令和４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５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 4 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 8
2.1 シーリングシステム長期性能評価技術開発 8
2.1.1 背景・目的 8
2.1.2 実施概要 9
2.1.3 令和 4 年度の成果 10
2.2 埋戻し材の再冠水挙動、ベントナイトの流出・侵入 22
2.2.1 背景・目的 22
2.2.2 令和 4 年度の実施内容 22
2.2.3 令和 4 年度の成果 23
2.2.4 まとめ 51
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― 54
3.1 膨潤挙動評価試験 54
3.1.1 背景・目的及び実施内容 54
3.1.2 膨潤挙動縮尺模型試験 55
3.1.3 気相を考慮したベントナイト中の連成現象 80
3.1.4 まとめ 93
3.2 EDZ シーリング試験 96
3.2.1 背景・目的および実施概要 96
3.2.2 ベントナイト系材料の吹付け施工性確認試験 97
3.2.3 EDZ シーリング原位置試験 108
3.2.4 まとめ 116
3.3 EDZ 等の連続性調査技術の高度化 118
3.3.1 EDZ 等の連続性調査技術の高度化 119
3.3.2 掘削損傷領域の経時変化に関する調査 139
3.4 ボアホールシーリング試験 169
3.4.1 背景および目的 169
3.4.2 ボーリング孔の掘削 170
3.4.3 ベントナイトブロックの充填試験 182
3.4.4 まとめ 202
3.5 EDZ シーリングのための代替材料としての基礎的検討（2） 204
3.5.1 水理試験（湧水量測定、透水試験） 205
3.5.2 オーバーコアリングおよび追加孔の掘削と地質調査 210
3.5.3 原位置でのモニタリングデータを対象とした再現解析 222
3.5.4 EDZ シーリングのための代替材料としての基礎的検討結果 228

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... 236
4.1 背景及び目的 ... 236
4.2 埋戻し材の施工技術オプションの整備に向けた研究開発計画 ... 236
4.3 埋戻し材の材料特性に関する室内試験 ... 239
4.3.1 埋戻し材の材料特性データの拡充 ... 240
4.4 埋戻し材の施工試験に向けた仕様・条件設定 ... 242
4.4.1 転圧工法及び吹付け工法の材料・施工仕様の設定 ... 242
4.4.2 計測技術の要素試験及び条件設定 ... 250
4.5 実規模模擬坑道を活用した地上実証試験 ... 256
4.5.1 目的と全体概要 ... 256
4.5.2 施工方法及び施工条件 ... 258
4.5.3 材料製造 ... 269
4.5.4 施工結果 ... 271
4.5.5 計測技術および埋戻し材の解体・分析 ... 283
4.5.6 埋戻し施工による模擬坑道への影響確認 ... 296
4.6 埋戻し施工の効率化に向けた施工方法の検討（スクリュー工法、ブロック工法） ... 302
4.6.1 スクリュー工法 ... 302
4.6.2 ブロック工法 ... 313
4.7 埋戻し施工技術の品質管理方法の検討 ... 328
4.7.1 製造・施工プロセス管理手法の素案の整備 ... 328
4.7.2 3D 計測によるかさ密度管理 ... 337
4.7.3 非破壊検査手法の検討 ... 339
4.7.4 巨視的透水係数 ... 342
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 ... 353
5.1 背景及び目的 ... 353
5.2 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備 ... 353
5.2.1 地下構成要素を対象とした品質保証体系の整備方針 ... 353
5.2.2 品質管理プログラム及び性能確認プログラムの整備の考え方 ... 357
5.2.3 品質管理プログラム及び性能確認プログラムの素案の整備 ... 358
5.3 地下構成要素を対象とした計測関連技術の整備 ... 369
5.3.1 地下環境における無線伝送技術に対する信頼性の向上 ... 370
5.3.2 地下環境における無線給電技術の高度化 ... 371
5.4 品質保証体系の整備に関する今後の研究開発課題 ... 384
6. 結言 ... 388
7. 謝辞 ... 390

付録 1 膨潤挙動評価試験 ... 付 1-1
付録 2 施工技術の選定に資する情報の整理 ... 付 2-1
付録 3 品質管理及び性能確認のためのパラメータ整理 ... 付 3-1

図目次

図 1.2-1　本事業の到達目標と進め方 3
図 2.1-1　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 9
図 2.1-2　コンクリート成分の溶脱による埋戻し材の変質に至る状態変遷 11
図 2.1-3　埋戻し材の変質解析（上部間隙内の流速を 1.0×10^{-9} m/s とした解析ケース） 12
図 2.1-4　膨潤解析モデル 12
図 2.1-5　膨潤解析結果 14
図 2.1-6　地表面における核種移行率の比較 15
図 2.1-7　シーリングシステムの安全機能の低下が核種移行に及ぼす影響を回避・低減するための対策の全体像 16
図 2.1-8　シーリングシステムの性能確保に分野間（設計・工学と安全評価）の連携の全体像 17
図 2.2-1　流出・侵入試験装置 24
図 2.2-2　使用したベントナイトペレットと乾燥密度 24
図 2.2-3　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 1） 25
図 2.2-4　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 1） 26
図 2.2-5　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 2） 27
図 2.2-6　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 2） 28
図 2.2-7　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 3） 29
図 2.2-8　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 3） 30
図 2.2-9　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 3B） 31
図 2.2-10　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 3B） 32
図 2.2-11　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 4） 33
図 2.2-12　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 4） 34
図 2.2-13　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 5） 35
図 2.2-14　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 5） 36
図 2.2-15　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 6） 37
図 2.2-16　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 6） 38
図 2.2-17　総流出量に対するベントナイト総流出量 39
図 2.2-18　検量線用試験容器（低乾燥密度供試体） 40
図 2.2-19　検量線用試験容器（高乾燥密度供試体） 40
図 2.2-20　湿潤密度、乾燥密度と CT 値の関係 42
図 2.2-21　通水試験用試験容器 44
図 2.2-22　通水試験概念図 44
図 2.2-23　ベントナイト供試体解体状況 45
図 2.2-24　イオン交換水条件の通水量、水頭の経時変化 45
図 2.2-25　人工海水条件の通水量、水頭の経時変化 46
図 2.2-26　通水過程における CT 画像の変化（中央部断面の例） 47
図 2.2-27　含水比と湿潤密度の空間分布図（イオン交換水条件） 49
図 2.2-28　含水比と湿潤密度の空間分布図（人工海水条件） 50
図 2.2-29　湿潤密度の推定値と実測値の比較 51
図 3.1-1　人工バリア性能確認試験 55

図 3.1-2　縮尺模型試験装置の概要 57
図 3.1-3　イオン交換水を用いた試験の条件 60
図 3.1-4　縮尺模型試験の解体調査の状況 62
図 3.1-5　上方膨潤率と注水量の経時変化 63
図 3.1-6　土圧計およびロードセルの設置位置（イオン交換水） 64
図 3.1-7　土圧の経時変化（イオン交換水） 65
図 3.1-8　解体調査時の埋戻し材上部の状況（イオン交換水） 67
図 3.1-9　緩衝材の乾燥密度分布（イオン交換水） 68
図 3.1-10　緩衝材の飽和度分布（イオン交換水） 69
図 3.1-11　埋戻し材の含水比分布（イオン交換水） 70
図 3.1-12　Case D-2 の緩衝材の挙動の模式図 71
図 3.1-13　Case D-3 の乾燥材の挙動の模式図 72
図 3.1-14　上方膨潤率と注水量の経時変化（NaCl 水溶液） 73
図 3.1-15　土圧の経時変化（NaCl 水溶液） 74
図 3.1-16　解体調査時の埋戻し材上部の状況（NaCl 水溶液） 76
図 3.1-17　緩衝材の乾燥密度分布（NaCl 水溶液） 77
図 3.1-18　緩衝材の飽和度分布（NaCl 水溶液） 78
図 3.1-19　埋戻し材の含水比分布（NaCl 水溶液） 79
図 3.1-20　解析モデルと境界条件 82
図 3.1-21　解析結果（温度） 85
図 3.1-22　解析結果（飽和度） 86
図 3.1-23　解析結果（間隙空気圧） 87
図 3.1-24　試験装置と試験条件 88
図 3.1-25　室内試験結果 90
図 3.1-26　試験結果と解析結果の比較 92
図 3.1-27　間隙圧解析結果（対数表示） 93
図 3.2-1　EDZ シーリング原位置試験の概要図 97
図 3.2-2　原位置吹付け施工試験実施場所 98
図 3.2-3　試験実施前の試験坑道 2 の様子 99
図 3.2-4　ベントナイト混合土の吹付け完了時と養生の様子 100
図 3.2-5　サンプラーとブロックサンプリングの例 101
図 3.2-6　サンプリング位置 102
図 3.2-7　含水比と乾燥密度の関係 102
図 3.2-8　切欠き部とボーリング孔の掘削位置 104
図 3.2-9　EDZ-N2 孔の掘削位置（断面図） 105
図 3.2-10　B-1 孔～B-3 孔の掘削位置 105
図 3.2-11　EDZ-N2 孔のコア写真および BTV 観察の結果 106
図 3.2-12　B-01 孔～B-03 孔のコア写真 107
図 3.2-13　B-01 孔～-B-03 孔の BTV 観察の結果 107
図 3.2-14　EDZ シーリング試験における試験領域の概要（試験坑道 3 底盤部） 109
図 3.2-15　透水試験におけるパッカーの設置位置 109
図 3.2-16　定常解析および非定常解析で算出した EDZ 領域の透水係数の経時変化 112
図 3.2-17　浸透流解析における三次元解析モデル 114

図 3.3-1　令和３年度までに実施したグラウト注入および注入前の事前の物理探査結果（左）とそれを踏まえた令和４年度の原位置試験の実施概要（右） 120
図 3.3-2　調査位置平面図（幌延深地層研究所深度 350m 坑道内） 121
図 3.3-3　弾性波の速度分布断面位置図 123
図 3.3-4　P 波速度分布（T1-T2 断面） 124
図 3.3-5　S 波速度分布（T1-T2 断面） 124
図 3.3-6　P 波速度分布（T-1—T-3 断面） 125
図 3.3-7　S 波速度分布（T-1—T-3 断面） 125
図 3.3-8　P 波速度分布（T-3—T-2 断面） 126
図 3.3-9　S 波速度分布（T-3—T-2 断面） 126
図 3.3-10　塩水圧入時における間隙水圧の変化 127
図 3.3-11　電気伝導度測定結果 128
図 3.3-12　比抵抗分布（T-1—T-2 間、T-3—T-2 間） 129
図 3.3-13　BTV 画像の一例 130
図 3.3-14　比抵抗測定の模式図 132
図 3.3-15　各供試体の比抵抗 134
図 3.3-16　各供試体の P 波速度 135
図 3.3-17　各供試体の S 波速度 135
図 3.3-18　各断面における令和２年度と令和４年度の弾性波速度、比抵抗分布の変化 137
図 3.3-19　コア観察等から評価した割れ目の走向・傾斜の分布 138
図 3.3-20　令和 3 年度に実施した透水試験結果の例 138
図 3.3-21　BTV で得られた割れ目の分布と P 波速度分布の対比 139
図 3.3-22　スムースネス制約の設定 147
図 3.3-23　坑道の形状を考慮した電位分布の計算例 151
図 3.3-24　数値モデルによる事前情報を付与することによる人工物による偽像の除去手法の評価 152
図 3.3-25　解析するデータを取得した場所と坑道のレイアウト 153
図 3.3-26　弾性波トモグラフィのレイアウト 153
図 3.3-27　比抵抗トモグラフィのレイアウト 154
図 3.3-28　試験坑道 2 の周辺で取得したデータの解析結果 154
図 3.3-29　解析モデル 155
図 3.3-30　タイムラプス解析の数値テストの結果 156
図 3.3-31　試験坑道 2 を対象としたタイムラプス解析による弾性波速度分布 157
図 3.3-32　弾性波速度の変化率 157
図 3.3-33　室内試験で測定した幌延深地層研究センターの深度 350m における弾性波速度および比抵抗の飽和度特性 158
図 3.3-34　P 波速度と電気伝導度の関係の多項式近似 159
図 3.3-35　数値テストによるジョイント・インバージョンの結果の比較 161
図 3.3-36　ジョイント・インバージョンにおける残差の推移 162
図 3.3-37　逆解析結果における弾性波速度と電気伝導度の関係 162
図 3.3-38　数値モデルによる掘削損傷領域を対象としたジョイント・インバージョンの結果 163
図 3.3-39　残差の推移 164
図 3.3-40　逆解析結果における電気伝導度と弾性波速度の関係 164

図 3.3-41　Correspondence map における式 3.3-45 からの乖離度 165
図 3.3-42　Correspondence map を用いた掘削損傷領域の識別 166
図 3.4-1　250m 調査坑道の平面図 170
図 3.4-2　BoS-1 孔の削孔状況 171
図 3.4-3　BoS-1 孔断面図 171
図 3.4-4　割れ目の頻度分布 172
図 3.4-5　観察したコアの状況 173
図 3.4-6　BoS-1 孔の孔壁展開画像（1/3） 175
図 3.4-7　BoS-1 孔の孔壁展開画像（2/3） 176
図 3.4-8　BoS-1 孔の孔壁展開画像（3/3） 177
図 3.4-9　孔曲がりの測定結果 179
図 3.4-10　光学式孔径計測の計測模式図 180
図 3.4-11　光学式孔径計測の結果 181
図 3.4-12　透水試験時のパッカー編成とベントナイトブロック充填後のパッカー編成 183
図 3.4-13　室内試験に用いた試験容器の概要 185
図 3.4-14　膨潤圧測定用の試験装置の状況 186
図 3.4-15　ベントナイトブロックの膨潤の様子（ブロック正面） 188
図 3.4-16　ベントナイトブロックの膨潤の様子（ブロック上面） 189
図 3.4-17　膨潤圧の経時変化 190
図 3.4-18　膨潤圧と室温の計測結果 190
図 3.4-19　乾燥密度・含水比測定のためのサンプリング状況 191
図 3.4-20　コンテナを用いたベントナイトブロックの設置概念 192
図 3.4-21　ベントナイトブロック充填装置 192
図 3.4-22　ベントナイトブロック設置作業の状況 194
図 3.4-23　電動ウインチを用いたコンテナの挿入・回収作業 194
図 3.4-24　設置作業の状況 195
図 3.4-25　模擬地下水の注水期間の状況 199
図 3.4-26　模擬地下水の注水期間における注水流量、排水流量および間隙水圧 199
図 3.4-27　排水ラインに設置した気液分離管 200
図 3.4-28　モックアップ試験の実施概要 201
図 3.4-29　モックアップ試験時の注水圧力と注水流量の経時変化および膨潤状況 202
図 3.5-1　作業場所および試験概念図 204
図 3.5-2　各ボーリング孔の名称と配置 204
図 3.5-3　試験装置の設置概念図および設置状況 206
図 3.5-4　試験区間 206
図 3.5-5　試験 1　透水試験結果 208
図 3.5-6　試験 2　透水試験結果 208
図 3.5-7　透水係数の時間変化（区間長は試験 1 と同じ） 209
図 3.5-8　ボーリング孔掘削状況および掘削後の状況 210
図 3.5-9　炭酸塩鉱物分布状況の分類基準 211
図 3.5-10　コア写真一覧 212
図 3.5-11　路盤コンクリートー砕石部の近影（例：注入孔 No.5 OC） 213
図 3.5-12　オーバーコアリング孔のコンシード（乳白色部）分布状況 214

図 3.5-13　オーバーコアリング時の試料採取時の状況 214
図 3.5-14　生痕化石の例（生痕化石部を黄色点線で図示） 215
図 3.5-15　亀裂面のグラウトの付着状況 215
図 3.5-16　割れ目の成因分類図 216
図 3.5-17　剪断割れ目の開口部を充填する炭酸塩鉱物 216
図 3.5-18　断層破砕帯の例①（No.6 OC） 217
図 3.5-19　断層破砕帯の例②（断層角礫：追加孔 B-6） 217
図 3.5-20　断層破砕帯の分布状況 218
図 3.5-21　BTV 観察結果　全孔一覧図 220
図 3.5-22　全孔を対象とした解析結果（シュミットネット図） 220
図 3.5-23　コンシード注入前後のオーバーコアリング孔の BTV 画像（No.5、No.6 トレースラインなし） 221
図 3.5-24　実測データ（注入直後） 222
図 3.5-25　実測データ（8 か月後） 222
図 3.5-26　解析モデル 223
図 3.5-27　室内温度測定試験（満水時） 224
図 3.5-28　熱源のモデル化 224
図 3.5-29　中心モニター孔位置における温度の経時変化（実測値と解析値） 226
図 3.5-30　ケース 1　温度分布の変化図 227
図 3.5-31　ケース 4　温度分布の変化図（初期～17 日後） 228
図 3.5-32　透水係数の時間変化（図 3.5-7 に地震等を含む情報を加筆） 229
図 3.5-33　コンシード注入前後の炭酸塩鉱物分類割合図 230
図 3.5-34　コンシード注入孔（充填孔）と中心モニター孔および追加孔との距離 231
図 3.5-35　No.5、No.6 孔のコンシード注入前と注入後（オーバーコアリング孔）の孔壁状況 232
図 3.5-36　コンシードの力学試験結果 234
図 3.5-37　オーバーコアから取り出したコンシード硬化体の一軸圧縮試験結果 235
図 4.2-1　透水係数と乾燥密度および有効粘土密度の関係 237
図 4.3-1　透水係数と乾燥密度および有効粘土密度の関係 240
図 4.3-2　透水係数と乾燥密度および有効粘土密度の関係 240
図 4.3-3　透水係数と乾燥密度及び有効粘土密度の関係 242
図 4.3-4　透水係数とベントナイト混合率の関係 242
図 4.4-1　埋戻し材料・施工仕様の設定フロー（転圧工法） 243
図 4.4-2　締固め試験結果（埋戻し材 A） 244
図 4.4-3　乾燥密度と透水係数の関係（室内試験、埋戻し材 A 及び B） 244
図 4.4-4　転圧のパス数と転圧層の圧縮率の関係（予備試験；撒出し厚 250mm） 246
図 4.4-5　撒出し厚さをパラメータとした乾燥密度と含水比の関係（予備試験） 246
図 4.4-6　検討したノズルワーク（吹付け工法（高密度)） 250
図 4.4-7　埋戻し材を対象とした計測技術の研究開発フロー 251
図 4.4-8　平行型 300 Ω フィーダ線 251
図 4.4-9　ケーブル TDR 法による結果の解釈（模式図） 252
図 4.4-10　埋戻し材と空隙の判別試験結果および隙間長さの検知試験結果（左：中段ケーブル、右：底板ケーブル） 253

図 4.4-11　隙間高さの検知試験結果（左：上段ケーブル、右：下段ケーブル） 253
図 4.4-12　FBG/OFDR センサシステムの計測原理の模式図（左）および外観（右） 254
図 4.4-13　温度変化と熱伝導率の関係 254
図 4.4-14　材料物性ごとの加熱時間および平均温度の変化 255
図 4.4-15　材料物性ごとの加熱時間および平均温度の変化 255
図 4.4-16　乾燥密度と熱伝導率の関係 255
図 4.5-1　実証試験に使用した模擬坑道（5m×5m の馬蹄形） 257
図 4.5-2　埋戻し材の実証試験の対象範囲 257
図 4.5-3　転圧機と坑道内壁との干渉の例とその対応策 257
図 4.5-4　吹付け工法を併用した転圧工法の施工手順概要 258
図 4.5-5　吹付け工法（低密度）の機器構成のイメージ図 259
図 4.5-6　吹付け工法（低密度）の施工対象範囲のブロック割 260
図 4.5-7　施工手順（吹付け工法（低密度）） 260
図 4.5-8　供試体サンプリング位置（乾燥密度用 9 ヶ所＋透水試験用 1 ヶ所） 261
図 4.5-9　転圧工法による埋戻し材の施工手順 262
図 4.5-10　砂置換法による密度測定及び透水試験用サンプリング位置 263
図 4.5-11　吹付けロボット 266
図 4.5-12　吹付け工法（高密度）の機器構成のイメージ図 266
図 4.5-13　各ケースの施工位置（吹付け工法（高密度）） 267
図 4.5-14　施工手順（吹付け工法（高密度）） 268
図 4.5-15　付着材のサンプリング位置例（左：ケース 5-1、右：ケース 5-2） 269
図 4.5-16　埋戻し材製造後の含水比の頻度分布（転圧工法） 269
図 4.5-17　調整後の含水比の頻度分布（吹付け工法（低密度）） 270
図 4.5-18　各段階での材料の含水比の度数分布（吹付け工法（高密度）） 271
図 4.5-19　吹付け前後での材料の含水比及びベントナイト混合率の変化 272
図 4.5-20　転圧層の仕上がり高さ 273
図 4.5-21　転圧層の層厚の頻度分布 273
図 4.5-22　模擬坑道周縁部への人力による吹付け（吹付け工法（高密度）） 274
図 4.5-23　乾燥密度の測定結果（吹付け工法（低密度）） 275
図 4.5-24　乾燥密度の頻度分布（吹付け工法（低密度）） 275
図 4.5-25　転圧工法による埋戻し材の乾燥密度と含水比 276
図 4.5-26　転圧工法による埋戻し材の乾燥密度の頻度分布 276
図 4.5-27　乾燥密度測定結果（吹付け工法（高密度）） 277
図 4.5-28　乾燥密度の頻度分布（吹付け工法（高密度）） 277
図 4.5-29　透水係数測定結果（吹付け工法（低密度）） 278
図 4.5-30　透水係数と乾燥密度の関係（転圧工法） 278
図 4.5-31　透水係数測定結果（吹付け工法（高密度）） 279
図 4.5-32　各作業の歩掛の比率（吹付け工法（低密度）） 280
図 4.5-33　転圧工法による埋戻し材の施工歩掛の割合 281
図 4.5-34　模擬坑道に敷設した計測用ケーブル（300Ω フィーダ線） 284
図 4.5-35　坑道壁面に設置した計測用ケーブル（Cable1, 2）の設置概要 284
図 4.5-36　aDTS 法による密度分布測定のフロー図 285
図 4.5-37　模擬坑道に敷設した加熱式光ファイバ（転圧施工面） 285

図 4.5-38　模擬坑道に敷設した加熱式光ファイバ（吹付け施工面） 286
図 4.5-39　加熱式光ファイバの敷設完了後（左：転圧施工面　右：吹付け施工面） 286
図 4.5-40　レファレンス槽の作製手順 286
図 4.5-41　断熱材（発砲スチロール）によるレファレンス槽の養生状況 287
図 4.5-42　レファレンス槽の温度上昇勾配　1 回目（左：転圧工法用　右：吹付け工法用） 287
図 4.5-43　埋戻し材の熱伝導率と乾燥密度の関係（左：転圧工法用　右：吹付け工法用） ... 288
図 4.5-44　埋戻し材の解体、目視観察およびサンプリングの手順 288
図 4.5-45　上部観測孔　ビデオスコープによる隙間観察結果 289
図 4.5-46　吹付け工法と転圧工法の境界部分 289
図 4.5-47　吹付け面でサンプル採取した位置およびサンプリング深さの模式図 290
図 4.5-48　転圧面でサンプル採取した位置およびサンプリング深さの模式図 290
図 4.5-49　計測時におけるフィーダ線の埋戻し状況とそれぞれの計測波形 291
図 4.5-50　坑道天端で確認された隙間および隙間箇所（イメージ図） 292
図 4.5-51　フィーダ線に埋戻し材が付着した状況および付着物の分布イメージ 292
図 4.5-52　加熱式光ファイバの配置及び区間割り（転圧施工箇所） 293
図 4.5-53　加熱式光ファイバの配置及び区間割り（吹付け施工箇所） 293
図 4.5-54　転圧施工面の乾燥密度分布 294
図 4.5-55　乾燥密度の頻度分布（転圧施工面） 294
図 4.5-56　吹付け施工箇所の乾燥密度分布 295
図 4.5-57　乾燥密度の頻度分布（吹付け施工面） 295
図 4.5-58　模擬坑道への計測器設置位置概略図 297
図 4.5-59　各年度の施工試験における埋戻し範囲 298
図 4.5-60　土圧計測定値の推移 300
図 4.5-61　鉄筋計によるひずみ値の推移 301
図 4.6-1　要素試験の施工状況 302
図 4.6-2　埋戻し材の充填形状 303
図 4.6-3　要素試験全体レイアウト計画 304
図 4.6-4　試験土槽 305
図 4.6-5　試験装置全景 305
図 4.6-6　各試験ケース充填方法 306
図 4.6-7　分離抑制板 307
図 4.6-8　埋戻し材製造二軸強制練りミキサ 307
図 4.6-9　材料製造手順 308
図 4.6-10　各試験ケースの粒度分布 309
図 4.6-11　要素試験の様子 310
図 4.6-12　特徴点の撮影 311
図 4.6-13　計測機器及び計測の様子 311
図 4.6-14　計測制度の確認 312
図 4.6-15　3D 点群図及びモデル図の例 312
図 4.6-16　小型ブロックの外観　一例 315
図 4.6-17　ブロック定置作業イメージ図 316
図 4.6-18　膨潤変形試験装置概略図 318
図 4.6-19　最大粒径の違いによる最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係 319

図 4.6-20　加圧方向と膨潤変形方向の組合せ 320
図 4.6-21　加圧方向の違いによる最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係 320
図 4.6-22　二方向膨潤変形試験装置概略図 321
図 4.6-23　供試体の変形方向及び給水箇所 321
図 4.6-24　二方向膨潤変形試験による膨潤率の経時変化（ベントナイト 15%） 322
図 4.6-25　二方向膨潤変形試験後の供試体状況 322
図 4.6-26　二方向膨潤変形試験における最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係 323
図 4.6-27　自己シール性試験装置の概略図 324
図 4.6-28　隙間充填後発生圧力の経時変化 325
図 4.6-29　隙間充填後の発生圧力と隙間充填後の有効粘土密密度の関係 325
図 4.6-30　隙間充填後供試体カット幅 326
図 4.6-31　供試体底面からの距離と隙間充填後の乾燥密度及び含水比の分布 326
図 4.6-32　有効粘土密度と透水係数の関係（推定値） 327
図 4.7-1　3D スキャナによる出来形計測（転圧工法） 337
図 4.7-2　3D 計測画像（点群データ）例 338
図 4.7-3　小型土槽の埋戻し材の乾燥密度の測定に用いる手法 340
図 4.7-4　土槽試験における測定点配置図 341
図 4.7-5　小型土槽の乾燥密度の測定結果 342
図 4.7-6　解析対象（計算領域）の模式図 344
図 4.7-7　転圧不足を想定した感度解析におけるケースごとの乾燥密度の分布 345
図 4.7-8　転圧工法と吹付け工法の坑道断面の割付図 345
図 4.7-9　浸透流解析の境界条件 346
図 4.7-10　乾燥密度の空間分布の例 346
図 4.7-11　透水係数の空間分布の例 346
図 4.7-12　巨視的透水係数の頻度分布 347
図 4.7-13　乾燥密度の空間分布例 348
図 4.7-14　透水係数の空間分布例 348
図 4.7-15　巨視的透水係数の頻度分布：CASE 4 349
図 4.7-16　低密度領域の分布 350
図 4.7-17　低密度領域の感度解析モデルの境界条件 350
図 5.2-1　被ばく管理に関する評価の流れ 354
図 5.2-2　バリア性能の変化の概念図 357
図 5.2-3　品質管理プログラム及び性能確認プログラムの整備の流れ 358
図 5.2-4　性能確認プログラムの素案 369
図 5.3-1　緩衝材ブロックに設置したセンサの無線伝送データ 370
図 5.3-2　埋戻し材ブロックに設置したセンサの無線伝送データ 371
図 5.3-3　緩衝材中の間隙水圧計（002 局）の無線伝送データ（全試験期間） 371
図 5.3-4　磁界共振結合のイメージ図 372
図 5.3-5　1 対の送受電器による磁界共振結合（S-S 方式）の等価回路 373
図 5.3-6　送受電器 1：6 における磁界共振結合（S-S 方式）の等価回路 375
図 5.3-7　送受電コイルの設置位置 377
図 5.3-8　緩衝材内部における無線給電の構成 377
図 5.3-9　本検討で設定した送受電コイル設置位置を対象とした無線給電システムの構成 378

図 5.3-10　無線給電システムの設計方法の検討フロー 378
図 5.3-11　各センサに給電する送受電コイル②の給電効率の見積り手順 379
図 5.3-12　送受電コイル①の給電効率の見積り手順 380

表目次

表 2.1-1　膨潤解析パラメータ 13
表 2.2-1　流出・侵入試験ケース 25
表 2.2-2　検量線用試験ケース一覧 41
表 2.2-3　飽和前の CT 測定結果 42
表 2.2-4　飽和後の CT 値と湿潤密度 43
表 2.2-5　通水試験ケース一覧 45
表 2.2-6　イオン交換水条件における CT 値 47
表 2.2-7　人工海水条件における CT 値 47
表 2.2-8　解体後の含水比測定結果（イオン交換水条件） 48
表 2.2-9　解体後の含水比測定結果（人工海水条件） 48
表 3.1-1　縮尺模型試験の緩衝材と埋戻し材の仕様 59
表 3.1-2　クニゲル V1 の物性値 59
表 3.1-3　試験用水の水質分析結果 59
表 3.1-4　縮尺模型試験の結果まとめ（イオン交換水） 71
表 3.1-5　縮尺模型試験の結果まとめ（NaCl 水溶液） 80
表 3.1-6　記号と物性値（二相流パラメータ） 82
表 3.1-7　熱物性値 83
表 3.1-8　水蒸気拡散に関するパラメータ 84
表 3.1-9　解析ケース 84
表 3.1-10　クニゲル V1 の物性値 88
表 3.2-1　吹付け材料の仕様 99
表 3.2-2　サンプリング数量 101
表 3.2-3　各サンプリング位置における含水比と乾燥密度の平均値 103
表 3.2-4　ボーリング孔の掘削実績と調査実績 104
表 3.2-5　EDZ-N2 孔の割れ目一覧 106
表 3.2-6　B-01 孔の割れ目一覧 108
表 3.2-7　透水試験に使用した模擬地下水組成 109
表 3.2-8　原位置透水試験の結果 111
表 3.2-9　検討①の透水係数の設定値 114
表 3.2-10　EDZ を対象とした定圧注水試験の結果 114
表 3.2-11　検討①の浸透流解析の結果 115
表 3.2-12　検討②の透水係数の設置値 115
表 3.2-13　健岩部を対象としたパルス試験の結果 115
表 3.2-14　検討②の浸透流解析の結果 115
表 3.2-15　透水試験結果を再現できる透水係数の組合せ 116
表 3.3-1　3 ヵ年の実施工程 119
表 3.3-2　使用資機材一覧表 122
表 3.3-3　弾性波トモグラフィ解析ソフトウェア一覧表 122
表 3.3-4　比抵抗トモグラフィ解析ソフトウェア 122
表 3.3-5　比抵抗測定の電極点数 122

表 3.3-6　水温測定結果 128
表 3.3-7　S-1、S-2 で確認された亀裂の一覧 130
表 3.3-8　BTV で確認された割れ目 131
表 3.3-9　比抵抗測定　使用資機材一覧 132
表 3.3-10　コア試料における各供試体の深度 133
表 3.3-11　供試体の飽和作業に使用した水溶液の電気伝導度 134
表 3.4-1　岩盤等級区分判断基準 173
表 3.4-2　BTV 観察に使用した機材一覧 174
表 3.4-3　孔曲がり測定の使用機材の概要 178
表 3.4-4　透水試験の条件および結果の一覧 182
表 3.4-5　模擬地下水の組成 182
表 3.4-6　ベントナイトブロックと測定項目の対応 185
表 3.4-7　乾燥密度および含水比の測定結果 191
表 3.4-8　ベントナイトブロックの諸元（設置作業 1 回目） 196
表 3.4-9　ベントナイトブロックの諸元（設置作業 2 回目） 196
表 3.4-10　ベントナイトブロックの諸元（設置作業 3 回目） 196
表 3.4-11　ベントナイトブロックの諸元（設置作業 4 回目） 197
表 3.4-12　ブロック設置作業の結果 197
表 3.5-1　間隙水圧測定に用いた機器の仕様一覧 205
表 3.5-2　定圧注水試験に用いた機器の仕様一覧表 205
表 3.5-3　試験区間概要 206
表 3.5-4　湧水量測定結果 207
表 3.5-5　透水試験結果 209
表 3.5-6　オーバーコアリングの仕様 210
表 3.5-7　追加ボーリング孔の仕様 210
表 3.5-8　ボーリング孔掘削で使用する機材一覧表 210
表 3.5-9　コア掘削の概要（下端深度：GL-m） 212
表 3.5-10　断層破砕帯の出現深度 217
表 3.5-11　オーバーコアリング孔の炭酸塩鉱物分布状況　集計結果一覧表 218
表 3.5-12　ボーリング孔壁面観察で使用する機材の仕様と出力 219
表 3.5-13　調査数量一覧表 219
表 3.5-14　解析概要 223
表 3.5-15　解析ケース一覧 224
表 3.5-16　ケース 2　初期発生熱量一覧 225
表 3.5-17　ケース 3　初期発生熱量一覧 225
表 3.5-18　ケース 4　初期発生熱量一覧 226
表 3.5-19　炭酸塩鉱物分布状況　集計結果一覧 230
表 3.5-20　オーバーコアリング孔および追加孔のコア観察で得られた炭酸塩鉱物の有無 231
表 3.5-21　BTV 観察結果によるコンシード注入孔からの最短距離とき裂内充填状況について 233
表 4.2-1　埋戻し材の設計要件 237
表 4.2-2　埋戻し材の基本仕様 237
表 4.2-3　本年度の実施概要 239

表 4.3-1　室内試験の使用材料 241
表 4.3-2　室内試験の試験ケース 241
表 4.4-1　使用材料 243
表 4.4-2　転圧工法の予備試験の条件 245
表 4.4-3　転圧面の高さの標準偏差（予備試験） 246
表 4.4-4　材料・施工仕様選定フロー（吹付け工法（高密度）） 247
表 4.4-5　得られた成果の一覧表 256
表 4.5-1　吹付け工法（低密度）の埋戻し材の仕様 258
表 4.5-2　吹付け工法（低密度）の主な使用機械 259
表 4.5-3　実規模模擬坑道試験における施工仕様（吹付け工法（低密度）） 260
表 4.5-4　主な測定項目（吹付け工法（低密度）） 261
表 4.5-5　転圧工法の埋戻し材の仕様 261
表 4.5-6　転圧工法の主な使用機械 262
表 4.5-7　転圧施工試験の施工仕様 262
表 4.5-8　主な測定項目（転圧工法） 263
表 4.5-9　埋戻し材の仕様（吹付け工法（高密度）） 264
表 4.5-10　吹付け工法（高密度）の主な使用機械 265
表 4.5-11　施工仕様（吹付け工法（高密度）） 266
表 4.5-12　試験ケース（吹付け工法（高密度）） 267
表 4.5-13　計測項目（吹付け工法（高密度）：実規模模擬坑道試験） 268
表 4.5-14　使用直前の埋戻し材のフレコンバッグからの採取位置別含水比（平均値） 271
表 4.5-15　リバウンド率一覧表（吹付け工法（低密度）実規模模擬坑道試験） 272
表 4.5-16　リバウンド率一覧表（吹付け工法（高密度）実規模模擬坑道試験） 274
表 4.5-17　実規模模擬坑道試験における各作業の所要時間（吹付け工法（低密度）） 279
表 4.5-18　施工速度（吹付け作業のみ及び全作業）（吹付け工法（低密度）） 280
表 4.5-19　転圧工法による埋戻し材の施工歩掛 281
表 4.5-20　転圧工法による埋戻しの施工速度 281
表 4.5-21　実規模模擬坑道試験における各作業の所要時間（吹付け工法（高密度）） 282
表 4.5-22　実規模模擬坑道試験における歩掛（吹付け工法（高密度）） 283
表 4.5-23　レファレンス槽の熱伝導率 288
表 4.5-24　模擬坑道の計測実施項目 296
表 4.5-25　各年度の施工試験実施時期及び実施内容 298
表 4.6-1　使用材料 306
表 4.6-2　埋戻し材の配合（質量%） 306
表 4.6-3　各試験ケース（計画値） 306
表 4.6-4　2mm ふるいによる簡易分析結果 310
表 4.6-5　3D 計測システム及び人力計測による埋戻し材の体積 312
表 4.6-6　膨潤変形試験の供試体仕様 318
表 4.6-7　一次元膨潤変形試験ケース（加圧方向の違い） 320
表 4.6-8　二方向膨潤変形試験の供試体仕様 321
表 4.6-9　二方向膨潤変形試験ケース 322
表 4.6-10　自己シール性試験の供試体仕様 324
表 4.6-11　自己シール性試験ケース 324

表 4.6-12　隙間設定条件 325
表 4.7-1　転圧工法及び吹付け工法における埋戻し材の製造プロセス管理手法の素案 329
表 4.7-2　撒出し・転圧工法における施工プロセス管理の素案 330
表 4.7-3　吹付け工法における施工プロセス管理の素案 331
表 4.7-4　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理の素案（製造段階） 332
表 4.7-5　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理の素案（施工段階） 333
表 4.7-6　ブロック工法における製造・施工プロセス管理手法の素案（製造段階） 334
表 4.7-7　ブロック工法における製造・施工プロセス管理手法の素案（製造段階） 335
表 4.7-8　ブロック工法における製造・施工プロセス管理手法の素案（施工段階） 336
表 4.7-9　かさ密度と砂置換法による密度測定結果の比較 337
表 4.7-10　3D スキャナの仕様（吹付け工法（高密度）） 338
表 4.7-11　かさ密度とシリコーンオイル法による乾燥密度測定結果の比較 339
表 4.7-12　小型土槽の埋戻し材の目標乾燥密度 341
表 4.7-13　乾燥密度の確率分布パラメータと透水係数と乾燥密度の関係 344
表 4.7-14　巨視的透水係数の解析ケース 345
表 4.7-15　巨視的透水係数の標準統計量（CASE 1～3） 348
表 4.7-16　巨視的透水係数の比率（CASE 1～3） 348
表 4.7-17　巨視的透水係数の標準統計量（CASE 4） 349
表 4.7-18　巨視的透水係数の比率（CASE 4） 349
表 4.7-19　巨視的透水係数に対する低密度領域の感度解析結果 350
表 5.2-1　中深度処分における監視測定設備と目的 354
表 5.2-2　米国における性能確認プログラムと品質保証に関する規制要求 355
表 5.2-3　測定及び監視活動に関する SSM からスウェーデン政府への意見書の概要 356
表 5.2-4　性能確認プログラムの具体化に向けた方向性 357
表 5.2-5　残存酸素による腐食のパラメータ整理結果（オーバーパック） 359
表 5.2-6　耐食性に対する放射線影響の抑制のパラメータ整理結果（オーバーパック） 360
表 5.2-7　地下構成要素の製造・施工時における基本的な管理項目 361
表 5.2-8　性能確認プログラムで把握する項目（案） 362
表 5.2-9　オーバーパックの製造・施工プロセスにおける管理項目と研究開発課題 363
表 5.2-10　緩衝材の製造・施工プロセス管理手法の素案と研究開発課題 364
表 5.2-11　PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案（製造・組立段階）(1) 365
表 5.2-12　PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案（製造・組立段階）(2) 366
表 5.2-13　PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案（搬送・定置段階） 367
表 5.2-14　PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案と研究開発課題 368
表 5.3-1　無線給電方式の分類 372
表 5.3-2　人工バリア性能確認試験で使用されているセンサの一覧 382
表 5.3-3　プラグ内に設置したセンサの稼働に必要な電力（試算値） 383
表 5.3-4　人工バリア性能確認試験における無線給電システムの仕様案 384

1. 緒言

1.1 本事業の背景と目的

本事業は、令和 4 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損傷領域（Excavation Damage Zone; 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）による緩衝材や埋戻し材への影響や、埋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 月に原子力委員会で決定された「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 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、その重要性は引き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。

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する。

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、緩衝材や埋戻し材あるいはその代替材料も含め、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いることを確認・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。

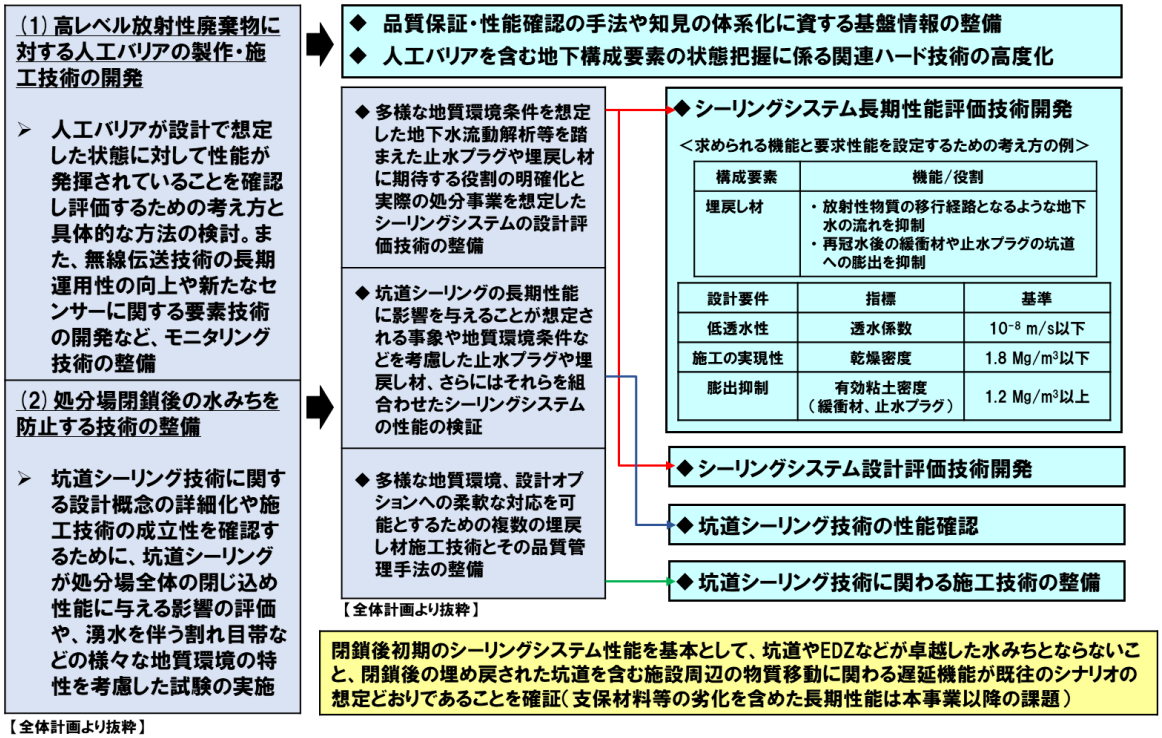


図 1.2-1　本事業の到達目標と進め方

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 EDZ が地上と直結する水みちとなることを防止するため、現在考えられている埋戻し材やプラグなどのシーリングシステムについて、これらの長期的な変遷を仮定した地層処分システム全体への閉じ込め性能への影響を評価するための技術を整備する。具体的には、平成 31 年度までに実施したケーススタディーで得られた成果を踏まえ、令和 2 年度以降は主に以下の 4 つの検討を進めることとした。

- 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長期変遷を想定したシナリオの具体化
- シーリングシステムの長期変遷が安全評価に有意な影響を及ぼす条件の把握と条件の生起可能性の検討
- シーリングシステムの性能の変化に応じた対応策の検討を踏まえた性能の考え方の整理

令和 3 年度までに、シーリングシステムが劣化する場合の因子・プロセスおよびこれらの相互作用について網羅的に整理しつつ、蓋然性にも留意した上で処分場閉鎖後の坑道や EDZ が水みちとなりうるシナリオを検討した。また、これらのシナリオについて、地下水流動解析や物質移行解析を通じて、移行経路評価を実施することで、シナリオで考慮される因子・プロセスが地層処分システムの閉じ込め性能に及ぼす影響を評価した。令和 4 年度は、これまでに実施した地下水流動解析や物質移行解析の結果や因子・プロセスとして考えられる力学的要因も考慮し、処分場閉鎖後の坑道や EDZ が水みちとなりうるシナリオの詳細化を図る。また、構築したシナリオの蓋然性を高めることを目的に、EDZ の経時変化や埋戻し材、止水プラグの割れ目等への侵入・流出などの因子・プロセスに関する現象理解を継続して進める。さらに、リスク論的な手法に基づくシナリオの蓋然性評価の結果も含め、坑道や EDZ が水みちとなる場合にこれらが地層処分

システム全体の閉じ込め性能に及ぼす影響を評価するための技術を整備する。

また、令和 4 年度までに、本事業で得られる坑道シーリングに関わる技術開発成果を体系的に整理・統合し、必要に応じて平成 31 年度までの本事業で提案した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フローの更新・高度化を図る。

(2) 坑道シーリング技術の性能確認

止水プラグや埋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。

埋戻し材について、令和 4 年度は、令和 3 年度まで継続実施している緩衝材と埋戻し材を対象とした縮尺模型試験等を継続してデータの蓄積を図るとともに、これらの膨潤変形挙動に影響を及ぼす物理的・化学的事象（例えば、地下水の水質や緩衝材中の空気の移動など）についても検討を進める。そのうえで、これらの成果を踏まえて、緩衝材と埋戻し材の力学的相互作用を考慮した膨潤挙動の現象理解を進める。

止水プラグについては、EDZ シーリング試験として、平成 31 年度までに幌延の深度 350m坑道底盤部において粘土系材料を用いた止水壁を構築し、EDZ の遮水性能を確認しており、令和２年度はその結果を踏まえ坑道天盤・側壁部への粘土系材料による止水壁構築技術の開発のための材料選定および地上での予備試験を実施した。また、令和 3 年度は、EDZ シーリング試験を継続して EDZ の遮水性能の経時変化を確認するとともに、幌延の地下坑道側壁部において止水プラグの切欠き部に対する粘土系材料の吹付け施工の適用性を確認するための原位置吹付け施工試験を実施した。令和 4 年度は、EDZ シーリング試験を継続して EDZ の遮水性能の経時変化を確認するとともに、令和３年度実施した原位置吹付け施工試験箇所の解体調査を実施し、同施工方法の適用性に関する評価を実施する。さらに、名古屋大学で開発されたコンクリーション化充填材について、EDZ シーリングのための代替材料としての基礎的検討のための原位置透水試験などやコンクリーション化材注入孔のオーバーコアリング等によるコンクリーションの伸展状況調査も実施する。

また、EDZ・EdZ（Excavation disturbed Zone、以下、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、令和 3 年度までに製作した Mini-seismic 装置のプロトタイプの改良・高度化を図るとともに、整備したサイトにおいて、グラウト材注入と透水試験を実施し、岩盤中の連続性の高い割れ目の検知に関する物理探査技術の適用性を把握する準備を行った。令和 4 年度は、令和 2 年度と同じ場所での高精度トモグラフィ調査を実施し、それらの比較を通じ高精度化した物理探査技術の適用性確認を実施するとともに、EDZ の経時変化を把握するためのトモグラフィ調査および調査結果からそれらを定量的に把握するための解析技術の開発などを実施する。

さらに、ボアホールシーリング技術開発として、令和 3 年度までに文献調査および地下施設内から掘削されたボーリング孔を対象とした閉塞技術を整備するための室内試験・モックアップ試験を実施し、ベントナイトブロックのボーリング孔閉塞に係る特性の把握やボーリング孔への設置手順を確認した。令和 4 年度は、この結果を踏まえ、幌延の地下坑道から試験用の水平ボーリング孔を掘削するとともにそれを用いた原位置シーリング試験を実施する。

(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戻し材の施工試験
・ 埋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戻し材の施工試験では、瑞浪の深度 500 m の坑道を対象として、実際の地質環境下における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。また、埋戻し材の特性を踏まえた施工技術オプションの整備では、多様な地質環境条件等に対応できる埋戻し材の材料バリエーションや施工技術オプションの整備に向けて、ベントナイトの種類・混合率、模擬掘削ズリの種類・最大粒径などをパラメータとした室内試験および模擬坑道等を対象とした転圧工法と吹付け工法による施工試験を実施した。これらを通して、施工パラメータや施工品質等に関するデータを取得するとともに、今後、施工試験等によって適用性の確認を進めるうえで必要となる、製造・施工プロセス管理手法の基礎を構築した。また、施工技術オプションとして、転圧工法と吹付け工法に加えて、スクリュー工法及びブロック工法による要素試験を実施し、適用可能な材料構成や施工後の乾燥密度等に関するデータを取得した。さらに、埋戻し材の浸潤挙動に関する解析結果の妥当性確認に資する材料パラメータ等を取得した。

令和 4 年度は、地上の実規模模擬坑道を活用して、転圧工法と吹付け工法を組合せた全断面施工を実施し、施工技術として適用性を検証するとともに各工法の適用範囲、施工品質、歩掛等の施工情報を取得する。また、埋戻し材の施工品質及び施工後の状態変化の把握等の計測技術として、ケーブル TDR を用いた坑道上部の隙間検知および加熱式光ファイバを用いた乾燥密度分布計測の高度化に取り組む。更に、スクリュー工法とブロック工法については、要素試験をとおして埋戻し工法としての適用性の見通しを得るとともに、施工技術の実証に向けた課題を抽出する。

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

－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管理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３年度までに、地下構成要素の品質保証と性能確認に関する海外情報および包括的技術報告書等の調査・分析を行い、竪置き・ブロック方式を対象とした品質管理プログラム（製造・施工プロセス管理における管理項目や管理指標、プロセス管理フロー等）と性能確認プログラム（性能評価に必要なパラメータの抽出と取得方法等）の素案を作成した。令和４年度は、横置き・PEM 方式を対象とした品質管理プログラムと性能確認プログラムの具体化に向けて、包括的技術報告書等の調査・分析を行い、地下構成要素の品質管理プログラムと性能確認プログラムの素案を更新する。また、地下構成要素を対象とした品質管理プログラムと性能確認プログラムに有益なデータを提供するための計測技術に共通する基盤技術として無線給電技術による給電効率の向上を

目的とした要素試験等によりプラグ等の鉄筋を介した給電効率を確認した。令和４年度は、実証試験等への適用を想定して無線給電システムの設計方法を整備するとともに、人工バリア性能確認試験を例題としてシステムの仕様例を示す。

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.

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.

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.

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.

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，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，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

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（NUMO, 2021）。このうち、埋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設計フローを構築し、この設計フローに従いシーリング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の是非や、その場合に移行経路となりうる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 2.1-1）、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、安全機能が低下すること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。

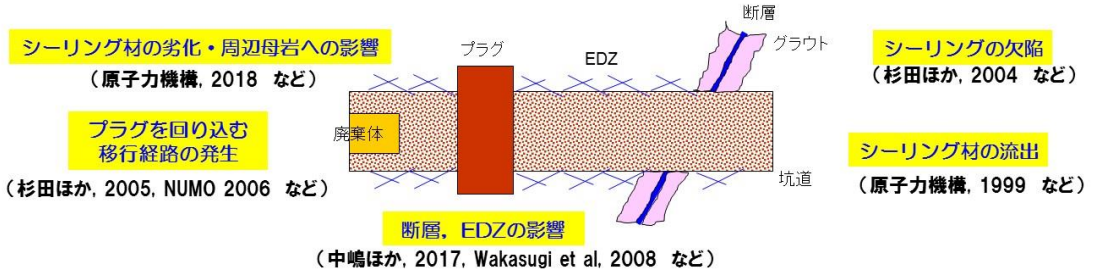


図 2.1-1　シーリングシステムが卓越した移行経路となりうる構造・要因

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（原子力機構・原環センター, 2019）。

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、仮に埋戻し部（坑道埋戻し、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、基本シナリオに加え、抽出したシナリオが生起した場合であっても処分システムに及ぼす影響は小さく、種々の工学的対策を講じることにより、その影響をさらに低減できる可能性が示された（原子力機構・原環センター, 2020）。

令和 2 年度は長期変遷によって埋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、坑道支保工のコンクリート成分の溶出や埋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戻し材の変質及ぼす影響について解析的にケーススタディを行い、このような影響は地下水流れの上流部もしくは坑道との割れ目交差部に限定され、少なくとも埋戻し部全域にわたって変質が促進する可能性は小さいことが示唆された。また、NUMO（2021）で示された深成岩類および新第三紀堆積岩類の地質環境特性をベースに、シーリングシステムの安全機能が喪失する場合を悲観的に仮定した物質移行解析を行った結果、新第三紀堆積岩では深成岩と比べ、水平坑道や立坑を介した移行が相対的に卓越するものの、坑道と交差する割れ目に多くの粒子が移行することが確認され、この効果はシーリングシステムが卓越した移行経路となることに対し、有利に働く可能性が示唆された。上述の結果を踏まえ、リスク論的な手法により、シーリングシステムが卓越した移行経路となり得ることをリスクと考えた場合のその生起可能性や影響度の評価を試行し、リスクマトリクスという形でシーリングシステムの安全機能の考え方を例示した（原子力機構・原環センター, 2021）。

令和 3 年度は、前年度の検討に加え、岩盤と坑道支保工との境界部で生じる諸現象や関連性を

再整理した上で、これら現象が生じた場合に埋戻し材の安全機能が低下する可能性のあるシナリオの詳細化を図った。また、詳細化したシナリオの発生可能性や埋戻し材の安全機能への影響を評価した。さらに、前年度に示唆された坑道と交差する割れ目に多くの粒子が移行する効果を含め、亀裂頻度や透水量係数分布などが、坑道や立坑を介した物質移行に及ぼす影響の感度を評価することで、シーリングシステムの安全機能が仮に失われた場合を想定した際のシステムの長期の安全性に影響を及ぼす地質環境条件を抽出した。上記の検討を通じ、前年度と同様の手法により、シーリングシステムの安全機能の考え方の更新を図った。

令和 3 年度は、坑道支保工の劣化（コンクリート成分の溶脱や外的要因に起因したひび割れ）に起因した埋戻し材の安全機能を変化させ得る可能性のあるシナリオについて詳細化を図った結果、3 つのシナリオを抽出した。このうち、コンクリート成分の溶脱により埋戻し材中のモンモリロナイトが変質するシナリオについては、今年度実施した反応輸送解析の結果、地下水の供給箇所および流出箇所については、CSH などの二次鉱物の沈殿により閉塞することから、変質の要因となる高アルカリ性の地下水の流入および移流場となる可能性は低いと考えられた。外的要因によって坑道支保工内のひび割れが生じたとしても、生じた間隙は二次鉱物の沈殿によって閉塞する可能性が示唆された。埋戻し材上部の間隙形成に起因して埋戻し材中のモンモリロナイトが変質するシナリオについては、二次鉱物の形成とともに、埋戻し材そのものの膨潤の影響によって間隙が閉塞する可能性も考えられることから、上述の坑道支保工内のひび割れが断続的に生じる場合と同様に力学的な相互作用を考慮した評価の実施を課題として示した。

令和 4 年度は、これまでの検討結果を踏まえ、シーリングシステムの長期変遷により安全機能が低下するシナリオのうち、処分システム全体の安全評価への影響度も踏まえ、最も憂慮すべきシナリオを記述する。この際、岩盤特性（割れ目頻度、透水性など）や埋戻し時の坑道の状態などの初期条件、埋戻し材周辺部材との相互作用等を踏まえ、シナリオが生じ得る条件の詳細化を図った。また、リスク論的手法に基づき、「埋戻し材の透水性が上昇すること」に対し、発生可能性と処分システム全体の安全評価への影響度を指標とし、リスク回避あるいはリスク低減策として取り得る対策の効果も含めてリスク評価を実施した。さらに、リスク評価結果に基づき、シーリングシステムの安全機能の考え方を提示した。

2.1.3 令和 4 年度の成果

(1) シーリングシステムの安全機能を変化させうるシナリオ

シーリングシステムには「放射性核種の移行の制限」という安全機能が設定されることが検討されており（NUMO，2021）、安全機能が失われるもしくは低下する直接的な要因は、埋戻し材やプラグに使用することが検討されている低透水性材料の性能が失われるもしくは低下することである。これらを踏まえ、国際 FEP リストを参考に、上述の性能を変化させ得る THMC プロセスを抽出し、これらの関係性をインフルエンスダイアグラムとして整理してきた（JAEA・RWMC，2019）。この中で、膨潤性鉱物であるモンモリロナイトが変質するプロセスが埋戻し材の安全機能を低下させるキーとなるプロセスと考え、埋戻し材の施工状態や周辺部材となる坑道支保工および岩盤との相互作用がモンモリロナイトの変質に与える影響を反応輸送解析によって評価してきた。坑道支保工と埋戻し材の状態遷移とこれに応じた埋戻し材中のモンモリロナイトの変質については、埋戻し材の施工後早期に想定される状態や力学的作用を考慮すると図 2.1-2 のように整理される（原子力機構・原環センター，2022 に追記）。吹付け工法によって埋戻し材を施工した場合、主に自重沈下により数 mm 程度の空隙が発生した事例があることから（秋山ほか、2016）初期状態（状態 3-A）として坑道上部に間隙（もしくは高透水性領域）の形成を想定している。状態 3-A から状態 4-A への変遷に伴う埋戻し材中のモンモリロナイトの変質評価を行った。解析条

件は原子力機構・原環センター（2022）における反応輸送解析と同様である。その結果、坑道支保工に使用されるセメント系材料からの Ca 等の溶脱によって、埋戻し材周辺の地下水の pH が上昇することで、モンモリロナイトの変質が生じるものの、変質が生じる領域は坑道支保工の近傍に限定されることが示唆された（図 2.1-3）。また、状態 4-B から状態 4-A における支保工内の割れ目が主に CSH やカルサイトといった二次鉱物の生成によって閉塞する傾向にある（原子力機構・原環センター，2022）。このような閉塞した割れ目等の空隙は地震動などの力学的作用によって再開口する可能性が考えられるが、ヨルダン、マカーリンのナチュラルアナログの検討事例の中で、再開口した割れ目が再度二次鉱物等によって閉塞するかの検討が行われている。この検討事例では、天然のコンクリート成分によって割れ目が一度 CSH や CASH、沸石類等によって閉塞した後に、谷の斜面の崩落によって割れ目が再開口しておりこの開口部に沿って流れる地下水の水質が RegionI 相当の高アルカリ溶液であれば再度閉塞するが、RegionII 相当、あるいは FRHP のようなより高アルカリの地下水が流れる場合には再閉塞しないことが示されている（核燃料サイクル機構，2005）。したがって、一度閉塞したコンクリート割れ目が開口し、再度開口部が閉塞するかについては、現状では閉塞／未閉塞の両方の可能性が考えられる。一方、埋戻し材に含まれるベントナイトは膨潤性を有するため、ベントナイトの膨潤プロセスがこのような空隙を閉塞する方向に作用する。そこで、図 2.1-4 に示す体系で弾粘塑性体を仮定し、モデルの境界条件による違いも含め、開放端の部分から膨出する埋戻し材の膨張率を評価した。解析には MACBECE（三原ほか，2009）を使用した。解析パラメータを表 2.1-1 に示す。解析の結果、5m ×5m のモデルにおける最大膨潤変位が 0.23 cm という結果となった（図 2.1-5）。本解析結果から、埋戻し材の膨潤のみで、秋山ら（2016）で報告されている空隙の全ては埋まらないまでも、一定程度の空隙を埋める効果が期待できると考えられる。

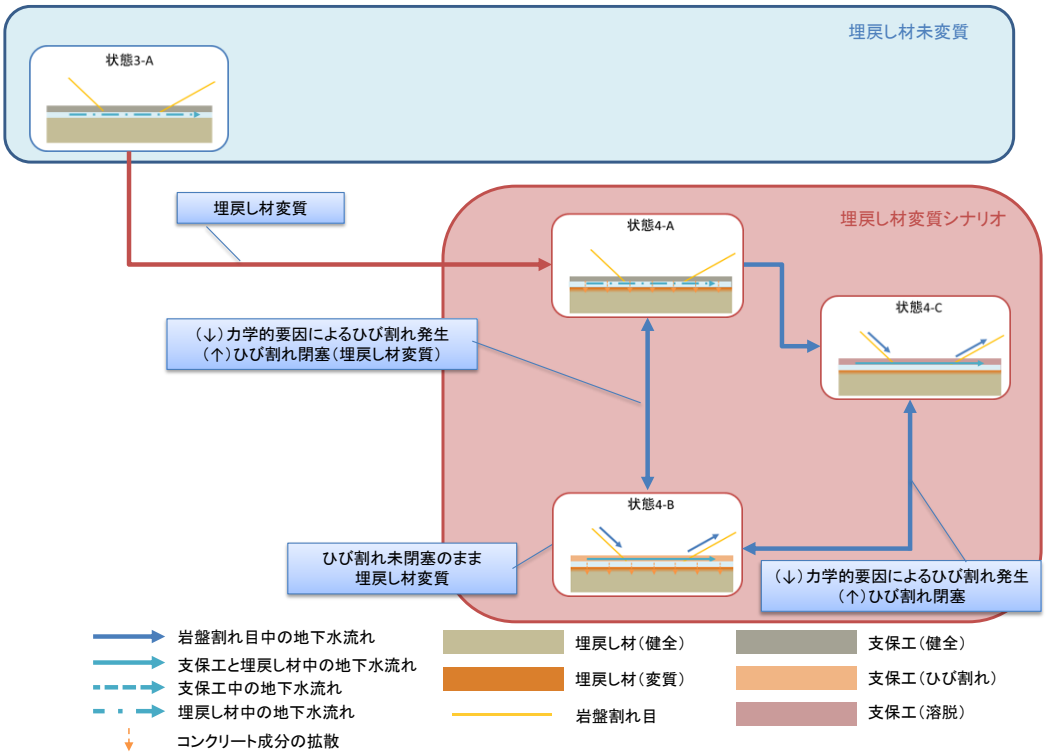


図 2.1-2　コンクリート成分の溶脱による埋戻し材の変質に至る状態変遷
（坑道上部の空隙を考慮）

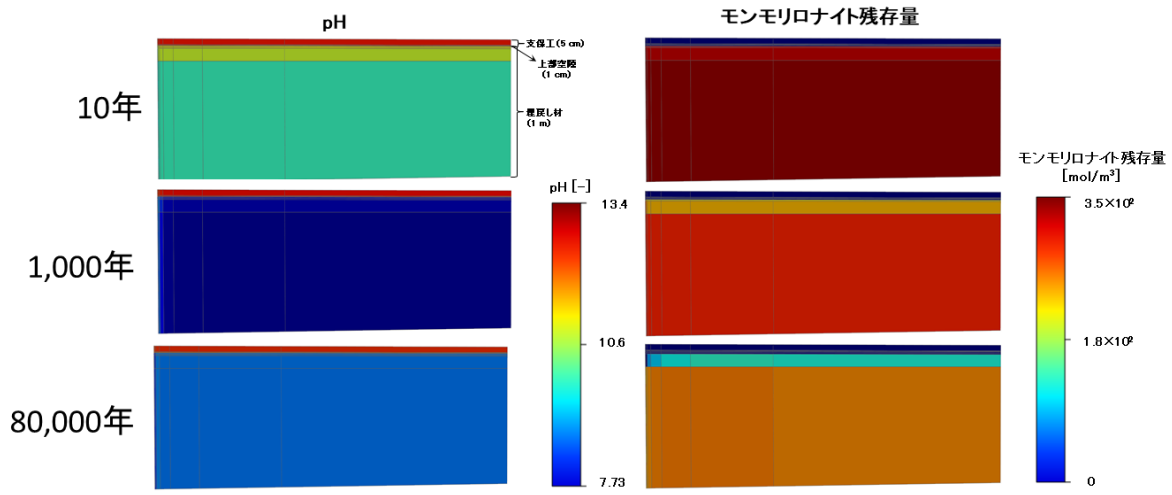


図 2.1-3　埋戻し材の変質解析（上部間隙内の流速を 1.0×10^{-9} m/s とした解析ケース）

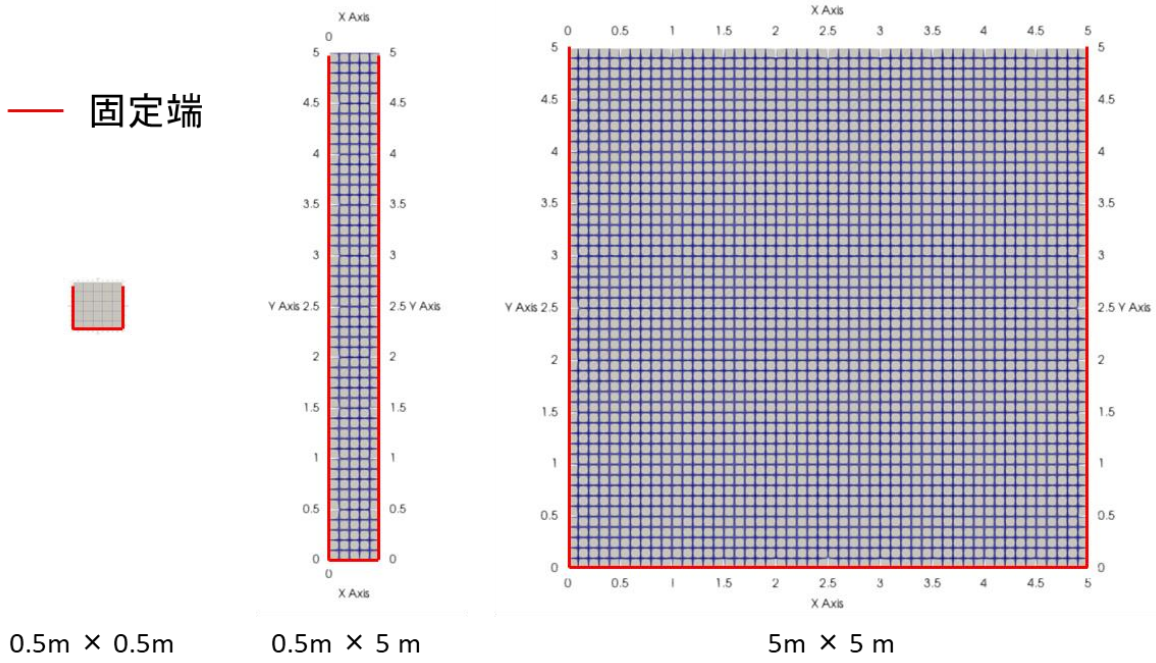
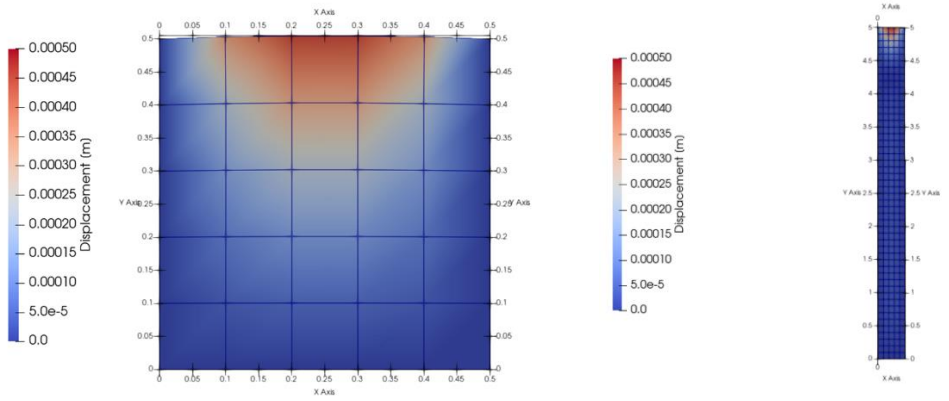


図 2.1-4　膨潤解析モデル

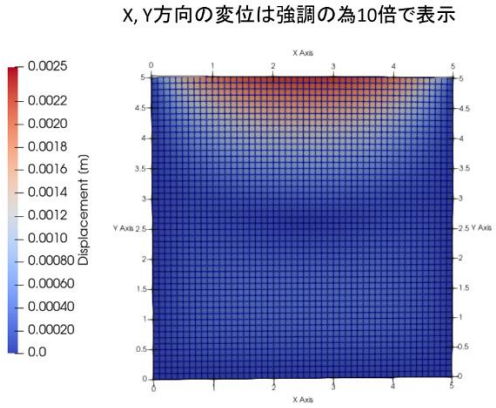
表 2.1-1　膨潤解析パラメータ

（NUMO，2021）

項目	記号	単位	設定値	備考
砂混合率	R_s	%	85	埋戻し材仕様の物性値
乾燥密度	ρ_d	Mg/m^3	1.800	
有効粘土密度	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、 ケイ砂：2.64
初期間隙比	e_0		0.472	乾燥密度から計算
圧縮指数	λ	－	0.066	圧密試験の値：原環センター（2015）
膨潤指数	κ	－	0.008	
ポアソン比	ν	－	0.300	埋戻し材の設定値：齋藤ほか（2010）
限界状態応力比	M	－	1.213	非排水三軸圧縮試験の値：原環センター（2015）
先行時の土被り圧	σ'_{0i}	MPa	－	自重解析による有効上載圧と同じとする
初期静止土圧係数	K_0	－	1.0	初期は膨潤圧により等方状態と仮定
二次圧密係数	α	－	4.30×10^{-4}	圧密試験の値： 原環センター（2015）
初期体積ひずみ速度	v_0	1/h	深成岩類 2.58×10^{-10}	$v_0=\alpha/(tc1\times H^2)$より算出、 H：排水距離[cm] 最大の排水距離：595 cm



(a)0.5 m×0.5 m モデル　　(b)0.5 m×5m モデル



(c)5 m×5m モデル

図 2.1-5　膨潤解析結果

上述した坑道上部に空隙（もしくは高透水性領域）が存在する状態で支保工由来のコンクリート溶脱成分に起因した埋戻し材の変質が生じた場合、主として坑道上部が選択的な核種移行経路となり得るため、安全評価上有意な影響を及ぼす可能性がある。そのため、これまでに埋戻し材の変質によって、坑道およびその周辺岩盤における核種移行挙動に及ぼす影響度を評価するため、1 枚の処分パネルと立坑を模擬した水理・物質移行解析を実施してきた（原子力機構・原環センター，2020；2021）。本解析では、埋戻し材が変質する、すなわち立坑や坑道が高透水性となる状態において、岩盤特性（亀裂頻度や透水性）、処分孔の位置などの条件が核種の移行挙動に及ぼす影響の感度を把握することを目的としたため、解析初期から立坑や坑道が高透水性を有する条件を設定してきた。模擬処分パネルおよび立坑の周辺はNUMO包括的技術報告（NUMO, 2021）の中で整理されている国内を代表する岩盤として深成岩類および新第三紀堆積岩類を想定し、それぞれの岩盤特性を考慮した。また、竪置きの処分概念に基づき、放射性核種に見立てた粒子は処分孔に配置した。物質移行解析結果から、亀裂頻度および透水量係数の統計値が相対的に大きい深成岩類の方が立坑や坑道を移行する粒子が相対的に少ない傾向にあった。これは、坑道と交差する比較的透水性が高い割れ目が多いため、これらの割れ目を介して選択的に核種が移行したことがその要因として考えられた（原子力機構・原環センター，2020）。一方で、局所的に高透水性となった坑道や立坑を移行する核種も見られたことから、核種の移行時間を分析し、安全機能が維持される状態を仮定した解析ケースとの比較を行った。図 2.1-6 は 2 本の立坑を片側一方

に配置し、両立坑の直近の位置に止水プラグを設置した条件で実施した物質移行解析結果（原子力機構・原環センター，2021）から、地表面に到達する移行率と移行時間を算出した結果である。少なからず劣化した坑道（立坑）を核種が移行する場合、その移行速度は相対的に速くなることから、安全機能が維持する場合と比べ、地表面に到達する移行時間が速くなる傾向が見られた（図 2.1-6）。

これらの結果を踏まえると、シーリングシステムの安全機能が失われるもしくは低下する可能性のあるシナリオは次のように記述される。すなわち、埋戻し材の膨潤性能が発揮されるものの、埋戻し材施工時の不均質性や施工初期段階で生じる自重沈下等により、主として坑道上部に空隙（もしくは高透水性領域）が形成された状態で坑道支保工由来の高 pH 地下水が坑道埋戻し部に移行すると、埋戻し材中のモンモリロナイトの変質が促進され主に坑道上部（坑道支保工直近の領域）に局所的に高透水性領域が形成され、それ自身は地表面まで直結する水みちにはならないものの、局所的に高透水性となった埋戻し部に核種が移行する場合、埋戻し材の安全機能が長期的に維持される場合と比べ、相対的に移行時間が短くなる可能性がある。このような坑道上部に高透水性領域が形成されるシナリオが成立する可能性をリスク論的な手法の一つである ESL モデルを用いて評価した結果、想定したシナリオが生起することの蓋然性は低いということが示された（原子力機構・原環センター，2022）。

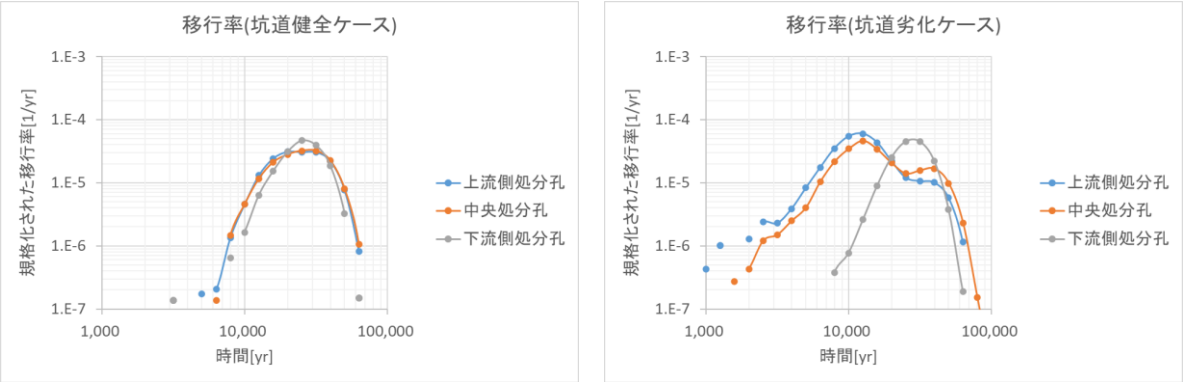
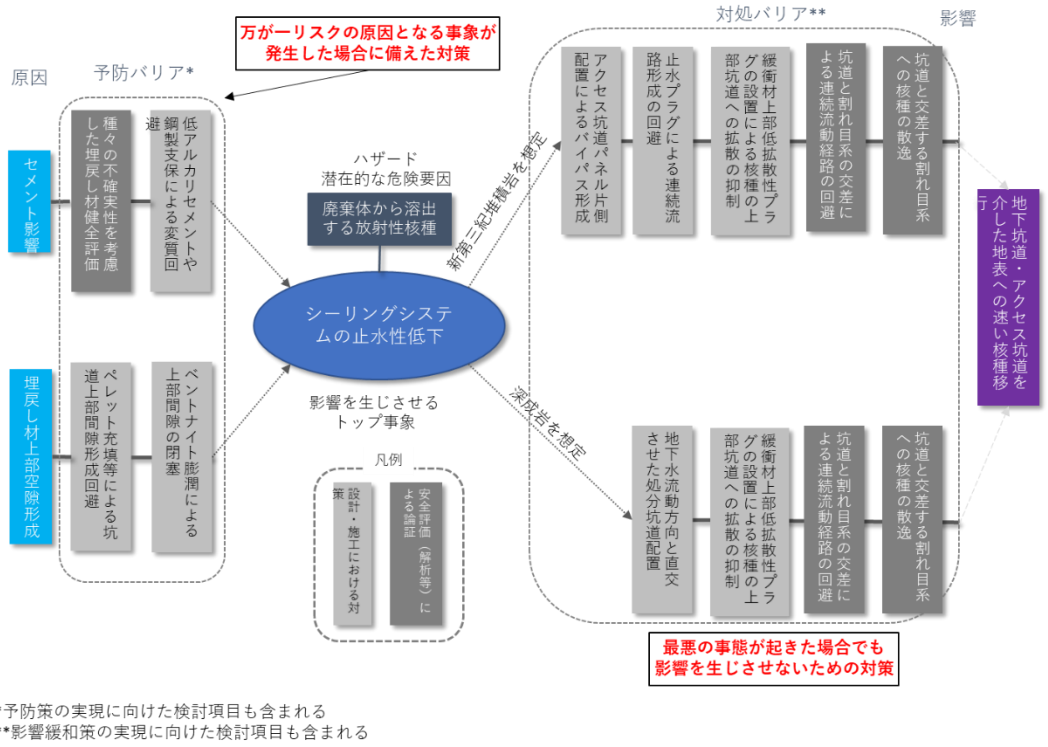


図 2.1-6　地表面における核種移行率の比較

(2) シーリングシステムの性能の変化に応じた対応策の検討を踏まえて性能の考え方の整理

過年度の検討結果から、シーリングシステムの安全機能が低下する可能性のあるシナリオの詳細化を図る一方で、そのシナリオが生起することの蓋然性は低いことを示してきた。その一方で、ESL の評価の基になるエビデンスは必ずしも十分ではないことに起因した不確実性を一定程度含んでいる。また、設定した各命題の重大性や命題を肯定／否定する確からしさについては、複数の専門家の判断を組み合わせてなされるものであるが、現時点では十分なコンセンサスが得られているとは言えない。したがって現時点で 2.1.1(1)で詳述したシナリオが生起することを完全に否定することは困難である。一方で、第二次取りまとめ（原子力機構，1999）や NUMO 包括的技術報告（NUMO，2021）においては、本検討で想定するようなシーリングシステムの安全機能が低下するシナリオが具体的な安全評価上のシナリオとして現時点で想定されているわけではないものの、処分システムの頑健性をより確保する観点から、今後シーリングシステムの安全機能の変化に応じた安全評価・性能評価がなされる場合、本検討で想定したシナリオを回避するための方策や、核種移行への影響を緩和するあるいは低減するための方策を抽出しておくことは、有益な情報となり得る可能性がある。このような観点から、シーリングシステムの性能が低下する

ことを回避するための方策と性能が低下することを想定した場合に生じる影響を低減するための対策について、その対策の効果（原子力機構・原環センター，2020）を含めて整理を行ってきた（図 2.1-7：原子力機構・原環センター，2022 を改訂）。仮に本検討で想定したシナリオが成立した場合においても、図 2.1-7 に示す対策を講じるあるいは対策の実現に向けた検討を実施することにより、立坑や坑道を介した選択的な核種移行の影響を低減することが可能であると考えられる。このような対策を講じることが将来的に必要となることを想定し、設計・施工、安全評価等の分野間の連携や、処分システムの構成要素間の関連性をより明確にし、シーリングシステムの性能を確保するための方策の全体像を提示した（図 2.1-8）。なお、本全体像の中には、過年度の検討項目と併せ、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場合の処分システムの頑健性確保のために必要な課題を整理している。ここでは、安全評価分野において必要と考えらえる対策について詳述する。なお、ここで示す対策や必要な検討はシーリングシステムの安全機能が低下したことを想定したシナリオの成立を回避する、あるいは成立した場合の影響を低減する方向に寄与するものを、現状の検討を踏まえて整理したものであるため、必ずしもすべての対策、検討が将来的な処分場の安全性確保において必要であるわけではないことに留意する必要がある。



*予防策の実現に向けた検討項目も含まれる
**影響緩和策の実現に向けた検討項目も含まれる

図 2.1-7　シーリングシステムの安全機能の低下が核種移行に及ぼす影響を回避・低減するための対策の全体像

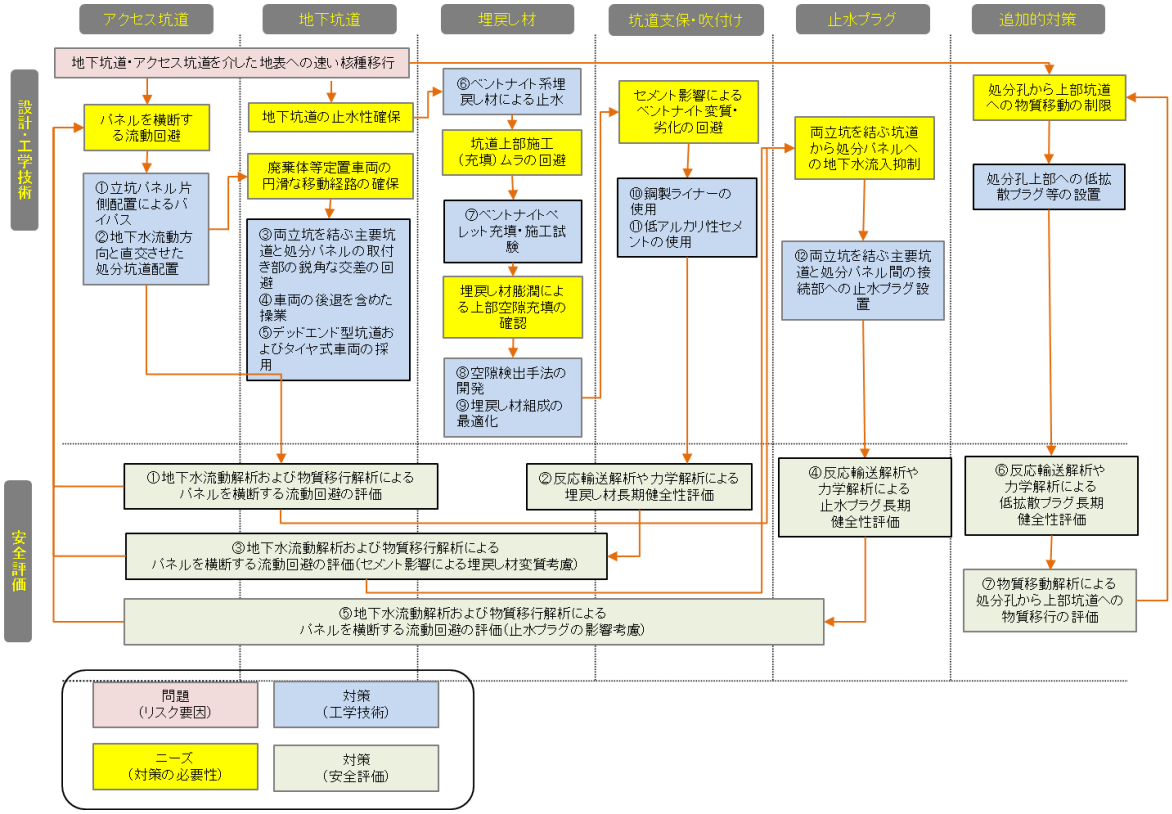


図 2.1-8　シーリングシステムの性能確保に分野間（設計・工学と安全評価）の連携の全体像

①地下水流動解析および物質移行解析による処分パネルを横断する流動回避の評価

本検討では、立坑パネル片側配置による地下水流動のバイパスや、地下水流動方向と直交させた処分坑道配置によりパネルを横断する地下水流動が回避できることを示してきた（原子力機構・原環センター, 2021）。一方で今後課題として、以下の評価を行うことが必要であると考えられる。

- 立坑出口や地表面（生活圏）における影響を現実的に評価するための核種移行解析を実施し、地表面での移行率や被ばく線量を評価すること。そのためには、処分パネルや立坑の影響を現実的に評価するための、複数パネルや立坑を含んだ水理・物質移行・核種移行解析モデルを作成することが必要になってくると考えられる。
- 地質環境、特に割れ目ネットワーク（割れ目のリアライゼーション）を変更した場合でも上記の結果（地下水のバイパス経路形成や、地下水流動方向と直交させた処分坑道配置によりパネルを横断する地下水流動が回避できること）が成立すること

②反応輸送解析や力学解析による埋戻し材長期健全性評価

本検討では、坑道上部の埋戻し材に着目し、支保工と埋戻し材を考慮した、簡単な軸対称円筒座標系および坑道軸方向（上流部および下流部）でのセメント影響を評価するための反応輸送解析モデルをそれぞれ作成し、埋戻し材へのセメント影響を評価した。また、ESL モデルにより、「コンクリート影響を考慮しても坑道埋戻し材の止水性は長期（10 万年程度以上）にわたって期待できる」という命題の評価を実施し、結果としてシーリング劣化の蓋然性は低い（正確には、「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」）という結果になった。今後の課題としては、以下のような評価を行うことが挙げられる。

- 立坑埋戻し材のセメント影響による長期健全性評価…本検討では立坑自身の長期健全性評価は実施していなかったが、立坑部分にもセメント系材料を使用することが想定されるため、その使用量を反映させて長期健全性評価を実施する。
- グラウトを使用する場合の影響評価…本検討ではグラウトの使用を想定した評価は実施していなかったので、その場合の埋戻し材の長期健全性評価を実施する。
- 坑道に交差する割れ目の閉塞影響、およびその核種移行挙動への影響評価…不均質な岩盤に坑道を設置した場合、坑道と割れ目が交差することが考えられる。その際セメント溶脱成分が割れ目から流出することによりその割れ目が閉塞して坑道周辺の水理場が変化することが考えられ、それにより核種移行経路が変化したり、坑道周囲の岩盤の核種収着特性が変化することが考えられる。シーリングシステムへの影響としては、例えば坑道に交差した割れ目が閉塞し、かつ坑道の透水性が上昇しているような場合、坑道内を移行する核種が増加する、といったような影響が考えられるため、そのような場合を想定した評価を行うことが課題として考えられる。
- 坑道内のセメント成分の枯渇時期の評価…上記で評価する割れ目の閉塞挙動は、坑道内のセメント成分の残存量と相互に影響すると考えられる。そのため、坑道全体を対象とした反応輸送解析を実施し、割れ目閉塞挙動とセメントの枯渇を連成させて評価する解析を実施することも課題の 1 つと考えられる。
- 地震動等の影響評価…まず割れ目閉塞部の再開口や支保工のひび割れ発生等、地震動により核種移行挙動に影響を与え得る事象を整理する。その後、それらがシーリングシステムに与える影響を評価する。例えば、割れ目閉塞部が再開口する場合、岩盤領域へ抜ける核種は増加するが、坑道内を移行する核種は少なくなり、シーリングシステムの性能劣化時にはむしろ処分場全体としての性能は担保される、といったような結果になることが予想される。さらに、地震動だけではなく、応力場の変化による亀裂の発生、地圧による亀裂の圧力融解といった現象によって亀裂分布が変化することも考えられるため、文献調査や原位置試験・室内試験等でその発生確率やメカニズムの調査を行うことや、考えられるシナリオの整理、そのシナリオが発生した場合の影響評価を実施することが必要と思われる。
- EDZ の不確実性（影響範囲や透水性等）の埋戻し材長期健全性への影響評価…本検討においては EDZ の不確実性を考慮したシーリングシステムの性能評価は実施していなかったため、その影響を評価するための検討を実施することも課題の 1 つであると考えられる。さらに、この結果を設計・施工側にフィードバックできるような形で整理することが必要である。
- 低アルカリ性セメントや鋼製ライナーを用いる場合の埋戻し材長期健全性への影響評価…鋼製ライナーを用いる場合の評価は、概念としては挙げたものの、定量的な評価は本検討では実施できていないので、今後の課題の 1 つとして挙げる。低アルカリ性セメントについては、予察的な反応輸送解析（軸対称円筒座標系の解析）でセメント系材料として HFSC を用いたケースで取り扱ったが、他の体系や、あるいは上述のような坑道と交差する割れ目の閉塞を考慮した、三次元的な水理・反応輸送解析を実施する場合に、低アルカリ性セメントを用いた場合の割れ目閉塞挙動等、OPC と比較してどのような差異が生じるのかを確認することも課題の 1 つと考えられる。

③地下水流動解析および物質移行解析によるパネルを横断する流動回避の評価（セメント影響による埋戻し材変質考慮）

本検討では、Partridge による不均質岩盤を想定した物質移行解析を種々のケースを想定したモデルで評価してきた。今後の課題としては、以下の検討が必要であると考えられる。

・ 地表面での移行率や被ばく線量の評価…シーリングシステムの性能を端的に表現するための指標としては立坑出口や地表面（生活圏）における移行率や被ばく線量が最もわかりやすい指標であると考えられ、これらの指標を評価するための核種移行解析を実施することが課題の 1 つである。現時点では、NUMO 包括的技術報告（NUMO，2021）に記述されている処分場の一部を取り出したモデルを用いて評価し、上述したような成果は得られているものの、例えば複数のパネルを表現したり、EDZ、支保工、埋戻し材をすべて区別できるような解像度で処分場全体のモデルを作成する、といったような主にモデル構築の部分については技術的な課題を解決する必要がある。
・ 時間変遷を考慮した物質移行解析…水理場や化学場の状態は実際には時間的に変遷すると考えられる（例えば隆起による水理場の変化や、セメント成分の溶脱による水理場・化学場の変化、塩淡境界との位置関係の変化等）。これら現実的に評価するため、水理・反応輸送解析との連携を強化し、水理場や化学場の時間変遷を考慮した物質移行解析を実施し、その影響を評価することが課題の 1 つと考えられる。

④反応輸送解析や力学解析による止水プラグ長期健全性評価

本検討では、止水プラグと埋戻し材の相互作用による影響評価ができていない。したがってまずは簡易な反応輸送解析モデルや力学モデルで埋戻し材への影響評価や止水プラグ自体の長期健全性評価を実施することが課題と考えられる。

⑤地下水流動解析および物質移行解析によるパネルを横断する流動回避の評価（止水プラグの影響考慮）

本検討では、Partridge による不均質岩盤を想定した物質移行解析の中で、止水プラグを設置したモデルで物質移行解析を実施し、止水プラグの設置位置が地下水流動や物質移行挙動に及ぼす影響を評価してきた。今後の主な課題としては、より現実的なレイアウトを考慮した評価を実施するため、④の評価で止水プラグの長期健全性評価を行い、その劣化段階に応じて止水プラグの透水性等を設定した水理・物質移行解析を実施することが考えられる。またこれらの評価は③で述べた「時間変遷を考慮した物質移行解析」とも連携して実施する必要があると考えられる。

⑥反応輸送解析や力学解析による低拡散プラグ長期健全性評価および⑦物質移動解析による処分孔から上部坑道への物質移行の評価

処分孔上部に設置する低拡散性プラグについて、本検討においては変質影響や水理・物質移行解析に基づく評価は実施していない。今後一つの技術オプションとして考慮する場合、以下のような評価を実施する必要があると考えられる。

・ 低拡散性プラグの長期健全性評価…坑道近傍に用いられているセメント系材料（主に支保工）の影響により低拡散性プラグがどのように変質するか、反応輸送解析により評価する。
・ 物質移行解析の実施…上記の低拡散プラグ長期変遷挙動を踏まえ、処分孔全体をモデル化した物質移行解析を実施することで、低拡散性プラグの有無により、上部坑道への核種移行挙動にどのような影響があるかを評価する

図 2.1-8 で示したような分野間を横断する検討課題を効率良く進めるためには、評価ツールの統合化、検討結果等の情報を統合的に管理するシステムや体制の構築、GUI 等のインターフェー

スの設計や機械学習によるサロゲートモデルや粗視化を用いた計算の高速化等の整備をすることが必要であると考えられる。このようなハード面における技術開発は、様々なステークホルダが関与する地層処分事業において、その周辺環境も流動的になると考えられ、可能な限り意思決定に必要な材料をそろえるための時間を短縮する上で有益であると考えられる。

(3) まとめ

令和４年度の成果は以下のとおりである。

- 主として過年度の反応輸送解析および水理・物質移行解析に基づき、シーリングシステムの安全機能が低下する可能性のあるシナリオとして、坑道上部に埋戻し材の自重沈下等による空隙が存在する状態において、坑道支保工のコンクリート系材料に起因した埋戻し材中のモンモリロナイトが変質するシナリオを抽出した。
- 上記のシナリオにおいて、モンモリロナイトの変質箇所は坑道上部に限定されるものの、この変質箇所を核種が移行する場合の移行速度は埋戻し材が健全な場合と比べて相対的に高い傾向である。ただし、このような核種の移行率は種々の設計や工学的対策を講じることで低減可能である。
- シーリングシステムの安全機能が低下する可能性のあるシナリオは、ESL モデルによる評価結果から、現時点では成立する可能性は低いと判定されたものの、各命題が有する不確実性を低減するための検討を継続して進めることにより、より蓋然性の高い評価が可能である。
- シーリングシステムの性能やシーリングシステムの安全機能を低下させるシナリオの蓋然性をより確実にするための対策について、設計・施工と安全評価の分野間連携の関係性をするとともに、今後必要となる検討課題を抽出した。

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，原環センター技術報告書，RWMC TRJ 15001, 2016.

核燃料サイクル開発機構，マカーリンナチュラルアナログプロジェクトの概要 －フェーズ I~III までの主な成果－，JNC TN8400 2005-005, 2005.

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.

原子力発電環境整備機構，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― 本編，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.

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.

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，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，2020.

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，2021.

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，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，2022.

三原守弘，佐藤信之，大野進太郎，森川誠司，TRU 廃棄物地層処分施設の力学挙動解析コード（MACBECE）の開発，JAEA-Data/Code 2009-026，2009.

2.2 埋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、立坑や坑道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戻し材で埋め戻すことが検討されている（例えば、NUMO, 2021）。埋戻し材は、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。一方で、埋戻し材に含まれる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中のモンモリロナイトの乾燥密度が低下し、埋戻し材に期待する放射性核種の移行の抑制機能を低下させる恐れがあることが指摘されている（例えば、原子力機構・原環センター, 2019 ; 2020）。スウェーデンの SKB では、特に埋戻し材の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、材料仕様等）を把握するための検討が行われており、これらの現象メカニズムには不確実性が多分に含まれるため継続した検討が必要としつつも、坑道の再冠水により坑道全体にかかる動水勾配が解消されることで、パイピングや浸食によって生じた間隙（gap）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として、施工方法や施工手順に係る事象についても指摘されており、SKB で検討されているベントナイトブロックとペレットを併用して埋め戻す工法について、坑道への湧水量が 0.25 L/min～1.0 L/min の場所ではジオテキスタイルによる湧水の分散や排水対策を講じる必要があることが指摘されている（Sandén and Börgesson, 2014）。国内においても、主に緩衝材を中心にパイピングや浸食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，2022）原位置試験等を通じ、岩盤からの湧水量とベントナイト浸食量との関係が整理されている（例えば、原子力機構・原環センター, 2019）。我が国では、処分場の設計フローに従い、埋戻し材を含む地下施設構成要素に求められる安全機能を考慮し、処分システムの閉鎖前および閉鎖後長期の安全性への影響評価から具体的な設計要件を決定することが検討されている（NUMO, 2021）。地質環境条件や材料の長期変遷に含まれる不確実性を考慮すると、設計や工学的対策によって不確実性を低減可能な施工初期から比較的短期に生じ得る現象に着目し、埋戻し材の安全機能を損なうような現象・プロセスの理解を図ることは、処分システムの長期安全性をより確実なものとする上で重要であると考えられる。また、SKB（2010）で指摘されているように、操業段階から坑道の再冠水までの期間で生じる坑道内およびその周辺岩盤の地下水流動場の変遷がパイピングや浸食現象を引き起こす要因の一つとして考えられていることから、パイピングや浸食現象などによって埋戻し材の安全機能を損なう要因となる条件（施工方法、材料仕様、地質環境条件）を理解することは、今後、処分事業の進展によって具体化される埋戻し材の施工概念はもとより、埋戻し材の設計要件等の決定や、長期的な埋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、主に施工初期の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 4 年度の実施内容

令和 3 年度においては、ベントナイトの流出現象のスケール依存性を確認するため、長尺の試験系を構築し、材料仕様（ペレットの粒径、ブロック）、水質（淡水、海水）やベントナイト充填区間の水頭条件、注水位置などの要因に着目した室内試験を実施し、それぞれの条件がベントナイトの流出現象に与える影響を確認した。その結果、各条件が埋戻し材の閉塞挙動や流出現象に

及ぼす影響が異なり、特に、人工海水条件ではベントナイトの膨潤による充填区間内の間隙（gap）の閉塞がイオン交換水条件に比べて速い傾向が見られるとともに、注水位置から流出位置までの距離が長いほど、ベントナイトの流出への影響が小さい可能性が示唆された。また、X 線 CT によるペレット間の間隙状態の評価を行い、X 線 CT 値から間隙状態の評価が概ね可能である見通しを得られた。

令和 4 年度においては、令和 3 年度の試験において、ベントナイトの流出が継続したことで供試体内の間隙閉塞のしにくい条件に絞り、長期間（最大 1 週間程度）の試験を行った。また、X 線 CT 分析については、充填、膨潤前後の CT 値と膨潤後のベントナイト供試体の含水比、乾燥密度測定を行い、CT 値と含水比、あるいは湿潤密度との関係性の整理を行った。

2.2.3 令和 4 年度の成果

(1) 流出・侵入試験

(a) 試験条件

図 2.2-1 に試験装置を示す。試験セル（アクリルチューブ）は長さ 100 cm、外径 100 mm とし、試験セルの上部には中央、端部の 2 箇所に注水口が構築されており、サイフォンの原理に基づき、最上流部の注水タンクから一定水頭差で注水可能となっている。試験セル下流には流出口が設けられており、流出水の重量から排出流量を測定している。また、一定頻度でメスシリンダーによる排出水の採水を行い、濁度測定と流出水の乾燥重量の両方からベントナイト流出量を算出した（原子力機構・原環センター, 2022）。供試体に使用したベントナイトペレットは粒径 15 mm のペレット（クレイパール、中島ほか, 2014）であり、クニゲル V1（クニミネ工業製）を含水比 12%に調整した上で、ブリケットマシンにより造粒した（図 2.2-2 (a)）。造粒したベントナイトペレットの平均乾燥密度は 1.96 Mg/m^3 となった（図 2.2-2 (b)）。ベントナイトペレットはロートとホースを用いアクリルチューブを立てた状態で上部から重力落下で充填した。
充填したペレットの重量からベントナイトペレットの充填密度を算出した。流出・侵入試験の試験ケースを表 2.2-1 に示す。

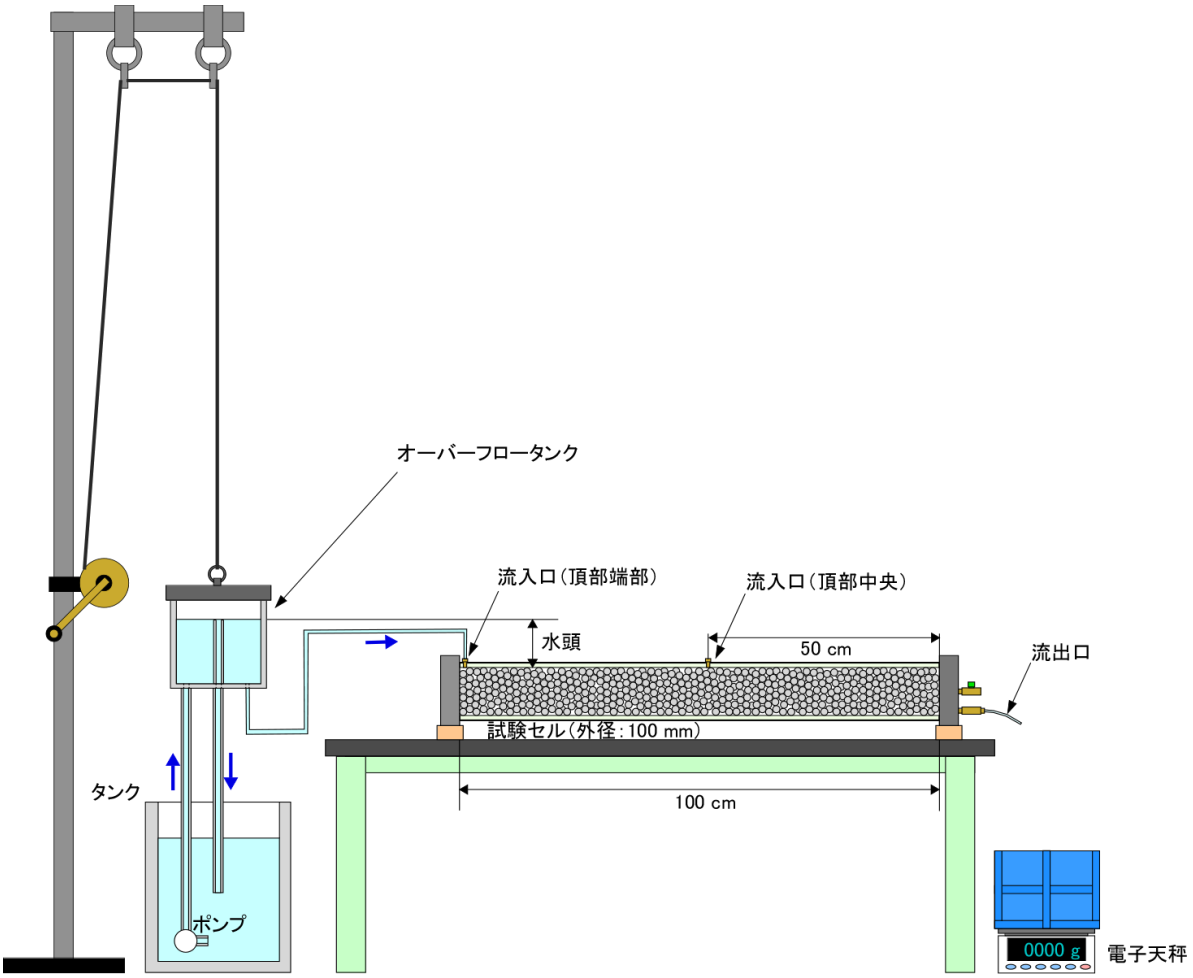


図 2.2-1　流出・侵入試験装置

(a)

(b)

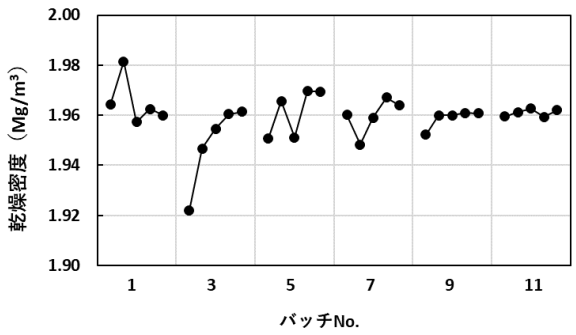


図 2.2-2　使用したベントナイトペレットと乾燥密度

表 2.2-1　流出・侵入試験ケース

ケース名	試験水	初期水頭（cm）	注水位置	充填乾燥密度（Mg/m³）
ケース 1	イオン交換水	10	頂部中央	1.13
ケース 2		10	頂部端部	1.12
ケース 3		5	頂部中央	1.13
ケース 3B		5	頂部端部	1.12
ケース 4	人工海水	10	頂部中央	1.11
ケース 5		10	頂部端部	1.11
ケース 6		50	頂部中央	1.12

(b) 流出・侵入試験結果

(i) ケース 1

流出流量と流出水中のベントナイト濃度を図 2.2-3 に示す。注水流量は注水開始 3 分後から 100 mL/min に上昇し 24 時間後までに 120 mL/min 程度まで上昇した。局所的な流量の増減はセル内の空気が流出水に混入したことがその要因と考えられる。ベントナイトペレットの浸潤は流出が観察された 3 分後では、図 2.2-4 (a)に示すようにセルの下部数 mm の位置に一様に広がっている。2 時間後には図 2.2-4 (b)に示すように、流出が続いている状態であっても徐々にペレットが吸水し浸潤範囲が上方に広がっていく様子が観察できる。8 時間後（図 2.2-4 (c)）の状態を経て、24 時間後には、注入口下部において注入口まで浸潤領域が広がった（図 2.2-4 (d)）。注入口左側の浸潤領域が、右側よりも高い位置まで拡張しているのは、左側は流出口がないために水の流れが非常に小さく、流出口がある右側に比べペレットの膨張や水の浸潤がしやすかったためと考えられる。その後、34 時間後においては、右側の浸潤も進展したが、同時に浸潤境界の近傍に水みちとみられる流路も見られるようになった（図 2.2-4 (e)）。

さらに、48 時間後には注水口下部に観察された洗掘とみられる空洞が発生し始め（図 2.2-4 (f)）、64 時間後（図 2.2-4 (g)）にはセルの下部まで広がった。これによりセル内が閉塞する可能性は低いと判断し、73 時間後（図 2.2-4 (h)）に流出口を閉鎖した。ベントナイト流出濃度は流出が開始した初期に高く、24 時間後および 32 時間後に一時的な上昇が見られるものの、時間とともに低下する傾向にあった。

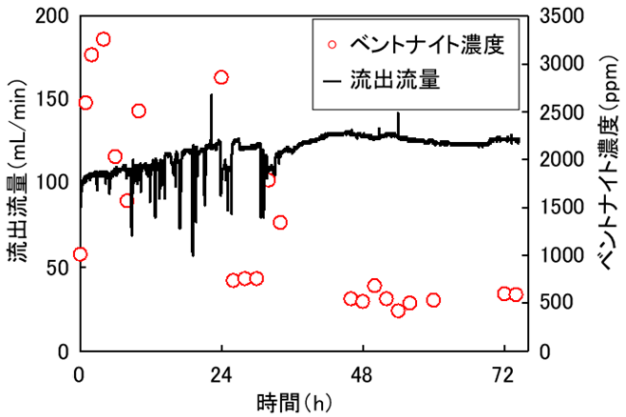


図 2.2-3　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 1）

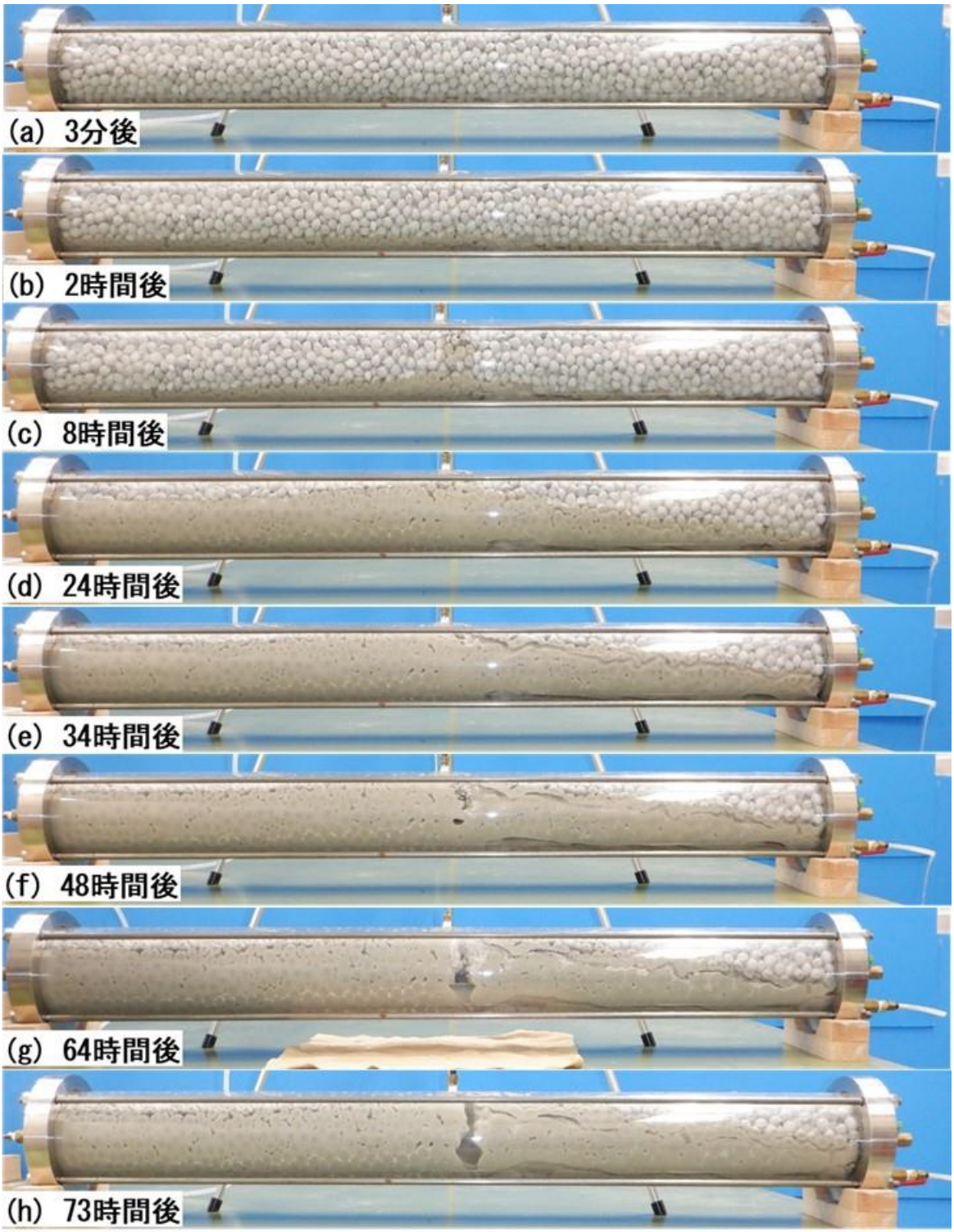


図 2.2-4　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 1）

(ii) ケース 2

流出流量と流出水中のベントナイト濃度を図 2.2-5 に示す。流出開始から 78 時間後まで 120 mL/min 程度の流出が続き、その後徐々に流出流量が低下し 107 時間後に流出が止まった。時間の経過とともに注入口の直下の浸潤が進展し、72 時間後の時点で注入口の位置まで浸潤が到達した（図 2.2-6 (a)～(f)）。注水開始から 6 時間後程度で水みちが観察され、34 時間後から生じた注水箇所直下に形成された水みちについては時間の経過とともに拡大していることがわかる。ベントナイト流出濃度については、水の流出が開始された直後に上昇し、24 時間後までに 1000ppm まで低下している。その後 1000ppm 前後のベントナイト濃度で推移した後、流出流量が低下し始める 72 時間後から上昇傾向を示し、流出流量が 0 になるまでこの傾向は継続した。

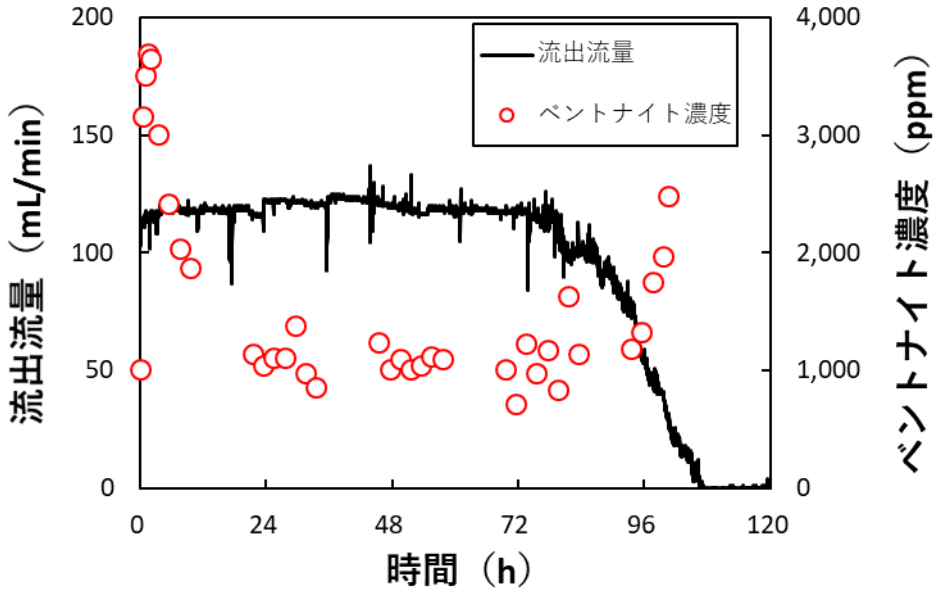


図 2.2-5　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 2）

図 2.2-6　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 2）

(iii) ケース 3

流出流量と流出水中のベントナイト濃度を図 2.2-7 に示す。注水開始から 4 分後に流出口から水の流出が始まり、168 時間の時点で流出が継続する状態であった。ケース 1 やケース 2 と同様に、試験セル底部から浸潤が始まり時間とともに上部方向へ浸潤が拡大していった（図 2.2-8）。浸潤の過程でケース 1 と同様に、注水口直下に洗堀が生じ、時間とともに拡大している様子が確認された（図 2.2-8 (c)～(h)）。水の流出開始直後にベントナイト流出濃度が上昇し、その後 1000ppm 前後で推移するものの、上述した洗堀が確認された時点からベントナイト濃度の上昇が確認された（図 2.2-7）。これは、洗堀の形成によってより多くのベントナイトが流出したことがその要因と考えられる。

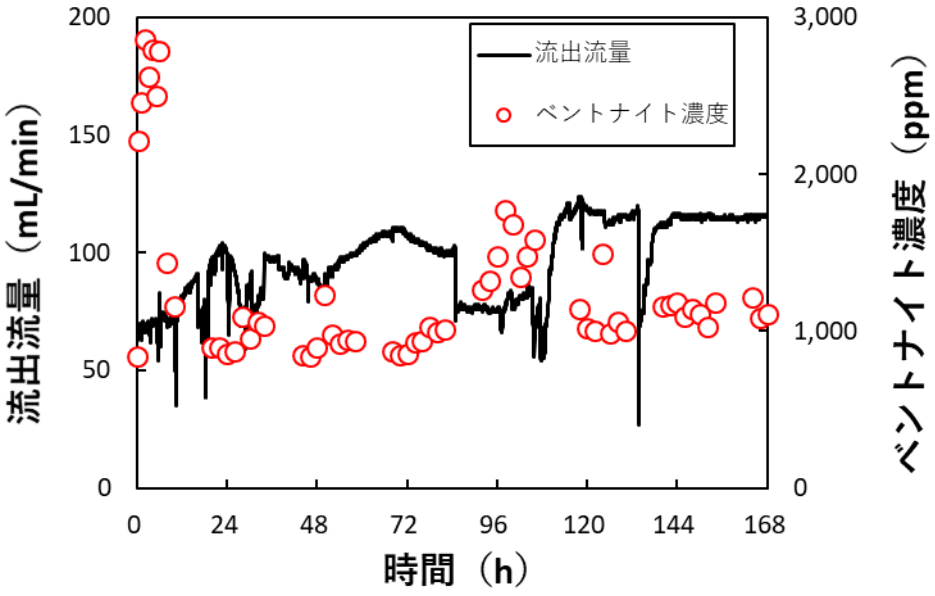


図 2.2-7　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 3）

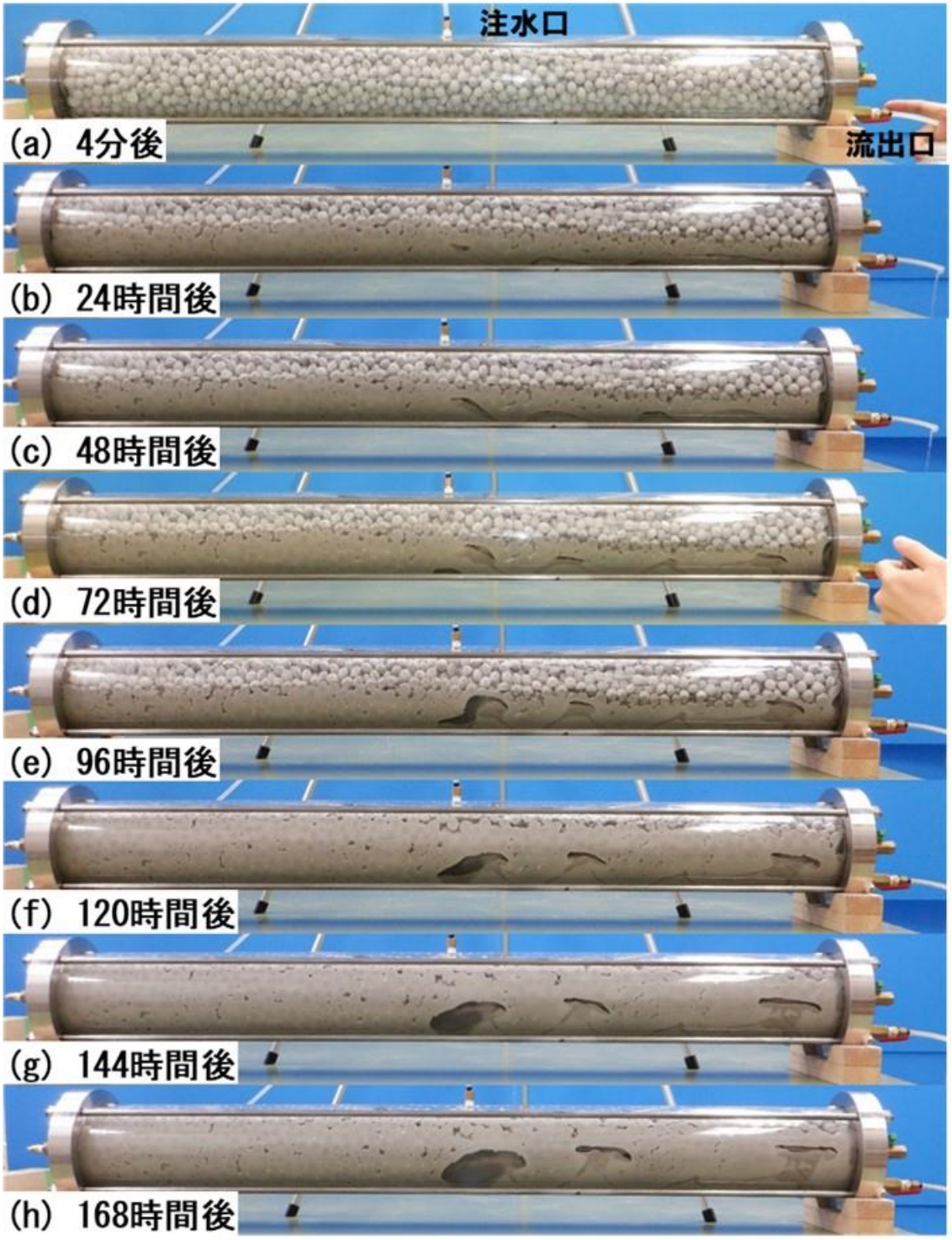


図 2.2-8　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 3）

(iv) ケース 3B

流出流量と流出水中のベントナイト濃度を図 2.2-9 に示す。注水開始から 4 分後に水の流出が始まり、168 時間経過時点で流出が継続する状態であった。通水初期の浸潤状況はケース 1～3 と同様に底部から開始しているものの、上部方向への浸潤速度が遅く、168 時間後において試験セルの半分までしか浸潤が見られなかった。図 2.2-10 (b)～(g)に見られるように、浸潤面に沿う形で明瞭な水みちが形成されており、注水した水が選択的にこの水みちを流れ続けた結果、他のケースと比べて上部方向への浸潤が遅くなったものと考えられる。ケース 3B はケース 2 と比べ試験セルにかかる水頭が小さく、試験セル入口の単位時間当たりの流量および流速が小さいことから、相対的にベントナイトの流出やパイピングの形成が生じにくいケースと考えられるものの、試験結果は逆の結果となっている。これは、通水初期に確認できるベントナイト濃度のピーク濃度がケース 1～3 と比べて、最も高いことから注水口周辺や試験セル底部のベントナイトペレット間の局所的な間隙状態がケース間で異なり、試験セル内のベントナイトペレット間の局所的な流速がケース 3B の方が相対的に大きかったことが要因の一つとして考えられる。

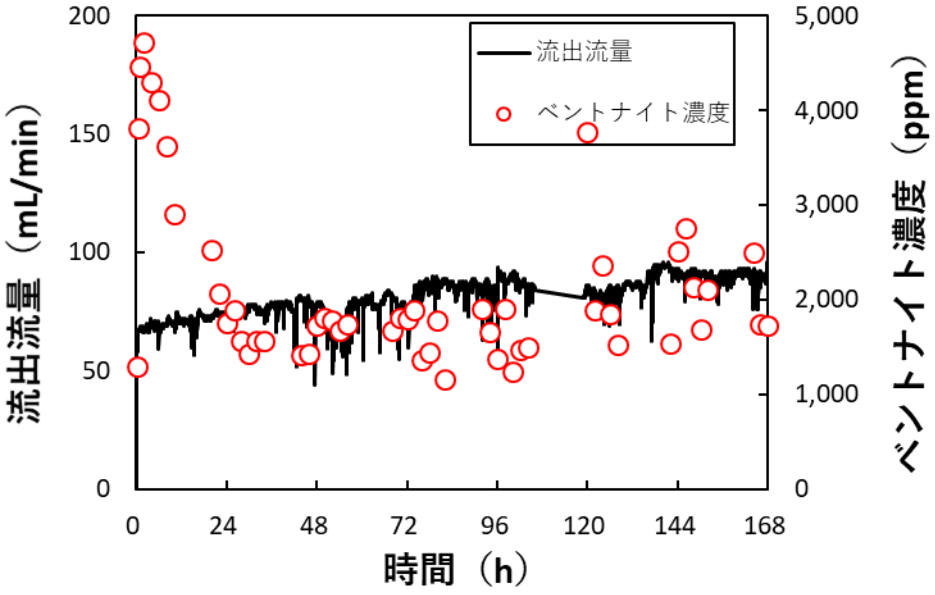


図 2.2-9　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 3B）

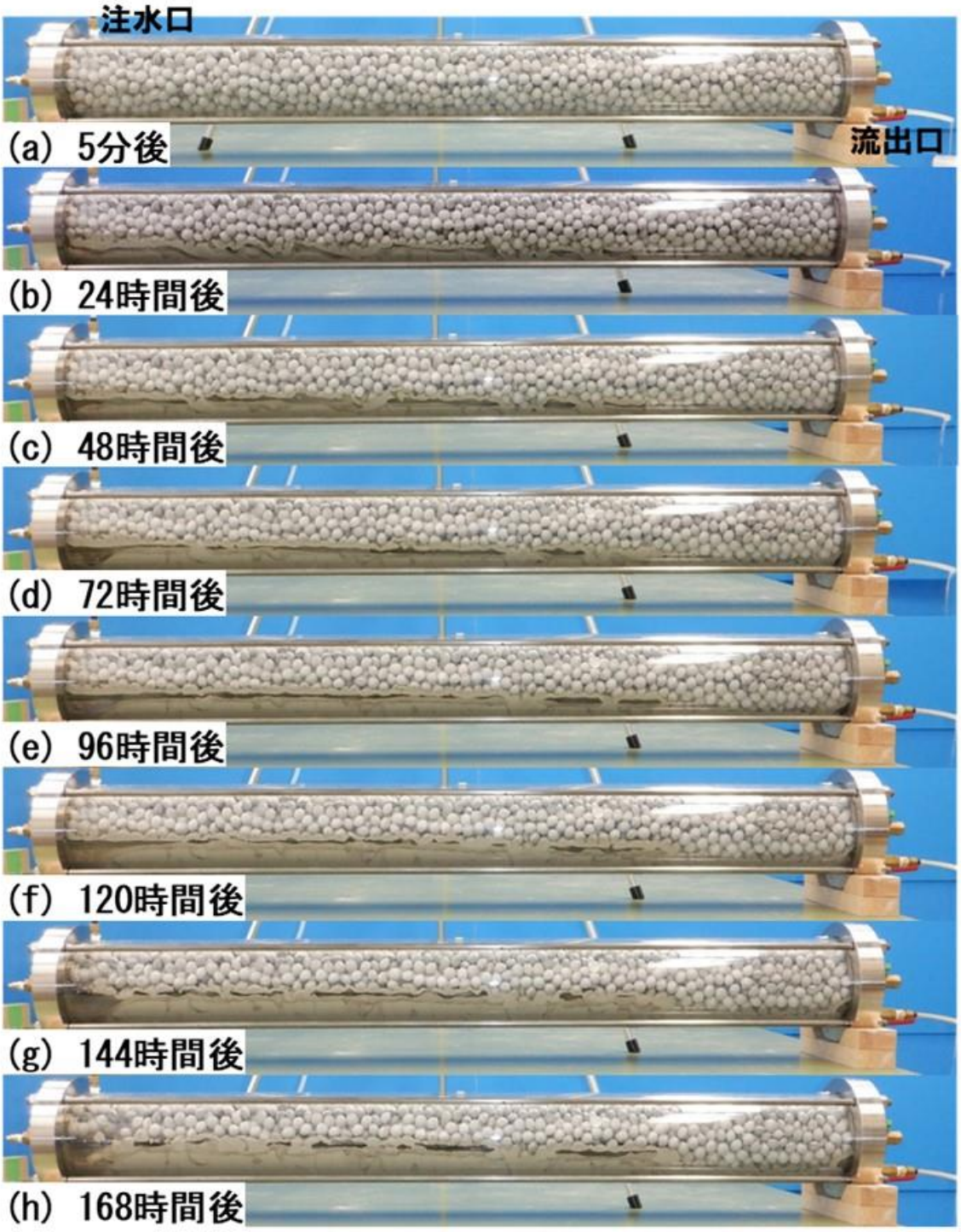


図 2.2-10　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 3B）

(v) ケース 4

流出流量と流出水中のベントナイト濃度を図 2.2-11 に示す。通水開始から 4 分後に水の流出が始まり、77 分後に流出が停止し 90 分後まで停止した状態が継続した。イオン交換水条件のケース 1～3B と比べ、流出流量が小さく、最大流出流量は 90mL/min 程度であった。これは、イオン強度の高い水が通水され、ベントナイトの崩壊によって比較的粒径が大きいベントナイト粒子が流れることにより、ベントナイトペレット間の間隙を埋めやすく、試験セル内の巨視的な流速が相対的に小さくなったためと考えられる。試験セル内の左側上部区間に浸潤していない領域が確認されるが（図 2.2-12 (d)）、これは、注水口から下流側のセル内の浸潤の進行が相対的に早く（図 2.2-12 (c)）、試験セル左側の上部に滞留した空気の排出経路が閉じられたことが要因で、浸潤が進行しなかったと考えられる。流出水中のベントナイト濃度は通水初期から上昇し、流出が停止する直前までこの傾向が継続した。通水から 60 分後に試験セル上部に明瞭な水みちが生じたものの（図 2.2-12 (e)）、時間とともに閉塞する傾向にあることが確認できる（図 2.2-12 (f)）。

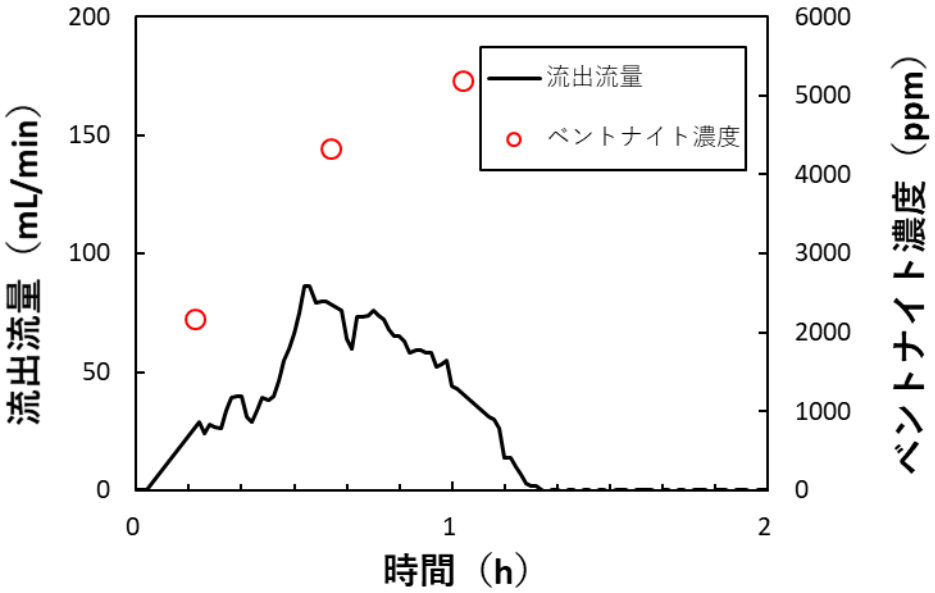


図 2.2-11　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 4）

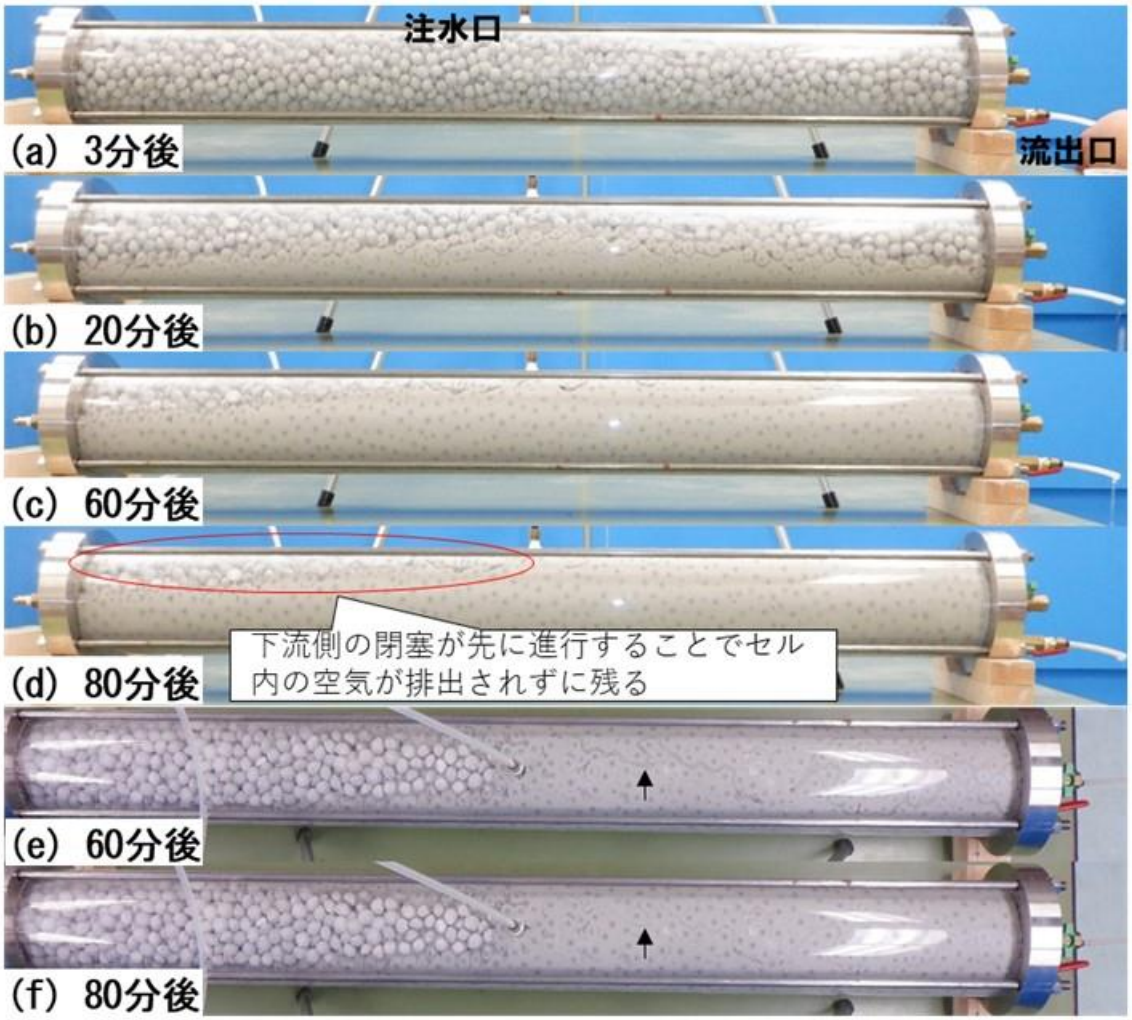


図 2.2-12　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 4）

(vi) ケース 5

流出流量と流出水中のベントナイト濃度を図 2.2-13 に示す。通水開始から 14 分後に水の流出が始まり、通水から 59 分後に流出が停止した。ケース 4 と同様に、イオン交換水条件と比べ、流出流量が小さく、最大で 20mL/min 程度であった。浸潤の過程で水みちが形成されたもののケース 4 と同様に、時間とともに収斂、閉塞に向かう傾向が確認された（図 2.2-14 (c)～(e)、(f)～(g)）。流出水中のベントナイト濃度は通水初期に 2500ppm 程度から低下する傾向が見られた。

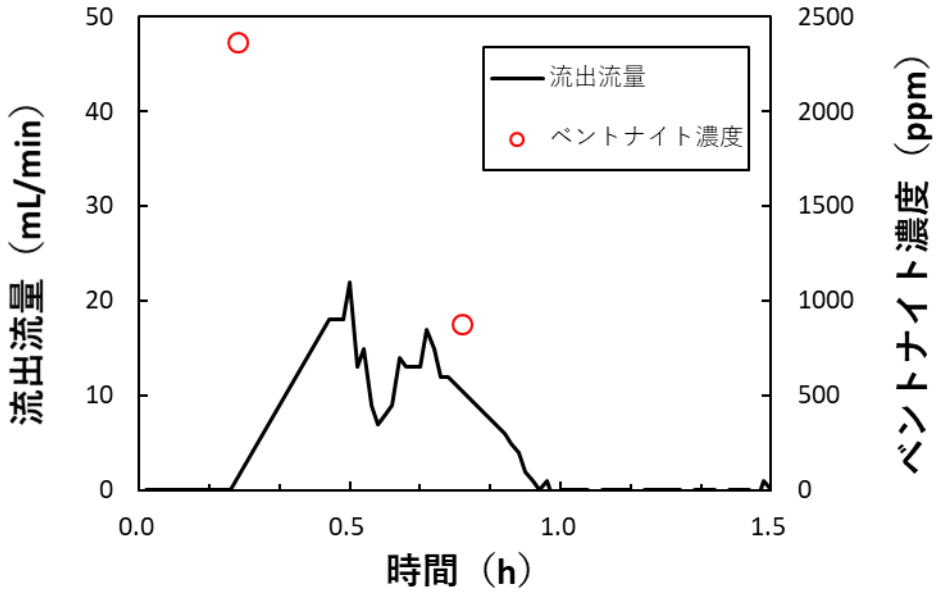


図 2.2-13　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 5）

図 2.2-14　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 5）

(vii) ケース 6

流出流量と流出水中のベントナイト濃度を図 2.2-15 に示す。注水開始から 1 分後に水の流出が始まり、15 分後に 320mL/min 程度の流出流量を示した。その後、200mL/min まで流出流量が低下し、その後は 8 時間後まで概ね一定で推移した。流出水のベントナイト濃度は流出流量の増加に伴って上昇し、その後は徐々に低下する傾向を示した。図 2.2-16 (a)～(d)から、試験セル側面には明瞭な水みちは形成されていないものの、試験セル上部には水みちが形成されており、時間とともに拡大している様子が確認された（図 2.2-16 (e)～(f)）。本試験ケースは塩水条件下での試験ケースの中で最も流出流量が大きい結果となったが、これは、設定した水頭差が最も高いことがその要因の一つとして考えられ、注水口から試験セル上部に形成された水みちが維持された状態で継続して流出が生じたためと考えられる。

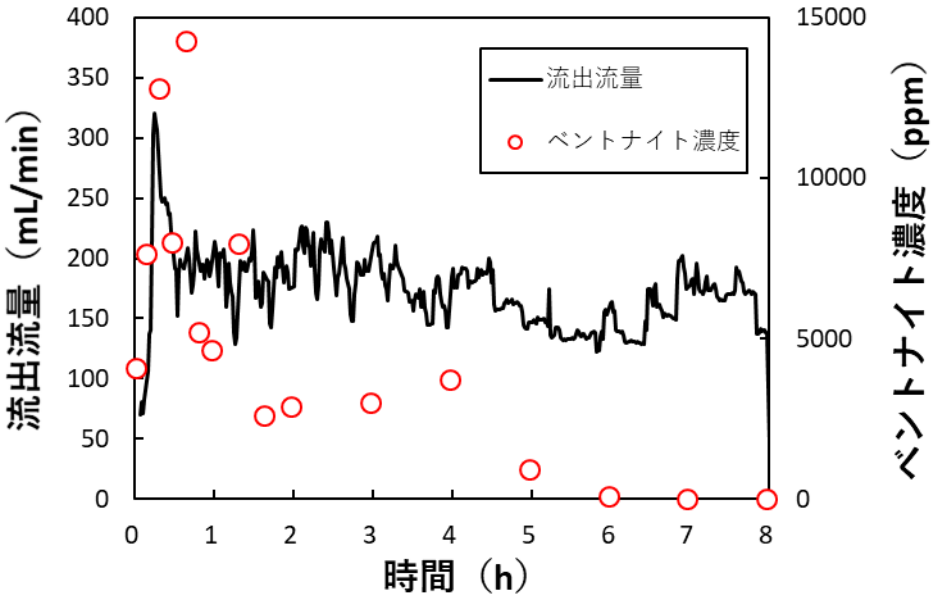


図 2.2-15　流出流量およびベントナイト流出濃度（ケース 6）

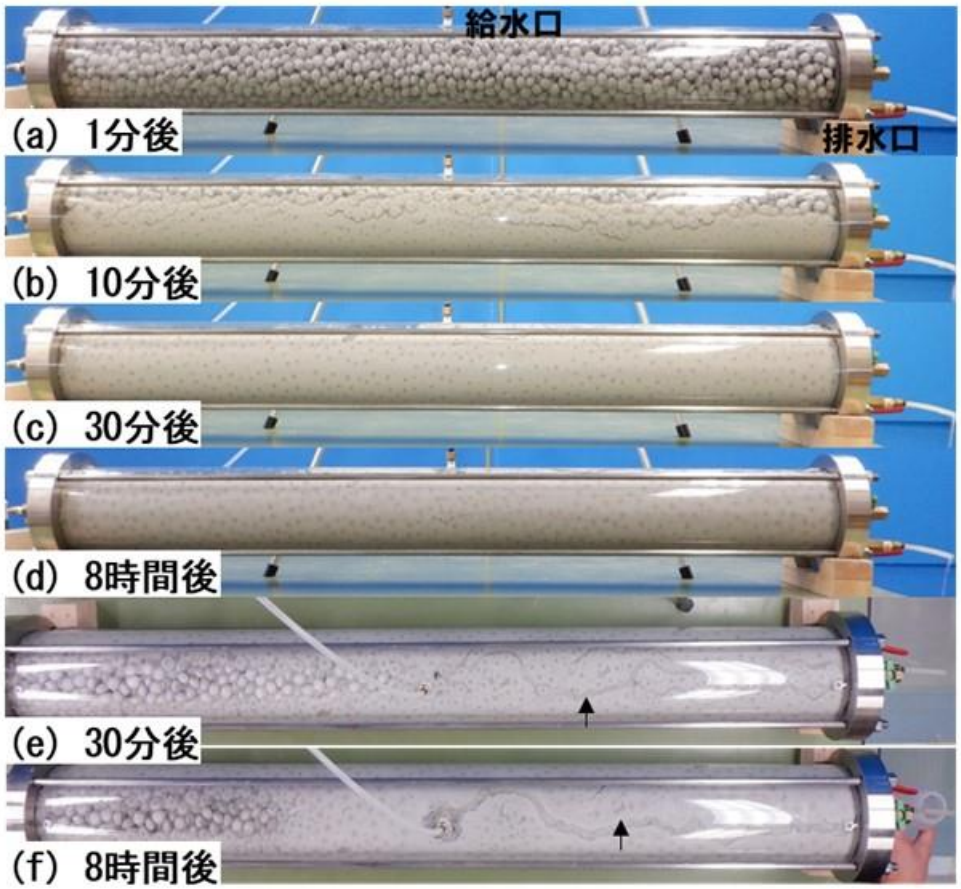


図 2.2-16　ベントナイトペレットの湿潤状態（ケース 6）

(c) 流出・侵入試験のまとめ

イオン交換水条件では、ケース 2 のみ 107 時間後に試験水の排水が停止し、残りのケースでは最大 168 時間経過後まで試験水の流出が継続した。初期水頭条件の差異により、ケース 3 および 3B の方が試験水の流出流量は小さいものの、ベントナイト流出量は逆に低い水頭条件となるケース 3 および 3B の方が大きくなる傾向にあった。4 ケースいずれも、アクリルセル底部に明瞭な水みちが形成されており（図 2.2-4、図 2.2-6、図 2.2-8、図 2.2-10）、特に流出口の直下の底部で顕著であった。これは、Φ15 mm の単粒径ペレットで充填する場合、ペレット間に生じる間隙を介して、主に重力によってほぼ直下にパイプ状に流れる水みちが形成され、その後アクリルセルとベントナイトペレットとの間の間隙が流出口に直結したことによるものと考えられる。特に、ペレットのような球状の材料を充填する場合、今回の試験装置のようなアクリルセルとベントナイトペレットといった材料間には比較的間隙が残りやすい傾向にある（原子力機構・原環センター，2022）こととも整合する。単純な間隙の大きさだけではなく、間隙の連結性も関係すると考えられ、実際の坑道の埋戻しの際に許容できる間隙の大きさについて定量的に言及することは難しいものの、ペレット工法による埋戻しの際はこのような選択的な水みちを回避するための方策として、粒径の異なるペレットを使用し、可能な限り粒子間および材料間の間隙を小さくすることが望ましいと考えられる。

人工海水条件では、水頭差を他のケースの 5 倍に設定したケース 6 を除き、イオン交換水条件と比べ、比較的早期（試験開始から約 1 時間）に水の流出が停止した。高イオン強度を有する水を注水したため、ベントナイトが崩壊し比較的粒径の大きい塊状のベントナイトが流出すること

でペレット間や材料間の間隙が閉塞しやすかったためと考えられる。ケース 6 については、他のケースと比べ格納容器内への単位時間当たりの試験水の流入量が大きいため、パイピング等の選択的な水みちが維持もしくは進展していったため、流出が停止しなかったと考えられる。人工海水条件では、試験中に局所的にパイピングが確認されたものの、ケース 6 以外は徐々に閉塞に向かう傾向にあった。このように、イオン強度が相対的に高い湧水環境下においては塊状のベントナイトが流出することで材料間の間隙をより早期に閉塞する傾向にあることが示唆された。

人工海水およびイオン交換水条件での総流出量に対するベントナイト総流出量を比較すると、早期に間隙が閉塞する傾向にあるイオン交換水条件の方が小さく、少なくとも 5 cm および 10 cm 水頭条件間あるいは注水位置による明瞭な違いは確認されなかった。また、イオン交換水条件での試験では、両対数軸においての傾きは概ね一致していた（図 2.2-17）。これは、排水が停止したケース 2 を含め、イオン交換水条件では格納容器の底部に選択的な水みちが形成されたことで、底部に充填されたベントナイトが全てのケースにおいて、流出しやすい状況にあったためと考えられる。

イオン交換水条件においては、注水位置の違いによる試験セル内の膨潤状況や流出流量との関連性は明瞭ではなかったものの、人工海水条件のケース 4 とケース 5 を比較すると、頂部端部注水（ケース 5）の方がわずかに流出の停止までの時間が早く、ベントナイト流出量も小さい結果となった。前述のように、塩水環境下ではベントナイト粒子の表面が崩壊し、粒径の大きい塊状のベントナイトが流出するため、流出口までの距離が比較的長いほど、重力による沈積が生じやすいと考えられる。このため、ケース 5 はケース 4 と比べて相対的に塊状のベントナイトが流出口から見て上流側に沈積しやすい、すなわち上流側の間隙閉塞が進行しやすい傾向にあったと推定される。ただし、このような効果は塊状のベントナイトを輸送する水の流速にも依存すると考えられることから、ベントナイトペレットの充填区間に作用する水理条件がベントナイト流出に与える影響について更なる評価が必要であると考えられる。

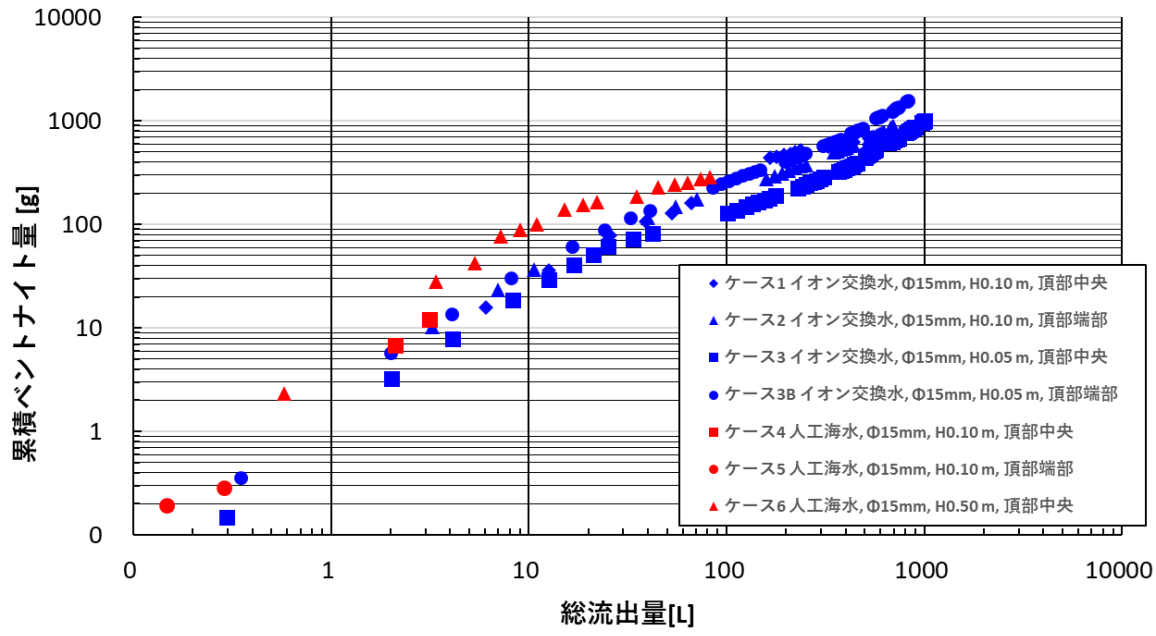


図 2.2-17　総流出量に対するベントナイト総流出量

(2) X 線 CT 評価試験

(a) 検量線作成用試験

(i) 試験条件

令和 2 年度の結果を踏まえ、X 線 CT 値から含水比あるいは湿潤密度への変換を可能とするために、含水比および乾燥密度既知の供試体を複数体準備し、それぞれの X 線 CT 値から乾燥密度および含水比との検量線を作成することとした。試験容器は図 2.2-18 および図 2.2-19 に示すように、2 種類の試験容器を準備するとともに、高乾燥密度供試体については、試験容器の材質が X 線 CT 値に及ぼす影響を評価するため、試験容器なし（ベントナイト供試体のみ）の条件でも計測を行っている。X 線 CT の計測は、供試体飽和前、途中、飽和後の 3 回実施しており、飽和過程においては、イオン交換水を張った脱気水槽に試験容器を浸漬させて飽和を促進させている。試験条件を表 2.2-2 に示す。下部フランジとアクリル製の胴部を組み上げ、ベントナイトの流出防止として下から多孔板・メンブレンフィルターを順に設置した。X 線 CT 値への試験容器に使用する材料の影響を低減するために試験容器はアクリル、塩化ビニル、樹脂の部品で構成した。また、膨潤過程におけるベントナイトの容器外への流出を防ぐため、アクリル製多孔板の内側にメンブレンフィルターを設置した。

検量線作成用の供試体では、低密度条件と高密度条件で 2 種類の試験容器を用いている。低密度条件では、ベントナイトの粉体を試験容器に 5 回に分けて投入し、1 層ごとに突き固めることで供試体（5 層突固め）を作製した。高密度条件では、あらかじめ一軸圧縮試験機を用いて静的締固めにより作製しておいた供試体（3 層静的締固め）を試験容器に入れ、試験に供した。

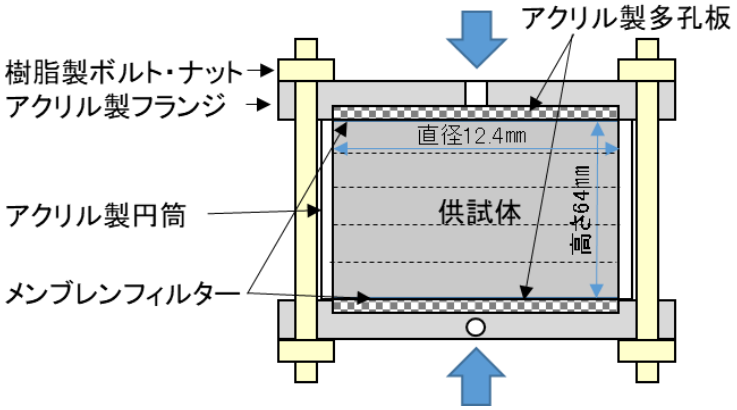


図 2.2-18　検量線用試験容器（低乾燥密度供試体）

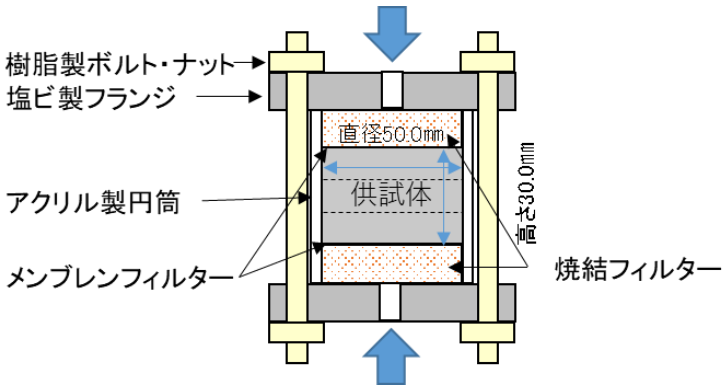


図 2.2-19　検量線用試験容器（高乾燥密度供試体）

表 2.2-2　検量線用試験ケース一覧

試験ケース	設定乾燥密度 (Mg/m³)	実測乾燥密度 (Mg/m³)	設定含水比 (%)	実測含水比 (%)	測定日（飽和後の経過時間：日）		
					飽和前	飽和途中	飽和後
1-1	0.600	0.759	10.00	10.04	0	25	63
1-2	0.800	0.800	10.00	10.04	0	25	63
1-3	1.000	1.000	10.00	10.04	0	25	63
1-4	0.600	0.600	20.00	20.03	0	25	63
1-5	0.800	0.800	20.00	20.03	0	25	63
1-6	1.000	1.000	20.00	20.03	0	25	63
2-1	1.000	1.011	10.00	10.04	0	25	63
2-2	1.000	1.010	20.00	20.03	0	25	63
2-3	1.200	1.207	15.00	15.04	0	25	63
2-4※	1.400	1.404	15.00	15.04	0※		
2-5※	1.600	1.596	15.00	15.04	0※		
2-6※	1.800	1.791	15.00	15.04	0※		
2-4	1.400	1.407	15.00	15.04	0	14	52
2-5	1.600	1.600	15.00	15.04	0	14	52
2-6	1.800	1.795	15.00	15.04	0	14	52

※試験容器なしの条件で測定したケース

(ii) 試験結果

試験ケース 2-4～2-6 と 2-4※～2-6※の結果から、試験容器の有無により、CT 値の最小値、最大値および平均値でそれぞれ、150、198 および 173 ほど、試験容器なしのケースの方が高いことが分かった。このことから、試験容器に使用される材料（樹脂、塩化ビニル、アクリル）を X 線が透過することにより、ベントナイト供試体部分を通過する X 線の強度が減衰する可能性があるため、前年度と同様に、試験容器と一体でベントナイト供試体の X 線 CT 値を評価する際は、以下の式で補正を行うこととした。

$$x_{補正後CT値} = 0.001x_{補正前CT値} + 0.6757 \qquad \text{式 2.2-1}$$

式 2.2-1 で補正を行った上での飽和前の CT 値の測定結果を表 2.2-3 に示す。各ケースのベントナイト供試体の乾燥密度および湿潤密度のそれぞれと補正後の CT 値との相関を見ると、いずれの値も相関性が良く、わずかに湿潤密度の相関性が良い結果となった（図 2.2-20）。

表 2.2-3　飽和前の CT 測定結果

試料 No.	浸潤状況	実測含水比 %	実測乾燥密度 Mg/m³	実測湿潤密度 Mg/m³	CT 値	補正 CT 値
1-1	飽和前	10.0	0.759	0.835	5.17	178.17
1-2	飽和前	10.0	0.800	0.880	72.02	245.02
1-3	飽和前	10.0	1.000	1.100	283.83	456.83
1-4	飽和前	20.0	0.600	0.720	-127.29	45.71
1-5	飽和前	20.0	0.800	0.960	114.85	287.85
1-6	飽和前	20.0	1.000	1.200	390.06	563.06
2-1	飽和前	10.0	1.011	1.113	243.97	416.97
2-2	飽和前	20.0	1.010	1.213	339.68	512.68
2-3	飽和前	15.0	1.207	1.389	512.91	685.91
2-4	飽和前	15.0	1.404	1.615	784.35	957.35
2-5	飽和前	15.0	1.596	1.836	1037.11	1210.11
2-6	飽和前	15.0	1.791	2.060	1253.88	1426.88

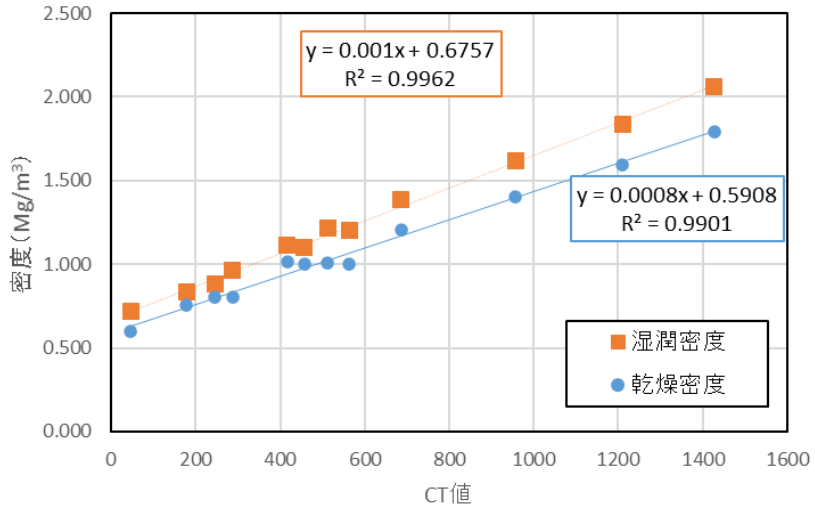


図 2.2-20　湿潤密度、乾燥密度と CT 値の関係

飽和後のベントナイト供試体の CT 値と図 2.2-20 の近似式を適用した際の湿潤密度の推定値および湿潤密度の実測値を表 2.2-4 に示す。推定値と実測値で概ね一致する結果となり、飽和前のベントナイト供試体の CT 値から作成した検量線により、飽和後のベントナイト供試体の湿潤密度を推定することが可能であることが分かった。

表 2.2-4　飽和後の CT 値と湿潤密度

供試体 No.	CT 値	補正 CT 値	湿潤密度（Mg/m³）	
			推定値	実測値
1-1	507.45	680.45	1.356	1.376
1-2	656.64	829.64	1.505	1.507
1-3	785.85	958.85	1.635	1.624
1-4	519.95	692.95	1.369	1.372
1-5	652.88	825.88	1.502	1.504
1-6	802.54	975.54	1.651	1.637
2-1	741.49	914.49	1.590	1.644
2-2	736.44	909.44	1.585	1.638
2-3	878.16	1051.16	1.727	1.766
2-4	976.37	1149.37	1.825	1.832
2-5	1089.5	1262.48	1.938	1.951
2-6	1192.4	1365.42	2.041	2.087

(b) 通水試験

(i) 試験条件

通水試験用の試験容器は、図 2.2-21 に示すように縦 200mm、横 200mm、深さ 70mm である。試験水の通水は試験容器底面より行い、容器上面より排水する。給水面と排水面には、アクリル製の多孔板を設置した。X 線 CT 測定に影響を及ぼさないよう、試験容器は側面円筒部分をアクリル製、上下フランジ、ボルトおよびナットは塩ビ製とした。ベントナイトの流出を防ぐため多孔板の内側にメンブレンフィルターを設置した。イオン交換水条件の試験容器は、令和 2 年度の試験において、通水試験時に漏水が確認されたことから、漏水を防止するために上下のフランジをそれぞれ 2 枚とした。人工海水条件の試験容器は、前年度の測定で漏水が発生しなかったことから、前年度と同様に上下のフランジは 1 枚ずつとした。ペレットの充填はアクリルセル上部よりスコップを用いて流し込んだあと、均質になるように手で敷き均した。突き固めは行わず、振動等も与えなかった。ペレットの充てん密度はイオン交換水条件および人工海水条件ともに 1.239 (Mg/m³)であった。ペレット上部にメンブレンフィルタ・アクリル製多孔板を順に設置し、上部フランジを組み上げて塩ビ製のボルトで固定した。なお、イオン交換水条件の供試体は、膨潤圧によるフランジの変形を抑えるために、上下のフランジをそれぞれ 2 枚組とした。

通水試験は図 2.2-22 の体系で実施し、試験容器への通水はマリオットタンクを用いて行った。試験容器にかかる水頭は初期水頭を 0.1m とし、排水が停止したことを確認後から段階的に昇圧（最大 1m）した。通水試験に使用したベントナイトペレットは 2.2.3(1)流出・侵入試験と同様のものを使用した。また、通水に使用した試験水も 2.2.3(1)流出・侵入試験と同様のイオン交換水と人工海水を用いた。表 2.2-5 に試験条件を示す。各試験水に対して 1 ケースを実施した。試験ケース名は、XP（粒径）－（試験水：イオン交換水(D)、人工海水(S)）としている。通水試験用供試体では、試験の前後と途中の 3 回にわたり X 線 CT 測定を実施した。通水試験開始から試験途中の測定までは、供試体下面から給水し、上面に排水する形で通水試験を実施した。試験途中の測定後は飽和を促進させるために試験水を張った脱気水槽を用いて水浸脱気により飽和の促進を図った。水浸脱気時は、試験水に浸漬させているため上下の孔から供試体に試験水が供給される状態である。また、通水試験前後で、供試体の質量を計測した。通水試験後にはベントナイト供試体を解体し、小さなブロックに分割し、ブロックごとに含水比を測定した（図 2.2-23）。通水試験用の供試体は試験ケース毎に 300 ピースのブロックに分割した。

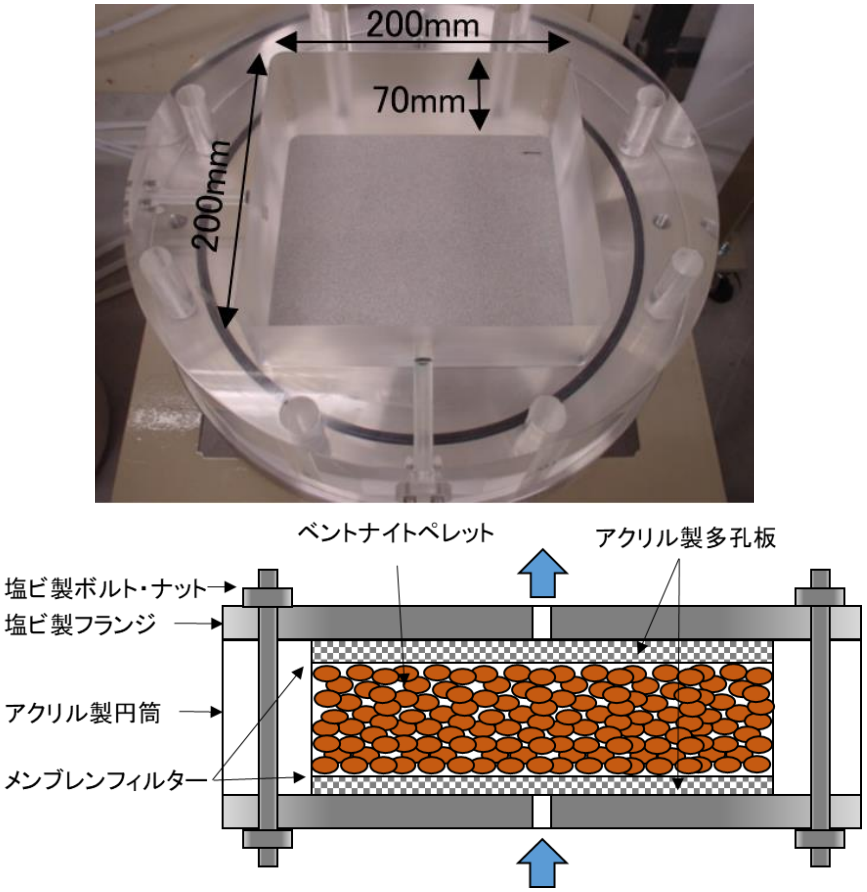


図 2.2-21　通水試験用試験容器
（上図：試験容器内寸、下図：試験装置概要）

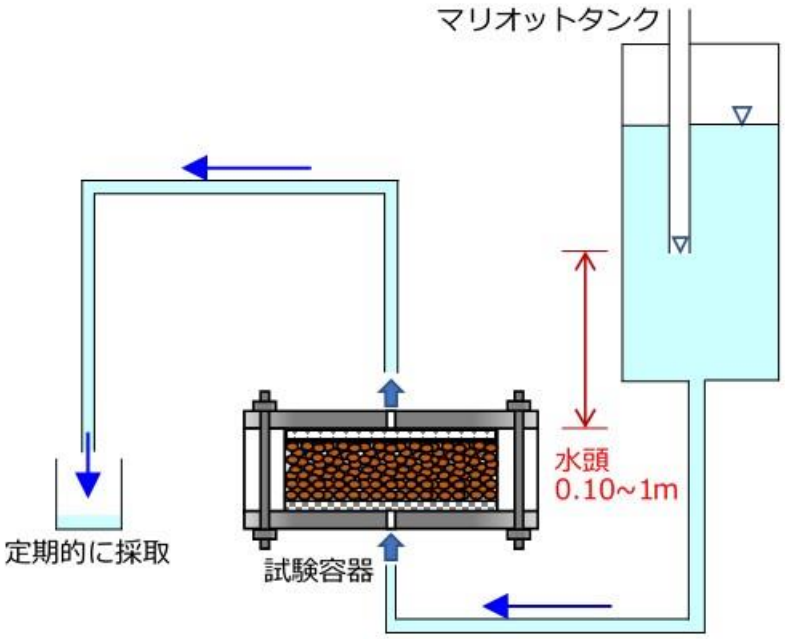


図 2.2-22　通水試験概念図

表 2.2-5　通水試験ケース一覧

試験ケース	設定乾燥密度 (Mg/m³)	設定含水比 (%)	ペレット粒径 (mm)	製作日	測定日（通水後の経過時間：日）		
					試験前	試験途中	試験後
XP15-D	-	-	15.0	2022/11/21	0	25	63
XP15-S	-	-	15.0	2022/11/21	0	25	63

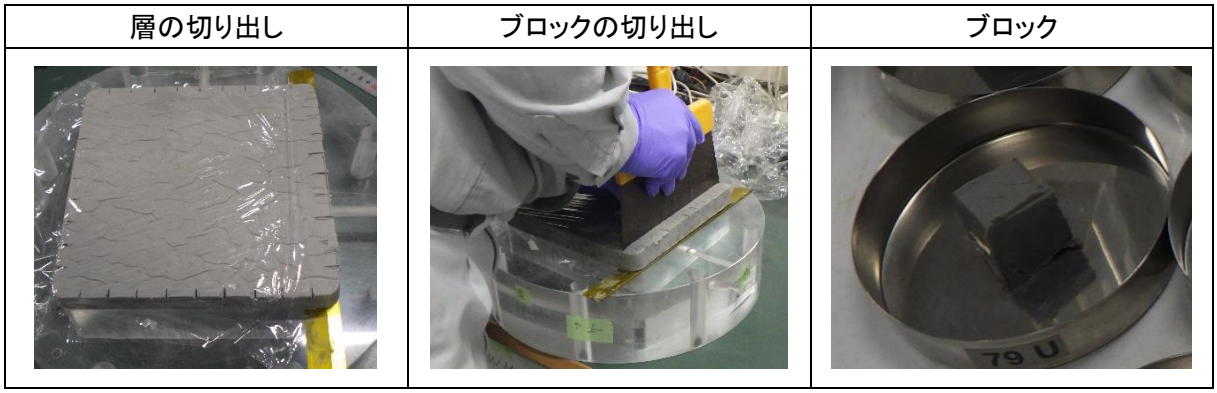


図 2.2-23　ベントナイト供試体解体状況

(ii) 通水試験結果

供試体にイオン交換水と人工海水をそれぞれ通水し、通水量の経時変化を記録した。通水量の経時変化を図 2.2-24 および図 2.2-25 に示す。通水は水頭 10cm からスタートし、通水が止まった時点で順次水頭を上げ、最大 1m まで上昇させた。イオン交換水条件では、水頭を 10cm、50cm、1m と上げた。人工海水条件では、水頭を 10cm から 50cm に上げた際に急激に流量が増えたため、一旦水頭を 10cm へ戻した。その後、水頭を 30cm、50cm、1m と上げた。イオン交換水条件と人工海水条件ともに 10 日間の通水を実施した後、浸潤途中段階の X 線 CT 測定を行った。その後は、ベントナイトの浸潤を進行させるため、試験水で満たした脱気水槽内で水浸脱気を行った。

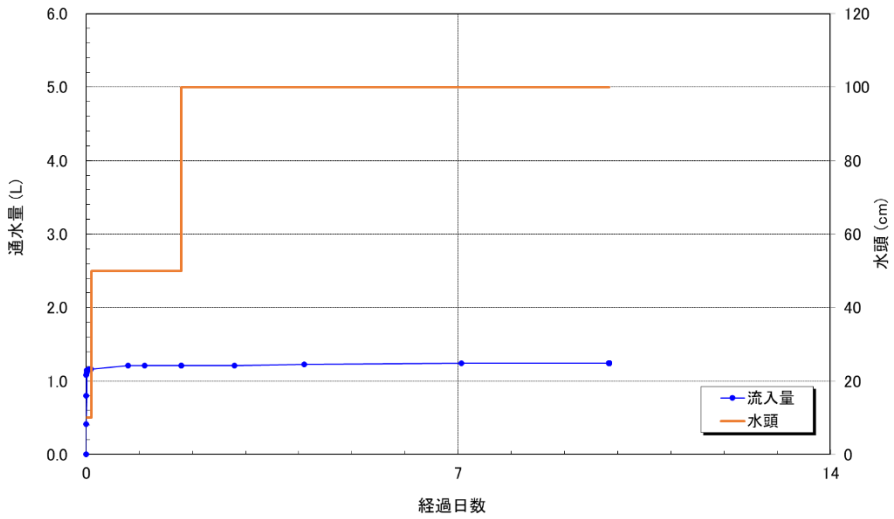


図 2.2-24　イオン交換水条件の通水量、水頭の経時変化

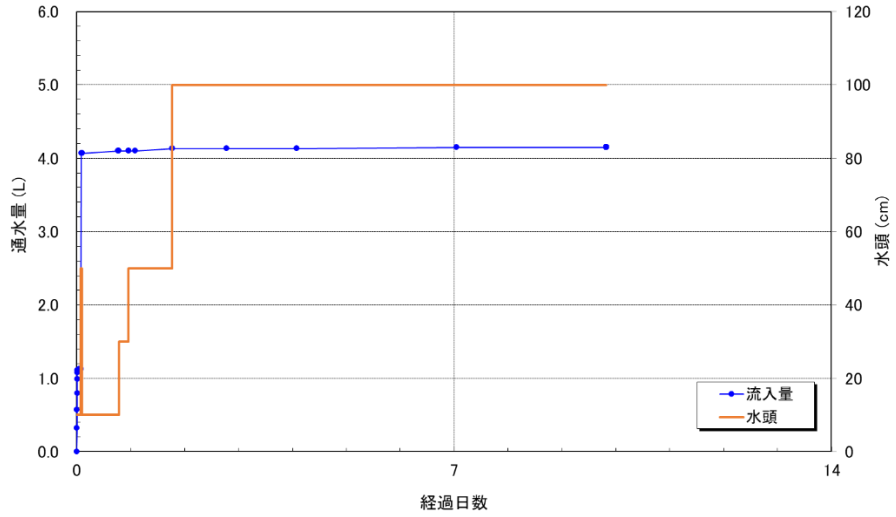


図 2.2-25　人工海水条件の通水量、水頭の経時変化

人工海水条件の供試体の測定時に使用している台座（木製）が CT 値に与える影響を把握するための測定を行った。測定の結果、台座ありの条件で CT 値が 16 ほど高いことが分かった。一般的には木製の材料は X 線透過時に強度が減衰するため、CT 値が低くなると考えられ、今回はその逆の結果となったがその差は小さく、測定誤差の範囲内であると考えられるため、台座の有無で補正は行わないこととした。イオン交換水条件と人工海水条件の試験容器でフランジの枚数が異なるため、フランジの枚数の差が CT 値に与える影響を把握するために計測を行った。測定の結果、フランジ 2 枚の条件で 1 枚の時より CT 値が 44 ほど高いことが分かった。一般的にはフランジにより X 線透過時に強度が減衰するため、CT 値が低くなると考えられる。今回はその逆の結果となったが値の差は小さく、誤差の範囲内であると考えられる。そのためフランジの枚数による補正は行わないこととする。

通水試験の前後と途中（計 3 回）における X 線 CT 画像（中央部断面）を図 2.2-26 に示す。イオン交換水条件では通水によりベントナイトの膨潤が進行し、最終的に間隙がほぼなくなる過程を観察することができた。人工海水条件ではイオン交換水条件に比べて試験途中の内部の間隙が大きく、飽和が進行しても内部の複数個所に間隙が残ることが確認された。CT 画像から得られたベントナイト供試体部の CT 値を表 2.2-6 および表 2.2-7 に示す。空気の CT 値は-1000、水の CT 値は 0 で表され、一般的に密度が高いものほど CT 値が高くなる傾向にある。前年度の計測結果と同様に両試験水条件において CT 値の平均値は、試験前から試験途中にかけて上昇し、試験後までは変化がほとんど無かった。CT 値の最大値に着目すると、両条件で試験前は 1900 程度であったが、試験途中と試験後では 1400 程度に減少している。これはペレットの湿潤密度に比例しており、膨潤により密度の低下が起きたと考えられる。一方、CT 値の最小値に着目すると、試験前は両条件で-1900 程度であったが、試験後では 60 程度に増加している。このことからイオン交換水条件と人工海水条件の両条件において、ベントナイトペレット間の間隙は空気ではなくほぼ水で満たされていると考えられる。

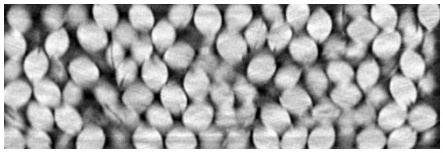
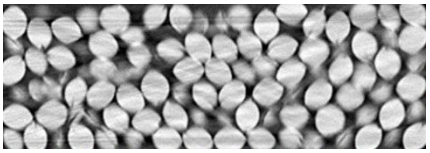
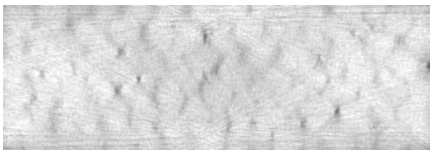
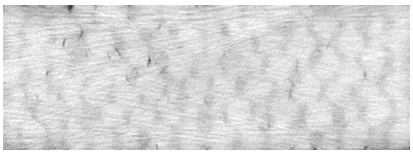
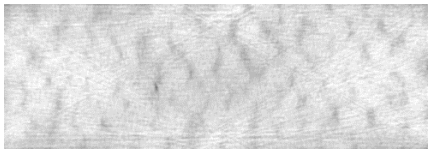
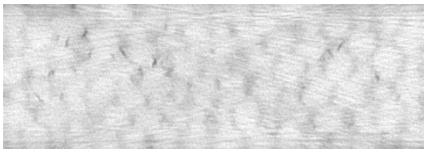
	イオン交換水条件	人工海水条件
試験前		
試験途中		
試験後		

図 2.2-26　通水過程における CT 画像の変化（中央部断面の例）

表 2.2-6　イオン交換水条件における CT 値

補正 CT 値	平均値	最小値	最大値
試験前	695	-1906	2119
試験途中	955	64	1437
試験後	951	60	1445

表 2.2-7　人工海水条件における CT 値

補正 CT 値	平均値	最小値	最大値
試験前	964	-1860	2091
試験途中	997	-288	1595
試験後	994	54	1473

通水後の解体した供試体の含水比の測定結果を表 2.2-8 および表 2.2-9 に示す。また、供試体が飽和したと仮定した際の含水比から推定した湿潤密度の分布図を図 2.2-27 および図 2.2-28 に示す。湿潤密度の推定においては、供試体が飽和していると仮定し、土粒子の密度と含水比から算出した。含水比測定の結果、イオン交換水、人工海水条件ともに上下の層の含水比が比較的高く、中層は低いという結果となった。また層の平面的な分布を見ると周辺部よりも中心部の含水比が低いことが分かった。特に中層の内部の含水比が低い結果となったが、これはベントナイトペレットが膨潤し底部や側面から内部への浸潤が時間とともに遅くなったためと考えられる。上層と下層の乾燥密度分布に着目すると、周辺部よりも中心部で相対的に乾燥密度が高い結果となった。縦軸を CT 値からの湿潤密度の推定値、横軸を湿潤密度の実測値とし、値をプロットしたグラフを図 2.2-29 に示す。黒の破線は、推定値＝実測値となる領域である。プロットは実測値側に分布し、検量線では湿潤密度を低めに見積もる結果となった。この要因として、検量線作成用の試験容器と通水試験用の試験容器の形状や材質が異なることが考えられることから、同一試験容器毎に式 2.2-1 で示すような CT 値の補正式を算定する必要があると考えられる。

表 2.2-8　解体後の含水比測定結果（イオン交換水条件）

統計値	上層	中層	下層	平均
平均値(%)	50.7	44.9	51.7	49.084
中央値(%)	50.7	44.1	51.5	49.880
標準偏差	2.55	2.03	1.84	3.71
変動係数	0.05	0.05	0.04	0.08
最大値(%)	63.7	51.2	56.2	63.698
最小値(%)	45.8	41.8	48.0	41.811
幅(%)	17.8	9.4	8.2	21.9
標本数	100	100	100	300

表 2.2-9　解体後の含水比測定結果（人工海水条件）

統計値	上層	中層	下層	平均
平均値(Mg/m^3)	48.3	43.0	46.8	46.038
中央値(Mg/m^3)	47.7	42.5	46.7	46.247
標準偏差	2.43	1.54	1.21	2.88
変動係数	0.05	0.04	0.03	0.06
最大値(Mg/m^3)	55.1	48.2	49.6	55.102
最小値(Mg/m^3)	44.7	40.8	43.9	40.789
幅(Mg/m^3)	10.4	7.5	5.7	14.3
標本数	100	100	100	300

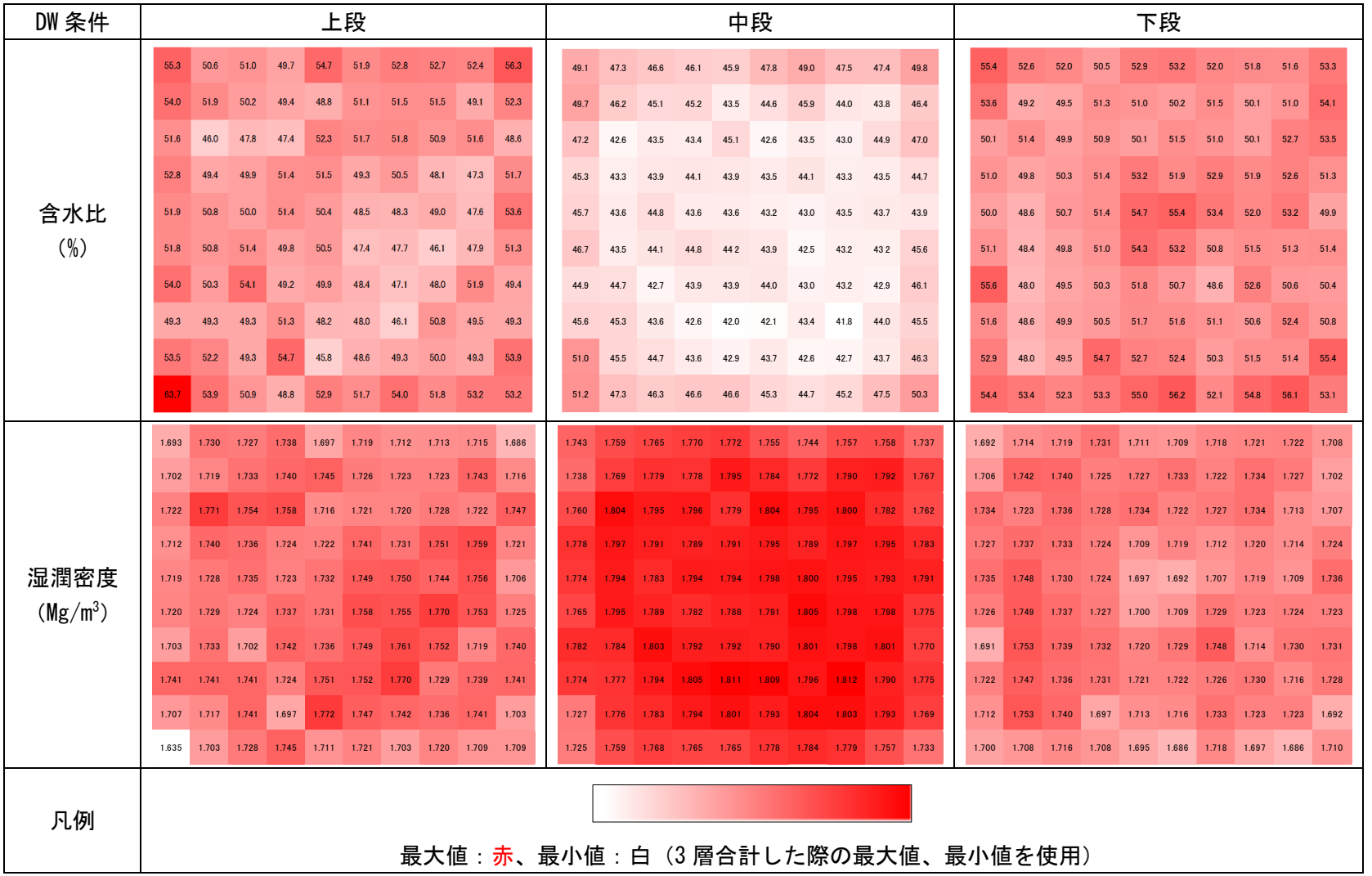


図 2.2-27　含水比と湿潤密度の空間分布図（イオン交換水条件）

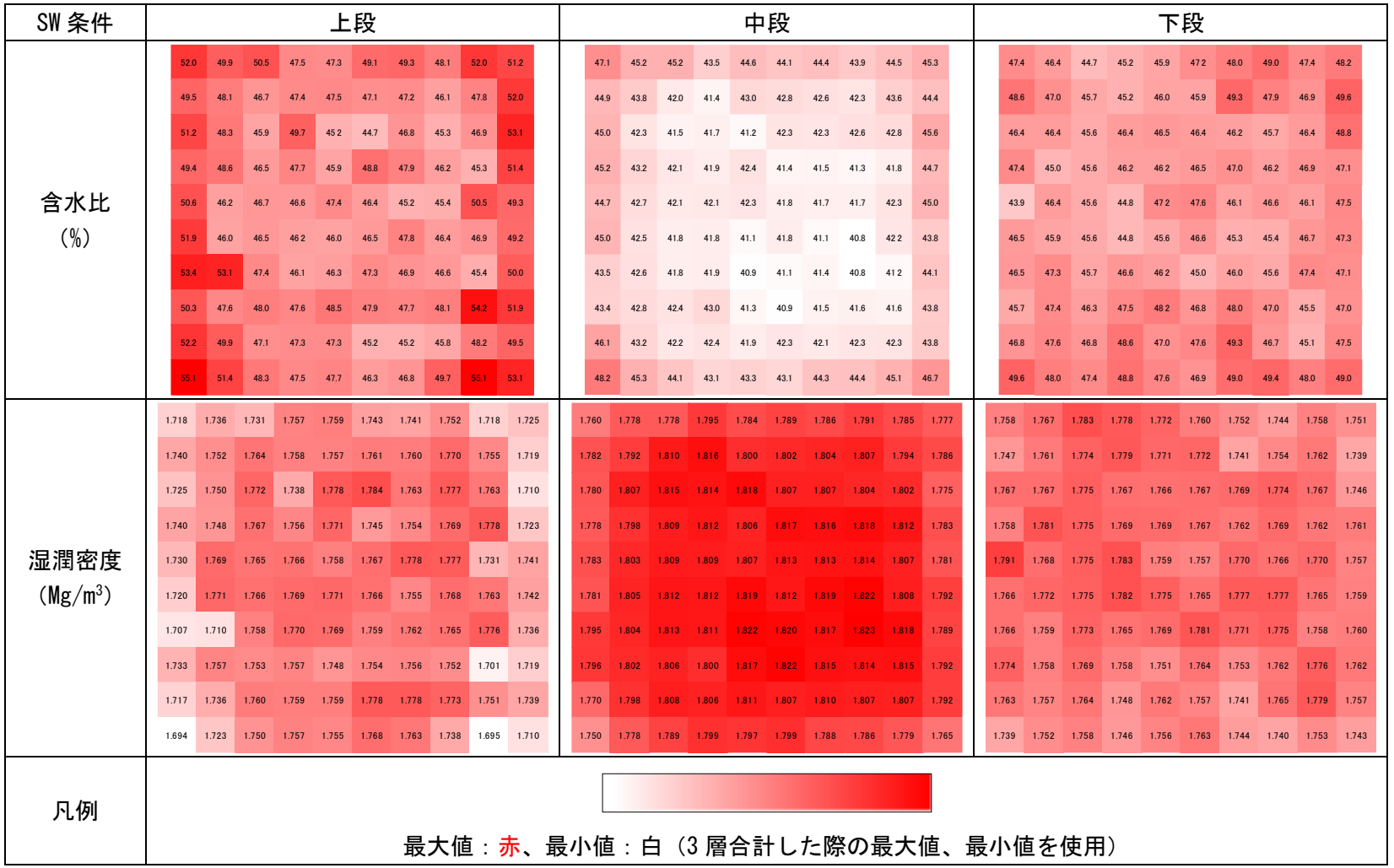


図 2.2-28　含水比と湿潤密度の空間分布図（人工海水条件）

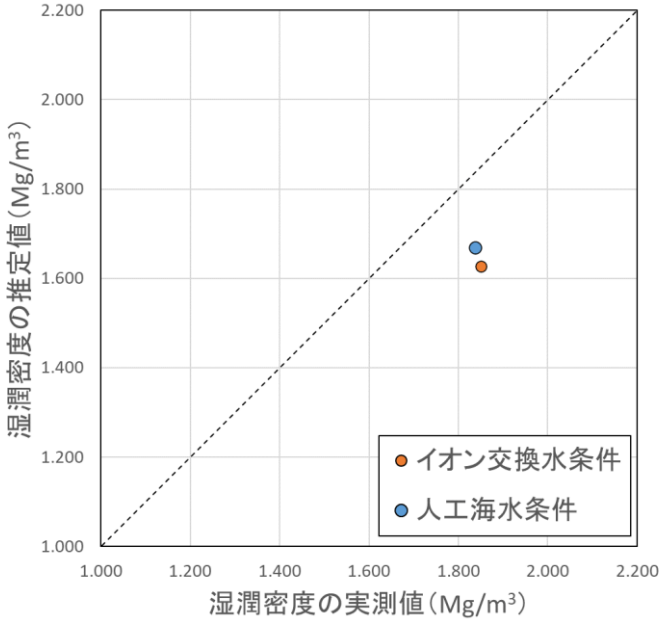


図 2.2-29　湿潤密度の推定値と実測値の比較

(c) X 線 CT 評価試験のまとめ

X 線 CT 評価試験を実施し、得られた知見を以下に示す。

・ 密度を変えた供試体を複数作製し、X 線 CT を測定することで CT 値と密度の関係を整理した。CT 値は湿潤密度と高い相関を示したため、CT 値と湿潤密度から検量線の作成を行った。検量線で得られた推定値と解体時の密度測定の結果は非常によく一致し、検量線の精度は高いと言える。このことから、CT 値から湿潤密度の分布を推測できる可能性が示唆された。

・ X 線 CT 画像の分析の結果、イオン交換水と人工海水でペレット内部の飽和状況に差が生じた。イオン交換水条件ではベントナイトの膨潤により内部の間隙までしっかりと閉塞されるのに対し、人工海水条件では内部の間隙が一部残ったままであることが分かった。

2.2.4 まとめ

埋戻し材の再冠水挙動、ベントナイトの流出・侵入に関して令和 4 年度に得られた成果は以下のとおりである。

・ 実際の坑道の埋戻しの際に許容できる間隙の大きさについて定量的に言及することは難しいものの、ペレット工法による埋戻しの際はペレット間の間隙が選択的な水みちとして機能すること回避するための方策として、粒径の異なるペレットを使用し、可能な限り粒子間および材料間の間隙を小さくすることが望ましいと考えられる。
・ 今回の試験条件においては、イオン強度が相対的に高い湧水環境下においては塊状のベントナイトが流出することで材料間の間隙をより早期に閉塞する傾向にあることが示唆された。
・ イオン交換水条件においては、注水位置の違いによる試験セル内の膨潤状況や流出流量との関連性は明瞭ではなかったものの、人工海水条件では注水位置の違いによりわずかに流出の停止までの時間が早く、ベントナイト流出量も小さい結果となった。前述のように、塩水環境下ではベントナイト粒子の表面が崩壊し、粒径の大きい塊状のベントナイトが流出するた

め、流出口までの距離が比較的長いほど、重力による沈積が生じやすいと考えれるため、流出口までの距離が長いほど間隙閉塞が進行しやすい傾向にあったと推定される。ただし、このような効果は塊状のベントナイトを輸送する水の流速にも依存すると考えられることから、ベントナイトペレットの充填区間に作用する水理条件がベントナイト流出に与える影響について更なる評価が必要であると考えられる。

・ 密度を変えた供試体を複数作製し、X 線 CT を測定することで CT 値と密度の関係を整理した結果、CT 値は湿潤密度と高い相関を示すとともに、この関係から作成した検量線で得られた推定値と解体時の密度測定の結果は非常によく一致したことから、CT 値から湿潤密度の分布を推測できる可能性が示唆された。

参考文献

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

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

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.

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，2020.

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，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研究開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書，2021.

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，令和 3 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，2022.

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 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書，2019.

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—

止水プラグや埋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、坑道シーリングの構成要素として考えられる埋戻し材、止水プラグに着目し、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について、研究事例の調査等の結果を踏まえ、シーリングの構成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。

3.1 膨潤挙動評価試験

3.1.1 背景・目的及び実施内容

(1) 背景・目的

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。埋戻し材の設計においては、乾燥密度や材料配合を埋戻し材に設定し、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、埋戻し材の仕様に対する緩衝材の膨潤量や膨潤に伴う乾燥密度の変化の程度を把握し、緩衝材の膨出挙動を評価することが必要となる。

平成 30 年度から令和 2 年度までの 3 年間にわたり、緩衝材と埋戻し材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データを取得した。さらに、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ことを目的として、緩衝材や埋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戻し材の膨出抑制機能に及ぼす影響を考慮に入れた検討を実施している。また、緩衝材と埋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戻し材の膨出抑制機能を評価する方法を検討する。

令和 3 年度以降は、上記に加えて、緩衝材中に内包される空気やガラス固化体の発熱によって生じる水蒸気などの気相が、緩衝材の連成現象に及ぼす影響に着目した検討を進める。

(2) 実施内容

幌延 URL にて実施している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 3.1-1 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上部の空間と坑道部分を埋戻し材により埋め戻している。

原位置試験を例にみると、緩衝材と埋戻し材の間では緩衝材の膨潤圧や埋戻し材の自重相当の荷重が相互に作用しており、緩衝材の膨潤変形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潤変形挙動を把握し埋戻し材の設計・評価手法へ反映することを目的として、緩衝材と埋戻し材を組み合わせた室内模型試験である小規模模型試験及び縮尺模型試験を実施し、膨潤変形量や膨潤圧、乾燥密度の変化など膨潤変形挙動に係るデータの取得を実施した。また、小規模模型を用いた試験の結果については付録 1 に示す。

緩衝材中に内包される空気やガラス固化体の発熱によって生じる水蒸気などの気相が、緩衝材

の連成現象に及ぼす影響に着目した検討として、令和 4 年度は、間隙空気がベントナイト中の連成現象に与える影響を整理するために、気液二相流解析と解析結果を検証するための室内試験を実施した。

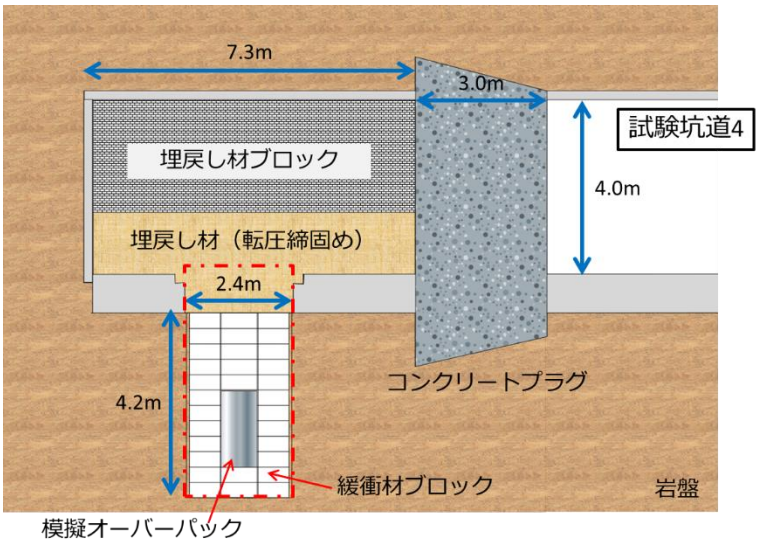


図 3.1-1　人工バリア性能確認試験

3.1.2 膨潤挙動縮尺模型試験

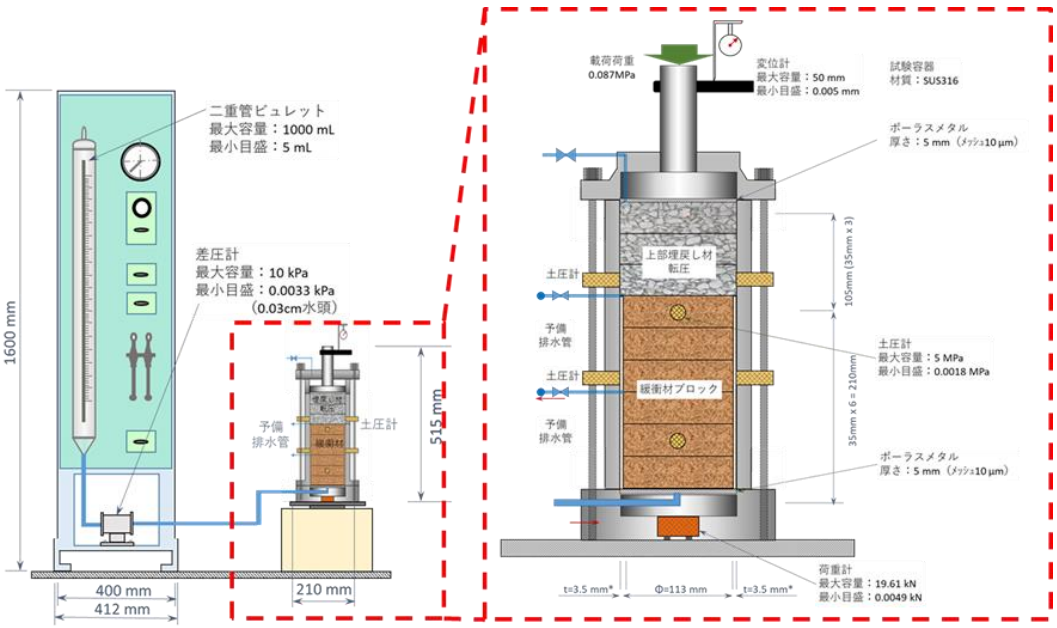
(1) 縮尺模型試験の概要

原位置試験の 1/20 スケールの模型（以下、縮尺模型）を用いた試験により、埋戻し材により緩衝材の膨潤変形挙動がどの程度変化するか、また、試験用水の水質の違いが緩衝材の膨潤変形挙動に及ぼす影響を調査した。縮尺模型試験の装置概要を図 3.1-2 (a)に示す。縮尺模型で原位置試験の状況を模擬するにあたって留意した点は以下の通りである。

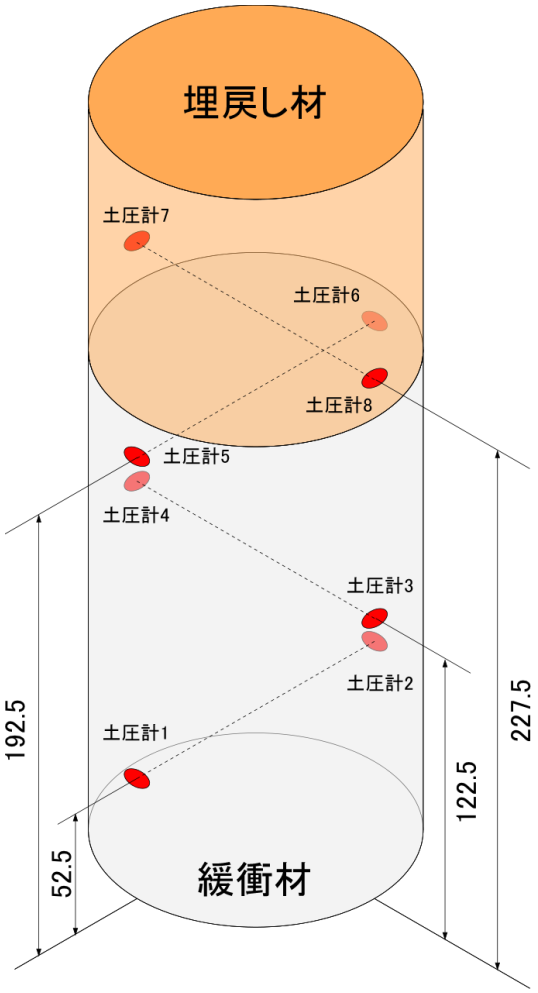
- 縮尺模型の寸法は、原位置試験の 1/20 スケールとした。
- 人工バリアは緩衝材のみを模型で模擬し、オーバーパックの模型は設置しないこととした。
- 原位置試験では、試験孔底及び緩衝材と岩盤の隙間にケイ砂を充填し、試験孔底から注水する原位置地下水が充填したケイ砂層を通じて緩衝材の底部および周面から供給される構造となっている。縮尺模型試験では、緩衝材と試験容器の隙間にケイ砂を充填し、試験容器下部に設置したポーラスメタルより注水した試験用水がケイ砂層を通じて緩衝材の底部と側面より供給される構造とした。
- 埋戻し材を設置する場合には、緩衝材との境界近傍のみを縮尺模型で模擬した。原位置試験と縮尺模型試験の力学的な境界条件を揃えるために、原位置試験において緩衝材に作用している埋戻し材の自重に相当する荷重と同等の鉛直圧を埋戻し材の上部より作用させる。

縮尺模型試験装置は、一定の上載荷重を作用させながら給水を行い、緩衝材や埋戻し材の縮尺模型の吸水膨潤により生じる変形や圧力などの経時変化を計測するものである。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、二重管ビュレットより自然水頭で給水した試験用水がポーラスメタルおよび緩衝材側面に設置したケイ砂層を通じて緩衝材の底部と側面より供給される。給水に用いた二重管ビュレットの最大容量は 1000 mL、最小目盛は 5 mL である。二重管ビュレットと試験容器との間に最大容量が 10 kPa、最小目盛が 0.0033 kPa の差圧計を設置し、試験中の注

水量を連続的に計測した。試験装置には、変位計、荷重計、土圧計を設置した。縮尺模型の吸水膨潤に伴う上方への変位量を試験装置上部に設置した最大容量 50 mm、最小目盛 0.005 mm の変位計により計測した。鉛直下向きに発生する圧力は、試験装置の最下部に設置した最大容量 19.61 kN、最小目盛 0.0049 kN のロードセルにより計測した。また、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 0.0018 MPa の土圧計を設置した。土圧計は図 3.1-2(b)に示すように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 の高さにそれぞれ 2 個ずつ設置している。同じ高さに位置する土圧計は 180°対向する位置に設置してあり、緩衝材下部と緩衝材の上部の土圧計は同一の鉛直断面に位置しており、緩衝材中部と埋戻し材の土圧計はそれから 90°回転した鉛直断面に位置している。



(a) 縮尺模型試験の概要図



(b) 土圧計の設置位置

(c) 試験装置の外観

図 3.1-2　縮尺模型試験装置の概要

(2) 縮尺模型試料と試験条件

縮尺模型試験で用いた緩衝材と埋戻し材の仕様を表 3.1-1 に示す。また、令和 4 年度の試験で用いたクニゲル V1 の物性値を表 3.1-2 に示す。

緩衝材の縮尺模型は直径 113 mm、高さ 210 mm とした。緩衝材の材料には、クニゲル V1 とケイ砂を重量比で 70%と 30%の割合で混合したものを用いた。さらに、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%の割合で混合している。緩衝材の縮尺模型は 6 つのブロックに分割して作製し、それぞれのブロックの直径は 113 mm、高さは 35 mm、初期乾燥密度は 1.80 Mg/m^3、初期含水比は 10.5%とした。

埋戻し材の縮尺模型は直径 120 mm、高さ 105 mm とした。埋戻し材の材料は、クニゲル V1 と幌延の掘削ズリを重量比で 40%と 60%の割合で混合したものを用いた。掘削ズリは、粒径が 20 mm 以下となるように調製している。埋戻し材は試験条件にあわせて初期乾燥密度を 1.20 Mg/m^3 もしくは 1.40 Mg/m^3 とした。

令和 4 年度は、イオン交換水と 0.2 mol/L の NaCl 水溶液を試験用水として、それぞれの試験用水で 3 ケースずつ試験を実施した。試験用水の水質分析の結果を表 3.1-3 に示す。

イオン交換水を用いた試験では、埋戻し材を設置したことにより緩衝材の膨潤がどの程度抑制されるかを評価するために埋戻し材を設置した試験を 2 ケース、埋戻し材を設置しない試験を 1 ケース実施した。それぞれのケースの試験条件は図 3.1-3 に示すように、試験容器に埋戻し材を乾燥密度 1.40 Mg/m^3 として締固めた条件（Case D-1）、埋戻し材ブロックを設置した条件（Case D-2）および埋戻し材を設置しない条件（Case D-3）とした。Case D-2 では埋戻し材ブロックを直径が 113mm、高さが 35mm、乾燥密度 1.40 Mg/m^3 として作製し、緩衝材の上に設置した埋戻し材ブロックと試験容器の隙間に埋戻し材料（掘削ズリの粒径 0.85 mm 以下）を充填した。また、試験の際には Case D-1 と Case D-2 では、原位置試験を例として試験孔の上部に位置する埋戻し材の自重に相当する荷重として上載荷重は 0.087 MPa とした。Case D-3 では、埋戻し材を設置していないことから上載荷重は作用させなかった。

NaCl 水溶液を用いた試験では、塩分濃度を有する場合の緩衝材の吸水膨潤挙動を評価することを目的に同じ条件で 3 ケースの試験を実施した。緩衝材はイオン交換水と同様の仕様とし、埋戻し材は乾燥密度を 1.20 Mg/m^3 として試験容器内に締固めることにより作製した。

表 3.1-1　縮尺模型試験の緩衝材と埋戻し材の仕様

試験用水		緩衝材	埋戻し材
イオン交換水	材料構成 （重量比）	クニゲル V1：ケイ砂 70：30	クニゲル V1：掘削ズリ 40：60
	初期乾燥密度（Mg/m^3）	1.80	1.40
	初期飽和度（%）	56.2	91.2
	初期含水比（%）	10.5	30.0
	供試体直径（mm）	113	120
	供試体高さ（mm）	210	105
0.2mol/L-NaCl 水溶液	材料構成 （重量比）	クニゲル V1：ケイ砂 70：30	クニゲル V1：掘削ズリ 40：60
	初期乾燥密度（Mg/m^3）	1.80	1.20
	初期飽和度（%）	56.2	78.7
	初期含水比（%）	10.5	35.0
	供試体直径（mm）	113	120
	供試体高さ（mm）	210	105

表 3.1-2　クニゲル V1 の物性値

	クニゲル V1
土粒子密度（Mg/m^3）	2.743
液性限界（%）	392.8
塑性限界（%）	23.7
塑性指数（-）	369.1
モンモリロナイト含有率（%）	52.9
陽イオン交換容量（meq/g）	0.763
交換性 Na イオン量（meq/g）	0.575
交換性 Ca イオン量（meq/g）	0.174
交換性 K イオン量（meq/g）	0.004
交換性 Mg イオン量（meq/g）	0.010

表 3.1-3　試験用水の水質分析結果

	Na^+ （mg/L）	K^+ （mg/L）	Mg^{2+} （mg/L）	Ca^{2+} （mg/L）
イオン交換水	0.16	<0.1	0.01	<0.1
0.2 mol/L-NaCl 水溶液	4400	<0.1	0.07	0.27

※表中の<印は、定量下限値未満を示す。

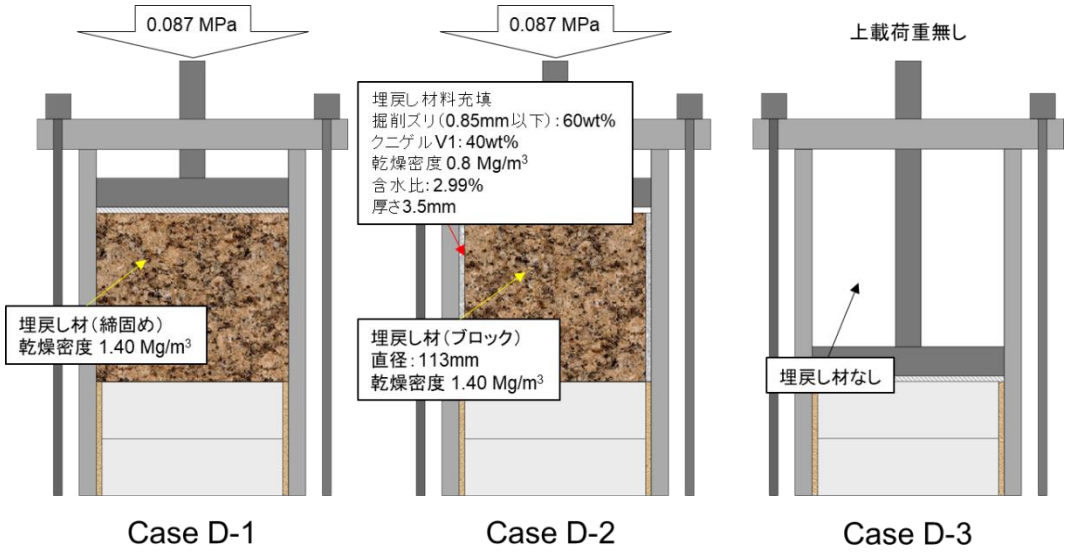


図 3.1-3　イオン交換水を用いた試験の条件

(a) 緩衝材

緩衝材ブロックは直径 113 mm、高さ 35 mm として 1 ケースにあたり 6 個のブロックを作製した。クニゲル V1、3 号ケイ砂及び 5 号ケイ砂を乾燥密度 1.80 Mg/m³、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を用いて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を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。

緩衝材ブロックを設置する際には、砂層分の厚さ 3.5 mm を確保するために試験容器内側に厚紙を数枚巻いた。その後、緩衝材ブロックを 1 個ずつ試験容器内に設置した。6 個の緩衝材ブロックを設置した後、試験容器から厚紙を取り外し代わりに直径 3 mm 程度のアルミ製の丸棒をスペーサーとして挿入した。緩衝材ブロックの上にろ紙を置き、緩衝材と試験容器の隙間に 8 号ケイ砂を充填した。このとき、ケイ砂の充填性を高めるために、試験容器を木槌で軽くたたいた。

(b) 埋戻し材

埋戻し材の縮尺模型は、試験容器内に直接締固める方法および埋戻し材ブロックを作製して試験容器に設置する方法の 2 種類の方法で作製した。

直接締固める方法では、高さ 105 mm の埋戻し材模型を 3 層に分けて締固めた。1 層あたりの高さを 35 mm として、クニゲル V1 と掘削ズリのそれぞれについて所定の乾燥密度に必要な重量を計量した。ビニール袋に投入した掘削ズリに霧吹きを用いてイオン交換水を加えて、それぞれの乾燥密度の初期含水比を調整した。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。試験容器を圧縮成型装置に設置し、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。2 層目以降は、前の層の埋戻し材の上に材料を投入し、3 層目の埋戻し材の高さが 105 mm となるまで同様の手順で締固めを実施した。

埋戻しブロックは直径を 113 mm、高さ 35 mm として作製した。クニゲル V1 と掘削ズリを乾燥密度 1.40 Mg/m^3 に必要な重量を計量した。ビニール袋に投入した掘削ズリに霧吹きを用いてイオン交換水を加えて、初期含水比を調整した。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を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。埋戻し材ブロックを設置する際には、試験容器との間に 3.5mm の隙間を確保するために厚紙を設置した。埋戻し材ブロックを設置後に厚紙を取り除いた後に試験容器との隙間に、クニゲル V1 と粒径 0.85 mm 以下の掘削ズリを混合した埋戻し材料を充填した。

Case D-2 では、隙間への充填性を高めるためにクニゲル V1 を自然含水比の状態で混合したため充填した埋戻し材の含水比は 2.99%であった。また、隙間への埋戻し材の投入量は 108.14g で乾燥密度は 0.804 Mg/m^3 であった。埋戻しブロックと隙間充填部を合わせた埋戻し全体の乾燥密度は 1.332 mg/m^3 となった。

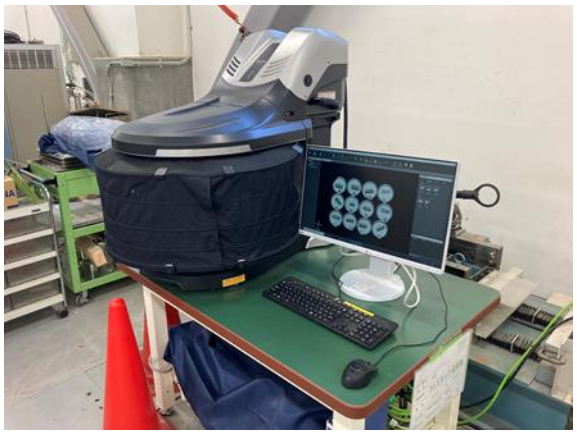
(3) 試験方法

緩衝材と埋戻し材の縮尺模型の試験容器内に作製後、試験容器上部に載荷板を設置し試験装置を組み立てた。ベロフラムシリンダにより載荷板を介して、試験孔直上の埋戻し材の自重に相当する 0.087 MPa の鉛直圧を埋戻し材の縮尺模型に作用させ、15 分程度その状態を保持した。時間が経過した後に、試験容器に注水管を接続し注水管内を試験用水で満たした。真空ポンプを用いて試験容器内の空気を抜いた後、注水管のコックを切替えて試験容器内への注水を開始した。この時、試験用水は真空脱気したものを用いた。試験中は、差圧計と変位計、側面土圧計、ロードセルの示す値をデータロガーにより計測した。

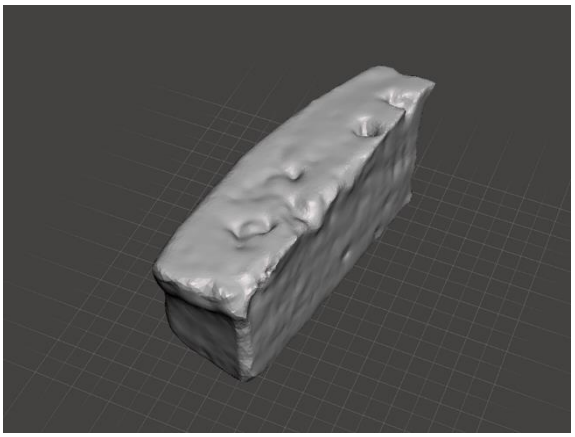
試験終了後に緩衝材の含水比と乾燥密度および埋戻し材の含水比を計測した。計測時の作業状況を図 3.1-4 に示す。緩衝材は高さ方向に厚さ 10mm 程度の円盤状で切り出した。円盤状の緩衝材の中央部を長さ 30mm、幅 10mm 程度の大きさで 12 個のブロックに分割した。分割したブロックは 3 辺の長さを計測した後、3D スキャナ（KEYENCE 製）により体積を計測し乾燥密度を算出した。3D スキャナの計測は分割したブロックを蒸発皿に載せた状態で計測した。1 つのブロックに対して、まず、1 回計測を行った後にブロックを裏返し、再度計測することで合計 2 回の計測を行った。2 回の計測で得られたデータを専用のソフトで処理することにより図 3.1-4 (d)に示す三次元モデルを作成し体積を算出した。計測を終えたブロックは炉乾燥法により含水比を計測した。埋戻し材は高さ方向に 3 個のブロックに分割し、それぞれのブロックで中央部と外周部に分けて含水比を計測した。

(a) 緩衝材の解体状況（1）

(b) 緩衝材の解体状況（2）

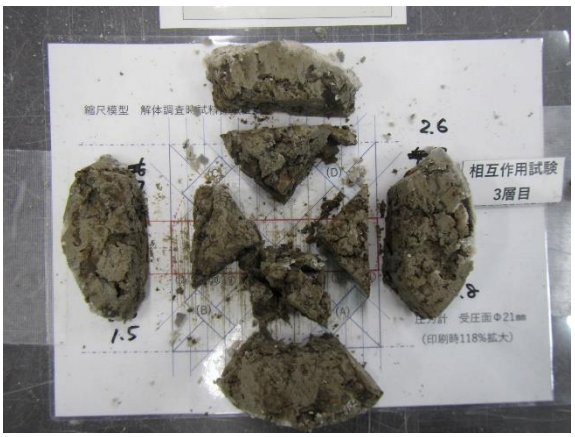


(c) 3D スキャナによる計測



(d) 緩衝材の 3 次元モデル

(e) 埋戻し材の解体状況（1）



(f) 埋戻し材の解体状況（2）

図 3.1-4　縮尺模型試験の解体調査の状況

(4) 試験の結果

(a) イオン交換水

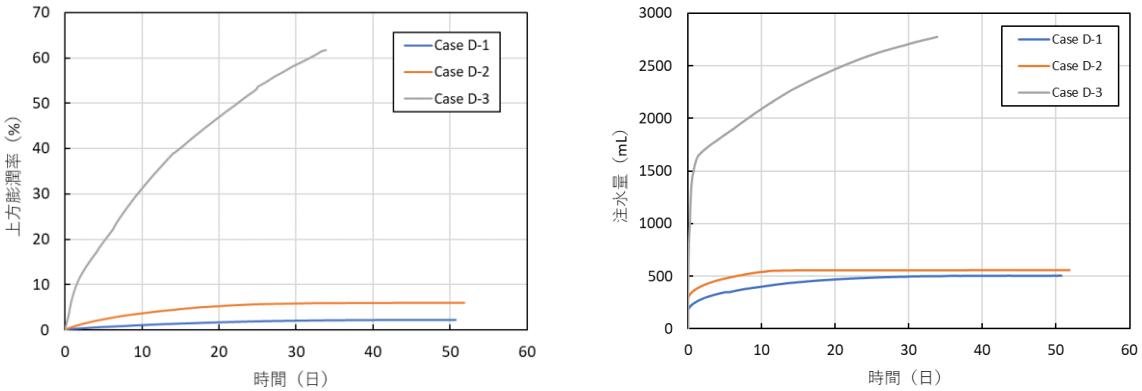
(i) 上方膨潤率

縮尺模型試験では試験装置上部に設置した変位計により、緩衝材と埋戻し材の上方への変位量を計測している。ここでは、埋戻し材の膨潤による変形がないものと仮定して、上方膨潤率を緩衝材の初期高さに対する上方への変位量の割合として定義した。

図 3.1-5 に上方膨潤率と注水量の経時変化を示す。試験開始後、注水量の増加に伴い上方膨潤率が上昇している。Case D-1 では注水量は試験開始後に急激に増加した後、30 日ごろまで緩やかに増加する傾向を示した。上方膨潤率も 30 日ごろまで緩やかに上昇する傾向を示し、最終的な上方膨潤率は 2.23%であった。Case D-2 では注水量が試験開始 10 日ごろから一定の値を示しているものの、上方膨潤率は 30 日ごろまで緩やかに上昇し続け、試験終了時の最大膨潤率は 5.98%であった。Case D-3 では埋戻し材を設置していないため試験開始直後に 1500 mL を超える量の試験用水が給水された。このため、緩衝材模型は試験期間を通じて試験用水に完全に浸かってしていたと考えられる。34 日経過後に試験を終了するまで、注水量が増加し続けるとともに上方膨潤率も増加し続け、最終的に 61.74%となった。

試験終了時の上方膨潤率は、Case D-1 で 2.23%、Case D-2 で 5.98%、Case D-3 で 61.74%となり、埋戻し材を設置することで緩衝材の上方への変形が抑制されていることを確認した。

また、Case D-1 と Case D-2 を比較すると、Case D-2 では埋戻し材ブロックと試験容器の隙間に埋戻し材料を充填しているため、Case D-1 の締固めた埋戻し材と比較すると試験容器近傍での埋戻し材の乾燥密度が低くなっており、このため上方膨潤率が大きくなった可能性がある。この結果より、埋戻し材と試験容器界面の状態により緩衝材の抑制機能に差異が出ることが示唆された。



(a) 上方膨潤率　　(b) 注水量

図 3.1-5　上方膨潤率と注水量の経時変化

(ii) 土圧

図 3.1-6 に土圧計及びロードセルの設置位置を示す。図 3.1-7 に土圧計とロードセルで計測した土圧の経時変化を示す。緩衝材の部分に設置した土圧計は、土圧計 1、2 が緩衝材下部、土圧計 3、4 が緩衝材中部、土圧計 5、6 が緩衝材上部に位置する。

Case D-1 では緩衝材下部と中部では試験開始直後に急激に圧力が増加した後、その増加傾向が緩やかになり、最終的に圧力は下部で 1.4 MPa 程度、中部で 1.0 MPa～1.3 MPa 程度であった。緩衝材の下部では試験開始直後に圧力が増加した後、緩やかに減少する傾向に転じ、最終的に 0.6MPa 程度の圧力を示した。Case D-2 では土圧計 1～6 で試験開始直後に圧力が増加して最大値を示すピークが現れた後、緩やかに減少する傾向に転じた。試験終了時の圧力は緩衝材下部で 1.2 MPa 程度、中部で 0.5 MPa ~0.8 MPa、上部で 0.4 MPa 程度であった。Case D-3 では土圧計 1～6 で試験開始直後に圧力が増加して最大値のピークが現れた後急激に圧力が減少し、最終的な圧力は 0.1 MPa 程度であった。同じ高さに設置した土圧計を比較すると、上方膨潤率が大きいほどの順に土圧の値が低くなっていた。また、土圧計を設置した高さで土圧を比較すると、緩衝材の下部、中部、上部の順に高い土圧の値を示した。

埋戻し材に設置した土圧計 7、8 では試験終了時の土圧が Case D-1 で 0.5 MPa 程度、Case D-2 で 0.16 MPa 程度であった。Case D-3 では埋戻し材を設置していないが最終的な土圧は 0.06 MPa と 0.02MPa であった。これは膨潤した緩衝材の半径方向への膨潤圧が計測されていると考えられる。

図 3.2-7(e)に示すようにロードセルは、Case D-1 で 1.6 MPa、Case D-2 で 1.23 MPa、Case D-3 で 0.12 MPa を示し、膨潤変形率が大きいほど圧力が小さくなることを確認した。

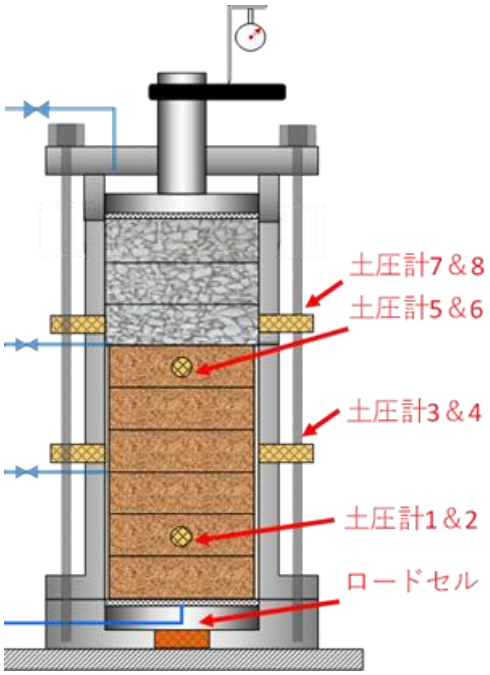
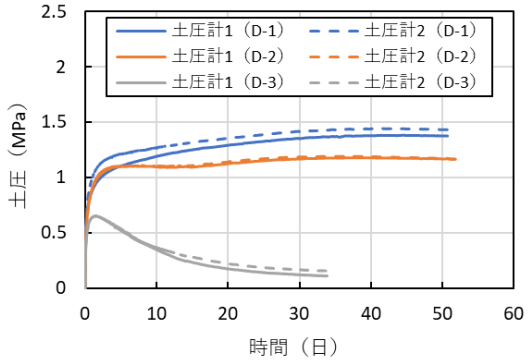
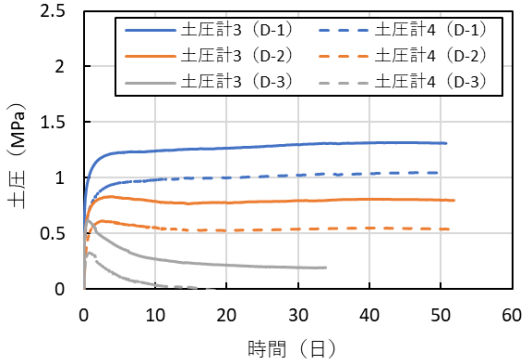


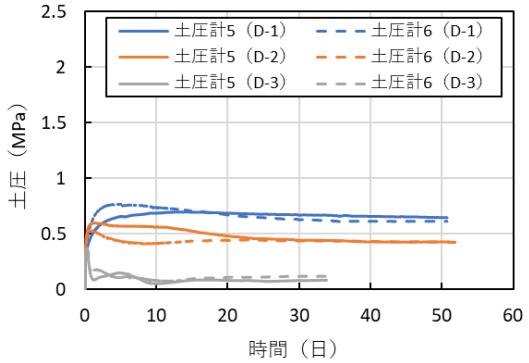
図 3.1-6　土圧計およびロードセルの設置位置（イオン交換水）



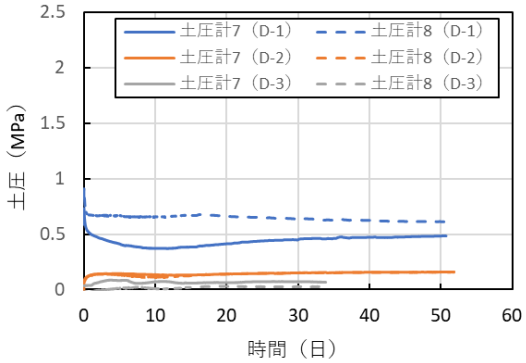
(a) 土圧計 1，2



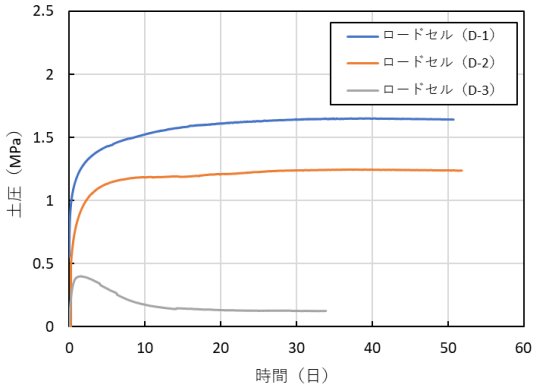
(b) 土圧計 3，4



(c) 土圧計 5，6



(d) 土圧計 7，8



(e) ロードセル

図 3.1-7　土圧の経時変化（イオン交換水）

(iii) 解体調査の結果

試験終了後には緩衝材と埋戻し材の縮尺模型を試験容器から取り出して乾燥密度と含水比を計測した。縮尺模型を解体した時の様子を図 3.1-8 に示す。Case D-2 では埋戻し材の上部にわずかながら試験用水がたまっていた。また、Case D-3 では緩衝材の上部に試験用水がたまっており、緩衝材全体が水浸していたことが確認された。

緩衝材は高さ方向に 10 mm 程度の厚さで切り出し Case D-1 で 17 層、Case D-2 で 18 層、Case D-3 で 22 層に分割した。いずれのケースにおいても、各層の中央部分を 12 個のブロックに分割した。個々のブロックは、湿潤重量を測定した後、3D スキャナで計測して体積を算出した。その

後、炉乾燥法により含水比と乾燥重量を計測した。これらの計測で得られた値より、個々のブロックの乾燥密度と飽和度を算出した。

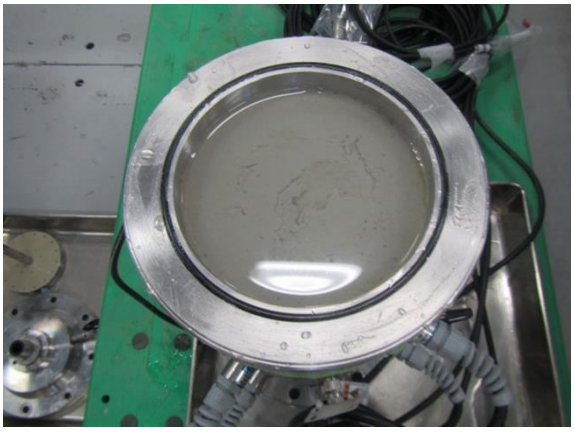
図 3.1-9 に緩衝材の乾燥密度の分布を示す。Case D-1、Case D-2 および Case D-3 の平均乾燥密度はそれぞれ 1.60 Mg/m^3、1.55 Mg/m^3 および 1.14 Mg/m^3 であった。Case D-1 と Case D-2 では埋戻し材の設置により上方への膨潤変形が抑制されており、初期状態の乾燥密度 1.80 Mg/m^3 からの減少量が少ない。乾燥密度の分布をみてみると、埋戻し材を設置した Case D-1 で緩衝材の中心部で、Case D-2 では緩衝材外周の上部と中心部分でそれぞれ乾燥密度が 1.50 Mg/m^3 程度と低くなっていることがわかる。また、緩衝材の下部では乾燥密度が 1.60 Mg/m^3～1.70 Mg/m^3 程度と高いままであることが確認できる。一方、Case D-3 では埋戻し材を設置しておらず、緩衝材全体が試験用水に浸かっていたため、緩衝材の底面と側面に加えて頂部が給水面となり、給水面に近い部分の乾燥密度が 1.00 Mg/m^3 程度と顕著に低下していることがわかる。一方、中心部分は 1.40 Mg/m^3 程度と比較的高い乾燥密度を示した。以上のことより、埋戻し材の設置により、緩衝材の上方への変形が抑制されること、埋戻し材により緩衝材の膨潤変形が抑制されることで中心部分の乾燥密度が低くなる不均質な分布を示すことが明らかになった。

図 3.1-10 に緩衝材の飽和度分布を示す。Case D-1、Case D-2 および Case D-3 の平均飽和度はそれぞれ 68%、75%および 92%であった。Case D-1 と Case D-2 では試験終了時に上方膨潤量、変位量ともに一定の値となり変化していなかったが、飽和に達していないことが確認された。また、飽和度の分布をみてみると給水面に近い外周部では 90%に近い飽和度を示したが中心部では 50%~60%であり、飽和がほとんど進行していないことが確認された。Case D-2 では給水面に近い緩衝材の底部よりも埋戻し材との境界面に近い緩衝材の上部で飽和度が高い結果となった。Case D-3 では、吸水面に近い底部、外周部および頂部で飽和度が 100%に近い値を示しており、全体の平均飽和度も 92%と高い値を示した。

埋戻し材は高さ方向に 3 個のブロックに分割し、中心部と外周部に分けて含水比を計測した。含水比の測定結果を図 3.1-11 に示す。Case D-1 と Case D-2 の両方のケースにおいて、中央部では埋戻し材の上部と下部に比べて中部の含水比が高い傾向を示すが、外周部では埋戻し材の上部および下部が中部に比べて含水比が高くなっている。それぞれのケースにおける埋戻し材全体の平均含水比は Case D-1 が 33%、Case D-2 が 35.2%となっている。埋戻し材が膨潤により変形しないと仮定すると飽和度は Case D-1 が 100.55%、Case D-2 が 107.26%となる。ここで Case D-2 において飽和度が 100%を超えた理由として、埋戻し材の上部に溜まっていた試験用水が埋戻し材に付着しており、含水比計測の際にその付着した水分を含んでいた可能性が考えられる。

(a) Case D-1

(b) Case D-2



(c) Case D-3

図 3.1-8　解体調査時の埋戻し材上部の状況（イオン交換水）

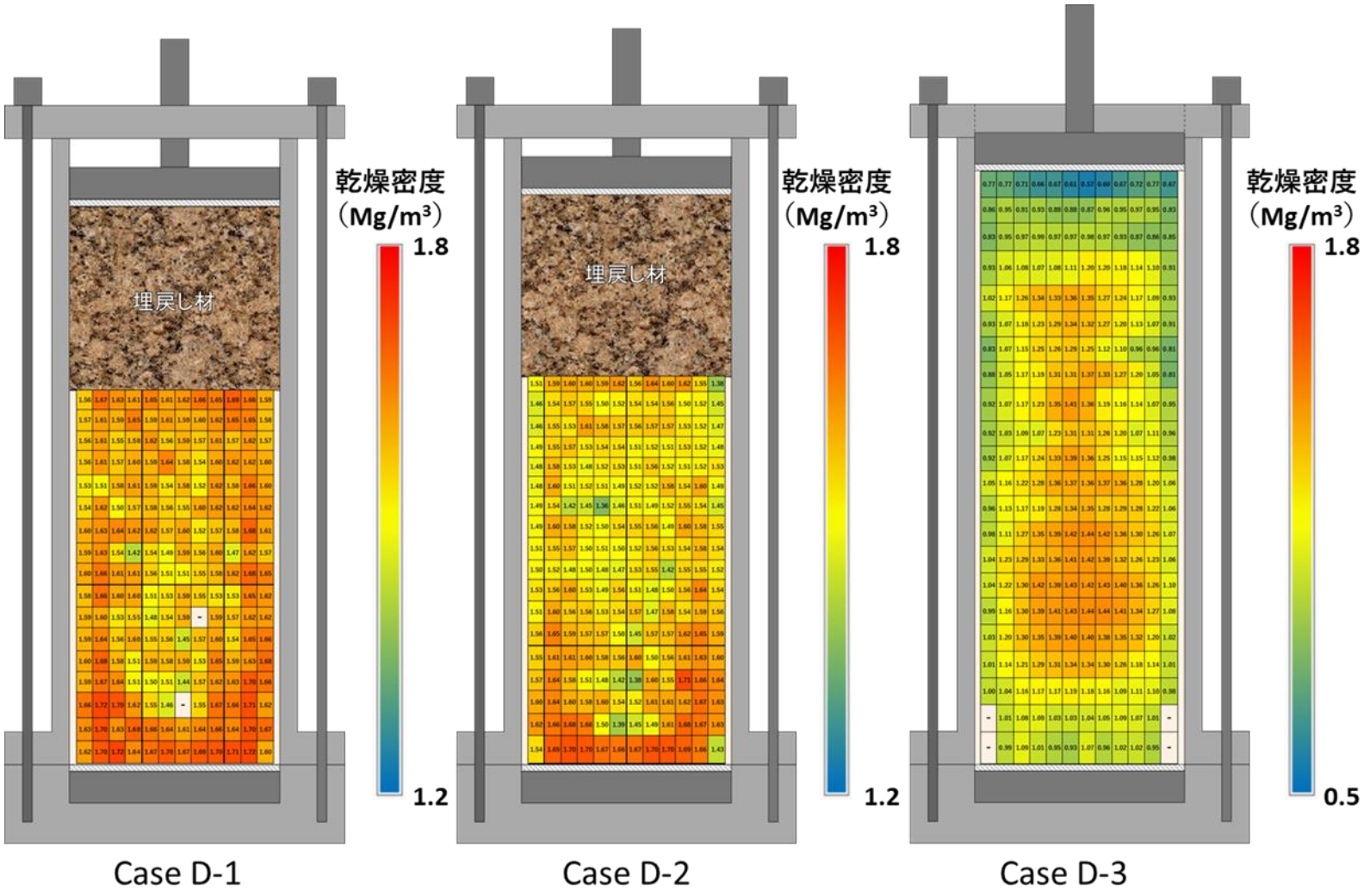


図 3.1-9　緩衝材の乾燥密度分布（イオン交換水）

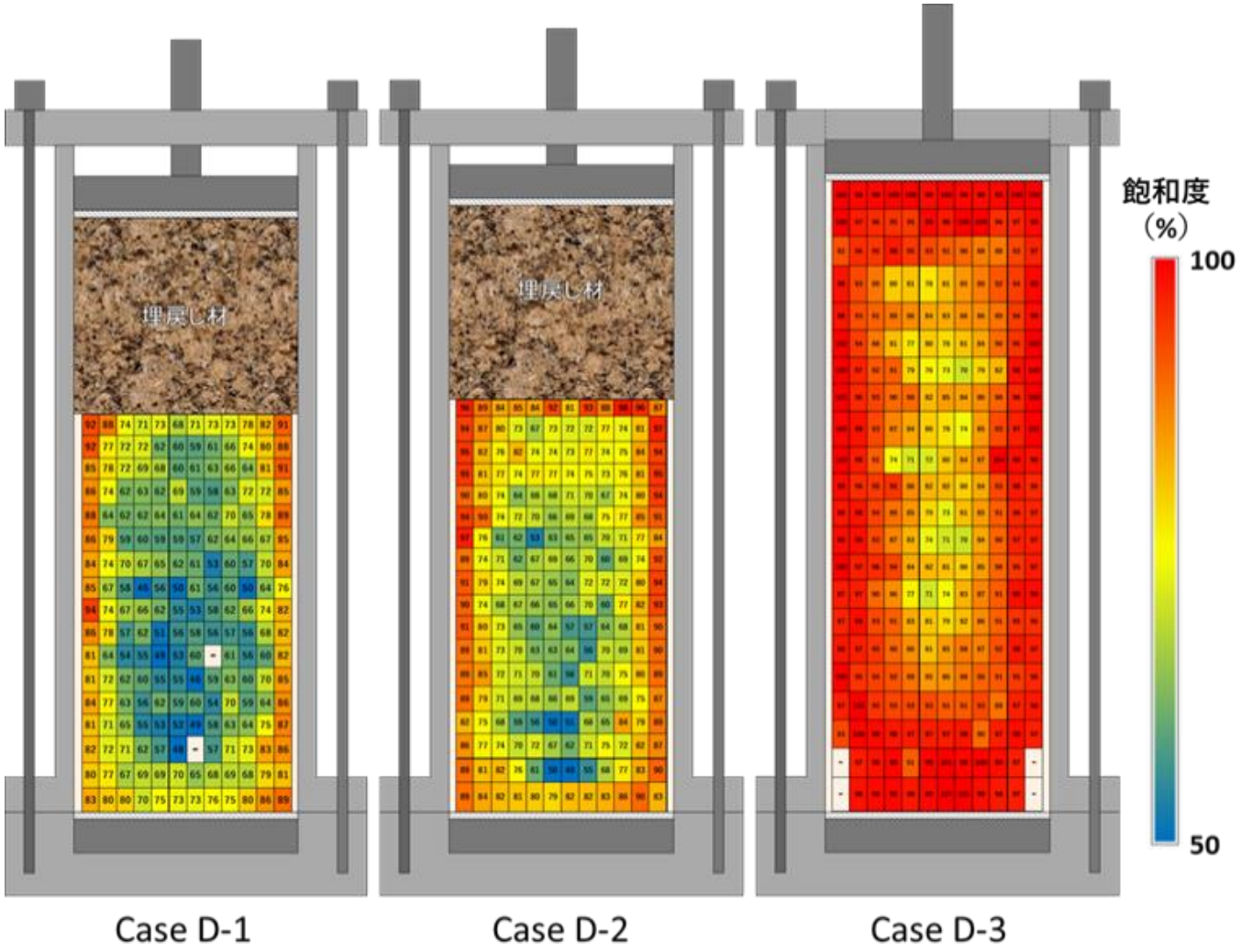
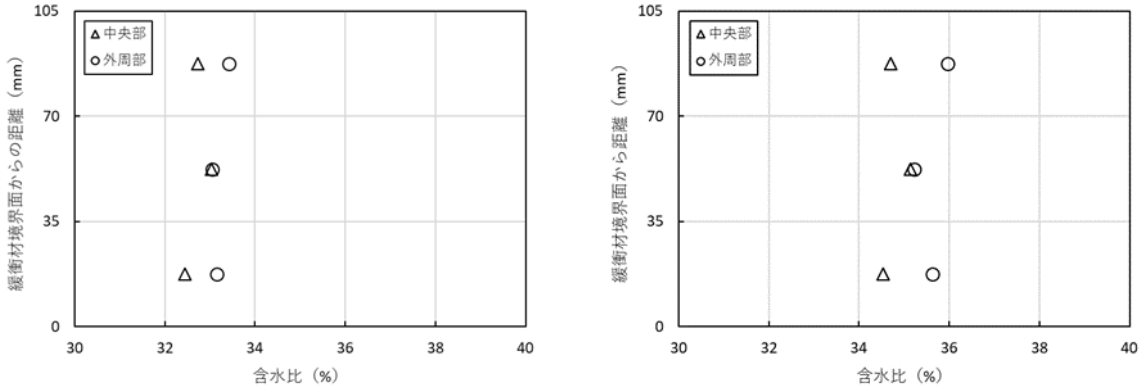


図 3.1-10　緩衝材の飽和度分布（イオン交換水）



(a) Case D-1　　(b) Case D-2

図 3.1-11　埋戻し材の含水比分布（イオン交換水）

(iv) まとめ

表 3.1-4 にイオン交換水の縮尺模型試験の結果を示す。緩衝材の平均乾燥密度は、試験終了時の変位量と解体調査時に計測した円盤状の緩衝材ブロックの直径の平均値を用いて算出した。

緩衝材の平均直径は全てのケースで 3 mm 程度増加していた。算出した平均乾燥密度は Case D-1 で 1.672 Mg/m^3、Case D-2 で 1.602 Mg/m^3、Case D-3 で 1.056 Mg/m^3 となった。また、緩衝材の解体調査で得られた含水比の平均値を用いて緩衝材全体の飽和度を算出すると Case D-1 が 78%、Case D-2 が 83.7%、Case D-3 が 88.5%となった。Case D-1 と Case D-2 については、試験終了時に上方膨潤率はほとんど変化していなかったが、緩衝材は飽和には達していなかった。埋戻し材を試験容器内で締固めて設置した Case D-1 と埋戻し材ブロックを設置し容器との隙間に粉末状の埋戻し材料を充填した Case D-2 を比較すると、Case D-2 の上方膨潤率が大きい値を示しているが、これは試験容器と接触する部分の埋戻し材の乾燥密度が低く、埋戻し材全体の乾燥密度も若干低いことが影響している可能性がある。また、埋戻し材に部分に設置した土圧計の結果より、Case D-2 の圧力が低くなっており容器と埋戻し材の間の摩擦も小さくなっている可能性がある。

図 3.1-12 と図 3.1-13 に縮尺模型試験中の緩衝材の挙動の模式図を示す。図中の赤の矢印は土圧計とロードセルで計測した土圧を示している。容器側面の土圧計は図 3.1-2(b)に示すように同一の鉛直断面に位置していないが、模式図中では同一断面上に土圧を示している。

図 3.1-12 に示す Case D-2 では、緩衝材の上方への膨潤が始まり、土圧がピークを示した 3.5 日後と試験終了時の 51.8 日後の様子を示す。3.5 日後の時点の緩衝材側面の土圧は緩衝材の上部が最も高く、中部、下部の順に低くなっている。また、緩衝材底部の土圧は側面の土圧よりも高い。試験終了時は 3.5 日時点よりも緩衝材が上方への膨潤が進んでいるが、3.5 日時点に比べて緩衝材上部の土圧が低くなっており、緩衝材下部と底部の土圧が高くなっていることが分かる。試験終了時には緩衝材の下部で土圧が高く、上部で低い傾向には変化がないことが分かる。

一方、図 3.1-13 に示す Case D-3 では、試験開始後 1.4 日、15 日および試験終了時の 33.8 日の様子を示す。試験開始直後の 1.4 日では、上方への膨潤変形が小さい段階であり、埋戻し材を設置した Case D-2 よりも土圧の値は低いが、緩衝材の下部で土圧が高くなる傾向は一致している。また、埋戻し材を設置したケースと比較して、緩衝材底部の鉛直方向の土圧が緩衝材下部の土圧よりも低くなっており、計測された土圧の分布が異なることが確認できる。その後 15 日の時点では、上方への膨潤が進んでおり、緩衝材の下部の土圧が減少していることが分かる。試験終

了時点では上方への膨潤がさらに進んでおり、土圧の値も 15 日時点と比較して減少していることがわかる。

今回の試験のように乾燥密度 1.40 Mg/m^3 程度の埋戻し材を設置した場合には、埋戻し材を設置しない場合と比較して上方膨潤率を 1/10 以下となることが確認できた。ただし、どの程度上方膨潤率が低下するかは、埋戻し材と周囲の試験容器との接触状態などが影響している可能性があり、緩衝材の膨潤が抑制されるメカニズムについては今後さらなる検討が必要である。

表 3.1-4　縮尺模型試験の結果まとめ（イオン交換水）

	初期	D-1	D-2	D-3
上方膨潤率（%）	-	2.23	5.98	61.74
変位量（mm）	-	4.68	12.56	129.66
緩衝材高さ（mm）	210	214.68	222.56	339.66
緩衝材平均直径 1)（mm）	113	115.97	116.34	116.02
緩衝材乾燥密度（Mg/m^3）	1.800	1.672	1.602	1.056
緩衝材含水比 2)（%）	10.5	17.7	21.0	50.6
緩衝材飽和度（%）	56.9	78.0	83.7	88.5

1) 緩衝材平均直径は解体調査時に計測

2) 緩衝材含水比は解体調査で得られた緩衝材全体の含水比の平均値

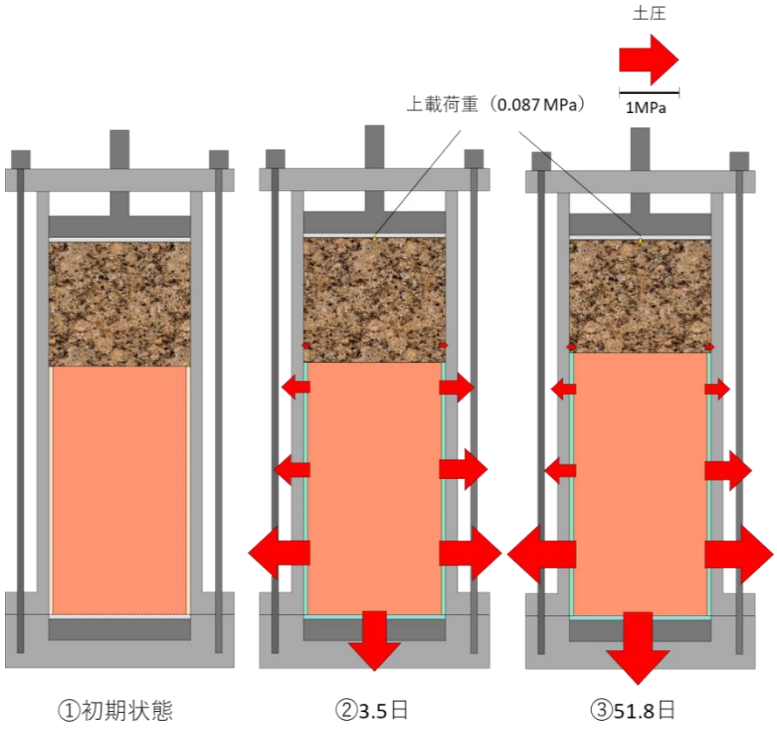


図 3.1-12　Case D-2 の緩衝材の挙動の模式図

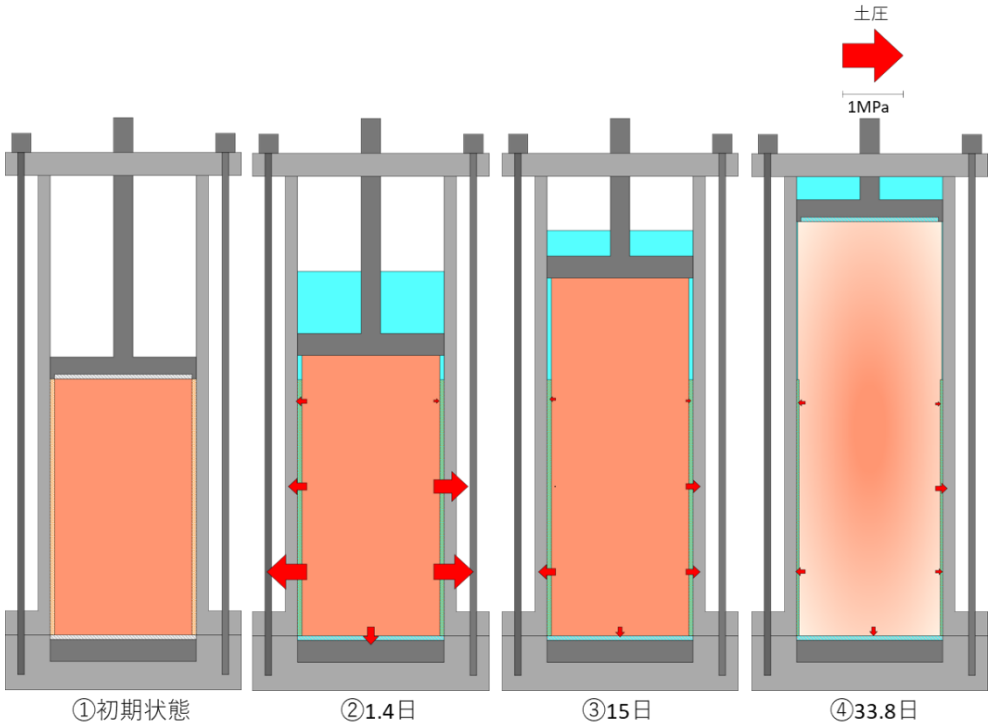
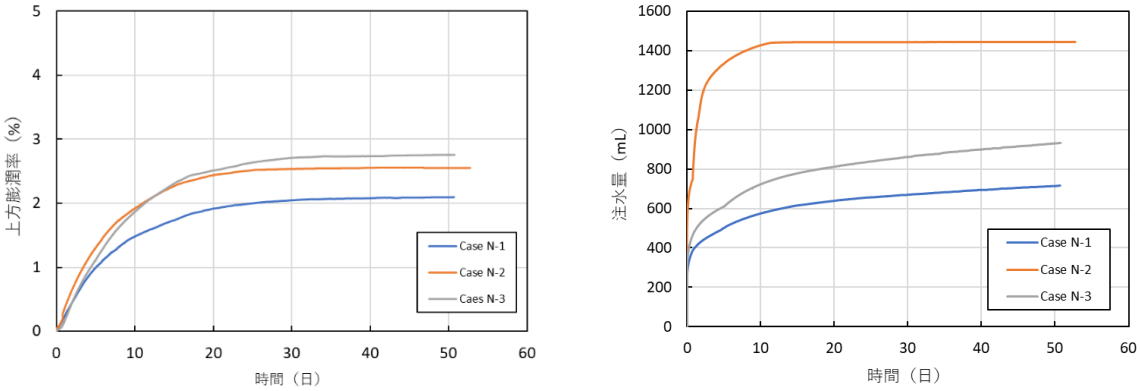


図 3.1-13　Case D-3 の乾燥材の挙動の模式図

(b) 0.2 mol/L-NaCl 水溶液

(i) 上方膨潤率

NaCl 水溶液においても、イオン交換水と同様に埋戻し材が膨潤により変形しないと仮定して上方膨潤率を算出した。図 3.1-14 に上方膨潤率と注水量の経時変化を示す。Case N-2 において、試験開始後に注水量が大幅に増加しているが、これは試験装置頂部に位置する排水管より試験用水が流出したためである。そのため、他の 2 ケースとは異なり、試験開始直後から埋戻し材上部まで試験用水に使っている状態にあったと考えられる。この時、流出した水を全量回収することができなかったため流出量は不明である。Case N-2 では試験開始 10 日後から注水量は変化していないが、Case N-1 と Case N-3 では試験終了時まで緩やかに注水量が増加する傾向を示した。上方膨潤率は、いずれのケースにおいても試験開始から 20 日を過ぎたあたりからその増加傾向が緩やかになり、試験終了時には一定の値となった。試験終了時の上方膨潤率は Case N-1 が 2.10%、Case N-2 が 2.56%、Case N-3 が 2.76%となり大きな差はみられなかった。



(a) 上方膨潤率　　(b) 注水量

図 3.1-14　上方膨潤率と注水量の経時変化（NaCl 水溶液）

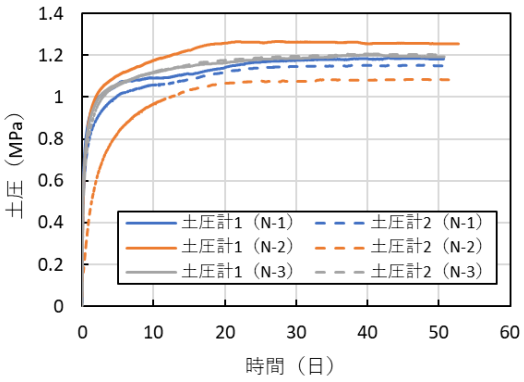
(ii) 土圧

土圧計とロードセルの設置位置はイオン交換水と同様に図 3.1-6 に示す通りである。図 3.1-15 に NaCl 水溶液における土圧の経時変化を示す。いずれのケースにおいても土圧計 1、2 は試験開始直後に圧力が急激に増加した後、20 日ごろまで緩やかに増加する傾向となり、試験終了時には 1.1 MPa～1.3 MPa を示した。土圧計 3、4 では急激に圧力が増加した後、ピークの値を示し 10 日頃まで緩やかに圧力が減少した。その後、20 日頃まで増加する傾向を示し、Case N-3 の土圧計 4 を除いて 0.7 MPa～0.9 MPa を示した。土圧計 5、6 では圧力がピークの値を示した後、減少する傾向に転じ、20 日を過ぎたあたりで一定の値となり試験終了時には 0.3 MPa～0.5MPa を示した。NaCl 水溶液においても緩衝材の下部の圧力が最も高い値を示した。

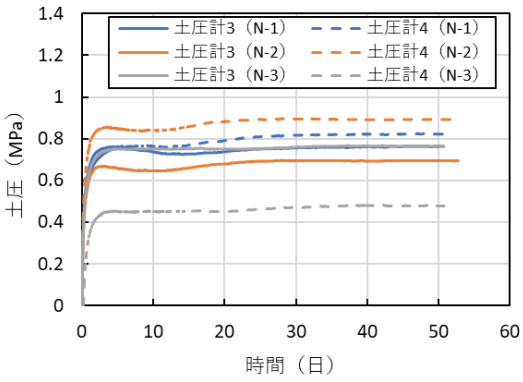
埋戻し材に設置した土圧計 7、8 では Case N-2 の土圧計 7 で試験開始直後に 0.6 MPa 程度の圧力を示しているが、その後すぐに減少し試験終了時には全てのケースにおいて 0.1 MPa～0.2 MPa を示した。

ロードセルは、試験開始直後に急激に圧力が増加し 5 日ごろからは緩やかな増加傾向を示した後、20 日を過ぎたあたりからほぼ一定の値となり、試験終了時には 0.9 MPa～1.1 MPa を示した。

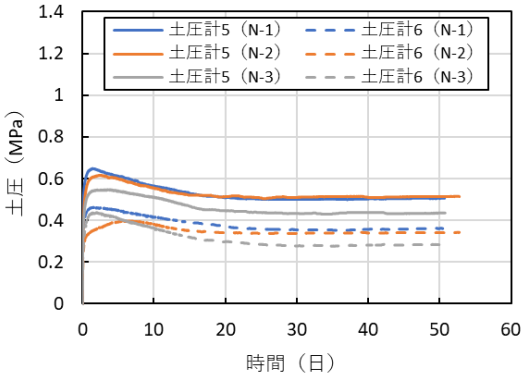
以上の結果より、NaCl 水溶液を用いた 3 ケース全ての試験で土圧の挙動に大きな差は確認されなかった。



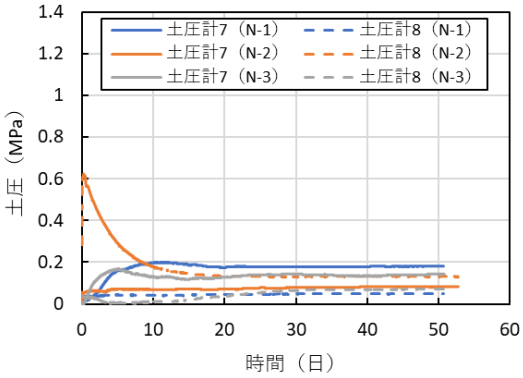
(a) 土圧計 1，2



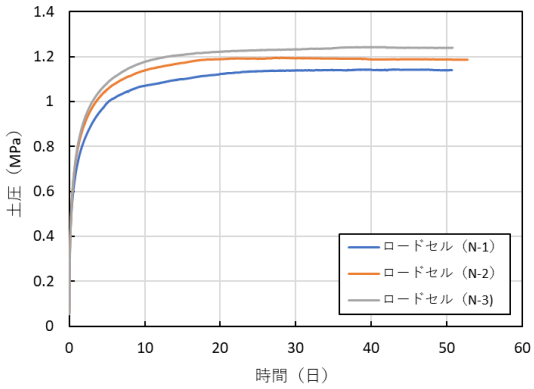
(b) 土圧計 3，4



(c) 土圧計 5，6



(d) 土圧計 7，8



(e) ロードセル

図 3.1-15　土圧の経時変化（NaCl 水溶液）

(iii) 解体調査の結果

NaCl 水溶液の条件においてもイオン交換水と同様に、試験終了後に緩衝材と埋戻し材の縮尺模型を試験容器から取り出して乾燥密度と含水比を計測した。解体調査時の様子を図 3.1-16 に示す。試験中に試験容器上部からの流出が確認されたのは Case N-2 だけであったが、全てのケースにおいて埋戻し材の上部に試験用水が溜まっていた。

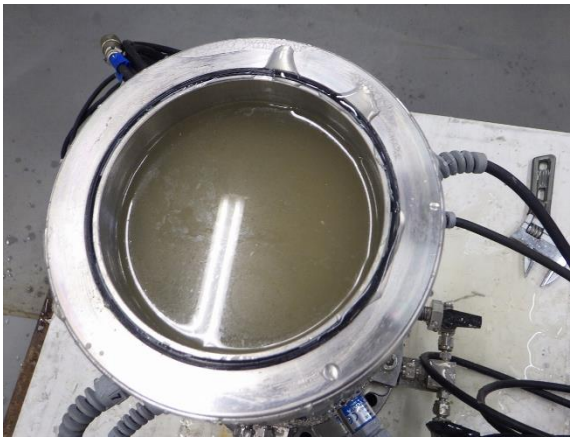
緩衝材は高さ方向に円盤状のブロックに分割し、Case N-1 が 17 層、Case N-2 が 16 層、Case N-3 が 17 層であった。各層の中央部分を 12 個のブロックに分割した。分割した個々のブロックは、湿潤重量を測定した後、ノギス法と 3D スキャナで計測して体積を算出した。その後、炉乾燥法により含水比と乾燥重量を計測した。計測で得られた値より、個々のブロックの乾燥密度と飽和度を算出した。

図 3.1-17 に乾燥密度分布を示す。Case N-3 の緩衝材中部から上部にかけて存在する白字で示すブロックは 3D スキャナで計測した 2 回分のデータから三次元モデルが作成できず、1 回分のデータを補正して体積を算出しているため、得られた乾燥密度の精度は低いと考えられるが参考値として示す。平均乾燥密度は、Case N-1 が 1.59 Mg/m^3、Case N-2 が 1.57 Mg/m^3、Case N-3 が 1.55Mg/m^3 となり、上方膨潤率が小さいほど乾燥密度が高くなる結果であった。緩衝材の中心部と外周部の乾燥密度を比較すると中心部の乾燥密度が低い傾向がある。Case N-1 においては、緩衝材上部の乾燥密度が 1.60 mg/m^3～1.65 Mg/m^3 程度で高い傾向があった。Case N-2 では、緩衝材の中心部分の乾燥密度が 1.45 Mg/m^3～1.55Mg/m^3 程度の低い値を示している。Case N-3 では緩衝材の上部で乾燥密度が低い傾向がみられるが、前述の通り 3D スキャナ計測のデータに補正を加えた影響で実際の乾燥密度が正しく算出できていない可能性が高い。

図 3.1-18 に飽和度の分布を示す。平均飽和度は Case N-1 が 69%、Case N-2 が 73%、Case N-3 が 71%と大きな差はなく、全てのケースで緩衝材全体が飽和に達していないことが確認された。Case N-1 と Case N-3 では試験終了時に注水量が増加する傾向であったが上方膨潤率が一定の値となり変化していない状態であった。飽和度の分布は全てのケースで緩衝材の中心部分の飽和度が 60%程度と低い値を示した。Case N-2 については他のケースと異なり、緩衝材上部で 90%近い飽和度を示す領域が広がっているが、これは試験開始初期に多くの試験用水が供給され埋戻し材の上部まで達した影響により他の 2 つのケースと飽和の進展状況が異なった可能性が考えられる。

埋戻し材もイオン交換水と同様に高さ方向に 3 個のブロックに分割し、各ブロックを中心部と外周部に分けて含水比を計測した。含水比の計測結果を図 3.1-19 に示す。Case N-2 および Case N-3 では外周部の含水比が中心部に比べて高い傾向を示すが、Case N-1 では埋戻し材の中部と下部で中心部の含水比が外周部に比べて高い値を示した。埋戻し材全体の含水比は、Case N-1 が 38.2%、Case N-2 が 40.4%、Case N-3 が 40.8%となり、飽和度に換算するとそれぞれ 85.41%、90.33%、91.23%となった。NaCl 水溶液のケースでは、全てのケースで試験終了時には試験用水が埋戻し材の上部に溜まっている状態であったが、埋戻し材は飽和に達していないことが確認された。

(a) Case N-1



(b) Case N-2

(c) Case N-3

図 3.1-16　解体調査時の埋戻し材上部の状況（NaCl 水溶液）

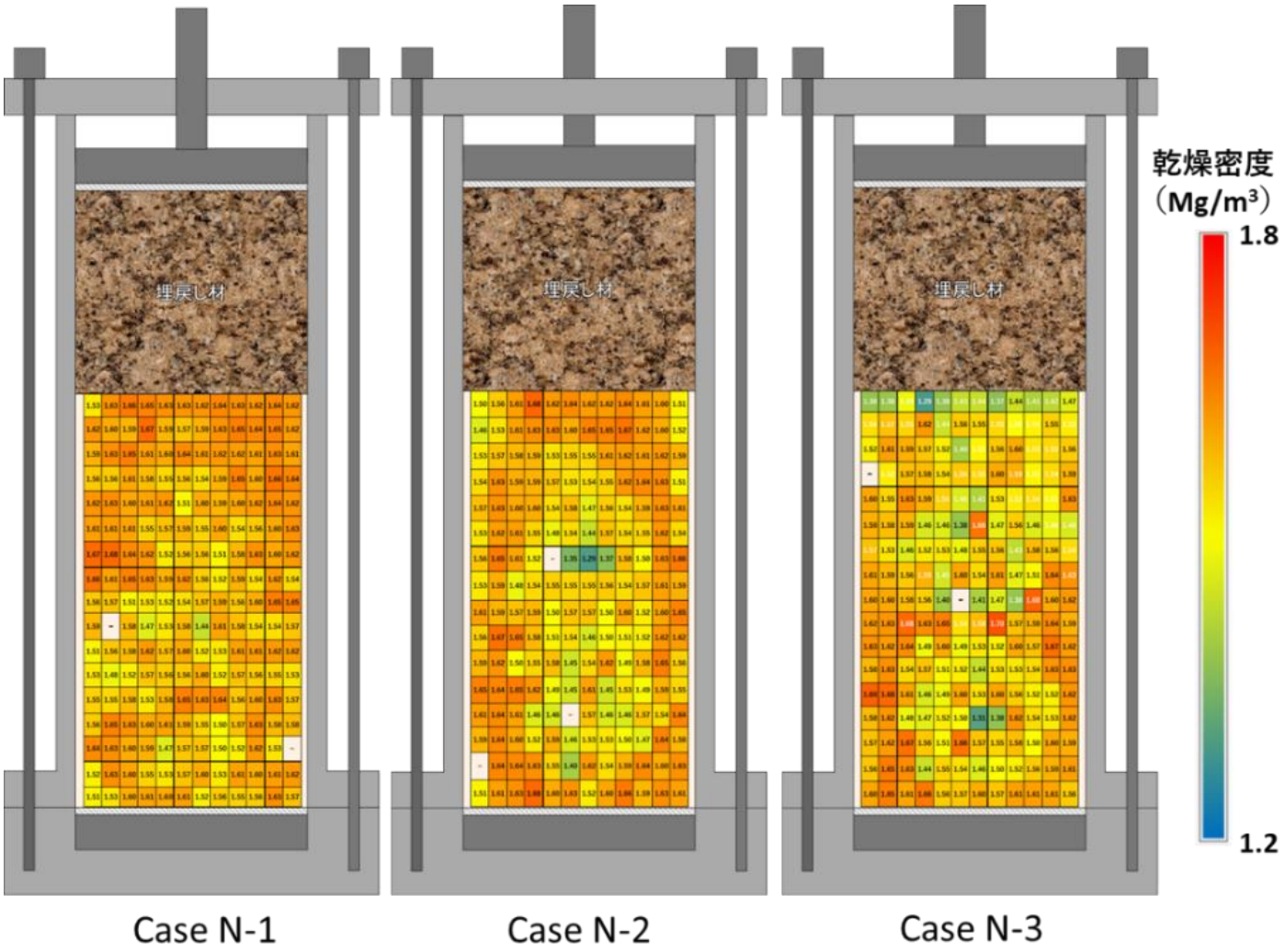


図 3.1-17　緩衝材の乾燥密度分布（NaCl 水溶液）

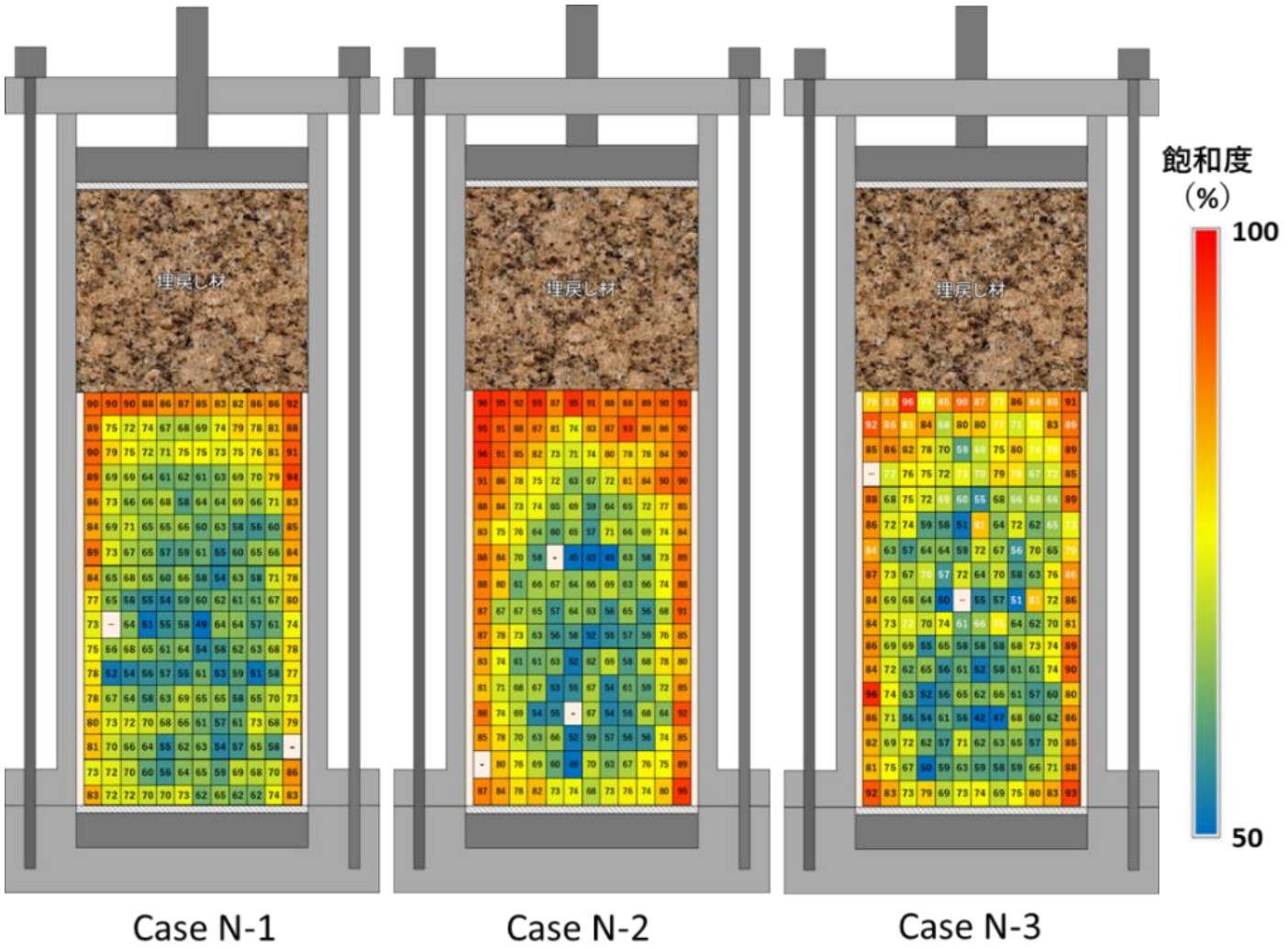
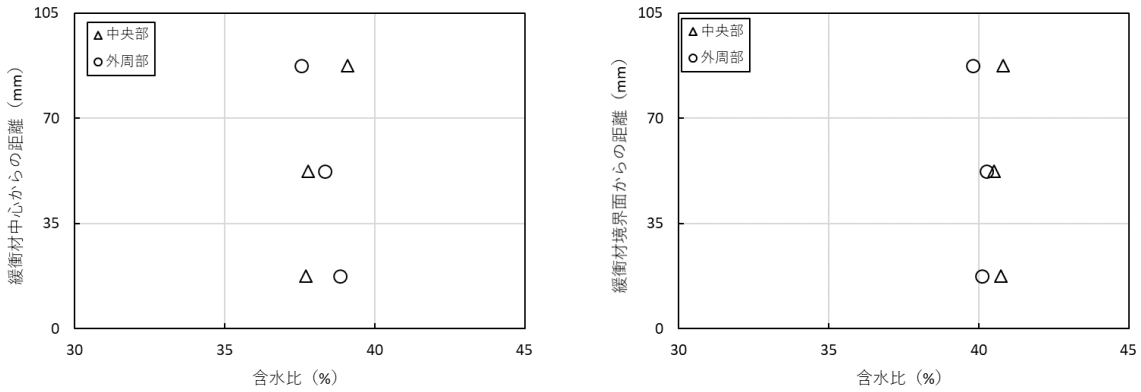
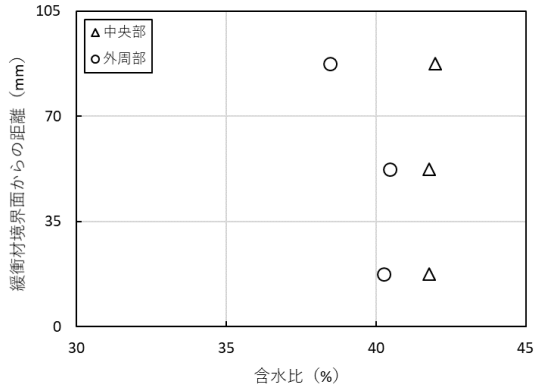


図 3.1-18　緩衝材の飽和度分布（NaCl 水溶液）



(a) Case N-1　　(b) Case N-2



(c) Case N-3

図 3.1-19　埋戻し材の含水比分布（NaCl 水溶液）

(iv) まとめ

表 3.1-4 に NaCl 水溶液の縮尺模型試験の結果を示す。緩衝材の平均乾燥密度はイオン交換水と同様に、試験終了時の変位量と解体調査時に計測した円盤状の緩衝材ブロックの直径の平均値を用いて算出した。

緩衝材の平均直径は全てのケースで 3 mm 以上増加しており、緩衝材が上方だけではなく半径方向にも膨潤していることが分かった。平均乾燥密度は Case N-1 が 1.672 Mg/m^3、Case N-2 が 1.651 Mg/m^3、Case N-3 が 1.644 Mg/m^3 であった。NaCl 水溶液で設置した埋戻し材の乾燥密度は 1.20 Mg/m^3 であり、イオン交換水の Case D-1 で設置した埋戻し材よりも低い密度であったが、上方膨潤量および乾燥密度の変化は小さい結果となった。令和 3 年度には、埋戻し材の乾燥密度を 1.20 Mg/m^3 としてイオン交換水と NaCl 水溶液を用いた縮尺模型試験をそれぞれ実施しており、NaCl 水溶液の場合に上方膨潤率が小さくなる結果が得られている（原子力機構・原環センター，2022）。NaCl 水溶液のように塩分濃度を有する水の場合には緩衝材の上方膨潤率が小さく、低い乾燥密度でも十分な膨出抑制機能を持つ可能性があるが、試験終了時に埋戻し材の上部に試験用水が溜まっている状況が確認されたように、埋戻し材の透水性が高くなる可能性がある。

また、解体調査で得られた緩衝材の含水比の平均値を用いて緩衝材全体の飽和度を算出すると Case N-1 が 79.1%、Case N-2 が 84.6%、Case N-3 が 84.4%となった。NaCl 水溶液の場合でも試験終了時には上方膨潤率にほとんど変化がみられなかったが、緩衝材は飽和に達していない。全てのケースにおいて、試験終了時の乾燥密度と飽和度はおおむね同じ値を示しており、再現性

のある試験結果が得られたと考える。

表 3.1-5　縮尺模型試験の結果まとめ（NaCl 水溶液）

	初期	N-1	N-2	N-3
上方膨潤率（%）	-	2.10	2.56	2.76
変位量（mm）	-	4.41	5.38	5.79
緩衝材高さ（mm）	210	214.41	215.38	215.79
緩衝材平均直径 1)（mm）	113	116.35	116.52	116.63
緩衝材乾燥密度（Mg/m^3）	1.800	1.663	1.651	1.644
緩衝材含水比 2)（%）	10.5	18.2	19.8	20.0
緩衝材飽和度（%）	56.9	79.1	84.6	84.4

1) 緩衝材平均直径は解体調査時に計測

2) 緩衝材含水比は解体調査で得られた緩衝材全体の含水比の平均値

3.1.3 気相を考慮したベントナイト中の連成現象

(1) 気液二相流解析

(a) 解析コードの概要

緩衝材の膨潤挙動評価のためには、緩衝材中に内包される空気やガラス固化体の発熱によって生じる水蒸気などの気相が、緩衝材中の熱－水－応力（THM）連成現象にどのような影響を及ぼすのかを整理する必要がある。ここでは、気相の境界条件を排気または非排気とした場合に、ベントナイト中の温度、飽和度、間隙空気圧分布がどのように変化するかを、気液二相流連成解析により確認した。気液二相流連成解析にはカタルーニャ工科大の地盤工学研究室で開発された CODE_BRIGHT（Olivella et al., 1996）を用いた。CODE_BRIGHT は、間隙水の加熱による水蒸気化（液相から気相）、間隙空気圧増加による水への溶解（気相から液相）と言った相変換を考慮でき、さらに膨潤性粘土の弾塑性挙動を表現できる Barcelona Basic model（Alonso et al., 1990）が適用可能なソフトウェアである。CODE_BRIGHT の支配方程式は、式 3.1-1 から式 3.1-3 に示す固体、水、空気の質量保存則、式 3.1-4 に示す運動量保存則及び式 3.1-5 に示す内部エネルギー保存則により記述される。

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_s(1-\varphi)\right)+\nabla\cdot(\mathbf{j}_s)=0 \qquad \text{式 3.1-1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\theta_l^w S_l\varphi+\theta_g^w S_g\varphi\right)+\nabla\cdot\left(\mathbf{j}_l^w+\mathbf{j}_g^w\right)=f^w \qquad \text{式 3.1-2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\theta_l^a S_l\varphi+\theta_g^a S_g\varphi\right)+\nabla\cdot\left(\mathbf{j}_l^a+\mathbf{j}_g^a\right)=f^a \qquad \text{式 3.1-3}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma_t}+\boldsymbol{b}=\mathbf{0} \qquad \text{式 3.1-4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(E_s\rho_s(1-\varphi)+E_l\rho_l S_l\varphi+E_g\rho_g S_g\varphi\right)+\nabla\cdot\left(\boldsymbol{i}_c+\boldsymbol{j}_{Es}+\boldsymbol{j}_{El}+\boldsymbol{j}_{Eg}\right)=f^Q \qquad \text{式 3.1-5}$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

$\boldsymbol{\sigma_t}$　；全応力テンソル

$\boldsymbol{b}$　；物体力

θ　；相の単位体積あたりの質量含有率

S_l ; 液相飽和度

φ ; 間隙率

S_g ; 気相飽和度

$\boldsymbol{j}$; 全質量流束

ρ ; 密度

E ; 内部エネルギー

$\boldsymbol{i_c}$; 熱伝導流束

$\boldsymbol{j_E}$; エネルギー流束

f^a, f^w ; 外部から供給される単位体積当たりの空気及び水

f^Q ; 外部から供給される単位体積当たりのエネルギー

$\dot{\boldsymbol{u}}$; 固相の速度ベクトル

上付きの$\boldsymbol{w}$と$\boldsymbol{a}$は水と空気をそれぞれ示し、下付きのs、l及びgは固相、液相及び気相をそれぞれ示す。支配方程式内の各流束は構成式及び平衡則から導かれ、各相の移流流束は式 3.1-6 の Darcy 則、熱伝導は式 3.1-7 の Fourier 則、水蒸気や溶存空気の拡散は式 3.1-8 の Fick 則を適用している。

$$\mathbf{q}_\alpha = -\frac{\boldsymbol{k}k_{r\alpha}}{\mu_\alpha}(\nabla P_\alpha - \rho_\alpha \boldsymbol{g}) \qquad \text{式 3.1-6}$$

$$\mathbf{j}_\alpha^i = \theta_\alpha^i \mathbf{q}_\alpha$$

$$i_c = -\lambda \nabla T \qquad \text{式 3.1-7}$$

$$\boldsymbol{i}_\alpha^i = -\left(\tau\varphi\rho_\alpha S_\alpha D_\alpha^i \boldsymbol{I}\right)\nabla\omega_\alpha^i \qquad \text{式 3.1-8}$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

λ ; 多孔質媒体の熱伝導率

$\boldsymbol{q}_\alpha$; ダルシー流速

$\boldsymbol{k}$; 絶対透過係数テンソル

μ_α, $k_{r\alpha}$; 動粘性係数、相対浸透率

P_α ; 圧力

$\boldsymbol{g}$; 重力加速度ベクトル

D_α^i ; 拡散係数

τ ; 屈曲度

$\boldsymbol{I}$; 単位行列

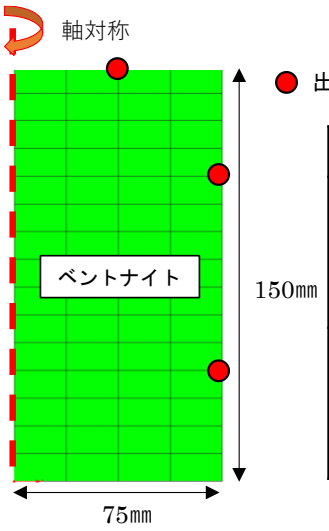
ω_α^i ; 質量分率

上付きの i は α 相中の他の媒体（例えば、液相中の溶存空気または気相中の水蒸気）を示し、下付きの α は各相を示す。

(b) 解析条件

図 3.1-20 に解析モデルと境界条件を示す。解析モデルは室内試験の供試体寸法に合わせて設定

し、軸対称にてモデル化した。本検討では、解析モデル上部の温度条件（25℃、95℃）、解析モデル上部の気相の境界条件（排気、非排気）、ベントナイトの乾燥密度（1.2、1.6 Mg/m³）、気相の相対浸透率を変化させ、気液二相流解析を実施した。解析に用いた各物性値を以下に示す。



境界条件		
温度	上面	温度固定境界（25℃、90℃）
	底面	温度固定境界（25℃）
	側面	断熱境界
流体	上面	不浸透境界
	底面	水圧固定境界
	側面	不浸透境界

図 3.1-20　解析モデルと境界条件

表 3.1-6　記号と物性値（二相流パラメータ）

記号	単位	物性値または係数
κ	m^2	絶対浸透率
ρ_b	Mg/m^3	有効粘土密度
S_r	%	初期飽和度
S_{ls}	－	水相最大飽和率
S_{lr}	－	水相残留飽和率
S_{gs}	－	ガス相最大飽和率
S_{gr}	－	ガス相残留飽和率
S_e	－	水相有効飽和率
λ_g,λ_l	－	相対浸透率モデルにおけるモデル係数
P_c	Pa	毛細管圧力
P_0	Pa	ガス侵入圧
n	－	毛細管圧力モデルにおけるモデル係数
k_{rl}	－	水相相対浸透率
k_{rg}	－	ガス相相対浸透率

表 3.1-6 に二相流特性で用いる記号と物性値または係数の対応表を示す。絶対浸透率は、有効粘土密度と絶対浸透率の関係式（松本ほか, 1997）から、有効粘土密度を代入して算出した。水分特性曲線には van Genuchten モデル（van Genuchten, 1980）を用い、相対浸透率については、液相には van Genuchten モデル、気相には Power モデルと Grant モデルを用いた。式 3.1-9 から式 3.1-14 にそれぞれの式を示す。van Genuchten パラメータ（P_0）は、既往の研究成果（佐藤ほか, 2017）を基に、式 3.1-15 に示す絶対浸透率とガス侵入圧の関係式（原環センター, 2011）

から絶対浸透率 k の比を用いて補正し、乾燥密度ρ_d=1.20 Mg/m³ では P_0=0.48 MPa、乾燥密度ρ_d=1.60 Mg/m³ では P_0=1.64 MPa とし、モデル係数は、n=1.28 とした。

絶対浸透率

$$\kappa = exp\left(-42.10 + 1.1447\rho_b + \rho_b^2\right) \qquad \text{式 3.1-9}$$

水分特性曲線：van Genuchten モデル

$$P_c = P_0\left(S_e^{-n/1-n} - 1\right)^{1/n} \qquad \text{式 3.1-10}$$

$$S_e = (S_l - S_{lr})/(S_{ls} - S_{lr}) \qquad \text{式 3.1-11}$$

相対浸透率（液相）：van Genuchten モデル

$$K_{rl} = \sqrt{S_e}\left(1 - \left(1 - S_e^{-1/\lambda_l}\right)^{\lambda_l}\right)^2 \qquad \text{式 3.1-12}$$

相対浸透率（気相）：Power モデル

$$K_{rg} = \ (1 - S_e)^{\ \lambda_g} \qquad \text{式 3.1-13}$$

相対浸透率（気相）：Grant モデル

$$K_{rg} = 1 - K_{rl} \qquad \text{式 3.1-14}$$

$$\frac{(P_0)_1}{(P_0)_2} = \left(\frac{\kappa_1}{\kappa_2}\right)^{-0.6389} \qquad \text{式 3.1-15}$$

本検討材料であるクニゲル V1（乾燥密度ρ_d=1.20 Mg/m³ 及びρ_d=1.60 Mg/m³）の熱特性は、ホットディスク法により計測された熱物性値（菊池・棚井, 2003）を用いた（表 3.1-7）。

表 3.1-7　熱物性値

	乾燥密度 [Mg/m³]	比熱 [kJ/kg K]	熱伝導率 [W/m K]
飽和度状態	1.6	-	1.501
	1.2	-	1.464
乾燥状態	1.6	0.713	0.413
	1.2	0.367	0.129

CODE_BRIGHT における水蒸気拡散は式 3.1-8 に示すように Fick 則を仮定しており、拡散係数は以下の式より算出する。

$$D_\alpha^i = D\left(\frac{(273.15 + T)^n}{P_g}\right) \qquad \text{式 3.1-16}$$

ここで τ、D、n はモデルパラメータ、P_gはガス圧を示す。なお、本解析では屈曲度の飽和度依存

性は考慮しない。水蒸気拡散に関するパラメータを以下に示す。水蒸気拡散に対するパラメータは Philip らの研究成果（Philip and De Vries, 1957）より、表 3.1-8 に示す値を用いることとした。本検討で実施した二相流解析のケースを表 3.1-9 に示す。

表 3.1-8　水蒸気拡散に関するパラメータ

	単位	物性値
材料パラメータ D	$m^2/s \cdot K^n \cdot Pa$	5.90×10^{-6}
材料パラメータ n	－	2.30
屈曲度 τ	－	1.0

表 3.1-9　解析ケース

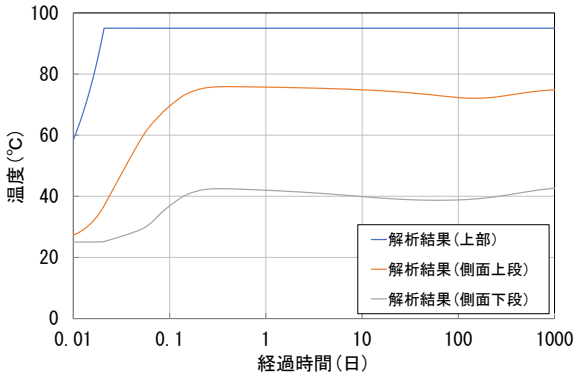
解析ケース	上部温度	上面気相境界条件	乾燥密度	初期飽和度	気相の相対浸透率
1	95℃	非排気	1.6 Mg/m^3	40 %	Power モデル
2	25℃	非排気	1.6 Mg/m^3	40 %	Power モデル
3	95℃	排気	1.6 Mg/m^3	40 %	Power モデル
4	95℃	非排気	1.2 Mg/m^3	20 %	Power モデル
5	95℃	非排気	1.6 Mg/m^3	40 %	Grant モデル

(c) 感度解析結果

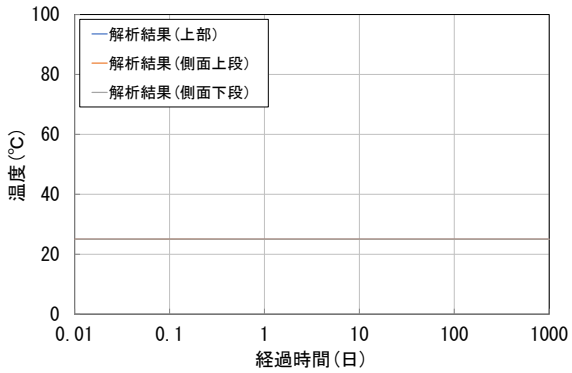
図 3.1-21 から図 3.1-23 に各ケースの温度、飽和度、間隙空気圧の解析結果を示す。ケース 1 の温度解析結果は、試験開始後数時間で側面上段、下段部は一度ピーク温度（側面上段：75℃、側面下段：42℃）に達し、試験開始後 100 日程度経過した段階で側面上段、下段部ともにピーク温度から数℃低下する。温度が低下する要因としては下部からの注水により、飽和が進むため温度が低下すると考えられる。これらの傾向は他のケースでも同様の傾向を示し、飽和度分布によって若干の温度差が見られるものの大きな差はない。

ケース 1 の飽和度分布は、浸潤面に近い側面下段では試験開始後数日で上昇し、100 日後には約 80%に近い飽和度になった。他ケースにおいても乾燥密度が低いケース 4 では若干浸潤が速いものの同様の傾向を示した。一方、加熱面である上部やそれに近い側面上段では 100 日を超えてから飽和度は増加し始め、特に加熱温度 95℃、非排気としたケース 1、4、5 の上部では温度勾配によって生じる水分拡散によって、一時的に上部の飽和度が低下した。ケース 3 についても、上部の飽和度が低下しているが飽和度が低下し始める時間や低下量はケース 1、4 、5 とは大きく異なる。これは上部の気相の境界条件が排気条件としたことにより、乾燥した空気と一緒に水蒸気も排気されることによって飽和度が低下しており、その影響で側面上段の飽和度も低下した。

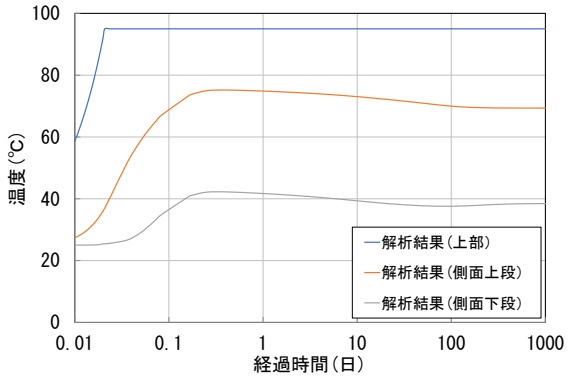
間隙空気圧の分布は、加熱温度 95℃、非排気としたケース 1、4、5 で高い間隙空気圧を示し、特に加熱面である上部では、2 MPa を超える結果となった。今回の解析では、ベントナイト中を間隙空気が破過することを考慮していないため、温度が高い条件では間隙空気圧が高くなりやすいという傾向を示した結果である。



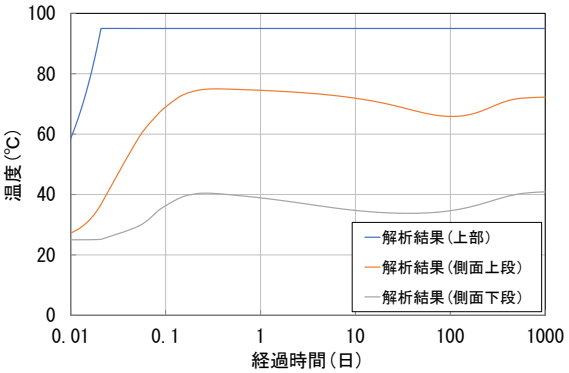
(a) ケース 1



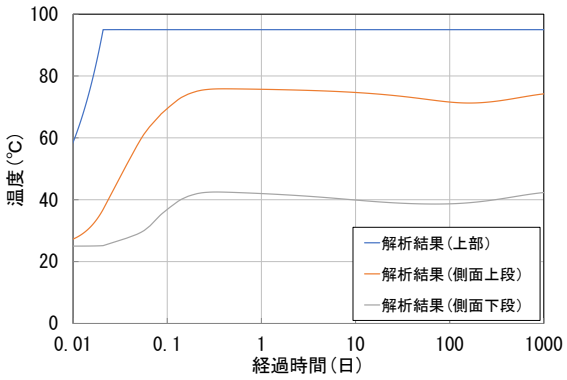
(b) ケース 2



(c) ケース 3

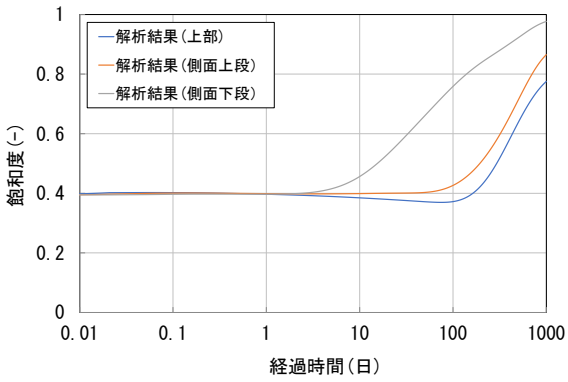


(d) ケース 4

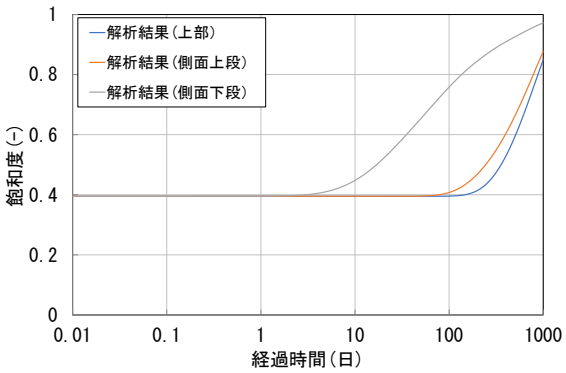


(e) ケース 5

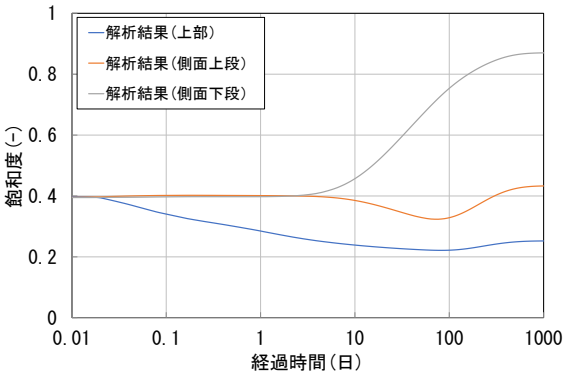
図 3.1-21　解析結果（温度）



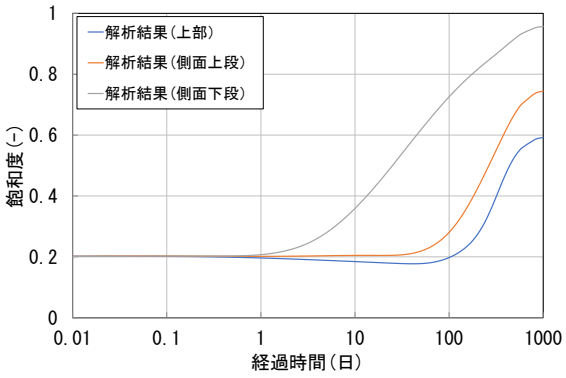
(a) ケース 1



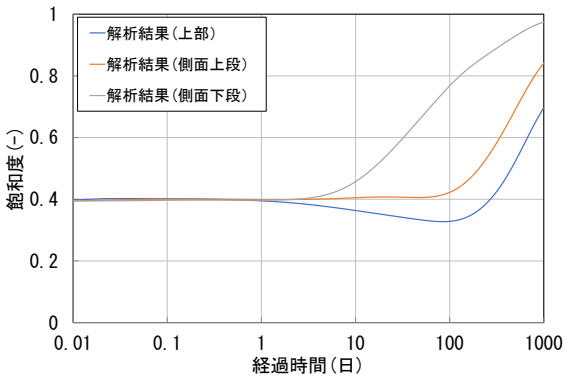
(b) ケース 2



(c) ケース 3

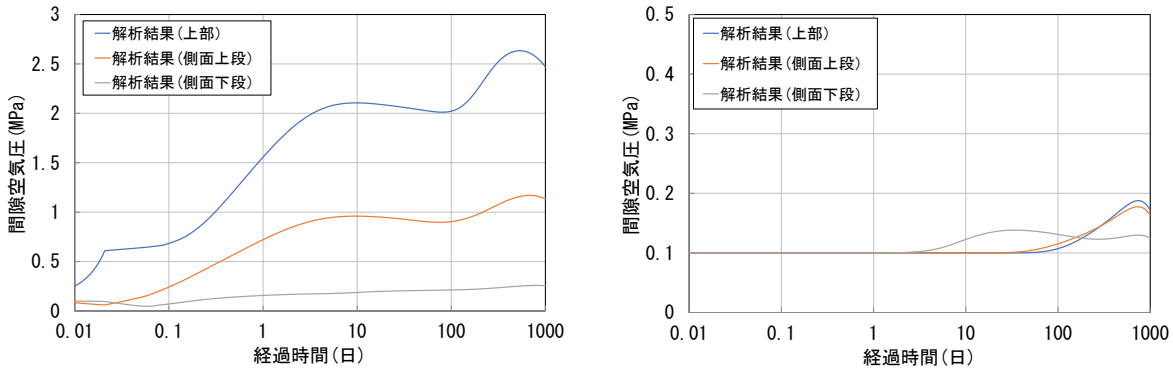


(d) ケース 4



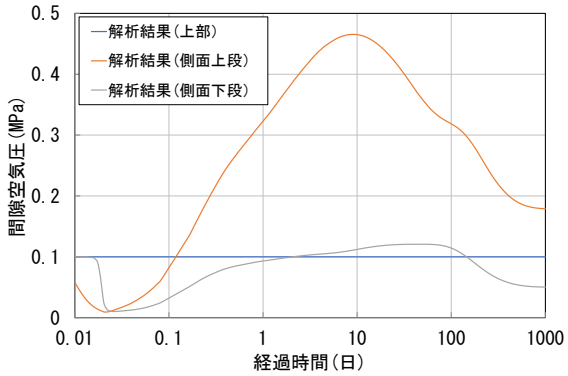
(e) ケース 5

図 3.1-22　解析結果（飽和度）

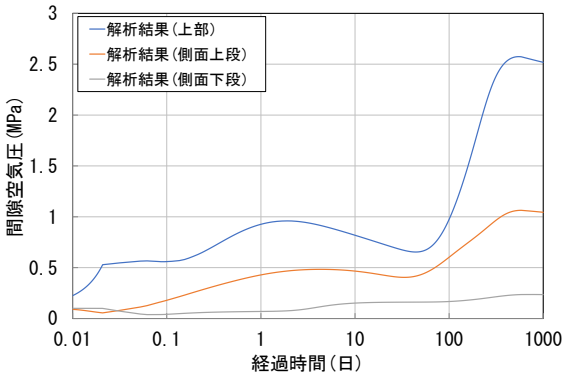


(a) ケース 1

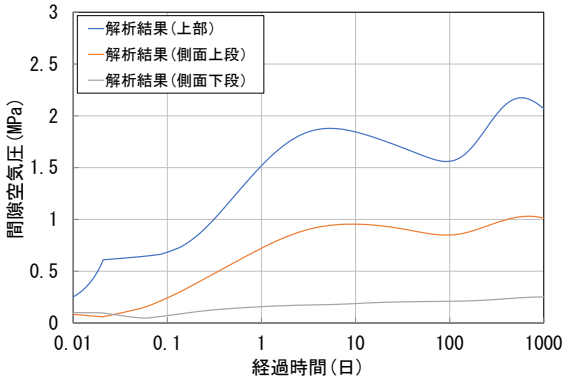
(b) ケース 2



(c) ケース 3



(d) ケース 4



(e) ケース 5

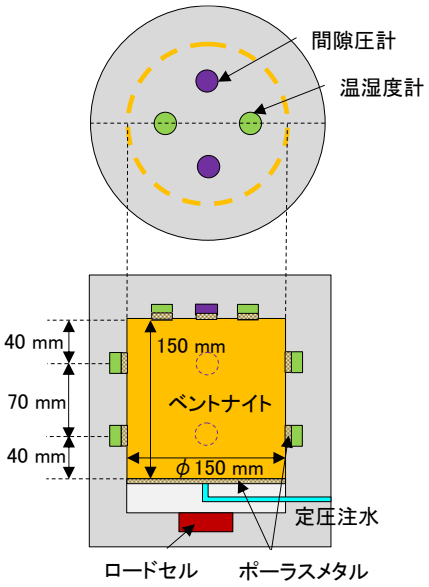
図 3.1-23　解析結果（間隙空気圧）

(2) 室内試験検討

(a) 試験概要と条件

感度解析の結果、上部を非排気とした場合には上部の間隙空気圧が上昇し、温度が高いほど上昇傾向が大きくなることが確認されたが、解析結果の妥当性を確認するためには室内試験による検討も必要である。本検討では、気相の現象理解のため、より単純な系である温度一定の条件で、ベントナイト中の水分分布と間隙圧分布がどのように変化するかを室内試験により確認することとした。図 3.1-24 に試験装置の概要と試験条件を示す。本試験装置に設置する供試体の寸法は直径 150 mm、高さ 150 mm の円筒形とし、下部に注水を行う機構を設けるとともに、相対湿度、間隙圧を連続計測するためのセンサーを設置した。供試体はクニゲル V1（100%）用い、初期乾燥密度は比較的早期に現象が確認できるように 1.1 Mg/m^3、初期飽和度は飽和度と相対湿度の関係を考慮し、相対湿度の変化が捉えられるように 20%とした。供試体の作成には、100 kN まで

載荷可能な圧縮試験装置を用いて、供試体圧縮時に試験装置にかかる圧縮応力を考慮し、所定の密度となるように 1 層約 25 mm（計 6 層）と設定し、圧縮成型を行った。1 層ごとに圧縮成型終了後には、層間の密着性を高めるため、直ナイフなどで表面に刻み線を入れた。試験は、温度 25℃、湿度 60%に設定した恒温恒湿室内で実施し、供試体へ給水する試験用水は脱気したイオン交換水を用いた。本検討で用いるベントナイト（クニゲル V1）の物性値を表 3.1-10 に示す。なお、メチレンブルー吸着量の測定方法は日本ベントナイト工業会に準拠した方法で実施し、モンモリロナイト含有率は、純モンモリロナイトのメチレンブルー吸着量 140（mmol/100 g）を基準として算出した値である。陽イオン交換容量、浸出陽イオン量は SFSA 法を用いて計測した。



項目	内容
試験種別	HM連成試験
材料	クニゲルV1（100 %）
供試体寸法	直径 150 mm、高さ 150 mm （1層 25 mm × 6層）
乾燥密度	1.10 Mg/m³
初期飽和度	20 [%]
試験水	イオン交換水（脱気水）
試験期間	60日

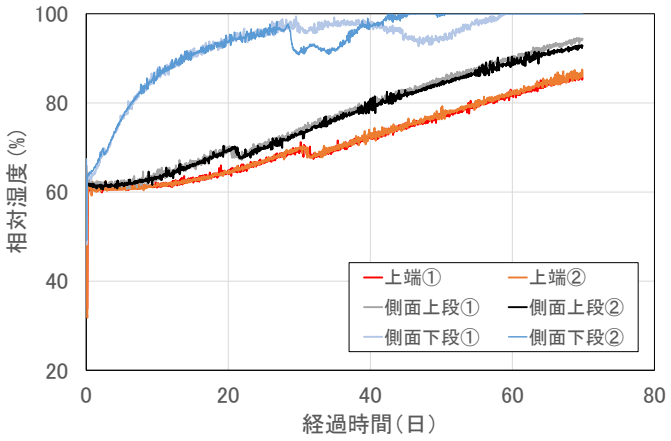
図 3.1-24　試験装置と試験条件

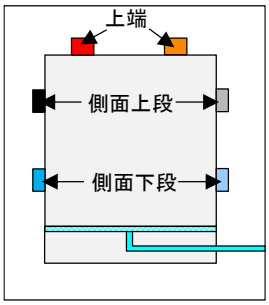
表 3.1-10　クニゲル V1 の物性値

試料名	クニゲル V1
土粒子密度（Mg/m³）	2.743
液性限界（%）	488.6
塑性限界（%）	26.0
塑性指数（−）	462.6
メチレンブルー吸着量（mmol/100g）	89.0
モンモリロナイト含有率（%）	63.5
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

(b) 室内試験結果

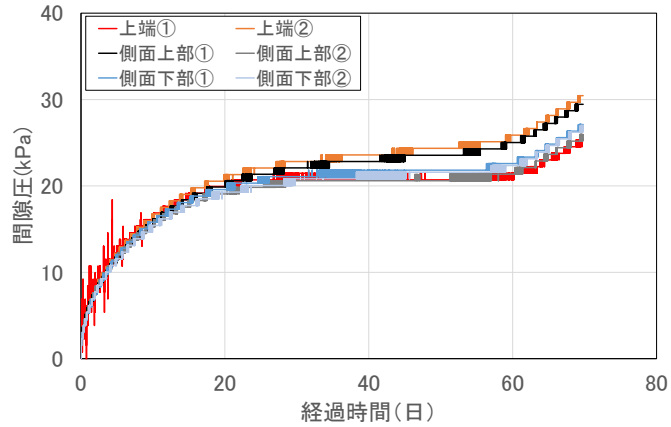
図 3.1-25 に室内試験結果を示す。計測された相対湿度は、浸潤面に近い側面下段では 30 日経過段階で 96%程度の値を示し、最終には 100%に近づく結果となった。側面上段や上端部の相対湿度は浸潤面から離れるほど増加傾向は緩やかになり、同じ高さに設置したセンサー同士でほぼ同じ値を示した。間隙圧の計測結果は、試験開始から緩やかに上昇し、その後一定になり、60 日以降から再び上昇するような傾向が確認され、すべてのセンサーでほぼ同じ結果となった。この結果は、試験開始後初期は飽和度が低い領域が多く、間隙空気が移動しやすいため、間隙圧は緩やかな上昇を示すが、飽和が進行するにつれて、間隙空気が移動しにくくなり、その結果として、60 日以降に間隙圧の上昇が見られる可能性がある。本試験における土圧はピーク時の土圧として 130 kPa が確認され、徐々に低下する結果となった。計測された土圧は既存の推定式（菊池・棚井, 2005）から推定された最大膨潤圧（340 kPa）の約半分の計測値である。今後、飽和が進めば、計測値が大きくなる可能性がある。試験終了時の注水量は約 470 ml であり、供試体内の初期水分量等から供試体の平均飽和度を算出すると 55%程度の飽和度となった。

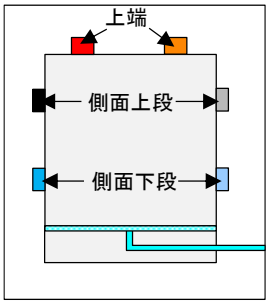




計測位置

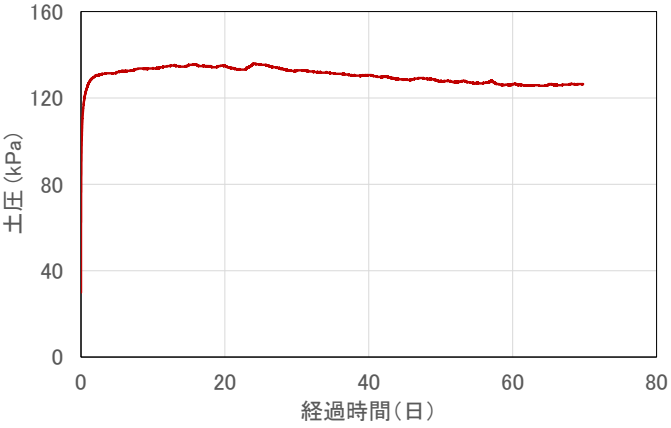
(a) 相対湿度計測結果

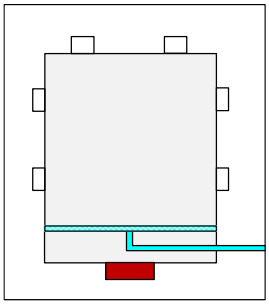




計測位置

(b) 間隙圧計測結果





計測位置

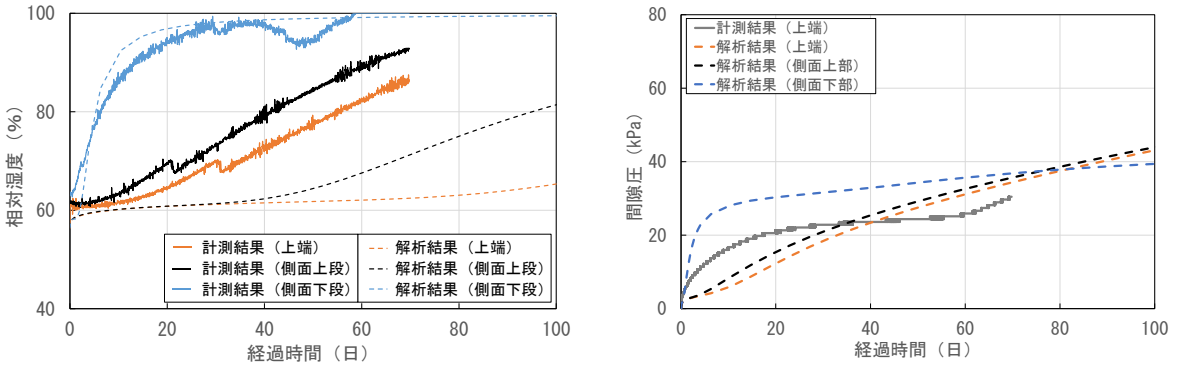
(c) 土圧計測結果

図 3.1-25　室内試験結果

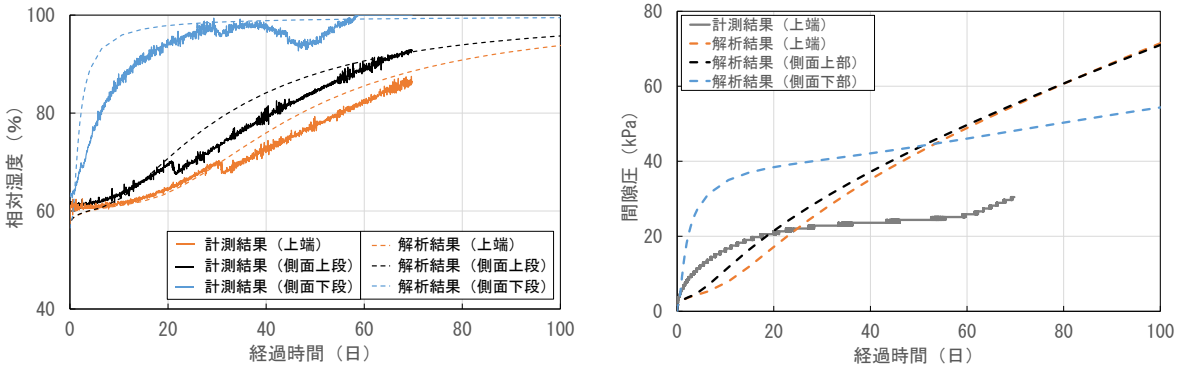
(c) 解析結果との比較

室内試験を実施した乾燥密度 ρ_d=1.10 Mg/m^3 の条件で、絶対浸透率と水分特性曲線を補正し気液二相流解析を実施した。液相の相対浸透率には式 3.1-12 に示す van Genuchten モデル、気相の相対浸透率には式 3.1-13 に示す power モデルを採用しλ_l=0.5、λ_g=3.0 とした。以上のパラメータを用いた解析結果をケース 1 として図 3.1-26 (a)に示す。相対湿度は、浸潤面側に近い下段の相対湿度の再現性は高いが上部の解析結果は低く評価する結果となった。また、間隙圧の計測結果は同じ挙動を示すのに対し、解析結果は高さによって間隙圧の挙動は異なり、側面下段の間隙圧の立ち上がりが速い結果となった。設定した水理パラメータのうち、絶対浸透率は室内試験で取得された関係式、水分特性曲線は既存検討に基づいた補正式を使用しているが、液相と気相の相対浸透率については設定根拠が乏しい。そこで、液相、気相の相対浸透率が、相対湿度と間隙圧の解析結果にどのように影響を及ぼすかを検証することとした。液相の相対浸透率の van Genuchten モデル係数λ_lを 0.5 から 0.67 に大きくした解析結果をケース 2 として図 3.1-26 (b)に示す。van Genuchten モデル係数λ_lを大きくすると相対浸透率も大きくなるため、浸潤速度は速くなり相対湿度も全体的に早い時間で上昇する。さらに、気相の相対浸透率は飽和度に依存し、飽和度が増加するほど気相が動きにくくなるため、結果として間隙圧の増加傾向も大きくなる。ベントナイトなどの膨潤性粘土の絶対浸透率は、ベントナイトの膨潤による間隙構造の変化によって、乾燥時の透気試験で測定される絶対浸透率は飽和時の透水試験で測定される絶対浸透率よりも 5 オーダーほど高くなるといった報告例もある（棚井, 2009）。そこで、本検討では式 3.1-13 の気相の相対浸透率を 100 倍にし、その解析結果をケース 3 として図 3.1-26 (c)に示す。相対湿度の解析結果は、気相の相対浸透率を大きくしても変化はないが、気相は動きやすくなるため間隙圧の増加傾向は小さくなり、すべての高さで同じ間隙圧を示した。

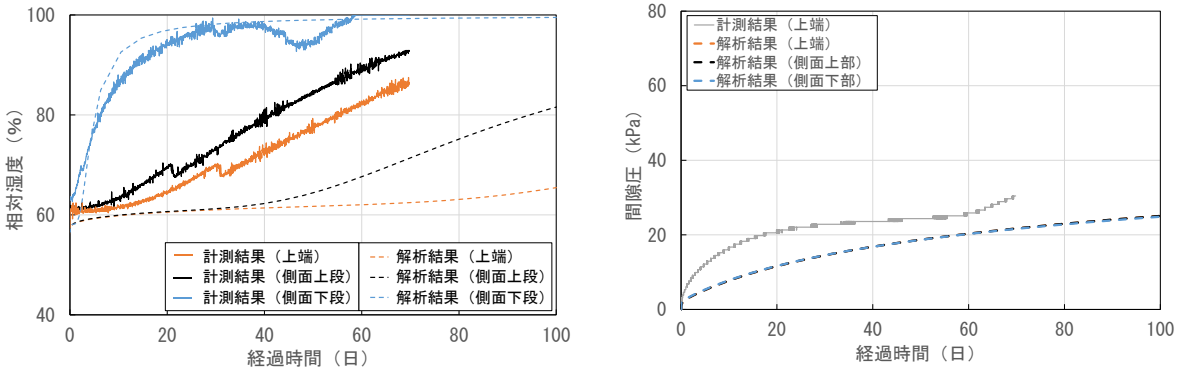
間隙圧の計測結果は 60 日以降から再び上昇するような傾向が確認されており、より長い時間での間隙圧の挙動を確認するため、図 3.1-26 の解析を 1000 日後まで延長した。その解析結果を図 3.1-27 に示す。その結果、60 日以降も間隙圧の上昇傾向は継続し、数 100 日後にピークを迎えた後、減少する傾向が確認された。ピークの大きさは設定した気相の相対浸透率によって大きく異なり、相対湿度の解析結果が同じ場合でも、気相の相対浸透率の設定によって間隙圧を過剰/過少に評価する可能性がある。



(a) ケース 1

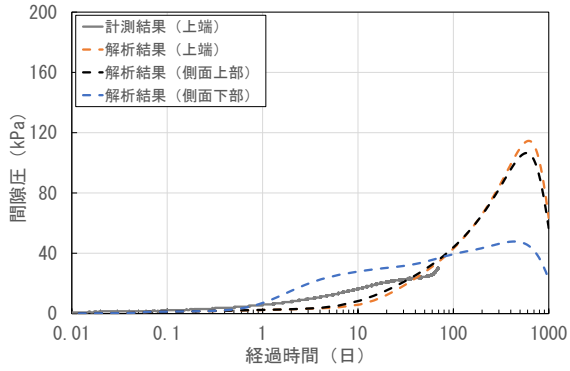


(b) ケース 2

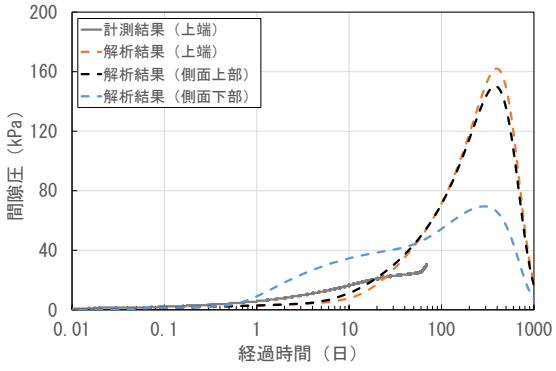


(c) ケース 3

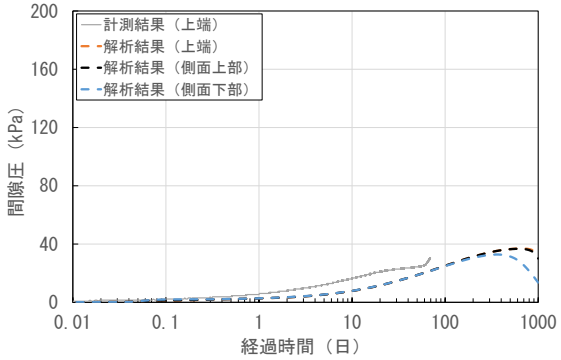
図 3.1-26　試験結果と解析結果の比較



(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3

図 3.1-27　間隙圧解析結果（対数表示）

3.1.4 まとめ

縮尺模型試験において以下を確認した。

乾燥密度 1.4 Mg/m³ の埋戻し材を設置した条件のみではあるものの、埋戻し材の設置により緩衝材の上方への膨潤がどの程度抑制されるのか定量的なデータを取得した。また、緩衝材の膨潤変形が抑制されることにより、乾燥密度や飽和度が不均質に分布することを確認した。今後の検討課題としては、今回確認された乾燥密度や飽和度の不均質な分布がより長い時間経過した場合に、どのように変化するのか確認することが必要となる。また、今回の縮尺模型試験で生じた現象が緩衝材や埋戻し材のスケールが変わった場合にも同様に起こるのか確認することも必要となる。埋戻し材の設計や評価の際には解析検討を実施することも考えられるが、上記のような不均質性を有する現象をどのように取り扱うか、試験用水の塩分濃度などの条件をどのように反映させるかも今後の研究開発が必要となる。

また、気相を考慮したベントナイト中の連成現象については、緩衝材中に内包される空気やガラス固化体の発熱によって生じる水蒸気などの気相が、緩衝材中の連成現象にどのような影響を及ぼすのかを把握することを目的として、単純系での気液二相流連成解析と室内試験を実施した。気液二相流連成解析の結果、非排気条件では非排気側の間隙空気圧が上昇し、加熱温度が高いほどその傾向は大きく、境界条件や相対浸透率の設定によって、間隙空気圧の傾向は大きく異なることが確認された。室内試験では、相対湿度と間隙圧の経時変化を同時に計測にすることにより、二相流解析結果の検証を実施できることを示した。しかし、試験結果の間隙圧は初期の挙動のみの検証であり、解析結果では 100 日以降に間隙圧の高まりが確認されていることから、さらに長期の試験結果での検証が必要となる。本検討で対象とする人工バリア定置後の過渡期変遷状態では、低飽和度から高飽和度までの広い範囲の飽和度変化を伴うため、相対浸透率も広い飽和度で

の再現性が求められる。また、力学を考慮した場合、膨潤変形や間隙圧の高まりにより乾燥密度が変化する可能性があるため、密度変化に対応した二相流パラメータの整備も重要である。

参考文献

Alonso, E. E., GENS, A. and JOSA, A., A constitutive model for partially saturated soils, Géotechnique 40, No. 3, pp.405-430, 1990.

Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., and Alonso, E. E., Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media, Engineering Computations, Vol. 13, No. 7, pp.87-112, 1996.

Philip, J. R. and de Vries, D. A., Moisture movement in porous materials under temperature gradients, EOS Trans. AGU 38(2), 222–232, 1957.

Van Genuchten, M.T., A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. AM. J., 44, pp. 892-898, 1980.

菊池広人，棚井憲治，緩衝材の熱物性測定試験（Ⅲ）－面熱源法による緩衝材熱物性の取得－，JNC TN8430 2003-009，2003.

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（試験報告），JNC TN8430 2004-005，2005.

棚井憲治，緩衝材中ガス移行試験データベース, JAEA-Data/Code 2008-028, 2009.

松本一浩，菅野毅，藤田朝雄，鈴木英明，緩衝材の飽和透水特性，PNC TN8410 97-296，1997.

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，平成 22 年度 地層処分技術調査等委託 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術 ガス移行挙動評価高度化（2）－モデル化・解析手法の高度化に係わる検討－，2011.

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，令和 3 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，2022.

3.2 EDZ シーリング試験

3.2.1 背景・目的および実施概要

(1) 背景・目的

地層処分施設においては、処分場閉鎖後の安全性を考慮する際に、建設した坑道の周辺岩盤に発生した掘削損傷領域（Excavated Damaged Zone; EDZ）が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。このような懸念に対して、移行経路となることを防止するための対策の一つ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欠き部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）。

止水プラグの設計については、対象とする岩盤に応じてその力学特性や坑道周辺の EDZ の発生状況が異なることが想定されることから、ある地質環境が与えられた場合にどのようなプラグの幾何学的形状が適切かを設定する方法論を検討した（原子力機構・原環センター, 2020）。また、止水プラグに求める地下水移行抑制機能を設定する上では、岩盤の種類や地下水組成などの地質環境条件に応じた止水プラグの性能を明確化することが必要となる。そこで、堆積岩かつ塩水系地下水が存在する幌延深地層研究センターの地下施設において、止水プラグの材料として検討されているベントナイトの EDZ における止水性能を評価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 年度より実施している（原子力機構・原環センター, 2019；2020；2021；2022）。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 350 m 調査坑道において、図 3.2-1 に示すように、止水プラグの切欠き部部分の規模を縮小して模擬した粘土止水壁を構築した。粘土止水壁で囲まれた領域を対象に透水試験を実施してその透水係数を算出することで、粘土止水壁の構築前後の EDZ を含む領域における透水性の変化を評価した。その結果、EDZ を含む領域の透水係数は、粘土止水壁の施工前は 10^{-6} m/s オーダーの値であったが、施工後には 10^{-9} m/s オーダーの値まで低下するとともに、粘土止水壁の構築から 2 年が経過した時点においても 10^{-9} m/s オーダーの透水係数が維持されていることを確認した。

また、止水プラグが EDZ の連続性を遮断して物質の移行経路となることを防ぐための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ように、設計された仕様を満たすように施工できる方法が必要となる。例えば、止水プラグを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や、ブロック工法の場合に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り、施工方法に起因するこれらの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。そこで令和 2 年度からの 3 年間で、止水プラグの切欠き部のように狭隘かつ上部に位置する空間に対してベントナイト系材料を施工する方法として、吹付け工法の適用性を検討することとした。令和 2 年度には、ベントナイトの配合割合や材料の形態に応じた吹付けにかかる特性データを取得するとともに切欠き部を模擬した型枠に対する吹付け施工試験を実施し、令和 3 年度には、幌延深地層研究センターの地下施設において、岩盤を掘削して設けた切欠き部に対する原位置吹付け施工試験を実施し、ベントナイトの吹付け工法が止水プラグに適用可能である見通しを得た。

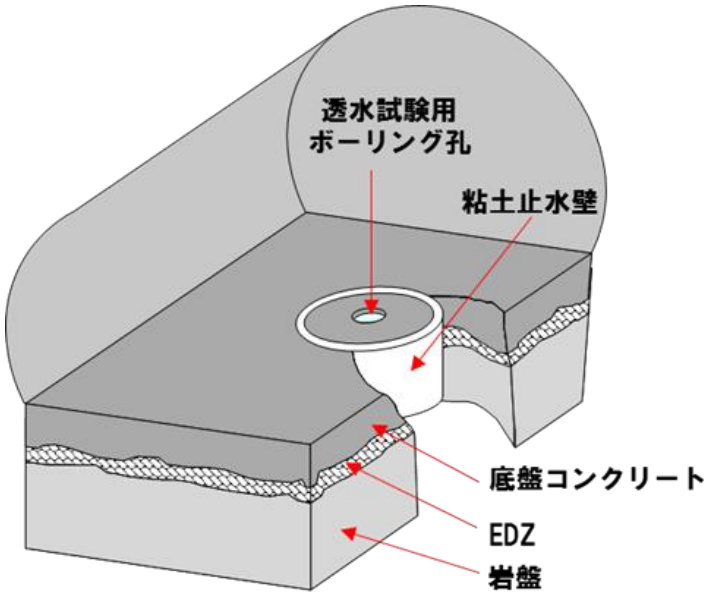


図 3.2-1　EDZ シーリング原位置試験の概要図

(2) 実施概要

令和 4 年度は、ベントナイトの吹付け工法の適用性の確認として、幌延深地層研究センターの地下施設の試験坑道 2 において令和 3 年度に吹付けを実施したベントナイト材料のサンプリングを実施し、吹付け後のベントナイトの含水比や乾燥密度の経時変化を調査し、施工品質を評価した。また、令和 3 年度まで継続して実施してきた試験坑道 3 底盤に構築した粘土止水壁を対象とした透水試験を実施し、止水壁を含む領域の透水係数を算出することでベントナイト系材料の止水性能を評価した。

令和 4 年度における具体的な実施項目を以下に示す。

- ベントナイト系材料の吹付け施工性確認試験
  - 幌延の地下施設に施工した吹付けベントナイトについて乾燥密度と含水比の経時変化を含めた施工品質の評価
  - 切欠き部背面の岩盤における切欠き部掘削の影響による新たな EDZ の発生状況の調査
- 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継続して実施し、EDZ を含む区間の透水性の経時変化を把握
  - 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

3.2.2 ベントナイト系材料の吹付け施工性確認試験

(1) 原位置吹付け試験の概要

令和 3 年度に、幌延深地層研究センターの 350 m 試験坑道 2（図 3.2-2）において、坑道の側壁部の岩盤を掘削して切欠き部を設けるとともに、この切欠きに止水プラグの施工を想定したベントナイト系材料の吹付けを実施し、吹付け後の含水比や乾燥密度といった施工品質や吹付け速度などの施工能力を確認することで吹付け施工の適用性を評価した。

試験坑道 2 は直径約 4 m の円形断面を有しており、坑道の壁面には鋼製支保工が約 1.5m の間隔で設置されるとともに厚さ約 20 cm の吹付けコンクリートで覆われている（図 3.2-3）。試験で

は、試験坑道 2 の南側の側壁の鋼製支保工の間の吹付けコンクリートと岩盤を掘削し、高さが約 3.0 m、幅が約 1.3 m、奥行きが最大約 1.3 m の切欠き部を設けた。

吹付けに用いた材料は、表 3.2-1 に示すように、粉体ベントナイトであるクニゲル V1 の混合率を 70%としてケイ砂と混合したもの（以下、ベントナイト混合土）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。吹付け後のベントナイト混合土に期待する透水係数の値としては、吹付け実施場所の周辺岩盤と同程度の透水係数を目標とするという考えのもと、原位置試験を実施する 350 m 坑道周辺の岩盤基質部の透水係数である 10^{-10} m/s に対して、施工時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値とした。10^{-11} m/s オーダーの透水係数となるベントナイト系材料の有効粘土密度を 1.20 Mg/m³ と見積もっている。ここでは、有効粘土密度を以下のように定義している。

$$\rho_e = \frac{\rho_d(100 - R_S)}{100 - \frac{\rho_d}{\rho_S} R_S} \qquad \text{式 3.2-1}$$

ρ_e：有効粘土密度（Mg/m³）
ρ_d：乾燥密度（Mg/m³）
ρ_S：砂の土粒子密度（Mg/m³）
R_S：乾燥質量での砂の混合率（%）

式 3.2-1 より有効粘土密度 1.20 Mg/m³ をベントナイト混合率 70%のベントナイト混合土の乾燥密度に換算すると 1.43 Mg/m³ となる。また、地上吹付け試験の実績と締固め試験の結果（原子力機構・原環センター，2021；2022）より、ベントナイト混合土の含水比を締固めエネルギーが 2Ec の場合の最適含水比である 18.62%とした。

試験では、ベントナイト混合土の吹付けを吹付けコンクリート表面付近まで実施し、吹付け完了後には吹付けた材料の膨出や崩落等を防止する目的でゴムマットと木板を設置して表面を養生した（図 3.2-4）。

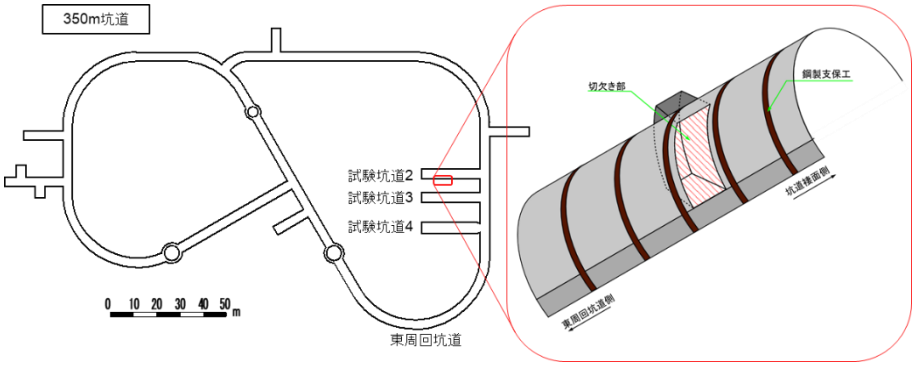


図 3.2-2　原位置吹付け施工試験実施場所

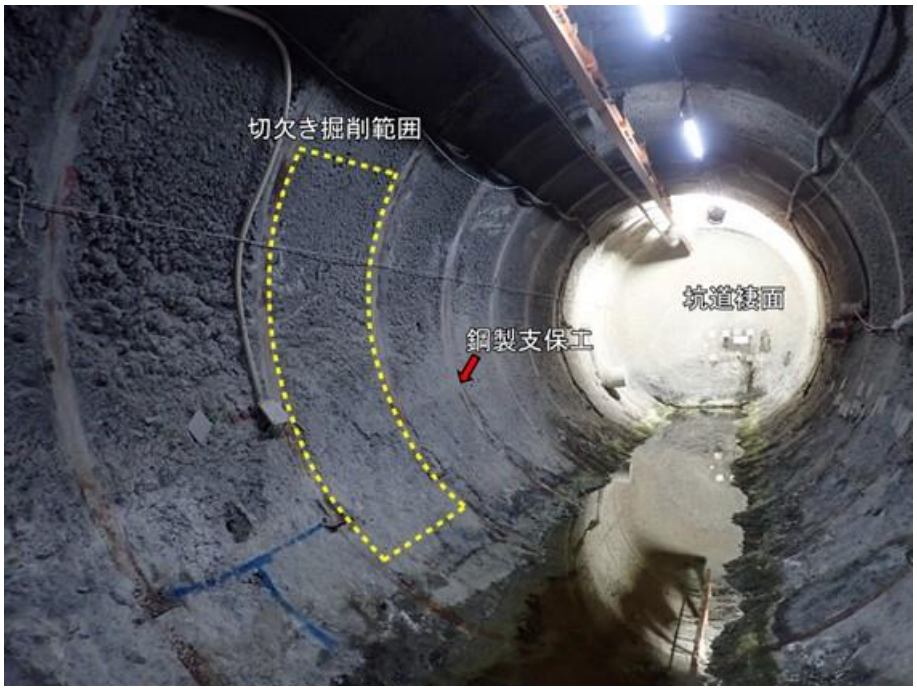
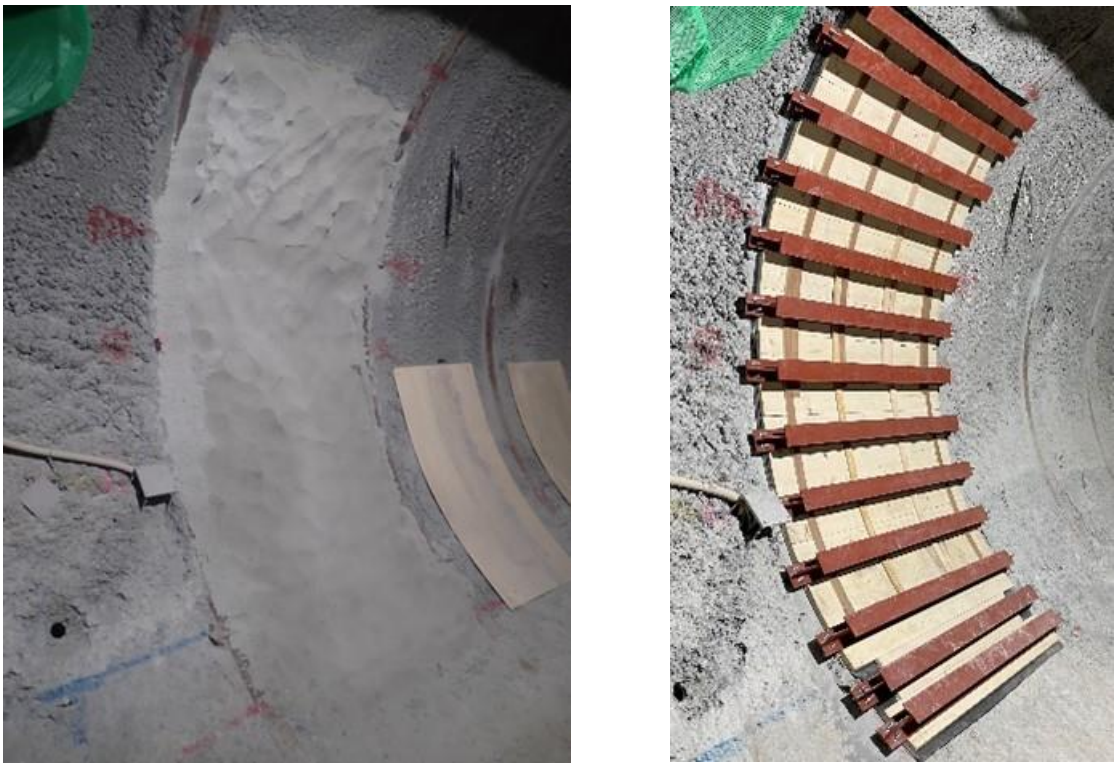


図 3.2-3　試験実施前の試験坑道 2 の様子

表 3.2-1　吹付け材料の仕様

ケース名	配合比（%）		目標乾燥密度 (Mg/m^3)	目標含水比 (%)
	クニゲル V1	ケイ砂		
V1-70	70	30	1.43	18.62



(a) 吹付け完了時　　(b) 吹付け完了後の養生

図 3.2-4　ベントナイト混合土の吹付け完了時と養生の様子

(2) 乾燥密度・含水比評価

令和 3 年度に切欠き部に吹付けたベントナイトを施工後 1 年程度経過した時点においてサンプリングを行い、その乾燥密度と含水比を評価した。サンプリング位置は、吹付け施工時にサンプリングを行った表面および表面から 50 cm 程度内側（以下、内面とする）の 2 断面とした。

サンプリングは、サンプラー（採土管）による方法とブロック試料を切り出す方法の 2 種類で実施した（図 3.2-5）。サンプラーには容積が 50 ml のステンレス試料円筒を用いた。また、ブロック試料は 1 辺が 10 cm 程度の大きさで採取した。サンプリング数量を表 3.2-2 に示す。サンプリングは図 3.2-6 に示すように、サンプラー試料を表面で 7 か所、内面で 5 か所を採取し、ブロック試料を表面で 12 か所、内面で 10 か所を採取した。乾燥密度および含水比の測定は、1 つのサンプラー試料から 1 試料、1 つのブロック試料から 3 試料を採取して実施した。含水比の測定は炉乾燥法により、乾燥密度の測定はサンプラー試料ではノギス法により、ブロック試料ではパラフィン法により実施した。

サンプリング試料の含水比と乾燥密度の関係を図 3.2-7 に示す。表面部分の含水比は、サンプラー試料で 10.41%～23.04%の範囲にありその平均値が 16.01%、ブロック試料で 8.77%～20.43%の範囲にありその平均値は 14.62%であった。令和 3 年度の吹付け直後のサンプリングでは含水比の平均値が 20.46%であったこと、また、サンプリング時に吹付けたベントナイトの表面にひび割れが観察されたことから、表面部分はゴムマットと木板で養生していたものの坑道内の換気の影響により乾燥して含水比が低下したと考えられる。乾燥密度については、サンプラー試料で 1.544 Mg/m^3～1.717 Mg/m^3 の範囲にあり平均値が 1.622 Mg/m^3、ブロック試料で 1.528 mg/m^3～1.691 Mg/m^3 の範囲にあり平均値が 1.622 Mg/m^3 であった。令和 3 年度のサンプリング試料の乾燥密度の平均値は 1.579 Mg/m^3 であり、表面部分ではベントナイト混合土の乾燥収縮により乾燥密度が増加している可能性がある。

一方で、内面部分の含水比は、サンプラー試料で 19.53%～21.35%の範囲にあり平均値が 20.20%、ブロック試料で 19.33%～22.38%の範囲にあり平均値は 20.91%であった。令和 3 年度のサンプリング試料の含水比の平均値は 20.78%であり、表面部分とは異なり時間経過による含水比の変化はほとんど確認できなかった。乾燥密度については、サンプラー試料で 1.554 Mg/m^3～1.665 Mg/m^3 の範囲にあり平均値が 1.599 Mg/m^3、ブロック試料で 1.354 mg/m^3～1.613Mg/m^3 の範囲にあり平均値が 1.531 Mg/m^3 であった。令和 3 年度のサンプリング試料の乾燥密度の平均値は 1.523 Mg/m^3 であり、今年度のサンプリング試料の乾燥密度の値が大きかったものの、含水比はほとんど変化していないことから、施工品質のばらつきによるものと考えられる。

以上の結果より、吹付け施工したベントナイトは、表面付近では顕著な含水比の低下がみられたものの 50 cm 程度内側の領域では含水比がほとんど変化せず水分が保持されていることが確認できた。また、止水プラグの切欠き部に対するベントナイト系材料の施工方法として、吹付け工法により目標とする乾燥密度 1.43 Mg/m^3（有効粘土密度 1.20 Mg/m^3）を満たすことが可能であることを確認した。

(a) サンプラー

(b) ブロックサンプリング

図 3.2-5　サンプラーとブロックサンプリングの例

表 3.2-2　サンプリング数量

分類	サンプリング位置	サンプリング数量	含水比・ 乾燥密度測定	備考
サンプラー	表面	7	7	ノギス法
サンプラー	内面	5	5	ノギス法
ブロック	表面	12	12×3=36	パラフィン法
ブロック	内面	10	10×3=30	パラフィン法

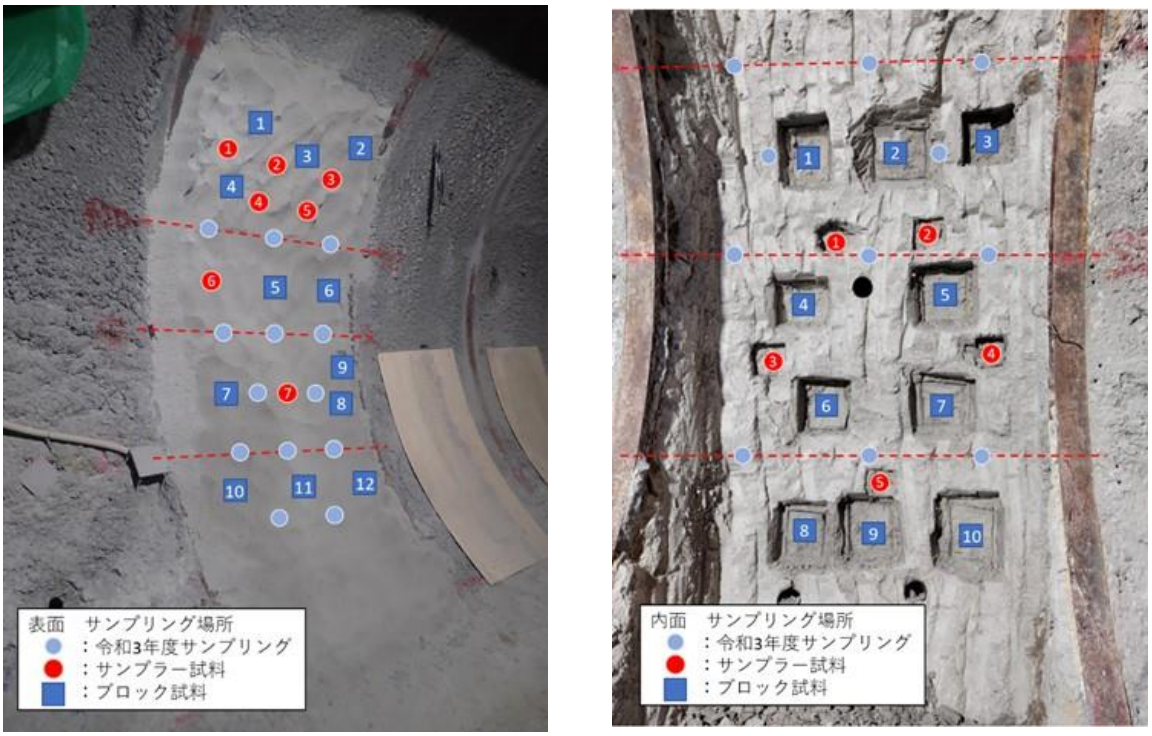


図 3.2-6　サンプリング位置

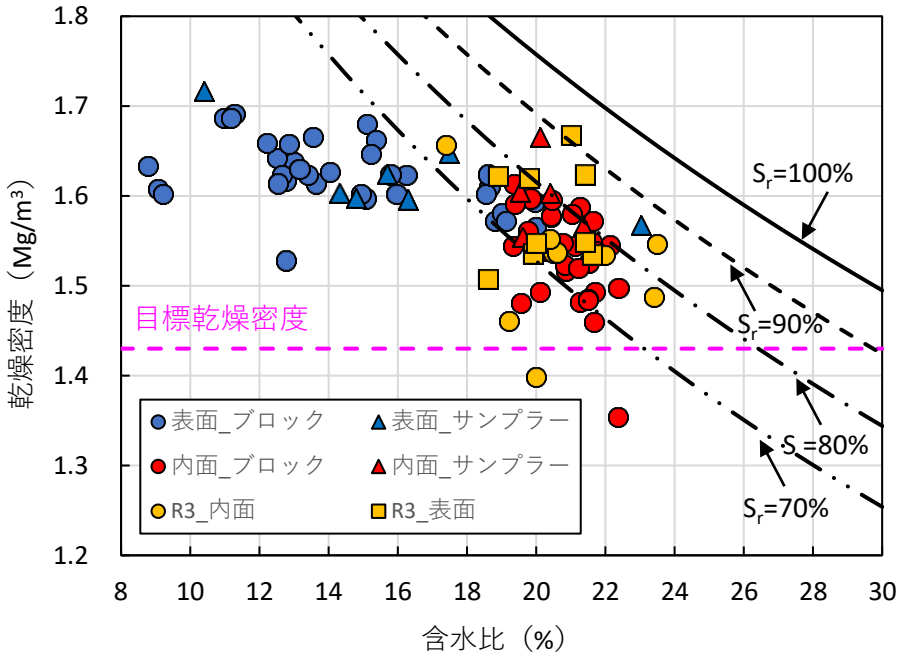


図 3.2-7　含水比と乾燥密度の関係

表 3.2-3　各サンプリング位置における含水比と乾燥密度の平均値

サンプリング位置	サンプル種類	含水比（%）	乾燥密度（Mg/m³）
表面	サンプラー	16.01	1.622
	ブロック	14.62	1.622
	令和 3 年度	20.46	1.579
内面	サンプラー	20.20	1.599
	ブロック	20.91	1.531
	令和 3 年度	20.78	1.523

(3) 切欠き部掘削による新たな EDZ の発生状況の調査

止水プラグを設置する際に、EDZ の幅を上回るように切欠き部を掘削するが、この時に切欠き部周囲の岩盤に新たな EDZ が形成されないように掘削することが求められる。

令和 3 年度の原位置吹付け試験で実施した切欠き部の掘削は電動バックホウに取り付けたブレーカを用いて実施した。この切欠き部の掘削に伴う新たな EDZ の形成の状況を調査するためにボーリング調査を行い、コア観察と BTV 観察を実施した。

図 3.2-8 に切欠き部とボーリング孔の掘削位置を示す。切欠き部の掘削位置は 350m 試験坑道 2 の鋼製支保工の 10 基目と 11 基目の間の南側の側壁である。

令和 2 年度には切欠き部掘削前の EDZ の状況を事前に確認するために鋼製支保工の 9 基目と 10 基目の間にボーリング孔（EDZ-N2 孔）を掘削している。図 3.2-9 に示すように、EDZ-N2 孔は鋼製支保工の接続位置から 25cm 上がった位置から 45º 下向きに孔径 65 mm で 3 m の長さを掘削した。

令和 4 年度は図 3.2-10 に示すように切欠き部背面に B-01 孔～B-03 孔を掘削してコア観察と BTV 観察を実施した。ボーリング孔は孔径を 90mm として、吹付けコンクリート面を基準に 3.3m 程度実施した。表 3.2-4 にボーリング孔の掘削実績と調査実績を示す。

図 3.2-11 に EDZ-N2 孔におけるコア写真と BTV 観察の結果を示す。また、表 3.2-5 に EDZ-N2 孔で確認された割れ目の一覧を示す。EDZ-N2 孔においては、吹付けコンクリートが 0.00～0.16 mabh (meter along borehole)の区間に存在している。構造性割れ目が 0.19～0.42 mabh 区間、2.75 mabh～3.03 mabh 区間、3.07～3.20mabh 区間で発達していることが確認された。各区間の特徴を以下に示す。

- 0.19～0.42 mabh 区間は、引張割れ目が卓越している区間であるが、これらは坑道掘削影響による緩み割れ目の可能性が高い。
- 2.75～3.03 mabh 区間は、引張性・剪断性複合割れ目を主体とした構造性割れ目発達区間である。本区間は、2.75～2.98 mabh の層理面と平行な引張性・剪断性複合割れ目を主体とし、ネットワーク状に割れ目が派生している。
- 3.07～3.20 mabh 区間は、構造性割れ目によって岩片状を呈しており、岩片に張割性割れ目および引張性・剪断性複合割れ目が認められ、元々はネットワーク状に割れ目が発達していたと考えられる。

BTV 観察の結果からは、坑道壁面付近の割れ目は孔口から 19 cm～32 cm 付近に観察されており、それ以深は、2 m 付近に位置数本観察されているのみであった。

これらの結果より、試験坑道 2 を掘削した影響により生じた割れ目が吹付けコンクリートの面から 42 cm 程度の深さまでの区間で発達していると判断した。

図 3.2-12 に B-01 孔～B-03 孔のコア写真を図 3.2-13 に BTV 観察の結果を示す。また、表

3.2-6 に B-01 孔で確認された割れ目の一覧を示す。コア観察では B-01 孔で 1 本の引張割れ目が認められたが、B-02 孔および B-03 孔には割れ目は認められなかった。BTV 観察の結果からは、いずれのボーリング孔においても岩盤中には割れ目が確認されなかった。コア観察の結果と比較すると B-02 孔および B-03 孔では割れ目がないことで一致している。一方、B-01 孔ではコア観察の結果では引張割れ目が確認されているものの BTV 観察では確認されておらず、岩盤内部では割れ目が閉じていて BTV 観察では認識されなかったものと考えられる。

今回の調査においては、切欠き部背面の岩盤においては天然の割れ目および新たな EDZ の形成は確認されなかった。このことより、切欠き部の掘削に適用したブレーカを用いた機械掘削工法は坑道周辺に新たな EDZ を生じさせる可能性が低いことを実証的に示すことができた。

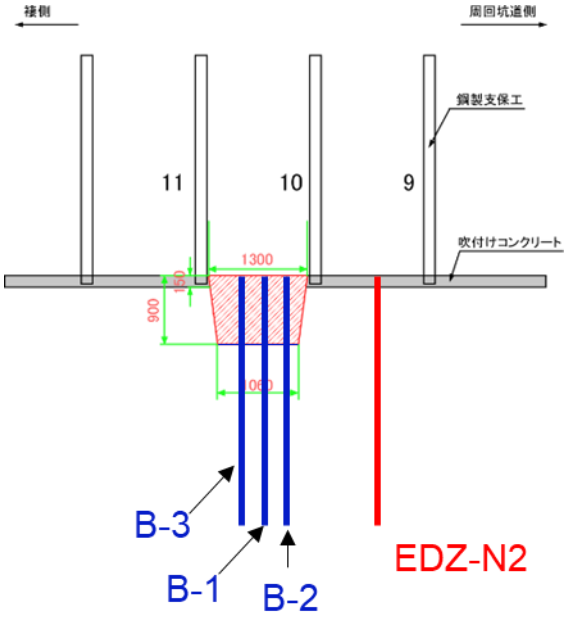


図 3.2-8　切欠き部とボーリング孔の掘削位置

表 3.2-4　ボーリング孔の掘削実績と調査実績

	掘削実績（m）	コア観察（m）	BTV 観察（m）
EDZ-N2 孔	3.20	3.20	2.98
B-01 孔	3.30	3.30	3.25
B-02 孔	3.50	3.50	3.47
B-03 孔	3.50	3.50	3.47

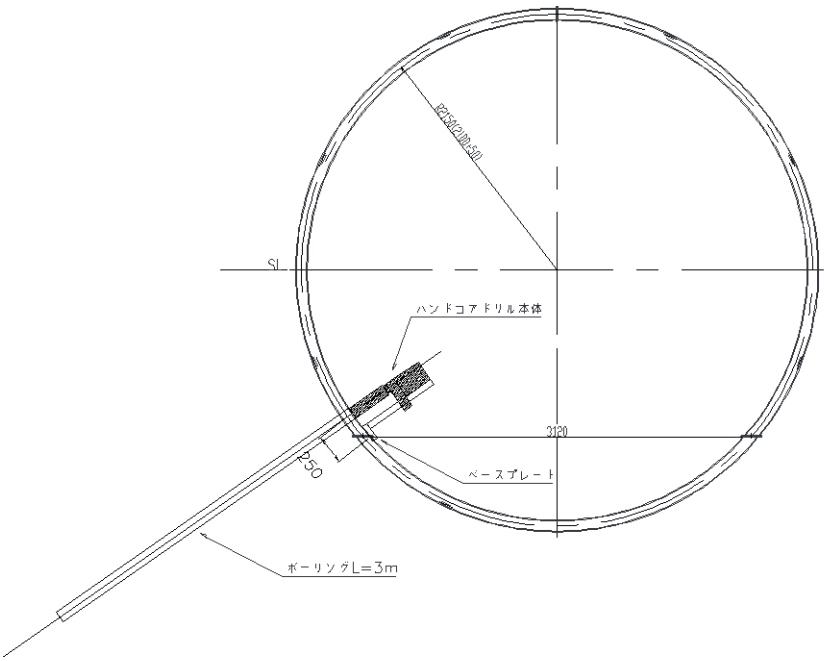


図 3.2-9　EDZ-N2 孔の掘削位置（断面図）

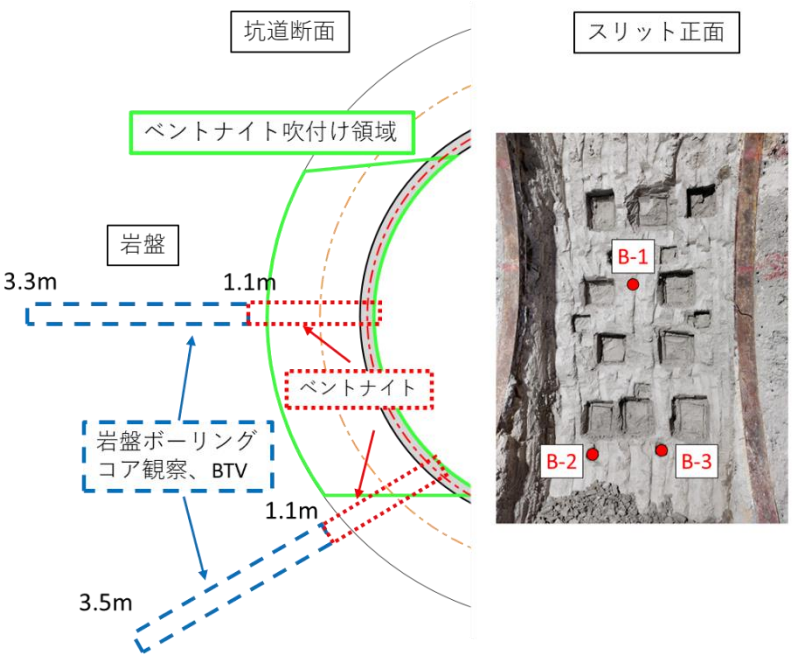


図 3.2-10　B-1 孔～B-3 孔の掘削位置

図 3.2-11　EDZ-N2 孔のコア写真および BTV 観察の結果

表 3.2-5　EDZ-N2 孔の割れ目一覧

割れ目番号	中央深度（mabh）	記載深度(mabh)	
		上端	下端
001-1	0.23	0.19	0.27
001-2	0.27	0.23	0.30
001-3	0.38	0.37	0.38
001-4	0.40	0.39	0.41
001-5	0.42	0.41	0.42
002-1	1.10	1.10	1.10
002-2	1.35	1.34	1.35
003-1	2.87	2.75	2.98
003-2	2.87	2.82	2.91
003-3	2.90	2.87	2.92
003-4	2.98	2.95	3.00
003-5	2.99	2.98	3.00
004-1	3.02	3.00	3.03
004-2	3.11	3.07	3.14

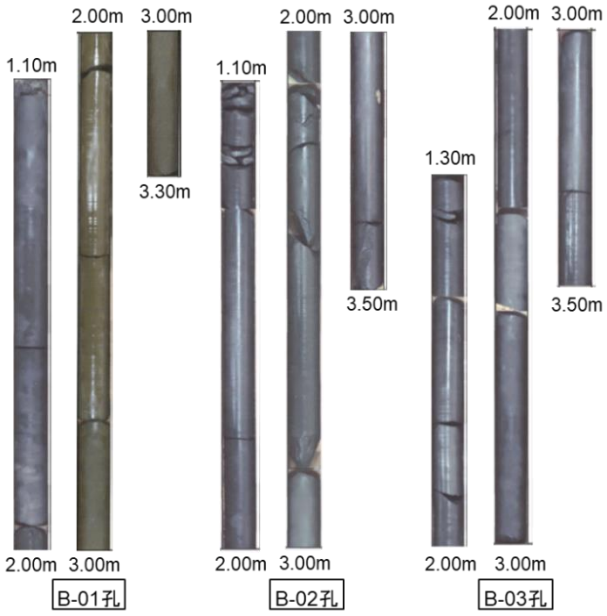
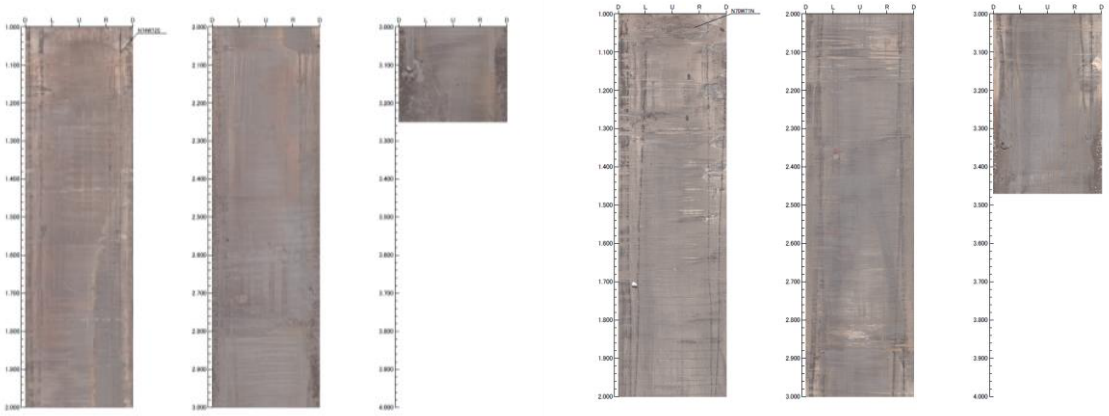
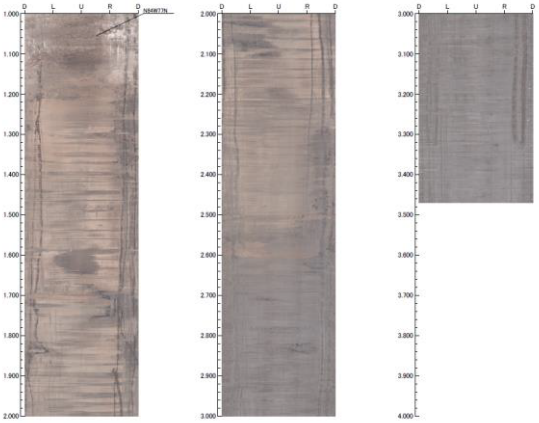


図 3.2-12　B-01 孔～B-03 孔のコア写真



(a) B-1 孔　　(b) B-2 孔



(c) B-3 孔

図 3.2-13　B-01 孔～-B-03 孔の BTV 観察の結果

表 3.2-6　B-01 孔の割れ目一覧

割れ目番号	中央深度（mabh）	記載深度(mabh)	
		上端	下端
002-1	2.08	2.06	2.09

3.2.3 EDZ シーリング原位置試験

(1) 目的・実施内容

平成 31 年度までに幌延深地層研究センターの 350 m 試験坑道 3 にて実施した EDZ シーリング原位置試験においては、坑道の底盤部において 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。また、令和 3 年度までは、EDZ の区間を対象とした透水試験を繰り返して実施し、粘土止水壁を構築して 2 年程度経過した時点においても EDZ の区間の透水係数が粘土止水壁の構築直後と同等程度に低い値を示すことを確認した。本年度は、令和 3 年度の透水試験から 1 年程度経過した時点で EDZ 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した。また、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。

(2) 透水試験

(a) 試験手順

図 3.2-14 に示すように、試験坑道 3 の底盤には長さ 3.23 m のボーリング孔（以下、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 3.2-15 に示す EDZ を対象とした区間（区間①）および健岩部を対象とした区間（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。令和 3 年度の試験時よりもボーリング孔の底部に堆積物が溜まっている兆候が見られたため、過年度の試験よりもパッカーの位置を上方に 9cm 移動させ、上部パッカーの下端の深度を 0.22 mabh、下部パッカー上端の深度を 1.61 mabh とし、試験区間の長さを 1.39m とした。区間②については、シングルパッカー方式のパルス試験と定圧注水試験を実施し、下部パッカー下端の 2.16 mabh からボーリング孔の孔底の 2.80 mabh の 0.64m を試験区間とした。

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 3.2-7 に示す。定圧注水試験では、約 0.057 MPa の一定圧力で注水を行い、一定時間注水した後、注水を停止して回復試験を実施した。

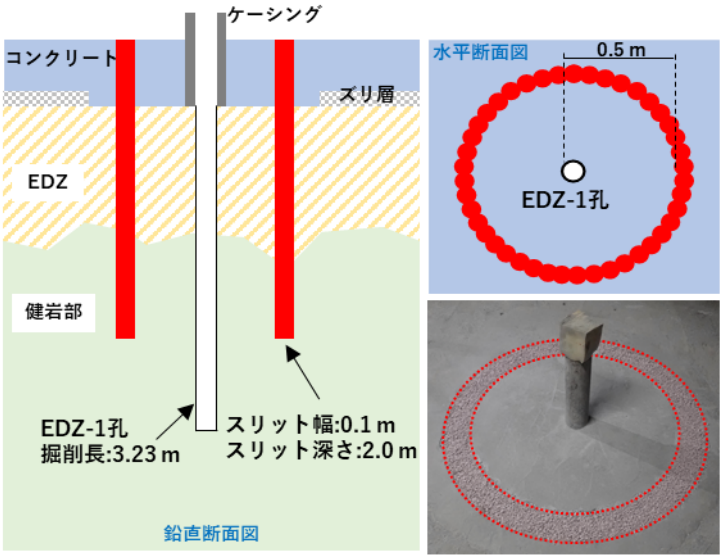


図 3.2-14　EDZ シーリング試験における試験領域の概要（試験坑道 3 底盤部）

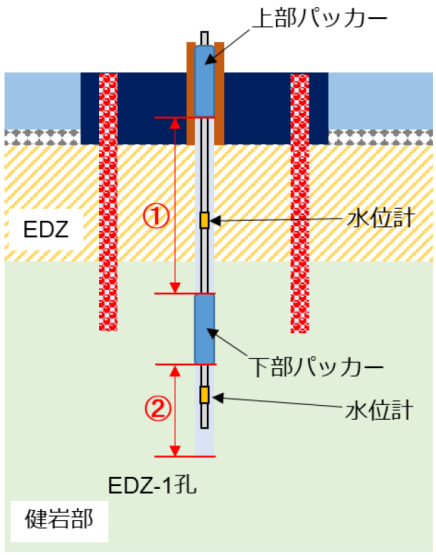


図 3.2-15　透水試験におけるパッカーの設置位置

表 3.2-7　透水試験に使用した模擬地下水組成

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

(b) 試験結果

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。

平成 31 年度から今年度にかけて実施した透水試験の結果を表 3.2-8 に示す。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 2.11×10^{-9} m/s、非定常解析で 2.29×10^{-9} m/s であった。令和 3 年度までに得られた粘土止水壁構築後の透水係数の同様に 10^{-9} m/s のオーダーの値となった。定常解析および非定常解析から算出した透水係数の経時変化を図

3.2-16 に示す。今年度の透水試験は粘土止水壁の構築から約 3 年が経過しているが、これまでの透水試験で得られた透水係数と同等の値が得られており、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。

また、区間②については、パルス試験と定圧注水試験を実施した。パルス試験では Hvorslev の式を用いた定常解析を実施し、透水係数は 7.27×10^{-9} m/s であった。また、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 7.28×10^{-9} m/s、非定常解析で 2.49×10^{-9} m/s であった。令和 2 年度に実施した透水試験（原子力機構・原環センター, 2021）と同様に区間②の透水係数は 10^{-9} m/s のオーダーであることを確認した。

表 3.2-8　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							
EDZ（区間①）	止水壁施工後 2021 年 12 月 13 日	定圧	1.39		0.1030	0.2010	0.0980	4.76×10^{-9}	3.50×10^{-9}	-	2.87×10^{-9}
			0.31	1.7							
EDZ（区間①）	止水壁施工後 2023 年 2 月 6 日	定圧	1.39		0.057	0.090	0.033	2.11×10^{-9}	2.29×10^{-9}	-	解析困難
			0.22	1.61							
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							
区間②	止水壁施工後 2023 年 2 月 8 日	パルス	0.64		0.094	0.115	0.021	7.27×10^{-9}	-	解析困難	-
			2.16	2.8							
区間②	止水壁施工後 2023 年 2 月 8 日	定圧	0.64		0.095	0.134	0.039	7.28×10^{-9}	2.49×10^{-9}	-	解析困難
			2.16	2.8							

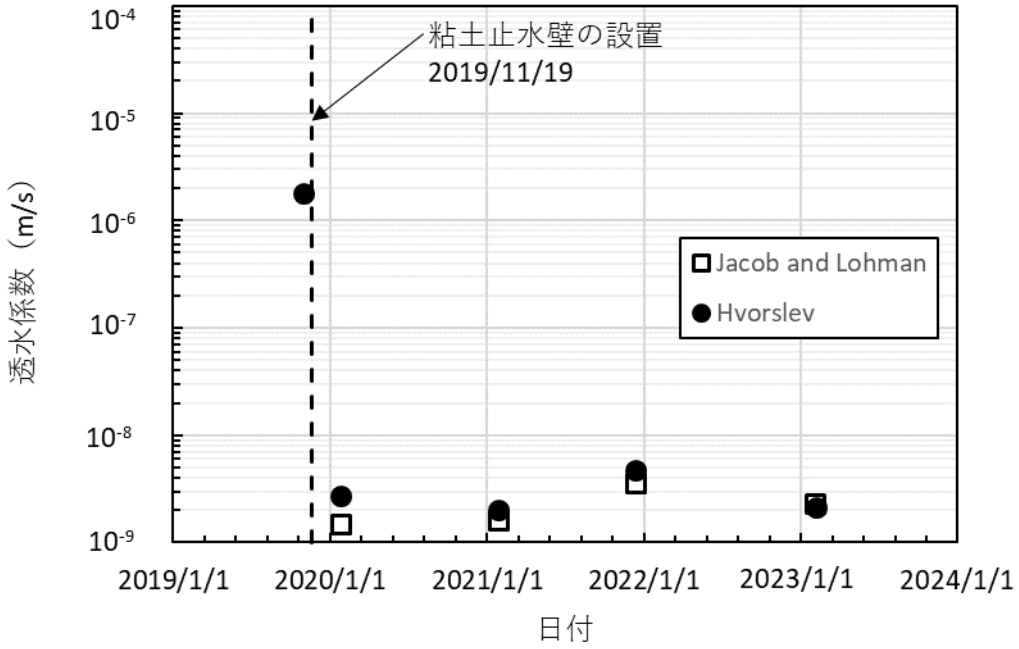


図 3.2-16　定常解析および非定常解析で算出した EDZ 領域の透水係数の経時変化

(3) 浸　透流解析

粘土止水壁の透水係数を推定し止水性を評価することを目的に浸透流解析を実施した。令和 4 年度は、EDZ（区間①）を対象とした透水試験を再現する浸透流解析（以下、検討①とする）および健岩部（区間②）を対象とした透水試験を再現するの浸透流解析（以下、検討②とする）を実施した。検討①では、健岩部を対象として実施した透水試験で得られた透水係数を浸透流解析における健岩部の透水係数に設定して、その透水試験を再現できる粘土止水壁の透水係数を推定した。一方、検討②では、検討①で得られた粘土止水壁の透水係数を浸透流解析における粘土止水壁の透水係数に設定して、健岩部を対象とした透水試験を再現できる健岩部の透水係数を推定した。

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。使用した三次元解析モデルを図 3.2-17 に示す。ボーリング孔の孔径は 76mm とし、長さは透水試験の試験区間に併せて 1.39 m とした。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、水セメント比が 46.9%の時の透水係数である 3.3×10^{-11} m/s を設定した。ズリおよび EDZ の透水係数は、平成 31 年度に実施した解析で算出した値（原子力機構・原環センター, 2020）を設定した。

検討①では、令和 4 年度に実施した健岩部を対象とした透水試験の結果に基づき健岩部の透水係数を 2.19×10^{-9} m/s および 7.28×10^{-9} m/s に設定して浸透流解析を実施した。検討①の各要素の透水係数を表 3.2-9 に示す。表 3.2-10 に示す EDZ を対象とした定圧注水試験の水位差と透水係数の値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の推定は、粘土止水壁の透水係数を変更して浸透流解析を繰り返すことで、試験開始時と定常状態の水圧差が再現できる粘土止水壁の透水係数を探索した。解析結果の評価は、浸透流解析と定圧注水試験のそれぞれの水圧差の値が 10 mm の精度で一致した場合に、浸透流解析により再現できたと判断した。

検討①の浸透流解析の結果を表 3.2-11 に示す。健岩部の透水係数を 7.28×10^{-9} m/s とした場合には、粘土止水壁の透水係数が 1.64×10^{-11} m/s の時に領域全体の透水係数である 2.11×10^{-9} m/s が再現できた。また、健岩部の透水係数を 2.19×10^{-9} m/s とした場合には、粘土止水壁の透水係数が 1.19×10^{-10} m/s の時に領域全体の透水係数である 2.11×10^{-9} m/s が再現できた。

検討②では、検討①の結果に基づき粘土止水壁の透水係数を 1.64×10^{-11} m/s および 2.19×10^{-10} m/s に設定して浸透流解析を実施した。検討②の各要素の透水係数を表 3.2-12 に示す。表 3.2-13 に示す健岩部を対象としたパルス試験の水位差と透水係数の値を再現できる粘土止水壁の透水係数を推定した。検討②においても検討①と同様の手順で健岩部の透水係数を推定した。

検討②の浸透流解析の結果を表 3.2-14 に示す。粘土止水壁の透水係数を 1.64×10^{-11} m/s とした場合には、健岩部の透水係数が 5.86×10^{-9} m/s の時に領域全体の透水係数である 7.27×10^{-9} m/s が再現できた。また、粘土止水壁の透水係数を 1.19×10^{-10} m/s とした場合には、健岩部の透水係数が 5.78×10^{-9} m/s の時に領域全体の透水係数である 7.27×10^{-9} m/s が再現できた。

検討①より、EDZ を対象とした透水試験結果を満足する粘土止水壁と健岩部の透水係数の組合せを確認した。また、検討②では、健岩部を対象とした透水試験結果を満足する粘土止水壁と健岩部の透水係数の組合せを確認した。この 2 つの検討結果に基づいて、「EDZ を対象とした透水試験」および「健岩部を対象とした透水試験」の両方の結果を満足する「粘土止水壁と健岩部の透水係数」の組合せを推定した。各透水試験で得られた粘土止水壁の透水係数と健岩部の透水係数の関係を式に示す。

「EDZ を対象とした透水試験」

$$k_{健岩部} = -5.0 \times k_{EDZ} + 8.0 \times 10^{-9} \qquad \text{式 3.2-2}$$

「健岩部を対象とした透水試験」

$$k_{健岩部} = -0.8 \times k_{EDZ} + 6.0 \times 10^{-9} \qquad \text{式 3.2-3}$$

上記の 2 つ式を連立方程式として解くと、表 3.2-15 に示すように令和 4 年度に実施した 2 つの透水試験の結果を再現できる粘土止水壁と健岩部の透水係数がそれぞれ 4.50×10^{-11} m/s と 5.80×10^{-9} m/s となった。この結果より、粘土止水壁の透水係数の推定値は、施工目標と同程度のオーダーであることが確認できた。

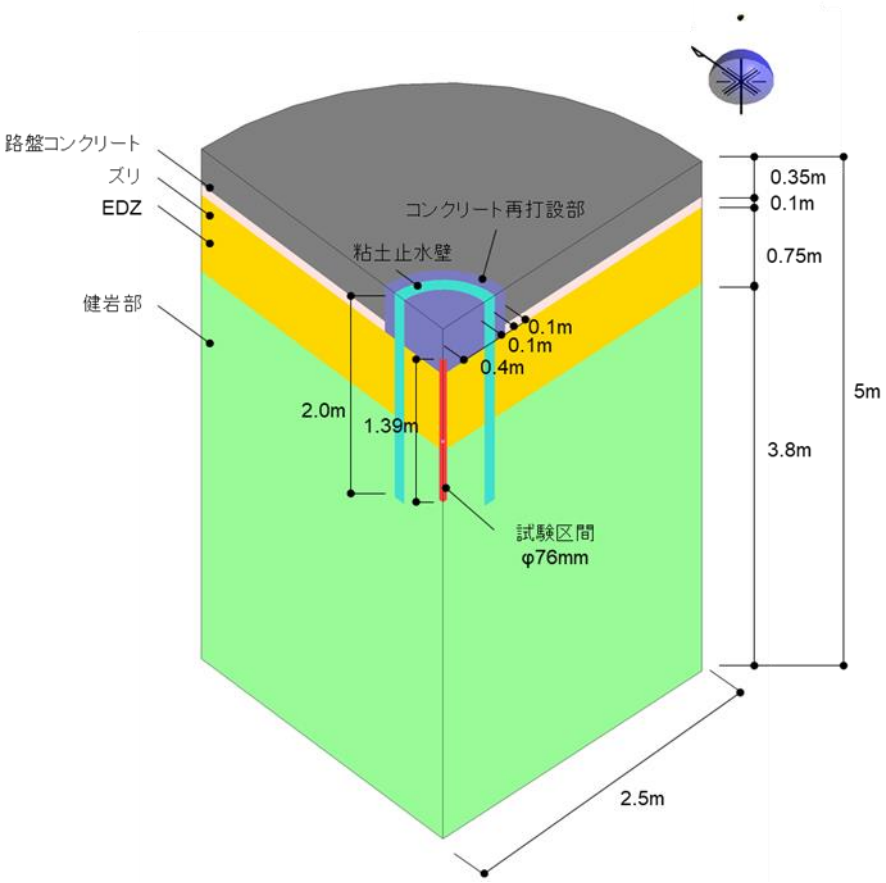


図 3.2-17　浸透流解析における三次元解析モデル

表 3.2-9　検討①の透水係数の設定値

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	2.19×10^{-9}および7.28×10^{-9}
粘土止水壁	今回推定

表 3.2-10　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）
令和 4 年度 （2023 年 2 月 6 日）	2.11×10^{-9}	3.385

表 3.2-11　検討①の浸透流解析の結果

	粘土止水壁 透水係数 （m/s）	解析結果		定圧注水試験	
		水位低下量 （m）	透水係数 （m/s）	水位低下量 （m）	透水係数 （m/s）
Case-01 (健岩部： 2.19×10^{-9})	1.19×10^{-10}	3.385	2.11×10^{-9}	3.385	2.11×10^{-9}
Case-02 (健岩部： 7.28×10^{-9})	1.64×10^{-11}	3.385	2.11×10^{-9}	3.385	2.11×10^{-9}

表 3.2-12　検討②の透水係数の設置値

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	今回推定
粘土止水壁	1.64×10^{-11} m/sおよび1.19×10^{-10} m/s

表 3.2-13　健岩部を対象としたパルス試験の結果

	透水係数 （m/s）	試験開始時との水位差 （m）
令和 4 年度パルス試験 （2023 年 2 月 8 日）	7.27×10^{-9}	3.956

表 3.2-14　検討②の浸透流解析の結果

	健岩部 透水係数 （m/s）	解析結果		パルス試験	
		水位低下量 （m）	透水係数 （m/s）	水位低下量 （m）	透水係数 （m/s）
Case-01 (粘土止水壁： 1.64×10^{-11})	5.86×10^{-9}	3.956	7.27×10^{-9}	3.956	7.27×10^{-9}
Case-02 (粘土止水壁： 1.19×10^{-10})	5.78×10^{-9}	3.956	7.27×10^{-9}	3.956	7.27×10^{-9}

表 3.2-15　透水試験結果を再現できる透水係数の組合せ

材料	透水係数 （m/s）
粘土止水壁	4.50×10^{-11}
健岩部	5.80×10^{-9}

3.2.4 まとめ

EDZ に構築した粘土止水壁の止水性能を評価するための原位置透水試験では、構築した粘土止水壁により EDZ の透水係数が周辺の健岩部と同程度まで低下していることを確認した。また、粘土止水壁を構築してから 3 年経過後においても透水係数は 10^{-9} m/s のオーダーの値を示し、原位置地下水中に施工したベントナイト材料により EDZ の透水係数が構築直後と同等に低く保っていることを確認している。今後は実規模スケールの止水プラグを施工した場合に、EDZ の透水性をどの程度低下させることができるかを確認する必要がある。

また、令和 2 年度からの 3 年間で、止水プラグの切欠き部に対する吹付け工法の適用性を検討するための地上吹付け試験および原位置吹付け試験を実施した。その結果、止水プラグに要求する透水係数として設定した 10^{-12} m/s を確保できる乾燥密度を吹付け施工により達成できることを確認し、切欠き部への施工方法として有効であることを確認した。一方で、高い乾燥密度での施工を実現するために材料投入量を少なくしているため単位時間あたりに吹付けられる材料の量に限りがあり、施工効率を向上させることが個別の技術的課題である。また、今後は、切欠き部と坑道部分を合わせて止水プラグを構築するための施工方法を検討することが課題である。

参考文献

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.

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.

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.

土木学会，2002 年版 コンクリート標準示方書 改定資料，2002.

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 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.

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，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研究開発事業地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2021.

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，令和 3 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，2022.

3.3 EDZ 等の連続性調査技術の高度化

処分場の閉鎖後に坑道周辺の掘削影響領域（Excavation disturbed zone、以下、EdZ）・掘削損傷領域（Excavation damaged zone、以下、EDZ）が、地上と地下を結ぶ短絡的な物質の移行経路になることを防ぐための坑道シーリングにおいては、EDZ（EdZ を含む）の物性や連続性を定量的に把握し、移行抑制に最も効果的なプラグの幾何学的形状・配置場所の検討を行うことが重要である。このため、地質環境特性とその長期変遷に係る調査・評価技術の信頼性向上（例えば、NUMO, 2021）に向け、幌延の新第三紀堆積岩を対象に、EDZ の範囲や物性を定量的に把握する非破壊調査技術の開発に取り組む。

原位置の岩盤を広範囲に非破壊で調査する手法として、トモグラフィ技術を用いた物理探査が一般的である。EDZ の物理学的特性を把握する目的として、幌延の堆積岩を対象として、物理探査を適用した多くの事例が報告されている（杉田ほか, 2012；2018）（青柳ほか, 2013；2014；2017；2018）（窪田ほか, 2013；2018）。しかし、従来の物理探査手法で示されるのは、定性的な EDZ の物性値（弾性波速度及び比抵抗等）の分布であり、坑道周辺の EDZ の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）。よって、以下の 3 項目に分けて調査技術の開発を実施した。

○EDZ の物理特性の取得：岩盤中の連続性の高い割れ目を検知する調査技術の開発

○EDZ 等の連続性調査技術の高度化：EDZ の範囲や性状を空間的に評価する技術の高度化

○EDZ の経時変化に関する調査：EDZ の経時変化を把握・評価する技術開発

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（P・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、調査精度及び EDZ の連続性の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、幌延の堆積岩を対象とし 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、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、次年度以降のトモグラフィ調査のためのボーリング調査・室内試験及び初期値としての弾性波・比抵抗トモグラフィを実施するとともに、新たに幌延の深度 350m 試験坑道 4 を対象としたトモグラフィ調査を実施し、EDZ の経時変化に関する物性データを蓄積するとともに、坑道周りの吹付けコンクリートの影響を考慮した解析手法を検討した。

令和 3 年度は、整備したサイトにおいて岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を主目的として、ボーリングによるコア採取と検層及び水理試験を実施し、グラウト注入の可否を検討するとともに、製作したプロトタイプを用いた計測を実施し、高精度化した物理探査技術の適用性を検討した。また、EDZ の経時変化を考慮した、弾性波と比抵抗トモグラフィの同時逆解析のためのプログラム開発に向け、室内試験において飽和度と物性値のデータを取得した。

3 か年の事業期間中の実施工程を表 3.3-1 に示す。

表 3.3-1　3ヵ年の実施工程

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												
・試作及び適用性確認												
・改良・高度化												
・適用性評価												
2.EDZ 等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・水理試験												
・注入後の変化値の取得・サンプリング												
・適用性評価												
3.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												
・物性値取得												
・経時変化の評価												

※　平成３０年度および令和元年度の成果により継続事業として認められたことから、本報告書では令和２年度から令和４年度までの実施工程について記載

3.3.1 EDZ 等の連続性調査技術の高度化

(1) 実施概要

原位置の岩盤を広範囲に非破壊で調査する手法として、トモグラフィ技術を用いた物理探査が一般的であるが、幌延の新第三紀堆積岩のような岩盤を対象に坑道周辺部を対象とした相対的に規模の小さい領域における同調査技術の適用性を検討した事例は少ない。この技術開発では、整備サイトにおいて、弾性波および比抵抗を用いた高精度な三次元トモグラフィ調査に加え、水理試験、検層、室内試験等を実施し、EDZ および EdZ 内の水みちの連続性等を把握する上での既往の物理探査技術の適用性を評価することを目的として実施してきた。

令和３年度は、令和２年度のトモグラフィ調査から得られた弾性波（P 波）の低速度部分と割れ目に相関性が見られることから、既知の割れ目との連通性のある岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を目的とし、T-1 孔から 1.0m 離れた位置でボーリング調査（コア採取、各種検層）、水理試験およびグラウト注入を検討した。

令和４年度は、本フェーズにおける技術開発の最終年度として、令和２年度と同様の仕様での弾性波・比抵抗トモグラフィ調査を実施し、グラウト注入前後での EDZ、EdZ の物性分布の変化を調査するとともに、新たなサンプリング孔を掘削し地質およびグラウト材の充填状況を確認した。また、岩盤中に原位置地下水とは電気伝導度の異なる水を注水し比抵抗分布に与える影響も併せて調査した。最後にこれらの結果を総合的に検討し、第三紀堆積軟岩に対する適用性を評価した。今年度の調査の流れを図 3.3-1 に示す。

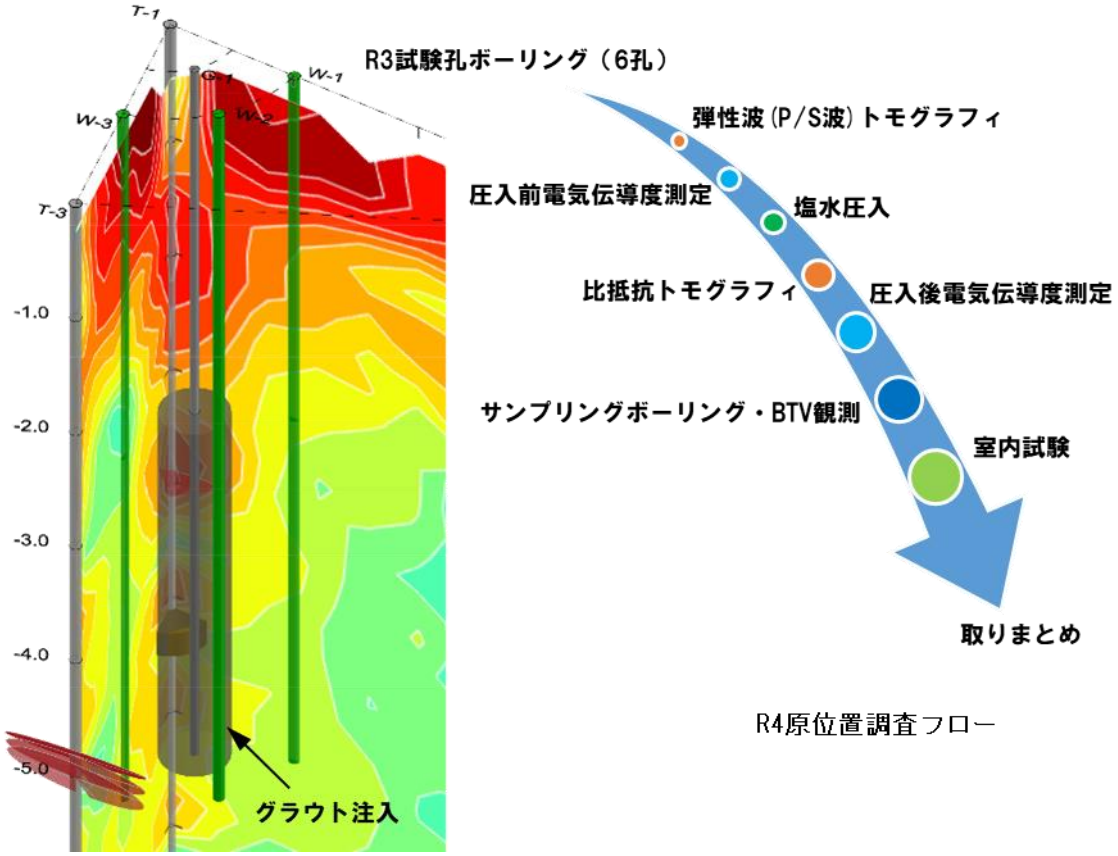


図 3.3-1　令和３年度までに実施したグラウト注入および注入前の事前の物理探査結果（左）とそれを踏まえた令和４年度の原位置試験の実施概要（右）

(2) トモグラフィ調査

(a) 調査の概要

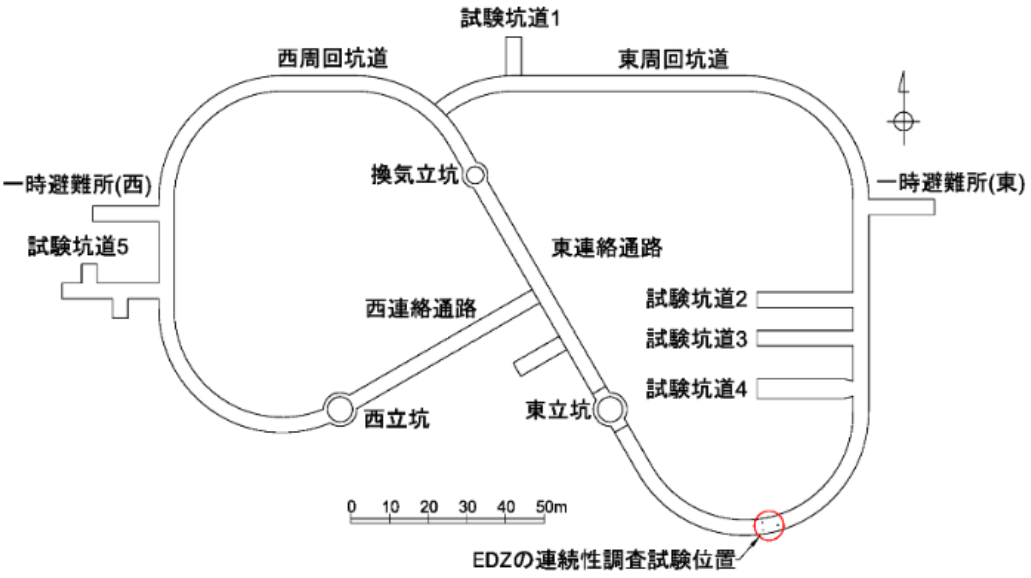
弾性波・比抵抗トモグラフィは、初期状態との比較のため、令和２年度と同一の場所および仕様にて実施した。図 3.3-2 に調査位置を、表 3.3-2、表 3.3-3 に使用機材と解析ソフトを、現地調査に使用した使用資機材一覧表を表 3.3-4 に示す。

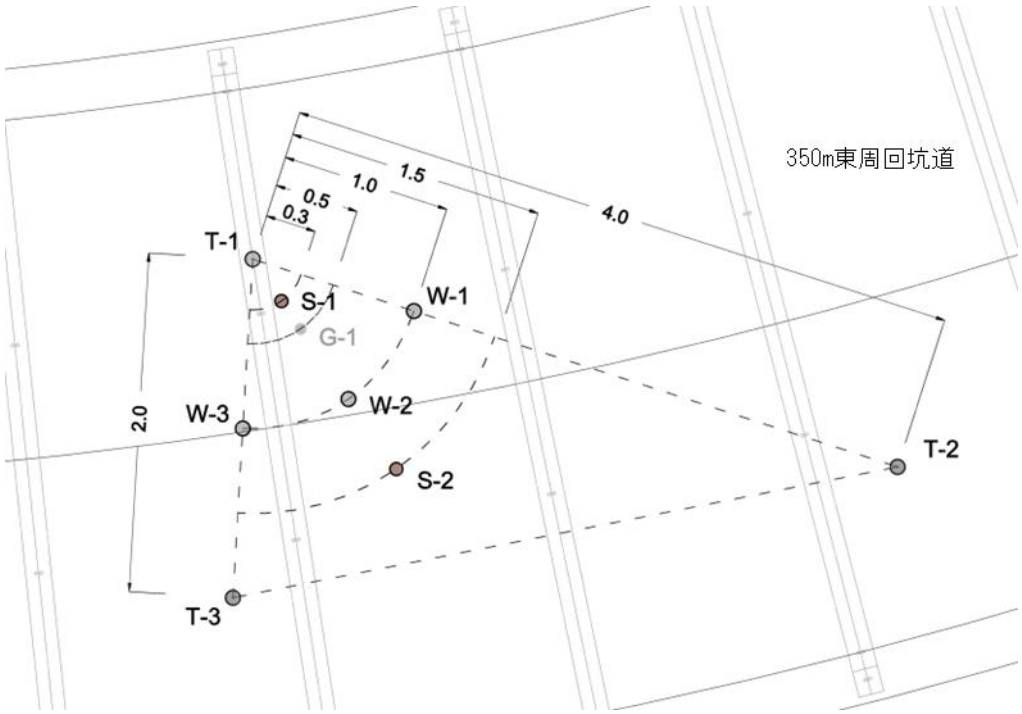
弾性波トモグラフィについては、P 波および S 波の起振を発振周波数 2kHz 程度の点震源を使用し、T-1、T-2、T-3 孔は発振間隔 0.5m、深度 0.75m～10.25m の孔内発振 20 点とした。W-2 孔は発振間隔 0.5m、深度 0.75m～6.25m の孔内発振 12 点とした。受振は、孔内は受振感度 4kHz 程度、床面は周波数 100Hz の受振装置を設置し、T-1、T-2、T-3 孔は受振間隔 0.5m、深度 0.5m～10.5m までの孔内受振 21 点、W-2 孔は、受振間隔 0.5m、深度 0.5m～6.5m の孔内受振 13 点、令和 3 年度に掘削した W-1、W-3 孔は深度 0.35m の位置にハイドロフォンを 1 点ずつ設置した。床面の受振間隔は 0.5m、受振 15 点に電極棒を先端が岩盤に到達するように設置し、棒頭部に受振器を設置してサンプリング間隔 30μs 以下でデータを取得した。

比抵抗トモグラフィについては、W-2 孔から電気伝導度 5,000 mS/m 以上の塩水を圧入し、5 孔(T-1、T-2、T-3、W-1、W-3)の孔内電極と床面電極で比抵抗の三次元データを取得した。電極間隔は 0.5m を基本とし、T-1、T-2、T-3 孔は深度 0.0m～10.5m、W-1、W-3 孔は深度 0.0m～7.0m まで電極を設置した。

試験孔は地下水（電気伝導度 1.5 S/m）を溜めた状態でデータを取得した。測定手法は、2 極法電極配置を採用し、孔内電極点と床面電極点の全ての組み合わせで測定を実施した。遠電極

は、既存の電極点を使用した。電極数を表 3.3-5 に示す。なお、比抵抗測定の前に、6 孔（T-1、T-2、T-3、W-1、W-2、W-3）の孔内水の電気伝導度および温度を測定した。測定間隔は全深度 0.5m 毎、測定範囲は 0.00～10.00 S/m とした。比抵抗の測定中においても、5 孔（T-1、T-2、T-3、W-1、W-3）の電気伝導度および温度を上記と同様に測定して圧入効果を確認した。





単位：m

図 3.3-2　調査位置平面図（幌延深地層研究所深度 350m 坑道内）

表 3.3-2　使用資機材一覧表

機器名および型式	機　　能	仕　　様	数量
弾性波トモグラフィ調査			
測定器：DAQ Link 4 system	弾性波測定器、制御ソフトウェア入り PC、専用ケーブルによる複数台連動操作	24ch のアナログ入力（ジオフォンを想定）、電圧・接点によるトリガ、最大 64KHz サンプリング、ソフトウェアによる垂直重合、相互相関処理	2 台
発振器：Borehole Sparker SourceSBS-42	高電圧発生器、P 波用振源	100V 入力(高電圧発生器にて 230V に昇圧)、1000J 発振、感電防止のための多重保護回路	1 式
発振器：Borehole Sparker SourceBIS-SH-DS	高電圧発生器、S 波用振源	100V 入力、感電防止のための多重保護回路	1 式
孔内受振器：Hydrophone	孔内水を媒介とした孔内振動検知	0.5m x 21ch	1 式
受振器：Land Geophone	床面における振動検知	共振周波数 100Hz、坑道床に穿孔し電極棒を打ち込み、これに固定。床面受振点用。	15 個
受振器：Hydrophone	孔内水を媒介とした孔内振動検知	1ch(W-1, W-3 用)	2 式
比抵抗トモグラフィ調査			
測定器：McOhm Profiler 4/ Scanner	比抵抗探査用測定器	32ch(本体) + 64ch(Scanner：外付け端子切り替え機）、12V 入力、最大 400V 送信	1 式
孔内電極	孔内水を媒介とする多連電極	0.5m x 24ch	3 式
孔内電極	孔内水を媒介とする多連電極	0.5m x 16ch	2 式
地表電極		ジオホン取り付けの鉄筋棒と共用	16 本

表 3.3-3　弾性波トモグラフィ解析ソフトウェア一覧表

ソフトウェア名	製作会社	機能
Front End Express	Geogiga Technology Corp.	波形表示・初動走時読取り
GeoTomCG	GeoTom, LLC	三次元解析プログラム

表 3.3-4　比抵抗トモグラフィ解析ソフトウェア

ソフトウェア名	製作会社	機能
Res3dinvx64	Geotomo Software Sdn Bhd	三次元解析プログラム

表 3.3-5　比抵抗測定の電極点数

	T-1	T-2	T-3	W-1	W-2	W-3	床面	合計（点）
電極点	22	22	22	15	—	15	15	111

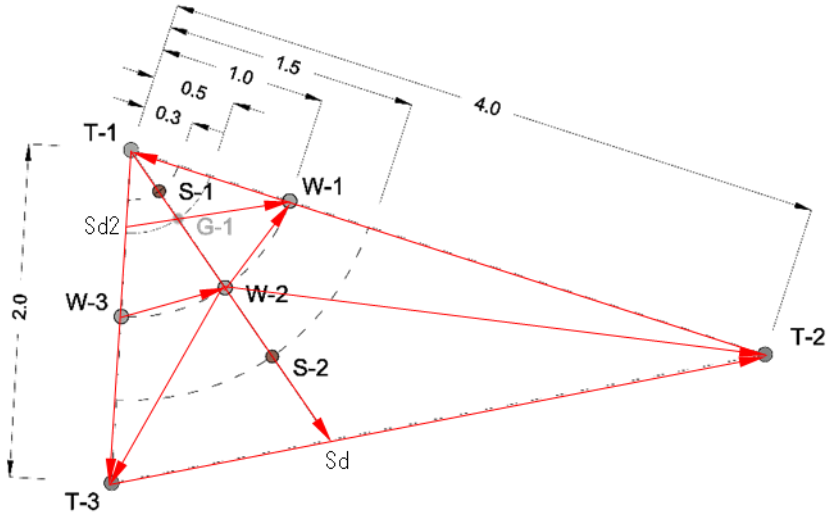
(b) 調査結果

(i) 弾性波トモグラフィ

各ボーリング孔間の速度断面図、ならびに深度方向のスライス断面図を作成した。具体的には、T-2～T-1 孔間、T-3～T-2 孔間、T-1～T-3 孔間、T-1～W-2 孔間、W-2～W-1 孔間、W-2～T-2 孔間、T-3～W-2 孔間、W-3～W-2 孔間の計 8 断面図のほか、T-1～Sd 間（S-1、G-1、W-2、S-2 を通る断面）と Sd2～W-1 間（G-1 を通る断面）の計 10 断面図を作成した。図 3.3-3 に断面位置図を示す。

解析断面図は、速度分布断面図、速度変化（差分：令和 4 年度－令和 2 年度）で表示し、令和 2 年度は初期値、令和 4 年度はグラウト注入後の測定データである。

図 3.3-4 から図 3.3-9 に P 波速度、S 波速度分布の主な解析断面図を示す。これらの結果から、EDZ（掘削損傷領域）と考えられる床盤コンクリート下 1m 程度の範囲については、令和 2 年度、令和 4 年度とも、P 波・S 波とも低速度帯となっており、３次元的に捉えられている。



単位：m

図 3.3-3　弾性波の速度分布断面位置図

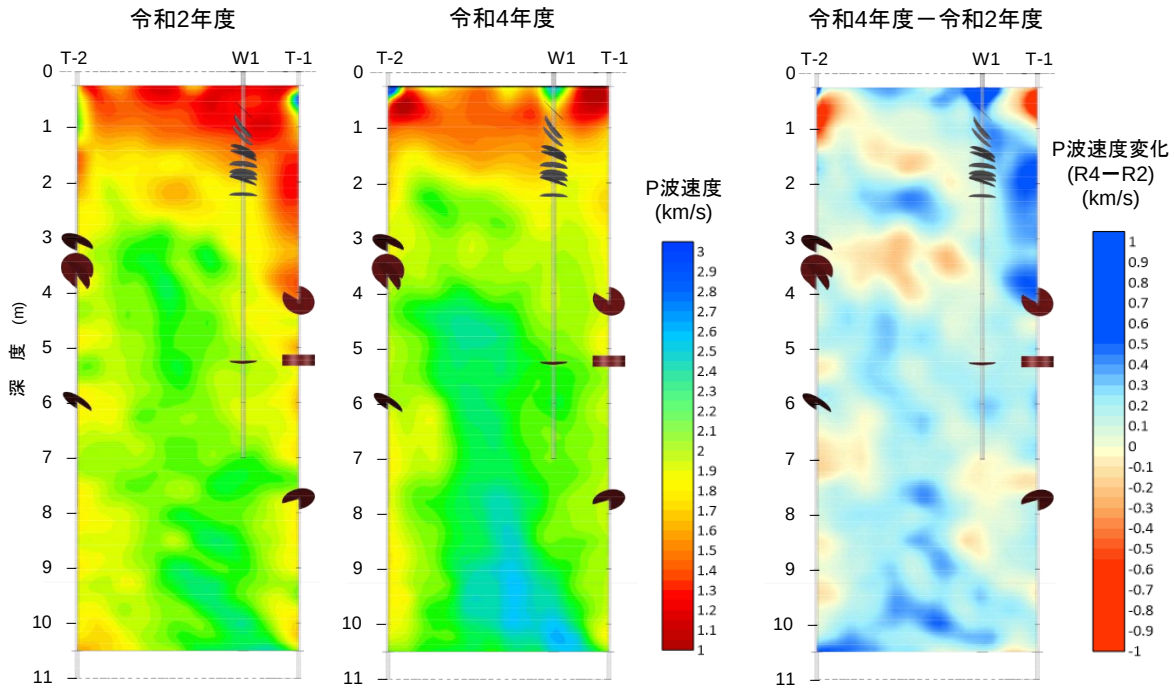


図 3.3-4　P 波速度分布（T1-T2 断面）

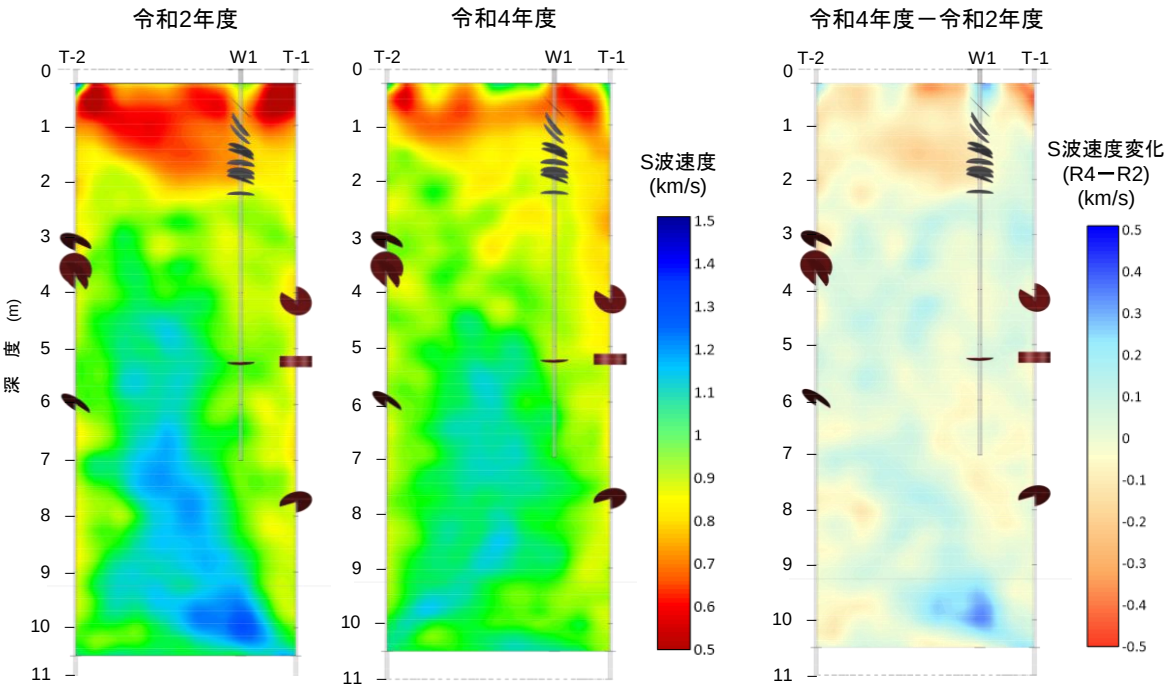
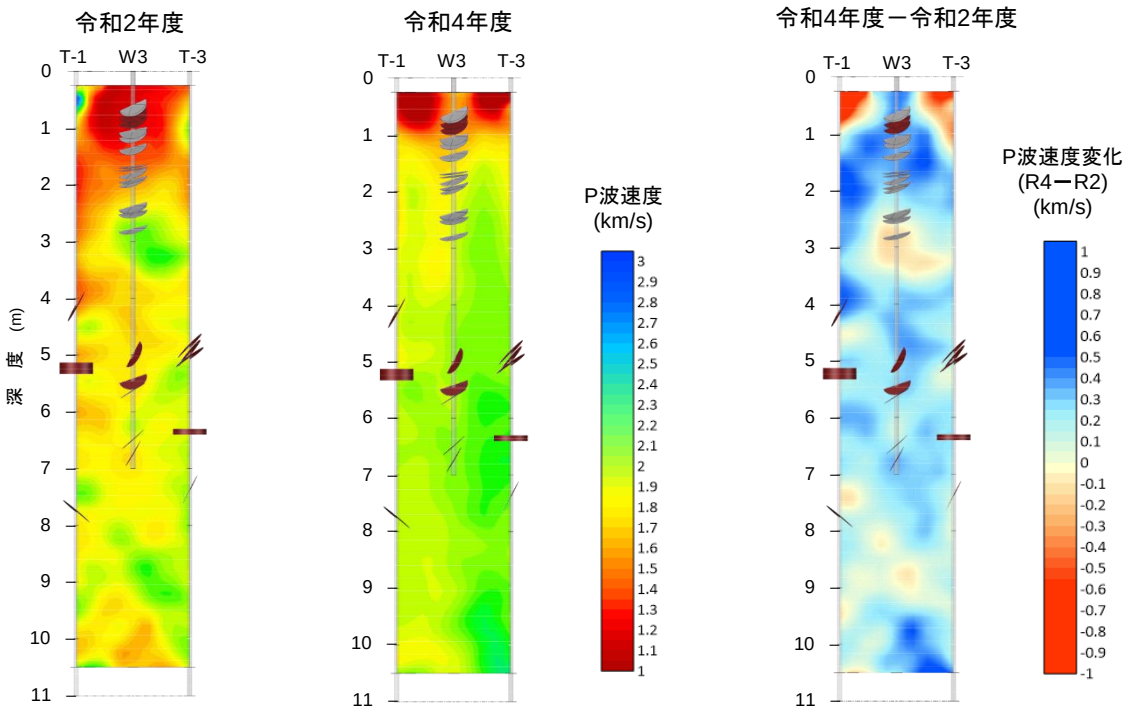
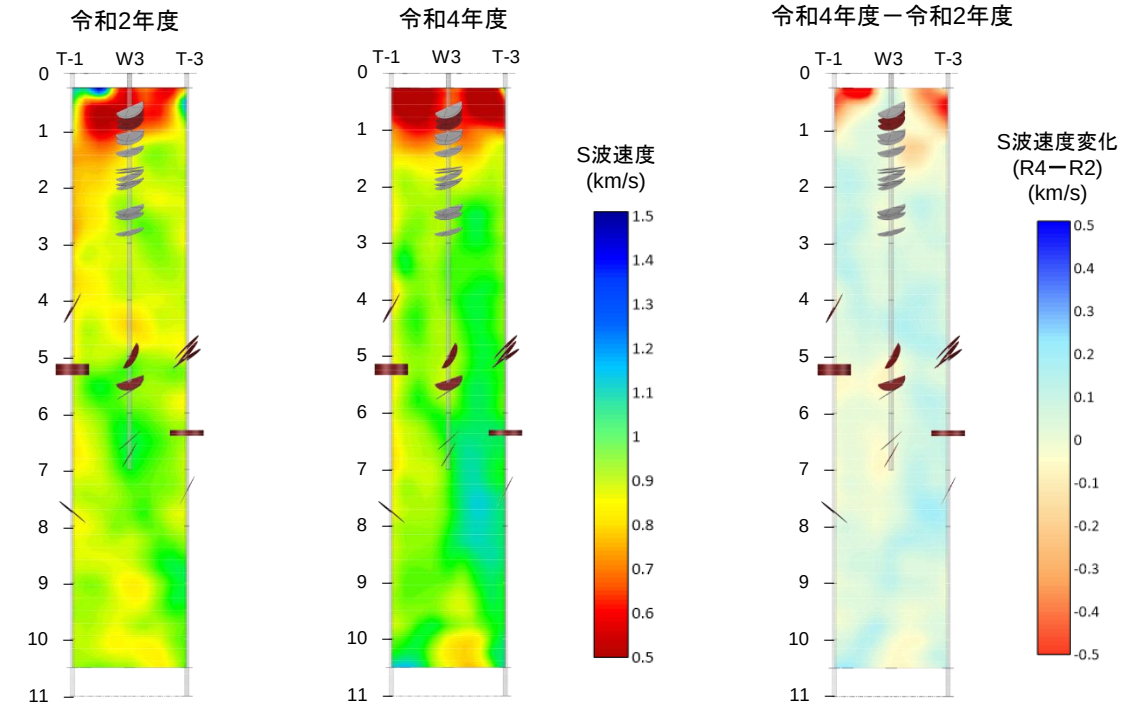


図 3.3-5　S 波速度分布（T1-T2 断面）



P波速度分布断面（T1-T3）

図 3.3-6　P 波速度分布（T-1—T-3 断面）



S波速度分布断面（T1-T3）

図 3.3-7　S 波速度分布（T-1—T-3 断面）

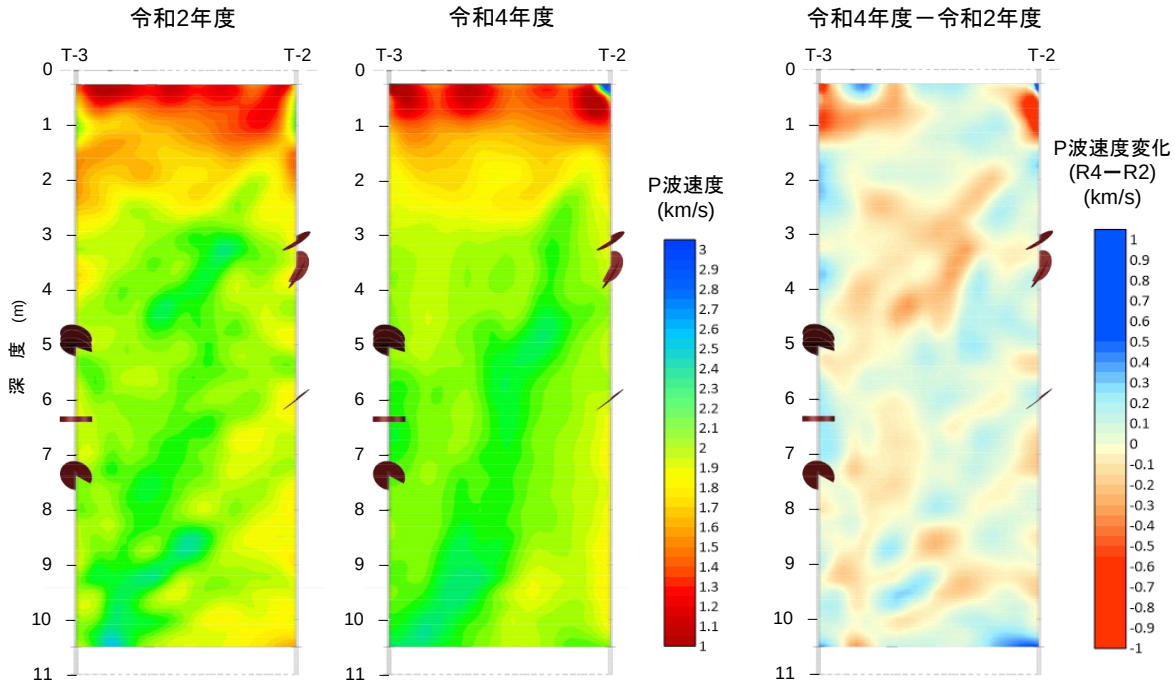


図 3.3-8　P 波速度分布（T-3—T-2 断面）

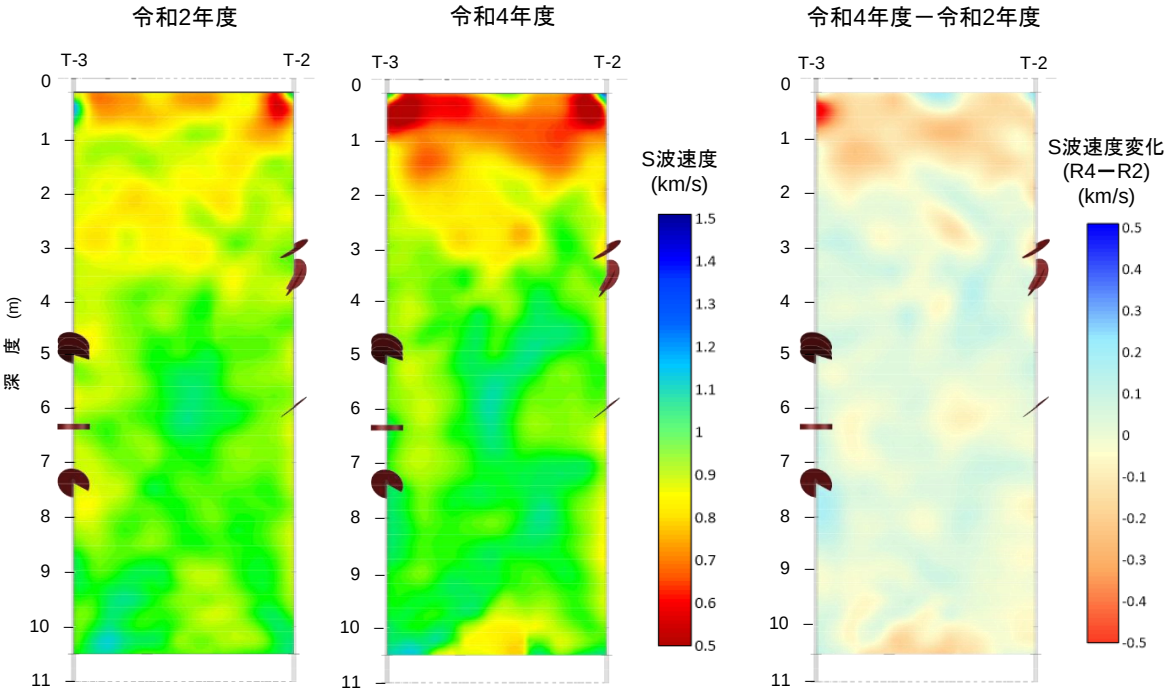


図 3.3-9　S 波速度分布（T-3—T-2 断面）

(ii) 比抵抗トモグラフィ

比抵抗測定では、対象となる地質環境中は低比抵抗（数オーム程度）であり間隙水や地下水の比抵抗が影響することから、比抵抗値のコントラストが大きな変化領域（割れ目）を検知するために、坑内で使用している工業用水に食塩を加えて電気伝導度 5000mS/m 以上の塩水を製作し、電気伝導度を測定後（後述）に W-2 孔から塩水を圧入して 5 孔（T-1、T-2、T-3、W-1、W-3）の孔内電極と床面電極を用いて測定を実施した。塩水圧入の開始から測定終了後に圧入を停止するまでの間に、約 6L の塩水を注入した（図 3.3-10）。

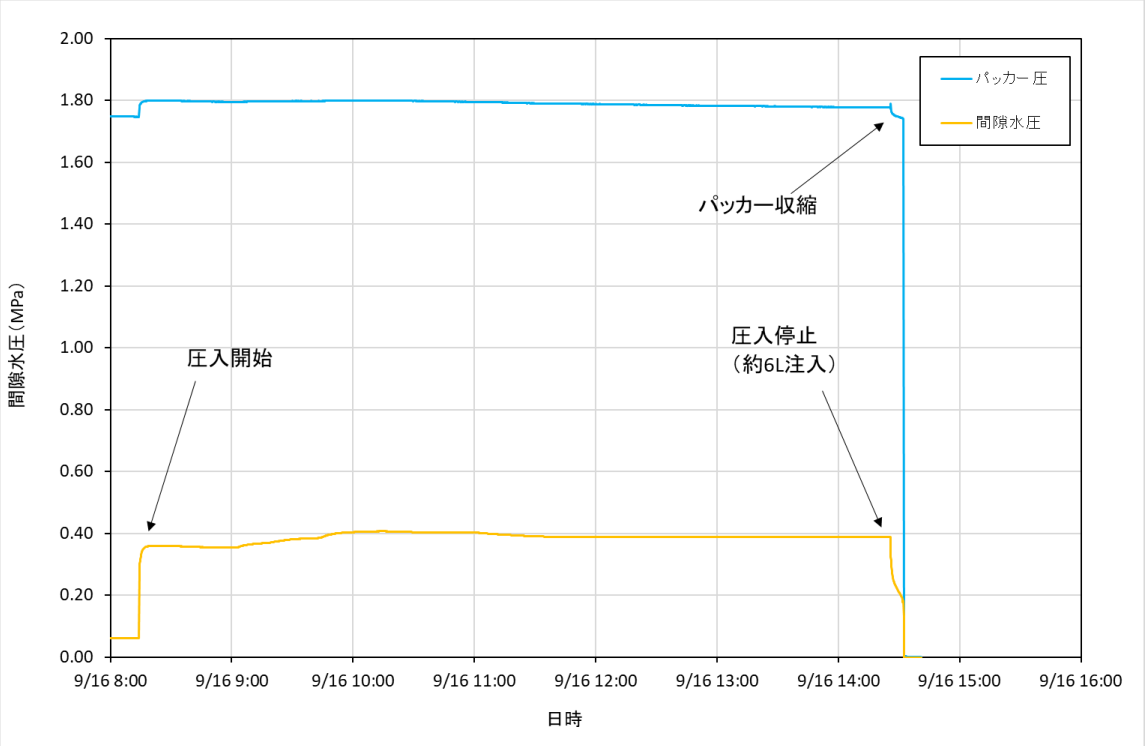


図 3.3-10　塩水圧入時における間隙水圧の変化

また、測定前（塩水圧入前）と測定中に 6 孔（T-1、T-2、T-3、W-1、W-2、W-3）で電気伝導度および水温を測定した（図 3.3-11、W-2 は圧入孔のために測定前のみ実施）。W-1 は孔口から 2-3cm 下まで孔内水で満たされていたが、それ以外の孔は孔内水位が低く、深度 0.5m 以深で測定した。

比抵抗トモグラフィ調査の結果、逆解析による比抵抗分布断面図（図 3.3-12）は、令和 2 年度の測定時に相対的に比抵抗が大きな領域（暖色系の領域）の比抵抗が全体的に低下する結果となった。これは、今回の測定では電気伝導度がバックグラウンドよりも数オーダー大きい塩水を作成・注入したことによる影響と推察される。

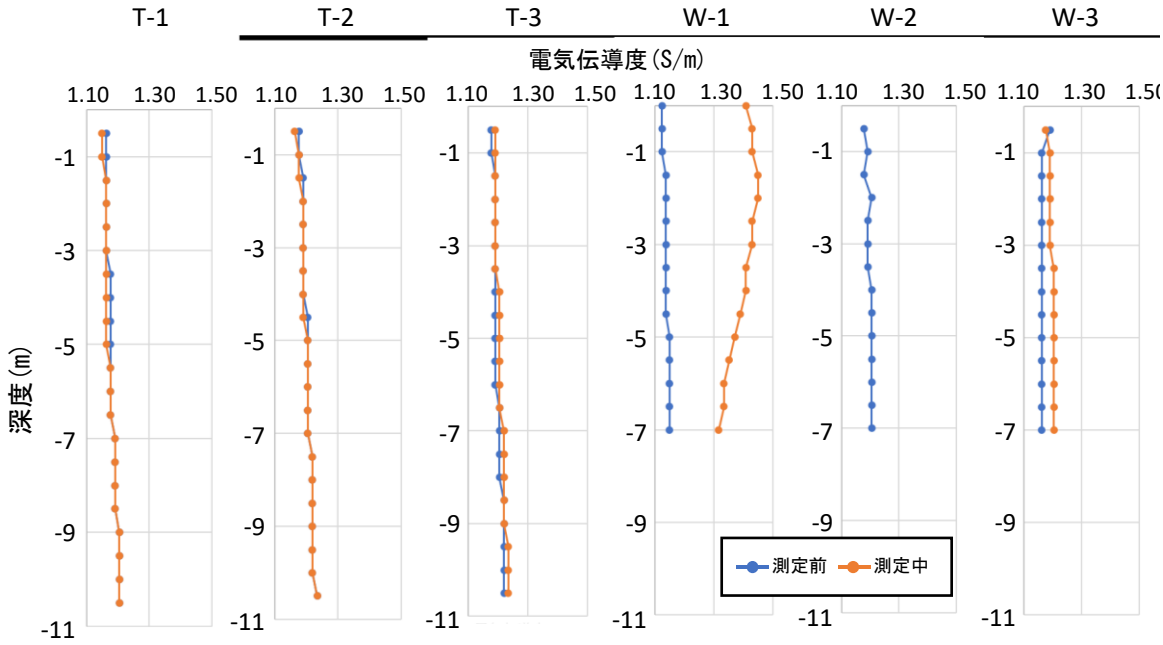
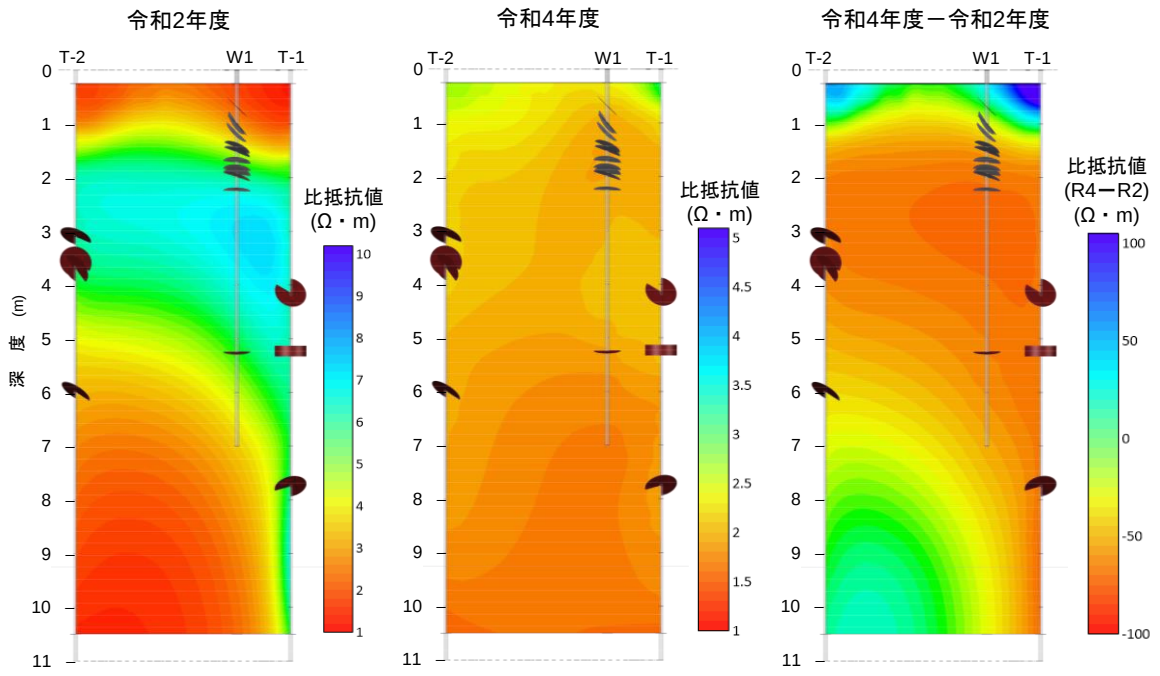


図 3.3-11　電気伝導度測定結果

表 3.3-6　水温測定結果

	測定前				測定中		
	測定日時	深度 [m]	ATC (℃)		測定日時	深度	ATC
	9 月 15 日	0.0	(孔内水無し)		9 月 16 日	0.0	(孔内水無し)
T-1	11:05~	0.5	20.0	T-1	13:19~	0.5	20.1
		1.0	20.1			1.0	20.1
	9 月 15 日	0.0	(孔内水無し)		9 月 16 日	0.0	(孔内水無し)
T-2	10:55~	0.5	20.3	T-2	14:04~	0.5	20.3
		1.0	20.3			1.0	20.3
	9 月 15 日	0.0	(孔内水無し)		9 月 16 日	0.0	(孔内水無し)
T-3	11:13~	0.5	20.1	T-3	14:13~	0.5	20.3
		1.0	20.3			1.0	20.3
	9 月 15 日	0.0	(孔内水無し)		9 月 16 日	0.0	19.8
W-1	11:01~	0.5	19.7	W-1	14:36~	0.5	19.8
		1.0	19.9			1.0	19.9
	9 月 15 日	0.0	(孔内水無し)			0.0	(孔内水無し)
W-3	11:10~	0.5	20.2	W-3	9 月 16 日	0.5	20.0
		1.0	20.2		14:43~	1.0	20.2

※ATC…自動温度換算値。水温を電気伝導度電極に内蔵してあるサーミスタで測定しながら換算



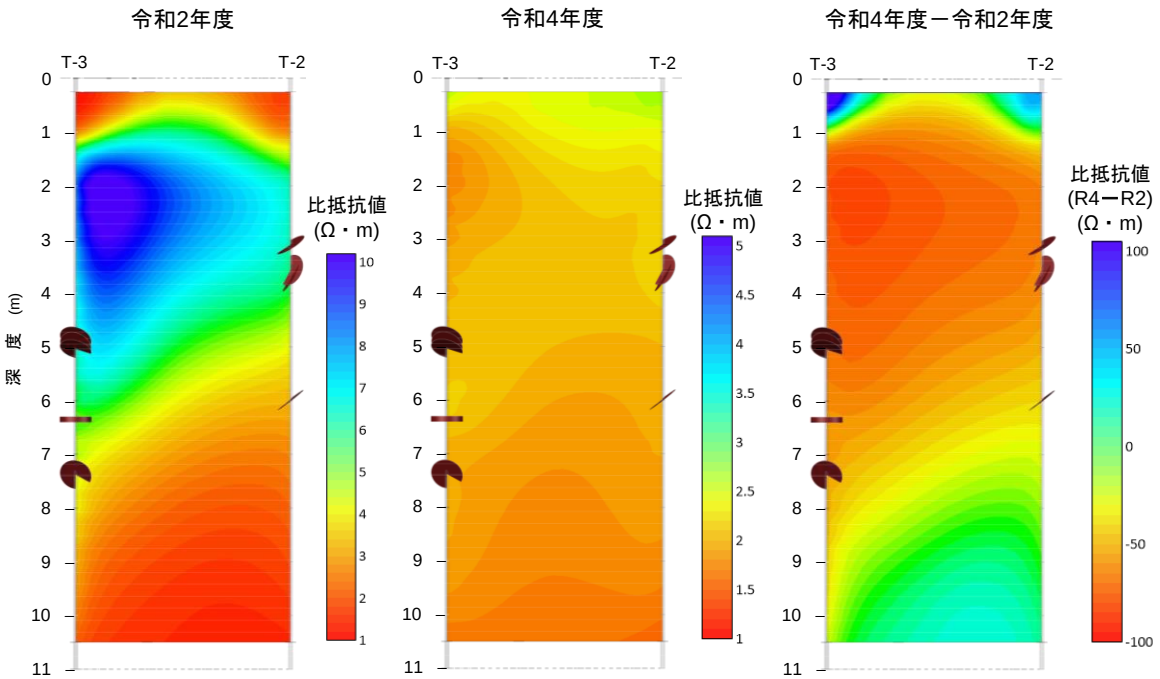


図 3.3-12　比抵抗分布（T-1—T-2 間、T-3—T-2 間）

(3) サンプリングボーリングおよび BTV 観察

トモグラフィ調査の範囲内において、令和 3 年度に実施したグラウト注入の状況等を確認するために 2 孔（S-1、S-2 孔）のサンプリングボーリング（鉛直下向、孔径 76mm、掘削長 7.0m）を実施するとともに BTV 観察を実施した。BTV 観察により把握した割れ目の情報を表 3.3-7 に

示す。図 3.3-13 に示す例のようにいくつかの割れ目の一部にグラウト材が浸透した可能性のある痕跡が見られた。令和 3 年度までに実施した BTV の結果を表 3.3-8 に示す。グラウト材の浸透の可能性が有る割れ目は、S-1、S-2 に集中していて、その深度は 2～6m の範囲である。なお、採取されたコアでは、グラウト材の浸透による痕跡のある割れ目は認められないが、これは注入したグラウト材の配合が C:W=1:4 と 1:3 という薄いセメントミルクであったため、ボーリング時に消失した可能性が高いことが推定される。

表 3.3-7　S-1、S-2 で確認された亀裂の一覧

孔 No.	確認深度(m)	走向(真北)・傾斜(°)			グラウトの有無
		#01	#02		
S-1	1.81		N70W31S		○
	3.81	N83W53N	N78W53N		△(部分的)
	5.07	N87E16N	N75E21N		×
	6.44	N53W28SW			○
	6.45		N47W37SW		

孔 No.	確認深度(m)	走向(真北)・傾斜(°)			グラウトの有無
		#03	#04	#05	
S-2	1.62			N19E43W	○
	1.78			N32E48NW	○
	1.93	N27E32W	N30E34NW	N25E27NW	○
	2.65	N26E28W	N27E25W	N31E21NW	○
	3.01	N45E35NW	N50E35NW	N48E34NW	○
	6.43	N86W53N	N86W52N	N87W49N	×

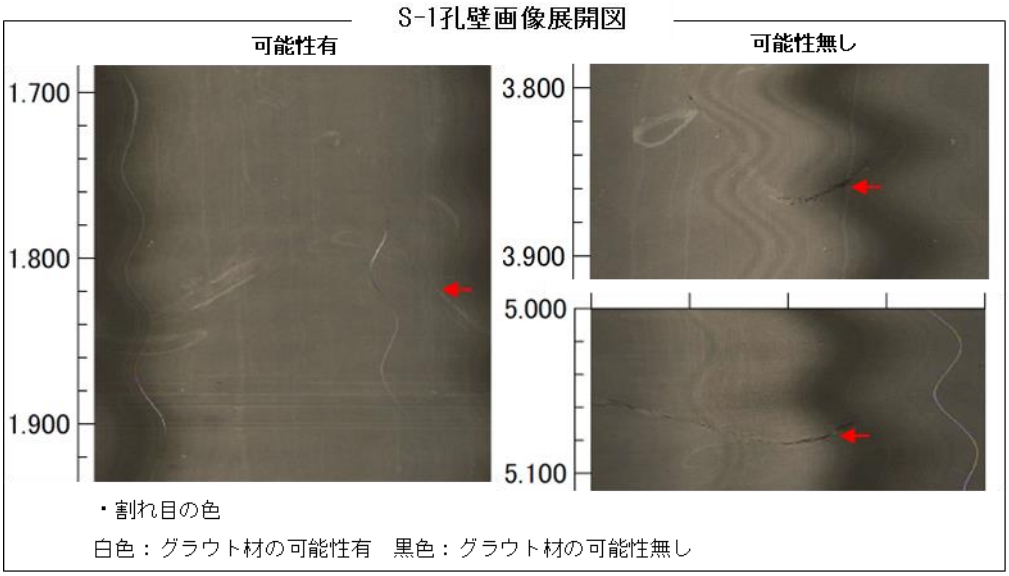


図 3.3-13　BTV 画像の一例

表 3.3-8　BTV で確認された割れ目

実施年度	孔 No.	**亀裂の確認深度(m)**	**走向(真北)(°)**	**傾斜(°)**	グラウトの有無	BTV 観察結果
グラウト注入前						
R2	T-1	4.13	N89E	61N	ー	ヘアークラック
		5.10~5.30 区間			ー	読取不可
		7.75	N89W	40S	ー	ヘアークラック
	T-2	3.10	N35W	35SW	ー	ヘアークラック
		3.57	N58W	70SW	ー	ヘアークラック
		3.70	N24W	61W	ー	ヘアークラック
		5.99	N16W	38W	ー	ヘアークラック
	T-3	4.84	N79W	46N	ー	開口幅 3mm
		4.96	N78W	51N	ー	ヘアークラック
		5.03	N76W	36N	ー	ヘアークラック
		7.38	N85W	63N	ー	ヘアークラック
R3	G-1	0.69	N30E	38W	ー	
		0.90	N25E	54W	ー	
		5.02	N40W	20S	ー	
		5.27	N73W	40N	ー	
		5.41	N10E	22E	ー	
グラウト注入後						
R3	W-1	0.68	N20E	45E	×	
		5.24	N70E	12N	○	
	W-2	0.72	N50E	28S	×	
		0.76	N47E	40S	×	
		0.85	N53E	40S	×	
		5.77	N72W	50N	×	
	W-3	0.62	N25E	45N	×	
		0.73	N25E	45N	×	
		0.83	N25E	45N	×	
		1.11	N25E	38W	×	
		5.41	N20E	50W	×	
	T-1	**4.14**	N75W	45N	○	
R4	**S-1**	**1.81**	N70W	31S	○	
		3.81	N78W~N83W	53N	△	
		5.07	N75E~N87E	16N~21N	×	
		6.44~6.45	N47W~N53W	28SW~37SW	○	
	S-2	**1.62**	N19E	43W	○	
		1.78	N32E	48NW	○	
		1.93	N25E~N30E	27NW~34NW	○	
		2.65	N26E~N31E	21NW~28W	○	
		3.01	N45E~N50E	34NW~35NW	○	
		6.43	N86W~N87W	49N~53N	×	

(4) 室内試験

室内試験は、弾性波・比抵抗トモグラフィ結果を検討する基礎的な情報を得るため実施した。測定項目は、一般的な物理試験で得られる密度、含水比、飽和度などとともに、弾性波速度および比抵抗の測定も実施した。一般的な JIS や地盤工学会基準を適用して実施しているが、比抵抗については、千葉ら（1993）を参考に測定を実施した。

ある物質の電気抵抗を R（Ω）、長さを L（m）、断面積を S（m^2）とし、単位体積あたり（＝1 m^3）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。

$$\rho = R \times \frac{S}{L} \quad (\Omega\text{-m}) \qquad \text{式 3.3-1}$$

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。

$$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{S}{L} \quad (\Omega\text{-m}) \qquad \text{式 3.3-2}$$

図 3.3-14 に測定の模式図を示す。電極には銅板を使用し、電極間や試料との間には、電気伝導度を調整した水を浸み込ませた濾紙を挟んだ。使用機材の一覧を表 3.3-9 に、使用したコアの採取深度を表 3.3-10 に示す。

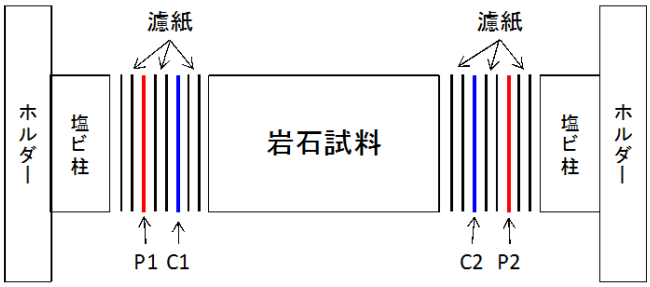


図 3.3-14　比抵抗測定の模式図

表 3.3-9　比抵抗測定　使用資機材一覧

機器名	製作会社	仕　様	数量
比抵抗探査装置 MCOHM-EL2i	OYO	出力電圧：１０ ～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		銅板を加工	２枚
その他		電極ケーブル、バッテリー	１式

表 3.3-10　コア試料における各供試体の深度

Bor.	試料番号	深度(m)	備考	土粒子の密度 ρs(Mg/m3)	湿潤密度(自然) ρt(Mg/m3)	湿潤密度(飽和) ρt(Mg/m3)
S-1	S1-1-1	2.00～2.10	水道水で飽和	2.452	1.831	1.825
	S1-1-2	2.10～2.20	800mS の水で飽和	2.435	1.811	1.813
	S1-1-3	2.20～2.30	1500mS の水で飽和	2.382	1.803	1.810
	S1-1-4	2.30～2.40	3000mS の水で飽和	2.415	1.818	1.824
	S1-1-5	2.50～2.60	4000mS の水で飽和	2.402	1.822	1.833
	S1-1-6	2.60～2.70	5000mS の水で飽和	2.455	1.841	1.844
	S1-2-1	6.00～6.10	水道水で飽和	2.431	1.785	1.777
	S1-2-2	6.10～6.20	800mS の水で飽和	2.391	1.795	1.797
	S1-2-3	6.20～6.30	1500mS の水で飽和	2.370	1.805	1.809
	S1-2-4	6.43～6.53	3000mS の水で飽和	2.405	1.803	1.809
	S1-2-5	6.53～6.63	4000mS の水で飽和	2.436	1.844	1.850
	S1-2-6	6.63～6.73	5000mS の水で飽和	2.459	1.833	1.840
S-2	S2-1-1	2.37～2.46	水道水で飽和	2.432	1.815	1.812
	S2-1-2	2.46～2.55	800mS の水で飽和	2.393	1.816	1.818
	S2-1-3	2.55～2.63	1500mS の水で飽和	2.391	1.821	1.825
	S2-1-4	2.63～2.70	3000mS の水で飽和	2.417	1.815	1.822
	S2-1-5	2.70～2.79	4000mS の水で飽和	2.413	1.815	1.824
	S2-1-6	2.79～2.88	5000mS の水で飽和	2.431	1.816	1.824
	S2-2-1	6.00～6.10	水道水で飽和	2.378	1.801	1.801
	S2-2-2	6.10～6.20	800mS の水で飽和	2.395	1.833	1.835
	S2-2-3	6.20～6.30	1500mS の水で飽和	2.421	1.798	1.799
	S2-2-4	6.30～6.40	3000mS の水で飽和	2.393	1.797	1.801
	S2-2-5	6.50～6.60	4000mS の水で飽和	2.397	1.784	1.796
	S2-2-6	6.60～6.70	5000mS の水で飽和	2.419	1.795	1.802

室内試験は、S-1, S-2 孔の深度 2.0m～3.0m、6.0m～7.0m の岩石試料から 24 個の供試体を成形したが、成形直後の供試体にはクラックは認められなかった。試験は、間隙水の電気伝導度の供試体の比抵抗への影響を調べることを目的とし、供試体によって電気伝導度の異なる間隙水を用いて飽和作業を行った。原位置の地下水の電気伝導度が約 1500mS であることを考慮し、表 3.3-11 に示すように水道水（20mS)、800、1500、3000、4000、5000mS を目安とした 6 種類の塩化ナトリウム水溶液を作成し、それらの水溶液で岩石を飽和させて比抵抗および弾性波速度を測定した。

比抵抗測定結果、弾性波速度測定結果を図 3.3-15～図 3.3-17 に示す。本調査位置に分布する堆積岩は、自然状態では供試体の比抵抗は、4.3～5.3 ohm-m を示す。どのコアの採取箇所においても、水溶液の電気伝導度が原位置の地下水に近い 1500mS では、自然状態と飽和状態の比抵抗に差はほとんど見られない。1500mS の水より電気を通しにくい水道水や 800ms で飽和させた供試体は、自然状態より飽和状態での比抵抗が大きくなり、逆に電気を通しやすい 3000mS、4000mS、5000mS の水で飽和させたものは、飽和状態での比抵抗が小さくなっている。

弾性波速度については、P 波速度（Vp）は 2100 ~2250 m/s、S 波速度（Vs）は 950～1050m/s の範囲であり、比抵抗と異なり水溶液の違いは大きな影響を与えないことがわかる。また、自然状態、飽和状態ともにコア試料を採取した深度 2～3m と深度 6～7m の 2 深度で Vp、Vs を比較したが、EDZ の範囲外であるため、明確な速度の違いは認められなかった。

表 3.3-11　供試体の飽和作業に使用した水溶液の電気伝導度

水溶液名称	水溶液作成時(mS)	供試体脱気前(mS)	供試体飽和後(mS)
水道水	18.71	19.5	79.2
800mS	798	797	881
1500mS	1468	1472	1570
3000mS	3000	3000	2990
4000mS	3990	3970	3940
5000mS	5020	4980	4840

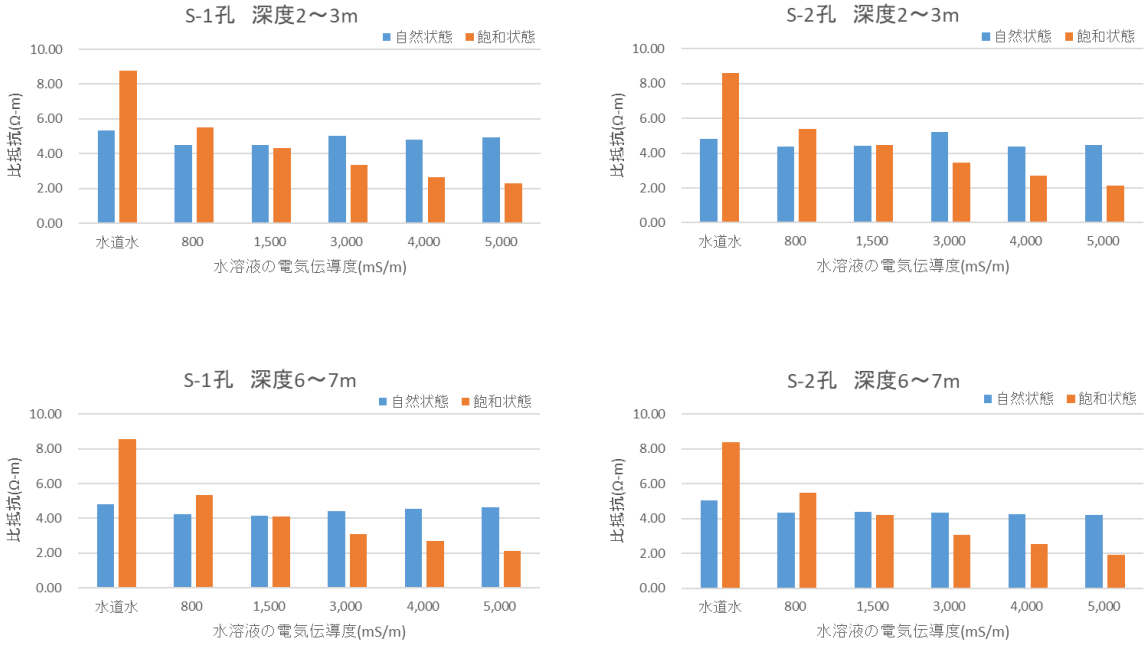


図 3.3-15　各供試体の比抵抗

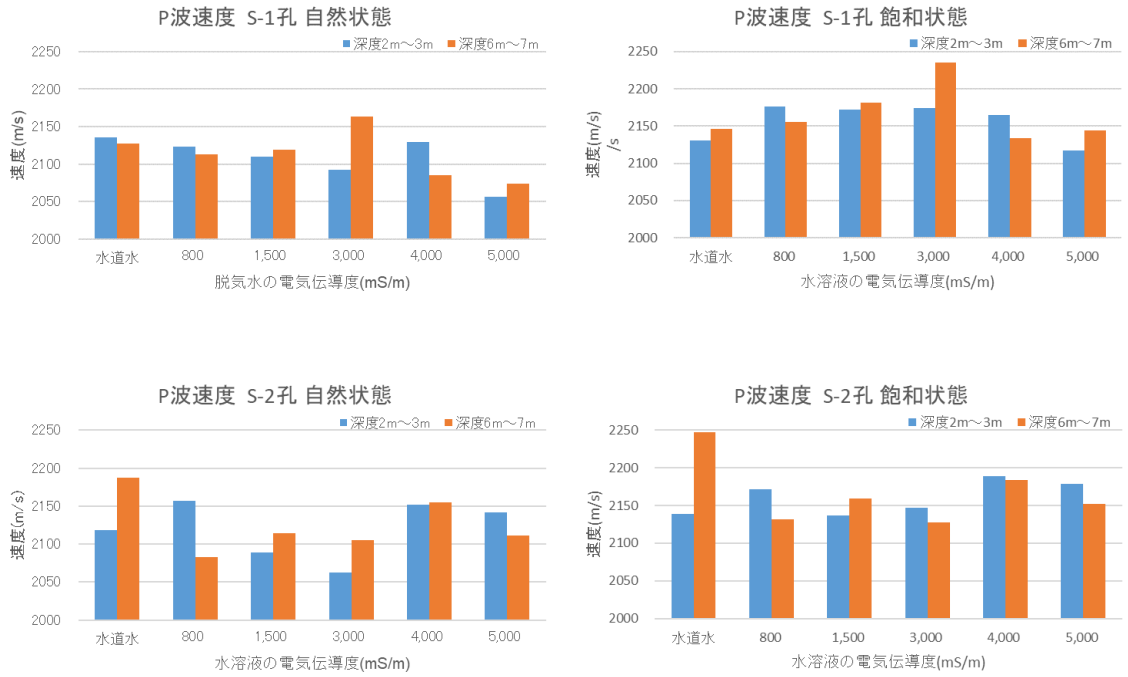


図 3.3-16　各供試体の P 波速度

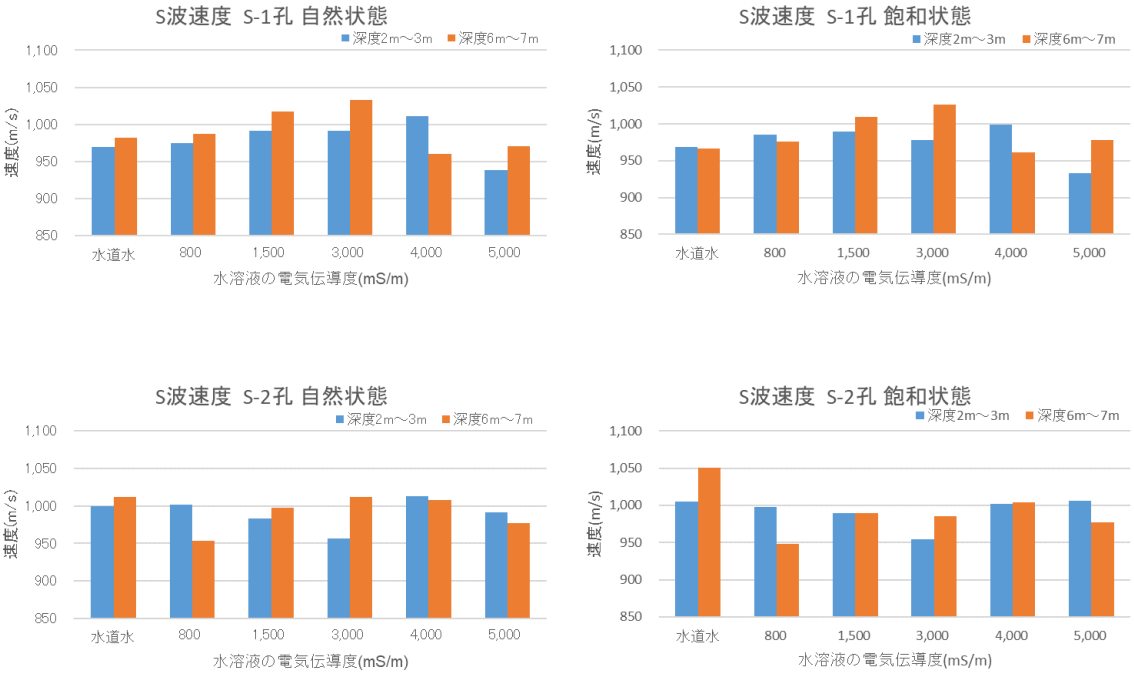


図 3.3-17　各供試体の S 波速度

(5) EDZ の連続性等の把握に対する既存の物理探査手法の適用性評価

令和 2 年度と令和 4 年度に取得したトモグラフィ断面と弾性波速度変化および比抵抗変化を図 3.3-18 に示す。弾性波速度（P 波）については、母岩となる珪藻質泥岩の平均速度（P 波：約 2km）の半分程度に、S 波については、母岩の平均速度（約：1km）の 7 割から半分程度に減少する領域が、底盤部の岩盤上面から約 1m 程度の範囲に 3 次元的に連続して広がっている。P 波に比べ S 波の速度変化が小さいのは、図 3.3-19 に示すように EDZ 内の割れ目が低角すなわち底盤に対して平行に近い傾斜で分布していることが一因である可能性があり、またこの速度変化や範囲の大きさは幌延深地層研究所において実施された既存の研究における EDZ の評価と合致することから、弾性波トモグラフィは新第三紀堆積軟岩においても EDZ の範囲を連続的にとらえられることが確認できたと考える。一方で、比抵抗トモグラフィについては、上記の領域内でそのような有意な変化は認めれないことから、EDZ のような岩盤への物理的損傷よりも水質の影響を強くうける同手法は EDZ の連続性等の調査には不向きであると考えられる。

一方、今回適用した 3 次元の高解像度トモグラフィ技術により、岩盤内に存在する水みちのような個々の湧水割れ目の検出が可能か否かについても、グラウト注入や塩水トモグラフィのようにバックグラウンドに対して有意に差がある流体注入を行った場合の変化についても本事業の中で検討を行ってきた。それらの結果をまとめると以下のようになる。

- 地質の状況としては、各ボーリング孔とも深度 3 m以浅（特に 2m まで）に低角の割れ目が集中。一方、深度 4m 以深でも比較的高傾斜の割れ目が見られる（BTV）。グラウト材注入では水：セメント比が 3:1、4:1 の薄いセメントミルクを注入しており、割れ目が完全にグラウト材で注入されている状況は認められていない
- グラウト注入前後に実施した W-2 を発信孔とする孔間透水試験（深度 2m 以深）では、グラウト注入前後の透水係数のオーダー的な変化は限定的（図 3.3-20）
- 弾性波については P 波、S 波とも 2 割程度（P 波：0.4km/s, S 波：0.2km/s）の速度増加が見られている領域は、T-1-W-2 孔間の 2～4m、T-2-W-2 孔間の 2～6m、T-3-W-2 孔間の 6～8m、W-2-W-3 孔間の深度 2m 程度の箇所で相対的には調査で把握された割れ目が相対的に多い場所と対応する（図 3.3-21）。比抵抗トモグラフィについては断面によらず、深度 2～8m 程度の間で 50%程度の比抵抗の減少が認められる
- 前述の室内試験の結果では、W-2 孔に注水した 5000μS/m の高塩分溶液で岩石の比抵抗は 50%低下している。一方、弾性波については、この溶液の影響は一割にも満たない。

これらのことから、EDZ の外側領域(EdZ: Excavation disturbed Zone)の部分で生じた弾性波速度や比抵抗の変化は以下のように解釈できる。すなわち、W-2 孔を中心として、T-1、T-2 孔側では深度 2～6m の範囲内で、T-3 孔側では 6～8m 程度の範囲でグラウト注入により弾性波速度が増加している可能性がある。比抵抗については、すべての断面で同じ区間で 50%程度比抵抗が低下していることと、室内試験結果および BTV の状況から、注水した高塩分溶液が岩盤中の割れ目を通じて本試験エリア内全体に 3 次元的に広がったためと推定される。

以上をまとめると、EDZ の連続性については、特に弾性波探査は有効であると考えられる。ただし、EDZ 外の水みちの連続性の把握という観点では、トモグラフィ調査自体で得られる情報はある程度の範囲を示すにとどまることから、この分解能では十分な情報を得ることは難しいと考えられる。今後、EDZ 外に存在する水みちなどの連続性を把握する必要がある場合はトモグラフィ調査以外の手法を適用することが有意な結果を得るうえで重要と考えられる。

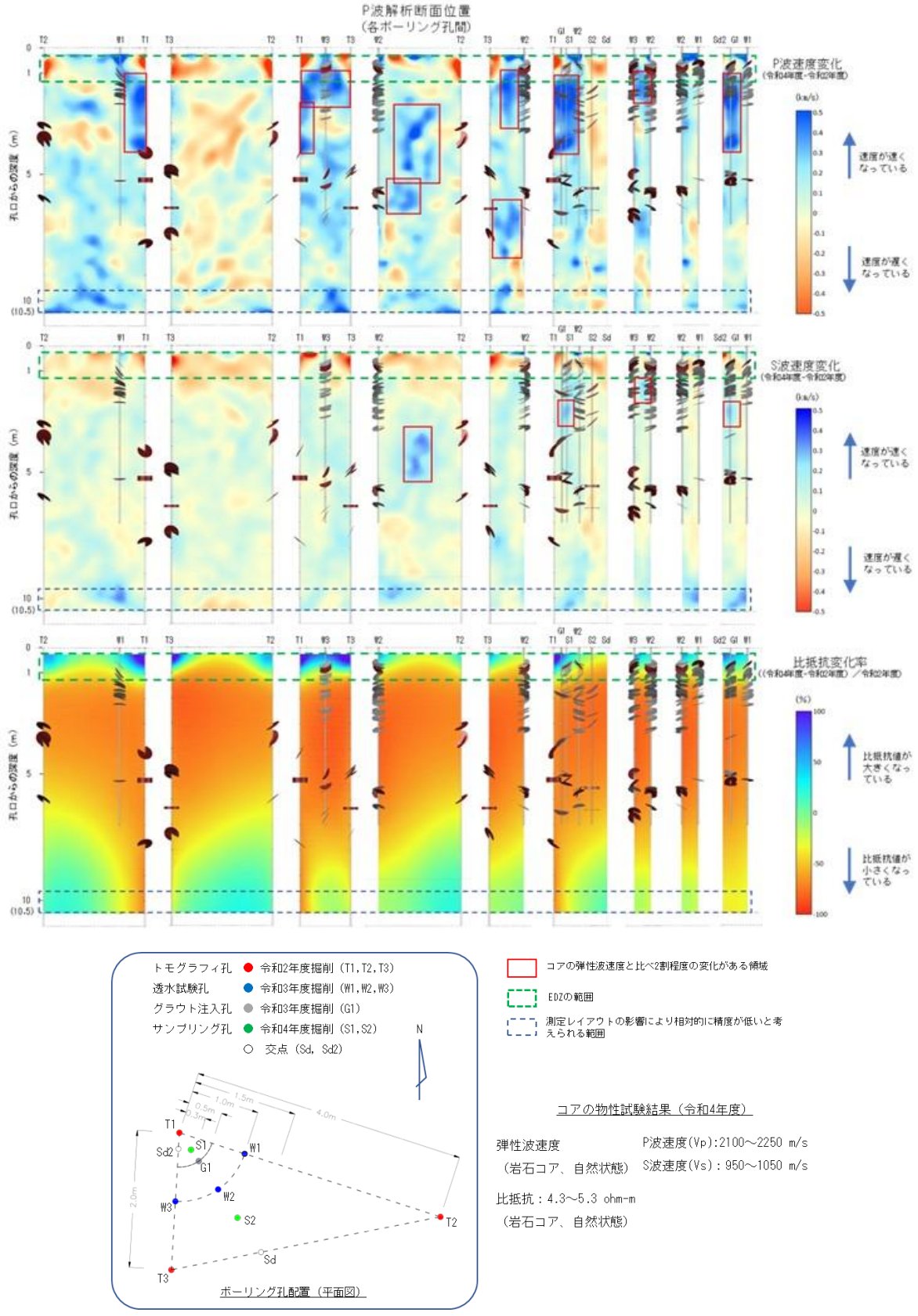
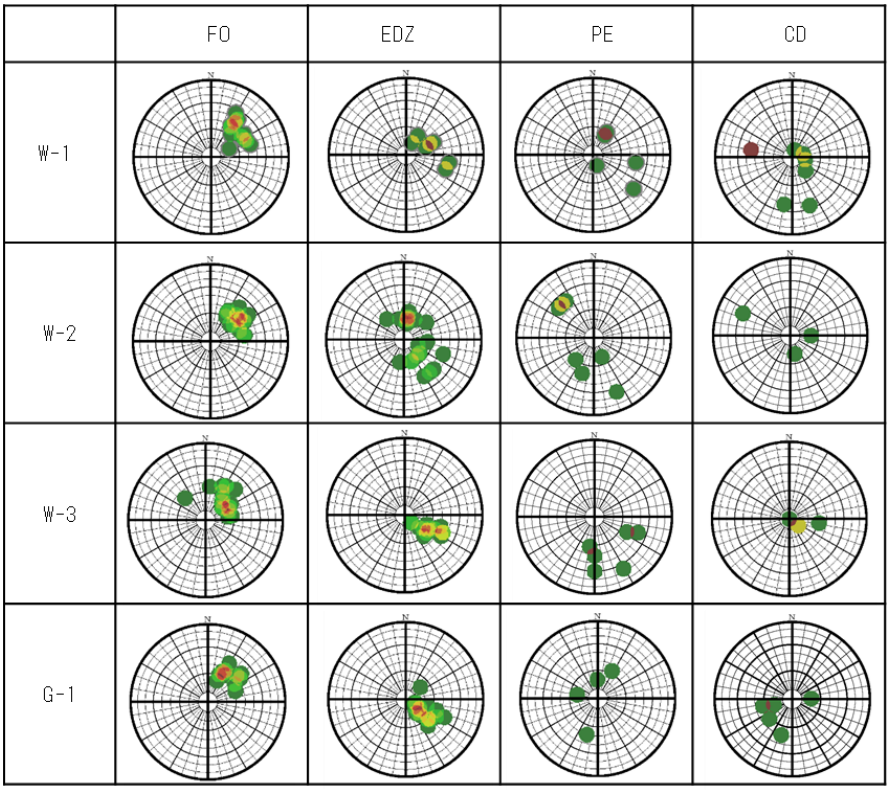


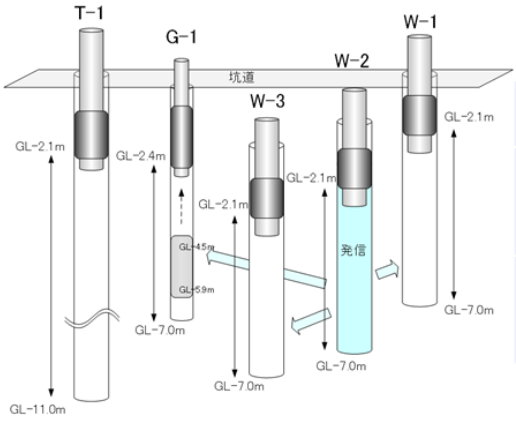
図 3.3-18　各断面における令和２年度と令和４年度の弾性波速度、比抵抗分布の変化



FO 層理、EDZ　掘削により発生した引張割れ目、

PE　初生的に存在しているせん断割れ目もしくは引張割れ目、CD　機械的割れ目およびコアディスキング

図 3.3-19　コア観察等から評価した割れ目の走向・傾斜の分布
（原子力機構・原環センター, 2022）



W-2 定流量注水試験結果一覧表

調査ステージ	試験深度（GL-m） 上端	試験深度（GL-m） 下端	区間長（m）	透水量係数 T（m^2/sec）	貯留係数（－）	解析方法
グラウト注入前	2.10	7.00	4.90	7.4E-10	1.4E-04	Cooper-Jacob
				1.3E-09	4.3E-05	Agarwal
グラウト注入後	2.10	7.00	4.90	5.3E-10	1.5E-04	Cooper-Jacob
				8.1E-10	2.9E-05	Agarwal

図 3.3-20　令和 3 年度に実施した透水試験結果の例
（原子力機構・原環センター, 2022）

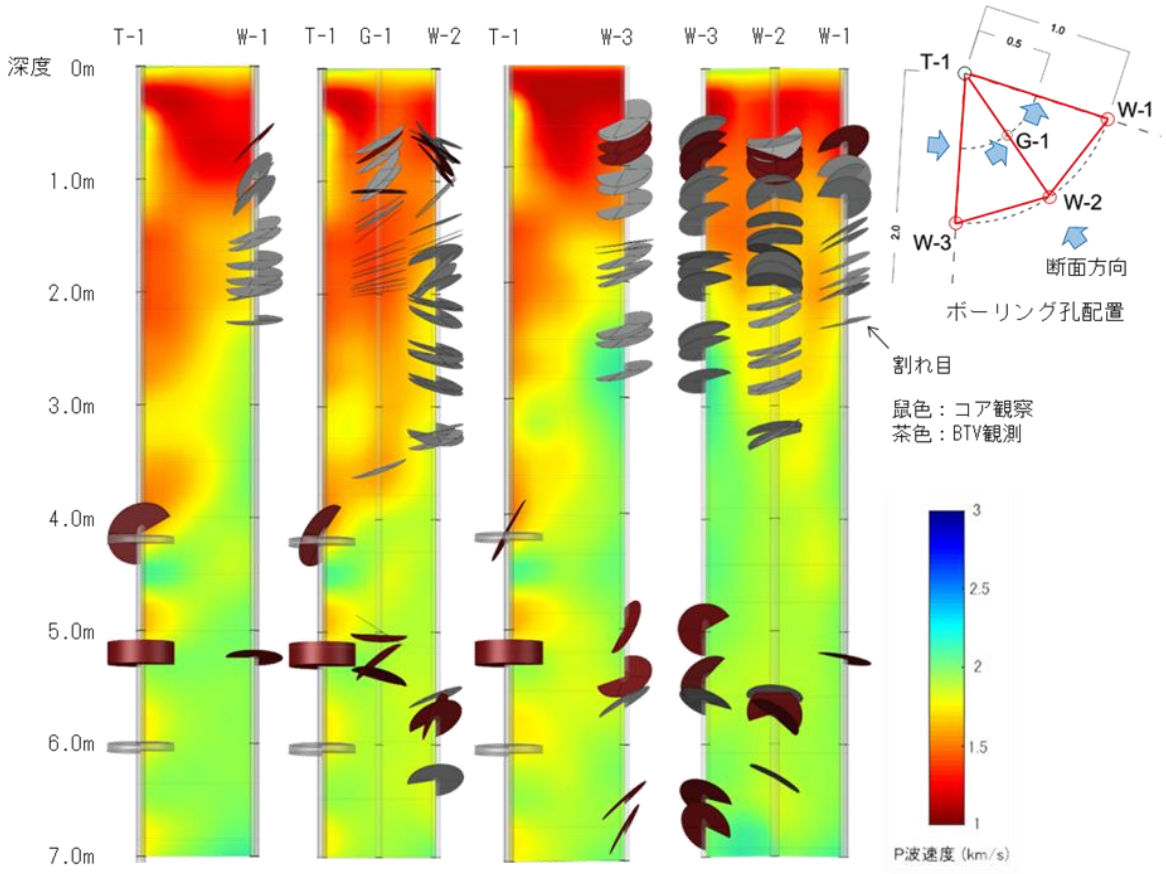


図 3.3-21　BTV で得られた割れ目の分布と P 波速度分布の対比
（原子力機構・原環センター, 2022）

3.3.2 掘削損傷領域の経時変化に関する調査

(1) 実施概要

物理探査を用いた掘削損傷領域の経時変化に関して、その間における物性値の変化は掘削損傷領域の発生時における変化と比較して小さくなることが予測される。従って、掘削損傷領域の経時変化を物理探査により評価する際には、原位置における調査手法とともにデータの解析技術に関しても既存の手法を高度化する必要がある。そこで 3.3.2 では、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィを対象に解析手法の高度化を行った。これらの探査手法は、調査機器、解析技術等がすでに確立されており、浅層を調査する物理探査手法として一般的な技術である。従って、これまでに国内外において掘削損傷領域の調査を目的として数多く適用されているとともに、今後においてもその簡易さから掘削損傷領域の調査に適用されると考えられるため、これら手法の解析技術の高度化は掘削損傷領域の調査技術の向上に直接的に貢献できる。

弾性波トモグラフィや比抵抗トモグラフィは、掘削損傷領域の調査に際し数多く適用されてきているものの、坑道内部といった特殊な環境条件下での適用を考慮した場合には、特有の問題が生じる。例えば、坑道壁面周辺では坑道の安定性といった安全上の理由から吹付コンクリートや鋼製支保が使用されている場合が多いが、これら人工物は自然に存在する岩石と大きく物性値が異なることから、物理探査調査における障害となりうる。具体的には、坑道壁面に施工された吹付コンクリートが弾性波トモグラフィにおいて障害となることが確認されている。また、比抵抗トモグラフィにおいても坑道そのものが電位を歪めるため、坑道の形状を考慮した解析手法が必

要である（原子力機構・原環センター, 2020）。これらの問題点は、通常の地表面からの調査では問題とならない場合が多く、その影響の評価や除去技術の開発はこれまであまり取り組まれていない。そこで、解析技術の高度化に先立ちこれらの問題点の解決に取り組んだ。

解析技術の高度化では、第一に経時変化の評価のためのタイムラプス解析の開発を行った。同一場所において繰り返し物理探査が実施されている場合には、タイムラプス解析により得られたデータを同時に解析することにより、物性値の時系列変化のより精確な評価を期待できる。開発したタイムラプス解析手法を幌延深地層研究センターで取得した弾性波トモグラフィのデータに適用することで掘削損傷領域における経時変化の評価を行った。また、同一領域の調査を対象として異なる物理探査が適用されている場合には、それらのデータを組み合わせて解析するジョイント・インバージョンの適用が可能となる。ジョイント・インバージョンでは、解析に用いるデータ数が増加することによる推定結果の信頼性の向上、異なる解像度を有する手法を組み合わせることによる解像度の向上、複数の物性値を同時に評価することによる解析結果の解釈の向上に寄与することが期待できる。そこで、今年度は 2021 年度に取得した岩石の電気伝導度と弾性波速度の関係を用いて弾性波トモグラフィと比抵抗トモグラフィのジョイント・インバージョンを開発し、掘削損傷領域を定量的に評価する手法を提案した（原子力機構・原環センター, 2021）。

(2) 弾性波（P 波）トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィの理論および解析手法

ここでは、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィの理論的な背景および本研究で適用した解析手法に関して述べる。各々の手法に関して、解析対象となる初動の到達時間および電位の計算方法を述べた後、逆解析で必要とされる感度の計算方法に関して述べる。その後、本研究で適用した逆解析手法に関する基礎的な背景を述べ、吹付コンクリートの影響の除去方法、タイムラプス解析、同時逆解析手法に関して述べる。なお、逆解析の手法に関しては、弾性波および比抵抗トモグラフィにおいて共通である。また、本研究では弾性波トモグラフィに関しては P 波速度のみを解析対象としている。

(a) 弾性波トモグラフィ

(i) 順計算の計算手法

弾性波トモグラフィの解析では、弾性波の波線を計算した後に波線に沿う経路を伝わる弾性波の到達時間を解析する手法（例えば、White, 1989）と、アイコナル方程式に基づく手法がある（例えば、Li and Fomel, 2013）。本研究では、アイコナル方程式に基づく手法を適用した。

ある弾性波速度を有する媒体の中を伝播する弾性波速度の到達時間は、式 3.3-3 のアイコナル方程式で記載される。

$$(\nabla T)^2 = \frac{1}{V_p^2} \qquad \text{式 3.3-3}$$

T：伝播時間（sec）

V_p：弾性波速度(P 波速度) (m/sec)

式 3.3-3 は、有限差分法（Podvin and Lecomte, 1991）や不連続ガラーキン法（例えば、Bouteiller et al., 2018）を用いて解くことができるが、本研究では、計算の効率性から有限差分法を用いて解いた。式 3.3-3 を有限差分法で解く場合には、セル毎にセル内の伝達時間を計算した後にそれを全体の領域で最小化する手法を採用している。セル内の伝達時間の計算は、Podvin and Lecomte (1991)に従い計算し、全体の領域における最小化は、fast sweeping method（Detrixhe

et al., 2013; Qian et al., 2007; Zhang et al., 2005; Zhao, 2005）を採用した。

(ii) 随伴方程式法による感度分布の計算

逆解析を行うためには、観測値を推定する物性値で微分した値である感度を計算する必要がある。感度の計算に際し、本研究では効率的に計算可能な随伴方程式法を用いた。なお、弾性波トモグラフィの感度解析計算のための随伴方程式は、Leung and Qian(2006)や Taillandier et al., (2009)を参考に導出した。導出を下記に示す。

弾性波トモグラフィ調査において、送受信間においてある到達時間を観測した場合、計算等により推定される到達時間と観測される到達時間との誤差は、下記の式で記載できる。

$$E = \frac{1}{2}\int (T - T_{obs})^2 \sum_i \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x_i}) dV \qquad \text{式 3.3-4}$$

E：予測誤差（sec²）
T：予測伝播時間（sec）
T_{obs}：観測伝播時間（sec）
$\boldsymbol{x_i}$：観測点の場所
δ：デルタ関数

ここで、式 3.3-4 を最小化することにより観測により得られたデータから弾性波速度を推定することができる。予測伝播時間は式 3.3 3 で記載されるため、式 3.3-3 を満たしながら式 3.3-4 を最小化する必要がある。そこで、ラグランジュの未定乗数λを適用して導出される式 3.3-5 を最小化することを考える。

$$L(T, V_p, \lambda) = E - \frac{1}{2}\int \lambda \left((\nabla T)^2 - \frac{1}{V_p^2} \right) dV \qquad \text{式 3.3-5}$$

式 3.3-5 をT, V_p ,λで微分し、その値を 0 とすることで、式 3.3-3 を満たしながら式 3.3-4 を最小化できる。式 3.3-5 をλで微分しその値を 0 とすると式 3.3 3 と同値となるため、この場合は順計算を実施することと同値になる。

式 3.3-5 をTで微分しその値を 0 とした場合、式 3.3-6 が導出され、仮定したV_pと式 3.3-3 で計算されたTよりλを求めることができる。

$$\frac{\partial}{\partial T} L(T, c, \lambda) = \frac{\partial E}{\partial T} - \int \lambda(\nabla T) \cdot \frac{\partial}{\partial T}(\nabla T) dV = \frac{\partial E}{\partial T} - \int \lambda(\nabla T) \cdot \left(\nabla \frac{\partial T}{\partial T} \right) dV = 0 \qquad \text{式 3.3-6}$$

式 3.3-6 の第一項は式 3.3-7 となり、第二項に関して積の微分公式から得られる式 3.3-8 を代入することで、式 3.3-6 は式 3.3-9 に変形できる。

$$\frac{\partial E}{\partial T} = \int (T - T_{obs}) \sum_i \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x_i}) dV \qquad \text{式 3.3-7}$$

$$\nabla \left(\lambda \nabla T \frac{\partial T}{\partial T} \right) = \nabla(\lambda \nabla T) \frac{\partial T}{\partial T} + \lambda \nabla T \cdot \nabla \frac{\partial T}{\partial T} \qquad \text{式 3.3-8}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial T}L(T,c,\lambda) &= \int (T-T_{obs})\sum_i \delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x_i})V \\ &+ \int \nabla(\lambda\nabla T)\frac{\partial T}{\partial T}dV - \int \nabla\left(\lambda\nabla T\frac{\partial T}{\partial T}\right)dV \\ &= \int (T-T_{obs})\sum_i \delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x_i})V \\ &+ \int \nabla(\lambda\nabla T)dV - \int (\lambda\nabla T)\cdot\boldsymbol{n}\,dS\end{aligned} \qquad \text{式 3.3-9}$$

ここで、式 3.3-9 の最後の変形には、ガウスの定理を適用している。λの境界上条件を 0 とすることで、式 3.3-6 は、

$$\int (T-T_{obs})\sum_i \delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x_i}) + \nabla(\lambda\nabla T)dV = 0 \qquad \text{式 3.3-10}$$

となり、式 3.3-3 の解Tからλを求められる。

最後に、式 3.3-5 をV_pで微分すると、

$$\frac{\partial}{\partial V_p}L(T,V_p,\lambda) = \frac{\partial E}{\partial V_p} + \int \frac{\lambda}{V_p^3}dV \Leftrightarrow \sum_i \frac{\partial T_i}{\partial V_p}(T-T_{obs}) = -\int \frac{\lambda}{V_p^3}dV \qquad \text{式 3.3-11}$$

T_i：観測点 i 番目における予測伝播時間（sec）

ここで、$\partial T_i/\partial V_p$が弾性波速度の感度に相当するものとなる。式 3.3-11 において、$T-T_{obs}=1$とすることにより、感度のみ抽出することが可能であるが、これはλの導出に用いる式 3.3-10 において、$T-T_{obs}=1$とすればよい。これは、感度を求めたい観測点においてデルタ関数をソースとする拡散方程式を解くことに相当する。本研究では、式 3.3-10 の求解においても、fast sweeping method 法を適用している。随伴方程式法を用いることにより、逆解析におけるモデル修正 1 回あたりに必要な順計算の回数は、実際の観測における発振回数分であるN_s回分の式 3.3 3 の求解と、発振毎に受信器の個数であるN_r回の式 3.3-10 の求解の、計$N_s \times N_r$回である。

(b) 比抵抗トモグラフィ

(i) 順計算の解析手法

電気探査の基礎方程式は、式 3.3-12 に示すポアソン方程式により記載することができる。

$$\nabla(\sigma\nabla\varphi) = -I\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x_i}) \qquad \text{式 3.3-12}$$

σ：電気伝導度（S/m）

φ：電位（V）

I：電流（A）

$\boldsymbol{x_i}$：ソースの場所

式 3.3-12 は、有限要素法や有限差分法で解くことができるが、これらの手法を用いて精度よく解く場合には、ソース付近の電位の取り扱いおよび遠方における境界条件の取り扱いが重要となる。ソース付近の電位の取り扱いに関しては、Lowry et al., (1989)を参考に、境界条件の取り扱

いに関しては、Dey and Morrison (1979)を参考にモデル化を行った。

1) 境界条件の設定方法

境界条件に関して、無限媒質中における式 3.3-12 の解は、式 3.3-13 で記述できる。

$$\varphi_p = \frac{I}{4\pi\sigma r} \qquad \text{式 3.3-13}$$

r：電位からの距離（m）

ここで、遠方における電位の勾配は、

$$\nabla\varphi = -\frac{I}{4\pi\sigma r^2}\frac{\partial r}{\partial x_i} = -\frac{I}{4\pi\sigma r^3}(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r_s}) \qquad \text{式 3.3-14}$$

$\boldsymbol{r}$：ある地点を示すベクトル

$\boldsymbol{r_s}$：ソースの位置ベクトル

であり、解析領域から外向きの法線ベクトルを$\boldsymbol{n}$とすると、その位置における解析解の電位の勾配に関する条件式 3.3-15 が得られる。

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = \nabla\phi\cdot\boldsymbol{n} = -\frac{I}{4\pi\sigma r^3}(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r_s})\cdot\boldsymbol{n} = -\phi\frac{\cos\theta}{r} \Leftrightarrow \frac{\partial\varphi}{\partial n} + \varphi\frac{\cos\theta}{r} \qquad \text{式 3.3-15}$$

θ：$\boldsymbol{r}$と$\boldsymbol{r_s}$からなるベクトルと$\boldsymbol{n}$のなす角

数値解析において、式 3.3-15 を第三種境界条件として適用することにより、高精度な数値解を計算できる。

2) ソース点における特異点除去

ソース付近の電位の誤差に関しては、式 3.3-13 に示す通りソースの位置において電位が無限大になる一方で、数値解析では無限を取り扱うことができないことから生じる。この対策として、式 3.3-12 において、電流ソースから発生する一次電位φ_pと電気伝導度の不均質構造によって生じる二次電位φに分離して解析することで、高精度な数値解を求める。一次電位φ_pは、電気伝導度が一様な場合を仮定すると、式 3.3-13 により記述でき、φ_pは基礎方程式を満たすことから、式 3.3-16 が満たされる。

$$\nabla\left(\sigma_0\nabla\varphi_p\right) = -I\delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x_i}) \qquad \text{式 3.3-16}$$

σ_0：φ_pを計算するための一様な電気伝導度

なお、式 3.3-12 は、電気伝導度の不均質構造の有無に依存せず成立するが、式 3.3-16 は電気伝導度が一様にσ_0の場合のみに成立する。式 3.3-12 から式 3.3-16 を引くと式 3.3-17 を得ることができる。

$$\nabla(\sigma\nabla\varphi_s) = -\nabla\left(\sigma_a\nabla\varphi_p\right) \qquad \text{式 3.3-17}$$

φ_s：$\varphi = \varphi_s + \varphi_s$

σ_a：$\sigma_a = \sigma - \sigma_0$

ここで、式 3.3-17 を解く場合に、電流ソースの位置を計算ノード上からずらすことにより、無限大を取り扱う必要がなくなり計算上の精度を向上させることができる。

3) 2 次元問題の取り扱い

なお、式 3.3-12 は 3 次元空間における基礎方程式であるが、2 次元問題を取り扱う場合は、電気伝導度の構造が 2 次元である一方、電位分布の 3 次元的に減衰を考慮して解析する必要がある（例えば、Pan and Tang, 2014）。このような計算を行うためには、同じ電気伝導度の構造が連続した次元の方向に対して式 3.3-12 をフーリエ変換し、得られた方程式を数値的に解いた後にその解をフーリエ逆変換することで電位を計算する必要がある。式 3.3-12 に対して、構造が連続した軸方向に対してフーリエ変換を行った基礎方程式は式 3.3-18 となる。

$$\nabla\big(\sigma(x,z)\nabla\tilde{\varphi}(x,k,z)\big) - k^2\sigma(x,z)\tilde{\varphi}(x,k,z) = -\frac{1}{2}\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x_i}) \qquad \text{式 3.3-18}$$

k：空間周波数

なお、式 3.3-18 では、y 軸方向を同じ構造が連続している方向としている。式 3.3-18 においても高精度な数値解を得るためには、3 次元と同様に境界条件とソース付近の電位の取り扱いに注意する必要がある。式 3.3-18 で示される 2 次元問題において、3 次元問題において式 3.3-13 で示される一次電位は式 3.3-19 で示される。

$$\widetilde{\varphi_p}(x,k,z) = \frac{I}{4\pi\sigma}K_0(kr) \qquad \text{式 3.3-19}$$

K_0：第２種修正ベッセル関数

また、3 次元問題における境界条件である式 3.3-15 は式 3.3-20 となる。

$$\frac{\partial\tilde{\phi}}{\partial n} + k\frac{K_1(kr)}{K_0(kr)}cos\,\theta\,\tilde{\phi} = 0 \qquad \text{式 3.3-20}$$

得られた空間周波数領域における解から 3 次元空間における電位への変換は式 3.3-21 となる。

$$\varphi(x,0,z) = \sum_{i=1}^{N_k} w_k\tilde{\varphi}\,(x,k,z) \qquad \text{式 3.3-21}$$

N_k：考慮数空間周波数の数
w_k：フーリエ逆変換における重み

4) 波数の決定およびフーリエ逆変換に用いる係数の計算方法

式 3.3-21 における重み係数w_kおよび波数kは、Pan and Tang (2014)を参考に計算した。均質媒体中において式 3.3-21 の適用を考えると、左辺は式 3.3-13 で$y = 0$の場合の解析解として記載することができ、また左辺における空間周波数における電位の解は、式 3.3-19 で記載され、式 3.3-22 となる。

$$\frac{I}{4\pi\sigma_0 r(y=0)} = \sum \frac{I}{4\pi\sigma_0} w_k K_0(kr) \qquad \text{式 3.3-22}$$

従って、電極間隔等を考慮しつつ複数のr_iを設定し、式 3.3-22 を式 3.3-23 に示す最適化問題として解くことにより最適な重み係数w_kおよび波数kを求めることできる。

$$\min_{w_j,k_j} \sum_i^M \left(\frac{1}{r_i} - \sum_{j=1}^N w_j K_0(k_j r_i) \right)^2 \qquad \text{式 3.3-23}$$

なお、式 3.3-23 の最適化は differential evolution 法を用いた。

5) 空洞を含む領域での境界条件の設定方法

坑道内部で電気探査を実施する場合、坑道の形状や空洞の存在を考慮した計算が必要になる。本研究では、Penz et al., (2013)を参考に、坑道壁面における境界条件を適切に設定することにより、坑道の形状を考慮した計算を行った。岩盤に対して空気は比抵抗が高いため、坑道や空洞の表面における電位分布は境界面に鉛直となる。したがって、坑道壁面や岩盤と空洞の境界における境界条件は、式 3.3-24 となる。

$$\nabla\varphi \cdot \boldsymbol{n} = \nabla\varphi_p \cdot \boldsymbol{n} + \nabla\varphi_s \cdot \boldsymbol{n} = 0 \Leftrightarrow \nabla\varphi_s \cdot \boldsymbol{n} = -\nabla\varphi_p \cdot \boldsymbol{n} \qquad \text{式 3.3-24}$$

従って、坑道や空洞を考慮した電位を求めるためには、2 次電位を解く際の坑道や空洞における境界条件を一次電位から計算することになる。

(ii) 感度分布の計算方法

電気探査の逆解析において必要な感度分布に関しても、弾性波トモグラフィの場合と同様に、随伴方程式法を用いて計算した。なお、ここでは、有限要素法や有限差分法を用いて電位分布を解く場合の、連立方程式から随伴方程式を導出する。有限要素法や有限差分法を用いて式 3.3-12 や式 3.3-18 を解く場合、式 3.3-25 を解くことで数値解を得ることができる。

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{\sigma})\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b} \qquad \text{式 3.3-25}$$

$\boldsymbol{A}$：有限要素法や有限差分法により得られる行列
$\boldsymbol{\sigma}$：各要素の電気伝導度からなるベクトル
$\boldsymbol{x}$：計算ノードにおける電位の値からなるベクトル
$\boldsymbol{b}$：ソース項ベクトル

ここで、式 3.3-25 をある計算要素の電気伝導度σで微分すると、式 3.3-26 となる。

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial \sigma_k}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{A}\frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial \sigma_k} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial \sigma_k} = -A^{-1}\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial \sigma_k}\boldsymbol{x} \qquad \text{式 3.3-26}$$

ここで、$\boldsymbol{x}$ をσで微分した値が感度分布となる。行列$\boldsymbol{A}$は自己随伴性から対称行列となっており、行列$\boldsymbol{A^{-1}}$のある行における成分は、式 3.3-25 の右辺のベクトルを該当する行の要素のみを 1 とし

そのほかの値を 0 として解いた場合の式 3.3-27 における解と等しくなる。

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{\sigma})\boldsymbol{\lambda_i} = \boldsymbol{e_i} \qquad \text{式 3.3-27}$$

式 3.3-26 および式 3.3-27 より、ある計算ノードにおける感度分布は、式 3.3-28 となる。

$$\frac{\partial x_i}{\partial \sigma_k} = -\boldsymbol{\lambda}_i^T \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial \sigma_k}\boldsymbol{x} \qquad \text{式 3.3-28}$$

従って、ある電位分布が得られている場合に、観測点ノードにおける感度分布を計算する場合は、観測点の数だけ式 3.3-27 を解けばよく、逆解析のモデル修正 1 回あたりに必要な順計算の計算回数は、弾性波トモグラフィの場合と同様に、実際の観測における送信回数分であるN_s回の各々に対して受信器の個数であるN_r回の、計$N_s \times N_r$回である。

(c) 逆解析手法

(i) スムースネス制約を用いた逆解析

本研究では、決定論的な手法を用いて逆解析を行う。逆解析は、式 3.3-29 に示す目的関数を最小化することで弾性波速度構造および比抵抗構造を可視化できる（例えば、Aldridge and Oldenburg, 1993）。

$$\Phi = \Phi_d + \Phi_m \qquad \text{式 3.3-29}$$

ここで、式 3.3-29 の右辺第一項および二項は、式 3.3-30 および式 3.3-31 である。

$$\Phi_d = \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{F_i(\boldsymbol{m}) - d_i}{\sigma_i}\right)^2 \qquad \text{式 3.3-30}$$

F_i：順計算における演算子
$\boldsymbol{m}$：モデルパラメータベクトル
d_i：観測番号i番目のデータ
σ_i：観測番号i番目のデータの分散

$$\Phi_m = \alpha_s \left\| \boldsymbol{W_s}\left(\boldsymbol{m} - \boldsymbol{m_{ref}}\right)\right\|^2 + \alpha_m \|\boldsymbol{W_m}\boldsymbol{m}\|^2 \qquad \text{式 3.3-31}$$

$\boldsymbol{m_{ref}}$：モデルパラメータの参照値ベクトル
$\boldsymbol{W_s}$：重みパラメータ行列
$\boldsymbol{W_m}$：スムースネス制約行列
α_s：モデルの参照制約に対するトレードオフパラメータ
α_m：スムースネス制約に対するトレードオフパラメータ

ここで、式 3.3-31 第一項は、推定するモデルパラメータを参照値に固定するための項であり、$\boldsymbol{W_s}$は、モデルパラメータをある値に固定する場合には 1 を、そうでない場合は 0 を対角成分に有する行列である。また、第二項は、隣り合う要素の値の差の二乗和を計算する項であり、$\boldsymbol{W_m}$の行

列の要素は式 3.3-32 により計算される。

$$\left\|\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{m},i0}\boldsymbol{m}\right\|_{i0}^{2}=\sum_{i\in\{i1,i2,i3,i4\}}(m_i-m_{i0})^2 \qquad \text{式 3.3-32}$$

ここでm_{i0}およびm_{i1}からm_{i5}は、$i0$番セルにおける物性値および$i0$番セルを中心として隣接するセルの物性値である。

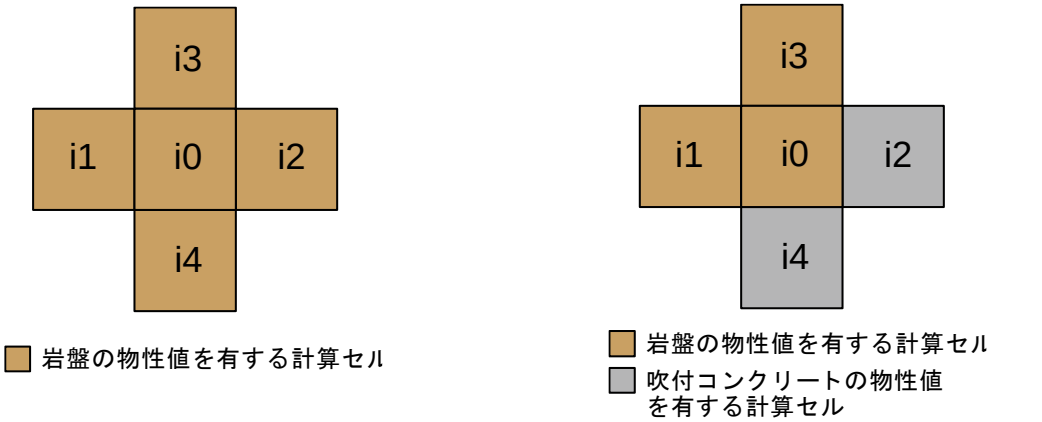
式 3.3-29 をモデルパラメータベクトル$\boldsymbol{m}$で最小化して得られる連立方程式 3.3-33 を解くことでモデル修正量を計算し、式 3.3-30 で計算される残差が十分に小さくなるまでモデル修正を繰り返した。

$$\left(\frac{J^TJ}{\sigma^2}+\alpha_mW_m^TW_m+\alpha_sW_s^TW_s\right)m_{n+1}=\left(\frac{J^T}{\sigma^2}(F(m_n)-d)+\alpha_sW_s^TW_sm_{ref}\right) \qquad \text{式 3.3-33}$$

(ii) 事前情報を付与した逆解析による人工物影響の除去

坑道周辺において、比抵抗トモグラフィや弾性波トモグラフィ調査を実施した場合、調査結果が吹付コンクリートや鋼製支保といった人工物の影響を受ける可能性が考えられる。こうした構造は、施工の設計等から事前にその構造を把握することができ、その情報を逆解析に与えることでこれらの影響を解析結果から除去することが可能であると考えられる。そこで、本研究では、式 3.3-32 に示すスムースネス制約を変形することで吹付コンクリートの構造に関する情報を逆解析に付与する方法を導入する。図 3.3-22 は、あるセル$i0$におけるスムースネス制約を設定するために考慮する周辺のセルを示す。図 3.3-22 (a)のように、ある岩盤の計算セルに対して周辺のセルの全てが岩盤に該当するセルの場合、スムースネス制約の行列は周辺のすべてのセルを考慮した式 3.3-32 から計算される。一方で、図 3.3-22 (b)のように、吹付コンクリートの境界に位置するセルにおけるスムースネス制約は、式 3.3-34 に示す通り岩盤のセルのみを考慮することで設定し、岩盤における物性値と吹付コンクリートにおける物性値に関して不連続性を許容した。

$$\left\|\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{m},i0}\boldsymbol{m}\right\|_{i0}^{2}=\sum_{i\in\{i1,i3\}}(m_i-m_{i0})^2 \qquad \text{式 3.3-34}$$



(a) 岩盤内部　　(b) 岩盤と吹付コンクリートの境界部

図 3.3-22　スムースネス制約の設定

(iii) タイムラプス解析による時系列データの解析

同一場所において繰り返し調査を実施している場合、逆解析において、その場所における物性値の時間的な連続性を考慮するタイムラプス解析を適用することが可能である。タイムラプス解析は、特に、調査時間内に地下の物性値が変化する場合において有効な解析手法とされているが、物性値の変化に必要な時間が調査時間と比較して短い場合においても、物性値の差分等を比較する場合においては、各調査結果を単独に解析する場合と比較して解析による偽像が低減されることが報告されている（Kim et al., 2009）。そこで、本研究では、同一場所で測定されたデータの解析に際し、タイムラプス解析を適用する。

タイムラプス解析では、測定毎に計算される式 3.3-29 を全て足し合わせ、さらに前後する測定時間のモデルパラメータに制約を与える式 3.3-35 を加えた式 3.3-36 を目的関数とする。

$$\Phi_t = \alpha_t \sum_{i=0}^{n-1} (\boldsymbol{m}_{i+1} - \boldsymbol{m}_i)^2 \qquad \text{式 3.3-35}$$

$\boldsymbol{m_i}$：i回目の観測から測定されるモデルパラメータベクトル
α_t：タイムラプス解析に対するトレードオフパラメータ

$$\Phi_t = \sum_{i=0}^{N} \alpha_i \Phi_i + \Phi_t \qquad \text{式 3.3-36}$$

$\boldsymbol{\Phi_i}$：第i回目の調査に対する目的関数
α_i：第i回目の目的関数に対するトレードオフパラメータ

目的関数を全てのモデルパラメータで最小化することで得られる、モデルパラメータを求めるための連立方程式は式 3.3-37 となる。

$$\begin{pmatrix} \frac{J_0^T J_0}{\sigma_0^2} + \alpha_m W_m^T W_m + \alpha_s W_s^T W_s - \alpha_0 & \alpha_0 & 0 \\ -\alpha_0 & \frac{J_1^T J_1}{\sigma_1^2} + \alpha_m W_m^T W_m + \alpha_s W_s^T W_s + \alpha_1 - \alpha_2 & \alpha_2 \\ 0 & -\alpha_1 & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{0,n} \\ m_{1,n} \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{J_0^T}{\sigma_0^2}\left(F(m_{0,n}) - d_0\right) + \alpha_s W_s^T W_s m_{ref} \\ \frac{J_1^T}{\sigma_1^2}\left(F(m_{1,n}) - d_1\right) + \alpha_s W_s^T W_s m_{ref} \\ \vdots \end{pmatrix} \qquad \text{式 3.3-37}$$

下付き文字 iは、観測回数 i回目における各パラメータ

本研究では、式 3.3-37 をブロックガウス・ザイデル法（Heidtmann, 1981）で解いた。

(iv) ジョイント・インバージョンよる弾性波トモグラフィと比抵抗トモグラフィの統合

同じ領域を対象として異なる種類の物理探査手法が実施された場合、異なる物理探査結果を統合的に解析するジョイント・インバージョンを適用することができる。ジョイント・インバージョンでは、例えば異なる感度分布を有する手法を結びつけることによる解像度の向上や推定結果の信頼性の向上が期待できる。

ジョイント・インバージョンにおいて、異なる調査手法を結びつける方法として、個別の手法から推定されるモデルパラメータの構造の形状に類似性を持たせる、cross gradient 法があげられる（例えば、Gallardo and Meju, 2003）。また、物理探査で推定される比抵抗や弾性波速度といった物性値をさらに分解し、間隙率や飽和度といった個別の物理探査手法から推定される物性値に共通する物性値で逆解析を行う petrophysical joint inversion や、室内試験等により取得される物性値間の関連性である correspondence map を逆解析に導入する方法がある。本研究では、多項式近似した correspondence map によるジョイント・インバージョンを開発した（例えば、Carrillo and Gallardo, 2018）。Correspondence map による物性値の関連性を考慮したジョイント・インバージョンの目的関数は、個別の手法から計算される目的関数である式 3.3-29 を足し合わせ、さらに物性値間の関連式の誤差を加えた式 3.3-38 となる。

$$\Phi_{joint} = \gamma_1 \Phi_d + \gamma_2 \Phi_m + \tau g(\boldsymbol{m_{vel}}, \boldsymbol{m_{res}}) \qquad \text{式 3.3-38}$$

γ_1：弾性波トモグラフィの重要度を決めるトレードオフパラメータ
γ_2：比抵抗トモグラフィの重要度を決めるトレードオフパラメータ
$\boldsymbol{\Phi_d}$：弾性波トモグラフィの目的関数
$\boldsymbol{\Phi_m}$：比抵抗トモグラフィの目的関数
τ：correspondence map に関するトレードオフパラメータ
g ：correspondence map
$\boldsymbol{m_{vel}}$：各計算要素の弾性波速度からなるベクトル
$\boldsymbol{m_{res}}$：各計算要素の電気伝導度からなるベクトル

ここで、g は本研究では、弾性波速度と比抵抗を結びつける correspondence map であり、式 3.3-39 で記載される。

$$g(\boldsymbol{m_{vel}}, \boldsymbol{m_{res}}) = \left(\sum_{i=0}^{q} \sum_{j=0}^{p} a_{ij} \boldsymbol{m_{vel}^i} \boldsymbol{m_{res}^j} \right)^2 \qquad \text{式 3.3-39}$$

a_{ij}は、室内試験等により求めることができる。なお、a_{ij}を逆解析により求める場合、a_{ij}の全てが 0 となる場合の解を防ぐため、a_{ij}をa_{00}で割って得られる式 3.3-40 を用いる。

$$g(\boldsymbol{m_{vel}}, \boldsymbol{m_{res}}) = \left(-1 - \sum_{i=1}^{q} \sum_{j=1}^{p} a_{ij} \boldsymbol{m_{vel}^i} \boldsymbol{m_{res}^j} \right)^2 \qquad \text{式 3.3-40}$$

式 3.3-38 をモデルパラメータで微分して得られる、モデルパラメータを求めるための連立方程式は式 3.3-41 となる。

$$\begin{pmatrix} \frac{J_{vel}^T J_{vel}}{\sigma_{vel}^2} + C_{vel}^T C_{vel} + \tau J_{g,vel}^T J_{g,vel} & \tau J_{g,vel}^T J_{g,res} \\ \tau J_{g,res}^T J_{g,vel} & \frac{J_{res}^T J_{res}}{\sigma_{res}^2} + C_{res}^T C_{res} + \alpha_s W_s^T + \tau J_{g,vel}^T J_{g,vel_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{vel,n} \\ m_{res,n} \end{pmatrix}$$

式 3.3-41

$$= \begin{pmatrix} \frac{J_{vel}^T}{\sigma_{vel}^2}\left(F_{vel}(m_{vel,n}) - d_{vel}\right) + \alpha_s W_s^T W_s m_{vel,ref} + \tau J_{g,vel}^T g(m_{vel,n}, m_{res,n}) \\ \frac{J^T}{\sigma_{res}^2}\left(F_{res}(m_{res,n}) - d_{res}\right) + \alpha_s W_s^T W_s m_{res,ref} + \tau J_{g,res}^T g(m_{vel,n}, m_{res,n}) \end{pmatrix}$$

下付き文字の vel は弾性波、res は電気伝導度に関するパラメータ

ここで、

$$C_i^T C_i = \alpha_{m,i} W_{m,i}^T W_{m,i} + \alpha_{s,i} W_{s,i}^T W_{s,i}$$ 式 3.3-42

$$J_{g,vel} = \frac{\partial g}{\partial m_{vel}}$$ 式 3.3-43

$$J_{g,res} = \frac{\partial g}{\partial m_{res}}$$ 式 3.3-44

とする。

(3) 数値テストおよび実データ解析

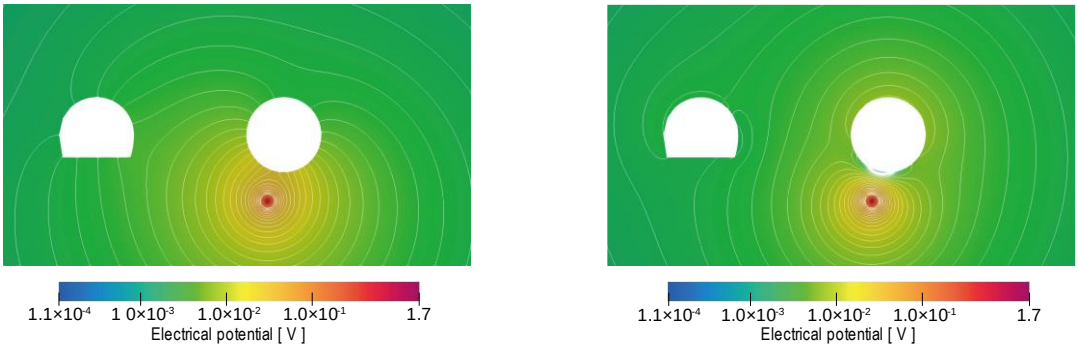
(a) 坑道の存在を考慮した電位の順計算による高精度化

逆解析において、地下構造を適切に推定するためには精度の高い順計算が必要となる。比抵抗トモグラフィでは、(2)(b)(i)に示す通り、ソース付近における特異点や坑道と岩盤の境界条件の適切な取り扱いが必要となる。本研究では、坑道内部における坑道周辺の岩盤の調査を対象としており、坑道や空洞の存在や形状を考慮した解析が必要となる。一方で、一般的な地表面からの比抵抗調査等では、地下に存在する坑道や空洞の形状を考慮する必要性が高くない場合が多いため、坑道や空洞が電位分布に与える影響はこれまであまり検討されていない。そこで、(2)(b)(i)5)に示す順計算において坑道の形状を考慮した場合と、坑道の形状を考慮していない場合の電位分布に関して比較を行い、比抵抗トモグラフィの逆解析における順計算において坑道の形状を考慮する必要性を示す。

図 3.3-22 は、2 次電位の計算における坑道壁面での境界条件を(2)(b)(i)5)に示す方法により設定し坑道の形状を考慮した場合の計算結果と、2 次電位の坑道壁面における境界条件にノイマン境界条件を設定した場合の計算結果である。なお、後者の境界条件であるノイマン境界条件は、地上からの比抵抗探査における電位分布の計算において水平な地表面における境界条件として設定される方法であり、従って後者の坑道壁面における境界条件の設定方法は、坑道内部の空気の存在による高比抵抗領域の存在は考慮しているものの、坑道の形状を無視した解析であると捉えることができる。解析は、簡単のため 1 S/m 一様の構造を仮定し、計算領域の 1 点に、1 A の正の電流源を配置した場合の結果である。坑道の形状として、後の図 3.3-27 を参考に、幌延深地層研究センターの深度 350m に位置する試験坑道 2 および試験坑道 3 をモデル化しており、試験坑道 4 に関しては埋め戻されているためモデル化していない。

図 3.3-23 (a)では、坑道壁面において境界面に対して等電位線が鉛直となっており、電位が適切に計算されている。他方、(b)では坑道境界面に対して等電位線が鉛直となっていない。また、坑道の形状を考慮しない(b)において、図中右側に位置する円形坑道上部付近では坑道の形状を考慮した場合と比較して高い電位の値となっているものの、円形の坑道周辺の下部においては負の

値となっており、坑道周辺において電位分布が正確に計算されていない。坑道の周辺の電位分布を精度よく計算し信頼性の高い逆解析結果を取得するためには、坑道の形状を考慮した(2)(b)(i)5)に示す方法の導入が必要である。



(a) 坑道の存在を考慮した場合　　(b) 坑道の存在を考慮しない場合

図 3.3-23　坑道の形状を考慮した電位分布の計算例

(b) 吹付コンクリートの構造を付与した逆解析による偽像の低減

坑道内部において物理探査を実施する場合、対象とする調査領域内に坑道壁面に設置された鋼製支保や吹付コンクリートが存在する場合が想定される。こうした人工物は、セメント材料においては場合には高い剛性を、金属材料においては低比抵抗を有しているため、弾性波や電流の選択的な伝播経路になりうるため、物理探査において障害となりうる。実際に既往の研究（青柳ほか，2014）では、調査においてこれら人工物の影響を低減されるため、孔壁から吹付コンクリートを取り除く対応をしている。

このような人工物は、設計図面等からその構造や物性値を把握することができる。そこで、これらの情報を事前に逆解析に入力することで、解析的に探査結果からその影響を除去することが期待できる。そこで、(2)(c)(ii)に示す方法により、逆解析において解析的に人工物の影響を除去する方法を開発した。

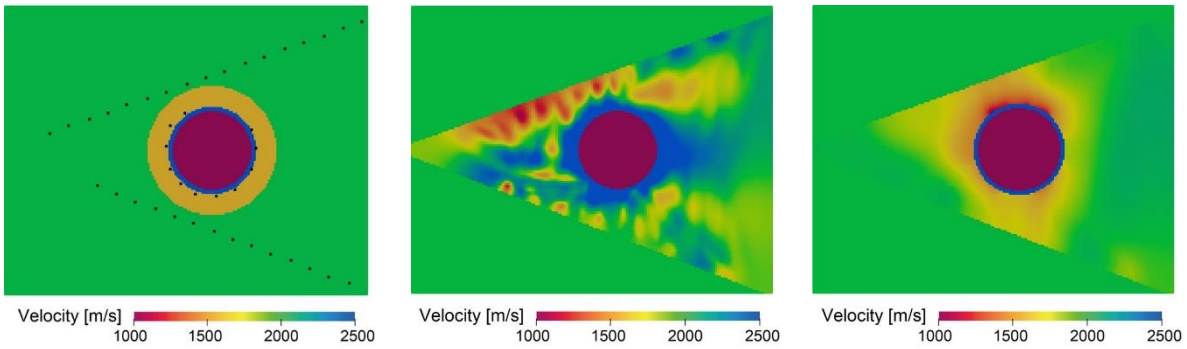
(i) 数値モデルを用いた弾性波トモグラフィ逆解析テスト

坑道周辺の物理探査による調査において、支保を構成する吹付コンクリートは剛性が高くその弾性波速度は、5 km/sec 程度である（原環センター，原子力機構, 2021）。この値は、例えば堆積軟岩等と比較すると大きな値であり、弾性波トモグラフィ調査において解析結果に大きく影響するものと予測される。そこで、(2)(c)(ii)に示す手法を適用した場合と適用した場合の逆解析結果を比較することにより、解析的に人工物の影響を低減できることを示す。

実データの解析に先立ち、数値テストによる性能評価を行った。図 3.3-24 はその結果で、(a)は数値テストに使用したモデルである。このモデルを用いて送受信間の到達時間を計算し、その到達時間を入力データとして逆解析を行い、逆解析により得られた結果を比較することで開発した手法の評価を行った。健岩部の弾性波速度（P 波速度）は幌延深地層研究センターの深度 350m で採取された岩石の弾性波速度を参考に 2 km/sec とし、掘削損傷領域の弾性波速度は 1.6 km/sec としたモデルを作成した。なお、吹付コンクリートは 5 km/sec で厚さは 20 cm とした。受信点配置や坑道の寸法は、図 3.3-26 を参考に設定している。

図 3.3-24 (b)は、吹付コンクリートに関する情報を付与しない場合の逆解析結果で、(c)は吹付コンクリートに関する情報を付与した場合の結果である。吹付コンクリートの情報を付与しない

場合の結果では、坑道周辺に高速度領域が広く推定されている。坑道周辺の掘削損傷領域をモデル化した低速度領域は明確には推定できておらず、坑道の上方に位置する受信点付近において低速度領域が推定されている。一方で、吹付コンクリートの情報を付与した場合には、坑道周辺に低速度領域のみが推定され、(a)に示すモデルを(b)よりも再現できている。これらの結果より、弾性波トモグラフィのデータが吹付コンクリートの影響を受けていた場合にも、吹付コンクリートの情報を付与したスムースネス制約を用いて逆解析を行うことにより、掘削損傷領域を評価できることが示された。



(a) モデル　(b) 吹付コンクリートの影響を考慮しない場合の結果　(c) 吹付コンクリートの影響を考慮した場合の結果

図 3.3-24　数値モデルによる事前情報を付与することによる人工物による偽像の除去手法の評価

(ii) 実データへの適用

開発した、吹付コンクリートの構造を付与した逆解析手法を実データに適用し、その実用性の確認を行った。解析に用いたデータは、幌延深地層研究センターの深度 350m の試験坑道 2 の周辺で取得されたものである。図 3.3-25 に調査の場所と調査場所付近の坑道のレイアウトを示す。解析対象とするデータを取得した場所付近では、坑道が平行に 3 本掘削されており、中心に位置する試験坑道 3 から左右に位置する試験坑道 2 および試験坑道 4 に向かって調査用の複数のボーリング孔が掘削されている。それらのボーリング孔のうち、S2-1 および S2-2 孔を用いて試験坑道 2 を対象とした弾性波トモグラフィが、R2-1 および R2-2 孔を用いて比抵抗トモグラフィが実施されている。同様に、試験坑道 4 を対象に S4-1 および S4-2 孔を用いて弾性波トモグラフィが、R4-1 および R4-2 孔を用いて比抵抗トモグラフィが実施されている。これら、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィの調査のレイアウトを、図 3.3-26 および図 3.3-27 に示す。これら 3 本の坑道は、試験坑道 2 は円形坑道であり、試験坑道 3 および試験坑道 4 は馬蹄形坑道である。なお、試験坑道 4 に関しては、人工バリア性能確認試験のため S4-1、S4-2 孔および R4-1、R4-2 孔付近は埋め戻されている。

本研究では、試験坑道 4 を対象とした解析を実施した。なお、試験坑道 4 で取得されたデータは、2020 年度の簡易的な解析により、弾性波トモグラフィのデータは吹付コンクリートの影響を受けていることが確認されている。

図 3.3-28 に解析により得られた結果を示しており、(a)の結果は吹付コンクリートの情報を付与しない場合の結果で、(b)は付与した場合の結果である。吹付コンクリートの情報を付与しない場合は、坑道周辺には高速度領域のみ推定されている。また、送信点付近において、低速度領域が推定されており、その結果は数値テストの結果である図 3.3-28 (b)に類似している。一方で、吹

付コンクリートに関する情報を付与した場合、坑道の周辺に掘削損傷領域と考えられる低速度領域を推定することができた。

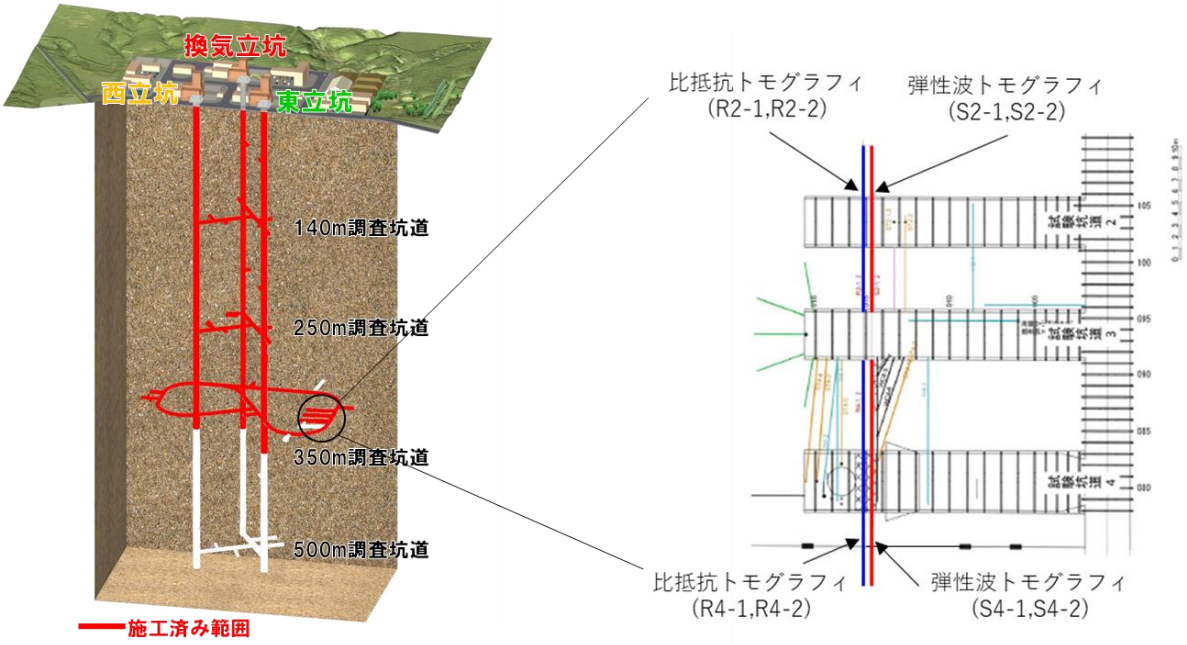
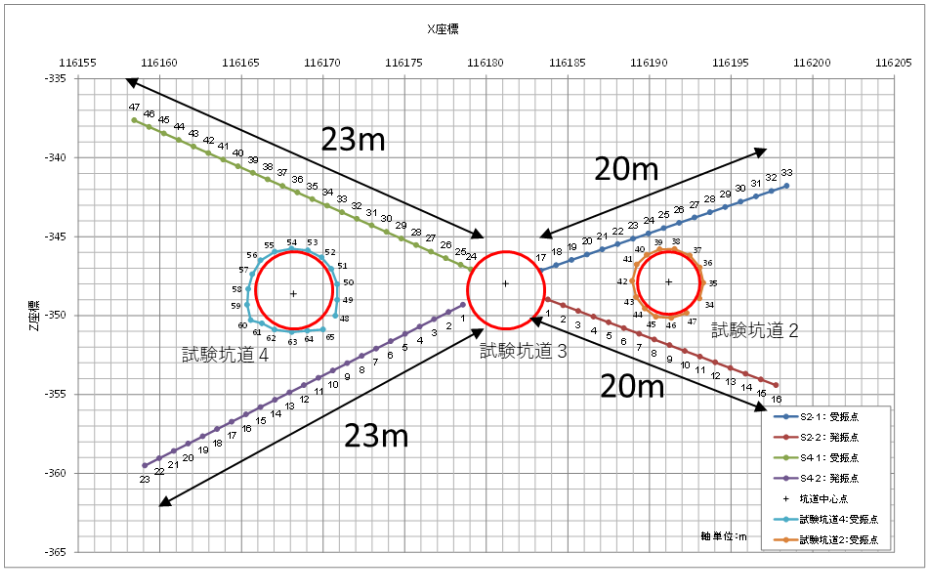
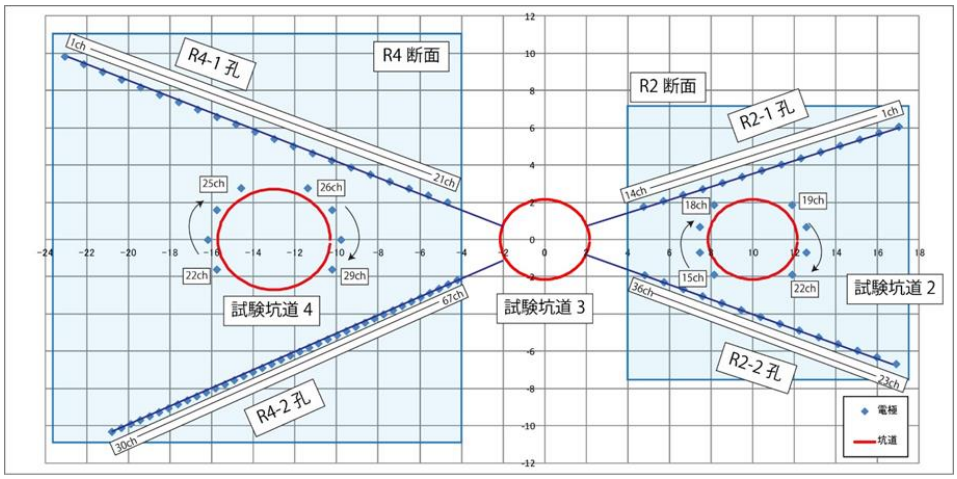


図 3.3-25　解析するデータを取得した場所と坑道のレイアウト



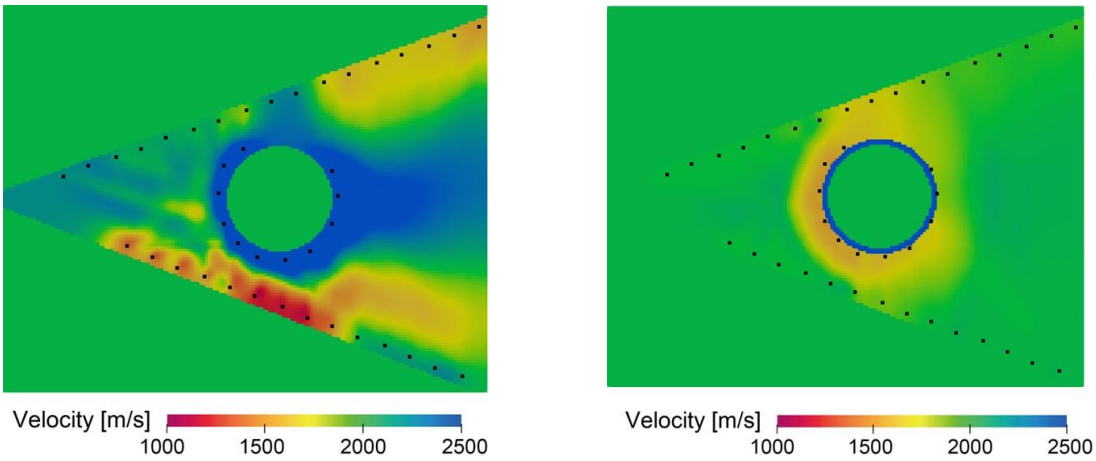
測定箇所	発信点	受信点
R2	16	31
R4	23	42

図 3.3-26　弾性波トモグラフィのレイアウト



測定箇所	電極数	測定データ数
R2	36	1260
R4	67	3700

図 3.3-27　比抵抗トモグラフィのレイアウト



(a) 坑道の存在を考慮した場合　　(b) 坑道の存在を考慮しない場合

図 3.3-28　試験坑道 2 の周辺で取得したデータの解析結果

(c) タイムラプス解析による経時変化の評価

幌延深地層研究センターの深度 350m では、図 3.3-25 に示す物理探査用のボーリング孔を用いて、同一測線において繰り返し探査が実施されている。そこで、経時変化を捉えるために、(2)(c)(iii)に示すタイムラプス解析手法を解析し、弾性波トモグラフィのデータに対して適用した。実データへの適用に先立ち、数値モデルを用いた解析テストを実施し、掘削損傷領域の経時変化が存在しそれに伴い弾性波速度が坑道壁面周辺で変化する場合に、逆解析によりどのように可視化できるのか検討を行った後に、実データへの適用を行った。

(i) 数値モデルを用いた弾性波トモグラフィ逆解析テスト

図 3.3-29 に、解析テストに使用した数値モデルを示す。数値テストでは、坑道掘削前と坑道掘削後の 5 ステップからなるモデルを用いた。坑道掘削前および坑道掘削後における健岩部の弾性波速度を図 3.3-24 の場合と同様に、2.0 km/sec とし、吹付コンクリートの弾性波速度を 5.0

km/sec とした。また、掘削損傷領域に関しては、損傷の度合が比較的小さい場合として、1.6 km/sec を、損傷が著しい場合として 1.2 km/sec を設定し、時間とともに掘削損傷領域が広がる場合を想定したモデルとした。なお、坑道掘削前においては坑道壁面に受信点を配置できないため、ボーリング孔内における送受信のみを想定し、掘削後のモデルに関しては坑道壁面の受信点も配置した場合の解析を行った。なお、送受信点の配置および坑道の寸法は、図 3.3-26 に基づき設定している。これらモデルから、各ステップにおける伝播時間を計算しそれらを入力データとしてタイムラプス解析を実施した。なお、タイムラプス解析における逆解析において、(2)(c)(iii)で開発した吹付コンクリートに関する構造を付与した解析を実施している。

図 3.3-30 に逆解析による結果を示す。図 3.3-30 では、図 3.3-29 でモデル化したステップに応じて低速度領域が広がる様子を再現することができた。この結果より、原位置において掘削損傷領域が経時変化しており、それに伴い弾性波速度が変化する場合には、タイムラプス解析を行うことにより十分に捉えることができることが確認された。

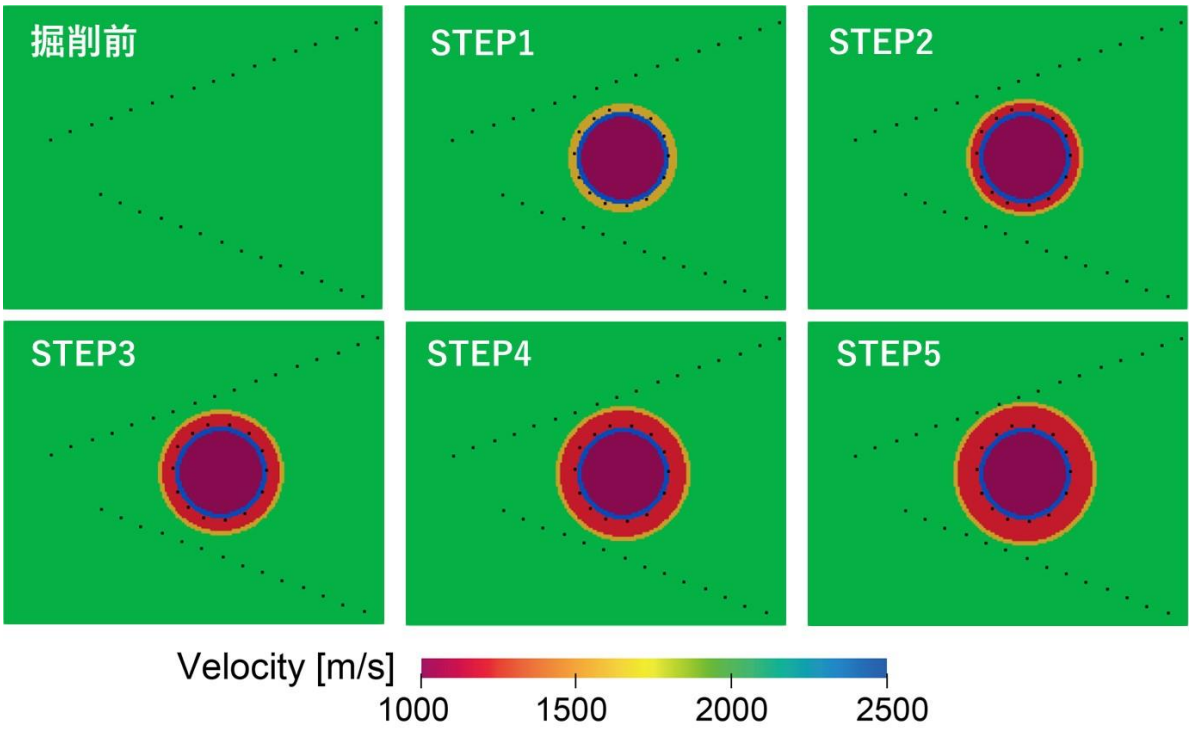


図 3.3-29　解析モデル

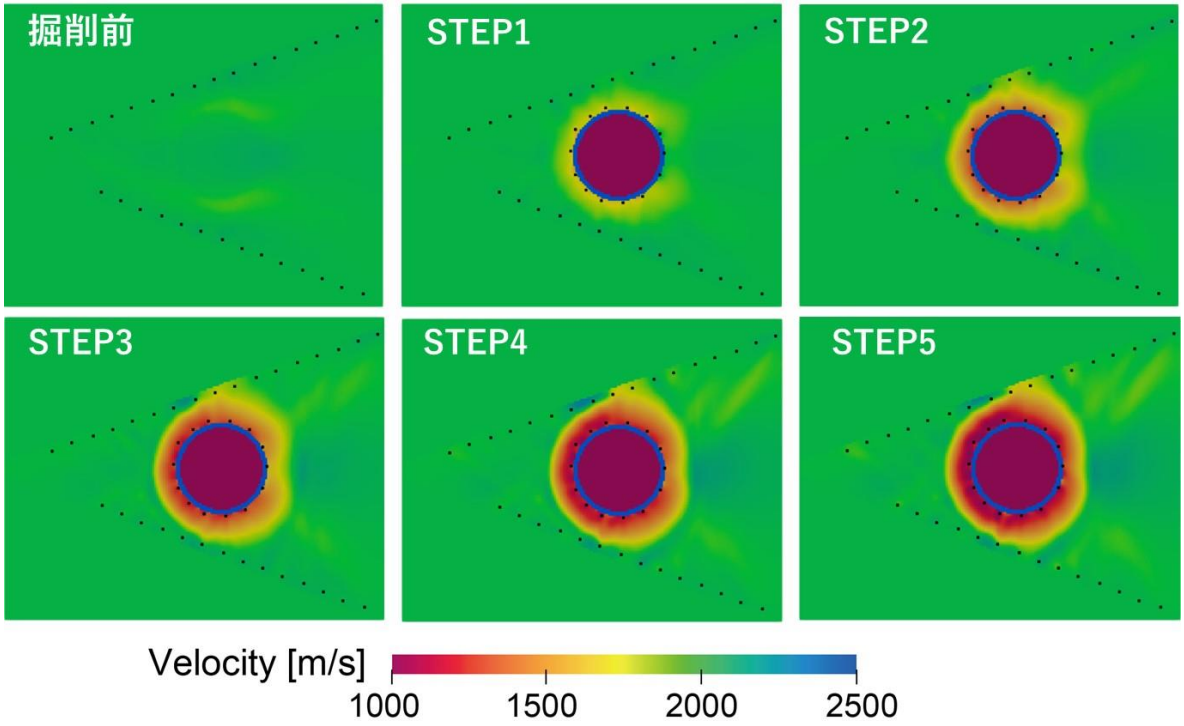


図 3.3-30　タイムラプス解析の数値テストの結果

(ii) 実データへの適用

幌延深地層研究センターの深度 350m において繰り返し取得された弾性波トモグラフィのデータに対してタイムラプス解析を適用し、該当期間中における掘削損傷領域の経時変化の評価を行った。なお、本研究においては試験坑道 2 における弾性波トモグラフィのデータを解析し、坑道解放条件下における掘削損傷領域の経時変化に関する評価を行った。

調査は、試験坑道 2 の掘削前の 2013 年 10 月に 1 度実施され、その後、坑道掘削後に繰り返し調査が実施されている。ここでは、2020 年 11 月までに実施した、7 年間分のデータの解析を行った。図 3.3-31 に解析により得られた結果を示す。坑道掘削前の結果である、2013 年 10 月 3 日の結果では、坑道が掘削される位置の周辺において低速度領域は推定されていないが、坑道掘削後にその周辺に低速度領域が推定されている。なお、坑道掘削後の弾性波速度分布はどの段階においても概ね類似した分布になっており、該当期間中に掘削損傷領域の顕著な経時変化は認められない。

タイムラプス解析により推定された弾性波速度の経時変化を強調するため、隣接する時間における弾性波速度の変化率を、図 3.3-32 に示す。坑道掘削前後において、坑道周辺において弾性波速度が 20%以上低下しているものの、それ以降の変化率は最大でも概ね 10%程度であり、低速度領域が系統的に拡張している様子は認められなかった。

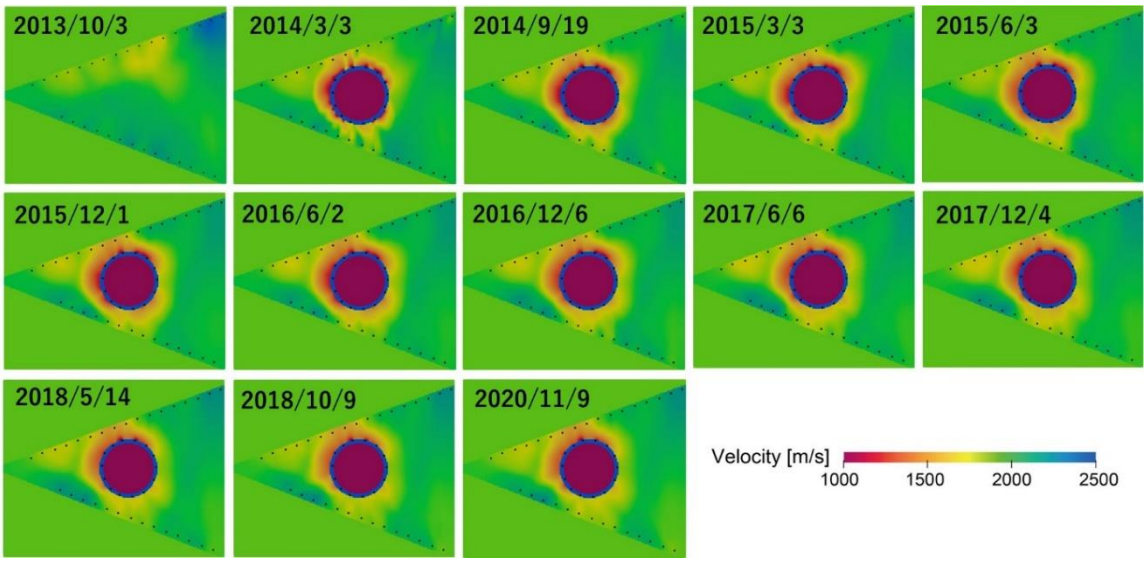


図 3.3-31　試験坑道 2 を対象としたタイムラプス解析による弾性波速度分布

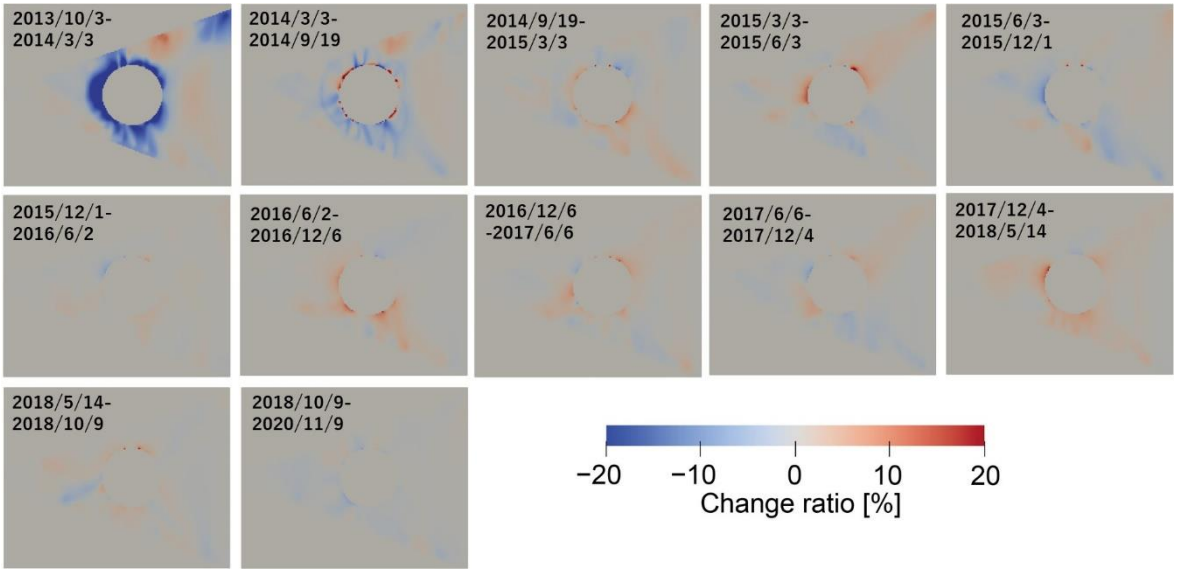


図 3.3-32　弾性波速度の変化率

(d) ジョイント・インバージョンによる弾性波および比抵抗トモグラフィの同時解析

図 3.3-25 から図 3.3-27 に示す通り、同一の対象領域を異なる手法で調査している場合、それらを組み合わせて解析するジョイント・インバージョンにより、解析結果の高精度化が期待できる。そこで、弾性波トモグラフィと比抵抗トモグラフィのジョイント・インバージョンによる、掘削損傷領域を対象とした物理探査の高度化を行った。

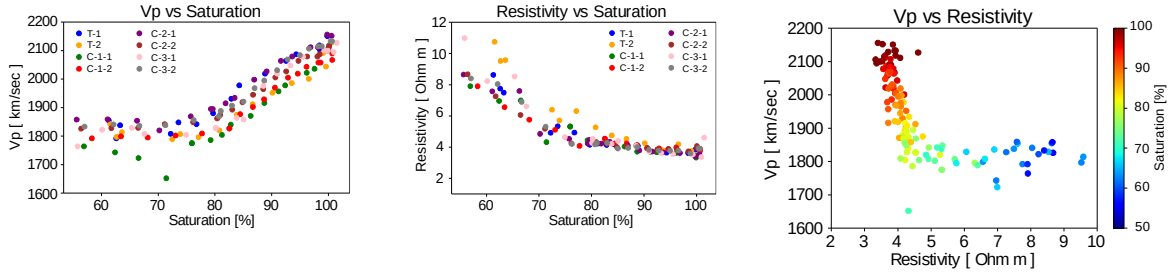
(i) Correspondence map の作成

本研究では、(2)(c)(iv)に示す correspondence map を用いたジョイント・インバージョンを開発する。Correspondence map を作成するに際し、2021 年度に幌延深地層研究センターで採取された岩石を用いて室内で測定した、比抵抗および弾性波速度のデータを用いた。従って、ここで示す correspondence map を用いたジョイント・インバージョンは、幌延深地層研究センターの

深度 350m に特化したものとなっている。なお、他の現場における同手法によるジョイント・インバージョンに関しては、対象とするフィールドにおいて採取した岩石試料を用いて室内試験等において岩石の物性値測定を実施し、新たに correspondence map を作成して解析コードに入力することにより、適用可能である。

図 3.3-33 (a)および(b)に、幌延深地層研究センターの深度 350m で採取した岩石の、弾性波速度（P 波速度）および比抵抗と飽和度の関係を示す。飽和度が上昇すると、弾性波速度は上昇し比抵抗も低下する。弾性波速度および比抵抗に関して、飽和度を軸として関連付けた結果が(c)である。(c)に示す通り、弾性波速度と比抵抗には、関連性が認められたため、この関連性を correspondence map としてジョイント・インバージョンを行った。

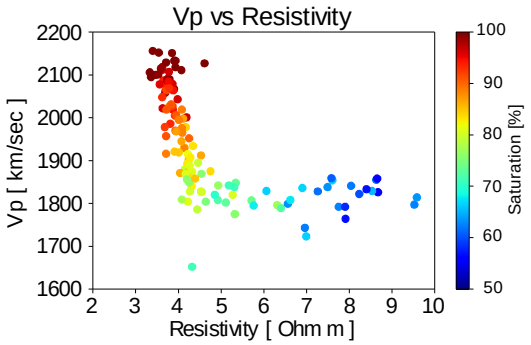
2021 年度に実施した研究では、図 3.3-33 の P 波速度と飽和度の関係および比抵抗と飽和度の関係は、各々Gassman-Biot の式および Archie の式で記載できることを確認している（原子力機構・原環センター, 2021）。これらの岩石モデルから correspondence map を導出し、それをジョイント・インバージョンで使用することは可能ではあるものの、correspondence map の非線形性が大きい場合にはそれを含む逆解析が不安定になることが危惧されたため、本研究では図 3.3-33 (c)を多項式近似し、ジョイント・インバージョンに適用した。なお、電気伝導度の逆解析において、電気伝導度の常用対数をモデルパラメータとして取り扱っている。従って、図 3.3-33 (c)の比抵抗に関しては、電気伝導度の常用対数に変換した後に、多項式近似を行った。



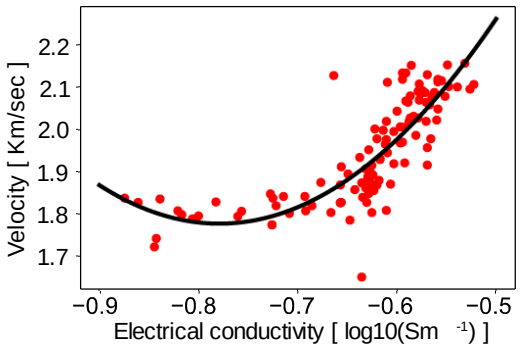
(a) P 波速度と飽和度の関係　(b) 比抵抗と飽和度の関係　(c) P 波速度と比抵抗の関係

図 3.3-33　室内試験で測定した幌延深地層研究センターの深度 350m における弾性波速度および比抵抗の飽和度特性

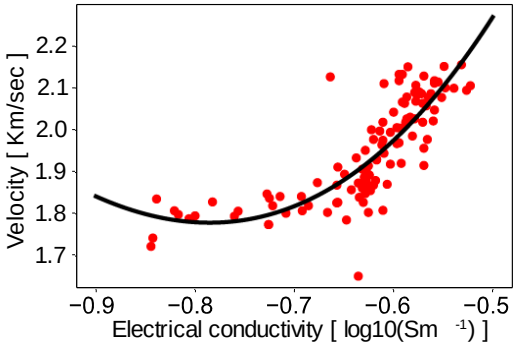
図 3.3-34 に多項式近似による結果を示す。対象としている物性値の範囲において、2 次式で十分に近似できることから、弾性波速度と電気伝導度は式 3.3-45 で関連付けられるとし、従って式 3.3-40 は式 3.3-46 とした。



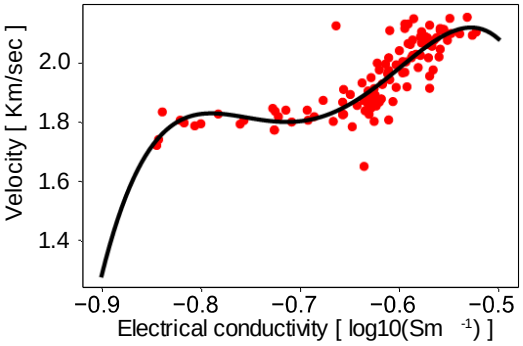
(a) P 波速度と比抵抗の関係



(b) 2 次式による近似結果



(c) 3 次式による近似結果



(d) 4 次式による近似結果

図 3.3-34　P 波速度と電気伝導度の関係の多項式近似

$$\boldsymbol{m_{vel}} = 6199.2 \times \boldsymbol{m_{res}^2} + 9658.6 \times \boldsymbol{m_{res}} + 5540 \qquad \text{式 3.3-45}$$

$$g(\boldsymbol{m_{vel}}, \boldsymbol{m_{res}}) = (-1 - 1.81 \times 10^{-4} \times \boldsymbol{m_{vel}} + 1.12 \times \boldsymbol{m_{res}^2} + 1.74 \times \boldsymbol{m_{res}})^2 \qquad \text{式 3.3-46}$$

m_{vel}：弾性波速度（P 波速度）(m/s)

m_{res}：$log_{10}(\sigma)$

σ：電気伝導度(S/m)

(ii) 数値テストによるジョイント・インバージョンの性能評価

開発したジョイント・インバージョンが、個別の逆解析と比較してどのように動作するのかを検証するため、また、目的関数に含まれる各ハイパーパラメータにより解析結果が受ける影響を評価するため、簡単なモデルを用いた数値テストによる逆解析の評価を行った。

ジョイント・インバージョンにおいては、式 3.3-38 に含まれる通り、γ_1、γ_2、τのハイパーパラメータがあり、さらに式 3.3-29 に含まれる弾性波および比抵抗トモグラフィの各々の目的関数の中に、α_s、α_mのハイパーパラメータの計 7 つのパラメータを調整する必要がある。ここでは、これらのパラメータに関して、以下の方針で大まかな決定を行った。

・比抵抗および弾性波トモグラフィを個別に解析することにより、最適なα_s、α_mを決定する

・α_sは、あるモデルセルの値を固定する場合に設定する必要のあるパラメータであるが、このパラメータは個別解析において、対象としているセルの値が確認できるほど十分に大きな値を設定する

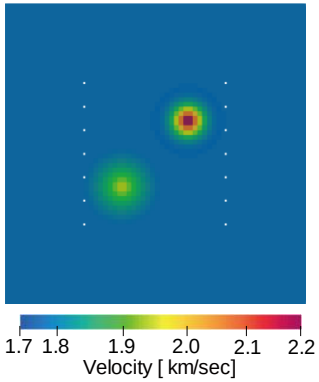
・α_mは、誤差が十分に収束する最大付近の値とする

・弾性波および比抵抗トモグラフィのどちらを重視するかに併せて、γ_1、γ_2、τを調整する。

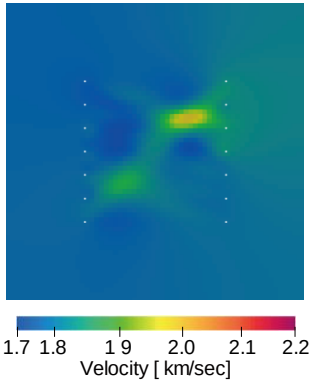
ここで、式 3.3-38 におけるτに関して、その値を大きくした場合、弾性波速度と電気伝導度の 2 つのパラメータを関連付ける correspondence map に関する項が大きくなることにより、推定される弾性波速度と電気伝導度はその関係式に従う度合が強くなり、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィの結果はお互いに影響を及ぼすようになる。その状況においてγ_1の値を大きくした場合には、弾性波トモグラフィの目的関数に対して correspondence map に関する項の影響が相対的に小さくなるため、ジョイント・インバージョンにおいて弾性波トモグラフィの結果は比抵抗トモグラフィの影響を受けにくくなる一方で、抵抗トモグラフィの目的関数に対する correspondence map の項の相対的な大きさは変わらず、比抵抗トモグラフィの結果は弾性波トモグラフィの影響を変わらずに受けることになるため、結果的に弾性波トモグラフィ情報を重視した結果が得られるようになる。γ_1を変化させずγ_2の値を大きくした場合に関しても、同様に逆が成り立つ。

図 3.3-35 に数値モデルを用いた解析結果を示す。図 3.3-35 (a)および(f)に示すモデルは、式 3.3-45 の関係式により関連付けられている。図 3.3-35 (b)および(g)は、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィの逆解析を個別に実施した場合の結果である。(c)および(h)は、γ_1の値を大きな値に設定し、弾性波トモグラフィを重視した場合の結果である。この場合、比抵抗トモグラフィの結果における形状が個別解析の場合とは異なり、(b)の弾性波トモグラフィの結果のように角張った形状となっている。(d)および(i)は、γ_2の値を相対的に大きな値に設定した場合の結果で、比抵抗トモグラフィの結果を重視した場合の結果である。この場合、(d)に示す弾性波トモグラフィ結果では、 弾性波トモグラフィの個別解析結果(b)にみられ直線的な推定構造が消えている。なお、この直線的な構造は比抵抗トモグラフィの個別解析結果(g)には認められない。(e)および(i)は、弾性波トモグラフィと比抵抗トモグラフィを同様に重視した場合の結果で、各々、推定結果が個別解析の結果とは異なり、解析結果はモデルを最もよく再現している。

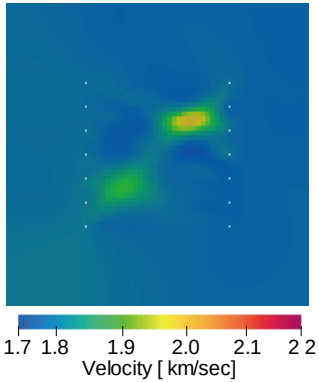
図 3.3-36 は、ジョイント・インバージョンの数値テストにおける弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィの残差の推移を示す。数値テストを実施したいずれの場合においても、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィの残差は十分に収束している。図 3.3-36(c)は、式 3.3-46 の値であり、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィで得られた結果における弾性波速度と電気伝導度が式 3.3-45 に従う場合にはこの値が小さくなる。ジョイント・インバージョンによる結果では全ての場合において式 3.3-46 の値は収束しているが、この値を最小化しない個別解析においてはこの値は収束していない。この結果は、図 3.3-37 に示す各逆解析結果における電気伝導度と比抵抗の関係からも明確である。



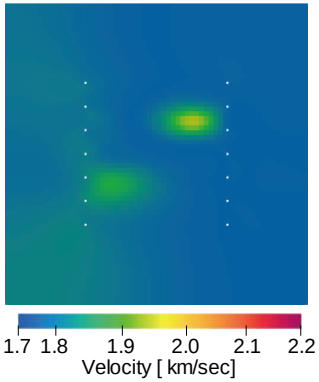
(a) P 波速度モデル



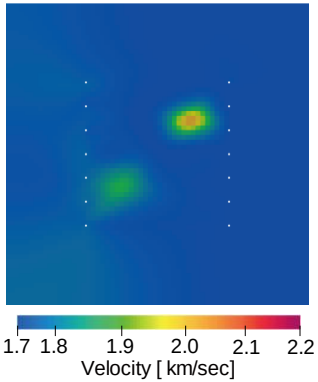
(b) 個別解析による弾性波速度構造



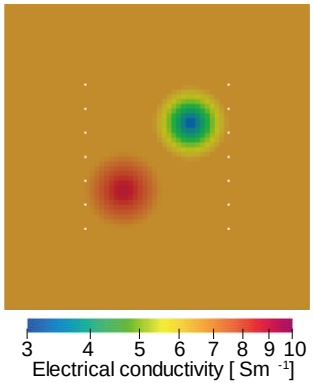
(c) 弾性波トモグラフィを重視した場合の弾性波速度構造



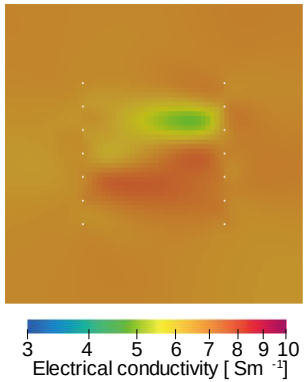
(d) 比抵抗トモグラフィを重視した場合の弾性波速度構造



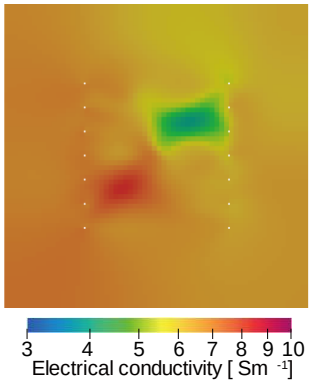
(e) 弾性波および比抵抗トモグラフィを同程度に重視した場合の弾性波速度構造



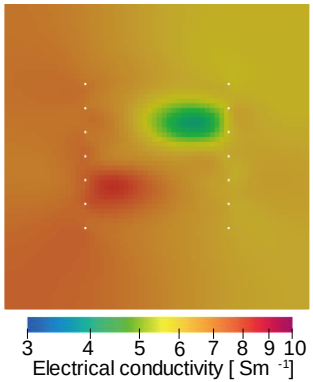
(f) 電気伝導度モデル



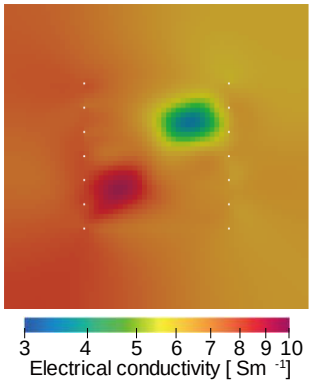
(g) 個別解析による電気伝導度構造



(h) 弾性波トモグラフィを重視した場合の電気伝導度構造

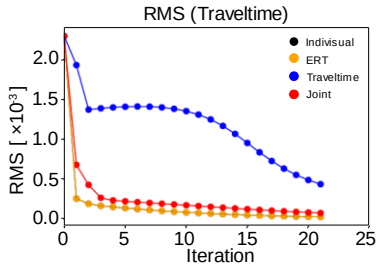


(i) 比抵抗トモグラフィを重視した場合の電気伝導度構造

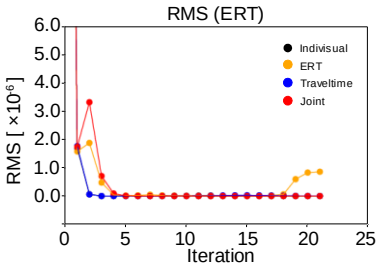


(j) 弾性波および比抵抗トモグラフィを同程度に重視した場合の電気伝導度構造

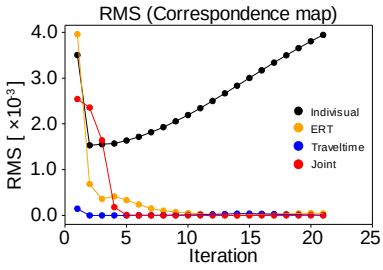
図 3.3-35　数値テストによるジョイント・インバージョンの結果の比較



(a) 弾性波トモグラフィにおける残差の推移

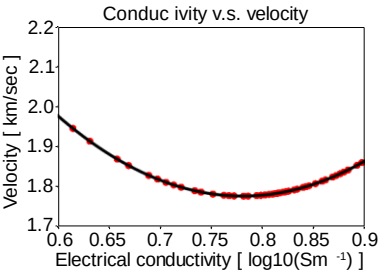


(b) 比抵抗トモグラフィにおける残差の推推移

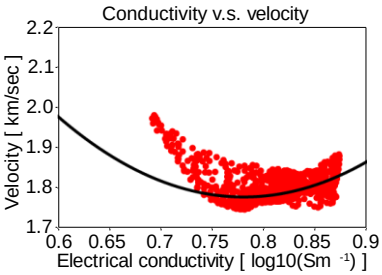


(c) 式 3.3-46 の値

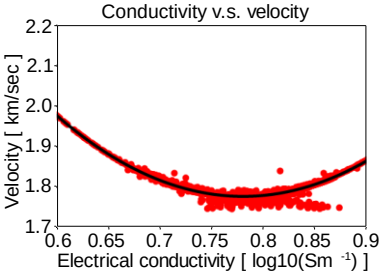
図 3.3-36　ジョイント・インバージョンにおける残差の推移



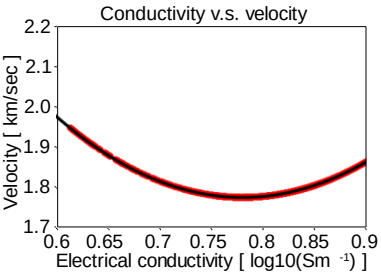
(a) 数値モデルの弾性波速度と電気伝導度の関係



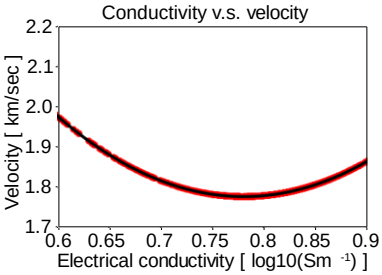
(b) 個別逆解析における弾性波速度と電気伝導度の関係



(c) 弾性波トモグラフィを重巣したジョイント・インバージョにおける関係



(d) 比抵抗トモグラフィを重巣したジョイント・インバージョにおける関係



(e) 両トモグラフィを同様に重視したジョイント・インバージョンにおける関係

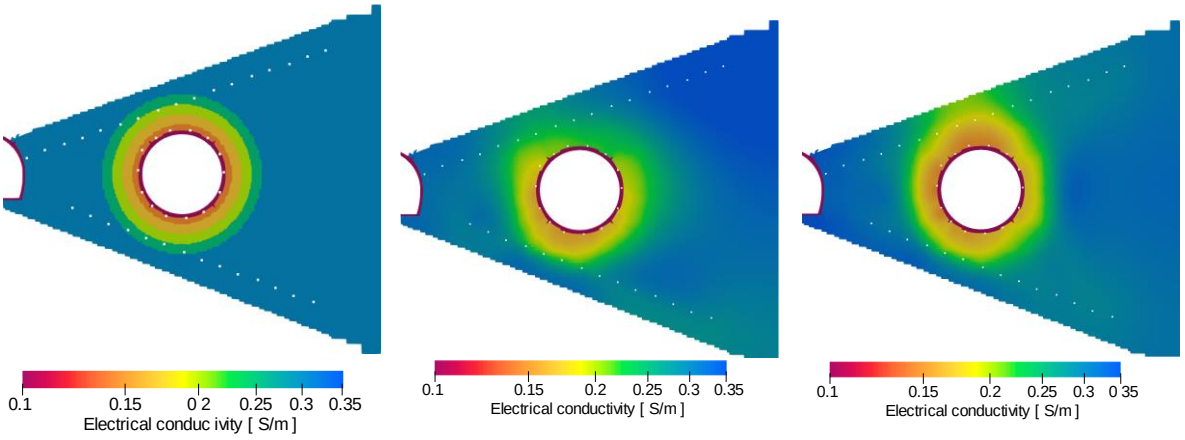
図 3.3-37　逆解析結果における弾性波速度と電気伝導度の関係

(iii) 数値モデルを用いた弾性波速度と電気伝導度のジョイント･インバージョンによる掘削損傷領域の評価手法の検討

数値モデルを用いた逆解析テストにより、開発したジョイント・インバージョンを用いた掘削損傷領域の評価手法に関する検討を行う。なお、用いる数値モデルは図 3.3-26 および図 3.3-27 を参考に、幌延深地層研究センターの深度 350m の試験坑道 2 を対象とした場合の調査をモデル化した。図 3.3-38 に用いたモデルと逆解析結果を示す。なお、使用したモデルに関して、電気伝導度に関しては坑道の内側から乾燥している状況を仮定し、坑道の内側から外側に向かって電気伝導度が高くなるモデルを使用した。弾性波速度に関しては、孔壁から 1 m までの領域、電気伝導度とは独立に 1200 m/s の値を設定し掘削損傷領域をモデル化した。それ以外の領域に関しては、式 3.3-45 により弾性波速度を設定することで、健岩部および掘削影響領域をモデル化した。

図 3.3 38 (b)および(e)は、個別解析による電気伝導度構造および弾性波速度構造で、(c)および(f)はジョイント・インバージョンによる解析結果である。電気伝導度構造において、坑道の上部では、ジョイント・インバージョンによる結果の方が数値モデルの再現度が高いが、電気伝導度および弾性波速度のいずれの場合の結果においても、単独解析の結果とジョイント・インバージョンの双方の結果において坑道周辺に低電気伝導度および低速度領域が推定されており、解像度等に大きな違いは認められない。今回使用したモデルは比較的シンプルなモデルであることから、ジョイント・インバージョンを使用した場合においても解像度の大幅な向上が認められなかったと考えられる。図 3.3-39 に逆解析における残差の推移を示す。個別解析およびジョイント・インバージョンのどちらにおいても残差は十分に収束している。

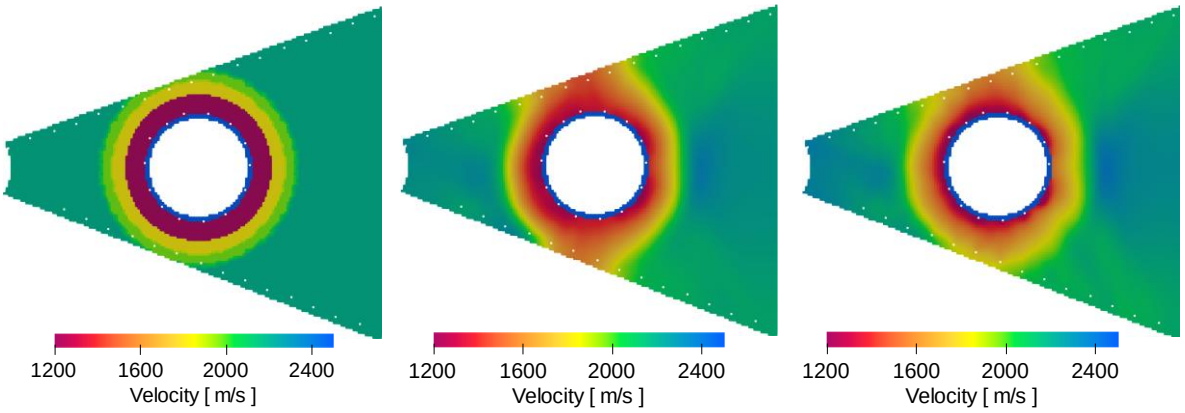
図 3.3-40 に個別解析およびジョイント・インバージョンにより得られた電気伝導度と弾性波速度の関係を示す。個別解析においては、これら 2 つのパラメータに関して系統的な関連性は認められない。一方で、ジョイント・インバージョンにおいては、式 3.3-45 に示す関連性を制約として与えているために、式 3.3-45 の関係式付近に物性値が分布している。



(a) 電気伝導度モデル

(b) 個別解析により推定された電気伝導度構造

(c) ジョイント・インバージョンにより推定された電気伝導度構造

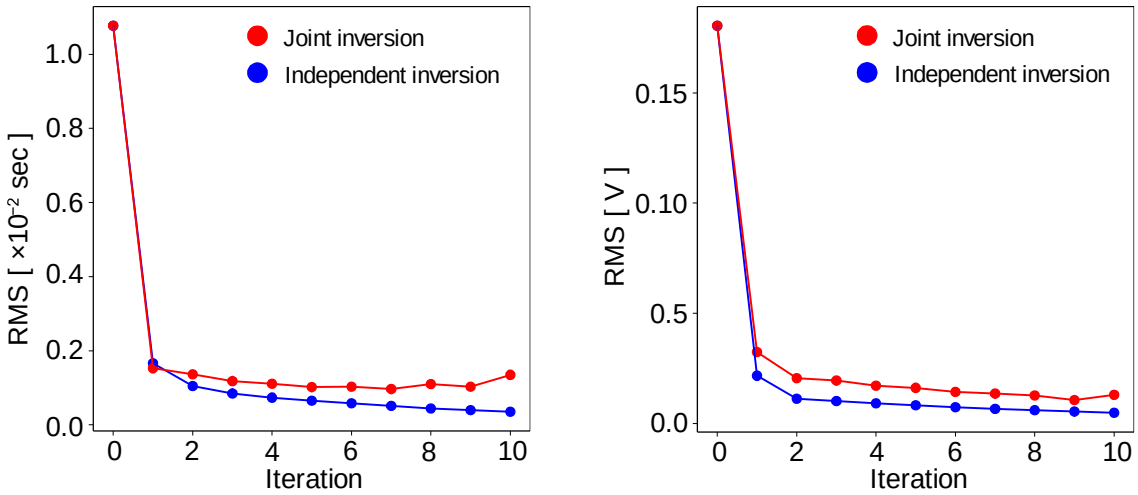


(d) 弾性波速度モデル

(e) 個別解析により推定された弾性波速度構造

(f) ジョイント・インバージョンにより推定された弾性波速度構造

図 3.3-38　数値モデルによる掘削損傷領域を対象としたジョイント・インバージョンの結果



(a) 弾性波トモグラフィにおける残差　　(b) 比抵抗トモグラフィにおける残差

図 3.3-39　残差の推移

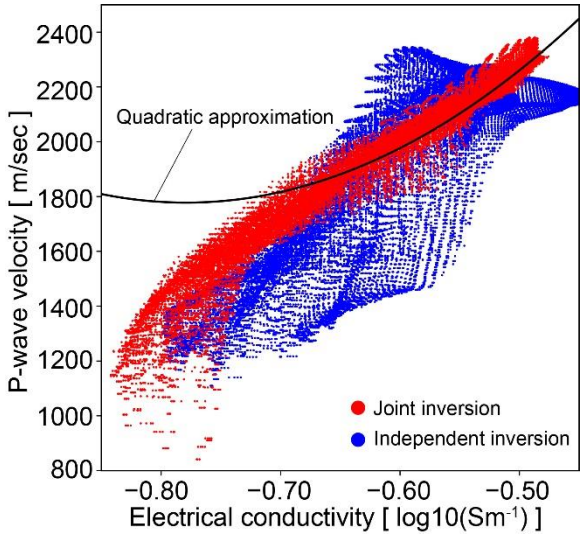


図 3.3-40　逆解析結果における電気伝導度と弾性波速度の関係

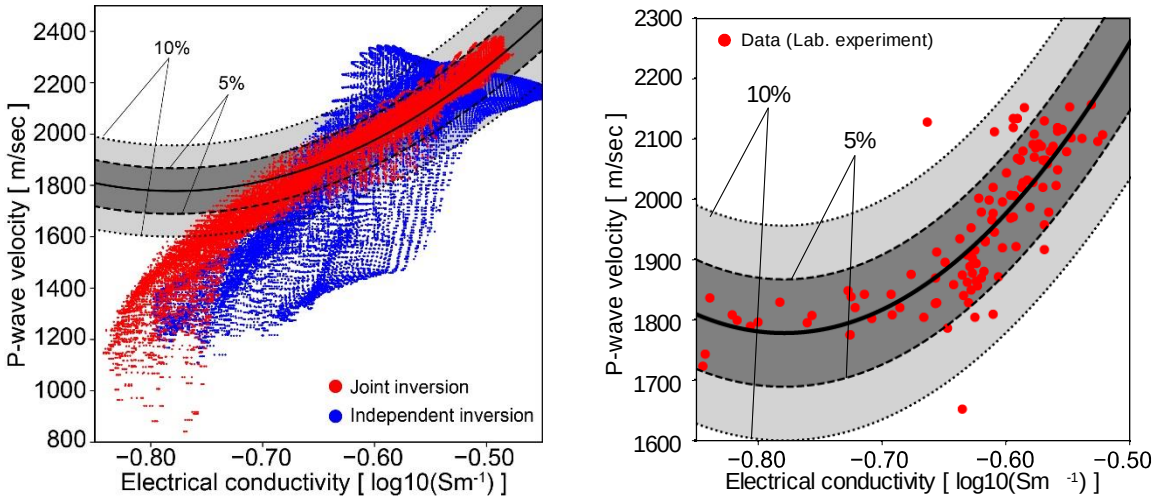
(iv) Correspondence map を用いた掘削損傷領域と掘削影響領域の識別

本研究で使用したモデルでは、比較的単純なモデルを使用したため、ジョイント・インバージョンによる解像度の向上などは見られなかった。一方で、correspondence map を用いたジョイント・インバージョンでは、図 3.3-40 に示すとおり、推定されたパラメータ間に関連性を有する correspondence map を取得することができる。この correspondence map を用いることで、室内試験等において測定した岩石の物性値間の関係と、逆解析で取得される物性値の関係がどの程度乖離しているかを空間的に評価することが可能である。本研究のように、室内試験において健岩部の岩石を用いて correspondence map を作成した場合、その関係式付近に分布している物性値を有する岩石は破壊等の影響が及んでいない領域と考えることができ、従ってその領域は健岩部もしくは掘削影響領域に相当する領域であると評価することができる。一方で、同一岩種内において、関係式から乖離した領域は健岩部とは異なる特性を有する岩石であり、破壊等が進んでいる領域であることを示唆している。これらの関係を用いて、correspondence map における式

3.3-43 の関係式からの乖離度を評価することで弾性波トモグラフィと比抵抗トモグラフィの逆解析結果から掘削損傷領域を識別する方法を検討する。

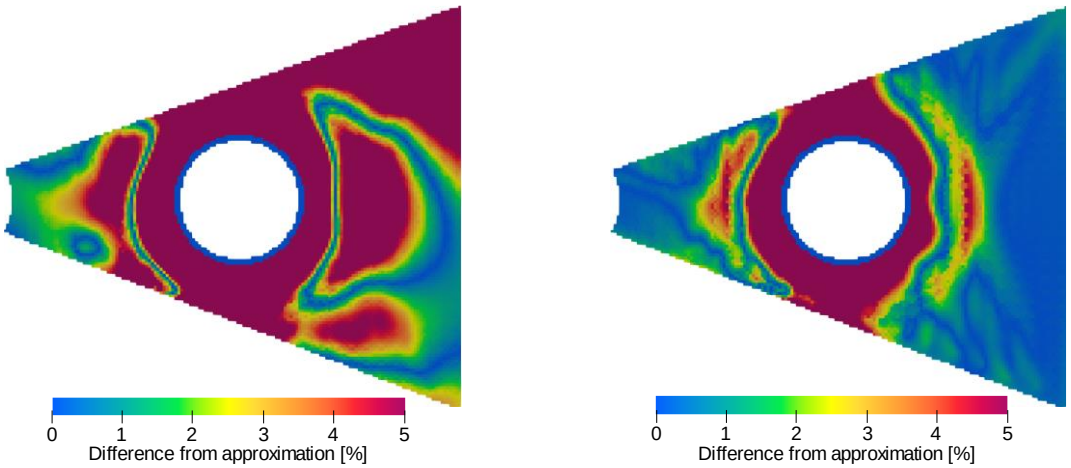
図 3.3-41 (a)に、逆解析結果における電気伝導度と弾性波速度の関係および式 3.3-45 からの乖離度を示す。ジョイント・インバージョンにおいて、電気伝導度と弾性波速度の関係は、関係式 3.3-45 から 5%程度乖離位置に概ね分布している。従って、5%以上乖離している場所を掘削損傷領域の可能性が高い位置として逆解析結果を分類する。なお、この閾値の設定に関して、原位置における実データを用いた逆解析結果の分類を行う際には、図 3.3-41 (b)に示す室内結果のデータのばらつきを参考に決定する手法が候補としてあげられる。

図 3.3-42 に電気伝導度と弾性波速度の関係の式 3.3-45 からの乖離度の空間分布を示す。個別解析では、解析領域全域において乖離が大きくこの結果から掘削損傷領域の識別は困難である。一方で、ジョイントによる場合、モデルにおいて掘削損傷領域を設定した付近に乖離度が高い場所が集中している。このように、ジョイント・インバージョンでは式 3.3-45 からの乖離度を評価することにより、弾性波トモグラフィの結果と比抵抗トモグラフィの結果を客観的に評価し、掘削損傷領域を推定することが可能である。



(a) 逆解析結果における乖離度　　(b) 室内試験におけるばらつき

図 3.3-41　Correspondence map における式 3.3-45 からの乖離度



(a) 個別解析における電気伝導度と弾性波速度の式 3.3-45 からの乖離度

(b) ジョイント・インバージョンにおける電気伝導度と弾性波速度の式 3.3-45 からの乖離度

図 3.3-42　Correspondence map を用いた掘削損傷領域の識別

(4) 掘削損傷領域の経時変化調査のための物理探査の高精度化のまとめ

本研究では、掘削損傷領域の経時変化を物理探査により把握することを目的として、既存の調査手法における問題点の把握と解決および解析の高度化を行った。下記に成果をまとめる。

- 弾性波トモグラフィにおいて、掘削損傷領域の調査のような坑道壁面周辺を対象とした調査では、その剛性の高さからトンネル支保構造の影響を顕著に受けることが認められた。これは岩石の弾性波速度が遅い堆積軟岩においてより顕著であると考えられる。逆解析においてその支保構造の情報を事前に組み込むことによりその影響を低減できることを示した。
- 比抵抗トモグラフィにおいては、坑道の形状を考慮して電位分布を計算する必要がある。本研究では、坑道の形状を考慮できる順計算手法を開発し逆解析に組み込むことで比抵抗トモグラフィの信頼性を向上させた。
- 同一場所において繰り返し調査を実施した場合の結果に関しては、タイムラプス解析を適用可能である。幌延深地層研究センターにおいて取得された 7 年分の弾性波トモグラフィの調査結果に対してタイムラプス解析を適用することにより、調査位置において調査を実施した該当期間中において、掘削損傷領域に変化が認められないことを確認した。
- 同一場所において異なる物理探査が適用されている場合、それら手法を組み合わせたジョイント・インバージョンが適用可能である。本研究では、異なる物性値間の関係を用いた correspondence map を用いたジョイント・インバージョン手法を開発し、掘削損傷領域を識別する手法を提案した。

今後の課題として、例えばジョイント・インバージョンにおいては調整するパラメータの数が多く解析者の主観に依存する部分も残されていることから、これらパラメータを客観的に設定する手法の検討が必要である。また、本研究では弾性波（P 波）トモグラフィと比抵抗トモグラフィを対象としたジョイント・インバージョンの開発を行ったが、今後の開発方針として、これらとは異なる物理探査手法を組み合わせた手法の開発があげられる。なお、本研究では堆積軟岩を対象とした解析手法の高度化を行ってきたが、結晶質岩においても室内試験等により図 3.3-33 に示す関係式が得ることができれば本手法は適用可能である。

参考文献

Aldridge, D.F., and Oldenburg, D.W., Two-dimensional tomographic inversion with finite-difference traveltimes, J. Seism. Explor., 2(3), 257–274, 1993.

Bouteiller, P., L., Benjemaa, M., Métivier, L., and Virieux J., An accurate discontinuous Galerkin method for solving point-source Eikonal equation in 2-D heterogeneous anisotropic media, Geophys. J. Int., 212(3), 498–1522, 2018.

Carrillo, J., and Gallardo, L., A., Joint two-dimensional inversion of magnetotelluric and gravity data using correspondence maps, Geophys. J. Int., 214, 1061-1071, 2018.

Detrixhe, M., Gibou, F., and Min, C., A parallel fast sweeping method for the eikonal equation, J. Comput. Phys., 237, 46–55, 2013.

Dey, A., and Morrison H., F., Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures, Geophys. Prop., 27(1), 106-136, 1979.

Gallardo, L., A., and Meju,, M., A., Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data, Geophys. Res. Lett., 30(13), 1658, 2003.

Heidtmann, K.D., New gauss–seidel like block iterative methods to solve discrete boundary value problems. Int. J. Comput. Math., 9(4), 343–351, 1981.

Kim, J.H., Yi, M.J., Park, S.G., and Kim, J.G., 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model. J. Appl. Geophy., 68(4), 522–532, 2009.

Leung, S., and Qian, J., An adjoint state method for three-dimensional transmission traveltime tomography using first-arrivals, Commun. Math. Sci., 4(1), 249–266, 2006.

Li, S., Vladimirsky, A., and Fomel, S., First-break traveltime tomography with the double-square-root eikonal equation, Geophys., 78(6), U89–U101, 2013.

Lowry, T., Allen, M., and Shive, P., Singularity removal: A refinement of resistivity modeling techniques, Geophys., 54(6), 766-774, 1989.

Pan, K., and Tang, J., 2.5-D and 3-D DC resistivity modelling using an extrapolation cascadic multigrid method, Geophys. J. Int., 197, 1459-1470, 2014.

Penz, S., Chauris, H., Donno, D., and Mehl, C., Resistivity modelling with topography. Geophys. J. Int., 194, 1486-1497, 2013.

Qian, J., Zhang, Y.T., and Zhao, H.K., Fast sweeping methods for eikonal equations on triangular meshes, SIAM J. Numer. Anal., 45(1), 83–107, 2007.

Taillandier, C., Noble, M., Chauris, H., and Calandra, H., First-arrival traveltime tomography based on the adjoint-state method, Geophys., 74(6), WCB57–WCB66, 2009.

White, D.J., Two-dimensional seismic refraction tomography, Geophys. J. Int., 97(2), 223–24, 1989.

Zhang, L., Rector III, J.W., and Hoversten, G.M., Eikonal solver in the celerity domain, Geophys. J. Int., 162(1), 1–8, 2005.

Zhao, H., A fast sweeping method for eikonal equations, Math. Comp., 74, 603–627, 2005

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）, 70 (4), 412-423, 2014.

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.
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.
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，日本原子力研究開発機構，令和 3 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回収可能性技術高度化開発，2021.
小峯秀雄，電気比抵抗による薬液注入改良部の充填率の評価方法，土木学会論文集，463(Ⅲ-22)，153-162，1993.
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.
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.
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.
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，48，P221-226, 1993
地盤工学会，地盤材料試験の方法と解説，P201, 2020.
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 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.
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，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研究開発事業地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2021.
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，令和 3 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，2022.

3.4 ボアホールシーリング試験

3.4.1 背景および目的

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）。また、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, 2008；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の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く、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。

そこで、令和 2 年度から令和 4 年度までの 3 年間で、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・条件を比較したうえで室内試験や原位置試験を実施している。

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（原子力機構・原環センター, 2021）。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。

令和 3 年度は、ベントナイトブロックによるボーリング孔の閉塞技術を対象として、ブロックの特性として膨潤状況や閉塞後の透水性を把握するための室内試験を実施した（原子力機構・原環センター，2022）。また、令和 2 年度に抽出・整理した技術的な課題に基づいて検討したボーリング孔内にベントナイトブロックを設置する方法について、既往の調査（原子力機構, 2019）を基

に手順の具体化を図り、その手順を室内でのモックアップ試験により確認した。

令和 4 年度は、幌延の地下施設においてベントナイトブロックによるボーリング孔の閉塞試験を実施した。250m 調査坑道において、閉塞試験を実施するためのボーリング孔を掘削し、コア観察や検層の結果よりベントナイトブロックの充填位置を選定した。また、令和 3 年度までに検討してきた密閉可能なコンテナを用いたベントナイトブロックの設置方法について、実際のボーリング孔における作業手順やボーリング孔に設置後のベントナイトブロックの膨潤状況などを確認した。

3.4.2 ボーリング孔の掘削

(1) 実施概要

ベントナイトブロックによるボーリング孔の閉塞試験を実施するため、幌延の地下施設の 250m 調査坑道においてボーリング孔を掘削した。図 3.4-1 に示すように 250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑（以下、大型試錐座（西））から 250m 換気立坑側第 1 ボーリング横坑（以下、大型試錐座（北））に向かって貫通するようにボーリング孔（以下、BoS-1 孔）を掘削した。ボーリング孔の掘削後には、コア観察、BTV 観察、孔曲がり測定、孔径検層を実施してベントナイトブロックの充填位置を決定した。

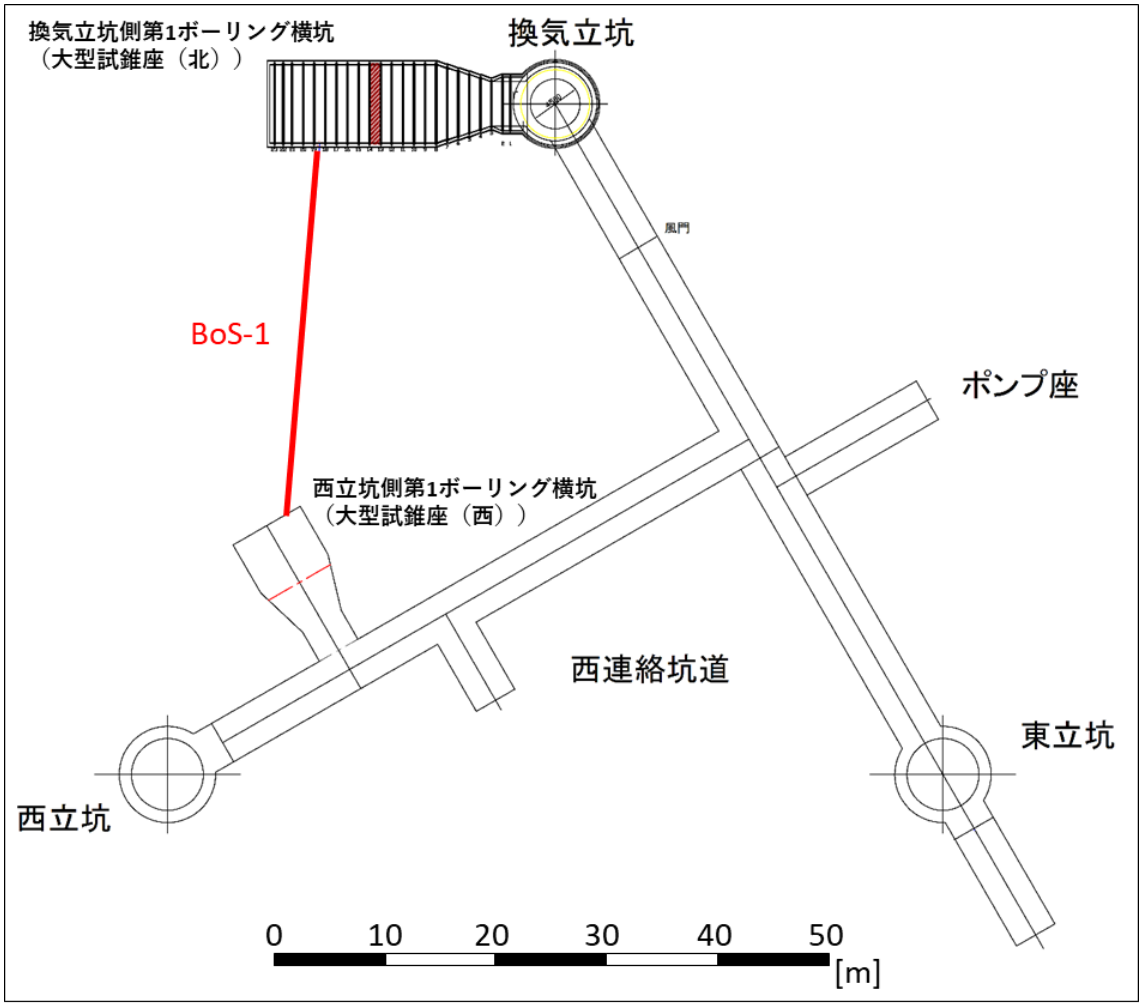


図 3.4-1　250m 調査坑道の平面図

(2) ボーリング孔の掘削

図 3.4-2 に示すように大型試錐座（西）にボーリングマシンを設置し、大型試錐座（北）に貫通するように BoS-1 孔を掘削した。掘削作業では、孔径 76mm のオールコアボーリングにより大型試錐座（北）への貫通を確認した後に孔径 98mm に拡幅削孔した。大型試錐座（西）および大型試錐座（北）ともに高さが 5.6m、幅が 7.0m の坑道断面を有しているが、掘削したボーリング孔に上下方向に傾斜がついた場合、大型試錐座（北）で貫通を確認できないことが懸念されたためほぼ水平に掘削することとした。

BoS-1 孔の掘削には防爆仕様のロータリ式ボーリングマシンを用いて、掘削速度、湧水・逸水量、スライムの状況や岩質、割れ目、断層破砕帯等に注意しながら作業を実施した。大型試錐座（西）側のボーリング孔の孔口を床面から 1.1 m の高さとして掘削を開始し、33.5 m を掘削した時点で大型試錐座（北）より貫通を確認した。貫通した際の大型試錐座（北）の孔口の高さは 1.5 m であり、大型試錐座（西）から見てやや上向きに傾斜している結果となった（図 3.4-3）。図 3.4-3 は上下方向の傾斜を強調するために、縮尺を縦 5：横 1 の割合としている。また、孔径 98mm への拡幅削孔後には、大型試錐座（西）から 0 mabh～2.0 mabh および 31.5 mabh～33.5 mabh の区間は孔径 116mm で拡幅削孔してケーシング（SUS304 製）を設置した。BoS-1 孔からは若干湧水が認められたものの、その量はごくわずかであった。

図 3.4-2　BoS-1 孔の削孔状況

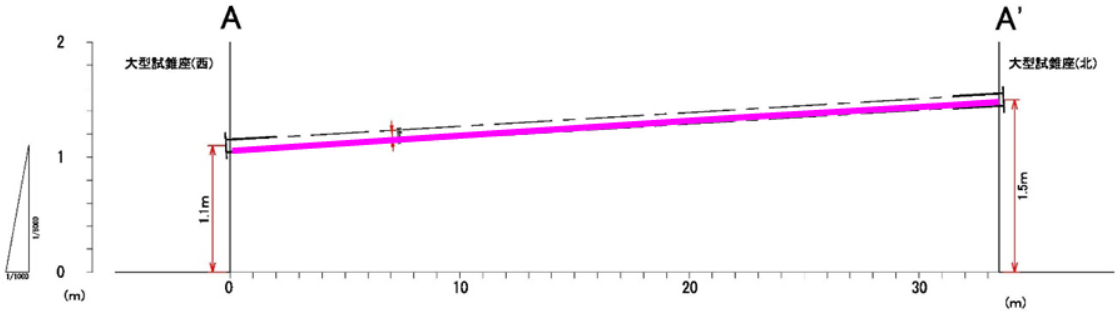


図 3.4-3　BoS-1 孔断面図

(3) コア観察

ボーリングで採取したコアは、コア箱に整理した後、コア観察を実施した。観察では、岩種、岩の硬軟、コアの形状、割れ目の状態、風化の状態、変質の状態、色調等を詳細に観察した。

BoS-1 孔を掘削した大型試錐座（西）と大型試錐座（北）の間には珪藻質泥岩（声問層）の岩盤が広がっている。BoS-1 孔は全体的に 10 cm 以上の柱状コアが主体であった。割れ目の頻度分布を図 3.4-4 に示す。単位長さ当たりの割れ目本数は 0～11 本/m の範囲となり、平均が 6 本/m であった。また、割れ目の集中する区間は、1～2 mabh、5～8 mabh、11～14 mabh、15～16 mabh、30～33 mabh 区間であった。割目の成因ごとに比較すると、せん断(S)割れ目（図 3.4-5 (a)）が主体であり、引張(T)割れ目（図 3.4-5 (b)）、機械(D)割れ目は一部の区間で発達していた。また、29.5～29.7mabh 区間は破砕状コアであり図 3.4-5 (c)に示すような断層ガウジが認められた。特に割れ目頻度分布から、引張割れ目は大型試錐座（西）の切羽面よりも大型試錐座（北）側の支保工壁面に多く発達していることを確認した。また、特徴としてはせん断割れ目の多くは割れ目面に粘土が付着し、鏡肌が認められるのに対し、引張割れ目は粘土の付着は殆どなく平滑で、羽毛状構造が発達しているものが多いことが挙がった。一部の区間ではディスキングの発達が認められており、ディスキングを示す主な区間は 0.40～1.60mabh、4.60～5.20mabh、6.60～8.00mabh、10.0～11.00mabh、29.40～29.80mabh、32.80～33.15mabh であった。

岩盤等級に関しては、表 3.4-1 に示す岩盤等級区分判定基準（舟木ら，2008）を基に行った。なお、29.5～29.7mabh 区間の断層ガウジは CL-L とした。CL-M と CL-H の区間が相互に分布する結果であった。コア観察の結果より、21.00～29.40 mabh 区間では割れ目が少なく、CL-H 区間が厚く連続していることがわかった。

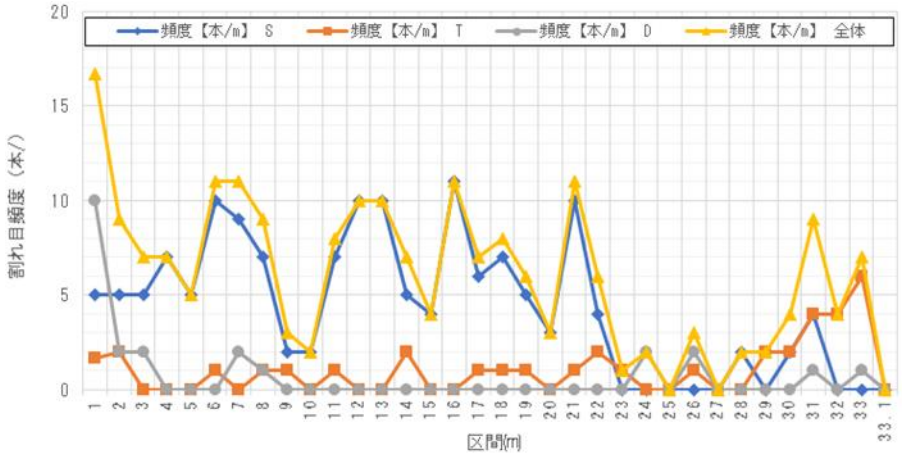


図 3.4-4　割れ目の頻度分布

(a) せん断割れ目の例

(b) 引張割れ目の例

(c) 断層ガウジ（26.5～29.7 mabh）

図 3.4-5　観察したコアの状況

表 3.4-1　岩盤等級区分判断基準

地層	岩盤等級区分	割れ目	ヘアークラック	岩石コアの特徴
声問層	D	－	－	カッターの刃が 2 ㎜以上刺さる。
				コアは角礫状～岩片状～粘土状を示す。
	CL	L	－	カッターの刃が 1 ㎜程度刺さる。
				コアは角礫状～岩片状を示す。
		M	有・無	カッターの刃が 1 ㎜程度刺さる。
				コアは概ね 10 ㎝未満の短柱状を主体とする。
		H	有・無	カッターの刃が 1 ㎜程度刺さる。
				コアは概ね 10 ㎝以上の長柱状～棒状を主体とする。
稚内層	CM	L	－	カッターの刃で傷がつく程度。
				コアは角礫状～岩片状を示す。
		M	有・無	カッターの刃で傷がつく程度。
				コアは概ね 10 ㎝未満の短柱状を主体とする。
		H	有・無	カッターの刃で傷がつく程度。
				コアは概ね 10 ㎝以上の長柱状～棒状を主体とする。

(4) BTV 観察

BTV 観察は BIP-5 システム（レアックス製）を用いて実施した。BIP-5 システムでは、ボーリング孔壁の 360º 全周画像を定方位かつ連続的にデジタル記録することができる。BTV 観察に使用した機材の一覧を表 3.4-2 に示す。展開画像専用プローブは、方向計や方向センサなどで方向を探知する機能を備えており、孔壁前週の画像を連続的に撮影するための円錐鏡と TV カメラが収納された水密プローブである。BIP システムコントロール部は定方位展開画像に展開処理してリアルタイムでフルカラー画像記録する地上装置である。コントロール部とプローブはケーブルで接続してウインチを用いて一定速度でプローブをボーリング孔内へ挿入する。また、ボーリング孔への挿入深度はプーリーを用いて測定した。

BTV 観察は大型試錐座（西）から 0～2 mabh および 31.5～33.5 mabh の区間における孔径 116mm の拡幅削孔後に実施した。そのため、それらの区間と 2.0～31.5 mabh では孔径が異なるため孔壁展開画像は分けて作成した。孔壁展開画像を図 3.4-6～図 3.4-8 に示す。図中には不連続面と判断した部分にトレースラインを書いている。孔壁展開画像より、22.0～29.0 mabh の区間に割れ目が確認できないことが分かる。図 3.4-4 に示すコア観察における割れ目頻度分布の結果と併せて考えると 22.0～26.0 mabh の区間が特に割れ目の少ない岩盤が連続していると考えられる。

表 3.4-2　BTV 観察に使用した機材一覧

名称	型式	機能	数量	備考
BIP システム コントロール部	BIP-5	コントロール部	1	展開画像作成・記録プローブ制御機能
展開画像専用 プローブ	BPR-553	ボーリング孔壁画像 撮影カメラ	1	CCD カメラ円錐ミラー 蛍光灯照明 磁気方位センサ φ50mm アクリル窓
水平用深度測定 プーリー・ 電動押し込み機	SCR-125	深度測定カウンター 0.25mm/Pulse	1	ケーシング取り付け機構
バックアップ用 VTR デッキ	Sony 社製	DV ビデオデッキ	1	バックアップ画像録画

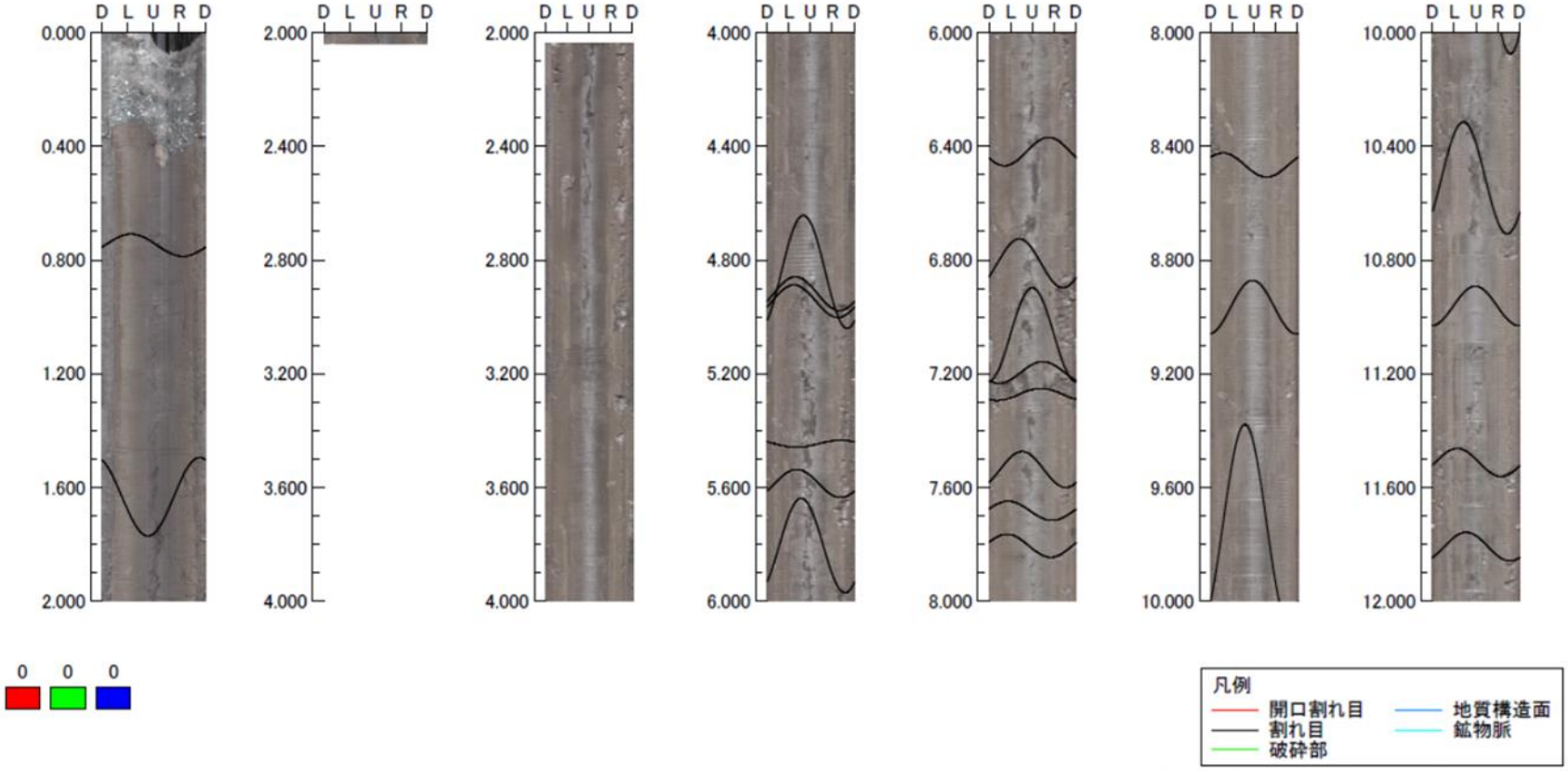


図 3.4-6　BoS-1 孔の孔壁展開画像（1/3）

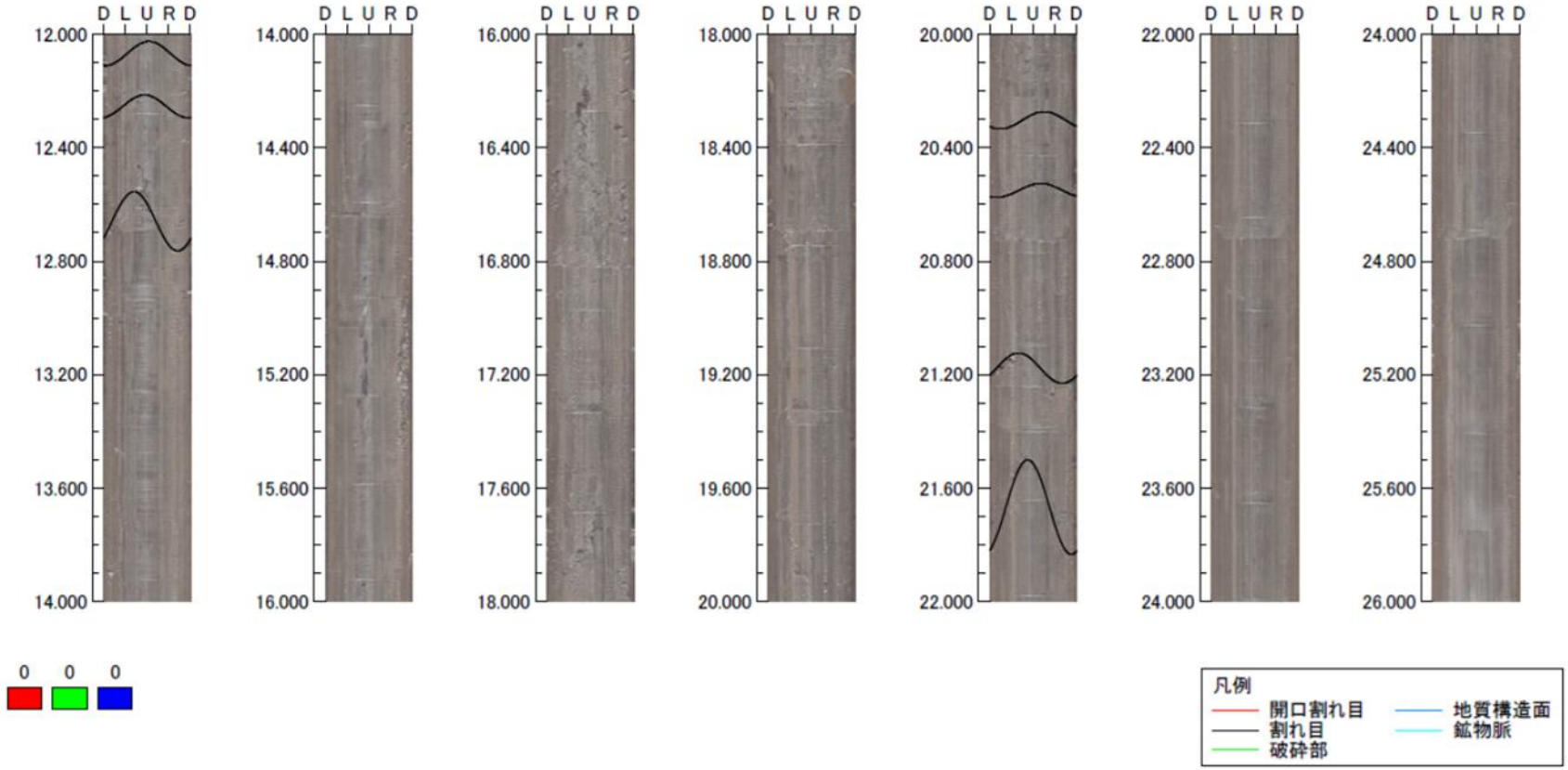


図 3.4-7　BoS-1 孔の孔壁展開画像（2/3）

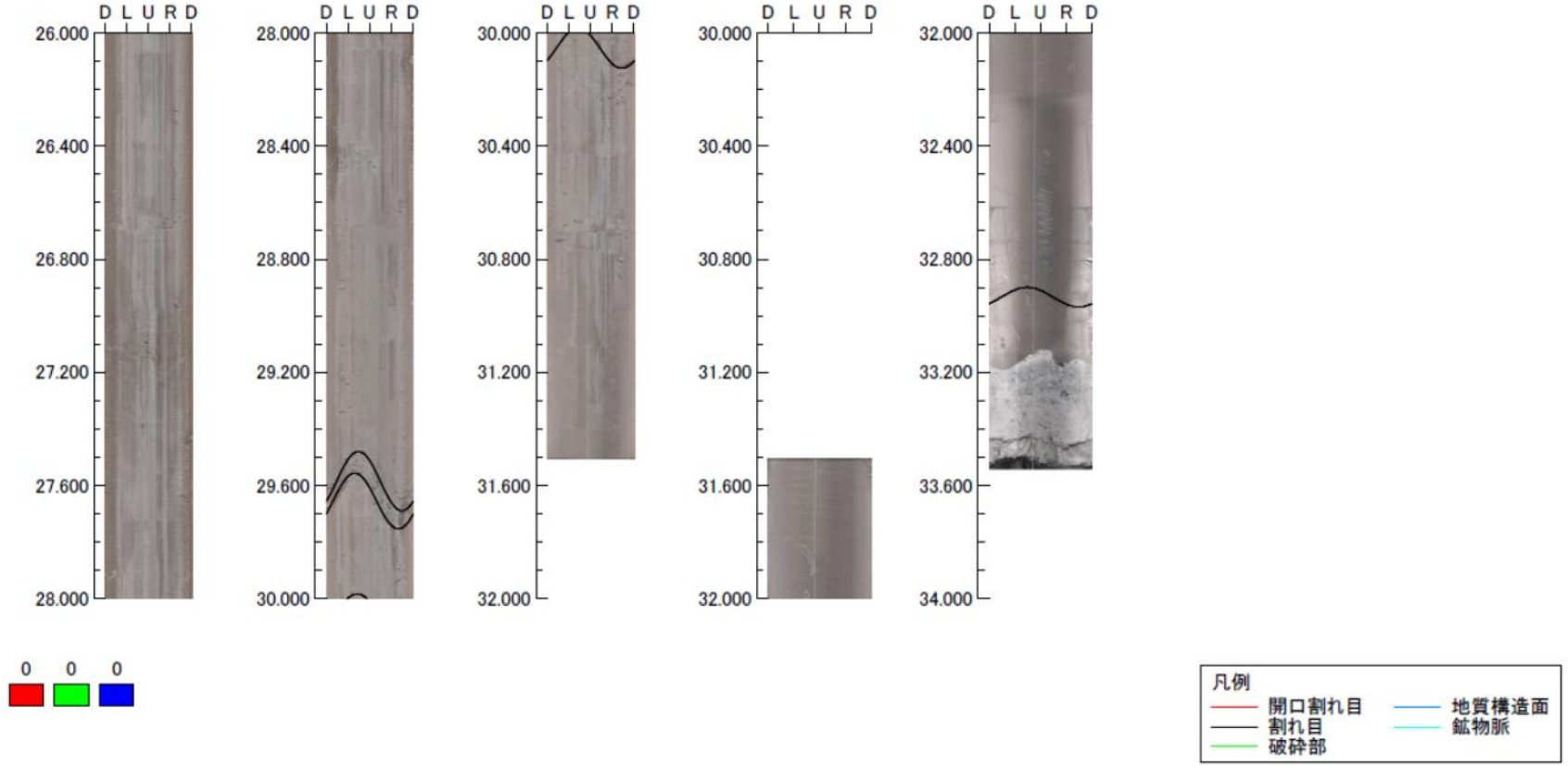


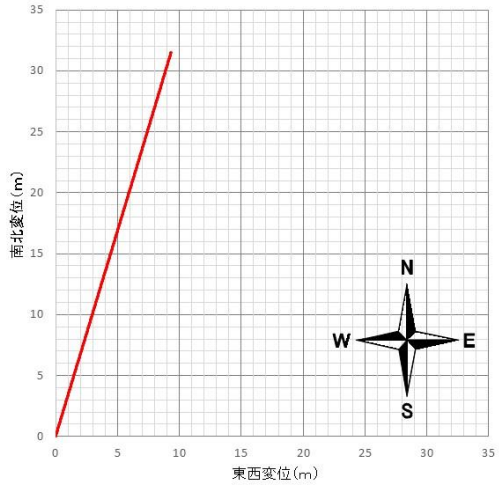
図 3.4-8　BoS-1 孔の孔壁展開画像（3/3）

(5) 孔曲がり測定

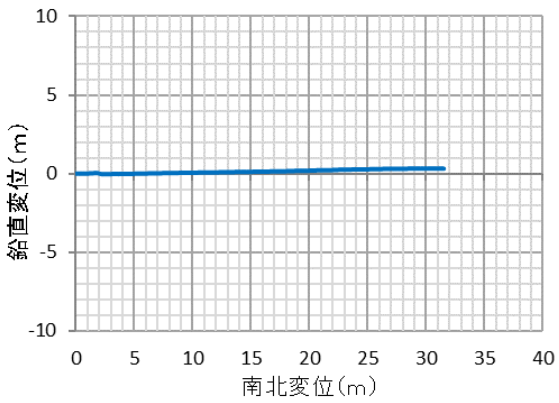
掘削した BoS-1 孔の精度を確認するために孔曲がり測定を実施した。地磁気に影響を及ぼすケーシング等の鋼管内でも使用可能な 3 軸ジャイロ式を用いてボーリング孔の全長に対して測定を実施した。孔曲がり測定で用いた機材の概要を表 3.4-3 に示す。平面投影軌跡と断面投影軌跡を図 3.4-9 に示す。孔径が変わる部分の段差の影響で一部のデータに異常値が出たため、これらのデータは除外して残りのデータのみで計測結果を評価することとした。その結果、大型試錐座（西）側の孔口を基準としたときの大型試錐座（北）側の孔底における変位は北に 31.52m、東に 9.33m、上に 0.31 m となった。孔傾斜の則手結果より推定すると、掘削当初はほぼ水平に掘削していたが、掘削長 5m あたりから上方に若干傾斜し、その後掘削長 20m まで同様の傾斜角度で掘削していたが、掘削長 20m を超えたあたりからさらに上方に傾斜していると考えられる。

表 3.4-3　孔曲がり測定の使用機材の概要

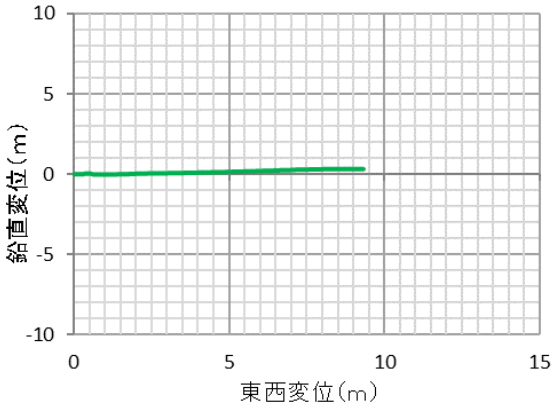
名称	TUG-NAVI（多摩川精機）
搭載センサ	DTG3 軸ジャイロセンサ 3 軸加速度計
精度	1/500（誤差/測定長）
プローブ諸元	直径 56 mm、長さ 680 mm、重量 6 kg
耐水圧・温度	耐水圧 500 m 相当/-20～50ºC



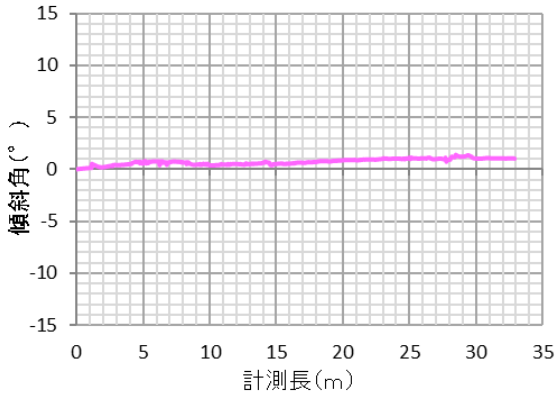
(a) BoS-1 孔軌跡（水平投影）



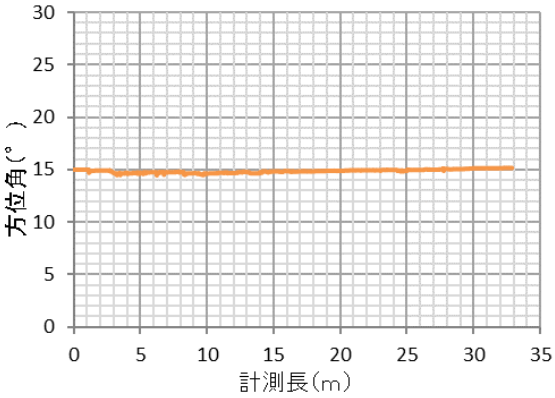
(b) BoS-1 孔軌跡（断面投影：南北方向）



(c) BoS-1 孔軌跡（断面投影：東西方向）



(d) BoS-1 孔傾斜（傾斜角）

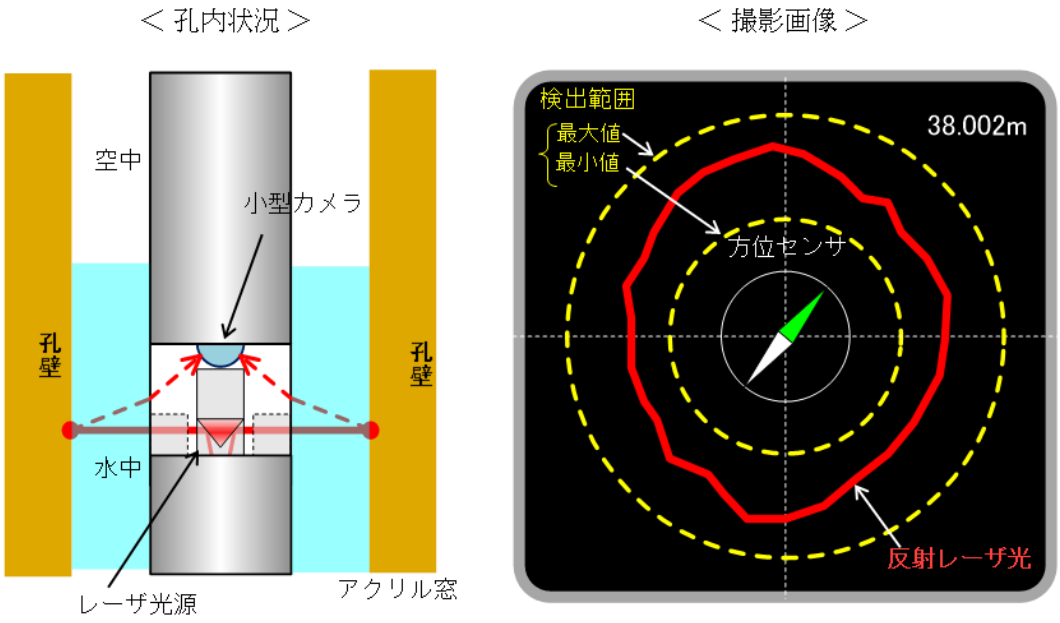


(e) BoS-1 孔方位（方位角）

図 3.4-9　孔曲がりの測定結果

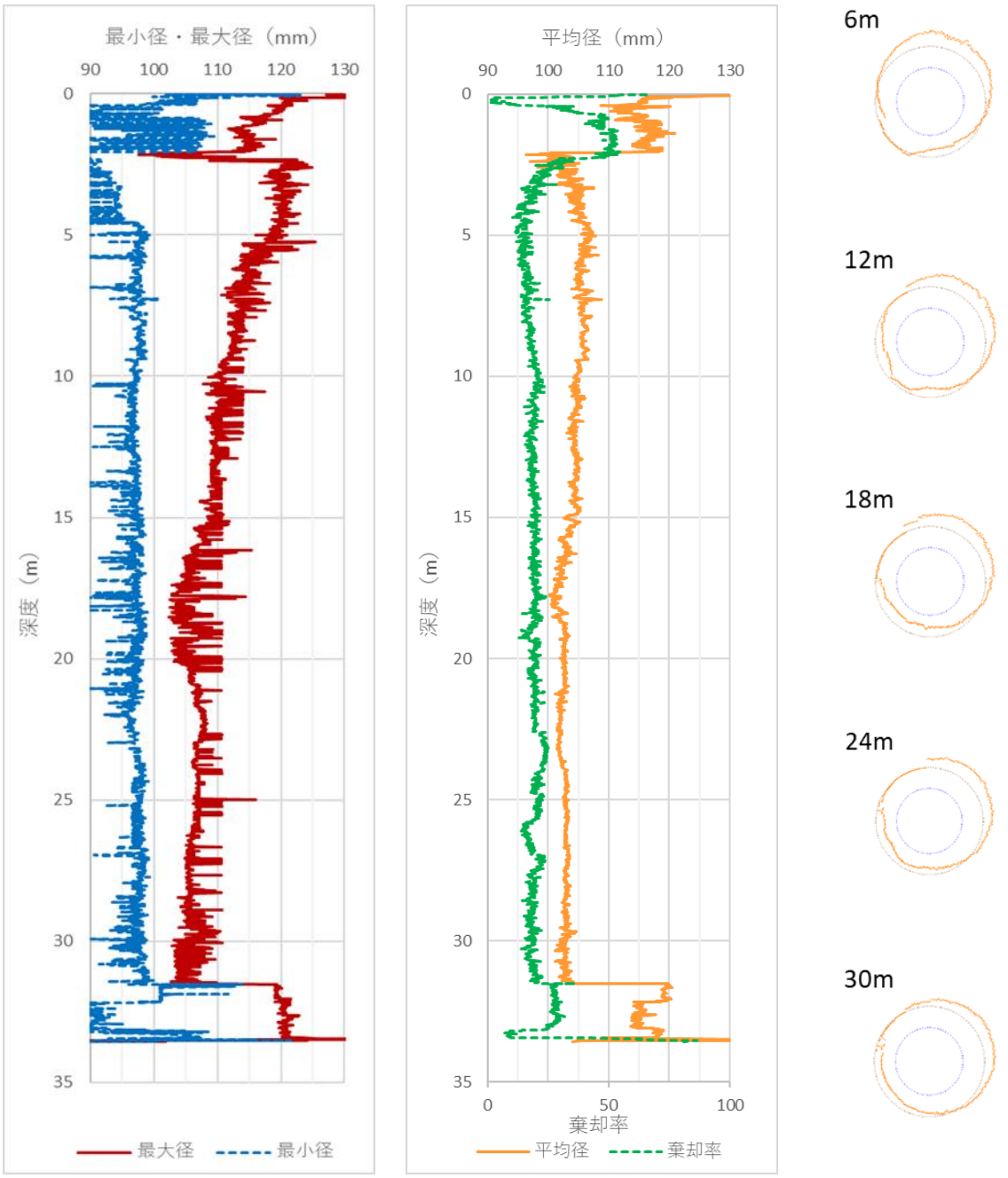
(6) 孔径検層

孔径検層で一般に用いられるアーム式のキャリパー検層は重力の影響を受けるため、水平ボーリング孔に対して重力の影響を受けない光学式孔径計測をボーリング孔の全長に対して実施した。光学式孔径計測はロープから孔壁面に対して垂直に照射したレーザー光の反射を方位センサ内蔵の小型カメラで斜め上方から撮影し、方位情報とレーザー光の出現位置をもとに、定方位の距離データに変換するものである。したがって、孔内水の有無に関わらず、レーザー反射を視認できる孔内環境であれば、孔壁に非接触で孔径や孔形状を把握できることが特徴である。計測模式図を図 3.4-10 に示す。本計測では計測間隔を 1 cm、検出範囲を 32～84 mm とした。測定の際の装置の孔内への押し込み時にはボーリングマシンの補助を利用し、大型試錐座（北）側に到達するまでプローブを押し込みながら計測した。測定結果を図 3.4-11 に示す。ここで、棄却率はある計測深度における反射レーザー光から得られた計測値のうち検出範囲から外れたデータの存在割合を示す。計測の結果、計測深度 0.00 m～2.07 m 区間の平均孔径は 117 mm、2.08 m～31.51 m 区間の平均孔径は 104 mm、31.52 m～33.56 m 区間の平均孔径は 117 mm であった。2.08 m～31.51 m 区間における孔径の平均値は全区間で概ね同程度であったが、大型試錐座（西）に近いほど最大径が大きくなる傾向が見られた。



※検出範囲：反射レーザ光を検出する際のプローブ中心から孔壁までの距離の最大値から最小値の範囲

図 3.4-10　光学式孔径計測の計測模式図



(a) 最小径・最大径　　(b) 平均径・棄却率　　(c) 断面形状

図 3.4-11　光学式孔径計測の結果

(7) ブロック充填位置の設定

ベントナイトブロックによるボーリング孔の閉塞試験を実施するためのボーリング孔の掘削と検層作業を実施した。2 つの試錐座を貫通するように掘削した BoS-1 孔に対して孔曲がり計測と孔径検層を実施した結果、大型試錐座（西）から見てやや上向き（傾斜角 0.75° 相当）かつ水平方向にほとんど変位がなく、また、ボーリング孔の全長にわたって崩壊や拡幅がないことを確認した。コア観察と BTV 観察の結果より、大型試錐座（西）から 22.0～26.0 mabh の区間に割れ目が少ないことが確認された。以上のことから、22.0～26.0 mabh の 4m の区間をベントナイトブロックの設置位置とすることとした。

3.4.3 ベントナイトブロックの充填試験

(1) 実施概要

250m 調査坑道に掘削した BoS-1 孔を用いて、コンテナを用いたベントナイトブロックの設置方法の確認と設置したブロックの膨潤状況の確認試験を実施した。まず、ベントナイトブロックに求める透水係数を検討するために、BoS-1 孔内のベントナイトブロックの設置位置周辺を対象に透水試験を行い、岩盤の透水係数を評価した。その後、コンテナプローブを用いてベントナイトブロックを BoS-1 孔内に設置した後、模擬地下水を注水することで設置したベントナイトブロックが膨潤し、どのようにボーリング孔の閉塞が進行するかを確認した。

(2) 透水試験

ベントナイトブロックの設置位置は、ボーリング孔の掘削時の各種調査より大型試錐座（西）から 22.0～26.0 mabh の区間としている。透水試験ではベントナイトブロックの設置位置の周辺に複数の区間を設定し透水試験を実施した。透水試験を実施した区間と試験条件の一覧を表 3.4-4 に示す。図 3.4-12 に透水試験時のパッカー編成を示す。各試験の試験区間の設定に基づいてパッカーを設置した。設置したパッカーを拡張した後、試験区間へ注水して試験区間のエア抜きを実施した。その後、仮注水を行い注水流量に対する圧力上昇量から試験方法を選定し、本試験では定流量注水試験を実施した。定流量注水試験はプランジャーポンプを用いて吐出量を一定流量に制御して注水する手法とした。その際、注水時間は 3～4 時間として、表 3.4-5 に示す組成となるように塩化ナトリウムにより調整した模擬地下水を用いた。試験時には大型試錐座（北）から注水を行い、各透水試験での注水量は 3～200 mL/min であった。試験結果より、割れ目を含まない 26.0～27.0 mabh では透水係数が 10^{-10} m/s となり、その他の区間では 10^{-8} m/s であった。この透水試験結果より、26.0～27.0 mabh が健岩部の透水係数を示していると判断した。

表 3.4-4　透水試験の条件および結果の一覧

試験名称	試験区間 （mabh）	区間長 （m）	注水量 （mL/min）	透水係数 （m/s）
透水試験①	26.0～27.0	1.0	3	6.3×10^{-10}
透水試験②	21.0～27.0	6.0	200	1.2×10^{-8}
透水試験③	21.0～26.0	5.0	200	1.8×10^{-8}
透水試験④	21.0～22.0	1.0	150	7.6×10^{-8}

表 3.4-5　模擬地下水の組成

Na^+ (mg//L)	Cl^- (mg//L)
1900	4833

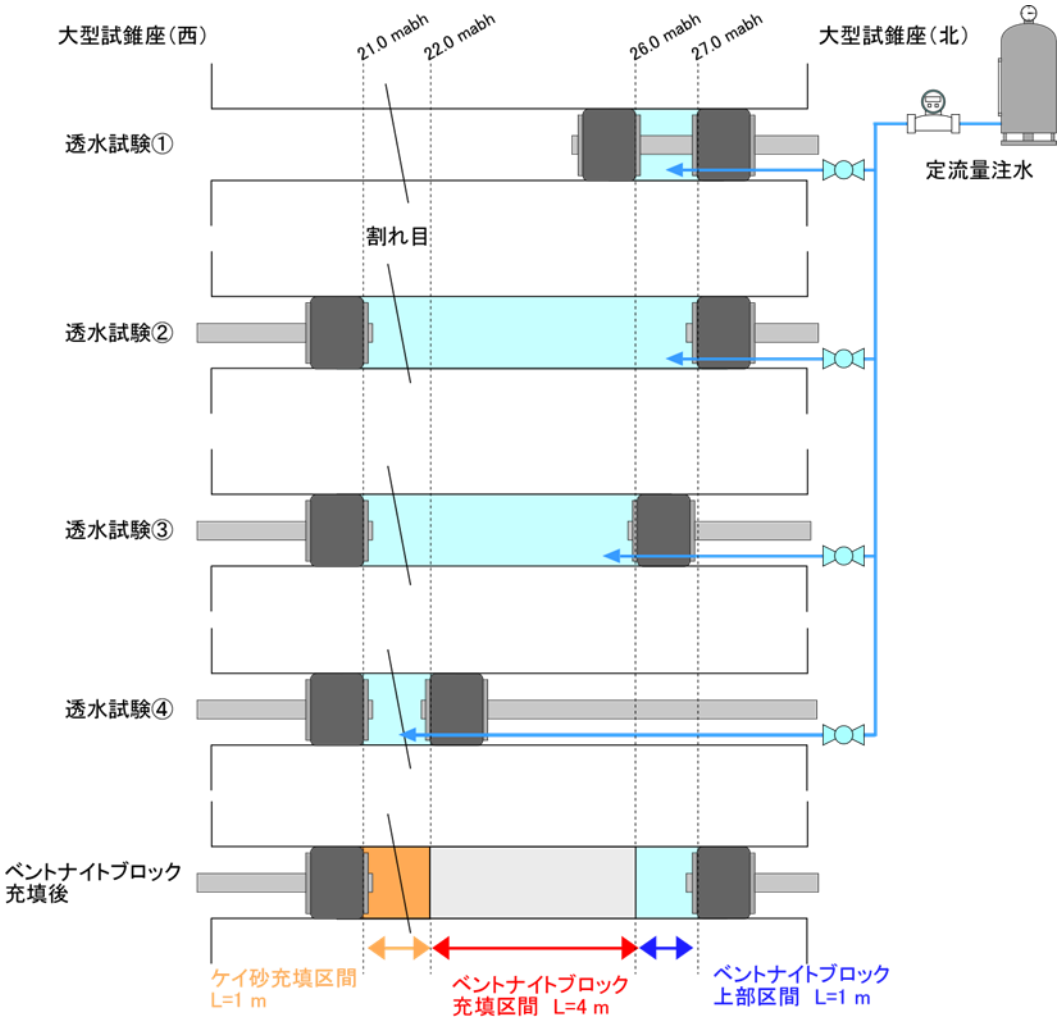


図 3.4-12　透水試験時のパッカー編成とベントナイトブロック充填後のパッカー編成

(3) ベントナイトブロックの仕様の設定

ボーリング孔の閉塞のために設置するベントナイトブロックに求める透水係数の値を BoS-1 孔周辺岩盤の健岩部の透水係数である 10^{-10} m/s とした。塩分濃度を有する水の場合は、ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係（NUMO，2021）より、10^{-10} m/s オーダーの透水係数を確保できる有効粘土密度が 0.80 Mg/m^3～1.1 Mg/m^3 の範囲となる。本試験では、ベントナイトブロックはクニゲル V1 を 100%の割合で作製するとしたため、乾燥密度がそのまま有効粘土密度となる。孔径 100 mm のボーリング孔に対して直径 75mm のベントナイトブロックを設置するとして、ベントナイトブロックが膨潤してしてボーリング孔を閉塞した際の有効粘土密度が 0.90 Mg/m^3 となるようにブロックの作製時の乾燥密度を 1.60 Mg/m^3 に設定した。設定した仕様のベントナイトブロックの膨潤の様子や膨潤後の室内試験を実施した。以下に、その概要と結果を示す。

(a) 室内試験の概要

室内試験ではボーリング孔を模擬するためアクリル製の円筒形試験容器を用いた。試験容器の内径はボーリング孔相当として 100 mm、試験装置の軸方向の内側の長さは 116 mm である。ベントナイトブロックを設置する際には両端部にベントナイトの流出を防ぐためのワイヤメッシュとスペーサを用いて軸方向の内側の長さが 100 mm とすることができる（図 3.4-13）。試験装置

両端のフランジ部には給水と排気のための貫通孔を設けた。

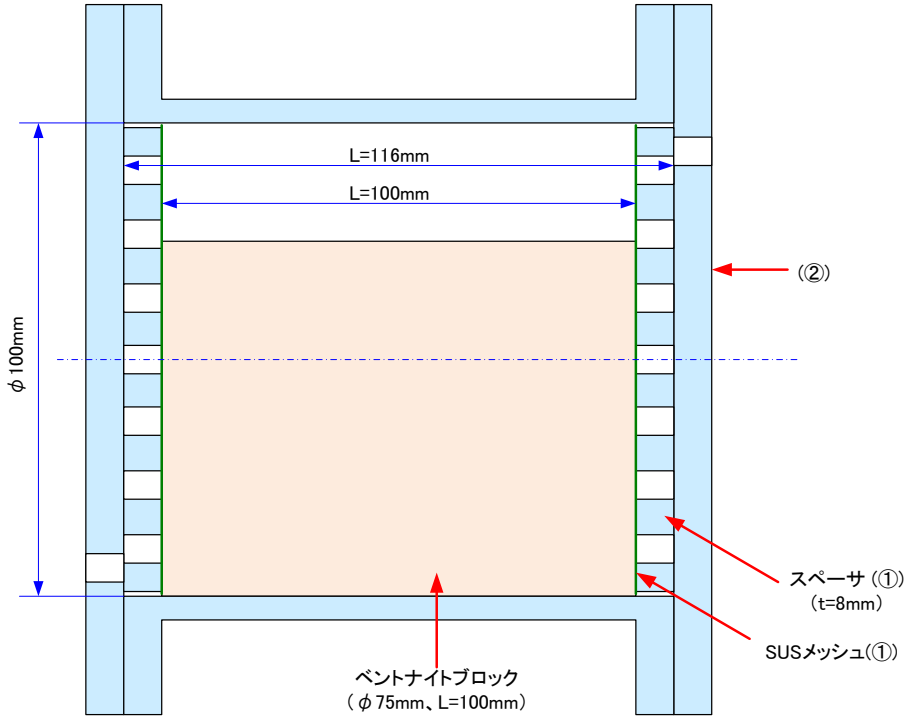
膨潤状況の確認、膨潤圧測定および膨潤後のベントナイトの乾燥密度・含水比測定とそれぞれの測定項目に対して 1 個または複数個の試験装置とベントナイトブロックを準備して試験を実施することとし、合計 4 個のブロックを用いて試験を実施した。表 3.4-5 に測定項目と使用したベントナイトブロックの諸元の対応を示す。ベントナイトブロックは前述の通り、直径を 75 mm、長さを 100 mm、乾燥密度を 1.60 Mg/m^3 として作製した。

膨潤状況の確認にはベントナイトブロックを 1 個（ブロック No.1）使用し、目視確認と連続写真により膨潤状況を記録した。ブロック No.1 の試験容器は内部の観察のためにスペーサとワイヤメッシュは設置せず、試験容器の軸方向の長さが 116mm となっている。

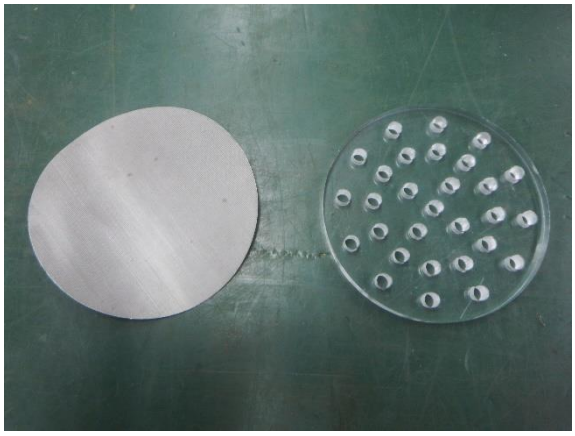
膨潤圧測定にはベントナイトブロックを 1 個（ブロック No.2）使用した。試験容器の上面側に小型圧力センサ（KYOWA 製、PGM-10KE）を取り付けた。小型圧力センサは試験装置の上面に設置用の貫通穴を設けて装置の外側から土圧計を取り付けることで、受圧面を試験装置内面付近へと設置した（図 3.4-14）。

乾燥密度・含水比測定にはベントナイトブロックを 2 個（ブロック No.3 および No,4）使用した。

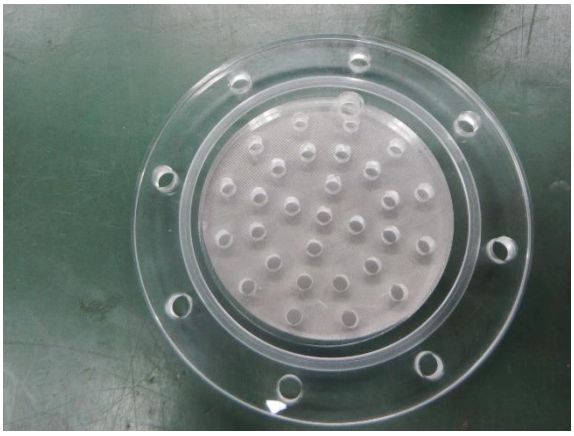
アクリル製容器にベントナイトブロックを充填し、試験容器ごと水槽内に沈めて試験用水に浸した。試験の実施状況を図 3.4-15 に示す。水槽内の試験用水は、原位置の地下水を模擬するため、表 3.4-5 に示したようにナトリウムイオン濃度が 1,900 mg/L となるよう、幌延の地下施設で用いている工事用水に塩化ナトリウムを添加した。



(a) 試験容器の概要図



(b) ワイヤメッシュ（左）とスペーサ（右）

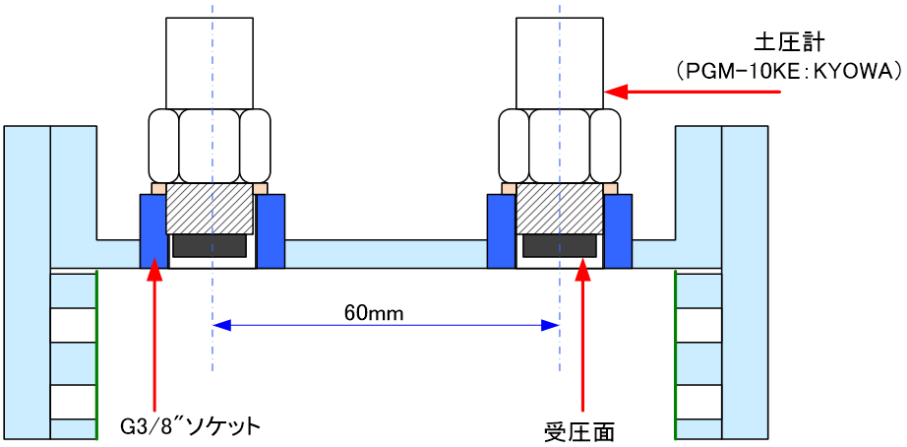


(c) 試験装置端部のイメージ

図 3.4-13　室内試験に用いた試験容器の概要

表 3.4-6　ベントナイトブロックと測定項目の対応

ブロック No.	確認・測定項目	軸方向長さ (mm)	ベントナイトブロック			
			作製前含水比 (%)	平均高さ (mm)	平均直径 (mm)	乾燥密度 (Mg/m^3)
1	膨潤状況の確認	116	22.0	100.35	75.01	1.595
2	膨潤圧測定	100	22.0	100.30	75.02	1.596
3	密度・含水比測定	100	22.0	100.28	75.02	1.597
4	密度・含水比測定	100	22.0	100.25	75.02	1.597



(a) 小型圧力センサの取り付け概略図

(b) 土圧計を取り付けた試験容器の状況

図 3.4-14　膨潤圧測定用の試験装置の状況

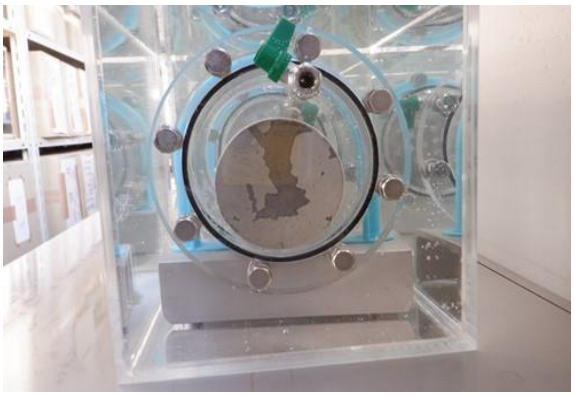
(b) 室内試験の結果

ベントナイトブロックの膨潤状況の確認は、試験容器内の閉塞状況をデジタルカメラなどの映像記録による目視確認を行った。膨潤状況の目視観察を行った結果を図 3.4-15 および図 3.4-16 に示す。試験開始時には、試験容器の内径に対してベントナイトブロックの直径が小さいため、試験容器とベントナイトブロックの間に大きな隙間があった。時間の経過とともに、ベントナイトブロックが膨潤する様子が確認され 7 日程度で上部の排水孔付近まで膨潤し、13 日後にはベントナイトブロックが容器周面全体にほぼ到達した状況が確認された。しかし、31 日後の写真を見ると、正面にひびのようなものが見え始めており、55 日後には、はっきりとわかる程度までひびが進行していた。これらのひびは試験容器の側面では確認できず、正面端部のごくわずかな範囲のものであった可能性が高い。この原因としては、長さ 100mm のブロックに対してスペーサを使用していない試験容器の内寸は長さが 116mm となっており正面端部のみ軸方向へも膨潤変形が可能である影響が考えられる。また、ベントナイトブロックが膨潤して排水孔付近まで達すると、排水孔が閉塞して試験容器内への試験用水の給水が途絶えてしまうため、膨潤の進行が抑制された可能性がある。82 日経過後まで観察を継続したが、その後は顕著な変化は確認されなかった。

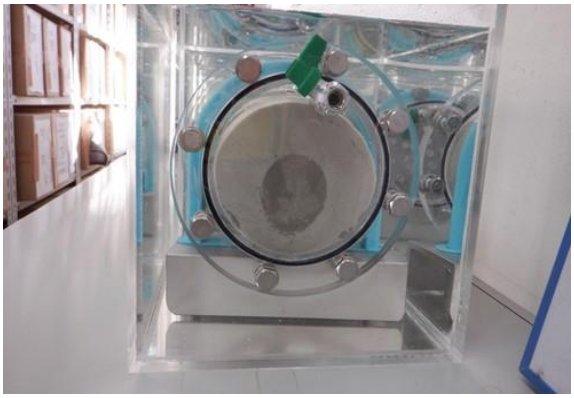
膨潤圧の測定結果を図 3.4-17 に示す。試験開始 7 日後あたりから膨潤圧の値が増加し始め、容器周面全体まで膨潤した 14 日目の時点で約 0.035 MPa、20 日目ごろには 0.05 MPa を示した。

土圧計 1 の計測値は、40 日経過頃までに 0.09 MPa 程度まで上昇したが、その後は上昇ペースが緩やかになり、55 日経過以降は約 0.1MPa でほぼ一定となった。一方、土圧計 2 の計測値は 30 日経過以降から 0.75MPa 程度でほぼ一定となった。2 台の土圧計の計測値は、35 日目ごろまで概ね一致していたが、それ以降、若干の圧力差が生じた。これはベントナイト表面に生じた亀裂の影響などが考えられる。また、土圧計の計測値には最大 0.2MPa 程度の日単位の周期的な変動が確認された。そこで、試験の途中より、T-熱電対式温度計を設置して室温も追加記録した。図 3.4-18 に膨潤圧および室温の計測結果を示す。この土圧計の計測値の周期的な変動は室温の変動に伴うものと推定され、膨潤圧は室温の上昇に伴い低下し、室温の低下とともに上昇する傾向が確認された。

室内試験の終了後に含水比、乾燥密度の計測を実施した。表 3.4-6 に示した 4 個のブロックのうち、No.3 および No.4 については、試験開始 45 日後に試験を終了し、乾燥密度・含水比測定のためのサンプリングを実施した。残りの 2 体についても膨潤圧の変動が収束していることを確認した後、82 日経過後に試験を終了して、乾燥密度・含水比測定に供した。乾燥密度・含水比測定のためのサンプリングは、図 3.4-19 に示すようにベントナイトブロックの上段、中段・下段の 3 ヶ所から採土管を用いて行い、それぞれに対して湿潤密度および含水比を測定し、乾燥密度を算出した。それぞれの測定結果を表 3.4-7 に示す。いずれの供試体においても容器上段側で含水比が 81%～134%、乾燥密度が 0.6 Mg/m^3～0.8 Mg/m^3 であるのに対し、容器中段および下段では含水比が 46%～69%、乾燥密度が 0.9 Mg/m^3～1.2 Mg/m^3 となり、容器上段での含水比が高い傾向が確認された。容器上段はベントナイトブロックが膨潤することによりブロックと試験容器の間の隙間を埋めた部分であり、膨潤後のベントナイトブロックの乾燥密度が不均質な分布を持つことが確認できる。No.1 のブロックについては、前述のとおりスペーサを設置していない分、試験容器の軸方向にも膨潤変形するため他のブロックと比較して乾燥密度が低い結果となった。



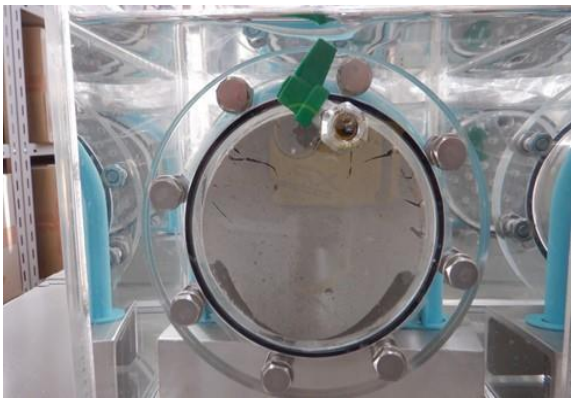
(a) 試験開始時



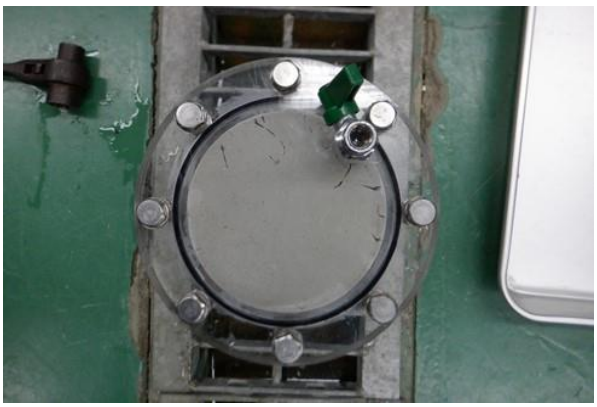
(b) 試験開始 7 日後

(c) 試験開始 17 日後

(d) 試験開始 31 日後

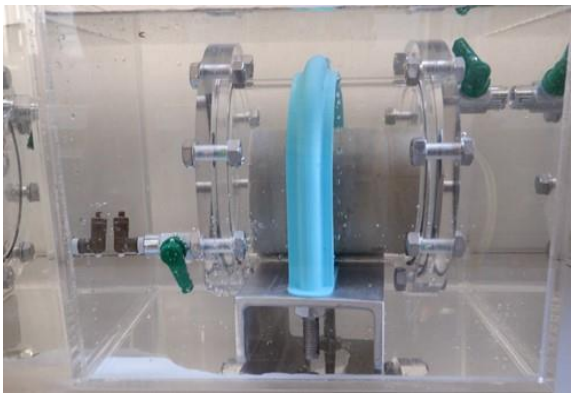


(e) 試験開始 55 日後

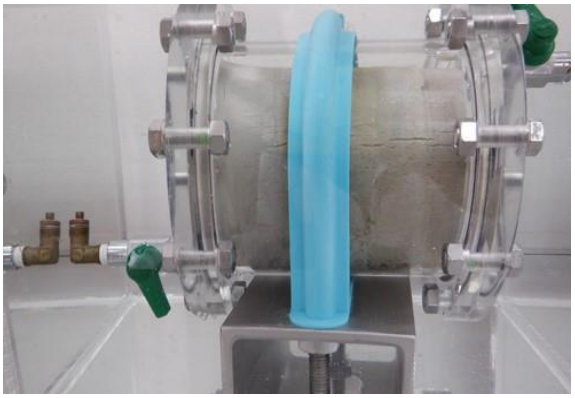


(f) 試験開始 82 日後

図 3.4-15　ベントナイトブロックの膨潤の様子（ブロック正面）

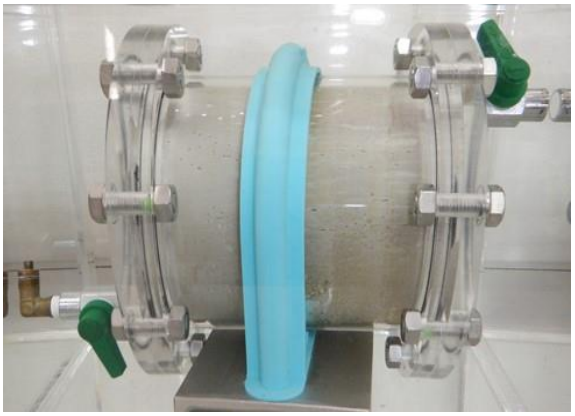


(a) 試験開始時

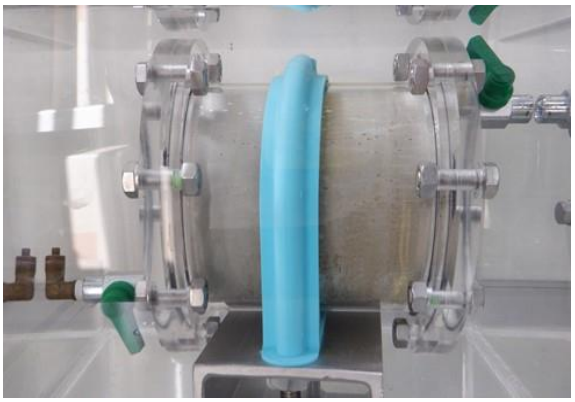


(b) 試験開始 7 日後

(c) 試験開始 17 日後



(d) 試験開始 31 日後



(e) 試験開始 55 日後

(f) 試験開始 82 日後

図 3.4-16　ベントナイトブロックの膨潤の様子（ブロック上面）

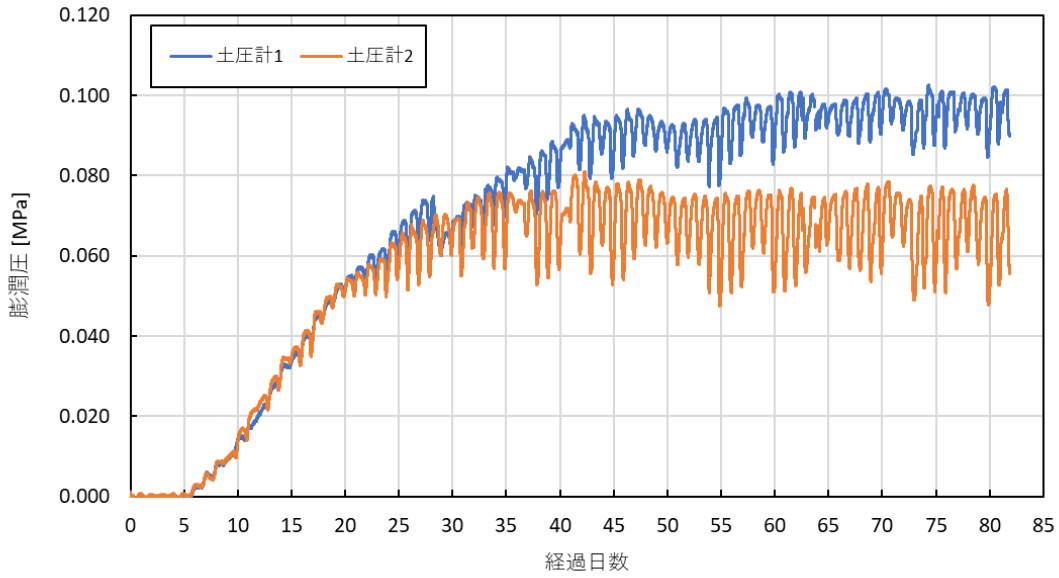


図 3.4-17　膨潤圧の経時変化

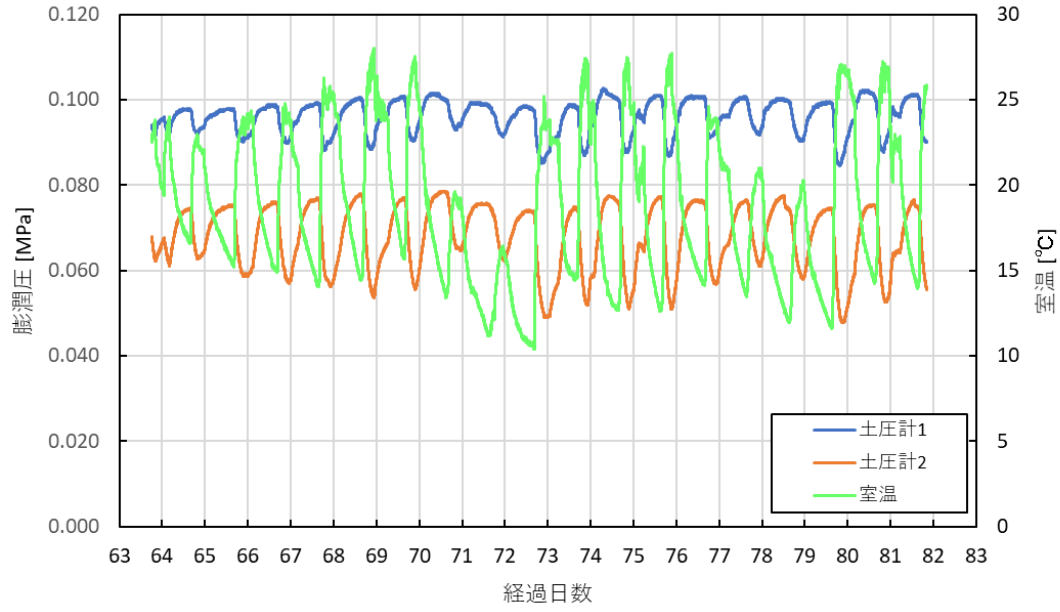


図 3.4-18　膨潤圧と室温の計測結果

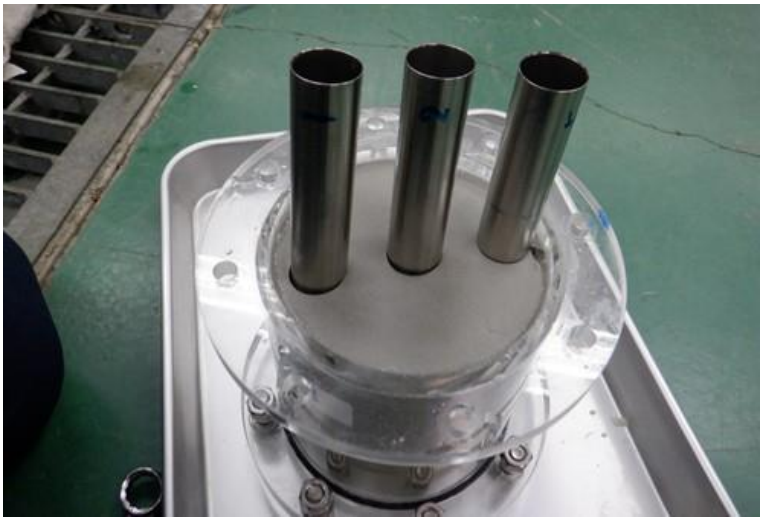


図 3.4-19　乾燥密度・含水比測定のためのサンプリング状況

表 3.4-7　乾燥密度および含水比の測定結果

試験期間	ブロック No.	サンプリング位置	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm^3)	乾燥密度 (g/cm^3)
82 日	No.1（目視確認用）	上段	133.9	1.36	0.58
		中段	69.1	1.59	0.94
		下段	52.1	1.69	1.11
	No.2（膨潤圧計測用）	上段	81.4	1.51	0.83
		中段	53.1	1.68	1.09
		下段	57.1	1.65	1.05
45 日	No.3	上段	98.7	1.43	0.72
		中段	51.8	1.67	1.10
		下段	45.6	1.76	1.21
	No.4	上段	99.4	1.45	0.73
		中段	50.7	1.71	1.13
		下段	45.9	1.73	1.19

(4) BoS-1 孔へのベントナイトブロックの設置と膨潤状況の確認

(a) ベントナイトブロックの設置手順

令和 3 年度に実施した室内モックアップ試験と同様にコンテナを用いてベントナイトブロックを設置する方法を採用した（原子力機構・原環センター，2022）。図 3.4-20 にコンテナを用いた方法の概念を示す。コンテナは、ベントナイトブロックを押し出すための水圧駆動のピストン付きロッドを備えている。また、コンテナの先端はフタを取り付けることにより密閉可能な構造となっている。

コンテナによるベントナイトブロックの設置手順は、まず、(a)ベントナイトブロックを収納しフタにより密閉したコンテナをボーリング孔内に挿入する。(b)設置箇所までコンテナが到達した後に、コンテナへ注水することにより、コンテナが移動してフタとともにベントナイトブロック

がボーリング孔内へと排出される。(c)コンテナをボーリング孔から抜きとったのち、ベントナイトブロックがボーリング孔内の地下水により膨潤し隙間を埋めることでボーリング孔が閉塞する。この方法では、コンテナを密閉するためのフタがボーリング孔内に残置されることになる。

図 3.4-21 に本試験で用いたベントナイトブロックの充填装置を示す。充填装置は 100mm 程度のボーリング孔に挿入できるように外径 90mm のコンテナにベントナイトブロック（直径 75 mm、長さ 100 mm）を最大 10 個（1 m 分）収納可能な構造とした。充填作業中に地下水がブロックに接触して膨潤することを防ぐためにコンテナ端部にガラス製の蓋を取り付け密閉することができる。コンテナをブロックの設置箇所まで挿入したのち、コンテナに接続されたチューブを介してピストン付きロッドの上部に注水してコンテナ内部のピストンを移動させることで、ガラス蓋とベントナイトブロックをボーリング孔内に押し出す。ピストンが作動するためにはコンテナの先端側に反力が必要となる。

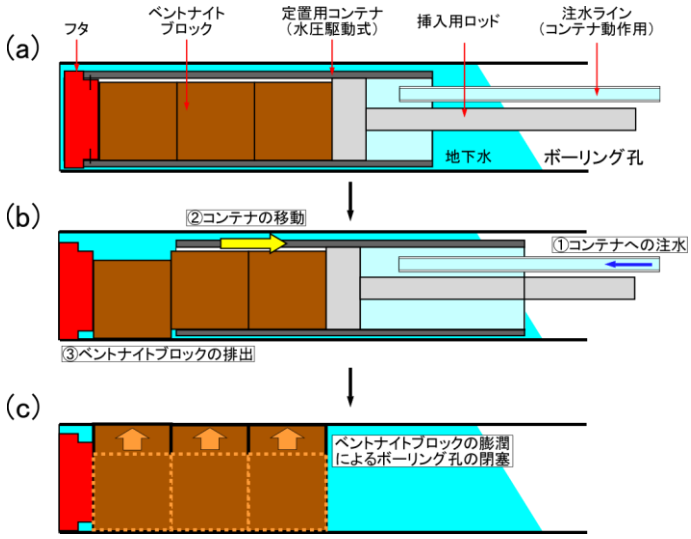
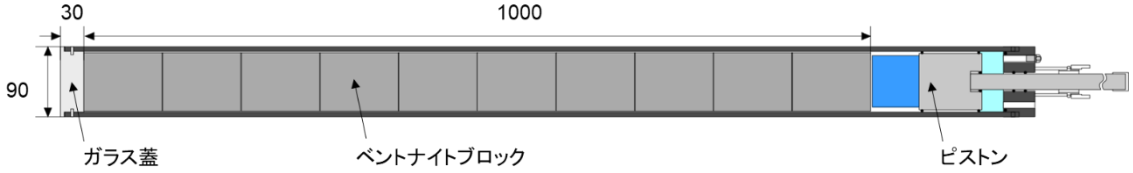


図 3.4-20　コンテナを用いたベントナイトブロックの設置概念



(a) ベントナイトブロック充填装置の概略図

(b) ガラス蓋およびガラスピン

(c) ベントナイトブロック充填装置の外観

図 3.4-21　ベントナイトブロック充填装置

(b) ベントナイトブロックの設置作業

ベントナイトブロックの設置は 22.0～26.0mabh の 4m 区間を対象とし、コンテナを用いた設置作業は 4 回実施した。設置作業中のボーリング孔内の状況を図 3.4-22 に示す。コンテナの挿入などの設置作業は、大型試錐座（西）で実施した。設置作業中は、BoS-1 孔では地下水の流入がほとんどなかったため、大型試錐座（北）から模擬地下水を流量 100 mL/min で注入した。設置作業は、①コンテナの準備、②コンテナの挿入、③ブロックの設置、④コンテナの回収、⑤段取り換えの 5 つの作業に分け、それぞれの作業に要した時間を記録した。各作業の内容を以下に示す。

① コンテナの準備では、コンテナへのベントナイトブロックの格納およびガラス蓋、ガラスピンの装着、ピストン付きロッド上部の空気抜き作業を実施した。

② コンテナの挿入では、コンテナにロッドを接続しながらボーリング孔内の所定の深度に達するまで挿入した。コンテナの挿入は図 3.4-23 (a)に示すように、電動ウインチを用いてワイヤーを巻き取る力を 2 台の滑車を用いたボーリング孔へ押し込む力に変換して実施した。コンテナの挿入深度は、コンテナに接続したロッドの長さとロッドの残尺から確認した。

③ ブロックの設置では、所定の深度にコンテナが達した後、ピストン付きロッドの上部へと注水した。この時、注水圧力を 0.5 MPa として、1m 分のブロックをコンテナから排出するために約 5 L の水が必要であった。また、ピストンの反力は大型試錐座北から 26.0 mabh へ設置したパッカーとした。ブロックがコンテナから排出されたことをロッド残尺が 1m 増加したことにより確認した。

④ コンテナの回収では、図 3.4-23 (b)に示すように電動ウインチを用いてボーリング孔内からコンテナを回収した。

⑤ 段取り換えでは、次の作業のためのウインチの準備や作業スペースの整理などを実施した。

設置作業の状況を図 3.4-24 に示す。また、設置作業に用いたベントナイトブロックの諸元を表 3.4-8～表 3.4-11 に設置作業の結果を表 3.4-12 に示す。設置作業の 1 サイクルの所要時間は 40 分～60 分程度であった。各作業の所要時間について以下のようにまとめた。

- コンテナ準備は概ね 5 分程度となった。作業環境に関わらず所要時間に大きな差は生じない作業と考えられる。
- コンテナ挿入は、1～2 回目は 20 分程度所要したが、3 回目以降は 10 分程度と大幅に短縮した。所要時間が短縮された要因は、作業員が作業要領を習得していったこと、および 3 回目以降から電動ウインチから人力挿入主体へ切り替えたことによる。
- 電動ウインチを用いた際に、ウインチの出力に対してロッド自重による負荷が小さくウインチのワイヤーが空巻きとなり、電動ウインチのワイヤー張り直し作業が増え作業効率が低下する場合があった。そこで、3 回目の作業からコンテナに接続されたロッドが短い浅い深度では人力による挿入に切り替えた。電動ウインチの使用は、挿入長や孔傾斜などによる装置重量の負荷に応じて適宜選択することが望ましい。
- ベントナイトブロックの設置作業には 6～12 分を要した。作業を重ねることで所用時間は短縮されたが、初回の充填時に基本的な機器の準備を済ませておけば 2 回目以降は作業時間に大きな差は生じないと考えられる。
- コンテナ回収の所用時間は、挿入時と同様である。
- 段取り替えは、次の挿入手順へ切り替える作業を含んでおり所要時間は 8～15 分である。コンテナ回収とコンテナ挿入におけるワイヤーと滑車の付け替えなどの定型作業以外にも、次の挿入に向けたチューブ、ロッドの取り回しなどの不定形作業も含まれるため、充填深

度や作業環境などで所要時間は変わると考えられる。

・ 充填作業のサイクルに含まれない単独作業として、電動ウインチのセッティングが挙げられる。今回の検討では透水試験の作業の待ち時間を利用して約 1 時間で準備を行った。電動ウインチの準備作業は、ボーリング孔の状況や孔の傾斜、ベントナイトブロックの充填位置までの距離など、ボーリング孔内の環境次第で準備する機材や所要時間は大きく変わると考えられる。

4 回のベントナイトブロック設置作業が終了した結果、設置区間は 21.76～26.0 mabh となり想定していた区間へベントナイトブロックが設置できることを確認した。充填深度の上端が 21.76 mbah となったのは、ベントナイトブロックの設置の際に厚さ約 3 cm のガラス蓋も孔内に残置したことによる誤差と考えられる。また、2 回目の設置作業の際に反力用パッカーの位置が 26.0 mabh よりも大型試錐座（北）側にずれていることが確認された。そこでパッカーを押し込み、所定の位置である 26.0 mabh に再設置した。この影響で 1 回目に設置した際のガラス蓋は一連の作業で横倒しになった可能性があり、充填区間が 1.08m と想定よりやや長めになっていると考えられる。

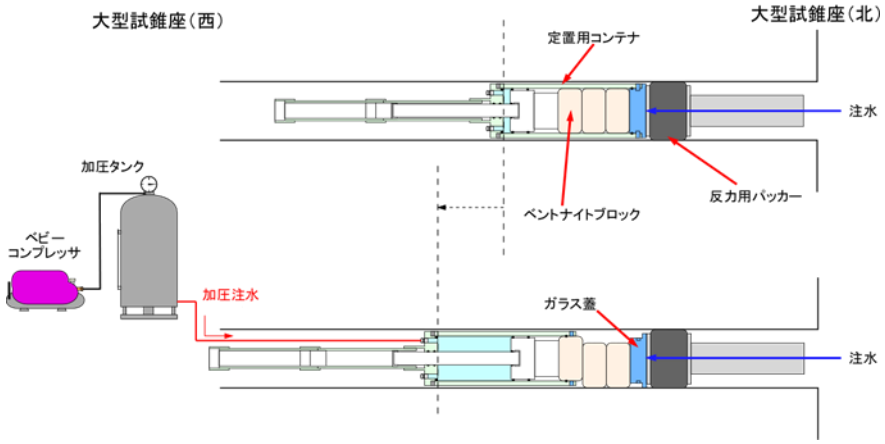
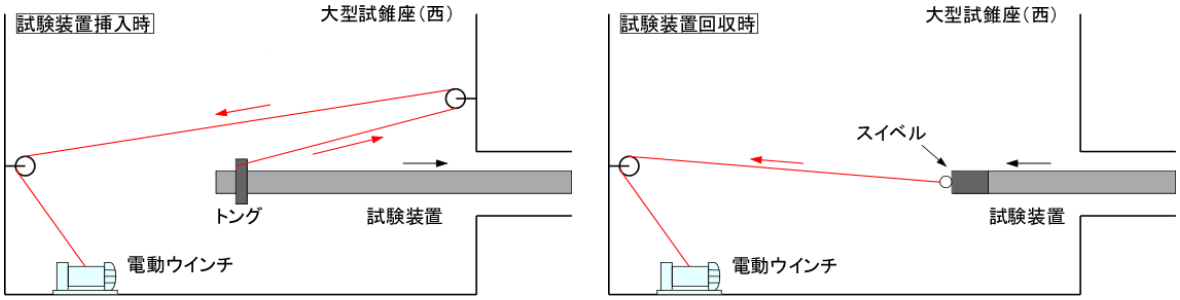


図 3.4-22　ベントナイトブロック設置作業の状況



(a) コンテナ挿入時　　(b) コンテナ回収時

図 3.4-23　電動ウインチを用いたコンテナの挿入・回収作業

(a) ロッドの検尺

(b) ベントナイトブロック 1m 分

(c) ガラス蓋の取り付け

(d) コンテナの挿入作業

(e) ロッドの残尺確認

(f) ピストン付きロッド上部への注水

図 3.4-24　設置作業の状況

表 3.4-8　ベントナイトブロックの諸元（設置作業 1 回目）

供試体 No.	作製前含水比	平均高さ	平均直径	乾燥密度
	(%)	(cm)	(cm)	(Mg/m^3)
5	22.1	10.010	7.506	1.598
6		10.033	7.503	1.598
7		10.008	7.512	1.595
8		10.015	7.503	1.600
9	22.1	10.025	7.504	1.595
10		10.008	7.506	1.597
11		10.033	7.502	1.595
12		10.028	7.503	1.595
13	22.0	10.028	7.503	1.598
14		10.013	7.503	1.599

表 3.4-9　ベントナイトブロックの諸元（設置作業 2 回目）

供試体 No.	作製前含水比	平均高さ	平均直径	乾燥密度
	(%)	(cm)	(cm)	(Mg/m^3)
15	22.0	10.018	7.506	1.597
16		10.008	7.503	1.600
17	22.0	10.043	7.499	1.599
18		10.035	7.499	1.601
19		10.025	7.499	1.600
20		10.043	7.502	1.597
21	22.0	10.053	7.499	1.594
22		10.010	7.498	1.602
23		10.023	7.500	1.600
24		10.010	7.500	1.602

表 3.4-10　ベントナイトブロックの諸元（設置作業 3 回目）

供試体 No.	作製前含水比	平均高さ	平均直径	乾燥密度
	(%)	(cm)	(cm)	(g/cm^3)
25	22.0	10.028	7.503	1.597
26		10.013	7.499	1.604
27		10.023	7.507	1.596
28		10.008	7.495	1.605
29	22.2	10.005	7.506	1.600
30		10.028	7.508	1.592
31		10.008	7.494	1.603
32		10.028	7.501	1.598
33		10.018	7.499	1.600
34		10.010	7.501	1.597

表 3.4-11　ベントナイトブロックの諸元（設置作業 4 回目）

供試体 No.	作製前含水比	平均高さ	平均直径	乾燥密度
	(%)	(cm)	(cm)	(Mg/m^3)
35	22.2	10.018	7.500	1.597
36		10.000	7.502	1.603
37	22.2	10.023	7.507	1.594
38		10.020	7.496	1.601
39		10.020	7.504	1.597
40		10.020	7.504	1.597
41	22.1	10.000	7.503	1.604
42		10.033	7.498	1.600
43		10.010	7.497	1.603
44		9.995	7.498	1.605

表 3.4-12　ブロック設置作業の結果

定置	ブロック No.	充填対象深度 (mabh)	1 サイクルの所要時間	備考
1 回目	No.5～No.14	24.92～26.00	セッティング： 5 分 コンテナ挿入：17 分 ブロック充填：12 分 コンテナ回収：17 分	・ロッド 3m×8 本 ・ロッド 1m×2 本 ・定置コンテナ 1.42m
2 回目	No.15～No.24	23.86～24.92	段取り替え　：15 分 セッティング： 5 分 コンテナ挿入：20 分 ブロック充填：11 分 コンテナ回収：15 分	・ロッド 1m 分除去
3 回目	No.25～No.34	22.81～23.86	段取り替え　：13 分 セッティング： 5 分 コンテナ挿入：10 分 ブロック充填： 6 分 コンテナ回収： 5 分	・ロッド 2m 分除去
4 回目	No.35～No.44	21.76～22.81	段取り替え　： 8 分 セッティング： 5 分 コンテナ挿入：12 分 ブロック充填： 8 分 コンテナ回収： 6 分	

(c) 設置したベントナイトブロックの膨潤状況の確認

ベントナイトブロックの設置後には模擬地下水を継続して注水し、ブロックの膨潤状況を確認するために注水に伴う間隙水圧の経時変化などを計測した。模擬地下水の注水期間における BoS-1 孔の状況を図 3.4-25 に示す。模擬地下水は大型試錐座（西）側から 100 mL/min の流量で約 6 週間注水した。

大型試錐座（西）側に設置したパッカーの注水ラインにベントナイトブロックが膨潤して干渉しないようにパッカーとベントナイトブロックの間にケイ砂を充填した。ケイ砂は 1 号を用い、充填区間は約 1m とした。ケイ砂の充填作業にはベントナイトブロック設置用のコンテナを用いた。最初のケイ砂充填時にはピストンが作動せずケイ砂を充填できなかったため、コンテナを一旦回収し、点検を行った結果、ガラス蓋が外れていないことが確認された。これは、コンテナの内容物が砂のような粒状体の場合、ベントナイトブロックと異なってピストンに作用する圧力が砂に吸収されて、ガラス蓋までうまく伝わらないことが原因と考えられた。そこで、再度ケイ砂の充填作業を行った時には、ガラス蓋を固定するガラスピンの本数を半分に減らすとともに、ピストンを作動させるための注水圧を 0.5 MPa から 1.0 MPa まで高める等の工夫を施すことでピストンが作動し、ケイ砂を充填することができた。その際、所定の位置より数 cm 手前で定置コンテナが入らなくなったが、充填区間は 20.67 mabh～21.76 mabh となり概ね所定の位置にケイ砂を充填することができた。ケイ砂充填後には大型試錐座（北）側のパッカーを 27.0 mabh の位置に設置し、ベントナイトブロックの端部から 1m 程度の距離をとった。

模擬地下水の注水期間中は、大型試錐座（北）側からチューブ（内径 4 mm）を通して排水できる構造として、注水流量、排水流量、ケイ砂充填区間（以下、西側）の間隙水圧およびベントナイトブロック端部と大型試錐座（北）側のパッカー間（以下、北側）の間隙水圧を測定した。

注水期間中の注水流量、排水流量および間隙水圧を図 3.4-26 に示す。排水流量は試験の開始初期に大きな乱れがみられた。大型試錐座（北）からの排水にボーリング孔内の遊離ガスが混ざっていることが確認され、遊離ガスの存在により流量計での測定値が乱れていることが分かった。そこで、流量計の手前に図 3.4-27 に示す気液分離管を設置し、遊離ガスを取り除くこととした。その結果、15 日目以降は安定して排水流量を計測することができた。BoS-1 孔にも若干の湧水があるため、注水流量が 100 mL/min であるのに対して排水流量は 120mL/min 程度と多くなっている。

注水開始後 8 日を経過したあたりから西側の間隙水圧が上昇し、北側よりも約 0.04 MPa 高い値を示すようになった。11 日目以降は圧力上昇が止まり西側の間隙水圧は 0.05 MPa 程度の値を示し、北側よりも約 0.04 MPa 高い値が維持された。これはベントナイトの膨潤が一定程度進行して模擬地下水の流路が狭くなり、西側から北側への水の流れに圧力損失が生じたためと考えられる。その後は、時間の経過とともにベントナイトブロックの膨潤が進行することで西側と北側の圧力差がさらに大きくなることが想定されたが、13 日目に排水流量が 0 mL/min になるとともに西側と北側の間隙水圧が急激に上昇した。状況を確認したところ、北側のパッカーの排水ラインがベントナイトを含む排水により閉塞していることが判明し、試験用水を排水ラインに注水することで閉塞を解消した。しかしながら、その後も排水ラインが閉塞する傾向がみられたため、21 日目以降はパッカーに接続しているロッド（内径 36 mm）に変更して排水を行うようにした。このような対策を取ったにもかかわらず、排水ラインの詰まりとみられる圧力上昇が確認されたため、再びパッカーを回収して点検したところ、ロッド内の閉塞ではなく、膨潤したベントナイトブロックがパッカー先端の排水口付近まで到達していたことによる排水障害である可能性が高いと考えられた。そこで、パッカーを数 cm 北側にずらして再設置して試験を継続した。25 日目以降は、注水・排水ともに安定した傾向を示したが、間隙水圧に変化は確認できなかった。ボー

リング孔の閉塞の兆候が見られないことから 33 日目からは北側からの排水を停止して、西側からの注水のみを継続しベントナイトブロックの膨潤を促進させることとした。ベントナイトブロックが膨潤することにより閉塞が進行した場合には、西側と北側の間隙水圧に差が生じると考えていたが、1 週間程度経過しても西側と北側の間隙水圧がほぼ同じ傾向で変化しており、閉塞が進行していないものと判断し、40 日が経過した時点で試験を終了した。

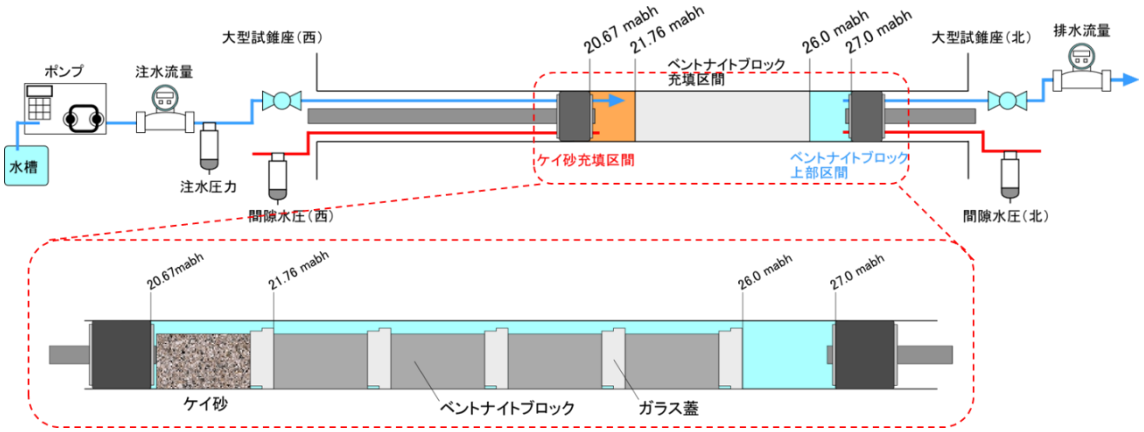


図 3.4-25　模擬地下水の注水期間の状況

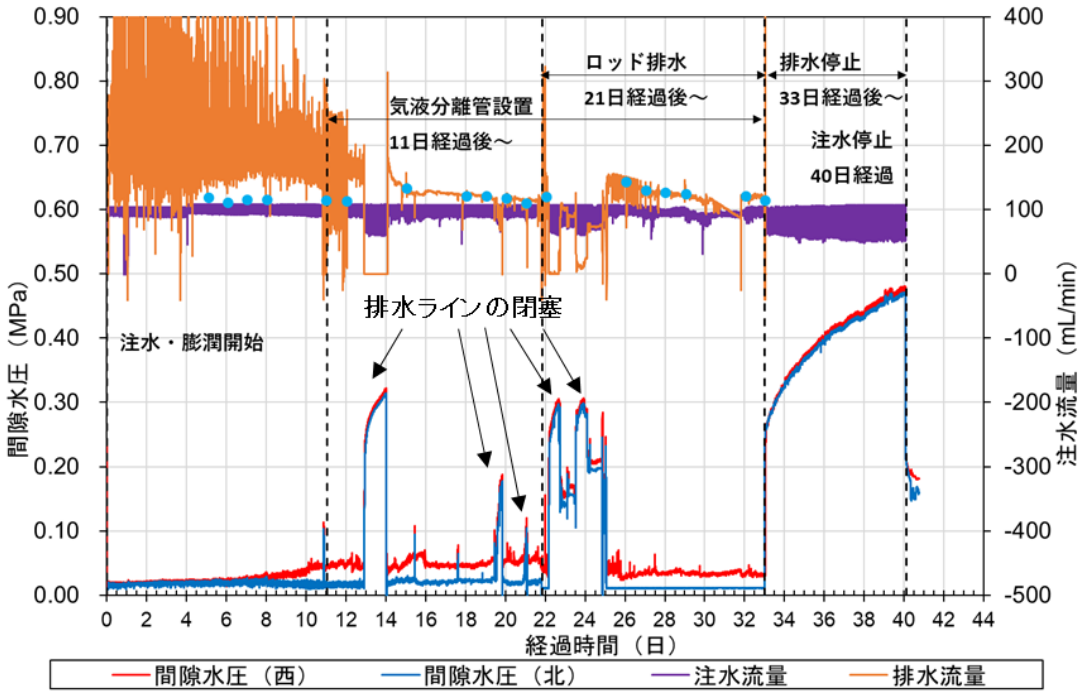
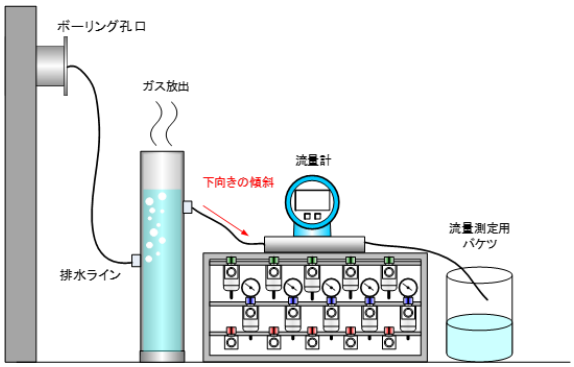


図 3.4-26　模擬地下水の注水期間における注水流量、排水流量および間隙水圧



(a) 気液分離管の概略　　（b）気液分離管の外観

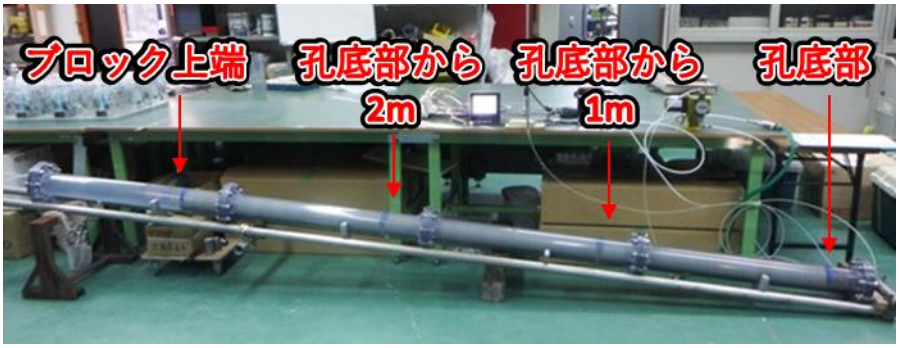
図 3.4-27　排水ラインに設置した気液分離管

(d) ベントナイトブロックの膨潤挙動の考察

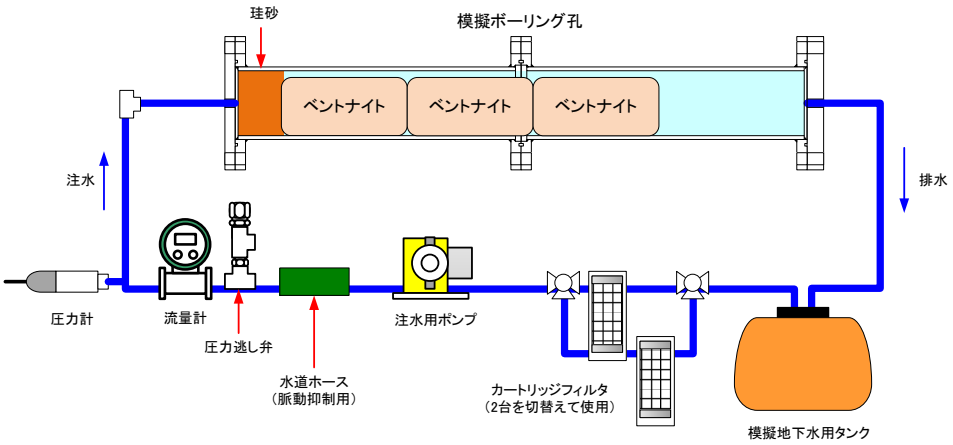
図 3.4-28(a)に令和 3 年度に実施したモックアップ試験で、模擬ボーリング孔に設置したベントナイトブロックに模擬地下水を注水して膨潤状況を確認した際の状況を示す。モックアップ試験では水平下向きに 5°の傾斜をつけた長さ 4m の模擬ボーリング孔に 3m 分のベントナイトブロックを設置した。ベントナイトブロックの充填後には、図 3.4-28(b)に示す循環システムを構築して模擬ボーリング孔の孔底部から 100mL/min の流量で注水を継続し、目視による膨潤状況の観察と注水状況の時間変化を測定した。図 3.4-29 にモックアップ試験の結果の一例を示す。試験開始時は注水流量が 100 mL/min、注水圧力はほぼ 0 MPa であったが、試験開始後 18 日目ごろから注水圧力が徐々に上昇し、それに対応するように注水流量が徐々に減少することを確認した。その後、注水流量はさらに低下し、試験開始後 32 日目には注水流量が 40 mL/min、注水圧力が 0.13 MPa となった。ベントナイトブロックの膨潤が進んでベントナイトブロックと模擬ボーリング孔の間の水みちが狭くなっていることを目視で確認しており、ブロックと模擬ボーリング孔の間の隙間が狭くなることで注水圧力が上昇し注水流量が減少していると考えられ、ボーリング孔の閉塞が進行しているものと判断した。

令和 4 年度に実施した原位置での試験においても、ベントナイトブロックの膨潤により隙間が狭くなり流路抵抗が増え、間隙水圧の上昇と注水流量の低下が起こると想定していた。しかし、モックアップと同等の条件で注水を行っていたものの、実際には 100 mL/min の一定の流量で注水が続き、西側と北側の間隙水圧差も最大で約 0.04MPa 程度であった。

上記のようにモックアップ試験と原位置試験でベントナイトブロックの膨潤状況に差が出た原因として、使用したポンプの性能の影響が考えられる。令和 3 年度に実施したモックアップ試験では、最大吐出圧が 0.5 MPa のダイヤフラムポンプを利用している。ベントナイトブロックの膨潤により水みちが狭くなることで抵抗が大きくなり、注水流量の低下と試験区間の圧力上昇が生じたと考えられる。一方で、原位置試験での試験では最大吐出圧が 5.0 MPa の HPLC ポンプを利用した。原位置試験においてもベントナイトブロックが膨潤することによりボーリング孔の孔壁との隙間が狭くなるが、ポンプの吐出能力が高いため抵抗が増えても安定して注水が可能であったと考えられる。そのため、モックアップ試験と比較してブロックと孔壁の隙間の閉塞が進まなかったと考えられる。

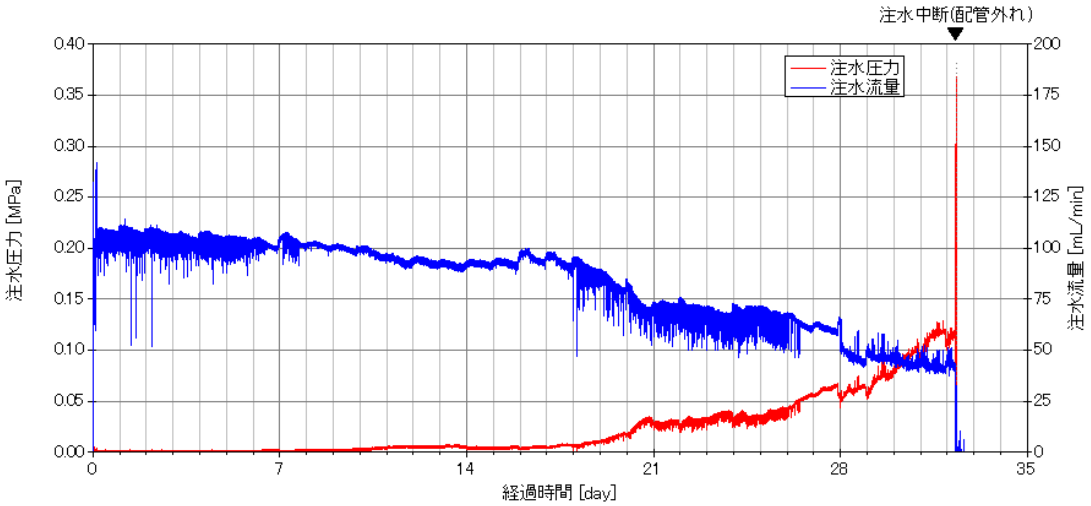


(a) モックアップ試験の実施状況

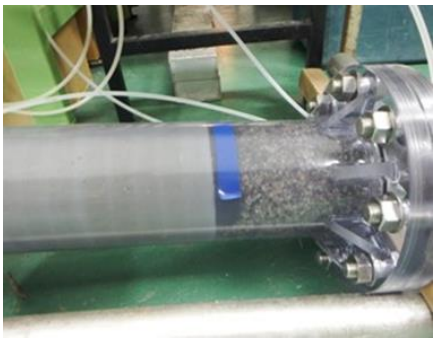


(b) 循環システム

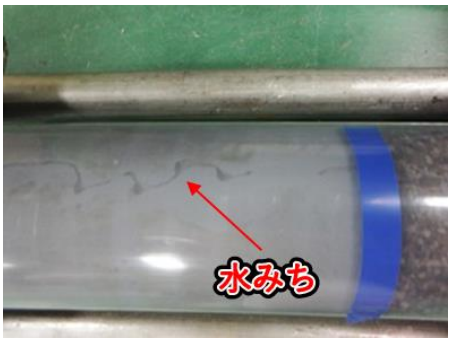
図 3.4-28　モックアップ試験の実施概要
（原子力機構・原環センター，2022）



(a) 注水圧力と注水流量の経時変化



(b) 孔底部の状況（10 日目）



(c) 孔底部の状況（30 日目）

図 3.4-29　モックアップ試験時の注水圧力と注水流量の経時変化および膨潤状況
（原子力機構・原環センター，2022）

3.4.4 まとめ

令和 4 年度は、コンテナを用いてベントナイトブロックをボーリング孔内に設置する手順について、幌延の地下施設に掘削したボーリング孔で確認した。また、設置したベントナイトブロックの膨潤状況を確認するためにボーリング孔へ模擬地下水を連続的に注水した。

- 地下施設内に掘削した孔径 100 mm の水平ボーリング孔において、コンテナを用いた設置装置を用いてベントナイトブロックを 20 m 程度の距離を輸送し、目的とする深度にベントナイトブロックを設置可能であることを確認した。
- 電動ウインチを用いた充填手順について確認を行い、1 回の充填に 40 分～60 分程度要すること、充填深度により施工効率に差が生じると考えられることなどが分かった。
- ボーリング孔への湧水を模擬した 100 mL/min の注水により、ベントナイトブロックが膨潤しボーリング孔の閉塞が進行する傾向を確認した。一方で、ボーリング孔の孔口側から排水を許容する条件では、モックアップ試験と同程度の期間では閉塞は完了しなかった。今後は、ボーリング孔を閉塞できる技術としての適用性を確認するために許容できる湧水量（注水量）や閉塞を進行させるための方策について検討が必要である。また、本試験では 2 つの坑道を貫通したボーリング孔を用いて試験を行っていたが、実際のボーリング孔では、作業ができるのは孔口側からのみとなる。そのため、孔口側からの作業でボーリング孔内に設置したベントナイトブロックの膨潤状況を評価して閉塞していることを確認する方法が課題として残った。

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., Ramqvist, G., Borehole Project – Final Report Phase 3, SKB R-07-58, 2008.

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.

日本原子力研究開発機構，平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書　廃棄物埋設における性能評価手法に関する調査，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，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研究開発事業地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2021.

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，令和 3 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，2022.

舟木泰智，常盤哲也，石井英一，羽出山吉裕，松尾重明，津田和康，小泉朗，石川泰己，大條裕一，杉山和稔，幌延深地層研究計画換気立坑先行ボーリング(PB-V01 孔)調査報告書; 地質調査，JAEA-Data/Code 2008-013，2008.

3.5 EDZ シーリングのための代替材料としての基礎的検討（2）

本事業では、実際の処分場で構築される可能性のある止水プラグの使用材料候補である粘土（ベントナイト）について、実際の地質環境における性能や施工性を把握するための EDZ シーリング試験を実施している。しかし、粘土材料を用いた止水プラグについては、地下深部での大量・高水圧での湧水時の対処、粘土流出を防ぐためのコンクリートプラグの併設による大型化やそれらの施工に伴う EDZ の拡大の可能性といったデメリットも考えられる。

このため、名古屋大学 吉田英一教授を中心とするグループが開発した、自然界で見られるコンクリーションを人工的に生じさせる液体充填材（国際特許取得（国際公開番号:WO2020/040243AI）。以下、コンシードと称す）を原位置岩盤中に注入し、同材料の EDZ の止水に関する適用性を基礎的に検討する原位置試験を令和３年度から開始した（図 3.5-1）。

令和３年度は、幌延深地層研究センター地下施設の坑道内に試験エリアを設け、EDZ の透水性等を確認するための中心モニター孔およびコンシード注入孔を掘削し、注入前の地質的な情報の取得および注入前からの透水性変化に関する情報を取得した（EDZ シーリングのための代替材料としての基礎的検討）。

令和４年度は、「EDZ シーリングのための代替材料としての基礎的検討（2）」として、コンシード注入後の EDZ の透水性変化を確認するための透水試験、コンクリーションの広がりを把握するためのオーバーコアリング、追加孔の掘削（図 3.5-2）とそれらの地質調査を実施するとともに、コンシードが原位置岩盤中で硬化する際の発熱による熱的干渉の影響を把握するための数値解析を実施した。以降に得られた結果を示す。

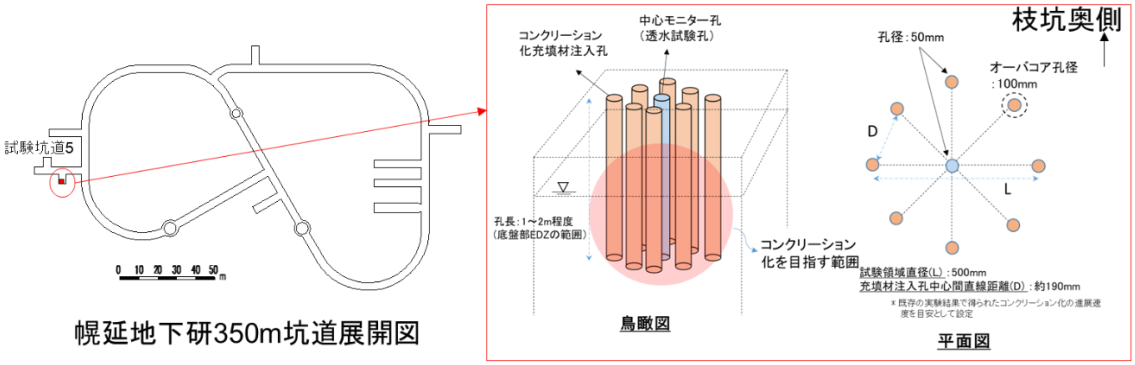
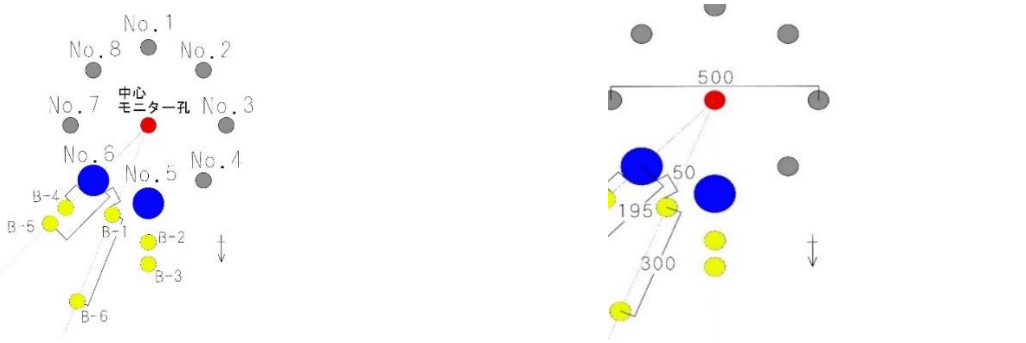


図 3.5-1　作業場所および試験概念図



(a)各ボーリング孔の名称　　（b）各ボーリング孔の配置

図 3.5-2　各ボーリング孔の名称と配置

（青：オーバーコアリング孔、黄色：追加孔）

3.5.1 水理試験（湧水量測定、透水試験）

(1) 試験内容・試験手法

透水試験（図 3.5-3）に使用した主な機器の諸元を、表 3.5-1、表 3.5-2 に示す。これは令和３年度の試験と同一である。なお、今年度の試験では、令和３年度の調査時に把握された孔終端付近の断層破砕部の影響も確認するため、図 3.5-4、表 3.5-3 に示すようにパッカーの位置を変えて試験を実施した。

透水試験は、間隙水圧測定を一晩程度実施したのち、定圧注水で行っている。なお、与えた差圧については、周辺環境への影響を極力低減するため、0.005～0.015MPa 程度の範囲とした。

表 3.5-1　間隙水圧測定に用いた機器の仕様一覧

名称	主な仕様	メーカー
圧力計 (PDCR4000 シリーズ) ※間隙水圧測定用	型式：PDCR4030 測定範囲：0～0.5MPa 精度：±0.1%FS BSL	GE Oil & Gas 社製
タッチ型データロガー (TR-W500)	最大計測チャンネル数 温度/電圧：16ch、パルス：4ch	キーエンス社製

表 3.5-2　定圧注水試験に用いた機器の仕様一覧表

名称	主な仕様	メーカー
NN38 シングルパッカー	拡張方式：下部スライド式 管部：ステンレス パッカー部：ゴム、φ38mm、L70mm	原工業社製
コリオリ式流量センサー (FD-S シリーズ)	型式：FD-SS02A 測定範囲：0～0.2L/min 精度：±1%FS	キーエンス社製
圧力計 (PDCR4000 シリーズ) ※間隙水圧測定用	型式：PDCR4030 測定範囲：0～0.5MPa 精度：±0.1%FS BSL	GE Oil & Gas 社製
圧力計 (UNIK5000 シリーズ) ※注水圧管理用	型式：PMP5033-TB-A3-CA-H0-PF 測定範囲：0～2MPa 精度：±0.1%FS BSL	GE Oil & Gas 社製
タッチ型データロガー (TR-W500)	最大計測チャンネル数 温度/電圧：16ch、パルス：4ch	キーエンス社製
精密レギュレーター （モデル 10）	型式：No.10262U 設定圧力範囲：0.01MPa～1.0MPa 設定感度：±0.2%FS	Fairchild 社製
精密レギュレーター （IR1000）	型式：IR1000-01BG-A 設定圧力範囲：0.005MPa～0.2MPa	SMC 社製
チャンバータンク	有効容量：35L 材質：ステンレス	特注品
コンプレッサー	型式：AK-HH1250E2 エアータンク容量：27L 圧力制御最大値：4.4MPa	マックス社製

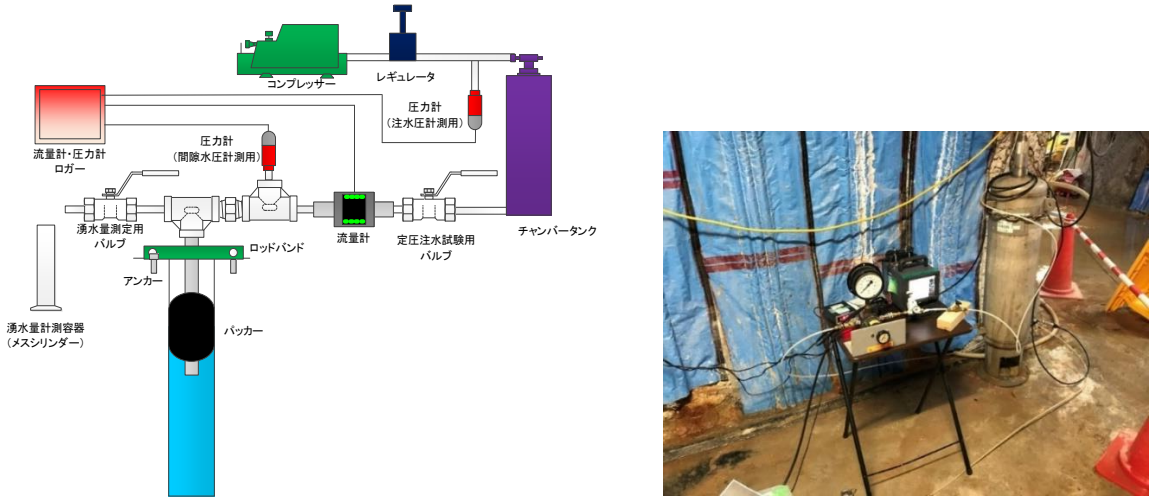
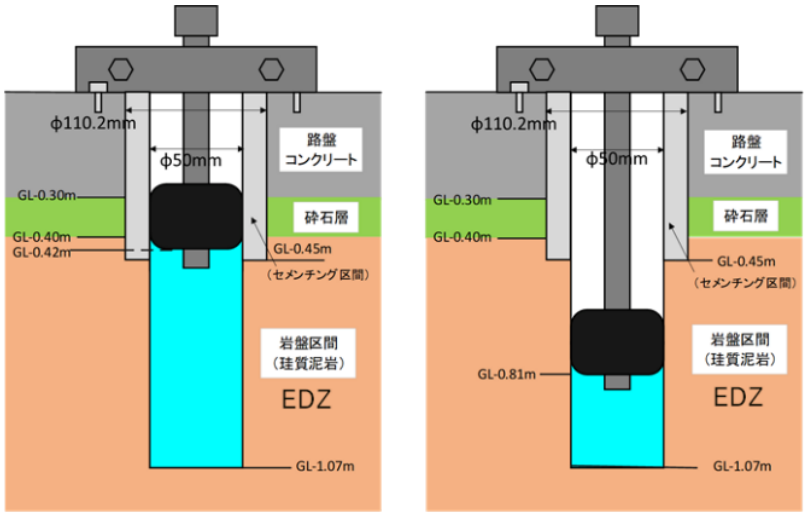


図 3.5-3　試験装置の設置概念図および設置状況



（a）試験 1　　（b）試験 2

図 3.5-4　試験区間

表 3.5-3　試験区間概要

試験名	試験孔	孔角度	試験区間			
			上端 (GL-m)	下端 (GL-m)	長さ (m)	形式
試験 1	モニター孔	鉛直	0.42	1.07	0.65	シングル
試験 2	モニター孔	鉛直	0.81	1.07	0.26	シングル

透水係数は、これまでと同様、以下に示す Hvorslev 定常法を用い算出した（式 3.5-1）。なお、透水係数の算出に用いる値のうち、試験開始前の初期圧は注水開始前 1 分間のデータの平均値、試験区間最大圧および注水流量は試験終了直前の 1 分間の平均値とした。

【Hvorslev 定常式】

$$K(m/\sec) = \frac{2.3 \times Q}{2 \times \pi \times \Delta s \times L} \log(2L/D) \qquad \text{式 3.5-1}$$

ここで、K：透水係数（m/sec）、Q：注水量（m^3/sec）、L：試験区間長（m）
D：試験孔直径（m）、Δs：水頭差（m）

(2) 試験結果

(a) 湧水量測定

透水試験を実施する前に、中心モニター孔の湧水量を測定した。今回は、コンシードの注入から 13 か月経過後の湧水量の確認することを目的とした試験となる。湧水量は 6.0（ml/min）となった。表 3.5-4 に、名古屋大学から提供いただいた湧水量に関する測定データ湧水量も併せて示す。

同表より、中心モニター孔掘削直後の湧水量は、9.7（ml/min）であったが、その周囲にコンシード注入孔 8 本を掘削した時点では湧水がみられなくなり、コンシード注入後には 3.7（ml/min）となった。これは、注入材の初期止水効果を示していると考えられる。また、令和 4 年度の測定（コンシード注入後 13 か月経過後）で、湧水量は 6.0（ml/min）と増加していた。これは、コンシードによる EDZ 内のコンクリーションの進展硬化と考えられる。

表 3.5-4　湧水量測定結果

測定状況	計測日時	採水量(ml)	湧水量(ml/min)
中心モニター孔 掘削直後	2021/3/10 10:00～10:20	194	9.7
コンシード注入孔 8 本 掘削直後	2021/10/8 15:00～15:20	0	0.0
8 本 コンシード注入直後	2021/10/13 13:30～13:45	56	3.7
コンシード注入後 13 か月経過後	2022/10/24 14:42～14:57	90	6.0

(b) 透水試験結果

図 3.5-5 に試験 1（試験区間 GL-0.42m～-1.07m）の圧力―流量の時間変化図を、図 3.5-6 に試験 2（試験区間 GL-0.81m～-1.07m）の図を示す。また、令和 3 年度の本試験開始後に得られた透水係数を表 3.5-5 に示す（水色部は本事業実施分、緑色は名古屋大学からご提供いただいたデータ）。表 3.5-5 より、試験 1 の区間も試験 2 の区間も、概ね同じ透水係数で、10^{-7}（m/sec）オーダーであり、局部的な地質の変化等の影響はないことがわかる。

また、透水係数の変化傾向を把握するため、図 3.5-7 に試験 1 の区間における透水係数の時間変化を示す。図 3.5-7 より、コンシードの注入孔掘削後とコンシードの注入直後は透水係数が高かったが、コンシード注入から 4 か月経過以降は概ね 10^{-7}（m/sec）のオーダーとなり、中心モニター孔掘削直後、すなわち本試験が実施される前の初期状態における岩盤の透水係数と概ね同じ程度となったことがわかる。

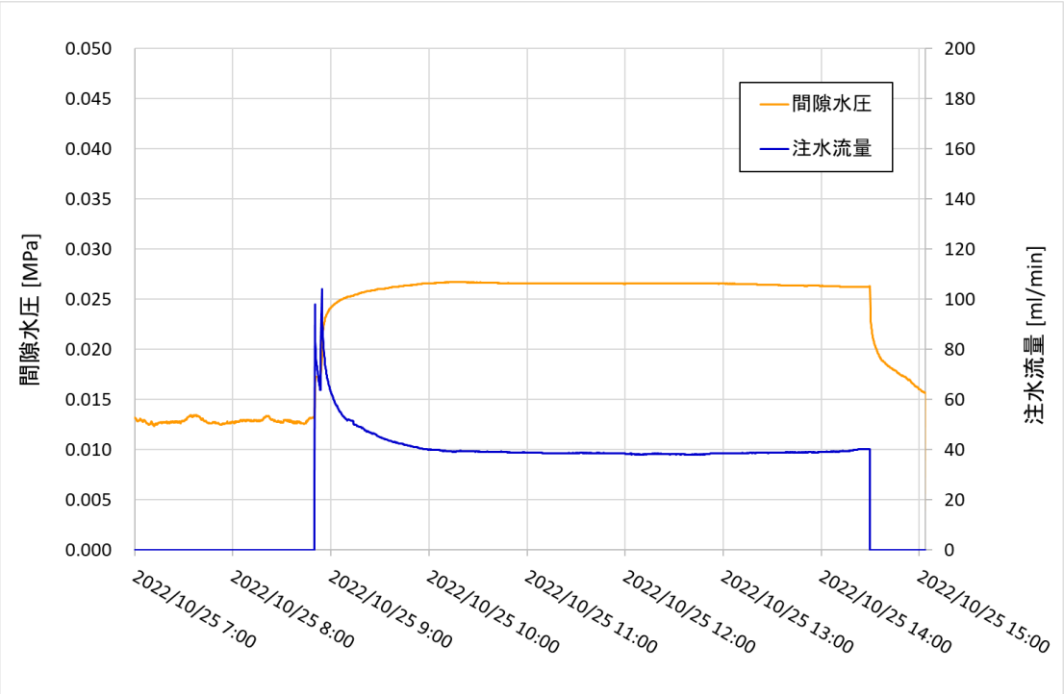


図 3.5-5　試験 1　透水試験結果

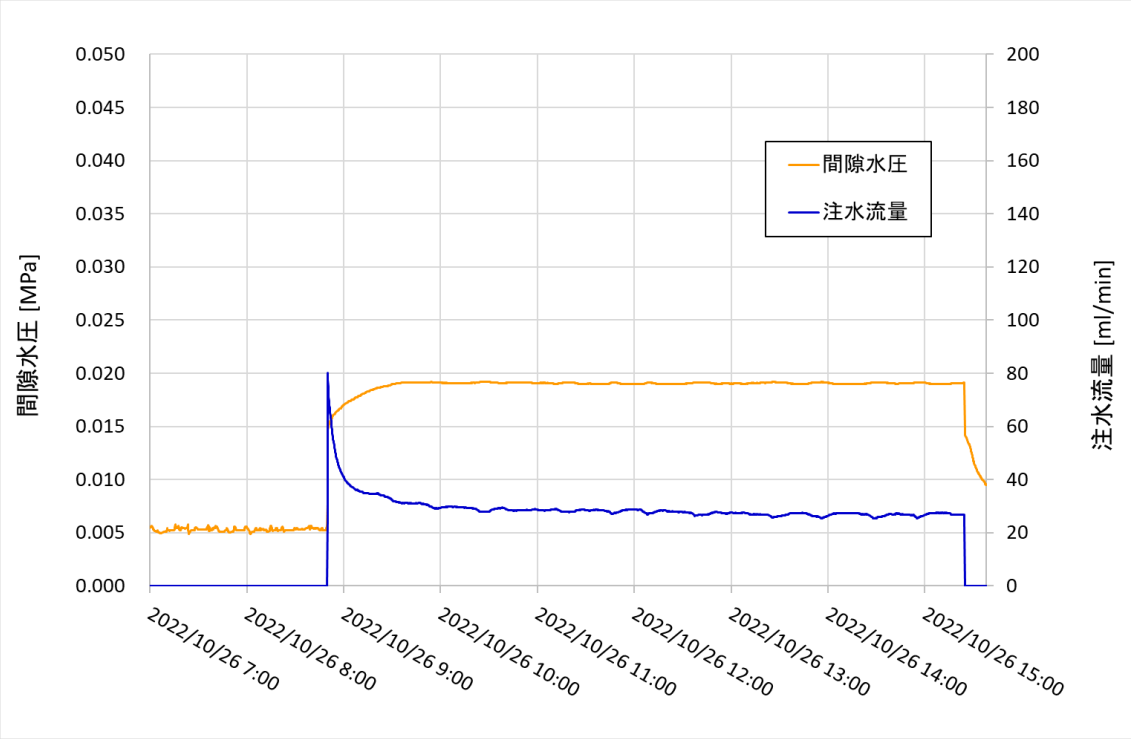


図 3.5-6　試験 2　透水試験結果

表 3.5-5　透水試験結果

試験名		圧力(MPa)			注水流量 (ml/min)	透水係数 (m/sec)	区間長 (m)	半径 (m)	試験区間 (mabh)	
		初期圧	最大圧	差圧						
中心モニター孔掘削直後	ステップ①	0.0088	0.0405	0.0317	117.0	4.81E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
	ステップ②	0.0088	0.0562	0.0474	178.7	4.91E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
	ステップ③	0.0088	0.0770	0.0682	264.2	5.05E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
	ステップ④	0.0088	0.0960	0.0872	335.7	5.01E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
				提案値:	透水係数平均値	4.95E-07				
コンクリーション化充填材注入前		0.0071	0.0111	0.0039	1799.0	5.96E-05	0.650	0.025	0.420	1.070
コンクリーション化充填材注入直後		0.0081	0.0199	0.0118	212.2	2.35E-06	0.650	0.025	0.420	1.070
コンクリーション化充填材注入4か月後	ステップ①	0.0111	0.0205	0.0094	35.1	4.86E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
	ステップ②	0.0111	0.0243	0.0132	44.2	4.36E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
	ステップ③	0.0111	0.0291	0.0180	55.2	3.99E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
	再現性確認	0.0111	0.0205	0.0094	35.0	4.85E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
				提案値:	ステップ①～③の透水係数平均値	4.41E-07				
コンクリーション化充填材注入8か月後	試験1	0.0060	0.0177	0.0118	50.1	5.54E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
	試験2-1	0.0041	0.0177	0.0136	26.4	4.52E-07	0.260	0.025	0.810	1.070
	試験2-2	0.0041	0.0176	0.0135	22.5	3.90E-07	0.260	0.025	0.810	1.070
コンクリーション化充填材注入11か月後	試験1	0.0137	0.0274	0.0137	126.2	1.20E-06	0.650	0.025	0.420	1.070
	試験2	0.0066	0.0213	0.0147	82.1	1.31E-06	0.260	0.025	0.810	1.070
コンクリーション化充填材注入13か月後	試験1	0.0132	0.0263	0.0131	40.2	4.01E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
	試験2	0.0054	0.0191	0.0137	26.7	4.56E-07	0.260	0.025	0.810	1.070

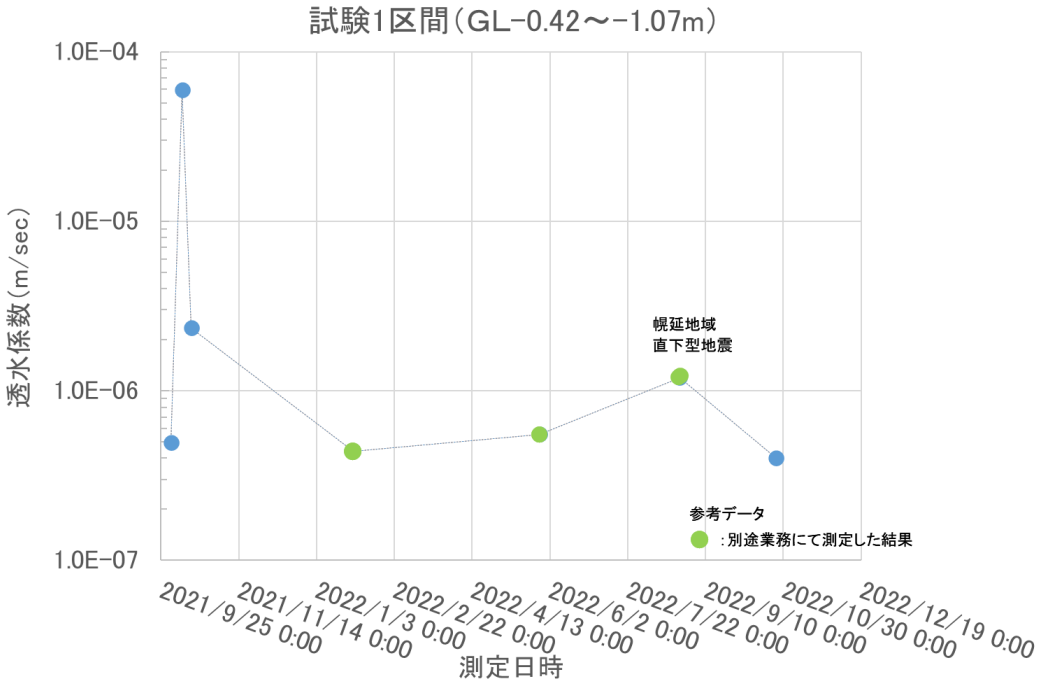


図 3.5-7　透水係数の時間変化（区間長は試験１と同じ）

3.5.2 オーバーコアリングおよび追加孔の掘削と地質調査

(1) オーバーコアリングおよび追加孔の掘削

前出の図に示すように、令和 4 年度は 8 孔のコンシード充填孔のうちの 2 孔のオーバーコアリングとコンクリーションの進展状況調査のための追加孔掘削を実施した。オーバーコアリング孔（以降、拡幅孔）の仕様を表 3.5-6 に、追加ボーリング孔の仕様を表 3.5-7 に、使用機材を表 3.5-8 に示す。またオーバーコアリングおよび追加孔掘削および掘削後の状況を図 3.5-8 に示す。

表 3.5-6　オーバーコアリングの仕様

項目	仕様
対象	コンシード注入孔のうち No.5 孔と No.6 孔を対象に実施。
サイズ	孔径　φ100mm、掘削長　1.5m 程度／孔

表 3.5-7　追加ボーリング孔の仕様

項目	仕様
対象	2 本の拡幅孔の近傍に、計 6 本のボーリング孔を新たに掘削
サイズ	孔径　φ50mm、掘削長　1.5m 程度／孔

表 3.5-8　ボーリング孔掘削で使用する機材一覧表

資機材名	メーカーと型式
ハンマードリル	パナソニック　EZ7880
コアドリル	シブヤ　ダイヤモンドドリル

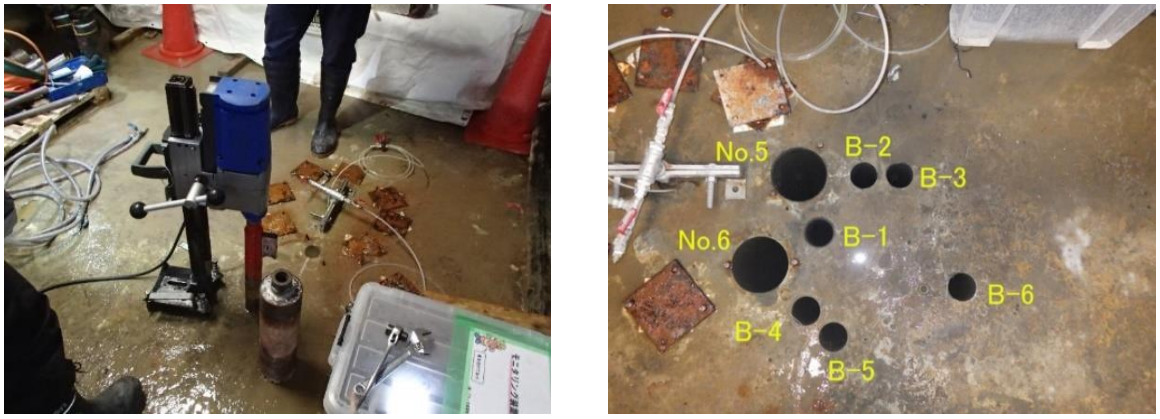


図 3.5-8　ボーリング孔掘削状況および掘削後の状況

(2) コア観察

(a) コア観察方法

コア観察では、通常の地質的な情報の取得の他、コンクリーション化の浸透状況を把握するため、炭酸塩鉱物の分布状況を以下の方法で確認した。

コア試料中の割れ目、コア表面などに塩酸を滴下し、発泡の程度、炭酸塩鉱物の付着状況、相対的な付着量の多寡を目視で調べた。追加孔については、それぞれの亀裂に対し、塩酸を滴下することによって確認した。拡幅で取得したコアについては、5cm あるいは 10cm 間隔を基本に塩酸を滴下し、発泡の有無を調べた。なお、追加孔、拡幅孔どちらのコアも、炭酸塩鉱物の分布が明らかに視認できる場合には、塩酸による確認を省略した。

炭酸塩鉱物の分布状況の分類は、A～C の 3 種および“なし”の 4 種類とした。分類に用いた

基準を図 3.5-9 に示す。

図 3.5-9　炭酸塩鉱物分布状況の分類基準

(b) 観察結果

(i) 地質性状

表 3.5-9 にコア観察によって確認した地盤構成と掘削深度の一覧を示す。また、図 3.5-10 に各孔のコア写真を並べて示す。

コア観察の結果、深度 0.0～0.3m は路盤コンクリート、深度 0.3～0.5m は砕石層、深度 0.4～1.7m は珪質泥岩が分布していたことがわった。既往資料より、本試料における珪質泥岩層は、新第三系中新統稚内層に相当する。

表 3.5-9　コア掘削の概要（下端深度：GL-m）

地盤構成 （下端深度）	注入孔 No.5OC	注入孔 No.6OC	追加孔 B-1	追加孔 B-2	追加孔 B-3	追加孔 B-4	追加孔 B-5	追加孔 B-6
路盤コンクリート	0.25	0.30	0.30	0.25	0.33	0.27	0.26	0.26
砕石層	0.40	0.50	0.45	0.40	0.40	0.38	0.40	0.40
珪質泥岩（稚内層）	1.35	1.70	1.70	1.57	1.65	1.65	1.55	1.54

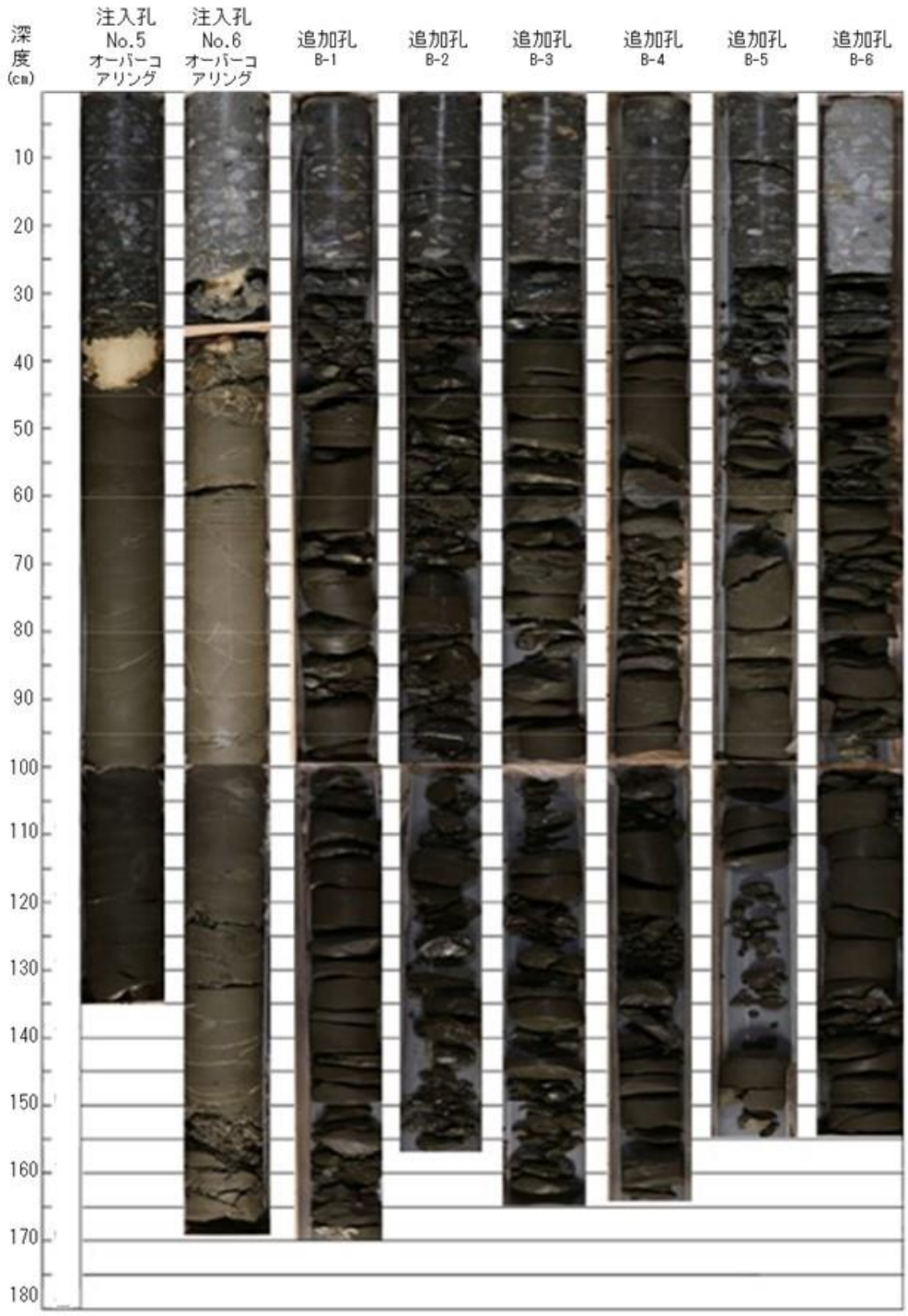


図 3.5-10　コア写真一覧

路盤コンクリートの深度は、おおむね GL-0.3mまでで、どの孔も分布深度に違いはみられなかった。砕石層は、上部はバラスト砕石主体、下部は掘削ズリ主体の 2 層に大別される。砕石層の深度は GL-0.4～0.5m で、孔によって 10cm 程度のばらつきが認められた。砕石層の近接写真を図 3.5-11 に示す。

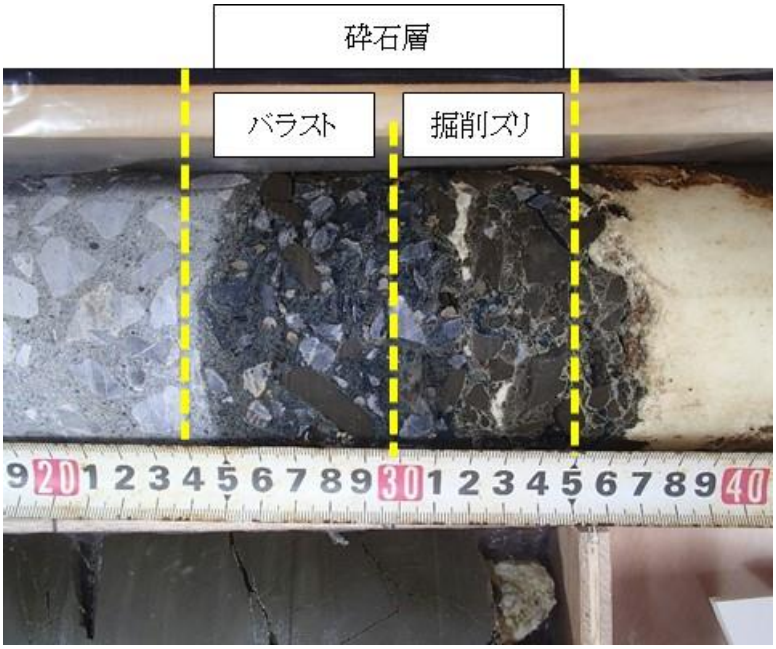


図 3.5-11　路盤コンクリート－砕石部の近影（例：注入孔 No.5 OC）
＊写真中央の湿っている部分が砕石層。周囲と比較して空隙が多く、その部分に水を保持しているため湿っている。

オーバーコアリング孔および追加孔に分布する地質は、いずれも珪質泥岩（稚内層）であり、岩相に大きな違いはみられなかった。色調は暗褐灰色～黒褐色、コアの硬さは H2（ツメで傷が付く程度）、風化程度は w2（新鮮）、変質程度は h2（弱変質）を示した。RQD 値は拡幅孔で 70～100%、追加孔で 0～20%と顕著な違いを示した。これは、拡幅孔については、コアの中心部に硬化したコンシードが貫通している影響で、1 本の棒状コアとして採取されたのに対し、追加孔のコアは中心部にコンシードがないため、掘削の機械割れ等で短柱状～角礫状となった状態で回収されためと考えられる。オーバーコアリング孔のコンシードの状況を図 3.5-12 に、試料採取時の状況を図 3.5-13 に示す。

岩級区分はいずれも電中研式岩盤分類上の CL 級となった。また、後述するが、オーバーコアリング孔のコアは EDZ 内から採取しており、多数のき裂が存在するため通常は分離してバラバラの状態になるが、注入孔とほぼ全てのき裂内にコンシードあるいは炭酸塩鉱物が充填されているため、数十 kg の重量のコアが分離せず回収されている。このことは、コンシードの注入により EDZ の部分にも止水性のみならずき裂面同士を固着するような力学的改良効果が期待できることを示している。

図 3.5-12　オーバーコアリング孔のコンシード（乳白色部）分布状況

図 3.5-13　オーバーコアリング時の試料採取時の状況

No.5 および No.6 孔のオーバーコアリング孔とも、コアには、全長にわたり表面に生痕化石が点在していた。生痕化石は灰色～暗灰色の色調を呈す円～楕円形であった。生痕化石部は、粒度・構成物ともに周囲の岩盤部分とほとんど差異はなく、色調のみによって識別でき、一部の生痕化石では、塩酸をかけると発泡した。生痕化石の例を図 3.5-14 に示す。また、追加孔 B-5　GL-1.5m で L=1cm 程度の貝化石が確認された。葉理、その他の堆積構造については、肉眼で判別できる構造はみられなかった。

オーバーコアリング孔、追加孔全孔において、コア試料のほとんどの亀裂面に白色～乳白色の炭酸塩鉱物がまだら状あるいは層状に付着していた。肉眼では炭酸塩鉱物の付着が確認できない亀裂面についても、塩酸による発泡が認められたことから、微細な炭酸塩鉱物が付着していることがわかった。なお、多くの亀裂面で試験坑道 5 の施工時に使用されたと考えられるグラウト材が確認できたが（図 3.5-15)、グラウトは黒色～暗緑色～淡黄色を呈しコンクリーションによる炭酸塩鉱物とは比較的容易に区別できた。さらに、多くの場合、グラウト材表面にも炭酸塩鉱物が付着しており、グラウト材が浸透可能な割れ目よりも細かい割れ目内にコンクリーションが進展することも確認された。

図 3.5-14　生痕化石の例（生痕化石部を黄色点線で図示）

図 3.5-15　亀裂面のグラウトの付着状況
＊黒色のグラウトの一部は淡黄色に変色している。グラウト部分の表面は、微細な炭酸塩鉱物が付着し、塩酸により発泡する。

今回掘削したボーリング孔計 8 本に対して、珪質泥岩に発達する割れ目の成因を調べた結果を図 3.5-16 に示す。亀裂は 2 本の拡幅孔、B-1、および B-6 では S（剪断割れ目）が卓越していた。残りの孔では、およそ半数が D（掘削時の機械割れ目）と判定された。割れ目の成因については、機械割れ、またはせん断亀裂が多くの割合を占めている傾向が全体に共通していた。なお、B-2 は、割れ目箇所数が少ないが、これはコア試料の大部分が角礫化し、割れ目の有無および成因の判定が困難であったためである。

S（剪断割れ目）、T（引張割れ目）と判断された割れ目は、傾斜 0～40° の低角～中角傾斜が多く、高角度の傾斜はほとんどなかった。また、S、T 割れ目では、白色～乳白色の炭酸塩鉱物の介在が多いことが特徴的であった。特に、オーバーコアリング孔では割れ目の開口部全体を炭酸塩鉱物が完全に充填する状況が確認された（図 3.5-17）。

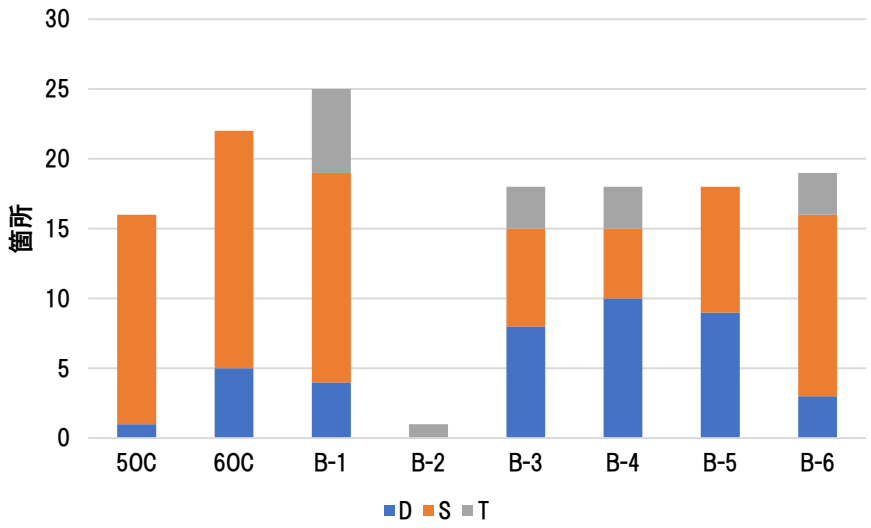


図 3.5-16　割れ目の成因分類図

図 3.5-17　剪断割れ目の開口部を充填する炭酸塩鉱物

(ii) 断層

コア試料中に粘土および 5mm 程度の大きさの角礫からなる断層破砕帯が確認された（図 3.5-18 および図 3.5-19)。断層破砕帯は概ね 10cm 程度の厚みで分布し、断層粘土は粘性が大きく含水も多い。断層角礫は 2～10mm 程度の大きさで亜角～角礫からなり、粒径は不均一であり、それらは粘土中に不均質に混じっていた。また、断層粘土および断層角礫に塩酸をかけると弱く発泡し、この断層破砕帯部にも炭酸塩鉱物を含むことが示唆された。一部の試料については掘削時に断層粘土が流失したが、断層角礫の有無・分布形態から断層破砕帯を判定した。

上記の断層破砕帯は、複数の試料で確認できたことから、断層は追加孔掘削範囲の中において、ある程度連続性を持つと考えられる。表 3.5-10 に、それぞれのコア試料における断層破砕帯の確認深度を示す。また、断層破砕帯の中心深度を図 3.5-20 に 3 次元的に示した。分布深度にばらつきはあるものの、断層破砕帯はおおむね南～南西方向に傾斜していると考えられる。

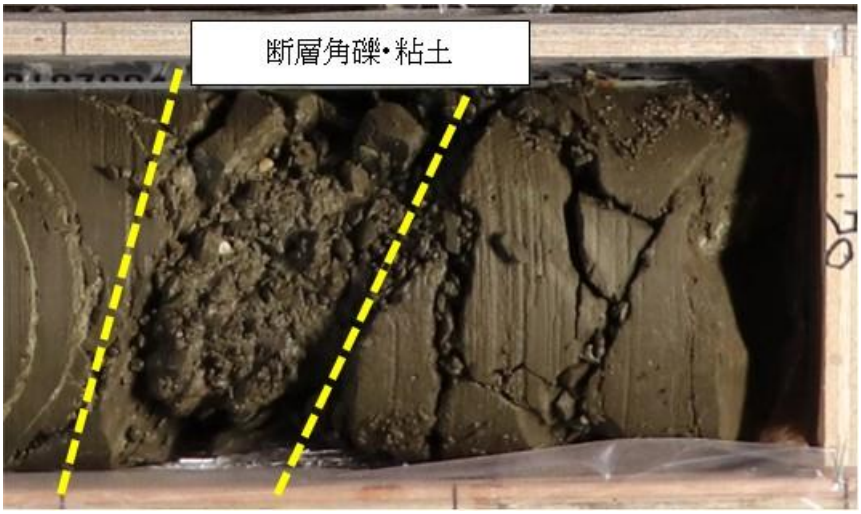
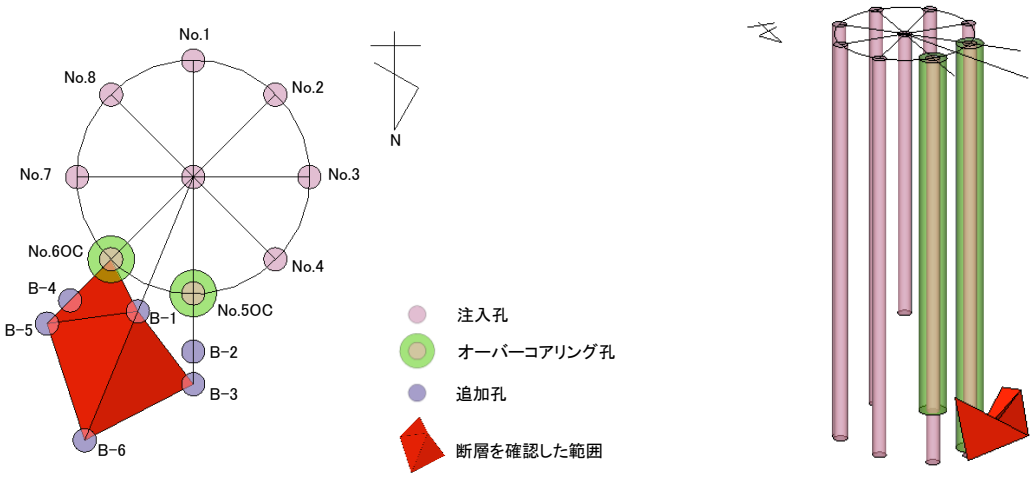


図 3.5-18　断層破砕帯の例①（No.6 OC）

図 3.5-19　断層破砕帯の例②（断層角礫：追加孔 B-6）

表 3.5-10　断層破砕帯の出現深度

深度 ＼ 孔名	注入孔 No.5OC	注入孔 No.6OC	追加孔 B-1	追加孔 B-2	追加孔 B-3	追加孔 B-4	追加孔 B-5	追加孔 B-6
断層粘土および断層角礫分布範囲	×	1.50～1.60	1.50～1.60	×	1.20～1.25	1.25～1.35	1.20～1.40	1.34～1.40
中心深度	-	1.55	1.55	-	1.23	1.30	1.30	1.37
備考	確認されず	断層粘土あり		コア試料が角礫化しており判別不能				断層粘土あり



(a) 平面図　　(b) 斜め図（追加孔の描写を省略）

図 3.5-20　断層破砕帯の分布状況

(iii) 炭酸塩鉱物の分布状況

図 3.5-9 に示した分類基準に従い、各試料について D（掘削時の機械割れ目）を除く割れ目（S および T）に対し、オーバーコアリング孔、追加孔の分類結果をそれぞれ集計した（表 3.5-11）。この表より、オーバーコアリング孔のき裂は開口部全体が炭酸塩鉱物で充填されており、“C”と分類した。一方、追加孔については、B-1 孔のみ“C”に分類される炭酸塩鉱物が確認された（表 3.5-11 参照）。B-1 孔は、コンシード孔 No.5 および No.6 のどちらの孔からも、最短距離にあることから、2 本の孔に充填したコンシードからのイオン放出によるコンクリーション化の影響を強く受けるため、炭酸塩鉱物で完全に充填されたき裂が確認されたものと考えられる。

表 3.5-11　オーバーコアリング孔の炭酸塩鉱物分布状況　集計結果一覧表

オーバーコアリング孔	孔名	亀数	なし	A	B	C
	No.5	15	0	0	0	15
	No.6	17	0	0	0	17
	合計	32	0	0	0	32
追加孔	孔名	亀裂数	なし	A	B	C
	B-1	21	0	2	16	3
	B-2	1	0	0	1	0
	B-3	10	0	1	9	0
	B-4	8	1	0	7	0
	B-5	8	0	2	6	0
	B-6	16	0	3	13	0
	合計	64	1	8	52	3

(iv) ボーリング孔壁面観察（BTV 観察）

使用した機材の仕様を表 3.5-12 に、調査数量を表 3.5-13 に、図 3.5-21 に BTV 画像一覧を、図 3.5-22 にステレオネット図を示す。図 3.5-22 から、原位置試験サイトに分布するき裂の走向・傾斜は、概ね走向が NW－SE 方向で低角～中角の北傾斜であることがわかる。なお、図 3.5-23 はトレースラインなしのオーバーコアリング孔の BTV 画像であるが、オーバーコアリング孔のコア同様、き裂全面にわたってコンクリーションによる炭酸塩鉱物の充填が認められた。

表 3.5-12　ボーリング孔壁面観察で使用する機材の仕様と出力

機材名称	仕様
メーカー	レアックス
プローブ(BIP6-ODS)　寸法／重量	φ50mm、L1180mm、6.7kg
解像度	円周方向　360/720/1440/2880pixel
対水圧	600m
照明	白色 LED(調光機能:消灯～全灯　256 段階で調整可能)
コントローラ(BPR-650)　外形／重量	W210xD230xH75(mm)、1.6Kg(ケーブル含まず)
計測深度／速度表示	整数 3 桁、小数 2 桁(m)/整数 2 桁、少数 2 桁(m/min)

表 3.5-13　調査数量一覧表

孔番	観察区間	延長(m)	備考
B-1	0.000～1.492m	1.492	孔径:φ50mm　傾斜:鉛直下方
B-2	0.000～1.547m	1.547	孔径:φ50mm　傾斜:鉛直下方
B-3	0.000～1.448m	1.448	孔径:φ50mm　傾斜:鉛直下方
B-4	0.000～1.326m	1.326	孔径:φ50mm　傾斜:鉛直下方
B-5	0.000～1.331m	1.331	孔径:φ50mm　傾斜:鉛直下方
B-6	0.000～1.369m	1.369	孔径:φ50mm　傾斜:鉛直下方
中心 モニター孔	0.000～0.887m	0.887	孔径:φ50mm　傾斜:鉛直下方
No.5 OC	0.000～1.136m	1.136	孔径:φ100mm　傾斜:鉛直下方
No.6 OC	0.000～1.459m	1.459	孔径:φ100mm　傾斜:鉛直下方

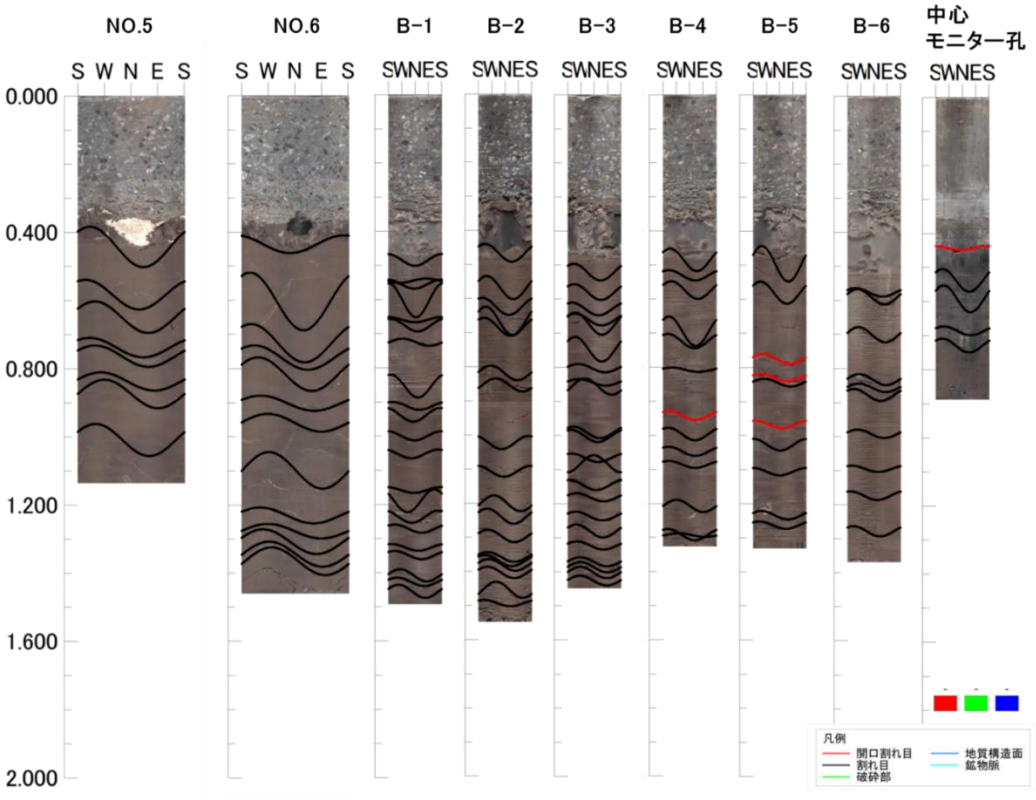


図 3.5-21　BTV 観察結果　全孔一覧図

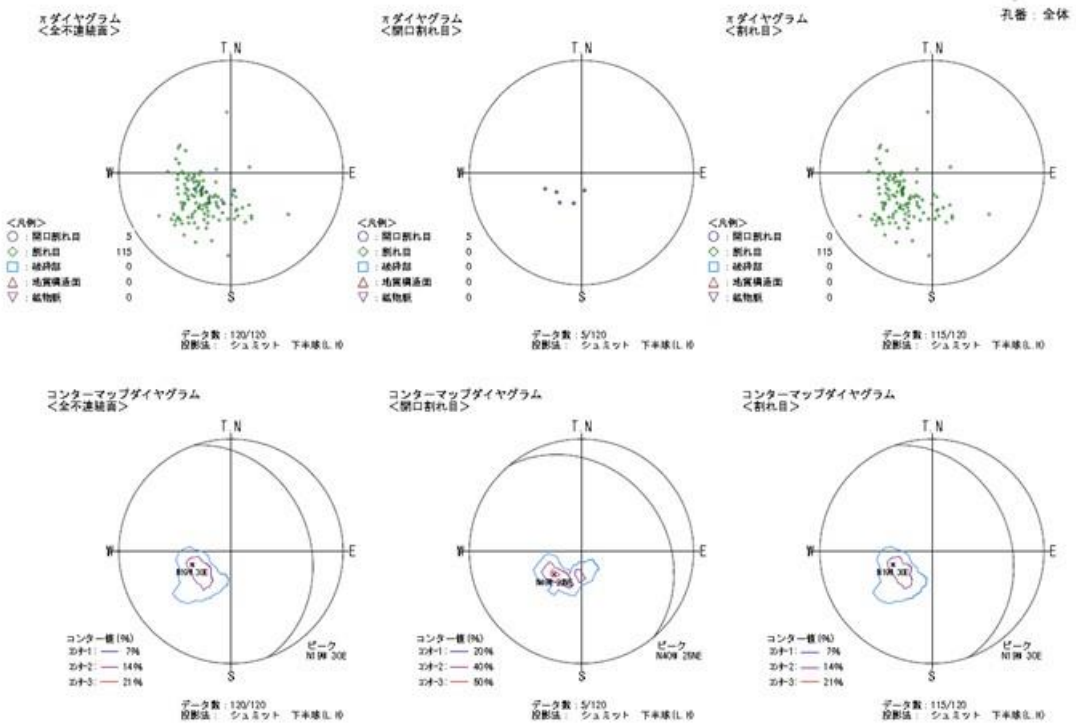


図 3.5-22　全孔を対象とした解析結果（シュミットネット図）

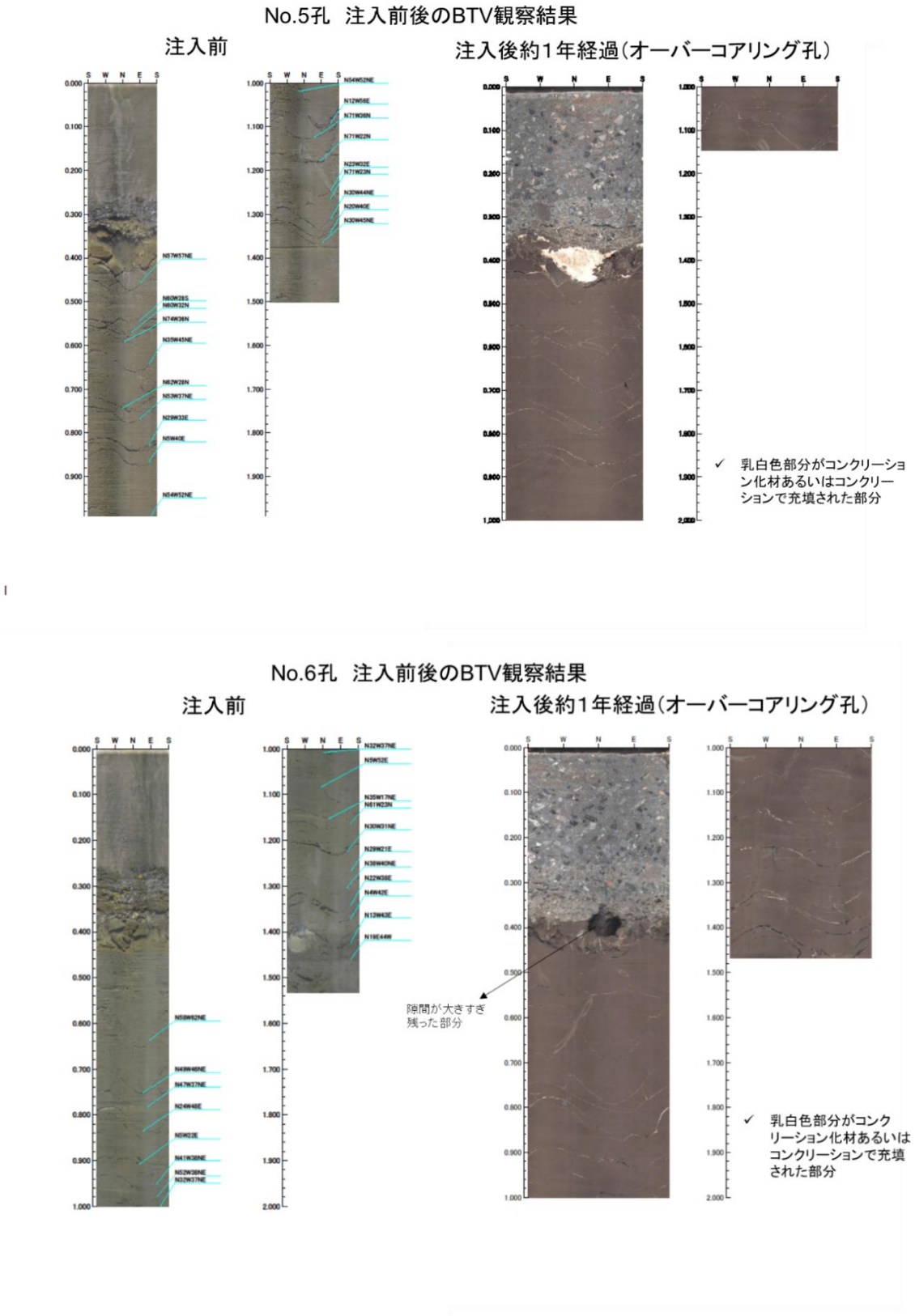


図 3.5-23　コンシード注入前後のオーバーコアリング孔の BTV 画像（No.5、No.6 トレースラインなし）

3.5.3 原位置でのモニタリングデータを対象とした再現解析

コンシードの充填時初期には、硬化に伴う発熱が生じることがわかっている。一方、ベントナイトで構成される緩衝材は鉱物変質を防止するため 100℃の制限温度がある。コンシードを地層処分の止水材として利用するにあたり、今回のような非常に狭い範囲での注入が必要となるような施工条件では、コンシード硬化時の発熱による温度干渉も考慮する必要があると想定される。

このため、令和３年度から中心モニター孔で観測していた温度測定結果（図 3.5-24、図 3.5-25）を用い、施工計画の検討に資する知見を得るための温度変化の再現解析を試みた。

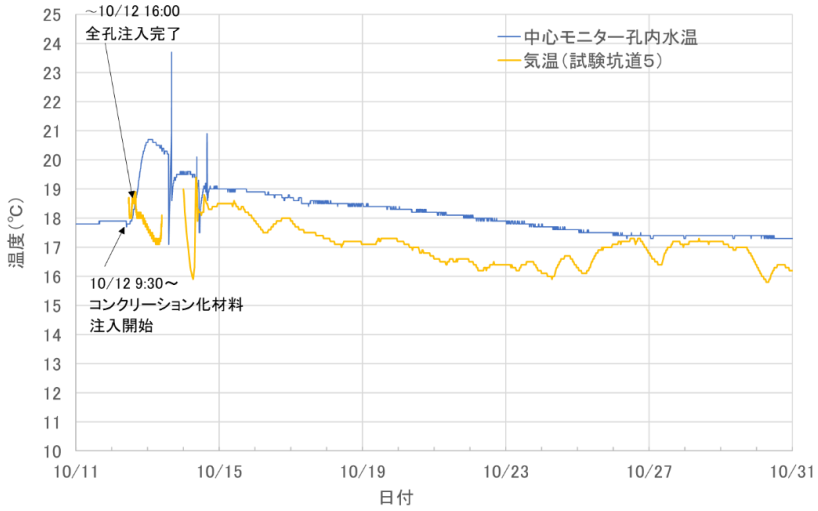


図 3.5-24　実測データ（注入直後）

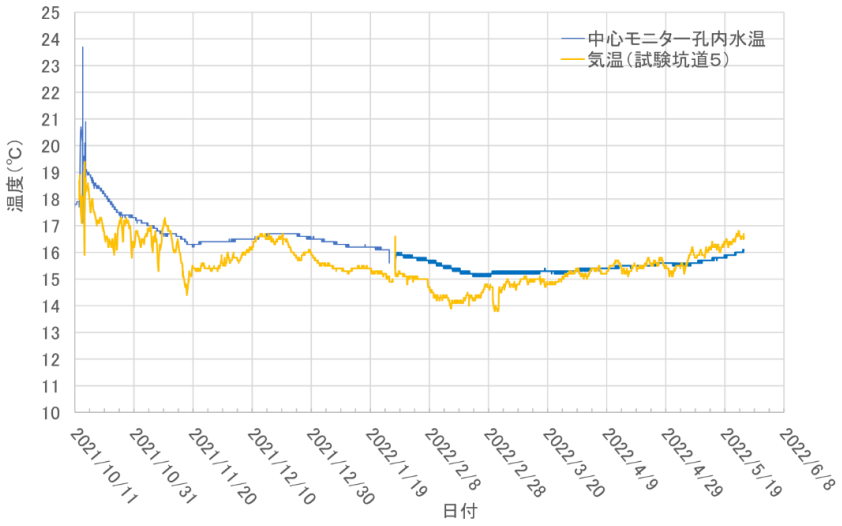
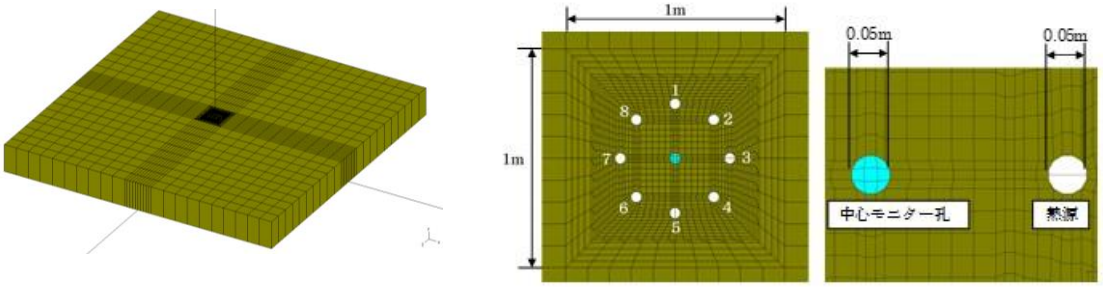


図 3.5-25　実測データ（8 か月後）

(1) 熱伝導解析の概要

図 3.5-26 に熱伝導解析モデルを、表 3.5-14 に実施した解析の概要を示す。解析では、中心モニター孔とコンシード注入孔がほぼ同じ長さであり、かつ注入材料および周辺の地質環境はすべて同じ発熱特性を持つため、2 次元の熱伝導解析としたが、材料の発熱が短時間であることもあり、中心モニター孔と注入孔の幾何学的配置および注入時の施工順序は忠実に反映した。



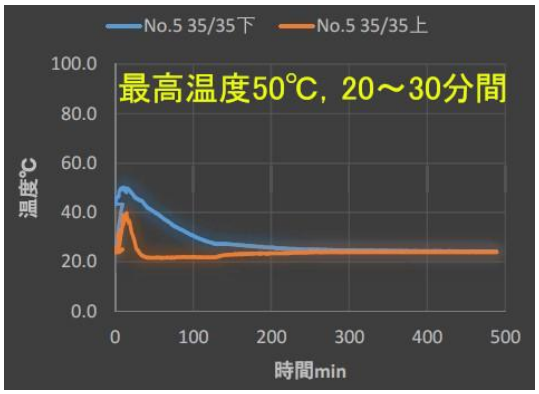
(a) 解析モデル全体　　(b) 中心モニター孔および熱源の配置

図 3.5-26　解析モデル

表 3.5-14　解析概要

項目	仕様	値
解析	二次元熱伝導解析	解析コード:G-HEAT(地層科学研究所開発)
初期温度	原位置岩盤の温度	実測水温において、コンシード注入(2021/10/12 終日)前までの測定値のうち異常値を除いた値の平均値をとり、17.8℃とした。
パラメータの値	【岩盤】 JNC-TN5400-2005-004 【水(純水)】 密度と比熱容量 理科年表 熱伝導率 熱物性ハンドブック 290K の値	【岩盤】 密度 1700kg/m^3、熱伝導率 1.1W/m･K 比熱容量 1.4J/g･K 【水純水】 密度 998.2kg/m^3、熱伝導率 0.5943W/m･K 比熱容量 4.18J/g･K
中心モニター孔内の水温の変化	実測データ 注入直後	図 3.5-24 参照
	実測データ 8 か月後	図 3.5-25 参照
熱源設置の順序と時間	実測値	【熱源設置順序】(孔位置は図 3.5-26 を参照されたい) No.4 孔→No.5 孔→No.6 孔→No.7 孔→No.8 孔→No.1 孔→No.2 孔→No.3 孔 【熱源設置間隔】(最初の孔、すなわち No.4 孔に設置した時刻を 0 とし、直前の孔の設置時刻からの経過時間で標記) 0→30 分後→30 分後→2 時間 30 分後→30 分後→15 分後→45 分後→30 分後(全孔設置完了までにかかった時間 5.5 時間)
熱源の状況(モデル化)	コンシード料のメーカーから提供された室内試験結果	･ケース 1 熱源の経過時間による温度変化をモデル化し、熱源位置に設定する ･ケース 2～4 初期発生熱量を熱源位置に与える

熱源となるコンシードの硬化時の温度変化を図 3.5-27 に示す。今回使用した材料の配合では、同図に青のラインで示される温度変化をたどり、硬化開始から 20～30 分後で最高温度が約 50℃となることから、熱伝導解析ではこれも考慮した解析ケースを設定した。表 3.5-15 に解析ケース一覧を示す。



(a) 実験結果（青色のライン）

(b) 実験状況

図 3.5-27　室内温度測定試験（満水時）

表 3.5-15　解析ケース一覧

ケース名	熱源概要
ケース 1	温度の経過時間による変化をモデル化
ケース 2	初期発生熱量を試算　55(kJ/kg)
ケース 3	初期発生熱量を試算　ケース 2 の 1.5 倍
ケース 4	初期発生熱量を試算　ケース 2 の 2 倍

(2) ケース 1（熱源の経過時間による温度変化をモデル化し、熱源位置に設定する場合）

図 3.5-27 に示す室内実験結果（満水にした塩ビ管にコンシードを水と入れ替えるように充填し、約 500 分程度静置した期間の温度を測定）に基づき、最高温度（50℃）を 20 分保持後、300 分で外気温まで低下させる熱源モデルを用いた（図 3.5-28）。

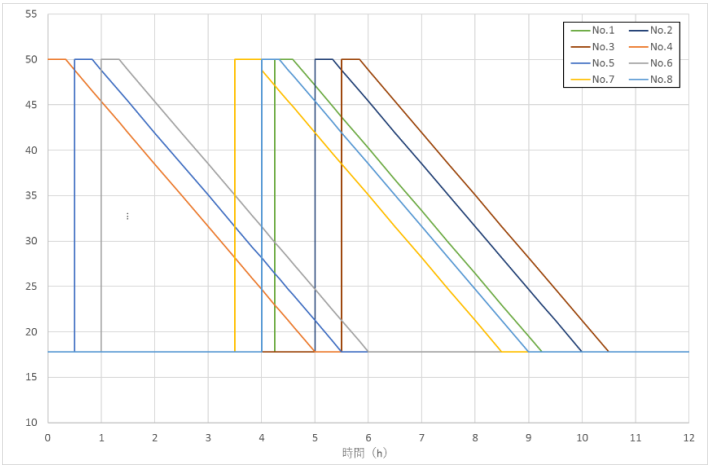


図 3.5-28　熱源のモデル化

(3) ケース 2～ケース 4（初期発生熱量を熱源位置に与える場合）

これらのケースは、図 3.5-27 に示す実験結果に基づき、初期発熱量を計算しパラメータとして与えた。具体的には、ケース 2 では、図 3.5-27 の室内試験結果を反映し、最高温度が 61℃、気温が 22℃として 1kg あたりの発熱量を求めると、約 55kJ／kg となったため、この発熱量を材料 1kg あたりの初期発生熱量と仮定し各充填孔の初期発生熱量を求め、解析パラメータとして与えた（表 3.5-16）。なお、コンシードの比熱は 1,407（J/kg・℃）である。ケース 3 は、ケース 2 の 1.5 倍の発生熱量（コンシード硬化時温度が 80.5℃まで上昇した場合に相当）、ケース 4 は、ケース 2 の約 2 倍の発熱量（コンシード硬化時温度が 100.0℃まで上昇した場合に相当）を仮定した（表 3.5-17、表 3.5-18）。

表 3.5-16　ケース 2　初期発生熱量一覧

孔 No	材料の充填量（kg）	初期発生熱量（kJ）*	初期発生熱量 解析時パラメータ（J/sec/m）**
1	5.9	324.5	180.3
2	5.8	319.0	177.2
3	5.6	308.0	171.1
4	5.4	297.0	165.0
5	6.3	346.5	192.5
6	4.4	242.0	134.4
7	5.4	297.0	165.0
8	5.4	297.0	165.0

*：発生熱量を 55kJ／kg で計算

**：ボーリング孔長 1.5m、継続時間 20min の場合として計算

表 3.5-17　ケース 3　初期発生熱量一覧

孔 No	材料の充填量（kg）	初期発生熱量（kJ）*	初期発生熱量 解析時パラメータ（J/sec/m）**
1	5.9	486.8	270.4
2	5.8	478.5	265.8
3	5.6	462.0	256.7
4	5.4	445.5	247.5
5	6.3	519.8	288.8
6	4.4	363.0	201.7
7	5.4	445.5	247.5
8	5.4	445.5	247.5

*：発生熱量を 55×1.5＝82.5kJ／kg で計算

**：継続時間 20min、ボーリング孔長 1.5m として、平面上の初期発生発熱量を計算

表 3.5-18　ケース 4　初期発生熱量一覧

孔 No	材料の充填量（kg）	初期発生熱量（kJ）*	初期発生熱量 解析時パラメータ（J/sec/m）**
1	5.9	649.0	360.6
2	5.8	638.0	354.4
3	5.6	616.0	342.2
4	5.4	594.0	330.0
5	6.3	693.0	385.0
6	4.4	484.0	268.9
7	5.4	594.0	330.0
8	5.4	594.0	330.0

*：発生熱量を 110kJ／kg で計算

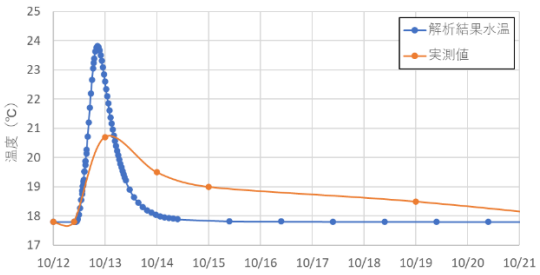
**：継続時間 20min、ボーリング孔長 1.5m として、平面上の初期発生発熱量を計算

(4) 熱伝導解析結果

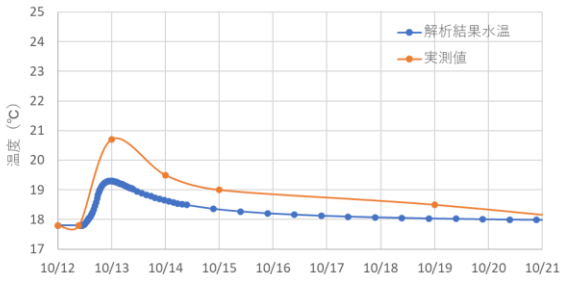
(a) 実測した中心モニター孔における温度分布との比較

図 3.5-29 に中心モニター孔において測定した温度（実測値）と解析結果の比較を示す。ケース 1 では、温度の立ち上がり時間は調和的であるが、最高温度到達時間が解析の方が早く、温度も 3℃程度高い。また、最高温度到達後、実測はなだらかに温度低下するのに対し、解析の温度低下速度は速い。

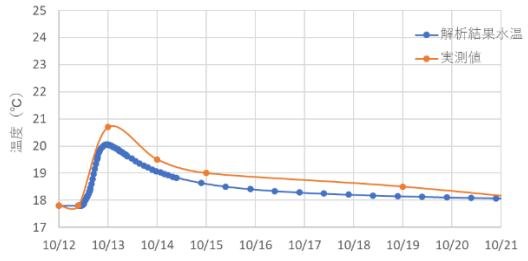
一方、ケース 2～ケース 4 では、最高温度到達時間はケース 1 と同様に実測と調和的であり、かつ最高温度到達後の温度変化も実測結果に近い。最高温度は与えた初期発熱量の違いで変わっており、最も再現性が良いのはケース 4（コンシード硬化時温度が 100.0℃まで上昇した場合に相当）であった。



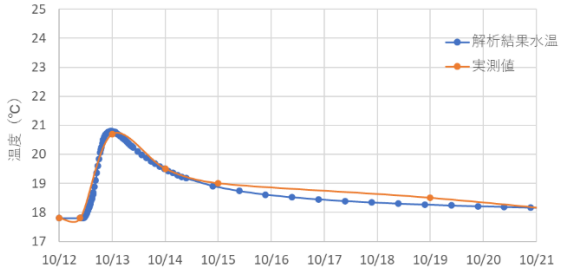
(a) ケース 1　解析結果



(b) ケース 2　解析結果



(c) ケース 3　解析結果



(d) ケース 4　解析結果

図 3.5-29　中心モニター孔位置における温度の経時変化（実測値と解析値）

(b) 熱源およびモニタリング孔付近の温度分布の経時変化

図 3.5-30 にケース 1 の解析で得られたモニター孔および注入孔を含む領域の温度の経時変化を、図 3.5-31 に最高温度が最もよく再現できたケース 4 の結果を示す。

ケース 1 の場合は、初期の時点から温度変化が発生し、かつ孔間の温度もケース 4 に比べ高く、その状態は注入完了時まで継続している。3.5.3 (4) (a)の結果も合わせると、熱源の温度変化を考慮した解析（ケース 1）では中心センター孔と注入孔を含む領域での温度干渉が生じており、その結果実測値に比べ 2 倍程度の最高温度となっていると考えられる。

今回領域内の岩盤中の温度変化を計測していないため、モデル化の妥当性の評価は困難であるが、今回の解析結果からは、ケース 2～ケース 4 のようなモデル・解析結果で示されるような温度変化の状況となっているものと推定される。また、その場合、温度干渉が生じ温度が上昇する程度や時間は相対的に短く、地層処分の閉鎖時に適用する場合には影響はほとんどないことが示唆される。

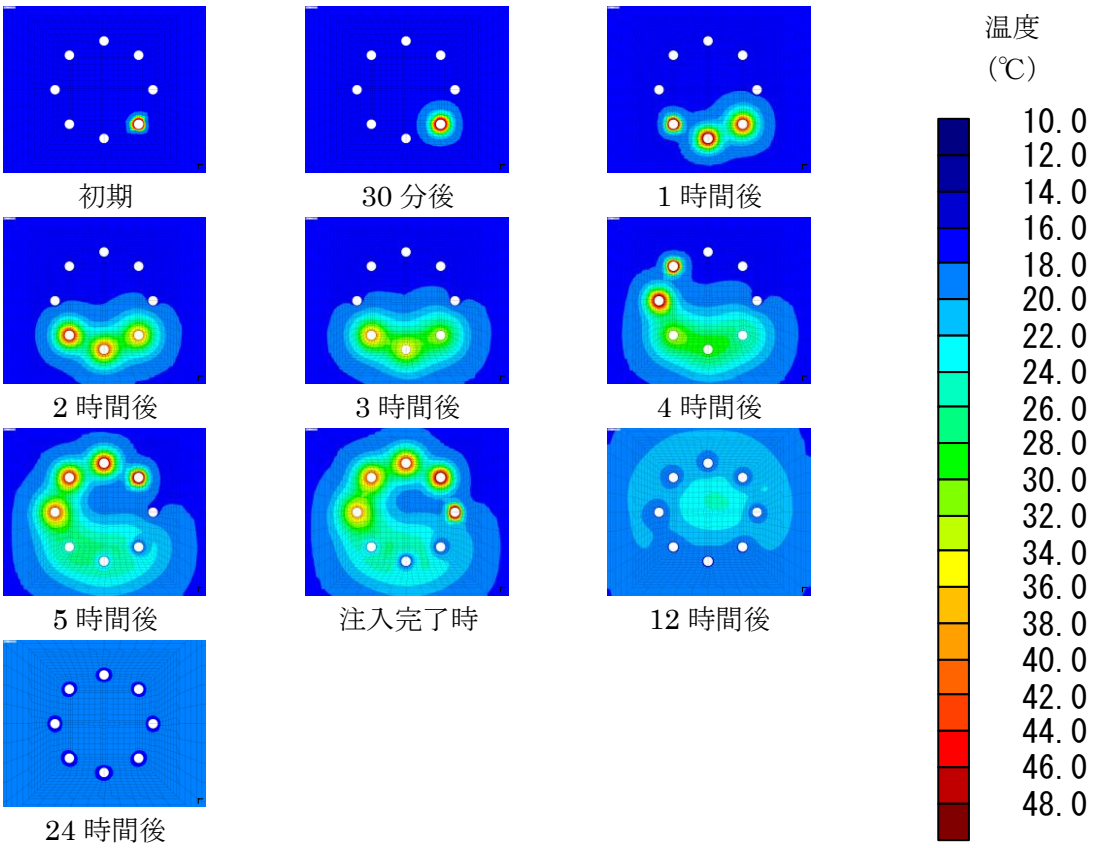


図 3.5-30　ケース 1　温度分布の変化図

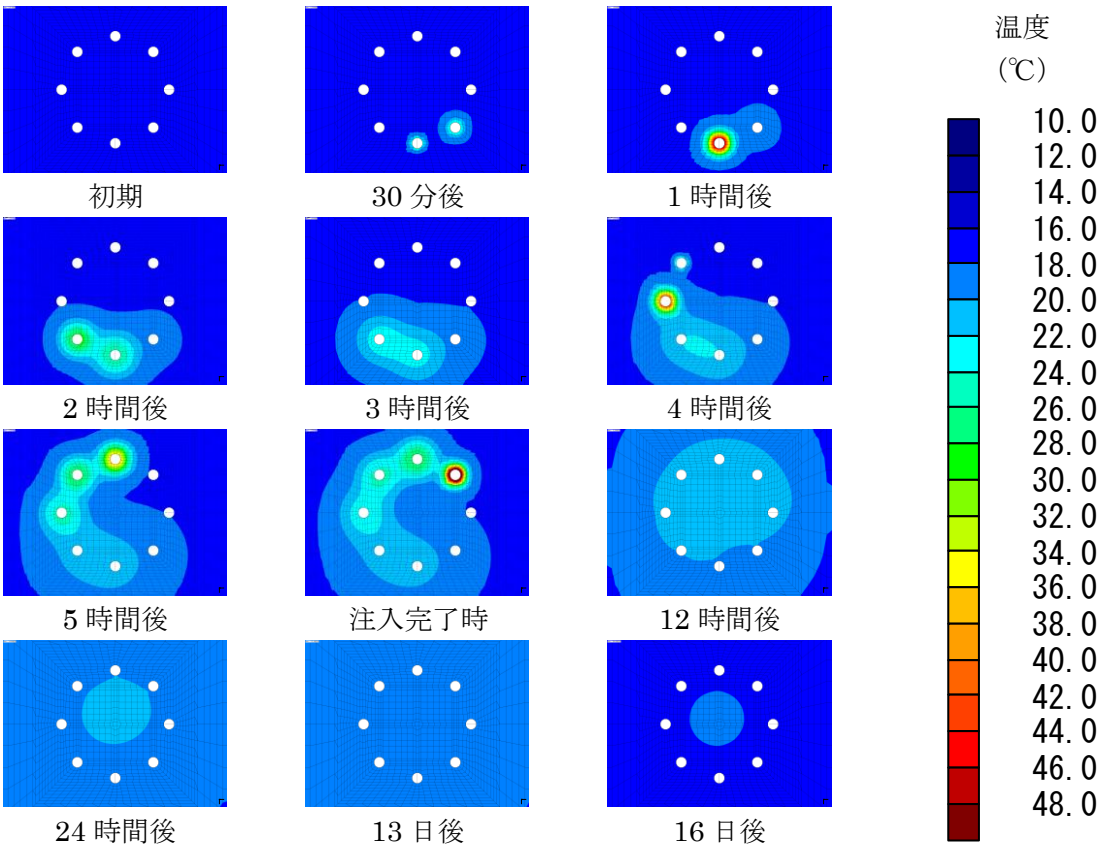


図 3.5-31　ケース 4　温度分布の変化図（初期～17 日後）

3.5.4 EDZ シーリングのための代替材料としての基礎的検討結果

本項では、令和 3 年度の成果も踏まえ止水プラグに用いられるベントナイト混合土の代替材料としての適用性について検討する。止水プラグに要求される基本性能は、止水性であり、それが施工の容易性からは注入工法による施工で十分な性能を発揮するか否かである。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分のみならず土木工学等の他分野への展開の観点では、EDZ の力学的改良効果や温度による影響の有無も重要となるため、これらについて以下に詳述する。

(1) EDZ の止水効果

図 3.5-32 に、令和 3 年度、令和 4 年度にわたって実施した中心モニター孔の透水試験で得られた透水係数の時間変化を示す。8 本のコンシード注入孔を削孔した直後には、初期の EDZ の透水性(10^{-7}m/s オーダー)より 2 オーダー高い 10^{-5}（m/sec）オーダーとなり、岩盤の透水性は上昇したが、これは非常に狭い領域内に 8 本の注入孔を掘削したことによるダメージに起因すると考えられる。8 本すべてにコンシードを注入した直後には、透水性が 1 桁減少し、その後初期状態である 10^{-7}m/s オーダーまで透水係数は低下した。

本事業において、類似の試験レイアウトで実施している EDZ シーリング試験では、床盤にスリットを掘削しベントナイトペレットを充填した止水壁を構築したが、その試験では EDZ の透水性は 3 オーダー程度低減することが示されている。現状は 2 オーダーの低減であるが、これは後述のようにコンクリーションにより EDZ 内に止水壁に類する壁が形成される途中であることによると考えられ、コンシードがもつ性質（時間経過とともに岩盤中の割れ目等にコンクリーションを生じさせる）を考慮すると、今後も透水係数は低減し、現状のベントナイトやベントナイト混合土と同等以上の止水性能を発揮する可能性が高いと評価できる。

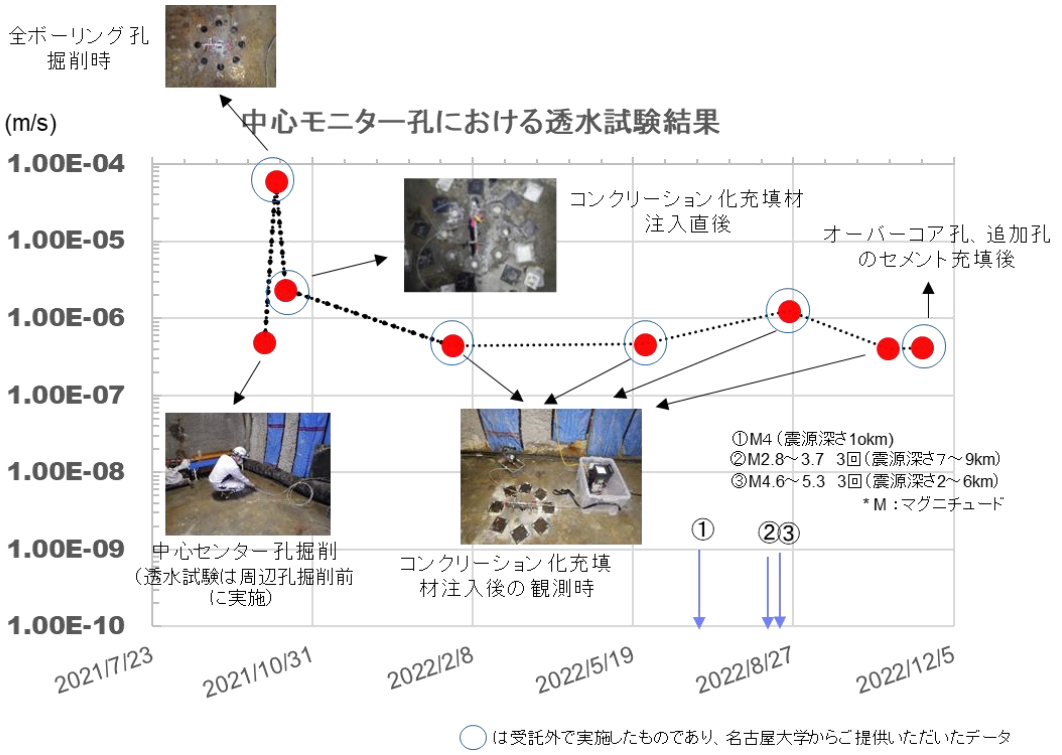


図 3.5-32　透水係数の時間変化（図 3.5-7 に地震等を含む情報を加筆）

そのことを確認するため、BTV、コア観察結果等から得られるの情報に基づくコンシード注入1年経過後の岩盤への浸透状況調査を令和4年度に実施した。

表 3.5-19 には、令和3年度に実施した中心モニター孔、および周辺のコンシード注入孔掘削時のコア観察に加え、図 3.5-9 の分類に従って令和 4 年度のオーバーコアリング孔、追加孔のコアにおけるき裂部分の炭酸塩鉱物の状態を区分した結果を示す。この結果を図示したものが図 3.5-33 になるが、令和3年度のコンシード注入前では“B”および“C“に相当する炭酸塩鉱物がそれぞれ約 40%、約 3%であったのに対し、コンシード注入後では約 80%、約 5%となりそれぞれ増加したことがわかる。幌延の地下水中には HCO_3 が多く、もともと炭酸塩鉱物が生成されやすい環境であるが、コンシードの注入により、1 年という短期間でき裂等へのコンクリーション化が生じたと考えれられる。

表 3.5-19　炭酸塩鉱物分布状況　集計結果一覧

(a) 注入前

孔名	き裂数	なし	A	B	C
中心モニター孔	14	6	0	7	1
No.1	5	1	0	4	0
No.2	14	5	0	8	1
No.3	13	13	0	0	0
No.4	18	13	0	4	1
No.5	10	4	0	6	0
No.6	18	13	0	5	0
No.7	14	8	0	6	0
No.8	13	9	0	4	0
合計	119	72	0	44	3

(b) 注入後（オーバーコアリング孔、追加孔）　再掲

	孔名	亀数	なし	A	B	C
オーバー コアリング孔	No.5	15	0	0	0	15
	No.6	17	0	0	0	17
	合計	32	0	0	0	32
	孔名	亀裂数	なし	A	B	C
追加孔	B-1	21	0	2	16	3
	B-2	1	0	0	1	0
	B-3	10	0	1	9	0
	B-4	8	1	0	7	0
	B-5	8	0	2	6	0
	B-6	16	0	3	13	0
	合計	64	1	8	52	3

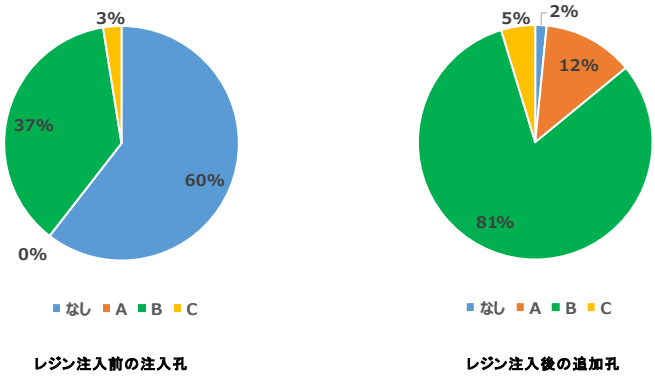


図 3.5-33　コンシード注入前後の炭酸塩鉱物分類割合図

次にコンクリーションの進展範囲の検討結果について述べる。表 3.5-20 には、令和４年度掘削したオーバーコアリング孔および追加孔のコア観察結果に基づくき裂の幅と充填物の充填状況を調査した結果を、図 3.5-34 に追加孔等の掘削位置と注入孔（No.5、No.6）の位置関係を示すが、注入孔壁面からの距離が最も遠い（B-6 の 36.7cm）の位置においても、岩片表面、またはき裂面に目視で確認できる炭酸塩鉱物が認められ、さらに、目視で認められない場合でも炭酸塩鉱物の存在を確認できた。これより、コンクリーション化は、注入後約 1 年で注入孔から約 37cm まで生じていると考えられる。また、幌延の堆積岩は有効空隙率が 30%程度と大きいため、割れ目部分のみではなく岩石マトリックス部についても調査が行われており、元素マッピングではマトリックス部の空隙にも炭酸塩鉱物の存在が確認されている。

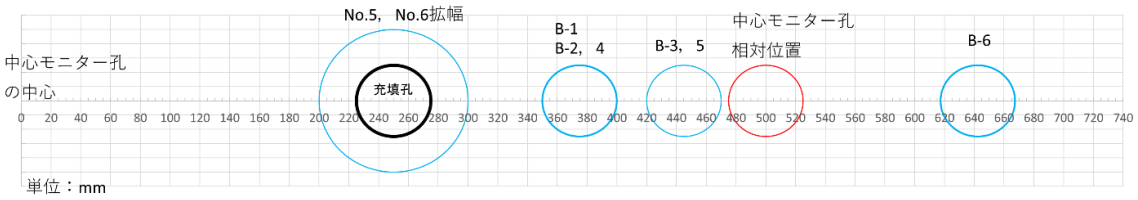


図 3.5-34　コンシード注入孔（充填孔）と中心モニター孔および追加孔との距離

表 3.5-20　オーバーコアリング孔および追加孔のコア観察で得られた炭酸塩鉱物の有無

コンシード注入孔壁面からの距離(cm)	No.5 オーバーコア	No.6 オーバーコア	コンシード注入孔壁面からの距離 孔の中心(cm)	B-1	B-2	B-4	B-3	B-5	B-6
	2.5			10.0			17.0		36.7
亀裂	◎	○	亀裂・岩片表面（炭酸塩鉱物目視確認可）	○	○	○	○	○	○
ヘアクラック	○	／	亀裂・岩片表面（炭酸塩鉱物目視未確認）	／	／	○	○	○	○
マトリックス（不連続面近傍）	／	○	ヘアクラック	○	／	／	／	／	／
マトリックス	△	○	マトリックス	○	／	／	○	／	／
岩片表面	／	／	その他	／	／	グラウト近傍	／	／	／
◎激しく発泡、○発泡あり、△わずかに発泡、×発泡なし、／記載なし									

次に、BTV 解析結果の比較による岩盤への浸透状況の検討結果を述べる。オーバーコアリング孔は、コンシード注入前にも BTV を実施していたため、それらを直接比較検討した（図 3.5-35）。その結果、コア観察と同様に、オーバーコアリング孔については、注入前に存在したき裂のほとんどが、乳白色の充填物で完全に充填されており、これらはコンシード注入により生成された炭酸塩鉱物と考えられる。さらに、BTV 画像から、き裂の幅と充填物の充填状況の関係を詳細に検

討した結果を表 3.5-21 に示す。この結果から、注入孔から 2.5cm の位置では、幅 1mm 以下の割れ目はコンクリーションで完全に充填されており、注入位置から最も遠い 41.7cm の位置でも炭酸塩鉱物と考えられる付着物が確認された。

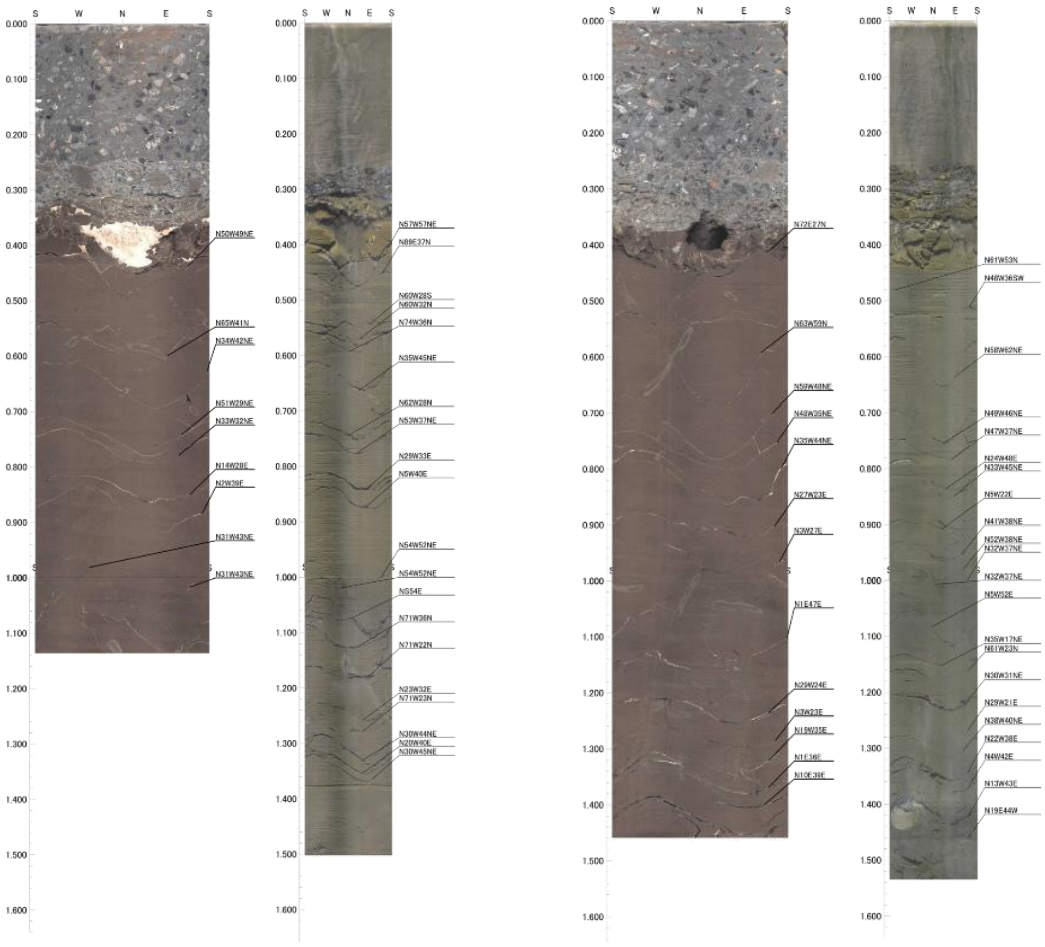


図 3.5-35　No.5、No.6 孔のコンシード注入前と注入後（オーバーコアリング孔）の孔壁状況

表 3.5-21　BTV 観察結果によるコンシード注入孔からの最短距離とき裂内充填状況について

孔名		No.5, 6 オーバーコア	B-1,2,4 壁面（近）	B-1,2,4 壁面（遠）	B-3，5 壁面（近）	B-3，5 壁面（遠）	中心モニター孔壁面（近）	中心モニター孔壁面（遠）	B-6 壁面（近）	B-6 壁面（遠）
コンシード注入孔からの最短距離(cm)		2.5	10.0	15.0	17.0	22.0	22.5	27.5	36.7	41.7
不連続面幅・目視	0.1mm	○	○	×	×	×	×	×	／	×
	0.2mm	○	△	△	△	×	×	×	／	×
	0.4mm	○	△	△	×	△	×	△	／	×
	0.6mm	×	×	△	×	×	／	／	△	×
	0.8mm	×	△	△	×	×	／	／	△	×
	1mm	×	△	△	△	△	／	△	／	×
	掘削ズリ層	○	×	×	×	×	／	／	×	×

○充填、△付着物あり、×みられない、／不連続面は認められず

以上に述べた結果から、コンシード注入後 1 年程度で注入孔から 2.5cm の範囲はすべての割れ目が炭酸塩鉱物で完全に充填され、炭酸塩鉱物の生成が生じている範囲も注入孔から 40cm 程度まで及んでいることが確認され、本試験サイト内に分布する割れ目や岩石マトリックスにおいて時間経過とともにコンクリーションが進行していること、数年後には今回の試験レイアウトで設定されている孔間距離(約 19cm)内に存在する割れ目が炭酸塩鉱物で充填され、EDZ シーリング試験における止水壁に類する壁が形成される可能性が高いことが示唆される。

(2) 施工性

本試験における原位置岩盤中へのコンシードの注入作業を経て、本試験サイトのように静水圧分布する短尺のボーリング孔では概ね実用に耐える注入作業ができるようになったと考えられる。一方で、原位置岩盤中に存在する高水圧の環境（異常高圧、断層破砕部など）への適用にあたっては、注入システムや注入手順の改良が必要と考えられ、この点は汎用的な手法構築に向けた課題と考えられる。

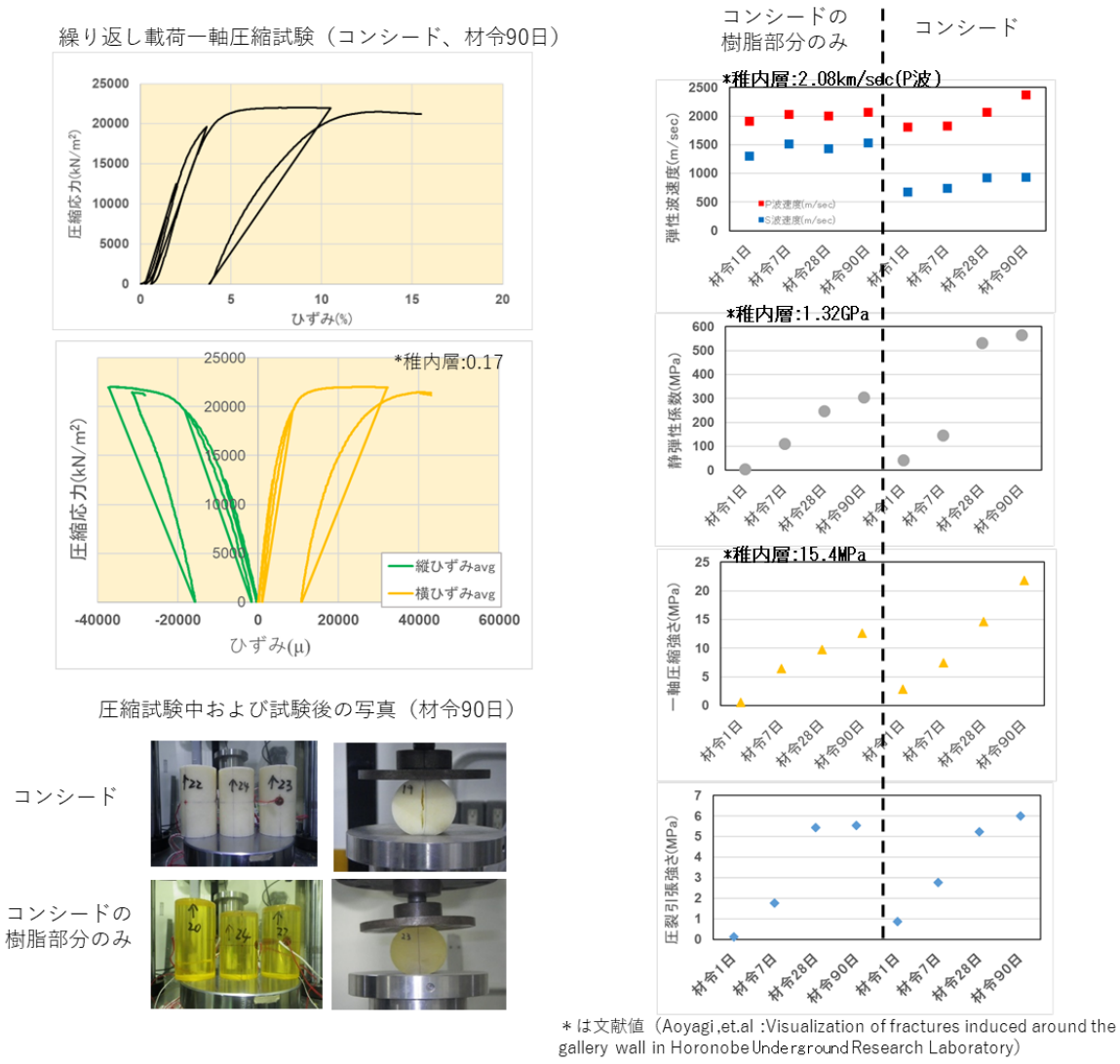
(3) EDZ の力学的改良効果

上記と同様、止水効果のみならず力学的改良効果についても令和 3 年度、令和 4 年度に室内試験により検討している。

図 3.5-36 はその結果をまとめたものであるが、完全に硬化した状態でのコンシードは、幌延の堆積軟岩とほぼ同程度の力学的な強度・変形特性を有しており、EDZ 内の割れ目が炭酸塩鉱物で完全に充填されれば十分な力学的改良効果が期待できると考えられる。特に、引張強度については、幌延の堆積軟岩よりも 3 倍程度大きいことから、EDZ のような坑道壁面近傍で引張応力場に

なる可能性がある領域では改良効果は大きいと想定される。

一方、令和４年度に実施したオーバーコアリングのコアからコンシード硬化体のみを取り出し一軸圧縮試験を実施した結果（図 3.5-37）では、材料としての力学的挙動は令和３年度の試験と概ね同じであるが、強度・変形特性は上記で得られた試験結果の約半分程度となった。これは、室内環境と異なり注入孔周辺に存在する地下水による冷却で注入したコンシードの硬化が抑制されたためと推定され、力学的な改善効果も期待する場合は、原位置岩盤中での使用にあたっては対象とする場の温度環境も念頭に置く必要があると考えられる。



＊は文献値（Aoyagi,et.al :Visualization of fractures induced around the gallery wall in Horonobe Underground Research Laboratory）

図 3.5-36　コンシードの力学試験結果
（令和３年度実施）

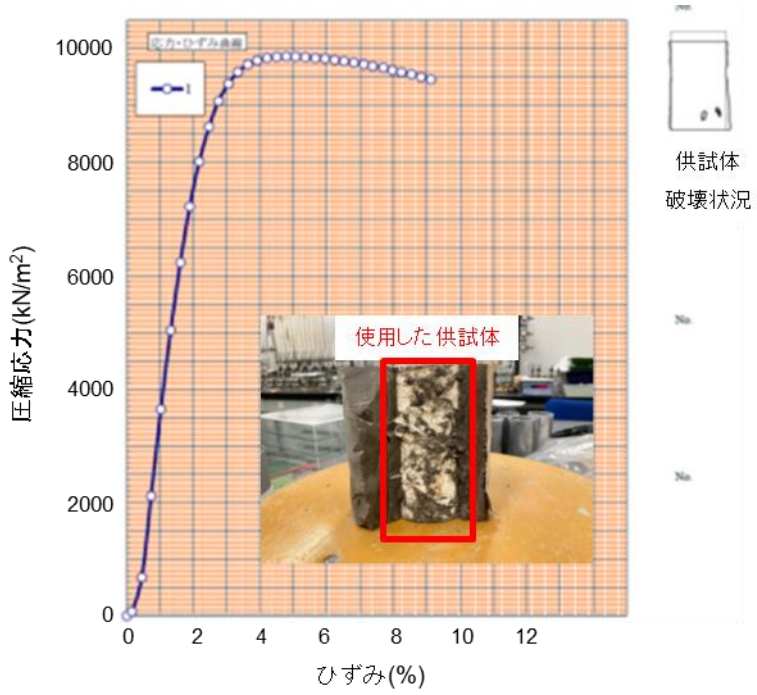


図 3.5-37　オーバーコアから取り出したコンシード硬化体の一軸圧縮試験結果
（令和 4 年度実施）

(4) 代替材料としての適用性について

(1)～(3)で示したように、コンシードによる炭酸塩鉱物の生成は注入後わずかな時間で生じ、かつグラウト材等の従来の止水材は浸透しないような非常に開口幅が小さい割れ目にも充填・硬化が見られることやコンシードに含まれる成分が枯渇するまでその効果が継続することから、これまで地層処分で考えられてきたベントナイト系材料と同等以上の EDZ の止水性を発揮できる可能性があることがわかった。また、液体材料であるため、従来の止水プラグに比べ施工が格段に容易であることに加え、一度炭酸塩鉱物でき裂が完全に充填されれば、ベントナイト系材料で懸念されるベントナイト流出による性能低下は生じないこと、地震のような天然現象に対してもある程度の耐性があること、さらには止水性の改善のみならず力学的な改良効果もある程度期待できることから、止水プラグの代替材として十分利用できる見通しが得られたと考えられる。

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条件や処分概念に応じて埋戻し材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施工手順や時間ならびに再冠水に至る過渡期の状態変化などに留意する必要がある。また、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戻し材の施工試験
・埋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戻し材の施工試験については、2018 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戻し材の全断面吹付け施工試験等を実施した。2019 年度には、吹付け施工後の埋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（原子力機構・原環センター, 2020）。

埋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、2021 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、締固めエネルギーなどをパラメータとした埋戻し材の室内試験および撒出し・転圧工法と吹付け工法による施工試験、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、埋戻し材の材料特性や各工法における施工品質に関するデータを取得した。また、埋戻し材への水の浸潤に関する不飽和パラメータ等のデータを取得した。

2022 年度は、埋戻し材の塩水環境における透水試験、転圧工法と吹付け工法の組合せによる坑道全断面を対象とした実証試験、計測技術の実証試験、スクリュー工法およびブロック工法による要素試験などを実施し、埋戻し材および埋戻し施工方法に関するデータを取得した。

4.2 埋戻し材の施工技術オプションの整備に向けた研究開発計画

精密調査段階後半の地下調査施設における実証試験では、建設・操業・閉鎖に関する工学技術の実用性が確認される（NUMO,2018 ; 2021）。工学技術の実用性の確認では、要求される機能を満足するための材料製造、施工プロセス、施工後の品質などの確認をとおして品質管理方法が確立されることになる。埋戻し材に関する要求性能や設計仕様は、段階的なサイト調査を経て、母岩の岩種や平均的な透水係数、地下水の組成や濃度などの地質環境条件を踏まえて具体化される。

そのため、図 4.2-1 に示すように、文献調査から概要調査といったサイト選定の初期段階では、要求性能や設計仕様の柔軟な設定に資するように、埋戻し材に対する要求性能の幅に留意して、模擬掘削土を用いた室内試験や施工試験等により、網羅的に材料・施工に関するデータを取得するとともに、例えば要求性能の一つである透水係数を仮設定するなどして、埋戻し材の製造及び施工時の管理項目、管理指標、プロセス管理手法などを具体的に整備していくことが効果的である。これらの取組をとおして埋戻し材の柔軟な設計を支援する情報を整備しておくことで、地質環境条件が詳細化された段階に、埋戻し材の設計仕様の具体化および製造・施工の品質管理手法を効果的に構築することができると考えられる。

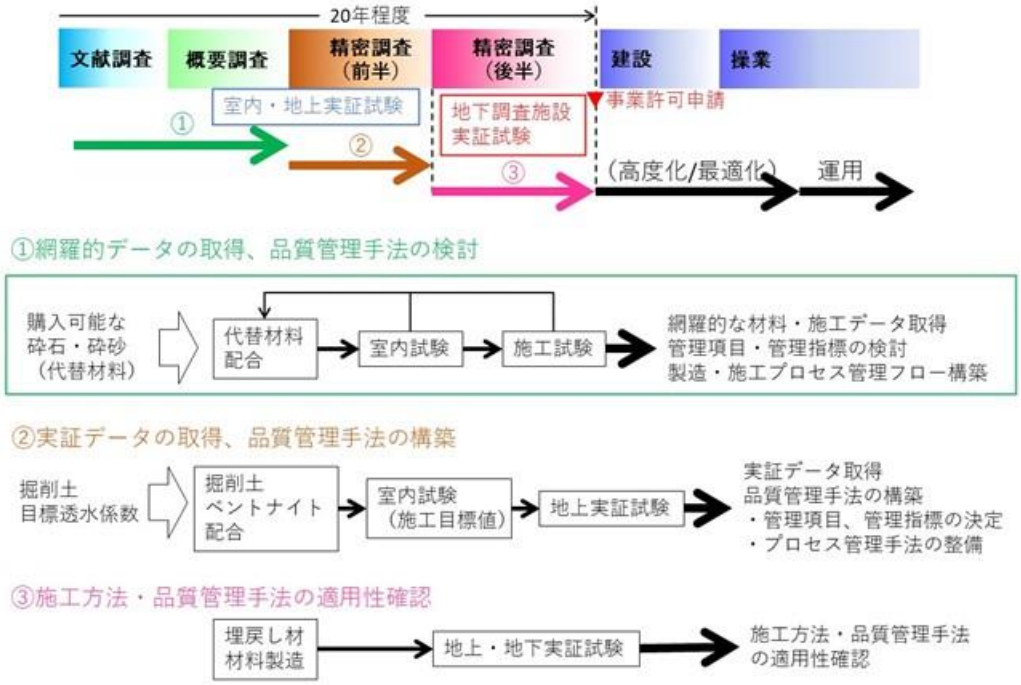


図 4.2-1　透水係数と乾燥密度および有効粘土密度の関係

表 4.2-1 に示すように、埋戻し材の設計要件の一つとして坑道内が卓越した地下水の流動経路にならいこと（低透水性）が設定されており、低透水性の指標となる埋戻し材の透水係数は、地下水流動解析による感度解析の結果を踏まえて，母岩の平均的な透水係数の 10 倍を上限値としている（NUMO, 2018 ; 2021）。また、埋戻し材には低透水性を確保するためのベントナイトに加えて、材料の調達のしやすさや経済性の観点から、坑道の掘削に伴い大量に発生する掘削土を利用することが想定されている。ただし、埋戻し材の仕様は、対象となるサイトが特定されていない段階では掘削土の物性を設定できないため、掘削土の物性をケイ砂の物性で代用して検討しており、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。そのため、本章では、埋戻し材の透水係数の暫定的な目標値を 1×10^{-9} m/s とし、表 4.2-2 に示す材料仕様を仮設定して検討を進めることとした。

表 4.2-1　埋戻し材の設計要件

設計要件	指標	基準	本章で暫定的に設定した施工試験等における目標値
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

表 4.2-2　埋戻し材の基本仕様

項目	仕様
使用材料	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 20 mm～5 mm、砕砂　最大粒径 5 mm）
混合率	ベントナイト 15 %、模擬掘削土 85 %

埋戻し材の仕様は、サイトが特定された段階以降には、当該サイトの地質環境特性に応じて、掘削土の性状、地下水条件などを考慮しつつ、適切かつ迅速に詳細な仕様を設定する必要がある。また、埋戻し材の施工方法は、適用可能性のある様々な工法により、候補サイトの地質環境、設計仕様（坑道の特徴を含む）、実現性および施工効率などを考慮して選定される。

そのため、将来の候補サイトの地質環境特性などに応じた柔軟な埋戻し材の仕様設定及び施工方法の選択ができるように、材料特性、施工性および施工品質に関わる基盤情報を整備する必要がある。また、埋戻しの施工は地下坑道内という空間的な制約を受ける環境で実施するため、その施工環境に適した品質管理方法を検討する必要がある。このような観点から、本事業では以下に示す 3 つの開発方針により研究開発を進めてきた。

① 埋戻し材の材料特性データの取得（締固め性、透水性）
② 施工技術オプションの整備（施工方法、品質保証体系の検討）
③ 品質管理方法の検討（地下坑道環境下を想定した品質管理方法）

埋戻し材の材料特性データの取得では、包括的技術報告書（NUMO, 2018；2021）で示される 3 種類の地質環境モデル（深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類）を対象とした処分場の設計を念頭におき、様々な岩種のコンクリート用砕石・砕砂を将来の候補サイトの掘削土の代用材（模擬掘削土）として作製した埋戻し材の特性を室内試験により網羅的に取得し、模擬掘削土の種類、最大粒径、ベントナイトの種類、混合率が埋戻し材の特性に与える影響について検討した。

施工技術オプションの整備では、国内外で検討されている埋戻し施工方法（撒出し・転圧工法（以下、「転圧工法」という。）、吹付け工法、スクリュー工法、ブロック工法）を対象として、施工性や施工品質に関わる基盤情報を整備した。転圧工法及び吹付け工法については要素試験、小規模施工試験と段階的に検討を進め、実規模模擬坑道を活用した実証試験を実施して、既往の技術を用いた施工技術として適用性を検証するとともに各工法の適用範囲、施工品質、歩掛等の施工情報を取得した。また、転圧工法や吹付け工法と比べて施工効率（施工管理が軽微、施工速度が速いなど）の向上が期待できるスクリュー工法とブロック工法については、要素試験をとおして埋戻し工法としての適用性の見通しを得るとともに、施工技術の実証に向けた課題を抽出した。また、埋戻し材の施工品質及び施工後の状態変化の把握等の品質保証体系の構築に向けた計測技術として、ケーブル TDR を用いた坑道上部の隙間検知および加熱式光ファイバを用いた乾燥密度分布計測の高度化に取り組んだ。

品質管理方法の検討では、地下坑道内という空間的な制約を受ける施工環境を想定した品質管理方法について、要素試験や施工試験を通して検討を進め、施工環境に即した各工法の製造・施工プロセス管理と埋戻し材の質量及び 3D 計測技術を活用したかさ密度管理による方法を提案した。また、埋戻し材の品質確認方法の一つとして衝撃加速度試験などの非破壊検査方法の適用性を示した。更に、各工法で生じる施工品質のばらつきを考慮した透水係数の評価方法として、巨視的透水係数による評価方法について検討し適用条件や課題について整理した。

以上のような本年度の実施概要について、表 4.2-3 に要約整理する。

表 4.2-3　本年度の実施概要

項目	実施概要	
①材料特性データ	室内試験	・人工海水条件下において埋戻し材の低透水性を確保するためのベントナイト混合率の把握
②施工技術オプション	実規模施工試験	・転圧工法と吹付け工法を組合せた全断面施工（実規模模擬坑道） ・計測技術（ケーブル TDR、加熱式光ファイバ）の実証 ・埋戻し材の解体・分析
	要素試験	・スクリュー工法における材料分離抑制に関する試験 ・ブロック工法におけるブロックの膨潤挙動に関する試験（膨潤変形試験、自己シール性試験）
③品質管理方法の検討	要素試験 数値解析	・製造・施工プロセス管理の更新 ・3D 計測技術の実証 ・非破壊検査技術の検討 ・巨視的透水係数によるばらつき評価

4.3 埋戻し材の材料特性に関する室内試験

埋戻し材の設計要件として低透水性が設定されており、低透水性の指標となる埋戻し材の透水係数は、地下水流動解析による感度解析の結果を踏まえて，母岩の平均的な透水係数の 10 倍を上限値としている。また、埋戻し材には低透水性を確保するためのベントナイトに加えて、材料の調達のしやすさや経済性の観点から、坑道の掘削に伴い大量に発生する掘削土を利用することを想定している（NUMO, 2018 ; 2021）。そのため、埋戻し材の製造時には、破砕して粒度調整した掘削土が用いられることになるが、その粒度分布にはばらつきが生じることが想定される。また、サイトが沿岸部の場合には帯水層中に海水起源の塩水系地下水が含まれる可能性があるため、塩水環境下の埋戻し材の材料特性を把握する必要がある。

そこで、2020 年度より模擬掘削土の粒度が埋戻し材の透水係数に与える影響について、イオン交換水及び人工海水条件下による透水試験により確認してきた（図 4.3-1、図 4.3-2）。その結果、イオン交換水条件下では模擬掘削土の粒度の透水係数への影響は小さいこと、人工海水条件下では乾燥密度が 2Mg/m^3 以上の場合には細粒分が含まれている方が透水係数は低くなることなどがわかった。また、人工海水条件下の場合、埋戻し材のベントナイト混合率が 15%では十分な低透水性を確保できない可能性が高いことも確認された。そこで、2020 年度は人工海水条件下において埋戻し材の低透水性を確保するためのベントナイト混合率について検討した。

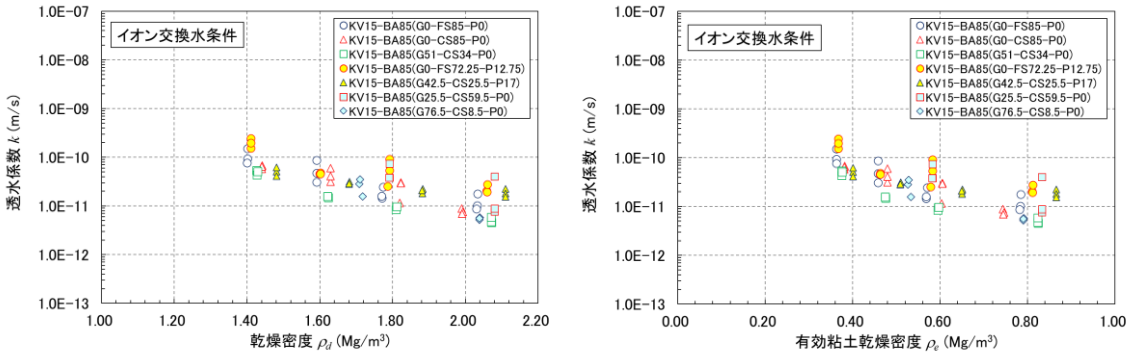


図 4.3-1　透水係数と乾燥密度および有効粘土密度の関係

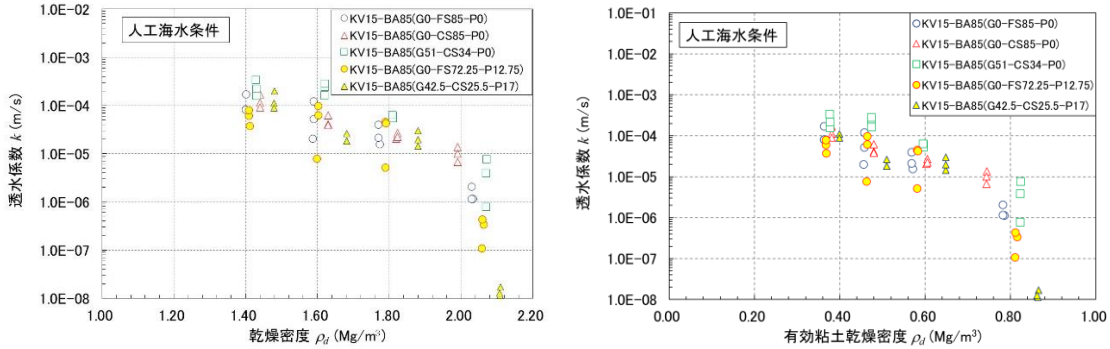


図 4.3-2　透水係数と乾燥密度および有効粘土密度の関係

※上図中の凡例：例えば KV15-BA(G0-FS85-P0)は、クニゲル V1（KV）が 15%、玄武岩（BA：basalt）のうち砕石（G）が 0%、砕砂粗目（CS）が 0%、砕砂細目（FS）が 85%、微粉末（P）が 0%を表している。

4.3.1 埋戻し材の材料特性データの拡充

(1) 目的

模擬掘削土として玄武岩の砕石・砕砂を用い、ベントナイト混合率をパラメータとした埋戻し材の透水試験を実施し、人工海水条件下において埋戻し材の低透水性を確保するためのベントナイト混合率を把握する。

(2) 試験条件

使用材料を表 4.3-1 に示す。模擬掘削土には 2 種類の粒度の砕石・砕砂（玄武岩）、ベントナイトには Na 型のベントナイトを用いた。また、試験に使用する水は人工海水（SW）とした。

試験ケースを表 4.3-2 に示す。ベントナイトの混合率は 15、20、25、30%とした。また、模擬掘削土は砕砂粗目および砕石と砕砂粗目を 60:40 で混合したものを使用した。透水試験の供試体は締固め試験の A 法（許容最大粒径 19mm、Ec＝0.55 J/cm^3）の締固め度 95%、C 法（許容最大粒径 19mm、Ec＝2.48 J/cm^3）の締固め度 95%の条件で作製した。

表 4.3-1　室内試験の使用材料

名称	仕様	記号
模擬掘削土（玄武岩）	砕石（粒径 20 mm～5 mm）	G
	砕砂粗目（最大粒径 5 mm）	CS
ベントナイト	Na 型（クニゲル V1）	KV
試験溶液	人工海水	SW

表 4.3-2　室内試験の試験ケース

No.	模擬掘削土		ベントナイト	試験溶液
	種類	混合率（%）	混合率（%）	
1	砕砂粗目（CS）	85	15	人工海水
2		80	20	
3		75	25	
4		70	30	
5	砕石（G）：砕砂粗目（CS）＝6：4	85	15	
6		80	20	
7		75	25	
8		70	30	

(3) 試験結果

透水試験と乾燥密度及び有効粘土密度の関係を図 4.3-3 に、透水係数とベントナイト混合率の関係を図 4.3-4 に示す。同じベントナイト混合率の場合は透水係数の代替指標として乾燥密度で管理することができるが、異なるベントナイト混合率の場合は乾燥密度よりも有効粘土密度による管理の方が適している。ただし、有効粘土密度 0.90 Mg/m^3 付近において透水係数のばらつきが生じているのが確認できる。

透水係数とベントナイト混合率の関係をみると、A 法の締固め度 95%で作製した供試体はベントナイト混合率 30%でも本事業で仮設定した要求性能（透水係数 1×10^{-9} m/s）を満足することができなかった。また、C 法の締固め度 95%で作製した供試体はベントナイト混合率 20%以上で透水係数 1×10^{-9} m/s を満足したが、ベントナイト混合率 15%と 20%では透水係数の結果に 5 オーダーほどの差が生じた。なお、本試験においては模擬掘削土の粒度が埋戻し材の透水係数に与える影響は確認されなかった。

埋戻し材に要求される性能を透水係数 1×10^{-9} m/s 以下と仮定すると、人工海水条件下ではベントナイト混合率 20%以上、且つ締固め度（C 法）95%以上（有効粘土密度 1.00 Mg/m^3 以上）の仕様が必要であることがわかった。また、本試験においては、ベントナイト混合率 15%～20%（C 法）、有効粘土密度 0.90Mg/m^3 付近において透水係数に大きな差が生じる範囲があることが確認された。この理由については不明であるが、材料及び施工の仕様設定の際には留意する必要があると考えられる。

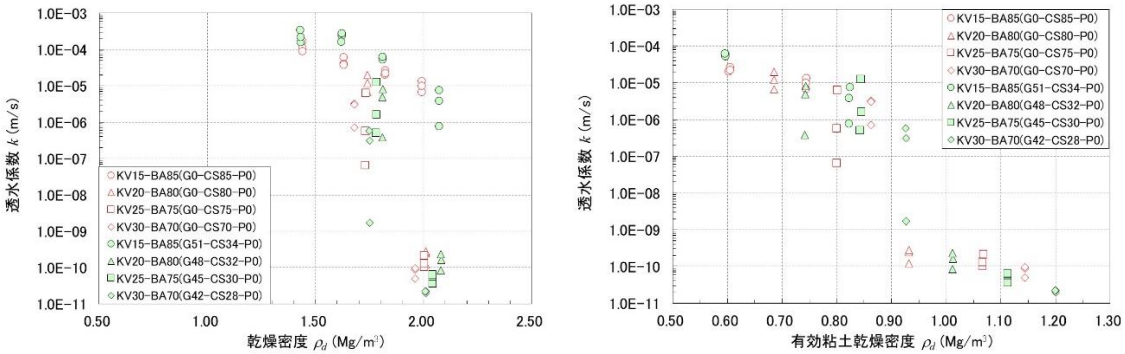


図 4.3-3　透水係数と乾燥密度及び有効粘土密度の関係

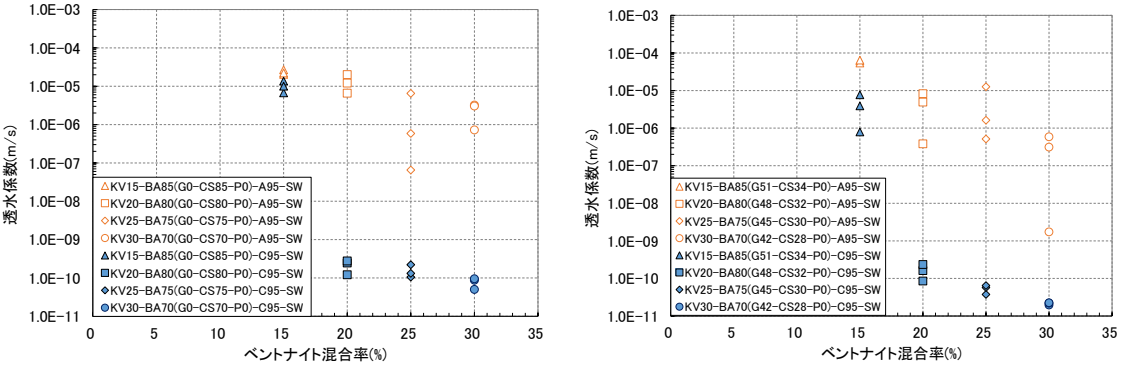


図 4.3-4　透水係数とベントナイト混合率の関係
（左：砕砂粗目、右：砕石、砕砂粗目混合）
※凡例は色抜きが A 法 95%、色付きが C 法 95%のデータを示す。

4.4 埋戻し材の施工試験に向けた仕様・条件設定

本節では、転圧工法及び吹付け工法の実規模模擬坑道を活用した埋戻し施工試験における仕様設定方法について、これまでの成果（原子力機構・原環センター, 2019；2020；2021；2022）より引用、整理して記載する。また、埋戻し施工試験において埋戻し材の品質及び施工後の状態変化の把握のために設置した計測技術（隙間検知技術、乾燥密度分布計測技術）の実証試験に至るまでの要素試験結果による条件設定をまとめて記載する。

4.4.1 転圧工法及び吹付け工法の材料・施工仕様の設定

(1) 転圧工法

(a) 撤出し・転圧工法における材料・施工仕様の設定フロー

転圧工法における埋戻し材料及び転圧仕様の設定フローを図 4.4-1 に示す。埋戻し材料及び転圧の仕様は、室内試験、小規模施工試験及び実証試験を段階的に実施して定めた。後述する(2)項以降に材料・施工仕様の設定結果を示す。

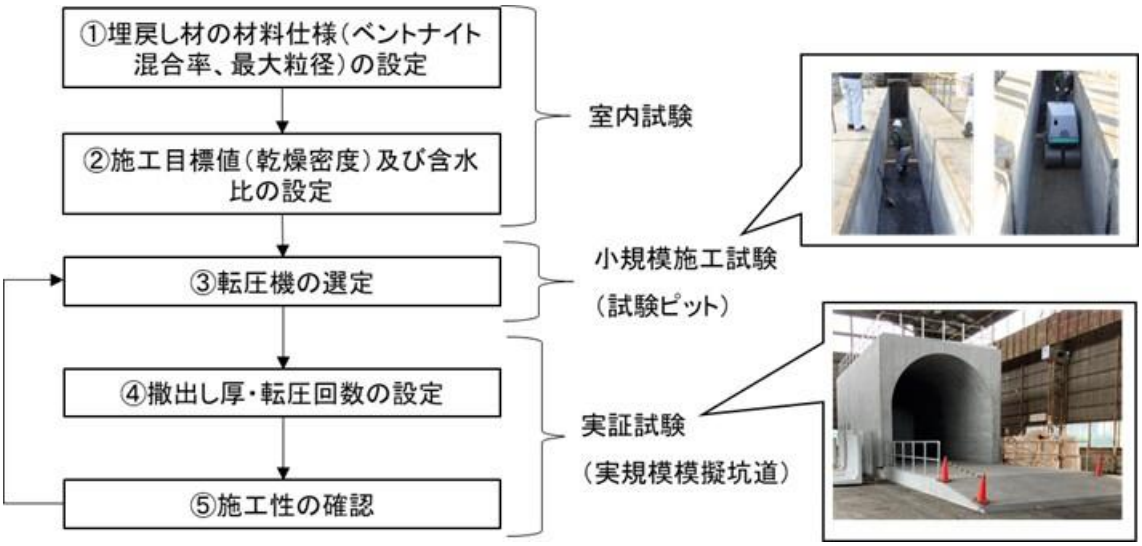


図 4.4-1　埋戻し材料・施工仕様の設定フロー（転圧工法）

(b) 転圧工法における材料・施工仕様の設定

(i) 埋戻し材の材料仕様の設定

転圧工法で用いる埋戻し材は、ベントナイトと模擬掘削土からなるベントナイト混合土であり、ベントナイトには Na 型ベントナイトのクニゲル V1、模擬掘削土には玄武岩の砕石（粒径 20 －5 mm）と砕砂（最大粒径 5 mm）を用いた。これらを組み合わせた配合について室内試験（締固め試験、透水試験など）を行い、各配合の材料に対する締固め特性、及び乾燥密度と透水係数の関係を整理した。配合の中から、淡水条件において透水係数が 1×10^{-9} m/s 以下であること、締固め性がよいこと、並びに経済性に優れていることを勘案し、表 4.4-1 に示す配合を設定した。ベントナイトと模擬掘削土の混合率は、乾燥質量比でそれぞれ 15%及び 85%とした。転圧工法用の模擬掘削土については、模擬掘削土の最大粒径は経済性に優れた 20 mm とし、砕石と砕砂（最大粒径 5 mm）を乾燥質量比 6:4 で混合したものを用いた。転圧工法と併用する吹付け工法は、吹き付け箱試験の結果、最大粒径が 20mm の砕石を用いるとリバウンド率が大きく、ホース内で目詰まりが生ずることから、砕砂（最大粒径 5 mm）を用いた。

本配合は地下水条件として淡水を想定したものであり、海水条件ではベントナイト混合率を増大するなど、地下水条件に応じて調整や検討を要することに注意が必要である。

表 4.4-1　使用材料

埋戻し材の種別	使用材料		適用
	ベントナイト	砕砂	
埋戻し材 A	Na 型（クニゲル V1）15%	玄武岩：砕石 51%・砕砂粗目 34%	転圧工法
埋戻し材 B	Na 型（クニゲル V1）15%	玄武岩：砕砂粗目 85%	吹付け工法

注）使用材料の割合は、乾燥質量の割合。砕砂粗目：最大粒径 5mm の砕砂。

(ii) 施工管理値の設定

埋戻し材の締固め試験の結果を図 4.4-2 に示す。坑道内の埋戻しで使用する転圧機の締固めエネルギーは Ec～4Ec の範囲とし、締固め試験 A 法（Ec）と C 法（4Ec）の双方を実施した。締固

め試験 A 法の最大乾燥密度は 1.910 Mg/m³、最適含水比は 13.7%、C 法の最大乾燥密度は 2.175 Mg/m³、最適含水比は 8.0%である。設定含水比については、含水比が高いと転圧機のローラの付着など施工性が低下するため、A 法の最適含水比より低い C 法の最適含水比に 1%を加えた 9%に設定した。

設定含水比の妥当性の確認のため、同じ配合の埋戻し材に対して小型振動ローラを用いた施工試験において含水比を w_{opt}+1%に設定した結果、2.1 Mg/m³ 程度の高い乾燥密度が得られた。また、同じ配合の埋戻し材に対して 3 種類の含水比（6%、9%、12%）の埋戻し材の転圧試験を実施した結果、6%と 9%では乾燥密度の違いは見られず、12%では、乾燥密度が低下するとともに転圧面の凹凸が大きくなり施工性が低下する傾向が見られた。これらの結果から、本配合の設定含水比は適切と判断した。

図 4.4-3 に示した埋戻し材の乾燥密度と透水係数の関係から、1×10^{-9} m/s 以下の透水係数にするためには 1.4 Mg/m³ 程度の乾燥密度で施工すれば十分だと考えられるが、今回の施工試験では、乾燥密度のばらつきを考慮して、乾燥密度の施工目標値を 1.81 Mg/m³（締固め試験 A 法における締固め度 D_c = 95%相当）とした。

乾燥密度は、地下水が海水条件のときには、締固め特性に加えて、室内試験で得られた乾燥密度と透水係数の関係式による低透水性の評価を行う必要がある。また、施工性については、スケール効果の影響が考えられることから、施工試験による確認を要する。

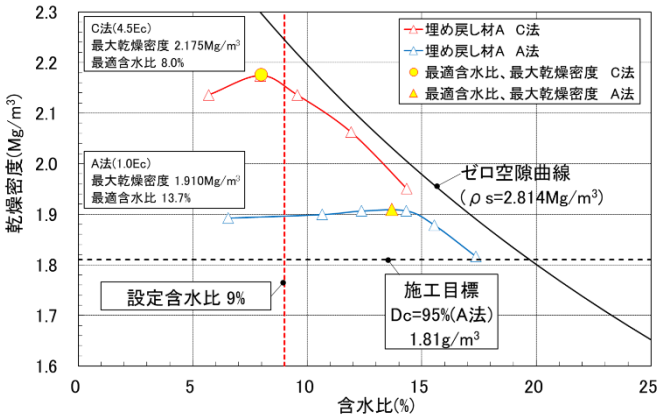
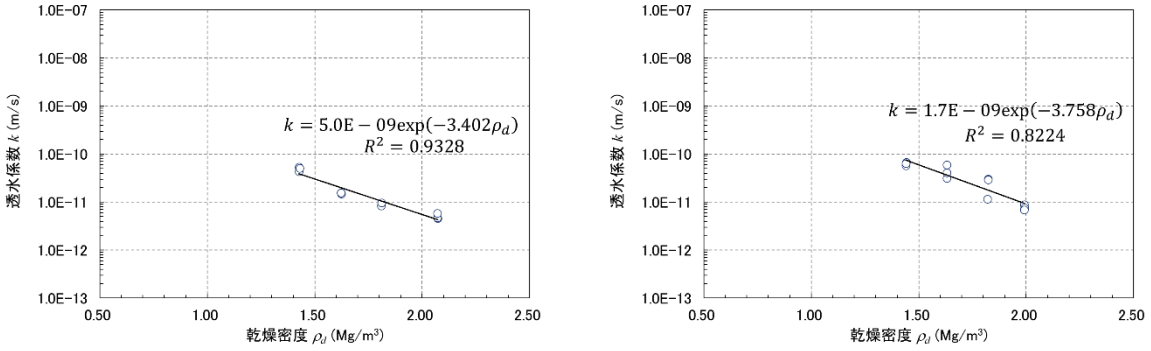


図 4.4-2　締固め試験結果（埋戻し材 A）



(a)埋戻し材　A　　(b)埋戻し材　B

図 4.4-3　乾燥密度と透水係数の関係（室内試験、埋戻し材 A 及び B）

(iii) 転圧機の設定

転圧機の設定は、小規模施工試験に基づいて行った。具体的には、坑道側部の内壁との干渉の低減が期待できる小型の転圧機（プレートコンパクタ、バイブロコンパクタ、ハンドガイド振動ローラ及び 1.5t 小型振動ローラ）を用いて試験ピット（幅 1.0m×長さ 5.0m）内での転圧試験を行い、締固め度が最も大きい 1.5t 小型振動ローラを選択した。タンピングランマは、1.5t 小型振動ローラと同等の締固め度が得られたが、施工効率が低いことから 1.5t 小型振動ローラの補助的な使用に限定した。1.5t 小型振動ローラは、実規模模擬坑道を用いた実証試験でも同等の乾燥密度が得られたことから、試験ピットによる転圧機の選定は適切であったと考えられる。

(iv) 撒出し厚・転圧回数の設定

実規模模擬坑道において埋戻し材の撒出し厚さと転圧回数をパラメータとした転圧施工の予備試験を実施した。予備試験の条件を表 4.4-2 に示す。含水比 9%の埋戻し材を用いて、撒出し厚さを 50mm 刻みで 200 mm から 300 mm、転圧回数を最大 6 パス（3 往復）として、各 1 層ずつの転圧施工を行い、施工後に砂置換法で乾燥密度を求めた。予備試験の転圧の範囲は、幅 5.0m×長さ 5.5m とした。

表 4.4-2　転圧工法の予備試験の条件

埋戻し材の種別	撒出し厚さ (mm)	施工機械	転圧回数
埋戻し材 A	200	1.5 t 小型振動ローラ	無振動転圧 2 パス（1 往復） 振動転圧 max 6 パス（3 往復）
	250		
	300		

撒出し厚さ 250 mm におけるパス数と転圧層の圧縮率（= 転圧後厚さ／撒出し厚さ）の関係を図 4.4-4 に示す。転圧後の埋戻し材の圧縮率は、4 パスで 47.2%、6 パスで 46.0%であった。6 パスの転圧後に砂置換法で測定した埋戻し材の乾燥密度を図 4.4-5 に示す。撒出し厚さが増加すると、層の下部に締固めエネルギーが伝わらなくなるため乾燥密度は小さくなると考えられるが、本試験では､撒出し厚さが最小となる 200 mm の乾燥密度が最も小さくなった｡その原因として、埋戻し材の含水比が比較的大きかったことが考えられる。撒出し厚 250 mm における乾燥密度は、上下密度差が生じた撒出し厚 300mm における乾燥密度より大きいことから、小型振動ローラでは、撒出し厚さ 250 mm は、締固めエネルギーが層の下部により伝わる撒出し厚であると考えられる。以上の結果から、転圧工法の実証試験の条件は、撒出し厚さ 250mm、無振動転圧 2 パス（1 往復）、振動転圧 6 パス（3 往復）とした。

撒出し厚さと転圧回数の設定については、複数の転圧ラインが必要となることから、実規模模擬坑道での試験施工によるデータの取得が不可欠である。

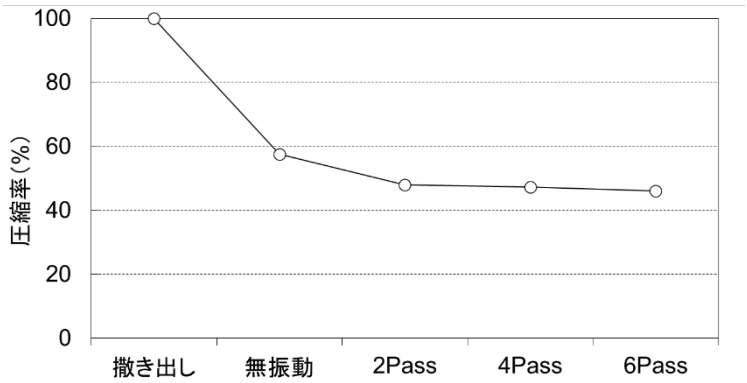


図 4.4-4　転圧のパス数と転圧層の圧縮率の関係（予備試験；撒出し厚 250mm）

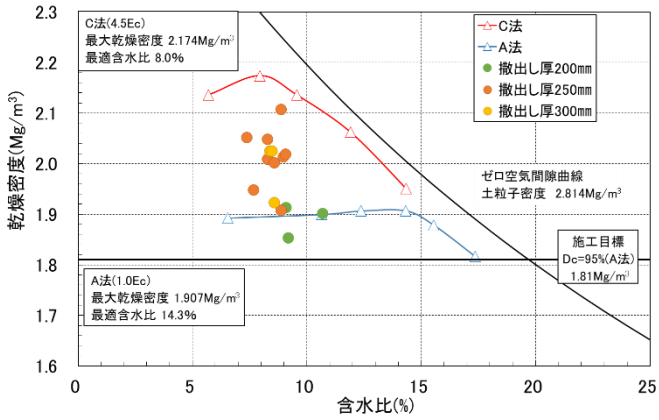


図 4.4-5　撒出し厚さをパラメータとした乾燥密度と含水比の関係（予備試験）

(v) 施工性の確認

転圧工法では、転圧面を複数の走行ラインに分け、各走行ラインの転圧回数を管理する。このとき、転圧面に凹凸があると、転圧機の走行性が低下して走行ラインごとの転圧回数にばらつきが生じ、結果として埋戻し材の乾燥密度のばらつきが増大すると考えられる。また、走行ラインの修正作業は、施工効率の低下を招く。こうした転圧機の走行性（施工性）を事前に把握しておくため、実規模模擬坑道において予備試験を行い、転圧面のレベル計測を実施した。

2020 年度～2022 年度の予備試験における転圧面のレベル計測結果を表 4.4-3 に示す。2022 年度の転圧面の標準偏差は、転圧面の凹凸が大きかった 2020 年度の 1/2 であり、転圧面の凹凸が小さかった 2019 年度と同等であったことから、2022 年度の撒出し厚 200mm～300mm の範囲は施工性には問題がないと判断した。

施工性の確認は、広い範囲のレベル測定を要するため、実規模模擬坑道の試験施工が不可欠であると考えられる。レベル計測の誤差の低減及び計測作業の合理化は今後の課題である。

表 4.4-3　転圧面の高さの標準偏差（予備試験）

	2020 年度	2021 年度	2022 年度		
撒出し厚(mm)	300	250	200	250	300
転圧面高さの標準偏差(mm)	25.9	12.2	9.2	11.0	13.6

備考）転圧機：2020 年度は 4t タンデムローラ、2021 年度及び 2022 年度は 1.5t 小型振動ローラ
2020 年度は、転圧面の凹凸が大きくなり施工性が低下した。

(2) 吹付け工法

(a) 吹付け工法における材料・施工仕様の選定フロー（高密度）

吹付け工法（高密度）における材料・施工仕様選定フローを表 4.4-4 に示す。仕様選定のために実施する試験は、次の 4 種類である。

①締固め試験（JIS A 1210 突き固めによる土の試験方法）

②小規模施工試験（吹付け箱試験）

③小規模模擬坑道試験

④実規模模擬坑道試験

上記②の小規模施工試験（吹付け箱試験）は、実施工と同じ吹付けシステムにより、吹付け箱（50cm 四方、深さ 20cm）に対し、人力で吹付けを行うものである。吹付け時間は数分程度である。③の小規模模擬坑道試験は、馬蹄形断面を持つボックスカルバート（内幅 1.5m、高さ 1.5m、奥行 2.0m）の奥側を合板で塞ぎ妻壁を設けたもの）の妻面に対して、実施工と同じ吹付けシステムにより、吹付けを行い、材料・施工仕様を検討する試験である。吹付け量は 3 t 程度、吹付け時間は 30 分～1 時間程度である。なお、③の試験による検討は、④実規模模擬坑道試験または一定の面積（1.5m 四方以上）の垂直な吹付け面が確保できる試験スペースがあれば実施が可能である。

表 4.4-4　材料・施工仕様選定フロー（吹付け工法（高密度））

材料・施工仕様選定フロー	実施した試験	着目する主な特性	備　　考
吹付け圧力の設定	締固め試験（C法） 小規模施工試験 （吹付け箱試験）	・最大乾燥密度 ・付着材の乾燥密度	
模擬掘削土の粒度 （最大粒径）の設定	小規模施工試験 （吹付け箱試験）	・施工性 ・閉塞発生状況 ・材料供給機への負荷	
埋戻し材の含水比 及び材料供給量の設定	小規模施工試験 （吹付け箱試験）	・付着材の乾燥密度 ・リバウンド率	埋戻し材の含水比は、連続施工性も考慮して設定
連続施工性の確認 埋戻し材の含水比の最終決定	小規模模擬坑道試験	・連続施工時間 ・リバウンド率 ・ノズル内部への埋戻し材の付着状況	実規模模擬坑道試験により検討することも可能
ノズル操作重機の選定	小規模模擬坑道試験	・操作性 ・吹付け面に対するノズルの直交性	実規模模擬坑道試験により検討することも可能
ノズルワーク（Pass数）の設定	実規模模擬坑道試験	・Pass数に応じて形成される凸部の高さと幅 ・リバウンド率	

(b) 選定フローの概要

(i) 吹付け圧力

埋戻し材に用いる模擬掘削土の岩種及び粒度（最大粒径）の異なる数種類の埋戻し材について、C 法（締固めエネルギー4.5Ec）による締固め試験を実施し、それぞれの埋戻し材の締固め特性（最適含水比 w_{opt} と最大乾燥密度 ρ_{dmax}）を求めた。続いて、吹付け圧力 0.7MPa で小規模施工試験（吹付け箱試験）を実施し、試験後にシンウォールサンプリングにより吹付け箱に付着した試料を採取し、パラフィン法により乾燥密度 ρ_d を測定した。その結果、いずれの埋戻し土でも、ρ_d は、ρ_{dmax} の概ね 90～95%の値が得られた。以上の結果から、吹付け圧力 0.7MPa での吹付けは、

4.5Ec 相当の締固めエネルギーでの締固めに相当するものと判断し、吹付け圧力としては、0.7MPa を採用することとした。以降の小規模施工試験、小規模模擬坑道試験並びに実規模模擬坑道試験では、吹付け圧力はこの値に統一して実施した。

(ii) 模擬掘削土の最大粒径

模擬掘削土の最大粒径（2.5mm、5mm、13mm）及び含水比（w_{opt}－3.0%～w_{opt}＋3.0%）をパラメータとした小規模施工試験（吹付け箱試験）を実施し、施工性の観点（主に閉塞の有無）から最大粒径の選定を行った。

一連の試験の結果、最大粒径 2.5mm 及び 13mm で、含水比が高い（w_{opt} 以上）ケースにおいてホースの閉塞や所定の材料供給量が達成できない事態が生じた（材料供給機の能力不足によるものであり、吹付け機への 10 秒あたりの埋戻し材の材料供給質量が当該吹付け工法（高密度）では、通常 7.5 kg/10sec～15 kg/10sec の範囲で設定する）。一方、最大粒径 5mm のケースでは、幅広い含水比において、閉塞が生じることなく、所定の材料供給量により施工できることを確認した。以上により、模擬掘削土には、最大粒径 5mm のもの（玄武岩砕砂粗目）を選定した。

(iii) 埋戻し材の含水比及び材料供給量

模擬掘削土として玄武岩砕砂粗目（最大粒径 5mm）を用い、埋戻し材の含水比及び吹付け機への材料供給量（kg/10sec）をパラメータとした小規模施工試験（吹付け箱試験）を実施し、付着材の品質（乾燥密度）が確保でき、且つ、施工効率が良くなるような（リバウンド率が低くなるような）含水比及び材料供給量の設定を試みた。以下に一連の試験結果を要約する。

- 材料供給量を一定（15 kg/10sec）として、埋戻し材の含水比を w_{opt}－3.0%～w_{opt}＋3.0%の範囲で変化させた一連の試験の結果、
  - 付着材の乾燥密度 ρ_d は 1.8 Mg/m^3～2.0 Mg/m^3 の範囲に分布し、含水比が増加するほど、若干低下する傾向がある。
  - リバウンド率は、含水比が増加するほど低下する傾向がある。
- 埋戻し材の含水比を 6 段階（w_{opt}－3.0%、w_{opt}－1.5%、w_{opt}、w_{opt}＋1.0%、w_{opt}＋1.5%、w_{opt}＋3.0%）のそれぞれの含水比で一定として、材料供給量を 4 段階（7.5 kg/10sec、10 kg/10sec、12.5 kg/10sec、15 kg/10sec）で変化させた一連の試験の結果、
  - 付着材の乾燥密度 ρ_d は、ばらつきは大きいものの、いずれの含水比の埋戻し材においても、材料供給量が増加するほど増加する傾向がある。
  - リバウンド率は、材料供給量によらず一定、もしくは材料供給量の増加に伴い若干低下する傾向がある。

以上の結果から、埋戻し材の含水比については、乾燥密度とリバウンド率のバランスを考慮して設定する必要がある。材料供給量については、最も乾燥密度が大きい 15kg/10sec に設定することとした。

(iv) 連続施工性の確認

小規模模擬坑道試験により、連続施工性について確認を行った。試験に供した埋戻し材は、模擬掘削土として玄武岩砕砂粗目（最大粒径 5mm）を用い、含水比は、w_{opt}－3.0%、w_{opt}－1.5%、w_{opt} 及び w_{opt}＋1.0%の 4 種類とした（w_{opt}＋1.0%を超える含水比については、リバウンド率は小さくできるものの、品質（乾燥密度）も低下する傾向があることを考慮して除外した）。材料供給量は最大設定である 15 kg/10sec とした。

試験の結果、いずれの含水比の埋戻し材でも、予定した 3 t 程度の吹付けを、ほとんど閉塞を生

じることなく連続して吹付けできることを確認した。また、リバウンド率は、小規模施工試験（吹付け箱試験）と同様に、含水比が高くなるほど低下する傾向であった。

以上の結果から、いずれの含水比でも、連続施工性に問題は無いが、施工性（リバウンド率）を考慮すると、埋戻し材の含水比としては、最も高い w_{opt}＋1.0%を選定すべきということになる。しかし、吹付け施工後のノズル内部の観察結果から、含水比 w_{opt}+1.0%のケースではノズルの内部に埋戻し材が付着していることが確認された。含水比がより小さい他のケースでは、このような付着は確認されなかった。このことから、施工時間がより長くなる実規模模擬坑道試験では、含水比が w_{opt}+1.0%の埋戻し材を用いると、ノズルが閉塞する可能性が高いと考えられる。したがって、実規模模擬坑道試験では、埋戻し材の含水比は w_{opt} を採用することとした。

(v) ノズル操作重機

長時間の連続施工性の確認を行った小規模模擬坑道試験では、人力施工の他に２種類のノズル操作重機（BROKK160、MR－Ⅲ）による機械施工も行い、施工性や操作性等の確認を行った。

その結果、いずれのノズル操作重機とも、リモコン操作が可能であるが、吹付けコンクリート施工の専用機である MR－Ⅲの方が、ノズルを取り付けるアーム先端部を上下方向、左右方向のいずれにも、ほぼ自由に回転できるため、吹き付け面に対して、ノズルを直交するように設置しやすいことが確認できた。

模擬坑道の安全確保や作業環境の観点からリモコン操作（遠隔操作）が可能で、模擬坑道の吹付け面に対してノズルを直交に保てる MR－Ⅲを選定した。

(vi) ノズルワーク

実規模の施工では、5m 四方程度の広大な吹付け面に対して機械施工により吹付けを行うこととなる。そのような広大な面に対して、できるだけ均一、且つ効率的に吹付けを行うためには、機械施工における適切なノズルワークを選定する必要がある。そこで、実規模模擬坑道試験の実施に先立ち、ノズルワークの選定（次に述べる吹付け Pass 数の設定）を行った。

基本的なノズルワークは、既往の研究（原環センター, 2013）において確立されたものであり、その概要を図 4.4-6 に示す。最初に、吹付け面の最下部において、ノズルを坑道（吹付け面）の横断方向に水平に移動させながら吹付けたのち（図中①）、ノズルを上部に移動したうえで（図中②）、最下部同様に水平方向に移動させる（図中③）。続いて、これらの一連の動作によって形成される吹付け面上に水平方向に延びる二本の凸部の間（谷間：図中の①と③の間）をなぞるようにノズルを水平方向に移動させて埋めたのち（図中④）、二本の凸部よりもさらに上部へノズルを移動させる。これを繰り返すことで、吹付け面全体を施工する。

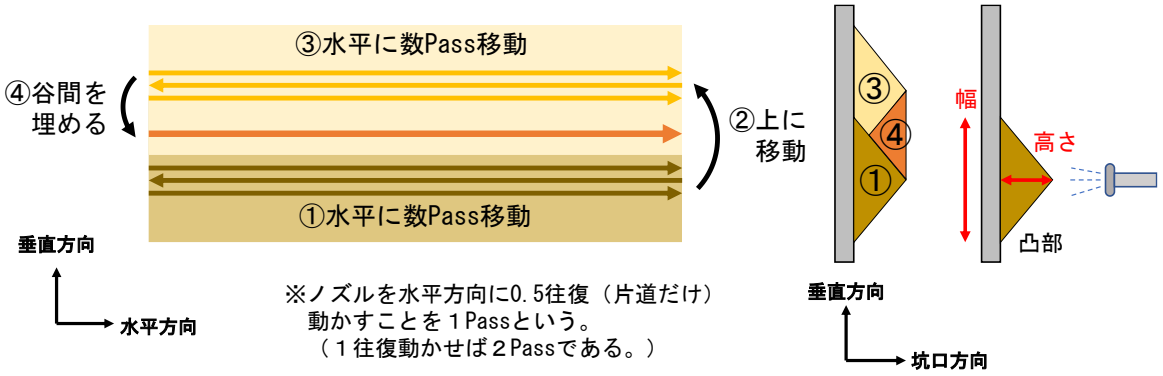


図 4.4-6　検討したノズルワーク（吹付け工法（高密度））

今回の施工仕様の検討では、最初に、実規模模擬坑道の妻面上（コンクリートの妻面上に厚さ150mm の吹付けを行った面上）において、水平方向の Pass 数（上図 4.4-6 中の①及び③）を、1Pass～4Pass の 4 段階で変えて吹付けを行い、Pass 数の増加に伴い形成される凸部の高さと幅の成長度合いの確認を行った。その結果、Pass 数の増加に比例して凸部の高さと幅が増加することを確認した。

続いて、1Pass と 3Pass の 2 ケースを選択し、実規模模擬坑道において、前述の(v)で選定したノズル操作重機を用いて、模擬坑道上半部の吹付け試験を実施し、両ケースのリバウンド率の比較を行った。その結果、両者にほとんど差は無かったことから、実規模模擬坑道試験の機械施工では、1Pass を採用することとした。

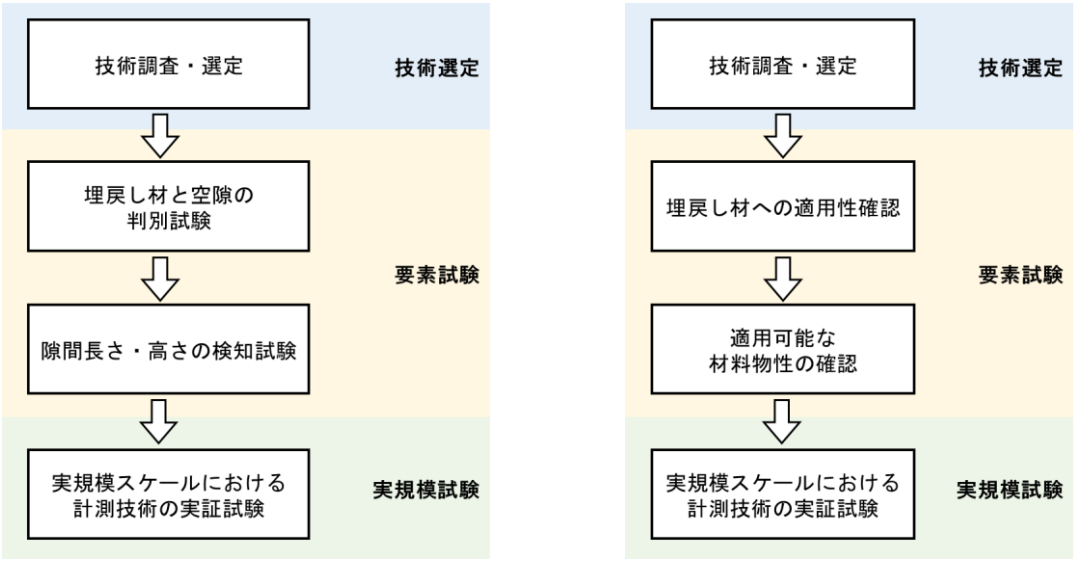
4.4.2 計測技術の要素試験及び条件設定

埋戻し材の施工後には自重沈下や乾燥収縮による坑道天端での隙間の発生が懸念される。施工後に発生する坑道天端の隙間の体積を事前に把握できれば、埋戻し材の材料構成や施工方法に反映することが可能となる。また、施工後の埋戻し材の実際の乾燥密度は、砂置換法やブロックサンプリングによる点計測が一般的であることから、事前の施工試験等によって複数の位置で密度を測定して密度分布を取得して、そのバラツキを見積もっておくこととなる。従来の計測方法に加えて、簡易的、且つ連続的な密度分布として把握することができれば、埋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。

そこで本事業では、下記の技術に関する研究開発に取り組むこととして、図 4.4-7 に示す研究開発フローに沿って 3 か年の研究開発を進めてきた。

◯自重沈下や乾燥収縮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（以下、「隙間検知技術」という。）

◯埋戻し材の連続的な乾燥密度分布を把握するための計測技術（以下、「密度分布測定技術」という。）



①隙間検知技術　　②密度分布測定技術

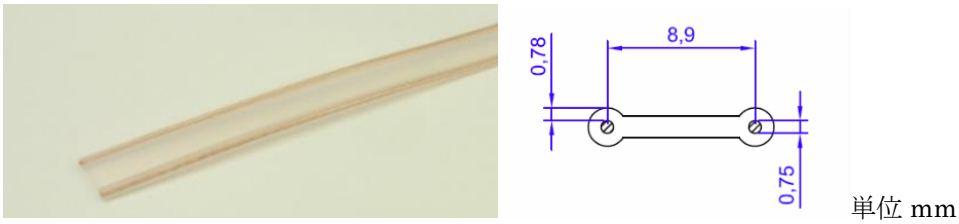
図 4.4-7　埋戻し材を対象とした計測技術の研究開発フロー

(1) 隙間検知技術

(a) 技術調査・選定

国内外における計測技術の開発や適用動向等を文献調査し、技術の完成度、埋戻し材及び施工技術への適用性などを判断指標として、隙間検知技術にケーブル TDR 法を選定した。

ケーブル TDR 法は、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計測手法であり、誘電特性の違いを識別することで空隙を検知する。TDR センサ部は、通常、金属ロッドから構成されるが、測定長の延長や耐腐食性等を踏まえ、図 4.4-8 に示すようにポリエチレン材で被覆した平行型 300Ωフィーダ線で置き換えている。TDR 計測装置（Campbell Scientific 社製：TDR200）からフィーダ線へパルス印加した電圧は、フィーダ線の終端部で反射して電圧反射係数Γ（もしくは電圧）として出力される。電圧反射係数Γは、進行波と反射波の電圧振幅の比、または伝送線路のインピーダンスで示される（式 4.4-1）。



単位 mm

図 4.4-8　平行型 300 Ω フィーダ線

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_L - Z_O}{Z_L + Z_O} \quad (-1 \leq \Gamma \leq 1)$$　　式 4.4-1

ここで、E_iは電圧の入射波、E_rは電圧の反射波、Z_Lは負荷インピーダンス、Z_Oは特性インピーダンスを示す。$\Gamma = 1$（$Z_L = \infty$）の場合は開放状態（フィーダ線の終端位置の回路が切断された状態）、$\Gamma = -1$（$Z_L = 0$）の場合は短絡状態（回路の一部がショートした状態）、$\Gamma = 0$の場合はイン

ピーダンスの整合（電圧の入射波振幅と反射波振幅は同値の場合：無反射状態）を示す。フィーダ線の周囲（半径数 mm～数 cm）の物質によって負荷インピーダンスが変化するため、図 4.4-9 に示すように電圧反射係数の変化（入射波に対する反射波の強度）によってケーブル沿いの物質の違いを識別する。なお、フィーダ線を伝播する電圧パルスの速度vは、周囲の物質（比誘電率ε_r）に応じて変化し、式 4.4-2 で示される。

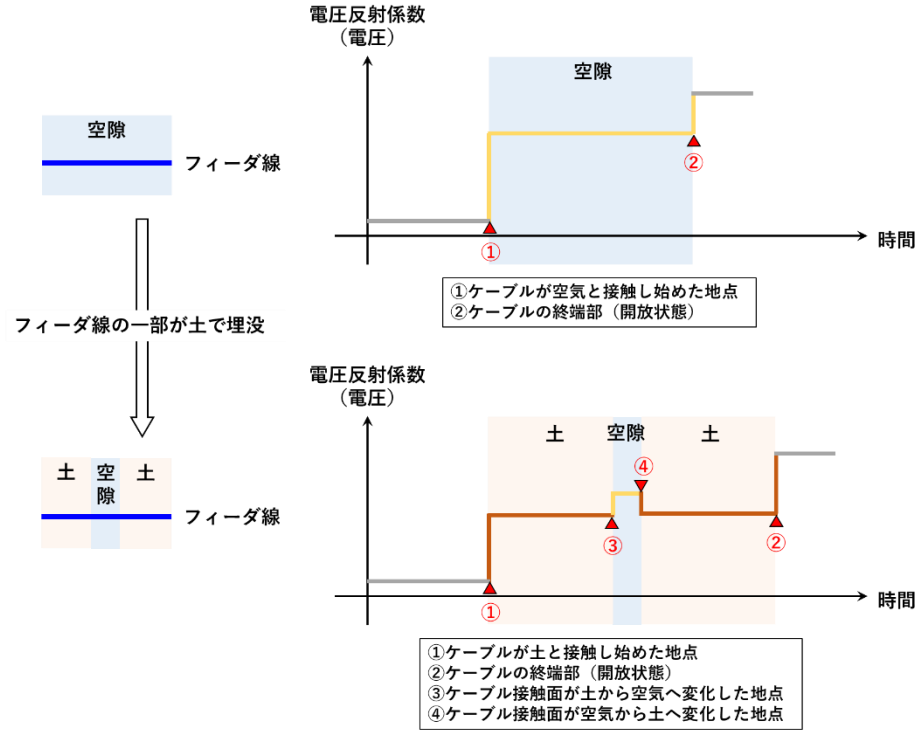


図 4.4-9　ケーブル TDR 法による結果の解釈（模式図）

$$v = \frac{v_c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad \text{式 4.4-2}$$

ここで、v_cは光の速度、ε_rは比誘電率を示す。フィーダ線を伝播する電圧パルスの速度は、周囲の物質（比誘電率）に応じて変化するため、同じ長さのフィーダ線であっても測定時間は異なる（図 4.4-9）。

(b) 埋戻し材と空隙の判別試験

埋戻し材と空隙の違いがケーブル TDR 法で判別可能であることを要素試験により確認した。埋戻し材と空隙の判別試験結果（隙間長さの検知試験含む）を図 4.4-10 に示す。ケーブルの設置位置（全面空隙条件と片面コンクリートプレート設置条件）に限らず、隙間長さ（25 cm、50 cm、100 cm）の検知は可能であることを確認した。

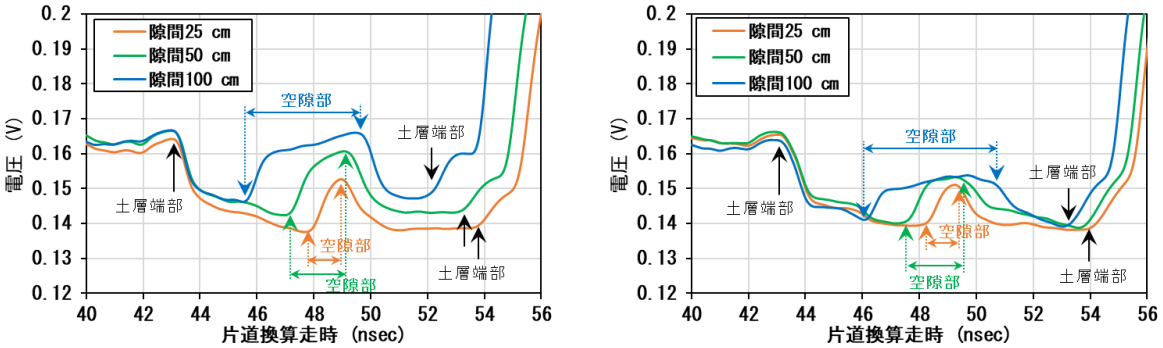


図 4.4-10　埋戻し材と空隙の判別試験結果および隙間長さの検知試験結果（左：中段ケーブル、右：底板ケーブル）

(c) 隙間長さ・高さの検知試験

ケーブル TDR 法により計測可能な空隙の隙間長さおよび隙間高さを要素試験で確認した。隙間高さの検知試験結果を図 4.4-11 に示す。最小 25 mm の隙間および土被り厚をケーブル TDR 法により検知可能なことを確認した。ただし、隙間高さおよび土被り厚さの定量値の取得は現状では困難であり今後の課題である。

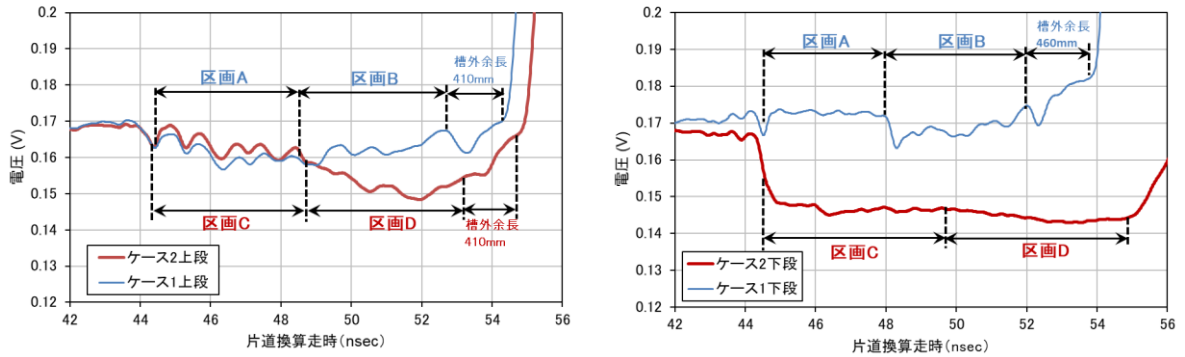


図 4.4-11　隙間高さの検知試験結果（左：上段ケーブル、右：下段ケーブル）

(2) 密度分布測定技術

(a) 技術調査・選定

国内外における計測技術の開発や適用動向等を文献調査し、技術の完成度、埋戻し材及び施工技術への適用性などを判断指標として、密度分布測定技術に加熱式光ファイバを用いた aDTS 法（分布型温度センシング法）（以下、「aDTS 法」という。）を選定した。本研究で用いた加熱式光ファイバ（OFS 社製：GS87100）は、光ファイバのコアに回折格子を等間隔に付した FBG ファイバとし、計測には反射光を利用した OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)方式を選定した。図 4.4-12 に FBG/OFDR センサシステムの計測原理の模式図およびその外観を示す。OFDR センサシステムの波長可変レーザから FBG センサ（光ファイバ）及び全反射終端（レファレンスケーブル）へ入射光を照射し、反射光を検出器で取得する。FBG センサの回折格子で反射した光波長（ブラッグ波長）と全反射終端で反射した光波長は、入射光の波長ごとに整理して干渉光として扱う。入射光（光源）の波長ごとに干渉光の周波数スペクトルをとることで、温度変化によるひずみ分布を求めることができる。なお干渉光は、長さが既知であるレファレンスケーブルによる反射光の要素（ビート周波数）が含まれるため、距離換算が可能となる。

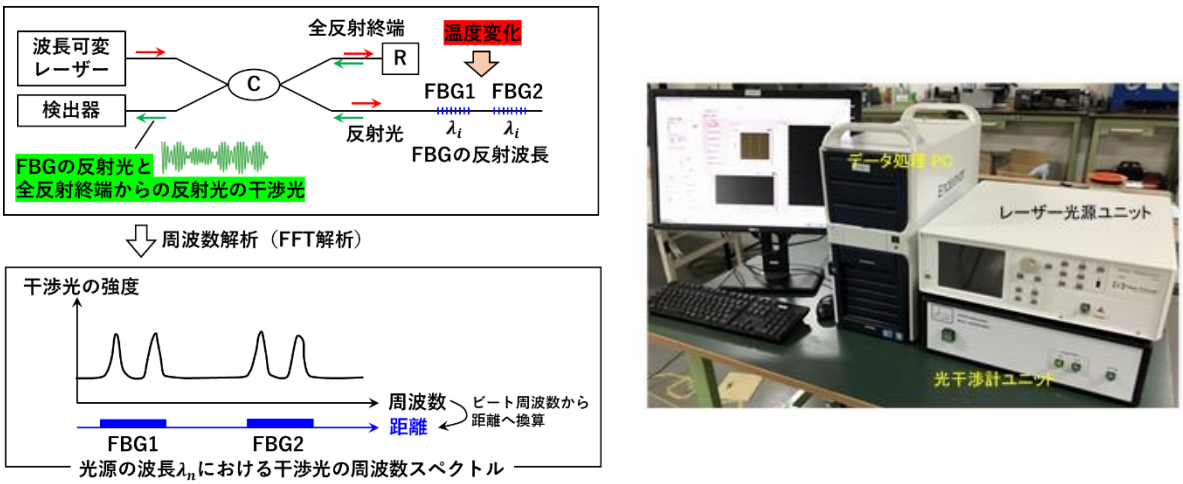
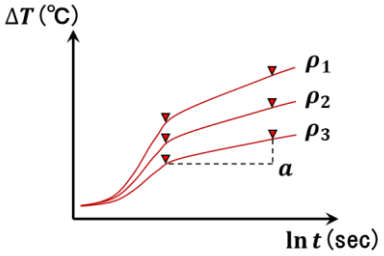


図 4.4-12　FBG/OFDR センサシステムの計測原理の模式図（左）および外観（右）

加熱式光ファイバの発熱用銅線で対象材料を加熱し、光ファイバ（FBG センサ）で経時的な温度変化を測定する。片対数で整理した温度の経時変化は、線形近似できる区間が取得され、その傾きaとケーブルに与えた熱量Qで対象材料の熱伝導率Kが求められる（図 4.4-13）。対象材料の含水比が一定であれば、熱伝導率と密度の間には相関があるため（原子力機構・原環センター, 2021；2022）、乾燥密度を推定することができる。



熱伝導率 K(W/mK)は次の式で与えられる

$$K = \frac{Q}{4\pi a}$$

ここで　a: ΔT－ln t の傾き、t: 計測時間(sec)

Q: ケーブルに与えた熱量(W/m)

ΔT: 光ファイバで計測した温度の変化量(℃)

図 4.4-13　温度変化と熱伝導率の関係

(b) 埋戻し材への適用性確認

埋戻し材の乾燥密度が計測技術で計測可能であることを要素試験で確認した。図 4.4-14 に示すグラフのように、温度上昇量と時間（対数）の傾きa（加熱開始から 3～30 分）を予め求め、図 4.4-13 に示した熱伝導率の計算式を用いて、乾燥密度ごとの熱伝導率を取得することができた。

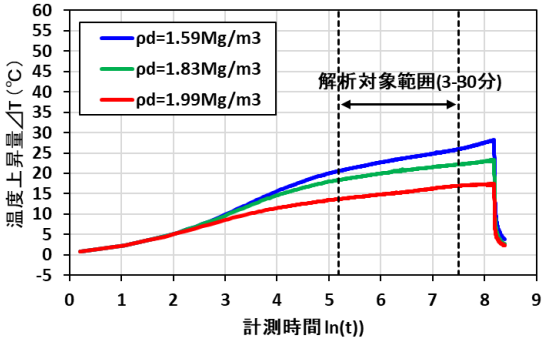


図 4.4-14　材料物性ごとの加熱時間および平均温度の変化
（含水比 3%、乾燥密度 1.59 Mg/m^3、1.83 Mg/m^3、1.99 Mg/m^3）

(c) 適用可能な材料物性の確認

埋戻し材の材料物性（乾燥密度・含水比）を変化させた要素試験により、計測技術（加熱式光ファイバ）の適用可能な範囲を確認した。含水比を 9%に変化させた場合でも、図 4.4-15 に示すグラフのように、温度上昇量と時間（対数）の傾きa（加熱開始から 3～30 分）を予め求め、図 4.4-13 に示した熱伝導率の計算式を用いて、乾燥密度ごとの熱伝導率を取得できた。

併せて、材料物性（乾燥密度・含水比）と熱伝導率には、図 4.4-16 に示すような正の相関があることが確認できた。

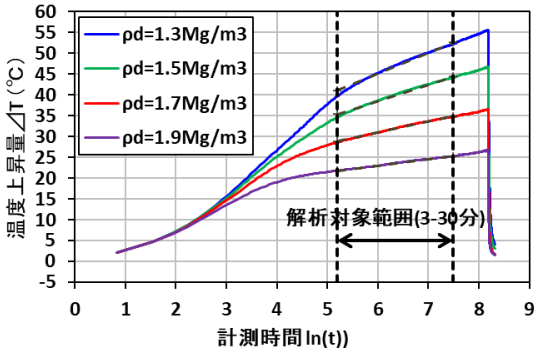


図 4.4-15　材料物性ごとの加熱時間および平均温度の変化
（含水比 9%、乾燥密度 1.3 Mg/m^3、1.5 Mg/m^3、1.7 Mg/m^3、1.9 Mg/m^3）

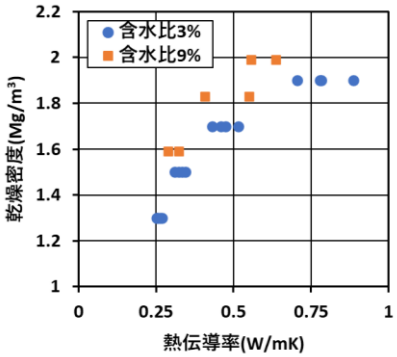


図 4.4-16　乾燥密度と熱伝導率の関係

(3) 選定した計測技術

以上のように、計測技術の実証試験に向けた要素試験等によって得られた成果（確認した項目）を表 4.4-5 に整理する。

表 4.4-5　得られた成果の一覧表

技術名	開発項目	成果
隙間検知技術（ケーブル TDR 法）	技術選定・調査	・ 空隙を分布（線計測）で検知可能、且つ導入の実績から開発の見通しがある技術としてケーブル TDR 法を選択した。
	埋戻し材と空隙の判別試験	・ フィーダ線（センサ）を伝播する電圧の速度と振幅から取得される電圧反射係数により、埋戻し材と隙間の判別が可能であることを確認した。
	隙間幅・高さの検知試験	・ 2.5cm より大きい隙間高さはすべて空隙として測定されることが分かった。 ・ 検知可能な隙間長さ（25cm）を確認した。
密度分布測定技術（加熱式光ファイバ(aDTS 法)）	技術選定・調査	・ 乾燥密度を分布（線計測）で計測可能、且つ地層処分関連の開発実績があることから、適用性に見通しのある技術として aDTS 法を選択した。
	埋戻し材への適用性確認	・ 埋戻し材の温度上昇量の経時変化を加熱式光ファイバにおいて取得した。 ・ 温度上昇量より算定した熱伝導率により、埋戻し材の乾燥密度を推定できることを確認した。
	適用可能な材料物性の確認	・ 埋戻し材の乾燥密度(1.3～2.0 Mg/m^3)および含水比(3, 9 %)の幅を変化させた場合でも、加熱式光ファイバにより温度上昇量の経時変化を取得可能であることを確認した。

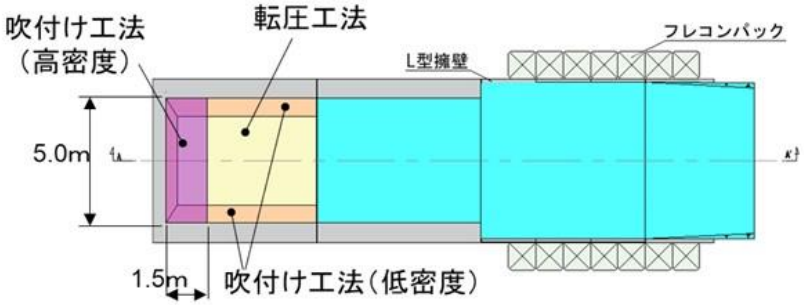
4.5 実規模模擬坑道を活用した地上実証試験

4.5.1 目的と全体概要

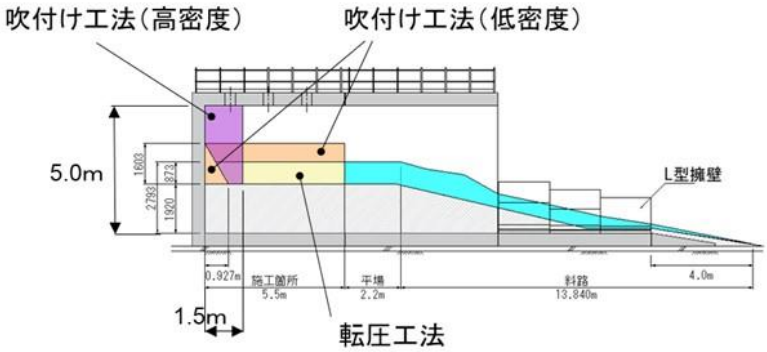
転圧工法と吹付け工法を組み合せることにより、仮設定した要求品質（透水係数 1×10^{-9} m/s）を満足する埋戻し材の坑道全断面施工が可能なことを確認し、施工品質、歩掛などの施工情報を取得するために模擬坑道を活用した地上実証試験を行った。実証試験の場となる模擬坑道を図 4.5-1 に示す。実証試験では上記の施工試験に加えて、埋戻し材の施工品質および施工後の状態変化の把握等のため計測技術の開発に係る取組として、ケーブル TDR を用いた坑道上部の隙間検知および加熱式光ファイバを用いた乾燥密度分布計測も実施した。さらに、施工後約 6 ヵ月経過時には埋戻し材を解体・分析し、埋戻し材の初期段階の経時変化を確認するとともに、計測技術の検証を行った。

実証試験の対象範囲を図 4.5-2 に示す。転圧工法については、2021 年度の埋戻し範囲（長さ 5.5m、幅 5.0m、高さ 1.9m）をかさ上げし、限界高さ 2.8m まで施工した。この限界高さは、吹付けロボットの坑道内搬入が可能となる高さである。転圧工法は、転圧機と坑道アーチ部（側部）や妻部が干渉するために下半部までしか施工できない（図 4.5-3）。そのため、アーチ部等の転圧機が干渉する境界部を吹付け工法（低密度）で埋め戻し、その内側を転圧工法で埋め戻した。転圧工法で埋め戻した後、模擬坑道の上半部を吹付け工法（高密度）により坑道妻壁より 1.5m まで埋め戻した。計測技術は、隙間検知用のフィーダ線を坑道妻壁から 0.3、0.6m の位置の壁面周方向に 2 本設置し、乾燥密度計測用の光ファイバを転圧工法の最下層及び吹付け工法の妻壁から 1.2m の位置に設置した。実証試験における埋戻し手順の概要を図 4.5-4 に示す。各工法の詳細については次項 4.5.2 に、計測技術の詳細については次項 4.5.5 に整理する。

図 4.5-1　実証試験に使用した模擬坑道（5m×5m の馬蹄形）

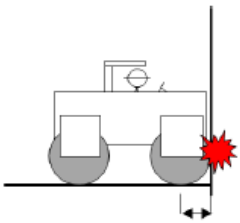


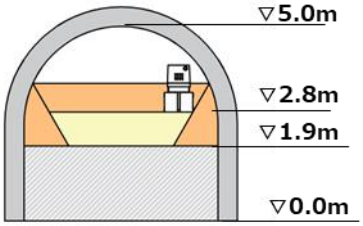
(a) 平面図



(b) 縦断面図（A-A 断面）

図 4.5-2　埋戻し材の実証試験の対象範囲

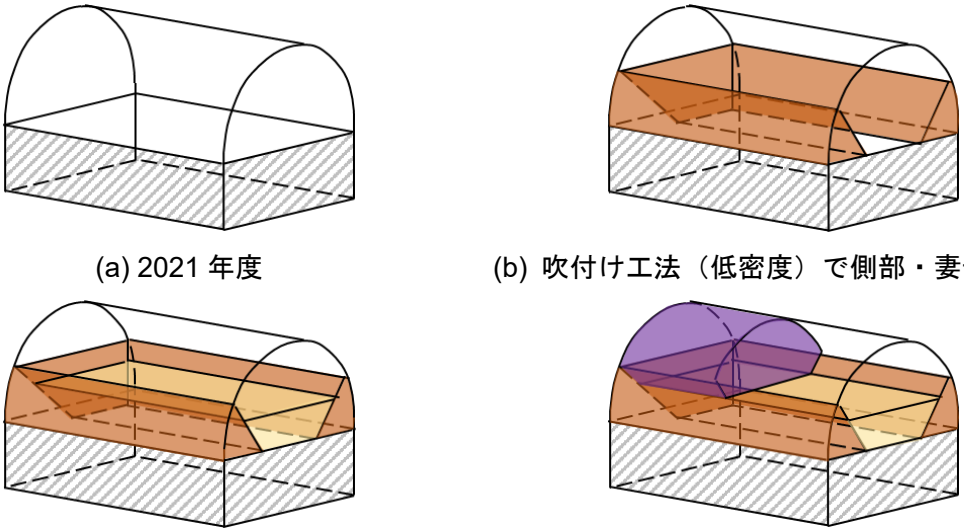




*転圧機と干渉する範囲を吹付け工法で施工

(a) 転圧機と坑道内壁との干渉の例　　(b) 吹付け工法併用による対応策

図 4.5-3　転圧機と坑道内壁との干渉の例とその対応策



(a) 2021 年度　(b) 吹付け工法（低密度）で側部・妻部埋戻し

(c) 転圧工法で埋戻し　(d) 吹付け工法（高密度）で上半部埋戻し

図 4.5-4　吹付け工法を併用した転圧工法の施工手順概要

4.5.2 施工方法及び施工条件

(1) 吹付け工法（低密度）（坑道妻部及び側部の埋戻し）

(a) 材料仕様

吹付け工法（低密度）の実証試験に用いた埋戻し材の仕様を表 4.5-1 に示す。模擬掘削土の粒度（最大粒径）及び埋戻し材の設定含水比は、前述したように小規模施工試験（吹付け箱試験）を行い施工性（閉塞の発生、リバウンド状況）や付着材の乾燥密度を比較した上で設定した。

表 4.5-1　吹付け工法（低密度）の埋戻し材の仕様

工法種別	使用材料【乾燥質量による混合率】		設定含水比
	ベントナイト	模擬掘削土	
吹付け工法（低密度）	Na 型（クニゲル V1）【15%】	玄武岩：砕砂粗目（最大粒径 5mm）【85%】	13%（w_{opt}）

備考：設定含水比は、JIS A 1210 突き固めによる土の試験方法（A 法）により得られた最適含水比とした。

(b) 施工仕様

吹付け工法（低密度）における主な使用機械を表 4.5-2 に、機器構成のイメージ図を図 4.5-5 に、吹付け工法（低密度）の施工仕様を表 4.5-3 に示す。吹付け圧力及びノズル距離（ノズル先端から吹付け面までの距離）は、本実証試験の前に予備的な吹付け試験を行い、施工性（閉塞の発生有無）や乾燥密度を測定・比較した上で設定した。

吹付け工法（低密度）の施工対象範囲のブロック割図を図 4.5-6 に、ブロック毎の施工フローを図 4.5-7 に示す。妻面下部を 3 ブロック（BL1～BL3）に、西側側壁下部を 3 ブロック（BL4～BL6）に、東側側壁下部を 3 ブロック（BL7～BL9）にそれぞれ分けて施工を行った。BL1～BL7 は図 4.5-7 内の(a)のフローで施工したが、ブロックの下部において付着材にリバウンド材が巻き込まれて付着材の乾燥密度が低下していることが懸念されたため、BL8～BL9 では、図 4.5-7 内の(b)のフローに示したように、フレコンバッグ 1 袋分の吹付けが完了するごとに吹付けを中断し、リバウンド材の回収を行った。

表 4.5-2　吹付け工法（低密度）の主な使用機械

機器名	項目	諸元等	備考
吹付け機	種別	ロータ式吹付け機	名称：アリバ AL257
	ロータ容量(ℓ)	6.0	
	材料吐出量(m^3/hr)	2.0～5.0	
	空気圧力(MPa)	0.3～0.4	
	ホッパー容量(ℓ)	56.5	
コンプレッサ	種別	ドライコンプレッサ	
	吐出圧力(MPa)	0.7	
	吐出空気量(m^3/min)	11	
	出力(PS)	110	
ノズル操作重機（吹付けロボット）	機器名称	バックホウ後方小旋回	容量 0.03m^3
	機体重量(kg)	890	
	最小横幅(mm)	840	
	最小高さ(mm)	1,390	
	出力(kW)	7.7	
ホース	径(mm)	40	
ノズル	材質	硬質ゴム製	
	内径(mm)	28	ノズル先端部

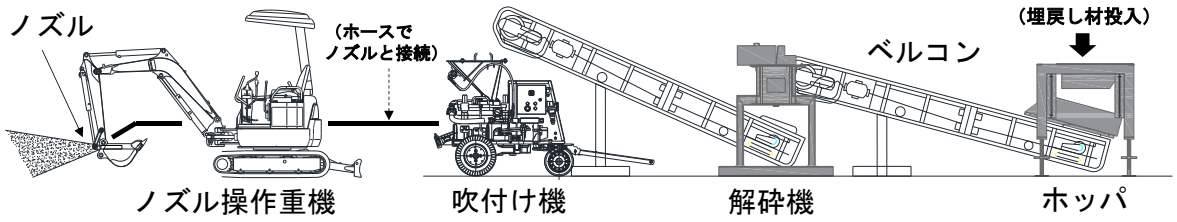


図 4.5-5　吹付け工法（低密度）の機器構成のイメージ図

表 4.5-3　実規模模擬坑道試験における施工仕様（吹付け工法（低密度））

項　　目	設定仕様	備　　考
吹付け圧力	0.3～0.4 MPa	吹付機の上部エアバルブと下部エアバルブの開閉具合により強、弱の２段階で調整が可能 予備試験では、強、弱２段階でそれぞれ吹付けを行い、強の方が、付着材の乾燥密度が高くなることが確認できたので、実規模模擬坑道試験では「強」に設定した。
材料供給量	33 kg/min 程度	吹付け工法（高密度）と同じ単位に換算すると、 5.4 kg/10sec 程度。 この値は変更せず、一定とする。
ノズル距離	1 m 程度	予備試験では、0.5m と 1.0m で比較を行ったが、付着材の乾燥密度には差が認められなかったので、1m とした。

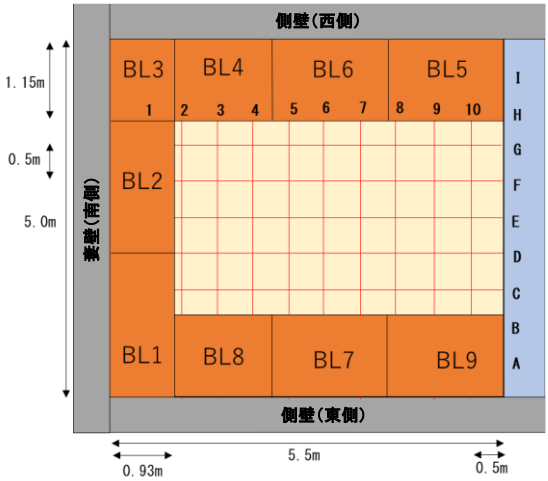
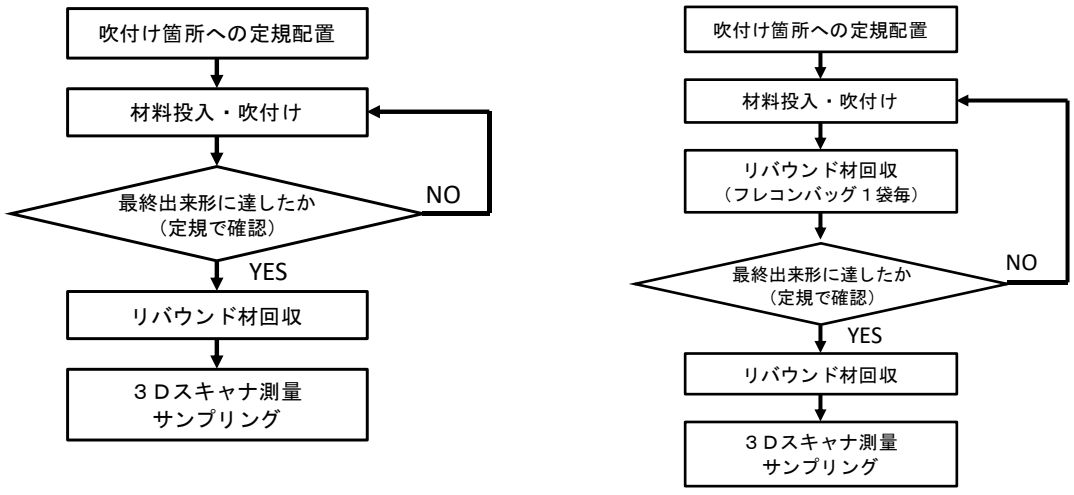


図 4.5-6　吹付け工法（低密度）の施工対象範囲のブロック割



(a) BL1～BL7　　(b) BL8～BL9

図 4.5-7　施工手順（吹付け工法（低密度））

(c) 測定項目及びサンプリング位置

吹付け工法（低密度）の実規模模擬坑道試験における主な測定項目を表 4.5-4 に示す。また、乾燥密度および透水係数測定のための供試体サンプリング位置を図 4.5-8 に模式的に示す。

表 4.5-4　主な測定項目（吹付け工法（低密度））

取得データ	測定方法または準拠した規格・基準	測定頻度
材料投入質量	クレーンスケール	1ブロック
リバウンド材質量	クレーンスケール	1ブロック
ロス材質量	クレーンスケール	1ブロック
最終出来形	3D スキャナ測量	1ブロック
施工時間	ストップウォッチ	各作業段階
乾燥密度	JGS 1613-2012（単位体積質量法：コアカッター法）	9 点／1 ブロック
含水比	JIS A 1203	同上
透水係数	JGS 0312-2018	6 点

図 4.5-8　供試体サンプリング位置（乾燥密度用 9 ヶ所＋透水試験用 1 ヶ所）（吹付け工法（低密度））

(2) 転圧工法（坑道中央部の埋戻し）

(a) 材料仕様

転圧工法の実証試験に用いた埋戻し材の仕様を表 4.5-5 に示す。模擬掘削土の粒度（最大粒径）及び埋戻し材の設定含水比は、前述したように小規模施工試験を行い施工性や施工品質（乾燥密度など）を比較した上で設定した。

表 4.5-5　転圧工法の埋戻し材の仕様

種別	使用材料【乾燥質量による混合率】		設定含水比
	ベントナイト	模擬掘削土	
転圧工法	Na 型（クニゲル V1） 【15%】	玄武岩：砕石 51%・砕砂粗目 34% 【85%】	9%

(b) 施工仕様

転圧工法の実証試験で使用した主な使用機械を表 4.5-6 に、施工仕様を表 4.5-7 に、施工手順を図 4.5-9 に示す。実証試験では、質量を予め測定しておいたフレコンバッグから埋戻し材を開梱し、バックホウで塊をほぐした後、キャリアダンプで模擬坑道内に埋戻し材を運搬した。撒き出した埋戻し材を人力で敷き均し、レベル測量で所定の撒出し厚さになっていることを確認して、転圧を行った。1 層の転圧を実施するごとに、3D 計測による出来形管理、砂置換法による埋戻し材の乾燥密度測定、ブロックサンプリングによる透水試験等により施工品質を確認した。

表 4.5-6　転圧工法の主な使用機械

使用機器	仕様	単位	数量	備考
バックホウ	0.25 m^3	台	1	材料ほぐし用
キャリアダンプ	0.4 m^3	台	1	材料撒出し用
1.5t 小型振動ローラ	1.5 t	台	1	一般部転圧用

表 4.5-7　転圧施工試験の施工仕様

転圧機	撒出し厚	転圧回数
1.5t 小型振動ローラ	250mm	・無振動転圧　2Pass ・振動転圧　　6Pass

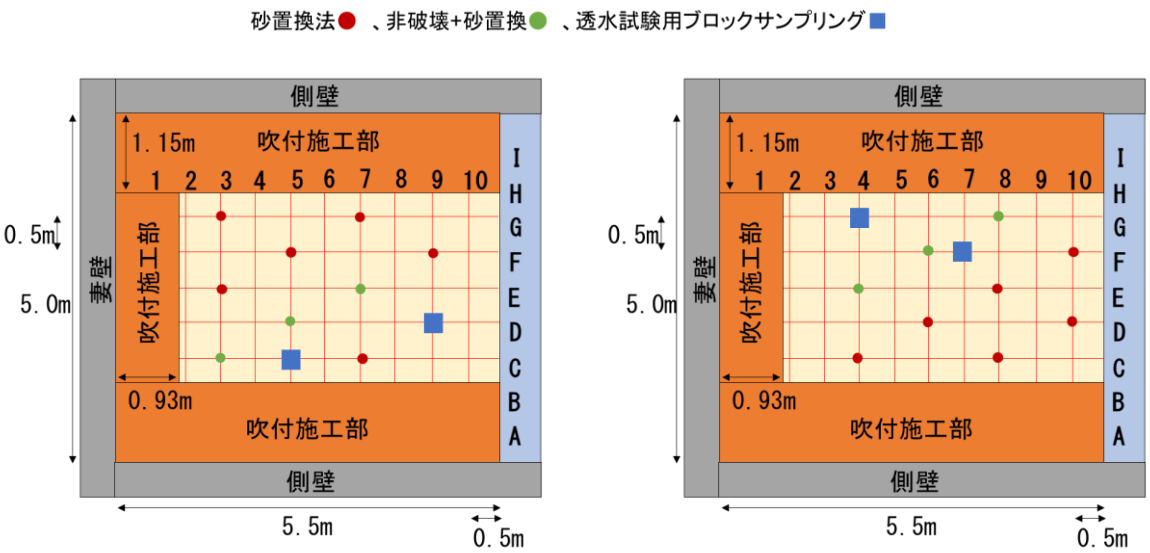
図 4.5-9　転圧工法による埋戻し材の施工手順

(c) 測定項目及びサンプリング位置

転圧工法の実証試験で取得したデータを表 4.5-8 に、砂置換法による乾燥密度測定及び透水試験用試料等のサンプリングの位置を図 4.5-10 に示す。奇数層と偶数層で密度測定及びサンプリング位置が重ならないように位置を設定した。

表 4.5-8　主な測定項目（転圧工法）

取得データ	測定方法、規格・基準	測定頻度
投入量	材料の投入量	1 点/各層
転圧回数	目視確認	転圧時
施工層厚	レベル測量	1 点以上/m²
出来形測定	3D スキャナ測量	2 回/各層（撒き出し後、転圧後）
施工速度	歩掛	各施工段階
乾燥密度	JIS A 1214(単位体積質量法;砂置換法)	9 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)	3 点/各層
透水係数	JGS 0312-2018	2 点/各層



(a) 奇数層　　(b) 偶数層

図 4.5-10　砂置換法による密度測定及び透水試験用サンプリング位置

(3) 吹付け工法（高密度）（坑道上半部の埋戻し）

(a) 材料仕様

吹付け工法（高密度）の実証試験に用いた埋戻し材の仕様を表 4.5-9 に示す。模擬掘削土の粒度（最大粒径）及び埋戻し材の設定含水比は、前述したように小規模施工試験を行い施工性や施工品質（乾燥密度など）を比較した上で設定した。

表 4.5-9　埋戻し材の仕様（吹付け工法（高密度））

工法種別	使用材料【乾燥質量による混合率】		設定含水比
	ベントナイト	模擬掘削土	
吹付け工法 （高密度）	Na 型（クニゲル V1） 【15%】	玄武岩：砕砂粗目（最大粒径 5mm） 【85%】	8.5% （w_{opt}）

備考：設定含水比は、JIS A 1210 突き固めによる土の試験方法（C 法）により得られた最適含水比とした。

(b) 施工仕様

吹付け工法（高密度）の実証試験で使用した主な使用機械を表 4.5-10 に、吹付けロボットの様子を図 4.5-11 に、機器構成のイメージ図を図 4.5-12 に、施工仕様を表 4.5-11 に示す。

吹付けロボットは、模擬坑道の中央に据え、ブームの旋回とノズル角度の調整により、吹付け面に対してノズルが直交するように配置することが可能であり、ノズルから吹付け面までの距離は 0.5～1.5 m の範囲で吹付けを行うことができる。また、ホース内付着量を低減するために、圧送ホースはできるだけたわみを少なく、且つ一直線となるように配置した。

試験ケースを表 4.5-12 に、各ケースの施工位置（施工ブロック割）を図 4.5-13 に、各ケース（ケース 2 を除く）の施工手順（フロー）を図 4.5-14 に示す。

ケース 1 では吹付けロボットの操作性の確認を行った。ケース 2、3 及び 4 は、施工仕様の検討の一環としてノズルワークの検討を行ったものであり、その概要は既出の 4.4.1 項で述べた。ケース 1（及び 2）の施工後に、図 4.5-13(c)の破線の位置に化粧板の壁面（箱抜き）を設置し、ケース 3 以降は、断面を分割して施工を行った。ケース 5～7 では、人力施工と機械施工の違いや、両者を併用（機械では施工しにくい周縁部を人力で、一般部を機械で施工）した場合のリバウンド率への影響等について考察を行った。

表 4.5-10　吹付け工法（高密度）の主な使用機械

機器名	項目	諸元等	備考
コンプレッサ	種別	トレーラ	
	吐出圧力(MPa)	0.7	
	吐出空気量(m^3/min)	18.5	
	出力(PS)	190	
材料供給機	機種名	グラニュレータ	AGC プライブリコ製
	タイプ	湿潤材料供給機	
	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
	ホッパ(m^3)	1.4	
吹付け機	名称	ニードガン 2000	AGC プライブリコ製
	タイプ	ロータ式吹付け機	
	材料吐出量(m^3/hr)	20	
	所要空気量(m^3/min)	20	
	材料送り最大距離(m)	水平 200／垂直 100	
	吹付け可能最大粒径	15mm	
	回転数(rpm)	30	
吹付けロボット	機器名称	ミニロボット MR-Ⅲ	ニシオティーアンドエム製
	全長(mm)	4,694	
	全幅(mm)	1,300	
	全高(mm)	2,270	
	機体重量(kg)	1,680	
	ブーム旋回角度(左右各)(度)	50	
	ブーム起伏角度(上･下)(度)	54～16	
	アーム伸縮長(mm)	1,000	
	ノズル前後傾角(度)	270	
	ノズル回転角(度)	360	
ホース	径(インチ)	2	（50.8mm）
	長さ(m)	20	
ノズル	タイプ	ラバールノズル	（超音速ノズル）
	最狭部内径(mm)	0.36D	（D：ホース内径）

(a) 全景　　(b) ノズルアタッチメント

図 4.5-11　吹付けロボット

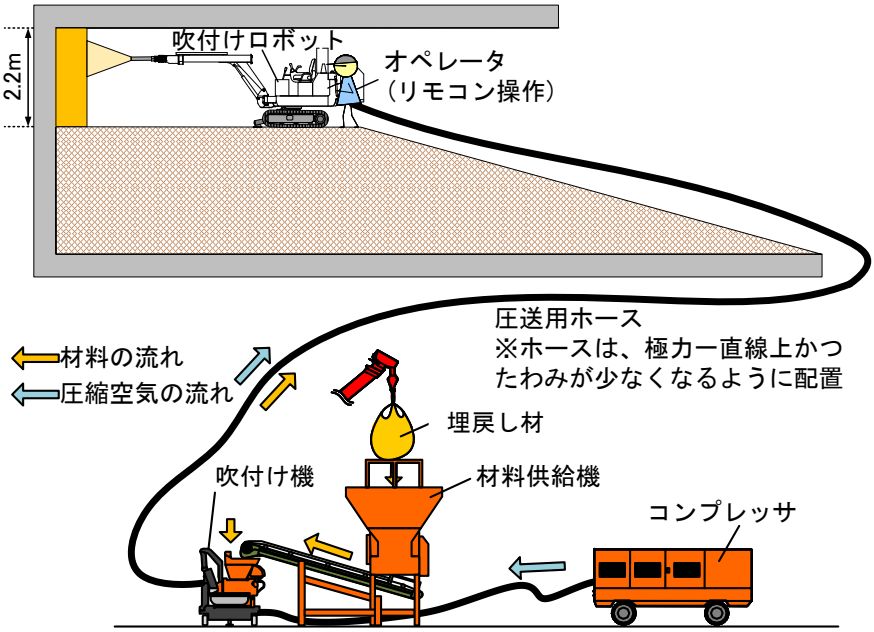


図 4.5-12　吹付け工法（高密度）の機器構成のイメージ図

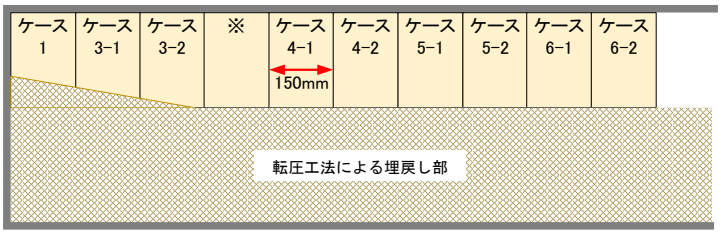
表 4.5-11　施工仕様（吹付け工法（高密度））

項　　目		設定仕様	備　　考
吹付け圧力		0.7 MPa	設定経緯は、4.4.1(2)(b)参照
材料供給量		15 kg/10sec	設定経緯は、4.4.1(2)(b)参照
施工方法		人力、機械 または両者の併用	併用する場合は、吹付け面周縁部（隅角部）を人力で、中央部を機械で施工
人力	ノズル距離	1m 程度	
機械	ノズル距離	0.5m～1.5m	
	ノズルワーク	1Pass または 3Pass	検討の概要は、4.4.1(2)(b)参照
	ノズル水平方向 移動速度	約 0.5m/s	吹付けロボットの機能上の制約により、左記の速度に固定

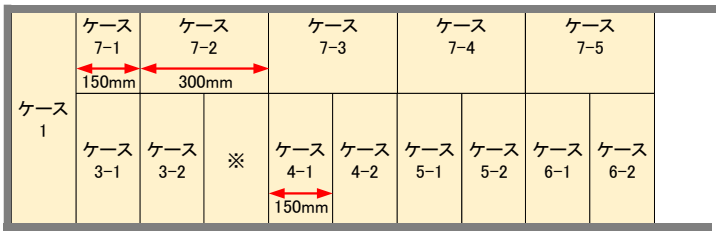
表 4.5-12　試験ケース（吹付け工法（高密度））

ケース No.	吹付け厚さの目安 (mm)	妻壁から吹付け仕上がり面までの長さの目安 (mm)	施工方法	実施内容	試験の目的
1	150	150	機械施工	MR-IIIの操作性確認	操作性や凸部に係る事前確認
2				凸部の高さ・幅の計測	
3-1	150	300		1Pass での吹付け	凸部の高さの違いがリバウンド率に与える影響の確認
3-2	150	450			
4-1	150※	750		3Pass での吹付け	
4-2	150	900			
5-1	150	1,050	人力／機械併用	周縁部周辺は人力で先行して吹付けたのち中心部を機械施工（1Pass）	周縁部の施工方法がリバウンド率に与える影響の確認
5-2	150	1,200			
6-1	150	1,350	人力施工	吹付け面全体を人力施工	機械施工におけるリバウンド率と人力施工におけるリバウンド率の比較
6-2	150	1,500			
7-1	150	300		吹付け面全体を人力施工	
7-2	300	600			
7-3	300	900			
7-4	300	1,200			
7-5	300	1,500			

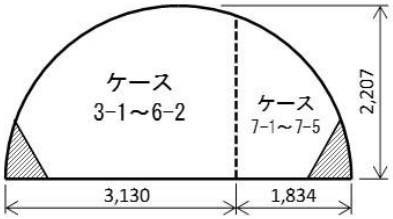
※ケース 4-1 の施工前に、妻壁から吹付け面までの長さが 600 mm となるように吹付けを実施



(a) 各ケースの施工位置（縦断面図）



(b) 各ケースの施工位置（平面図）



(c) 各ケースの施工位置（正面図）

図 4.5-13　各ケースの施工位置（吹付け工法（高密度））

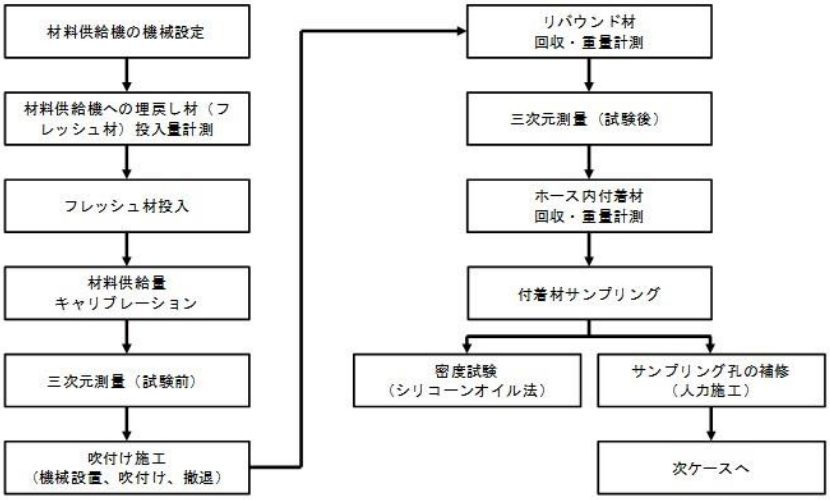


図 4.5-14　施工手順（吹付け工法（高密度））

(c) 測定項目及びサンプリング位置

施工品質を評価するために実施した計測項目を表 4.5-13 に、サンプリング位置を図 4.5-15 に模式的に示す。各ケースの吹付け完了後に、付着材をブロックサンプリングしてシリコーンオイル法による密度試験及び含水比測定（含水比測定器（MOC63u））を行った。付着材の透水試験は、変水位透水試験方法（JGS 0311）及び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。また、ケース 2 を除く各ケースの施工前後に、坑道内部で 3D スキャナを用いた三次元測量を実施し、各ケースの施工前の既設施工体の表面（施工前の吹付け面）及び付着材の表面（施工後の吹付け面）の座標データを取得した。それらの三次元座標データを用いた施工前後の差分から、各ケースの付着材の体積を算出し、かさ密度の算定を行った。

表 4.5-13　計測項目（吹付け工法（高密度）：実規模模擬坑道試験）

取得データ			計測方法	計測頻度
施工前	使用前の埋戻し材（フレッシュ材）（F 材）	粒度	粒度試験（JIS A 1204）	1 回／ケース（ケース 7-1～5 で 2 回）
		含水比	含水比測定器（MOC63u）	2～3 点／フレコンバッグ
		材料供給機への投入重量	クレーンスケール	1 回／ケース
	施工前の坑道内部	三次元座標データ	3D スキャナ	1 回／ケース
施工中		施工時間	ストップウォッチ	各作業時間
施工後	模擬坑道への付着材（付着材）	乾燥密度	シリコーンオイル法	3～9 点／ケース（計 58 点）
		含水比	含水比測定器（MOC63u）	同上
		粒度	粒度試験（JIS A 1204）	1 回／ケース（ケース 7-1～5 で 3 回）
		透水係数	透水試験（JGS 0311、JGS 0312-2018）	3 点
		三次元座標データ	3D スキャナ	1 回／ケース
	圧送ホース内壁への付着材	重量	電子天秤	1 回／ケース
	リバウンド材（R 材）	重量	クレーンスケール	1 回／ケース
		粒度	粒度試験（JIS A 1204）	1 回／ケース

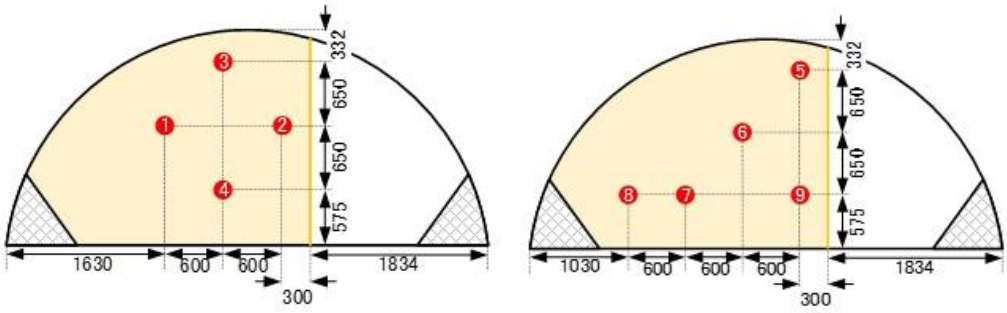


図 4.5-15　付着材のサンプリング位置例（左：ケース 5-1、右：ケース 5-2）

4.5.3 材料製造

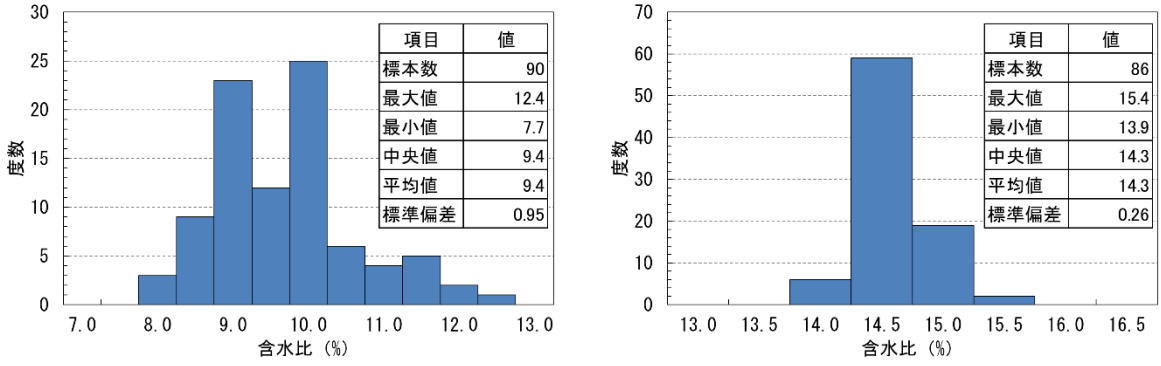
(1) 吹付け工法（低密度）及び転圧工法

吹付け工法（低密度）と転圧工法で使用する材料は、同様の条件で製造した。埋戻し材製造時の加水量を設定するために、施工試験で使用するクニゲル V1：13 t、砕石：56 t、砕砂粗目：25 t に対して、クニゲル V1 は 48 試料、砕石は 15 試料、砕砂粗目は 60 試料を採取して含水比を測定した。測定結果から求めた含水比の平均値（クニゲル V1：7.2%、砕石：1.5%、砕砂粗目：5.2%）を用いて加水量を設定した。

埋戻し材の製造にはアイリッヒミキサ（DE-22）を用いた。回転しているミキサ内にベルトコンベアで砕石と砕砂（吹付け工法は砕砂のみ）を供給した。クニゲル V1 はミキサ内に砕石と砕砂を所定量の半分供給した時点で投入した。材料投入後、15 秒間の空練りを行い、ミキサを回転させながら所定量加水し、加水終了後に 30 秒間の混錬（本練り）を行って埋戻し材を製造した。

製造した埋戻し材の含水比の頻度分布を図 4.5-16 に示す。埋戻し材の管理基準目標（設定含水比の±2%）に対して、転圧工法の材料では一部で管理基準目標を外れるフレコンが存在したものの、概ね管理基準値内で製造することができた。管理基準を外れた原因としては、梅雨時に製造したため、砕石の含水比にばらつきが生じた可能性が挙げられる。吹付け工法（低密度）の材料は全数を管理基準目標内で製造することができた。製造後の埋戻し材は、内部コーティングされた耐候性フレコンに入れたうえで、雨天などの影響を受けないように倉庫内に保管した。フレコンは、埋戻し材の圧縮を避けるため 2 段積みまでとした。

なお、吹付け工法（低密度）の材料は、管理基準目標内で製造することが出来たものの、施工現場における試験前の事前確認により、含水比を 1%程度調整してから使用した。含水比調整後の埋戻し材の含水比の頻度分布を図 4.5-17 に示す。



(a) 転圧工法　設定含水比 9%　　(b) 吹付け工法（低密度）　設定含水比 13%

図 4.5-16　埋戻し材製造後の含水比の頻度分布（転圧工法）

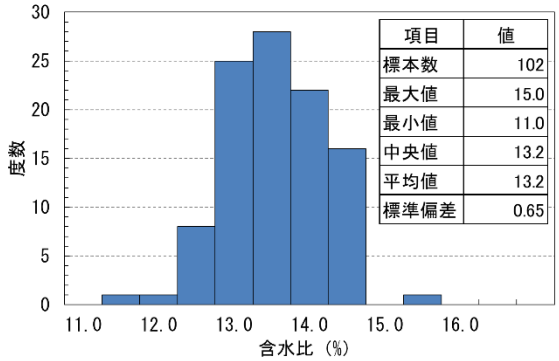


図 4.5-17　調整後の含水比の頻度分布（吹付け工法（低密度））

(2) 吹付け工法（高密度）

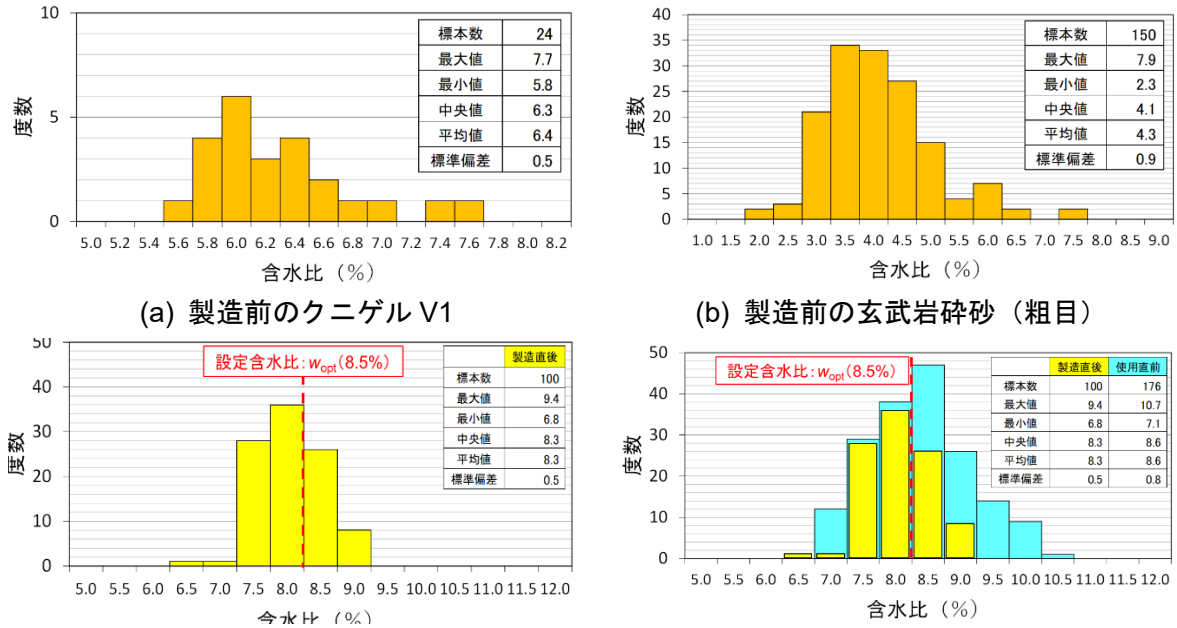
埋戻し材の製造は、2021 年度と同様の方法により行った。材料の混練には、アイリッヒミキサー（DE-22）を使用し、1 バッチあたりの練り混ぜ量は、約 1,000kg とした。混練の手順は、①材料の含水比測定及び加水量計算、②クニゲル V1 と玄武岩砕砂粗目をミキサに投入し空練り（1 分）、③加水、④混練（1 分）、⑤含水比測定、⑥フレコンバッグに約 500kg ずつ投入して保管した。1 バッチ毎に加水量を調整して混練を実施するため、①及び⑤の含水比測定は、赤外線水分計により実施し、その場で測定結果を確認した。含水比の測定頻度は、①の混練前のクニゲル V1 は約 1,000kg 使用毎（6 または 7 バッチ毎）、玄武岩砕砂粗目はフレコンバッグ 1 袋毎（1 バッチ毎）とした。⑤の混練直後の含水比測定は、1 バッチにつき 2 試料を採取して測定を行い、設定含水比に対する誤差を確認した。製造後の埋戻し材は、フレコンバッグの上からビニール製の外袋で覆い養生した状態で、屋根付きの倉庫内で約 2 ヶ月間保管した。

試験場所への運搬中及び保管期間中に、乾燥或いはフレコンバッグ内での含水比のバラつきの発生などの可能性がある。そこで、試験開始前に、改めて全フレコンバッグより 2～3 試料ずつ試料を採取して含水比の計測を行った。

製造前の各材料（クニゲル V1 及び玄武岩砕砂粗目）、製造直後の埋戻し材及び使用直前の埋戻し材の含水比の度数分布を図 4.5-18 に示す。埋戻し材の全質量の 8 割以上を占める玄武岩砕砂粗目の混練前の含水比のばらつきは標準偏差で 0.9%であったが、製造後の埋戻し材の含水比のばらつきは 0.5%と小さくなった。この結果から、1 バッチ 1 t 程度の埋戻し材を製造する場合、材料の含水比を高頻度に測定することでバラつきを抑えることが可能であると考えられる。

図 4.5-18 に示した図内(c)の製造直後と、図内(d)の使用直前の埋戻し材の含水比分布を比較すると、平均値は、前者が 8.3%であるのに対して後者は 8.6%であり、運搬中及び約 2 ヶ月間の保管期間における含水比の平均値の変動が小さいことを確認した。

なお、使用直前の埋戻し材の一部について、製造直後よりも含水比が高い試料が存在するが、表 4.5-14 に示したフレコンバッグの試料採取位置別の含水比の測定結果からは、採取位置による含水比の偏りは生じていないと考えられ、試料採取時に細粒分を過度にサンプリングしたことが原因の一つであると推察される。



(a) 製造前のクニゲル V1　　(b) 製造前の玄武岩砕砂（粗目）

(c) 製造直後の埋戻し材　　(d) 使用直前の埋戻し材

図 4.5-18　各段階での材料の含水比の度数分布（吹付け工法（高密度））

表 4.5-14　使用直前の埋戻し材のフレコンバッグからの採取位置別含水比（平均値）

採取位置	採取試料数	含水比（平均値）(%)
上部	80	8.4
中心部	80	8.9
底部	16	8.4

4.5.4 施工結果

(1) 施工性

(a) 吹付け工法（低密度）

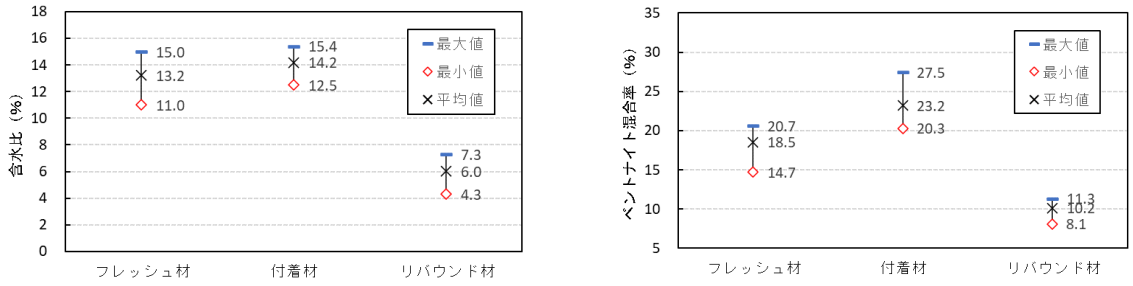
吹付け施工中は、一時吹付け機の不調により吹付け機出口での閉塞が発生したが、それ以外は、閉塞は殆ど発生せず、概ね順調に吹付けを行うことできた。

吹付け工法（低密度）のリバウンド率は、ブロック毎に、総吐出量からロス材（こぼれ落ちた材料）量を差し引いた重量に対するリバウンド材の重量の比率として算定した。各ブロックのリバウンド率を、表 4.5-15 に示す。リバウンド率の値は、8～20%の範囲に分布しており平均で 14.3 %程度であった。後述する吹付け工法（高密度）では、最も小さいケースでも 30%を超えるリバウンド率となっており、付着材の密度が低ければリバウンド率も小さいという結果が得られた。

表 4.5-15　リバウンド率一覧表（吹付け工法（低密度）実規模模擬坑道試験）

BL No.	総吐出量 (kg)	リバウンド量 (kg)	ロス材量 (kg)	リバウンド率 (%)
BL1	3,101	308	39.3	10.1
BL2	3,179	252	19.0	8.0
BL3	2,065	253	38.3	12.5
BL4	4,214	359	26.6	8.6
BL5	3,157	378	35.9	12.1
BL6	4,967	890	36.5	18.1
BL7	4,201	842	24.5	20.2
BL8	4,218	819	39.5	19.6
BL9	5,482	1,079	3.6	19.7

埋戻し材の含水比及びベントナイト混合率が、吹付け前（フレッシュ材）と後（付着材及びリバウンド材）で、どのように変化したかを図 4.5-19 に示す。ここで、ベントナイト混合率は、フレッシュ材、付着材及びリバウンド材それぞれの細粒分含有率から模擬掘削土（玄武岩砕砂粗目）の細粒分含有率を差し引いた値とした。含水比は、フレッシュ材では平均 13.2%であったが、付着材では平均 14.2%に上昇し、リバウンド材は平均 6.0%であった。一方、ベントナイト混合率は、フレッシュ材では平均 18.5%であったが、付着材では平均 23.2%に増加し、リバウンド材では平均 10.2%に減少している。これらの結果から、比較的粒径の小さい粒子が付着して、粒径の大きい粒子がリバウンドする傾向にあり、付着材粒子の表面積が大きくなり、より多くの水分が保持されることで、含水比が大きくなっているものと考えられる。



(a) 含水比　　(b) ベントナイト混合率

図 4.5-19　吹付け前後での材料の含水比及びベントナイト混合率の変化

(b) 撒出し・転圧工法

転圧工法では施工性を確認するために転圧層の仕上がり高さのレベル測量を実施した。転圧層の仕上がり高さを図 4.5-20 に示す。転圧層の仕上がり高さは、トンネルの中心軸方向（妻部からトンネルの入り口に向けての方向）の転圧後の高さを示している。施工試験で転圧した 4 層のいずれも、上下の不陸が小さいことがわかる。

転圧層（本試験の 4 層に仕上げ層を加えた 5 層）の層厚の頻度分布図を図 4.5-21 に示す。転圧層の層厚の分布形状は正規分布である。層厚の平均値は 115mm、標準偏差は 9mm であり、2021 年度（層厚の平均値 122mm、標準偏差 12mm）とほぼ同等である。

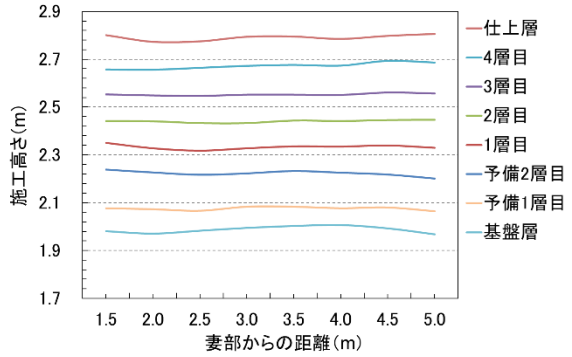


図 4.5-20　転圧層の仕上がり高さ

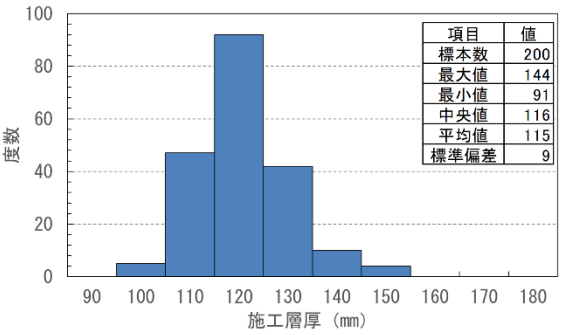


図 4.5-21　転圧層の層厚の頻度分布

(c) 吹付け工法（高密度）

吹付け施工中は、ノズルやホースの詰まりによる閉塞は全く発生せず、順調に施工することができた。リバウンド率は、ケース毎に、総吐出量からホース内付着量を差し引いた重量に対するリバウンド材の重量の比率として算定した。各ケースのリバウンド率を表 4.5-16 に示す。ケース毎に施工条件が異なるが、全体的に見ると、リバウンド率は 30%強～40%強の値となっている。

Pass 数の異なるケース 3（3-1、3-2）と 4（4-1、4-2）は、いずれも 40%強のリバウンド率となり、差は認められなかった。Pass 数の増加に伴い凸部の高さと幅が成長（増加）するが、凸部が高くなりすぎると、片持ち梁状に成長した山が途中で折れて落ちてしまい（全てリバウンド材となり）、リバウンド率が増加することが想定されたが、今回の施工条件では、少なくとも 3Pass までは、そのような現象は生じなかった。

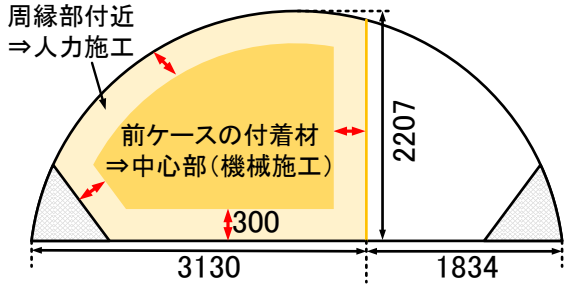
人力施工のみのケース（ケース 6-1、6-2、7-1～7-6）のリバウンド率は、平均で 35.6%であるのに対して、機械施工のみのケース（ケース 3-1、3-2、4-1、4-2）のリバウンド率は、平均で 41.9%であり、6%程度機械施工の方が大きかった。この差の主な要因として、機械施工で吹付け面の周縁部の吹付を行う際に、吹付けロボットのアームが実規模模擬坑道の坑壁と干渉してしまい、ノズルからの吹付け方向と吹付け面の角度を直交するように調整することが困難であったことが挙げられる。このため、周縁部のリバウンド率は、それ以外の箇所（中心部）と比較して、高くなることが予想された。

このことを確認するために、ケース 5（5-1、5-2）では、吹付け面の周縁部付近を先行して人力施工によって吹付け、ノズルと吹付け面との角度の調節が容易な中心部については、機械施工で吹付けるという施工方法を試行した（図 4.5-22 参照）。この場合のリバウンド率は、周縁部施工時と中心部施工時に分けて算定し、両者の平均値を、当該ケースのリバウンド率とした。

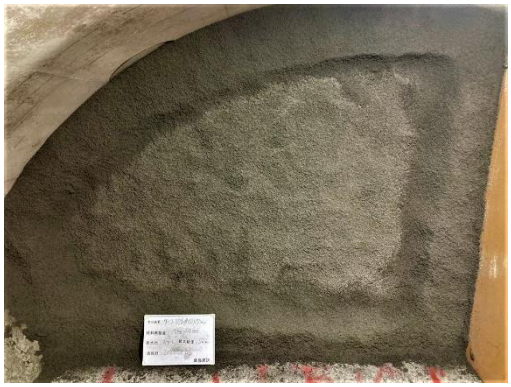
試験の結果、ケース 5-1 及び 5-2 におけるリバウンド率（平均）は、それぞれ 33.9%及び 35.3%であり、人力施工のケースと同等のリバウンド率となった。また、ケース 5-1、5-2 の機械吹付けによる中心部の吹付のリバウンド率も 36%程度であり、人力施工の場合と同等であった。以上のことから、周縁部の機械吹付け時のリバウンド量の増加が、リバウンド率の悪化の主要因であること、および周縁部を機械施工で吹付ける場合でも、吹付け方向と吹付け面をできるだけ直交させることができればリバウンド率を改善できる可能性がある。

表 4.5-16　リバウンド率一覧表（吹付け工法（高密度）実規模模擬坑道試験）

ケース No.	吹付け面 材質	施工方法	実施内容	リバウンド率（%）	
1	コンクリート	機械（MR-III）	MR-IIIの操作性確認	43.6	
3-1	前ケースの付着材		1Pass での吹付け	42.5	（平均）41.8
3-2				41.1	
4-1			3Pass での吹付け	43.1	（平均）42.0
4-2				40.9	
5-1		人力	周縁部吹付け	32.6	（平均）33.9
		機械（MR-III）	中心部吹付け（1Pass）	35.1	
5-2		人力	周縁部吹付け	33.1	（平均）35.3
		機械（MR-III）	中心部吹付け（1Pass）	37.5	
6-1		人力	吹付け面全体を人力施工	34.1	（平均）34.5
6-2				34.9	
7-1	コンクリート			38.4	（平均）36.1
7-2	前ケースの付着材			35.9	
7-3				32.8	
7-4				35.8	
7-5				37.5	



(a) 人力施工の範囲（ケース 5-1、5-2）



(b) 人力施工完了時の吹付け面の状況

図 4.5-22　模擬坑道周縁部への人力による吹付け（吹付け工法（高密度））

(2) 乾燥密度

(a) 吹付け工法（低密度）

各ブロックから採取した試料による乾燥密度の測定結果を、室内締固め試験結果（締固め曲線）の図にプロットしたものを図 4.5-23 に、測定結果の頻度分布を図 4.5-24 にそれぞれ示す。乾燥密度の平均値は 1.768 Mg/m^3 であり、殆どのデータが、目標とした乾燥密度（締固め度 95%相当である 1.82Mg/m^3）には達しなかったが、締固め度 90%（1.73Mg/m^3）～95%（1.82Mg/m^3）の範囲に収まった。乾燥密度が低く出たデータ（1.73Mg/m^3 未満）については、図 4.5-7 の施工手順の(a)に示したフローで施工したことにより、リバウンド材の回収頻度が少なかったため、リバ

ウンド材を巻き込んでしまったことが考えられる。施工手順の(b)に示したリバウンド材の回収頻度を増やしたフローで施工した BL8～9 の試験では、乾燥密度の平均値は、1.78～1.81Mg/m³ であった。

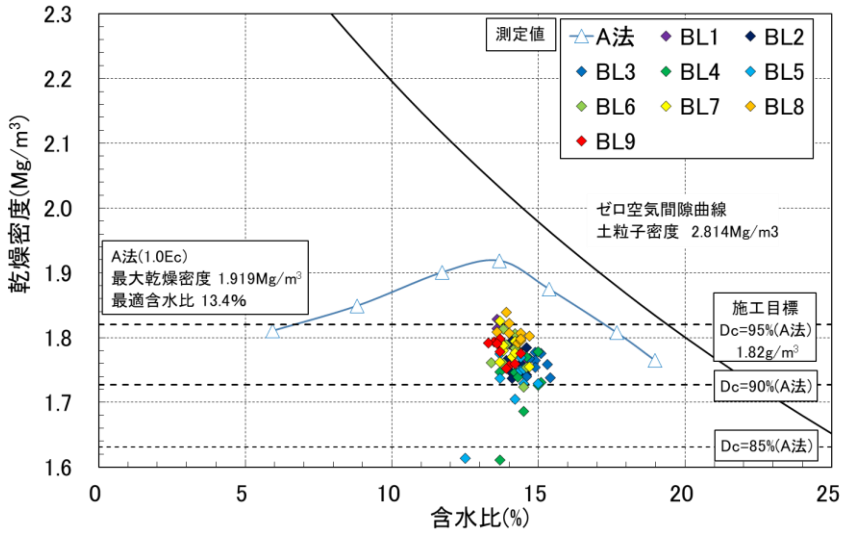


図 4.5-23　乾燥密度の測定結果（吹付け工法（低密度））

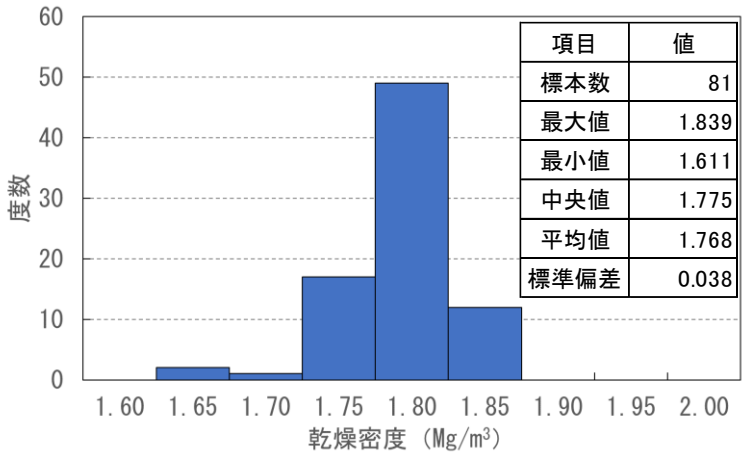


図 4.5-24　乾燥密度の頻度分布（吹付け工法（低密度））

(b) 撒出し・転圧工法

転圧施工試験後に砂置換法で埋戻し材の乾燥密度を測定した結果を図 4.5-25 に示す。小型振動ローラを用いて撒出し厚さ 250 mm で施工することで、1 点を除く他の全ての測定点で目標乾燥密度を達成した。乾燥密度の頻度分布を示した図 4.5-26 から、乾燥密度の頻度分布形状は正規分布とみなすことができる。乾燥密度の平均値は 1.984 Mg/m³、標準偏差は 0.072 Mg/m³ であり、2021 年度の施工試験結果（平均値 2.018 Mg/m³、標準偏差 0.054 Mg/m³）とほぼ一致した。

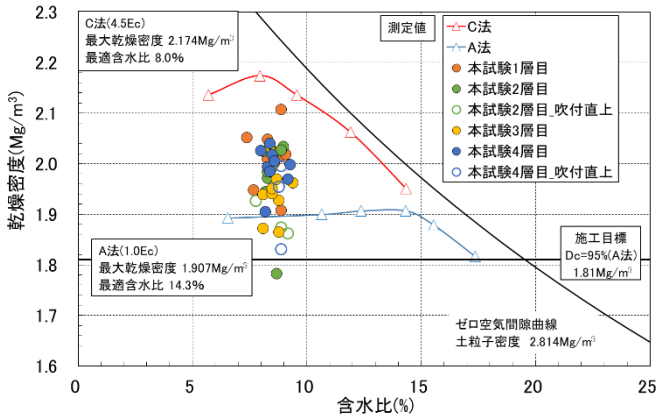


図 4.5-25　転圧工法による埋戻し材の乾燥密度と含水比

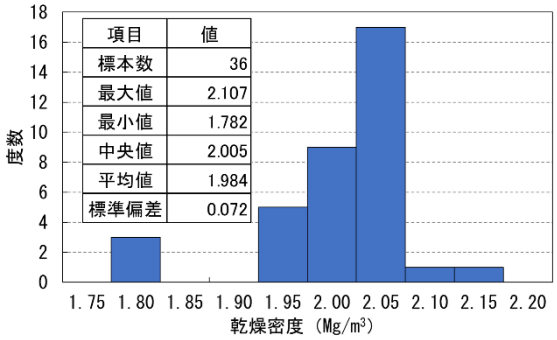


図 4.5-26　転圧工法による埋戻し材の乾燥密度の頻度分布

(c) 吹付け工法（高密度）

各ケース（ケース 3～7）の吹付け完了後に、採取した試料による乾燥密度の測定結果を、室内締固め試験結果（締固め曲線）の図にプロットしたものを図 4.5-27 に、乾燥密度の頻度分布を図 4.5-28 にそれぞれ示す。乾燥密度の平均値は 1.954Mg/m³、標準偏差は 0.034Mg/m³ であった。乾燥密度の大きさとしては、転圧工法の乾燥密度（平均 1.984Mg/m³）より若干小さく、吹付け工法（低密度）の乾燥密度（平均 1.768Mg/m³）よりも 0.1Mg/m³ ほど大きい。値のばらつきとしては、転圧工法（標準偏差 0.072Mg/m³）よりも小さく、吹付け工法（低密度）（標準偏差 0.038Mg/m³）と同等である。

今回の実規模模擬坑道試験では、試験ケースによってノズルワーク（Pass 数）、施工方法（機械施工または人力施工）及び坑道周縁部の施工方法を変えて試験を行ったが、付着材の乾燥密度及び含水比は概ね同等であった。このことから、吹付け面の断面積や施工方法（ノズルワーク、人力／機械）が異なっていても、埋戻し材の配合、材料供給量及び埋戻し材に与えるエネルギー（コンプレッサが加える圧縮空気圧）が同等であれば、付着材の乾燥密度及び含水比も概ね同等になると考えられる。

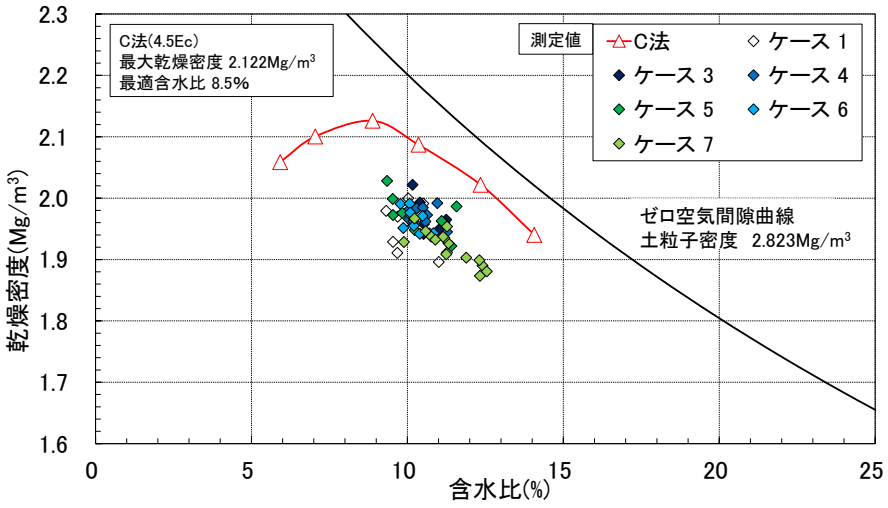


図 4.5-27　乾燥密度測定結果（吹付け工法（高密度））

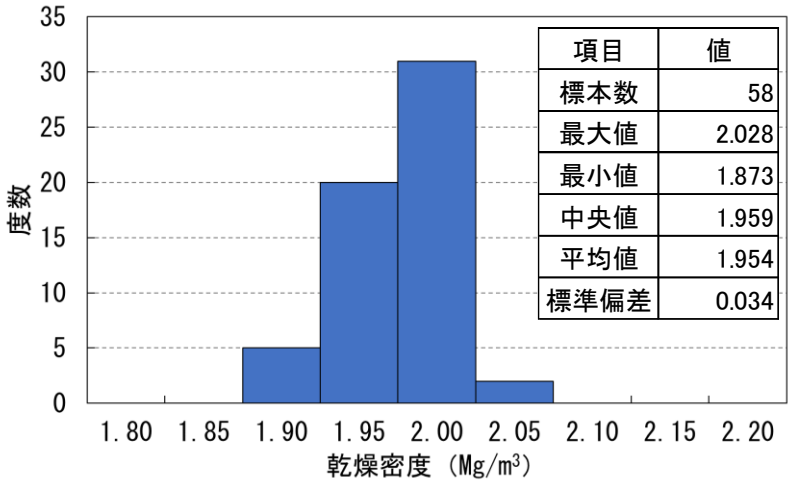


図 4.5-28　乾燥密度の頻度分布（吹付け工法（高密度））

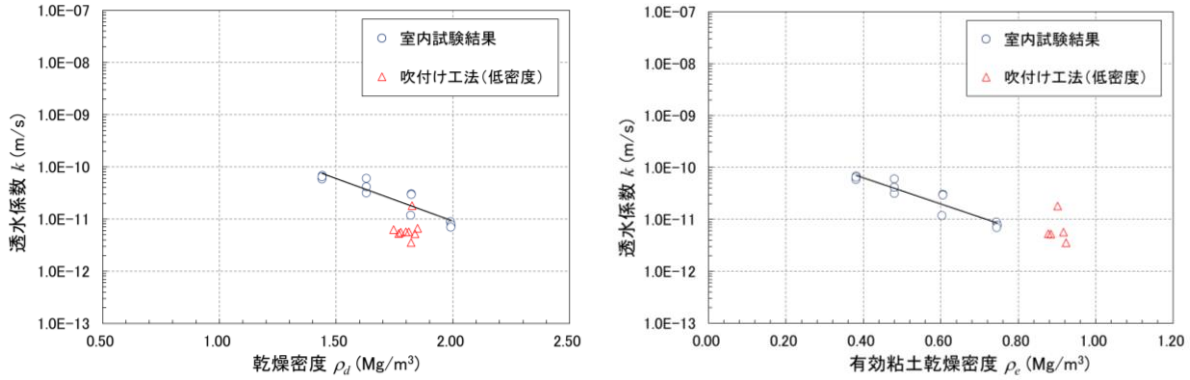
(3) 透水係数

(a) 吹付け工法（低密度）

吹付け施工試験後の付着材からシンウォールサンプリングにより採取した試料による透水試験結果を図 4.5-29 に示す。同図内(a)には乾燥密度との関係を、(b)には有効粘土乾燥密度との関係を示しており、いずれも室内での突き固めにより作成した供試体による室内透水試験結果とともに示している。

透水係数は、10^{-11}～10^{-12} m/s のオーダーの値であり、目標透水係数である 1.0×10^{-9} m/s 以下を満足することが確認できた。室内透水試験結果と比較すると、(a)のグラフから、実証試験での透水係数は、室内透水試験の同じ乾燥密度での室内透水試験の結果よりも小さめに出ていること、(b)のグラフから、実規模模擬坑道試験の有効粘土乾燥密度は、室内透水試験のいずれの供試体よりも高い値となっていることから、付着材のベントナイト混合率が吹付け前の埋戻し材より増加し、透水係数の低下に寄与したと考えられる。

以上より、吹付け施工（低密度）でも低透水性を確保できる見通しが得られた。妻面下部や側面下部の埋戻し施工において、吹付け工法（低密度）の適用性は高いと評価できる。



(a) 透水係数と乾燥密度の関係　　(b) 透水係数と有効粘土乾燥密度の関係

図 4.5-29　透水係数測定結果（吹付け工法（低密度））

(b) 転圧工法

転圧施工試験後にブロックサンプリングした試料（計 7 か所）から、透水試験用の供試体を作製して透水試験を実施した。透水係数と乾燥密度の関係を図 4.5-30 に示す。図には、本年度の埋戻し材と同じ材料を使用した室内試験結果及び 2020 年度～2021 年度の転圧施工試験結果を併せて示した。施工試験後の埋戻し材の透水係数は 2×10^{-11} m/s 以下であり、室内透水試験結果から求めた近似曲線と概ね整合している。サンプリング試料の乾燥密度は 1.807～2.012 Mg/m³ であり、乾燥密度の施工目標値 1.81 Mg/m³ をわずかに下回る試料が 1 つあったが、ブロックサンプリングから求める乾燥密度は砂置換法とは異なり、供試体整形時など体積の測定誤差が生じやすい可能性がある。

なお、乾燥密度のばらつきの巨視的透水係数への影響については、後述する巨視的透水係数の評価の検討において詳述する。

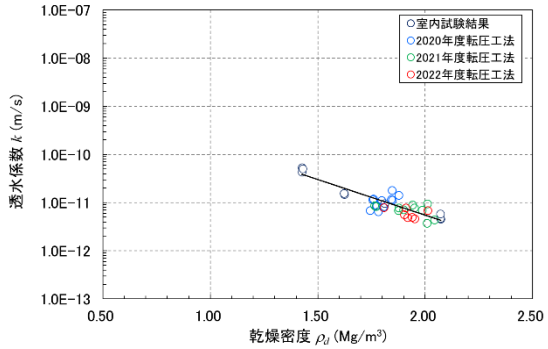


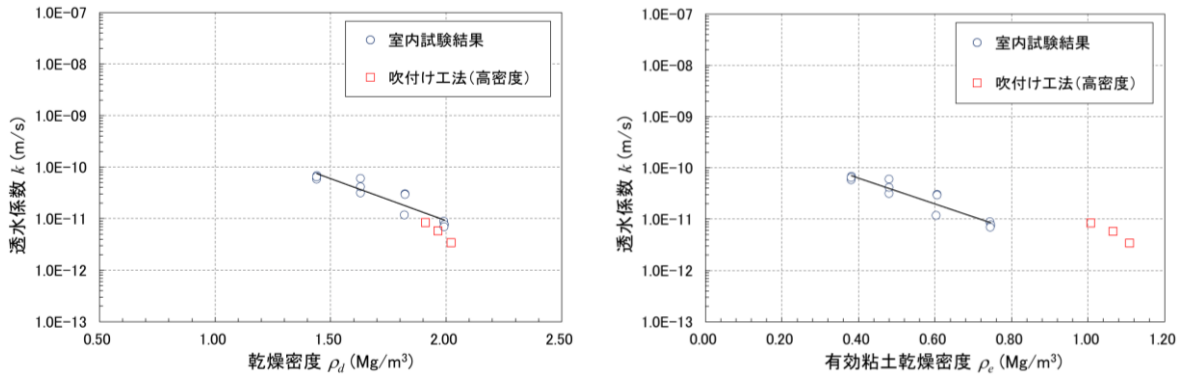
図 4.5-30　透水係数と乾燥密度の関係（転圧工法）

(c) 吹付け工法（高密度）

吹付け試験後の付着材からブロックサンプリングにより採取した試料による透水試験結果を図 4.5-31 に示す。同図内の(a)には乾燥密度との関係を、(b)には有効粘土乾燥密度との関係を示している。試料はケース 1 及び 3～6 の中央部から採取した 17 サンプルのうち、乾燥密度が最も高かったもの（ケース 3-2）、最も低かったもの（ケース 3-1）及び中位のもの（ケース 1）の 3 つを抜粋した。なお、両図中には、室内での突き固めにより作成した供試体による室内透水試験結果とともに示している。

透水係数はいずれも 10^{-12}m/s オーダーの透水係数となっており、乾燥密度が大きいほど、また

は有効粘土乾燥密度が大きいほど、透水係数は小さくなる傾向が伺われる。室内透水試験結果との関係は、吹付け工法（低密度）と同様であるが、吹付け工法（高密度）の方が有効粘土密度の増加割合が大きい。これは、高密度工法の方が低密度工法よりもリバウンド率が大きいため、より粒径の小さい粒子が付着しているためであると考えられる。



(a) 透水係数と乾燥密度の関係　　(b) 透水係数と有効粘土乾燥密度の関係

図 4.5-31　透水係数測定結果（吹付け工法（高密度））

(4) 歩掛

(a) 吹付け工法（低密度）

吹付け工法（低密度）の実証試験における各作業の所要時間を表 4.5-17 に示す。各ブロックの施工体積は多少異なるが、概ね同等として、各作業の平均作業時間の比率を図 4.5-32 に示す。吹付け施工の時間が約半分（約 50%）を占めている。試料採取関連（試料サンプリング＋試料採取穴の穴埋め）の時間は 11%＋8%＝19%であるのに対して 3D 計測の時間は 15%であるので、施工管理方法として 3D 計測のみで品質確認ができれば、施工速度の向上が期待できる。

吹付け工法（低密度）の歩掛（施工速度）を表 4.5-18 に示す。吹付け作業のみの場合は平均で 0.64 m^3/hr、全作業を考慮した場合は平均で 0.32m^3/hr という結果が得られた。

表 4.5-17　実規模模擬坑道試験における各作業の所要時間（吹付け工法（低密度））

作業名	BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6	BL7	BL8	BL9	平均
吹付け準備	0:24	0:03	0:02	0:12	0:00	0:27	0:20	0:00	0:07	0:35
吹付け	2:10	1:40	0:57	1:48	1:33	2:43	1:51	2:03	3:14	1:59
リバウンド材回収	0:18	0:20	0:11	0:20	0:15	0:23	0:15	1:49	0:42	0:30
試料サンプリング	0:35	0:35	0:19	0:23	0:25	0:31	0:25	0:25	0:27	0:27
穴埋め	0:13	0:13	0:15	0:08	0:08	0:15	0:20	0:13	1:17	0:20
3D 計測	0:37	0:24	0:22	0:53	0:34	0:21	0:42	0:45	0:41	0:35
合計	4:17	3:15	2:06	3:44	2:55	4:37	3:53	5:15	6:28	4:03

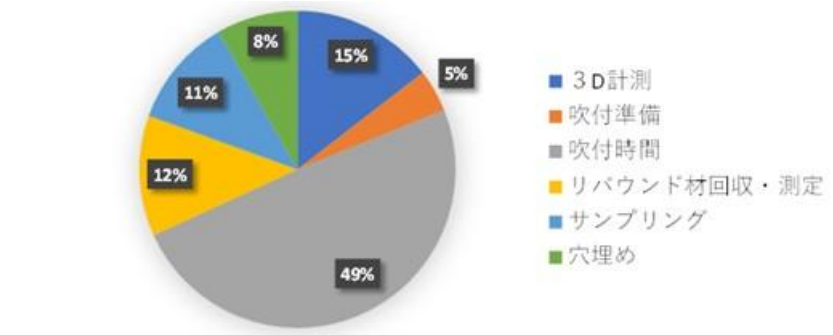


図 4.5-32　各作業の歩掛の比率（吹付け工法（低密度））

表 4.5-18　施工速度（吹付け作業のみ及び全作業）（吹付け工法（低密度））

		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6	BL7	BL8	BL9	平均
施工体積(m^3)		1.17	1.12	0.79	1.55	1.13	1.59	0.91	1.13	2.06	1.27
施工時間 (hr)	吹付けのみ	2.17	1.67	0.95	1.80	1.55	2.72	1.85	2.05	3.23	1.98
	全作業	4.28	3.25	2.10	3.73	2.92	4.62	3.88	5.25	6.47	4.06
施工速度 (m^3/hr)	吹付けのみ	0.54	0.67	0.83	0.86	0.73	0.58	0.49	0.55	0.64	0.64
	全作業	0.27	0.34	0.38	0.41	0.39	0.34	0.23	0.21	0.31	0.32

(b) 撤出し・転圧工法

転圧工法の施工歩掛りを表 4.5-19 に示す。品質管理として現場密度試験とレベル測量を行う場合には、施工時間は 194.3 min/層（3.24 hr/層）となる。品質管理として 3D スキャナを行う場合は、110.8 min/層（1.85 hr/層）となり、前者と比較して大幅に施工時間が短縮できる。

参考として、2020 年度から 2022 年度までの転圧工法による埋戻し材の施工歩掛の割合を図 4.5-33 に示す。2022 年度の転圧工法による埋戻し材の施工歩掛の割合（作業毎の内訳）は、2021 年度とほぼ同じである。

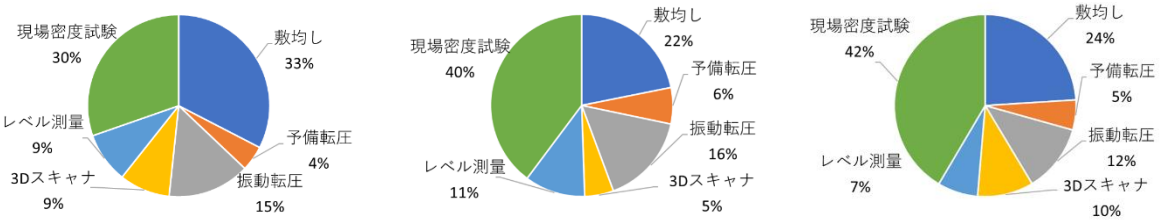
転圧工法による埋戻し材の施工試験における 1 層当たりの平均施工速度を表 4.5-20 に示す。表 4.5-20 の上段には、施工管理にレベル測量と砂置換法による密度試験を用いたケース、下段には、施工管理に 3D スキャナを用いたケースを示す。本年度の施工速度は、1 層当たり施工体積が減少したこと及び坑道アーチ部との干渉など施工スペースが制限された施工であったことから、2020 年度や 2021 年度と比べると遅いという結果になった。

3D スキャナ測量を用いた場合の施工速度は、品質管理として現場密度試験（砂置換法）とレベル測量を用いた場合の約 2 倍となった。また、施工試験では坑道軸方向の延長距離 5.5m としたが、延長距離が延びると測量点が増えるためにレベル測量と砂置換法を用いた場合と 3D スキャナを用いた場合の施工速度の差はさらに拡大すると考えられる。このように、3D スキャナを用いることで大幅な歩掛向上が期待できる。そのためには、3D スキャナの精度を向上するとともに、3D スキャナのデータを利用したかさ密度による施工管理手法、すなわち製造・施工プロセス管理手法の構築が必要である。

表 4.5-19　転圧工法による埋戻し材の施工歩掛

作業名		施工時間（min/層）				
		1 層	2 層	3 層	4 層	平均
施工	敷均し	47	55	55	50	51.8
	予備転圧	12	9	10	15	11.5
	振動転圧	43	17	22	22	26.0
品質管理	3D スキャナ	30	18	15	23	21.5
	レベル測量	34	15	6	7	15.5
	現場密度試験	80	95	80	103	89.5
施工、レベル測量、現場密度試験		216	191	173	197	194.3
施工、3D スキャナ		132	99	102	110	110.8

注）予備転圧：1.5t 小型振動ローラによる無振動転圧、振動転圧：1.5t 小型振動ローラによる振動転圧



備考：転圧機は 4t タンデムローラ　　備考：転圧機は 1.5t 小型振動ローラ　　備考：転圧機は 1.5t 小型振動ローラ

2020 年度　　2021 年度　　2022 年度

図 4.5-33　転圧工法による埋戻し材の施工歩掛の割合

表 4.5-20　転圧工法による埋戻しの施工速度

作業内容			2020 年度	2021 年度	2022 年度
敷均し、予備転圧、振動転圧、レベル測量、品質管理試験	施工時間	hr/層	3.46	3.94	3.24
	施工体積	m^3/層	4.49	2.82	1.88
	施工速度	m^3/hr	1.32	0.73	0.59
敷均し、予備転圧、振動転圧、3D 測量	施工時間	hr/層	2.34	1.84	1.85
	施工体積	m^3/層	4.49	2.82	1.88
	施工速度	m^3/hr	2.01	1.55	1.04

備考）2020 年度の転圧機は 4t タンデムローラ、撒出し厚は 300mm。2021 年度及び 2022 年度の転圧機は 1.5t 小型振動ローラ、撒出し厚は 250mm。

(c) 吹付け工法（高密度）

吹付け工法（高密度）における各作業の所要時間を表 4.5-21 に示す。吹付け工法（高密度）で使用した吹付けロボット（MR-Ⅲ）は、吹付け工法（低密度）で使用したノズル操作重機（0.03m^3 バックホウ）よりも大きく、機械の設置や撤退に時間を要するため、その時間の計測を行った他、リバウンド材回収時間の計測も実施した。人力吹付けのケースでは、機械の設置・撤退時間は無い。なお、3D 計測時間や品質管理（シリコーンオイル法による密度測定）に要する時間は、ケー

ス毎の測定は行っていないが、1 ケースあたりの概ねの所要時間は、前者は 10 分～20 分程度程度（スキャナの設置及び片付けを含む）、後者は 30 分程度（凸型吹付け～サンプリング～測定器による密度計測）であった。

表 4.5-21　実規模模擬坑道試験における各作業の所要時間（吹付け工法（高密度））

ケース No.	MR-III設置 (hr)	吹付け施工 (hr)	MR-III撤退 (hr)	リバウンド回収 (hr)	合計所要時間 (hr)
1	0.10	0.52	0.05	0.60	1.27
3-1	0.08	0.48	0.07	0.52	1.15
3-2	0.10	0.52	0.07	0.53	1.22
4-1	0.12	0.60	0.05	0.78	1.55
4-2	0.08	0.62	0.05	0.78	1.53
5-1（周縁部）		0.20		0.17	0.37
5-1（中心部）	0.10	0.38	0.07	0.33	0.88
5-2（周縁部）		0.27		0.23	0.50
5-2（中心部）	0.08	0.32	0.05	0.35	0.80
6-1		0.45		0.40	0.85
6-2		0.50		0.55	1.05
7-1		0.27		0.27	0.53
7-2		0.53		0.48	1.02
7-3		0.50		0.40	0.90
7-4		0.57		0.57	1.13
7-5		0.53		0.55	1.08

吹付け工法（高密度）の歩掛（施工速度）を表 4.5-22 に示す。吹付け作業のみの速度は、平均で、機械吹付けでは 1.33 m^3/hr、人力吹付けでは 1.44 m^3/hr であり、機械施工の方が若干早いが、全作業（機械の設置、撤去、リバウンド材回収）を考慮した場合の作業速度は、機械施工では 0.56m^3/hr であったのに対して人力吹付けでは 0.74 m^3/hr であり、逆転している。この理由として以下が考えられる。

◯人力施工では、機械施工よりもリバウンド率が小さいため、リバウンド材の回収量が機械施工の場合よりも少ない

◯機械施工の場合は吹付けロボットと作業員の接触事故などを避けるために吹付け終了後にリバウンド材の回収を行ったのに対して人力施工の場合は吹付けと並行して回収を進めたため

ただし、今回の実績は、施工数量が 0.6～0.9 m^3 程度の場合の実績である。施工数量が増加すれば、相対的に吹付け作業時間の占める割合が増加し、機械施工の歩掛が増加することが想定される。

Pass 数の違いによる施工速度（吹付けのみ）への影響を見ると、1Pass（ケース 3-1、3-2）では平均 1.18 m^3/hr、3Pass（ケース 4-1、4-2）では平均 1.46 m^3/hr であり、3Pass の方が 2 割程度速いという結果であった。今回、ケース 2 では、Pass 数の違いにより、形成される凸部の高さと幅の計測を行ったが、さらに一連のノズルワークで凸部を形成するのに要する時間を計測することにより、最も効率的なノズルワークの検討が可能になる。

表 4.5-22 には、各ケースの必要人工数を記載した。機械施工で行ったケース 1～5-2 までの人工数は、それぞれ 7 人工であった。内訳は、材料供給機への材料の補充要員として 3 人工、吹付け機の操作要員が 1 人工、吹付けロボットのオペレータとして 2 人工、坑道内の雑工が 1 人工である。一方、人力施工を行ったケース 6-1～7-5 では、それぞれ 6 人工であった。内訳は、材料供給機への材料の補充要員として 3 人工､吹付け機の操作要員が 1 人工､ノズルマンとして 1 人工、坑道内の雑工が 1 人工である。

表 4.5-22　実規模模擬坑道試験における歩掛（吹付け工法（高密度））

ケース No.	付着材の体積（m^3）	合計所要時間（hr）		歩掛（m^3/h）		人工数
		吹付けのみ	全作業	吹付けのみ	全作業	
1	0.65	0.52	1.27	1.25	0.51	7
3-1	0.57	0.48	1.15	1.19	0.49	7
3-2	0.61	0.52	1.22	1.17	0.50	7
4-1	0.85	0.60	1.55	1.42	0.55	7
4-2	0.92	0.62	1.53	1.48	0.60	7
5-1	0.76	0.58	1.25	1.31	0.61	7
5-2	0.84	0.59	1.30	1.42	0.64	7
6-1	0.64	0.45	0.85	1.42	0.75	6
6-2	0.85	0.50	1.05	1.70	0.81	6
7-1	0.35	0.27	0.53	1.30	0.66	6
7-2	0.71	0.53	1.02	1.34	0.70	6
7-3	0.69	0.50	0.90	1.38	0.77	6
7-4	0.84	0.57	1.13	1.47	0.74	6
7-5	0.76	0.53	1.08	1.43	0.70	6
平均	—	—	—	(機械) 1.33 (人力) 1.44	(機械) 0.56 (人力) 0.74	—

※ケース 1～4-2：機械施工、ケース 6-1～7-5：人力施工
ケース 5-1～5-2：周縁部は人力施工、中央部は機械施工（平均歩掛計算上は機械施工に入れる）

4.5.5 計測技術および埋戻し材の解体・分析

(1) 敷設方法および計測条件

(a) ケーブル TDR 法による隙間検知技術

埋め戻した坑道上部の界面に発生する可能性がある隙間を検知するため､図 4.5-34 に示すように、壁面の周方向に 300Ωフィーダ線を 2 本（坑道妻壁から 300mm、600mm（以下、それぞれ「Cable 1」､「Cable 2」と称する。））敷設した。Cable1, 2 は、レイタンスなどを除去した壁面にプライマーを塗布し、粗面対応の強力両面テープで壁面に固定させた。

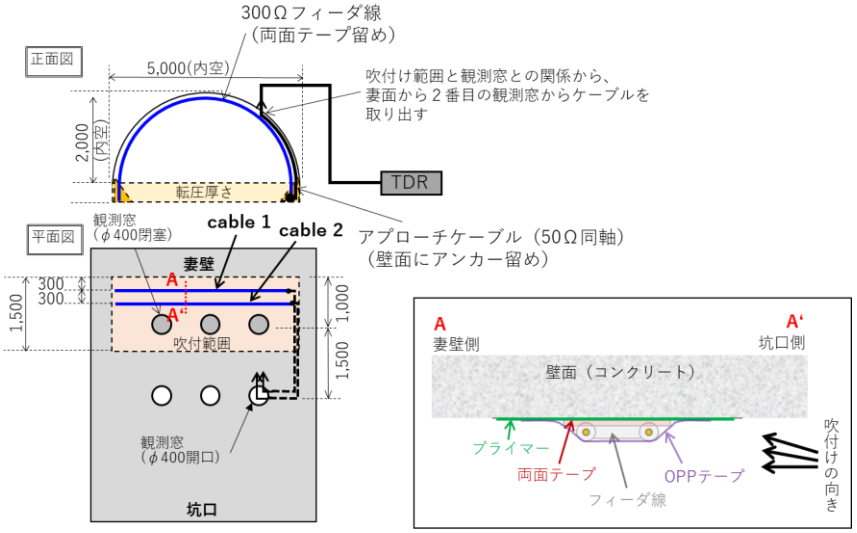


図 4.5-34　模擬坑道に敷設した計測用ケーブル（300Ωフィーダ線）

図 4.5-35 に坑道壁面に設置した Cable1, 2 の設置状況を示す。計測長は右側壁下部を基準（0 m）として、左側壁下部までの全長 8.88 m とした。Cable 1 の 7.88～8.88 m 区間は、半割の塩ビ管でフィーダ線を覆って既知の空隙とした。Cable1 ,2 の天端（4.45 m）および両サイド（3.45 m, 5.45 m）には、計測位置を把握するため、局所的な反射が起こるように目印（m1, m2, m3）を設けた。

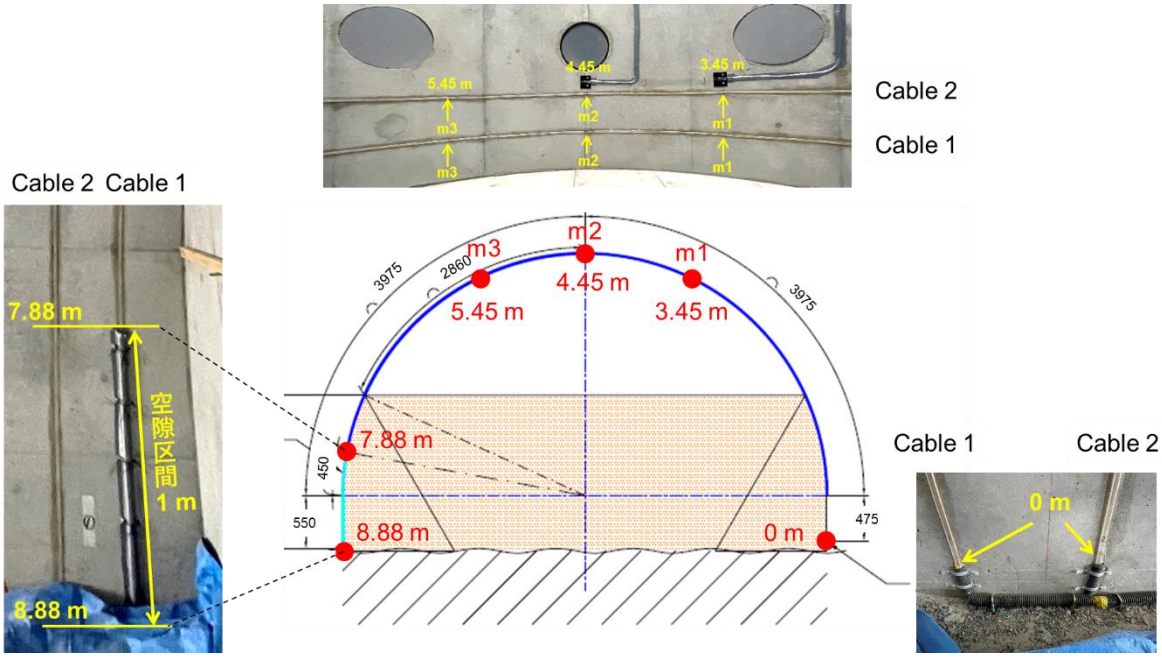


図 4.5-35　坑道壁面に設置した計測用ケーブル（Cable1, 2）の設置概要

(b) aDTS 法による密度分布測定技術

加熱式光ファイバを用いた aDTS 法による密度分布測定のフローを図 4.5-36 に示す。転圧工法および吹付け工法で施工した埋戻し材の乾燥密度の分布を計測するため、図 4.5-37 及び図 4.5-38 に示すように、それぞれの施工面に計測用ケーブル（加熱式光ファイバ）を敷設した。転

圧施工部分は、2021 年度に転圧施工した面（仕上層）に加熱式光ファイバ（測定長 8.5 m）を U 字状に敷設し、その上から埋戻し材を施工した。吹付け施工部分は、妻壁から 1.2 m まで埋戻し材を吹き付けた面に加熱式光ファイバを二重円状（外周：6.5 m、内周：4 m）に敷設し、その上から埋戻し材を施工した。図 4.5-39 に加熱式光ファイバ敷設完了後の状況を示す。

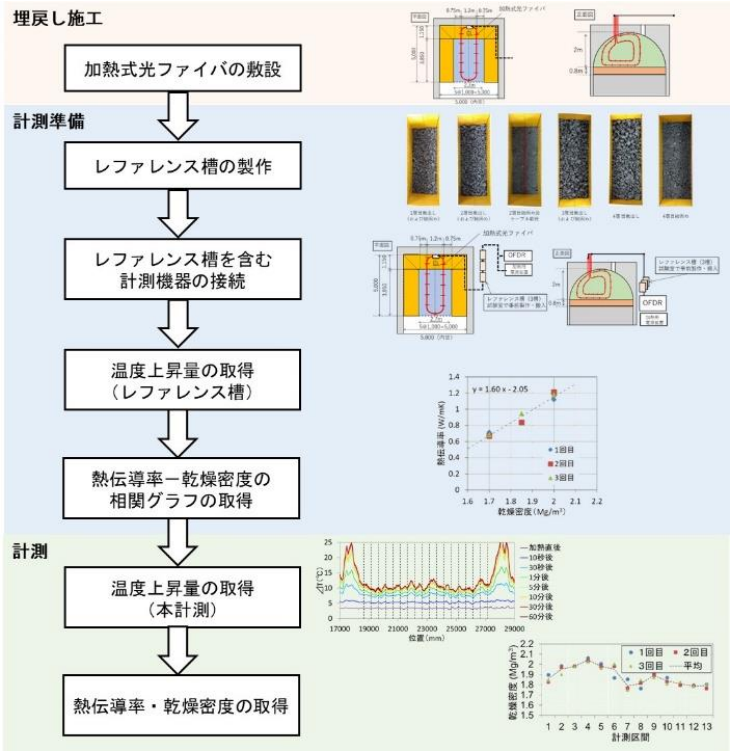


図 4.5-36　aDTS 法による密度分布測定のフロー図

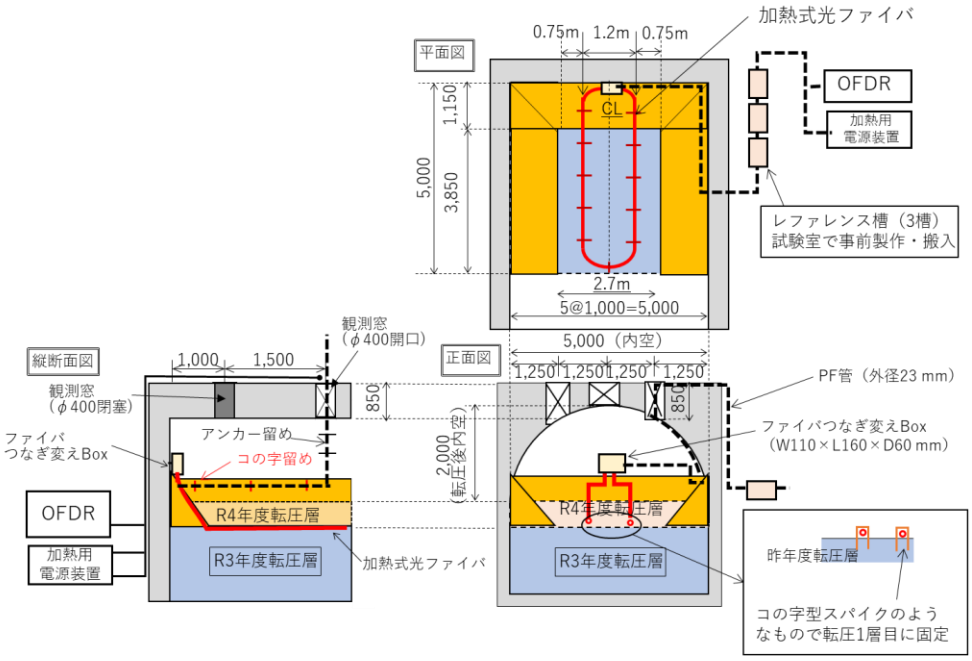


図 4.5-37　模擬坑道に敷設した加熱式光ファイバ（転圧施工面）

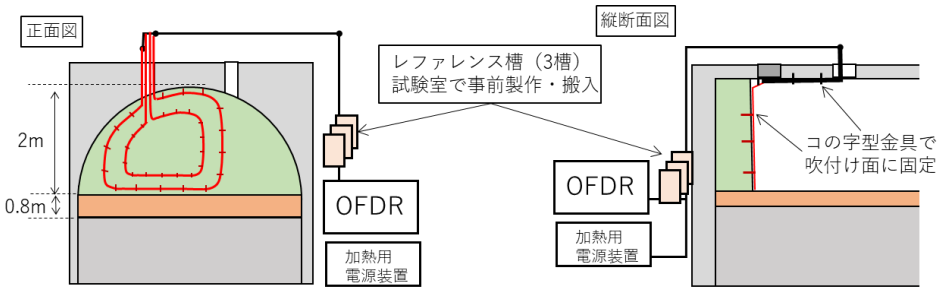


図 4.5-38　模擬坑道に敷設した加熱式光ファイバ（吹付け施工面）

図 4.5-39　加熱式光ファイバの敷設完了後（左：転圧施工面　右：吹付け施工面）

転圧工法および吹付け工法で施工した埋戻し材のサンプリングデータ（材料、ベントナイト混合率、砂礫の粒径、乾燥密度、含水比）を踏まえ、図 4.5-40 に示す手順でレファレンス槽（長さ 44 cm, 幅 15 cm, 高さ 22 cm）を作製した。レファレンス槽は転圧工法用と吹付け工法用に分けて、図 4.5-37 及び図 4.5-38 に示す試験系に組み込み、乾燥密度－熱伝導率の相関データを取得した。なお、転圧工法用のレファレンス槽として、乾燥密度 1.8 Mg/m^3, 1.95 Mg/m^3, 2.1 Mg/m^3 の 3 槽、吹付け工法用のレファレンス槽は、乾燥密度 1.7 Mg/m^3, 1.85 Mg/m^3, 2.0 Mg/m^3 の 3 槽を準備した。

レファレンス槽の加熱の際に外気温による影響を抑制するため、図 4.5-41 に示すようにレファレンス槽の周囲を断熱材（発砲スチロール）で覆った。レファレンス槽の側面には白金抵抗温度センサを取り付け、土槽容器－埋戻し材界面の温度変化をモニターした。

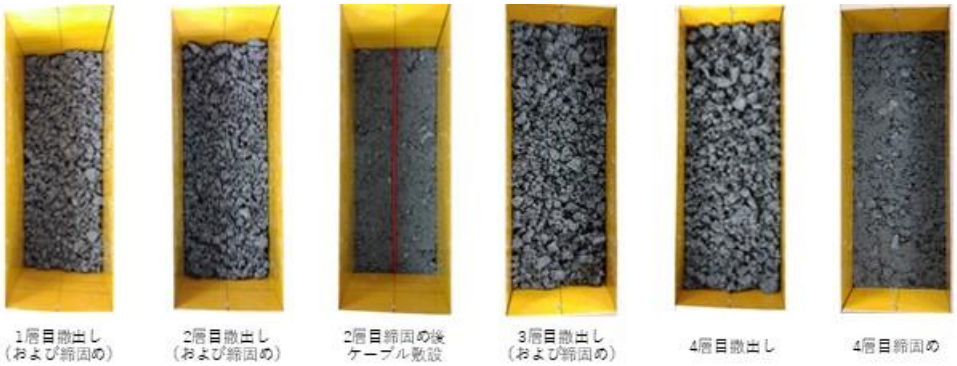


図 4.5-40　レファレンス槽の作製手順

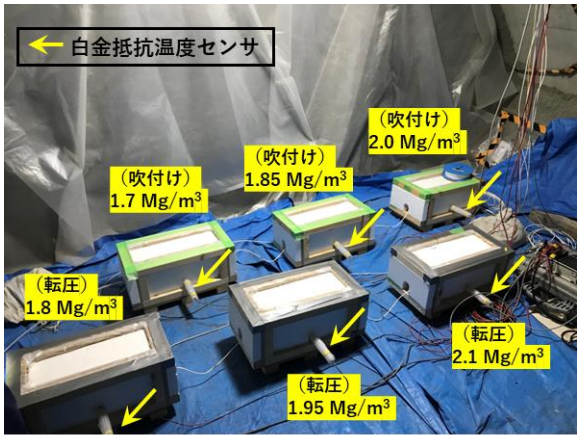


図 4.5-41　断熱材（発砲スチロール）によるレファレンス槽の養生状況

レファレンス槽の温度上昇量を対数時間で整理したグラフを図 4.5-42 に示す。温度上昇量は、土槽の両端部（外気温による温度の擾乱が懸念される箇所）を除外した区間（30 cm）の平均値とした。熱伝導率の算定に使用する温度上昇量のデータは、3～60 分の範囲とした。初期の 3 分間（Ln t = 5.2）の非線形区間は、熱源由来の特性が影響しているため除外しており、60 分経過時点では、レファレンス槽の側面で温度変化はなく、加熱式光ファイバの熱源が容器側面へ到達する影響が含まれないことを確認した。

図 4.5-42 から取得した傾きaを用いて、図 4.4-13 に示した式により熱伝導率Kを算定した。算定した熱伝導率を表 4.5-23 に示す。転圧工法用のレファレンス槽では、2 回目の計測データが欠損したため、1 回目と 3 回目のデータより算定した。

埋戻し材の熱伝導率と乾燥密度の相関グラフを図 4.5-43 に示す。本試験の条件では、熱伝導率と乾燥密度の相関は線形近似式で表現された。以降、加熱式光ファイバで計測した埋戻し材の熱伝導率は、図 4.5-43 に示した較正の式を用いて乾燥密度に換算する。

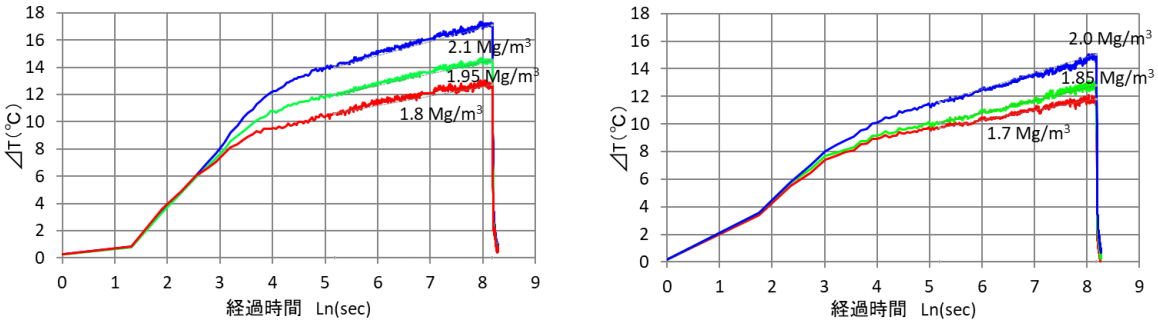


図 4.5-42　レファレンス槽の温度上昇勾配　1 回目（左：転圧工法用　右：吹付け工法用）

表 4.5-23　レファレンス槽の熱伝導率

工法	乾燥密度 (Mg/m³)	熱伝導率（W/m）			
		1 回目	2 回目	3 回目	平均
転圧	1.8	0.795	－	0.763	0.779
	1.95	0.985	－	0.994	0.989
	2.1	1.217	－	1.233	1.225
吹付け	1.7	0.713	0.670	0.684	0.689
	1.85	0.840	0.838	0.946	0.875
	2	1.118	1.212	1.178	1.169

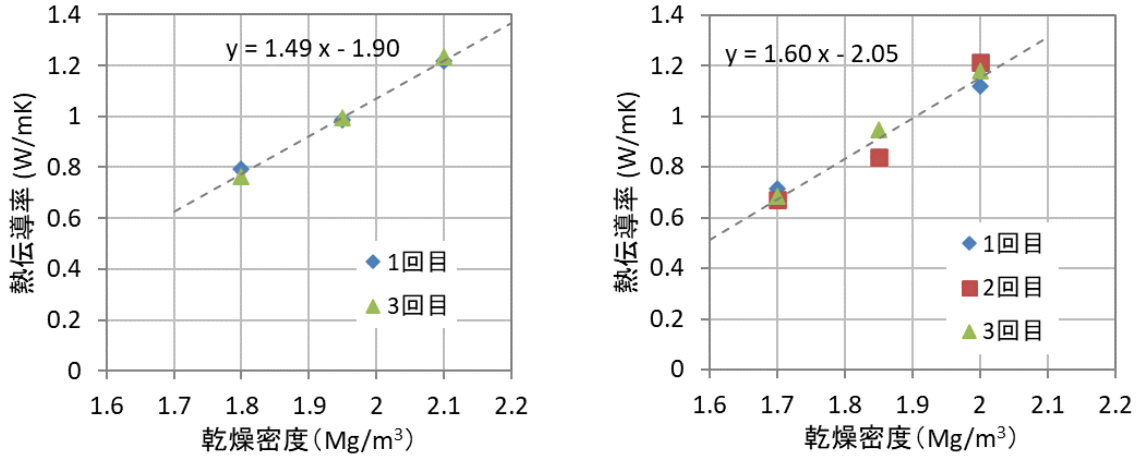


図 4.5-43　埋戻し材の熱伝導率と乾燥密度の関係（左：転圧工法用　右：吹付け工法用）

(2) 埋戻し材の解体方法およびサンプル採取箇所

ケーブル TDR 法による隙間検知及び aDTS 法による密度分布測定の結果を踏まえ、埋戻し材を解体して目視観察およびサンプリングを実施し、計測技術による測定結果との整合性を確認した。埋戻し材の解体は、施工完了から約 6 か月後である。本年度に埋戻し施工した箇所について、図 4.5-44 に示す手順で解体、目視観察並びにサンプリングを行った。

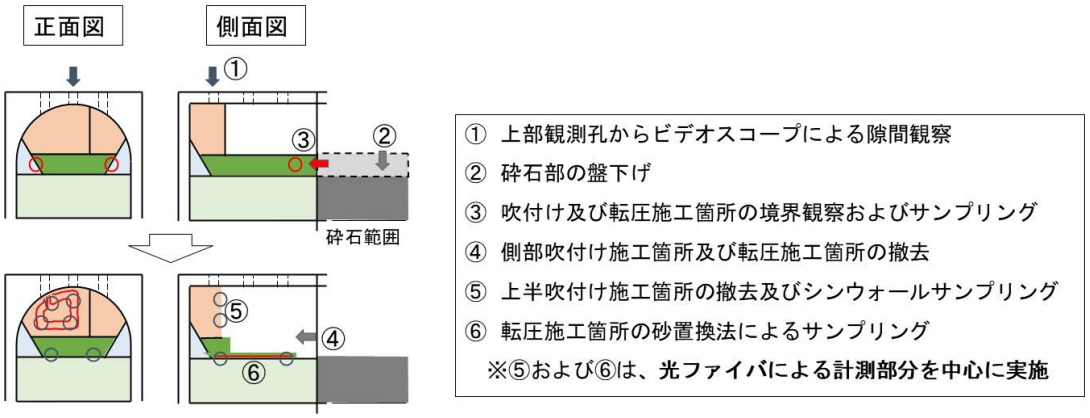


図 4.5-44　埋戻し材の解体、目視観察およびサンプリングの手順

まず、坑道壁面と吹付け施工による埋戻し材との間の隙間の発生の有無について、模擬坑道天端の上部観測孔よりビデオスコープを用いて観察した。次に、転圧施工箇所の手前にある砕石部分を盤下げし、本年度に施工した側部吹付け施工箇所と転圧施工箇所の境界部分を観察した。そして、側部吹付け施工箇所及び転圧施工箇所を撤去した後、加熱式光ファイバを設置した面まで上半部の吹付け施工箇所を撤去してシンウォールサンプリングを行った。最後に、転圧施工箇所に設置した加熱式光ファイバの位置を確認して砂置換法により密度を計測した。

上部観測孔からのビデオスコープによる隙間観察の様子を図 4.5-45 に、吹付け工法と転圧工法の境界部分の様子を図 4.5-46 に、吹付け施工箇所のシンウォールサンプリング位置を図 4.5-47 に、転圧施工箇所の砂置換の位置を図 4.5-48 に示す。

吹付け工法と転圧工法の境界部分は目視による確認ではクラックなどは確認されず一体化している様子が確認された。

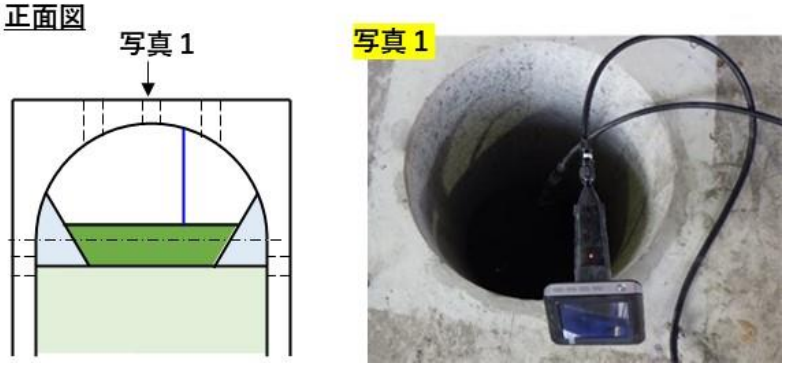


図 4.5-45　上部観測孔　ビデオスコープによる隙間観察結果

図 4.5-46　吹付け工法と転圧工法の境界部分

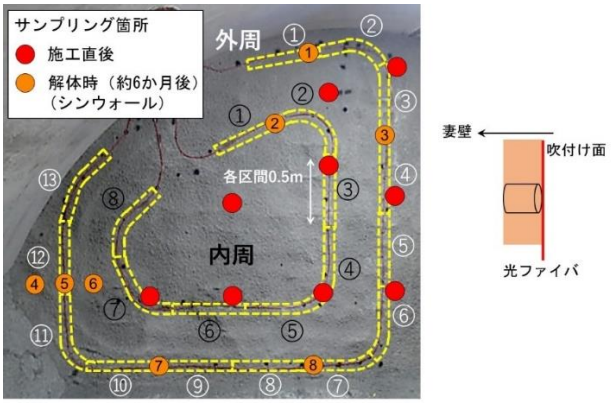


図 4.5-47　吹付け面でサンプル採取した位置およびサンプリング深さの模式図

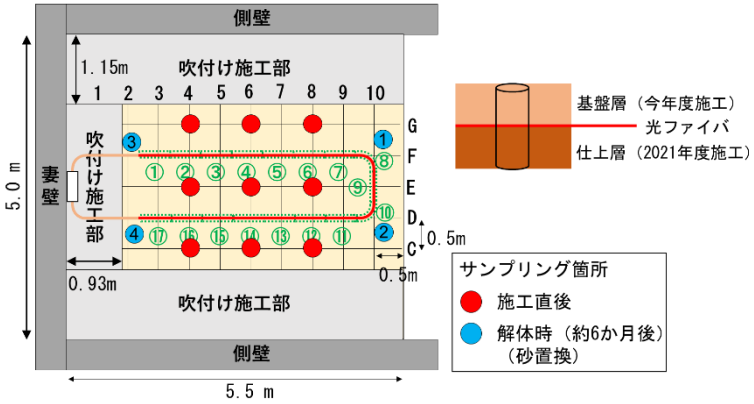


図 4.5-48　転圧面でサンプル採取した位置およびサンプリング深さの模式図

(3) 計測および解体分析結果

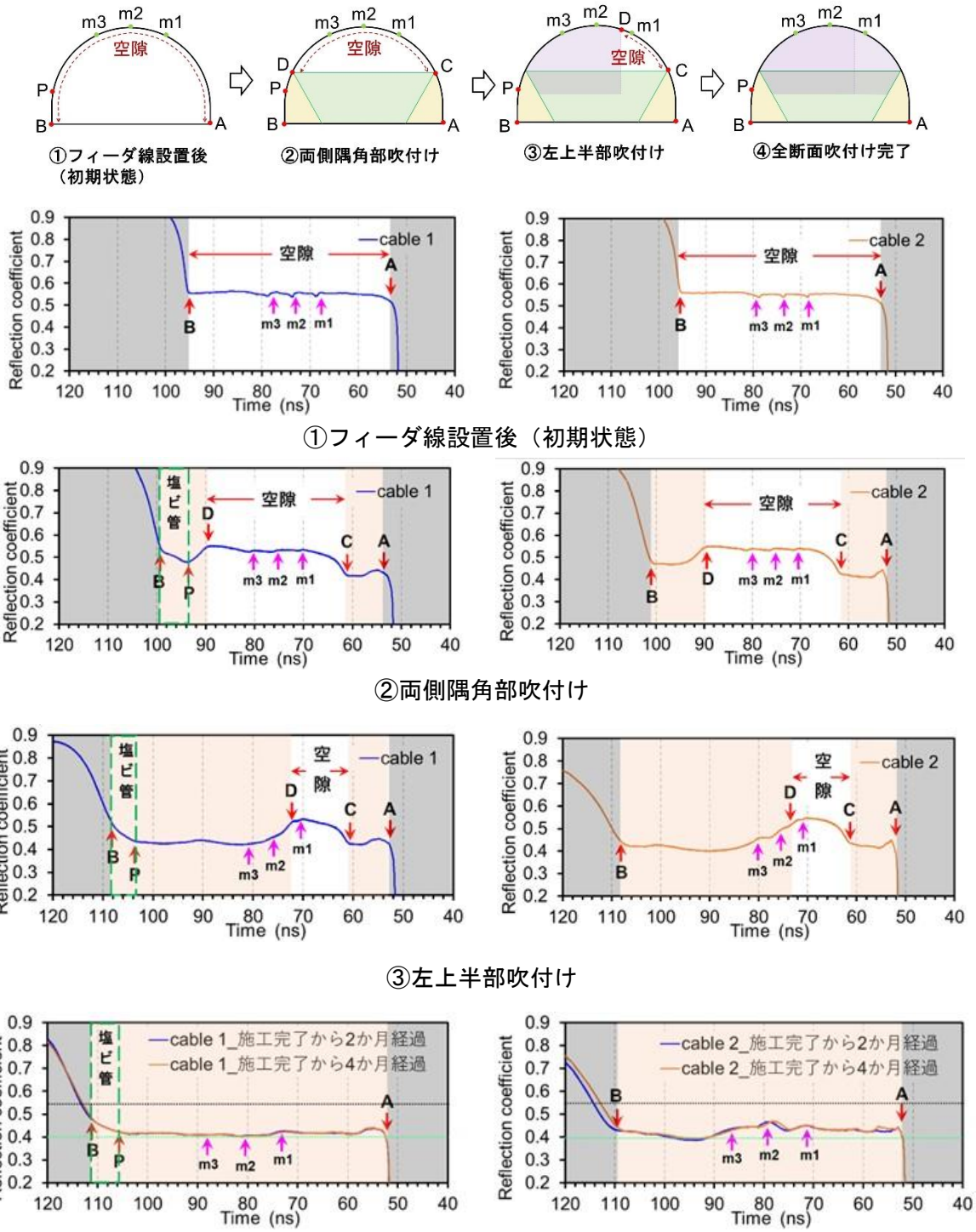
(a) 隙間検知結果

(i) 埋戻し工程における空隙検知

模擬坑道における一連の埋戻しの各工程でのケーブル TDR 法による計測波形を図 4.5-49 に示す。縦軸は電圧反射係数（進行波と反射波の電圧振幅の比）、横軸は電圧パルスの伝播時間（所定区間の往復に要した時間）である。①フィーダ線の設置後（初期状態）では、坑道面（コンクリート面）に敷設されたフィーダ線の全長（測定長）において空隙が連続して分布するため、計測波形は平坦な形状を示した。位置把握のための目印（m1, m2, m3）は、波形の変化として確認でき、実際の目印位置と相対的に一致した。②両端隅角部の吹付け後では、埋め戻された区間は、Cable 1, 2 ともに電圧反射係数（振幅）の低下および間延びした波形の挙動を示した。Cable 1 では、終端に模擬空隙（塩ビ管）を設置しているため、P-B 区間の電圧反射係数は上昇して間は縮んだ。位置把握のための目印（m1, m2, m3）は、波形の変化として確認できた。③左上半部の吹付け後では、埋め戻された区間は、Cable 1, 2 ともに電圧反射係数（振幅）の低下および間延びした波形の挙動を示した。Cable 1 の終端（模擬空隙の設置）では、P-B 区間の電圧反射係数は上昇する挙動を示したが、前ステップ（②両端隅角部の吹付け後）と比べて埋戻し領域が拡がったため、波形の変化は高周波パルスの減衰で鈍くなった。位置把握のための目印（m1, m2, m3）についても、同様の理由で波形の変化は鈍くなった。④全断面吹付け完了後では、Cable 1 は、フィーダ線の全長が埋戻し材と坑道壁面（コンクリート面）に接触しているため、計測波形は平坦な形状を示した。Cable 1 の終端（模擬空隙の設置）では、P-B 区間の電圧反射係数は上昇する傾向を示した

が、埋戻し材が連続することで高周波成分が大きく減衰したため、波形の変化は鈍くなった。Cable 2 は、Cable 1 と同条件で敷設しているが、Cable 1 と異なり計測波形は波打つ形状を示しており、妻壁に向かって右側で電圧反射係数が僅かに上昇することが確認された。

以上の結果より、ケーブル TDR 法により埋戻し工程における空隙の検知が可能であることが確認された。



①フィーダ線設置後（初期状態）

②両側隅角部吹付け

③左上半部吹付け

④全断面吹付け完了

図 4.5-49　計測時におけるフィーダ線の埋戻し状況とそれぞれの計測波形

(ii) 坑道天端の隙間検知

図 4.5-49 の④（全断面の吹付け完了後）に示すように、Cable 1（妻壁から 300 mm）で取得された波形では、目立った乱れはなく、坑道壁面と埋戻し材は密着していたと考えられる。一方、Cable 2（妻壁から 600 mm）で取得された波形では、波打つ形状（凹凸）を示しており、部分的な空隙もしくは何かしらの事象が発生している可能性が示唆された。そこで、ケーブル TDR 法による測定結果の確認を含めて、埋戻し材の解体時に坑道天端の隙間の確認を行った。隙間の確認方法は、上部観測孔からのビデオスコープによる観察、埋戻し材解体時のテーパーゲージ（隙間測定工具）による隙間幅測定である。

隙間確認の結果、妻壁から 300～1,200 mm の坑道天端部分に幅 8～15mm の隙間が発生していることを確認した。（図 4.5-50 の平面図：赤ハッチング箇所）。埋戻し施工中には隙間なく施工していることを目視確認しているため、この隙間は施工後に発生した可能性が高い。隙間が発生した原因としては、自重による沈下、坑道側への滑動、乾燥収縮、水分の移動に伴う細粒分の移動などが考えられるものの、詳細については今後の課題である。また、Cable 2 のように、明瞭に隙間としての波形が得られなかった原因として、図 4.5-51 に示すようにフィーダ線に埋戻し材が付着し、空隙として検知されなかった可能性が考えられる。

以上の結果より、ケーブル TDR 法の坑道上部の隙間検知技術としての適用性は高いと考えられる。今後は更なる高度化のために以下の課題に取り組む必要がある。

・坑道などにフィーダ線を密着固定させるための敷設方法の検討。
・空隙の状態（フィーダ線に埋戻し材が付着する状態）に応じた計測波形の取得および整理。
・電圧パルスの高周波成分の減衰を考慮した有効計測長の把握。
・ケーブル TDR 法の連続計測システムの構築。

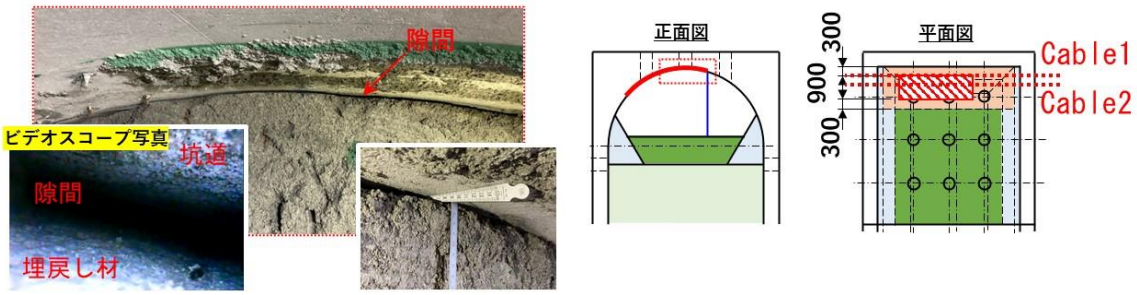


図 4.5-50　坑道天端で確認された隙間および隙間箇所（イメージ図）

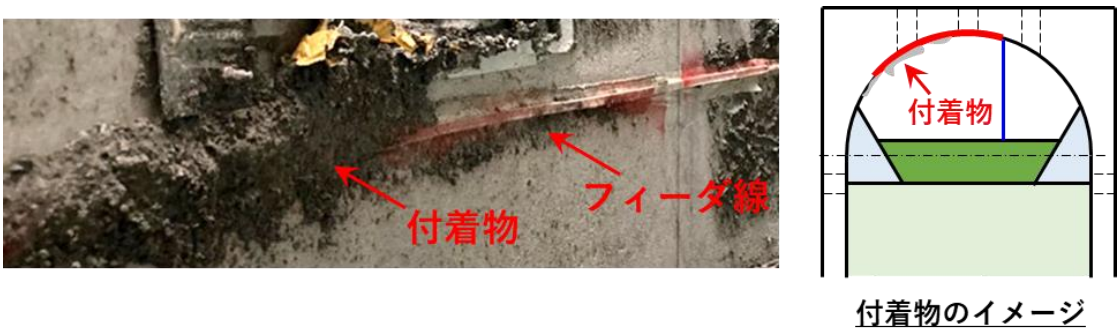


図 4.5-51　フィーダ線に埋戻し材が付着した状況および付着物の分布イメージ

(b) 密度分布測定結果

加熱式光ファイバの配置及び区間割りのうち、転圧施工箇所を図 4.5-52 に、吹付け施工箇所を図 4.5-53 に示す。解析対象区間を 0.5 m ごとに区切り、その区間ごとに温度変化を分析し、その温度上昇量より熱伝導率を算定し、乾燥密度を推定した。

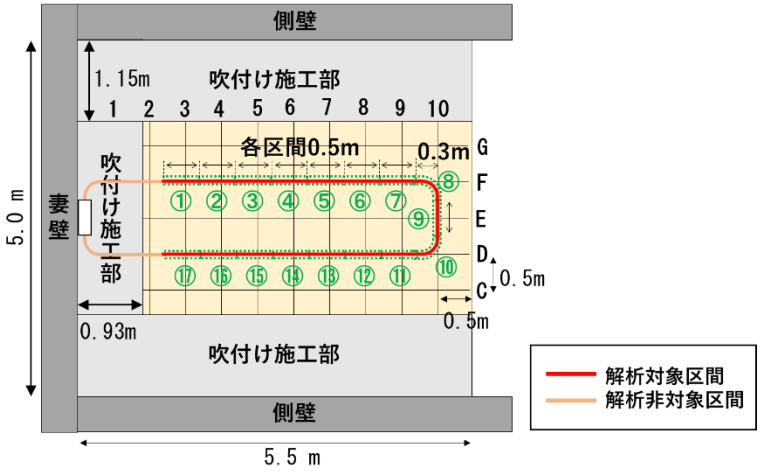


図 4.5-52　加熱式光ファイバの配置及び区間割り（転圧施工箇所）

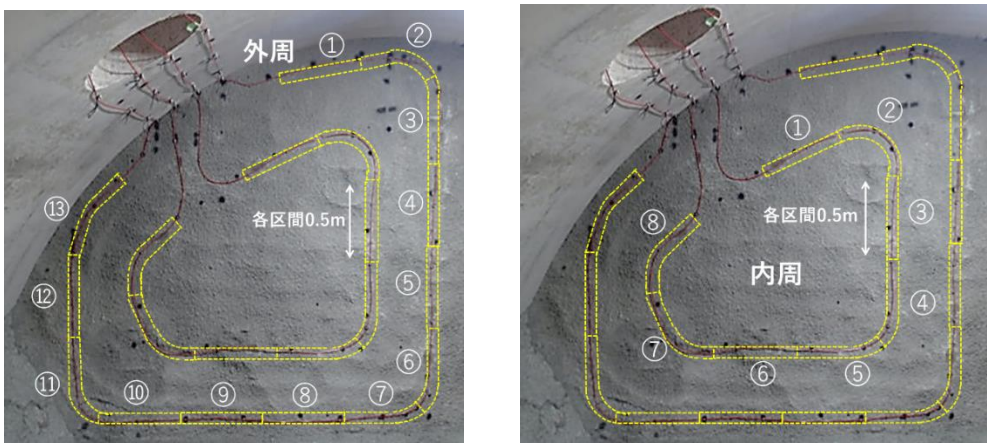


図 4.5-53　加熱式光ファイバの配置及び区間割り（吹付け施工箇所）

(i) 転圧施工箇所の乾燥密度

aDTS 法により計測した転圧施工箇所の乾燥密度分布を図 4.5-54 に、乾燥密度の頻度分布を図 4.5-55 に示す。図には施工直後及び解体時のサンプリングデータも併せて示した。

転圧施工箇所の乾燥密度分布は、局所的に低密度の区間（区間 10 と 17）があるものの、全体的に乾燥密度 2.0～2.1 Mg/m^3 の分布を示した。転圧施工面のサンプリングデータは、施工直後の 9 点と解体時の 4 点を比較対象とした。ただし、施工直後のサンプリングデータについては、図 4.5-54 に示すように、加熱式光ファイバの計測区間に近接する 2 点の平均値とした。サンプリングによる乾燥密度の値は、若干ばらつきはあるものの概ね加熱式光ファイバで推定した乾燥密度と一致した。なお、区間 1 および区間 17 は、他区間と比べて乾燥密度が低く表れており、吹付け施工箇所との境界付近の施工性が影響している可能性が考えられる。

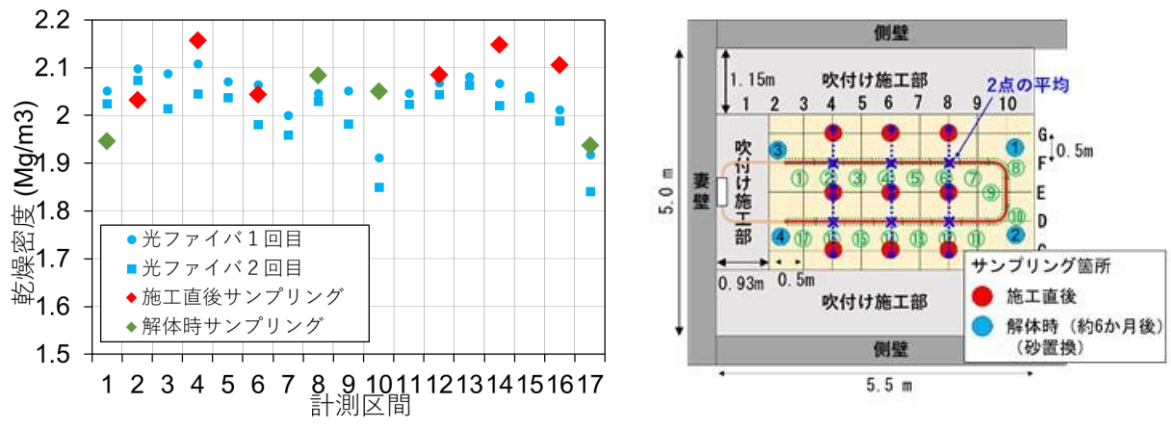


図 4.5-54　転圧施工面の乾燥密度分布

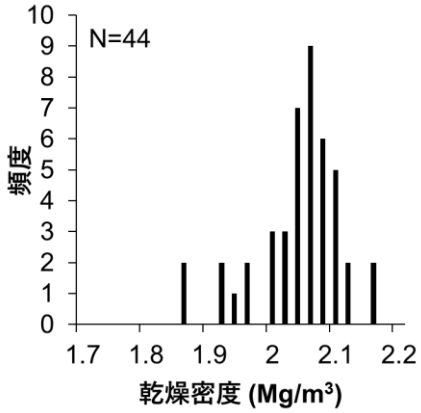


図 4.5-55　乾燥密度の頻度分布（転圧施工面）

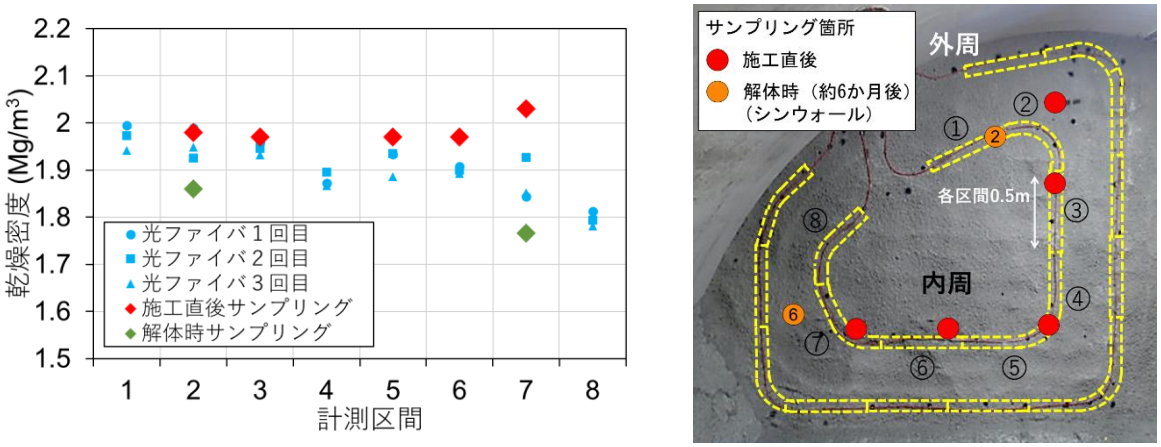
(ii) 吹付け施工箇所の乾燥密度

aDTS 法により計測した吹付け施工箇所の密度分布を図 4.5-56 に、乾燥密度の頻度分布を図 4.5-57 に示す。図には施工直後及び解体時のサンプリングデータも併せて示した。

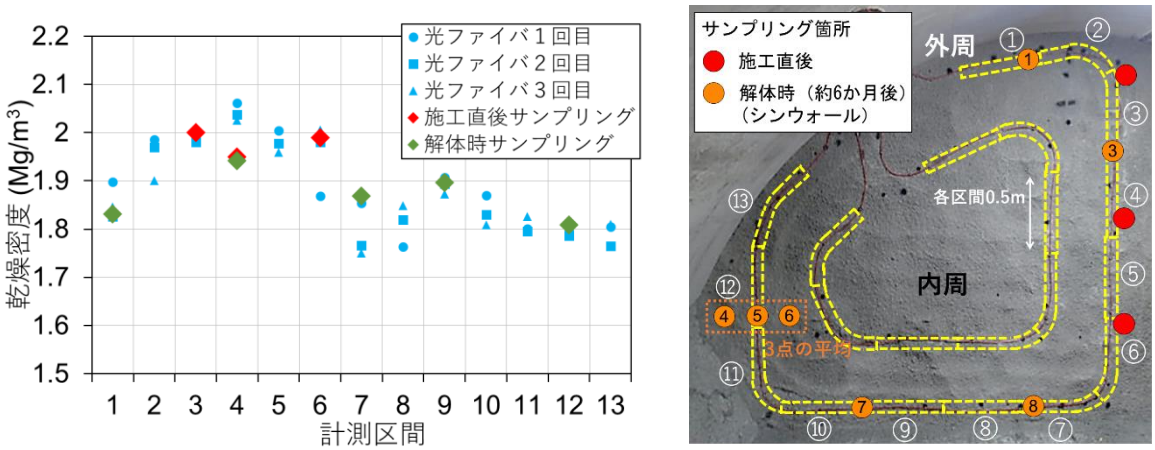
内周の乾燥密度は 1.8～2.0 Mg/m³ の範囲に収まっているが、区間 1 から区間 8 に向かって漸減する傾向を示した。サンプリングデータは、施工直後の 5 点、解体時の 2 点を比較対象として用いた。サンプリングによる乾燥密度の値は、aDTS 法で推定した乾燥密度と概ね一致した。

外周では、区間 1～6 と区間 7～13 で密度分布が異なる傾向を示しており、区間 1～6 は乾燥密度 1.8～2.2 Mg/m³ の範囲で分布するのに対して、区間 7～13 は乾燥密度 1.8～1.9 Mg/m³ の範囲で分布している。また、図 4.5-57 の頻度分布でも二峰性を示している。サンプリングデータは、施工直後の 3 点、解体時の 7 点を比較対象として用いた。ただし、解体時のサンプリングデータ④～⑥については、3 点の平均値とした。サンプリングによる乾燥密度の値は、aDTS 法で推定した乾燥密度と概ね一致した。

aDTS 法およびサンプリングデータの結果より、吹付け面の下部（外側：区間 7～10）や坑道側壁の近傍（外側：区間 11～13）に近づくほど、乾燥密度が低下する傾向が確認された。吹付け下部および左端部では、吹付け施工時に発生するリバウンドや隅角部の施工性が影響している可能性が考えられる。

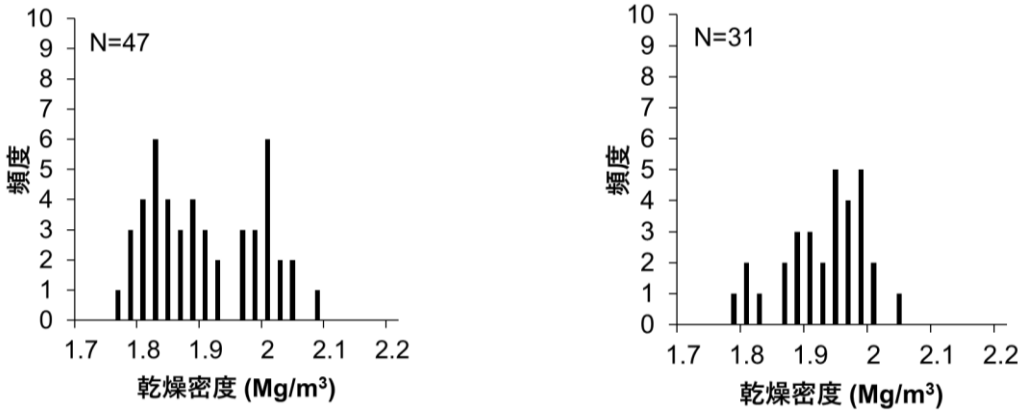


内周の乾燥密度分布



外周の乾燥密度分布

図 4.5-56　吹付け施工箇所の乾燥密度分布



外周　　内周

図 4.5-57　乾燥密度の頻度分布（吹付け施工面）

以上の結果より、密度分布測定技術としての aDTS 法の適用性は高いと考えられる。ただし、転圧施工箇所の乾燥密度の一部はサンプリングによる値と異なる箇所もみられた。その原因として、粗粒分（転圧では最大粒径 20 mm）が埋戻し材と加熱式光ファイバの密着度を低下させたことにより、加熱式光ファイバで測定する温度上昇量の波形の S/N 比を低下させた可能性が考えら

れる。これらを踏まえて、今後は更なる高度化のために以下の課題に取り組む必要がある。

・材料物性（粒度分布、乾燥密度、含水比）をパラメータとした、熱伝導率－乾燥密度のレファレンスケースデータの拡充（データの代表性）。
・材料物性（粒度分布、乾燥密度、含水比）が温度上昇量の波形ノイズに与える影響の把握。
・加熱式光ファイバ設置時に生じるひずみの影響をキャンセルできる計測方法の具体化。

4.5.6 埋戻し施工による模擬坑道への影響確認

(1) 目的

2020 年度～2022 年度に模擬坑道を対象に実施した一連の実証試験により、例えば設計で想定した以上の土圧が模擬坑道に作用するなど、実証試験に影響を及ぼすような変形や劣化等が生じていないことを確認するために、試験実施期間中に模擬坑道に作用する土圧及びひずみの計測を行った。

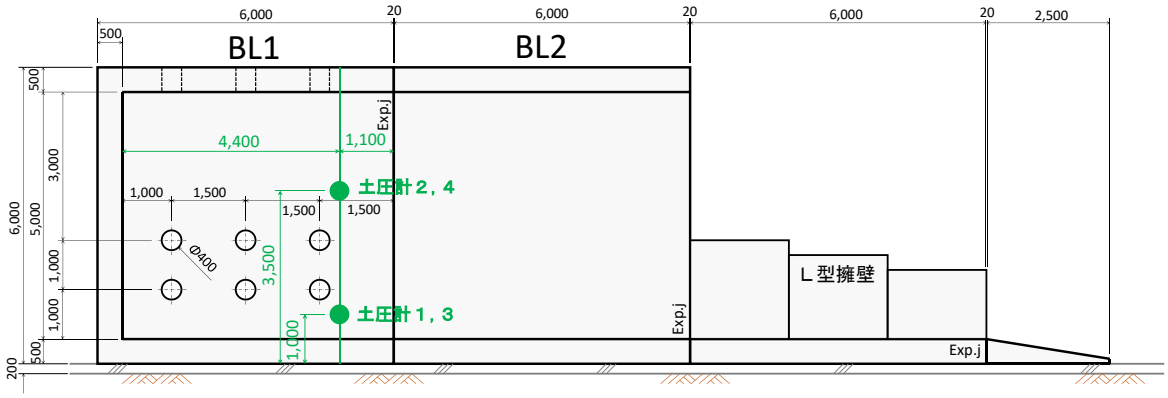
(2) 計測機器の配置

計測項目を表 4.5-24 に示す。これらの計測項目は、模擬坑道内面に作用する側圧及び模擬坑道躯体に生じる応力（ひずみ）である。

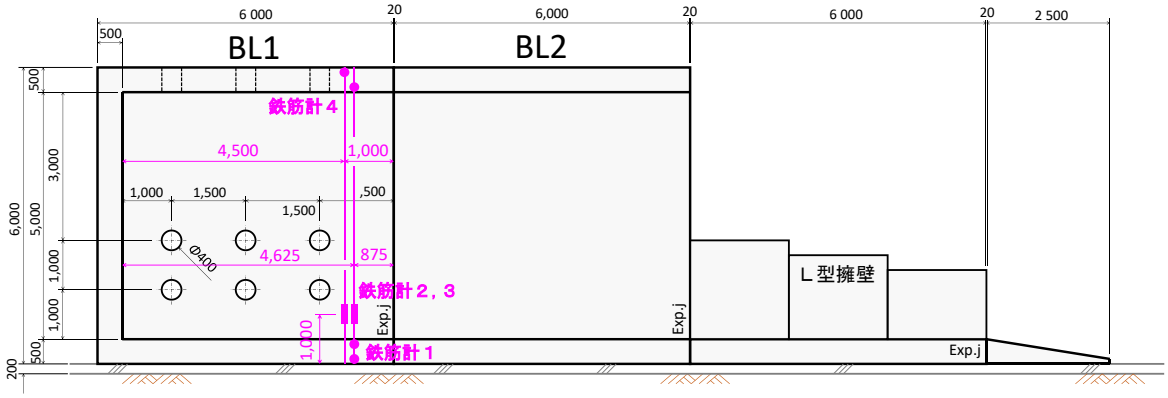
土圧計及び鉄筋計の設置位置の概略を図 4.5-58 に示す。土圧計は、妻壁より 4.50m の横断面において、両側壁の下部及び上部の計 4 ヶ所に設置している。鉄筋計は、妻壁より 4.625m の横断面内に位置する 2 本の主鉄筋（内側と外側）に設置しており、両側壁下部の 2 ヶ所、及び底版中央と天端中央の各 1 ヶ所の計 4 ヶ所（1 ヶ所あたり内側と外側の 2 ヶ所で計 8 ヶ所）に設置している。なお、鉄筋計は材料の温度変化に伴う変形に対する温度補償が成されている。

表 4.5-24　模擬坑道の計測実施項目

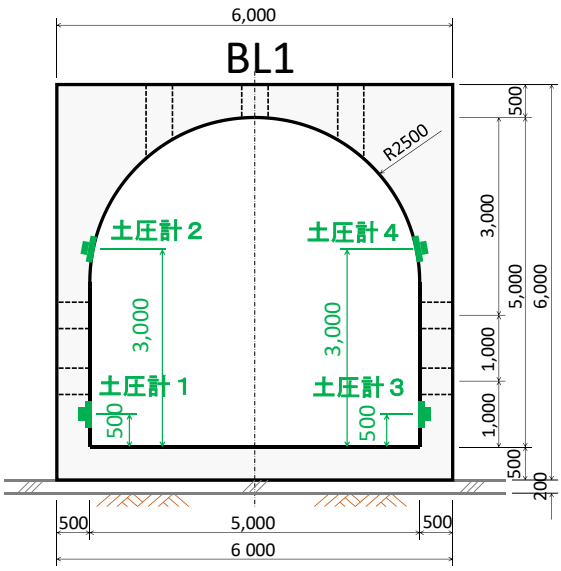
計測項目	計測内容	使用機器
側圧	埋戻し施工時に模擬坑道に作用する側圧の変動	土圧計
応力（ひずみ）	埋戻し施工に伴い、模擬坑道躯体に発生する応力（ひずみ）の変動	鉄筋計 （測温機能付）



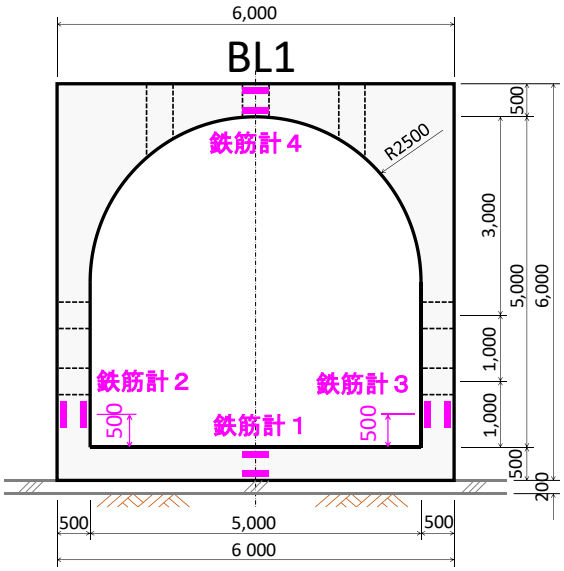
(a) 模擬坑道側面から見た配置（土圧計）



(b) 模擬坑道側面から見た配置（鉄筋計）



(c) 土圧計設置位置



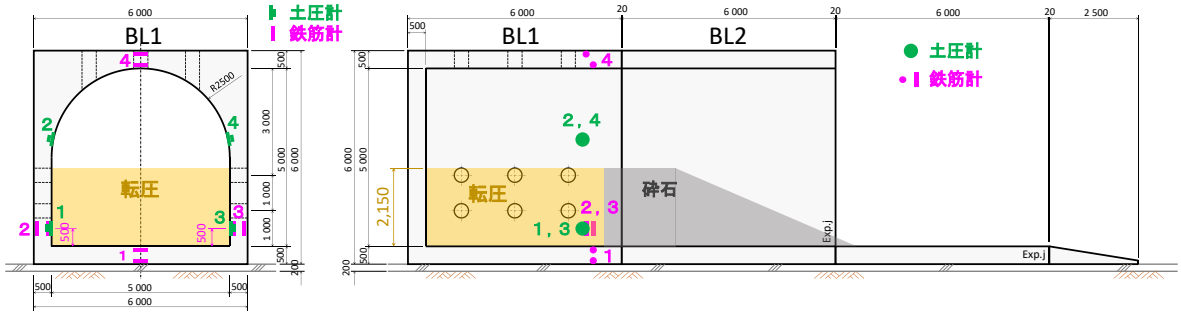
(d) 鉄筋計設置位置

図 4.5-58　模擬坑道への計測器設置位置概略図

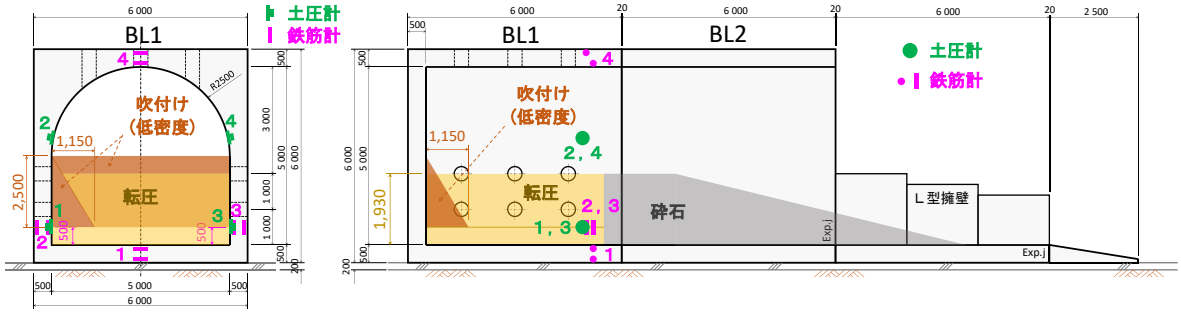
(3) 実証試験の実施経緯

2020～2022 年度の間に、模擬坑道における複数回の実証試験を実施した。各年度に実施した実証試験における埋戻しの範囲を図 4.5-59 に、各年度の施工試験の実施時期及び実施内容を表

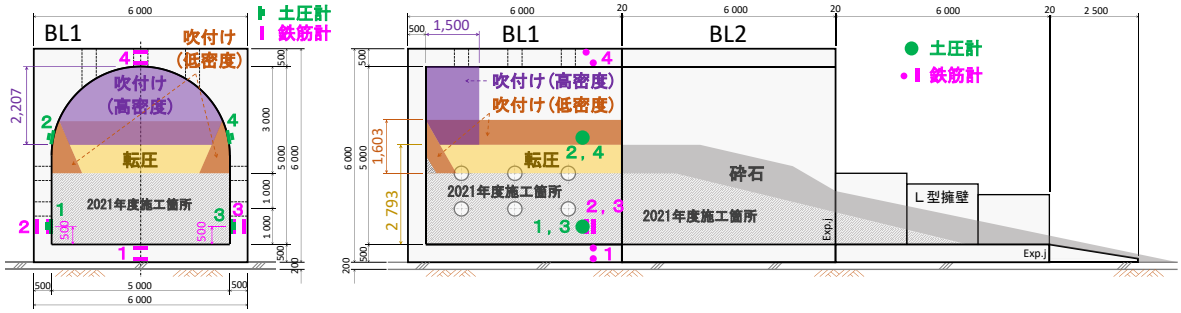
4.5-25 に示す。2021 年度は、2020 年度に施工した埋戻し材を全て撤去し、改めて施工試験を実施した。また、2022 年度は、2021 年度に埋め戻した層の上に施工試験を行った。



(a) 2020 年度の埋戻し範囲（断面図及び側面図）



(b) 2021 年度の埋戻し範囲（断面図及び側面図）



(c) 2022 年度の埋戻し範囲（断面図及び側面図）

図 4.5-59　各年度の施工試験における埋戻し範囲

表 4.5-25　各年度の施工試験実施時期及び実施内容

年度	実施期間	埋戻し方法	埋戻し高さ (m)	備考
2020	11/6～12/8	転圧工法	0 ⇒ 2.15 ⇒ 0	試験終了後、埋戻し材撤去
2021	7/26～9/21	妻面及び左側面下部：吹付け工法（低密度） 中央部：転圧工法	0 ⇒ 1.93	埋戻し材存置
2022	6/22～29	妻面及び側面下部：吹付け工法（低密度）	1.93 ⇒ 2.79	2021 年度施工層の上に施工
	7/4～8	中央部：転圧工法		
	8/2～9	坑道上半部：吹付け工法（高密度）		

(4) 計測結果及び考察

2020～2022 年度における各土圧計の測定値の推移を図 4.5-60 に、鉄筋計によるひずみ値及び温度の推移を図 4.5-61 に示す。各図には、転圧工法による埋戻し高さの推移も示している。

(a) 土圧

2020 年度及び 2021 年度に、両側壁の下部に設置した土圧計 1 及び 3（図 4.5-58）において、40～45 kN/m² 程度（最大 46kN/m²）の値が生じている。これは、側面近傍でランマを用いて入念に締固めを行うことで生じた土圧である。なお、模擬坑道の設計では、模擬坑道側面にかかる水平土圧の荷重条件として、模擬坑道の内部を天端まで、単位体積重量 24kN/m³ の埋戻し材により全て埋め戻した場合の静止土圧を採用している。土圧計設置位置（底面から高さ 0.5m、天端から 4.5m）における静止土圧は、下式のとおり 54kN/m² であり、上記の発生土圧は設計で想定した範囲に収まっている。

$$P = K_o \gamma h = 0.5 \times 24 \times 4.5 = 54 \text{ kN/m}^2 \qquad \text{式 4.5-1}$$

P ：土圧
K_o ：静止土圧係数（=0.5）
γ ：埋戻し材の単位体積重量（=24kN/m³）
h ：深さ（土圧計設置位置で 4.5m）

(b) ひずみ

ひずみ値は、最大で、引張方向には約 60μ（2021 年度の天端の内側主鉄筋）、圧縮方向には約 100μ（2022 年度の天端の外側主鉄筋、2022 年度の右側側壁下部の外側主鉄筋）であった。これらのひずみを 6m あたり（模擬坑道の高さ）の変形量で示すと、前者は 0.36mm、後者は 0.6mm であり、ごく微小であると言える。また、現地での目視観察の結果、模擬坑道には有害な貫通ひび割れは生じていない。以上の結果から、2020～2022 年度の実証試験（埋戻し施工試験）をとおして、模擬坑道には有害な変形量が生じていないと判断できる。

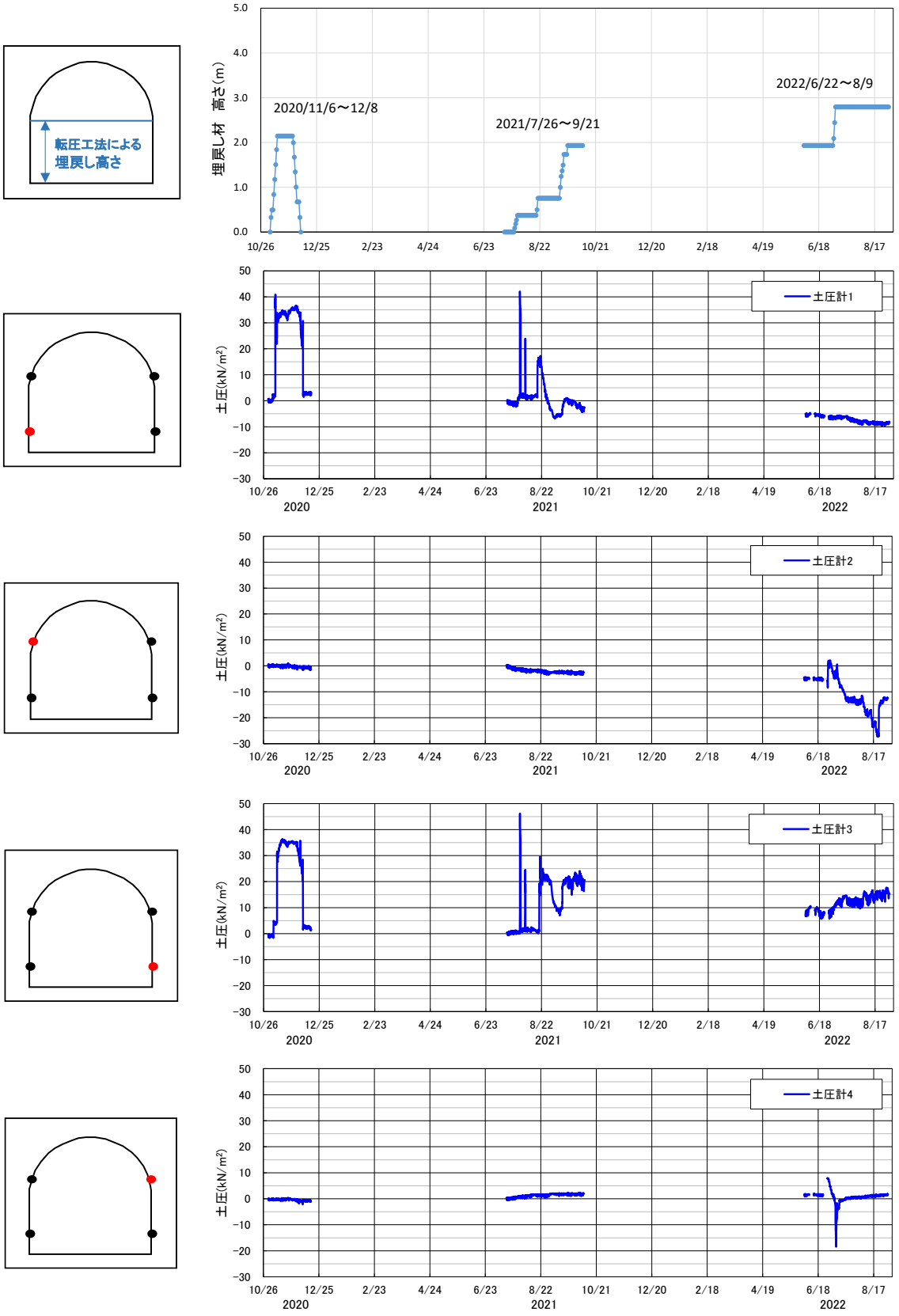


図 4.5-60　土圧計測定値の推移

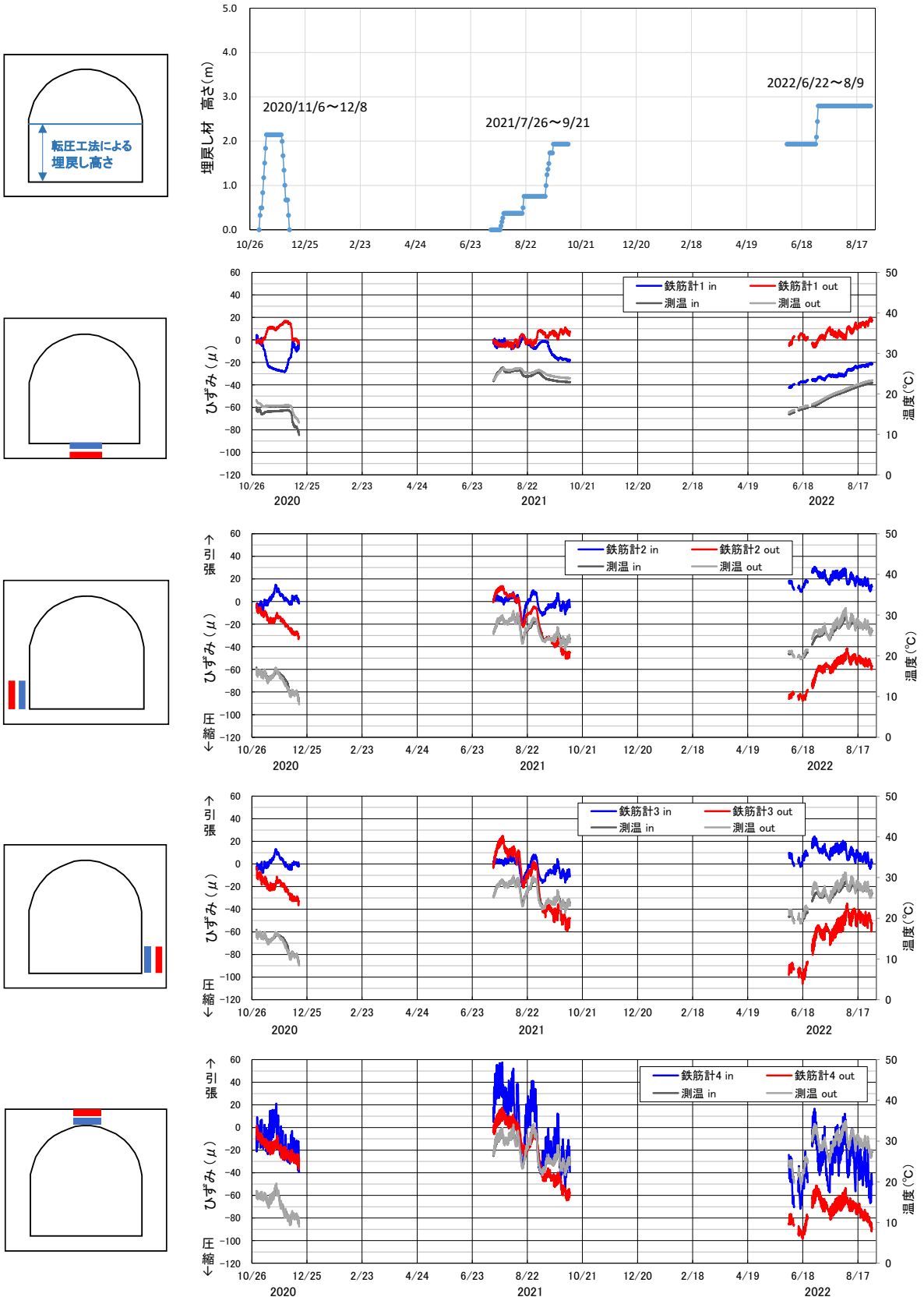


図 4.5-61　鉄筋計によるひずみ値の推移

4.6 埋戻し施工の効率化に向けた施工方法の検討（スクリュー工法、ブロック工法）

転圧工法や吹付け工法と比べて施工効率（施工管理が軽微、施工速度が速いなど）の向上が期待できるスクリュー工法とブロック工法について、それぞれ 2019 年度（スクリュー工法）及び 2020 年度（ブロック工法）より要素試験を実施し、得られた試験データなどから埋戻し工法として適用性の見通しを得るとともに、実証試験に向けた課題を抽出した。次項よりそれぞれの工法の研究計画、これまでに得られた成果及び本年度の実施内容を記載する。（原子力機構・原環センター，2020；2021；2022）

4.6.1 スクリュー工法

(1) 研究開発計画

スクリュー工法の特徴としては、①主たる構成要素であるスクリューフィーダ（以下、「スクリュー」とする）が産業界ですでに実用化されており埋戻し施工への応用が容易なこと、②壁面の凹凸など坑道の内空を充填する設計上の柔軟性が高いこと、③原位置施工は機械運転が中心であり施工管理の省力化（あるいは無人化）の余地が大きいこと、④スイス Nagra において、材料は異なるものの実規模試験での施工性が実証されており（Nagra, 2019）、実現性が高いことが挙げられる。また、スクリュー工法は配置するスクリュー本数を増やすことで施工速度を高められる余力が大きい。ただし、スクリュー工法に埋戻し材（砕石・砕砂を多く含むベントナイト混合材で自然含水比の条件で利用）を用いた事例はみつけられていない。

そこで本業務では、埋戻し工法としてのスクリュー工法の適用性を確認するため、以下に示す計画により研究開発を進めてきた。（図 4.6-1）

1. 概念設計
2. 搬送性と埋戻し材の初期品質の確認（自由落下、先端密着条件）
3. 土槽充填性確認試験（スクリュー1 本）
4. 土槽充填性確認試験（スクリュー2 本）
5. 製造・施工プロセス管理手法の検討

自由落下

土槽充填性確認（1 本）

土槽充填性確認（2 本）

図 4.6-1　要素試験の施工状況

(2) 前年度までの成果

前年度までに得た主な成果を以下に示す。

(a) 概念設計

地下における施工環境、既往の地層処分施設の設計及び処分事業のスケジュールの検討例を参考に埋戻しの工程面での要求事項を想定しつつ概念設計を行い、埋戻し材の搬送及び充填が想定

した工程や仕様に対する適切性を確認するための要素試験装置を整備した。実際の要素試験装置では、既往のスクリューの設計例を参考に、スクリューの口径はφ20 mm の砕石への対応が可能なφ300 mm、回転数は 5～10 rpm（rpm：1 分あたりの回転数）を基本として、幅を持った調整が可能な装置とした。

(b) 搬送性と埋戻し材の初期品質

自由落下条件及び先端密着条件による埋戻し材の搬送性及び初期品質を確認した。スクリュー回転数 5.05 rpm、7.58 rpm 及び 10.10 rpm の 3 ケースに対して、それぞれの条件における搬送量を見積もった。単位時間当たりの充填量は、回転数にほぼ比例する結果となり、10.10 rpm の条件で概念設計から求められた搬送量に近い 4.24m³/h（自由落下条件）、及び 4.23 m³/h（先端密着条件）が得られた。よって主要坑道の推定施工量 52m³/h を現実的なスクリュー本数 14 本で満足できることを確認した。なお、スクリュー管内の埋戻し材の充填率は約 60%でほぼ一定あった。

また、埋戻し材の初期品質を確認した結果、自由落下条件での乾燥密度は 1.663～1.786 Mg/m³、先端密着条件での乾燥密度は 1.653～1.694 Mg/m³ であり、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（1.542 Mg/m³）を満足することを確認した。

(c) 土槽充填性確認（1 本）試験

先端密着条件について、上記の土槽充填時の搬送量の見積もりに加え、充填後の斜面の粒度分布の把握を行った。搬送量は自由落下と同程度、回転数に比例する傾向も同様であった。充填した際に形成される斜面の下流側ではやや粒度分布が粗く、斜面の上流側では逆に粒度が細かくなる傾向がみられた。スクリュー先端の埋戻し材への挿入量はスクリュー管上面で 50mm 程度の挿入長を維持しつつスクリューを後退させる方式で実施した。

(d) 土槽充填性確認（2 本）試験

坑道上部のアーチ両端部及び側壁下部隅角部への充填性の確認を兼ねた合理的な要素試験を実施するために、2 本のスクリューを配置して埋戻し材を押し上げる（あるいは押し込む）効果を確認する要素試験を実施した。埋戻し材の充填完了時の形状を図 4.6-2 に示す。スクリュー先端から土槽内に供給された埋戻し材は、スクリューの回転慣性により回転方向へ押し込まれる傾向となることがわかった。

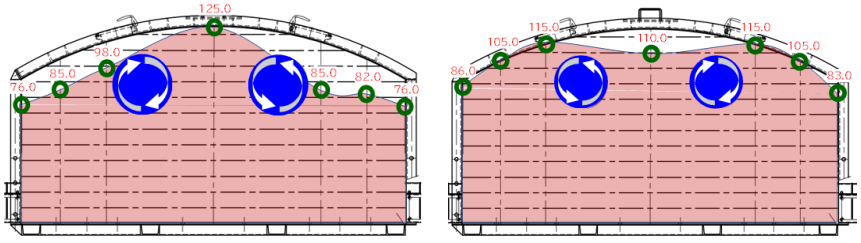


図 4.6-2　埋戻し材の充填形状
（充填完了時、妻面より 150cm 断面）

(3) 本年度の実施内容

2020 年度のスクリュー単体及び 2021 年度のスクリュー2 本での要素試験の結果、埋戻し材中の粗粒分が土槽底部に集積する材料分離が観察された。かさ密度による品質管理を行うためには、材料分離が許容可能な範囲に収まることを前提とするため、埋戻し材の材料分離を抑制する手法

を考案しスクリュー単体の要素試験で確認することとした。また、狭隘な模擬坑道内においても埋戻し材の施工後の形状測定が可能な 3D カメラを用いた計測方法についてもその適用性を検討した。更に、本年度の成果をもとにスクリュー工法の製造・施工プロセス管理手法を更新した。製造・施工プロセス管理手法については 4.7.1 に記載する。

(a) 試験方法

試験設備は、試験土槽、スクリュー、埋戻し材供給設備、スクリュー制御機器、油圧シリンダ、油圧ポンプ並びに安全設備などから構成される。試験設備の全体レイアウトを図 4.6-3 に、試験土槽を図 4.6-4 に、試験装置の全景を図 4.6-5 に示す。

使用したスクリューは 2021 年度と同様の仕様とした。試験土槽の幅は、2020 年度に提案したスクリュー間隔 1,250 mm と同じ幅とした。この幅については、後述の試験ケース 3 の実施時に 900 mm に変更できるように中仕切りを設けられるようにした。試験土槽長は連続して 2 ケースの試験が実施可能な長さ 3,600 mm（内面の有効長）とした。土槽側面には、埋戻し材の施工状況を観察・撮影するための観察窓を左右それぞれ 10 か所ずつ設けた。この側部の観察窓は、サンプラーによる試料採取が可能な構造とした。土槽上面は撮影記録及び 3D 計測のための撮影が可能となるように開放とした。試験土槽は、土槽の質量を随時計測するためのスケール及び後退速度を制御するための油圧シリンダを備えた設備とした。なお、今年度は、試験後の人力によらない安全な埋戻し材の排出及び次ケースの準備への迅速な移行のために、土槽自体が傾いて埋戻し材を排出する機能を付与させた。

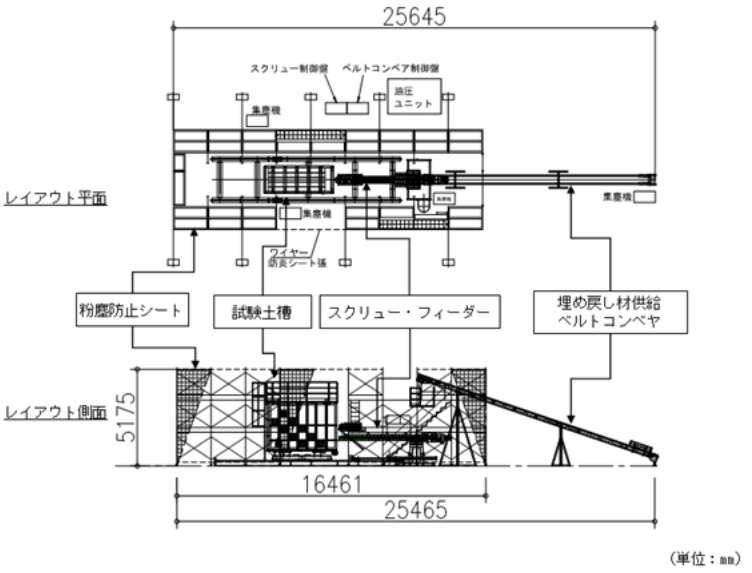


図 4.6-3　要素試験全体レイアウト計画

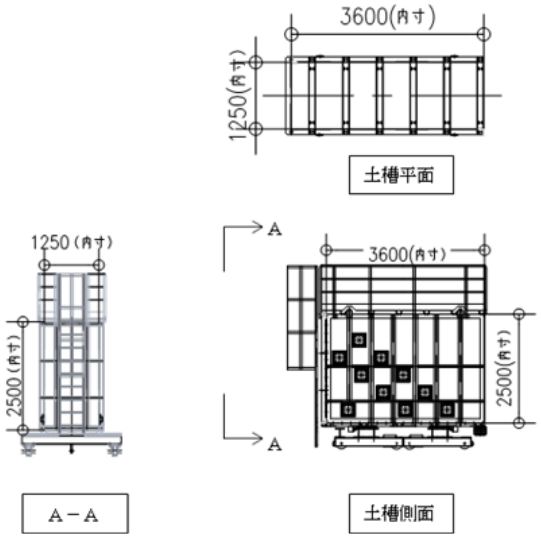


図 4.6-4　試験土槽

図 4.6-5　試験装置全景

要素試験の使用材料を表 4.6-1 に、配合を表 4.6-2 に、試験ケースを表 4.6-3 に、充填方法を図 4.6-6 に示す。埋戻し材は、最大粒径 20 ㎜の A 配合と最大粒径 5 mm の B 配合の 2 種類、ベントナイト混合率は 15%とした。材料分離に関する影響を確認するための試験ケースとして、基本ケースに加えて、分離抑制板の効果、土槽幅の影響、最大粒径の影響、スクリュー高さの影響および二段施工の影響を把握するための全 6 ケースを設定した。基本ケースであるケース 1 は、2019 年度に坑道全断面の一括施工（埋戻し）を想定した坑道全体をカバーするスクリュー配置のうち、坑道底部隅角部に最も近いスクリューの坑道との位置関係を反映した（スクリュー中心高さ 1,250 mm、土槽幅 1,250 mm）。ケース 2 では、図 4.6-7 に示すようにスクリューの横に羽のような分離抑制板を設置し、材料の滑落を緩和させる効果を期待した。ケース 3 では、土槽幅を 900 mm とし、1 本のスクリューが受け持つ範囲を狭める効果を期待した。ケース 4 では、模擬掘削土の砕石・砕砂を最大粒径 20mm の砕石・砕砂から、最大粒径 5 mm の砕砂に変更した。ケース 5 では、スクリュー高さを 1,250mm から 650 mm と低くした。ケース 6 では、多段施工を想定して、ケース 5 の上部にケース 2 と同条件で充填した。

表 4.6-1　使用材料

材料	品名	備考
模擬掘削土	コンクリート用砕石・砕砂	JISA5005:2020 砕石：最大粒径 20、10mm 砕砂：最大粒径 5mm
ベントナイト	クニゲル V1	クニミネ工業㈱製

表 4.6-2　埋戻し材の配合（質量%）

	クニゲル V1	砕砂 0-5mm	砕石		推定含水比(%)	呼称
			5-20mm	5-10mm		
最大粒径 20mm	15	25	20	40	1.9	A 配合
最大粒径 5mm	15	85	－	－	2.5	B 配合

表 4.6-3　各試験ケース（計画値）

ケース	目的	スクリュー仕様				土槽幅（mm）	材料の最大粒径（mm）	分離抑制板
		中心高さ（mm）	回転数（rpm）	後退速度（mm/min）	先端挿入長管理目標値（mm）			
1	基本ケース	1,250	12	5	300	1,250	20	無し
2	分離抑制板の効果							有り
3	土槽幅の影響					900		無し
4	最大粒径の影響					1,250	5	
5	スクリュー高さの影響	650					20	有り
6	二段施工の影響	1,250						

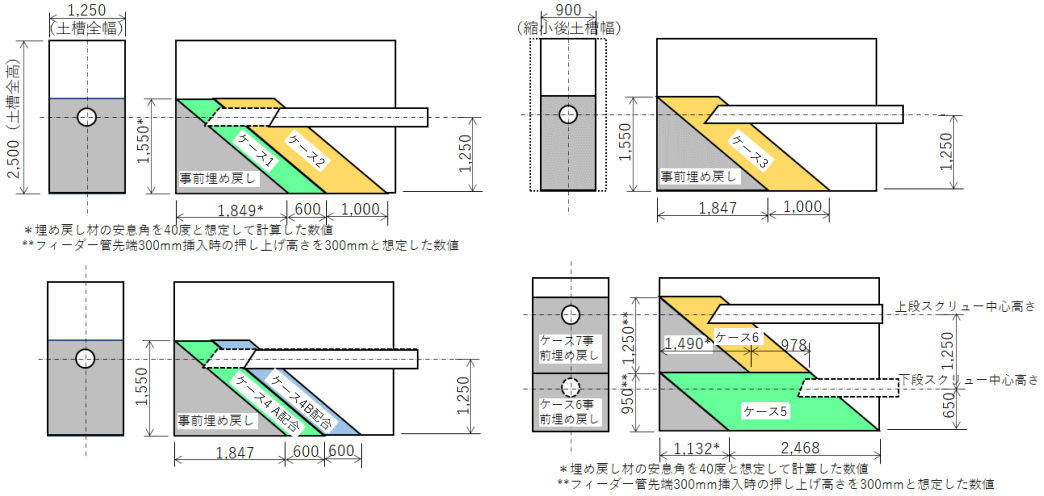


図 4.6-6　各試験ケース充填方法

図 4.6-7　分離抑制板

(b) 材料製造

スクリュー工法に用いる埋戻し材は、製造時に加水せずに自然含水比（表面乾燥状態）で混錬することから、製造後の時間経過に伴う、自重による固形化、乾燥などの品質の変化は生じ難いが、運搬時の材料分離などの品質の変化の可能性に留意する必要がある。材料製造では加水調整が必要ではないことから、混練自体は比較的容易な作業であり、ミキサは広く普及している汎用の二軸強制練りモルタルミキサを用いた。製造に使用したミキサ（光洋機械産業社製：KBHS500D ）を図 4.6-8 に、材料製造手順を図 4.6-9 を示す。混練後の埋戻し材は、容量 1 m^3 のフレキシブルコンテナ（内袋付き）に詰めて、出荷までは風雨の影響を受けないように、フレコンパックの下にシートを敷設するとともに、全体を同じくシートで覆って保管した。なお、製造した埋戻し材の含水比は概ね 2%であった。

図 4.6-8　埋戻し材製造二軸強制練りミキサ

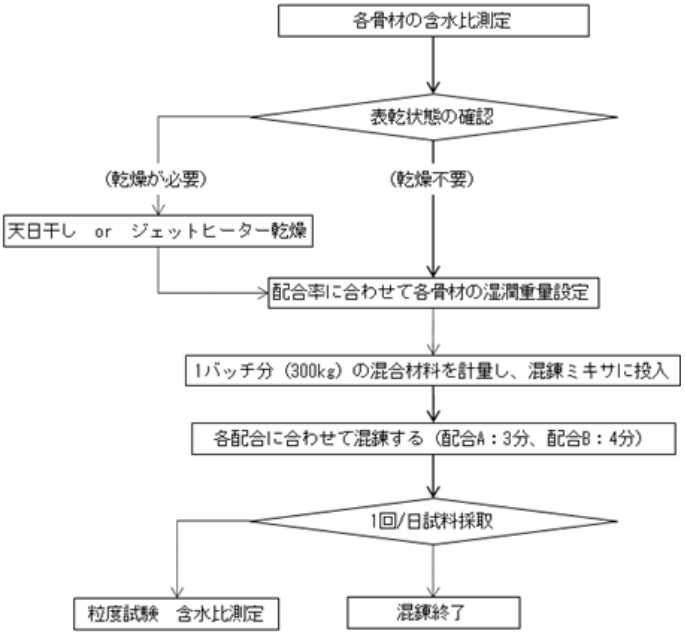


図 4.6-9　材料製造手順

(c) 試験結果

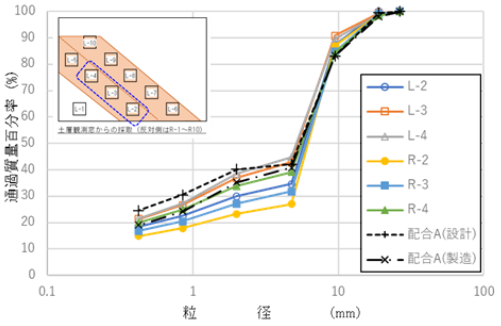
(i) 粒度分布

各試験ケースにおける粒度試験の結果を図 4.6-10 に、材料分離を迅速に判定するため実施した 2 mm ふるいによる表面部分の簡易分析結果を表 4.6-4 に、要素試験の様子を図 4.6-11 に示す。

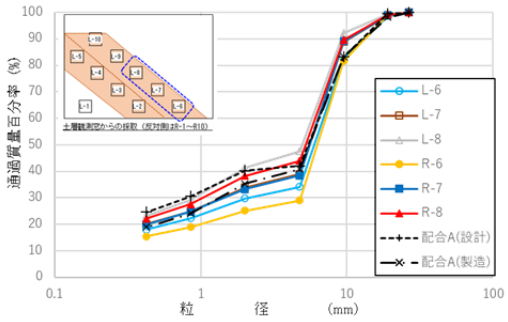
最大粒径を 5 mm にしたケース（ケース 4）では、粒径加積曲線のばらつきがほとんどなく、均質に充填されたことがわかる。最大粒径 20mm のケースでは、スクリュー高さを低くしたケース（ケース 5）が最も粒径加積曲線のばらつきが小さく、材料分離抑制効果が高いことがわかる。また、分離抑制板を用いたケース（ケース 2)、は、基本ケース（ケース 1）と比べて、粒径加積曲線のばらつきが若干小さくなっており、材料分離抑制に対する一定の効果がみられた。

一方、土槽幅を小さくしたケース（ケース 3）では、基本ケースよりも粒径加積曲線のばらつきが大きくなるとともに、土槽左側（L 側＝スクリューの回転方向側）と右側（R 側）の粗粒分の集積に差が生じた。これは、スクリューの回転力により左側へ多く送出された材料がすぐに側壁に衝突し、滑落と分級により材料分離が生じたためと考えられる。

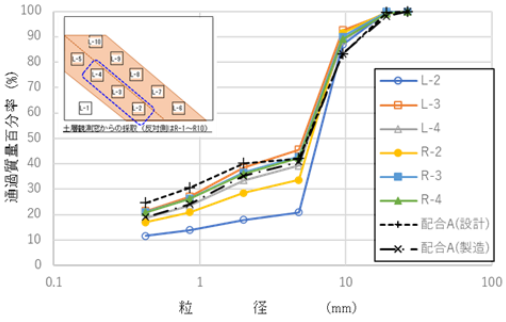
以上の結果より、材料分離抑制の対策としては、最大粒径を 5mm としたケースが最も効果が高いことがわかった。また、最大粒径 20mm の骨材を使用した埋戻し材の材料分離を抑制するためには、スクリューの高さを低くすること、もしくは分離抑制板の導入が効果的（ただし、今回試験的に導入した分離抑制板の改良が必要）と考えられる。



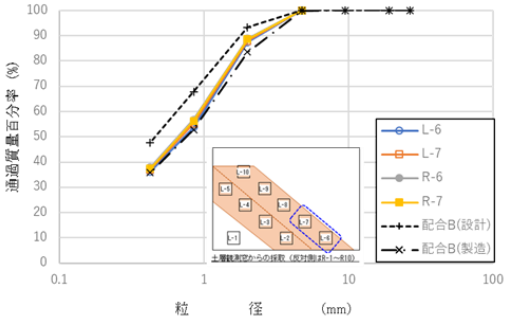
基本ケース（ケース 1）



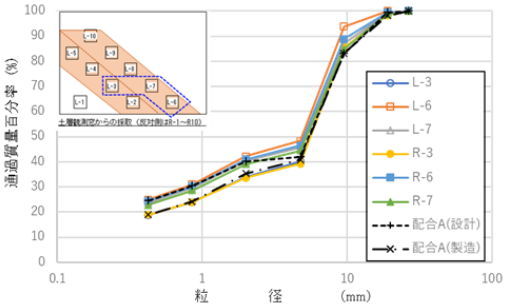
分離抑制板の効果（ケース 2）



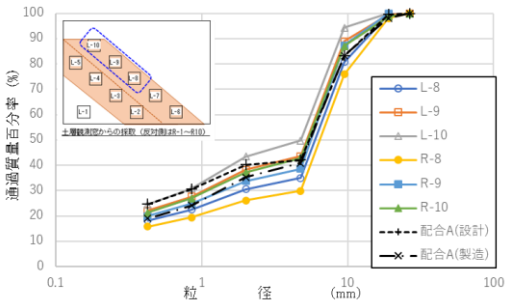
土槽幅の影響（ケース 3）



最大粒径の影響（ケース 4）



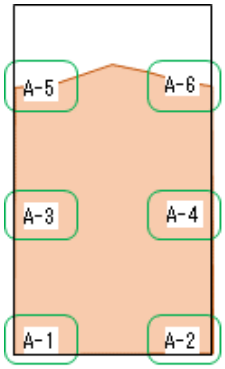
スクリュー高さの影響（ケース 5）



二段施工の影響（ケース 6）

図 4.6-10　各試験ケースの粒度分布

表 4.6-4　2mm ふるいによる簡易分析結果

試験ケース			1	2	3	4	5	6
2mm ふるい通過分の質量比(%)	充填前材料		36.3	35.7	38.9	88.5	35.7	36.2
 土槽正面	充填後	A-1	3.1	24.2	2.7	88.2	32.3	32.5
		A-2	3.0	16.0	1.8	89.3	28.9	44.8
		A-3	44.7	31.8	38.0	89.1	43.6	31.2
		A-4	42.7	25.7	39.7	89.9	51.3	37.0
		A-5	43.9	41.6	46.7	88.9	48.2	52.6
		A-6	37.0	43.6	42.5	90.3	52.8	39.6

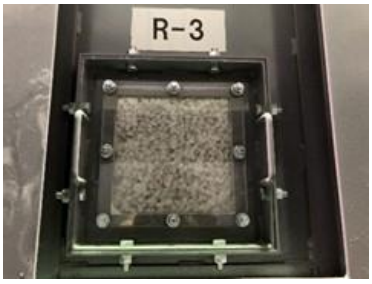


図 4.6-11　要素試験の様子

(d) 3D 計測システムによる充填形状の測定

(i) 測定方法

かさ密度を計算するための充填形状の測定に、画像データを利用した 3D 計測システムを用いた。画像は、小型カメラを土槽上面から下向きにセットし、撮影しながら土槽長手方向に移動して取得した。スクリュー装置による死角を防ぐため、撮影線は土槽長手方向に並行 2 列とした。撮影画像は、PC アプリケーションで分析することにより 3D データに変換され、埋戻し材の体積を計算する。本手法により形状を測定するための“特徴点”の撮影を図 4.6-12 に、計測機器及び計測の様子を図 4.6-13 に示す。同システムによる計測手順を以下に示す。

① モバイルカメラを移動させつつ画像フレームを撮影
② 画像中の空間に存在する静止物の特徴点を 1 撮影フレーム当たり 200 点以上特定
③ 複数フレームの同一特徴点を比較することでカメラの位置・姿勢（角度）を割り出す
④ カメラ位置・姿勢（角度）と特徴点の見え方を基にカメラと特徴点の距離を計算
⑤ 各特徴点とカメラの距離から特徴点相互の距離を割り出すことにより、特徴点の三次元座標を決定する

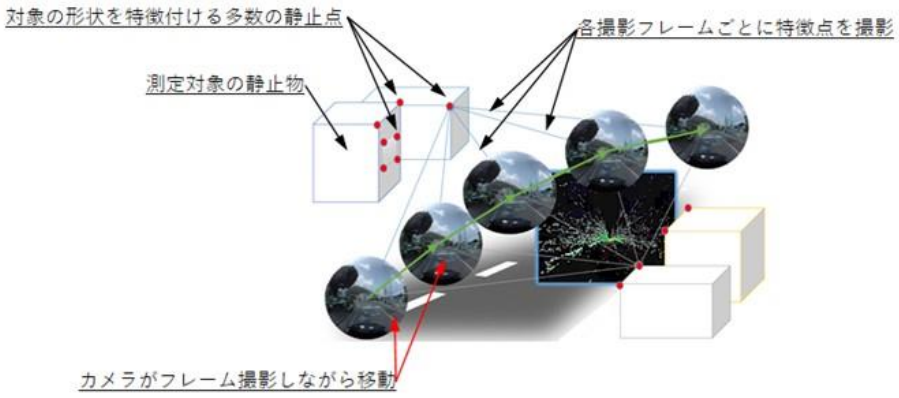


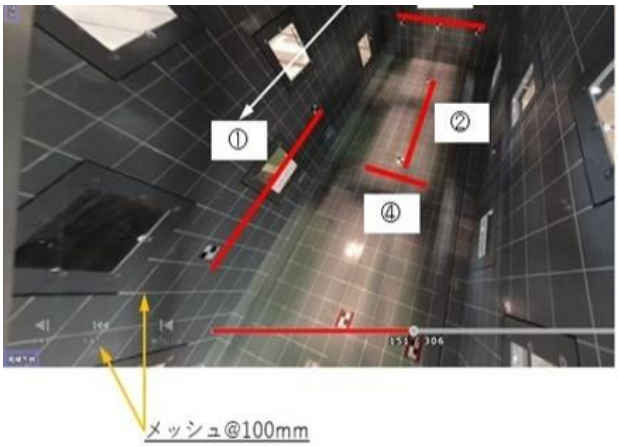
図 4.6-12　特徴点の撮影

図 4.6-13　計測機器及び計測の様子

今回の試験条件における 3D 計測システムの計測精度について、予め以下の方法により確認を行った。

① 土槽内部を黒色で塗装し、横断方向・長手方向に 100 mm 間隔の白線メッシュを描く
② 土槽手前に 3D 計測用カメラをセットし、土槽長手方向に移動しながら撮影
③ 撮影画像から土槽内の既知の 2 点間の距離を計算
④ 実距離と計算値による距離を比較

計測精度の確認結果を図 4.4 66 に示す。3D 計測システムは最大でも 0.6%程度の誤差で距離の測定が可能であることを確認した。また、この方法によれば、人手による計測で生じる可能性のある、メジャーの微小な傾きによる誤差や測点選択の偏り（人は凹凸の特徴のある点を選ぶあるいは避ける傾向がある）を排除できる。



計測番号	A:3D計測値 (mm)	B:実測値 (mm)	誤差：(B-A)/B X100(%)
①	1,000	1,000	0
②	1,102	1,100	0.18
③	895	900	0.55
④	497	500	0.60

図 4.6-14　計測制度の確認

(ii) 測定結果

3D 計測システム及び人力計測（メジャーを用いた人手による計測）により算出した充填完了時の埋戻し材の体積を表 4.6-5 に、3D 点群図及びモデル図の例を図 4.6-15 に示す。３D 計測システムと人力計測で測定した埋戻し材の体積の差は 4～10%程度であり、概ね同様の値を示した。

3D 計測システムは 3D レーザーによる計測システムと比較して、使用機材が安価であり、狭隘な空間でも容易かつ迅速な撮影が可能である。今後、実証試験等の施工条件次第では埋戻し材の施工管理方法としての適用性は高いと考えられる。

表 4.6-5　3D 計測システム及び人力計測による埋戻し材の体積

ケース	3D 計測システム（m^3）	人力計測（m^3）
1	1.22	—
2	1.49	—
3	0.91	0.88
4	1.42	1.30
5	3.08	2.86
6	0.63	—

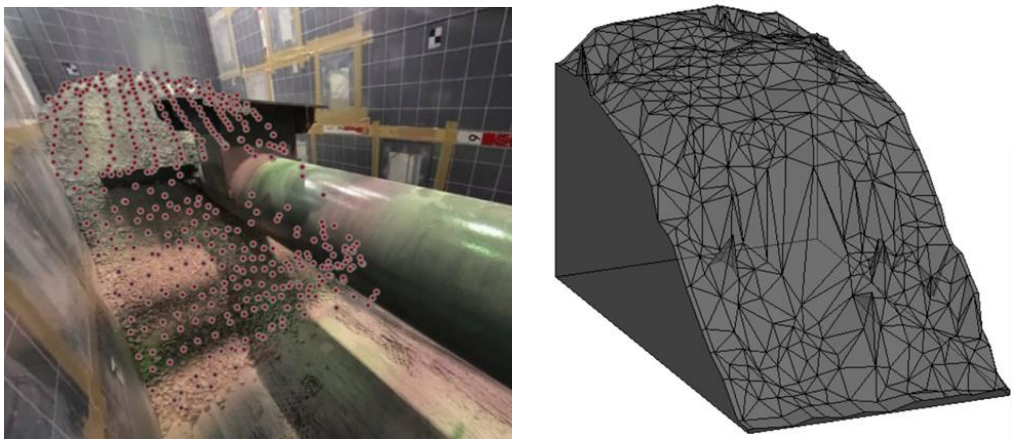


図 4.6-15　3D 点群図及びモデル図の例

(4) まとめと今後の課題

今年度の要素試験のまとめ、及びこれまでに得られた成果を踏まえた課題を以下に要約する。

(a) 今年度のまとめ

1. 掘削土（砕砂）の最大粒径が 5 mm の埋戻し材であれば材料分離がなく均質な施工が可能である見通しを得た。
2. スクリュー工法における材料分離対策として、スクリュー高さを低くすることが効果的であり、土槽幅（スクリューの分担幅）の縮小は効果が得られない。
3. 分離抑制板の改良により、材料分離対策となる可能性がある（ただし、今回試験的に導入した分離抑制板の改良が必要）。
4. 埋戻し材の品質管理方法として、画像データを利用した 3D 計測システムの適用性は高い。

(b) 今後の課題

1. 実際の坑道を埋め戻す場合は、多くのスクリューを立体的に配置して、それぞれを制御する必要がある。今後は、各スクリューへの埋戻し材の供給を含む、システムとしての充填装置の設計と運転パラメータの最適化に向けた実証的な研究が必要である。
2. 上記の実証研究や実事業の設計（仕様）検討のために、坑道断面や材料の違いを含めて充填を評価するシミュレーション技術の開発を進めることが望まれる。
3. スクリューの押込み力による乾燥密度の向上策を検討し、有効性が確認できる場合には設計や施工計画に反映する。具体的な手段（開発課題）として、スクリュー間隔、押込みが有効な埋戻し材の配合、押込み力と乾燥密度向上の関係の把握などがあげられる。
4. 最大粒径 20mm でも材料分離が生じ難いスクリュー配置や分離抑制板の改良などを行い、使用材料のバリエーションへの柔軟性を向上させる。

4.6.2 ブロック工法

(1) 研究開発計画

ブロック工法の利点として、①地上の施設で埋戻し材ブロックを製作できることから一定の品質を確保したブロックが製作可能であること、②埋戻し材の要求性能に対して柔軟な対応が可能であること、③施工時には埋戻し材ブロックを坑道に定置するのみであることから作業を容易・迅速に実施できる可能性があること、④施工時の管理項目を少なくできる可能性があること、⑤施工後の品質を把握するための計測などの工程を短縮できる可能性があることなどが挙げられる。一方、ブロック工法は他の工法に比べて、埋戻し材ブロックとしての製造・施工方法や基本特性に関する検討が十分ではないのが現状である。

そこで本業務では、埋戻し工法としてのブロック工法の適用性を確認するため、以下に示す計画により研究開発を進めてきた。

1. 埋戻し材ブロックの設計仕様の設定
   埋戻し材の要求性能である低透水性から開発の目標となる透水係数を設定し、透水係数と有効粘土密度の関係からブロックの有効粘土密度を設定した。
2. ブロックの製作・設計仕様に関するデータ取得
   貧配合のベントナイト混合土（ベントナイト混合率 15、30%）の埋戻し材ブロックを対象に静的締固め試験と透水試験を実施し、ブロックが製作可能な材料構成の範囲や透水係数に関するデータを取得した。

3. ブロック製作試験

静的締固め試験の結果や既往の研究成果を基に、小型ブロック（30cm×30cm×10cm）の製作試験を行い、埋戻し材ブロックの製作における諸条件（材料の種類、構成（ベントナイト混合率、模擬掘削土の種類)、製作直後の品質規定（かさ密度等)、工法規定（成型圧等)）を設定するための基礎データを取得した。

4. 実寸大ブロックを対象とした施工方法の検討

文献調査の結果等から埋戻し材ブロックの形状寸法を設定し、ブロックの定置方法、定置装置等を検討した。

5. 坑道壁面とブロック間の隙間処理の検討

ベントナイト混合土である埋戻しブロックは、定置後に残存する坑道内の隙間（坑道とブロック、ブロック間）をベントナイトの膨潤によって閉塞する（自己シール性）ことが期待されている。そこで、貧配合のベントナイト混合土（ベントナイト混合率 15%）を対象として膨潤変形試験、自己シール性試験を行い、膨潤変形や自己シール性に関するデータ（混合材料の影響、隙間充填部の密度や発生圧力）を取得した。

6. ブロック工法による製造・施工プロセス管理手法に関する検討

埋戻し材ブロックの製造段階、施工（定置）段階、開発段階（自己シール性に関する検討、ブロックの製作装置・定置装置の予備設計に関する検討）の各段階についてプロセス管理手法を検討した。

(2) 前年度までの成果と課題

前年度までに得た主な成果及び課題を以下に示す。

(a) 埋戻し材ブロックの設計仕様の設定

埋戻し材に求められる透水係数を満足する有効粘土密度（代替指標）の設定は、ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係（原子力発電環境整備機構（2021））を基にすると、淡水条件では概ね 0.4 Mg/m^3 以上、塩水条件では 0.8 Mg/m^3 以上となる。本業務では、この既往成果に準じ、埋戻し材の設計要件の代替指標として、有効粘土密度 0.8 Mg/m^3 以上を仮設定することとした。

(b) ブロックの製作・設計仕様に関するデータ取得

(i) 静的締固め試験

埋戻し材ブロックの製作前に、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て静的圧力による締固め特性のデータを取得した。試験では、模擬掘削土の配合をパラメータとして、1 試験ケース当たり 6 水準の含水比（5、7、9、11、13、15%）に対する乾燥密度のデータを取得した。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）以上の値が得られた。以上より、埋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))、製作直後の品質規定（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。

(ii) 透水試験

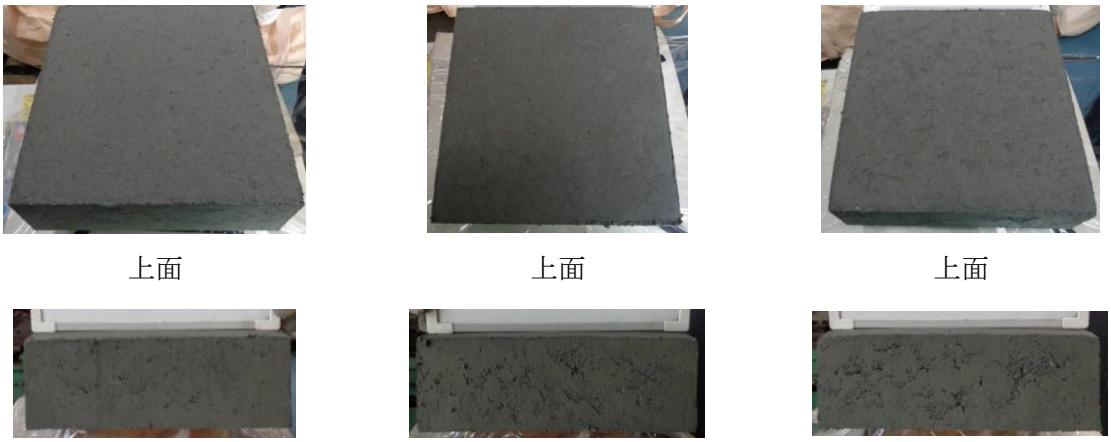
静的締固めで作成した内径φ100 mm、高さ 100 mm の供試体を用いた透水試験を実施し、埋戻し材ブロックの配合と透水係数の関係に関する基礎データを取得した。供試体の仕様は、埋戻し材ブロックを想定した貧配合のベントナイト混合土（ベントナイト混合率 15、30%）を、低有効粘土密度（1.0 Mg/m^3 以下）の範囲で設定した。試験結果より、透水係数は 10^{-12}～10^{-11} m/sec

オーダーであり、有効粘土密度が高くなると透水係数は低くなる傾向が見られ、既往の試験結果と同程度の透水係数を示した。有効粘土密度 1.0 Mg/m³ では、ベントナイト混合率や模擬掘削土の粒度分布による透水係数への影響はほとんどなく、有効粘土密度 0.6、0.8 Mg/m³ でも大きなばらつきはないことがわかった。

(c) ブロック製作試験（小型ブロック）

小型ブロック製作試験では、静的締固め試験の結果や既往の研究成果を基に、埋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、模擬掘削土の種類）、施工直後の品質規定（かさ密度等）、工法規定（成型圧等））を設定するための基礎データを取得した。ブロックの形状寸法は幅 W30 cm×奥行 L30 cm×高さ H10 cm である。試験結果より、圧縮成型後のブロックの外観について、製作した 18 個（6 試験ケース×3 個/ケース）の全ブロックについて、下記に示す不良な状態にはならず、製作が可能となる結果となった。図 4.6-16 に圧縮成型、脱型後の小型ブロックの外観写真の一例を示す。

また、製作したブロックを水平方向：9 分割、高さ方向：3 分割（合計 27 分割）し、各試料に対して含水比及び湿潤密度を測定し、乾燥密度を算出した。製作条件が同じ 3 個のブロックでは、乾燥密度の平均に対する差分は最大で+0.02 Mg/m³ となり非常に小さい値であった。また、1 ブロック当り 27 試料の測定結果から、1 ブロック中の乾燥密度のバラツキは±0.1 Mg/m³ 程度、含水比のバラツキは±1%程度となることが推察された。ただし、この推察は本検討のブロックの仕様（例えば、幅 30 cm×奥行 30 cm×高さ 10 cm の寸法形状）を前提としたものであり、ブロックの大型化などを念頭に、種々の仕様のブロックに関するデータを蓄積していく必要がある。



含水比 12%、ベントナイト混合率 15 %、成型圧力 10 MPa　含水比 13%、ベントナイト混合率 30 %、成型圧力 10 MPa　含水比 15%、ベントナイト混合率 30 %、成型圧力 10 MPa

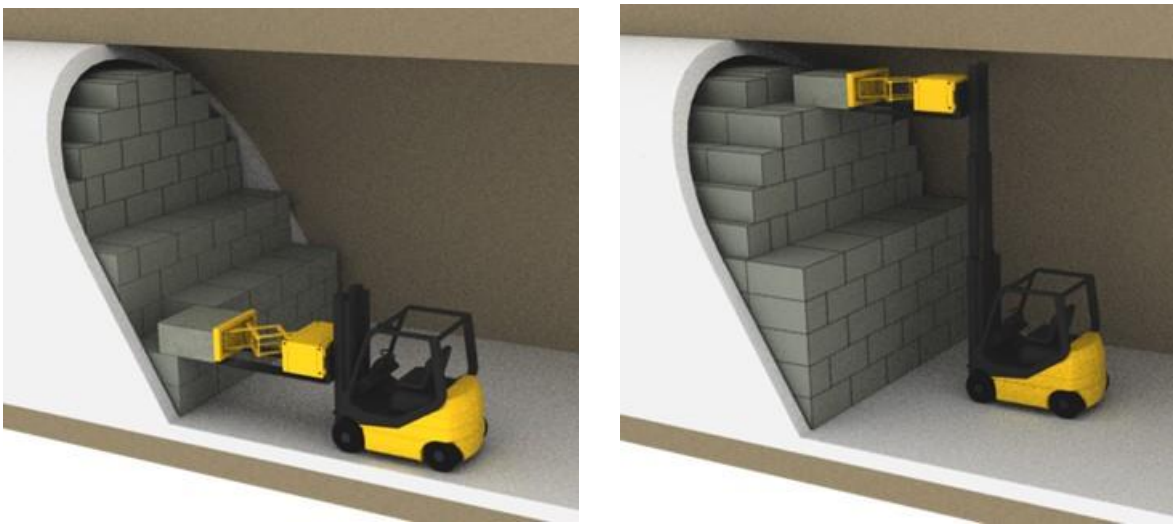
図 4.6-16　小型ブロックの外観　一例

(d) 実寸大ブロックを対象とした施工方法の検討

埋戻し材ブロックの製作装置や定置装置を具体化し、これらの装置を用いた作業手順（ハンドリングフロー）を整備した。ブロック定置装置の具体化における埋戻し材ブロックの寸法は、国内外の実績や施工性等を考慮し坑道寸法から逆算して仮設定した。

埋戻し材ブロック定置装置の稼働搬送部分は、作業空間として上部空間が確保できないこと、坑道内の作業エリアが狭く複数台の装置を用いた作業をすることが非効率であること、異なる寸

法の埋戻し材ブロックを必要に応じて定置する可能性があること、並びに重量物を高所へ設置させるための転倒防止が必要なことなどから、これらの制約を考慮してブロックの把持方式をプッシュプル方式とした。ブロックの定置作業ではブロックの定置位置のズレ対策（定置精度の確保）や坑道の壁面付近での壁面との接触防止が課題となる。



(a) 下段部分定置作業　　(b) 上段部分定置作業

図 4.6-17　ブロック定置作業イメージ図

(e) 実寸大ブロックを対象とした施工速度の予備的検討

実際の処分事業において必要となる埋戻し材ブロックの施工速度に係る予備的検討を実施した。本検討では、竪置き・ブロック方式、パネル型の深成岩類の設計オプションを対象として、次の 2 棲類の埋戻し材ブロックを主要坑道に配置することを仮定した。

・ブロック A：幅 60cm×奥行 50cm×高さ 35cm
・ブロック B：幅 30cm×奥行 50cm×高さ 35cm

6 パネルで構成される処分場の主要坑道（掘削土量 33 万 m^3）の埋戻し期間を 2 年と設定して、必要となるブロックの施工速度を算出した。ブロック A、B の配置案から、主要坑道の奥行 4m 当たりに約 800 個の埋戻し材ブロックを設置することから、1 時間当たりの埋戻し材ブロックの施工個数、施工体積、ブロック 1 個当たりの施工時間は以下となる。

・1 時間当たりの埋戻し材ブロックの施工個数
　：114 個／（hr・パネル・施工班）（≒800 個／（4m・パネル・施工班）÷7hr）
・1 時間当たりの埋戻し材ブロックの施工体積
　：9m^3／（hr・パネル・施工班）（≒114 個／（hr・パネル・施行班）×ブロック体積）
・ブロック 1 個当たりの施工時間
　：32 秒／（個・パネル・施工班）（≒3600sec／hr÷114 個／（hr・パネル・施工班））

上記の検討結果（ブロック 1 個当たりの施工時間 32 秒）は、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下、「SKB」という。）が想定する埋戻し材ブロック 1 個当たりの定置時間 30 秒とほぼ同等であり、今後の研究開発における埋戻し材ブロックの施工装置の検討の際の一つの目安となる。

(f) 坑道壁面とブロック間の隙間処理の検討

埋戻し材ブロックは、定置後に残存する坑道内の隙間（坑道壁面とブロック間、隣接するブロ

ック間）をベントナイトの膨潤によって閉塞する（自己シール性）ことが期待されている。そこで、埋戻し材ブロックを想定した貧配合のベントナイト混合土（ベントナイト混合率 15、30%）の膨潤変形試験を実施し、膨潤変形に関するデータ（混合材料の影響、隙間充填部の密度や発生圧力）を取得した。

膨潤変形試験では、供試体の高さが有効粘土密度 1.1 Mg/m^3 以下のベントナイト混合土の最大膨潤変形率に与える影響を確認した。試験結果より、最大膨潤率は 30～40 %と低い値であるが、供試体高さ 5 mm 及び 25 mm において最大膨潤率は同程度であり、膨潤特性理論評価式が示す結果と同じ傾向を示していることから、本検討条件においては、供試体高さによる最大膨潤率への影響は少ないことが確認できた。なお、有効粘土密度 0.95、1.1 Mg/m^3、供試体高さ 25 mm では、限られた試験期間において膨潤率が定常化に至らなかったため、双曲線近似により最大膨潤率を求めた。

(g) ブロック工法による製造・施工プロセス管理手法に関する検討

2020 年度の検討では、製造段階と施工段階を対象として、製造・施工プロセス管理手法（案）を表形式で取り纏め、2021 年度にはその更新を行った。また、2021 年度には、それまでに実施した坑道壁面とブロック間の隙間処理の検討、及びブロックの施工（定置）に関する検討（製作装置・定置装置の概念検討）に基づき、新たに開発段階を対象とした次のプロセス管理（案）を示した。

・開発段階における埋戻し材ブロックの自己シール性に関する検討のプロセス管理（案）
・開発段階における埋戻し材ブロックの製作、定置装置の予備設計に関するプロセス管理（案）

(3) 本年度の実施内容

本年度は、膨潤変形に関するデータ（混合材料の影響、膨潤挙動、隙間充填部の密度や発生圧力）を拡充するために貧配合のベントナイト混合土を対象とした膨潤変形試験等を実施した。また、施工技術の選定に資する情報の整理として、ベントナイト系材料によるブロック製作の実績例を調査してまとめるとともに、施工可能な埋戻し材の構成材料の範囲やブロック寸法の設定手順案を提示した。更に、本年度の成果をもとに 2021 年度に作成した埋戻し材ブロックの製造・施工プロセス管理手法を更新した。

施工技術の選定に資する情報の整理の詳細については付録 2 に、製造・施工プロセス管理手法については 4.7.1 に記載する。

(a) 坑道壁面とブロック間の隙間処理の検討

(i) 目的と検討概要

埋戻し材ブロックの定置後に残存する坑道壁面とブロック間の隙間をベントナイトの膨潤変形により閉塞させるためには、事前に埋戻し材ブロックの自己シール性を評価して、許容される隙間の体積やブロックのベントナイト混合率を設定する必要がある。これまでの検討では現象把握のためのデータが不足しており、膨潤変形に関するデータ（混合材料の影響、膨潤挙動、隙間充填部の密度や発生圧力）の拡充が必要であった。そこで、膨潤変形に関するデータを拡充するために、貧配合のベントナイト混合土を対象とした膨潤変形試験等を実施した。

(ii) 模擬掘削土の最大粒径が最大膨潤率に与える影響

1) 試験方法

2021 年度の検討では、ケイ砂（最大粒径 2mm）を用いた場合の最大膨潤率に対する供試体高

さ（5 mm vs 25 mm）の影響が殆どないことを確認した。模擬掘削土として使用する玄武岩（コンクリート用砕砂）は最大粒径が 5 mm であり、既往の研究で使用されているケイ砂よりも最大粒径が大きい。試験における供試体高さは、最大粒径の 5 倍以上が必要であることが一般的であるため、最大粒径 5 mm の場合は供試体高さを 25 mm、最大粒径 2 mm の場合は供試体高さを 10 mm として、模擬掘削土の最大粒径が最大膨潤率に与える影響を確認した。また、試験後の溶出陽イオンを測定し、模擬掘削土の種類（玄武岩、ケイ砂）の違いによる最大膨潤率への影響も確認した。表 4.6-6 に膨潤変形試験の供試体の仕様を示す。図 4.6-18 に膨潤変形試験装置の概略図を示す。

表 4.6-6　膨潤変形試験の供試体仕様

項目	仕様		
供試体仕様	供試体寸法	ϕ60 mm×H25 mm、5 mm または 25 mm	
	初期含水比	ベントナイト：15% 玄武岩：85% 最大粒径 2mm、5mm	6.7% （成型圧力 40 MPa の最適含水比*）
	目標有効粘土密度	0.8、0.95、1.1 Mg/m^3	
	作製方法	静的締固め	
試験仕様	水質	蒸留水	
	上載荷重	9.8 kPa	

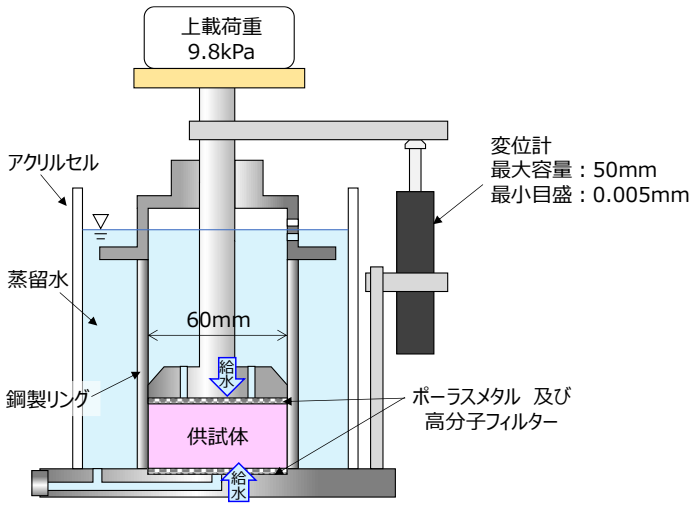


図 4.6-18　膨潤変形試験装置概略図

2) 試験結果

図 4.6-19 に 2021 年度のデータも含めて最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係を示す。膨潤特性理論評価式（Komine and Ogata, 2003 ; 2004）により推定される初期有効粘土密度と最大膨潤率の関係を、間隙水中のイオン濃度（n_0＝20、30、40 mol/m^3）ごとに示している。

最大膨潤率は 25～40%程度と低い値であるが、最大粒径 5 mm 及び 2 mm において最大膨潤率は同程度であり、同図に示した膨潤特性理論評価式が示す推定値と同じ傾向を示すことを確認した。一方で、ケイ砂を用いた条件の最大膨潤率の傾向と比べると、玄武岩を用いた条件ではやや低い値を示している。そこで、試験後の容器内残留水の水質分析を行ったところ、模擬掘削土を

玄武岩とした場合の間隙水中のイオン濃度n_0は 28.53～40.36 mol/m³、ケイ砂とした場合は 18.41～30.02 mol/m³ であり、玄武岩を用いた条件でやや低い最大膨潤率を示した理由の一つとして、イオン濃度による影響も考えられる。

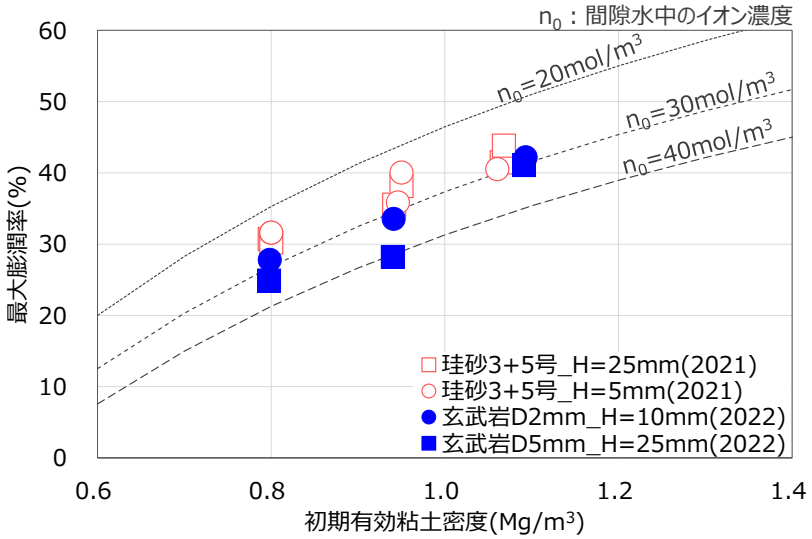


図 4.6-19　最大粒径の違いによる最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係

(iii) 膨潤変形の異方性

既往の膨潤変形試験（例えば、小峯・緒方, 1999；小峯・緒方, 2001；小峯ほか,　2007；田中・中村, 2005）では、水平方向を拘束して鉛直方向のみに膨潤変形させて最大膨潤率を求めている。しかし坑道内に定置された埋戻し材ブロックは、坑道壁面との間で鉛直・水平の二方向に膨潤変形することが想定されるため、ブロック製作時の加圧面と異なる方向への膨潤変形特性を把握する必要がある。そこで、①ブロック製作時の加圧方向の違いによる一次元膨潤変形試験、②二方向膨潤変形試験（鉛直・水平方向の二方向へ膨潤変形）の 2 つの試験を実施した。既往の研究結果との比較のために、以降の試験において模擬掘削土はケイ砂（3 号+5 号）を使用した。

1) 加圧方向の違いによる膨潤変形試験

a) 試験方法

表 4.6-7 に試験ケースの一覧を、図 4.6-20 に加圧方向と膨潤方向の組合せ状況を示す。本検討では、埋戻し材ブロック製作時の加圧方向が膨潤変形に与える影響を確認するために、一次元膨潤変形試験を実施した。試験装置は図 4.6-18 に示したものを使用した。

表 4.6-7　一次元膨潤変形試験ケース（加圧方向の違い）

膨潤変形方向	ベントナイト混合率（%）	目標有効粘土密度（Mg/m³）	目標乾燥密度（Mg/m³）	目標含水比（%）
加圧方向と同じ	100	1.1	1.1	実験室内保管含水比
		1.3	1.3	
加圧方向と異なる		1.1	1.1	
		1.3	1.3	
加圧方向と同じ	15	0.8	2.038	6.7
		1.1	2.275	6.7
加圧方向と異なる		0.8	2.038	6.7
		1.1	2.275	6.7

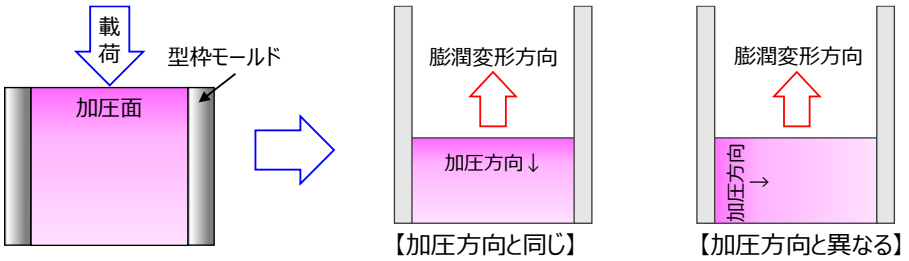


図 4.6-20　加圧方向と膨潤変形方向の組合せ

b) 試験結果

一例として図 4.6-21 にベントナイト混合率 15%の供試体作製時の加圧方向と変形方向の違いによる最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係を示す。ベントナイト混合率 100%、15%の両条件ともに、加圧方向の違いによる最大膨潤率への影響は確認されず、両方向ともに同程度の値を示した。このことから、一次元膨潤変形試験条件において、供試体作製時の加圧方向による最大膨潤率への影響はないことを確認した。

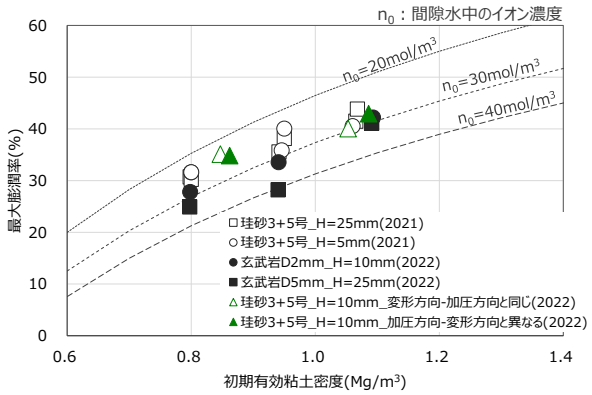


図 4.6-21　加圧方向の違いによる最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係
（ベントナイト混合率 15%）

2) 二方向膨潤変形試験

これまでに、鉛直・水平の二方向に膨潤変形した場合における膨潤変形量について試験や測定をした事例を見つけることができていない。そのため、本業務において二方向への膨潤変形を可能とする試験を実施し、二方向膨潤変形挙動及び膨潤率について確認した。

a) 試験方法

図 4.6-22 に二方向膨潤変形試験の装置の概略を示す。本業務で実施した二方向膨潤変形試験は、一次元膨潤変形試験と同様に一定の荷重を供試体に作用させた状態で給水し、鉛直方向及び水平方向に膨潤変形する変位量を測定する試験である。同図に示すように、鋼製の容器に鉛直及び水平方向の 2 箇所にピストンを設置して、両方向のピストンに取り付けた変位計で変形量を計測した。上載荷重についてはピストンの重量を考慮して水平方向と同等になるように設定し、水平方向の載荷には滑車を用いて一定荷重を載荷できる機構とした。給水は図 4.6-23 に示すように 4 方向から行った。

表 4.6-8 及び表 4.6-9 に供試体の仕様及び試験ケースを示す。二方向膨潤変形試験に使用する供試体は各辺 30 mm の立方体として作製した。

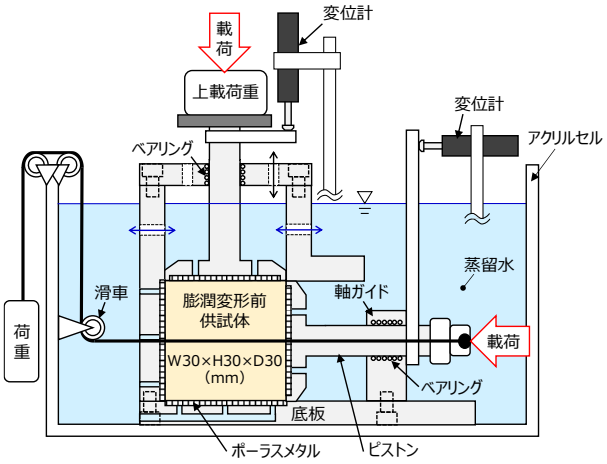


図 4.6-22　二方向膨潤変形試験装置概略図

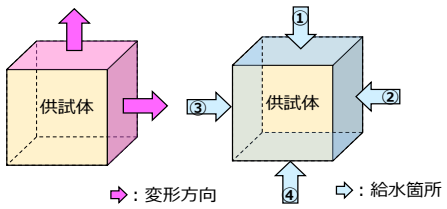


図 4.6-23　供試体の変形方向及び給水箇所

表 4.6-8　二方向膨潤変形試験の供試体仕様

項目	仕様	
供試体寸法	W30 mm×H30 mm×D30 mm	
ベントナイト混合率	15%	100%
模擬掘削土	ケイ砂(3 号+5 号)	－
載荷圧力	9.8kPa	19.6kPa
目標有効粘土密度	1.1 Mg/m^3	1.3 Mg/m^3
作製方法	1 層、静的締固め	

表 4.6-9　二方向膨潤変形試験ケース

変形方向	ベントナイト混合率（%）	目標有効粘土密度 (Mg/m³)	目標乾燥密度 (Mg/m³)	目標含水比 (%)
U：鉛直変位 S：水平変位	15	1.1	2.275	6.7
U：鉛直変位 S：水平変位	100	1.3	1.3	実験室内保管含水比

b) 試験結果

図 4.6-24 にベントナイト混合率 15%の場合の二方向膨潤変形試験による鉛直・水平方向への膨潤率の経時変化を示す。併せて図 4.6-25 に二方向膨潤変形試験後の供試体状況を示す。図 4.6-24 より、水平方向への膨潤率よりも鉛直方向への膨潤率の方が約 1.6 倍大きくなる結果が得られた。図 4.6-26 に最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係を示す。比較として、一次元膨潤変形試験により得られた最大膨潤率も記載した。鉛直方向への膨潤率は一次元膨潤変形試験による結果と同程度であり、水平方向はそれよりも小さい膨潤率であった。ただし本試験の試験点数に制約があるため（再現性の確認をしていないため）、再現性の確認を含めた試験方法や条件の設定など、更なる検討が必要である。

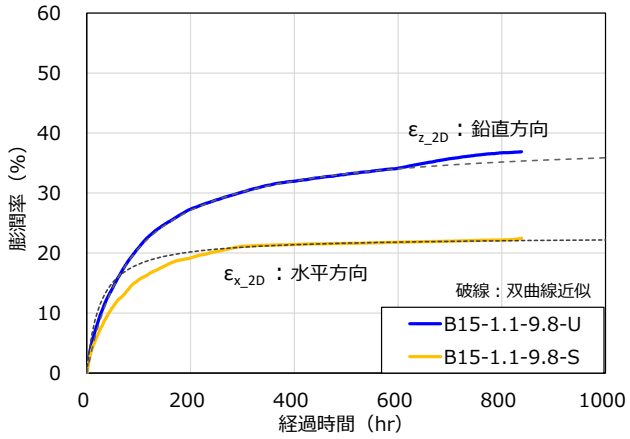


図 4.6-24　二方向膨潤変形試験による膨潤率の経時変化（ベントナイト 15%）

(a) 側面側　　(b) 背面側

図 4.6-25　二方向膨潤変形試験後の供試体状況

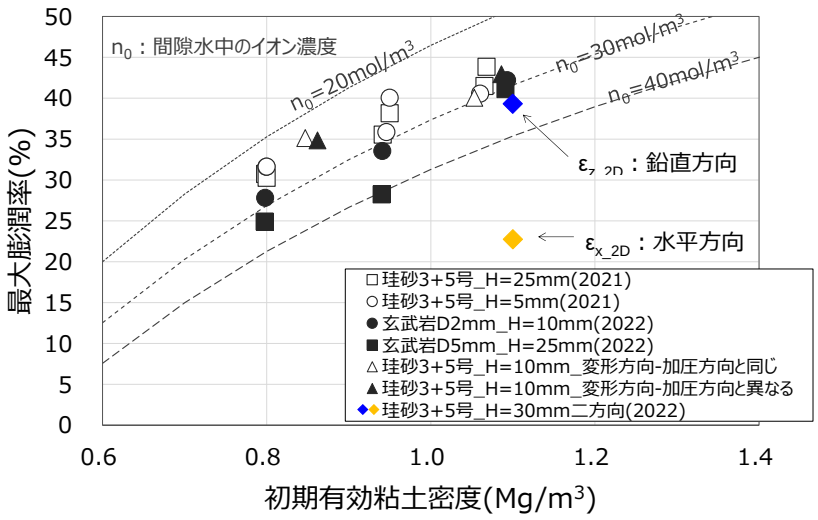


図 4.6-26　二方向膨潤変形試験における最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係
（ベントナイト 15%、一次元膨潤変形試験結果との比較）

(iv) 自己シール性評価手法の適用性（自己シール性試験）

NUMO 包括的技術報告書（2021）では、緩衝材ブロックの自己シール性に対する指標及び基準として、緩衝材の膨潤量が施工時にできる隙間体積の 2 倍以上となることを設定している（式 4.6-1）。

$$\varepsilon_v \geq 2\theta \qquad \text{式 4.6-1}$$

ε_v：最大膨潤率（%）
θ：隙間体積比（隙間体積/ブロック初期体積）

スウェーデンの処分実施主体である SKB やフィンランドの地層処分実施主体であるポシヴァ社（以下、「POSIVA」という。）では、ベントナイト系材料の自己シール性に関する研究が先行して行われており、自己シール性を「埋戻し材と坑道壁面の隙間部分をベントナイトの膨潤変形により充填すること」としている。SKB と POSIVA では、埋戻し材と坑道壁面との間にはペレットを充填するとされており、自己シール性の達成のための埋戻し材への要求性能を平均透水係数 10^{-10} m/s、膨潤圧を 100 kPa 以上と設定している（POSIVA・SKB, 2017）。NUMO 包括的技術報告書（2021）の基準（膨潤量が隙間幅の 2 倍以上）は緩衝材が対象であり、埋戻し材へ直接適用することはできない。そこで、自己シール性試験を実施し、隙間充填後の密度、発生圧力、透水係数の推定を行い、その関係性について整理した。

1) 試験方法

図 4.6-27 に、本業務において使用した自己シール性試験装置の概略図を示す。自己シール性試験装置は既往の研究（小峯ほか, 2009）を参考に、一次元膨潤変形試験と同様の試験装置を用いて、隙間充填後に発生する圧力（以下、「発生圧力」という。）の計測のためにフレーム及びロードセルを設置した。隙間は供試体の上部に設定し、供試体が膨潤変形しピストンに接触することにより発生圧力を計測した。給水は供試体上部のみから行い、下部から排気できるように供試体

上下部にポーラスメタル及び高分子フィルターを設置した。

表 4.6-10 に自己シール性試験に用いた供試体の仕様を、表 4.6-11 に試験ケースを示す。表 4.6-11 に示した隙間幅の設定は、NUMO 包括的技術報告書（2021）に示されている式 4.6-1 を参照して、表 4.6-12 の値より求めた。なお、隙間幅の設定に用いた膨潤率は、既往の試験結果（原子力機構・原環センター, 2021）を用いた。また、比較としてベントナイト 100%のケースも実施することとして、目標有効粘土密度が同程度となるように隙間幅を設定している。

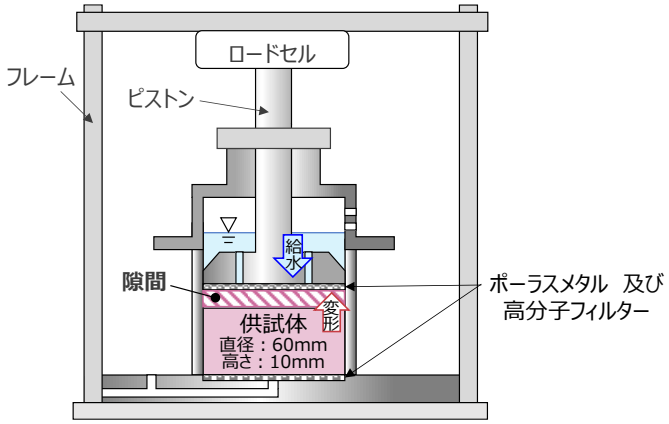


図 4.6-27　自己シール性試験装置の概略図

表 4.6-10　自己シール性試験の供試体仕様

項目		仕様
供試体仕様	供試体寸法	ϕ60×H10 mm
	ベントナイト混合率	15、100%
	模擬掘削土	ケイ砂（3 号+5 号）
	目標有効粘土密度	1.1 Mg/m^3
	隙間	1～7 mm
	作製方法	1 層、静的締固め

表 4.6-11　自己シール性試験ケース

ベントナイト混合率（%）	隙間設定	初期有効粘土密度（Mg/m^3）	隙間幅（mm）	隙間充填後平均有効粘土密度（Mg/m^3）
15	$\varepsilon_v \geq 4\theta$	1.1	1	0.821
	$\varepsilon_v \geq 2\theta$		2	0.655
	$\varepsilon_v \geq 1.3\theta$		3	0.545
100	$\varepsilon_v \geq 2.1\theta$		7	0.647

表 4.6-12　隙間設定条件

ベントナイト混合率（%）	隙間設定	ε_v（膨潤率（%））	θ（隙間体積比＝隙間幅／供試体高さ）
15	$\varepsilon_v \geq 4\theta$	40	10
	$\varepsilon_v \geq 2\theta$	40	20
	$\varepsilon_v \geq 1.3\theta$	40	30
100	$\varepsilon_v \geq 2.1\theta$	150	70

2) 試験結果

a) 隙間充填後の発生応力及び有効粘土密度

図 4.6-28 に隙間充填後の発生圧力の経時変化を示す。隙間幅が広くなるほど発生圧力の発現に時間を要している。また、隙間幅が広くなるほど発生圧力は低くなる傾向を示した。

隙間充填後の発生圧力と隙間充填後の有効粘土密度の関係を図 4.6-29 に示す。隙間充填後の有効粘土密度が大きいほど発生圧力は大きくなり、膨潤特性理論評価式による計算結果と同様な傾向を示した。また隙間幅の設定が同じ条件では、隙間充填後の有効粘土密度も同程度となることを確認した。

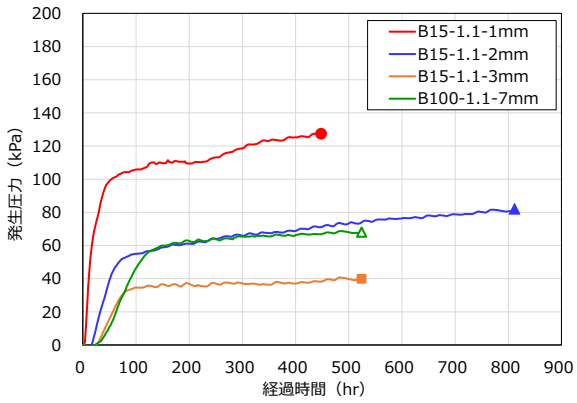


図 4.6-28　隙間充填後発生圧力の経時変化

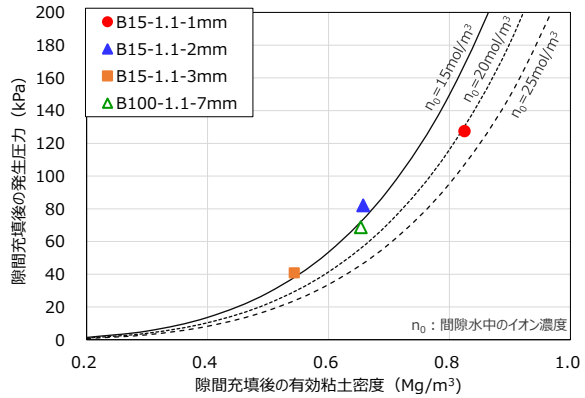


図 4.6-29　隙間充填後の発生圧力と隙間充填後の有効粘土密密度の関係

b) 自己シール性試験後の供試体密度及び含水比分布

図 4.6-30 に示すように、自己シール性試験後に供試体を変形箇所上面から同一高さでカットした（端数分は高さを実測）。カットした部分の含水比及び重量から乾燥密度を算出し、算出した乾燥密度から透水係数を推定した。試験結果の一例として、図 4.6-31 に隙間充填後の高さが 13 mm のベントナイト 15%の結果を示す。試験体底面からの距離が離れるにつれて乾燥密度が低くなり、含水比が高くなる傾向が確認できた。

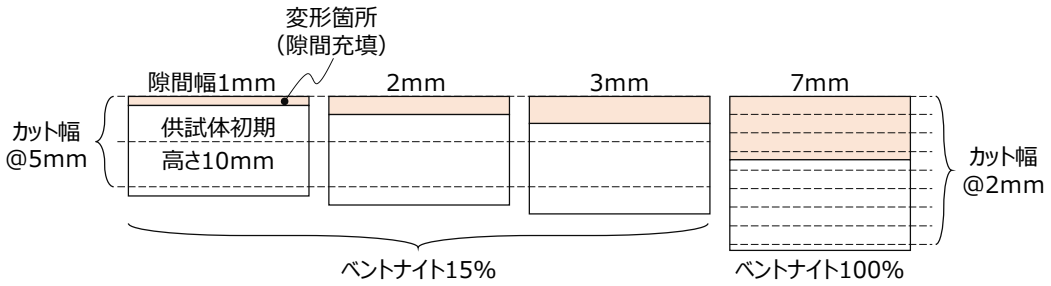


図 4.6-30　隙間充填後供試体カット幅

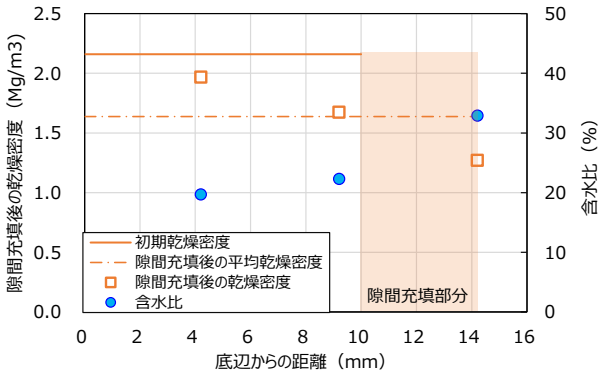


図 4.6-31　供試体底面からの距離と隙間充填後の乾燥密度及び含水比の分布
（ベントナイト 15%-隙間幅 3mm）

c) 自己シール性試験後の透水係数

自己シール性試験後の供試体の乾燥密度から有効粘土密度を換算し、透水係数の推定を行った。図 4.6-32 に隙間充填後の高さが 13 mm のベントナイト混合率 15%の結果を示す。透水係数の推定値は、既往の研究結果（原子力機構・原環センター, 2020；2021；菊池・棚井, 2005）の値から近似式で求めた。これより推定した透水係数は 10^{-12}～10^{-10} m/sec オーダーであった。自己シール後の供試体全体の平均有効粘土密度は 0.515～0.624 Mg/m^3、透水係数は 3.42×10^{-11}～1.70×10^{-11} m/s であった。

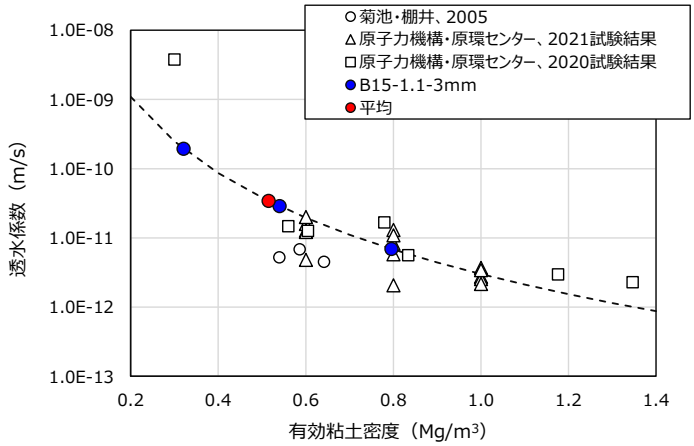


図 4.6-32　有効粘土密度と透水係数の関係（推定値）
（ベントナイト 15%-隙間幅 3mm）

(4) まとめと今後の課題

(a) 埋戻し材ブロックの製作に関する検討

埋戻し材ブロックの製作に関する検討において、埋戻し材ブロックを想定した貧配合ベントナイト混合土（ベントナイト混合率 15%、30%）を用いた静的締固め試験及び透水試験、小型ブロック（30 cm×30 cm×10 cm）の製作試験を実施した。これらの結果から、埋戻し材ブロックの製作のためのデータや知見が整理されつつある。

ただし、材料の構成、密度、ブロック寸法など、種々の条件を網羅する広範な基礎データの取得までには至っていない。そこで、小型モールドによる静的締固め試験を実施して更なる基礎データ（例えば、模擬掘削土の粒度分布、ベントナイトの種類等をパラメータとした静的締固め試験）を拡充し、ブロックの製作が可能な材料構成、密度等のデータを蓄積していく必要がある。また、ブロックサイズを小型、中型、大型とスケールアップした場合の製作性の確認や製作方法の確立が必要である。

(b) 埋戻し材ブロックの施工（定置）に関する検討

埋戻し材ブロックの製作装置や定置装置を具体化し、これらの装置を用いた作業手順（ハンドリングフロー）を作成した。また、埋戻し材ブロックの寸法を仮定して、埋戻し材ブロック定置装置の概念検討を行った。

今後は実用化に向けた実証的な試験や検討を進め、ブロックの運搬、保管、定置作業における温度・湿度対策、ブロックの定置時に生じる隙間（坑道壁面とブロック間、隣接するブロック間）への対処法、ブロック定置装置の開発等の実施が望まれる。

(c) 自己シール性に関する検討

膨潤特性理論評価式を用いた自己シール性の評価については、実際の挙動把握を目的として、膨潤挙動に関するデータ（混合材料の影響、膨潤挙動、隙間充填部の密度や発生圧力）の取得に向けた各種の試験を実施した。ただし、膨潤挙動の把握のために実施した二方向変形試験では、試験ケースが少なく再現性の確認ができなかったため、更なる試験や検討が必要である。また、埋戻し材ブロックの自己シール性については、今後も継続して検討を行うことが必要である。

以上のように、現時点では、貧配合ベントナイト混合土（ベントナイト混合率 15%）の埋戻し材ブロックの膨潤によって処分坑道の坑壁とブロックとの隙間をシールできるか否かを評価する

ためのデータや知見は十分とは言えず、今後の更なる検討や知見の拡充が必要である。

なお、隙間のシールを容易にする対策としては、埋戻し材ブロックと坑道壁面との隙間を小さくする、埋戻し材ブロック全体または隙間に近い埋戻し材ブロックのベントナイト混合率を上げる、隙間にベントナイトペレットを充填する（SKB・POSIVA で採用）等のオプションを措定し得るが、これらのオプションで要求性能を保証するためには、試験や実証的な研究を進めて設計仕様を具体化していく必要がある。

(d) 埋戻し材ブロック工法による製造・施工プロセス管理手法に関する検討

埋戻し材ブロック工法による製造・施工プロセス管理手法に関する検討では、製造段階と施工段階に加えて、開発段階における埋戻し材ブロックの自己シール性に関する検討及び埋戻し材ブロックの製作装置、定置装置の予備設計に関するプロセス管理（案）を作成した。

今後は、埋戻し材ブロックの開発段階で実施される各種試験の結果や埋戻し材ブロックの製作装置、定置装置の予備設計に関するデータを収集して取り込むことで、埋戻し材ブロック工法における製造・施工プロセス管理手法の更新を続けていく必要がある。

4.7 埋戻し施工技術の品質管理方法の検討

4.7.1 製造・施工プロセス管理手法の素案の整備

施工後の埋戻し材の施工品質の確認のために、砂置換法などの原位置でのサンプリングによる乾燥密度の確認といった方法が考えられるが、本事業では、実際の坑道の埋戻し施工における原位置での作業負荷の低減等を念頭に、施工した埋戻し材の質量と体積から算出されるかさ密度で最終的な品質確認を行うことを目指している。そのような品質管理方法の具体化に向けて、施工試験等をとおして製造及び施工時の管理項目の抽出及び管理方法の検討を進めてきた。

前年度までに作成した各施工方法における製造・施工プロセス管理手法の素案に対して、本年度に実施した施工試験や要素試験の結果から得られた知見を反映したプロセス管理手法の素案を表 4.7-1～表 4.7-8 に示す。

表 4.7-1　転圧工法及び吹付け工法における埋戻し材の製造プロセス管理手法の素案

プロセス	管理項目	管理指標 （管理の判断に用いる情報）	管理方法（管理の判断の方法）の案
材料調達	・ 原材料の品質	・ モンモリロナイト含有率 ・ 土粒子密度 ・ 掘削土の化学成分 ・ 掘削土の最大粒径 ・ 掘削土の粒度分布	・ 材料ごとの品質保証書など（砕石・砕砂などは採取日が異なるたびに管理）
一時貯蔵	・ 骨材の含水状況	・ 骨材の含水比 ・ 一時貯蔵場所の湿度	・ 骨材の定期的な含水比試験 ・ 貯蔵場所の湿度測定
混錬	・ 配合 ・ 混練仕様 ・ 材料の均質性	・ ベントナイトの含水比 ・ 掘削土の含水比 ・ ベントナイトの混合率 ・ 加水量 ・ 混錬手順 ・ 混錬時間	・ １バッチ当たりの材料の投入質量で管理 ・ 事前に設定した仕様を遵守 ・ フレコンごとの質量を確認 ・ バッチごとの含水比が許容範囲であることを確認 ・ バッチごとの粒度分布が許容範囲であることを確認
貯蔵	・ 保管方法	・ 埋戻し材の保管の仕様	・ 保管袋の識別番号と製造記録（製造日、配合、材料の湿潤質量、含水比、品質保証書、試験結果、保管期間）の関連づけを確認 ・ 埋戻し材の圧密を避けるため、フレコンの最大積み重ね数を管理 ・ 製造記録ごとの材料保管状況を確認

表 4.7-2　撒出し・転圧工法における施工プロセス管理の素案

プロセス	管理項目	管理指標 （管理の判断に用いる情報）	管理方法（管理の判断の方法）の案
埋戻し材の搬入	・ 材料搬入	・ 埋戻し材の含水比	・ 配合など製造記録と施工仕様の一致を確認 ・ 製造記録及びサンプルの試験結果が含水比、粒度分布の許容範囲内であることを確認
撒出し	・ 撒出し仕様	・ 撒出し厚さ ・ 撒出し質量	・ 3D スキャナなどによる各層の撒出し厚さの測定 ・ 撒出し質量は、使用したフレコンの質量を確認 ・ 材料の製造記録で湿潤質量と含水比を確認 ・ 湿潤質量の計量は回収のたびに行い、含水比はサンプルの含水比試験結果に基づき確認 ・ 回収漏れがないように、目視、画像などで確認
転圧	・ 転圧仕様	・ 転圧回数 ・ 出来形（体積、仕上がり高さ）	・ 転圧機械の仕様を確認 ・ 転圧回数を施工機械の軌跡などで管理。 ・ 3D スキャナなどで各層の出来形（体積）を測定 ・ 転圧層の不陸が許容範囲であることを確認
品質確認	・ かさ密度	・ 出来形（体積） ・ かさ密度（乾燥密度）	・ 転圧した埋戻し材の乾燥質量を出来形（体積）で除した値からかさ密度を算出

表 4.7-3　吹付け工法における施工プロセス管理の素案

プロセス	管理項目	管理指標 （管理の判断に用いる情報）	管理方法（管理の判断の方法）の案
埋戻し材の搬入	・材料搬入	・埋戻し材保管袋の識別番号 ・埋戻し材の含水比 ・団粒化の抑制	・配合など製造記録と施工仕様の一致を確認 ・製造記録及びサンプルの試験結果が含水比、粒度分布の許容範囲内であることを確認 ・最大積み重ね数を管理
埋戻し材の供給	・使用材料	・使用した埋戻し材の湿潤質量、含水比	・材料の製造記録で湿潤質量と含水比を確認
吹付け	・吹付け仕様	・吹付け圧力 ・材料供給量 ・ノズルワーク ・出来形（体積）	・吹付け機械の仕様を確認 ・3D スキャナなどで吹付け層の出来形（体積）を測定
材料回収及び目詰まり対応	・吹付け仕様	・材料の回収の頻度と手順、目詰まり点検頻度と対応手順	・頻度、手順は目視、画像などで確認
	・リバウンドした埋戻し材	・リバウンドした埋戻し材の湿潤質量、含水比、粒度分布	・リバウンドした埋戻し材の質量計量、含水比試験、粒度試験
品質確認	・かさ密度	・付着材（開封材料と回収材料の差）の乾燥質量 ・出来形（体積） ・かさ密度	・付着材の乾燥質量を出来形（体積）で除した値からかさ密度を算出

表 4.7-4　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理の素案（製造段階）

プロセス	管理項目	管理指標 （管理の判断に用いる情報）	管理方法（管理の判断の方法）の案
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	・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
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）
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	・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
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
（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
埋戻し材混錬	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
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 4.7-5　スクリュー工法における製造・施工プロセス管理の素案（施工段階）

プロセス	管理項目	管理指標 （管理の判断に用いる情報）	管理方法（管理の判断の方法）の案
施工段階全体の管理	埋戻し材品質 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）
埋戻し材運搬	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
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
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)
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
かさ密度	出来形／埋戻し材料の質量		・出来形を計測し、充填体積と投入埋戻し材重量からかさ密度を計算
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）
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 4.7-6　ブロック工法における製造・施工プロセス管理手法の素案（製造段階）

プロセス	管理項目	管理指標 （管理の判断に用いる情報）	管理方法（管理の判断の方法）の案
材料の計量準備	懸濁物質量、混合水中のイオン濃度等	試験結果が所定の基準範囲内となること	・各種試験による確認 ・R&D段階で例えば上水道水を用いた場合に設計要件に影響がないことが確認されていれば、管理項目から除外することも可、と考えられる
	ベントナイトの含水比	―	・含水比試験（JIS A 1203） ・混合時の加水量算出用
	掘削土の含水比	―	・含水比試験（JIS A 1203） ・混合時の加水量算出用
材料の計量	混合水（加水量）の計量値	計量値が所定範囲内となること	・計量装置による測定、記録による確認
	ベントナイトの計量値	計量値が所定範囲内となること	・計量装置による測定、記録による確認
	掘削土の計量値	計量値が所定範囲内となること	・計量装置による測定、記録による確認
材料の混合・加水	材料混合プラントの維持管理具合	プラントが適切に維持管理されていること	・プラントの定期点検、記録による確認
	混合方法（材料投入手順、加水方法、混合手法、混合時間等）プラント仕様	規定した混合がなされていること	・混合規定の目視、記録による確認 ・R&D段階で混合に関する規定（混合方法、プラント仕様）を決定しておく
埋戻し材（混合土）の排出	ベントナイト混合率	所定範囲内の細粒分含有率またはメチレンブルー吸着量となること	・細粒分含有率（JIS A 1223） ・メチレンブルー吸着量試験（JIS Z 2451）
	含水比	含水比が所定の基準範囲内となること	・含水比試験（JIS A 1203）
	ベントナイト混合率の平均値、範囲 含水比の平均値、範囲	混合率、含水比のバラツキが所定範囲内に収まること	・統計的手法による確認
埋戻し材の保管（大型土のう等）	例えば、大型土のうに保管した混合土の質量	保管中に混合土の含水比変化が所定の基準範囲となること	・計量装置による測定、記録による確認
埋戻し材の運搬（製作工場へ）	運搬方法	規定した運搬方法であること	・運搬方法について目視、記録による確認 ・R&D段階で混合土の分離、圧密等が生じない運搬方法を規定しておく

表 4.7-7　ブロック工法における製造・施工プロセス管理手法の素案（製造段階）

プロセス	管理項目	管理指標 （管理の判断に用いる情報）	管理方法（管理の判断の方法）の案
圧縮成型機、金型の点検、清掃	圧縮成型機の維持管理具合	圧縮成型機が適切に維持管理されていること	・圧縮成型機の定期点検、記録による確認 ・点検は ITV(監視カメラ)または、目視による
	金型寸法、金型の維持管理具合	金型の寸法が所定の基準範囲内となること、金型が適切に維持管理されていること	・金型寸法の測定と記録による確認、金型の定期点検、記録による確認、金型寸法測定は、ゲージ方式または、レーザ距離計による、金型重量測定は、ロードセル方式による
金型への材料投入量の計量	材料（混合土）の計量値	計量値が所定範囲内となること	・計量装置による測定、記録による確認 ・材料投入はフィーダー方式とし、材料投入重量を計量する
金型への材料投入、敷き均し	敷均し高さ	敷均し面が平滑で、所定の基準範囲内となること	・敷均し面の高さの測定、記録による確認 ・敷均し機能としてスクレーパ方式を採用し、敷均し面の凹凸測定を行う
圧縮成型、圧縮保持	圧縮成型機の設定値（圧縮成型圧力、圧縮時間、圧縮速度、圧縮保持時間）	圧縮成型機の設定値が所定の基準範囲内となること	・圧縮成型機の設定値について目視及び測定、記録による確認、圧縮速度、圧縮保持時間は、脱気が十分にできる速度を規定する
金型からブロックの脱型	脱型方法、脱型状態	規定した脱型状態であること	・脱型状態について目視、記録による確認 ・脱型は押し出し方式による、脱型毎に金型を洗浄
ブロックのかさ密度、外観の確認	ブロック寸法、ブロック質量	かさ密度が所定の基準範囲内となること	・ブロック寸法、質量の測定、材料の含水比から、かさ密度（乾燥密度）を算出し、確認 ・R&D 段階で例えば、ブロック内に生じる密度差等を把握しておき、設計要件を満たすブロックのかさ密度の基準範囲を規定しておく
	ひび割れ、破損の有無	有意なひび割れ、破損がないこと（基準範囲内のひび割れ、破損）	・ひび割れ、破損の有無について目視、記録による確認 ・R&D 段階で、設計要件を満たす管理指標・基準を決定しておく

表 4.7-8　ブロック工法における製造・施工プロセス管理手法の素案（施工段階）

プロセス	管理項目	管理指標 （管理の判断に用いる情報）	管理方法（管理の判断の方法）の案
ブロックの運搬	運搬方法	規定した運搬方法であること	・運搬方法の目視、記録による確認
梱包材の取り外し	ひび割れ、破損の有無	有意なひび割れ、破損がないこと （基準範囲内のひび割れ、破損であること）	・ひび割れ、破損の有無について目視、記録による確認
ブロックの定置	ブロック間の隙間長、ブロック個数（質量）、坑道壁面との距離	ブロックの定置位置が所定の基準範囲内となること	・目視及び測量機器による測定、記録による確認 一例として、プッシュプルの把持方式であるフォークリフト方式によるブロックの定置装置を検討（遠隔制御仕様として、カメラ、ライトを付帯） フォークリフト方式を前提とした場合に、想定される施工精度から、ブロック相互間の隙間を 10mm、坑道壁面との距離 100mm 以下の 50mm と仮設定 ブロックの定置位置（配置）は、高さ方向に千鳥配置、坑道軸方向に対し、ブロック断面毎に千鳥配置と仮設定
	単位容積当たりのブロック個数(質量)	かさ密度が所定の基準範囲内となること	・坑道容積、定置したブロックの質量（定置個数から算出)、ブロックの含水比から、かさ密度を算出、記録よる確認 上記のフォークリフト方式では、保持したブロックの重量測定用ロードセル、定置位置測定用のレーザ距離計を付帯） 定置装置の制御、定置したブロックの測量等を目的とした移動式制御機の導入を想定し、ブロックの定置位置を 3 次元計測器で計測することを検討
ブロックと坑道壁面との隙間処理	隙間処理方法によるため、未定 例えば、単位容積あたりの隙間処理材の質量	規定した隙間処理方法であること	・隙間処理方法の記録による確認 （隙間処理方法を今後検討し、ブラッシュアップ）
	単位容積あたりの埋戻し材の質量 （ブロック+例えば、ベントナイトペレット等の隙間処理材を含む質量)	かさ密度が所定の基準範囲内となること	・坑道容積、埋戻し材の質量、材料含水比から、かさ密度（乾燥密度）を算出

4.7.2 3D 計測によるかさ密度管理

(1) 転圧工法

撒出し・転圧を行った各層の埋戻し材のかさ密度は、撒き出した埋戻し材の乾燥質量を埋戻し材の出来形の体積で除して求める。事前にフレコンバッグごとに埋戻し材の質量と含水比を測定しておき、1 層ごとに数体のフレコンバッグから埋戻し材を撒き出した。撒出し厚さが 250 mm になった時点で余った埋戻し材の質量を測定して、フレコンバッグから出した埋戻し材の乾燥質量と余った埋戻し材の乾燥質量の差を撒き出した埋戻し材の乾燥質量とした。各層の転圧後には、3D スキャナによる形状計測を実施して出来形の体積を求めた。形状計測結果の例として、2022 年度の基盤層の転圧完了から 1 層目の転圧完了までの形状を図 4.7-1 に示す。

転圧施工後の埋戻し材のかさ密度の算出結果を表 4.7-9 に示す。表には、砂置換法で求めた乾燥密度の平均値も併せて示した。表内の「転圧層 No.」は、転圧層の番号を表しており、1-3 は転圧層 No.1 から No.3 までの累積値であることを表す。撒き出した埋戻し材の乾燥質量、出来形体積の合計は、それぞれ 15,666 kg、7.5 m^3 であり、砂置換法で求めた乾燥密度の平均値に対するかさ密度の誤差は、＋2.3%～＋4.7%であった。砂置換法により求めた乾燥密度に比べて 3D 計測によるかさ密度が若干大きめに算出された要因としては、模擬坑道内への材料の撒き出し時のロスや含水比のばらつきなどが考えられる。そのため、埋戻し材の施工品質をかさ密度で管理するためには、撒き出した埋戻し材の質量及び含水比の誤差を低減するための方策を検討する必要がある。

(a) 基盤層転圧完了　　(b) 1 層目の撒出し完了　　(c) 1 層目の転圧完了

図 4.7-1　3D スキャナによる出来形計測（転圧工法）

表 4.7-9　かさ密度と砂置換法による密度測定結果の比較

転圧層 No.	かさ密度 (Mg/m^3)	砂置換乾燥密度 (Mg/m^3)	差 (Mg/m^3)	誤差 (%)
1	2.085	2.011	0.074	3.5
1-2	2.047	2.000	0.046	2.3
1-3	2.037	1.980	0.057	2.8
1-4	2.080	1.983	0.097	4.7

備考）転圧層 No.の 1-3 は 1 層～3 層の累積値を示す。誤差は砂置換法で求めた乾燥密度を基準とした。

(2) 吹付け工法（高密度）

吹付け工法（高密度）により施工した埋戻し材のかさ密度は、付着材の乾燥質量を 3D スキャナ測量で取得した吹付け体積で除して求める。付着材の乾燥質量は、材料供給機への総材料投入質量からリバウンド材およびホース内付着量の質量を差し引いて算定する（今回の試験ではホース内付着は観察されなかった）。乾燥質量への換算は、材料供給機に投入した材料については、投入直前に測定した埋戻し材の含水比を用い、リバウンド材については、別途（リバウンド材の粒度試験時に）測定した含水比を用い、それぞれ乾燥質量に換算してから差し引いた。

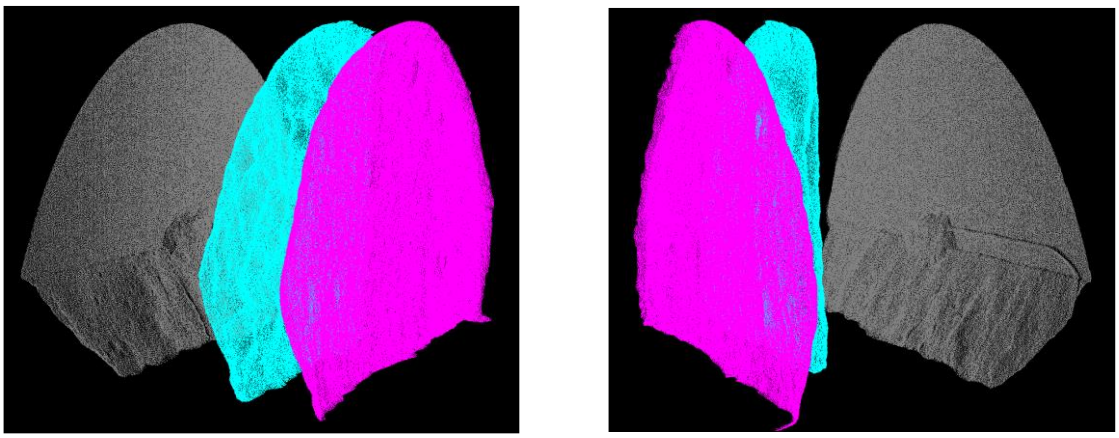
3D スキャナによる体積測定は、各ケースの吹付け完了後に、3D スキャナによる吹付け形状（体積）の測定を行い、直前に施工したケースの施工完了時の体積測定結果との差分により求めた。使用した 3D スキャナの仕様を表 4.7-10 に、測定した 3D 計測画像の例を図 4.7-2 に示す。3D スキャナは、5mm の精度で測定できる機器を使用した。

3D 計測によって算出した各ケースのかさ密度を表 4.7-11 に示す。同表には、かさ密度（A）のほかに、シリコーンオイル法によって求めた各ケースの乾燥密度の平均値（B）及び両者の誤差を併記している。なお、シリコーンオイル法は、JIS に規定されているパラフィン法よりも小さな値を示す傾向があることを確認している。（原環センター，2020）

3D 計測によって算出したかさ密度は、シリコーンオイル法によって測定した乾燥密度に対して +0.016 Mg/m^3～+0.113 Mg/m^3、比率にして+0.8 %～+5.6 %であった。

表 4.7-10　3D スキャナの仕様（吹付け工法（高密度））

最長測定距離（m）	800 m
最短測定距離（m）	0.5 m
精度	5 mm
計測時間	45 秒
計測範囲	鉛直方向：100°（+60°、－40°） 水平方向：360°
レーザークラス	クラス 1（アイセーフ）
レーザー波長	1,550 nm



(a) 左斜め前より　　(b) 右斜め前より

図 4.7-2　3D 計測画像（点群データ）例

（灰色：妻壁、水色：ケース 5-1 施工後、桃色：ケース 7-5 施工後（最終仕上がり面））

表 4.7-11　かさ密度とシリコーンオイル法による乾燥密度測定結果の比較
（吹付け工法（高密度））

ケース名	かさ密度(A) (Mg/m³)	シリコーンオイル法 乾燥密度(B) (Mg/m³)	誤差（A－B） (Mg/m³)	誤差の比率 (%)
1	2.022	1.952	0.070	3.5
3-1	1.988	1.972	0.016	0.8
3-2	2.039	1.968	0.071	3.5
4-1	2.075	1.978	0.097	4.7
4-2	2.005	1.968	0.037	1.8
5-1	2.059	1.951	0.108	5.2
5-2	2.087	1.992	0.095	4.6
6-1	2.032	1.953	0.079	3.9
6-2	2.082	1.975	0.107	5.1
7-1	2.004	1.928	0.076	3.8
7-2	2.011	1.923	0.087	4.3
7-3	2.002	1.906	0.096	4.8
7-4	2.018	1.935	0.083	4.1
7-5	2.028	1.914	0.113	5.6

(3) まとめ

埋戻し材の品質管理方法の一つとして 3D 計測によるかさ密度管理の適用性を検討するため、実規模実証試験において埋戻し材の出来形の 3D 計測を実施してかさ密度を算出した。転圧工法では既往の品質管理方法である砂置換法に対して＋2.3%～＋4.7%の差、吹付け工法では既往の品質管理方法であるシリコーンオイル法に対して+0.8 %～+5.6 %の差であった。

今後、更にかさ密度管理の精度を向上させるためには、3D 計測自体の精度向上に加えて、使用した埋戻し材の質量及び含水比の測定精度の向上が必要である。

4.7.3 非破壊検査手法の検討

本事業では、埋戻し材の施工品質を 3D 計測によるかさ密度（乾燥密度）で管理することを目指しているが、施工中に原位置作業の負担が大きくない非破壊検査による計測が可能であれば、かさ密度管理方法を補完することができる。そのため、転圧施工試験で使用した埋戻し材（砕石・砕砂を含むベントナイト混合土）を用いた要素試験を行い、砕石を含む埋戻し材の乾燥密度測定に対する非破壊検査技術の適用性について検討した。

(1) 非破壊検査技術の概要及び試験方法

(a) 非破壊検査技術の概要

非破壊検査技術として、RI 法（散乱型 RI 計器）、衝撃加速度法（衝撃加速度試験装置を用いた方法）、キャスポルを用いた方法（以下「キャスポル」という）を抽出した（図 4.7-3）。

RI 法は、γ線・中性子線を RI 計器で読み取り、γ線で密度計測、中性子線で含水量計測を行う方法である。測定時間は短く、高速道路建設などの幅広い分野で利用されている（例えば、米澤ほか, 2019）。RI 計器には散乱型と透過型があり、このうち非破壊検査法に該当するのは散乱型

である。RI 機器の測定範囲は深さ 0.16m～0.2m である。RI 機器の適用範囲は、礫率（粒径 2.0mm 以上の割合）が 60%未満または細粒分（粒径 0.075mm 以下の割合）が 10%以上を満たす埋戻し材である。

衝撃加速度法は、ランマを一定の高さから地盤上に自由落下させた際に得られる衝撃加速度を測定して乾燥密度を算出する方法である（寒地地盤チーム, 2021）。衝撃加速度と乾燥密度の関係は、事前に室内試験（突固め試験）で求める。ランマ底面の形状は半球であり、測定器の操作が簡単で、測定時間は短い。試験に反力を必要とせず狭隘空間でも使用できる。乾燥密度計測における避けられないばらつきを考慮して、測定点数は 10 点と多く、また、測定結果の上限・下限の補正が行われる。衝撃加速度法の測定範囲は面積 1.0m²（幅 1.0×長さ 1.0m）、深さ 0.12m である。衝撃加速度法の適用範囲は砂質土（細粒分が 50%でかつ粒径 2.0mm 以下のもの）である。

キャスポルは、衝撃加速度試験で用いる機器（衝撃加速度測定装置）と同様の測定機能をもつ機器である（近畿技術事務所, 2005）。ただし、その目的は地盤の強度の測定（CBR 値、K30 値、qc 値など）であり、乾燥密度の測定に係る手順は整備されていない。本試験では、衝撃加速度試験法の手順を参考として乾燥密度の測定を試みる。キャスポルの地盤強度測定の測定範囲は、φ0.5m×深さ 0.1m である。キャスポルの地盤強度測定の適用範囲は、最大粒径 37.5mm 以下、粒径 10mm 以上が 30%未満の地盤である。

散乱型 RI 測器

衝撃加速度法

キャスポル

図 4.7-3　小型土槽の埋戻し材の乾燥密度の測定に用いる手法

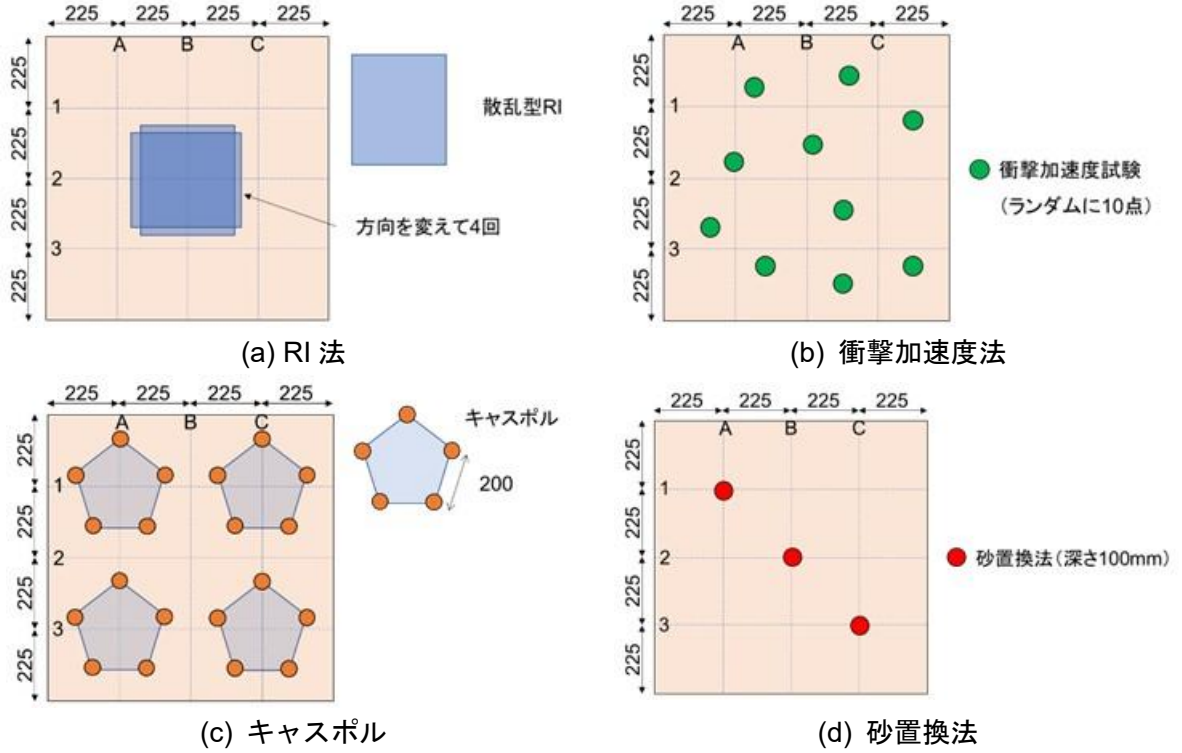
(b) 使用材料及び試験方法

砕石混じりの埋戻し材は、転圧工法の実証試験で用いた埋戻し材とした。小型土槽内の埋戻し材の目標乾燥密度は、最大乾燥密度（1.91 Mg/m³）を基に締固め度を変えた 5 種類とした（表 4.7-12）。供試体は、小型土槽（長さ 0.9m×幅 0.9m×高さ 0.3m）内に埋戻し材を高さ 0.05m ずつ電動ピックハンマで締固め、これを 6 回繰り返して作製した。

数種類の目標乾燥密度で締固められた埋戻し材の供試体に対して、非破壊検査方法による乾燥密度の測定を行い、目標値と比較した。また、各小型土槽に対して砂置換法で 3 か所の乾燥密度を測定した。各非破壊検査技術の試験における小型土槽内の測定点の配置を図 4.7-4 に示す。

表 4.7-12　小型土槽の埋戻し材の目標乾燥密度

ケース名	締固め度(%)	乾燥密度(Mg/m³)	設定含水比(%)
A100	100.0	1.91	9.0
A95	95.0	1.81	9.0
A90	90.0	1.72	9.0
A85	85.0	1.62	9.0
A80	80.0	1.53	9.0



(a) RI 法　　(b) 衝撃加速度法

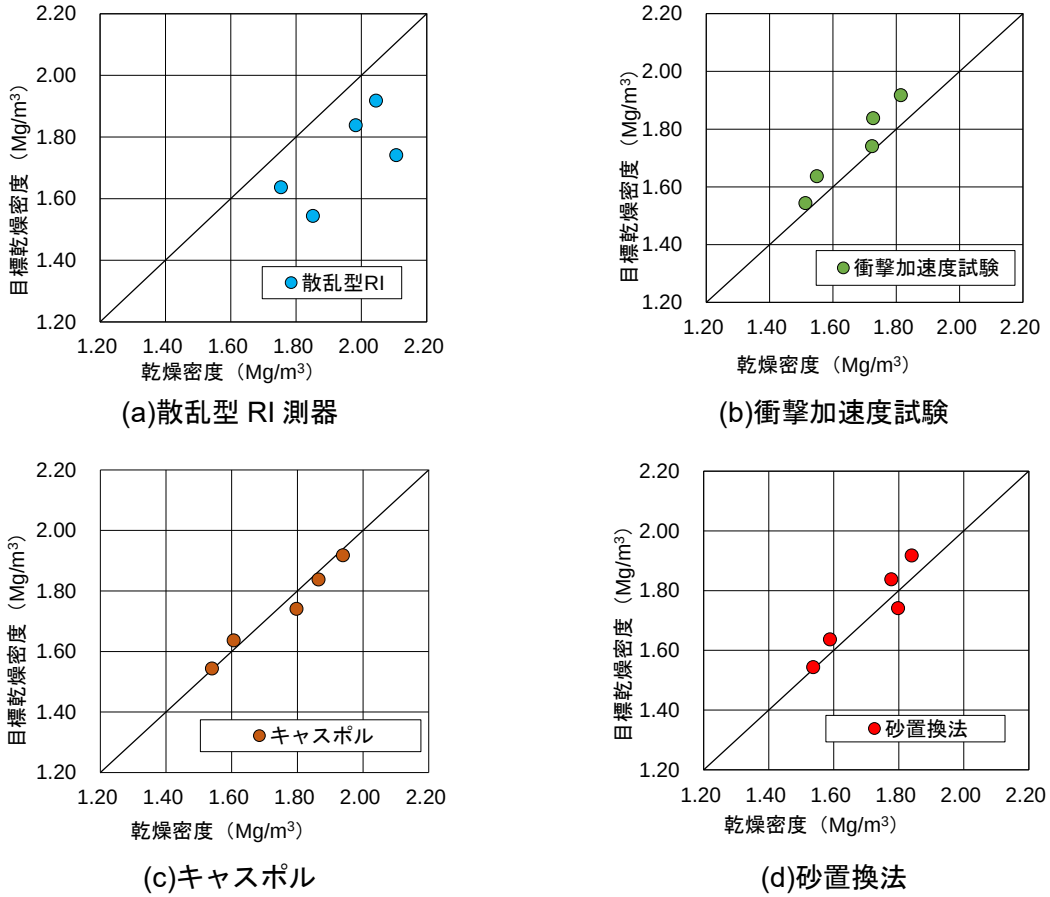
(c) キャスポル　　(d) 砂置換法

図 4.7-4　土槽試験における測定点配置図

(2) 試験結果

RI 法、衝撃加速度法、キャスポル及び砂置換法による乾燥密度の測定結果を図 4.7-5 に示す。縦軸は、小型土槽の目標乾燥密度、横軸は各々の検査法による乾燥密度の測定値を示す。RI 法による乾燥密度の測定値は、目標乾燥密度と大きく乖離していることから、砕石を含む埋戻し材への適用性は低いと考えられる。衝撃加速度法、キャスポル並びに砂置換法による乾燥密度の測定値は目標値と概ね一致しており、砕石を含む埋戻し材に対しても適用性が高いと考えられる。

今後の課題としては、実規模スケールでの適用性の確認、幅広い材料条件に対する適用性の確認などが挙げられる。



(a)散乱型 RI 測器　(b)衝撃加速度試験

(c)キャスポル　(d)砂置換法

図 4.7-5　小型土槽の乾燥密度の測定結果

4.7.4 巨視的透水係数

(1) 目的・実施概要

模擬坑道での転圧及び吹付け施工後の埋戻し材の乾燥密度には、図 4.5-26 に示したようにばらつきが見られた。施工試験において、砂置換法で測定した乾燥密度の 1 点が施工目標値を下回ったため、測定していない位置の乾燥密度が施工目標値を下回っていることも考えられる。また、施工試験では、目標の透水係数に対して乾燥密度の施工目標値を大きく設定したため、乾燥密度が施工目標値を下回る部分が存在しても透水性に及ぼす影響は小さいと考えられるが、母岩の平均的な透水係数が小さく、施工目標値と施工で達成できる乾燥密度の差が小さい場合には、乾燥密度が施工目標値を下回る部分が存在する確率が高くなる。

埋戻し材の設計要件の一つである「低透水性」については、直径 10 m、全長 200 m の円形坑道を対象に掘削損傷領域（EDZ）を考慮した地下水流動解析に基づき「母岩の平均的な透水係数の 10 倍以下」の基準が設定されていることから（NUMO, 2021）、局所的な埋戻し材の乾燥密度ではなく、坑道内の乾燥密度のばらつきを考慮した巨視的な透水性で性能を評価することが考え得る。ここでは、転圧工法及び吹付け工法による埋戻し材の施工試験結果に基づき、埋め戻した領域の巨視的透水係数の算出を試みる。

2021 年度は、転圧工法による施工試験結果に基づき、乾燥密度の標準偏差をパラメータとして、巨視的透水係数に対する感度解析を行い、乾燥密度の標準偏差の感度が低いことを示した。本年度は、転圧回数の不足した領域が存在することを仮定し、乾燥密度の平均値と標準偏差をパラメータとして感度解析を実施した。また、模擬坑道の全断面を対象とした転圧工法及び吹付け工法

による埋戻し施工試験結果を踏まえ、複合工法による埋戻し材の施工特性（品質や特徴）を踏まえたケース設定を行って巨視的透水係数を算出した。さらに、坑道のアーチ部と側部において施工機械との干渉による転圧不足や空隙などの乾燥密度が低い領域（低密度領域）が生ずる可能性があることから、低密度領域の延長割合をパラメータとした感度解析を実施した。

(2) 解析方法及び解析条件

(a) 解析方法

巨視的透水係数の解析対象の断面は、模擬坑道全断面（幅 5 m×高さ 5 m、馬蹄形）とした。模擬坑道の延長は、空間モデルの試行回数（解析回数）が多いことを考慮して、断面の幅・高さと同じ 5 m とした。なお、低密度領域の延長割合をパラメータとした感度解析については、ケース別の試行回数が 1 回であるため、延長は断面幅の 3 倍である 15.0 m とした。浸透流解析には、解析コード Dtransu3D-EL を用いた。

巨視的透水係数の計算手順を以下に示す。

①埋戻し材の乾燥密度の空間分布のデータを施工試験で取得
②乾燥密度の空間的相関性を分析
③乾燥密度の空間分布モデルを乾燥密度の空間相関性に応じて作成
④透水係数の空間分布モデルを埋戻し材の乾燥密度と透水係数の関係式を用いて作成
⑤巨視的透水係数を透水係数の空間分布を用いた飽和浸透流解析で算出
⑥巨視的透水係数が透水性の目標値をクリアすることを評価

乾燥密度に関する空間的相関性の分析では、2 つの測定点間の距離が近ければ乾燥密度が同じ値となり、距離が遠ければ異なる値となる傾向を分析する。具体的には、測定点間の距離とセミバリオグラム（乾燥密度の残差平方）の相関を分析する。乾燥密度の空間分布モデルは、乾燥密度の空間的相関性が見られる場合には条件付きシミュレーションで近似し、空間的相関性が見られない場合にはランダムな空間分布とする。空間分布モデルの個数は、巨視的透水係数の平均値や標準偏差が収束する個数とする。透水係数の空間分布モデルで用いる乾燥密度と透水係数の関係式は、埋戻し材の室内試験で求めた式を用いる。

(b) 解析条件

(i) 乾燥密度の空間的相関性と空間分布モデル

2021 年度の転圧工法による埋戻し材の施工試験結果から、乾燥密度の空間的相関性は、測定間距離 0.5 m 以上のときには見られなかった。また、転圧工法の埋戻し材の乾燥密度の頻度分布は、正規分布であった（図 4.5-26）。このことを踏まえて、乾燥密度の空間分布は 0.5 m 間隔のメッシュにランダムな乾燥密度を割り当てるモデルとした。吹付け工法による埋戻し材については、転圧工法と同様に乾燥密度の分布形状が正規分布であり、かつ転圧工法より標準偏差が小さいことから、転圧工法と同様にランダムな乾燥密度を割り当てるモデルを適用した。解析対象を図 4.7-6 に模式的に示す。乾燥密度の設定メッシュは 0.5 m 間隔、浸透流解析の FEM のメッシュは、坑道形状を再現するために 0.25 m 間隔とした。空間分布モデルの試行回数は 1,000 回とした。

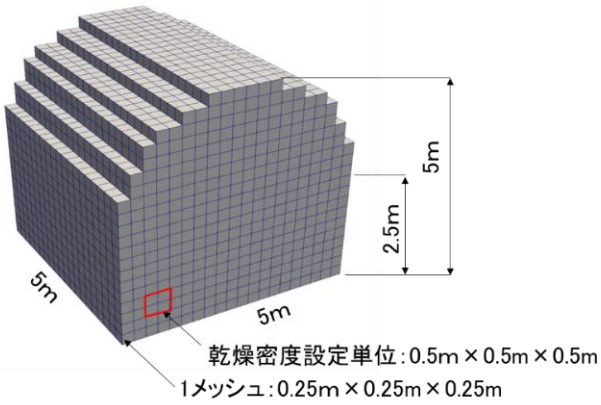


図 4.7-6　解析対象（計算領域）の模式図

(ii) 乾燥密度及び透水係数の空間分布の設定用パラメータ

乾燥密度の空間分布の設定パラメータは、本年度の転圧工法及び吹付け工法の施工試験結果に基づいて設定した（表 4.7-13）。透水係数の空間分布については、施工試験の結果が室内試験結果と整合することを確認したうえで、室内試験で求めた透水係数と乾燥密度の関係式を用いた（表 4.7-13、図 4.4-3）。

表 4.7-13　乾燥密度の確率分布パラメータと透水係数と乾燥密度の関係

区分	乾燥密度(Mg/m³)の確率分布パラメータ		透水係数 k と乾燥密度 ρ_d の関係*	確率分布パラメータの平均に対応する透水係数(m/s)
	平均	標準偏差		
転圧工法	1.984	0.072	$k = 5.0\times10^{-9}e^{-3.402\rho_d}$	5.86×10^{-12}
吹付け工法（低密度）	1.768	0.038	$k = 1.7\times10^{-08}e^{-3.758\rho_d}$	2.20×10^{-11}
吹付け工法（高密度）	1.954	0.034		1.10×10^{-11}

*透水係数と乾燥密度の関係式は室内試験結果に基づいた。

(iii) 解析ケース

巨視的透水係数の解析ケースを表 4.7-14 に示す。CASE 1～3 は、施工のバラツキおよび転圧不足等によるバラツキの拡大を想定した、平均値と標準偏差をパラメータとする感度解析である。CASE 1 は施工試験に基づく標準ケースであり、CASE 2 は無振動転圧の状態を最小とする乾燥密度の分布を想定したケース、CASE 3 は撒出し時の状態を最小とする乾燥密度の分布を想定したケースである（図 4.7-7 参照）。CASE 4 は、転圧工法及び吹付け工法の施工試験結果に基づいた、模擬坑道の全断面の巨視的透水係数の解析ケースである。転圧工法と吹付け工法の坑道断面の割り付けを図 4.7-8 に示す。

表 4.7-14　巨視的透水係数の解析ケース

CASE	解析断面	施工法	乾燥密度		
			分布の範囲	平均値	標準偏差
1	坑道全断面	転圧	施工試験結果	表 4.7-13 参照	
2	坑道全断面	転圧	最小値：無振動転圧時 最大値：施工試験結果	1.857 Mg/m³	0.084 Mg/m³
3	坑道全断面	転圧	最小値：撒出し時 最大値：施工試験結果	1.516 Mg/m³	0.197 Mg/m³
4	坑道全断面	転圧& 吹付け	施工試験結果	表 4.7-13 及び図 4.7-8 参照	

注）標準偏差は、分布幅（最大値−最小値）が 6σ に相当すると仮定して求めた

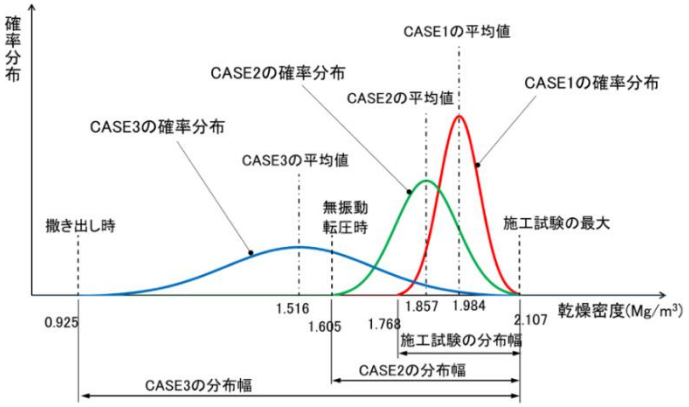


図 4.7-7　転圧不足を想定した感度解析におけるケースごとの乾燥密度の分布

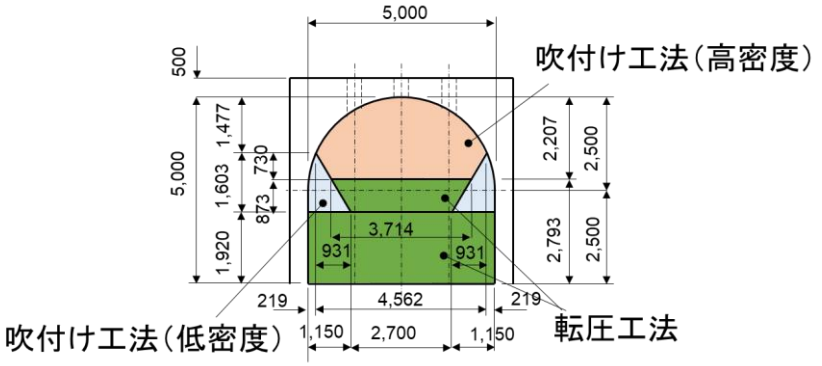


図 4.7-8　転圧工法と吹付け工法の坑道断面の割付図

(iv) 浸透流解析

浸透流解析の条件を図 4.7-9 に示す。浸透流解析に適用する境界条件として、図 4.7-9 の矢印のように水平方向の流れを想定し、動水勾配 i が 0.1 となるように上流側と下流側の側面の全水頭を固定した。他の側面と上面、下面は不透水境界とした。浸透流解析では飽和定常流として計算を行い、各ケースについて通過流量 Q を求め、通過面積 A と動水勾配 i から巨視的透水係数を算出した。なお、各ケースの解析では、試行回数と巨視的透水係数の関係を整理し、試行回数 1,000 回で巨視的透水係数が十分に収束することを確認した。

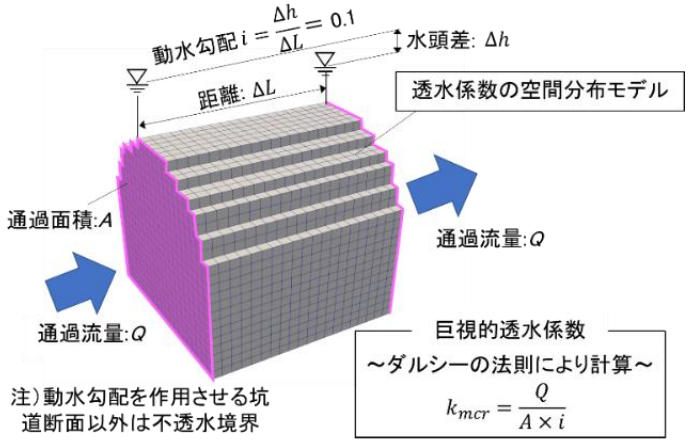
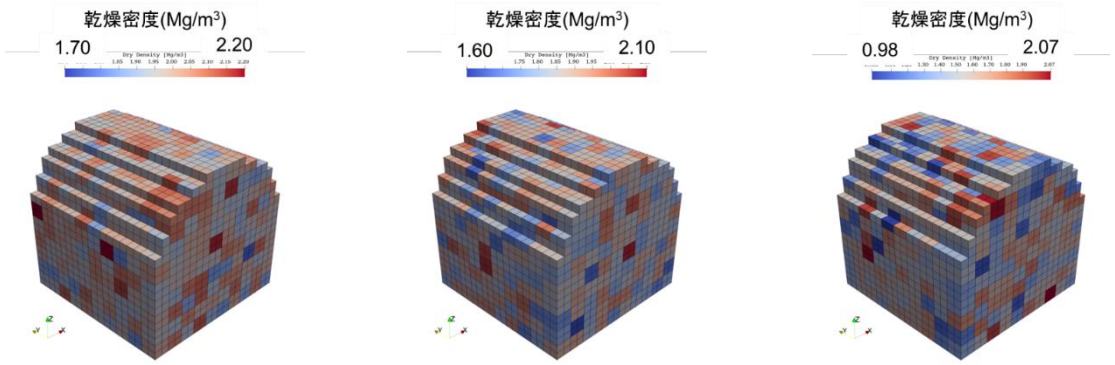


図 4.7-9　浸透流解析の境界条件

(3) 解析結果

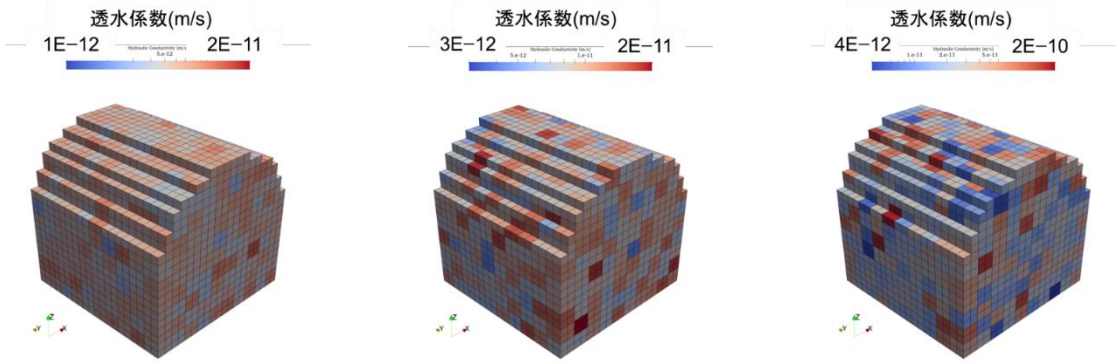
(a) 転圧不足を想定した平均値と標準偏差をパラメータとする感度解析（CASE 1～CASE 3）

CASE 1～CASE 3 の乾燥密度の空間分布モデルの例を図 4.7-10 に、透水係数の空間分布モデルの例を図 4.7-11 にそれぞれ示す。



CASE1 モデル No.1,000　　CASE2 モデル No.1,000　　CASE3 モデル No.1,000

図 4.7-10　乾燥密度の空間分布の例



CASE1 モデル No.1,000　　CASE2 モデル No.1,000　　CASE3 モデル No.1,000

図 4.7-11　透水係数の空間分布の例

CASE 1～CASE 3 の巨視的透水係数の頻度分布を図 4.7-12 に、標準統計量を表 4.7-15 に示す。各ケースの巨視的透水係数の平均値は中央値とほぼ一致し、巨視的透水係数の分布形状は正規分布を示す。

CASE 1 の巨視的透水係数の中央値 7.049×10^{-12} m/s は、乾燥密度の確率分布パラメータの平均に対応する透水係数 5.86×10^{-12} m/s より大きかった。2021 年度の矩形断面を対象とした巨視的透水係数では両者が一致したことから、坑道断面が馬蹄形などの断面であるときは、浸透流解析における透水係数の空間分布の影響が生じやすいと考えられる。

CASE1～3 における巨視的透水係数の比率（CASE 1 の平均値を 1 とした場合の比率）を表 4.7-16 に示す。巨視的透水係数の比率は、通過面積と動水勾配が一定であることから、CASE 1 の通過流量の平均値との比率を意味している。通過流量は、振動転圧をしない箇所がある場合（CASE 2）には平均値が 1.59 倍、最大値が 1.68 倍に増大し、転圧しない箇所がある場合（CASE 3）には、平均が 7.18 倍、最大が 8.15 倍に増大することがわかる。

一方、各ケースの巨視的透水係数の最大値は、各ケースの巨視的透水係数の平均値の 1.04 倍～1.14 倍であり、巨視的透水係数の最大値と平均値との差は小さかった。これは、巨視的透水係数の変動係数が極めて小さいためである。この結果は、埋戻し材の乾燥密度のばらつきよりも、平均値を管理することが、坑道断面の通過流量を見積もる（管理する）うえで重要であることを示唆していると考えられる。

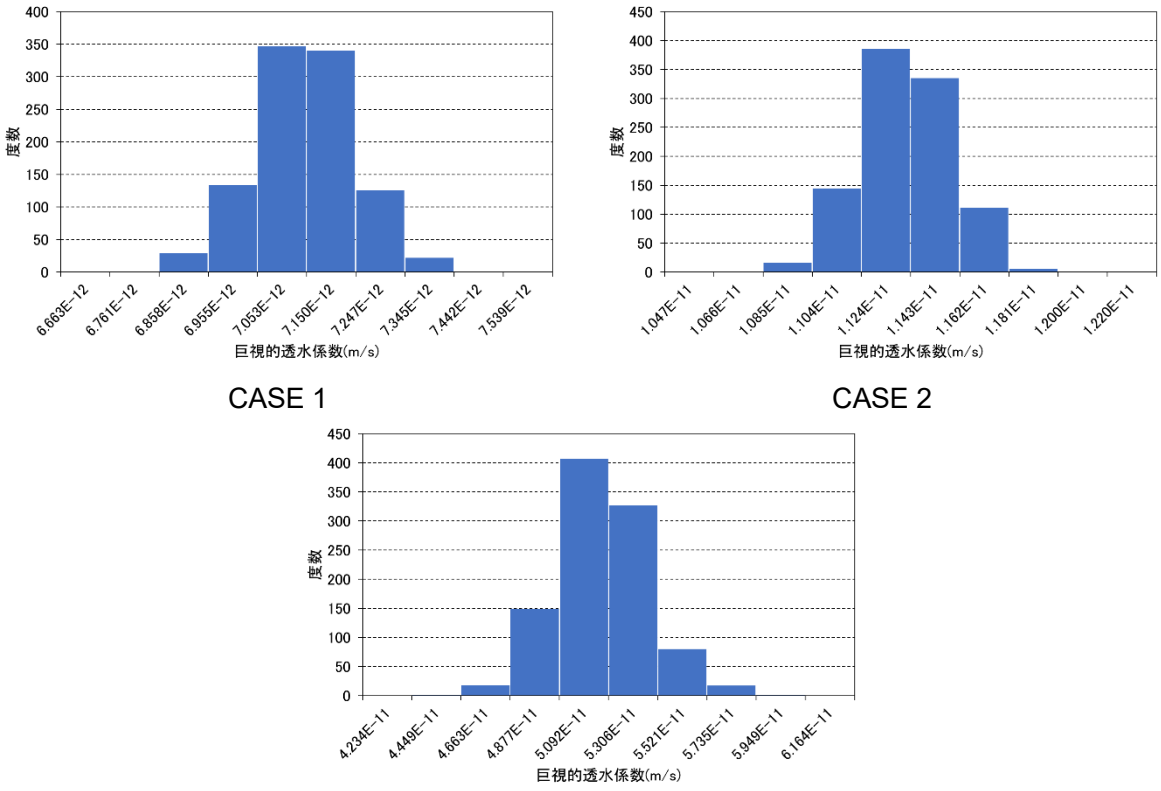


図 4.7-12　巨視的透水係数の頻度分布

表 4.7-15　巨視的透水係数の標準統計量（CASE 1～3）

項目	CASE 1	CASE 2	CASE 3
標本数	1000	1000	1000
最大値（m/s）	7.345×10^{-12}	1.181×10^{-11}	5.735×10^{-11}
最小値（m/s）	6.761×10^{-12}	1.066×10^{-11}	4.448×10^{-11}
中央値（m/s）	7.049×10^{-12}	1.121×10^{-11}	5.055×10^{-11}
平均値（m/s）	7.049×10^{-12}	1.121×10^{-11}	5.057×10^{-11}
標準偏差（m/s）	9.750×10^{-14}	1.739×10^{-13}	1.951×10^{-12}
変動係数（-）	0.0138	0.0155	0.0386

表 4.7-16　巨視的透水係数の比率（CASE 1～3）

項目	CASE 1		CASE 2		CASE 3	
	平均値	最大値	平均値	最大値	平均値	最大値
比率（-）	1.000	1.042	1.592	1.675	7.178	8.147

備考）比率は CASE 1 の平均値との比

(b) 転圧工法及び吹付け工法による施工試験を反映した坑道全断面の巨視的透水係数（CASE 4）

CASE 4 の乾燥密度の空間分布モデルの例を図 4.7-13 に、透水係数の空間分布モデルの例を図 4.7-14 にそれぞれ示す。

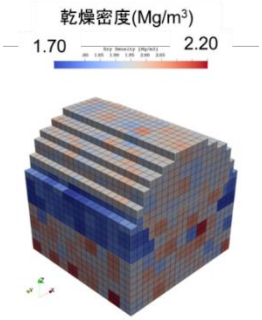


図 4.7-13　乾燥密度の空間分布例（CASE 4）

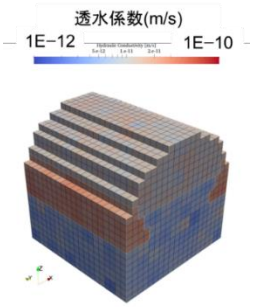


図 4.7-14　透水係数の空間分布例（CASE 4）

CASE 4 の巨視的透水係数の頻度分布を図 4.7-15 に、標準統計量を表 4.7-17 に示す。CASE 4 の巨視的透水係数の平均値は中央値と一致し、吹付け工法を考慮した場合（CASE 4）の巨視的透水係数の分布形状は、吹付け工法を考慮しない場合（CASE 1～3）と同様に正規分布であった。

CASE 1 の平均値に対する CASE 4 の巨視的透水係数の比率を表 4.7-18 に示す。巨視的透水係数の比率は、通過面積と動水勾配が一定であることから、CASE 1 の通過流量の平均値との比率を意味する。CASE 4 の通過流量は、吹付け工法の範囲の透水係数が転圧工法より小さいことから、平均値が 1.48 倍、最大値が 1.54 倍に増大した。このことから、複合工法で施工する場合には、各工法を反映したモデル化が必要になることがわかる。

CASE 4 の巨視的透水係数の最大値は、CASE 4 の平均値の 1.04 倍であり、CASE 1～3 と同様に、最大値と平均との差は小さかった。これは、巨視的透水係数の変動係数が小さいためである。この結果は、複合工法による埋戻し材の施工を行う場合においても、埋戻し材の乾燥密度のばら

つきよりも、平均値の管理が通過流量を見積もる（管理する）うえで重要であることを示している。

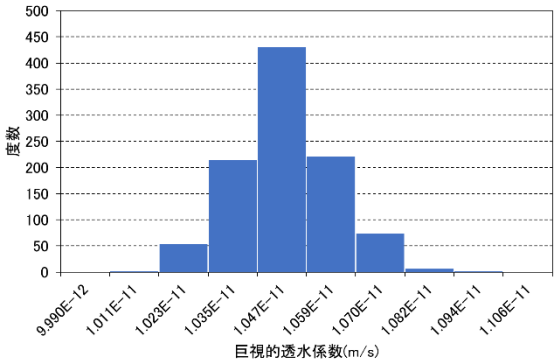


図 4.7-15　巨視的透水係数の頻度分布：CASE 4

表 4.7-17　巨視的透水係数の標準統計量（CASE 4）

項目	CASE 4
標本数	1000
最大値（m/s）	1.082×10^{-11}
最小値（m/s）	1.011×10^{-11}
中央値（m/s）	1.041×10^{-11}
平均値（m/s）	1.041×10^{-11}
標準偏差（m/s）	1.141×10^{-13}
変動係数（-）	0.0110

表 4.7-18　巨視的透水係数の比率（CASE 4）

項目	CASE 4	
	平均値	最大値
比率（-）	1.477	1.535

備考）比率は CASE 1 の平均値との比

(4) 坑道天端及び側部の低密度領域の延長割合の感度解析

坑道内のアーチ部と側部の埋戻し施工では、施工機械が坑道の壁と干渉するために、転圧不足や空隙などの乾燥密度が低い領域（低密度領域）が生じる可能性がある。そのため、低密度領域がトンネル軸方向の延長の全長に対する割合（延長割合）をパラメータとして巨視的透水係数の感度解析を実施した。

健全領域の透水係数は、転圧工法の施工試験の乾燥密度の平均値から求めた 5.86×10^{-12} m/s とし、低密度領域の透水係数は健全領域の 100 倍、5.86×10^{-10} m/s とした。坑道断面は模擬坑道と同一とし、坑道断面における低密度領域は図 4.7-16 に示す範囲とした。浸透流解析の境界条件を図 4.7-17 に示す。浸透流解析では、図 4.7-17 の矢印のように坑道軸方向の流れとし、動水勾配が 0.1 となるように上流側と下流側の断面の全水頭を固定した。他の側面と上面、下面は、不透水境界とした。坑道延長は 15.0 m とし、低密度領域がない場合（低密度領域の延長割合 0%）、低密度領域の延長が 15.0 m（低密度領域の延長割合 100%）の場合、低密度領域の延長が 7.5 m（低密度領域の延長割合 50%）の場合を、それぞれ CASE A、CASE B、CASE C とする。本解析

（CASE A～C）のメッシュサイズは、模擬坑道の断面形状の再現性を高めるため、CASE 1～4 のメッシュサイズ（0.25 m）より小さな 0.05 m サイズとした。

巨視的透水係数に対する低密度領域の感度解析結果を表 4.7-19 に示す。低密度領域の延長の割合が 100%（CASE B）のときの巨視的透水係数は、健全領域のみ（CASE A）の 18 倍、低密度領域の延長の割合が 50%（CASE C）のときの巨視的透水係数は、健全領域のみ（CASE A）の 1.8 倍となり、低密度領域の長さが全長から全長の半分になると巨視的透水係数の大きさは 1/10 程度になった。巨視的透水係数の比率は、通過面積と動水勾配は一定であることから、通過流量の比率となる。低密度領域が半分になることでその影響は、1/10 に抑えられることを踏まえると、低密度領域が避けられない場合であっても、低密度領域の延長をできる限り短くして通過流量の増大の程度を抑えることが重要であると考えられる。また逆に、低密度領域が連続する場合の巨視的透水係数が設計要件として許容される範囲であるならば、それに応じた施工仕様（例えば隅角部の低密度を許容する目標施工品質の設定）や柔軟な工法方法の組合せを検討することもできる。

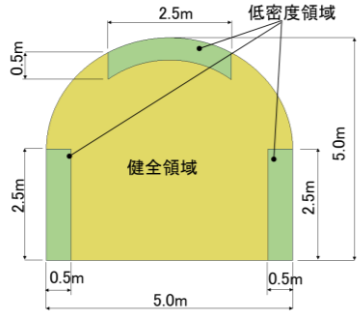


図 4.7-16　低密度領域の分布

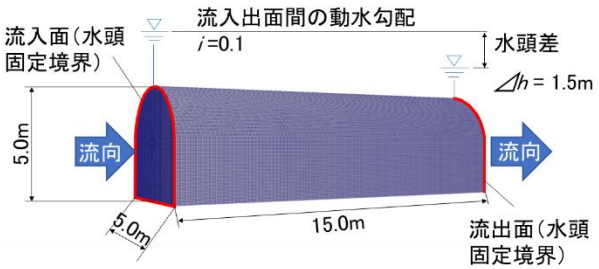
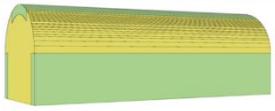
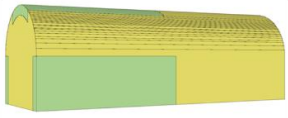


図 4.7-17　低密度領域の感度解析モデルの境界条件

表 4.7-19　巨視的透水係数に対する低密度領域の感度解析結果

CASE	CASE の概要	巨視的透水係数 (m/s)	巨視的透水係数の比率
A	低密度領域なし ：健全領域　：低密度領域 	5.86×10^{-12}	1.0
B	低密度領域長(15m)＝坑道縦断全長 ：健全領域　：低密度領域 	1.06×10^{-10}	18.1
C	低密度領域長(7.5m)＝坑道縦断全長×0.5 ：健全領域　：低密度領域 	1.04×10^{-11}	1.8

参考文献

Komine, H., and Ogata, N., New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. Canadian Geotechnical Journal, 40, No. 2, pp.460-475, 2003.

Komine, H. and Ogata, N., Predicting Swelling Characteristics of Bentonites, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 130(8), pp.818-829, 2004.

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.

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, 2017.

寒地地盤チーム，解説 衝撃加速度を用いた盛土および固化改良盛土の品質管理技術，寒地土木研究所月報，No.823，2021.

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（試験報告），JNC TN8430 2004-005, 2005.

近畿地方整備局近畿技術事務所，簡易支持力測定器（キャスポル）利用手引き，2005.

原子力環境整備促進･資金管理センター，平成 24 年度管理型処分技術調査事業地下空洞型処分施設性能確証試験報告書，2013.

原子力発電環境整備機構，包括的技術報告（レビュー版）：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－本編及び付属書，NUMO-TR-20-03，2018.

原子力発電環境整備機構，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－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03 付属書 4-15 緩衝材の基本的な設計要件に対する仕様の検討，2021.

小峯秀雄，緒方信英，高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋め戻し材の膨潤評価式の提案－砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響－，電力中央研究所報告，1999.

小峯秀雄，緒方信英，高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋め戻し材の透水特性、電力中央研究所報告，2001.

小峯秀雄，大橋良哉，安原一哉，村上哲，ベントナイトの膨潤圧・膨潤変形特性に及ぼす温度履歴の影響とその要因，土木学会論文集 C，Vol.63 No.3，731-741，2007.

小峯秀雄，安原一哉，村上哲，人工海水環境下におけるベントナイトの一次元自己シール性，土木学会論文集 C，Vol.65 No.2，389-400，2009.

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とその評価，土木学会論文集，No.806/Ⅲ-73,93-111，2005.

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.

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，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，2021.

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，令和 3 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，2022.
米澤友哉，三嶋信雄，小鳩利司，高速道路盛土の品質管理手法と品質管理の実態（その 1），地盤工学会北海道支部，技術報告集，vol.59，2019.

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

5.1 背景及び目的

地層処分施設の閉鎖後の長期安全性は、人の能動的な管理に依存しないものとなる。一方で、受動的な管理に移行するためには、閉鎖に至るまでの操業段階におけ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）の品質保証のための取組が重要となる。ここでは、地層処分事業が先行する欧米における地下構成要素の品質保証に類する取組やわが国の放射性廃棄物の処分事業に関する規制動向に留意して、処分場の閉鎖の判断に資する地下構成要素の品質保証体系を整備するための考え方を整理するとともに、品質保証体系の素案を整備した。また、地下構成要素の品質保証や事前の実証試験等を実施するうえで有効と考えられる地中無線伝送システムに対する信頼性向上のための運用実績データを示すとともに、地下環境での使用を想定した無線給電システムの設計方法を整備した。

5.2 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備

5.2.1 地下構成要素を対象とした品質保証体系の整備方針

地下構成要素の品質保証体系を整備するためには、地層処分事業に関する法令及び規制動向を把握しておくことが重要となる。わが国の地層処分事業に関する規制基準は検討段階にあるが、中深度処分の規制基準は地層処分の品質保証体系を整備するうえで参考になると考えられる。また、地層処分事業が先行する海外における品質保証に関する取組は、わが国における品質保証体系を整備するうえで参考になると考えられる。ここでは、わが国における処分事業の品質保証に関連する法令等、中深度処分の規制基準及び欧米における品質保証に関する取組の状況について調査したうえで、わが国における地層処分事業の品質保証体系を整備するための方針を示す。

(1) 国内外における規制動向及び品質保証に関する取組

(a) わが国の放射性廃棄物処分に関する法令等

核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則では、事業者は、事業許可を受けた日から 20 年を超えない期間ごとに定期的な評価を実施することが規定されている。定期的な評価では、最新の技術的知見[1]を踏まえて、核燃料物質等による放射線の被ばく管理に関する評価（以下「被ばく管理に関する評価」という）を行い、評価結果を踏まえて埋設施設の保全のために必要な措置を講ずることが規定されている。被ばく管理に関する評価について、現時点で具体的な内容は記載されていないが、中深度処分の安全規制関連資料（原子力規制員会, 2016、原子力規制庁, 2022 など）を参照すると、その評価の流れは図 5.2-1 のようになると考えられる。

被ばく管理に関する評価では、最新の技術的知見を反映した性能評価を実施して核種移行解析のモデル化及びパラメータ設定を行い、性能評価や安全評価を経て被ばく線量を算出する。中深度処分では、この評価は、放射線モニタリング及び地下水等モニタリングのための設備による監視測定結果を始めとする情報並びに最新の科学的知見等を反映したものとされている（原子力規

[1] 第二種埋設では、“定期的な評価の実施までに第二種廃棄物埋設施設に係る監視及び測定の結果、国内外の研究開発・技術開発成果等により得られた最新の知見であって、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則第 2 条第 2 項第 3 号から第 7 号までに掲げる書類の記載事項を更新するために必要なもの”が最新の技術的知見とされている（原子力規制委員会, 2020）。現時点の第一種埋設に関する法令等では、最新の技術的知見の内容について具体的に示されていない。

制庁, 2022)。放射線モニタリング及び地下水等モニタリングのための設備は、表 5.2-1 に示す目的のために設置される。

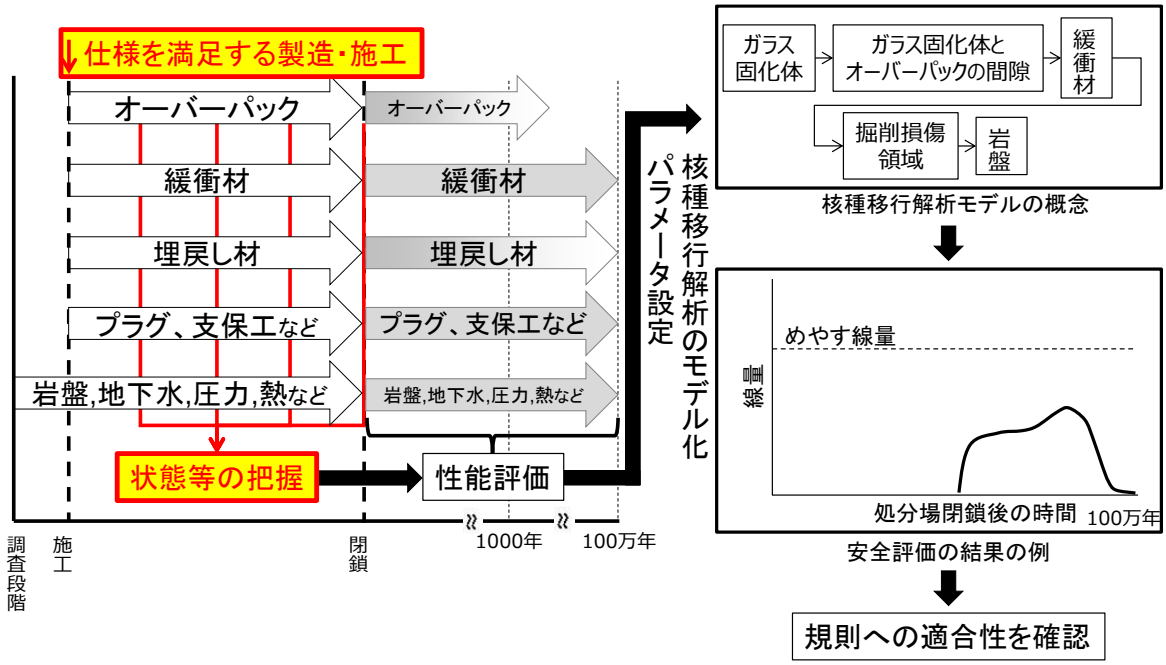


図 5.2-1　被ばく管理に関する評価の流れ
（第一種及び第二種廃棄物埋設の法令等を参考にして作成）

表 5.2-1　中深度処分における監視測定設備と目的
（原子力規制庁, 2022）

監視測定設備	監視測定の目的
放射線モニタリング	○人工バリアの施工の不具合等による異常な漏えい又はその兆候についての監視測定
地下水等モニタリング	○地下水の状態に加えて、設置された人工バリアや確認可能な範囲における天然バリアが設計を逸脱することなく期待された性能を発揮している、又はその見通しがあることを事業者が確認 ○定期的な評価に必要なデータを取得するため、閉鎖措置の開始までの間において、廃棄物埋設地及びその周辺の地質環境に係る物理的・化学的特性、人工バリアの性能や人工バリア及び天然バリアの機能に関係する地下水の状態等の確認のためのデータ取得 ※人工バリア及び天然バリアの機能を著しく損なわないものとするため、例えば人工バリアの機能の確認を目的とした地下水等モニタリングについては、実際に人工バリアが設置される環境と同等の条件を模擬した環境下での試験又はそれを補完する室内試験等の間接的な方法により代替することも考えられる。

(b) 欧米における規制動向及び品質保証に関する取組

(i) 米国における規制動向及び品質保証に関する取組

ユッカマウンテンにおける地層処分に関する安全規制では、施設の最終閉鎖の判断に資する取組として、表 5.2-2 に示す性能確認プログラムと品質保証の取組が要求されている（U.S. NRC, 2016）。性能確認プログラムは、処分場の最終閉鎖の判断ための性能評価や安全評価に必要なデータを取得するための取組であり、このプログラムの実施によって人工バリアや天然バリアの機能に悪影響を及ぼすことがないように、原位置でのモニタリングだけではなく室内試験や原位置実験などを含めてデータを取得することが計画される。ただし、ユッカマウンテンにおける地層処分は、廃棄体を定置する坑道を埋め戻さない概念であり、わが国の処分概念とは異なることに注意する必要がある。

表 5.2-2　米国における性能確認プログラムと品質保証に関する規制要求
米国 NRC 規則（10 CFR Part 63）から抜粋して要約（U.S. NRC, 2016）

サブパート F：性能確認プログラム（以下「一般的な要件」より）
○以下の判断に資するための情報を提供する（§63.131 より） ・建設・操業期間中に得られる地下環境（及び環境の変化）が、許認可審査で想定された限度内に収まっているか。 ・閉鎖後長期に渡りバリア機能の発揮が期待される天然/人工バリアが、意図および予測された機能を果たしているか。 ○性能確認プログラムは、サイト特性調査中に開始され、最終閉鎖段階まで継続されなければならない。 ○性能確認プログラムには、要求されるデータを入手する上で適切と考えられる原位置モニタリング、室内試験及びフィールド試験、原位置実験が含まれなければならない。
サブパート G：品質保証（以下「範囲」より）
○地層処分場及びその構造物、システムまたは構成要素が、実際の使用において満足のゆく性能を発揮する点について適切な確信を得るために必要な、あらゆる計画的及び系統立った措置。 ○品質保証には品質管理が含まれ、この品質管理は材料、構造物、構成要素またはシステムの物理的な特徴に関連する品質保証措置で、材料、構造物、構成要素またはシステムの品質が予め規定された要件に適合したものとなるように管理する手段・措置で構成される。

(ii) 北欧における規制動向及び品質保証に関する取組

地層処分事業が先行するフィンランド及びスウェーデンの規制文書では、地下構成要素の品質保証に関して具体的に規定されてはいない。処分場の性能確認に類する規定については、フィンランドでは、規制要件として“処分場の建設、操業及び閉鎖に関する計画設定では、（中略）調査及びモニタリングを通じて長期安全性を確保する必要性が考慮に入れられるものとする”と規定されている。また、スウェーデンにおける原子力安全・放射線防護の規制機関である放射線安全機関（SSM）が 2018 年に政府に提出した意見書（Swedish Radiation safety Authority, 2018）では、表 5.2-3 に示すように処分場の性能を明らかにするための SKB の検査プログラムの一環として、測定及び監視活動を含めるべきであると記載されている。フィンランド及びスウェーデンの規制文書では、性能確認のためのモニタリングを必ずしも要求しているわけではなく、実施

主体が策定するモニタリングプログラム等を規制機関が審査して妥当性が判断されることになる。

表 5.2-3　測定及び監視活動に関する SSM からスウェーデン政府への意見書の概要
文献（Swedish Radiation safety Authority, 2018）から抜粋

3.3.1　総合的な判断：建設及び操業 多重防護の第 2 レベル：施設の検査
SKB 社のプログラムには、閉鎖前及び閉鎖後の最終処分場の性能を明示するために、より広範かつ長期間にわたる検査プログラムの一環として測定及び監視活動が含まれるべきである。SSM は、閉鎖後の最終処分場の初期条件を確定するために、さらには最終処分場に関する知識の将来世代への伝承を可能にするために、建設、操業及び廃止措置/閉鎖段階のバリアシステムの諸特性に関する正確な測定及び文書化が重要な意味を持つと考えている。

(2) 地下構成要素の品質保証体系の具体化の方向性

図 5.2-1 に示した被ばく管理に関する評価は、最新の技術的知見を反映して定期的に実施される。その中で繰り返し実施される性能評価や安全評価のためには、地下構成要素の施工品質（施工実績）を把握するとともに、施工後の地下構成要素の状態を把握し、それらの情報を評価に反映することで評価結果の信頼性を向上させることが考えられる。そのため、地下構成要素の品質保証体系を以下の 2 つのプログラムに切り分けて考えることとする。

○品質管理プログラム：地下構成要素の仕様を満足する製造・施工を実施し、施工品質を把握するための取組
○性能確認プログラム：被ばく管理に関する評価に必要な情報を取得するための取組

地下構成要素の製造時または施工時において品質確認のために試料採取などを伴う検査を原位置で実施することは、放射線防護および作業負荷の増加や試料採取位置の補修の必要性などの観点から望ましくない。そのため、品質管理プログラムについては、製造および施工プロセスを管理することで施工品質を確保する“製造・施工プロセス管理”を指向してプログラムの検討を進める。

被ばく管理に関する評価では、人工バリアと天然バリアのバリア性能を評価することになる。そのためには、地下構成要素のバリア性能に関する情報が入力情報となるが、個々の地下構成要素のバリア性能の良し悪し（性能レベル）だけで処分場の長期安全性が判断されるわけではない。人工バリア及び天然バリアのバリア性能の変化の概念を図 5.2-2 に示す。天然バリアは、調査段階におけるボーリングや精密調査段階以降の坑道の掘削による酸素の引き込みなどにより、一旦、バリア性能は低下するが、閉鎖後は地下水位の上昇とともに掘削前の岩盤が有するバリア性能に回復すると考えられる。また、人工バリアについては、定置後の 1,000 年間はオーバーパックの閉じ込め機能が維持される。その後、安全評価の基本シナリオでは、ガラス固化体から溶出した放射性核種が緩衝材中を拡散により移行し、母岩に入った放射性核種は鉱物などへの収着を経ながら移流・分散によって移行するため、長期的には母岩のバリア性能が支配的になる。したがって、被ばく管理に関する評価に必要な情報としては、操業期間中における地下構成要素のバリア性能や地質環境に関する情報などが考えられる。

表 5.2-1 に示した地下水等モニタリングの目的を踏まえると、性能確認プログラムの具体化に向けて表 5.2-4 に示す 2 つの方向性が考えられる。方向性①は、処分場原位置での測定やモニタリングを主体として地下構成要素の状態を把握する方向性であるが、モニタリングの機器を設置

することによりバリア性能に影響を及ぼす可能性があることや機器の寿命などの課題がある。方向性②は、地下環境を模擬した環境での試験等を主体として地下構成要素が性能を発揮しつつあることを把握する方向性であり、操業期間中における原位置での作業負荷の低減、事前の室内試験や実証試験で取り組むべき課題の明確化などが期待できる。そのため、まずは方向性②で性能確認プログラムの素案を整備する。ただし、ここで整備する性能確認プログラムの素案は、今後、性能確認プログラムを具体化していくための基礎となるものであり、事前の試験等による知見やデータの十分性、将来の規制やステークホルダからの要求に応じて、最終的な性能確認プログラムでは原位置測定やモニタリングを組み込むことになる可能性がある。

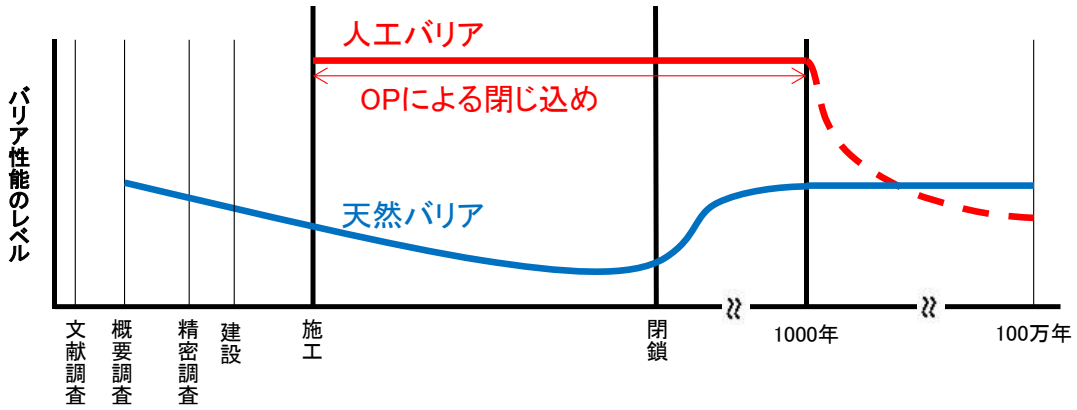


図 5.2-2　バリア性能の変化の概念図

表 5.2-4　性能確認プログラムの具体化に向けた方向性

	中深度処分の規制の考え方	プログラム具体化の方向性	研究開発の方向性
方向性①	設計を逸脱することなく期待された性能を発揮していることを確認	処分場原位置での測定やモニタリングを主体としてプログラムを具体化	原位置測定、モニタリング技術の高度化を指向
方向性②	設計を逸脱することなく期待された性能を発揮する見通しがあることを確認	地下環境を模擬した環境での試験等を主体としてプログラムを具体化	原位置測定、モニタリングに係る活動を最小化した取組を指向

5.2.2 品質管理プログラム及び性能確認プログラムの整備の考え方

地下構成要素には、操業期間中や閉鎖後長期の安全性に関する安全機能の確保に必要な設計要件及び評価項目が設定されており、それらに基づいて設計が行われる（NUMO, 2021）。設計では、外圧や地下水などのバリア性能に影響を及ぼす要因（以下、「環境要因」とよぶ）に対して、安全機能が維持できるように材料や寸法などの仕様が設定される。

製造及び施工時のプロセスで地下構成要素の品質を確保するためには、仕様を満足する製造と施工の条件を事前の試験等で把握しておく必要がある。実際の製造及び施工時には、製造・施工プロセスの管理と各プロセスで必要な検査を実施することにより、要求されるバリア性能を確保した地下構成要素を構築することができると考えられる。品質管理プログラムには、製造・施工プロセス管理で仕様を満足する品質を確保するための事前の試験を含む一連の活動が含まれる。

操業期間中における地下構成要素の施工後のバリア性能の変化については、実際に人工バリアが設置される環境と同等の条件を模擬した環境下での試験、またはそれを補完する室内試験等の間接的な方法で把握することができると考えられる。そのため、操業期間中にバリア性能を変化

させる可能性のある環境要因を継続的に測定することで、バリア性能の変化量を把握できることになる。また、操業期間中には、地下坑道の展開に伴い広範囲の母岩の地質環境を把握することができる。地下構成要素の設計段階では、概要調査及び精密調査における限定的な範囲の調査に基づき、空間的及び時間的な変動の幅を想定して設計が行われることになると考えられる。そのため、操業期間中の坑道展開に伴い母岩の地下環境をより精緻に把握することで、地下構成要素の設計の妥当性を確認することができるとともに、被ばく管理に関する評価で実施される性能評価や安全評価で使用される母岩のパラメータを、より信頼性の高い情報に更新することができる。

品質管理プログラム及び性能確認プログラムの整備の流れを図 5.2-3 に示す。品質管理プログラムについては、地下構成要素の設計要件及び評価項目を調査して、製造及び施工時における管理項目を抽出する。また、これまでに実施された製造及び施工に関する試験結果から必要な管理項目を抽出し、これらを統合して製造・施工プロセス管理手法の素案を整備する。性能確認プログラムについては、地下構成要素のバリア性能を変化させる環境要因を抽出するために、設計要件及び評価項目で使用されているパラメータを調査する。また、地下構成要素の設計の妥当性確認及び性能評価や安全評価で使用される母岩のパラメータの更新のために、設計要件、評価項目、性能評価や安全評価に必要な母岩のパラメータを調査する。これらの調査結果を踏まえて、性能確認プログラムの素案を整備する。

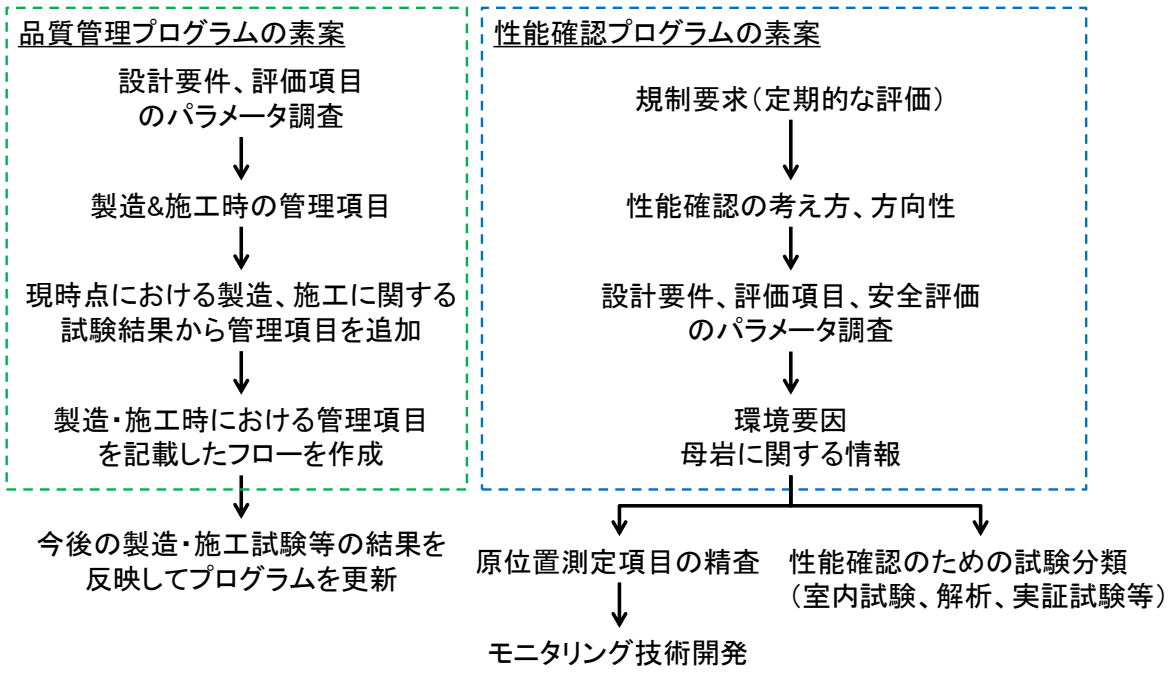


図 5.2-3　品質管理プログラム及び性能確認プログラムの整備の流れ

5.2.3 品質管理プログラム及び性能確認プログラムの素案の整備

(1) 地下構成要素の設計要件、評価項目に関するパラメータの整理

地下構成要素の製造及び施工時における管理項目及び性能確認プログラムにおける測定項目を抽出するために、オーバーパック、緩衝材、埋戻し材、PEM 容器の設計要件、評価項目及び性能評価や安全評価で使用されているパラメータ（NUMO, 2021）を調査した。設計要件の調査結果の例として、オーバーパックの残存酸素による腐食と耐食性に対する放射線影響の抑制のパラメータを表 5.2-5 及び表 5.2-6 にそれぞれ示す。オーバーパック、緩衝材、埋戻し材及び PEM 容

器の全ての設計要件及び評価項目の調査結果は、付録 3 に記載した。

【パラメータの整理方法（表 5.2-5、表 5.2-6 の例)】

- 表 5.2-5 の例では、“実機推定最大腐食深さ”を求めるためには、“平均腐食深さ”、“平均腐食深さと孔食係数の実験相関式”、“オーバーパックの表面積”、“信頼率”が必要であり、その関係をパラメータの階層として左列に整理した。
- 右列は、以下の考え方に基づき分類した。

  計算：下階層のパラメータを用いて算出されるパラメータ
  既知：空気中の酸素の体積割合や鉄の原子量など既知のパラメータ
  設定：信頼率など設計段階で設定されるパラメータ
  確認：ガラス固化体に関するパラメータ
  管理：設計により仕様が設定されているパラメータ
  試験：設計段階の試験や解析で取得されるパラメータ
  環境要因：地下構成要素のバリア性能に影響を及ぼす可能性のあるパラメータ
  母岩特性：母岩の密度やポアソン比などの地質環境に関するパラメータ

表 5.2-5　残存酸素による腐食のパラメータ整理結果（オーバーパック）

パラメータの階層	分類
実機推定最大腐食深さ	計算
平均腐食深さ	計算
腐食する鉄の量	計算
OP 一体あたりの残存酸素量	計算
緩衝材などの間隙に存在する酸素量	計算
緩衝材及び埋戻し材の間隙率	計算
標準状態の酸素のモル体積	既知
空気中の酸素の体積割合	既知
ベントナイトに吸着している酸素量	試験
OP 一体あたりの緩衝材及び埋戻し材の体積	計算
鉄の原子量	既知
鉄の密度	管理
OP の表面積	管理
平均腐食深さと孔食係数の実験相関式	試験
温度	環境要因
地下水の組成及び濃度	環境要因
OP の表面積	管理
信頼率	設定

表 5.2-6　耐食性に対する放射線影響の抑制のパラメータ整理結果（オーバーパック）

遮蔽代の設定				
	OP 表面における γ 線による水の吸収線量率			計算
		緩衝材の密度及び組成		管理
		岩盤の密度及び組成		母岩特性
		ガラス固化体の組成		確認
		OP の母材の密度		管理
		水の吸収線量率への換算係数		試験
		ガラス固化体の γ 線源強度分布		確認
		ガラス固化体の寸法		確認
		埋戻し材の厚さ（緩衝材の上部）		管理
	水の吸収線量率の最大値			計算
		γ 線照射による腐食の加速比率		試験
			地下水の組成及び濃度	環境要因
			温度	環境要因

地下構成要素の設計では、閉鎖後長期の安全性を考慮した設計要件と評価項目に基づいて仕様が設定されているため、地下構成要素の製造及び施工時に管理する基本的な項目は、表中で“管理”に分類された項目になる。設計要件及び評価項目の調査結果から、オーバーパック、緩衝材、埋戻し材、PEM 容器の製造及び施工時の基本的な管理項目を整理した結果を表 5.2-7 に示す。ここで、“基本的な管理項目”としているのは、例えば、埋戻し材の転圧施工で仕様を満足する乾燥密度を確保するためには、撒出し厚さなどの追加の管理項目があるためである。それらの管理項目については、製造試験や施工試験の結果を踏まえて追加することになる。緩衝材及び埋戻し材の透水係数から下の項目については乾燥密度に依存するため、これらの項目は乾燥密度で間接的に管理することができる。

表 5.2-7　地下構成要素の製造・施工時における基本的な管理項目

オーバーパック	緩衝材	埋戻し材	PEM 容器（無孔型）
母材の密度	地下水流れに対する物体の代表長さ	掘削土の最大粒径	ポアソン比
弾性係数	ケイ砂の混合率	掘削土の粒度分布	弾性係数
ポアソン比	ケイ砂の土粒子密度	掘削土の土粒子密度	降伏応力
降伏応力	緩衝材厚さ	掘削土の化学成分	外径
引張強さ	緩衝材の初期体積	掘削土の混合率	質量
蓋の直径	緩衝材と岩盤の隙間の厚さ	埋戻し材の乾燥密度	
円筒部の外径	緩衝材と OP の隙間の厚さ	透水係数	
OP の表面積	緩衝材の乾燥密度	モンモリロナイト含有率	
OP の重量	透水係数	弾性係数	
溶接欠陥寸法	有効粘土密度	ポアソン比	
溶接残留応力	初期間隙比	初期間隙比	
OP 中心軸から緩衝材内側までの距離	圧縮指数	圧縮指数	
OP 中心軸から緩衝材外側までの距離	膨潤指数	膨潤指数	
	ポアソン比	限界状態応力比	
	限界状態応力比	圧密降伏応力	
	圧密降伏応力	初期有効応力	
	初期有効応力	初期静止土圧係数	
	初期静止土圧係数	二次圧密係数	
	二次圧密係数	一次圧密終了時間	
	一次圧密終了時間	初期体積ひずみ速度	
	初期体積ひずみ速度		
	間隙比		
	弾性係数		
	内部摩擦角		
	回転硬化限界面の定数		
	回転硬化発展則の定数		

オーバーパック、緩衝材、埋戻し材のバリア機能に影響を及ぼす環境要因パラメータ、設計の適切性を確認するための母岩特性パラメータ、性能評価や安全評価に必要な岩盤パラメータの整理結果を表 5.2-8 に示す。表中の岩盤パラメータについては、文献（NUMO, 2021）の核種移行解析に用いたデータセットを参照して整理した。

表 5.2-7 及び表 5.2-8 に示した項目は、処分場のサイトが決定していない現段階の案であり、これらの項目は、今後の研究開発や処分場の地質環境条件等によって追加や削減される可能性がある。

表 5.2-8　性能確認プログラムで把握する項目（案）

性能評価用パラメータ		安全評価用パラメータ
環境要因パラメータ	母岩特性パラメータ	岩盤パラメータ
地下水の組成及び濃度	密度	EDZ の体積
動水勾配	飽和密度	EDZ の透水係数
地下水静水圧	透水係数	動水勾配
温度	引張強度	割れ目の開口幅
岩盤クリープ変形量	弾性係数	マトリクス拡散寄与面積率
地震動の加速度波形	せん断弾性係数	マトリクス拡散深さ
	一軸圧縮強度	有効間隙率
	ポアソン比	真密度
	粘着力	実効拡散係数
	内部摩擦角	収着分配係数
	減衰定数	
	延性パラメータ	
	時間依存性パラメータ	
	ピーク強度到達時間	

(2) 品質管理プログラムの素案の整備

品質管理プログラムは、製造・施工プロセス管理により仕様を満足するように地下構成要素を製造･施工して、その施工品質（施工実績）を把握するための一連の取組である。ここでは表 5.2-7 に示した地下構成要素の設計要件と評価項目から抽出した製造・施工時における基本的な管理項目に基づいて、オーバーパック、緩衝材、PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案を示す。埋戻し材の製造・施工プロセス管理手法の素案については、施工方法ごとに 4.7.1 に示した。

(a) オーバーパックの製造・施工プロセス管理手法の素案

オーバーパックの製造・施工プロセス管理手法の素案（原子力機構・原環センター, 2022）を基にして、オーバーパック製造・施工プロセス、管理項目及び今後の研究開発課題を整理した結果を表 5.2-9 に示す。これまでに実施された研究開発でオーバーパックが製造された実績があり（原環センター, 2009）、オーバーパックの基本的な製造技術は整備されていると考えられる。ただし、オーバーパックの母材と処分環境の条件によっては、応力腐食割れと水素脆化割れの発生を防止するために溶接残留応力を低減する必要がある。実際のオーバーパックの溶接後に溶接残留応力を測定することは難しいため、事前の溶接試験などで残留応力の低減が可能な溶接と熱処理のプロセスを設定しておく必要がある。また、ガラス固化体のオーバーパックへの挿入は放射線環境下での作業になるため、遠隔操作による技術実証が必要である。オーバーパックの搬送及び定置技術についても装置の開発及び実証は今後の研究開発課題となる。

表 5.2-9　オーバーパックの製造・施工プロセスにおける管理項目と研究開発課題

プロセス	管理項目	今後の研究開発課題
材料調達	化学成分 母材の密度、弾性係数、ポアソン比、降伏応力、引張強さ	－
胴部、蓋部の製造	蓋の直径、円筒部の外径	－
ガラス固化体の挿入	－	・遠隔操作による実証
溶接	溶接電流、溶接速度	・溶接部の品質確保及び溶接残留応力を低減可能な溶接方法及び溶接条件の設定
（熱処理）	溶接残留応力	・溶接残留応力を許容値以下にするための熱処理条件の設定
検査	溶接欠陥寸法、K_{ISCC}、K_{IHE} オーバーパックの質量	・必要に応じて超音波探傷法等の精度向上（フェーズドアレイ法で 2 mm 以上の溶接欠陥は検出可能）
地下への搬送	－	・搬送装置の開発及び実証
処分孔への定置	オーバーパック中心軸から緩衝材内側までの距離	・定置装置の開発及び実証

(b) 緩衝材の製造・施工プロセス管理手法の素案

緩衝材の製造・施工プロセス管理手法の素案（原子力機構・原環センター, 2022）を基にして、緩衝材の製造・施工プロセス、管理項目及び今後の研究開発課題を整理した結果を表 5.2-10 に示す。これまでに実施された研究開発では、複数の緩衝材ブロックが製造された実績があり（原環センター, 2004）、緩衝材ブロックの基本的な製造技術は整備されていると考えられる。また、真空把持装置を用いて緩衝材ブロックを模擬処分孔に定置する技術の実証的な取組も地上施設で行われている（原環センター, 2013）。一方で、これまでの試験で製造された緩衝材ブロックには局所的に乾燥密度が低い領域が存在することが確認されている（原環センター, 2004）。そのため、緩衝材ブロック中の乾燥密度分布の許容範囲の設定や均質な乾燥密度のブロックを製造するための成型条件などが今後の研究開発課題となる。また、地下施設での使用を具体的な想定した搬送・定置装置の開発及び実証も今後の研究開発課題になる。

表 5.2-10　緩衝材の製造・施工プロセス管理手法の素案と研究開発課題

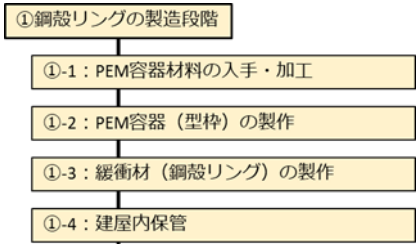
プロセス	管理項目	今後の研究開発課題
材料調達	土粒子密度 モンモリロナイト含有率	－
材料混合	ケイ砂の混合率 含水比	－
ブロック成型	混合土の質量 成型圧力	・乾燥密度の均質性の確保
検査	寸法 質量 外観	－
地下への搬送	－	・搬送装置の開発及び実証
処分孔への定置	緩衝材と岩盤の隙間の厚さ	・定置装置の開発及び実証 （真空把持装置による実証試験の実績あり）

(c) PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案

PEM 容器については、従来の無孔型に加えて PEM 容器内への地下水の浸潤が均一となるように有孔型の容器の検討が進められている（鈴木ほか, 2022）。ただし、現時点では有孔型の PEM 容器に関する製作試験等が実施されていないため、ここでは無孔型の PEM 容器を対象として製造・施工プロセス管理手法の素案を整備する。

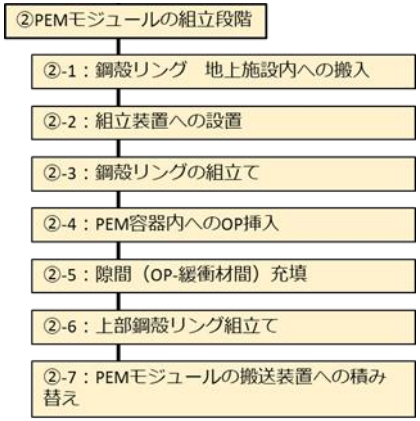
これまでに実施された鋼殻リング方式の PEM の製作試験（原環センター, 2010 ; 2011 ; 2012）及び地上施設及び地下施設におけるエアベアリング方式による PEM の搬送・定置の実証的な試験（原環センター, 2018c ; 2019）などを参考にして製造・施工プロセスについて検討した。PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案を表 5.2-11～表 5.2-13 に示す。また、PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案を基にして、PEM の製造・施工プロセス、管理項目及び今後の研究開発課題を整理した結果を表 5.2-14 に示す。

表 5.2-11　PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案（製造・組立段階）(1)

製造・組立フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
	①-1 PEM 容器の材料調達（炭素鋼）	・ 材料	・ 設計仕様や事前の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
	①-2 PEM 容器（型枠）の製作	・ 寸法 ・ 接合部の構造	・ 設計仕様や事前の開発段階で設定した範囲に収まっていること	・ ノギス等による計測 ・ 学会などの基準に沿った試験方法
	①-3 緩衝材（鋼殻リング）の製作※	・ 材料 ・ 材料の混合率 ・ 寸法（鋼殻リングの寸法によって決定） ・ 質量	・ 均質性；材料の分離がないように投入されていること ・ 投入量；事前の開発段階で設定した範囲に収まっていること ・ 転圧設定；事前の開発段階で設定した所定の機械を使用し、所定の設定（転圧面高さ、転圧回数など）であること	・ 目視による均質性の確認 ・ 投入量の重量測定 ・ 施工者の点検管理シート（転圧機械、転圧回数） ・ 適宜立ち入り検査（動作試験等）
	①-4 建屋内保管※	・ 温湿度 ・ 保管方法、手順	・ 保管の場所・方法の適切性；事前の開発段階で設定した範囲に収まっていること	・ 適宜立ち入り検査 ・ 保管環境の管理状況、記録の確認

※（原子力機構・原環センター, 2022）を参照

表 5.2-12　PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案（製造・組立段階）(2)

製造・組立フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
	②-1 鋼殻リングの搬入	・ 寸法	・ 外観；歪み、破損等の欠損がないこと	・ 目視
	②-2 組立設備への設置	・ 寸法 ・ 接合方法	・ 位置；事前の開発段階で設定した方法、手順に従っていること	・ 手順の確認 ・ 目視
	②-3 鋼殻リングの組立	－	－	－
	②-4 PEM 容器への OP 挿入	＜放射線管理区域＞ ・ 寸法	・ PEM容器及び緩衝材に対するOPの位置；事前の開発段階で設定した範囲に収まっていること ・ 遠隔性；上記の確認を遠隔でできること	・ 目視（カメラ）、レーザなど
	②-5 隙間充填	＜放射線管理区域＞ ・ 緩衝材（ペレットの材料、 ・ 材料の混合率 ・ （OP-緩衝材の）寸法 ・ 緩衝材（ペレット）の質量	・ 均質性；ペレットの充填にムラがないこと ・ 投入量；事前の開発段階で設定した範囲に収まっていること ・ 遠隔性；上記の確認を遠隔でできること	・ 目視（カメラ）による均質性の確認 ・ 投入量の重量測定 ・ 施工者の点検管理シート（充填機械等） ・ 適宜立ち入り検査（動作試験等）
	②-6 上部鋼殻リングの組立て	＜放射線管理区域＞ ・寸法 ・接合方法	・ 位置、組立精度；事前の開発段階で設定した範囲に収まっていること ・ 遠隔性；上記の確認を遠隔でできること	・ 目視（カメラ）、レーザなど
	②-7 搬送装置への積み替え（転胴）	＜放射線管理区域＞	・ PEM容器の毀損に配慮した転胴・積み替え方法であること ・ 遠隔性；上記を遠隔でできること	・ 転胴・積み替え機器の点検

※（原子力機構・原環センター, 2022）を参照

表 5.2-13　PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案（搬送・定置段階）

製造フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
①PEMモジュールの搬送 ①-1：アクセス坑道（斜坑）での搬送 ①-2：定置装置への積み替え ②PEMモジュールの定置 ②-1：台座コンクリートの設置 ②-2：PEMモジュールの所定数の定置 ②-3：埋戻し	①搬送工程全体		・ 事前に設定した製造の管理指標を満足すること ・ 定置に適した状態でモジュールを供給できること	・ 事前に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）
	①-1 アクセス坑道	・ 搬送環境	・ PEM モジュールを搬送するのに適切な搬送環境であること（滴水状況等）	・ 搬送前に坑道（インバート）の状況を確認 ・ 湧水の多い部分については遮水シートを坑道壁面に設置　等
	①-1 搬送装置	・ PEM の固定	・ PEM 容器の毀損に配慮した搬送方法であること	・ 固定具の確認 ・ 搬送速度の調整
	①-2 定置装置への積み替え	・ 積み替え機器	・ PEM容器の毀損に配慮した積み替え方法であること ・ 遠隔性；上記を遠隔でできること	・ 積み替え機器の点検 ・ PEM 外観の目視確認（カメラ）
	②定置工程全体		・ 事前の開発段階で設定した製造の管理指標を満足すること	・ 事前に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 台座部のコンクリート	・ コンクリートの配合・強度	・ 仕様を満たす標準配合を設定すること ・ 適切に現場配合を実施すること ・ スランプ値	・ 標準示方書等に即した配合設計の実施 ・ JIS 等に示されたスランプ試験（スランプフロー試験）の実施
	②-2PEM モジュールの定置	・ PEM モジュールの位置	・ 台座に対して適切に設置されること ・ 隣接する PEM との距離が適切であること	・ 定置装置のガイド
	②-3 埋戻し（狭隘部）※	・ 埋戻し	・ 所定の量の埋戻し材を投入すること ・ 所定の埋戻し機械が適切に稼働すること	・ 所定の機器の管理 ・ 事前の試験等で定めた埋戻し方法

※（原子力機構・原環センター, 2022）を参照

表 5.2-14　PEM の製造・施工プロセス管理手法の素案と研究開発課題

プロセス	管理項目	今後の研究開発課題
材料調達	弾性係数 ポアソン比 降伏応力	－
PEM 容器の製作	寸法	・PEM 容器製作の実証 （鋼殻リング方式の製作試験の実績あり）
PEM 容器の組立（緩衝材製作、オーバーパック挿入）	緩衝材の乾燥密度	・PEM 容器組立の実証 ・PEM 内の緩衝材施工方法の実証 （鋼殻リング方式の製作試験の実績あり）
検査	外径 質量	－
地下への搬送	－	・搬送装置の開発及び実証
処分坑道への定置	－	・定置装置の開発及び実証 （エアベアリング方式の搬送・定置試験の実績あり）

(3) 性能確認プログラムの素案の整備

性能確認プログラムは被ばく管理に関する評価に必要な情報を取得するための取組である。表 5.2-4 に示した方向性②（原位置測定及びモニタリングに係る活動を最小化）で性能確認プログラムを具体化するためには、操業期間中に表 5.2-8 に示した環境要因などの情報を取得するだけではなく、図 5.2-4 に示すように操業前の段階における取組も重要となる。操業期間中に拡充・精緻化される環境要因を用いて閉鎖後のバリア性能を評価し、バリア性能を発揮する見通しがあることを示すためには、地下構成要素の性能評価や安全評価のためのデータを事前に準備しておく必要がある。地下構成要素の設計の段階では、概要調査及び精密調査の期間に測定される環境要因に対して、空間的及び時間的な変動の幅を考慮して室内試験や解析などで設計のためのデータが取得されることになると考えられる。これらの設計用データは、性能評価や安全評価用のデータとして利用することができる。また、室内試験や解析では把握することが難しい事象については、地上施設や地下研での試験、または精密調査段階に実施される地下調査施設での実証試験などで性能評価や安全評価用データを取得しておくことになる。本事業では、これらの実証試験等を実施するうえで有効と考えられる無線技術についての研究開発にも取り組んでおり、その詳細は文献（原子力機構・原環センター, 2023）に記載した。

図 5.2-4 に示した設計用パラメータの中の岩盤材料パラメータについては、地下構成要素の設計の妥当性を確認するためのデータになる。概要調査段階のボーリング調査や物理探査では、処分場全体の地質環境特性を正確に把握することは難しいため、地質環境特性の空間的な分布を想定したうえで裕度を考慮した地質環境特性が設定されて地下構成要素の設計が実施されると考え

られる。地質環境特性は、精密調査段階及び処分場の操業段階における地下坑道の展開と供に詳細に把握することができるため、掘削時或いは操業期間中に岩盤材料パラメータを取得することで地下構成要素の設計の妥当性を確認することができると考えられる。

また、定期的な評価では、最新の技術的知見を踏まえて被ばく管理に関する評価が実施される。坑道掘削時や操業期間中に詳細に把握される性能評価や安全評価用データは、最新の技術的知見の一つと考えることができ、把握された岩盤の情報を用いることで、被ばく管理に関する評価で設定されている岩盤のパラメータの適切性の確認や岩盤パラメータを更新した評価を実施して、評価結果を更新していくことも考えられる。

表 5.2-8 に示したパラメータの測定の要否、測定頻度や測定場所は、地質環境等によって異なると考えられるため、サイト調査の進捗に応じて検討する必要がある。また、図 5.2-4 に示した性能確認プログラムの素案は、今後、関係者間で品質保証体系について議論をするための基礎となるものであり、地層処分事業の進捗に応じて適切に更新していく必要がある。

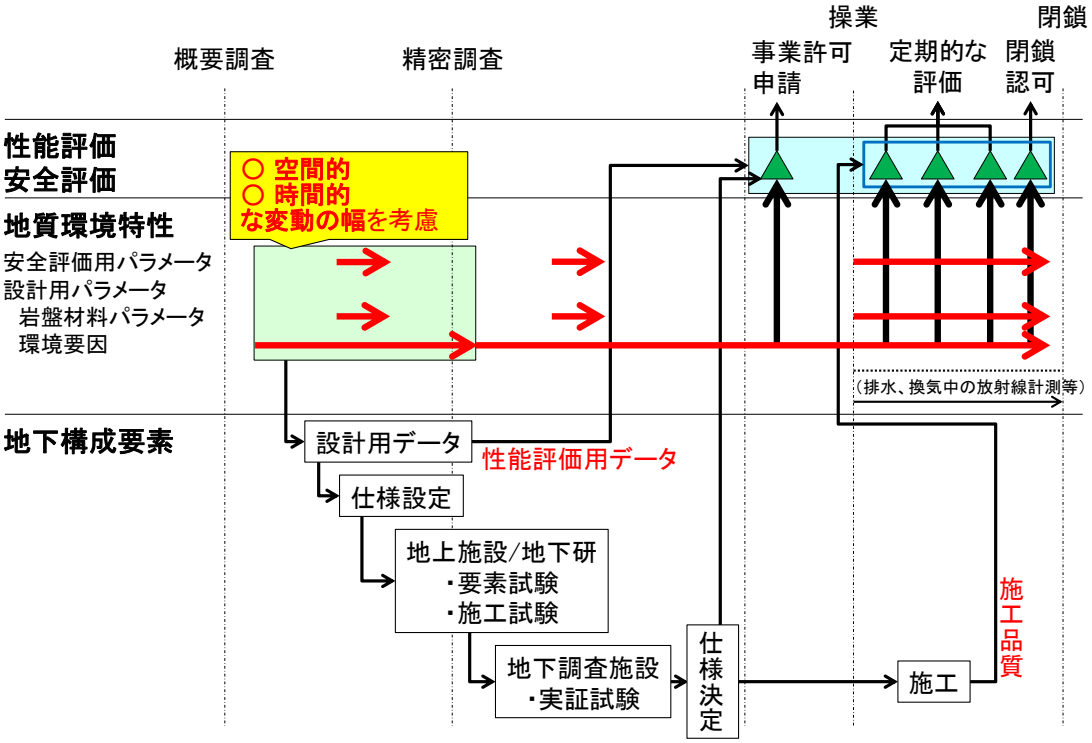


図 5.2-4　性能確認プログラムの素案

5.3 地下構成要素を対象とした計測関連技術の整備

地下構成要素の品質確認や性能確認のためには、地上施設または地下施設での長期間の要素試験や実証試験などを実施することが考えられる。とくに実証試験では多くの計測機器を設置することになるが、計測データの収集および計測機器への電力の供給に有線ケーブルを使用する場合、ケーブルの存在が場を乱し、正確なデータが取得できない可能性がある。また、実証試験における施工時には、大量の計測ケーブルの保護や取り回し等の作業負荷を増大させ、断線のリスクも伴う。これらのケーブルを敷設せずに計測データを収取できる無線伝送技術及び計測機器に電力を供給できる無線給電技術は、そのような懸念への対応策の一つであり、計測項目の種類に関わらず利用できる計測機器のための共通技術と位置付けられる。

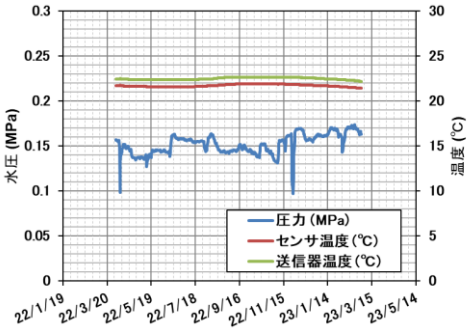
無線伝送システムについては、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターで実施され

ている人工バリア性能確認試験に組み込んだ無線伝送装置（原環センター, 2015）の運用を 2022 年度も継続しており、その運用実績から無線伝送システムに関する実用技術としての信頼性向上に向けてデータ取得を進めた。無線給電技術については、これまでに要素試験で取得した送受電コイル間の媒体と給電効率の関係のデータを用いて、人工バリア性能確認試験を例題として、地下環境での実証試験などに適用を想定した無線給電システムの設計方法を整備した。

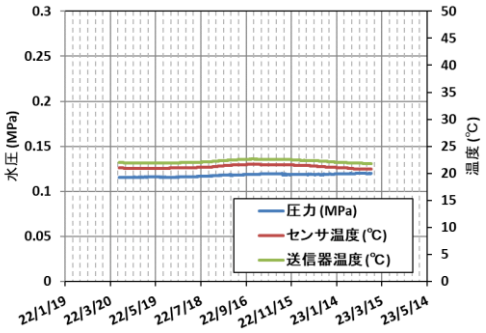
5.3.1 地下環境における無線伝送技術に対する信頼性の向上

2014 年度から幌延深地層研究センターで実施されている人工バリア性能確認試験では、緩衝材と埋戻し材の中に設置した一部の土圧計と間隙水圧計の出力を無線で伝送するための送信機が設置されている（原環センター, 2015）。送信機から送られたデータは、地中を通り力学プラグの外側のボーリング孔に設置された受信機を介して現在まで継続的に PC に蓄積されている。送信機の直径は 60 mm、長さは 240 mm であり、内部には塩化チオニルリチウム電池（19 Ah）が内蔵されている。各センサで 1 日に 1 回測定したデータを送信機に保存しておき、1 週間に 1 回の送信を実施している。この送信頻度であれば、送信機の設計上の寿命は 10 年程度と考えられている。

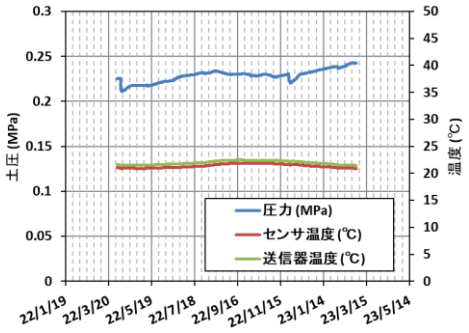
人工バリア性能確認試験における緩衝材ブロック及び埋戻し材ブロックの中に設置した間隙水圧計と土圧計の無線伝送データを図 5.3-1 及び図 5.3-2 にそれぞれ示す。また、2014 年度の試験開始から 2023 年 2 月末までの無線伝送データの一部を抜粋して図 5.3-3 に示す。人工バリア性能確認試験の開始から 8 年以上経過したが、データの欠損もなく無線で継続的にデータが送信されていることがわかる。このことから、10 年程度の期間の実証試験等においてケーブルを用いることなく、各種のセンサからの出力を無線伝送システムによってデータ送信が可能な見通が得られた。センサ及び電源の寿命を向上させることができれば、更に長期間の運用に供することが可能と考えられる。



(a) 間隙水圧データ（002 局）

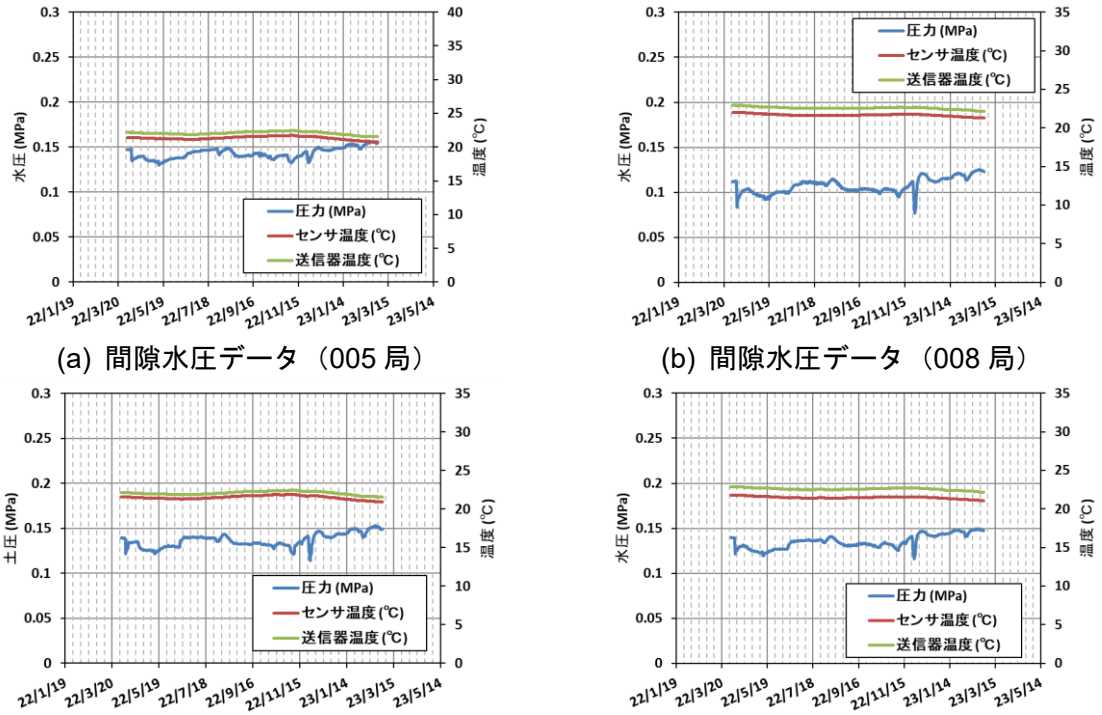


(b) 間隙水圧データ（004 局）



(c) 土圧計データ（003 局）

図 5.3-1　緩衝材ブロックに設置したセンサの無線伝送データ



(a) 間隙水圧データ（005 局）　(b) 間隙水圧データ（008 局）

(c) 土圧計データ（006 局）　(d) 土圧計データ（007 局）

図 5.3-2　埋戻し材ブロックに設置したセンサの無線伝送データ

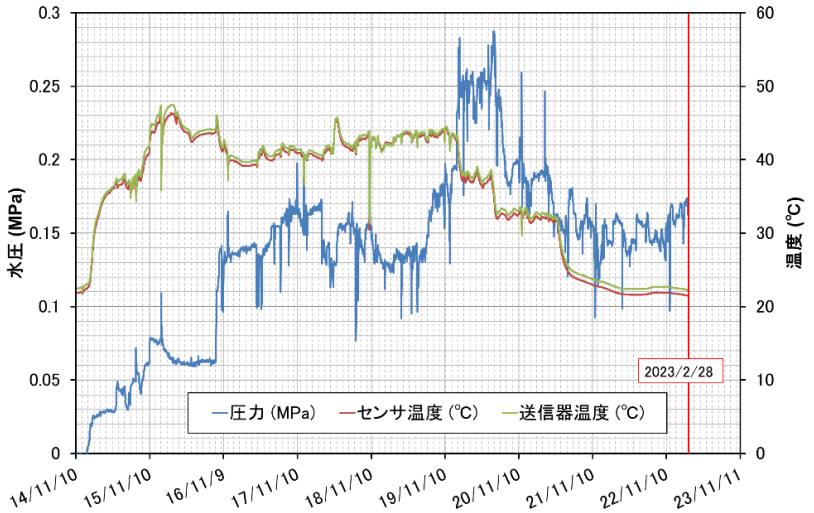


図 5.3-3　緩衝材中の間隙水圧計（002 局）の無線伝送データ（全試験期間）

5.3.2 地下環境における無線給電技術の高度化

(1) 地下環境を想定した無線給電システムの設計方法

(a) 無線給電の原理

無線給電技術には表 5.3-1 に示すように磁界、電界及び電磁波を用いた給電方式があり、磁界及び電界には、コイルの共振現象を利用した磁界共振結合と電界共振結合がある（原環センター, 2015）。これらの共振結合のうち、電界はベントナイトを媒体とすると損失が大きいことが知られているため（長井ら, 2014）、給電効率の観点から磁界共振結合方式を技術開発の対象として選択

した（原環センター, 2016）。

磁界共振結合方式による無線給電では、図 5.3-4 に示す電源の周波数、送電器の共振周波数及び受電器の共振周波数を一致させることで高い給電効率が得られる。送受電器は、コイルとコンデンサで構成され、共振周波数f_0は式 5.3-1 で表される。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \text{式 5.3-1}$$

ここで、Lはコイルの自己インダクタンス、Cはコンデンサのキャパシタンスである。磁界共振結合方式では、交流を負荷した送電器のコイル（1 次コイル）で発生する磁束を受電器のコイル（2 次コイル）で受け取ることで電力を送受電している。この電力の供給効率は、受電電力（W）／送電電力（W）＝給電効率（%）として算出される。

表 5.3-1　無線給電方式の分類

給電方式	電磁界（近傍界）				電磁波（遠方界）
原理など	磁界		電界		光、電波
	電磁誘導（磁界結合）	磁界共振結合（磁界共鳴）	電界結合	電界共振結合	レーザ マイクロ波

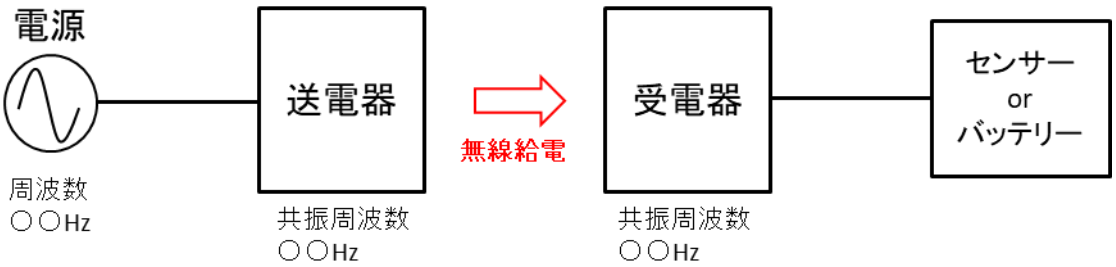


図 5.3-4　磁界共振結合のイメージ図

(i) 単純な系（送電：受電＝1:1）における給電効率の算出方法

1 対の送受電器による磁界共振結合の S-S 方式（Series-Series：コイルと共振用のコンデンサを直列に接続する方式）では、図 5.3-5 に示すように送受電コイルなどを等価回路に置き換えた回路解析によって給電効率を算出することができる。

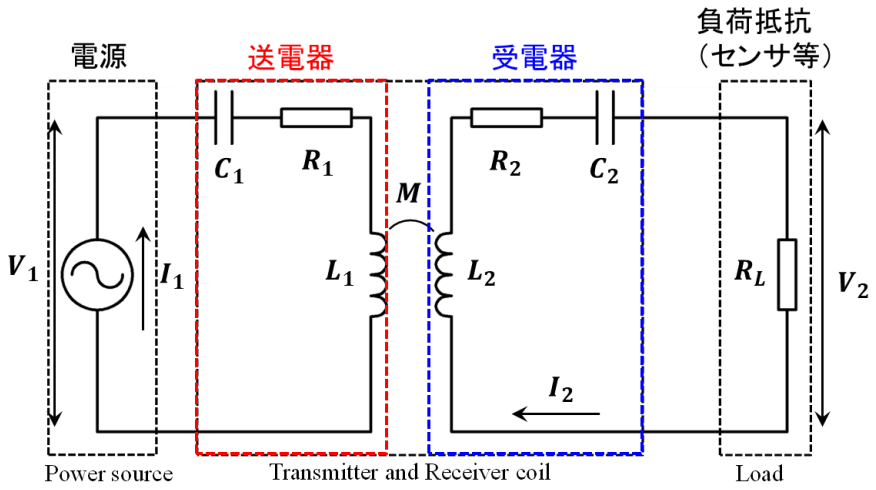


図 5.3-5　1 対の送受電器による磁界共振結合（S-S 方式）の等価回路

図中のMは相互インダクタンス、Cはキャパシタンス、Rは内部抵抗、R_Lは負荷抵抗である。添え字の 1 は送電側、2 は受電側を表している。図 5.3-5 の等価回路は、式 5.3-2 の回路方程式で表すことができ、送電器と受電器の共振周波数f_0（式 5.3-1）が一致（リアクタンス成分がゼロ）するとき、S-S 方式における等価回路は式 5.3-3 で表される。式 5.3-3 に送受電コイルの内部抵抗R及び送受電コイルの離間距離に応じた相互インダクタンスMを代入し、送電器（主電源）で出力する電圧（例えば 100 V）を入力することで、受電器に流れる電流が算出される。送受電器ごとに流れる電流及び電圧を式 5.3-4 に代入することで、給電効率を算定できる。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\left(\omega L_1 - \dfrac{1}{\omega C_1}\right) & j\omega M \\ j\omega M & R_2 + j\left(\omega L_2 - \dfrac{1}{\omega C_2}\right) + R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \qquad \text{式 5.3-2}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & j\omega M \\ j\omega M & R_2 + R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \qquad \text{式 5.3-3}$$

$$\eta = \frac{R_L {I_2}^2}{V_1 I_1} \qquad \text{式 5.3-4}$$

また、Li and Mi（2015）によると、負荷抵抗R_Lが最適負荷R_{Lopt}になるときに最大の給電効率η_{max}が得られることがわかっており、最大の給電効率η_{max}および最適負荷R_{Lopt}は、式 5.3-5 および式 5.3-6 で求められる。

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{\left(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}\right)^2} \qquad \text{式 5.3-5}$$

$$R_{Lopt} = r_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2} \qquad \text{式 5.3-6}$$

ここで、Q（Q値）は周波数fにおけるコイルの性能（共振の周波数特性の鋭さ）を表す尺度であり、式 5.3-7 で表される。送電コイルと受電コイルの共振周波数f_0（式 5.3-1）が一致（リアクタンス成分がゼロ）するときQ値は式 5.3-8 で算出することができる。

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} \qquad \text{式 5.3-7}$$

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad \text{式 5.3-8}$$

結合係数kは、送電器のコイル（1 次コイル）と受電器のコイル（2 次コイル）の結合の度合い（1 次コイルで発生した磁束を 2 次コイルで貫く割合）を示す指標であり、式 5.3-9 で表される。

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (0 \leq k \leq 1) \qquad \text{式 5.3-9}$$

以上より、無線給電における給電効率を理論的に求めるためには、結合係数kとコイル性能の尺度のQ値が必要となる。なお、周波数が一定であれば、Q値はコイル自身の性能（コイルの形状、サイズおよび材質）であるため、正対させた送受電コイルの距離やコイル間に介在する媒質によって変化する結合係数kが給電効率に大きく影響する。

(ii) 複雑な系（送電：受電＝1:n（n≧2））における給電効率の算出方法

1 つの送電器から 2 つ以上の受電器へ給電する方式（インナー方式）による磁界共振結合の S-S 方式についても、図 5.3-6（送電：受電＝1：6 を例にした図）に示されるように、送受電コイルなどを等価回路に置き換えた回路解析によって給電効率を算出することができる。

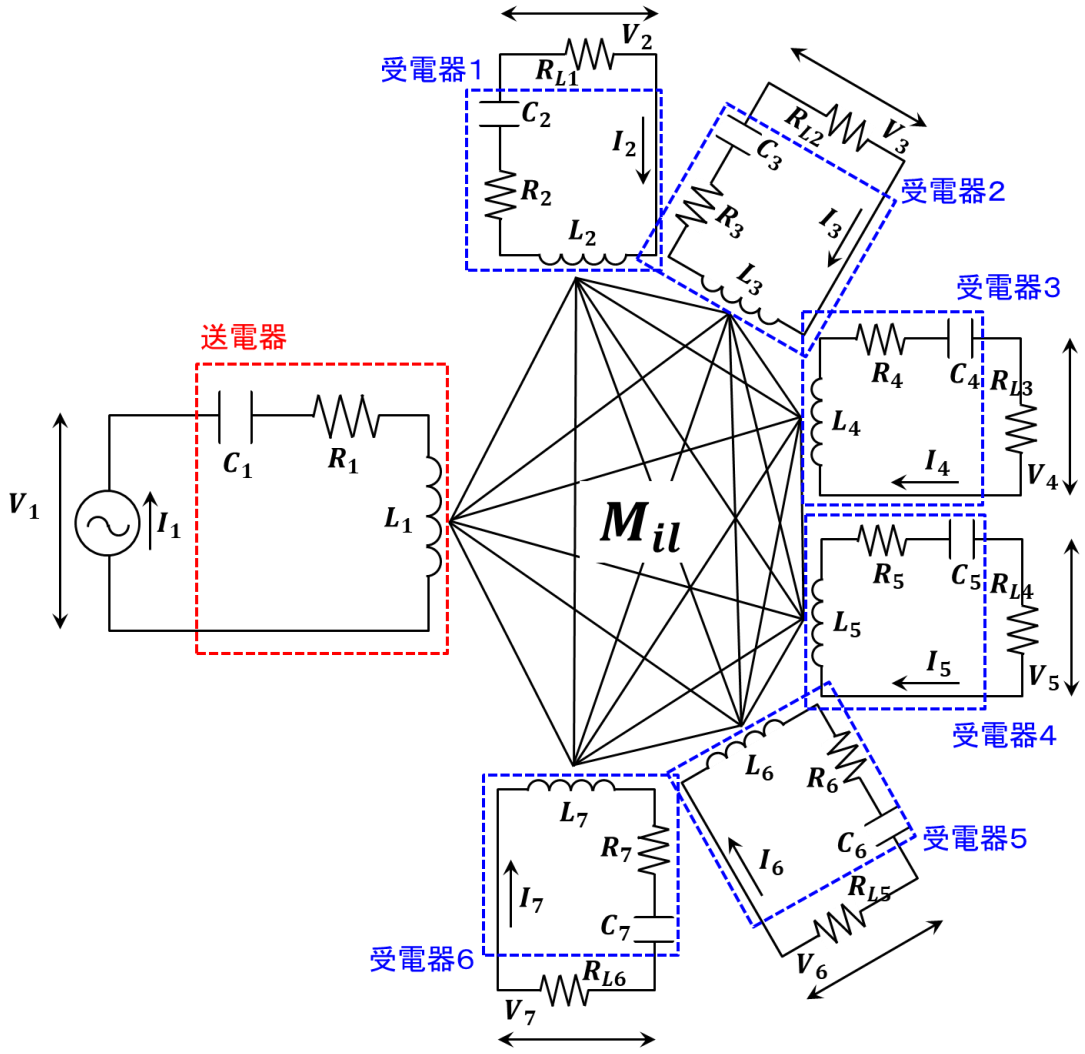


図 5.3-6　送受電器 1：6 における磁界共振結合（S-S 方式）の等価回路

1 つの送電器と 6 つの受電器は、それぞれが結合しており、相互インダクタンスM_{il}で示される。それぞれの結合を回路方程式で表す場合は、送電器の添え字は 1、受電器の添え字は 2~7 とした。なお、受電器固有の負荷抵抗R_Lの添え字は、1~6 で振り分けた。

図 5.3-6 の等価回路は、式 5.3-10 の回路方程式で表されるが、送電器と受電器の共振周波数f_0（式 5.3-1）が一致し（リアクタンス成分がゼロ）、かつ受電コイル間の結合（相互インダクタンス）の影響が小さければ式 5.3-11 で表される。式 5.3-11 に送受電コイルの自己インダクタンスL、内部抵抗R、および送受電コイルの離間距離に応じた相互インダクタンスMを入力し、送電器（主電源）で出力する電圧（例えば 100 V）を入力することで、受電器に流れる電流が算出される。送受電器ごとに流れる電流及び電圧を式 5.3-12 に入力することで、給電効率を算出することができる。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} & A_{17} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} & A_{27} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} & A_{37} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} & A_{47} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} & A_{57} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} & A_{67} \\ A_{71} & A_{72} & A_{73} & A_{74} & A_{75} & A_{76} & A_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} \quad \text{式 5.3-10}$$

$i = l$のとき　$A_{il} = R_i + j\left(\omega L_i - \dfrac{1}{\omega C_i}\right) + R_{L(i-1)}$

$i \neq l$のとき　$A_{il} = j\omega M_{il}$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} & j\omega M_{14} & j\omega M_{15} & j\omega M_{16} & j\omega M_{17} \\ j\omega M_{21} & R_2 + R_{L1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ j\omega M_{31} & 0 & R_3 + R_{L2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ j\omega M_{41} & 0 & 0 & R_4 + R_{L3} & 0 & 0 & 0 \\ j\omega M_{51} & 0 & 0 & 0 & R_5 + R_{L4} & 0 & 0 \\ j\omega M_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 + R_{L5} & 0 \\ j\omega M_{71} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_7 + R_{L6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} \quad \text{式 5.3-11}$$

$$\eta_{total} = \frac{R_{L1}{I_2}^2 + R_{L2}{I_3}^2 + R_{L3}{I_4}^2 + R_{L4}{I_5}^2 + R_{L5}{I_6}^2 + R_{L6}{I_7}^2}{V_1 I_1} \quad \text{式 5.3-12}$$

(b) 実証試験等への適用を想定した送受電コイルの配置例

無線給電システムの設計方法を整備するためには、送受電コイルの設置位置やコイル間に存在する媒体を具体的に想定する必要がある。そのため、幌延 URL で実施されている人工バリア性能確認試験を例として、送受電コイルの設置位置などを設定した。

送受電コイルの設置位置を図 5.3-7 に示す。実証試験等では坑道内のセンサに電力を供給するためにコンクリート製プラグを貫通して多くの電源ケーブルが配線される。これらのケーブルの配線時には、断線のリスクだけでなく施工時の作業量を増加させる。そのため、コンクリート製プラグを介して送電コイル①と受電コイル①を設置する。また、緩衝材ブロックの中に設置したセンサへの電力供給に坑道内から繋がるケーブルを用いた場合には、ケーブルに沿った水の流れなどが生じることで正確なデータが取得できない可能性がある。そのため、試験孔内の埋戻し材の部分に送電コイル②と緩衝材ブロック内に受電コイル②を設置する。試験孔内に設置する送受電コイルについては、設置位置及び受電コイル②からセンサへの接続方法の観点から、図 5.3-8 に示す 3 ケースについて検討した。

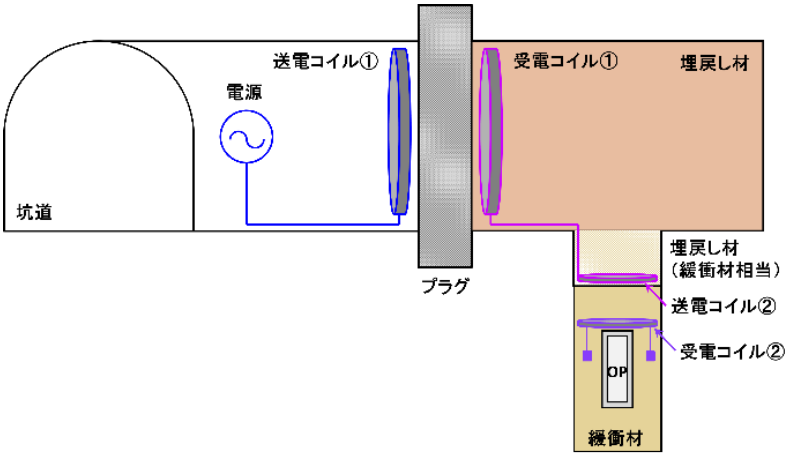


図 5.3-7　送受電コイルの設置位置

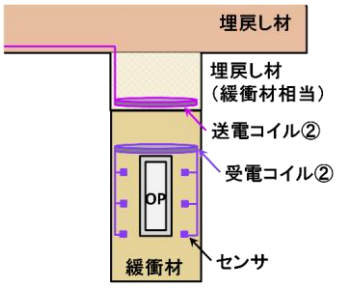
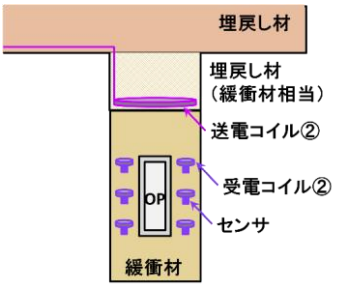
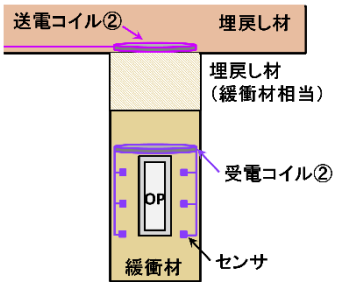
ケース A	ケース B	ケース C
		
・送電コイル② →受電コイル②と近接 ・受電コイル② →一括で受電し、センサと有線接続	・送電コイル② →受電コイル②と近接 ・受電コイル② →センサごとに小型の受電コイル接続	・送電コイル② →試験孔の上部に設置 ・受電コイル② →一括で受電し、センサと有線接続

図 5.3-8　緩衝材内部における無線給電の構成

送電コイル②の設置位置については、ケース A 及び B のように試験孔内の埋戻し材部分に設置する方法とケース C のように試験孔上部の埋戻し材部分に設置する 2 つのケースが考えられる。ケース C では、坑道から試験孔内にケーブルを配線する必要がないことが利点であるが、送受電コイル間の距離が長くなるため給電効率が低下してしまう。そのため、ケース A 及び B に示す試験孔内の埋戻し材の下部に送電コイル②を設置することとした。

受電コイル②からセンサへの給電方法については、ケース A のように受電コイル②から有線でセンサと接続する方法とケース B のように送電コイル②から各センサに接続された小型の複数の受電コイル②に給電する方法が考えられる。しかし、オーバーパックの材料が炭素鋼のような磁性体の場合、送電コイル②から出力される磁力線が炭素鋼に引き寄せられるため、給電効率が大きく低下する可能性がある。そのため、ケース A のように受電コイル②から有線でセンサと接続することとした。本検討で設定した送受電コイル設置位置を対象とした無線給電システムの構成を図 5.3-9 に示す。

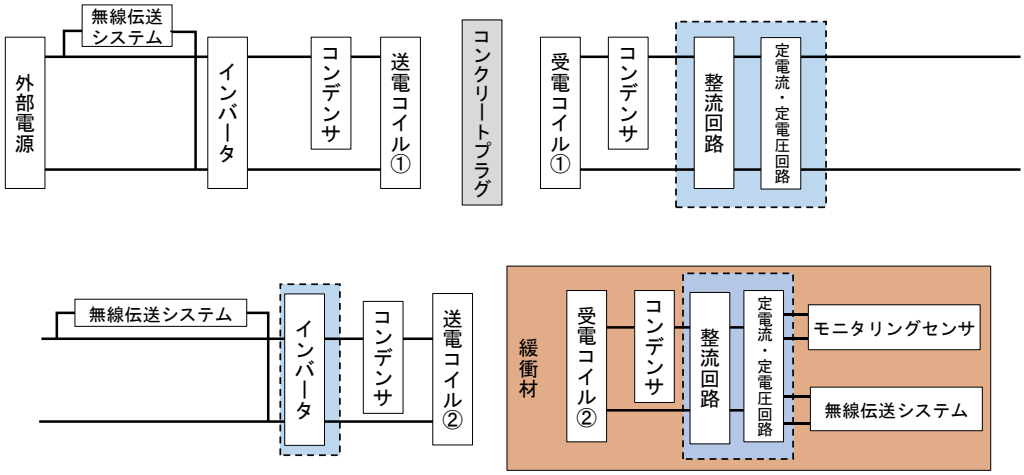


図 5.3-9　本検討で設定した送受電コイル設置位置を対象とした無線給電システムの構成

(c) 無線給電システムの設計方法の整備

図 5.3-9 に示した無線給電システムの構成に基づき、図 5.3-10 に示すフローに沿ってシステムの設計方法について検討する。無線給電システムの設計のためには、センサ（下流側）で必要な電力を把握した上で、送受電コイル間の媒体による給電効率の低下量を考慮して送受電コイル②及び送受電コイル①で必要な電力を算出し、主電源（上流側）で送電する電力を決定する。なお、システム設計の前提として、コイルの設計仕様のうち、コイルの素材（コイルボビン、導線）、導線の巻き数、コイル形状（ヘリカル型）は送受電コイル①と②で統一した。

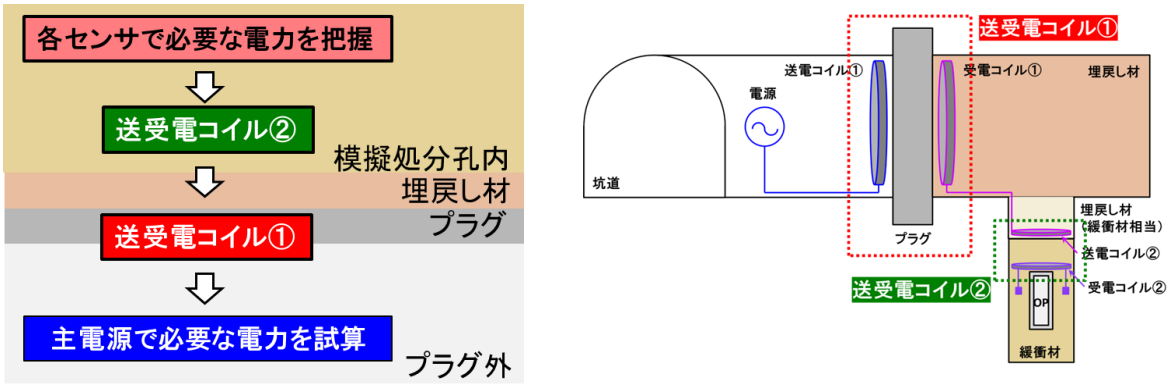


図 5.3-10　無線給電システムの設計方法の検討フロー

(i) 各センサへ給電する送電コイル②の給電効率の算出方法（試験孔内）

試験孔内に設置した各センサに必要な電力を供給するため、送受電コイル②の給電効率を図 5.3-11 に示す手順で見積もった。

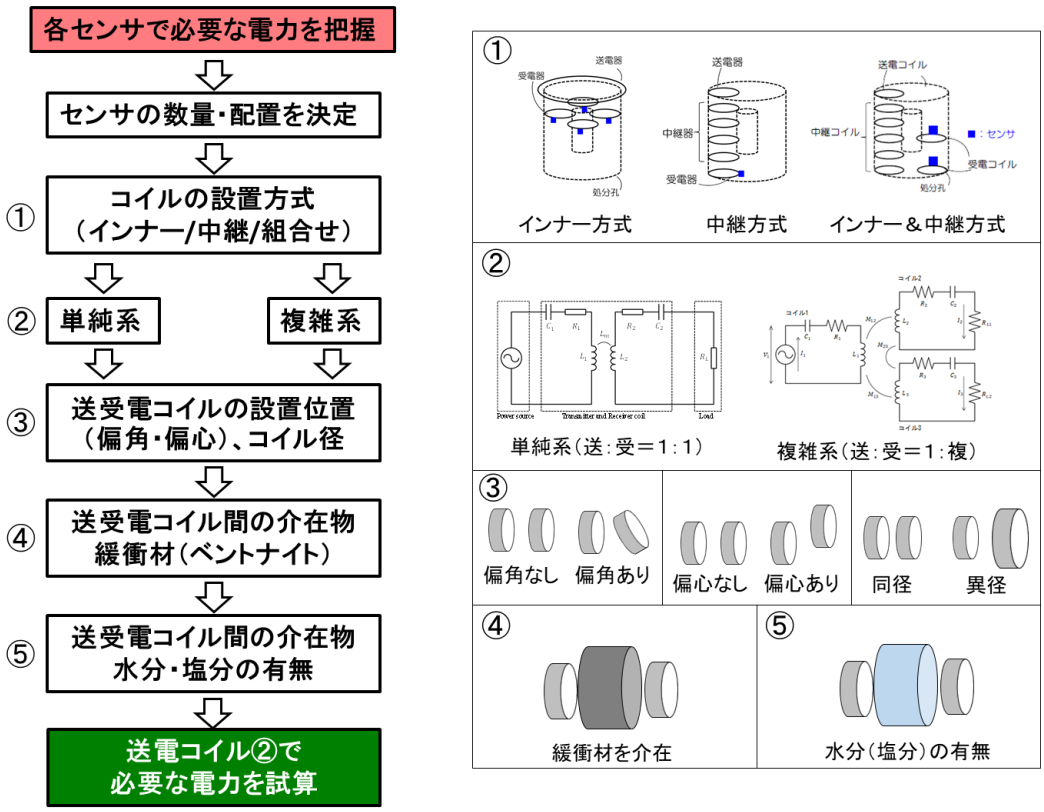


図 5.3-11　各センサに給電する送受電コイル②の給電効率の見積り手順

試験孔内のセンサの数量および配置に応じて、「①コイルの設置方式」を設定する。1 つの送電コイルから複数の受電コイルに送電する方式（インナー方式）、1 つの送電コイルから受電コイルへ送電する際、送受電コイル間の距離による給電効率の低下を抑制するために中継コイルを介する方式（中継方式）、インナー方式と中継方式の組合せ等が選択肢としてある（原環センター, 2018a, 原子力機構・原環センター, 2019）。コイル径、コイル間距離、センサごとに受電コイルの組込みが可能か否かなどを考慮して設置方式を選択する。インナー方式、中継方式および組合せ方式による給電効率の算出では、相互インダクタンスの考慮の有無等によって等価回路の系（上図②の単純系か複雑系）が定まる（原環センター, 2018a, 原子力機構・原環センター, 2019）。

「①コイルの設置方式」で考慮したコイル間距離を踏まえ、「③送受電コイルの設置位置」による給電効率を補正する。送受電コイルの径の違い、送受電コイル面の偏角および偏心は、送電コイルで生成される磁束の違い、および受電コイルで鎖交する磁束密度の違いを生じさせる要因となっているため、これまでに実施した要素試験で給電効率が把握されている（原環センター, 2017）。

送受電コイル間に介在物が存在する場合、「④⑤送受電コイルの介在物（緩衝材、水分・塩分）」による給電効率を補正する。介在する物質は、受電コイルで鎖交する磁束密度に違いを生じさせる要因となっており、要素試験により給電効率が把握されている（原環センター, 2015 ; 2018a）。緩衝材（ベントナイト）が介在する場合では、給電効率の低下は小さいが、塩水が介在する場合には、塩分濃度が高くなるにつれて給電効率が低下する傾向がある。

(ii) 送電コイル②へ給電する送受電コイル①の給電効率の算出方法（プラグ内外）

試験孔内に設置した送電コイル②に必要な電力を供給するために、送受電コイル①の給電効率

を図 5.3 12 に示す手順で見積もった。

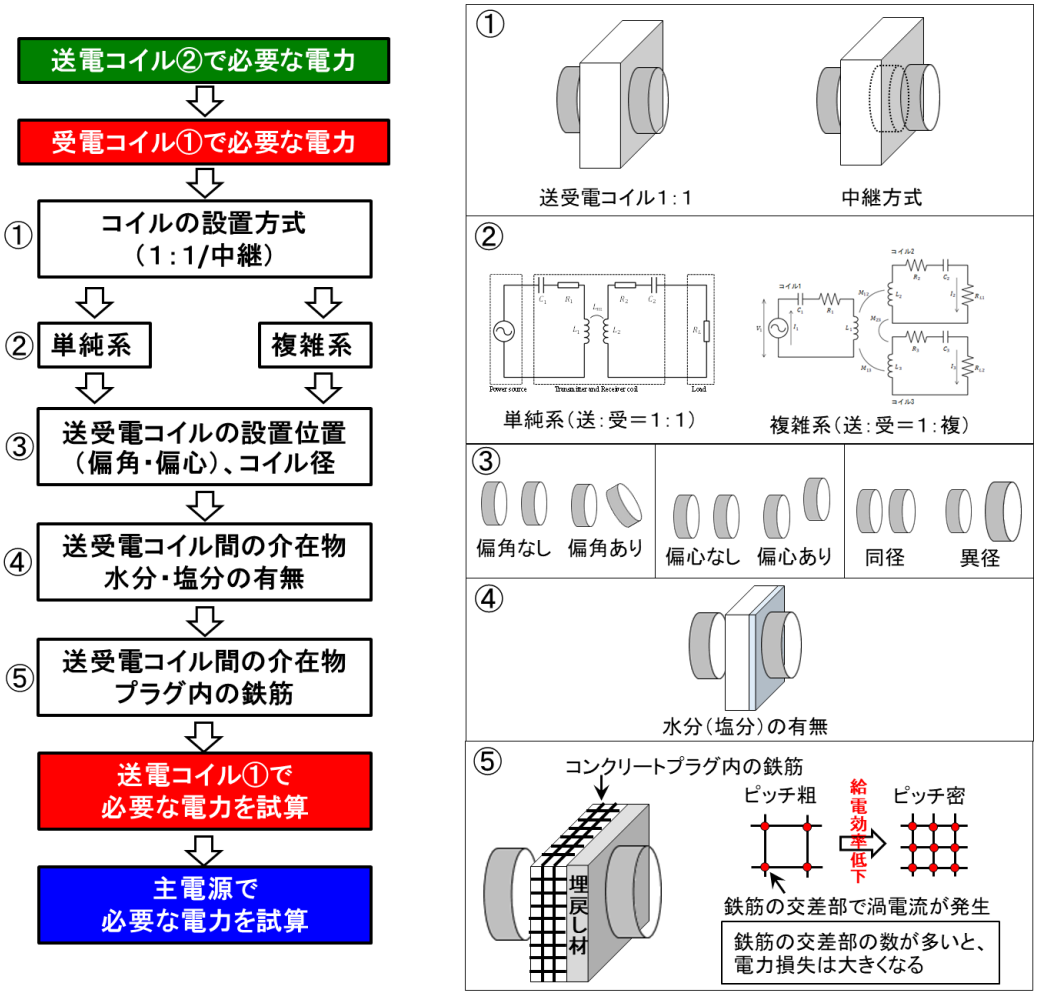


図 5.3-12　送受電コイル①の給電効率の見積り手順

受電コイル①と送電コイル②は有線接続としており、その間の電力損失などの影響は考慮しないこととする。そのため、送電コイル②で必要な電力は、受電コイル①に必要な電力として考える。

「①コイルの設置方式」は、必要な電力やプラグの厚さに応じて設定することになる。今回の設計方法の検討では、プラグを介して送電コイルと受電コイルは 1:1 で設置することにしているが、プラグの厚さによってはプラグ内に中継コイルを設置して給電することも可能である。ただし、中継コイル自体がプラグの性能を低下させる可能性に留意が必要である。送受電コイル 1:1 の場合、等価回路は「②単純系」となり、中継コイルの場合は相互インダクタンスの考慮の有無により等価回路は単純系か複雑系の選択となる（原環センター, 2018a, 原子力機構・原環センター, 2019）。

「①コイルの設置方式」で考慮したコイル間の距離を踏まえ、「③送受電コイルの設置位置」による給電効率を補正する。送受電コイルの径の差及び送受電コイル面の偏角および偏心は、送電コイルで生成される磁束の違い及び受電コイルで鎖交する磁束密度の違いを生じさせる要因となるため、これまでに実施した要素試験で給電効率が把握されている（原環センター, 2017）。また、給電効率は基本的にコイル径とコイル間距離の比で決まるため、コイル径に対するスケール効果

が給電効率に及ぼす影響は無視できるほど小さいことが確認されている（原環センター, 2016）。具体的には、コイル径 700 mm と 3,000 mm の送受電コイルでは、その他の条件（コイル径とコイル間距離の比、コイル間の介在物等）が一致していれば、給電効率は同じとなる。

送受電コイル間に介在物が存在する場合、「④及び⑤送受電コイル間の介在物（コンクリート、鉄筋、水分・塩分）」による給電効率を補正する。介在する物質は、受電コイルで鎖交する磁束密度に違いを生じさせる要因となっており、給電効率の低下の程度が要素試験で把握されている（原環センター, 2017；2018a, 原子力機構・原環センター, 2022）。コンクリートが介在する場合では、給電効率に与える影響は小さいが、塩水が介在する場合では、塩分濃度が高くなるにつれて給電効率は低下する傾向がある。また、プラグ内に配筋される鉄筋の存在は、給電効率を大きく低下させることが分かっており（原環センター, 2017）、コイルと鉄筋の距離を近づけることによる共振周波数の差の増加、鉄筋量の増加（鉄筋ピッチが密）、および鉄筋交差部の数の増加（渦電流の発生）が給電効率を低下させる要因である（原子力機構・原環センター, 2022）。給電効率の低下を回避する対策として、主電源及び送受電コイル①、②の共振周波数の調整（原環センター, 2017）、鉄筋交差部の絶縁処置による渦電流の発生の抑制（原子力機構・原環センター, 2022）といった方法がある。本設計方法では、給電効率の低下を抑制する効果が大きく、かつ簡易な方法である鉄筋交差部の絶縁処置を組み込むこととした。

(iii) 給電電力の試算方法および留意点

給電効率を低下させる個々の影響因子について、これまでに要素試験および回路解析により検討を進めてきた。しかし、実設計では複数の影響因子が並存するため、影響因子同士の相互作用を評価するための要素試験や回路解析による確認が必要である。本設計方法では、現段階で得られた知見に基づき、センサに必要な電力に給電効率を乗じることで、主電源で必要な送電量を見積もることとした。

(iv) 送受電コイル①②の回路設計の方法

送受電コイルは、コイル、コンデンサ、インバータ、整流回路、定電流・定電圧回路で構成させる回路とする。送受電コイルの設計方法として、磁界共振結合方式による無線給電システムとしているため、コンデンサを共振器として扱い、所定の共振周波数となるようにコイルのインダクタンスを考慮したコンデンサの容量を設定する。整流回路およびインバータは、電流、電圧、周波数を考慮して選定する。

(v) 主電源から送電コイル①までの設計

送電コイルおよびシステム回路に必要な量と質の電力を供給するためには、主電源（商用電源周波数の交流）を直流に変換する回路を準備する必要がある。変換した直流から所定の共振周波数に調整した交流電流に変化させるときにはインバータを利用する。インバータは、電流、電圧、周波数を考慮して選定する。

(d) 無線給電システムの仕様項目

地下施設での実証試験等で緩衝材や埋戻し材中に設置されたセンサに対して長期間の無線給電を実施するためには、送受電コイルを設置する場所の環境条件（圧力や地下水条件）や模擬廃棄体の発熱の影響などを踏まえた仕様が要求される。したがって、これらの環境や要求に適合できるシステムとするために、以下の仕様を満足する必要がある。

・試験期間中にメンテナンスフリーでの動作が保証できる。

・無線給電システムの構成要素が水密性を維持できる。
・塩水を含む地下水溶存成分に対して腐食などの劣化による性能低下がない。
・想定される温度条件での作動が保証できる。

(2) 地下施設への適用を想定した無線給電システムの試設計

前述した無線給電システムの設計方法に基づき、幌延深地層研究センターで実施されている人工バリア性能確認試験の設計仕様を対象として、力学プラグを介した無線給電システムを試設計し、システム適用に向けた課題を抽出した。

(a) センサ等の情報および設計条件

人工バリア性能確認試験で使用されているセンサの種類および数量（中山ほか, 2019）を表 5.3-2 に示す。人工バリア性能確認試験で使用されているセンサは、市販品のものに加えて特別に製作されたセンサなどがあり、全てのセンサについて電力値などの詳細情報を把握するには至らなかった。一般的に、センサの消費電力は大きくないことが想定されるため、1 つのセンサに対して USB3.0（定格電圧 5 V、消費電力 4.5 W）の電力供給で動作すると仮定した。

表 5.3-2　人工バリア性能確認試験で使用されているセンサの一覧
（中山ほか, 2019）

測定対象	センサ	数量
模擬オーバーパック	温度計	10
緩衝材	土圧計	13
	土圧計（無線伝送）	1
	水圧計	16
	水圧計（無線伝送）	2
	伸び変位計	6
	光学 pH 計	9
	温度計	12
	電位計	9
	腐食ポテンシャル	12
	相対湿度	6
	乾湿計	9
	FDR 土壌水分計	6
	ひずみ計	16
埋戻し材	土圧計	31
	土圧計（無線伝送）	2
	FDR 土壌水分計	15
	水圧計（無線伝送）	2
	ケーブル TDR	1
プラグ	ひずみ計	8
	土圧計	10

(b) 無線給電システムの試設計

人工バリア性能確認試験で使用されているセンサ等の情報および設計条件を踏まえたセンサの継続稼働に必要な主電源の出力値について、設計方法に従い算出した結果を表 5.3-3 に示す。

表 5.3-3　プラグ内に設置したセンサの稼働に必要な電力（試算値）

フロー	給電効率（%）	必要な電力（W）	説明
試験孔内			
1 つのセンサ	－	4.5	USB3.0 で電力供給（定格電圧 5V）
試験孔内のセンサ	－	571.5	全数量：127 個 受電コイル②で必要な電力
送受電コイル②の設置方式	87	656.9	1：1 で設置、単純系の等価回路
送受電コイル②の設置位置	100	656.9	偏角・偏心なし、直径 0.7 m
コイル②間に緩衝材が介在	100	656.9	ベントナイトの影響小
コイル②間に塩水が介在	85	772.8	塩分濃度 19 SPU（海水の 1/2）
送電コイル②で必要な電力	－	772.8	
埋戻し材及びプラグ内			
1 つのセンサ	－	4.5	USB3.0 で電力供給（定格電圧 5V）
埋戻し材及びプラグ内のセンサ	－	310.5	全数量：69 個
上記+送受電コイル②	－	1,083.3	受電コイル①で必要な電力
送受電コイル①の設置方式	87	1,245.2	1：1 で設置、単純系の等価回路
送受電コイル①の設置位置	100	1,245.2	偏角・偏心なし、直径 3.0 m
コイル①間に塩水が存在	85	1,464.9	塩分濃度 19 SPU（海水の 1/2）
コイル①間にプラグが存在	77	1,902.5	コンクリートの影響小、鉄筋ピッチ 300 mm（絶縁対策済）
プラグ外			
送電コイル①で必要な電力	－	1,902.5	
主電源で必要な電力	－	1,902.5	

受電コイル②に接続する整流回路および定電圧電流回路は、電力 571.5 W に対応可能な回路、受電コイル①に接続する整流回路および定電圧電流回路は、電力 1,083.3 W に対応可能な回路とした。送電コイル②に接続するインバータは、電力 772.8 W に対応可能なインバータ回路、送電コイル①に接続するインバータは、電力 1,902.5 W に対応可能なインバータ回路を選定する。主電源の設計仕様は、送電コイル①で必要な電力 1,902.5 W を安定して供給可能かつ坑道内に設置可能な寸法のものとする。

以上の検討内容を踏まえて、無線給電システムの仕様案を表 5.3-4 に整理した。インバータ、整流回路、定電流・定電圧回路の仕様については、要求される電力値が決定すれば、電気工学的な知見から回路設計が決定するため、試設計である現段階では詳述しない。

表 5.3-4　人工バリア性能確認試験における無線給電システムの仕様案

システム各部	構成要素	要求性能・要求仕様
電源部	主電源	1,902.5 W の電力を直流で供給できる装置
	インバータ	1,902.5 W の電力（直流）を 100 kHz に変換可能な回路
送電部	コンデンサ	式 5.3-1 より共振周波数を 100 kHz に調整（インダクタンスLに応じて設定）
	送電コイル①	直径 3 m、Q 値 300 程度
プラグ（鉄筋コンクリート）		
受電部	受電コイル①	直径 3m、Q 値 300 程度
	コンデンサ	式 5.3-1 より共振周波数を 100 kHz に調整（インダクタンスLに応じて設定）
	整流回路	1,083.3 W に対応する回路を選定
	定電流定電圧回路	1,083.3 W に対応する回路を選定
孔内送電部	インバータ	772.8 W に対応する回路を選定
	コンデンサ	式 5.3-1 より共振周波数を 100 kHz に調整（インダクタンスLに応じて設定）
	送電コイル②	直径 0.7 m、Q 値 300 程度
緩衝材（飽和ベントナイト）		
孔内受電部	受電コイル②	直径 0.7 m、Q 値 300 程度
	コンデンサ	式 5.3-1 より共振周波数を 100 kHz に調整（インダクタンスLに応じて設定）
	整流回路	571.5 W に対応する回路を選定
	定電流定電圧回路	571.5 W に対応する回路を選定

5.4 品質保証体系の整備に関する今後の研究開発課題

地下構成要素の品質保証体系は、サイト選定の進捗に伴う地質環境条件の詳細化や処分概念の具体化等により更新される。そのため現段階では、本事業で整備した品質保証体系の構築のための考え方ならびに品質管理プログラム及び性能確認プログラムの素案を地層処分の関係者で共有したうえで、関係者間で合意できる素案に更新していくことが必要である。また、品質保証体系の整備に関する今後の課題としては、以下が挙げられる。

- 他の地下構成要素（プラグなど）の品質管理プログラムの具体化
- 性能確認すべき項目の抽出､およびデータ取得場所(室内試験､地上施設/地下研での試験、地下調査施設での実証試験、原位置試験など）の分類
- 品質保証及び性能確認に必要な測定機器の開発
- 環境要因などに関するデータの取得方法の具体化

また、地下構成要素の品質確認や性能確認のための要素試験や実証試験などにおける正確なデータ取得、作業負荷の低減に向けて、ケーブルを用いない方法として無線技術の開発を進めてきた。これまでの取組で取得してきた磁界共振結合方式による無線給電技術の知見に基づき、地下環境への適用を見据えた無線給電システムの設計方法を整理した。同設計方法に基づき、幌延深地層研究センターで実施されている人工バリア性能確認試験を例題として、プラグを介した無線

給電システムを試設計し、システム仕様案を具体化した。このような設計方法の整理をとおして、以下の課題が示唆された。

- 複数の影響因子（介在する塩水、鉄筋等）の相互作用を考慮した試験による確からしい給電効率の算定
- オーバーパック（炭素鋼）による給電効率低下を抑制する方法の検討
- 無線給電システムの耐久性（耐腐食性、水密性、耐高温性）の確認

参考文献

S. Li and C.C. Mi, “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, pp. 4-17, 2015.

Swedish Radiation safety Authority, Sammanfattande rapport över SSM:s granskning av SKB:s ansökningar enligt kärntekniklagen om anläggningar för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle, 2018.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, 10 CFR Part 63 - Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, 2016.

原子力規制委員会，炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について，2016.

原子力規制委員会，第二種廃棄物埋設施設の定期的な評価等に関する運用ガイド（令和 2 年 3 月 31 日改正），原子力規制委員会決定，2020.

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ，中深度処分の規制基準の背景及び根拠，NRA 技術ノート，NTEN-2022-0001，2022.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 16 年度地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査 報告書（2/2），2004.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 20 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費 地層処分実規模設備整備事業 報告書，2009.

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　報告書（第 1 分冊）―遠隔操作技術高度化開発―，2010.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 22 年度地層処分技術調査等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　報告書（第 1 分冊）―遠隔操作技術高度化開発―，2011.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 23 年度地層処分技術調査等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　報告書（第 1 分冊）―遠隔操作技術高度化開発―，2012.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 24 年度原子力発電施設広聴・広報等事業 地層処分実規模設備整備事業 報告書，2013.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 26 年度 地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発 報告書（第 3 分冊）モニタリング関連技術の整備, 2015.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 27 年度 地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発 報告書（第 4 分冊）モニタリング関連技術の整備, 2016.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 28 年度 地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発 報告書（第 4 分冊）モニタリング関連技術の整備, 2017.

原子力環境整備促進・資金管理センター，平成 29 年度 地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発 報告書（第 4 分冊）モニタリング関連技術の整備, 2018a.

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可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書，2018c.

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可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書，2019.

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、2021.

鈴木覚，後藤考裕，山本修一，志村友行，佐藤伸，森岩寛稀，高レベル放射性廃棄物の PEM を対象とした閉鎖後の再冠水過程評価（その 1）PEM 容器の構造と再冠水挙動評価の解析条件，令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，2022.
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 2019-003，2019a.
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，令和 3 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，2022.
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，令和 4 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，2023.

6. 結言

最後に、令和４年度の事業で実施してきた技術開発の成果を述べる。

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。

「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、令和３年度まで実施してきた、シーリングシステムの安全機能が低下する要因となる諸条件の抽出とこれらの現象理解とシーリングシステムの安全機能が低下したことを仮定した物質移行解析を踏まえ、立坑や坑道が水みちとなり得るシナリオを整理した。また、ESL などのリスク論的な考え方に基づき、シナリオの発生可能性を評価するとともに、そのようなシナリオの発生可能性を低減するための工学的対策などを具体的に検討・例示した。

また、現象理解の一環として令和 2 年度から開始した埋戻し材の流出･侵入の検討については、令和 3 年度までの試験結果を踏まえ、ベントナイトペレットを使用し、地下水流速（水頭差）、水質（塩分濃度）をパラメータとした、流出・侵入現象を引き起こす条件の抽出を主目的とした室内試験を継続実施した。その結果、淡水・塩水条件によるベントナイトペレットの膨潤挙動あるいは流出挙動が異なることに起因し、ベントナイトペレットの隙間の閉塞傾向が異なることが示唆されたとともに、これを考慮した上での流出低減方策も併せて提示した。

「坑道シーリング技術の性能確認」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、EDZ シーリングのための代替材料に関する基礎的検討および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、これまでの縮尺模型試験を継続し、緩衝材・埋戻し材の力学的相互作用評価に必要な基礎的データの蓄積をはかるとともに、熱-水-応力（THM）連成現象の理解に重要となるベントナイト中の気相の影響を確認するために気液二相流解析が可能な連成解析コードによる感度解析を実施し、それらの解析結果を検証するための室内試験を実施した。その結果、幌延の人工バリア試験と同様の竪置き方式に関する、埋戻し材･緩衝材部分の変位量や側面土圧、飽和度分布、乾燥密度分布といった力学的相互作用の評価に必要な詳細データの蓄積が進んだ。また、気相の影響についても室内試験と解析結果の比較により現象理解が進んできており、今後これらのデータ等を利用した最終的な埋戻し材や緩衝材の設計手法の構築に資する基盤情報の整備を進めた。

EDZ シーリング試験では、令和元年度までに坑道の底盤部に施工した 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する透水試験を継続するとともに、課題となっていた底盤部以外の場所でのベントナイト系材料の施工技術の確立を目標として、幌延の地下施設の坑道側壁部に切欠きを設けて吹付け施工した模擬プラグ部分を解体調査した。その結果、底盤部については粘土止水壁により EDZ の透水係数が施工直後と同等に低く保たれていることが確認され、施工方法も含め長期的な性能を維持できる止水壁の構築が実際の地質環境中で可能であることが示された。また、側壁部についても、解体調査の結果、吹付け工法により目標仕様を満足する施工が可能であることを確認するとともに、切欠き掘削に適用した機械掘削工法は坑道周辺に新たな EDZ の形成等を生じさせる可能性が低いことを実証的に示すことができた。

掘削影響領域の連続性等に関わる調査技術開発では、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）とその外側の 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を実施してきた。令和 4 年度は、最終年度として、令和 2 年度に実施したトモグラフィ調査領域での再測定を実施し、得られた結果を令和 2 年度あるいはそれ以前のトモグラフィ調査結果と比較検討した。その結果、既存物理探査手法の高精度化により、幌延のような堆積軟岩であっても EDZ の連続性を把握することは十分可能であるが、岩盤中に局所的に存在する水みちのような構造を把握することは困難であり別の手法を用いることが適切であることを確認した。また、幌延のような堆積軟岩における EDZ の経時変化については、令和 3 年度までに構築した吹付けコンクリートの影響を除去できる解析手法の適用により、支保工が健全であれば時間経過に伴い EDZ が拡大する可能性はかなり低いことを示すことができた。さらに、EDZ の外側に存在する EdZ の状態変化も含め、坑道周辺地質環境の状態変化を詳細に評価するための弾性波・比抵抗トモグラフィ調査結果の統合化解析手法の構築にも取り組み、構築した手法の有効性をモデル解析により確認した。

ボアホールのシーリング技術開発では、坑道内から掘削したボーリング孔を対象として令和 3 年度までに実施した文献調査や室内試験等を踏まえて構築した、ベントナイトブロックを用いた施工技術を確認するための原位置試験を幌延の 250m 調査坑道で実施した。その結果、今回構築した施工方法により、孔内の所定の位置に閉塞材料を定置することができることは確認できたものの、施工時間や閉塞材料であるベントナイトブロックを短時間で膨潤させ機能を発揮させる上での課題があることも明らかになった。また、ベントナイト系材料の現場施工を必要とする EDZ シーリングに代わる代替材料（コンシード）を用いた注入法による止水性能の基礎的検討等を継続し、幌延の環境では、一般的なグラウト材が浸透しないような小さな開口幅のき裂も 1 年程度の短期間でコンシードの浸透あるいは炭酸塩鉱物による完全な充填が生じていることが確認され、EDZ の止水性をより高める効果をもったベントナイト系材料の代替材料として非常に有望であることが示された。

「坑道シーリングに係わる施工技術の整備」の中では、埋戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備では、実寸大の模擬坑道を活用し、撒出し・転圧工法と吹付け工法を組合せた全断面施工を実証するとともに、各工法の適用範囲、施工品質、歩掛などの施工情報を取得した。また、埋戻し材の施工品質及び施工後の状態変化の把握等に向けた計測技術として、ケーブル TDR を用いた坑道上部の隙間検知および加熱式光ファイバを用いた乾燥密度分布計測の高度化にも取り組んだ。さらに、スクリュー工法では充填時の材料分離に影響を及ぼす設計項目の抽出、ブロック工法では自己シール性に関する膨潤挙動試験などの要素試験を実施し、埋戻し工法としての適用性を確認するとともに、施工技術の実証試験に向けた課題を抽出した。

5 章の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、令和 3 年度までに実施した欧米における品質保証に関する取組状況、わが国の放射性廃棄物処分に関する規制関連文書等の調査結果を踏まえて、地層処分場の最終閉鎖の判断に資する地下構成要素の品質保証体系（品質管理プログラム及び性能確認プログラム）の素案を整備した。また、地下構成要素の品質管理や性能確認のための実証試験等における原位置状態把握技術を支援する無線技術について、地下研での無線伝送システムの適用性の確認を継続するとともに地下環境での使用を想定した無線給電システムの設計方法を構築した。本事業で整備した品質保証体系の素案は、今後、地下構要素の品質保証体系を更新していくための基礎となることが期待される。

7. 謝辞

事業の実施にあたっては、受託業者の方々には、各項目の実施のみならず原位置試験等の大型試験に関する安全確保にもご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

付録1 膨潤挙動評価試験

目次

1.1 はじめに .....付 1-2
1.2 小規模模型試験 .....付 1-2
1.2.1 小規模模型試験の概要 .....付 1-2
1.2.2 縮尺模型試料と試験条件.....付 1-2
1.2.3 試験結果 .....付 1-5
1.2.4 まとめ.....付 1-10

図目次

付図 1-1　小規模模型試験の概要図.....付 1-3
付図 1-2　小規模模型試験の試験条件.....付 1-4
付図 1-3　上方膨潤率と注水量の経時変化.....付 1-6
付図 1-4　解体調査時の埋戻し材上部の状況.....付 1-7
付図 1-5　緩衝材の乾燥密度分布 .....付 1-8
付図 1-6　緩衝材の飽和度分布.....付 1-9
付図 1-7　埋戻し材の含水比分布 .....付 1-10

表目次

付表 1-1　小規模模型の材料仕様 .....付 1-3
付表 1-2　小規模模型試験の結果まとめ .....付 1-10

1.1 はじめに

「令和 4 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」のうち「3.1 膨潤挙動評価試験」で実施した小規模模型試験の計測データについて本付録資料に示す。

1.2 小規模模型試験

1.2.1 小規模模型試験の概要

小規模模型試験は人工バリア性能確認試験（以下、原位置試験）の約 1/24 スケールの模型（以下、小規模模型）を用いて緩衝材と埋戻し材の力学的相互作用下の緩衝材の膨潤挙動に関するデータを取得するために実施した。

小規模模型試験で原位置試験の状況を模擬するにあたって留意した点は以下の通りである。

- 小規模模型の寸法は、原位置試験の約1/24スケールとした。
- 人工バリアは緩衝材のみを模型で模擬し､オーバーパックの模型は設置しないこととした。
- 原位置試験では、試験孔底および緩衝材と岩盤の隙間にケイ砂を充填し、試験孔底から注水した原位置地下水がケイ砂を通じて緩衝材の周面から供給される構造となっている。小規模模型試験では、緩衝材と試験容器の隙間にケイ砂を充填し、試験容器下部に設置したポーラスメタルより注水した試験用水がケイ砂層を通じて緩衝材の底面および側面より供給される構造とした。
- 埋戻し材は、緩衝材との境界近傍のみを小規模模型で模擬した。原位置試験と小規模模型試験の力学的な境界条件を揃えるために、原位置試験において緩衝材に作用する埋戻し材の自重に相当する荷重と同等の鉛直圧を埋戻し材の小規模模型上部より作用させる。

1.2.2 縮尺模型試料と試験条件

小規模模型試験で使用した試験装置を付図 1-1 に示す。また、緩衝材と埋戻し材の材料仕様を付表 1-1 に示す。

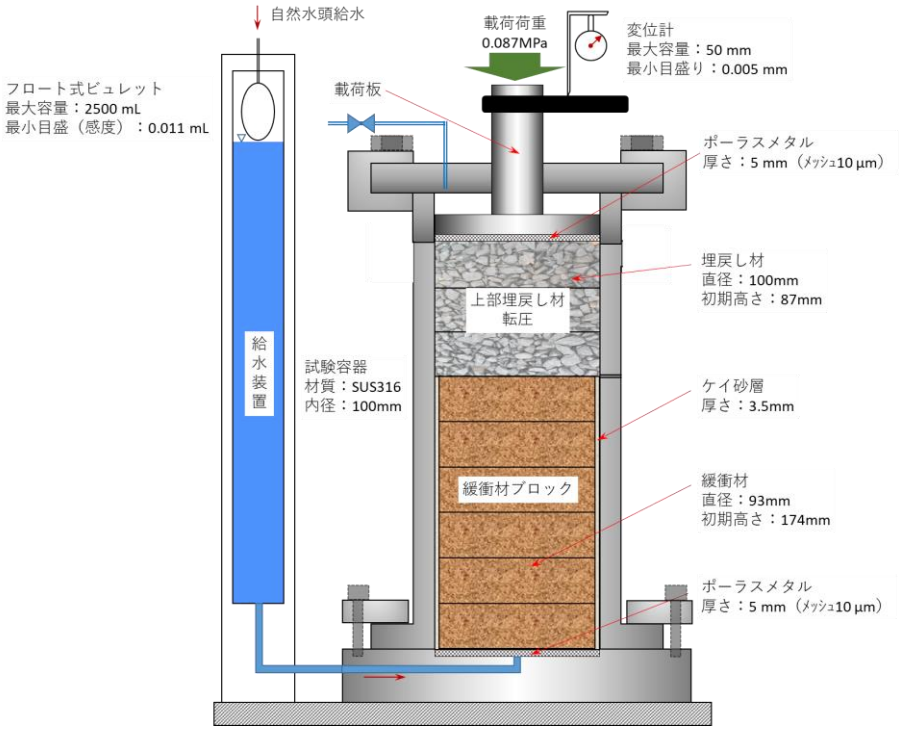
緩衝材の小規模模型は直径 93 mm、高さ 174 mm である。材料は、クニゲル V1 とケイ砂を重量比で 70%と 30%の割合で混合したものを用いた。ケイ砂は、3 号ケイ砂と 5 号ケイ砂を重量比でそれぞれ 50%の割合で混合している。緩衝材の小規模模型は 6 つのブロックに分割しており、それぞれのブロックは初期乾燥密度を 1.80 Mg/m^3、初期含水比を 10.5%として作製した。

埋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%の割合で混合したものを用いた。掘削ズリは、粒径が 20 mm 以下となるように調製している。埋戻し材の乾燥密度の違いが緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響を確認するため、初期乾燥密度を 1.20 Mg/m^3 と 1.40 Mg/m^3 の 2 種類として作製した。

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試験用水を給水することにより、緩衝材や埋戻し材への水の浸潤に伴う膨潤によって生じる上方への膨潤変位量を計測する。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る構造である。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がポーラスメタル及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。緩衝材の小規模模型の膨潤による上方への変形量は、試験装置上部の載荷板に設置した最大容量 50 mm、最小目盛り 0.005 mm の変位計で計測した。

小規模模型試験はイオン交換水を試験用水として、埋戻し材の乾燥密度および作製方法を変え

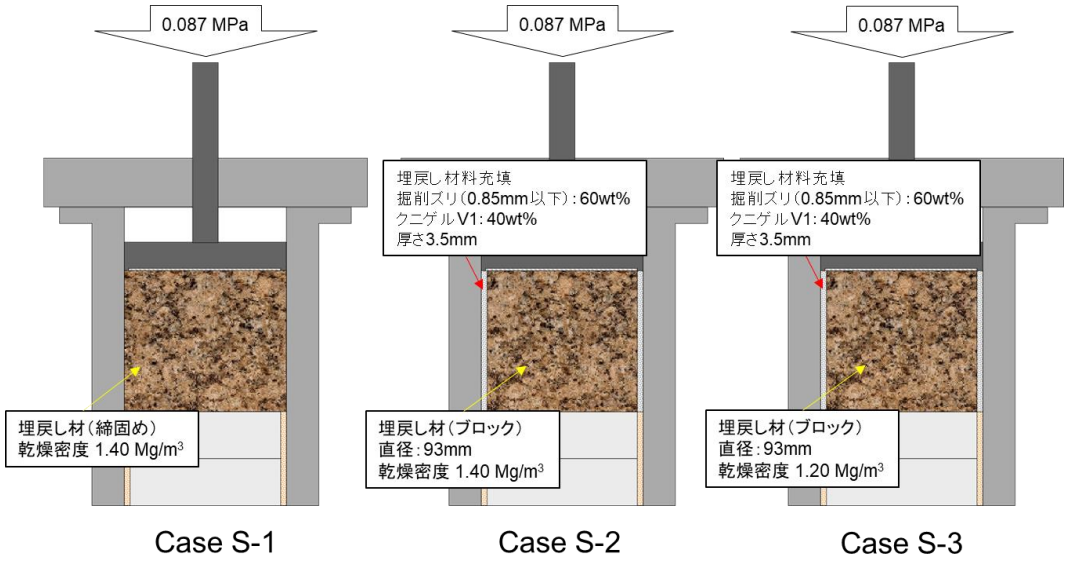
て 3 ケース実施した。付図 1-2 に試験条件を示す。Case S-1 は埋戻し材の乾燥密度を 1.40 Mg/m³ として試験容器に直接締固めて作製した。Case S-2 は埋戻し材ブロックを直径が 93 mm、高さが 29 mm、乾燥密度 1.40 Mg/m³ で作製し、緩衝材ブロックの上に 3 つの埋戻し材ブロックを設置した。埋戻し材ブロックと試験容器の隙間には埋戻し材料（掘削ズリの粒径 0.85 mm 以下）を充填した。Case S-3 は埋戻し材ブロックを直径が 93 mm、高さが 29 mm、乾燥密度 1.20 Mg/m³ で作製し、Case S-2 と同様の手順で設置した。試験時には、原位置試験を例として試験孔の上部に位置する埋戻し材の自重に相当する荷重の 0.087 MPa を上載荷重として作用させた。



付図 1-1　小規模模型試験の概要図

付表 1-1　小規模模型の材料仕様

ケース名		Case S-1	Case S-2	Case S-3
緩衝材	乾燥密度 (Mg/m³)	1.80		
	含水比 (%)	10.5		
埋戻し材	乾燥密度 (Mg/m³)	1.40	1.40	1.20
	含水比 (%)	30.0	30.0	35.0
	作製方法	締固め	ブロック	ブロック



付図 1-2　小規模模型試験の試験条件

(1) 緩衝材

緩衝材ブロックは直径 93 mm、高さ 29 mm として 1 ケースにあたり 6 個のブロックを作製した。クニゲル V1、3 号ケイ砂及び 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を用いて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を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。

緩衝材ブロックを設置する際には、砂層分の厚さ 3.5 mm を確保するために試験容器内側に厚紙を数枚巻いた。その後、緩衝材ブロックを 1 個ずつ試験容器内に設置した。6 個の緩衝材ブロックを設置した後、試験容器から厚紙を取り外し代わりに直径 3 mm 程度のアルミ製の丸棒をスペーサーとして挿入した。緩衝材ブロックの上にろ紙を置き、緩衝材と試験容器の隙間に 8 号ケイ砂を充填した。ケイ砂の充填性を高めるために、試験容器を木槌で軽くたたいた。

(2) 埋戻し材

埋戻し材の縮尺模型は、試験容器内に直接締固める方法および埋戻し材ブロックを作製して試験容器に設置する方法の 2 種類の方法で作製した。

直接締固める方法では、高さ 87 mm の埋戻し材模型を 3 層に分けて締固めた。1 層あたりの高さを 29 mm として、クニゲル V1 と掘削ズリのそれぞれについて乾燥密度 1.40 Mg/m^3 に必要な重量を計量した。ビニール袋に投入した掘削ズリに霧吹きを用いてイオン交換水を加えて、それぞれの乾燥密度の初期含水比を調整した。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。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。2 層目以降は、前の層の埋戻し材の上に材料を投入

し、3 層目の埋戻し材の高さが 87 mm となるまで同様の手順で締固めを実施した。

埋戻しブロックは直径を 93 mm、高さ 29 mm として作製した。クニゲル V1 と掘削ズリを所定の乾燥密度に必要な重量を計量した。ビニール袋に投入した掘削ズリに霧吹きを用いてイオン交換水を加えて、初期含水比を調整した。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を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。埋戻し材ブロックを設置する際には、試験容器との間に 3.5mm の隙間を確保するために厚紙を設置した。埋戻し材ブロックを設置後に厚紙を取り除いた後に試験容器との隙間に、クニゲル V1 と粒径 0.85 mm 以下の掘削ズリを混合した埋戻し材料を充填した。

（3） 試験手順

緩衝材と埋戻し材の小規模模型の作製後、試験容器上部に載荷板加圧板を設置し試験装置を組み立てた。その後、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、加圧板載荷板の上に変位計を取り付けた。ベロフラムシリンダにより載荷板を介して、試験孔直上の埋戻し材の自重に相当する 0.087 MPa の鉛直圧を埋戻し材の小規模模型に作用させ、15 分程度その状態を保持した。所定の時間が経過した後に、試験容器に注水管を接続し注水管内を試験用水で満たした。試験容器のエアを抜いた後、注水管のコックを切替えて試験容器内への注水を開始した。

試験終了後には緩衝材の含水比と乾燥密度および埋戻し材の含水比を計測した。緩衝材は高さ方向に厚さ 10 mm 程度の円盤状のブロックに切り分けた。円盤状の緩衝材の中央部を長さ 30 mm、幅 10 mm 程度の大きさで 9 個のブロックに分割した。分割したブロックは 3 辺の長さを計測した後、3D スキャナ（KEYENCE 製）により体積を計測し乾燥密度を算出した。3D スキャナの計測は、分割したブロック蒸発皿に載せた状態で計測した。1 つのブロックに対して、まず 1 回計測を行った後にブロックを裏返して計測することにより合計 2 回の計測を行った。2 回の計測で得られたデータを専用のソフトで処理することにより三次元モデルを作成し体積を算出した。計測を終えたブロックは炉乾燥法により含水比を計測した。埋戻し材は高さ方向に 3 個のブロックに分割し、それぞれのブロックで中央部と外周部に分けて含水比を計測した。

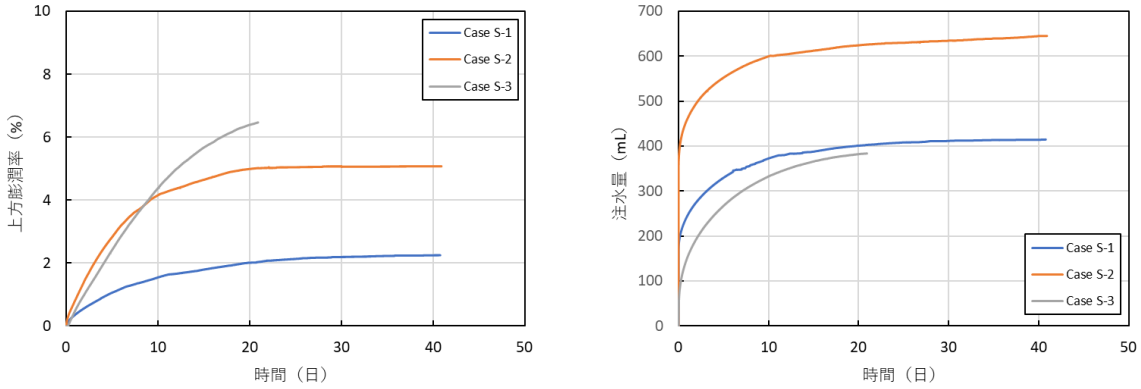
1.2.3 試験結果

（1） 上方膨潤率

小規模模型試験では試験装置上部に設置した変位計により、緩衝材と埋戻し材の上方への変位量を計測している。ここでは、埋戻し材の膨潤による変形がないものと仮定して、上方膨潤率を緩衝材の初期高さに対する上方への変位量の割合として定義した。

付図 1-3 に上方膨潤率と注水量の経時変化を示す。試験開始後、注水量の増加に伴い上方膨潤率が上昇している。試験終了時の上方膨潤率は Case S-1 が 2.25%、Case S-2 が 5.07%、Case S-3 が 6.47%となった。Case S-3 では試験終了時点で上方膨潤率が増加する傾向を示していたが、試験容器内での許容できる変位量の最大値に近づいていたため試験を終了した。

結果を比較すると、Case S-1 よりも Case S-2 の上方膨潤率が大きくなっている。これは Case S-1 の試験容器内で締固めて作製した埋戻し材に対して、Case S-2 は埋戻し材ブロックと試験容器の間に埋戻し材料を充填しており試験容器近傍の埋戻し材の乾燥密度が低くなっていることが影響していると考えられる。また、Case S-2 と Case S-3 で比較すると、埋戻し材ブロックの乾燥密度が低い Case S-3 で上方膨潤率が大きくなっていることがわかる。



(a) 上方膨潤率　　(b) 注水量

付図 1-3　上方膨潤率と注水量の経時変化

(2) 解体調査の結果

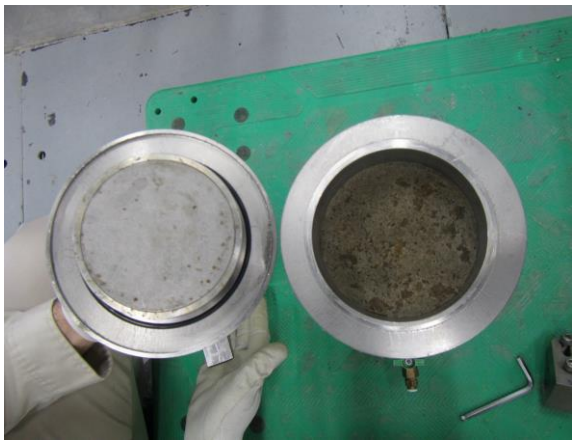
試験終了後には緩衝材と埋戻し材の縮尺模型を試験容器から取り出して乾燥密度と含水比を計測した。試験容器を解体した時の様子を付図 1-4 に示す。Case S-2 では埋戻し材の上部に試験用水がたまっていた。

緩衝材は高さ方向に分割し、Case S-1 で 15 層、Case S-2 で 14 層、Case S-3 で 15 層であった。いずれのケースにおいても各層の中央部分を 9 個のブロックに分割した。個々のブロックは湿潤重量測定した後、3D スキャナで計測して体積を算出した。その後、炉乾燥法により含水比と乾燥重量を計測した。これらの計測で得られた値より、個々のブロックの乾燥密度と飽和度を算出した。

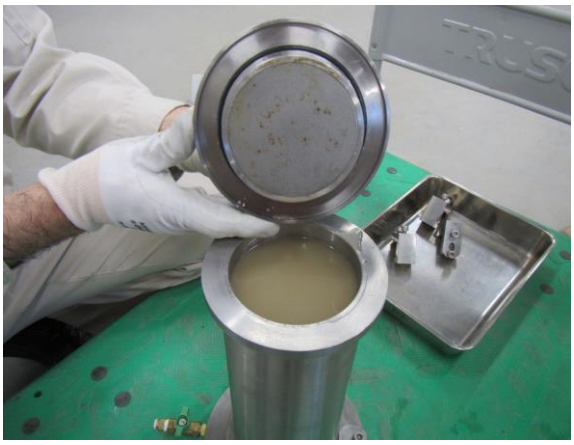
緩衝材の含水比分布を付図 1-5 に示す。Case S-1、Case S-2 および Case S-3 の平均乾燥密度はそれぞれ 1.57 Mg/m^3、1.55Mg/m^3 および 1.52Mg/m^3 であった。乾燥密度の分布は Case S-1 では緩衝材の中心部分の乾燥密度が 1.41Mg/m^3～1.55Mg/m^3 と低くなっている。また、底部で 1.70 Mg/m^3 と高い乾燥密度の部分が残っていることが確認された。Case S-2 では緩衝材の下部で乾燥密度が 1.60 Mg/m^3～1.65 Mg/m^3 と中部や上部と比較して高い部分がある。Case S-3 においても緩衝材の下部で乾燥密度が 1.55 Mg/m^3～1.65 Mg/m^3 であるのに対して、緩衝材の中部の乾燥密度が 1.36 Mg/m^3～1.51 Mg/m^3 と低くなっている。全てのケースにおいて緩衝材の下部の乾燥密度が高い傾向が一致した。

緩衝材の飽和度分布を付図 1-6 に示す。Case S-1、Case S-2 および Case S-3 の平均飽和度は 72%、83%および 78%であった。全てのケースにおいて緩衝材の中心部分の飽和度が低い傾向が一致している。平均飽和度は Case S-2 が最も高くなっているが、Case S-2 のみ解体時に埋戻し材の上部に試験用水が溜まっている状況が確認されており、注水量の違いが飽和の進行状況に影響を及ぼした可能性がある。また、上方膨潤率が最も低い Case S-1 では中心部分で飽和度が 50%台の領域が残っており、飽和が進行していないことが確認できる。

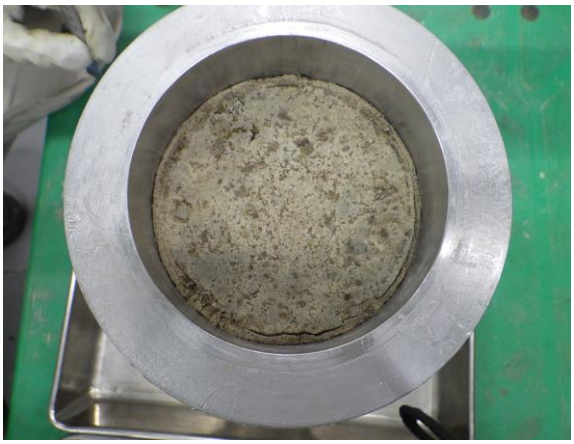
埋戻し材を高さ方向に 3 個のブロックに分割し、中心部と外周部で含水比を計測した。含水比の測定結果を付図 1-7 に示す。それぞれのケースにおける埋戻し材全体の平均含水比は Case S-1 が 34.3%、Case S-2 が 36.6%、Case S-3 が 39.78%となっている。埋戻し材が膨潤により変形がないと仮定すると飽和度は Case S-1 が 104.45%、Case S-2 が 111.55%、Case S-3 が 88.95%となる。



(a) Case S-1

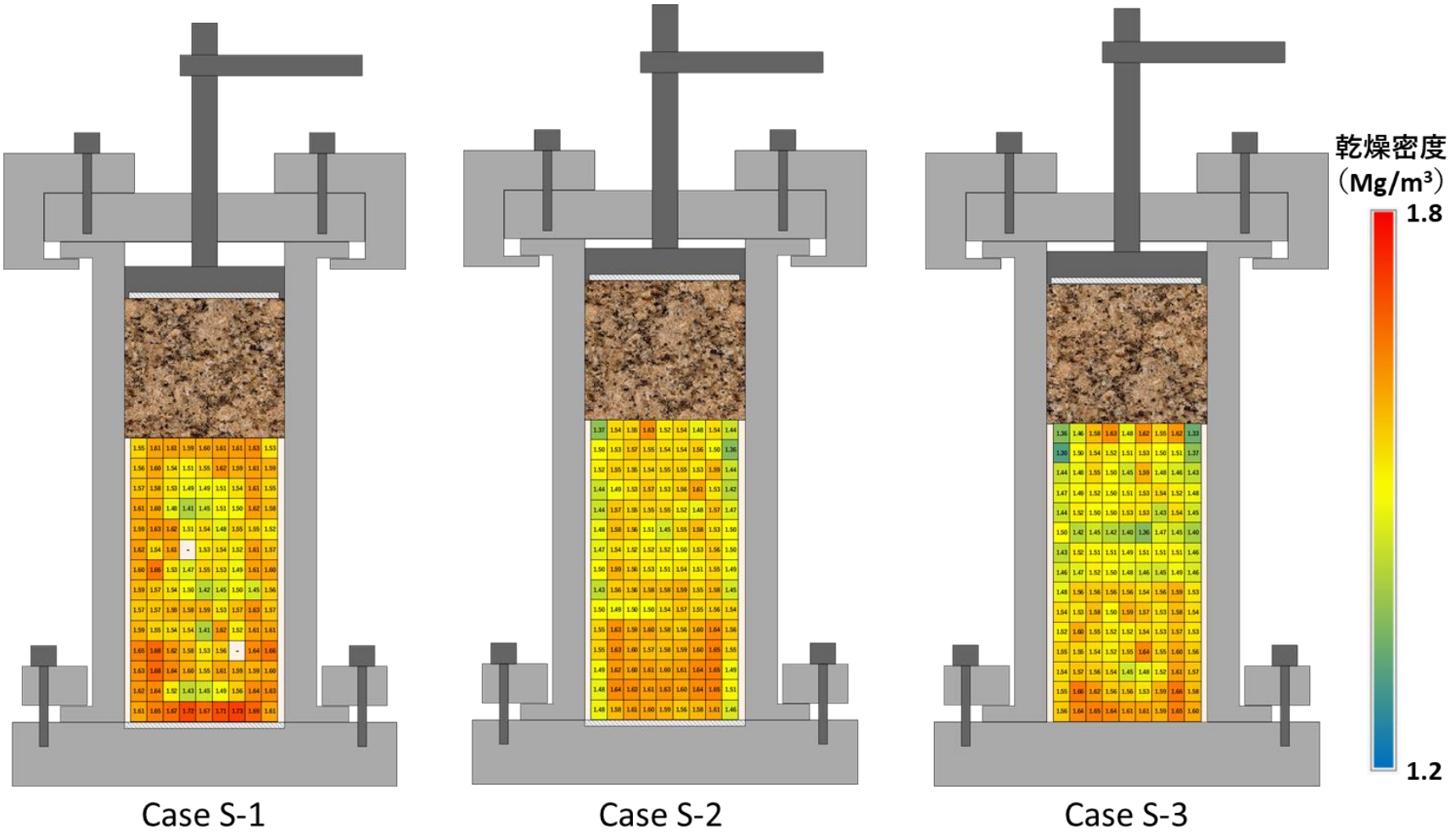


(b) Case S-2

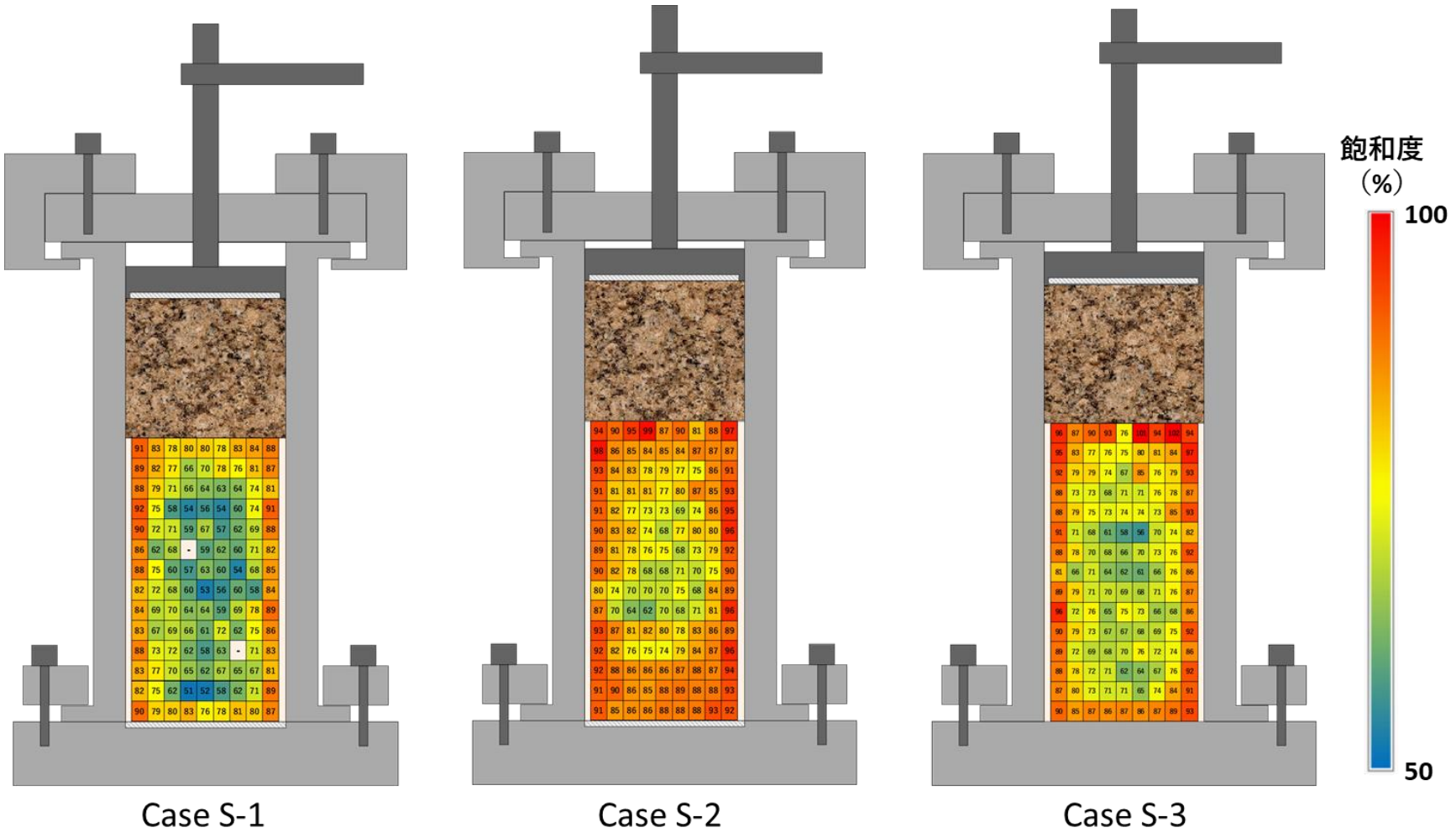


(c) Case S-3

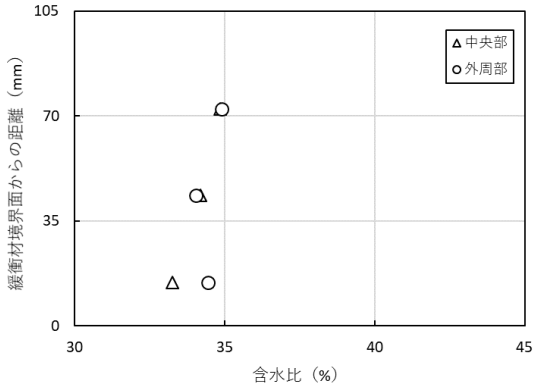
付図 1-4　解体調査時の埋戻し材上部の状況



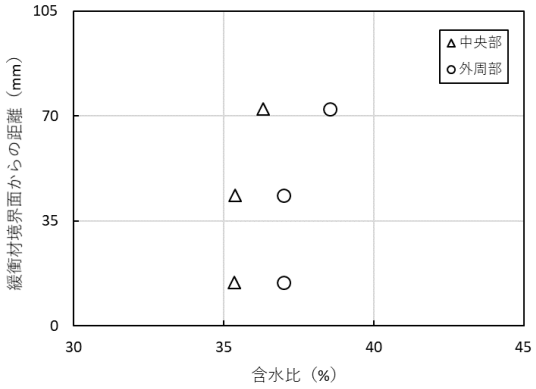
付図 1-5　緩衝材の乾燥密度分布



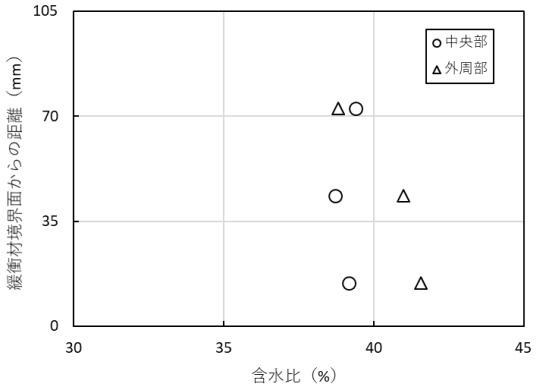
付図 1-6　緩衝材の飽和度分布



(a) Case S-1



(b) Case S-2



(c) Case S-3

付図 1-7　埋戻し材の含水比分布

1.2.4 まとめ

付表 1-2 に小規模模型試験の結果を示す。緩衝材の平均乾燥密度は試験終了時の変位量と解体調査時に計測した円盤状の緩衝材ブロックの直径の平均値を用いて算出した。この方法により算出した平均乾燥密度は Case S-1 が 1.665 Mg/m^3、Case S-2 が 1.595 Mg/m^3、Case S-3 が 1.595 Mg/m^3 であった。また、解体調査で得られた緩衝材の含水比の平均値を用いて緩衝材全体の飽和度を算出すると Case S-1 が 83.9%、Case S-2 が 91.1%、Case N-3 が 88.6%となった。

付表 1-2　小規模模型試験の結果まとめ

	初期	S-1	S-2	S-3
上方膨潤率（%）	-	2.25	5.07	6.47
変位量（mm）	-	3.92	8.84	11.26
緩衝材高さ（mm）	174	177.92	182.84	185.26
緩衝材平均直径 1)（mm）	93	95.64	96.38	95.75
緩衝材乾燥密度（Mg/m^3）	1.800	1.665	1.595	1.595
緩衝材含水比 2)（%）	10.5	19.5	23.5	22.9
緩衝材飽和度（%）	56.2	83.9	91.1	88.6

1) 緩衝材平均直径は解体調査時に計測

2) 緩衝材含水比は解体調査で得られた緩衝材全体の含水比の平均値

付録2 施工技術の選定に資する情報の整理

目次

2.1 施工技術の選定に資する情報の整備 ..... 付 2-3
2.1.1 施工オプションの選定に必要な情報の抽出 ..... 付 2-5
2.1.2 適用可能な埋戻し材の構成材料の範囲 ..... 付 2-14
2.1.3 施工技術の選定のための品質管理の検討（ブロック寸法設定手順案） ..... 付 2-17
2.1.4 試験計画案の提示 ..... 付 2-24
2.2 まとめ ..... 付 2-31

図目次

付図 2.1-1　埋戻し材ブロック寸法設定手順案 ..... 付 2-17
付図 2.1-2　深度 350m 試験坑道 4 断面イメージに加筆 ..... 付 2-18
付図 2.1-3　各候補ブロックに対するブロックレイアウト検討結果例 ..... 付 2-20
付図 2.1-4　人力によるブロック定置作業例 ..... 付 2-20
付図 2.1-5　定置装置能力として考慮する項目 ..... 付 2-22
付図 2.1-6　埋戻し材ブロック定置装置の例 ..... 付 2-22
付図 2.1-7　プッシュプル方式の稼働イメージ ..... 付 2-23
付図 2.1-8　幌延新地層研究センター向け埋戻しブロック製作状況 ..... 付 2-23
付図 2.1-9　1 m 規模ブロック製作プレス機イメージとブロック及び金型外形 ..... 付 2-24
付図 2.1-10　埋戻し材ブロック試験案の課題 ..... 付 2-26
付図 2.1-11　ブロック定置装置　予備設計結果 ..... 付 2-28
付図 2.1-12　掘削土の一例 ..... 付 2-29
付図 2.2-1　埋戻し材ブロック寸法設定手順案（再掲） ..... 付 2-32

表目次

付表 2.1-1　現状で残る主な課題　その１ ..... 付 2-4
付表 2.1-2　現状で残る主な課題　その２ ..... 付 2-5
付表 2.1-3　材料品質に対する事業開始前及び事業開始時の品質管理項目の例 ..... 付 2-7
付表 2.1-4　製品品質に対する事業開始前及び事業開始時の品質管理項目の例 ..... 付 2-9
付表 2.1-5　施工品質に対する事業開始前及び事業開始時の品質管理項目の例 ..... 付 2-12
付表 2.1-6　適用可能な埋戻し材の構成材料の範囲の概要 ..... 付 2-14
付表 2.1-7　ブロック寸法が製作・管理へ与える影響（1/2） ..... 付 2-15
付表 2.1-8　ブロック寸法が製作・管理へ与える影響（2/2） ..... 付 2-16
付表 2.1-9　ブロック工法単体と現場締固め工法との併用の比較 ..... 付 2-18
付表 2.1-10　候補ブロック概要 ..... 付 2-19

付表 2.1-11　定置装置の把持方式の比較.....付 2-21
付表 2.2-1　試験計画案のまとめ　ブロック製作装置関連.....付 2-33
付表 2.2-2　試験計画案のまとめ　ブロック搬送・定置装置関連.....付 2-34
付表 2.2-3　試験計画案のまとめ　ブロック関連（1/2）.....付 2-35
付表 2.2-4　試験計画案のまとめ　ブロック関連（2/2）.....付 2-36
付表 2.2-5　試験計画案のまとめ　操業設備関連.....付 2-37

2.1 施工技術の選定に資する情報の整備

4.6.2 ブロック工法のうち、施工技術の選定に資する情報の整理について事項に示す。これまでに実施した要素試験の結果等に基づき、“ブロック工法を対象とした施工技術オプション” の選定に必要な情報を整理する。整理する情報としては、適用可能な埋戻し材の構成材料の範囲（混合材料の最大粒径、粒度分布の範囲など）、施工品質（達成可能な乾燥密度など）などの項目について整理し、整理結果より現状で残っている課題を抽出後、それらの残された課題解決のための試験計画案を提示した。

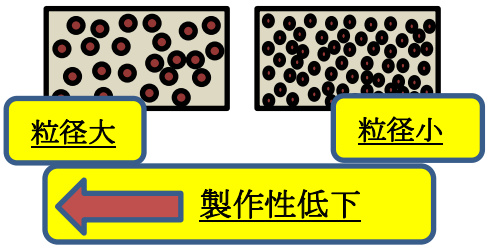
「施工技術オプションの選定に必要な情報の抽出」では、埋戻し材ブロックの品質管理を「材料品質」、「製造品質」、「施工品質」の三つの観点より分類し、それぞれの観点から品質管理に係わる内容を検討し、ハンドリングフローに追記した。「適用可能な埋戻し材の構成材料の範囲」では、ベントナイト系材料によるブロック製作の実績例を調査してまとめた。ブロックの製作に係わる定量的な閾値は、前提条件や材料仕様などが多岐にわたるため一意に設定できないが、実績の範囲であれば製作が可能である。「施工技術の選定のための品質管理の検討（ブロック寸法設定手順案）」では、上記までの検討を受けてブロック寸法の設定手順案を提示した。この手順案に従い、候補サイト条件（候補地点の力学条件、掘削土（ズリ）の特性等）が推定可能になった時点で、埋戻し材ブロックの寸法等の仕様設定作業を効率的に実施可能と考える。

埋戻しブロックに関して現状で残されている課題は、ブロック材料に含まれる礫などの骨材の粒径を起因としており、骨材粒径が大きくなることによりブロック製作性やブロック材料の混練性が低下することが各種の課題の原因となっている。

具体的には粒径の大きな骨材に対応した高出力のブロック製作機構を具体化する必要があるとともに、ブロックの製作効率向上のための改造、例えば圧縮時に脱気するなどの機構の有効性についての確認が必要である。また大型化したブロックの搬送・定置について、同等の大きさでのブロックについては、高レベル放射性廃棄物処分を対象とした材料での実績はあるが、骨材の粒径が大きくなって製作性が低下し、それに伴いブロック強度低下しているため、その強度に合わせた設備構成での実規模についての実証が必要であることなどか課題として残っている。これらの現状で残されている課題の一覧を、概要とともに付表 2.1-1、付表 2.1-2 にまとめた。

続いて、付表 2.1-1、付表 2.1-2 に示した課題を解決するための対応案を「試験計画案の提示」にまとめた。ここで示した複数の試験は、大型の埋戻し材ブロックを製作することにより、全ての試験が実施可能となるよう、効率的な試験体系として提示した。

付表 2.1-1　現状で残る主な課題　その１

	現状で残る技術的な課題	課題解決のための実施項目
材料	○骨材粒径が大きくなるとブロックの製作性が低下。  図　礫の粒径と製作性	ブロック用埋戻し材として適用可能な礫粒径の明確化されていない。 **大型ブロックの製作実証試験**により、以下の課題が明確となる。 ・利用可能な最大粒径の明確化 ・利用可能な粒度分布の明確化 ・材料適否判定基準の明確化
	○骨材粒径が大きくなると混練性が低下。	各種粒径の骨材に対応した**埋戻し材の混練実証試験**により、以下の課題が明確となる。 ・適切な混練条件の把握 ・混練後材料の基本特性
製作	○骨材粒径が大きくなるとブロックの製作性が低下。 ○ブロックの製作機構構造が検討途上であり、大型ブロックによる確認が必要な段階である。	各種粒径の骨材に対応した**大型ブロックの製作実証試験**により、以下の課題が明確となる。 ・大型ブロックに対応した圧縮装置の開発
	○実際の操業に対応したブロック製作設備については検討途上である。	操業条件に対応した**ブロック製作装置の実証試験**により、以下の課題が明確となる。 ・実証試験を通じた製作機構の改善
搬送	○ブロックの搬送機構が机上検討であり、地下坑道等を考慮した環境での確認が必要な段階である。	大型ブロックを対象とした**ブロック搬送装置の実証試験**により、以下の課題が明確となる。 ・搬送によるブロックへの影響の明確化 ・ブロック搬送機構の実装
	○地下環境における埋戻し材ブロックの保管方法について検討途上であり、地下坑道等を考慮した環境での確認が必要な段階である。	大型ブロックを対象とした**地下環境での保管試験**により、以下の課題が明確となる。 ・高湿度下での挙動の明確化 ・地下環境における保管条件の提示

付表 2.1-2　現状で残る主な課題　その２

	現状で残る技術的な課題	課題解決のための実施項目
定置	○狭隘空間で重量物を精度よく定置できる機構が検討途上であり、地下坑道等を考慮した環境での確認が必要な段階である。	大型ブロックを対象とした**地下環境での定置装置実証試験**により、以下の課題が明確となる。 ・大型ブロック定置機構の実装 ・位置確認、周辺状況確認機構の実装 ・定置品質確認機構の実証
	○ブロック定置後における隙間処理方法について検討途上であり、地下坑道等を考慮した環境での確認が必要な段階である。	大型ブロックを対象とした**地下環境での定置装置実証試験**により、以下の課題が明確となる。 ・隙間位置の確認方法の明確化 ・充填材仕様の明確化 ・充填材製作方法の明確化 ・充填機構の実装 ・隙間充填後充填剤状態確認方法の実証
操業	○生産設備について検討途上であること。 ○生産設備による操業稼働能力（タイムチャート）の具現化が検討途上。	上記の埋戻し材混練実証試験、大型ブロックの製作実証試験、ブロック製作装置の実証試験、ブロック搬送装置の実証試験、地下環境での保管試験、地下環境での定置装置実証試験の結果を参照して、**操業設備を検討すること**で設備全体としての操業稼働能力が明確となる。 これらより、今後優先的に効率化を図る必要のある設備や工程が明確になるとともに、開発目標も同時に明確となる。

2.1.1 施工オプションの選定に必要な情報の抽出

ここでは施工技術の選定のための品質管理について検討を加えた。また、品質管理の側面より今後、拡充または改善すべき技術課題を抽出した。

埋戻し材ブロックの品質管理の検討は、品質を「材料品質」、「製造品質」、「施工品質」の三つに分類して整理した。その目的は、品質を担保する対象を明確化することであり、また、品質確認の対象が事業開始前に課題を解決するために検討しなければならない品質確認の内容と、実際の事業運営時に品質確認を実施する対象とが異なるためである。

例えば、埋戻し材ブロック圧縮成形時を例に取ると、材料の選定に係わる品質確認は事業運営開始前に終了するべき項目であり、事業開始時には具体的な製造作業時の品質管理項目・測定方法･測定頻度が設定され､一連の品質確認作業のための管理計画が明確になっている必要がある。選定された品質の材料が適切な仕様でサイトに納入されているか、納入後材料の保管状態は適切か、仕様に適した材料に対応した適切な圧縮プレスによる製造が行われているか（材料投入量、プレス圧力、保持時間、脱型方法）等についての品質確認手法が確立している必要がある。

これに対してサイト選定前の現段階であれば、前記の事業開始に向けて、候補材料の選定方法の確立から検討が必要である。検討に際しては候補材料の基礎特性の把握はもちろんのこと、埋戻し材ブロックの一連の工程としての骨材材料の採鉱(掘削土)・材料加工、ベントナイトの選定、ベントナイトと骨材材料の混練、ブロックの加圧製造、保管、地下への搬送、処分坑道での定置段階までを考慮した検討と、それぞれの検討方法に関係する品質管理方法や品質管理値の設定を行うための試験方法の確立が必要となる。

例えば、ベントナイトの選定であればスメクタイトの含有量だけではなく、その材料の不均質性等の評価も含まれる。これはスメクタイトの含有量が十分であっても要求性能を満足しない材料が確認されているためである（例えば、SKB, 2014a)。また、骨材材料の粒度分布、含水比は埋戻し材ブロックの品質を決定する大きな要因であるため、骨材材料については、サイトの掘削土の使用も想定されている現状では、骨材材料の違いに着目した検討が特に重要となる。これはベントナイトのように製品としての品質管理がされていない骨材材料の特性がブロックの基礎特性だけではなく、埋戻し材ブロック製造設備の機械能力を左右し、かつ、品質管理への要求にも影響するなど事業全体への影響が大きいためである。

ただし、骨材材料の特性は、ブロック工法による埋戻しだけではなく、他の工法である転圧工法や吹付け工法、ペレット工法（ペレットを現地発生土で製作する場合）による埋戻しに対しても同様の問題がある点に注意が必要である。

「埋戻し材ブロックの製造・施工プロセス管理手法」について、「材料品質」、「製造品質」、「施工品質」の三つの分類の視点より検討した。

- 材料品質；埋戻し材に用いる材料に着目した品質管理対象。ブロック埋戻し工法に対してはブロックに用いるベントナイトと掘削土の品質。
- 製品品質；埋戻しに用いる製品の品質。ブロック埋戻し工法に対しては、ブロックの物理特性（乾燥密度、密度分布、寸法）に加えて、ブロック製品の保管時の品質を対象とする。具体的には、気中の湿潤状態によるブロック表面状態への影響やそれらへの対応方法を検討対象とする。
- 施工品質；埋戻し場所での施工方法に係わる品質。ブロック埋戻し工法に対しては、製品であるブロックを埋戻し地点に施工する際の定置精度等を対象とする。さらに、残置されるブロック間の隙間の大きさ、隙間の処理等を検討対象とする。

(1) 材料品質

材料品質は、製作する製品の材料に着目した品質管理が対象である。埋戻し材ブロック工法に対しては、ブロックに用いるベントナイトと掘削土及び加水する水の品質が品質管理の対象となる。これらについて事業開始前と事業開始後での品質管理項目を付表 2.1-3 に示す。

付表 2.1-3　材料品質に対する事業開始前及び事業開始時の品質管理項目の例

工　程		事業開始前	事業開始時
材料の製造工程	ベントナイト	【混練材料；ベントナイト】 （・製品番号;販売会社） ・ベントナイト特性基礎試験 ・モンモリロナイト含有量 ・乾燥密度	【混練材料；ベントナイト】 ・製品番号；書類検査 ・抜き取り検査 ・モンモリロナイト含有量 ・重量 ・含水比
	掘削土	【混練材料】 ・掘削土の材料適否判定 ・利用可能な最大粒径 ・利用可能な粒度分布 ・乾燥密度 ・鉱物組成 ・溶出イオン強度 ・含水比	【混練材料；掘削土】 ・破砕後の最大粒径 ・破砕後粒度分布 ・破砕後乾燥密度 ・破砕後含水比
	水	【水】 ・水分組成 ・イオン濃度	【水】 （・水分組成） （・イオン濃度）

事業段階であれば、納入されるベントナイトと掘削土、水については使用材料が特定されている段階であり、品質管理はこれら納入物の要求品質が満たされていることを確認する。最も理想的な品質管理は、納入物の品質がある程度に保たれていることに確証がある場合で、このときは納入品の品質保証に関する書類のみの管理となる。一般にはそれに加えて、定期的な抜き取り検査を実施する程度で対応が可能である。抜き取り検査項目はモンモリロナイト含有量、重量、含水比等である。

ベントナイトに関しては、国内の商標登録がされている業者からの納入物については、業者で実施している品質管理で十分要求する品質を保った材料の納入が期待できるため、納入時の業者の品質確認書類のチェックを行えば対応可能である。これに対し、国外企業からの輸入物はその限りではなく、輸入時のロット毎の管理が必要になる可能性がある（ロットによるバラツキの例としてはSKB, 2016、SKB, 2017等）。この場合には、ベントナイトの基礎特性をある程度の代表性のあるロット毎等に対して抜き取り検査を実施する。試験項目の乾燥密度、粒度分布（必要により）、メチレンブルー吸着量及び含水比である。しかし材料によっては、スメクタイトの含有量が要求水準に達していても、求める膨潤量が発現しない場合も報告されているので、その場合はこれらに加えて時間の要する膨潤変形量、膨潤圧、透水係数などの測定試験が必要となる可能性もある。このため、ベントナイト材料の選定は納入業者の品質管理体制にも依存することに注意が必要である。

加水する水については、イオン強度がベントナイトの膨潤性に影響するため、サイトでの工業用水や汲み上げる地下水等を用いる場合には、定期的な水質確認が必要である。また、事業開始前には使用する水を用いた埋戻し材ブロックの基礎特性試験等によりその影響を確認しておく必要がある。

掘削土については、採用の適否を事業段階以前に十分に確認しておく必要がある。事業開始前に確認する項目は、掘削土の材料特性として最大粒径、粒度分布、乾燥密度、鉱物組成、溶出す

るイオン強度であり、粒径によってはブロック作製用に対応可能な最大粒径以下に破砕する必要がある。ただし、粉砕設備については必要量を大量に処理する必要があり、破砕についての技術的課題は特にないが、粉じんなどが発生するため閉鎖型の設備を用意する必要がある（SKB, 2015b）。

埋戻し作業はパネル掘削工事と廃棄体の定置作業後、埋設開始の認可が得られた後に実施されるため、埋戻し材ブロック製作を開始するまでは掘削土が地上に保管されている。この保管期間は場合により 10 年以上が想定される。このため、処分場パネルの配置場所毎の地質種別の違いによる掘削土の特性把握はこの保管期間内に可能であり、地質種別毎に埋戻し材ブロックへの適用の可否を確認しておく。また、適用可能と判断した掘削土については、保管期間の影響の無いことを確認するために埋戻し材ブロック製作の直前に再度、溶出するイオン濃度を測定する必要な可能性がある。

（2） 製品品質

製品品質は、製作する製品に着目した品質管理対象を指す。このため品質管理では最終製品の品質管理とともに、製作方法に対する品質管理が対象となる。

サイトでの掘削土の加工、掘削土とベントナイトの混練を行う場合には、これらの工程も埋戻し材ブロックの製品品質の工程として分類した。

埋戻し材ブロックの製品品質では、この材料の混練工程、圧縮成型工程、ブロック製品管理（ブロックの保管状況）、保管時管理（保管後のブロックの状況）の工程に分けて、事業開始までに実施しておかなければならない品質管理項目と事業開始時に事業作業工程の中で実施する品質管理項目に分類し、それぞれについて付表 2.1-4 に示す。

付表 2.1-4　製品品質に対する事業開始前及び事業開始時の品質管理項目の例

工　程		事業開始前	事業開始時
材料の混練工程	混練方法	【混練方法】 ・ベントナイトとの混練特性;混練条件の同定と混練機構の選定（加水含む） ・混練機構の設計	【混練方法】 ・ベントナイトの投入量 ・掘削土の投入量 ・混合水（加水量）の計量 ・混練速度・混練時間
	混練後材料	【混練後材料】 ・適切な混練条件の把握 ・混練後材料の基本特性 ・混練装置の概念設計	【混練後材料】 ・重量の計量
圧縮成型工程	圧縮成型機	・圧縮方法の選定； 一軸圧縮、二軸圧縮、静水圧圧縮等 変速圧縮（ピストンと周囲機構の変速圧縮）等 ・圧縮条件の同定； 圧縮圧力、圧縮速度、圧縮保持時間	・圧縮成型期の維持管理具合 ・圧縮成形圧力 ・圧縮時間 ・圧縮速度 ・圧縮保持時間
	金型	・金型／マンドル（静水圧圧縮）機構設計 ・脱型方法の同定（金型機構設計） ・潤滑剤使用有無の判断	・金型の維持管理具合 ・金型への材料投入量､敷き均し高さ ・金型脱型作業
ブロック製品管理		・製作ブロック寸法 ・製作ブロック質量 ・圧縮後のブロック寸法変化確認 ・ブロック内密度分布／含水比分布確認 ・ブロック基礎特性（含水比、透水係数、膨潤圧、膨潤率、飽和後の圧縮率） →要求水準を満たすブロック仕様の選定	・ブロック寸法、ブロック質量 ・ブロック外観（ひび割れ､破損有無）
保管時管理		・ブロックの高湿度下での挙動把握 →環境影響を受けないブロック仕様設定 ・搬送時の振動によるブロックへの影響 →影響を受けない搬送方法の確立 ・ブロック保管形態の選定 →表面パッキング、専用容器保管など	・ブロック寸法、ブロック質量 ・ブロック外観（ひび割れ､破損有無）

a)材料の混練工程

材料の混練工程の混練方法は、前段の工程の材料の製造工程から適切な材料（掘削土が適切な最大粒径、粒度分布等に加工されていること）が搬入されるという前提のもとに、事業開始前には適切な混練方法を選定する／設備設計をする必要がある。高品質の混練が可能な設備については Eirich ミキサが国内外でも多く用いられているが､この系統のミキサの処理能力はそれほど高くない。このため小型の混練機で特性を把握したとしても、その機構が大型化できない場合があるので、実用に供しないため注意が必要である。

事業開始前の混練後材料については適切な混練条件の把握、混練後材料の基本特性把握、混練装置の概念設計が必要である。

事業開始時にはすでに適切な混練方法としての混練機械の速度、混練時間及び適切なベントナイト量、掘削土の量、追加する水の量が確定しているため、品質管理の対象は混練後の材料の重

量の計量となる。

b)圧縮成形工程

事業開始前には圧縮成型機の選定（設計）と金型の設計及びそれぞれの機械の実証試験が行われている必要がある。そのためには、想定する材料を用いて要求する性能を発揮するための密度に到達させる圧縮機の機構（一軸圧縮、二軸圧縮、静水圧圧縮等）の選定や、圧縮方法の選定（変速圧縮としてのピストンと周囲機構の変速圧縮、SKB, 2015b）などの実証を行う必要がある。

金型については、ブロックの脱型時のブロックに掛かる応力状態によりブロックに亀裂が発生するため、金型構造設計には十分な注意と実証が必要である（SKB, 2014c）。

事業開始後であれば圧縮成形機の維持管理具合（定期点検、作業開始前の点検）、製作時の圧縮成形圧力、圧縮時間、圧縮速度、圧縮保持時間の管理を行う。

金型については金型の維持管理具合（定期点検、作業開始前の点検）、金型への材料投入量管理、材料敷き均し高さ確認、金型脱型作業と脱型後の清掃作業がある。プレス時にブロックと金型の界面に潤滑剤を使用する場合には、この潤滑剤の除去作業などが追加される。

c)ブロック製品管理

埋戻しに用いる製品の品質については、事業開始前には以下の項目について要求する水準のブロックを作成する方法を確立しておく必要がある。

- 製作ブロック寸法；目標とするブロック寸法を確保するための材料投入量や圧縮力などの製作条件の把握
- 製作ブロック質量；目標とするブロック総質量を確保するための材料投入量や圧縮力などの製作条件の把握
- 圧縮後のブロック寸法変化確認；脱型後のブロックは応力除荷により寸法が大きくなる。寸法の変化が最終的な埋戻しに影響しない程度の寸法変化となる条件を把握する。
- ブロック内密度分布／含水比分布確認；ブロック内に、性能に影響する密度分布や含水比分布が発生しない条件を把握する。
- ブロック基礎特性（含水比、透水係数、膨潤圧、膨潤率、飽和後の圧縮率）

SKB では、これらの基礎特性を把握する試験とともに、ブロック強度特性試験を実施している。この試験の目的は材料条件の違いがブロックの強度特性に与える影響を確認するためとしており、一軸圧縮試験とビーム試験（曲げによる引張試験）の 2 種類の力学試験を採用している。このブロックの強度特性の把握は、処分坑道内でブロックが載荷される荷重に耐えられることが重要と考えているためである。また、SKB では複数の種類の材料によるブロック強度の違いと、同一材料でも圧縮前に粉砕等の加工を加えることによりブロック品質の向上の程度を確認するためにもこれらの試験結果を利用している（SKB, 2014a 他）

一軸圧縮試験は圧縮圧力（25 MPa、50 MPa）と含水率（納入時のまま，20%，22%，24%）をパラメータの 4 種類とした。試験結果からはブロック密度と含水率が破壊時の最大応力に及ぼす影響は大きい。また、試験片の乾燥密度はフルスケールブロックでの乾燥密度よりも高めとなっているが、試験結果よりブロック製造に選ばれた含水率 20%はブロック強度に関しても適切であると判断している。

ビーム試験（曲げによる引張強度試験）も一軸試験と同様に、材料の違いや含水比の違いによるブロック品質を比較評価するために実施している。また、試験は実験室で小さな試験片（□

50 mm, h 20 mm）からの切り出し、フルスケールのブロックから a×b×c～10×20×35 mm の試験片を製作して実施している。試験は、梁の中央部に 0.10 mm/min の一定の変形速度を与えて、梁を強制的に破壊させ、荷重と変位を連続的に測定している。

試験の結果から、強度は初期含水率の影響が明らかであり、また、含水率の増加もしくは密度の増加に伴い最大引張強度は増加する傾向にある。

Asha2010 の材料のように、ロットにより粒度が大きい材料を含むロットに対しては、材料を破砕し、含水率を幾分高めたところ、強度が著しく向上した。これにより初期の材料特性の違いに加えて、圧縮前の材料加工が適正かどうかもこのビーム試験で確認できる。これは強度試験で使用した試験体のエッジ部分に着目すると、固化が発生していない材料を用いた場合と固化が発生している材料を用いた場合で比較すると、固化が発生していない材料の方が試験体のエッジが安定しているので、このエッジの状態を確認することにより材料の固化状態の推定にも利用可能と考えられる。

以上のように、SKB で実施された一軸圧縮試験とビーム試験の力学試験は、これらの値を測定することにより、含水比と試験値、密度と試験値を事前に把握しておけば、間接的にブロック品質の確認に用いられることを示している。また、材料の違い、場合により同じ材料でもロットの違いによるブロック品質に与える影響を相対的に比較する場合にも有効な手法と考えられる。

ただし、この力学試験を品質確認に使用するためには、事前に使用予定材料と材料の加工方法、圧縮条件などと試験結果の関係を把握しておく必要がある。

事業開始時には、脱型後のブロック製品の外観観察、ブロック寸法、ブロック質量を測定する。このときには、品質管理基準として製作誤差の許容値設定が必要である。

d)保管時管理

ブロック製品の保管時の品質を対象とする。事業開始前にはブロックの高湿度下での挙動把握や搬送時の振動によるブロックへの影響を受けないブロック仕様の把握が必要である。また、必要により表面のパッキングや専用容器保管などを検討する。

事業開始時では出荷時のブロック寸法とブロック質量の測定及び目視によるブロック外観（ひび割れ、破損有無）の確認を実施する。

（3） 施工品質

施工方法に係わる品質、埋戻し材ブロック工法に対しては、製品であるブロックを埋戻し地点に設置する際の定置精度等を対象とする。さらに、残置されるブロック間の隙間の大きさ、隙間の処理等が品質管理対象となる。これらについて事業開始前と事業開始後での品質管理項目を付表 2.1-5 に示す。

付表 2.1-5　施工品質に対する事業開始前及び事業開始時の品質管理項目の例

工　程		事業開始前	事業開始時
ブロックの定置工程	定置装置	【トンネル形状､定置後ブロック位置確認】 ・トンネル形状確認方法の確立 測量技術（レーザ、画像分析） ・定置後ブロック位置確認方法確立 測量技術（レーザ、画像分析)	【トンネル形状、定置後ブロック位置確認】 ・トンネル形状確認 ・機械位置確認 ・ブロック位置確認
		【機械制御】 ・把持方法の選定 真空把持、機械式把持、機械式押込 ・稼働機構の設計	【機械制御】 ・把持データの確認 真空把持；真空吸引力測定 機械把持；把持圧データ測定 機械式押込；押出力データ測定 ・機械位置制御データ測定
	ブロック	・定置後ブロック表面状態確認方法 測量技術（レーザ、画像分析）確立	・定置後ブロック表面状態データ確認
隙間処理工程	隙間位置	【隙間位置、隙間量確認】 ・隙間位置の確認方法の確立 測量技術（レーザ、画像分析）	【隙間位置、隙間量確認】 ・隙間位置の確認 測量技術（レーザ、画像分析）
	充填材料	・充填材仕様の設定 ・充填材製作方法の確立	・充填材料重量管理
	充填方法	・充填機構の確立 充填アーム制御機構、材料移送機構、 材料充填機構（機械式移送、圧送）	・充填機構制御データ記録 ・充填量記録
	充填後	・隙間充填材料充填状態確認方法確立 測量技術（レーザ、画像分析）と充填量の管理方法確立	・隙間充填材料充填状態計測 測量技術（レーザ、画像分析）

a)ブロック定置工程

【定置装置】

事業開始前には定置装置に対しては以下の項目毎に事前の検討が必要である。

・トンネル形状、定置後ブロック位置確認；トンネル形状確認と既に置かれているブロックの定置位置を確認するためのレーザ計測や画像分析による確認技術の検討が必要である。

・機械制御、把持方法の選定；ブロックの把持方法の選定と把持機構の検討が必要である。把持機構には、真空把持、機械式把持、機械式押込があり、それぞれ長短がある。真空把持方式では、ブロックの表面状態に対応して必要な吸引力の確保と機構の検討が必要である。機械式把持では機械機構の検討が必要であり、ブロックをつかむときの圧力と、把持力を受けたブロックに影響を与えないような機構の選定が必要である。機械式押込では押し込み時のブロックとブロックの接触面の摩擦力と摩擦発生時にブロックが影響を受けない機構の検討が必要である。

・稼働機構の設計；搬送定置装置の機構の検討と実証が必要である。

事業開始時には定置装置に対しては以下の項目毎に事前の検討が必要である。基本的には各位置の確認と位置制御データの確認である。

・トンネル形状、定置後ブロック位置確認；トンネル形状確認と既に置かれているブロックの定置位置を確認するためのレーザ計測や画像分析による確認と確認データの記録
・機械制御系データの確認；真空把持では真空吸引力測定データ、機械把持では把持圧データ及び機械位置制御データの記録

【ブロック】

事業開始前には定置したブロックの確認のために以下の事前の検討が必要である。

・定置後ブロック表面状態確認方法；定置した後のブロックの表面状態を確認するため画像処理による確認技術の確立が必要である。
・事業開始時には定置したブロックの位置確認と定置後のブロック表見状態；位置確認データ、ブロック表面状態（欠損の有無、ひび割れ発生の有無等）の確認データ

b)隙間処理工程

事業開始前には隙間処理技術について以下の項目毎に事前の検討が必要である。

・隙間位置、隙間量確認；定置した後のブロックとブロックの隙間及びブロックとトンネル間の隙間を確認するためレーザまたは画像処理による確認技術の確立が必要である。
・充填材料の設定；充填材の仕様決定と製作方法の確立が必要である。
・充填機構の確立；充填アーム制御機構、材料移送機構、材料充填機構（機械式移送、圧送）等の各機構の確立が必要である。
・隙間充填材料充填状態確認方法確立；充填した後の充填状況を充填量との関係を考慮した画像処理データによる確認技術の確立が必要である。

事業開始時には定置装置に対しては以下の項目毎に事前の検討が必要である。

・隙間位置、隙間量確認；定置した後のブロックとブロックの隙間及びブロックとトンネル間の隙間の確認データ
・充填材料重量管理データ
・充填機構制御データ記録
・隙間充填材料充填状態計測；画像分析等

2.1.2 適用可能な埋戻し材の構成材料の範囲

適用可能な埋戻し材ブロックの構成材料範囲の把握のため、国内外の埋戻し材ブロックに関する知見をまとめた。

国内では緩衝材ブロックとしては、材料配合クニゲル V1 70%、珪砂 30%の材料で製作、試験が実施されている（原子力機構, 2016b）。埋戻し材については、小型であれば 300×300×100 mm 及び 300×300×150 mm 程度のクニゲル V1 40%、掘削土 60%の材料で製作されている（原子力機構, 2016a；2016b）。大型であれば 1,000×1,000×1,000 mm でベントナイト 70%、珪砂 30%、ベントナイト原鉱石 100%のものの製作実績がある（高尾ほか, 2005）。

SKB では複数の産地の異なる候補材料に対してのブロックを製作し、特性について調査が行われている。この調査では複数の産地（Ashapura（India）、Ibeco（Greece）など）のベントナイトで 300×148×75 mm や 500×571×400 mm のブロックを製作した実績がまとめられている（SKB, 2014a）。

これらの知見を参考に、適用可能な埋戻し材の構成材料及びブロックの仕様の範囲及び特記事項についてまとめた。付表 2.1-6 に示す。

使用するベントナイトについては粒径や含水比調整した材料から粒度調整した原鉱石まで製作実績がある。ただし、粒度調整が十分できていない材料の場合角部がもろくなることが報告されている（SKB, 2014a）。ベントナイト配合割合については最小では 15%（残り 85%は玄武岩：5 mm 以下）、最大では 100%について製作実績がある。ただし、粒径・含水比調整した材料（クニゲル V1）の様な材料の場合、貧配合になるほどだまが増加する傾向がある。含水比については、設計値で 9.0～40.0%までの製作実績がある。ただし、含水比が大きいほど金型への材料付着、表面の凹凸の増加やブロックが軟らかくなる傾向がある（原子力機構・原環センター, 2016a；原子力機構・原環センター, 2021）。ブロックサイズについては 300×148×75 mm から 1,000×1,000×1,000 mm のブロックについて製作実績がある。ただし、薄板の様な高アスペクト比のブロックについて製作実績はない。

付表 2.1-6　適用可能な埋戻し材の構成材料の範囲の概要

	適用可能範囲	特記事項
使用するベントナイト	粒径・含水比調整した材料から粒度調整した原鉱石まで対応可能である。	・粒度調整が十分できていない場合、角部がもろくなる可能性がある
掘削土粒径	1.7 mm 以下～20 mm 以下	
ベントナイト 配合割合	15～100%	・粒径・含水比調整した材料（例：クニゲル V1）の様な材料の場合、貧配合になるほどだまが増加する傾向がある。
有効粘土密度	0.73～1.37 Mg/m^3	
目標含水比 （実測値）	9.0～40.0% （11.7～38.75%）	・含水比が大きいほど金型への材料付着、表面の凹凸が生じる傾向がある ・含水比が大きいほど柔らかくなる傾向がある
ブロック寸法 （ブロック体積）	300×148×75～1,000×1,000×1,000 mm （0.003～1 m^3）	・薄板のような高アスペクト比な形状のブロックを製作した実績はない
乾燥密度	1.203～2.18 Mg/m^3	

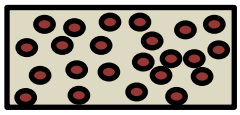
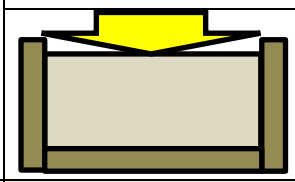
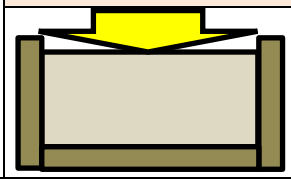
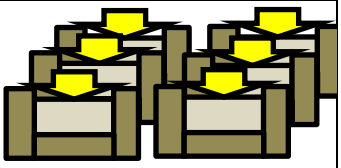
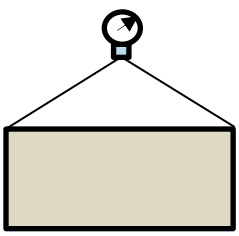
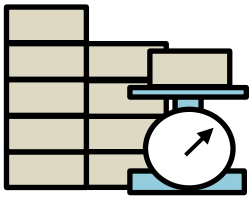
ここでは材料品質、製品品質、施工品質に分けて、ブロック寸法の差が製作・品質管理に対してどのような影響を与えるかを検討した。令和 3 年度のブロック寸法の検討結果（原子力機構・原環センター, 2022）を参考として、大型ブロックを 972 mm×1,000 mm×H481 mm、小型ブロックを 300 mm×300 mm×H100 mm と想定して検討した結果を付表 2.1-7 と付表 2.1-8 に示す。

材料品質については小型になるにつれて掘削土の粒径が影響の増加することが考えられる。

製品品質についてはブロックが小型になるにつれて圧縮設備の規模が小さくなることが考えられるが、設備の数が増加するためブロックの製作効率は低下する可能性が考えられる。また品質管理についても小型になるにつれて個数が増加するため、寸法や重量測定などの品質確認作業が増加する可能性がある。

施工品質については、小型になるにつれて、ブロック数が増加するため定置作業などの施工効率については悪化する可能性があるが、定置後の隙間処理などについては小型ブロックの方が有利になると考えられる。

付表 2.1-7　ブロック寸法が製作・管理へ与える影響（1/2）

			大型ブロック 972×1,000×481	小型ブロック 300×300×100	理　　由
材料品質	材料製造工程	掘削土	○	×	・小型になるにつれてブロックサイズに対して掘削土粒径が大きくなることから、ブロック内の配合に偏りが生じ、不良品が生じる可能性がある。
					
製品品質	材料混練工程				・寸法による影響はない。
	圧縮成型工程	圧縮成型	×	○	・ブロックが小型になるにつれて、必要な圧縮成型力が小さくなるため、圧縮成型に関わる設備の規模は小さくなる。
					
		ブロック製作効率	○	×	・ブロックが小型になるにつれて、設備数が増加する。
					
	ブロック製品管理		○	×	・ブロックが小型になるにつれて、ブロックの製作数が増加するため、ブロックの品質確認作業（寸法測定・重量測定）の作業量は増加する。
					

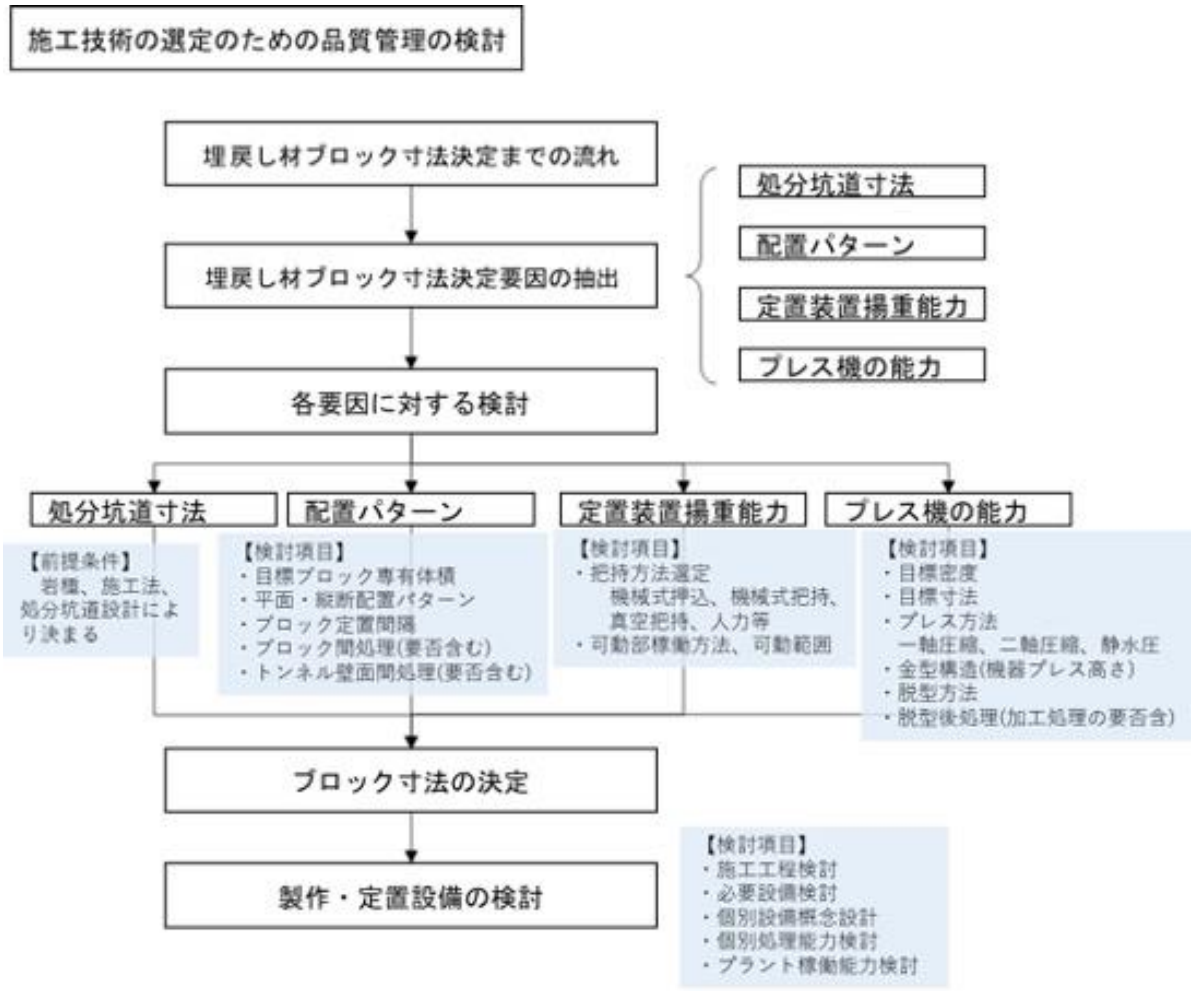
付表 2.1-8　ブロック寸法が製作・管理へ与える影響（2/2）

			大型ブロック 972×1,000×481	小型ブロック 300×300×100	理　　由
施工品質	ブロック定置	施工効率	○	×	・ブロックが小型になるにつれて埋め戻すブロックの数が増加するため、施工効率は低下する。
	定置品質管理	定置後の隙間処理	×	○	・ブロックが小型になるにつれて、隙間を埋めることが容易になり、ブロックと坑道間の隙間が減少する。

2.1.3 施工技術の選定のための品質管理の検討（ブロック寸法設定手順案）

上記までの検討を受けた、ブロック寸法の設定手順案を提示した（付図 2.1-1）。この手順案に従い、候補サイト条件（候補地点の力学条件、掘削土の特性等）が推定可能になった時点で、埋戻し材ブロックの寸法等の使用設定作業を効率的に実施可能と考える。また、この設定手順案に対して、現状で技術的課題が残る点については、今後、引き続き早期に課題解決を実施することを強く推奨する。

付図 2.1-1 に示す埋戻し材ブロック寸法設定手順では、図中の「埋戻し材ブロック寸法決定要因の抽出」で埋戻し材ブロックの決定要因を抽出した。決定要因の選定は SKB（SKB, 2014c；2015b）の埋戻し材ブロックに関する検討を参考とし『処分坑道寸法』、『（埋戻し材ブロック）配置パターン』、『（埋戻し材ブロックの）定置装置の（搬送）揚重能力』及び『（埋戻し材ブロックの）プレス機の能力』とした。

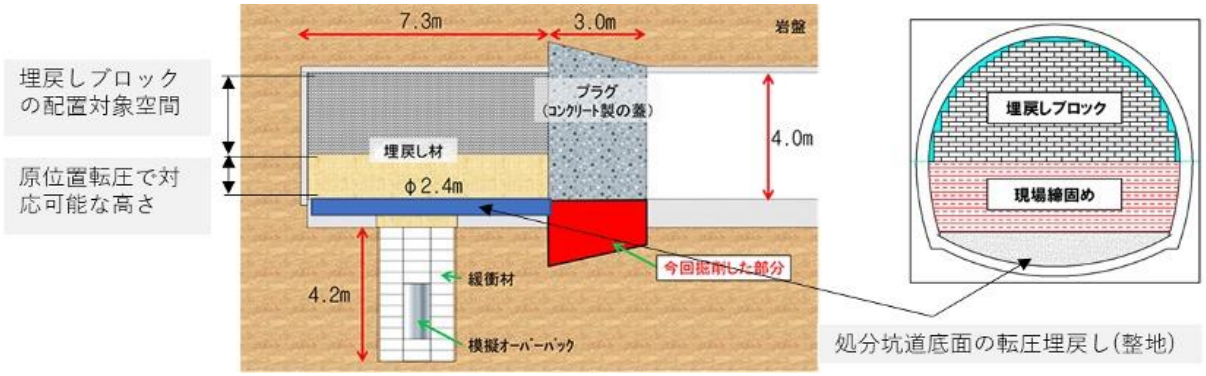


付図 2.1-1　埋戻し材ブロック寸法設定手順案

（1） 処分坑道寸法

処分坑道の寸法、形状は埋戻し材ブロック寸法、定置パターン決定の前提条件であり、この処分坑道に適合させて以後のブロック仕様の検討が行われる。

処分坑道寸法に関して更に検討しなければならない条件は、処分坑道を全てブロックで埋め戻すのではなく、大型転圧機で現場締固めが可能な高さまでは現場締固めを行い、処分坑道上部をブロックで埋め戻すことも考えられる。この現場締固めと埋戻し材ブロックの併用で埋め戻した例としては幌延深地層研究センター深度 350 m 試験坑道 4 断面の実例がある（付図 2.1-2）。



付図 2.1-2　深度 350m 試験坑道 4 断面イメージに加筆
（原子力機構, 2019 に加筆）

前提条件として与えられた処分坑道の寸法、形状に加えてブロックの定置空間を設定するためには、前述の処分坑道底部の処理をどの高さまで実施するかを考慮する必要がある。これは埋戻しを埋戻し材ブロック単体で実施するか、現場締固めとの併用で実施するかの工法選定が必要なことを示している。付表 2.1-9 にブロック工法単体と現場締固め工法との併用の長短比較を示す。この長短を考慮して、埋戻しに必要な空間体積の設定を行う。

ただし、処分坑道底面はブロックを設置するために、ブロック工法単体であっても、最低限水平な床面が形成できる程度までは原位置での締固めによる整地作業が必要である。

付表 2.1-9　ブロック工法単体と現場締固め工法との併用の比較

	ブロック工法単位での埋戻し	ブロック工法と原位置締固め工法の併用
長所	・ブロック定置のみの単一工程での施工 ・急速施工が可能 ・均一な品質の埋戻しが可能 ・埋戻しの高密度化が可能	・ブロック製作数の削減が可能
短所	・ブロック製作数の増加	・原位置転圧とブロック定置の作業段取り替え工程の増加 ・原位置転圧部とブロック部の密度が異なる

(2) （埋戻し材ブロック）配置パターン

埋戻し材ブロックの配置パターンはブロックの大きさや製作するブロックの種類の数等が影響する。検討に際してはブロックの大きさにより以下の特徴があることを考慮してブロックの大きさを選定し、配置パターンを設定する。ブロックの大きさによる特徴は以下である。

・ブロックが小さい方が、埋戻し部分の充填率があがる。
・ブロックが大きい方が、ブロックの表面積が減少する。
・人力での作業ではブロック寸法は 300×300×100 mm 以下となる。
・ブロックを大型化する方が、定置工程での作業効率があがる。
・ブロックを大型化するにつれて、トンネル壁面とブロックの間に空間が残置されるため、その部分を充填するためのブロックの準備が必要となる。

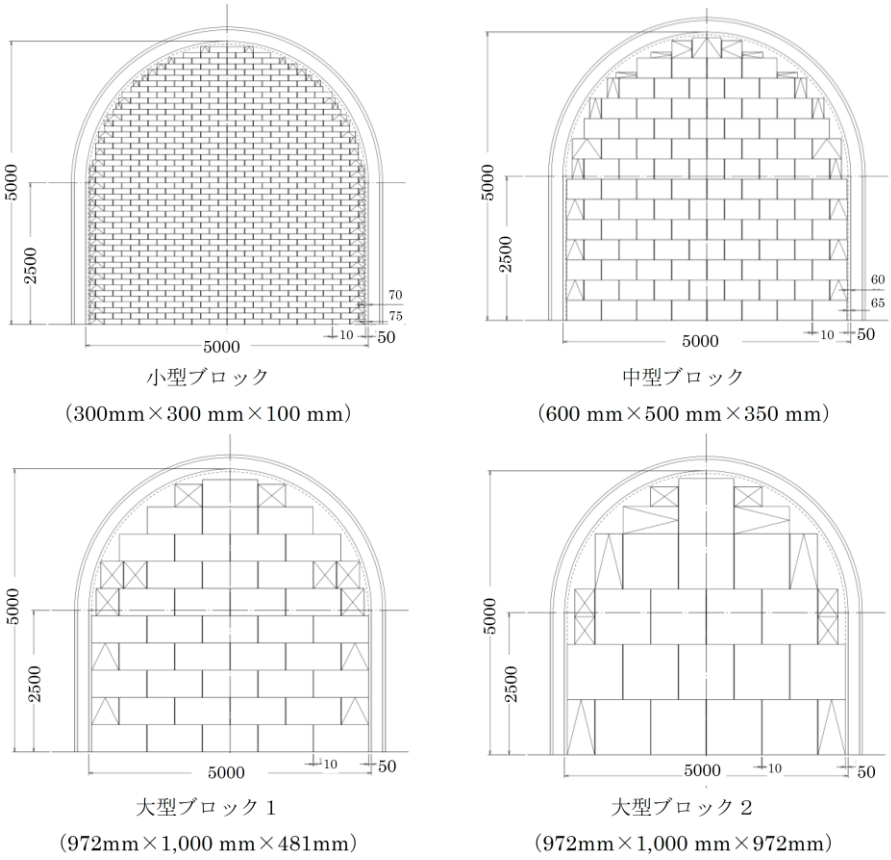
ブロックの配置パターンの検討のために設定したブロック寸法の例を付表 2.1-10 に示す（原環センター, 2021）。

このときの検討に用いられた 4 種類のブロックの大きさの根拠は小さなブロックは人力での作業が可能な大きさとして 300×300×100 mm（小型ブロック､付図 2.1-3）を選定し、大きなブロックは国内での製造実績がある 1,000×1,000×1,000 mm のブロックを対象とした（大型ブロック 2）。

その後、機械での搬送・定置を前提とした 650×500×350 mm のブロック（中型ブロック）と、最大規模のブロックに対してハンドリング性の向上を考慮して検討された最大規模のブロックの半分の高さのブロックとして 1,000×1,000×500 mm（大型ブロック 1）を選定し、それぞれ配置パターンを検討している。これらの四つの大きさのブロックの配置検討例を付図 2.1-3 に示す（原環センター, 2021）。大型のブロックについてはトンネル壁面とブロックの間の空間を減らすために大きさの異なるブロックが必要となる。

付表 2.1-10　候補ブロック概要
（原子力機構・原環センター, 2021 に加筆）

	寸法[mm]	実績・選定理由　等
小型	300×300×100	・幌延深地層研究センターの人工バリア性能確認試験の埋戻し材として使用された。 ・人力で搬送・定置が可能な寸法・重量である。
中型	650×500×350	・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、埋戻し材ブロックに関する要素試験で仮設定した寸法である。 ・作業の効率性を考慮して小型ブロックよりも大きくした。
大型 1	1,000×1,000×500	・L1 の処分坑道の側部埋戻しを対象とした国内製作実績の最大寸法（1,000 mm×1,000 mm×1,000 mm）の検討時に同時に検討された寸法（1,000 mm×1,000 mm×500 mm）。
大型 2	1,000×1,000×1,000	・L1 の処分坑道の側部埋戻しを対象とした国内製作実績の最大寸法（1,000 mm×1,000 mm×1,000 mm）。



付図 2.1-3　各候補ブロックに対するブロックレイアウト検討結果例
（原子力機構・原環センター, 2021）

付図 2.1-4　人力によるブロック定置作業例
（原子力機構, 2019）

(3) （埋戻し材ブロックの）定置装置の（搬送）揚重能力

ブロックの把持方法には付表 2.1-11 に示すように吊り具方式、クランプ方式、真空把持方式、プッシュプル方式の代表的な 4 つの方式が考えられる。それぞれの把持方法には特徴があるが、把持方法の選定では、表中に示す条件を考慮して選択する。ただし、通常、荷役作業に多用されている吊り具方式は、ブロック側に吊り代が付けられないため埋戻し材ブロック定置に際して吊り具方式を選択する場合には、真空吸引方式でブロックを把持して吊り具で吊り上げる組合せとなる。

また、人力で搬送可能な小さな小型ブロックに対しては機械式での定置作業を前提とした場合、ブロックの一つ一つを把持して定置することもできるが、作業の効率性の点からは複数個の小型ブロックをまとめて一回の定置作業を実施する。その場合には、クランプ式とプッシュプルでは、より大きなブロックの上に小型ブロックを搭載するか、パレット上の治具に搭載する必要がある。

付表 2.1-11　定置装置の把持方式の比較

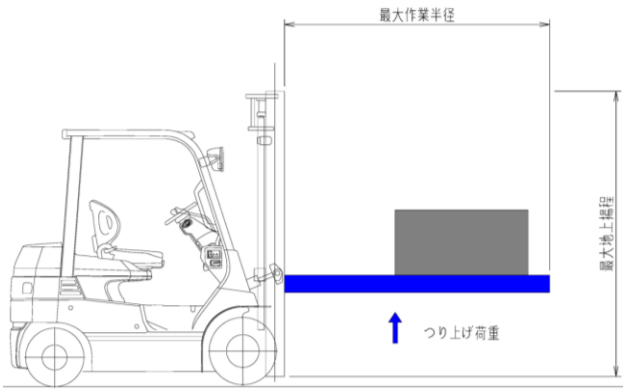
（原子力機構・原環センター, 2021）

	把持方式			
条件	吊り具 (吊り代をつり上げる)	クランプ (挟み込による把持)	真空把持 (真空吸引による把持)	プッシュプル (押し込みで定置)
ブロック上面の吊り代は小さいこと	× 吊り代が必要となるため適さない	○ 把持部を薄くすれば対応することができる	○ 片持ち方式であれば吊り代を小さくすることができる	○ 片持ち方式であれば吊り代を小さくすることができる
定置済みブロックや坑道天井、壁面に定置装置が干渉しないこと	× 把持機構がブロック上面に存在しないため適さない	× 把持部が定置済みブロックと干渉するため適さない	× 把持装置が坑道天井部分と干渉するため適さない	○ ブロック底面部で把持するため定置済みのブロックと干渉しない
作業エリアが小さいこと	○ クレーン装置のみであるため作業エリアを圧迫しない	○ 把持部と動力は一体化できるため作業エリアを圧迫しない	× 把持装置とは別に真空ポンプがあり、真空ポンプと真空把持装置間をパイプでつなぐ必要があり作業空間が圧迫される	○ 把持部と動力は一体化できるため作業エリアを圧迫しない
ブロックサイズに応じて装置の切り替えがないこと	× 把持面と重量次第では把持具を変更する必要がある	○ ブロックサイズに応じた装置の切り替えは必要ない	× 把持面と重量から真空パットの大きさや数を変更する必要がある	○ ブロックサイズに応じた装置の切り替えは必要ない

続いて把持方法の選定とともに、ブロックを把持して移動させる可動部の検討を同時に行う。

埋戻し材ブロックの定置作業ではブロック上面の吊り代は小さいこと、特に天端付近の狭隘となった箇所での定置作業では吊り具による吊り下げは困難である。

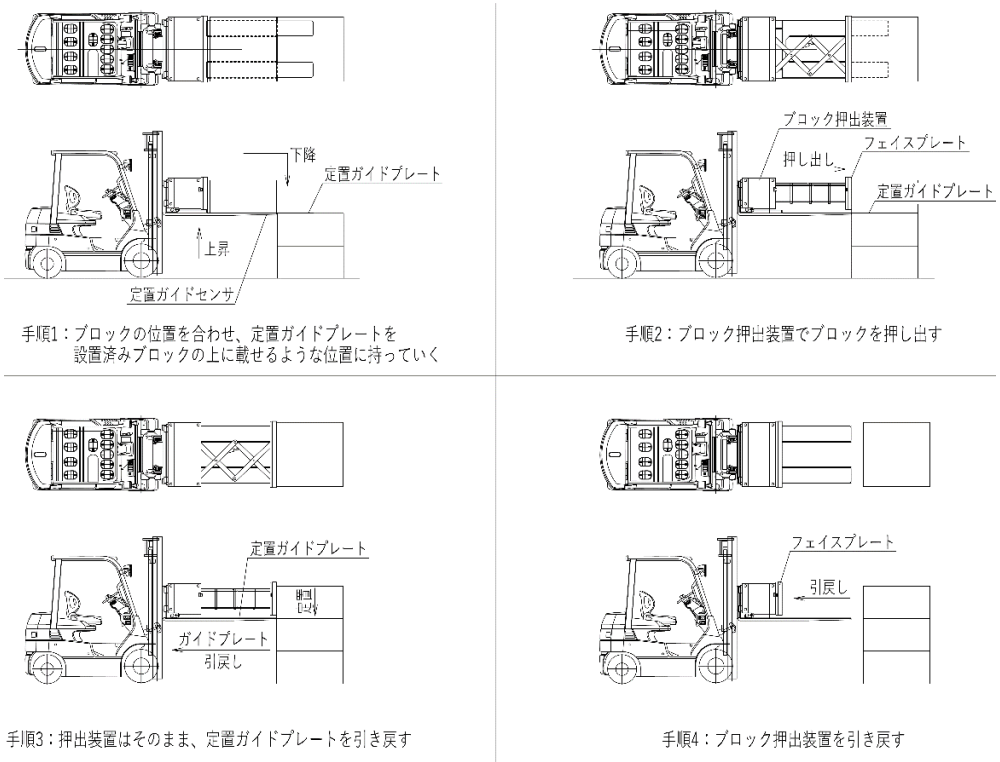
他の 3 方式においても付図 2.1-5 に示すように定置装置の能力としては吊り上げ能力、最大地上揚程、最大作業半径があり、これらのいずれもがブロック重量、つまりブロック寸法の制約を受ける。精度良く埋戻し材ブロックを定置する方法として SKB では真空吸引によりブロックを把持し、産業用ロボットにより定置作業を実施する実証試験が行われているが、この場合ではブロックの重量と寸法に適応した機械選定となり、大型のブロック搬送のために産業用ロボットを活用するためには狭隘部で大重量物の搬送を考慮した機械設計が必要である。



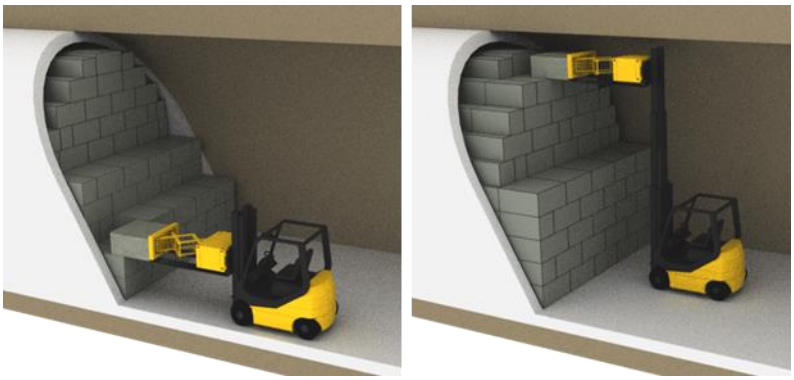
付図 2.1-5　定置装置能力として考慮する項目

原環センター（2021）では、付図 2.1-6 に示した以下の条件について比較検討を行い、埋戻し材ブロックの定置工程では作業空間として天端とブロックの間の上部空間が確保できないこと、坑道内の作業エリアが狭く複数台を用いた作業をすることが非効率であること、複数のブロックを必要に応じて定置する運用になることと重量物を高所へ設置させるための転倒防止が必要なことなどであり、これらの検討よりプッシュプル方式を第一候補として選定している（付図 2.1-6、付図 2.1-7）。

・ブロック上面の吊り代は小さいこと
・定置済みブロックや坑道天井、壁面に定置装置が干渉しないこと
・作業エリアが小さいこと
・ブロックサイズに応じて装置の切り替えがないこと



付図 2.1-6　埋戻し材ブロック定置装置の例
（原子力機構・原環センター, 2021）



付図 2.1-7　プッシュプル方式の稼働イメージ
（原子力機構・原環センター, 2021）

（4）（埋戻し材ブロックの）プレス機の能力

埋戻し材ブロックのプレス機の圧縮機構、必要プレス圧力の選定はブロック寸法と到達すべきブロックの乾燥密度を考慮して設計される。国内では、小型ブロックで要求する乾燥密度が 1.4 Mg/m^3 程度であれば、付図 2.1-8 程度の比較的小型のプレス機で対応した実績がある。ただし、掘削土の品質が良好でない場合や、より高い乾燥密度を要求された場合にはより大型のプレス機が必要となる。

(a) Compacting machine (distant view)　(b) Near view of mold and piston
Photo 50　Compacting machine for buffering material block

付図 2.1-8　幌延新地層研究センター向け埋戻しブロック製作状況
（原子力機構, 2016a）

○300 mm×300 mm×100 mm の埋戻し材ブロック製作実績
材料：ベントナイト 40wt%　掘削土 60wt%　初期含水比：33-39%
プレス機：公称圧力 800 kN プレス装置　　乾燥密度：1.4 Mg/m^3

大型の埋戻しブロックでは、1 m 程度までのブロック製作実績が報告されている（付図 2.1-9）。ただし、この場合でも圧縮する材料の品質が比較的良好なことが前提であり、サイトから入手する掘削土の組成及び圧縮前の破砕工程の善し悪しと、ベントナイト材料の混練工程の品質に大きく依存するため、材料条件によってはより大きなプレス力を必要と考えられる点に注意が必要である。

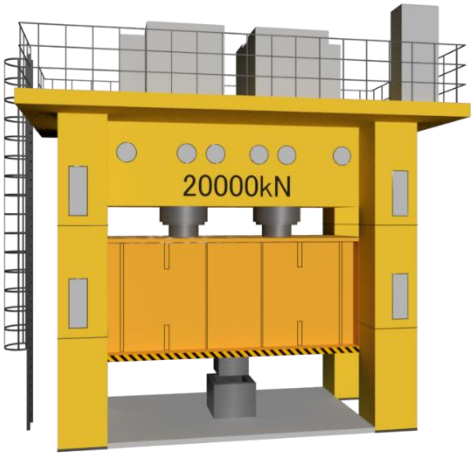


図-4 ブロック（ρ d=1.6Mg/m^3）　　図-3 1m ブロック用金型

付図 2.1-9　1 m 規模ブロック製作プレス機イメージとブロック及び金型外形
（高尾ほか, 2004）

2.1.4 試験計画案の提示

（1） 試験計画案作成方針

埋戻し材ブロックに関しては、材料が一定の品質が満たされれば、高品質のブロック製作が可能なことが確認されている一方、製作材料に問題がある場合には、要求された品質のブロック製作が不可能であり、この製作材料の満たすべき品質の範囲設定の明確化が困難な問題となっている。

この製作材料の品質の範囲設定に関する問題の難しい点は、技術的には混練設備、製作設備（プレス機）、保管設備、搬送・定置設備を高度化することにより、ある程度品質が悪い製作材料への対応が可能となるが、この場合は事業費用の大幅な増加が必要となる点である。具体的には製作材料を納入して加工を行い施工する、または製品を出荷するプロセスでは、製作材料の品質の悪さをプロセスの後段で対応することは可能であるが、後段で対応する設備を追加することは、工程が後段になればなるほど事業費用は急激に増加する傾向がある。つまり、製品品質がある程度悪くても設備費用を投入すれば対応は可能であるが、この場合の課題対応は「事業費用による」ということになってしまい、このような費用増加を前提とした技術体系は「実用」を旨とする工学の目指すべき体系とは真逆の形態であるため、推奨する対応ではない。

今回の問題である「製品品質がある程度悪くても設備費用をかければ対応は可能」である実例として、プレス機の構造・能力がある。世界最大級のプレス機には LNG プラントなどで使用されるスーパージャンボプレートの製造に使用されている 4 万トンのプレス成形ラインが稼働している。これらの能力設備を導入すれば、原材料の土粒子が大きくばらついていても、求める乾燥密度よりも遙かに高密度の圧縮が可能となる。この最大加圧による高密度のブロックでは、使用する材料が多少不均質であっても、ブロック内の密度分布の透水係数等に与える影響は無視できるまでに高密度化が可能と想定される。

このような一般的な状況に加え、実規模埋戻し材ブロックの大量製作実証等でも指摘されている製作材料の問題（SKB, 2014a；2014b；2014c；2016；2017 など）を考慮すると、プレス設備等の高度化という後工程での対応よりは、埋戻し材の加工までの処理段階で、問題を解決しておくことが合理的と考えられる。つまり、この埋戻し材の問題への対応では、購入するベントナイトの質がある一定以上であると仮定すると、着目点は骨材材料の質、粒度分布と、ベントナイトと骨材材料の混練の品質に依存する問題に帰結する。このような状況を勘案して、これらの指摘されている課題を効率的に、一連の試験系統で対応するために実規模の埋戻し材ブロックを前提とした試験計画を提示した。

従って、サイトが決定していない現状では、幅広い掘削土への対応を可能にするために、掘削土の形状、最大粒径、粒度分布をパラメータとして試験を行い、知見を蓄積しておくことが重要である。これと同時に、掘削土の形状、最大粒径、粒度分布に対して、ベントナイトと加水に対してどの程度の材料調整が必要かを抑えておくことが重要となる。

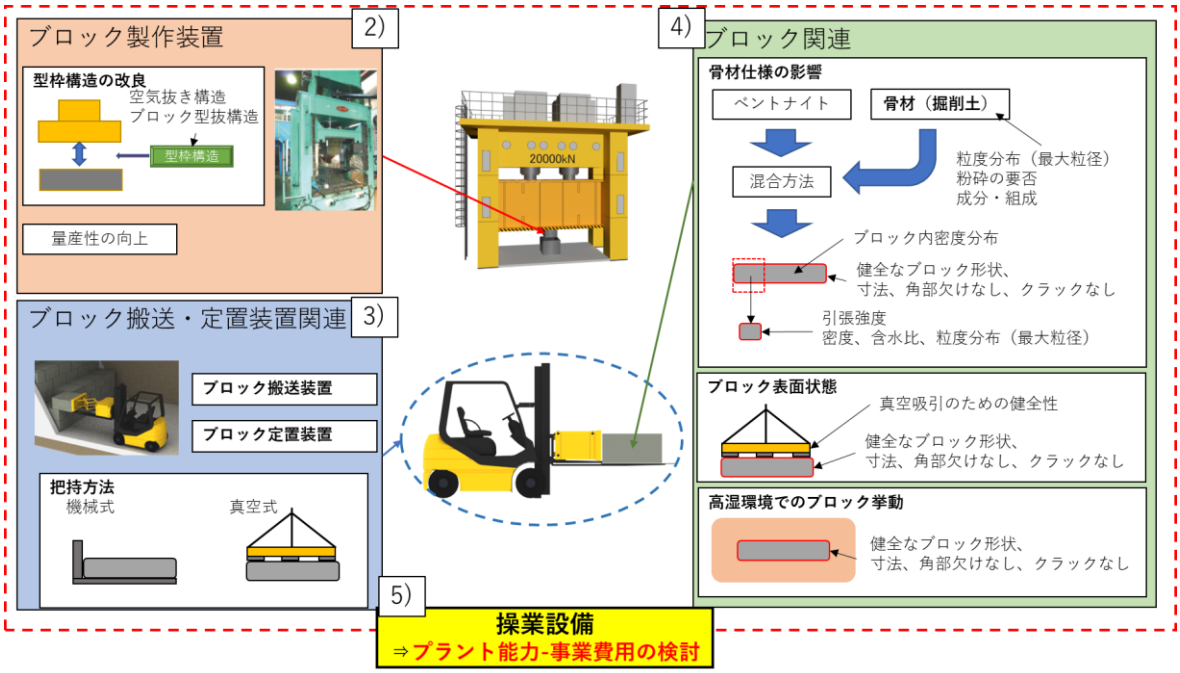
この骨材材料の質、粒度分布と混練の品質の問題に対応するためには、試験室レベルでの小さな供試体では、比較的粒径の大きな骨材材料やブロック内の密度分布の偏りを取り扱うことができないため、実規模程度の寸法のブロックを用いた実証実験を必要とする。

このような状況を勘案して、これらの課題を効率的に対応するために、一連の試験系統で対応するための実規模の埋戻し材ブロックを前提とした試験計画を提示した。

埋戻し材ブロックの試験計画案における検討対象を付図 2.1-10 に示す。この試験計画案では、ブロック製作装置関連の課題、ブロック搬送・定置装置関連の課題、ブロック関連の課題を効率的に解決することを目的としている。なお、本試験案では、骨材（掘削土）の粒度影響を正確に確認する必要があるため、材料条件の違いによる一般的なブロックの特性把握は小型ブロック（例えば 300 mm×300 mm×100 mm）の使用を想定し、掘削土の粒度影響やブロック内の密度分布及び最終製品としての埋戻し材ブロックの品質の確認を行うためには実規模の大型のブロック（例えば、972 mm×1,000 mm×481 mm）を前提として実施する。さらに、実規模の埋戻し材ブロックを製作することにより、ブロックの受ける環境影響や搬送・定置に関する課題の対応を行う。

これらの課題を効率的に対応するために、同じ実規模のブロックを複数の試験に供することにより、実規模のブロック製作個数を最小限に制限して発生費用を抑制する体系としている。

以降では付図 2.1-10 で示している「ブロック製作装置」、「ブロック搬送装置・定置装置関連」、「ブロック関連」及び「操業設備」それぞれの詳細を記載する。



付図 2.1-10　埋戻し材ブロック試験案の課題

（2） ブロック製作装置

【ブロック製作装置の課題点】

ブロック製作装置は、ブロックの製作性や量産性、品質に影響を与える。埋戻し候補材料を用いて埋戻し材ブロック製作を行う上では、一定の品質を確保しての製作方法が確立していない。たとえば十分な品質が確保できない埋戻し材料の報告（SKB, 2016）がある。また、人工バリア緩衝材ブロックの大型化に伴う研究（原環センター, 2002）では、ブロック寸法の大型化が表面状態や密度分布等に影響されると言う報告がある。

特に、HLW の緩衝材ブロックや L1 を対象とした大型ブロックでは、クニゲル VI とケイ砂を用いて大型のブロック製作の実績が得られている（高尾ほか, 2005）が、本業務で対象としている埋戻し材ブロック材料の仕様では実績が無く、大型化に伴いブロック品質の出来形や外観、密度分布、寸法変化など要求に十分対応できないことが想定される。ただし、SKB の大型の埋戻し材ブロック製作検討により、金型の改造や圧縮成形時に脱気を行うなどにより、品質の向上と作業効率の向上が提案されている（SKB, 2015b）。このような背景を考慮して、ここでは、埋戻し材ブロック製作装置の課題解決のために、以下の試験提案を行う。

試験提案の概要は、大型埋戻し材ブロック製作装置の改良、大型埋戻し材ブロックの製作及び、これらを通じて、埋戻し材ブロック仕様を考慮したブロック寸法特性（大型化に伴う品質の影響把握）を行う。

【課題の解決方法】

埋戻し材を用いた各種のブロック寸法及び製作条件（初期含水比、材料配合、目標乾燥密度、材料混練方法など）を考慮したブロック製作を行うことにより、大型埋戻し材ブロック製作装置の改良、大型埋戻し材ブロックの製作及び、これらを通じて、埋戻し材ブロック特性（大型化に伴う品質）の把握を行うことにより埋戻し材ブロックの大型化技術を確立する。

例えば原環センター（2002）では、緩衝材ブロック製作性把握試験で実績のある大型ブロック製作と各種の寸法のブロックの製作を通じて、このブロック大型化によるスケール効果の把握を

行っている（原環センター, 2002）。小型ブロックから大型ブロックへスケールアップを行い、スケール効果を確認する試験が行われている。この試験では直径 700 mm、300 mm 及び 50 mm の供試体に対して H/D（縦横比）を変化させてブロックを製作して、スケール効果を確認している。製作したブロックに対して、出来上がり寸法、寸法変化を確認している。これによりスケール効果の影響を考慮して、各種の寸法のブロック試験結果の解釈の参考としている。

また、SKB ではブロック製作方式について、品質についてはブロックの均質性を保つためにピストン部とフレーム部でスピードが変更可させている。さらに脱気機構を取り付けることでひび割れのリスクの減少やブロック製造速度向上の可能性についても言及されている（SKB,2015b）。

【課題の解決方法の具体的な提案】

ブロックの金型については SKB で言及されている空気抜き構造やブロック均質性を保つ抜型構造などを参考として、令和 3 年度に検討した金型を改良することが考えられる。

ブロックのスケール効果については、令和 3 年度に検討したブロック形状を対象として、複数の埋戻し材条件（材料配合、含水比など）や製造条件（成型圧力、プレス速度、圧縮保持時間など）で埋戻し材ブロックの製作を行い、各サイズにおけるブロックの製作性、出来形寸法、寸法変化及び外観（角部欠け、クラック）について確認することが考えられる。

（3） ブロック搬送・定置装置関連

a)ブロック搬送装置・定置装置関連試験の概要

【ブロック搬送・定置装置の課題点】

ブロック搬送装置・定置装置には、ブロックの一時的な保管庫と必要な量のブロックを搬送できることが求められ、これを満たす装置仕様の具体化を行う必要がある。

埋戻し材のブロックの大型化に伴い、ブロックの把持によるブロックの角欠けや重量増加によるブロックとブロックの摩擦による破損が懸念される。そのために「2)ブロック製作装置」で製作したブロックを用いて定置装置（把持機構）や搬送装置の影響を確認する。

b)ブロック搬送・定置装置関連試験計画

ⅰ)ブロック搬送装置

【課題の解決方法】

「2)ブロック製作装置」で製作した大型ブロックを対象とした搬送装置を製作し、その装置を用いた搬送試験を行うことにより、大型ブロックに対する搬送装置技術の確立や技術的な課題の抽出を行う。

【課題の解決方法の具体的な提案】

ここでは、特定の操業条件に対する搬送装置の仕様をまとめることを目的とした試験を示す。

搬送装置の検討では、特定の操業条件（埋戻し速度、処分坑道形状、アクセス坑道形状・坑道距離など）やブロックの保管条件（梱包の有無、地下環境、ブロック保管環境など）を設定し、最適な搬送方法を選定する。選定した搬送方法に対応した装置を製作する。製作した装置を用いて地下環境で実証試験を行い、搬送装置のブロックの保管能力（ブロックの形状変化、寸法変化、外観、含水比）とブロックの搬送能力（積載作業時間、搬送速度、積卸時間）の確認を行い、ブロック搬送装置の仕様をまとめる。

ⅱ)ブロック定置装置

【課題の解決方法】

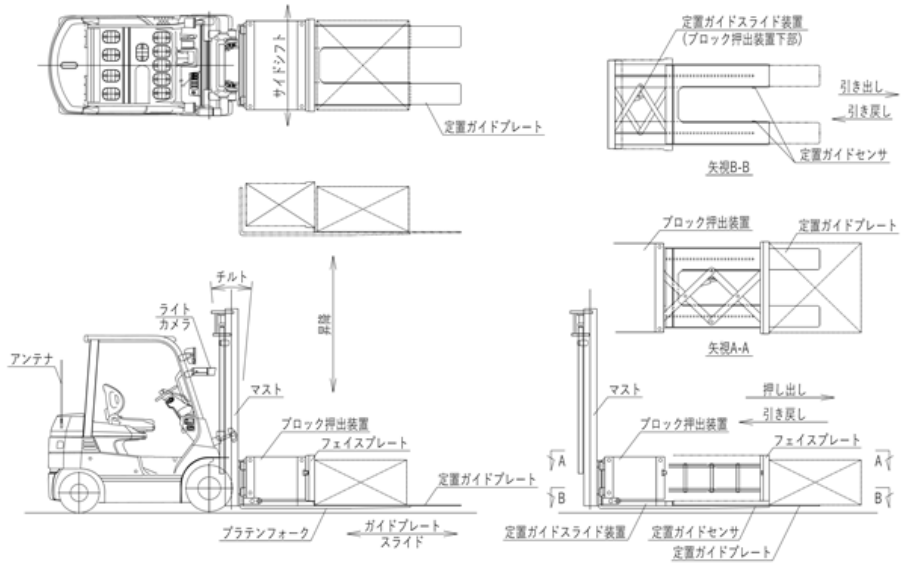
「2)ブロック製作装置」で製作した大型ブロックを対象とした定置装置を製作し、その装置を用いて地下処分環境で定置試験を行うことにより、大型ブロックに対する定置装置技術の確立や技術的な課題の抽出を行う。

【課題の解決方法の具体的な提案】

ブロック定置装置には、一定のブロック定置精度と埋戻し速度に応じた定置速度が求められ、これを満たす装置仕様の具体化を行う必要がある。ここでは、特定の埋戻し条件に対するブロック定置装置の仕様をまとめることを目的とした試験を示す。

試験では、既存の一般機械をレンタルにより調達し、令和 3 年度に示したブロック定置装置（付図 2.1-11）の把持部のみを新たに製作する。これを用いて特定の埋戻し条件（ブロック配置、埋戻し速度、坑道形状など）で実証試験を行い、埋戻し条件（定置精度、定置速度）を満たすことができるかを確認する。実証試験結果からブロック定置装置の仕様をまとめる。

また、真空吸引把持機構を定置時に用いることも想定されるため、実規模ブロックを用いての真空吸引で把持を行い、ブロック表面の状態の関係を確認する。これらより、ブロック定置装置の実現性向上に寄与する。



付図 2.1-11　ブロック定置装置　予備設計結果
（原子力機構・原環センター, 2021）

（4） ブロック関連

a)ブロック関連試験の概要

【ブロック関連の課題点】

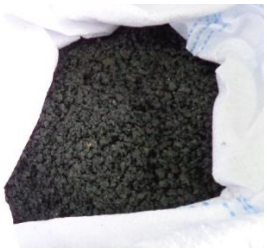
ブロックについては「ⅰ)ブロック搬送装置」に示すように、埋戻し候補材料を用いて埋戻し材ブロックの製作を行う上では、一定の品質を確保してのブロック製作方法は確立していない。埋戻し候補材料については、候補地毎に骨材仕様（材料成分や粒度分布、粒径など）が異なることが想定される。骨材の仕様の違いのイメージとして付図 2.1-12 を示す。また骨材（掘削土）は粒度調整の有無や含水調整の有無などによって、追加設備（乾燥、破砕など）が必要となり、コス

トに大きく影響する。そのため骨材の仕様については事前に検討しておくことが重要である。

このような背景を考慮して、ここでは、埋戻し材ブロックに関する課題の解決のために、骨材仕様の違いによるブロックの製作性の影響の把握とブロック表面状態の把握、高湿環境でのブロック挙動及びブロック内密度分布の確認を行う。

特に地下での作業環境等を考慮しての高湿環境でのブロック表面の挙動把握は SKB においても重要視しており、実規模ブロックや各種寸法での高湿度環境下の暴露試験を実施している（SKB, 2016 他）。また、国内においては、緩衝材ブロックを対象とした高湿度環境下の暴露試験を実施することにより（竹ヶ原ほか, 2004）、幌延実規模試験設備での展示用緩衝材ブロックの製作や幌延深地層研究センター向けの緩衝材ブロック仕様設定を参照している。

(a)幌延 URL 西立坑掘削土
（ふるい分け後）
（原子力機構, 2016）



(b)令和 2 年度業務で使用した模擬掘削土
（砕砂（粒径 5 mm 以下）玄武岩）
（原子力機構・原環センター, 2020）

付図 2.1-12　掘削土の一例

b)ブロック関連試験計画

ⅰ)骨材仕様の影響

【課題の解決方法】

骨材（掘削土）について複数の材料製作条件（含水比、材料成分、粒度分布、粒径など）で埋戻し材を製作し、「2)ブロック製作装置」で示したブロック製作装置を用いて、埋戻し材ブロックの製作を行い。各条件の埋戻し材に対する埋戻し材ブロック特性の把握を行い、埋戻し材製作に関する技術を確立し、掘削土の加工の必要性や加工における品質管理基準を定める。

【課題の解決方法の具体的な提案】

試験では、まず骨材（掘削土）に関わる仕様である含水比、材料成分、粒度分布及び粒径などをパラメータとして複数の条件で模擬掘削土を製作する。次に製作した模擬掘削土を用いて、埋戻し材を製作し、埋戻し材の製作性（混練）、基本特性の把握及び埋戻し材ブロックの製作性の確認を行う。試験結果から掘削土の加工条件や掘削土の加工における品質管理体系を確立する。

また、SKB で検討されている簡易な力学試験（SKB, 2014a ほか）による埋戻し材ブロックの品質判定方法を参照し、国内向けの候補材料を想定した強度とブロック品質の関係を解明することにより、品質確認の効率化に寄与する。

ⅱ)ブロック表面状態

【課題の解決方法】

「ⅰ)骨材仕様の影響」で製作した埋戻し材ブロックを対象として、表面の摩擦力を測定する。この結果を受けてブロック把持方法の選定や把持装置の設計へフィードバックする。

【課題の解決方法の具体的な提案】

試験では「ⅰ)骨材仕様の影響」で製作されたブロックを用いて、ブロックの表面状態の凹凸やブロックの底面と上面、側面同士、定置装置との接触など定置時に想定されるブロック面の摩擦（動摩擦係数、静止摩擦係数）の確認を行う。

ⅲ)高湿度環境でのブロック挙動

【課題の解決方法】

「ⅰ)骨材仕様の影響」で製作した埋戻し材ブロックを対象として、地下坑道を模擬した環境で暴露試験を行い、その結果からブロックの保管条件や地下環境での暴露期間などの品質管理項目を確立する。

【課題の解決方法の具体的な提案】

地下環境を模擬した環境（例えば 45℃、湿度 95%RH（竹ヶ原ほか, 2004））のような環境で、「ⅰ)骨材仕様の影響」で製作した埋戻し材ブロックを対象に、一定期間暴露しブロックの表面状態、ブロックの形状及び寸法の経時変化を把握する。この結果を用いて暴露期間と使用期限について確立する。

c)ブロック内密度分布の確認

【課題の解決方法】

「ⅰ)骨材仕様の影響」で製作した埋戻し材ブロックや「ⅲ)高湿環境でのブロック挙動」の試験後のブロックを対象として、ブロック内の密度分布、含水比分布等の均質性の確認試験を実施する。その結果から骨材仕様の差による密度分布への影響や環境影響による密度分布への影響を確認する。

【課題の解決方法の具体的な提案】

「ⅰ)骨材仕様の影響」で製作した埋戻し材ブロックや「ⅲ)高湿環境でのブロック挙動」の試験後の埋戻し材ブロックを用いて、ブロックの複数箇所のコアリングもしくは切断によりサンプリングを行う。採取した試料を一定の間隔で切断して、高さ側の分布を確認する。これらの結果からブロックの密度分布を把握し、ブロックの把持装置の設計や定置方法に対してフィードバックを行う。

（5） 操業設備の具体化

【操業設備の課題点】

埋戻し材ブロックの製造設備の具体化の一環としてタイムチャート等の提示が SKB（SKB, 2014b）で行われている。SKB では緩衝材ブロックに対する一軸圧縮製造工程の概要や一軸圧縮におけるブロック製造のタイムチャートが示されているとともに、埋戻し材ブロックの製造工程に対しても事業の実現性を示すために、必要な設備と設備能力、作業時間の算定が提示されている。

これに対して、わが国においては、埋戻し材ブロックの材料納入から材料混練、製作、保管、搬送、定置工程までの一連の作業を含んだ生産設備の提示や、事業の実現性を示すタイムチャートは提示されていない。

ここでは、前節までに実施した“（4）試験計画案の提示、2)～4)”の試験結果を考慮して埋戻し材の納入から材料混練、製作、保管、搬送、定置工程までの一連の作業を対象としたタイムチ

ャートを作成し、事業の実現性を提示するとともに、事業実施時の課題（より効率化が必要な設備やクリティカルパス）の抽出を通じて、更なる実現性の向上に寄与する。

【操業設備の具体化方法】

“2.1.4 試験計画案の提示”の”2)ブロック製作装置～4)ブロック関連の検討結果”から、各設備の必要能力・規模を算定した後、各工程の作業時間をもとに、材料搬入から埋戻し材ブロック定置までの全体プロセスとしての基本のタイムチャートを算出する。

次に基本のタイムチャートを基に、特定の操業条件（操業期間、埋戻し速度、パネルサイズ、坑道形状など）から埋戻しに必要なブロック製造数と保管エリアの容量を検討し、“(4) 2)ブロック製作装置”や“2.1.43)ブロック搬送・定置装置関連や 4)ブロック関連”の試験で確定した各設備の仕様から埋戻し材ブロックの製作を想定した地上設備の配置（2.1.4 (2) ブロック製作装置）や材料搬入から製造、保管、搬送・定置までを含めた運転タイムチャートを検討する。

さらにこれらの条件に基づいて事業費用の試算が可能な体系を提示する。これにより、操業工程において、どの工程の技術開発が事業費用抑制にどの程度効果的かを定量的に示すことが可能となり、技術開発の優先度を効率的に提示できることが期待される。

2.2 まとめ

本章で実施した「施工方法選択に資する情報の整備」で実施した検討のまとめを以下に示す。

① 施工技術オプションの選定に必要な情報の抽出

ここでは施工技術の選定のための品質管理について検討を加えた。また、品質管理の側面より今後、拡充または改善すべき技術課題を抽出した。埋戻し材ブロックの製造・施工プロセス管理手法について、「材料品質」、「製造品質」、「施工品質」の三つの分類の視点より検討したハンドリングフローを策定した。

また、各々の「材料品質」、「製品品質」、「施工品質」について事業開始前、事業開始時の品質管理項目例についてまとめた。

- ・材料品質；埋戻し製品に用いる材料に着目した品質管理対象。ブロック埋戻し工法に対してはブロックに用いるベントナイトと掘削土の品質。
- ・製品品質；埋戻しに用いる製品の品質。ブロック埋戻し工法に対しては、ブロックの物理特性（乾燥密度、密度分布、寸法）に加えて、ブロック製品の保管時の品質を対象とする。具体的には、気中の湿潤状態によるブロック表面状態への影響やそれらへの対応方法を検討対象とする。
- ・施工品質；埋戻し場所での施工方法に係わる品質。ブロック埋戻し工法に対しては、製品であるブロックを埋戻し地点に施工する際の定置精度等を対象とする。さらに、残置されるブロック間の隙間の大きさ、隙間の処理等を検討対象とする。

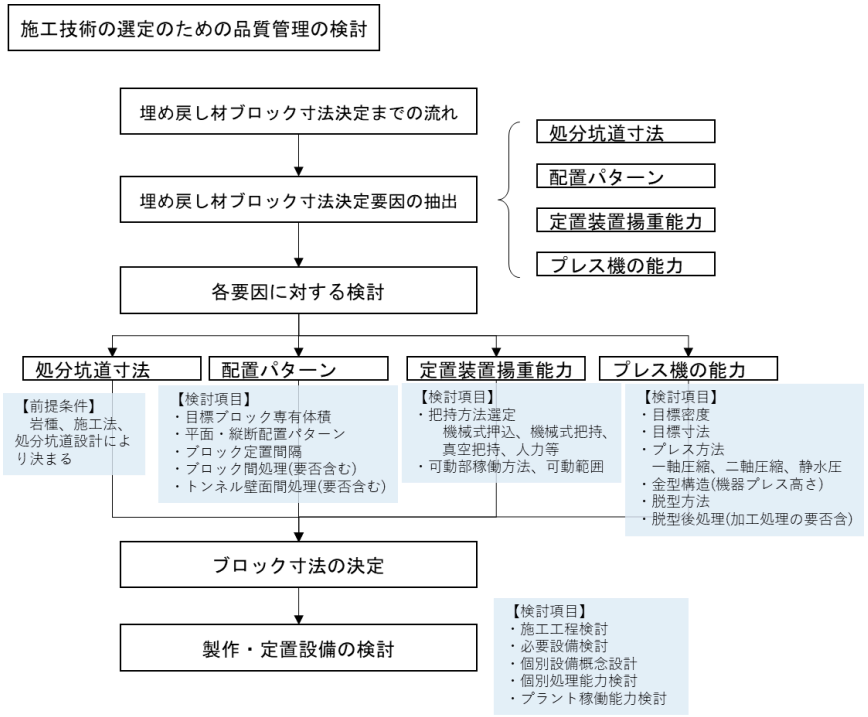
② 適用可能な埋戻し材の構成材料範囲

適用可能な埋戻し材ブロックの構成材料範囲の把握のため、国内外の埋戻し材ブロックに関する知見をまとめた。

また、ブロック寸法が製作や品質管理へ与える影響について、令和 3 年度に検討した大型ブロック（972 mm×1,000 mm×481 mm）と小型ブロック（300 mm×300 mm×100 mm）を対象として、検討を行った。結果、大型ブロックは製作効率や施工効率の面で優位であるが、設備が大型化するデメリットが考えられる結論となった。

③　施工技術の選定のための品質管理の検討（ブロック寸法設定手順案）

ブロック寸法の設定手順案として、付図 2.2-1 を示した。この表中の決定要因の選定は SKB（SKB, 2014c；2015b）の埋戻し材ブロックに関する検討を参考とした。また、この項では、抽出したブロック寸法決定要因である「処分坑道」、「配置パターン」、「定置装置楊重能力」、「プレス機の能力」についての検討例を示した。



付図 2.2-1　埋戻し材ブロック寸法設定手順案（再掲）

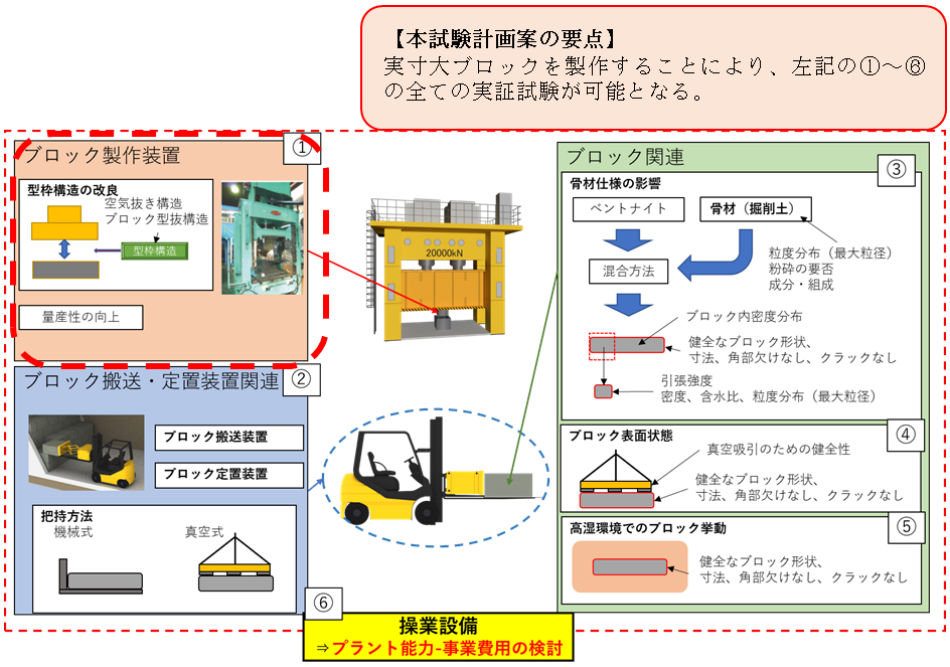
④　試験計画案の提示

現状の課題を効率的に対応するために、一連の試験系統で対応するための実規模の埋戻し材ブロックを前提とした試験計画を提示した。この試験計画案はブロック製作装置関連の課題、ブロック搬送･定置装置関連の課題､ブロック関連の課題を効率的に解決することを目的としている。

これらの課題を効率的に対応するために、一連の試験系統で対応するための実規模の埋戻し材ブロックを前提とした試験計画を提示した。本試験案では、骨材（掘削土）の粒度影響を正確に確認する必要があるため､材料条件の違いによる一般的なブロックの特性把握は小型ブロック（例えば 300 mm×300 mm×100 mm）の使用を想定し、掘削土の粒度影響やブロック内の密度分布及び最終製品としての埋戻し材ブロックの品質の確認を行うためには実規模の大型のブロック（例えば、972 mm×1,000 mm×481 mm）を前提として実施する。さらに、実規模の埋戻し材ブロックを製作することにより、ブロックの受ける環境影響や搬送・定置に関する課題の対応を行う。

提示した試験計画案について､課題と試験計画案､取得できるデータを付表 2.2-1～付表 2.2-5 に示す。

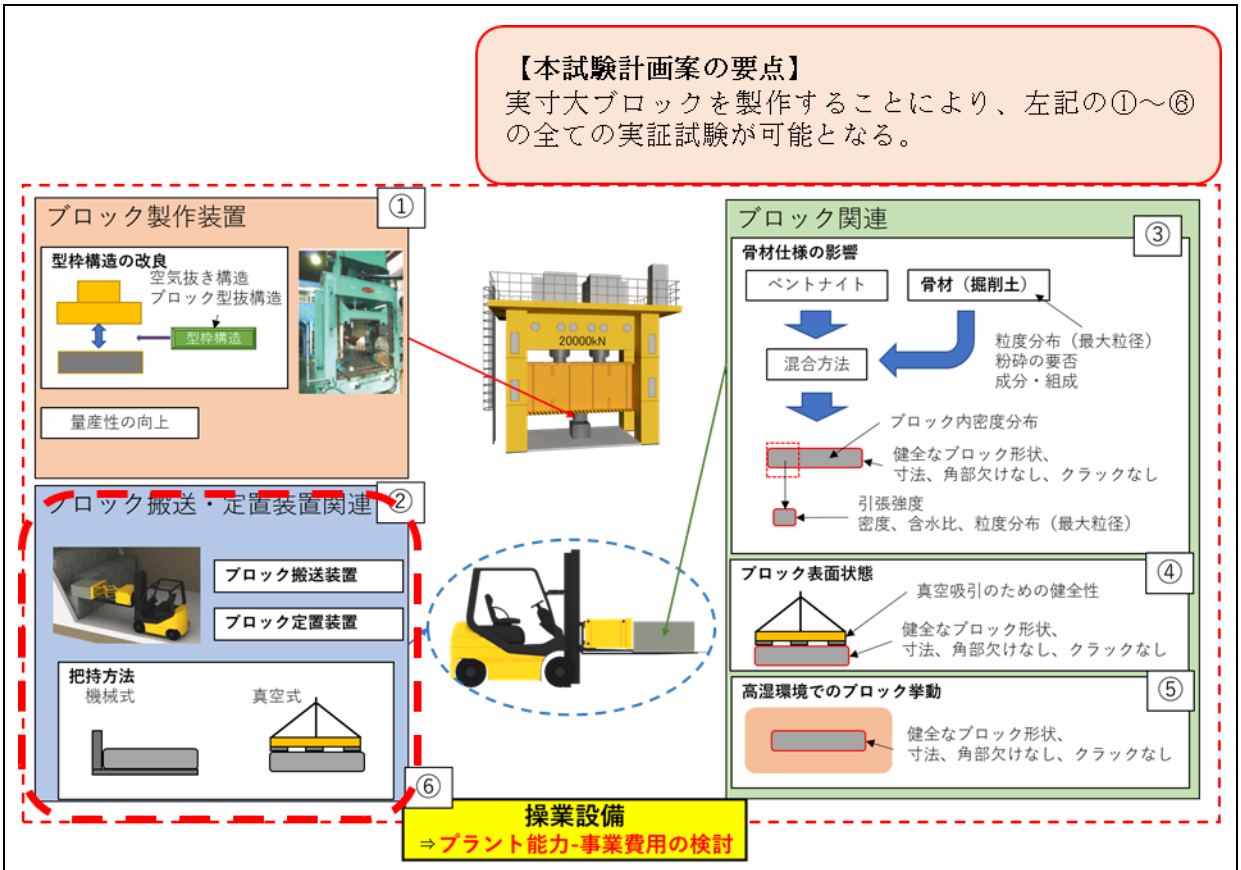
付表 2.2-1　試験計画案のまとめ　ブロック製作装置関連



試験計画案の位置づけ

	試験計画案	成果として得られるデータ
○ブロック製作用型枠の改良（量産性の向上、品質の向上など）	○ブロック製作用型枠の試作 ブロックの量産性や空気抜き構造などを改良したブロック製作用型枠を製作する。この金型に対して、適用できる埋戻し材材料条件や製造条件、製造後ブロックの出来形（寸法、外観など）を把握する。	○改良した金型に適用できる埋戻し材条件 ・材料配合　・含水比 ○改良した金型における製造条件 ・成型圧力　・プレス圧力 ・圧縮保持時間 ○改良した金型で製作したブロックの出来形 ・ブロック形状変化 ・ブロック寸法変化 ・外観（角部欠け、クラック） ・密度分布　・不良率
○大型埋戻し材ブロックスケール効果の検証	○大型埋戻し材ブロック製作実証 ブロックのスケール効果を検証するために、令和 3 年度に検討したブロック形状を対象として埋戻し材ブロック形状を対象として、複数の埋戻し材条件（材料配合、含水比など）や製造条件（成型圧力、プレス速度、圧縮保持時間など）を確認する。	○大型埋戻し材ブロックに適用できる埋戻し材の条件 ・材料配合　・含水比 ○製造条件 ・成型圧力　・プレス圧力 ・圧縮保持時間 ○大型埋戻し材ブロックの出来形 ・ブロック形状の経時変化 ・ブロック寸法の経時変化 ・外観（角部欠け、クラック） ・密度分布　・不良率

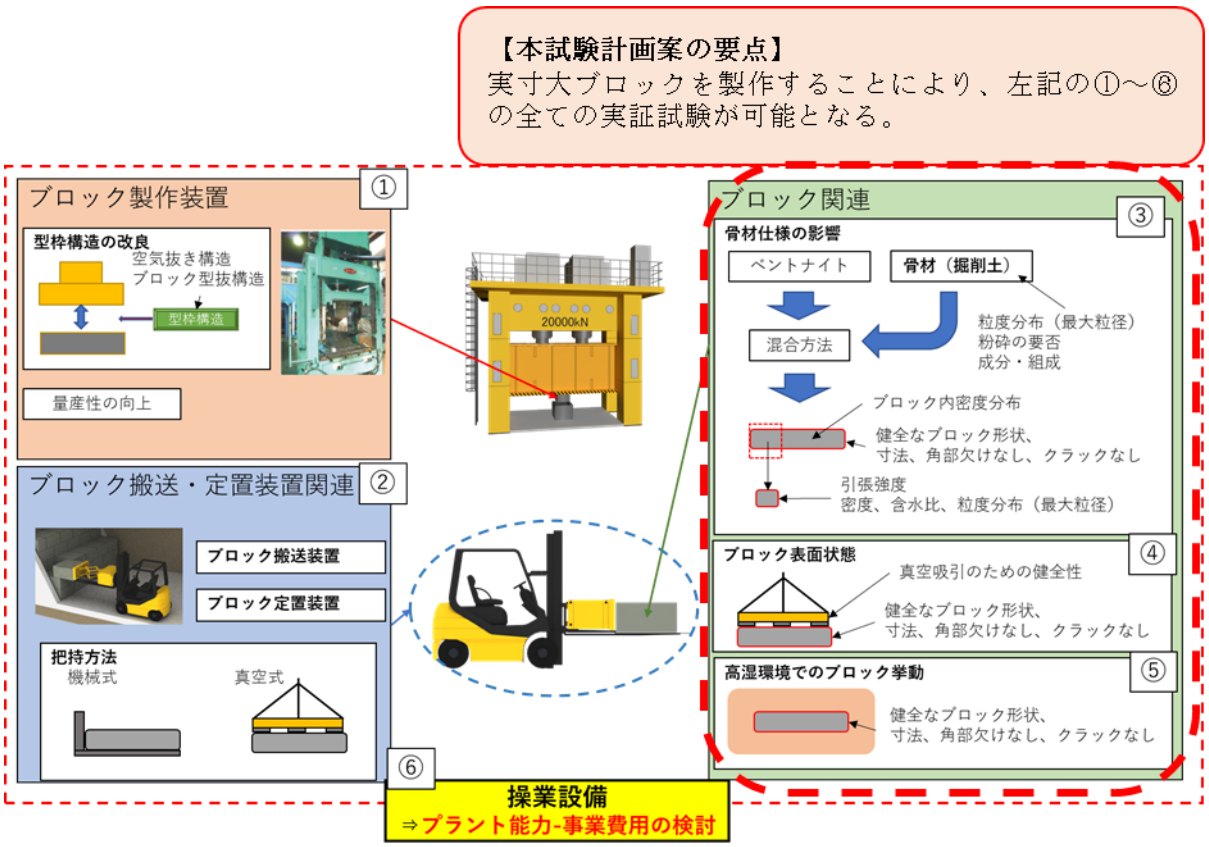
付表 2.2-2　試験計画案のまとめ　ブロック搬送・定置装置関連



試験計画案の位置づけ

	試験計画案	成果として得られるデータ
○ブロック搬送装置の具体化、実証	○ブロック搬送装置の試作・実証 搬送装置の検討では、特定の操業条件（埋戻し速度、処分坑道形状、アクセス坑道形状・坑道距離など）やブロックの保管条件（梱包の有無、地下環境、ブロック保管環境など）を設定し、最適な搬送方法を選定する。選定した搬送方法に対応した装置を製作する。製作した装置を用いて地下環境で実証試験を行う。	○搬送装置のブロック保管能力 ・ブロック形状変化 ・ブロック寸法変化 ・外観（角部欠け、クラック） ・含水比 ○ブロック搬送能力 ・搬送装置への積載作業時間 ・装置搬送速度 ・搬送装置から積卸作業時間
○ブロック定置装置の実証	○ブロック定置装置の試作・実証 既存の一般機械をレンタルにより調達し、令和 3 年度業務で示したブロック定置装置の把持部のみを新たに製作する。これを用いて特定の埋戻し条件（ブロック配置、埋戻し速度、坑道形状など）で実証試験を行い、埋戻し条件（定置精度、定置速度）を満たすことができるかを確認する。また、真空吸引把持機構を定置時に用いることも想定されるため、実規模ブロックを用いての真空吸引で把持試験を行う。	○定置装置の埋戻し能力 ・ブロック定置精度（ブロック間隙間） ・ブロック定置精度（ブロックと坑道間隙間） ・ブロック定置速度、作業時間 ○真空把持の実証定置によるブロックへの影響 ・真空把持の有無

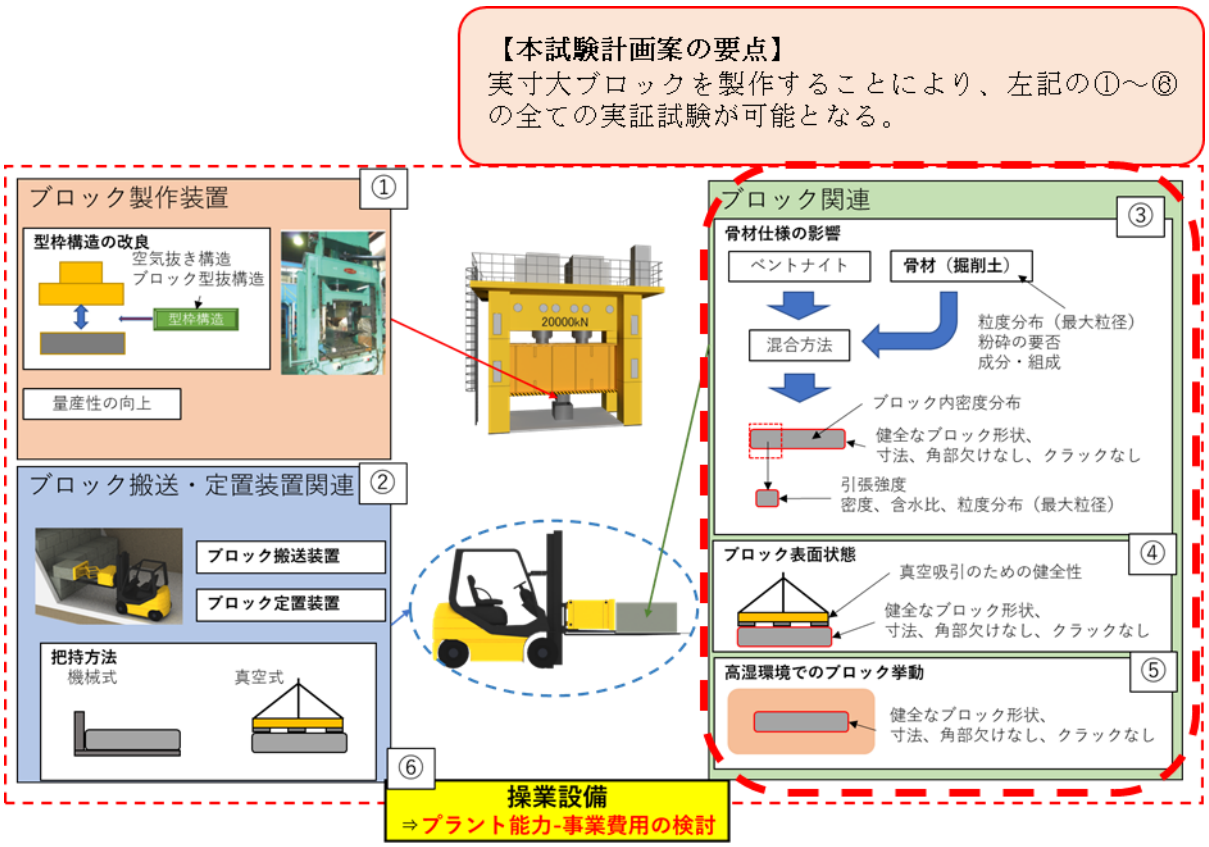
付表 2.2-3　試験計画案のまとめ　ブロック関連（1/2）



試験計画案の位置づけ

	試験計画案	成果として得られるデータ
○骨材仕様の影響	○掘削土の特性確認試験 掘削土（骨材）に関わる仕様（粒径、粒度分布や組成・成分や含水比など）をパラメータとして複数の条件で模擬掘削土を製作する。次に製作した模擬掘削土を用いて、埋戻し材の製作性（混練）、基本特性の把握及び埋戻し材ブロックの製作性について確認を行う。	○埋戻し材の製作性 ・混練方式　・混練条件 ・混練時間 ○埋戻し材の基本特性 ・含水比　・粒度分布 ・粒径　・材料成分 ○埋戻し材ブロックの製作性 ・ブロック寸法 ・外観（角部欠け、クラック）
○ブロック表面状態	○摩擦試験 骨材仕様の違いをパラメータとして製作したブロックを対象に、ブロック表面状態を把握する。	○ブロック表面状態 ・ブロック表面の凹凸 ・ブロックとブロック間の静止摩擦係数、動摩擦係数 ・ブロックと把持装置（素材）間の静止摩擦係数、動摩擦係数

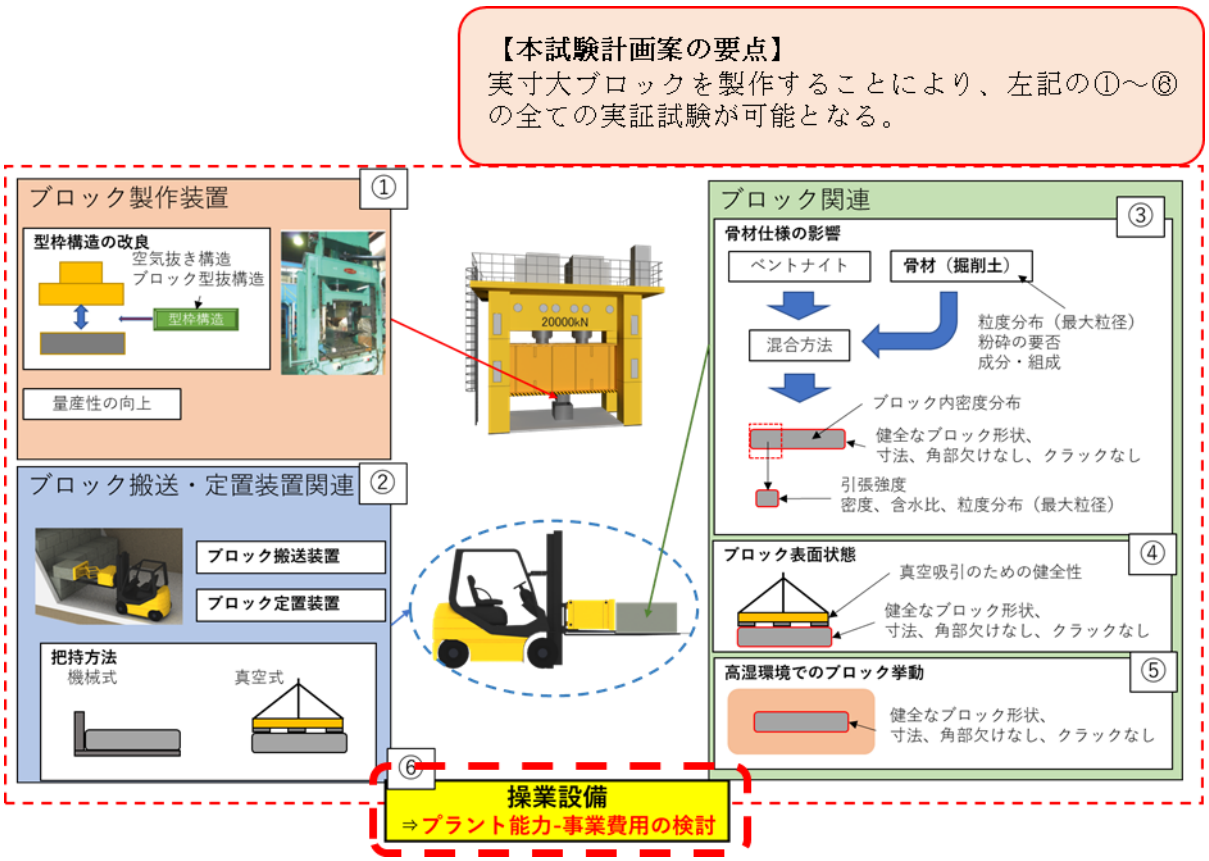
付表 2.2-4　試験計画案のまとめ　ブロック関連（2/2）



試験計画案の位置づけ

	試験計画案	成果として得られるデータ
○高湿環境でのブロック挙動	○地下坑道環境におけるブロック暴露試験 骨材仕様の違いをパラメータとして製作したブロックを対象に地下坑道を模擬した環境で暴露試験を行い、高湿環境によるブロックへの影響を把握する。	○高湿環境によるブロックへの影響 ・ブロックの表面状態 ・ブロック形状の経時変化 ・ブロック寸法の経時変化 ・ブロックの使用期限の明確化
○ブロック内密度分布の確認	○コアボーリング 骨材仕様の影響試験や高湿環境でのブロック挙動確認試験後の埋戻し材ブロックを用いて、ブロックの複数個所をコアリングもしくは切断によりサンプリングを行う。 採取した試料を一定間隔で切断してブロック特性（ブロック内密度分布）を確認する。	○ブロック特性の把握 ・ブロック内密度分布

付表 2.2-5　試験計画案のまとめ　操業設備関連



試験計画案の位置づけ

	試験計画案	成果として得られるデータ
○操業設備の具体化	○操業設備の具体化検討 ブロック製作装置、ブロック搬送定置装置及びブロック関連の結果から各設備に必要な能力・規模を算定し、各工程の作業時間を基に、材料搬入から埋戻しブロック定置までの全体プロセスとしての基本のタイムチャートを作成する。 特定の操業条件を設定し、運転タイムチャートを作成する。 運転タイムチャートを基に事業費用の試算を行う。	○操業設備の具体化 ・各設備に必要な能力・規模 ・埋戻し材原材料の納入から埋戻し材ブロック定置までの基本のタイムチャート ・特定の操業条件に対する運転タイムチャート ・運転タイムチャートに基づいた事業費用の試算

参考文献

SKB, Project on Alternative Systems Study (PASS), Final report, SKB Technical Report 93-04.1993.
SKB, Backfilling of KBS-3V deposition tunnels – possibilities and limitations, R-08-59,2008.
SKB, Investigation of backfill candidate materials, R-13-08,2014a.
SKB, Basic engineering of buffer production system, P-14-11,2014b.
SKB, System design of backfill; Basic engineering of backfill production system, P-14-23,2014c.
SKB, System design of backfill Project results, TR-14-20,2015a.
SKB, System design of backfill, Full scale production test of backfill blocks, P-14-24,2015b.
SKB, Investigation of parameters influencing bentonite block quality, P-16-06,2016.
SKB, Compaction properties of bentonite clay, TR-16-16,2017.
伊藤雅和，ベントナイト資源及び工業の現状と将来，原環センタートピックス，No.130，2019.
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，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，2020.
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、令和 3 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，2021.
高尾肇，竹ヶ原竜大，上坂文哉，宇津野二士，千々松正和，静的一軸圧縮プレスによる放射性廃棄物処分用 1m³緩衝材ブロックの製作，地盤工学研究発表会発表講演集，2005.
竹ヶ原竜大，増田良一，多田浩幸，朝野英一，高尾肇，上坂文哉，宇津野二士，高温多湿環境におけるベントナイトブロックの状態変化に関する検討（その２），土木学会第 59 回年次学術講演会，2004.
多田浩幸，増田良一，竹ヶ原竜大，朝野英一，高尾肇，上坂文哉，宇津野二士，ベントナイト緩衝材ブロックの摩擦特性に対する模型実験的検討，平成 16 年度土木学会年次学術講演会，2004.
動力炉･燃料開発事業団東海事務所, ベントナイトの基本特性調査, PNC-TN8410-89-033, 1989.
日本原子力研究開発機構，幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験－坑道の埋戻し材に関する検討－，JAEA-Research 2016-002，2016a.
日本原子力研究開発機構，幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験－大口径掘削機の開発，模擬オーバーパック，緩衝材および埋戻し材の製作－JAEA-Research 2016-010，2016b.
日本原子力研究開発機構，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戻し，JAEA-Research 2019-007，2019.

付録3 品質管理及び性能確認のためのパラメータ整理

目次

3.1 はじめに .....付 3-2
3.2 オーバーパックの設計要件及び評価項目 .....付 3-2
3.3 緩衝材の設計要件及び評価項目 .....付 3-7
3.4 埋戻し材の設計要件及び評価項目 .....付 3-14
3.5 PEM の設計要件及び評価項目 .....付 3-15

表目次

付表 3-1　残存酸素による腐食（オーバーパック） .....付 3-2
付表 3-2　低酸素環境における腐食（オーバーパック） .....付 3-3
付表 3-3　応力腐食割れ、水素脆化割れの評価（オーバーパック） .....付 3-3
付表 3-4　微生物腐食（オーバーパック） .....付 3-3
付表 3-5　OP の耐圧代（オーバーパック） .....付 3-4
付表 3-6　耐食性に対する放射線影響の抑制（オーバーパック） .....付 3-5
付表 3-7　地震動に対する構造健全性（オーバーパック） .....付 3-6
付表 3-8　低透水性（緩衝材） .....付 3-7
付表 3-9　自己シール性（緩衝材） .....付 3-7
付表 3-10　コロイドろ過能（緩衝材） .....付 3-7
付表 3-11　自己修復性（緩衝材） .....付 3-7
付表 3-12　微生物影響の防止（緩衝材） .....付 3-8
付表 3-13　物理的緩衝性（緩衝材） .....付 3-8
付表 3-14　ニアフィールドの状態変化に対する力学的安定性（緩衝材） .....付 3-9
付表 3-15　地震動に対する力学安定性（緩衝材） .....付 3-13
付表 3-16　低透水性（埋戻し材） .....付 3-14
付表 3-17　緩衝材又は止水プラグの膨出抑制（埋戻し材） .....付 3-14
付表 3-18　操業期間中の構造健全性（PEM） .....付 3-15

3.1 はじめに

地下構成要素の製造及び施工時における管理項目及び性能確認プログラムにおける測定項目を抽出するために、オーバーパック、緩衝材、埋戻し材、PEM の設計要件、評価項目及び性能評価や安全評価で使用されているパラメータ（NUMO, 2021）を調査し、以下に示す項目にパラメータを分類した。

計算：下階層のパラメータを用いて算出されるパラメータ
既知：空気中の酸素の体積割合や鉄の原子量など既知のパラメータ
設定：信頼率など設計段階で設定されるパラメータ
確認：ガラス固化体に関するパラメータ
管理：設計により仕様が設定されているパラメータ
試験：設計段階の試験や解析で取得されるパラメータ
環境要因：地下構成要素のバリア性能に影響を及ぼす可能性のあるパラメータ
母岩特性：母岩の密度やポアソン比などの地質環境に関するパラメータ

3.2 オーバーパックの設計要件及び評価項目

付表 3-1　残存酸素による腐食（オーバーパック）

実機推定最大腐食深さ						計算
	平均腐食深さ					計算
		腐食する鉄の量				計算
			OP 一体あたりの残存酸素量			計算
				緩衝材などの間隙に存在する酸素量		計算
					緩衝材及び埋戻し材の間隙率	計算
					標準状態の酸素のモル体積	既知
					空気中の酸素の体積割合	既知
				ベントナイトに吸着している酸素量		試験
				OP 一体あたりの緩衝材及び埋戻し材の体積		計算
		鉄の原子量				既知
		鉄の密度				管理
		OP の表面積				管理
	平均腐食深さと孔食係数の実験相関式					試験
		温度				環境要因
		地下水の組成及び濃度				環境要因
	OP の表面積					管理
	信頼率					設定

付表 3-2　低酸素環境における腐食（オーバーパック）

実機推定最大腐食深さ			計算
	平均腐食深さ		試験
		地下水の組成及び濃度	環境要因
	Gumbel 分布における位置パラメータ、尺度パラメータ		計算
		最大腐食深さ	試験
		地下水の組成及び濃度	環境要因
	OP 表面積		管理
	信頼率		設定

付表 3-3　応力腐食割れ、水素脆化割れの評価（オーバーパック）

応力腐食割れの発生可能性			
	応力拡大係数		計算
		溶接欠陥寸法	管理
		溶接残留応力	管理
	応力腐食割れ下限界応力拡大係数 K_{ISCC}		試験
		地下水の組成及び濃度	環境要因
水素脆化割れの発生可能性			
	応力拡大係数		計算
		溶接欠陥寸法	管理
		溶接残留応力	管理
	応力腐食割れ下限界応力拡大係数 K_{IHE}		試験
		拡散性水素濃度	試験
		温度	環境要因

付表 3-4　微生物腐食（オーバーパック）

平均腐食深さ				計算
	HS^-/S^{2-}の供給量			計算
		緩衝材内表面の HS^-/S^{2-}濃度（地下水の組成及び濃度）		環境要因
		緩衝材外表面の HS^-/S^{2-}濃度（地下水の組成及び濃度）		環境要因
		緩衝材中の HS^-/S^{2-}の拡散係数		試験
			温度	環境要因
		OP 中心軸から緩衝材内側までの距離		管理
		OP 中心軸から緩衝材外側までの距離		管理

付表 3-5　OP の耐圧代（オーバーパック）

母材の必要耐圧代				
	平板の板厚			計算
		平板の直径		管理
		外圧		計算
			岩盤クリープ変形量	環境要因
			地下水静水圧	環境要因
			緩衝材の膨潤により OP に作用する圧力	試験
		材料強度		管理
		平板の取り付け方法による係数		設定
	円頭部の板厚			計算
		円筒部の外径		管理
		材料強度		管理
		外圧		計算
			岩盤クリープ変形量	環境要因
			地下水静水圧	環境要因
			緩衝材の膨潤により OP に作用する圧力	試験
溶接部の必要耐圧代				計算
	OP 溶接部のせん断力			計算
		外圧による OP 溶接部のせん断力		計算
			外圧	環境要因
			蓋の直径	管理
		OP 吊り上げ荷重によるせん断力		計算
			OP の重量	管理
			ガラス固化体の重量	確認
			蓋の直径	管理
	許容される平均せん断応力			計算
		材料強度		管理

付表 3-6　耐食性に対する放射線影響の抑制（オーバーパック）

遮蔽代の設定				
	OP 表面における γ 線による水の吸収線量率			計算
		緩衝材の密度及び組成		管理
		岩盤の密度及び組成		母岩特性
		ガラス固化体の組成		確認
		OP の母材の密度		管理
		水の吸収線量率への換算係数		試験
		ガラス固化体の γ 線源強度分布		確認
		ガラス固化体の寸法		確認
		埋戻し材の厚さ（緩衝材の上部）		管理
	水の吸収線量率の最大値			計算
		γ 線照射による腐食の加速比率		試験
			地下水の組成及び濃度	環境要因
			温度	環境要因

付表 3-7　地震動に対する構造健全性（オーバーパック）

OP に生じる Mises 応力			計算
	材料要素の寸法		管理
	ガラス固化体の材料パラメータ		
		密度	確認
		弾性係数	
		ポアソン比	
	OP の材料パラメータ		
		密度	管理
		弾性係数	
		ポアソン比	
		降伏応力	
	緩衝材の材料パラメータ		
		乾燥密度	管理
		間隙比	上記で管理
		圧縮指数	
		膨潤指数	
		弾性係数	
		ポアソン比	
		限界状態応力比	
		内部摩擦角	
		先行圧密降伏応力	
		材料定数	
		回転硬化限界面の定数	
		回転硬化発展則の定数	
		透水係数	
	地盤の材料パラメータ		
		密度	母岩特性
		せん断弾性係数	母岩特性
		ポアソン比	母岩特性
		減衰定数	母岩特性
		内部摩擦角	母岩特性
		粘着力	母岩特性
	入力地震動		
		地震動の加速度波形	環境要因

（一部、山本, 2015 を参照）

3.3 緩衝材の設計要件及び評価項目

付表 3-8　低透水性（緩衝材）

ペクレ数				計算
	透水係数			試験
		地下水の組成及び濃度		環境要因
		有効粘土密度		管理
	動水勾配			環境要因
	地下水流れに対する物体の代表長さ			管理
	実効拡散係数			試験

付表 3-9　自己シール性（緩衝材）

膨潤率／隙間体積比				計算
	緩衝材の体積ひずみ			計算
		ベントナイトの体積ひずみ		試験
			地下水の組成及び濃度	環境要因
			有効粘土密度	管理
		有効粘土密度		管理
		ケイ砂の混合率		管理
		ケイ砂の土粒子密度		管理
	隙間体積比			計算
		緩衝材厚さ		管理
		OP 半径		管理
		緩衝材と岩盤の隙間の厚さ		管理
		緩衝材と OP の隙間の厚さ		管理

付表 3-10　コロイドろ過能（緩衝材）

コロイド透過率		試験
	有効粘土密度	管理

付表 3-11　自己修復性（緩衝材）

破過前後の透水係数の増加割合			計算
	破過前の透水係数		試験
		有効粘土密度	管理
		地下水の組成及び濃度	環境要因
	破過後の透水係数		試験
		有効粘土密度	管理
		地下水の組成及び濃度	環境要因

付表 3-12　微生物影響の防止（緩衝材）

菌体数					試験
	有効粘土密度				管理
	ベントナイト／水比				試験

付表 3-13　物理的緩衝性（緩衝材）

緩衝材の膨潤により発生する圧力と地下水静水圧の合計					計算
	緩衝材の膨潤により発生する圧力				計算
		緩衝材の間隙比			計算
			OP の腐食による体積変化		計算
				腐食膨張率	試験
				OP 腐食代	管理
				OP 胴部耐圧代	
				OP 蓋部耐圧代	
				OP 内面半径	
				OP 内面高さ	
				緩衝材厚さ	
				緩衝材の初期体積	
		圧密試験における載荷応力			試験
		緩衝材の乾燥密度			管理
		水の単位体積重量			既知
	地下水静水圧				環境要因
	OP の耐圧強度				管理

付表 3-14　ニアフィールドの状態変化に対する力学的安定性（緩衝材）

自重による長期沈下挙動				計算
	緩衝材厚さ（自重沈下後）			計算
		ガラス固化体の材料パラメータ		
			密度	確認
			弾性係数	
			ポアソン比	
		OP の材料パラメータ		
			密度	管理
			弾性係数	
			ポアソン比	
			降伏応力	
		緩衝材の材料パラメータ		
			土粒子密度	管理
			砂混合率	
			乾燥密度	
			有効粘土密度	上記で管理
			初期間隙比	
			圧縮指数	
			膨潤指数	
			ポアソン比	
			限界状態応力比	
			透水係数	
			先行圧密応力	
			初期有効応力	
			初期静止土圧係数	
			二次圧密係数	
			一次圧密終了時間	
			初期体積ひずみ速度	
		埋戻し材の材料パラメータ		
			土粒子密度	管理
			掘削土混合率	
			乾燥密度	
			有効粘土密度	上記で管理
			初期間隙比	
			圧縮指数	
			膨潤指数	
			ポアソン比	
			限界状態応力比	
			透水係数	
			先行圧密応力	

			初期有効応力	
			初期静止土圧係数	
			二次圧密係数	
			一次圧密終了時間	
			初期体積ひずみ速度	
		岩盤の材料パラメータ		
			飽和密度	母岩特性
			弾性係数	母岩特性
			ポアソン比	母岩特性
			透水係数	母岩特性
		インバートの材料パラメータ		
			設計基準強度	設定
			単位体積重量	管理
			弾性係数	試験
			ポアソン比	試験
			透水係数	試験
		吹付けコンクリートの材料パラメータ		
			設計基準強度	設定
			単位体積重量	管理
			弾性係数	試験
			ポアソン比	試験
			透水係数	試験
岩盤クリープと OP の腐食膨張による影響				
	緩衝材の破壊接近度			試験
	ガラス固化体の材料パラメータ			
		密度		確認
		弾性係数		
		ポアソン比		
	OP の材料パラメータ			
		密度		管理
		弾性係数		
		ポアソン比		
		降伏応力		
	緩衝材の材料パラメータ			
		土粒子密度		管理
		砂混合率		
		乾燥密度		
		有効粘土密度		上記で管理
		初期間隙比		
		圧縮指数		
		膨潤指数		

		ポアソン比	
		限界状態応力比	
		透水係数	
		モデルパラメータ	
		先行圧密応力	
		初期有効応力	
		初期静止土圧係数	
		地下水の組成及び濃度	環境要因
	埋戻し材の材料パラメータ		
		土粒子密度	管理
		掘削土混合率	
		乾燥密度	
		有効粘土密度	上記で管理
		初期間隙比	
		圧縮指数	
		膨潤指数	
		ポアソン比	
		限界状態応力比	
		透水係数	
		先行圧密応力	
		初期有効応力	
		初期静止土圧係数	
		地下水の組成及び濃度	環境要因
	岩盤の材料パラメータ		
		飽和密度（深成岩類、新第三紀堆積岩類）	母岩特性
		弾性係数（深成岩類、新第三紀堆積岩類）	母岩特性
		ポアソン比（深成岩類、新第三紀堆積岩類）	母岩特性
		粘着力（深成岩類）	母岩特性
		内部摩擦角（深成岩類）	母岩特性
		透水係数（深成岩類）	母岩特性
		一軸圧縮強度（新第三紀堆積岩類）	母岩特性
		引張強度（新第三紀堆積岩類）	母岩特性
		延性パラメータ（新第三紀堆積岩類）	母岩特性
		時間依存性パラメータ（新第三紀堆積岩類）	母岩特性
		ピーク強度到達時間（新第三紀堆積岩類）	母岩特性
	インバートの材料パラメータ		
		設計基準強度	設定
		単位体積重量	管理
		弾性係数	試験
		ポアソン比	試験
		透水係数	試験

	吹付けコンクリートの材料パラメータ		
		設計基準強度	設定
		単位体積重量	管理
		弾性係数	試験
		ポアソン比	試験
		透水係数	試験

付表 3-15　地震動に対する力学安定性（緩衝材）

緩衝材の破壊接近度			
	材料要素の寸法		管理
	ガラス固化体の材料パラメータ		
		密度	確認
		弾性係数	
		ポアソン比	
	OP の材料パラメータ		
		密度	管理
		弾性係数	
		ポアソン比	
		降伏応力	
	緩衝材の材料パラメータ		
		乾燥密度	管理
		間隙比	上記で管理
		圧縮指数	
		膨潤指数	
		弾性係数	
		ポアソン比	
		限界状態応力比	
		内部摩擦角	
		先行圧密降伏応力	
		材料定数	
		回転硬化限界面の定数	
		回転硬化発展則の定数	
		透水係数	
	地盤の材料パラメータ		
		密度	母岩特性
		せん断弾性係数	母岩特性
		ポアソン比	母岩特性
		減衰定数	母岩特性
		内部摩擦角	母岩特性
		粘着力	母岩特性
	入力地震動		
		地震動の加速度波形	環境要因

3.4 埋戻し材の設計要件及び評価項目

付表 3-16　低透水性（埋戻し材）

透水係数				試験
	埋戻し材の乾燥密度			試験
		モンモリロナイト含有率		管理
		掘削土の化学成分		管理
		掘削土の最大粒径		管理
		掘削土の粒度分布		管理
	地下水の組成及び濃度			環境要因
母岩の平均的な透水係数				母岩特性

付表 3-17　緩衝材又は止水プラグの膨出抑制（埋戻し材）

膨出後の有効粘土密度（緩衝材又は止水プラグ）				計算
	膨出体積（緩衝材又は止水プラグ）			試験
		膨潤圧（緩衝材又は止水プラグ）		試験
			乾燥密度（緩衝材又は止水プラグ）	管理
			弾性係数（緩衝材又は止水プラグ）	上記で管理
			ポアソン比（緩衝材又は止水プラグ）	
			地下水の組成及び濃度	環境要因
		変形量（埋戻し材）		試験
			乾燥密度（埋戻し材）	管理
			弾性係数（埋戻し材）	上記で管理
			ポアソン比（埋戻し材）	

3.5 PEM の設計要件及び評価項目

付表 3-18　操業期間中の構造健全性（PEM）

把持部及び把持周辺部のミーゼス相当応力		計算
	胴板使用材料のポアソン比	管理
	把持部使用材料のポアソン比	管理
	胴板部の縦弾性係数	管理
	把持部の縦弾性係数	管理
	温度	管理
	PEM の外形寸法	管理
	PEM の質量	管理
胴板部設計降伏応力		設定
把持部設計降伏応力		設定

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－，NUMO-TR-20-03、2021.

山本陽一，鈴木覚，佐藤伸，伊藤浩二，地震動が地層処分システムの人工バリアに及ぼす影響検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4（地震工学論文集第 34 巻），pp. I_963-I_973，2015.