果、パターン①において透水係数は 5.20×10^{-10} (m/s)、比貯留係数は 7.84×10^{-6}(1/m)となった。パターン②において透水係数は 1.42×10^{-10} (m/s)、比貯留係数は 6.13×10^{-6} (1/m)と

※孔径検層および BTV の結果から、路盤直下～GL-1.5m の範囲は孔壁崩壊による孔壁の凹凸が激しく、予定していた EDZ 区間にパッカーを設置することは困難でであった。

ボーリング孔の透水試験区間を表 3.3-12 に示し、試験のイメージを図 3.3-52 に示す。

表 3.3-12　透水試験区間一覧表

試験孔	区間	上端	下端	区間長	備考
		G.L.-m	G.L.-m	m	
T-1	P2	3.00	6.45	3.45	受信区間
	P1	6.75	11.00	4.25	
T-2	P2	3.00	6.42	3.45	注水区間
	P1	6.75	11.00	4.25	受信区間
T-3	P2	4.40	7.85	3.45	受信区間
	P1	8.15	11.00	2.75	

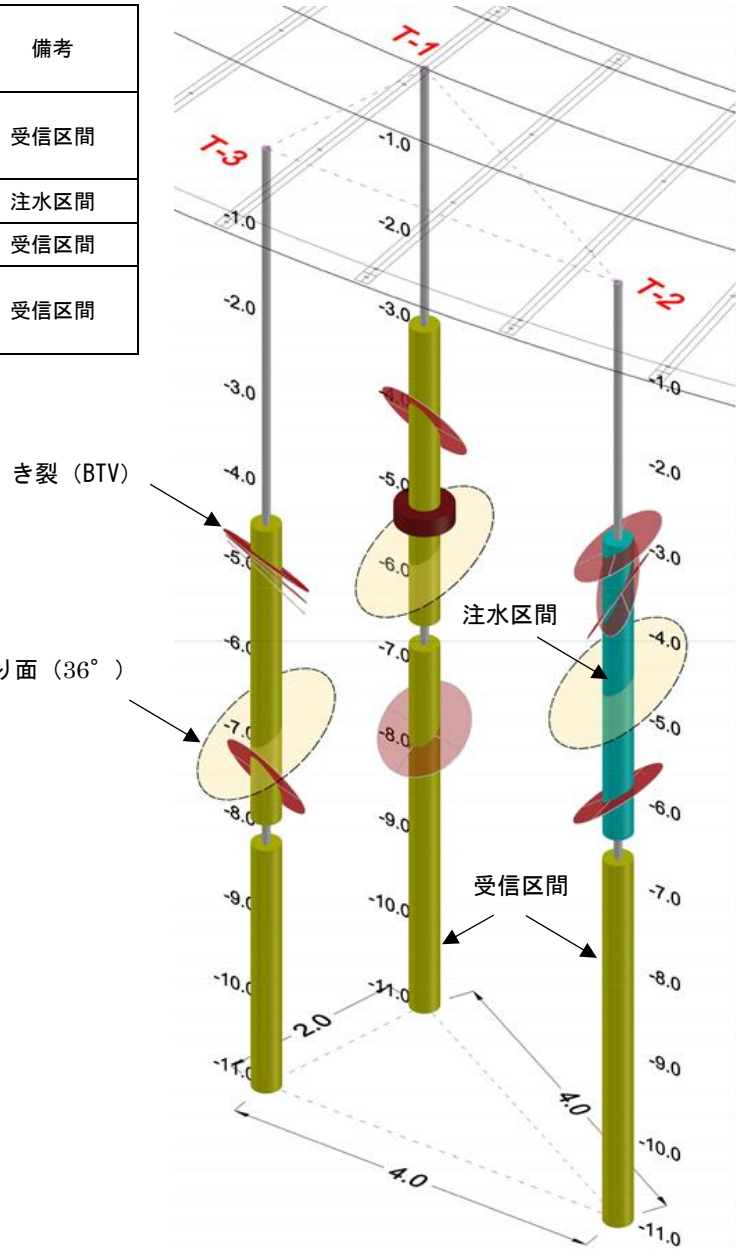
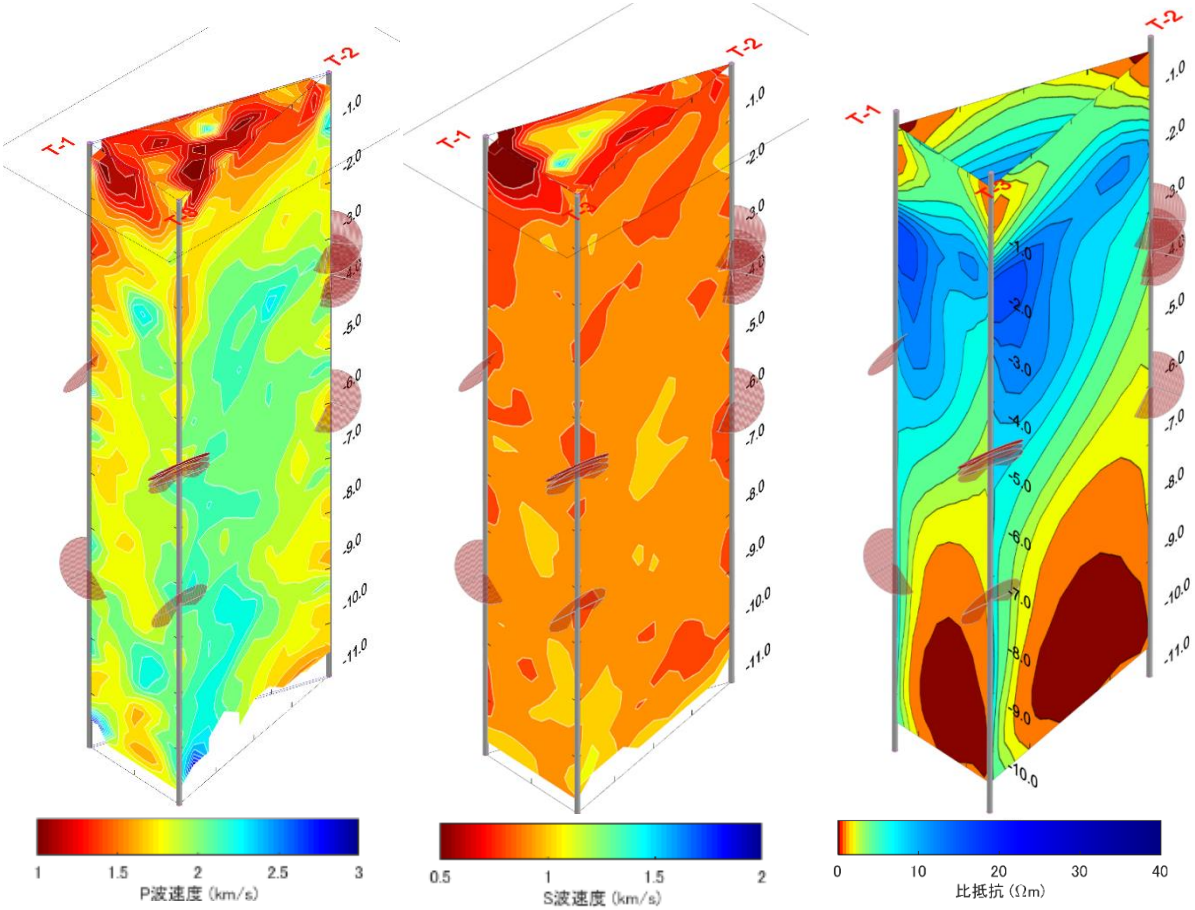


図 3.3-52　透水試験の 3D イメージ

3.3.2.3　まとめと課題

水理・物理特性調査を同一の調査範囲で実施する実験サイトを構築し、EDZ の範囲や損傷状態、性状を空間的に評価する技術の高度化を図ることを目的に、地下施設の深度 350m 調査坑道で原位置調査を実施した。調査は、坑道の床盤下の環境特性や物理特性を把握するためにボーリング 3 孔とコア観察および室内試験、BTV 観察、孔径検層等の原位置試験を実施するとともに、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィを実施した。

P 波および S 波の弾性波トモグラフィは、速度の空間分布を高分解能で可視化するために、三次元解析を 0.25m 間隔のメッシュで実施した。室内試験の結果から岩石マトリックス部自体は、深度方向に大きな物性変化は認められないが（図 3.3-40）、P 波および S 波ともに速度変化の領域を詳細に可視化できている。弾性波の低速度領域は、コアおよび BTV 観察によるき裂の位置とも調和的である。また、比抵抗トモグラフィの 2 次元解析結果と比較すると、高比抵抗部分が低速度領域の傾向と調和的である。図 3.3-53 に弾性波および比抵抗トモグラフィ結果の 3D モデルを示す。



P 波 3D モデル図　　S 波 3D モデル図　　比抵抗 3D モデル図

図 3.3-53　トモグラフィ結果

比抵抗トモグラフィ調査は、孔内水に電気伝導度の低い地下施設の工事用水（表 3.3-11）を使用した。一般的に岩石の比抵抗は、間隙水の比抵抗が低い場合や有効間隙率が高い場合は、主に間隙率とそこに含まれる水の比抵抗に依存することから、それらの影響による比抵抗分布を示し

ている。また、二次元解析であることから三次元解析を実施し検証する必要がある。

坑道床面下の EdZ の連続性については、三次元解析による速度変化を深度方向に 0.5m 間隔でスライスした断面を作成して可視化した（図 3.3-43，図 3.3-44，図 3.3-47，図 3.3-48）。

今後は、これらの速度変化を検証するため、岩石コアの採取や BTV 等の原位置試験を実施して妥当性を確認するとともに、トモグラフィ調査の測定（受発振・電極）間隔や計測機器の性能、解析メッシュや逆解析手法の最適化を図ることで、精度の高い EdZ 領域の連続性等の可視化が期待できる。実験サイトのボーリング孔で、孔壁の EdZ 部分の崩落が BTV や孔径検層により確認されたことから、EdZ 部分の損傷を伴わない追加ボーリング等も検討する。また、別途実施した透水試験により期待された層面すべり面の透水性（連続性）が確認できないことから、本調査を初期値として注入材による物性変化を測定するトモグラフィ調査は、高いコントラストで可視化するための注入材料や適用位置などを検討する。

参考文献

千葉昭彦，熊田政弘，岩石試料の比抵抗測定について，物理探査学会第 88 回学術講演会論文集，4，pp.221-226，1993.

Lehmann, B., Seismic Traveltime Tomography for Engineering and Exploration Applications, Vol 4, pp.434-446, 2015.

Lytle, R.J, Dines, K.A, Laine, E.F, Lager, D.L., Electromagnetic Cross-Borehole Survey of a Site Proposed for an Urban Transit Station, UCRL-52484, 1978.

Peterson, J. E, Paulson, B. N. P, McEvilly, T. V, Applications of Algebraic Reconstruction Techniques to Crosshole Seismic Data, Geophysics, v. 50, pp. 1566-1580. 1985.

3.3.3　EdZ の長期変遷に関する調査

EdZ（Excavation disturbed Zone：掘削影響領域）は、地下深部の岩盤を掘削する場合、掘削自体や応力集中により発生する物理的な損傷部分を意味しているが、その部分は透水性が母岩に比べ数オーダー高くなることから、坑道閉鎖後に物質の選択的移行経路となる可能性がある。このため坑道閉塞時に、例えばプラグ等を施工することにより EdZ を遮断し、坑道閉鎖後に移行経路となることを防ぐ等の対策が検討されている（原子力機構・原環センター，2020）。このプラグの設計では EdZ の厚さやその分布状況、さらには EdZ の経時変化を定量的に把握・評価する必要があると考えられるが、非破壊で効率的にそれを実施する調査手法は未だ確立されていない。

このため、原子力機構は、EdZ の経時変化を把握・評価するための技術開発として、自身が保有する幌延深地層研究所を利用し、既存の調査結果も用いて EdZ の経時変化の把握に対する物理探査手法の適用性評価の調査研究に着手した。本節では令和 2 年度に得られた成果について概説する。

3.3.3.1 実施概要

事業初年度として、幌延深地層研究所において既往の調査データがある深度 250m および 350m 坑道を事例として、EdZ の経時変化を把握するための調査技術の適用性評価に着手した。

具体的には、EdZ の経時変化を対象とした物理探査データの蓄積を目的として、深度 250m で弾性波トモグラフィ調査を、深度 350m 試験坑道 2 および 4 で弾性波および比抵抗トモグラフィを実施した。深度 250m では 2011 年の坑道掘削時から、また深度 350m では 2013 年の坑道掘削時から繰り返し物理探査が行われており、これらのデータに追加して、これまで実施されてきた手法と同じ手法の物理探査を同じ場所で適用することにより、EdZ の経時変化を把握する上で必要なデータを取得できるため、本年度実施した調査の結果を過去の調査結果の調査結果の一部と併せて示し、結果の簡単な解釈を以降に述べる。

また、EdZ の経時変化を捉えるためにはその変化の特徴や変化の大きさをあらかじめ把握しておく必要がある。このため、順計算によるモデル計算を実施し、EdZ が変化した場合に予測される物理探査データの変化、特に弾性波トモグラフィ調査で取得される走時の変化を評価した。

さらに、通常、物理探査で取得された結果は、逆解析等により物性値の断面図として示される。しかしながら、取得されたデータを逆解析等した場合には、計算に用いるグリッドの大きさや逆解析に必要となる初期モデルの影響を大きく受ける。そこで、順計算で予測された変化に基づき、逆解析結果ではなく走時の変化で EdZ の変化を評価することを試行した。　なお、上記の物理探査データの精査は、深度 250m および深度 350m 試験坑道 2 で取得された弾性波トモグラフィ調査結果のみを対象として実施した。

今年度調査を実施した場所のうち、深度 350m 試験坑道 4 では人工バリア性能試験が実施されており（中山，大野，2019、中山ほか，2019）、坑道が一部埋戻されそこへ注水が実施されている。このような場所で取得された物理探査データは人工的に岩盤に影響を与えた場合の応答であり、通常の坑道開放条件下における EdZ の経時変化の評価には利用できない。そのため、今年度は試験坑道 4 の詳細な解析は実施しない。他方、試験坑道 4 における物理探査データは、坑道閉塞後における EdZ や周辺岩盤の飽和過程を把握するために利用でき、坑道閉鎖技術開発に対して有益な情報を提供できる可能性があるため、今年度得られた知見に基づいて今後、解析する予定である。

一方、比抵抗トモグラフィに関しては、既存の調査として実施している試験坑道 2 や試験坑道 4 の電極配置のように、解析領域中に坑道等の空洞を含むような電極配置は一般的ではない。比

抵抗トモグラフィの解析では、通常、送信電極周辺の計算精度を担保するために電極位置の電位が無限大となる特異点を除去する処理（Lowry et al., 1989）が適用され、特異点除去を行うためには均質構造における特異点を含む電位分布の解析解が必要となるが、任意形状の空洞を解析領域中に含む場合は利用できる解析解が存在しない。従って、試験坑道 2 や試験坑道 4 で実施した比抵抗トモグラフィのデータに対して、特異点を考慮して高精度に解析する既存のソフトウェアは現状では存在しない。こうした問題に対処するため、任意空洞を含む電位計算手法が Penz et al., (2013)により開発されている。試験坑道 2 および 4 のように、坑道を含む領域での比抵抗トモグラフィは、地層処分の分野においては今後も適用される可能性が十分に考えられるため、令和 3 年度以降、Penz et al., (2013)の電位計算手法に基づく逆解析手法を開発し、解析領域中に空洞を含むような場合でも高精度に解析できる逆解析手法の開発を行う予定である。

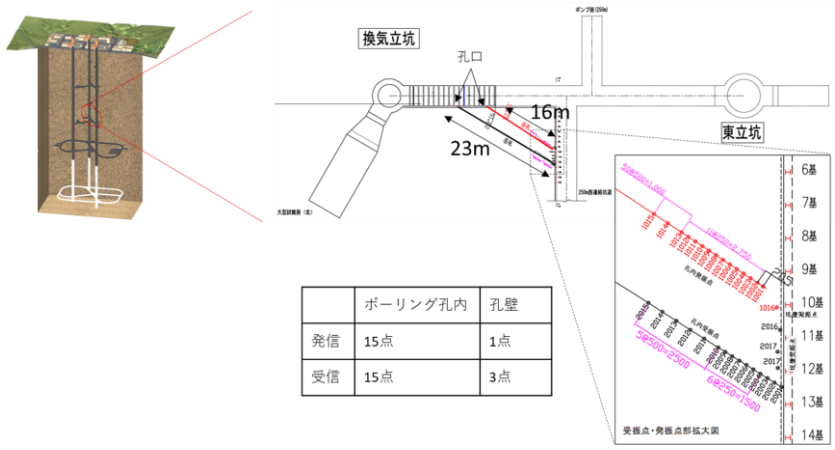
3.3.3.2 EdZ の経時変化に関する物理探査とその結果

令和 2 年度の EdZ の経時変化に関する物理探査は、令和 2 年 11 月 9 日から 11 月 13 日に実施した。調査した各々の結果およびその簡単な解釈を述べる。

(1) 深度 250m で実施した弾性波トモグラフィ

図 3.3-54 に深度 250m で弾性波トモグラフィを実施した場所および観測点配置を示す。この弾性波トモグラフィの観測点は、換気立坑と東立坑の間の坑道から西立坑に向かう坑道見向かって斜め方向に掘削した 2 本のボーリング孔を用いていた観測点配置である。これらのボーリング孔内の送受信点に加え、坑道壁面に送信点を 1 点、受信点を 3 点設置した観測点配置となっている。坑道掘削時を含むこれまでの調査結果は、青柳ほか(2014)や青柳ほか(2017)に取りまとめられており、物理探査の結果に加え内空変位や亀裂分布等の対比が行われている。今回の調査では、これまでの調査と同様に坑内送信源に、エアノッカー（SK-40LPS、サンコーコンサルタント製）を使用し、孔壁からはハンマーを用いて送信している。受信データに関してもこれまの調査で使用されたものと同様の受信機（孔内：HTI-96-MIN、Pro-Seismic 製、孔壁：GS-100、GeoSpace 製）を用いて観測している。

図 3.3-55 に今回実施した弾性波トモグラフィ結果とこれまでの調査結果を合わせて示す。坑道掘削後 1 年後から約 500 日間隔で取得したデータから推定された弾性波速度分布を示す。坑道壁面にみられる低速度領域は坑道掘削に伴い発生したものであり、EdZ の領域を示している（青柳ほか, 2014）。青柳ほか(2014)では、弾性波速度の低下は坑道掘削に伴う亀裂によるものと推定しており、亀裂密度と弾性波速度の低下を関係づける経験式を用いて評価している。これらの結果では、坑道壁面付近の低速度領域付近において坑道掘削後 64 日目から 561 日目までの結果に弾性波速度分布に変化は認められるものの、それ以降に変化は認められない。今回取得した結果に関しても、これまでの同様の結果が得られた。なお、青柳ほか(2017)による報告では掘削後における弾性波速度の変化の抽出を行っているもののその評価については実施していない。



	ボーリング孔内	孔壁
発信	15点	1点
受信	15点	3点

図 3.3-54　深度 250 で実施した弾性波トモグラフィの調査位置および送受信配置

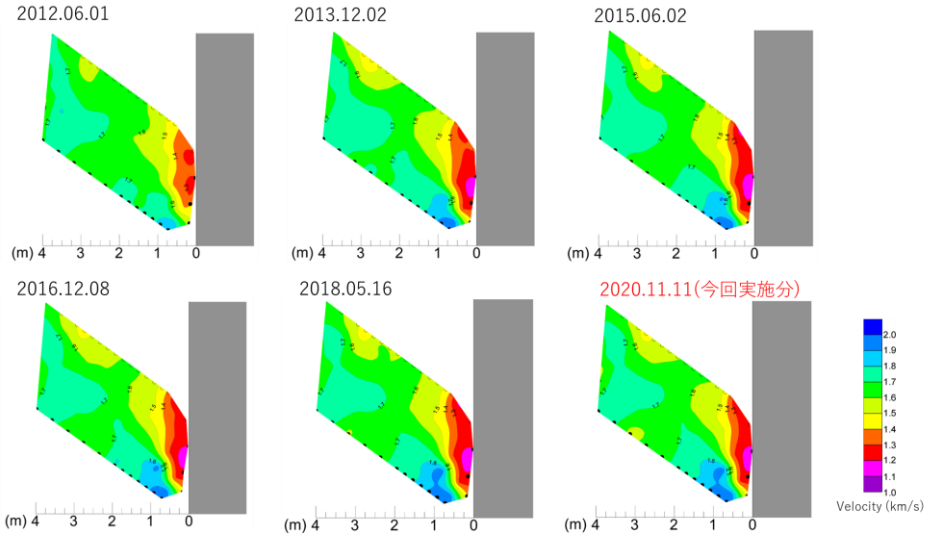


図 3.3-55　今回実施分とこれまで実施されてきた弾性波トモグラフィ調査結果

(2)　深度 350m 試験坑道 2 および試験坑道 4 で実施した弾性波トモグラフィ

図 3.3-56 に弾性波および比抵抗トモグラフィ調査を実施した深度 350m 試験坑道 2 および試験坑道 4 の調査位置および観測点配置を示す。3.3 で示す比抵抗トモグラフィに関しても、弾性波トモグラフィと同様の場所および同様の観測点配置で実施しているため、図 3.3-56 にまとめて示す。

この調査位置では、坑道が 3 本平行に掘削されており（図 3.3-56 右から試験坑道 2,3,4）、弾性波および比抵抗トモグラフィは、中央の坑道から左右それぞれの調査坑道を上下に挟むように掘削された計 4 本のボーリング孔を用いて実施している。坑道の掘削は、試験坑道 3 が初めに掘削され、試験坑道 2 および試験坑道 4 がその後掘削されており、トモグラフィ調査は試験坑道 2 および試験坑道 4 の掘削以前より実施されている。これらの坑道掘削後に両坑道の壁面に追加で観測点を配置し、以後トモグラフィ調査は孔内送受信点および壁面受信点を用いて実施している。なお、試験坑道 3 および試験坑道 4 は通常の馬蹄形であるのに対し、試験坑道 2 は円形の坑道で

ある。なお、試験坑道 4 では、人工バリア性能確認試験が実施されており坑道掘削後に、人工バリア接地用のピットの掘削や、ピットおよび坑道の埋め戻し、ヒーターの加熱および注水等が行われており(中山，大野，2019、中山ほか，2019)、これら人工バリア試験に伴う人工的な影響が予測される。今回の弾性波トモグラフィ調査では、坑内送信源にスパーカー振源（SBS42IPG5000、Geotomographie 製）を使用した。受信データは孔内受信機にハイドロフォン（孔内：CA-1045、VCable　孔壁：CA-1066、LLC 製）をデータ収録器に DAQlink4(Seismic Source Co 製)を用いて観測した。なお、これまでの調査では孔内震源に OWS 震源を使用しており、今回の調査は一部使用を変更して実施している。図 3.3-57 に今回実施した調査結果とこれまでの調査結果の一部を合わせて示す。

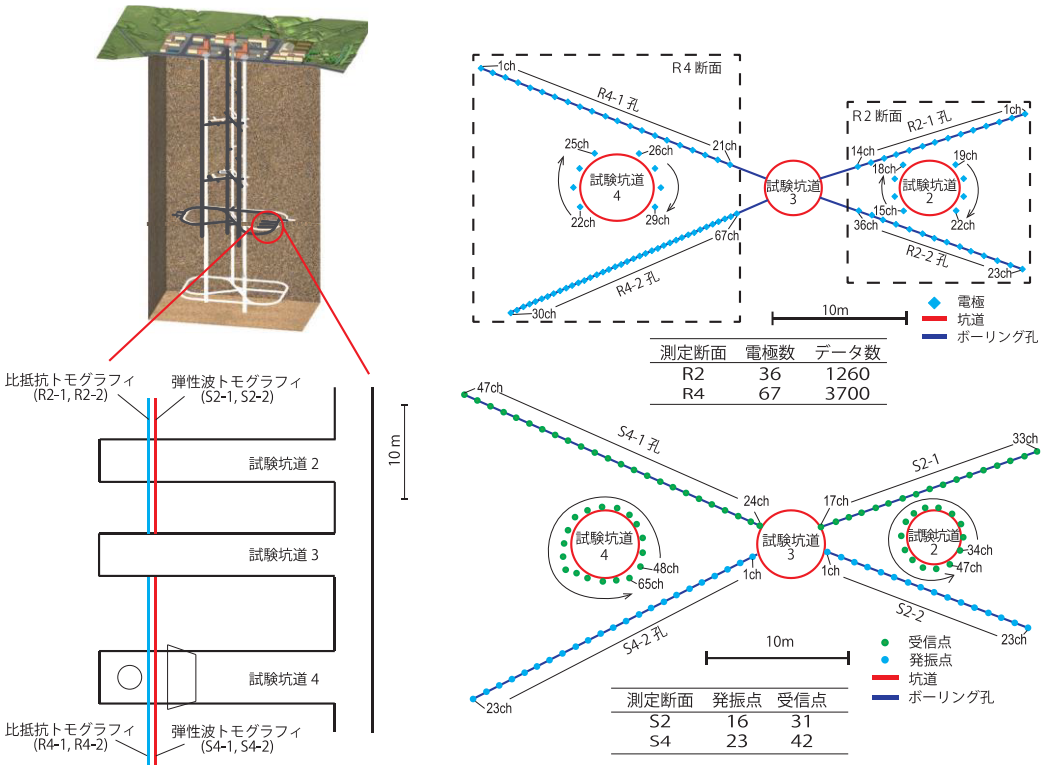


図 3.3-56　深度 350 試験坑道 2 および 4 の場所およびで実施した弾性波および比抵抗トモグラフィの送受信配置

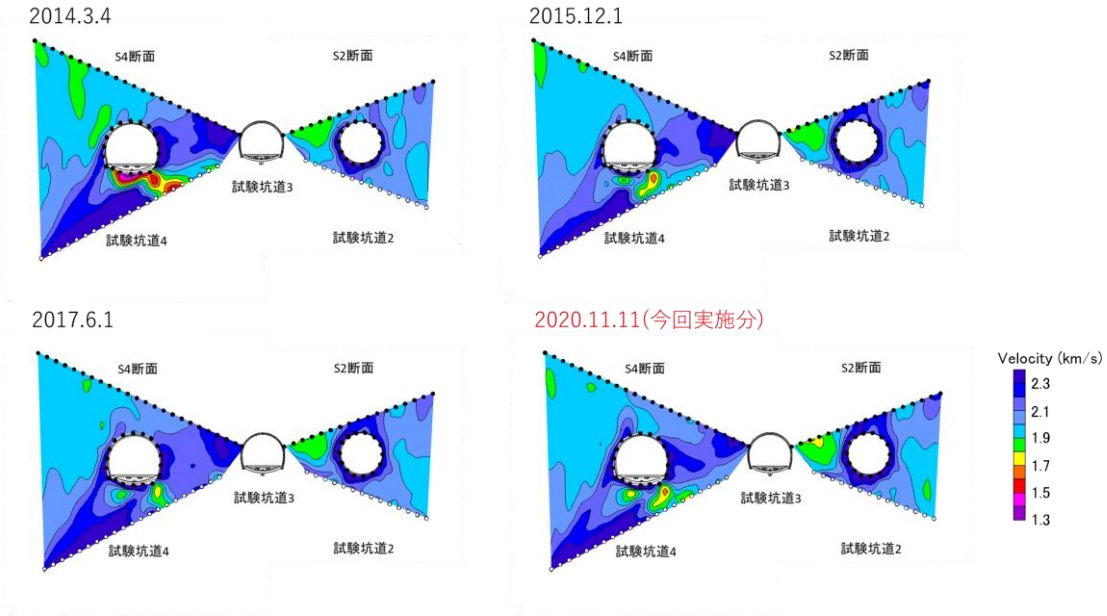


図 3.3-57　深度 350 試験坑道 2 および試験坑道 4 で実施した弾性波トモグラフィの結果

試験坑道 2 側においては、試験坑道 2 および試験坑道 3 の間の領域に低速度領域が現れている。また、EdZ の存在が予測される試験坑道 2 の孔壁周辺では、速度の低下ではなく周辺岩盤よりも速度が高い領域が推定されている。それ以外の領域に関しては概ね 1.9km/s から 2.1km/s 程度であり、顕著な経時変化は認められない。

試験坑道 4 側においては、坑道下部に弾性波速度の顕著な時系列変化が認められる。これは、人工バリア性能確認試験における、ピットの掘削や注水時期と関連しており、これら人工的な影響が弾性波でとらえられているものと考えられる。これら、人工バリア性能確認試験で実施した事項と弾性波トモグラフィ結果の時系列的な関係や、ピット内の膨潤圧、岩盤内の水圧と弾性波トモグラフィ結果の比較は、青柳ほか(2018)や Aoyagi et al., (2018)に報告がある。

弾性波速度は、式(1)で示すことができる。

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \qquad (1)$$

ここで、ρ は物質の湿潤密度、λ および μ はラメ乗数、E はヤング率、ν はポアソン比、K は体積弾性率、G は剛性率である。式(1)によると弾性波速度の上昇は体積弾性率や剛性率等の岩石の強度を反映すため、試験坑道 2 周辺の高速度領域は岩石の強度が高くなっているという解釈になり、物理的な損傷を受けている EdZ で想定される傾向とは逆の結果が推定されることとなる。この高速度領域に関しては、後述するように、吹付けコンクリートを迂回する初動による偽造であることを確認した。

試験坑道 4 側においては、ピットの掘削や注水に伴い坑道底面における弾性波速度が変化している（青柳ほか，2018)、Aoyagi et al., 2018）。弾性波速度と飽和度の関係は Mavko and Mukerji(1998)により、その混ざり方を考慮して図 3.3-58 に示す通り計算することが可能である。図 3.3-58 は昨年度実施した室内試験(原子力機構・原環センター, 2020)を参考にパラメータを設定した結果である。図 3.3-58 に示す uniform モデルでは、岩石内で固液気相が均質に混ざった場合を想定したモデルであり、patchy モデルは固液気相が分離した状態を均質化した場合のモデルである(Mavko and Mukerji, 1998)。なお、深度 250m の岩石に関しては弾性波速度の飽和度依存性を測定しており(窪田ほか，2018)、図 3.3-58 ほど飽和度が 1 付近でピーキーではないものの、uniform モデルのような飽和度依存性を示しており、深度 350m においても同様の挙動を示すことが予測される。図 3.3-58 より弾性波速度は、岩石中の飽和度の変化だけでも 30%程度の速度変化を説明することが可能である。試験坑道 4 側では人工バリア性能試験エリアで注水が行われており、飽和度変化の顕著な変化が予測されるとともに、青柳ほか(2018)で示されるピット周辺における亀裂の増加の影響も予測されていることから、試験坑道 4 側における弾性波速度分布は、ピット掘削による新たな EdZ の発生と注水による岩石の飽和度の変化の可能性を併せて解釈する必要がある。

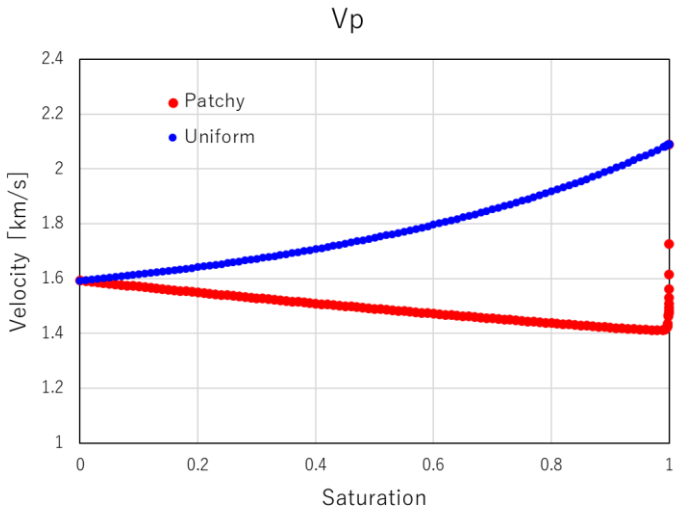


図 3.3-58　P 波速度と飽和度の関係

(3)　深度 350m 試験坑道 2 および試験坑道 4 で実施した比抵抗トモグラフィ

図 3.3-59 に今回実施した調査結果とこれまでの調査結果の一部を合わせて示す。なお、比抵抗トモグラフィはこれまでと同様の電気探査装置 Terra-meter LS (ABEM 社製)を使用して実施した。

幌延の地下水は塩水系でありまた岩盤も泥岩であるため、全体的に比抵抗値は数 Ωm から十数 Ωm 程度と非常に低い値を示している。

試験坑道 2 側では、坑道周辺に周辺よりも相対的に高比抵抗な領域が存在する。他方、試験坑道 4 側では、2015 年 12 月以降の結果では坑道壁面周辺では相対的に低比抵抗な領域が推定されている。

岩石の電気伝導度は、修正アーチ—の式を用いて下記のように記載することができる(例えば、高倉，2009)。

$$\sigma_r = \frac{\sigma_f}{F} S_w^n + \Sigma_s \qquad (2)$$

ここで、σ_r は岩石の電気伝導度、σ_f は間隙水の電気伝導度、F はフォーメーションファクタ、S_w は飽和度、Σ_s は表面伝導を示す。幌延のように、間隙水の電気伝導度が高い場合は、表面伝導の影響は無視できる。式(2)および昨年度実施した室内試験(原子力機構・原環センター，2020)に基づき計算した比抵抗と飽和度の関係を図 3.3-60 に示す。なお、n の値に関しては測定値が無いため、一般的な値である n=2 を用いている。

図 3.3-60 の結果から、試験坑道 2 周辺の 10Ωm 程度の領域は、飽和度が 0.6 程度の場合に得られる値であり、岩盤中の飽和度変化だけを考慮した場合、この高比抵抗部は坑道掘削に伴う坑道周辺の不飽和領域を捕らえたものと考えられる。他方、試験坑道 4 周辺の低比抵抗領域は、概ね飽和度が 1 程度の比抵抗値を示していることから、注水により坑道周辺の岩盤が飽和している様子を捕らえていると考えられる。

なお、本年度は岩石サンプルを用いた比抵抗の飽和度依存性を評価していないため、アーチ—の式を用いた評価の根拠は乏しい。この点に関しては、来年度以降の課題とする。

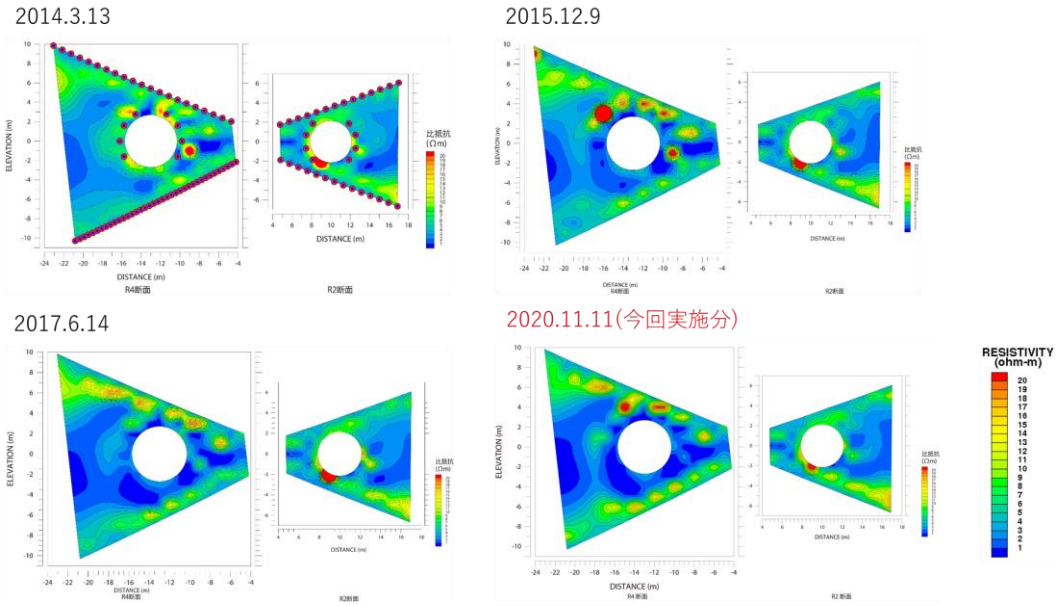


図 3.3-59　深度 350 試験坑道 2 および試験坑道 4 で実施した比抵抗トモグラフィの結果

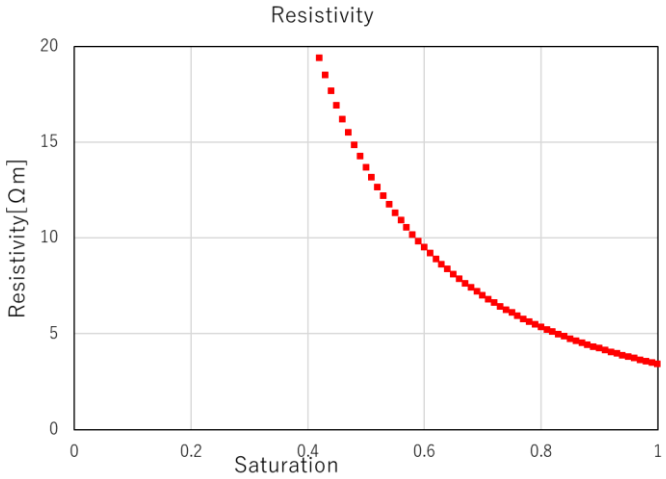


図 3.3-60　比抵抗と飽和度の関係

3.3.3.3 深度 250m アクセス坑道で取得された物理探査データの解析

(1) EdZ の影響を受けた走時の抽出

EdZ の経時変化を把握するには、取得されているデータのうち EdZ の影響を含むデータを抽出する必要がある。EdZ の厚さは通常坑道壁面から 1m 程度とされ、深度 250m の弾性波トモグラフィの送受信配置（図 3.3-61）を考慮した場合、調査範囲内の大部分は健岩部であると考えられる。

EdZ の影響を含むデータを抽出するために、送受信間距離と測定される平均速度に着目して評価を行った。横軸を送受信距離とし縦軸を走時としたグラフを**図** 3.3-62 に示す。これらのグラフは、全ての送信点から坑道壁面に設置した 3 点における受信点(図 3.3-61 中の受信点番号 2016,2017,2018)および孔内にある坑道壁面に近い受信点(図 3.3-61 中の受信点番号 2004,2006)における、送受信間距離と観測された平均速度の関係を示している。弾性波が EdZ と健岩部のような低速部と高速部からなる構造中を伝播する場合、特に低速部の領域が高速部の領域と比較して薄い場合には、送受信間距離に応じて低速部を通過する距離の割合が低くなるため、平均速度が速くなる。ボーリング孔内受信機で取得されたデータには、**図** 3.3-62 に示すように、このような傾向が認められないため、本検討では評価対象から除外した。他方、坑道壁面で取得されたデータにはこれらの傾向が顕著に認められることから、今回の解析対象とした。

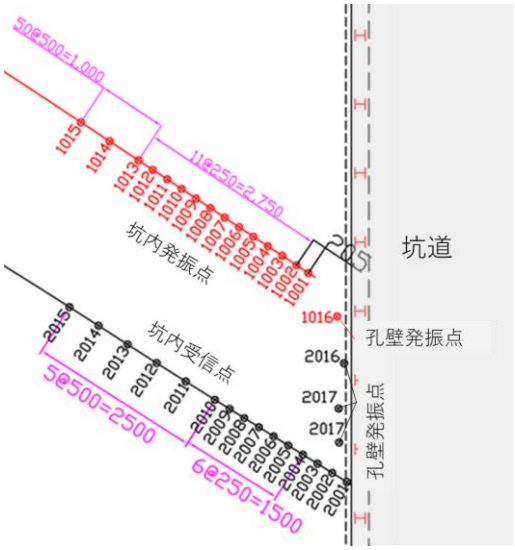


図 3.3-61　深度 250 で実施した弾性波トモグラフィの送受信点配置

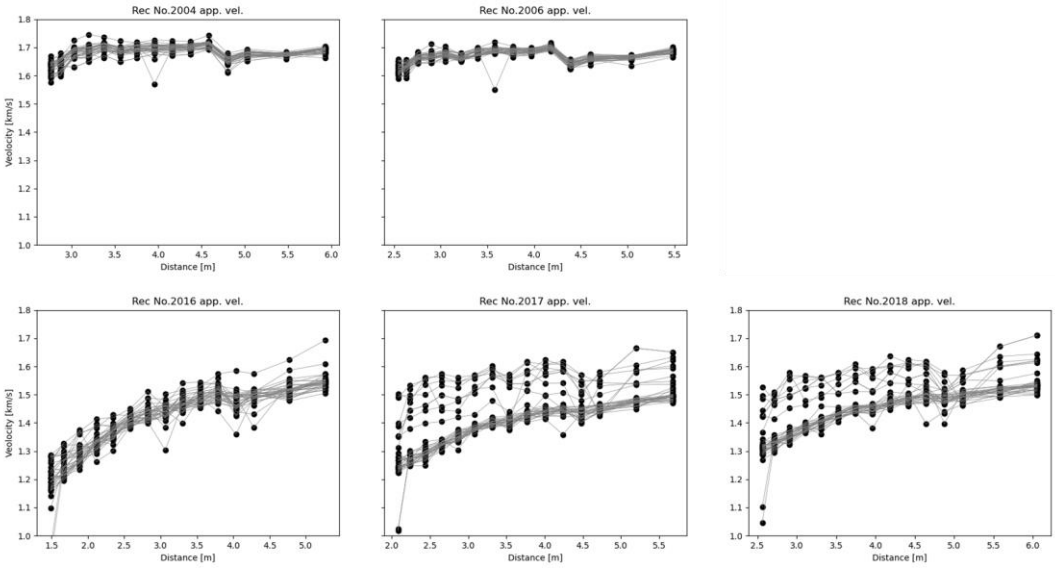


図 3.3-62　ボーリング孔内受信点(2004,2006)および壁面受信点(2016,2017,2018)で取得された距離と走時の関係

(2)　順計算による走時の予測解析手法

EdZ の弾性波速度や厚さが変化した際に、観測される走時にどのような影響が現れるのか、またどの送受信ペアの走時に影響が顕著に表れるのかを評価するため、レイトレーシングおよび走時を計算するプログラムを開発しフォワード計算による評価を実施した。加えて、坑道内における調査の場合には吹付けコンクリート等による観測への影響等も予測されることから、これら人工物が観測結果に与える結果に関する評価も行った。さらに、得られたシミュレーション結果を用いて、観測データから EdZ の経時変化を評価する解析手法を検討した。

本研究では、岩盤の構造を 1 次元とし、3 次元的に伝播する破線を追跡するプログラムを作成した。通常、レイトレーシングは解析領域をグリッドで区切り、爆発法（佐々ほか，1988）や線形走時内挿法（Asakawa and Kawanaka, 1993）等の手法により計算される。このような解析手法ではグリッドの大きさによる影響を受ける可能性がある一方、岩盤内の速度構造を 1 次元的であると仮定した場合、地質構造の厚さを仮定すれば解析グリッドを必要とせずにレイトレーシングを行うことができる。

鉛直方向に地質構造が変化する場合、ある地質の厚さを d_i、その地質における弾性波速度を v_i とする。送信位置の平面座標を(x_{src}, y_{src})、受信位置の平面座標を(x_{rec}, y_{rec})、破線が通過する地質境界の座標の平面位置を(x_i, y_i)とすると、送信点から受信点までの時間は式(3)で記載できる。

$$T = \sum_i^n \frac{\sqrt{(x_{i+1}-x_i)^2+(y_{i+1}-y_i)^2+{d_i}^2}}{v_i} \qquad (3)$$

ここで、(x_0, y_0)は(x_{src}, y_{src})、(x_n, y_n)は(x_{src}, y_{src})とする。破線が通過する座標(x_i, y_i)は、式(3)を最小化することで決定でき、得られた座標を直線で結ぶことにより破線を計算できる。式(3)の最小化は、ニュートン法を用いた。なお、本手法の妥当性は、計算により取得される破線が地層境界において Snell の法則を満たすことにより確認している。

(3)　EdZ の変化および吹付コンクリートの波線および走時への影響

図 3.3-63 から図 3.3-66 に、深度 250m で実施した弾性波トモグラフィの観測配置を適用した場合における、初動の波線の計算結果を示す。図 3.3-63 および図 3.3-64 は吹付けコンクリート

の影響がある場合の結果を、図 3.3-65 および図 3.3-66 に吹付けコンクリートの影響がない場合の波線の計算結果を示す。各々の図中には、EdZ 内の弾性波速度を 0.8km/s から 1.6km/s まで段階的に変化させた場合の結果を示しており、図 3.3-63 および図 3.3-64、図 3.3-65 および図 3.3-66 で各々EdZ の厚さが 0.5m の場合と 1.5m の場合を比較している。なお、健岩部の弾性波速度は 1.65km/s とし吹付けコンクリートの p 波速度は 5.6km/s としている。これらの値に関して、健岩部の弾性波速度に関しては坑道壁面から離れた位置における弾性波速度の平均速度を、吹付けコンクリートに関しては室内試験により取得された値を参考に設定している。

図 3.3-63 および図 3.3-64 に示す、吹付けコンクリートの影響を考慮した場合、初動の波線は送受信点間の間ではなく、送信点から壁面に伝達したのち吹付けコンクリートを伝達している。また、EdZ 中の弾性波速度が低下し健岩部との速度差が大きくなるにつれて、健岩部と EdZ の境界部で屈折が大きくなっている様子が認められる。

図 3.3-65 および図 3.3-66 に吹付けコンクリートの影響がない場合の結果を示す。この場合、初動の波線は送信点と受信機の間の領域を通過している。この結果に関しても、健岩部と EdZ の速度差が大きくなるにつれて健岩部と EdZ の境界で屈折が大きくなっている様子が確認できる。なお、送受信機の双方が EdZ 内に位置する場合にはモデル領域内に速度境界が存在しないため直達している。

これらの結果より、吹付けコンクリートの影響を考慮した場合、孔内送信点から坑道壁面に設置した受信点に伝播する初動の波線は、吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合と比較して大きく異なることが分かる。特に、図 3.3-61 に示すような送受信点配置の場合、坑道に対して送信点の配置が傾斜しているため、この影響が現れる可能性が高くなると考えられる。岩盤と吹付けコンクリート間で波動が伝播する場合には、弾性波トモグラフィ調査を実施した際に初動の波線が吹付けコンクリートを迂回し、波線が調査対象とする領域を通過しない恐れがあるため、調査時には注意が必要である。

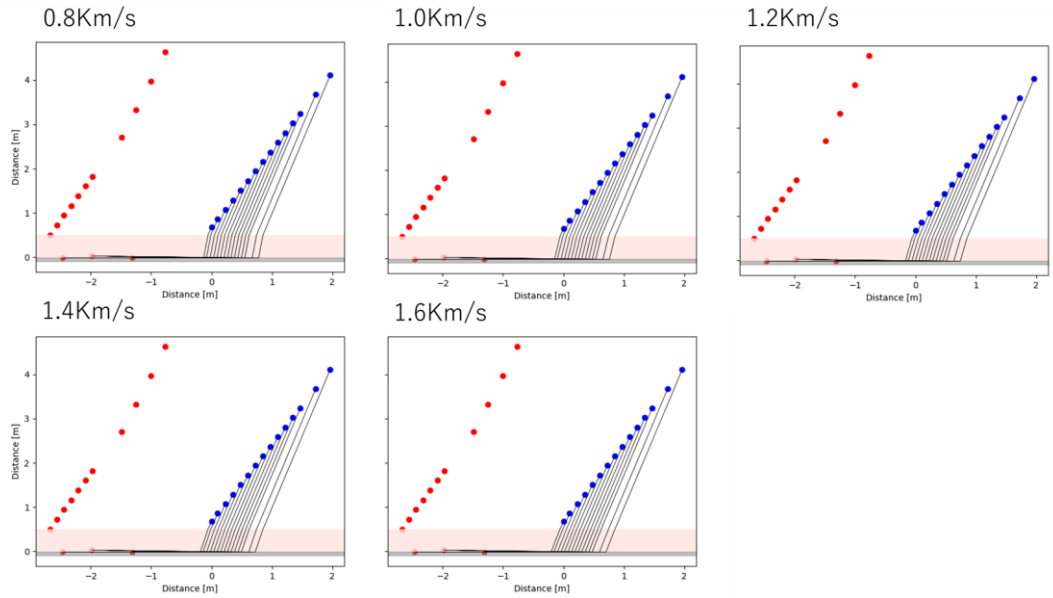


図 3.3-63　EdZ の厚さが 0.5m で吹付コンクリートの影響を考慮した場合の破線

赤点は送信点を青点は受信点を示しており、全送信点から坑道壁面に設置してある 3 受信点までで波線を示している。各々の図は、EdZ 中の弾性波速度が 0.8km/s から 1.6km/s まで変化させた場合の結果を示している。

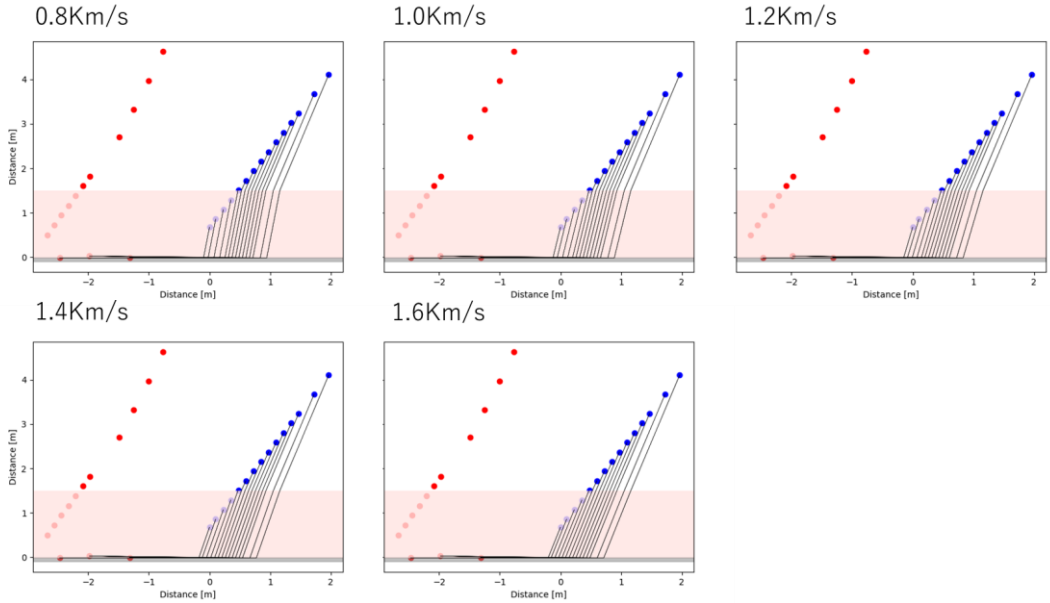


図 3.3-64　EdZ の厚さが 1.5m で吹付コンクリートの影響を考慮した場合の破線

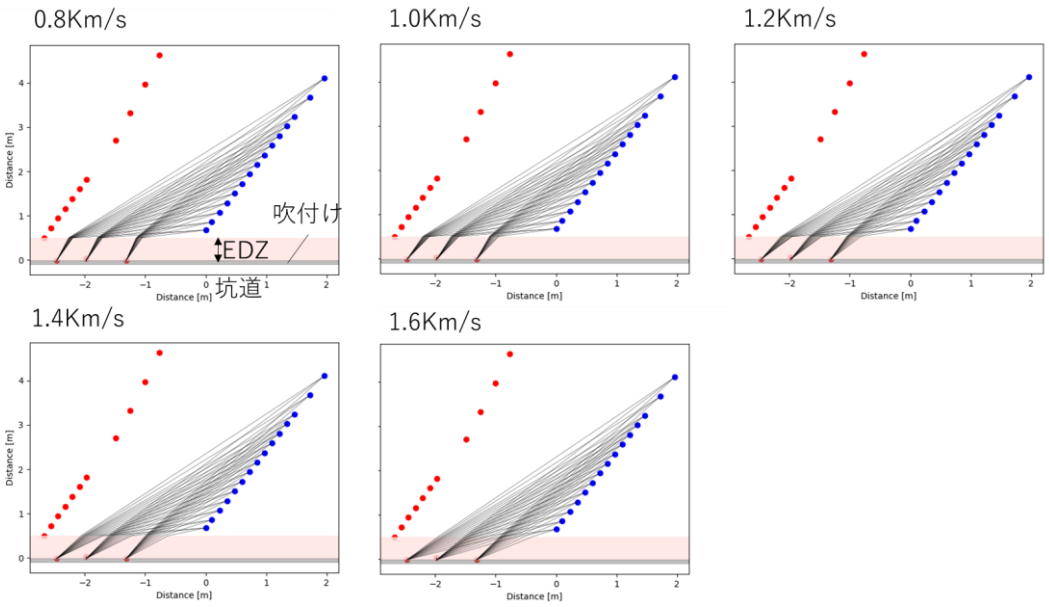


図 3.3-65　EdZ の厚さが 0.5m で吹付コンクリートの影響を考慮しない場合の破線

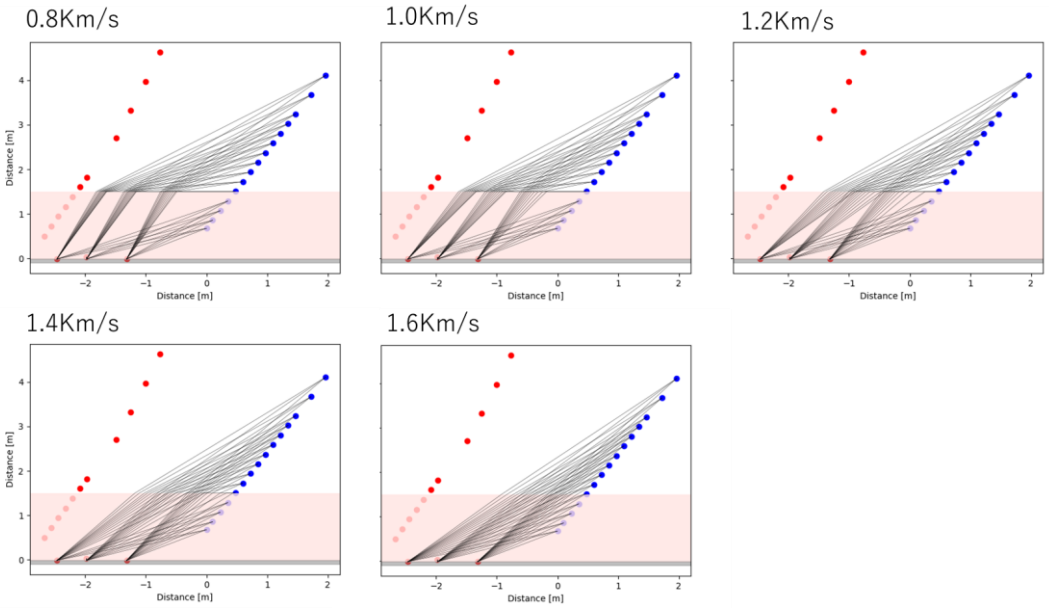


図 3.3-66　EdZ の厚さが 1.5m で吹付コンクリートの影響を考慮しない場合の破線

(4) 実測データとフォワード計算結果の比較

図 3.3-67 および図 3.3-68 に観測された走時とモデル計算により取得された走時を比較したグラフを示す。横軸に観測された走時を、縦軸で計算結果を示しており、図 3.3-67 は吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合、図 3.3-68 は考慮した場合の結果を示している。図 3.3-67 に示す吹付けコンクリートの影響を考慮した場合、EdZ の厚さが 1m 程度でかつ弾性波速度が 1.0km/s 程度以下まで低下しない場合を除き、計算結果の方が観測された弾性波よりも早く伝達している。他方、吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合、EdZ の弾性波速度が 1.4km/s 程度まで低下する場合には、どの場合も観測結果と計算結果は整合的である。

測定された観測データが吹付けコンクリートの影響を受けているか確認するために、孔内送受信点間で観測された走時着目する。EdZ の厚さが 2m とした場合、図 3.3-61 中の送信点 1007 番および孔内受信点 2010 番は共に EdZ 内に存在することになる。送信点 1007 番から孔内受信点 2010 番の直達経路は 2.25m である。他方、吹付けコンクリートを迂回する経路（図 3.3-69 に示すような経路）を伝播する場合、送信点および受信点から吹付けコンクリートまで最短距離で約 2m あり、送信点から吹付けコンクリートまでの 2m および吹付けコンクリートから受信点までの 2m 以上の計 4m 以上の距離を EdZ 中において通過する必要がある。この場合、直達経路の方が吹付けコンクリートを迂回する経路よりも EdZ を通過する距離が短くなり、必ず早く到達するため、この送受信ペアで観測される走時は直達経路を伝播した走時である。この走時を利用することで EdZ の弾性波速度を評価することができる。この経路における平均弾性波速度は 1.7km/s であり、健岩部相当の弾性波速度であることから EdZ の厚さが 2m とする設定は棄却することができる。同様に EdZ の厚さが 1.5m とした場合の条件設定も棄却することができる。

EdZ の厚さが 1m の場合、送信点 1002 番と受信点 2005 番の組み合わせで観測される走時を考える。弾性波速度が 0.8km/s の場合、図 3.3-69 に示すように吹付けコンクリートを伝播する走時は 2.48msec である。一方、実際に観測されている走時は 1.69msec である。従って、実際の観測データでは、この 2 点間における走時は直達経路の走時を記録しているか、もしくは EdZ 中の弾性波速度が 0.8km/s よりも早いことを示唆している。EdZ 中の弾性波速度が 0.8km/s よりも早い場合には、モデル計算による坑道壁面で観測される走時が実際の観測データを再現できない。従って、EdZ の厚さが 1m 程度で弾性波速度が 0.8km/s まで低下する場合のモデルに関しても棄却することができる。

このように、吹付けコンクリートの影響を考慮した場合、坑道壁面受信点で観測された走時を説明できないか、もしくは説明可能なモデルに関しても孔内送受信点の観測記録を用いてモデルを棄却することができる。他方、吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合に計算される走時は実測データからも整合的であることから、観測データは吹付けコンクリートの影響を受けていないと考えられる。なお、モデル計算結果と実測データの比較から、EdZ の厚さは 1m 程度であり、1m を超える場合には EdZ の弾性波速度が 1.4km/s 程度と飽和度の変化で説明可能な程度しか弾性波速度は変化していないことになる。

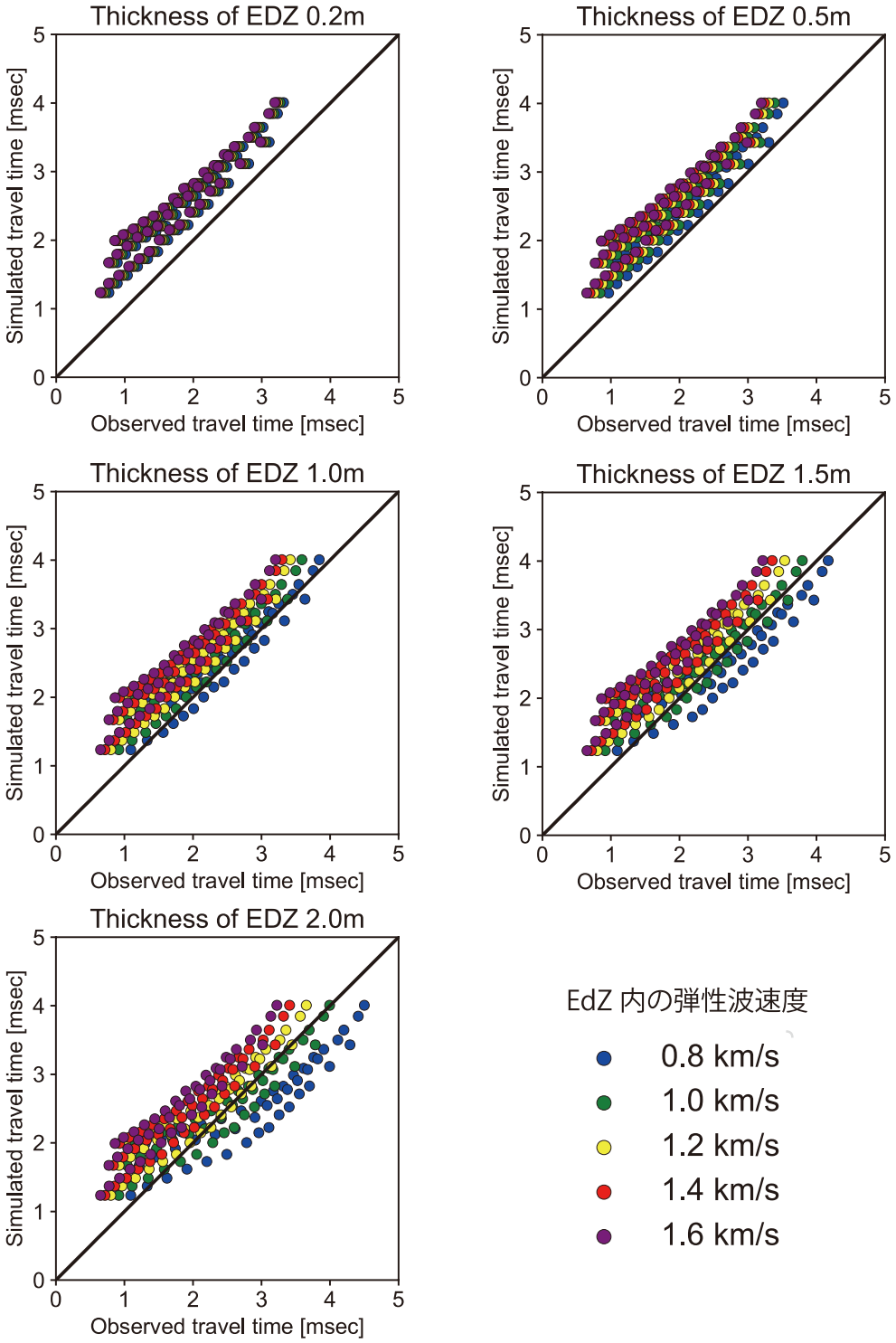


図 3.3-67　吹付コンクリートの影響を考慮した場合のモデル計算結果と実測データの走時比較
各グラフで EdZ の厚さが 0.2m から 2.0m の場合の結果を示しており、各々のグラフ中では異なる色で EdZ の弾性波速度が 0.8km/s から 1.6km/s まで変化させた場合の結果を示している。

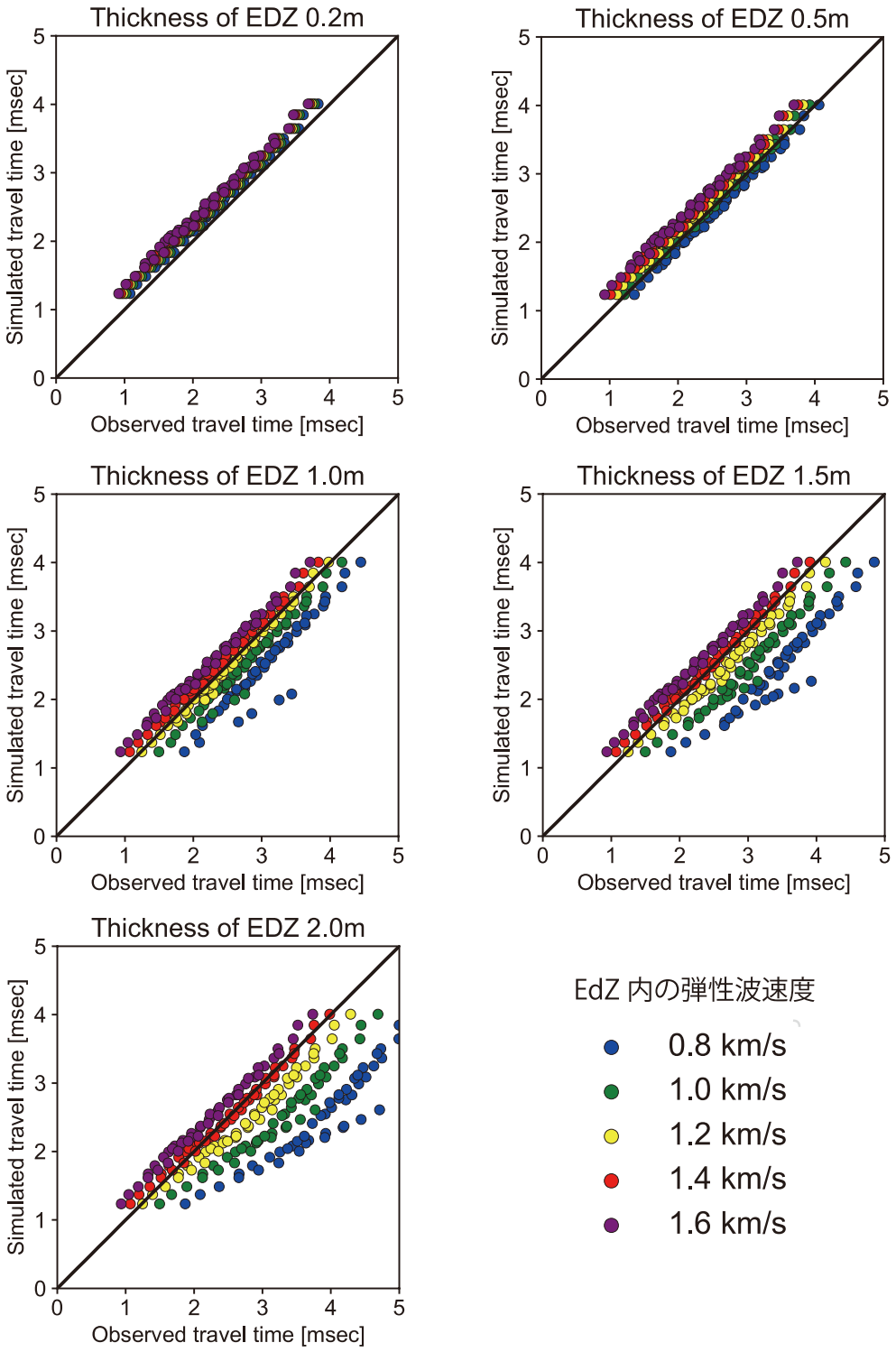


図 3.3-68　吹付コンクリートの影響を考慮しないモデル計算結果と実測データの比較

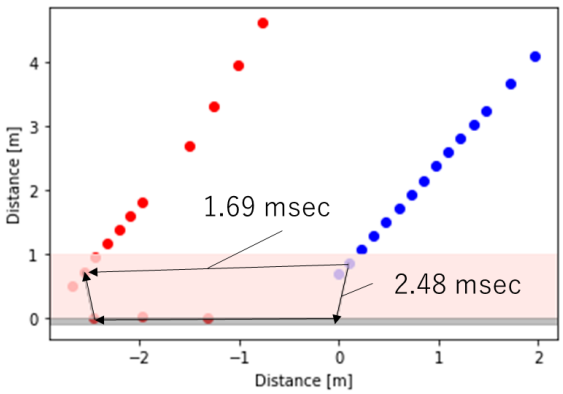


図 3.3-69　孔内受信機における直達走時と吹付コンクリートを迂回する走時の比較

(5)　順計算結果に基づくモニタリングデータの解析手法の検討

ここでは、EdZ の経時変化を評価する手法として、直接、走時の変化を評価する手法を試行した。具体的には、シミュレーションにより得られた結果を用いて、EdZ が経時変化した場合、即ち EdZ の弾性波速度や厚さが変化した場合に、受信点で観測される走時の変化を評価した。

走時を直接評価する以外の方法として、例えば送受信点間距離と観測走時から計算される平均速度等を評価する方法も考えられるが、我々が直接取得可能なデータは走時であり、平均速度等はそれを変換したものに過ぎず、これらは測定データである走時の精度に強く依存する。こうした理由により、EdZ の経時変化を走時の変化から直接評価する手法を検討した。

前出の議論のように、送受信間距離が長いほど EdZ の走時への影響は小さくなる。他方、ある送受信ペアの走時を比較した場合、EdZ と健岩部の境界に入射する角度が異なる場合には屈折角が異なる。入射角と屈折角の関係から、EdZ と健岩部の境界に対する入射角が異なる場合、EdZ の厚さや弾性波速度が変化した場合に走時の変化に与える影響が異なると予測できる。従って、EdZ の厚さや弾性波速度が変化した場合の走時の差分を、送受信点間の距離や入射角で分類することにより、EdZ の経時変化を評価する最適な送受信ペアや解析方法等を検討した。

図 3.3-70 は解析に使用したデータの送受信点間の距離および送受信点間を直線で結んだ場合の EdZ と健岩部の地層境界のなす角をヒストグラムで示したものである。図 3.3-71 は、入射角と距離の関係を示す。今回解析するデータを取得した送受信点配置では、送受信距離が 2~5m 程度でその線分が EdZ と健岩部の地層境界と 40°以上の角を有する組み合わせが多く、受信点毎ではこれらは一意な単調現象の関係となっている。

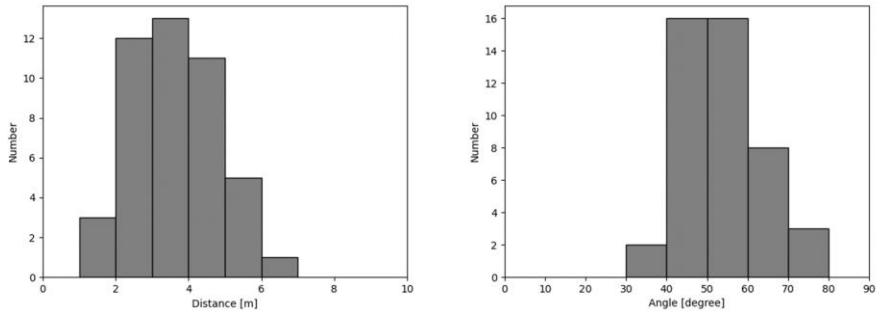


図 3.3-70　送受信間の距離と送受信間を直線で結んだ経路と EdZ と健岩部の地層境界がなす角の分布

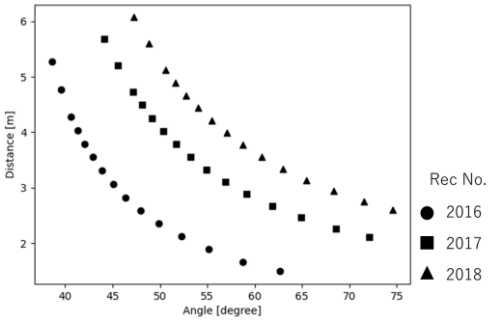


図 3.3-71　送受信点間の距離と送受信間を直線で結んだ経路と EdZ と健岩部の地層境界がなす角の関係

図 3.3-72 および図 3.3-73 に、EdZ の厚さが一定で EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を示す。図 3.3-72 は横軸を送受信距離とした場合で、図 3.3-73 は送受信間を結ぶ線分と EdZ と健岩部の地層境界がなす角度を横軸にした結果である。各々のグラフはすべて弾性波速度が 0.2km/s 低下した場合の結果であり、EdZ の厚さが 0.5m から 2.0m の場合の結果を別々のグラフで示している。各グラフ中の異なる色で、EdZ 内における変化前の弾性波速度が 1.0km/s から 1.6km/s までの場合を示している。

図 3.3-74 および図 3.3-75 に、EdZ 内の弾性波速度が一定で EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を示す。図 3.3-74 は横軸を送受信距離とした場合で、図 3.3-75 は送受信間を結ぶ線分と EdZ と健岩部の地層境界がなす角度を横軸にした結果である。各々のグラフで EdZ の弾性波速度が 0.8km/s から 1.6km/s の場合を示している。各グラフ中の異なる色で、EdZ の厚さが 0.2m から 0.5m、0.5m から 1.0m、1.0m から 1.5m、1.5m から 2.0m まで変化した場合の結果を示している。

なお、本章では吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合のみ検討する。

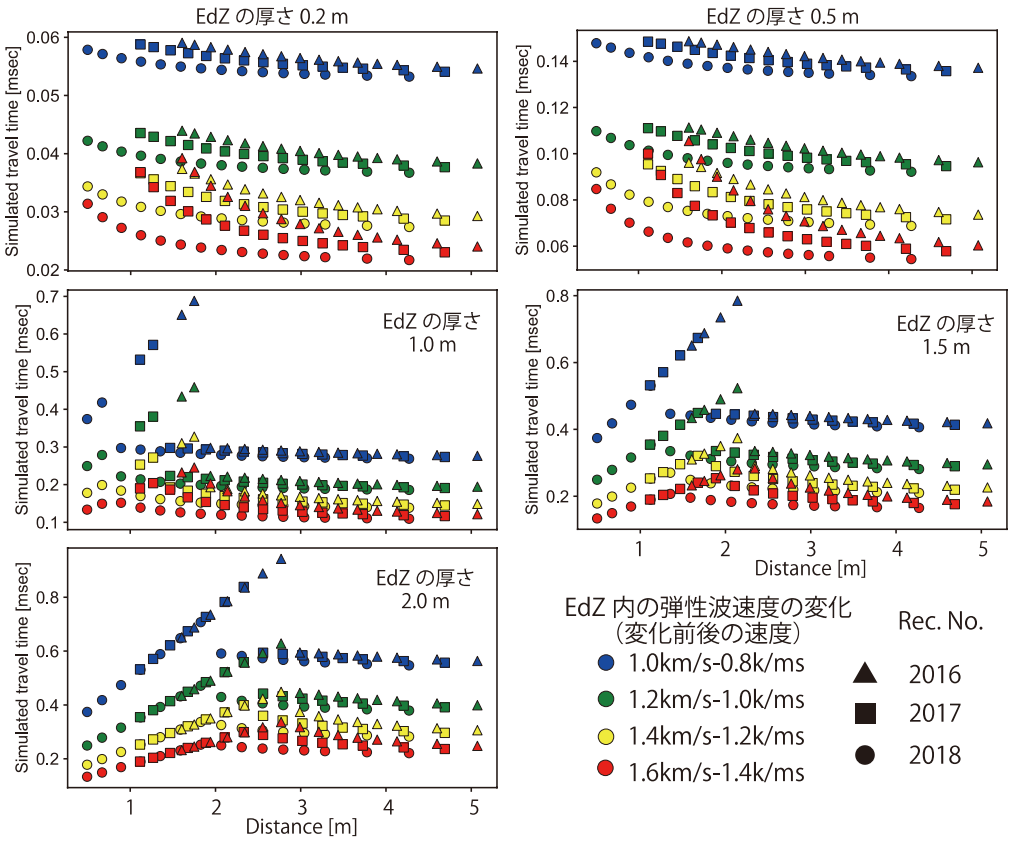


図 3.3-72　EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化

横軸を送受信距離とした場合の結果で、マーカーの形状で受信点の位置を示している。

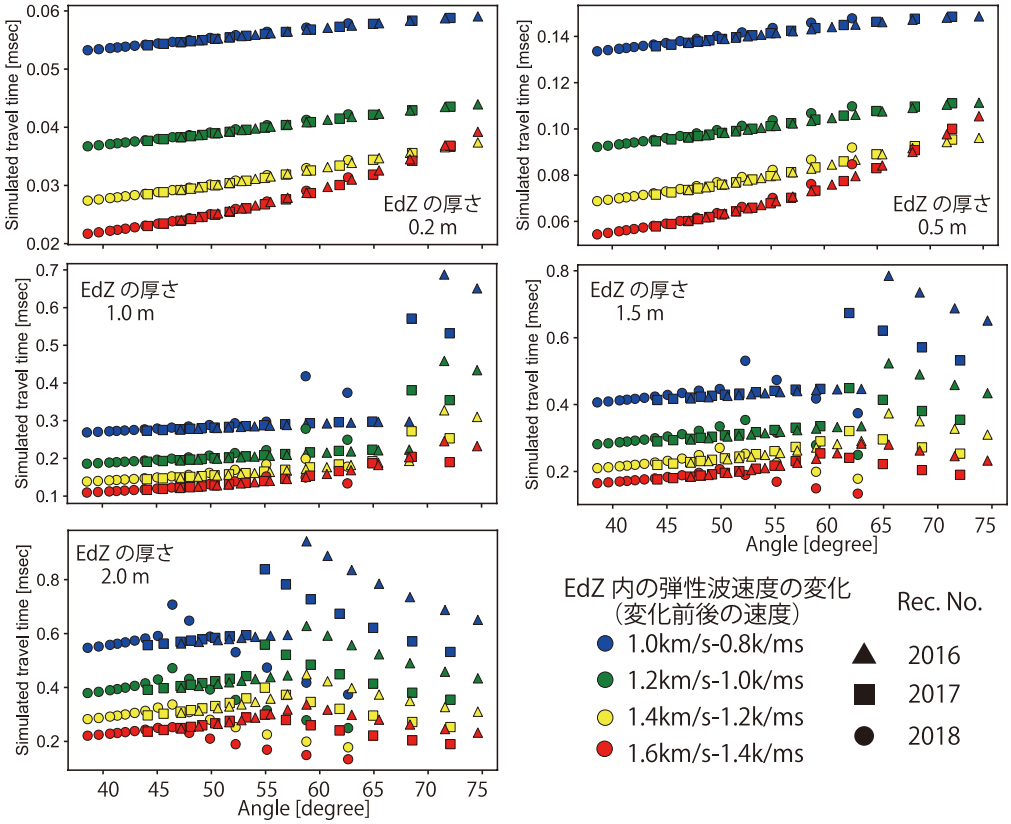


図 3.3-73　EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化

横軸を送受信点間の線分と EdZ と健岩部とのなす角とした場合の結果で、マーカーの形状で受信点の位置を示している。

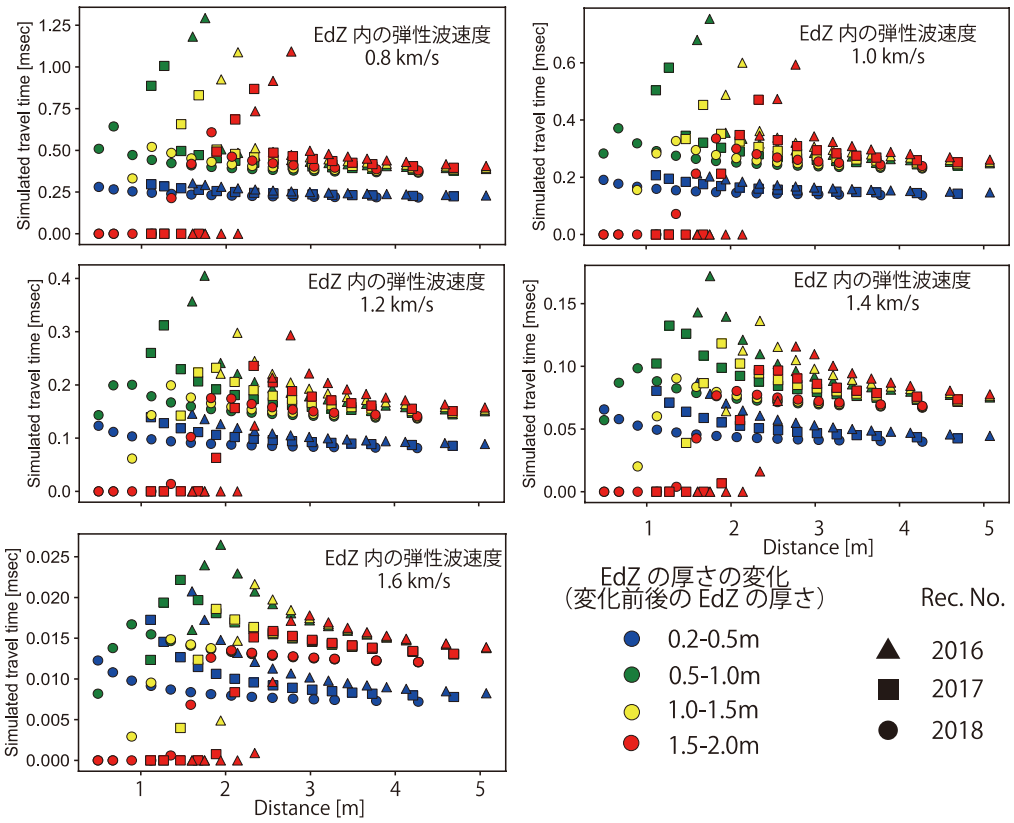


図 3.3-74　EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化

横軸を送受信距離とした場合の結果で、マーカーの形状で受信点の位置を示している。

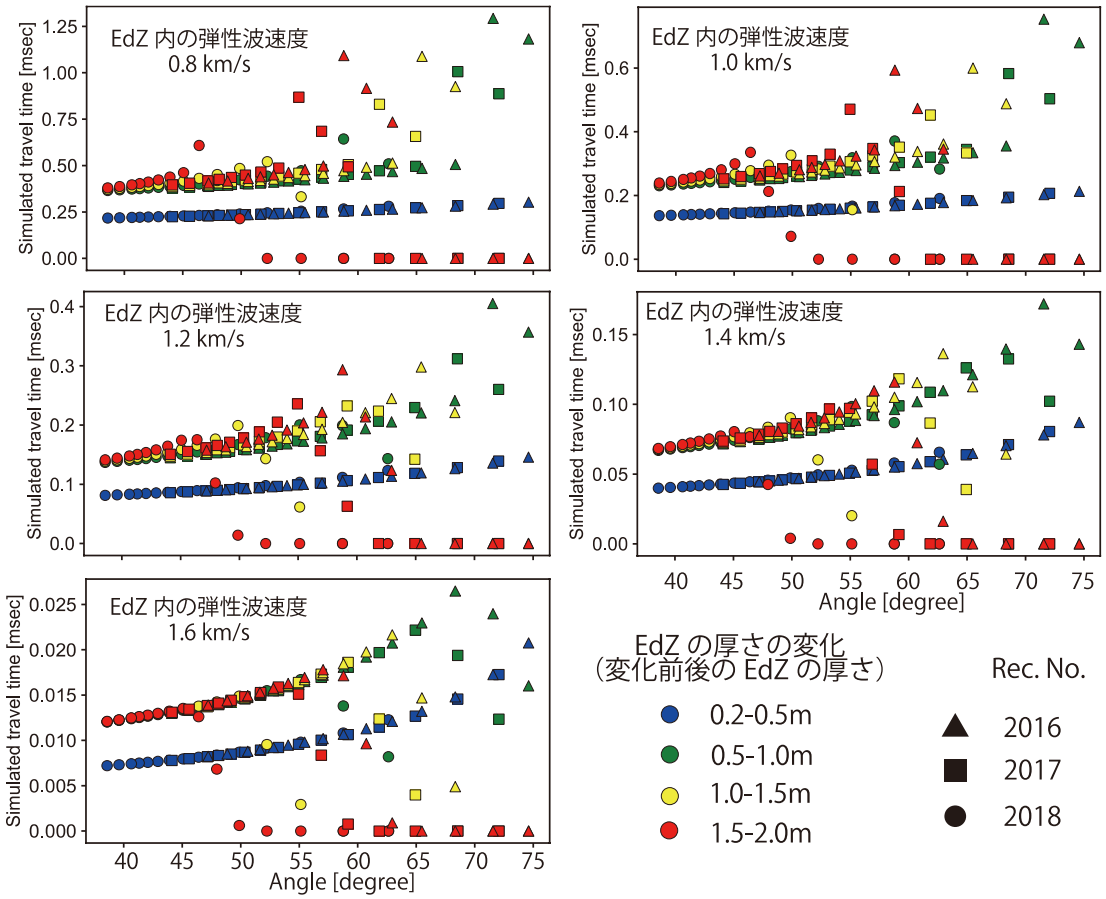


図 3.3-75　EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化

横軸を送受信点間の線分と EdZ と健岩部とのなす角とした場合の結果で、マーカーの形状で受信点の位置を示している。

図 3.3-72 に示す通り EdZ 内の弾性波速度が低下した場合、送受信距離が長いほど波線が EdZ を通過する割合は低くなるため、走時への影響が小さくなっている。ただし、走時の変化と送受信距離の関係は、受信点毎に異なっているため、送受信距離で走時の変化を分類した場合には、受信点毎にデータを分析する必要がある。他方、横軸を送受信点間の線分と EdZ と健岩部とのなす角とした場合、図 3.3-73 に示す通り、走時の変化と角度の関係は受信点によらない一意な直線として評価することができる。なお、EdZ の厚さが 1m 以上の場合にみられる図 3.3-72 中の送受信距離が短い位置にみられる直線的な走時の増加や、図 3.3-73 中にみられる高角度付近の走時の変化のバラつきは、送受信点の両方が EdZ 内に含まれる場合であり、送受信点間の直線経路が初動の走時となっている場合である。なお、EdZ 内の弾性波速度が変化する場合、EdZ 内の弾性波速度が遅い方がその影響は大きく、また、EdZ が厚いほどその影響は大きい。

図 3.3-74 および図 3.3-75 の通り、EdZ の厚さが変化する場合の走時変化は、EdZ 内の速度が変化する場合と同様の変化を示しており、走時変化を送受信点間の線分と EdZ と健岩部とのなす角で分類した場合には、走時の変化と角度の関係は受信点によらない一意な関係が得られている。EdZ の厚さが変化する場合には、走時の変化はその厚さに依存せず、EdZ 内の弾性波速度が遅いほど走時の変化は大きい。

これらの結果より、深度 250mで実施した弾性波トモグラフィの解析に関して、走時の変化を送受信点間の線分と EdZ と健岩部とのなす角で分類することにより、受信点の位置を気にせず抽出した全てのデータを同時に解析できることが分かった。

(6) 物理探査データの解析

(5)で検討した解析手法に基づいて、実測されたモニタリングデータの解析を行う。図 3.3-76 は深度 250m 坑道で取得した弾性波トモグラフィの走時であり、2011 年 5 月 30 日を基準とした差分の結果である。観測データはバラつきが大きいため、各観測データから外れ値を局所外れ値因子法で除去した。観測データでは、2011 年 5 月 30 日から 2012 年 9 月頃にかけて走時が遅くなっている傾向が認められる。

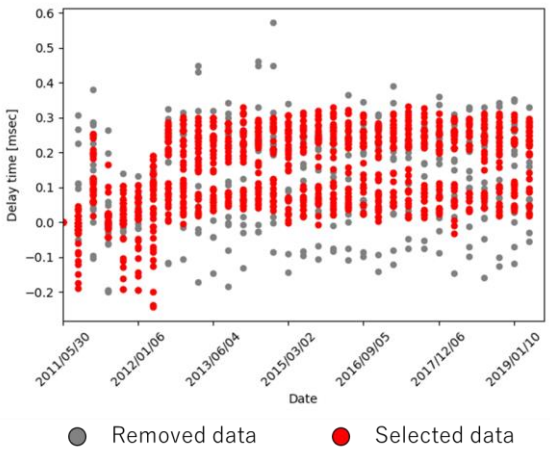


図 3.3-76 2011 年 5 月 30 日を基準とした走時の変化

全データを示しており、灰色が除外されたデータで、赤色が外れ値を除去したデータ。

図 3.3-77 は、(5)での議論に基づき、走時の差分を送受信点と坑道壁面のなす角度で分類した結果である。各々のグラフには、除外された外れ値のデータ、抽出されたデータ、抽出されたデータの平均を、各々、灰色、赤色、黒色で示している。図 3.3-78 は、図 3.3-77 の分類毎の平均値を時系列変化で示したグラフである。

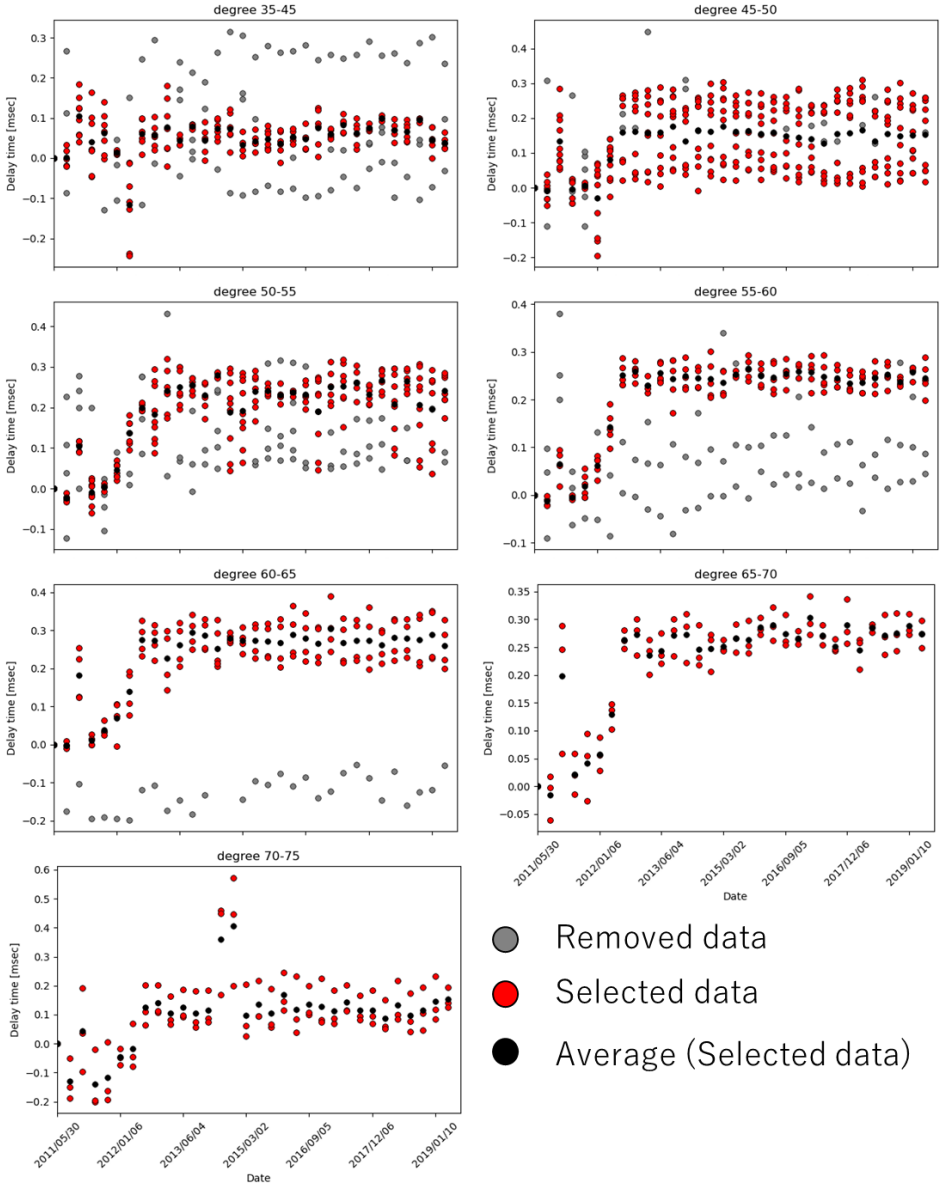


図 3.3-77　2011 年 5 月 30 日を基準とした走時の変化を、送受信点と坑道壁面のなす角で分類した結果

各々の結果に対して外れ値を除去しており、灰色が除外されたデータ、赤色が外れ値を除去したデータ、黒色が外れ値を除去したデータの平均を示す。

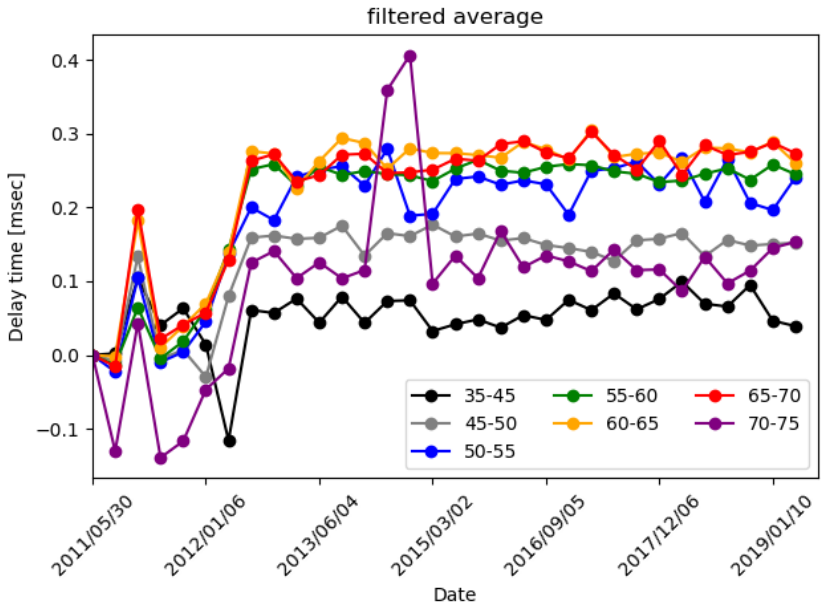


図 3.3-78　2011 年 5 月 30 日を基準とした走時の変化を、送受信点と坑道壁面のなす角で分類した場合のその平均の時系列変化

(5)での議論より、EdZ に時間変化がある場合の走時の時間変化を角度で分類した場合、その変化は角度が大きくなるほど大きくなることが示されている。図 3.3-77 および図 3.3-78 では、角度が 70 度から 75 度の場合を除き、角度の大きさと走時の遅れに概ね予測された傾向が認められることから、坑道掘削後から 2 年間程度の間、EdZ の弾性波速度もしくはその厚さに変化があったものと予測される。

(5)では、EdZ 内の速度が変化する場合には、なす角度と走時の遅れに線形関係が、EdZ の厚さが変化する場合には二次曲線状の関係があることが示されている。ある時点での走時遅れを角度でプロットし角度と走時遅れの関係を評価することにより、観測期間中の走時の変化が、EdZ 内の速度の変化によるものかそれとも EdZ の厚さが変化したことによるものか評価できると考えられる。観測走時に影響を及ぼした EdZ の変化の要因を特定するために、ある観測時点のおける走時遅れと角度の関係を示すグラフを図 3.3-79 に示す。図 3.3-79 に示す通り、掘削後時間が経過するにつれて角度によらず全体的に走時が遅くなっている。また、2012 年 12 月頃までは変化が認められるものの、それ以降はほとんど走時と角度の関係に変化が認められない。時間変化に伴う走時の全体的な傾向に変化は認められるものの、走時と角度に着目した場合、それらに明確な線形関係や二次曲線状の関係があるかの評価は現時点では困難であり、従って観測された走時の遅れが EdZ 内の弾性波速度の変化によるものかそれとも EdZ の厚さの変化によるものかに関するか現状の解析では評価は困難である。

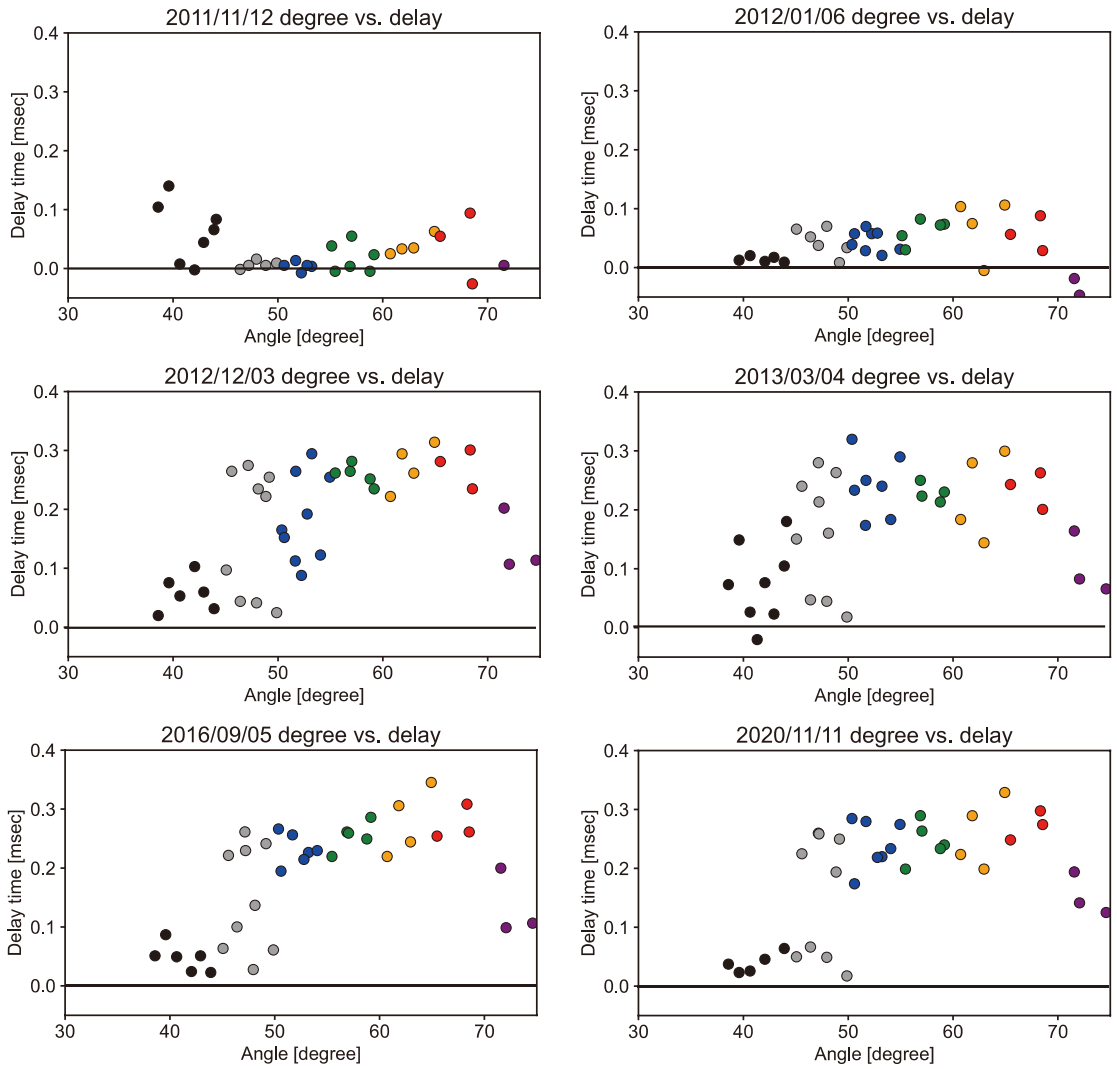


図 3.3-79　ある時点における 2011 年 5 月 30 日を基準とした走時の変化と、送受信点と坑道壁面のなす角の関係を示したグラフ

各々、2011 年 11 月 12 日、2012 年 1 月 6 日、2012 年 12 月 3 日、2013 年 3 月 4 日、2016 年 9 月 5 日、2020 年 11 月 11 日に測定された結果。

(7)　まとめ

本章では、深度 250m で実施した弾性波トモグラフィデータを解析するために、レイトレーシングおよび走時計算を実施し、吹付けコンクリートの影響および EdZ が変化した場合の走時の変化を順計算により評価した。モデル計算結果とシミュレーション結果を比較したところ、実測データには吹付けコンクリートの影響は認められなかった。順計算の結果に基づき EdZ の経時変化の評価方法を検討したところ、走時の差分を送受信点と坑道壁面のなす角で分類することにより、観測データから EdZ の変化の情報を抽出できることが分かった。今回検討した手法により、実測データの EdZ の経時変化の評価を実施したところ、掘削後 2 年程度の間には、EdZ の変化によると考えられる走時の変化が認められた。他方、その変化が EdZ の何の変化に起因しているかについては、更なる検討が必要である。

3.3.3.4 深度 350m 試験坑道 2 で取得された物理探査データの解析

本章においても、EdZ の経時変化の有無を検討するため前章と同様に走時の変化に着目した解析を実施する。前章と同様に、波線および走時の順計算を実施し、吹付けコンクリートの影響および EdZ の経時変化に伴う走時の変化の予測解析を実施した。得られた予測解析結果に基づいて EdZ の経時変化の評価手法を検討した。検討した評価手法を実際に取得されたデータに適用し、弾性波トモグラフィ測定により EdZ の経時変化が認められるか検討した。

(1) 解析手法

350m の試験坑道 2 では、円形坑道が掘削されている。そこで、図 3.3-80 に示すように吹き付けコンクリートおよび EdZ が同心円状に広がる構造を仮定し、レイトレーシングおよび走時の計算を行った。なお、本章では坑道の中心を極として送信点から EdZ へ入射する地点、EdZ から吹き付けコンクリートに入射する地点等の波線が曲がる場所の座標を極座標で表し、式(3) と同様の伝播時間を最小化する座標を計算することで走時および波線を計算した。なお、波線の計算は図 3.3-80 に示す通り、送信点から EdZ を通り受信点に至る経路、送信点から EdZ、吹付け、受信点と伝わる経路を考慮し、これらのうち最短となる走時を求めた。なお、吹き付けコンクリート内を伝播する経路では、坑道の壁面および EdZ と吹付けコンクリートの境界で反射を繰り返す経路も考え得るが、この経路に関しては簡単のため、図 3.3-80 右図で示す通り、吹付けコンクリートに入射後に坑道壁面まで伝達し、その後坑道壁面を伝わり受信点まで伝わる経路で近似した。

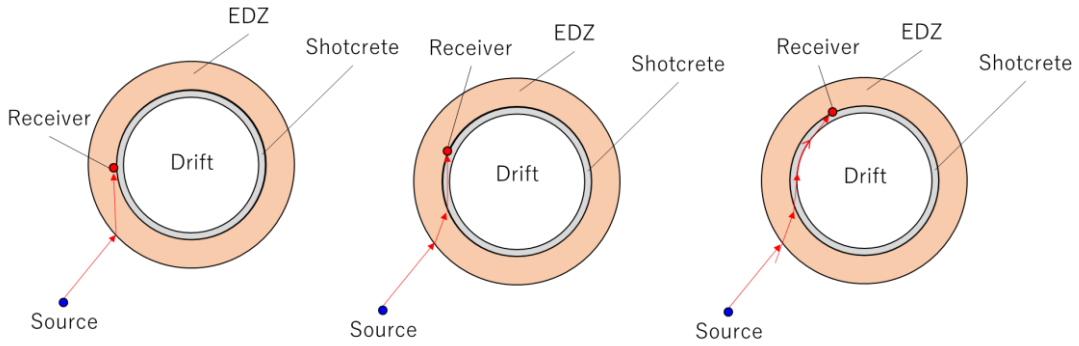


図 3.3-80 試験坑道 2 で実施した弾性波トモグラフィの走時を解析するために仮定した初動の伝播経路

(2) 吹付けコンクリートの影響や EdZ が経時変化した場合の波線および走時の予測解析

試験坑道 2 周辺では、トモグラフィ断面を作成するために、図 3.3-81 で示す通り、試験坑道 2 を挟み込むように掘削された 2 本のボーリング孔が掘削されており、ボーリング孔内を送受信点とする観測が行われている。また、試験坑道 2 の孔壁にも受信機を設置しており、これら送受信点間における走時を観測している。

試験坑道 2 周辺の EdZ を解析対象とするため、試験坑道 2 の孔壁に設置した受信点で取得されたデータのみを解析対象とした。また、本研究では吹き付けコンクリート内の多重反射を簡略化しており、こうした経路を通った走時の精度の低下が予測される。送受信ペアを直線で結んだ

場合にその線分が試験坑道 2 を横切る場合には伝播中に吹き付けコンクリート内で多重反射が予測されるため、そのような送受信点の組み合わせにより取得されている結果に関しては解析対象から除外した。

順計算に際し設定した吹付けコンクリートの厚さおよび試験坑道 2 の半径、吹付けコンクリート内の弾性波速度および健岩部の弾性波速度を表 3.3-13 に示す。吹付けコンクリートの弾性波速度は室内試験で測定された値を、健岩部の弾性波速度に関しては、昨年度実施した、岩石サンプルを用いた室内試験および検層の結果（原子力機構・原環センター, 2020）に基づき設定した。EdZ の厚さおよび EdZ 内の弾性波速度を様々に変化させた場合の走時を計算し、EdZ が経時変化した場合の走時の予測解析を実施した。

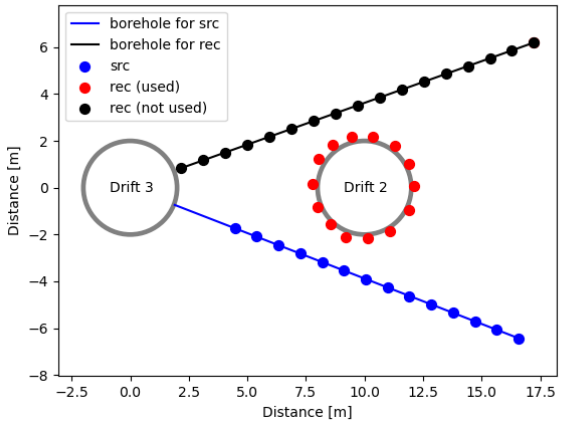


図 3.3-81　試験坑道 2 周辺の送受信点配置および解析に使用したデータの受信点配置

表 3.3-13　シミュレーションで使用した入力値

Properties	Value	Properties	Value
Radios of drift	2.1 m	Vp in intact rock	2.0 km/s
Thickness of shotcrete	0.2 m	Vp in shotcrete	5.6 km/s

図 3.3-82 に、解析する送受信点を直線で結んだ図、吹付けコンクリートが存在する場合の初動の波線および吹き付けコンクリートの影響を考慮しない場合の初動の波線を示す。図の結果は、EdZ の厚さが 1m で EdZ 内の弾性波速度が 1.4km/s の場合の結果である。

吹付けコンクリートの影響を考慮した場合、波線は試験坑道 2 の下部付近に集中しており、ほとんどの波線は吹付けコンクリートを通過している。また、健岩部と EdZ の境界における屈折は顕著ではない。他方、吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合には、明確な屈折が EdZ と健岩部の境界で認められ、波線が送受信点間の広い範囲に分布している。

図 3.3-83 は、EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の波線の比較である。EdZ の厚さを 1m に固定し、EdZ 内の弾性波速度を 1.0km/sec から 1.8km/sec まで変化させた場合の結果を示しており、吹付けコンクリートの影響を考慮した場合とその影響を考慮しない場合の結果の両方を示している。吹付けコンクリートの影響を考慮した場合、EdZ 内の弾性波速度が変化した場合でも、波線にあまり変化は見られない。他方、吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合には、EdZ と健岩部の境界における屈折角が EdZ 内の弾性波速度の低下に伴い大きくなっており、EdZ 内の弾性波速度の変化に伴い波線も大きく変化している。

図 3.3-84 は、EdZ の厚さが変化した場合の波線の比較である。EdZ の弾性波速度は 1.6km/s に固定し、EdZ の厚さが 0.5m から 1.5m まで変化した場合の波線を比較している。この場合においても、吹付けコンクリートの影響を考慮した場合には、波線が坑道の下部に集中しており EdZ の厚さの変化に伴う波線の変化はあまり認められない。他方、その影響を考慮しない場合には、EdZ と健岩部の境界における屈折角が EdZ の厚さに伴い変化しており、波線の変化を確認することができる。

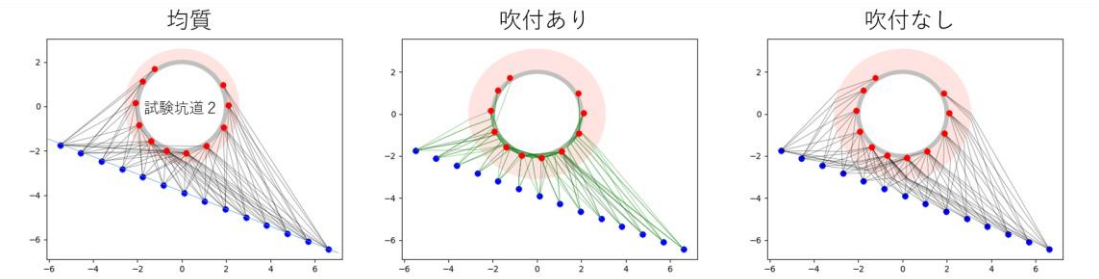


図 3.3-82　解析する送受信点間の直線経路（左図）、吹付コンクリートの影響を考慮した場合の波線（中図）、吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合の波線（右図）
黒線は吹き付けコンクリートを通過しない波線で、緑線は吹き付けコンクリートを通過する波線。

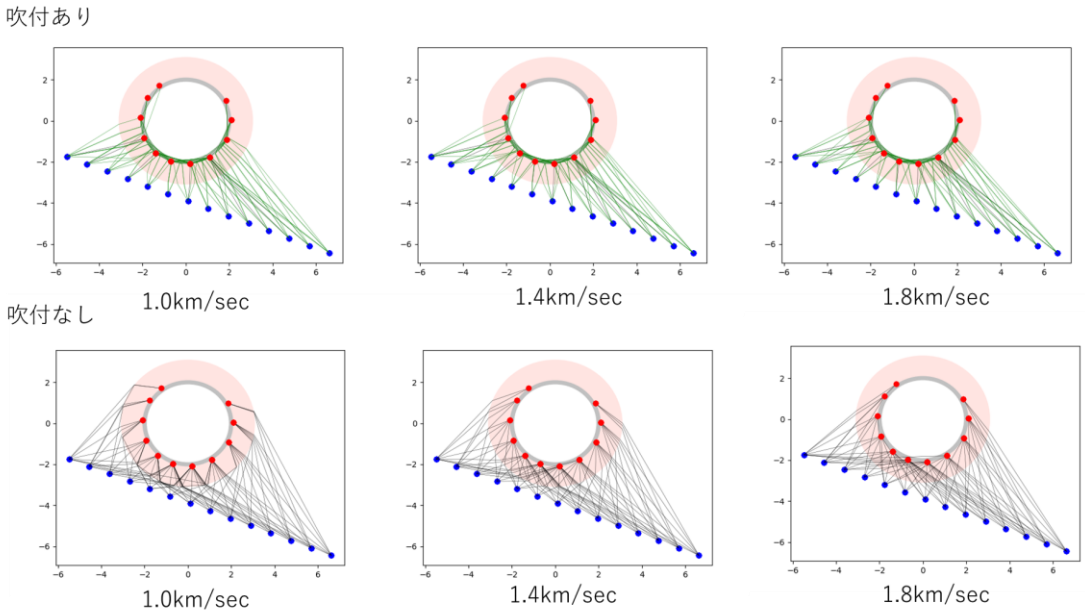


図 3.3-83　EdZ 内部の弾性波速度が変化した場合の波線の変化の比較
吹付コンクリートの影響を考慮した場合（上図）と考慮しない場合の結果（下図）。

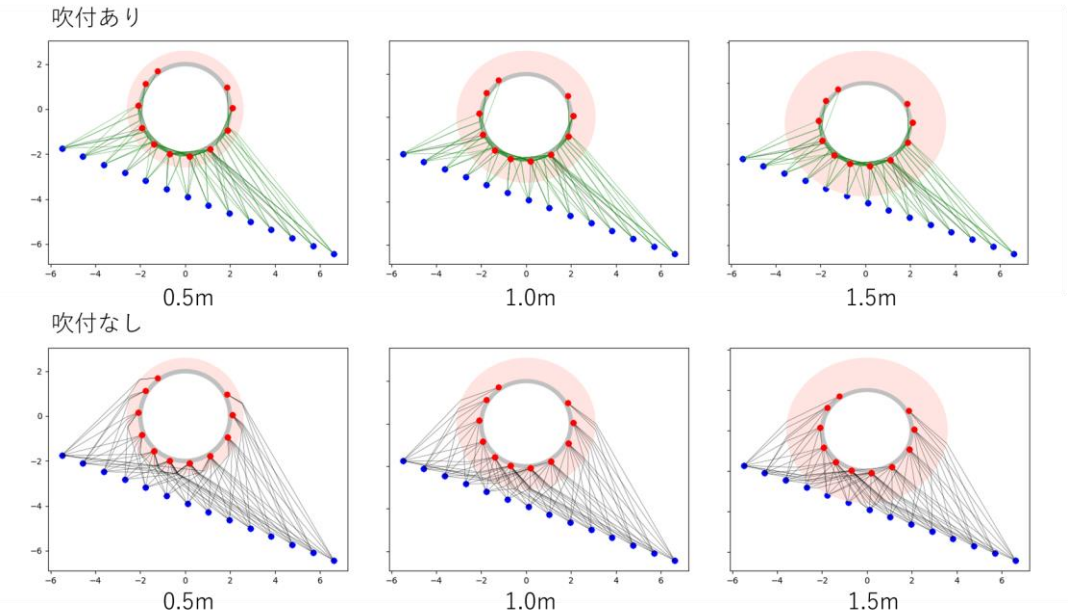


図 3.3-84　EdZ の厚さが変化した場合の波線の変化の比較
吹付コンクリートの影響を考慮した場合（上図）と考慮しない場合の結果（下図）。

吹付けコンクリートの影響が無視できない場合には、波線に偏りが生じる一方で、その影響を無視できる場合には波線は空間にまんべんなく分布する。トモグラフィ解析においては、感度分布の観点から波線の分布に偏りが無い方が好ましいため、吹付けコンクリートを伝播することによる下部への波線の集中は逆解析等において好ましくない影響を与える。他方、吹付けコンクリートの影響が顕著な場合には、EdZ の弾性波速度や EdZ の厚さが変化しても、吹付けコンクリートの影響がない場合と比較して初動の伝播経路があまり変化しない。このことをモニタリングの観点から評価すると、吹付けコンクリートを伝播する初動により EdZ に変化があったとしても、EdZ による屈折等による初動の波線への影響を排除し観測する位置を固定することができるということを示唆している。

(3)　シミュレーション結果と実測データの比較

前節で実施した順計算の妥当性および実測したデータにおける吹付けコンクリートの影響を評価するため、順計算により得られた結果と実測データの比較を図 3.3-85 および図 3.3-86 に示す。吹付けコンクリートの影響を考慮した結果を図 3.3-85 に、考慮しない場合の結果を図 3.3-86 に示す。横軸で観測値を縦軸で順計算により得られた結果を示している。各々のグラフは EdZ の厚さを 0.5m から 2.0m から変化させた場合の結果で、各グラフ中で EdZ 内の弾性波速度を 1.0km/s から 1.8km/s まで変化させた場合の結果を異なる色点で示す。

吹き付けコンクリートの影響を考慮した場合、EdZ の厚さが 0.5m 程度の場合は順計算により得られた走時は、観測された走時をよく再現している。EdZ の厚さが 1m を上回る状況を仮定した場合にも、EdZ 内の弾性波速度が 1.6km/s～1.8km/s 程度の場合には、本研究で実施した順計算により観測された走時を再現することができている。他方、吹き付けコンクリートの影響を考慮しない場合、順計算により計算される走時はどのモデルの場合でも実測された走時よりも遅く、再現することはできなかった。これらの結果より、試験坑道 2 周辺で取得された弾性波トモグラフィの走時データは吹付けコンクリートの影響を受けていると考えられ、EdZ の厚さは 0.5m 程度、もしくは 1m 程度で弾性波速度が 1.6km/s～1.8km/s 程度しか低下していないと推定できる。

ただし、これらの EdZ の厚さと速度のトレードオフに関しては、本研究で実施している解析からは区別することはできない。なお、健岩部の弾性波速度 2.0km/s から 1.6km/s～1.8km/s 程度までの弾性波速度の低下は、図 3.3-58 に示す通り、岩石内の飽和度の変化だけでも十分に説明できる弾性波速度の変化である。また、亀裂の発生による EdZ の弾性波速度に対する影響は、青柳ほか（2014）等で議論されており、これら物性値の取得を通して EdZ の厚さを特定することができると考えられる。

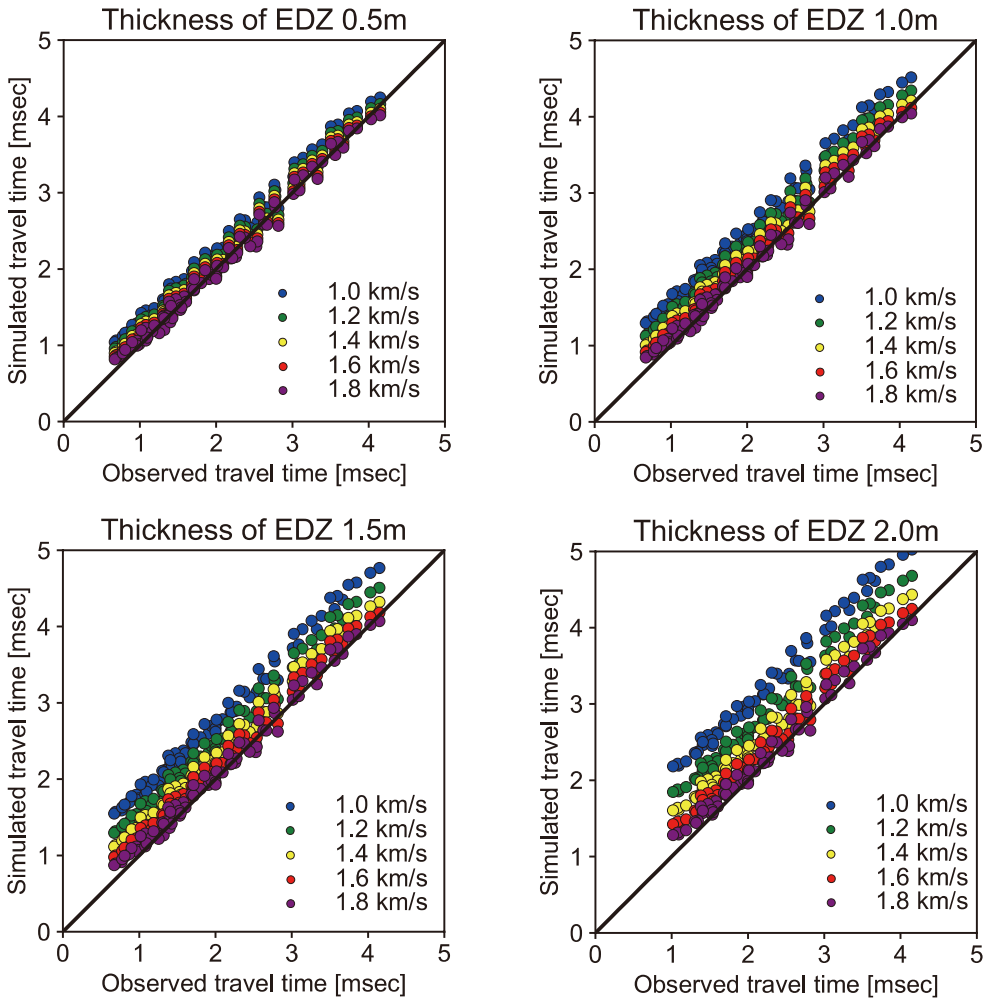


図 3.3-85　吹付けコンクリートの影響を考慮した場合の走時の順計算結果と観測データの比較
各々のグラフは EdZ の厚さが異なる場合の結果を示しており、グラフ中の異なる色で EdZ 内の弾性波速度が異なる場合の結果を示している。

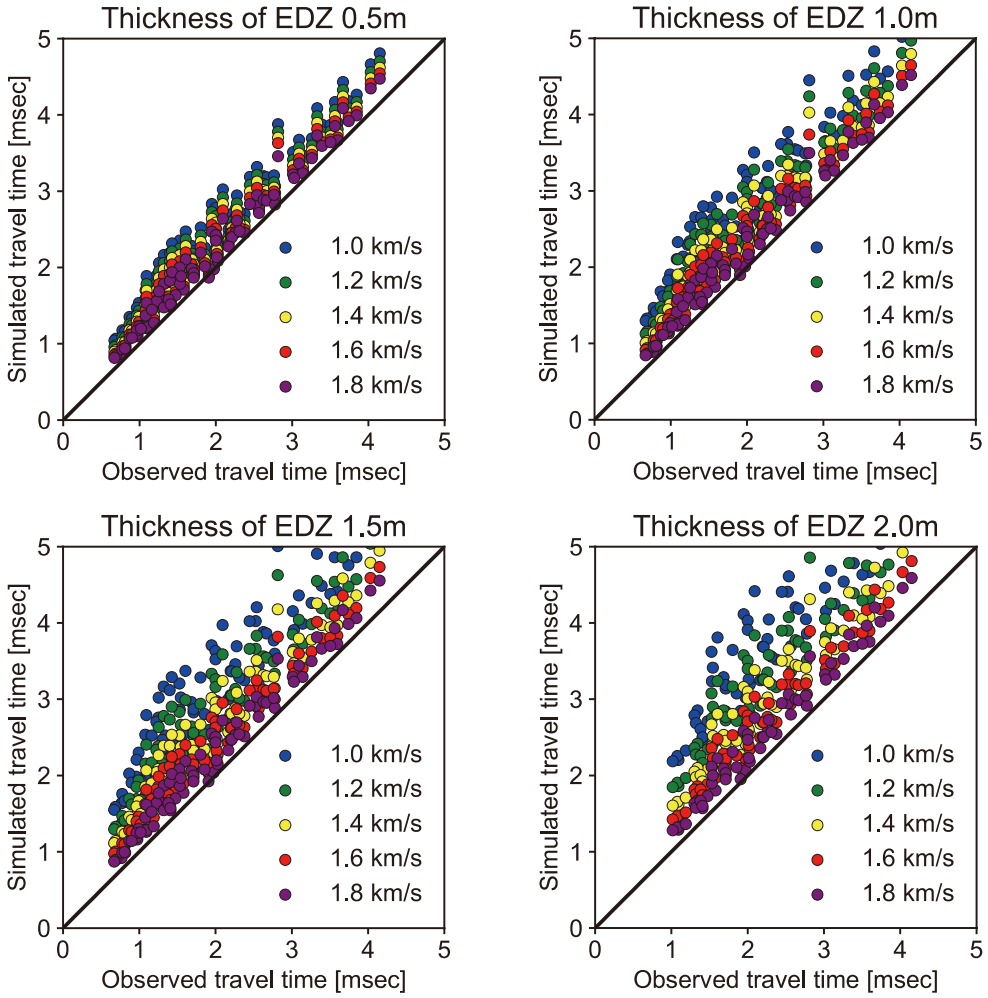


図 3.3-86　吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合の走時の順計算結果と観測データの比較

(4)　順計算により得られた結果に基づいた EdZ の経時変化把握手法の検討

順計算により、得られた結果に基づいて EdZ の経時変化を把握する手法を検討する。本章では、第 3 章と同様に走時の差分にから EdZ の経時変化を抽出する手法を検討する。なお、前節での議論により、本研究で使用する実測データは吹付けコンクリートの影響を受けていると予測されているものの、吹付けコンクリートの影響がない場合の手法に関しても検討する。

図 3.3-87 は解析に使用したデータの送受信点間距離のヒストグラムと送受信点の角度の差を示す。第 3 章でも議論したように、EdZ の厚さや弾性波速度が変化した場合の走時の変化は、送受信点間の距離や送受信点間のなす角度により影響を受けることが予測される。従って、走時の差分をこれら距離や角度により分類することで、EdZ の経時変化を把握する適切な手法を検討することができると考えられる。図 3.3-88 に送受信点間距離と送受信点間のなす角度の関係を示す。試験坑道 2 周辺の観測点配置の場合、第 3 章図 3.3-71 で示した場合と比較して送受信点間距離と送受信点間の角度に単純な関係は見られない。

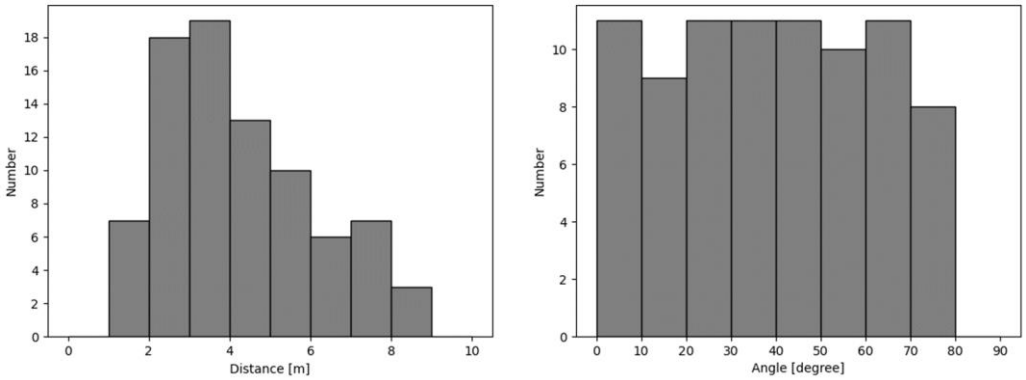


図 3.3-87　解析に使用した送受信点間距離と極座標における送受信点間の角度のヒストグラム

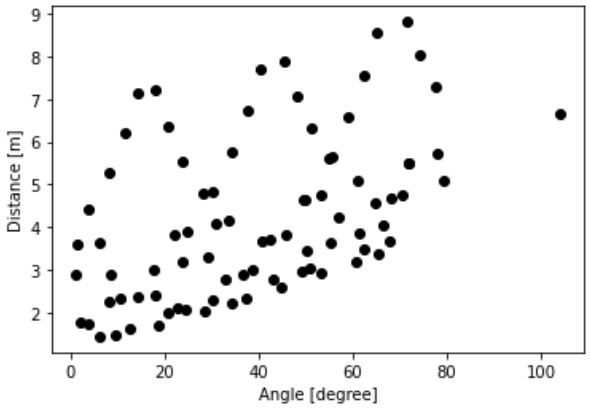


図 3.3-88　解析に使用した送受信点間距離と送受信点間の角度の関係

図 3.3-89 および図 3.3-90 に、吹付けコンクリートの影響を考慮した場合における EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を示す。図 3.3-89 は横軸を送受信点間距離とした場合の結果で、図 3.3-90 は送受信点間のなす角を横軸とした場合の結果である。各々のグラフで EdZ の厚さが 0.5m から 2.0m までの場合の結果を示している。各グラフ内の結果は、すべて弾性波速度が 0.2km/s 低下した場合の結果であり、異なる色で EdZ 内における変化前の弾性波速度が 1.2km/s から 1.8km/s までの場合を示している。

吹付けコンクリートの影響を考慮した場合、EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化は、送受信点間距離や送受信点間の角度によらず全ての送受信点間において、ほとんど一様に変化している。このことは、図 3.3-83 で示した波線により説明することができる。吹付けコンクリートの影響がある場合には EdZ 中の弾性波速度が変化した場合でも波線がほとんど変化しない。また、この場合にはすべての波線が EdZ を最短経路に近い経路で伝播している。EdZ 中の弾性波速度が変化した場合でも、変化前と変化後の波線経路はほとんど同じであるため、走時の差は EdZ 内部の速度差のみを反映したものにっている。

EdZ が厚いほど EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化は大きくなり、また、EdZ 内の弾性波速度が遅いほど EdZ 内を通過する時間が長くなるため、EdZ が厚く EdZ 内の弾性波速度が遅いほど、EdZ ないの弾性波速度が変化した場合の走時の変化は大きくなっている。

図 3.3-91 および図 3.3-92 に、吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合に EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を示す。図 3.3-91 は横軸を送受信点間距離とした場合で、図 3.3-92 は送受信点間のなす角度を横軸とした場合の結果である。

吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合、EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時と送受信点間距離の関係に一意な関係は認められない。他方、送受信点間の角度で示した場合には、送受信点間の角度が大きくなるにつれて値のバラつきは大きくなるものの、走時の変化量と送受信点間のなす角度の間には一意な関係が認められる。

これに関しても、図 3.3-83 で示す、EdZ の内の弾性波速度が変化した場合の波線の変化により説明することが可能である。吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合、EdZ と健岩部の境界における屈折による波線の影響が顕著にみられる。屈折は送受信点間のなす角が大きくなるにつれて大きくなり、送受信点間の距離とは関係がない。送受信点間のなす角がゼロに近い場合には、走時の変化は EdZ 内を伝達する速度の変化の影響を主に反映することになる。他方、送受信点間の角度が大きくなる場合には、EdZ 内の速度変化の影響に加え送受信間の角度に応じた屈折による経路の長さの違いによる影響をうけることとなる。走時の変化を送受信点間の角度で分類することにより、こうした波線経路と速度変化の影響の双方を考慮することができるため、比較的一意な関係を得ることができたと考えらえる。

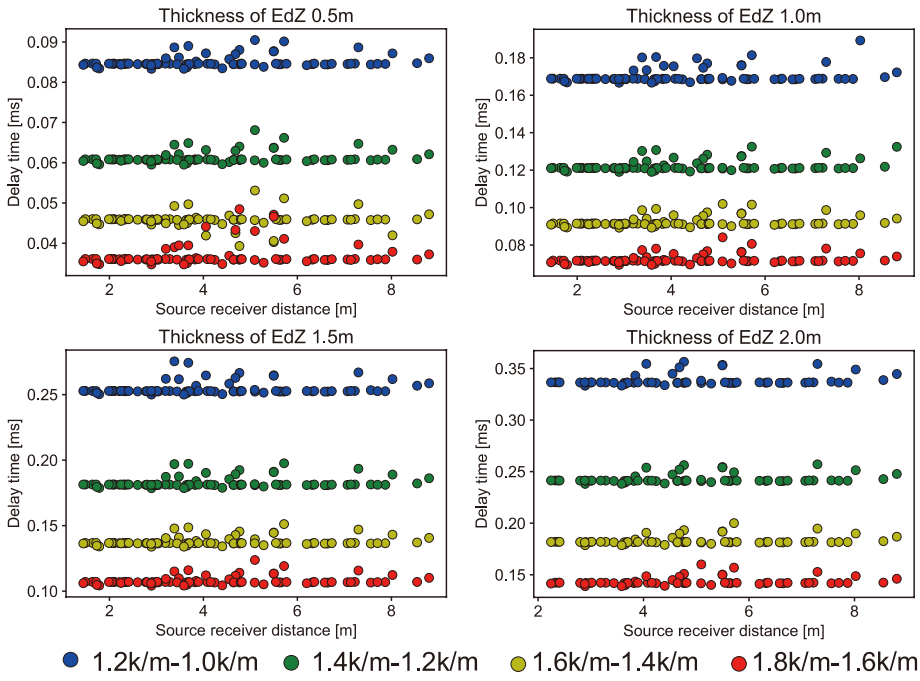


図 3.3-89　吹付コンクリートの影響を考慮した場合に EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を送受信点間距離を横軸として示した結果

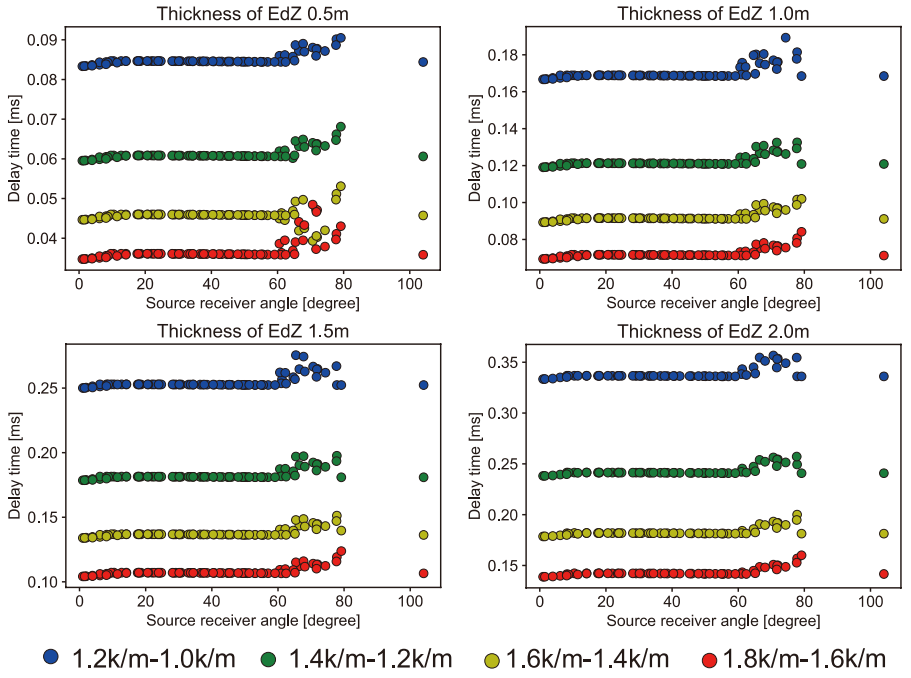


図 3.3-90　吹付コンクリートの影響を考慮した場合に EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を送受信点間のなす角度を横軸として示した結果

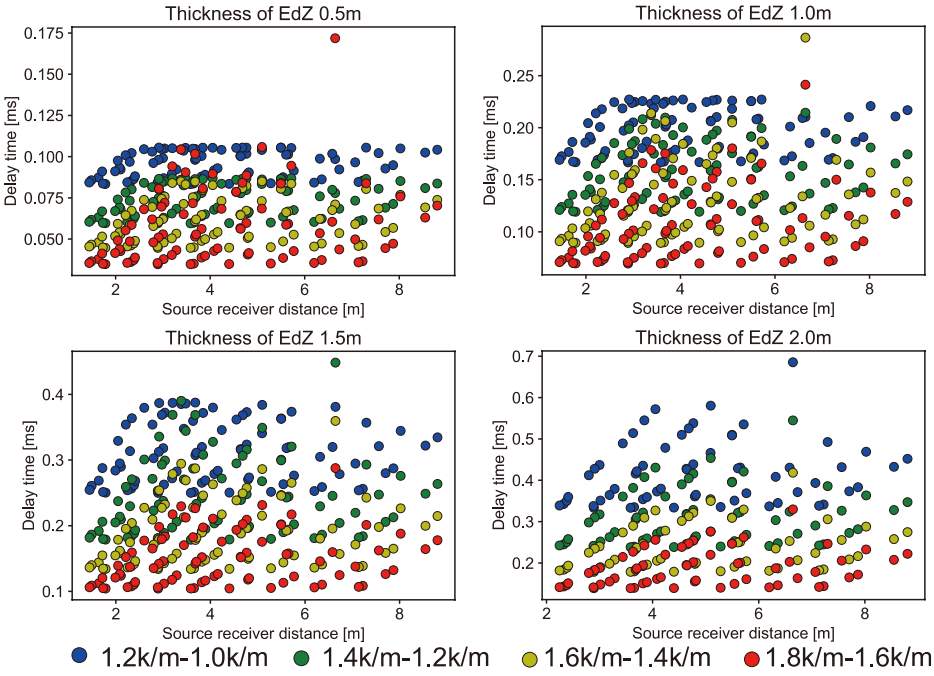


図 3.3-91　吹付コンクリートの影響を考慮しない場合に、EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を送受信点間距離を横軸として示した結果

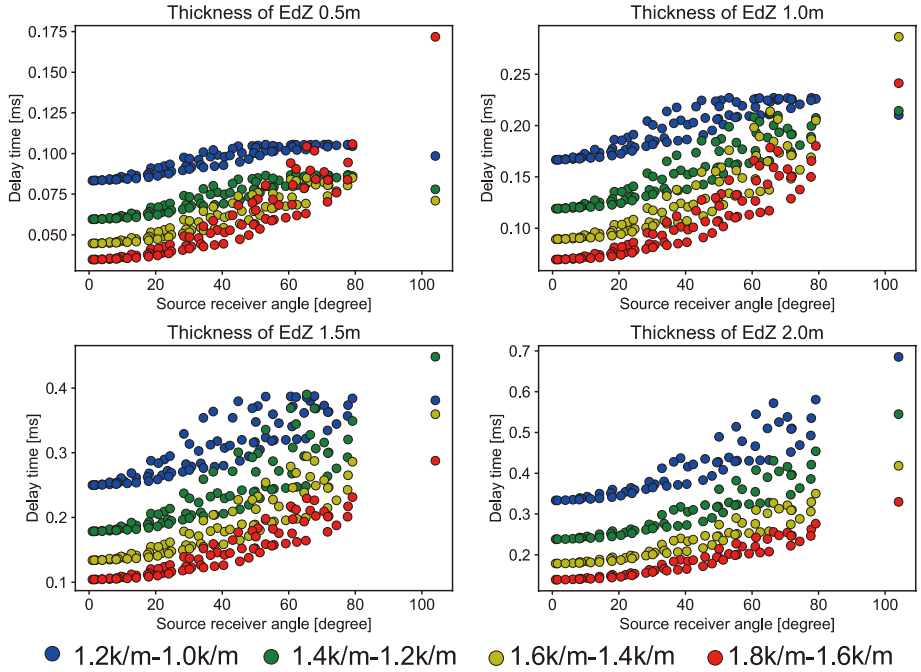


図 3.3-92　吹付コンクリートの影響を考慮しない場合に、EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を送受信点間のなす角度を横軸として示した結果

図 3.3-93 および図 3.3-94 は、吹付けコンクリートの影響を考慮した場合で、EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を示す。図 3.3-93 は横軸を送受信点間距離とした場合の結果で、図 3.3-94 は送受信点間のなす角を横軸とした場合の結果である。各々のグラフで EdZ の弾性波速度が 1.0km/s から 1.8km/s の場合を示している。各グラフ内の結果は、すべて EdZ の厚さが 0.5m 変化した場合の結果である。異なる色で変化前の EdZ の厚さが 0.5m、1.0m、1.5m の場合を示している。

吹付けコンクリートの影響を考慮した場合、EdZ の厚さが変化した場合においても EdZ 内の弾性波速度が変化した場合と同様に、全ての送受信点の組み合わせにおいて、走時がほぼ一様に変化している。これに関しても、EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化と同様に、図 3.3-84 に示す波線により説明することができる。図 3.3-84 に示す通り、EdZ の厚さが変化した場合でも、吹付けコンクリートの影響を考慮した場合には送信点から EdZ を通り吹付けコンクリートに至る経路にほぼ変化は見られない。従って EdZ の厚さが変化した場合、初動の伝播経路は変化しないため、EdZ が厚くなり弾性波速度が低下した領域が増えた分のみ一様に走時が変化したものと考えられる。

この場合、波線経路に変化がほとんどないため、走時の変化は、EdZ の厚さの変化分のみに依存し EdZ の変化前の厚さにはあまり依存しない。他方、EdZ 内の弾性波速度が遅い方が EdZ を通過する時間が長くなるため、走時の変化が大きくなっている。

図 3.3-95 および図 3.3-96 は、吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合に、EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を示す。図 3.3-95 は横軸を送受信点間距離とした場合の結果で、図 3.3-96 は送受信点間のなす角を横軸とした場合の結果である。各々のグラフで EdZ の弾性波速度が 1.0km/s から 1.8km/s の場合を示している。各グラフ内の結果は、すべて EdZ の厚さが 0.5m 変化した場合の結果である。異なる色で変化前の EdZ の厚さが 0.5m、1.0m、1.5m の場合を示している。

この場合の結果に関しても、EdZ の弾性波速度が変化した場合と同様に、走時の変化は距離で分類しても一意な関係は得られないが、送受信間の角度で分類した場合には一意に近い関係が得られている。これに関しても、これまでの議論と同様に波線の変化により説明できるものと考えられる。

これらの結果をまとめると、吹付けコンクリートの影響が顕著な場合には、図 3.3-81 に示すような送受信点配置の場合、EdZ に変化がある場合にはすべての送受信ペアにおいて走時の差分に一様に影響が表れていると予測されるため、全ての送受信ペアの走時の差分を計算しその変化を抽出すればよいと考えられる。複数の送受信ペアから取得される走時の差分から、ノイズ等の影響を考慮し代表的な値を取得することで EdZ の経時変化が評価できると考えられる。他方、吹付けコンクリートの影響がない場合には走時の差分を送受信間の角度で分類し、その走時変化と角度の関係から EdZ の経時変化を推定する必要があると考えられる。

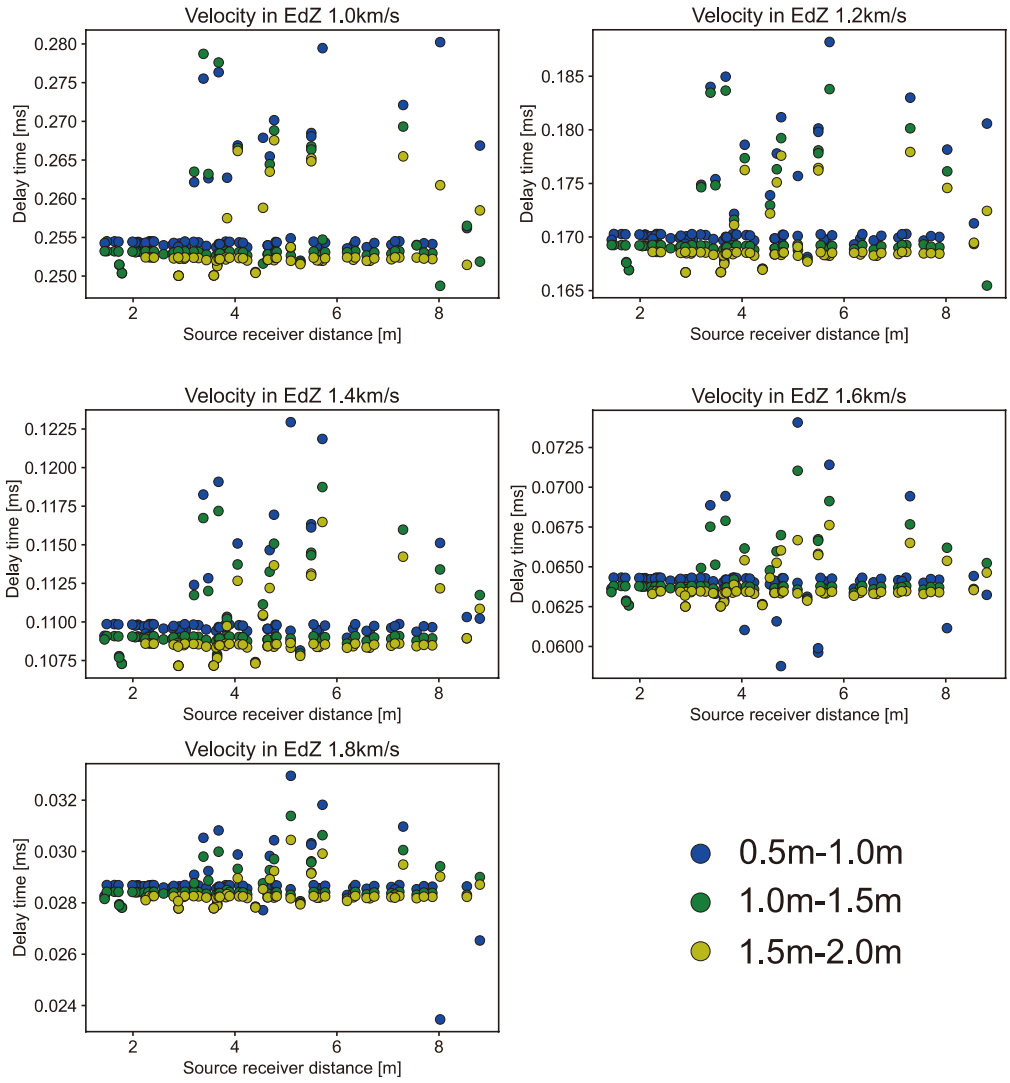


図 3.3-93　吹付コンクリートの影響を考慮した場合に EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を送受信点間距離を横軸として示した結果

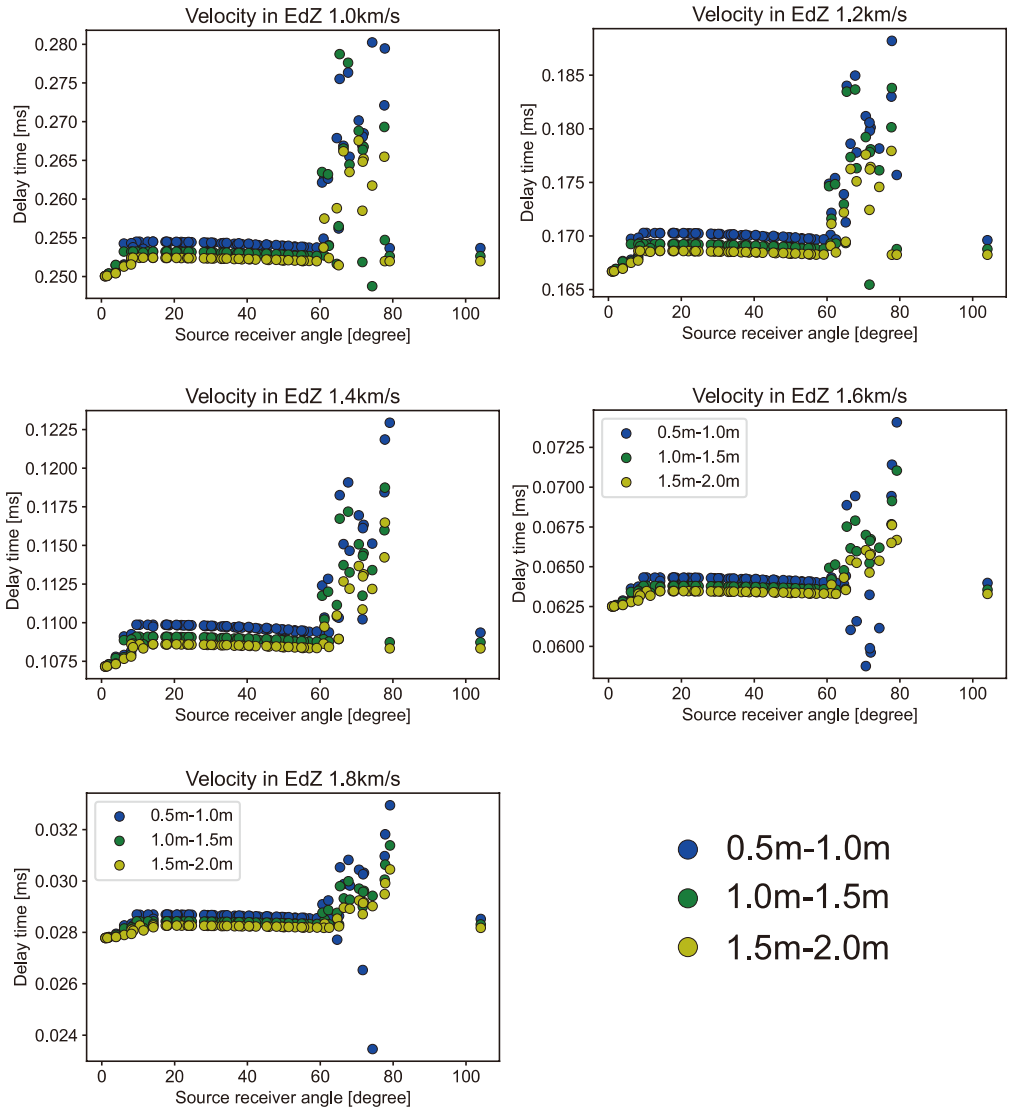


図 3.3-94　吹付コンクリートの影響を考慮した場合に EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を送受信点間の角度を横軸として示した結果

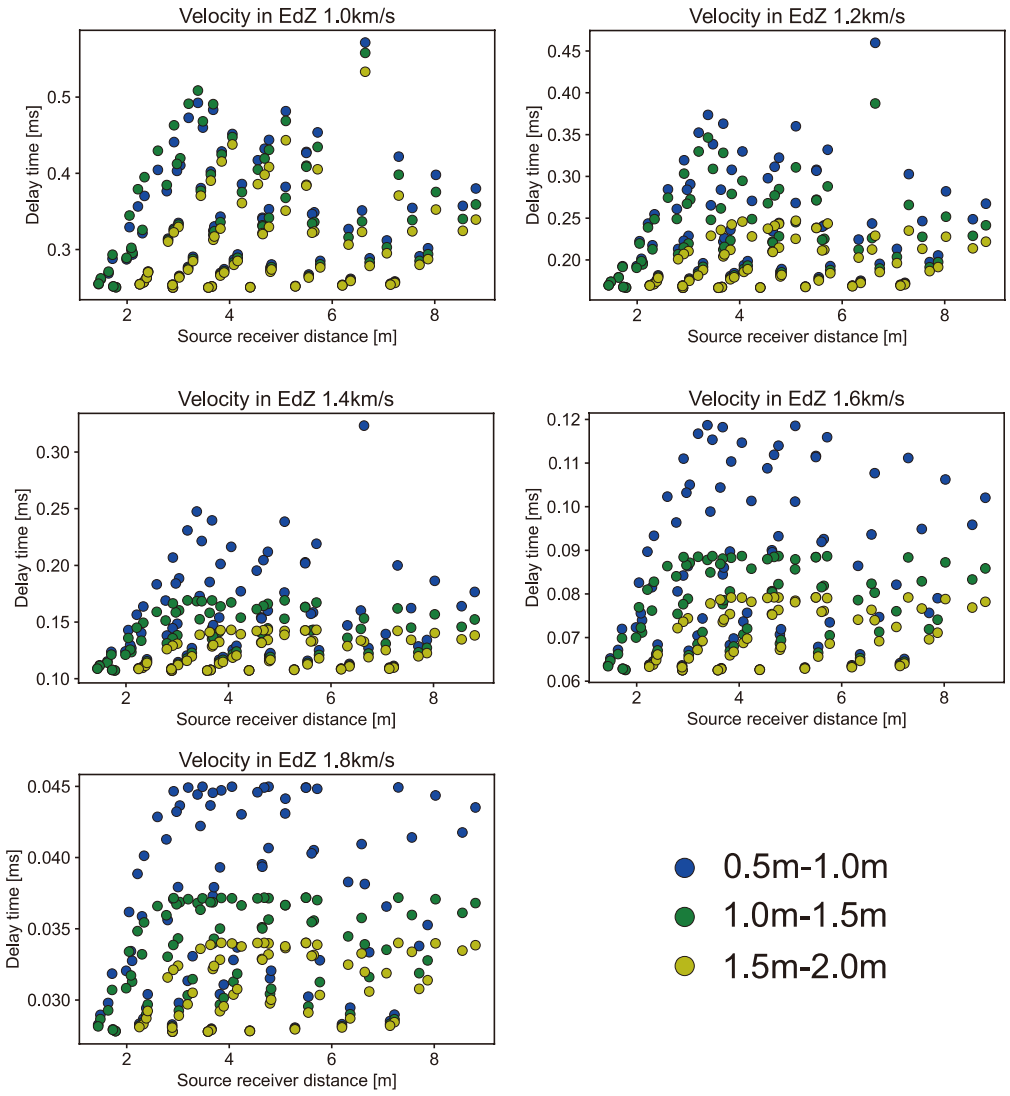


図 3.3-95　吹付コンクリートの影響を考慮しない場合に EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を送受信点間距離を横軸として示した結果

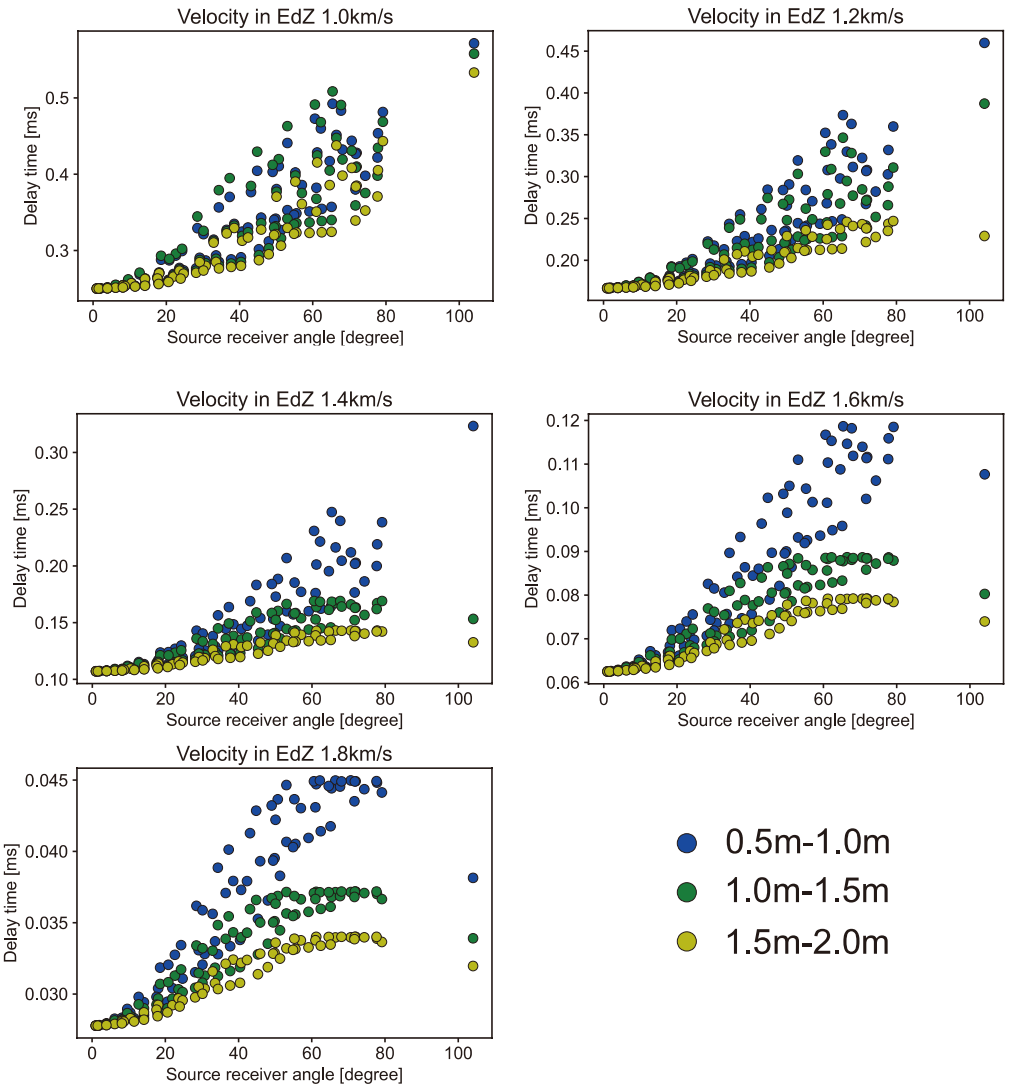


図 3.3-96　吹付コンクリートの影響を考慮しない場合に EdZ の厚さが変化した場合の走時の変化を送受信点間の角度を横軸として示した結果

(5) 物理探査データの解析

前節で検討した解析手法に基づいて、深度 350m 試験坑道 2 で取得されたモニタリングデータを解析し、EdZ の変化が捉えられているか検討する。(3)で検討した通り、取得したモニタリングデータは吹付けコンクリートの影響を受けていると考えることができる。従って、検討した手法のうち、吹付けコンクリートの影響がある場合の解析手法を適用する。

吹付けコンクリートの影響が顕著な場合、EdZ の変化は走時の差分を計算すれば、すべての送受信ペアの走時に等しくその影響が現れることになる。図 3.3-97 は、本研究で解析対象とした全送受信ペアで取得された走時の 2014 年 3 月 3 日のデータを基準とした差分である。正の変化および負の変化が一様に表れており、時系列変化として見た場合にも特別な傾向は認められない。3.3.3.4(4)での検討および Aoyagi et al., (2018)を参考に、EdZ の厚さを 0.5m 程度と仮定した場合、図 3.3-89、図 3.3-90、図 3.3-93、図 3.3-94 より 0.05msec 程度の走時の変化を検出する必要があるが、取得されたモニタリングデータのバラつきはこの値よりも大きく、また平均値にも 0.05msec 程度の系統的な変化は認められない。

詳細に検討するために、全送受信点で取得された走時データを同時に解析するのではなく、図 3.3-98 に示す送信点の組み合わせ毎に取得されたデータを分類する。送信点群を試験坑道 3 側から分類した場合、モデル計算中における EdZ 付近を通過する波線は、試験坑道 3 側の送信点群からの初動は坑道下部の左下側の EdZ を、ボーリング孔中心付近にある送信点群からの初動は坑道下部の EdZ を、ボーリング孔右側の送信点群からの初動は坑道下部右下の EdZ を通過している。モデル計算では、EdZ の厚さを同心円状に広がっていると仮定して計算したが、吹付けコンクリートにより波線が固定されることを考慮すると、図 3.3-98 のように送信点を分類し解析することで、坑道下部の領域を分割して EdZ の変化を把握することができると考えられる。従って、送信点群を図 3.3-98 の 3 組に分けた解析を実施した。なお、吹付けコンクリートによる影響が認められる場合に EdZ に経時変化があった場合には、どの送受信ペアにおいても同一の変化が現れるが、距離が長い場合にはノイズの影響が大きくなることや、図 3.3-94 のように送受信間の角度が高角度の場合には、走時の差分のバラつきが大きくなることが予測されるため、送受信点間の距離および送受信点間の角度についても分類を行った。

図 3.3-99 から図 3.3-104 に結果をまとめる。図 3.3-99、図 3.3-100 は坑道左下を対象とした結果で各々送受信点間の距離と送受信点間の角度で分類した結果を、図 3.3-101、図 3.3-102 は坑道直下を対象とした結果で各々送受信点間の距離と送受信点間の角度で分類した結果を、図 3.3-103、図 3.3-104 は坑道右下を対象とした結果で各々送受信点間の距離と送受信点間の角度で分類した結果を示す。図 3.3-99、図 3.3-100 および図 3.3-104 では送受信ペアが高角および長距離の場合、送受信ペアが低中角および中長距離の場合と比較して異なる傾向が見られた。これらを除外すると、概ねすべての場所において系統的な走時の変化は見られず、また走時の変化の平均値も高々0.05msec 程度である。これは、EdZ の厚さを 0.5m、EdZ の弾性波速度を 1.6km/s とした場合には、0.5m 程度 EdZ の幅が広がっていると考えることができ、また弾性波速度が変化した場合には 1.6km/s から 1.4km/s に変化する程度の変化であり図 3.3-58 によると飽和度の変化程度で説明できる弾性波速度の変化である。

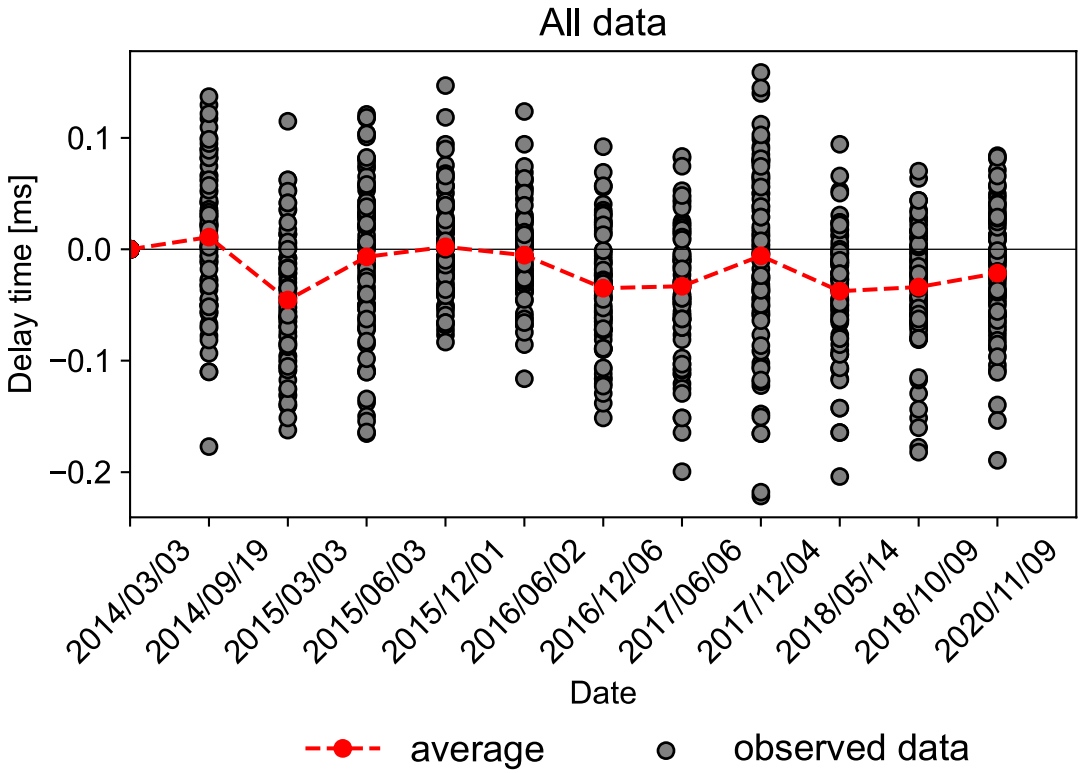


図 3.3-97　2014 年 3 月 3 日を基準とした全送受信ペアにおける走時の差分

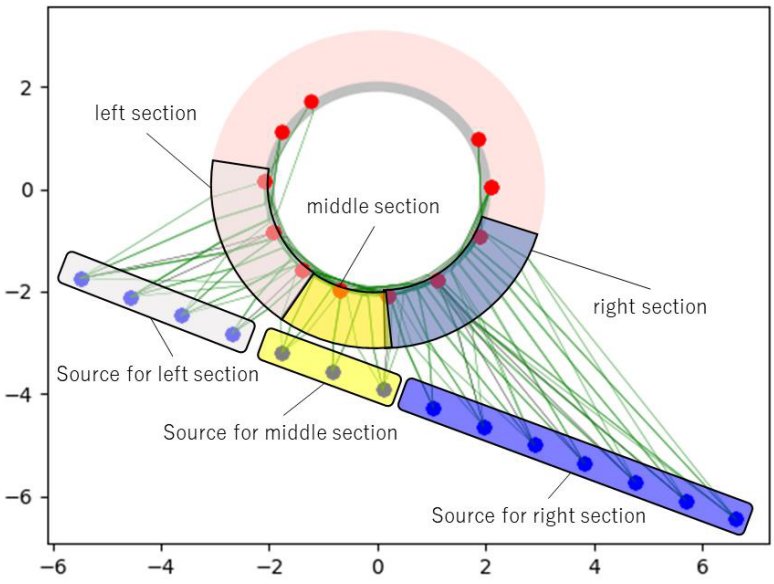


図 3.3-98　送信点群とその送信点から発信した弾性波が通過する EdZ の領域の分割

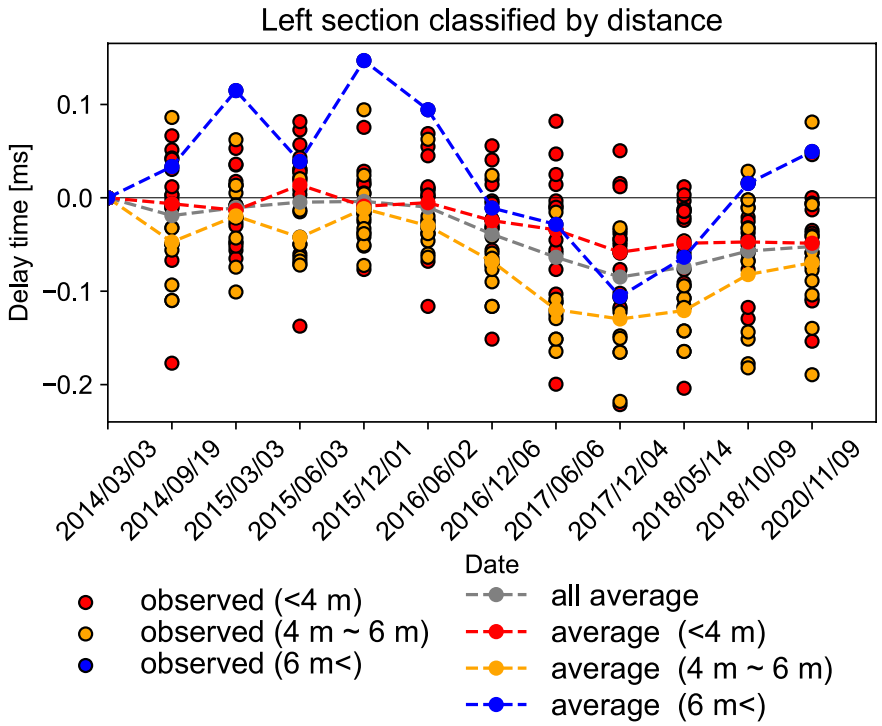


図 3.3-99　坑道下部左下付近の EdZ の経時変化
各色で送受信点間の距離が異なる場合の結果を示している

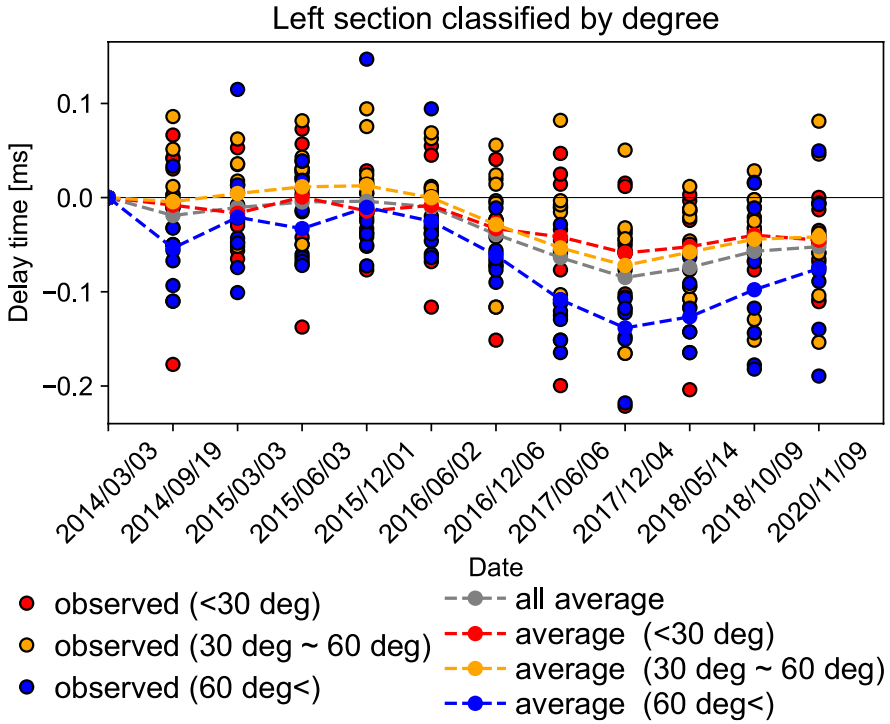


図 3.3-100　坑道下部左下付近の EdZ の経時変化
各色で送受信点間の角度が異なる場合の結果を示している

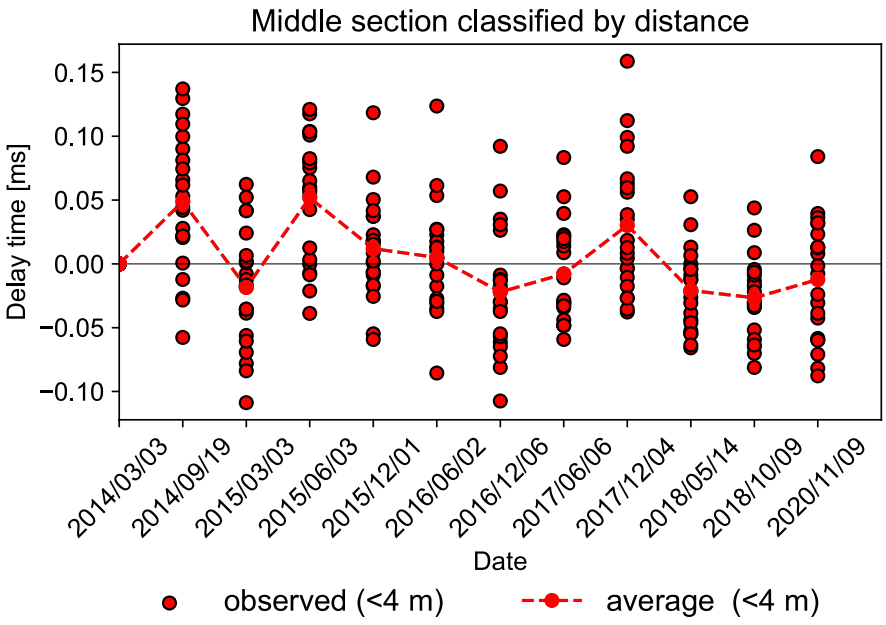


図 3.3-101　坑道下部付近の EdZ の経時変化
各色で送受信点間の距離が異なる場合の結果を示している。

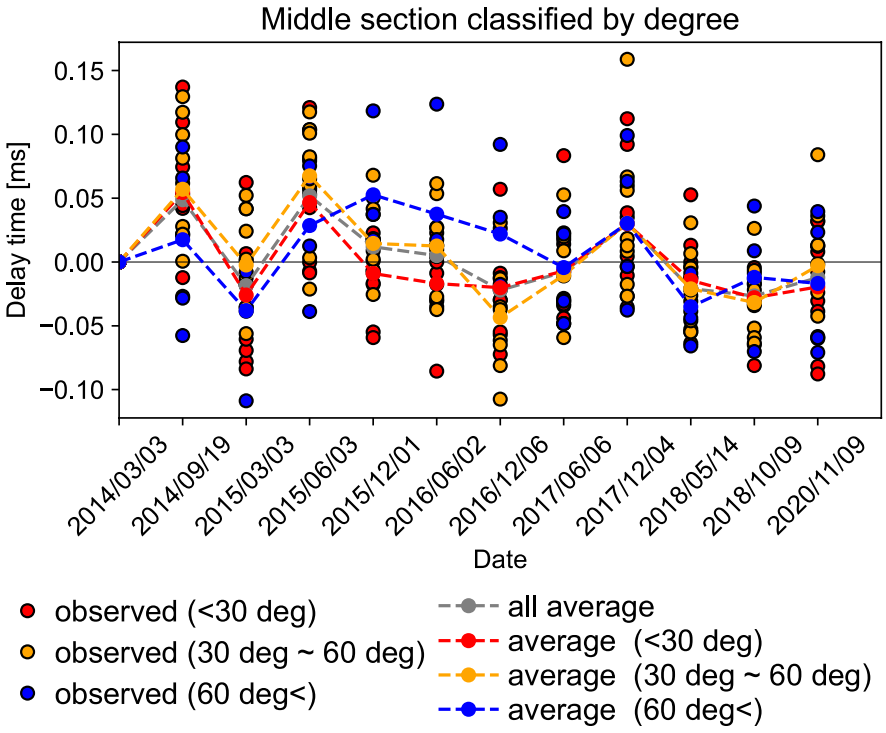


図 3.3-102　坑道下部付近の EdZ の経時変化
各色で送受信点間の角度が異なる場合の結果を示している。

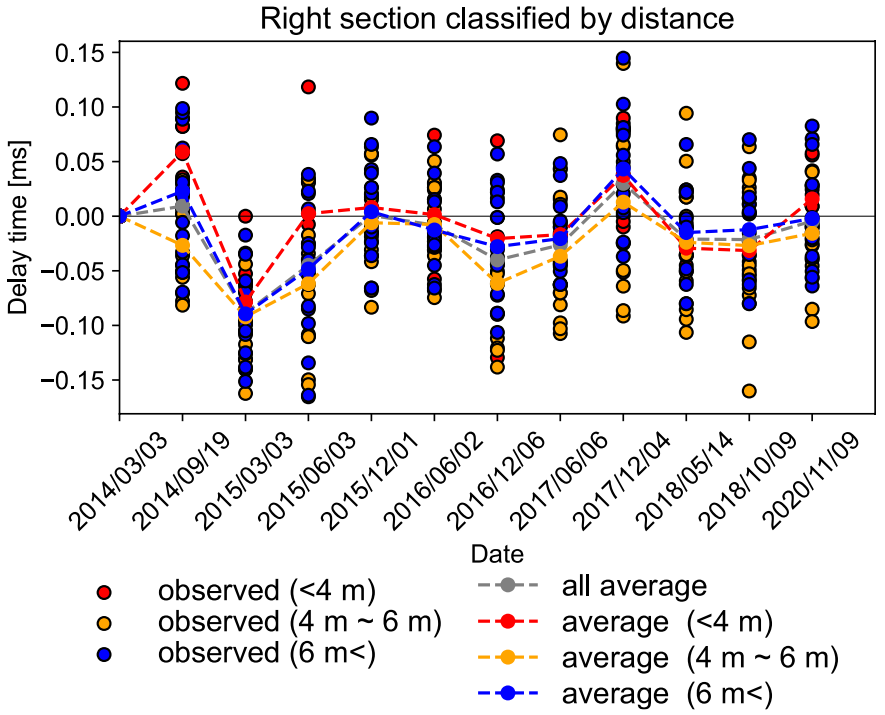


図 3.3-103　坑道下部右下付近の EdZ の経時変化
各色で送受信点間の距離が異なる場合の結果を示している

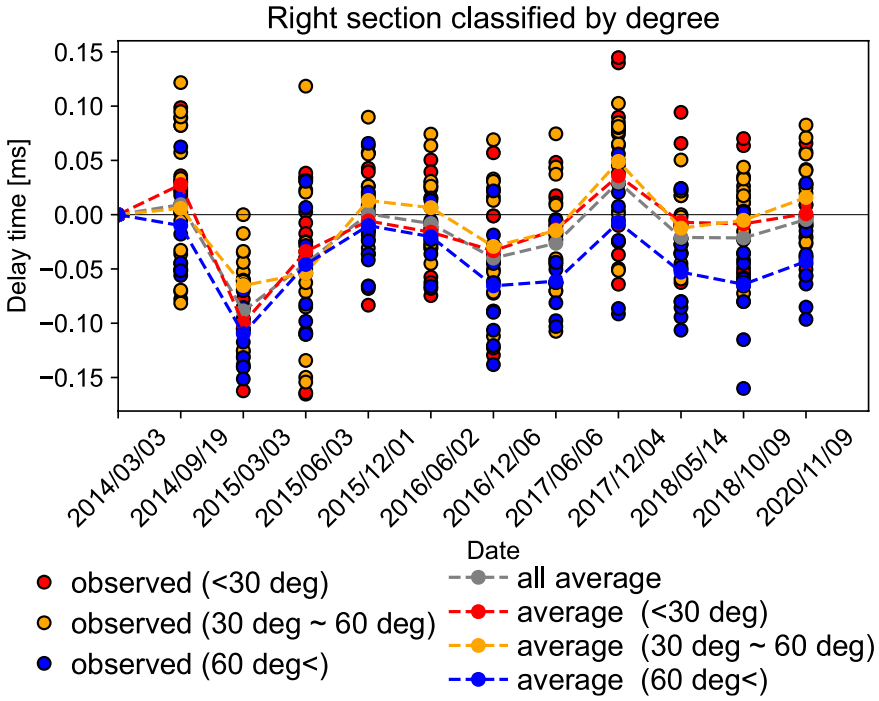


図 3.3-104　坑道下部右下付近の EdZ の経時変化
各色で送受信点間の角度が異なる場合の結果を示している

(6) まとめ

本節では、深度 350m 試験坑道 2 で実施した弾性波トモグラフィデータを解析するために、レイトレーシングおよび走時計算を実施し、吹付けコンクリートの影響および EdZ が変化した場合の走時の変化を順計算により評価した。モデル計算結果とシミュレーション結果を比較したところ、実測データは吹付けコンクリートの影響を受けていることが明らかとなった。従って、図 3.3-57 のトモグラフィ結果の試験坑道 2 に見える高速度の領域は、吹付けコンクリートの影響が反映された結果であると考えられる。

吹付けコンクリートの影響を考慮したモデル計算結果からは試験坑道 2 周辺の EdZ の厚さは 0.5m 程度と推測された。吹き付けコンクリートは、その影響を評価せずトモグラフィ断面を作成した場合には偽造の原因となる一方で、モデル計算からは吹付けコンクリートの影響が顕著な場合には EdZ の弾性波速度や厚さが変化しても波線を固定することができ、モニタリングを実施する上ではメリットであると考えることができる。今回検討した手法により、実測データの EdZ の経時変化の評価を実施したところ、観測期間中に走時の有意な変化は確認することができなかった。したがってモニタリング期間中に深度 350m 試験坑道 2 周辺において EdZ の範囲やその物性はほとんど変化していないと推察される。

3.3.3.5 まとめと今後の課題

本年度は、事業初年度として、深度 250m で弾性波トモグラフィを、深度 350m 試験坑道 2 および 4 において、比抵抗および弾性波トモグラフィを実施した。これら調査により、深度 250m では坑道掘削後約 11 年間の、深度 350m では坑道掘削後約 8 年間にわたる EdZ を対象とした物理探査データを蓄積することができた。

取得されたデータから経時変化を抽出するために、レイトレーシングおよび走時を計算するプログラムを作成し、順計算により EdZ が変化した場合の走時の変化を評価した。また、物理探査データの精査を行うために吹付けコンクリートの物理探査データへの影響に関する評価も実施した。これら順計算により得られた結果に基づき、EdZ の経時変化を抽出する解析手法を検討し、その手法を深度 250m および深度 350m 試験坑道 2 で取得されたデータに適用し、EdZ の経時変化に関する検討を行った。これらの解析により本研究を通して得られた結果および知見を以下にまとめる。

- 堆積軟岩のような岩盤における地下坑道内で弾性波トモグラフィを実施する場合には、初動が吹付けコンクリートを迂回する経路となる可能性があるため、その結果の解釈に注意が必要である。
- 深度 250m で取得された弾性波トモグラフィデータは吹付けコンクリートの影響を受けていないものの、深度 350m 試験坑道 2 で取得されたデータは吹付けコンクリートの影響を受けており、試験坑道 2 のトモグラフィ結果にみられる坑道周辺の高速度領域は吹付けコンクリートの影響を受けた偽像であると推測される。
- 吹付けコンクリートは、トモグラフィ解析を実施する際には波線の分布が偏る可能性があるために好ましくない影響がある恐れがある一方で、長期的な観測の観点からは吹付けコンクリートを迂回する初動により波線を固定することができる場合があり好ましい影響となる場合もある。
- 試験坑道 2 や 4 では坑道を含む領域のトモグラフィ解析を実施する必要があるものの、坑道が埋め戻されていたとしても初動は坑道表面の吹付コンクリートを伝わるため、解析モデルに既知情報として吹付コンクリートの構造を与えた解析によりその影響を排除することができる。なお、この解析の場合、送受信点配置等に基づく解析に使用する波線の選択を行う必要はない。
- 送受信点と坑道の形状を考慮して走時の差分を分類することにより、EdZ の厚さや EdZ 内の弾性波速度が変化した場合の走時の変化を適切に抽出できると考えられる。
- 深度 250m で取得された走時データには EdZ の変化に伴うと考えられる走時の変化が認められるものの、深度 350m 試験坑道 2 で取得されたデータからは走時の変化を抽出することができなかった。

今後は、比抵抗トモグラフィの高精度化を進め、弾性波トモグラフィと比抵抗トモグラフィ結果を統合的に解析することにより、EdZ の経時変化の有無やその原因に関する精査を進める必要がある。そのためには、岩石サンプルを用いた比抵抗及び弾性波速度の室内試験等を実施し、これら物性値の飽和度依存性等を把握する必要があるため、室内試験も合わせて行っていく予定である。

参考文献

青柳和平，津坂仁和，窪田健二，常盤哲也，近藤桂二，稲垣大介，幌延深地層研究所の 250m 調査坑道における掘削損傷領域の経時変化に関する検討、土木学会論文集 C、70(4)、412-423, 2014.

青柳和平，窪田健二，中田英二，末永弘，野原 慎太郎，幌延深地層研究施設における掘削影響領域の評価; 深度 250m を対象とした試験(共同研究) ，JAEA-Research 2017-004，2017.

青柳和平，宮良信勝，石井英一，松崎嘉輝，幌延深地層研究センターの人工バリア性能確認試験孔周辺の掘削影響領域の経時変化に関する検討，平成 30 年度(2018 年)資源・素材学会春季大会　講演集，2018.

Aoyagi, K., Miyara, N., Ishii, E., Nakayama, M. and Kimura, S., Evolution of the excavation damaged zone around a modelled disposal pit; Case study at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of 13th SEGJ International Symposium, 2019.

Aoyagi, K. and Ishii, E., A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, Rock Mechanics and Rock Engineering, 52, 385-401, 2018.

Asakawa, E. and Kawanaka, T., Seismic raytracing using linear traveltime Interpolation, Geophys. Props., 41, 99-111, 1993.

窪田健二，青柳和平，杉田裕，水平坑道掘削に伴う掘削影響領域の調査; 幌延深地層研究施設における検討, 物理探査学会第 138 回(平成 30 年度春季)学術講演会講演論文集, 51-54, 2018.

Lowry, T., Allen, M, B. and Shive, P, N., Singularity removal: A refinement of resistivity modeling techniques, geophysics, 54(6), 680-789, 1989.

Mavko G., and Mukerji, T., Bounds on low‐frequency seismic velocities in partially saturated rocks, Geophysics,63(3), 18–924, 1998.

中山雅、大野宏和，幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験; 350m 調査坑道における人工バリアの設置および坑道の埋め戻し、JAEA-Research 2019-007，2019.

中山雅，大野宏和，中山真理子，小林 正人，幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験; 計測データ集(平成 29 年度)，JAEA-Data/Code 2019-003，2019.

日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業　地層処分施設閉鎖技術確証試験　報告書，2020.

Penz, S., H., Chauris, Donno, D., and Mehl, C., Resistivity modelling with topography, Geophysical Journal International, 194(3), 1486-1497, 2013.

佐々宏一，芦田譲，小澤岳史，山田雅行，効果的なレイトレーシングによるサイスミックトモグラフィの精度向上について，物理探査学会第 78 回学術講演会論文集，pp.92-93，1988.

高倉伸一，粘土鉱物を含有する岩石の比抵抗－間隙水の塩分濃度と温度が及ぼす影響－，物理探査，62(4)，385-396，2009.

3.4 ボアホールシーリング試験

3.4.1　背景・目的・実施内容

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、概要調査から精密調査にかけて掘削される地上からのボーリング孔はそれ自体が地上へ直結する水みちとならないよう、適切な方法で閉塞することが求められている（NUMO, 2021）。処分場の建設段階で坑道内からボーリング孔が掘削される場合もあり、これらのボーリング孔が放射性核種の短絡経路となることや、地層処分システムの安全性に影響を及ぼさないよう、適切な方法で閉塞することが求められると考えられる。

諸外国においても、処分施設の封じ込めや保持特性を損なうことがないようにボーリング孔を閉塞することが求められており（Luterkort et al., 2012）、特に、閉塞に用いられる材料の一般的な要件として、低透水性や長期的な安定性などの項目が示されている（Chanplow, 2011）。このような要件を満たす材料として、低透水性や膨潤特性、物質の吸着特性などを有するベントナイトの使用が広く検討されており、閉塞する具体的な方法が検討・検証されてきている（例えば、Pusch et al, 2007；Sandén et al., 2018；Blumling et al., 2008 など）。

地上からのボーリング孔と坑道内からのボーリング孔では、ボーリング孔の状態や作業環境の違いにより、閉塞のために必要となる要素技術や考慮すべき事項、技術的な課題点などが異なると考えられる。例えば、坑道内からのボーリング孔では、水平に近い向きに掘削されることも想定されるが、水平ボーリング孔の場合には、重力方向へ材料を充填することができる鉛直孔とは異なり、重力以外の駆動力によって目的の閉塞位置まで材料を輸送することが必要となる。また、日本のように豊富に地下水が存在する地質環境では、地下空間へ向かう方向にかかる動水勾配が大きい地下環境において、ボーリング孔への地下水流入量が比較的多い中での作業が想定されるため、高水圧、高湧水量条件下で閉塞が適用可能な技術が必要となる。しかしながら、諸外国を含め、ボーリング孔の閉塞に関する検討事例の多くが地上からのボーリング孔を対象としたものであり、坑道内からのボーリング孔、特に、水平に近い向きのボーリング孔を対象とした検討は十分ではない。以上のような状況を踏まえると、坑道内から水平に近い向きに掘削されたボーリング孔の閉塞においては、既往のボーリング孔の閉塞に係る検討の成果を踏まえつつ、日本の地質環境条件への適用可能な材料仕様および施工方法を検討することが重要と考えられる。また、現在の日本のように、ボーリング孔の閉塞に関する具体的な設計要件および安全性の要件が明確に規定されていない状況においては、具体的に達成可能な性能を把握した上で、複数の施工オプションを提示することは今後、ボーリング孔の閉塞方法を具体化していく段階において重要な知見になると考えられる。

以上のことから、本試験では令和 4 年度まで、坑道内から水平に近い向きに掘削されたボーリング孔を対象に、地下深部の地質環境条件を考慮した上での材料仕様や施工方法の適用性を検討する。具体的には、達成可能な性能という観点から複数の施工方法・条件での室内試験や原位置試験を実施する。令和 2 年度は、海外の研究開発事例の文献調査により、ボーリング孔の閉塞技術に係る考慮すべき事項や現状の課題点を抽出し整理した。また、文献調査の結果を踏まえつつ、ベントナイト系材料の施工方法について机上検討により、ベントナイトブロックとベントナイトペレットを用いた施工方法の具体的な手順を検討するとともにその技術的な課題点を整理した。さらに、閉塞材料として想定されるベントナイトブロックとベントナイトペレットの適用性を検討するための情報取得を目的とした要素試験を実施した。

3.4.2　海外事例の文献調査

ボーリング孔の閉塞に関連する海外の研究開発事例について文献調査を行い、以下に示す項目について整理するとともに、考慮すべき事項や現状の課題点を抽出した。

- ボーリング孔の閉塞に求める要件
- ボーリング孔の閉塞方法（材料仕様、施工方法）に関する考え方
- ボーリング孔の閉塞にあたり重要だと考えられる条件、現象、プロセス

① ボーリング孔の閉塞に求める要件

ボーリング孔の閉塞に求められる性能は、ボーリング孔を介して発達する地下水の流れを抑制することで、ボーリング孔が地下水の短絡経路となることを回避することである。例えば、スウェーデンの SR-Can の要求事項では、ボーリング孔の閉塞後の透水係数について次のように述べている（Luterkort et al., 2012）。

- SRCAN191 : ボーリング孔は処分場の封じ込めや保持特性を損なわないように閉塞しなければならい。この要件は、ボーリング孔の閉塞による透水係数が 10^{-8} m/s 以下であれば達成され、膨潤圧が 0.1 MPa を超える場合に確実である。また、ボーリング孔の高透水領域では、この透水係数の値を維持する必要はない。

また、上記のボーリング孔の閉鎖性能は処分施設の安全性能と同様に 10 万年維持されることが求められている（Pusch et al., 2007、Sandén et al., 2018 など）。

② ボーリング孔の閉塞方法（材料仕様、施工方法）に関する考え方

ボーリング孔の閉塞に求める要件を達成できる材料について、以下の項目が示されている。（Chaplow, 2011）。

- 閉鎖後のシーリング要件を満たすことのできる材料
- 収縮を回避する材料
- 長寿命材料
- 放射性核種の移行を制限できる材料
- 人工バリアシステムへの影響を考慮した材料

上記の項目を満たす材料として、ベントナイトが膨潤特性、低透水性、放射性核種の吸着能および低い拡散係数を有することから広く利用されている。

ベントナイトは Na 型と Ca 型の 2 種類が検討されているが、どちらの材料を選択するかは地下水の化学的性質に依存する。Ca 型は淡水や塩水中では膨潤に乏しいため、多くの場合には Na 型のベントナイトが選択される。ただし、地下水が Ca に富むは場合には Ca 型が選択される。

ボーリングの閉塞システムは、閉塞システムの力学的安定性と水理的性能を向上させるため、複数の材料を組み合わせる考えが示されている（Blumling et al., 2008）。ベントナイトは、岩盤に損傷がなく透水係数が低く水を通す割れ目がない部分に配置する。一方で、透水性の高い亀裂が存在する場所や破砕帯では物理的・化学的に安定している石英ベースのコンクリートなど材料を設置する。

ベントナイトは圧縮したブロック、ペレットもしくは、粒状体のものを充填することが検討されている。SKB では、図 3.4-1 に示すように、Basic、Container、Couronne、Pellet の 4 種類の工法について検討を実施している（Pusch et al., 2007）。以下にそれらの概要を示す。

・ Basic type（ベーシックタイプ）

高圧縮ベントナイトを銅製の有孔管に収納しボーリング孔内に挿入する方法である。ベントナイトは有孔管の孔よりから膨潤し、有孔管とボーリング孔の間の隙間を閉塞する。ボーリング孔への挿入時のベントナイトの侵食に対する抵抗性を持つがあるが膨潤による閉塞には時間がかかる。Stripa プロジェクトにおいては、ベーシックタイプにより水平孔および鉛直孔で閉塞可能なことを示している。

・ Container type(コンテナタイプ)

高圧縮ベントナイトを密閉された管（コンテナ）に収納し、ボーリング孔に挿入する。目的とする充填位置までコンテナを輸送した後、圧縮ベントナイトを排出する。コンテナにより輸送中のベントナイトと地下水との接触による膨潤や侵食を防ぐ。ベーシックタイプに比べて早期に閉塞する。

・ Couronne type（クーロンタイプ）

クーロンタイプは、リング状に圧縮したベントナイトを金属ロッドに通して積み重ねたプラグである。このプラグのボーリング孔への挿入時には、ベントナイトが侵食されるため、100 m 程度の浅いボーリング孔に適用する。AspoHRL の直径 300 mm の大口径ボーリング孔において試験が実施され、クーロンタイプによる大口径ボーリング孔の閉塞が可能であることが示されている（Pusch et al., 2011）。

・ Pellet type（ペレットタイプ）

ベントナイトペレットを排水したボーリング孔に流し込む方法である。SKB では 20 m 程度までの浅いボーリング孔に対し適用するとしている。荷重や振動を与えることによって充填密度の向上が見込まれる。

NAGRA では、低・中レベル放射性廃棄物処分のためのプロジェクトにおいて坑道内から掘削した水平な調査ボーリングを閉塞するための方法としてロールプレスにより造立したペレットや粒状ベントナイトの使用を検討している（Blumling et al., 2008）。粒状ベントナイトでは、水を排水したボーリング孔に対して、4 mm から 10 mm の粒径のベントナイトを圧縮空気により吹付けることにより、閉塞区間に充填できることを確認している。

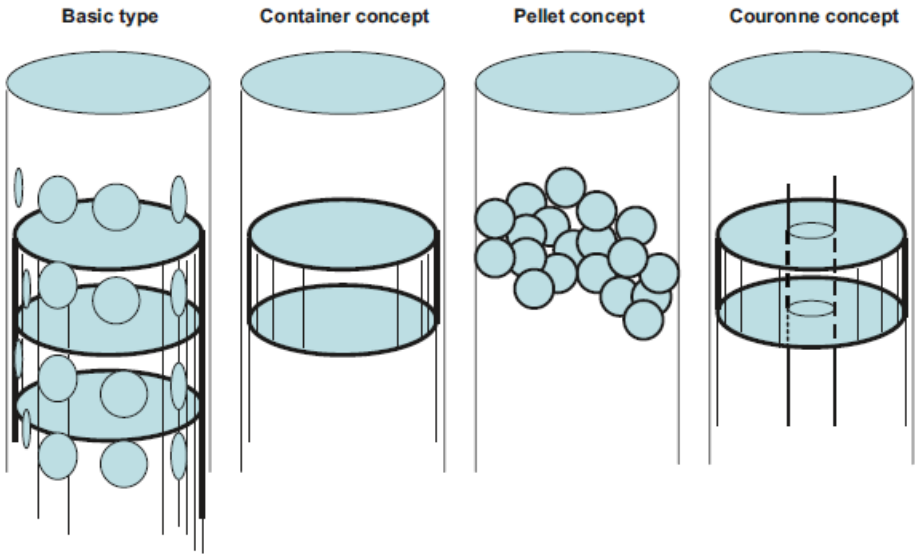


図 3.4-1　検討されているベントナイトの施工方法（Pusch et al., 2007）

③ ボーリング孔の閉塞にあたり重要だと考えられる条件、現象、プロセス

ボーリング孔の閉塞にあたり、その施工性や性能に影響をおよぼす条件や現象、プロセスについて以下に示す。

- ボーリング孔に充填したベントナイトが自重で圧密することがないよう十分な膨潤圧が生じるように材料仕様を定める。
- ボーリング孔の地下水の化学的性質は、ベントナイトの膨潤挙動に影響をおよぼす。地下水の電解質濃度が高い場合は、不均一な膨潤や急速な膨潤により生じる侵食、膨潤圧の減少、透水係数の増加などが問題となる。
- ボーリング孔の孔曲がりは、一度に設置できる閉塞材料の長さに影響を与える。また、ボーリング孔の壁面の粗い場合には、コンテナなどの設置容器が壁面に接触しスタックするリスクが存在する。
- ボーリング孔深部へのベントナイトの設置の場合には、水圧が高くなるとともに地下水と接触する時間が長くなることで輸送中にベントナイトの飽和度が高くなり、侵食（erosion）や損傷（damage）が生じる。

3.4.3 施工方法の検討

水平に近い向きに掘削したボーリング孔について、①ベントナイトブロック、②ベントナイトペレット、③ブロックとペレットの組み合わせの 3 つの材料についてボーリング孔の閉塞方法を検討することとして、文献調査の結果を踏まえつつ、それぞれの方法の利点や技術的な課題点を整理した。検討では、上記の方法についてその適用性を確認するための試験の試験条件を設定して、その手順や装置構成などを具体化した。また、適用性を確認する試験に先立って、室内試験等で検討が必要となると考えられる材料仕様などの項目についても整理した。適用性を確認する試験の条件を下記に示す。

- 対象とするボーリング孔は、水平に近い向きに掘削した直径 100 mm 程度のボーリング孔とする。
- ボーリング孔には、塩水系地下水が流入する。
- 充填するベントナイトにはクニゲル V1 を用いる。
- 充填したベントナイトの透水係数は、膨潤してボーリング孔を閉塞した後に周辺の岩盤と同程度の 10^{-10} m/s の透水係数を確保するものとする。

(1) ベントナイトブロック

ボーリング孔の閉塞にベントナイトブロックを用いることの利点としては、ブロックを作製する際に寸法や重量を定めることが可能であることから、ブロックの挿入時にベントナイトの充填量や設置深度の管理が容易にできることである。一方で、ボーリング孔内に地下水の流入がある場合には、挿入時にベントナイトブロックと地下水が接触することにより、挿入途中での膨潤による閉塞やブロックの侵食や損傷などが懸念される。そのため、ベントナイトブロックは遮水性を有するコンテナ等に収納して、定置直前まで地下水と接触しない構造が必要になると考えられる。

これらのことを踏まえて、水平ボーリング孔へのベントナイトブロックの充填方法の概念を図 3.4-2 に示す。ベントナイトブロックをコンテナプローブに収納し、プローブ先端には蓋をせん断ピンで固定して密閉構造とする。ベントナイトブロックを収納したコンテナプローブをベントナイト充填深度付近まで挿入し、水圧駆動のピストン構造などによりせん断ピンを破断させること

により蓋を脱落させ、ボーリング孔内にベントナイトブロックを排出する。ブロックの排出後にコンテナプローブを回収する。以上の方法であれば、充填作業中のベントナイトと地下水の接触を防ぐことができる一方で、検討課題として、以下の 3 点が想定される。

- 定置したブロックと孔壁の間に比較的大きな隙間が生じる。
- 充填深度が深くなるほど、または充填区間が長くなるほど、充填作業に時間を要する。
- コンテナプローブの構造によっては、孔内にベントナイト以外の残留物が生じる。

以上の検討課題について、ブロックと孔壁の間の隙間については、充填装置と孔壁およびブロックと充填装置のクリアランスやコンテナプローブの肉厚により生ずるものであり、ベントナイトブロックの膨潤により閉塞することを期待する。充填作業に必要となる時間については、ブロックを充填するごとにコンテナプローブを回収する必要があり、作業時間を短縮するためには作業回数を少なくすることが必要となる。ただし、コンテナプローブの挿入や引き抜きに必要となる空間や作業性を考慮すると 1 回の作業で挿入できるブロックの長さは 1 m 程度と考えられる。孔内残留物については、コンテナプローブの遮水構造に蓋を利用し、蓋を破壊することでベントナイトブロックを排出する場合には、孔内に蓋が残留する。残留する蓋が、ベントナイトによる閉塞に影響を及ぼす場合には、図 3.4-3 に示すようなボーリング孔内に残留物が生じないような構造として、ベントナイトブロックを遮水性のあるシートで覆い、シートの一部が破けることにより、ベントナイト排出しコンテナプローブとシートを回収する方法も考えられる。

ボーリング孔の内径を 100 mm とした場合に、コンテナプローブの肉厚や試験装置とボーリング孔とのクリアランスを考慮すると収納可能なベントナイトブロックの直径は 75 mm 程度となると考えられる。室内試験においては、塩水系地下水の条件において、定置したブロックとボーリング孔の間に生じた隙間が十分に閉塞し目標の乾燥密度が確保可能な材料仕様の検討が必要となる。

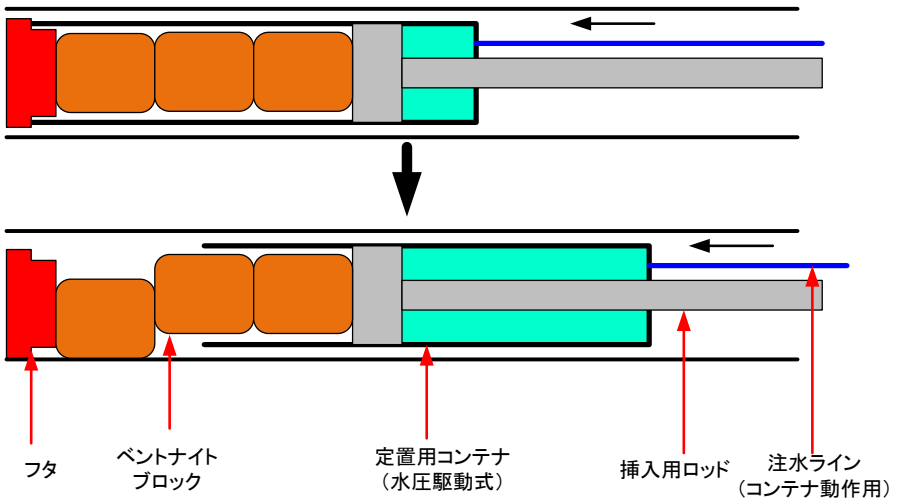


図 3.4-2　ベントナイトブロックを用いた充填方法の概要図（残留物がある方式）

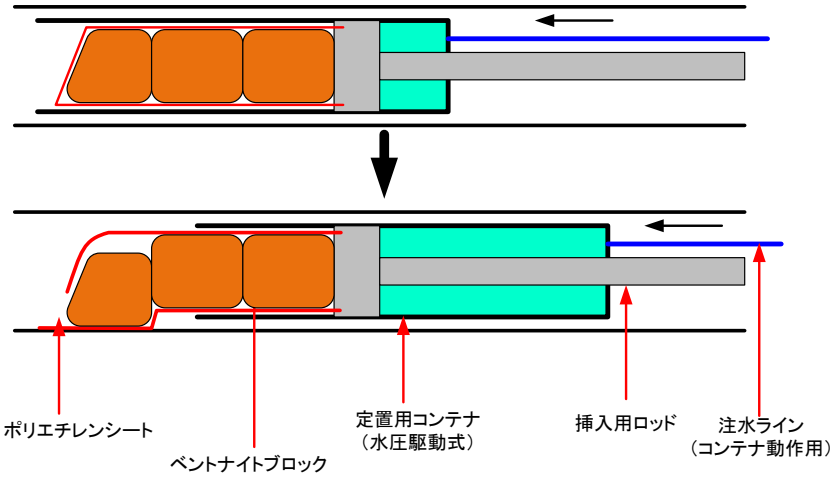


図 3.4-3　ベントナイトブロックを用いた充填方法の概要図（残留物がない方式）

(2)　ベントナイトペレット

ボーリング孔の閉塞にベントナイトペレットを用いる利点としては、個々の粒径が小さいため隙間の充填性やボーリング孔の形状への追従性が高いことである。一方で、ボーリング孔内に地下水の流入がある場合には、ペレットの輸送時に地下水と接触することにより膨潤し輸送途中で孔壁に付着してブリッジを形成することで不完全に閉塞してしまうことが懸念される。これらのことを踏まえて、水平ボーリング孔へのベントナイトペレットの充填方法の概念を図 3.4-4 に示す。この方法では、表面に親水遅延のコーティングを施したベントナイトペレットを設置深度付近まで挿入した充填管を通じて注入した水の流れにより輸送する。充填管の外側には、有孔の仕切り版を取り付け、充填区間からのペレットの流出を防ぎつつ注入した水をボーリング孔外へと排出する。充填作業時には、ペレットの充填量を確認しながら段階的に充填管を引き抜き、目標とする区間の充填を行う。この方法の場合には、ベントナイトの充填時間が比較的短時間になると考えられる。一方で、検討課題として、以下の 4 点が想定される。

- 充填区間において目標とする乾燥密度が達成できない可能性がある。
- 原位置での充填状況の確認方法を確立する必要がある。
- ベントナイトの充填時には、水を大量に必要とする。また、ボーリング孔への流入水と注入した水が坑道側へと排水されるため、排水された水を適切に処理する必要がある。
- 親水遅延コーティングの性能が充填作業に適したものであるか不明である。また、ベントナイトの膨潤特性そのものにおよぼす影響やボーリング孔内に残留することによる影響なども不明である。

目標の乾燥密度が達成できない可能性については、前述した輸送途中でペレットが孔壁に付着してブリッジを形成することにより不完全に閉塞することやペレットの細粒分の流出により空隙が増加することが原因として想定される。この対策については、複数の粒径のペレットを併用することにより充填密度を高くすることが考えられる。親水遅延コーティングについては、どの程度輸送中の膨潤を抑える性能を有するか、また、充填後の膨潤特性を損なうことがないか、長期的な閉塞性へ及ぼす影響の有無について、事前の室内試験で検討しておくことが必要となる。

ペレットにおいては、10^{-10} m/s の透水係数を確保できる乾燥密度の幅を抑えることにより、どの程度の充填状況であれば、目標の透水係数を達成できるか確認しておく必要がある。また、ペレットの充填性や輸送中の充填管内の抵抗の観点からペレットの粒径や材料組成およびコーティングの種類を検討する必要がある。

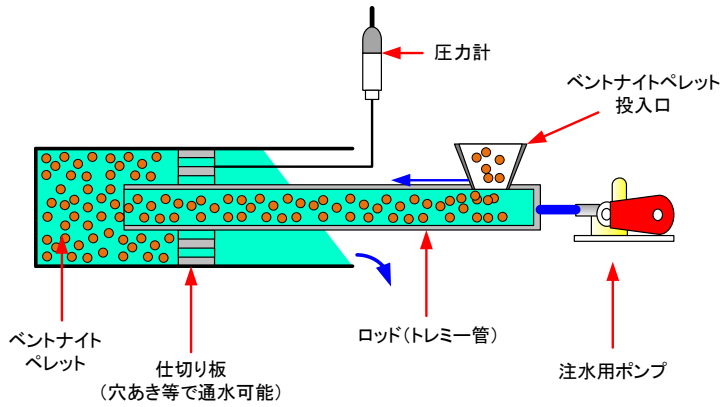


図 3.4-4　ベントナイトペレットを用いた充填方法の概念図

(3)　ブロックとペレットの組み合わせ

ベントナイトブロックとベントナイトペレットのそれぞれの方法を踏まえつつ、ブロックとペレットを組み合わせた方法について検討した。水平ボーリング孔へブロックとペレットを組み合わせた充填方法の概念を図 3.4-5 に示す。ベントナイトの充填区間の上端と下端にはベントナイトブロックを設置し、中間区間をベントナイトペレットで充填する。ブロックとペレットを組み合わせることにより、それぞれの方法で個別に充填した場合の検討課題の改善が見込まれる。例えば、ベントナイトブロックで懸念されるブロックと孔壁の間に生じた比較的大きな隙間については、ペレットを充填することによりその隙間を埋めることが期待される。また、充填区間が比較的長い場合には、その充填区間の大部分をペレットにより充填することで、充填作業の時間を短縮することを考えられる。同様に、ペレットを用いた場合に懸念される充填状況の確認方法については、ペレットの充填の後にブロックを挿入することにより、その挿入深度から充填状況を確認できると考えられる。一方で、想定される検討課題としては、上記で改善されない個々の課題に加えて、以下 2 点が考えられる。

・　ブロックと孔壁の間の隙間にペレットを充填できる条件を確認する必要がある。
・　ブロックとペレットの膨潤状況の違いにより、乾燥密度にばらつきが生じる可能性がある。

ブロックと孔壁の間の隙間にペレットを充填する場合には、ペレットを充填する断面積が小さいためペレットの課題である輸送途中の閉塞が生じやすくなる。これを改善するためには、ブロックの形状やサイズを変更して意図的に隙間を増加させる対策が考えられる。また、ブロックとペレットの膨潤状況の違いにより乾燥密度にばらつきが生じると、透水係数が高い領域やブロックとペレットの界面などが水みちとなる可能性が考えられる。ブロックとペレットを組み合わせた状態で膨潤により乾燥密度がどのように変化するか、事前の室内試験で確認しておくことが必要となる。

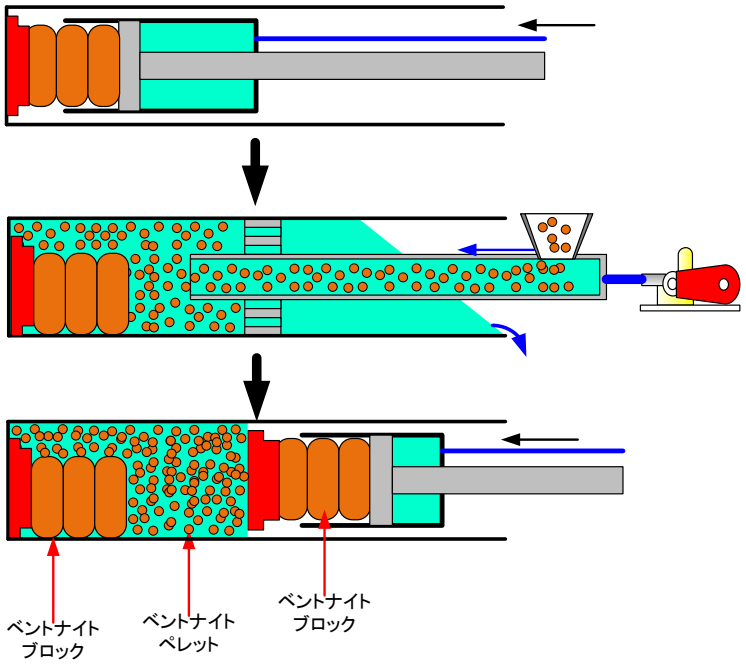


図 3.4-5　ブロックとペレットを併用した充填方法の概念図

3.4.4　予備試験

3.4.4.1　試験条件の整理

3.4.3 で検討した 3 種類の施工方法について、それぞれの材料の膨潤状況を確認するための予備試験を実施した。予備試験では、令和 3 年度以降に実施する施工方法の適用性を確認するための室内試験・原位置試験と同様の条件とする。試験条件を下記に示す。

- 対象とするボーリング孔は、水平に近い向きに掘削した内径 100 mm 程度のボーリング孔とする。
- ボーリング孔には、塩水系地下水が流入する。
- 充填するベントナイトにはクニゲル V1 を用いる。
- 充填したベントナイトの透水係数は、膨潤してボーリング孔を閉塞した後に周辺の岩盤と同程度の 10^{-10} m/s の透水係数を確保するものとする。

対象とするボーリング孔の内径に合わせて試験装置の内径を 100 mm とし、膨潤状況を確認できるようにアクリル製とした。塩水系地下水としては、表 3.4-1 に示す幌延の地下施設の 250m 調査坑道における地下水組成を模擬した試験用水を使用した。ベントナイトの膨潤後の乾燥密度は、図 3.4-6 に示す塩水条件のベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係より 10^{-10} m/s の透水係数を確保できる範囲として、目標値の上限を 1.1 Mg/m^3、下限を 0.8 Mg/m^3 と設定した。

表 3.4-1　250m 調査坑道の地下水組成

Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Li^+ (mg/L)	Cl^- (mg/L)
1900	49	40	25	4.7	1920

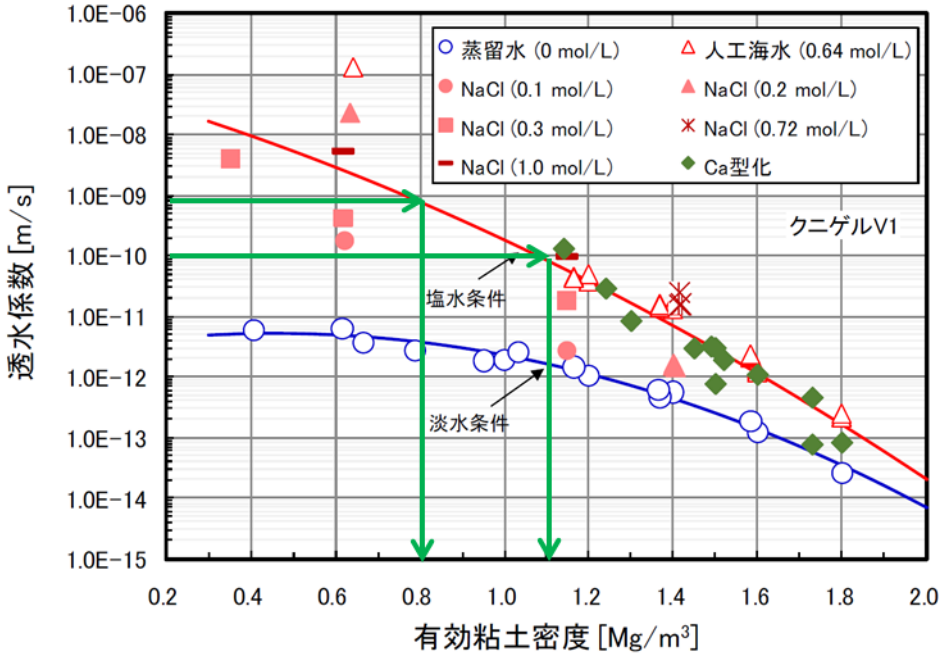


図 3.4-6　ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係（NUMO, 2021 に加筆）

3.4.4.2　予備試験の実施方法

(1)　予備試験装置

図 3.4-7 に予備試験装置の概要図を示す。予備試験装置は、試験体の膨潤状況が把握できるようにアクリル製とした。試験装置は、アクリルパイプの両端にフランジを取り付けることにより作製した。試験装置の内径をボーリング孔相当として 100 mm、装置内の軸方向の長さを 116 mm としたことから試験装置の容量は 911 cm^3 となった。試験装置両端のフランジ部には注水孔と排気孔を設けた。本予備試験では、水平ボーリング孔を模擬するため試験装置を注水孔が下方に、排気孔が上方に位置するように設置した。

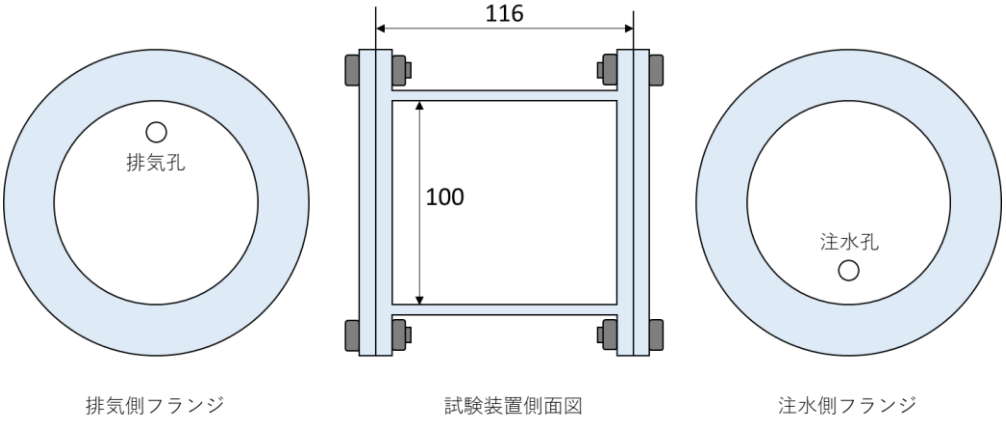


図 3.4-7　予備試験装置の概要図

(2)　予備試験の手順

図 3.4-8 に示すように、試験体を充填した試験装置内に模擬地下水を注水し、試験装置内の間隙を模擬地下水で満した。その後、フランジを閉め、試験装置全体を模擬地下水で満たした水槽内に横置きすることにより水平なボーリング孔の状態を模擬した。試験期間中は注水孔から模擬

地下水の供給および間隙中の空気の排出ができるように試験装置を水浸させた。ブロック、ペレット、ブロックとペレットの併用の各試験体の概要を次に示す。

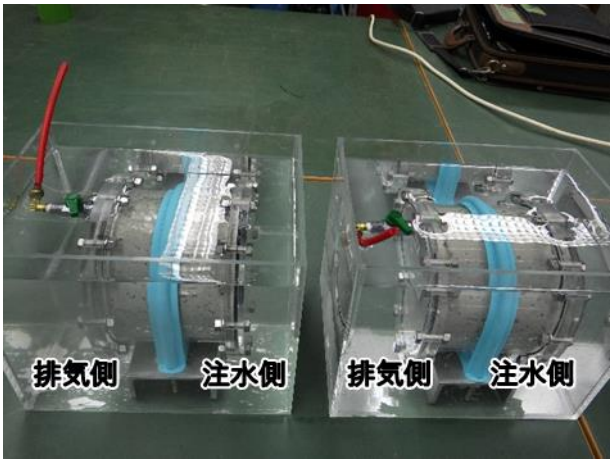


図 3.4-8　予備試験の実施状況

1)　ベントナイトブロック

予備試験では、クニゲル V1 を直径 75 mm、高さ 100 mm、乾燥密度 1.60 Mg/m^3 に締固めたベントナイトブロックを使用した。図 3.4-9 に作成したベントナイトブロックの外観を図 3.4-10 にベントナイトブロックの試験装置への設置状況の概要を示す。ベントナイトブロックは 1 体を作製し、インターバル撮影により静止画により膨潤状況を確認し、試験終了時にコアサンプリングを実施して含水比と乾燥密度の計測を行った。

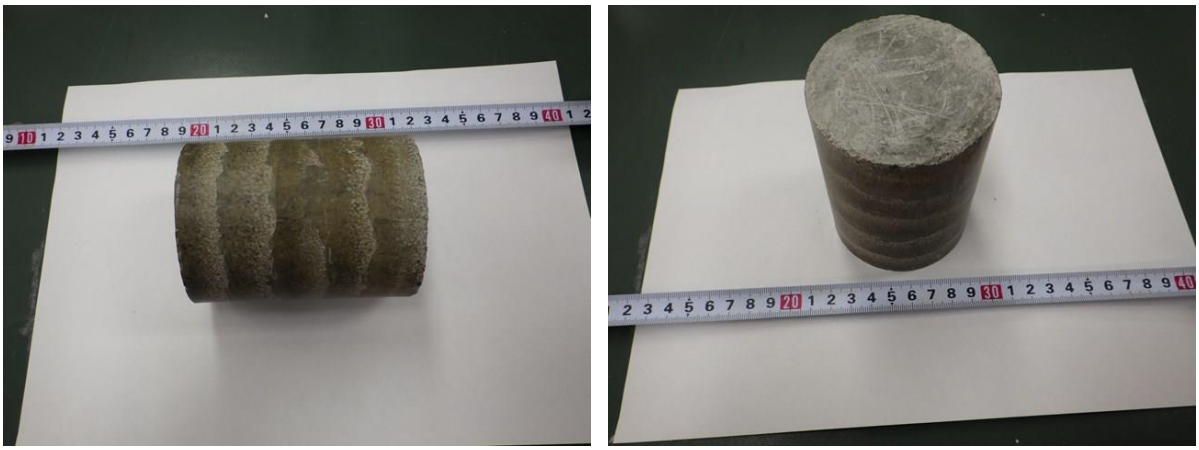


図 3.4-9　ベントナイトブロックの外観

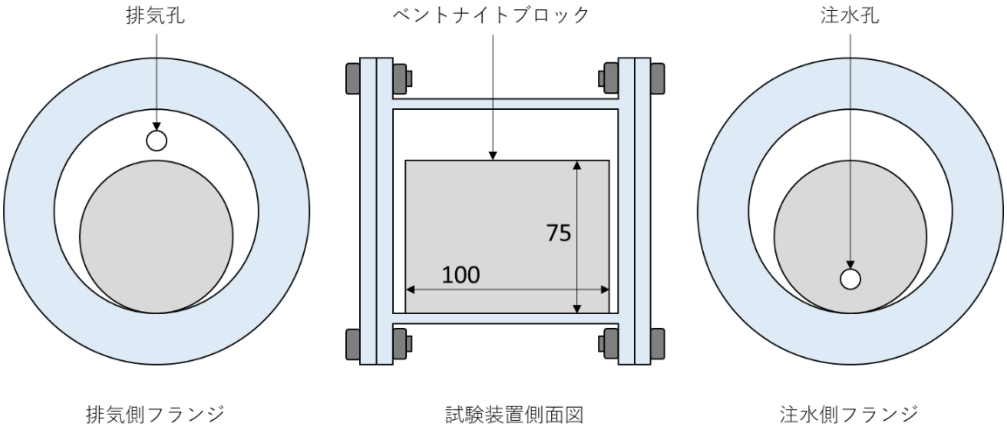


図 3.4-10　ベントナイトブロックの試験装置への設置状況

2)　ベントナイトペレット

図 3.4-11 に予備試験で使用したベントナイトペレットを示す。ベントナイトペレットには、クニゲル V1 を乾燥密度 1.90 Mg/m³、含水比 8%となるように締固めた後に破砕したものを使用した。試験では、充填したベントナイトペレットの膨潤後に透水係数が 10^{-10} m/s を確保できる乾燥密度の下限と上限を塩水条件での有効粘土密度と透水係数の関係より 0.8 Mg/m³、1.1 Mg/m³ と設定した。図 3.4-12 にペレットの試験装置への充填状況の概要を示す。試験装置に投入するペレットの重量は、膨潤後の目標乾燥密度、ペレットの含水比および試験装置の容積から算出し、目標乾燥密度 0.8 Mg/m³ で 787 g、目標乾燥密度 1.1 Mg/m³ で 1082 g が必要であった。目標乾燥密度 0.8 Mg/m³ のケースでは、必要重量のペレットを充填した初期状態において試験装置上部に大きな間隙が残っていた。一方で、目標乾燥密度 1.1 Mg/m³ のケースでは、試験装置に対して比較的密に充填した状態となり、初期状態の時点で間隙は少なかった。それぞれの膨潤状況をインターバル撮影により得た静止画で確認した。目標乾燥密度 0.8 Mg/m³ と 1.1 Mg/m³ の両方のケースそれぞれで 6 体ずつ供試体を作製した。一定時間が経過するごとに 1 体ずつ供試体のサンプリングを実施し、含水比および乾燥密度の経時変化を計測した。

図 3.4-11　ベントナイトペレットの外観

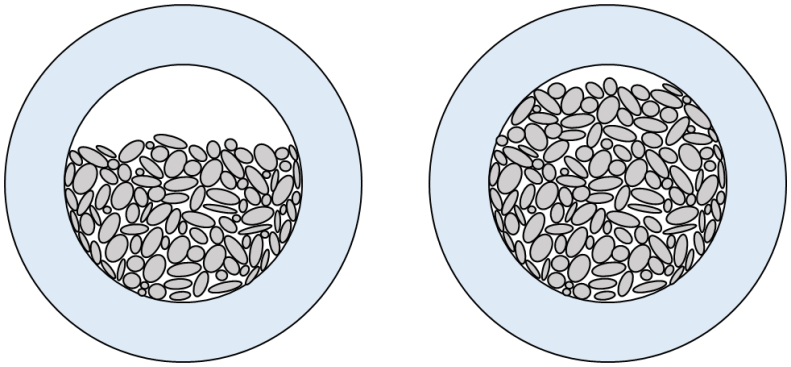


図 3.4-12　ベントナイトペレットの設置状況

3)　ブロック＋ペレット

ブロックとペレットを組み合わせた試験では、クニゲル V1 を直径 75　mm、高さ 100mm、乾燥密度 1.60 Mg/m^3 に締固めたベントナイトブロックを使用した。また、ペレットはペレット単体の試験で用いたものと同じものを使用した。ブロックとペレットの設置状況を図 3.4-13 に示す。試験では、ブロックを試験装置の下部に位置するように設置し、ブロックと試験装置の間の隙間をペレットで充填した。ペレットは密に充填し、理想的に充填ができた場合を模擬した。ペレットの重量は約 480 g であり、計算上の隙間の体積が約 470 cm^3 であることからペレットの膨潤後の乾燥密度は約 1.0 Mg/m^3 となった。ブロックの乾燥密度は 1.60 Mg/m^3 であり、初期状態での乾燥密度の差は大きいが膨潤により均一化した場合には全体が 1.3 Mg/m^3 程度になることが見込まれる。

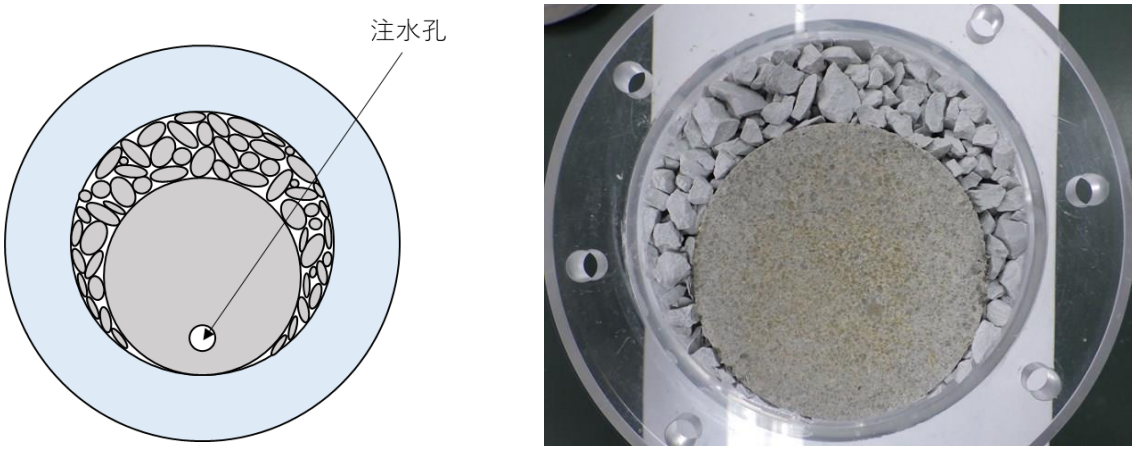


図 3.4-13　ブロックとペレットの設置状況

(3)　サンプリング

膨潤が進行した状態の試験体でコアサンプリングを実施し、含水比と湿潤密度、乾燥密度の計測を実施した。複数の試験体を作製したベントナイトペレットでは、ある経過時間ごとに 1 体ずつコアサンプリングを実施し、乾燥密度の経時変化を推定した。

コアサンプリングは外径 20 mm、肉厚 0.5 mm の円筒状の金属管を用いて実施した。コアサンプリングの位置は、図 3.4-14 に示すように試験体の鉛直断面の上段、中段、下段の 3 箇所で実施した。コアサンプリングの状況を図 3.4-15 に示す。採取したサンプルから湿潤密度と含水比

を測定して乾燥密度を算出した。また、図 3.4-6 に示すベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係より、得られた乾燥密度より透水係数の評価を行った。

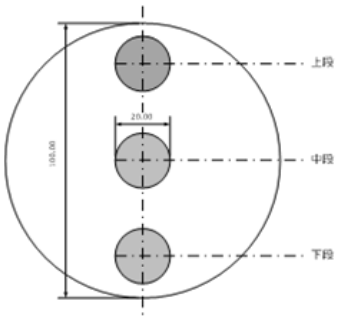


図 3.4-14　コアサンプリングの実施位置

図 3.4-15　試験体のコアサンプリング状況

3.4.4.3　予備試験の結果

(1)　ベントナイトブロック

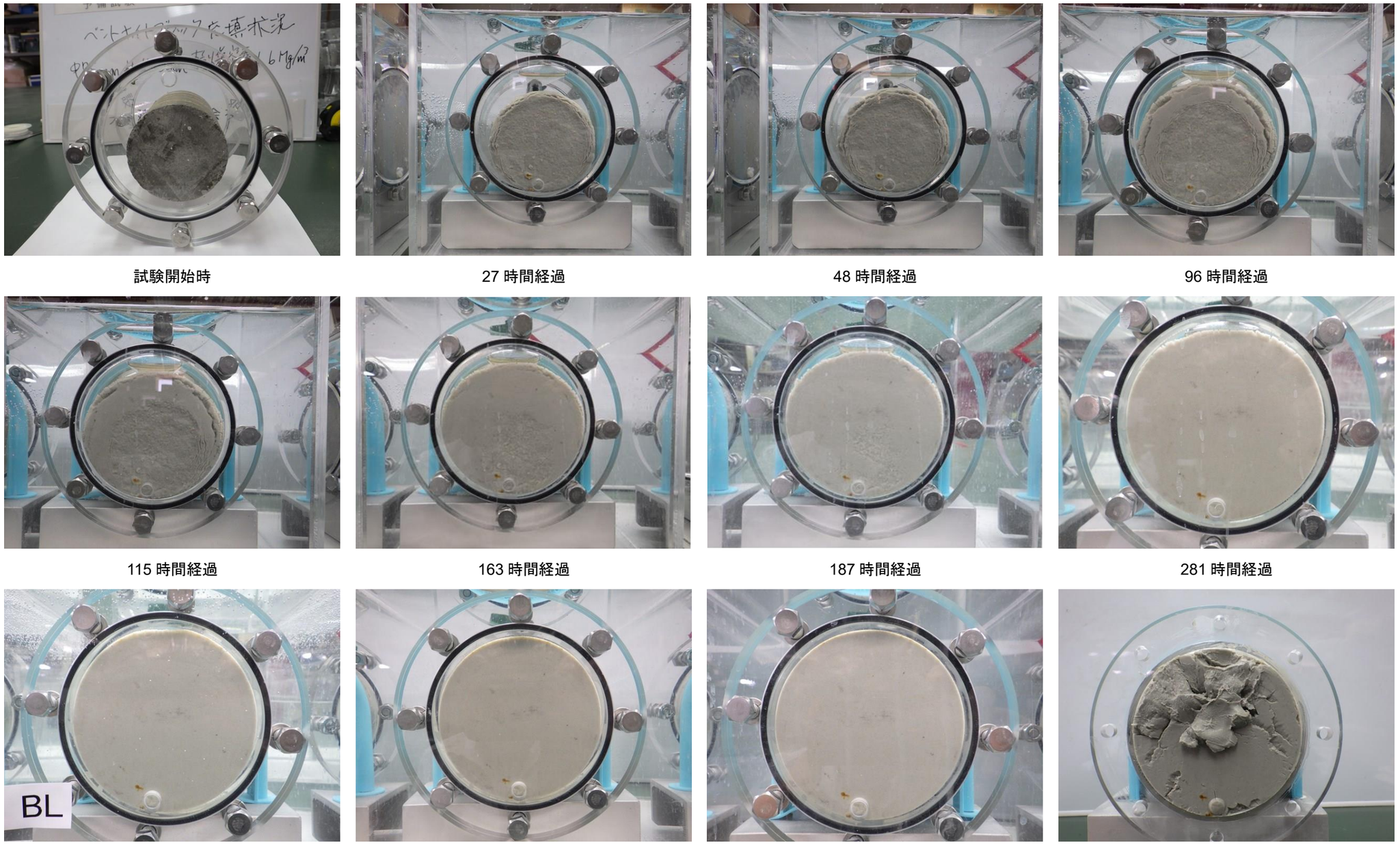
ブロックの膨潤状況を図 3.4-16 に示す。ブロックの膨潤は、ブロックが吸水することにより表面のベントナイトが剥離し、側方の隙間を埋めていき、徐々に上部の隙間を埋めていく様子が観察された。その後、見た目の変化がなくなった約 3 週間が経過した時点で試験を終了した。試験の終了時には、ベントナイトの膨潤により隙間の閉塞が進行していたが、試験容器上部へのベントナイトの密着具合は不完全であった。

上段、中段、下段のサンプリングにより測定した含水比と乾燥密度の結果を表 3.4-2 に示す。直径 75 mm、高さ 100 mm で初期乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 のベントナイトブロックが膨潤し、内径 100 mm 高さ 116 mm の予備試験装置の隙間を均一に充填した時の乾燥密度は 0.8 Mg/m^3 となる。上段のコアサンプルは含水比が 130%となっており、コアサンプルが自立できないほど柔らかい状態で、乾燥密度は 0.52 Mg/m^3 と非常に低い値を示した。中段では含水比 58.7%%、乾燥密度 0.86 Mg/m^3 の値を示した。下段では、含水比 41.6%、乾燥密度 1.33 Mg/m^3 であり、初期乾燥密度からの密度低下が少なく、吸水および膨潤が進んでいない結果を示した。本試験では、ブロックは膨潤の途中であり、フランジに設けた注水孔がベントナイトの膨潤により閉塞したことで水の供給が止まったため、膨潤が進行しなかったと考えられる。室内試験・原位置試験では、水の流入が続く状況を維持できればブロックの膨潤が進行すると考えられる。一方で、膨潤によ

り乾燥密度が均一になるには、時間を要すると考えられるとともに、流入量が多い場合には乾燥密度が低い部分でベントナイトの流出が生じる可能性がある。

表 3.4-2　ベントナイトブロックの初期乾燥密度および予備試験結果

	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)
初期値	1.59	22.3
上段	0.52	128.9
中段	0.86	58.7
下段	1.33	41.6



試験開始時　27 時間経過　48 時間経過　96 時間経過

115 時間経過　163 時間経過　187 時間経過　281 時間経過

329 時間経過　378 時間経過　499 時間経過　551 時間経過（試験終了時）

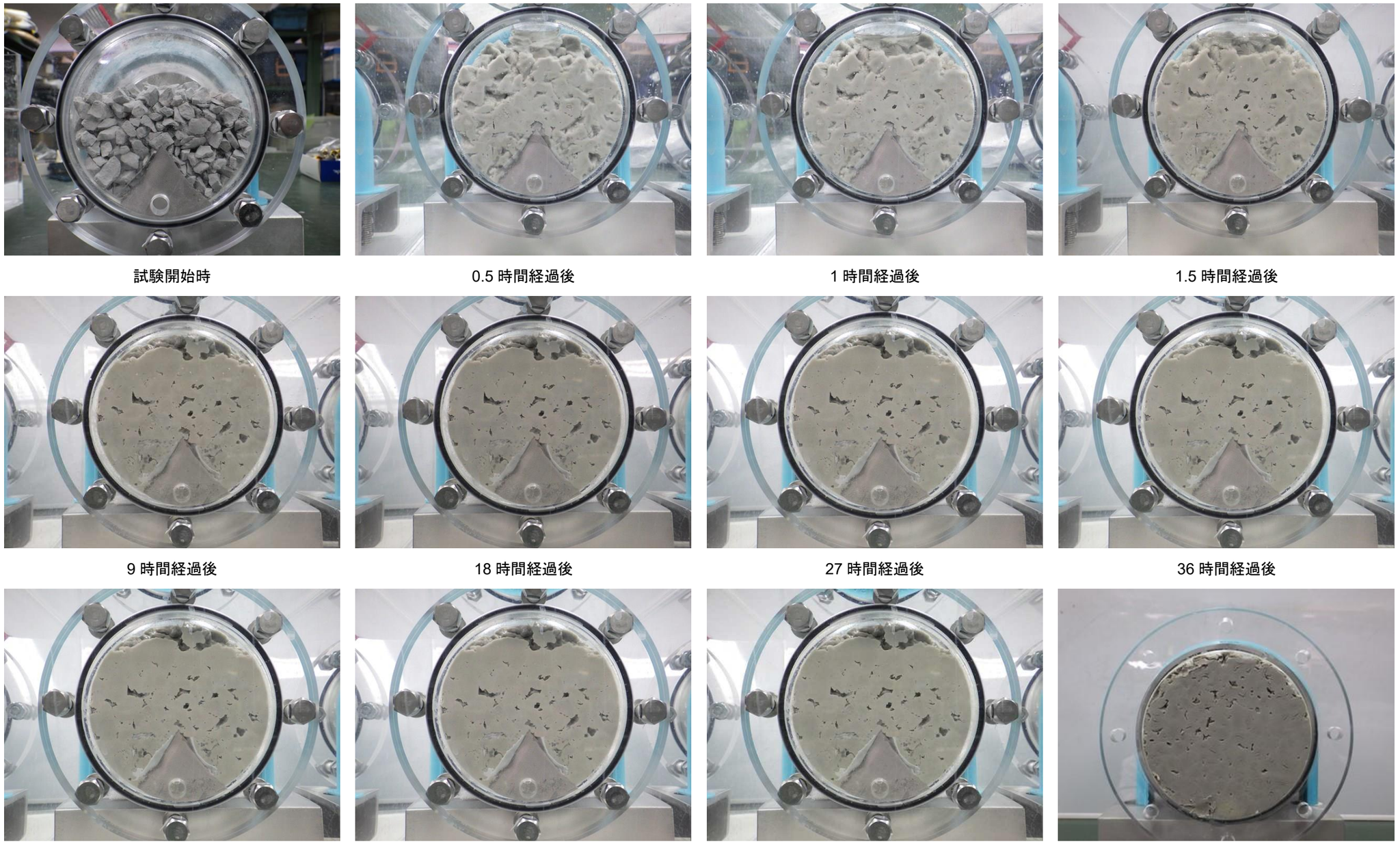
図 3.4-16　ベントナイトブロックの膨潤状況

(2) ベントナイトペレット

目標乾燥密度 0.8 Mg/m^3 のケースについてはペレットを充填した初期状態において試験装置上部に大きな間隙が残っていた。膨潤の様子を図 3.4-17 に示す。上部に残っていた大きな隙間はペレットの膨潤により閉塞した。上段、中段、下段のサンプリングにより測定した含水比と乾燥密度の経時変化を図 3.4-18、図 3.4-19 に示す。初期状態における上部の隙間が大きいため、試験開始初期の乾燥密度は、ばらつきが大きい結果となったが、約 350 時間が経過した時点では上段、中段、下段とも目標乾燥密度に近い値を示し、膨潤が進むにつれて乾燥密度が均一化していくことが確認された。

目標乾燥密度 1.1 Mg/m^3 のケースについては、試験装置に対して比較的密に充填した状態となった。膨潤の様子を図 3.4-20 に示す。初期状態の時点で隙間が少なく、試験開始後の比較的早い段階で隙間が閉塞した。含水比と乾燥密度の経時変化を図 3.4-21、図 3.4-22 に示す。目標乾燥密度 1.1 Mg/m^3 のケースでは、試験開始の初期段階より乾燥密度がほぼ一定の値を示した。

目標乾燥密度 0.8 Mg/m^3 のケースでは、膨潤により隙間は比較的早い段階で閉塞することが確認された。試験開始初期の段階で乾燥密度の値にばらつきがみられたものの、時間の経過ともに目標乾燥密度の値に収束する傾向を示した。



試験開始時　0.5 時間経過後　1 時間経過後　1.5 時間経過後

9 時間経過後　18 時間経過後　27 時間経過後　36 時間経過後

45 時間経過後　63 時間経過後　81 時間経過後　712 時間経過後（試験終了時）

図 3.4-17　ペレット（0.8 Mg/m^3）の膨潤状況

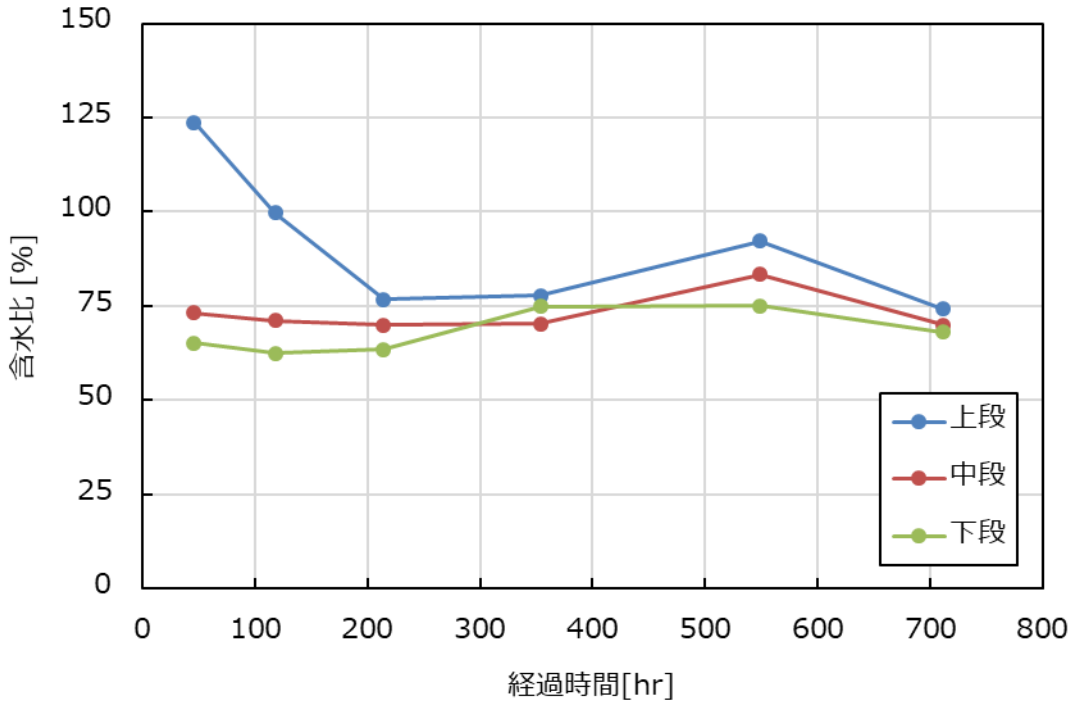


図 3.4-18　ペレット（0.8 Mg/m^3）における含水比の経時変化

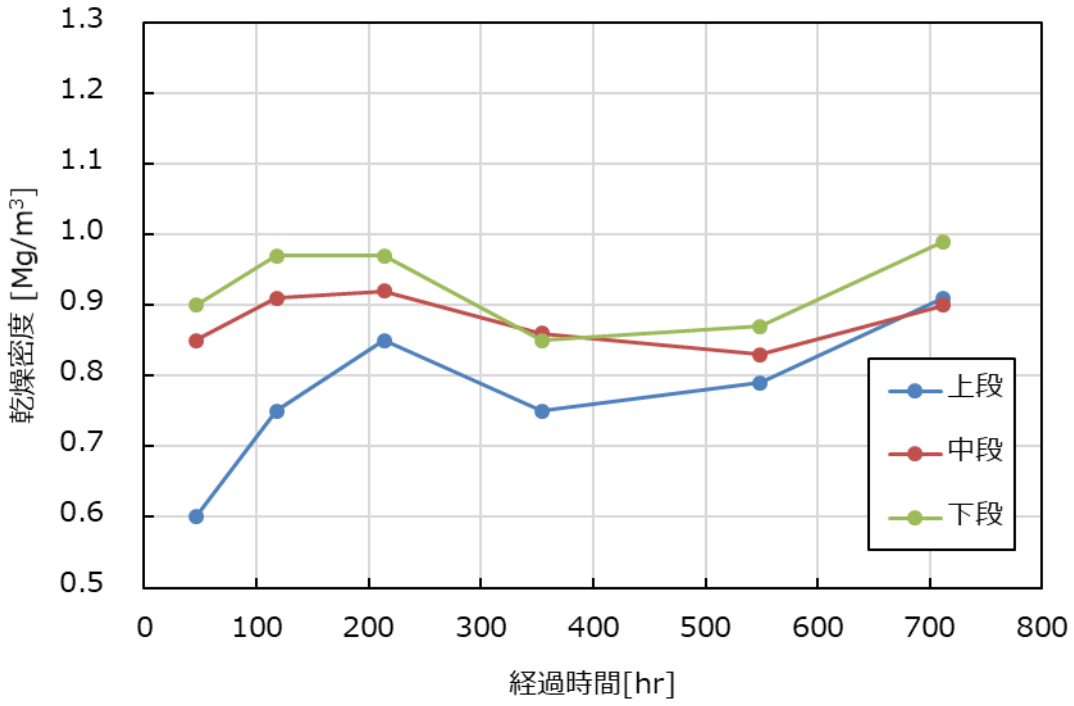
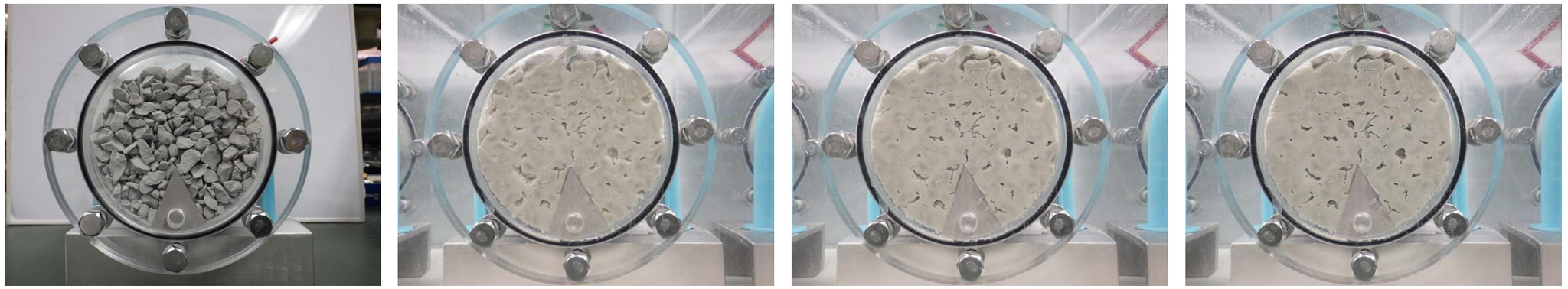
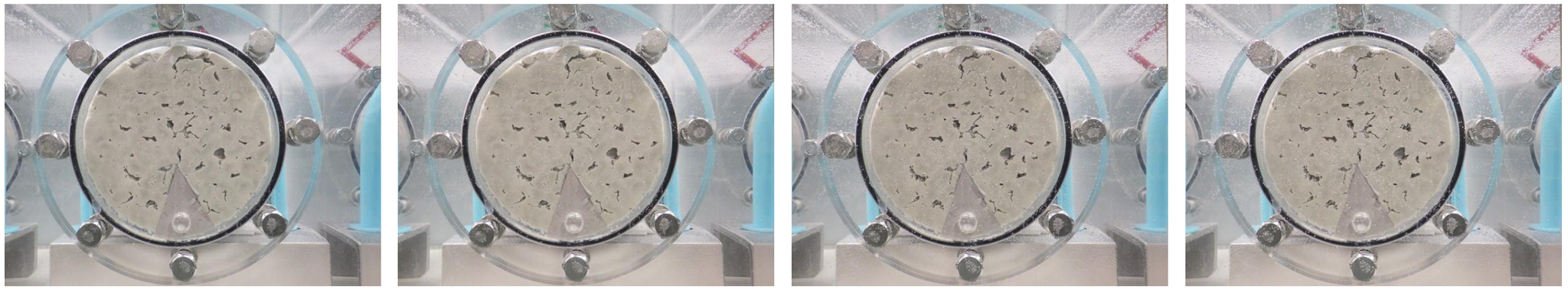


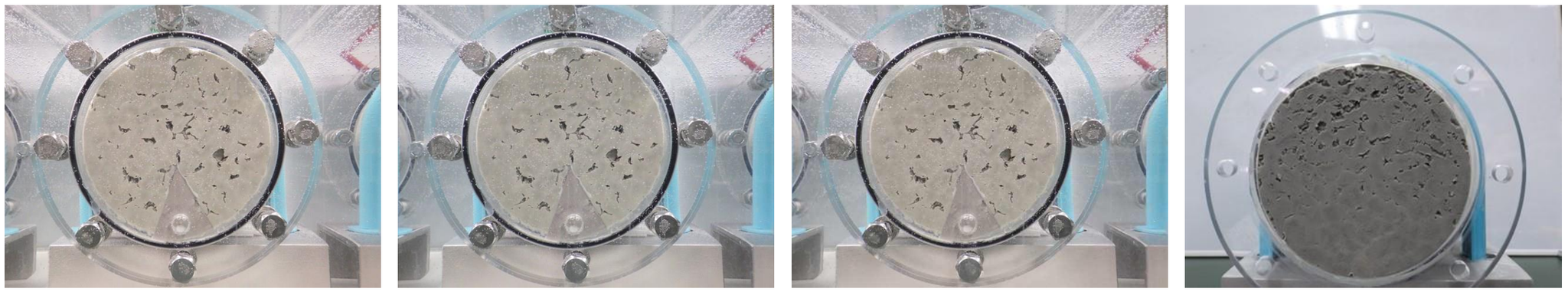
図 3.4-19　ペレット（0.8 Mg/m^3）における乾燥密度の経時変化



試験開始時　0.5 時間経過後　1 時間経過後　1.5 時間経過後



2 時間経過後　3 時間経過後　6 時間経過後　9 時間経過後



18 時間経過後　27 時間経過後　36 時間経過後　713 時間経過後（試験終了時）

図 3.4-20　ペレット（1.1 Mg/m^3）の膨潤状況

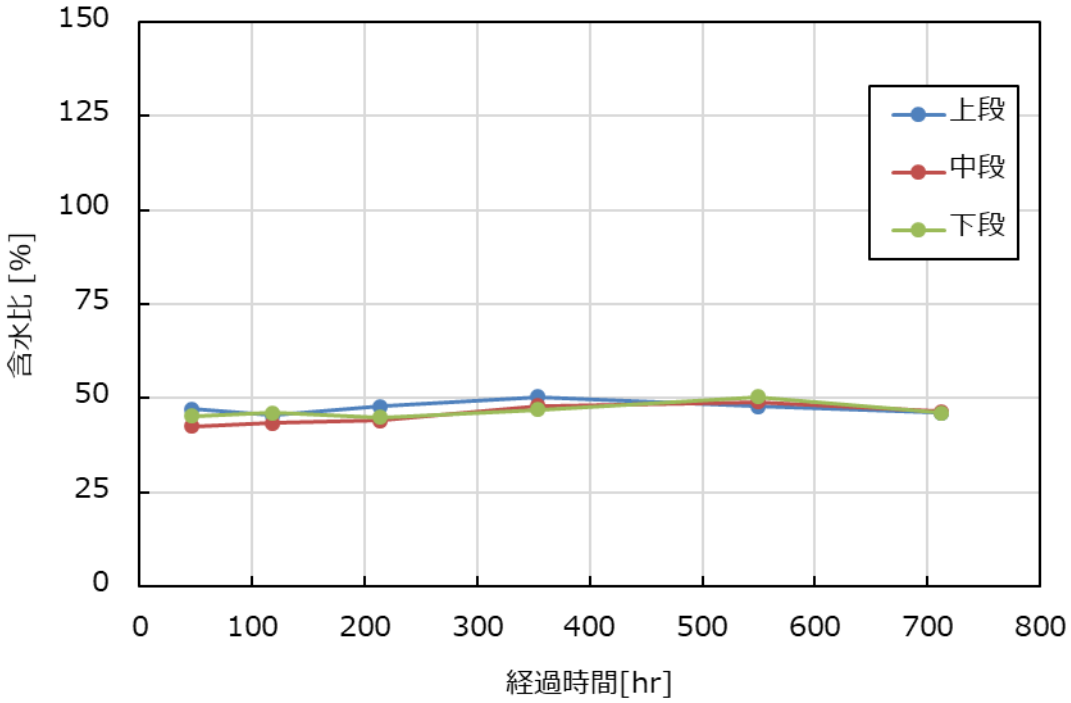


図 3.4-21　ペレット（1.1 Mg/m^3）における含水比の経時変化

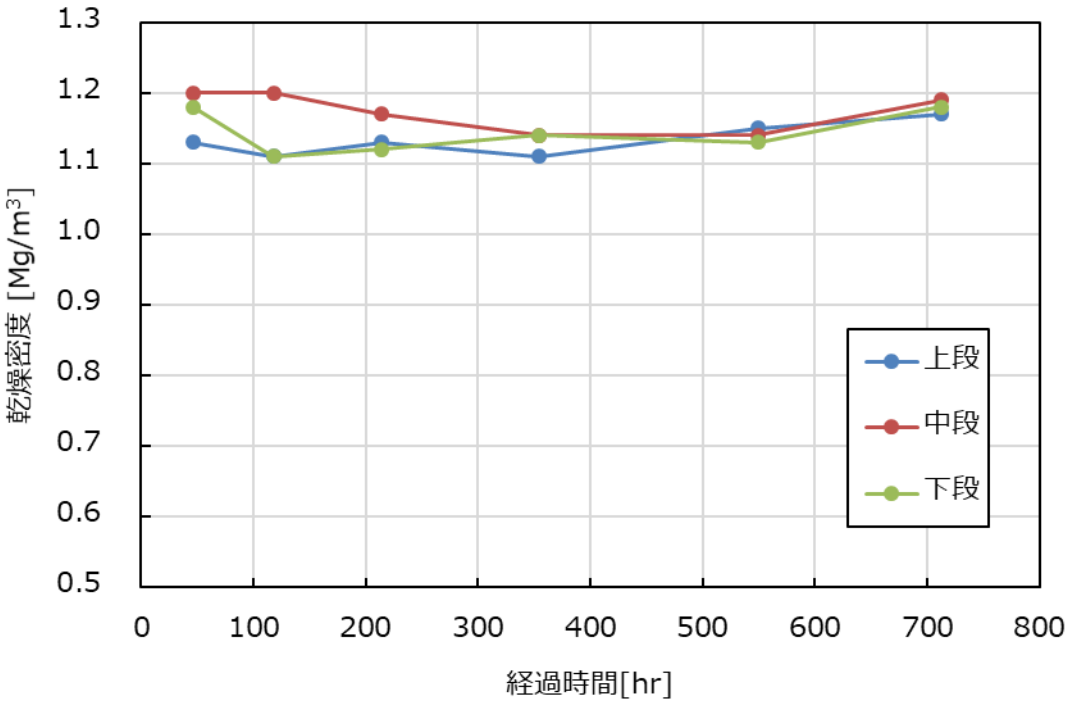


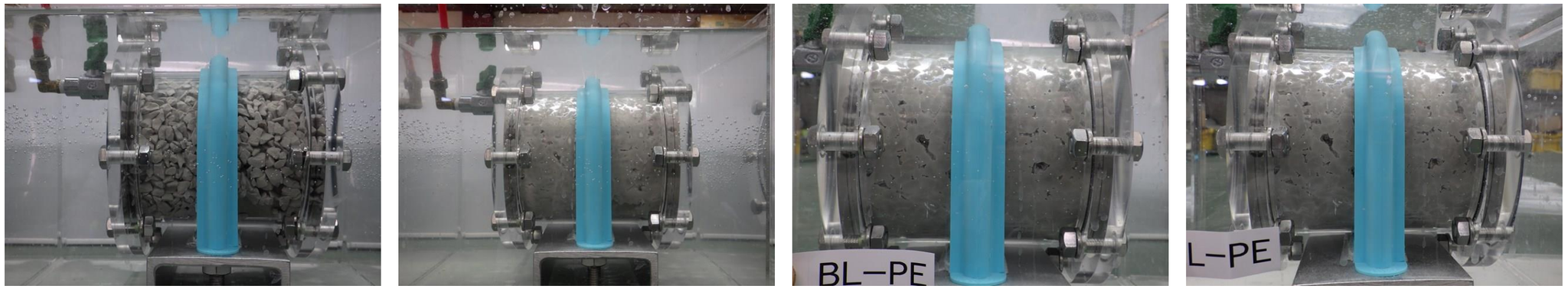
図 3.4-22　ペレット（1.1 Mg/m^3）における乾燥密度の経時変化

(3) ブロック＋ペレット

ブロックとペレットを併用したケースの膨潤の様子を図 3.4-23 に示す。ペレットの崩落を防止するためのふたを設置していたため、試験開始初期では側方からの撮影である。試験開始 0.5 時間でペレットの膨潤により隙間が閉塞している様子が確認された。一方で、約 23 日が経過した試験終了時でコアサンプリングする際には、目視で確認した外観よりも内側ではペレットの粒が残った状態であった。試験終了時においてもブロックとペレットの境界面が残っており、上段がペレット部からのサンプリングとなり、中段と下段がブロック部からのサンプリングとなった。サンプリングにより算出した試験結果を表 3.4-3 に示す。上部のペレット部の乾燥密度が 1.14 Mg/m^3、中段と下段のブロック部で 1.40 Mg/m^3 程度の値を示した。

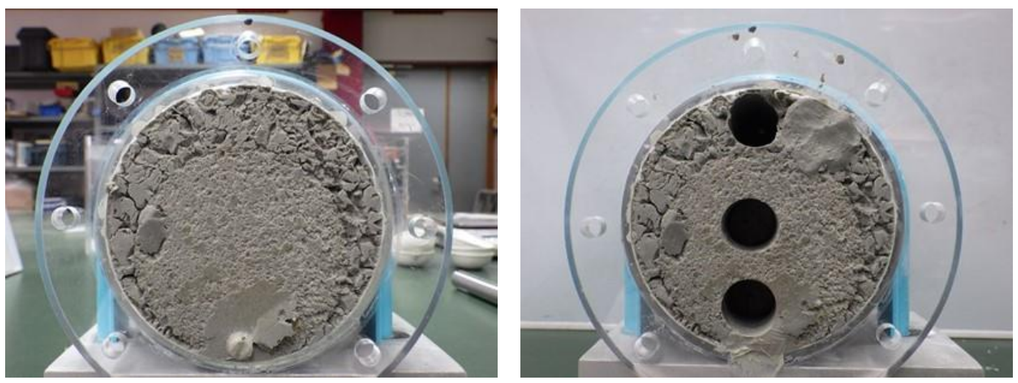
表 3.4-3　ブロックとペレット併用の予備試験結果

	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)
上段	1.14	45.0
中段	1.42	25.9
下段	1.48	26.6



試験開始時　0.5 時間経過後　43 時間経過後　186 時間経過後

284 時間経過後　378 時間経過後　450 時間経過後　498 時間経過後



549 時間経過後（試験終了時）　コア取得後の状態

図 3.4-23　ブロックとペレットの併用の場合の膨潤状況

3.4.4.4　予備試験のまとめ

予備試験で用いた試験体の重量の変化を表 3.4-4 に示す。ペレットのケースでは試験体を複数個作成しており、初期重量は全試験体の平均重量を、最終重量は最後まで試験を実施した試験体の重量とした。なお、ペレットの試験時間が最も長いが、隙間が充填するまでの時間はペレットのほうがブロックよりも短い結果となった。ブロックのケースと目標乾燥密度 0.8 Mg/m^3 のケースは試験終了時の全体の乾燥密度が 0.8 Mg/m^3 であるが、ブロックのほうが乾燥密度の値にばらつきが生じた。予備試験における最終重量はほぼ同じ値であり、ブロックのケースにおいても膨潤時間をより長い時間確保できれば、最終的には乾燥密度が均一化すると考えられる。ペレットとブロックを併用したケースにおいては、乾燥密度が高い値を示しているが、ペレットの充填が難しく施工性が課題になる。施工性の観点では、押し込んで定置するだけのブロックのほうが有利であると考えられ、室内試験・原位置試験で材料仕様および施工方法を検討することが必要となる。

表 3.4-4　予備試験における試験体重量

ケース	試験時間 (hr)	初期重量 (g)	最終重量 (g)	吸水量 (g)	全体乾燥密度 (Mg/m^3)
ブロック	551	862	1354	492	0.8
ペレット (0.8Mg/m^3)	712	776	1354	578	0.8
ペレット (1.1Mg/m^3)	713	1088	1530	442	1.1
ブロック＋ペレット	549	1345	1580	235	1.5

3.4.5　まとめ

今年度は、海外の研究開発事例の文献調査により、ボーリング孔の閉塞技術に係る考慮すべき事項や現状の課題点を抽出し整理した。懸念すべき課題点のひとつとして、日本のように豊富に地下水が存在する地質環境では、ベントナイトが地下水と接触することにより発生する充填途中での閉塞や地下水の化学的性質の影響による膨潤性能の低下が考えられる。

また、文献調査の結果を踏まえつつ、①ベントナイトブロック、②ベントナイトペレット、③ブロックとペレットの組み合わせの 3 つの材料を用いたボーリング孔の閉塞方法について、それぞれの方法の利点や技術的な課題点を整理するとともに上記の方法についてその適用性を確認するための試験の試験条件を設定して、その手順や装置構成などを具体化するための検討を実施した。さらに、3 つの材料を対象とした予備室内試験を実施し、材料によって膨潤してボーリング孔を閉塞するまでの時間は異なるものの、いずれの材料においても閉塞が可能であることを確認した。次年度以降は、整理した知見や課題点を踏まえた上で室内試験・原位置試験を実施し、ベントナイトの充填手順や侵食現象などの発生条件やその影響などを整理していく必要がある。

参考文献

Blumling, P. and Adamas, J., Grimsel Test Site investigation phase IV Borehole Sealing, Nagra Technical Report 07-01, 2008.

Chaplow, R., Site Characterisation Project REVIEW OF REQUIREMENTS FOR SEALING INVESTIGATION BOREHOLES, P/1035/TR1/2010, 2011.

原子力発電環境整備機構，包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－本編および付属書，NUMO-TR-20-03，2021.

Luterkort, D. and Gylling, B., Closure of the Spend Fuel Repository at Forsmark Studies of alternative methods for sealing ramp, shaft and boreholes, SKB TR-12-08, 2012.

Pusch, R., Ramqvist, G., Borehole Project – Final Report Phase 3, SKB R-07-58, 2008.

Pusch, R., Ramqvist, G., Sealing of 300 mm boreholes KXTT3 and KXTT4 at Äspö HRL Report of Subproject 3 of Borehole sealing Project, SKB R-11-19, 2011.

Sandén, T., Nilsson, U., Johannesson, L., Hagman P. and Nilsson, G., Sealing of investigation boreholes Full scale field test and large-scale laboratory tests, SKB TR-18-18, 2018.

4. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリングに関わる施工技術の整備-

4.1 背景及び目的

サイト選定プロセスの進展に伴い具体化される地質環境や処分概念に応じてシーリングの構成材料や施工技術を適切に選定するには、材料バリエーションや施工技術オプションに応じた施工特性および再冠水に至る過渡期の状態変化ならびに施工手順や時間などにも留意し、多様な地質環境条件等を踏まえた施工技術オプションや品質管理方法の具体化に資する基盤情報を整備するとともに、施工試験等を通じた施工方法の適用性を確認しておく必要がある。

これらを踏まえ、本研究項目では以下の研究開発に取り組んでいる。

・小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験
・埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備

小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験については、平成 30 年度に地下研究施設（瑞浪超深地層研究所）の深度 500 m の坑道を対象とした埋め戻し材の全断面吹付け施工試験等を実施した。また、令和元年度には、吹付け施工後の埋め戻し領域から採取した試料を用いて密度試験や透水試験等を実施し、それらの分析結果から埋め戻し材の吹付け施工の品質管理手法の適切性を確認した。

埋め戻し材の材料特性を踏まえた施工技術オプションの整備については、多様な地質環境条件や要求性能等に対して柔軟に対応できるように埋め戻し材の材料バリエーションや施工技術オプションを整備することを目的として、令和元年度までにベントナイトの種類・混合率、模擬掘削土の種類・粒径などをパラメータとした室内試験ならびに撒き出し・転圧工法と吹付け工法による小規模施工試験を実施し、埋め戻し材の材料特性や施工品質に関するデータを取得した。

令和 2 年度は、埋め戻し材の構成材料や締固めエネルギー等をパラメータとした透水試験、撒き出し・転圧工法及び吹付け工法に関する工学規模の施工試験、スクリュー工法とブロック工法に関する要素試験を実施した。さらに、埋め戻し材の性能確認に資する水の浸潤挙動に関するデータを取得した。撒き出し・転圧工法に関する施工試験については、実規模スケールでの試験を行い、埋め戻し材の施工後の非破壊検査やサンプリング等により施工位置と乾燥密度等の関係を詳細に把握した。

4.2 施工技術オプション整備のための研究開発計画

地層処分場のサイト選定では、段階的な調査により調査区域を絞り込みながら処分場としての適切性が判断される。これらの各調査段階で実施される処分場設計では、候補サイトに対して安全機能を有する処分場が構築できることを示す必要がある。坑道の埋め戻し材については、坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないことが設計要件の一つとして要求されており、埋め戻し材の低透水性の指標として、透水係数に“母岩の平均的な透水係数の 10 倍以下”が現在のジェネリックな段階において設定されている。また、埋め戻し材に掘削土を利用することが考えられており、例えば、竪置き・ブロック方式ではベントナイト 15%、掘削土 85%で乾燥密度 1.8 Mg/m^3 が埋め戻し材の仕様例として設定されている。ただし、処分サイトが決定していないジェネリックな現段階では、この埋め戻し材の仕様例は、掘削土の物性をケイ砂で代用した場合の例であり、将来の候補サイトの掘削土の特性によって配合などの仕様は変わることになる（NUMO, 2021）。

埋め戻し材に要求される透水係数は、候補サイトの地質環境条件及び地質環境条件に応じた処

分場の設計などによって異なるため、複数の候補サイトがある場合には、それぞれの地質環境や設計に応じた埋め戻し材の仕様が設定される。また、多様な地質環境や処分場の設計オプションに対して柔軟かつ迅速に対応するためには、複数の施工技術とそれぞれの施工技術に応じた施工管理方法を予め準備しておくことが効果的である。さらに、処分場の閉鎖後に埋め戻し材が期待した性能を発揮することを示すためには、再冠水して飽和に至るまでの埋め戻し材の状態変化の過程を予測評価することが重要となる。以上を踏まえると、段階的なサイト選定プロセスの各節目において柔軟かつ迅速な対応を行うためには、次のような情報や技術を予め整備しておくことが望まれる。

○坑道を埋め戻した後に水みちの発生を防止できる埋め戻し材の施工技術オプション
○埋め戻し材の施工プロセス管理方法
○多様な地質環境に応じた施設設計のバリエーションに対して、柔軟に対応可能な埋め戻し材の材料特性データ
○埋め戻し材への地下水の浸潤解析結果の妥当性確認

埋め戻し材の施工技術オプションとその施工プロセス管理方法を整備するためには、埋め戻し材の基本的な材料データを取得するための室内試験、施工可能な配合や施工した埋め戻し材の品質及びそのばらつきを把握するための小規模施工試験、さらに実際の坑道スケールにおける施工技術の適用性や施工品質などを確認するための地上試験施設での実規模施工試験、実際の地下環境を想定した地下試験施設での実規模試験など、これらの試験を段階的に組み合わせで取り組んでいくことで､施工技術オプション及び施工プロセス管理方法を効果的に整備することができる。

室内試験では、埋め戻し材の幅広い範囲の配合を対象として締固め性や透水性などに関する試験データを拡充することで、多様な地質環境を対象とした処分場設計に対して柔軟に対応可能な埋め戻し材の材料特性データを整備することができる。また、複数の施工方法（技術）を念頭においた小規模な施工試験によって、施工方法に応じて施工可能な掘削土の最大粒径などを把握することができる。埋め戻し材の施工プロセス管理方法は、一般土木分野における施工管理方法や国内外の放射性廃棄物処分分野における施工管理方法を参考にしつつ、地上試験施設での実規模施工試験による埋め戻し材の施工品質の評価などを通して施工プロセス管理方法の案を構築する。そして、地下施設での実規模施工試験を実施して、施工プロセス管理方法（案）の適用性を確認するとともに、地下施設の坑道を対象とした施工品質の管理に関する課題を抽出する。得られた課題については、地上施設での施工試験計画に反映して課題の解決方法について検討を行い、再び地下施設での実規模施工試験を実施する。このような反復プロセスにより施工技術を高度化して、最終的な施工プロセス管理方法が構築されると考えられる。

令和 2 年度からの 3 年間では、以下を目的とした。

【施工技術オプションの整備】
○撒き出し・転圧工法、吹付け工法、スクリュー工法、ブロック工法による埋め戻し材の施工技術オプションの整備
○上記の 4 工法を対象とした埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の構築
○埋め戻し材の施工品質を判断するための材料特性データの拡充
【埋め戻し材の性能評価に資する浸潤解析結果の妥当性確認】
○埋め戻し材の浸潤解析パラメータの取得及び解析結果の妥当性確認

4.3 プロセス管理による埋め戻しの品質管理

ここでは、埋め戻し材の製造から最終的な施工に至る埋め戻しのプロセスを管理することにより、埋め戻しの品質を確保するための手法の構築を目的とする。

以下では、プロセス管理が備えるべき要件とプロセス管理を合理的に進めるための方法としての段階的管理を検討するとともに、具体的な 4 種の埋め戻し施工技術を例に、プロセス管理手法の素案を構築する。次に各プロセス管理手法の要点を抽出するとともに、管理手法構築に向けた研究開発課題を挙げる。

4.3.1　プロセス管理手法が備えるべき要件

プロセス管理手法の素案の構築にあたり、プロセス管理手法が備えるべき要件を以下のように設定する。これらについては、来年度以降にプロセス管理を更新する際の要求事項となる。

〇品質目標を達成すること

埋め戻し材は、止水プラグと適切に組み合わせることによって、「坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路になることの抑制」を確保することを目的として設置される（NUMO, 2021）。埋め戻し材の最も優先度の高い品質管理目標は、坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないための止水性能を達成することである。例えば、透水係数において目標値を達成するとともに、施工による未充填残留及び沈下などによる空隙生成をどの程度に抑制するかという要求レベルも目標値となる。また、この残存空隙が発生する可能性がある施工技術の場合には、埋め戻し材の膨潤性を考慮した目標値を設定することにより、再冠水後の埋め戻し材の膨潤機能による閉塞を期待することができる。

〇安定した品質目標管理を低コストで達成すること

埋め戻し材の製造と埋め戻し施工では、多量の物量と長い期間にわたる品質管理が要求されることから、品質管理目標を安定して達成することにより、機能及び規制からの要求を満足するとともに、管理に要する作業負荷（頻度等）を低くすることで管理コストと管理の工程への影響を低減することが可能な品質管理手法が求められる。

また、処分サイトの地質環境条件や埋め戻し材への要求性能に応じて、埋め戻しに複数の工法が導入される可能性も考慮して、各工法間で管理項目を共通化するとともに、管理項目を適切に組み合わせて適用することで、埋め戻し作業の全体工程における管理の煩雑さとコストを軽減することも望ましい。

〇施工技術開発及び目標乾燥密度の変更などへの対応を可能とする柔軟な管理方法であること

管理手法に柔軟性を備えさせて、技術開発の成果の反映及び将来の処分環境の変化への埋め戻しの適合を円滑にできることが望ましい。特に、施工機械、測定技術などの工業技術は、比較的短期間に開発が進むことが予想されることから、現段階で課題がある技術であっても、現行技術による管理方法とともに、新技術による管理方法を候補として提示することで目標を示すことが望ましい。また、サイト条件及び処分安全確保方策などの違いにより、品質目標を変更する可能性もあり、プロセスの一部の見直しに追随できるような管理方法であることが望ましい。

4.3.2　段階的プロセス管理

ここでは、施工が完了した埋め戻し材に対する直接的な品質管理行為（特に埋め戻しの性能を毀損する可能性のある試料採取及び埋設計測器による測定）で埋め戻しを管理するのではなく、事前の開発段階及び材料製造から現地における、施工完了に至るすべての段階において、その各々のプロセスを管理することによって品質を確保する手法を検討する。

プロセス管理には、後述のように技術の開発段階から施工段階まで幅広い一連の行為が含まれるが、段階的プロセス管理を導入することにより、各段階で生じた品質不適合が前段階あるいはそれ以前の段階へ遡及することによる、工程・コストへの影響、施工者の信頼性及び許認可上の不適切な状況などを抑制できる。

以下ではプロセス管理の段階及び段階管理による合理化について述べる。

(1) プロセス管理の段階

処分事業における埋め戻しによる坑道閉鎖の品質管理では、次のような段階的な管理を考えることができる。

○開発段階：埋め戻し材及び埋め戻し施工技術を開発する段階であり、例えば、仕様の例示、概念設計、基本設計へと段階的に進展する設計の各段階に対応した開発行為、例えば室内試験、モックアップ試験及び原位置試験などが段階的に実施される。設計では、それぞれの段階（及びサイトなどの適用条件の明確化の過程）に応じた要求性能が提示され、試験などでその実現性を確認することとなる。

例えば、品質保証に係る取組として製造・施工プロセス管理手法を導入する際には、本段階において（処分場の建設・操業段階に先立ち)、地上や地下での試験等をとおして同手法を実証・確立しておく必要がある。

○製造段階：埋め戻し材の材料の調達、配合（水分調整含む)、混錬及び払い出しまでの主に地上での管理段階であり、各施工技術と目標性能に適合した埋め戻し材を準備する。この段階の品質は、最終性能及び施工性（施工可否、施工効率など）へ大きく影響することが予想され、品質管理上重要な管理段階である。

○施工段階:製造された埋め戻し材を地下の施工場所まで運搬して埋め戻す一連の段階である。施工プロセスは事前の試験などにより適用技術毎に規定され、現地ではそれに沿って施工することで品質を確保する。それ以外の現地での管理は、基本的には確認行為が中心となる。これにより、現地における管理行為に関するコストの低減、人的作業量の低減による安全性の向上などを図ることが可能となる。

(2) 段階管理による合理化

上述の管理段階で述べたように、処分事業における埋め戻しは、埋め戻し材・埋め戻し技術の開発、埋め戻し材の製造（保管・運搬）及び原位置での施工の順で実施される。

後述する海外先行事例（4.3.5(1)参照）で紹介しているように、各段階での管理を適切に実施することにより、ある段階の品質管理の課題を解決するために、前段階のプロセスへ逆戻りする必要がないようにすることが望ましい。したがって、段階ごとに管理を完結させて、不可避の外的要因によるものを除き、できるだけ前段階への遡及を必要としないような管理方法を採用すべきである。

この段階管理を実践するためには、各段階での品質管理を明確に定義された指標に沿って実施し、その管理が具体的な記録により追跡可能である必要がある。許認可の観点からも、この追跡可能性は重要である。さらに、品質管理を前段階へ遡及してやり直すという状況は、管理の拠り所としているプロセス管理手法への疑義を生じさせるだけでなく、すでに終えている埋め戻しの許認可上の取り扱いに混乱を生じることになりかねないので、避けなければならない。

なお、管理指標の設定を目的とした開発段階においても、原則として同様の段階管理を適用す

ることにより、いわゆる「手戻り」を防ぐとともに、開発・試験課程を通じて、実施工のプロセス管理の根拠となるデータの品質を保証することができる。

(3) 品質管理指標と管理段階

埋め戻しにおける主要品質管理指標と管理段階の関係は次の通りである。この基本的な構成に沿ってプロセス管理手法の項目が展開される。

○透水係数の目標値

埋め戻し材のベントナイト混合率（有効粘土密度）、配合骨材及び乾燥密度を管理することにより、達成可能な透水係数を設定する。

- ベントナイト混合率（有効粘土密度）　⇒「製造」プロセス管理
- 配合骨材（種類、粒度）　⇒「製造」プロセス管理
- 乾燥密度　⇒「施工」プロセス管理
- 材料の品質　⇒「製造」プロセス管理

○不均質性、局所的に低い乾燥密度及び残存空隙

局所的な品質不良及び残存空隙などにより、「坑道を核種移行の優先経路としない」という目標の達成に懸念が生じる可能性があるため、これを回避できる品質管理を行う必要がある。

- 埋め戻し材の不均質性により必要粘土密度を満足しない部位の回避⇒「製造」プロセス管理
- 材料運搬時及び充填時の材料分離などによる粘土密度や骨材の不均質分布の回避⇒「施工」プロセス管理
- 沈下による空隙および坑道壁面近傍などの低密度及び未充填空間の回避⇒「施工」プロセス管理

4.3.3　各施工技術のプロセス管理手法

本検討において候補とした 4 種の埋め戻し施工技術に関するプロセス管理手法の検討例を示す。実施工経験のない現段階では、一部は想定に基づく手法構築となるが、建設分野を中心としたこれまでの経験及び今年度の各種施工試験で得られた知見などを活用して全体を構成している。

以下では施工技術毎に、施工プロセスを理解するための情報として各施工技術の技術概要を述べるとともに、実施手順に沿ったプロセス管理手法を提示する。なお、今回構築したプロセス管理手法については、今後の各種検討を通じて評価指標や管理方法などの見直しを行うものとする。

(1) 撒き出し・転圧工法

撒き出し・転圧工法に関する製造・施工管理プロセスを表 4.3-1～表 4.3-3に示す。なお、プロセスを構成する項目は、比較を容易にするため、これ以降の全施工技術で共通とした。また、開発段階として今年度に実施した管理方法については、表内に「R2」の記号を付して記載した。

本工法は、後述の4.4.2(1)に示すように、指定の割合で混合した埋め戻し材を、転圧により密度が最大付近となる含水比を得られるように水分調整しながら混錬したものを、一定の量を撒き出して機械転圧し、目標とする性能を達成する工法である。スウェーデンの処分実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下「SKB」と称す。）が坑道埋め戻しの実証試験として実施しており、処分坑道以外の坑道の埋め戻し施工方法の候補となっている。

本工法は、これまでの建設分野における技術の蓄積により施工技術はほぼ確立しており、現時点では今後の短期的な新技術の開発も考慮する必要は無い。したがって、ここで提示したプロセス管理手法も、施工技術の観点からは、近い将来では大きく変わる可能性は低い。

施工現場でのプロセス管理の項目の多さとそれらの再修正のへの影響の大きさから､本工法は、品質確保における施工現場での管理が他の工法と比較して比較的高い工法であると考えられる。

(2) 吹付け工法

吹付け工法に関する製造・施工管理プロセスを表 4.3-4～表 4.3-6に示す。

本工法は、後述の4.4.2(2)に示すように、指定の割合で混合した埋め戻し材を、吹付けによる密度をできるだけ大きくするとともに、リバウンド量を抑制し、さらにできるだけ長い時間の連続施工が可能となるような含水比を得られるように水分調整しながら混錬したものを、適切な単位時間当たりの吹付け量を圧縮空気で吹付けて、目標とする性能を達成する工法である。

吹付け工法のうち、セメント系の吹付けについては、これまでの建設分野における技術の蓄積により、施工技術はほぼ確立しているが、本検討で対象としているベントナイト混合土（特に砕石を含む混合土）についての適用実績は十分ではない。

本工法は、最終品質に影響するプロセス管理の項目数が多く、特に吹付に適した材料の製造までの管理に加えて、現段階では現場での施工スキルの影響も想定される。それらのうち製造管理については､施工試験などによる品質規定上の適切な柔軟性（指標の幅）を確保することにより、実施工における管理の厳格さを緩和することも考慮すべきである。施工スキルについては、今後自動化などにより依存度を低下させて、現場における管理をより容易にすることも必要である。

(3) スクリュー工法

スクリュー工法に関する製造・施工管理プロセスを表 4.3-7～表 4.3-9に示す。

本工法は、後述の4.4.2(3)に示すように、一般産業界において粉体材料の搬送に使われているスクリューフィーダーを、今回の対象とする埋め戻し材の施工への適用を試みるものである。スイスの処分実施主体である放射性廃棄物管理共同組合（以下「Nagra」と称す。）が、横置き処分方式における処分坑道の空間を埋め戻すための工法として採用している。近年では、フィンランドの地層処分実施主体であるPosiva社（以下「Posiva」と称す。）が縦置き処分方式における処分坑道の埋め戻しのために、ブロック工法の代替案として検討を進めている。

スクリューの押し込み効果による大きな密度向上を期待できないことから、埋め戻し材を締固めずに密度が確保できるようにその組成を最適化する必要がある。そのために、含水比の調節に

よって密度を確保するような手法は適用できず、主に粒度分布を調整・管理することにより、目標とする乾燥密度を達成する。

埋め戻しに適したスクリューフィーダーは、埋め戻し材の配合（最大粒径）、閉鎖事業における埋め戻しの速度と体積を考慮して、スクリューの本数、配置、径及び回転速度を設計する必要がある。今年度は技術としての適用性を見極めるための要素試験として、1本のスクリューフィーダーを準備して搬送試験を行った。一部シールド工法での土砂搬送に使用されている建設分野での例を除き、類似の適用事例は無い。

また、長尺の円管内を搬送する必要があることから、埋め戻し材の流動性の確保が重要な課題であり、今年度の埋め戻し材の配合では、加水を一切行わない（ベントナイトは自然含水比、骨材は表面乾燥）状態での試験を行った。この点は、含水比の調整が性能確保上の要点となる他の3種の工法と異なる点であるが、結果としてこの特徴は安定した連続施工が可能という利点をもたらしている。さらに、本工法では埋め戻し材を調整した以降は、原位置での施工としては、スクリューの回転速度とそれに連携したフィーダー装置の後退速度、埋め戻し材供給量を電気的に制御するのみであり、スキルに影響される作業が少なく、管理を単純化することが可能である。

(4) 埋め戻し材ブロック工法

埋め戻し材ブロック工法に関する製造・施工管理プロセスを表 4.3-10～表 4.3-13に示す。

本工法は後述の 4.4.2(4)に示すように、締固めによって高い乾燥密度を得られるように埋め戻し材の含水比を調整した材料を型枠に入れ、プレス機で圧縮成型して密度の高いブロック状の埋め戻し材を製造し、原位置でそれを定置することにより坑道断面を埋め戻す工法である。スウェーデンの SKB が縦置き処分方式における処分坑道の埋め戻し工法として採用することが検討されている。

ブロック製造に関する工程のほぼ全てが地上の工場等の設備内で完結できることから、製造段階の品質管理は確実性が高く、現場で多くの管理が要求される他の工法と比較して、透水係数（乾燥密度）の目標達成管理が容易である。したがって、今後の本事業でのプロセス管理手法開発では、実施工に要求される施工効率の達成に適した形状寸法および定置方法の提示、ならびにブロックと坑道の間の空隙の充填法との適切な組み合わせ、およびその際の管理項目と管理指標の明確化などが課題となる。

表 4.3-1　撒き出し転圧工法における製造・施工プロセス管理（開発段階）

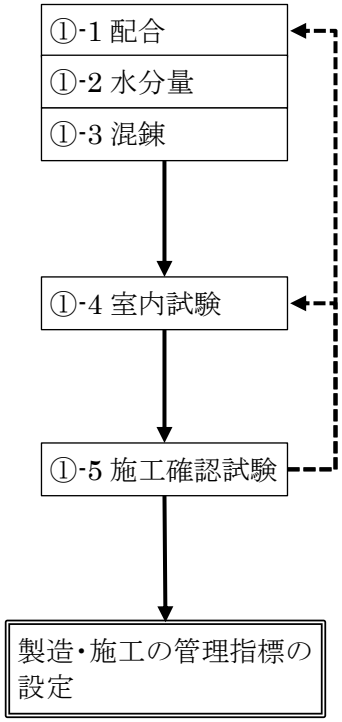
開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
①開発（試験による管理指標の設定）  	①製造・施工管理指標の設定	開発段階全体の管理	・各開発段階での適切な品質保証 ・各開発段階間の整合性	・開発各段階での品質保証により、段階全体の品質保証を達成する ・上流段階への遡及及び再試験を含む段階移行時の合理的マネジメントを実施する
	①-1埋め戻し材（配合）	ベントナイト・骨材の混合比率、骨材の選定（有害物質、強度、密度）	・設計の要求仕様への適合 ・①-3性能目標（止水性）達成との整合性 ・施工性、経済性に優れた配合	・設計上の規定があればそれに従う ・学会などの基準に沿った試験 ・JISなどの品質保証下の骨材を選定する ○R2:骨材は規格品使用（品質確認書類あり）での目標達成を確認
	①-2 埋め戻し材(水分量)	含水比 加水の水質	・①-3性能目標（止水性）達成との整合性 ・締固め試験による含水比－乾燥密度の情報	・学会などの基準に沿った試験 ・変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階の管理負荷の低減 ○R2:最適含水比による達成乾燥密度を確認、既往知見により透水係数目標達成を確認
	①-3 混錬	材料の均質性 ミキサ選定 混錬方法 混錬時間	・均質性（骨材の均質な分布、塊玉生成の抑制） ・投入手順、混錬時間	・均質性を得るミキサの選定と投入手順、混錬時間の管理 ・混錬後材料の粒度分析による確認 ○R2：既往の知見によるミキサ選定、混錬方法・時間設定
	①-4埋め戻し性能目標（室内試験）	透水係数 膨潤性	・乾燥密度 ・膨潤による充填可能な見積り空隙量に対応した有効粘土密度	・学会などの基準に沿った試験 ・既往知見との整合性 ・変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階管理負荷の低減 ○R2:既往知見に基づき目標透水係数達成を確認
	①-5埋め戻し性能目標（施工確認試験）	・撒き出し厚 ・転圧機械 ・乾燥密度 ・残留空隙 ・埋め戻しの均質性	・室内試験で規定された目標乾燥密度の達成（坑壁近傍、排水溝など転圧困難部位含む） ・目標達成のための撒き出し厚、転圧機械及び転圧回数 ・残留空隙が膨潤充填可能範囲か	・サンプリングによる乾燥密度、材料組成、粒度分布の測定と学会などの基準に沿った試験 ・観察による未充填空隙の把握 ・転圧機械、撒き出し厚、転圧方法の各管理項目への影響の把握と必要に応じた改善 ・実施工時に計画している品質管理手法（バルクでの密度評価、空隙感知・密度評価技術）の適用性の確認 ○R2:既往知見により選定した転圧機械、撒き出し厚による目標密度達成を、試験により確認

表 4.3-2　撒き出し転圧工法における製造・施工プロセス管理（製造段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
②製造	②製造段階全体の管理	材料品質 材料調整 製造 保管	・開発段階で設定した製造の管理指標を満足すること ・施工に適した状態で材料を供給できること	・開発段階で決定した管理指標を遵守するための管理方策 ・許認可に耐える品質保証の実践（品質保証記録の整備、承認と保管）
②-1～4 材料調達 ②-1 ベントナイト	②-1材料調達（ベントナイト）	モンモリロナイト含有率・有害物含有量など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・製造元がJISなどの品質保証を得ていること ・製造元発行のロット毎の分析管理シート ・適宜立ち入り検査
②-2 砕石・砂	②-2材料調達（骨材）砕石（掘削ズリ）・砂	岩石の有害物含有量・岩石強度など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・発生地層および一定量毎の試験 ・解砕前の目視、バッチ毎の計量(密度推定)
②-3 粒度調整	②-3砕石粒度調整（掘削ズリ解砕）	最大粒径、粒度分布など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・篩目の確認 ・一定量毎の粒径分布測定
②-4 水	②-4水	有害物質	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・供給元がJISなどの品質保証を得ていること ・供給元発行の分析管理シート ・適宜分析検査
（②-4 一時貯蔵）	（②-4一時貯蔵）	湿度（乾湿）	・乾湿の影響を受けないこと	・保管環境の管理と継続的測定
②-5 混錬	②-5埋め戻し材混錬	計量 ミキサ選定 混錬方法 加水量 材料の均質性	・開発段階で設定した方法、手順に従っていること ・均質性（骨材の均質な分布、塊玉生成の抑制） ・投入手順、混錬時間・回転数	・計量システムが認可を受けた機関の検査に合格していること(プラントが認証機関の品質保証を得ていること) ・バッチ毎の計量混合記録のチェックと保管 ・適宜分析検査
②-6 貯蔵	②-6貯蔵	湿度（乾湿）	乾湿の影響を受けないこと	・すべての保管バッチに②-1～5の製造記録が付帯すること ・保管環境の管理とランダムサンプリングによる確認 ・大型土嚢などによる乾燥防止策

表 4.3-3　撒き出し転圧工法における製造・施工プロセス管理（施工段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
③施工	③施工段階全体の管理	埋め戻し材品質 運搬・供給 撒き出し転圧 性能目標	・開発段階で設定した性能目標達成のための管理指標を満足すること ・性能目標達成を施工品質管理で保証すること	・開発段階で決定した管理指標を遵守するための管理方策 ・許認可に耐える品質保証の実践（品質保証記録の整備、承認と保管）
③-1 運搬	③-1埋め戻し材運搬	材料の均質性	・振動などにより材料の分離をしていないこと ・材料の乾湿により適正な水分範囲から逸脱しないこと	・運搬前後の目視 ・適宜ランダムサンプリング検査 ・全バッチに関する品質管理記録の確認
③-2 撒き出しへの供給	③-2撒き出しへの材料の供給	供給材料の均質性・含水量 供給材料の重量	・供給材料の均質性・含水量が維持されていること ・適正量の供給により材料の乾燥などを生じないこと	・画像目視による均質性の確認 ・供給システム（ベルコン、車両など）における重量測定
③-3 撒き出し	③-3撒き出し	撒き出し厚さ	・開発段階で設定した計画通りの撒き出しがおこなわれていること	・測量による高さ管理（3Dスキャナーまたはレベル）と結果の保管
③-4 転圧	③-4転圧	転圧機械 転圧回数	・目標密度に合致した計画通りの転圧がおこなわれ、達成目標密度が得られていること	・開発段階で選定した機械あるいは同等以上の能力を有する機械の使用 ・撒き出し厚ー仕上がり高さの関係から、転圧効果が予想値と合致していることの確認
③-5 埋め戻し密度	③-5埋め戻し密度	出来形／埋め戻し材料の質量		・出来形を計測し、充填体積と投入埋め戻し材重量からバルクとしての埋め戻し密度を計算
③-6 均質性	③-6均質性	充填の均質性	・転圧効果のばらつき、部位による差異が大きくないこと	・材料は撒き出し時の均質性で担保する(実証試験により確認) ・部位により転圧方法を変える場合は、転圧エネルギーを調整する(実証試験により確認)
③-7 未充填空隙	③-7未充填空隙	沈下量、坑道壁面との間の空隙、路盤排水溝	・開発段階で設定した範囲に収まっていること（試験施工で決定した規定の範囲に収まっていること）	・充填体積と坑道断面からの推定 ・あらかじめ設定した測定点における非破壊計測

表 4.3-4　吹付け工法における製造・施工プロセス管理（開発段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
①開発（試験による管理指標の設定） ①-1 配合 ①-2 水分量 ①-3 混錬 ①-4 室内試験 ①-5 施工確認試験 製造･施工の管理指標の設定	①製造・施工管理指標の設定	開発段階全体の管理	・各開発段階での適切な品質保証 ・各開発段階間の整合性	・開発各段階での品質保証により、段階全体の品質保証を達成する ・上流段階への遡及及び再試験を含む段階移行時の合理的マネジメントを実施する
	①-1埋め戻し材（配合）	ベントナイト・骨材の混合比率、骨材の選定（有害物質、強度、密度）	・設計の要求仕様への適合 ・①-3性能目標（止水性）達成との整合性 ・施工性、経済性に優れた配合	・設計上の規定があればそれに従う ・学会などの基準に沿った試験 ・JISなどの品質保証下の骨材を選定する ○R2:骨材は規格品使用（品質確認書類あり）での目標達成を確認
	①-2 埋め戻し材(水分量)	含水比 加水の水質	・①-3性能目標（止水性）達成との整合性 ・締固め試験による含水比－乾燥密度の情報	・学会などの基準に沿った試験 ・変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階の管理負荷の低減 ○R2:最適含水比による達成乾燥密度を確認、既往知見により透水係数目標達成を確認
	①-3 混錬	材料の均質性 ミキサ選定 混錬方法 混錬時間	・均質性（骨材の均質な分布、塊玉生成の抑制） ・投入手順、混錬時間、回転数	・均質性を得るミキサの選定と投入手順、混錬時間の管理 ・混錬後材料の粒度分析による確認 ○R2：既往の知見によるミキサ選定、混錬方法・時間設定
	①-4埋め戻し性能目標（室内試験）	透水係数	・乾燥密度	・学会などの基準に沿った試験 ・既往知見との整合性 ・変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階管理負荷の低減 ○R2:試験により目標密度達成を確認
	①-5埋め戻し性能目標（施工確認試験）	・吹付け機械、ノズル ・乾燥密度 ・残留空隙 ・埋め戻しの均質性 ・リバウンド、施工歩掛 ・湧水影響	・室内試験で規定された目標乾燥密度の達成（天端近傍、路盤上など吹付け困難部位含む） ・目標達成のための空気吐出量、材料供給量、吹付け機回転数 ・吹付けノズルの取り扱い（距離・角度） ・湧水影響による施工可能範囲 ・リバウンド量、付着材の組成	・サンプリングによる乾燥密度、材料組成、粒度分布の測定と学会などの基準に沿った試験 ・観察による未充填空隙の把握 ・吹付け機械、吐出量、ノズル取り扱い方法の各管理項目への影響の把握と必要に応じた改善 ・実施工時に計画している品質管理手法（バルクでの密度評価、空隙感知・密度評価技術）の適用性の確認 ○R2:吹付に適した配合、その場合の施工条件の組み合わせを試験により確認。未充填空隙が概ね無いことについて確認

表 4.3-5　吹付け工法における製造・施工プロセス管理（製造段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
②製造	②製造段階全体の管理	材料品質 材料調整 製造 保管	・開発段階で設定した製造の管理指標を満足すること ・施工に適した状態で材料を供給できること	・開発段階で決定した管理指標を遵守するための管理方策 ・許認可に耐える品質保証の実践（品質保証記録の整備、承認と保管）
②-1～4 材料調達 ②-1 ベントナイト	②-1材料調達（ベントナイト）	モンモリロナイト含有率・有害物含有量など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・製造元がJISなどの品質保証を得ていること ・製造元発行のロット毎の分析管理シート ・適宜立ち入り検査
②-2 砕石・砂	②-2材料調達（骨材）砕石（掘削ズリ）・砂	岩石の有害物含有量・岩石強度など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・発生地層および一定量毎の試験 ・解砕前の目視、バッチ毎の計量(密度推定)
②-3 粒度調整	②-3砕石粒度調整（掘削ズリ解砕）	最大粒径	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・篩目の確認 ・一定量毎の粒径測定
②-4 水	②-4水	有害物質	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・供給元がJISなどの品質保証を得ていること ・供給元発行の分析管理シート ・適宜分析検査
（②-4 一時貯蔵）	（②-4一時貯蔵）	湿度（乾湿）	・乾湿の影響を受けないこと	・保管環境の管理と継続的測定
②-5 混錬	②-5埋め戻し材混錬	計量 ミキサ選定 混錬時間 加水量 材料の均質性	・開発段階で設定した方法、手順に従っていること ・均質性（骨材の均質な分布、塊玉生成の抑制） ・投入手順、混錬時間	・計量システムが認可を受けた機関の検査に合格していること(プラントが認証機関の品質保証を得ていること) ・バッチ毎の計量混合記録のチェックと保管 ・適宜分析検査
②-6 貯蔵	②-6貯蔵	湿度（乾湿）	乾湿の影響を受けないこと	・すべての保管バッチに②-1～5の製造記録が付帯すること ・保管環境の管理とランダムサンプリングによる確認 ・大型土嚢などによる乾燥防止策

表 4.3-6　吹付け工法における製造・施工プロセス管理（施工段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
③施工	③施工段階全体の管理	埋め戻し材品質 運搬・供給 吹付け 性能目標	・開発段階で設定した性能目標達成のための管理指標を満足すること ・性能目標達成を施工品質管理で保証すること	・開発段階で決定した管理指標を遵守するための管理方策 ・許認可に耐える品質保証の実践（品質保証記録の整備、承認と保管）
③-1 運搬	③-1埋め戻し材運搬	材料の均質性	・振動などにより材料の分離をしていないこと ・材料の乾湿により適正な水分範囲から逸脱しないこと	・運搬前後の目視 ・適宜ランダムサンプリング検査 ・全バッチに関する品質管理記録の確認
③-2 吹付け機への供給	③-2吹付け機への材料の供給	供給材料の均質性・含水量 供給材料の重量	・供給材料の均質性・含水量が維持されていること ・適正量の供給により材料の乾燥などを生じないこと	・画像目視による均質性の確認 ・供給システム（ベルコン、車両など）における重量測定
③-3 吹付け	③-3吹付け	乾燥密度 残留空隙 埋め戻しの均質性 リバウンド､施工歩掛	・目標密度に合致した計画通りの吹付けがおこなわれ、達成目標密度が得られていること（リバウンド量、リバウンド組成、付着状況など）	・開発段階で選定した機械あるいは同等以上の能力を有する機械の使用 ・測量による出来形の計測（3Dスキャナーまたはレベル）と結果の保管 ・吹付け重量、リバウンド量及び出来形からバルクとしての埋め戻し密度を計算
③-4 転圧	③-6均質性	吹付の均質性	・吹付けのばらつき、部位による差異が大きくないこと	・材料の均質性は吹付け機供給時の均質性で担保する(実証試験により確認) ・部位による差は、実証試験により確認 ・リバウンド材の分析により付着材の組成を評価
③-5 埋め戻し密度 ③-6 均質性 ③-7 未充填空隙	③-7未充填空隙	沈下量、坑道壁面との間の空隙、路盤排水溝	・開発段階で概ね無いことを確認済みであるが、設定した範囲に収まっていることを確認	・吹付け体積、リバウンド体積と坑道断面からの推定 ・あらかじめ設定した測定点における非破壊計測

表 4.3-7　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理（開発段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
①開発（試験による管理指標の設定） ①-1 配合 ①-2 水分量 ①-3 混錬 ①-4 室内試験 ①-5 施工確認試験 製造・施工の管理指標の設定	①製造・施工管理指標の設定	開発段階全体の管理	・各開発段階での適切な品質保証 ・各開発段階間の整合性	・開発各段階での品質保証により、段階全体の品質保証を達成する ・上流段階への遡及及び再試験を含む段階移行時の合理的マネジメントを実施する
	①-1埋め戻し材（配合）	ベントナイト・骨材の混合比率、骨材（有害物質、強度、密度）・粒度分布	・設計の要求仕様への適合 ・①-3性能目標（止水性、空隙充填性）達成との整合性 ・施工性、経済性に優れた配合	・設計上の規定があればそれに従う ・学会などの基準に沿った試験方法 ・JISなどの品質保証下の骨材を選定する ○R2:骨材は粒度分布を確認、規格品使用（品質確認書類あり）で適切な配合が得られることを確認
	①-2 埋め戻し材(水分量)	含水比	・①-3性能目標（止水性、空隙充填性）達成との整合性 ・含水比－乾燥密度の情報	・学会などの基準に沿った試験方法 ・変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階の管理負荷の低減 ○R2:水分無調整での目標達成を確認
	①-3 混錬	材料の均質性 ミキサ選定 混錬時間・回転数	・均質性（骨材の均質な分布） ・混錬時間	・均質性を得る混錬時間の管理 ・混錬後材料の粒度分析による確認 ○R2：既往の知見によるミキサ選定、混錬方法・時間設定 ○R2：水分無調整による管理の軽減
	①-4埋め戻し性能目標（室内試験）	透水係数 膨潤性	・乾燥密度 ・膨潤による充填可能な見積り空隙量に対応した有効粘土密度	・学会などの基準に沿った試験方法 ・既往知見との整合性 ・変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階管理負荷の低減 ○R2:締固め度 85%での目標透水係数達成を確認
	①-5埋め戻し性能目標（施工確認試験）	・乾燥密度 ・残留空隙 ・埋め戻しの均質性 ・スクリューフィーダーの設計と施工による各管理項目への影響	・室内試験で規定された要求乾燥密度の達成（隅角部、天端など充填困難部位含む） ・残留空隙 ・材料分離 ・スクリューフィーダーによる各管理項目への影響 ・膨潤に期待する部位における配合オプション	・サンプリングによる乾燥密度、材料組成、粒度分布の測定と学会などの基準に沿った試験方法 ・観察による未充填空隙の把握 ・スクリュー充填装置を使うことによる各管理項目への影響の把握と必要に応じた改善 ・実施工時に計画している品質管理手法（バルクでの密度評価、空隙感知・密度評価技術）の適用性の確認 ○R2:スクリューフィーダーを用いて充填速度・充填方法（自由落下・押し込み）の違いによらず目標密度達成できることを確認

表 4.3-8　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理（製造段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
②製造 ②-1～4 材料調達 ②-1 ベントナイト ②-2 砕石・砂 ②-3 粒度調整 ②-4 水 ↓ （②-4 一時貯蔵） ↓ ②-5 混錬 ↓ ②-6 貯蔵	②製造段階全体の管理	材料品質 材料調整 製造 保管	・開発段階で設定した製造の管理指標を満足すること ・施工に適した状態で材料を供給できること	・開発段階で決定した管理指標を遵守するための管理方策 ・許認可に耐える品質保証の実践（品質保証記録の整備、承認と保管）
	②-1材料調達（ベントナイト）	モンモリロナイト含有率・有害物含有量など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・製造元がJISなどの品質保証を得ていること ・学会などの基準に沿った試験方法 ・製造元発行のロット毎の分析管理シート ・適宜立ち入り検査
	②-2材料調達（骨材）砕石（掘削ズリ）・砂	岩石（有害物質、強度、密度）	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・発生地層および一定量毎の試験 ・学会などの基準に沿った試験方法 ・解砕前の目視、バッチ毎の計量(密度推定)
	②-3砕石粒度調整（掘削ズリ解砕）	最大粒径、粒度分布など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・篩目の確認 ・学会などの基準に沿った試験方法 ・一定量毎の粒径分布測定
	②-4水（水分調整を行う場合のみ）	有害物質	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・供給元がJISなどの品質保証を得ていること ・供給元発行の分析管理シート ・適宜分析検査 ・学会などの基準に沿った試験方法
	（②-4一時貯蔵）	湿度（乾湿）	・乾湿の影響を受けないこと	・保管環境の管理と継続的測定
	②-5埋め戻し材混錬	計量 ミキサ選定 混錬時間 材料の均質性	・開発段階で設定した方法、手順に従っていること ・均質性（骨材の均等な分布） ・混錬時間	・計量システムが認可を受けた機関の検査に合格していること(プラントが認証機関の品質保証を得ていること) ・バッチ毎の計量混合記録のチェックと保管 ・適宜分析検査
	②-6貯蔵	湿度（乾湿）	乾湿の影響を受けないこと	・すべての保管バッチに②-1～5の製造記録が付帯すること ・保管環境の管理とランダムサンプリングによる確認

表 4.3-9　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理（施工段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
③施工	③施工段階全体の管理	埋め戻し材品質 運搬・供給 充填 性能目標	・開発段階で設定した性能目標達成のための管理指標を満足すること ・性能目標達成を施工品質管理で保証すること	・開発段階で決定した管理指標を遵守するための管理方策 ・許認可に耐える品質保証の実践（品質保証記録の整備、承認と保管）
③-1 運搬	③-1埋め戻し材運搬	材料の均質性	・振動などにより材料の分離をしていないこと ・材料の乾湿により適正な水分範囲から逸脱しないこと	・運搬前後の目視 ・適宜ランダムサンプリング検査 ・全バッチに関する品質管理記録の確認
③-2 フィーダーへの供給	③-2フィーダーへの供給量と材料性状の確認	供給材料の均質性 供給材料の重量	・供給材料の均質性が維持されていること ・埋め戻し速度と投入量の適正なバランスがとれていること ・各フィーダーに適切に分配されていること	・画像による均質性の確認 ・供給装置における各フィーダーの連続重量測定
③-3 充填速度	③-3充填速度	スクリュー回転数	・目標密度に合致した計画通りの充填がおこなわれていること	・計算された連続密度に対応した回転数制御(実証試験により設定)
③-4 充填抵抗値	③-4充填抵抗値	スクリュー回転トルク／ブレーキ	・目標密度に合致した計画通りの充填がおこなわれていること(実証試験により設定した範囲に収まっていること)	・制御システムにおける電流計測定
	③-5埋め戻し密度	出来形／埋め戻し材料の質量		・出来形を計測し、充填体積と投入埋め戻し材重量からバルクとしての埋め戻し密度を計算
③-5 埋め戻し密度 ③-6 均質性 ③-7 未充填空隙	③-6均質性	充填の均質性	・材料が分離せずに充填されていること ・充填密度に偏りが無いこと	・材料は供給時の均質性で担保する(実証試験により確認) ・スクリューの配置、各スクリューの供給量で担保する(実証試験により確認)
	③-7未充填空隙	沈下量、坑道壁面との間の空隙	・開発段階で膨潤量に基づき設定した範囲に収まっていること	・充填体積と坑道断面からの推定 ・あらかじめ設定した測定点における非破壊計測

表 4.3-10　ブロック工法における製造・施工プロセス管理（開発段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
①開発（試験による管理指標の設定） ①-1 配合・水分量 ①-2 混錬 ①-3 室内試験 ①-4 ブロック製造確認試験 ①-5 ブロック定置試験 製造・定置管理指標の設定	①製造・定置管理指標の設定	開発段階全体の管理	・各開発段階での適切な品質保証 ・各開発段階間の整合性	・開発各段階での品質保証により、段階全体の品質保証を達成する ・上流段階への遡及及び再試験を含む段階移行時の合理的マネジメントを実施する
	①-1ブロック材（配合・水分量）	ベントナイト・骨材の混合比率、骨材の選定・粒度分布・含水比など	・設計の要求仕様への適合 ・①-3性能目標（止水性）達成との整合性 ・含水比－乾燥密度の関係 ・製作性、経済性に優れた配合	・設計上の規定があればそれに従う ・学会などの基準に沿った試験方法 ・JISなどの品質保証下の骨材を選定する ・密度の変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階の管理負荷の低減 ○R2:骨材は規格品使用（品質確認書類あり）で適切な製作性が得られることを確認
	①-2 混錬	材料の均質性 ミキサ選定 混錬時間・回転数	・均質性（骨材の均質な分布、塊玉生成の抑制） ・混錬時間	・均質性を得る混錬時間の管理 ・混錬後材料の粒度分析による確認 ○R2：既往の知見によるミキサ選定、混錬方法・時間設定により適切に混錬可能なことを確認
	①-3ブロック性能目標（室内試験）	透水係数 膨潤性	・乾燥密度 ・膨潤による充填可能な見積り空隙量に対応した有効粘土密度	・学会などの基準に沿った試験方法 ・既往知見との整合性 ・変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階管理負荷の低減 ○R2:到達目標密度をもとに、既往知見に基づき透水係数目標達成を確認
	①-4ブロック製造確認試験	・乾燥密度 ・ブロックの均質性 ・形状維持	・室内試験で規定された要求乾燥密度の達成 ・不均質性 ・成型圧力	・乾燥密度、サンプリングによる材料組成の測定 ・学会などの基準に沿った試験方法 ○R2:目標密度が達成できることを確認
	①-5ブロック定置試験	・ブロックの定置位置への供給 ・定置方法、設備 ・スタック化 ・埋め戻し密度	・欠損や亀裂などによるブロックの品質を低下させない搬送及び定置方法とそれを実現する設備の仕様 ・ブロック相互間及びブロックと坑壁間の空隙が埋め戻し坑道全体の密度の要求条件を満足すること	・搬送試験及び定置試験の前後でのブロックの品質確認 ・定置方法（スタックあたりのブロック数、スタックの把持方法スタックの積み上げ方法など）の違いによる最終達成密度を試験により確認 ・別途決まる坑壁との空隙の充填方法からの要求事項を考慮した定置方法

表 4.3-11　ブロック工法における製造・施工プロセス管理（ブロック製造段階その１）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
②製造 ②-1～4 材料調達 ②-1 ベントナイト ②-2 砕石・砂 ②-3 粒度調整 ②-4 水 ↓ （②-4 一時貯蔵） ↓ ②-5 混錬 ↓ ②-6 貯蔵	②製造段階全体の管理	材料品質 材料調整 製造 保管	・開発段階で設定した製造の管理指標を満足すること ・施工に適した状態で材料を供給できること	・開発段階で決定した管理指標を遵守するための管理方策 ・許認可に耐える品質保証の実践（品質保証記録の整備、承認と保管）
	②-1材料調達（ベントナイト）	モンモリロナイト含有率・有害物含有量など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・製造元がJISなどの品質保証を得ていること ・製造元発行のロット毎の分析管理シート ・適宜立ち入り検査 ・学会などの基準に沿った試験方法
	②-2材料調達（骨材）砕石（掘削ズリ）・砂	岩石の有害物含有量・岩石強度・密度など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・発生地層および一定量毎の試験 ・学会などの基準に沿った試験方法 ・解砕前の目視、バッチ毎の計量(密度推定)
	②-3砕石粒度調整（掘削ズリ解砕）	最大粒径、粒度分布など	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・篩目の確認 ・一定量毎の粒径分布測定 ・学会などの基準に沿った試験方法
	②-4水（水分調整を行う場合のみ）	有害物質	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・供給元がJISなどの品質保証を得ていること ・供給元発行の分析管理シート ・適宜分析検査 ・学会などの基準に沿った試験方法
	（②-4一時貯蔵）	湿度（乾湿）	・乾湿の影響を受けないこと	・保管環境の管理と継続的測定
	②-5ブロック材混錬	計量 ミキサ選定 混錬時間 材料の均質性	・開発段階で設定した方法、手順に従っていること ・均質性（骨材の均質な分布、塊玉生成の抑制） ・混錬時間	・計量システムが認可を受けた機関の検査に合格していること(プラントが認証機関の品質保証を得ていること) ・バッチ毎の計量混合記録のチェックと保管 ・適宜分析検査
	②-6貯蔵	湿度（乾湿）	乾湿の影響を受けないこと	・すべての保管バッチに②-1～5の製造記録が付帯すること ・保管環境の管理とランダムサンプリングによる確認 ・大型土嚢などの含水量を維持する保管方法

表 4.3-12　ブロック工法における製造・施工プロセス管理（ブロック製造段階その２）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
②製造（その２） ②-7～8 製造設備 ②-7 圧縮成型機 ②-8 金型 ↓ ②-9 材料投入 ↓ ②-10 圧縮成型 ↓ ②-11 ブロック品質 ↓ ②-12 搬出 ↓ ②-13 貯蔵	②製造段階全体の管理	材料品質 材料調整 製造 保管	・開発段階で設定した製造の管理指標を満足すること ・施工に適した状態で材料を供給できること	・開発段階で決定した管理指標を遵守するための管理方策 ・許認可に耐える品質保証の実践（品質保証記録の整備、承認と保管）
	②-7圧縮成型機	作動と正確な制御	・適切に維持管理されていること	・製造者の点検管理シート ・適宜立ち入り検査（動作試験、圧縮力の検定）
	②-8金型	形状・寸法・強度	・寸法精度と表面平滑度が所要の誤差内であること ・圧縮力に耐えられる強度と剛性を有すること	・製造者の点検管理シート ・適宜立ち入り検査（設計図書との照合、組み立て状況）
	②-9材料投入	材料の均質性 投入量・平坦性	・開発段階で設定した範囲に収まっていること	・目視による均質性、平坦性の確認 ・投入量の重量測定
	②-10圧縮成型	圧縮機の制御	・開発段階で設定した圧力、圧力維持時間、ストローク	・目視、制御系の読み ・ブロックごとに②-9、10の記録を付帯
	②-11ブロックの品質	脱型 出来形・品質	・脱型時の損傷、寸法誤差、密度などが健全性開発段階で設定した範囲に収まっていること	・外観検査（欠損、ひび割れ、骨材剥落）、乾燥密度（重量測定、採寸） ・全てのブロックに②-9、10、11の記録を付帯
	②-12 搬出	ブロックの保全管理記録	・輸送時の破損、湿潤を防止する梱包 ・全てのブロックへの製造記録付帯	・梱包が防湿、強度などの要求機能を満足していることを設計図書、試験により確認 ・すべての保管バッチに②-9～12の記録が付帯することの確認
	②-13貯蔵	湿度（乾湿） 貯蔵形態	・乾湿の影響を受けないこと ・変形を誘引しない積み上げ段数であること	・すべての保管バッチに②-9～12の記録が付帯すること ・適宜立ち入り検査により、要求を満足している梱包がなされていることを書類、目視で確認 ・保管環境の管理状況、記録の確認

表 4.3-13　ブロック工法における製造・施工プロセス管理（施工段階）

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
③施工	③施工段階全体の管理	ブロック品質 運搬・供給 定置 性能目標	・開発段階で設定した性能目標達成のための管理指標を満足すること ・性能目標達成を施工品質管理で保証すること	・開発段階で決定した管理指標を遵守するための管理方策 ・許認可に耐える品質保証の実践（品質保証記録の整備、承認と保管）
③-1 運搬	③-1ブロック運搬	運搬方法	・ブロックの毀損、湿潤防止に配慮した運搬方法であること ・ブロック管理記録の保持	・運行記録などによる試行により確認された運搬方法が行われていることの確認 ・全運搬ブロックに関する品質管理記録の確認
③-2 定置準備	③-2定置準備	開包 スタック化（必要な場合）	・開包後のブロックの品質が維持されていること ・定置用スタックが正確に構築されていること	・目視（画像）によるブロック品質の確認 ・スタックに使用されたブロック番号、スタックの形状、寸法、重量及び安定性の確認
③-3 定置	③-3定置	定置位置への移送 ブロック定置	・目標密度に合致した空隙での定置がおこなわれること ・計画位置との設置誤差が許容値以下であること	・3D情報システムによる、ブロックの空間的位置情報の確認、記録 ・位置情報に基づく、空隙位置と空隙量の定量化、空隙が許容値以下であることの確認 ・バルクとしての埋め戻し密度の確認
③-4 空隙充填	③-4 空隙充填	充填材の準備 充填	・開発段階で選定した充填材及び充填設備の準備 ・性能目標を達成する密度での充填とすること	・ブロックの空間位置情報に基づく、充填位置と充填量の決定 ・坑道全体の目標密度とブロックかさ密度に基づく、充填密度の設定とバルク密度（充填材重量／空隙体積）の確認

4.3.4　各施工技術のプロセス管理の特徴

ここでは、各施工技術のプロセス管理上の留意すべき特徴を整理する。

(1) 撒き出し・転圧工法

本工法における、プロセス管理の特徴とその説明及び対応方法をまとめたものを表 4.3-14に示す。本工法の特徴として、建設分野で蓄積されたノウハウの活用が可能なこと、転圧機械選定が施工空間による制約を受けること、現段階ではサンプリングなどによる直接的な密度管理が必要なこと、などが挙げられる。

転圧機械の選定が施工空間の影響を受けることから坑壁近傍などで異なる機械を使用する必要が生じること及び坑道断面の施工を完遂するためには他の工法との組み合わせが必須となる。その結果、管理が複雑化するとともに、2つの工法を同時に併用する場合（例：坑道の手前で転圧工法、奥で他工法という組み合わせ）には、施工物資・機械の物流にも配慮が必要となる。

密度管理を施工対象物に対する直接的なサンプリングや測定などに依存しないように、かさ密度で実施する場合には、迅速な出来形の測定と埋め戻し材の投入量の見積りが必要となり、迅速化などの施工管理方法の高度化が必要となる。さらに、この施工管理方法を適切に実施するためには、部位による乾燥密度のばらつきを試験などにより評価し、実施工においては試験と同様の管理下での施工が行われていること（つまり試験で評価したばらつきを適用することの妥当性が認められること）を管理記録で証明することが要求される。

(2) 吹付け工法

本工法における、プロセス管理上の特徴をまとめたものを表 4.3-15に示す。

本工法の特徴として、埋め戻し材の配合（砕石の粒径）・含水比、吹き付け時の材料供給量及び施工者のスキルなどが連続施工可能性を含む広範な施工性、施工速度（歩掛）及びリバウンドなどへ影響が大きいことが挙げられる。また、施工時の湿度が施工品質等に影響を及ぼすことを示唆する試験結果もあり、品質及び施工性確保のための管理が他の工法と較べて厳格になる可能性がある。

現時点の技術では、吹き付けノズルを操作する施工者のスキルも品質に影響する可能性があり、上記の配合などの管理を含め、柔軟性のある品質管理を可能とする方法の開発が要求される。また、現在の汎用技術をベースとした試験の結果から、本工法単独での坑道全断面の埋め戻しには施工時間（歩掛り）の面で課題が想定されることから、他工法との組み合わせが現実的な選択肢として考慮されるべきと考えられる。

(3) スクリュー工法

本工法における、プロセス管理上の特徴をまとめたものを表 4.3-16表 4.3-15に示す。

本工法の全体を通じての特徴としては、埋め戻し密度がほぼ材料の配合に依存すること、そのため施工段階で取り得る密度向上対策の幅が狭いこと、ほぼ機械のみによる施工となるため、かさ密度による密度管理が容易なこと、などが挙げられる。

達成密度がほぼ当初の埋め戻し材配合で決定されることから、試験による粒度分布や配合比率などの設定を的確に実施することにより、乾燥密度のばらつきが比較的小さい施工結果が得られる。したがって、管理上も製造段階が重要であり、その後の施工における管理が密度に影響する比率は低いと考えられる。かさ密度による密度管理については、各スクリューへの供給質量の連続測定は容易であり、3Dレーザー計測などの連続的な出来形管理が可能な測定技術と併用すれば、随時の密度計算が可能となる。

(4) 埋め戻し材ブロック工法

本工法における、プロセス管理上の特徴をまとめたものを表 4.3-17に示す。

本工法の特徴として、埋め戻しの性能に関わる管理のほとんどがブロックの製造段階で完結することが挙げられる。一方で、最終品質を決定する定置方法及び坑壁との空隙の充填方法については、今後の検討課題となる。

ブロックの製造段階で密度管理がほぼ完了することから、本工法による埋め戻し部位についてはかさ密度での管理は容易であるが、空隙部の充填密度も加味した坑道全体としての評価方法が必要となる。

坑道断面が多数のブロックで構成されることから、個々のブロック内の品質のばらつきについては、坑道の閉鎖性能への影響は小さいと考えられる。この製造時の品質のばらつきに関する管理がどの程度省力化できるかを性能面から検討し、可能であれば混錬時の均質性の確保以降は、管理対象から外すことも検討できる。

表 4.3-14　撒き出し・転圧工法における製造・施工プロセス管理上の特徴

管理上の特徴	特徴の説明及び管理上の対応方法
建設分野における既往の知見の蓄積及び機械の開発が進んでおり、それらの成果を管理に活用することが可能である	◆ 土質材料の調整、転圧機械の選定及び撒き出し・転圧作業などの施工に関わる全ての項目について、管理方法のノウハウが多く蓄積しており、それらを参考とすることにより、管理上の課題が生じた場合の対応策の立案・執行の迅速化を図ることが可能である
撒き出し厚が品質管理上の要点となるので、施工中は管理状態を常に維持する必要があるが、撒き出し厚の管理を容易にする機械を開発することにより管理負担の軽減が可能である	◆ 試験などにより、転圧機械選定や材料の調整を事前に完了した場合でも、施工現場における撒き出し厚管理は施工中常に必要となる。既存の機械（アスファルトフィニッシャーなど）の活用による、広い空間における撒き出し厚を自動管理する工法は開発済であるので、施工対象となる狭隘な空間に対応できる機械の開発も可能と考えられる
施工設機械と作業空間の関係から、隅角部・妻壁・坑壁近傍などにおける転圧が不十分となる可能性があり、それら部位における密度確保・未充填回避のための、対応策の採用が必要となる。坑道上半の施工には、他の工法との組み合わせが必須である。	◆ 施工場所の空間制限に対応し、目標密度に到達できる施工法を適用する。目標密度の許容範囲に対応した施工機械・施工法を予め試験により設定し、その施工が実施されていることを確認する。機械や施工法による対応が困難な場合は、坑道上半の施工を含め、本工法以外の別工法との組み合わせ管理を考慮する ◆ 密度確保・未充填回避については、施工によるものに加えて、部分的な配合の変更など、材料面での対応策も考えられる。ベントナイトの膨潤による効果も期待できることから、開発段階において低密度―膨潤量―透水性の関係を把握し、管理指標の設定に反映する。
施工中に密度が管理目標値に達しないことが判明した場合の対応方法が限られており、材料調整を含めた試験による広範な対応策の採用が必要となる	◆ 埋め戻し材の含水比は、事前の締固め試験による最適含水比で設定、施工試験により確認するすことにより管理指標を設定する必要があり、現場で密度を向上させるために対応できる調整パラメータとして使用するためには、試験プロセスの積み上げを要する。今年度の試験により、締固めによる密度向上がある回数で頭打ちとなることが明らかとなったため、締固め回数による密度の増加も難しい。したがって、施工空間の制約などにより導入施工機械の締固めエネルギーによる対応が困難な場合は、撒き出し厚管理が唯一の方法となる。撒き出し厚を減じた場合は施工サイクルが増加することとなり、工期への影響を減じるような対策を取る必要が生じる。
現段階では施工を中断しない密度管理方法が開発・試行されておらず、既往の管理方法により時間とマンパワーを要しているが、開発によりそれを迅速化するとともに、省力化が可能である	◆ 現段階ではサンプリングや（非破壊ではあるが）直接的な密度管理を行っており、そのたびに施工を中断する必要がある。今後、施工を中断しないかさ密度による管理方法を適用する場合には、密度の変動を迅速に施工法へ反映し、品質管理による工期への影響を小さくする管理方法を検討すべきである。そのためには、試験施工などにより、密度のばらつきの範囲と分布を評価してそれを基準に管理指標を設定し、実施工でもその指標による管理をおこない、試験施工時と同等の品質の施工がおこなわれていることを記録などにより証明する。

表 4.3-15　吹付け工法における製造・施工プロセス管理上の特徴

管理上の特徴	特徴の説明及び管理上の対応方法
目標とする密度は､埋め戻し材の配合及び吹付け設備の双方の影響を強く受ける。特に、施工性が埋め戻し材の骨材の選定や含水比に強く影響される	◆ 試験により、目標とする乾燥密度の達成は可能である目途が立ったが、埋め戻し材の配合に加えて、それに適合した吹付け設備との組み合わせ及び材料供給量などの運用方法などが、達成乾燥密度だけでなく、施工の継続性への影響が大きいことが判明している。材料の配合及びそれに対応した設備選択・設定を試験施工により決定し、施工において厳格に管理することが必要である ◆ 骨材の選定や含水比を決定する要因としては、高い乾燥密度、低いリバウンド率及び長時間連続施工性（機械、ホース及びノズル内の付着）などが挙げられる。これらの要因を満足できる含水比を試験施工により設定管理することとなるが、その影響が全体に及ぶことから、管理指標としての含水比はできるだけ裕度を持った設定とすることが望ましい
供給量により埋め戻し材の質量を管理できることから、かさ密度による管理が比較的容易。吹付け面の出来形が不定形であり､それに対応した出来形管理が必要	◆ 施工中の連続的な出来形管理と投入材の質量測定によるかさ密度での管理を行う。現時点での技術では、出来形は 3 次元スキャナによる測定、質量は吹付け設備における定量供給量とリバウンド量により管理するなどの方法が適用可能である
湿度などの施工環境による施工性への影響を受けやすい	◆ 試験により、湿度の影響が無視できないことが判明した。試験などにより湿度の影響を予め評価し、それに適合した配合や施工法を選択できるようにする。さらに、管理の柔軟性を確保するために、湿度の違いによる施工性への影響を定量化するとともに、対応する配合・設備などを明確にする
長時間の連続施工性確保の対策が必要	◆ 試験により連続施工性確保が配合や施工法選定の重要な要因となることが判明した。実処分施設において要求される施工速度へ対応するための適切な配合と工法、それに対応した管理方法の構築が必要である
品質が施工者のスキルに強く影響される	◆ 一般建設工事における吹付けも同様であり、現段階の技術レベルでは避けることができない。指標の設定も困難であり、プロセス管理に馴染まない管理項目となっている。今後の技術開発により、施工の自動化などによりスキルに影響されない方法の開発と、それに沿った管理が求められる

表 4.3-16　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理上の特徴

管理上の特徴	特徴の説明及び管理上の対応方法
埋め戻し後の密度が埋め戻し材の配合・粒度分布に強く依存する	◆ 埋め戻し材の粒度分布の最適化による密度向上が基本的な対応となる。開発段階における試験による指標の設定及び製造段階における配合の管理が中心となるが、管理方法としては質量管理のみとなり、容易かつ定量的な管理が可能である。
埋め戻し現地での乾燥密度に関する調整方策が限られる	◆ 現地でのエネルギー付与による密度調整はしない。フィーダーの押し込み力(反力維持)と先端の埋め戻し材への挿入深さにより若干の密度向上は可能ではあるが、フィーダー先端からの影響範囲は限定的である。そのため、乾燥密度は供給材料の調整に強く依存し、製造段階での管理が重要である。
埋め戻し材の含水比調整による密度向上には期待しない（できない）ため管理が不要	◆ 上記のように締固めに期待しない工法であるので、含水比の調整による密度向上には期待しない。このため、含水比の管理と製造後の含水量維持管理がほぼ不要となり、管理負担が相当に軽減できる。本工法においては含水比調整による密度向上手法を採用できないこととなり、比較的簡易な調整方法である混錬時の加水による密度向上対策が取れないことは、管理上の対応幅を狭くしている
坑道天端・壁面近傍など施工困難位置における密度確保・未充填回避のための施工に装置の配置や埋め戻し材特性を対応させる必要がある	◆ 設計と試験施工により、スクリューの配置計画、各スクリューへの投入量の調整、施工困難位置に対応するスクリューへ供給する埋め戻し材の配合を細粒化するなどの管理値の設定を行う。 ◆ 密度確保・未充填回避については、施工によるものに加えて、ベントナイトの膨潤による効果も期待できることから、低密度―膨潤量―透水性の関係を把握し、目標密度の設定に反映する。また上記同様に、その部分に対応するそれぞれのスクリューへの投入材料の配合による管理（例：ベントナイト量を増やすなど）も可能である
現地での施工作業項目が少ない	◆ 基本的に、フィーダーの回転数、装置の後退速度(反力調整含む)のみであり、これらの管理指標を事前の施工試験で適切に設定すれば、現地で関与できる作業項目はほとんどないことから、作業員のスキルへの依存度は低く、プロセス管理の確実性は高い
施工は連続作業が可能	◆ 埋め戻し材料の連続供給により、施工に「完全に境目のない」連続作業が可能となる。坑道全断面への埋め戻しに最適化した装置設計により、フィーダー位置の操作も不要となる。したがって、管理はバッチではなく連続的な管理となり、ほぼ埋め戻し全量に対する管理が可能となる。
かさ密度による管理が比較的容易	◆ 施工中の連続的な出来形管理とスクリューへの供給材の質量測定によるかさ密度での管理を行う。出来形は海外事例でも採用されているような 3 次元スキャナ、質量はスクリューへの供給量の自動測定により測定するなどの方法が適用可能であることから、管理による大量の情報収集・処理も難易度は低い。

表 4.3-17　ブロック工法における製造・施工プロセス管理上の特徴

管理上の特徴	特徴の説明及び管理上の対応方法
製造の品質管理が工場で完結するため、その後のブロックの運搬・定置時のブロックの角欠け・ひび割れなどの許容値及び発生防止への管理が重要	◆ ベントナイトの自己シール性（膨潤）を考慮したうえで、設計要件（低透水性）を満足できる角欠け・ひび割れの管理許容値を設定するとともに、破損防止を可能とする管理方法を開発する
ブロック定置の許容誤差に沿った定置を行う必要がある。たとえば隣接するブロック間、ブロックと坑壁との許容隙間寸法の規定が必要である	◆ ブロック相互の隙間については、ブロックの密度―隣接するブロック間の隙間量―透水性の関係を把握し、管理指標として、設計要件（低透水性）を満足する最大の隙間量を設定する。 ◆ 管理指標を満足できない場合の、隙間への対処方法（工法）を検討・選定し、選定した工法の管理方法を定める
ベントナイトを貧配合とした埋め戻し材ブロックについては、製造可能な最大寸法に限界がある事が予想される。	◆ 試験により設計要件（低透水性）を満たすブロックの設計仕様（材料の種類、構成、施工直後に成立可能な密度）を明確にし、管理指標とする。
施工速度の向上及び定置の効率化を考慮して、製造寸法を決定する必要がある。	◆ 大型ブロックあるいはブロックの束を対象とした、運搬・定置に関する施工機械を開発・準備し、施工プロセス管理手法（品質・工法規定）を確立し、それに沿った管理を行う。
ブロック内に密度差が生じる可能性があり、その密度差が性能上問題となる場合は、ブロック内の均質性の確保を管理する必要が生じる	◆ ブロック内密度差と透水性・頑強性などの性能の関係を評価し、管理の必要性及び管理の指標を決定する。圧縮成型によるブロック製作試験において、ブロック内に生じる密度差の範囲を把握し、管理指標を満足する製作方法を設定する。
ブロック工法では、埋め戻し材の設計要件を達成するための主たる管理項目（ベントナイト混合率、ブロックのかさ密度など）に係る管理が、ほとんど地上施設で完了する。 地下の処分坑道内での作業は、ブロックの定置のみであり、処分坑道内での施工時の管理を簡素化できる	◆ 地上施設でのブロック製作時のプロセス管理は、現有技術による高いレベルでの管理が可能である。 ◆ 最終品質は、定置の品質管理により決定されることから、最終品質評価のためには、定置方法と設備に応じた管理方法と管理指標の設定が必要となる。
ブロック製造時の成型圧力などの調整により、ブロック密度の調整が柔軟にできる可能性が高い。 特に、埋め戻し材の仕様において、高密度が必要となる場合への対応が柔軟にできる可能性がある。	◆ 様々なブロックの設計仕様（透水性・製造性及び施工時の頑強性からの要求密度）に対し、製造プロセス管理に必要な情報を整備する。それを基に、要求性能に応じた管理指標を設定し、それに沿った管理を行う。

4.3.5　プロセス管理の手法の構築に向けた課題と開発の方向性

ここでは、今後のプロセス管理手法の構築に向けて、参考となる海外事例の調査結果の概要と、各施工技術のプロセス管理上の課題を整理し、今後の開発項目と期待される成果を述べる。

(1) 埋め戻し品質管理の考え方に関する先行事例の調査

原位置試験などにおける埋め戻しの品質管理に関する先行事例として、スイス Nagra が実施した原位置試験における埋め戻しの品質管理の考え方について別途調査を実施した。調査結果のうち、埋め戻しに関する品質保証やプロセス管理手法の構築に参考となる事項を整理したものを表 4.3-18 に示す。原位置試験の調査対象は、モンテリ岩盤試験場における FE 試験（Full-scale Emplacement Experiment；HLW 横置き、実規模ヒーター）及びそれに関連した室内・モックアップ試験、グリムゼル地下研究施設における GAST（Gas-Permeable Seal Test；ガス移行、緩衝材シール）試験及び HotBENT（High Temperature Effects on Bentonite Buffers；高温ヒーター、ベントナイト）試験である。

埋め戻しのプロセス管理に関連した要点は下記のとおりである。

- 埋め戻しの密度管理には、マスバランスによるかさ密度での管理が適している。
- 埋め戻しの材料と施工法に対応した計測技術を適用すべきである。
- 開発過程における QA/QC 戦略においては、試験毎の達成目標に沿った QA/QC 戦略が必要である。
- QA/QC 戦略においては、特性値取得ツール（測定方法・設備機器など）は埋め戻しの目的とその他条件との適切なバランスを考慮して選定すべきである。
- 段階的 QA/QC アプローチにより、最終的な段階の品質確保の確実性を向上させる。
- 目標パラメータは、要求条件を満たすだけでなく、実処分施設への適用を考慮して、合理的な方法で達成可能であるべきである。

既述したように、効果的な開発と品質管理をおこなうためには、段階的管理を採用することが推奨され、品質管理については、係る取組の重要性と合理性との適切なバランスを考慮すべきとされている。特に後者は、埋め戻しに求められる性能及び処分全体の安全性の確保に果たす役割に応じた、適切なレベルでの方法による管理をおこなうべきと解釈され、どのような情報がどのようなレベルで必要であり、全ての情報を同じレベル・頻度で取得する必要はないということはプロセス管理手法の設定の段階で明確にすべきである。

今後プロセス管理手法を更新するにあたり、これらの要点を適宜反映し、前例を参考とした実践的なプロセス管理手法の構築を目指す。

(2) 各埋め戻し施工技術におけるプロセス管理上の課題

前記 4.3.4 で検討した各施工技術のプロセス管理上の主な要求事項と課題・開発の方向性を整理したものを表 4.3-19～表 4.3-22 に示す。

今年度の各施工技術を用いた実証試験あるいは要素試験を通じて、4.3.4 で検討したプロセス管理の開発段階の一部あるいは多くを実践した。その試験結果に基づくプロセス管理項目と指標の評価については、後述の 4.4.2 に整理した各施工技術に関する試験結果を参照されたい。

このプロセス管理手法の構築は、今年度以降も継続して実施し、来年度以降は今年度の成果を踏まえて、今年度実施できなかった管理項目の実践及び今年度の実施を通じて課題が明らかとなった項目の改善に向けて計画的に着手する。その一例として、スクリュー工法における、今年度からの 3 ヶ年事業におけるプロセス管理の試行計画（案）を表 4.3-23 に示す。同表は、要素試験から段階的な開発によって、実証試験へ至る過程を念頭に置いており、各段階に応じた実践あるいは確認できるプロセス管理項目を整理している。このプロセス管理項目の実践においては、単独の施工技術の範疇での管理の適用だけでなく、他の施工法で先行的に確認された管理手法のうち、相互に適用可能なものについては、今後積極的な適用を試みる。

(3) プロセス管理の検討まとめ

今年度は、埋め戻し施工技術に関するプロセス管理手法の構築に着手した。主な成果は次の通りである。

- 埋め戻し施工技術として候補に挙げた4つの施工法に関して、技術の開発段階、埋め戻し材の製造段階及び埋め戻し施工段階で想定される製造・施工プロセスの具体化とその管理手法（案）を構築した
- 各施工技術のプロセス管理上の特徴を整理し、管理が必要なものについてはその方法を例示した
- 各施工技術の施工試験あるいは要素試験を通じて、プロセス管理上の課題を抽出するとともに、開発の方向性を整理した

来年度以降は、プロセス管理上の特徴のうち、各工法の利点は最大限に活用することとして、抽出された課題については試験・検討等を通じて順次対応を図り、より適用性の高いプロセス管理手法の構築と指標の明確化を進める。

表 4.3-18　先行事例（Nagra）の調査結果のうちプロセス管理手法構築に関連した事項

項目	内容
実処分坑道で考慮すべきこと	実処分坑道では、埋め戻しの擾乱は最小限とし、すべてのプロセスをシンプルにすることを考えるべきであり、その観点から、マスバランスによるバルクでの埋め戻し密度管理は妥当な方法である。埋め戻し材の体積、質量及び含水量に加えて、充填機械での連続的な各種データと充填圧、その結果としての密度とリンクした情報により、連続的な追跡可能な QC が可能となる。 長期にわたる飽和-膨潤プロセスが粒状ベントナイトを均質化すると思われることから、バルクでのパラメータがより重要となる。
埋め戻し材料・施工法と計測技術	品質管理のための計測技術は、埋め戻しの QA/QC 手法構築における重要要因であり、それは埋め戻しに使用される材料と施工法に依存するため、適用先に応じた適切な設定が求められる。
埋め戻しにおいて管理すべき目標値の設定と評価	同じ粒状ベントナイトを埋め戻す方式でも、たとえばスイスの横置き方式での処分坑道埋め戻しとフィンランドのアクセス坑道埋め戻しでは、目標値や用いるベントナイトの特性などが異なる。規模の大きい工学規模の操業における許容変動幅は、変動幅の確認を目的とする試験によること及び（あるいは）変動幅の達成を確認するための計測を詳細設計に考慮することにより、モデリングや安全評価によって評価できる。
埋め戻し施工技術の開発における QA/QC 戦略	1)開発過程での各試験の実施内容と要求事項を明確にする：最終目標が本工事の施工管理プロセス構築だとしても、そこに至る室内試験、モックアップ試験など各段階においては、それぞれの到達目標（例えば THM 連成現象を評価するためなのか、あるいは実処分施設のサイトにおける品質管理を最小化するためなのかなど）に沿った QA/QC 戦略が必要となる。 2)品質管理における特性値の取得：開発する必要があるもの、試験などにより経験を蓄積すべきものなど、特性値を取得するための様々なツールがあり、QA/QC 戦略においては、埋め戻しの目的とその他条件との適切なバランスを考慮して選定するべきである。そのために、異なる処分プログラム間では異なるアプローチを取り入れていることに留意すべきである。たとえば、スイスではパイロット処分坑道は、モニタリングをおこなう処分施設部分に該当するとされているので、そこで実施される埋め戻しの密度のモニタリングは、他の操業行為に対するものよりより強調される可能性がある。
埋め戻し材品質確保のための QC の負荷を軽減する工夫	たとえば、埋め戻し材の製造をサイトあるいはサイト近傍で実施することにより、製造～埋め戻しまでの埋め戻し材の経時変化に関する QC が軽減できる。ただし、一般的には、長期安全性の観点と ISO14001 などに従えば、サイトにおいて、埋め戻し材が要求事項を満足することを測定し、文書化することを要求される可能性がある。
段階的 QC アプローチによる品質確保方策	たとえば FE 試験は事前の研究、予備試験及びモックアップ試験という段階的アプローチの結果としての原位置試験であるので、最終的な原位置において、性能目標が達成できるという自信があった。地層処分はできるだけ単純、強靭かつフールプルーフであるべきで、目標パラメータは、要求条件を満たすだけでなく、リーズナブルな方法で達成可能であるべきである。ゆえに、FE 試験もコスト、工期及び品質の最適化を目標に、各段階での開発をおこなっている。

表 4.3-19　転圧工法の製造・施工プロセス管理における要求事項と既往の成果・課題・開発の方向性

管理のための要求事項	既往の成果と課題・開発の方向性
混錬後の混合土の混合率確認管理のための測定技術	これまで一般的に行われてきた、不明な細粒分を含まないような、ベントナイト・砂混合土の場合の分析技術は確立している（この場合、細粒分含有率をもってベントナイト混合率としている）。 砕石・砕砂のように、混合する母材中に細粒分を含むものについては混合率の測定方法は確立されていない。この場合、粒度分布測定で得られる細粒分を対象に、メチレンブルー吸着量の測定結果より推定する方法が提案できる。しかしながらこの方法でも、母材の粒度分布の影響を受け、測定頻度によっては代表値を測定できない場合もあるため、測定頻度を多くして多くの測定値から判断する必要があり、管理に時間とコストを必要とすることから、細粒分をベントナイトと母材の細粒分とに簡易に仕分ける技術が求められる。
現場密度を管理するための試験方法	今年度は、一般的なサンプリングによる測定を中心に実施した。 砂を母材とした場合、今回のように母材に 53mm 以下の礫が混合されている場合は砂置換法を適用するが、削孔作業に長い時間を要し、埋め戻し工程への影響が大きい。また、これらの方法はいずれも施工箇所に削孔をするような破壊を伴う測定方法であり、削孔箇所の埋め戻し方法に規定がなく、施工箇所と同等の品質を確保できるのかの疑義が残る。そのため、本事業では、サンプリングを伴わずに密度を評価する方法として、かさ密度による推定を目的の一つとしている。 これ以外に非破壊で密度を計測できる方法としては、建設の分野において、転圧機械の振動に対する地盤の加速度応答を測定し、規定の締固め度に到達できているかを判断する技術（CCV など）の開発が進んでいる。この適用に向けては、埋め戻し材の配合と要求締固め度に関する応答特性データを蓄積し、管理の確度を上げることで、規制をクリアする必要がある。また、他の非破壊の測定方法としては、今回使用したキャスポル、小型 FWD などの地盤反発係数や地盤支持力を測定し、これらの計測値と乾燥密度との間の相関性より乾燥密度を推定する方法の適用も考えられるが、これらの実施には施工を中断する必要があるため、補助的な適用となる。
かさ密度管理に必要な出来形測定技術	かさ密度の評価を迅速に実施するうえで必須の技術である。測量の分野では、トンネルを含む一般土木分野において、レーザー測量が実用化されている。また、今年度は 3D スキャナによる測量の試行を行って、良好な成果を得ている。埋め戻し工事への適用には、狭隘な地下空間において、機械が稼働し、形状が逐次変化するような施工中のオンタイムでの計測と迅速な演算による体積の推定、遠隔・自動化計測などの課題がある。
埋め戻しの均質性の管理のための、施工法が本質的に持つ、不可避の品質のばらつきの評価	今年度までの施工確認試験においても、品質管理を徹底し、ばらつきを最小限にとどめるよう留意したが、部位によっては 10%前後の密度のばらつきが観測された。このばらつきは、施工上不可避と考える必要がある。 しかしながら、これまでの知見の積み重ねにより、おおよその密度のばらつきに関する情報は取得されてきた。今後は、様々な材料、施工法に関する知見を蓄積して、確度の高い品質のばらつきを推定し、その範囲を管理するとともに、このばらつきを包含する指標の設定をおこなう必要がある。
複数の施工技術の組み合わせが必須である	本工法では、坑道上半の埋め戻しには異なる工法との組み合わせが必須であることから、管理手法の異なる工法を併用する際の管理の整合性について十分な検討が必要である。

表 4.3-20　吹付け工法の製造・施工プロセス管理における要求事項とその既往の成果・課題・開発の方向性

管理のための要求事項	既往の成果と課題・開発の方向性
施工性を確保するために適切な材料の配合と含水比の厳格な管理	工学規模試験を通じ、吹付け施工の継続可能時間延長（および施工性の確保）、リバウンド率低下や施工後の埋め戻し材の乾燥密度確保といった観点から、埋め戻し材の材料として最適な砕石の最大粒径や埋め戻し材の含水比、施工時の材料供給量などの組み合わせを取得した。 吹付け工法においては、これらの組み合わせを守ることが品質及び施工性の確保のために重要である。目標密度の達成は最優先であるが、本工法の場合はこの組み合わせが施工そのものの可否にも関わることが判明してきたことから、これら一連の管理を常に適切に実施する必要がある。
多様な施工環境での品質を確保するための管理に必要な知見	湧水環境下であっても施工可能であることを確認し、施工品質に対しても影響が小さいことを確認したが、施工場所における湿度の影響が施工性に影響することもわかった。
実施工時の長時間施工を可能にする管理	埋め戻し施工中の閉塞などの不具合の発生は、閉鎖工程に大きく影響するが、これまでの経験から、上記のように吹付け工法は施工性の確保のための適切な管理を要求することが予想される。今後は、ある程度規模の大きい坑道に対する、現実的な施工時間の試験施工を実施し、閉塞などの不具合が発生しない材料と施工法の組み合わせとその一貫した管理を試行して、課題を明確にする必要がある。
吹付後の埋め戻し材の乾燥密度を管理するための測定方法	今年度はサンプリングによる密度の確認を実施した。今後は、かさ密度による密度の推定を行うために、出来形の測定及びリバウンド量を考慮した埋め戻し材質量の測定を原位置で迅速に実施する技術を開発する必要がある。出来形については、建設分野で実用化している 3D レーザー測量技術、質量については材料供給量とリバウンド量を利用する方法が想定できる。いずれも既存技術の応用であることから、開発の可能性は高い。
坑道の内壁と吹付けた埋め戻し材の間の空隙の許容量の管理	埋め戻し材の膨潤量から、坑道の内壁と吹付けた埋め戻し材の間の空隙の許容量について決定し、試験施工により空隙が許容値以下となることを確認する。
埋め戻し材の材料管理	掘削ズリなどを母材として埋め戻し材を製造する場合、細粒分の混入、粒径の不均質性などが最適な施工条件に対し与える影響を評価し、管理指標を設定する必要がある。

表 4.3-21　スクリュー工法の製造・施工プロセス管理における要求事項とその既往の成果・課題・開発の方向性

管理のための要求事項	既往の成果と課題・開発の方向性
かさ密度管理に必要な出来形測定技術	トンネルを含む一般土木分野で 3D レーザー測量が実用化されている。本工法は、基本的には施工を中断しない連続施工であることから、施工中オンタイムで計測を実施する必要がある。また、遠隔・無人化計測の実施経験はない。先に述べたスイス Nagra の調査事例において、スクリューの稼働を止めた際にレーザー測量を実施した例があり、Nagra では次回はスクリューに測定機器を搭載して連続測量することを検討している。ただし、本事業では含水比が低い状態での施工を考えているところから、施工中の粉塵が発生した状況下での観察・計測技術にも課題がある。
埋め戻しの均質性管理	今年度の要素試験，あるいは幌延地下施設内で実施した既往の狭隘部充填実証試験における密度管理データにより、おおよその密度のばらつきに関する情報は取得されているが、施工空間およびそれに対応して埋め戻し材と施工法、埋め戻し材の配合及び埋め戻し対象の形状などが異なる場合などには、確認試験などによる再度の確認が必要である。特に、隅角部、天端付近などの充填を管理し、密度低下や残留空隙を確認するとともに、低減する方法（スクリュー配置の検討、遠隔での空隙感知技術など）を確立する必要がある。
施工現場での管理プロセスが簡素化されることによるリスクの排除	本工法では、特に施工現場での品質管理をできるだけ簡素化できることが、品質管理上の利点であり、逆にリスクでもある。これに対応するために、特に施工段階以前の製造段階におけるプロセス管理が品質確保に重要かつ適切なものであることを事前に試験などにより証明するとともに、プロセス管理手法に沿った管理を適切に実施することにより、品質が確保されていることを間接的に証明する。また、要求に応じて非破壊的な測定などにより品質が確保されていることを確認する方法も準備することが望ましい。
製造・施工管理記録の迅速な整備と両者の整合性の確保	本工法では、施工を連続的に行うことも施工法としての利点である。そのため、製造と充填工程が連続することとなり、該当する材料の製造・施工管理記録が常に追跡可能で、施工中の材料の製造記録に施工記録が対応しなければならない。管理記録は、管理が適切に実施されていることを規制が評価するために必要となるとともに、性能確認における重要な初期条件を提供する情報となることから、記録の整備・利用・保管のルールを検討しておくことが望ましい。

表 4.3-22　ブロック工法の製造・施工プロセス管理における要求事項とその既往の成果・課題・開発の方向性

管理のための要求事項	既往の成果と課題・開発の方向性
混合方法の適切性を管理するための規格化の必要性	・R&D 段階で、混合に関する規定（混合方法、プラント仕様など）を決定しておき、この規定を順守していることを製造・施工プロセス管理で確認することになると考え、プロセス管理手法（案）に当該内容を記載している。 ・これまで、様々なベントナイト系材料について、混合方法や混合後の品質などに関する実績や知見が、論文・報告書で多数発表されているものの、例えばレディミクストコンクリートの JIS 規定（品質、配合、材料、製造方法の規定など）と同等までの規格化までに至っていない。 ・混合方法の適切性を、より客観的に判断するためには、規格化が必要と思われる。
ブロック単体のかさ密度確認、外観検査	・かさ密度はブロック個々の寸法、質量、含水比の測定結果を基に算出、ブロック外観は外観による確認、を基本としており、自動化を含め現時点の技術を基に開発が可能である。
ブロックの均質性管理	・ブロックの均質性を管理項目とする場合には、密度のバラツキ程度や、ブロック内部の空隙の有無を測定する技術開発が必要と思われる。ただし、ブロックの均質性を管理項目すべきか否かについては、性能評価の観点からの検討と合意が必要である。
ブロックの定置位置管理	・所定の定置位置に、製作したブロックを精度よく定置することは、定置後の品質を確保するうえで重要と考えるが、大型のブロックを精度よく、且つ、効率的に運搬・定置する施工機械の開発には至っていない。 ・実際の処分事業を見据えた大型ブロックを対象とし、運搬・定置に関する施工機械を開発・準備し、施工プロセス管理手法（品質・工法規定）を確立しておくことが必要と思われる。
ブロックの定置後のかさ密度管理	・坑道容積や定置したブロックの出来形計測は、測量機器や 3D スキャナなどによる計測で対応可能と考えられ、トンネルを含む一般土木分野で実用化されているが、狭隘な地下空間における施工中の計測の実績は少なく、施工中のオンタイムでの計測、遠隔・無人化での計測については課題となる。 ・ブロックの質量は、製造管理情報とのリンクによりすべてのブロックで取得可能であることから、どの位置にどのブロックが定置されたかの位置情報と関連づけることで、ブロック部分のかさ密度による管理は容易と考えられる。

表 4.3-23　プロセス管理に関する本研究での課題に対する開発計画（スクリュー工法の例）

プロセス管理対応番号・管理項目		令和 2 年度 （要素試験）	令和 3 年度（複数スクリューによる中規模モックアップ試験を想定）	令和 4 年度 （多スクリューによる実証試験を想定）
①	ベントナイト	製造元発行のロットごとの分析管理シート入手、保管	同左	同左
②	掘削ズリ	JIS 規格の購入材料の調合による粒度の最適化調整	購入材料による最適粒度分布からの変動ケース作成／実掘削ズリの使用	
③	掘削ズリ解砕	——	実掘削ズリの解砕・粒度分析⇒変動ケースとしての利用	
④	ストック	試験室(要素試験場所)での管理（温度湿度の記録）	同左	同左
⑤	水	上下水の使用(管理された水の利用)	同左	同左
⑥	埋め戻し材混合	試験による最適な加水量の決定 試験用ミキサによる適切な混合時間の設定	同左（変動ケースを許容する素材の混合） （製造量によっては、コンクリートプラントミキサの利用による管理）	
⑦	搬出	試験用埋め戻し材の排出履歴管理	同左	同左
⑧	(搬送時)埋め戻し材	搬出後の埋め戻し材の状況記録	同左	同左
⑨	フィーダーへの供給量	単体スクリューの搬送能力測定	複数スクリューによる充填土槽・模擬坑道での充填により部位（スクリュー）毎の供給量バランス・充填速度を設定	
⑩	充填速度	単体スクリューの搬送能力測定		
⑪	充填抵抗値	——	充填土槽･模擬坑道での充填により達成密度を確認し、各スクリューのトルクとフィーダーのブレーキ管理の管理値を評価	
⑫	埋め戻し密度	単体スクリューでの自由落下に因る充填での達成密度の確認(簡易なバルクでの管理)	充填土槽・模擬坑道での充填における出来形と充填重量による達成密度の推定(バルクでの管理)とサンプリング分析による確認	
⑬	均質性	材料:単体スクリューでの埋め戻し材の排出時の分離の有無確認	材料：充填土槽・模擬坑道での礫分布の測定による確認 密度:複数スクリューによる充填土槽･模擬坑道での充填密度分布の測定による確認	
⑭	未充填空隙	——	空隙:配置を最適化した複数スクリューによる充填土槽、模擬坑道での壁面近傍の充填性確認 沈下:配置を最適化した複数スクリューによる充填土槽、模擬坑道での沈下量の確認	

4.4 試験による性能目標管理指標と解析評価情報の整備

4.4.1　室内試験による埋め戻し材の材料特性データの拡充

(1) 目的

NUMO が取りまとめた包括的技術報告書では、埋め戻し材の設計要件のうち、透水係数は“母岩の平均的な透水係数の 10 倍以下”とされている（NUMO, 2021）。一方、昨年度までに実施した埋め戻し材の透水試験の結果、例えば、締固めエネルギー1Ec、Na 型ベントナイト（クニゲル V1：混合率 15%）と模擬掘削土である玄武岩の砕石・砕砂（最大粒径 20 mm、混合率 85%）の混合土の透水係数は 10^{-11}～10^{-10} m/s オーダーであったことから、平均透水係数が 10^{-12}～10^{-11} m/s オーダーの母岩中の埋め戻しに対応可能ということが判明している。埋め戻し材の透水係数は乾燥密度と密接な関係があることから、乾燥密度を基準にした透水性の評価が可能であり、処分サイトの母岩の透水係数がさらに大きい場合には、より低い締固めエネルギーに対応した低い乾燥密度を施工時の目標乾燥密度に設定することも可能である。目標乾燥密度を低く設定することで、施工後の乾燥密度を管理する際の品質変動への裕度が増すとともに施工コストを低減することが可能となる。

本項では、埋め戻し材の施工目標乾燥密度の設定に資するための知見を拡充するために、模擬掘削土の最大粒径と乾燥密度をパラメータとした埋め戻し材の透水係数に関するデータを取得する。なお、以下の検討においては、これまでに本事業で過年度に実施済み（原子力機構・原環センター, 2019）及び後述の 4.4.2(1)の中で今年度に実施した試験結果についても取りまとめに加えて知見の体系的な整備を行った。

(2) 使用材料

1) 使用材料の基本特性

試験に使用した材料を表 4.4-1 に示す。また、ベントナイトと模擬掘削土の基本特性を取得するための試験項目を表 4.4-2 及び表 4.4-3 に示す。なお、本検討では玄武岩の砕石、砕砂に加え、その破砕時に発生する微粉末を用いた。これは、実際の掘削ズリには細粒分がある程度の割合で含まれると考えられるが、試験に使用する砕砂は材料として出荷される際の水洗いにより細粒分の多くが除去されているため、細粒分が透水係数に及ぼす影響を確認するために微粉末を混合した試験も実施した。

ベントナイトの基本特性の取得結果を表 4.4-4 に示す。試験に使用した材料は同一ロットの材料である。2018 年度の結果（原子力機構・原環センター, 2019）と比べて、今年度の測定結果に有意な差はなかった。骨材の基本特性に関する測定結果を表 4.4-5 示す。なお、これ以降は記述の簡略化のために、表 4.4-6 に示す例のように、模擬掘削土の混合仕様及び締固め試験並びに透水試験条件を記号表示する。

試験対象混合土は、表 4.4-1 に示したようにベントナイトと模擬掘削土を乾燥質量比 15：85 で混合したものとする。模擬掘削土の粒度分布を図 4.4-1 に示す。

表 4.4-1　試験に使用した材料

ベントナイト	模擬掘削土	模擬掘削土の種類
Na 型 (クニゲル V1(KV)) 混合率 15%	玄武岩 混合率 85%	微粉末(P) 砕砂細目（最大粒径 2.5mm）(FS) 砕砂粗目（最大粒径 5mm）(CS) 砕石（粒径 20mm～5mm）(G)

表 4.4-2　ベントナイトの基本特性試験

試験項目	基準類	備考
メチレンブルー吸着量	JIS Z 2451：2019	モンモリロナイト含有率の算出に使用
土粒子密度	JIS A 1202	ベントナイトの品質確認に使用
膨潤力	JBAS-104-77	ベントナイトの品質確認に使用

表 4.4-3　骨材の基本特性試験

試験項目	基準類	備考
粒度分布	JIS A 1204	骨材の品質確認に使用
土粒子密度	JIS A 1202	有効粘土密度の算出に使用

表 4.4-4　ベントナイトの基本特性試験結果

材料	記号	実施年度	試験結果				
			MBC(mmol/100g)		膨潤力	含水比	土粒子密度
			成績書	測定値	(ml/2g)	(%)	(Mg/m^3)
クニゲル V1	KV	2018	86	91	21.0	7.9	2.789
		今年度		92	21.0	8.9	2.804

表 4.4-5　骨材の基本特性試験結果

材料			記号	実施年度	試験結果	
					含水比 (%)	土粒子密度 (Mg/m^3)
火成岩	玄武岩	砕砂粗目	BA-CS	2018	4.5	2.797
		砕石	BA-G	2018	1.2	
		微粉末	BA-P	今年度	0.8	2.826
		砕砂細目	BA-FS	今年度	1.3	
		砕砂粗目	BA-CS	今年度	1.1	
		砕石	BA-G	今年度	0.9	

表 4.4-6　模擬掘削土・締固め試験・透水試験のケース表示例

使用材料混合比	ｸﾆｹﾞﾙ V1(KV) 15%：砕石(G) 42.5%：砕砂粗目(CS) 25.5%：微粉末(P) 17%
締固め度	締固め試験 A 法の最大乾燥密度の 95%（A95）（C 法の場合は C95）
透水試験使用水	イオン交換水(DW)（人工海水の場合は SW）
試験ケース表示	(KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A95-DW

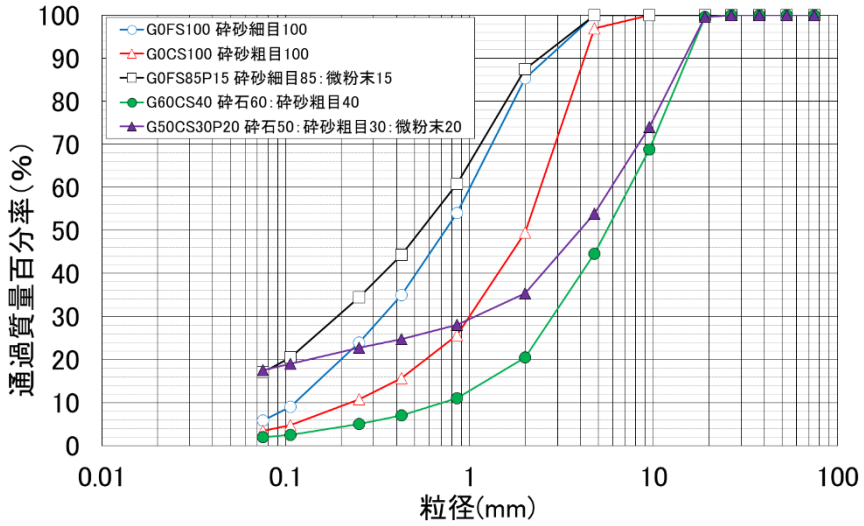


図 4.4-1　模擬掘削土の粒度分布

(3) 締固め試験結果

透水試験体の乾燥密度を設定するために、各混合土に対する締固め試験を次の仕様で実施した。

- 試験方法：JIS A 1210:2009「突固めによる土の締固め試験」に基づく次の2通り
  - ✓ A-c法（1.0Ec）（湿潤法、非繰返し、締固めエネルギー：小）
  - ✓ C-c法（4.5Ec）（湿潤法、非繰返し、締固めエネルギー：大）
- 使用材料：図 4.4-1に示す3種の混合土85%とベントナイト15%を混合したもの

今年度及び 2018 年度の試験ケースと締め固め試験の結果を表 4.4-7 に示す。

表 4.4-7　締固め試験結果

試験ケース（表 4.4-6 参照）	締固め試験			試験実施年度
	締固めｴﾈﾙｷﾞｰ	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (Mg/m^3)	
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A	1.0Ec (A 法)	14.5	1.867	今年度
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A		13.4	1.919	2018
KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A		13.7	1.905	2018
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A		13.7	1.880	今年度
KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A		10.5	1.978	今年度
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-C	4.5Ec (C 法)	9.5	2.140	今年度
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-C		9.2	2.095	2018
KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-C		8.0	2.175	2018
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-C		8.9	2.166	今年度
KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-C		7.0	2.225	今年度

(4) 透水試験の条件及び結果

坑道に施工された埋め戻し材の飽和後の透水性を評価するために、透水試験は飽和透水試験とした。締固め試験で得られた最大乾燥密度を基準として、初期含水比はすべて締固め試験により得られた最適含水比で調整した。埋め戻し材の透水係数の基準値は、対象とする母岩の透水係数の 10 倍以下となるように概ね 1.0×10^{-8} m/s とされている（NUMO, 2021）ことから、1 オーダーの余裕を考慮して 1.0×10^{-9} m/s 程度以下を目標として、比較的乾燥密度の低い領域の透水係数を求めることとした。試験体は締固めエネルギーが 1.0Ec（A 法）で調整したものを対象に、締固め試験で得られた最大乾燥密度の 75%、85%、95%に乾燥密度を調整した 3 ケースを対象とした。また、それらとの比較のために、締固めエネルギー4.5Ec（C 法）での最大乾燥密度 95%のケースを加えた。処分場周辺の地下水が降水と塩水の場合の両方を想定して、透水試験に用いる流体はイオン交換水と人工海水の 2 ケースとした。使用した人工海水の成分を表 4.4-8 に示す。

イオン交換水を使用した試験結果を表 4.4-9 に、人工海水を使用した試験結果を表 4.4-10 に示す。なお、透水試験は、今年度と来年度の 2 か年で実施することを計画しており、今年度はその一部を実施した。

表 4.4-8　使用した人工海水（マリンアート SF-1）の成分

Material	Amount (g/L)
Na_2SO_4	22.1
KCl	9.9
$NaHCO_3$	1.5
KBr	3.9
$Na_2B_4O_7\cdot10H_2O$	0.61
$SrCl_2$	0.19
NaF	0.096
LiCl	0.078
KI	0.013
$MnCl_2\cdot4H_2O$	0.003
$CoCl_2\cdot6H_2O$	0.001
$AlCl_3\cdot6H_2O$	0.0000081
$FeCl_3\cdot6H_2O$	0.0000006
$Na_2WO_4\cdot2H_2O$	0.000002
$(NH_4)_6Mo_7O_{24}\cdot4H_2O$	0.000008

表 4.4-9　透水試験ケース及び試験結果（その 1；イオン交換水）

試験ケース（記号は表 4.4-6 参照）		供試体仕様						透水係数 (m/s)	試験数※
		締固め試験結果		設定値		実測値			
		最適含水比(%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)		
砕石を含まない	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A75-DW	14.5	1.867	14.5	1.40	14.3	1.401	1.52×10^{-10}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A85-DW	14.5	1.867	14.5	1.59	14.6	1.588	1.72×10^{-10}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A95-DW	14.5	1.867	14.5	1.77	14.5	1.774	2.46×10^{-11}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-C95-DW	9.5	2.140	9.5	2.03	9.2	2.033	1.79×10^{-11}	1 (2)
砕石を含まない	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A75-DW	13.4	1.919	13.4	1.44	13.4	1.440	8.43×10^{-10}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A85-DW	13.4	1.919	13.4	1.63	13.1	1.631	2.23×10^{-10}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A95-DW	13.4	1.919	13.4	1.82	13.3	1.820	1.17×10^{-11}	1 [2]
	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-C95-DW	9.2	2.095	9.2	1.99	9.2	1.990	8.82×10^{-12}	1 (2)
砕石を含む	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A75-DW	13.7	1.905	13.7	1.429	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A85-DW	13.7	1.905	13.7	1.619	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A95-DW	13.7	1.905	13.7	1.810	—	—	—	[3]
	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-C95-DW	8.0	2.175	95	2.066	—	—	—	(3)
砕石を含まない	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A75-DW	13.7	1.905	13.7	1.41	13.2	1.410	1.53×10^{-10}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A85-DW	13.7	1.905	13.7	1.60	13.5	1.599	1.79×10^{-10}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A85-DW	13.7	1.905	13.7	1.79	13.5	1.786	2.54×10^{-11}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-C95-DW	8.0	2.175	8.9	2.06	8.6	2.058	2.04×10^{-11}	1 (2)
砕石を含む	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A75-DW	10.5	1.978	10.5	1.484	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A85-DW	10.5	1.978	10.5	1.681	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A95-DW	10.5	1.978	10.5	1.879	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-C95-DW	7.0	2.225	7.0	2.114	—	—	—	(3)

※試験数：(2)及び(3)は来年度実施見込み数

表 4.4-10　透水試験ケース及び試験結果（その 2；人工海水）

試験ケース（記号は表 4.4-6 参照）		供試体仕様						透水係数 (m/s)	試験数※
		締固め試験結果		設定値		実測値			
		最適含水比(%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)		
砕石を含まない	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A75-SW	14.5	1.867	14.5	1.400	14.4	1.400	8.13×10^{-5}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A85-SW	14.5	1.867	14.5	1.587	14.6	1.587	2.02×10^{-5}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A95-SW	14.5	1.867	14.5	1.774	14.6	1.774	1.57×10^{-5}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-C95-SW	9.5	2.140	9.5	2.033	9.2	2.034	1.15×10^{-6}	1 (2)
砕石を含まない	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A75-SW	13.4	1.919	13.4	1.439	13.5	1.440	1.13×10^{-4}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A85-SW	13.4	1.919	13.4	1.631	13.3	1.630	6.19×10^{-5}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A95-SW	13.4	1.919	13.4	1.823	13.4	1.819	2.05×10^{-5}	1 [2]
	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-C95-SW	9.2	2.095	9.2	1.990	9.0	1.990	6.75×10^{-6}	1 (2)
砕石を含む	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A75-SW	13.7	1.905	13.7	1.429	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A85-SW	13.7	1.905	13.7	1.619	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A95-SW	13.7	1.905	13.7	1.810				[3]
	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-C95-SW	8.0	2.175	95	2.066	—	—	—	(3)
砕石を含まない	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A75-SW	13.7	1.905	13.7	1.41	13.8	1.411	3.81×10^{-5}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A85-SW	13.7	1.905	13.7	1.60	13.8	1.599	7.80×10^{-6}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A95-SW	13.7	1.905	13.7	1.810	13.8	1.789	5.18×10^{-6}	1 (2)
	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-C95-SW	8.9	2.175	8.9	2.066	8.9	2.058	1.11×10^{-7}	1 (2)
砕石を含む	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A75-SW	10.5	1.978	10.5	1.484	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A85-SW	10.5	1.978	10.5	1.681	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A95-SW	10.5	1.978	10.5	1.879	—	—	—	(3)
	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-C95-SW	7.0	2.225	7.0	2.114	—	—	—	(3)

※試験数：(2)及び(3)は来年度実施見込み数

(5) 埋め戻し材の最大粒径及び有効粘土密度と透水係数の関係

表 4.4-9 及び表 4.4-10 に示した全てのケースの透水試験は、2 年間で取得する計画であり、今年度に取得したデータの範囲で今回特に着目している締固めエネルギーが低い範囲の乾燥密度と透水性の関係について考察する。ベントナイト混合土の透水性については、有効粘土密度で評価されることが一般的であり研究例も多いことから、ここでもその観点からの整理を行った。

透水係数を有効粘土密度で整理した結果を図 4.4-2 に示す。有効粘土密度が 0.36～0.84 Mg/m^3 の範囲では、イオン交換水を用いたケースの透水係数は 1×10^{-11}～1×10^{-9} m/s、人工海水を用いたケースの透水係数は 1×10^{-4}～1×10^{-7} m/s であり、同じ仕様で作製した試験体でもイオン交換水に比べて人工海水のケースは 10^5 オーダー程度透水係数が大きかった。また、両ケースでは有効粘土密度の増加にともない透水係数は小さくなった。蒸留水と人工海水を用いたクニゲル V1 の膨潤変形試験では、人工海水濃度が大きくなるほど最大膨潤率が小さくなる（田中・中村, 2004）ことがわかっており、有効粘土密度が 0.36～0.84 Mg/m^3 の範囲において、土粒子間の間隙に対して人工海水のケースでは、ベントナイトの膨潤量が小さいために間隙を埋めることがでなかったと考えられる。そのため、有効粘土密度の増加にともなう透水係数の低下は、ベントナイトの膨潤による効果よりも、試験体の乾燥密度の増加による土粒子間の間隙の減少による効果が大きいと考えられる。この結果から、海水環境において、例えば 10^{-9} m/s オーダーの透水性を確保するためには、クニゲル V1 の混合率 15%で乾燥密度が 2.0 Mg/m^3 程度でも十分な透水係数が確保できないことから、ベントナイト混合率を増加する必要性がある。

イオン交換水のケースでは、有効粘土密度が 0.36 Mg/m^3 以上ならば 10^{-9} m/s 以下の透水係数の確保が可能であり、ベントナイトの膨潤性能により土粒子間の間隙が埋められる効果が表れていると考えられる。また、有効粘土密度が 0.4 Mg/m^3 より小さい範囲では、砕砂の粒径が大きい方（砕砂粗目）が小さいもの（砕砂細目）と比較して、透水係数が 1 オーダー程度大きくなるが、有効粘土密度が大きくなると両者の差は小さくなる傾向が見られた。これは、砕砂粒子そのものは不透水であり、粒径の異なる砕砂相互を同じ密度同士で比較した場合に、空隙体積率は同じでも個々の空隙の大きさが異なることにより透水性に差が生じ、さらにそれをベントナイトが膨潤で埋める効果が発揮できる空隙の大きさがベントナイト混合率の影響を受ける傾向が予想できることから、妥当な結果であると考えられる。これらについては、来年度に実施予定の同ケースの追加試験及び粒度の異なる模擬掘削土を用いた試験により確認する。また、模擬掘削土として砕砂細目を用いた場合と砕砂細目に微粉末を加えた場合の透水係数は無視できるほど小さかった。

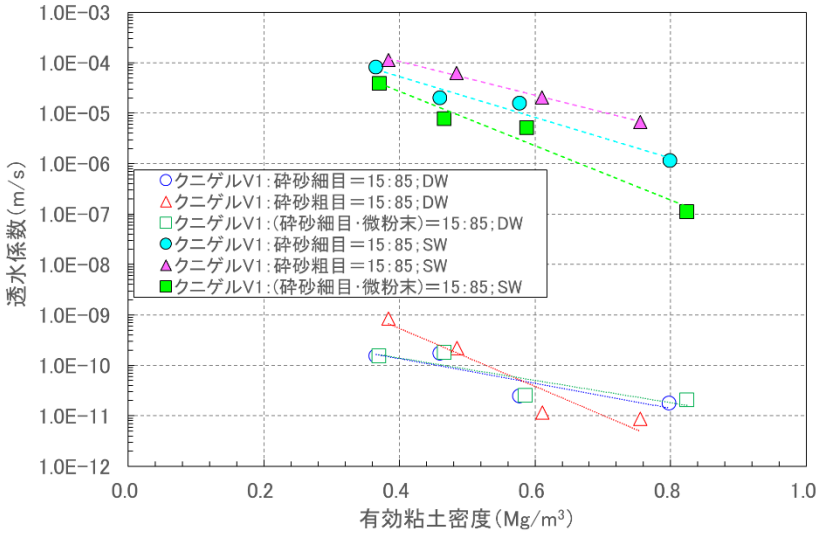


図 4.4-2　透水係数と有効粘土密度の関係

4.4.2　施工試験及び要素試験によるプロセス管理の実践

(1) 撒き出し・転圧工法

1)　目的

埋め戻し材の品質確認のために破壊的な手法であるサンプリングなどを実施した場合、サンプリングした部分の補修の適切性を判断することが難しい。そのため、処分場の埋め戻し施工時には、埋め戻し材のサンプリングなどの破壊的な手法を主体とした品質確認ではなく、材料の製造管理と施工時のプロセス管理ならびに原位置での出来形確認（3 次元スキャナなどで測定した坑道容積と材料投入量から求めたかさ密度などでの品質確認）を組み合わせた製造・施工プロセス管理手法の構築を指向する。

かさ密度による出来形確認によって最終的な品質確認を実施するためには、予め構築した製造・施工プロセス管理手法を事前の施工試験等に適用して、埋め戻し材の施工後の乾燥密度のばらつきを把握し、埋め戻し材の乾燥密度（埋め戻し材と坑道の界面などの施工が難しいと考えられる部分を含む）が設定した品質を満足させることができることを確認する必要がある。その際、事前の施工試験等では、かさ密度だけで最終的な品質を判断するのではなく、施工途中における非破壊検査等により乾燥密度などの把握やサンプリング等により測定される乾燥密度の実測値と非破壊検査の結果との比較なども有効になると考えられる。

撒き出し・転圧工法による製造・施工プロセス管理手法（案）の構築に向けて、その管理項目と管理指標の設定に資するために、地上施設の模擬坑道を対象とした施工試験を実施し、施工可能な範囲を確認するとともに、坑道中央部及び坑壁近傍における非破壊検査やサンプリングによる乾燥密度等の計測により施工位置に応じた埋め戻し材の品質を把握することを目的とする。

2)　試験材料及び材料製造

①　試験材料

埋め戻し材はベントナイトと模擬掘削土の混合土であり、ベントナイトには Na 型ベントナイト（クニゲル V1）を用いた。模擬掘削土には玄武岩の砕石と砕砂を用いた。ベントナイトと模擬掘削土の混合率は、表 4.4-11 に示すように乾燥重量比でそれぞれ 15%および 85%とした。ベントナイトと模擬掘削土の物理試験結果を表 4.4-12 に示す。

表 4.4-11　ベントナイト混合土の混合率

対象材料	混合率(wt%)		
	ベントナイト (クニゲル V1)	砕砂 (玄武岩砕砂粗目)	砕石 2005 (玄武岩砕石)
混合土	15	34	51

表 4.4-12　埋め戻し材料の物理試験結果

	クニゲル V1	模擬掘削土	
	V1	砕砂	砕石 2005
初期含水比 (%)	8.7	6.1	2.0
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	80.9	－	－
土粒子密度 (Mg/m^3)	2.730	2.824	

② 埋め戻し材の材料製造

使用予定の材料の初期含水比は、ベントナイトは 8.7±1.5%程度、玄武岩砕石は 2.0%、玄武岩砕砂は 6.1%であった。想定される含水比の範囲を締固め曲線に対応させたものを図 4.4-3 に示す。ここで、配合は、ベントナイト 15%、砕石 51%、砕砂 34%とした。

想定される含水比の範囲では、2 つの締固めエネルギー（A-c 法、C-c 法）に対して、1.90Mg/m³ 程度以上の乾燥密度が得られることが想定された。

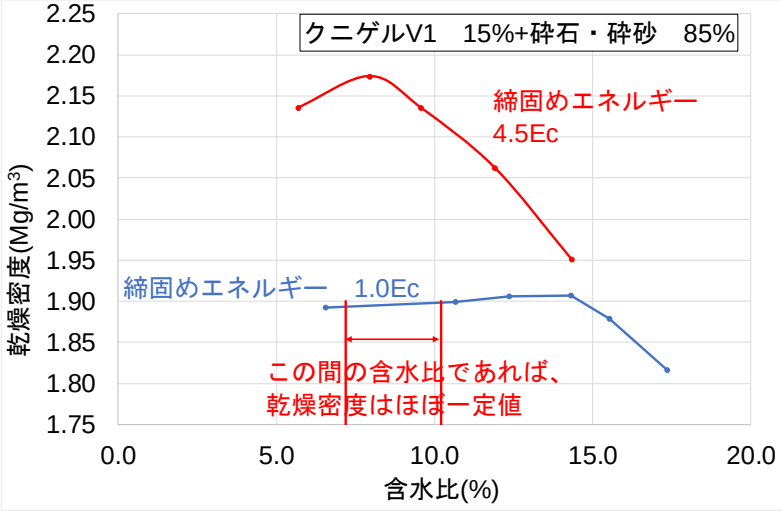


図 4.4-3　G60CS40 の締固め曲線

ベントナイト混合土の配合条件を表 4.4-13 に示す。材料の製造は、練り混ぜ段階でのばらつきの程度が確認できているバッチ式のアイリッヒミキサを用いて実施した。事前に測定した初期含水比に基づき、各材料の混合量および加水量を設定し混合を行った。

材料の混合の手順を以下に示す。製造バッチ数は 123 とし、骨材はあらかじめ砕石 558 kg、砕砂粗目 387 kgの計 945kg を詰めたフレコンパックを 123 体準備した。

a) 混合のバッチは、砕石・砕砂 1 フレコンパック単位で行い、砕石・砕砂はベルコンを介してミキサ上部の計量ホッパーに投入する。
b) 砕石･砕砂をフレコンパックの半分程度投入した段階で計量ホッパーにベントナイトを紙体（25kg）で所定量（175kg=約 7 袋）投入する。
c) 全材料をホッパーに投入後、ミキサへ投入する。
d) 空練りを 2 分行う。
e) 2 分経過したら、加水を開始。所定量の加水が終了したら 30 秒練混ぜする。
f) 練混ぜ終了後、排出する。

表 4.4-13　ベントナイト混合土の配合条件

	小計	ベントナイト	砕砂	砕石	加水
乾燥質量(kg)	1,073	161	365	547	―
水分量(kg) (含水比%)	97	14(8.7)	23(6.4)	13(2.3)	47
材料投入量(kg)	1,123	175	388	560	47
仕上がり量(kg)	―	1,170			

3)　施工試験条件

撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験は、図 4.4-4 に示す模擬坑道を対象として実施した。模擬坑道の内空は、高さ 5 m、幅 5 m、奥行 10 m であり、妻部から 5 m を施工範囲とした。

図 4.4-4　模擬坑道の外観

①　施工目標値の設定

透水係数の目標値は 1.0×10⁻⁹ m/s 以下とした。また、昨年度に実施した透水試験の結果（原子力機構・原環センター, 2020）を参照してまとめた図 4.4-5 より、透水係数 1.0×10⁻⁹ m/s を達成できる乾燥密度として、目標乾燥密度は 1.81 Mg/m³ とした。これは、A-c 法の締固めエネルギーによる室内締固め試験結果の最大乾燥密度 1.91 Mg/m³ に対して締固め度 95%に相当する。

今回の施工試験で目標とする埋め戻し材の透水係数、乾燥密度を表 4.4-14 に示す。

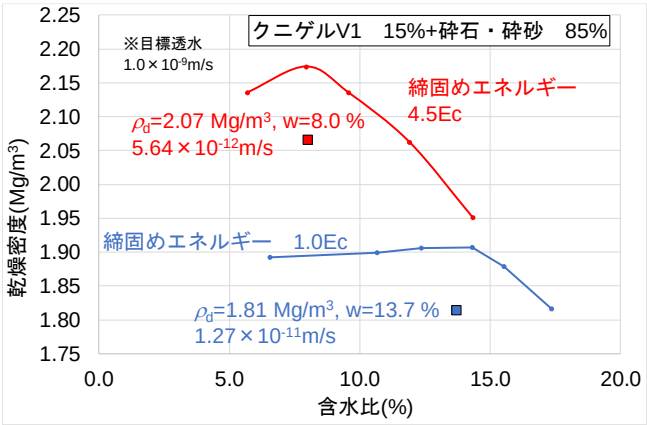


図 4.4-5　締固め曲線と透水試験結果の関係

表 4.4-14　転圧施工試験における埋め戻し材の施工目標値

項目	目標値	備考
透水係数	1×10⁻⁹ m/s 以下	
乾燥密度	1.81 Mg/m³	透水係数 1.0×10⁻⁹ m/s を達成できる乾燥密度として設定

② 転圧機械

転圧機械として、図 4.4-6 に示すサンドランマー（模擬坑道の排水溝埋め戻し用）、タンピングランマー、1.5t 小型振動ローラー、4t タンデムローラーを用いた。材料の撒出しはホイルローダーで行い、敷均しはバックホウと人力の組み合わせにより行った。

(a) サンドランマー

(b) タンピングランマー

(c) 1.5t 小型振動ローラー

(d) 4t タンデムローラー

図 4.4-6　施工試験に使用した転圧機械

③ 施工条件

予備試験の結果（付録 6 参照）を踏まえて設定した施工試験の転圧条件等を表 4.4-15 に示す。図 4.4-7 に示すように、坑道中央部（一般部）は 4t タンデムローラー、4t タンデムローラーでは締固めが難しい壁際部分を 1.5t 小型振動ローラー、妻壁部分をランマーで転圧を行う。

図 4.4-4 の右図に示した平場及び斜路部は、C-40 砕石を用いた法面を 1：2 程度の勾配で抑え盛土として施工した。振動ローラーによる転圧は、坑口から妻壁に向かって走行する時にのみ加振することとし、妻壁から坑口に戻る復路では無振動で走行するのみとした。

表 4.4-15　施工試験の施工仕様

	撒出厚さ	転圧機械	目的
側溝部分	70 mm	サンドランマー（右側のみ）	・施工品質の確保が難しい部分を把握 ・空間位置の違いによる密度のばらつきの把握
基本ケース	300 mm	一般部：4t タンデムローラー （無振動転圧 2 回、振動転圧 6 回） 壁際：1.5t 小型振動ローラー 妻部：ランマー	

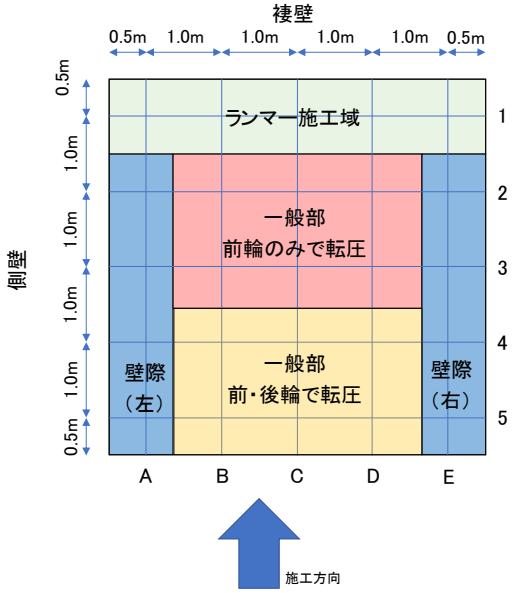


図 4.4-7　平面位置の違いによるエリア区分

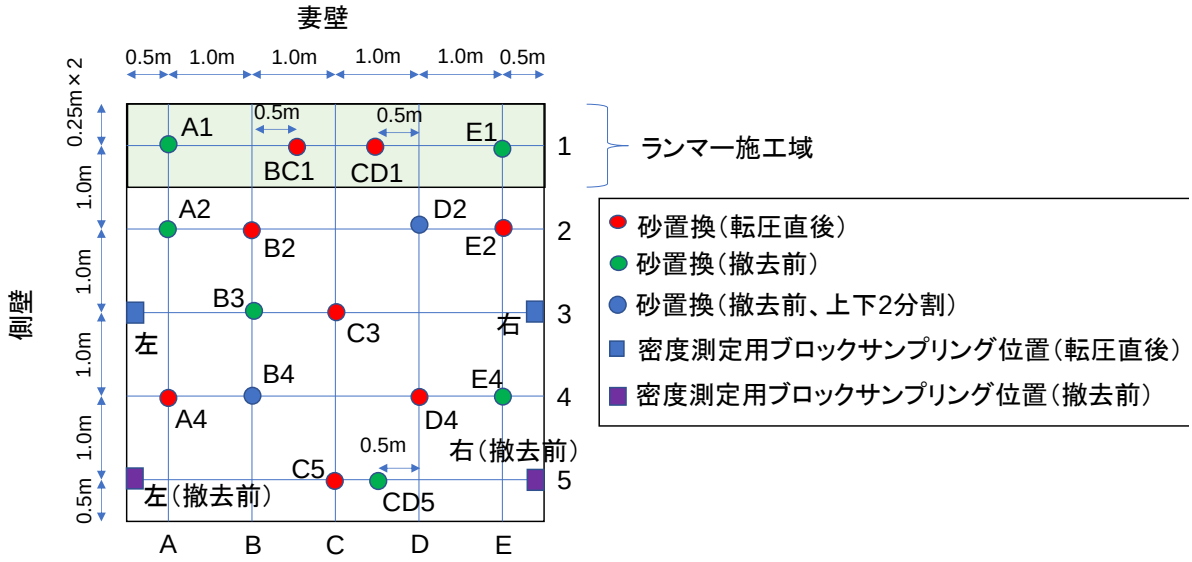
④　測定項目

施工試験の各段階で取得したデータを表 4.4-16 に示す。3D スキャナによる測定は、施工後の平均層厚と体積の測定を行う。施工時の材料投入量と施工後体積より、施工層全体でのかさ密度を求めた。レベル測量は、1m² あたり 1 点程度の頻度となるように格子状の点で測定できる場所とした。現場密度試験は砂置換法で行うことを基本とし、転圧機械の違いによる影響や平面的な位置の違いによる影響を把握することを目的として、図 4.4-7 に示すようにエリア区分をし、各エリアで 2 点以上の乾燥密度の測定を行うこととした。壁際の乾燥密度の測定は点検孔（模擬坑道の側壁に、中心高さ 1,000 mm、間隔 1,500 mm で 3 カ所設置された φ400 mm の開口部）とは別の場所より左右 1 箇所ずつ試料採取し、パラフィン法により行った。透水試験は、乾燥密度と透水係数の関係を把握することを主目的とし、全 13 層から計 16 か所の試料を採取し、それから 12 か所分の試料を選択して透水試験を実施した。

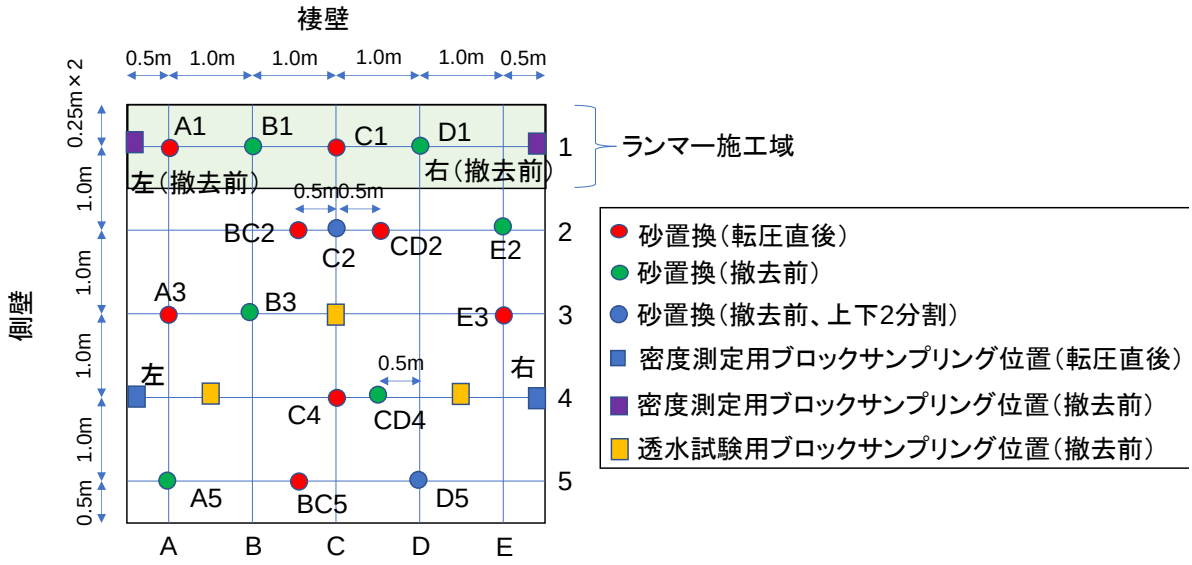
品質確認の実施位置を図 4.4-8 に示す。砂置換法やブロックサンプリングは、奇数層と偶数層で異なる位置で実施した。また、レベル測量及びキャスポルは図 4.4-8 に示す格子の交点で行った。

表 4.4-16　材料製造及び施工試験の各段階で取得するデータ

施工試験の段階	取得するデータ/試験項目	測定方法あるいは規格・基準	測定頻度
材料の基本物性	メチレンブルー吸着量	JIS Z 2451	3 点
	膨潤力	JBAS-104-77	1 点
	土粒子密度	JIS A 1202	3 点/各試料
	自然含水比	JIS A 1203	3 点/各試料
	粒度分布	JIS A 1204	1 点
混合材料の特性	締固め特性	JIS A 1210	1 試験/各混合材料
	締固め供試体の透水係数	JGS 0312-2018	計 8 点
	含水比	JIS A 1203	30 点兼　品質管理
	粒度分布	JIS A 1204	15 点
撒き出し・転圧	投入量	材料の投入量	1 点/各層
	転圧回数と施工層厚	レベル測量	1 点/m^2/各転圧パス
	出来形測定	3D スキャナ測定	撒き出し前、転圧前後
	施工速度	歩掛かり	1 回/各転圧パス
施工後品質	乾燥密度	JIS A 1214（砂置換法）	転圧後：8 点/各層 撤去中：8 点/各層
	含水比	JIS A 1203	同上
	乾燥密度	非破壊密度測定方法（キャスポル）	8 点/各層 概要版では記載省略
	含水比	非破壊含水率測定器（WARP）	8 点/各層 概要版では記載省略
	透水係数	JGS 0312-2018（低透水性材料の透水試験方法）	計 10 点目標



(a) 奇数層



(b) 偶数層

図 4.4-8　施工試験における品質確認の実施位置

⑤　施工試験の状況

施工試験の状況を図 4.4-9 に示す。

(a) 材料の撒き出し状況

(b) サンドランマーの側溝転圧状況

(c) ランマーの妻部転圧状況

(d) 小型振動ローラーの壁際転圧状況

(e) 4t タンデムローラーの転圧状況

(f) 測量状況

(g) 品質測定状況

(h) 砂置換法による現場密度測定状況

(i) 砂置換後の砂の回収

(j) 撤去時の掘削状況

図 4.4-9　施工試験の状況

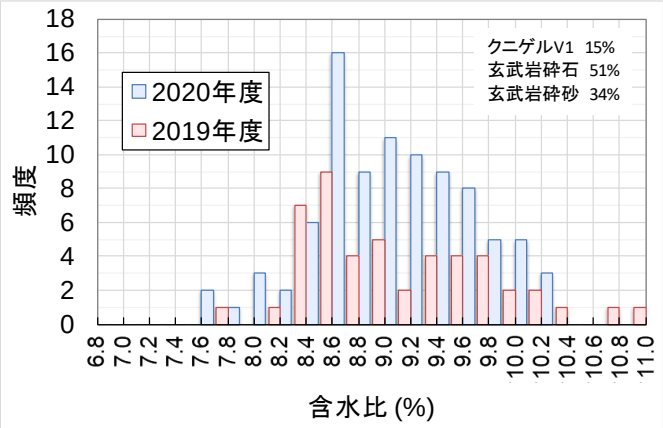
4)　施工試験結果及び考察

①　材料製造時の含水比及び粒度のばらつき

材料製造した全 123 バッチの中から 90 バッチを任意に抜き取り、混合土の含水比を測定した結果を図 4.4-10 に示す。図には、昨年度に製造した材料の含水比の測定結果（原子力機構・原環センター，2020）も併せて示した。設定含水比の 9.0%に対して、混合土の含水比のばらつきは 7.6%～10.4%程度の間で分布し、平均値は 9.1%であった。また、最頻値は 8.6%であり設定値よりも小さい値となった。混合土の含水比は、砕石や砕砂の初期含水比のばらつきの影響を受けるため、混合土の含水比のばらつきを小さくするためには混合前の砕石や砕砂の含水比ができるだけ一定になるように保管する必要がある。

全 123 バッチ中から 5～10 バッチ毎に混合土を任意に抜き取り、15 バッチ分の粒度試験を実施した結果を図 4.4-11 に示す。図中の凡例の数字は抜き取ったバッチ番号である。試験を行った 15 回の粒度分布のばらつきは大きくはないが、細粒分含有率は計算で求めた粒径加積曲線（赤線）より高かった。今回の混合土は、粒度分布のばらつきが小さかったことから、図 4.4-3 の締固め曲線を見ると、含水比が 7.6%～10.4%の範囲では 1Ec 程度の締め固めエネルギーならば乾燥密度の変化量は小さい。そのため、含水比のばらつきが乾燥密度に及ぼす影響は無視できるほど小さいと考えられる。

今回の試験のように埋め戻し材の含水比や粒度分布にはばらつきが生じることは避けられないため、埋め戻し材の施工品質を保証するためには、材料製造の段階でも含水比や粒度分布が許容範囲にあることを確認する必要があると考えられる。この許容範囲は、例えば、粒度分布をパラメータとした締固め試験を実施して、含水比による乾燥密度の低下割合から許容できる粒度分布と含水比を設定することなどが考えられる。



統計値	含水比 (%)
平均値	9.1
中央値	9.1
標準偏差	0.6
変動係数	0.1
最大値	10.3
最小値	7.7
幅	2.7
標本数	90

図 4.4-10　練混ぜ製造後のベントナイト混合土の含水比

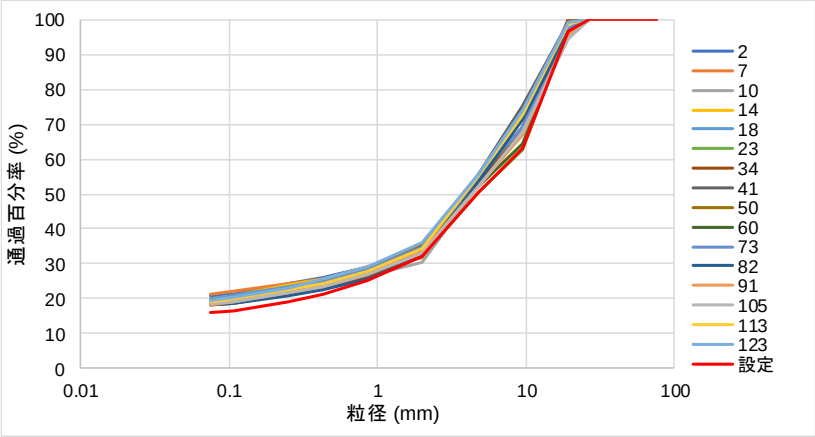


図 4.4-11　材料製造後の粒度試験結果

②　乾燥密度のばらつき

現場密度試験の結果を図 4.4-12 に示す。乾燥密度は、約 1.3～2 Mg/m³ の範囲に分布しており、全ての施工機械で目標乾燥密度の 1.81 Mg/m³ を下回る結果が見られた。1.5t 小型振動ローラーでの転圧箇所は 1.52～1.93 Mg/m³、4t タンデムローラー（前輪のみ）での転圧箇所は 1.40～1.91 Mg/m³、4t タンデムローラー（前後輪）での転圧箇所は 1.32～1.92 Mg/m³、ランマーでの転圧箇所は 1.29～1.83 Mg/m³ となり、1.5t 小型振動ローラーでの転圧箇所の乾燥密度が高く、ランマーでの転圧箇所の乾燥密度が低かった。

乾燥密度の低い場所を把握するために、施工位置と乾燥密度の関係を図 4.4-13 に示す。図の横軸の英数字は、図 4.4-14 の A～E と 1～5 の座標を表している。横軸の“平均”は、転圧した 1 層の上層と下層のそれぞれに対して砂置換法による乾燥密度測定を実施した場所であり、上層と下層の乾燥密度とそれぞれの体積を考慮して平均の乾燥密度を算出した。図 4.4-13 から、ランマーで施工した部分と“平均”の部分以外では、施工位置によって乾燥密度が顕著に低い部分は見られなかった。

施工試験後にブロックサンプリングから採取した試料を用いた透水試験の結果を図 4.4-15 に示す。乾燥密度（パラフィン法）は 1.80～1.90 Mg/m³ の範囲でばらつきがあったが、透水係数は 8.0×10^{-12}～2.0×10^{-11}m/s 程度であった。

③　転圧層中の上下の密度差

砂置換法により転圧層中の上下の乾燥密度の測定結果を図 4.4-16 に示す。後述する理由により、乾燥密度の測定結果の妥当性は確認できていないが、今回の施工試験では撒き出し厚さが 300 mm であったため、転圧層中の上部に比べて下部の乾燥密度が低下する傾向にあった。乾燥密度の大きさによっては、層中に乾燥密度が低い部分が連続すると透水係数の高い部分が存在してしまうため、層の下部に乾燥密度が低い部分ができることは防止する必要がある。そのため、撒き出し厚さをパラメータとして、層中の乾燥密度の差を考慮した上で適切な撒き出し厚さを設定する必要がある。

“平均”の部分は、図 4.4-17(a)及び(b)に示す方法で砂置換法により測定したが、(b)に示すように、層の上部の埋め戻し材を掘削した時の下部の表面には凹凸が形成されてしまった。とくに埋め戻し材に最大粒径 20 mm の砕石を含むため、砂置換法による乾燥密度測定時に使用するベースプレートと凹凸面の間に砂が侵入することで容積を過大評価する結果として乾燥密度が小さく測定されてしまうことも考えられる。また、今回の上下層それぞれの深さは 75 mm 程度で

あり、砂置換法で密度計測をする時に掘削する孔が浅いと、凹凸部に砂が侵入した場合に誤差が大きくなってしまう。これらのことから、層の上下の乾燥密度を測定する時には、表面の凹凸や孔の深さなどに注意する必要がある。

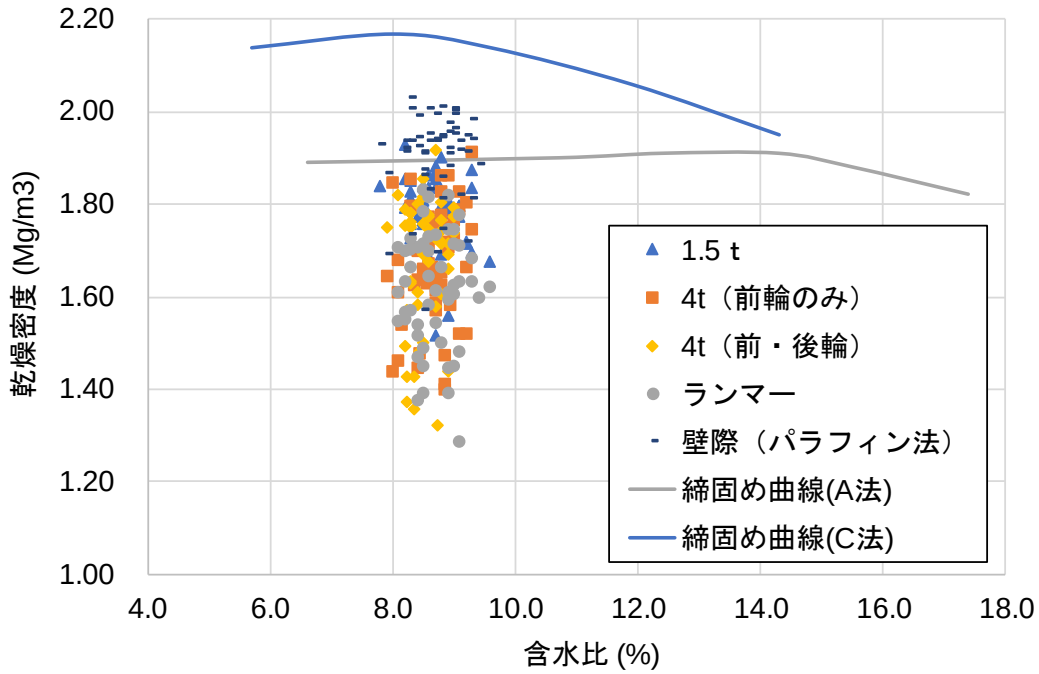


図 4.4-12　現場密度試験の結果

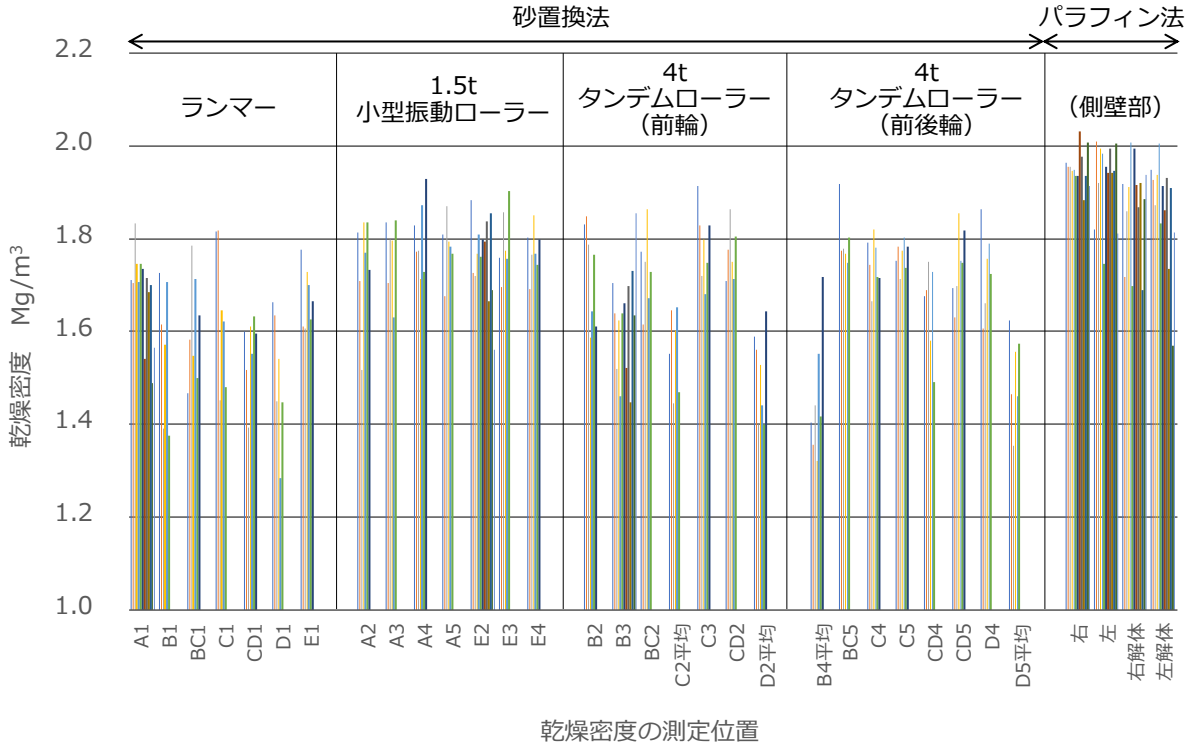


図 4.4-13　施工位置と乾燥密度の関係

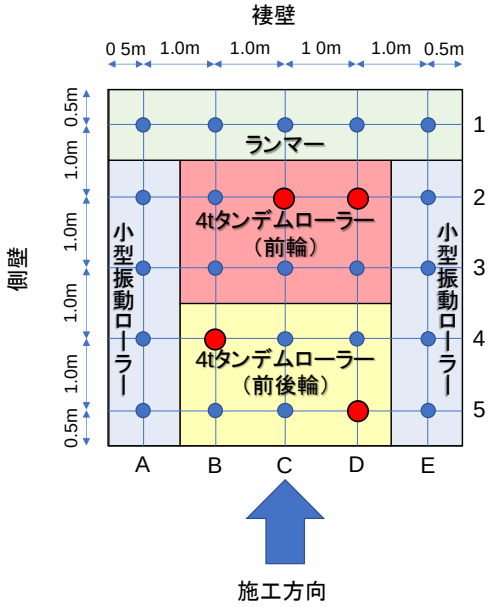


図 4.4-14　砂置換法の実施位置を示す座標

（赤丸は砂置換法により層の上下の乾燥密度を測定した部分）

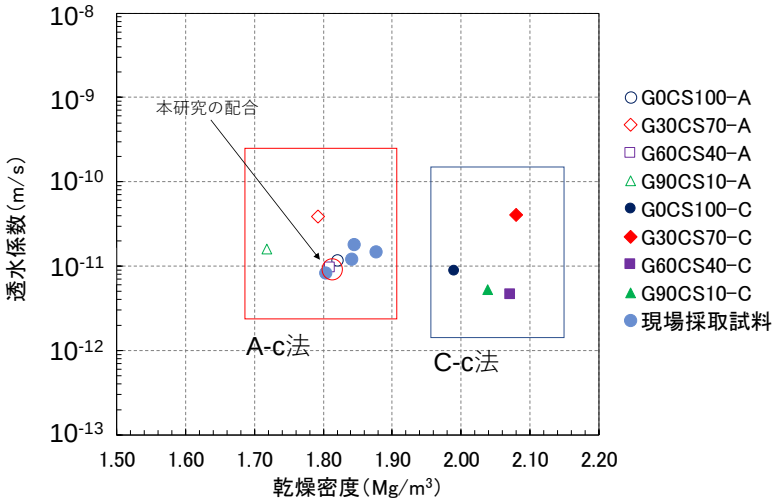


図 4.4-15　ブロックサンプリング試料を用いた透水試験結果

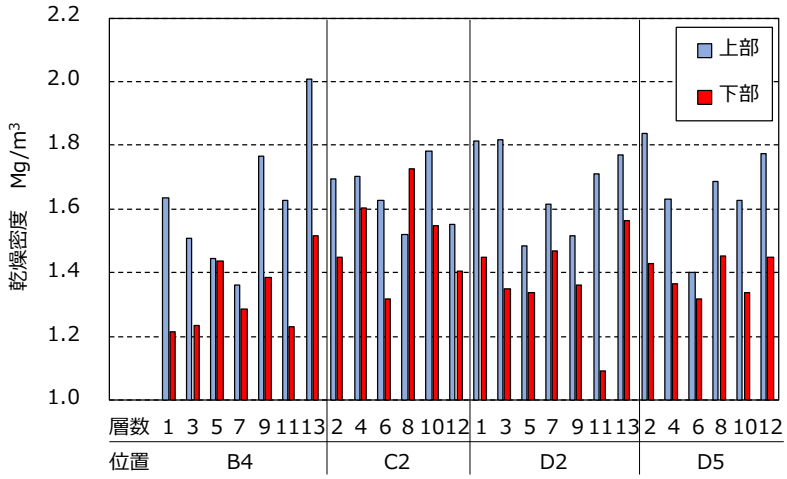
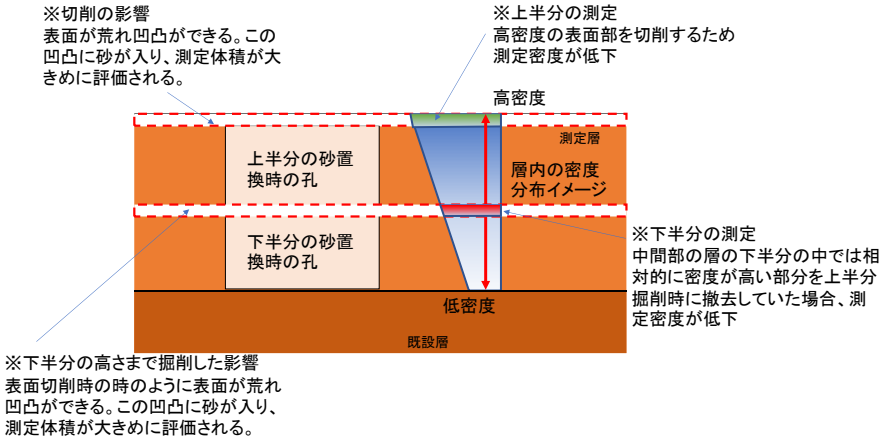


図 4.4-16　層上下の乾燥密度の測定結果

(a) 上部の砂置換法　　(b) 下部の砂置換法



(c) 上下分割して測定する時の砂置換時の模式図

図 4.4-17　層上下の乾燥密度の測定方法

④　非破壊検査結果と乾燥密度

乾燥密度とキャスポルの測定値（インパクト値 Ia）の関係を図 4.4-18 に示す。乾燥密度の増加にともないインパクト値は増加する傾向にあるが、乾燥密度のばらつきは大きかった。山田らの研究では、キャスポルの測定値は、転圧による層厚が薄く、乾燥密度が厚さ方向で均一な場合に適用できることが示されている（山田他，2020）。今回の施工試験では、転圧後の層厚が 160 mm 程度あり、層内の上下方向にも密度分布があったため、乾燥密度を過大評価するとともに、相関性が低くなったと考えられる。今後、撒き出し厚さを小さくするような場合には、乾燥密度を非破壊で推定する手法としてキャスポルを適用できる可能性がある。

今回は試験的に出来高の測量を 3D レーザースキャナにより行った。使用したレーザースキャナと測定状況を図 4.4-19(a)及び(b)に示す。また、3D スキャナで採取した点群データより取得した 5 層目転圧後の表面の形状を図 4.4-19(c)に示す。なお、同図では表面形状の様子が明確になるように z 軸方向の変位量を 3 倍にして表示している。転圧時にできたローラーの轍やランマーと 4t タンデムローラーの転圧機械を変更した境目等の表面に生じた凹凸形状が観察できる。レベル測量は、一般的な方法であり、転圧の凸凹が少なければ、容易に測量が行え、簡単なシステムで結果も短時間で出せる。一方、3D スキャナは、レーザーが届けば複雑な形状の測量も可能であるが、自己位置認識のための基準点が必要である。また、レーザーの入射角が浅いと精度が低下するなどの特徴を把握した上で適切に設置する必要がある。また、計測された容積と、撒き出した埋め戻し材の重量が分かれば、密度の算出を行うことも可能であるが、坑道内で連続的に施工を行うことを考えると、重量計測を効率的に行える設備が求められる。

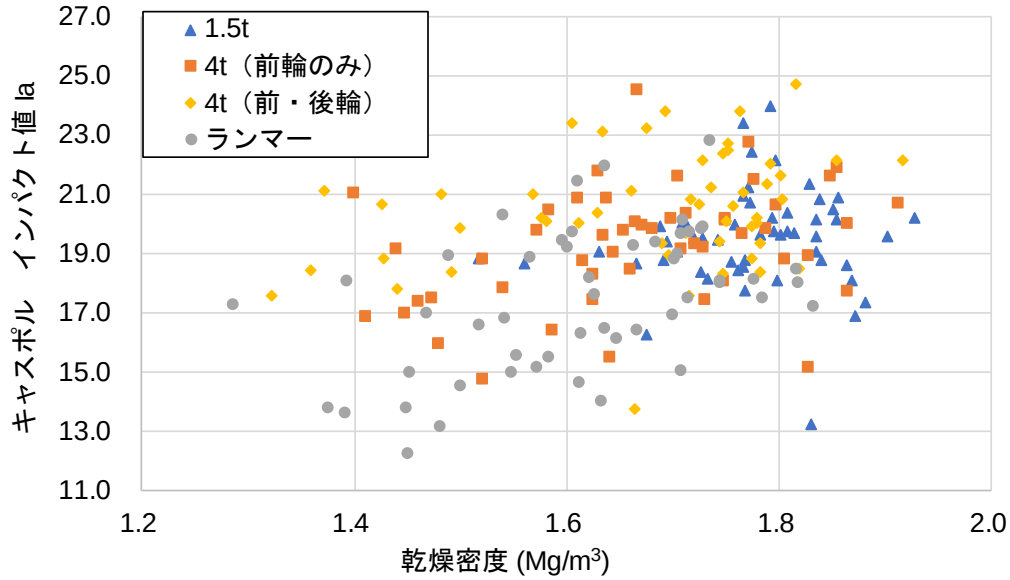
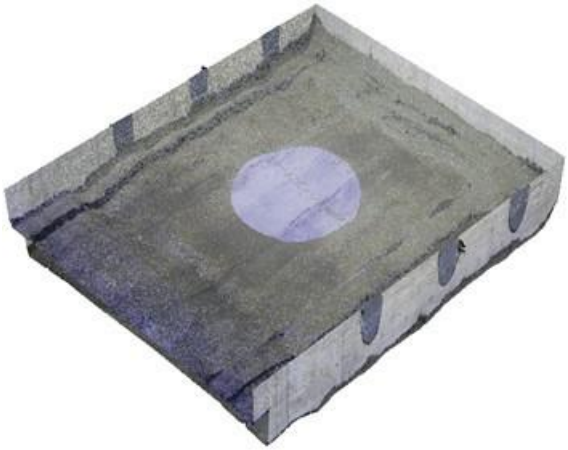


図 4.4-18　乾燥密度とキャスポル測定値の関係

(a) Leica RTC360 3D レーザースキャナ

(b) 測定状況



(c) 5 層目転圧後の 3D スキャナ画像（Z 軸方向変位量は 3 倍表示）

図 4.4-19　3D 計測の例

⑤　施工試験におけるサイクルタイム

施工試験中の各工程に要した作業時間を表 4.4-17 に示す。施工では、埋め戻し材の撒き出し・敷均し、斜路の造成、予備転圧、振動転圧の順番で実施し、品質確認では、3D 計測、レベル測量、砂置換法やキャスポルによる乾燥密度測定及びブロックサンプリングを実施した。埋め戻し材の撒き出し・敷均しの工程が最も時間を要しており、１時間～１時間半程度であった。次に時間を要した工程は品質確認であり、1 層当たり砂置換法の作業を 4 カ所同時に実施して計 8 カ所で 1 時間～1 時間 45 分程度の時間を要した。

13 層の各工程に要した時間を平均したサイクルタイムを図 4.4-20 に示す。今回の施工試験では、施工から品質確認まで 1 層当たり平均 4 時間 17 分であった。今回の施工試験では、施工目標値を達成できたわけではないが、今回のサイクルタイムに基づいて、処分場での埋め戻し施工を製造・施工プロセス管理手法と 3D 計測による出来形管理で品質確認をする場合の 1 層当たりの施工時間を試算すると、図中のレベル測量と品質測定を除いて 2 時間 46 分となり、約 1.73 m^3/hr の施工速度となった。

表 4.4-17　各施工層におけるサイクルタイム

工程		層数													平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
施工	敷均し	1:30	1:00	0:54	1:27	1:08	1:28	1:00	1:30	1:00	1:15	0:56	1:31	1:16	1:13
	斜路造成	0:08	0:03	0:21	0:15	0:22	0:24	0:24	0:32	0:30	0:44	0:44	1:05	0:34	0:28
	予備転圧	0:05	0:05	0:05	0:17	0:11	0:09	0:16	0:13	0:10	0:09	0:11	0:14	0:14	0:10
	振動転圧	0:41	0:26	0:37	0:49	0:33	0:29	0:31	0:35	0:30	0:34	0:30	0:30	0:47	0:34
品質確認	3D 測量	0:42	0:20	0:19	0:38	0:20	0:14	0:19	0:13	0:20	0:19	0:15	0:17	0:20	0:21
	レベル測量	0:34	0:16	0:16	0:20	0:19	0:20	0:15	0:15	0:18	0:22	0:20	0:16	0:22	0:19
	品質測定	1:15	1:45	1:04	1:12	1:20	1:10	1:03	1:01	1:10	0:57	1:02	1:12	0:50	1:09
合計（時間）		4:55	3:55	3:36	4:58	4:13	4:14	3:48	4:19	3:58	4:20	3:58	5:05	4:23	4:17

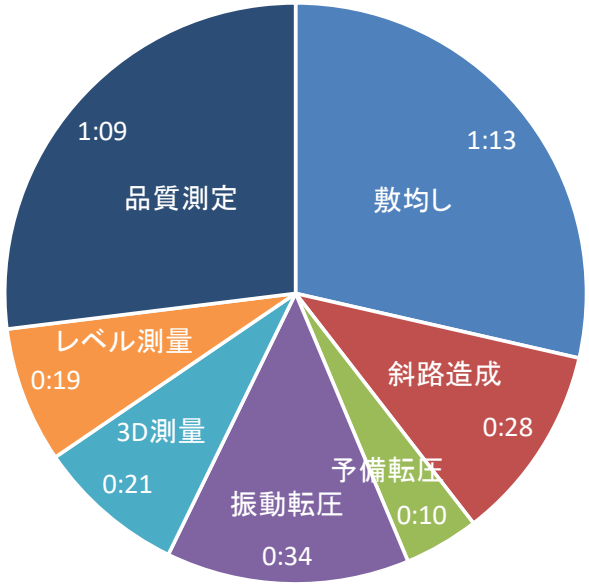


図 4.4-20　施工試験におけるサイクルタイム（13 層の平均時間）

⑵ 吹付け工法

1) 目的

吹付け工法を対象として材料製造と施工段階における管理項目（評価指標を含む）を設定するとともに、製造・施工プロセス管理手法を構築し、将来の柔軟かつ迅速な埋め戻し材の施工技術の選択を可能にするための基盤情報として整備することを3年間の目標として吹付け箱試験や施工試験を実施する。なお、実際の操業段階において、施工品質の確認のために原位置で施工した埋め戻し材に対してサンプリング等を実施することは、繁雑な作業を強いるだけでなくサンプリング部の適切な補修の必要性といった新たな課題も想定される。そのため、埋め戻し材のサンプリングなどの破壊的な手法を主体とした品質確認ではなく、材料の製造管理と施工時のプロセス管理ならびに原位置での出来形確認（３次元スキャナなどで測定した坑道容積と材料投入量から求めたかさ密度などでの品質確認）を組み合わせた製造・施工プロセス管理手法の構築を指向する。出来形確認（かさ密度）によって最終的な品質確認を実施するためには、予め構築した製造・施工プロセス管理手法を事前の施工試験等に適用して、埋め戻し材の施工後の乾燥密度のばらつきを把握し、埋め戻し材の乾燥密度（埋め戻し材と坑道の界面などの施工が難しいと考えられる部分を含む）が設定した品質を満足させることができることを確認する必要がある。

2) 試験材料及び試験装置

①埋め戻し材の使用材料

埋め戻し材はベントナイトと模擬掘削土の混合土であり、ベントナイトにはNa型ベントナイト（クニゲルV1）を用いた。昨年度までの吹付け箱試験の結果では、模擬掘削土として砕石を用いた場合、リバウンド材が多く発生した（原子力機構・原環センター, 2020）ため、今回の試験では最大粒径は、5 mmと2.5 mmの砕砂を用いた。ベントナイトと模擬掘削土の混合率は、乾燥重量比でそれぞれ15%および85%とした。

各材料の自然含水比（JIS A 1203 土の含水比試験に準拠）、土粒子密度（JIS A 1202:2009 土粒子の密度試験に準拠）の測定結果を表 4.4-18 に示す。ベントナイトの自然含水比、土粒子密度の測定では、ベントナイトの吸水量の影響を排除するため、炉乾燥温度を110±5℃ではなく160℃とした。最大粒径2.5mmの砕砂については、購入時期（第1回（令和2年10月）、第2回（令和3年1月））により自然含水比に差が見られた。これは砕砂の採取時期や保管状況（天候など）などの影響を受けているものと考えられる。材料混合時には、自然含水比を考慮して混合土の加水量を調整した。また、ベントナイトのメチレンブルー吸着量（JAS Z 2451 に準拠）を測定した結果、吸着量は82.63 mmol/100g、モンモリロナイト含有率は56.02%であった。使用した材料の粒度分布（JIS A1204:2009 土の粒度試験に準拠）の測定結果を図 4.4-21 に示す。最大粒径2.5mmに関しては昨年度と今年度の材料に変化は少ない。その一方で、最大粒径5mmの砕石・砕砂の粒度分布では昨年度と1月実施分は概ね同じであるが、10月分の砕石・砕砂は2mm以下の粒度成分が少ない材料であった。

表 4.4-18　埋め戻し材料の物性値

測定項目 （測定方法）	ベントナイト （クニゲル V1）	砕砂（玄武岩）		備考
		最大粒径 2.5 mm	最大粒径 5 mm	
自然含水比 （JIS A 1203）	8.7%	4.1%（第 1 回） 6.6%（第 2 回）	4.6%	ベントナイトの炉乾燥温度は 160℃
土粒子密度 （JIS A 1202）	2.741 Mg/m^3	2.836 Mg/m^3	2.803 Mg/m^3	ベントナイトの炉乾燥温度は 160℃

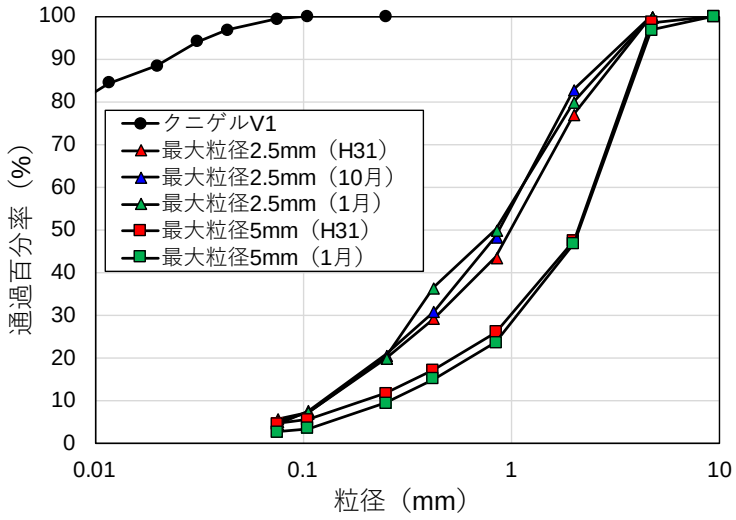


図 4.4-21　埋め戻し材材料の粒度分布

②透水係数の目標設定

埋め戻し材の設計要件の一つに「低透水性」が挙げられ、その指標及び基準は、「透水係数」と「母岩の平均的な透水係数の 10 倍以下」とされている（NUMO, 2021）。この基準に対して安全率やばらつきなどを考慮し、「1×10^{-9} m/s」を目標値とする施工管理基準値を設定した上で試験を実施する。目標とする埋め戻し材の透水係数を表 4.4-19 に示す。

表 4.4-19　埋め戻し材に要求する透水係数の目標値

設計要件	指標	基準	今回の試験における目標値
低透水性	透水係数	母岩の平均的な透水係数の 10 倍以下	透水係数：1×10^{-9} m/s 以下

③試験装置

吹付け工法では、材料供給機に投入された吹付け材料がベルトコンベアを介してロータ式吹付け機内に一定供給量で供給され、コンプレッサの圧縮空気によってホース内を圧送されて、吹付けノズル内で速度エネルギーを増加し吹付けられる方法である。吹付けノズルは吹付け面から 1 m 程度の位置で保持し、吹付け機から吹付け位置までは長さ 20 m、内径 50 mm のホースで圧縮空気により材料を圧送する。図 4.4-22 に示す施工機器は施工エリアから 20～100 m 程度離れた場所に設置可能である。

図 4.4-22　吹付け工法の概要

図 4.4-23　吹付け箱への吹付け状況

3)　吹付け箱試験（付録 6 を参照）

①　試験条件

後述の小規模模擬坑道を対象とした施工試験に向けて、材料条件及び機械条件の設定のために、模擬掘削土の最大粒径、含水比、材料供給量をパラメータとした吹付け箱試験を実施した。吹付け箱試験における試験ケースを表 4.4-20 に示す。表には、昨年度に実施した試験ケースも併せて示した。昨年度は、主に最適含水比よりも高含水比側で吹付け箱試験を実施したが、含水比が大きくなるとホース内に付着する埋め戻し材の量が多くなる傾向が見られた。ホース内の付着量が多くなるとホースが閉塞して施工ができなくなるため、施工試験を中断してホース内に砕石などを通して付着した埋め戻し材を除去する、またはホースを交換する必要がある。実際の施工では、施工を中断せずに連続的に施工することが望ましいため、ホース内の付着量をできる限り少なくできる材料条件や吹付け装置の条件を把握する必要がある。ホース内の付着量は、埋め戻し材の含水比と材料供給量の影響を受けると考えられるため、今年度は最適含水比よりも低含水比側で材料供給量を変化させて吹付け箱試験を実施した。

表 4.4-20　吹付け箱試験の試験ケース

ベントナイト		模擬掘削土		含水比 w (%)	材料供給量 (kg/10sec)	備考
種類	混合率 (wt%)	種類	最大粒径 (mm)			
クニゲル V1	15	玄武岩	2.5	7.2 (w_{opt}－3.0)	10	
					12.5	凸型無し
					15	凸型無し
				8.7 (w_{opt}－1.5)	7.5	令和元年度実施済
					10	
					12.5	
					15	
				10.2 (w_{opt})	7.5	
					10	
					12.5	
					15	
				11.7 (w_{opt}+1.5)	7.5	
					10	
					12.5	
					15	
			5	6.4 (w_{opt}－3.0)	12.5	凸型無し
					15	凸型無し
				7.9 (w_{opt}－1.5)	12.5	凸型無し
					15	凸型無し
				9.4 (w_{opt})	7.5	令和元年度実施済
					10	
					12.5	
					15	
				10.9 (w_{opt}+1.5)	7.5	
					10	
					12.5	
					15	
				12.4 (w_{opt}+1.5)	7.5	
					10	
					12.5	
					15	

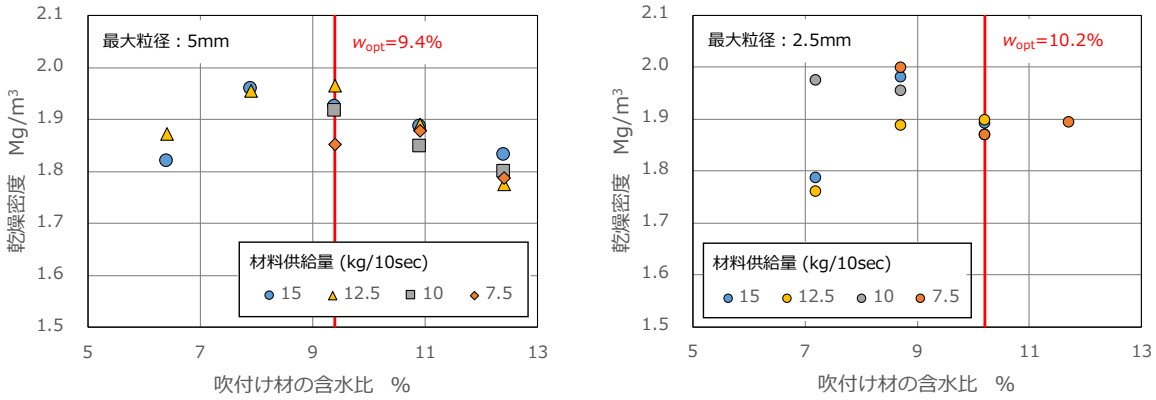
② 試験結果

吹付けた材料の含水比と吹付けにより付着した材料の乾燥密度の関係を図 4.4-24 に示す。乾燥密度の測定結果にはばらつきが見られるが、吹付けた材料の最適含水比より高含水比側では乾燥密度が小さくなる傾向が見られた。吹付け施工では、吹付けた材料が全て付着するわけではなく、吹付け時に材料がリバウンドするために吹付けた材料と付着した材料では材料構成や含水比が異なる。吹付けた材料とリバウンドした材料の粒度分布の一例として、模擬掘削土の最大粒径 5 mm、含水比 7.9%、材料供給量 12.5 kg/10sec の材料の吹付け前後の粒度分布を図 4.4-25 に示す。粒径の大きな材料が吹付け後の材料（リバウンド材）に含まれていることから、付着した材料には粒径の大きな砕砂の割合が減少していることがわかる。その結果、吹付け前の材料よりも付着した材料の含水比は高含水比になるため、吹付けた材料の最適含水比より低含水比側のときに付着した材料の乾燥密度が高くなったと考えられる。

模擬掘削土の最大粒径 5 mm における吹付け材の含水比と材料ロスの関係を図 4.4-26 に示す。図 4.4-26 (a)の含水比と材料付着率の関係から、吹付け材の含水比が大きくなると材料付着率が大きくなる傾向にあることがわかる。図 4.4-26 (b)と(c)には、吹付け時に材料が付着せずにリバウンドした材料の割合とホース内に付着した割合を示す。吹付け材の含水比が高くなると材料が付着しやすくなるためリバウンド率は低下する傾向にあったが、ホース内付着率は増加する傾向にあった。

材料供給量と乾燥密度の関係を図 4.4-27 に示す。吹付け箱試験では、コンプレッサーの吐出圧を一定としているため、材料供給量を増加すると乾燥密度が低下すると予想していたが、材料供給量 7.5～15 kg/10sec の範囲では乾燥密度の変化は明確には見られなかった。

以上の結果から、埋め戻し材の吹付け施工をできるだけ中断することなく連続的に実施するためには、材料の含水比は低含水比側が適しており、材料供給量が乾燥密度に及ぼす影響は小さいことがわかった。



(a) 最大粒径 5 mm　　(b) 最大粒径 2.5 mm

図 4.4-24　吹付け材の含水比と付着材の乾燥密度の関係

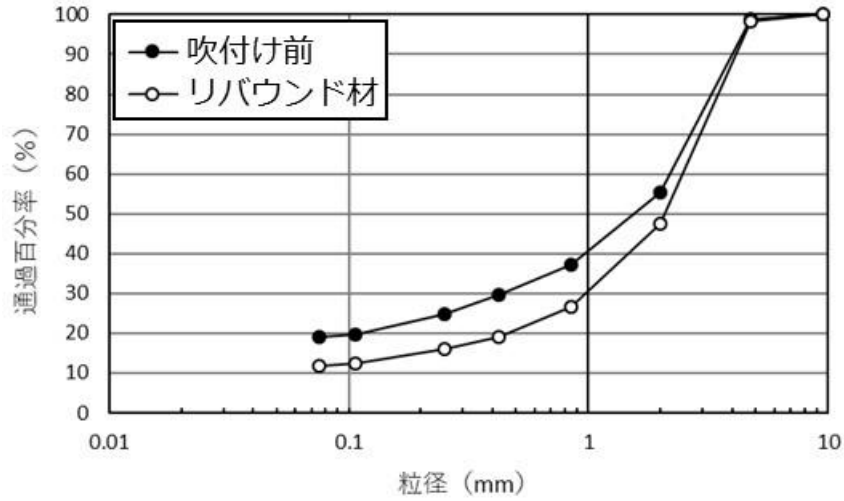
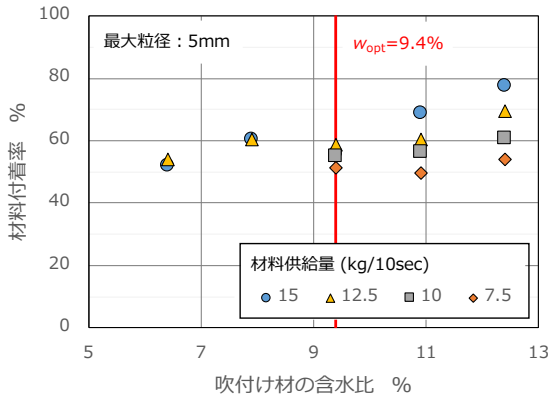
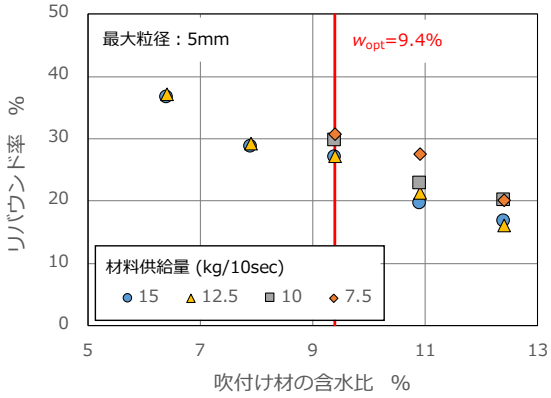


図 4.4-25　吹付けた材料とリバウンド材の粒度分布の例

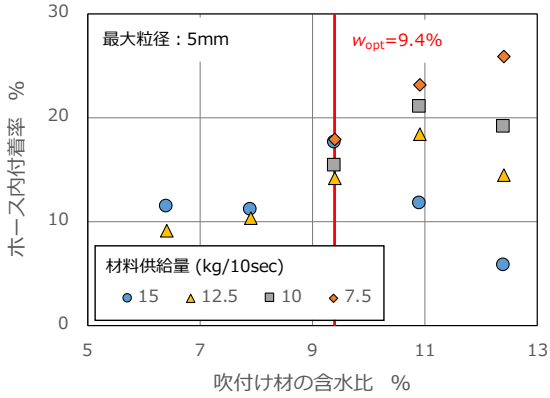
（模擬掘削土の最大粒径 5 mm、含水比 7.9%、材料供給量 12.5 kg/10sec）



(a) 材料付着率

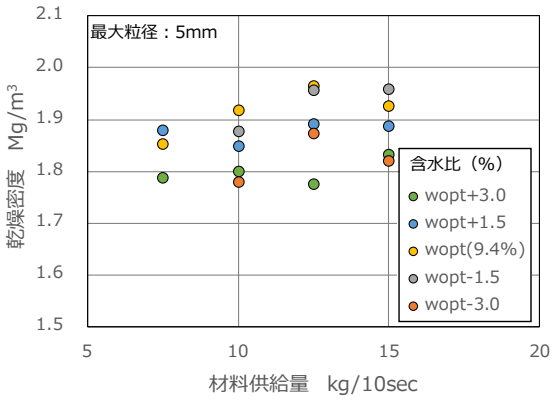


(b) リバウンド率

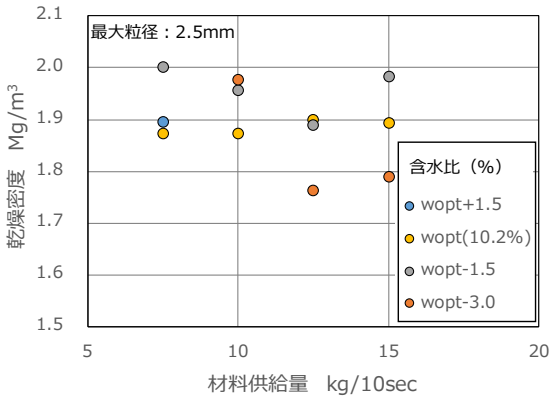


(c) ホース内付着率

図 4.4-26　含水比と材料ロスの関係（最大粒径 5 mm）



(a) 最大粒径 5 mm



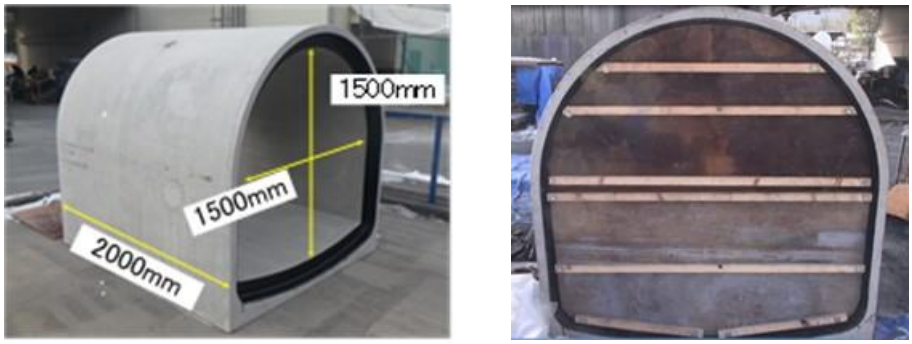
(b) 最大粒径 2.5 mm

図 4.4-27　材料供給量と乾燥密度の関係

4)　小規模模擬坑道を対象とした施工試験（付録６を参照）

吹付け箱試験に比べて施工量の多い小規模模擬坑道を対象とした施工試験を実施することで、長時間の施工によるホース閉塞の有無及び、実施工で想定される坑道中央部、アーチ部、クラウン部における埋め戻し材の乾燥密度を確認した。

小規模模擬坑道を対象とした施工試験では、図 4.4-28 に示すアーチカルバートを用いた。アーチカルバートはコンクリート製で、内部は幅 1,500 mm、高さ 1,500 mm、奥行き 2,000mm である。妻壁は、カルバートにホークカットアンカーを打ち込み、合板（厚さ 15 mm 程度）をボルトで固定した。また、施工試験後の妻部の施工状況を確認できるように、合板は着脱式とした。



（1）全景　　（2）背面（妻壁）

図 4.4-28　小規模模擬坑道（アーチカルバート）の外観

①　試験ケース及び試験手順

小規模模擬坑道を対象とした施工試験の試験ケースは、吹付け箱試験の結果を基に連続した吹付け施工が可能と考えられる条件を設定した。試験ケースを表 4.4-21 に示す。砕砂の最大粒径は 2.5 mm、5 mm、含水比は w_{opt}、w_{opt}－3.0%の計 4 ケースとし、材料供給量は 10～15 kg/10sec とした。

施工試験の試験フローを図 4.4-29 に示す。小規模模擬坑道試験は、吹付け箱試験と概ね同じ手順で行うが、乾燥状態の小規模アーチカルバートの内壁により、埋め戻し材の水分が吸収されることのないように、施工試験の前にカルバートの内壁を霧吹きなどで湿らせた。また、施工前後の座標から施工体積を算出するため、三次元測量を実施した。材料は１袋ごとに含水比の計測、計量を行い、ホッパー内に投入した。施工試験では、最大約 3t の埋め戻し材を吹付けた。施工終了後はリバウンド材の回収及び計量、三次元測量、沈下量計測を実施し、吹付けた埋め戻し材の解体及びブロックサンプリングを実施した。図 4.4-30 に吹付け試験の状況を示す。

表 4.4-21　小規模模擬坑道試験の試験ケース

ベントナイト	模擬掘削土	砕砂の最大粒径 (mm)	ベントナイト混合率 (wt%)	含水比 w(%)	材料供給量 (kg/10sec)	連続施工量 (t)
クニゲル V1	玄武岩	2.5	15	w_{opt}	10.0	3
				w_{opt}-3.0	12.5	
		5		w_{opt}	15.0	
				w_{opt}-3.0	12.5	

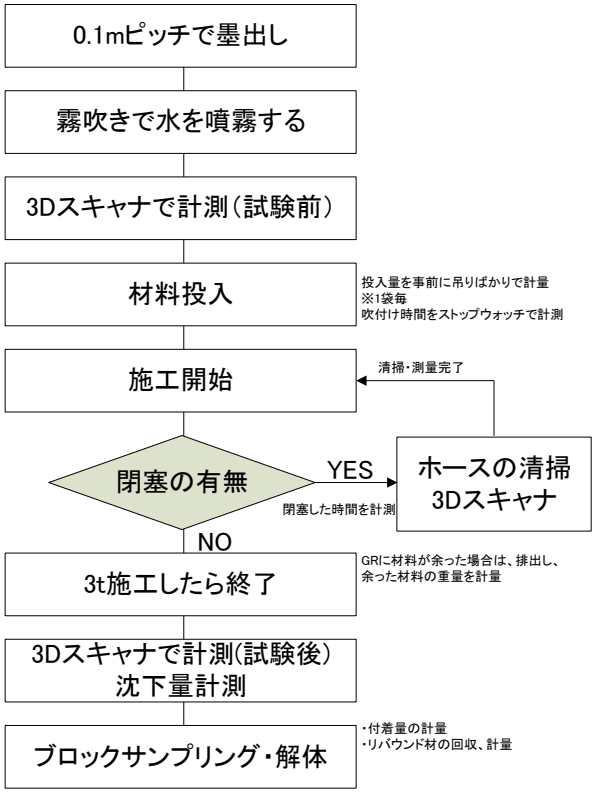


図 4.4-29　小規模模擬坑道試験の試験フロー

(a) 吹付け状況　　(b)吹付け完了後

図 4.4-30　小規模模擬坑道での吹付け試験の状況

小規模模擬坑道試験の品質管理項目を表 4.4-22 に示す。吹付けた埋め戻し材の容積は、三次元スキャナを用いて施工前後の座標から算出した。アーチカルバート内の埋め戻し材の付着量は、

（吹付け機への埋め戻し材の投入量）－（(リバウンド量）＋（ホース内の付着量））

として求めた。かさ密度を算出した。また、施工後の品質確認終了後、アーチカルバート内の埋め戻し材の解体の際に、施工した埋め戻し材をフレコンバッグに入れて、吊りばかりで重量を計測し、吹付け機への埋め戻し材の投入量とリバウンド量及びホース内の付着量の差から求めた付着量と比較した。かさ密度の算出に加え、凸型吹付け部を採取し、シリコーンオイル法による乾燥密度の測定を実施した。また、施工後には、吹付けた材料の自重沈下によるカルバートとの間の隙間が発生する可能性があるため、隙間の長さを計測した。

表 4.4-22　小規模模擬坑道試験での品質管理項目

分類	対象	項目	確認方法
施工前	アーチカルバート	三次元測量	三次元スキャナ
施工時	-	歩掛り計測	ストップウォッチ
		圧縮空気圧	圧力計
	フレッシュ材	含水比計測	炉乾燥法
	付着材	密度計測	シリコーンオイル法
		含水比計測	赤外線水分計
	リバウンド材	リバウンド率計測	電子秤
施工後	埋め戻された アーチカルバート	三次元測量	三次元スキャナ
	付着材	含水比	炉乾燥法
	リバウンド材	粒度	粒度試験
	埋め戻し材	止水性	透水試験
		乾燥密度	パラフィン法

② 埋め戻し材の製造

埋め戻し材の製造は、ジクロスミキサを用いて 1 袋ごとに行い、製造後に屋根付きの倉庫に保管した。吹付け前の埋め戻し材の含水比を表 4.4-23 及び表 4.4-24 に示す。目標含水比は、埋め戻し材の設計上の含水比（設定含水比）に製造後の際の温度、湿度の影響を考慮して、設定含水比+0.2%とした。4 ケースともに、目標含水比との差は±0.5%程度であった。

表 4.4-23　埋め戻し材の含水比（最大粒径 2.5 mm ケース）

ケース名				材料供給量：10 kg/10sec						
最大粒径 2.5mm_w_{opt}-3%				目標含水比：7.4%（設定含水比 7.2%）						
袋番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
含水比	7.49	7.68	7.73	7.40	7.26	7.71	7.40	7.64	7.19	7.32
ケース名				材料供給量：12.5 kg/10sec						
最大粒径 2.5mm_w_{opt}				目標含水比：10.4%（設定含水比 10.2%）						
袋番号	1	2	3	4	5	6	7	8		
含水比	10.75	10.52	10.58	10.42	10.38	10.75	10.36	10.64		

表 4.4-24　埋め戻し材の含水比（最大粒径 5 mm ケース）

ケース名				材料供給量：10 kg/10sec						
最大粒径 5mm_w_{opt}-3%				目標含水比：6.6%（設定含水比 6.4%）						
袋番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
含水比	6.8	6.78	6.92	6.60	6.83	6.60	6.67	6.98	6.95	6.85
ケース名				材料供給量：12.5 kg/10sec						
最大粒径 5mm_w_{opt}				目標含水比：9.6%（設定含水比 9.4%）						
袋番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
含水比	9.98	9.81	9.89	9.77	9.75	9.89	9.65	9.75	9.48	9.86	9.88

③　試験結果

小規模模擬坑道試験の試験結果を表 4.4-25 に示す。表中の連続施工量と連続施工時間は、ホースが閉塞するまでの施工量と施工時間を示している。最大粒径 2.5 mm、5 mm ともに、埋め戻し材の含水比を最適含水比よりも乾燥側に設定することで、最長で 1 時間程度の施工が可能であった。その一方で、吹付け箱試験の結果と同様に、埋め戻し材の含水比が高いほど、付着率、リバウンド率は向上した。長時間の施工及び材料付着率、リバウンド率を考慮すると最大粒径 2.5 mm、5 mm ともに吹付け工法では、埋め戻し材の施工に適した含水比は w_{opt}-3%＜w＜w_{opt} の範囲にあると考えられる。また、施工終了後にサンプリングした試料の一部を使用してシリコーンオイル法によって乾燥密度の算出を行った。サンプリングは、3 箇所から採取してその平均乾燥密度を記載した。最大粒径 5 mm、w_{opt}-3%以外のケースに関しては、吹付け箱試験の結果に比べ低い値を示した。これは、供試体をサンプリングした位置が前面（施工終盤）であり、ホースの閉塞による影響が生じたと考えられる。

実測した付着量、湿潤密度と施工時間から算出した歩掛は、各ケース 0.9～1.5 m^3/hr 程度であった。

表 4.4-25　小規模模擬坑道試験の結果まとめ

（施工数量）

ケース	設定含水比 w（%）	材料供給量 (kg/10sec)	連続施工量 (kg)	連続施工時間 (min)	実測材料供給量 (kg/10sec)
最大粒径 2.5mm Wopt－3%	7.2	10.0	2,811	61.6	7.6
最大粒径 2.5mm Wopt	10.2	12.5	553	12.2	7.6
最大粒径 5mm Wopt－3%	6.4	15.0	3,611	43.8	13.7
最大粒径 5mm Wopt	9.4	12.5	2,874	40	12.0

（分析数量）表中（赤字）は同条件の吹付け箱試験結果

ケース	材料付着率 (%)	リバウンド率 (%)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	歩掛 (m^3/hr)
最大粒径 2.5mm Wopt－3%	71.4 (53.6)	27.4 (33.6)	8.51	1.902 (1.977)	0.94
最大粒径 2.5mm Wopt	79.4 (73.2)	15.6 (16.6)	10.78	1.888 (1.900)	1.45
最大粒径 5mm Wopt－3%	55.6 (52.5)	42.5 (36.5)	8.87	1.913 (1.819)	1.35
最大粒径 5mm Wopt	75.7 (62.5)	22.7 (27.2)	11.25	1.902 (1.959)	1.53

④　埋め戻し材の乾燥密度及びかさ密度

実規模の施工試験を行う上で必要となる長時間に亘る施工性を確認した。長時間施工による乾燥密度のバラつきの評価及び施工位置に起因する品質のバラつきを評価するために、埋め戻したアーチカルバートからブロックサンプリングを行い、パラフィン法で密度試験を実施した。施工後には、図 4.4-31 に示すように、複数の箇所（一般部とクラウン部、アーチ部など）から埋め戻し材をサンプリングし、乾燥密度のバラつきを確認した。長時間施工による乾燥密度の変化を確認するために、奥行き方向の 3 深度（後：施工序盤、中：施工中盤、前：施工終盤）についても各位置にてサンプリングを行った。

図 4.4-32 に試験位置と乾燥密度の関係を示す。一般部と特殊部の乾燥密度は概ね同等である。また、長時間施工による密度の変化も少なく、均一に施工が行えていることが分かる。その一方で、最も閉塞の多かったケース（最大粒径 2.5mm_w_{opt}）は、密度のバラつきを確認した。これは、閉塞に伴う、ホース内部に付着した材料が一気に吐出する現象によるものと考えられる。

吹付け施工では、材料を吹付けた面を滑らかに施工することが難しいため、レベルなどを用いた水準測量などによる高さの把握が難しい。そこで、吹付け施工の出来形計測方法として、施工前後に三次元スキャナによる計測を行い、施工体積を算出することで出来形管理を行った。そして、アーチカルバート内の付着量を（吹付け機への埋め戻し材の投入量）－（(リバウンド量）＋（ホース内の付着量)）として求めて、かさ密度の算出を行った。図 4.4-33 に使用した三次元スキャナと測定結果の一例を示す。

三次元スキャナによって算出した体積を表 4.4-26 に示す。施工を途中で中断した最大粒径 2.5mm_w_{op} のケース以外は 1.0 m^3 程度の施工実績となった。なお、アーチカルバートの断面積が約 1.77 m^2 であり、施工厚さは 0.4～0.6 m 程度であった。

計算付着量（投入量、リバウンド量、ホース内付着量から算出)、含水比、三次元スキャナによって算出した体積から、全体のかさ密度を算出した結果を表 4.4-27 に示す。表中の（　）内の数値はシリコーンオイル法で求めた乾燥密度である。シリコーンオイル法との差は-0.03~0.05 Mg/m^3 であり、両手法で算出した乾燥密度は概ね一致した。誤差要因としては、三次元スキャナの誤差（最大 5 mm の誤差)、シリコーンオイル法の誤差（0.01 Mg/m^3）（原子力環境整備促進・資金管理センター，2007)、リバウンド材の回収誤差が考えられる。

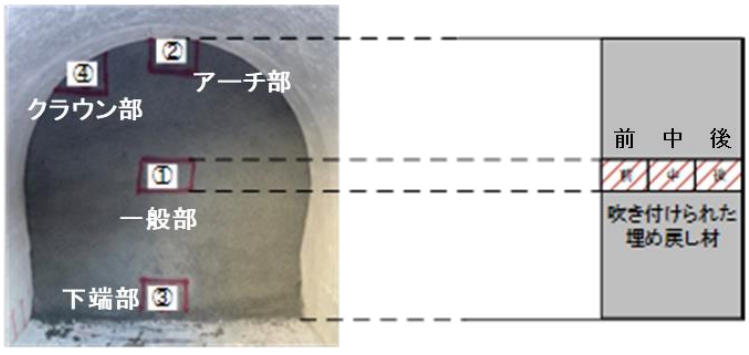
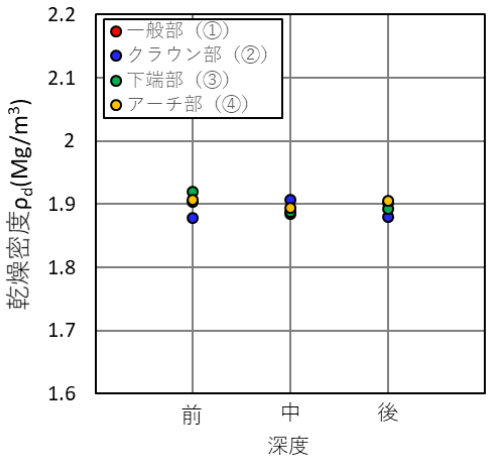
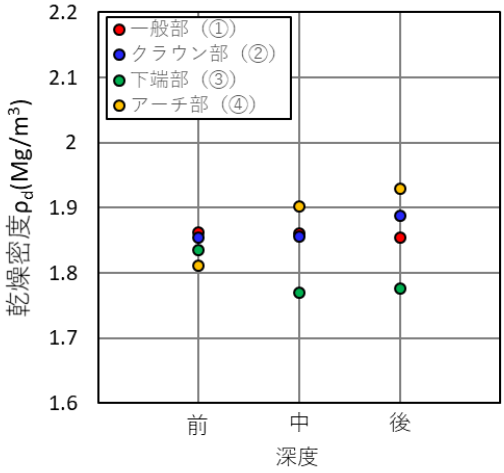


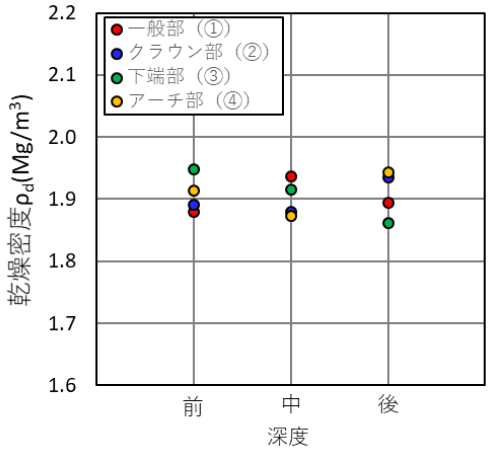
図 4.4-31　乾燥密度試験の採取位置



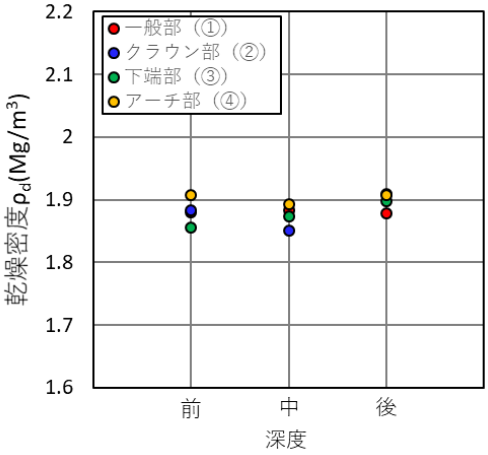
（1）最大粒径 2.5mm_w_{opt}-3%



（2）最大粒径 2.5mm_w_{opt}



（3）最大粒径 5mm_w_{opt}-3%



（4）最大粒径 5mm_w_{opt}

図 4.4-32　試験位置と乾燥密度の関係

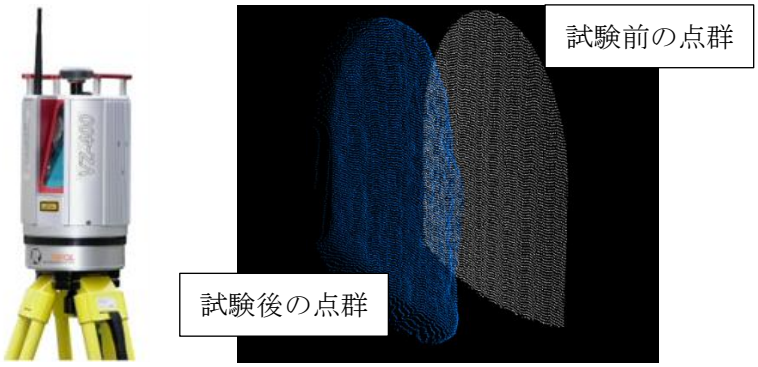


図 4.4-33　三次元スキャナと測定結果の一例

表 4.4-26　3 次元スキャナによる施工体積の測定結果

ケース名	体積 (m^3)	施工厚さ (m)
最大粒径 2.5mm_w_{opt} -3%	0.93	0.53
最大粒径 2.5mm_w_{opt}	0.73	0.41
最大粒径 5mm_w_{opt} -3%	0.97	0.54
最大粒径 5mm_w_{opt}	1.13	0.63

表 4.4-27　各試験ケースにおけるかさ密度の比較

ケース名	計算付着量 (kg)	含水比 (%)	体積 (m^3)	かさ密度* (Mg/m^3)	シリコーン オイル法との差 (Mg/m^3)
最大粒径 2.5mm w_{opt}-3%	1,951	8.51	0.93	1.933 (1.902)	-0.031
最大粒径 2.5mm w_{opt}	1,483	10.78	0.73	1.834 (1.888)	0.054
最大粒径 5mm w_{opt}-3%	2,056	8.87	0.97	1.946 (1.913)	-0.033
最大粒径 5mm w_{opt}	2,430	11.25	1.13	1.933 (1.902)	-0.031

*（　）内の数値はシリコーンオイル法で算出した乾燥密度

⑤　埋め戻し材の沈下量

各ケース施工完了後に吹付けた埋め戻し材の自重沈下によるアーチカルバートとの間の隙間を計測した。最大粒径 5mm、w_{opt} のケースは施工完了から 60 時間（2.5 日）残置してから計測を行った。その他ケースに関しては施工完了から 0.5 時間～1 時間程度で計測を行った。60 時間残置するケースに関しては、外気温による埋め戻し材の凍結、雨水の侵入を防ぐため、内部には緩衝材、外部はブルーシートを用いて養生を行った。沈下量は図 4.4-34 に示すようにクラックスケールを使用して計測を行った。計測位置は、クラウン部を中心に計 7 点計測を行った。

表 4.4-28 に沈下量計測結果を示す。施工完了から 0.5~1 時間程度の時間経過であれば埋め戻し材の沈下は確認されなかった。一方で、60 時間残置することで最大 2 mm 程度の沈下が確認された。また、クラウン部を最大にアーチ部にかけて沈下量は減少していた。

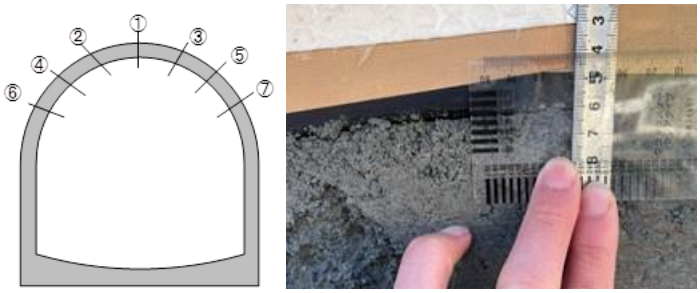


図 4.4-34　沈下量計測の計測位置と計測方法（クラックスケール）

表 4.4-28　60 時間残置後の沈下量計測結果

ケース名	材料供給量（kg/10sec）	沈下量(mm)						
		経過時間（h）	計測位置					
			⑥	④	②	①	③	⑤	⑦
最大粒径 5mmw_{opt}	12.5	60	0.95	1.4	1.5	2.0	1.8	1.6	1.1

⑥　埋め戻し材の透水係数

透水試験は、乾燥密度を測定するためにサンプリングした供試体の一部を用いて実施した。表 4.4-29 に透水試験に供した供試体の諸元を示すが、最大粒径 2.5 mm と 5 mm、ともに Wopt-3%の 2 ケースで、施工中盤の深度「中」で採取された供試体とした。なお表中に示す「供試体の乾燥密度」は、透水試験用に採取した供試体を用いており、前述したブロックサンプリングによるパラフィン法で得られた乾燥密度より、小さめの数値が得られている。透水試験は、変水位透水試験方法（JGS 0311）、低透水性材料の透水試験方法（JGS 0312-2018）に準拠して実施した。最大粒径 2.5 mm、5 mm ともに目標の透水係数 1×10^{-9} m/s 以下を満足した。また、最大粒径 2.5 mm、5 mm ともに、施工位置に起因する透水係数のばらつきは少なかった。

表 4.4-29　透水試験に用いた供試体の諸元

ケース No.	サンプリング No.	深度	供試体の含水比(%)	供試体の乾燥密度(Mg/m³)	透水係数（m/s）
最大粒径 2.5mm w_{opt} -3%	①一般部	中	8.52	1.783	9.30×10^{-12}
	②クラウン部	中	7.46	1.885	6.65×10^{-12}
	③下端部	中	8.43	1.825	7.21×10^{-12}
	④アーチ部	中	8.37	1.875	6.41×10^{-12}
最大粒径5mm w_{opt}	①一般部	後	11.21	1.911	7.06×10^{-12}
		中	11.38	1.810	6.44×10^{-12}
		前	10.85	1.970	5.98×10^{-12}
	②クラウン部	中	11.27	1.833	8.26×10^{-12}
	③下端部	中	11.48	1.788	8.94×10^{-12}
	④アーチ部	中	11.20	1.770	7.66×10^{-12}

⑦　吹付けによる埋め戻し材の施工条件

吹付け箱試験と小規模模擬坑道試験における吹付け材の含水比と付着率、連続施工時間の関係を図 4.4-35 に示す。吹付け箱試験に比べると小規模模擬坑道試験の材料付着率は大きくなった。吹付け箱は 0.5 m×0.5 m×0.3 m のサイズであり、吹付け面積に比べて隅角部の割合が大きいため、吹付けた材料のリバウンドが多くなったと考えられる。今回のアーチカルバートを用いた小規模模擬坑道試験では、処分場の埋め戻し材施工時に近い材料付着率が得られたと考えられる。また、模擬掘削土の最大粒径が 2.5 mm のケースでは、w_{opt}-3%で 60 分程度、最大粒径が 5 mm のケースでは、40 分程度の連続的な施工が可能であることを確認した。ただし、最大粒径が 2.5 mm、w_{opt} のケースでは 12 分程度でホースが閉塞した。これらのことから、吹付け工法により連続的な吹付けが可能な含水比は、w_{opt}-3%～w_{opt} の間にあると考えられる。また、その時の時間当たりの施工量は、1～1.5 m³/h 程度である。

今回の吹付け試験では、乾燥密度が 1.8～1.9 Mg/m^3 で透水係数としては 10^{-12} m/s 程度の高品質の施工が可能であることを確認した。埋め戻し材に要求される透水係数にもよるが、今後の課題としては、吹付け機械の設定を変更して乾燥密度を下げることにより、歩掛などの施工効率を向上させることも考えられる。

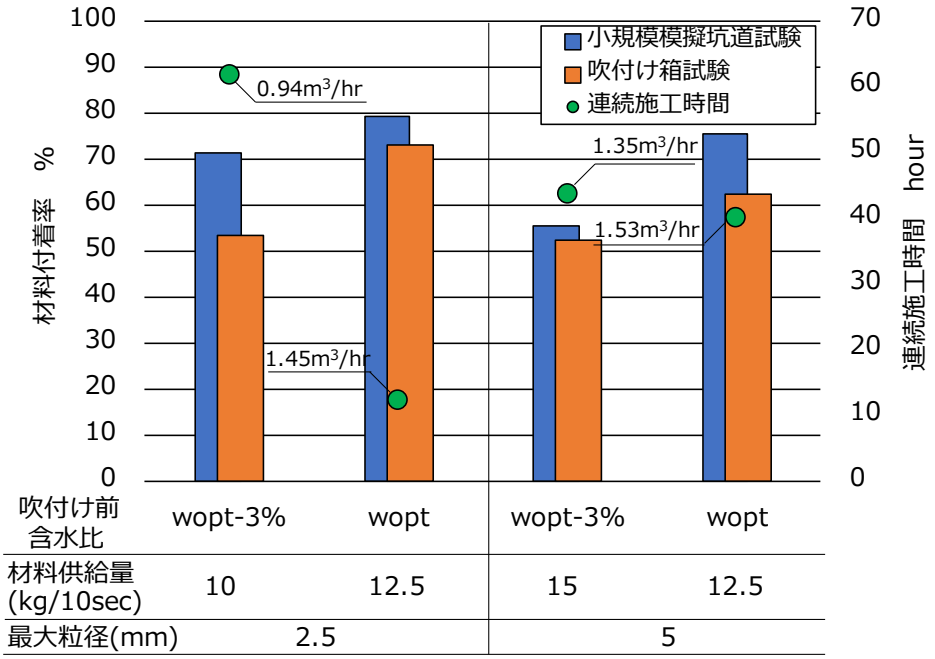


図 4.4-35　埋め戻し材の含水比と施工性の関係

⑶ スクリュー工法

1) 目的

埋め戻し施工技術のうち、スクリュー工法による埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の構築に向けて、その管理項目と管理指標の設定に資するために、使用に適した材料、到達可能な乾燥密度、適切なスクリュー設備及びその運用方法を明らかにするとともに、実坑道の埋め戻しを考慮した隅角部などの充填困難部位への対処方法などを試行することを目的として、試験検討を実施する。

2) 使用材料

①使用材料の基本仕様

過去の類似試験の実績から、スクリュー工法は、原位置における締固めによる大幅な乾燥密度の向上が期待できないことが判明しており、目標乾燥密度の達成と充填困難部位への充填性確保のためには、埋め戻し材の製造時の組成と粒度分布が重要となる。本検討では、目標透水係数を 1×10^{-9} m/s に仮設定し、その達成が可能な混合率として、ベントナイト混合率 15%+模擬掘削土 85%（最大粒径 10～20 mm）を設定した。この設定を基本として、過去の類似検討での知見を加味して、スクリューによる埋め戻しに最適な組成と粒度分布が得られるような材料を選定した。対象とする埋め戻し材の基本仕様を表 4.4-30 に示す。なお、要素試験では砕石に 2005（粒径 20 mm～5 mm）を使用するが、材料試験では比較のために砕石 1005（粒径 10 mm～5 mm）も使用した。

前述の目標透水係数をもとに目標乾燥密度を設定するにあたり、適切な粒度分布を得るために、ベントナイト材料として粉体であるクニゲル V1 と細粒体であるクニゲル GX を併用した。また、スクリューによる良好な搬送性の確保及び埋め戻し材の製造段階でのプロセス管理を容易にする目的で、ここでは混錬時の加水による埋め戻し材の水分調整を行わず、ベントナイトは自然含水比、模擬掘削土は表面乾燥状態の材料を用いた。

表 4.4-30　スクリュー工法の検討に用いる埋め戻し材の基本仕様

<table>
<tr><th>材料</th><th>配合</th><th colspan="2">比率
（質量%）</th><th colspan="2">含水比</th><th>有効粘土密度
(Mg/m³)</th></tr>
<tr><td>ベントナイト</td><td>クニゲル V1+
クニゲル GX</td><td colspan="2">15</td><td colspan="2">自然含水比
(約 10%)</td><td rowspan="3">約 2.8%</td><td rowspan="3">0.28</td></tr>
<tr><td rowspan="2">模擬掘削土</td><td>砕石※</td><td>45</td><td rowspan="2">85</td><td rowspan="2">表面
乾燥
状態</td><td>約 1%</td></tr>
<tr><td>砕砂</td><td>40</td><td>約 2%</td></tr>
</table>

※流紋岩質凝灰岩（赤穂産）

②材料の品質管理試験及び配合の決定

(a) 土粒子密度・含水比・粒度分布

土粒子密度試験（JIS A 1202）及び含水比試験（JIS A 1203）の結果を表 4.4-31、材料の粒度試験（砕石最大粒径 20 mm のケース、JIS A 1204）の結果を図 4.4-36 に示す。図 4.4-36 の曲線のうち、Fuller 曲線は粒子の締固めをしない場合で最大の密度が得られるとされている粒度分布を表したものである。図中の Fuller:15_25 は、20 mm を間に挟む、最大粒径 15 mm と 25 mm の Fuller 曲線を示している。Fuller 曲線は、埋め戻し材などのペレット充填を行なう海外実施主

体や過年度の国内プロジェクトでも指標として採用されている（NAGRA, 2019、原子力機構・原環センター，2020）。この図を基に、砕石、砕砂及びクニゲル GX と V1 との混合率を設定した。

表 4.4-31　各材料の土粒子密度と含水比

	ベントナイト		模擬掘削土		
	V1	GX	砕石 2005	砕石 1005	砕砂
土粒子密度(Mg/m³)	2.738	2.784	2.751		2.715
含水比(%)	9.9	10.2	0.8	1.1	2.3

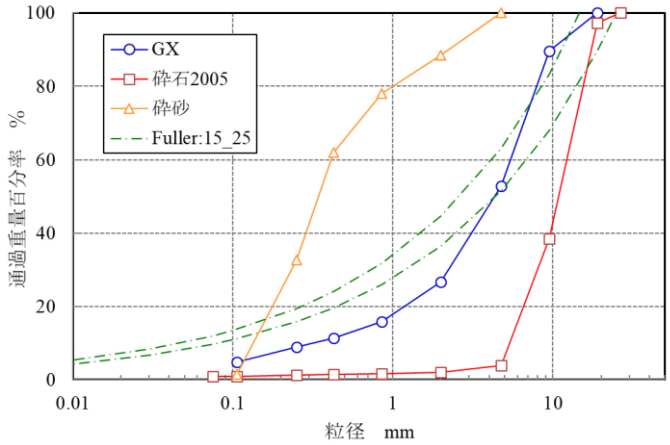


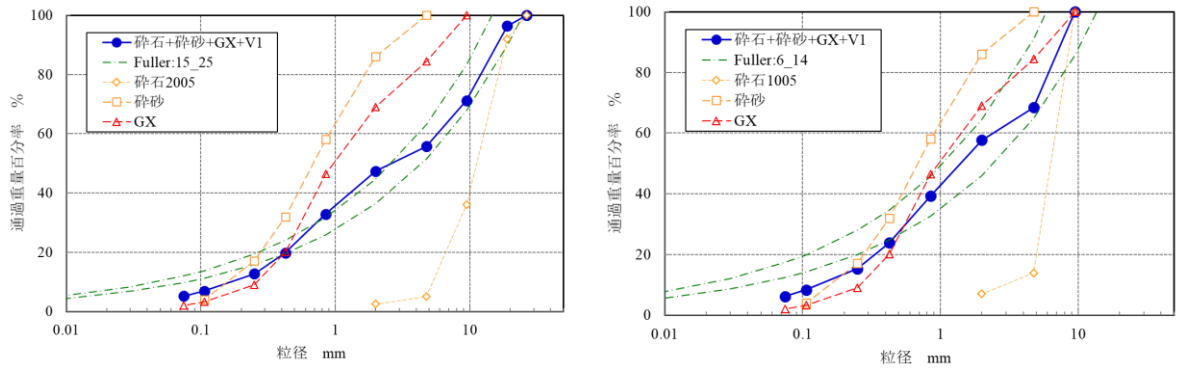
図 4.4-36　各材料の粒度試験結果

(b)　配合の決定

埋め戻し材の配合は、ベントナイトはクニゲル V1+GX で質量比 15%とし、砕石の最大粒径に応じて配合比を変えて前出の Fuller 曲線に適合する分布となるように、表 4.4-32 に示す割合で各材料を配合した。埋め戻し材の粒度分布を図 4.4-37（混合土：青線、Fuller 曲線：緑破線）に示す。

表 4.4-32　ベントナイト混合土の配合率

	ベントナイト（質量%）		模擬混合土（質量%）		
	V1	GX	砕石 2005	砕石 1005	砕砂
砕石 2005 使用	5	10	45	－	40
砕石 1005 使用	7	8	－	35	50



(a) 砕石 2005　　(b) 砕石 1005

図 4.4-37　混合土（青線）の粒度分布

(c) 締固め試験

模擬掘削土の最大粒径 20 mm 及び 10 mm を用いた埋め戻し材の締固め試験（JIS A 1210; A 法）の結果を表 4.4-33 に示す。最適含水比は、自然含水比 2.8%と比較して 7%程度高い値となっている。本工法は、目標密度確保のための原位置での締固め効果は小さいことが想定されるので、密度の向上を期待した水分調整は行わず、自然含水比の状態での試験を行う。なお、実施工において模擬掘削土材料の表面水量が多く、搬送性の低下が懸念される場合には、天日干しなどによる乾燥処理を行うことも想定される。

表 4.4-33　埋め戻し材の締固め試験結果

	最大乾燥密度（Mg/m^3）	最適含水比（%）
砕石 2005 使用	1.928	9.9
砕石 1005 使用	1.927	10.1

3)　目標乾燥密度の設定

①　透水試験

埋め戻しの施工管理においては、透水性との関連が強いと考えられる乾燥密度により品質管理を行うものとし、本検討で目標とする透水係数 1×10^{-9} m/s 以下に相当する目標乾燥密度を設定する。過年度の実績（原子力機構・原環センター，2020）から、ベントナイト混合率 15%、乾燥密度 1.8～1.9 Mg/m^3 程度の混合土では、目標より低い透水係数 1×10^{-11} m/s 程度の値が得られていることから、ここではそれよりも低い乾燥密度の領域も含めた乾燥密度と透水係数の関係をもとに、目標とする乾燥密度を設定する。

模擬掘削土の最大粒径 20 mm 及び 10 mm を用いた埋め戻し材のそれぞれについて、最大乾燥密度及びその 90%、80%の密度に調整した試験体による透水試験の結果を表 4.4-34 に示す。試験体は、試験に先立って自然水頭での通水（48 日間）及び真空脱気・飽和（3 日間）を経て飽和したものを用いた。試験の結果、すべての密度で目標とする透水係数 1×10^{-9} m/s 以下が得られ、砕石の最大粒径 10 mm の 1005 の方が、20 mm の 2005 より透水係数が若干小さくなった。

表 4.4-34　透水試験結果

試験乾燥密度の最大乾燥密度との比率(%)	砕石 2005 使用			砕石 1005 使用		
	乾燥密度 (Mg/m³)	有効粘土密度(Mg/m³)	透水係数 (m/s)	乾燥密度 (Mg/m³)	有効粘土密度(Mg/m³)	透水係数 (m/s)
100	1.928	0.722	7.38×10^{-11}	1.927	0.723	6.86×10^{-11}
90	1.735	0.565	1.40×10^{-10}	1.734	0.566	8.34×10^{-11}
80	1.542	0.445	2.14×10^{-10}	1.542	0.445	1.98×10^{-10}

② 目標乾燥密度

ベントナイト混合土の透水性については、混合土の有効粘土密度を指標として整理されることが多い。今回の透水試験における、乾燥密度、有効粘土密度及び透水係数の値を表 4.4-34 に、有効粘土密度と透水係数の関係を整理した図（核燃料サイクル開発機構，2005）に本試験の結果を追記したものを図 4.4-38 に示す。

この結果、砕石の最大粒径 10 mm、20 mm とも最大乾燥密度の 80%の乾燥密度 1.542 Mg/m³ で目標透水係数 1×10^{-9} m/s を下回り、おおよそ 2×10^{-10} m/s 程度の透水係数が得られることが判明した。今回の配合による透水試験の試験体作製のためには、80%程度の締固め度が下限値であり、これよりも低い密度での透水試験は困難である。そのため本検討では、根拠となる透水係数が得られている最小密度である 1.542 Mg/m³ 以上を目標乾燥密度に設定する。

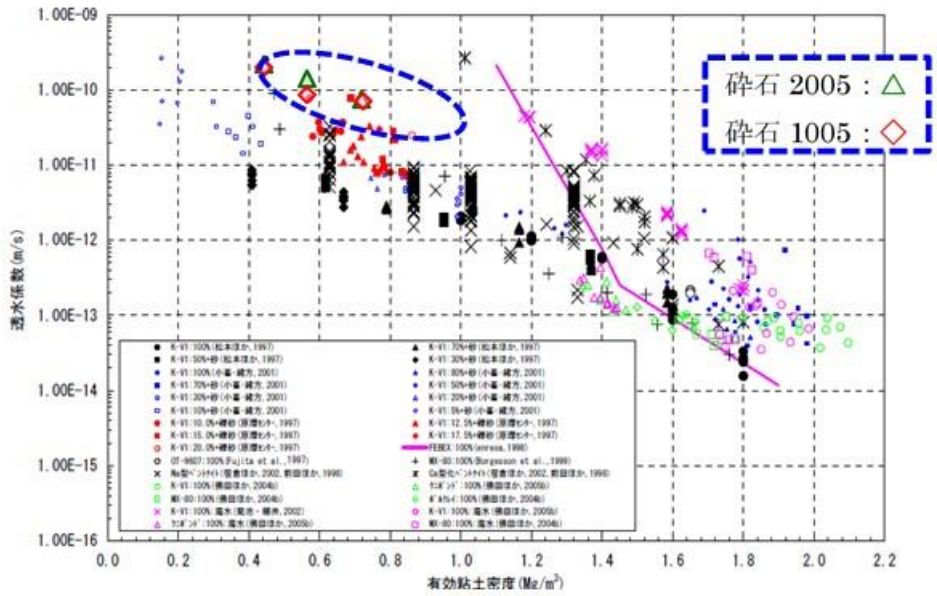


図 4.4-38　有効粘土密度と透水係数の関係

（核燃料サイクル開発機構，2005 に今年度実施分を追記）

4)　試験方法

①　試験装置の準備

上記で設定した混合土の搬送及び充填が適切に実施できる試験装置を設計・整備した。昨年度に実施したスクリューフィーダーの設計例（原子力機構・原環センター，2020）を参考に、スクリューの口径はφ20 mm の砕石への対応が可能なφ300 mm 程度とし、回転数は 5～6 rpm（rpm:

1 分あたりの回転数）を基本に幅を持った調整が可能な装置とした。試験に用いるスクリューの長さは、材料の投入部及び排出部が搬送に影響を及ぼさないと考えられる長さ 3 m 程度以上とする条件と昨年度に実施したスクリュー装置の概念設計において、坑道上半をスクリューで埋め戻すことを想定した上段のスクリュー長 4.75 m の両条件から、長い方を採用して 4.75 m とした。スクリューフィーダー本体の外観を図 4.4-39 に示す。

今年度は、スクリュー単体による搬送性及び充填性を評価するための要素試験を実施する。搬送性は事前に配合した混合土を円滑に材料分離が少なく搬送できること、充填性は達成可能な乾燥密度と充填後の材料分離の割合などにより評価する。そのために、試験装置にはスクリュー以外に、埋め戻し材を投入してスクリューへ供給するためのホッパー、充填を行なう土層、埋め戻し材を循環再利用するための運搬システムなどを用いる。試験装置本体と土層の構造を図 4.4-40 に示す。なお、レイアウトを決定するために、埋め戻し材の斜面を形成する自然崩壊角を 30 度と仮定した。

図 4.4-39　スクリューフィーダー本体及びホッパー

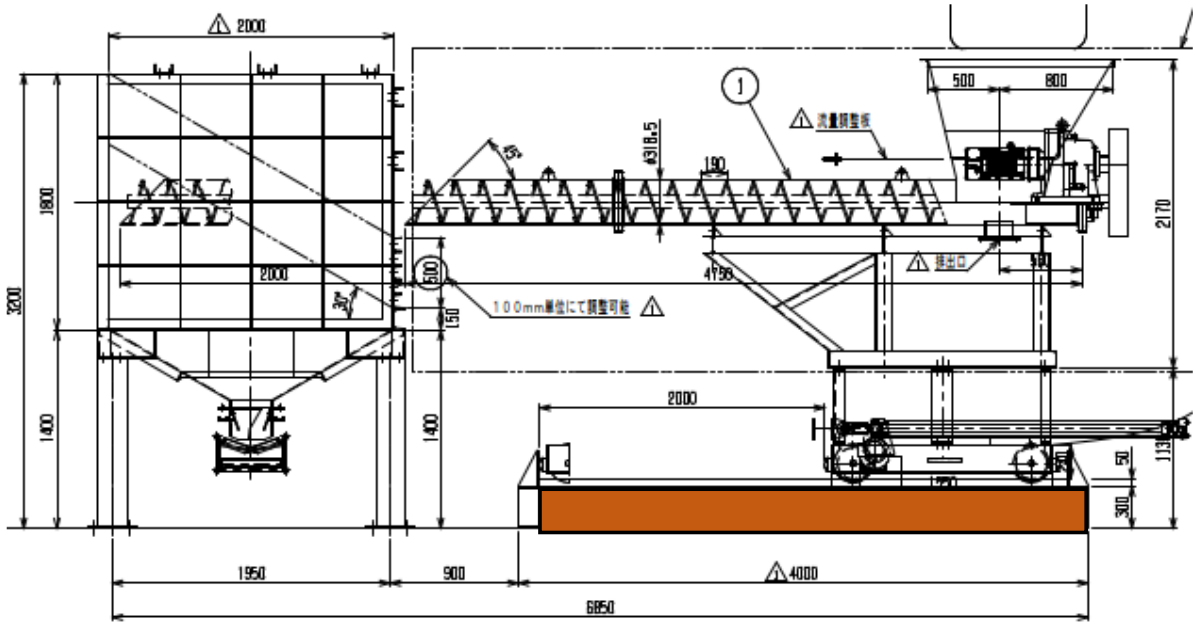


図 4.4-40　試験装置本体・土層の構造

② 埋め戻し材の製造

埋め戻し材は、材料試験を実施したもののうち、砕石 2005（最大粒径 20 mm）のケースとする。試験に用いる埋め戻し材の製造は、汎用のモルタルミキサ（スターミキサー3.5 型）を用いて、 表 4.4-35 に示す配合比率で準備した材料により、200 kg（1 回の混錬は乾燥質量で 100 kg、混錬時間は 30 秒間）の試験用埋め戻し材を製造した。ミキサによる混錬状況及び混錬後の埋め戻し材を図 4.4-41 に示す。

表 4.4-35 最終製造配合表（砕石 2005 最大粒径 20mm）

	配合	乾燥質量	含水比	湿潤質量
	%	kg	%	kg
砕石 2005	45.0	45.0	0.7	45.3
砕砂	40.0	40.0	1.2	40.5
クニゲル GX	10.0	10.0	11.9	11.2
クニゲル V1	5.0	5.0	7.9	5.4
計		100.0	2.4	102.4

図 4.4-41 ミキサによる混錬状況及び混錬後の埋め戻し材（砕石 2005 使用のケース）

③ 試験条件・試験ケース

要素試験では、砕石 2005 を使用した混合土をスクリュー先端から自由落下させる試験（以下、自由落下ケース）及びスクリュー先端を埋め戻し材に挿入した試験（以下、先端密着ケース）を実施する。

自由落下の落下高さは、昨年度のスクリュー装置の概念設計例（原子力機構・原環センター, 2020）から最下段スクリューの先端と坑道床面の距離及びスクリュー先端位置におけるスクリュー相互の高低差の最大の値を参照して 1,500 mm とし、落下高さが乾燥密度などの充填性に及ぼす影響を確認するために 750 mm も実施する。

スクリューの回転数は、最大 30 rpm で設定可能とした。昨年度に検討したスクリュー装置の概念設計において、主要坑道断面全体を 12 本のスクリューを用いて埋め戻すことを前提に設定した 1 本あたりの搬送量 4.33 m^3/h を満足するスクリューの回転数 7.58 rpm（制御周波数 60 Hz、

本試験装置では 1 Hz= 0.1263 rpm で換算可能）を基本として、5.05 rpm 及び 10.10 rpm（周波数 40 Hz 及び 80 Hz に相当）の 3 ケースで要素試験を実施する。

先端密着ケースでは、スクリューによる押し込み力の反力でスクリュー装置全体が押し返されるが、その際の後退速度を調整することで、スクリュー先端の埋め戻し材への挿入量を一定に保つことが可能である。この挿入量を多くすることにより静的な締固め効果による充填時の密度増加が期待できると考えられるが、その締固め効果については定量的な評価をされた例は見られない。ただし、その効果の及ぶ範囲はスクリュー径程度に限定されると予想されることから、本試験ではスクリュー先端位置での大粒径材料の滑落による材料分離が防止できると考えられる挿入量（スクリュー管上面で 50 mm 程度、下面で 350 mm 程度）を維持する後退速度を設定した。要素試験ケースを表 4.4-36 に、自由落下ケース及び先端密着ケースの試験の実施状況を図 4.4-42 に示す。

表 4.4-36　スクリュー要素試験ケース

試験ケース		制御周波数(Hz)	回転数(rpm)	落下高さ(mm)	後退速度(m/h)
自由落下	1	40	5.05	750	―
	2			1,500	
	3	60	7.58	750	
	4			1,500	
	5	80	10.10	750	
	6			1,500	
先端密着	7	40	5.05	―	1.2
	8	60	7.58		1.8
	9	80	10.10		2.4

(a) 自由落下ケース

(b) 先端密着ケース

図 4.4-42　試験中のスクリュー先端付近の状況

④ 測定項目

乾燥密度等の目標達成及び製造・施工プロセス管理項目・指標の評価に資するため、表 4.4-37 に示す項目を測定した。

表 4.4-37　要素試験における測定項目

測定項目	自由落下ケース	先端密着ケース
単位時間当たりの充填量	ケース 1 は 1 分、ケース 2、3 は 30 秒ごとの移送質量を測定	10 分毎に土層内の目盛りを用いて、埋め戻し材の土層内の表面形状を測定し、体積増分を計算
充填乾燥密度（かさ密度）	毎分前半 30 秒分の落下試料をモールドに受けて質量を測定、それをモールド体積で除した湿潤密度から含水比を用いて乾燥密度を計算	充填完了後、埋め戻し材の土層内の表面形状及び全充填埋め戻し材の重量を測定、湿潤密度から含水比を用いて乾燥密度を計算（体積からフィーダー管分は差し引く）
試験前後の含水比及び粒度分布	試験前は材料ストックから、試験後はモールドから試料を採取し試験に供する	試験前は材料ストックから、試験後は土層から試料を採取し試験に供する

⑤ 試験結果

(a) 試験前後の含水比

今回の要素試験では、同一試料を再利用して充填試験を実施した。試験室内の湿度の影響により埋め戻し材の含水比が変化すると、各試験ケースの乾燥密度などを直接的に比較することが難しくなるため、試験前後で埋め戻し材の含水比を測定した。自由落下ケース及び先端密着ケースにおける、充填試験前後の埋め戻し材の含水比をそれぞれ表 4.4-38 及び表 4.4-39 に示す。各試験ケースにおける試験前後の含水比の差は、最大で 0.120%であった。また、全試験ケースにおける含水比の最大値は 2.251%、最小値は 2.003%、その差は 0.248%であり、含水比の変化が充填後の乾燥密度などに及ぼす影響は無視できるほど小さいと考えられる。

表 4.4-38　試験前後の含水比（自由落下ケース）

試験ケース			試験前	試験後
	回転数 (rpm)	落下高さ (mm)	平均含水比 (%)	平均含水比 (%)
1	5.05	750	2.068	2.003
2		1,500	2.131	2.251
3	7.58	750	2.126	2.098
4		1,500	2.073	2.189
5	10.10	750	2.106	2.021
6		1,500	2.124	2.114

表 4.4-39　試験前後の含水比（先端密着ケース）

試験ケース		試験前平均含水比 (%)	試験後平均含水比 (%)
	回転数 (rpm)		
7	5.05	2.224	2.250
8	7.58	2.250	2.038
9	10.10	2.038	2.374

(b) 単位時間当たりの充填量及び充填乾燥密度

自由落下ケース及び先端密着ケースにおける、単位時間当たりの充填量及び充填乾燥密度をそれぞれ表 4.4-40 及び表 4.4-41 に示す。自由落下ケースでは、試験開始から充填量が安定した 3 分後から表 4.4-37 に示した時間間隔で測定を行い、所定量の充填が完了するまでの測定値を平均した。先端密着ケースでは、図 4.4-43（ケース 8、その他のケースは付録 6 に示した）に示すように、土層奥から 5 断面の断面形状を測定して、前後の断面を両端面とした角錐台として容積を近似計算し、累計により土層内の総体積を計算してスクリュー管の体積を減ずることにより、充填体積を求めた。

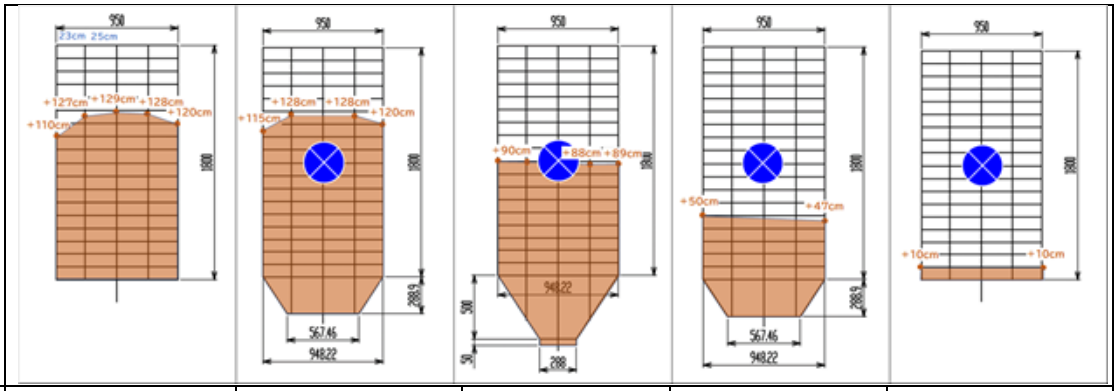
この結果、単位時間当たりの充填量は、自由落下ケース、先端密着ケースとも回転数にほぼ比例する結果となった。自由落下ケースの同一回転数で比較すると、落下高さが 750 mm に比べて 1,500 mm の方が乾燥密度は大きかった。また、自由落下ケース及び先端密着ケースとも、回転数（単位時間当たりの充填量）が乾燥密度に及ぼす影響は小さかった。

表 4.4-40　単位時間当たりの充填量及び乾燥密度（自由落下ケース）

試験ケース			1 時間当たり充填質量 (Mg/hr)	湿潤密度 (Mg/m^3)	試験後の含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)
	回転数 (rpm)	落下高さ (mm)				
1	5.05	750	3.675	1.699	2.003	1.663
2		1,500	3.585	1.836	2.251	1.795
3	7.58	750	5.553	1.720	2.098	1.684
4		1,500	5.507	1.811	2.189	1.772
5	10.10	750	7.388	1.743	2.021	1.708
6		1,500	7.345	1.824	2.114	1.786

表 4.4-41　単位時間当たりの充填量及び乾燥密度（先端密着ケース）

試験ケース		充填完了時間 (分)	充填体積 (m^3)	充填質量 (Mg)	1 時間当り充填質量 (Mg/hr)	湿潤密度 (Mg/m^3)	試験後の含水比(%)	乾燥密度 (Mg/m^3)
	回転数 (rpm)							
7	5.05	50	1.699	2.822	3.386	1.690	2.250	1.653
8	7.58	37	1.879	3.225	5.230	1.716	2.038	1.682
9	10.10	27.5	1.848	3.205	6.993	1.734	2.374	1.694



断面 No.	①	②	③	④	⑤
断面積(m²)	1.199	1.344	1.139	0.685	0.096

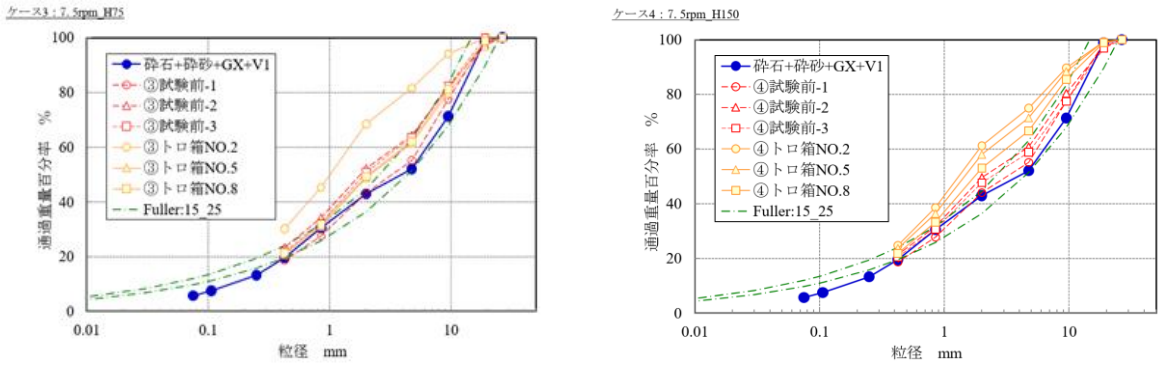
図 4.4-43　土層の断面積測定例（ケース 8　充填完了時（試験時間 37 分）

(c)　試験前後の粒度分布

自由落下ケースにおける、充填試験前後の粒度分布の測定結果の例として、ケース 3 とケース 4 を図 4.4-44 に示す（赤線が試験前、黄線が試験後。その他のケースの試験結果は付録 6 に示した）。また、先端密着ケースについても同様に、ケース 7 及びケース 8 における充填試験前の粒度分布及び試験後は充填部位ごとに試料を採取して測定した結果を図 4.4-45 に示す（赤線が試験前、黄線が試験後）。充填部位ごとの試料の採取位置の例としてケース 7 における No.1～No.6 の各測定位置と 2 mm ふるいを通過した土粒子の重量%を図 4.4-46 に示す。なお、その他のケースは付録 6 に示した。

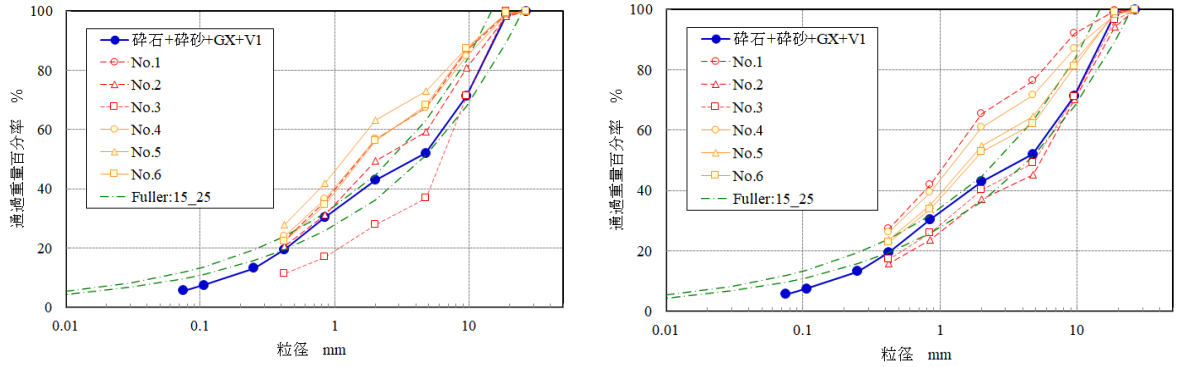
自由落下ケースの粒度分布については、試験前に比較して全般に試験後の曲線が左に移行しており、わずかではあるが粒度が細かくなった。先端密着ケースの粒度分布では、試験後の測定部位ごとに特徴があり、充填した際に形成される斜面の下方ではやや粒度分布が粗く、斜面の上方では逆に粒度が細くなる傾向がみられた。

先にも述べたように、本試験では試験材料を再利用しているため、試験の繰り返しによって粗粒分（特にクニゲル GX）が摩耗して細粒化する現象が発生したと推定される。また、先端密着ケースでは、充填試験中に斜面の表面に存在する粒径の大きい礫が斜面を滑落することが確認されており、その結果として斜面下方で粗粒分の割合が増加したと考えられる。



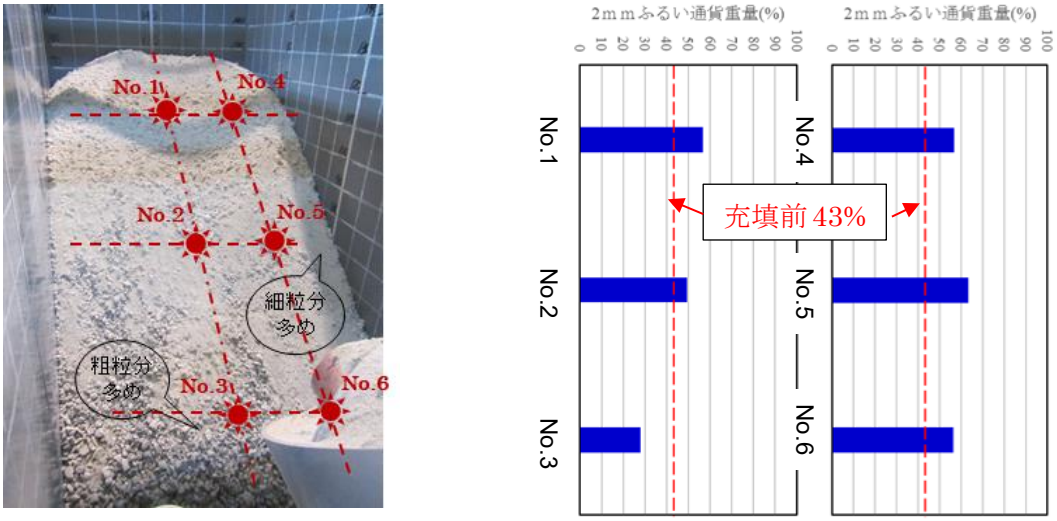
ケース 3（落下 750 mm）　　ケース 4（落下 1,500 mm）

図 4.4-44　充填試験前後の粒度分布（自由落下ケース 3 及びケース 4）



ケース 7　　ケース 8

図 4.4-45　位置毎の粒度分布の比較（先端密着ケース 7 及びケース 8）



先端密着ケース試料採取位置　　採取位置における 2 mm 以下の細粒分の重量比（%）

図 4.4-46　ケース 7 における充填後の試料採取位置及び 2 mm 以下ふるい通過重量比（%）

5)　試験によるプロセス管理指標の評価

今年度に実施した要素試験の結果を基に、スクリュー工法の製造・施工プロセス管理における管理指標を評価する。本工法のプロセス管理は、前出の表 4.3-7～表 4.3-9、プロセス管理における要求事項と課題は表 4.3-21 に示した通りである。

①　埋め戻し材の乾燥密度

埋め戻し材の乾燥密度は、地層処分場の坑道埋め戻し時の主要な管理対象の一つである。そのため、プロセス管理において乾燥密度は、施工技術の開発段階における室内試験、適用性確認のための試験で、施工技術としての成立性を判断するための指標となる。また、埋め戻し材には低透水性が要求されることから、とくに研究開発段階においては、乾燥密度と透水性の関係を把握しておくことが重要となる。

◆ 目標乾燥密度の達成と評価指標の設定

すべての試験ケースにおいて降水系の環境（材料特性試験ではイオン交換水で対応）を想定して設定した目標乾燥密度の1.542 Mg/m³以上を達成した。ただし、本目標乾燥密度は、

最適含水比に調整して低い締め固めエネルギーで作製した試験体を用いた事前の透水試験により得られた透水係数に基づいて設定されたものであるため、要素試験後の埋め戻し材とは条件が異なる（自然含水比の試料をそのまま透水試験に供することで、試験開始後のベントナイトの吸水による膨潤及びいわゆる「水締め」の発生の可能性がある）。この含水比の違いが透水性に及ぼす影響を確認するために、充填試験後の自然含水比状態である埋め戻し材から採取した試験体による透水試験をおこなうことが望ましい。

- 埋め戻し材の混錬（配合）管理

  要素試験の結果から、本工法ではスクリュー装置の運転パラメータ（スクリューの回転数や埋め戻し材の落下高さなど）が充填後の乾燥密度に及ぼす影響は小さく、埋め戻し材の配合が充填後の乾燥密度に大きく影響すると考えられる。現段階において、本工法は埋め戻し材の製造時に水分調整を実施しない施工法としており、混錬管理は配合管理と空練りにより完結する。管理手法としては簡易であり、要素試験においても容易に試行することができた。本工法では加水調整が無いことから、練り混ぜ時間は概ね材料の均質性を確保できる最低時間を順守すればよく、練り混ぜ時間が長すぎる場合はクニゲルGXの粉砕などにより適切な粒度分布でなくなる可能性がある。本試験では一般的なモルタルミキサー混錬と同じ約30秒間の練り混ぜで材料が均質となっていることを確認した。

- 試験パラメータと埋め戻し材の乾燥密度の関係

  試験パラメータのうち、埋め戻し材の乾燥密度に影響すると考えられるものは、充填方法（自由落下ケースあるいは先端密着ケース）、充填速度（スクリュー回転数）及び先端の挿入長である。今年度は、挿入長は50 mmで固定とし、充填方法と充填速度について比較試験を実施した。

  充填方法については、表 4.4-40に示すように自由落下ケースの方が先端密着ケースより乾燥密度が大きくなった。また、自由落下ケースでは、落下高さ750 mmよりも1,500 mmの乾燥密度が大きかった。これは、落下のエネルギーが密度を大きくすることに貢献したと考えられる。したがって、均一な乾燥密度を確保するためのプロセス管理方法としては、自由落下するような施工形態ではなく、先端密着のような施工形態で管理することが適切と考えられる。

  充填速度（スクリュー回転数）については、表 4.4-40及び表 4.4-41に示したように、有意な差は見られなかった。今後、埋め戻しの工程短縮などを目的に、速い充填速度が要求されることも考えられるため、回転数が埋め戻し材の密度に及ぼす影響が大きくないという傾向は、埋め戻し工程管理の調整が施工品質に大きく影響しないという管理上の利点となる。

- バルクでの密度管理

  本試験では、図 4.4-43に示したように、先端密着ケースにおいて土層形状と埋め戻し上面の高さから概算した埋め戻し材の体積と、充填した埋め戻し材の質量から、プロセス管理で求められるバルクでの密度評価を試行した。今回採用した方法は、レーザーで詳細な表面形状を測定する方法と比較すると精度は低いが、手法としては単純であり、実坑道においても、充填面位置の画像判定とスケール付ベルトコンベアなどによる供給材重量の連続測定などにより充填途中の密度を管理する方法への展開も考えられる。

② 未充填空隙

- 隅角部空隙の残存

  埋め戻し材の未充填空隙は、プロセス管理における開発段階の施工確認試験及び施工段階の充填後の管理対象である。実施工時の上段スクリューによる充填状況を想定した先端密着ケースでは、自由落下ケースの落下高さ750 mmと同程度の乾燥密度が得られていることから、土

層中に大きな空隙が残存している状況にはないと推定される。ただし、試験土層と実坑道とは隅角部などの形状が異なり、土層よりも未充填が生じやすくなる可能性があることから、坑道を模擬した土層を用いた試験により空隙の充填状況を確認することが望ましい。

- 天端の沈下

本工法では、含水比の低い埋め戻し材を使用することから、前述のように再冠水時の地下水の浸潤による、いわゆる「水締め」による沈下が生じる可能性があり、同時にベントナイトの膨潤が生じる。坑道天端部の沈下による空隙形成の抑制という観点からは、両者は相反する効果がある。スクリュー工法による施工後の乾燥密度を考慮した埋め戻し材の圧密試験や膨潤試験により空隙の閉塞状況を把握し、必要に応じて空隙形成への対策をプロセス管理に導入することが必要となる。

③　均質性

充填後の埋め戻しの均質性は、プロセス管理において開発段階の混錬試験、施工確認試験における管理指標設定及び施工段階のフィーダーへの供給時の管理対象である。スクリュー工法では、ほぼ自然状態の平均含水比 2～3%程度で施工することを計画しており、含水比が低いために施工中の振動などにより粒径の大きい材料が沈下するなど、材料分離が比較的発生しやすくなる可能性がある。

要素試験の結果、図 4.4-46 に示したように、粗粒分が斜面を滑落して下部に蓄積する傾向が観察された。複数本のスクリューで充填する埋め戻し断面全体を考えた場合、坑道底盤付近に粗粒分が蓄積しないように管理する必要があると考えられる。今後の試験により、坑道下部に蓄積する粗粒分が地下水の優先的な流路を形成しないかどうかを確認する必要があるとともに、この粗粒分の蓄積を予防する方策を検討して、品質管理に反映する必要がある。

④　充填速度（単位時間当たりの充填量）

埋め戻し材の充填速度は、プロセス管理において開発段階の工程計画に影響する施工確認試験、施工段階のスクリューの回転数による管理を行う。坑道の断面形状に応じて配置される各スクリューの回転数は、必要に応じて独立して制御することで、断面の各位置の充填速度を管理することが可能である。

研究開発段階における要素試験装置の設計では、現時点で想定されている坑道の埋め戻し工程から目標充填速度を仮設定し、口径（スクリュー外径)、スクリュー管内の埋め戻し材の充填率（管の断面の何%が材料で埋まるかを表し、設計では最大値 90%を仮定）及びスクリューの回転数を設定した。ただし、充填率はスクリューの構造だけでなく、埋め戻し材の粒度分布及びスクリューの回転数などの影響を受けるため、要素試験により管理値の目安を得る必要がある。

単位時間当たりの充填量の測定結果から、スクリュー管内の充填率は約 60%となり、今回の試験範囲（5.05～10.10 rpm）ではスクリューの回転数にかかわらず安定していた。したがって、充填速度の管理についてもこの数値を基に、回転数のみで制御できることが判明した。ただし、工期短縮のために回転の増加が要求される場合及びスクリュー回転抵抗が高まった場合などは、充填率が大きくなることが予想されるので、試験により回転数と充填量の関係を決定する必要がある。その場合でも、今回の要素試験のような簡易・短時間の試験で十分な精度のデータが取得できることから、管理値としての回転数－充填速度の関係を定量化したデータの整備は容易と考えられる。

(4) ブロック工法

1) 目的

ブロック工法は地下原位置での施工が前提となる他の工法とは異なり、事前に地上施設で製造した埋め戻し材ブロックを使用するため品質管理が容易であることが利点として挙げられる。本検討では、ブロック工法による製造・施工プロセス管理手法（案）の構築、及び材料製造と施工段階における管理項目（評価指標を含む）の設定など、柔軟かつ迅速な埋め戻し材の施工技術の選択を可能にするための基盤情報を整備することを目的として、今年度は埋め戻し材ブロックの製造、及び埋め戻し材ブロックの製造プロセス管理手法の構築に資するデータを取得するために静的締固め試験を実施した。

2) 使用材料

本検討で使用した埋め戻し材の材料構成を表 4.4-42 に示す。ベントナイトは、Na 型ベントナイト（クニゲル V1）を用いた。掘削土は処分場を設置する母岩固有のものであるが、現段階では特定できないため模擬掘削土として玄武岩を用いた。ベントナイトと玄武岩の初期含水比と土粒子密度を表 4.4-43 に、ベントナイトのメチレンブルー吸着量試験の結果を表 4.4-44 に示す。メチレンブルー吸着量 140 mmol/100g の場合にモンモリロナイト含有率を 100 %とした場合（動力炉･核燃料開発事業団, 1993）、表 4.4-44 に示したメチレンブルー吸着量 82 mmol/100g から、モンモリロナイト含有率を推定すると 59%となった。この値は、既往研究における報告値（例えば、小峯, 2005）と同程度であった。

掘削土は施工性の向上を目的に破砕し粒度調整することが想定される。そのため、模擬掘削土にはコンクリート用骨材として使用されている玄武岩の砕石と砕砂（図 4.4-47）を準備し、これらの乾燥質量比（砕石（Gravel）、砕砂（Sand）の頭文字を取って、GS [砕石：砕砂]とする）を管理して配合することで粒度調整を行った。具体的には、GS[0：10]、[2：8]、[4：6]、[6：8]とした4種類の模擬掘削土を準備した。粒度調整した模擬掘削土の粒度試験結果を表 4.4-45と図 4.4-48に示す。

表 4.4-42　試験に使用した埋め戻し材の材料構成

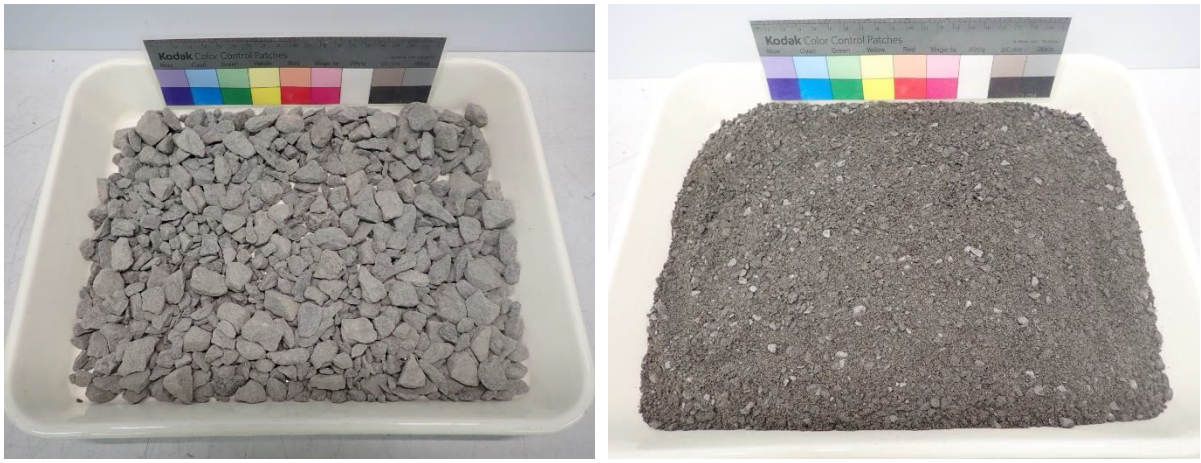
対象	仕様
ベントナイト	Na 型ベントナイト（クニゲル V1）
模擬掘削土	玄武岩：砕石（粒径 5 ~ 20 mm）、砕砂（粒径 5 mm 以下）
ベントナイト混合率	乾燥質量比で、ベントナイト混合率 15%、30%

表 4.4-43　土粒子密度と初期含水比

	ベントナイト（クニゲル V1）	模擬掘削土（玄武岩）	
		砕石	砕砂
土粒子の密度（Mg/m^3）	2.747	2.803	2.803
初期含水比（%）	11.5	1.1	2.6

表 4.4-44　ベントナイト（クニゲル V1）メチレンブルー吸着量試験結果

	平均	1 回目	2 回目	3 回目
メチレンブルー吸着量（mmol/100g）	82	82	82	82



砕石（粒径 5～20 mm）　　砕砂（粒径 5 mm以下）

図 4.4-47　模擬掘削土（玄武岩）の砕石と砕砂

表 4.4-45　模擬掘削土の粒度試験結果

	模擬掘削土中の砕石(G)と砕砂(S)の乾燥質量比			
	GS [0:10]	GS [2:8]	GS [4:6]	GS [6:8]
60%粒径　D_{60}	2.0	2.7	4.3	7.1
30%粒径　D_{30}	0.65	0.94	1.5	2.8
10%粒径　D_{10}	0.16	0.20	0.28	0.48
均等係数　Uc	12	13	16	15
曲率係数　U'c	1.3	1.6	2.0	2.3

D_{60}、D_{30}、D_{10}：通過百分率が 60、30、10%の時の粒径

均等係数　$Uc = \dfrac{D_{60}}{D_{10}}$

曲率係数　$U'c = \dfrac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$

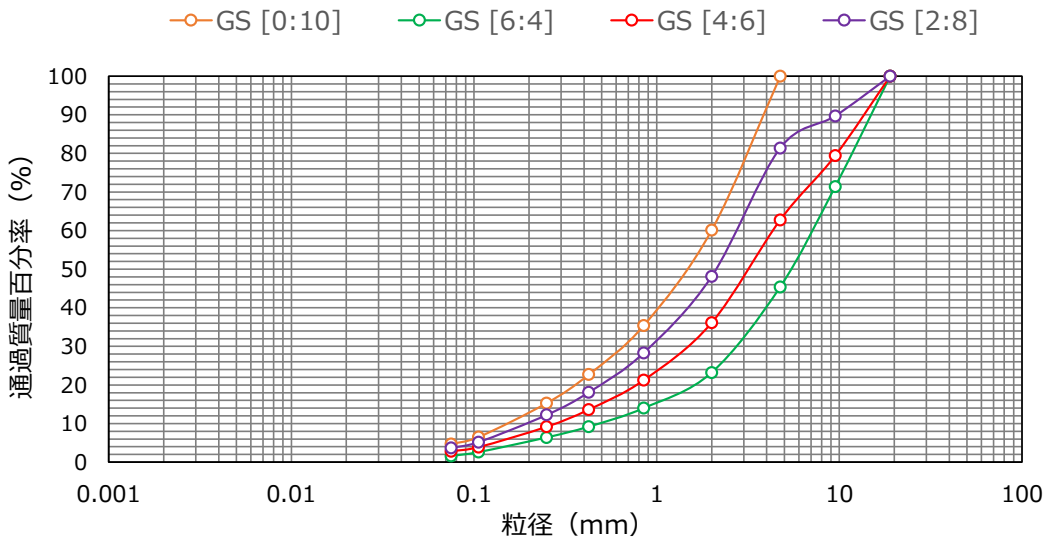


図 4.4-48　模擬掘削土の粒度分布

ベントナイト混合率は15%と30%の2ケースとし、表 4.4-27に示す粒度分布の異なる4ケースの模擬掘削土と混合して計6ケースのベントナイト混合土を製造した。製造したベントナイト混合土の突き固めによる土の締固め試験結果を表 4.4-46に示した。

表 4.4-46　ベントナイト混合土の突き固めによる土の締固め試験結果（C-c 法、4.5Ec）

ベントナイト混合率（%）	模擬掘削土中の砕石(G)と砕砂(S)の乾燥質量比	最適含水比（%）	最大乾燥密度 [最大有効粘土密度] (Mg/m^3)
15	GS[0:10]	9.2	2.090 [0.856]
	GS[2:8]	9.0	2.171 [0.953]
	GS[4:6]	8.5	2.168 [0.949]
	GS[6:4]	8.0	2.175 [0.958]
30	GS[0:10]	9.9	2.067 [1.282]
	GS[6:4]	9.5	2.116 [1.346]

3）目標乾燥密度の設定

埋め戻し材ブロックを製作するための目標値として、透水係数の代替指標となる有効粘土密度と乾燥密度の値を設定した。透水係数と有効粘土密度の関係を図 4.4-49 に示す。この図より、「塩水条件」で透水係数が 1×10^{-9} m/s 以下となる有効粘土密度 0.8 Mg/m^3 以上を目標値とした。乾燥密度の目標値は、有効粘土密度の目標値と模擬掘削土の混合率、土粒子密度から算出した。埋め戻し材ブロック製作のための目標値を表 4.4-47 に示す。

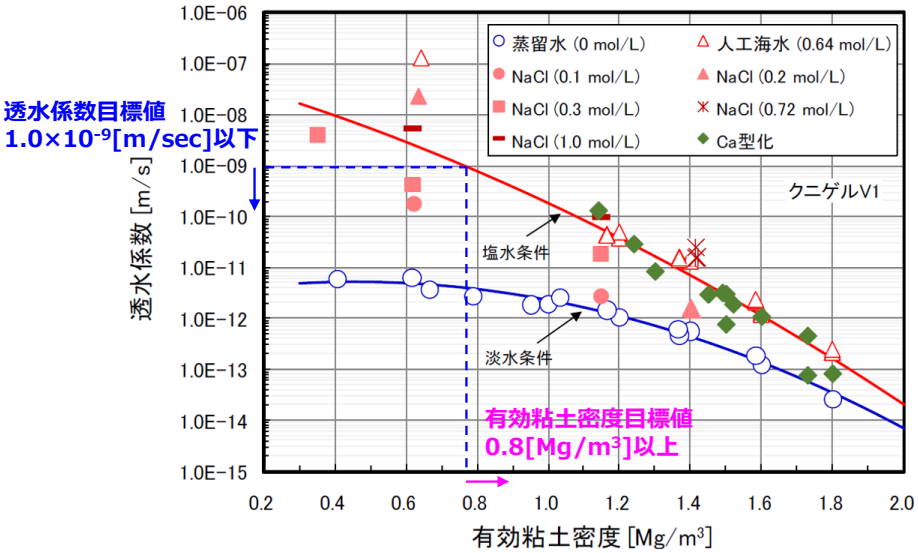


図 4.4-49　ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係
（NUMO，2021 に一部加筆）

表 4.4-47　透水係数、有効粘土密度、乾燥密度の目標値

ベントナイト混合率(%)	透水係数(m/s)	有効粘土密度(Mg/m^3)	乾燥密度(Mg/m^3)
15	1×10^{-9} 以下	0.8 以上	2.04 以上
30			1.60 以上

4）静的締固め試験

内径φ100 mmの小型モールドを用いた静的締固め試験を実施し、静的圧力による締固め特性のデータを取得した。これより埋め戻し材ブロックの製造に係る諸条件（成型圧力、ベントナイト混合率、模擬掘削土の粒度分布、含水比）が品質（乾燥密度、表面の凹凸、角部の欠け）に与える影響について確認した。

① 試験ケース

静的締固め試験では、ベントナイトの混合率、模擬掘削土中の砕石(G)と砕砂(S)の乾燥質量比、成型圧力をパラメータとして試験を実施した。静的締固め試験の試験ケースを表 4.4-48 に示す。1 試験ケースあたり、6 水準の含水比（5、7、9、11、13、15%）に対する乾燥密度を取得した。

表 4.4-48　静的締固め試験の試験ケース

ベントナイト混合率(%)	模擬掘削土中の砕石(G)と 砕砂(S)の乾燥質量比	成型圧力（MPa）
15	GS[0:10]	5、10、20、30、40
	GS[2:8]	
	GS[4:6]	
	GS[6:4]	
30	GS[0:10]	
	GS[6:4]	

② 試験装置

内径φ100 mm、高さ 180 mm（モールド本体＋カラー）の鋼製モールド及び押込み軸（圧縮用ピストン）を製作し（図 4.4-50）、圧縮試験機（最大荷重 1,000 kN）を用いて、片押し方式により、静的締固め試験を実施した。材料投入量は 1,300 g、圧縮保持時間は 1 分、圧縮速度は 10 mm/sec 以下（手動調整）とした。

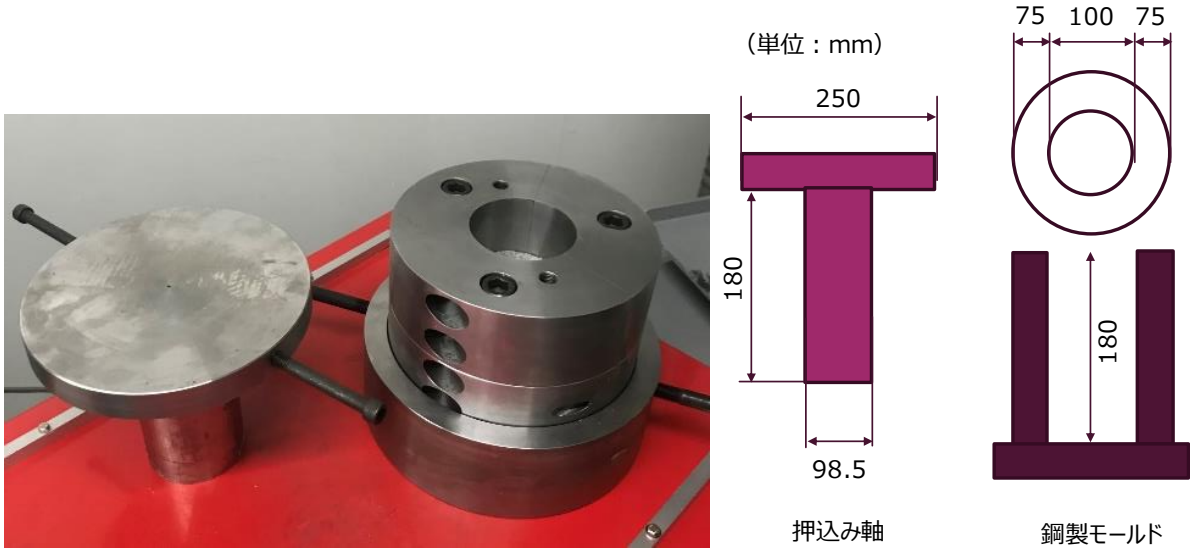


図 4.4-50　製作した鋼製モールドと押込み軸

③ **試験結果**

静的締固め試験の結果から得られた最適含水比及び最大乾燥密度を表 4.4-49 に示す。表には、最大乾燥密度、模擬掘削土の混合率、土粒子密度から算出した最大有効粘土密度も併せて示した。この結果から、今回の試験条件では全てのケースで有効粘土密度の目標値（0.8 Mg/m^3 以上）以上の値が得られた。

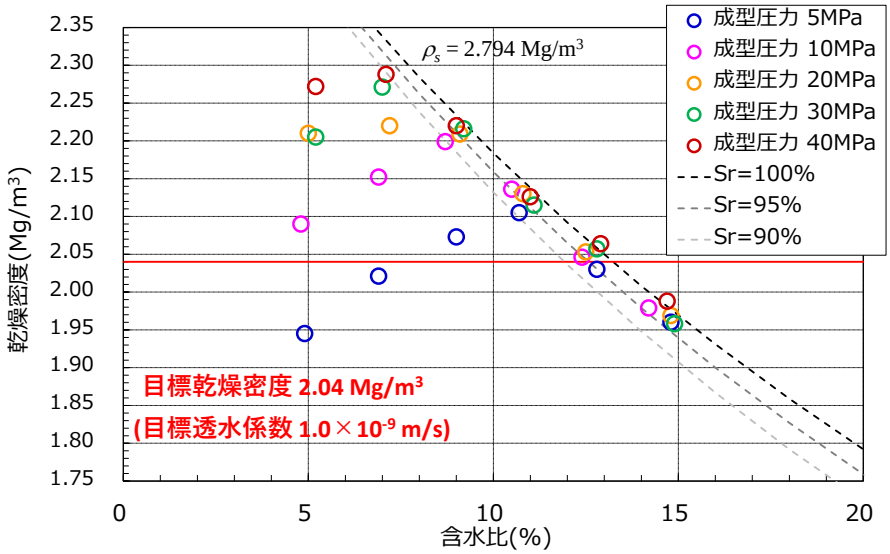
表 4.4-49　静的締固め試験結果（最適含水比、最大乾燥密度）

ベントナイト混合率(%)	模擬掘削土中の砕石(G)と砕砂(S)の乾燥質量比	成型圧力 (MPa)	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 [最大有効粘土密度] (Mg/m^3)
15	GS[0:10]	5	10.6	2.105 [0.873]
		10	8.6	2.199 [0.990]
		20	8.0	2.223 [1.023]
		30	7.3	2.273 [1.097]
		40	6.7	2.291 [1.126]
	GS[2:8]	5	9.4	2.126 [0.898]
		10	8.5	2.216 [1.013]
		20	6.9	2.259 [1.076]
		30	6.7	2.293 [1.129]
		40	6.5	2.312 [1.160]
	GS[4:6]	5	9.0	2.134 [0.907]
		10	7.6	2.222 [1.022]
		20	6.9	2.269 [1.091]
		30	6.2	2.296 [1.134]
		40	6.2	2.315 [1.165]
	GS[6:4]	5	8.8	2.103 [0.871]
		10	7.9	2.209 [1.004]
		20	6.8	2.254 [1.068]
		30	6.1	2.299 [1.139]
		40	6.2	2.304 [1.147]
30	GS[0:10]	5	11.0	2.038 [1.245]
		10	9.2	2.136 [1.373]
		20	8.4	2.187 [1.446]
		30	7.3	2.220 [1.495]
		40	6.9	2.261 [1.558]
	GS[6:4]	5	11.0	2.009 [1.210]
		10	9.3	2.115 [1.345]
		20	8.2	2.175 [1.428]
		30	7.4	2.194 [1.456]
		40	7.4	2.218 [1.492]

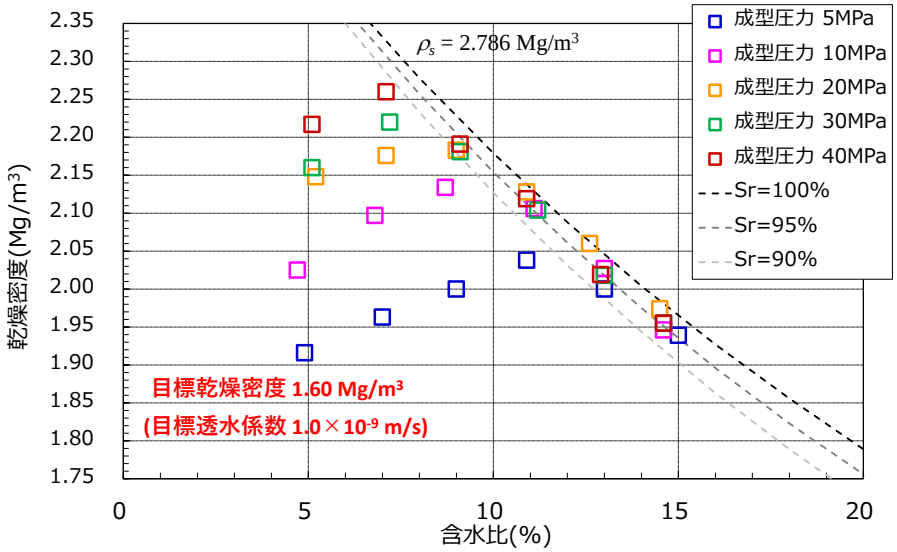
④考察

(a) 成型圧力と乾燥密度の関係

ベントナイト混合率 15%及び 30%、模擬掘削土の砕石（G）と砕砂（S）の乾燥質量比 GS[0:10]における静的締固め試験の結果を図 4.4-51 に示す。両ケースとも成型圧力に応じて最大乾燥密度は増加する傾向にあったが、成型圧力が 20 MPa 以上ではその変化量は小さかった。これは模擬掘削土の砕石砕砂の乾燥質量比 GS が異なるケースでも同様の傾向が見られた。この結果から、乾燥密度の変動が少ない埋め戻し材ブロックを製作するためには、成型圧力が 20 MPa 程度以上が適していると考えられる。ただし、成型圧力を設定するためには成型圧力が埋め戻し材ブロックに与える影響、静的締固め試験の供試体と埋め戻し材ブロックのスケールの違いによる影響などを確認する必要がある。なお、一部のデータがゼロ空気間隙曲線を超えており計算上では飽和度が 100%以上となった。これは、土粒子密度や供試体体積の計測精度に起因するものであり、実際には供試体の飽和度が 100%に近い状態であると考えられる。



(a) ベントナイト混合率 15%



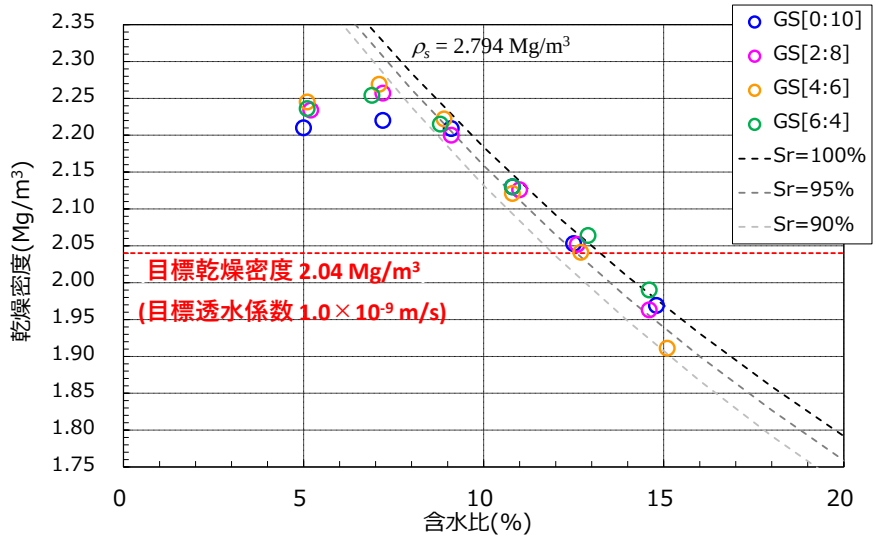
(b) ベントナイト混合率 30%

図 4.4-51 成型圧力をパラメータとした乾燥密度と含水比の関係

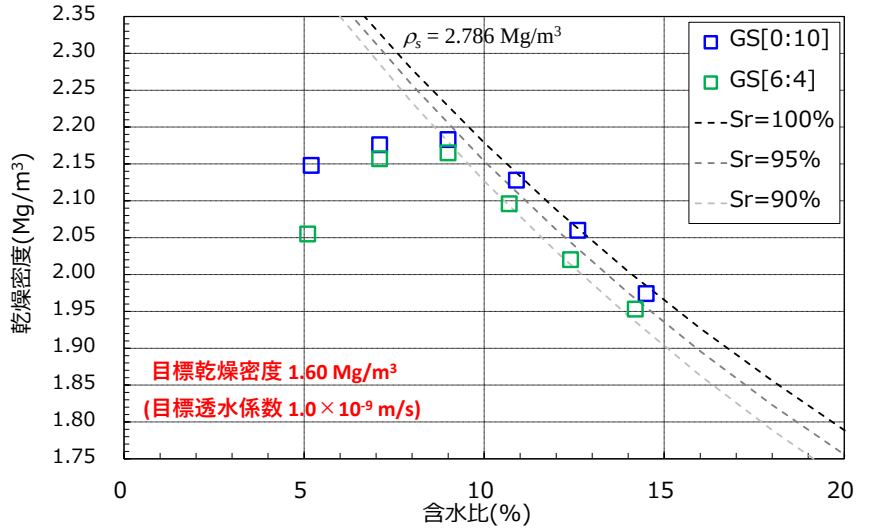
（砕石(G)と砕砂(S)の乾燥質量比 GS[0:10]）

(b) 模擬掘削土の粒度分布と乾燥密度の関係

静的締固め試験では、模擬掘削土の砕石（G（粒径 5～20 mm 以下））と砕砂（S（粒径 5 mm 以下））の乾燥質量比（GS）を管理し、GS[0:10]、GS[2:8]、GS[4:6]、GS[6:4]の粒度分布の異なる 4 種類の模擬掘削土を用いた。4 種類の模擬掘削土の均等係数 Uc は 12～16（表 4.4-45）であり、締固め易い土質材料に分類される。成型圧力 20 MPa において 4 種類の模擬掘削土を用いた場合の静的締固め試験の結果を図 4.4-52 に示す。これより、模擬掘削土の最大粒径が 20 mm 以下でかつ粒度分布の均等係数 Uc が 12～16 であれば、模擬掘削土の粒度分布は、成型圧力 20 MPa で製造する埋め戻し材ブロックの乾燥密度に与える影響は小さいと考えることができる。ただし、模擬掘削土の砕石の比率が大きく、含水比、成型圧力が小さいケースでは、供試体表面に凹凸が生じ、角部が欠けるものが多く見られた。これらが埋め戻し材ブロックの性能に及ぼす影響については、今後、確認する必要がある。



(a) ベントナイト混合率 15%



(b) ベントナイト混合率 30%

図 4.4-52 乾燥密度と粒度分布の関係（成型圧力 20MPa）

(c) 含水比が供試体の形状に及ぼす影響

ここでは、成型圧力を 20 MPa としたケースの締固め曲線（図 4.4-52）から埋め戻し材ブロックの製造における含水比の影響について以下のように考察した。

土の締固めでは最適含水比で乾燥密度が最大となり、最適含水比より大きな範囲では、土中の間隙は飽和状態に近く、締め固めにより間隙を小さくするには排水しなければならないため、この領域では含水比が大きくなるほど乾燥密度は小さくなる（建山, 1988）。土が飽和状態にあるときの乾燥密度と含水比の関係を示したものがゼロ空隙曲線であり、厳密には、飽和状態になるまで締め固めることは不可能であるが、図 4.4-52 を見ると含水比が 9%以上の全てのケースでゼロ空隙曲線に近い乾燥密度であった。最適含水比より乾燥側では、サクション効果による土粒子間の接触力が大きくなり締固めにくくなる（常田ほか, 2010）。そのため乾燥密度は小さくなる傾向にあるが、図 4.4-52(b)のはベントナイト混合比 30 %、含水比約 5%以外では模擬掘削土の粒度分布の違いによる乾燥密度の差は小さかった。これは、含水比の低下によって増加した土粒子間の接触力に対し、圧縮試験機による成型圧力が充分に大きいためであると考えられる。また、乾燥密度の変化が小さくなる成型圧力は試験結果（図 4.4-51）を見ると、玄武岩を模擬掘削土とした場合は 20 MPa 以上が一つの目安となると考えられる。

今回の試験では、ベントナイト混合率 15%の目標乾燥密度は 2.04 Mg/m^3 以上としており、これを満足する含水比をゼロ空隙曲線から求めると 13.2%以下となる。最適含水比は 7～8%程度であるが、埋め戻し材にはベントナイトに加えて掘削土を用いることや大量に必要となることから、含水比の調整や管理は容易ではない。最適含水比以下でも乾燥密度は目標値を満足するが、含水比が低い供試体は表面に凹凸が生じ、角部が欠けるものが見られた（図 4.4-53）。成型圧力が 20 MPa よりも小さく設定含水比が 5%のケースでは脱型後に形状を維持できない供試体もあり、含水比の設定については乾燥密度の値だけで判断することは適切ではないと考えられる。例えば、埋め戻し材ブロックの運搬、定置等の施工が可能となる強度についての力学的な検討も必要であると考えられる。

掘削土を用いたベントナイト混合土の含水比の調整、管理方法は今後の課題であり、材料およびブロック製造コストと管理コストを踏まえて品質を確保できる仕様、含水比の範囲設定、管理基準の設定等の検討が必要である。

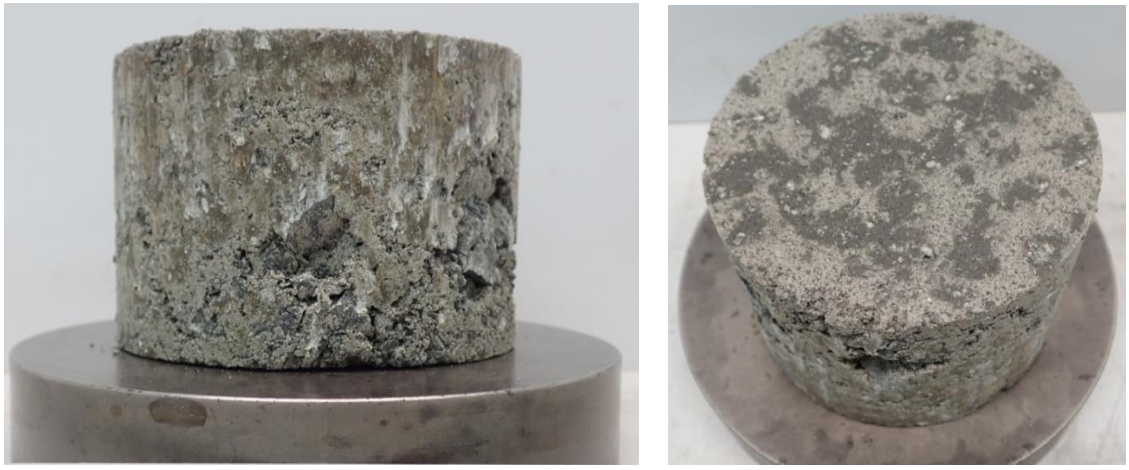


図 4.4-53　供試体表面の凹凸と角部の欠け

（含水比 5.1%、乾燥密度 2.236 Mg/m^3、ベントナイト混合率 15 %、
模擬掘削土内の砕石と砕砂の乾燥質量比 GS[6:4]、成型圧力 20 MPa）

4.4.3　埋め戻し材の浸透流解析の適用性確認に向けたデータ取得

(1) 背景及び目的

構造物の品質を確保する取組（本事業では品質保証プログラム）に基づいて施工された埋め戻し材には、地下水位の回復にともない地下水が浸潤して最終的には飽和に至ることが想定されている。閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングでは、安全評価で想定した現象などが想定通りに起こっていることを事業期間中のモニタリングにより確認することが基本とされている（NUMO, 2021）が、埋め戻し材が低透水性であることを考えると、モニタリング可能な処分場の操業期間中に埋め戻し材の浸潤状況を原位置におけるモニタリングで把握することは現実的ではない。また、長期安全性への影響を考えると、モニタリング機器やケーブルは可能な限り設置しないことが望ましい。そのため、解析によりその浸潤状況を把握することができれば、モニタリング機器の設置作業の負荷や長期安全性への影響を低減することができると考えられる。ただし、モニタリングの代わりに解析を用いるためには、解析結果の妥当性及び浸透流解析や二相流解析の適用性などを確認しておくことが必要である。

本項では、埋め戻し材を対象とした浸透流解析結果の妥当性確認に向けて、解析に必要な埋め戻し材の不飽和特性を取得する。

(2) 埋め戻し材の浸潤挙動に関するデータ取得

1) 取得データ及び試験ケース

前年度までに、ベントナイト（クニゲル V1 またはクニボンド）混合率 15%と模擬掘削土（ケイ砂 6 号）の混合土を対象として保水性試験及び透気試験よって水分特性曲線、不飽和透水係数及び透気係数のデータを取得した。今年度は、模擬掘削土として玄武岩の砕砂（最大粒径 5 mm）を用いて、これにクニゲル V1 を 15%混合した埋め戻し材の水分特性曲線、不飽和透水係数及び透気係数のデータを取得した。今年度の取得データと試験ケースを表 4.4-50 に示す。試験液種には、蒸留水と人工海水（八洲薬品(株)社製アクアマリン）の 2 種類を用いた。

表 4.4-50　今年度の取得データと試験ケース

取得データ	左記データを取得するための試験方法		ベントナイト（クニゲル V1）混合率：15% 模擬掘削土：玄武岩砕砂（最大粒径 5 mm）	
			試験液種：蒸留水	試験液種：人工海水
水分特性曲線	保水性試験	加圧板法	R2	R2
		サイクロメーター法	R2	R2
		蒸気圧法	R2	R2
不飽和透気係数	透気試験	定常試験	R2	R2

2) 供試体及び試験方法

供試体の仕様を表 4.4-51 に示す。供試体の含水比と乾燥密度は、事前に実施した締固め試験の結果から設定した。具体的には、供試体の含水比は最適含水比（w_{opt}）、乾燥密度は最大乾燥密度の 95%（ρ_{dmax}×95%）として設定した。試験方法とその概要を表 4.4-52 に示す。

定常透気試験の試験システムを図 4.4-54 に示す。透気ガスには窒素ガスを用い、埋戻し材を充てんした供試体セルの上流側および下流側で、それぞれ圧力および透気流量を計測した。透気流量の測定には、上流側は質量流量計（マスフローメーター：MFM）を、下流側にはフロート式流量計（FFM）を用いた。供試体セルのサイズは直径 5cm×高さ 5cm とした。

表 4.4-51 各混合土の締固め試験結果と室内試験の供試体仕様

ベントナイト	模擬掘削土		ベントナイト混合率	締固め試験結果		供試体仕様	
				最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (Mg/m³)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m³)
Na 型 (ｸﾆｹﾞﾙ V1)	玄武岩	砕砂	15%	13.4	1.919	13.4	1.82
		砕砂+砕石		13.7	1.910	12.0	1.81

表 4.4-52 試験方法及びその概要

測定項目		試験方法及び概要	備考
不飽和特性データ	水分特性曲線	「土の保水性試験方法（JGS 0151-2009）」のうち、加圧板法、サイクロメーター法及び蒸気圧法に準拠 ・ 加圧板法では、一旦飽和した後に排水過程と吸水過程の試験を実施	・基準化された試験方法に準拠
	不飽和透気係数	定常法 ・ 飽和度の異なる供試体で透気試験を実施	・試験方法が基準化されていない ・直接、透気係数を測定 ※高い飽和度では試験不可
		非定常法（逆解析を要する） ・ 飽和透水係数、不飽和透水係数、水分特性曲線を用いる ・ 試験結果を二相流解析コードで逆解析することで不飽和透気係数を取得	・試験方法が基準化されていない ・高飽和度側の不飽和透気係数の測定が可能 ※高圧、長時間を要する

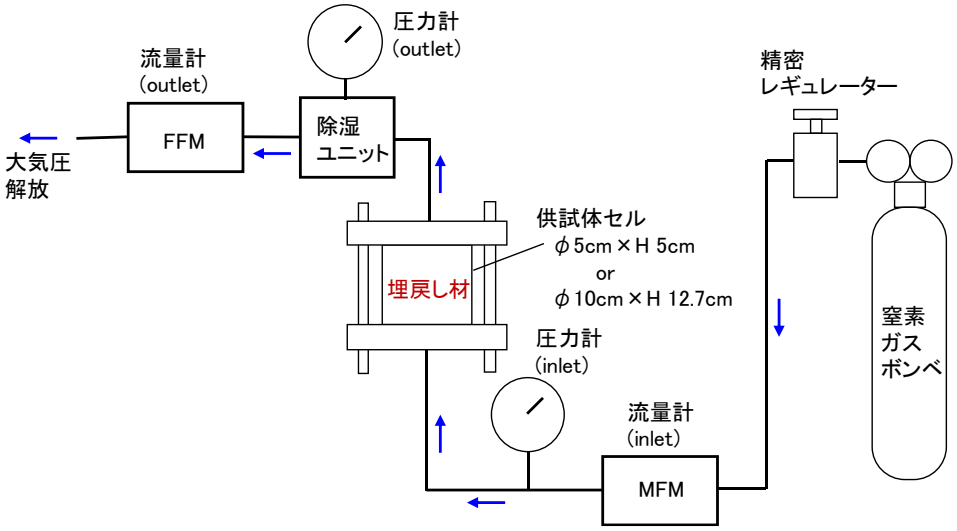


図 4.4-54　定常透気試験の試験システム

1)　試験結果

①　水分特性曲線

保水性試験の各測定法(蒸気圧法、サイクロメーター法(冷却鏡法(WP4C)、露点法(PSΨPRO))、加圧板法）で測定される土中水のポテンシャルは、蒸気圧法及びサイクロメーター法では化学ポテンシャル、加圧板法ではマトリックポテンシャルである。土中水の化学ポテンシャルは、主に土の吸着力や表面張力で決まるマトリックポテンシャルと、土中水が含むイオン濃度によって決まる浸透圧成分（“浸透ポテンシャル”または“オスモティックポテンシャル”）に分けられる。ここでは、蒸気圧法とサイクロメーター法で測定された土中水の化学ポテンシャルから浸透ポテンシャルの影響を補正してマトリックポテンシャルを算出し（化学ポテンシャルから浸透ポテンシャルを差し引いた値をマトリックポテンシャルとした)、全ての測定法における水分特性曲線をマトリックポテンシャルで整理した。浸透ポテンシャルは、次式で推定することができる。

浸透ポテンシャル＝–0.36×χ（kPa）
ここで、χ：土中水の電気伝導率（mS/m）

土中水の電気伝導率の測定は地盤工学会基準 JGS 0212（土懸濁液の電気伝導率試験方法）により実施した。電気伝導率は、蒸留水の場合は 60 mS/m 程度であり、人工海水の場合は 4,800 mS/m と高い値であった。なお、ケイ砂混合土と玄武岩の砕砂混合土の場合でその値に大きな差はみられなかった。電気伝導率の測定結果から浸透ポテンシャルを算出すると、蒸留水の場合は –20 kPa 程度、人工海水の場合は–1,700 kPa 程度であった。

試験液種を蒸留水及び人工海水としたクニゲル V1（15%）と砕砂（85%）の混合土のマトリックポテンシャルを図 4.4-55 に示す。含水比が 4%程度以下におけるマトリックポテンシャルは、蒸留水と人工海水で大きな違いはなかった。含水比が 4%程度以上においては、蒸留水では含水比が上昇するにつれてマトリックポテンシャルの低下が見られたが、人工海水ではマトリックポテンシャルの低下は見られず–2 MPa 程度の値であった。

平成 30 年度及び平成 31 年度に測定した蒸留水環境でのクニゲル V1（15%）とケイ砂（85%）の混合土のマトリックポテンシャルとクニゲル V1（15%）と砕砂（85%）の混合土のマトリックポテンシャルを比較して図 4.4-56 に示す。低含水比域では、砕砂混合土の方がマトリックポテ

ンシャルの値が大きいが、高含水比域になると逆にケイ砂混合土の方がマトリックポテンシャルの値は大きかった。

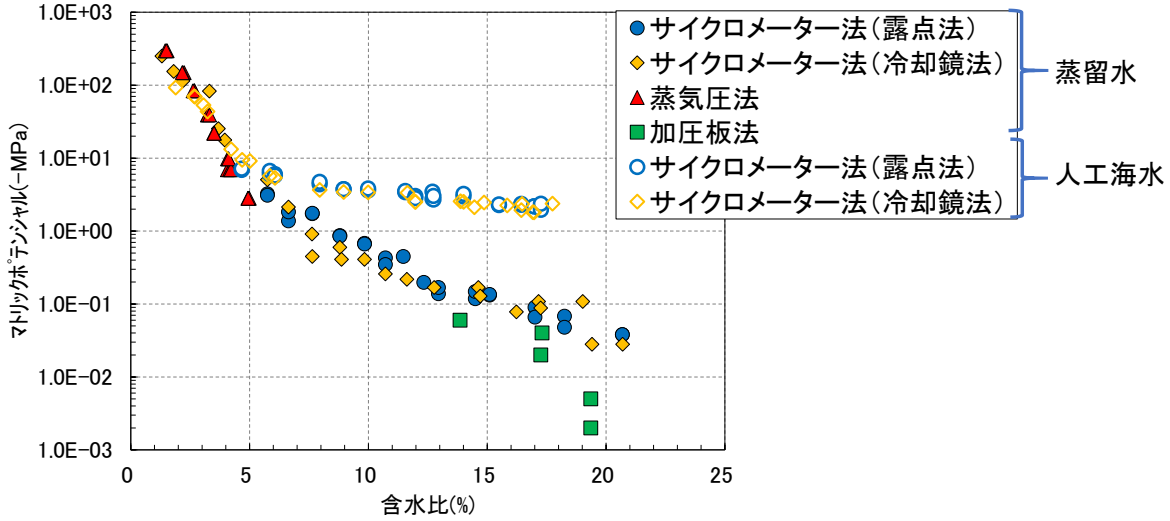


図 4.4-55　マトリックポテンシャルの測定結果（試験溶液の種類の影響）
（クニゲル V1：砕砂＝15：85）

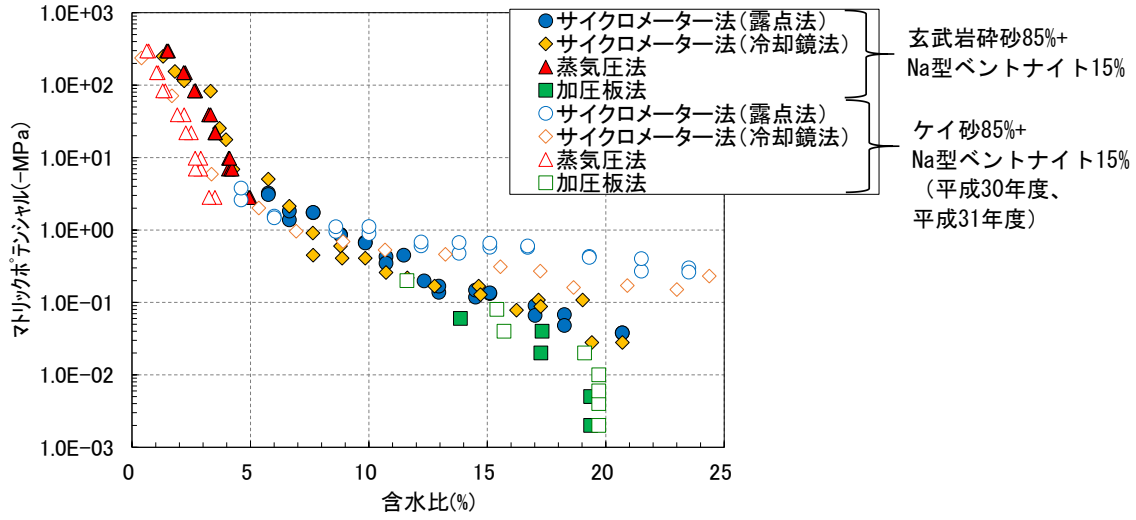


図 4.4-56　マトリックポテンシャルの測定結果（模擬掘削土の種類の影響）
（クニゲル V1：砕砂＝15：85、クニゲル V1：ケイ砂＝15：85）

②　飽和透水係数

定常透気試験では、試験体に一定の圧力でガスを透気させて透気流量を計測し、圧力と透気流量の関係から透気係数を求める。透気流量は試験体の飽和度により異なるため、同じ乾燥密度で飽和度が異なる供試体に対して透気流量を計測し、不飽和透気係数、すなわち飽和度と透気係数の関係を求めた。

精製水及び人工海水を試験液種としてクニゲル V1（15%）と砕砂（85%）の混合土の飽和度と浸透率の関係を図 4.4-57 に示す。精製水及び人工海水のケースともに、飽和度が 70%までの浸

透率の変化は小さく、飽和度が 70%より大きい範囲では浸透率は低下した。この結果から、クニゲル V1（15%）と砕砂（85%）の混合土では、試験溶液によらず乾燥密度と飽和度が同じであれば浸透率は同じと考えられる。

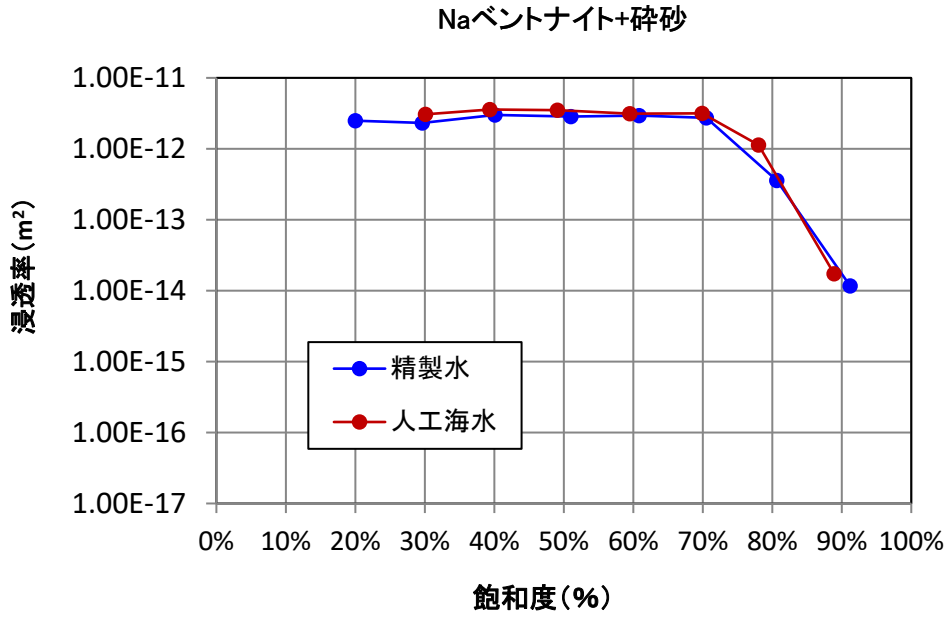


図 4.4-57　飽和度と浸透率の関係
（クニゲル V1：砕砂＝15：85）

4.5 まとめ

4.5.1　プロセス管理による埋め戻しの品質管理

埋め戻し施工技術に関するプロセス管理手法の構築に着手し、埋め戻し施工技術として候補に挙げた 4 つの施工方法（転圧工法、吹付け工法、スクリュー工法、ブロック工法）に関して、技術の開発段階、埋め戻し材の製造段階及び埋め戻し施工段階で想定される製造プロセス及び施工プロセスを具体化し、その管理手法（案）を構築した。また、各施工技術のプロセス管理上の特徴を整理し、管理が必要なものについてはその方法を例示するとともに、各施工技術の施工試験あるいは要素試験を通じて、プロセス管理上の課題を抽出するとともに、開発の方向性を整理した。

4.5.2　試験による性能目標管理指標と解析評価情報の整備

(1) 室内試験による埋め戻し材の材料特性データの拡充

埋め戻し材の施工目標乾燥密度の設定に資するための知見を拡充するために、模擬掘削土の最大粒径、粒度分布及び乾燥密度をパラメータとした埋め戻し材の透水係数に関するデータを取得した。有効粘土密度が 0.36～0.84 Mg/m^3 の範囲では、イオン交換水を用いたケースの透水係数は 1×10^{-11}～1×10^{-9} m/s、人工海水を用いたケースの透水係数は 1×10^{-4}～1×10^{-7} m/s であり、同じ仕様で作製した試験体でもイオン交換水に比べて人工海水のケースは 10^5 オーダー程度透水係数が大きかった。また、有効粘土密度が 0.4 Mg/m^3 より小さい範囲では、砕砂の粒径が大きい方（砕砂粗目）が小さいもの（砕砂細目）と比較して、透水係数が 1 オーダー程度大きくなるが、有効粘土密度が大きくなると両者の差は小さくなる傾向が見られた。これは、砕砂粒子そのものは不透水であり、粒径の異なる砕砂相互を同じ密度同士で比較した場合に、空隙体積率は同じでも個々の空隙の大きさが異なることにより透水性に差が生じ、さらにそれをベントナイトが膨潤で埋める効果が発揮できる空隙の大きさがベントナイト混合率の影響を受ける傾向が予想できることから、妥当な結果であると考えられる。これらについては、来年度に実施予定の同ケースの追加試験及び粒度の異なる模擬掘削土を用いた試験により確認する。

(2) 施工試験及び要素試験によるプロセス管理の実践

模擬坑道を対象とした転圧施工試験、アーチカルバートを対象とした吹付け施工試験、スクリュー工法とブロック工法による要素試験から得られた結果を表 4.5-1 に示す。表中の数値等は、今回の試験結果に基づいた参考値であり、今後の試験結果に応じて更新されることになる。

施工可能な材料範囲については、吹付け工法ではリバウンド材の発生量の観点から、埋め戻し材として利用可能な掘削土の最大粒径は 5 mm 程度であった。その他の工法では、模擬掘削土の最大粒径 20 mm の試験を実施して埋め戻し材としての適用性を確認しており、より大きな粒径の掘削土の利用も可能と考えられる。達成可能な品質レベルについては、ブロック工法では静的締固め試験により高い乾燥密度でブロック成型が可能な見通しが得られた。一方で、転圧工法では乾燥密度のばらつきが大きかったため、適切な撒き出し厚さを設定するなどの対応が必要である。施工速度については、スクリュー工法では 1 本のスクリュー当たり 4.23 m^3/hr という試験結果であり、坑道の全断面を対象として 12 本のスクリューを配置する場合には、他の工法に比べて施工速度が速いという利点があることがわかった。

4.5.3　埋め戻し材の浸透流解析の適用性確認に向けたデータ取得

埋め戻し材を対象とした浸透流解析結果の妥当性確認に向けて、解析に必要な埋め戻し材の不飽和特性（水分特性曲線や透気係数等）を取得した。試験液種を蒸留水及び人工海水としたクニゲル V1（15%）と砕砂（85%）の混合土のマトリックポテンシャルの関係から、含水比が 4%程度以下におけるマトリックポテンシャルは、蒸留水と人工海水で大きな違いは見られなかった。含水比が 4%程度以上においては、蒸留水では含水比が上昇するにつれてマトリックポテンシャルの低下が見られたが、人工海水ではマトリックポテンシャルの低下は見られなかった。また、透気係数に関しては、精製水及び人工海水のケースともに、飽和度が 70%までの浸透率の変化は小さく、飽和度が 70%より大きい範囲では浸透率は低下し、クニゲル V1（15%）と砕砂（85%）の混合土では、試験溶液によらず乾燥密度と飽和度が同じであれば浸透率は同じと考えられた。

表 4.5-1　各施工技術に関するまとめ
（表中の数値等は今回の試験結果に基づく参考値）

施工技術 オプション	施工可能 材料範囲 1)	達成可能な 品質レベル 乾燥密度 （有効粘土密度）	材料ロス率	施工速度	施工管理 の容易性 2)
撒き出し・転圧	K-V1：15%以上 掘削土の 最大粒径≦20 mm	1.2～1.9 Mg/m^3	0	1.73 m^3/hr	
吹付け	K-V1：15%以上 掘削土の 最大粒径≦5 mm	1.7～1.9 Mg/m^3	（d_{max}=2.5）20～30% （d_{max}=5mm）25～45%	（d_{max}=2.5）≧0.94 m^3/hr （d_{max}=5mm）≧1.35 m^3/hr	
スクリュー	K-V1、K-GX：15%以上 掘削土の 最大粒径≦20 mm	1.5～1.8 Mg/m^3 (0.5～0.7 Mg/m^3)	0	スクリュー1 本当り 4.23 m^3/hr	
ブロック	K-V1：15%以上 掘削土の 最大粒径≦20 mm	1.8～2.1 Mg/m^3 （0.7～1.3 Mg/m^3）	0	ブロックのサイズ 定置装置に依存	

1) K-V1：クニゲル V1、K-GX：クニゲル GX　2) 試験の進捗に応じて、具体的な数値等を入れる
※表中の数値等は今回の試験結果に基づいた記載であり、今後の試験結果に応じて更新する

参考文献

動力炉・核燃料開発事業団（1993）: ベントナイトの鉱物組成分析，PNC TN8430 93-003，1993

地盤工学会，地盤材料試験の方法と解説－二分冊の１－，p171，2009.

原子力環境整備促進･資金管理センター，平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化報告書，第 1 分冊－遠隔操作技術高度化開発－（2/2），2007.

核燃料サイクル開発機構，TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－，JNC TY14000 2005-013，2005.

小峯秀雄（2005）: 同一名称ベントナイトの産出年度による違いと膨潤特性理論評価式の適用性，土木学会第 60 回年次学術講演会（平成 17 年 9 月），2005

NAGRA, Implementation of the Full-scale Emplacement Experiment at Mont Terri: Design, Construction and Preliminary Results, NTB15-02, 2019.

日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進･資金管理センター，平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2019.

日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進･資金管理センター，平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書，2020.

建山和由（1988），土の締固め施工の合理化に関する研究，京都大学学術情報リポジトリ，1988.5.23

田中幸久，中村邦彦，海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響，電極中央研究所報告　研究報告（04007），2004.

常田賢一，小田和弘，佐野郁雄，澁谷 啓，新納 格，土質力学，理工図書，2010.

山田淳夫，千々松正和，小栗 光，伊藤歩夢，礫混じりベントナイト混合土を対象とした施工後の乾燥密度測定に関する研究，第 55 回地盤工学研究発表会(令和 2 年度)，地盤工学会，23-7-4-04，2020.7.

5. 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発
-製作・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備-

5.1 背景及び目的

“地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度)”では、構築された人工バリアが閉鎖後長期の安全性を確保できることを示すための品質保証体系の整備に向けて、施工プロセス管理による品質管理方法の具体化とそれを補完するモニタリング技術の開発等の重要性が示されている。これらの品質保証体系について、米国では、地層処分施設の最終閉鎖の判断に資するため、NRC 規則として人工バリアの品質保証やモニタリングを包含した性能確認に関する取組みが規定されている（Nuclear Regulation Committee, 2001)。また、フィンランドとスウェーデンでは、人工バリアを含む地下構成要素の品質保証の取組みとして、材料製造から施工までの各プロセスの検査等により、それらの品質を保証する取組が進められている（POSIVA-SKB, 2017)。

本事業では、施設の最終閉鎖の判断に資する人工バリアを含む地下構成要素（以下、地下構成要素という）の品質保証体系の構築に向けて、これまでの国際共同研究や諸外国の検討事例などを踏まえた上で、施工プロセス管理、地上施設や地下施設における試験ならびに原位置でのモニタリングなどを組み合わせた、人工バリアを含む地下構成要素が設計で期待した性能を発揮することを確認し評価するための考え方と具体的な方法について検討を進める。

○“地層処分研究開発に関する全体計画”では、人工バリアの品質保証体系の整備に向けて、施工プロセス管理による品質管理の方法の具体化とそれを補完するモニタリング技術開発等の重要性が示されている。

○品質保証体系の重要性について、海外文献などを引用しつつ訴求する。
- ・アメリカでは、地層処分施設の最終閉鎖の判断に資するため、NRC 規則で品質保証や性能確認に関する取組が規定されている。
- ・北欧では、地下構成要素の品質保証のための取組として、材料製造から施工までの各プロセスの検査等により品質を保証する方向性。

○本事業では、品質保証に関する海外先行事例を調査・分析し、わが国の地下構成要素に適用可能な品質保証体系を整備するとともに、品質保証体系に必要なモニタリング技術の整備を進める。

5.2 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備に向けた調査研究方針

これまでに、天然バリア及び人工バリアの状態や機能の変遷挙動を予測するための性能評価とその入力情報を取得するための取組（例えば、原位置でのモニタリングなど）について国際共同研究や諸外国の先行事例を対象として調査を実施した。その調査結果を踏まえ、わが国に適用可能な取組として具体化する上で、次の 2 つの取組（プログラムの枠組み）に分けて研究開発に取り組む（原子力機構・原環センター，2020)。

○品質保証プログラム（地下構成要素の施工品質の確保に関する取組）

○性能確認プログラム（地下構成要素の変遷挙動を把握するための取組）

後者の性能確認プログラムでは、処分場原位置での測定やモニタリングを主体とした取組と、原位置を模擬した環境での試験等を主体とした取組が考えられ、現段階ではこれら 2 つの方向性を見据えて研究開発に取り組む。

※本章では、2 つのプログラムを以下のように定義する。	
品質保証プログラム	地下構成要素を対象とした一定の施工品質（仕様）を確保するための取組である。製造・施工プロセス管理によって達成するものもあれば、地下構成要素の現物検査によって品質を確認することもある。品質保証プログラムを通して得られた構造物の施工品質は、その後の人工構造物の変遷挙動の予測評価のための初期状態としての入力情報となる。
性能確認プログラム	地下構成要素と母岩（ニアフィールド領域プラスα）を対象として、直接的あるいは間接的なモニタリングや実証試験等により、地下構成要素の変遷挙動を把握するための取組である。ここで得られた情報は天然バリア及び人工バリアの状態や機能の変遷挙動を予測するための性能評価の入力情報となる。ただし、本章での具体化に当たっては地下構成要素を対象とする。

わが国に適用可能な品質保証プログラム及び性能確認プログラムの具体化のためには、以下の処分概念及び期間を前提とする。

○現在わが国で有望とされている概念／定置方式（竪置きブロック方式、横置き PEM 方式）の地下構成要素（人工バリアを含む）を対象
○建設・操業～再冠水までの期間を対象とした性能評価に資する情報を提供

構造物の品質保証及び性能確認のためには、施工直後の品質や地下水位の回復にともなう構造物の変遷挙動を把握するための計測技術が必要となる。本章では、埋め戻し材を先行検討対象として、品質保証及び性能確認のための計測技術などの開発についても取り組みを進める。

5.3 品質保証プログラムの具体化

5.3.1 品質保証プログラムの整備に向けた調査研究方針

わが国に適応可能な品質保証プログラムの具体化については、諸外国における検討事例等に関する昨年度までの調査によって、主に次のように取り組まれていることを把握した（原子力機構・原環センター，2020）。

○事前に実証・確立された製造・施工プロセス管理手法を適用して品質を確保する

そのため、製造・施工プロセス管理手法を主体とした品質保証プログラムの具体化を目指して検討を進める。

製造・施工プロセス管理は、事前に規定された製造・施工プロセスの各段階で適切な品質管理を実施することであり、施工物の破壊を伴う検査を含めた原位置で品質確認のための活動を極力少なくし、施工物の品質の擾乱や原位置での作業員の被ばくや事故リスクを抑制し、作業を効率的に進めることが期待できる方法である。諸外国の先行検討例として、フィンランドの Posiva では、セーフティケースの付属文書であるプロダクションライン報告書の中で、材料の調達から、製造、施工に至るまでのプロセスと、それぞれの段階での品質管理方法を規定しており、人工バリアを含む地下構成要素ごとに取りまとめている。同様の報告書は同じ処分概念を有するスウェーデンの SKB でもまとめられている。また、わが国の一般産業分野においても、材料調達や地上施設での製造等に関して類似の方法で品質を保証する事例が多数存在し、一般産業分野で近年に取り入れられつつある工法規定方式などは、上記に類似した品質保証に係る取組の考え方である。

放射線環境や大深度といった地層処分に固有の特徴に留意が必要となるが、地層処分における地下構成要素の個々に使用する材料の特性や製造・原位置への搬送・原位置での施工等の方法や手順を踏まえて、これらの事例を参照することでプログラムの具体化を図ることができる。一方で、製造・施工プロセス管理手法は、規定されたプロセスを順守することで品質を担保する方法であるため、規定されたプロセスの妥当性や信頼性を予め証明（実証・確立）しておく必要がある。そのためには事前に実施される実験や実証試験を充実させる必要がある。

以上を踏まえ、本事業における品質保証プログラムの具体化では、わが国で有望とされる 2 つの概念（竪置きブロック方式及び横置き PEM 方式）を対象として、地下構成要素の製造・施工プロセス管理手法を提示することを目標とする。具体的には、人工バリアを含む地下構成要素に対する要件及び施工方法に応じた施工プロセス管理を行うための管理パラメータ等を特定し、製造・施工プロセス管理手法の適用性の確認のために事前に行われるべき地上や地下での試験の方法（試験における取得パラメータと取得方法の特定）について取りまとめる。以上の目標を達成するための研究方針を図 5.3-1 に示す。

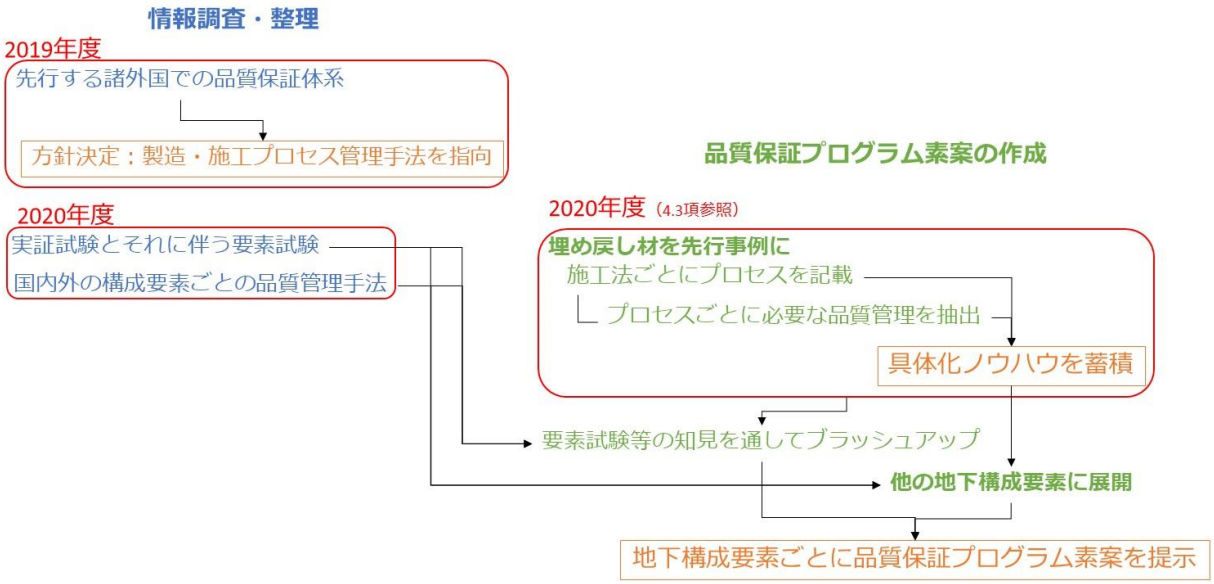


図 5.3-1　品質保証プログラムの具体化に関する研究方針

品質保証プログラムの具体化に向けて、今年度は 3 ヵ年計画の初年度として、地下構成要素の製造・施工プロセス管理手法の構築に資する情報の整理（5.3.2(1)）とわが国の埋め戻し材に関する事前の実証試験等に向けた課題整理（5.3.2(2)）を実施する。具体的には、わが国で有望とされる 2 つの処分概念に対応した地下構成要素のそれぞれについて、製造・施工プロセス管理手法の構築に資する国内外の参考情報の調査・整理を行う。また、実証試験の先行事例として、諸外国の実証試験とそれに関連する室内試験等の実施内容を調査・整理する。その際、特に本事業で着目している埋め戻し材を先行検討対象として、今後の実証試験等に反映できるように試験方法や留意点の整理を進める。

製造・施工プロセス管理に関する情報については、わが国で有望とされる 2 つの処分概念のそれぞれに含まれる人工バリアを含む地下構成要素毎に調査結果を整理した。品質保証プログラムの具体化に資する情報収集に係る調査の観点及び対象について表 5.3-1 に示す。埋め戻し材の製造・施工プロセス管理の構築に向けた実証試験等の取組みについては、地下研究施設を有するスウェーデン SKB とスイス Nagra を対象に、実証試験及び関連する室内試験や要素試験等の取組について調査、整理した。

表 5.3-1　品質保証プログラムの具体化に資する情報収集の調査対象

整理事項		調査対象
(1) 製造・施工プロセス管理に関する情報		
	わが国の竪置きブロック方式の管理方法に資する参考事例	KBS-3V*のプロダクションライン報告書
	わが国の横置き PEM 方式の管理方法に資する参考事例	KBS-3H**のプロダクションライン報告書
	わが国の他分野等で一般的に使用されている手法	日本の類似産業における管理技術
(2) 埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の構築に向けた実証試験等の取組み		
	製造施工プロセス管理のレファレンスを提示するまでの経緯	SKB の事例
	実証試験に至るまでの室内試験などの研究計画	Nagra の事例

*　スウェーデンおよびフィンランドで検討されている竪置き処分の概念。わが国の竪置きの概念と類似。

**　スウェーデンおよびフィンランドで検討されている横置き処分の概念。穴あき PEM を採用している。

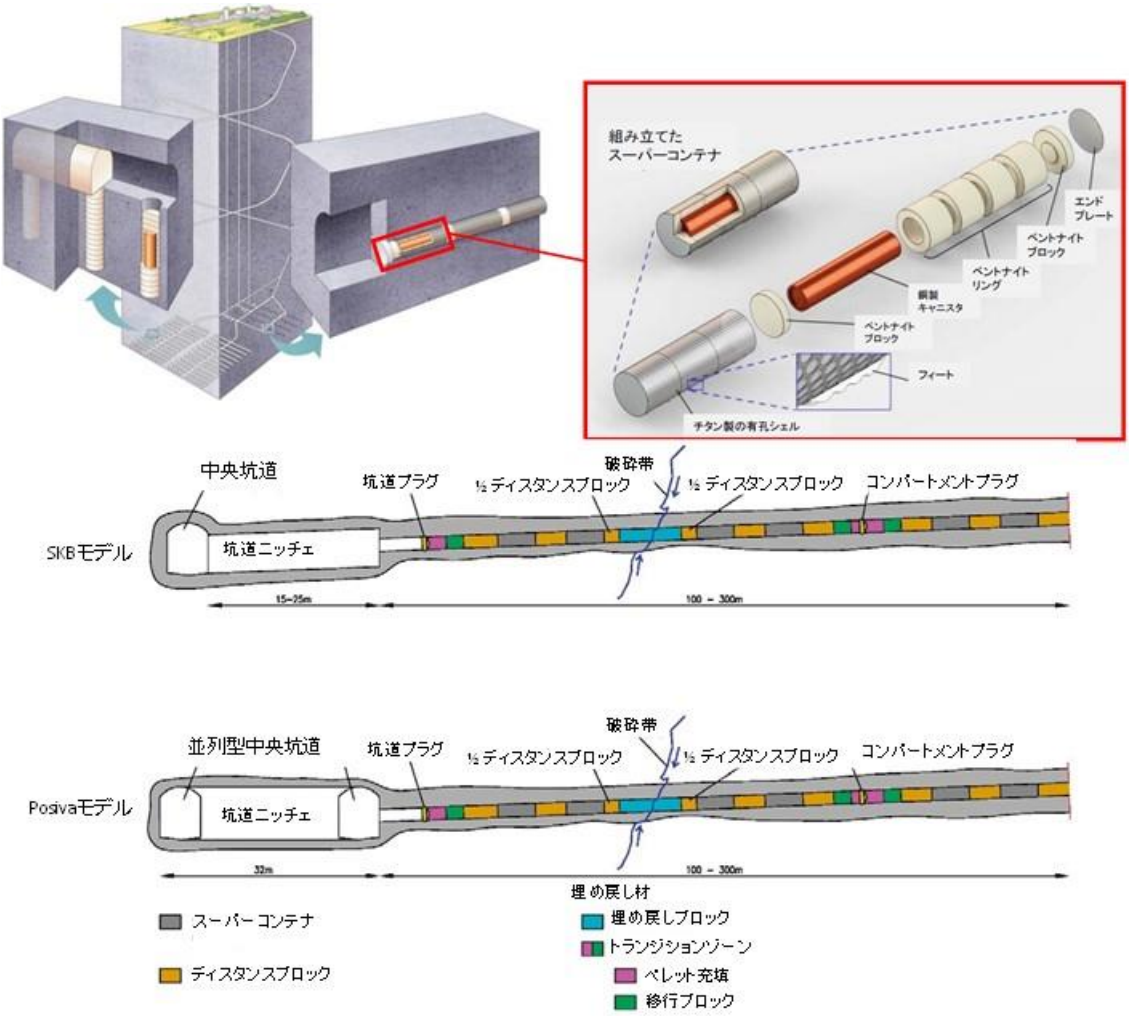
また、今年度は、埋め戻し材を先行事例として、4.3 で示した埋め戻し材の 4 つの施工法について、製造・施工プロセス管理手法の構築を試みた。プロセス管理には施工に至るまでに幅広い一連の工程が含まれるが、開発段階、製造段階、施工段階の各段階に応じて適切なプロセス管理手法を導入することにより、各段階で生じた品質不適合を前の段階あるいはそれ以前まで遡及することなく合理的に管理ができることを目指した。また、段階的プロセスの導入により、工程・コストへの影響、施工者の信頼性及び許認可上の不適切な状況なども制御できる。海外事例と比較すると開発段階を 1 つの段階として設定したのが特徴である。製造・施工段階でプロセス管理手法を導入するためには、事前にプロセス管理手法の実証・確立が必要となる。開発段階とは、そのような実証・確立に係る地上や地下での事前の試験等の取組を行うための段階として位置付けたものである。詳細は 4.3 を参照されたい。

5.3.2　地下構成要素の製造・施工プロセス管理手法の構築に資する情報の整理

(1) 製造・施工プロセス管理と品質管理方法に関する情報整理

わが国で有望とされる 2 つの概念（竪置きブロック方式及び横置き PEM 方式）を対象とした地下構成要素の製造・施工プロセス管理手法を提示するために、国内外の情報を調査し、参考となる情報を地下構成要素ごとに整理した。

調査対象である KBS-3V 処分概念及び KBS-3H 処分概念に関する概念を図 5.3-2 に示す。わが国の竪置きブロック方式と類似した特徴を有する KBS-3V 概念は、既に事業許可申請段階にあるスウェーデンとフィンランドで採用されている概念である。KBS-3H 概念は、廃棄体と緩衝材を囲うチタン製の有孔の外殻（スーパーコンテナ）を処分深度にある作業エリアで組み立て、狭隘な処分坑道に横置きで設置する概念である。KBS-3H には未だに開発要素が残されいるが、同概念の導入に伴う経済的優位性が認められれば、今後、SKB において研究開発プログラム（RD&D 2022）を改定する可能性がある（SKB, 2019）。KBS-3H に関する情報については付録 7 を参照されたい。



※左上図：KBS-3V 概念および KBS-3H 概念の外観図
※右上図：KBS-3H のスーパーコンテナの概要
※下図：KBS-3H の処分坑道内の主要な構成部材）

図 5.3-2　KBS-3 概念図

（SKB・Posiva, 2017 より作成）

KBS-3 概念の人工バリアの製造・施工プロセスは、材料の調達、人工バリアを構成する要素の製造、運搬・貯蔵、地下原位置での施工といったフェーズごとに、品質管理に係る取組が実施される。これら品質管理の目的は、地下の原位置に施工される人工バリアに設定されている品質要件を満たすことであり、用いられる試験や検査の方法は、既に他の産業分野で信頼性が確認されている手法の適用も可能としている。例えば、測定精度は、検査対象となる特性に関して許容可能なばらつきの範囲内でなければならないが、十分な精度を備えた従来型の手法及び装置が利用可能である。なお、試験や検査の種類や回数等の詳細は、今後の品質管理計画で決定される予定であり、定められた試験や検査を規定通りに実施することで品質要件を満たす人工バリアが製造、施工できる予定である。

わが国の処分概念と KBS-3 概念は類似点も多いことから、わが国の概念と KBS-3 概念の主な特徴を比較し類似点を整理した。その上で、共通する部分に適用される管理手法を KBS-3 概念から抽出し、わが国の製造・施工プロセス管理手法の構築に資する情報として整理した。また、他分野で実施されている品質管理手法についても調査した。具体的には低レベル放射性廃棄物処分場、産業廃棄物処分場、道路工事等の一般産業等を対象に、覆土、グラウト、セメント系部材に焦点を当てて調査を行った。わが国の製造・施工プロセス管理手法の構築に資する情報と考えられたものは、上記の海外情報の整理に加えてまとめて整理した。

以上の調査結果の整理は、NUMO 包括的技術報告書（NUMO，2021）を参考としつつ、わが国で有望とされる 2 つの処分概念に含まれる地下構成要素のうち、以下の要素に対して取りまとめた。以降はこれらの地下構成要素ごとに整理する。

- オーバーパック
- 竪置きブロック方式における緩衝材
- 横置きPEM方式における緩衝材
- 主要坑道等及び竪置きブロック方式の処分坑道における埋め戻し材
- 横置きPEM方式の処分坑道における埋め戻し材
- プラグ（力学・水理）

1) オーバーパック

スウェーデン及びフィンランドは使用済燃料を高レベル廃棄物とする直接処分を採用している。そのため、わが国におけるオーバーパックに相当するものは、使用済燃料を装填した鋼鉄製インサートとそれを取り囲む銅製のチューブで構成されるキャニスタである。

表 5.3-2　廃棄体に関するわが国の竪置きブロック方式と KBS-3V 方式の比較

竪置きブロック方式	KBS-3V方式
廃棄対象：ガラス固化体	廃棄対象：使用済燃料
オーバーパック	キャニスタ（canister）
・ 炭素鋼製	・ 鋳鉄製インサート＋銅製チューブ

どちらの概念も、廃棄体を金属製の容器に封入して処分孔に緩衝材とともに定置する概念であるが、対象とする廃棄物が異なることから材料、構造、サイズが異なる。そのため、先行する KBS-3V 方式での品質管理方法のうち、キャニスタの製造中の管理方法でわが国の参考になるものは少ないと考えられる。ただし、わが国のオーバーパック及び KBS-3V でのキャニスタはいずれも同一素材の蓋と溶接するため、溶接部の非破壊検査に関する知見は参考になる。KBS-3V 方式におけるキャニスタの溶接部の非破壊検査に関する知見を以下に示す。

蓋溶接部の非破壊検査

キャニスタの品質管理として、インサートの製造、銅製チューブの製造、底部及び蓋部の製造、溶接というプロセスの中で非破壊検査が適宜実施されている。銅製蓋の溶接後の検査としては、表面を目視試験（VT）、過電流試験（ET）で、内部については超音波試験（UT）、放射線透過試験（RT）で検査する。

2) 竪置きブロック方式における緩衝材

わが国の竪置きブロック方式と KBS-3V 方式における緩衝材の主な特徴を表 5.3-3 に示す。

表 5.3-3 緩衝材に関するわが国の竪置きブロック方式と KBS-3V 方式の比較

竪置きブロック方式	KBS-3V方式
緩衝材	緩衝材（buffer）
• ベントナイト（クニゲルV1）＋ケイ砂 • 1/8分割リング状ブロック • 隙間充填未定	• ベントナイト（MX-80他検討中） • リング状ブロック • 隙間ペレット充填

いずれの概念でも緩衝材はベントナイトを主成分としており、形状は異なるものの、ブロック成形する点が共通している。そのため、KBS-3V 方式で検討されている品質管理方法のうち、ベントナイト材料の品質管理や、ブロック製造、ブロック施工（定置）に関する品質管理が参考になると考えられる。KBS-3V 方式の緩衝材の品質管理項目と品質管理方法を表 5.3-4 に示す。KBS-3V 概念で特に重要とされているのは含水比、かさ密度、寸法であり、その管理方法を以下に示す。

表 5.3-4 KBS-3V における緩衝材の品質管理項目と管理方法

フェーズ	品質管理項目	管理方法
材料調整	粒径分布	・粒径分布曲線
	含水比	・材料を一部採取して加熱前後の計量
	材料組成	・モンモリロナイト含有量；X 線回折 ・有機炭素、硫化物等；燃料ガス測定
圧密特性	粒径分布	・ふるい曲線
	含水比	・材料を一部採取して加熱前後の計量
ブロック及び ペレットの製造	含水比	・ブロック製造前の材料を一部採取して加熱前後の計量
	寸法	・ブロックの寸法；カリパス、機械装置による自動測定（全量） ・ペレットの寸法；カリパス
	かさ密度	・ブロックのかさ密度（重量及び寸法に基づく体積） ・ペレットのかさ密度（個々のペレットの重量及び寸法）
ブロック定置及び ペレット充填	かさ密度	・貯蔵中のブロックの外観検査 ・定置した処分孔直径 ・定置したブロック位置の確認 ・ペレット充填隙間幅の計測 ・充填したペレット（減量分）の計量および体積

含水比の品質管理

材料調整時（粉砕前後）及びブロック圧縮成型直前に材料の一部をサンプリングして熱乾燥させ算出している。その他、処分深度への運搬と貯蔵期間においてブロックの水分吸収や変質発生の有無等を確認するために、一定数のブロックを抜き取って計量を実施している。ブロック製造前の材料の管理の他、製造後の貯蔵や輸送に係る品質管理としても実施することとなっている。

寸法の計測

ブロック及びペレットの寸法の測定は、カリパス（長さを測定する器具）を用いて行われる。ブロックの寸法は、±1 mm の精度で測定される。また、ブロックの測定は機械加工装置によっても自動的に行われる。

かさ密度の計測

ブロックのかさ密度は、記録された重量及び寸法から計算する。かさ密度に関して容認されるばらつきは約±1%である。ブロックの重量を±2 kg の精度で、寸法を±0.1 mm の精度で測定できると仮定した場合、密度は約±0.15%の精度で測定できることになる。寸法が±1.0 mm の精度で測定された場合、密度は約±0.5～0.7%の精度で測定できる。個々のブロックの重量及び寸法は加工装置によって全量自動的に記録されている。

個々のペレットのかさ密度は、空気中及びパラフィン法で記録された重量及び体積から計算される。ペレットの重量（50 g）が 0.1 g 精度のスケールで測定されると仮定すると、個々のペレットの密度は約±25kg/m^3 の精度で決定することができる。また、ブロックと処分孔の隙間に充填されたペレットのかさ密度は、その隙間の体積とロットから掃き出したペレットの減少量から計算される。

3)　横置き PEM 方式における緩衝材

わが国の横置き PEM 方式における緩衝材と KBS-3H 方式における緩衝材の特徴を表 5.3-5 に示す。

表 5.3-5　緩衝材に関するわが国の横置き PEM 方式と KBS-3H 方式の比較

横置きPEM方式	KBS-3H方式
緩衝材	緩衝材（buffer）
• ベントナイト（クニゲルV1）＋ケイ砂 • PEM容器を分割した鋼殻リングの内部に材料を撒き出し、リング状に締固め	• ベントナイト100%（MX-80他検討中） • スーパーコンテナ内のベントナイトブロック、ベントナイトリング • ディスタンスブロック

横置きの緩衝材については、わが国の横置き PEM 方式では、PEM 容器を分割した鋼殻リングの内部に材料を撒き出し，空圧駆動のランマにより締固めてリング状の緩衝材を製作する方法が例示されている（NUMO，2021）。一方 KBS-3H の緩衝材はスーパーコンテナ内のベントナイトブロック及びスーパーコンテナとスーパーコンテナの間に設置されるディスタンスブロックが緩衝材として検討されている。スーパーコンテナ内の緩衝材及びディスタンスブロックのいずれの緩衝材も、ブロック製造方式での製造・施工が検討されており、KBS-3H の製造・施工に適用される品質管理方法をわが国の横置き PEM 方式の緩衝材に直接参照適用することはできない。また、わが国の低レベル放射性廃棄物処分場の覆土層や一般廃棄物及び産業廃棄物の最終処分場

に用いられる土質系遮水工などは、地下水（及び廃棄物に含まれる物質）の移行抑制機能が期待され転圧締固めで施工される土質系材料の類似例ではあるものの、いずれも現地発生土等を混合させた材料を使用するなど、品質管理手法を参考とするには工夫が必要である。

一方で、横置き PEM の製作に関して、平成 19 年度から平成 24 年度にかけて横置き PEM 方式の実規模試験が実施されており、以下のような取組の成果や知見が得られている（原子力環境整備促進･資金管理センター，2013）。今後、これらを参照しつつ、課題の抽出や対応研究を進めることで、品質管理プログラムの構築に資する基盤情報の整備が可能となる。

- PEM 製作・組み立て技術の一部として PEM 内部への緩衝材の設置方法が検討され、PEM 容器を横割りで製作し緩衝材ブロックを横置き姿勢で組み立てる方法（平面 6 分割型ブロックとリング型ブロック）について実規模試験が行われた。
- 分割型ブロック同士の継ぎ目の隙間及びずれや、リング型ブロック定置の際に生じる隙間が搬送・定置作業中に発生する振動による緩衝材の損傷、破壊が懸念されたことから、隙間を発生させない PEM 製作・組立技術として竪置き姿勢で製作・組立する鋼殻リング方式が検討された。
- 鋼殻リング内の緩衝材の定置手法として空圧式の締固め方式で竪割りの PEM 容器内に緩衝材が製作された。締固め層厚は 50mm とし、施工中の乾燥密度管理は高さ測定により行われた。施工後、コアサンプリングによる乾燥密度を測定したところ、締固めによる限界の飽和度付近で緩衝材の乾燥密度、含水比を設定すること、締固め層厚 50mm 程度の条件下で、もっとも密度がばらついた場合においても最大値 : 1.83Mg/m^3、最小値 : 1.74Mg/m^3、密度差 : 0.09 で製作できることが確認されている。

4)　主要坑道等及び竪置きブロック方式の処分坑道における埋め戻し材

わが国の竪置きブロック方式における埋め戻し材と KBS-3V 概念における埋め戻し材の特徴を表 5.3-6 に示す。KBS-3 概念では竪置き、横置き方式ともに処分坑道を埋め戻すものを埋め戻し材、それ以外の地下空間を埋め戻すものを閉鎖材として分類している。なお、主要坑道等の処分深度の閉鎖材に対する性能要件や仕様は埋め戻し材と同様の材料・仕様としているため、処分深度の浅い場合に施工される閉鎖材を除けば、わが国の埋め戻し材と KBS-3 概念の埋め戻し材（及び同深度の閉鎖材）は概ね同様の機能や要件が割り当てられていると考えて良い。SKB は、処分坑道の埋め戻し材と同深度の主要坑道等の閉鎖材を同様に想定していることについて、主要坑道等には本来ならば緩衝材の膨出を抑制する要件が割り当てられていないため、要求性能を下げることでコストダウンが見込まれるが、主要坑道の埋め戻しは将来実施されることから、現段階で過度な検討は不要と考えている。

表 5.3-6　埋め戻し材に関するわが国の概念と KBS-3V 方式の比較

竪置きブロック方式	KBS-3V方式
埋め戻し材	埋め戻し材（backfill）
• ベントナイト＋れき混合土 • 施工法検討中（転圧締固め） • 坑道全般を対象	• 処分坑道を対象 • ベントナイト10～30%+適格な等級の砂 • ブロック（ロボット定置）＆ペレット（底盤層：撒き出し締固め）
	閉鎖材（closure）
	• 処分坑道以外の坑道の埋め戻し材を閉鎖材として分類 • 役割別(主に深度別)で仕様を調整 • 主要坑道等の処分深度の閉鎖材は埋め戻し材を踏襲

わが国の埋め戻し材はベントナイトと礫（掘削土）の混合土を原位置締固めすることを想定してるのに対し、KBS-3V ではベントナイトに砂を混ぜた混合土でブロック・ペレットの定置をすることとしている。SKB 社は、過去にベントナイト・砂混合物や、ベントナイト・破砕岩混合物に関する調査を行っているが、礫の仕様は 2 mm 又は 5 mm 以下としており、粒径の大きなものの検討例はない。粒度が大きい場合、均質な混合物を得ることが比較的困難になることと、施工中の材料分離の可能性を懸念している。また、材料の検討と施工試験の結果から（詳細は 5.3.2(2)参照）、施工方法については、当初検討していた転圧及び吹付けは除外し、ブロック及びペレットの定置を現在のレファレンス方法として設定している。なお、坑道の埋め戻しに関する施工オプションの検討は継続されており、今後変更する可能性もある。

埋め戻し材に関する以上のような海外事例に加えて、わが国における低レベル放射性廃棄物処分場や一般廃棄物及び産業廃棄物の最終処分場の事例を見てみると、覆土層や土質系遮水工に関する知見が参考になると考えられた。

低レベル放射性廃棄物処分場における、覆土に期待される基本安全機能は移行抑制と遮蔽であり、粘土や破砕岩など様々な材料が検討されている。また、施工は機械式の締固めとされており、地層処分における埋め戻し材との類似性がある。覆土の施工及び管理の方法は低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法に関する学会標準（日本原子力学会, 2016）において示されており、覆土材の選定方法、覆土の安定化（覆土の厚さ）、覆土の施工に対して管理項目を規定している。この管理項目を満たすための技術的要件として、①覆土材の材料条件の安定性、②施工完了時の締固め達成度、③力学的安定性、④耐浸食性、⑤安全評価の前提条件と施工後性能の整合性が定められている。技術的要件ごとの品質管理項目の例及びその管理方法の例を表 5.3-7、表 5.3-8 に示す。なお、品質管理項目を調べる方法は JIS や JGS といった一般に規格化された試験を踏襲している。

表 5.3-7　覆土の技術的要件と品質管理項目の例

（日本原子力学会，2016）

技術的要件	品質管理項目	対象
① 覆土材の材料条件の安定性	強熱減量	覆土材の原材料
	含水比	覆土材
	乾燥密度	覆土材、覆土
② 施工完了時の締固め達成度 a)	粒度	覆土材の原材料、覆土材
	撒き出し厚、転圧回数	覆土材
③ 力学的安定性	密度	覆土材の原材料、覆土材
	含水比	覆土材の原材料、覆土材
	粒度	覆土材の原材料、覆土材
	強熱減量	覆土材の原材料
	乾燥密度	覆土材、覆土
	覆土厚さ	覆土
④ 耐浸食性	密度	覆土材の原材料、覆土材
	含水比	覆土材の原材料、覆土材
	強熱減量	覆土材の原材料
	乾燥密度	覆土材、覆土
	覆土厚さ	覆土
⑤ 安全評価の前提条件（シナリオ及びモデル）と施工後性能の整合性	メチレンブルー吸着量 b)	覆土材の原材料、覆土材
	含水比	覆土材
	乾燥密度	覆土材、覆土
	覆土厚さ	覆土

注 a)　覆土の施工完了時に所定の締固め度を達成できること。
注 b)　ベントナイトを使用する場合に限る。

表 5.3-8　品質管理項目及び管理方法の例

（日本原子力学会，2016）

品質管理項目	試験方法
粒度	JIS A 1204:2009、JGS 0131 2009（土の粒度試験方法）
強熱減量	JIS A 1226:2009、JGS 0131 2009（土の強熱減量試験方法）
密度	JIS A 1202:2009、JGS 0131 2009（土粒子の密度試験方法）
含水比	JIS A 1203:2009、JGS 0131 2009（土の含水比試験方法）
乾燥密度	JIS A 1210:2009、JGS 0131 2009（突固めによる土の締固め試験方法）
	JIS A 1214:2001（砂置換法） または JGS 1614:2003（RI 法）
強度及び変形特性	JGS 0523:2009（土の圧密非排水三軸圧縮試験）
メチレンブルー吸着量	JBAS-107:1991[ベントナイト（粉状）のメチレンブルー吸着量測定方法]
透水係数	JIS A 1218:2009、JGS 0131 2009（土の透水試験方法）
覆土厚さ	測量

また、一般廃棄物や産業廃棄物の最終処分場で用いられる土質系遮水工の知見（全国都市清掃会議，2010）について参考になると考えられた情報をまとめる。遮水工とは、一般廃棄物及び産業廃棄物の最終処分場のうち管理型処分場において、浸出液に含まれる汚染物質の施設外部への流出を防止するために、廃棄物処分場の底部などに設ける難透水性の層であり、その遮水工の 1 つとしてベントナイトを利用したものを土質系遮水工という（諸留，2018）。汚染物質の流出を防止するためにベントナイトを利用した土質系材料を転圧締固めで施工する点で類似性がある。

土質遮水工の品質管理は、その遮水性能の確保を第一とした管理が必要とされる。各種の土質試験方法は、日本業規格（JISA 1218）及び「土質試験の方法と解説（地盤工学会）」を参照している。表 5.3-9 に土質材料の粒度調整・添加材添加・混合から転圧までの各段階における各管理項目および土質遮水工の管理項目に対する管理方法と管理値を示す。また、それぞれの管理項目の概要について以下に述べる。

表 5.3-9　土質遮水工の品質管理項目とその管理方法及び管理値

（全国都市清掃会議，2010 より作成）

管理項目	管理対象			管理方法	代用特性値	管理値	不具合の修正
	①土質材料	②混合土（添加材添加後）	③転圧後				
粒度	○			粒度試験	粒度加積曲線 （礫、砂、細粒分）		篩分け
混合状況		○		目視 メチレンブルー吸着法	 メチレンブルー吸着量	混合方法 混合時間	再混合
含水比	○	○	○	①炉乾燥 ②レンジ乾燥 ③RI 法	含水比　W W_{opt}：最適含水比 W_n：自然含水比	①$W_{opt}+\alpha$ ②W_n	乾燥 加水
締固め度	○		○	①突固め試験 ②RI 法 ③砂置換	締固め度　D	D＝90～98 %	再転圧 再施工
透水性	○		○	①ピット法 ②ブロックによる 室内透水試験	透水係数　k	k=10～1 nm/s	再転圧 再施工 再混合
層厚さ			○	測量			再転圧 再施工
強度 （支持力）			○	①ブロックによる 一軸、三軸圧縮試験 ②平板載荷試験 ③土壌硬度測定 ④コーン乾乳試験	①一軸圧縮強さ ②粘着力 C、内部摩擦角Φ ③地耐力		再転圧 再施工
面仕上げ精度			○	①測量 ②目視			再整形 細転圧

現場発生材の粒度管理

遮水工用改良土の混合性向上のためには、粒径 75mm 以上の礫及びごみなどを除去する。除去方法としては振動フルイ、バックホウのスケルトンバケットなどの利用が考えられる。測定方法としては、土の粒度試験方法（JISA1204）が利用できる。

混合状況管理

いずれの混合方式においても、室内試験による配合量に所定の施工ロスを考慮した増分が必要となる。混合度合いの管理は、目視による確認またはサンプリング試料のメチレンブルー吸着試験（日本ベントナイト工業会標準試験法 JBAS-107-91）が行われている。ただし、材料土の含水比調整に ABS（合成洗剤の主原料）を含んだ現地発生水を用いた場合、メチレンブルー分子を吸着するため注意を要する。

密度管理

締固め密度は、遮水工の性能に影響し、その良否により透水係数は 1~2 オーダー変化する。一般にフィルダムの設計密度は、突固めによる土の締固め試験（JISA1210）により得られた最大乾燥密度の 90~98%が用いられる。測定方法としては、RI 計測器による土の密度試験（地盤工学会規格 JGS1614）、砂置換による土の密度試験（JISA 1214）が一般的である。散乱型の RI 計測器を使用した場合、遮水工を非亀裂で管理することが可能となる。ただし、その際には必ず試験盛土を用いて使用する遮水材料土に合わせた校正を行う。また、遮水工の施工精度を高める技術として GPS を利用した締固め管理方法も提案されている。

含水比管理

土質遮水工の場合、締固め時の遮水材の含水比が締固め密度に影響し、最適含水比付近で締固め密度は最大となる。一方、遮水性能は、一般的に最適含水比十数%時に最大となるといわれている。測定方法としては、RI 計測器による土の密度試験（JGS1614）、土の含水比試験（JISA 1203）、電子レンジを用いた土の含水比試験（JGS0122）などが利用できる。

透水係数管理

室内での測定方法は、性能指針では、土の透水試験（JISA1218）が規定されており、透水係数が低い場合は変水位透水試験などを使い分けて行う。ただし、透水係数が 10nm/s 以下の場合は、変水位透水試験においても所定の精度が得られないことがある。このような場合は、土の三軸圧縮試験（JGS0520）を代用して透水係数を求める方法もある。

現場測定方法としては、締固めた地盤の透水試験（JGS 1316）などが利用できる。また、現場により、シリンダを用いた透水試験や、遮水工のブロックサンプリングを行い室内で透水試験などを実施する場合もある。

仕上げ精度

仕上げ精度の品質管理は、目視による管理と測量が一般的に行われており、土質遮水層の仕上げ精度が、その後の表面の仕上げ精度や耐久性に影響するため、極力平滑な仕上げが要求される。土質遮水工の仕上げ精度は、上部に遮水シートが敷設されていることを考慮すると、表面凹凸のピッチを L、その高さを H とすると、H/L<1/10、H<5cm が望ましい。

5)　横置き PEM 方式の処分坑道における埋め戻し材

わが国の埋め戻し材は処分坑道と主要坑道等で要件等に違いはない。主要坑道等の埋め戻し材については竪置きと横置きで埋め戻し材料や施工方法が変わることはないが、処分坑道については処分孔上部の処分坑道を埋め戻す竪置きブロック方式の場合と PEM 容器の周りを埋め戻す横置き PEM 方式で施工方法が変わる。横置き PEM 方式の処分坑道では、PEM 容器と坑道壁の隙間を埋め戻すが、放射線防護の観点からは、遠隔操作による無人化施工が必要である。その施工方法として、ペレット充填工法と吹付工法の適用が可能である（NUMO，2021）。

KBS-3H 概念において、埋め戻し材は明確に定義されていない。ここでは便宜上、充填材を埋め戻し材に相当するものとして調査した（図 5.3-3）。わが国の横置き PEM 方式における埋め戻し材と KBS-3H 方式における埋め戻し材（充填材）の特徴を表 5.3-10 に示す。

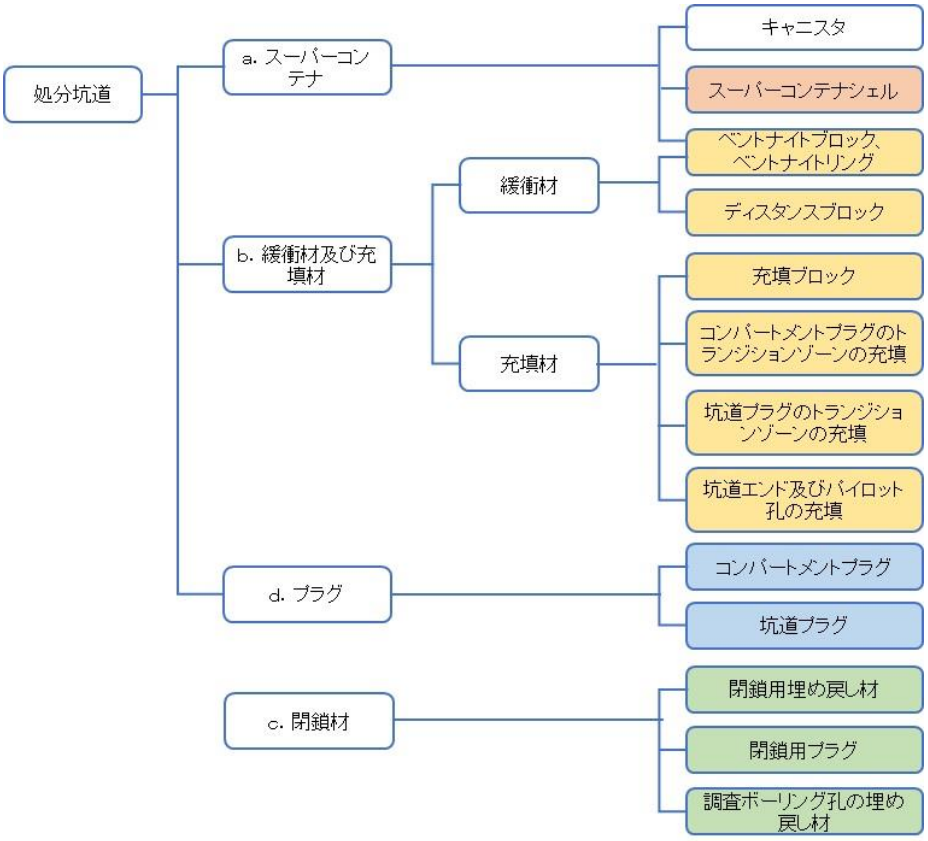


図 5.3-3　KBS-3H の各部位の構成

表 5.3-10　埋め戻し材に関するわが国の概念と KBS-3V 方式の比較

横置きPEM方式	KBS-3H方式
埋め戻し材	埋め戻し材（backfill）
• 坑道全般を対象 • ベントナイト＋掘削土（れき）混合土 • 施工法検討中 …処分坑道；ペレット充填工法、吹付け工法 …その他の坑道；転圧締固め	• 処分坑道を対象 • ベントナイトの含有率10～30% • スーパーコンテナ周囲の充填材、緩衝材（ディスタンスブロック）に隣接する移行ブロックの設置
	閉鎖材（closure）
	• 処分坑道以外の坑道の埋め戻し材を閉鎖材として分類 • 役割別(主に深度別)で仕様を調整 • 主要坑道等の処分深度の閉鎖材は埋め戻し材を踏襲

KBS-3H における埋め戻し材（充填材）に相当するトランジションゾーンはブロック及びペレット充填で施工される。したがってわが国の製造・施工プロセス管理を構築する上で、ペレットに関する管理項目等は参考になると考えられる。ペレットに関する品質管理方法は 5.3.2 2)に示した緩衝材のペレットと同様である。

また、緩衝材と共通であるが、緩衝材や埋め戻し材の膨潤圧や透水係数といった要件の多くは、設置期間に測定するのが困難である。この課題に対し、SKB は乾燥密度による品質管理を検討している。その詳細を下記に示す。

乾燥密度による品質管理

緩衝材や埋め戻し材の膨潤圧や透水係数といった要件の多くは、設置期間に測定するのが困難なことから別の指標が必要である。SKB では、事前に特定の材料の乾燥密度と膨潤圧及び透水係数に相関（関数）があることを定量的に示しておくことで、設置時点（施工時点）の乾燥密度で管理することを検討している。設置時点の乾燥密度については、坑道容積（設置に先立った坑道スキャン）と設置された材料の含水比、設置した埋め戻し材の総質量から算出する。

6) 力学プラグ及び止水プラグ

わが国におけるプラグと KBS-3 概念におけるプラグの特徴を表 5.3-11 に比較する。わが国では、力学プラグと止水プラグの導入が検討されており、これらは竪置きブロック方式、横置き PEM 方式共通の構成要素である。一方、KBS-3V と KBS-3H では検討されているプラグが異なる。竪置きの KBS-3V 方式では処分坑道の埋め戻し材とそれ以外の坑道の埋め戻し材を閉鎖材として分けているのに合わせて、処分坑道端部に設置されるプラグを処分坑道プラグ（埋め戻し材の一部の扱い）、それ以外の坑道に設置されるプラグを力学プラグと止水プラグ(閉鎖材の一部の扱い)としている。横置きの KBS-3H では水平坑道を区画するコンパートメントプラグと処分坑道端部に処分坑道プラグが設置される。KBS-3H の特徴的な活動として、スーパーコンテナ等を定置した後に人工注水して脱気する DAWE（Drainage, Artificial Water and air Evacuation）がある。KBS-3H の水平坑道（処分坑道）に設置されるプラグには、DAWE の操作を行うための注水パイプや脱気パイプのための貫通部が設けられ、コンクリートとチタン合金製の構成要素によって成り立つ。

わが国の力学プラグは、緩衝材及び埋め戻し材などの性能低下につながる可能性のある膨出を抑制することを目的として設置され、設計要件として構造健全性、製作施工性が設定されている。止水プラグは、埋め戻し材と組み合わせることにより閉鎖後長期の安全性に関する安全機能「放射性物質の移行の抑制」のうち「坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経路になることの抑制」を確保することを目的に設置され、設計要件として低透水性、製作施工性が設定されている。上述の通り、KBS-3H で検討されているプラグはチタン合金製の構成要素であり、人工注水の機構がついているなどわが国の概念とは異なる。一方、KBS-3V 方式におけるプラグはわが国の力学プラグや止水プラグと類似した構造、要件が設定されており、参考になると考えられる。

表 5.3-11　プラグに関するわが国の概念と KBS-3 概念の比較

竪置きブロック 横置きPEM共通	KBS-3V方式	KBS-3H方式
力学プラグ	処分坑道プラグ	処分坑道プラグ
• 処分坑道端部に設置 • コンクリート製 • プラグの背面に透水性の高い材料（砕石）による透水層を設け、操業期間中の効率 的な排水	• 処分坑道端部に設置 • 処分坑道のプラグは、一つで止水性と力学性の機能を有する • 材質はベントナイト（止水性）、コンクリート（力学性）、砂または砕石（フィルタ層）	• 処分坑道端部に設置 • 坑道からの大量の水の流れを避ける • 隣接する埋め戻しと飽和の前に緩衝材等を所定の位置に保持し、DAWE操作を容易にする • 固定リング、カラー、キャップの3つで構成される • コンクリート打設と他の構成要素はチタン合金製
	力学プラグ	コンパートメントプラグ
	• 処分坑道以外に設置 • コンクリートまたは他の剛性の高い構造物により施工されるプラグ • プラグの前後に施工された埋め戻し材/閉鎖材が飽和するまでの間、物理的に支える • 操業段階において処分場をセクションごとに隔離する	• 処分坑道のセクション（最大150m）を水理的に分離し、密閉する • 坑道内の構成要素を所定の位置に維持し、バリア性能をサポート • DAWE操作を容易にする • 固定リング、カラー、キャップの3つで構成される • コンクリート打設と他の構成要素はチタン合金製
止水プラグ	止水プラグ	力学プラグ・止水プラグ
• 埋め戻し材との組み合わせで、坑道およびその周辺に沿った地下水の流動を抑制 • ベントナイト＋ケイ砂 • 締め固めたベントナイトブロックを積み上げ	• 処分坑道以外に高透水性の亀裂などが見られる場合に設置 • 長期的な水の流れを防止する • 高透水性の部分に対し、力学プラグと同じ構造のコンクリート構造物を2つ設置し、その間にフィルタ層で支持した膨潤性粘土（ブロック・ペレット）を設置 • 施工の詳細は隣接する埋め戻し材/閉鎖材、深さ、位置などによって異なる	KBS-3Vと同様

力学プラグはいずれの概念でも一部にコンクリートを用いることから製造・施工時の品質管理方法について参考にできると考えられる。また、止水プラグについては KBS-3V の止水プラグも主として粘土系材料が用いられる。わが国の止水プラグはベントナイトブロックを積み上げる施工方法としており、双方ともに粘土系材料を用いることから、KBS-3V 方式のプラグの製造に関する管理項目などはわが国の参考になると考える。以下に力学プラグの製造・施工時に取得すべきデータ、止水プラグの製造時の管理項目について示す。

力学プラグの材料検査

材料検査は広く認められている標準や規格に従っていなければならない。また、材料と構成要素の保管条件（例、相対湿度(RH%)や温度）には慎重に従わなければならない。

止水プラグの製造に係る検査

粘土系材料の製造・施工時に取得すべきデータは、埋め戻し材と同様の項目の検査をしなければならない。またフィルタ層に関しては、材料は含水量、粒径分布及び混合物からの汚染に関する清浄性を検査する。

(2) 埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の構築に向けた実証試験等の取組み

製造・施工プロセス管理手法は、事前に規定されたプロセスに沿って製造、施工することで、対象とする地下構成要素の品質を保証する取組である。そのため、事前にプロセスを規定する取組の妥当性を実証・確立しておく必要がある。そこで、埋め戻し材の材料決定や製造、施工に関する事前の実証試験等について、諸外国の事例から以下の 3 つを整理した。詳細を表 5.3-12～表 5.3-14 に示す。

- SKBのプロトタイプ試験場におけるKBS-3V概念の実証試験
- SKBによるÅskarプロジェクト（埋め戻し材システム設計プロジェクト）
- NagraによるFE（Full-scale Emplacement）試験に向けたGronoでの実証試験

実証試験は一般に、対象とする概念・設計が設定した要件や機能を満足することを示すとともに、その後の研究開発にフィードバックすべき課題の有無を確認することも目的の 1 である。これらの目的を達成するためには実規模及び実際の処分場に即した環境での実施が望ましい。

上記の 3 つの実証試験等で共通しているのは、実証試験を実施する前に数多くの要素試験を実施している点である。SKB は、実証試験を行うためには多くの開発作業が伴うとしている。開発作業の中で、概念的又は数値的なモデル化が実施され、対象とするシステム及びプロセスを理解し、また概念全体や個別実験の評価を行うために使用される。モデル化は、実験を設計したり評価したりするための手段であると同時に、設計の動機付けにもなりうる。モデル化を含めた開発作業は通常、次に挙げるステップに分けられる。

1) 概念設計
   - 要件及び条件の設定
   - 基本概念の設定
   - 基本概念の実現可能性の評価
   - モデル化解析を使用した当該概念の試験
   - 要件を満たす設計仕様の策定
2) サブシステム及び構成要素の試験及び開発
   - 個々の構成要素／サブシステムの開発
   - 個々が設計仕様を満たすことを要素試験等で示す（必要に応じて概念設計を更新）
   - 仕様に沿ったことを確認する製作試験（小規模／工学規模／実規模）
3) さまざまなサブシステムの連携試験
   - さまざまな構成要素が連携して機能することを示す
   - 構成要素をいくつかに限定した連携試験
   - 理想的な条件下での試験
4) 実証試験
   - 必要なデータや目標が確実にもたらされるようにすることを示す
   - 当該試験の評価
   - 今後の開発における課題点

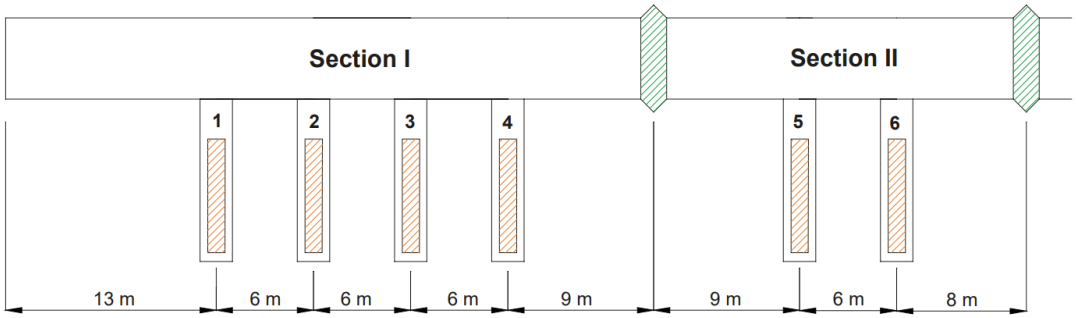
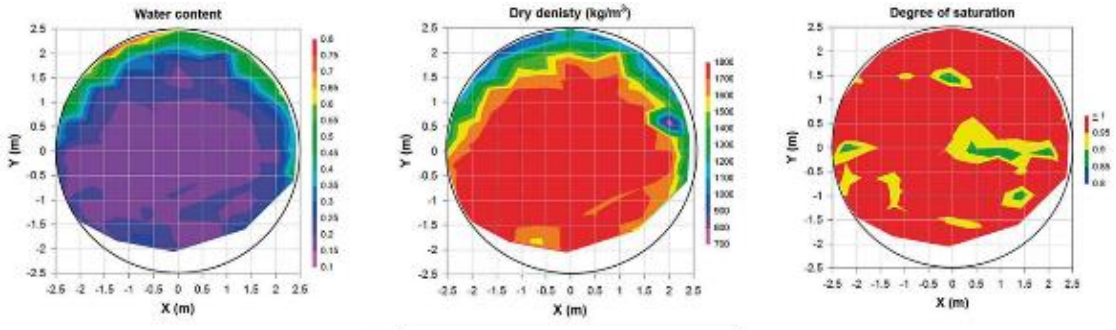
実証試験に向けて概念設計として要件を整理するところから始まり、それに即した要素試験、スケールアップさせた試験、個々のサブシステムの連携試験などを段階的に展開、実施する上記の開発ステップは、整理した 3 件の事例のいずれにも共通している。SKB のプロトタイプ処分場のプロジェクトは 1960 年代から開発が進められた KBS 概念の再現シミュレーションであり、そ

れまでの研究開発の集大成である。Åskar プロジェクトは埋め戻し材や閉鎖材に焦点を当てたプロジェクトであり、材料の選定、ブロックの製造、ペレットの製造、それぞれの施工法の検討、試験といったサブプロジェクトごとの検討を経て、最終的には地下の実環境での施工試験を実施している。Nagra の FE 試験で用いられる埋め戻し材に注目すると、埋め戻し材となる GBM（Granulated Bentonite Mixture；粒状ベントナイト）の検討、GBM を充填するスクリューオーガ装置（BFM）の設計、開発、埋め戻された乾燥密度測定に関する検討など、それぞれの検討結果を踏まえて地下坑道でのモックアップ試験を実施し、得られた知見を基に FE 試験を計画・設計して実施している。

本事業においても地上の実規模坑道を用いて坑道埋め戻し材の施工に関する実証試験を行っている。施工試験に当たっては、その条件として、わが国のジェネリックな状況を鑑み、透水係数 1×10^{-9}m/s を仮設定し、各工法の施工試験に向けた検討を実施している。埋め戻し材の施工試験という目的に対し、4.4.2(1)～(4)はサブプロジェクトと捉えることができる。最も検討が進んでいる(1)撒き出し・転圧工法は、既往の検討（原子力機構・原環センター，2020）や 4.4.1 で示された材料特性データを踏まえて材料の決定がなされており、また施工技術は一般土木での知見を参考に試験を計画している。(2)吹付工法は、吹付け工法に適した材料の検討とともに、小規模な吹付箱試験、アーチカルバートによる少し規模を大きくした試験を実施している。(3)のスクリュー工法については、わが国での検討が浅いことから、わが国の埋め戻し材で検討されているベントナイトと礫の混合土に対する適用性確認のための要素試験を行った。また、同じくわが国の埋め戻し材に関する検討の浅い(4)ブロック工法については、小型モールドを用いた静的締固め試験を実施し、ブロック製造の諸条件と品質の関係性について確認を行っている。以上のように、その技術の成熟度によってサブプロジェクトごとに段階は異なるが、段階的な施工試験に向けて材料データの取得や施工法の適用性の確認などの要素試験を実施しており、これらの取組は諸外国の実証試験に向けた開発ステップとも整合する。

また、上記の試験の結果、各施工法でのメリットやデメリットも確認され、将来的にはデメリットを緩和するための技術の高度化開発のみならず、これらの技術を組み合わせて実施する可能性もある。その場合には、諸外国の事例で窺えるような連携試験も今後必要になる。実規模模擬坑道における施工試験を実証試験と見なすことができる一方で、実処分場での施工や、精密調査段階の地下施設における試験を念頭に置けば、模擬坑道における実規模での施工試験は、Nagra の事例における予備試験やモックアップ試験と見なすこともできる。いずれの試験の位置づけであれ、実証試験はその後の研究開発のための課題を示すことが目的の 1 つであり、次の段階の開発に反映させることが重要である。

表 5.3-12　SKB によるプロトタイプ処分場プロジェクトの概略

プロジェクトの目的	KBS-3V 処分場を部分的に再現し、幾何学性や設計、材料、建設、岩石の環境についてできる限り正確にシミュレーションする。
プロジェクトの概要	✓ エスポ地下研究所の地下450mレベルにおいて実規模試験を実施 ✓ 検討されている実寸大の銅製キャニスタ（使用済燃料の代わりに温度シミュレーションヒーターを封入）、緩衝材を定置 ✓ 全長64mの試験坑道に6つの処分孔とし、2つのセクションに分けている ✓ 内側の4本はセクションⅠとして2001年から20年間稼働予定 ✓ 外側2本はセクションⅡとして2003年から2010年の約7年間稼働 ✓ セクションⅠ及びⅡの埋め戻し材は共通で以下の仕様である。 ➢ ミロス島産ベントナイト*（30重量%）と0～5 mmの破砕岩（70重量%）の混合物 ➢ 含水比約12.5%となるように調整 ➢ 10㎝の水平層締固め+30度傾斜20cm層締固め ➢ 目標乾燥密度　1,850kg/m^3 *ミロス島ベントナイトは粉末状にした Na 活性化ベントナイトであり MX-80 と同等の性能が得られることを確認 ✓ それぞれのセクションの端部に鉄筋コンクリート製プラグを設置 ✓ セクションⅡについては2010年に解体し、サンプリング調査等を実施 ✓ 23m の坑道内を 11 の区画に分け、含水比と乾燥密度の測定を約 100 点実施
参考図	 プロトタイプ処分場試験の設置概要 （SKB, 2016）  内側のプラグから約 5 m の位置で測定した含水比、乾燥密度及び飽和度 （Johannesson, 2004）

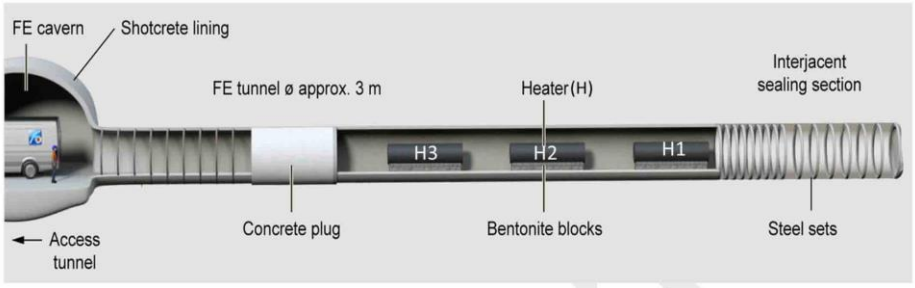
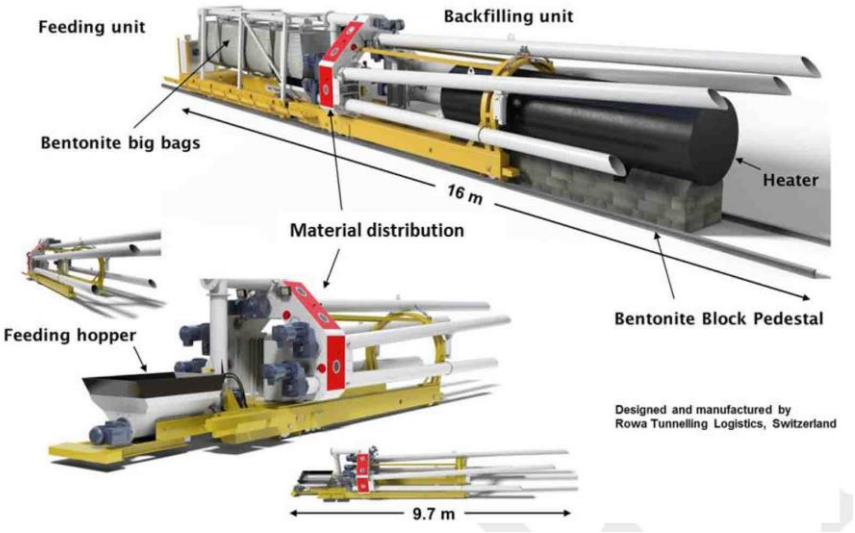
埋め戻し材開発の経緯	**KBS-1 概念及び KBS-2 概念** ➢ ワイオミングベントナイト10%+ケイ砂90% ➢ 透水係数10^{-8}～0^{-11}m/sを想定 ➢ 複数層の締固め+吹付施工を検討 **KBS-3 概念** ➢ 主な機能を決定 ・ 岩盤に対する永続的な支保 ・ 当該エリアの水理条件の回復 ⇒置き換えられる岩体と同水準の低透水性が求められる ➢ 粉末上ベントナイト10-20%+適格な等級のケイ砂で検討を開始 ➢ ストリパ施設にて緩衝材材料試験プロジェクト（BMT）を実施。最適含水比の考え方を提示した。 ベントナイト10%の最適含水比は14%。これは90%飽和に相当する。現場試験では水の取り込みを考慮して10%に設定する。 **現地で発生する破砕岩の利用検討（1990 年代）** ➢ 利点：コスト、産業廃棄物（掘削土）の削減 ➢ 懸念点：破砕のための新規設備の検討、掘削作業から埋め戻し作業までの50～100年間のギャップに伴う保管場所の確保、保管管理費用、環境影響 ➢ ベントナイト0-30%+エスポ地下研究所建設で得られたTBM掘削ズリのサンプル ➢ 締固めエネルギー、締固め手法、間隙水組成、締固めされたサンプルの拘束圧をパラメータとした以下の要素試験を実施 ①締固め試験　②透水試験　③圧縮試験　④せん断試験 ➢ <u>これらの試験結果を基にプロトタイプ処分場で用いる埋め戻し材の仕様を決定</u> **埋め戻し材及び閉鎖材に関する Posiva との共同研究** ➢ 2000年代初頭にKBS-3概念で使用する埋め戻し材と閉鎖材の材料の選定及び開発を実施 ➢ 6件の異なる坑道埋め戻し概念に対し、ベントナイト含有率、乾燥密度、添加水の塩分濃度、締固め時の初期含水比をパラメータとして透水係数、膨潤圧を測定。 ➢ 施工法は原位置締固め又はブロック法に焦点を合わせており、Gunnarssonらにより、2つの方法が比較された（Gunnarsson et al.,2006）によりこの2つの方法が比較された。その結果、乾燥密度に関する要件を満たす上でブロック法が適しているという結論が得られ、以降、ブロック概念に関する開発を継続している。
評価結果	・埋め戻し材施工後の平均乾燥密度は 1,750kg/m^3 だと想定されていたが、7 年後のサンプリングでは 1,500kg 未満と大幅に下回った。 ・岩盤表面の近く、特に天端の近くに埋め戻し材の密度（＜1,000k g/m^3）が低く、含水比が高い部分が存在していた。 ・撤去時の埋め戻し材はかなり不均質な状態であり、飽和度は低い部分が点在していた。ただし、坑道を平均してみた場合には完全な飽和状態と言えた。 ・ 平均乾燥密度が設置時に測定された密度を大幅に下回っていた理由として、設置時の密度測定を直接的な方法で測定されておらず、想定よりも低かった可能性、あるいは飽和に伴い埋め戻しが自重によって沈下した可能性が考えられた。 ・ サンプリングの際にはすでにベントナイト/破砕岩のオプションを放棄しており、乾燥密度が下回った理由について深い分析はなされていない。

表 5.3-13　SKB による「Åskar」プロジェクトとそれにかかわる要素試験の概略

プロジェクトの目的	処分坑道の埋め戻しに関する参照設計（Reference design）が意図したとおりに機能し、製造とその品質管理の検証可能性が要件を満たしていることを確認する。
プロジェクトの概要	このプロジェクトでは上記の目的を達成するために以下の検討が行われた。 ・埋め戻し材の材料に関する検討 ・埋め戻し材ブロックに関する検討 ・埋め戻し材ペレットに関する検討 ・埋め戻し材施工時の湧水に対する取扱いの検討 ・埋め戻し材の施工に関する検討 ・大規模施工試験 ・製造・施工プロセスの検討 ・品質保証及び品質管理に関する検討
参考図	 ペレット底盤層積み重ね試験 埋め戻し材施工ロボットの動作試験 **サブシステムの試験の様子** **（Johnsson, 2011）** **Äspö HRL で実施された Åskar プロジェクトにおけるロボット工法実証試験の様子** **（Johnsson, 2011）**

大規模施工試験に向けた開発作業	**1）概念設計** ➢ 確認する埋め戻し材の機能、要件 ✓ 移流輸送の制限（透水係数） ✓ 緩衝材の膨出の制限（膨潤圧） ➢ 対象とする施工法はブロック、ロボット方式 ➢ 底盤層及び坑道壁との隙間にペレットを使用。底盤層の機能及び方針は以下の通り。 ✓ ブロックを定置するための均一な表面を得る ✓ 流入する水の処理 ✓ 原位置締固めをしない ➢ 湧水条件はフォルスマルクエリアを対象としたモデルを活用 ➢ ブロックサイズの最適化；500×571×400（mm） ➢ ベントナイトの材料試験を実施 **2）サブシステム及び構成要素の試験及び開発** ➢ ペレット底盤層の積み重ね試験（湧水条件あり/なし） ✓ コンクリート製の実寸大ブロック4段+重りで重量をシミュレーション ✓ ブロックを定置するのに十分安定した均一な表面が得られることを確認 ➢ ブロックの製作試験（小規模、煉瓦サイズ、実規模サイズ） ✓ 実規模サイズのブロック製造のため、新規モールドを設計、製作 ✓ 異なる材料、含水比、締固め圧力で製作試験を実施、ブロック内の含水比、乾燥密度の分布を測定 ✓ 閉鎖後安全性に影響するような乾燥密度のばらつきは見られなかった ✓ ブロックの取扱い上、高品質な（密度のばらつきが少ない）ブロックはモールド、プレス速度、ベントナイト含水比の調整によって製作可能と考えられる。 ➢ 湧水の取扱い；湧水の多い場所について坑道壁にジオテキスタイルを設置する概念を検討 ➢ ペレット充填 ➢ 施工設備 ✓ ロボットの購入、センサ類のプログラミング、ロボットに付随するつり上げ装置などのツール開発 **3）様々なサブシステムの連携試験** ➢ 埋め戻し材ブロックの施工ロボット実規模試験 **4）実証試験** ➢ Äspö HRLの地下450mのトンネル12mの埋め戻しを実施 ➢ 坑道に対するブロック充填度71%、設置乾燥密度約1420kg/m^3、合計作業時間89時間
評価結果	・移流制限に関する要件が満たされることを確認 ・緩衝材の膨出制限に対する要件が満たされることを示すには更なる調査が必要 ・ブロック及びペレットの製造に必要な装置は一般に購入できるもので十分であり、研究開発の必要はない ・埋め戻し材施工機器については、実験室試験及び実規模試験に基づき、設置環境は適していると言えるが、施工時間の要件を満たすために自動プロセスの更なる開発が必要

表 5.3-14　実規模定置試験（FE 試験）の概略

プロジェクトの目的	1）標準的な設備を用いた処分坑道の建設の技術的な実現可能性を調査し、実際の地下条件でのキャニスタの定置やベントナイトの設置の最適化をはかる 2）実際に処分場が操業された場合に生じる可能性のある THM プロセスの連成効果について理解する
FE 試験の概要	✓ 粘土に富む地層（オパリナスクレイ）にあるモンテリ岩盤研究所（URL）において、SF/HLW処分坑道の建設、廃棄物定置、埋め戻し及び初期段階で起こる変遷に関するシミュレーションを実施。 ✓ SF/HLW キャニスタに想定されている実寸法（長さ 4.5m）のヒーター（3 個）を FE 坑道内のベントナイトブロック台座上に配置し、坑道の残りの部分を GBM（粒状ベントナイト混合物）で埋め戻した。 ✓ 実験の実施期間と定置後期間に数百個のセンサを用いて THM の変遷に関するモニタリングを実施。
参考図	 FE 試験坑道の概要 （Mueller et al, 2015）  用いられたプロトタイプ「埋め戻し装置」（BFM）の模式図 （Köhler S, et al., 2015） グローノ（Grono）にある地下施設）に建設された FE 試験用の実規模坑道モデル （Nagra, 2019）

FE 試験に向けた開発作業	**＜キャニスタ周囲に設置される埋め戻し材に関する検討＞** ○埋め戻し材に求められる機能 ・水を吸収し膨潤する能力（空洞の閉鎖、透水性の低下、岩盤応力及び坑道変形への拮抗） ・放射性核種の移行の遅延及び吸着の能力 ○GBM（高圧縮した粒状ベントナイト）を採用 ・目標乾燥かさ密度：1.45 Mg/m³（過度の不均質性がないこと） ・施工法としてスクリューコンベヤ（オーガー）を選択 **＜GBM（粒状ベントナイト混合物）の密度を均一に保つための品質確認（ラボ測定）＞** 1.1.1. 鉱物組成 1.1.2. 含水比調整 ・80℃未満でベントナイトを乾燥し、含水比を 12%から 4%～6%の範囲に低下 ・定期的な含水率測定を実施 1.1.3. 粒度調整 ・最大粒径を約 10 mm ・ベントナイトの圧縮、粉砕、丸め、フラー曲線粒度分布を用いてふるい分け及び混合 1.1.4. 粒子及びバルク材に関するさまざまな密度測定 **＜BFM の設計及び建設作業準備のための予備試験（ハーゲルバッハ試験坑道（Versuchsstollen Hagerbach：VSH））＞** ○FE 試験のための埋め戻し装置（BFM）の設計及び建設作業の準備 ① 材料搬送に関する連成パラメータ、その結果生じる埋め戻し圧、材料押し上げポテンシャル、それに対応する単一スクリューコンベアの作動パラメータに関する調査 ② 覆いのない GBM 斜面で起こる小規模な材料なだれによって引き起こされる分離効果を低減させるいくつかの異なる方法の試験 ③ 振動利用による GBM 埋め戻し材の乾燥かさ密度の上昇方法の比較 ④ 密度測定などの QC 措置の開発や試験 **＜密度測定に関する検討＞** 1.2. 乾燥かさ密度は基本的に物質収支法（パレットごとのバルク質量、容積、含水比補正）で実施 1.3. 埋め戻した容積を算出するために埋め戻す前後でレーザースキャン 1.4. 総誤差（容積計算、材料計量、含水比測定に伴う誤差、材料損失など）が0.5%以下であることを確認 1.5. 埋め戻し期間にわたりGBM含水比が一定と仮定した場合、誘電体プローブ（TDR）によって信頼に足る密度測定ができることを確認 **＜モックアップ試験（グラウブンデン州グローノ（Grono）にある地下施設）＞** ・ 埋め戻し装置（BFM）施工による埋め戻し密度の達成可能性を試験、評価 ・ VSH における予備試験に基づき、FE 試験のために計画された埋め戻し QC 計画を試行 ・ QC 措置の試験：異なる密度測定方法の比較と、多数の信頼性の高い密度測定の実行を重視
評価結果	**＜FE 試験結果＞** ・ 埋め戻し装置（BFM）は、モニタリング計器及びヒーターの設置に加え、3D レーザースキャンのために FE 坑道を 11 回出入りした。 ・ 埋め戻し材の乾燥かさ密度測定は FE 坑道に対し、質量-容積計算で 12 回測定。 ・ モンテリ URL での FE 試験に加え、さまざまな予備試験及びモックアップ試験での埋め戻しに要した GBM は合計で 255 Mg。破損や事故が起こることなく終了した。 ・ 実証作業及び埋め戻し品質に関するプロジェクトの目的は全て達成された。 ・ スイスの処分場概念に従った HLW 処分坑道に関して 1.45 Mg/m³ という乾燥かさ密度が追加的措置を講じることなく達成されることを確認した（平均乾燥密度 1.489±0.04t/m³）。 **＜最適化の可能性＞** FE 試験では良好な結果が得られたが、必要に応じて以下の観点で更なる最適化を実施する。この埋め戻しシステムは複雑かつ高度な技術の組み合わせのため、1 件のパラメータの修正が別のパラメータに影響を及ぼす可能性があることに留意が必要である。 ➢ GBM の最大粒径の調整（より大きく寄り高密度な GBM の検討） ➢ GBM の粒子形状、真円度に加え、フラー曲線に合う粒度分布も生産プロセスによって管理 ➢ BFM で使用するオーガーの数、直径、長さ、形状 ➢ BFM のコンベアスクリューやチューブで観察される摩耗の低減措置 ➢ 全般的なプロセスの自動化、アクセスの容易さ ➢ 乾燥かさ密度測定の最適化（坑道壁面による影響や計器の挿入・取り外しの擾乱の影響）

5.4 性能確認プログラムの具体化

5.4.1　性能確認プログラムの整備に向けた調査研究方針

性能確認プログラムは、処分場の閉鎖後安全性を示すため地下構成要素の設置後の変遷挙動を把握（性能評価）するのに必要な情報を取得する取組みをまとめたものである。性能確認プログラムの具体化については、わが国において有望な 2 つの処分概念（竪置きブロック方式及び横置き PEM 方式）を対象とし、性能確認プログラムで取得すべき情報とその情報の取得方法及び今後の研究開発課題の体系的な整理とそれに付随する情報集をまとめることを目指す。

性能評価は Posiva を含む諸外国において、処分場構成要素の機能や状態の変遷を評価し、その後の核種移行解析や線量評価といった安全評価の初期状態を示すために実施されている（原子力機構・原環センター, 2020）。性能評価で必要な情報、すなわちニーズを調べることで、性能確認プログラムで取得すべき情報が整理できると考えられる。

これまでの諸外国における事例調査（原子力機構・原環センター, 2020）の結果、性能確認プログラムにはモニタリングや実証試験、解析など様々な取組みが含まれることが示唆された。性能評価に用いるデータの取得方法は、1 つの取組みしかないわけではなく複数あり、それらの取組みを組み合わせることにより、より確度の高いデータの取得ができると考えられる。諸外国情報の整理から、どの取組みによってデータを取得するかの方向性として以下の方向性が示された。

・方向性①：処分場原位置での測定やモニタリングを主体とする方向性
・方向性②：原位置を模擬した環境での試験などを主体とする方向性

これらの方向性は、地質環境や処分概念の特徴、規制などのステークホルダとの関係、合理性（時間やコスト）といった要素を考慮して、実施主体によって決定される。わが国の地層処分に関する現状はサイト情報を含め条件などが未定な場合が多いことから、方向性①②両方を見越した研究開発を進める必要がある。以上を踏まえ、本事業における調査研究方針を図 5.4-1 に示す。

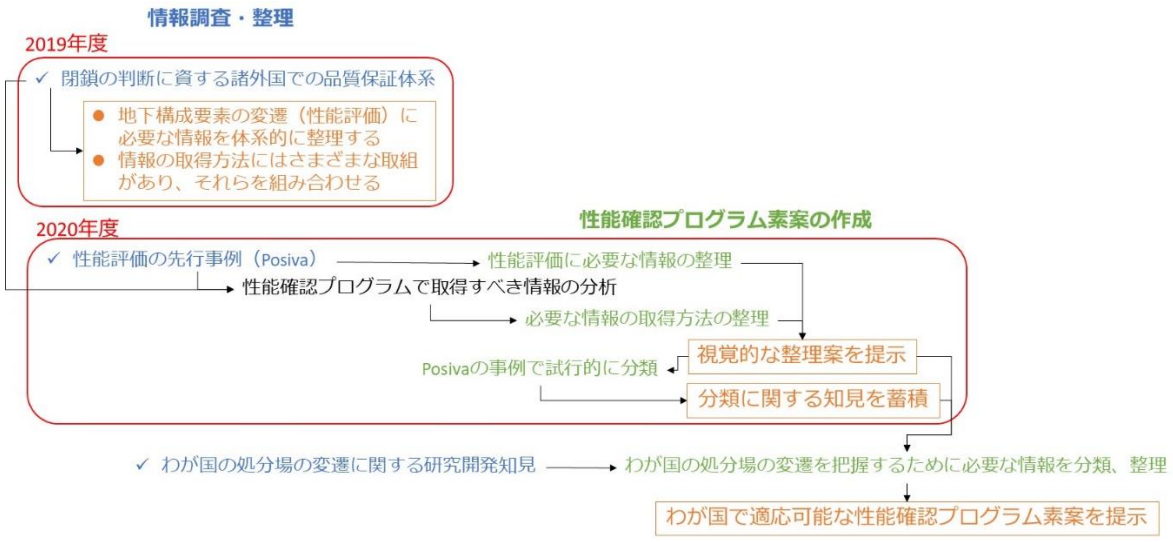


図 5.4-1　性能確認プログラムの具体化に関する調査研究方針

性能確認プログラムの具体化に向けて、今年度は 3 か年計画の初年度として、性能評価の体系的な整理を実施している Posiva 情報を整理し（5.4.2）、性能確認プログラムで取得すべき情報について分析する（5.4.3）。性能確認プログラムで取得すべき情報の分析については、今年度及び過年度の調査結果を用いて、性能評価に必要な情報を取得する方法としてどのような取組みが考えられるか、分類項目を整理する。整理した分類項目に対し、Posiva の埋め戻し材を例として、性能評価で必要とされる情報をどのように取得するかの分類し、分類工程に関する知見を蓄積する。来年度以降、今年度得られた知見を踏まえながらわが国の性能確認プログラムで取得すべき情報を整理する。

5.4.2 地下構成要素に対する性能評価の実施内容

わが国における性能確認プログラムで取得すべき情報を効率的に整理するため、まずは性能評価について体系的に整理されている Posiva の事例を整理する。調査対象は Posiva のセーフティケースのうち、性能評価に関する報告書（竪置き概念である KBS-3V に関する報告書（Posiva, 2013）及び横置き概念である KBS-3H に関する報告書（Posiva, 2018））とその関連文書とする。

竪置きの KBS-3V 概念および横置きの KBS-3H 概念に関する性能評価は、表 5.4-1 に示すようにそれぞれの評価期間に分けられている。本業務における検討は建設・操業～再冠水完了までを対象としていることを踏まえ、調査対象とする評価期間を限定した。また、調査結果は KBS-3V、KBS-3H のそれぞれの地下構成要素に設定されている性能評価項目ごとに整理した。

表 5.4-1 KBS-3 概念における性能評価期間と調査対象期間

	評価期間	調査対象
KBS-3V	掘削及び操業期間から閉鎖まで	○
	閉鎖後 1 万年まで	○
	長期的変化（Long-term evolution）	
	繰り返される氷河周期の変化（Evolution for repeated glacial cycles）	
KBS-3H	坑道（Drift）が飽和するまでの初期の変化 （Early evolution until saturation of the drift）	○
	次の氷河期までの坑道の変化 （Evolution of the drift until the next glacial period）	
	その後の氷河サイクル中の坑道の変化 （Evolution of the drift during subsequent glacial cycles）	

Posiva の性能評価事例を調査する中で、性能確認プログラムで取得すべき情報を整理するためには以下に示す情報を抽出する必要があると考えられた。

- 性能評価項目
  地下構成要素の性能に影響する変遷挙動（状態や機能の変化）やプロセス
- 評価パラメータ
  各性能評価項目が、何をパラメータ（評価指標）としているか
- 評価方法
  評価パラメータをどのような方法で評価しているか
- データ
  評価に使用されているデータは何か

性能確認プログラムで取得すべき情報は、上記のうちデータに相当する。ただし、評価方法が変われば必要なデータも変わるため、評価方法が定まっていない場合などでは評価パラメータが性能確認プログラムで取得すべきデータとなる可能性もある。上記の項目で Posiva の性能評価に関する調査内容を分類した整理結果を表 5.4-2～表 5.4-9 に示す。なお、Posiva の性能評価に関する詳細な内容は付録 8 に示した。調査結果の整理は、以下のような判断で実施した。

- 各評価項目のパラメータやデータに関する記述が見られない場合には、「具体的記述なし」と記述した。
- 埋め戻し材の性能評価項目の一部について、評価パラメータやデータが緩衝材と同様となる場合には、その旨を記述した（例「パイピング/エロージョン」など）。
- KBS-3Hにおける性能評価項目の評価パラメータやデータがKBS-3Vと同様の場合も、その旨を記述した。
- 表 5.4-6～表 5.4-9における黄色ハッチングはKBS-3Vと評価パラメータが異なる性能評価項目を示しており、赤文字はKBS-3Hに特有の性能評価項を示している。

KBS-3V と KBS-3H の性能評価項目等を比較してみると、多くの項目は共通しており、異なるのは KBS-3H に特有の地下構成要素であるスーパーコンテナに関係する評価である。また、KBS-3V 及び KBS-3H ともに埋め戻し材の性能評価項目の多くは緩衝材と同様の評価を行っている。これは KBS-3 概念における緩衝材及び埋め戻し材はベントナイトを主成分としていることに起因すると考えられる。また、埋め戻し材の性能評価項目「処分坑道プラグの変化」と、閉鎖材の性能評価項目「閉鎖プラグの変化」は、どちらもコンクリート構造物の変化を対象としており、評価に用いられるパラメータも同じであった。このことから、地下構成要素の材料に応じた評価項目と評価方法の整備の有用性が考えられた。処分概念や人工バリアを含む地下構成要素の詳細な仕様が決定していなくても、地下構成要素の材料ごとに評価方法を整備しておき、実際に仕様が決まった場合にそれらの情報を反映させることで柔軟な対応が可能と考えられる。

表 5.4-2　フィンランド KBS-3V における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（キャニスタ）

処分場構成要素	性能評価項目					パラメータ	評価方法	データ	備考 (*)
	THMCR 分類	項目（プロセス）		掘削・操業から閉鎖まで	閉鎖後 1 万年まで				
キャニスタ	力学・化学	腐食	定置前の、大気による腐食	○		大気による腐食効果 (*)	文献調査 (*)	具体的な記述なし	腐食現象に関する文献のレビューを実施し、左記項目による影響を定性的に評価している。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 1) 腐食とその力学的影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.7.2
			取り扱いと据え付けに起因する腐食	○		取り扱い時に生じるキャニスタ表面の不連続部やオーバーパックの変形に対する荷重 (*)	文献調査 (*)	具体的な記述なし	腐食現象に関する文献のレビューを実施し、左記項目による影響を定性的に評価している。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 1) 腐食とその力学的影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.7.3
			応力腐食割れ	○		銅製キャニスタの応力腐食割れへの感受性、キャニスタの蓋の溶接時に生じる残留応力 (*)	文献調査 (*)	具体的な記述なし	腐食現象に関する文献のレビューを実施し、左記項目による影響を定性的に評価している。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 1) 腐食とその力学的影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.7.4
			不飽和緩衝材中の外部腐食	○		銅製キャニスタ周囲の湿度 (*)	文献調査 (*)	具体的な記述なし	腐食現象に関する文献のレビューを実施し、左記項目による影響を定性的に評価している。 ・ 該当箇所（付録8）： 5.1.2 (1) 1) 腐食とその力学的影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.7.6
			高塩分地下水中における銅の腐食	○		ニアフィールドの pH (*)	文献調査 (*)	具体的な記述なし	腐食現象に関する文献のレビューを実施し、左記項目による影響を定性的に評価している。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 1) 腐食とその力学的影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.7.8
			残留水の放射線分解による内部腐食	○		キャニスタあたりの放射線分解によって形成される酸の生産収率（the radiolytic acid production yield）	計算（詳細記述なし）	キャニスタ 1 本あたりの内部残留水量[g] など	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 1) 腐食とその力学的影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.7.5
			処分坑道内における好気性腐食	○		好気性腐食による最大腐食量	物質収支法による計算	埋め戻し材内の残留空気量[mol]	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 1) 腐食とその力学的影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.7.7
			緩衝材が飽和している間の腐食		○	銅のピッティング (*)	文献調査 (*)	pH Cl^-含有量 微生物活性	腐食現象に関する文献のレビューを実施し、左記項目による影響を定性的に評価している。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 4) 腐食（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.8.2
			緩衝材が飽和した後の腐食 - 硫化物の腐食		○	腐食電位の変遷	混合電位モデル	O_2 消費量[mol] HS^-発生量[mol] など	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 4) 腐食（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.8.3
			緩衝材間隙水の放射線分解に起因する、外部キャニスタの腐食		○	酸化放射線分解生成物（oxidising radiolysis products）からの最大腐食量 (*)	文献調査 (*)	具体的な記述なし	腐食現象に関する文献のレビューを実施し、左記項目による影響を定性的に評価している。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 4) 腐食（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.8.4
		力学的影響（荷重）	等方圧荷重		○	ベントナイトの膨潤圧[MPa]	文献調査 (*)	モンモリロナイト含有量 飽和密度[kg/m^3] など	ベントナイトの膨潤圧についての文献をレビューし、キャニスタの強度解析の定義と比較対照して評価している。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 3) 力学的荷重 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.9.2
			ベントナイトの不均一な膨潤圧		○	不明（考慮すべき多くのパラメータがある、との記載） (*)	文献調査 (*)	具体的な記述なし	複数の包括的荷重ケースの評価がなされた文献をレビューしている。ベントナイト緩衝材の不均一な膨潤圧は、処分孔に流入する水の確率特性、初期的なベントナイトの特性のばらつき、処分孔またはベントナイト緩衝材の初期的な形状や位置の幾何学的精度不良に依存しており、考慮すべき多くのパラメータがある、

									としている。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 3) 力学的荷重 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.9.3
			岩石せん断荷重		○	評価を実施していない（*）	具体的な記述なし（*）	具体的な記述なし	「岩石せん断荷重は確率論的な性格の荷重であるため、既存のキャニスタ位置に集中したせん断、及びその規模を超えるせん断の発生確率が非常に低く、許容され得るものであるように、設計岩石せん断ケース 5 ㎝幅、が定義されている。」という記載である。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 3)力学的荷重 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.9.5
	放射線	未臨界		○		キャニスタが定置時に未臨界状態にあることの保証	輸送及びカプセル封入の目的に対しての臨界安全性解析結果の引用	具体的な記述なし	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 2)未臨界（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.8
					○	燃料棒の初期形状の維持（*）	具体的な記述なし（*）	具体的な記述なし（*）	「最初の 10,000 年間、キャニスタは損傷などがない状態であると予測され、よって燃料棒の初期形状も維持されると予測される。」という評価結果の記載があるが、その根拠については記載がない。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (1) 5) 未臨界（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.10

表 5.4-3　フィンランド KBS-3V における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（緩衝材）

処分場構成要素	性能評価項目 THMCR分類	項目（プロセス）		掘削・操業から閉鎖まで	閉鎖後1万年まで	パラメータ	評価方法	データ	備考（*）
緩衝材	熱	温度変化		○		キャニスタの表面及び処分孔壁（Deposition hall wall）の温度変化	予測 (予測方法の具体的な記述はなし)	平均燃焼度[MWd/kgU] キャニスタ同士の距離[m] 緩衝材の導電率 [W/(m・K)] 時間[年]	・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 1)温度変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.2.2
					○	上記に同じ	上記に同じ	上記に同じ	・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 7)　温度変化（閉鎖後1万年まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.2
	水理・力学	パイピング／エロージョン		○		Ms：パイピング／エロージョンによる粘土の重量減少量[kg]	経験則に基づく式（Posiva, 2013） Ms＝Cs×Qw×t t：時間[年]	Cs：浸食水中の固相含有量[kg/m^3] Qw：パイピング／エロージョンに寄与する水量[m^3/y]	・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 2)　パイピング／エロージョン（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.4.2
		飽和プロセス			○	緩衝材の飽和度	CODE BRIGHT によるモデリング	時間[年]	・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 1) 8)　飽和プロセス（閉鎖後1万年まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.4.2
		膨潤及び均質化	膨潤作用		○	粘土の膨潤圧[kPa]	右記の条件を変化させて膨潤圧を実測	試料乾燥密度[kg/m^3] 地下水の塩分濃度[g/L]	・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 9)　膨潤及び均質化（閉鎖後1万年まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.4.3 および 6.4.4
			均質化		○	試料の平均含水率、 平均乾燥密度	数値モデルと複数の相補的ラボ試験	具体的な記述なし	
		緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤			○	「キャニスタと緩衝材の間」(1 か所)、「緩衝材と埋め戻し材の間（3 か所）」のそれぞれの鉛直変位[m]	CODE BRIGHT によるモデリング	時間[年]	・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 10)（飽和した）緩衝材ベントナイトの、埋め戻し材への膨潤（閉鎖後1万年まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.4.5
	化学	酸素の枯渇及び pH 変化		○		酸素消費速度	物質収支計算	緩衝材と埋め戻し材内の残留空気中の酸素量 微生物作用 黄鉄鉱の酸化	・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 3)　酸素の枯渇及びpH変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.5.2
						pH の変化	具体的な記述なし	二酸化炭素の生成 二酸化炭素分圧（P_{CO_2}）の増加	
		コロイド生成		○		コロイドの分布密度の変遷（特に処分物質の分解に関連するもの）及び変化する地下水条件下でのコロイドの移動性と安定性（*）	文献調査（*）	無し	コロイドに関する文献をレビューしているのみ。具体的な評価に至っていない。「導入されたコロイドの分布密度の変遷、特に処分物質の分解に関連するものや、および変化する地下水条件下でのコロイドの移動性と安定性については、まだ十分に定義されていない。」との記載あり。 ・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 4）コロイド生成（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.5.3
		セメント系浸出液の影響		○		$n_{OH,defect}$：各体積に対応するモンモリロナイトを溶解するのに必要な OH^- の量[mol]	経験則に基づく式（Posiva,2012）、（Posiva,2013） $n_{OH,shape} = B \cdot \frac{m_{montmo,shape}}{M_{montmo}}$	$m_{montmo,shape}$：与えられた形状の体積中のモンモリロナイトの質量[kg] M_{montmo}：モンモリロナイトの分子量[367 g/mol] B：モンモリロナイト溶解反応の化学量論的因子	・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 5)　セメント系浸出液の影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.5.4
					○	緩衝材と接触することになる OH^- イオンの量、または pH	具体的な記述なし	具体的な記述なし	・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 17)　セメント浸出液の影響（閉鎖後1万年まで） ・該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.5.8
		シリカゾルの影響		○		シリカゾルの凝集（*）	文献調査（*）	無し	ベントナイトに対するシリカゾルの定性的作用に関する文献をレビューしているのみ。具体的な評価に至っていない。「シリカゾルとベントナイトのコロイドが様々な状態においてどのように凝集するかについては不確実性がある。」との記載がある。 ・該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 1) 6)　シリカゾルの影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

								・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.5.5
		上昇した温度下での地球化学的変遷		○	温度[℃]、Na^+交換率（体積分率）、[%]、Ca^{2+}交換率（体積分率）、[%]、SiO_2形成（am）、カルサイト[%]、無水物形成率[%] など	The integral finite difference code；TOUGHREACT を使用した熱水地球化学モデリング	時間[年]	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 11） 予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.5.2
		モンモリロナイトの変質		○	緩衝材中のスメクタイトがイライトへ転換する割合	複数のモデルによるモデリング	カリウムイオン濃度[mg/L] 温度[℃] 時間[年]	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 12） モンモリロナイトの変質（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.5.3
		熱的ステージでのセメンテーション		○	モンモリロナイトの変質から形成される二酸化ケイ素（SiO_2）の量	反応輸送モデルを用いた計算	随伴鉱物の溶解－析出プロセスからの析出ケイ酸の量	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 13） 熱的ステージでのセメンテーション（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.5.4
		飽和後の間隙水の化学反応・陽イオン交換体化学		○	MX-80 ベントナイトの間隙水と交換体の組成 logP_{CO_2}、pH など	間隙水の化学反応式から計算	具体的記述なし	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 14）飽和後の間隙水の化学反応及び陽イオン交換体の化学反応（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.5.5
		微生物活動		○	代替緩衝材中の好気性従属栄養性細菌（CHAB）、硫酸塩還元細菌（SRB）、独立栄養性酢酸生成細菌（AA）、及び鉄還元細菌（IRB）の量[/g]	定量解析	具体的記述なし	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 15）微生物活動（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.5.6
		硫化物の流入		○	硫化物の拡散流量（*）	分析収縮コアモデルと一次元線形反応輸送モデル	具体的記述なし	分析収縮コアモデルと一次元線形反応輸送モデル（an analytical shrinking core model and a linear 1D reactive transport model）を使用した境界評価（bounding assessment）を行っているが、このモデルに投入するパラメータについては具体的な記述がない。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (2) 16） 硫化物の流入（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.5.7

表 5.4-4　フィンランド KBS-3V における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（埋め戻し材）

処分場構成要素	性能評価項目				パラメータ	評価方法	データ	備考 (*)
	THMCR 分類	項目（プロセス）	掘削・操業から閉鎖まで	閉鎖後 1 万年まで				
埋め戻し材	水理・力学	パイピング／エロージョン	○		緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 1) パイピング／エロージョン（掘削及び操業期間から閉鎖まで ） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.4.2
		飽和プロセス		○	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 7)飽和プロセス（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.4.2
		膨潤及び均質化		○	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 8) 膨潤及び均質化（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.4.3 および 6.4.4
		緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤		○	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 9) 緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.4.5
	力学・化学	処分坑道プラグ（コンクリート構造物）の変化	○		設置後最初の 100～200 年間に HZ20 層より上で使用される標準コンクリートの耐久性	設計ガイドラインとの比較	具体的記述なし	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 2) 処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.6.3
					設置後最初の 100～200 年間に HZ20 層より下で使用される低 pH 自己圧密コンクリートの耐久性	コンクリート強度試験の実施	具体的記述なし	
	化学	酸素の枯渇及び pH 変化	○		緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 3) 酸素の枯渇及びpH変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.5.2
		コロイド生成	○		緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 4) コロイド生成（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.5.3
		セメント系浸出液の影響	○		緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 5) セメント系浸出液の影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.5.4
		シリカゾルの影響	○		緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 6) シリカゾルの影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　5.5.5
		飽和後の間隙水の化学反応		○	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	緩衝材に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 10) 飽和後の間隙水の化学反応（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.6.2
		硫化物の生成と微生物活動		○	硫化物の生成速度	バウンディング解析及び熱力学計算	埋め戻し材と緩衝材のインターフェースにおける溶解硫化物の最大濃度[mol/L] キャニスタへの硫化物流束	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 11) 硫化物の生成と微生物活動（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.6.3
		セメントー粘土相互作用		○	埋め戻し材の上の処分坑道プラグに使われる低 pH のコンクリートの劣化が与える影響	反応輸送シミュレーション	CSH 相の溶解によって発生する高 pH（pH > 11）のプルームの移動距離 など	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 12) セメントー粘土相互作用（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.6.4
		鉄－粘土相互作用		○	鉄と粘土の相互作用の影響 (*)	文献調査 (*)	具体的記述なし	埋め戻し材の鉄－粘土相互作用について、室内実験の結果をまとめた複数の論文をレビューしているが、論文では、相互作用の詳細はまだ明らかになっておらず、影響は可能性として示されているにとどまる。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (3) 13) 鉄－粘土相互作用（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013）　6.6.5

表 5.4-5　フィンランド KBS-3V における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（閉鎖材）

処分場構成要素	性能評価項目				パラメータ	評価方法	データ	備考 (*)
	THMCR 分類	項目（プロセス）	掘削・操業から閉鎖まで	閉鎖後 1 万年まで				
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化	○		具体的記述なし (*)	地下水と閉鎖要素との顕著な化学的相互作用の有無を予測	具体的記述なし	地下水と閉鎖要素との顕著な化学的相互作用は予測されないとし、この段階において、品質管理策が厳密に遵守されていれば、閉鎖埋め戻し材の性能に大きな不確実性は存在しない、という評価であり、パラメータに関する明確な記述がない。 ・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (4) 1) 閉鎖材の変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.6.2
				○	処分坑道と閉鎖埋め戻し材（closure backfill）の性能低下の影響	シミュレーション	坑道の透水係数（hydraulic conductivity）[m/s] など	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (4) 3) 閉鎖材の変化（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.7.2
	力学・化学	閉鎖プラグ（コンクリート構造物）の変化	○		埋め戻し材の「処分坑道プラグ（コンクリート構造物）の変化」に同じ	埋め戻し材の「処分坑道プラグ（コンクリート構造物）の変化」に同じ	埋め戻し材の「処分坑道プラグ（コンクリート構造物）の変化」に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (4) 2) 閉鎖プラグにおけるコンクリート構造物の変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 5.6.3
				○	低レベル及び中レベル廃棄物処分場のコンクリートの耐久性	数値モデル（FEM）	具体的記述なし	・ 該当箇所（付録8）：5.1.2 (4) 4) 閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化（閉鎖後1万年まで） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2013） 6.7.3

表 5.4-6　フィンランド KBS-3H における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（スーパーコンテナ）

処分場構成要素	性能評価項目 THMCR 分類	項目（横置き）Posiva2016-02		坑道（Drift）が飽和するまでの初期の変化	評価パラメータ	評価方法	データ	備考（*）
スーパーコンテナ	化学	チタン合金の一般的な腐食の挙動		○	中性に近い状態でベントナイトと接触するチタン合金の腐食速度 低 pH コンクリートと接触するチタン合金の腐食速度	文献調査（*）	pH 酸素濃度 放射線レベル 塩化物種や硫黄種など攻撃的な種の濃度（concentration of aggressive species, such as chloride, sulphur species） 微生物活動 温度	2 つの評価パラメータ（「中性に近い状態でベントナイトと接触するチタン合金の腐食速度」及び「低 pH コンクリートと接触するチタン合金の腐食速度」）を、文献レビューにより予測して評価している。 ・　該当箇所（付録8）：5.2.2(1) 1)　チタン合金の一般的な腐食の挙動 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.4.1
	化学	閉鎖直後、飽和前の予想腐食率（Expected corrosion rates immediately post-closure, before saturation）		○	チタン合金を含む 3 種類の部品（スーパーコンテナシェル、コンパートメントプラグ、ドリフトプラグ）の腐食速度	スーパーコンテナシェル、コンパートメントプラグ、ドリフトプラグの腐食速度を、それぞれの厚さと比較	局所的な微生物活動 鉱物の酸化 金属材料の腐食によって消費される酸素の残量	・　該当箇所（付録8）：5.2.2(1) 2) 閉鎖直後、飽和前の予想腐食率 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.4.2
	力学	プラグ（ドリフトプラグとコンパートメントプラグ）の機械的性能	力学的な過負荷	○	評価を実施していない（*）	予測される負荷と設計上耐えられる負荷の比較	具体的記述なし	「ドリフトプラグとコンパートメントプラグが予測される負荷に耐えるように設計されているため、影響を受けない。」と結論づけられている。 ・　該当箇所（付録8）：5.2.2(1) 3)プラグ（ドリフトプラグとコンパートメントプラグ）の機械的性能 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.4.3
			クリープ変形	○	チタン合金のクリープ特性（*）	文献調査（評価するにはデータ不十分、との結論）（*）	チタンのクリープ変形しきい値温度：約 647K（374°C）	チタン合金のクリープ特性についての文献レビューの結果、評価をするにはデータが不十分であると結論付け、性能評価をしていない。 ・　該当箇所（付録8）：5.2.2(1) 3)プラグ（ドリフトプラグとコンパートメントプラグ）の機械的性能 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.4.3
			持続荷重割れ	○	クリープ延性の高さ	文献調査（評価するには現象解明不十分、との結論）（*）	水素または水素化物の生成 結晶学的配向の違いによる、隣接する粒子のクリープひずみ蓄積の不一致	持続荷重割れ現象に関する文献をレビューし、クリープ延性の低下が持続荷重割れに関係する可能性が高いことを示している。そのうえで、該事業で使用されるチタン合金（グレード 12 チタン合金）のクリープ延性の高さから、初期評価では、これが短期的に問題になる可能性は比較的低いと予測評価している。ただし、文献調査の結果は、クリープ延性の低下が関係する可能性を示唆しているのみであるため、性能評価に追加の実験作業が必要になると結論付けられている。 ・　該当箇所（付録8）：5.2.2(1) 3) プラグ（ドリフトプラグとコンパートメントプラグ）の機械的性能 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.4.3

※　黄色ハッチング・・・KBS-3Vと評価パラメータが異なる性能評価項目
※　赤文字・・・KBS-3Hに特有のスーパーコンテナシェルなどに関連する性能評価項目

表 5.4-7　フィンランド KBS-3H における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（キャニスタ）

処分場 構成要素	性能評価項目				評価パラメータ	評価方法	データ	備考（*）
	THMCR 分類	項目（横置き）Posiva2016-02		坑道（Drift）が飽和するまでの初期の変化				
キャニスタ	力学	熱的及び力学的影響		○	竪置き「力学的影響（荷重）」に同じ（ただし、「ベントナイトの不均一な膨潤圧」のみ）	竪置き「力学的影響（荷重）」に同じ（ただし、「ベントナイトの不均一な膨潤圧」のみ）	竪置き「力学的影響（荷重）」に同じ（ただし、「ベントナイトの不均一な膨潤圧」のみ）	・　該当箇所（付録8）：5.2.2(2) 1) 熱的及び力学的影響 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　10.2.2
	化学	腐食	定置前の、大気による腐食	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	・　該当箇所（付録8）：5.2.2(2) 2) 腐食 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　10.2.1
			取り扱いと据え付けに起因する腐食	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	
			応力腐食割れ	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	
			残留水の放射線分解による内部腐食	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	
			不飽和緩衝材中の外部腐食	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	
			処分坑道内における好気性腐食	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	
			高塩分地下水中における銅の腐食	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	
			緩衝材の飽和中の腐食	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	
			緩衝材の飽和後の腐食 – 硫化物腐食	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	
			緩衝材の間隙水の放射線分解に起因する外部キャニスタの腐食	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	
			迷走電流に起因する腐食	○	銅製キャニスタの腐食速度[μm/年]	処分坑道の抵抗モデル及び 1 台のスーパーコンテナセクションの数値計算	抵抗率 処分坑道長さ[m] 電界[V/km]	・　該当箇所（付録8）：5.2.2(2) 2) 腐食 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　10.2.1　Stray current corrosion
			ガルバニック腐食	○	ガルバニック腐食による銅の腐食速度（*）	文献調査（複数文献により総合的に評価）（*）	具体的記述なし	ガルバニック腐食の様々な要因の影響に関する複数の文献のレビューにより定性的に評価している。 ・　該当箇所（付録8）：5.2.2(2) 2) 腐食 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　10.2.1　Galvanic corrosion of copper due to titanium
	放射線	未臨界		○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	・　該当箇所（付録8）：5.2.2(2) 3) 未臨界 ・　該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　10.2.3

※　黄色ハッチング・・・KBS-3Vと評価パラメータが異なる性能評価項目
※　赤文字・・・KBS-3Hに特有のスーパーコンテナシェルなどに関連する性能評価項目

表 5.4-8　フィンランド KBS-3H における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（緩衝材）

処分場 構成要素	性能評価項目 THMCR 分類	項目（横置き）Posiva2016-02	坑道（Drift）が飽和するまでの初期の変化	評価パラメータ	評価方法	データ	備考
緩衝材	熱	温度変化	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 1)温度変化 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　5.2
	水理・力学	力学的浸食（Mechanical erosion）	○	$m_{erosion}$：流入位置付近の処分坑道の長さあたりの、粘土の損失質量[g/m]	経験則に基づく式（Posiva, 2018） $m_{erosion} = c \times V_{piping}$	c：単位流量体積及びパイピングが発生する材料の長さあたりのパイピングフローの粘土輸送能力[g/m・L] V_{piping}：処分坑道の飽和段階で、1 つの流入場所から流入する水の体積[L]	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 2)力学的浸食（Mechanical erosion） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.2.2
		水の吸収と膨潤	○	キャニスタ周辺各部位の飽和度[-]	CODE_BRIGHT によるモデリング	時間[年]	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 3)水の吸収と膨潤 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.2.1
	化学	酸素欠乏と pH の変化（Oxygen depletion and changes in pH）	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 4) 酸素欠乏とpHの変化（Oxygen depletion and changes in pH） ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.3.4
		コロイドの形成	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 5)コロイドの形成 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.3.5
		セメント系浸出液の影響	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 6) セメント系浸出液の影響 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.3.2　Effect of cementitious leachates
		予想される温度上昇範囲における緩衝材の地球化学的変遷	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 7) 予想される温度上昇範囲における緩衝材の地球化学的変遷 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.3.1
		モンモリロナイトの変質	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ（加えて、Nagra-Posiva-SKB 研究結果（Leupin et al. 2015）に基づいて評価）。	KBS-3V に同じ（Nagra-Posiva-SKB 研究結果については具体的な記載なし。）	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 8) モンモリロナイトの変質 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.3.2　Montmorillonite transformation
		セメンテーションと不飽和条件の影響	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ（加えて、ベントナイトの物理試験に関連する文献調査）	KBS-3V に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 9) セメンテーションと不飽和条件の影響 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.3.2　Cementation and effects of unsaturated conditions
		微生物活動	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 10) 微生物活動 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.3.3
		スーパーコンテナ チタンシェルの影響	○	緩衝材に移行する Ti の量	物質収支計算	腐食速度[nm/a] 時間[年]	・ 該当箇所（付録8）：5.2.2 (3) 11) スーパーコンテナ チタンシェルの影響 ・ 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018）　7.3.2　Impact of the supercontainer titanium shell

※　黄色ハッチング・・・KBS-3Vと評価パラメータが異なる性能評価項目
※　赤文字・・・KBS-3Hに特有のスーパーコンテナシェルなどに関連する性能評価項目

表 5.4-9　フィンランド KBS-3H における性能評価項目（プロセス）とそれらの評価に用いるパラメータ（埋め戻し材、閉鎖材）

処分場 構成要素	性能評価項目			評価パラメータ	評価方法	データ	備考
	THMCR 分類	項目（横置き）Posiva2016-02	坑道（Drift）が飽和するまでの初期の変化				
埋め戻し材	水理・力学	機械的浸食（Mechanical erosion）	○	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	• 該当箇所（付録8）：5.2.2 (4) 1) 力学的浸食（Mechanical erosion） • 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018） 7.2.2
		水の吸収と膨潤	○	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	• 該当箇所（付録8）：5.2.2 (4) 2) 水の吸収と膨潤 • 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018） 7.2.1
	化学	酸素欠乏と pH の変化 （Oxygen depletion and changes in pH）	○	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	• 該当箇所（付録8）：5.2.2 (4) 3)酸素欠乏とpHの変化（Oxygen depletion and changes in pH） • 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018） 7.3.4
		コロイドの形成	○	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	• 該当箇所（付録8）：5.2.2 (4) 4) コロイドの形成 • 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018） 7.3.5
		セメント系浸出液の影響	○	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	• 該当箇所（付録8）：5.2.2 (4) 5) セメント系浸出液の影響 • 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018） 7.3.2 Effect of cementitious leachates
		微生物活動	○	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	KBS-3H 緩衝材に同じ	• 該当箇所（付録8）：5.2.2 (4) 6)微生物活動 • 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018） 7.3.3
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	• 該当箇所（付録8）：5.2.2 (5) 1) 閉鎖材の変化 • 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018） 11.2
	力学・化学	閉鎖プラグの変化	○	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	KBS-3V に同じ	• 該当箇所（付録8）：5.2.2 (5) 2) 閉鎖プラグの変化 • 該当箇所（原文）：（Posiva, 2018） 11.3

5.4.3　性能確認プログラムで取得すべき情報の分析

性能確認プログラムで取得すべき情報とその取得方法を体系的に整理するため、5.4.2 の調査内容や既往の検討成果から、性能評価に必要な情報（データ）を取得する方法について検討した。検討の結果、わが国で適応可能な性能確認プログラムで取得すべき情報の取得方法は以下のように考えられた。以降では諸外国の知見などを含めながらその取得方法が選ばれた経緯を示す。

- 品質保証プログラム
- 操業中モニタリング
- 試験（実規模、中規模、室内規模）
- 数値解析
- 既存文献の調査

品質保証プログラムの位置づけ

性能確認プログラムで取得すべき情報は性能評価に必要な情報である。5.4.2 で示した品質保証プログラムで得られる地下構成要素の施工直後の品質は、その後の変遷を評価する性能評価の初期条件となる情報であり、必要かつ重要な情報である。

操業中モニタリングの考え方

設置された地下構成要素の変遷挙動を把握する方法として、確度が最も高いと考えらえるのは設置した地下構成要素の対象となるデータを経時的に計測、観察するモニタリングだと考えられる。ただし、受動的管理を基本とする地層処分においては、閉鎖後のモニタリングは検討されないため、操業中アクセスできる範囲でのモニタリングとなる。

対象となる地下構成要素を原位置で継続的に直接計測するモニタリングは、時間・空間的に、さらには規制や地域住民などのステークホルダへの説明責任の観点からも最も妥当性の高い方法である。一方で、モニタリングのための計測器やケーブルの設置による水みちの形成や計測器の耐久性、バッテリー切れなどによる計測可能な期間の制限などが国際的に懸念されている（IAEA, 2014）。これらの懸念から、人工バリアを含む地下構成要素を直接計測するのではなく、処分場内の温度、地震活動、潜在的な岩盤の変位（地震活動のモニタリングとの関連）、地下水の組成と流れ及び中央坑道側の処分坑道プラグ正面の目視によるモニタリングする例が SKB や Posiva で見られた（Modern2020, 2019）。この方法はアクセス可能な地点から、対象とする地下構成要素に関係するデータを現地で継続的に計測、記録するため、エビデンスとしての信用性が高い。ただし、直接的な計測ではないことから、問題が発生した場合に、正確な地点の特定が出来ない可能性がある。

試験（実規模、中規模、室内規模）の考え方

性能評価に必要な情報を得る取組みの 1 つとして、さまざまな試験が国内外で行われている。試験はその対象や求める精度によって、実施される場所や規模が異なり、より実際の状態を把握し確度の高いデータを取得するならば、実処分施設に隣接した区域に実証試験施設を設ける方法がある。例えば、スイスの場合、操業開始の許認可を得るため、試験施設（Test Facility）を設置することとしている。試験施設はサイト調査（主として地表からの探査）で取得できない情報や、主施設（Main Facility）の操業に必要な情報、さらには閉鎖後の安全性に関連する情報の取得を目的として複数の坑道内での試験などが計画され、サイト固有の地下岩盤研究施設（URL）と位

置付けられている。ただし、操業許認可のための情報は従前より実施される地上実験施設や他のサイトの URL などの一連の実験結果とともに評価される。操業が認可され廃棄物の定置が可能となった段階以降は、主施設に先だってパイロット施設（Pilot Facility）でモニタリングが実施される予定である。パイロット施設は、主施設と同じ廃棄物を処分し、モニタリングにより人工バリアの挙動に関する情報を提供し、予測モデルを確認することを目的として設置される。さらには、主施設の操業中も継続的にモニタリングを実施することで、施設全体の閉鎖に関する意思決定のための情報を提供する実証施設としても機能する（Nagra, 2002）。

地下岩盤研究施設は上述のスイスのテスト施設のように実処分場に隣接して建設される場合には、実処分場に限りなく近い環境情報が得られる。わが国の例で考えると精密調査段階に建設される地下調査施設が同様の考え方である。一方で、他のサイトでの地下岩盤研究施設でも岩盤特性の調査や、坑道サイズに合わせた施工性の確認試験など、得られるものは多い。わが国の例で考えれば、幌延深地層研究センターや瑞浪超深地層研究所での研究事例が該当する。このような地下試験は、実際の処分環境に近い条件での試験となるため信用性の高いデータが得られるが、地下施設によってはコストや試験期間、試験規模、試験内容などが制限される。また、他のサイトでの地下研究所であれば、実サイトとの環境条件の違いも加味しなければならない。

地下での実証試験の多くは単独で成立するものではなく、5.3.2(2)で示したように、室内規模試験や地上での実証試験などの成果から補完されている。また、処分場の変遷を把握するためには実証試験のみならず、現象理解のための試験なども重要である。現象理解のための試験ならば、安定した環境下で要因を分析するために室内規模の試験が有用だと考えられる。室内規模の試験では実験対象の含水比や乾燥密度といった前提条件の変更が比較的容易であり、ケース数を増やした検討なども可能である。

数値解析の考え方

地層処分の特徴として、地下環境であることと長期の検討が必要であることを踏まえると解析による推測値の活用は不可欠である。特に、サイトが決定する前のジェネリックな段階や、サイト特異的な情報の少ないサイト選定初期段階においては解析によるデータ取得（推定）の割合は多くなる。評価手法として用いることもあることから、妥当性や信頼性が保証された解析手法を用いる必要がある。また、あくまで推定値となることから、事業段階が進み、実サイトの地質環境情報などが取得できた場合には置き換えるなど、段階に応じた反映が必要である。

既存文献の調査の考え方

第 2 次取りまとめ_分冊 3 における評価パラメータの確認方法に関する記述によれば、「文献より値を設定」が確認できる。文献調査段階含め、性能評価に必要な情報を文献から得ることは十分に考えられる。引用文献の信頼性や情報の適用性を判断するためにも、その文献の条件などの記載が重要である。

以上の検討内容について、わが国に適応可能な性能確認プログラムに含まれる取組の概要と特徴を表 5.4-10 のように整理した。

表 5.4-10　わが国に適用可能な性能確認プログラムにおける必要なデータを取得する取組み

データの取得方法		データの取得方法の概要	特徴
品質保証プログラム		・ 製造・施工の各工程に管理項目や管理指標などを設け、設置直後の品質を保証する	品質保証プログラムは、事前の試験などでの確認が十分なされている場合に信用度は高い。品質保証プログラムの目的は「施工直後の品質を定置までに確認する」ことであり、性能確認プログラムで取得すべき情報のうち、性能評価の初期条件に相当する情報が得られる。
操業中のモニタリング		・ 構成要素に計測器などを設置し、構成要素を直接計測するモニタリング ・ アクセス性などの観点から直接モニタリングできない項目について、側溝や観測井戸などより浸出液などを採取する間接モニタリング	直接モニタリングは、対象物を原位置で直接、継続的に計測（モニタリング）するため、時間・空間的、さらには説明性の観点からも最も確度の高い方法である。ただし、アクセス性、人工バリアの健全性の観点などから現実的ではない。また全ての対象にセンサを設置することはコストの面から現実的ではない。センサの設置個所を限定するには、その代表性を示す根拠が必要となる。 間接モニタリングは側溝や観測井戸など、アクセス可能な地点から、対象物を間接的にモニタリングに計測する。実際の数値を計測、記録するため、エビデンスとしての信用性が高い。ただし、直接的な計測ではないため、問題が発生した場合に、正確な地点の特定が出来ない可能性がある。また、観測井戸などを設置した場合には処分場への地下水の流入など、悪影響を及ぼす可能性がある。
試験	実規模	・ 地下試験施設における実規模の試験 ・ 地上施設における実規模の試験	試験施設である為、操業中モニタリングに比べてアクセスの容易性などが高い。また実規模であるため、実際の変遷挙動に近いデータが得られる。環境条件については試験施設が建設される場所によって異なり、実処分場に隣接した施設であれば確度は高く、他サイトの試験施設であれば実際の処分場とは異なる可能性があるため相違点に留意する必要がある。また、地上施設であれば地下条件での制限についても考慮する必要がある。試験期間として数年程度の変遷しか実測できない。
	中規模	・ 実規模試験と室内規模試験の中間の規模 ・ 地上施設での試験 ・ 地下施設での試験	室内規模試験と実規模試験の中間として、実規模試験よりも縮小した構成要素により試験のことである。試験は地下施設または地上施設で実施することが想定され、地下施設で試験を実施する際には地下数百 m での試験であり、地下環境条件による試験が実施できる。試験施設として建設されている為、試験の自由度やアクセスの容易性などが高い。また実験室での試験に比べ、実規模や実規模に近い縮尺による実施できる。地上施設による試験の際には、施設設備によって環境を模擬するため、地下水流量や圧力など、設定可能な範囲で調整ができる。ただし、設備によりすべての環境が模擬できるわけではなく、限定的な試験になる。試験期間は数年程度の変遷しか実測できないことが多い。
	室内規模	・ 実験室における小規模な試験	小規模であるため、実験対象の含水比や乾燥密度といった前提条件の変更が容易である。また、試験系の工夫ができるため、現象理解などに役立つ。ただし、小規模な設備での試験となるため、処分場の環境条件を詳細に再現することは難しく、スケール効果なども考慮しなければならない。また、概ね試験期間は数時間～数年程度となり、その間の挙動しか実測できない。
数値解析		・ コンピュータ（解析モデル）を用いた地下環境などの変遷シミュレーション	試験設備がなくとも挙動の確認ができる。また地下環境の入力や、数万年に渡る評価期間の設定も可能であり、処分場のデータに基づいた長期の挙動確認ができる。あくまで解析による推測であり、実際の挙動とは異なる可能性があるため、現地情報などが入手できた場合には確認やデータの反映が必要である。
既存文献の調査		・ その時点までに公開された文献の調査	発行元の信用度が高ければ、引用が容易。ただし、合致する条件での試験結果を記述した文献でなければ、引用が難しい。条件が異なる試験結果を引用する場合には、「参考」とする必要がある。

表 5.4-10 で示した性能確認プログラムにおける取得すべきデータの取得方法について、5.4.2 で整理した Posiva における性能評価の事例で分類を試みた。検討対象は、わが国の埋め戻し材に相当する KBS-3V 概念の埋め戻し材と閉鎖材とした。整理に際してパラメータの確認方法が調査対象文献（Posiva, 2013）より読みとれず、以下のような推定を実施する場合も多かった。

- 評価方法において「ガイドラインとの比較」など既存の知見や経験などに基づいていると判断した場合には品質保証プログラムや既存文献に分類した
- 「試験を実施」とある場合には室内規模試験に分類した
- 濃度や流量などを計算に基づいて算出していると判断した場合には数値解析とした
- 分子量などの物理的な値の場合には既存文献とした

上記に示したように、Posiva の性能評価事例に対して、表 5.4-10 で示したわが国に適用可能な性能確認プログラムにおける取得すべき情報の取得方法の項目で分類検討を行ったところ、以下のような結果が得られた。

- 最も該当するデータが多かった取得方法は数値解析であった
  今回の分類検討で一番多く分類されたのは数値解析であった。数値解析は試験設備など空間的な制約がなく、また、今回設定した項目の中で唯一長期の変遷に対応できることから、その汎用性は高い。
- 品質保証プログラムに該当するものが少なかった
  性能評価事例を参照した場合、データの取得方法として品質保証プログラムに分類される項目は少なかった。品質保証プログラムで得られる施工直後の品質は性能評価の初期条件であり、評価を実施する上で必要なデータとして性能評価報告書の個別の評価事例からは読み取ることができなかった。性能評価事例を参照して分類を行う場合、性能確認方法としての品質保証プログラムの位置づけについては更なる検討が必要である。
- 操業中モニタリングで取得すべきデータは該当するものがなかった
  操業中モニタリングで取得すべきデータは今回の検討で該当するものがなかった。これは、今回の調査対象が建設認可申請に向けた性能評価であり、その時点で操業中モニタリングは未実施であるため、操業中モニタリングに該当するものがなかったと考えられる。なお、Posivaはモニタリングに関する国際共同研究Modern2020の中で、ベントナイトバリアの健全性の維持がKBS-3概念において重要な要素であることから、モニタリング活動などによるバリアの擾乱は起こさないようにするとしており（Modern2020，2017）、モニタリングパラメータのスクリーニングで操業中モニタリングに該当するデータは地下水組成など間接的に取得するものに限っている（Modern2020，2019）。

具体化を目指す性能確認プログラムは、閉鎖の判断に資するものである。原子炉等規制法によれば、廃棄事業者はその事業を開始しようとする時には廃止措置を実施するための方針を作成して、公表しなければならないとされている。そのため、事業許可申請の段階で、廃止措置を踏まえた研究開発計画が必要であり、この研究開発計画に資する情報整理のツールとして性能確認プログラムを整備したい。したがって、性能確認プログラムで取得すべき情報と、それを取得する方法の分類は現状技術のみならず、閉鎖の要件を達成するために必要な情報を見越した技術を抽出する必要がある。また、今回の検討では取得すべき情報とその情報を取得する方法の分類を行う実施者の経験と知識による判断も多かったため、一般に認められる分類方法の検討が必要である。

5.5　人工バリアを含む地下構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化

“4.処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備－坑道シーリングに関わる施工技術の整備－”で施工試験等を実施している埋め戻し材を先行検討対象として、その品質保証及び性能確認のための計測技術及び計測技術に関する共通基盤技術として計測機器やモニタリング機器に対して長期的に電力を供給することが可能な技術の一つである無線給電に関する研究開発に取り組む。

5.5.1　品質保証プログラム及び性能確認プログラムにおける計測技術の位置付け

埋め戻し材には設計要件として「低透水性」が設定されており、その内容としては「坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないこと」が求められている（NUMO, 2021）。そのためには、埋め戻し材に要求される透水係数に対して設定された施工目標値（乾燥密度）で施工することになるが、施工後には以下の事象が発生することも考えられる。

○自重沈下による坑道天端の隙間

○地下水の浸潤にともなう圧密による坑道天端の隙間

5.2 に示した品質保証プログラムの定義に従えば、施工後に発生する坑道天端の隙間の体積を把握したうえで、例えば、ベントナイトの膨潤により隙間が閉塞するベントナイト混合率を設定するなど、埋め戻し材の材料構成や施工方法に反映した製造・施工プロセス管理手法を構築する必要がある。自重沈下により発生する可能性のある坑道天端の隙間の体積については、地上施設の模擬坑道における施工試験で把握することができ、圧密沈下により発生する可能性のある隙間については、圧密試験により把握することができる。また、そのような試験で隙間体積が把握できれば、隙間の閉塞に必要なベントナイト混合率とした埋め戻し材を用いて注水可能な試験装置を用いることにより、隙間が閉塞することを確認することもできる。

そのため、本節では、以下の事象を確認するための計測技術に関する研究開発に取り組む。

○自重沈下による坑道天端の隙間の体積を把握するための計測技術

○飽和後にベントナイトの膨潤により隙間が閉塞すること確認するための計測技術

また、締め固めた土の密度は、砂置換法やブロックサンプリング試料を用いるなどの点計測が一般的であるが、埋め戻し材の品質保証のために実施される施工試験等において、その密度を連続的な分布として把握することができれば、施工後の品質に対する信頼性を向上させることができると考えられる。

上述の現象を把握するための計測技術として、海外の地層処分実施主体の取り組み状況や既往の文献等を調査した結果、表 5.5-1 に示す計測技術の適用性が高いと考えられるため、これらの計測技術を用いて埋め戻し材を対象とした要素試験を実施する。

表 5.5-1　計測技術と品質保証及び性能確認の関係

計測対象	計測技術	品質保証プログラム	性能確認プログラム
乾燥密度	：加熱式光ファイバ、誘電式水分計	○	
坑道天端の隙間	：加熱式光ファイバ、ケーブル TDR※	○	
膨潤により発生する圧力	：光ファイバ	○	○

※時間領域反射法：Time Domain Reflectometry

表 5.5-1 に示した計測技術は、埋め戻し材の一定の施工品質を確保するための製造・施工プロセス管理手法を整備するために必要な計測技術であり、これらの計測結果を反映した製造・施工プ

ロセス管理手法に基づいて施工された埋め戻し材は、操業から飽和までの品質が保証されていると考えることができる。一方で、5.2 に示した性能確認プログラムの定義に従えば、これらの計測技術のうち、膨潤により発生する圧力を計測するための光ファイバは、埋め戻し材の施工後にその性能が発揮しつつあること（ベントナイトの膨潤により坑道に生じる可能性のある隙間が閉塞する現象）を把握するための計測技術と捉えることもできる。つまり、地上施設で注水可能な試験装置で埋め戻し材と坑道界面の隙間が膨潤により閉塞する過程を確認することは、性能確認の一部となる。また、必要に応じて、地下研や地下調査施設において埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法に基づく施工を実施した実証試験により隙間の閉塞状況を確認することで、埋め戻し材の施工品質や性能に対する信頼性を向上させることができると考えられる。

これらの計測技術に加えて、将来の柔軟なモニタリング戦略の策定のための計測技術に関する共通基盤技術として、計測機器やモニタリング機器に対して長期的に電力を供給することが可能な技術の一つである無線給電技術に関する要素試験にも取り組む。

5.5.2　埋め戻し材の乾燥密度に関する計測技術の研究開発

処分場における坑道の埋め戻し材に要求される低透水性は、埋め戻し材の乾燥密度と強い関連がある。一般的に締め固めた土の乾燥密度は、砂置換法やブロックサンプリングなどにより算出され、坑道の埋め戻し材に対しては、事前の施工試験等により複数の位置で乾燥密度を測定して、そのばらつきなどを確認することになると考えられる。これらの測定方法は土木分野での多くの適用事例があり、とくに砂置換法による密度測定については JIS 規格が整備されているなど、信頼性の高い測定方法である。これらの各測定位置の情報が得られる測定方法に加えて、簡易的に任意の位置の乾燥密度の測定が可能な測定方法や乾燥密度を連続的に分布として把握できる測定方法が適用できれば、埋め戻し材の施工品質に対する信頼性を向上させることができると考えられる。そのため、誘電式土壌水分計と加熱式光ファイバを用いた要素試験により、乾燥密度の分布計測への適用性を確認した。

(1)　計測技術の選定

1)　計測技術への要求事項

埋め戻し材を対象とした乾燥密度の計測技術には、次のような項目が求められる。

- 埋め戻し材の施工試験の支障にならないこと
- 品質管理に要求される、乾燥密度の計測精度を有すること
- 計測機器の耐久性と性能が計測に必要な期間に維持できること
- 低コストであること
- 類似の技術開発実績により、導入の見通しが立っていること

これらの要求については、その決定要因（例：施工法の確定、性能保証に必要な計測期間）の多くがこれから設定されていくこともあり、現段階で具体的な要求仕様として設定することは困難であるが、計測技術の選定では、将来これらの要求事項が提示されることも考慮する。

2)　計測技術の選定

国内外での類似の技術開発実績について既往文献の調査を行い、候補技術を選定した。その結果、直接的に密度を測定するのではなく、埋め戻し材の土中水分あるいは熱伝導率の計測結果から密度を推定する方法が有力であると考えられる。前者は主に農業分野で土壌の水分を計測する目的で利用されており、後者は主に近年の放射性廃棄物処分研究の分野で開発されたものである。

この中から、前述の要因を考慮した結果、下記の 4 候補が選定された。その中から、本事業の 3 年間で計測技術としての適用性確認をすることを目標に、特に放射性廃棄物処分関連での開発実績を考慮して以下の 2 候補（◎印で示す）を開発対象とした。

・誘電式土壌水分計（キャパシタンス式）◎
・誘電式土壌水分計（プロファイル式）
・誘電式水分測定機器：ケーブル式 TDR 及びロッド式 TDR
・加熱式光ファイバ（OFDR 式）　◎

選定した 2 つの技術の原理と候補機器・計測設備については、後述の(2)で説明する。

3)　計測技術の要素技術開発計画の具体化

施工後の埋め戻し材からの試料採取によらずに埋め戻し材の乾燥密度を計測し、その品質を確認するための、3 ヶ年の事業期間における成果の目標と研究開発方針を示す。

土質材料である埋め戻し材の低透水性は、配合に依らない場合には密度を高めることにより確保できる。したがって、施工により達成された埋め戻し材の乾燥密度を正確に確認することは、坑道シーリング性能の品質管理において重要なプロセスである。

3 ヶ年事業における研究開発計画及び工程案を表 5.5-2 に示す。

表 5.5-2　乾燥密度の計測技術の要素技術開発計画案

	2020		2021		2022	
①計測技術選定						
②要素試験による計測技術の要素技術開発						
③モックアップ試験等による技術の実証						

各年度における主要な実施内容及び成果目標は次のとおりである。

- 2020年度（実施済み）：国内外の実績を調査し、技術の完成度、埋め戻し材及び施工技術への適用性などを基に、本事業で研究開発対象とする技術を選定した。さらにその技術を対象に、埋め戻し材の品質確認のための、本研究での評価項目を設定した。次に選定技術についての要素試験により、目的とした埋め戻し材の乾燥密度が測定可能なことを確認した。
- 2021年度：2020年度の要素試験において明らかとなった課題の解決、性能向上のための検討及び試験による技術の信頼性向上と改良を行う。また、実規模環境を考慮した室内試験などにより、より現実的な計測環境への適用課題を抽出するとともに、モックアップ試験などによる適用性評価に向けた計画を立案する。
- 2022年度：モックアップ試験により、規模の大きい測定対象への適用性を評価するとともに、実規模試験や地下調査施設での実証試験への適用に向けた課題を整理する。

(2)計測原理

既往文献の調査及び国内での実績などにより、埋め戻し材の乾燥密度の計測技術として、誘電式土壌水分計（キャパシタンス式土壌水分計）及び加熱式光ファイバを選定した。

1)　誘電式土壌水分計

誘電式土壌水分計は主に農業分野で使用されてきた機器であり、図 5.5-1 に示すような電極間

にある土壌（今回は埋め戻し材が対象）の誘電率（電気の通りやすさ）を測定する計測器である。本研究では、キャパシタンス式土壌水分計を用いることとした。TDR 法と比べて地温や電気伝導度の影響を受けやすいが、電圧値として出力され、信号解析が不要でデータの即時性が高いという利点がある。

計測器はコンデンサと端子で構成される。端子に電圧をかけることにより内部のコンデンサが充電され、充電時間から静電容量が測定される。静電容量が比誘電率と比例することから、両端子間の土壌の誘電特性が求められ、体積含水率と誘電率の関係から体積含水率が推定できるという原理に基づいている。さらに、誘電率は土壌の組成及び水分量と関係があるため、組成が同一ならば水分量をパラメータとして土壌の誘電率を測定しておくことにより、誘電率から対象土壌の水分量を推定することができる。そのため、埋め戻し材の材料配合及び含水比が均質であれば、その誘電率から水分量が得られる。

一方、これらの均質性を前提とすれば、体積含水率と湿潤密度には一定の関係が成立することから、これをもとに乾燥密度を計算することができる。このような手順で誘電式土壌水分計の計測により埋め戻し材の乾燥密度を得ることが可能となる。したがって、センサ出力と乾燥密度の関係については、センサや測定対象によって異なるため個々の場合について校正（キャリブレーション）する必要がある。

計測機器としては、スイス（Sakaki et al.，2015）や瑞浪超深地層研究所（榊ほか，2015）、幌延深地層研究センター（原環センター，2018b）において密度計測を目的として使用実績のある土壌水分計（米国 METER 社製 EC-5）を採用した。EC-5 の仕様を表 5.5-3 に示す。

図 5.5-1　使用したキャパシタンス式土壌水分計（米国 METER 社製 EC-5）

表 5.5-3　誘電式土壌水分計 EC-5 の仕様

測定精度(%)	分解能(%)	応答時間(ms)	出力(V)	基準電源(V)	電流(mA)
体積含水率±3	0.1	10	アナログ 0.22～0.8	DC2.5-3.6	10

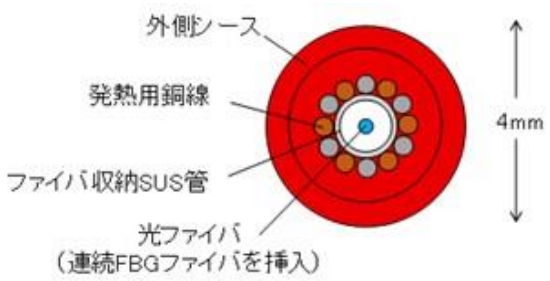
2)　加熱式光ファイバ

加熱式光ファイバ（図 5.5-2 参照）技術では、ファイバケーブル沿いの対象材料の熱伝導率から乾燥密度を推定する。アクティブ DTS（分布型温度センシング（Distributed Temperature Sensing））法とも呼ばれ、スイス（Sakaki et al., 2019）や国内（鵜山・榊，2019）で既にベントナイト系の材料の乾燥密度を計測するツールとしての適用事例がある。

加熱式光ファイバは、温度を計測するための光ファイバとケーブルを加熱するための発熱用銅線で構成されており、発熱用銅線に加熱後の温度変化を光ファイバで計測する。温度変化はファイバケーブル沿いの対象材料の熱伝導率と比熱の影響を受ける。前述の誘電率と同様に、土壌の

組成及び含水比が同一な様々な乾燥密度の埋め戻し材の温度特性を測定しておくことにより、温度変化から埋め戻し材の乾燥密度を推定することが可能となる。

これまでは、ベントナイト及びベントナイトと砂の混合土の測定実績はあるが、埋め戻し材のように礫混じりのベントナイト混合土に関する実績は見当たらないことから、礫混じりのベントナイト混合土に対する本計測手法の適用性を確認する必要がある。



※FBG：ファイバブラッググレーティング(Fiber Bragg Grating）－光ファイバのコア部に周期的な屈折率変化（グレーティング）が形成されたもの。ひずみ・温度が加わるとグレーティングの幅、屈折率が変化するので，それを検知することでひずみ・温度センサとなる。

図 5.5-2　加熱式光ファイバセンサの構造※

本計測技術では、ケーブルの熱は均等に放射状に拡散すると仮定して、線熱源からの熱伝導は円筒座標系で評価する。そのための基本理論式は下式で示す熱伝導方程式となる。埋め戻し材の密度 ρ 、比熱 c、熱伝導率 k が一定であり、ある点のケーブルからの距離を r とした場合、

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}=\frac{\rho c}{k}\frac{\partial T}{\partial \tau}$$　k: **熱伝導率**，T: **温度**，τ: **時間**，ρ: **密度**，c: **比熱**，r: **ケーブルからの距離**

となる。下記の境界条件から上式を解くと

$$T(r,0)=T_0 \quad r_0 \le r \le \infty, \qquad T(\infty,\tau)=T_0 \quad \tau \ge 0$$

$$\partial T = T-T_0=\frac{q}{4\pi k}\int_{\frac{r^2}{4\alpha\tau}}^{\infty}\frac{e^{-u}}{u}\partial u \qquad \alpha:\frac{k}{\rho c}\ \text{熱拡散率}$$

上式右辺の積分部分は下式の様に近似化される。

$$\int_{\frac{r^2}{4\alpha\tau}}^{\infty}\frac{e^{-u}}{u}\partial u=-0.5772-\ln\frac{r^2}{4\alpha\tau}$$

これを$\partial T = T-T_0$に代入すると最終的に熱伝導率は下式のようになり、発熱量が既知のケーブル温度の時間変化（∂T－ln τ 関係で整理）を計測することにより、熱伝導率が計算できる。

$$k=\frac{q}{4\pi\left(\frac{\partial T}{ln\tau}\right)}$$

(3)試験装置及び試験条件

1)　誘電式土壌水分計による方法

①試験装置

誘電式土壌水分計の計器としてキャパシタンス式の米国 METER 社製 EC-5 土壌水分計（図 5.5-1）及び専用の読み取り機を使用した。同計器は電極部が約 5 cm であり、ベントナイト系材料の乾燥密度計測に対する適用事例（Sakaki et al., 2015; 榊ほか, 2015）がある。計測される範囲は、電極の中心から 1～2 cm 程度（Limsuwat et al., 2009）である。

②試験条件及び手順

(a)試験条件

埋め戻し材として現在検討されている砕石を含むベントナイト材料の乾燥密度測定に対する誘電式土壌水分計の適用性を確認するための要素試験を実施した。

試験に使用した埋め戻し材の配合を表 5.5-4 に、混錬後の材料を図 5.5-3 示す。砕石の最大粒径は 10 mm とし、各材量は自然含水比（砕石、砕砂は表面乾燥状態）とした。全体としての含水比は 3.0%であり、流動性の高い材料である。

表 5.5-4　埋め戻し材の配合比率（質量 100 kg あたり）

材料	配合重量比 (%)	乾燥質量 (kg)	含水比 (%)	湿潤質量 (kg)
砕石 1005	35	35.0	1.1	35.4
砕砂	50	50.0	2.3	51.2
クニゲル GX	8	8.0	11.5	8.9
クニゲル V1	7	7.0	7.3	7.5
計	100	100.0	3.0	103.0

(a) 砕石 1005（表面乾燥状態）

(b) 混錬後

図 5.5-3　混錬後の使用材料

(b)試験手順

試験は次の手順で実施した。

i) 埋め戻し材を 5 mm ふるいで砕石とそれ以外（細粒分）に分離し、試験材料とする。分離する理由は、次のステップでスプーンを用いて材料を容器に詰める際に、配合に偏りを生じさせずに質量比が適正に保てるように砕石を別扱いとするためである。

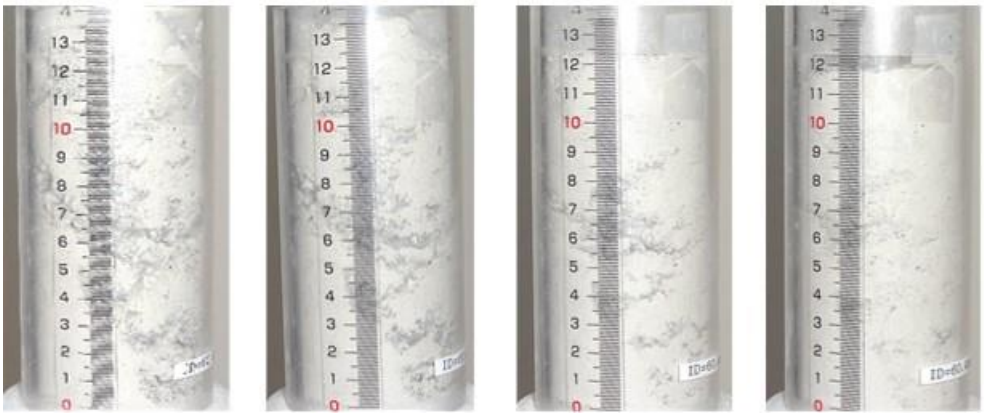
ii) 容器の下部から上向きにセンサを挿入し、砕石を重量比で 35%、細粒分 65%をスプーンで振動や衝撃を与えないよう注意深く容器に充填する。最も緩い状態を再現できる最低乾燥密度と仮定し、計測を実施する（図 5.5-4(a)）。同時に試料の高さを測定し、かさ密度を計算して、含水比を用いて乾燥密度に換算する。

iii) ゴムハンマーで容器を一様に軽く叩き振動により密度を 0.05 Mg/m^3 程度上げる。

iv) 密度の上がった材料の計測を行い、乾燥密度を算出する。

v) ステップ iii)、iv)を繰り返し、徐々に高密度化した材料の計測を実施する。

埋め戻し材を容器に詰めた状況を図 5.5-4 に示す。



(a) ρ_{dry} = 1.51 Mg/m^3　(b) ρ_{dry} = 1.61 Mg/m^3　(c) ρ_{dry} = 1.81 Mg/m^3　(d) ρ_{dry} = 1.88 Mg/m^3

図 5.5-4　誘電式土壌水分計による乾燥密度計測の試験体の例

2)　加熱式光ファイバ

①試験装置

本計測技術における主要な装置は、OFDR 計測システム（レーザー光源、光干渉計及びデータ処理 PC）、加熱用電源及び光ファイバ（連続 FBG ファイバ、OFS Fitel 社製／GS87100（波長・反射率を指定）をアクティブヒーティング用チューブに挿入したもの。断面構成は図 5.5-2 参照）である。

試験装置を図 5.5-5 に示す。また、装置の仕様を表 5.5-5 及び表 5.5-6 に示す。OFDR 計測システムでは、レーザー光線ユニットから放たれたレーザー光が FBR ファイバのグレーティングで反射したレイリー散乱反射光を光干渉計ユニットで捉える（装置の配置は図 5.5-6 参照）。

(a) OFDR 計測システム

(b) 連続 FBG ファイバ
（ボビンに撒いた状態、断面は図 5.5-2 参照）

図 5.5-5　加熱式光ファイバによる計測試験装置

表 5.5-5　OFDR※計測システム機器の主な仕様

メーカー/型式	測定原理	測定対象	位置分解能	測定分解能
Lazoc /LAOFDR1500C1	OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry)	温度・ひずみ分布	最小 0.6mm	・温度：約 0.2℃ ・ひずみ：約 1ue
※OFDR：光ファイバ周波数領域反射法（Optical Frequency Domain Reflectometry） 波長可変光源により波長チャープさせたレーザー光を光ファイバに入射し、戻ってくるレイリー散乱反射を自己遅延干渉させるなどして、ファイバに加わったひずみと温度を分布的に測定する方法。				

表 5.5-6　連続 FBG ファイバの仕様

メーカー/型式	中心波長	コア径 （モードフィールド径）	クラッド径	被覆材質
OFS /GS87100	1550 ±2 nm	10.5 ±1 μm	125 ±1 μm	アクリル樹脂

②試験条件及び手順

(a)試験条件

試験装置の概要を図 5.5-6 に示す。光ケーブルを設置した木製容器の中に表 5.5-4 に示した埋め戻し材を設置し、発熱用銅線を加熱して光ファイバケーブルの温度の時間変化を測定する。

加熱式光ファイバによる乾燥密度測定の適用範囲を確認するために、図 5.5-6 に示したように乾燥密度が 1.59、1.83、1.99 Mg/m^3 の埋め戻し材を木製容器内に充填した。木製容器の延長 178 cm は、隣接する測定区間の温度の影響を受けないと考えられる距離 50 cm（榊ほか，2017）で 3 区間設置でき、さらに土層両端の影響を考慮して両端部それぞれ 14 cm を付加して決定した。また、断面寸法（15×15 cm）は、1 時間程度の加熱においてファイバの温度変化が外側境界の影響を受けない十分な断面寸法である（榊ほか，2017）。埋め戻し材の乾燥密度は、木製容器中に埋め戻し材を緩く詰めた後、充填区間へのハンマーによる振動締固めとし、振動締固めの相互影響を回避するため、高密度から低密度の順に調整した。土層の各区間における乾燥密度は、充填対象の体積が既知であることから、充填質量から求めたかさ密度（湿潤密度）と材料の含水比から計算した。土層の充填状況を図 5.5-7 に示す。

埋め戻し材の乾燥密度の最大値及び最小値は、坑道の埋め戻しで想定されるおおよその最大値及び最小値とした。3 つの乾燥密度の差はできるだけ同じになることを目指し、最小値は誘電式土壌水分計の試験における最小値 1.5 Mg/m^3 を目標としたが、60 cm 区間（特にケーブル周り）の均等な充填が困難なことが目視で確認されたため、目標を 1.6 Mg/m^3 とした。

計測機器、試験土層などの設置が完了した状況を図 5.5-8 に示す。本試験機器による温度の空間解像度は 2 mm である。試験における加熱量は、ケーブル 1 m あたり 10 W/K (K : ケルビン)、加熱時間は 60 分とした。

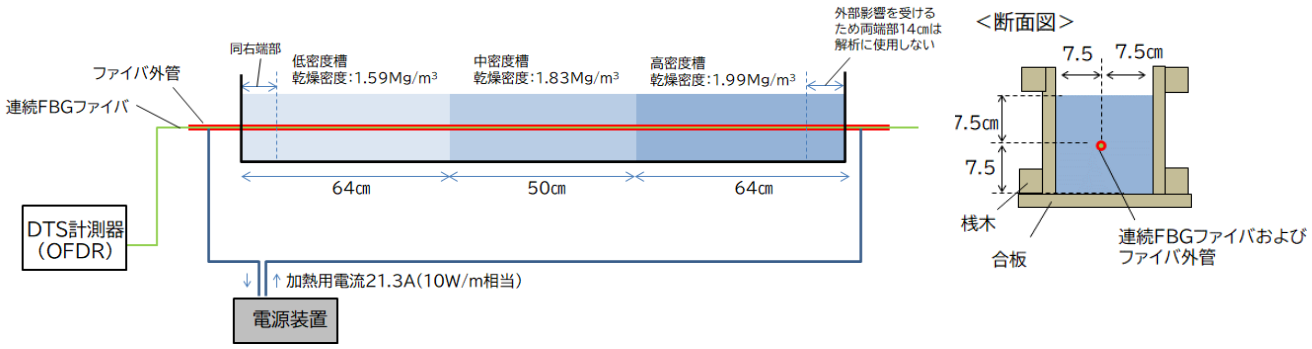


図 5.5-6　加熱式光ファイバ法による乾燥密度計測試験の概要（その１）

高密度土層　　締固め後 γ_d=1.99Mg/m^3

中密度土層 γ_d=1.83Mg/m^3　　低密度土層 γ_d=1.59Mg/m^3

図 5.5-7　試験土層の充填状況

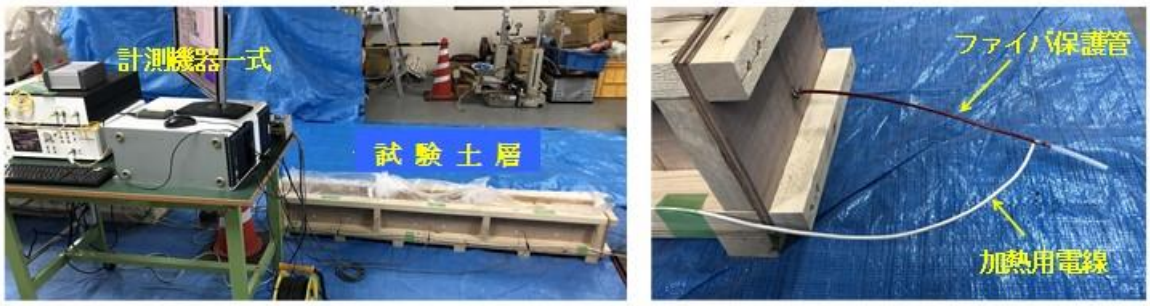


図 5.5-8　加熱式光ファイバ法による乾燥密度計測試験の概要（その２）

(b)試験手順

光ケーブルの発熱用銅線に通電して加熱し、ケーブル温度の経時変化を計測する。試験手順は次の通りである。

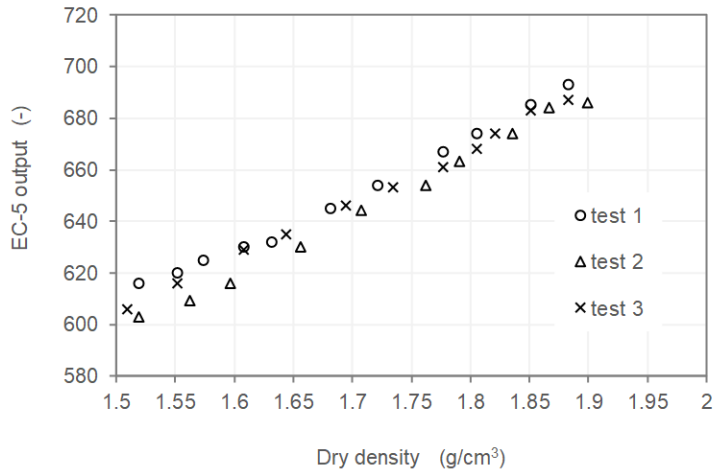
- 計測機器一式、光ケーブル及び発熱用銅線の接続
- 初期温度の測定
- 加熱及び温度計測開始（加熱時間60分）
- 温度サンプリング時間　2 sec毎
- 温度計測時間　70~80 min（加熱前の温度安定性確認、冷却時間を含む）
- 再現性確認のため、計測は十分な冷却時間を含めて2回繰り返し
- データを解析処理して、時間と温度変化及び熱伝導率と時間（対数）の関係に整理する

(4)試験結果及び考察

1)誘電式土壌水分計による乾燥密度の測定結果

図 5.5-4 に示すように、埋め戻し材の乾燥密度を約 1.5～1.9 Mg/m^3 まで変化させながら 3 回計測した誘電式水分計（EC-5）の出力値と乾燥密度の関係を図 5.5-9 に示す。

本試験による EC-5 センサの出力値（図 5.5-9 の縦軸）は、本測定機種に固有の「規定電圧」である（図中解説参照）。体積含水率の値を反映しており、土壌の含水比が一定であれば図 5.5-9 をキャリブレーション曲線として、出力値から土壌の密度が推定できる。今回は、0.05 Mg/m^3 の乾燥密度の増加量に対し、センサ出力値もほぼ比例する形で増加した。



縦軸“EC-5 Output”
3V の電圧をかけたときの電極周辺の静電容量から得られるmV 値（アナログ）を 12bit のデジタル値に変換した値（EC-5 の機能としては体積含水率を出力することも可能）

図 5.5-9　誘電式土壌水分計（EC-5）の出力と埋め戻し材の乾燥密度の関係

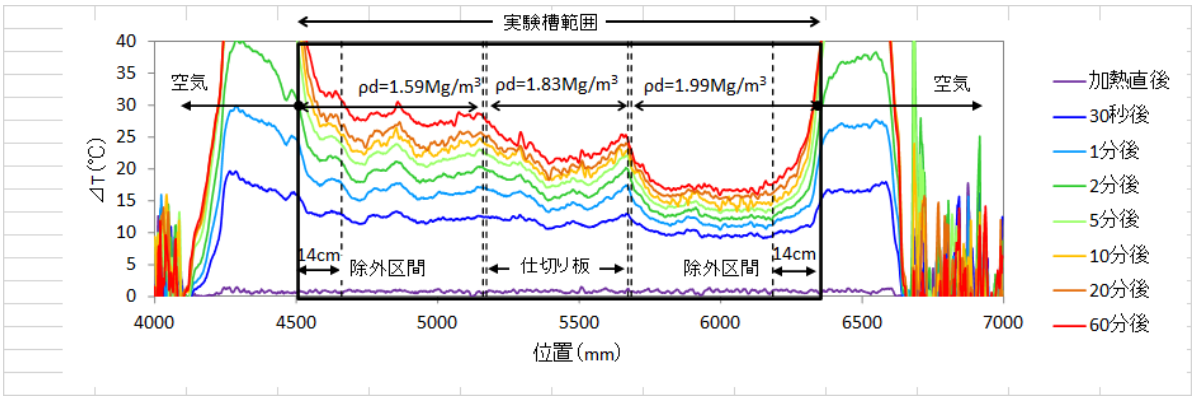
2)加熱式光ファイバによる試験結果

先に説明した土層を用いて加熱式光ファイバによる 2 回の測定試験を実施した。各回のケーブル全長の時間と温度上昇量の関係を図 5.5-10 に、各測定区間の時間と平均温度上昇量の関係を図 5.5-11 に示す。

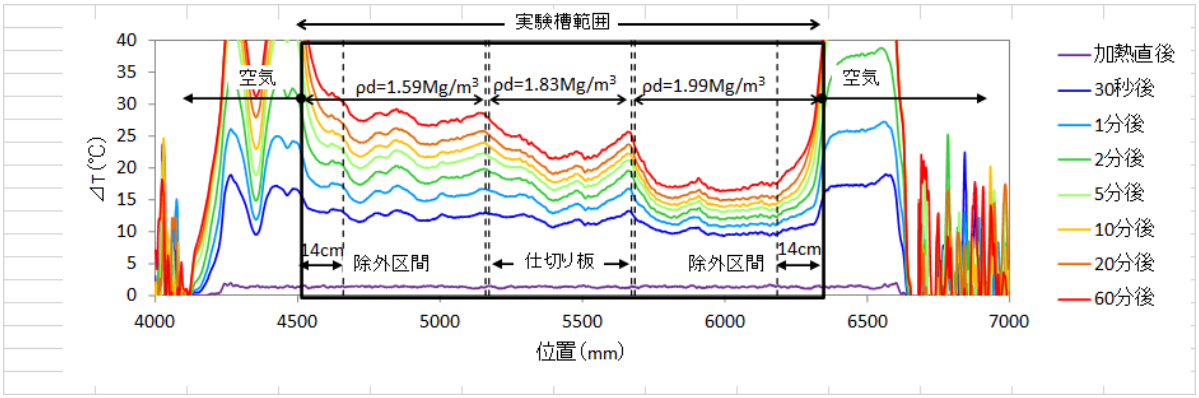
2 回の測定結果ともに、加熱開始から時間の経過にともなって温度が上昇し、乾燥密度に応じて温度上昇量は異なった。また、土層両側からの気温の影響（図 5.5-10 における除外区間の温度変化）及び隣接区間の温度影響（図 5.5-10 における仕切り板付近の温度変化）が見られたが、各土層区間の中央ではそれらの影響は小さく、おおよそ平坦な温度分布の区間が得られた。なお、仕切

り板は埋め戻し材と比べて熱伝導率が高いため、土層境界部の温度上昇が大きくなった。今回の試験結果から、各土層区間で 0.2 Mg/m³ 程度の乾燥密度の差があれば、それぞれの土槽区間で明確に異なる温度変化が観測できることが判明した。

図 5.5-11 における計測開始～3 分（ln 180 = 5.2）までの非線形性が強い部分を除いて平均した⊿T－ln t の傾きを用いて、今回の試験で用いた埋め戻し材の熱伝導率を計算した結果を表 5.5-7 及び図 5.5-12 に示す。この結果から、砕石を含む埋め戻し材の乾燥密度と熱伝導率には比例関係が成り立っていると考えられ、事前に埋め戻し材の乾燥密度をパラメータとして熱伝導率を測定しておけば、加熱式光ファイバを用いて乾燥密度が推定できる見通しが得られた。

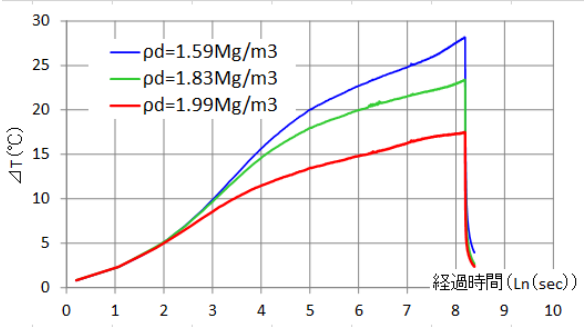


(a) 試験 1 回目

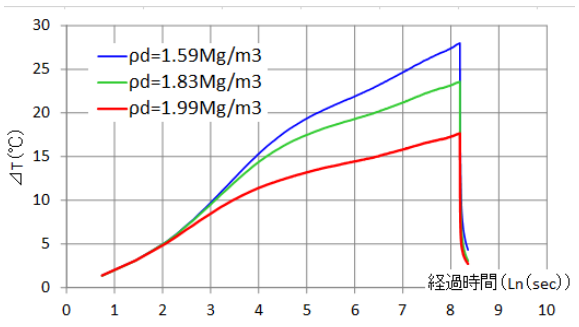


(b) 試験 2 回目

図 5.5-10　測定ケーブル全長の時間－温度上昇量



(a) 試験 1 回目



(b) 試験 2 回目

図 5.5-11　土層密度区間毎の平均温度上昇量の時間（対数）変化

表 5.5-7　各土層区間で得られた熱伝導率

乾燥密度 (Mg/m^3)	試験 1 回目 熱伝導率 (W/mK)	試験 2 回目 熱伝導率 (W/mK)	1 回目/2 回目
1.59	0.324	0.289	1.12
1.83	0.549	0.408	1.35
1.99	0.635	0.557	1.14

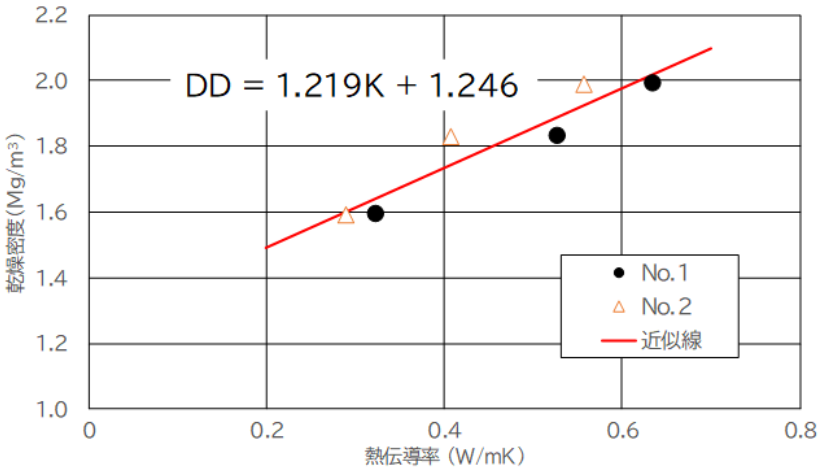


図 5.5-12　加熱式光ファイバ法で得られた乾燥密度と熱伝導率の関係

3)考察

①誘電式土壌水分計による密度測定

試験に使用した誘電式土壌水分計は、今回対象とした埋め戻し材の乾燥密度を 1.5～1.9 Mg/m^3 の範囲で推定できる見通しが得られた。

誘電率の点測定による埋め戻し乾燥密度の推定を、品質保証プログラムへ組み入れることを想定した場合には、次のような課題がある。

- 図 5.5-9に示すキャリブレーションによる乾燥密度の推定が適用可能な対象は、同一材料かつ同一含水比の材料に限られる。したがって、埋め戻し施工中に含水比の変化が生じる場合は、施工試験による含水比変化測定などを通じてキャリブレーション対象試料の適切な状態を決める必要がある。
- 同じ理由で、本方式のような点測定が有する「測定位置による不均質性の影響」を回避するために、試験により適切な測定位置及び測定点数の決定方法をプロセス管理方法で規定することが必要である。特に、今回対象とした埋め戻し材は、比較的粒径の大きい砕石が35%含まれることから、本方式の狭い測定範囲に砕石が含まれる場合には実際の乾燥密度と測定値が大きく異なる可能性がある。

本試験の結果は、今回対象とした埋め戻し材の誘電特性が密度によって有意に変化することを示唆するものであるため、EC-5 センサに限らずその他の誘電式水分センサも密度推定に利用できる可能性がある。実用化されているセンサには様々なタイプがあるため、今回対象とする埋め戻し材の組成・含水率・乾燥密度により適合したセンサの有無についても今後検討することが望ましい。

②加熱式光ファイバによる密度測定

試験に使用した加熱式光ファイバは、今回対象とした埋め戻し材の乾燥密度を 1.59～1.99 Mg/m^3 の範囲で推定できる見通しが得られた。

温度変化と時間との関係について、2 回の試験結果を比較すると、2 回目の試験結果の方が測定値が安定しており、また 2 回目の試験による熱伝導率の方が平均で 19%程度小さい値となった。この原因については解明されていない。実施工では、より幅の広い埋め戻し材特性（材料組成、乾燥密度、含水比など）への対応が要求される可能性があることから、これらの原因を解明して、より安定した測定値が得られるよう、さらなる確認試験が必要と考えられる。

温度変化量と時間との関係から算出した熱伝導率と乾燥密度との関係は、概ね線形性を有していた。

試験上の留意点として、次のような事項が明らかとなった。

- 光ファイバケーブルによる温度測定では、外気や仕切り版の影響を受けるが、その影響範囲は測定区間内へも及ぶことが判明している。したがって、今後の試験において埋め戻し材の熱伝導率を正確に反映する区間長の設定には、材質、含水率及び周辺気温などの影響も受けるこれらの影響範囲を適切に評価する必要がある。不確実性が残るのであれば、この影響を回避するために、測定区間には十分な長さを確保することが望ましい。
- 高密度の埋め戻し材に比較して、低密度の計測データのばらつきが大きい傾向があった。本検討の重要課題の一つである、低密度領域の検知については、今後さらに能力の向上を目指す必要がある。
- 熱伝導率を求めるための、温度変化－時間曲線の傾きを求める際に使用するデータの範囲を適切に設定する必要があり、複数の方法による熱伝導率の測定結果を参考にすることも考慮すべきである。

加熱式光ファイバによる埋め戻し乾燥密度の推定を、品質保証プログラムへ組み入れることを想定した場合には、前記の測定の安定性確保に加えて、次のような課題がある。

- 施工による損傷を回避し、適切な測定が可能な光ファイバケーブルの設置方法について、坑道壁面との距離、ケーブルの固定方法（保護方法）、測定可能延長及びケーブルの取り回しなどを埋め戻し施工試験での試行などを通じて決定する必要がある
- 当手法の測定可能範囲はケーブルの周囲の狭い範囲に限定されることから、坑道埋め戻し断面内において、乾燥密度を測定するための適切な位置及び本数を設定する必要がある。
- 埋め戻しは再冠水により含水比が変化することから、幅の広い含水比に対するキャリブレーションに加えて、含水比の変化を把握できる測定技術との組み合わせによる、再冠水中を含む長期の密度測定への対応方法を検討する

5.5.3　坑道天端の隙間に関する計測技術の研究開発

埋め戻し材の設計要件には低透水性が設定されており、坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないことが求められている（NUMO，2021）。処分場の坑道埋め戻しは、適切な配合の埋め戻し材及び適切な工法で施工されるが、施工の適切性を判断するためには、事前の施工試験等で埋め戻し後の自重沈下や圧密沈下により坑道天端に空隙が発生していないことを確認することが望ましい。事前の施工試験において、仮に隙間が生じた場合には、埋め戻し材の配合や施工方法にフィードバックすることで、隙間の発生を防止した施工が可能である。ここでは、埋め戻し材の施工品質を保証するための計測技術の一つとして、ケーブル式 TDR（Time Domain Reflectometry）及び加熱式光ファイバを用いて坑道界面における空隙を検知するための要素試験を実施し、隙間計測技術としての適用性を確認する。

(1) 計測技術の選定

1) 計測技術への要求事項

本計測技術は、坑道天端の隙間の有無を検知することを目的とした技術である。坑道天端の隙間は、施工時の充填不良による隙間の残存、再冠水による埋め戻しの中の細粒分の移動による密実化、埋め戻し材の自重による沈下及び圧密などが原因として考えられる。本計測技術は、5.2 の品質保証プログラムにおける事前の施工試験や地下調査施設での実証試験での適用を想定している。そのため、隙間検知の計測技術には次のような項目が求められる。

- 埋め戻し施工の支障にならないこと
- 品質管理に要求される、隙間の検知精度を有すること
- 計測機器の耐久性と性能保証が計測に必要な期間得られること
- 低コストであること
- 類似の技術開発実績により、導入の見通しが立っていること

これらの要求については、その決定要因（例：施工法の確定、性能保証に必要な計測期間）の多くがこれから設定されていくこともあり、具体的な要求仕様として設定することは困難であるが、計測技術の選定では、将来これらの要求事項が提示されることも選定条件に加える。

2) 計測技術の選定

国内外での類似の技術開発実績についての既往文献の調査を行い、候補技術を選定した。この中から、前述の要因を考慮した結果、以下の 2 つの技術を開発対象とした。

・ケーブル式 TDR

・加熱式光ファイバ（OFDR（Optical Frequency Domain Reflectometry）式）

なお、ケーブル式 TDR の選定に関しては、感度が高く実績のある平衡型並行フィーダー線と感度は劣るがノイズ低減効果があると考えられた同軸ケーブルが候補に残ったが、要素試験に先立って実施した埋め戻しの材を用いた選定試験において、埋め戻し材の内部で後者のノイズ低減効果が有効に発揮されないことが判明したため、前者を選定した。選定した 2 つの技術の原理と候補機器・計測設備については、後述の(2)で説明する。

3) 計測技術の要素技術開発計画の具体化

3 ヶ年事業における研究開発計画及び工程案を表 5.5-8 に示す。

表 5.5-8　坑道界面の隙間の計測技術の要素技術開発計画案

	2020		2021		2022	
①計測技術選定						
②要素試験による計測技術の要素技術開発						
③モックアップ試験等による技術の実証						

各年度における主要な実施内容及び成果目標は次のとおりである。

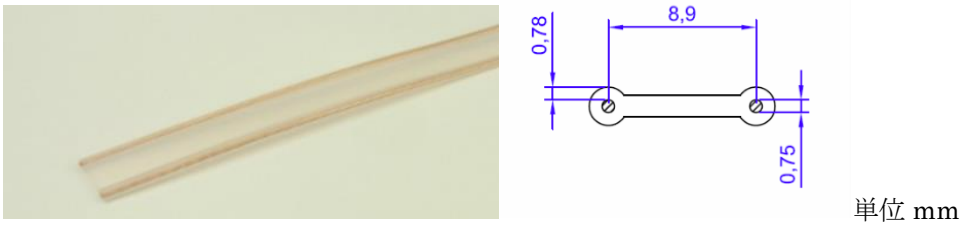
- 2020年度（実施済み）：国内外の実績を調査し、技術の完成度、埋め戻し材及び施工技術への適用性などを基に、本事業の研究開発対象とする技術を選定した。さらにその技術を対象に、埋め戻し材の品質確認のための、本研究での評価項目を設定した。次に選定技術についての要素試験により、目的とした隙間が検知可能なことを確認した。
- 2021年度：2020年度の要素試験において明らかとなった課題の解決、性能向上のための検討及び試験による技術の信頼性向上と改良を行う。また、実規模環境を考慮した室内試験などにより、より現実的な計測環境への適用課題を抽出するとともに、モックアップ試験などによる施工技術対応を含む適用性評価に向けた計画を立案する。
- 2022年度：モックアップ試験により、規模の大きい測定対象への適用性を評価するとともに、実規模試験や地下調査施設での実証試験への適用に向けた課題を整理する。

(2) 計測原理

1) ケーブル式 TDR

本計測技術では、乾燥密度の計測で用いた誘電式土壌水分計と同様に、土壌の誘電特性から含水率を求める計測原理を応用したものである。空気と埋め戻し材の誘電特性の違いを識別することにより、本計測技術により空隙を検知する。

空隙の検知に用いるケーブル TDR 法は、通常、金属ロッドからなる TDR センサの電極部を図 5.5-13 に示すように平行 2 線電線で置き換えたものであり、金属ロッドと比較して定量性は劣るが、測定長の拡大可能性、耐久性及びコストに優れている。



単位 mm

図 5.5-13　平衡型 200Ω 平行フィーダー線

本計測方法では、2 本のケーブルにパルス的に印加した電圧が、ケーブル周囲の電気伝導度の異なる断面で反射して帰ってくる原理を応用している。この反射波は、ケーブル端までのさまざまな反射断面で反射されるものが重複して戻ってくるため、それを分析した結果の電圧値の変曲点がケーブル周囲の電気伝導度が大きく変化した位置(今回は埋め戻し材と空気の境界)となる。

今回使用した 300Ω平行フィーダー線の場合、ケーブル被覆及び 2 本のケーブルの間はポリエチレン材が使用されている。この線に電圧を印加した場合、被覆の外側では空気よりも埋め戻し材の電気伝導度が高いため、埋め戻し材と空気の境界の前後で電気伝導度（抵抗）に差が生じて電圧の傾向が変化し、ケーブル延長方向に電圧値をプロットすると変曲点となる。したがって、

隙間が 1 ケーブル上に複数存在する場合は、このような変曲点が複数現れることになる。なお、ポリエチレン部分は、周囲の埋め戻し材や空気と比較して電気伝導度が相当に高いため、周囲の電気伝導度の変化を計測する障害にはなりにくい。

一般にアンテナなどに使用される平行フィーダー線には、200Ω と 300Ω のものがあるが、今回は、埋め戻し材中での予備試験の結果、ノイズの少ない 300Ω 平行フィーダー線をセンサとして選定した。おそらく、抵抗値の大きいフィーダー線の方が、周囲の微小な電気伝導度の変化への感度が低く、安定した測定値が得られたものと考えられる。

本計測技術で得られる情報は、ケーブ延長上の様々な箇所で反射する電磁パルスの電圧値と反射に要する往復時間の関係である。この往復時間は、電磁パルスに対するケーブルの抵抗値に影響されるため、往復時間と反射位置の関係を特定するためには、ケーブル延長の抵抗値が既知である必要があるが、ケーブル周囲の環境（埋め戻し材、空気）、土層の素材やコンクリートとの接触具合などにより抵抗値が変わるため､その値を詳細に把握することは困難である｡したがって、反射時間から反射位置を絶対値として特定することは困難であり、ケーブルの設置状況とケーブル全長からの相対的な位置から、おおよその位置を推定することとなる。

2) 加熱式光ファイバ（OFDR 式）

本技術の計測原理は、乾燥密度の計測 5.5.2(3)2)において説明したものと同様である。前出では、ケーブル周囲の埋め戻し材の乾燥密度を定量化するための測定であったが、ここでは空気と埋め戻し材という極端に密度が異なる 2 種の材料を識別することを目的とする。したがって、ここでは、検知可能な隙間の最小値、隙間の大きさに対する感度及び先の乾燥密度の計測でも観測された、外気の埋め戻し側の測定値への影響の評価が技術課題となる。

(3) 試験装置及び試験条件

1) ケーブル TDR

① 試験装置

ケーブルは一般的な 300Ω 平行フィーダー線を使用し、パルス波を発生及び分析する TDR 計測装置は図 5.5-14 及び表 5.5-9 に示すものを使用した。

図 5.5-14 TDR 計測装置（TDR200：米国 Campbell Scientific 社製）

表 5.5-9 TDR 計測機器（TDR200）の主な仕様

パルス発生及サンプリング応答時間の合計	パルス電圧	パルス長	最大波形アベレージ回数	最大レンジ	解像度
170ps※1, ※2	0.25V※1	25.5μs	128 回	3,800m 以下 27.75μs 以下	1.35mm 以上 4.4Ps 以下

※1 インピーダンス 50Ω 線路に接続した場合の値

※2 パルス発生及びサンプリングのそれぞれは 85ps

② 試験条件及び手順

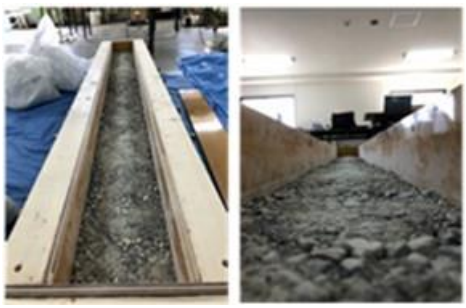
(a) 試験条件

計測対象とする埋め戻し土層は、ケーブル TDR と後述の加熱式光ファイバで共通とし、両者の試験結果を比較できるようにした。また、坑道の内側表面に設置したセンサからの隙間検知を想定した試験を行うために、土層の底板はコンクリート製として、坑道界面をモデル化した。埋め戻し材の配合（表 5.5-4)、土層の全体の寸法及び埋め戻し材の充填方法は、乾燥密度計測と同様とした。埋め戻し材の乾燥密度は、乾燥密度の計測で対象とした 3 ケースのうち、中央の値 1.83 Mg/m^3 とした。土層の充填状況を図 5.5-15 に、計測機器の接続及び埋め戻し土層内の計測ケーブルの配置を図 5.5-16 に示す。

ケーブル式 TDR（300Ωフィーダー線）2 本は、それぞれ坑道界面を模擬した底面コンクリートに密着させたものと、坑道界面との距離の影響を評価するために底面から 7.5 cm 離して設置した。フィーダー線は土層から TDR 計測器までの区間は CD 管で保護した。

検知対象の隙間は、中央部の埋め戻しを除去することで模擬した。隙間は、25 cm、50 cm 及び 100 cm の 3 段階で設置した。土層に隙間を設置した状況を図 5.5-17 に示す。

(a) 投入開始　　(b) 規定質量投入締固め前



(c) 締固め後

図 5.5-15　隙間計測要素試験用土層の埋め戻し材充填状況

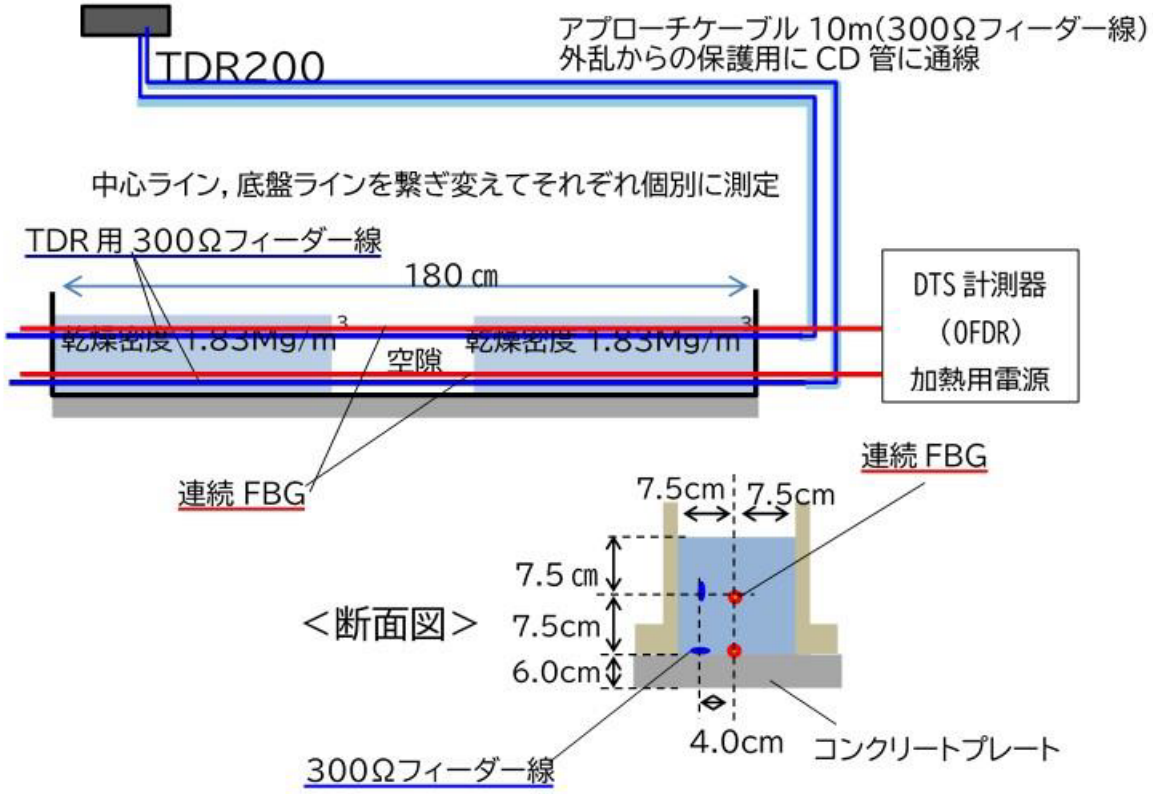
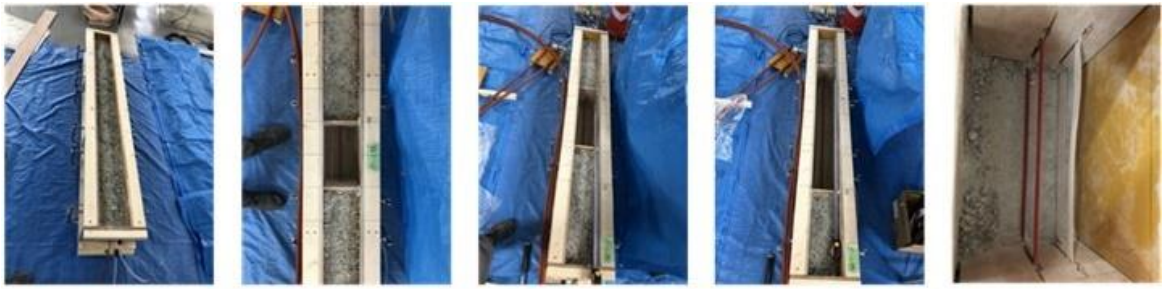


図 5.5-16　計測機器の接続及び埋め戻し土層内の計測ケーブルの配置



(a) 隙間無し　(b) 隙間 25cm　(c) 隙間 50cm　(d) 隙間 100cm　(e) 隙間のケーブル

図 5.5-17　土層隙間設置状況

(b) 試験手順

TDR 計測装置からフィーダー線にパルス波を送り、反射波を計測する。試験手順は次のとおりである。

- 計測機器一式、ケーブルの接続
- 隙間の無い土層での測定
- 隙間の長さをパラメータ（25、50、100 cm）としてそれぞれ計測
- データを解析処理して、距離と電圧の関係に整理する

2)　加熱式光ファイバ

① 試験装置

試験装置及び使用ケーブルは、5.5.2(2)2)で説明した乾燥密度計測用と同一である。

② 試験条件及び手順

(a) 試験条件

試験条件は、ケーブル式 TDR と同様である。

(b) 試験手順

光ファイバケーブル内の電熱線に通電して加熱し、ケーブル温度の経時変化を計測する。試験手順は次の通りである。

- 計測機器一式、光ファイバケーブル及び電熱線の接続
- 隙間なしの土層を用いた初期温度の測定
- 加熱及び温度計測開始（加熱時間60分）
- 温度サンプリング時間　2 sec毎
- 温度計測時間　70~80 min （加熱前の温度安定性確認、冷却時間を含む）
- 再現性確認のため、計測は十分な冷却時間を含めて2回繰り返し
- 隙間の長さをパラメータ（25、50、100 cm）としてそれぞれ計測
- データを解析処理して、時間と温度変化及び熱伝導率と時間（対数）の関係に整理する

(4) 試験結果及び考察

1) ケーブル式 TDR による試験結果

ケーブル式 TDR による計測結果のうち、隙間 25 cm のケース及び隙間 100 cm のケースを図 5.5-18 に示す。隙間 50 cm のケースについては付録 9 に示した。なお、本計測方法の特徴として、ケーブル延長方向の位置（絶対値）の特定が難しいことがあり、図中に示した隙間部や土層端部の位置は、電圧値の緩やかな変曲点からの推定である事に留意する必要がある。この点は、後述の加熱式光ファイバによる計測と大きく異なる。

① 隙間の大きさの検知可能性と隙間の大きさによる違い

本計測においては、電圧の変化をケーブル周囲の誘電率の変化、つまり媒体の変化と捉えて隙間を検知する手法を用いる。したがって、電圧―パルスの往復時間の関係を図示した場合は、その曲線の変曲点がケーブルの周辺媒体の誘電率の変化に該当する。特に、埋め戻し材と空気の間には誘電率の大幅な差があるので、埋め戻しから空気層へ入ると抵抗が大幅に増加し、逆の場合は減少する。ただし、両者の境界部では相互に影響を及ぼし合うため、変化はなだらかに移行することが多い。

図 5.5-18 に示すように、本試験においては、25～100 cm の隙間の検知は可能であった。また、下記でも述べるように、ケーブル延長方向の隙間の位置の特定に課題があり、隙間 25 cm と 100 cm のケースの隙間と判断できる波形区間のパルス波の通過時間（トラベルタイム）を比較すると、3 倍程度となり、隙間部の長さの比率とは合致しなかった。この隙間部はケーブル周囲が空気であり、誘電率が低いため埋め戻し部分と比較してパルス波の速度が速く、相対的にトラベルタイムが短くなったと考えられる。

② ケーブル設置位置による違い

本計測では、坑道界面の隙間計測が目的であることから、ケーブルは坑道界面の近接あるいは密着して設置されることが想定される。ケーブル周囲の誘電率は、そこにある媒体の誘電特性の

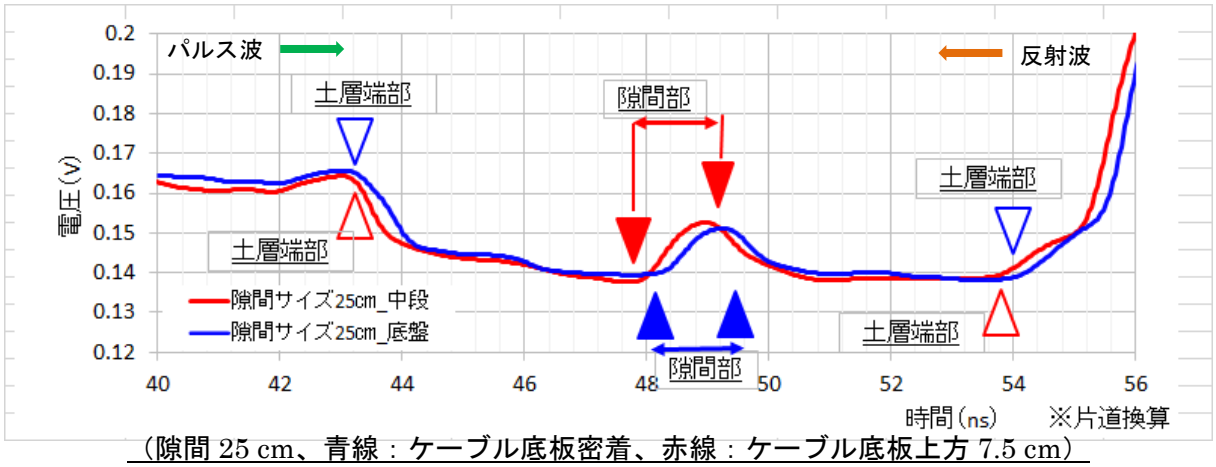
影響を受けるため、坑道（コンクリートとした場合、誘電率は施工直後の埋め戻し材より高い）と埋め戻し材では、異なる計測結果が出力される可能性があり、それが隙間検知可能性に影響することが予想される。

図 5.5-18 の計測結果では、コンクリート製底板に密着してケーブルを設置したケースと、7.5 cm 上方に設置したケーブルともに隙間の検知は可能であった。ただし、底板に密着して設置したケーブルは、離して設置したケーブルに比較してやや電圧値の変化が小さく、検知感度が低い傾向が見られた。また、下記でも述べるように、土層と隙間、土層と土層端部に見られる電圧値の変曲点の位置が、双方で異なる結果となり、特に隙間の大きい（埋め戻し部が短い）ケースで顕著であった。

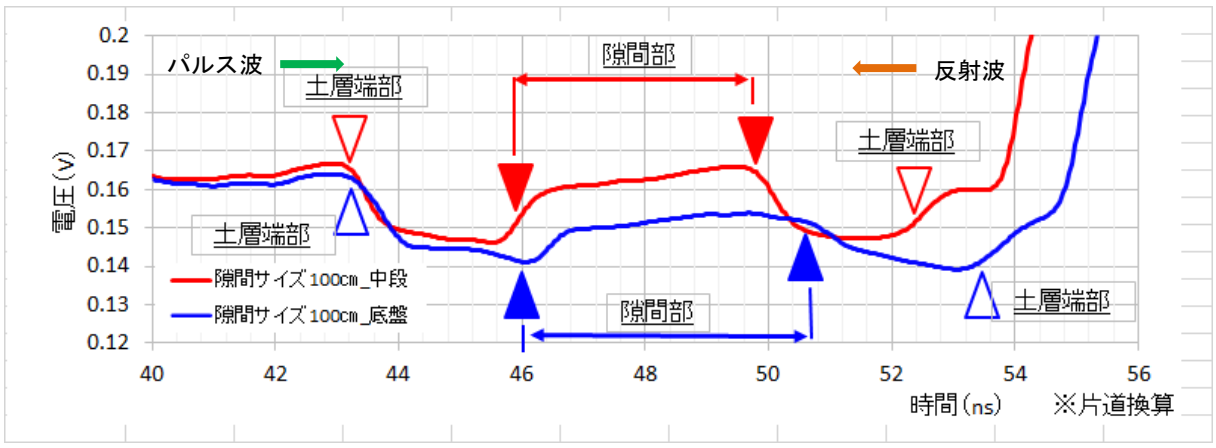
③ ケーブル延長方向の位置の特定

先にも述べたように、本計測方法ではパルスの反射位置を具体的な絶対値として特定することは困難である。したがって、図中の位置情報も計測値の変化とケーブル全長からの相対的な位置からの推定である。

図 5.5-18 の隙間部及び土層端部位置の推定結果から、ケーブルをコンクリート底板に密着させて設置したケースの方が、コンクリートの誘電率が高いことによるパルス波のトラベルタイムの低下を生じており、相対的に長い時間を要する結果になったと考えられる。



（隙間 25 cm、青線：ケーブル底板密着、赤線：ケーブル底板上方 7.5 cm）



（隙間 100 cm、青線：ケーブル底板密着、赤線：ケーブル底板上方 7.5 cm）

図 5.5-18　ケーブル式 TDR による計測結果

2) 加熱式光ファイバによる試験結果

加熱式光ファイバによる隙間 25 cm のケース及びケーブルを底板に密着させたすべてのケースの計測結果を図 5.5-19 に示す。その他のケースについては、付録 9 に示した。なお、ケーブル式 TDR とは異なり、本計測方式では測定点のケーブル上の位置の特定は可能である。

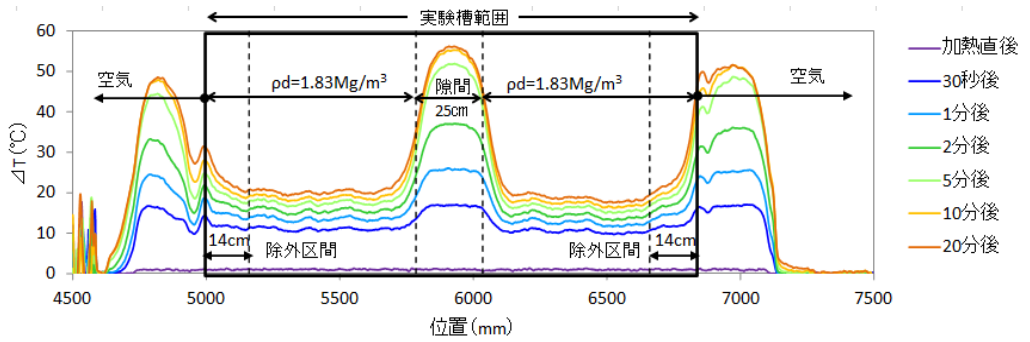
① 隙間の大きさの検知可能性と隙間の大きさによる違い

図 5.5-19 に示したように、本試験においては、25 cm～100 cm の隙間の検知が可能であった。空気と埋め戻し材の熱伝導率の大きな違いにより、温度差が大きく異なる結果となった。これは、乾燥密度の計測における、埋め戻し材の 0.2 Mg/m^3 程度の乾燥密度の差による熱伝導率の差と比較しても顕著であった。

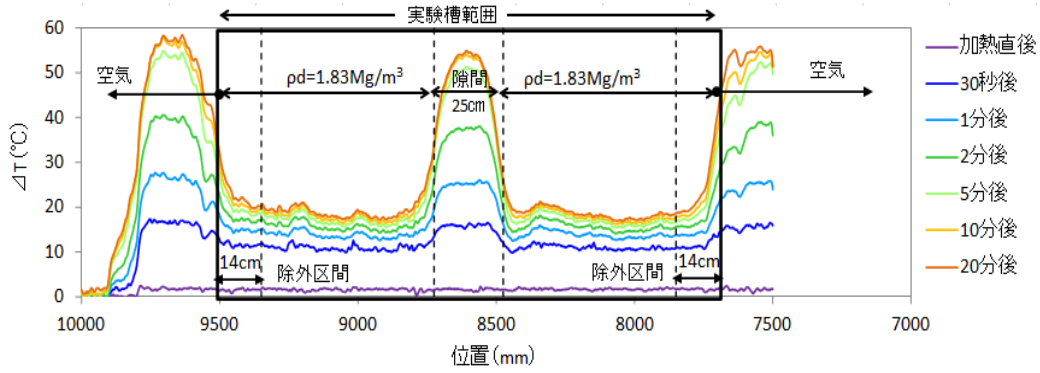
隙間の位置をより正確に検知するためには、埋め戻し材と空気の熱伝導率の違いにより生じる温度変化の勾配が大きい方が位置の特定がより容易となる。その一方で、光ケーブルによる温度計測では、埋め戻し材と空気の境界においてもケーブル自体が連続していることから温度の変化は連続的となり、明確な温度差を作り出すことは困難である。そのため、計測値のみから埋め戻し材と隙間の境界を精度よく特定することは困難であった。

② ケーブル設置位置による違い

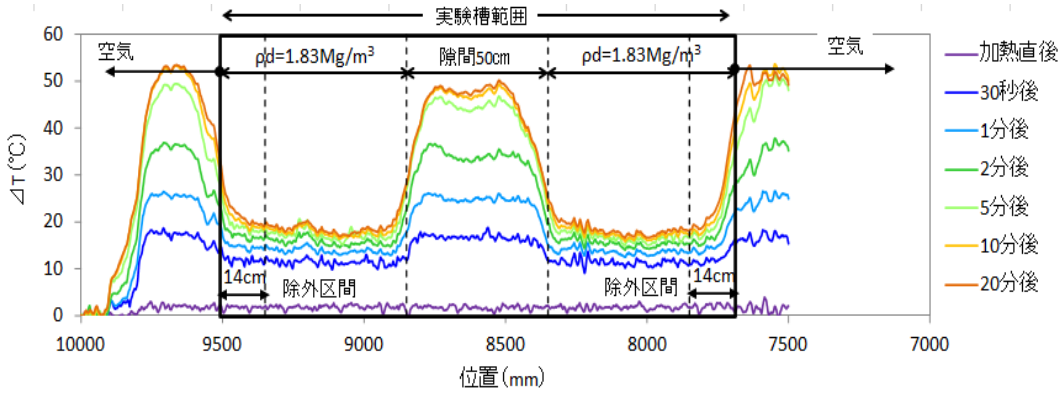
埋め戻し材に比べてコンクリートの熱伝導率は大きいため、坑道表面に設置したケーブルでは温度変化が小さくなり、隙間を正確に検知できない可能性がある。そのため、隙間 25 cm でケーブルを底板上方 7.5 cm と底板密着に設置したケースで測定結果を比較した。図 5.5-19 (a)と(b)から、ケーブル設置位置の違いにより温度変化に大きな差は生じていなかった。理論的には、コンクリートの熱伝導率は埋め戻し材より大きいことから、ケーブルを底板に密着させたケースの方が温度上昇は緩やかであったが、顕著ではなかった。



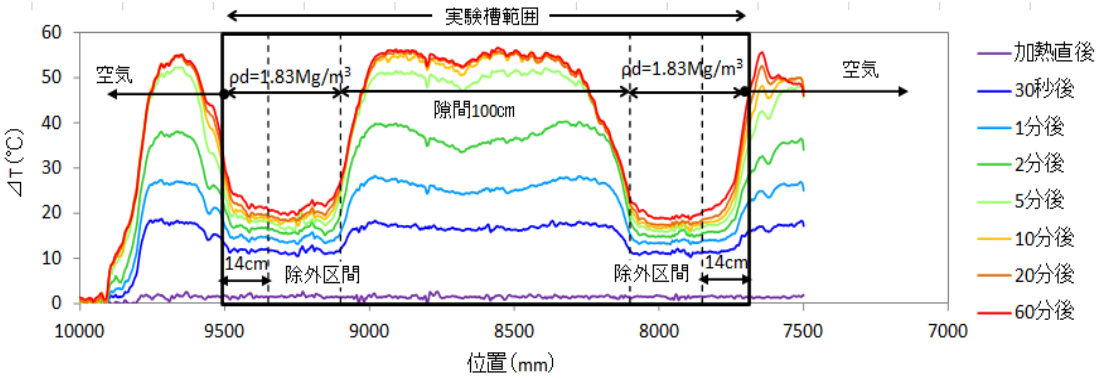
(a) 隙間 25cm、ケーブル底板上方 7.5cm



(b) 隙間 25cm、ケーブル底板密着



(c) 隙間 50cm、ケーブル底板密着



(d) 隙間 100cm、ケーブル底板密着

図 5.5-19　加熱式光ファイバによる計測結果

3) 考察

① ケーブル式 TDR

ケーブル式 TDR は、今回対象とした埋め戻し材の隙間の位置の特定には課題があるが、その存在を検知できる感度があることがわかった。今後、坑道界面の隙間検知にケーブル式 TDR を用いる場合には、次のような課題がある。

- 25 cm以上の隙間の存在及びそのおおよその長さについては、ケーブルTDR計測による情報取得が可能であるが、隙間の絶対的な位置の情報については計測精度が低い。そのため、隙間の位置を特定する場合は、本ケーブルの特性、埋め戻し材及び坑道支保工コンクリートの電気伝導度などに基づき位置の特定が可能な方法を開発する必要がある。
- 今回の試験では、最短隙間を25 cmとした。適切な施工品質管理によれば、幅25 cmの隙間に対する隙間深さは隙間幅以下（たとえば10 cm程度）に抑制できると考えられ、埋め戻し隙間の検知長としては十分であると考えるが、今後の検討に依ってはより狭い隙間の検知が求められる可能性もあることから、試験により確認して最小値の目安を立てておくことが望ましい。
- 測定器の仕様上は、3,000 m以上の計測が可能となっているが、地上施設の模擬坑道などを対象とした埋め戻し材の施工試験により、想定する使用方法での最大延長での計測が可能かどうかを確認する必要がある。
- 本計測技術には、低コスト、頑強及び坑道壁面への固定が容易などの利点があり、埋め戻し材の品質保証プログラムにおいては、次のような用途での利用が期待できる。

  i)地上施設の模擬坑道を対象とした埋め戻し材の施工試験後の最終出来形において、坑道天端の残留隙間量が埋め戻し材の飽和後の膨潤により閉塞可能な範囲に収まっていることを確認することができる。

  ii)また、本計測技術は、埋め戻し材の施工プロセス管理手法を構築する段階において、坑道界面の隙間が残留していないことを確認するために、施工中の連続的な計測により、隙間の残留を迅速に検知して施工プロセス管理手法に反映するためにも活用することができる。

② 加熱式光ファイバ

加熱式光ファイバは、今回対象とした埋め戻し材の坑道界面付近で想定されるような隙間の存在を比較的良い解像度で検知できる感度があることを確認した。ただし、加熱式光ファイバによる坑道界面の隙間検知には、次のような課題がある。

- 今回用いた機器（OFDR）の計測可能延長は最大40 mであり、もうひとつの代表的な測定機器であるラマンOTDRに比べる計測可能延長が短いという欠点があるが、位置分解能が数mm～1 cm程度であり微小な空隙も検知可能である。ラマンOTDRの位置の分解能は通常のもので1 m、最良のもので30 cm程度であり、検知できる最小空隙サイズもそれに準じたものとなるが、その計測可能延長は数kmに及ぶという長所がある。したがって、品質保証プログラムにおける計測の目的と使用方法に応じて適切な計測方法（ラマンOTDRを含む他の有力な計測方法）を選定することが望ましい。
- 加熱式光ファイバケーブルの耐荷重性、耐水性などの頑強性能について、埋め戻し施工法を考慮した確認が必要である。
- 施工による損傷を回避し、適切な計測が可能な光ファイバケーブルの設置方法について、坑道壁面との距離、ケーブルの固定方法（保護方法）、計測可能延長及びケーブルの取り回しなどを埋め戻し施工試験での試行などを通じて決定する必要がある

- 当手法の測定可能範囲はケーブルの周囲の狭い範囲に限定されることから、坑道埋め戻し断面内において、隙間を測定するための適切な位置及び本数を設定する必要がある。また、乾燥密度の計測と兼ねることが可能であり、この観点からの効率的な配置も検討するべきである。

5.5.4　埋め戻し材の膨潤により発生する圧力に関する計測技術の研究開発

(1) 3 年間の成果目標及び研究開発方針

本項では、操業段階における性能確認プログラムにおいて適用されることを念頭に置いた計測技術のうち、埋め戻しの膨潤により発生する圧力及びその分布状況を把握するための計測技術について検討を行う。同測定技術は、事業許可申請段階までに実証・確立されるべき製造・施工プロセス管理手法の検証のために事前に行われる地上や地下での実証試験等での活用も期待される。埋め戻しは処分坑道、主要坑道などで広範囲に施工され、処分施設のシーリング性能の確保に重要な役割を果たす。したがって、施工後に地下水による浸潤の進行とともに期待される性能が予定どおり発揮されていくことを把握することで、施工した埋め戻しの性能や品質の確からしさを裏付けることができる。埋め戻し材に期待される低透水性能には、そこに混合されるベントナイトの膨潤特性が重要な役割を担うと考えられる。坑道内の広範囲にわたり膨潤の状況を計測するためには、従来の点計測に基づく方法では多数実施する必要があり、計測点ごとに設置される機器数及びそれに伴うケーブル長・本数が多くなり、埋め戻しの性能を損なう可能性もある。このような課題に対して、光ファイバセンサのように連続的な分布計測が可能な計測技術が適用できれば、上記の目的に対して有効なツールとなり得ることが期待される。

過年度の研究において、埋め戻し材の膨潤により発生する圧力及びその分布状況を把握するための計測技術に関する先行研究の調査・分析を行い、被覆厚が異なる 2 本の分布型光ファイバのひずみ計測値の差分をとり、圧力に起因した成分だけを抽出する方法（原子力機構・原環センター, 2020）を候補技術として選定した。

計測技術の研究開発では要素試験による基礎性能の確認や計測方法の構築、そして実規模レベルでの適用性の確認が必要となる。埋め戻し材の膨潤に伴う圧力の計測技術の開発を 3 年計画で実施するとした場合の開発フローを図 5.5-20 に示す。

このうち、本年度は既往計測技術の調査、メカニズムの解明を目的とした要素試験を実施した。

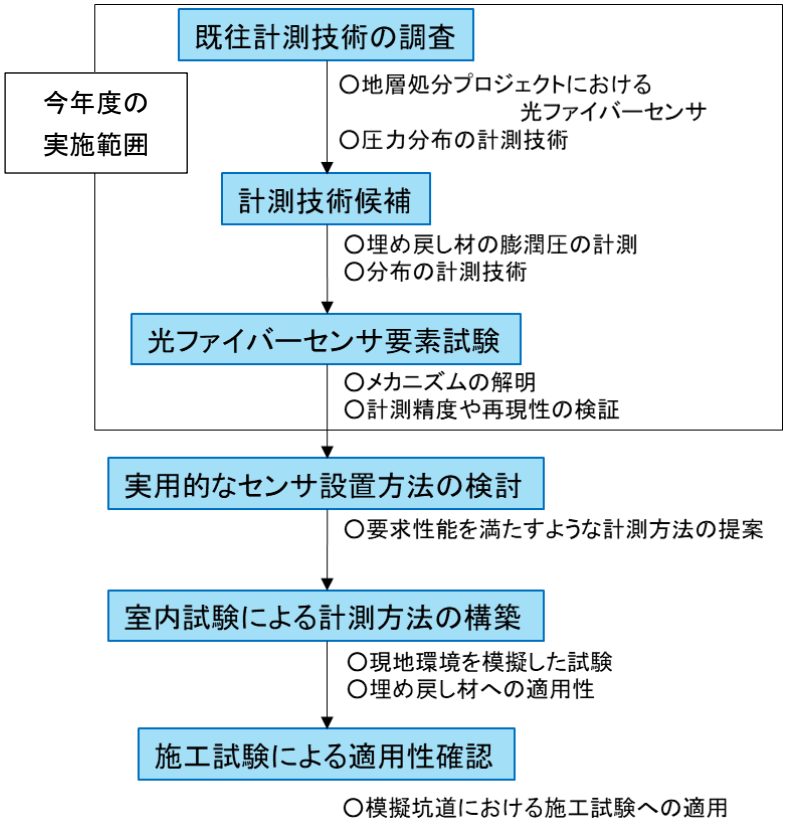


図 5.5-20　研究開発計画の全体フロー

(2) 計測原理

施工した埋め戻し材の圧力分布の測定を目的とした分布型光ファイバセンサの計測原理の概要を以下に示す。

○開発の対象とする光ファイバセンサ方式

光ファイバによる計測方法は、計測原理、計測可能距離、分解能、使用機器などによりさまざまな種類のものが開発されている。本研究では、文献調査及びこれまでの開発経験を基に、埋め戻しの圧力計測に適した計測方法として、レイリー散乱光を用いた TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry) 方式を選定した。もうひとつの代表的な計測法であるブリルアン散乱光を分析する計測器は圧力計測の実績が多いが、レイリー散乱光を分析するタイプの計測器はそれと比較して分解能が高く、計測対象圧力が比較的低い 0.1 MPa の計測に適していると判断した。

○光ファイバによるひずみの測定

光ファイバによる圧力の計測は、後述のように圧力により光ファイバに生じたひずみを計測し、別途取得する圧力－ひずみ関係から圧力に換算する方法による。ケーブルのひずみは、光源から光ファイバに入射された光が、ひずみを受けているケーブル断面で反射、散乱した結果を受信して分析することにより計測する。

○圧力の光ファイバのひずみへの変換

圧力が作用していない分布型光ファイバセンサは、設置により元来生じるひずみと温度によるひずみを持っている。これは、ケーブル被覆の厚さにかかわらず一定である。ここに外部からの圧力が加わると、被覆が半径方向に変形し、被覆と光ケーブルのコア部分が一体で変形すると仮定すると、同時にポアソン効果により光ファイバケーブルの延長方向のひずみに圧力由来の成分として加わる。図 5.5-21 に示すような被覆条件が異なる 2 本の光ファイバでは、両者の間で圧力によって被覆に生じる変形量が異なるため、光ファイバで計測されるひずみ量に差が発生する。このひずみ量の差は外部から加わった圧力に由来するものであるので、これを評価して外部からの圧力値を得る。したがって、比較するケーブルの被覆の厚さ及びポアソン比の差が大きい程、圧力によるケーブル軸方向の変形量の差が大きくなり、圧力感度が高くなると予測される。

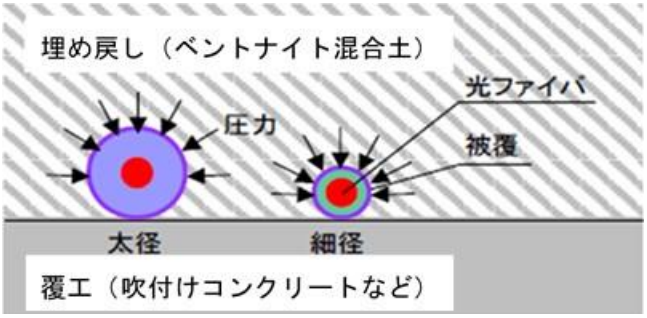


図 5.5-21　分布型光ファイバによる圧力計測の概念

(3) 試験方法及び試験装置

計測原理及びセンサとして利用する光ファイバケーブルの条件を検討するために、被覆条件が異なる複数の光ファイバケーブルを加圧し、圧力と光ファイバに発生するひずみの関係を把握する。そのための試験方法及び試験装置を以下に示す。

1) 試験方法

①加圧方法

光ファイバケーブルへの加圧イメージを図 5.5-22 に示す。要素試験では被覆径や素材が異なる 4 種類の光ファイバに対して圧力を加え､圧力感度が高い光ファイバの組合せの抽出を試みた。また、光ファイバケーブルに圧力を均等に作用させるために、ケーブルの上下には軟質の素材による加圧面シートを用いた。

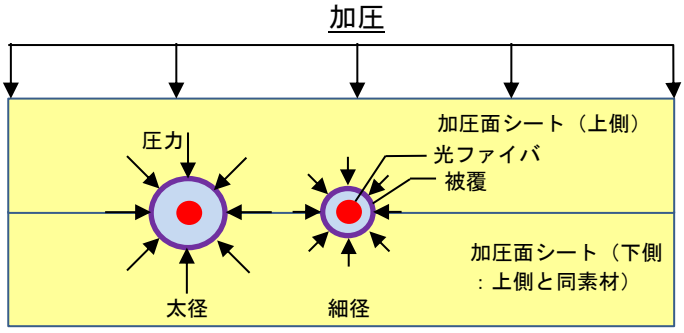


図 5.5-22　光ファイバケーブルへの加圧イメージ

加圧にはジャッキ式加圧装置を使用した。圧力範囲は、埋め戻し材の膨潤圧を考慮して 0～0.1 MPa として、0.005 MPa 刻みで載荷、除荷を行った。また、載荷圧力を段階的に増加させる際に圧力値が変動することが確認されたため、加圧時は約 10 分間、減圧時は約 5 分間の保持時間をおいてから計測を行った。計測にかかる時間（約 3 分間）を考慮し、圧力計測値は 3 分間の平均値とした。なお、試験中の加圧装置表面の温度測定結果から、その変動は 1℃以内であった。典型的な較正定数（軸方向ひずみ：-150 MHz/ με、温度変化：-1,500 MHz/℃）を用いると、1℃の温度変動は約 10 μεの軸方向ひずみに換算され、今回のひずみの測定範囲に対して温度の影響は小さいため、計測値に対する温度補正の必要はないと判断した（実施しなかった）。

②光ファイバケーブル

試験対象とした光ファイバケーブルの一覧を表 5.5-10 に示す。光ファイバケーブルはいずれも直径 0.125 mm のシングルモードファイバ（SMF）であり、被覆の違いによる影響を把握するために、被覆を含めた外径が 0.15 mm、0.25 mm、0.50 mm、0.90 mm、被覆素材がポリイミドと UV 樹脂からなるものを選定した。

表 5.5-10　試験で使用する光ファイバーケーブル

ID	光ファイバのタイプ	光ファイバの直径 mm	被覆素材	被覆の外径 mm	被覆厚さ mm	製造元 型番
A	SMF	0.125	ポリイミド	Φ0.15	0.0150	古川電工 BF05717-01
B	SMF	0.125	UV 樹脂	Φ0.25	0.0625	住友電工 SM(PureAccess-PB)
C	SMF	0.125	UV 樹脂	Φ0.50	0.1875	古川電工 F24659
D	SMF	0.125	UV 樹脂	Φ0.90	0.3875	住友電工 SM(PureAccess-PB)

③加圧面シート

光ファイバと接する加圧面シートの影響を確認するため、3 種類の素材で光ファイバを挟んで加圧した。光ファイバケーブルと接する加圧面シートの一覧を表 5.5-11 に示す。サイズはいずれも直径 290 mm、厚さ 10 mm である。加圧により加圧面シートがひずむ影響を確認するため、

素材はゴム硬度 60 の CR ゴム、ゴム硬度 50 のシリコーンゴム、ゴム硬度 35 のシリコーンゴムスポンジとした。試験では同じ素材の加圧面シートで光ファイバケーブルを挟み加圧した。

表 5.5-11　試験で使用する加圧面シート

No.	名称	仕様
1	ゴムシート	材質：CR ゴム、硬度 65 寸法：Φ290mm×t10mm
2	シリコーンゴムシート	材質：シリコーンゴム、硬度 50 寸法：Φ290mm×t10mm
3	シリコーンゴムスポンジシート	材質：シリコーンゴムスポンジ、硬度 35 寸法：Φ290mm×t10mm シリコーンゴムスポンジ

2)　試験装置

本試験で使用する機器を表 5.5-12 に示す。光ファイバに加える圧力は、2 本の光ファイバの組み合わせを繰り返し換えて計測することを考慮して機械式（ジャッキ式）の加圧装置を用いた。

計測システムの概要を図 5.5-23 に、試験時の光ファイバの配置と加圧装置を図 5.5-24 に示す。図に示すように、ゴムシート、シリコーンゴムシート、シリコーンゴムスポンジシートそれぞれの間に外径Φ0.15 mm、Φ0.25 mm、Φ0.50 mm、Φ0.90 mm の光ファイバを水平方向に 1 cm の間隔で並べ、加圧条件に差が生じることを避けるために、各層を重ねる構成で同時に加圧して計測を行った。また、光ファイバケーブルの設置位置がひずみの計測結果に及ぼす影響を確認するために、第 1 層にφ0.9 mm のケーブル 4 本を設置し、第 2 層以降は第 1 層と同じ位置にケーブルを設置した。このように配置した場合のケーブルの加圧区間長は、中心に近い 2 本で 289.96 mm、外側の 2 本で 289.61 mm となり、加圧区間長の差がひずみの計測値に及ぼす影響は無視できるほど小さいと考えられる。なお、図 5.5-25 に示すように、光ファイバケーブルは外径順で結線して、1 本の光ファイバケーブルとして設置し、16 カ所の加圧箇所を同時計測する構成とした。

表 5.5-12　使用機器

	型式	仕様
加圧装置	特注品 （ロードセル：UWV1-20T）	最大加圧：2.5 MPa まで（荷重計：200 kN まで） 加圧面積：Φ300 mm ※圧力設定は人がトルクを調整して行った
光ファイバ計測機	NBX-7020 or 7031	光ファイバ：SMF（シングルモードファイバ） レーザー：Class1；発光波長：1556～1558 nm 測定周波数：192～193 GHz 測定精度：ひずみ 1 με/ 温度 0.1℃
温度センサ	熱電対	銅・コンスタンタン熱電対
データロガー	TDS-530	ひずみゲージ・ひずみゲージ式変換器・直流電圧・熱電対・白金測温抵抗体のマルチ測定用 ※本試験では加圧装置の荷重計及び熱電対の直流電圧記録用に使用した

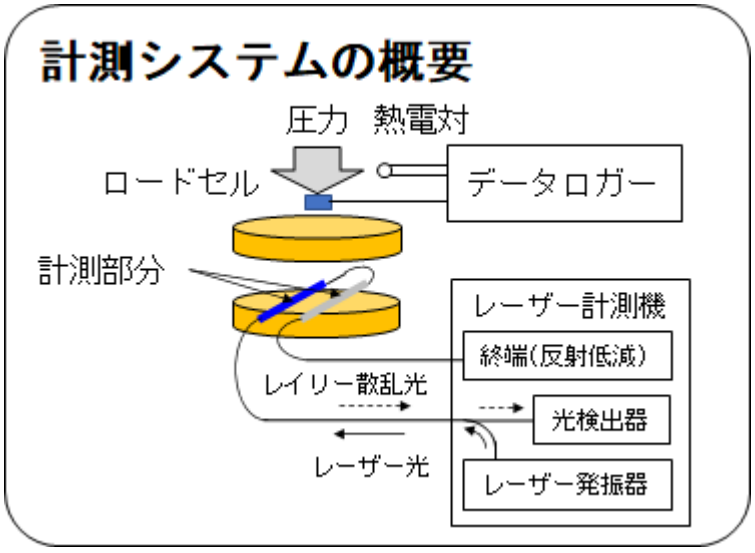


図 5.5-23　計測システム概要

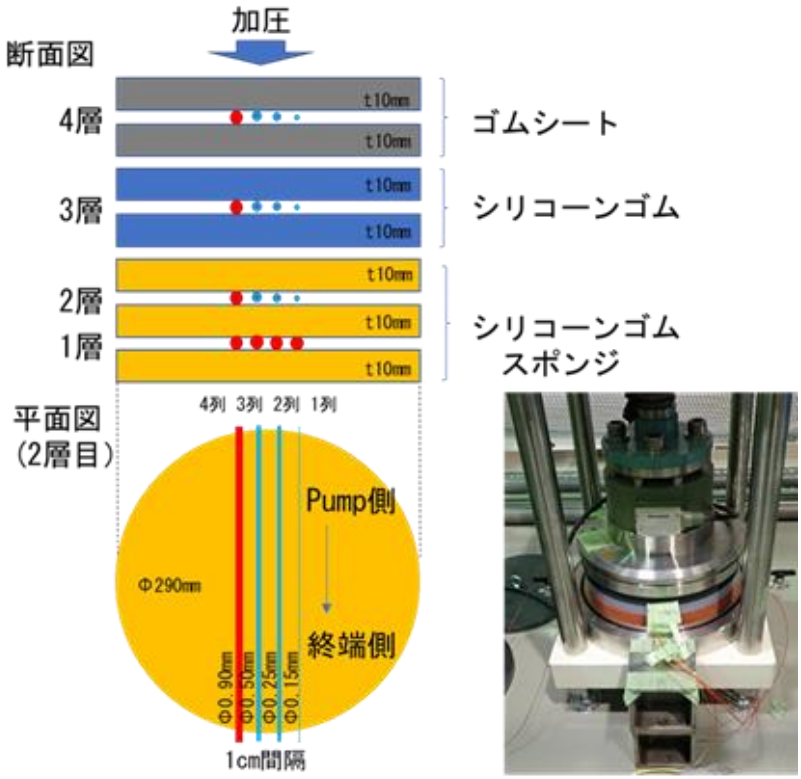


図 5.5-24　圧力試験時の光ファイバの配置と加圧装置試験状況

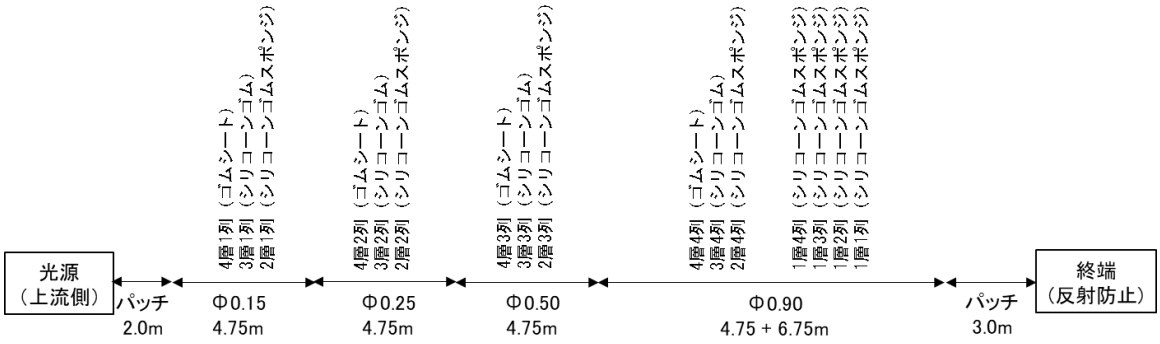


図 5.5-25　光ファイバケーブルの結線順序

(4) 試験結果

光ファイバによる圧力計測に関する標準的な試験方法はないため、まず試験方法が計測結果に与える影響を確認するための計測結果の整理をおこない、次に、被覆条件の異なる光ファイバケーブルの比較による圧力計測の可能性評価のための結果を整理する。

1) ケーブル設置位置の影響

①ケーブル設置位置（1 列～4 列）の違い

ケーブル設置位置（1 列～4 列）の違いが計測値に与える影響について、第 1 層に設置したφ 0.90 mm の 4 本のケーブルの計測結果を比較することにより確認した。第 1 層の計測結果を図 5.5-26 に示す。なお、これ以降の計測結果に共通であるが、後の検討で昇圧時（0→0.1 MPa）と降圧時（0.1→0 MPa）の測定値及びその傾向に大きな差が認められなかったため、計測結果は昇圧時のものを示す。また、測定値のグラフは、計測開始時（P=0 MPa）からのひずみを積算して積算ひずみとし、その値は正が引張側、負が圧縮側のひずみを示す。

各ケーブルの計測区間中央における積算ひずみの値と、最小値に対する最大値の比を計算した結果を表 5.5-13 に示す。なお、ケーブル 4 のひずみの値が他の 3 本に比べて高い傾向が見られたため、ケーブル 4 を除く 3 本の最小値に対する最大値の比も併せて計算した。

その結果、ケーブル位置による測定値への影響は 16～24%程度で、圧力が高くなると僅かながらその影響は減少することがわかった。ケーブル 4 を除いた場合は、その影響は 3～6%程度まで低減することから、ケーブル 4 の計測ではケーブル位置の影響が表れている可能性があった。この関係が概ね他のシート層にも該当すると仮定した場合、ケーブル 4（φ0.90 mm）のひずみ値を 1/1.219=82%程度に換算して測定値を評価する方法も考えられる。

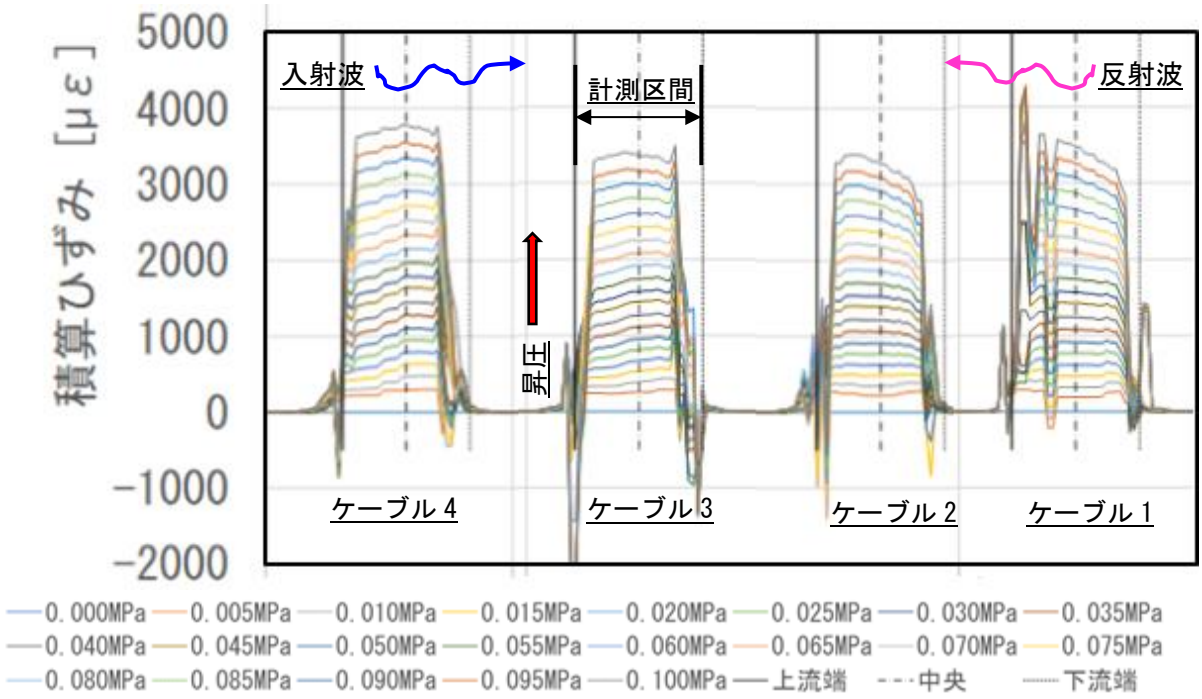


図 5.5-26　ケーブル設置位置の違いによる計測値の比較（第 1 層φ0.90 mm 昇圧時）

表 5.5-13　ケーブル設置位置の違いによる計測値の比較（第 1 層φ0.90 mm 昇圧時）

圧力 (MPa)	計測区間中央の積算ひずみの値（με）				最大値／最小値		ケーブル 4／ケーブル 1~3 の平均
	ケーブル 4	ケーブル 3	ケーブル 2	ケーブル 1	全ケーブル	ケーブル 4 を除く 3 本	
0.025	949.3	804.0	768.0	764.0	1.243	1.052	1.219
0.050	1,785.3	1,569.3	1,521.3	1,565.3	1.174	1.032	1.150
0.075	2,726.7	2,418.7	2,354.7	2,466.7	1.158	1.048	1.130
0.100	3,789.3	3,353.3	3,273.3	3,477.3	1.158	1.062	1.125

②加圧シートの端部と中心部との違い

試験方法としては均等に圧力を載荷できるシステムを採用しているが、加圧シートは弾性変形することから、1 本のケーブル中でも中央部と端部で加圧状態が異なる可能性がある。また、本研究で採用している計測法では、理想的な試験であれば理論的には各ケーブルの計測値はほぼ対称形を示すこととなる。計測区間の境界の影響は除外した場合でも、たとえば図 5.5-26（およびこれ以降に示す各図）の計測結果によれば、ほぼ対称形を示しているものの、反射側（図では右側）の計測値がやや低めの値を示す傾向が見られた。この原因が試験方法によるものなのか、あるいは端部で反射させる光ファイバケーブルによるひずみ測定が元来持ち得るものなのかについては、現時点では不明である。

2)　加圧シートの材質による影響

今回 3 種類を比較した加圧シートの材質による違いを評価するために、光ファイバケーブルに発生したひずみ分布のうち、φ0.90 mm 及びφ0.15 mm のケーブルの加圧時の計測値を加圧シート間で比較したものを図 5.5-28 及び図 5.5-28 に示す。積算ひずみの正負は図 5.5-26 と同様

で、いずれも左が入射側、右側が反射側である。

加圧シートの CR ゴム、シリコーンゴム、シリコーンゴムスポンジの違い（図 5.5-24 参照）により、発生したひずみ量には差があり、光ファイバと加圧シートの接し方（つまり、圧力の載荷状況）がシートによって大きく異なることがわかる。また、両図をケーブル毎に比較した場合、積算ひずみの最大値は近い値を示しており、ゴムシート毎のひずみの分布形状と時間変化も比較的似たものとなっていた。

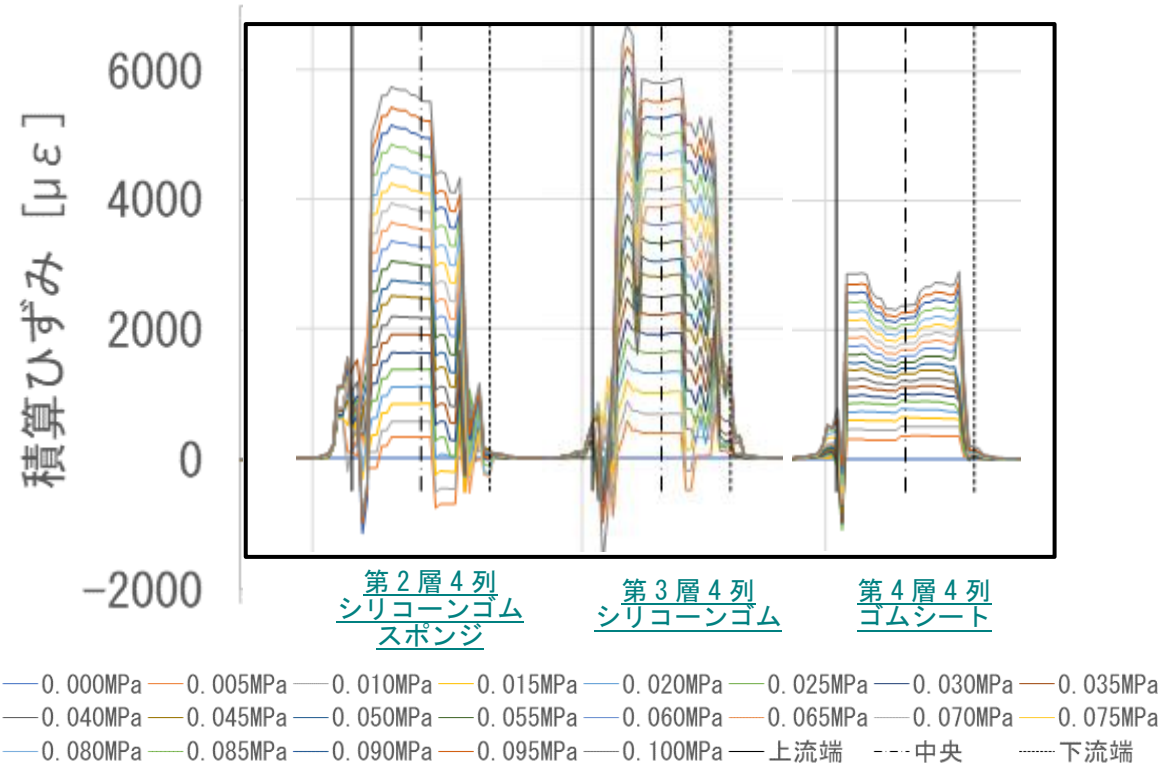


図 5.5-27　加圧シートの材質の違いによる計測値の比較（φ0.90 mm 昇圧時）

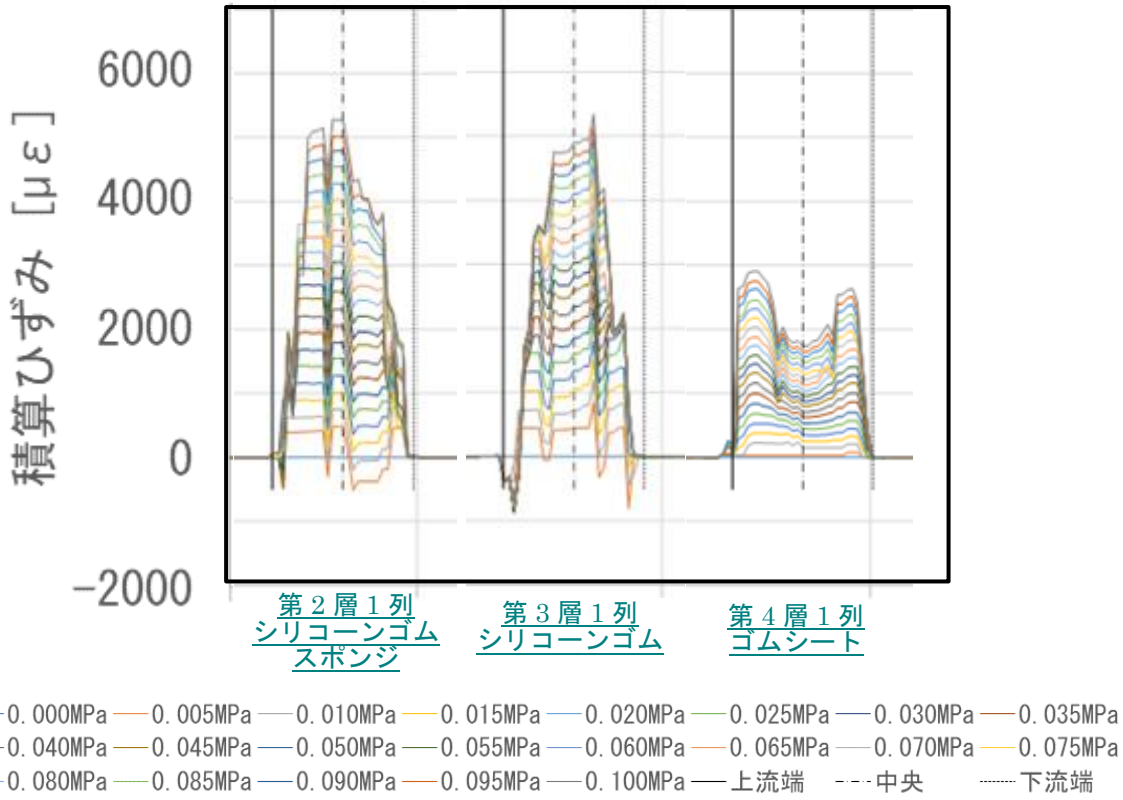


図 5.5-28　加圧シートの材質の違いによる計測値の比較（φ0.15 mm 昇圧時）

3)　加圧層の違いの影響

試験毎の加圧条件の偏りを回避するために、図 5.5-24 に示すような多層系により試験をおこなった。この層の上下あるいは積層の順が試験結果に及ぼす影響を概略ではあるが評価するために、同一加圧シート・ケーブル及びケーブル位置相互の試験結果を比較した。

図 5.5-29 にφ0.90 mm のケーブル 4 列、昇圧時の第 1 層と第 2 層（いずれも加圧シートはシリコーンゴムスポンジ）の積算ひずみの計測結果を示す。この結果、ひずみの計測結果には有意な相違が生じた。このことは、多層系で加圧試験をおこなう際に各層で使用される加圧シートの材質とその積層の順序、上下層の同じ位置に置かれたケーブル（主に径）が計測結果に影響する可能性を示しているが、複数の要因が混在しているため主たる要因は明らかとなっていない。

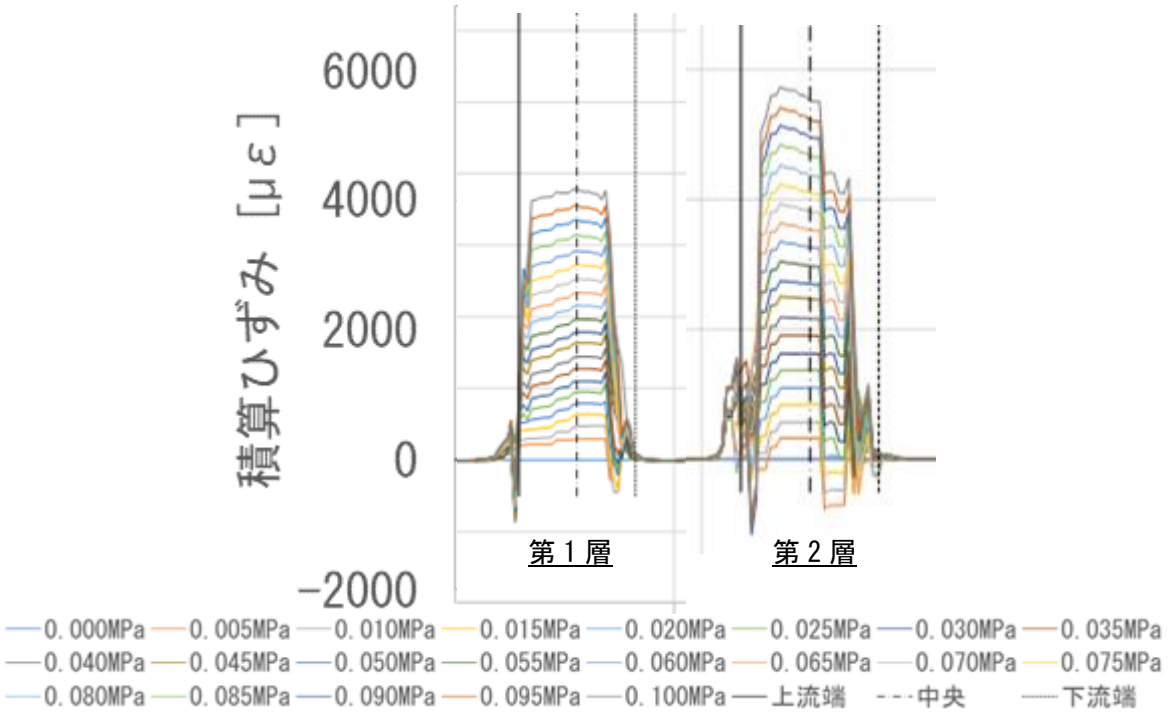


図 5.5-29　層の違いによる計測値の比較（φ0.90 mm、ケーブル第 4 列、昇圧時）

4)　昇圧時と降圧時の違い及び積算ひずみと圧力の関係

本研究では、昇圧過程だけではなく降圧過程も計測対象としている。ここでは、昇圧過程と降圧過程の双方を計測することにより、昇圧過程と降圧過程の計測結果の違いを評価した。各ケーブルの加圧面の中央のひずみを代表値として、昇圧及び降圧に伴うひずみ変化のうち、一例としてシリコーンゴムシートにおける全ケーブルの昇圧時及び降圧時の圧力と積算ひずみを図 5.5-30、φ0.15 mm 及びφ0.500 mm の積算ひずみの数値を表 5.5-14 に示す。他の加圧シートにおける計測結果でも同様であるが、昇圧時と降圧時の計測値の差は小さかった。ただし、被覆が厚いケーブル（φ0.90 mm 及び 0.50 mm）では降圧過程においてひずみが残留し、被覆が薄いケーブル（φ0.25 mm 及び 0.150 mm）では値としては小さいが逆の圧縮ひずみが生じる傾向があった。

また、図 5.5-30 より、圧力と積算ひずみは比較的良好な線形関係にあることがわかる。試験中における温度変化は 0.1℃程度であることから、温度変化の影響は除外して考えることができる。したがって、この計測値は加圧によるひずみと設置により元来生じているひずみの合計値と考えることができる。加圧によるひずみの増分がひずみ全体に占める割合が支配的である場合は、1 本のひずみ測定値から温度影響を差し引くことで圧力の影響が評価できる可能性があることを示している。

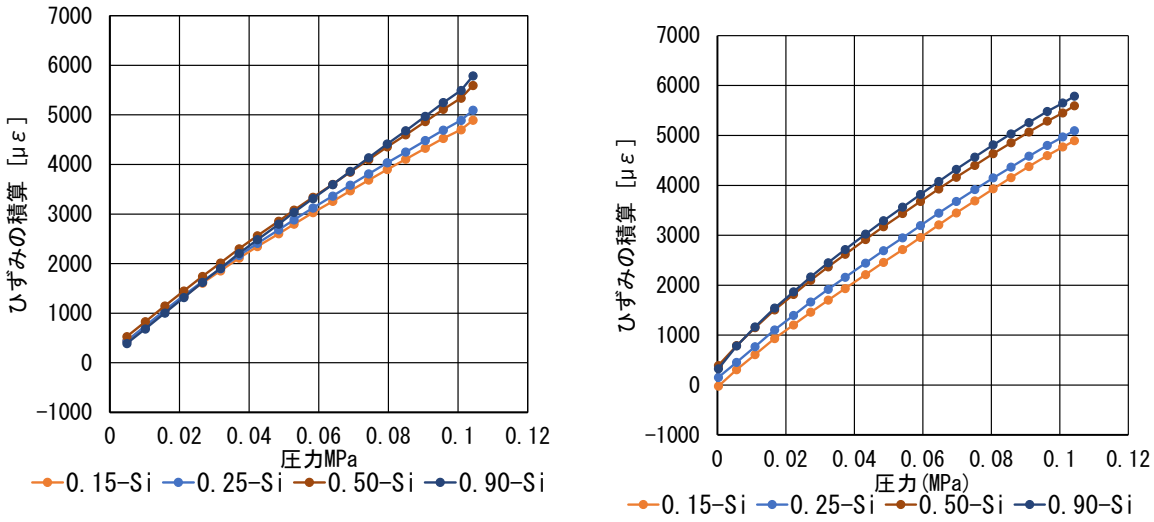


図 5.5-30　昇圧過程（左）と降圧過程（右）での計測値の比較

（第 3 層、各ケーブルの計測中間点での値）

表 5.5-14　昇圧過程と降圧過程での計測値の比較

（第 3 層、φ0.15 mm 及びφ0.500 mm ケーブルの計測中間点での値）

φ 0.150mm の積算ひずみ(με)	加圧力(MPa)					
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
昇圧過程	0	1,336.0	2,345.3	3,256.0	4,106.7	4,893.3
降圧過程	-24.0	1,202.7	2,212.0	3,206.7	4,154.7	4,893.3
降圧過程－昇圧過程	-24.0	-133.3	-132.3.	-49.3	48.0	0.0
φ 0.500mm の積算ひずみ(με)	加圧力(MPa)					
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
昇圧過程	0	1,449.3	2,562.7	3,600.0	4,598.7	5,592.0
降圧過程	389.3	1,812.0	2,914.7	3,928.0	4,850.7	5,592.0
降圧過程－昇圧過程	389.3	362.7	352.0	328.0	252.0	0.0

5)　ケーブルの違いの評価

本研究の目的である、ケーブル被覆の違いによるひずみ差を用いて圧力を評価するためには、ケーブル間のひずみの差は重要な項目である。

同一の加圧シート面における 4 本の光ケーブルそれぞれの積算ひずみの値の変化の一例として、第 3 層の結果を図 5.5-31 に示す。いずれの加圧シート面においても、各光ファイバ相互の加圧面内で得られたひずみは一様ではなく、加圧面内でのケーブル相互間での違いが認められた。この違いが大きいほど、圧力変化に対するひずみ変化の「差」が大きいこととなり、ひずみ差による圧力の評価がより容易になる可能性がある。

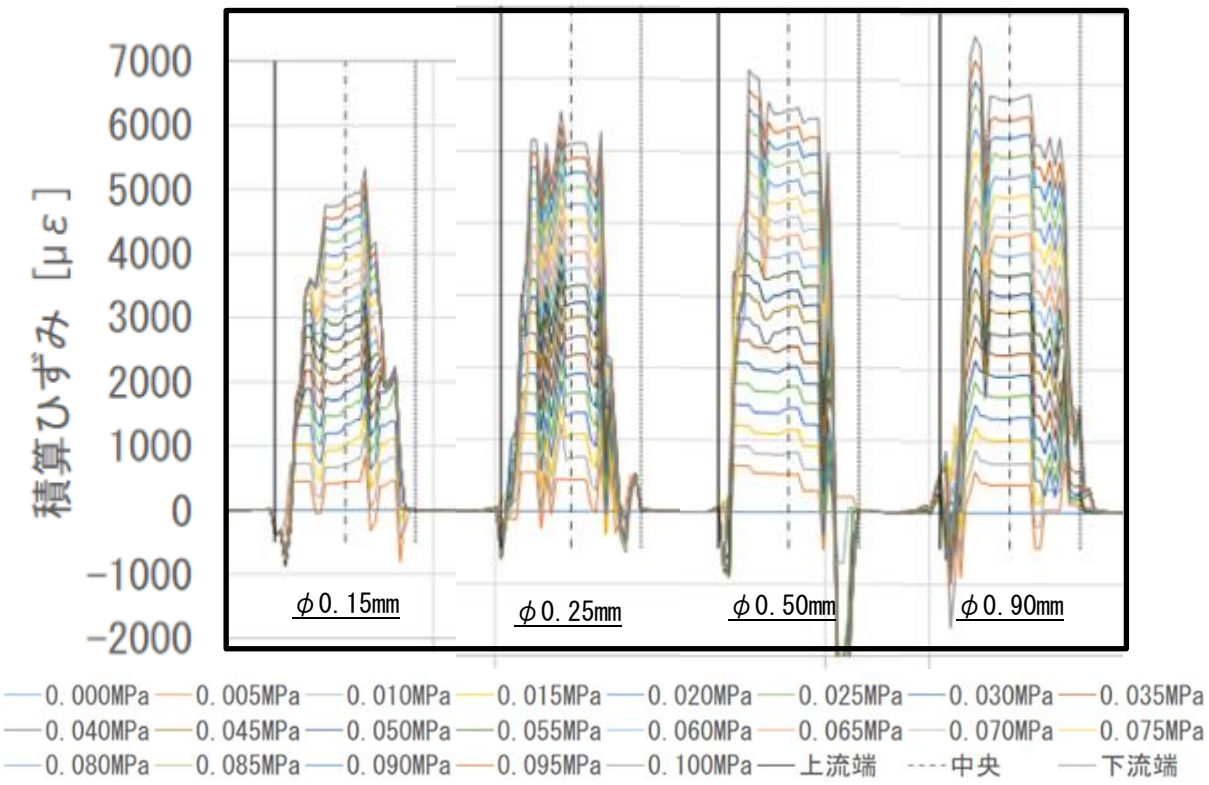


図 5.5-31　ケーブルの違いによる計測値の比較（第 3 層シリコーンゴム･昇圧時）

(5) 考察

本研究では、被覆の力学変形特性が異なる 2 本の光ファイバケーブルの加圧時のひずみ計測値の差分を求めることにより、設置時のひずみと温度の影響を相殺し、加圧の影響のみによる光ファイバケーブルのひずみを得ることにより、ケーブルに作用している圧力を評価する。したがって、この差分が誤差などを考慮しても識別可能なレベルで明確に表れることと、圧力とひずみの差分の関係が安定して得られることの 2 点が重要である。以下では、この目的を達成するための試験方法としての妥当性評価と、課題及び今後の開発の方向性について検討する。

1) 試験方法の妥当性

本研究で採用した試験方法は、被覆条件の異なる光ファイバケーブルの選定、加圧シートの特性、光ファイバケーブルの配置及び加圧シートを積み重ねた試験方法など、標準的な試験法がなく、さらにこれまでの実施例も極めて少ないと考えられる試験方法であることから、上述の試験結果では、それぞれの結果に影響する要素について計測結果を整理した。試験では、図 5.5-22 に示したような理想的な加圧条件にできるだけ近い条件を設定することが望ましい。今回の試験では、正の相関性を示すひずみと圧力の関係が得られたことから、試験方法としてはある程度の妥当性は得られたと考えるが、一方でいくつかの重要な課題が抽出された。

①ケーブルの位置

本試験では、ケーブル間のひずみの差分を取得するために 4 本の種類の異なるケーブルに等しい条件で圧力を加える必要があることから、4 本を加圧シート間の同一層（最下段の第 1 層）に

配置した。しかしながら表 5.5-13 に示したように、第 4 列のケーブルのひずみが 13～22%程度大きい値を示した。第 4 列には全ての層に最も太いφ0.90 mm のケーブルが配置されている。弾性体である加圧シートは上下それぞれ 10 mm の厚みがあり、第 4 列のケーブル径φ0.90 mm に比べて十分に厚いと考えられることから、ケーブル径が大きいことによる影響ではない可能性が高い。一方でケーブルの接続順の可能性もあるが、隣接する同じ第 1 層の第 3 列のひずみ値が第 1 及び 2 列と大きく異ならない（つまり、第 4 列と第 3 列の間の測定値の差が大きい）ことから、この可能性は低いと考えられる。したがって、他の試験条件（加圧力の偏向、加圧面の偏りなど）の影響が考えられる。ケーブル径の影響が表れた可能性もあるが、現段階では明らかではない。いずれにしても、計測値の解釈の際には、第 4 列のφ0.90 mm のケーブルのひずみ値にこのような影響が含まれている可能性を考慮する必要がある。

②加圧シートの種類の影響

3 種類の加圧シートによるひずみ測定値の違いは、図 5.5-27 及び図 5.5-28 に示したとおりである。本研究ではケーブル相互のひずみの差分を取得することが必要であるため、加圧シートの違いに関わらず、同じシート中におけるケーブル相互のひずみ計測値の差が安定していることが望ましい。また、ケーブル間のひずみの差分の値が大きい方が圧力に対する評価が容易なことから、ケーブル相互間のひずみ差が大きく表れるような加圧シートが好ましいといえる。その観点からは、シリコーンゴムとシリコーンゴムスポンジが試験に適していると考えられる。これらは、ゴムシートと比較して柔らかく、加圧状態がより理想に近いものであったと推定される。

また、加圧による光ファイバケーブルの被膜が延長方向へひずんだ場合、加圧シートとケーブル被覆が密着していれば、加圧シートとケーブル被覆との摩擦によりポアソン比の小さい方のひずみが抑制される可能性がある。両者の材質は比較的近い変形特性を有しているが、比較するとケーブル被覆（樹脂系）の方が硬質であり、ポアソン比がやや小さい傾向にあると考えられる。ゴム製の加圧シートのポアソン比は 0.5 に近いため、ポアソン比の差が小さい方が好ましいという観点からは、加圧シートとしてはシリコーンゴムが好ましい。いずれにしても、試験結果に対する加圧シートの影響は大きいことに留意する必要がある。

③その他試験法の影響

本試験では、剛性の高いプレートによる加圧をおこなっているが、加圧による加圧シートの側方変形（主にゴム系材料のポアソン比が大きいことによる）により、均等な圧力伝播がなされていない可能性がある。7 枚の加圧シート（合計厚さ 7 cm）を積み重ねて加圧試験を実施したため、この側方変形の影響は大きい可能性がある。またこの変形は加圧シートの材質により異なるため、それらを複数積み重ねた状態での影響は複雑になると考えられる。

埋め戻し材中のベントナイトの膨潤により発生する圧力は増加及び減少の両現象が発生する可能性があるため、本試験でも昇圧－降圧時のひずみ特性を取得した。その結果、ひずみ履歴はほぼ同じ経路をたどることが判明したが、加圧完了後も一部で残留ひずみが確認された。この残留ひずみが圧力の評価に大きく影響することはないと考えられるが、残留ひずみが生じた原因が計測結果全体に影響を与えないことを別途確認する必要がある。

以上のように、光ファイバを用いた圧力計測のための標準的な試験方法がないため、本試験結果から得られた試験装置及び試験方法など、結果に影響する様々な要因について、今後、計測に与える影響を明らかにし、それに沿って試験結果を評価する必要がある。

また、これらの影響要因を減らすためには、例えば水などの流体あるいは微粒子粉体による加

圧を行うなどによってケーブルに均等に加圧するための工夫を施すなど、新たな試験方法を検討することも考えられる。粉体などの固体を使用する場合は、内部摩擦角の影響も考慮して、3 軸状態の加圧ができる方法も考慮する必要がある。

2) ひずみによる圧力の評価

①ひずみ差分による圧力の評価結果

本研究の目的である､被覆の異なる光ファイバケーブルのひずみ差分による圧力評価を試みる。同一加圧面における異なるケーブル間のひずみの差分を計算した例を図 5.5-32 に示す。この図より、ひずみの差分と圧力には正の相関性が見られる。他の加圧シートにおける計測値の差分もほぼ同様の傾向を示している。この図における各グラフ線の始点（P=0.005 MPa 加圧時のひずみ）に差が見られるが、これはケーブルの設置状態の違いによる初期の調整によるものと推察される。このような挙動は、変位－荷重関係を計測する際に、荷重が作用し始める際にもよく見られるものであり（いわゆる「馴染み」と呼ばれる現象)、このような場合には各計測器間の変位の読み値の違いを軽微な荷重作用時の変位を差し引くことにより調整することもできる。この方法を適用する場合は、初期の値（具体的には、最初の荷重ステップ 0.005 MPa 載荷時のひずみ）を揃えてその後の増分を評価することにより、適切なひずみ差分－圧力増分の関係が得られるものと思われる。その方法に沿って差分を計算したものを図 5.5-33 に示す。この図においては、ひずみ差分と圧力との正の相関性がより明確となり、本研究で提案している「異なる被覆を有するケーブルのひずみの差分による圧力の評価方法」の可能性を示唆している。

②差分による評価を行う際の留意点

ひずみの差分により圧力を評価する場合は、差分の値ができるだけ大きくなる方が、圧力に対する感度が大きくなり、圧力変化への追従性が向上する。たとえば図 5.5-33 の例では、ケーブル径 0.90 mm と 0.15 mm のひずみの差が最も大きく、圧力に対する感度が高い。このひずみ差が被覆のひずみを反映しているのであれば、被覆厚さの差の大きい順に感度が高いと考えられ、本図の結果もそれに沿ったものとなっている。ただし、差分であることからその値はひずみの絶対値（図 5.5-30 参照）と比較して相当小さいため、測定の誤差や不安定さに紛れてしまわないように試験法方に注意する必要がある。

先の(4)1)①で検討したように、本図におけるケーブル径 0.90 mm の設置位置（第 4 列）は、ひずみが 15%程度大きく計測される可能性があり、それを差し引いた場合は、圧力に対する感度は低下することも考えられるが、それについては先にも述べたように試験方法も含めて詳しく検討する必要がある。また、図 5.5-30 に示したように、各ケーブルのひずみ－圧力は比較的直線に近い正の相関があり、別途、温度計測（坑道断面内の少ない点数で十分と思われる）を行うことにより、温度影響をキャンセルできればケーブル 1 本のひずみ計測で圧力が近似的に評価できる可能性もある。

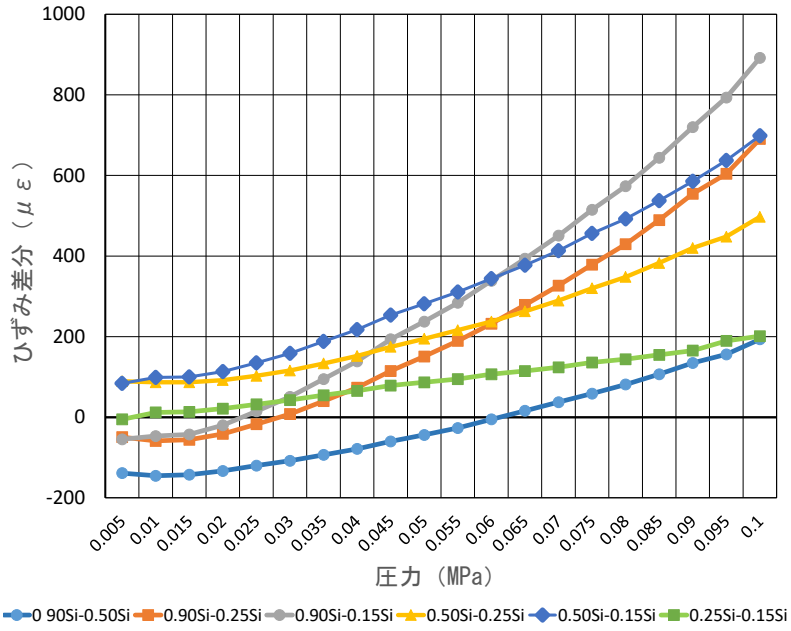


図 5.5-32　光ケーブル相互のひずみ値の差分と圧力の関係（昇圧時、シリコーンゴムシート）

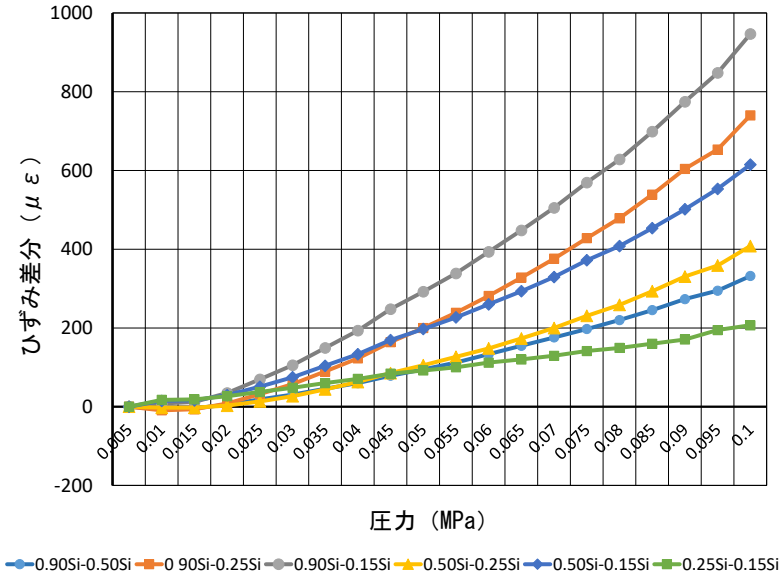


図 5.5-33　光ケーブル相互のひずみ値の差分と圧力の関係（昇圧時、初期ひずみを 0 とした場）

5.5.5　処分環境を想定した無線給電技術の研究開発

(1) 3 年間の成果目標及び研究開発方針

処分施設におけるモニタリングについては、施設全体の水密性の確保、施設構造物・計測システムの耐久性向上及びモニタリング戦略の柔軟性確保の観点から、プラグなどの構造物を挟んだ、地上側から計測センサへの電力供給にケーブルを用いない技術（以下、無線給電技術）の開発が進められてきた（原環センター，2018a、原子力機構･原環センター，2020、など）。

本研究では、これまでの無線給電技術の研究開発の成果を基に、当技術の適用性を拡張するために、鉄筋コンクリート構造を挟んだ電力供給技術を開発する。本技術の 3 年間の研究開発計画を表 5.5-15 に示す。

過年度の研究（原環センター，2017）では、鉄筋を模擬した試験により、給電効率が 60%以上低下するという結果が得られており、実用化のためには、給電効率の向上が必須の課題である。今年度はこの無線給電の障害となることが予想される、鉄筋コンクリート構造物に含まれる鉄筋の影響を評価することを目的に、鉄筋量及び無線給電コイルと鉄筋メッシュとの位置関係の、給電効率に与える影響に関する要素試験を実施してその影響を評価するとともに、効率向上のための改善策を提案する。

表 5.5-15　鉄筋コンクリートを透過する無線給電技術の研究開発計画

	実施項目	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度
1	鉄筋による無線給電への影響評価のための要素試験実施			
2	要素試験を踏まえた影響評価と改善策検討			
3	開発対象とする改善策選定			
4	選定した改善策の実装方法検討			
5	実装した改善策効果検証のための要素試験実施			
6	要素試験の評価とさらなる改善策検討			

(2) 試験装置及び試験条件

1)　無線給電システム構成及びコイル型式

無線給電システム全体の構成をブロック図で表したもの及び計測機器を図 5.5-34 に示す。送電側の電圧は直流 12V とする。受電側の電子電荷は、実使用では計測センサに該当する。

要素試験に使用する送受電コイル型式は、スパイラル型との比較検討により、同性能での寸法が小さく設置への制約が少ないことからヘリカル型を選定した。両形式を図 5.5-35 に、試験に使用したコイル（直径 500mm、巻き数は 15 とした）を図 5.5-36 に示す。

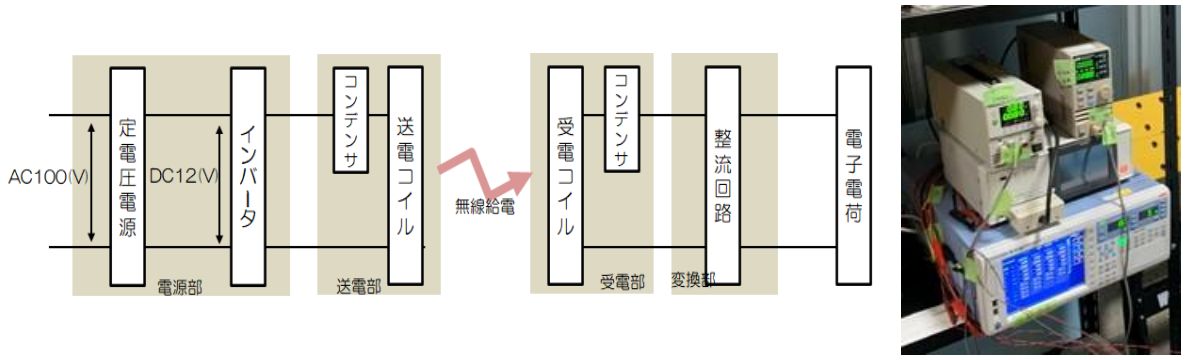


図 5.5-34　無線給電システムのブロック図及び測定機器

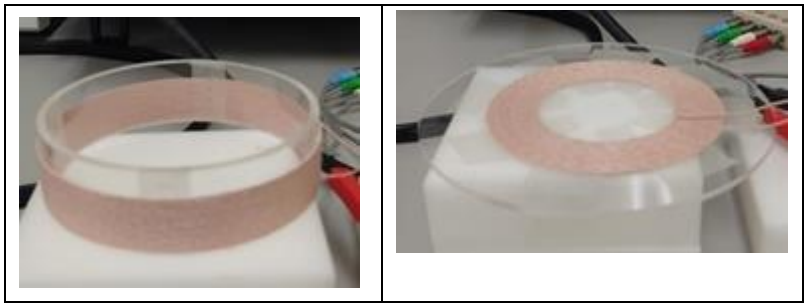


図 5.5-35　ヘリカル型コイル（左）及びスパイラル型コイル（右）（巻き数は 20）

図 5.5-36　要素試験に使用したヘリカル型コイル（巻き数は 15）

2)　試験体（鉄筋）及びコイルとの離間

試験は、図 5.5-37 に示すように、送受電コイルの間に鉄筋を介在させて、コイル間の給電効率を評価する。利用した鉄筋は異形鉄筋 D16、鉄筋の間隔は鉄筋中心間隔で 100mm、200mm 及び 300mm の 3 ケースを対象とした。試験では、コイル間距離（＝伝送距離）をコイル直径と同じ 500mm（鉄筋とコイルの距離はそれぞれ 250mm）とした。

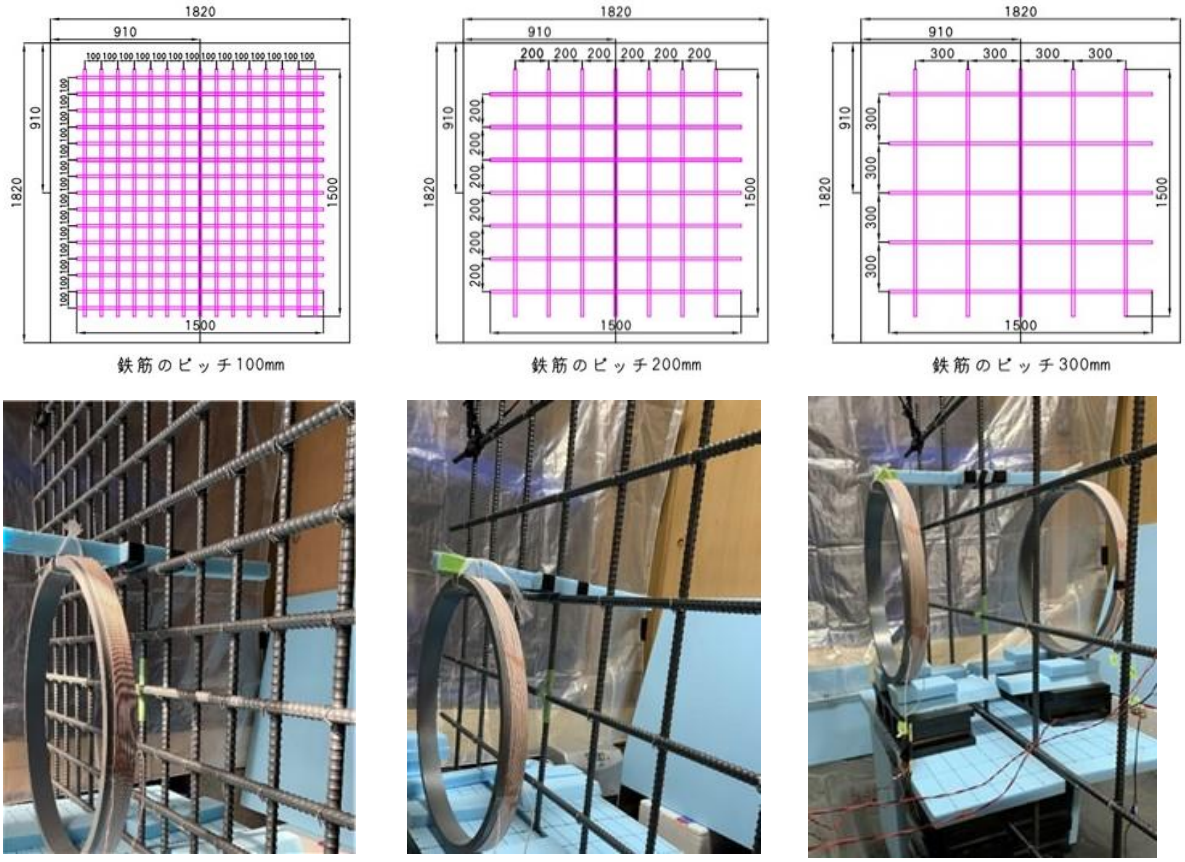


図 5.5-37　配筋図及び鉄筋に対するコイルの配置

3) 試験ケース

要素試験における試験パラメータは、鉄筋の間隔（メッシュの間隔）及び平面的なコイルと鉄筋メッシュとの位置関係とした。試験における送受信コイルと鉄筋との位置関係は、図 5.5-38 に示す 4 パターンとする。

- パターン(i)：送受電コイル中心と鉄筋交差部が同一位置
- パターン(ii)：送受電コイル中心を縦方向に鉄筋間隔の 1/2 移動
- パターン(iii)：送受電コイル中心を横方向に鉄筋間隔の 1/2 移動
- パターン(iv)：送受電コイル中心を縦方向と横方向に鉄筋間隔の 1/2 移動（メッシュ中央）

したがって、試験ケースは、鉄筋間隔 3 ケース×コイル中心位置 4 ケース=12 ケースとなる。

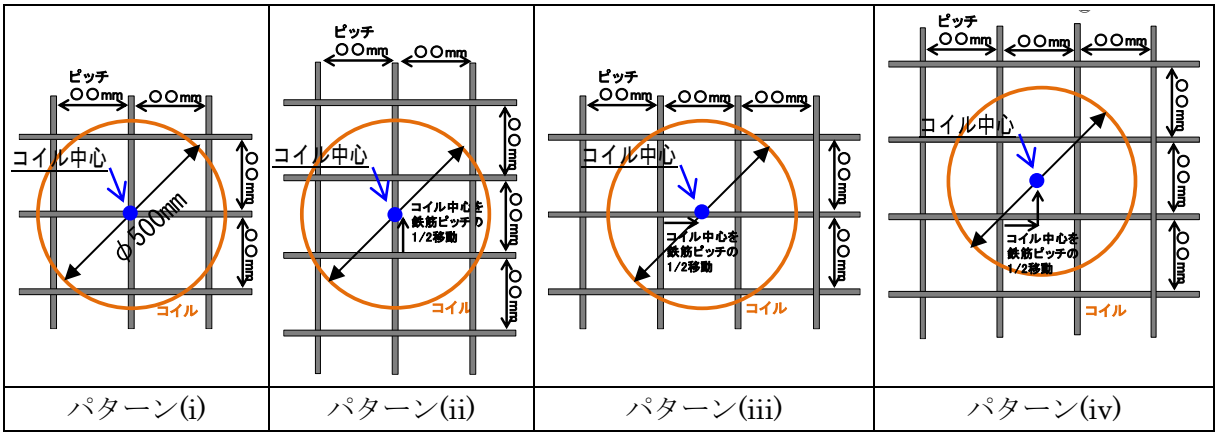


図 5.5-38　コイルと鉄筋との位置関係（間隔:100, 200, 300mm）

4) 試験方法及び測定項目

試験では、図 5.5-34 の電子負荷の電流を 0~1.5A 間を 0,1A ごとに変化させて、それによる送受電コイル間の給電効率、システム（インバータ～電子負荷）間の給電効率の変化についてパワーアナライザを利用して測定した。

(3) 試験結果

鉄筋間隔の違い、鉄筋メッシュとコイル中心との位置関係による給電効率への影響試験結果を順に報告する。

1) 鉄筋間隔の影響

鉄筋メッシュとコイル中心位置との関係パターン(i)及びパターン(iv)における、鉄筋間隔 100mm、200mm 及び 300mm の場合の給電効率を図 5.5-39 及び図 5.5-40 に示す。また、パターン(i)～(iv)のコイル間給電効率及びステム間給電効率のピーク値をまとめたものを表 5.5-16 及び表 5.5-17 に示す（給電効率は、供給側電力に対する受電側電力の比で求める）。両ケースとも、鉄筋間隔が広がるほど給電効率が向上しており、特に 100mm→200mm の変化が大きく、200mm →300mm の変化は小さい。

コイル間給電効率がピーク値を示した電子負荷部分の抵抗値をまとめたものを表 5.5-18 表 5.5-17 に示す。ピークとなる電子負荷部分の抵抗値は、鉄筋間隔が小さくなるに従い小さくなる（つまりピークが左にシフトする）傾向がある。これもピーク値同様に、100mm→200mm の変化が大きく、200mm→300mm の変化は小さい。

全般的な傾向として、システム間の給電効率は、電子負荷部分の抵抗が小さくなるにしたがって向上し、表 5.5-18 に示すシステム間の給電効率がピークとなる抵抗値を下回ると給電効率は急激に減少する傾向を示している。コイル間の給電効率も同様の傾向を示すが、鉄筋間隔の違いによるピーク時の抵抗値の変化はシステム間給電効率の抵抗値の変化と比べて小さく、鉄筋間隔 100mm については、明確なピークが計測されていない。

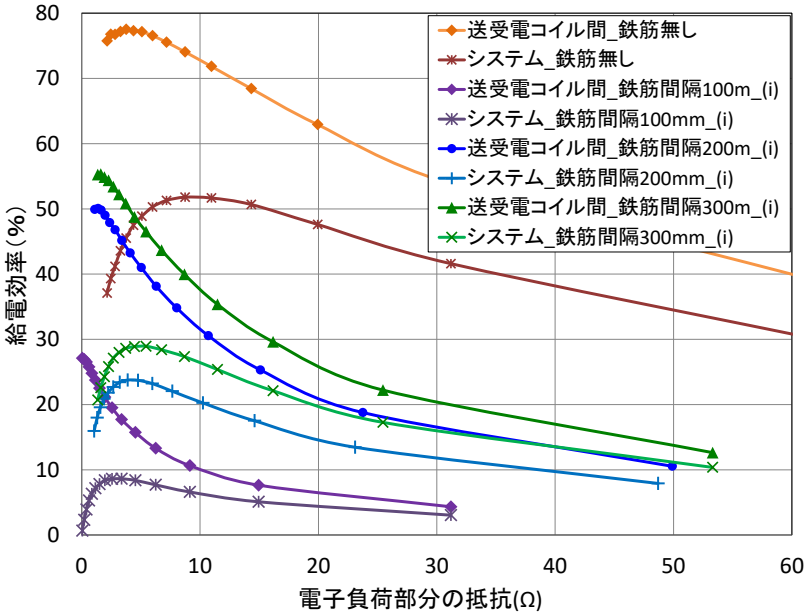


図 5.5-39　鉄筋間隔 100mm、200mm、300mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（パターン(i)）

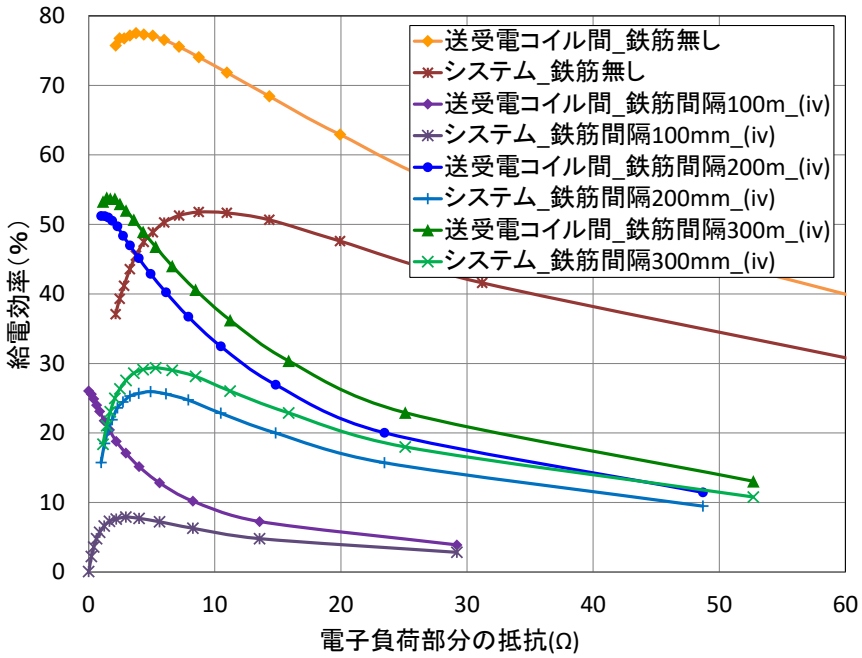


図 5.5-40　鉄筋間隔 100mm、200mm、300mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（パターン(iv)）

表 5.5-16　コイル間給電効率のピーク値

試験ケース	鉄筋無し	パターン	鉄筋間隔		
			100mm	200mm	300mm
給電効率(%)	77.5	(i)	27.1	49.5	55.3
		(ii)	26.4	50.1	52.7
		(iii)	25.9	51.4	53.5
		(iv)	26.0	51.2	53.8
		平均	26.4	50.6	54.0

表 5.5-17　システム間給電効率のピーク値

試験ケース	鉄筋無し	パターン	鉄筋間隔		
			100mm	200mm	300mm
給電効率(%)	51.8	(i)	8.6	23.7	28.9
		(ii)	8.3	25.0	28.6
		(iii)	7.4	25.9	28.9
		(iv)	7.9	26.0	29.4
		平均	8.1	25.1	29.0

表 5.5-18　システム間給電効率がピークを示した時の抵抗値

試験ケース	鉄筋無し	パターン	鉄筋間隔		
			100mm	200mm	300mm
抵抗値(Ω)	9.6	(i)	2.6 及び 3.4	3.9 及び 4.8	4.5 及び 5.4
		(ii)	3.0	4.1 及び 5.0	5.5
		(iii)	2.6 及び 3.6	5.0	5.0
		(iv)	3.0	4.9	5.3

2)　鉄筋メッシュとコイル中心との位置関係の影響

鉄筋間隔 100mm での、図 5.5-38 の各パターン及び鉄筋無しのケースにおける給電効率を比較したものを図 5.5-41 に、鉄筋有りのケースのみを拡大表示したものを図 5.5-42 に示す。同様に鉄筋間隔 200mm 及び 300mm のケースの鉄筋有りの曲線を拡大したものを図 5.5-43 及び図 5.5-44 に示す。なお、両図は鉄筋間隔 100mm のケース（図 5.5-42）と比較して給電効率が高いため、グラフの縦軸（給電効率）のスケールを 1/2 としている。

試験の結果、鉄筋間隔 100mm、200mm 及び 300mm のどのケースにおいても、鉄筋メッシュとコイル中心との位置関係の違い（パターン(i)～(iv)）による給電効率の違いは顕著ではなく、パターン毎の傾向の違いも見られなかった。

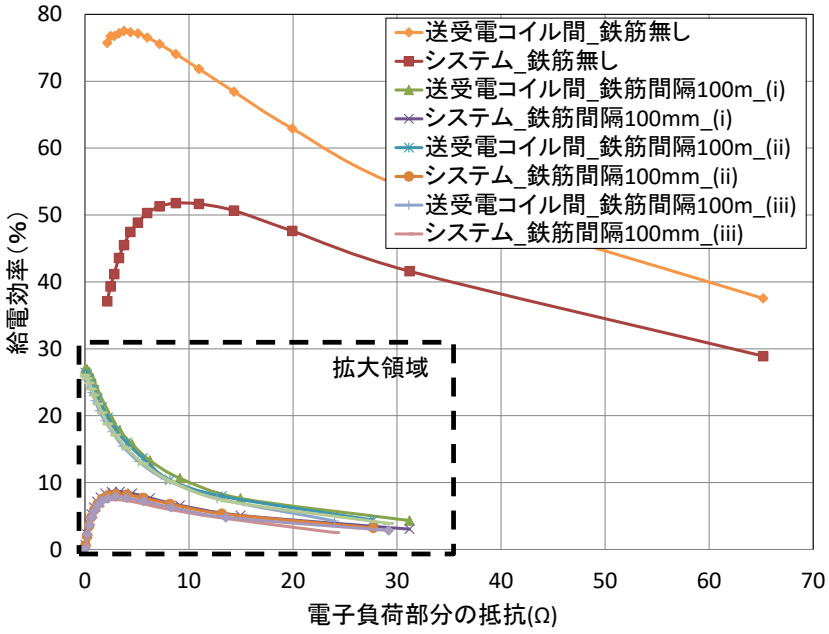


図 5.5-41　鉄筋間隔 100mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（鉄筋無し含む）

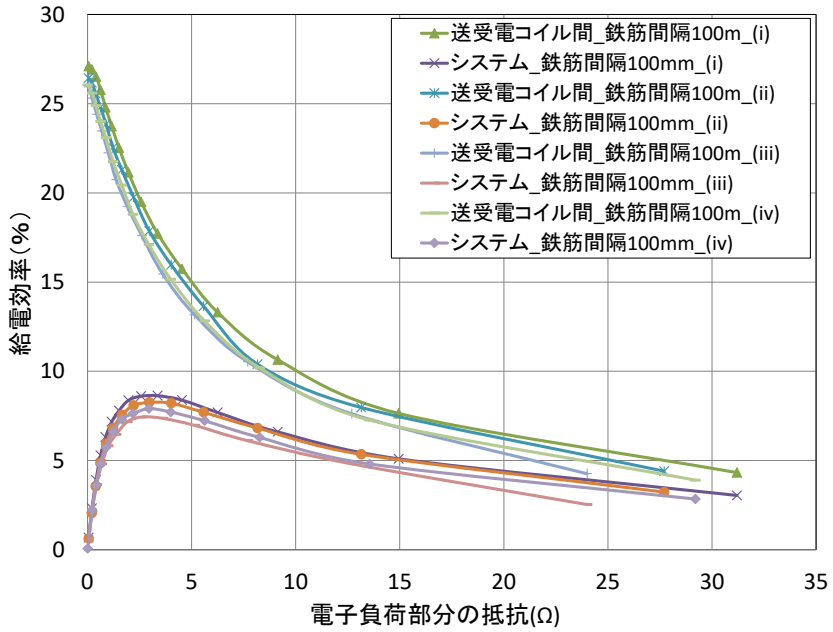


図 5.5-42　鉄筋間隔 100mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（拡大図）

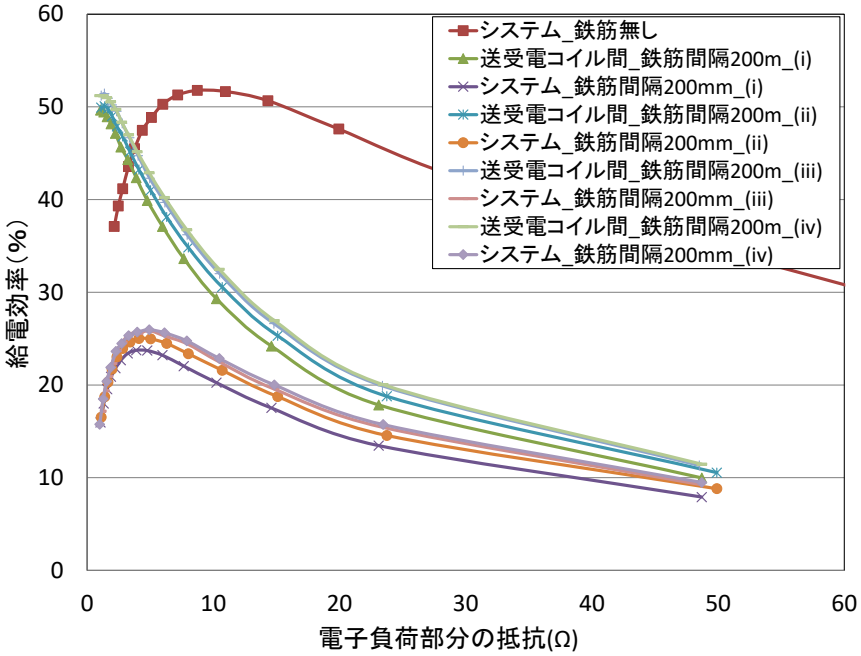


図 5.5-43　鉄筋間隔 200mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（拡大図）

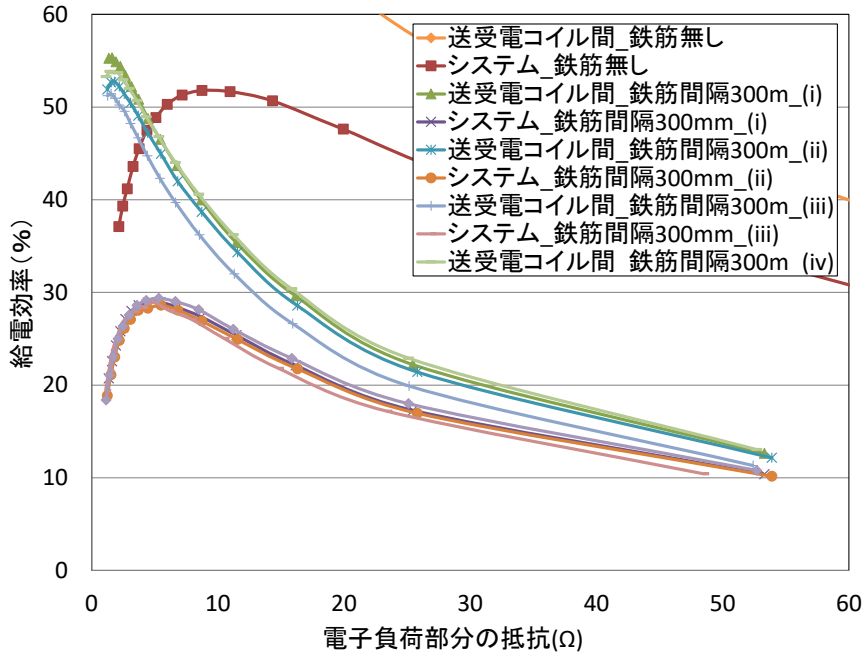


図 5.5-44　鉄筋間隔 300mm の場合における給電効率と受電負荷の関係（拡大図）

(4)　考察

1)　鉄筋間隔（コイル間の金属量）の影響

鉄筋間隔が小さくなる（コイル間の金属量が増加する）と給電効率は低下するが、これは、送受電コイル間に存在する金属内に生じる渦電流により損失するため考えられる。そのため、鉄筋コンクリート構造物を介する場合は、鉄筋量の少ない断面を通じた給電を行う方が効率がよく、そのためには構造物の設計に応じた受給電位置の計画をおこなうことが望ましい。

その一方で、今回の結果は、鉄筋間隔と給電効率のピークは比例関係ではないことを示しており、ある程度以下の鉄筋間隔（金属量）であれば、鉄筋間隔の部分的な偏りにより給電効率が極端に低下する事はないと予想され、構造物に対する受給電位置の柔軟性が確保できる可能で胃がある。そのためには、コイル間の金属量と給電効率の関係、特に給電効率が急激に低下するしきい値の目途を立てておくことが望ましい。

2) 鉄筋メッシュとコイルとの位置関係

鉄筋メッシュとコイルの位置関係の給電効率への影響は小さく、前述の鉄筋間隔（金属量）に留意すれば、鉄筋コンクリート構造物を介する場合の受給電位置の設定は柔軟性が高いと考えられる。これは、一般的な建設工事における鉄筋組立の位置が、ある程度誤差を有することも多く、さらにコンクリート打設によりずれを生じることも考えられることから、望ましい傾向である。

3) 抵抗値と給電効率の関係

試験結果で述べたように、電子負荷部分の抵抗値とコイル間及びシステム間の給電効率の関係は、抵抗値が低い領域でピークを持ち、システム間給電効率についてはその後抵抗値が低下するに従い、急激に低下している。このシステム間給電効率の急激な低下現象を緩和するためには、システムの整流部の改善が必要と考えられる。

4) 給電効率低下の改善策

本年度の研究の結果を総合して、プラグに無線給電を適用する際の給電効率向上策としては、次のような方法が提案できる。

- 抵抗値の低い領域での給電効率については、低下の原因が整流回路の負荷抵抗依存性にある可能性が高い。別途の検討に依り、負荷抵抗に応じて 2 種類の整流回路（大負荷：ダイオード整流回路、小負荷：同期整流回路）を切り替えて使用することにより、改善される可能性が高いことが判明したことから、来年度以降の開発にこのような手法を適用することにより、低抵抗領域での給電効率を改善できる可能性がある。
- 鉄筋が近傍にあることで、コイルのインダクタンスが変化するため、コイル間の共振周波数にずれが生じる。したがって、適切なコンデンサを用いることにより、共振周波数を調整して給電効率を改善できる可能性がある。
- 実適用では、コイル間に金属量が少ない位置で給電を計画する、構造物側からの改善点としては、カーボンファイバなど非金属補強材を利用するなどが考えられる。

参考文献

原子力環境整備促進･資金管理センター，平成 24 年度地層処分秘術調査事業高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発　遠隔操作技術高度化開発　人工バリア品質評価技術の開発　モニタリング技術の開発　平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書，2013.

原子力環境整備促進･資金管理センター，平成 28 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業，処分システム工学確証技術開発，報告書，2017.

原子力環境整備促進･資金管理センター，平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業，処分システム工学確証技術開発　平成 25 年度～平成 29 年度の取りまとめ報告書，2018a.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成３０年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発　報告書（第 2 分冊），2018b.

原子力環境整備機構，包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現―適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築―，2021.

Gunnarsson D, Morén L, Sellin P, Keto P, Deep repository – engineered barrier systems. Assessment of backfill materials and methods for deposition tunnels. SKB R-06-71, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

IAEA, Monitoring and surveillance of radioactive waste disposal facilities, Specific Safety Guide No.SSG-31, 2014.

Johannesson L-E, Gunnarsson D, Sandén T, Börgesson L, Karlzén R, Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository. Installation of buffer, canisters, backfill, plug and instruments in Section II. SKB IPR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2004.

Johnsson A, Tests for evaluation of pellets as foundation bed material KBP1003 – ÅSKAR. SKB P-11-48, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2011.

Limsuwat, A., T. Sakaki, A. and T. H. Illangasekare, Experimental quantification of bulk sampling volume of ECH2O soil moisture sensors, Proceedings of the 29th Annual American Geophysical Union Hydrology Days, March 25-27, ed. J. A. Ramirez, pp. 39-45, Colorado State University, Fort Collins, CO., 2009.

諸留章二，廃棄物処分場の維持と管理，化学と教育 66 巻 10 号，p.484-487，2018.

Modern2020, Repository Monitoring Strategies and Screening Methodologies, D2.1, 2017.

Modern2020, Monitoring Parameter Screening: Test Cases, D2.2, 2019.

Müller H.R., Garitte B., Köhler S., Vogt T., Sakaki T., Weber H.P., Vietor T. Final Report of WP2. LUCOEX Project Deliverable D2.6, 2015.

Nuclear Reguration Committee, 10CFR Part63: Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, 2001.

日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進･資金管理センター，平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　地層処分施設閉鎖技術確証試験　報告書，2020.

Nagra, Project Opalinus Clay Safety Report – Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Technical Report NTB 02-05, 2002.

Nagra, Implementation of the Full-scale Emplacement Experiment at Mont Terri: Design, Construction and Preliminary Results. Nagra Technical Report NTB 15-02, Nagra Switzerland, 2019.

日本原子力学会，低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法：2016－ピット処分及びトレンチ処分編－，2016

Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto Design Basis 2012 , 2012.

Posiva, Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Performance Assessment 2012. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2012-04. 520 p. ISBN 978-951-652-185-8, 2013.

Posiva, Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto - Performance Assessment Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-02. 506 p. ISBN 978-951-652-249-7, 2018.

Posiva-SKB, Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. Posiva SKB Report 01, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017.

榊利博，真田祐幸，大貫賢二，竹内竜史，坑道埋戻し材の密度管理への誘電水分センサーの適用予備試験，第 70 回土木学会年次学術講演会，岡山大学，平成 27 年 9 月, 2015.

榊利博, B. Firat Lüthi, T. Vogt，丹生屋純夫，西村政展，鵜山雅夫，光ファイバ熱伝導率計の計測範囲の実験的評価，第 72 回土木学会年次学術講演会，平成 29 年 9 月, 2017.

Sakaki, T., S. Köhler, M. Hertrich and H. R. Müller, FE Experiment: Density measurement of granulated bentonite mixture in a 3D 1:1 scale mockup test using dielectric tools, P-04-03, Clay Conference 2015, March 23-26, Brussels, Belgium, 2015.

榊利博，B. Firat Lüthi, T. Vogt，鵜山雅夫，西村政展，丹生屋純夫，加熱型光ファイバケーブルによる緩衝材未充填部の検出，第 73 回土木学会年次学術講演会，平成 30 年 8 月, 2018.

Sakaki, T., B. Firat Lüthi, T. Vogt, M. Uyama and S. Niunoya, Heated fiber-optic cables for distributed dry density measurements of granulated bentonite mixtures: Feasibility experiments, Geomechanics for Energy and the Environment, Vol. 17, 56-65, 2019.

鵜山雅夫，榊利博，アクティブヒーティングを利用した OFDR 計測によるベントナイト密度測定（密度固定レファレンスを用いた高精度熱伝導率計測），日本機械学会論文集, 86 巻 882 号 p. 19-00225, DOI https://doi.org/10.1299/transjsme.19-00225, pp. 11, 2019.

SKB, Prototype Repository. Opening and retrieval of outer section of Prototype Repository at Aspo Hard Rock Laboratory. Summary report, TR-13-22, 2016.

SKB, RD&D Programme 2019, 2019.

全国都市清掃会議，廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領_2010 改訂版，2010.

6. 結言

6.1 令和２年度の主な成果

本事業において、得られた主な成果を以下に記述する。

2、3、4 章では、「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」について、それぞれ「坑道シーリングの設計・評価技術の整備」、「坑道シーリング技術の性能確認」および「坑道シーリングに係わる施工技術の整備」を実施した結果について述べた。

2 章「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」のうち、「坑道シーリングの設計・評価技術の整備」では、「シーリングシステム長期性能評価技術開発」として、シーリングシステムの長期変遷に関する現象理解、シーリングシステムの安全機能が低下することを想定した物質移行解析、シーリングシステムの性能劣化の影響回避や緩和策の検討を踏まえた性能の考え方の整理を実施した。

シーリングシステムの長期変遷に関する現象理解では、埋め戻し材が顕著に変質する可能性が高いのは、坑道と新鮮な地下水が接触し続けるような坑道最上流部や、岩盤亀裂との交差部のような領域のみであることが示唆されたが、モデルの最適化や計算時間の点で課題が残った。また、現象理解の一環として今年度から開始した、埋め戻し材の再冠水挙動、ベントナイトの流出・侵入については、予備的な室内試験を行い、室内試験手法に関する基礎的な情報を得るとともに、次年度以降の試験に向けた課題が抽出された。シーリングシステムの安全機能が低下することを想定した物質移行解析では、深成岩および新第三紀堆積岩について、シーリングシステムが劣化し安全機能が喪失することを仮定した場合の地上までの物質の移動状況を示すとともに、それらを低減させるための具体的な工学的対策工の効果について評価を行った。シーリングシステムの性能劣化の影響回避や緩和策の検討を踏まえた性能の考え方の整理では、これまでの成果を踏まえ、リスクマトリックスや PIM などを用いてシーリングシステムの安全機能の考え方を試行的に整理し視覚化した。

処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備の中では、膨潤挙動評価試験、EDZ シーリング試験、掘削影響領域の連続性等に関わる調査技術開発、ボアホールシーリングに関する技術開発を実施した。

坑道シーリングに関わる施工技術の整備を実施した。膨潤挙動評価試験では、塩水を用いた室内実験を新たに追加し、既往の研究成果と整合的な結果を得るとともに、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験において内部に設置した計測機器が測定データに及ぼす影響を検討した。今後は塩水を用いた縮尺模型試験も実施していくとともに、測定データの定量的な評価のための知見の蓄積もはかっていく。EDZ シーリング試験では、令和 3 年度実施予定の坑道の天端部及び側壁部におけるベントナイトの吹付け施工の適用性確認のための文献調査および吹付け試験と EDZ シーリング原位置試験における透水試験を実施し、施工試験に用いる材料特性や施工方法に関する知見を得るとともに、令和元年度までに底盤部に施工した EDZ の遮水のための粘土止水壁の性能が維持されていることを確認した。掘削影響領域の連続性等に関わる調査技術開発ではあらたに、幌延深地層研究施設深度 350m の試験坑道を活用し、坑道周辺の EDZ（掘削損傷領域）を含む EdZ（掘削影響領域）の拡がりや、それらの経時変化を高精度に把握するための技術開発として、Mini-seismic プロトタイプの製作と性能試験、同一領域を対象とした高精度物理探査、地質調査、水理調査とそれらの結果の総合的解釈による物理探査の高精度化の効果と課題の抽出を行うとともに、坑道周辺の EDZ の経時変化のデータの蓄積とデータ評価手法に関する基礎的な検討を実施した。さらに、諸外国における研究動向の調査を行うとともに室内での基礎的物性試験等を実施し、それらの結果を踏まえた次年度以降のモックアップ試験や原位置試験に

必要となる具体的なボアホールシーリング方法等に関する予備的検討を実施した。

また、埋め戻し材の施工技術オプションおよび製造・施工プロセス管理手法の整備に向けて、埋め戻し材の構成材料や締固めエネルギー等をパラメータとした透水試験、撒き出し・転圧工法と吹付け工法に関する工学規模の施工試験、スクリュー工法とブロック工法に関する要素試験を実施して、埋め戻し材の透水係数および工法に応じた施工後の乾燥密度等に関するデータを取得した。更に、埋め戻し材の施工後の品質確認のための計測技術として、加熱式光ファイバやケーブル式 TDR（Time Domain Reflectometry：時間領域反射法）を用いた乾燥密度、坑道天端の隙間の計測に対する適用性等を確認した。また、埋め戻し材の性能確認に資する水の浸潤解析に必要な不飽和特性に関するデータを取得した。撒き出し・転圧工法に関する施工試験については、実規模スケールの模擬坑道を対象として埋め戻し材の施工後の非破壊検査やサンプリング等により施工位置と乾燥密度等の関係を詳細に把握し、品質管理手法や施工プロセス管理手法に反映した。

5 章に示す高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発 －製作・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備－では、諸外国における地下構成要素の品質保証や性能確認に関する先行検討事例の調査を行い、我が国の人エバリアを含む地下構成要素を対象とした品質保証プログラムおよび性能確認プログラム(それぞれ必要なモニタリングを含む)の構築に向けた知見やデータ等の基盤情報の整備に向けて、プログラムの開発・構築の参考となるフィンランドやスウェーデン等の海外先行事例を調査し、人工バリアを含む地下構成要素の品質保証の考え方、性能評価に必要なパラメータの設定根拠等を整理した。また、上記プログラムに関連する地下構成要素の状態把握に係る技術については、埋め戻し材を先行検討対象として、原位置等での状態把握に係る計測・モニタリング技術の高度化を進めた。具体的には、光ファイバセンサを用いた圧力計測により埋め戻し材の膨潤状況を確認するための要素試験を実施して、計測メカニズムに関する検討を行った。また、モニタリング技術に関する共通基盤技術として、無線給電技術による計測機器への給電効率に及ぼすプラグ内の鉄筋等の影響に関する要素試験により、給電効率等を確認した。

6.2 おわりに

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁から日本原子力研究開発機構および原子力環境整備促進・資金管理センターが受託を受け、地層処分施設閉鎖技術の高度化や基盤情報の整備を目的として実施した技術開発の、令和 2 年度の技術開発成果を取りまとめたものであり、コロナ禍の影響はあったものの、関係諸氏のご協力により、令和 4 年度までの事業初年度として考えていた事業計画が達成できた。また、令和 2 年度は、幾つかの項目について国内外での学会（Waste Magement 2020, 原子力学会）への個別成果の公表を行ったが、地層処分施設の閉鎖技術の信頼性向上に資するとともに、地層処分が信頼に足るものとして社会に受け入れられる一助となるよう、今後も積極的な外部への情報発信を行っていく。

付録１　2.1　シーリングシステム長期性能評価技術開発

目次

1.　坑道上部空隙の閉塞可能性の検討.....付 1-1
1.1　解析条件.....付 1-1
1.2　解析結果.....付 1-3
2.　鉱物の反応速度式および比表面積.....付 1-4
参考文献 .....付 1-25

1. 坑道上部空隙の閉塞可能性の検討

埋め戻し材の施工時に生じる可能性のある乾燥密度の不均質性や施工後の自重等による圧縮などで坑道上部の埋め戻し材と坑道支保工の間に空隙が生じる可能性がある。しかし施工後初期に空隙が生じた場合でも埋め戻し材の膨潤によりその空隙が埋められる可能性もある。本項では坑道上部空洞の埋め戻し材膨潤による空隙閉塞の可能性を検討するために MACBECE を用いた埋め戻し材の膨潤挙動解析について述べる。

1.1 解析条件

埋め戻し材の膨潤挙動は MACBECE を用いて計算を行った。計算は付図 1-1 に示す 2 次元メッシュにて行った。計算体系の大きさは x 方向が 0.1 m または 0.2 m とし、y 方向は 5 m とした。x 方向についてはメッシュサイズによる解析結果への影響を確認するためにメッシュサイズを解析パラメータとした。y 方向は x 方向のメッシュサイズによらず 0.05 m 間隔にメッシュを 100 分割した。メッシュは y=0 の端部ノード（付図 1-1 中下端ノード）は変位固定（x、y 両方向の変位が 0）とし、それ以外のノードは x 方向の変位を固定し、y 方向に自由に変位可能とした。まず埋め戻し材を弾性体として扱い、埋め戻し材を初期膨潤圧により膨張させた。その後埋め戻し材を弾粘塑性体として扱い、長期の変形挙動を計算した。膨潤圧は地下水の当量イオン濃度に基づく経験式で計算した。地下水の当量イオン濃度は初期の埋め戻し材間隙水組成から計算した値 0.008 とした。初期膨潤後では 1600 ステップかけて 10 万年にわたり計算を実施した。

埋め戻し材の膨潤計算に用いる埋め戻し材の物性パラメータは NUMO 包括的技術報告（NUMO，2021）を参考に設定した。設定した物性パラメータを付表 1-1 に示す。埋め戻し材の膨潤圧は TRU2 次取りまとめ（電事連，核燃料サイクル開発機構，2005）に従い、ベントナイト系材料の化学的変遷指標に応じて変化する、下記の経験式から計算した。

$$P_{bal} = g\left(ESP、\ \rho'_{sme}\right)h(C_i)f(\rho'_{sme}) \quad [\mathrm{MPa}]$$

$$f = 0.00126 \times \exp(6.0573\rho'_{sme})$$

$$g = L(ESP)\{J(\rho'_{sme}) - 1\} + 1$$

$$L = 2.985ESP - 0.364$$

ただし L>1 の時 L=1、L<0 の時 L=0

$$J = 2.1272{\rho'_{sme}}^{2} - 6.126\rho'_{sme} + 5.3114$$

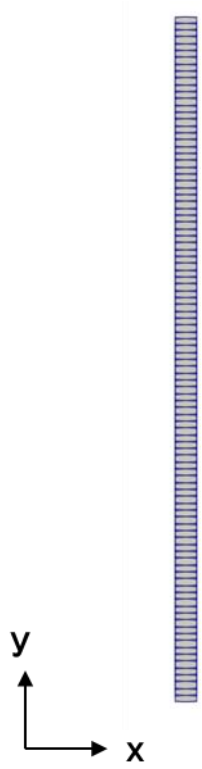
$$h = -1.698C_i + 1$$

ただし h<0 の時 h=0

ここでρ'_{sme}は下式で表される変形を考慮したスメクタイト部分乾燥密度、ESP は交換性ナトリウム率、C_iは地下水の当量イオン濃度[eq/l]である。

$$\rho'_{sme} = \frac{1}{\dfrac{1}{\rho_{sme}} - \dfrac{\varepsilon_v}{G_{sme}}\dfrac{e_{sme}}{\theta}}$$

ここでρ_{sme}はスメクタイト部分乾燥密度[Mg/m^3]、ε_vは力学解析により求まる体積ひずみ、G_{sme}はスメクタイトの比重、e_{sme}はスメクタイト部分間隙比、θは空隙率である。埋め戻し材の初期膨潤圧は 0.036 MPa と計算された。



付図 1-1　膨潤解析における 2 次元メッシュ

付表 1-1　埋め戻し材の解析時の物性パラメータ

項目	記号	単位	設定値	備考
砂混合率	R_s	-	0.85	
乾燥密度	ρ_d	Mg/m^3	1.8	
有効粘度密度	ρ_e	Mg/m^3	0.642	
土粒子密度	ρ_s	Mg/m^3	2.649	ベントナイト 2.70、珪砂 2.64 として混合比に基づき計算
初期間隙比	e_0	-	0.47	乾燥密度から計算
圧縮指数	λ	-	0.066	圧密試験の結果（RWMC，2015）
膨潤指数	κ	-	0.008	圧密試験の結果（RWMC，2015）
ポワソン比	ν	-	0.3	埋戻し材の設定値
限界状態応力比	M	-	1.21	非排水三軸圧縮試験の値（RWMC，2015）
透水係数	k	m/s	4.8×10^{-12}	圧密試験の要素シミュレーションによる最適値
先行圧密応力	σ'_{my}	MPa	0.07	粘性項を考慮するため正規圧密状態を仮定。初期有効応力に等しい
初期有効応力	σ'_{m0}	MPA	0.07	淡水条件の膨潤圧とし有効粘度密度から計算
初期静止土圧係数	K_0	-	1	初期は等方状態と仮定
二次圧密係数	a	-	4.3×10^{-4}	圧密試験の値（RWMC，2015）
一次圧密終了時間	t_{c1}	h	4.71	圧密試験の値（RWMC，2015）
初期体積ひずみ速度	v_0	1/h	1.46×10^{-9}	
ダイレイタンシー係数	D	-	0.032	$D=\lambda\Lambda/\{M(1+e_0)\}$
非可逆比	Λ	-	0.88	$\Lambda=1-\kappa/\lambda$
弾性係数	E	MPa	3.0	第二次取りまとめ(1999)第二分冊 IV-328
交換性ナトリウム率	ESP	-	0.895	
スメクタイトの比重	G_{sme}	-	2.7	
スメクタイト部分乾燥密度	ρ_{sme}	Mg/m3	0.351	
空隙率	θ	-	0.321	

1.2　解析結果

MACBECE による埋め戻し材の変形解析結果を付図 1-2 に示す。付図 1-2 **図**は埋め戻し材の固定していない端における y 軸方向の変位を示す。すなわち長さ 5 m の解析メッシュがどの程度膨張により移動したかを示す。いずれの x 方向のメッシュサイズでも初期膨潤により変位は増大し、その後には変位は一定であった。変位はいずれのメッシュサイズについてのケースでも同一であり、0.045 m であった。そのため膨潤と直交する方向のメッシュサイズは本解析の範囲では解析に影響しないことが分かった。

5 m の解析メッシュに対して埋め戻し材の膨潤による変位が 4.5 cm と計算された。埋め戻し材の施工時に生じる可能性のある乾燥密度の不均質性や埋め戻し材の自重により坑道上部に 1 cm 程度の空洞ができたとしても埋め戻し材の地下水による膨潤により空洞が閉塞する可能性が示された。

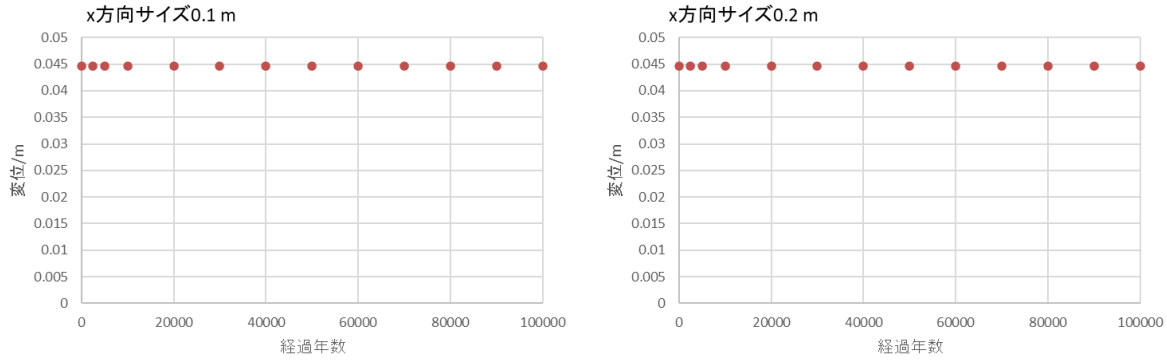


図 1-2　埋め戻し材膨潤による変位の経時変化

2.　鉱物の反応速度式および比表面積

2.1　鉱物の反応速度式

2.1.3.1(3)の反応輸送解析で用いる鉱物の溶解速度式は既存検討（JAEA，2016）において使用された式を引用した。

ギブス自由エネルギー ΔGr を非線形関数とした場合の溶解反応速度式は(1)式で表される。

$$r = A \cdot \left[k_a \cdot \exp\left\{\frac{-e_a}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} \cdot a_{H+}{}^{l} + k_n \cdot \exp\left\{\frac{-e_n}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} + k_b \cdot \exp\left\{\frac{-e_b}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} \cdot a_{H+}{}^{n} \right] \cdot \left[1 - \exp\left\{ m \cdot \left(\frac{\Delta G_r}{RT}\right)\right\}^{p} \right] \quad (1)$$

ここで、r は溶解速度[mol m^{-3} s^{-1}]、k_a、k_n および k_b は酸性領域、中性領域およびアルカリ性領域での単位比表面積当たりの溶解定数[mol m^{-2} s^{-1}]、A は水溶液の単位体積当たりの反応表面積[m^{-1}]、e_a、e_n および e_b は酸性領域、中性領域およびアルカリ性領域でのみかけの活性化エネルギー[J mol^{-1}]、R は気体定数[J mol^{-1} K^{-1}]、T およびは T_0 絶対温度および 25℃における絶対温度[K]、a_{H+}はイオン活量[−]、l、m、n、p はパラメータ[−]を表す。各鉱物の反応速度に関わるパラメータを付表 1-2 に示す。

また、ギブス自由エネルギー ΔGr は(2)式で表される。

$$\Delta G_r = RT \cdot \ln\left(\frac{IAP}{K}\right) \quad (2)$$

ここで、IAP は反応の化学量論に応じた溶存化学種の活量積[−]、K は反応平衡定数[−]を表す。さらに、一部の鉱物において m のパラメータは(3)式で表される。

$$m = exp\{4.75 \cdot log(T) - 0.27 \cdot pH - 13.39\} \quad (3)$$

なお、m=p=1 の場合、上記の式は飽和指数 SI を用いて、(4)式とも表される。

$$r = A \cdot \left[k_a \cdot exp\left\{ \frac{-e_a}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} \cdot a_{H^+}{}^{l} + k_n \cdot exp\left\{ \frac{-e_n}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} + k_b \cdot exp\left\{ \frac{-e_b}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} \cdot a_{H^+}{}^{n} \right] [1 - 10^{SI}] \quad (4)$$

付表 1-2　鉱物の反応速度パラメータ（JAEA，2016）

	k_a [mol m^2 s^{-1}]	k_n [mol m^{-2} s^{-1}]	k_b [mol m^{-2} s^{-1}]	e_a [kJ mol^{-1}]	e_n [kJ mol^{-1}]	e_b [kJ mol^{-1}]	l	n	m	p
Albite	-	3.98×10^{-13}	5.25×10^{-17}		56.63	34.82	-	-0.5	※	3
Anorthite	-	3.98×10^{-13}	5.25×10^{-17}		56.63	34.82	-	-0.5	※	3
K-Feldspar	-	3.89×10^{-12}	6.31×10^{-22}		38	94.1	-	-0.823	※	3
Illite	-	2.82×10^{-14}	2.82×10^{-15}		22	22	-	-0.22	※	3
Analcime	-	-	3.91×10^{-12}		-	77.1	-	0	1	1
Chalcedony	-	-	3.09×10^{-15}		-	108.4	-	-0.52	1	1
Brucite	-	-	5.75×10^{-9}		-	42.0	-	0	1	1
Sepiolite	-	-	3.98×10^{-13}		-	29.0	-	0	1	1
Hydrotalcite	-	-	5.75×10^{-9}		-	42.0	-	0	1	1
$Fe(OH)_2$	2.24×10^{-8}	-	2.24×10^{-17}		-	-	0.992	-0.784	1	1
Magnetite	2.57×10^{-9}	-			-	-	0.279	-	1	1
Berthiernie	-	-	8.91×10^{-18}		22.2	17.9	-	-0.472	1	1
Greenalite	-	-	8.91×10^{-18}		22.2	17.9	-	-0.472	1	1

※(3)式により、m を導出

●モンモリロナイトの溶解速度式

モンモリロナイトは各イオン型共通で(5)式で表される。

$$\mathbf{r = A \cdot \left[k_b \cdot a_{H^+}^{n} \cdot exp\left\{ \frac{-e_b}{RT} \right\} \right] \cdot \left[1 - exp\left\{ m \cdot \left(\frac{AG_r}{RT} \right) \right\}^{p} \right]} \quad (5)$$

付表 1-3 にモンモリロナイトの溶解速度式中の定数を示す。

付表 1-3　モンモリロナイトの溶解速度式中の定数

	$-k_b \cdot a_{H^+}{}^n$ [mol m^{-2} s^{-1}]	e_b [kJ mol^{-1}]	m	p
Montmorillonite	$10^{0.212 \cdot pH - 6.40}$	38.7	(3)式より導出	3

●炭酸を含む鉱物の速度式

炭酸を含む鉱物は CO_2 分圧（P_{CO2}）を用いて(6)式で表される。

$$r = A \cdot \left[k_a \cdot a_{H^+}^{l} + k_n \cdot exp\left\{ \frac{-e_n}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} + k_b \cdot exp\left\{ \frac{-e_b}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} \cdot P_{CO_2}^{n} \right] \cdot \left[1 - exp\left\{ m \cdot \left(\frac{\Delta G_r}{RT} \right) \right\}^{p} \right] \quad (6)$$

付表 1-4 に各鉱物に対応するこれらの定数・パラメータの値を示す。

付表 1-4　炭酸を含む鉱物の溶解速度式中の定数

	k_a [mol m^2 s^{-1}]	k_n [mol m^{-2} s^{-1}]	k_b [mol m^{-2} s^{-1}]	e_a [kJ mol^{-1}]	e_n [kJ mol^{-1}]	e_b [kJ mol^{-1}]	l	n	m	p
Calsite	5 01×10^{-1}	1 55×10^{-6}	3 31×10^{-4}	14 4	23 5	35 4	1	1	1	1
Dolomite	6 46×10^{-4}	2 95×10^{-8}	3 09×10^{-6}	36 1	52 2	34 8	0 5	0 5	1	1
Siderite	5 01×10^{-1}	1 55×10^{-6}	3 31×10^{-4}	14 4	23 5	35 4	1	1	1	1

●石英の速度式

石英は $Al(OH)_4^-$ の反応抑制を考慮して(7)式で表される。

$$r = A \cdot \left[k_a \cdot exp\left\{\frac{-e_a}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} \cdot a_{H+}l + (1-S) \cdot k_b \cdot exp\left\{\frac{-e_b}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right\} \cdot a_{H+}n\right] \cdot \left[1 - exp\left\{m \cdot \left(\frac{\Delta G_r}{RT}\right)\right\}^p\right] \quad (7)$$

ここで、S は $Al(OH)_4^-$ の物質量[$Al(OH)_4^-$][mol/kg]を用いて(8)式で表される。

$$\mathbf{S} = \frac{(-\mathbf{3000} \cdot \mathbf{pH} + \mathbf{39700}) \cdot (-\mathbf{0.196} \cdot \mathbf{pH} + \mathbf{2.94}) \cdot [\mathbf{Al(OH)_4^-}]}{\mathbf{1} + (-\mathbf{3000} \cdot \mathbf{pH} + \mathbf{39700}) \cdot [\mathbf{Al(OH)_4^-}]} \quad (8)$$

以上の速度式を用い、各鉱物の溶解反応速度式を決定する。石英のパラメータは付表 1-5 のようにまとめられる。

付表 1-5　石英の溶解速度式中の定数

	k_a [mol m^2 s^{-1}]	k_b [mol m^{-2} s^{-1}]	e_n [kJ mol^{-1}]	e_b [kJ mol^{-1}]	l	n	m	p
Quartz	4 34×10^{-12}	8 22×10^{-15}	87 6	8 6·pH+13 06	0 3	-0 3	1	1

●反応速度が温度、pH に依存しないものと仮定した鉱物の速度式

これらの鉱物は、(4)式をさらに簡略化した形式になり、溶解速度は(8)式で表される。

$$\boldsymbol{r = A \cdot k \cdot [1 - 10^{SI}]} \quad (8)$$

C-S-H ゲルは Trapote-Barreira ら（Trapote-Barrerira, 2014）によって提案された溶解反応速度式を C/S を 0.1 刻みで離散化して用いた（付表 1-6）。また、付表 1-7 に反応速度が温度、pH に依存しないものと仮定した鉱物の溶解速度を示す

付表 1-6　C-S-H ゲルの速度定数

	logk
CSH165	-8.44
CSH155	-8.50
CSH145	-8.65
CSH135	-9.19
CSH125	-9.97
CSH115	-10.66
CSH105	-10.96
CSH095	-10.86
CSH085	-10.87

付表 1-7　その他の鉱物の溶解速度

	logk	根拠
Portlandite	-6	C-S-H ゲルより溶解が早いため
Ettringite-Al	-10.94	CSH(1.0)と同様
Monosulfate-Al	-10.94	Ettringite と同様
Laumontite	-11.41	25℃におけるゼオライトの沈殿速度式(全型)
Phillipsite	-11.41	Laumontite と同様（全型）
Heulandite	-11.41	Laumontite と同様（全型）
C3AH6	-10.94	CSH(1.0)と同様
C4AH13	-10.94	CSH(1.0)と同様
C4AH19	-10.94	CSH(1.0)と同様
Katoite-Al	-10.94	CSH(1.0)と同様
Katoite-AlSi084	-10.94	CSH(1.0)と同様
Stratlingite	-10.94	CSH(1.0)と同様
Friedel_Salt	-10.94	Ettringite と同様

2.2　鉱物の反応比表面積

鉱物の比表面積については、既往の検討（JAEA，2016）中の設定を引用した。2.1.3.1(3)で使用した初期鉱物および二次鉱物の反応比表面積の一覧を付表 1-9 に示す。

付表 1-9　反応比表面積

鉱物	比表面積（$m^2\ g^{-1}$）	鉱物	比表面積（$m^2\ g^{-1}$）
Calcite	10.00	Friedel_Salt-Al	9.80
Dolomite	10.00	Pyrophylite	10.00
Illite	5.4	Gypsum	10.00
K-Feldsar	10.00	Phillipsite(全型)	10.00
Quartz	0.1	CSH165	22.43
Portlandite	10.44	CSH155	29.11
Ettringite-Al	9.80	CSH145	35.78
Hydrotalcite-Al	11.94	CSH135	42.46
Katoite-Al	10.00	CSH125	49.13
Katoite-AlSi084	10.00	CSH115	55.81
Stratlingite	10.00	CSH105	62.48
Brucite	10.00	CSH095	69.16
Analcime-I	10.00	CSH085	75.84
Montmorillonite （全型)	7.00	$Fe(OH)_2$	1.76
Chalcedony	0.23	Magnetite	0.12
Laumontite (全型)	10.00	Siderite	0.16
Sepiolite	10.00	Berthierine	8.16
Monosulfate-Al	10.00	Greenalite	8.16
Heulandite (-dia)	10.00	Monocarbonate-Al	10.00
C_4AH_{13}	10.00	Hemicarbonate-Al	10.00
C_4AH_{19}	10.00		

3.　亀裂交差部における流量設定の検討

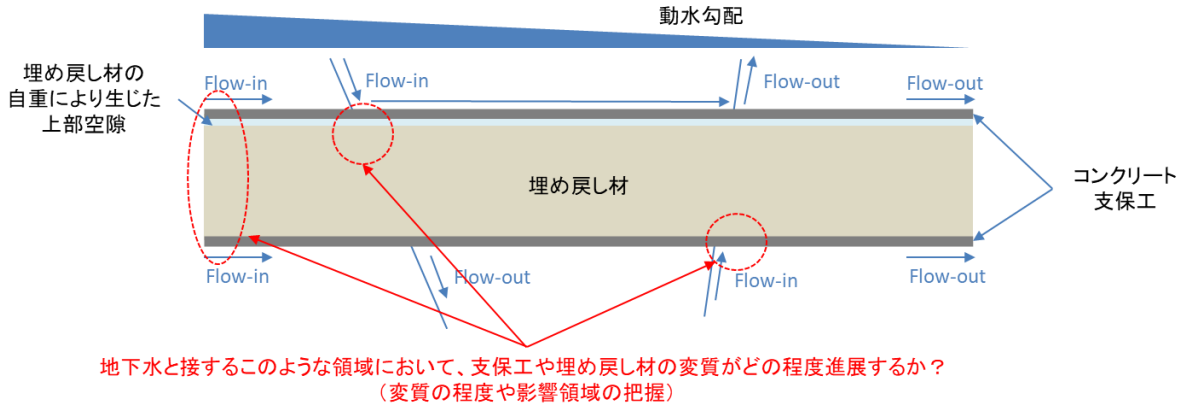
周囲の岩盤不均質性（坑道と交差する割れ目の透水性に応じた湧水量の違い)、によってシーリングの変質・劣化も不均質に進む可能性が考えられる。これは、埋め戻された坑道を流れる地下水組成が坑道支保工内のコンクリート成分及び埋め戻し材中のベントナイトとの反応時間、距離に応じて異なる可能性があることを示唆している。このような背景から、2.1.3.1(2)のケース 16 の条件設定に関して、以下の検討を行った。

- 坑道上流部の新鮮な地下水が流入し続ける部分における坑道支保工および埋め戻し材中の変質（間隙水組成および鉱物組成の変化）の空間的な拡がりや時間的変遷の把握
- 坑道が割れ目と交差し、地下水が流入するようなケースにおいてやはり新鮮な地下水が流入し続けることが考慮した場合に坑道支保工および埋め戻し材変質（間隙水組成および鉱物組成の変化）の空間的な拡がりや時間的変遷について把握する

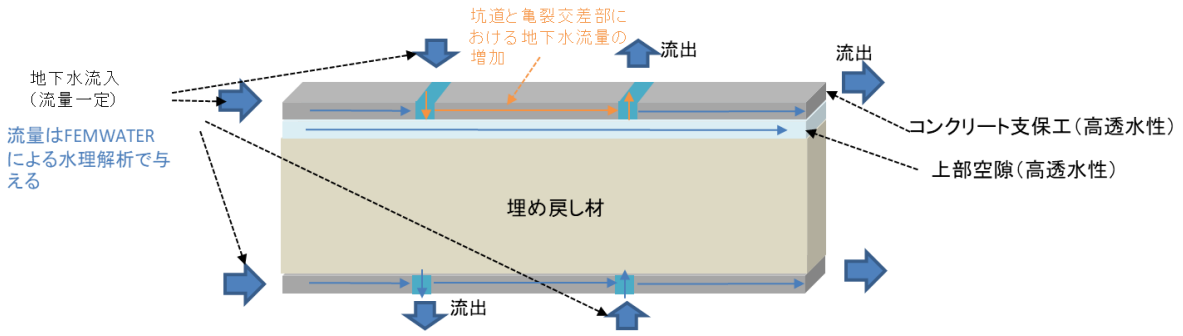
3.1　概念モデル

上記の検討を実施するための解析の概念モデルを付図 1-3 に、解析を実施する際の解析モデルの概念図を付図 1-4 に示す。付図 1-3 のように、坑道軸方向に動水勾配のかかった系で、地下水の流入や流出を考え、特に坑道の最上流部や地下水の流入部近傍において、坑道支保工や埋め戻し材の変質がどの程度進展するかを把握することが目的である。

このような概念モデルに対し、解析モデル上は、付図 1-4 のような準二次元の多重空隙媒体モデルで反応輸送解析を実施することとし、水理解析は別途 FEMWATER で実施した流量を境界条件として入力することとした。



付図 1-3　岩盤の不均質性を考慮した場合の埋め戻し材変質解析の概念図

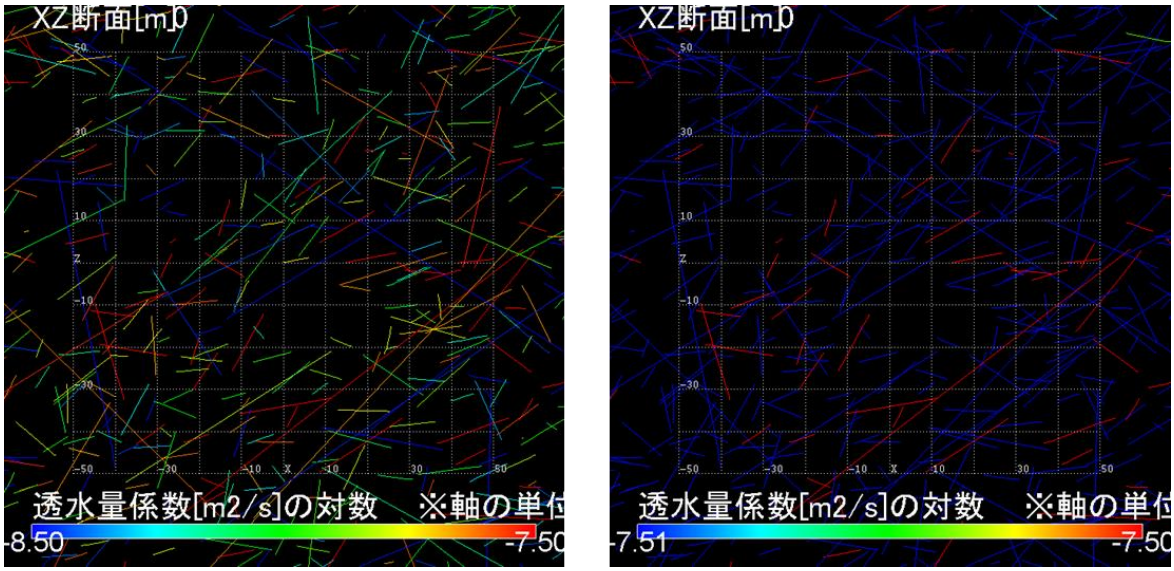


付図 1-4　岩盤の不均質性を考慮した場合の埋め戻し材変質解析の概念モデル

3.2　埋め戻し材の上部空隙を考慮した地下水流動解析

3.2.1　亀裂分布

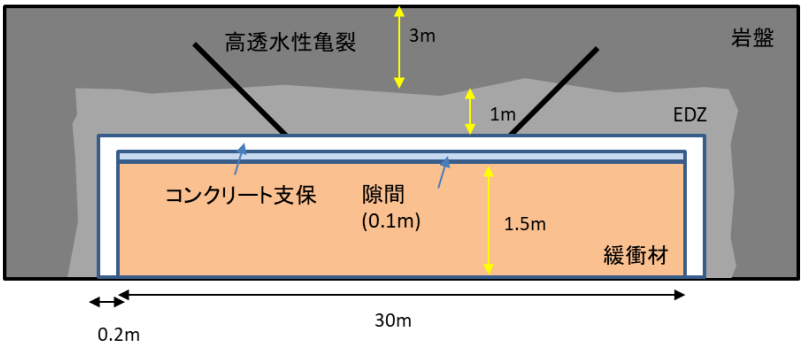
NUMO 包括的技術報告（NUMO，2021）における岩盤中亀裂の統計量（2.3.1.2　表 2.1-12）を元に、亀裂を生成し、ある断面での亀裂分布（トレース長）を描画した。透水量係数の対数平均値、対数標準偏差(1.0×10^{-8}[m²/s]、0.43)に対して、約 1σ 以上の大きな透水量係数を持つ亀裂は、10m に 1 本程度の間隔で坑道と交差していると考えられる（付図 1-5）。



付図 1-5　ある岩盤断面での亀裂交差分布
（格子間隔は 10m。カラーレンジを、左は±約 1σ、右は+1σ 以上と以下で色分け）

3.2.2　各部位の流量の算出

坑道の一部をモデル化（付図 1-6）し、地下水流動解析を行い、坑道支保工、埋め戻し材上部空隙、亀裂を流れる地下水流量を算出した。空隙の透水係数は第２次とりまとめにおいて採用されている２乗則（核燃料サイクル開発機構，1999）に基づいて設定した。メッシュ解像度の制約上 1 ㎝の空隙を 10 ㎝の厚みでモデル化(透水係数は 1 ㎝のもので算出)しているため、図中横方向の流れが 10 倍となる影響を補正するためその方向の透水係数を 1/10 倍している。



空隙の透水係数

snow3乗則（平行平板）：$T = \frac{\rho g}{12\mu}(2b)^3, K = \frac{\rho g}{12\mu}(2b)^2$

H12レポート2乗則　　：$T = (2b/2)^2, K = (2b/2)/2$

2b=1[cm]では、2乗則でK=2.5e-3[m/s]

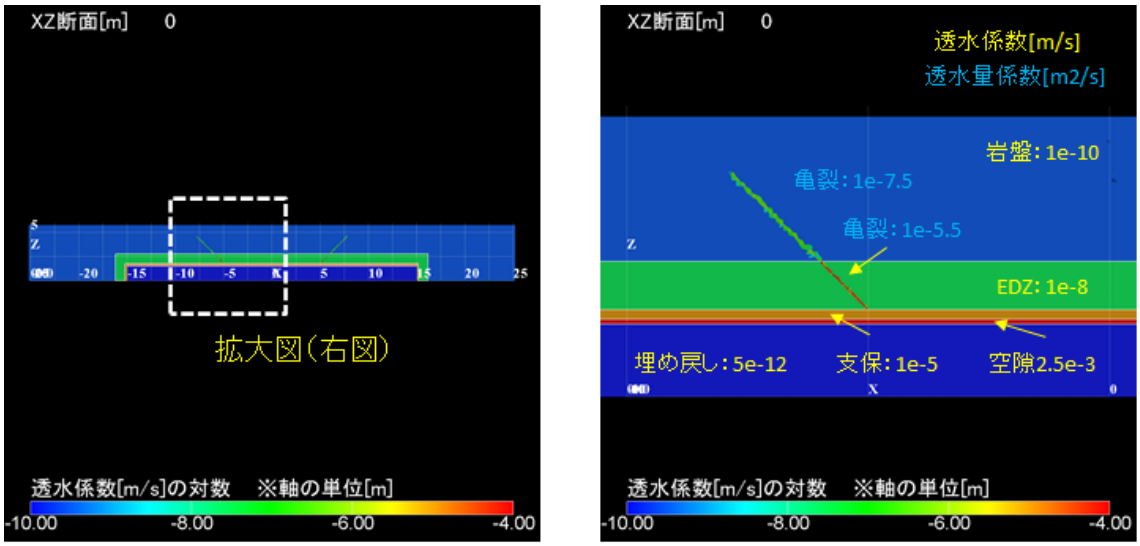
μ：粘性係数(=$\rho\nu$)
ν：動粘性係数

ρ=1e+3[kg/m3]
g=9.8[m2/s]
μ=1e-3[Pa*s]
2b=1e-2[m]

付図 1-6　各部位の流量の算出解析の概念図

3.2.3　水理解析（ケース 1）

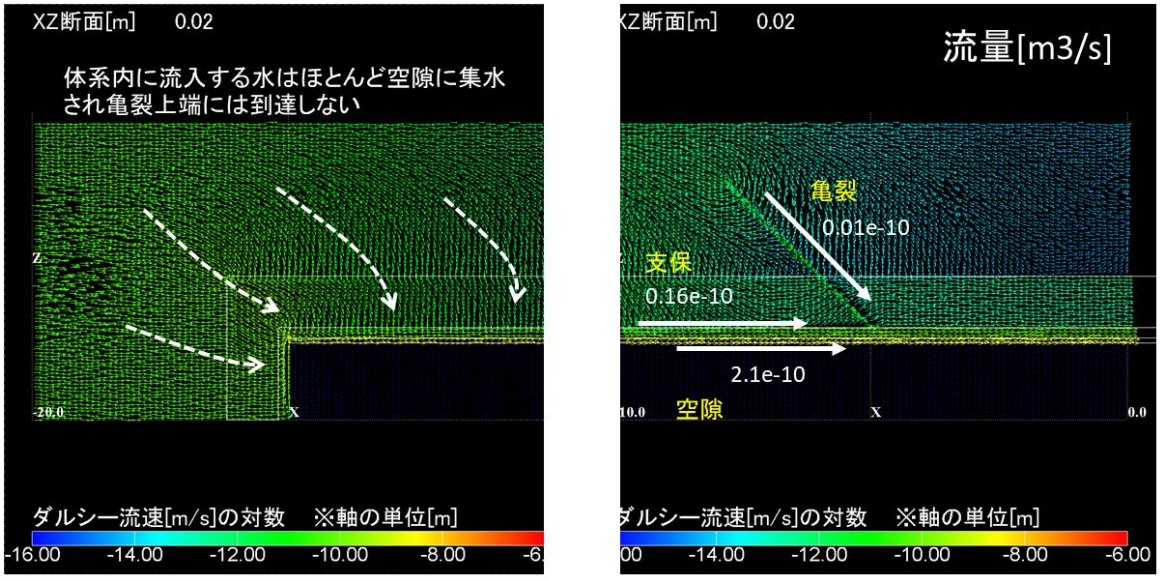
解析ケース 1 として、10m 間隔で坑道と交差する亀裂（偏差 1σ の高透水性亀裂）を 2 本配置した（付図 1-7）。なお、EDZ 中の亀裂の透水係数はその値を 10 倍にしている。



**1cmの亀裂幅を10cmでモデル化しているため、空隙のx軸方向の透水係数は1/10倍としている

付図 1-7　水理解析ケース 1 の解析モデル

亀裂の上流側端部が、坑道の上流側端部に比べて、下流側にある場合、解析体系に流れる水は、ほぼ空隙（および支保）に集水されてしまうため、坑道交差部における亀裂からの流入量は小さい結果となった（付図 1-8）。



流量は、各領域中央付近の代表的なダルシー流速をもとに、それぞれの厚みを、空隙10cm、支保20cm、亀裂（要素サイズ）5cmで換算している

付図 1-8　水理解析ケース 1 の解析結果

3.2.4　水理解析（ケース 2）

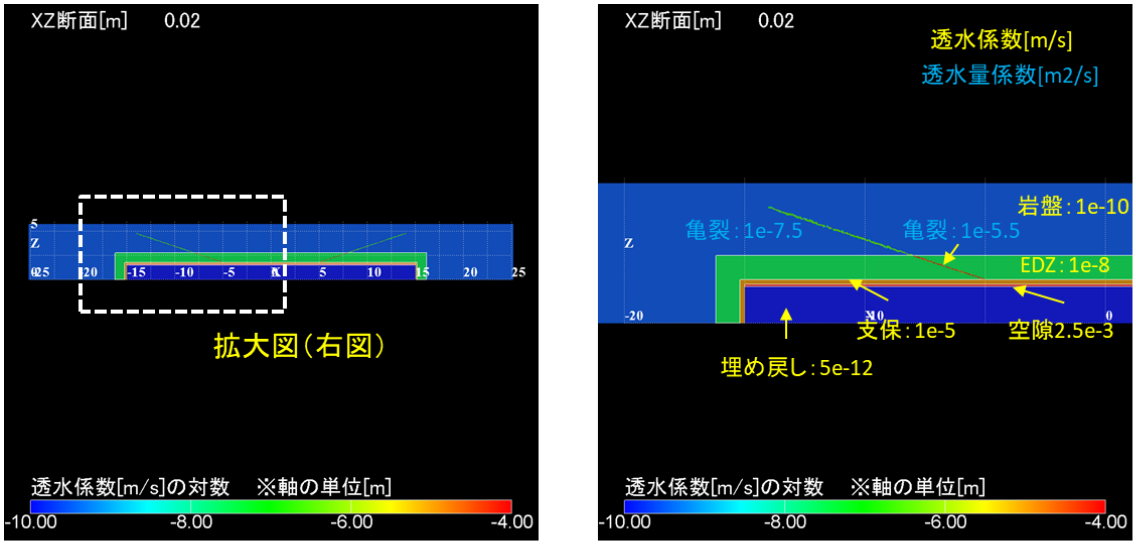
亀裂ネットワークが形成された場合を想定して、亀裂上流側端部の水頭を坑道上流端と同程度になるように、亀裂向きと亀裂径を変更した。解析モデルを付図 1-9 に示す。ケース 1 と異なり、亀裂内を流れる流量が大きくなるとともに、亀裂下流端からの坑道支保および空隙内を流れる水の流量比が異なる結果となった（付図 1-10）。

3.2.5　まとめ

上記の 2 ケースの水理解析を踏まえ、本年度は保守的により亀裂からの流入量が大きくなるケース②を考慮した反応輸送解析を行うこととした。

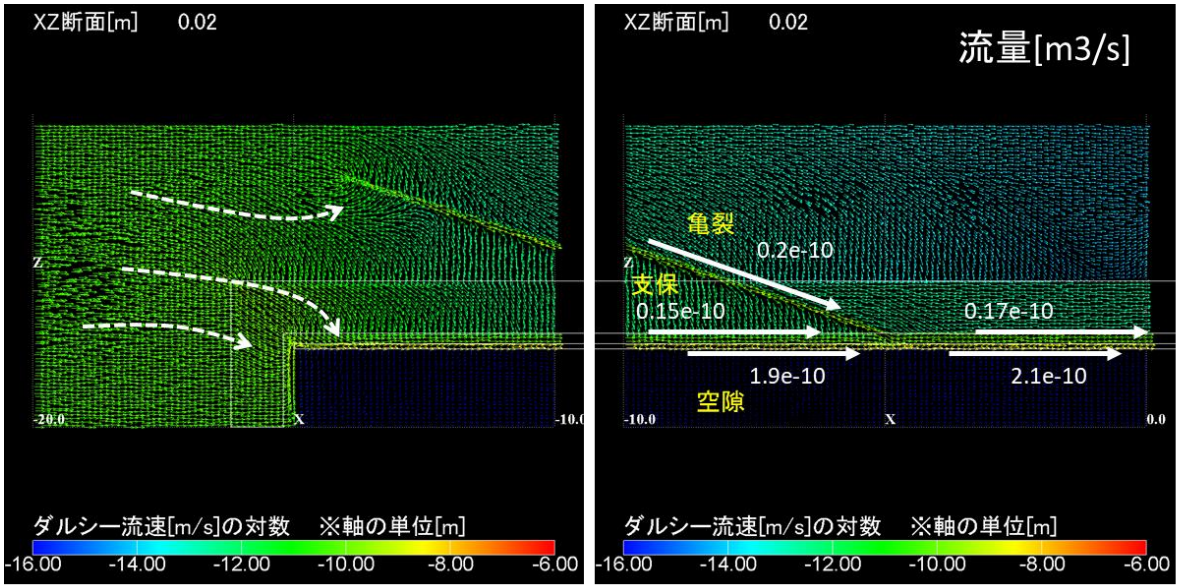
付表 1-10　水理解析を踏まえた反応輸送解析のケース設定

	対応する水理解析	亀裂からの流入量 (m^3/s)	支保工の流量 (m^3/s)	空隙部の流量(m^3/s)
ケース 16	ケース②	0.2×10^{-10}	0.15×10^{-10}	1.9×10^{-10}



**1cmの亀裂幅を10cmでモデル化しているため、空隙のx軸方向の透水係数は1/10倍としている

付図 1-9　水理解析ケース 2 の解析モデル



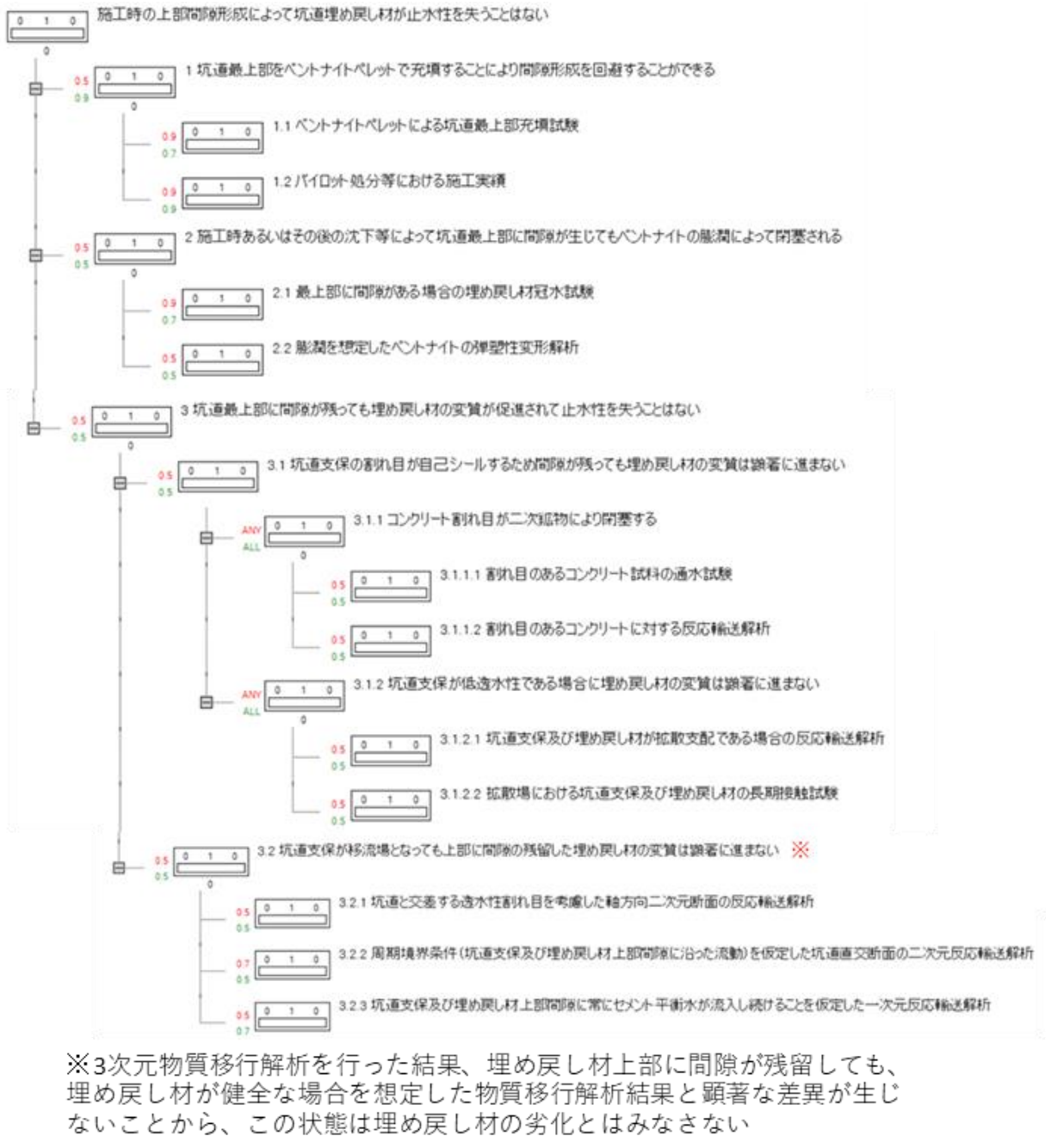
流量は、各領域中央付近の代表的なダルシー流速をもとに、それぞれの厚みを、空隙10cm、支保20cm、亀裂（要素サイズ）5cmで換算している

付図 1-10　水理解析ケース 2 の解析結果

4.1　ESL モデルの末端命題の評価

2.3.1.3 (1) 3) (i)の手法に従い、図 2.1-44 に示す末端命題の評価を、エビデンスの充足性等に従って評価を行った。昨年度の検討に加え、2.3.1.2 および 2.3.1.3 の解析結果や既往の研究事例など、現状で入手可能なエビデンスに基づき、図 2.1-46 に示す ESL モデルの下位命題の成否の判

断およびエビデンスの品質の評価を行った。以下にエビデンスと共に示す。なお、各エビデンスの冒頭に付記した数字（例えば「1.1 ベントナイトペレットによる坑道最上部充填試験」の 1.1 など）は付図 1-11 に示す ESL モデル中の命題番号を示す。



付図 1-11 構築した ESL モデル（再掲）

1.1 ベントナイトペレットによる坑道最上部充填試験

NUMO 包括的技術報告書（NUMO, 2021）によれば、連絡坑道とアクセス坑道の埋め戻しは、高レベル放射性廃棄物処分場の竪置き・ブロック方式の処分坑道などの場合と同様に、施工効率からは現場締固め工法が有力である。水平坑道や斜坑の場合は、坑道下半について埋め戻し材を撒き出し、振動ローラーなどの転圧機械で所定の密度に締め固め、上半については狭隘な空間で

の施工となるため専用の機械により斜めに撒き出し、先端に振動盤を装着した締固め機により所定の密度に締め固めるとしている。また、「地下空洞型処分施設性能確証試験」における実規模実証試験（秋山他、2016）においては、転圧工法と吹付け工法の組み合わせによって、狭隘でかつ隅角部を有する上部埋戻し材の構築が可能であることを明らかにした。さらに、施工後の上部埋戻し材から採取した試料を用いて、透水試験等の室内試験を実施し、透水係数が十分に小さい（透水係数：1.0×10^{-11} m/s 程度）ことを確認した。上記の事例においては、坑道の埋め戻しの種々の工法において、坑道上部に空隙が生じる可能性については述べられておらず、その対策としてのベントナイトペレットによる充填については言及されていない。

- エビデンスの品質（理論的基盤、精度、代表性、網羅性）

ベントナイトペレットを用いた埋め戻しは、地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発―実証試験（平成 27 年～平成 31 年）において実施され、狭隘部への充填が可能であることが示されている（原環センター，2016）。ただし、本実証試験においては PEM 下部の狭隘部の充填に重点が置かれており、坑道上部への施工についての検討は含まれない。

- エビデンスに基づく命題の判断
  - 支持の程度：ペレットにより狭隘部の充填が可能であることは実証されているが坑道最上部の間隙についてのものではないため、中程度（0.5）とする
  - 否定の程度：現在のところ、ペレットによる上部間隙閉塞の可能性を否定するエビデンスはない（0.0）

2.2 膨潤を想定したベントナイトの弾塑性変形解析

ベントナイト系材料の弾粘塑性モデルを実装した解析コード（MACBECE）で力学解析埋め戻し材がどの程度膨潤するかを確認した。解析体系および結果については付録 1 1.坑道上部空隙の閉塞可能性の検討の通りである。

「地下空洞型処分施設性能確証試験」における実規模実証試験（秋山他、2016）によれば、埋戻し材膨潤による坑道上部の変位は、初期膨潤圧による変位が 1.5cm 程度であり、施工後の自重による沈下として想定される 1mm 以下の間隙はこの時点で閉塞するものと考えられる。その後の 10 万年の変位はベントナイトの粘性挙動によるものであり、10 万年後の変位は 3.5cm 程度であった。

- エビデンスの品質（理論的基盤、精度、代表性、網羅性）

上記のベントナイト弾塑性変形解析は緩衝材の力学特性を埋め戻し材のベントナイト密度に応じて見直して用いたものであり、埋め戻し材再冠水時の膨潤試験等との比較による検証も行われていないことから不確かさが含まれるものと考えられる。

- エビデンスに基づく命題の判断
  - 支持の程度：上述した不確実性を考慮して低い（0.3）とする
  - 否定の程度：現在のところ、埋め戻し材膨潤による上部間隙閉塞の可能性を否定するエビデンスはない（0.0）

3.1.1.1 割れ目のあるコンクリート試料の通水試験

Rooij et.al(2012)によれば、施工後のコンクリートの割れ目がカルサイトやエトリンガイト等の沈殿によって閉塞する現象は 19 世紀から良く知られていた。また、20 世紀以降に海中のコンク

リート構造物中の塩素等の実効拡散係数が時間とともに低下すること等からも炭酸塩鉱物等による閉塞部が緻密で止水性や低拡散性を有することが推定されていた。時間を経たコンクリート構造物における炭酸塩鉱物による割れ目の閉塞については多くの観察事例がある。コンクリート中の割れ目の閉塞（自己シール）が生ずるためには、二次鉱物による閉塞が可能な比較的小さい開口幅（条件にもよるが例えば 100 ミクロンオーダー以下）であることが必要とされている。

Edvardsen(1996)では、割れ目開口幅が制限されるようなコンクリート材料として、繊維補強コンクリート（FRC: Fiber Reinforced Concrete）が注目されており、割れ目を有する試料を用いた通水試験が行われ透水性の低下が報告されている。

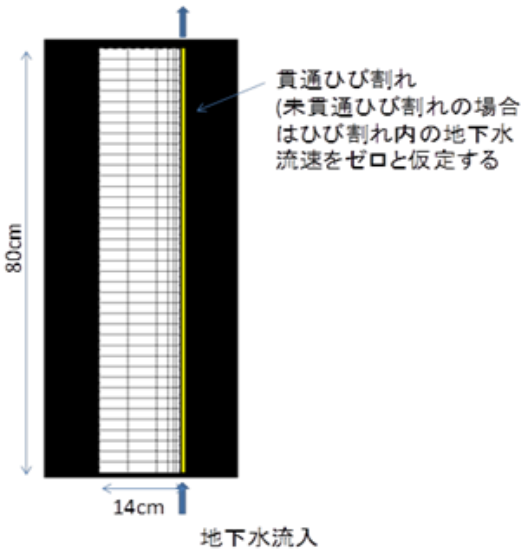
Fukuda ほか（2012）では、 厚さ 15mm で開口幅 0.1mm の割れ目を有する円盤状の FRC 試料を用いて通水試験を行った結果、7 週間後までに下流端付近でカルサイトによる閉塞が生じたことを報告している。

- エビデンスの品質（理論的基盤、精度、代表性、網羅性）
  - コンクリートの割れ目が炭酸塩鉱物等によって閉塞し、自己シールすることは古くからよく知られており、また、閉塞部の強度が回復することや、透水性あるいは実効拡散係数が低下することも上記のような種々の試験研究によって示されている。
  - このような自己シールの前提となるのは、割れ目の開口幅が 100 ミクロンオーダー程度以下に制限されていることであるが、引張強度が低いと言われるコンクリート全般で必ずしも成立するとは言えない。このため、エビデンスの信頼性を高めるためには、坑道支保コンクリートとしてダクタル等の繊維強化コンクリートを用いること、そして、自己シールが生ずるまでの期間、繊維の強度が長期にわたって担保されることを示すこと等が必要となる
- エビデンスに基づく命題の判断
  - 支持の程度：コンクリートの割れ目開口幅が比較的小さい場合の炭酸塩鉱物等による閉塞に関しては当該分野の専門家間でのコンセンサスが存在するものと考えられるが、現時点では支保に用いるコンクリートの種類が不確定である点を考慮して中程度（0.5）とする
  - 否定の程度：現在のところ、炭酸塩鉱物等によるコンクリートの割れ目の閉塞の可能性を否定するエビデンスはない（0.0）

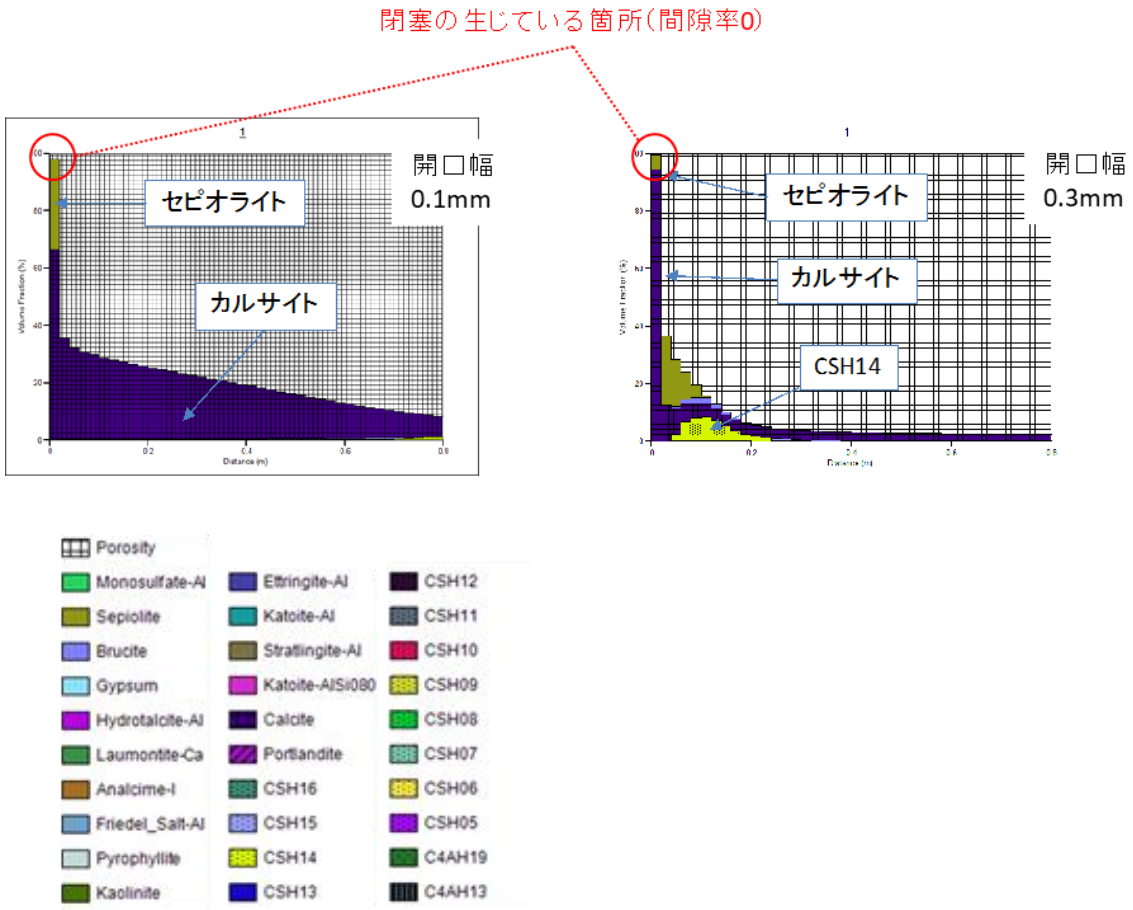
3.1.1.2 割れ目のあるコンクリートに対する反応輸送解析

坑道支保貫通割れ目を含む反応輸送解析を実施した。反応輸送解析に当たっては、坑道支保を貫通する割れ目における溶質の移流及び割れ目と隣接したコンクリートマトリクス内での拡散の双方を考慮した 1 次元二重空隙媒体モデルを作成（付図 1-12）し、割れ目内及びマトリクスの間隙水中での液相反応や固相反応（セメントの溶解や炭酸塩鉱物等の二次鉱物の沈殿）を考慮した。割れ目上流端から常に地下水（水質は FRHP 一定）が流入するものと仮定（動水勾配 0.01）した。

付図 1-13 に解析結果を示す。割れ目開口幅 0.1mm 及び 0.3mm のいずれの場合も 1 年以内にカルサイト及び CSH 系鉱物によって割れ目が閉塞するという結果を得た。閉塞の生じた位置は上流端から数 cm であり、割れ目のあるコンクリート試料の通水試験結果（Fukuda, 2012）と整合的である。



付図 1-12　坑道支保貫通割れ目を考慮した一次元反応輸送解析モデル



付図 1-13　二次鉱物による割れ目の閉塞状況

● エビデンスの品質（理論的基盤、精度、代表性、網羅性）

上記のような一次元モデルを用いて種々の条件における解析が行われているが、いずれの場合も割れ目の閉塞が生じている。また、前項で述べた通水試験や既存のコンクリートの観察事例とも

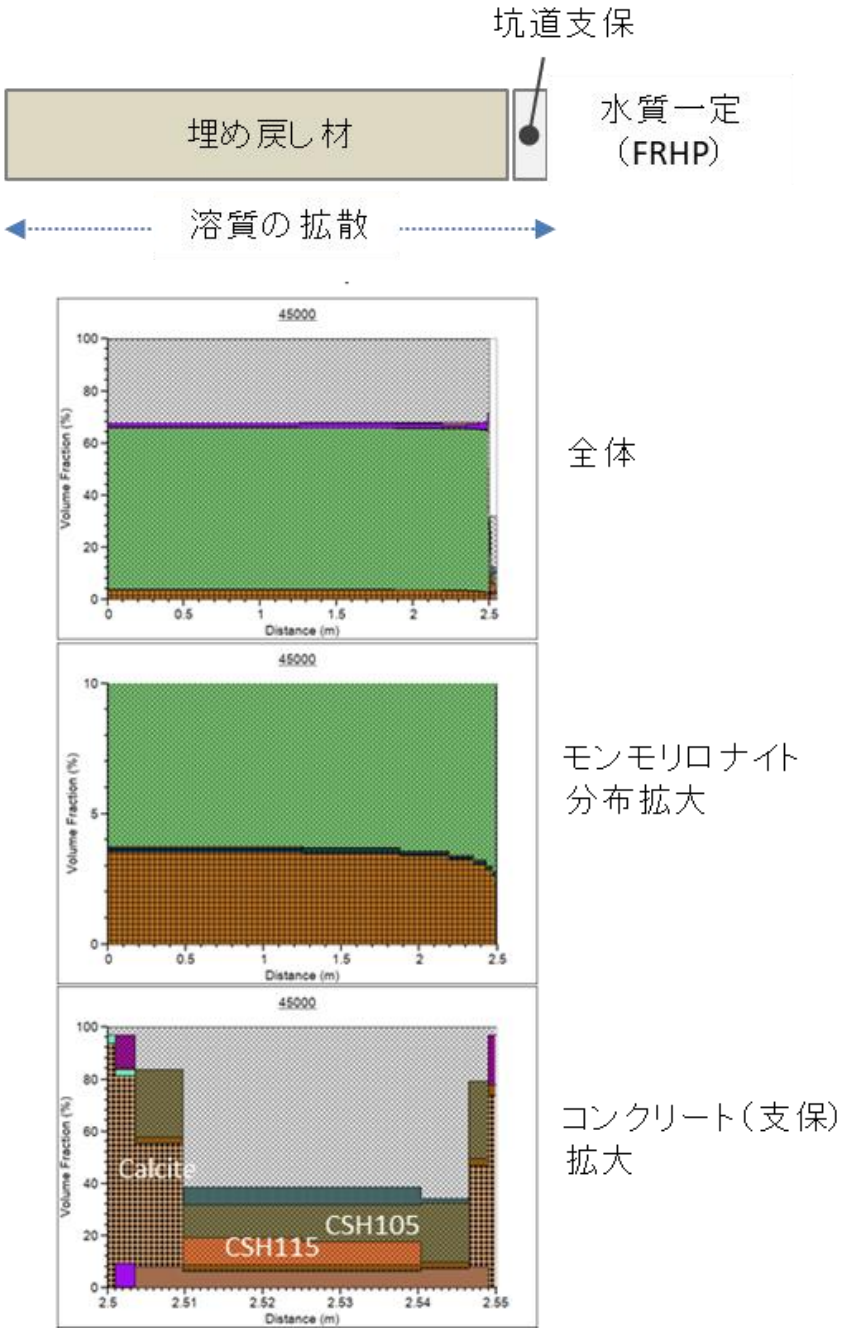
整合的であるため一定の信頼性を有すると考えられるが、長期予測に付随した不確実性（地震動等の外力によって割れ目閉塞部が繰り返し破壊される場合の再生の可能性等）も考慮する必要があると考えられる。

- エビデンスに基づく命題の判断
  - 支持の程度：コンクリートの割れ目開口幅が比較的小さい場合の炭酸塩鉱物等による閉塞に関しては種々の条件で同様の計算結果が整合的に得られているが、上述した長期予測の不確実性を考慮して中程度（0.5）とする
  - 否定の程度：現在のところ、炭酸塩鉱物等によるコンクリートの割れ目の閉塞の可能性を否定する解析結果は見当たらない（0.0）

3.1.2.1 坑道支保及び埋め戻し材が拡散支配である場合の反応輸送解析

コンクリート製坑道支保と埋め戻し材の化学的相互作用に関する 1 次元モデル反応輸送解析を行った。ベントナイト系埋め戻し材とコンクリート製坑道支保から成る 1 次元反応輸送解析モデルを作成し、溶質の移動は拡散のみによって生じ、支保外側は濃度固定境界条件（FRHP 地下水の水質）を適用した。液相反応及びベントナイトの溶解、セメント溶出及び二次鉱物沈殿から成る反応系を想定して解析を行った。

その結果、コンクリート支保と埋め戻し材の境界におけるカルサイトの沈殿によってコンクリート表面付近の間隙がほぼ完全に閉塞しており、溶質の移動が制限されるため、埋め戻し材の変質は抑制された。45,000 年後のモンモリロナイト溶失はコンクリートとの境界近傍において僅かに生じているに過ぎず、埋め戻し材の止水性への影響は無視し得るほど小さいという結果となった（付図 1-14）。



付図 1-14　45,000 年後の支保及び埋め戻し材変質状況鉱物分布

- エビデンスの品質（理論的基盤、精度、代表性、網羅性）

移流が顕著ではない状況においてコンクリートとベントナイトの境界部がカルサイト等によって閉塞しベントナイトの変質が抑制されることは既往の検討事例でも述べられており（例えば、電事連，核燃料サイクル開発機構，2005、NUMO，2021 など）、また、粘土層中のトンネルにおける考古学的アナログでも支持されており信頼性が高い

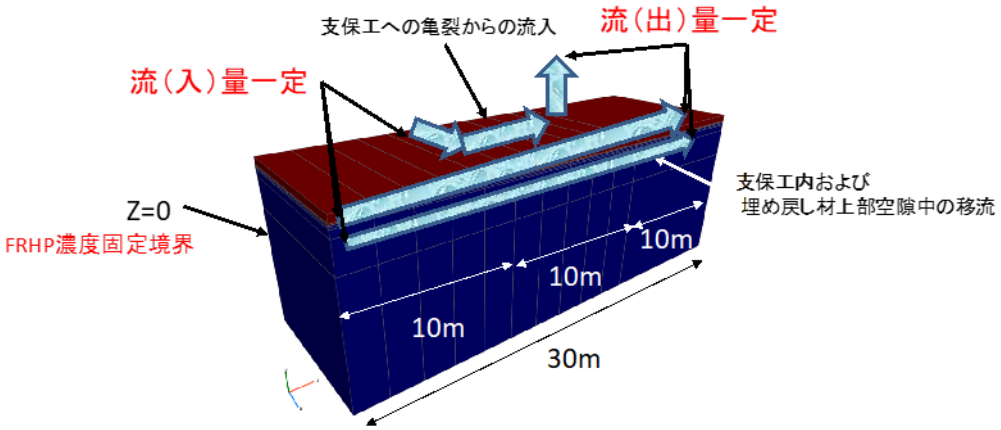
- エビデンスに基づく命題の判断
  - 支持の程度：拡散場でのセメント影響によるベントナイト変質抑制に関してはコンセンサスがあり考古学的アナログ等でも支持されていることから高い（0.7）とする
  - 否定の程度：拡散場においてベントナイトがセメント影響により顕著に変質することを

示唆するエビデンスはない（0.0）

3.2.1 坑道と交差する透水性割れ目を含む軸方向二次元断面の反応輸送解析

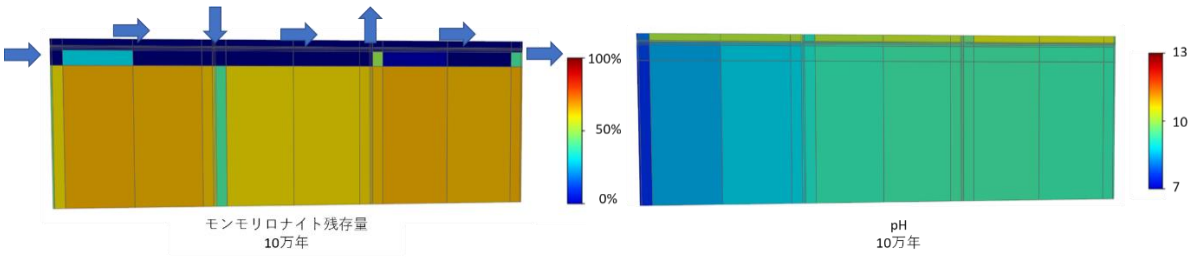
NUMO 包括的技術報告書における新第三紀堆積岩では、透水量係数の対数平均値 1.0×10^{-8}[m²/s]、対数標準偏差 0.43 と仮定されており（NUMO，2021）、約 1σ 以上の大きな透水量係数を持つ亀裂（$T>10^{-7.5}$ m²/s）はおよそ 10m に 1 本程度の間隔で坑道と交差している。そこで、このような透水性割れ目及びこれと交差する坑道区間をモデル化し、水理解析を行って坑道支保及び埋め戻し材上部間隙の地下水流量を算出した。坑道上流端及び透水性割れ目交差部からの地下水の流入を想定した二次元反応輸送解析モデルを作成し（付図 1-15）、上記の水理解析結果に従いそれぞれの地下水流入量を仮定した。

この二次元反応輸送解析モデルでは、埋め戻し材中の溶質の移動は拡散のみによって生じるが、支保及び埋め戻し材上部間隙では移流を仮定する。また、坑道上流端及び透水性割れ目交差部から流入する地下水は本来の水質（FRHP 相当）であると仮定した。また、化学反応系としては、液相反応及びベントナイトの溶解、セメント溶出及び二次鉱物沈殿を想定している。



付図 1-15　坑道上流端及び透水性割れ目交差部からの地下水の流入を想定した二次元反応輸送解析モデル

解析結果を付図 1-16 に示す。解析の結果、埋め戻し材中のモンモリロナイト残存量分布は、地下水流入部である坑道上流端及び透水性割れ目交差部の近傍ではモンモリロナイトの溶解が顕著に生じているが、透水性割れ目交差部から離れた位置では支保及び上部間隙を流れる地下水水質がベントナイト及びコンクリート反応に関して平衡に近づくために後述する周期境界条件を仮定した解析の場合と同様モンモリロナイトの変質が抑制される傾向を示している。



付図 1-16　坑道上流端及び透水性割れ目交差部からの地下水の流入を想定した二次元反応輸送解析結果

- エビデンスの品質（理論的基盤、精度、代表性、網羅性）

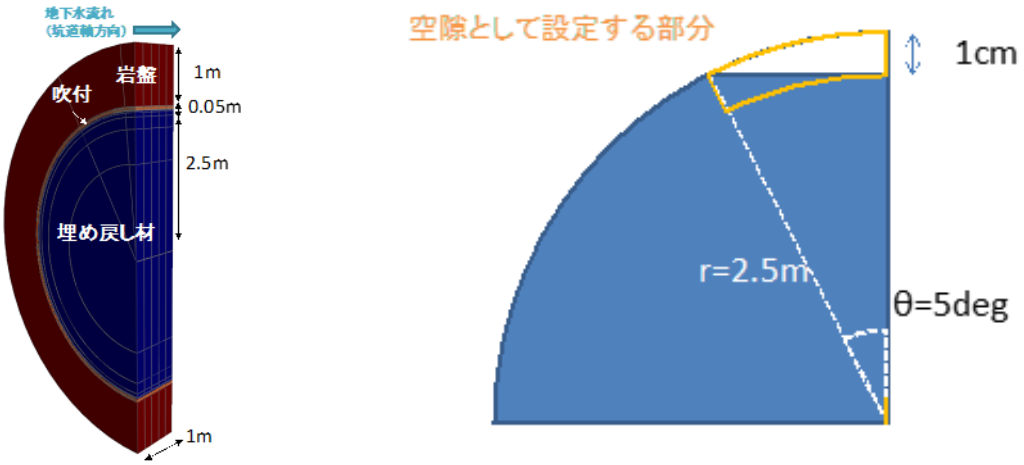
上記の解析は計算負荷が大きいため、解析時間が十分でないとともに坑道軸方向のメッシュサイズ依存性によって計算結果が変動する可能性もあることから、現時点では不確実性が残されているものと考えられる。

- エビデンスに基づく命題の判断
  - 支持の程度：上述した不確実性を考慮して低い（0.3）とする
  - 否定の程度：現在のところ、埋め戻し材膨潤による上部間隙閉塞の可能性を否定するエビデンスはない（0.0）

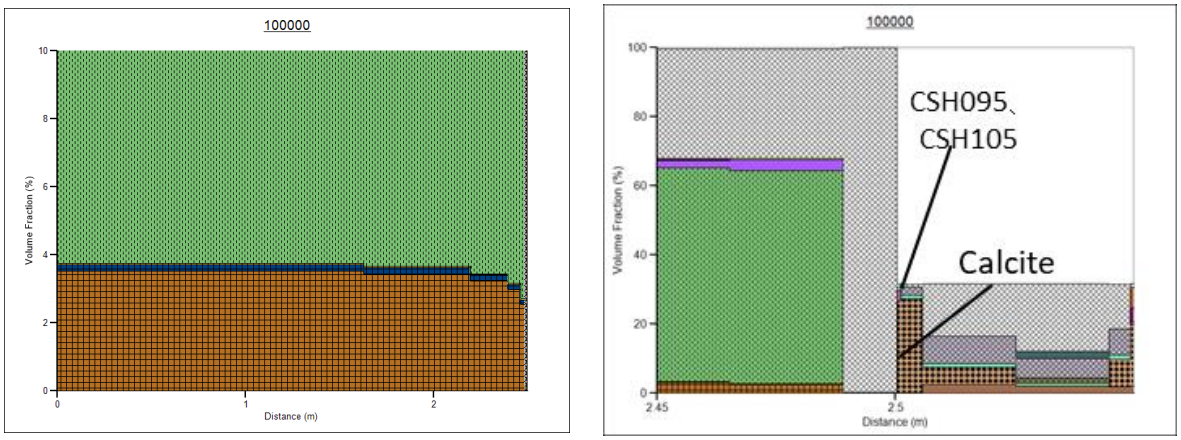
3.2.2 周期境界条件を仮定した坑道直交断面の二次元反応輸送解析

坑道直交断面の二次元反応輸送解析（付図 1-17）では、埋め戻し材及び坑道支保における系方向の溶質の拡散及び割れ目が閉塞されず透水性が高いと仮定した坑道支保及び埋め戻し材の膨潤によって充填されないと仮定した上部間隙における坑道軸方向の移流を想定して周期境界条件を適用した（反応後に下流側に流出する地下水水質を上流側の流入水質に適用）。すなわち、コンクリート及びベントナイトと反応して平衡に近づいた水が支保と上部間隙に沿って流れる状況を想定（透水性割れ目との交差部以外の坑道区間に対応）した解析を行った。解析では、液相反応及びベントナイトの溶解、セメント溶出及び二次鉱物沈殿から成る反応系を想定した。

解析の結果、コンクリート支保と埋め戻し材における移流は継続しているが、カルサイトの沈殿によってコンクリート表面付近の間隙がほぼ完全に閉塞しており、コンクリート溶質成分の埋め戻し材への移動が制限されるため、ベントナイトの変質は抑制されていることが示された（付図 1-18）。100,000 年後のモンモリロナイト溶失はコンクリートとの境界近傍において僅かに生じているに過ぎず、埋め戻し材の止水性への影響は無視し得るほど小さい（付図 1-19）。

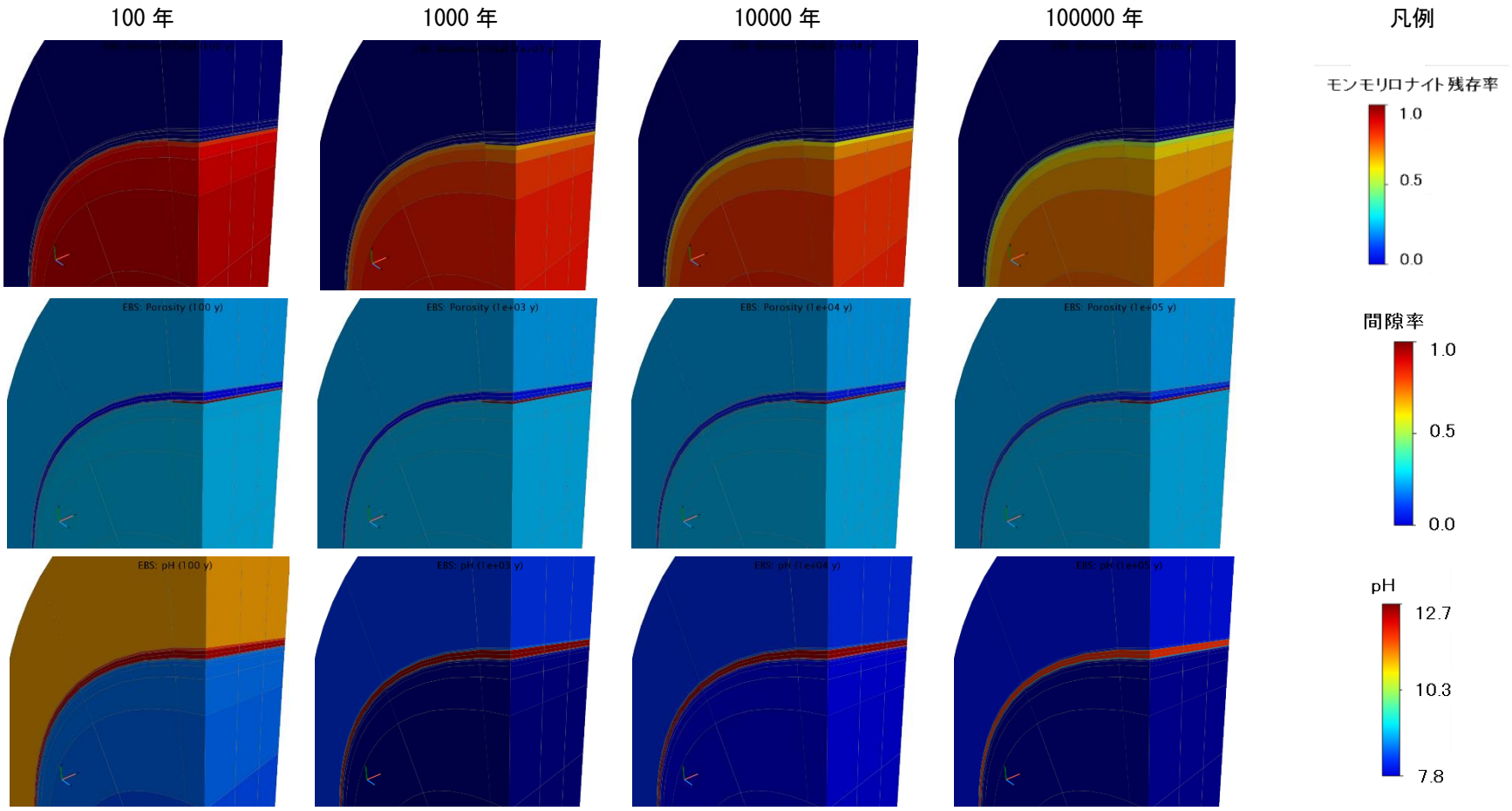


付図 1-17　解析モデルの概念図（左図：全体、右図：空隙部分拡大）



(a)埋め戻し材拡大図　　(b)坑道支保工-埋め戻し材境界拡大図

付図 1-18　100000 年後の坑道支保工および埋め戻し材の変質状況および鉱物分布



付図 1-19　周期境界条件を仮定した坑道直交断面の二次元反応輸送解析結果（ケース 14）

- エビデンスの品質（理論的基盤、精度、代表性、網羅性）

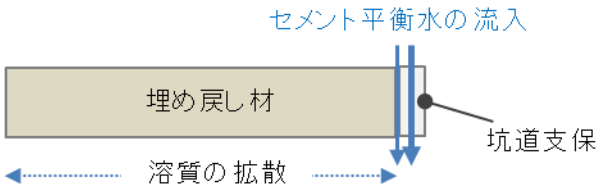
移流が顕著であっても平衡に近い水の場合はコンクリート表面付近で間隙閉塞することでベントナイト変質が抑制される結果は合理的

- エビデンスに基づく命題の判断
  - 支持の程度：上記結果に合理性があることから高い（0.7）とする
  - 否定の程度：上記結果に反するようなエビデンスはない（0.0）

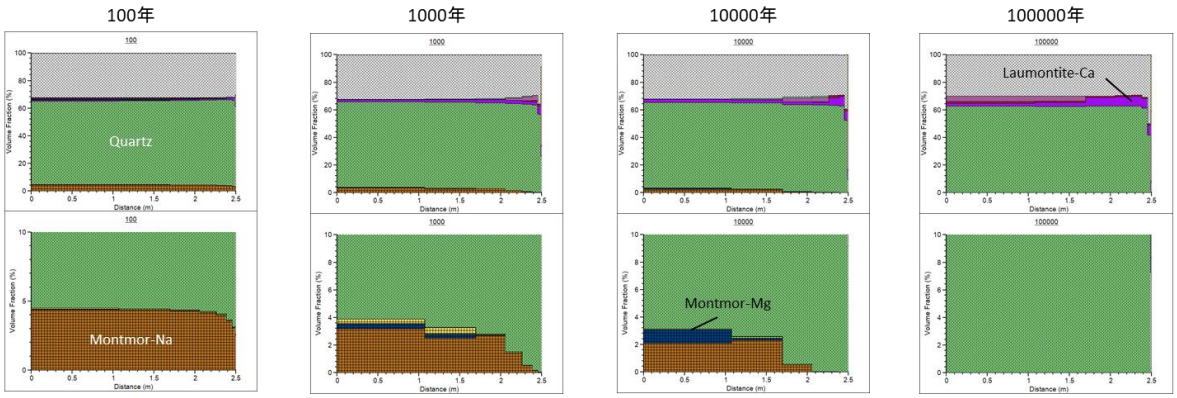
(a) 3.2.3 セメント平衡水が流入し続けることを仮定した一次元反応輸送解析

付図 1-20 に、コンクリート製坑道支保と埋め戻し材の化学的相互作用に関する 1 次元反応輸送解析のモデルを示す。埋め戻し材中の溶質の移動は拡散のみによって生じるが、支保及び埋め戻し材上部間隙では移流を仮定した。また、上流側から流入する地下水は常にセメント（ポルトランダイト）平衡であると仮定した。反応系は、液相反応及びベントナイトの溶解、セメント溶出及び二次鉱物沈殿から成る系を想定した。

解析の結果、モンモリロナイトのイオン型は Na 型のまま変化していないが、境界部の間隙閉塞は生じず、各時間における溶解領域は拡大しており、10 万年時点ではモンモリロナイトが完全に溶解していることが示された（付図 1-21）。



付図 1-20　一次元反応輸送解析モデル



付図 1-21　鉱物分布の経時変化（上段：埋め戻し材部分、下段：埋め戻し材拡大図）

- エビデンスの品質（理論的基盤、精度、代表性、網羅性）
  - 移流によってベントナイト溶解生成物が散逸する一方、上流側からセメント溶出成分（特に水酸基）が継続して流入することから、ベントナイトの溶解が抑制されないという結果は合理的なものと考えられる。
  - ただし、「上流側からセメント溶出成分（特に水酸基）が継続して流入する」という仮定は、移流支配の場でもコンクリート表面付近の間隙が閉塞してアルカリソースとしての

強度が低下するという前出の解析結果や中性化といった長期経過後のコンクリートの変質状況に関する知見に照らせば悲観的なものであることに注意を要する（ただしこの点は、既に述べた通り、エビデンスの「重み」として考慮されている）。

- エビデンスに基づく命題の判断
  - 支持の程度：上記結果に反する（ベントナイトが変質しないことを示す）ようなエビデンスはない（0.0）
  - 否定の程度：上流側からセメント溶出成分（特に水酸基）が継続して流入するためベントナイトの溶解が抑制されないという結果は合理的なものと考えられることから、高いとする（0.7）

(b) エビデンスの評価結果

上記に示した個々のエビデンスの評価を構築したESLモデルに入力したものを**エラー! 参照元が見つかりません。**に示す。個々のエビデンスに付与した「重み」及び上述した既存のエビデンスに基づく評価より、主要命題「施工時の上部間隙形成によって坑道埋め戻し材が止水性を失うことはない」を肯定する確からしさは0.48、否定する確からしさは0.09、どちらともいえない判断保留分は0.43と算出された。

参考文献

原子力発電環境整備機構，包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03，2021.

秋山吉弘，寺田賢二，山田淳夫，地下空洞型処分施設施工技術の確証試験の概要，RWMC-TRJ-15001，2016.

Edvardsen, C.K., Water permeability and self-healing of through-cracks in concrete, DAfStb Bull 455, 1996. (in German)

Fukuda, D., Investigation of self-sealing in high-strength and ultra-low-permeability concrete in water using micro-focus X-ray CT, Cement and Concrete Research, Vol.42, 11, 1494-1500, 2012.

電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構，TRU 廃棄物処分技術検討書―第２次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ―，JNC TY 1400 2005 013，2005.

原子力発電環境整備機構，包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03，2021.

原子力環境整備促進・資金管理センター，原環センター2015 年度技術年報，2016.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 26 年度　管理型処分技術調査等事業　地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2015.

核燃料サイクル開発機構，わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－分冊２　地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022, 1999.

Rooij, M.R. et al., Self-healing Phenomena in Cement-Based Materials, Splinger, 2013.

日本原子力研究開発機構，平成 28 年度　地層処分技術調査等事業　処分システム評価確証技術開発報告書，2016.

Trapote-Barreira, A., Cama, J. and Soler, J.M., Dissolution kinetics of C-S-H gel: Flow-through experiments. Physics and Chemistry of the Earth, Vol.70-71, 17-31, 2014.

付録２　3.2　EDZ シーリング試験

目次

1.　室内試験の計測結果 ..... 付 2-1
1.1　締固め試験 ..... 付 2-1
2.　吹付け試験 1 の計測データ ..... 付 2-2
2.1　含水比調整時の混練時間 ..... 付 2-2
2.2　吹付け材の含水比 ..... 付 2-3
2.3　吹付け後のサンプリングによる含水比、乾燥密度計測 ..... 付 2-5
2.4　メチレンブルー吸着量 ..... 付 2-10
2.5　吹付け試験 1 の施工品質に係る計測項目 ..... 付 2-11
3.　吹付け試験 2 の計測データ ..... 付 2-12
3.1　材料投入量および加水量 ..... 付 2-12
3.2　含水比調整時の混練時間 ..... 付 2-14
3.3　吹付け材の含水比計測 ..... 付 2-17
3.4　メチレンブルー吸着量計測 ..... 付 2-19
3.5　吹付け後のサンプリングによる含水比、乾燥密度計測 ..... 付 2-21
3.6　吹付け試験 2 の施工品質に係る計測項目 ..... 付 2-24

1. 室内試験の計測結果

1.1 締固め試験

突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）を実施し、最適含水比を求めた。締固めエネルギーは 1Ec、2Ec、4Ec とした。付表 2-1 から付表 2-4 に結果を示す。

付表 2-1　V1-70 の締固め試験結果

1Ec		2Ec		4Ec	
含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)
15.34	1.425	12.49	1.525	10.54	1.556
17.46	1.449	14.54	1.550	12.72	1.596
19.62	1.468	16.92	1.587	14.90	1.661
22.13	1.479	19.36	1.596	17.33	1.671
24.56	1.464	22.08	1.554	19.68	1.629
27.15	1.434	25.34	1.525	24.81	1.570

付表 2-2　V1-50 の締固め試験結果

1Ec		2Ec		4Ec	
含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)
10.57	1.569	10.04	1.691	7.72	1.666
12.84	1.593	12.29	1.706	10.10	1.751
15.54	1.600	14.74	1.726	12.57	1.772
18.07	1.604	17.25	1.713	14.72	1.749
20.02	1.581	19.99	1.679	17.51	1.700
22.51	1.550	22.60	1.636	20.01	1.675

付表 2-3　GX-100 の締固め試験結果

1Ec		2Ec		4Ec	
含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)
20.59	1.372	15.03	1.414	12.50	1.500
23.58	1.388	17.01	1.467	14.89	1.517
26.57	1.467	20.03	1.522	17.42	1.536
30.24	1.407	22.04	1.502	19.76	1.514
34.74	1.333	26.91	1.429	24.97	1.456
40.24	1.236	29.05	1.410	27.68	1.438

付表 2-4　GX-70 の締固め試験結果

1Ec		2Ec		4Ec	
含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)
12.44	1.460	12.53	1.559	7.34	1.609
14.94	1.479	14.95	1.589	10.03	1.635
17.50	1.498	17.51	1.624	12.30	1.664
19.71	1.510	19.80	1.618	14.83	1.681
22.54	1.484	22.52	1.573	17.51	1.665
24.77	1.457	24.75	1.519	19.99	1.604

2.　吹付け試験 1 の計測データ

吹付け試験 1 における含水比や乾燥密度、メチレンブルー吸着量などの計測データを以下に示す。

2.1 含水比調整時の混練時間

吹付け材製造時の空練り時間と加水時の混練時間を付表 2-5 に示す。

付表 2-5　吹付け試験 1 の混練時間

ケース	バッチ	空練り時間 (秒)	加水時の混練時間 (秒)
V1-70	1	60	180
	2	60	145
V1-50	1	60	120
	2	60	120
	3	60	120
GX-100	1	60	120
	2	60	120
GX-70	1	60	120
	2	60	120
	3	60	180
V1-100	1	60	120

2.2 吹付け材の含水比

吹付け材の含水比について、材料の混練直後、ふるい後およびリバウンドのそれぞれを炉乾燥法により計測した。付表 2-6 から付表 2-10 に計測結果を示す。V1-50 については、作製した 3 バッチすべてでサンプリングを実施し、それ以外のケースについては、1 バッチのみサンプリングを実施した。

付表 2-6　V1-70 の含水比測定結果

サンプリング	含水比 (%)
含水比調整直後	19.1
含水比調整直後	19.6
含水比調整直後	18.0
ふるい後	16.4
ふるい後	16.9
ふるい後	17.2
リバウンド	12.4

付表 2-7　V1-50 の含水比測定結果

サンプリング	含水比 (%)
含水比調整直後（1 バッチ目）	12.2
含水比調整直後（1 バッチ目）	17.9
含水比調整直後（1 バッチ目）	12.1
ふるい後（1 バッチ目）	10.7
ふるい後（1 バッチ目）	10.7
ふるい後（1 バッチ目）	10.9
含水比調整直後（2 バッチ目）	14.4
含水比調整直後（2 バッチ目）	16.0
含水比調整直後（2 バッチ目）	11.4
ふるい後（2 バッチ目）	11.3
ふるい後（2 バッチ目）	11.7
ふるい後（2 バッチ目）	10.2
含水比調整直後（3 バッチ目）	13.2
含水比調整直後（3 バッチ目）	13.3
含水比調整直後（3 バッチ目）	15.1
ふるい後（3 バッチ目）	11.4
ふるい後（3 バッチ目）	10.7
ふるい後（3 バッチ目）	11.1
リバウンド	7.6

付表 2-8　GX-100 の含水比測定結果

サンプリング	含水比 (%)
含水比調整直後	19.2
含水比調整直後	19.0
含水比調整直後	18.0
ふるい後	18.1
ふるい後	19.1
ふるい後	19.3
リバウンド	17.4

付表 2-9　GX-70 の含水比測定結果

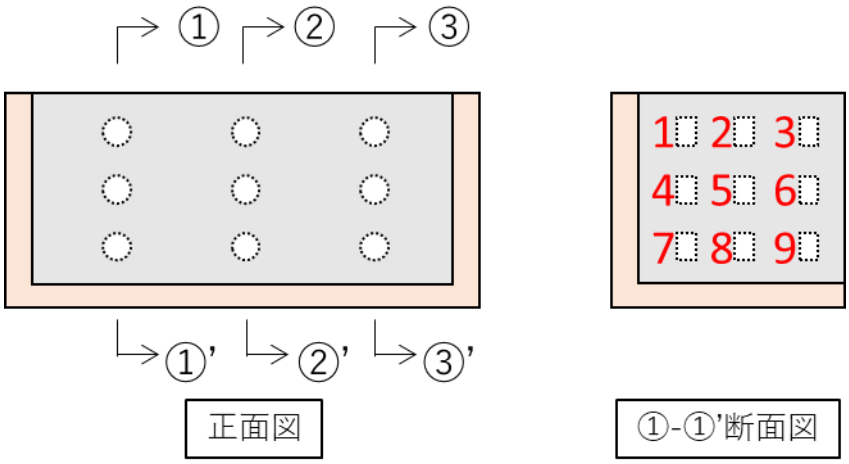
サンプリング	含水比 (%)
含水比調整直後	15.7
含水比調整直後	15.4
含水比調整直後	16.0
ふるい後	15.6
ふるい後	16.6
ふるい後	14.9
リバウンド	16.2

付表 2-10　V1-100 の含水比測定結果

サンプリング	含水比 (%)
含水比調整直後	28.3
含水比調整直後	28.0
含水比調整直後	29.3
ふるい後	28.6
ふるい後	36.2
ふるい後	29.0
リバウンド	26.2

2.3 吹付け後のサンプリングによる含水比、乾燥密度計測

型枠に吹付け後の供試体からコアサンプリングを実施し、含水比は炉乾燥法により、乾燥密度は重量と寸法から算出した。付図 2-1 にサンプリングの位置を示す。①-①'断面、②-②'断面、③-③'断面のそれぞれで 9 点ずつサンプリングを実施した。計測結果を付表 2-11 から付表 2-15 に示す。



付図 2-1　吹付け試験 1 のサンプリング位置

付表 2-11　V1-70 のコアサンプリングによる計測結果

断面 No.	サンプリング No.	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m$^{3)}$
①-①’	1	21.2	1.42
①-①’	2	21.1	1.46
①-①’	3	21.9	1.43
①-①’	4	19.6	1.38
①-①’	5	20.9	1.42
①-①’	6	22.2	1.47
①-①’	7	17.5	1.21
①-①’	8	19.7	1.52
①-①’	9	21.1	1.44
②-②’	1	20.3	1.46
②-②’	2	22.0	1.40
②-②’	3	21.8	1.43
②-②’	4	19.6	1.36
②-②’	5	22.1	1.41
②-②’	6	22.3	1.51
②-②’	7	18.4	1.13
②-②’	8	20.9	1.23
②-②’	9	20.4	1.51
③-③’	1	20.0	1.49
③-③’	2	23.0	1.47
③-③’	3	24.0	1.44
③-③’	4	19.9	1.42
③-③’	5	20.3	1.48
③-③’	6	18.4	1.52
③-③’	7	15.5	1.07
③-③’	8	19.7	1.31
③-③’	9	20.8	1.36

付表 2-12　V1-50 のコアサンプリングによる計測結果

断面 No.	サンプリング No.	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m$^{3)}$
①-①’	1	18.5	1.46
①-①’	2	16.8	1.49
①-①’	3	17.6	1.62
①-①’	4	16.4	1.53
①-①’	5	18.5	1.52
①-①’	6	20.2	1.48
①-①’	7	13.0	1.25
①-①’	8	11.6	1.45
①-①’	9	18.1	1.40
②-②’	1	20.6	1.48
②-②’	2	17.5	1.46
②-②’	3	16.4	1.54
②-②’	4	14.1	1.46
②-②’	5	16.9	1.52
②-②’	6	18.6	1.50
②-②’	7	10.3	1.17
②-②’	8	13.0	1.39
②-②’	9	16.3	1.44
③-③’	1	21.1	1.51
③-③’	2	13.4	1.42
③-③’	3	17.8	1.65
③-③’	4	13.9	1.36
③-③’	5	17.7	1.49
③-③’	6	17.2	1.44
③-③’	7	9.6	1.25
③-③’	8	10.6	1.15
③-③’	9	14.1	1.36

付表 2-13　GX-100 のコアサンプリングによる計測結果

断面 No.	サンプリング No.	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m$^{3)}$
①-①’	1	21.3	1.38
①-①’	2	-	-
①-①’	3	-	-
①-①’	4	19.8	1.36
①-①’	5	19.5	1.36
①-①’	6	22.1	1.37
①-①’	7	20.1	1.21
①-①’	8	20.8	1.34
①-①’	9	20.7	1.28
②-②’	1	20.8	1.33
②-②’	2	-	-
②-②’	3	-	-
②-②’	4	20.4	1.38
②-②’	5	21.1	1.41
②-②’	6	20.6	1.32
②-②’	7	20.7	1.32
②-②’	8	20.2	1.32
②-②’	9	20.4	1.31
③-③’	1	21.6	1.39
③-③’	2	-	-
③-③’	3	-	-
③-③’	4	20.4	1.45
③-③’	5	20.5	1.29
③-③’	6	21.5	1.40
③-③’	7	18.4	1.18
③-③’	8	19.6	1.24
③-③’	9	22.0	1.32

付表 2-14　GX-70 のコアサンプリングによる計測結果

断面 No.	サンプリング No.	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m$^{3)}$
①-①’	1	18.2	1.60
①-①’	2	17.0	1.51
①-①’	3	18.5	1.53
①-①’	4	18.3	1.64
①-①’	5	17.1	1.54
①-①’	6	16.1	1.54
①-①’	7	15.2	1.33
①-①’	8	15.4	1.34
①-①’	9	16.1	1.39
②-②’	1	17.5	1.57
②-②’	2	16.4	1.41
②-②’	3	19.4	1.50
②-②’	4	17.9	1.66
②-②’	5	16.5	1.54
②-②’	6	17.0	1.52
②-②’	7	16.3	1.57
②-②’	8	16.3	1.53
②-②’	9	16.5	1.48
③-③’	1	17.3	1.67
③-③’	2	18.3	1.58
③-③’	3	19.0	1.52
③-③’	4	17.4	1.66
③-③’	5	18.0	1.71
③-③’	6	16.8	1.58
③-③’	7	16.8	1.63
③-③’	8	15.8	1.57
③-③’	9	15.6	1.45

付表 2-15　V1-100 のコアサンプリングによる計測結果

断面 No.	サンプリング No.	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m$^{3)}$
①-①’	1	-	-
①-①’	2	-	-
①-①’	3	-	-
①-①’	4	-	-
①-①’	5	-	-
①-①’	6	-	-
①-①’	7	28.8	1.34
①-①’	8	28.4	1.25
①-①’	9	31.1	1.32
②-②’	1	-	-
②-②’	2	-	-
②-②’	3	-	-
②-②’	4	28.0	1.33
②-②’	5	28.5	1.38
②-②’	6	28.0	1.35
②-②’	7	-	-
②-②’	8	-	-
②-②’	9	-	-

2.4 メチレンブルー吸着量

型枠に吹付け後の供試体からコアサンプリングを実施し、メチレンブルー吸着量を計測した。クニゲル V1 の混合率 100%の時のメチレンブルー吸着量を 82 mmol/100g、クニゲル GX の混合率 100%の時のメチレンブルー吸着量を 69 mmol/100g としてベントナイト混合率を求めた。メチレンブルー吸着量およびベントナイト混合率の計測結果を付表 2-16 に示す。

付表 2-16　メチレンブルー吸着量の計測結果

ケース	サンプリング No.	メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	ベントナイト混合率 (%)
V1-70	②-②’ 4	62	76
	②-②’ 5	70	85
	②-②’ 6	70	85
V1-50	②-②’ 4	54	66
	②-②’ 5	64	78
	②-②’ 6	64	78
GX-70	②-②’ 4	50	72
	②-②’ 5	52	75
	②-②’ 6	54	78

2.5 吹付け試験 1 の施工品質に係る計測項目

吹付け試験 1 における出来形重量やリバウンド回収量などの施工品質に係る計測項目について付表 2-17 に示す。

付表 2-17　吹付け試験 1 の施工品質に係る計測データ

ケース	材料投入量 (kg)	出来形重量 (kg)	リバウンド回収量 (kg)	ロス量 (kg)	ダマ除去量 (kg)	吹付け時間 (hr)	吹付け速度 (m^3/hr)	エアー量
V1-70	731	372	252	92	16	0.28	0.78	12.0, 14.0
V1-50	1105	349	533	181	43	0.30	0.70	12.0
GX-100	505	191	229	67	18	0.12	1.02	12.0
GX-70	753	272	330	128	23	0.23	0.65	12.0
V1-100	363	259	57	37	10	0.08	1.81	14.0, 16.0

3. 吹付け試験 2 の計測データ

3.1 材料投入量および加水量

吹付け試験 2 における、吹付け材製造時のクニゲル V1、3 号ケイ砂、5 号ケイ砂の投入重量とクニゲル V1 の自然含水比、加水量を付表 2-18 および付表 2-19 に示す。10 バッチ目終了後に、天端部へ吹付けた材料 140kg を除去した。このため除去分 140kg を差し引いた重量を V1-70 の合計投入重量とした。

付表 2-18　V1-70 の材料投入量

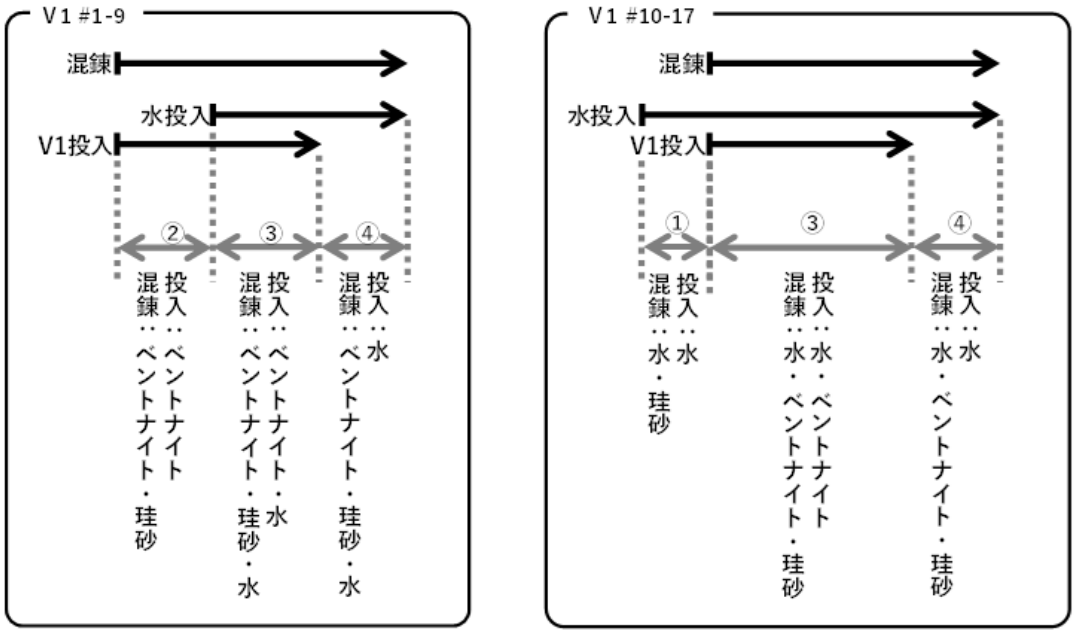
バッチ	投入重量［kg］			自然含水比［%］	加水量［kg］
	クニゲル V1	3 号ケイ砂	5 号ケイ砂	クニゲル V1	-
1	230	45	45	9.64	35.6
2	230	45	45	-	50.6
3	230	45	45	-	45.6
4	230	45	45	-	50.6
5	230	45	45	-	50.6
6	230	45	45	-	48.6
7	233	45	45	10.78	46.2
8	233	45	45	-	48.2
9	233	45	45	-	68.2
10※	233	45	45	-	68.2
11	233	45	45	-	68.2
12	233	45	45	-	68.2
13	228	45	45	8.47	73.1
14	228	45	45	-	73.1
15	228	45	45	-	73.1
16	228	45	45	-	73.1
17	228	45	45	-	73.1

付表 2-19　GX-70 の材料投入量

バッチ	投入重量［kg］			自然含水比［%］	加水量［kg］
	クニゲル GX	3 号ケイ砂	5 号ケイ砂	クニゲル GX	-
1	223	45	45	6.36	41.5
					6.0
2	223	45	45	-	47.5
3	223	45	45	-	43.5
4	223	45	45	-	43.5
5	223	45	45	-	41.5
6	223	45	45	-	43.5
7	223	45	45	-	43.5
8	223	45	45	-	43.5
9	223	45	45	-	43.5
10	223	45	45	-	43.5
11	223	45	45	-	43.5
12	224	45	45	6.71	42.70
13	224	45	45	-	42.7
14	224	45	45	-	42.7
15	224	45	45	-	42.7
16	224	45	45	-	42.7
17	224	45	45	-	42.7
18	224	45	45	-	42.7
19	224	45	45	-	42.7
20	224	45	45	-	42.7
21	222	45	45	5.92	44.4
22	222	45	45	-	44.4

3.2 含水比調整時の混練時間

吹付け試験における V1-70 と GX-70 の含水比調整時の混練時間を付表 2-20 および付表 2-21 に示す。V1-70 の材料投入と加水の手順を付図 2-2 に示す。V1-70 ではベントナイトの投入と加水、混練を同時に実施している。一方、GX-70 ではベントナイトの投入終了後に加水、混練を実施ししました。



付図 2-2　V1-70 の加水、混練手順

付表 2-20　V1-70 の混練時間

ケース	バッチ	混練時間（秒）				備考
		①	②	③	④	
V1-70	1	-	40	101	10	
	2	-	-	143	-	
	3	-	10	148	-	ベントナイト投入終了前に水の投入が終了（水投入終了後の練り混ぜ時間：15 秒）、ベントナイト投入後に水 5Ｌを追加投入（練り混ぜ時間 19 秒）
	4	-	10	114	27	
	5	-	-	123	45	④の後、水 5Ｌを追加投入（練り混ぜ時間 24 秒）
	6	-	-	130	20	
	7	-	-	147	10	
	8	-	-	123	26	
	9	-	-	124	52	
	10	30	-	135	55	④の後、水 10L を追加投入（練り混ぜ時間 33 秒）
	11	30	-	130	37	
	12	30	-	124	45	
	13	45	-	124	44	
	14	62	-	127	23	
	15	60	-	146	07	
	16	45	-	142	23	④の後、追加で練り混ぜを実施（練り混ぜ時間 10 秒）
	17	46	-	140	27	

付表 2-21　GX-70 の混練時間

ケース	バッチ	空練り時間 （秒）	加水時の混練時間 （秒）
GX-70	1	60	169
	2	60	169
	3	60	154
	4	60	166
	5	60	135
	6	60	142
	7	60	139
	8	60	143
	9	60	140
	10	60	140
	11	60	139
	12	60	138
	13	60	140
	14	60	138
	15	60	131
	16	60	140
	17	60	139
	18	60	132
	19	60	143
	20	60	140
	21	60	145
	22	60	143

3.3 吹付け材の含水比計測

吹付け材の混練直後（ふるい前）およびふるい後の含水比について炉乾燥法により計測した。付表2-22および付表2-23に計測結果を示す。

付表 2-22　V1-70 の含水比計測結果

バッチ	設定含水比	含水比［%］		
		ふるい前	ふるい前	ふるい後
		赤外線水分計	乾燥炉	乾燥炉
1	18.6	17.99	20.35	16.05
2	23.2	23.35	21.93	22.94
3		-	19.72	21.66
4		19.19	21.27	18.68
5		20.61	20.06	21.72
6		19.36	20.45	20.28
7		17.56	18.61	16.88
8		22.41	20.86	19.38
9	30.3	29.18	28.82	27.13
10		27.60	26.16	26.31
11		25.38	24.11	23.99
12		27.36	26.19	-
13		26.97	26.56	26.22
14		28.72	28.64	27.58
15		28.68	26.17	27.77
16		30.74	31.03	29.01
17		32.94	31.24	30.12

付表 2-23　GX-70 の含水比計測結果

バッチ	設定含水比	含水比［%］		
		ふるい前	ふるい前	ふるい後
		赤外線水分計	乾燥炉	乾燥炉
1	18.3	16.27	-	-
1		19.08	18.08	16.84
2		17.21	16.46	13.30
3		17.36	18.10	17.24
4		17.94	19.23	17.54
5		16.09	16.63	16.98
6		18.76	18.39	17.87
7		17.96	18.26	18.02
8		16.39	19.04	17.88
9		16.08	15.68	16.72
10		18.13	18.18	17.91
11		17.52	18.06	17.91
12		16.13	16.10	16.35
13		17.30	17.81	16.36
14		15.51	15.91	15.99
15		17.07	17.36	17.49
16		16.74	17.71	16.77
17		16.73	16.76	16.05
18		18.75	18.44	17.73
19		17.91	16.47	17.62
20		16.77	17.66	17.15
21		17.12	16.34	16.65
22		16.85	17.34	16.65

3.4 メチレンブルー吸着量計測

ふるい後の材料（吹付け前）、型枠に吹付け後の供試体およびリバウンド材のメチレンブルー吸着量を計測した。型枠に吹付け後の供試体はコアサンプリングにより 18 サンプル、吹付け前の材料は 5 バッチごとに 1 サンプル、リバウンド材はリバウンド材を回収するタイミングでサンプリングした。付表 2-24 および付表 2-25 に結果を示す。

付表 2-24　V1-70 のメチレンブルー吸着量およびベントナイト混合率計測結果

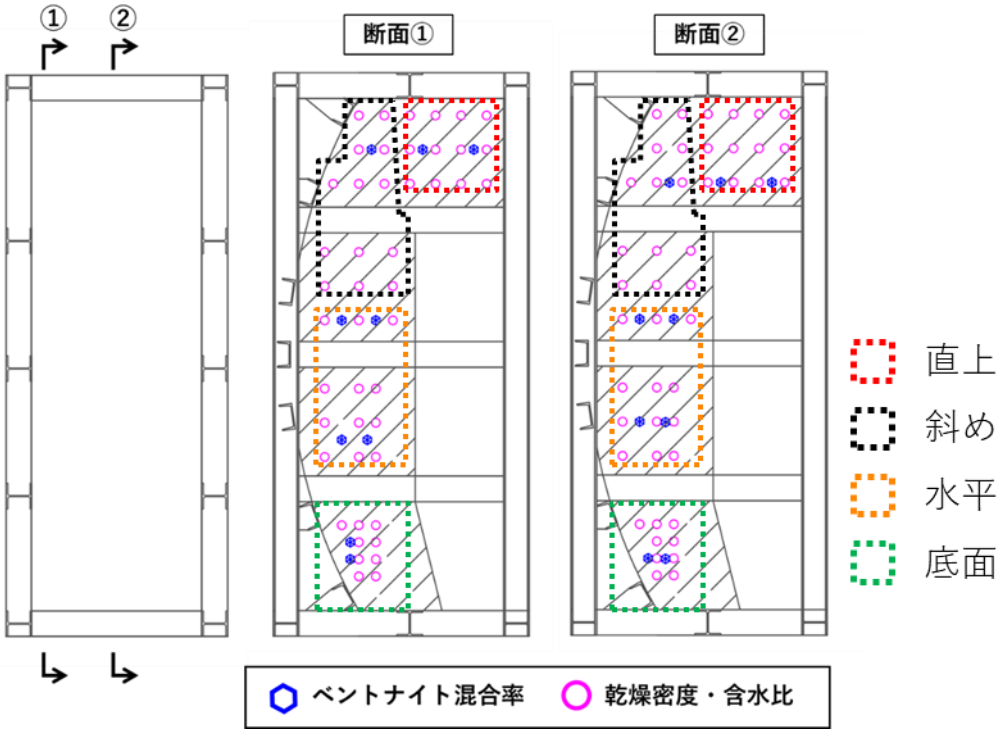
ケース	No	メチレンブルー吸着量（mmol/100g）	ベントナイト混合率（%）	平均混合率（%）
吹付け前	1	60	73	72
吹付け前	6	56	68	
吹付け前	11	58	71	
吹付け前	16	62	76	
リバウンド材	5	44	54	68
リバウンド材	11	54	66	
リバウンド材	15	58	71	
リバウンド材	17	66	80	
吹付け後	1	68	83	80
吹付け後	2	64	78	
吹付け後	3	66	80	
吹付け後	4	74	90	
吹付け後	5	64	78	
吹付け後	6	68	83	
吹付け後	7	64	78	
吹付け後	8	64	78	
吹付け後	9	62	76	
吹付け後	10	70	85	
吹付け後	11	68	83	
吹付け後	12	66	80	
吹付け後	13	66	80	
吹付け後	14	62	76	
吹付け後	15	64	78	
吹付け後	16	60	73	
吹付け後	17	62	76	
吹付け後	18	64	78	

付表 2-25　GX-70 のメチレンブルー吸着量およびベントナイト混合率計測結果

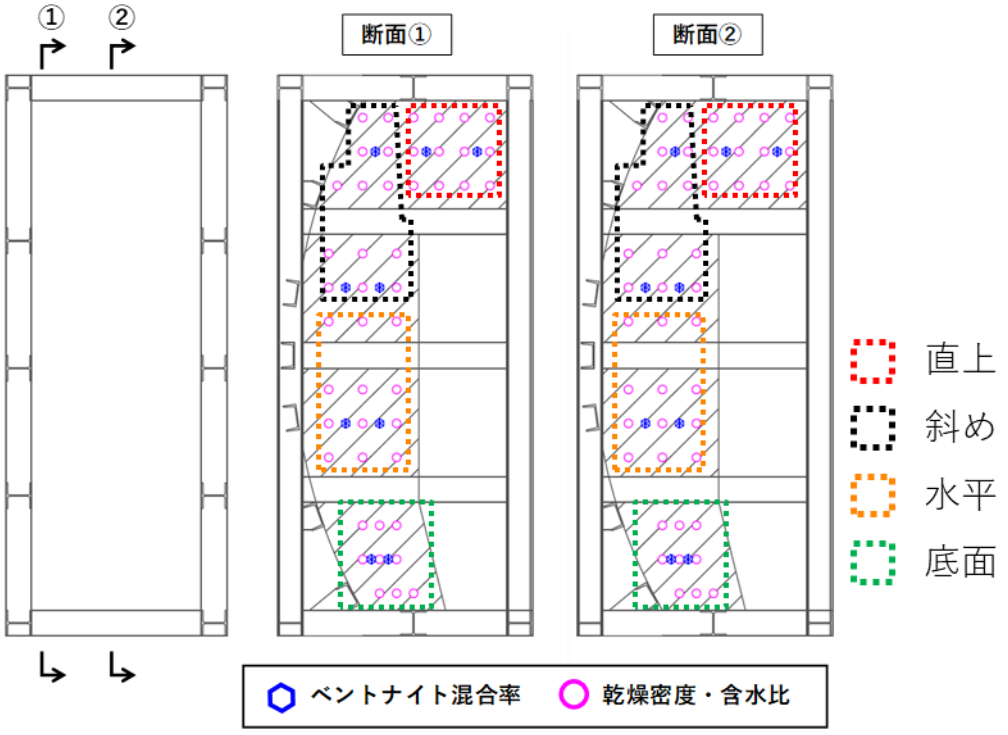
ケース	No.	メチレンブルー吸着量	ベントナイト混合率	平均混合率
		(mmol/100g)	(%)	(%)
吹付け前	1	46	67	68
吹付け前	6	48	70	
吹付け前	11	48	70	
吹付け前	16	46	67	
吹付け前	21	48	70	
リバウンド材	9	44	64	69
リバウンド材	19	50	72	
リバウンド材	22	48	70	
吹付け後	1	48	70	68
吹付け後	2	48	70	
吹付け後	3	46	67	
吹付け後	4	46	67	
吹付け後	5	50	72	
吹付け後	6	46	67	
吹付け後	7	46	67	
吹付け後	8	48	70	
吹付け後	9	44	64	
吹付け後	10	46	67	
吹付け後	11	48	70	
吹付け後	12	46	67	
吹付け後	13	48	70	
吹付け後	14	46	67	
吹付け後	15	46	67	
吹付け後	16	48	70	
吹付け後	17	48	70	
吹付け後	18	44	64	

3.5 吹付け後のサンプリングによる含水比、乾燥密度計測

付図 2-3 および付図 2-4 にサンプリングの位置を示す。側面断面、中央断面のそれぞれで 46 点ずつサンプリングを実施し、含水比は炉乾燥法により、乾燥密度は重量と寸法から算出した。計測結果を付表 2-26 および付表 2-27 に示す。



付図 2-3　V1-70 のサンプリング位置



付図 2-4　GX-70 のサンプリング位置

付表 2-26　V1-70 のコアサンプリングによる計測結果

断面	エリア	座標		含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	断面	エリア	座標		含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)
		X	Y					X	Y		
側面	底面	-0.9	0.2	25.63	1.31	中央	底面	-0.9	0.2	22.95	1.49
側面	底面	-1	0.2	23.47	1.37	中央	底面	-1	0.2	23.54	1.44
側面	底面	-0.9	0.3	25.39	1.38	中央	底面	-0.9	0.3	25.07	1.44
側面	底面	-1	0.3	23.38	1.29	中央	底面	-1	0.3	23.39	1.41
側面	底面	-0.9	0.4	24.71	1.29	中央	底面	-0.9	0.4	26.54	1.42
側面	底面	-1	0.4	20.06	1.31	中央	底面	-1	0.4	23.21	1.41
側面	底面	-0.9	0.5	21.77	1.50	中央	底面	-0.9	0.5	23.61	1.44
側面	底面	-1	0.5	21.98	1.06	中央	底面	-1	0.5	24.27	1.44
側面	底面	-1.1	0.5	23.55	1.33	中央	底面	-1.1	0.5	22.50	1.34
側面	水平	-0.9	0.9	26.43	1.32	中央	水平	-0.9	0.9	29.33	1.44
側面	水平	-1	0.9	24.50	1.37	中央	水平	-1	0.9	19.58	1.64
側面	水平	-1.2	0.9	23.48	1.41	中央	水平	-1.2	0.9	24.39	1.44
側面	水平	-0.9	1.1	26.28	1.38	中央	水平	-0.9	1.1	24.15	1.47
側面	水平	-1	1.1	24.02	1.39	中央	水平	-1	1.1	22.65	1.49
側面	水平	-1.2	1.1	23.74	1.42	中央	水平	-1.2	1.1	24.09	1.38
側面	水平	-0.9	1.3	29.12	1.43	中央	水平	-0.9	1.3	20.94	1.48
側面	水平	-1	1.3	26.19	1.29	中央	水平	-1	1.3	22.54	1.46
側面	水平	-1.2	1.3	23.68	1.43	中央	水平	-1.2	1.3	23.39	1.48
側面	水平	-0.8	1.7	28.13	1.44	中央	水平	-0.8	1.7	27.69	1.45
側面	水平	-1	1.7	25.47	1.38	中央	水平	-1	1.7	23.14	1.40
側面	水平	-1.2	1.7	25.65	1.32	中央	水平	-1.2	1.7	24.76	1.38
側面	斜め	-0.8	1.9	27.63	1.40	中央	斜め	-0.8	1.9	27.78	1.42
側面	斜め	-1	1.9	24.95	1.39	中央	斜め	-1	1.9	21.47	1.43
側面	斜め	-1.2	1.9	25.20	1.34	中央	斜め	-1.2	1.9	21.97	1.39
側面	斜め	-0.8	2.1	28.51	1.37	中央	斜め	-0.8	2.1	28.03	1.42
側面	斜め	-1	2.1	22.34	1.34	中央	斜め	-1	2.1	22.79	1.43
側面	斜め	-1.2	2.1	25.78	1.38	中央	斜め	-1.2	2.1	20.63	1.47
側面	直上	-0.25	2.45	27.96	1.37	中央	直上	-0.25	2.45	27.83	1.43
側面	直上	-0.4	2.45	27.72	1.45	中央	直上	-0.4	2.45	28.38	1.39
側面	直上	-0.55	2.45	26.50	1.43	中央	直上	-0.55	2.45	27.74	1.42
側面	直上	-0.7	2.45	25.85	1.43	中央	直上	-0.7	2.45	27.38	1.43
側面	斜め	-0.85	2.45	27.41	1.41	中央	斜め	-0.85	2.45	26.85	1.42
側面	斜め	-1	2.45	24.38	1.40	中央	斜め	-1	2.45	22.73	1.47
側面	斜め	-1.15	2.45	23.23	1.48	中央	斜め	-1.15	2.45	20.91	1.47
側面	直上	-0.25	2.65	27.83	1.39	中央	直上	-0.25	2.65	28.48	1.41
側面	直上	-0.4	2.65	27.95	1.39	中央	直上	-0.4	2.65	27.49	1.37
側面	直上	-0.55	2.65	28.13	1.37	中央	直上	-0.55	2.65	25.57	1.42
側面	直上	-0.7	2.65	25.17	1.43	中央	直上	-0.7	2.65	25.61	1.43
側面	斜め	-0.85	2.65	25.72	1.46	中央	斜め	-0.85	2.65	23.87	1.46
側面	斜め	-1	2.65	25.33	1.43	中央	斜め	-1	2.65	27.13	1.39
側面	直上	-0.25	2.85	26.87	1.42	中央	直上	-0.25	2.85	27.84	1.39
側面	直上	-0.4	2.85	27.56	1.41	中央	直上	-0.4	2.85	27.52	1.43
側面	直上	-0.55	2.85	26.59	1.39	中央	直上	-0.55	2.85	26.22	1.49
側面	直上	-0.7	2.85	27.33	1.34	中央	直上	-0.7	2.85	24.66	1.45
側面	斜め	-0.85	2.85	26.79	1.40	中央	斜め	-0.85	2.85	26.75	1.42
側面	斜め	-1	2.85	24.32	1.39	中央	斜め	-1	2.85	27.20	1.40

付表 2-27　GX-70 のコアサンプリングによる計測結果

断面	エリア -	座標		含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m³)	断面	エリア	座標		含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m³)
		X	Y					X	Y		
側面	底面	-0.7	0.1	16.50	1.44	中央	底面	-0.7	0.1	18.73	1.47
側面	底面	-0.8	0.1	17.86	1.39	中央	底面	-0.8	0.1	18.80	1.54
側面	底面	-0.9	0.1	19.26	1.57	中央	底面	-0.9	0.1	20.18	1.51
側面	底面	-0.8	0.3	18.08	1.37	中央	底面	-0.8	0.3	18.50	1.52
側面	底面	-0.9	0.3	16.96	1.34	中央	底面	-0.9	0.3	18.72	1.51
側面	底面	-1	0.3	18.68	1.54	中央	底面	-1	0.3	18.80	1.53
側面	底面	-0.8	0.5	18.66	1.54	中央	底面	-0.8	0.5	19.36	1.52
側面	底面	-0.9	0.5	18.35	1.50	中央	底面	-0.9	0.5	19.62	1.55
側面	底面	-1	0.5	18.78	1.56	中央	底面	-1	0.5	18.55	1.54
側方	水平	-0.8	0.9	19.23	1.54	中央	水平	-0.8	0.9	19.11	1.55
側面	水平	-1	0.9	19.98	1.56	中央	水平	-1	0.9	19.41	1.53
側面	水平	-1.2	0.9	18.41	1.48	中央	水平	-1.2	0.9	19.02	1.61
側面	水平	-0.8	1.1	18.35	1.48	中央	水平	-0.8	1.1	18.44	1.45
側面	水平	-1	1.1	19.04	1.51	中央	水平	-1	1.1	21.16	1.51
側面	水平	-1.2	1.1	19.00	1.57	中央	水平	-1.2	1.1	19.34	1.50
側面	水平	-0.8	1.3	18.12	1.48	中央	水平	-0.8	1.3	18.96	1.50
側面	水平	-1	1.3	19.07	1.55	中央	水平	-1	1.3	20.23	1.50
側面	水平	-1.2	1.3	19.39	1.56	中央	水平	-1.2	1.3	18.99	1.49
側面	水平	-0.8	1.7	18.77	1.53	中央	水平	-0.8	1.7	19.11	1.53
側面	水平	-1	1.7	17.90	1.45	中央	水平	-1	1.7	19.68	1.54
側面	水平	-1.2	1.7	18.72	1.49	中央	水平	-1.2	1.7	18.90	1.51
側面	斜め	-0.8	1.9	18.35	1.47	中央	斜め	-0.8	1.9	19.22	1.52
側面	斜め	-1	1.9	18.87	1.42	中央	斜め	-1	1.9	17.00	1.43
側面	斜め	-1.2	1.9	18.94	1.52	中央	斜め	-1.2	1.9	19.20	1.54
側面	斜め	-0.8	2.1	19.02	1.54	中央	斜め	-0.8	2.1	20.37	1.50
側面	斜め	-1	2.1	18.59	1.53	中央	斜め	-1	2.1	18.35	1.45
側面	斜め	-1.2	2.1	18.95	1.51	中央	斜め	-1.2	2.1	19.38	1.54
側面	直上	-0.25	2.45	18.65	1.54	中央	直上	-0.25	2.45	18.79	1.51
側面	直上	-0.4	2.45	19.34	1.54	中央	直上	-0.4	2.45	18.45	1.52
側面	直上	-0.55	2.45	18.93	1.50	中央	直上	-0.55	2.45	19.11	1.53
側面	直上	-0.7	2.45	17.70	1.51	中央	直上	-0.7	2.45	18.42	1.52
側面	斜め	-0.85	2.45	18.27	1.55	中央	斜め	-0.85	2.45	18.38	1.56
側面	斜め	-1	2.45	17.97	1.46	中央	斜め	-1	2.45	18.07	1.50
側面	斜め	-1.15	2.45	18.12	1.51	中央	斜め	-1.15	2.45	19.64	1.49
側面	直上	-0.25	2.65	17.96	1.49	中央	直上	-0.25	2.65	18.92	1.57
側面	直上	-0.4	2.65	19.12	1.51	中央	直上	-0.4	2.65	18.52	1.56
側面	直上	-0.55	2.65	18.52	1.45	中央	直上	-0.55	2.65	18.77	1.54
側面	直上	-0.7	2.65	17.87	1.41	中央	直上	-0.7	2.65	17.81	1.51
側面	斜め	-0.85	2.65	19.03	1.46	中央	斜め	-0.85	2.65	16.45	1.49
側面	斜め	-1	2.65	17.77	1.43	中央	斜め	-1	2.65	18.34	1.49
側面	直上	-0.25	2.85	17.20	1.42	中央	直上	-0.25	2.85	19.15	1.53
側面	直上	-0.4	2.85	17.71	1.42	中央	直上	-0.4	2.85	17.88	1.44
側面	直上	-0.55	2.85	18.07	1.44	中央	直上	-0.55	2.85	18.50	1.45
側面	直上	-0.7	2.85	18.25	1.44	中央	直上	-0.7	2.85	16.68	1.49
側面	斜め	-0.85	2.85	18.83	1.41	中央	斜め	-0.85	2.85	18.54	1.40
側面	斜め	-1	2.85	18.08	1.43	中央	斜め	-1	2.85	18.44	1.43

3.6 吹付け試験 2 の施工品質に係る計測項目

吹付け試験 2 における出来形重量やリバウンド回収量などの施工品質に係る計測項目について付表 2-28 に示す

付表 2-28　吹付け試験 2 の施工品質に係る計測データ

ケース	材料投入量 (kg)	出来形重量 (kg)	リバウンド回収量 (kg)	ロス量 (kg)	ダマ除去量 (kg)	吹付け時間 (hr)	吹付け速度 (m^3/hr)	エアー量
V1-70	6322	3836	1112	677	697	1.45	1.51	12.0, 13.0
V1-50	7851	4186	2482	525	658	1.53	1.53	12.0

付録３　3.掘削影響領域の連続性等に関わる調査技術開発

目次

3.1　EDZ(Excavastion damaged Zone）の物理特性の取得 ..... 付 3-1
(1)　試験装置 ..... 付 3-1
(2)　弾性波の速度解析 ..... 付 3-2
3.2　EdZ(Excavation disturbed Zone)の連続性調査技術の高度化 ..... 付 3-6
(1)　ボーリング掘削 ..... 付 3-6
(2)　ボーリングコアの観察 ..... 付 3-8
(3)　BTV 観察 ..... 付 3-17
(4)　孔径検層 ..... 付 3-27
(5)　トモグラフィ調査 ..... 付 3-28
1)　使用機器 ..... 付 3-28
2)　座標変換 ..... 付 3-29
3)　波形データ処理と走時の読み取り ..... 付 3-33
4)　弾性波トモグラフィの逆解析 ..... 付 3-35

3.1　EDZ(Excavastion damaged Zone) の物理特性の取得

(1)　試験装置

弾性波測定 (本文図 3.3-9　超音波探査測定概略図)、比抵抗測定 (図 3.3-12　比抵抗測定概念) に使用した試験装置の一覧を付表 3-1 に示す。

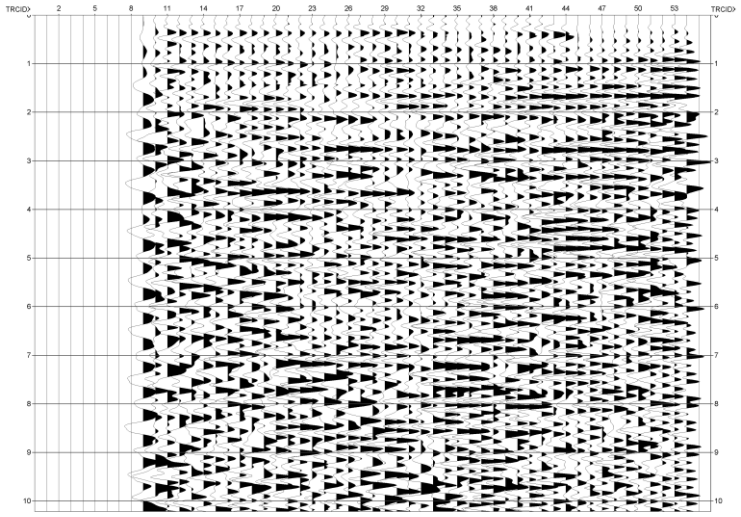
付表 3-1　測定機器一覧表

超音波探査装置			
種別	名称・型式・製造元	主な仕様	数量
地震探鉱機	DAQ Link 4 Seismic Source Co 社製	Input 24ch, 24 bit sigma delta converter Preamp Gain　x1 x4 x16, SamplingRate 8, 4,2,1,1/2,1/4,1/8,1/16,1/32,1/64ms	1
発受振素子	圧電振動板 村田製作所社製	共振周波数 4.6KHz	20
減衰機	DAT-2001 大和探査技術㈱社製	1/5, 1/10, 1/15, 1/20	1
波形増幅器	MN180BT TTMOW 社製	+/- 5V 1W 送信	1
波形発生器	WAVE FACTORY 1946B NF 回路社製	2ch 任意波形（サイン波,矩形波,スイープ波）発生、周波数 0.01uHz-15MHz	1
測定制御・記録 PC	Toughbook Panasonic 社製	13.3inch Display with Windows7 OS Interface USB3.0x3, Ethernet, RS-232C, PC-Card	1
カメラ	ITC-JK401(F) I.T.S 社製	約 200 万画素：解像度 1920×1080（1080P） アナログハイビジョン方式 視野角 約 77 度、レンズ単焦点 3.6mm 外形 30mm x 30mm サイズ	3
レコーダー	SHDVR-XVR4C-X1	アナログハイビジョン方式 x4 カメラ同時レコーダー	1
比抵抗探査装置			
種別	名称・型式・製造元	主な仕様	数量
電気探査装置	McOHM Profiler-4 応用地質性	4 極同時測定、送信電流 120mA * 400V（最大） Scanner 使用による最大電極数 288 電極配置（ポール・ポール,ポール・ダイポール,ダイポール・ダイポール等）に対応, 高精度 24 ビットＡ/Ｄコンバータ、OS,WindowsＸＰ	1
	McOhm-Profiler4-Scanner	外部 64 極（内部 32 極）	1
電極			16

(2)　弾性波の速度解析

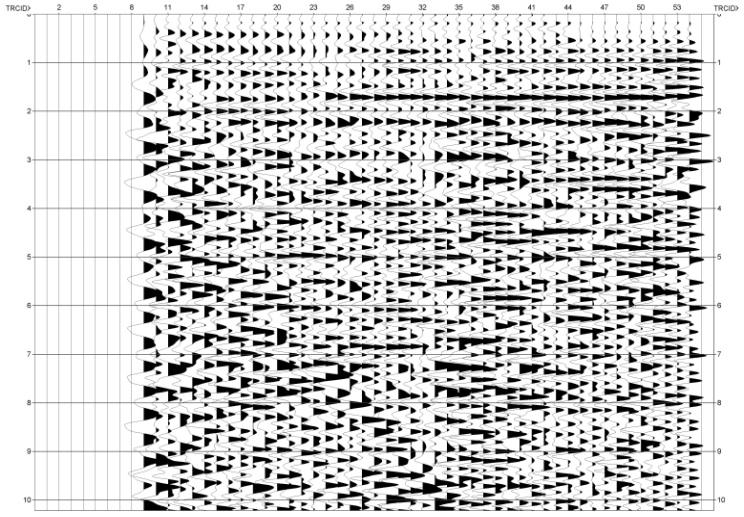
一様な速度を仮定して実施した定速度重合の時間断面図を付図 3-1～付図 3-11 に示す（本文図 3.3 19　反射時間断面図）。

RMSV=400m/s



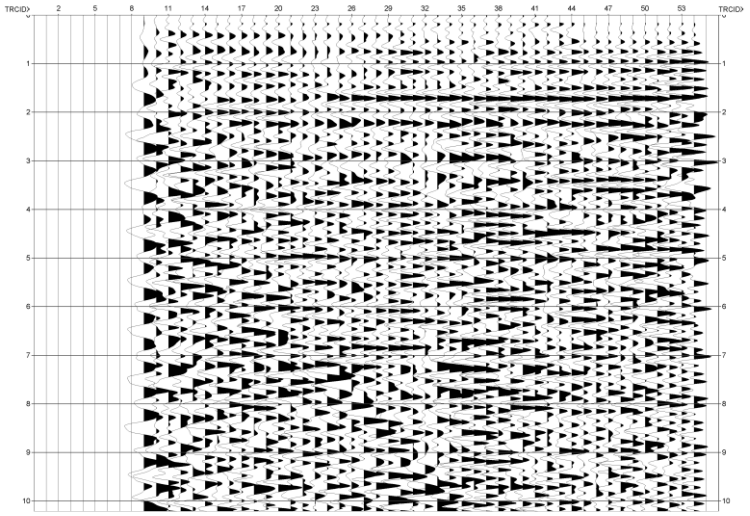
付図 3-1　定速度重合（RMSV400m/s）の時間断面図

RMSV=450m/s



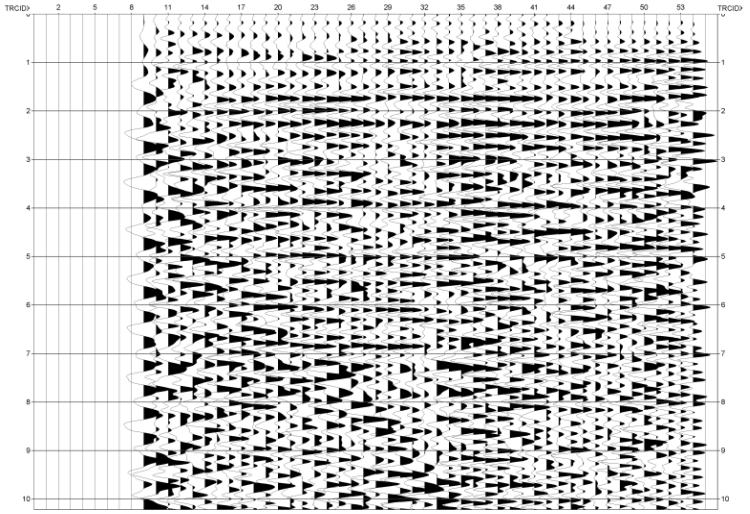
付図 3-2　定速度重合（RMSV450m/s）の時間断面図

RMSV=500m/s



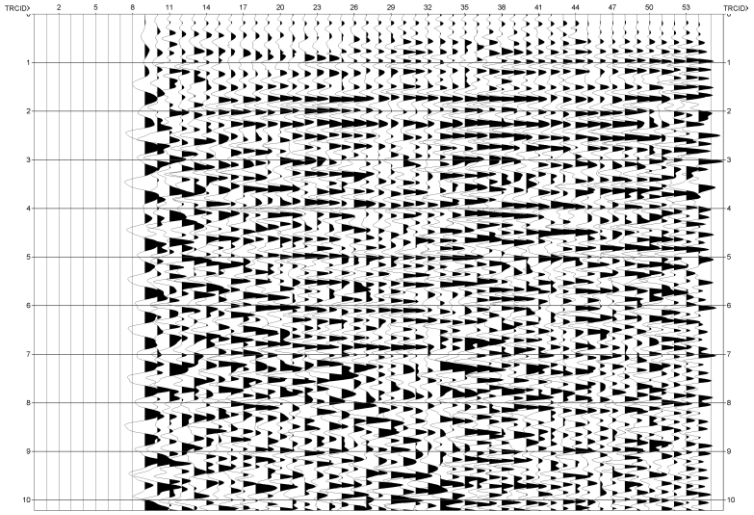
付図 3-3　定速度重合（RMSV500m/s）の時間断面図

RMSV=550m/s



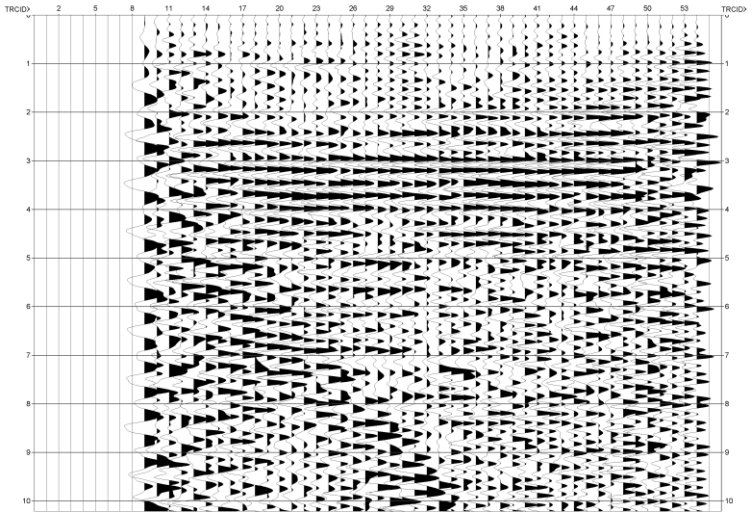
付図 3-4　定速度重合（RMSV550m/s）の時間断面図

RMSV=600m/s



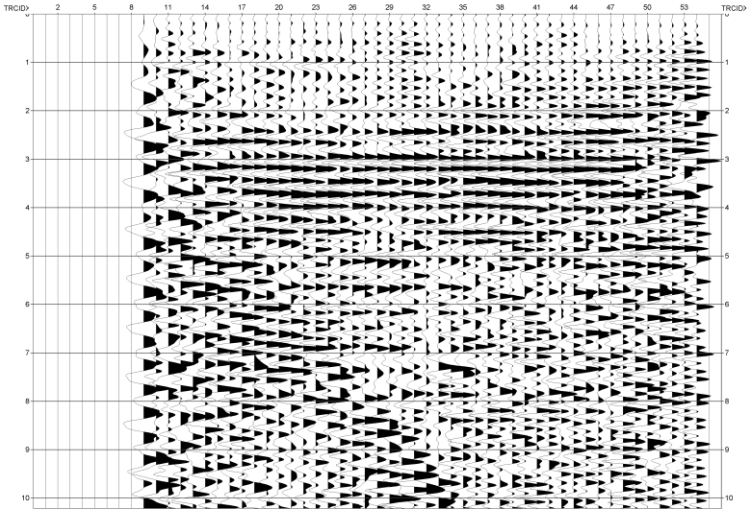
付図 3-5　定速度重合（RMSV600m/s）の時間断面図

RMSV=700m/s



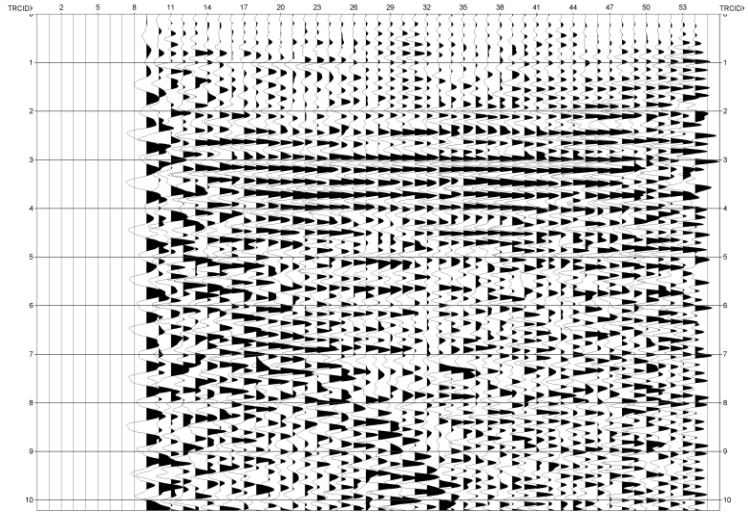
付図 3-6　定速度重合（RMSV700m/s）の時間断面図

RMSV=800m/s



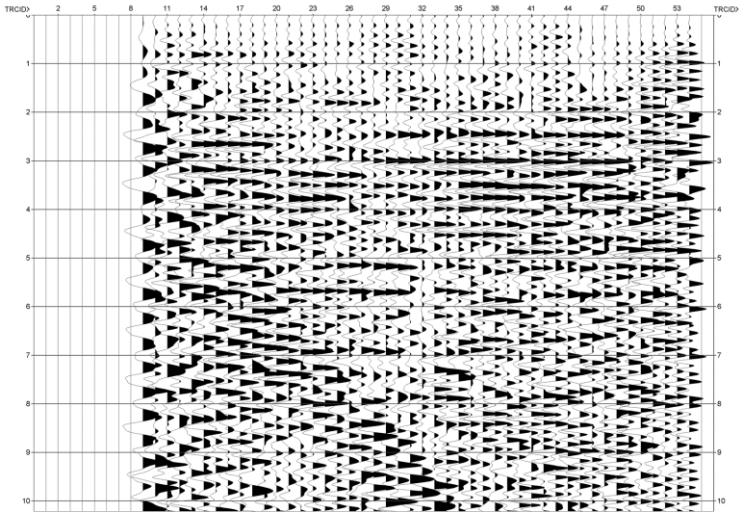
付図 3-7　定速度重合（RMSV800m/s）の時間断面図

RMSV=900m/s



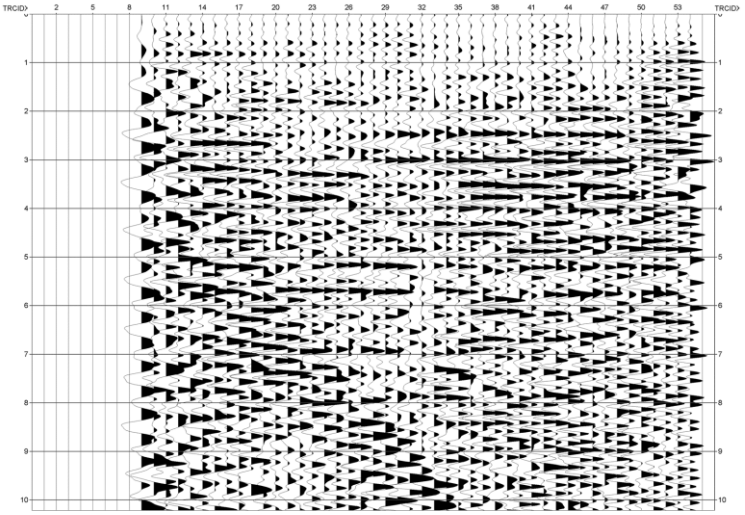
付図 3-8　定速度重合（RMSV900m/s）の時間断面図

RMSV=1000m/s



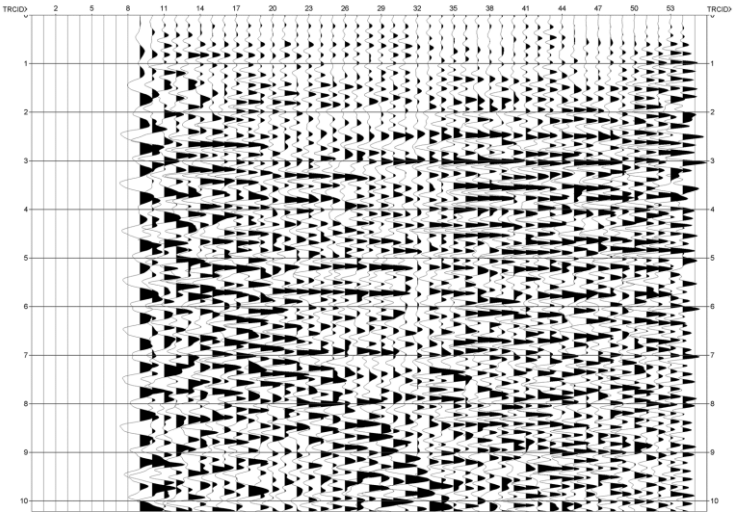
付図 3-9　定速度重合（RMSV1000m/s）の時間断面図

RMSV=1100m/s



付図 3-10　定速度重合（RMSV1100m/s）の時間断面図

RMSV=1200m/s



付図 3-11　定速度重合（RMSV1200m/s）の時間断面図

3.2 EdZ(Excavation disturbed Zne)の連続性調査技術の高度化

(1) ボーリング掘削

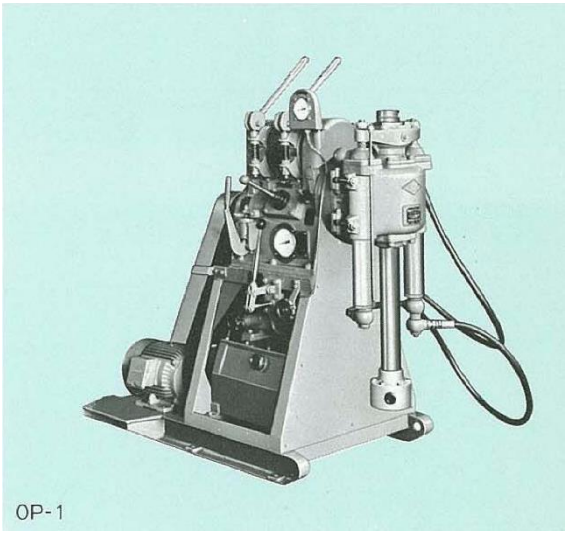
ボーリング掘削孔は 3 本、孔径 86mm、鉛直下向き、削孔長 11.00m、オールコアボーリングとし、路盤コンクリート面から岩盤到達深度（1m 程度）まで外径 86mm に調整した NQ ビット、岩盤到達後は 86mm コアチューブを用いて約 1m 削孔する毎にコアチューブを抜管し、コアを回収して削孔した。深度 11.00m（余掘り 1.00m 含む）まで掘進した後、送水による孔内洗浄を行ってスライムを除去し検尺により削孔長 11.00m を確認して掘り止めとした。削孔中は、支障をきたす孔壁の崩壊や湧水・逸水・溶存ガスの噴出等の発生はない。ボーリングの主要資機材を付表 3-2 に示し、ボーリングマシンの仕様および図を付表 3-3 と付図 3-12 に示し、ボーリングポンプの仕様と付図を付表 3-4 と付図 3-13 に示す。

付表 3-2　ボーリング主要資機材一覧表

名称	形式	仕様	数量	単位	機体寸法（mm）
試錐機	OP-1（鉱研工業㈱）	最大巻上げ能力 1.1t	1	台	L：1,325 × W：815 × H：1,210 380kg
同原動機	防爆型	15kW モーター	1	台	
試錐ポンプ	MG-5（鉱研工業㈱）	最大吐出量 70L/min	1	台	L：1,650 × W：470 × H：680 200kg
ロッド	AQ		1	式	
ビッド	NQ	外径 86mm に調整	1	式	
コアチューブ	86mm	コア径 70mm	1	台	
水中ポンプ		2” 100V	1	台	
ホース類	デリバリーホース	2” 高圧ホース	1	本	
ホース類	サクションホース	1” 低圧ホース	1	本	
足場用鋼材			1	式	
止め具			1	式	

表 3-3　ボーリングマシンの仕様表

型式	単位	OP-1
掘進能力	m	150
スピンドル回単数	rpm	150　300　600
スピンドル内径	mm	48
スピンドルストローク	mm	400
トルク	kg・m	24
スラスト	kg	押し下げ　1,250 押し上げ　1,600
巻上能力	kg	1,100
機体寸法（L×W ×H）	mm	1,325 × 815 × 1,210
重量（除原動機）	kg	380
原動機	kW・P PS	モーター　3.7－5.5－4 エンジン　5－7.5



付図 3-12　ボーリングマシン

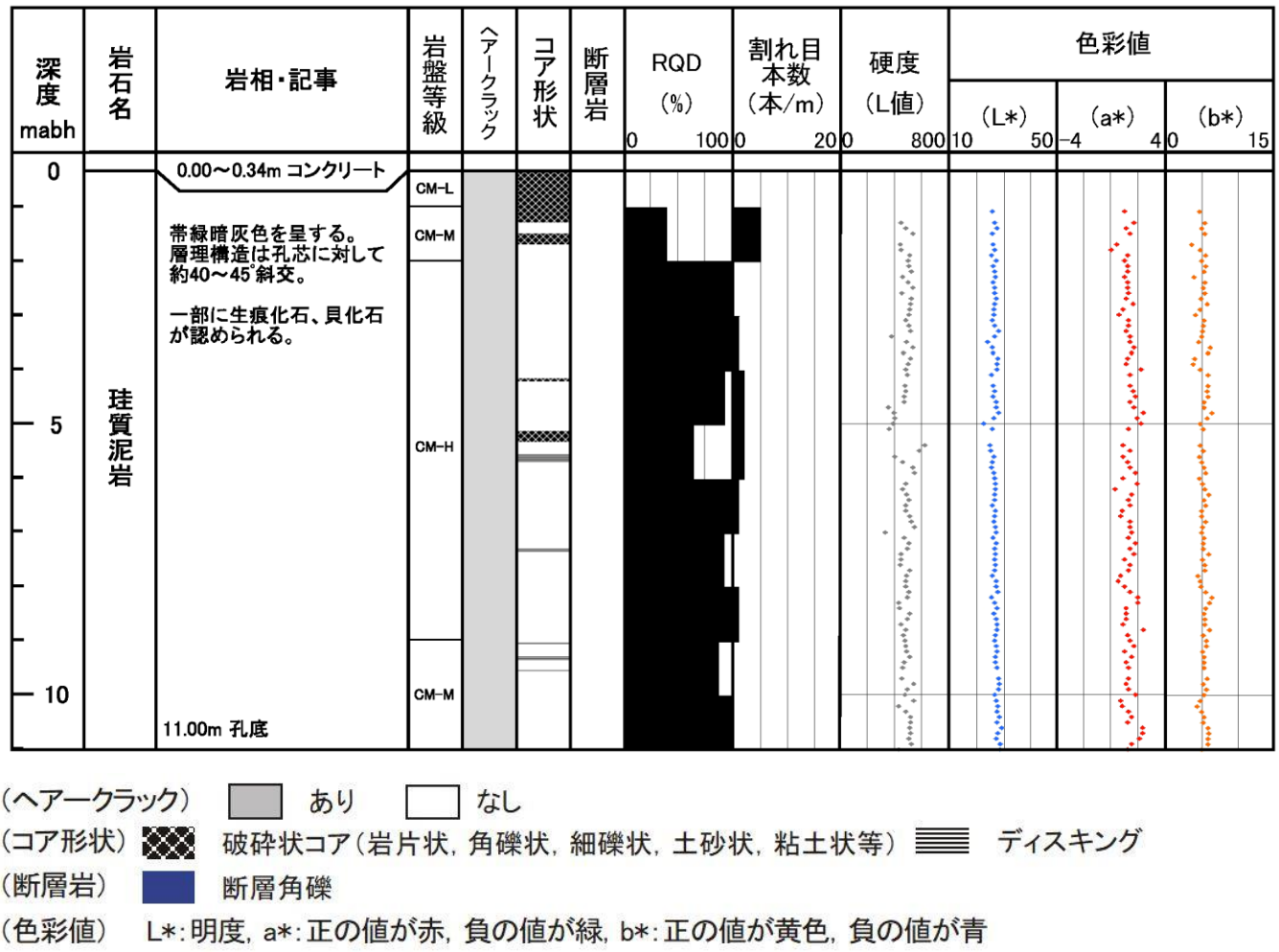
付表 3-4　ボーリングポンプの仕様表

型式	単位	MG-5		
方式		短筒複動ピストンポンプ		
ピストン径	mm	45	52	68
吐出量	L/min	28	40	70
吐出圧力	MPa	6.0	4.0	2.5
ストローク長	mm	60		
ストローク数	min-1	165		
吸入口径	mm（in）	38A（1-1/2B）		
吐出口径	mm（in）	32A（1-1/4B）		
機体寸法（L×W×H）	mm	1,650 × 470 × 680		
質量	kg	200		
原動機	kW/PS	3.7/5～7		

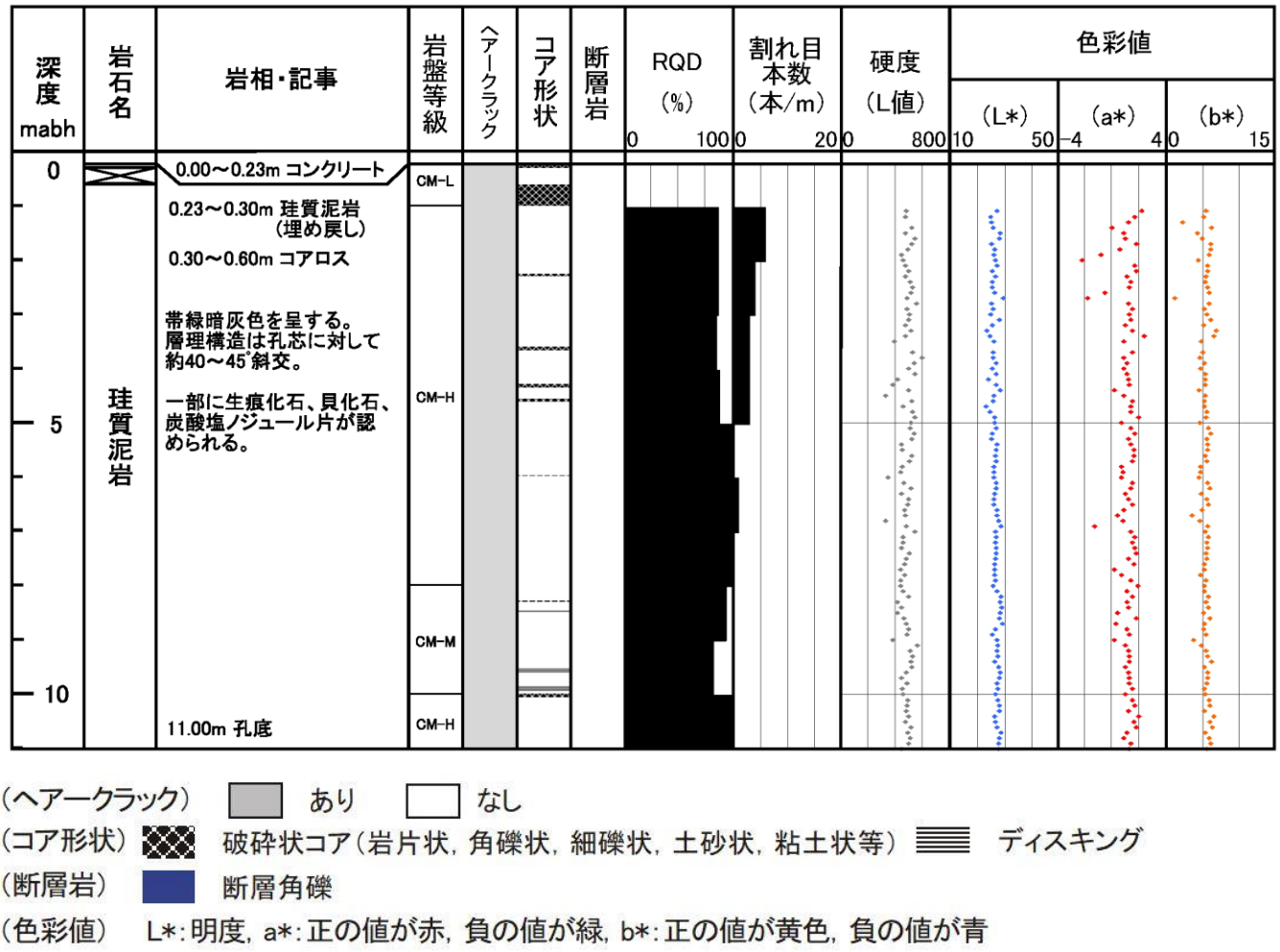
付図 3-13　ボーリングポンプ

(2)　ボーリングコアの観察

EDZ の連続性調査技術の高度化に資するボーリング孔についてコア観察の結果を取りまとめた総合柱状図を付図 3-14～付図 3-16 に示し、割れ目リスト一覧を付表 3-5～付表 3-7 に示す。



付図 3-14　T-1 孔総合柱状図



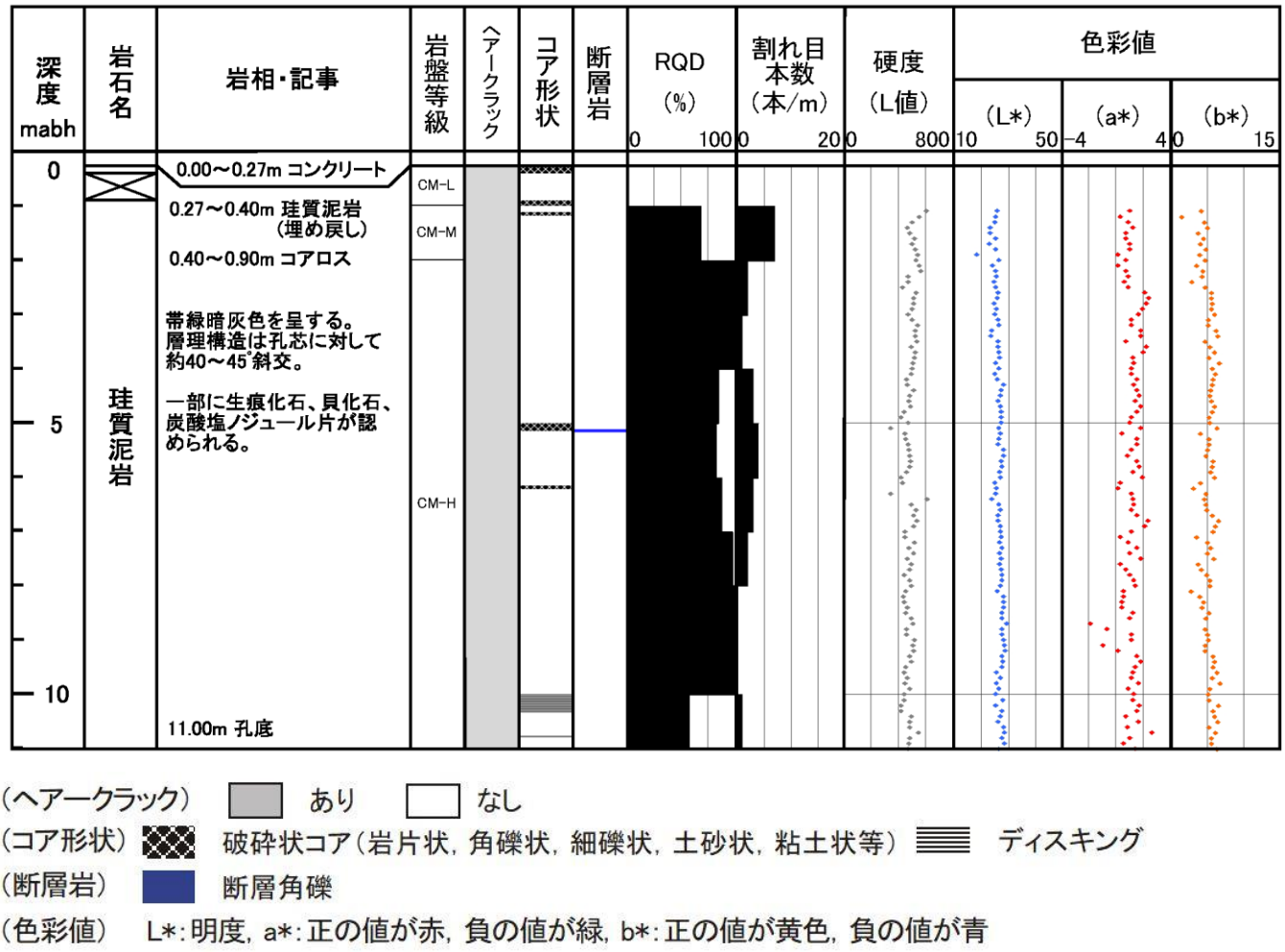
(ヘアークラック) あり なし

(コア形状) 破砕状コア(岩片状, 角礫状, 細礫状, 土砂状, 粘土状等) ディスキング

(断層岩) 断層角礫

(色彩値) L*:明度, a*:正の値が赤, 負の値が緑, b*:正の値が黄色, 負の値が青

付図 3-15　T-2 孔総合柱状図



（ヘアークラック） あり なし

（コア形状） 破砕状コア（岩片状，角礫状，細礫状，土砂状，粘土状等） ディスキング

（断層岩） 断層角礫

（色彩値） L*：明度，a*：正の値が赤，負の値が緑，b*：正の値が黄色，負の値が青

付図 3-16　T-3 孔総合柱状図

付表 3-5　T-1 孔の割れ目リスト一覧表

割れ目番号	中央深度（mabh）	記載深度(mabh)		タイプ	層理面との関係	傾斜角度	割目面の特徴	断層岩	成因
		上端	下端						
001-1	1.32	1.30	1.33	f	Pp	30	- , - , -	-	T
001-2	1.38	1.36	1.39	f	Pp	30	- , - , -	-	T
001-3	1.39	1.37	1.40	f	Pp	30	- , - , -	-	T
001-4	1.51	1.50	1.52	f	Pp	20	- , - , -	-	T
001-5	1.93	1.92	1.93	f	Pp	10	- , - , -	-	T
003-1	3.31	3.28	3.34	f	Pp	55	SS , SL(55) , ST(235)	-	S
004-1	4.20	4.17	4.23	f	Pp	55	SS , SL(115) , ST(295)	-	S
004-2	4.49	4.47	4.51	f	Pp	40	SS , - , ST(320)	-	S
005-1	5.67	5.62	5.72	f	Pp	70	SS , - , -	-	S
005-2	5.97	5.94	6.00	f	Pp	50	SS , - , -	-	S
006-1	6.04	6.00	6.07	f	Pp	55	SS , SL(145) , ST(325)	-	S
008-1	8.35	8.34	8.36	f	Pr	25	SS , - , -	-	S

付表 3-6　T-2 孔の割れ目リスト一覧表

割れ目番号	中央深度（mabh）	記載深度(mabh)		タイプ	層理面との関係	傾斜角度	割目面の特徴	断層岩	成因
001-1	1.19	1.17	1.21	f	Pp	60	SS , - , -	-	T,S
001-2	1.27	1.25	1.29	f	Pp	50	SS , - , -	-	T,S
001-3	1.48	1.46	1.49	f	Pp	45	SS , - , -	-	T,S
001-4	1.52	1.51	1.53	f	Pp	45	SS , - , -	-	T,S
001-5	1.77	1.74	1.80	f	Pp	55	SS , - , -	-	T,S
001-6	1.92	1.89	1.94	f	Pp	35	- , - , -	-	T
002-1	2.05	2.02	2.08	f	Pp	55	SS , - , -	-	T,S
002-2	2.13	2.11	2.15	f	Pp	50	SS , - , -	-	T,S
002-3	2.28	2.26	2.30	f	Pp	45	- , - , -	-	T
002-4	2.45	2.41	2.48	f	Pp	55	- , - , -	-	T
003-1	3.04	3.02	3.06	f	Pp	40	- , - , -	-	T
003-2	3.14	3.11	3.16	f	Pp	45	- , - , -	-	T
003-3	3.22	3.19	3.24	f	Pp	45	- , - , -	-	T
004-1	4.33	4.30	4.35	f	Pp	70	SS , SL(100) , -	-	S
004-2	4.84	4.82	4.86	f	Pp	50	- , - , -	-	T
004-3	4.98	4.95	5.00	f	Pp	45	- , - , -	-	T
006-1	6.30	6.25	6.34	f	Pp	60	SS , - , -	-	T,S

付表 3-7　T-3 孔の割れ目リスト一覧表

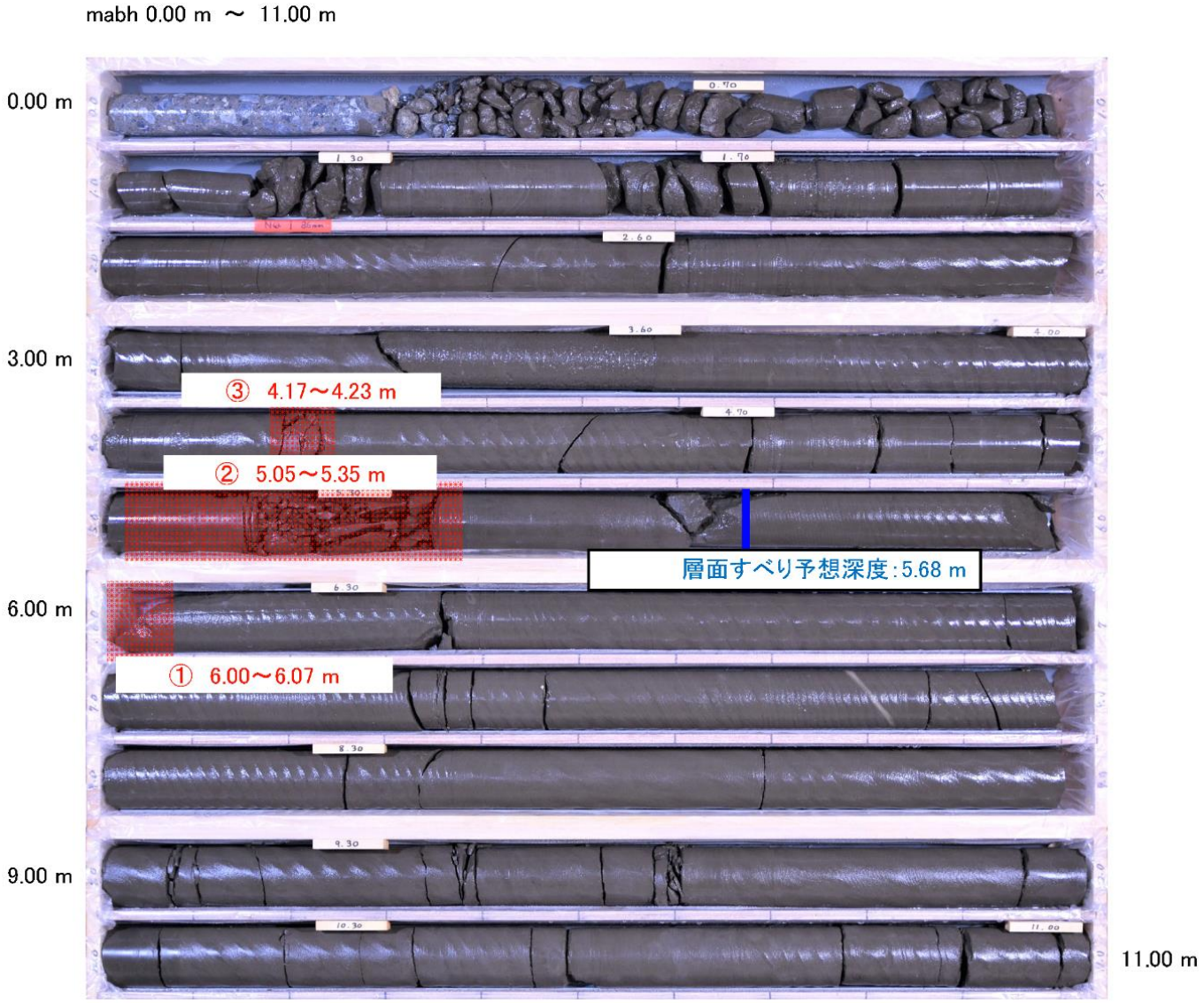
割れ目番号	中央深度（mabh）	記載深度(mabh)		タイプ	層理面との関係	傾斜角度	割目面の特徴	断層岩	成因
		上端	下端						
001-1	1.38	1.36	1.40	f	Pp	35	- , - , -	-	T
001-2	1.43	1.41	1.45	f	Pp	45	- , - , -	-	T
001-3	1.51	1.49	1.53	f	Pp	35	- , - , -	-	T
001-4	1.64	1.61	1.66	f	Pp	40	- , - , -	-	T
001-5	1.66	1.64	1.68	f	Pp	45	- , - , -	-	T
001-6	1.77	1.74	1.79	f	Pp	40	- , - , -	-	T
001-7	1.86	1.83	1.88	f	Pp	40	- , - , -	-	T
002-1	2.34	2.31	2.36	f	Pp	45	SS , - , -	-	T,S
002-2	2.45	2.43	2.46	f	Pp	40	SS , - , -	-	T,S
003-1	3.05	3.04	3.06	f	Pp	40	- , - , -	-	T
004-1	4.85	4.84	4.86	f	Pp	30	SS , SL(150) , ST(150)	-	S
004-2	4.90	4.87	4.93	o-f	Pp	60	SS , - , -	-	T,S
004-3	4.92	4.89	4.94	o-f	Pp	60	SS , - , -	-	T,S
005-1	5.05	5.02	5.07	f	U	50	SS , SL(95) , ST(275)	-	S
005-2	5.13	5.11	5.15	f	U	65	SS , - , -	f-bt	S
005-3	5.12	5.06	5.17	f	U	65	SS , SL(75) , ST(255)	f-bb	S
005-4	5.15	5.12	5.17	f	Pp	45	SS , SL(90) , ST(270)	-	S
006-1	6.41	6.34	6.48	f	Pp	70	SS , SL(145) , -	-	T,S
006-2	6.52	6.50	6.53	f	Pp	30	SS , SL(70) , -	-	T,S
006-3	6.58	6.54	6.62	f	Pp	70	SS , - , -	-	T,S
007-1	7.48	7.43	7.52	f	Pp	65	SS , - , -	-	T,S
007-2	7.50	7.45	7.55	f	Pp	65	SS , - , -	-	T,S
010-1	10.30	10.29	10.31	f	Pp	40	SS , SL(15) , -	-	T,S

＜ 記 載 深 度 ＞　朱字の記載深度は，コアの端に達していない割れ目の上下端の深度。
＜ タ イ プ ＞　f：非癒着割れ目，o-f：開口割れ目。
＜割れ目の特徴＞　SS：鏡肌，SL：条線のレーク角，ST：スリッケンステップから判定した上盤の移動方向。
＜ 成　　因 ＞　S：剪断割れ目，T：引張割れ目，T,S：複合割れ目。
＜ 断 層 岩 ＞　f-b：断層角礫を伴う割れ目。断層角礫は基質と岩片が未固結，破砕岩片の含有率が 30%以上。
f-bt：断層角礫の上端を構成する面。f-bb：断層角礫の下端を構成する面。
f-g：断層ガウジを伴う割れ目。断層ガウジは基質と岩片が未固結，破砕岩片の含有率が 30%以下。
f-gt：断層ガウジの上端を構成する面。f-gb：断層ガウジの下端を構成する面。
f-gs：固結した黒色細粒な断層破砕物質を伴う割れ目。

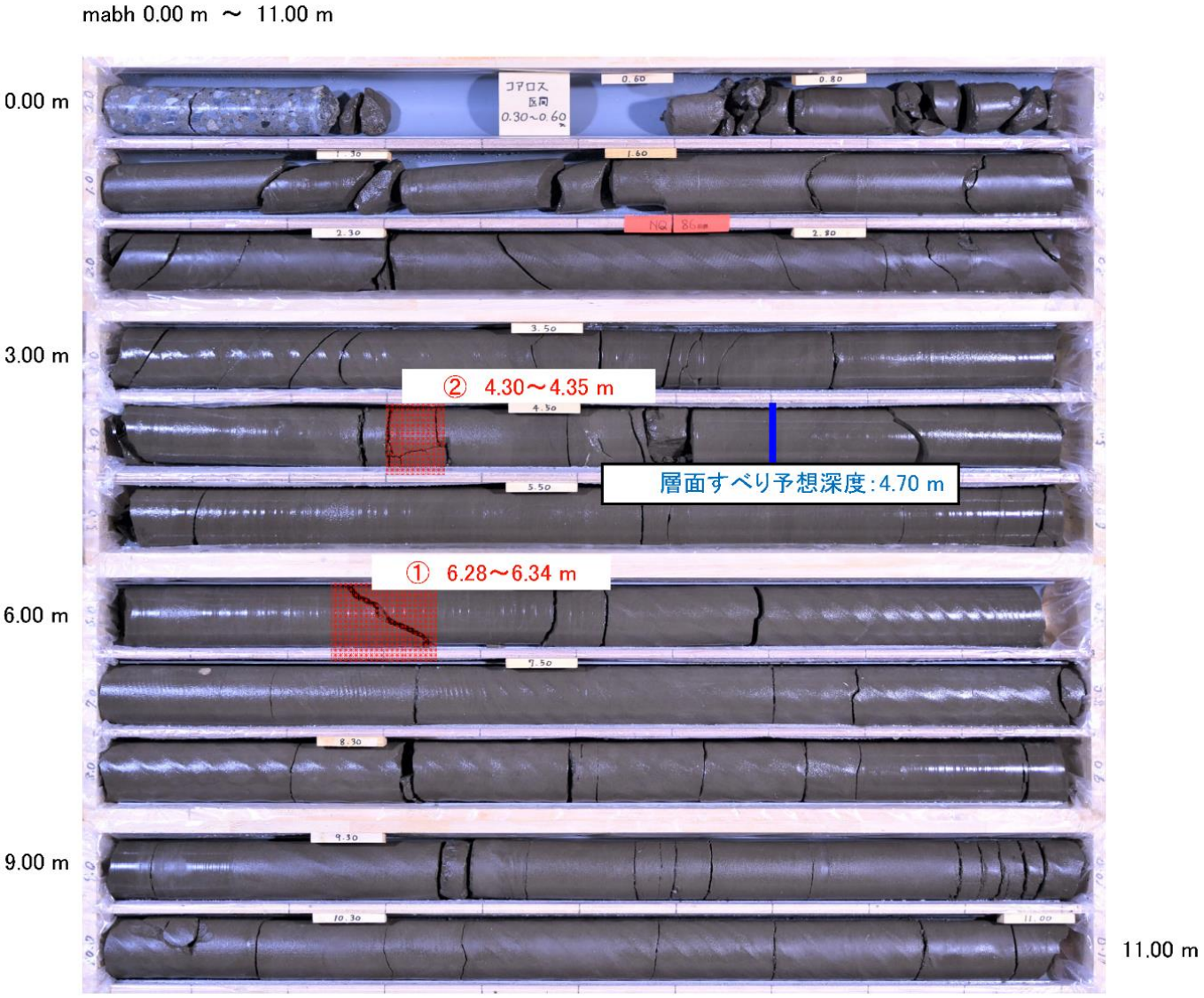
層面すべりの逢着予想深度とコア観察結果による割れ目深度の深度一覧表を付表 3-8 に示し、コア写真を付図 3-17～付図 3-19 に示す。

付表 3-8　層面すべりと主要割れ目区間の深度一覧表

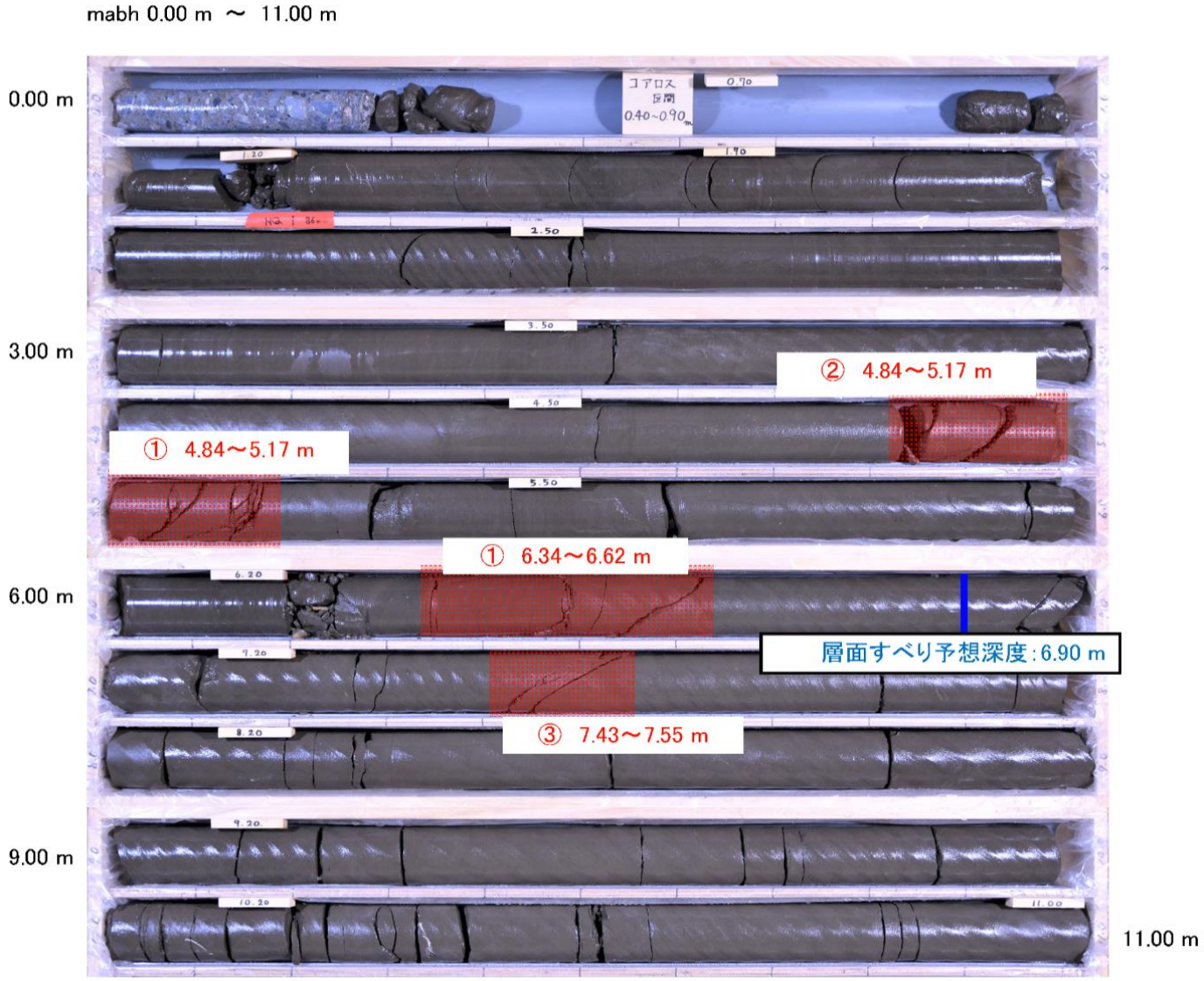
孔名	層面すべり予想深度 (mabh)	コア観察の主要な割れ目区間 (mabh)	BTV 観察結果による主要な割れ目区間 (mabh)
T-1	5.68	①4.17～4.23 ②5.05～5.35 ③6.00～6.07	4.050 付近 5.100～5.300
T-2	4.70	①4.30～4.35 ②6.28～6.34	3.550 付近
T-3	6.90	①4.84～5.17 ②6.34～6.62 ③7.43～7.55	4.800～5.000 6.350 付近 7.300 付近



付図 3-17　T-1 コア写真



付図 3-18　T-2 コア写真



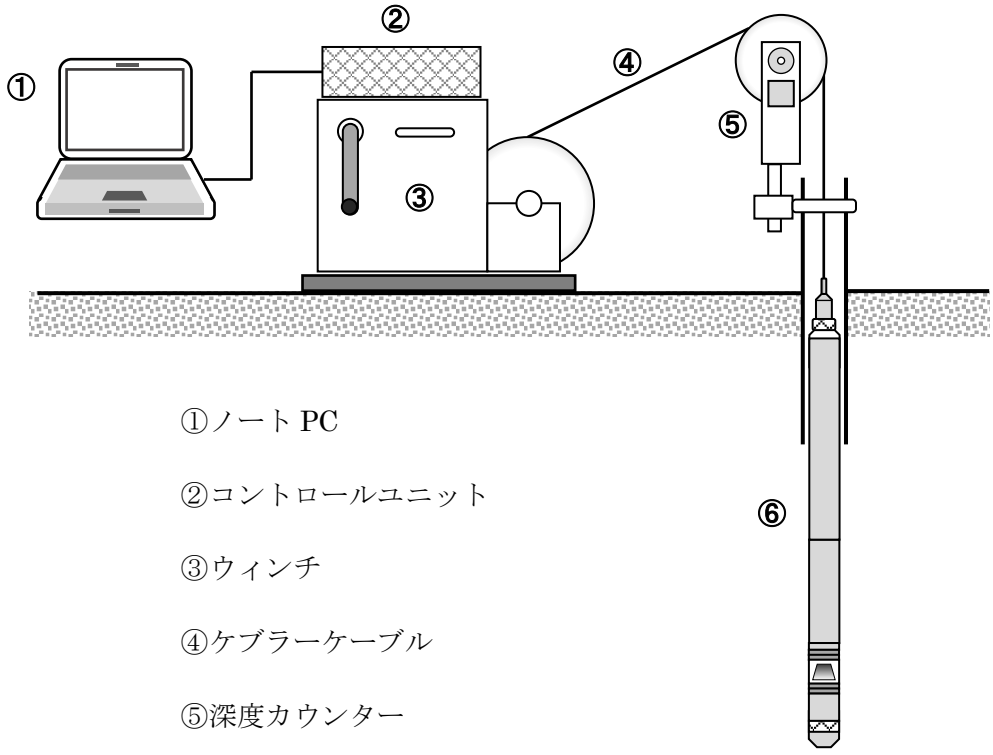
付図 3-19　T-3 コア写真

(3) BTV 観察

ボーリング 3 孔（T-1、T-2、T-3）でボアホールテレビカメラ（BTV）で撮影し、孔内の壁面展開画像によりき裂の有無を確認した。使用機器の一覧を付表 3-9 に示し、測定の概念を付図 3-20 に示し、孔壁の展開画像（本文中図 3.3-37　BTV 画像）を付図 3-21~付図 3-29 に示す。

付表 3-9　ボアホールテレビカメラ（BTV）使用機器一覧表

機器名および型式	機　能	仕　様	数量
ノート PC （ToughBookCF-19）	システム制御	BIP-V アプリケーション、展開画像作成・データ保存	1 台
コントロールユニット （ BIP-V、ODS-200U）	プローブ制御機能		1 台
ウインチ （MDW-200）	孔内プローブ昇降	300m 対応 5 芯ケブラーケーブル 有効計測長 300m プローブ φ50mm×L1.03m 計測可能口径 φ120mm 以下	1 台
展開画像専用プローブ （ BPR-553）	ボーリング孔壁撮影	CCD カメラ（NTSC 準拠） 円錐ミラー、LED 照明、磁気方位センサ、アクリル窓 φ48mm	1 台
深度定カウンター	ケーシング取り付け機構	0.25mm/Pulse	1 台



①ノート PC

②コントロールユニット

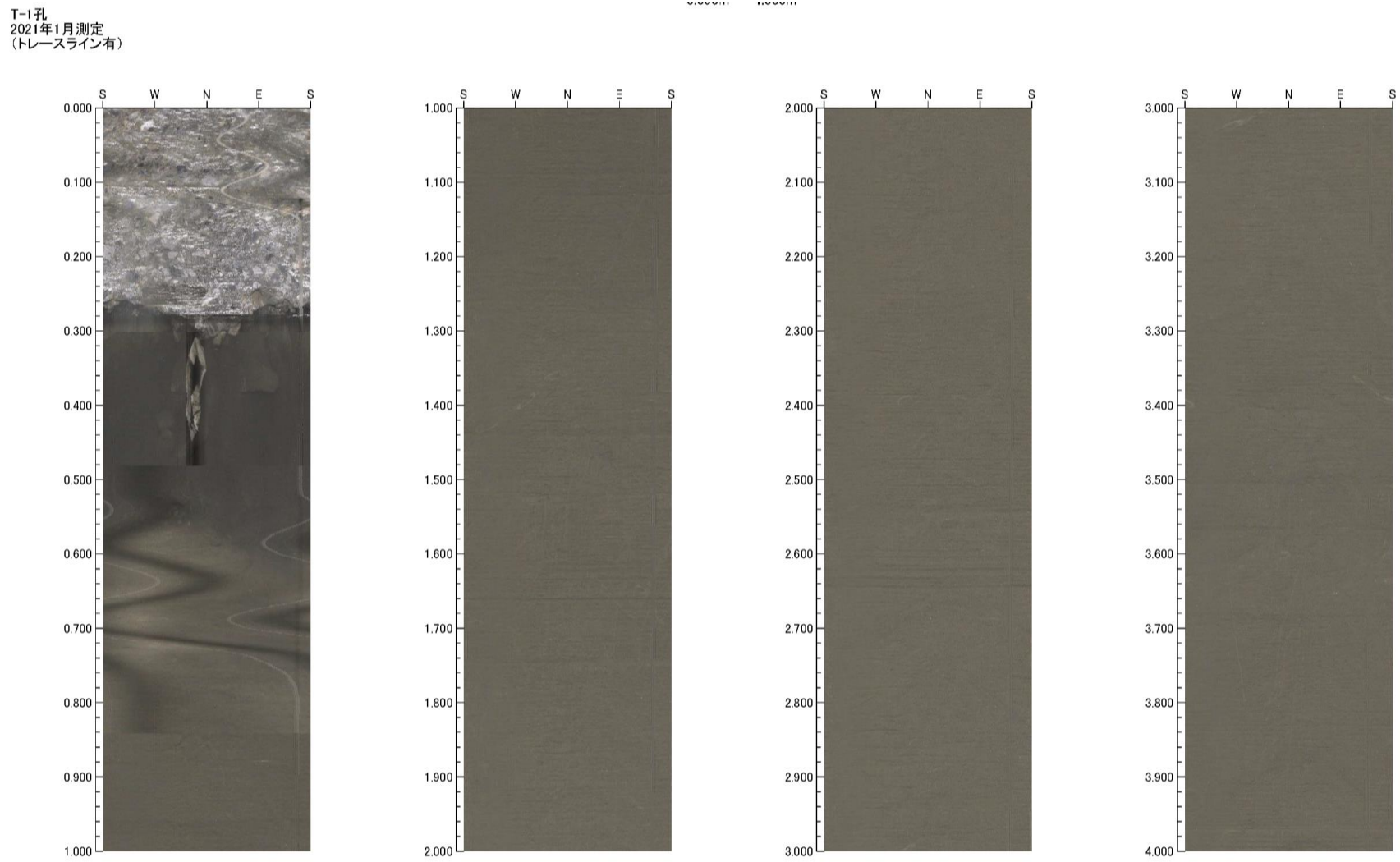
③ウィンチ

④ケブラーケーブル

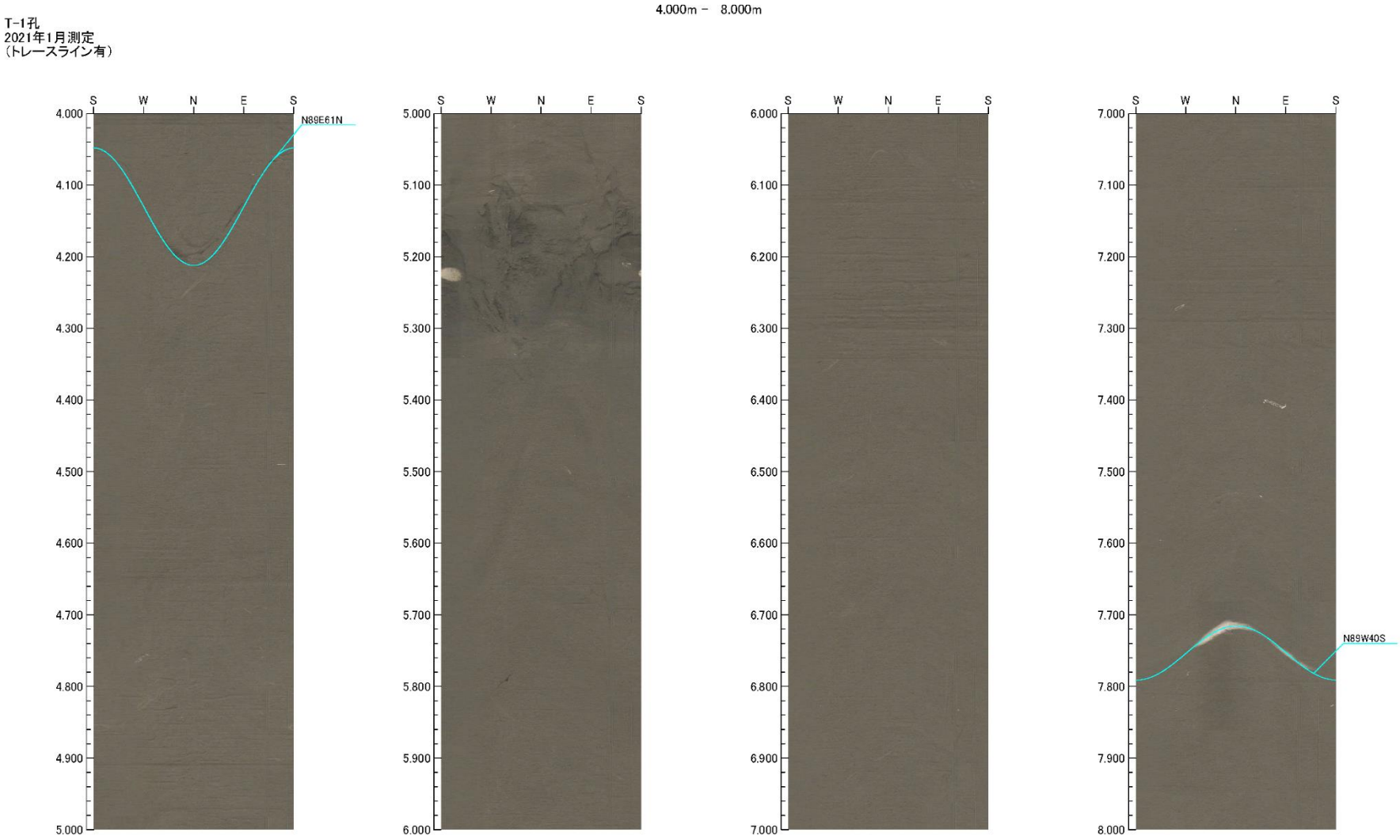
⑤深度カウンター

⑥プローブ

付図 3-20　BTV 測定概念図



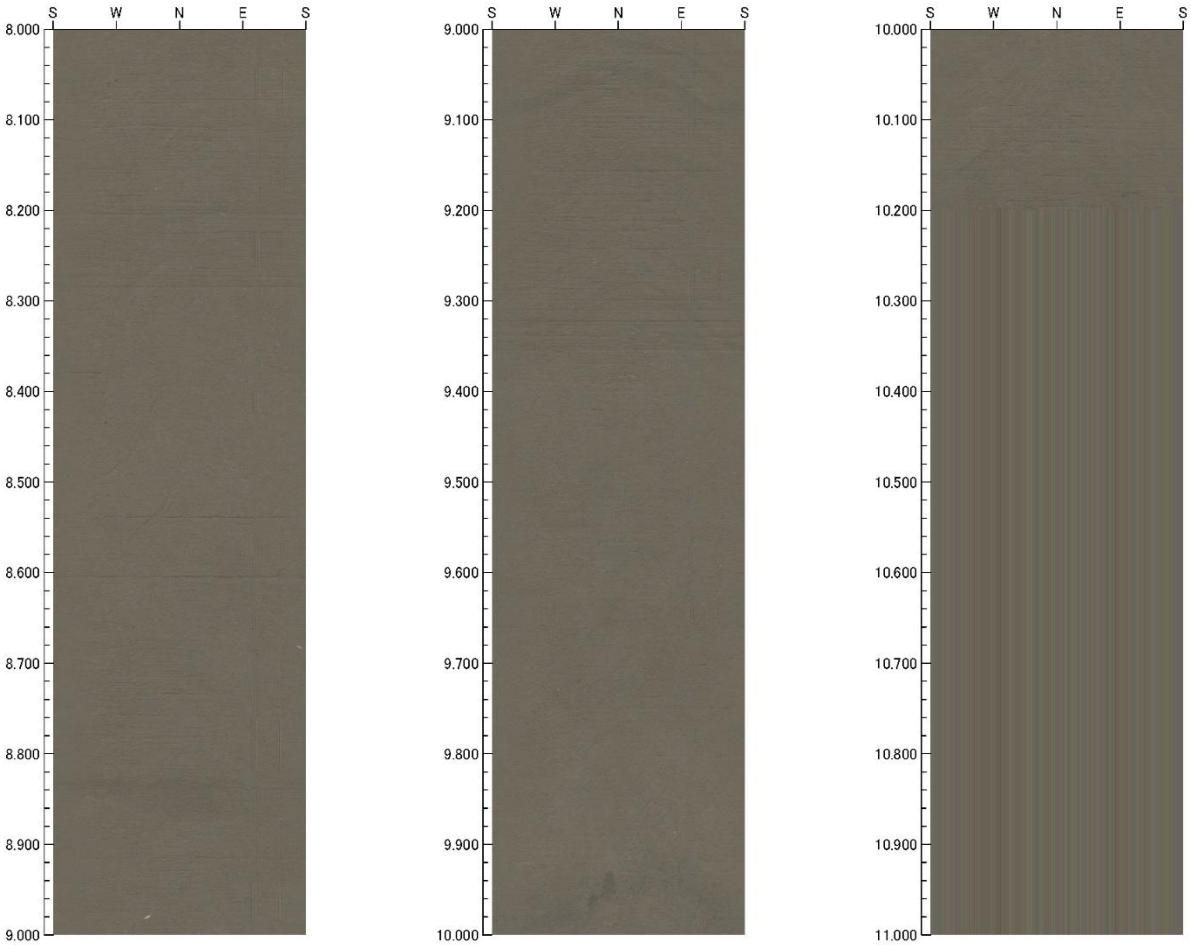
付図 3-21　T-1 孔壁の展開画像



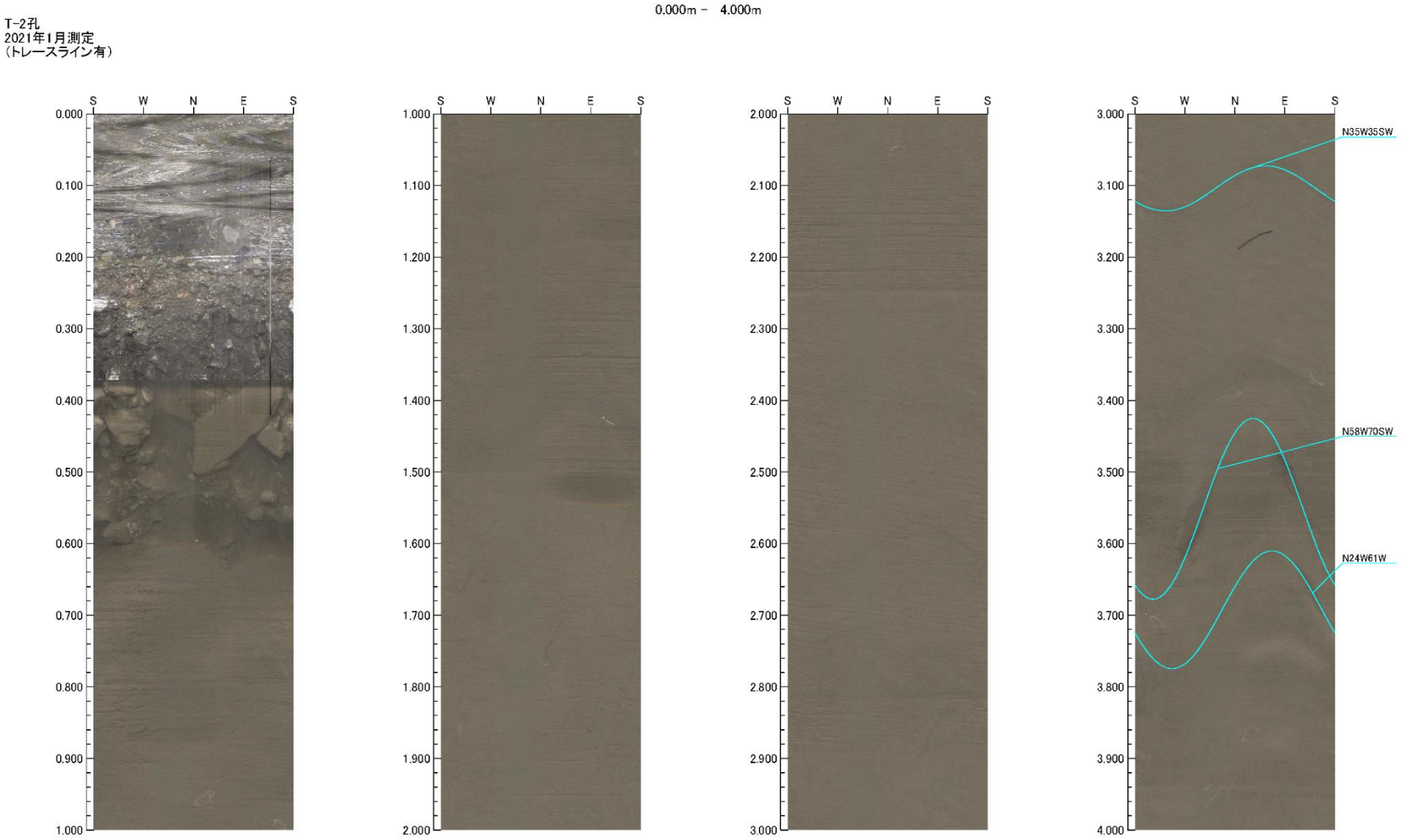
付図 3-22　T-1 孔壁の展開画像

T-1孔
2021年1月測定
（トレースライン有）

8.000m - 11.000m



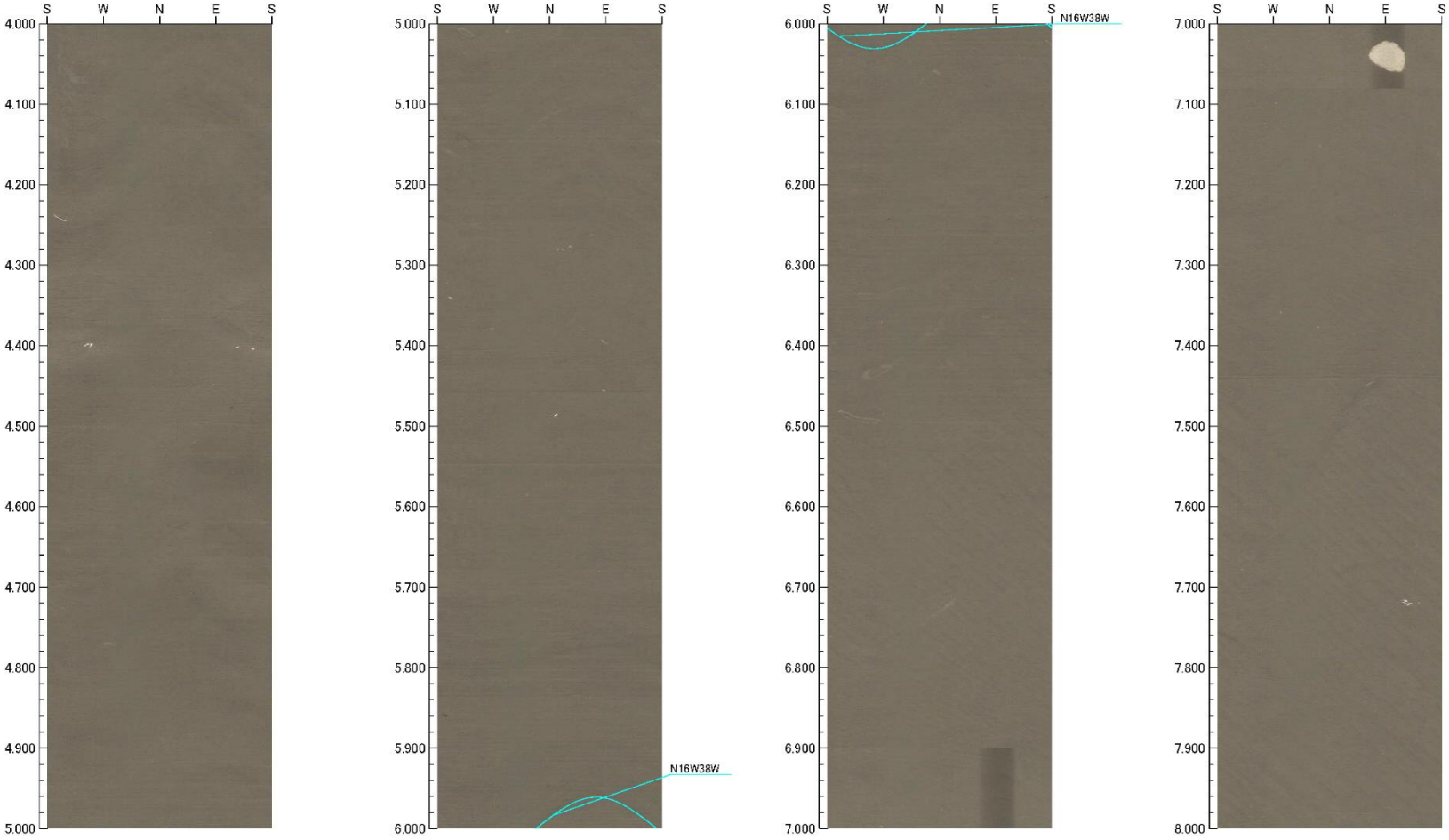
付図 3-23　T-1 孔壁の展開画像



付図 3-24　T-2 孔壁の展開画像

T-2孔
2021年1月測定
（トレースライン有）

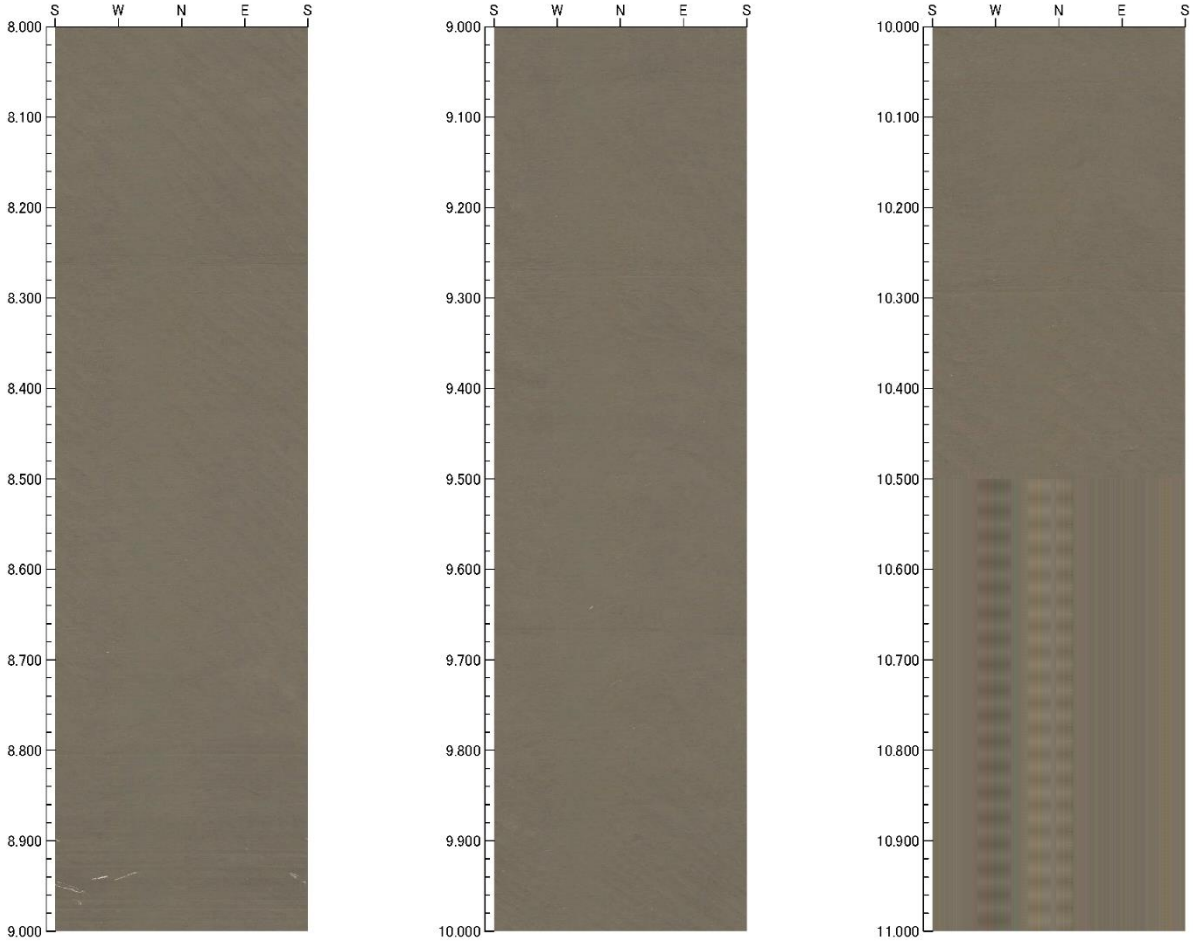
4.000m - 8.000m



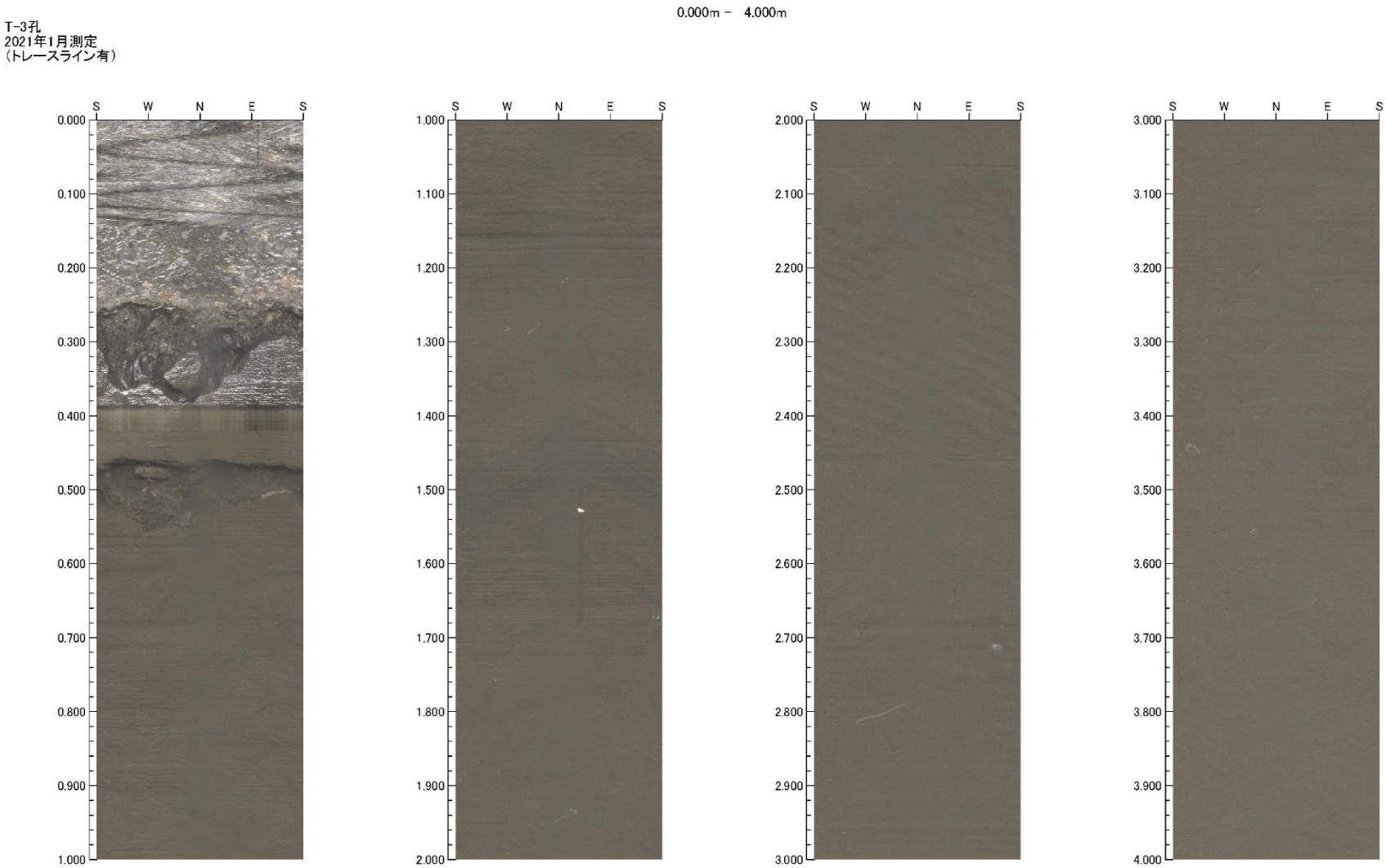
付図 3-25　T-2 孔壁の展開画像

T-2孔
2021年1月測定
（トレースライン有）

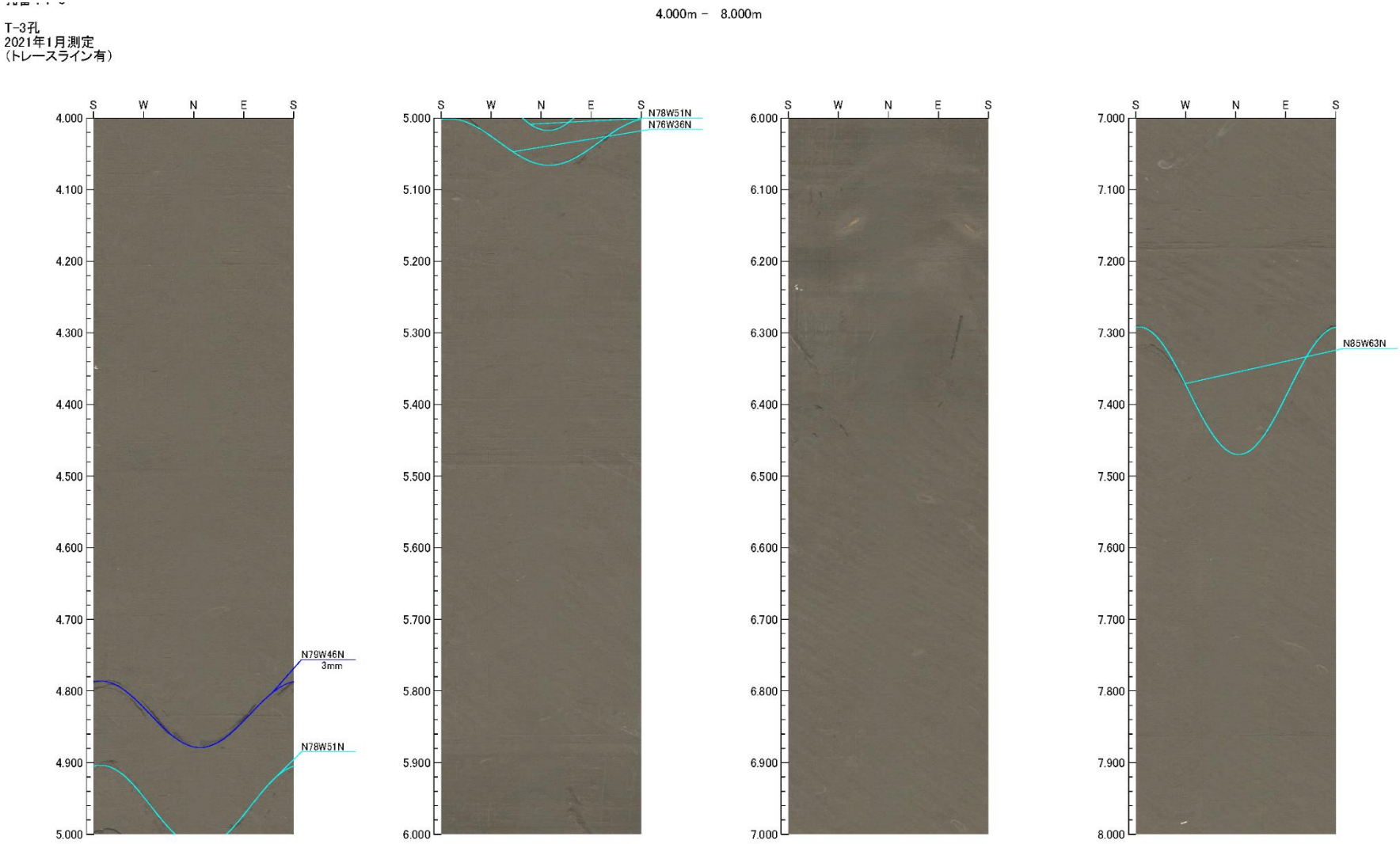
8.000m - 11.000m



付図 3-26　T-2 孔壁の展開画像



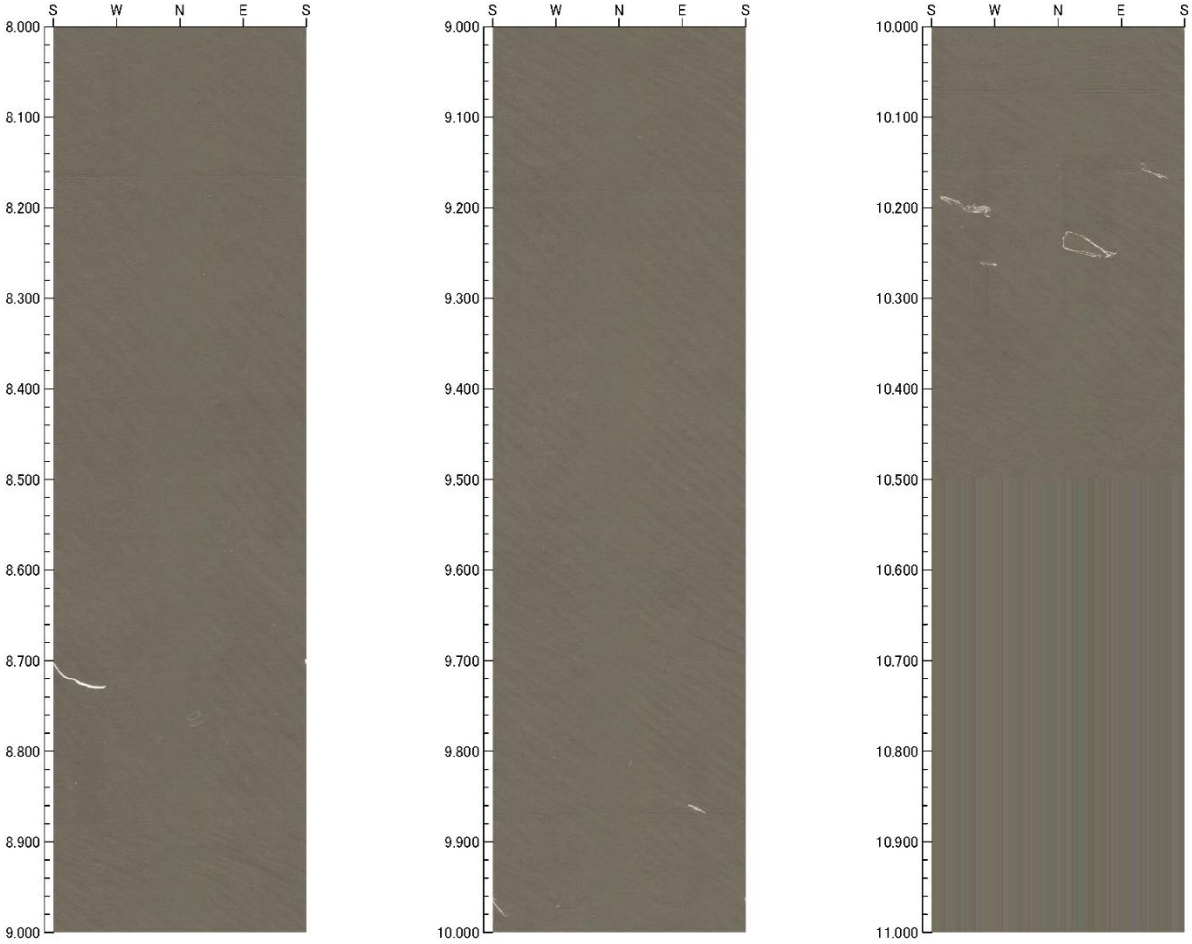
付図 3-27　T-3 孔壁の展開画像



付図 3-28　T-3 孔壁の展開画像

T-3孔
2021年1月測定
（トレースライン有）

8.000m - 11.000m



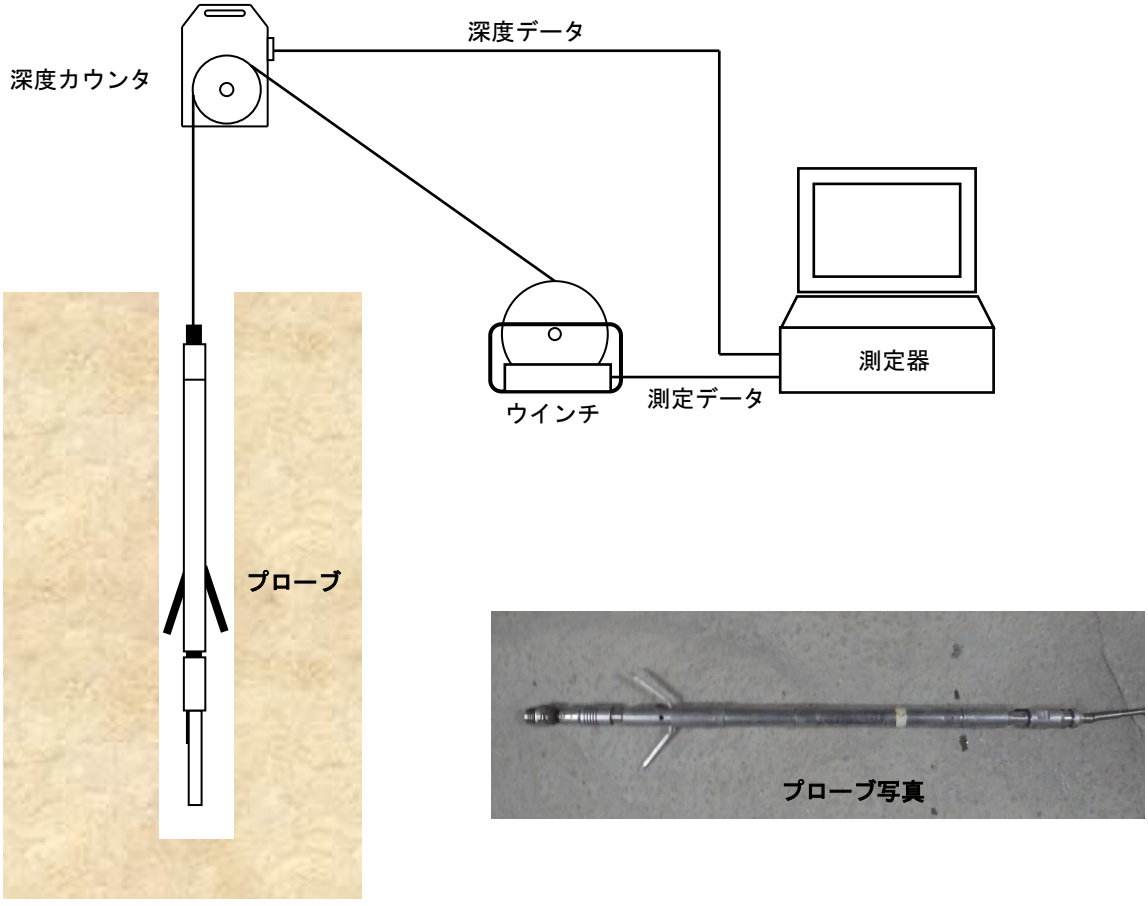
付図 3-29　T-3 孔壁の展開画像

(4)　孔径検層

ボーリング孔の孔径を測定する孔径（キャリパー）検層に使用した機器の一覧を付表 3-10 に示し、測定概念を付図 3-30 に示す（本文中 3.3-29　口径検層結果)。

付表 3-10　孔径検層使用機器内欄表

種別	名称・型式・製造元	主な仕様	数量
測定器	McOhm-EL2，Model-2111 応用地質社製	電気検層（電．気・温度・キャリパー）対応、 電源 12V	1 台
孔径測定器	プローブ，Model-3973 応用地質社製	測定範囲 φ50-110mm、精度±2ｍｍＦ．Ｓ．	1 台
深度測定カウンタ	深度測定 応用地質社製	吊り下げ方式	1 台



付図 3-30　孔径検層概念図

(5) トモグラフィ調査

1) 使用機器

弾性波トモグラフィ調査（本文図 3.3 29　弾性波トモグラフィの測定概念図、図 3.3-30　主要機器図）に使用した機器の一覧をおよび比抵抗トモグラフィ調査（図 3.3-35　比抵抗トモグラフィの測定概念図）に使用した機器の一覧を付表 3-11 に示す。

付表 3-11　トモグラフィ使用機器一覧表

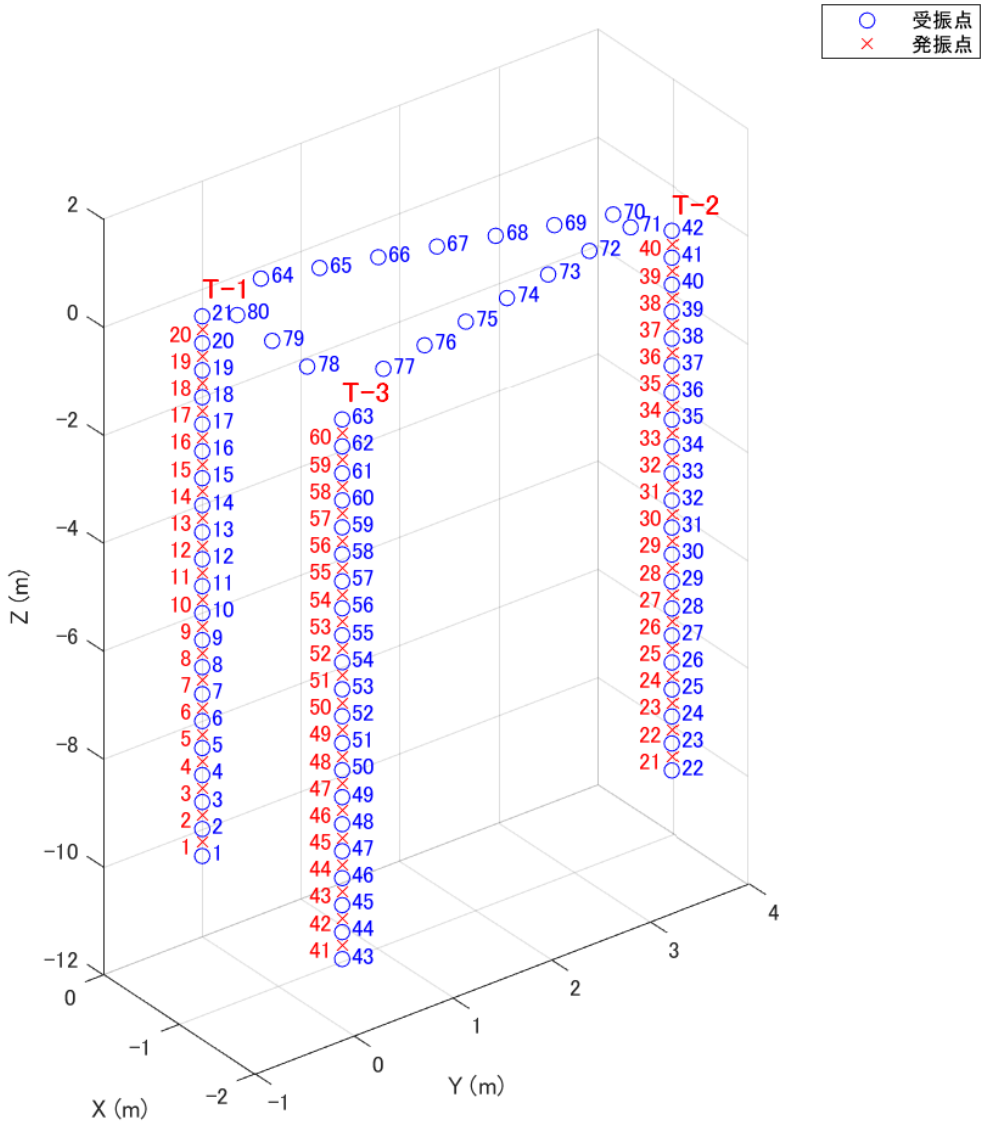
弾性波トモグラフィ			
種別	名称・型式・製造元	主な仕様	数量
地震探鉱機	DAQ Link 4 Seismic Source Co 社製	Input 24ch, 24 bit sigma delta converter Preamp Gain　x1 x4 x16, SamplingRate 8, 4,2,1,1/2,1/4,1/8,1/16,1/32,1/64ms	3
孔内受振器	DBT-2101 大和探査技術㈱社製	0.5m×12ch，共振周波数 4.6KHz	3
地表受振器	Geophone Gs-100 Geospace 社製	共振周波数 100Hz	18
P 波孔内震源	Sparker probe SBS Geotomographie 社製	P-Wave Source，FQ upto 4-5KHz	1
S 波坑内震源	Borehole Sourse BIS-SH-DS Geotomographie 社製	S-Wave Sourse，FQ upto 4-5KHz	1
高圧電源装置	Impulse Generater IPG 1005 Geotomographie 社製	Impulse voltage：500V，Impulse energy：1000J	1
カメラ	ITC-JK401(F) I.T.S 社製	約 200 万画素：解像度 1920×1080（1080P） アナログハイビジョン方式 視野角 約 77 度、レンズ単焦点 3.6mm 外形 30mm x 30mm サイズ	3
レコーダー	SHDVR-XVR4C-X1	アナログハイビジョン方式 x4 カメラ同時レコーダー	1
比抵抗トモグラフィ			
種別	名称・型式・製造元	主な仕様	数量
電気探査装置	McOHM Profiler-4 応用地質性	4 極同時測定、送信電流 120mA * 400V（最大） Scanner 使用による最大電極数 288 電極配置（ポール・ポール,ポール・ダイポール,ダイポール・ダイポール等）に対応, 高精度 24 ビットA/Dコンバータ、OS,WindowsXP	1
	McOhm-Profiler4-Scanner	外部 64 極（内部 32 極）	1
孔内電極	DBE-2101 (有)アスクシステム社製	0.5m x 24ch /本	3

2)　座標変換

ボーリング孔の座標を基に座標変換を行いトモグラフィ調査の解析に使用した座標値を付表 3-12 に示し、発受振点位置と座標値を付図 3-31 および付表 3-13~付表 3-15 に示す。

付表 3-12　ボーリング孔の変換座標一覧表

地点名	平面直角座標 XII 系（JGD200,GSR80）		標高	解析に使用した座標系		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
350-24(基準点)	116130.9290	-30691.8420	-349.5530			
T-1	116133.5182	-30688.0749	-349.5280	0.0000	0.0000	0.0000
T-2	116132.2933	-30684.2670	-349.4970	-1.2249	3.8079	0.0310
T-3	116131.5216	-30688.1919	-349.5270	-1.9966	-0.1170	0.0010



付図 3-31　発受振点位置図

付表 3-13　発振点座標一覧表

T-1 孔内発振点				T-2 孔内発振点				T-3 孔内発振点			
No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z
1	0.0000	0.0000	-10.2500	21	-1.2249	3.8079	-10.2190	41	-1.9966	-0.1170	-10.2490
2	0.0000	0.0000	-9.7500	22	-1.2249	3.8079	-9.7190	42	-1.9966	-0.1170	-9.7490
3	0.0000	0.0000	-9.2500	23	-1.2249	3.8079	-9.2190	43	-1.9966	-0.1170	-9.2490
4	0.0000	0.0000	-8.7500	24	-1.2249	3.8079	-8.7190	44	-1.9966	-0.1170	-8.7490
5	0.0000	0.0000	-8.2500	25	-1.2249	3.8079	-8.2190	45	-1.9966	-0.1170	-8.2490
6	0.0000	0.0000	-7.7500	26	-1.2249	3.8079	-7.7190	46	-1.9966	-0.1170	-7.7490
7	0.0000	0.0000	-7.2500	27	-1.2249	3.8079	-7.2190	47	-1.9966	-0.1170	-7.2490
8	0.0000	0.0000	-6.7500	28	-1.2249	3.8079	-6.7190	48	-1.9966	-0.1170	-6.7490
9	0.0000	0.0000	-6.2500	29	-1.2249	3.8079	-6.2190	49	-1.9966	-0.1170	-6.2490
10	0.0000	0.0000	-5.7500	30	-1.2249	3.8079	-5.7190	50	-1.9966	-0.1170	-5.7490
11	0.0000	0.0000	-5.2500	31	-1.2249	3.8079	-5.2190	51	-1.9966	-0.1170	-5.2490
12	0.0000	0.0000	-4.7500	32	-1.2249	3.8079	-4.7190	52	-1.9966	-0.1170	-4.7490
13	0.0000	0.0000	-4.2500	33	-1.2249	3.8079	-4.2190	53	-1.9966	-0.1170	-4.2490
14	0.0000	0.0000	-3.7500	34	-1.2249	3.8079	-3.7190	54	-1.9966	-0.1170	-3.7490
15	0.0000	0.0000	-3.2500	35	-1.2249	3.8079	-3.2190	55	-1.9966	-0.1170	-3.2490
16	0.0000	0.0000	-2.7500	36	-1.2249	3.8079	-2.7190	56	-1.9966	-0.1170	-2.7490
17	0.0000	0.0000	-2.2500	37	-1.2249	3.8079	-2.2190	57	-1.9966	-0.1170	-2.2490
18	0.0000	0.0000	-1.7500	38	-1.2249	3.8079	-1.7190	58	-1.9966	-0.1170	-1.7490
19	0.0000	0.0000	-1.2500	39	-1.2249	3.8079	-1.2190	59	-1.9966	-0.1170	-1.2490
20	0.0000	0.0000	-0.7500	40	-1.2249	3.8079	-0.7190	60	-1.9966	-0.1170	-0.7490

付表 3-14　受振点座標一覧表

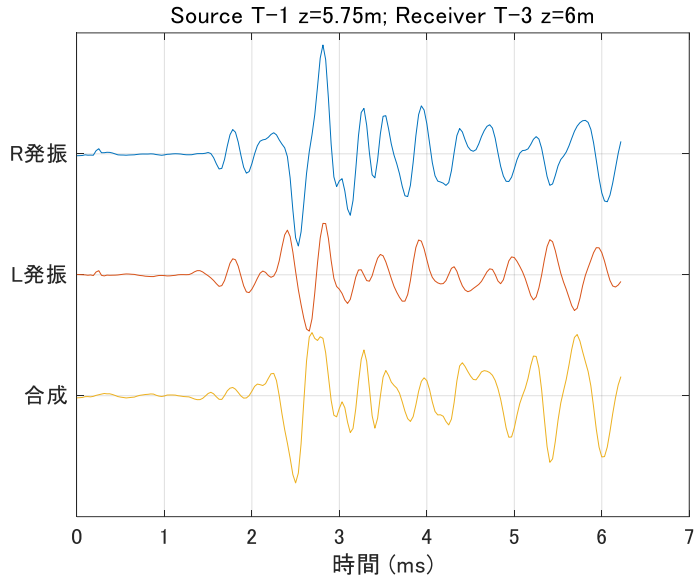
T-1 孔内受振点				T-2 孔内受振点				T-3 孔内受振点			
No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z
1	0.0000	0.0000	-10.5000	22	-1.2249	3.8079	-10.4690	43	-1.9966	-0.1170	-10.4990
2	0.0000	0.0000	-10.0000	23	-1.2249	3.8079	-9.9690	44	-1.9966	-0.1170	-9.9990
3	0.0000	0.0000	-9.5000	24	-1.2249	3.8079	-9.4690	45	-1.9966	-0.1170	-9.4990
4	0.0000	0.0000	-9.0000	25	-1.2249	3.8079	-8.9690	46	-1.9966	-0.1170	-8.9990
5	0.0000	0.0000	-8.5000	26	-1.2249	3.8079	-8.4690	47	-1.9966	-0.1170	-8.4990
6	0.0000	0.0000	-8.0000	27	-1.2249	3.8079	-7.9690	48	-1.9966	-0.1170	-7.9990
7	0.0000	0.0000	-7.5000	28	-1.2249	3.8079	-7.4690	49	-1.9966	-0.1170	-7.4990
8	0.0000	0.0000	-7.0000	29	-1.2249	3.8079	-6.9690	50	-1.9966	-0.1170	-6.9990
9	0.0000	0.0000	-6.5000	30	-1.2249	3.8079	-6.4690	51	-1.9966	-0.1170	-6.4990
10	0.0000	0.0000	-6.0000	31	-1.2249	3.8079	-5.9690	52	-1.9966	-0.1170	-5.9990
11	0.0000	0.0000	-5.5000	32	-1.2249	3.8079	-5.4690	53	-1.9966	-0.1170	-5.4990
12	0.0000	0.0000	-5.0000	33	-1.2249	3.8079	-4.9690	54	-1.9966	-0.1170	-4.9990
13	0.0000	0.0000	-4.5000	34	-1.2249	3.8079	-4.4690	55	-1.9966	-0.1170	-4.4990
14	0.0000	0.0000	-4.0000	35	-1.2249	3.8079	-3.9690	56	-1.9966	-0.1170	-3.9990
15	0.0000	0.0000	-3.5000	36	-1.2249	3.8079	-3.4690	57	-1.9966	-0.1170	-3.4990
16	0.0000	0.0000	-3.0000	37	-1.2249	3.8079	-2.9690	58	-1.9966	-0.1170	-2.9990
17	0.0000	0.0000	-2.5000	38	-1.2249	3.8079	-2.4690	59	-1.9966	-0.1170	-2.4990
18	0.0000	0.0000	-2.0000	39	-1.2249	3.8079	-1.9690	60	-1.9966	-0.1170	-1.9990
19	0.0000	0.0000	-1.5000	40	-1.2249	3.8079	-1.4690	61	-1.9966	-0.1170	-1.4990
20	0.0000	0.0000	-1.0000	41	-1.2249	3.8079	-0.9690	62	-1.9966	-0.1170	-0.9990
21	0.0000	0.0000	-0.5000	42	-1.2249	3.8079	-0.4690	63	-1.9966	-0.1170	-0.4990

付表 3-15　受振点座標一覧表

坑道床受振点											
No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z
64	-0.15311	0.47599	0.00388								
65	-0.30623	0.95197	0.00775								
66	-0.45934	1.42800	0.01163								
67	-0.61245	1.90390	0.01550								
68	-0.76556	2.37990	0.01938								
69	-0.91868	2.85590	0.02325								
70	-1.07180	3.33190	0.02713								
71	-1.32140	3.31730	0.02725								
72	-1.41780	2.82670	0.02350								
73	-1.51430	2.33610	0.01975								
74	-1.61070	1.84540	0.01600								
75	-1.70720	1.35480	0.01225								
76	-1.80370	0.86422	0.00850								
77	-1.90010	0.37361	0.00475								
78	-1.49740	-0.08775	0.00075								
79	-0.99830	-0.05850	0.00050								
80	-0.49915	-0.02925	0.00025								

3)　波形データ処理と走時の読み取り

観測データの走時を読み取る前に、S 波発振の記録について R 発振と L 発振を合成し、S 波が強調されたひとつのデータセットとして処理を行った。S 波の強調処理を付図 3-32 に示す。P・S 波発振の読取波形例を付図 3-33、付図 3-34 に示す。また、P 波発振と S 波発振による平均パワースペクトルを付図 3-35 に示す。



付図 3-32　S 波振源の R 発振と L 発振合成による S 波の強調

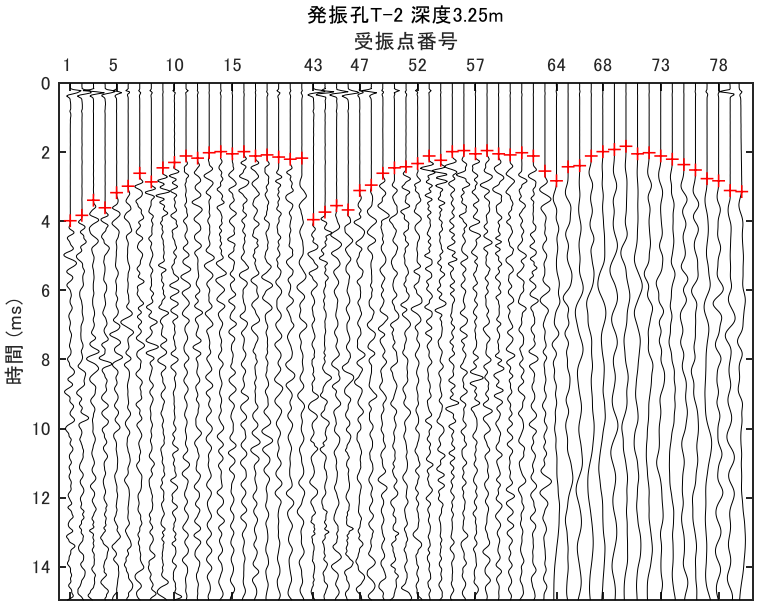


図 3-33　T-2 における P 波受振の波形例と読み取り走時 (+)

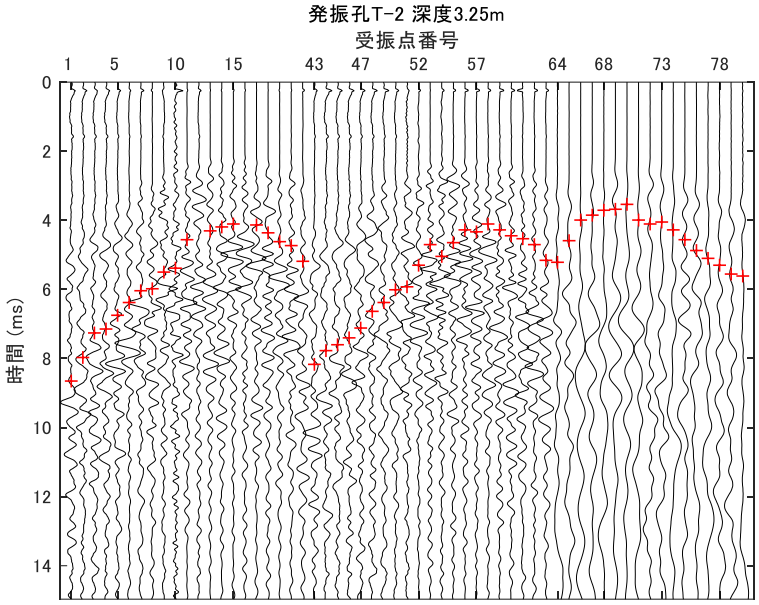


図 3-34　T-2 における S 波発振の波形例と読み取り走時 (+)

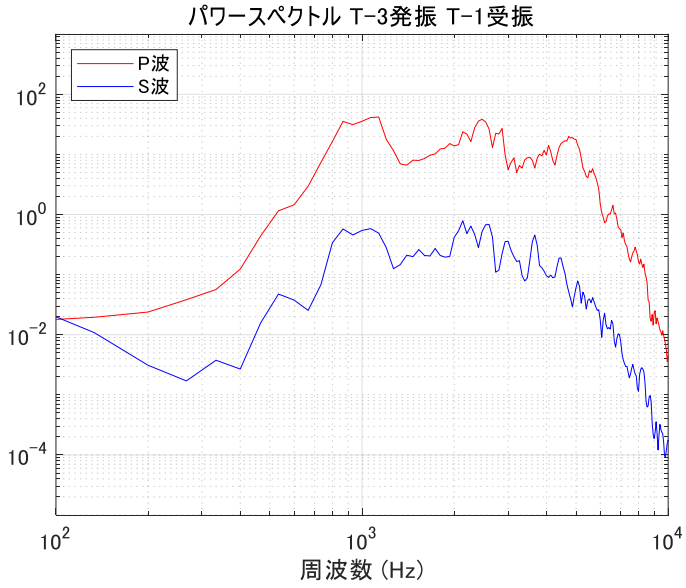


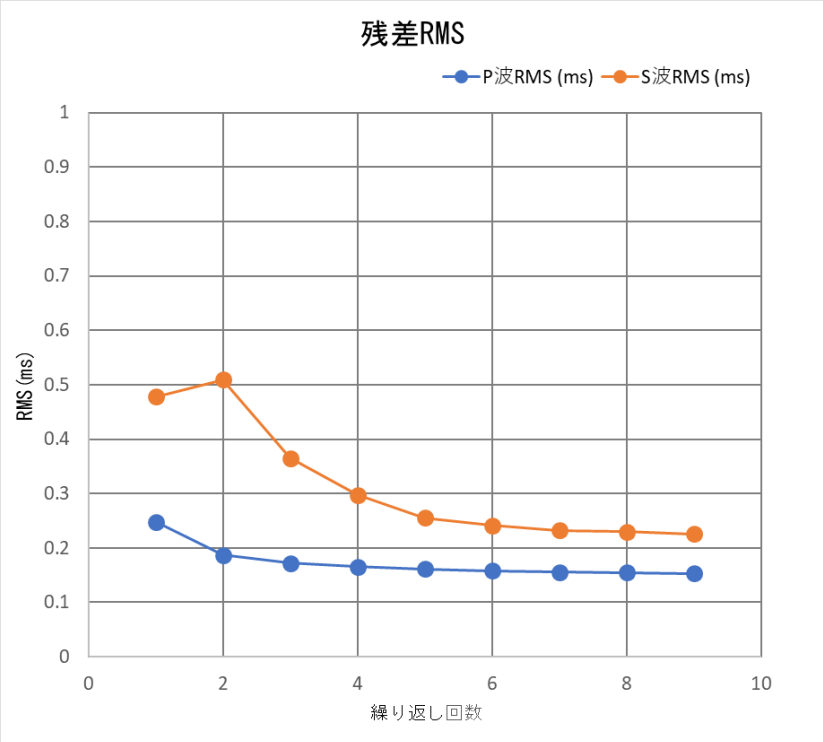
図 3-35　P 波発振、S 波発振によるパワースペクトルの比較
(深度 5.5m 以上の同一深度での発振・受振トレースのパワースペクトルを平均)

4)　弾性波トモグラフィの逆解析

P 波および S 波それぞれについて、読み取った走時データを用いて三次元トモグラフィ逆解析を行い、弾性波速度構造を求めた。解析メッシュ間隔は 0.25 m とし、初期モデルは平均速度による一様構造を仮定し、速度範囲は、P 波は 1.0～3.0 km/s、S 波は 0.5～2.0 km/s とした。逆解析は、モデルから計算される理論走時と観測走時の残差が小さくなるようにモデルの修正を繰り返し、反復 9 回で残差の値が十分に小さいことから収束したとみなした。反復回数と逆解析の残差（RMS）を付表 3-16 に示し、繰り返し回数による走時残差 RMS の変化をグラフにして図 3-36 に示した。

付表 3-16　繰り返し回数と残差値

繰り返し回数	P 波　RMS (ms)	S 波　RMS (ms)
1	0.2481	0.4780
2	0.1868	0.5089
3	0.1723	0.3648
4	0.1652	0.2973
5	0.1614	0.2552
6	0.1584	0.2411
7	0.1559	0.2325
8	0.1544	0.2300
9	0.1529	0.2257



付図 3-36　逆解析の繰り返し回数と走時残差 RMS の変化グラフ

付録 4　3.4　ボアホールシーリング試験

目次

1.　文献調査の結果 ..... 付 4-1
1.1　Borehole Project – Final Report Phase 3 ..... 付 4-1
1.2　Grimsel Test Site investigation phase IV Borehole Sealing ..... 付 4-2
1.3　Site Characterisation Project REVIEW OF REQUIREMENTS FOR SEALING INVESTIGATION BOREHOLES ..... 付 4-3
1.4　Sealing of 300 mm boreholes KXTT3 and KXTT4 at Äspö HRL Report of Subproject 3 of Borehole sealing Project ..... 付 4-4
1.5　Closure of the Spend Fuel Repository at Forsmark Studies of alternative methods for sealing ramp, shaft and boreholes ..... 付 4-5
1.6　Sealing of investigation boreholes Full scale field test and large-scale laboratory tests ..... 付 4-6
1.7　Final Report of Borehole, Shaft and Tunnel Sealing-Test-Volume 1: Borehole plugging ..... 付 4-7
参考文献 ..... 付 4-9

1. 文献調査の結果

ボアホールシーリングに関する海外での研究事例調査を実施した。その内容を以下に示す。

1.1 Borehole Project - Final Report Phase 3

- 著者

  Roland Pusch and Gunnar Ramqvist
- 発行年

  2007
- ボーリング孔閉塞の考え方と求める性能
  - ボーリング孔の割れ目が少なく透水性の低い岩盤を強固にシーリングし、亀裂と交差する区間については物理的に安定な材料で充填する。
  - 全ての材料は化学的に相互作用せず、シーリング性能が 10 万年維持されることが求められる。
  - シーリング材には、ボーリング孔周辺の岩盤よりも低い透水係数を求めており、亀裂と交差するような高い透水性の区間を充填する材料については透水性についての要件はない。
- 閉塞方法
  - 基本タイプ（Basic type）、コンテナタイプ（Container type）、クーロンタイプ（Couronne type）、ペレットタイプ（Pellet type）の 4 種類のシーリング方法が検討されている。
  - MX-80 はこれ以前の調査においても用いられているスメクタイトに富む粘土であり、いずれのタイプにおいても、MX-80 の高圧縮ベントナイト（HCB）が用いられている。HCB は MX-80 の粉末は約 250 MPa で圧縮されて作製される。
  - 基本タイプは、HCB が厚さ 2mm の銅製有孔管に充填されている。有孔管とボーリング孔の孔壁の隙間は 4mm に設計されており、膨潤することにより有孔管と孔壁の間の隙間を高密度に閉塞する。基本タイプでは、有孔管に収納することで設置中のベントナイトの侵食を抑えるとともに、膨潤を遅らせる。
  - コンテナタイプは、基本タイプと異なり密閉された管（コンテナ）にベントナイトを充填する。目的とする充填区間にコンテナを輸送した後、ベントナイトを排出する。コンテナに収納することにより、侵食に対する抵抗性を有する。
  - クーロンタイプは、リング状に圧縮したベントナイトを金属ロッドに通して積み重ねたプラグである。設置中にベントナイトが侵食されるため、100m 程度の浅いボーリング孔に適用する。
  - ペレットタイプは、ベントナイトペレットを排水したボーリング孔に流し込む方法である。20m 程度までの浅いボーリング孔に対し適用できるとしている。荷重や振動を与えることによって充填密度の向上が見込まれる。
- 閉塞にあたり重要と考える条件、現象、プロセス
  - Na 型のベントナイトの使用が考えられている。Ca 型のベントナイトは淡水と塩水の両方で膨潤性に乏しく、不均一なシーリングとなるおそれがある。
  - ボーリング孔内に塩水が流入している場合には、ベントナイトの分散を抑え、シーリングの密度が低くなることを防ぐために、塩水を水道水に置き換えることがよいとされている。
  - 水圧の影響は、膨潤の初期段階で重要な因子になると考えられている。コンテナタイプでは、水の侵入がブロックの詰まり排出が困難になる可能性を考慮に入れて設計する必

要がある。
- 銅はベントナイトに対して化学的に不活性であるため、基本タイプの有孔管の材料として使用されている。

1.2 Grimsel Test Site investigation phase IV Borehole Sealing

- 著者

  Blumling, P. and Adamas, J.
- 発行年

  2008
- ボーリング孔閉塞の考え方と求める性能
  - 低中レベル放射性廃棄物の処分場に関する調査プロジェクトで掘削した調査ボーリング孔の閉塞に関する試験を実施した。
  - ボーリング孔は地下施設からほぼ水平に掘削されており、その長さは 500 m、直径は 76 mm～146 mm でところどころ孔壁が崩壊している。
  - 処分場に直接つながる優先的な水みちもしくは割れ目帯への短絡経路にならないようにボーリング孔を閉塞する。
  - ボーリング孔のシーリングには周辺の岩盤と同程度の 10^{-11} m/s から 10^{-12} m/s の透水係数が求められる。
  - 調査地点である Wellenberg の Palfris 層の地盤工学的および水理学的な特性に基づき、母岩を破壊する可能性がある過剰な荷重（5MPa 未満）を避ける必要がある。
  - 適切に制御された信頼性の高い手順のシーリング方法を構築する必要性が述べられている。
  - 複数の材料を組み合わせによるボーリング孔のシーリングは、シーリングシステムの力学的安定性と水理的性能の両方を向上させる。
- 閉塞方法
  - 孔壁の崩落の可能性があり、母岩の損傷を避けるために膨潤圧を制限する必要のあるボーリング孔に対して、多くの材料や施工方法が検討された。
  - SKB で検討される基本タイプ（Basic type）や重力によるペレットの充填は水平ボーリング孔に適用できないため、別の 2 つの方法が検討された。
  - ボーリング孔周囲の損傷を受けていない岩盤と同程度の透水係数を持つことが実証されているベントナイトが主要なシーリング材として考えられている。
  - 粒径 4-10 mm の粒状 MX-80 が圧縮空気による吹付け充填（pneumatic injection）の試験で使用された。
  - 機械的な注入（mechanical injection）では、MACMET Tool を用いて、ベントナイトペレット（compactonit）をドリルストリングの中を通して目的とする区間に油圧で押し出す。コアバレルのピストンがベントナイトを押し出し、ドリルストリングにより機械的に圧縮される。シーリングが完了するまでこの方法でのベントナイトの充填が繰り返される。この方法では、シーリングの完了まで時間がかかる。
  - 両試験で、母岩と同程度の 10^{-12} m/s オーダーの透水係数が達成できることを示した。
- 閉塞にあたり重要と考える条件、現象、プロセス
  - シーリングの有効性は、乾燥密度に大きく依存する。乾燥密度に影響を与える因子はペレットやブロック、粒状体の個々の密度および粒子の大きさ、施工方法を含んでいる。
  - Na 型と Ca 型のベントナイトの選択は、地下水の化学的性質によって行われる。Na に

富む地下水が存在する場合にはMX-80などのNa型ベントナイトがCaに富む地下水の場合にはCa型ベントナイトを選択することが考えられる。
- ベントナイトの大きさや形状（ブロック、ペレット、粒状体）などの物理的な性質はボーリング孔の形状に応じて設計される。
- ベントナイトペレットを水平ボーリング孔に充填する場合に、高い摩擦力が発生する。

1.3 Site Characterisation Project REVIEW OF REQUIREMENTS FOR SEALING INVESTIGATION BOREHOLES

- 著者

  Chanplow, R.
- 発行年

  2011
- ボーリング孔閉塞の考え方と求める性能
  - シーリング材に求める要件を下記に示す。
    ① 閉鎖後のシーリング要件を満たすことができる材料
    ② 収縮を回避する材料
    ③ 長寿命材料
    ④ 放射性核種の移行を制限できる材料
    ⑤ 人工バリアシステムへの影響を考慮した材料
  - 処分場の長期的な安全性を確保するために、低透水性のプラグを所定の場所に維持することを求めている。
- 閉塞方法
  - ベントナイトは、その膨潤特性、低い透水係数、放射性核種の吸着能および低い拡散係数を持つことから一般的なボーリング孔のシーリング材として検討されている。
  - 基本的なシーリングの方法は、水を通す割れ目がなく透水係数の低い岩盤にベントナイトを設置し、透水性の高い亀裂が存在する区間や水を通しやすい岩盤には低品質のコンクリートなどの不活性な重点材料を設置する。すなわち、ベントナイトの両端をセメント系材料で支持したベントナイトプラグを意味する。
  - ボーリング孔のシーリングに関する手順は、ボーリング孔の洗浄、ボーリング孔の特性評価、ボーリング孔の安定化およびプラグの設置である。
- 閉塞にあたり重要と考える条件、現象、プロセス
  - 腐食は優先的な水みちの形成につながるため、可能であればボーリング孔からケーシングを除去する。
  - シーリング方法の設計で考慮すべき因子を下記に示す。
    ① ボーリング孔の状態
    ② 地質的な制約条件
    ③ 水理的な制約条件
    ④ ガスや流体の圧力
    ⑤ 地球化学
    ⑥ 周辺活動の影響
    ⑦ 原位置での応力
    ⑧ 熱負荷
    ⑨ 地震活動

1.4 Sealing of 300 mm boreholes KXTT3 and KXTT4 at Äspö HRL Report of Subproject 3 of Borehole sealing Project

- 著者

  Pusch, R., Ramqvist, G.

- 発行年

  2011

- ボーリング孔閉塞の考え方と求める性能
  - ボーリング孔の閉塞では、ボーリング孔の割れ目が少なく透水係数が低い部分を密閉し、割れ目と交差する部分は低透水性を必要としない安定した材料で充填するシーリングの概念を検討している。より具体的には、低透水性材料として高圧縮ベントナイトにより閉塞し、安定化させる材料としてコンクリートを打設する。
  - 本報告は、Äspö HRL の直径 300 mm、傾斜 36 度の比較的短い 2 つのボーリング孔（KXTT3 & KXTT4）での試験結果を述べている。試験では、安価で迅速なペレットタイプと他方は単純なクーロンタイプが検討された。
- 閉塞方法
  - 主要なシーリング材にベントナイトを使用した。ベントナイトは CEBOGEL 製（含水率 16%、モンモリロナイト含有率 70%～80%）または G001-L 製スメクタイトが使用された。
  - コンクリートは低 pH の Q/C シリカセメント（セメント 60 kg/m^3、シリカ 60 kg/m^3）、10 MPa 下の 24 時間後の強度 1 MPa のものが使用された。
  - ペレットには、長さ 6 mm 及び 5～20 mm のベントナイト CEBOGEL ペレットが使用された。ペレットは、密度 1650 kg/m3、乾燥密度 1000 kg/m^3 で期待される透水係数は 10^{-10} m/s であった。これらの、ペレットは長さ 2 m のステンレス鋼躯体（10 mm の開口部）に収納された。ペレットの隙間は 1200 kg/m^3 のスラリーで充填されている。これは、シリカパウダーと混合された MX-80 から作られたスラリーである。100 µm を超えるボーリング孔内の亀裂による粘土の流出を避けるために十分な粒子径が選択され、全体としての密度、プラグの均一性を高めることが期待された。
  - ペレット法では、ボーリング孔底部全体にスラリーとベントナイトペレットを 15～20m のケージ内に充填し、上部シールには耐久性のあるコンクリートの設置を計画した。しかしながら、強い振動を加えてもスラリーが非常に硬く、緻密なスラリーの中にベントナイトを配置することが困難であり、この方法は失敗した。
  - クーロンプラグには、CEBOGEL と G001L の両方を使用した圧縮ベントナイトを採用した。それぞれのブロックは直径 285mm、厚さ 100m、中央銅製ロッド 72mm であった。
  - クーロンタイプでは、ボーリング孔の下部に 5m ベントナイトプラグと上部に 1m のベントナイトプラグを設置した。それぞれのベントナイトプラグがコンクリートで固定されている。また、各材料の界面に機械式パッカーを設置した。具体的な作業手順は、ボーリング孔の底部を砂と礫で充填した。その後、Q/C プラグを打設し、1 日後にベントナイトプラグを 5m（50 個のベントナイトブロック）の長さで設置した。さらに中央のコンクリートプラグを打設し、上部のベントナイトプラグを 1m（10 ブロック）の長さで設置した後、最上部をシーリングした。
  - 試験によりクーロンタイプで、直径 300mm の大口径ボーリング孔においてもシーリングすることが可能であり、地下水の流入量が比較的多い場合でも適用できることを示し

た。

- 閉塞にあたり重要と考える条件、現象、プロセス
  - ベントナイトプラグ周辺の地下水流れによる侵食、粘土ーセメント相互作用によるシーリング性能の低下が懸念されていた。

1.5 Closure of the Spend Fuel Repository at Forsmark Studies of alternative methods for sealing ramp, shaft and boreholes

- 著者

  Luterkort, D. and Gylling, B.
- 発行年

  2012
- ボーリング孔閉塞の考え方と求める性能

調査ボーリング孔のシーリングに関連する可能性のある要件をいかに示す。

【設計の前提（design premises)、長期安全性（SSCL）に基づくレベル 3 閉鎖要件】

- SSCL 18：水の流れを制限し、処分場と地上の間のバリア機能を脅かす透水性の良いチャンネルが形成されないようにすること
- SSCL42：長期耐久性があり、期待される環境下でバリア機能を維持できること
- SSCL20：他のバリアの機能を損なわないこと
- SSCL22：実際に試行、テストされた実証済みの技術をベースにすること
- SSCL23：高い信頼性で製造・設置が可能な製品であること
- SSCL34：費用対効果、製造、検査、施工
- SSCL26：最終処分場への不用意な侵入を確実に妨害すること

【レベル 4 閉鎖要件（DRCL)】

- DRCL20：水の流れを抑制するためのボーリング孔や地下開口部の閉塞は、ベントナイト系粘土材料を圧縮したもので構成する
- DRCL36：地上につながる地下開口部の上部区間に対する閉鎖は、侵入を防止するために緊密にはめ合わされた岩石ブロックで構成する。

【SR-Can 要求事項】

- SRCAN191：ボーリング孔は処分場の封じ込めや保持特性を損なわないように閉塞しなければならい。この要件は、ボーリング孔の閉塞による透水係数が 10^{-8} m/s 以下であれば達成され、膨潤圧が 0.1MPa を超える場合に確実である。また、ボーリング孔の高透水領域では、この透水係数の値を維持する必要はない。。
- SRCAN179：トップシールの深さは、評価期間中に予想される永久凍土の範囲が考慮されるが、処分場上の 100m 以上の深さにすることはできない。
- SRCAN210：上部シーリングに対しては透水係数に対する要件はない。

- 閉塞方法

ボーリング孔の閉塞方法として下記の条件を設定している。

- ボアホールのシーリングには、基本タイプを適用し、高圧縮ベントナイトを銅製有孔管に充填して使用する。
- 高透水性の水みちと交差する区間では、粘土が侵食される可能性があるため、これらの区間では、浸透性があり侵食に強い石英ベースのコンクリートで充填する。ボーリング孔の最上部では、粘土の膨潤圧に抵抗し、物理的な応力に耐える材料とした。
-

- 閉塞にあたり重要と考える条件、現象、プロセス
  - ボーリング孔のシーリングに関する解析では、異なる透水係数を考慮して実施された。結果より、透水係数が 10^{-6}m/s 以下の透水係数では、粒子の移行経路にはほとんど影響がない事が示されている。粒子の移行経路に影響を与えるためには透水係数が 10^{-4}m/s より大きいことが必要となると述べている。このことは、ボーリング孔の透水係数に対する要件を緩和することを支持している。

1.6 Sealing of investigation boreholes Full scale field test and large-scale laboratory tests

- 著者

  Sandén, T., Nilsson, U., Johannesson, L., Hagman P. and Nilsson, G.
- 発行年

  2018
- ボーリング孔閉塞の考え方と求める性能
  - ボーリング孔のシーリングには、本来の地下水の流れを大きく変化させることのない透水係数が求められている。また、ボーリング孔のシーリング性能は、施設の寿命（10 万年）まで安定して維持することを要求している。
  - 地下水のボーリング孔内への流入を防ぐこと、異なるタイプの地下水がボーリング孔を介して互いに接触しないことが追加の要件としてあげられている。
  - スウェーデンにおけるボーリング孔の安全性に係る規定では、透水係数を 10^{-8} m/s 以下と設定している（Luterkort et al., 2012）。しかし、10^{-6} m/s 以下のオーダーの透水係数においても有意な水みちとならないという結果を示す研究や文献も存在する（Luterkort et al., 2012）。
  - そこで、Sandwich concept と呼ばれるシーリングの概念が検討とその性能の評価が実施されている。
- 閉塞方法
  - 本文献では、ボーリング孔を 3 つのタイプ（BH1 型、BH2 型、BH3 型）に分類している。この分類は、単純にボーリング孔の深さとボーリングがどれだけ処分場へ近接しているかを基準としたものである。
  - BH1 型：ボーリング孔の深さが 0～75m であるもの。処分場への水理的影響はない。ボーリング孔は透水性の高い割れ目と交差しておらず、処分場と水理的に接続していない。
  - BH2 型：ボーリング孔の深さが深さ 75～1000m であり、ボーリング孔が処分場から 400m 以上離れているもの。ボーリング孔は透水性の高い割れ目と交差しておらず、処分場と水理的に接続していない。
  - BH3 型：ボーリング孔の深さが深さ 75～1000m であり、処分場から 400m 未満、または処分場と水理的に接続しているもの。
  - このうち、BH3 型のボーリング孔を Sandwich concept によりシーリングすることを検討している。Sandwich concept では、ボーリング孔の主要な部分を力学的にも化学的にも安定している砂で充填する。割れ目の少ない岩盤の区間には高圧縮ベントナイトのプラグを設置する。砂とベントナイトの間の区間には低 pH 製のコンクリートプラグを打設する。コンクリートプラグは、ボーリング孔の軸方向のベントナイトの膨潤を抑制し密度低下による透水係数の増加を防ぐ。これらの材料の境界部には材料の混合を防ぐために銅製のプラグを設置する。

・

- 閉塞にあたり重要と考える条件、現象、プロセス
  - Sandwich concept では、ボーリング孔の主要部分を充填する砂の透水係数が 10^{-5} m/s のオーダーの透水係数であり、ベントナイトの透水係数は 10^{-13} m/s のオーダーである。このため、ボーリング孔の全長の透水係数は 10^{-6} m/s を満たさないが局所的に非常に低い透水係数の区間が存在する。
  - この検討では、砂やベントナイトなどのそれぞれのシーリング材料の区間長と透水係数から算出した軸方向の流れに対する水理抵抗（hydraulic resistance）によりシーリングの性能を評価しており、局所的に非常に低透水性のシーリング区間が存在するとボーリング孔の全長が 10^{-8} m/s の透水係数で充填された場合よりも高い水理抵抗が生じることを示している。

1.7 Final Report of Borehole, Shaft and Tunnel Sealing-Test-Volume 1: Borehole plugging

- 著者

  Pusch, R., Börgesson, L., Ramqvist, G.
- 発行年

  1987
- ボーリング孔閉塞の考え方と求める性能
  - 効果的なボーリング孔のシーリングのためには、岩盤とシーリング材が良好に接触状態を保ち、この境界に沿った水みちが形成しないことが必要となる。また、充填されるシーリング材は、設置される場所に元来存在している岩盤コアよりも高い透水性でなければならないとしている。
  - 上記の要件を達成するためには、高密度、延性、膨潤性、長期間の持続性を有する材料が必要であり、その材料としてベントナイトがボーリング孔のシーリングに適しているとしている。
- 閉塞方法
  - ベントナイトには、Na 型ベントナイトである MX-80 を選定している。選定の理由としては、花崗岩と片麻岩での化学的な安定性に優れていること、透水性が非常に低いこと、主要イオンの拡散が自由水中での拡散と比較して非常に小さいことがあげられている。
  - 基本タイプのプラグでのシーリングを検討しており、用いられる銅製有孔管は厚さが 2-4mm で 50%の開孔率であり、その底部は高圧縮のベントナイトブロックを収納するために密封されている。
  - ベントナイトブロックは、MX-80 の粉末を 50～120MPa の高圧力で圧縮し有孔管にぴったりと収まるように作製された。
  - 基本タイプのプラグを用いた複数のシーリングが検討された。
  - 1 つ目は、長さ約 100m、直径約 56mm の水平ボーリング孔にプラグを設置した場合の実証実験である。プラグは、高い水圧によるパイピングに抵抗し、2.5 年後には均一に膨潤したことが示された。岩盤中の微細な亀裂より十分な量の地下水が供給されており、ベントナイトの飽和は良好であった。
  - もう 1 つは、長さ 14m、直径 76mm の 2 本のボーリング孔に対して、開孔の孔径が異なる銅製容器（有孔管、メッシュ）を用いた 4m のプラグによりシーリングした実証試験である。約 1 年後にプラグを押し出すために必要な力は 8～10ton であり、接着強度

は約 100kPa であった。メッシュタイプの容器の方が若干早く膨潤していることがわかった。

- 閉塞にあたり重要と考える条件、現象、プロセス
  - ベントナイトが自重で圧密することのないように、十分な膨潤圧を確保しなければならない。かさ密度が 1.7～1.8 t/m^3 程度であれば、鉛直ボーリング孔の鉛直圧には十分に対抗できるとされている。
  - ベントナイトに有害な影響をおよぼす化学的プロセスを避けるために 100°C 以下の温度を必要とする。
  - ベントナイトは、塩分濃度の高い岩盤や破砕の著しい岩盤には適さない場合がある
  - 不安定な岩盤部は、グラウト（セメントで安定化）して再掘削する必要がある。
  - ベントナイトを所定の位置に保持し、軸方向の膨張に対抗するためにセメントプラグが必要である。
  - 水が非常に少ない場所でのベントナイトプラグの膨潤は非常に遅いかほとんど膨潤しない状態になるが、水がほとんどない場合にシーリングは必要ない。
  - 急激な地下水流入は、ベントナイトプラグの侵食が生じる可能性がある。

参考文献

Blumling, P. and Adamas, J., Grimsel Test Site investigation phase IV Borehole Sealing, Nagra Technical Report 07-01, 2008.

Chaplow, R., Site Characterisation Project REVIEW OF REQUIREMENTS FOR SEALING INVESTIGATION BOREHOLES, P/1035/TR1/2010, 2011.

Luterkort, D. and Gylling, B., Closure of the Spend Fuel Repository at Forsmark Studies of alternative methods for sealing ramp, shaft and boreholes, SKB TR-12-08, 2012.

Pusch, R., Börgesson, L., Ramqvist, G., Final Report of Borehole, Shaft and Tunnel Sealing-Test-Volume 1: Borehole plugging, SKB-SP-TR 87-01, 1987.

Pusch, R., Ramqvist, G., Borehole Project – Final Report Phase 3, SKB R-07-58, 2008.

Pusch, R., Ramqvist, G., Sealing of 300 mm boreholes KXTT3 and KXTT4 at Äspö HRL Report of Subproject 3 of Borehole sealing Project, SKB R-11-19, 2011.

Sandén, T., Nilsson, U., Johannesson, L., Hagman P. and Nilsson, G., Sealing of investigation boreholes Full scale field test and large-scale laboratory tests, SKB TR-18-18, 2018.

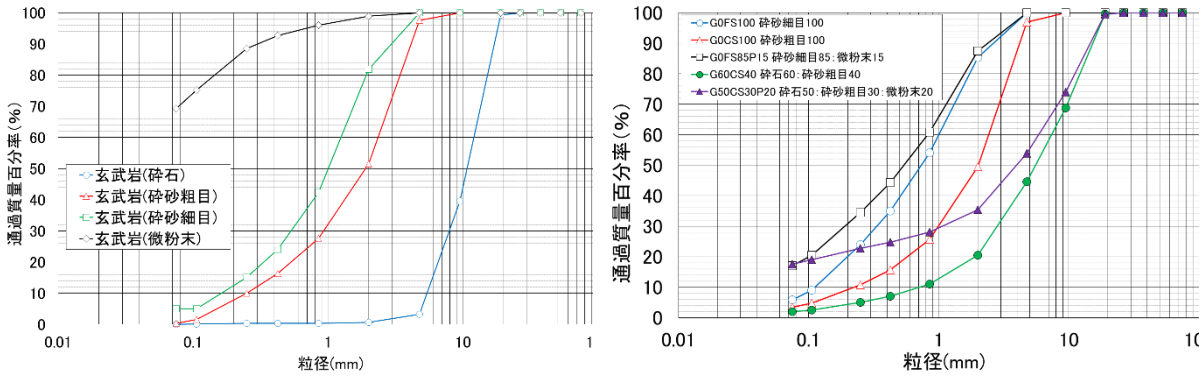
付録５　埋め戻し材の材料データ

目次

1.　締固め試験結果.....付 5-1
2.　透水試験結果 .....付 5-4

1.　締固め試験結果

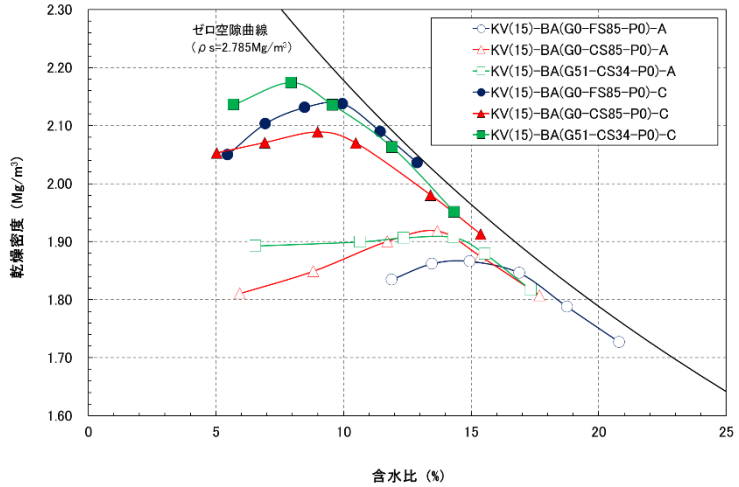
材料特性データを取得した埋め戻し材を構成する個別材料の粒度分布及びそれらを配合したベントナイトを含まない埋め戻し材の粒度分布を付図 1-1 に示す。砕石の最大粒径は 20mm である。数字はベントナイトを除く構成材料(100%)中の各材の質量%を表す。試験には、この配合にベントナイト 15%を混合した材料を用いた。



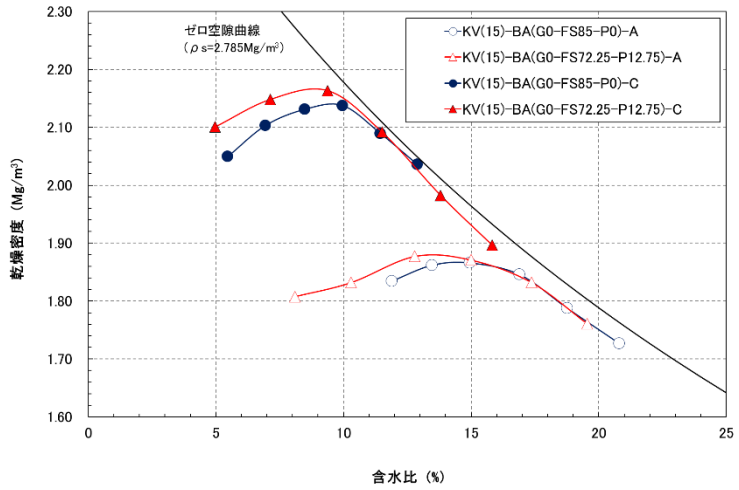
今年度使用した模擬掘削土構成材料個別の粒度　　今年度使用した模擬掘削土の調合後の粒度

付図 1-1　今年度使用した模擬掘削土の粒度

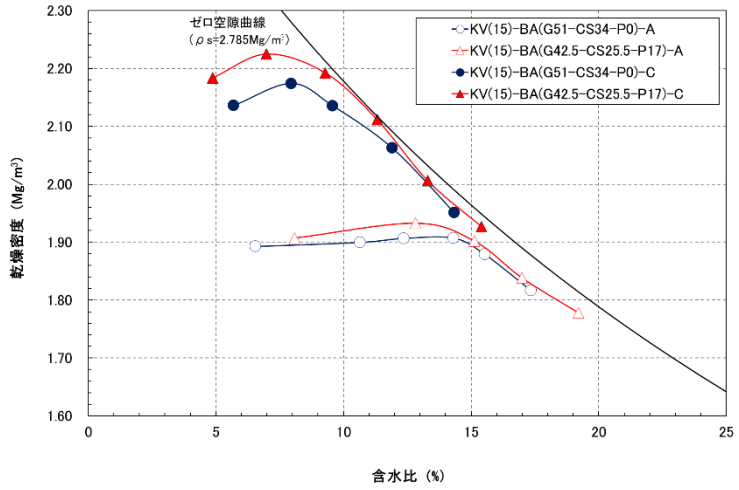
各配合による埋め戻し材を JIS A 1210:2009「突固めによる土の締固め試験」の A-c 法（1.0Ec）（湿潤法、非繰返し、締固めエネルギー：小、記号では"A"と表示）及び C-c 法（4.5Ec）（湿潤法、非繰返し、締固めエネルギー：大、記号では"B"と表示）の 2 通りで締固め試験を実施した結果を比較したものを付図 1-2～付図 1-4 に、結果をまとめたものを付表 1-1 に示す。



付図 1-2　締固め試験結果の比較（模擬掘削土：砕砂単独と砕石・砕砂混合との比較）



付図 1-3　締固め試験結果の比較（模擬掘削土：砕砂混合材料の微粉末の有無の比較）



付図 1-4　締固め試験結果の比較（模擬掘削土：砕石・砕砂混合材料の微粉末有無の比較）

付表 1-1　締固め試験結果

ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ		模擬掘削土									締固め試験結果			
種類	混合率	種類	骨材 混合率	全体 混合率	種類	骨材 混合率	全体 混合率	種類	骨材 混合率	全体 混合率	ケース名	締固め ｴﾈﾙｷﾞｰ	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (Mg/m^3)
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A		14.5	1.867
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 粗目 (CS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A		13.4	1.919
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	60	51.00	砕砂 粗目 (CS)	40	34.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A	1.0Ec	13.7	1.905
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	85	72.25	微粉末 (P)	15	12.75	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A		13.7	1.880
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	50	42.50	砕砂 粗目 (CS)	30	25.50	微粉末 (P)	20	17.00	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A		10.5	1.978
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-C		9.5	2.140
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 粗目 (CS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-C		9.2	2.095
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	60	51.00	砕砂 粗目 (CS)	40	34.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-C	4.5Ec	8.0	2.175
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	85	72.25	微粉末 (P)	15	12.75	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-C		8.9	2.166
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	50	42.50	砕砂 粗目 (CS)	30	25.50	微粉末 (P)	20	17.00	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-C		7.0	2.225

2. 透水試験結果

各埋め戻し材に関する透水試験は、イオン交換水（”DW”）及び模擬海水（“SW”）により実施した。透水試験ケースを付表 2-1 及び付表 2-2 に示す。
本編では、有効粘土密度と透水係数の関係で整理したが、ここでは透水係数と乾燥密度との関係を付図 2-1～付図 2-2 に整理した。
また、乾燥密度及び有効粘土密度の考え方を付図 2-3 に示す。

付表 2-1　透水試験　試験ケース一覧表（その 1；イオン交換水）

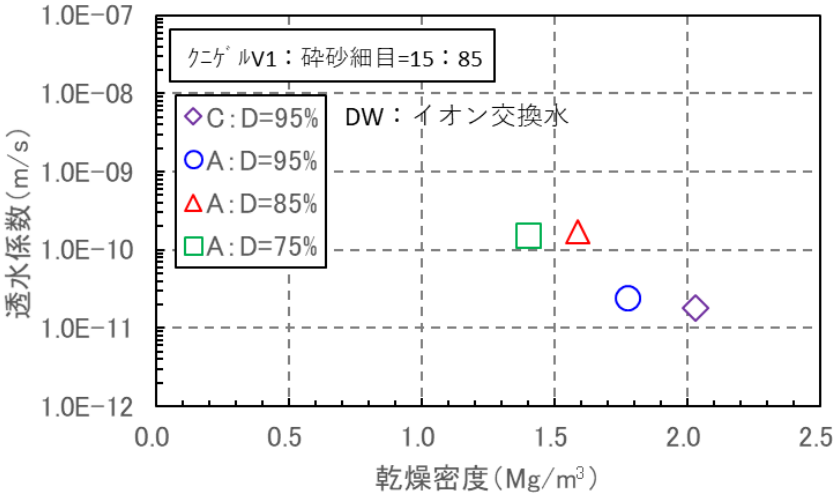
ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ		模擬掘削土									透水試験																						
種類	混合率	種類	骨材混合率	全体混合率	種類	骨材混合率	全体混合率	種類	骨材混合率	全体混合率	試験ケース（イオン交換水）	設定		設定値		数量			試験ケース（イオン交換水）	設定		設定値		数量			試験ケース（イオン交換水）	設定		設定値		数量		
												含水比	乾燥密度	含水比	乾燥密度	1	2	3		含水比	乾燥密度	含水比	乾燥密度	1	2	3		含水比	乾燥密度	含水比	乾燥密度	1	2	3
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	14.5	1.77	●	○	○	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A85-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	14.5	1.59	●	○	○	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A75-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	14.5	1.40	●	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 粗目 (CS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	13.4	1.82	●	◎	◎	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A85-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	13.4	1.63	●	○	○	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A75-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	13.4	1.44	●	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	60	51.00	砕砂 粗目 (CS)	40	34.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	13.7	1.81	◎	◎	◎	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A85-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	13.7	1.62	○	○	○	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A75-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	13.7	1.42	○	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	85	72.25	微粉末 (P)	15	12.75	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	13.7	1.79	●	○	○	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A85-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	13.7	1.60	●	○	○	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A75-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	13.7	1.41	●	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	50	42.50	砕砂 粗目 (CS)	30	25.50	微粉末 (P)	20	17.00	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	10.5	1.88	○	○	○	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A85-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	10.5	1.68	○	○	○	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A75-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	10.5	1.48	○	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-C95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	9.5	2.03	●	○	○																
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 粗目 (CS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-C95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	9.2	1.99	●	○	○																
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	60	51.00	砕砂 粗目 (CS)	40	34.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-C95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	8.0	2.07	○	○	○																
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	85	72.25	微粉末 (P)	15	12.75	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-C95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	8.9	2.06	●	○	○																
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	50	42.50	砕砂 粗目 (CS)	30	25.50	微粉末 (P)	20	17.00	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-C95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	7.0	2.11	○	○	○																

実施予定　◎：2020 年度に別業務で実施（5 試験）
●：本業務で実施（2020 年度）（12 試験）
○：本業務で実施（2021 年度）見込み（43 試験）

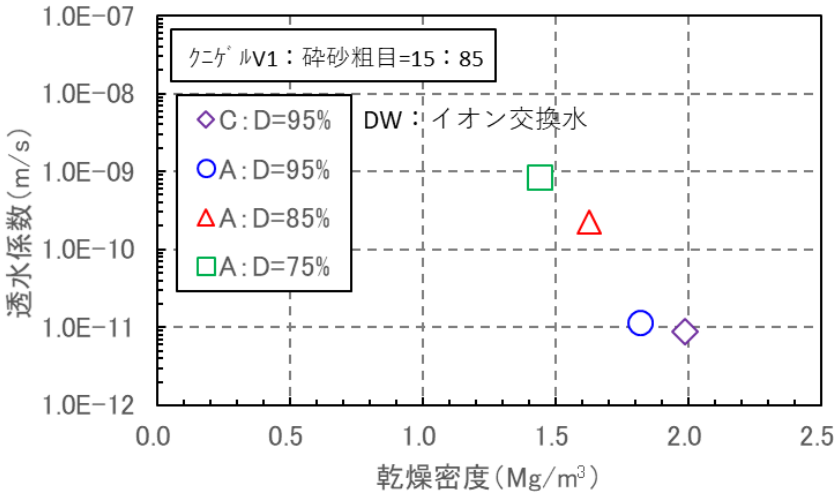
付表 2-2　透水試験　試験ケース一覧表（その 2；人工海水）

ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ		模擬掘削土									透水試験																				
種類	混合率	種類	骨材混合率	全体混合率	種類	骨材混合率	全体混合率	種類	骨材混合率	全体混合率	試験ケース（人工海水）	設定		設定値		数量			試験ケース（人工海水）	設定		設定値		数量			試験ケース（人工海水）	設定		設定値		数量		
												含水比	乾燥密度	含水比	乾燥密度	1	2	3		含水比	乾燥密度	含水比	乾燥密度	1	2	3		含水比	乾燥密度	含水比	乾燥密度	1	2	3
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	14.5	1.77	●	○	○	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A85-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	14.5	1.59	●	○	○	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A75-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	14.5	1.40	●	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 粗目 (CS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	13.4	1.82	●	◎	◎	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A85-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	13.4	1.63	●	○	○	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A75-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	13.4	1.44	●	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	60	51.00	砕砂 粗目 (CS)	40	34.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	13.7	1.81	◎	◎	◎	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A85-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	13.7	1.62	○	○	○	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-A75-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	13.7	1.42	○	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	85	72.25	微粉末 (P)	15	12.75	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	13.7	1.79	●	○	○	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A85-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	13.7	1.60	●	○	○	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A75-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	13.7	1.41	●	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	50	42.50	砕砂 粗目 (CS)	30	25.50	微粉末 (P)	20	17.00	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	10.5	1.88	○	○	○	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A85-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×85%	10.5	1.68	○	○	○	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-A75-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×75 %	10.5	1.48	○	○	○
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-C95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	9.5	2.03	●	○	○																	
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 粗目 (CS)	100	85.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-C95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	9.2	1.99	●	○	○																	
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	60	51.00	砕砂 粗目 (CS)	40	34.00	微粉末 (P)	0	0.00	KV(15)-BA(G51-CS34-P0)-C95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	8.0	2.07	○	○	○																	
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	0	0.00	砕砂 細目 (FS)	85	72.25	微粉末 (P)	15	12.75	KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-C95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	8.9	2.06	●	○	○																	
ｸﾆｹﾞﾙ V1 (KV)	15	砕石 (G)	50	42.50	砕砂 粗目 (CS)	30	25.50	微粉末 (P)	20	17.00	KV(15)-BA(G42.5-CS25.5-P17)-C95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} ×95%	7.0	2.11	○	○	○																	

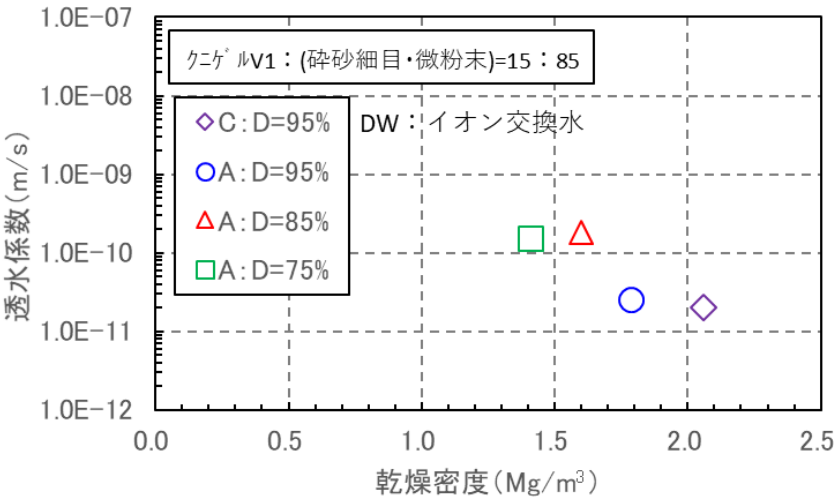
実施予定　◎：2020 年度に別業務で実施（5 試験）
●：本業務で実施予定（2020 年度）（12 試験）
○：本業務で実施予定（2021 年度）（43 試験）



(a) KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-DW；砕砂細目

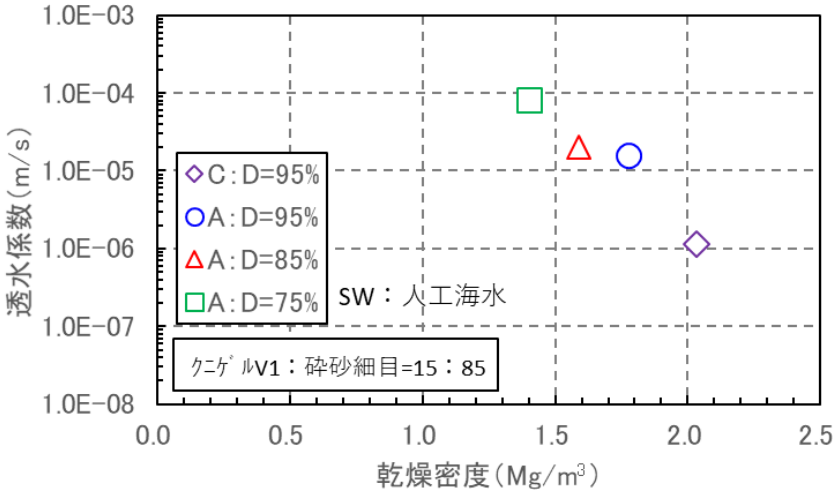


(b) KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-DW；砕砂粗目

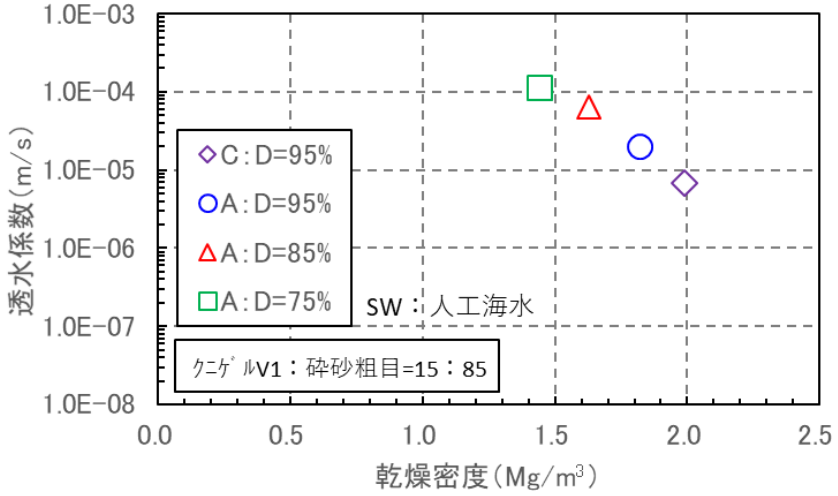


(c) KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-DW；砕砂細目・微粉末

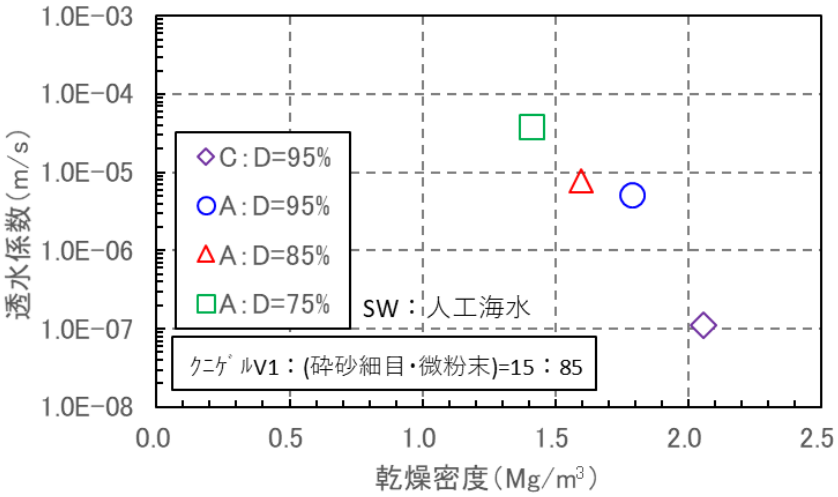
付図 2-1　各材料の透水係数と乾燥密度の関係（イオン交換水）



(a) KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-SW；砕砂細目



(b) KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-SW；砕砂粗目



(c) KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-SW；砕砂細目・微粉末

付図 2-2　各材料の透水係数と乾燥密度の関係（人工海水）

付表 2-3　透水試験結果（その 1；イオン交換水）

試験ケース	供試体仕様						透水係数 (m/s)
	設定		設定値		実測値		
	含水比	乾燥密度	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A75-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×75%	14.5	1.40	14.3	1.401	1.52×10^{-10}
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A85-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×85%	14.5	1.59	14.6	1.588	1.72×10^{-10}
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×95%	14.5	1.77	14.5	1.774	2.46×10^{-11}
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-C95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (C法)×95%	9.5	2.03	9.2	2.033	1.79×10^{-11}
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A75-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×75%	13.4	1.44	13.4	1.440	8.43×10^{-10}
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A85-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×85%	13.4	1.63	13.1	1.631	2.23×10^{-10}
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×95%	13.4	1.82	13.3	1.820	1.17×10^{-11}
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-C95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (C法)×95%	9.2	1.99	9.2	1.990	8.82×10^{-12}
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A75-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×75%	13.7	1.41	13.2	1.410	1.53×10^{-10}
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A85-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×85%	13.7	1.60	13.5	1.599	1.79×10^{-10}
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A85-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×95%	13.7	1.79	13.5	1.786	2.54×10^{-11}
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-C95-DW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (C法)×95%	8.9	2.06	8.6	2.058	2.04×10^{-11}

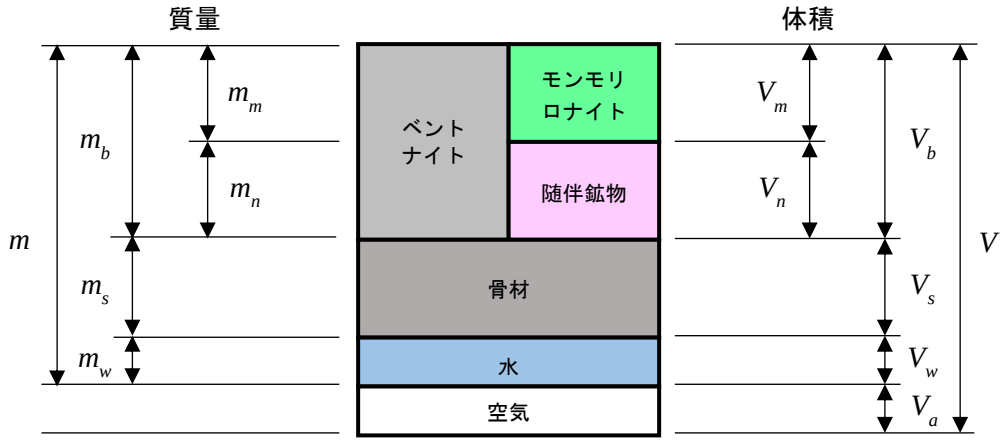
付表 2-4　透水試験結果（その 2；人工海水）

試験ケース	供試体仕様						透水係数 (m/s)
	設定		設定値		実測値		
	含水比	乾燥密度	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A75-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×75%	14.5	1.40	14.4	1.400	8.13×10^{-5}
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A85-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×85%	14.5	1.59	14.6	1.587	2.02×10^{-5}
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-A95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×95%	14.5	1.77	14.6	1.774	1.57×10^{-5}
KV(15)-BA(G0-FS85-P0)-C95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (C法)×95%	9.5	2.03	9.2	2.034	1.15×10^{-6}
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A75-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×75%	13.4	1.44	13.5	1.440	1.13×10^{-4}
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A85-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×85%	13.4	1.63	13.3	1.630	6.19×10^{-5}
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-A95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×95%	13.4	1.82	13.4	1.819	2.05×10^{-5}
KV(15)-BA(G0-CS85-P0)-C95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (C法)×95%	9.2	1.99	9.0	1.990	6.75×10^{-6}
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A75-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×75%	13.7	1.41	13.8	1.411	3.81×10^{-5}
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A85-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×85%	13.7	1.60	13.8	1.599	7.80×10^{-6}
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-A85-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (A法)×95%	13.7	1.79	13.8	1.789	5.18×10^{-6}
KV(15)-BA(G0-FS72.25-P12.75)-C95-SW	ω_{opt}	ρ_{dmax} (C法)×95%	8.9	2.06	8.9	2.058	1.11×10^{-7}

≪有効粘土密度ρ_{eb}≫

$$\rho_{eb} = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d R_s/\rho_s} \qquad \text{(式-1)}$$

ここで、ρ_{eb}は有効粘土密度（Mg/m³）、ρ_dは乾燥密度（Mg/m³）、R_sは骨材の混合率（%）、ρ_sは骨材の土粒子の密度（Mg/m³）である。



乾燥密度	有効粘土密度	有効モンモリロナイト密度
$\rho_d = \frac{m_m + m_n + m_s}{V_m + V_n + V_s + V_w + V_a}$	$\rho_{eb} = \frac{m_m + m_n}{V_m + V_n + V_w + V_a}$	$\rho_{em} = \frac{m_m}{V_m + V_w + V_a}$

付図 2-3　各代替指標密度の概念図

付録６　埋め戻し材の施工試験結果

目次

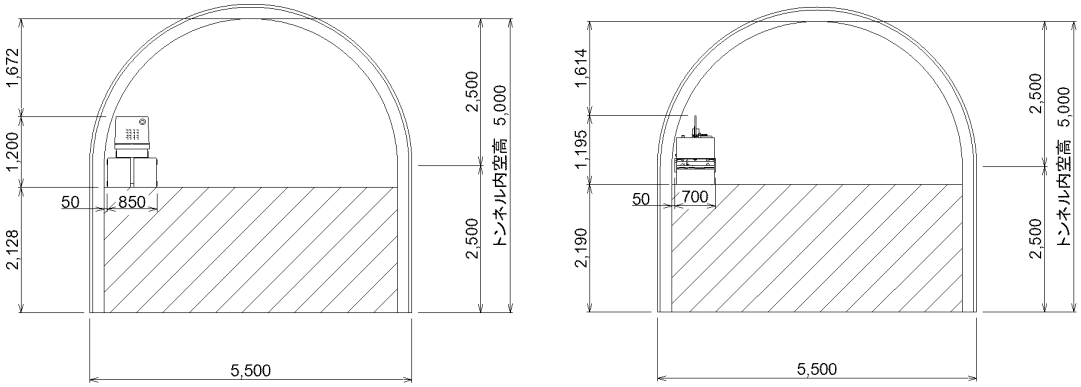
1.　撒き出し・転圧工法 ..... 付 6-1
1.1.　撒き出し厚さ設定のための予備試験結果 ..... 付 6-1
1.2.　模擬坑道を対象とした施工試験結果 ..... 付 6-4
1.2.1.　施工試験時の施工方法の設定 ..... 付 6-4
1.2.2.　乾燥密度測定結果（施工中および施工後） ..... 付 6-4
2.　吹付け工法 ..... 付 6-9
2.1.　付録資料の構成 ..... 付 6-9
2.2.　吹付試験の概要 ..... 付 6-9
2.2.1.　材料供給機 ..... 付 6-9
2.2.2.　コンプレッサ ..... 付 6-11
2.2.3.　ロータ式吹付け機 ..... 付 6-11
2.3.　吹付け材の製造 ..... 付 6-12
2.4.　工学規模試験（吹付け箱試験、湧水無し） ..... 付 6-14
2.4.1.　試験概要 ..... 付 6-14
2.4.2.　試験ケース ..... 付 6-15
2.4.3.　品質管理項目 ..... 付 6-16
2.4.4.　試験結果 ..... 付 6-16
2.5.　工学規模試験（吹付け箱試験、湧水有り） ..... 付 6-22
2.5.1.　模擬湧水の発生方法 ..... 付 6-22
2.5.2.　試験状況 ..... 付 6-23
2.5.3.　試験結果 ..... 付 6-24
2.6.　工学規模試験のまとめ ..... 付 6-27
2.7.　小規模模擬坑道試験 ..... 付 6-29
2.7.1.　吹付け率、リバウンド、現場密度試験 ..... 付 6-29
3.　スクリュー工法 ..... 付 6-35
3.1.　使用材料及び試験設備 ..... 付 6-35
3.2.　自由落下ケース ..... 付 6-37
3.3.　先端密着ケース ..... 付 6-38
4.　ブロック工法 ..... 付 6-42
4.1.　静的締固め試験結果 ..... 付 6-42
4.1.1.　実施概要 ..... 付 6-42
4.1.2.　使用材料 ..... 付 6-42
4.1.3.　試験ケース ..... 付 6-42
4.1.4.　試験方法・手順 ..... 付 6-43
4.1.5.　静的締固め試験 試験結果 ..... 付 6-48

1.　撒き出し・転圧工法

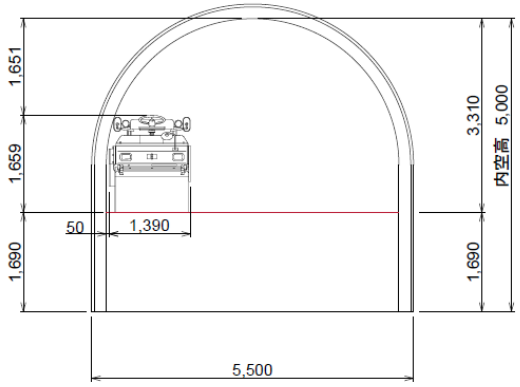
撒き出し・転圧工法に関する付録資料では、以下の項目を掲載する。
・撒き出し厚さ設定のための予備試験の結果
・施工中および施工後に実施した乾燥密度の測定結果

1.1.　撒き出し厚さ設定のための予備試験結果

施工試験の目的は、撒き出し・転圧工法において、空間位置の違いおよび施工品質の確保が難しい部分の密度のばらつきを把握することを目的としている。予備試験を行い、施工機械・施工方法（4t タンデムローラーの撒き出し厚さ、側溝部分の施工方法、空頭制限（付図 1-1）などについて確認を行い、施工試験の施工条件を設定した。実施した予備試験のケースを付表 1-1 に示す。



(a)小型振動ローラー　　(b)ハンドガイドローラー

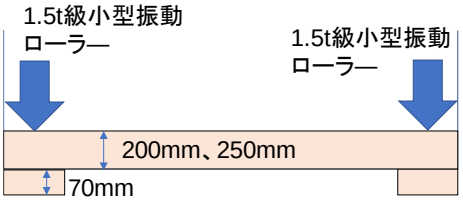


(c)4t タンデムローラー

付図 1-1　施工機械による転圧施工可能高さの違い

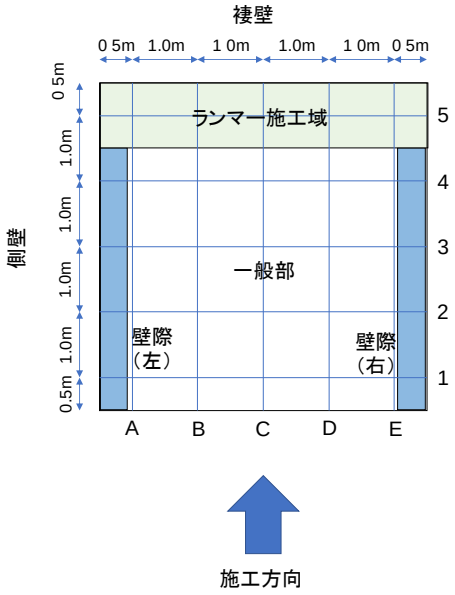
付表 1-1　予備試験ケース

層 No.	施工機械	確認事項 1 撒出厚	確認事項 2 側溝部の施工法
予備試験層 1	壁　際：1.5t 小型振動ローラー 一般部：4t タンデムローラー	200mm	1.5t 級小型振動ローラー
予備試験層 2	壁　際：1.5t 小型振動ローラー 一般部：4t タンデムローラー	250mm	1.5t 級小型振動ローラー
予備試験層 3	壁　際：1.5t 小型振動ローラー 一般部：4t タンデムローラー	300mm	1.5t 級小型振動ローラー
予備試験層 4	※側溝部のみ施工 サンドランマー	―	サンドランマー （撒き出し厚 100mm）



予備試験層　1、2:
壁際の転圧と同時に側溝部分も施工

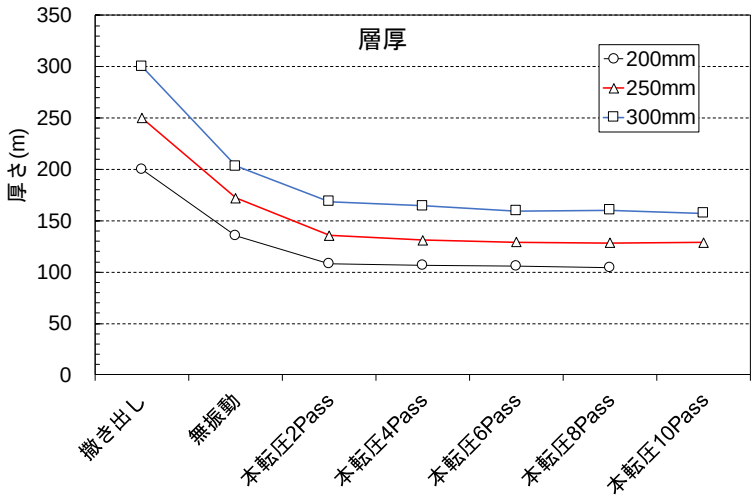
付図 1-2　側溝部施工時概念　断面図



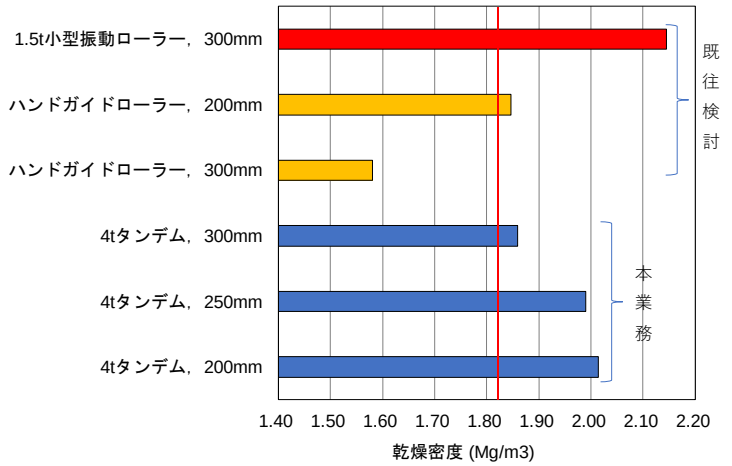
付図 1-3　施工領域の区分　平面図

予備試験結果を評価するための施工基準として、乾燥密度（目標値；1.81 Mg/m3）を達成することとした。**付図 1-4** に転圧回数による平均層厚の変化を示す。どの撒き出し厚さでも転圧回数 6 回で層厚は収束すると判断した。各ケースともに転圧回数 6 回になれば目標乾燥密度である 1.81 Mg/m3 を満足した。

付図 1-5 に 4t タンデムローラーで行った予備試験の結果を棒グラフで示す。同図には、過去に同じ材料配合で転圧試験を行った結果も併記する。4t タンデムローラーを使用した場合、最終的に到達した乾燥密度は、撒き出し厚さ 300mm でも 1.85 Mg/m^3 となった。



付図 1-4　転圧回数による平均層厚の変化



付図 1-5　転圧完了後の乾燥密度の比較

側溝部分の転圧時の撒き出し厚を変えた場合とサンドランマーによる締固めを行った後の乾燥密度の一覧表を付表 1-2 に示す。

1.5t 級小型振動ローラーで転圧した箇所は、1.85～2.05Mg/m³ 程度であったことから、壁際は 1.5t 小型振動ローラーにより施工を行うこととした。

付表 1-2　側溝部分の締固め後の乾燥密度

測定場所	乾燥密度 (Mg/m³)	含水比 (%)	施工時層厚 (mm)	転圧機械
予備試験層 1　右　上下	1.96	9.7	270	1.5 級小型振動ローラー
予備試験層 1　右　下	1.93	10.7	270	1.5 級小型振動ローラー
予備試験層 1　左　下	1.85	11.3	270	1.5 級小型振動ローラー
予備試験層 2　右　下	2.05	8.9	320	1.5 級小型振動ローラー
予備試験層 2　左　下	2.05	8.8	320	1.5 級小型振動ローラー
予備試験層 3　左　上下	1.95	8.8	370	1.5 級小型振動ローラー
予備試験層 4　右　上	1.92	9.1	300	1.5 級小型振動ローラー
予備試験層 4　右　下	1.74	8.4	70	サンドランマー

1.2.　模擬坑道を対象とした施工試験結果

1.2.1.　施工試験時の施工方法の設定

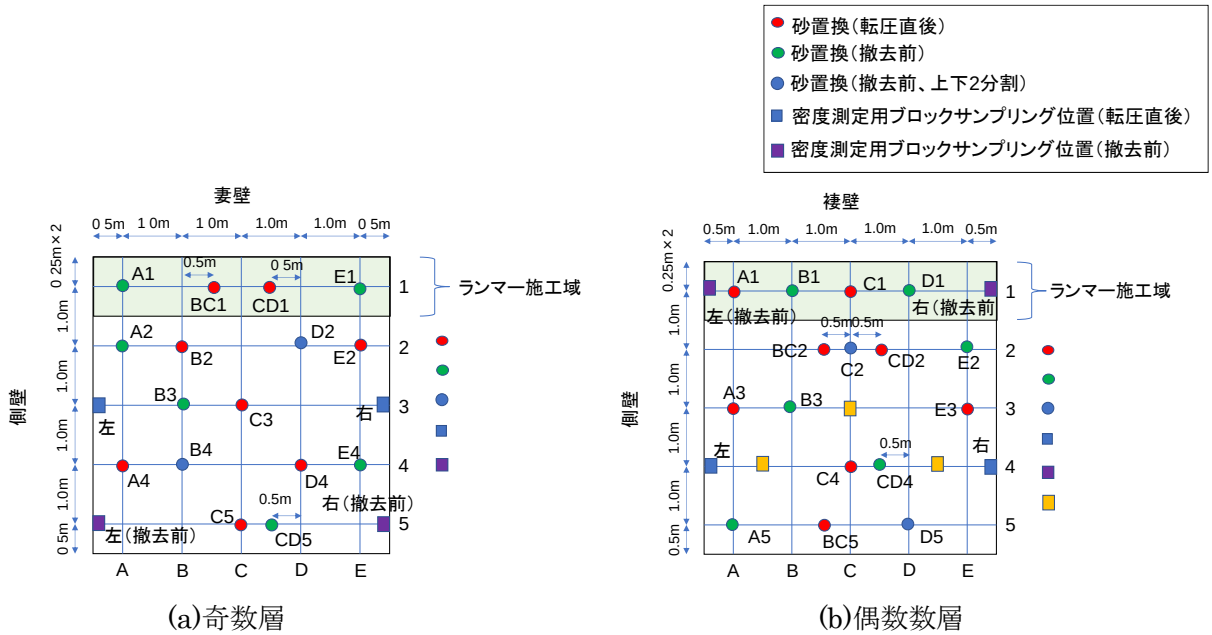
施工試験の施工仕様を付表 1-3 に示す。施工仕様は、予備試験の結果をもとに、撒出厚は 300mm とし、基本的に 4t タンデムローラーで 6 回転圧を行い、4t タンデムローラーでは締固めできない壁際部分は 1.5t 小型振動ローラーで、妻壁部分はランマーで転圧を行った。

付表 1-3　施工試験の施工仕様

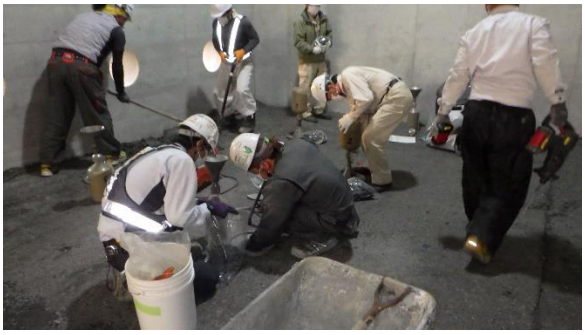
	撒出厚	転圧機械	目的
側溝部分	70mm	サンドランマー（右側のみ）	・施工品質の確保が難しい部分を把握 ・空間位置の違いによる密度のばらつきの把握
基本ケース	300mm	一般部：4t タンデムローラー （無振動転圧 2 回、振動転圧 6 回） 壁際：1.5t 小型振動ローラー 妻部：ランマー	

1.2.2.　乾燥密度測定結果（施工中および施工後）

砂置換法は、各層で転圧後・撒去直前のともに 8 点ずつとした。奇数層および偶数数層での品質管理実施位置を付図 1-6 に示す。品質測定の状況を付図 1-7 に示す。8 点の内訳はランマー転圧場所で 2 点ずつ、1.5t 級小型振動ローラー転場所で 2 点ずつ、4t タンデムローラーの前輪のみで転圧する場所で 2 点ずつ、前後輪の両方で転圧する場所で 2 点ずつ採取できる配置とした。壁際の乾燥密度の測定は点検孔とは別の場所より左右 1 箇所ずつ試料採取し、パラフィン法により行った。



付図 1-6　各層での品質管理実施位置



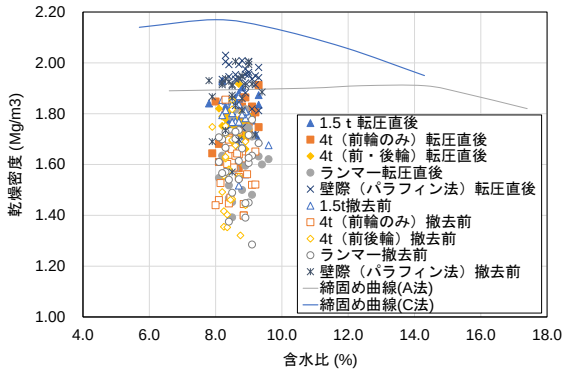
(a)試料採取状況

(b)砂置換法による現場密度測定状況

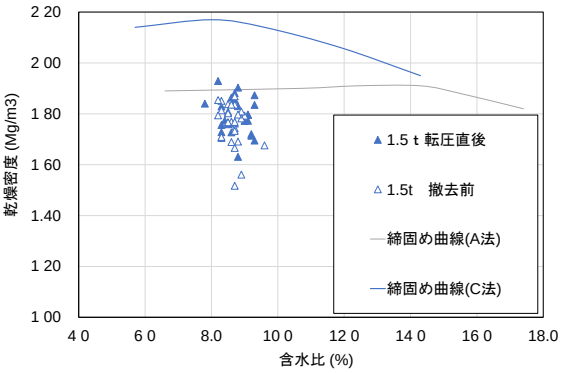
付図 1-7　品質測定状況

施工直後と撤去前の時点で、各層複の複数点でサンプリングを行い、乾燥密度と含水比の関係を測定した結果を付図 1-8 に示す。図中、(a)には全てのデータを示しており、以下(b)から(e)は砂置換法により求めた乾燥密度を、1.5t 小型振動ローラー転圧、4t タンデムローラー転圧(前輪のみ)、4t タンデムローラー転圧(前・後輪)、ランマー転圧の順に個別に示した。また、(f)には、1.5t 小型転圧ローラーで転圧した壁際から採取した試料をパラフィン法により求めた乾燥密度の結果を示した。

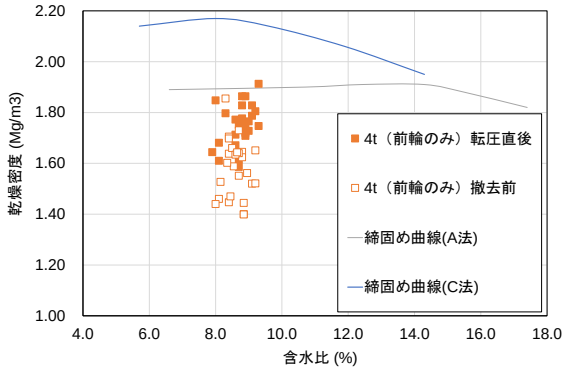
各層の砂置換法による乾燥密度の平均値を、施工直後と撤去前の時点で付図 1-9 に示し、また、各層のパラフィン法による乾燥密度の平均値（採取位置は壁際のみ）を付図 1-10 に示した。



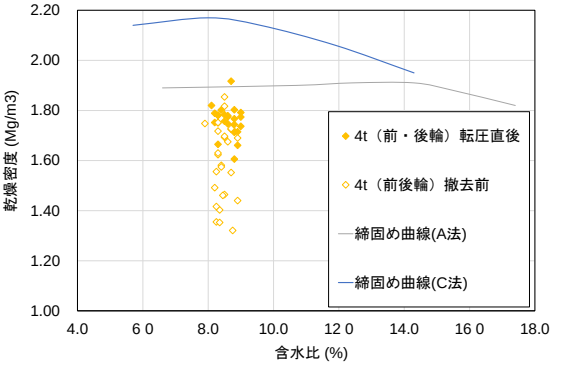
(a)全ての試料



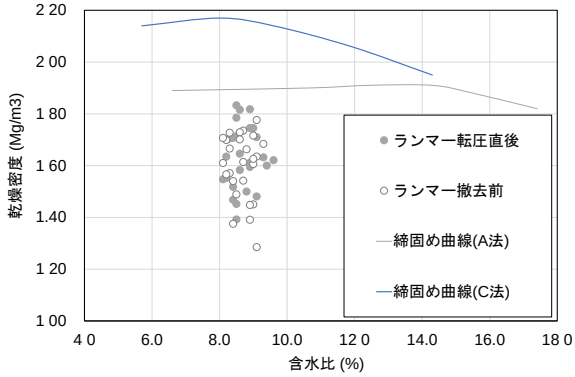
(b) 1.5t 小型振動ローラー転圧



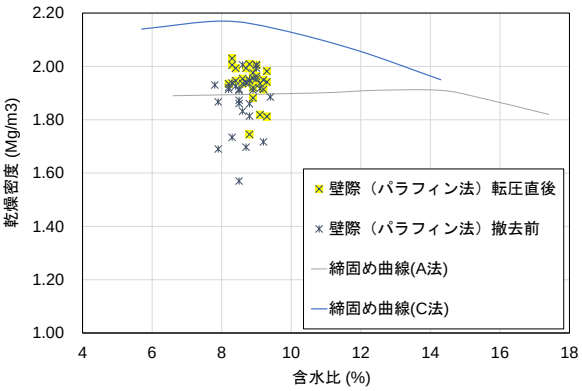
(c) 4t タンデムローラー転圧(前輪のみ)



(d)4t タンデムローラー転圧(前・後輪)

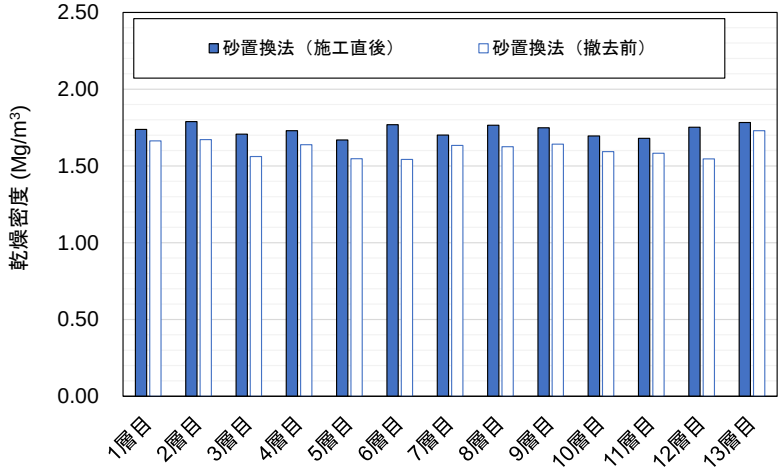


(e)ランマー転圧

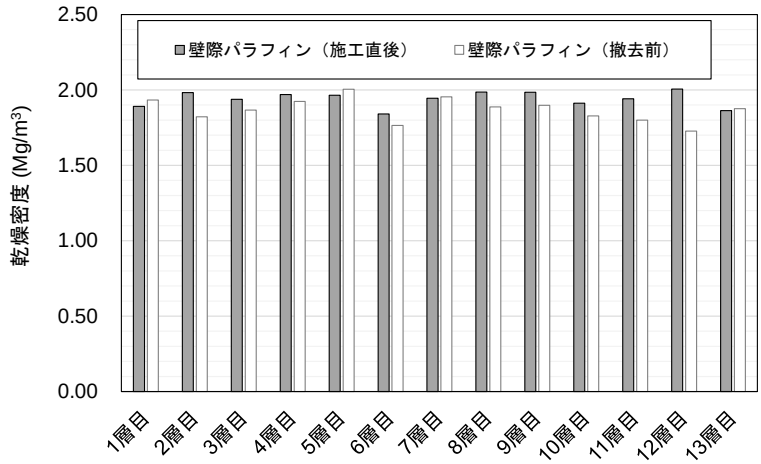


(f)　1.5t 小型転圧、壁際（パラフィン法））

付図 1-8　乾燥密度と含水比の関係（施工直後と撤去前の時点）



付図 1-9　各層の砂置換法による乾燥密度の平均値



付図 1-10　各層のパラフィン法による乾燥密度の平均値（壁際）

① 砂置換法により求めた乾燥密度

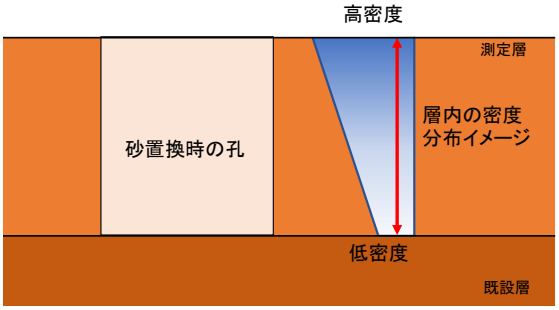
・(b)から(e)の砂置換法の乾燥密度の分布状態より、1.5t 小型振動ローラー、4t タンデムローラー、ランマーの順に乾燥密度が大きくなる傾向があった。

・施工直後と撤去前の時点の比較では、施工直後の乾燥密度がやや大きくなる分布状態となった。

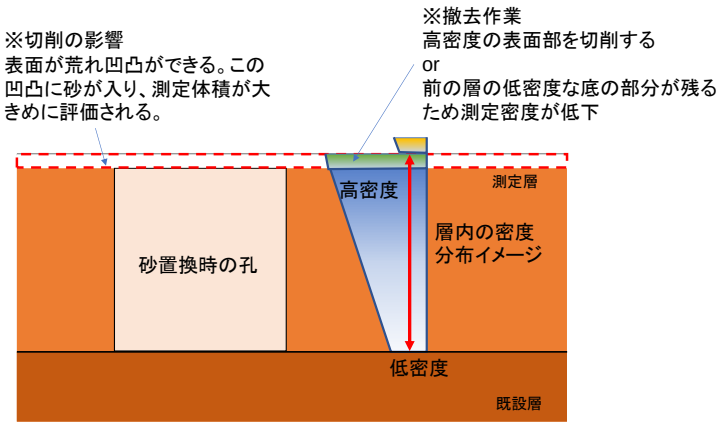
【撤去時の乾燥密度が相対的に小さくなった理由の推測】

砂置換法により求めた乾燥密度について、施工直後と撤去時を比較した場合、撤去時の乾燥密度が相対的に小さくなった理由として、以下によるものと推測した。

施工直後の、砂置換時の掘削孔と層内の密度分布の模式図を付図 1-11 に示す。一方、撤去時は、表面をバックホウなどのバケットで剥ぎ取る影響が考えられる。付図 1-12 に示すように表面近くの高密度の部分も撤去してしまう影響、または撤去すべき上層の底の密度が低い部分が残ってしまう影響が考えられる。さらに、撒き出し材が礫を含むため表面切削によって礫が浮き出し凹凸が形成され、置換する砂が凹凸に砂が入り込み体積を実際よりも大きく測定する影響が考えられる。これらの要因が、全て乾燥密度が小さく方向に作用して、撤去時の乾燥密度が相対的に小さくなったのではないのかと推測される。



付図 1-11　層内の密度分布と砂置換時の掘削孔の模式図



付図 1-12　撤去時における砂置換時の掘削孔の模式図

② パラフィン法により求めた乾燥密度

・(f)のパラフィン法により求めた乾燥密度は、(b)から(e)の砂置換法による乾燥密度より、0.1 Mg/m^3 程度大きい値となった。これは、締固め能力の大きい 1.5t 小型振動ローラーにより転圧したコンクリート壁際は、密度が大きくなりやすい位置であり、その部分から試料を採取したことも影響していると考えられる。さらに、ブロック試料の中にパラフィンが浸透したため、浸透した分の見かけの体積が減少し、乾燥密度が大きめに測定されていることも考えられる。

2. 吹付け工法

2.1. 付録資料の構成

吹付け工法に関する付録資料では、以下の項目を掲載する。また、本文中で示す「H31 年度の研究成果」は参考文献（原子力機構・原環センター,2019）を示している。

- 事業で用いた吹付け工法および機器の概要
- 埋め戻し材の製造
- 工学規模試験の試験結果
- 小規模模擬坑道試験

2.2. 吹付試験の概要

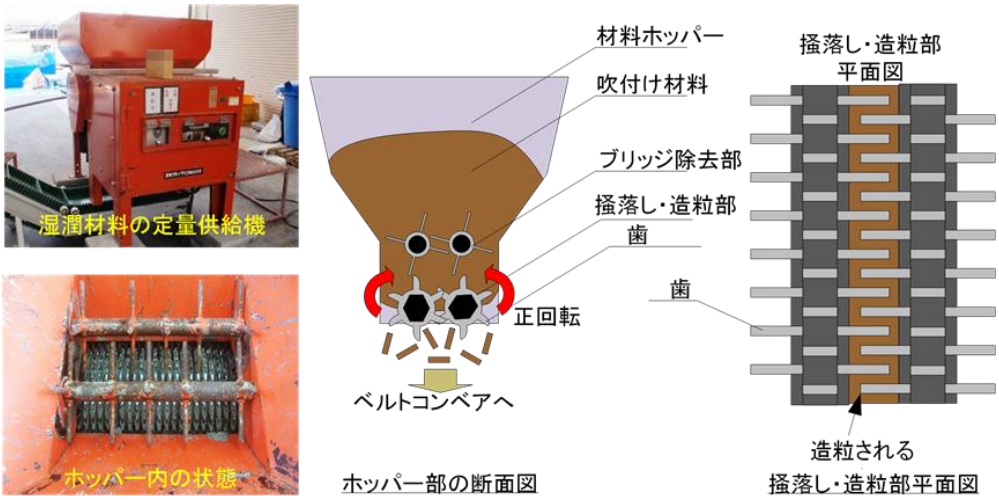
業務で利用した吹付工法は、材料供給機に投入された吹付け材料を、ベルトコンベアを介してロータ式吹付け機内に一定供給量で供給し、コンプレッサの圧縮空気によってホース内を圧送され、吹付けノズル内で速度エネルギーを増加し、吹付け面に吹付ける湿式吹付け工法である。

付図 2-1 業務で用いた吹付け方法の概要

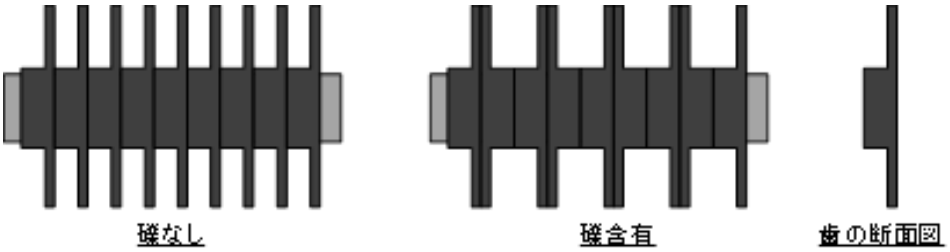
2.2.1. 材料供給機

湿式吹付け工法では、材料の含水比を事前に調整したものを吹付けるが、均一な施工品質を確保するためには湿潤材料の定量供給が重要と考えられ、材料供給機としてグラニュレータ（ACG プライブリコ社製）を使用した。この材料供給機は付図 2-2 に示すような解砕型の造粒機構を備えている。一般的に湿潤状態の粉体材料は、ホッパー内でアーチ効果によるブリッジを形成し、材料の定量供給を困難にする。このため、本工法で使用した材料供給機には、ホッパー内にブリッジ除去用の回転シャフトを設置し、ホッパーの排出部付近に落とされた材料を一定速度で強制的に掻落し・造粒部でベルトコンベアに排出することによって一定供給性を実現している。この機械を通過した材料は、ゆるい団粒物となるが、圧縮空気で吹付け機から吹付けノズルに至るまでのホース内を搬送される間に再び解砕される程度の硬さになるように、掻落し・造粒部の歯の間隔を調整している。この間隔は付図 2-3 に示すように、吹付ける材料の最大粒径に応じて調整することも可能である。付表 2-1 に材料供給機の仕様を示す。

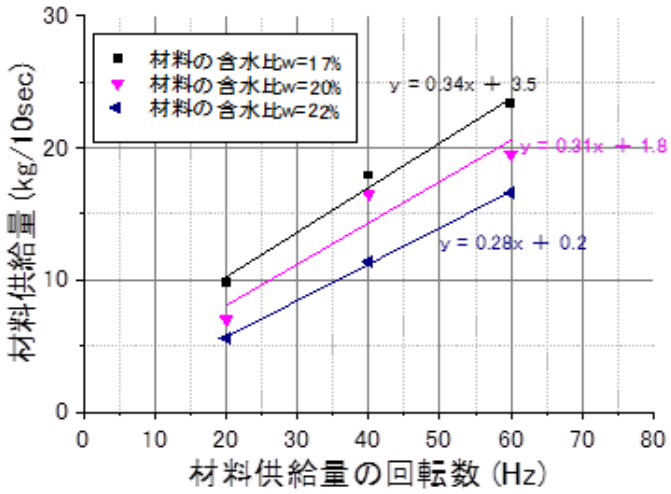
この材料供給機では、供給量を掻落し・造粒部の回転数によって制御している。このため、材料ごとに、試験前に付図 2-4 に示すように、回転数と供給量のキャリブレーション線を取得して使用する。図から、回転数が大きい程、供給量が増える傾向にあり、掻落し・造粒部の回転数と材料供給量の関係はほぼ線形で、材料供給量の制御が容易である。



付図 2-2　湿潤材料の定量供給機



付図 2-3　掻落し・造粒部の歯の取り付け方



付図 2-4　回転数と材料供給量の関係（例）

付表 2-1　材料供給機の仕様

機種名（メーカー）	グラニュレータ（ACG プライブリコ社製）	
部位	湿潤材料供給機	ベルトコンベア
材料吐出量（m^3/hr）	1.0~4.0	-
回転数（rpm）	1~10（常用使用回転数）	-
所要電源	200/220V・4P・7.5Kw	200/220V・4P・0.4Kw
駆動	インバータモータによる 無段変速回転	-
ホッパー（m^3）	1.4	-
寸法（mm）	1,590W×1,490L×2,530H	300W×3,000L
質量（kg）	約 1,200	

2.2.2. コンプレッサ

試験では、吹付け用のコンプレッサとして 190HP ドライ（PDS655SD：北越工業製）使用した。その概要を付図 2-5 に、仕様を付表 2-2 表 4.3 2 に示す。

付図 2-5　コンプレッサ（PDS655SD：北越工業製）

付表 2-2　コンプレッサの標準仕様

機種名（メーカー）		PDS655SD（北越工業）
吐出空気量（m^3/min）		18.5
吐出圧力（MPa）		0.7
寸法（mm）	全長 L	3,650
	全幅 W	1,685
	全高 H	2,070
乾燥質量（整備質量）（kg）		3,120［3,460］

2.2.3. ロータ式吹付け機

本試験に使用したロータ式吹付け機を付図 2-6 に、機械の仕様を付表 2-3 に示す。本機は乾式吹付けだけでなく、湿式吹付けにおいても、材料の吐出が均一かつ連続投入が可能なため、安定して良質な施工体の構築が可能である。

付図 2-6　ロータ式吹付け機

付表 2-3　ロータ式吹付け機の仕様

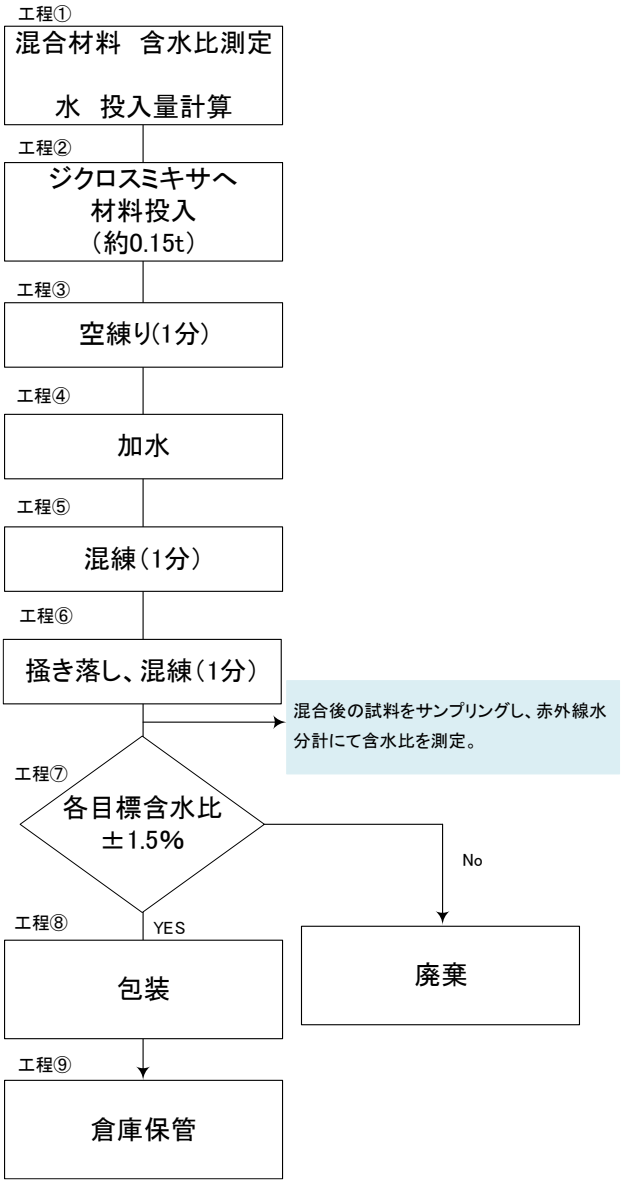
機種（メーカー）	ニードガン 2000 （AGC プライブリコ社製）
材料ホース内径（mm）	63.5
材料吐出量（m^3/hr）	20
所要空気量（m^3/min）	20
所要空気圧力（MPa）	0.74
材料送り最大距離（m）	水平 200・垂直 100
吹付け可能最大粒径（mm）	15
駆動	7.5Kw インバータモータ 220V　3 相
回転数（rpm）	30
寸法（mm）	990W×1,845L×1,175H
質量（kg）	約 1,200

2.3.　吹付け材の製造

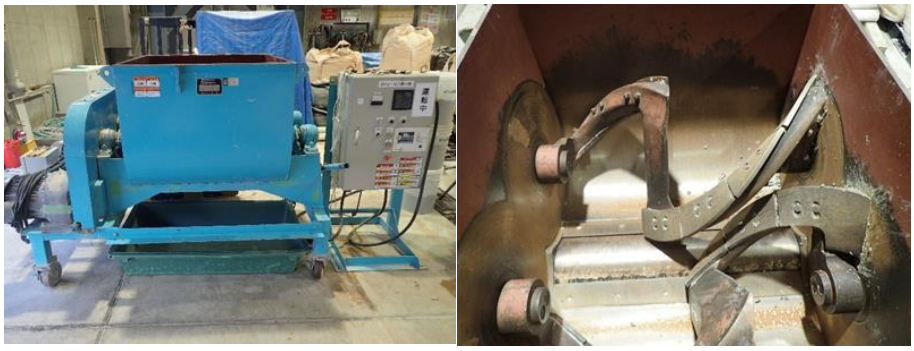
吹付け材（埋め戻し材）は、含水比調整後の材料が 1 ケースあたり合計約 0.8t になるように混合し、混合後の材料は、含水比が変化しないようにビニール袋を外側に被せて養生した。吹付け材の製造フローを付図 2-7 に示す。

⑵使用機械及び仕様

吹付け材の製造にはジクロスミキサを用いて含水比調整を実施した。付図 2-8 に使用したジクロスミキサの写真を、付表 2-4 に仕様を示すが、生コンなどを練る 2 軸のミキサであり、1 バッチ当たり 150kg 程度練ることが可能である。



付図 2-7　吹付け材の製造フロー



ジクロクミキサの全景　　２軸ミキサ

付図 2-8　ジクロスミキサ

付表 2-4　ジクロスミキサの仕様

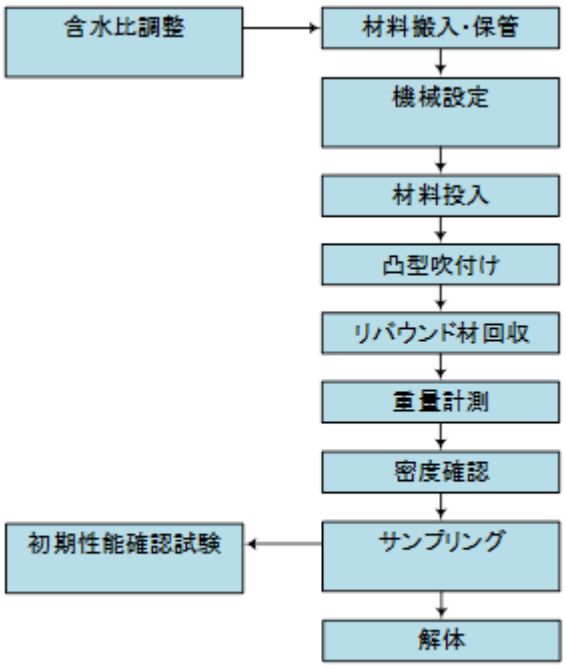
機種（メーカー）	WHQ-120（北川鉄工所）
練り混ぜ容量（m^3）	0.12
駆動	200V　3 相、3.7×2（kW）
使用材料最大粗骨材粒径（mm）	40
重量（kg）	1,100

2.4.　工学規模試験（吹付け箱試験、湧水無し）

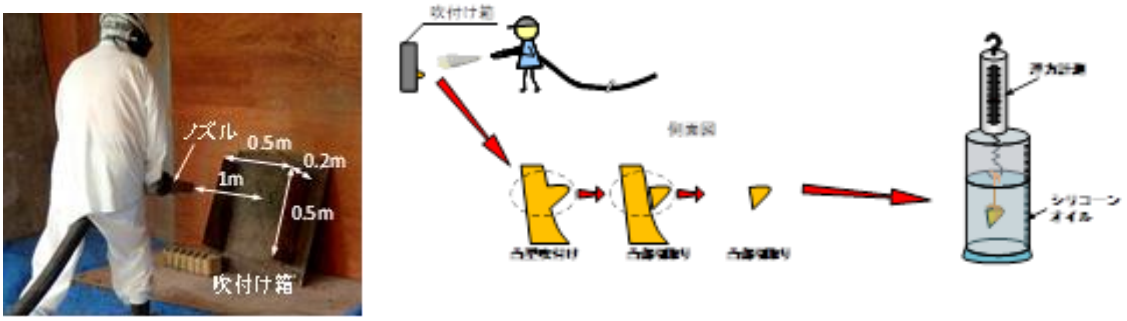
2.4.1.　試験概要

工学規模試験では、実規模模での施工試験に向けた材料条件及び機械設定の選定を行うことを目的とし、礫の最大粒径、含水比、湧水の有無をパラメータとした吹付け箱試験を実施した。

試験の施工フローを付図 2-9 に示す。本試験では 50×50×20cm 小型吹付け箱を使用し、吹付け箱に吹付けたベントナイト混合土の湿潤密度（シリコーンオイル法）と電子レンジ法から得られる含水比から乾燥密度の算出及び確認を現地で行った。吹付け状況とシリコーンオイル法による密度計測の概要を付図 2-10 に示す。さらに、解体後の試料を持ち帰ってパラフィン法と炉乾燥法でも、乾燥密度と含水比の算出を行った。



付図 2-9　工学規模試験の試験フロー



付図 2-10　吹付け状況及びシリコーンオイル法による密度計測

2.4.2. 試験ケース

試験では砕石・砕砂の最大粒径、含水比、及び材料供給量、湧水の有無をパラメータとした工学規模試験を実施した。湧水無しの試験ケース（9 ケース）を付表 2-5、湧水有りケース（6 ケース）を付表 2-6 に示す。なお、従来の吹付け箱試験では密度計測用に凸型吹付け（付図 2-10 参照）を実施する。この凸型施工は、通常の施工に比べリバウンドが多く生じる。このため、備考欄に「凸型無し」と記載のケースに関しては、凸型施工を行わず、ブロックサンプリングの一部を用いて、密度試験を実施し、凸型施工時に発生するリバウンドを排除した。なお、凸型の体積、施工時間から凸型施工を行った場合に発生するリバウンド量は算出できる。つまり、凸型なしの吹付け方法で試験を実施しているが、凸型ありの試験と同じ評価が可能である。

H31 年度研究で実施した同種の材料による吹付け箱試験では、Na 型ベントナイト（クニゲル V1）を 15%混合し、最大粒径 2.5mm、5mm の玄武岩を混合した埋め戻し材を吹付けたケースが最も乾燥密度が高かった。また、含水比に関しては、締固め試験（4.5Ec）で得られた最適含水比より乾燥側（w_{opt}-1.5%のケース）でも、鉛直に近い状態で立てかけられた吹付け箱から、埋め戻し材が剥離することなく吹付け可能であることが分かった。これらの知見に基づき、今年度はさらに乾燥側（w_{opt}-3.0%）でも試験を実施する。

付表 2-5　工学規模試験ケース（湧水無し）

ケース No.	ベントナイトの種類	岩種	玄武岩の最大粒径（mm）	ベントナイト含有率（wt%）	材料供給量（kg/10sec）	含水比 w（%）	備考
1	クニゲル V1	火成岩（玄武岩）	2.5	15	10	w_{opt}－3.0	
2					12.5		凸型無し
3					15		凸型無し
4			5		10	w_{opt}－3.0	
5					12.5		凸型無し
6					15		凸型無し
7					10	w_{opt}－1.5	
8					12.5		凸型無し
9					15		凸型無し

付表 2-6　工学規模試験ケース（湧水有り）

ケース No.	ベントナイトの種類	岩種	玄武岩の最大粒径（mm）	ベントナイト含有率（wt%）	材料供給量（kg/10sec）	含水比 w（%）	備考
10	クニゲル V1	火成岩（玄武岩）	2.5	15	10	$w_{opt}-3.0$	
11						w_{opt}	
12						$w_{opt}+1.5$	
13			5		10	$w_{opt}-3.0$	
14						w_{opt}	
15						$w_{opt}+3.0$	

2.4.3. 品質管理項目

試験で実施する品質管理項目を付表 2-7 に示す。吹付け試験を実施した際の評価項目は、吹付け前後（以下、吹付け前の埋め戻し材：フレッシュ材（F 材)、吹付けた際に付着しなかった埋め戻し材：リバウンド材（R 材)）の含水比、吹付け前後の粒度分布、吹付けた材料（付着材）の乾燥密度、リバウンド率及び吹付け中の圧縮空気圧である。これらの計測は、吹付けた埋め戻し材の品質のみならず、リバウンド材の再利用や長時間に亘る施工性、歩掛などを算出する際に重要な情報となる。

吹付けた後のベントナイト混合土の品質に関しては、乾燥密度、含水比、ベントナイト含有率及び透水係数を計測する。乾燥密度に関しては、施工品質確認のためのシリコーンオイル法による迅速な乾燥密度計測を実施した。

付表 2-7　工学規模試験での品質管理項目

分類	材料	項目	確認方法	数量
品質管理（施工時）	-	歩掛	吹付け時間	1 ケースごと
		圧縮空気圧	圧力ゲージ	1 ケースごと
	付着材	密度	シリコーンオイル法	1 ケースごと
		含水比	電子レンジ法	1 ケースごと
	リバウンド材	リバウンド率	電子秤	1 ケースごと
品質管理（施工後）	付着材	含水比	炉乾燥法	1 ケースごと
		粒度	粒度試験	1 ケースごと
	リバウンド材	粒度	粒度試験	1 ケースごと
	埋め戻し材	止水性	透水試験	1 ケースごと吹付け箱の中心部
		乾燥密度	パラフィン法	1 ケースごと

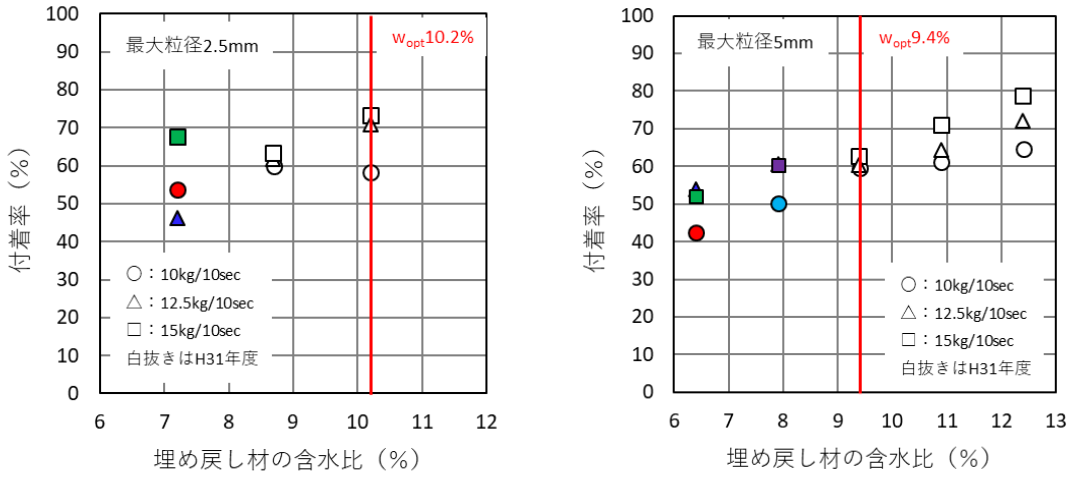
2.4.4. 試験結果

湧水無し 9 ケースに関して、いずれの配合においてもノズル内への閉塞もほとんど確認されず施工が可能であった。これらのケースは、最適含水比よりも乾燥側であり、最大粒径 2.5mm、5mm ともに最適含水比よりも乾燥側で埋め戻し材の製造を行うことで、閉塞頻度の少ない施工が可能となることが想定された。

(1) 歩掛、付着率

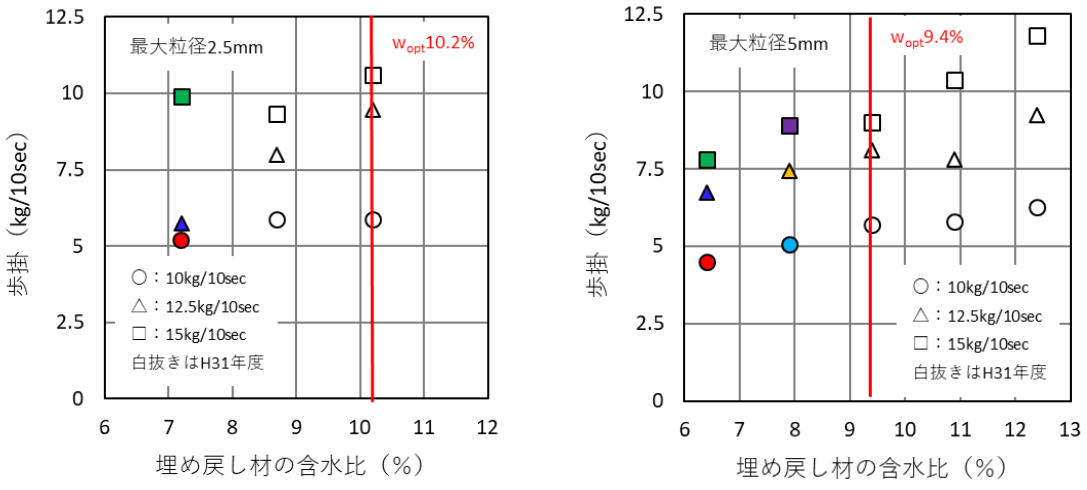
材料供給量は、吹付け箱へ吹付ける前に、材料供給機からの 10 秒間の供給量で、この供給量と吹付け時間の積を材料総使用量とした。

吹付け箱への付着量は、吹付け後に電子秤を用いて計測した。この付着量を吹付け時間で割り、歩掛を算出した。また、付着率は全ケースの施工性を統一的に評価するため、材料総使用量に対する吹付箱への付着量の比（湿潤質量割合）として算出した。埋め戻し材の含水比と吹付け箱への付着率の関係を付図 2-11 に、埋め戻し材の含水比と歩掛の関係を付図 2-12 に示す。なお、図中の赤線は最適含水比、白抜き凡例は H31 年度の試験結果をプロットしている。



最大粒径2.5mm　　最大粒径5mm

付図 2-11　付着率

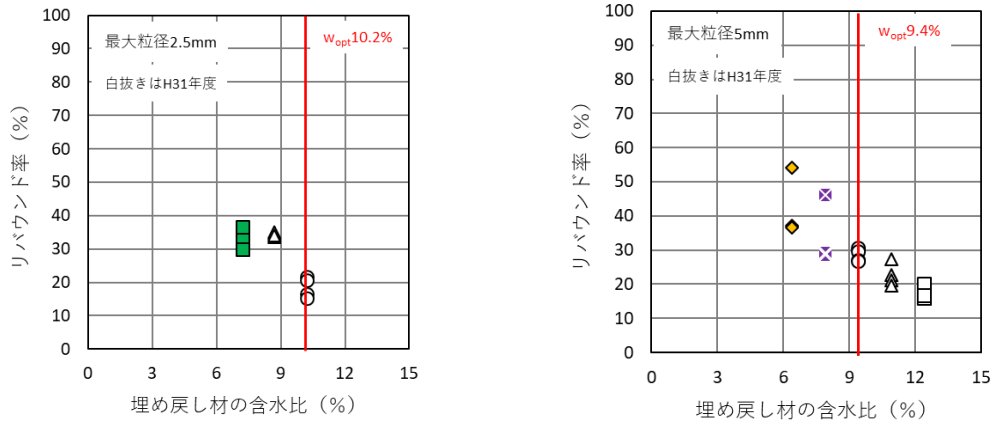


最大粒径2.5mm　　最大粒径5mm

付図 2-12　施工効率（歩掛）

(2) リバウンド率

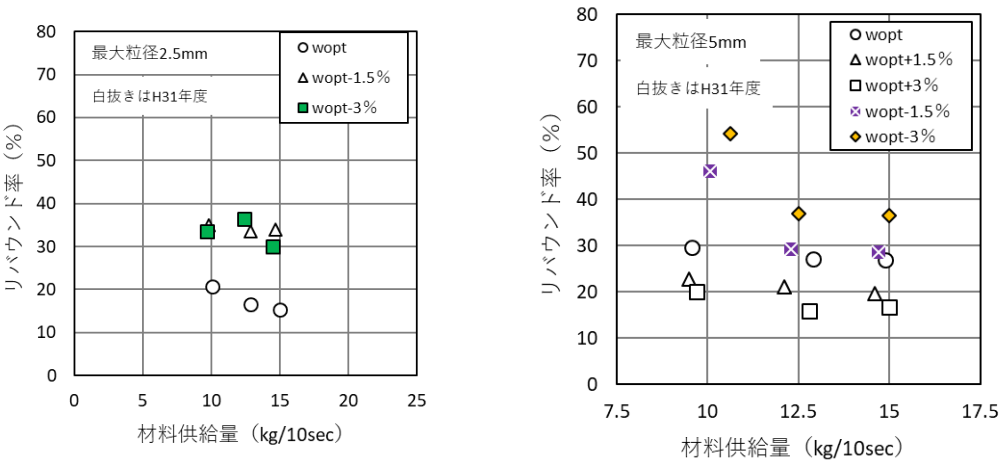
吹付け工法で生じるリバウンド材の量は、小さい方が効率の高い施工が可能であり、埋め戻し材の含水比と材料供給量に着目し、リバウンドについて検討を行った。リバウンド量は吹付け後に回収し、その質量を計測した。埋め戻し材の含水比がリバウンド率に及ぼす影響について、埋め戻し材の含水比とリバウンド率の関係を付図 2-13 に示す。図中の赤線は最適含水比を、白抜きは H31 年度の測定結果をプロットしている。最大粒径 2.5mm、5mm ともに埋め戻し材の含水比増加に伴いリバウンド率は減少傾向を示している。これは、埋め戻し材の含水比の増加に伴い、付着率が向上したことが要因と考えられる。



（1）最大粒径 2.5mm　　（2）最大粒径 5mm

付図 2-13　含水比とリバウンド率の関係

次に材料供給量がリバウンド率に及ぼす影響について、材料供給量とリバウンド率の関係を付図 2-14 に示す。図中に白抜きは H31 年度の測定結果をプロットしている。最大粒径 2.5mm、5mm ともに材料供給量増加に伴い、リバウンド率は減少傾向を示した。これは、空気量一定で材料供給量が増加しているため、材料一粒一粒に与えられるエネルギーが減少したことが要因と考えられる。リバウンド率は減少するものの、速度エネルギーも減少するため、乾燥密度に影響を及ぼす可能性がある。



（1）最大粒径 2.5mm　　（2）最大粒径 5mm

付図 2-14　材料供給量とリバウンド率の関係

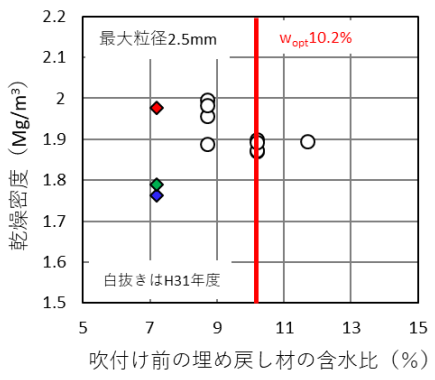
吹付けの施工性（歩掛、埋め戻し材の付着率及びリバウンド率）と、埋め戻し材の配合や施工環境の関係について、以下のように考えられる。

- 埋め戻し材の砕石・砕砂は、最大粒径が小さい方が施工性に優れる
- 埋め戻し材の含水比は、玄武岩の最大粒径が 5mm であれば w_{opt}～w_{opt}－1.5%程度が、2.5mm であれば w_{opt}～w_{opt}－3%程度が最も施工性が良い
- 埋め戻し材の含水比がw_{opt}より湿潤側になると、リバウンド率は減少するものの、吹付け中ノズルやホースの閉塞が生じる恐れがある

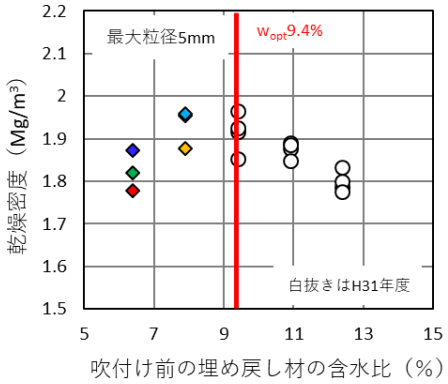
(3) 現場密度試験

吹付け前の埋め戻し材の含水比と付着材の乾燥密度の関係を付図 2-15 に示す。図より、最大粒径 2.5mm のケースに関して、w_{opt}-3%のケースにおいて同一含水比であるものの、大幅な密度低下が確認された。また、付図 2-16 に示す材料供給量と乾燥密度の関係より、材料供給量の増加に伴い、乾燥密度が低下していることが分かる。これは、材料供給量が増加することで、空気量一定で材料供給量が増加しているため、材料一粒一粒に与えられるエネルギーが減少したことが要因と考えられる。加えて、R 材の粒度に着目すると付図 2-17 に示すように、材料供給量 10kg/10sec ではフレッシュ材（F 材：吹付け前の埋め戻し材）とリバウンド材（R 材）の粒度に乖離が少ないものの、材料供給量 12.5kg/10sec や材料供給量 15kg/10sec になると、R 材の粒度は大きな乖離が生じている。つまり、密度の高い礫が付着せずにリバウンドしたことも密度低下要因の一つと考えられる。

また、付図 2-15 に示した最大粒径 5mm に関しては、吹付け前の埋め戻し材の含水比が w_{opt} -3%～w_{opt} にかけて乾燥密度は増加傾向を示しているが、w_{opt} 以降は含水比の増加に伴い乾燥密度は減少傾向を示しており、吹付け工法としての最適含水比が w_{opt} -1.5%～w_{opt} の間に位置していることが分かる。

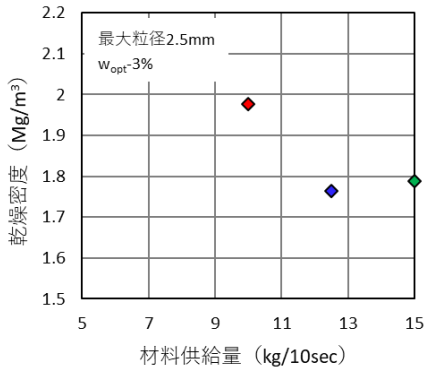


最大粒径2.5mm

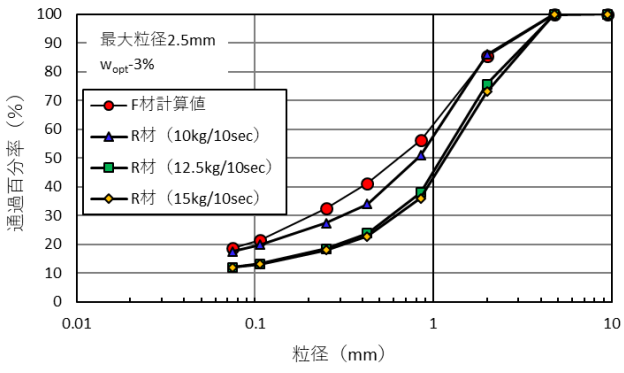


最大粒径5mm

付図 2-15　付着材の乾燥密度

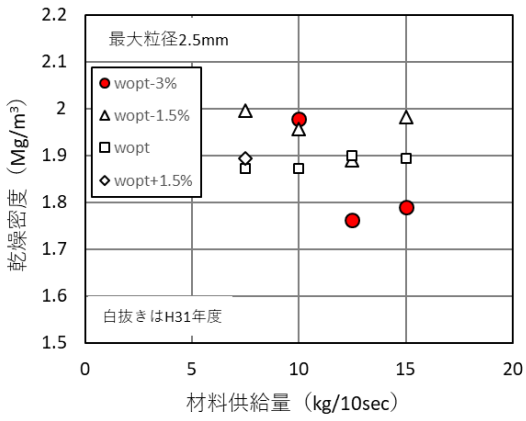


付図 2-16　材料供給量と乾燥密度

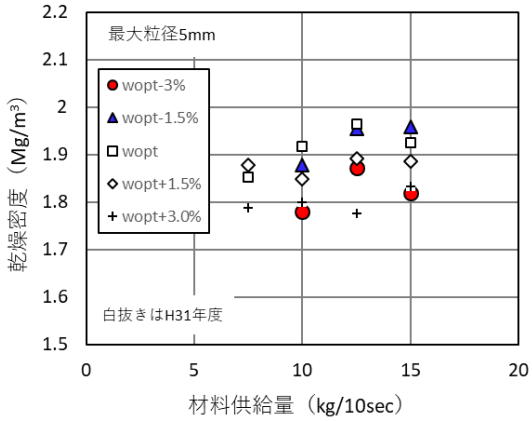


付図 2-17　粒度試験結果

次に、材料供給量が及ぼす乾燥密度の影響についてまとめた。付図 2-18 に材料供給量と乾燥密度の関係を示す。最大粒径 2.5mm のケースに関しては、材料供給量増加に伴い、乾燥密度は減少傾向を示しており、材料供給量が増加することで、空気量一定で材料供給量が増加した



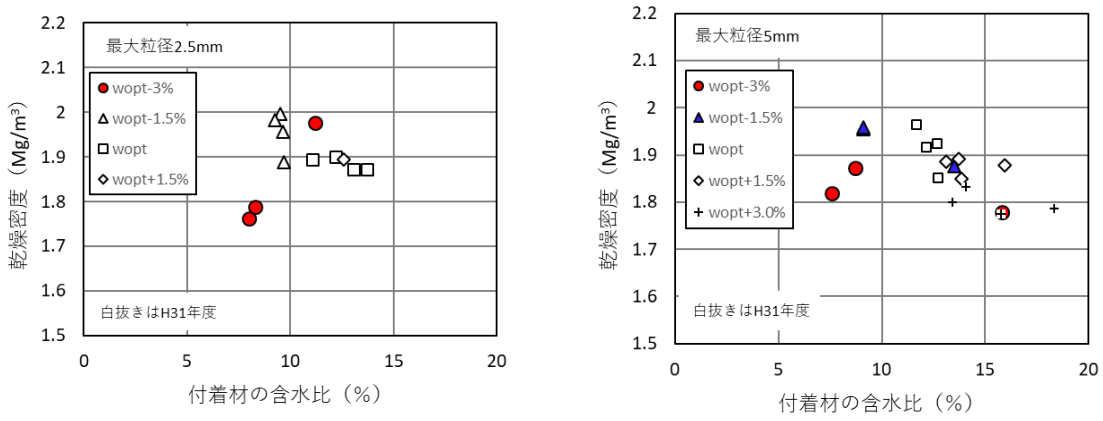
最大粒径2.5mm



最大粒径5mm

付図 2-18　材料供給量と乾燥密度

付着材の含水比が及ぼす乾燥密度の影響について、付図 2-19 に付着材の含水比と乾燥密度の関係を示す。製造した埋め戻し材の含水比に比べ、付着材の含水比は高い値を示した。吹付けた埋め戻し材のうち、主に玄武岩がリバウンドし、吹付け前の埋め戻し材と比べて付着材中のベントナイトの混合比が相対的に増加していることが推測される。最大粒径 2.5mm、5mm ともに、付着材の含水比の増加に伴い、乾燥密度は減少傾向を示している。

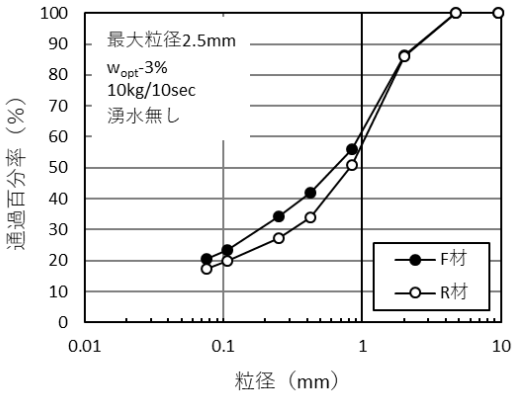


最大粒径2.5mm　　最大粒径5mm

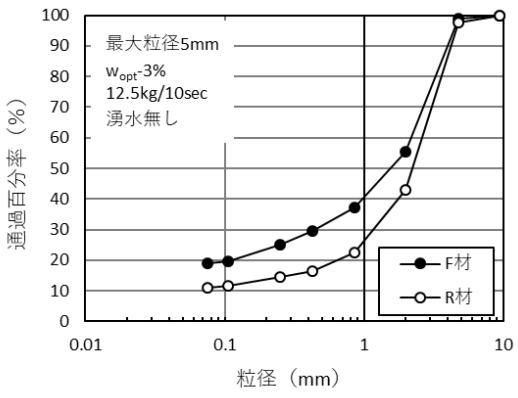
付図 2-19　付着材の含水比と乾燥密度

(4) リバウンド材の粒度

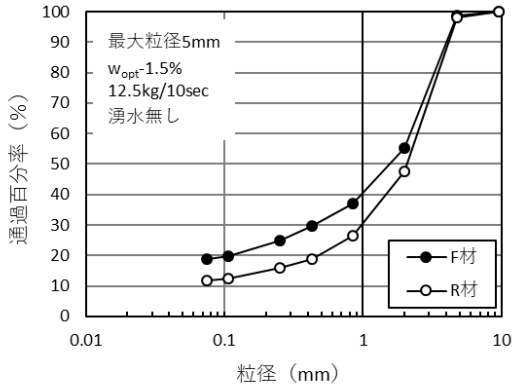
最大粒径 2.5mm、5mm のフレッシュ材（F 材）とリバウンド材（R 材）の粒度試験結果の一例を付図 2-20 に示す。本試験では、サンプル位置によって粒径がばらつく可能性があるため、回収後のリバウンド材をよくかき混ぜてから 2kg 程度採取し、試験を実施した。最大粒径 2.5mm、5mm ともに、リバウンド材の粒度はフレッシュ材の粒度と乖離が生じている。両者の細粒分含有率に着目すると、2.5mm、5mm ともにリバウンド材の細粒分がフレッシュ材の細粒分に比べて最大で 10%程度少なくなっている。また、どのケースにおいても 0.85mm 以上の材料が選択的にリバウンドしていることが分かる。



（a）最大粒径 2.5mm_w_{opt}-3%_10kg/10sec



（b）最大粒径 5mm_w_{opt}-3%_12.5kg/10sec



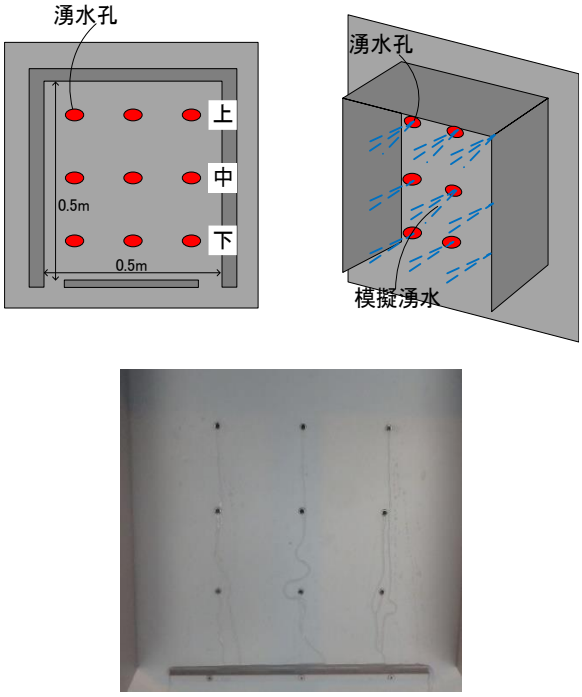
（c）最大粒径 5mm_w_{opt}-1.5%_12.5kg/10sec

付図 2-20　フレッシュ材とリバウンド材の粒度試験結果

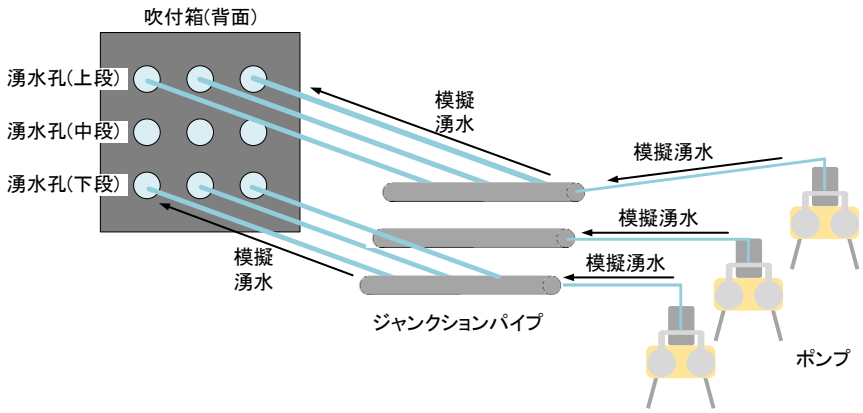
2.5.　工学規模試験（吹付け箱試験、湧水有り）

2.5.1.　模擬湧水の発生方法

付表 2-6 に示した湧水環境下における吹付け施工試験については、**付図 2-21** のように吹付け箱の底板に 9 つの給水孔を設けた吹付け箱を利用した。吹付け箱の背後には上段、中段、下段それぞれの孔に対応する 3 つのジャンクションパイプを配置し、ポンプから圧送した模擬湧水は、各ジャンクションパイプにて、さらに 3 孔に分岐し、吹付け箱底板の湧水に至る。このような仕組みにより各湧水孔での水位差がなくなり、均等な湧水量を制御した。本試験における吹付け箱とジャンクションパイプ及びポンプの配置イメージを**付図 2-22** に示す。なお、本試験では、総湧水の量を 100ml/min（1 孔当たり 11ml/min）として実施し、この流量はポンプにて制御した。



付図 2-21　湧水環境下での吹付け



付図 2-22　ジャンクションパイプを経由した送水

※湧水孔(中列)に接続するチューブは図中では省略

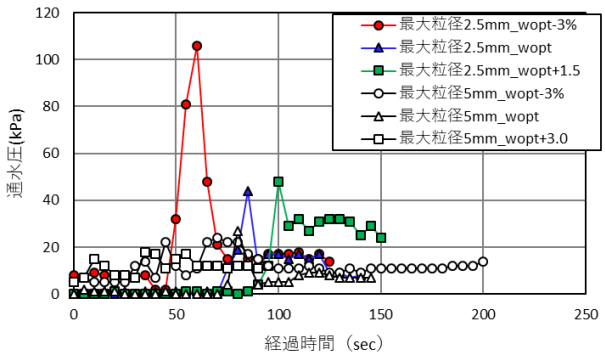
2.5.2. 試験状況

模擬湧水を発生させて吹付けを行った 6 ケースでは、いずれの場合も施工が可能であることを確認した（付図 2-23）。さらに、付着した埋め戻し材により湧水量が減少することを目視と付図 2-24 に示す通水圧の増加により確認した。これらのケースでは、付着した埋め戻し材と吹付け箱底板の間に止水された模擬湧水が溜まり、吹付け終了後に送水用のチューブを取り外す際、溜まったそれらが底板裏側よりあふれ出る様子が確認された（付図 2-25）。

最大粒径 5mm、w_{opt}＋1.5%、湧水ありケース及び最大粒径 5mm、w_{opt}＋3%、湧水ありケースでは、吹付け中にノズルの閉塞が発生した。試験全 15 ケースの中で最も含水比が高いため、埋め戻し材中の水分が表面に比較的浮き出しやすく、浮き出た水分が埋め戻し材中のベントナイトに吸着され、全体の粘性が高くなっていたと考えられる。加えて、本ケースの実施日（10 月 23 日）は雨天であり、ドライコンプレッサーを使用しているものの、吹付けの際にコンプレッ

サからホース及びノズルへ送り出される空気が湿っていたことで、より材料全体の粘性が高まり、閉塞が生じたものと考えられる。本ケースについては、試験を継続することで、空気圧が異常に高まってホースが暴れたり、ノズル内に閉塞した材料塊が吐出したりするなど危険な事象が想定される。

付図 2-23　湧水有りの施工状況



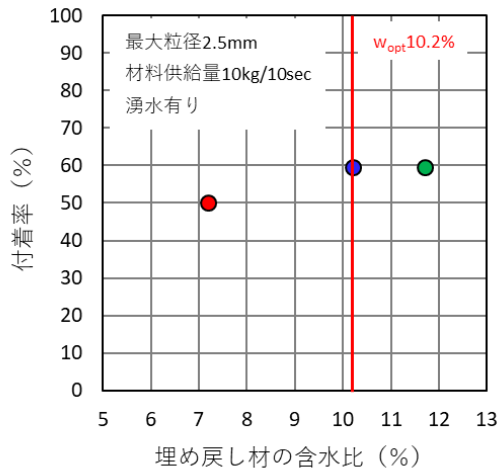
付図 2-24　模擬湧水の通水圧の変化

付図 2-25　吹付け箱裏側よりあふれ出る模擬湧水

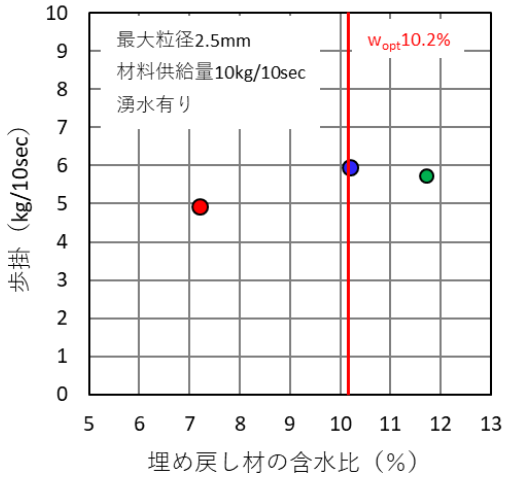
2.5.3.　試験結果

(1) 歩掛、付着率（湧水有り）

付図 2-26 および付図 2-27 に湧水あり条件下での埋め戻し材の含水比と付着率、歩掛の関係を示す。湧水ありのケースでは、吹付け材料の含水比が増加しているため、実際の付着率や歩掛はさらに低下するものと考えられる。これは、湧水環境下では吹付け施工体が形成されても含水比の増加に伴う強度の低下により、後続の吹付けによって吹き飛ばされるためであると考えられる。このため、実施工でも、湧水環境下では吹付け施工は実施可能であるが、付着率や歩掛の低下、吹付け施工体の強度の低下などを考慮する必要がある。

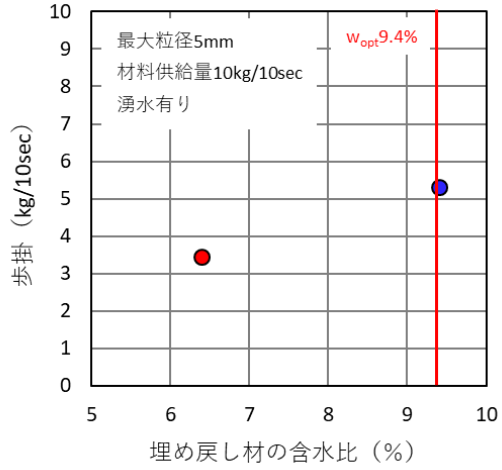


（1）付着率

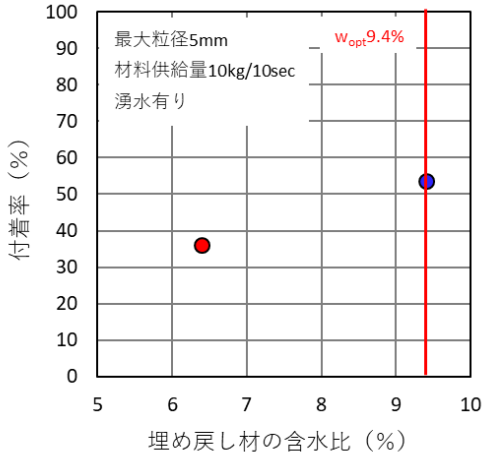


（2）歩掛

付図 2-26　最大粒径 2.5mm（付着率と歩掛）



（1）付着率



（2）歩掛

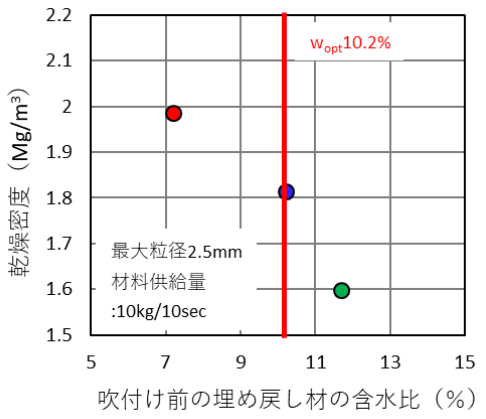
付図 2-27　最大粒径 5mm（付着率と歩掛）

(2) リバウンド率

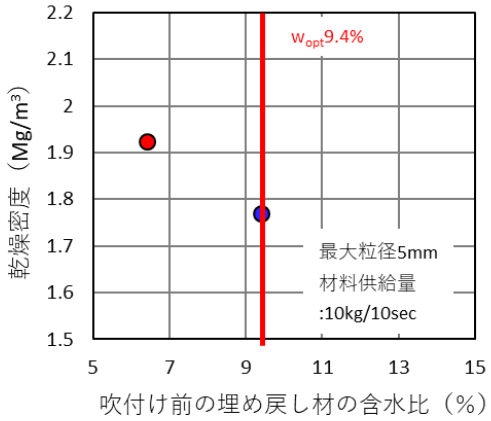
リバウンド材について、模擬湧水なしのケースではリバウンド材を回収することができたが、模擬湧水ありのケースでは、吹付け前後に模擬湧水が周辺に流出しており、リバウンド材のみの質量を確認することが困難であるため、計測できなかった。

(3) 現場密度試験

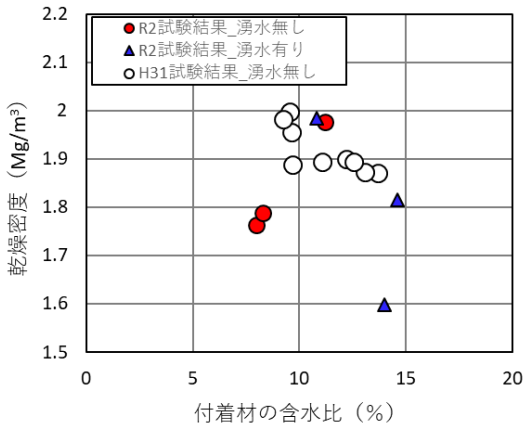
付図 2-28 および**付図 2-29** に湧水有りケースにおける、吹付け前の埋め戻し材の含水比と付着材の乾燥密度の関係を示す。最大粒径 2.5mm、5mm ともに吹付け前の埋め戻し材の増加に伴い、乾燥密度は減少傾向を示した。また、**付図 2-30** および**付図 2-31** に付着材の含水比と乾燥密度の関係を示す。最大粒径、湧水の有無にかかわらず、付着材の含水比増加に伴い、乾燥密度は減少傾向を示した。



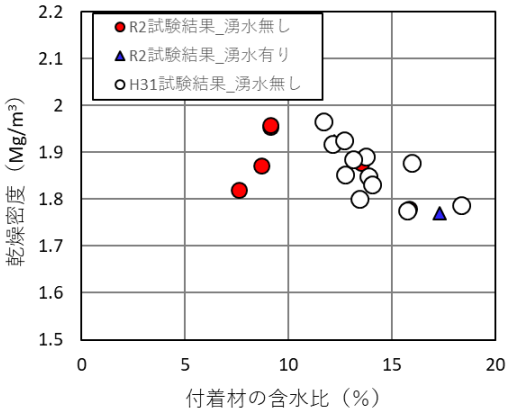
付図 2-28　付着材の乾燥密度
(最大粒径2.5mm)



付図 2-29　付着材の乾燥密度
(最大粒径5mm)



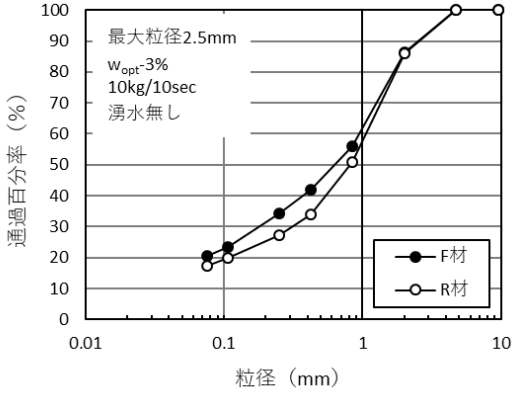
付図 2-30　付着材の含水比と乾燥密度
(最大粒径2.5mm)



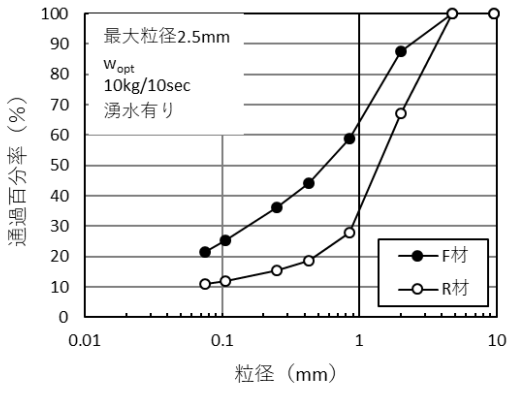
付図 2-31　付着材の含水比と乾燥密度
(最大粒径5mm)

(4) リバウンド材の粒度

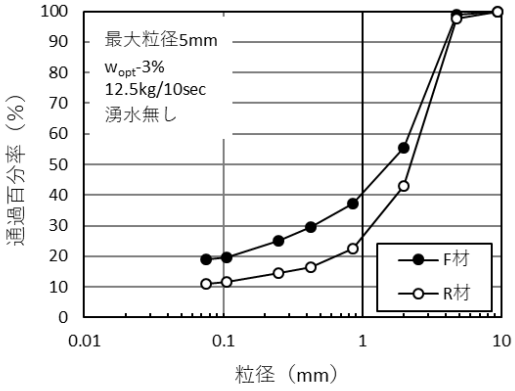
付図 2-32 に最大粒径 2.5mm、5mm のフレッシュ材とリバウンド材の粒度試験結果の一例を示す。本試験では、サンプル位置によって粒径がばらつく可能性があるため、回収後のリバウンド材をよくかき混ぜてから 2kg 程度採取し、試験を実施した。最大粒径 2.5mm、5mm ともに、リバウンド材の粒度はフレッシュ材の粒度と乖離が生じている。両者の細粒分含有率に着目すると、2.5mm、5mm ともにリバウンド材の細粒分がフレッシュ材の細粒分に比べて最大で 10%程度少なくなっている。また、どのケースにおいても 0.85mm 以上の材料が選択的にリバウンドしていることが分かる。



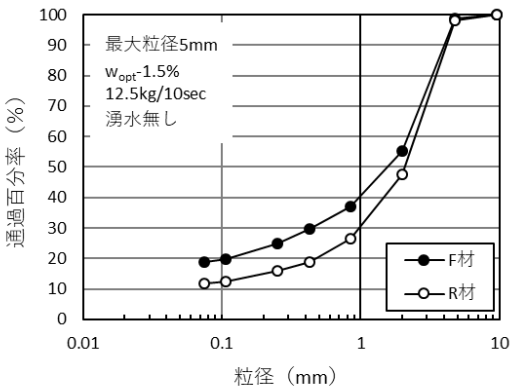
（1）最大粒径 2.5mm_w_{opt}-3%_10kg/10sec_湧水無し



（2）最大粒径 2.5mm_w_{opt}_10kg/10sec_湧水有り



（3）最大粒径 5mm_w_{opt}-3%_12.5kg/10sec_湧水無し



（4）最大粒径 5mm_w_{opt}-1.5%_12.5kg/10sec_湧水無し

付図 2-32　フレッシュ材とリバウンド材の粒度試験結果

2.6.　工学規模試験のまとめ

工学規模試験結果の施工データを付表 2-8 及び付表 2-9 にまとめた。吹付けの施工性（歩掛、埋め戻し材の付着率及びリバウンド率）と、埋め戻し材の配合や施工環境の関係について、以下のように考えられる。

- 湧水条件下においても施工は可能なものの、湧水の無い条件下の方が施工性は良い
- 埋め戻し材の砕石・砕砂は、最大粒径が小さい方が施工性に優れる
- 埋め戻し材の含水比は、玄武岩の最大粒径が 5mm であれば w_{opt}～w_{opt}－1.5%程度が、2.5mm であれば w_{opt}～w_{opt}－3%程度が最も施工性が良い
- 埋め戻し材の含水比がw_{opt}より湿潤側になると、リバウンド率は減少するものの、吹付け中ノズルやホースの閉塞が生じる恐れがある

付表 2-8　工学規模試験結果の施工データ（湧水無し）

試験ケース				材料供給量 (kg/10sec)	吹付け時間 (sec)	材料総使用量 (kg)	吹付け箱への付着量 (実測) (kg)	材料リバウンド量 (実測) (kg)	歩掛 (kg/10sec)	リバウンド率 (%)	付着率 (%)	備考
No.	含水比(%)	玄武岩最大粒径 (mm)	模擬湧水の有無									
1	$w_{opt}-3.0$	2.5	なし	9.70	127	123.2	66.0	41.4	5.20	33.6	53.6	
2				12.4	71	88.0	40.8	32.1	5.75	36.5	46.3	
3				14.5	67	97.7	66.2	29.4	9.88	30.0	67.7	
4	$w_{opt}-3.0$	5	なし	10.62	162	172.0	72.6	93.2	4.48	54.2	42.2	
5				12.5	103	128.8	69.4	47.6	6.74	37.0	53.9	
6				15.0	80	120	62.5	43.4	7.81	36.5	52.1	
7	$w_{opt}-1.5$		なし	10.08	153	154.2	77.2	71.1	5.05	46.1	50.1	
8				12.3	62	76.0	46.0	22.2	7.42	29.2	60.5	
9				14.7	92	81.1	55	81.1	8.89	28.6	60.3	

付表 2-9　工学規模試験結果の施工データ（湧水無し）

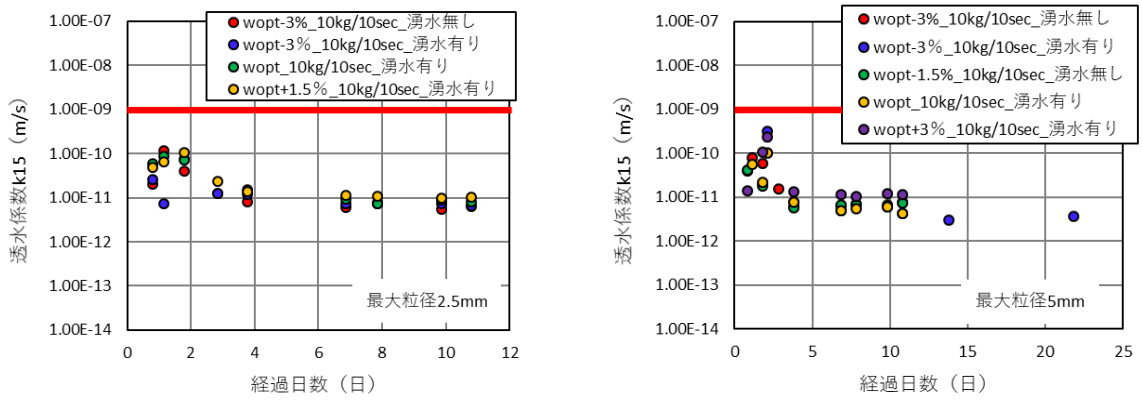
試験ケース				材料供給量 (kg/10sec)	吹付け時間 (sec)	材料総使用量 (kg)	吹付け箱への付着量 (実測) (kg)	材料リバウンド量 (実測) (kg)	歩掛 (kg/10sec)	リバウンド率 (%)	付着率 (%)	備考
No.	含水比(%)	玄武岩最大粒径 (mm)	模擬湧水の有無									
10	$w_{opt}-3.0$	2.5	有り	9.84	123	121.0	60.6		4.93		50.1	
11	w_{opt}		有り	10.00	137	137.0	81.6		5.96		59.6	
12	$w_{opt}+1.5$		有り	9.64	150	144.6	86.2		5.75		59.6	やや閉塞
13	$w_{opt}-3.0$	5	有り	9.62	198	190.5	68.5		3.46		36.0	
14	w_{opt}		有り	9.90	144	142.6	76.5		5.31		53.6	
15	$w_{opt}+3.0$		有り	10.34	88							閉塞

吹付け箱に吹き付けられた付着材の中央位置から供試体を採取し、透水試験を実施した。透水試験に供した供試体の諸元を付表 2-10 に示す。透水試験は、変水位透水試験方法（JGS 0311）、低透水性材料の透水試験方法（JGS 0312-2018）に準拠して実施した。なお、供試体には別途実施した湧水を考慮した吹付け箱試験の供試体も加えて表示している。

透水試験結果を付図 2-33　透水試験結果に示すが、図中の赤線は本検討での目標透水係数 1×10^{-9}m/s である。試験結果では最大粒径 2.5mm、5mm ともに時間の経過に伴い、透水係数は一旦減少し、横ばい傾向を示し、湧水の有無に影響なく、目標透水係数 1×10^{-9}m/s 以下を満足する結果となった。

付表 2-10　透水試験に用いた供試体の諸元

ケース No.	吹付け前 埋め戻し材の 含水比(%)	模擬湧水 の有無	玄武岩の 最大粒径	供試体の 含水比(%)	供試体の 乾燥密度 (Mg/m³)
1	7.2	なし	2.5mm	8.25	1.881
10	7.2	有り		8.09	1.878
11	10.2	有り		11.26	1.960
12	11.7	有り		12.37	1.868
4	6.4	なし	5mm	10.69	1.943
13	6.4	有り		9.76	2.017
7	7.9	なし		10.01	1.925
14	9.4	有り		11.93	1.952
15	12.4	有り		14.01	1.712



（a）最大粒径 2.5mm　　（b）最大粒径 5mm

付図 2-33　透水試験結果

2.7.　小規模模擬坑道試験

2.7.1.　吹付け率、リバウンド、現場密度試験

(1)　最大粒率 2.5mm－w_{opt}-3%

最大粒率 2.5mm－w_{opt}-3%での試験結果および施工後の埋め戻し材の状況を付図 2-34 に示す。

施工終盤（7 袋目投入時）から、ホース内部に付着した材料が一気に吐出する現象が確認された。最終的に 10 袋目投入時に空気圧の急激な上昇が確認されたため、施工を中断した。ホース内部には埋め戻し材の微粒分が付着しており、これらが空気圧の急激な上昇を引き起こしたと考えられる。その結果、本ケースでの施工時間は 61.9min、施工量は 2,811kg、ホース内付着量は 38kg、リバウンド量は 822kg であり、計算によって算出される付着量は 1,951kg（施工量-ホース内付着量-リバウンド量）となった。解体後の付着材の量は 2,000kg であり、計算値との差は 49kg であった。計量した付着量、リバウンド量から付着率、リバウンド率の算出を行った。付着率は 71.4%、リバウンド率は 29.2%と工学規模試験に比べ、施工性が改善されている。これは、工学規模試験に比べ、施工エリアが広く、隅角部が少ないためノズルワークが改善されたことが要因と考えられる。

(2) 最大粒率 2.5mm－w_{opt}

最大粒率 2.5mm－w_{opt} での試験結果および施工後の埋め戻し材の状況を付図 2-35 に示す。本ケースの埋め戻し材の含水比は 10.2%と全 4 ケースの中で最も高いケースである。施工序盤から、ホース内部に付着した材料が一気に吐出する現象が確認された。空気圧の急激な上昇が確認されたため、施工を中断した。ホース内の清掃を実施し、再度施工を開始したが、すぐに閉塞が生じた。閉塞後のホース内部には、埋め戻し材が一面に付着しており、これらが空気圧の急激な上昇を引き起こしたと考えられる。8 袋終了時点で本ケースは中止とした。付着量の実測と計算値の差は 3kg であった。同粒径の w_{opt}-3%（乾燥側）に比べ、付着率（79.4%）は高く、リバウンド率（15.6%）も低いケースではあるが、閉塞が多く、現状の施工法では長時間施工には適さない材料であることが明らかとなった。

(3) 最大粒率 5mm－w_{opt}-3%

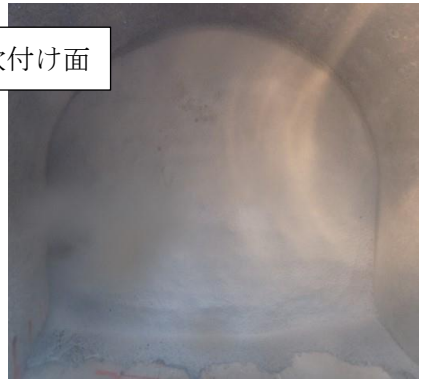
最大粒率 5mm－w_{opt}-3%での試験結果および施工後の埋め戻し材の状況を付図 2-36 に示す。本ケースの埋め戻し材の含水比は 6.4%と全 4 ケースの中で最も低いケースである。材料は計 3,611kg（フレコン 11 袋分）投入した。本ケースは一度も閉塞を起こさずに施工を完了した。付着量の実測と計算値の差は 46.8kg であった。付着率は 55.6%で工学規模試験に比べ、増加したものの、リバウンド率も 42.5%と工学規模試験に比べ増加した。3.6t を 43.8min で吹き終わり、長時間かつ連続的に施工は可能なものの、発生するリバウンド材の量に課題がある。リバウンド率を減少させるためには、含水比を高くする（w_{opt}-1.5%）など対策を講じる必要がある。

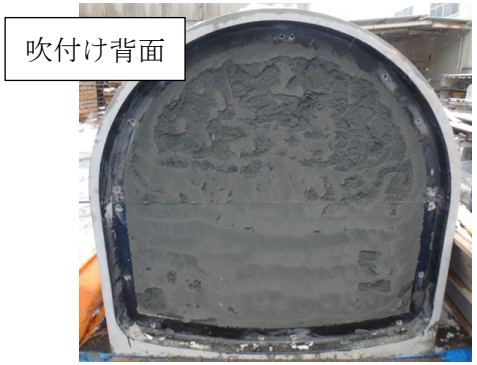
(4) 最大粒率 5mm－w_{opt}

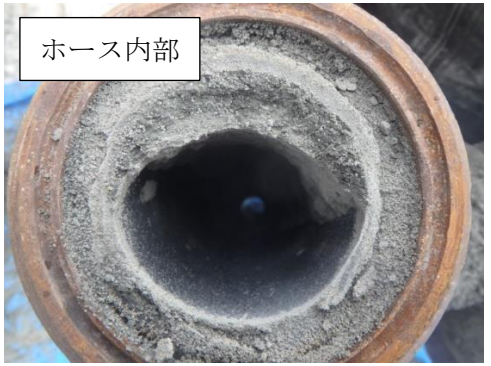
最大粒率 5mm－w_{opt} での試験結果および施工後の埋め戻し材の状況を付図 2-37 に示す。材料は計 3,331kg（フレコン 10 袋分）投入した。施工終盤にかけて、ホース内部に付着した材料が一気に吐出する現象が確認された。最終的に 10 袋目投入時に空気圧の急激な上昇が確認されたため、施工を中断した。ホース内の清掃を実施し、再度施工を行った。連続施工時間は 40min、連続施工量は 2,874kg であった。付着量の実測と計算値の差は 3kg であった。工学規模試験に比べ、施工エリアが広く、隅角部の少なさがノズルワークの改善につながり、付着率は増加、リバウンド率は低下する結果となった。さらに同粒径の w_{opt}-3%（乾燥側）に比べ、付着率は高く、リバウンド率も低い結果となった。

ケース名	材料供給量（kg/10sec）	投入量（投入順に記載）（kg）		閉塞状況	ホッパー残量（kg）	施工量（kg）	ホース内付着量（kg）	リバウンド量（kg）	計算付着量（kg）	実測付着量（kg）	実測値との差（付着量）（kg）	付着率（%）	リバウンド率（%）	施工時間（min）
最大粒径 2.5mm w_{opt}-3%	10	1	330	-	0	2,811	38	773※ (822)	2,000※ (1,951)	2,000	0※ (49)	71.4 工：53.6	27.4 (29.2) 工：33.6	61.9
		2	342	-										
		3	330	-										
		4	336	-										
		5	320	-										
		6	344	-										
		7	327	-										
		8	333	-										
		9	333	-										
		10	336	閉塞	520									
計		3,331			520	2,811	38	773 (822)	—	—	—	—	—	—

※本ケースのみ施工途中から降雪が強まり、リバウンド材の吸水により、正確なリバウンド量の計測が不可能であった。
そこで、リバウンド量＝施工量-（ホース内付着量+実測付着量）で計算。表中の（）内は実測リバウンド量である。

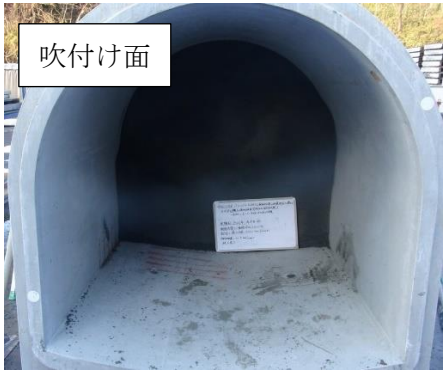






付図 2-34　小規模模擬坑道試験結果（最大粒径 2.5mm_wopt-3%）

ケース名	材料供給量（kg/10sec）	投入量（投入順に記載）（kg）		閉塞状況	ホッパー残量（kg）	施工量（kg）	ホース内付着量（kg）	リバウンド量（kg）	計算付着量（kg）	実測付着量（kg）	実測値との差（付着量）（kg）	付着率（%）	リバウンド率（%）	施工時間（min）
最大粒径 2.5mm w_{opt}	12.5	1	340	-	0	553	18	85	450	1,480	-3	79.4 工：73.2	15.4	12.2
		2	328	-	0									
		3	330	閉塞	445									
		4	331	閉塞	104	227	19	32	176				14.1	3.4
		5	329	閉塞	228	101	15	20	66				19.3	5.1
		6	330	閉塞	0	330	20	49	261				14.8	2.6
		7	330	閉塞	0	330	17	48	265				14.6	3.0
		8	341	-	0	341	17	60	264				17.6	3.0
計		2,659			777	1,882	105	294	1,483	－	－	－	15.6 工：16.6	26.3

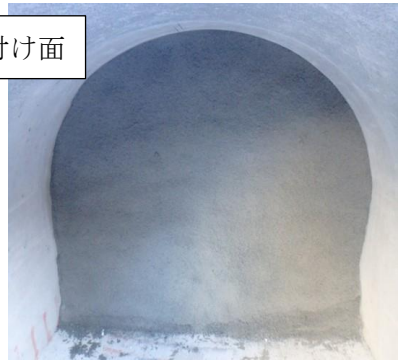


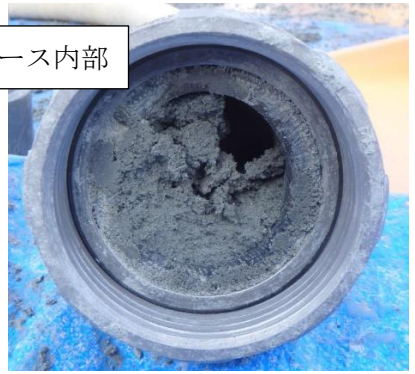
付図 2-35　小規模模擬坑道試験結果（最大粒径 2.5mm_wopt）

ケース名	材料供給量（kg/10sec）	投入量（投入順に記載）（kg）		閉塞状況	ホッパー残量（kg）	施工量（kg）	ホース内付着量（kg）	リバウンド量（kg）	計算付着量（kg）	実測付着量（kg）	実測値との差（付着量）（kg）	付着率（%）	リバウンド率（%）	施工時間（min）
最大粒径 5mm w_{opt}-3%	15.0	1	292	-	0	3,611	22.5	1,533	2,056	2,009	-46.8	55.6 工：52.5	42.5 工：36.5	43.8
		2	333	-	0									
		3	332	-	0									
		4	330	-	0									
		5	331	-	0									
		6	332	-	0									
		7	333	-	0									
		8	334	-	0									
		9	330	-	0									
		10	332	-	0									
		11	332	-	0									
計		3,611			0	3,611	22.5	1,553	2,056	—	—	—	—	—

付図 2-36　小規模模擬坑道試験結果（最大粒径 5mm_wopt-3%）

ケース名	材料供給量（kg/10sec）	投入量（投入順に記載）（kg）		閉塞状況	ホッパー残量（kg）	施工量（kg）	ホース内付着量（kg）	リバウンド量（kg）	計算付着量（kg）	実測付着量（kg）	実測値との差（付着量）（kg）	付着率（%）	リバウンド率（%）	施工時間（min）
最大粒径 5mm w_{opt}	12.5	1	333	-	0	2,874	38	622	2,214	2,427	-3	75.7 工：62.5	21.6	40.0
		2	334	-	0									
		3	334	-	0									
		4	334	-	0									
		5	321	-	0									
		6	329	-	0									
		7	328	-	0									
		8	332	-	0									
		9	324	-	0									
		10	331	閉塞	426									
		11	330	-	0	330	10	104	216				31.6	5.0
計		3,630			426	3,204	48	726	2,430	－	－	－	22.7 工：27.2	45





付図 2-37　小規模模擬坑道試験結果（最大粒径 5mm_wopt）

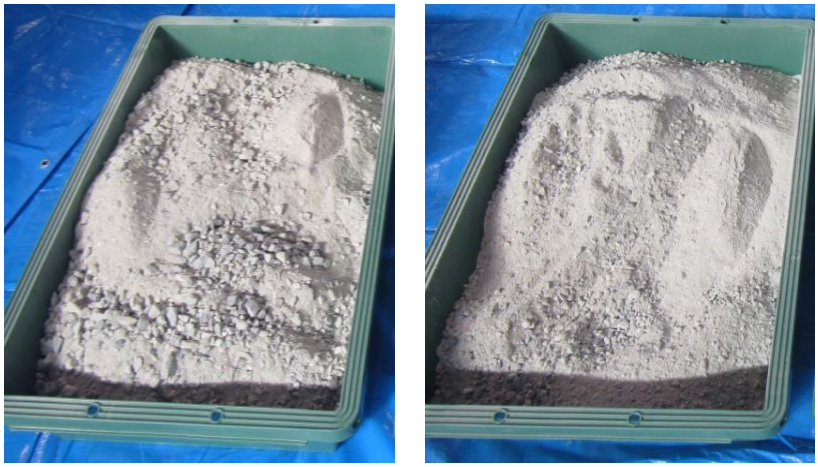
3.　スクリュー工法

3.1.　使用材料及び試験設備

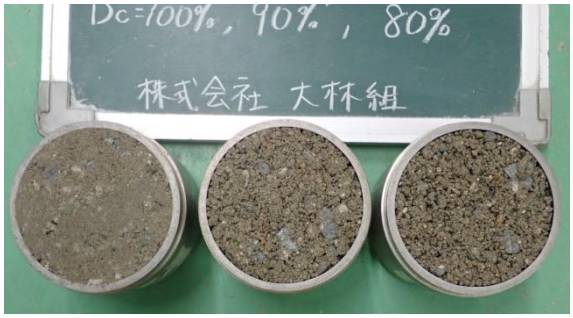
配合後の材料試験に使用した埋め戻し材（砕石は 2005（最大粒径 20mm）及び 1005（最大粒径 10mm））を付図 3-1 に示す。また、透水試験に供した試験体（締固め試験 A 法により、最大乾燥密度の 100%、90%、80%の試験体を製作）を付図 3-2 に示す。

要素試験に用いた試験装置の準備状況を付図 3-3 及び付図 3-4 に示す。このうち、試験土層内面の目盛りは、スクリューによる充填時の斜面形状を定量化するためのスケールである（付図 3-7 参照）。

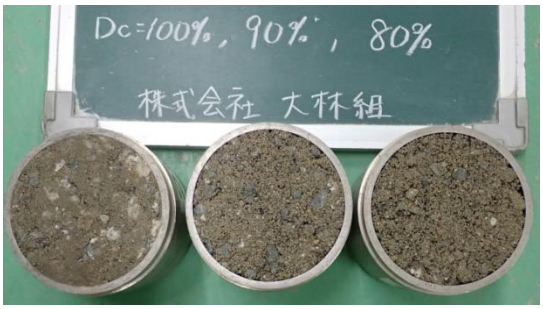
試験時のスクリュー先端からの埋め戻し材の吐出状況を付図 3-5 に示す。



付図 3-1　材料混錬後
（左：砕石 2005、右：砕石 1005）



A 法での最大湿潤密度の左から 100%,90%,80%



A 法での最大湿潤密度の左から 100%,90%,80%

付図 3-2　透水試験供試体
（左：砕石 2005、右：砕石 1005、最適含水比で調整）

スクリューシャフト（前面）

スクリュー羽根

材料ホッパ（投入口）

試験土層

付図 3-3　試験装置準備状況（その１）

（上・下）スクリューフィーダー及び充填土層

（上・下）試験土層

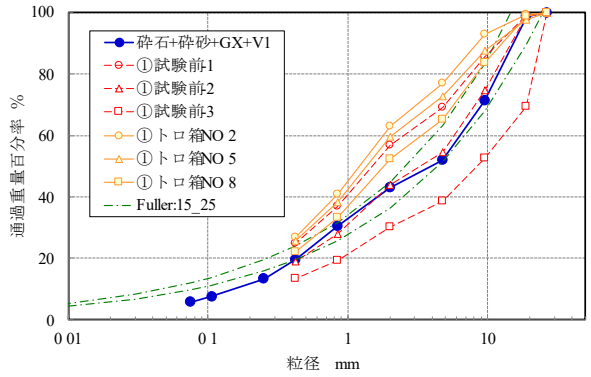
付図 3-4　試験装置準備状況（その２）

砕石 2005　　砕石 1005

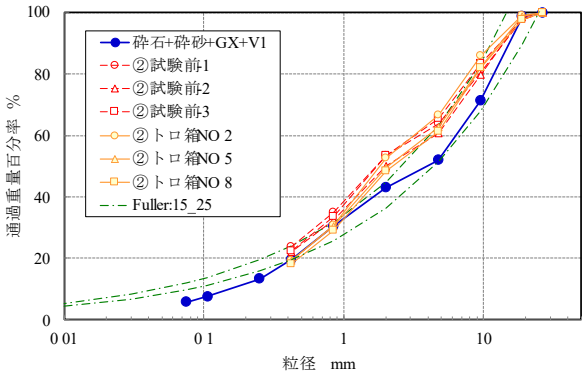
付図 3-5　ベントナイト混合土吐出状況

3.2.　自由落下ケース

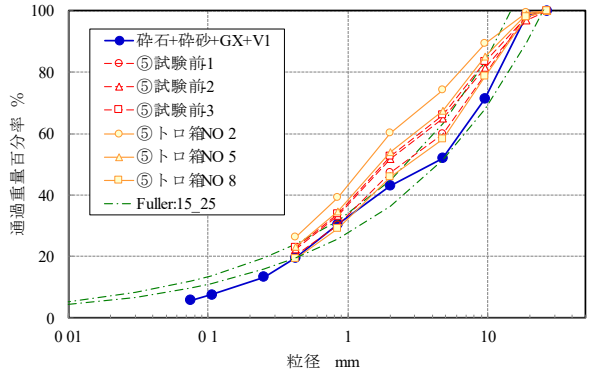
自由落下ケースのうち、ケース 1、2、5、6 の粒度分布の試験前後の比較を付図 3-6 に示す。



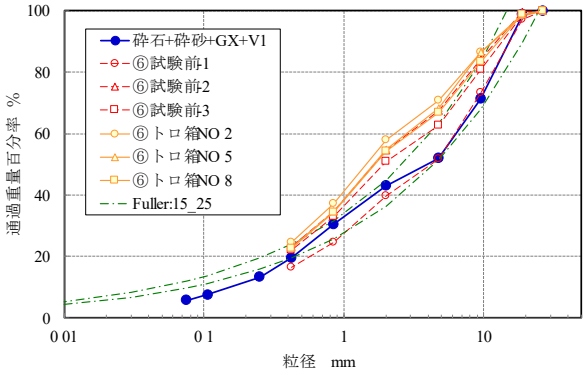
ケース 1(回転数 5.05rpm,落下高さ 750mm)



ケース 2(回転数 5.05rpm,落下高さ 1500mm)



ケース 5(回転数 10.10rpm,落下高さ 750mm)



ケース 6(回転数 10.10rpm,落下高さ 1500mm)

付図 3-6　充填試験前後の粒度分布（自由落下ケース 1，2，5 及び 6）

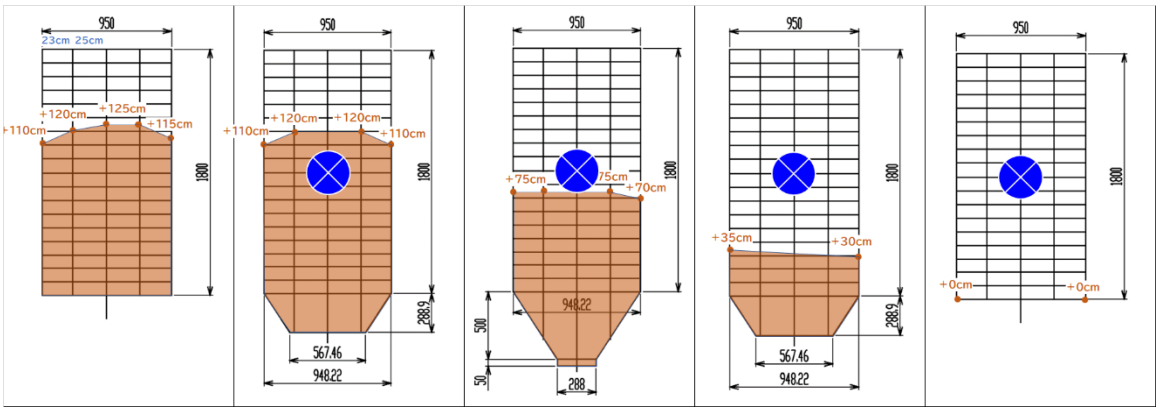
3.3.　先端密着ケース

先端密着ケースにおける、バルク密度を求めるために必要な埋め戻し材の表面形状を決定するための、ケース 7 及びケース 9 試験終了時の試験土層内の断面形状を奥から順に並べたものを付図 3-7 に示す。

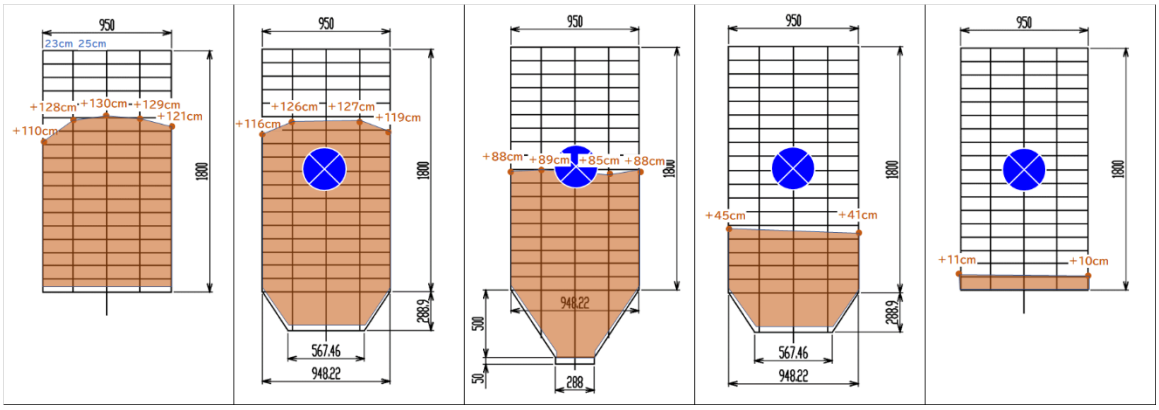
また、充填速度を評価するための土層充填体積の時間変化を付図 3-8 に示す。この図から、充填量は充填時間及びスクリューの回転数に比例しており、安定した充填が行われたことを示している。

ケース 8 及び 9 における試験前後の粒度分布の比較及び試験後の埋め戻しの表面の状況並びに表層の埋め戻し材の粒度分布の傾向を整理したものをそれぞれ付図 3-9 及び付図 3-10 に示す。この結果、試験により全体の粒度はやや細粒化した傾向が見られるとともに、粗粒分が砕石の滑落により埋め戻しの下部に蓄積しやすいことが判明した。

スクリュー充填装置は、回転数を安定させるためにインバータにより電流制御することとしている。充填した埋め戻し材にスクリュー先端を挿入して、埋め戻し材を押し込むことによる（回転数を維持するための）電流の増加の状況を付図 3-11 に示す。実施工では、オペレータがこの電流量を観測することにより押し込み抵抗を把握して充填が適切に行われていることを確認するとともに、この記録が品質管理記録の役割を果たす。

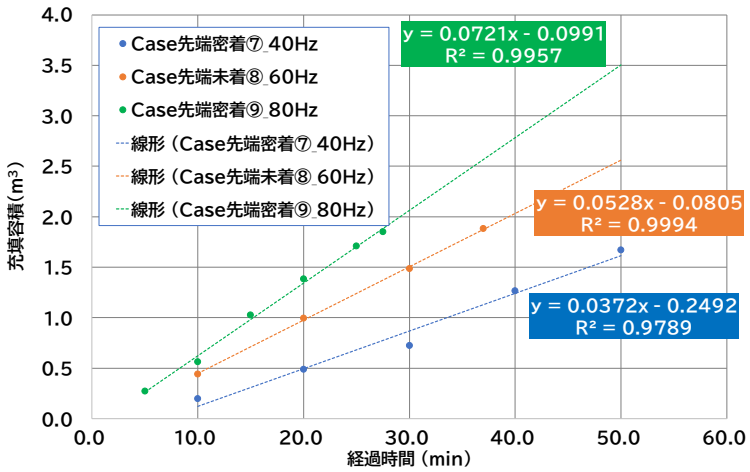


先端密着ケース 7 試験終了時（試験時間 50 分）

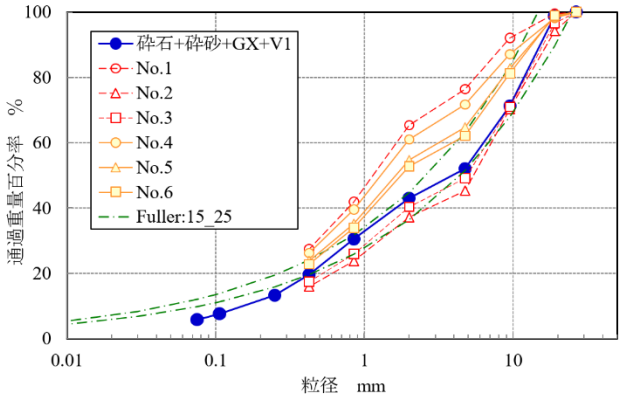


先端密着ケース 9 試験終了時（試験時間 27.5 分）

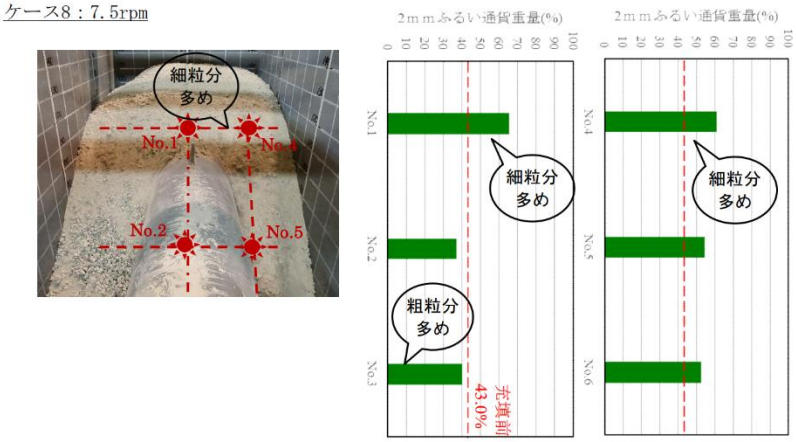
付図 3-7　土層の断面積測定（ケース 7 及びケース 9）



付図 3-8　土層充填体積の時間変化（先端密着ケース 7，8，9）

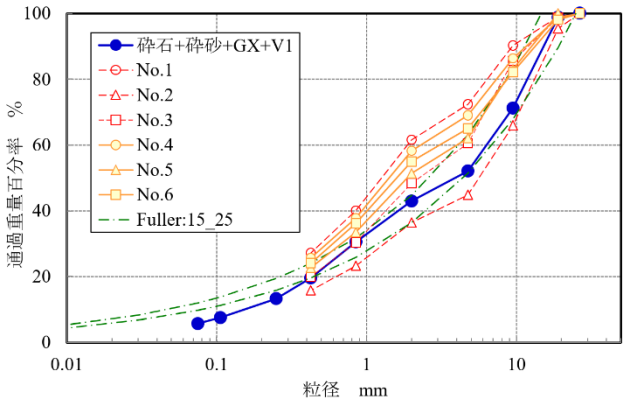


試験前後の粒度分布（先端密着ケース 8）

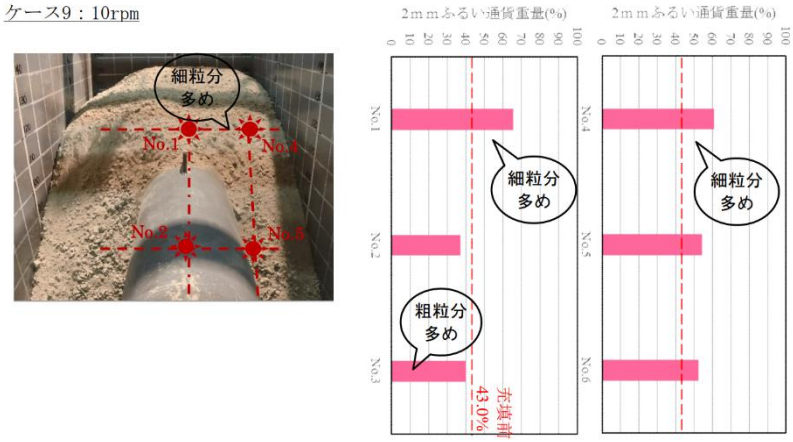


試料採取位置及び粒度観察結果　　採取箇所別細粒分比較（先端密着ケース 8）

付図 3-9　先端密着ケース 8　充填前後の粒度分布変化及び細粒分の分布

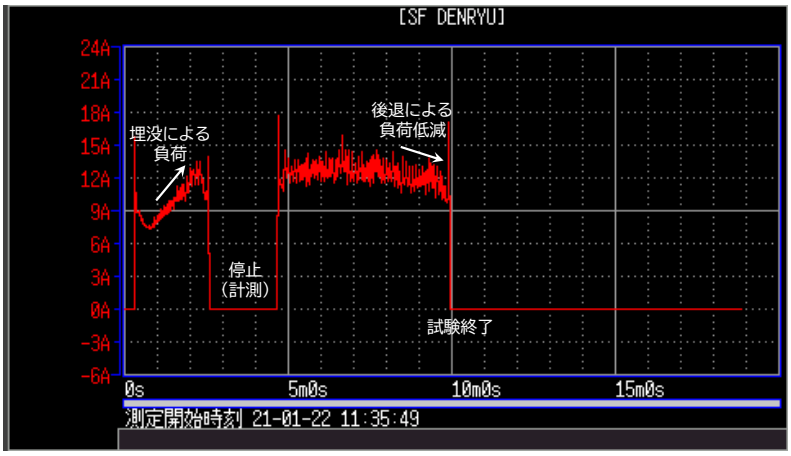


試験前後の粒度分布（先端密着ケース 9）



試料採取位置及び粒度観察結果　　採取箇所別細粒分比較（先端密着ケース 9）

付図 3-10　先端密着ケース 9　充填前後の粒度分布変化及び細粒分の分布



付図 3-11　スクリュー回転抵抗値を表す電流データの例（先端密着ケース 9）

4. ブロック工法

4.1. 静的締固め試験結果

4.1.1. 実施概要

埋め戻し材ブロックの製作前に、内径φ100mm の小型モールドを用いた静的締固め試験を実施し、静的圧力による締固め特性のデータを取得した。静的締固め試験により、埋め戻し材ブロックの製作の諸条件（材料の種類、構成（ベントナイト混合率、模擬掘削土の粒径、粒度））、施工直後の品質規定（かさ密度）、工法規定（成型圧力等））を設定するための基礎データを取得した。

4.1.2. 使用材料

本検討で使用した埋め戻し材の材料構成を付表 4-1 に示す。ベントナイトは、Na 型ベントナイト（クニゲル V1）を用いた。掘削土は処分場を設置する母岩固有のものであるが現段階では特定できないため模擬掘削土として玄武岩を用いた。

掘削土は施工性の向上を目的に破砕し粒度調整することが想定されている。本試験の模擬掘削土にはコンクリート用骨材として使用されている玄武岩の砕石（粒形5～20mm）と砕砂（粒形5mm以下）を準備し、これらの乾燥質量比（GS [砕石：砕砂]）を管理し配合することで粒度調整を行った。具体的には、GS[0：10]、[2：8]、[4：6]、[6：8]とした4種類の模擬掘削土を準備した。

付表 4-1 埋め戻し材の材料構成

対象	仕様
ベントナイト	Na 型ベントナイト（クニゲル V1）
模擬掘削土	玄武岩：砕石（粒形 5 ~ 20 mm）、砕砂（粒形 5 mm 未満）
ベントナイト混合率	乾燥質量比で、ベントナイト混合率 15%～50%

4.1.3. 試験ケース

静的締固め試験の試験条件として、ベントナイトの混合率、模擬掘削土中の砕石(G)と砕砂(S)の乾燥質量比、成型圧力を変えて実施した。静的締固め試験の試験ケースを付表 4-2 に示す。1 試験ケースあたり、6 水準の含水比（5、7、9、11、13、15%）に対する乾燥密度を取得した。

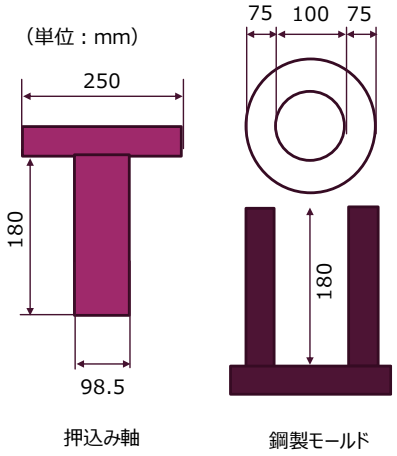
付表 4-2 静的締固め試験の試験ケース

ベントナイト混合率(%)	模擬掘削土中の砕石(G)と 砕砂(S)の乾燥質量比	成型圧力（MPa）
15	GS[0:10]	5、10、20、30、40
	GS[2:8]	
	GS[4:6]	
	GS[6:4]	
30	GS[0:10]	
	GS[6:4]	

4.1.4. 試験方法・手順

内径φ100mm、高さ 180mm（モールド本体+カラー）の鋼製モールド及び押込み軸（圧縮用ピストン）を製作し、圧縮試験機（最大荷重 1,000kN）を用いて、片押し方式により、静的締固め試験を実施した。製作した鋼製モールド・押込み軸の写真を付図 4-1 に、概要図を付図 4-2 に、圧縮試験機の写真を付図 4-3 に示す。

付図 4-1　製作した鋼製モールド（右）、押込み軸（左）



付図 4-2　製作した鋼製モールド（右）、押込み軸（左）の概要図

付図 4-3　圧縮試験機（最大荷重 1,000kN）

本試験の成型圧力条件に対し、圧縮試験機に必要となる荷重を整理した表を付表 4-3 に示す。内径 φ100mm のモールド面積：7,850 mm² より、例えば 5 MPa（=N/mm²）の成型圧力に必要となる荷重は、5 N/mm² × 7,850mm² 39,250 N ≒ 39 kN となる。

付表 4-3　成型圧力に対し、圧縮試験機に必要となる荷重

成型圧力 (MPa)	必要荷重	
	(kN)	(t)
5	39	4
10	79	8
20	157	16
30	236	24
40	314	32

以下に、実施した静的締固め試験の手順を示す。

① 試料の準備、混合

1）ベントナイト及び模擬掘削土の自然含水比を測定
2）ベントナイト混合率及びベントナイト混合土の含水比の設定に基づき、必要となる各材料の質量と加水量を計算
3）所定量のベントナイト及び模擬掘削土をビニール袋に入れて、人力にて 1 分間、混合
4）（模擬掘削土：砕石砕砂混合材の場合）9.5mm の円筒フルイにて篩分け※し、粒径 9.5mm 以上の材料（主に砕石）はビニール袋に戻し、フルイを通過した粒径 9.5mm 以下の材料は小型ミキサの攪拌容器に入れ、1 分間、空練り
（模擬掘削土：GS[0:10]の場合）材料を小型ミキサの攪拌容器に入れ、1 分間、空練り
※本業務で使用した小型ミキサ（㈱愛工舎製作所、マイティ S20）では、9.5mm 以上の材料を含む場合にミキサブレードへの抵抗が大きく、均一に混合できない可能性、ミキサが故障する可能性があると判断し、粒径 9.5mm で篩分け
5）4）の後、所定量の混合水を小型ミキサへ加水、2 分間の混合攪拌後、攪拌容器内のかき混ぜを人力にて行い、再度 2 分間、小型ミキサにて攪拌混合
6）（模擬掘削土：砕石砕砂混合材の場合）小型ミキサにて攪拌混合を行った材料（粒径 9.5mm 以下の材料）と粒径 9.5mm 以上の材料をビニール袋内で、人力にて 5 分程度混合
7）混合を完了した試料（ベントナイト混合土）の質量計測
8）ビニール袋内で密封養生（20 時間）
9）養生後、試料の質量を計測し、質量に変化がないことを確認

② 成型圧力の設定

・圧力の設定から圧縮試験機で必要となる荷重を確認

③ 所定量の試料（ベントナイト混合土）をモールド内に投入、敷均し

1）所定量の試料をモールド内に投入、天端をヘラ等により敷均し後、付着防止シート設置
2）モールド天端から試料天端までの寸法を測定し、モールド内の試料の敷均し高さを算出

④ 静的締固め

・圧縮試験機の操作により、試料を静的に締固め

⑤ 設定した荷重となる時点で、静的締固めを終了（押込み軸の稼働を止める）

1）試験機の示す荷重が、設定した荷重となる時点で押込み軸の稼働を停止

2）静的締固めの時間（押込み軸と試料の接触開始から、設定した荷重となり押込み軸の稼働を止めるまでの時間）をストップウォッチ等で計測

※圧縮速度は、10mm/s 以下を設定（人工バリア性能確認試験における埋め戻し材ブロックの製作では、30mm/s）

※今回使用する圧縮試験強さ試験機では、圧縮速度の調整が手動となるため正確な速度調整が難しいが、できる限り統一した圧縮速度とした

⑥ 圧縮保持（1 分程度）

・押込み軸の稼働を止めた後に、試料の体積を拘束した状態で 1 分程度、圧縮保持

⑦ 押込み軸（圧縮用ピストン）の上昇

⑧ 圧縮された試料の高さ寸法測定（試料はモールド内）

・モールド天端から試料天端までの寸法を測定、モールド内で圧縮された試料の高さを算出

⑨ 試料の脱型

・モールド内から試料を押し出して脱型

⑩ 寸法（直径、高さ）測定、質量測定、外観確認（目視及び写真撮影）

1）寸法及び質量を測定

2）試料の外観の目視確認、写真撮影

⑪ 乾燥密度等の算出、グラフの作成等、埋め戻し材ブロックの製作のための基礎データの取得

1）測定した寸法、質量及び含水比から乾燥密度等を算出

2）静的締固め試験の結果（例えば、含水比－乾燥密度の関係、含水比－有効粘土密度の関係等）をグラフに表し、ブロックの製作が可能になり得る条件（模擬掘削土の最大粒径、ベントナイト混合率、成型圧力）の範囲を示す基礎データとしてまとめ、次工程となる埋め戻し材ブロックの製作条件の決定に利用した。

静的締固め試験の一連の状況等を付図 4-4、付図 4-5 に示す。

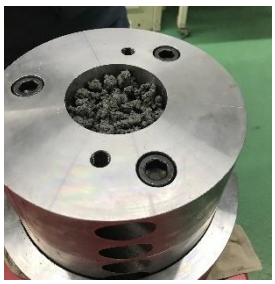
<table>
<tr>
<td>
試料の準備、混合-1
所定量のベントナイト及び模擬掘削土をビニール袋に入れて、人力にて 1 分間、混合後</td>
<td>
試料の準備、混合-2
（模擬掘削土：砕石砕砂混合材の場合）
9.5mm の円筒フルイにて篩分けし、粒径 9.5mm 以上の材料（主に砕石）はビニール袋に戻し、フルイを通過した粒径 9.5mm 以下の材料は小型ミキサの撹拌容器に入れた後</td>
</tr>
<tr>
<td>
試料の準備、混合-3
小型ミキサ：(株)愛工舎製作所、マイティ S20</td>
<td>
試料の準備、混合-4
小型ミキサで 1 分間空練り状況</td>
</tr>
<tr>
<td>
試料の準備、混合-5
所定量の混合水を小型ミキサへ加水、2 分間の混合撹拌後、撹拌容器内のかき混ぜを人力にて行い、再度 2 分間、小型ミキサで撹拌混合した後</td>
<td>
試料の準備、混合-6
（模擬掘削土：砕石砕砂混合材の場合）
小型ミキサにて撹拌混合を行った材料（粒径 9.5mm 以下の材料）と粒径 9.5mm 以上の材料をビニール袋内で、人力にて 5 分程度混合後</td>
</tr>
</table>

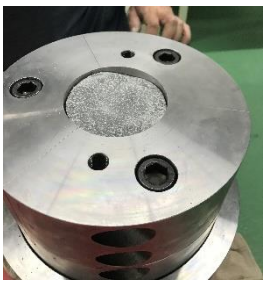
付図 4-4　静的締固め試験の状況（1/2）

試料の準備、混合-7
試料の混合後（模擬掘削土：砕石砕砂混合材、ベントナイト混合率 15%の例）

試料の準備、混合-8
試料の混合後（模擬掘削土：GS[0:10]、ベントナイト混合率 15%の例）

静的締固め試験-1
所定量の試料（ベントナイト混合土）をモールド内に投入





静的締固め試験-2
敷均し、材料付着防止シートの設置

静的締固め試験-3
静的締固め状況

静的締固め試験-4
静的締固め状況

静的締固め試験-5
試料の脱型前

静的締固め試験-6
試料の脱型後（模擬掘削土：GS[0:10]、ベントナイト混合率 15%の例）

付図 4-5　静的締固め試験の状況（2/2）

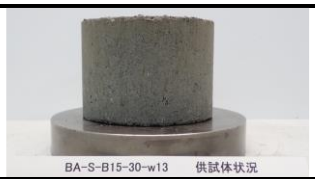
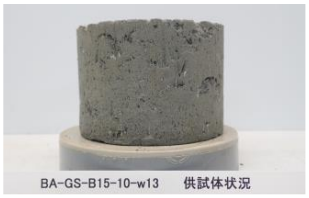
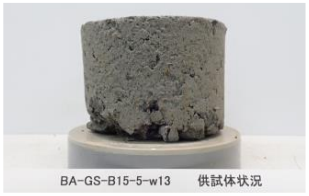
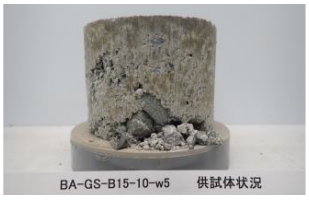
4.1.5. 静的締固め試験 試験結果

試験結果（締固め曲線）と脱型後の試料の外観、含水比、乾燥密度、有効粘土密度をまとめたものを試験ケースごとに次頁以降に示す。乾燥密度は脱型後の試料の含水比を使用して算出し、有効粘土密度を算出する際の模擬掘削土の土粒子密度は 2.803Mg/m^3（土質試験結果）を用いた。また、試料の識別 ID として、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比－ベントナイト混合率(%)－成型圧力(MPa)－含水比(%)の順で表す。模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比を GS[砕石:砕砂]と表記する。例えば、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比 6 : 4 を使用し、ベントナイト混合率 15%、成型圧力 5MPa、含水比 10%の場合の試料 ID は、以下と表記する。

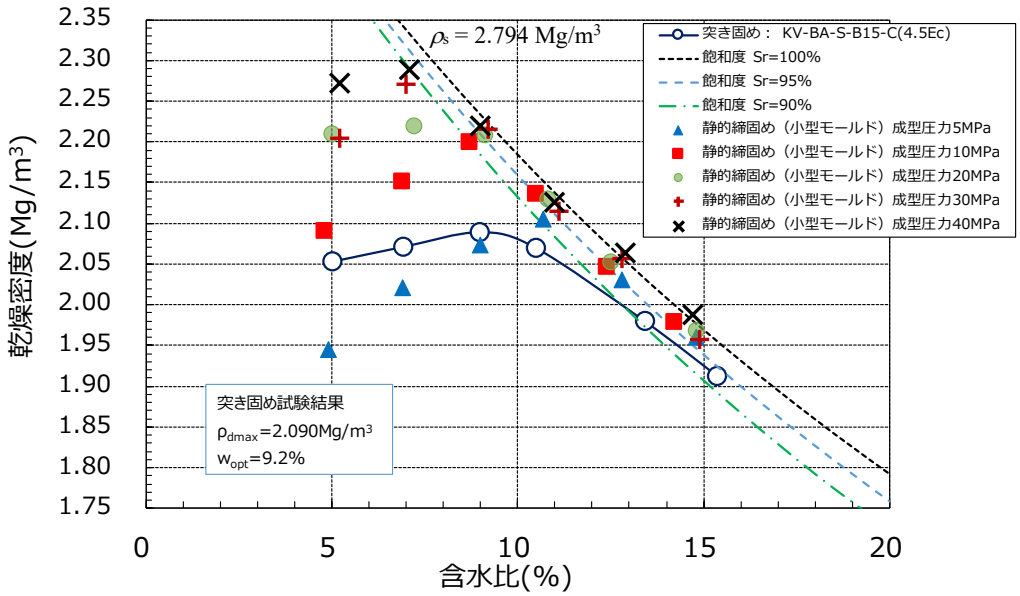
GS[6:4]－B15－P5－w10

脱型後の試料外観について、本業務では定量的な測定を実施していない。そこで、定性的ではあるが、出来る限り客観的な結果を提示することを指向し、脱型後の試料の外観の状態について、付表 4-4 に示す状態Ⅰ～Ⅴで区分けした。

付表 4-4　脱型後の試料の外観の状態の区分け基準

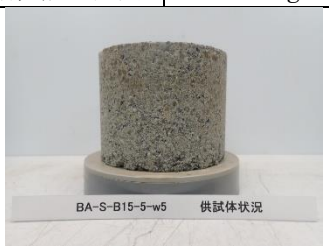
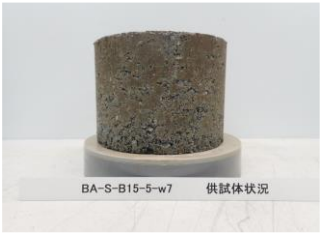
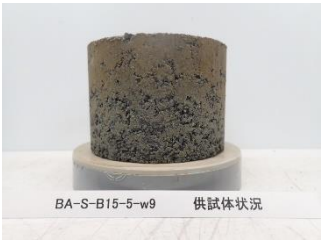
区分け	脱型後の試料の外観の状態（目視による確認）	
状態Ⅰ	欠けなし、試料表面が滑面 （例右図；GS[0:10]－B15-P30-w13 の結果）	
状態Ⅱ	1cm 以下程度の多少の角欠け、多少の試料表面の凹凸あり （例右図；GS［6:4］-B15-P10-w13 の結果）	
状態Ⅲ	1cm～3cm 程度の角欠け、試料表面の凸凹あり （例右図；GS［6:4］-B15-P5-w13 の結果）	
状態Ⅳ	3cm 以上の角欠け、試料表面の凸凹あり （例右図；GS［6:4］-B15-P10-w5 の結果）	
状態Ⅴ	脱型後～寸法測定の間にブロック形状を維持できない （例右図；GS[0:10]－B30-P5-w5 の結果）	

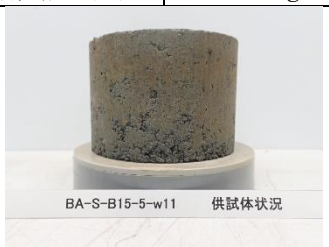
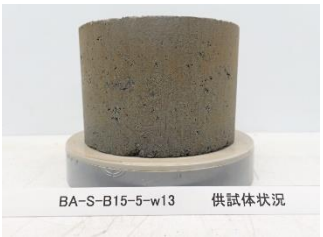
(1) ベントナイト混合率：15%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比 GS[0：10]



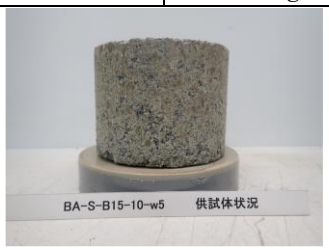
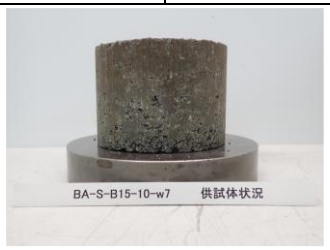
付図 4-6　静的締固め試験結果（GS[0:10]－B15－P5,10,20,30）

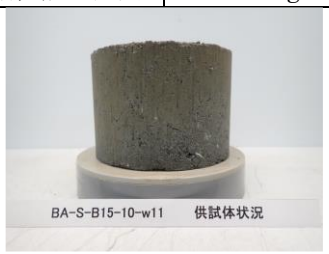
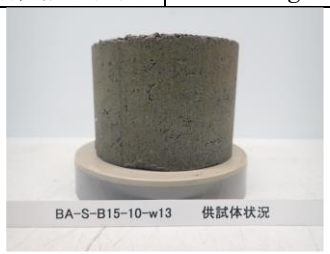
付表 4-5　成型圧力毎の静的締固め試験結果 1（GS[0:10]－B15－P5）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [0:10]、**成型圧力：5MPa**					
含水比	4.9 %	含水比	6.9 %	含水比	9.0 %
乾燥密度	1.945 Mg/m³	乾燥密度	2.021 Mg/m³	乾燥密度	2.073 Mg/m³
有効粘土密度	0.711 Mg/m³	有効粘土密度	0.783 Mg/m³	有効粘土密度	0.837 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

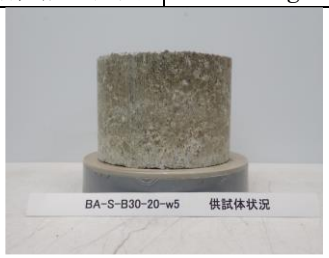
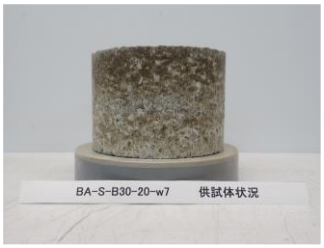
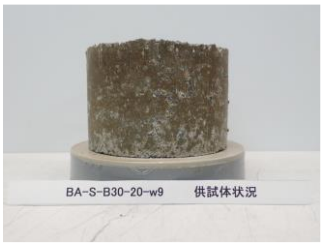
含水比	10.7 %	含水比	12.8 %	含水比	14.8 %
乾燥密度	2.105 Mg/m³	乾燥密度	2.030 Mg/m³	乾燥密度	1.960 Mg/m³
有効粘土密度	0.873 Mg/m³	有効粘土密度	0.792 Mg/m³	有効粘土密度	0.725 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

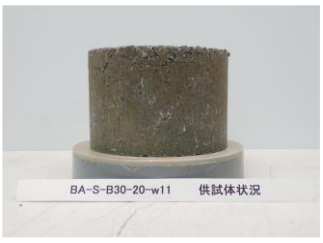
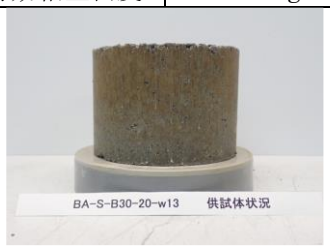
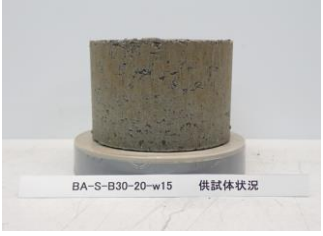
付表 4-6　成型圧力毎の静的締固め試験結果 2（GS[0:10]－B15－P10）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [0:10]、**成型圧力：10MPa**					
含水比	4.8 %	含水比	6.9 %	含水比	8.7 %
乾燥密度	2.090 Mg/m³	乾燥密度	2.152 Mg/m³	乾燥密度	2.199 Mg/m³
有効粘土密度	0.856 Mg/m³	有効粘土密度	0.929 Mg/m³	有効粘土密度	0.990 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

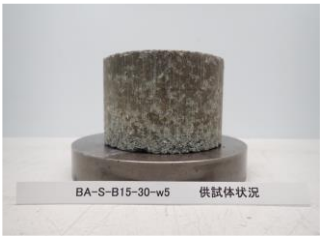
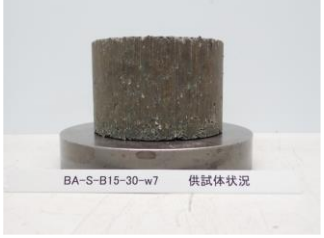
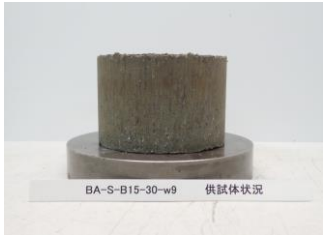
含水比	10.5 %	含水比	12.4 %	含水比	14.2 %
乾燥密度	2.136 Mg/m³	乾燥密度	2.046 Mg/m³	乾燥密度	1.979 Mg/m³
有効粘土密度	0.910 Mg/m³	有効粘土密度	0.809 Mg/m³	有効粘土密度	0.742 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

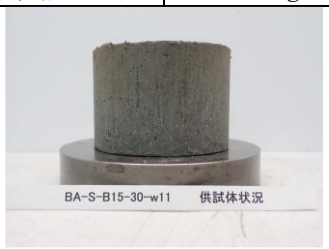
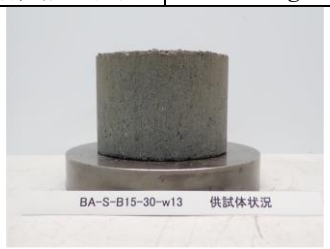
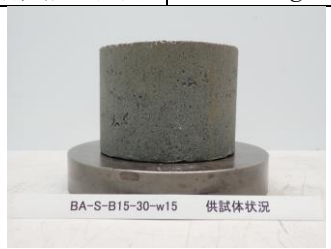
付表 4-7　成型圧力毎の静的締固め試験結果 3（GS[0:10]－B15－P20）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [0:10]、**成型圧力：20MPa**					
含水比	5.0 %	含水比	7.2 %	含水比	9.1 %
乾燥密度	2.210 Mg/m³	乾燥密度	2.220 Mg/m³	乾燥密度	2.209 Mg/m³
有効粘土密度	1.005 Mg/m³	有効粘土密度	1.019 Mg/m³	有効粘土密度	1.004 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

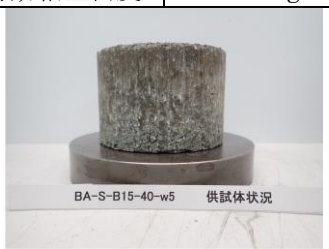
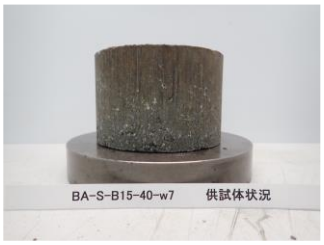
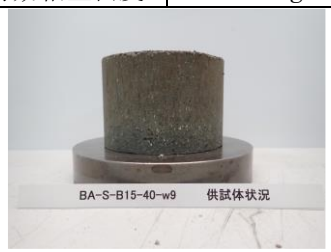
含水比	10.8 %	含水比	12.5 %	含水比	14.8 %
乾燥密度	2.130 Mg/m³	乾燥密度	2.053 Mg/m³	乾燥密度	1.969 Mg/m³
有効粘土密度	0.902 Mg/m³	有効粘土密度	0.816 Mg/m³	有効粘土密度	0.733 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

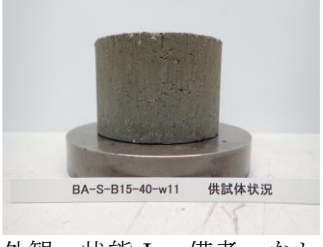
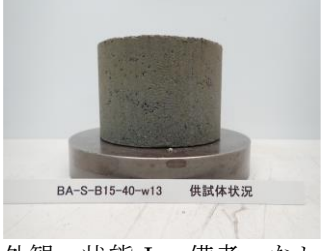
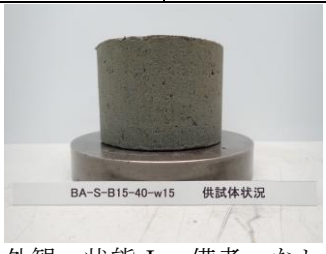
付表 4-8　成型圧力毎の静的締固め試験結果 4（GS[0:10]－B15－P30）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [0:10]、**成型圧力：30MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	7.0 %	含水比	9.2 %
乾燥密度	2.205 Mg/m³	乾燥密度	2.271 Mg/m³	乾燥密度	2.216 Mg/m³
有効粘土密度	0.998 Mg/m³	有効粘土密度	1.094 Mg/m³	有効粘土密度	1.013 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

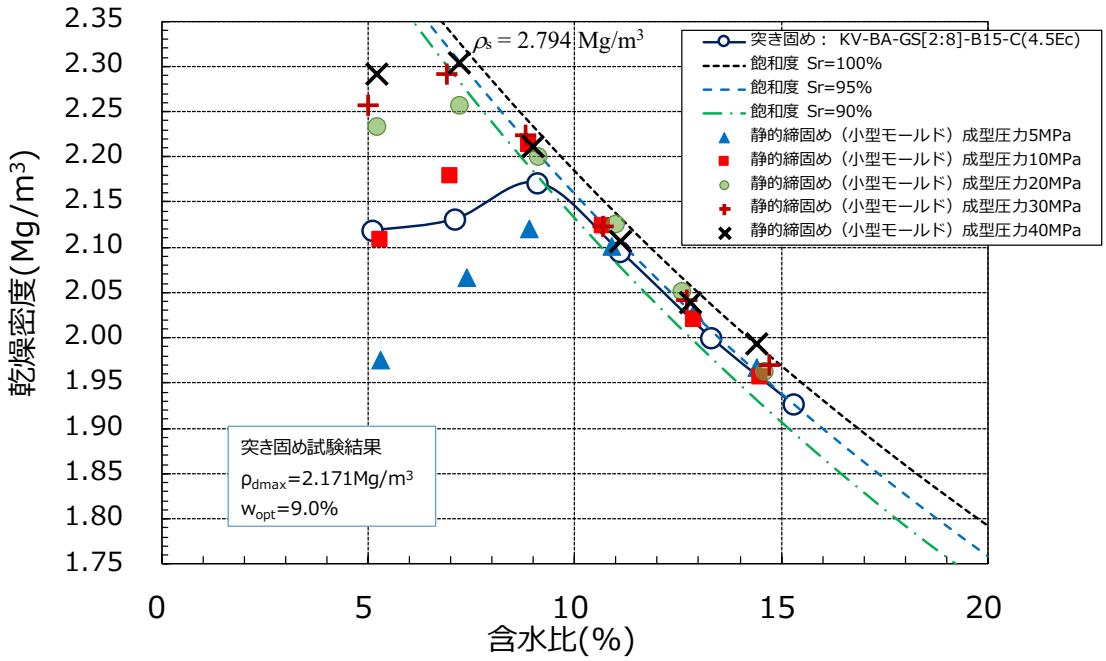
含水比	11.1 %	含水比	12.8 %	含水比	14.9 %
乾燥密度	2.115 Mg/m³	乾燥密度	2.057 Mg/m³	乾燥密度	1.958 Mg/m³
有効粘土密度	0.885 Mg/m³	有効粘土密度	0.820 Mg/m³	有効粘土密度	0.723 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

付表 4-9　成型圧力毎の静的締固め試験結果 5（GS[0:10]－B15－P40）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [0:10]、**成型圧力：40MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	7.1 %	含水比	9.0 %
乾燥密度	2.272 Mg/m³	乾燥密度	2.288 Mg/m³	乾燥密度	2.220 Mg/m³
有効粘土密度	1.096 Mg/m³	有効粘土密度	1.121 Mg/m³	有効粘土密度	1.019 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

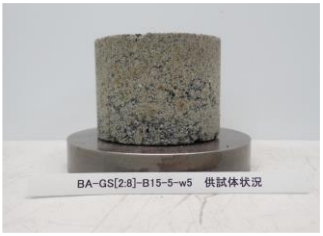
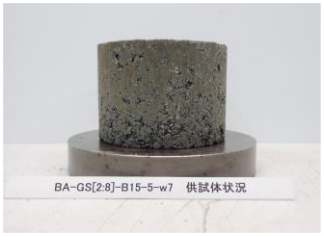
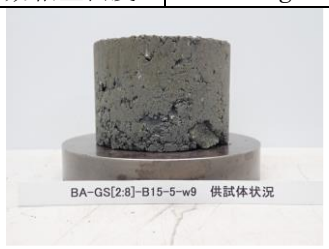
含水比	11.0 %	含水比	12.9 %	含水比	14.7 %
乾燥密度	2.126 Mg/m³	乾燥密度	2.064 Mg/m³	乾燥密度	1.988 Mg/m³
有効粘土密度	0.898 Mg/m³	有効粘土密度	0.828 Mg/m³	有効粘土密度	0.751 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

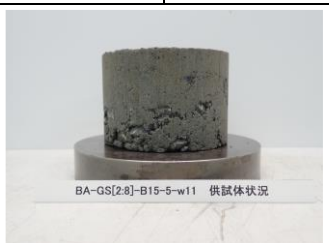
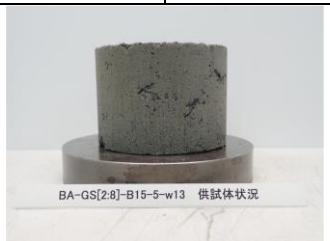
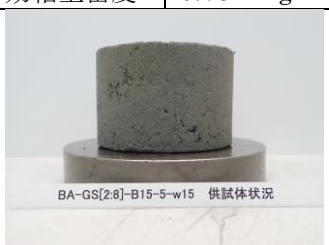
(2) ベントナイト混合率：15%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比 GS[2：8]



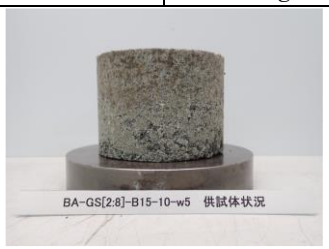
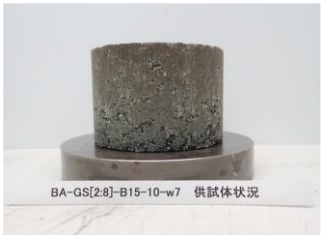
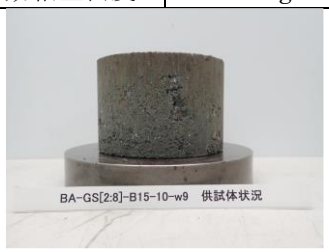
付図 4-7　静的締固め試験結果（GS[2:8]－B15－P5,10,20,30）

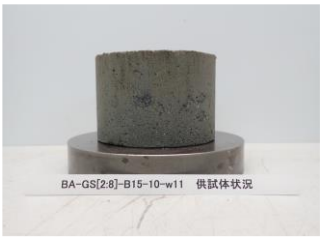
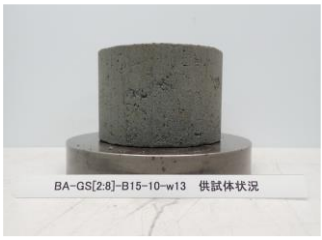
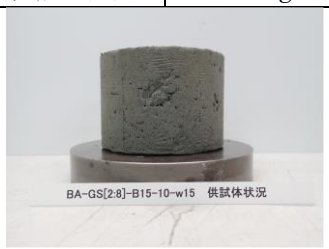
付表 4-10　成型圧力毎の静的締固め試験結果 1（GS[2:8]－B15－P5）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [2:8]、**成型圧力：5MPa**					
含水比	5.3 %	含水比	7.4 %	含水比	8.9 %
乾燥密度	1.975 Mg/m³	乾燥密度	2.067 Mg/m³	乾燥密度	2.121 Mg/m³
有効粘土密度	0.739 Mg/m³	有効粘土密度	0.831 Mg/m³	有効粘土密度	0.892 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし	

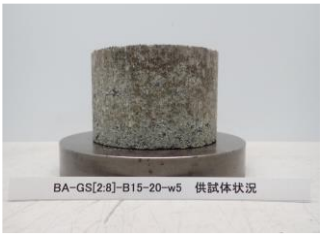
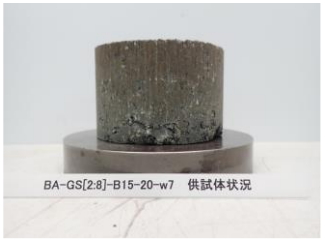
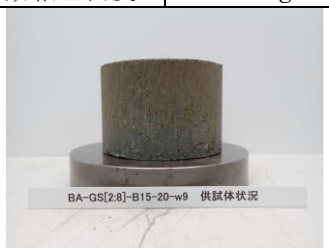
含水比	10.9 %	含水比	12.9 %	含水比	14.4 %
乾燥密度	2.101 Mg/m³	乾燥密度	2.028 Mg/m³	乾燥密度	1.967 Mg/m³
有効粘土密度	0.868 Mg/m³	有効粘土密度	0.790 Mg/m³	有効粘土密度	0.731 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

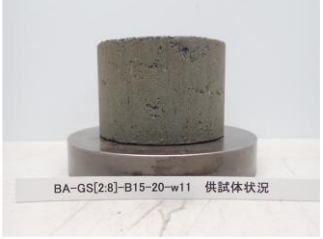
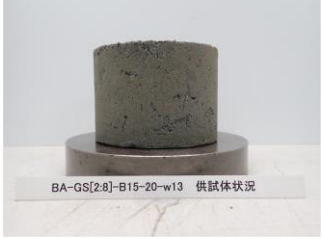
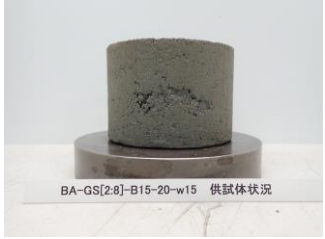
付表 4-11　成型圧力毎の静的締固め試験結果 2（GS[2:8]－B15－P10）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [2:8]、**成型圧力：10MPa**					
含水比	5.3 %	含水比	7.0 %	含水比	8.9 %
乾燥密度	2.108 Mg/m³	乾燥密度	2.178 Mg/m³	乾燥密度	2.213 Mg/m³
有効粘土密度	0.876 Mg/m³	有効粘土密度	0.962 Mg/m³	有効粘土密度	1.009 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし	

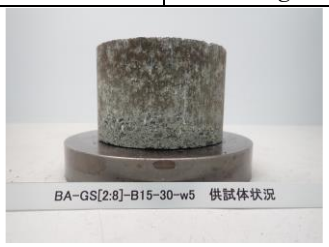
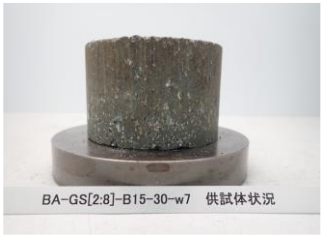
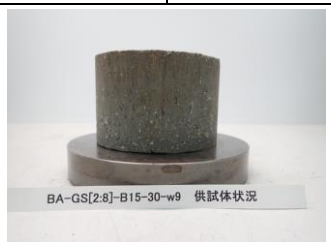
含水比	10.7 %	含水比	12.9 %	含水比	14.5 %
乾燥密度	2.123 Mg/m³	乾燥密度	2.019 Mg/m³	乾燥密度	1.956 Mg/m³
有効粘土密度	0.894 Mg/m³	有効粘土密度	0.781 Mg/m³	有効粘土密度	0.721 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

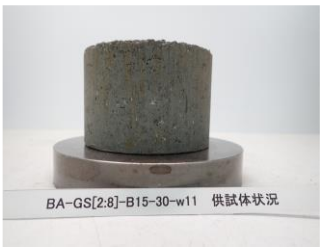
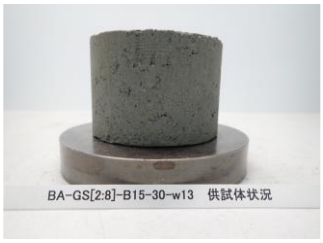
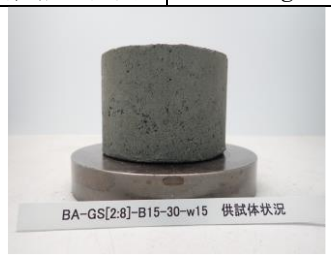
付表 4-12　成型圧力毎の静的締固め試験結果 3（GS[2:8]－B15－P20）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [2:8]、**成型圧力：20MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	7.2 %	含水比	9.1 %
乾燥密度	2.234 Mg/m³	乾燥密度	2.257 Mg/m³	乾燥密度	2.200 Mg/m³
有効粘土密度	1.039 Mg/m³	有効粘土密度	1.073 Mg/m³	有効粘土密度	0.991 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

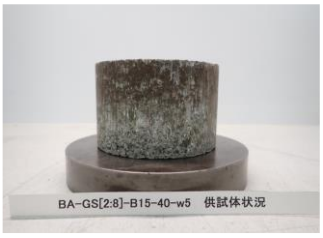
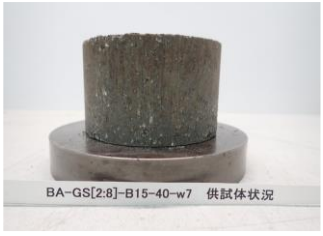
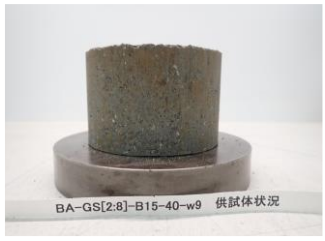
含水比	11.0 %	含水比	12.6 %	含水比	14.6 %
乾燥密度	2.126 Mg/m³	乾燥密度	2.052 Mg/m³	乾燥密度	1.963 Mg/m³
有効粘土密度	0.898 Mg/m³	有効粘土密度	0.815 Mg/m³	有効粘土密度	0.728 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし	

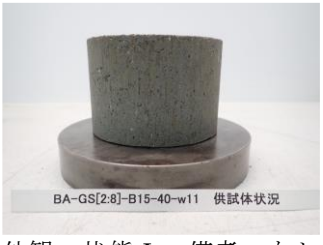
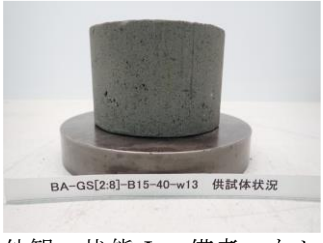
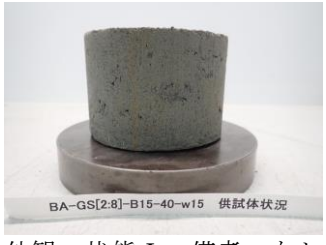
付表 4-13　成型圧力毎の静的締固め試験結果 4（GS[2:8]－B15－P30）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [2:8]、**成型圧力：30MPa**					
含水比	5.0 %	含水比	6.9 %	含水比	8.8 %
乾燥密度	2.257 Mg/m³	乾燥密度	2.292 Mg/m³	乾燥密度	2.224 Mg/m³
有効粘土密度	1.073 Mg/m³	有効粘土密度	1.127 Mg/m³	有効粘土密度	1.025 Mg/m³
 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

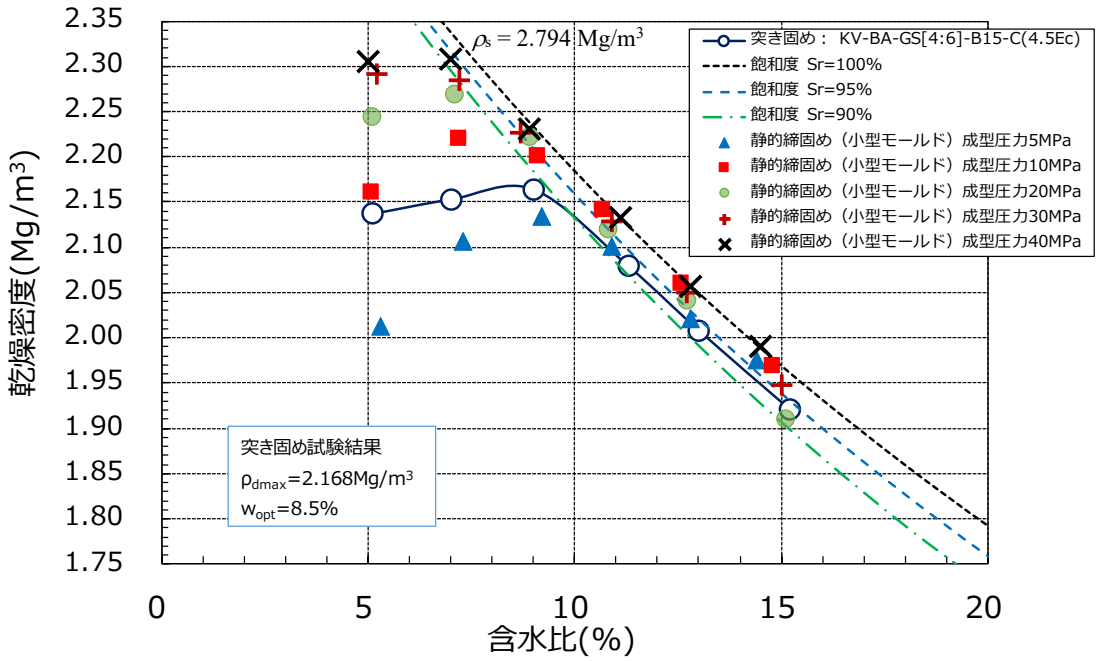
含水比	10.7 %	含水比	12.7 %	含水比	14.7 %
乾燥密度	2.123 Mg/m³	乾燥密度	2.041 Mg/m³	乾燥密度	1.970 Mg/m³
有効粘土密度	0.894 Mg/m³	有効粘土密度	0.803 Mg/m³	有効粘土密度	0.734 Mg/m³
 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし	

付表 4-14　成型圧力毎の静的締固め試験結果 5（GS[2:8]－B15－P40）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [2:8]、**成型圧力：40MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	7.2 %	含水比	9.0 %
乾燥密度	2.291 Mg/m³	乾燥密度	2.304 Mg/m³	乾燥密度	2.211 Mg/m³
有効粘土密度	1.126 Mg/m³	有効粘土密度	1.147 Mg/m³	有効粘土密度	1.006 Mg/m³
 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

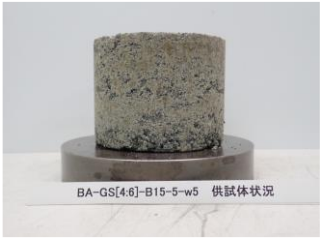
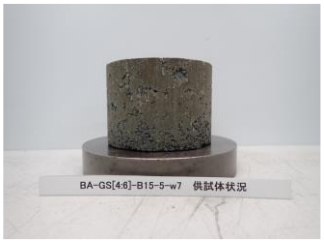
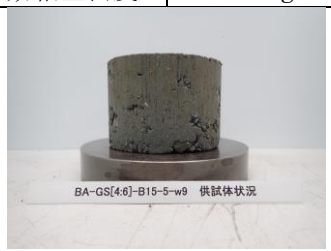
含水比	11.1 %	含水比	12.8 %	含水比	14.4 %
乾燥密度	2.106 Mg/m³	乾燥密度	2.039 Mg/m³	乾燥密度	1.993 Mg/m³
有効粘土密度	0.874 Mg/m³	有効粘土密度	0.801 Mg/m³	有効粘土密度	0.756 Mg/m³
 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

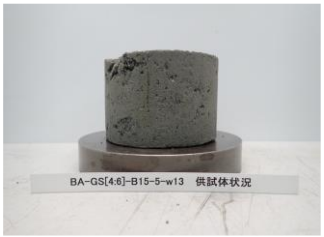
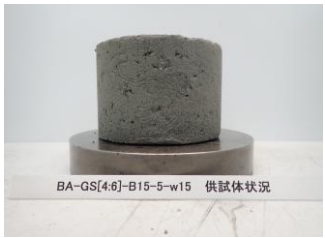
(3) ベントナイト混合率：15%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比 GS[4：6]



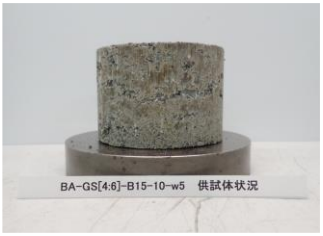
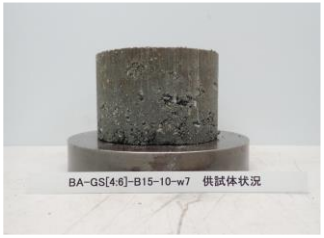
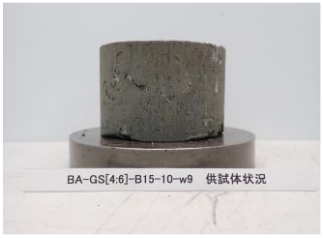
付図 4-8　静的締固め試験結果 1（GS[4:6]－B15－P5,10,20,30）

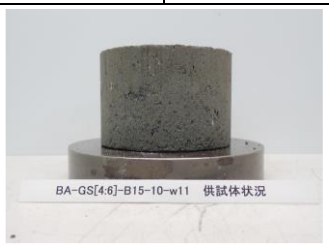
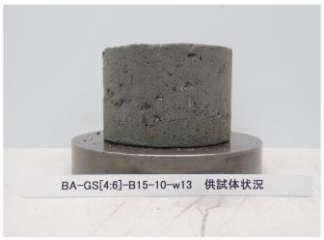
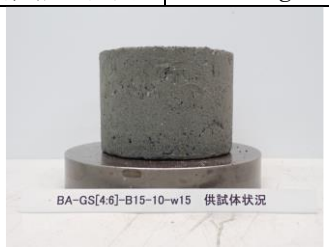
付表 4-15　成型圧力毎の静的締固め試験結果 1（GS[4:6]－B15－P5）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [4:6]、**成型圧力：5MPa**					
含水比	5.3 %	含水比	7.3 %	含水比	9.2 %
乾燥密度	2.013 Mg/m³	乾燥密度	2.106 Mg/m³	乾燥密度	2.134 Mg/m³
有効粘土密度	0.775 Mg/m³	有効粘土密度	0.874 Mg/m³	有効粘土密度	0.907 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし	

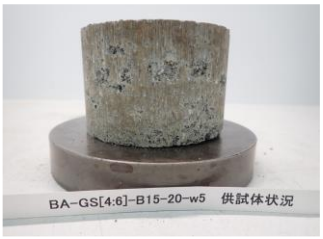
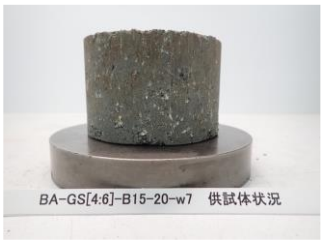
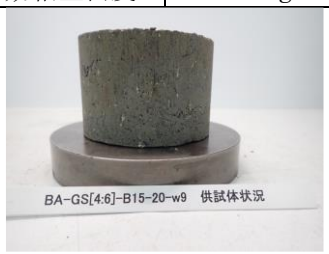
含水比	10.9 %	含水比	12.8 %	含水比	14.4 %
乾燥密度	2.101 Mg/m³	乾燥密度	2.021 Mg/m³	乾燥密度	1.976 Mg/m³
有効粘土密度	0.868 Mg/m³	有効粘土密度	0.783 Mg/m³	有効粘土密度	0.740 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

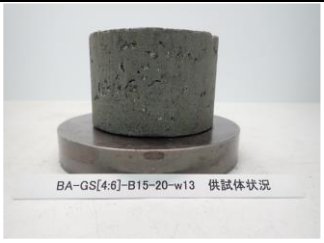
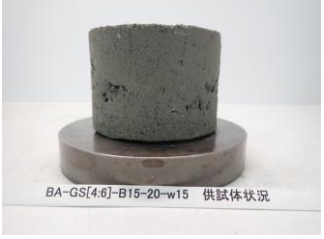
付表 4-16　成型圧力毎の静的締固め試験結果 2（GS[4:6]－B15－P10）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [4:6]、**成型圧力：10MPa**					
含水比	5.1 %	含水比	7.2 %	含水比	9.1 %
乾燥密度	2.160 Mg/m³	乾燥密度	2.220 Mg/m³	乾燥密度	2.200 Mg/m³
有効粘土密度	0.939 Mg/m³	有効粘土密度	1.019 Mg/m³	有効粘土密度	0.991 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし	

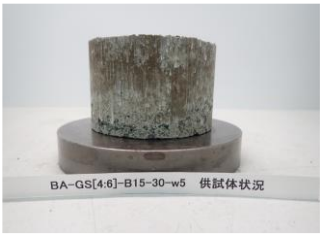
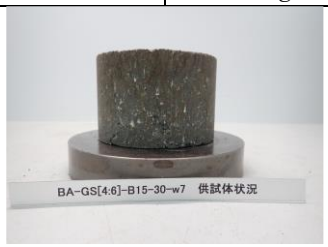
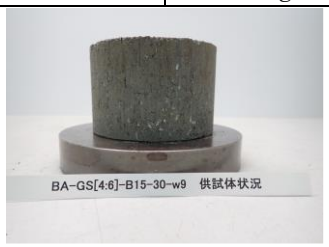
含水比	10.7 %	含水比	12.6 %	含水比	14.8 %
乾燥密度	2.141 Mg/m³	乾燥密度	2.060 Mg/m³	乾燥密度	1.969 Mg/m³
有効粘土密度	0.916 Mg/m³	有効粘土密度	0.823 Mg/m³	有効粘土密度	0.733 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

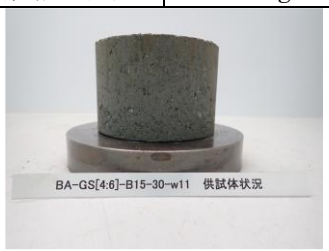
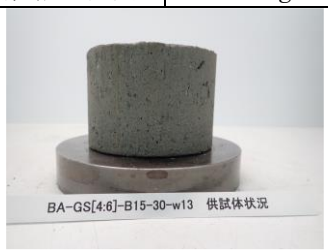
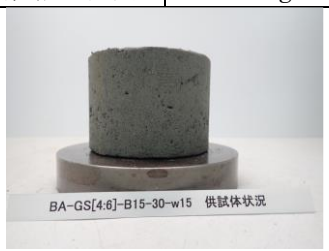
付表 4-17　成型圧力毎の静的締固め試験結果 3（GS[4:6]－B15－P20）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [4:6]、**成型圧力：20MPa**					
含水比	5.1 %	含水比	7.1 %	含水比	8.9 %
乾燥密度	2.245 Mg/m³	乾燥密度	2.269 Mg/m³	乾燥密度	2.222 Mg/m³
有効粘土密度	1.055 Mg/m³	有効粘土密度	1.091 Mg/m³	有効粘土密度	1.022 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

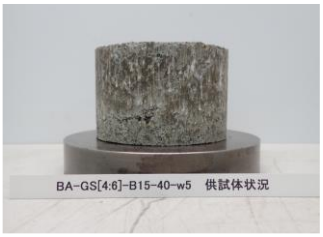
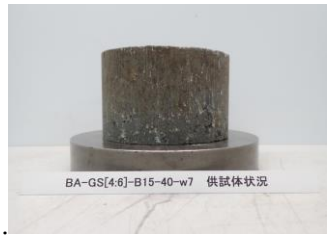
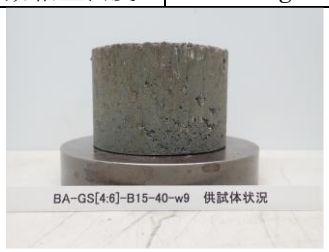
含水比	10.8 %	含水比	12.7 %	含水比	15.1 %
乾燥密度	2.121 Mg/m³	乾燥密度	2.041 Mg/m³	乾燥密度	1.911 Mg/m³
有効粘土密度	0.892 Mg/m³	有効粘土密度	0.803 Mg/m³	有効粘土密度	0.682 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

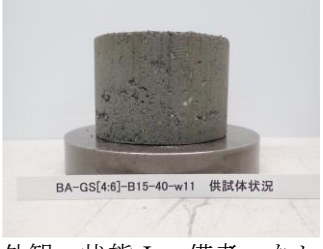
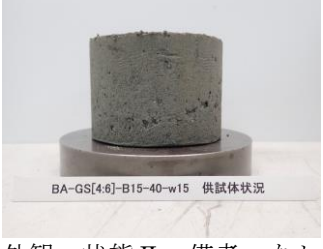
付表 24-18　成型圧力毎の静的締固め試験結果 4（GS[4:6]－B15－P30）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [4:6]、**成型圧力：30MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	7.2 %	含水比	8.7 %
乾燥密度	2.291 Mg/m³	乾燥密度	2.285 Mg/m³	乾燥密度	2.226 Mg/m³
有効粘土密度	1.126 Mg/m³	有効粘土密度	1.116 Mg/m³	有効粘土密度	1.027 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

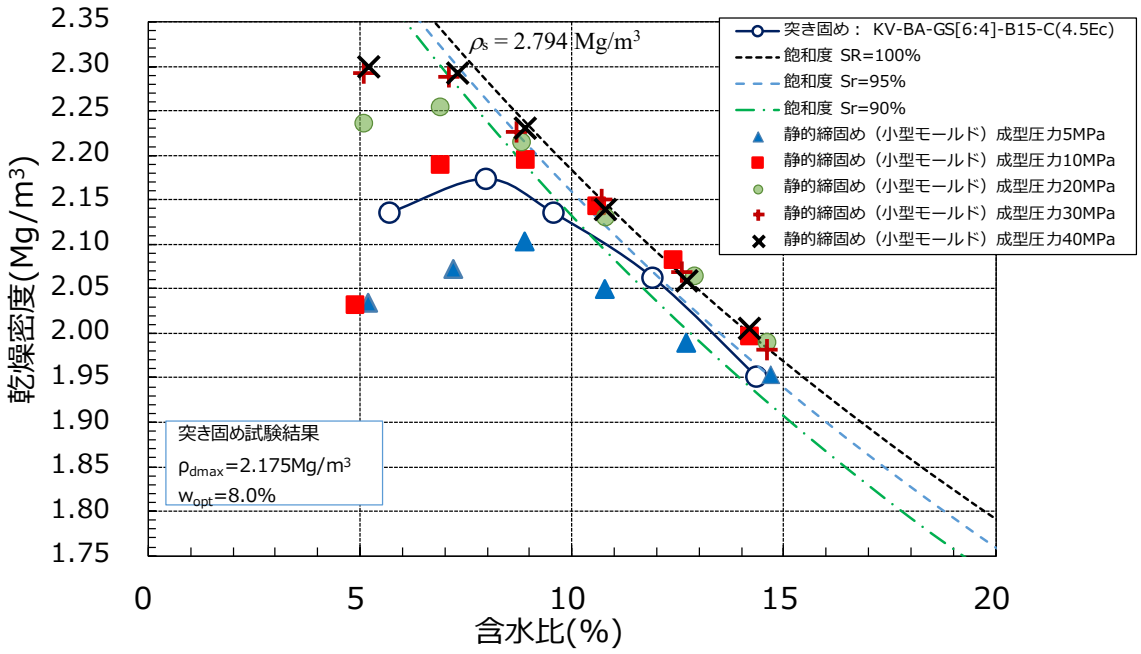
含水比	10.9 %	含水比	12.7 %	含水比	15.0 %
乾燥密度	2.128 Mg/m³	乾燥密度	2.050 Mg/m³	乾燥密度	1.948 Mg/m³
有効粘土密度	0.900 Mg/m³	有効粘土密度	0.813 Mg/m³	有効粘土密度	0.714 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

付表 4-19　成型圧力毎の静的締固め試験結果 5（GS[4:6]－B15－P40）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [4:6]、**成型圧力：40MPa**					
含水比	5.0 %	含水比	7.0 %	含水比	8.9 %
乾燥密度	2.305 Mg/m³	乾燥密度	2.308 Mg/m³	乾燥密度	2.231 Mg/m³
有効粘土密度	1.149 Mg/m³	有効粘土密度	1.154 Mg/m³	有効粘土密度	1.035 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

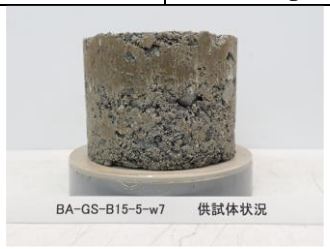
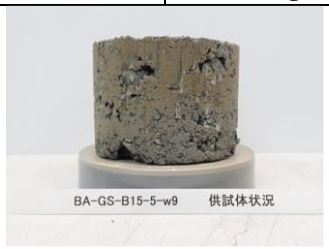
含水比	11.1 %	含水比	12.8 %	含水比	14.5 %
乾燥密度	2.133 Mg/m³	乾燥密度	2.057 Mg/m³	乾燥密度	1.991 Mg/m³
有効粘土密度	0.906 Mg/m³	有効粘土密度	0.820 Mg/m³	有効粘土密度	0.754 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

(4) ベントナイト混合率：15%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比 GS[6：4]



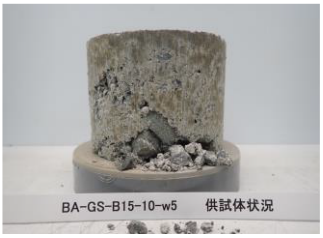
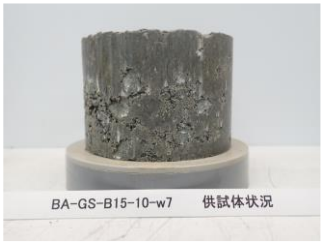
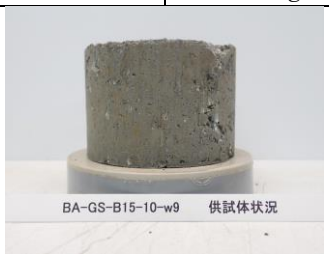
付図 4-9　静的締固め試験結果（GS[6:4]－B15－P5,10,20,30）

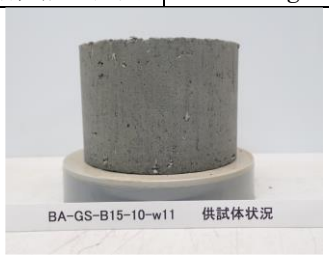
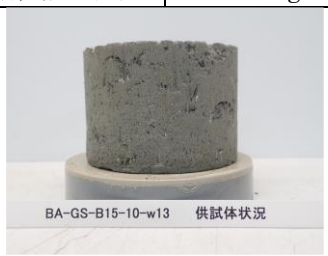
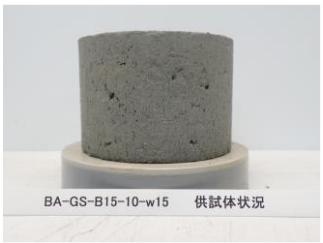
付表 2. 4-20　成型圧力毎の静的締固め試験結果 1（GS[6:4]－B15－P5）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：5MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	7.2 %	含水比	8.9 %
乾燥密度	2.034 Mg/m³	乾燥密度	2.071 Mg/m³	乾燥密度	2.103 Mg/m³
有効粘土密度	0.796 Mg/m³	有効粘土密度	0.835 Mg/m³	有効粘土密度	0.871 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし	

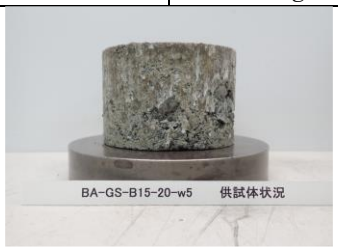
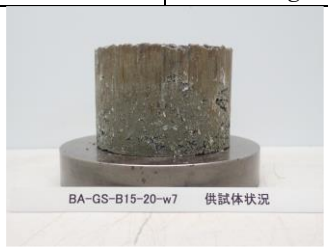
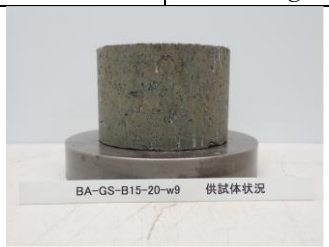
含水比	10.8 %	含水比	12.7 %	含水比	14.7 %
乾燥密度	2.049 Mg/m³	乾燥密度	1.988 Mg/m³	乾燥密度	1.953 Mg/m³
有効粘土密度	0.812 Mg/m³	有効粘土密度	0.751 Mg/m³	有効粘土密度	0.718 Mg/m³
外観：状態Ⅳ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

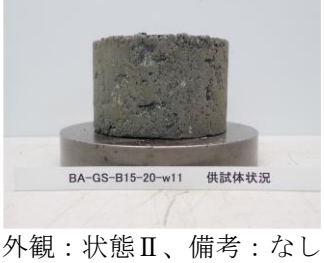
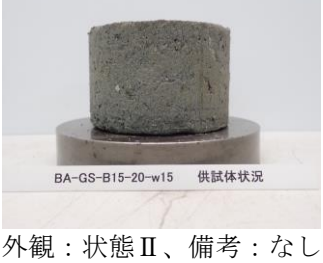
付表 4-21　成型圧力毎の静的締固め試験結果 2（GS[6:4]－B15－P10）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：10MPa**					
含水比	4.9 %	含水比	6.9 %	含水比	8.9 %
乾燥密度	2.031 Mg/m³	乾燥密度	2.189 Mg/m³	乾燥密度	2.195 Mg/m³
有効粘土密度	0.793 Mg/m³	有効粘土密度	0.977 Mg/m³	有効粘土密度	0.985 Mg/m³
 外観：状態Ⅳ 備考：寸法計測直後に一部崩壊		 外観：状態Ⅲ、備考：なし		 外観：状態Ⅲ、備考：なし	

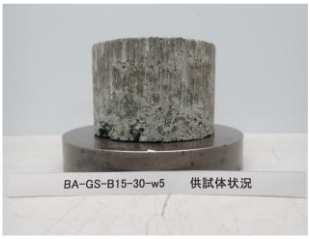
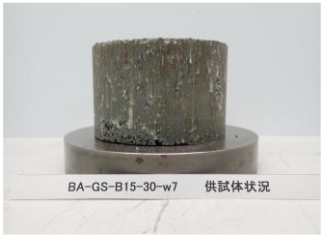
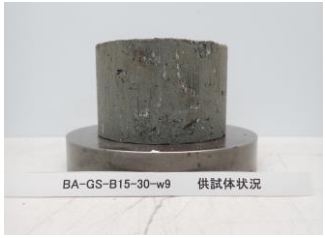
含水比	10.6 %	含水比	12.4 %	含水比	14.2 %
乾燥密度	2.143 Mg/m³	乾燥密度	2.082 Mg/m³	乾燥密度	1.996 Mg/m³
有効粘土密度	0.918 Mg/m³	有効粘土密度	0.847 Mg/m³	有効粘土密度	0.759 Mg/m³
 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

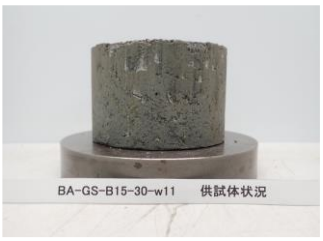
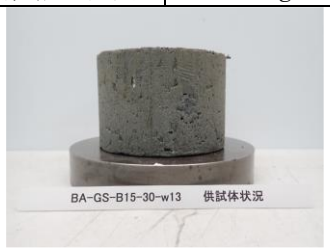
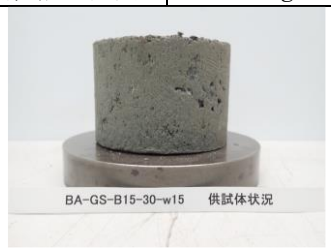
付表 4-22　成型圧力毎の静的締固め試験結果 3（GS[6:4]－B15－P20）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：20MPa**					
含水比	5.1 %	含水比	6.9 %	含水比	8.8 %
乾燥密度	2.236 Mg/m³	乾燥密度	2.254 Mg/m³	乾燥密度	2.215 Mg/m³
有効粘土密度	1.042 Mg/m³	有効粘土密度	1.068 Mg/m³	有効粘土密度	1.012 Mg/m³
 外観：状態Ⅲ、備考：なし		 外観：状態Ⅲ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし	

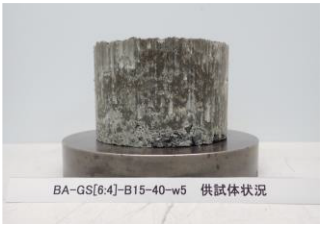
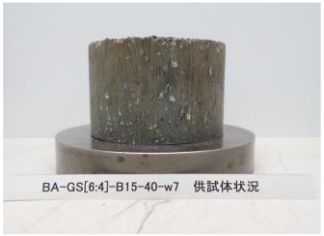
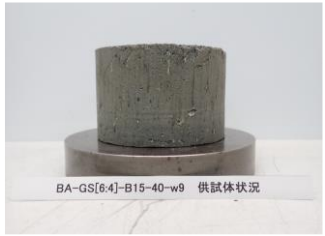
含水比	10.8 %	含水比	12.9 %	含水比	14.6 %
乾燥密度	2.130 Mg/m³	乾燥密度	2.064 Mg/m³	乾燥密度	1.990 Mg/m³
有効粘土密度	0.902 Mg/m³	有効粘土密度	0.828 Mg/m³	有効粘土密度	0.753 Mg/m³
 外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし	

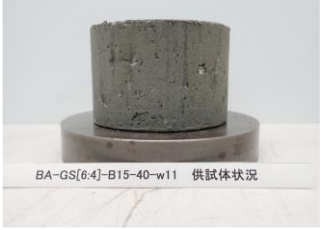
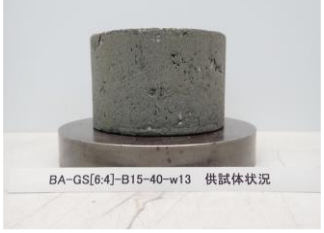
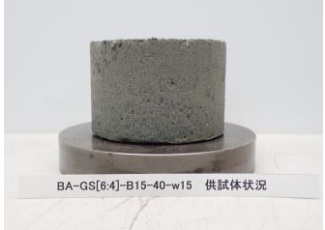
付表 4-23　成型圧力毎の静的締固め試験結果 4（GS[6:4]－B15－P30）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：30MPa**					
含水比	5.1 %	含水比	7.1 %	含水比	8.7 %
乾燥密度	2.293 Mg/m³	乾燥密度	2.288 Mg/m³	乾燥密度	2.226 Mg/m³
有効粘土密度	1.129 Mg/m³	有効粘土密度	1.121 Mg/m³	有効粘土密度	1.027 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

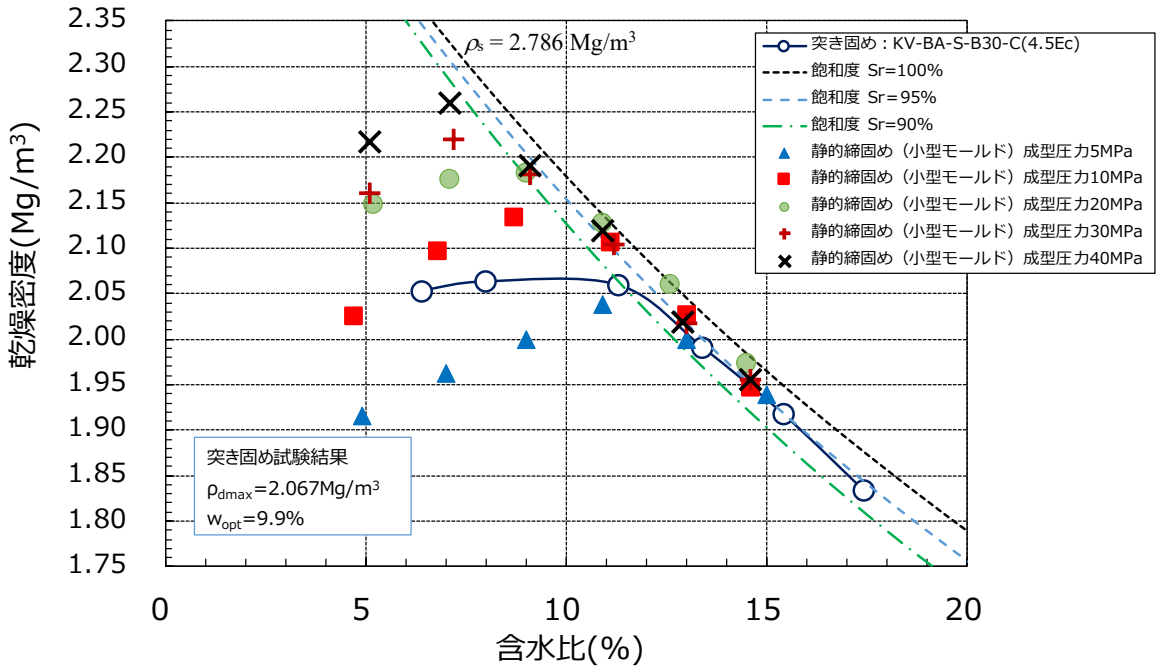
含水比	10.7 %	含水比	12.6 %	含水比	14.6 %
乾燥密度	2.150 Mg/m³	乾燥密度	2.069 Mg/m³	乾燥密度	1.981 Mg/m³
有効粘土密度	0.927 Mg/m³	有効粘土密度	0.833 Mg/m³	有効粘土密度	0.744 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

付表 4-24　成型圧力毎の静的締固め試験結果 5（GS[6:4]－B15－P40）

材料条件：ベントナイト混合率 15%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：40MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	7.3 %	含水比	8.9 %
乾燥密度	2.300 Mg/m³	乾燥密度	2.293 Mg/m³	乾燥密度	2.231 Mg/m³
有効粘土密度	1.140 Mg/m³	有効粘土密度	1.129 Mg/m³	有効粘土密度	1.035 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

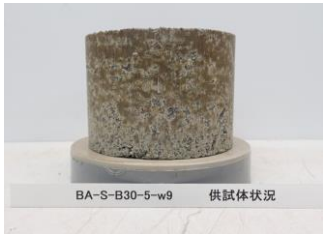
含水比	10.8 %	含水比	12.7 %	含水比	14.2 %
乾燥密度	2.139 Mg/m³	乾燥密度	2.059 Mg/m³	乾燥密度	2.005 Mg/m³
有効粘土密度	0.913 Mg/m³	有効粘土密度	0.822 Mg/m³	有効粘土密度	0.767 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

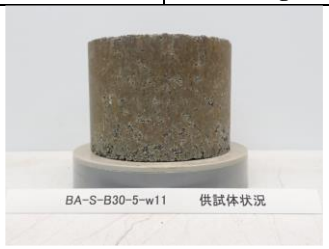
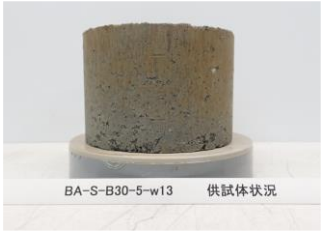
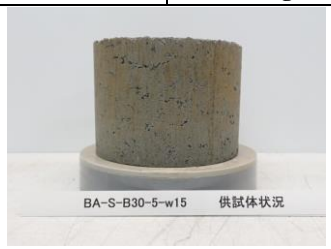
(5) ベントナイト混合率：30%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比 GS[0：10]



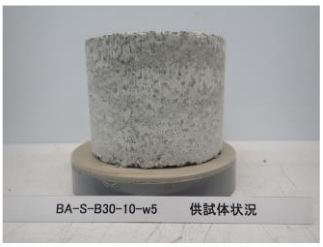
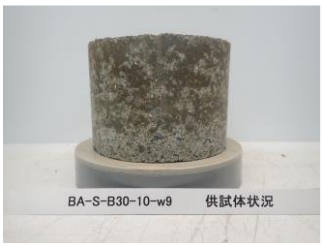
付図 4-10　静的締固め試験結果（GS[0:10]－B30－P5,10,20,30））

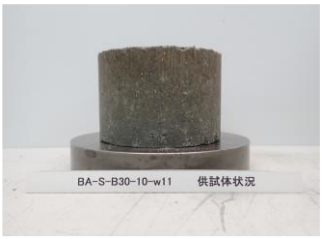
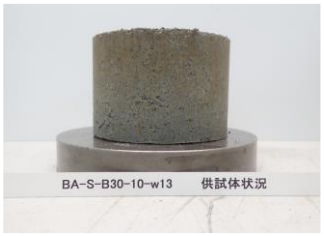
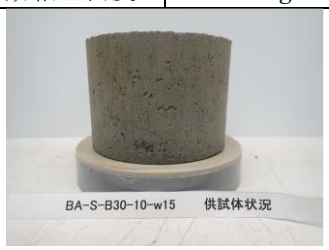
付表 2. 4-25　成型圧力毎の静的締固め試験結果 1（GS[0:10]－B30－P5）

材料条件：ベントナイト混合率 30%、GS [0:10]、**成型圧力：5MPa**					
含水比	4.9 %	含水比	7.0 %	含水比	9.0 %
乾燥密度	1.916 Mg/m³	乾燥密度	1.963 Mg/m³	乾燥密度	2.000 Mg/m³
有効粘土密度	1.102 Mg/m³	有効粘土密度	1.155 Mg/m³	有効粘土密度	1.199 Mg/m³
外観：状態Ⅴ、備考：寸法計測後の写真撮影時に一部崩壊		外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし	

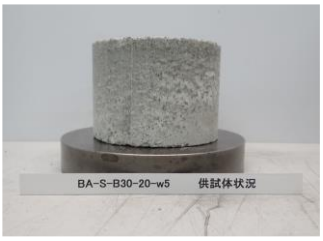
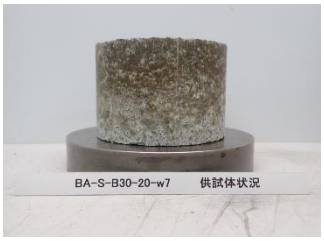
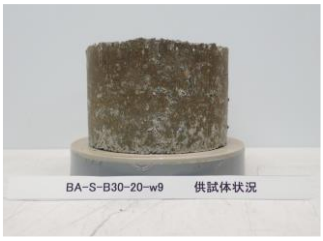
含水比	10.9 %	含水比	13.0 %	含水比	15.0 %
乾燥密度	2.038 Mg/m³	乾燥密度	2.000 Mg/m³	乾燥密度	1.939 Mg/m³
有効粘土密度	1.245 Mg/m³	有効粘土密度	1.199 Mg/m³	有効粘土密度	1.128 Mg/m³
 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

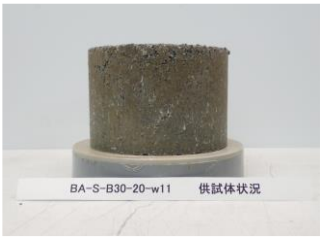
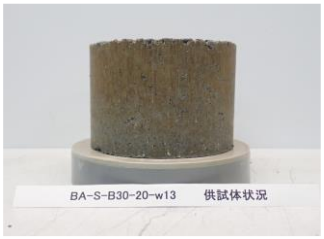
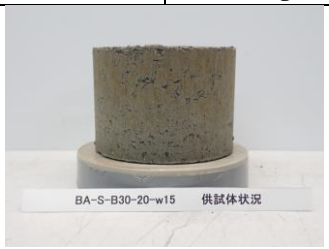
付表 4-26　成型圧力毎の静的締固め試験結果 2（GS[0:10]－B30－P10）

材料条件：ベントナイト混合率 30%、GS [0:10]、**成型圧力：10MPa**					
含水比	4.7 %	含水比	6.8 %	含水比	8.7 %
乾燥密度	2.025 Mg/m³	乾燥密度	2.097 Mg/m³	乾燥密度	2.134 Mg/m³
有効粘土密度	1.229 Mg/m³	有効粘土密度	1.321 Mg/m³	有効粘土密度	1.371 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

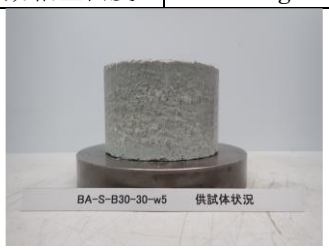
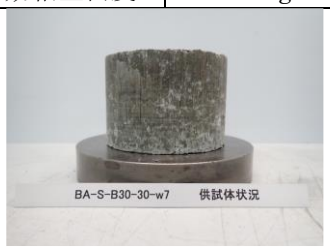
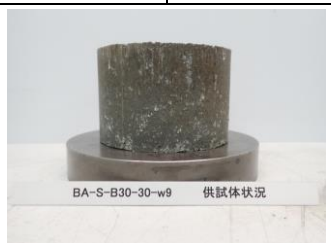
含水比	11.1 %	含水比	13.0 %	含水比	14.6 %
乾燥密度	2.106 Mg/m³	乾燥密度	2.027 Mg/m³	乾燥密度	1.946 Mg/m³
有効粘土密度	1.333 Mg/m³	有効粘土密度	1.231 Mg/m³	有効粘土密度	1.136 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

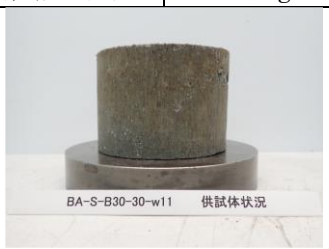
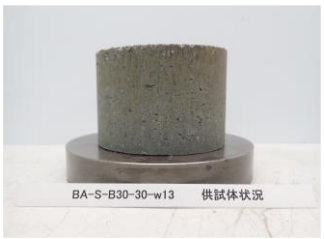
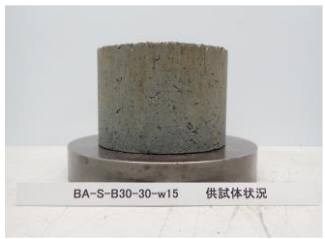
付表 4-27　成型圧力毎の静的締固め試験結果 3（GS[0:10]－B30－P20）

材料条件：ベントナイト混合率 30%、GS [0:10]、**成型圧力：20MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	7.1 %	含水比	9.0 %
乾燥密度	2.148 Mg/m³	乾燥密度	2.176 Mg/m³	乾燥密度	2.183 Mg/m³
有効粘土密度	1.390 Mg/m³	有効粘土密度	1.430 Mg/m³	有効粘土密度	1.440 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

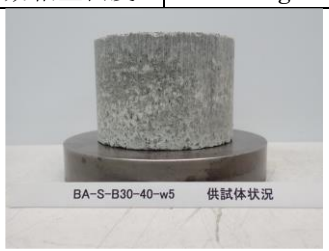
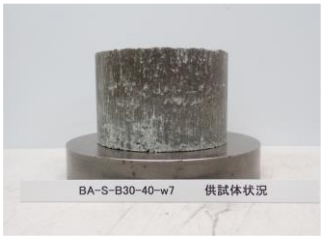
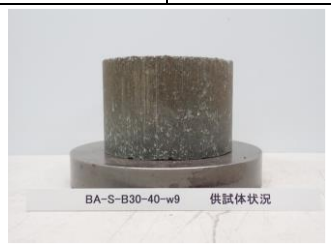
含水比	10.9 %	含水比	12.6 %	含水比	14.5 %
乾燥密度	2.128 Mg/m³	乾燥密度	2.060 Mg/m³	乾燥密度	1.974 Mg/m³
有効粘土密度	1.362 Mg/m³	有効粘土密度	1.273 Mg/m³	有効粘土密度	1.168 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

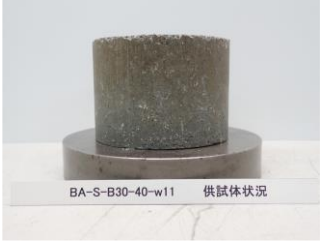
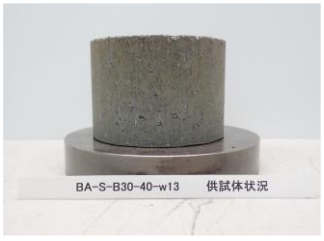
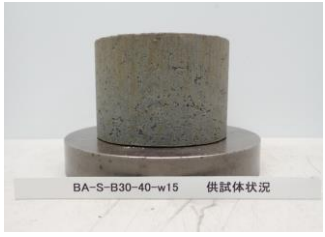
付表 4-28　成型圧力毎の静的締固め試験結果 2（GS[0:10]－B30－P30）

材料条件：ベントナイト混合率 30%、GS [0:10]、**成型圧力：30MPa**					
含水比	5.1 %	含水比	7.2 %	含水比	9.1 %
乾燥密度	2.160 Mg/m³	乾燥密度	2.220 Mg/m³	乾燥密度	2.181 Mg/m³
有効粘土密度	1.407 Mg/m³	有効粘土密度	1.495 Mg/m³	有効粘土密度	1.437 Mg/m³
 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

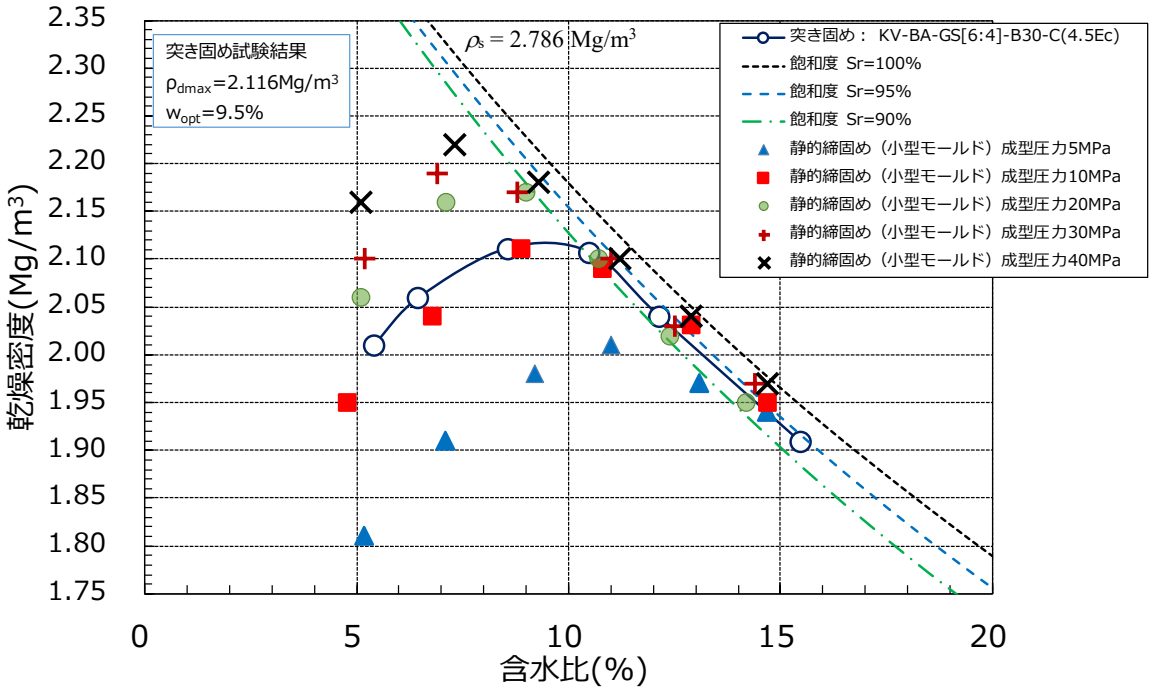
含水比	11.2 %	含水比	13.0 %	含水比	14.6 %
乾燥密度	2.104 Mg/m³	乾燥密度	2.018 Mg/m³	乾燥密度	1.955 Mg/m³
有効粘土密度	1.330 Mg/m³	有効粘土密度	1.220 Mg/m³	有効粘土密度	1.146 Mg/m³
 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

付表 4-29　成型圧力毎の静的締固め試験結果 3（GS[0:10]－B30－P40）

材料条件：ベントナイト混合率 30%、GS [0:10]、**成型圧力：40MPa**					
含水比	5.1 %	含水比	7.1 %	含水比	9.1 %
乾燥密度	2.217 Mg/m³	乾燥密度	2.260 Mg/m³	乾燥密度	2.191 Mg/m³
有効粘土密度	1.490 Mg/m³	有効粘土密度	1.556 Mg/m³	有効粘土密度	1.452 Mg/m³
 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

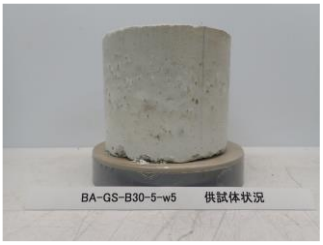
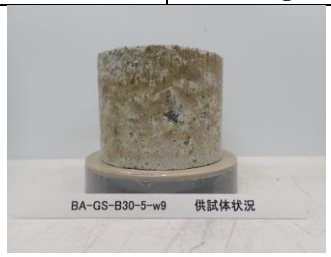
含水比	10.9%	含水比	12.9%	含水比	14.6 %
乾燥密度	2.119 Mg/m³	乾燥密度	2.019 Mg/m³	乾燥密度	1.955 Mg/m³
有効粘土密度	1.350 Mg/m³	有効粘土密度	1.222 Mg/m³	有効粘土密度	1.146 Mg/m³
 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

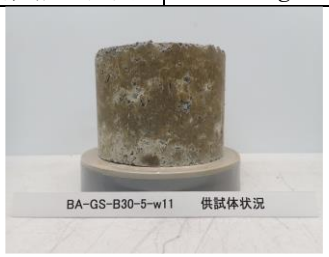
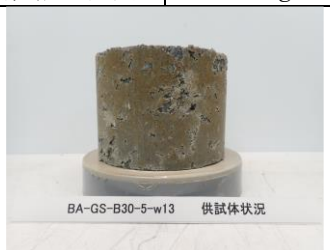
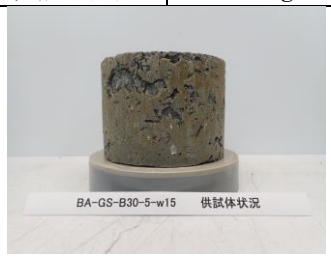
(6) ベントナイト混合率：30%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比 GS[6：4]



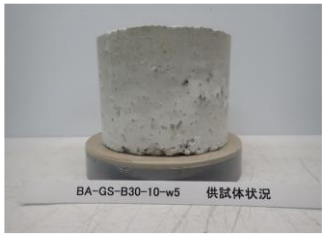
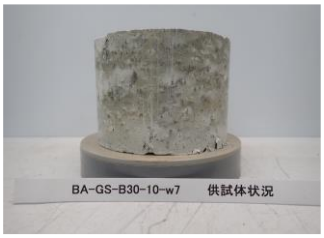
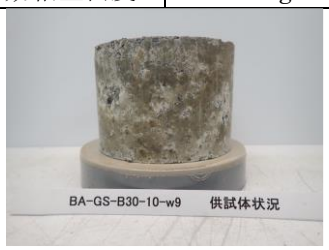
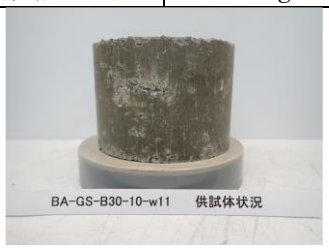
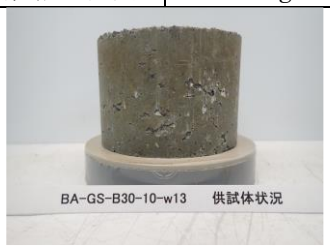
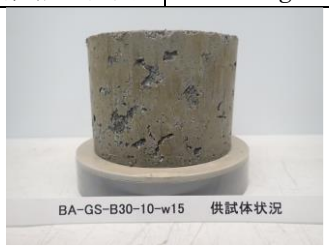
付図 4-11　静的締固め試験結果（GS[6:4]－B30－P5,10,20,30）

付表 2. 4-30　成型圧力毎の静的締固め試験結果 1（GS[6:4]－B30－P5）

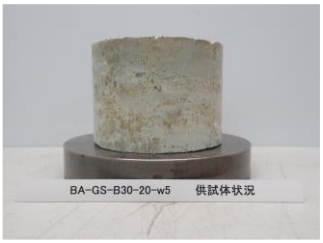
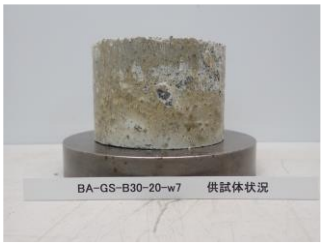
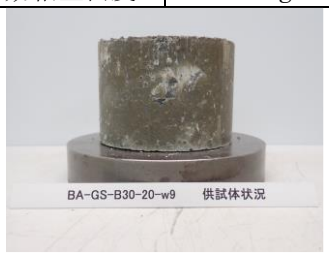
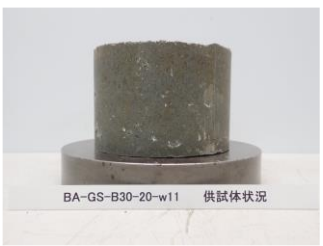
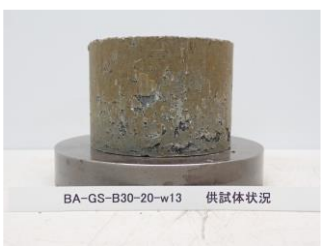
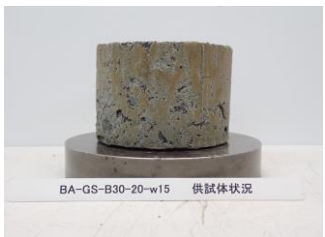
材料条件：ベントナイト混合率 30%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：5MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	7.1 %	含水比	9.2 %
乾燥密度	1.806 Mg/m³	乾燥密度	1.914 Mg/m³	乾燥密度	1.978 Mg/m³
有効粘土密度	0.987 Mg/m³	有効粘土密度	1.100 Mg/m³	有効粘土密度	1.173 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

含水比	11.0 %	含水比	13.1 %	含水比	14.7 %
乾燥密度	2.009 Mg/m³	乾燥密度	1.972 Mg/m³	乾燥密度	1.944 Mg/m³
有効粘土密度	1.210 Mg/m³	有効粘土密度	1.166 Mg/m³	有効粘土密度	1.133 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

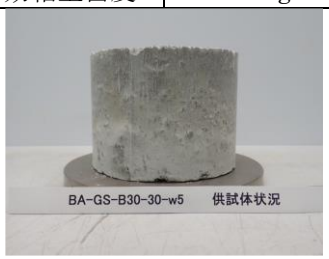
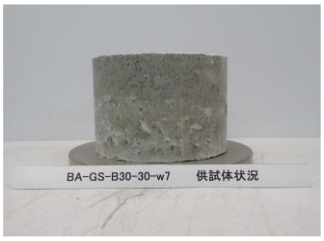
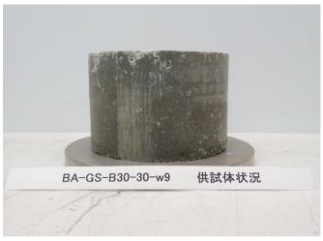
付表 4-31　成型圧力毎の静的締固め試験結果 2（GS[6:4]－B30－P10）

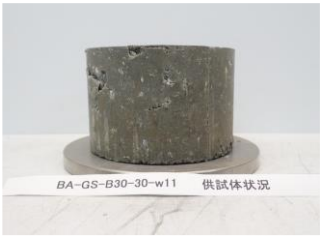
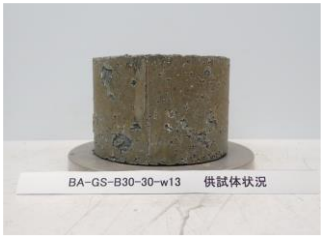
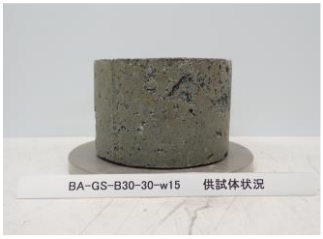
材料条件：ベントナイト混合率 30%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：10MPa**					
含水比	4.8 %	含水比	6.8 %	含水比	8.9 %
乾燥密度	1.947 Mg/m³	乾燥密度	2.041 Mg/m³	乾燥密度	2.112 Mg/m³
有効粘土密度	1.137 Mg/m³	有効粘土密度	1.249 Mg/m³	有効粘土密度	1.341 Mg/m³
					
外観：状態Ⅲ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	
含水比	10.8 %	含水比	12.9 %	含水比	14.7 %
乾燥密度	2.094 Mg/m³	乾燥密度	2.028 Mg/m³	乾燥密度	1.953 Mg/m³
有効粘土密度	1.317 Mg/m³	有効粘土密度	1.233 Mg/m³	有効粘土密度	1.144 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅰ、備考：なし	

付表 4-32　成型圧力毎の静的締固め試験結果 3（GS[6:4]－B30－P20）

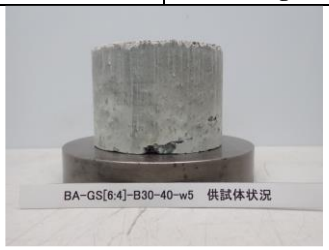
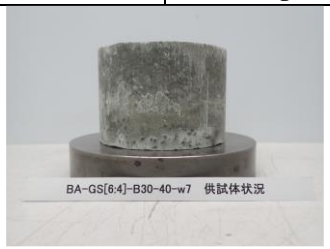
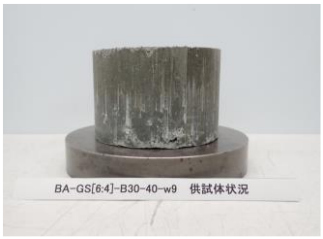
材料条件：ベントナイト混合率 30%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：20MPa**					
含水比	5.1 %	含水比	7.1 %	含水比	9.0 %
乾燥密度	2.055 Mg/m³	乾燥密度	2.157 Mg/m³	乾燥密度	2.165 Mg/m³
有効粘土密度	1.266 Mg/m³	有効粘土密度	1.403 Mg/m³	有効粘土密度	1.414 Mg/m³
					
外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	
含水比	10.7 %	含水比	12.4 %	含水比	14.2 %
乾燥密度	2.096 Mg/m³	乾燥密度	2.020 Mg/m³	乾燥密度	1.953 Mg/m³
有効粘土密度	1.319 Mg/m³	有効粘土密度	1.223 Mg/m³	有効粘土密度	1.144 Mg/m³
					
外観：状態Ⅰ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし		外観：状態Ⅱ、備考：なし	

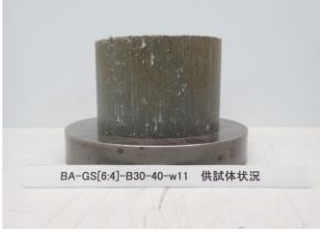
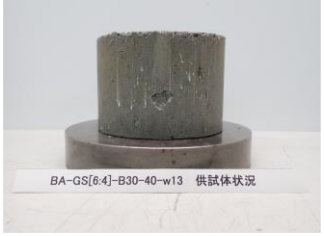
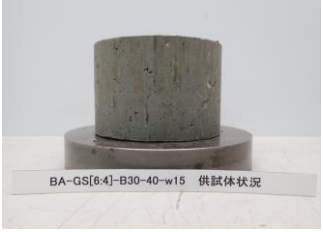
付表 4-33　成型圧力毎の静的締固め試験結果 4（GS[6:4]－B30－P30）

材料条件：ベントナイト混合率 30%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：30MPa**					
含水比	5.2 %	含水比	6.9 %	含水比	8.8 %
乾燥密度	2.101 Mg/m³	乾燥密度	2.189 Mg/m³	乾燥密度	2.169 Mg/m³
有効粘土密度	1.326 Mg/m³	有効粘土密度	1.449 Mg/m³	有効粘土密度	1.420 Mg/m³
 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

含水比	11.0 %	含水比	12.5 %	含水比	14.4 %
乾燥密度	2.099 Mg/m³	乾燥密度	2.027 Mg/m³	乾燥密度	1.967 Mg/m³
有効粘土密度	1.323 Mg/m³	有効粘土密度	1.231 Mg/m³	有効粘土密度	1.160 Mg/m³
 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし	

付表 4-34　成型圧力毎の静的締固め試験結果 5（GS[6:4]－B30－P40）

材料条件：ベントナイト混合率 30%、模擬掘削土：GS [6:4]、**成型圧力：40MPa**					
含水比	5.1 %	含水比	7.3 %	含水比	9.3 %
乾燥密度	2.160 Mg/m³	乾燥密度	2.218 Mg/m³	乾燥密度	2.177 Mg/m³
有効粘土密度	1.407 Mg/m³	有効粘土密度	1.492 Mg/m³	有効粘土密度	1.431 Mg/m³
 外観：状態Ⅲ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

含水比	11.2 %	含水比	12.9 %	含水比	14.7 %
乾燥密度	2.095 Mg/m³	乾燥密度	2.037 Mg/m³	乾燥密度	1.970 Mg/m³
有効粘土密度	1.318 Mg/m³	有効粘土密度	1.244 Mg/m³	有効粘土密度	1.163 Mg/m³
 外観：状態Ⅰ、備考：なし		 外観：状態Ⅱ、備考：なし		 外観：状態Ⅰ、備考：なし	

(7) 圧縮成型後試料の外観

静的締固め試験区分毎に、脱型後の試料の外観を付表 4-4 に示す区分けで整理した結果を付図 4-12、付図 4-13 に示す。

ベントナイト混合率15%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比GS[0:10]

設定含水比 成型圧力	5%		7%		9%		11%		13%		15%
5MPa	Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ	w_{opt} 10.6%	Ⅱ		Ⅰ		Ⅰ
10MPa	Ⅱ		Ⅱ	w_{opt} 8.6%	Ⅱ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ
20MPa	Ⅰ		Ⅰ	w_{opt} 8.0%	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ
30MPa	Ⅱ		Ⅰ	w_{opt} 7.3%	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ
40MPa	Ⅱ	w_{opt} 6.7%	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ

ベントナイト混合率15%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比GS[2:8]

設定含水比 成型圧力	5%		7%		9%		11%		13%		15%
5MPa	Ⅲ		Ⅱ		Ⅲ	w_{opt} 9.4%	Ⅲ		Ⅱ		Ⅰ
10MPa	Ⅲ		Ⅲ	w_{opt} 8.5%	Ⅲ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅱ
20MPa	Ⅱ	w_{opt} 6.9%	Ⅲ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅱ		Ⅲ
30MPa	Ⅱ	w_{opt} 6.7%	Ⅱ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅱ
40MPa	Ⅱ	w_{opt} 6.5%	Ⅱ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ

ベントナイト混合率15%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比GS[4:6]

設定含水比 成型圧力	5%		7%		9%		11%		13%		15%
5MPa	Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	w_{opt} 9.0%	Ⅲ		Ⅲ		Ⅱ
10MPa	Ⅲ		Ⅲ	w_{opt} 7.6%	Ⅲ		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ
20MPa	Ⅲ	w_{opt} 6.9%	Ⅱ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅱ		Ⅱ
30MPa	Ⅱ	w_{opt} 6.2%	Ⅱ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅱ		Ⅱ
40MPa	Ⅱ	w_{opt} 6.2%	Ⅱ		Ⅱ		Ⅰ		Ⅱ		Ⅱ

ベントナイト混合率15%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比GS[6:4]

設定含水比 成型圧力	5%		7%		9%		11%		13%		15%
5MPa	Ⅲ		Ⅲ	w_{opt} 8.8%	Ⅲ		Ⅳ		Ⅲ		Ⅱ
10MPa	Ⅳ		Ⅲ	w_{opt} 7.9%	Ⅲ		Ⅰ		Ⅱ		Ⅰ
20MPa	Ⅲ	w_{opt} 6.8%	Ⅲ		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ
30MPa	Ⅲ	w_{opt} 6.1%	Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ
40MPa	Ⅱ	w_{opt} 6.2%	Ⅰ		Ⅰ		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ

砕砂の混合割合大

砕石の混合割合大

付図 4-12　圧縮成型後の試料の外観状態の比較 1（ベントナイト混合率 15%）

ベントナイト混合率30%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比GS[0:10]

設定含水比 成型圧力	5%		7%		9%		11%		13%		15%
5MPa	Ⅴ		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ	w_{opt} 11.0%	Ⅱ		Ⅰ
10MPa	Ⅱ		Ⅱ		Ⅰ	w_{opt} 9.2%	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ
20MPa	Ⅱ		Ⅰ	w_{opt} 8.4%	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ
30MPa	Ⅱ		Ⅰ	w_{opt} 7.3%	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ
40MPa	Ⅱ	w_{opt} 6.9%	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ

ベントナイト混合率30%、模擬掘削土の砕石と砕砂の乾燥質量比GS[6:4]

設定含水比 成型圧力	5%		7%		9%		11%		13%		15%
5MPa	Ⅲ		Ⅲ		Ⅱ		Ⅱ	w_{opt} 11.0%	Ⅱ		Ⅱ
10MPa	Ⅲ		Ⅱ		Ⅱ	w_{opt} 9.3%	Ⅱ		Ⅱ		Ⅰ
20MPa	Ⅱ		Ⅱ	w_{opt} 8.2%	Ⅱ		Ⅰ		Ⅱ		Ⅱ
30MPa	Ⅱ		Ⅰ	w_{opt} 7.4%	Ⅰ		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ
40MPa	Ⅲ		Ⅱ	w_{opt} 7.4%	Ⅰ		Ⅰ		Ⅱ		Ⅰ

砕砂の
混合割合大

↓

砕石の
混合割合大

付図 4-13　圧縮成型後の試料の外観状態の比較 2（ベントナイト混合率 30%）

ベントナイト混合率 15%、30%のケースともに、模擬掘削土を砕砂（最大粒径 5mm）とした場合について、脱型後の外観の状態が良好となるケースが数多い結果となった。

ベントナイト混合率 15%、最大粒径 20mm となる砕石砕砂混合材を模擬掘削土として用いた場合には、砕石と砕砂の混合割合について、砕石を 2 割と最も少なくしたケースがその他のケースに比べ、脱型後の外観の状態が良好となるケースが数多い結果となった。

ブロックの外観の良し悪しが、ブロックに求められる性能・設計要件へどの程度影響するのかについては今後の課題となるが、外観を良くする（角欠けなし、試料表面が滑面とする）ためには、模擬掘削土の最大粒径は小さい方が有利となる結果となった。

ただし、上記の結果は、モールド径 φ100mm における静的締固め試験によるものであり、ブロックのスケールアップに伴う影響等は、今後の課題の一つとなる。

参考文献

日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2019.

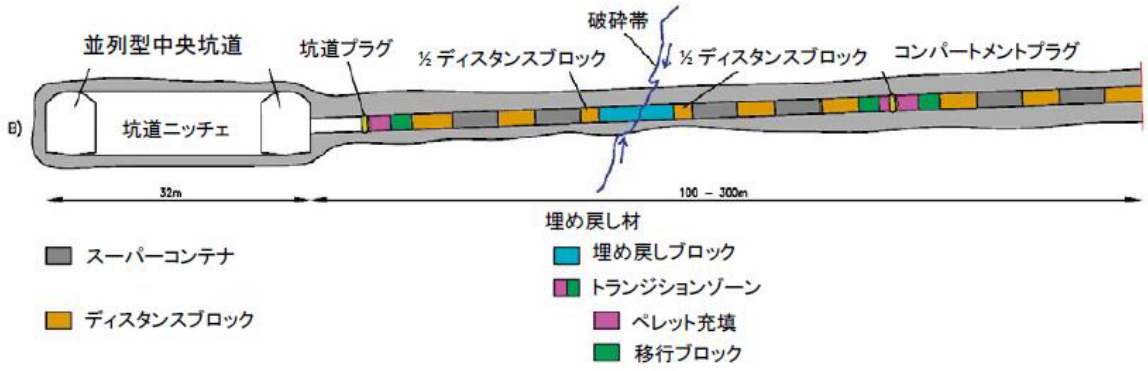
付録 7　KBS-3H の概要

目次

1.　KBS-3H 概念における人工バリアなどの構成 ..... 付 7-1
2.　スーパーコンテナ ..... 付 7-2
2.1.　構成要素の基本情報（要件や仕様） ..... 付 7-2
2.2.　製造方法および施工方法 ..... 付 7-5
2.3.　管理手法および管理項目（パラメータ） ..... 付 7-8
3.　緩衝材及び充填材 ..... 付 7-9
3.1.　構成要素の基本情報（要件や仕様） ..... 付 7-9
3.2.　製造方法及び施工方法 ..... 付 7-21
3.3.　管理手法および管理項目（パラメータ） ..... 付 7-22
4.　閉鎖材 ..... 付 7-26
4.1.　構成要素の基本情報（要件や仕様） ..... 付 7-26
4.2.　製造方法及び施工方法 ..... 付 7-29
4.3.　管理方法及び管理項目（パラメータ） ..... 付 7-29
5.　プラグ ..... 付 7-29
5.1.　構成要素の基本情報（要件や仕様） ..... 付 7-29
5.2.　製造方法及び施工方法 ..... 付 7-33
5.3.　管理手法及び管理項目（パラメータ） ..... 付 7-34
6.　坑道（開口部） ..... 付 7-35
6.1.　構成要素の基本情報（要件や仕様） ..... 付 7-35
6.2.　製造方法及び施工方法 ..... 付 7-36
6.3.　管理方法及び管理項目（パラメータ） ..... 付 7-38
参考文献 ..... 付 7-41

1.　KBS-3H 概念における人工バリアなどの構成

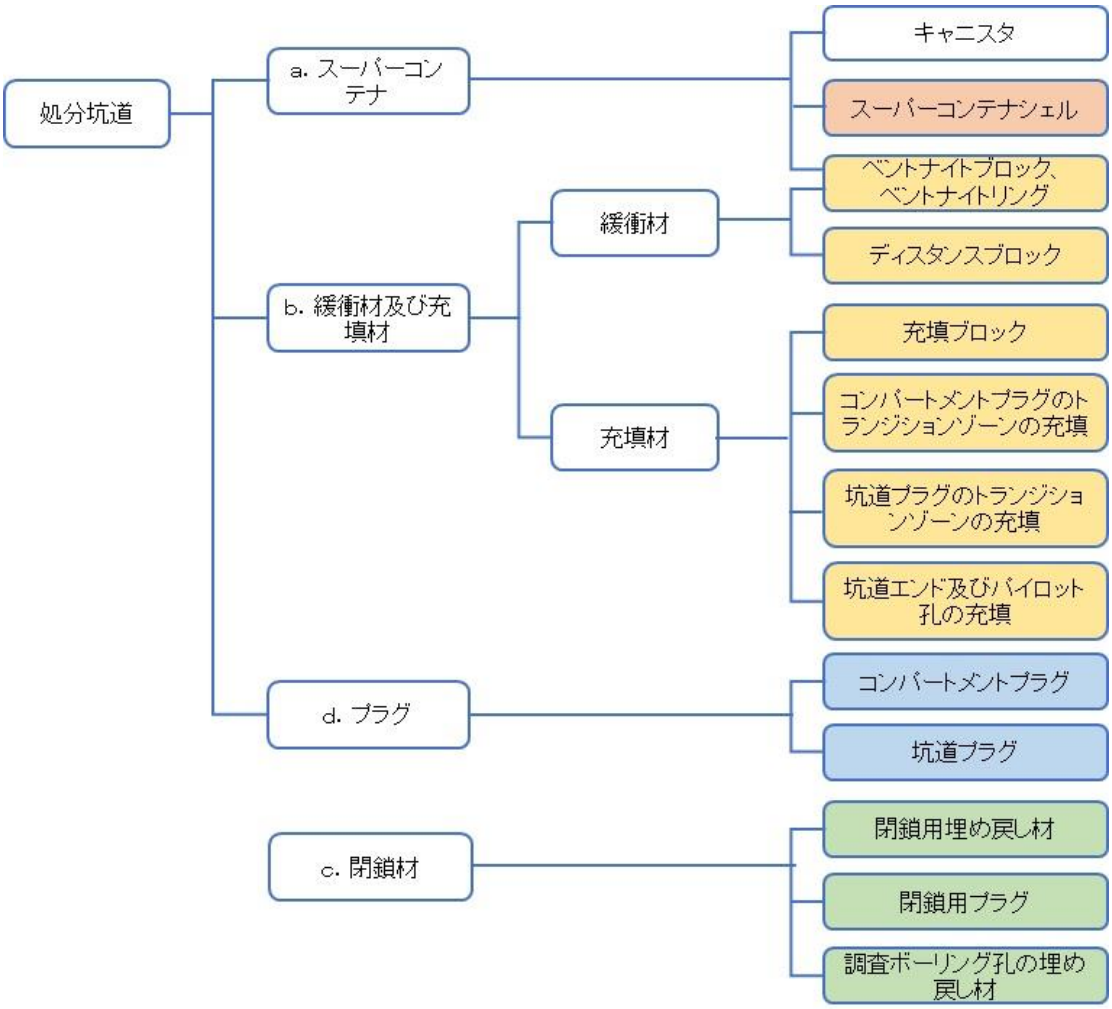
KBS-3H 処分システム（Posiva, 2018a）は、スーパーコンテナ、プラグ、地下開口部（処分施設）、及び緩衝材と充填材といったいくつかのサブシステムで構成されている（付図 1-1 参照）。



付図 1-1　KBS-3H 定置坑道の概観（Posiva, 2018a）

以降では、付図 1-1 の各部位をスーパーコンテナ、緩衝材と充填材、閉鎖材とプラグに分類して整理し、各部位に含まれる構成要素を付図 1-2 に示す。

① スーパーコンテナ（Super container）：スーパーコンテナシェル
② 緩衝材（buffer）及び充填材（filling components）：ディスタンスブロック（Distance block）、スーパーコンテナ内のベントナイトブロック（Bentonite block）・ベントナイトリング（Bentonite rings）、及び充填材構成要素
③ 閉鎖材（closure）：閉鎖用埋め戻し材、閉鎖用プラグ（3 種類のプラグ）、調査ボーリング孔の埋め戻し材
④ プラグ（plug）：コンパートメントプラグ（Compartment plug）、坑道プラグ（Drift plug）



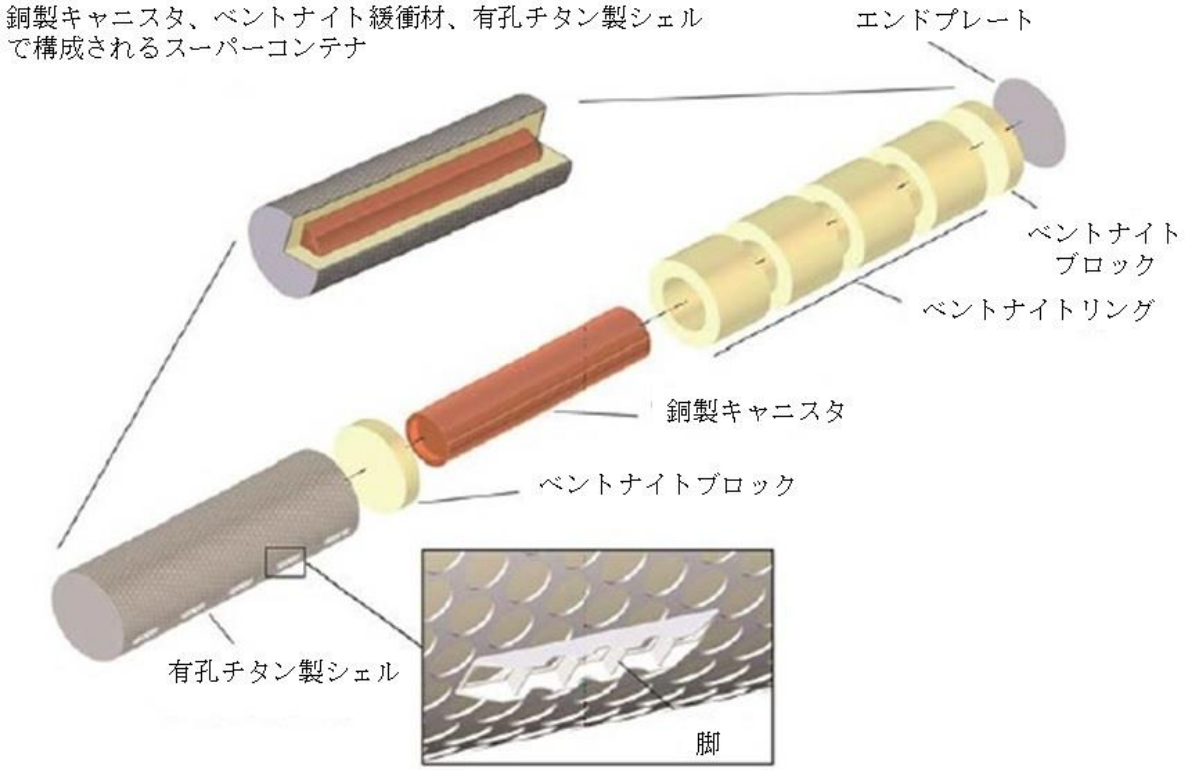
付図 1-2　KBS-3H の各部位の構成

2.　スーパーコンテナ

2.1.　構成要素の基本情報（要件や仕様）

KBS-3H（Posiva, 2018f）では、ベントナイト緩衝材で囲まれたキャニスタは、その外側を金属（チタン）製の有孔シェルにより一体として保持され、予めパッケージングするスーパーコンテナとして定置坑道に配置される。スーパーコンテナ（Posiva, 2018a）は、以下の構成要素から構成される集合体（assembly）である（付図 2-1）。

- 使用済燃料キャニスタ（銅製キャニスタ）
- ベントナイト緩衝材
- 有孔チタン製シェル



付図 2-1　KBS-3H スーパーコンテナ（Posiva, 2018f）

スーパーコンテナは、下記のタイプの使用済燃料キャニスタ用に設計されている。これらキャニスタの寸法と製造上の公差を付表 2-1 に示す（Posiva, 2018c）。

- SKB PWR
- SKB BWR
- Posiva BWR
- Posiva VVER
- Posiva EPR

付表 2-1　各キャニスタの寸法及び製造上の公差（Posiva, 2013a, 2018c）

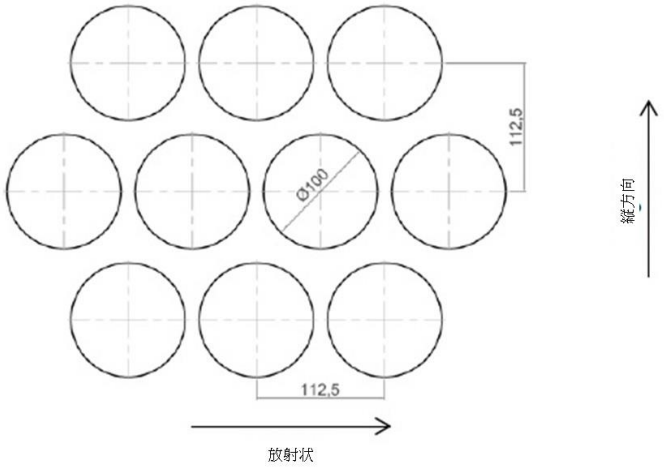
	外径（mm）	長さ（mm）	総重量（kg）
SKB PWR	1,050 $^{+1.2}/_{-1.2}$	4,835 $^{+3.25}/_{-2.75}$	26,500
SKB BWR	1,050 $^{+1.2}/_{-1.2}$	4,835 $^{+3.25}/_{-2.75}$	24,600
Posiva BWR	1,050 $^{+1.2}/_{-1.2}$	4,752 $^{+3.25}/_{-2.75}$	24,500
Posiva VVER	1,050 $^{+1.2}/_{-1.2}$	3,552 $^{+3.25}/_{-2.75}$	18,800
Posiva EPR	1,050 $^{+1.2}/_{-1.2}$	5,223 $^{+3}/_{-3}$	29,000

スーパーコンテナ内の緩衝材（Posiva, 2018f）は、リング状のブロック及び両端に固形状のブロックで構成される。様々なキャニスタに対するスーパーコンテナのサイズを付表 2-2 に示す。なお、スーパーコンテナの直径は、1,761mm である。

付表 2-2　スーパーコンテナのサイズ（Posiva, 2018c）

	外径 [mm]	長さ [mm]	総重量 [kg]
SKB SC PWR キャニスタ	1,761	5,395	44,490
SKB SC BWR キャニスタ	1,761	5,395	42,590
Posiva SC BWR キャニスタ	1,761	5,387	42,760
Posiva SC VVER キャニスタ	1,761	4,187	33,290
Posiva SC EPR キャニスタ	1,761	5,859	52,750

スーパーコンテナシェルは、スーパーコンテナ内のベントナイトが湿潤すると膨潤し、スーパーコンテナと水平坑道との間の空隙を埋めることができるように、穿孔されている。スーパーコンテナのシェルには、水平坑道から持ち上げるための五つの 1 対の金属製の脚が設けられる。脚は、ベントナイトブロック間の接合部の下に、坑道フロアに面して配置される。(Posiva, 2018c)
スーパーコンテナシェルは穿孔されたシリンダ（円柱形）で、エンドプレートの厚さは 6 mm とする。シェルには、約 61～62%の孔が開けられている。穿孔部は直径 100 mm の孔で構成されており、孔のパターンを付図 2-2 に示す。シェルには、放射状に合計で 49 個の孔があり、SF キャニスタのタイプに応じて 37 個、47 個、48 個、または 52 個となる（付表 2-3）。エンドプレートには、孔はない。(Posiva, 2018c)
スーパーコンテナシェル（エンドプレート及び脚を含む）は、チタン Grade 3（ASTM）で製造される。(Posiva, 2018f)



付図 2-2　スーパーコンテナシェルの孔のパターン（Posiva, 2018a）

付表 2-3　スーパーコンテナシェルの厚さ、孔、穿孔度（Posiva, 2018c）

	厚さ [mm]	孔（放射状）	孔（縦方向）	穿孔度 [%]
SKB PWR	6	49	48	62
SKB BWR	6	49	48	62
Posiva BWR	6	49	47	61
Posiva VVER	6	49	37	61
Posiva EPR	6	49	52	62

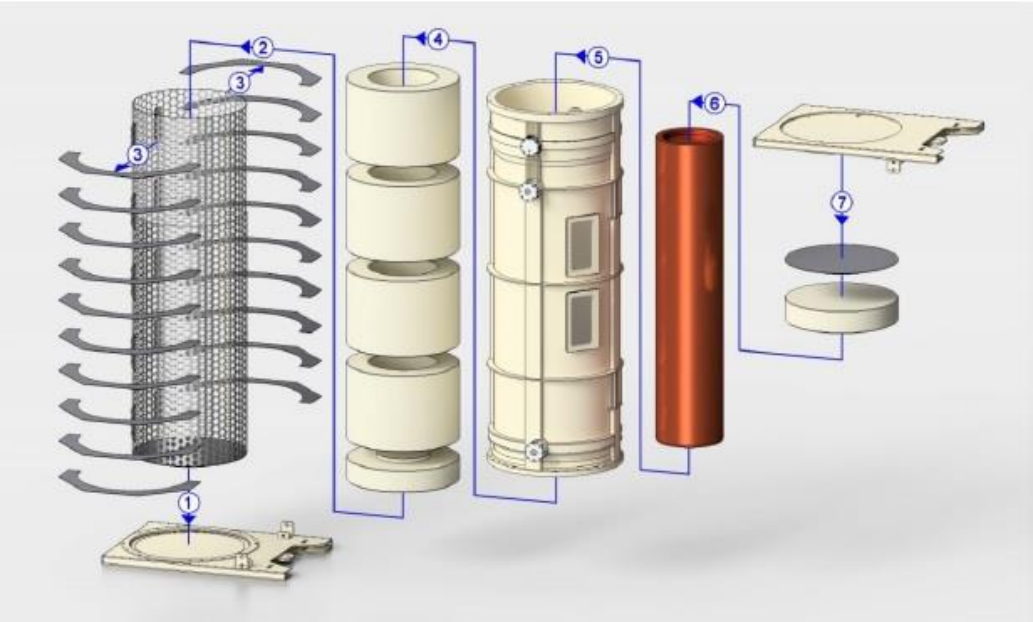
2.2. 製造方法および施工方法

スーパーコンテナシェルの製造は、外部の作業場で行われる。シェルはチタンプレートから製造され、下記の製造ステップから成る。(Posiva, 2018c)

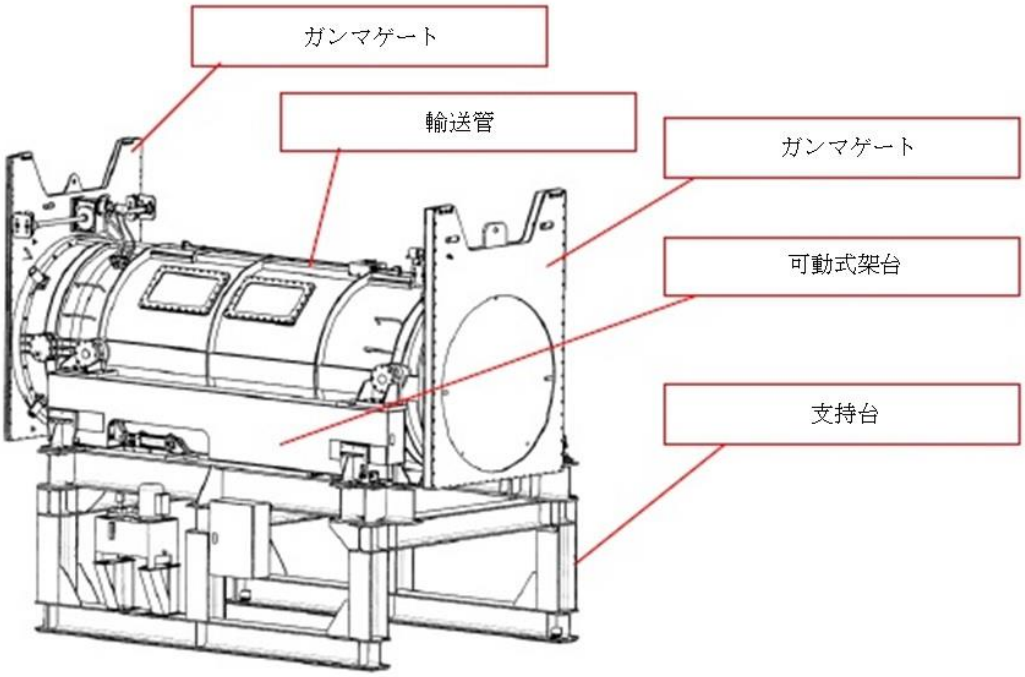
- 孔のパターンのカッティング
- 円筒状シェルの成形
- シェルの溶接
- エンドプレートの溶接
- 脚の溶接

スーパーコンテナの組立ては、処分場深度にあるリローディングステーション（reloading station）で行われる。組立ては、スーパーコンテナを垂直にした状態で行われる。(Posiva, 2018c)
スーパーコンテナの組立は、下記の主な手順で構成される（付図 2-3)。(Posiva, 2018c)

⓪輸送管ガンマゲート（transport tube gamma gate）(付図 2-4）は、組立位置に配置される。
①ガンマゲートの上に、補強板を備えたスーパーコンテナシェルを配置する。
②緩衝材のエンドブロックと四つの緩衝材リングがスーパーコンテナシェル内に配置される。
③スーパーコンテナシェルの補強板を取り外す。
④輸送管をスーパーコンテナの上に置き、ガンマゲートに取り付ける。
⑤キャニスタを持ち上げて、スーパーコンテナの中に入れる。
⑥上部緩衝材ブロックと下部エンドプレートを持ち上げてスーパーコンテナの上部に置き、エンドプレートをスーパーコンテナのシェルに溶接する。
⑦上部ガンマゲートを輸送管に取り付ける。
⑧輸送管を持ち上げて搬送フレームに載置し、水平位置に傾斜させる。
搬送フレームにスーパーコンテナを載置した輸送管は、重量物搬送車の助けを借りて中間貯蔵エリアや定置場所に搬送することができる。

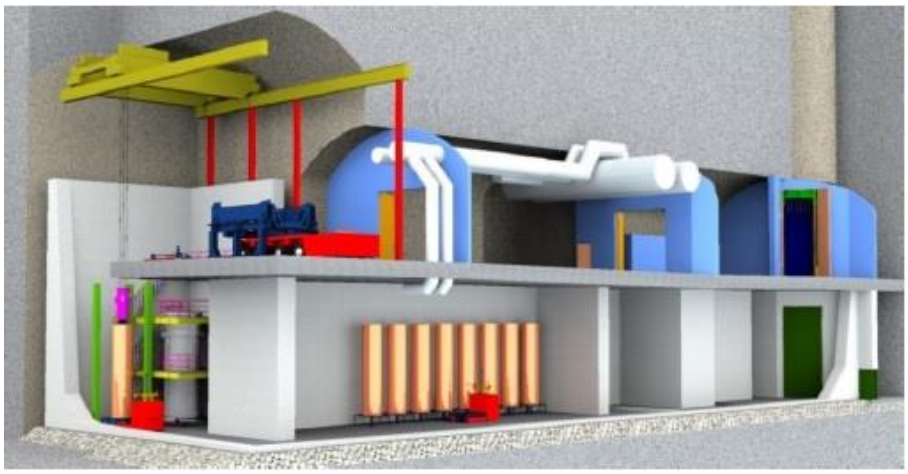


付図 2-3　スーパーコンテナの組立て（Posiva, 2018c）



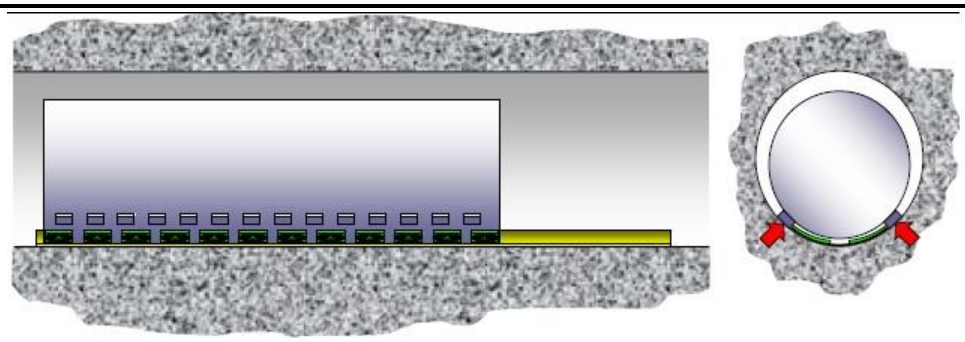
付図 2-4　ガンマゲートを備えた輸送管の 3D イメージ図（Posiva, 2018c）

Posiva によるリローディングステーションのイメージを付図 2-5 に示す（Posiva, 2018c）。

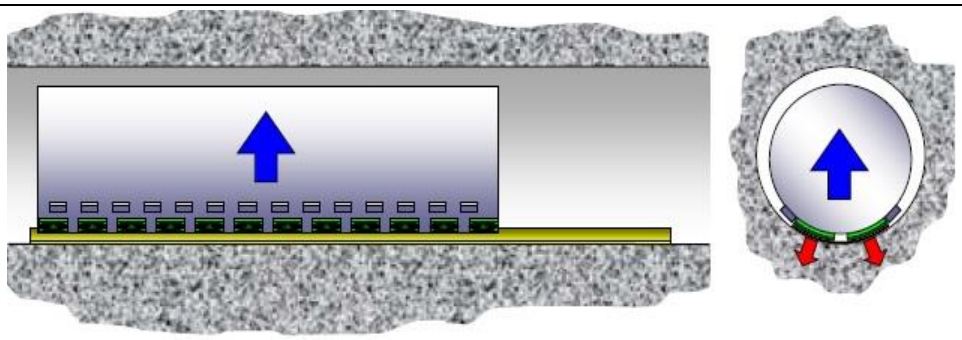


付図 2-5　リローディングステーション及びキャニスタ貯蔵の 3D イメージ（Posiva, 2018c）

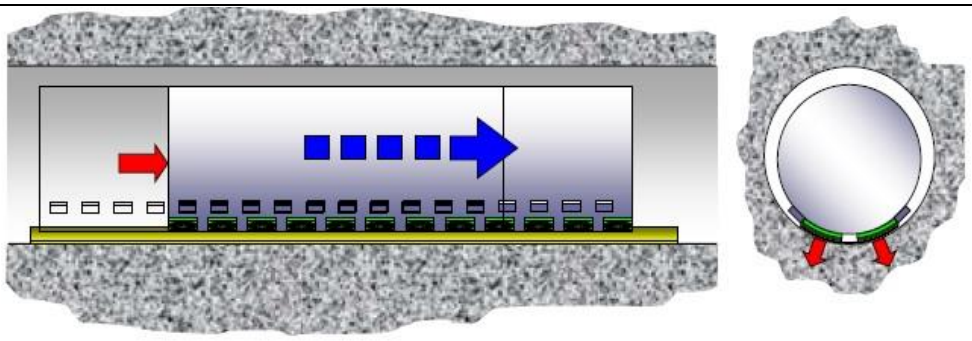
定置装置の設計は、スーパーコンテナを坑道内で段階的に移動させるという搬送原理に基づいている。このプロセスは、スーパーコンテナが定置坑道内の正しい位置になるまで連続的に繰り返される。脚部を備えたスーパーコンテナは、リフティングクッションパレット（lifting cushion pallet）とスーパーコンテナの下にある脚部の間の空間に配置されたスライドプレート（slide plate）の助けを借りて移動する（付図 2-6）（Posiva, 2018c）。



ステップ 1
スーパーコンテナは、その支持脚（赤い矢印で示されている）の上に載っている。スーパーコンテナの脚部の間にあるリフティングパレット/スライドプレートは作動していない。



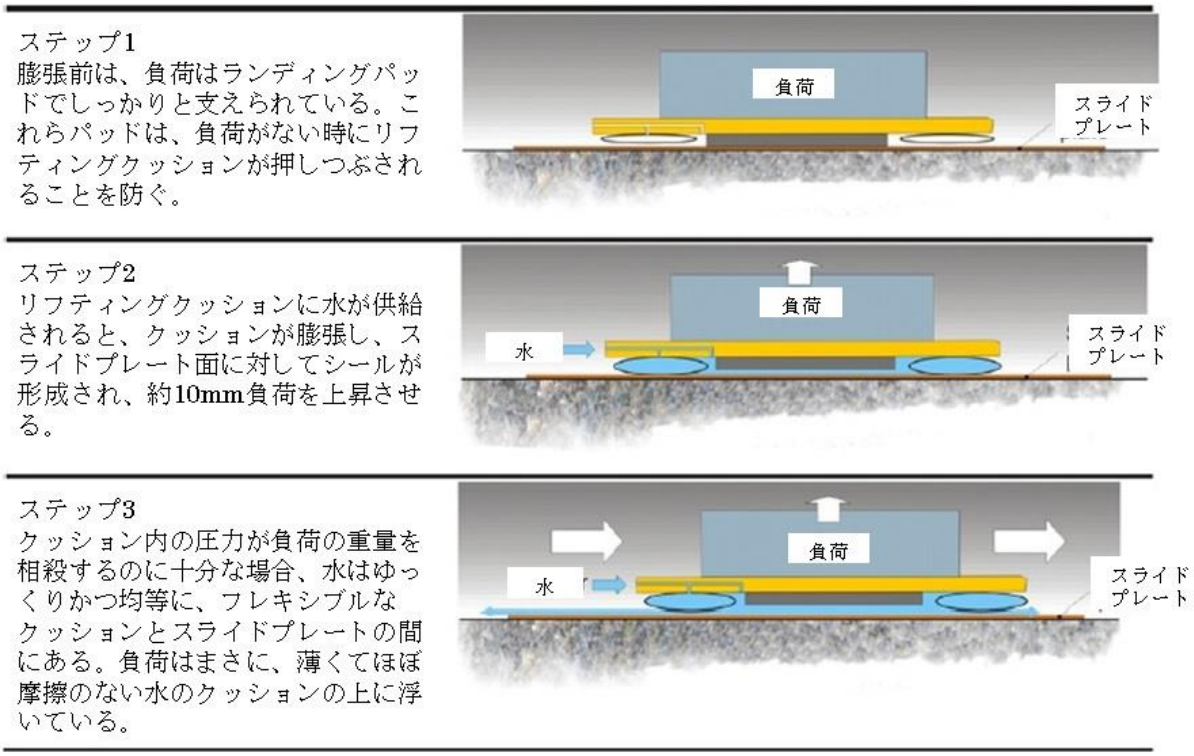
ステップ 2
パレットのリフティングクッションがアクティブになると（赤い矢印で示す）、スーパーコンテナが持ち上げられる※。スーパーコンテナは薄い水の膜の上に浮かぶ。



ステップ 3
水膜の上に浮かんだ状態で、スーパーコンテナはスライドプレート上を 1 ストローク（1.5m）前進させる。ストロークが完了すると、リフティングクッションは作動しなくなり、スーパーコンテナは脚部で支えられるように下ろされ、スライドプレートは次のサイクルの準備のために前方に移動される。

※使用されるリフティングクッションは、水を圧力媒体として円筒面上を走行するように適応された重量物搬送用の標準的なエアクッションである（水圧を利用した荷重支持方式の装置（ウォーターパレット方式））。空気よりも水の方がエネルギー効率は高いことを示すモックアップ試験を実施した結果、空気の代わりに水を圧力媒体として使用することにした。（Bo Halvarsson, 2008）

付図 2-6　スーパーコンテナの輸送／定置の原理（Posiva, 2018c）



付図 2-7　リフティングクッションの原理（Posiva, 2013b）

2.3.　管理手法および管理項目（パラメータ）

スーパーコンテナシェルの検査計画には、少なくとも付表 2-4 の検査項目が含まれる（Posiva, 2018c）。

付表 2-4　スーパーコンテナシェル製造での検査パラメータ（Posiva, 2018c）

特性	設計パラメータ	検証
材料特性	最大抗張力（R_m） 降伏強度（R_e）	材料証明書
寸法	直径、内側の長さ ベベル（溶接）準備	検査プロトコル
形状	真円度 真直度	検査プロトコル
溶接	視覚的な形状 NDE（通常 20%） NDE（脚部周りの溶接 100%）	検査プロトコル

スーパーコンテナの組立中に以下の検査を実施し、検査プロトコルに文書化しなければならない（Posiva, 2018c）。

- スーパーコンテナシェルのガンマゲートへの配置に関する検査（目視）
- スーパーコンテナシェルの形状に関する検査（目視）
- 清浄度に関する検査（目視）

- 配置後の緩衝材の検査（目視）
- 補強材を取り外した後のシェルの検査（目視）
- 輸送管／ガンマゲートのボルト締めの検査（トルクの測定）
- キャニスタ配置前の清浄度に関する検査（目視）
- 上部ブロック配置後の緩衝材の検査（目視）
- 溶接部の検査（目視と PT による検査）

3. 緩衝材及び充填材

3.1. 構成要素の基本情報（要件や仕様）

緩衝材と充填材の構成要素を整理すると、以下の様になる。

緩衝材：ディスタンスブロック、スーパーコンテナ内のベントナイトブロック・ベントナイトリング

充填材：後述のように 6 種類ある充填材を以下のように四つのグループに分ける。(Posiva, 2017b)

- 充填ブロック（付図 3-1 の 2）
- コンパートメントプラグのトランジションゾーンの充填（付図 3-1 の 3・4）
  ※トランジションゾーン＝トランジションブロック＋ペレット充填
- 坑道プラグのトランジションゾーンの充填（付図 3-1 の 1）
- 坑道エンド及びパイロット孔*の充填（付図 3-1 の 5・6）
  *パイロット孔は、詳細な現場調査に対応すること及び坑道を段階的にリーミングするための幾何学的ガイドとして機能することの 2 つの目的を果たす。定置坑道の建設はパイロット孔の掘削で始まる。リファレンスの方法では、中間の全面リーマ加工ステップ（直径約 300 mm）を使用して、ステアリングコアドリルパイロット孔（直径 76 mm）をドリルし、その後フルドリフトサイズにリーマ加工する。

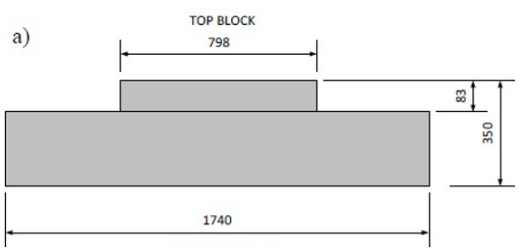
付図 3-1 KBS-3H 坑道の充填材構成要素（Posiva, 2017b）

KBS-3H の緩衝材は、寸法、乾燥密度、含水率の異なる 3 種類のベントナイトブロックで構成される。これらは、キャニスタの周囲に配置されたリング状のブロック、スーパーコンテナ内のキャニスタの両端に配置された固体円筒状のブロック、スーパーコンテナ間に配置された固体円筒状のディスタンスブロックである（Posiva, 2017a）。

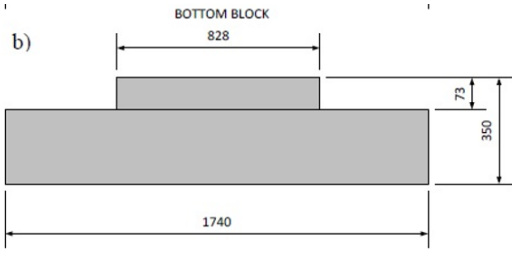
スーパーコンテナ内の緩衝材は、キャニスタを完全に囲むのに十分な数のリング状のブロックと固体円筒状のブロックで構成される。スーパーコンテナ内のベントナイ緩衝材ブロックのリファレンス設計を付表 3-1 及び付図 3-2 に示す（Posiva, 2017a）。

付表 3-1　スーパーコンテナ内のリファレンス緩衝材ブロック（Posiva, 2017a）

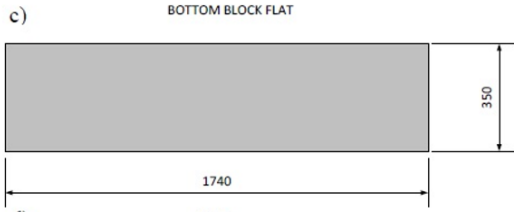
設計パラメータ	公称設計値	許容される変動値
スーパーコンテナ内側の固体ブロック		
乾燥密度	1,753 kg/m^3	±20 kg/m^3
含水率	17 %	±1 %
寸法	長さ：350 mm 外径：1,740 mm 内径（トップブロック）：798 mm 内径（ボトムブロック、くぼみを含んだボトム）：828 mm 内径（ボトムブロック、フラットボトム）：	±1 mm +1/−2 mm +0/−2 mm +0/−2 mm —
スーパーコンテナ内部のリング状のブロック		
乾燥密度	1,885 kg/m^3	±20 kg/m^3
含水率	11 %	±1 %
寸法	長さ：890-1,308 mm 外径：1,740 mm 内径：1,058 mm	±1 mm +1/−2 mm +1/−2 mm



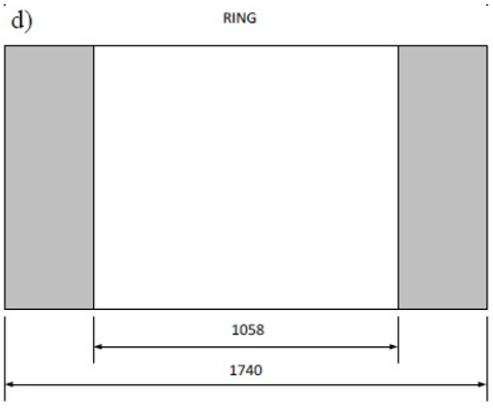
TOP　BLOCK



BOTTOM　BLOCK



BOTTOM　BLOCK　FLAT



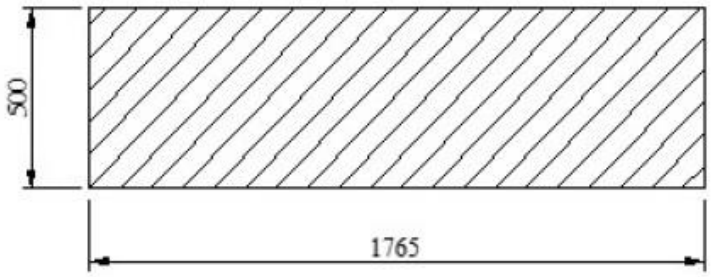
RING

付図 3-2　スーパーコンテナ内の計画図（Posiva, 2017a）

ディスタンスブロックは、坑道中のスーパーコンテナの間に配置される。ディスタンスブロックを形成するベントナイトブロックのリファレンス設計を付表 3-2 及び付図 3-3 に示す。ディスタンスブロックの含水比は、操業中の湿度により誘起される割れを防止するために、スーパーコンテナの緩衝材ブロックよりも高くしている。ディスタンスブロックを構成する個々のベントナイトブロックの長さは、現時点では 500mm を想定しているが、これは圧縮方法の開発により変更される可能性がある（Posiva, 2017a）。

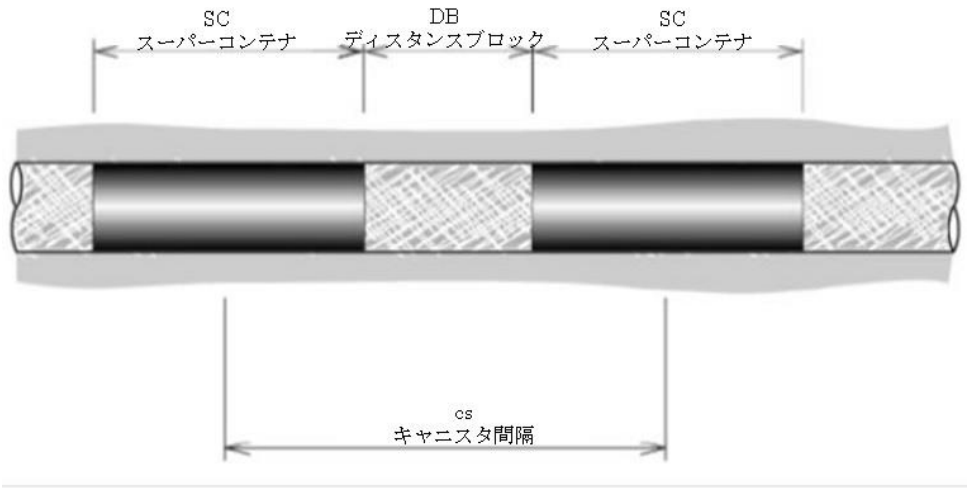
付表 3-2　スーパーコンテナ外側のリファレンス緩衝材ブロック（ディスタンスブロック）（Posiva, 2017a）

設計パラメータ	公称設計値	許容される変動値
スーパーコンテナ外側の固体ブロック（ディスタンスブロック）		
乾燥密度	1,712 kg/m^3	±20 kg/m^3
含水比	21 %	±1 %
寸法	高さ：500mm 外径：1,765 mm	±1 mm



付図 3-3　ディスタンスブロックを形成する固体円筒状ブロックの断面図（Posiva, 2017a）

ディスタンスブロックは、キャニスタのタイプに基づき、いくつかの代替長さがある（付図 3-4）。2 種類の締固め技術（単軸（uniaxial）と静水圧（isostatic））が利用可能で、締固めるブロックの長さは、各キャニスタタイプのニーズに合わせて最適化することができる。（Posiva, 2017a）



	キャニスタ間隔 cs (mm)		ディスタンスブロック長さ DB (mm)
LO1-2	7200	LO1-2	3013
OL1-2	9000	OL1-2	3613
OL3-4	10,600	OL3-4	4741

付図 3-4　坑道に定置されたスーパーコンテナ間におかれたディスタンスブロック
（Posiva, 2017a）

充填材構成要素（Filling components）は、スーパーコンテナやディスタンスブロック（Distance block）が設置できない場所、つまりスーパーコンテナセクションとしては不向きな坑道セクションにある定置坑道で使用される。充填材には 6 種類ある（付図 3-5）。（Posiva, 2017a, 2018f）

1.坑道プラグ近傍の充填（コンパートメント側）、ペレット充填及びトランジションブロック（transition block）（トランジションゾーンと呼ばれる）を含む（付図 3-6）

坑道プラグのコンパートメント側（コンパートメントプラグの場合も）の充填は、プラグに隣接するペレット充填セクションと、それに続くトランジションブロックから成る。ペレット充填セクションは、プラグの取り付けに必要なスペースの関係上、トランジションブロックに直接隣接してプラグを取り付けることができないために必要とされる。

2.流入部の充填（充填ブロック（filling block）と呼ばれる）（付図 3-8）

スーパーコンテナ 1 体あたりの地下水流入量が 0.1 ℓ/min を超える坑道セクション（長さは 10m 程度であるが、キャニスタの種類により異なる）には、充填ブロックが設置される。

3.コンパートメントプラグの入口側の充填、ペレットの充填とトランジションブロックを含む。（まとめてトランジションゾーンと呼ばれる）（付図 3-7）

コンパートメントプラグの入口側のトランジションゾーンは、ペレット充填セクション（プラグに隣接）とトランジションブロックから成る。

4.コンパートメントプラグの坑道エンド側の充填（ペレットの充填とトランジションブロックを含む）

上記 1. と同じ

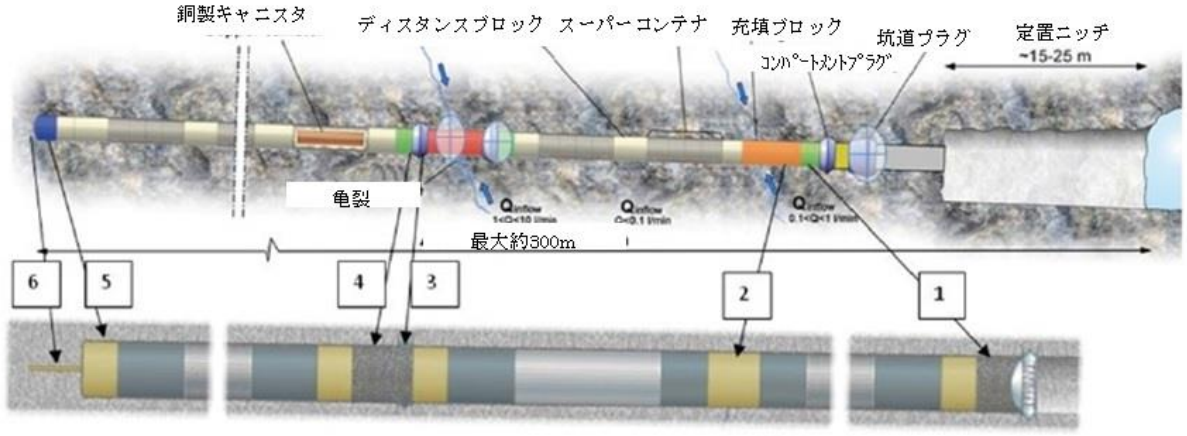
5.坑道エンドでの充填

坑道面（drift face）（坑道の遠端にある）と隣接するディスタンスブロックとの間の坑道に、

充填材を配置することが提案されている。それは、坑道エンドのコーナー周辺に岩盤応力が集中する可能性があるためである。したがって、坑道エンドに隣接する岩は、小規模の外乱に対してより脆弱で、この場所で亀裂が開口する傾向がある。この充填材は、坑道に残るエア抜きパイプ（坑道壁に固定）の後部に隣接する。（付図 3-14）

6.パイロット孔（pilot hole）の充填

坑道エンドにあるパイロット孔（pilot hole stump）は、円筒形の高圧縮ベントナイトブロックで充填される。パイロット孔は、坑道ボーリングマシンのカッターヘッドを操縦するために必要である。（付図 3-14）

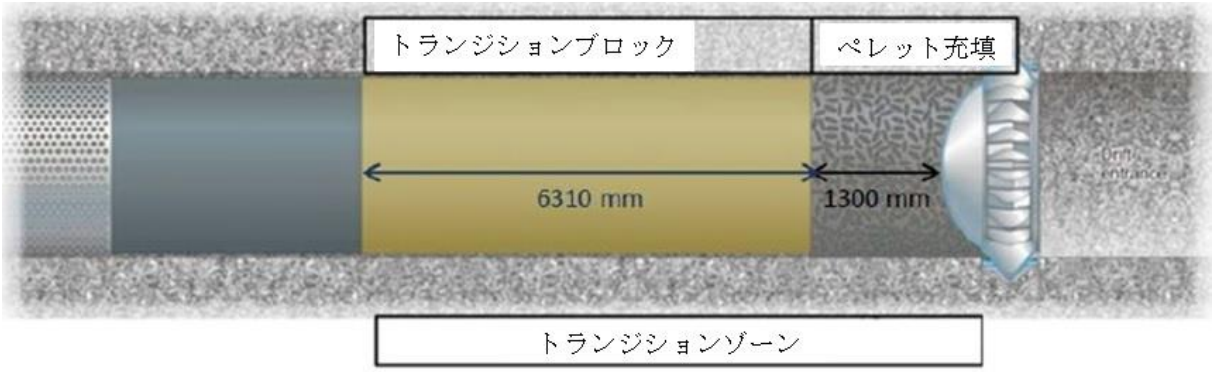


付図 3-5　KBS-3H 坑道の充填材（Posiva, 2013b）

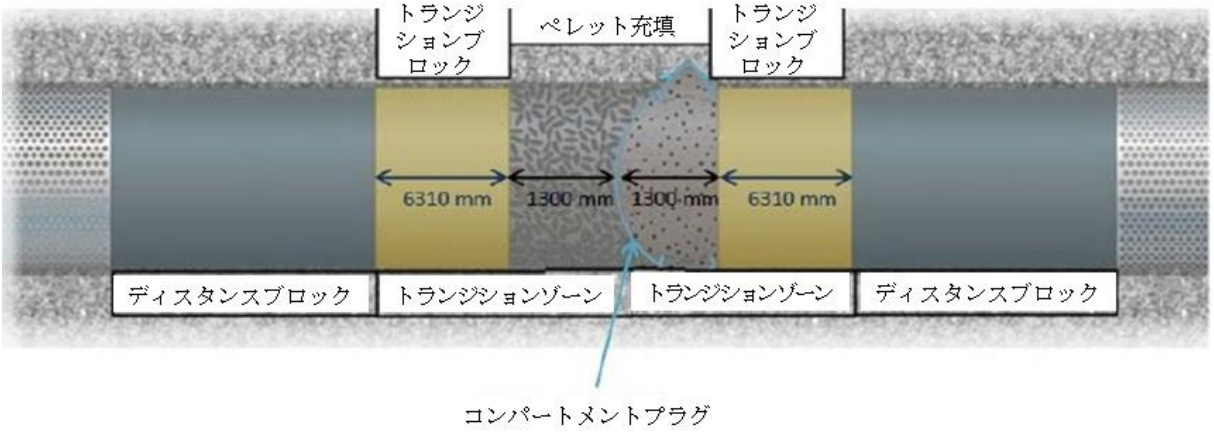
充填部材は、緩衝材と同様の粘土材料（MX-80）で構成されることが計画されている。充填材の概念設計は、可能であれば、ペレットとディスタンスブロックに類似した円筒形ブロックの使用に基づいている。ブロックは、固定サイズの厚さの円筒形ブロックを組み合わせてもよいし、運用上の考慮事項に基づいて特定の要件に合わせて厚さを調整してもよい。（Posiva, 2018f）

坑道プラグ及びコンパートメントプラグ（上記の 1 及び 3）に関連する充填材構成要素については、プラグの密閉側の設計は同一であり、以下の原則に基づいている。（Posiva, 2018e）

- プラグの密閉側の空容積は、低密度をもたらすペレットで満たされている。
- ペレット充填部と隣接するディスタンスブロックとの間には、トランジションブロックと呼ばれる高圧縮ブロックのセクションが配置されている。充填材構成要素が水を吸収して膨潤すると、坑道（及びコンパートメント）プラグから密度勾配を有するディスタンスブロックへのトランジションゾーンが存在することになる。トランジションブロックは、ディスタンスブロックと同様の方法で、複数のより小さなブロックで構成することができる。圧縮方法は、均衡（isostatic）圧縮に基づいており、ブロックの寸法は、その後最適化される。



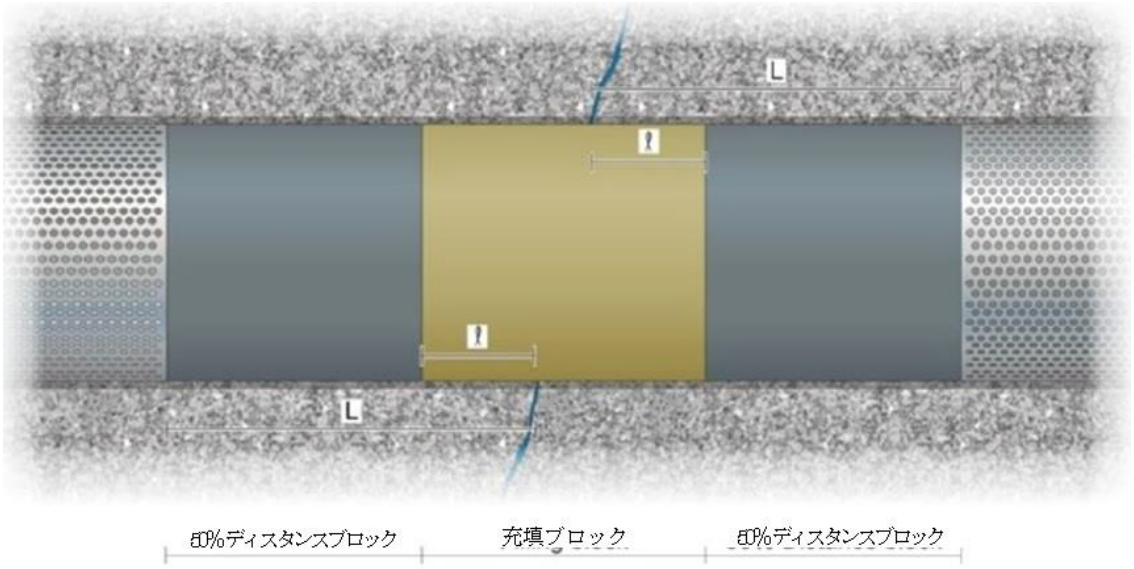
付図 3-6　坑道プラグに隣接する充填材の設計（Posiva, 2018e）



付図 3-7　コンパートメントプラグに隣接する充填材構成要素の概略図（Posiva, 2018e）

充填ブロックは 0.1ℓ/min 以上の坑道への初期流入を与える亀裂が交差する坑道位置に配置されることになる（Posiva, 2013b）。充填ブロックの寸法は、下記の原則に基づく（Posiva, 2017a）。

- 充填ブロックの両側には半分のディスタンスブロックがある（付図 3-8）。これは、0.099ℓ/min の流入（スーパーコンテナの定置に使用する限界値 0.1ℓ/min 以下）があり、このセクションにあるスーパーコンテナ間に通常のディスタンスブロックが配置されている状況に適合している。
- 充填ブロックの全長は、次に依存する：a）亀裂の傾斜、b）ディスタンスブロックの全長、c）流入率。これは、充填ブロックの全長が、スーパーコンテナに入れられたキャニスタから最も近い透水性部分への移行長を設定するという原則に基づいている。流入量が大きければ大きいほど、必要な移行長は大きくなる。シーリング材が全評価時間枠（100 万年）にわたって所定の位置に留まることが予想されないため、設計はあらゆるシーリング操作の前の新しい流入量に基づいていることに注意が必要である。
- 充填ブロックは、厚さ 500 mm のベントナイトブロック（スライス）で構成されていると想定されている。ただし、必要に応じて調整し、最適化することが可能である。
- 充填ブロックは、製造を簡素化し、システムへの新材料や追加工程の導入を避けるために、同じ材料で作られ、ディスタンスブロックと同じ直径を有する。様々な代替材料の耐浸食性は現在研究中であり、その結果は後の設計に影響を与える可能性がある。



※l は亀裂からディスタンスブロック境界までの距離、L は亀裂からスーパーコンテナ境界までの距離を表す。

付図 3-8　分割されたディスタンスブロックと 2 つのスーパーコンテナの間の充填ブロック
（Posiva, 2017a）

充填ブロックの長さは、上記の原則を用いて、亀裂からの初期流入量の関数として確立されている。感度解析（scoping calculation）では、0.1～0.5 ℓ/min、0.5～1 ℓ/min、1 ℓ/min 以上の流入量で、10 ℓ/min（坑道全体への最大許容流入量に対応）を上限とする透水性の亀裂に必要な配慮距離（respect distance）（図 3.1 17 の L）の暫定推定値（付表 3-4）が示されている。ディスタンスブロックの長さと配慮距離に対応する充填ブロックの設計を、付図 3-9～付図 3-11 に示す。（Posiva, 2013b）

以下では、亀裂からの初期流入の関数として充填物の長さを定義する基準を定式化する方法について記す。ここで示す基準は暫定的なものであり、放射性核種の放出と移行の考慮のみに基づいている。提案されたアプローチは以下のとおりである。（Posiva, 2013b）

- 充填ブロックを含む坑道セクションが亀裂と交差し、初期流入が 0.1ℓ/min 以上と仮定する。
- この充填ブロックに隣接するスーパーコンテナのキャニスタが破損し、燃料マトリクスに組み込まれていないすべての放射性核種（つまり、IRF（Instant Release Fraction）及びジルカロイ及びその他の金属部品のインベントリ）がスーパーコンテナ内の周囲の緩衝材に放出されるとする。
- 緩衝材を通過する亀裂へのこれらの放射性核種の最大放出速度は、フィンランドの地質－生物フラックス（geo-bio flux）の制限をかなりの余裕をもって満足するようなものでなければならない。

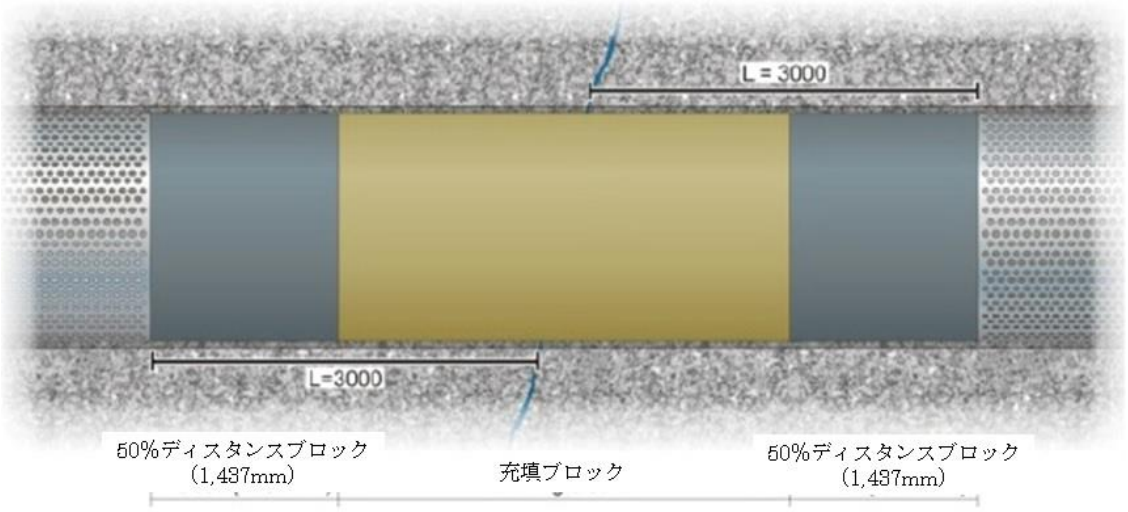
フィンランドの安全評価では、I-129、Cl-36、及び C-14 が、一般にキャニスタ破損後の放出または最大線量を支配しており、C-14 はキャニスタの寿命が短く、処分場バリアの有効性が低下している場合に支配的であることが多い。その他、I-129 及び Cl-36 が支配的になる（これは C-14 の半減期が短いためである）。付表 3-3 に、それらの放射能インベントリ及びその割合、及びそれらの地質－生物フラックスの制限を示す。（Posiva, 2013b）

付表 3-3　支配核種に関するデータ（Posiva, 2013b）

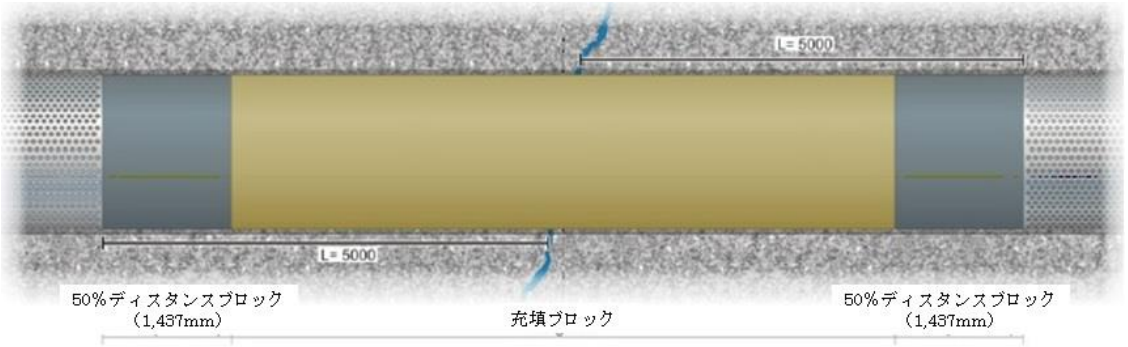
放射性核種	インベントリ [GBq/tU]	割合 [%]				地質－生物フラックスの制限 [GBq/y]	正規化された放出 [y/tU]
		燃料マトリクス	IRF	ジルカロイ	その他金属部品		
C-14	$2.78 \cdot 10^{1}$	30	3	33	33	0.3	63.9
Cl-36	$1.04 \cdot 10^{0}$	45	5	50	0	0.3	1.90
I-129	$1.14 \cdot 10^{0}$	95	5	0	0	0.1	0.57

付表 3-4　流入量に対する配慮距離（respect distance）と許容される構成要素
（Posiva, 2013b）

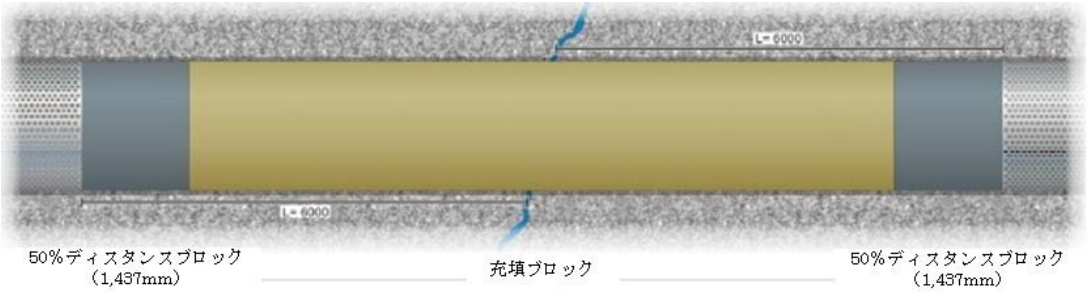
初期流入範囲 [ℓ/min]	配慮距離 [m]及び許容される構成要素
< 0.1	スーパーコンテナセクション
0.1–0.5	3m（充填ブロック＋各サイドで半分のディスタンスブロック
0.5–1	5m（充填ブロック＋各サイドで半分のディスタンスブロック
> 1	代替案1　6m（充填ブロック＋各サイドで半分のディスタンスブロック 代替案2　二重のコンパートメントプラグセクション



付図 3-9　流入量が 0.1～0.5 ℓ/min の場合の充填ブロック（Posiva, 2013b）



付図 3-10　流入量が 0.5～1.0 ℓ/min の場合の充填ブロック（Posiva, 2013b）



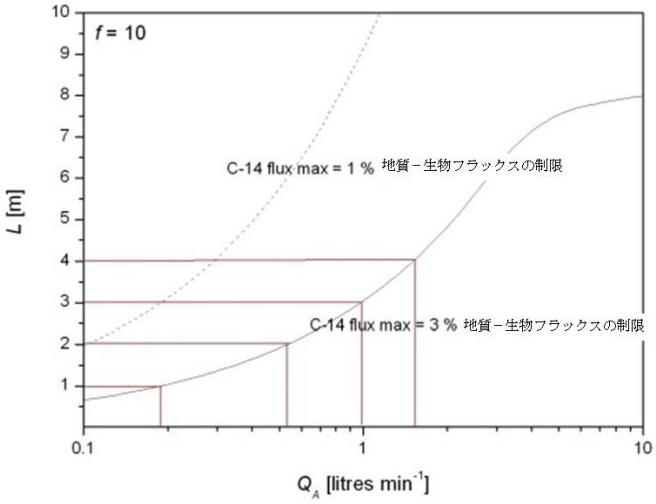
付図 3-11　流入量が 1.0 ℓ/min～の場合の充填ブロック（Posiva, 2013b）

付表 3-3 において、正規化された放出は、ジルカロイ及びその他の金属部品、IRF でのインベントリを、地理 - 生物フラックスの制限で割ったものである。この正規化された放出は C-14 によって支配されているため、C-14 に注目して検討を行っている。（Posiva, 2013b）

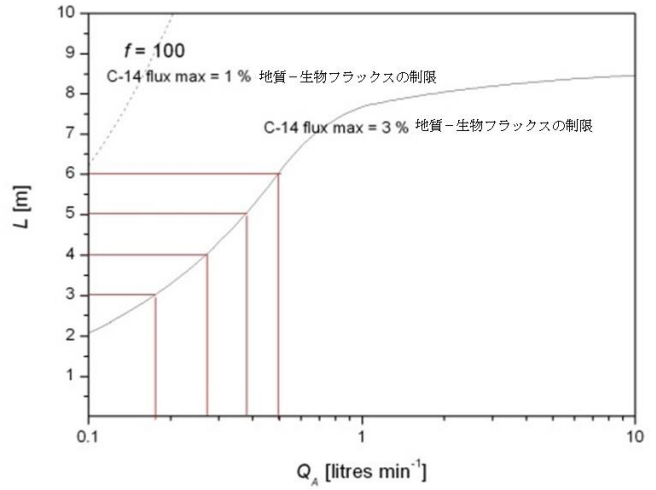
さらに、坑道からの距離 L で、亀裂がより大きな地物（feature）と交差し、その結果、この地物と坑道との間の水圧差、及び亀裂の透水係数が、初期流入を制御すると仮定する。これにより、初期流入量から亀裂の透水係数の値を推測できる。次に、亀裂を通る長期的な流量は、透水係数と局所的な動水勾配から推測できる。このような単純なアプローチは十分に実証されていないものの、スコーピング計算としては適切であるとみなされている。（Posiva, 2013b）

パルスとして放出された C-14 は、垂直方向に十分に混合されていると仮定され、坑道に沿った 1 次元拡散移行のみが考慮されており、保守的に、亀裂に向かう坑道沿いの移行のみが考慮されている。坑道に沿った他の方向への亀裂からの拡散は無視されているる。さらに、保守的に、亀裂が交差する坑道内の位置に到達するすべての C-14 は、亀裂に移行し、坑道に沿ってそれ以上拡散しないと仮定されている。（Posiva, 2013b）

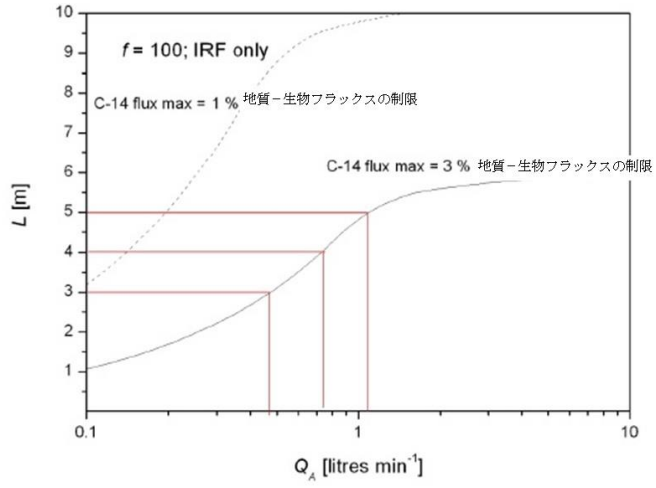
以上のようなアプローチにより導出された結果を付図 3-12、付図 3-13 に示す。これらの図では、亀裂へのフラックスが年間 0.03GBq または 0.01GBq、つまりフィンランドの規制による地理－生物フラックス制限である年間 0.3GBq の 10%または 3%になるのに必要な L の値をプロットしている。付図 3-1 に、ジルカロイのインベントリは考慮せず、C-14 の IRF と他の金属部品のインベントリを考慮した、亀裂の水理開口幅に対する移行開口幅の比率 f = 100 の結果を示す。（Posiva, 2013b）



付図 3-12　初期流入から亀裂までの関数として提案された最小配慮距離（L）：亀裂の水理開口幅に対する移行開口幅の比率 10（Posiva, 2013b）



付図 3-13　初期流入から亀裂までの関数として提案された最小配慮距離（L）：亀裂の水理開口幅に対する移行開口幅の比率 100（Posiva, 2013b）



付図 3-1　初期流入から亀裂までの関数として提案された最小配慮距離（L）：亀裂の水理開口幅に対する移行開口幅の比率 100（ジルカロイからの放出は含まれない）（Posiva, 2013b）

最終的には、付図 3-1 に示す結果に基づいて、亀裂への C-14 の放出が地質－生物フラックスの最大値の 3%を超えてはならないという基準が適切であることが暫定的に提案されている。結果として示唆された配慮距離を付表 3-1 に示す。(Posiva, 2013b , 2017a) 定置坑道における種々充填材の寸法を付表 3-2 に示す。(Posiva, 2017a)

充填材の初期含水量はディスタンスブロックと同じで 21%（付表 3-2)、固体ベントナイトブロックの空隙率は 42%（最終飽和値）で、ペレット充填セクションの空隙率は、軸方向の均質化前は 64%である。

付表 3-1　流入率と許容構成要素に関する配慮距離（Posiva, 2017a）

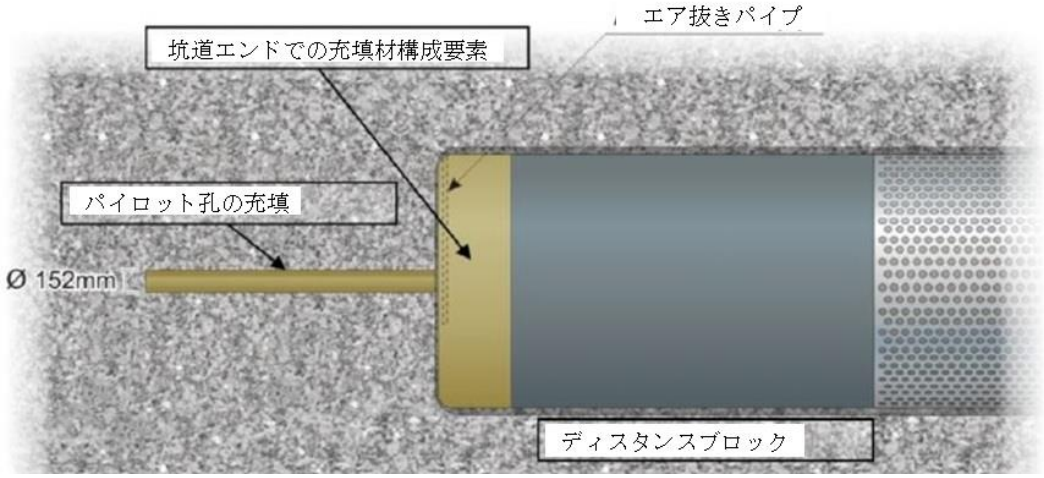
初期流入量範囲（ℓ/min）	配慮距離 L（m）
0.1–0.5	3
0.5–1	5
> 1 (but < 10)	6

付表 3-2　各種充填材の寸法（Posiva, 2017a）

充填材構成要素	公称設計値
坑道プラグまたはコンパートメントプラグに隣接する充填材	
トランジションブロック	6.31 m （長さ） 1.765 m （直径）
ペレット充填材	1.3 m （長さ）
流入部での充填	
充填材ブロック	3.125 m （最小長さ、長さは亀裂の傾きに依存する） 1.765 m （直径）
坑道エンドでの充填	
坑道エンドでの充填材	0.5 m （長さ） 1.765 m （直径）
パイロット孔の充填	
パイロット孔の充填材	2.0 m （パイロット孔の長さ） 0.132 m （ブロックの直径） 0.5 m （シングルブロックの長さ）

付表 3-3　充填ブロック及びトランジションブロックの仕様（Posiva, 2018a）

設計パラメータ	公称設計値	許容される変動値
乾燥密度 [kg/m^3]	1,712	±20
含水量 [wt.-%]	21	±1
寸法 [mm]	高さ：500 外径：1,765	±1



付図 3-14　坑道エンド及びパイロット孔の充填（Posiva, 2018a）

付表 3-4　坑道端部での充填材の寸法及び特性（Posiva, 2018a）

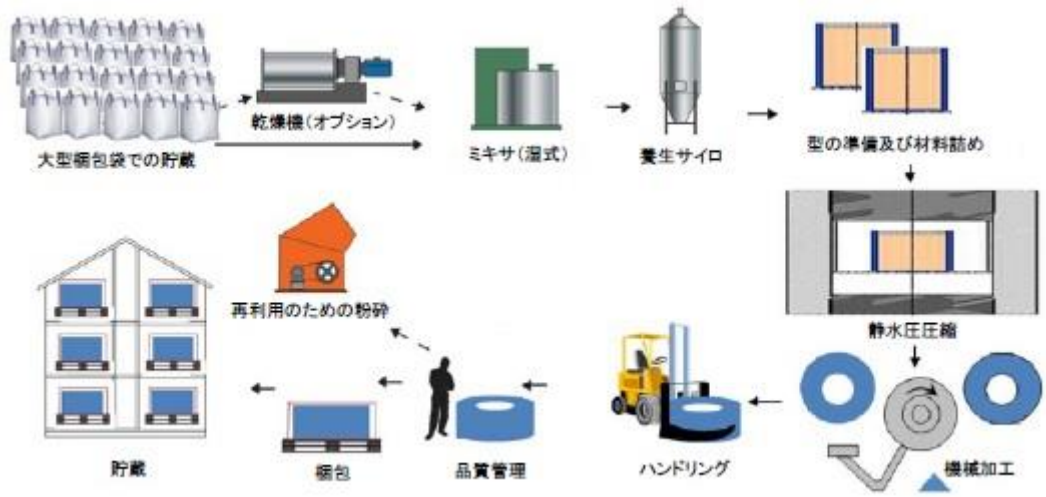
坑道端部での充填材		
長さ	0.50	m
ブロックの直径	1.765	m
ブロックの初期乾燥密度	1,712	kg/m^3

付表 3-5　パイロット孔の充填材の寸法及び特性（Posiva, 2018a）

パイロット孔の充填材の仕様		
パイロット孔の長さ	2,000	mm
パイロット孔の直径	152	mm
ブロックの直径	132	mm
単一ブロックの長さ	500	mm
ブロックの初期乾燥密度	1,712	kg/m^3

3.2. 製造方法及び施工方法

付図 3-2 に、緩衝材及び充填材の製造工程の概要を示す。LO1-2、OL1-2、OL-3、OL-4 型のキャニスタとそれに対応するスーパーコンテナの合計約 4,500 本が定置坑道に配置される。



付図 3-2　緩衝材及び充填材構成要素の製造工程の概要（Posiva, 2018a）

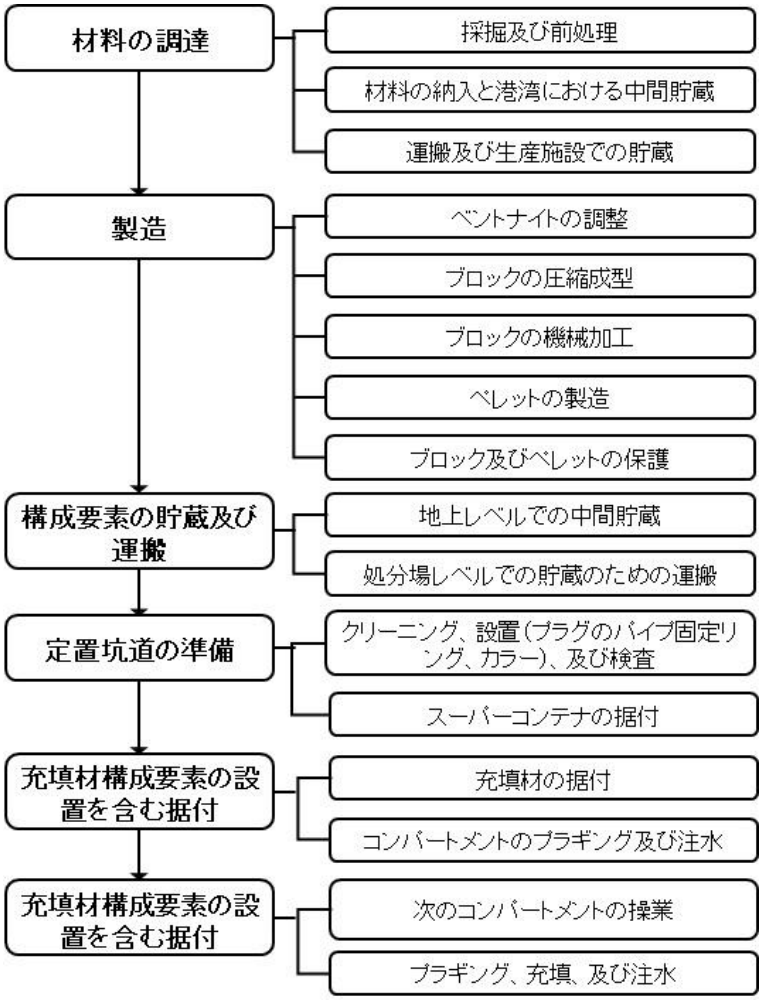
緩衝材及び充填材構成要素の Production Line は、次の五つの主要部分で構成される。(Posiva, 2018a)

- 材料の調達
- 製造
- 保管と輸送
- 定置坑道の準備、洗浄、設置、検査
- スーパーコンテナ、ディスタンスブロック、プラグ、充填材構成要素の設置を含む構成要素の配置

緩衝材及び充填材構成要素の Production Line を付図 3-3 に示す。(Posiva, 2018a)

緩衝材ブロックは、ブロック製造のための Posiva のリファレンス方法である静水圧圧縮（締固め）法で製造される。ペレット製造のためのリファレンス方法は、小さなブリケット（briquettes）のローラ圧縮法である。(Posiva, 2018a)

サイトに運搬されたベントナイトブロック及びペレットは、フォークリフトの助けを借りて、緩衝材及び充填材構成要素の貯蔵施設からキャニスタリフトに移される。キャニスタリフトは、ベントナイトブロック及びペレットを処分場レベルまで降ろす。ベントナイトブロックはフォークリフトにより、テクニカルルームに移される。大袋に入ったブロックとペレットは、適切な水分と温度条件を維持できる施設で処分場レベルでにより管される。処分場レベルでは、ブロックとペレットは短期間しか保管されない。処分場レベルでは、常に 2 本の定置坑道分のブロックとペレットが保管されている。処分場レベルでの 1 本の定置坑道の緩衝材と充填材の保管に必要なスペースは約 550m^2 である。(Posiva, 2018a)



付図 3-3　緩衝材及び充填材構成要素の Production Line（Posiva, 2018a）

3.3.　管理手法および管理項目（パラメータ）

試験及び検査の目的は、緩衝材と充填材の材料と構成要素の特性が、それらに設定された要件を満たしていることを保証することである。（Posiva, 2018a）

試験と検査は、Production Line の各段階で実施される。試験と検査の種類と回数は品質計画に定義されている。これらの試験は、品質要求事項を満たす材料と部品のみが生産に使用されることを保証するためのものである。（Posiva, 2018a）

試験及び検査の方法は､他の産業分野の既存の信頼性の高い技術に基づいている｡測定の精度は、検査対象となる特性の許容範囲内でなければならない。十分な測定精度を有する従来の技術と装置が利用可能である。（Posiva, 2018a）

緩衝材及び充填材構成要素の設計パラメータは、製造された緩衝材及び充填材構成要素がリファレンス設計に適合していることを確認するために、緩衝材及び充填部材の製造中に、直接または間接的に検査されなければならない。設計パラメータの結果は、初期状態では既知であることが必要である。長期安全性及び製造に関して要求される特性、製造時に検査される設計パラメータ及びパラメータとそれらの関係を付表 3-6 及び

付表 3-7 に示す。（Posiva, 2018a）

付表 3-6　要求される特性と関連する設計パラメータ、及び製造中に検査されるパラメータ（調整・製造段階）（Posiva, 2018a）

要求される特性	設計パラメータ	製造・施工時に検査されるパラメータ
材料組成	モンモリロナイト含有率	X 線回折パターン
	硫化物含有率	燃焼ガス
	全硫黄含有率（硫化物含む）	燃焼ガス
	有機炭素	燃焼ガス
圧縮材料の圧密特性	粒径分布	ふるい曲線
	含水率	乾燥前重量及び乾燥後重量
ブロックの密度及び寸法	かさ密度	重量及び寸法に基づく容量
	寸法	高さ、外径、リング状ブロックの孔の直径
ペレットの密度及び寸法	個々のペレットのかさ密度	個々のペレットの重量及び寸法
	寸法	直径（もしくは厚さ及び幅）及び個々のペレットの長さ
	緩い充填材（loose filling）のかさ密度	緩い充填材の重量及び容量

付表 3-7　要求される特性、関連する設計パラメータ、及び製造中に検査されるパラメータ（設置段階）（Posiva, 2018a）

要求される特性	設計パラメータ	製造・施工時に検査されるパラメータ
緩衝材及び充填材の密度*1	ブロックのかさ密度	設置されるブロックの重量
	ペレット充填材のかさ密度	設置されるペレットの重量及び体積
	ペレットが充填された容量*3	定置坑道の幾何形状、 設置されたブロック及び坑道の構成要素の位置
設置形状*2	緩衝材及び充填材構成要素の厚さ	定置坑道の幾何形状、 設置されるブロックの寸法、 設置されたブロック及び坑道の構成要素の位置
	ペレット充填材の容量	定置坑道の幾何形状、 設置されるブロックの寸法、 設置されたブロック及び坑道の構成要素の位置
	設置されたリング状ブロック内側の孔の直径／幾何形状*4	スーパーコンテナに設置されるブロックの寸法、 設置されたブロックの位置

*1 ブロックの最後の重量測定は、据付中に設置マシンによって実施される。

*2 定置坑道の幾何形状及びブロックの寸法は設置に先立って実施される。

*3 スキャンされた処分孔の容積と緩衝材・充填材ブロックの寸法に従って計算される。
*4 スーパーコンテナの一部。

全工程の製造検査スキームを付表 3-8 に示すが、検査のポイントを✓で示している。設計パラメータを含む検査特性は、材料組成、圧縮特性、ブロックの密度と寸法、ペレットの密度と寸法、設置密度と設置形状に分けられている。（Posiva, 2018a）付表 3-8 で、黄色の部分には，ブロックとペレットが調製・製造される段階が含まれ，水色の部分は設置段階に関連している。黄色の部分のより詳細な内容を付表 3-9 に示す。水色部分のより詳細な内容を付表 3-10 に示す。（Posiva, 2018a）

付表 3-8　緩衝材及び充填材構成要素製造における製造検査スキーム（Posiva, 2018a）

特性	設計パラメータ	1. ベントナイトの調整	2. ブロックの圧縮成型 / ペレットの圧縮成型	3. ブロックの機械加工	4. 中間貯蔵	5. 処分場レベルへの運搬及び貯蔵	6. 定置坑道の準備 *4	7. スーパーコンテナの設置	8. ディスタンスブロック及び充填材の設置
材料組成	モンモリロナイト								
	有機炭素								
	硫化物								
	全硫黄								
	膨潤指標								
	陽イオン交換容量								
圧密特性	粒径分布	✓							
	含水率	✓*1	✓						
ブロックの密度及び寸法	かさ密度		✓	✓					
	寸法		✓*2	✓					
ペレットの密度及び寸法	個々のペレットのかさ密度		✓						
	寸法		✓						
	緩い充填材のかさ密度（Bulk density loose filling）		✓						
設置された密度	寸法				✓	✓*3			
	ブロックのかさ密度				✓	✓*3		✓	✓
	ペレット充填材のかさ密度				✓	✓*3			✓
	ペレット充填材の容量							✓	✓
設置形状	設置されたブロックの位置							✓	✓
	ペレットが充填された開口部の容量							✓	✓
	設置されたブロック内での坑道の直径							✓	

*1　加水混合後かつ圧縮前、*2　機械加工前、*3　カバーの目視検査後に必要に応じて、*4　坑道の準備は、ベントナイト緩衝材に直接焦点を当てた検査には含まれていない

付表 3-9　緩衝材及び充填材構成要素の製造におけるブロックとペレットの圧縮特性、密度、寸法の試験及び検査方法（Posiva, 2018a）

特性	設計パラメータ	1. ベントナイトの調整	2. ブロックの圧縮成型/ペレットの圧縮成型	3. ブロックの機械加工
圧密特性	粒径分布	ふるい分け*1		
	含水率	オーブンで乾燥*2	オーブンで乾燥	
ブロックの密度及び寸法	かさ密度		計量及び寸法	計量及び寸法
	寸法		ノギス（calliper）	機械情報*
ペレットの密度及び寸法	個々のペレットのかさ密度		計量及び寸法**	
	寸法		ノギス（calliper）	
	緩い充填材のかさ密度（Bulk density loose filling）		定義された容量の計量	

* CNC 加工（コンピュータ数値制御加工）

** パラフィンオイルの計量によって定義される個別のペレットのかさ密度

*1 粉砕後　*2 混合後

付表 3-10　緩衝材及び充填材構成要素の設置時の密度及び配置の試験及び検査方法（Posiva, 2018a）

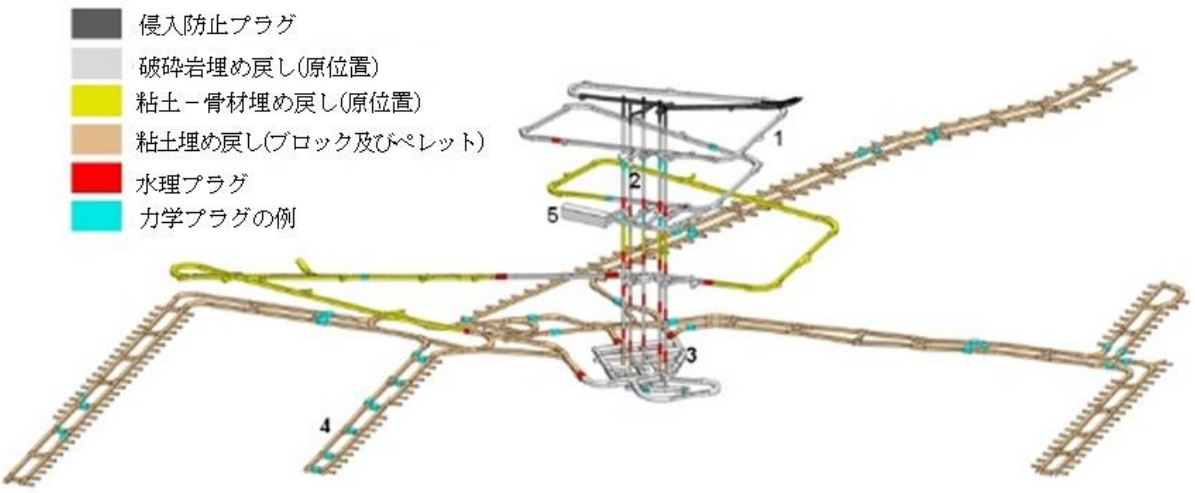
特性	設計パラメータ	4. 中間貯蔵	5. 処分場レベルへの運搬及び貯蔵	6. 定置坑道の準備	7. スーパーコンテナの設置	8. ディスタンスブロック及び充填材の設置
設置された密度	ブロックの寸法	寸法測定	必要に応じて寸法測定			
	ブロックのかさ密度	計量及び目視検査	目視検査及び必要に応じて計量	目視検査及び防湿システムの機能試験	ブロック設置マシン情報	ブロック設置マシン情報
	ペレット充填材のかさ密度	ペレット及び大袋の計量及び目視検査	大袋の目視検査及び必要に応じて計量			設置前の計量と容量
	ペレット充填材の容量				ブロック設置マシン情報	ブロック設置マシン情報
設置形状	設置されたブロックの位置				ブロック設置マシン情報	ブロック設置マシン情報
	ペレットが充填された隙間*の幅				ブロック設置マシン情報	ブロック設置マシン情報
	設置されたブロック内での坑道の直径				ブロック設置マシン情報	

* 設置されたブロックの位置とスキャンされた定置坑道の寸法に基づく。

4. 閉鎖材

4.1. 構成要素の基本情報（要件や仕様）

処分施設の閉鎖材（closure）には、定置坑道の外側の（坑道プラグまで）地下開口部を閉鎖するために使用される全ての埋め戻し材及びプラグ材が含まれる。閉鎖材はまた、深部調査孔もカバーする。KBS-3V との相違点は、KBS-3H では、閉鎖材には、坑道入口セクション（坑道プラグ外側の坑道部分）での充填と、定置ニッチ部（deposition niche）（坑道外側）での埋め戻しが含まれることである。閉鎖後フェーズの開始時の閉鎖材の様子を付図 4-1 に示す。(Posiva, 2017a)



1：アクセス坑道、2：立孔、3：処分場レベルにあるテクニカルルーム、
4：中央坑道、5：LILW 処分場

付図 4-1　閉鎖材のリファレンス設計（Posiva, 2017a）

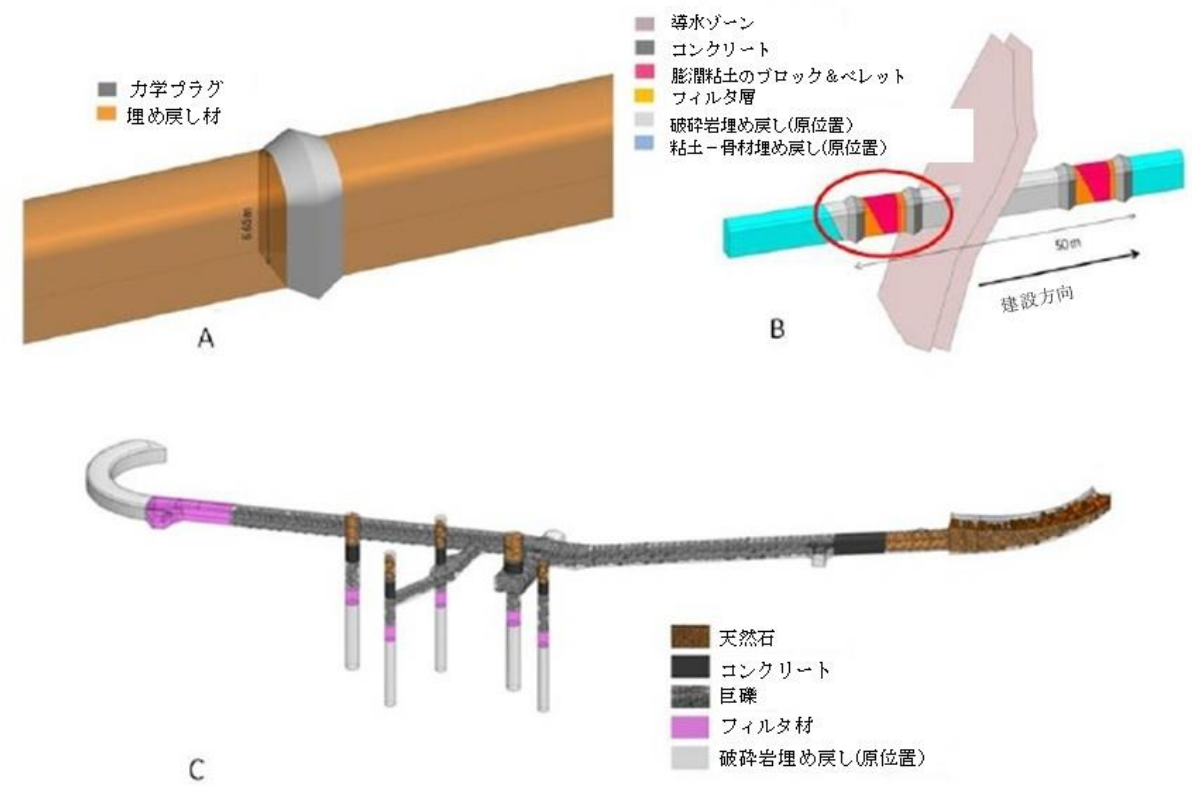
性能目標、設計要件、設計仕様を満たす閉鎖材システムの埋め戻し構成要素を設置するのに適切な材料と方法の選択は、いくつかの要因に依存する。これらには以下が含まれる。(Posiva, 2017a)

1)　埋め戻しを行う領域、その位置、寸法、形状、アクセスのしやすさ
2)　閉鎖材システムの様々な領域に対して設定されている性能要件
3)　閉鎖材システムの様々な構成要素の構成または性能の潜在的な変動に対するシステム全体の性能の感度
4）時宜にかなった一貫した方法で埋め戻し材の設置ができること

処分場の閉鎖及びシーリングには、3 種類のプラグ及びシーリング構造が必要である。(付図 4-2)（Posiva, 2018f）

1. 処分場内の力学プラグ。力学プラグは、操業段階において、設置された坑道の埋め戻しを支持し、保護するために使用される。
2. 処分場内の水流を防止する長期的な「水力」プラグ。プラグは様々なパーツから構成されており、それぞれが機能的な目的を持っている。コンクリート構造物は埋め戻し材と粘土コアをサポートし、粘土コアは水の流れを制限する。その他の層はプラグの施工に必要なものである。
3. 処分施設への侵入を防止する長期プラグ。これら恒久的なプラグは、アクセス坑道や立坑

の上部に使用される。このプラグは、コンクリート層が打設された大きな岩石ブロックで構成されている。



A：力学プラグ、B：アクセス坑道で交差する透水性の亀裂帯を隔離するために使用される水理プラグ（赤枠で囲った部分）、C：アクセス坑道の侵入防止プラグ（intrusion obstructing plug）

付図 4-2　各閉鎖材（プラグ）の概念図（Posiva, 2017a）

プラグ構造物の形状、寸法及び組成は、その機能及び処分施設内の位置によって異なる。水理地質帯 HZ20 より下のプラグには、低 pH コンクリートが使用される。このコンクリートの水と乾燥材料の比率は 0.29 であり、密度は 2,335 kg/m^3 である。水理地質帯 HZ20 より上では、標準的なコンクリート配合を使用することができる。（Posiva, 2017a）

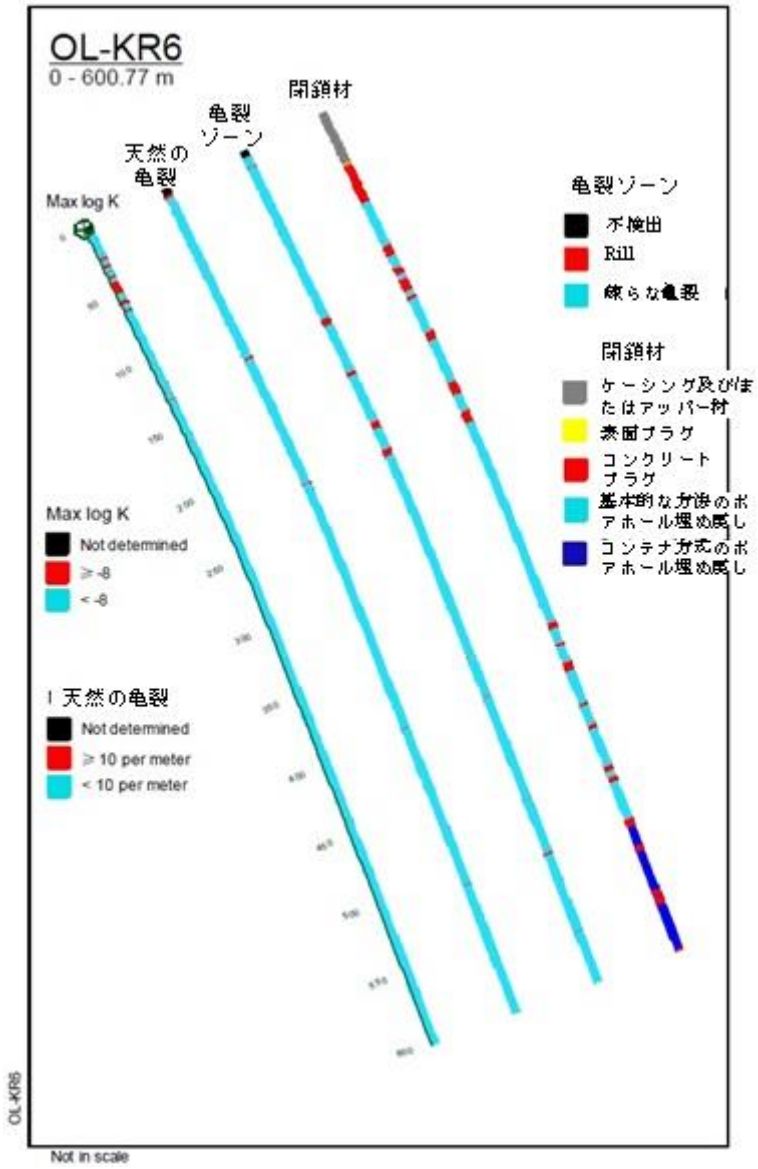
水理プラグに使用される粘土ブロックやペレットの初期状態は正式には定義されておらず、将来的に設定される性能要件に依存する。水理プラグに使用される粘土ブロックやペレットは、膨潤性の高い粘土成分を多く含むベントナイト系粘土材料から製造されることが想定されている。これらのプラグ構造物には、コンクリートや粘土以外にも、組成や粒度が未確定の砕石を含む材料が含まれており、これらの材料の初期状態は、正式な設計・施工仕様書が作成された後でなければ定義できない。（Posiva, 2017a）
侵入防止プラグは、岩、天然石、骨材（砕石など）で構成される。それらには、化学、密度、透水係数に関連する明確に定義された性能や初期状態の特性はなく、単に妨害構造として機能する（付図 4-2 の C）。（Posiva, 2017a）

調査ボーリング孔はサイトの特徴を明らかにするためにオルキルオトの岩盤に掘削されている。

深部調査掘削孔の位置は既知であり、処分場の地下開口部を貫通することはない。自然の状態を復元し、優先的な経路を形成しないようにするためには、調査ボーリング孔を密閉しなければならない。（Posiva, 2017a）

ボーリング孔内に埋め戻し材を配置する最良の方法は、基本工法とコンテナ工法である。基本工法では、穿孔した銅管の中に高密度のボーリング孔埋め戻し材を充填し、地下水の影響を受けた場合には、その孔から調査孔内に押し出す。コンテナ工法では、水密性の高いコンテナを用いて、高密度な円筒形のボーリング孔埋め戻しブロックをボーリング孔内に配置して設置する。（Posiva, 2017a）

調査ボーリング孔の閉鎖材の設計例を付図 4-3 に示す。（Posiva, 2017a）



付図 4-3　閉鎖された調査孔の概念図（Posiva, 2017a）

4.2. 製造方法及び施工方法

製造方法・施工方法は、KBS-3V と同様である（日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター,2020）。

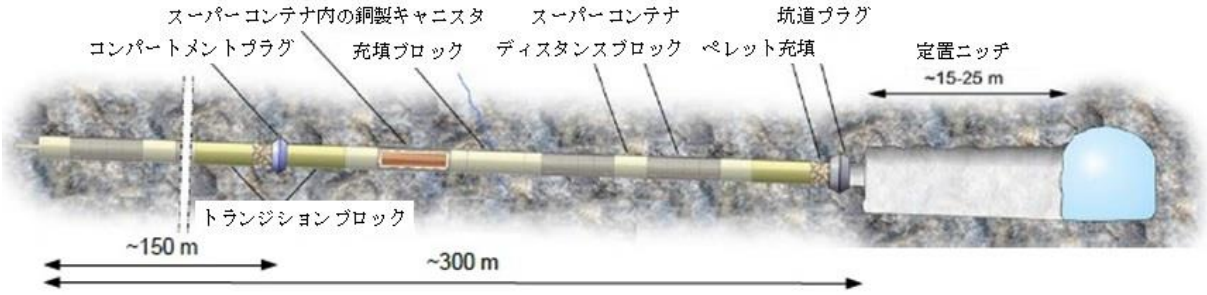
4.3. 管理方法及び管理項目（パラメータ）

管理手法・管理項目は、KBS-3V と同様である。（日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター,2020）。

5. プラグ

5.1. 構成要素の基本情報（要件や仕様）

コンパートメントプラグは、水平坑道のセクション（最大でも 150m）を水理的に分離し、密閉するために使用され、坑道の構成要素を所定の位置に維持することによって他のバリア性能をサポートし、それによって坑道内を好ましい条件にし、人工注水及びエア抜き（DAWE: Drainage, Artificial Watering and air Evacuation）操作を容易にすることである（Posiva, 2017a, 2018f）。坑道プラグは、他のすべての坑道構成要素が配置された後に坑道を塞ぐために、定置坑道の出入り口近くに設置される。坑道プラグは、緩衝材または充填材のパイピングエロージョンを引き起こす可能性がある坑道からの大量の水の流れを避けるために設置される。また、隣接する中央坑道の埋め戻しと飽和の前に、緩衝材と充填材を所定の位置に保持し、DAWE 操作を容易にする（Posiva, 2017a, 2018f）。KBS-3H 定置坑道におけるコンパートメントプラグ及び坑道プラグの位置を付図 5-1 に示す（Posiva, 2018b）。



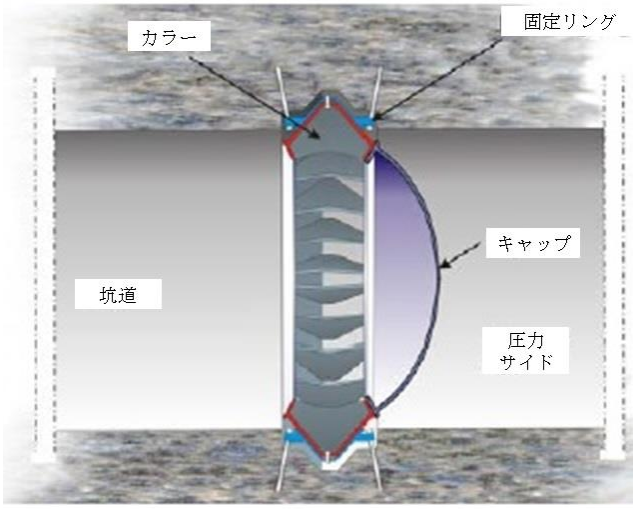
付図 5-1　KBS-3H 定置坑道及びコンパートメントプラグ・坑道プラグの位置
（Posiva, 2018b）

コンパートメントプラグ及び坑道プラグは、次の 3 つの構成要素で構成されている（Posiva, 2017a, 2018f）。

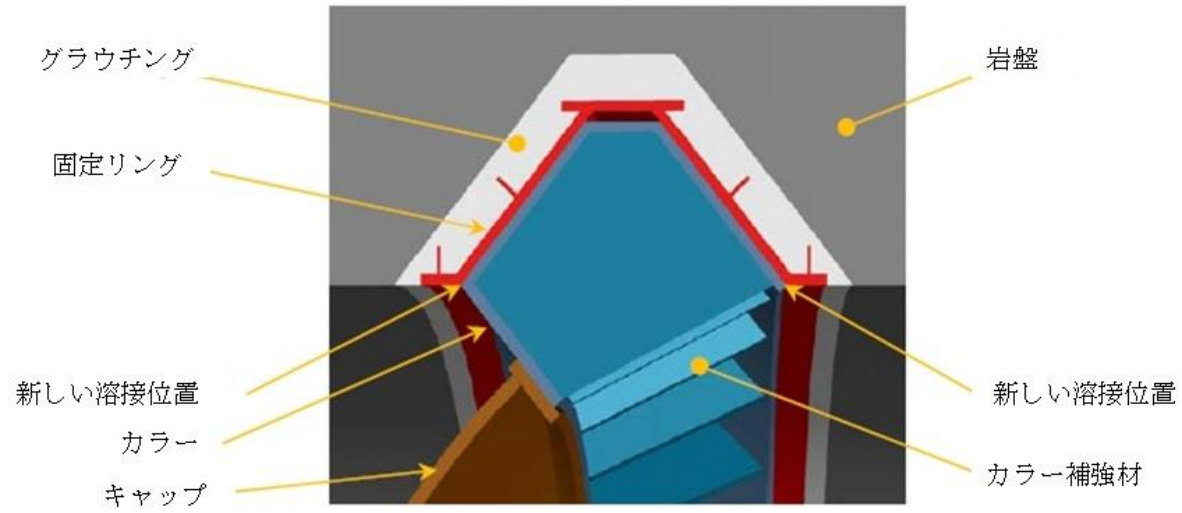
- 固定リング（fastening ring）
- カラー（collar）（注水パイプ及びエア抜きパイプ用のブッシング（bushing）／リードスルー（lead-through）付き）
- キャップ（ペレット充填用接続部付き）

固定リングは V 字型のリングで、低 pH コンクリートを使用して岩盤の切欠き（notch）に打設される。カラーは溶接によって固定リングに取り付けられ、キャップも溶接によってカラーに取り

付けられる。またカラーには、注水パイプを通すための 3 つのリードスルーと、エア抜きパイプのための一つの貫通部が設けられている。プラグにはまた、注水パイプとエア抜きパイプのためのカラーのブッシングと、トランジションゾーンの一部を形成するプラグの背後にあるペレット充填用のキャップの開口部が備えられている。コンパートメントプラグ及び坑道プラグは、いずれも溶接部に荷重がかからないように設計されているため、シールとしての機能のみを果たす。プラグのイメージ図を　に、固定リング及びカラーの断面図を付図 5-2 に示す。付図 5-3 にプラグの下部に配置されている注水パイプとエア抜きパイプを示す（Posiva, 2017a, 2018f）。

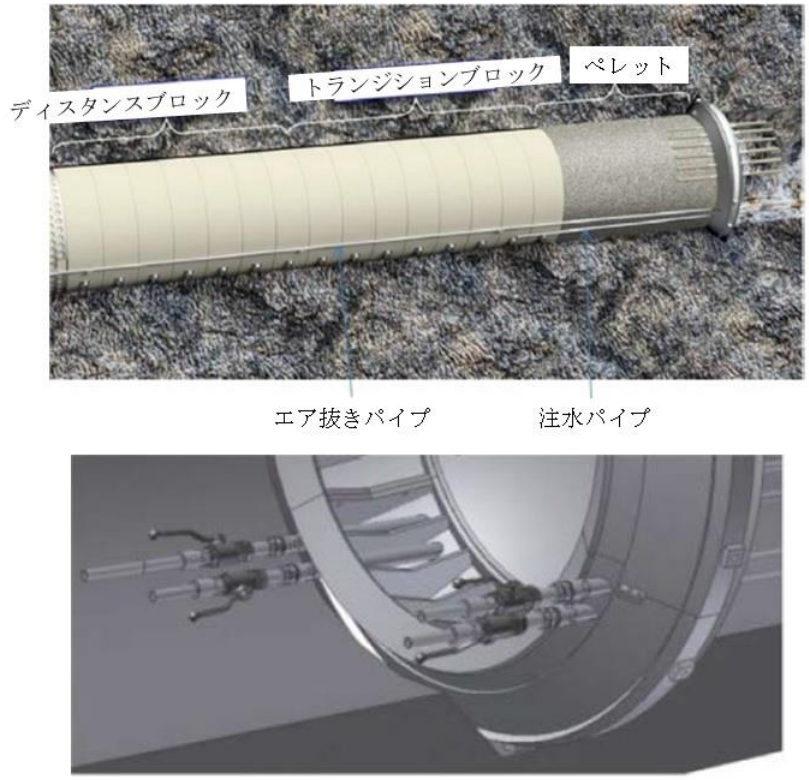


付図 5-2　プラグのイメージ図（Posiva, 2018b）



※溶接部へのアクセスを容易にしたカラーの新しいリファレンス設計

付図 5-3　固定リング及びカラーの断面図（Posiva, 2018b）



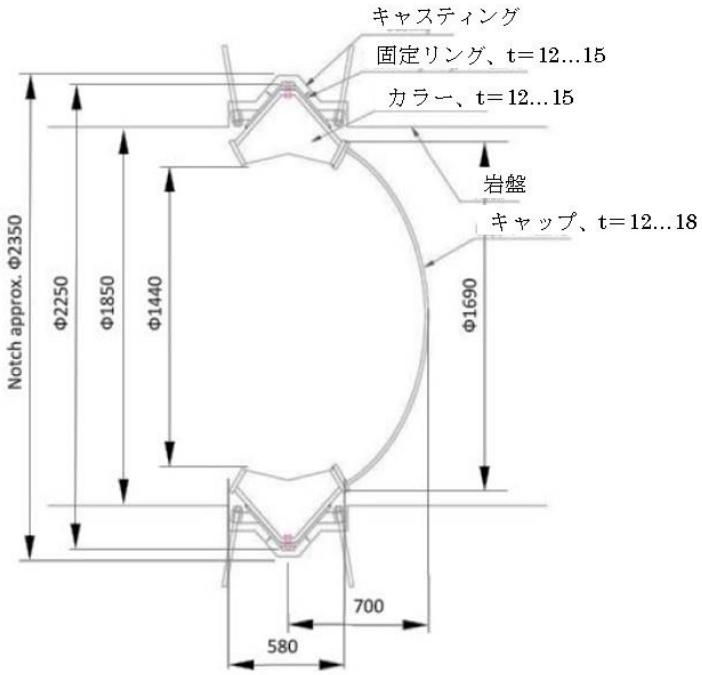
付図 5-4　注水パイプ及びエア抜きパイプ（Posiva, 2017a）

付図 5-5　坑道プラグ（銀色の部分）（Posiva, 2017b）

付表 5-1 に、コンパートメントプラグ及び坑道プラグの初期状態での寸法を、付図 5-6 に、コンパートメントプラグの主要部位の寸法を示す。（Posiva, 2017a）

付表 5-1　コンパートメントプラグ及び坑道プラグの初期状態での寸法（Posiva, 2017a）

初期状態値	コンパートメントプラグ	坑道プラグ
直径	1,650 mm	1,650 mm
（ドーム）高さ	400 mm	400 mm
（ドーム）厚さ	16 mm	24 mm
カラーのメインプレート厚さ	20 mm	20 mm
グラウト厚さ	40 mm	40 mm



付図 5-6　コンパートメントプラグの主要部位の寸法（Posiva, 2017a）

コンパートメントプラグ及び坑道プラグの構成要素（コンクリート打設部を除く）は、100%チタン合金で構成され、チタングレード 3 または 12 のいずれかであると仮定されている（安全評価ではグレード 12 が仮定されている）。チタングレード 3 と 12 は力学的特性が類似しており、入手可能性に応じてどちらかを選択することができる。プラグの材料組成と材料特性を付表 5-2 に示す（Posiva, 2017a）。

付表 5-2　初期状態でのプラグの材料組成及び特性（Posiva, 2017a）

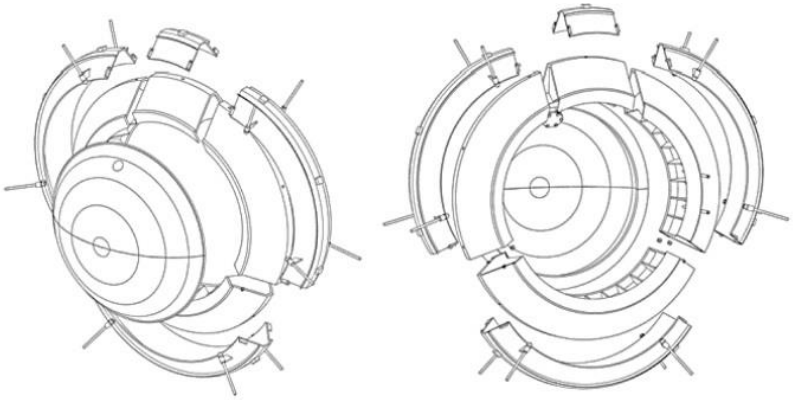
構成要素	設計パラメータ	リファレンス設計	初期状態値
プラグ材料組成			
プラグ、全てのパーツ（チタン Grade12）	炭素含有量　(%)	0.08	0.08
	水素含有量　(%)	0.015	0.015
	鉄含有量　(%)	0.3	0.3
	酸素含有量　(%)	0.25	0.25
	モリブデン含有量　(%)	0.2−0.4	0.2−0.4
	ニッケル含有量　(%)	0.6−0.9	0.6−0.9
	チタン	Bal.	Bal.
グラウト	今後研究		
プラグ材料特性			
プラグ、全てのパーツ（チタン Grade12）	密度　(kg/m^3)	4500	
	引張強度、最大　(MPa)	min 483　(typical 620)	
	引張強度、降伏　(MPa)	min 345　(typical 480)	
グラウト	圧縮強度　(MPa)	>85	<xx

固定リング周辺のグラウトは、バリアへの悪影響を回避するために、低 pH コンクリートで作成する必要がある。低 pH コンクリート（pH＜11）は、結合材の 40wt%をシリカヒュームで置換したコンクリートである。設計基準に適合するために必要な強度と気密性を有するようなコンクリート組成が定義される。しかしながら、この用途のためのコンクリートはまだ開発されていない。（Posiva, 2017a）

5.2. 製造方法及び施工方法

(1)固定リング及びカラー

固定リングとカラーの取り付けを可能にするために、それらは四つのパーツに分割され、定置坑道で互いに固定されている。したがって、パーツに要求される精度は非常に高く、特に接触面に関しては非常に高くなる。（付図 5-7）（Posiva, 2017a, 2018b）



付図 5-7　コンパートメントプラグの分解立体図（左：内側から、右：外側から）
（Posiva, 2017a）

個々のパーツは、最初に一緒にタック溶接されたプレートで構成されている。パーツの接続時に公差に達することができるようにするために、種々プレートには、組立後の機械加工と最終溶接を可能にする余白が設けられている。プレートには、各パーツに対する長さが約 5mm、V 字型の表面には約 3mm のマージンが設けられている（Posiva, 2018b）。

製造時や機械加工時に V 字形を維持するために、リングパーツの外側にタック溶接された補強板を備えた固定リングパーツが提供されている。補強板は、機械加工後に取り外される。パーツが一緒にタック溶接された後、パーツの各端のあわせ面は、その最終的な措置（measure）に合わせて機械加工される。その後、パーツはリングに一緒に固定され、ネジでロックされる。パーツ固定後は以下の手順に従う（Posiva, 2018b）。

- 関連するすべての措置の検証
- 最終溶接
- 溶接部の非破壊検査（PT）
- 熱処理（応力緩和）
- V 字面の最終措置までの加工
- 措置のチェックと文書化
- 組立溶接の準備
- 各パーツのマーキング
- パーツの切り離し

⑵キャップ

キャップはリングとカップ状の切妻（cupped gable）で構成されている。カップ状の切妻は、正しい形状にプレスされたプレートでできている。固定リング及びカラーのプレートに関しては、カップ状の切妻に取り付けられたリングには、機械加工を可能にするマージンが設けられている。（Posiva, 2018b）

以下の手順に従う。（Posiva, 2018b）

- カップ状の切妻の機械加工
- リングの加工
- 関連するすべての措置の検証
- カップ状の切妻へのリングの溶接
- 溶接部の非破壊検査（PT）
- 熱処理（応力緩和）
- リングのの最終措置までの加工
- 措置のチェックと文書化
- 組立溶接の準備

5.3. 管理手法及び管理項目（パラメータ）

プラグの製造検査では、材料特性が想定される荷重に耐えるために必要な規定値に適合していることを確認する。提案されている材料は ASTM 規格に準拠しているため、特性のばらつきは小さい。プラグの製造検査計画には、最低でも付表 5-3 に記載されている検査が含まれている。（Posiva, 2017a）

付表 5-3　プラグの製造検査パラメータ（Posiva, 2017a）

特性	設計パラメータ	検証
材料特性	最大引張強度　（Rm） 降伏強度　（Re）	材料証明書
寸法	直径 ベベル（溶接）準備 公差	検査プロトコル
形状	真円度 角度 公差	検査プロトコル
溶接	視覚的形状　（100%） NDE　（通常 100%）	検査プロトコル
組立前	形状適合性	検査プロトコル

※NDE: non-destructive examination

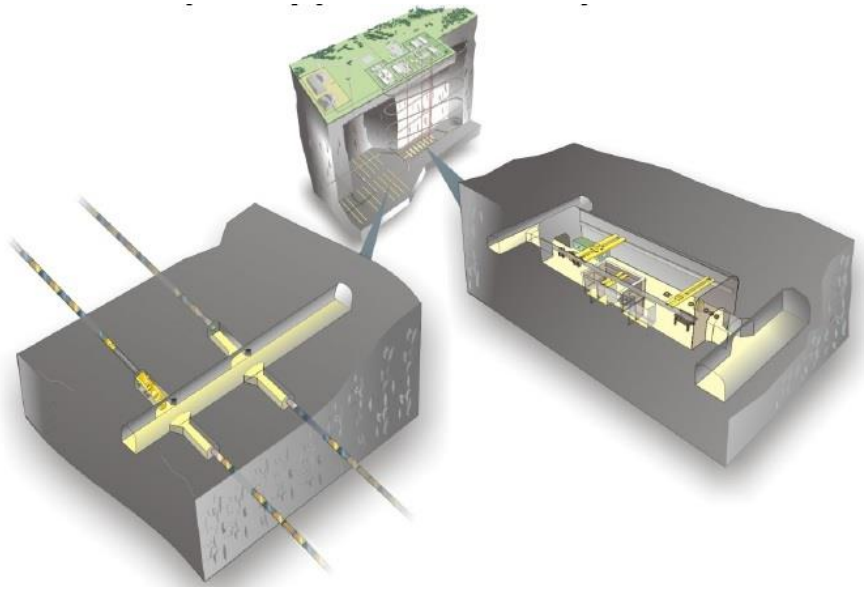
6. 坑道（開口部）

6.1. 構成要素の基本情報（要件や仕様）

(a) 要件や仕様（基本情報）

地下開口部について、KBS-3H 処分施設の大部分は KBS-3V と同様であるが、以下の例外がある（Posiva, 2017b）。

- 定置坑道（3V での定置坑道及び定置孔に代わるもの）
- 定置ニッチ（niche）
- リローディングステーション（reloading station）（テクニカルルームの一部）



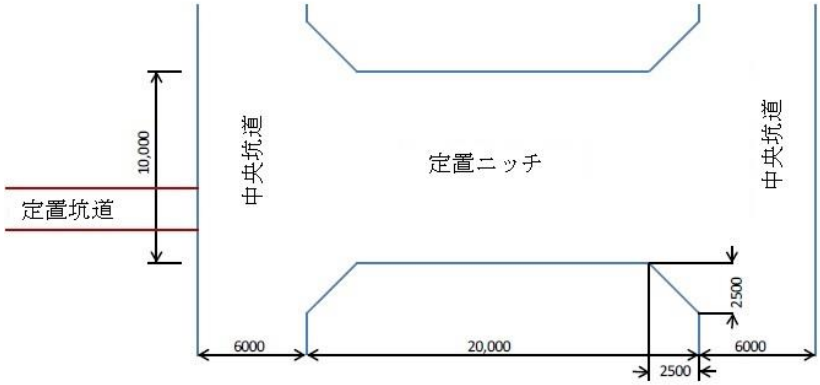
付図 6-1　リローディングステーション（右下）、中央坑道・定置ニッチ・定置坑道（Posiva, 2010b）

円柱状の定置坑道は、長さ 100～300 m、直径 1850＋5 mm で、中央坑道のニッチからやや上向きに傾斜している。定置坑道は、コンパートメントプラグで区切られた一つまたは 2 つのコンパートメント（それぞれ最大 150 m まで）で構成されている。使用済燃料の種類にもよるが、坑道ごとに約 20～30 個のスーパーコンテナが配置される（Posiva, 2017b）。

最大水平応力と平行に近い位置に定置坑道を配置することで、定置坑道の剥落の可能性を大幅に減少させることができる。剥落のリスクを大幅に低減するためには、定置坑道を最大水平応力の方向から±30 度以内にする必要がある（Posiva/SKB,2017a）。

掘削に伴う応力による定置坑道の剥落は許容されるが、最終的な定置坑道の幾何形状は、設計基準で指定された許容差に適合していなければならない。原位置での応力条件、岩石の特性、剥落の程度をモデル化する能力に関連した不確実性とそれに関連する透水係数の変化は、この段階でのリファレンス設計の検証を制限する。定置坑道における剥落を低減または排除するための偶発的な対策は、最大水平応力とほぼ平行に定置坑道を配置することである。定置坑道で剥落が発生した場合、上記の設計基準への適合を達成する可能性を高めるために、緩和策を実施する必要がある。坑道の閉鎖時に、熱によって引き起こされる剥離が発生する可能性がある。この問題の潜在的な緩和策の一つは、ベントナイトの膨潤によって導入される十分に高い逆圧が確立される可能性があることである（Posiva/SKB,2017a）。

定置ニッチ（niche）は、定置坑道入口前の長さ約 25m の坑道部分で、設置段階では定置装置を収容しているす。オルキルオトのレイアウトでは、平行な中央坑道が使用されており、その間隔はほぼ同じ（～20m）であるため、ニッチは平行な 2 本の中央坑道（付図 6-1 参照）の間に、接続坑道（中央坑道接続）として掘削することができる。付図 6-2 に示す寸法は、定置装置に必要なスペースに基づいている。2 つの平行な中央坑道の間に定置ニッチを使用すると、一つのニッチから 2 つの定置坑道を操作することが可能となる。そのため掘削量が節約され、効率性がよい。KBS-3H では、定置ニッチは 25m ごとに建設される（Posiva, 2017b）。

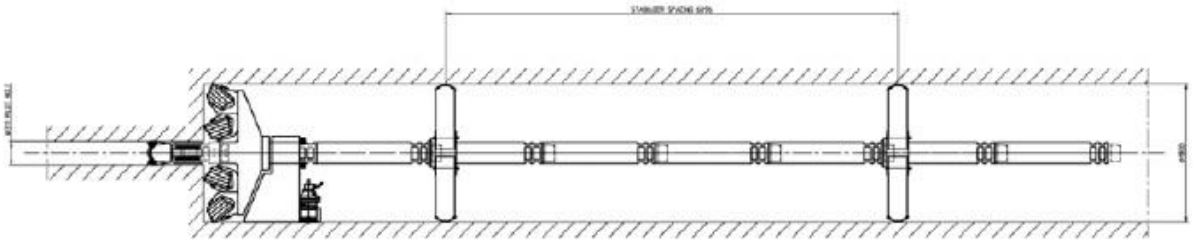


付図 6-2　上から見た定置ニッチの寸法（mm）（Posiva, 2017b）

処分場レベルにあるリローディングステーションでは、スーパーコンテナが制御された手順で組み立てられる。作業は完全に自動化され、リモートで制御される（Posiva, 2017b）。

6.2.　製造方法及び施工方法

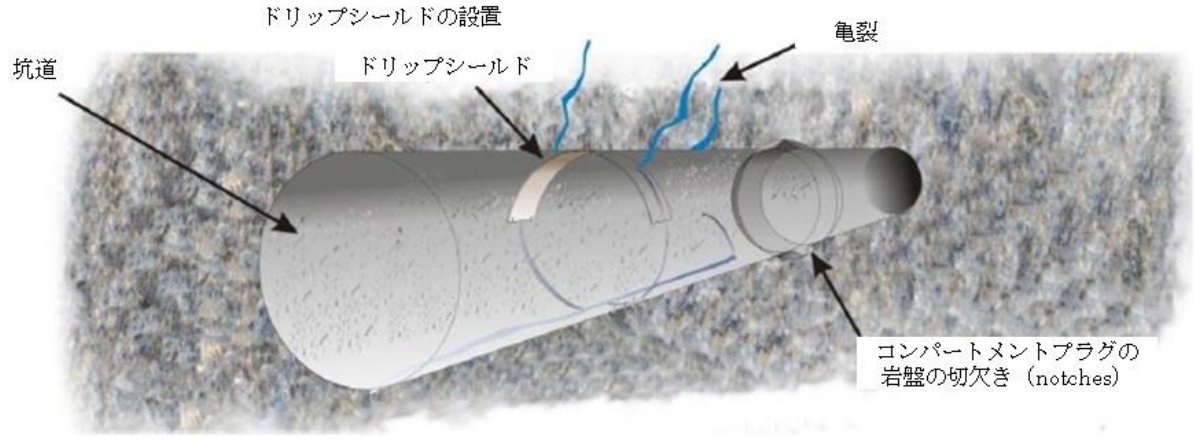
定置坑道の掘削方法は、全面水平プッシュリーミング（full-face horizontal push-reaming）法を参考にしている。パイロット孔を完全な坑道径にリーマ仕上げ（reaming）するには、カッターヘッドを押して回転させる従来のレイズボーリングに少しだけ適合した装置を使用される。ボアストリングを安定させるためにスタビライザが必要である。（付図 4 6-3）（Posiva, 2018d）



付図 4 6-3　水平プッシュリーミング（Posiva, 2018d）

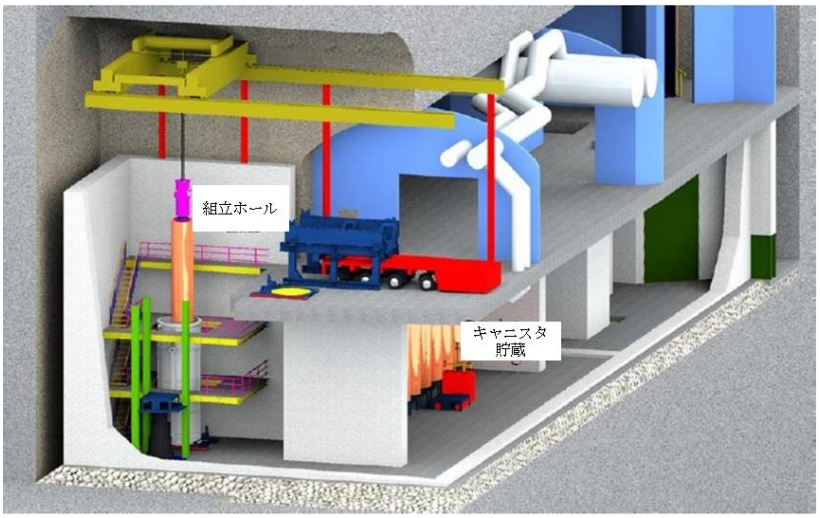
坑道の構成要素、例えばベントナイトブロックやスーパーコンテナを据え付ける前に、以下のような定置坑道の準備が行われる（Posiva, 2018d）。

- 定置坑道のクリーニング
- 定置坑道への流入とその分布の検査
- 定置坑道（及び隣接する坑道）と交差する潜在的に識別可能な亀裂の検査
- 必要に応じて、ドリップ／スプレイシールドの取り付け（付図 6-4）
- 定置坑道の真の／実際の寸法と幾何公差を決定するための検査
- 粘土ベースの充填材を用いて、岩石が発生している可能性のある部分を平準化する。
- 限界を超えて漏水が増加した場合は、補足的なポストグラウチングを行う（一次ポストグラウチングからドリフト構成要素の設置までの間）
- パラレルカットソーを使用したプラグのための岩盤の切欠き（notches）の掘削
- DAWE システムパーツの取り付け



付図 6-4　ドリップシールドの使用原理（Posiva, 2018d）

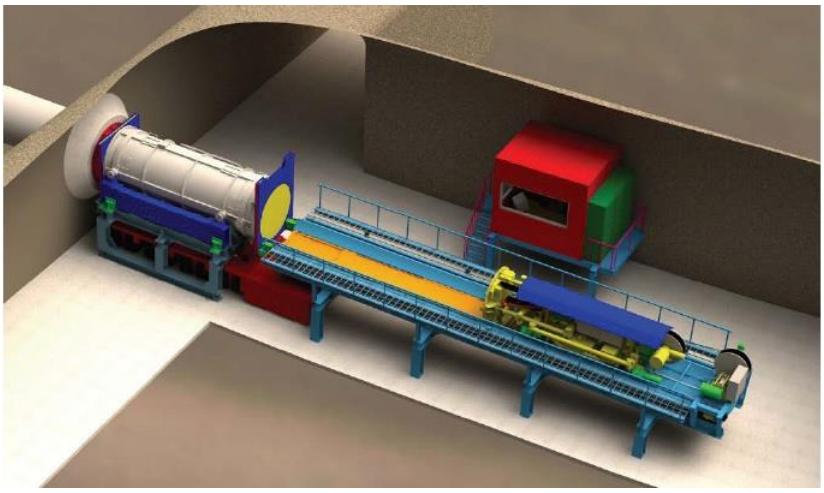
リローディングステーション（付図 6-5）では、キャニスタはスーパーコンテナに梱包される。スーパーコンテナは、中央坑道を経由して輸送用の遮蔽管（shielding tube）に入れられ、輸送車によって処分場及び定置ニッチまで輸送される。輸送車両は自走式のモジュール式輸送機をベースにしており、超大型で重量物の輸送に世界中で広く使用されている（Posiva, 2018d）。



※リローディングステーションは黄色クレーンの下に位置する施設部分

付図 6-5　処分場深度にあるリローディングステーション（Posiva, 2018f）

処分エリアでは、スーパーコンテナが定置ニッチから設置される（付図 6-6）。設置作業では、定置坑道の前に 23 m 以上の自由空間が必要である。（Posiva, 2018d）



付図 6-6　定置ニッチ、輸送車両、定置マシン（Posiva, 2018d）

6.3.　管理方法及び管理項目（パラメータ）

定置坑道及びスーパーコンテナセクションの配置は、熱的・力学的・水理地質学的条件に依存している。（Posiva/SKB,2017a）

- 熱的条件：定置坑道から別の定置坑道までの公称（中心から中心）水平距離（坑道間隔）は、25m である。
- 力学的条件：キャニスタの位置は、合理的に可能な限り、キャニスタが耐え得る以上のせん断力を持たないように選択すべきである。将来発生する可能性のある地震の影響を軽減するために、キャニスタの位置は、いわゆる「大規模亀裂」と呼ばれる識別可能な亀裂と交差しないように選択される。
- 水理地質学的条件：現在の経験に基づき、グラウト注入後の定置坑道への最大流入量は、

300 m 長さの定置坑道で 10 ℓ/min 以下に設定される。緩衝材が流入水に晒されてから飽和するまでの間、スーパーコンテナセクションに流入する水の総量は、0.1 ℓ/min 以下あるいは 0.1 ℓ/min 等しくなるように制限されることが望ましい。

坑道の構成要素、例えばベントナイトブロックやスーパーコンテナを設置する前に、下記のような定置坑道の準備が行われる。(Posiva, 2018d)

- 定置坑道の清掃
- 定置坑道への水の流入とその分布の検査
- 定置坑道（及び隣接する坑道）と交差する潜在的に識別可能な亀裂の検査
- 必要に応じて、ドリップ/スプレイシールドを設置
- 定置坑道の真の/実際の寸法と幾何公差を決定するための検査
- 粘土ベースの充填材による岩石の発生の可能性の平準化
- 漏れが制限を超えて増加した場合の補足的なポストグラウチング（一次ポストグラウチングと坑道構成要素設置の間の時間）
- 平行切断鋸引きを採用したプラグの岩盤の切欠き（notches）の掘削
- DAWE システムのパーツの設置

定置坑道への流入量が設計基準に適合していることを確認するための手順が策定される。岩盤適性分類（RSC: rock suitability classification）に基づき、詳細設計の中で定置坑道の計画位置（熱的に最適な坑道間隔、など）を決定する。詳細設計の調整や検証のためのインプットは、観測手法や詳細なサイト調査プログラムの枠組みの中で、すなわち、掘削孔や地下開口部での特性評価や異なるスケールでのモデル化の結果を組み合わせることによって得られる。定置坑道のスケール（坑道スケール）を示すモデルは、坑道の地質学的・水理地質学的マッピング、坑道への地下水流入量の測定、及び定置坑道のためのパイロット孔についての先行する地質学的・水理地質学的特性評価に基づく（Posiva, 2018d)。

掘削された定置坑道及びスーパーコンテナセクションへの流入は、可能な限り、すなわち坑道構成要素の設置が開始されるまで監視されることが想定されている。定置坑道またはスーパーコンテナセクションが設計基準に準拠していない場合は不合格となる（Posiva, 2018d)。

SKB 及び Posiva では、いわゆる「大規模な亀裂」と呼ばれる識別可能な亀裂（及び断層帯）を検出する確率を最大化するための手順を開発している。これには、主に坑道掘削に先立つ詳細な調査プログラムを調整することが含まれる。坑道とコアサンプルの地質学的なマッピングは、坑道と隣接する坑道とが交差する亀裂の詳細な特徴を提供する。コアサンプル、パイロット孔のログ、及び調査は、潜在的に識別可能な（大きな）亀裂の位置と方向に関する情報を提供する。外挿により、隣接する定置坑道や坑道と交差するような亀裂があれば、調査する必要がある。また、定置坑道とパイロット孔の間の亀裂（及び断層帯）のマッチングに使用された手法の信頼性を評価する必要がある。これらの方法には、孔位間の相関（運動学的指標を利用する)、ドリルホールレーダーや地震学などの水理及び孔位間の地球物理学的技術が含まれ、また、孔周辺の岩石中の亀裂/ゾーンの位置と形状（潜在的には範囲も）の良い指標を提供する、開発された坑道間の測定も含まれる。したがって、この基準を適用するには、地質学的特性評価、物理探査技術、統合モデリングの結果が必要である。これらの技術（抵抗性（mise-a-la-masse（鉱体流電/流電電位）法）を含む）を用いた“大規模な亀裂”の実験が、Äspö で実施されている。この基準を満たさないスーパーコンテナはすべて不合格となる（Posiva, 2018d)。

坑道面の粗さ、ステップ、直径の変化などに関する要件は、測定によって対処する必要がある。坑道のレーザースキャンは Äspö でテストされ、実行可能であることがわかっている。この方法では、大量のデータが生成され、そこから表面の形状を画像化して分析することができる。(Posiva, 2018d)

定置坑道の寸法を検査するための適切な方法や機器は他にもあり、例えば測地法などがある。SKB 及び Posiva は、定置坑道の幾何公差が設計基準に適合していることを検証するための手順を開発している。主に品質管理及び保証手順を適用して、掘削装置の適切な位置決め、固定、及びアライメント、並びに掘削作業に関連する条件（例えば、カッターの状態をチェックするなど）を通じて、パイロット孔（及び定置坑道）を検査する。掘削後の結果として得られる形状は、一つまたは複数の測定方法を組み合わせて検査される。定置前の剥落の発生を評価するために、完成した定置坑道の目視検査も必要である。幾何学的許容差に適合しない定置坑道は、不合格とし、埋め戻される（Posiva, 2018d）。

参考文献

Posiva, MANU – Isostatic Compression of Buffer Blocks – Small Scale, Posiva Working Report 2009-134, 2010a.

Posiva, TKS-2009 Nuclear Waste Management at Olkiluoto and Loviisa Power Plants Review of Current Status and Future Plans for 2010 –2012, 2010b.

Posiva, Isostatic Compression of Buffer Blocks - Middle Scale, Posiva Working Report 2011-62, 2012h.

Posiva, Canister Design 2012, Posiva Report POSIVA 2012-13, 2013a.

Posiva, KBS-3H Complementary Studies 2008–2010, Posiva Report POSIVA 2013-03, 2013b.

Posiva, Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto − Description of the Disposal System, Posiva Report POSIVA 2016-04, 2017a.

Posiva, Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto – Design Basis, Posiva Report POSIVA 2016-05, 2017b.

Posiva, KBS-3H − Design, Production and Initial State of Buffer and Filling Components, Posiva Report POSIVA 2016-06, 2018a.

Posiva, KBS-3H − Design, Production and Initial State of the Compartment and Drift Plugs, Posiva Report POSIVA 2016-07, 2018b.

Posiva, KBS-3H − Design, Production and Initial State of the Supercontainer, Posiva Report POSIVA 2016-08, 2018c.

Posiva, KBS-3H - Design, Construction and Initial State of the Underground Openings, Posiva Report POSIVA 2016-09, 2018d.

Posiva, Design and Production of the KBS-3H Repository,.Posiva Report POSIVA 2016-10, 2018e.

Posiva, KBS-3H Disposal Facility Description, Posiva Report POSIVA 2016-19, 2018f.

日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金資金管理センター,平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書,2020.

付録８　フィンランドにおける性能評価方法

目次

1.　KBS-3V 概念における性能評価の実施内容 ..... 付 8-1
1.1.　性能評価項目の概要（キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材） ..... 付 8-1
1.2.　性能評価項目ごとの評価方法 ..... 付 8-5
1.2.1.　キャニスタ ..... 付 8-5
1.2.2.　緩衝材 ..... 付 8-13
1.2.3.　埋め戻し材 ..... 付 8-33
1.2.4.　閉鎖材 ..... 付 8-38
2.　KBS-3H 概念における性能評価の実施内容 ..... 付 8-40
2.1.　性能評価項目の概要（キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材） ..... 付 8-40
2.2.　評価内容及び評価に用いられるパラメータの概要（スーパーコンテナ、キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材） ..... 付 8-43
2.2.1.　スーパーコンテナ ..... 付 8-43
2.2.2.　キャニスタ ..... 付 8-45
2.2.3.　緩衝材 ..... 付 8-47
2.2.4.　埋め戻し材 ..... 付 8-50
2.2.5.　閉鎖材 ..... 付 8-52
3.　参考文献 ..... 付 8-53

1. KBS-3V 概念における性能評価の実施内容

1.1. 性能評価項目の概要（キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材）

性能評価報告書（Posiva, 2013）の 2 章では、母岩及び人工バリア（キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材）の性能目標及び目標特性（Performance target and Target property）を特定し、4 章では、2 章でリスト化された性能目標及び目標特性（Performance target and Target property）を、EBS（engineered barrier system）及び地球圏の変化関連の FEP（Features, Events and Processes）に対してチェックし、人工バリアの性能を脅かす可能性のある関連プロセスを特定している。したがって、この「人工バリアの性能を脅かす可能性のある関連プロセス」が、性能評価項目にあたる。4 章でリスト化された FEP は、5 章～8 章の処分場システムの性能評価に組み込まれている。

5 章～8 章では、「掘削及び操業期間から閉鎖まで」、「閉鎖後 1 万年まで」、「長期的変化（LONG-TERM EVOLUTION）」、「繰り返される氷河周期の変化（THE EVOLUTION FOR REPEATED GLACIAL CYCLES）」の四つの期間に分けられ、処分場システムの性能評価の内容が性能評価項目ごとにまとめられていることから、5～8 章の目次が、そのまま各評価期間の性能評価項目一覧と見なすことができる。このため、本業務で対象としている「操業～再冠水に至る期間」に相当する評価期間である「掘削及び操業期間から閉鎖まで」、及び「閉鎖後 1 万年まで」の処分場システムの性能評価について記載された性能評価報告書（Posiva, 2013）の 5 章及び 6 章の目次を示した後、それらを弊社の判断により処分場構成要素及び THMCR にて分類・整理した。

【掘削及び操業期間から閉鎖まで】

「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の期間における、キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材の性能評価の内容については、性能評価報告書（Posiva, 2013）の 5 章に示されている。その目次構成を付表 1-1 に、目次構成に基づき弊社の判断で THMCR ごとに整理した「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の性能評価項目一覧を付表 1-2 にそれぞれ示す。

付表 1-1　性能評価報告書（Posiva, 2013）の 5 章の目次構成

大項目	小項目
地圏の水理学的及び地球化学的変遷	地下水流動
	地下水組成 ・地下水中の塩分 ・pH 及び酸化還元状態 ・地下水中の溶存イオン及び硫化物 ・操業期間中の地圏における硫化物の変化に関するモデル化 ・操業期間中の微生物活動 ・建設中のセメント起源のコロイド
ニアフィールドの熱的変遷	ニアフィールドにおける温度変化
ニアフィールド岩盤の力学的変遷	EDZ（Excavation Damaged Zone）
	掘削による岩盤損傷
	断層の再活性化（Reactivation of fractures）
緩衝材及び埋め戻し材の力学的及び水理学的変遷	パイピング／エロージョン ・処分孔における重量減少量 ・影響を受ける処分孔の数 ・寄与する水量 ・浸食水中の固相含有量 ・処分坑道埋め戻し材の重量減少量
緩衝材及び埋め戻し材の地球化学的変遷	酸素の枯渇及び pH 変化
	コロイド生成
	ニアフィールドにおけるセメント系浸出液の影響 ・セメント系材料の浸出 ・岩盤中での浸出液の移行 ・セメント系浸出液と粘土／モンモリロナイトの相互作用
	その他のシール材物質の浸出－シリカゾル
閉鎖材に関する力学的、水理学的及び地球化学的変遷	操業期間中の閉鎖埋め戻し材の変化
	操業期間中の閉鎖プラグ及び処分坑道プラグ材におけるコンクリート構成要素の変化 ・コンクリート耐久性に関する概要 ・設置後 100～200 年間の HZ20（hydrogeological zones）上部の標準コンクリートの変化 ・設置後 100～200 年間の HZ20 下部の低 pH 自己充填コンクリートの変化
キャニスタの腐食	定置前の、大気による腐食（Atmospheric corrosion）
	ハンドリング及び操業要因による腐食
	応力腐食割れ
	残留水の放射線分解による内部腐食（internal corrosion）
	不飽和緩衝材中の外部腐食（External corrosion）
	処分孔内の好気性腐食（Aerobic corrosion）
	高塩分濃度の地下水における銅腐食
	キャニスタへの力学的影響
未臨界	－

付表 1-2 「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素、THMCR にて分類）

処分場 構成要素	性能評価項目	
	THMCR 分類	項目
キャニスタ	力学・化学	腐食とその力学的影響
	放射線	未臨界
緩衝材	熱	温度変化
	水理・力学	パイピング／エロージョン
	化学	酸素の枯渇及び pH 変化
		コロイド生成
		セメント系浸出液の影響
		シリカゾルの影響
埋め戻し材	水理・力学	パイピング／エロージョン
	力学・化学	処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化
	化学	酸素の枯渇及び pH 変化
		コロイド生成
		セメント系浸出液の影響
		シリカゾルの影響
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化
	力学・化学	閉鎖プラグにおけるコンクリート構造物の変化

【閉鎖後 1 万年まで】

「閉鎖後 1 万年まで」の期間における、キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材の性能評価の内容については、性能評価報告書（Posiva, 2013）の 6 章に示されている。その目次構成を付表 1-3 に、目次構成に基づき弊社の判断で THMCR ごとに整理した「閉鎖後 1 万年まで」の性能評価項目一覧を付表 1-4 にそれぞれ示す。

付表 1-3　性能評価報告書（Posiva, 2013）の 6 章の目次構成

大項目	小項目
地圏の水理学的及び地球化学的変遷	地下水流動
	地下水組成 ・地下水中の塩分 ・pH 及び酸化還元状態 ・地下水中の溶存イオン及び硫化物
ニアフィールドの熱的変遷	－
岩盤の力学的変遷	熱的スポーリング（Thermally induced spalling）
	断層の再活性化（Reactivation of fractures）
	クリープ
緩衝材及び埋め戻し材の力学的及び水理学的変遷	飽和プロセス ・亀裂間の岩盤から水が供給されると仮定したシミュレーション（岩盤透水係数＞０）
	膨潤及び均質化 ・膨潤と均質化のカップリング
	緩衝材及び埋め戻し材の均質化 ・数値モデルからの均質化の証拠 ・緩衝材の均質化の試験データ ・埋め戻し材の均質化の試験での証拠 ・パイピングチャンネルの均質化及び自己シール ・緩衝材の埋め戻し材への膨張
	飽和緩衝材ベントナイトの飽和埋め戻し材への膨潤
緩衝材の地球化学的変遷	予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷
	モンモリロナイトの変質
	熱的ステージでのセメンテーション
	飽和後の緩衝材の間隙水化学及び陽イオン交換体化学
	緩衝材中での微生物活動
	緩衝材への硫化物の流入
	緩衝材へのセメント浸出液の影響
埋め戻し材の地球化学的変遷	飽和後の埋め戻し材間隙水化学
	埋め戻し材中での硫化物の生成と微生物活動
	埋め戻し材中でのセメント－粘土相互作用
	埋め戻し材中での鉄－粘土相互作用 ・鉄/鋼の腐食において硫酸還元バクテリアにより生成される硫化物
閉鎖材構成要素に関する力学的、水理学的及び地球化学的変遷	閉鎖埋め戻し材材料の変化
	閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化
キャニスタの腐食	緩衝材飽和中における腐食
	緩衝材飽和後における腐食－硫化物腐食
	緩衝材間隙水の放射線分解によるキャニスタの外部腐食
キャニスタへの力学的荷重	静水圧による荷重
	ベントナイトの不均などな膨潤による圧力
	荷重の組み合わせ
	岩盤せん断荷重の評価
未臨界	－

付表 1-4 「閉鎖後 1 万年まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素、THMCR にて分類）

処分場構成要素	性能評価項目	
	THMCR 分類	項目
キャニスタ	力学	力学的荷重
	化学	腐食
	放射線	未臨界
緩衝材	熱	温度変化
	水理・力学	飽和プロセス
		膨潤及び均質化
		緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤
	化学	予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷
		モンモリロナイトの変質
		熱的ステージでのセメンテーション
		飽和後の間隙水の化学反応及び陽イオン交換体の化学反応
		微生物活動
		硫化物の流入
		セメント浸出液の影響
埋め戻し材	水理・力学	飽和プロセス
		膨潤及び均質化
		緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤
	化学	飽和後の間隙水の化学反応
		硫化物の生成と微生物活動
		セメントー粘土相互作用
		鉄ー粘土相互作用
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化
	力学・化学	閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化

1.2. 性能評価項目ごとの評価方法

1.2.1. キャニスタ

キャニスタにおける性能評価項目を、評価期間及び THMCR ごとに整理した。整理結果を付表 1-5 及び付表 1-6 に示す。

付表 1-5 「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素を THMCR にて分類）

処分場構成要素	性能評価項目	
	THMCR 分類	項目
キャニスタ	力学・化学	腐食とその力学的影響
	放射線	未臨界

付表 1-6 「閉鎖後 1 万年まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素を THMCR にて分類）

処分場構成要素	性能評価項目	
	THMCR 分類	項目
キャニスタ	力学	力学的荷重
	化学	腐食
	放射線	未臨界

以下に性能評価項目ごとの評価方法を示す。

（1） 腐食とその力学的影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、掘削及び操業期間から閉鎖までの期間のキャニスタの腐食とその力学的影響について評価するにあたり、以下の 7 種類の腐食荷重を考慮している。

- 定置前の、大気による腐食
- 取り扱いと据え付けに起因する腐食
- 応力腐食割れ（Stress corrosion cracking）
- 残留水の放射線分解による内部腐食
- 不飽和緩衝材中の外部腐食
- 処分坑道内における好気性腐食
- 高塩分地下水中における銅の腐食

このうち、「定置前の、大気による腐食」、「取り扱いと据え付けに起因する腐食」、「応力腐食割れ」、「不飽和緩衝材中の外部腐食」、「高塩分地下水中における銅の腐食」については、関連文献のレビューにより性能評価項目による影響を定性的に評価している。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「定置前の、大気による腐食」についての記載箇所は、”5.7.2 Atmospheric corrosion before emplacement”である。

「定置前の、大気による腐食」については、以下の文献のレビューを実施し、影響を定性的に評価している。

- King et al. An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository,POSIVA 2011-01, 2012.
- Nieminen, J. Ventilation systems of encapsulation plant,Working Report 2012-55, 2012.

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって評価パラメータは「大気による腐食効果」と考えられる。

- 大気による酸化からキャニスタの表面に腐食生成物の膜ができるが、大気による腐食効果は無視できる程度である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「取り扱いと据え付けに起因する腐食」についての記載箇所は、”5.7.3 Corrosion due to handling and emplacement”である。

「取り扱いと据え付けに起因する腐食」については、以下の文献のレビューを実施し、影響を定性的に評価している。

- King et al. An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository,POSIVA 2011-01, 2012.
- Raiko, H., Sandström, R., Rydén, H. and Johansson, M. Design analysis report for the canister. Stockholm, Sweden, TR-10-28, 2010.

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって評価パラメータは「取り扱い時に生じるキャニスタ表面の不連続部やオーバーパックの変形に対する荷重」と考えられる。

- 取り扱いや据え付けによりキャニスタの表面が損傷してできる不連続部は、キャニスタの腐食挙動に影響を及ぼさない。
- 取り扱い時に生じる銅製オーバーパックの変形に対する様々な荷重の影響はあるが、適切な環境下では腐食による亀裂（cracking）は防げる。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「応力腐食割れ」についての記載箇所は、“5.7.4 Stress corrosion cracking”である。

「応力腐食割れ」については、以下の文献のレビューを実施し、影響を定性的に評価している。

- King, F. & Newman, R. Stress corrosion cracking of copper canisters, TR-10-04, 2010.
- King et al. An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository,POSIVA 2011-01, 2012.
- King, F. & Kolář, M. Theory manual for the copper corrosion model for stress corrosion cracking of used fuel disposal containers,Report 06819-REP-, 2004.
- King, F. & Kolář, M. 2005. Preliminary assessment of the stress corrosion cracking of used fuel disposal containers using the CCM-SCC.0 model. Nuclear Waste Management Division Report 06819-REP-01300-10103-R00. 2005
- Maak, P. & King, F. 2005. A model for predicting stress corrosion cracking behavior of copper containers in a deep geologic repository. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX, Mat. Res. Soc. Symp. Proc.932. Warrendale, PA, USA: Materials Research Society. 2005.
- Raiko, H., Sandström, R., Rydén, H. and Johansson, M. Design analysis report for the canister. Stockholm, Sweden, TR-10-28, 2010.
- Gripenberg, H. Residual stress investigation of copper plate and canister EB weld complementary results. Working Report 2009-21. 2009.

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって評価パラメータは「銅製キャニスタの応力腐食割れへの感受性、キャニスタの蓋の溶接時に生じる残留応力」と考えられる。

- キャニスタの応力腐食割れへの感受性（susceptibility）が高い期間の予測により、感受性のある期間は短く、応力腐食割れの潜在的可能性を高める pH の条件と応力腐食割れを誘引する種（SCC-inducing species）が同時に存在する可能性はほとんどない。
- キャニスタの蓋を溶接する際に生じる残留応力（Residual stress）はキャニスタの性能に影響を及ぼすものではない。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「不飽和緩衝材中の外部腐食」についての記載箇所は、“5.7.6 External corrosion in unsaturated buffer”である。

「不飽和緩衝材中の外部腐食」については、以下の文献のレビューを実施し、影響を定性的に評価している。

- King et al. An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository,POSIVA 2011-01, 2012.
- Pusch, R. 2008. Geological storage of highly radioactive waste. ISBN-10: 3540773320, ISBN-13: 978-3540773320. 2008.

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって評価パラメータは「銅製キャニスタ周囲の湿度」と考えられる。

- 銅は Cl^- 溶液を含む O_2 中や、表面の薄い水の膜を形成するために必要な湿度を上回る相対湿度（RH）を提供する大気条件下において腐食するため、キャニスタ周囲の湿潤プロセスが不飽和緩衝材中の外部腐食の形態や範囲に影響を及ぼすと考えられるが、キャニスタの表面は均一に湿潤するので腐食も均一である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「高塩分地下水中における道の腐食」についての記載箇所は、“5.7.8 Copper corrosion in highly saline groundwaters”である。

「高塩分地下水中における銅の腐食」については、以下の文献のレビューを実施し、影響を定性的に評価している。

- King et al. An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository,POSIVA 2011-01, 2012.

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって評価パラメータは「ニアフィールドの pH」と考えられる。

- 処分場の建設及び操業によって生じる乱流（disturbances）のために地下水の塩分濃度が上昇する可能性があり、酸性状態において高い Cl^- 濃度では、銅は水中で熱水力的に不安定な状態になる可能性がある。しかし、ニアフィールドの pH は中性あるいは微塩基性である。
- 厳密な酸素欠乏状態における銅の腐食速度を測定したところ、いったん微量の O_2 が消費されてしまうと、継続した腐食の痕跡は見当たらなかった。したがって、中性 pH での濃縮 Cl^- 溶液中（高塩分濃度状態）における銅の腐食を示す証拠はない。
- 塩基性 pH での高塩分濃度状態における銅の腐食については、性能評価報告書（Posiva, 2013）の 6.8 節で言及している。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「残留水の放射線分解による内部腐食」についての記載箇所は、”5.7.5 Internal corrosion due to radiolysis of residual water”である。

「残留水の放射線分解による内部腐食」については、残留水の放射線分解によって形成される最も攻撃的な腐食剤は硝酸であるとし、形成される可能性がある硝酸の最大量を推定するために、キャニスタあたりの放射線分解酸の生産収率（the radiolytic acid production yield）を計算で推定して評価している。したがって評価パラメータは「キャニスタあたりの、放射線分解によって形成される酸の生産収率」である。具体的には、一つの BWR キャニスタには 12 本の漏えい燃料棒があり、12 本それぞれが $50cm^3$ の空隙を有すると悲観的に仮定した場合、残留水の含有量はキャニスタあたり 600g となり、放射線分解酸の生産収率は、概念モデル、データ及び適用される仮定に応じて、キャニスタあたり 160～450g の間であると推定されている。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「処分坑道内における好気性腐食」についての記載箇所は、”5.7.7 Aerobic corrosion in the deposition hole”である。

「処分坑道内における好気性腐食」については、埋め戻し材内の残留空気量を計算し、好気性腐食による最大腐食量を、物質収支法によって計算して評価している。したがって評価パラメータは「好気性腐食による最大腐食量」である。いったんキャニスタが処分孔に定置されると、緩衝材及び埋め戻し材に取り込まれた空気による好気性腐食が発生する。いったん処分坑道が埋め戻され、施栓されると、キャニスタに接触する空気の発生源はなくなると仮定されるため、残留空気の量は有限である。性能評価報告書（Posiva, 2013）Appendix C に示すとおり、EBS（engineered barrier system）の定置後、酸素分子は主に埋め戻し材中にある。Appendix C の表 C.3-1 の推定によれば、埋め戻し材 1m あたり 37.8mol の酸素分子が存在する。処分孔と処分孔との間の距離（9m）がそれぞれのキャニスタに帰属する埋め戻し材の一部であると仮定すると、酸素分子の総量は 340.2mol である。質量収支の観点からは、この量の酸素はキャニスタ蓋の相当な割合を腐食させるのに十分である。しかしながら、酸素分子は埋め戻し材中に存在する Fe (II) 鉱物と反応し、おそらく微生物劣化を通じて有機炭素とも反応すると思われる。

（2） 未臨界（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における記載箇所は、”5.8 Subcriticality”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）によると、未臨界性を考慮した性能目標は、「キャニスタは損傷したキャニスタ壁を通じた水の浸入を含む、想定されるあらゆる操業状態及び処分場状態において未臨界であること」である（1.3-CAN-14）。未臨界性の評価にあたるものとして、キャニスタが定置時に未臨界状態にあることを高い安全裕度で保証するために、輸送及びカプセル封入の目的に対して臨界安全性解析を実施している。したがって評価パラメータは「キャニスタが定置時に未臨界状態にあることの保証」である。

フィンランドの処分キャニスタの予備臨界安全性解析については、以下の文献で報告されている。

- Anttila, M. Criticality safety calculations of the nuclear waste disposal canisters for twelve spent fuel assemblies. Working Report 1999 -03.1999.
- Anttila, M. Criticality safety calculations for three types of final disposal canisters. Working Report 2005-13. 2005.

Anttila の調査によると、初期濃縮度 4.2%の 12 体の VVER-440 新燃料集合体を装荷した VVER キャニスタは臨界安全性基準を満たしている。初期濃縮度 3.8%のいわゆる ATRIUM 10X10-9Q 型の BWR 新燃料集合体 12 体を装荷した、可燃性吸収材を含まない初期設計の BWR キャニスタも安全基準を満たすことが実証された。しかしながら、これらの計算では様々な不確実性については十分に評価されなかった。臨界計算では、キャニスタは水で満たされており、燃料は新燃料であると仮定された（つまり、燃料燃焼度による反応度の低下は考慮されなかった）。

最近の Anttila による調査は、OL3 キャニスタに主に焦点を当てている。いわゆる燃焼度クレジットの原則が適用された場合に限り、このタイプのキャニスタは臨界安全性基準を満たすことがわかっている。OL3 キャニスタに装荷する燃料集合体は、初期濃縮度がおよそ 4%であれば、少なくとも燃焼度 20 MWd/kgU まで照射されているはずである。

（3） 力学的荷重

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、閉鎖後 1 万年までの期間のキャニスタに対する力学的荷重について評価するにあたり、以下の 3 種類の荷重を考慮している。

- 等方圧荷重（Isostatic load）
- ベントナイトの不均一な膨潤圧
- 岩石せん断荷重

このうち、「等方圧荷重（Isostatic load）」、「ベントナイトの不均一な膨潤圧」については、関連文献のレビューにより性能評価項目による影響を定性的に評価している。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「等方圧荷重」についての記載箇所は、”6.9.2 Isostatic loads”である。

「等方圧荷重」については、外的な力学的荷重は自然環境からのものであり、また周囲のベントナイト緩衝材の挙動からのものであるとして、ベントナイトの膨潤圧についての文献をレビューし、キャニスタの強度解析の定義と比較対照して評価している。したがって評価パラメータは「ベントナイトの膨潤圧」と考えられる。

等方圧による荷重は明確に定義されており、すべてのキャニスタについてこの荷重の存在が想定されている。圧力の最大値は悲観的な値である。荷重への EBS の他の部分からの寄与は、ベン

トナイト緩衝材の膨潤特性によるものだけである。したがって、緩衝材の特性が特定され、キャニスタの強度解析での定義と対照されることが重要である。

外的な力学的荷重は自然環境からのものであり、また周囲のベントナイト緩衝材の挙動からのものである。オルキルオトの規準処分場の公称深度は 420m である。よって、地下水の最大静水圧は 4.1 MPa である。12 万年のタイムスケールにおける Olkiluoto の気候シナリオ報告書（Pimenoff, N., Venäläinen, A. & Järvinen, H. Climate scenarios for Olkiluoto on a time-scale of 120,000 years. POSIVA 2011-04. 2011）によると、Olkiluoto 地域の氷河作用中に想定される最大の氷床の厚さは 2～2.5km であるが、今後 10,000 年間には氷河作用は予測されていない。その後は、氷河作用の可能性があるときには、等方圧荷重が増大する可能性がある。ベントナイト緩衝材は、ベントナイトが水で飽和すると膨潤する。処分場坑道を埋め戻し、数か月以内に閉鎖した後、坑道と処分孔への漏水率によって最長千年までの間に、ベントナイト緩衝材の湿潤化は、徐々に起こると予測されている。ベントナイトの膨潤圧は緩衝材の初期的な乾燥密度に大きく依存する。吸収した水の塩分濃度も膨潤に影響を与える。初期的には、飽和した緩衝材の規定の密度は 1,950～2,050 kg/m^3 である（Posiva. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Design Basis 2012. POSIVA 2012-03. 2012. _5.5 節を参照）。更に、時間の経過と共に緩衝材の密度が増大することにつながるプロセスはない（osiva. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Design Basis 2012. POSIVA 2012-03. 2012. _6.4 節を参照）。このことはつまり、キャニスタの設計分析報告書（Raiko, H. Sandström, R. Rydén, H. and Johansson, M. Design analysis report for the canister. Stockholm, Sweden,TR-10-28, 2010._2.2 節）の、各々2～10 MPa という膨潤圧につながる。ベントナイトの最大膨潤圧は、ベントナイトの密度と鉱物組成の両方に依存する。長期的には、Na ベントナイトの化学物質含有量は変化し、Na イオンが Ca イオンに変わる可能性がある。KBS-3 処分場の受入管理手順におけるベントナイト緩衝材の化学的・鉱物学的特性評価報告書（Karnland, O. Chemical and mineralogical characterization of the bentonite buffer for the acceptance control procedure in a KBS-3 repository. TR-10-60. 2010）によると、Ca ベントナイトには、Na ベントナイトよりも顕著に高い膨潤圧があり、例えばモンモリロナイトの含有量が 0.83 で飽和密度が 2,050 kg/m^3 といった高密度の領域では、最大 15 MPa である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「ベントナイトの不均一な膨潤圧」についての記載箇所は、”6.9.3 Uneven bentonite swelling pressure”である。

「ベントナイトの不均一な膨潤圧」については、複数の包括的荷重ケースの評価を実施した以下の文献のレビューを実施している。しかし、文献の結論は「考慮すべき多くのパラメータがある。」である。したがって評価パラメータは「不明」である。

- Raiko, H., Sandström, R., Rydén, H. and Johansson, M. Design analysis report for the canister. Stockholm, Sweden,TR-10-28, 2010.
-

主なレビュー内容は以下のとおりである。

- ベントナイト緩衝材の不均一な膨潤圧は、処分孔に流入する水の確率特性、初期的なベントナイトの特性のばらつき、処分孔またはベントナイト緩衝材の初期的な形状や位置の幾何学的精度不良に依存しており、考慮すべき多くのパラメータがある。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「岩石せん断荷重」についての記載箇所は、”6.9.5 Assessment of rock shear load”である。

「岩石せん断荷重」については、性能評価を実施していない。岩石せん断荷重は確率論的な性格の荷重であるため、既存のキャニスタ位置に集中したせん断、及びその規模超えるせん断の発生確率が非常に低く、許容され得るものであるように、「設計岩石せん断ケース 5 ㎝幅」が定義されている。

（4） 腐食（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、閉鎖後 1 万年までの期間のキャニスタの腐食について評価するにあたり、以下の 3 種類の腐食過程を考慮している。

- 緩衝材が飽和している間の腐食
- 緩衝材が飽和した後の腐食 - 硫化物の腐食
- 緩衝材間隙水の放射線分解に起因する、外部キャニスタの腐食

このうち、「緩衝材が飽和している間の腐食」、「緩衝材間隙水の放射線分解に起因する、外部キャニスタの腐食」については、関連文献のレビューにより性能評価項目による影響を定性的に評価している。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「緩衝材が飽和している間の腐食」についての記載箇所は、”6.8.2 Corrosion during buffer saturation”である。

「緩衝材が飽和している間の腐食」については、実験室と地下の研究施設内で処分場の条件をシミュレートして実施された腐食試験について記された以下の文献のレビューを実施し、影響を定性的に評価している。

- King et al. An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository,POSIVA 2011-01, 2012.

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって評価パラメータは「銅のピッティング」と考えられる。

- 腐食試験の結果は、キャニスタに旧来から知られているピッティング（腐食作用など種々の原因によって材料表層に微小な穴が発生すること）が発生するのでなく、陽極側と陰極側に永久に分かれることがないところではむしろアンダーデポジット腐食（under-deposit corrosion）が発生することを示唆している。
- Olkiluoto の地下水の Cl^- 含有量の高さは、局所化された腐食よりも全体の溶解を促進する傾向になるが、全体の溶解はベントナイトの間隙水が地下水と平衡状態に達するまでは起きない。
- ピッティングまたは再不動態化電位と腐食電位との差が pH の上昇とともに増加するため、pH が上昇すると、実際には表面が局部腐食の影響を受けにくくなる。したがって、万一にセメント系材料の高 pH 浸出液がキャニスタ表面に至ったとしても、キャニスタの性能に悪影響はない。
- 飽和が完了する前に、より大きな微生物活性が予測され、飽和時間は最大で数千年間継続し得る。温暖期の早い時期に移流条件を確立するに十分な緩衝材を喪失する処分孔は、あるとしてもごく少数と考えられる。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「緩衝材が飽和した後の腐食 - 硫化物の腐食」についての記載箇所は、“6.8.3 Corrosion after buffer saturation – sulphide corrosion”である。

「緩衝材が飽和した後の腐食 - 硫化物の腐食」は、地層処分場で想定される条件での銅の腐食に関する最新の報告書の更新版（King et al. An update of the state-of-the-art report on the

corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository,POSIVA 2011-01, 2012.）によって開発された混合電位モデルによって、初期に捕獲された O_2 が消費され様々なソースからの HS^- が腐食挙動を支配し始めるにつれ腐食電位がどのように変遷するか予測し評価している。したがって評価パラメータは「腐食電位の変遷」である。

いったん O_2 が消費されると、銅の主要な腐食剤として残るのは、（HS^- の形態での）硫化物イオンである。硫化物による銅の腐食は、（HS^- または H_2O の陽子の還元からの）硫化銅と分子水素の形成と共に進行する。

$$2Cu + HS^- + H^+ \rightarrow Cu_2S + H_2$$

銅の腐食モデルは、最終物質が Cu_2S であることを想定しているが、これは即ち 1mol の S が 2mol の Cu を腐食させることを意味する。銅の腐食に関する文献（Macdonald, D.D. & Sharifi-Asl, S. 2011. Is copper immune to corrosion when in contact with water and aqueous solutions? Research 2011:09. 2011）によると、現実として、銅は CuS を形成する可能性があり、あるいは他のポリ硫黄種（ポリ硫化物、ポリ硫酸塩、及びポリチオン酸塩）と反応する可能性もあり、それらポリ硫黄種は、濃度は非常に低いが無酸素条件下で存在する。混合電位モデルは、硫化物を含む塩化物間隙水を伴う締固めベントナイト内での銅の腐食に重要な、様々な電気化学、質量輸送、酸化還元、析出、及び吸着反応を説明している。地下水、緩衝材、及び埋め戻し材が、主な硫化物源である。地下水内の硫化物の源泉は、岩石から亀裂内の流水への硫化鉱物の溶解、あるいは地下水－岩石システム内の硫酸塩還元細菌（SRB）である。現在の地下水内の硫化物レベルは 1 mg/L 未満で、腐食計算の目的では 3 mg/L と、悲観的に想定されている。

性能評価報告書（Posiva, 2013）における「緩衝材間隙水の放射線分解に起因する、外部キャニスタの腐食」についての記載箇所は、“6.8.4 External canister corrosion due to radiolysis of buffer porewater”である。

「緩衝材間隙水の放射線分解に起因する、外部キャニスタの腐食」については、放射線分解に起因するキャニスタ周辺の湿潤空気による腐食について記された以下の文献のレビューを実施し、影響を定性的に評価している。

- King et al. An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository,POSIVA 2011-01, 2012.
- Raiko, H., Sandström, R., Rydén, H. and Johansson, M. Design analysis report for the canister. Stockholm, Sweden, TR-10-28, 2010.
- SKB. CORROSION CALCULATIONS REPORT FOR THE SAFETY ASSESSMENT SR-SITE. TR-10-66. 2010.

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって評価パラメータは「酸化放射線分解生成物（oxidising radiolysis products）からの最大腐食量」と考えられる。

- キャニスタ外面は、外部の水または水蒸気の放射線分解によって腐食する可能性がある。キャニスタの壁面を透過できる放射線は、ガンマ線（及び中性子線のごく一部）だけである。ガンマ線のほとんどは Cs-137 と Sr-90 によるものであり、その半減期は約 30 年である。従って、外部の水の放射線分解は、処分後最初の 300 年間についてのみ関係するものである。
- キャニスタ周辺の線量率の最高値及び水と空気の最大量を用いて、SKB は酸化放射線分解生成物（oxidising radiolysis products）からの最大腐食量を推定した。この推定にでは、キャニスタの周囲の 5mm の層に存在する酸化物が銅の表面に到達して反応するとの想定で、約 300 年後に可能性のある酸化銅の最大量が、深さ 14 μ m の腐食をもたらすとされている。

・ 早期の変遷期におけるキャニスタ周辺の緩衝材間隙水の放射線分解からの腐食は、キャニスタ表面での放射線量が制限されているので、無視できる程度のものである。

(5) 未臨界（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における未臨界の記載箇所は、”6.10 Sub-criticality”である。性能評価報告書（Posiva, 2013）では、「最初の 10,000 年間、キャニスタは損傷などがない状態であると期待され、よって燃料棒の初期形状も維持されると期待される。」という評価結果の記載がある。したがって、評価パラメータは「燃料棒の初期形状の維持」と考えられる。ただし、キャニスタの損傷などがないことや燃料棒の初期形状が維持されると期待される根拠については記載がない。

1.2.2. 緩衝材

緩衝材における性能評価項目を、評価期間及び THMCR ごとに整理した。整理結果を付表 1-7 及び付表 1-8 に示す。

付表 1-7 「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素、THMCR にて分類）

処分場構成要素	性能評価項目	
	THMCR 分類	項目
緩衝材	熱	温度変化
	水理・力学	パイピング／エロージョン
	化学	酸素の枯渇及び pH 変化
		コロイド生成
		セメント系浸出液の影響
		シリカゾルの影響

付表 1-8 「閉鎖後 1 万年まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素、THMCR にて分類）

処分場構成要素	性能評価項目	
	THMCR 分類	項目
緩衝材	熱	温度変化
	水理・力学	飽和プロセス
		膨潤及び均質化
		緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤
	化学	予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷
		モンモリロナイトの変質
		熱的ステージでのセメンテーション
		飽和後の間隙水の化学反応及び陽イオン交換体の化学反応
		微生物活動
		硫化物の流入
		セメント浸出液の影響

以下に性能評価項目ごとの評価方法を示す。

(1) 温度変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における温度変化の記載箇所は、”6.10 Sub-criticality”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、ベントナイト緩衝材の飽和度が極端に異なる場合における、設置後の経過時間の関数として、キャニスタの表面及び処分孔壁（Deposition hall wall）の

温度変化を予測している。したがって評価パラメータは「キャニスタの表面及び処分孔壁（Deposition hall wall）の温度変化」である。

温度変化予測の設定条件は以下のとおりである。

- キャニスタは処分場の中央部に位置していると想定
- キャニスタ：OL3 を想定
- 平均燃焼度：50MWd/kgU
- 処分場内のキャニスタ同士の距離：10.5m、25m
- 緩衝材の導電率：初期状態で 1.0W/(m・K)、飽和状態で 1.3W/(m・K)
- 初期状態では、キャニスタと緩衝材の間に 10mm の空隙があり、飽和状態では空隙が閉じていると想定。

緩衝材と岩石の間の 50mm の隙間は、初期状態では 0.2 W/(m・K)、飽和時には 0.6W/(m・K)の導電率をもつベントナイトペレットで満たされていると想定。

（2） パイピング／エロージョン（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるパイピング／エロージョンの記載箇所は、”5.4.2 Mass loss estimates in deposition holes”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、パイピング／エロージョンによる粘土の浸食は、粘土による水の吸収率、粘土の膨張率、流路へ流入する流量、地下水の化学組成、及び、粘土と水の境界面の特性などによって左右されるとしている。ただし、これらの依存性の詳細が不明であるため、粘土材の浸食については純粋に経験則に基づいた、以下の評価式を用いている。

$$Ms = Cs \times Qw \times t$$

ここで、

Ms：パイピング／エロージョンによる重量減少量（kg）

Cs：浸食水中の固相含有量（kg/m^3）

Qw：パイピング／エロージョンに寄与する水量（m^3/y）

したがって評価パラメータは「Ms：パイピング／エロージョンによる重量減少量」である。

（3） 酸素の枯渇及び pH 変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における酸素の枯渇及び pH 変化の記載箇所は、”5.5.2 Oxygen depletion and changes in pH”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、長期的な安全性の観点から、酸素とpHの変化は潜在的な懸念事項であるとしている。理由は、キャニスタの腐食を促進する可能性があるためである。花崗岩中の酸素の枯渇に関する文献（Puigdomenech, I., Ambrosi, J.-P., Eisenlohr, L., Lartigue, J.E., Banwart, S.A., Bateman,K., Milodowski, A.E., West, J.M., Griffault, L., Gustafsson, E., Hama, K., Yoshida, H.Kotelnikova, S., Pedersen, K., Michaud, V., Trotignon, L., Rivas Perez, J. & Tullborg,E.-L. O2 depletion in granitic media. The REX project. TR-01-05. 2001）によると、酸素の変化については微生物の影響が大きい。なぜならば、微生物が好気性生物分解によって坑道環境と周囲の岩石で酸素を急速に消費するためである。

pH の変化を評価するにあたっては、二酸化炭素の生成と二酸化炭素分圧（pCO_2）の増加、セメント系材料からのアルカリ浸出液の影響を考慮している。二酸化炭素の生成と二酸化炭素分圧（pCO_2）の増加は pH に影響するが、pH は炭酸カルシウム（$CaCO_3$）の溶解によって緩衝され

る。したがって、自然の状態に関連した pH の顕著な低下は予測されない。さらに、セメント系材料からのアルカリ浸出液が局所的に地下水のアルカリ性を強める（pH 値が高くなる）可能性がある。しかし、高 pH の浸出液の影響は、処分坑道へのアルカリ性浸出液の流れが限定されているためごくわずかであり、その結果、緩衝材及び埋め戻し材の鉱物的変化は限定される。

酸素の枯渇を評価するにあたっては、緩衝材と埋め戻し材内の残留空気中の酸素量を推定している。さらに、埋め戻し材内については、酸素の消費を微生物作用や黄鉄鉱の酸化による酸素消費速度によって評価している。したがって評価パラメータは「酸素消費速度」である。

緩衝材内の酸素量は、処分孔あたり約 16～20mol と推定されている（値はキャニスタの種類による。推定方法に関する記述はない）。埋め戻し材内と比較し、緩衝材内の酸素量は少ないため、緩衝材内の酸素量の推定方法及び緩衝材内の酸素の枯渇の評価についてはこれ以上の記述がない。

性能評価報告書（Posiva, 2013）内の Appendix C によると、埋め戻し材の酸素濃度は、空隙率（the porosity）、初期含水率（the initial moisture content）、空気密度（25°C で 1.1839 g/L）、空気中の酸素の質量分率（0.233）及び酸素の分子量（32g/mol）から計算された結果、坑道 1m あたりの酸素は 37.8 mol である。処分孔と処分孔の間の距離（9m）が各キャニスタに起因する可能性がある埋め戻し材の部位であると仮定すると、埋め戻し材内の酸素は 340.2mol である（計算式の記述は文献に無い）。このため、キャニスタ 1 体あたりの酸素の総量はおよそ 360mol となり、そのほとんどが埋め戻し材中に存在する。

物質収支の観点から、埋め戻し材のすべての酸素がキャニスタの蓋に拡散すると仮定すると、埋め戻し材の酸素はキャニスタを数ミリ腐食する可能性がある。ただし、酸素分子のほとんどは、緩衝材及び埋め戻し材内の黄鉄鉱や菱鉄鉱などの還元鉱物と反応する。 さらに酸素分子の一部は岩石の中に拡散し、微生物作用によって消費される。 埋め戻し材では飽和中に好気性生分解も発生するかもしれない。これによって、酸素の消費速度が上昇するが、この物質中の微生物活動に関しては不確実性がかなり大きい。生分解プロセスにより、酸素消費速度が上昇し、このキャニスタを腐食させる物質の影響を制限する。

黄鉄鉱の酸化による埋め戻し材内の酸素の消費速度は、文献において確立された風化速度を用いた境界計算によって評価されている（計算の詳細については性能評価報告書（Posiva, 2013）の Appendix C参照）。酸化速度は、酸素濃度、pH、黄鉄鉱の表面積及び湿分に左右される。飽和状態では、の消費速度及び黄鉄鉱の表面積0.12～1.2m²/gに基づく酸素消費時間は非常に早く（0.2～2日）、これは埋め戻し材の酸素消費量に関する評価報告書（Grandia, F., Domenech, C., Arcos, D. & Duro, L. Assessment of the oxygen consumption in the backfill. R-06-106. 2006.）の計算と一致する（Williamson, M.A. & Rimstidt, J.D. The kinetics and electrochemical rate determining step of aqueous pyrite oxidation. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol.58, no. 24. 1994）。

（4） コロイド生成（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるコロイド生成の記載箇所は、“5.5.3 Formation of colloids”である。

コロイド生成の影響については、以下の文献をレビューしている。

- Alexander, W.R., Berry, J.A., Kelly, M.J. & Swanton, S. Review of colloids in the geosphere and their treatment in performance assessment. UK: Serco.Report to NDA-RWMD. Serco/TAS/002924/01. 2011.

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって具体的な評価に至っていないが、現状で

の評価パラメータは「コロイドの分布密度の変遷（特に処分物質の分解に関連するもの）及び変化する地下水条件下でのコロイドの移動性と安定性」と考えられる。

・ コロイドは主に緩衝材と埋め戻し材に粘土を配置することによって生成されるが、導入されたコロイドの分布密度の変遷（特に処分物質の分解に関連するもの）や、変化する地下水条件下でのコロイドの移動性と安定性については、まだ十分に定義されていない。

（5） セメント系浸出液の影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるセメント系浸出液の影響の記載箇所は、“5.5.4 Effect of cementitious leachates on the near field”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、セメント浸出液と粘土/モンモリロナイトの相互作用について、セメント浸出液との相互作用により大幅に分解したとしてもバリアの安全機能を大幅に損なうことのない緩衝材（または埋め戻し材）の限定体積を定義し、物質収支論を用いて、これらの限界体積の緩衝材（または埋め戻し材）の最大分解量を計算している。これらの限定体積の緩衝材または埋め戻し材に対するモンモリロナイトの質量($m_{montmo,defect}$)は付表 1-9 に示したように、モンモリロナイトの質量を溶解するために必要な OH^- の量（$n_{OH,defect}$）と対応している。

付表 1-9 想定される分解体積（形状）におけるモンモリロナイトの質量（$m_{montmo,defect}$）と、対応するモンモリロナイトの質量を溶解するために必要な OH^- の量（$n_{OH,defect}$）

（Posiva, 2013 の表を和訳）

	緩衝材 リング状	埋め戻し材 リング状
$m_{montimo,defect}$ [g]	9,298	43,193
$n_{OH,defect}$ [mol]	119	551

各体積に対応するモンモリロナイトを溶解するのに必要な OH^- の量（$n_{OH,defect}$）は、以下の計算式で算出される。

$$n_{OH,shape} = B \cdot \frac{m_{montmo,shape}}{M_{montmo}}$$

$m_{montmo,shape}$ = 与えられた形状の体積中のモンモリロナイトの質量（kg）
M_{montmo} = モンモリロナイトの分子量（367g/mol）
B = モンモリロナイト溶解反応の化学量論的因子

緩衝材では、m_{montmo} は、粒子密度が 2,750kg/m^3、空隙率が 0.42、モンモリロナイトの体積分率が 75％と想定して決定される。坑道の埋め戻し材に対応するバルク値は、乾燥密度が 1705kg/m^3、モンモリロナイトの体積分率が 48.6%である。

化学量論的因子（B）は次のようにして得られる。低 pH セメントの挙動とベントナイトの安定性への影響について、低 pH セメントに関する文献（Savage, D. & Benbow, S. 2007. Low pH cements. SKI Report 2007:32. 2007）は、モンモリロナイトの変化作用（溶解反応）が、pH に対する the aqueous silica speciation dependency に沿って起こると提案している。pH 範囲が 10-13 の場合、提案されている全体的な反応は以下のとおりである。

$Na_{33}Mg_{33}Al_{1.67}Si_4O_{10}(OH)_2 + 4.68OH^- + 2H_2O \rightarrow 0.33Na^+ + 0.33Mg^{2+} + 1.67Al(OH)_4^- + 4HSiO_3^-$

したがって、モンモリロナイト 1 mol を消費するには、OH^-が 4.68 mol 必要であり、これが化学量論的因子（B）である。なお、pH <10 では、ケイ酸塩鉱物の溶解度が低いため、モンモリロナイトの分解は無視できると考えられる。

（6） シリカゾルの影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるシリカゾルの影響の記載箇所は、“5.5.5 Leaching of other sealing materials - Silica sol”である。

シリカゾルの影響については、ベントナイトに対するシリカゾルの定性的レベルでの効果を推定するため、シーラントと、シリカゾル及びベントナイトの様々な混合物についての調査結果について記された以下の文献のレビューを実施している。

- Holmberg, J.-E. & Kuusela, P. The Bentonite Barrier: Microstructural properties and the influence of γ-radiation. Working Report 2011-36. 2011

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって具体的な評価に至っていないが、現状での評価パラメータは「シリカゾルの凝集」と考えられる。

- 調査の予備的な結論は、シリカゾルは高いイオン強度によって大きな凝集体が形成されるときだけでなく、主に脱水の後に（あるいは水分含有量が低い場合に）凝集する可能性があるということである。しかし、バルク材としてベントナイトに顕著な影響を及ぼすためには、相当重量のシリカゾル及びベントナイトが必要である。
- 天然のベントナイトには、石英やクリストバライト（石英の高温結晶形）の他に、相当な量の非晶質シリカが含まれる場合がある。さらに、熱水力学的観点において、高シリカ反応（high silica activities）は、他の粘土鉱物に比べてモンモリロナイトを安定化させる。このような点から、シリカゾルとベントナイトのコロイドが様々な状態においてどのように凝集するかについては不確実性がある。

（7） 温度変化（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における温度変化の記載箇所は、“6.2 Thermal evolution of the near field”である。

「(1) 温度変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで)」と同様に、キャニスタの表面及び処分孔壁（Deposition hall wall）の温度変化を予測している。したがって評価パラメータは「キャニスタの表面及び処分孔壁（Deposition hall wall）の温度変化」である。

操業フェーズの終了時点（100 年後）において、キャニスタの表面温度は、緩衝材の飽和状態次第で 70℃～80℃であり、岩盤の最高温度は約 65℃である。10,000 年後は、キャニスタ表面の温度及び処分孔の中心域の岩壁（つまり、何基かのキャニスタに囲まれた領域）の温度は、いずれも同様に約 20℃で、即ち初期状態より約 10℃高くなっていると予測される。

（8） 飽和プロセス（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書 (Posiva, 2013) における飽和プロセスの記載箇所は、“6.4.2 Saturation process”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、緩衝材と埋め戻し材の飽和プロセスを評価するにあたり、粘土の熱水力学的挙動を CODE BRIGHT を使用してモデル化している。飽和プロセスは、複数のケースでシミュレーションされ、埋め戻された不飽和の坑道への水の流入（5L/分）及びさまざまな埋め戻し材の透水係数を想定した、時間の関数としての緩衝材の飽和度を算出することで評価されている。したがって評価パラメータは「緩衝材の飽和度」である。

CODE BRIGHT は、通水性可変塩水媒体（porous deformable saline media）を通る塩水とガスの非等温多相流（non-isothermal multiphase flow）用に最初に開発された有限要素コード（the finite element code）である。緩衝材と埋め戻し材の飽和プロセスの分析に対し、ONKLO における流量モニタリングの結果と地下水の流れのモデリングの結果に基づいて、開放坑道（open tunnels）と処分孔（deposition holes）への流入を示す一連の事例が定義されている。

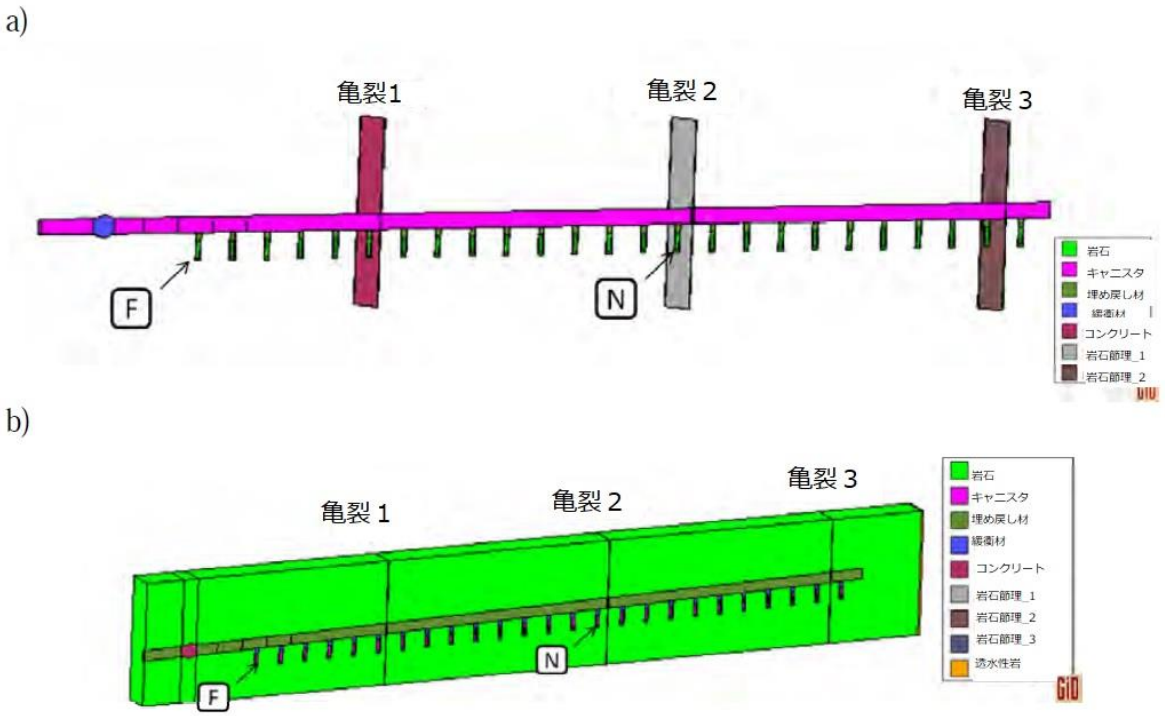
飽和プロセスのシミュレーションのため、以下 A）及び B）のケースが考慮されている。

A）：3 つの亀裂によって水が提供されているが、亀裂の間の岩盤からは水が提供されていないと仮定（つまり、岩盤の透水係数 K はゼロ。K = 0m/s）。

- 亀裂の破断面は典型的な状態を表すように定義されているが、例外的に乾燥または湿潤状態も定義されている。
- 湿潤状態の坑道…operational phase での総流入量：5L/分
- 典型的な坑道…operational phase での総流入量：0.5L/分
- 乾燥状態の坑道…operational phase での総流入量：0.01L/分

B）：亀裂そのものと、亀裂と亀裂の間の岩盤から水が提供されると仮定（つまり、岩盤の透水係数 K はゼロよりも高く、$K = 1.52 \times 10^{-12}$m/s）。

ケース A）と B）の概念モデルを付図 1-1 に示す。埋め戻された坑道（the backfilled tunnel）は内部プラグの表面（the inner plug face）からの長さが 300m、内部プラグの表面（the inner plug face）から最初の処分孔の中心軸まで 27.35m である。処分孔と処分孔の間の距離は 11m である。



付図 1-1　緩衝材と埋め戻し材の飽和分析の配置
a）亀裂からのみ提供されるケース A の水の分析。b）3 つの亀裂と、亀裂同士の間の rack mass から提供されるケース B の水の分析。図中の F は、亀裂から遠い処分孔の位置を示し、N は、亀裂に近い処分孔の位置を示す。
（Pintado・Rautioaho, 2013 の図を和訳）

上部境界と坑道セクション（Tunnel section）上部の距離、及び坑道セクション下部と下部境界の距離を付表 1-10 に示す。モデルの境界は一定の深さにあるため、坑道と境界の間の距離はわずかに異なるものの、坑道には小さな勾配がある。亀裂は、厚さ 0.2m としてシミュレーションされる。 亀裂の透過率は、以下 3 つの例示的なケースの流入をもたらすように調整される。

- 湿潤状態の坑道…operational phase での総流入量：5L/分
- 典型的な坑道…operational phase での総流入量：0.5L/分
- 乾燥状態の坑道…operational phase での総流入量：0.01L/分

付表 1-10　坑道と境界の間の距離
（Posiva, 2013 の表を和訳）

	上部バウンダリ - アーチ頂部（m）	底部バウンダリ - 坑道底部（m）
亀裂 1	26.3	21.8
亀裂 2	24.4	23.7
亀裂 3	22.3	25.7

埋め戻し材の飽和透水係数の 3 つの値がテストされた。3 つの値は 10^{-10} m/s（最大値）、10^{-11}m/s

及び 10^{-12}m/s（予想される最小値）である（付表 1-11 を参照）。

計算中に一定に保たれる水力学パラメータを付表 1-12 に示し、初期条件を付表 5. 1-13 に示す。さまざまなケースと流入条件の位置 N と F（付図 1-1 を参照）における、結果の飽和時間（resulting saturation times＝埋め戻された不飽和の坑道への水の流入（5L/分）及びさまざまな埋め戻し材の透水係数を想定した、時間の関数としての緩衝材の飽和度）を付図 1-2 に示す。考慮される緩衝材の飽和透水係数は5.59・10^{-14}m/sであり、（Martikainen, J. & Schatz, T. Laboratory tests to determine the effect of Olkiluoto bounding brine water on buffer performance. Working Report 2011-68. 2011）が1530kg/ m3の乾燥密度に対して計算した値に近い。

付表 1-11　亀裂の透過率と埋め戻し材の透水係数に関する水力学パラメータ
（Posiva, 2013 の表を和訳）

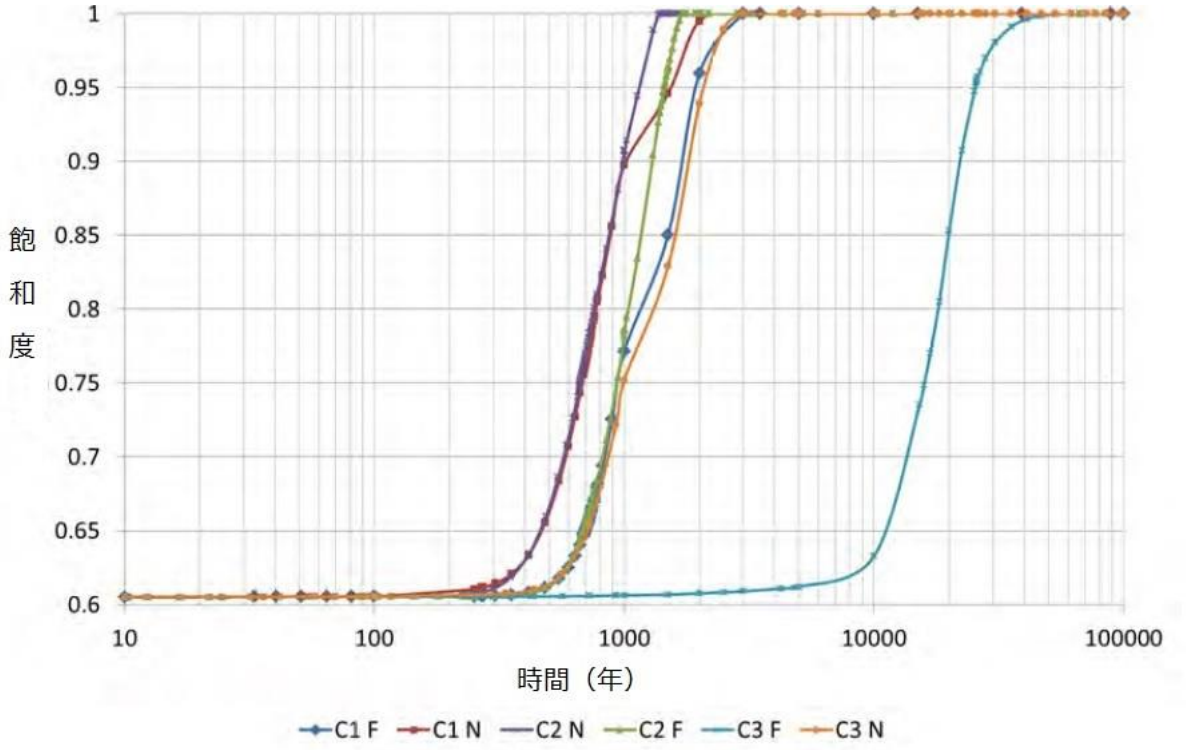
	亀裂 1（m2/s）	亀裂 2（m2/s）	亀裂 3（m2/s）	埋め戻し材（m/s）
ケース 1	1.28·10-8	2.34·10-7	1.3·10-8	1·10-10
ケース 2	1.28·10-8	2.34·10-7	1.3·10-8	1·10-11
ケース 3	1.28·10-8	2.34·10-7	1.3·10-8	1·10-12
ケース 4	1.28·10-9	2.34·10-8	1.3·10-9	1·10-10
ケース 5	1.28·10-9	2.34·10-8	1.3·10-9	1·10-11
ケース 6	1.28·10-9	2.34·10-8	1.3·10-9	1·10-12
ケース 7	2.56·10-11	4.68·10-10	2.6·10-11	1·10-10
ケース 8	2.56·10-11	4.68·10-10	2.6·10-11	1·10-11
ケース 9	2.56·10-11	4.68·10-10	2.6·10-11	1·10-12

付表 1-12　固定水力学パラメータ
Van Genuchten の法則パラメータ（air entry 値）（P_0）、Van Genuchten の法則パラメータ（形状関数）（λ）及び相対透水係数のべき乗則（power of relative hydraulic conductivity law）（N）
（Posiva, 2013 の表を和訳）

	P0（MPa）	λ	N
緩衝材	31.25	0.5	3
埋め戻し材	1.5	0.3	3
亀裂	1.5	0.3	3
コンクリート	1.5	0.3	3

付表 5. 1-13　初期条件および液体の圧力と空隙率（φ）
（Posiva, 2013 の表を和訳）

	液体の圧力（MPa）	φ
緩衝材	-41	0.438
埋め戻し材	-40.2	0.4602
亀裂	静水（Hydrostatic）	0.02
コンクリート	-40.2	0.02



付図 1-2　埋め戻された不飽和坑道への水の流入（5L/分）及びさまざまな埋め戻し材透水係数を想定した、時間の関数としての緩衝材の飽和度
C1、C2、C3 はそれぞれケース 1、ケース 2、ケース 3 を参照している。F は亀裂から遠い処分孔の位置を示し、N は亀裂近くの処分孔の位置を示す（付図 1-1 を参照）。
（Posiva, 2013 の図を和訳）

（9）　膨潤及び均質化（閉鎖後 1 万年まで）

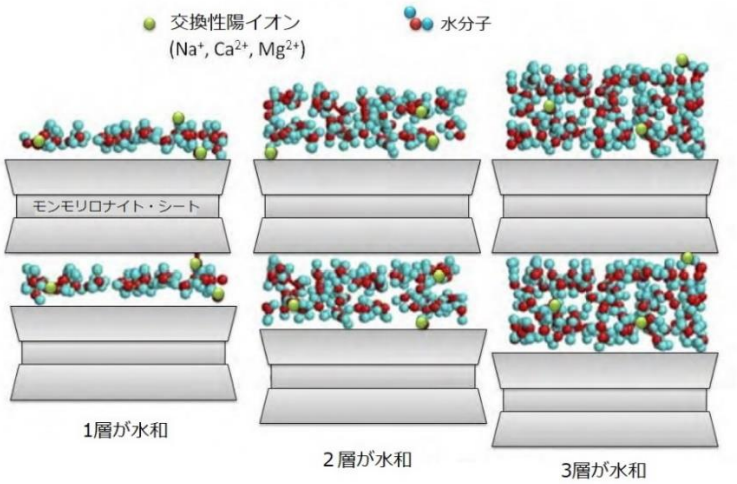
性能評価報告書（Posiva, 2013）における膨潤及び均質化の記載箇所は、“6.4.3 Swelling and homogenisation”及び“6.4.4 Homogenisation of buffer and backfill”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、緩衝材と埋め戻し材の膨潤作用の潜在的可能性を評価するにあたり、緩衝材と埋め戻し材を構成する粘土の膨潤圧（Swelling pressure、単位：kPa）を計測して評価している。したがって膨潤作用の評価パラメータは「粘土の膨潤圧」である。

緩衝材と埋め戻し材の均質化については、数値モデルと複数の相補的ラボ試験に基づき評価している。緩衝材の均質化の実験では、試料の平均含水率と平均乾燥密度を計測している。したがって均質化の評価パラメータは「緩衝材（または埋め戻し材）の平均含水率と平均乾燥密度」である。

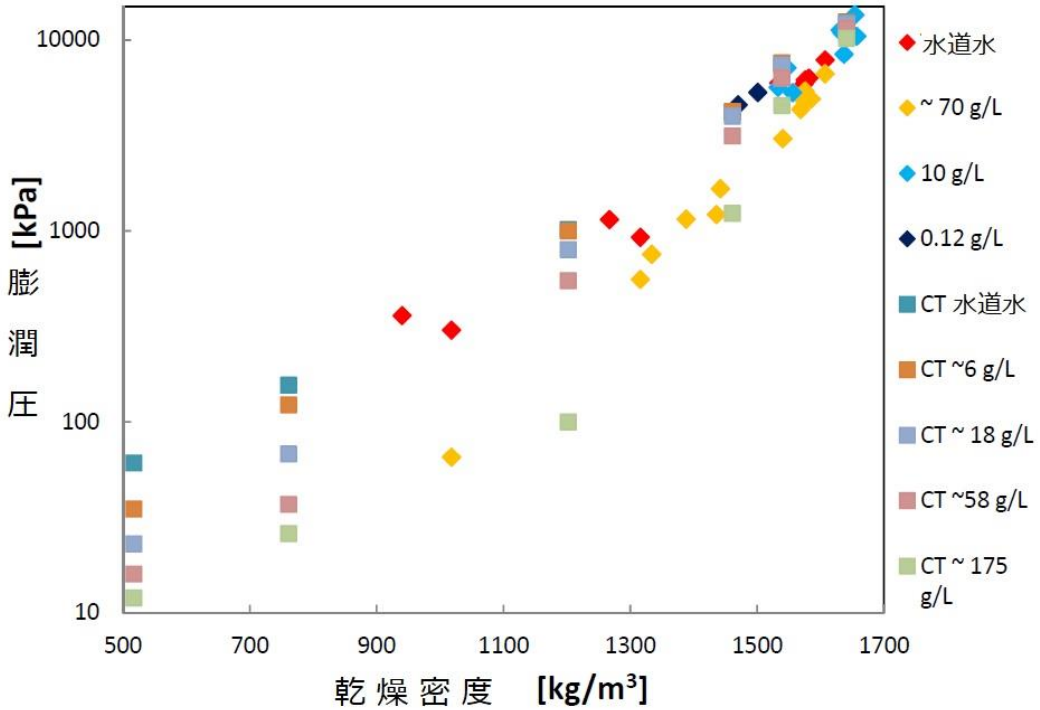
緩衝材と埋め戻し構成要素（Backfill components、例えばペレット、ブロックなど）の密度分布は、初めは不均質であるが、飽和の過程で均質化する。均質化は、緩衝材と埋め戻し材料（backfill materials）の飽和中に起こるプロセスである。埋め戻し構成要素であるブロックの膨潤能が高いため、質量は、隣接するすべての空洞（open cavities）を満たす膨潤によって誘発される変形によって再分配される。したがって、様々な部分での密度がより均一になる。

緩衝材と埋め戻し構成要素（Backfill components）が膨潤する潜在的可能性は、膨潤する粘土のモンモリロナイト含有量に左右される。このベントナイトの膨潤は、モンモリロナイトの結晶構造の層間空間内に複数の水の層ができることにより引き起こされる（付図 1-3 を参照）。



付図 1-3　交換性陽イオンの周囲の層間空間内に水の層ができた結果発生したベントナイトの大きな膨潤の略図
（Posiva, 2013 の図を和訳）

膨潤圧は、粘土の膨潤潜在性を反映する。一般に、粘土の膨潤はモンモリロナイトの含有量、試料の密度、層間陽イオンの種類、浸透流動水の塩分濃度（またはイオン強度）及び飽和度に左右される。膨潤圧は、密度と水力学的伝導率に直接関係する。試料の密度の関数として、緩衝材のベントナイト（MX-80 Na-ベントナイト及び Milos Ca-ベントナイト、IBECO RWC & Deponit CA-N）について計測された膨潤圧を付図 1-4 に示す。



付図 1-4　乾燥密度と地下水の塩分濃度（TDS）の関数として計測された MX-80 の膨潤圧
“CT”は（Karnland, O., Olsson, S. & Nilsson, U. Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. TR-06-30. 2006）が発表した結果を示す。
（Posiva, 2013 の図を和訳）

緩衝材と埋め戻し材の均質化については、数値モデルと複数の相補的ラボ試験に基づき、「緩衝材と埋め戻し材の両方において、ペレットと空気が充満した空隙内の十分な均質化が起きるので、限定的な局所的質量損失があるケースであっても、性能目標は満足されると結論づけることができる。」と評価している。SKB の腐食に関する報告書（SKB. CORROSION CALCULATIONS REPORT FOR THE SAFETY ASSESSMENT SR-SITE. TR-10-66. 2010.）によると、（Åkesson, M., Börgesson, L., & Kristensson, O. SR-Site Data report. THM modelling of buffer, backfill and other system components. TR-10-44. 2010）で使われた数値モデルの適合性は、Canister Retrieval Tests（CRT）のモデル化と、モデル化による結果を試験での計測値と比較することによって検証された。（Olivella, S., Toprak, E., Mokni, N. & Pintado, X. Thermo-hydro-mechanical modelling of buffer. POSIVA 2012-47. 2013）と（Pintado, X., Hassan, Md. M., Martikainen, J. Thermo-hydro-mechanical tests of buffer material. POSIVA 2012-49. 2013）によるラボ試験の結果と予備的モデル化の結果は、浸食ないし設置時のミスによる質量損失を考慮していない「正常ケース」で緩衝材の均質化が起きた、との結論を支持している。

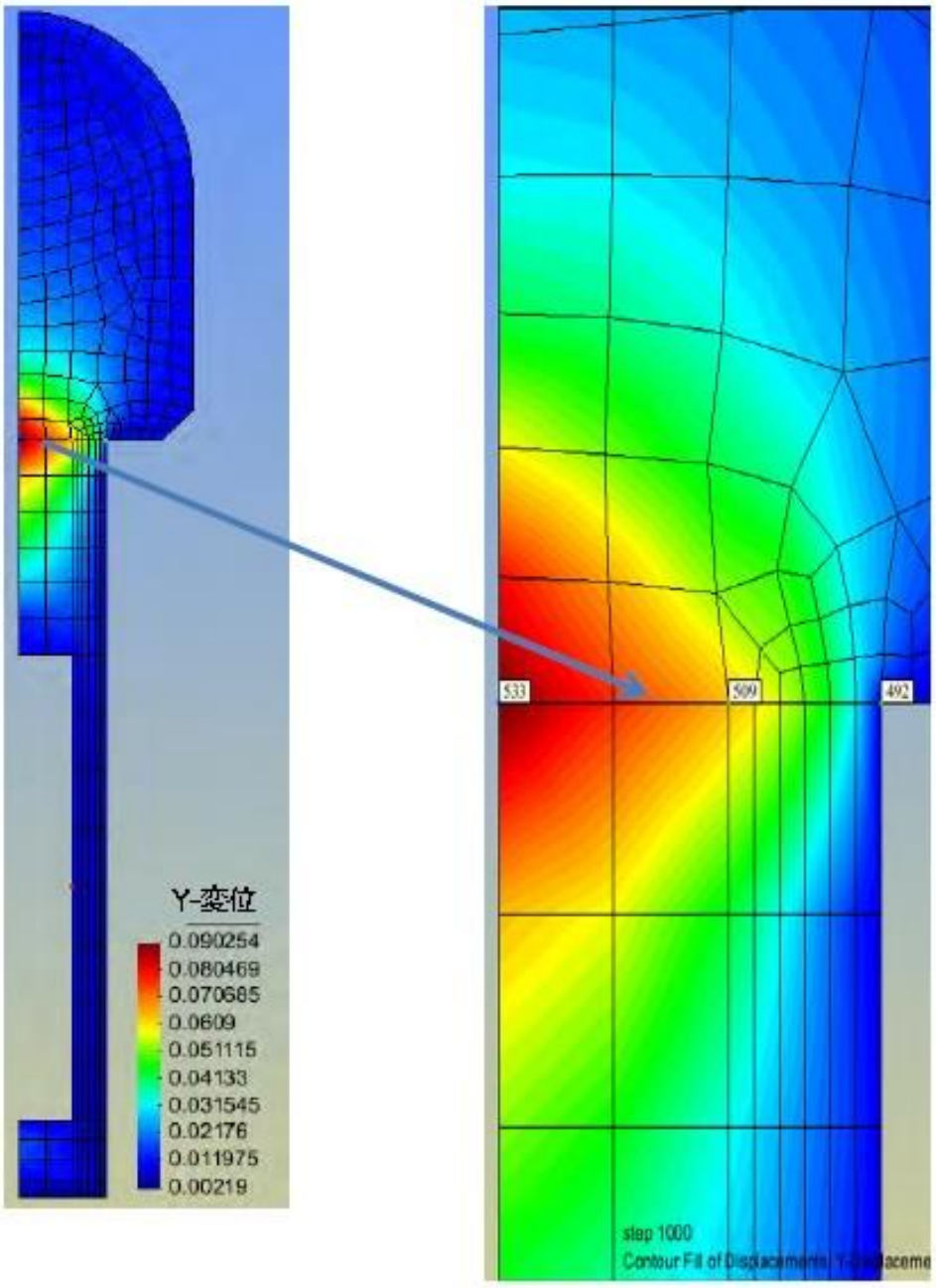
（10）　（飽和した）緩衝材ベントナイトの、埋め戻し材への膨潤（閉鎖後１万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における緩衝材ベントナイトの、埋め戻し材への膨潤の記載箇所は、“6.4.5 Swelling of saturated buffer bentonite into saturated backfill”である。

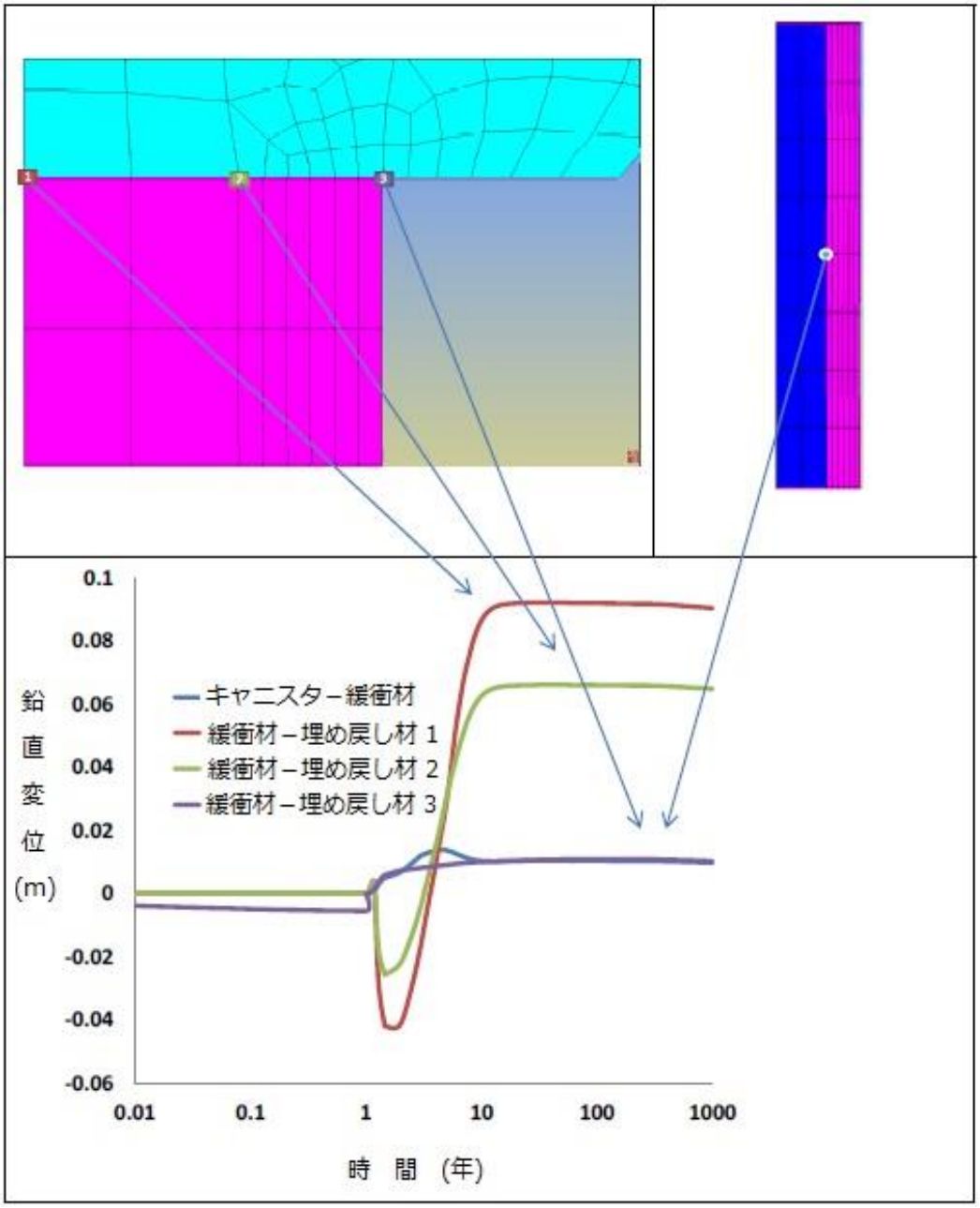
緩衝材ベントナイトの、埋め戻し材への膨潤作用は、CODE_BRIGHT による数値モデリングによって評価された（ただし、部分的飽和状態における材料パラメータの情報がないため、モデリングの結果は、緩衝材と埋め戻し材がいずれも完全に飽和した状態にのみ該当するものである。加えて、使われた材料パラメータのいくつかは、更なるラボ試験による確認が必要である。したがってモデリングの結果は、予備的なものととらえられるべきである。）。

モデリングは軸対象条件で行われた。モデルに投入する緩衝材と埋め戻し材のパラメータについて、性能評価報告書（Posiva, 2013）には具体的な記述はないが、（Kristensson, O. & Åkesson, M. Mechanical modeling of MX-80 – Quick tools for BBM parameter analysis. Physics and Chemistry of the Earth. Vol. 33. 2008）によると、緩衝材のパラメータは圧密試験から算定され、使われたパラメータは、MX-80 ベントナイトのものと比較された。（Sandén, T. & Börgesson, L. Deep repository - engineered barrier system. Wetting and homogenization processes in backfill materials. Laboratory tests for evaluating modeling parameters. R-06-72. 2008）によると、いくつかの圧密試験から、埋め戻し材のパラメータも確認された。

モデリングの結果は、時間の変化に対して、キャニスタと緩衝材の間（1 か所）及び緩衝材と埋め戻し材の間（3 か所）のそれぞれの鉛直変位（Vertical Displacement、単位：m）によって示している（付図 1-5、付図 1-6）。したがって評価パラメータは、「キャニスタと緩衝材の間及び緩衝材と埋め戻し材の間のそれぞれの鉛直変位」である。



付図 1-5　キャニスタと緩衝材の間及び緩衝材と埋め戻し材の間のそれぞれの鉛直変位
左図：緩衝材の膨潤圧が埋め戻し材の膨潤圧より 10 倍高いと想定した場合の配置全体の鉛直変位を示したもの。右図：緩衝材と埋め戻し材の接触部（矢印で示した部分）での鉛直変位を示したもの。
（Posiva, 2013 の図を和訳）



付図 1-6　任意の位置における鉛直変位の変遷
（Posiva, 2013 の図を和訳）

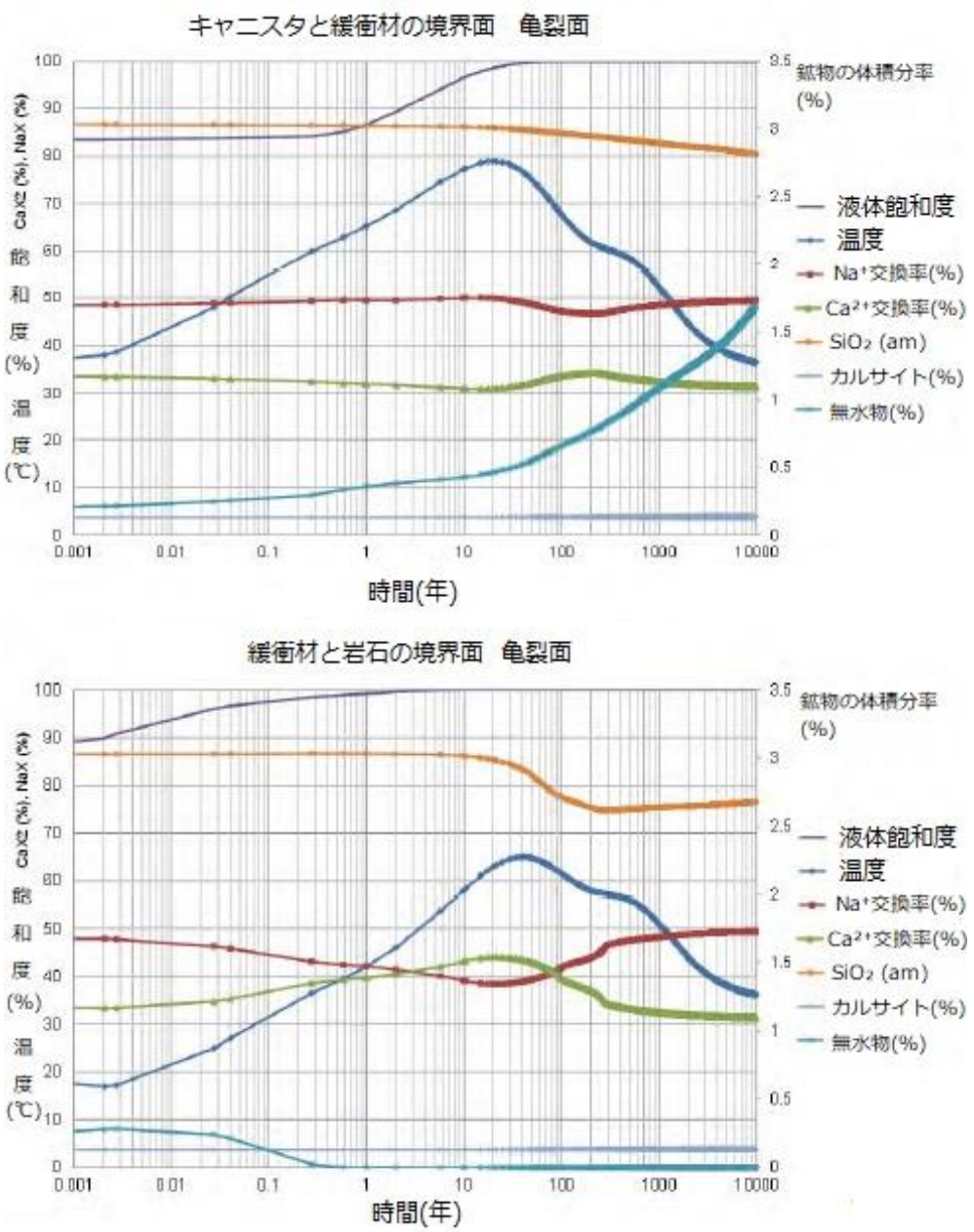
（11）　予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷の記載箇所は、“6.5.2 Geochemical evolution of buffer at the expected range of elevated temperatures”である。

熱段階（thermal stage）における、初期の不飽和緩衝材間隙水（unsaturated buffer porewater）の地球化学的進化は、”TOUGHREACT（The integral finite difference code）“を使用し、（Idiart, A., Maia, F. & Arcos, D. Geochemical evaluation of the near-field for future HLW repository at Olkiluoto. Working Report. 2013）による熱水地球化学モデリング（thermo-hydro-geochemical modelling）によって評価された。なお、TOUGHREACT のユーザーズガイドは、（Xu, T.,

Sonnenthal, E., Spycher, N. & Pruess, K. TOUGHREACT User's Guide: A simulation program for non-isothermal multiphase reactive transport in variably saturated geologic media, Version 1.2.1. 2008）である。

いくつかの選択したパラメータについて、緩衝材と埋め戻し材の接合部分、及び埋め戻し材と岩石の接合部分で得られたシミュレーション結果の例が示されている（付図 1-7）。選択されているパラメータは、温度、Na^+交換率（体積分率、%）、Ca^{2+}交換率、SiO_2形成、方解石、無水物である。したがって、評価パラメータは「温度（℃）、Na^+交換率（体積分率、%）、Ca^{2+}交換率（体積分率、%）、SiO_2形成（am）、方解石（%）、無水物（%）など」である。



付図 1-7　THC（ Thermal, Hydrological, Chemical）モデルから抜粋された、いくつかの間隙水パラメータの変化を示す結果
上図はキャニスタと緩衝材の境界での結果、下図は緩衝材と岩石の境界での結果。
（Posiva, 2013 の図を和訳）

（12） モンモリロナイトの変質（閉鎖後１万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるモンモリロナイトの変質の記載箇所は、“6.5.3 Montmorillonite transformation”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、モンモリロナイトの変質を評価するにあたり、スメクタイト（膨潤性の粘土鉱物の総称。モンモリロナイトはスメクタイトの一種である）のイライト化反応に着目し、複数のモデルを用いて、時間の経過に対して緩衝材中のスメクタイトがイライトへ転換する割合を推定している。したがって、評価パラメータは「衝材中のスメクタイトがイライトへ転換する割合」ある。モデルに投入しているパラメータは、カリウムイオン濃度（mg/L）、時間（年）、温度（℃）である。

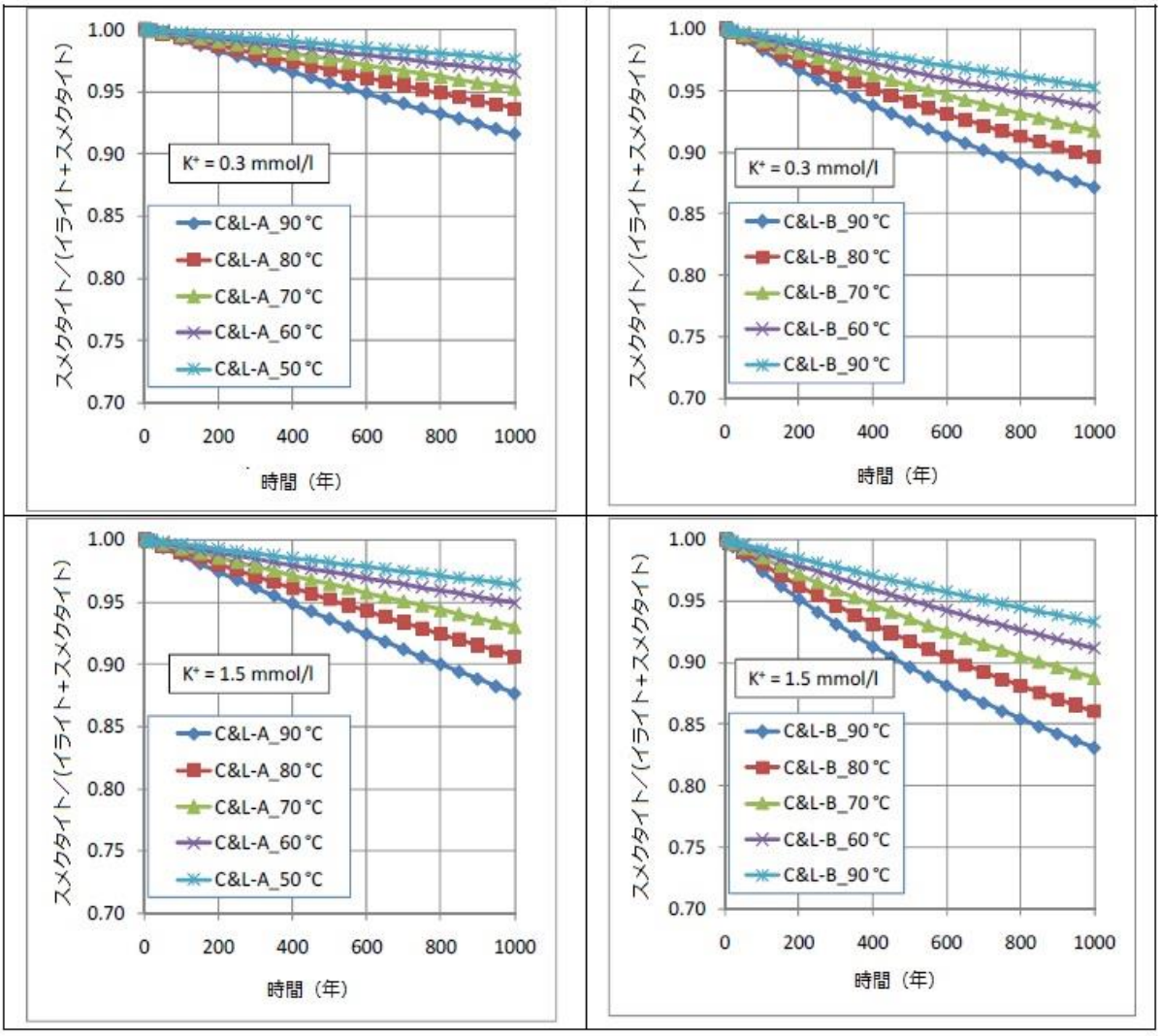
ベントナイトの主な成分であるモンモリロナイトは、緩衝材の有利な物性をもたらす。上昇した温度でモンモリロナイトは不安定化し変質する可能性がある。例えば（Karnland, O. & Birgersson, M. Montmorillonite stability with special respect to KBS-3 conditions. TR-06-11. 2006）や（SKB. Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SRSite. TR-10-47. 2010）でまとめられているように、モンモリロナイトの変質には、可能性としていくつかの化学変化がある。今回の評価では、特にイライト化に焦点を当てて議論している。

イライト化は、以下の反応で模式的に説明できる。

モンモリロナイト ＋ K^+ （＋ Al^{3+}） → イライト ＋ SiO_2 ＋ （Ca^{2+}, Na^+）

イライト化プロセスは動力学的に制御され、温度に強く依存する。イライト化プロセスには主として 2 つの側面、(1) 層電荷の増加、及び (2) カリウムの可用性、が関与している。また、ケイ酸、アルミニウム、交換性陽イオン、及び間隙水（porewater）中の H^+の活性にも影響を受ける。

複数のモデルのうちの一つの評価結果を付図 1-8 に示す。



付図 1-8　Experimental kinetic study of the smecite-to-illite transformation（Cuadros・Linares, 1996）の運動速度方程式の比較
左図がモデル A、右図がモデル B。温度 50℃から 90℃でのスメクタイトのイライト転換を、2 つの異なる K^+密度で評価した結果。
（Posiva, 2013 の図を和訳）

（13）　熱的ステージでのセメンテーション（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における熱的ステージでのセメンテーションの記載箇所は、“6.5.4 Cementation induced during the thermal stage”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、熱的ステージでのセメンテーションを評価するにあたり、随伴鉱物の溶解ー析出プロセスからの析出ケイ酸の量を反応輸送モデルで示し、モンモリロナイトの変質から形成される二酸化ケイ素（SiO_2）の量を計算で示して評価している。したがって評価パラメータは、「モンモリロナイトの変質から形成される二酸化ケイ素（SiO_2）の量」である。

熱的ステージでのセメンテーションは、次のような作用により、緩衝材の性能に影響する可能性がある：熱ステージ中に、緩衝材全体の温度勾配と高温によって、塩類とケイ酸塩類の再分布が引き起こされる→石膏/無水石膏、炭酸塩類、シリカなどの付属鉱物の溶解と再沈殿が発生（低

温の部分では、ケイ素（Si）の放出と二酸化ケイ素（SiO_2）の沈殿によってイライト化が起こる）→沈殿したシリカが空隙内に形成され、セメントはモンモリロナイトの薄片と結合して可塑性を失わせる可能性が出てくる→膨潤圧、水力学的伝導率といったバルク特性に影響を与える→緩衝材の性能に影響する可能性が出てくる。

（14） 飽和後の間隙水の化学反応及び陽イオン交換体の化学反応（閉鎖後１万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における飽和後の間隙水の化学反応及び陽イオン交換体の化学反応の記載箇所は、“6.5.5 Buffer porewater and cation exchanger chemistry after saturation”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、飽和後の間隙水の化学反応及び陽イオン交換体の化学反応を評価するにあたり、MX-80 ベントナイトの間隙水と交換体の組成を算出している。付表 1-14 は、これら間隙水のモデルの結果を示している。したがって評価パラメータは、この表に示された組成（$logP_{CO_2}$）、pH など）である。

間隙水の化学反応を規制する主な作用は、陽イオン交換、プロトン化／脱プロトン化表面反応、並びに随伴の石こうと方解石の溶解である。「より淡水性の強い」地下水内では P_{CO_2} 及び Ca/Na 比、Mg/Na 比がより高いので、Na^+の、Ca^{2+}及び Mg^{2+}との交換並びに方解石の溶解が、以下の反応で発生する。

$$2NaX + CaCO_3（固体） + CO_2（気体） + H_2O \rightarrow CaX_2 + 2Na^+ + 2HCO_3^-$$

付表 1-14　目標湿潤密度 2000kg/m^3 における、モデル化された緩衝材の間隙水の濃度
（特に記載がないものは単位：mmol/L）　Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto: Radionuclide solubility limits and migration parameters for the canister and the buffer（Wersin ほか, 2013）によると、「塩」水と「汽」水は温暖期を表しており、「希薄な炭酸塩に富んだ水」、「高アルカリ水」、及び「融氷水」は結合水の組成を表している
（Posiva, 2013 の表を和訳）

		塩水	汽水	希薄で炭酸塩に富んだ水	高アルカリ水	融氷水
対応する地下水		KR20/465/1	KR6/135/8	KR4/81/1	セメントによる影響	Grimsel 水
遊離間隙水	$\log P_{CO_2}$	-3.20	-2.70	-2.40	-8.28	-5.48
	pH	7.80	7.23	7.69	10.0	9.62
	Eh（mV）	-245	-207	-238	-407	-201
	アルカリ性（meq/L）	0.83	0.75	3.57	1.89	0.51
	イオン強度（meq/L）	512.6	271.2	30.1	215.8	2.01
	Na	499.6	150.8	22.1	116.0	1.54
	K	2.6	0.9	0.5	0.28	0.010
	Mg	10.5	14.4	1.2	2.63	0.0012
	Ca	11.0	30.7	1.1	33.40	0.11
	Cl	339.8	222.3	19.6	182.46	0.31
	SO_4^{2-}	101.9	9.4	1.9	0.21	0.12
	S^{2-}	0.01	0.0012	0.00058	0.0057	-
	C（4）	0.94	0.90	3.72	0.010	0.28
	Sr	0.19	0.20	0.012	0.16	0.0039
	Si	0.18	0.17	0.18	1.88	0.31
	Mn	0.008	0.041	0.006	0.006	9.51E-06
	Fe	0.003	0.011	0.013	0.0023	5.42E-06
	F	0.081	0.032	0.064	0.051	0.71
	Br	0.99	0.33	0.036	0.56	-
	B	0.19	0.11	0.053	0.12	-
交換体	CEC（meq/L）	2873	2873	2873	2873	2873
	NaX（%）	80.1	34.7	18.1	-	4.4
	CaX_2（%）	13.5	46.9	54.6	-	95.1
	MgX_2（%）	4.7	17.6	25.8	-	0.4
	KX（%）	1.7	0.8	1.5	-	0.1
辺縁サイト（meq/L）	≡SOH	24.91	49.74	57.00	-	43.40
	$\equiv SOH^{2+}$	0.40	2.39	3.77	-	1.60
	$\equiv SO^-$	78.48	51.89	43.24	-	59.00

（15） 微生物活動（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における微生物活動の記載箇所は、“6.5.6 Microbial activity in the buffer”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、微生物活動を評価するにあたり、代替緩衝材 4 種類中の好気性従属栄養性細菌（CHAB）、硫酸塩還元細菌（SRB）、独立栄養性酢酸生成細菌（AA）、及び鉄還元細菌（IRB）の定量解析を行っている。したがって評価パラメータは、「代替緩衝材中の好気性従属栄養性細菌、硫酸塩還元細菌、独立栄養性酢酸生成細菌、及び鉄還元細菌の量」である。

進行中の研究及び公開されている研究のデータが提案している、微生物活動の重要なパラメータは、以下 4 点である。

- 活性化した微生物の生命活動に必要な遊離水（free water）の量
  （この遊離水の量は、水の活性と水分量（moisture content）の計測値に現れる）
- 存在している微生物の生存能力に影響する温度
- 緩衝材の膨潤圧及び空隙のサイズ
- 栄養物の少なさ

（Eng, A., Nilsson, U. & Svensson, D. Äspö hard rock laboratory, Alternative buffer material, Installation report. IPR-07-15.2007）によると、市販されているベントナイト内の微生物の存在については、Äspö HRL において、いわゆる代替緩衝材実験（Alternative Buffer Experiment = ABM）で調査が行われている。異なる粘土の解析によって、実に多様で多数の微生物の存在を示しており（付表 1-15）、ほとんどの種類の粘土内に嫌気性の硫酸塩還元細菌と鉄還元細菌（SRB、IRB）、独立栄養の酢酸生成細菌及び好気性細菌などがあることも示されている。（Masurat, P. & Pedersen, K. Microbial sulphide production in compacted Wyoming bentonite MX-80 under in situ conditions relevant to a repository for high-level radioactive. ISBN 1-55899-752-0. 2010）によると、wasteMX-80 内の SRB の存在は、以前から培養によって示されている。また、DNA の分子解析により、在来 SRB の存在が 4 種類すべての市販の粘土内に確認されている。

付表 1-15 試験を行った 4 種の代替緩衝材内の培養可能な好気性従属栄養性細菌（CHAB）、硫酸塩還元細菌（SRB）、独立栄養性酢酸生成細菌（AA）、及び鉄還元細菌（IRB）の定量解析

（Posiva, 2013 の表を和訳）

材料	CHAB（/g）	MPN SRB（/g）	MPN AA（/g）	MPN IRB（/g）
MILOS/Deponit CA-N	1,000 ± 570[a]	9（4−44）[b]	<10	77（32−207）[b]
Friedland	1,750 ± 880	68（26−198）	35（13−106）[b]	6,900（2590−22800）
Ibeco Seal M-90	5,830 ± 4860	61（23−178）	63（24−183）	7,920（2970−26200）
MX-80	6,600 ± 1620	<10	9（5−46）	263（105−895）

[a]±標準偏差、[b]上下 95%信頼区間

（16） 硫化物の流入（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における硫化物の流入の記載箇所は、“6.5.7 Sulphide fluxes to the buffer”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、緩衝材への硫化物の流入について、分析収縮コアモデル

と一次元線形反応輸送モデル（an analytical shrinking core model and a linear 1D reactive transport model）を使用した境界評価（bounding assessment）を行っている。モデルに投入するパラメータについては具体的な記述がないが、硫化物の拡散流量は、硫酸塩の還元率、Fe（II）の可用性、硫化鉄沈殿の有効性だけでなく、処分坑道周辺の水力学的条件にも左右されるとしている。したがって、硫化物の流入を評価するパラメータは「硫化物の拡散流量」と考えられるが、分析収縮コアモデルと一次元線形反応輸送モデルに具体的に投入するパラメータについては詳細不明である。

硫化物は、空隙率がより大きい領域内（例：緩衝材と損傷領域の境界面、または緩衝材と横断亀裂の境界面など）で、硫酸塩還元菌（sulphate-reducing bacteria：SRB）の活動を介して硫酸塩から生成され得る。（Wersin, P., Pitkänen, P., Snellman, M., Román-Ross, G., Smith, P., Filby, A., Kiczka, M. Sulphide fluxes in the spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Working Report (to be published). 2013）によると、そのようなケースは、緩衝材由来の硫酸塩について、岩石/緩衝材境界面でゼロ濃度境界が想定される分析収縮コアモデルと一次元線形反応輸送モデル（an analytical shrinking core model and a linear 1D reactive transport model）の両方を使った境界評価（bounding assessment）において考慮されている。

両モデルとも、緩衝材と隣接の「SRB 領域」との硫酸塩濃度の差が大きいことによって、緩衝材中の石こうブルー（gypsum pool）の損耗が比較的急速に、数百年の範囲内で起きると予測している。発生した硫化物は緩衝材中に拡散し、キャニスタの腐食に影響を与える潜在的可能性がある。

（17） セメント浸出液の影響（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるセメント浸出液の影響の記載箇所は、“6.5.8 Effect of cementitious leachates on the buffer”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、緩衝材と埋め戻し材に対するセメント浸出液の影響を、緩衝材または埋め戻し材と接触することになる OH^-イオンの量、または pH をパラメータとして評価している。

閉鎖後の施設内には、グラウト、ロックボルトのグラウト、プラグのコンクリートのような、地下水の pH を高めて緩衝材と埋め戻し材性能に影響を与える潜在的可能性を有するセメント系物質が残留する。緩衝材と直接に接触するセメントはないであろうことから、セメント浸出液の反応のプロセスは、セメント系物質からの OH^-の浸出率及び亀裂ネットワーク（fracture network）内での地下水との混合と拡散移行（dispersive migration）によって弱まっていくと考えられている。

1.2.3. 埋め戻し材

埋め戻し材における性能評価項目を、評価期間及び THMCR ごとに整理した。整理結果を付表 1-16 及び付表 1-17 に示す。

付表 1-16 「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素を THMCR にて分類）

処分場構成要素	性能評価項目	
	THMCR 分類	項目
埋め戻し材	水理・力学	パイピング／エロージョン
	力学・化学	処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化
	化学	酸素の枯渇及び pH 変化
		コロイド生成
		セメント系浸出液の影響
		シリカゾルの影響

付表 1-17 「閉鎖後 1 万年まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素を THMCR にて分類）

処分場構成要素	性能評価項目	
	THMCR 分類	項目
埋め戻し材	水理・力学	飽和プロセス
		膨潤及び均質化
		緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤
	化学	飽和後の間隙水の化学反応
		硫化物の生成と微生物活動
		セメントー粘土相互作用
		鉄ー粘土相互作用

以下に性能評価項目ごとの評価方法を示す。

（1） パイピング／エロージョン（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるパイピング／エロージョンの記載箇所は、“5.4.2 Piping and erosion”である。

評価パラメータは、緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(2) パイピング／エロージョン（掘削及び操業期間から閉鎖まで)」の項を参照。

（2） 処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化の記載箇所は、“5.6.3 Evolution of the concrete components in the closure plugs and the deposition tunnel plug during the operational period”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、掘削及び操業期間から閉鎖までの処分坑道プラグ及び閉鎖プラグにおけるコンクリート構造物の変化について、コンクリートの耐久性を予測することにより評価している。したがって評価パラメータは「コンクリートの耐久性」である。コンクリートの耐久性は、「設置後最初の 100～200 年間に HZ20 層より上で使用される標準コンクリートの耐久性」と、「設置後最初の 100～200 年間に HZ20 層より下で使用される低 pH 自己圧密コンクリートの耐久性」の２つに分けられて評価されている（HZ＝Hydrogeological Zones の意。オル

キルオトでは、主な断層帯に HZ20A、HZ20B などの名称を付けている。HZ20 の詳細な位置は、性能評価報告書（Posiva, 2013）の 3 章、図 3-24 及び図 3-25 を参照。）。

「設置後最初の 100～200 年間に HZ20 層より上で使用される標準コンクリートの耐久性」については、設計寿命が 50 年のコンクリート混合物のガイドライン設計から、設計寿命が 100～200 年の耐久性のある標準コンクリートを計算により設計している。（Finnish Concrete Association. Concrete Code 2004 (in Finnish: by 50, Betoninormit 2004). ISBN 952-5075-60-5, ISSN 0358-5239. 2004）によると、フィンランドの場合、設計寿命が 50 年のコンクリート混合物は「コード 50」に示されるガイドラインに従って設計することになっている。このガイドライン設計と、寿命は構造物厚さの二乗に正比例するという事実から、構造物の厚さを増すことによって、処分場の状態における設計寿命が 100～200 年の標準コンクリートを設計することは可能であるとしている。

「設置後最初の 100～200 年間に HZ20 層より下で使用される低 pH 自己圧密コンクリートの耐久性」については、このコンクリートが耐久性コンクリートのための通常の一般設計の範疇から外れているため、（Vogt, C., Lagerblad, B., Wallin, K., Baldy, F. & Jonasson, J.-E. Low pH selfcompacting concrete for deposition tunnel plugs. R-09-07. 2009）により、コンクリートの強度試験が実施されている。

（3） 酸素の枯渇及び pH 変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における酸素の枯渇及び pH 変化の記載箇所は、“5.5.2 Oxygen depletion and changes in pH”である。

評価パラメータは、緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「1.2.2（3）酸素の枯渇及び pH 変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで)」の項を参照。

（4） コロイド生成（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるコロイド生成の記載箇所は、“5.5.3 Formation of colloids”である。

評価パラメータは、緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(4）コロイド生成（掘削及び操業期間から閉鎖まで)」の項を参照。

（5） セメント系浸出液の影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるセメント系浸出液の影響の記載箇所は、“5.5.4 Effect of cementitious leachates on the near field”である。

評価パラメータは、緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「・

セメント系浸出液の影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで)」の項を参照。

（6） シリカゾルの影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるシリカゾルの影響の記載箇所は、“5.5.5 Leaching of other sealing materials - Silica sol”である。

評価パラメータは、緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(6）シリカゾルの影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで)」の項を参照。

（7） 飽和プロセス（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における飽和プロセスの記載箇所は、“6.4.2 Saturation process”である。

評価パラメータは、緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(8) 飽和プロセス（閉鎖後 1 万年まで)」の項を参照。

(8) 膨潤及び均質化（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における膨潤及び均質化の記載箇所は、“6.4.3 Swelling and homogenisation”及び“6.4.4 Homogenisation of buffer and backfill”である。

評価パラメータは、緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(9) 膨潤及び均質化（閉鎖後 1 万年まで)」の項を参照。

(9) 緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤の記載箇所は、“6.4.5 Swelling of saturated buffer bentonite into saturated backfill”である。

評価パラメータは、緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(10)（飽和した）緩衝材ベントナイトの、埋め戻し材への膨潤（閉鎖後 1 万年まで)」の項を参照。

(10) 飽和後の間隙水の化学反応（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における飽和後の間隙水の化学反応の記載箇所は、“6.6.2 Backfill porewater chemistry after saturation”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、閉鎖後 1 万年までの飽和後の間隙水の化学反応を、緩衝材の間隙水と同様のモデリングにより評価している。したがって評価パラメータは、緩衝材の間隙水の化学反応の評価パラメータと同様である（「(14) 飽和後の間隙水の化学反応及び陽イオン交換体の化学反応（閉鎖後 1 万年まで)」を参照)。

モデリングの際に基準となる埋め戻し材の組成については、以下のとおりである。

埋め戻し材間隙水と緩衝材の間隙水の鉱物学的特性は同様であるので、飽和後、埋め戻し材間隙水は緩衝材の間隙水と同様の拡散プロセス（diffusive process）と地球化学的プロセスを経る。Olkiluoto における使用済核燃料の処分のためのセーフティケース報告書（Wersin, P., Kiczka, M. & Rosch, D. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto: Radionuclide solubility limits and migration parameters for the backfill. POSIVA 2012-39. 2013）では、緩衝材の間隙水のものと同じモデリング概念が埋め戻し材間隙水の派生物に採用されているが、(埋め戻し材内の異なる組成物質の体積量を考慮に入れた、基準埋め戻し材平均組成に基づき）異なる反応性随伴鉱物の一覧（inventory）が考慮されている。塩水及び汽水の地下水と接触する基準埋め戻し材組成について選択された結果を付表 1-18 に示す。

付表 1-18　埋め戻し材間隙水の組成

（Posiva, 2013 の表を和訳）

		塩水	汽水	炭酸塩を多く含む希薄水	融氷水	高アルカリ水
対応する地下水		KR20/465/1	KR6/135/8	KR4/81/1	Grimsel 融氷水	セメントによる影響
フリー間隙水	$\log P_{CO_2}$	-3.47	-2.70	-2.40	-5.48	-8.28
	pH	7.60	7.21	7.28	8.75	10.00
	Eh（mV）	-234	-201	-201	-297	-394
	アルカリ度（meq/L）	0.23	0.73	1.53	0.08	3.40
	イオン強度（meq/L）	362.06	245.08	86.44	46.58	350.52
	Na	204.43	110.24	29.36	5.93	252.94
	K	3.27	0.67	0.62	0.04	0.38
	Mg	26.52	16.04	6.77	0.06	5.09
	Ca	36.45	35.35	13.48	14.50	37.64
	Cl	288.17	176.01	12.63	0.22	288.05
	SO_4^{2-}	22.27	18.50	28.15	17.28	20.64
	S^{2-} tot	0.0056	0.0006	0.0003	-	0.0056
	CO_3 tot	0.364	0.865	1.686	0.044	0.014
	Sr	0.170	0.167	0.025	0.106	0.256
	Si	0.175	0.173	0.179	0.204	3.323
	Mn	0.007	0.033	0.005	0.000	0.010
	Fe	0.020	0.018	0.007	0.008	0.042
	F	0.069	0.025	0.040	0.470	0.080
	Br	0.868	0.265	0.023	0.000	0.886
	B	0.164	0.089	0.038	0.000	0.188
交換体	CEC（meq/L）	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12
	NaX（eq.%）	50.7	35.1	17.6	4.3	64.0
	CaX_2（eq.%）	29.4	46.8	55.7	95.3	32.2
	MgX_2（eq.%）	16.7	17.2	25.2	0.4	3.4
	KX（eq.%）	3.2	0.8	1.5	0.1	0.4
辺縁サイト（meq/L）	≡SOH	26.2	39.9	44.4	0.2	17.7
	$\equiv SOH^{2+}$	0.6	1.9	2.8	0.0	0.2
	$\equiv SO^-$	56.1	41.1	35.7	81.9	65.0

（11） 硫化物の生成と微生物活動（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における硫化物の生成と微生物活動の記載箇所は、“6.6.3 Production of sulphide and microbial activity in backfill”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、閉鎖後 1 万年までの硫化物の生成と微生物活動を、埋め戻し材と緩衝材のインターフェイスにおける溶解硫化物の最大濃度を推定することでキャニスタへの硫化物流束を評価する「バウンディング解析」に基づく硫化物生成速度の推定により評価している。したがって評価パラメータは「硫化物の生成速度」である。

埋め戻し材から発するキャニスタへの硫化物の流束の評価については、別の方法として、埋め戻し材/緩衝材のインターフェイスにおける溶解硫化物の最大濃度を熱力学計算によって推定することでも評価している。自然システムの中での観察では、鉄と硫化鉄の析出によって硫化物が固定化されるという確かな証拠がある。埋め戻し材内の最大硫化物濃度の評価が、熱力学計算によって行われた。計算結果は、（Wersin, P., Pitkänen, P., Snellman, M., Román-Ross, G., Smith, P., Filby, A., Kiczka, M. Sulphide fluxes in the spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Working Report. 2013）におけるFe（II）の輸送も考慮したナチュラルアナログのデータと比較された。

（12） セメント－粘土相互作用（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）におけるセメント－粘土相互作用の記載箇所は、“6.6.4 Cement-clay interactions in the backfill”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、閉鎖後 1 万年までの埋め戻し材のセメント－粘土相互作用については、埋め戻し材の上の処分坑道プラグに使われる低 pH のコンクリートの劣化が与える影響を、反応輸送シミュレーションにより予測して評価している。したがって評価パラメータは「埋め戻し材の上の処分坑道プラグに使われる低 pH のコンクリートの劣化が与える影響」である。

（Grandia, F., Galíndez, J.-M., Molinero, J. & Arcos, D. Evaluation of low-pH cement degradation in tunnel plugs and bottom plate systems in the frame of SR-Site.SKB. TR-10-62. 2010）によると、SKB が行った反応輸送のシミュレーションでは、CSH 相の溶解によって高 pH（pH>11）のブルームが発生し、それが処分坑道の埋め戻しの中に約 6 cm 入り込むと予測した。また、埋め戻し材とコンクリートのインターフェイス内での主な地球化学的プロセスは、エトリンガイトの析出に起因する空隙率の損失だと予測した。このことは、プラグのコンクリートの劣化が埋め戻しに与える影響が限定的であり、坑道にも使われる可能性のあるロックボルトのグラウトについても同様であることを示唆している。

（13） 鉄－粘土相互作用（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における鉄－粘土相互作用の記載箇所は、“6.6.5 Iron-clay interactions in the backfill”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、閉鎖後 1 万年までの埋め戻し材の鉄－粘土相互作用について、室内実験の結果をまとめた複数の論文を引用し、相互作用の影響を調査している。論文では、相互作用の詳細はまだ明らかになっていないとされており、相互作用の影響は可能性として示されているにとどまる。したがって評価パラメータは「鉄－粘土相互作用の影響」と考えられるにとどまる。

1.2.4. 閉鎖材

性能評価項目

閉鎖材における性能評価項目を、評価期間及び THMCR ごとに整理した。整理結果を付表 1-19 及び付表 1-20 に示す。

付表 1-19 「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素、THMCR にて分類）

処分場	性能評価項目	
構成要素	THMCR 分類	項目
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化
	力学・化学	閉鎖プラグにおけるコンクリート構造物の変化

付表 1-20 「閉鎖後 1 万年まで」の性能評価項目一覧
（処分場構成要素、THMCR にて分類）

処分場	性能評価項目	
構成要素	THMCR 分類	項目
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化
	力学・化学	閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化

以下に性能評価項目ごとの評価方法を示す。

（1） 閉鎖材の変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における閉鎖材の変化の記載箇所は、“5.6.2 Evolution of closure backfill during operational period”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、掘削及び操業期間の閉鎖材の変化については、処分坑道内に既に設置された埋め戻し材の化学的変遷と同様になると考えている。掘削及び操業の期間中は、水力学的及び力学的状態の比較的ゆっくりした復旧のために、地下水と閉鎖要素との顕著な化学的相互作用は予測されないとし、この段階において、品質管理策が厳密に遵守されていれば、閉鎖埋め戻し材の性能に大きな不確実性は存在しないとしている。

評価パラメータとしての明確な記述はないが、地下水と閉鎖要素との顕著な化学的相互作用があるかどうかを予測して、性能評価を行っているといえる。

（2） 閉鎖プラグにおけるコンクリート構造物の変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における閉鎖プラグにおけるコンクリート構造物の変化の記載箇所は、“5.6.3 Evolution of the concrete components in the closure plugs and the deposition tunnel plug during the operational period”である。

埋め戻し材の性能評価パラメータと同じである。「(2) 処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで)」の項を参照。

（3） 閉鎖材の変化（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における閉鎖材の変化の記載箇所は、“6.7.2 Evolution of the closure backfill material”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、閉鎖後 1 万年までの閉鎖材の変化は、（Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Appleyard, P., Baxter, S., Roberts, D. & Simpson, T. Hydrogeological modelling for assessment of radionuclide release scenarios for the repository system 2012. Working report 2012-42. 2013）によるシミュレーションで、処分坑道と閉鎖埋め戻し材の性能低下の影響を予測することにより評価されている。したがって評価パラメータは「処分坑道と閉鎖埋め戻し材の性能低下の影響」である。

シミュレーションには、坑道の水力学的伝導率（hydraulic conductivity）が基準想定より高いいくつかのケースが含まれた。これらのモデリングケースには、すべての坑道の導水性が 10 倍高いケース及び処分坑道に基準想定値を使ったケースが含まれているが、その他の坑道の水力学的伝導性は 100 倍高いものであった。緩衝材の規準水力学伝導率は 10^{-12}m/s で、処分坑道内の埋め戻し材の規準水力学伝導率は 10^{-10}m/s であった。その他の坑道の埋め戻し材については、水力学的伝導率は深さにより、また処分場内の場所により異なる埋め戻し材料によって、様々であった。以下の値の水力学的伝導率が使われた。

- 地表から深さ約 200m まで：10^{-7} m/s
- 深さ 200m から HZ20（ちょうど深さ約 300m）まで：10^{-8} m/s
- HZ20 から処分場深度まで、及び HZ20 系より下方にある処分場のアクセス坑道内と立坑内：10^{-9} m/s

（4） 閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化（閉鎖後 1 万年まで）

性能評価報告書（Posiva, 2013）における閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化の記載箇所は、“6.7.3 Evolution of the closure plugs and the deposition tunnel plugs”である。

性能評価報告書（Posiva, 2013）では、閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化については、低レベル及び中レベル廃棄物処分場のコンクリートの耐久性を、数値モデル（FEM）を使って予測することで評価している。したがって評価パラメータは「コンクリートの耐久性」である。

FEM には、低レベル及び中レベル廃棄物処分場のコンクリート劣化を評価するために、関連する複数の劣化メカニズムが盛り込まれた。検討されたメカニズムは、コンクリートの空気中での炭酸化、湿分の侵入、塩化物浸透、硫酸塩とマグネシウムの貫入に起因するコンクリートの腐食、セメントペーストの化合物の地下水への浸出である。

2. KBS-3H 概念における性能評価の実施内容

2.1. 性能評価項目の概要（キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材）

性能評価報告書（Posiva, 2018）の 2 章では、母岩及び人工バリア（キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、Compartment 及び坑道プラグ、閉鎖材）の性能目標を特定し、4 章では、これらの性能目標の達成に影響を与える可能性のあるプロセスについてまとめている。4 章でリスト化された FEP は、5 章～11 章の処分場システムの性能評価に組み込まれている。

5 章～11 章では、坑道が変化する時間枠を以下の 3 つに分けた上で、処分場システムの性能評価の内容が性能評価項目ごとにまとめられていることから、5～11 章の目次が、そのまま各評価期間の性能評価項目一覧と見なすことができる。

- 坑道（Drift）が飽和するまでの初期の変化（early evolution until saturation of the drift）
- 次の氷河期までの坑道の変化（evolution of the drift until the next glacial period）
- その後の氷河サイクル中の坑道の変化（evolution of the drift during subsequent glacial cycles）

本業務で対象としている「操業～再冠水に至る期間」に相当する評価期間は、「坑道（Drift）が飽和するまでの初期の変化（early evolution until saturation of the drift）」の期間である。この期間における処分場システムの性能評価について記載されている性能評価報告書（Posiva, 2018）の 5 章、7 章、10 章及び 11 章の目次を示した後、それらを弊社の判断により処分場構成要素及び THMCR にて分類・整理した。性能評価報告書（Posiva, 2018）の 5 章、7 章、10 章及び 11 章の該当部分の目次構成を付表 2-1 に、目次構成に基づき弊社の判断で THMCR ごとに整理した「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の性能評価項目一覧を付表 2-2 にそれぞれ示す。

付表 2-1　性能評価報告書（Posiva, 2018）の 5・7・10・11 章の該当部の目次構成

章	大項目	中項目 1	中項目 2	小項目
5	処分場システムの熱変遷	ニアフィールドとファーフィールドの温度変遷		
7	ドリフトの初期変遷（～飽和状態まで）	粘土成分の熱的、機械的及び水力学的変遷	水の吸収と膨潤（Water uptake and swelling）	
			機械的浸食（Mechanical erosion）	
		粘土成分の地球化学的変遷	予想される温度上昇範囲における緩衝材の地球化学的変遷	
			ベントナイトの変質	モンモリロナイトの変質 セメンテーションと不飽和条件の影響 セメント系浸出液の影響 スーパーコンテナチタンシェルの影響
			微生物活動	
			酸素欠乏と pH の変化（Oxygen depletion and changes in pH）	
			コロイドの形成	
		スーパーコンテナのシェルとプラグ	チタン合金の一般的な腐食の挙動	
			閉鎖直後、飽和前の予想腐食率（Expected corrosion rates immediately post-closure, before saturation）	
			プラグの機械的性能	クリープ変形 持続的な負荷亀裂
10	キャニスタの変遷	キャニスタの初期変遷	キャニスタの腐食	
			キャニスタへの熱的及び機械的影響	
			未臨界度（Subcriticality）	
11	閉鎖材の変遷	閉鎖材の初期変遷（～飽和状態まで）		
		閉鎖材の長期変遷	閉鎖プラグの変化	
			閉鎖埋め戻し材の化学的浸食	

付表 2-2　性能評価項目一覧
（処分場構成要素、THMCR にて分類）

処分場構成要素	性能評価項目		
	THMCR 分類	項目（KBS-3H）（Posiva, 2018）	（参考）項目（KBS-3V）（Posiva, 2013）
スーパーコンテナ	化学	チタン合金の一般的な腐食の挙動	（無し）
		閉鎖直後、飽和前の予想腐食率（Expected corrosion rates immediately post-closure, before saturation）	（無し）
	力学	プラグの機械的性能	（無し）
キャニスタ	力学	熱的及び機械的影響	力学的荷重
	化学	腐食	腐食
	放射線	未臨界	未臨界
緩衝材	熱	温度変化	温度変化
	水理・力学	機械的浸食（Mechanical erosion）	パイピング／エロージョン
		水の吸収と膨潤	飽和プロセス
			膨潤及び均質化
			緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤
	力学・化学		処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化
	化学	酸素欠乏と pH の変化（Oxygen depletion and changes in pH）	酸素の枯渇及び pH 変化
		コロイドの形成	コロイド生成
		セメント系浸出液の影響	セメント系浸出液の影響
			シリカゾルの影響
		予想される温度上昇範囲における緩衝材の地球化学的変遷	予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷
		モンモリロナイトの変質	モンモリロナイトの変質
		セメンテーションと不飽和条件の影響	熱的ステージでのセメンテーション
			飽和後の間隙水の化学反応及び陽イオン交換体の化学反応
		微生物活動	微生物活動
			硫化物の流入
		スーパーコンテナ チタンシェルの影響	（無し）
埋め戻し材	水理・力学	機械的浸食（Mechanical erosion）	パイピング／エロージョン
		水の吸収と膨潤	飽和プロセス
			膨潤及び均質化
			緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤
	力学・化学		処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化
	化学	酸素欠乏と pH の変化（Oxygen depletion and changes in pH）	酸素の枯渇及び pH 変化
		コロイドの形成	コロイド生成
		セメント系浸出液の影響	セメント系浸出液の影響
			シリカゾルの影響
			飽和後の間隙水の化学反応
		微生物活動	硫化物の生成と微生物活動
			セメント－粘土相互作用
			鉄－粘土相互作用
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化	閉鎖材の変化
	力学・化学	閉鎖プラグの変化	閉鎖プラグにおけるコンクリート構造物の変化

2.2. 評価内容及び評価に用いられるパラメータの概要（スーパーコンテナ、キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、閉鎖材）

地下構成要素ごとにそれぞれ設定されている性能評価項目について、性能評価報告書（Posiva, 2018）から評価内容及び評価に用いられているパラメータを読み取り、2.2.1～2.2.5 に記した。評価に用いられているパラメータは、さらに以下の 3 項目に細分化して整理した。

- 各性能評価項目が、何をパラメータ（評価要素）としているか
- パラメータはどのような方法で評価されているか
- 評価に使用されているデータは何か

評価に用いられているパラメータと地下構成要素の関係については、以下のことが分かった。

- 緩衝材と埋め戻し材で、性能評価項目が同じ場合は、評価に用いられるパラメータも同じであった。
- KBS-3H と KBS-3V で、同じ地下構成要素、同じ性能評価項目の場合は、評価に用いられるパラメータも同じであった。

2.2.1. スーパーコンテナ

スーパーコンテナの変化に影響を与え、最終的に緩衝材の性能目標の達成に影響を与える可能性のある項目は付表 5. 2-3 のとおりである。

付表 5. 2-3　スーパーコンテナの性能評価項目一覧

処分場構成要素	性能評価項目		
	THMCR 分類	項目（KBS-3H）（Posiva, 2018）	（参考）項目（KBS-3V）（Posiva, 2013）
スーパーコンテナ	化学	チタン合金の一般的な腐食の挙動	（無し）
		閉鎖直後、飽和前の予想腐食率（Expected corrosion rates immediately post-closure, before saturation）	（無し）
	力学	プラグの機械的性能	（無し）

以下に性能評価項目ごとの評価方法を示す。

（1）　チタン合金の一般的な腐食の挙動

性能評価報告書（Posiva, 2018）におけるチタン合金の一般的な腐食の挙動の記載箇所は、“7.4.1 General corrosion behaviour of the titanium alloy”である。

性能評価報告書（Posiva, 2018）では、チタン合金の一般的な腐食の挙動について評価するにあたり、文献調査により以下 2 か所のチタン合金の腐食速度を予測して評価している。したがって評価パラメータは「チタンの腐食速度」である。

- 中性に近い状態でベントナイトと接触するチタンの腐食速度
- 低 pH コンクリートと接触するチタンの腐食速度

一般的に、金属の腐食挙動を決定づけるパラメータは、pH、酸素濃度、放射線レベル、塩化物種や硫黄種など攻撃的な種の濃度（concentration of aggressive species, such as chloride, sulphur species）、微生物活動、温度などである。

（2）　閉鎖直後、飽和前の予想腐食率（Expected corrosion rates immediately post-closure,

before saturation）

性能評価報告書（Posiva, 2018）における閉鎖直後、飽和前の予想腐食率の記載箇所は、“7.4.2 Expected corrosion rates immediately post-closure, before saturation”である。

性能評価報告書（Posiva, 2018）では、閉鎖直後、飽和前の予想腐食率について評価するにあたり、チタン合金を含む 3 種類の部品（スーパーコンテナシェル、コンパートメントプラグ、ドリフトプラグ）の腐食速度を予測し、それぞれ 3 種類の部品の厚さと比較して評価している。腐食速度の予測には、局所的な微生物活動、鉱物の酸化、金属材料の腐食によって消費される酸素の残量を考慮している。腐食速度の予測方法については報告書に記載されていない。

（3） プラグ（ドリフトプラグとコンパートメントプラグ）の機械的性能

性能評価報告書（Posiva, 2018）におけるプラグ（ドリフトプラグとコンパートメントプラグ）の機械的性能の記載箇所は、“7.4.3 Mechanical performance of the plugs”である。

性能評価報告書（Posiva, 2018）では、ドリフトプラグとコンパートメントプラグの機械的性能について評価するにあたり、以下の 3 つの負荷について考慮している。

- 機械的な過負荷（mechanical overloading）
- クリープ変形（Creep deformation）
- 持続荷重割れ（Sustained load cracking）

機械的な過負荷については、ドリフトプラグとコンパートメントプラグが予測される負荷に耐えるように設計されているため、影響を受けないと結論づけられている。したがって、性能評価を実施しておらず、評価パラメータは無い。

金属のクリープ変形については、評価をするにはデータが不十分という結論である。通常、金属のクリープ変形は高温下・長期間にて起こる、時間に依存した現象である。金属のクリープ変形は、温度が融点の約 30%に近づいたときにのみ顕著になる。したがって、融点が 1,941K のチタンの場合、高温クリープのしきい値温度は約 647K（374℃）である。ドリフトプラグとコンパートメントプラグのクリープ現象は低温下のクリープ現象に分類されるため、性能評価報告書（Posiva, 2018）では低温下のクリープ現象について数点の文献をレビューしているが、いずれの文献も低温下のクリープ現象を評価するにはデータが不十分であると結論づけられている。したがって具体的な評価に至っていないが、現状での評価パラメータは「チタン合金のクリープ特性と考えられる。

持続荷重割れについては、文献調査によって、クリープ延性の低下が持続荷重割れに関係する可能性が高いことを示し、当該事業で使用されるチタン合金（グレード 12 チタン合金）のクリープ延性の高さから、初期評価では、これが短期的に問題になる可能性は比較的低いと予測評価している。したがって、現状での評価パラメータはクリープ延性の高さである。ただし、文献調査の結果は、クリープ延性の低下が関係する可能性を示唆しているのみであるため、性能評価に追加の実験作業が必要になると結論付けられている。なお、文献によると、持続荷重割れの現象そのものについては、以下 2 つの主要な理論がある。

- 粒子または α/β 境界での水素（または水素化物の形成）は、持続的な負荷の下で破壊を引き起こす可能性がある。
- 結晶学的配向の違いによる、隣接する粒子のクリープひずみ蓄積の不一致は、いくつかの粒界で大きな蓄積と破壊につながる可能性がある。このメカニズムは、水素の存在によっても影響を受ける可能性がある。

2.2.2. キャニスタ

キャニスタの変化に影響を与え、最終的に緩衝材の性能目標の達成に影響を与える可能性のある項目は付表 2-4 のとおりである。

付表 2-4　キャニスタの性能評価項目一覧

処分場構成要素	性能評価項目		
	THMCR 分類	項目（KBS-3H）（Posiva, 2018）	（参考）項目（KBS-3V）（Posiva, 2013）
キャニスタ	力学	熱的及び機械的影響	力学的荷重
	化学	腐食	腐食
	放射線	未臨界	未臨界

以下に性能評価項目ごとの評価方法を示す。

（1）　熱的及び力学的影響

性能評価報告書（Posiva, 2018）における熱的及び機械的影響の記載箇所は、“10.2.2 Thermal and mechanical impacts on canister”である。

性能評価報告書（Posiva, 2018）では、キャニスタへの熱的及び機械的影響について評価するにあたり、以下の 5 点の要因が個別または組み合わさることによって影響が生じるとしている。

- （キャニスタの）取り扱いと転送（L3-CAN-16 を参照）
- （ベントナイトの）不均一な膨潤（L3-CAN-9）
- 熱変形（L3-CAN-9）
- 外圧（L3-CAN-9）
- クリープ（L3-CAN-9）

これら 5 点の要因のうち、「（ベントナイトの）不均一な膨潤」以外の要因については、KBS-3V と同じ制御ガイダンスに従う、とあり、これ以上の影響予測及び評価は行われていない。

「（ベントナイトの）不均一な膨潤」については、KBS-3V でも問題にならないため、同様に KBS-3H でも影響は問題にならない、という評価をしている。

（2）　腐食

性能評価報告書（Posiva, 2018）における腐食の記載箇所は、“10.2.1 Canister corrosion”である。

性能評価報告書（Posiva, 2018）では、キャニスタの腐食の影響について評価するにあたり、以下の 12 種類の腐食荷重を考慮している。

① 定置前の、大気による腐食
② 取り扱いと据え付けに起因する腐食
③ 応力腐食割れ（Stress corrosion cracking）
④ 残留水の放射線分解による内部腐食
⑤ 不飽和緩衝材中の外部腐食
⑥ 処分坑道内における好気性腐食
⑦ 高塩分地下水中における銅の腐食
⑧ 緩衝材の飽和中の腐食
⑨ 緩衝材の飽和後の腐食 - 硫化物腐食
⑩ 緩衝材の間隙水の放射線分解に起因する外部キャニスタの腐食

⑪　迷走電流（Stray current）に起因する腐食
⑫　ガルバニック腐食（Galvanic corrosion）

このうち、①～⑩は、KBS-3V の性能評価報告書（Posiva, 2013）で考慮されている腐食荷重の項目と同じであり、評価パラメータも同じである。これらの評価パラメータについては、「((1) 腐食とその力学的影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで）」及び「(4) 腐食（閉鎖後 1 万年まで)」の項に記載した。なお、KBS-3V の性能評価報告書（Posiva, 2013）では、これらの腐食タイプのいずれも、注目している期間内に性能目標を無効にする程度にキャニスタを損傷することはない、と結論付けられている。⑪と⑫は、KBS-3H 特有の腐食荷重である。

「⑪　迷走電流（Stray current）に起因する腐食」の影響については、モデル化することによって評価している。性能評価報告書（Posiva, 2018）によると、迷走電流とは、周囲の環境（土壌や海水など）に存在する電流が金属構造物に入り、構造物の別の場所に出るときに発生する電流である。（Revie, R.W. & Uhlig, H.H. Stray current corrosion. New Jersey, USA: John Wiley and Sons, Inc. 4th Edition. 2008.）によると、これらの電流は、人為的起源または自然に発生する地磁気誘導電流（GIC）である可能性があり、場合により、電流の入口と出口で腐食が促進される可能性がある。また、その損傷は交流電流よりも直接電流の方が深刻である。周囲の環境の電圧差が大きいため、個々の隔離されたキャニスタなどの比較的短い物体よりも、パイプラインなどの長い構造物の腐食に影響を与える可能性が高くなる。

性能評価報告書（Posiva, 2018）の Appendix E では、電流と銅の腐食を計算するため、処分坑道の抵抗モデル及び 1 台のスーパーコンテナセクションの数値計算が示されている。10,000Ωm の抵抗率の岩石で 600m の長さの処分坑道を使用した例では、50V/km の均一な電界が、処分坑道の真ん中近くに配置された銅製キャニスタの腐食速度を、処分坑道の方向に約 0.06μm/年だけ増加させることを示している。したがって評価パラメータは「銅製キャニスタの腐食速度」である。

ガルバニック腐食は、2 つの異なる金属が電解質内（例：海水）で直接電気的に接触している場合（つまり、金属を介して電子が自由に通過する場合）に発生する腐食である。「⑫　ガルバニック腐食」の影響については、ガルバニック腐食の様々な要因の影響について記された以下の文献のレビューを実施している。

- LaQue, F.L. Marine Corrosion. USA: Wiley and Sons. 1975.
- Kunieda, H., Yamamoto, H. & Nishijima, N. Galvanic corrosion of some copper alloys coupled with titanium in synthetic sea water. 1980
- Du, X., Yang, Q., Chen, Y., Yang Y. & Zhang, Z. Galvanic corrosion behavior of copper/titanium galvanic couple in artificial seawater. Transactions of the Nonferrous Metals Society of China. Vol. 24, no. 2. 2014

主なレビュー内容は以下のとおりである。したがって具体的な評価に至っていないが、現状での評価パラメータは「ガルバニック腐食による銅の腐食速度」と考えられる。

- ベントナイトが完全に侵食され、スーパーコンテナシェルまたはその一部が銅製のキャニスタに接触した場合、ベントナイトの密度が低下した場合（例：希薄な水の侵入による侵食)、銅製のキャニスタがベントナイト内に沈む場合には、チタンシェルが銅キャニスタに直接接触する可能性があり、銅のガルバニック腐食の可能性を考慮する必要がある。
- ガルバニック腐食電流は、チタンの表面の不動態電流密度によって決定される。この不動態

電流密度は、無酸素条件下では非常に低くなる。

(3) 未臨界

性能評価報告書（Posiva, 2018）における未臨界の記載箇所は、“10.2.3 Subcriticality”である。評価パラメータは KBS-3V と同じである。「(2) 未臨界」及び「(5) 未臨界」の項を参照。

2.2.3. 緩衝材

緩衝材の変化に影響を与え、最終的に緩衝材の性能目標の達成に影響を与える可能性のある項目は付表 2-5 のとおりである。

付表 2-5 緩衝材の性能評価項目一覧

処分場構成要素	性能評価項目		
	THMCR 分類	項目（KBS-3H）（Posiva, 2018）	（参考）項目（KBS-3V）（Posiva, 2013）
緩衝材	熱	温度変化	温度変化
	水理・力学	機械的浸食（Mechanical erosion）	パイピング／エロージョン
		水の吸収と膨潤	飽和プロセス
			膨潤及び均質化
			緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤
	力学・化学		処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化
	化学	酸素欠乏と pH の変化（Oxygen depletion and changes in pH）	酸素の枯渇及び pH 変化
		コロイドの形成	コロイド生成
		セメント系浸出液の影響	セメント系浸出液の影響
			シリカゾルの影響
		予想される温度上昇範囲における緩衝材の地球化学的変遷	予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷
		モンモリロナイトの変質	モンモリロナイトの変質
		セメンテーションと不飽和条件の影響	熱的ステージでのセメンテーション
			飽和後の間隙水の化学反応及び陽イオン交換体の化学反応
		微生物活動	微生物活動
			硫化物の流入
		スーパーコンテナ チタンシェルの影響（チタンシェルの腐食が処分坑道内の粘土に及ぼす影響)	（無し）

以下に性能評価項目ごとの評価方法を示す。

(1) 温度変化

性能評価報告書（Posiva, 2018）における温度変化の記載箇所は、“5.2 Temperature evolution in the near and far field”である。

評価パラメータは KBS-3V と同じである。「(1) 温度変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで)」及び「(7) 温度変化（閉鎖後 1 万年まで)」の項を参照。

(2) 力学的浸食（Mechanical erosion）

性能評価報告書(Posiva, 2018)における機械的浸食の記載箇所は、“7.2.2 Mechanical erosion”である。

性能評価報告書では、流入位置におけるパイピング／エロージョンの最大量は、以下の評価式

で見積もられている。

$$m_{erosion}[^{g}/_{m}] = c[^{g}/_{m \cdot l}] \cdot V_{piping}[l]$$

$m_{erosion}$：流入位置付近の処分坑道の長さあたりの、粘土の損失質量（g/m）（Clay mass loss per length of drift near the inflow location）
c：単位流量体積及びパイピングが発生する材料の長さあたりのパイピングフローの粘土輸送能力（g/m・L）（Clay transport capacity of piping flow per unit flow volume and length of material piping occurs through）　（この値は、実験室でのテストから得られる）。
V_{piping}：処分坑道の飽和段階で、一つの流入場所から流れてくる水の体積（L）

（3）　水の吸収と膨潤

性能評価報告書（Posiva, 2018）における水の吸収と膨潤の記載箇所は、“7.2.1 Water uptake and swelling”である。

KBS-SH 設計のバリアシステムのコンポーネント中の温度、飽和度（degree of saturation）、液体圧力（liquid pressure）、ひずみ、応力の変化は、数値的手法を用いて研究されてきた。一連のラボ実験結果が、モデルに採用されたパラメータのキャリブレーションに使用された。現場による実験結果　（Results from an “in-situ” test）は、水力パラメータの検証に使用された。モデリングは、熱水力（thermo-hydraulic: TH）及び熱水力機械（thermo-hydro-mechanical: THM）分析で構成され、重要な熱水力機械プロセス、パラメータ、機能が特定された。モデリングは、CODE_BRIGHT を使用して実行された。CODE_BRIGHT を使用している点は、KBS-3V に同じである（「(10)（飽和した）緩衝材ベントナイトの、埋め戻し材への膨潤（閉鎖後 1 万年まで）」を参照）。CODE_BRIGHT の詳細は、以下の論文及びユーザーズガイドに記載されている。

- Olivella, S., Carrera, J., Gens, A. & Alonso, E.E. Nonisothermal multiphase flow of brine and gas thorough saline media. Transport Porous Media. Transport Porous Media. Vol. 15, no. 3. 1994.
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. & Alonso, E.E. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. Engineering Computations. Vol. 13, no. 7. 1996.
- DIT-UPC. CODE_BRIGHT. A 3-D program for thermos-hydro-mechanical analysis in porous media. USER’S GUIDE. Barcelona, Spain: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). 2016.

TH モデルは熱モデル（Thermo model）よりも複雑で、3D で研究されている。THM モデルは非常に複雑であり、スーパーコンテナシェルの存在によりさらに複雑になる。使用される機械モデルは、バルセロナ基本モデル（Barcelona Basic Model: BBM、Alonso etal。1990）である。

モデリング作業には、次の a.～c.が含まれる。それぞれの作業では、時間（年）に対するキャニスタ周辺各部位の飽和度に注目している。したがって評価パラメータは「キャニスタ周辺各部位の飽和度」である。

a. 1 次元の一つのスーパーコンテナ、軸対称の二次元、及び三次元モデルに対応する緩衝材の熱水力変化の評価
b. KBS-3H 処分坑道の熱水力変化の評価
c. 1 次元及び二次元の軸対称モデルを使用した一つのスーパーコンテナに対応する緩衝材の熱水力機械変化の評価

（4） 酸素欠乏と pH の変化（Oxygen depletion and changes in pH）

性能評価報告書（Posiva, 2018）における酸素欠乏と pH の変化の記載箇所は、“7.3.4 Oxygen depletion and changes in pH”である。

評価パラメータは KBS-3V と同じである。「1.21.2.2（4）コロイド生成（掘削及び操業期間から閉鎖まで）」の項を参照。

（5） コロイドの形成

性能評価報告書（Posiva, 2018）におけるコロイドの形成の記載箇所は、“7.3.5 Formation of colloids”である。

評価パラメータは KBS-3V と同じである。「(4）コロイド生成（掘削及び操業期間から閉鎖まで）」の項を参照。

（6） セメント系浸出液の影響

性能評価報告書（Posiva, 2018）におけるセメント系浸出液の影響の記載箇所は、“7.3.2 Bentonite alteration”である。評価パラメータは KBS-3V と同じである。「1.21.2.2（5）セメント系浸出液の影響（掘削及び操業期間から閉鎖まで）」及び「1.2（5）（17）セメント浸出液の影響（閉鎖後 1 万年まで）」の項を参照。

（7） 予想される温度上昇範囲における緩衝材の地球化学的変遷

性能評価報告書（Posiva, 2018）における予想される温度上昇範囲における緩衝材の地球化学的変遷の記載箇所は、“7.3.1 Geochemical evolution of buffer at the expected range of elevated temperatures”である。

評価パラメータは KBS-3V と同じである。「(11）予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷（閉鎖後 1 万年まで）」の項を参照。

（8） モンモリロナイトの変質

性能評価報告書（Posiva, 2018）におけるモンモリロナイトの変質の記載箇所は、“7.3.2 Bentonite alteration”である。

評価パラメータは KBS-3V と同じである。「(12）モンモリロナイトの変質（閉鎖後 1 万年まで）」の項を参照。ただし KBS-3H は、KBS-3V の性能評価内容に加え、Nagra-Posiva-SKB 研究結果（Leupin, O.X. (ed.), Birgersson, M., Karnland, O., Korkeakoski, P., Mäder, U., Sellin, P. & Wersin, P. Montmorillonite stability under near-field conditions. Wettingen, Switzerland: Nagra. Technical Report 14-12. ISSN 1015-2636. 2015.）にも基づいて評価している。この研究結果の詳細については性能評価報告書（Posiva, 2018）には記載がない。

（9） セメンテーションと不飽和条件の影響

性能評価報告書（Posiva, 2018）におけるセメンテーションと不飽和条件の影響の記載箇所は、“7.3.2 Bentonite alteration”である。

反応輸送モデリングを用いて評価をしている点は、KBS-3V と同じである。「(13）熱的ステージでのセメンテーション（閉鎖後 1 万年まで）」の項を参照。加えて、KBS-3V とは異なる複数の文献（ベントナイトの物理的試験の結果が主である）を参照して総合的に評価している。

（10） 微生物活動

性能評価報告書（Posiva, 2018）における微生物活動の記載箇所は、“7.3.3 Microbial activity”である。

評価パラメータは KBS-3V と同じである。「(15) 微生物活動（閉鎖後 1 万年まで)」の項を参照。

(11) スーパーコンテナ チタンシェルの影響（チタンシェルの腐食が処分坑道内の粘土に及ぼす影響）

性能評価報告書（Posiva, 2018）におけるスーパーコンテナ チタンシェルの影響の記載箇所は、“7.3.2 Bentonite alteration”である。

性能評価報告書では、スーパーコンテナ チタンシェルの腐食が処分坑道内の粘土に及ぼす影響について、物質収支を用いて、緩衝材に移行するチタン（Ti）の量を算出して評価している。評価の結果、初期の変化段階では、緩衝材に移行するチタンの量は無視できる程度である。したがって評価パラメータは「緩衝材に移行するチタンの量」である。

2.2.4. 埋め戻し材

埋め戻し材の変化に影響を与え、最終的に埋め戻し材の性能目標の達成に影響を与える可能性のある項目は付表 2-6 のとおりで、すべて緩衝材の性能評価項目と重複している。

付表 2-6 埋め戻し材の性能評価項目一覧

処分場構成要素	性能評価項目		
	THMCR 分類	項目（KBS-3H）（Posiva, 2018）	（参考）項目（KBS-3V）（Posiva, 2013）
埋め戻し材	水理・力学	機械的浸食（Mechanical erosion）	パイピング／エロージョン
		水の吸収と膨潤	飽和プロセス
			膨潤及び均質化
			緩衝材ベントナイトの埋め戻し材への膨潤
	力学・化学		処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化
	化学	酸素欠乏と pH の変化（Oxygen depletion and changes in pH）	酸素の枯渇及び pH 変化
		コロイドの形成	コロイド生成
		セメント系浸出液の影響	セメント系浸出液の影響
			シリカゾルの影響
			飽和後の間隙水の化学反応
		微生物活動	硫化物の生成と微生物活動
			セメントー粘土相互作用
			鉄ー粘土相互作用

以下に性能評価項目ごとの評価方法を示す。

(1) 力学的浸食（Mechanical erosion）

性能評価報告書(Posiva, 2018)における機械的浸食の記載箇所は、“7.2.2 Mechanical erosion”である。

評価パラメータは KBS-3H の緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(2) 力学的浸食(Mechanical erosion)」の項を参照。

(2) 水の吸収と膨潤

性能評価報告書（Posiva, 2018）における水の吸収と膨潤の記載箇所は、“7.2.1 Water uptake

and swelling”である。

評価パラメータは KBS-3H の緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(3) 水の吸収と膨潤」の項を参照。

(3) 酸素欠乏と pH の変化（Oxygen depletion and changes in pH）

性能評価報告書（Posiva, 2018）における酸素欠乏と pH の変化の記載箇所は、“7.3.4 Oxygen depletion and changes in pH”である。

評価パラメータは KBS-3H の緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(4) 酸素欠乏と pH の変化（Oxygen depletion and changes in pH)」の項を参照。

(4) コロイドの形成

性能評価報告書（Posiva, 2018）におけるコロイドの形成の記載箇所は、“7.3.5 Formation of colloids”である。

評価パラメータは KBS-3H の緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(5) コロイドの形成」の項を参照。

(5) セメント系浸出液の影響

性能評価報告書（Posiva, 2018）におけるセメント系浸出液の影響の記載箇所は、“7.3.2 Bentonite alteration”である。

評価パラメータは KBS-3H の緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(6) セメント系浸出液の影響」の項を参照。

(6) 微生物活動

性能評価報告書（Posiva, 2018）における微生物活動の記載箇所は、“7.3.3 Microbial activity”である。

評価パラメータは KBS-3H の緩衝材の性能評価パラメータと同じである。「(10) 微生物活動」の項を参照。

2.2.5. 閉鎖材

閉鎖材の変化に影響を与え、最終的に緩衝材の性能目標の達成に影響を与える可能性のある過程は付表 2-7 のとおりである。

付表 2-7　閉鎖材の性能評価項目一覧

処分場構成要素	性能評価項目		
	THMCR 分類	項目（KBS-3H）（Posiva, 2018）	（参考）項目（KBS-3V）（Posiva, 2013）
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化	閉鎖材の変化
	力学・化学	閉鎖プラグの変化	閉鎖プラグにおけるコンクリート構造物の変化
			閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化

以下に性能評価項目ごとの評価方法を示す。

（1）　閉鎖材の変化

性能評価報告書（Posiva, 2018）における閉鎖材の変化の記載箇所は、“11.2 Early evolution of closure （~until saturation)”である。

評価パラメータは KBS-3V と同じである。「(1) 閉鎖材の変化（掘削及び操業期間から閉鎖まで)」の項を参照。

（2）　閉鎖プラグの変化

性能評価報告書（Posiva, 2018）における閉鎖プラグの変化の記載箇所は、“11.3 Long-term evolution of closure”である。

評価パラメータは KBS-3V と同じである。「(4) 閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化（閉鎖後 1 万年まで)」の項を参照。

3. 参考文献

Posiva, Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Performance Assessment 2012. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2012-04. 520 p. ISBN 978-951-652-185-8,2013.

Pintado, X. & Rautioaho, E. Thermo-Hydraulic Modelling of Buffer And Backfill. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2012-48. 2013.

Posiva, Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto - Performance Assessment Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-02. 506 p. ISBN 978-951-652-249-7,2018.

付録９　人工バリアを含む地下構成要素の状態把握に係る関連ハード技術の高度化

目次

1.　坑道界面の隙間に関する計測技術の研究開発 ..... 付 9-1
1.1.　ケーブル式 TDR による試験結果 ..... 付 9-1
1.2.　加熱式光ファイバケーブルによる試験結果 ..... 付 9-2
2.　埋め戻し材の膨潤により発生する圧力に関する計測技術の研究開発 ..... 付 9-3
2.1.　計測原理による分類 ..... 付 9-3
2.2.　光ファイバセンサの分布型計測の実施例 ..... 付 9-4
2.3.　開発対象技術の選定 ..... 付 9-8
3.　処分環境を想定した無線給電技術の研究開発 ..... 付 9-12
3.1.　システム内の直流－交流返還における電力ロスの低減 ..... 付 9-12
3.1.1.　電力ロスの発生部位の明確化 ..... 付 9-12
3.1.2.　整流回路の電力ロス低減方策 ..... 付 9-13
3.2.　コイル形状に関する検討 ..... 付 9-14
4.　無線伝送技術の実証 ..... 付 9-15
4.1.　計測概要 ..... 付 9-15
4.2.　計測結果 ..... 付 9-16
参考文献 ..... 付 9-20

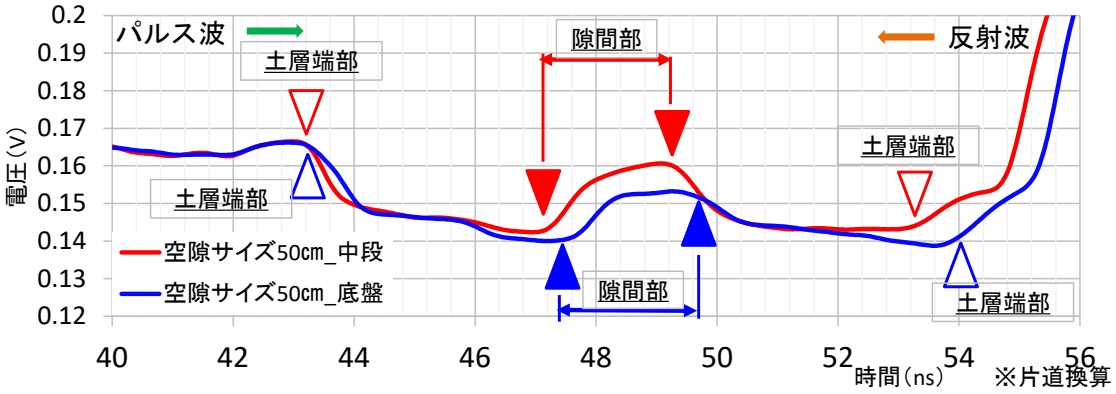
1.　坑道界面の隙間に関する計測技術の研究開発

1.1.　ケーブル式 TDR による試験結果

本研究では、300Ωフィーダー線によるケーブル式 TDR を用いた隙間検知試験を実施した。報告書本編では 3 つの試験ケースのうち、隙間の最も狭い 25cm と最も広い 100cm の試験結果を例示した。ここでは残る隙間 50cm のケースの結果を付図 1-1 示す。

本図を報告書本編の隙間 25cm 及び 100cm のケースと比較すると、底板密着ケーブルと底板上方 7.5cm ケーブルの隙間検知位置のずれ、底板密着ケーブルは底板上方ケーブルと比較して土層長さを長めに評価するなど、ほぼ同じ傾向を示すとともに、両者間の隙間位置のずれ及び土層長の差異も隙間 25cm と 100cm のケースの中間付近のやや 25cm のケースに近い状況を表している。

このことから、50cm のケースを考慮しても、報告書本編での 25cm と 100cm のケース間の比較による計測の傾向に関する評価には変更はない。



（隙間 50cm、青線：ケーブル底板密着、赤線：ケーブル底板上方 7.5cm）

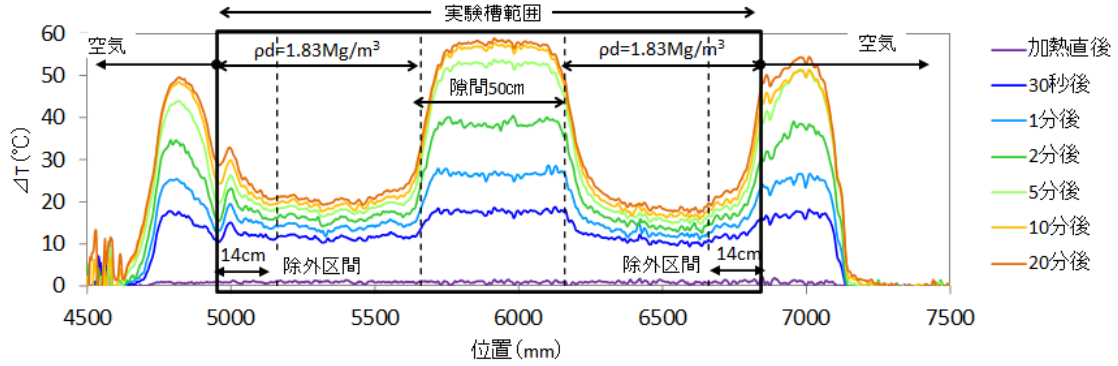
付図 1-1　ケーブル式 TDR による計測結果（隙間 50cm）

1.2. 加熱式光ファイバケーブルによる試験結果

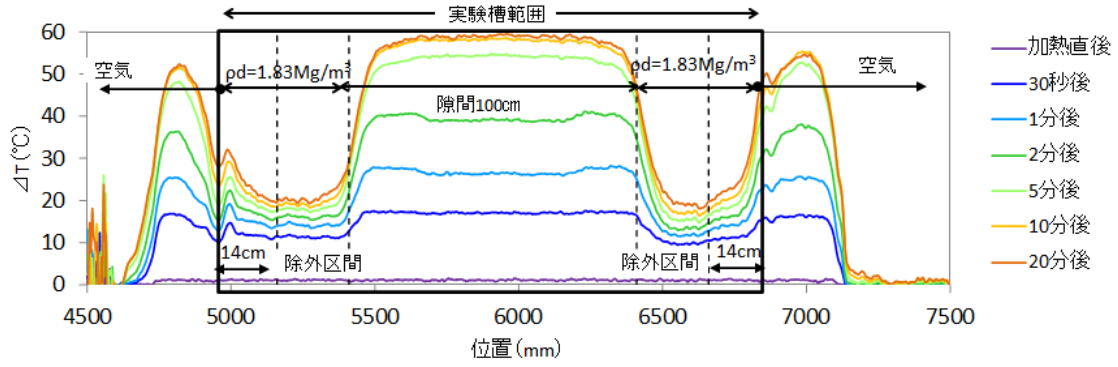
本研究では、ケーブル式 TDR を用いた隙間検知試験に加えて、加熱式光ファイバによる試験を実施した。報告書本編では 3 つの隙間ケース×2 つのケーブル位置＝6 計測結果のうち、隙間の最も狭い 25cm における 2 つのケーブル位置、隙間 50ｃｍ及び 100cm のケーブルを底板に密着させたケースの試験結果を例示した。ここでは残る隙間 50cm 及び 100cm のケーブルを底板上方 7.5cm に設置したケースの結果を

付図 1-2 に付図 1-1 示す。

報告書本編の隙間 25cm（ケーブル底板上方 7.5cm）との比較では、ケーブル底板密着と同様に隙間の検知が可能であり、空気と埋め戻し材の熱伝導率の違いにより、温度差が大きく異なる結果となった。また、隙間 50cm 及び 100cm のケーブルを底板に密着させたケースとの比較では、加熱による最高温度が高くなる傾向にあり、報告書本編における隙間 25cm での設置位置の違いによる評価と同様の結果となった。ケーブルを底板上方 7.5cm に設置したケースの温度上昇が大きいのは、隙間の空気と比較して、コンクリート底板の熱伝導率が大きく、底板密着ケースでは光ファイバの熱がコンクリートを通じて逸散していることに起因すると考えられる。光ファイバが底板に密着していないほうが温度差がより強調される傾向を利用して、光ファイバを坑壁コンクリートから少し離して設置することにより、隙間を検知する感度を向上させる方法も検討すべきである。



隙間 50cm、ケーブル底板上方 7.5cm



隙間 100cm、ケーブル底板上方 7.5cm

付図 1-2　加熱式光ファイバによる計測結果

2.　埋め戻し材の膨潤により発生する圧力に関する計測技術の研究開発

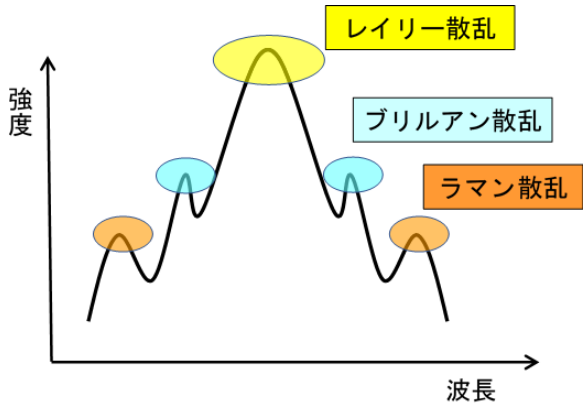
埋め戻し材に含まれるベントナイトの膨潤により発生する圧力（以下、埋め戻しの膨潤圧）を点ではなく線状に分布を計測する手法（以下、分布型計測）として、光ファイバセンサを用いた計測を提案した。光ファイバによる各種計測は、すでに広く実用化されているところではあるが、土圧計などの市場に流通する汎用的な計測センサとは異なり、現状では計測対象や使用環境等に応じて仕様を検討して製作することが多い。

ここでは、光ファイバセンサを用いて埋め戻しの膨潤圧を計測する技術を開発するにあたり、既存の光ファイバによる計測システムを調査し、本研究開発に適したシステムを選択する。

2.1.　計測原理による分類

光ファイバを用いた計測には、光ファイバにセンサを接続して光ファイバでデータを転送するものと、光ファイバ自体をセンサとして使用するものがある。ここでは、光ファイバ全長にわたる圧力分布を計測することが目的であるため、後者を対象とする。これは、光源から光ファイバへ一定波長（周波数）のパルス光を入射し、光ファイバの端部で反射した波（散乱光）と入射波を比較して、その乱れから光ケーブルのひずみの大きさと場所を特定することを基本とする。主な計測原理は次の 3 種類に分類できる。付図 2-1 に散乱光の概念を示す。縦軸が散乱光の強度、横軸が波長である。

- レイリー散乱（Rayleigh scattering）：入射光と同じ周波数で戻る散乱光で、ひずみと温度によるガラス粒子の密度の不均一性により散乱が発生し、発生場所の光ファイバ内の損失の変動に伴い強度が変化する。
- ラマン散乱（Raman scattering）：光ファイバ内のガラス分子の振動とエネルギーの授受をおこない、その結果入射光の波長がシフトする。生じる散乱発生場所の温度の変化に伴い散乱光の強度が変化する。入射光よりも周波数の低い（波長の長い）ストークス光と高い（波長の短い）アンチストークス光があり、特に後者が温度の影響を強く受ける。
- ブリルアン散乱（Brillouin scattering）：光ファイバ内のガラス分子の振動で発生する音響波によって生じる散乱で、散乱が発生した場所のひずみや温度変化に伴い波長が変化する。



付図 2-1　散乱光のスペクトルの概念

このように、計測対象とする散乱光の種類により、温度のみが計測できるもの、温度とひずみが計測できるものの 2 種類があり、埋め戻し材の膨潤に伴う圧力変化の計測には、ひずみの計測が可能なレイリー散乱あるいはブリルアン散乱のどちらかを使用することとする。なお、補助的に温度計測を併用する場合は、ラマン散乱光を利用することも考慮する。

2.2. 光ファイバセンサの分布型計測の実施例

2019 年度の研究（日本原子力研究開発機構･原子力環境整備促進･資金管理センター，2019）において、光ファイバセンサによる分布型計測を実施した例を調査している。そのうち、ひずみ、圧力の計測例を抜粋したものを付表 2-1 に示す。

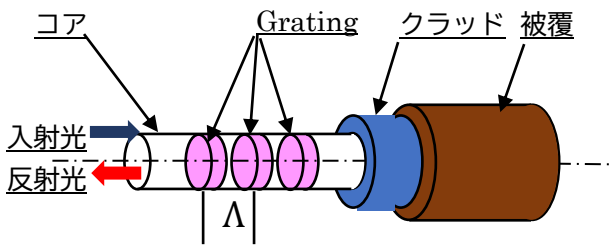
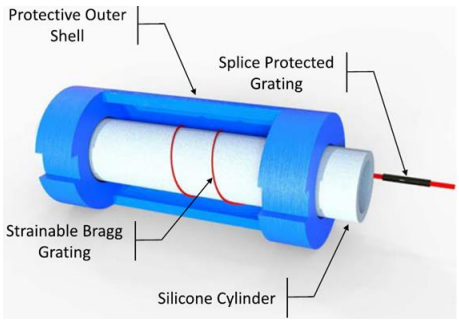
付表 2-1　分布型光ファイバーセンサ技術の適用例

計測項目	計測対象	計測方式	実施主体	備考
ひずみ分布	力学的評価 （坑道）	ブリルアン （レイリー）	NAGRA	
	内空変位 （坑道）	ブリルアン レイリー	ANDRA	
	ひび割れ （低拡散層）	ブリルアン レイリー	原環センター	
圧力	緩衝材の膨潤圧 （低透水層）	レイリー	原環センター	・基礎検証レベルであり、機構の解明が必要 ・特殊光ファイバが必要

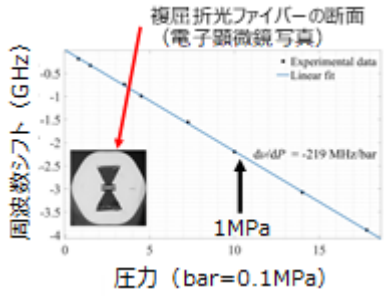
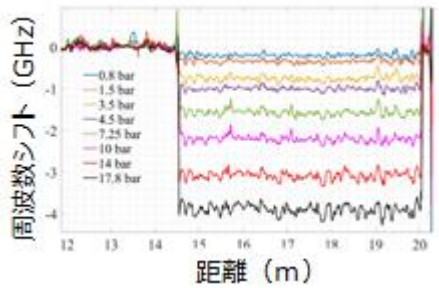
本研究で使用する技術の選定の参考とするために、前記調査以降に報告された文献を追加調査した。そのうち、分布型計測を扱ったものを

付表 2-2～付表 2-5 に要約した。

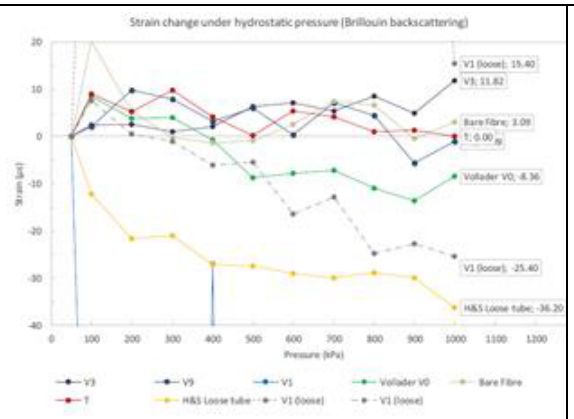
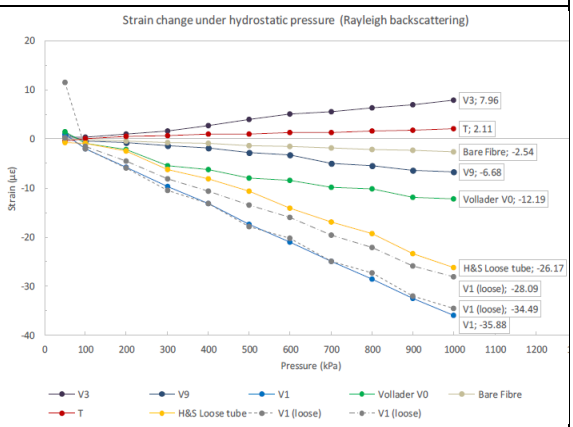
付表 2-2　文献調査結果（その１）

文献	Rotary Ventricular Assist Device Control With a Fiber Bragg Grating Pressure Sensor
報告	Stephens, A. F. et al, 2020
計測技術及び文献概要	計測技術 FBG（Fiber Bragg Grating）：下図 a 参照。光ファイバケーブルは、屈折率の高いコア、低いクラッド及び被覆で構成される。レーザー加工により、光ファイバのコアに一定のピッチで周期的な屈折率変化（Grating：回折格子）を持たせることにより、Bragg の法則で決定される、ある特定の波長（Bragg 波長）のみ反射するケーブルとなる。この、Grating の間隔は、ケーブルに作用する力と温度により変化するため、その場所ごとに反射する波長と透過する波長が決まり、その反射光をインテロゲータと呼ばれる機器で計測値へ変換し波長を得ることによりケーブルのひずみを得る。したがって、この技術では、温度とひずみの両方を計測することとなる。 下図参照。医療用の人工心臓の血圧センサとして開発されたもので、下図 b において圧力に応じて円筒に加わる変形を FBG センサ(図中の赤線)の伸縮で、シリコンシリンダ（白色の円筒）のひずみ変化として検知でする。温度補正用に FBG センサを併用している。
適用性	Bragg Grating を刻んだ区間のみ計測が可能（連続とするには多段連装が必要） 現段階では、対応できる圧力が小さい（-3～27kPa）
図など	 $\lambda = 2\eta\Lambda$　ここに Λ: *Grating 周期*, η: *コア屈折率*, λ: *Bragg 波長(反射波長)* 図 a－FBG 光ファイバケーブルの構造
	 図 b－文献における計測の概要

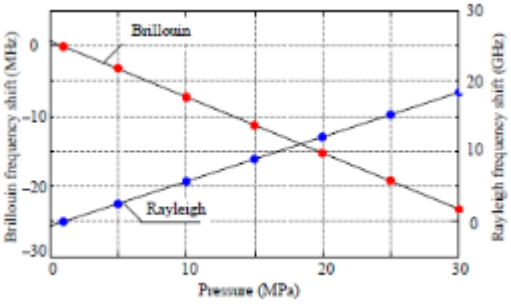
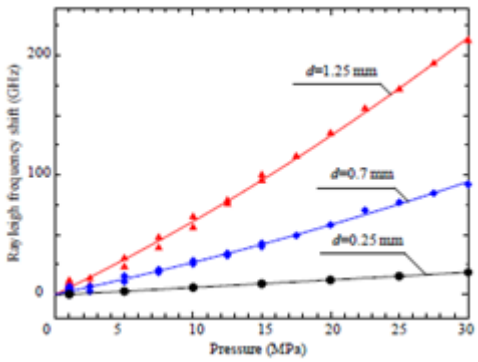
付表 2-3　文献調査結果（その２）

文献	Distributed hydrostatic pressure measurement using phase-OTDR in a highly birefringent photonic crystal fiber
報告	Mikhailov, S et al, 2019
計測技術及び概要	主に長距離伝送を目的として開発された、屈折率導波型光ファイバ PCF（Photonic crystal fiber，光ファイバケーブルのクラッド部に規則的な空孔や高屈折率ガラスを配列したもの（一般的なものでは、たとえば、藤田ら，2002，三宅ら，2002））が波の振動面の向きによって屈折率が異なる複屈折を持つ（下図 a の断面参照）ことを利用して、ケーブルの屈折率が高いファースト軸と低いスロー軸それぞれで得られるレイリー散乱スペクトルの変化が、下図 b に示すように圧力に依存することを利用している。 phase-OTDR を用いて、0.8~67bar までの圧力変化を空間分解能 5cm で計測した。その結果、これまでの同ファイバを用いた圧力感度よりも数倍高いものを実現した。
適用性	実験結果からは圧力感度の線形性が確認され、計測性能の点からは、本業務への適用性が高いと思われる。一方で、ここで使用された特殊なタイプの PCF 光ファイバは通常のものとは異なりまだ広く普及しておらず、さらに特殊な光学計測系を用意する必要があることから、本研究での適用研究として取組むのは困難と考えられるが、長距離搬送が可能であり、将来的には有望な技術となる可能性がある。
図など	 図 a－圧力と周波数シフトの関係	 **図 b－圧力による周波数シフト分布の変化**

付表 2-4　文献調査結果（その３）

文献	Distributed fiber optic strain sensing in pavements
報告	Puzrin, A. et al, 2019
計測技術及び概要	アスファルト舗装のモニタリングのために、頑丈な光ケーブルを評価し、敷設方法について検討を行い、2.5 年にわたってアスファルト内のひずみデータを得た。 それに向けて、圧力検知を目的に、静水圧環境下における実験を行い、ブリルアン計測（BOTDA 方式、下図 a）及びレイリー計測（OFDR 方式、下図 b）で水圧上昇に伴う線形なひずみ変化を確認している。力学的な軸ひずみとの区別が難しいこと、ひずみ変化に正負が混在することが課題として挙げられている。研究の時間的制限からそれ以上の実験は行われなかったが、アスファルト内で圧力計測をするための実験方法の提案がなされている。
適用性	OFDR 方式と呼ばれるレイリー散乱を用いた高精度な計測技術を用いて、被覆（下図 c）によって感度を調整して圧力を捉えようとする試みは、本業務への適用性が高いと言える。また、水圧によるケーブルのキャリブレーション試験方法は参考となる。
図など	 図 a－水圧によるひずみ変化（ブリルアン）
	 **図 b－水圧によるひずみ変化（レイリー）**
	 図 c－試験対象光ケーブル

付表 2-5　文献調査結果（その４）

文献	Study of optical fibers strain-temperature sensitivities using hybrid Brillouin-Rayleigh System
報告	Kishida, K. et al, 2014
計測技術及び概要	レイリー散乱による計測（TW-COTDR 方式）、ブリルアン散乱による計測（BOCDA 方式）について 0～30MPa の範囲で圧力感度を実測した。また、外径が異なる光ファイバで実験を行い、太径のものほど感度が高いことを示した。さらに、レイリー・ブリルアンを計測することで、圧力や温度、ひずみを区別できることを示した。
適用性	レイリー散乱を利用した計測のうち TW-COTDR は長距離計測可能なことが知られており、同方式を用いて被覆による圧力感度の違いを用いて圧力のみを選択的に計測する手法である。本業務においては、膨潤圧だけでなく、ひずみや温度変化も生じる可能性があることから、本手法の適用性は高い。
図など	 図 a－水圧によるレイリー及びブリルアン周波数シフトの変化  図 b－外径によるレイリー周波数シフトの違い

2.3.　開発対象技術の選定

光ファイバセンサによる既存の圧力の分布型計測が可能な技術を付表 2-6 に示す。

BOTDR や OFDR、f-OTDR、BDG、OTDR、TW-COTDR などによる計測技術を用いた圧力センサは、光ファイバ全長に沿って連続的な圧力分布を計測できる点に大きなメリットがある。BOTDR ほかや OFDR によれば、市販計器と汎用光ファイバによって圧力による影響をブリルアン周波数変化あるいはレイリー周波数変化として捉えることができる。

BOTDR ほかは長距離計測に優れる一方、OFDR は数 mm などの非常に高い空間分解能を実現できるが、数 10m 以上の計測範囲ではノイズが大きく不向きである。また、両者ともに周波数変化はひずみと温度の影響を受けるため、圧力成分のみを抽出するための補償方法が必要である。

f-OTDR ほかや BDG によれば、温度補償が不要な技術もあるが、特殊な光ファイバを使用する必要があること、また計測するための光学・電気回路が複雑なこと、から適用技術を開発するうえでハードルが極めて高い。

汎用な OTDR を用いた取組みもみられるが、クラッドの厚さや屈折率が圧力によって変化する

特殊な光ファイバが必要であり、まだ 0.5m 長光ファイバでの確認レベルに過ぎない。

TW-COTDR によれば、空間分解能は OFDR ほど高くないが、数 cm の空間分解能を広い計測範囲で実現することができる。OFDR、TW-COTDR ともに市販の計測機を用いて実現することができるが、やはり同様にひずみや温度による影響を除く手段が必要となる。

付表 2-6　圧力の分布型計測が可能と考えられる計測技術

計測技術	圧力範囲	メリット	デメリット
BOTDR ほか	～34.5MPa	◆ 分布型 ◆ 長距離可能 ◆ 市販計測機と汎用光ファイバ	◆ ひずみ・温度補償必要
OFDR	0～1MPa	◆ 分布型 ◆ 高空間分解能 ◆ 市販計測機と汎用光ファイバ	◆ 長距離不向き ◆ ひずみ・温度補償必要
f-OTDR ほか	0～13.8MPa	◆ 分布型 ◆ 温度補償不要な技術も有	◆ 特殊光ファイバ ◆ 計測構成が複雑
BDG	～6.1MPa	◆ 分布型 ◆ 温度補償不要な技術も有	◆ 特殊光ファイバ ◆ 計測構成が複雑
OTDR	～30MPa	◆ 分布型 ◆ 市販計器	◆ 特殊光ファイバ ◆ 0.5m 長での実績のみ
TW-COTDR	0～30MPa	◆ 分布型 ◆ 長距離可能 ◆ 市販計測機と汎用光ファイバ	◆ ひずみ・温度補償必要

既往研究による取組みは、ブリルアン散乱光を用いた方が、レイリー散乱光を用いた事例よりも数が多い。一方、レイリー散乱光を用いた方が、ブリルアン散乱光を用いたセンサ技術よりも、圧力計測精度が高い。また、レイリー散乱光を用いたセンサ技術のうち OFDR 方式は実用的な計測範囲が数 10m である。

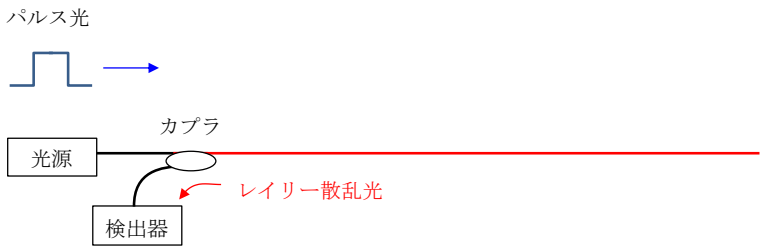
本業務における圧力分布センサ技術として、圧力計測感度が高いことと計測範囲が長いことから、レイリー散乱光の周波数変化を利用した TW-COTDR 方式とした。同方式を本業務に適用するうえで必要な開発課題と、その対策案を付表 2-7 に記す。

付表 2-7　選定した計測技術の開発課題

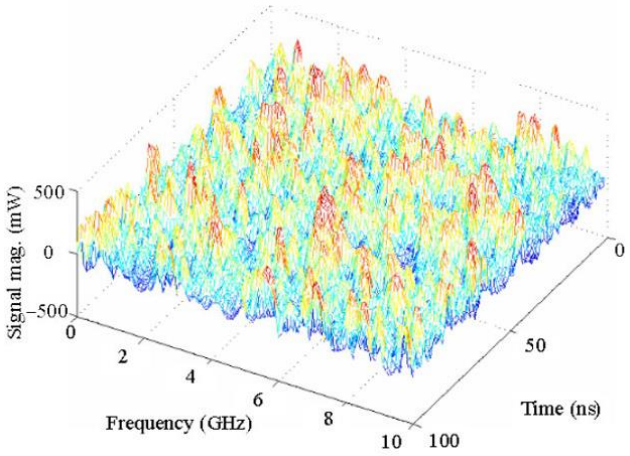
技術	開発課題	対策案
Fiber Optic TW-COTDR 方式（レイリー散乱光）	• 圧力検知のメカニズムが明確ではない。(圧力による光ファイバの屈折率変化／ポアソン効果などによる長軸方向のひずみ変化／分散の変化)	• 室内での検証実験方法を改善する(繰り返しの圧力付与などが容易な効率的な実験方法の確立。ひずみ・温度を同時に付与できる実験。)
	• ひずみや温度の補償方法が必要。	• 二本の光ファイバを併設し、その差分から圧力のみを計測する。 • 温度補償方法を確立する。
	• 室内検証レベルの域を出ない。(静水圧または膨潤圧環境下における確認のみ。繰り返しによる再現性などに関する知見、現地環境下における適用の知見がない。光ファイバ素線や心線の例が多い。)	• 実環境レベルでの検証を行う。 • 耐施工性を有する光ケーブルを試作する。 • 光ケーブルの材料物性や圧力場をもとにした解析的な検討を加える。

ここで TW-COTDR（Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry）方式の基本的な光ファイバの構成を付図 2-2 に示す。光ファイバ内に片端からパルス光を入射して、レイリー散乱光を観測する。この散乱光スペクトルは、光ファイバの僅かな密度の違いなどによって異なり、光ファイバの種類や位置によってそれぞれが固有のパターンを有する。レイリー散乱光のピーク波長の変化（レイリー周波数シフト）はわずかなもので、そのピークを抽出することは容易ではないが、比較する二つのスペクトルのパターン（付図 2-3）の相互相関をもとにすることで、わずかなレイリー周波数シフトを精度よく計測することができる。計測位置の情報は、パルス光の帰還時間と光速から算出する。本方式において、分布計測としての位置分解能は、入射するパルス光の幅に依存する。レイリー周波数シフト（$\Delta\nu_R$）は、ひずみ定数 C_εと温度定数 C_Tを用いて下式のようにあらわされる。ここで、$\Delta\varepsilon$とΔT はそれぞれひずみ変化と温度変化で、光ファイバ種類などで異なるが、それぞれおよそ-7με/GHz と-0.7℃/GHz である。

$$\Delta\nu_R = C_\varepsilon \Delta\varepsilon + C_T \Delta T$$



付図 2-2　TW-COTDR 方式の構成



付図 2-3　レイリー散乱のスペクトル（Kishida、2014）

シングルモード光ファイバを使用し、典型的な計測精度は、ひずみで 1με、温度で 0.01℃以下である。

3.　処分環境を想定した無線給電技術の研究開発

今年度の研究着手に先立って、給電効率を向上させるための、平成 31 年度の研究課題として挙げられた次の 2 課題について試験検討を実施した。

- システム内の直流－交流返還における電力ロスの低減
- コイル形状に関する検討

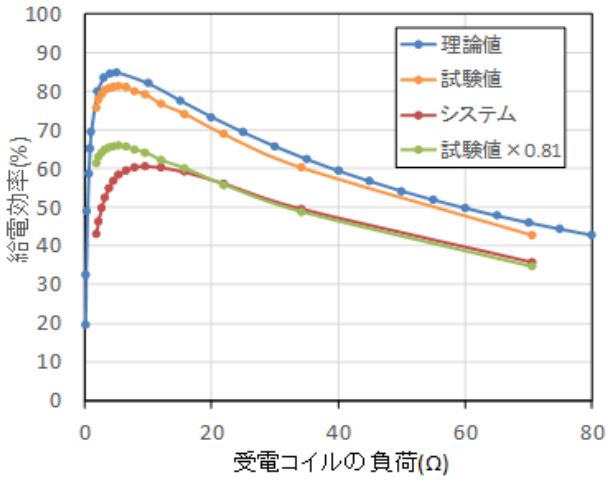
3.1.　システム内の直流－交流返還における電力ロスの低減

3.1.1.　電力ロスの発生部位の明確化

昨年度（日本原子力研究開発機構･原子力環境整備促進･資金管理センター，2020）の試験の結果、コイル間の給電効率はおおむね理論通りであったが、コイル間の効率と比較して、システム間（コイル部前後の直流－交流変換部相互）における電力ロスが大きい結果が得られた（付図 3-1 参照）。この電力ロスは、コイル間の給電効率に関わらず負うものであることから、コイル間の給電効率の向上と並行して、この電力ロスを軽減する方策が重要である。

コイル前後のシステムにおける低下後の効率を給電側・受電側それぞれ 0.9（0.1 のロス）と推定（受給電総合では 0.9×0.9=0.81）し、付図 3-1 にロスを見込んだ給電効率「試験値×0.81」の給電効率曲線を記入したところ、おおよそシステム間の給電効率曲線と重なったことから、システムにおける効率低下は、おおよそ 0.2 程度と考えられ、特にロスが大きいのは、低負荷領域であることが判明した。

次にシステム内での電力ロスの発生部位を明確にするために、コイルの共振状況を確認した（付図 3-2）。その結果、発信周波数 100kHz に対して、両コイルともほぼ同等の共振周波数が得られた。したがって、コイルに電力を供給する送電部及びコイルから電力を受ける受電部には電力ロスがほとんど生じていないことが明らかとなった。したがって、システム内で電力ロスが生じる可能性があるのは、システムの中の交流を直流に変換する整流回路（付図 3-3 参照）と推定された。



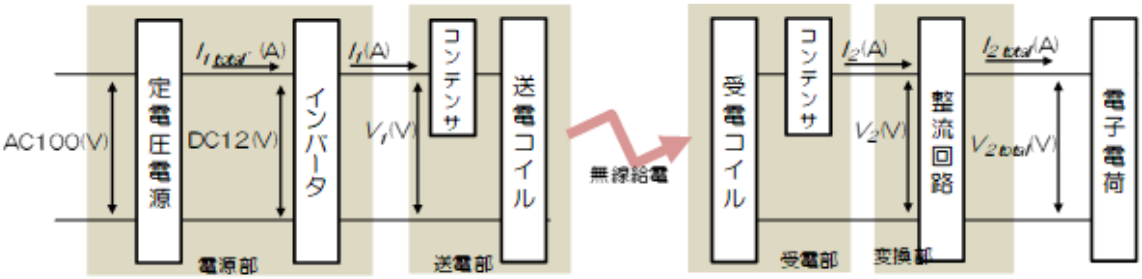
付図 3-1　昨年度の室内試験結果

試験結果

交流電源の周波数：100kHz	給電側	受電側
コイルのインダクタンス(μH)	262.3	263.0
コンデンサ(nF)	9.90	9.67
共振周波数(kHz)	98.85	99.41

※交流電源の周波数及び給電側・受電側コイルの周波数が一致する場合に、交流位相差による電力ロスが最小となり、コイル間の給電効率は最大となる。

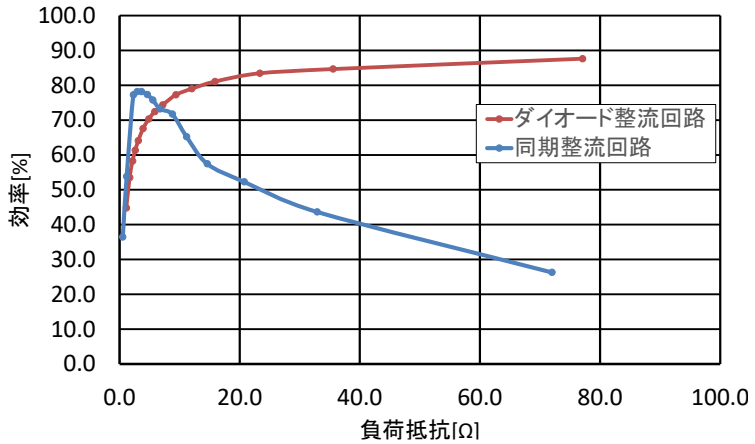
付図 3-2　コイルの共振状況確認試験



付図 3-3　電子負荷を利用した室内試験機のブロック図

3.1.2.　整流回路の電力ロス低減方策

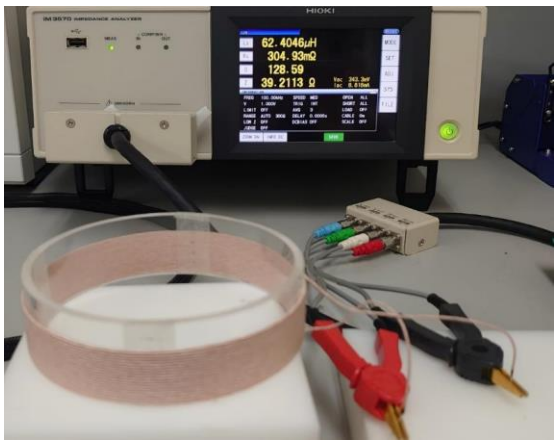
整流回路として、まず昨年度使用したダイオード整流回路の電力ロス計測をおこなった。計測は、付図 3-3 の受電側に、受電コイルに代えて交流電源を直接接続し、電子電荷（実計測ではセンサに相当）の抵抗値を変化させながら電力ロスを計測した。その結果、低負荷抵抗の領域での電力ロスが大きいことが判明したため、同期整流回路に変更して再計測した。両者の計測結果を付図 3-4 に示す。この結果から、電力効率を向上させるためには、おおよそ 5Ω以下の低負荷抵抗では同期型整流回路、それ以上ではダイオード整流回路を使用することが適切と考えられる。つまり、センサの抵抗値により、整流回路を使い分けることで効率を上げることが可能な事が判明した。



付図 3-4　ダイオード整流回路と同期型整流回路との効率比較

3.2. コイル形状に関する検討

無線給電システムで使用するコイル形状としては、付図 3-5 に示すような、コイルを筒状に巻き重ねるヘリカル型と、平面上に巻くスパイラル型の 2 つが考えられる。



ヘリカル型コイル（20 巻）

スパイラル型コイル（20 巻）

付図 3-5　ヘリカル型とスパイラル型

両者の給電効率の違いを、試験により評価した。コイルの直径を 100mm とし、巻き数 5 及び 20 のケースで、インダクタンスと内部抵抗値を比較した。計測結果を付表 3-1 に示す。この結果、巻き数 5 では、インダクタンス、内部抵抗ともほとんど差が無く、給電効率の差はほとんどないと考えられる。巻き数 20 では、コイルパラメータに差が生じたため、スパイラル型の性能を上げるために、27 巻及び 28 巻の試験を追加した。その結果、巻き数を増やすことでスパイラル型もヘリカル型と同じ性能を発揮することが判明した。

付表 3-1　コイル型式の比較（コイル直径 100mm）

巻き数	5		20		27	28
コイル型式	ヘリカル型	スパイラル型	ヘリカル型	スパイラル型		
インダクタンス（uH）	6.00	5.59	62.07	45.37	62.85	64.36
内部抵抗（mohm）	78.90	75.03	299.3	237.4	296.6	300.9
Q	47.78	46.78	130.2	120.01	133.1	134.4

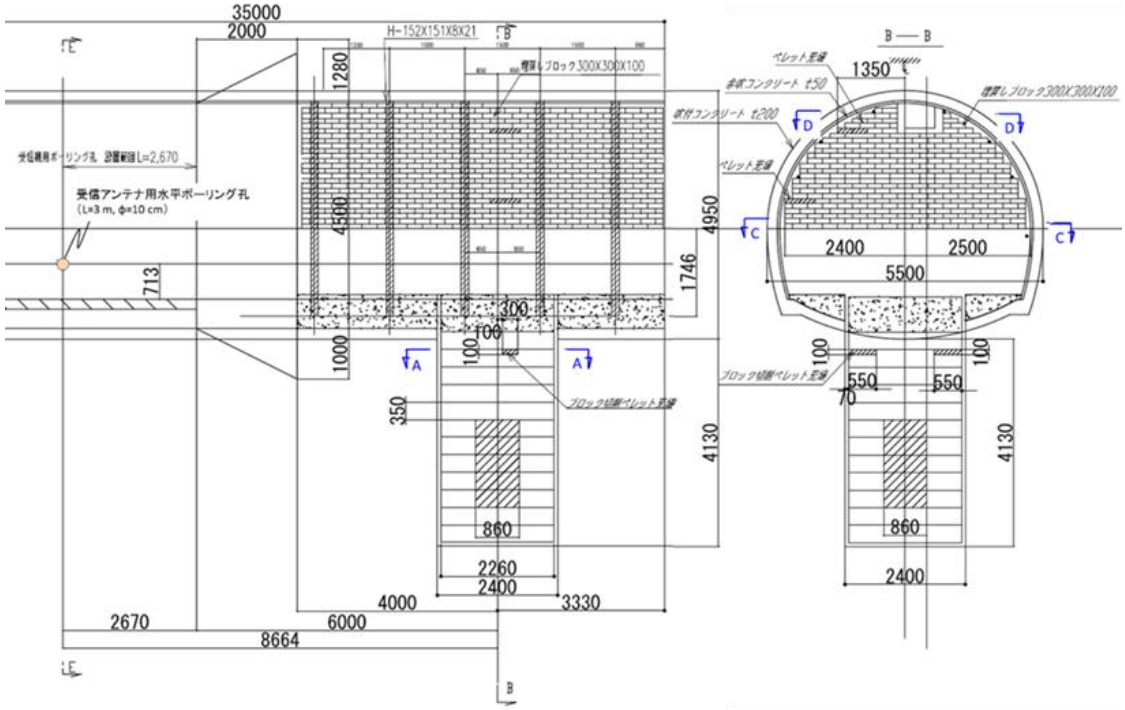
この試験の結果から、両形式の性能には、決定的な違いは無いと考えられるため、両者の形状の違いによる適切な使い分けが可能と考えられる。

4. 無線伝送技術の実証

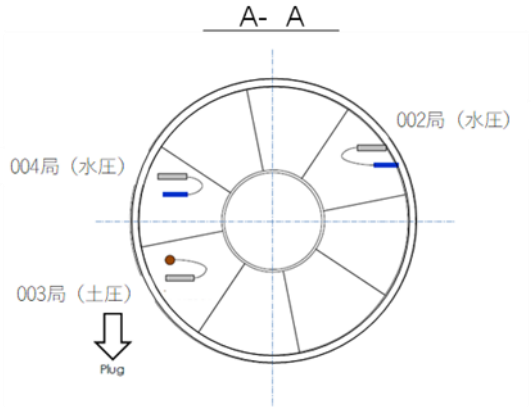
日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターでは、地下施設（以下、幌延 URL）の 350m 調査坑道（試験坑道 4）において、平成 26 年度から人工バリア性能確認試験を実施しており、それに合わせ、無線伝送技術による間隙水圧等の計測を実施中である。

4.1. 計測概要

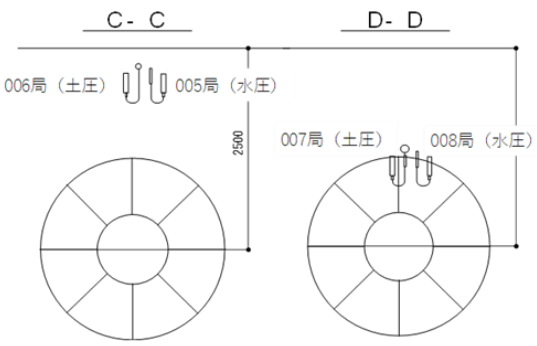
地中無線モニタリング装置は、緩衝材ブロックに 3 台（間隙水圧計 2 台：002 局・004 局、土圧計 1 台：003 局）、埋め戻し材ブロックに 4 台（間隙水圧計 2 台：005 局・008 局、土圧計 2 台：006 局・007 局）、計 7 台（Geokon 社製）設置している（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2019）。付図 4-1 に設置位置を示す。



(a)地中無線送信装置の設置位置（全体図）



(b)設置位置（A-A 断面）



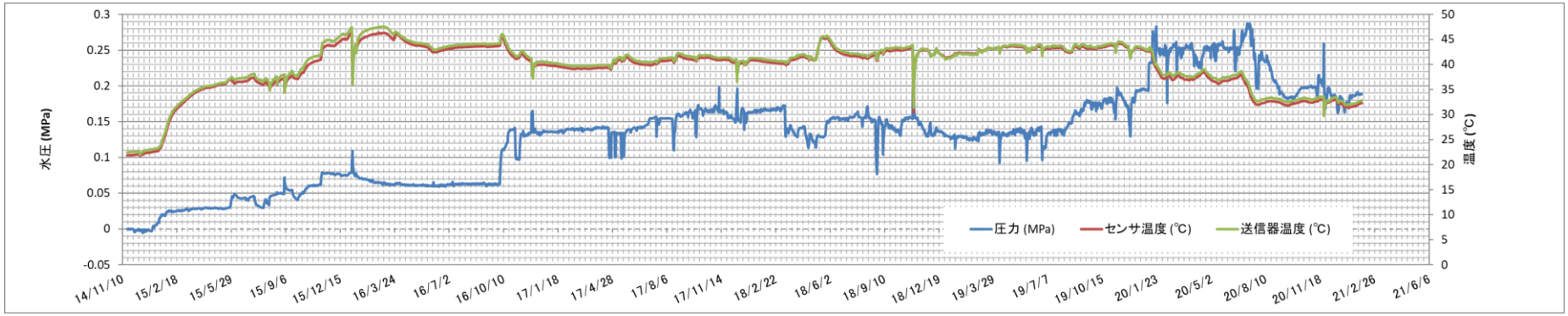
(c)設置位置（C-C 及び D-D 断面）

付図 4-1 計測位置

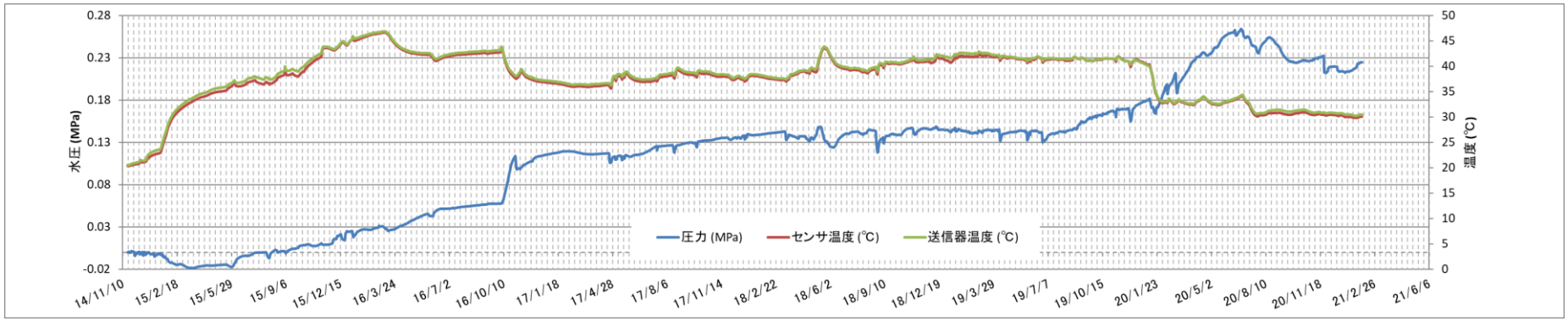
4.2. 計測結果

平成 26 年度から令和 3 年（2021 年）2 月までの計測結果を付図 4-2～付図 4-8 に示す。

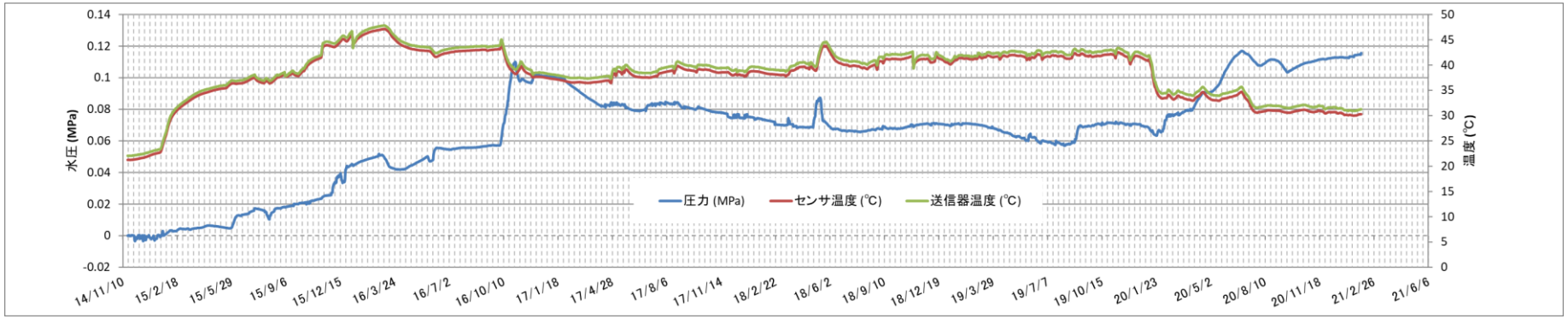
計測値は人工バリア性能確認試験での注水状況に伴って変化している。



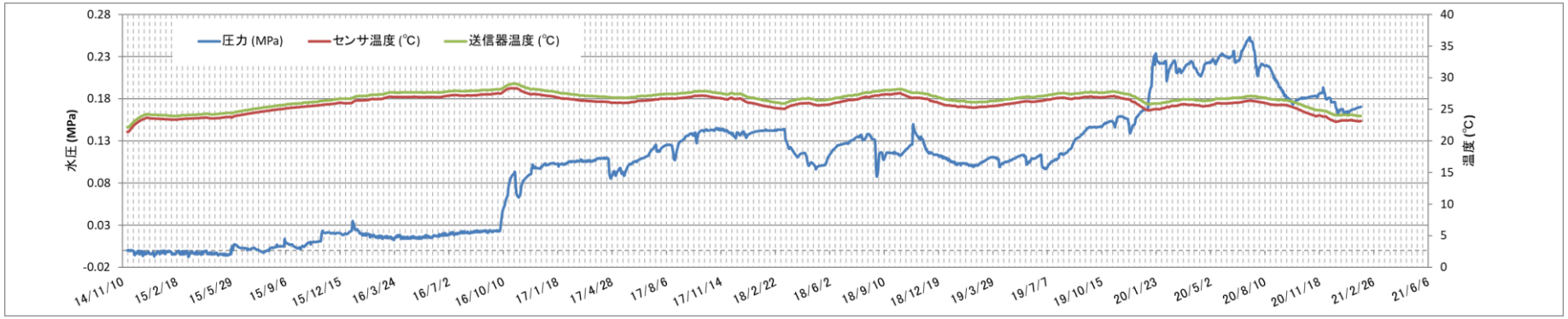
付図 4-2　局番 002 の計測結果（緩衝材と壁面との境界部の水圧）



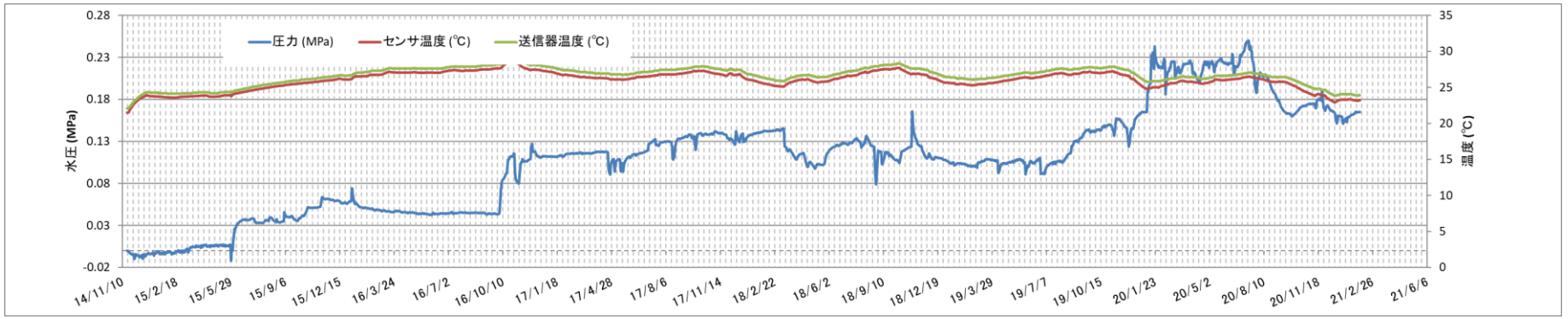
付図 4-3　局番 003 の計測結果（緩衝材中の土圧）



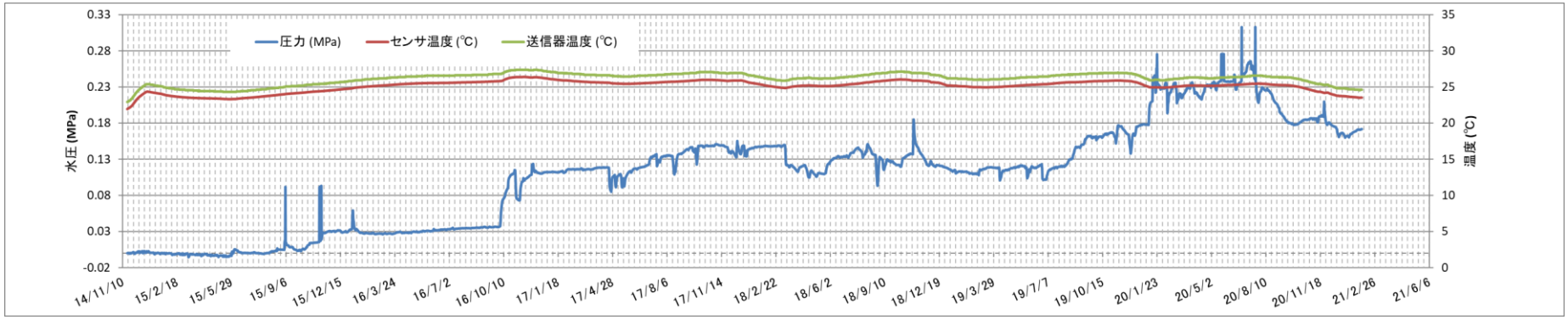
付図 4-4　局番 004 の計測結果（緩衝材中の水圧）



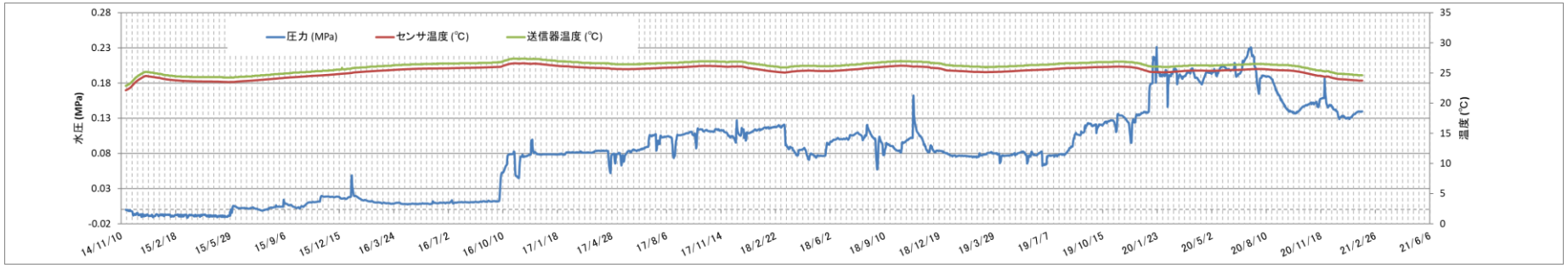
付図 4-5　局番 005 の計測結果（埋め戻し材中の水圧）



付図 4-6　局番 006 の計測結果（埋め戻し材中の土圧）



付図 4-7　局番 007 の計測結果（埋め戻し材中の土圧）



付図 4-8　局番 008 の計測結果（埋め戻し材中の水圧）

参考文献

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地層処分施設閉鎖技術確証試験）―新たなセンサー技術に関する開発動向の調査―, 2019.

Stephens, A. F., Busch, A., Salamonsen, R. F., Gregory, S. D. and Tansley, G. D., Rotary Ventricular Assist Device Control With a Fiber Bragg Grating Pressure Sensor. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020.

Mikhailov, S., Zhang, L., Geernaert, T., Berghmans, F. and Thévenaz, L., Distributed hydrostatic pressure measurement using phase-OTDR in a highly birefringent photonic crystal fiber. Journal of Lightwave Technology, vol. 37, no. 18, pp.4496-4500, 2019.

Puzrin, A.M., Rabaiotti, C., Hauswirth, D., Fischli, F., Tsirantonaki, D., Iten, M., Facchini, M., Friedrich, E., Distributed fiber optic strain sensing in pavements. Research report to grant VSS 2014/501, 2019.

Kishida, K., Yamauchi, Y., and Guzik, A.: Study of optical fibers strain-temperature sensitivities using hybrid Brillouin-Rayleigh System, Photonic sensors, 4(1), 1-11, 2014.

藤田盛行，田中正俊，山取真也，鈴木聰人，小柳繁樹，山本哲也，フォトニック結晶ファイバ(1)－光学特性－，三菱電線工業時報　第 99 号，2002

三宅和幸，八若正義，田中正俊，遠山修，山口俊一郎，フォトニック結晶ファイバ(2)－非線形特性と応用－，三菱電線工業時報　第 101 号，2002

原子力環境整備促進･資金管理センター，平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業，処分システム工学確証技術開発　平成 25 年度～平成 29 年度の取りまとめ報告書，2018