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

令和4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」の事業報告書である。

目次

1. 緒言	
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	
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	
2. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備-坑道シーリングの設計・評価技術	の整備 7
2.1 シーリングシステム長期性能評価技術開発	7
2.1.1 背景・目的	
2.1.2 実施概要	
2.1.3 令和3年度の成果	
2.2 埋め戻し材の再冠水挙動、ベントナイトの流出・侵入	
2.2.1 背景・目的	
2.2.2 令和3年度の実施内容	
2.2.3 令和3年度の成果	
3. 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備坑道シーリング技術の性能確認	
3.1 膨潤挙動評価試験	122
3.1.1 背景・目的及び実施内容	
3.1.2 膨潤挙動小規模試験	123
3.1.3 縮尺模型試験	
3.1.4 気相を考慮した連成試験	
3.1.5 まとめ	
3.2 EDZ シーリング試験	
3.2.1 背景・目的および実施概要	
3.2.2 ベントナイト系材料の原位置吹付け施工確認試験	
3.2.3 EDZ シーリング試験	
3.2.4 まとめ	
3.3 掘削損傷領域の連続性等に関わる調査技術開発	
3.3.1 EDZ の物理特性の取得	
3.3.2 EDZ 等の連続性調査技術の高度化	
3.3.3 使用した岩石試料と測定方法	
3.3.4 測定結果	
3.3.5 岩石モデルによる測定値のモデル化	
3.4 ボアホールシーリング試験	
3.4.1 背景・目的・実施内容	
3.4.2 ベントナイトブロックを対象とした室内試験	
3.4.3 ベントナイトブロックを対象としたモックアップ試験	
3.4.4 まとめ	
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	

3.5.1 背景・目的	312
3.5.2 実施方法	314
3.5.3 位置試験および室内試験結果	318
3.5.4 まとめと残される課題	331
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	335
4.1 背景及び目的	335
4.2 埋め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	335
4.3 埋め戻しに関する室内試験及び施工試験	338
4.3.1 室内試験による埋め戻し材の材料特性データの拡張	338
4.3.2 撒き出し・転圧工法による埋め戻し施工試験	341
4.3.3 吹付け工法による埋め戻し施工試験	361
4.3.4 スクリュー工法による埋め戻し要素試験	379
4.3.5 ブロック工法に関する要素試験4	414
4.3.6 埋め戻し材の浸潤解析結果の妥当性確認に資するデータ取得	456
4.4 まとめ	479
5. 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの政策・施工技術の開発 ―製作・施工技術に係る	5品
質保証体系及びモニタリング技術の整備4	481
5.1 はじめに	481
5.2 製造・施工技術に係る品質保証体系の具体化に向けた基盤整備	482
5.2.1 背景及び目的	482
5.2.2 品質保証体系で用いられるパラメータの整理	484
5.2.3 品質保証体系の具体化のための建設・操業工程のタイムラインの設定4	487
5.2.4 品質保証体系を構成するプログラムの具体化	490
5.3 地下構成要素を対象とした計測関連技術の整備	504
5.3.1 埋め戻し材の乾燥密度の測定技術の高度化	504
5.3.2 埋め戻し天端の隙間検知のための測定技術の高度化	516
5.3.3 埋め戻し材の膨潤により発生する圧力の測定技術	530
5.3.4 地下環境における無線給電技術の高度化	546
5.4 まとめ	563
6. 結言	566
6.1 令和3年度の主な成果	566
6.2 現フェーズにおける本事業のとりまとめに向けた検討	568
6.2.1 埋め戻し材の設計	568
6.2.2 止水プラグの設計	569
6.2.3 その他閉鎖技術に関連する技術開発	571
6.3 おわりに	572
付録 1 膨潤挙動相互作用試験	1-1
付録 2 EDZ シーリング試験	2-1
付録3 掘削損傷領域の連続性等に関わる調査技術開発	3-1
付録4 坑道シーリングに関わる施工技術の整備	4-1
付録 5 製造・施工技術に係る品質保証体系の具体化	5-1
付録6 地下構成要素を対象とした計測関連技術の整備	6-1

図目次

义	1.2-1	本事業の到達目標と進め方	3
义	$2.1 \cdot 1$	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	8
义	2.1-2	坑道に交差する割れ目の透水量係数のヒストグラム	.11
义	2.1 - 3	坑道支保工内の流速分布	.11
义	2.1-4	領域 A および C における流速分布	.11
义	2.1 - 5	割れ目②の反応輸送モデル概念	12
义	2.1-6	割れ目②の反応輸送モデル	13
义	2.1-7	割れ目⑤の反応輸送モデル概念	13
义	2.1-8	割れ目⑤の反応輸送モデル	14
义	2.1-9	坑道支保工割れ目内の鉱物組成	19
义	2.1 - 10	坑道支保工第一マトリクス部鉱物組成変遷	20
义	$2.1 \cdot 11$	坑道支保工第三マトリクス部鉱物組成変遷	21
义	2.1 - 12	坑道支保工割れ目内の pH 分布	21
义	$2.1 \cdot 13$	坑道支保工内割れ目の最上流部(左図)および再下流部(右図)の間隙率変化	22
义	$2.1 \cdot 14$	岩盤割れ目内の鉱物組成	23
义	$2.1 \cdot 15$	岩盤割れ目内の pH 変遷	23
义	$2.1 \cdot 16$	岩盤割れ目の最上流部(左図)および再下流部(右図)の間隙率変化	24
义	$2.1 \cdot 17$	坑道支保工の地下水流速分布	25
义	2.1 - 18	反応輸送解析モデル	26
义	2.1 - 19	Case3-1 : pH の変遷	27
义	2.1 - 20	Case3-1:モンモリロナイト残存率の変遷	27
义	2.1 - 21	Case3-1:間隙率の変遷	28
义	2.1 - 22	坑道支保工境界部の間隙率の変化(Case3-1)	28
义	2.1 - 23	Case3-2:pH の変遷	29
义	2.1 - 24	Case3-2:モンモリロナイト残存率の変遷	30
义	2.1 - 25	Case3-2:間隙率の変遷	30
义	2.1 - 26	坑道支保工境界部の間隙率の変化(Case3-2)	31
义	2.1 - 27	Case3-3:pH の変遷	32
义	2.1 - 28	Case3-3:モンモリロナイト残存率の変遷	32
义	2.1 - 29	Case3-3:間隙率の変遷	33
义	2.1 - 30	坑道支保工境界部の間隙率の変化(Case3-3)	33
义	2.1 - 31	Case3-4:pH の変遷	34
义	2.1 - 32	Case3-4:モンモリロナイト残存率の変遷	34
义	2.1 - 33	Case3-4:間隙率の変遷	35
义	2.1 - 34	コンクリート影響による劣化シナリオで考えられる状態	40
义	2.1 - 35	コンクリート影響による劣化シナリオの状態遷移	41
义	2.1 - 36	上部空隙発生を想定したシナリオで考えられる状態	45
义	2.1 - 37	上部空隙発生を想定したシナリオにおける状態遷移	46
义	2.1 - 38	コンクリート成分の溶脱による埋め戻し材劣化シナリオ(シナリオ A)	48
义	2.1 - 39	ひび割れの断続的発生による埋め戻し材劣化シナリオ(シナリオ B)	49
义	2.1-40	上部空隙発生による埋め戻し材劣化シナリオ(シナリオ C)	49

义	2.1-41	解析モデル	. 52
义	2.1-42	解析モデル(立坑周辺の拡大図)	. 53
义	2.1-43	解析モデル構成要素計上	. 53
义	2.1-44	吹付け+EDZ 領域の透水性を変更した場合の物質移行解析	. 55
义	2.1-45	シーリング機能低下についてのリスク要因や対応策の例	. 56
义	2.1-46	Marty 式を用いた場合のベントナイト緩衝材変質解析	. 57
义	2.1-47	Oda 式を用いた場合のベントナイト緩衝材変質解析	. 58
义	2.1-48	拡散場を想定した反応輸送モデル及びその結果の概要	. 59
义	2.1-49	セメント平衡水の流入を想定した反応輸送モデル及びその結果の概要	. 60
义	2.1-50	グラウチングに伴うグラウト材と岩盤との相互作用メカニズムの変遷に係る概念	うえ
	デル.		. 62
义	2.1 - 51	今年度改訂したボウタイモデル	. 65
义	2.1 - 52	「埋め戻し材の周囲が拡散場となる」の ESL モデル	. 67
义	2.1 - 53	「拡散場において埋め戻し材の変質が顕著とならない」の ESL モデル	. 68
义	2.1 - 54	「移流場において埋め戻し材の変質が顕著とならない」の ESL モデル	. 69
义	2.1 - 55	Ratio plot による主命題の評価	. 73
义	2.1 - 56	深成岩におけるリスクマトリクス	. 74
义	2.1-57	新第三紀堆積岩におけるリスクマトリクス	. 75
义	2.2-1	流出・侵入試験装置	. 81
义	2.2-2	ベントナイトブロックの充填方法	. 82
义	2.2-3	水頭差 10 cm 時の浸潤距離	. 84
义	2.2-4	水頭差 10 cm 時の浸潤距離	. 84
义	2.2-5	試験体全景(ケース 2)	. 86
义	2.2-6	10 cm 水頭差による通水流量(ケース 2)	. 86
义	2.2-7	流出水の濁度および電気伝導度測定結果	. 87
义	2.2-8	濁度、電気伝導度および残渣重量から算定したベントナイト濃度(ケース 2)	. 87
义	2.2-9	水頭 10 cm 通水で 5 分後に浸潤が止まるまでの状態変化	. 88
义	2.2-10	0.3~0.5 MPa 通水段階で破過したときの流量	. 89
义	2.2-11	10 cm 水頭差による通水流量(ケース 4)	. 90
义	2.2 - 12	ケース4の流出流量およびベントナイト流出濃度	. 91
义	2.2 - 13	供試体内の水の浸潤の様子	. 93
义	2.2-14	水頭 10 cm 通水の 8 分後の状況	. 95
义	2.2 - 15	10 cm 水頭差による流量の変化(ケース 8)	. 96
义	2.2-16	10 cm 水頭差による通水段階の流量(ケース 10)	. 98
义	2.2 - 17	濁度および電気伝導度から換算したベントナイト濃度(ケース 10)	. 98
义	2.2-18	流出水のイオン濃度(ケース 10)	. 98
义	2.2 - 19	10 cm 水頭における水の浸潤の状況(47 分後)	. 99
义	2.2-20	水みちの発生状況(ケース 11:通水試験 2 時間後)	100
义	2.2-21	流量と水頭差の変化(ケース 11)	100
义	2.2-22	濁度および電気伝導度から算定したベントナイト濃度(ケース 11)	101
义	2.2-23	10 cm 水頭差による流量の変化(ケース 12)	102
义	2.2-24	濁度から換算したベントナイト濃度(ケース 12)	102
义	2.2 - 25	10 cm 水頭差による流量の変化	103

义	2.2-26	濁度、電気伝導度、残渣重量から換算したベントナイト濃度(ケース 13)	103
义	2.2-27	試験装置の概念図	106
义	2.2-28	試験容器(左図:試験容器寸法、右図:多孔質フィルタの設置状況)	106
义	2.2-29	イオン交換水条件の通水量の経時変化	107
义	2.2 - 30	人工海水条件の通水量の経時変化	107
义	2.2-31	電気伝導度および濁度から換算したベントナイト濃度の経時変化	108
义	2.2-32	X線CT画像の予備計測	111
义	2.2-33	CT 計測結果(通水前)	112
义	2.2 - 34	CT 計測結果(イオン交換水:試験途中)	113
义	2.2 - 35	CT 計測結果(人工海水:試験途中)	114
义	2.2 - 36	CT 計測結果(イオン交換水:試験後)	115
义	2.2 - 37	CT 計測結果(人工海水:試験後)	116
义	2.2-38	含水比と乾燥密度の空間分布	119
义	3.1-1	人工バリア性能確認試験の概要	123
义	3.1 - 2	小規模模型試験装置の概要	124
义	3.1-3	小規模試験装置の組立状況	126
义	3.1-4	小規模模型の解体状況	127
义	3.1 - 5	パラフィン法による測定状況	128
义	3.1-6	3D スキャナによる測定状況	129
义	3.1-7	小規模模型試験の膨潤変形率	131
义	3.1-8	Case3 における膨潤変形率と載荷荷重	131
义	3.1 - 9	小規模模型試験 Case1 及び Case3 の緩衝材中の含水比分布	133
义	3.1-10	小規模模型試験 Case1 における緩衝材の乾燥密度分布	134
义	3.1-11	小規模模型試験 Case1 における緩衝材中の飽和度分布	134
义	3.1 - 12	小規模模型試験 Case4 及び Case5 の緩衝材中の含水比分布	136
义	3.1-13	小規模模型試験 Case4 及び Case5 の緩衝材の乾燥密度分布	136
义	3.1-14	Case5 における緩衝材の 5 層目の解体状況	137
义	$3.1 \cdot 15$	小規模模型試験 Case4 及び Case5 の緩衝材中の飽和度分布	137
义	3.1-16	縮尺模型試験装置の概要	139
义	$3.1 \cdot 17$	縮尺模型試験装置の準備状況	141
义	$3.1 \cdot 18$	縮尺模型の解体状況	142
义	3.1-19	膨潤変形率の経時変化	144
义	3.1 - 20	注水量の経時変化	144
义	3.1 - 21	土圧計及びロードセルの設置位置	145
义	3.1 - 22	側面土圧の経時変化	146
义	3.1 - 23	側面土圧の比較	146
义	3.1 - 24	底面土圧の経時変化	147
义	3.1 - 25	イオン交換水-1 の解体状況	148
义	3.1 - 26	縮尺模型試験における含水比分布	149
义	3.1 - 27	埋め戻し材の含水比分布	149
义	3.1 - 28	イオン交換水-1における緩衝材の含水比、乾燥密度及び飽和度の分布	150
义	3.1 - 29	0.2M-NaClにおける緩衝材の乾燥密度の分布	151
义	3.1-30	0.2M-NaClにおける緩衝材の飽和度の分布	151

义	3.1 - 31	試験装置概要	152
义	3.1 - 32	間隙圧計測結果	153
义	3.1-33	温湿度計による温度計測結果	154
义	3.1 - 34	温湿度計による湿度計測結果	155
义	3.1 - 35	サーモグラフィ(テストー製:testo872)及び確認状況	155
义	3.1 - 36	サーモグラフィ計測結果(経時変化)	156
义	3.1 - 37	サーモグラフィ計測結果	157
义	3.1 - 38	温度計測結果	159
义	3.1 - 39	相対湿度計測結果	160
义	3.1-40	間隙圧計測結果	160
义	3.1-41	解体後の含水比分布	161
义	3.2 - 1	EDZ シーリング原位置試験の概要図	164
义	3.2-2	令和2年度に実施した切欠き型枠吹付け試験の状況	165
义	3.2-3	吹付け試験結果	166
义	3.2-4	吹付け材料の粒径加積曲線	167
义	3.2-5	締固め試験結果	167
义	3.2-6	地上吹付け施工試験の使用機器配置図	168
义	3.2-7	強制二軸ミキサー (W-500)	169
义	3.2-8	ふるい(目開き 25 mm)	169
义	3.2-9	吹付け機(ニードガン 2000)	170
义	3.2 - 10	アーム付き汎用重機(DXR140)	171
义	3.2 - 11	木製型枠の外観	171
义	3.2 - 12	木製型枠の寸法	172
义	3.2 - 13	サンプリング位置	173
义	$3.2 \cdot 14$	吹付け後の出来形	176
义	3.2 - 15	含水比と乾燥密度の関係	177
义	3.2 - 16	原位置吹付け施工試験実施場所	181
义	3.2 - 17	試験実施前の試験坑道2の様子	181
义	3.2 - 18	試験坑道2の切欠き施工図(必要範囲)	181
义	3.2 - 19	掘削に使用したバックホウとブレーカ	182
义	3.2-20	切欠きの掘削作業の状況(1/2)	183
义	3.2-21	切欠きの掘削作業の状況(2/2)	184
义	3.2-22	原位置吹付け試験時の機械配置	186
义	3.2-23	材料作製プラントの配置状況	186
义	3.2-24	吹付け時の吹付けプラントの配置状況	187
义	3.2 - 25	原位置吹付け施工試験の各作業日の作業フロー	188
义	3.2-26	材料作製および地下への搬入時の状況	189
义	3.2-27	吹付け時の作業状況	190
义	3.2-28	出来形計測の状況	191
义	3.2-29	原位置吹付け施工試験のサンプリング	191
义	3.2-30	赤外線水分計と炉乾燥法による含水比の比較	194
义	3.2-31	乾燥密度測定箇所(1 断面目)	195
义	3.2-32	乾燥密度測定箇所(2 断面目)	195

凶	3.2 - 33	含水比と乾燥密度の関係	196
义	3.2-34	メチレンブルー吸着量測定用試料のサンプリング位置	198
义	3.2-35	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)	203
义	3.2-36	透水試験におけるパッカーの設置位置	204
义	3.2-37	Jacob and Lohman の方法における Derivative plot(区間①)	205
义	3.2-38	定常解析より算出した透水係数の経時変化	207
义	3.2-39	浸透流解析における3次元解析モデル	208
义	3.3 - 1	ボーリング配置と調査領域(断面図)	213
义	3.3-2	弾性波の調査方法	214
义	3.3 - 3	- 次処理の流れ	216
义	3.3-4	発振時刻の補正例	217
义	3.3-5	スタック処理後の波形例	218
义	3.3 - 6	受振データのパワースペクトル(W-1孔)	219
义	3.3-7	ニアトレースの振幅	220
义	3.3-8	初動走時の傾き(平均)	221
义	3.3-9	弾性波の速度分布	221
义	3.3-10	反射断面	222
义	3.3-11	比抵抗の調査方法	223
义	3.3-12	2 極法及び 4 極法配置の最大電極間隔	224
义	3.3 - 13	比抵抗解析の流れ	225
义	3.3-14	比抵抗分布図	226
义	3.3-15	W-1 孔の調査断面の比較	228
义	3.3-16	W-2 孔の調査断面の比較	229
义	3.3-17	W-3 孔の調査断面の比較	230
义	3.3-18	ボーリング位置と調査フロー	231
义	3.3-19	ボーリング配置及び写真	232
义	3.3-20	コアドリル削孔図	233
义	3.3-21	コアドリル削孔及びボーリング状況	234
义	3.3-22	ステレオネット図	237
义	3.3-23	ボアホール画像解析概要図	238
义	3.3 - 24	孔曲がり測定結果	240
义	3.3 - 25	T-1 孔グラウト注入前後の比較画像	241
义	3.3-26	W-1 孔グラウト注入前後の比較画像	242
义	3.3 - 27	グラウト注入前後比較画像(W-2 孔)	243
义	3.3-28	W-3 孔グラウト注入前後の比較画像	243
义	3.3-29	水理試験孔の配置状況	244
义	3.3-30	水理試験の流れ	245
义	3.3-31	応答観測の概要	246
义	3.3 - 32	グラウト注試験の概要	247
义	3.3-33	透水試験の概要	248
义	3.3-34	T -1 孔の応答観測結果	249
义	3.3-35	圧力応答と掘削進捗	249
义	3.3-36	グラウト注入状況	250

3.3 - 37	試験孔配置とパッカー深度	251
3.3-38	ボーリング孔の割れ目及び弾性波の断面分布	253
3.3-39	T-1 孔と G-1 孔の連通する割れ目	254
3.3-40	測定に用いた試料の採取場所	255
3.3-41	試料を飽和している様子	257
3.3-42	予備試験で測定した水浸時の水中重量の時間変化	257
3.3-43	乾燥により試料に生じたクラック	258
3.3-44	弾性波速度の測定の概略図(左)と測定中の写真(右)	258
3.3-45	比抵抗の測定の概略図(左)と測定中の写真(右)	259
3.3-46	測定された比抵抗と飽和度の関係	260
3.3-47	測定された P 波速度と飽和度の関係	261
3.3-48	測定された S 波速度と飽和度の関係	261
3.3-49	測定された P 波速度と比抵抗の関係	262
3.3-50	試料成形直後の比抵抗および P 波速度	263
3.3 - 51	各試料に対して飽和度と比抵抗をアーチ—の式でモデル化した結果	264
3.3 - 52	全試料から得られる全てのデータを用いて飽和度と比抵抗をアーチ-の式でモ	デル
化した	·結果	265
3.3 - 53	測定データと Wyllie の式による P 波速度と飽和度の関係	266
$3.3 \cdot 54$	各試料に対して測定された飽和度とS波速度の関係をモデル化した結果	267
$3.3 \cdot 55$	全試料から測定されたデータを用いて飽和度とS波速度をモデル化した結果	268
$3.3 \cdot 56$	岩盤内部の飽和度の分布の概念図。Uniform model(左)と Patchy model(右)	269
3.3 - 57	測定データと各試料毎にモデル化したP波速度と飽和度の関係	270
$3.3 \cdot 58$	全試料から測定されたデータを用いてモデル化した P 波速度と飽和度の関係	270
3.3 - 59	岩石モデルから導出された P 波速度と比抵抗の関係	271
3.3-60	P 波速度と比抵抗の関係とその解釈	273
3.3-61	異なる物理探査結果を個別に解析・解釈した場合(左)とジョイント・インバー	ジョ
ン(右	ī)	273
3.4-1	室内試験装置の概要図	276
3.4-2	スペーサ、ワイヤメッシュおよびフランジ	277
3.4-3	小型圧力センサの設置状況	277
3.4-4	小型圧力センサの取り付け概略図	277
3.4-5	超小型圧力計の設置状況	278
3.4-6	超小型圧力計の取り付け概略図	278
3.4-7	試験装置の準備状況	281
3.4-8	室内試験の実施状況	282
3.4-9	ベントナイトブロックの膨潤状況(試験装置断面)	283
3.4-10	ベントナイトブロックの膨潤状況(装置側面、装置上面)	284
3.4-11	試験終了時のベントナイトブロックの膨潤状況(試験装置側面、底面)	284
3.4-12	膨潤圧の経時変化	285
3.4-13	土圧計設置位置付近の状況(試験装置 No.3)	286
3.4-14	透水試験の概要	287
3.4-15	透水試験前後のブロック供試体の状況	287
3.4-16	透水試験後のブロック供試体の状況	288
	$3.3 \cdot 37$ $3.3 \cdot 38$ $3.3 \cdot 39$ $3.3 \cdot 40$ $3.3 \cdot 41$ $3.3 \cdot 42$ $3.3 \cdot 43$ $3.3 \cdot 43$ $3.3 \cdot 43$ $3.3 \cdot 45$ $3.3 \cdot 45$ $3.3 \cdot 45$ $3.3 \cdot 45$ $3.3 \cdot 45$ $3.3 \cdot 49$ $3.3 \cdot 50$ $3.3 \cdot 51$ $3.3 \cdot 52$ $1 \le 1 \le 1$ $3.3 \cdot 53$ $3.3 \cdot 54$ $3.3 \cdot 55$ $3.3 \cdot 54$ $3.3 \cdot 55$ $3.3 \cdot 56$ $3.3 \cdot 57$ $3.3 \cdot 58$ $3.3 \cdot 57$ $3.3 \cdot 58$ $3.3 \cdot 56$ $3.3 \cdot 57$ $3.3 \cdot 58$ $3.3 \cdot 56$ $3.3 \cdot 57$ $3.3 \cdot 58$ $3.3 \cdot 54$ $3.3 \cdot 55$ $3.3 \cdot 56$ $3.3 \cdot 57$ $3.3 \cdot 58$ $3.3 \cdot 54$ $3.3 \cdot 55$ $3.3 \cdot 56$ $3.3 \cdot 57$ $3.3 \cdot 58$ $3.3 \cdot 54$ $3.4 \cdot 4$ $3.4 \cdot 1$ $3.4 \cdot 1$	 3.3-37 試験工配置とパッカー深度 3.3-38 ボーリング孔の割れ目及び弾性波の断面分布

义	$3.4 \cdot 17$	密度・含水比計測用試料の採取状況	289
义	3.4-18	コンテナを用いたベントナイトブロックの設置概念	291
义	3.4-19	模擬ボーリング孔の概略図	292
义	3.4-20	模擬ボーリング孔の外観	292
义	3.4-21	端部閉塞用のブラインドフランジ	292
义	3.4-22	ブロック設置装置の概略図	293
义	3.4-23	ブロック設置装置の外観	293
义	3.4-24	設置装置端部の状況	294
义	3.4-25	動作確認試験の状況	294
义	3.4-26	ベントナイトブロックの外観	295
义	3.4-27	試験用水循環システムの概略図	297
义	3.4-28	試験用水循環システムの整備状況	297
义	3.4-29	ベントナイトブロック設置試験の作業概要	298
义	3.4-30	ベントナイトブロックの設置状況	299
义	3.4-31	ベントナイトブロック設置後の状況	299
义	3.4-32	膨潤状況観察時の試験装置の状況	300
义	3.4-33	モックアップ試験開始後 10 日目の状況	301
义	3.4-34	モックアップ試験開始後 16 日目の状況	301
义	3.4 - 35	モックアップ試験開始後 18 日目の状況	301
义	3.4-36	孔底部付近の水みちの状況	302
义	3.4-37	試験開始 24 日目の水みちの状況	302
义	3.4-38	ブロック上端の膨潤状況	303
义	3.4-39	模擬ボーリング孔孔口付近のベントナイトの沈殿状況	303
义	3.4-40	孔底部の膨潤状況	303
义	3.4-41	孔底部から1m 付近の膨潤状況	304
义	3.4-42	モックアップ試験時の注水圧力と注水流量	305
义	3.4-43	注水終了前後の注水圧力と注水流量	305
义	3.4-44	注水終了前後の水みちの状況(孔底部付近)	305
义	3.4-45	閉塞性確認試験1の概略	307
义	3.4-46	模擬ボーリング孔内の圧力の経時変化(閉塞性確認試験 1)	307
义	3.4-47	閉塞性確認試験 2 の概略	308
义	3.4-48	注水圧力とマリオットタンク重量(閉塞性確認試験 2)	308
义	3.4-49	注水圧力と注水量(コンプレッサを用いた閉塞性確認試験)	309
义	3.4-50	ベントナイトブロックの状況(閉塞性確認試験 2)	309
义	3.4-51	乾燥密度および含水比測定用試料の採取位置(黄色テープ付近)	310
义	3.4-52	乾燥密度および含水比測定用試料の採取状況	310
义	3.5-1	コンシードに係る基礎的研究の情報	313
义	3.5 - 2	先行研究における試験の状況(幌延深地層研究所深度 350 m 試験坑道 5 内)	313
义	3.5-3	原位置試験イメージ	314
义	3.5-4	室内試験用供試体の作成状況	318
义	3.5 - 5	試験坑道 5 坑口側枝坑内におけるボーリング孔の位置	319
义	3.5-6	各ボーリング孔の位置関係と孔名(中心モニター孔および No.1~No.8 孔)	319
义	3.5-7	BTV 観察結果(1)(検知された割れ目情報一覧)	320

义	3.5-8	BTV 観察結果(2)(割れ目のトレース図)	. 320
义	3.5 - 9	BTV 観察結果(3)(検知された割れ目の卓越方向)	. 321
义	3.5-10	コア写真(中心モニター孔および注入孔 8 孔)	. 322
义	3.5-11	透水試験システムの概要	. 323
义	3.5-12	透水試験中の透水試験区間圧の変化(初期値計測)	. 324
义	3.5-13	透水試験中の注水圧、注水流量の変化(初期値計測)	. 324
义	3.5 - 14	注水圧-注水流量関係(初期値計測)	. 325
义	3.5-15	センター孔周辺岩盤の透水係数の経時変化	. 325
义	3.5-16	室内試験結果一覧	. 327
义	3.5-17	一軸繰り返し圧縮試験結果(コンシード、材令 90 日)	. 328
义	3.5-18	圧縮試験後および試験中の供試体状況	. 328
义	3.5-19	モニタリング状況	. 329
义	3.5-20	中心モニター孔における孔口湧水量の経時変化	. 329
义	3.5-21	中心モニター孔における孔内水温の経時変化	. 330
义	4.2-1	埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の構築までの流れ	. 336
义	4.3-1	使用材料及び埋め戻し材の粒度分布	. 339
义	4.3-2	透水係数と乾燥密度の関係(イオン交換水)	. 340
义	4.3-3	透水係数と乾燥密度の関係(人工海水)	. 340
义	4.3-4	撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験の対象(実規模模擬坑道)	. 341
义	4.3-5	埋め戻し材の締固め試験結果	. 342
义	4.3-6	撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験の概要	. 343
义	4.3-7	撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験の状況	. 344
义	4.3-8	小型振動ローラの外観	. 344
义	4.3-9	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	. 345
义	4.3-10	埋め戻し材製造後の含水比	. 346
义	4.3-11	転圧のパス数と転圧層の厚さの関係	. 347
义	$4.3 \cdot 12$	撒き出し厚さをパラメータとした乾燥密度と含水比の関係	. 347
义	4.3-13	埋め戻し材の含水比のばらつきと乾燥密度の関係	. 348
义	4.3 - 14	撒き出し・転圧工法における乾燥密度測定結果	. 349
义	$4.3 \cdot 15$	撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の乾燥密度の頻度分布	. 349
义	4.3-16	撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の乾燥密度と透水係数の関係	. 350
义	4.3-17	3D スキャナによる出来形計測	. 350
义	4.3-18	トータルステーションによる転圧回数の管理	. 352
义	4.3-19	埋め戻し材のセミバリオグラム	. 353
义	4.3-20	乾燥密度と透水係数の空間分布モデル	. 354
义	4.3-21	巨視的透水係数の解析モデルと境界条件	. 354
义	4.3-22	浸透流解析の計算ケース別の乾燥密度の確率密度	. 355
义	4.3-23	巨視的透水係数の対数の頻度分布図(ケース 1)	. 356
义	4.3-24	巨視的透水係数の対数の頻度分布図(ケース 2)	. 356
义	4.3 - 25	巨視的透水係数の対数の頻度分布図(ケース 3)	. 356
义	4.3-26	埋め戻し材の締固め試験結果	. 363
义	4.3-27	模擬掘削土の粒度分布(試験 I)	. 364
义	4.3-28	小規模模擬坑道の断面図(試験I)	. 364

凶	4.3-29	実規模模擬坑道における吹付け工法の施工範囲(試験Ⅱ)	364
义	4.3-30	吹付け工法の機器構成例	365
义	4.3-31	吹付けシステム外観と吹付け状況(仕様 I)	365
义	4.3-32	吹付けシステム外観と吹付け状況(仕様Ⅱ)	365
义	4.3-33	小規模模擬坑道試験の施工後の乾燥密度の測定位置(試験 I)	366
义	4.3-34	埋め戻し材の製造後の含水比の頻度分布図	366
义	4.3-35	材料供給量と乾燥密度の関係(試験I)	367
义	4.3-36	吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度の頻度分布図	368
义	4.3-37	吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度の空間分布(試験I)	368
义	4.3-38	機械施工における小規模模擬坑道の狭隘箇所施工の状況(試験I)	369
义	4.3-39	ホースの配置(屈曲)の改善の状況	370
义	4.3-40	ホース内部の埋め戻し材の付着状況(試験Ⅱ)	370
义	4.3-41	吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度と透水係数の関係	371
义	4.3-42	3D スキャナによる出来形体積測定結果	372
义	4.3-43	リバウンド材を吹付けた状況	374
义	4.3-44	スクリュー充填装置の概略図	379
义	4.3-45	スクリュー配置の案及び充填性を確認すべき坑道の部位	381
义	4.3-46	埋め戻し材の押し上げによるアーチ中央部・端部の充填の概念	381
义	4.3-47	スクリュー要素試験装置の概要図	382
义	4.3-48	スクリュー要素試験装置の主要部分の外観	383
义	4.3-49	スクリュー反力の支持と後退速度の調整	384
义	4.3-50	土槽天端中央及び両側の隅角部を充填するためのスクリュー配置案	384
义	$4.3 \cdot 51$	材料供給方式	385
义	4.3-52	試験土槽形状寸法	387
义	$4.3 \cdot 53$	試験土槽の試験用開口部	388
义	4.3 - 54	土槽内面の格子及び測定ラインの位置	389
义	4.3-55	スクリュー充填要素試験に用いる埋め戻し材の配合	391
义	4.3-56	埋め戻し時のスクリュー後退計画概念図	393
义	4.3-57	モールド/スコップによる埋め戻し斜面からの試料採取計画(ケース2)	394
义	4.3-58	透水試験用モールドの設置(左)及び回収(右)	395
义	4.3-59	充填状況(ケース 2)	398
义	4.3-60	充填形状の経時変化(ケース 2)	399
义	4.3-61	充填高さ・形状の経時変化(ケース2:土槽アーチ中央部及びアーチ端部)	400
义	4.3-62	粒径加積曲線の比較(ケース 2)	403
义	4.3-63	埋め戻し材の充填形状(充填完了時、妻面より150 cm 断面)	405
义	4.3-64	坑道全体を埋め戻す場合のスクリュー配置概念案	409
义	4.3-65	模擬掘削土の粒度分布	415
义	4.3-66	透水係数と有効粘土密度の関係	418
义	4.3-67	透水係数と模擬掘削土配合割合との関係	418
义	4.3-68	透水係数と乾燥密度の関係	419
义	4.3-69	透水係数と間隙比の関係	419
义	4.3-70	最大膨潤変形率と有効粘土密度の関係	421
义	4.3-71	最大膨潤変形率と有効粘土密度の関係	422

义	4.3-72	最大膨潤変形率と有効粘土密度の関係(ベントナイト混合率 15%)	422
义	4.3-73	想定される残存する隙間と及び膨潤変形方向	423
义	4.3-74	検討モデル	424
义	4.3-75	拘束圧の設定	425
义	4.3-76	埋め戻し材ブロックにおける鉛直・水平方向への膨潤変形を考慮した計算手順	425
义	4.3-77	一方向のみの最大膨潤変形率分布図	426
义	4.3-78	鉛直・水平の二方向を想定した最大膨潤変形率分布図	426
义	4.3-79	鉛直・水平の二方向を想定した最大膨潤変形率分布図	427
汊	4.3-80	本検討のために仮設定した埋め戻し材ブロック及び隙間の仮体積	428
汊	4.3-81	想定される隙間に対する膨潤変形量_間隙水のイオン濃度 n ₀ =20 mol/m ³	428
汊	4.3-82	設定した行及び列毎の自己シール性の判定(鉛直・水平方向)	429
义	4.3-83	主要坑道における各ブロックの定置レイアウト	431
义	4.3-84	埋め戻し材ブロック製作装置のイメージ図	435
义	4.3-85	定置装置用移動式制御機のイメージ図	441
义	4.3-86	埋め戻し材ブロック定置装置(案)	442
义	4.3-87	埋め戻し材ブロック 製作・搬送・保管・定置の作業手順	444
义	4.3-88	埋め戻し材ブロック製作手順	445
义	4.3-89	埋め戻し材ブロックの定置順序と配置レイアウト	446
义	4.3-90	埋め戻し材ブロック定置手順	447
义	4.3-91	ブロック定置作業イメージ図	447
义	4.3-92	浸潤試験の全体構成	457
义	4.3-93	浸潤容器構造図	457
义	4.3-94	計測プローブの設置位置	458
义	4.3-95	試料採取位置	459
义	4.3-96	装置上面の観察窓から確認された浸潤前線の進行(開放条件)	460
义	4.3-97	間隙水圧及び空気圧測定値の変化(ケース B-O-1 空気穴開放)	461
义	4.3-98	間隙水圧及び空気圧測定値の変化(ケース B-C-1 空気穴閉鎖)	461
义	4.3-99	試験中の比誘電率測定値の変化(ケース B-O-1 空気穴開放)	462
义	4.3-100	試験中の比誘電率測定値の変化(ケース B•C•1 空気穴閉鎖)	463
义	4.3-101	供試体への積算浸潤量の変化(ケース B·O·1 空気穴開放)	463
汊	4.3-102	試体への積算浸潤量の変化(ケース B-C-1 空気穴閉鎖)	464
义	4.3-103	供試体の乾燥密度及び体積含水率(ケース B-O-1 空気穴解放)	465
义	4.3-104	試体の乾燥密度及び体積含水率(ケース B-C-1 空気穴閉鎖)	466
义	4.3-105	解析モデル	468
义	4.3-106	水分ポテンシャル	469
义	4.3-107	比透水係数及び比透気係数	469
义	4.3-108	カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況および間隙水圧(B-O-2-U)	471
义	4.3-109	カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況、間隙水圧、気相圧力(B·O·2	·T)
図	4.3-110	カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況、間隙水圧、気相圧力(B·C·1·	472 T) 479
図	4.3-111	カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況、間隙水圧、気相圧力(B-C-2-	413 ·T) 474
	•••••		+14

义	4.3-112	2 試験結果と解析結果の比較(開放条件)	. 477
义	4.3-113	3 試験結果と解析結果の比較(閉鎖条件)	. 478
义	5.2 - 1	閉鎖の判断に至るまでの流れと品質保証体系の関係	. 482
义	5.2-2	品質管理プログラム及び性能確認プログラムの経時的な関係性	. 483
义	5.2 - 3	品質保証体系の具体化で仮設定した処分場のタイムライン	. 489
义	5.2-4	オーバーパックの溶接部イメージ	. 492
义	5.2 - 5	原位置での測定を最小限にする性能確認プログラムの考え方(概念)	. 502
义	5.3 - 1	埋め戻し材の乾燥密度測定技術の開発フロー	. 505
义	5.3-2	FBG の構造と加熱式光ファイバケーブルの断面図	. 506
义	5.3 - 3	温度変化と熱伝導率の関係	. 506
义	5.3-4	乾燥密度計測試験土槽寸法	. 507
义	5.3 - 5	試験中の土槽の外観と埋め戻し材設置後の状況	. 507
义	5.3-6	乾燥密度の測定システム	. 508
义	5.3-7	レファレンス土槽	. 509
义	5.3-8	ベースライン及び土槽外縁部の測定	. 509
义	5.3 - 9	ベースライン、レファレンス土槽及び室温の測定結果	. 510
义	5.3 - 10	全土槽の加熱時間ごとの試験土槽内の温度分布	511
义	5.3 - 11	各区画の加熱時間と平均温度の変化	.512
义	5.3 - 12	熱伝導率計算結果	. 513
义	5.3 - 13	乾燥密度-熱伝導率の比較	. 516
义	5.3 - 14	埋め戻し隙間検知のための測定技術の開発フロー	.517
义	5.3 - 15	平衡型 300 Ω 平行フィーダ線	. 518
义	5.3 - 16	隙間検知測定試験の土槽寸法	. 519
义	5.3 - 17	土槽外観及び締固め後の埋め戻し材(上面)	. 520
义	5.3 - 18	隙間検知の計測システム	. 521
义	5.3 - 19	加熱式光ファイバ計測による各土槽の加熱時間と温度変化	. 522
义	5.3 - 20	加熱式光ファイバ計測による各土槽平均温度の時間変化	. 523
义	5.3 - 21	2 段配置の加熱式光ケーブルによる隙間計測の概念	. 525
义	5.3-22	空隙の厚さと熱伝導率の関係	. 525
义	5.3 - 23	計測ケーブル耐力確認試験	. 527
义	5.3 - 24	ケーブル TDR の測定結果(計測 2 回目)	. 529
义	5.3 - 25	埋め戻し材の膨潤に伴う圧力の測定技術の開発フロー	. 530
义	5.3-26	被覆条件の異なる光ファイバの周波数シフトの差分	. 531
义	5.3 - 27	水圧式加圧試験装置の概略図及び外観	. 532
义	5.3-28	試験に用いた光ファイバの断面模式図	. 533
义	5.3 - 29	水圧とひずみ換算値の関係	. 534
义	5.3 - 30	ひずみ換算値の差分と水圧の関係	. 534
义	5.3 - 31	再現解析のモデルに与える各種条件	. 536
义	5.3 - 32	理論式の座標系とパラメータの定義	. 538
义	5.3-33	FEM 解析の実施フロー	. 540
义	5.3 - 34	一方向圧力モデル(Step.1)に与える各種条件	. 541
义	5.3 - 35	二心線一方向圧力モデル(Step.2)に与える各種条件	. 542
义	5.3 - 36	一方向圧力によって生じたひずみ成分(模式図)	. 543

凶	5.3 - 37	2本の光ファイバの離隔ケース	544
义	5.3 - 38	φ0.90 mm-φ0.25 mm の光ファイバの離隔とひずみの関係	545
义	5.3 - 39	人工バリア性能確認試験に設置した間隙水圧計の無線伝送による観測データ	546
义	5.3-40	鉄筋における磁界による渦電流の発生	547
义	5.3-41	送受電コイルと置き換えた等価回路の関係	548
义	5.3-42	無線給電試験に使用したコイル	549
义	5.3 - 43	鉄筋試験体の組み立て図	549
义	5.3-44	絶縁テープと鉄筋交差部の絶縁状況	550
义	5.3-45	インピーダンスアナライザ及び VNA による測定状況	550
义	5.3-46	VNA を用いた給電効率の測定のブロック図及び共振コンデンサ	551
义	5.3-47	既往の回路を用いた給電効率の測定のブロック図	551
义	5.3-48	鉄筋無しにおけるコイル間距離と給電効率と周波数の関係	552
义	5.3-49	鉄筋無しにおけるコイル間距離と給電効率の関係	552
义	5.3 - 50	鉄筋を介した場合の鉄筋ピッチごとのコイル間距離と給電効率の理論値	554
义	$5.3 \cdot 51$	VNA を用いた各鉄筋ピッチにおけるコイル間距離ごとの周波数と給電効率の	関係
	•••••		555
义	5.3 - 52	VNA を用いた各鉄筋ピッチにおけるコイル間距離と給電効率の関係	556
义	5.3 - 53	鉄筋に絶縁措置を施した場合のコイル間距離ごとの周波数と給電効率の関係	557
义	5.3 - 54	各鉄筋ピッチにおけるコイル間距離と給電効率の関係	558
义	5.3 - 55	鉄筋の存在による送信コイルのインダクタンス変化	559
义	5.3 - 56	無線給電システム導入時の設計検討手順案	562
义	6.3-1	本事業の成果を踏まえ処分場の閉鎖にあたり提案する設計体系(案)	573
义	6.3-2	提案する設計体系(案)と本事業における個別技術開発との関連(1)	574
义	6.3-3	提案する設計体系(案)と本事業における個別技術開発との関連(2)	575

表	2.1-1	割れ目②の水理パラメータ	13
表	2.1 - 2	割れ目⑤の水理パラメータ	14
表	2.1 - 3	OPC の化学成分	15
表	2.1-4	クリンカー鉱物の組成	15
表	2.1 - 5	セメント系材料(W/C=55%)の配合	15
表	2.1-6	セメント系材料の初期水和物量(OPC)	16
表	2.1-7	OPC セメントペーストの初期間隙水組成(FRHP)	16
表	2.1-8	深成岩類の初期鉱物組成	17
表	2.1-9	深成岩類における二次鉱物の設定	17
表	$2.1 \cdot 10$	解析ケース	18
表	2.1-11	解析ケース	26
表	2.1 - 12	岩盤の影響因子	36
表	$2.1 \cdot 13$	坑道支保工の影響因子	37
表	$2.1 \cdot 14$	坑道支保工と埋め戻し材の状態(コンクリート影響による劣化シナリオ)	39
表	$2.1 \cdot 15$	セメント影響による劣化シナリオにおける2つの状態間の遷移の考え方	42
表	$2.1 \cdot 16$	坑道支保工と埋め戻し材の状態(上部空隙発生を想定したシナリオ)	44
表	$2.1 \cdot 17$	上部空隙発生を想定したシナリオにおける2状態間の遷移の考え方	47
表	$2.1 \cdot 18$	水理・物質移行解析設定パラメータ	54
表	$2.1 \cdot 19$	重み設定の考え方と設定理由(1/3)	70
表	2.1 - 20	重み設定の考え方と設定理由(2/3)	71
表	2.1-21	重み設定の考え方と設定理由(3/3)	72
表	2.1 - 22	多重バリアシステムの安全機能の有無を想定した場合の影響レベル	73
表	2.2-1	ベントナイトペレットの仕様	81
表	2.2-2	試験ケース	83
表	2.2-3	ケースの試験概要(1 mmペレット・精製水・端部注水)	84
表	2.2-4	0.1 MPa の昇圧時における流出水の分析結果	85
表	2.2-5	試験結果概要(ケース2:15 mm ペレット・精製水・端部注水)	86
表	2.2-6	ケース3の試験結果概要(混合ペレット・精製水・端部注水)	88
表	2.2-7	破過時の流出水の分析結果(ケース3:混合ペレット・精製水・端部注水)	89
表	2.2-8	ケース4の試験概要(ブロック・精製水・端部注入)	90
表	2.2-9	ケース5の試験概要(1mmペレット・人工海水・端部注水)	92
表	2.2-10	ケース 6 の試験概要(15 mm ペレット・人工海水・端部注水)	94
表	2.2-11	流出水の分析結果(ケース 6)	94
表	2.2 - 12	ケース7の試験概要(ケース7:混合ペレット・人工海水・端部注水)	95
表	$2.2 \cdot 13$	ケース8の試験概要(泥岩ブロック・人工海水・端部注水)	96
表	2.2 - 14	ケース9の試験概要(混合ペレット・精製水・頂部注水)	97
表	$2.2 \cdot 15$	破過時の流出水の分析結果(ケース9:混合ペレット・精製水・頂部注水)	97
表	2.2 - 16	ケース 10 の試験概要(ケース 10:泥岩ブロック・精製水・頂部注水)	97
表	2.2 - 17	試験結果概要(ケース 11:15 mm ペレット・人工海水・頂部注水)	99
表	2.2 - 18	ケース 12 の試験概要(泥岩ブロック・人工海水・頂部注水)	101
表	2.2 - 19	試験結果概要(ケース 13:15 mm ペレット・精製水・頂部注水)	103

表目次

表	2.2-20	イオン交換水条件の流出水の濃度	109
表	2.2-21	人工海水条件の流出水の濃度	109
表	2.2-22	主要イオン濃度分析結果	.110
表	2.2-23	含水比測定の結果	.117
表	2.2-24	湿潤密度の測定結果	.117
表	2.2-25	乾燥密度の測定結果	.118
表	3.1-1	小規模模型試験の試験条件	130
表	3.1-2	小規模模型試験における試験溶液の水質分析結果	130
表	3.1 - 3	縮尺模型試験における試験用水の水質分析結果	143
表	3.1 - 4	縮尺模型試験における試験条件	143
表	3.1-5	イオン交換水・1から採取した試験用水の水質分析結果	148
表	3.1-6	計測機器の分解能	153
表	3.1-7	サーモグラフィ 分解能	156
表	3.1-8	クニゲル V1 物性値	158
表	3.1-9	試験条件	158
表	3.2-1	試験ケース一覧	166
表	3.2-2	材料の基本物性値	167
表	3.2-3	強制二軸ミキサーの仕様	168
表	3.2-4	吹付け機の仕様	170
表	3.2 - 5	アーム付き汎用重機の仕様	171
表	3.2-6	地上吹付け施工試験の試験ケース一覧	172
表	3.2-7	地上吹付け施工試験の品質管理項目	173
表	3.2-8	混合土の含水比測定結果	175
表	3.2-9	メチレンブルー吸着量の測定条件	178
表	3.2-10	ベントナイト混合率の測定結果	178
表	3.2-11	吹付け時の材料重量(地上吹付け試験)	179
表	3.2-12	吹付けの施工品質と施工能力(地上吹付け試験)	180
表	3.2-13	掘削に使用した資機材一覧	182
表	3.2-14	原位置吹付け施工試験における材料仕様	185
表	3.2 - 15	原位置吹付け施工試験の使用機械一覧	187
表	3.2-16	原位置吹付け施工試験の作業実績	188
表	$3.2 \cdot 17$	原位置吹付け施工試験の品質管理項目	192
表	3.2-18	作製材料の含水比測定結果	193
表	3.2-19	サンプリング試料の乾燥密度および含水比の測定結果	196
表	3.2-20	メチレンブルー吸着量の測定条件(再掲)	197
表	3.2-21	ベントナイト混合率の測定結果(原位置吹付け施工試験)	199
表	3.2-22	バッチ毎の施工重量	201
表	3.2-23	作業日毎の施工重量	202
表	3.2 - 24	吹付け体積と吹付け速度および乾燥密度の結果	202
表	3.2 - 25	模擬地下水組成	204
表	3.2-26	原位置透水試験の結果	206
表	3.2 - 27	解析モデルの各要素の透水係数の設定値	209
表	3.2-28	EDZ を対象とした定圧注水試験の結果	209

表	3.2-29	浸透流解析の結果	209
表	3.3 - 1	実施工程表	212
表	3.3-2	弾性波調査の主要機器	215
表	3.3-3	比抵抗調査の主要機器	224
表	3.3-4	逆解析の収束 RMS 残差	226
表	3.3-5	試験孔の電気伝導度	227
表	3.3-6	ボーリングの内容	233
表	3.3-7	検層の内容	233
表	3.3-8	ボーリングコアの割れ目状態	234
表	3.3-9	割れ目面の特徴とイメージ	235
表	3.3-10	割れ目本数一覧表	236
表	3.3-11	割れ目一覧表	238
表	3.3-12	孔径検層結果	239
表	3.3-13	孔曲がり測定結果	239
表	3.3-14	グラウト材の仕様	250
表	3.3-15	グラウト注入状況	250
表	3.3-16	間隙水圧の観測結果	252
表	3.3-17	W-2 の注水試験結果	252
表	3.3-18	作成した試料の情報	255
表	3.3-19	試料の密度特性および間隙率	256
表	3.3-20	弾性波速度測定に使用した機材	259
表	3.3-21	比抵抗測定に使用した機材	259
表	3.3-22	試料毎のフォーメーションファクタと n	264
表	3.3-23	モデル化により推定された各試料の剛性率	268
表	3.3-24	モデル化により推定された各試料の体積弾性率	270
表	3.3-25	モデル化ケースと使用したデータ	271
表	3.3-26	各ケースのより推定されたパラメータ	271
表	3.4-1	250 m 調査坑道の地下水組成	275
表	3.4-2	試験装置と確認・測定項目の対応	280
表	3.4-3	透水試験の実施結果	288
表	3.4-4	室内試験における密度・含水比測定の結果	290
表	3.4-5	250 m 調査坑道の地下水組成	291
表	3.4-6	モックアップ試験におけるベントナイトブロックの緒元	296
表	3.4-7	ベントナイトブロックの排出に係る注水圧力および注水量	299
表	3.4-8	閉塞性確認試験1の試験結果	308
表	3.4-9	モックアップ試験における密度・含水比測定結果	.311
表	3.5-1	コンクリーション化充填材の仕様	315
表	3.5^{-2}	ボーリング孔掘削で使用する機材一覧表	315
表	3.5-3	ボーリング孔壁面観察で使用する機材の仕様と出力	315
表	3.5-4	注入用コンシード作製の使用機材一覧表(受託外)	316
表	3.5 - 5	透水試験の使用機材,材料諸元一覧表	316
表	3.5-6	モニタリングの使用機材	317
表	3.5 - 7	室内物性試験で使用した機器	317

表	3.5-8	透水試験結果(中心モニター孔における EDZ の初期値計測)	. 324				
表	3.5 - 9	コンシードの室内試験結果	. 326				
表	3.5-10	コンシードの硬化性樹脂材料のみの室内試験結果					
表	3.5-11	各注入孔における底盤部とコンシード上端面距離の経時変化(単位:mm) 331					
表	4.2-1	め戻し材の設計要件					
表	4.2-2	埋め戻し材の基本仕様	. 336				
表	4.3-1	室内試験の使用材料	. 338				
表	4.3-2	室内試験(透水試験)で用いた埋め戻し材の配合	. 339				
表	4.3-3	転圧施工試験の試験条件	. 342				
表	4.3-4	撒き出し・転圧工法で使用した機材	. 344				
表	4.3-5	転圧施工試験の仕様	. 348				
表	4.3-6	各層施工後の累積でのかさ密度と砂置換による密度測定結果の比較	. 351				
表	4.3-7	転圧工法による埋め戻しの施工速度	. 352				
表	4.3-8	浸透流解析の解析ケース	. 355				
表	4.3-9	解析条件と巨視的透水係数から求めた乾燥密度(ケース 3)	. 357				
表	4.3-10	撒き出し・転圧工法における製造・施工プロセス管理(開発段階)	. 358				
表	4.3-11	撒き出し・転圧工法における製造・施工プロセス管理(製造段階)	. 359				
表	4.3-12	撒き出し・転圧工法における製造・施工プロセス管理(施工段階)	. 360				
表	4.3-13	吹付け工法の施工試験の概要	. 361				
表	4.3-14	埋め戻し材の基本仕様	. 362				
表	4.3-15	埋め戻し材の乾燥密度の施工目標と設定含水比	. 363				
表	4.3-16	埋め戻し材の基本配合	. 363				
表	4.3-17	模擬掘削土の均等係数と曲率係数(試験 I)	. 363				
表	4.3-18	乾燥密度の測定位置	. 366				
表	4.3-19	模擬掘削土の粒度の違いと埋め戻し材の透水係数の関係(試験I)	. 367				
表	4.3-20	埋め戻し材のリバウンド率(試験 I)	. 369				
表	4.3-21	埋め戻し材のリバウンド率(試験Ⅱ)	. 369				
表	4.3-22	かさ密度の精度(試験 I)	. 372				
表	4.3-23	かさ密度の精度(試験Ⅱ)	. 372				
表	4.3-24	吹付け工法による埋め戻しの施工速度(試験I)	. 373				
表	4.3-25	吹付け工法による埋め戻しの施工速度(試験Ⅱ)	. 373				
表	4.3-26	吹付け工法における製造・施工プロセス管理(開発段階)	. 376				
表	4.3-27	吹付け工法における製造・施工プロセス管理(製造段階)	. 377				
表	4.3-28	吹付け工法における製造・施工プロセス管理(施工段階)	. 378				
表	4.3-29	スクリュー工法研究開発工程(案)	. 380				
表	4.3-30	スクリュー充填装置の基本仕様(単位:mm)	. 384				
表	4.3-31	埋め戻しに要求する透水係数の目標値	. 389				
表	4.3-32	埋め戻し材の基本仕様	. 390				
表	4.3-33	スクリュー充填要素試験に用いる埋め戻し材の透水試験結果	. 390				
表	4.3-34	埋め戻し充填要素試験の試験ケース	. 392				
表	4.3-35	要素試験で取得する情報及び取得方法	. 393				
表	4.3-36	埋め戻し斜面からの試料採取計画(ケース 2)	. 395				
表	4.3-37	試験経時記録(ケース 2)	. 396				

表	4.3-38	かさ密度及び充填速度(ケース 2)	401			
表	4.3-39	スクリューの埋め込み深さ及びジャッキ反力	402			
表	4.3-40	採取試料より計算した乾燥密度(ケース 2)	404			
表	4.3-41	透水試験結果(ケース 2)				
表	4.3-42	スクリュー工法における製造・施工プロセス管理(開発段階)	411			
表	4.3-43	制御・設計パラメータの品質への影響	413			
表	4.3-44	試験に使用した埋め戻し材の材料構成	414			
表	4.3-45	模擬掘削土の粒度試験結果	415			
表	4.3-46	透水試験仕様	416			
表	4.3-47	透水試験ケース	416			
表	4.3-48	透水試験の結果	417			
表	4.3-49	既往の透水試験の結果	417			
表	4.3-50	膨潤変形試験仕様	420			
表	4.3-51	膨潤変形試験ケース	420			
表	4.3-52	設計要件の確認方法(自己シール性)	423			
表	4.3-53	計算に用いた埋め戻し材ブロックの各パラメータの値	424			
表	4.3-54	比較する埋め戻し材ブロックの寸法	430			
表	4.3 - 55	埋め戻し材ブロックの必要個数	432			
表	4.3-56	仮設定した埋め戻し材ブロックに対する適性の検討(1/2)	433			
表	4.3 - 57	仮設定した埋め戻し材ブロックに対する適性の検討(2/2)	434			
表	4.3 - 58	埋め戻し材ブロック製作、運搬、保管 要求機能・品質まとめ	436			
表	4.3-59	埋め戻し材ブロックの施工要求機能・品質まとめ 1/3	438			
表	4.3-60	埋め戻し材ブロックの施工 要求機能・品質まとめ 2/3	439			
表	4.3-61	埋め戻し材ブロックの施工 要求機能・品質まとめ 3/3	440			
表	4.3-62	把持方式の選定	442			
表	4.3-63	埋め戻し材ブロック工法における製造・施工プロセスの管理上の特徴・課題	449			
表	4.3-64	ブロック工法における製造・施工プロセス管理(開発段階 その1)	450			
表	4.3-65	ブロック工法における製造・施工プロセス管理(開発段階 その2)	451			
表	4.3-66	ブロック工法における製造・施工プロセス管理(開発段階 その3)	452			
表	4.3-67	ブロック工法における製造・施工プロセス管理(ブロック製造段階 その1)…	453			
表	4.3-68	ブロック工法における製造・施工プロセス管理(ブロック製造段階 その2)	454			
表	4.3-69	ブロック工法における製造・施工プロセス管理(施工段階)	455			
表	4.3-70	供試体の諸元	458			
表	4.3-71	浸潤試験ケース	459			
表	4.3-72	埋め戻し材の飽和・不飽和浸透流および気液二相流の解析用パラメータ	468			
表	4.3-73	解析ケース	469			
表	5.2 - 1	品質保証体系におけるパラメータの調査対象リスト(OP)	485			
表	5.2-2	品質保証体系におけるパラメータの調査対象リスト(緩衝材)	485			
表	5.2 - 3	品質保証体系におけるパラメータの調査対象リスト(埋め戻し材)	485			
表	5.2-4	(埋・1) 埋め戻し材の低透水性に関する調査結果	486			
表	5.2 - 5	集約したパラメータの対象	490			
表	5.2-6	オーバーパックの製造・施工プロセス管理(開発段階)	494			
表	5.2-7	オーバーパックの製造・施工プロセス管理(製造段階)	495			

表	5.2-8	オーバーパックの製造・施工プロセス管理(施工段階)496
表	5.2-9	緩衝材ブロックの製造施工プロセス管理(開発段階)
表	5.2 - 10	緩衝材ブロックの製造施工プロセス管理(製造段階) 500
表	5.2 - 11	緩衝材ブロックの製造施工プロセス管理(施工段階)
表	5.3 - 1	連続 FBG ファイバケーブルの仕様 506
表	5.3-2	乾燥密度測定試験ケース509
表	5.3-3	埋め戻し材の熱伝導率の計算結果(W/mK)512
表	5.3-4	隙間検知試験-熱伝導率計算結果(W/mK) 524
表	5.3 - 5	ケーブルの耐力確認試験結果528
表	5.3-6	試験に用いた光ファイバケーブルの仕様 532
表	5.3-7	光ファイバケーブルの被覆材の材料物性値535
表	5.3-8	石英ガラスと樹脂の間の面インターフェース要素の材料物性値535
表	5.3-9	0.1 MPa 静水圧下における 0.90 mm 光ファイバのひずみ(FEM 解析結果) 536
表	5.3 - 10	0.1 MPa の水圧下における φ0.90 mm の光ファイバのひずみ538
表	$5.3 \cdot 11$	石英ガラスと樹脂の間のインターフェース要素の材料物性(再掲)540
表	5.3 - 12	光ファイバと接触するコンクリート及び埋め戻し材の材料特性541
表	$5.3 \cdot 13$	埋め戻し材及びコンクリートと光ファイバの間のインターフェース要素の材料特性
表	$5.3 \cdot 14$	一方向圧力モデルにおける各成分のひずみ(0.90 mm) 542
表	5.3 - 15	離隔 0.575 mm における光ファイバのひずみ 544
表	$5.3 \cdot 16$	離隔 0.2875 mm における光ファイバのひずみ544
表	$5.3 \cdot 17$	離隔 0 mm(接触)における光ファイバのひずみ
表	5.3 - 18	給電試験におけるコイル間距離549
表	5.3 - 19	鉄筋無しにおけるkとQ及び給電効率(100 kHz) 551
表	5.3-20	鉄筋無しにおけるコイル間距離と給電効率552
表	5.3 - 21	鉄筋を介した場合におけるkとQおよび給電効率の関係(周波数 100 kHz) 554
表	5.3-22	実証試験等における測定機器に関する課題560
表	5.3 - 23	無線給電システムの設計で特に留意すべき課題と対応案561
表	6.3-1	閉鎖技術開発の進捗等に関する整理表(案) 576

1.1 本事業の背景と目的

本事業は、令和3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 ラグや埋め戻し材などの物理的および化学的安定性に関しては、例えばコンクリート製プラグの 変質(溶脱に伴う Ca 濃度や pH の上昇など)による緩衝材や埋め戻し材への影響や、埋め戻し 材の膨潤圧による堆積岩系岩盤における坑道周辺岩盤の長期的な力学的安定性の保持などについ て概略的な評価がなされている(核燃料サイクル開発機構,1999a,1999b)。また、安全評価に おいては、プラグや埋め戻し材などの閉鎖に関連する構成材料にはバリア機能を期待しないこと として、処分システムの評価が行われていた(核燃料サイクル開発機構,1999b)。

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

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

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

1.2本事業における研究開発、技術開発の全体フレーム

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

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

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

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



図 1.2-1 本事業の到達目標と進め方

1.3 本年度の実施概要

1.3.1 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備

(1) 坑道シーリングの設計・評価技術の整備

処分場の閉鎖後に坑道や 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 られている埋め戻し材やプラグなどのシーリングシステムについて、これら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2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構築した。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3年度は、構築したシナリオの蓋然性 を高めることを目的に、EDZ の経時変化や埋め戻し材、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進めつつ、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への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

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

埋め戻し材について、令和3年度は、令和2年度まで継続実施している緩衝材と埋め戻し材を 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、緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用 を考慮した膨潤挙動の評価手法を整備する。

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。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 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室内試験、原位置透水試験などを実施する。

また、EDZ・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2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、ボーリングによるコア採取と室内試験及び透水試験を追加実施し、岩盤中の連続性の高い割れ目の検知、グラウト注入の可否を検討するとともに、高精度化した物理探査技術の適用性確認のための試験計画を検討する。

さらに、ボアホールシーリング技術開発として、令和2年度にボーリング孔が処分場閉鎖後の 水みちとならないための閉塞技術の研究開発状況を調査し、閉塞の考え方および技術的な課題等 を抽出・整理した。令和3年度は、整理した情報に基づき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に、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の確認を実施する。

(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め戻し材の施工試験

・埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備

小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験では、瑞浪の深度 500m 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、埋め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め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、 埋め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3年度は、埋め戻し材の施工技術に応じた製造・施工プロセス管理手法の整備に向けて、 地上の模擬坑道を対象とした転圧工法と吹付け工法の組み合わせによる施工試験を実施し、埋め 戻し材の乾燥密度のばらつきや施工パラメータ(施工速度、材料ロス率等)を把握する。スクリ ュー工法及びブロック工法については、要素試験により埋め戻し材の品質に関するデータを継続 して取得するとともに、施工装置の概念設計等を実施する。これらに加え、埋め戻し材を対象と した小規模浸潤試験を実施し、浸潤プロセスの解析技術の妥当性確認に資するデータを取得する。

1.3.2 高レベル放射性廃棄物に対する人エバリアの製作・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保証プログラム及び性能確認プログラム (それぞれ必要なモニタリングを含む)の構築に向けた知見やデータ等の基盤情報を整備する。 また、上記プログラムに関連する地下構成要素の状態把握に係る技術について(無線関連技術及 び原位置での状態把握に係る計測・モニタリング技術など)、地下環境を想定した室内試験等をと おして適用性等を確認しつつ技術の高度化を進める。

令和2年度までに、地下構成要素の品質保証に関する海外情報を整理・分析することで処分シ ステムの性能評価の入力情報を抽出し、それらの情報の取得方法(室内・工学規模・原位置試験 等)を分類・整理した。令和3年度は、埋め戻し材を先行検討対象として、施工技術オプション に応じて施工品質を確保するための技術(品質保証技術)を整備する。品質保証技術の整備に当 たっては、処分事業が先行する諸外国の先行事例や一般土木分野等の知見を参照しつつ、坑道シ ーリングに関わる施工技術の整備で実施する施工試験等の結果を踏まえ、埋め戻し材の品質保証 に必要となる管理パラメータを抽出し、製造・施工プロセス管理フローを整備する。人工バリア および他の地下構成要素を対象とした品質保証技術に必要となる計測関連技術として、令和2年 度までに埋め戻し材の施工品質や膨潤に伴う圧力を対象とした計測方法として期待される光ファ イバセンサや時間領域反射率測定法(TDR)を用いた計測技術の適用性を確認するための要素試 験および共通基盤技術となる無線給電技術における給電効率の向上を目的とした要素試験等を実 施した。令和3年度は、埋め戻し材を対象とした密度および圧力ならびに坑道界面との隙間を計 測するための光ファイバセンサおよび TDR による室内模擬試験等を実施するとともに、引き続 き無線給電技術による給電効率の向上に向けた検討を実施する。 参考文献

- 核燃料サイクル開発機構,わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層 処分研究開発第2次取りまとめ-分冊2地層処分の工学技術,JNC TN1400 99-022, 1999a.
- 核燃料サイクル開発機構,わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層 処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3地層処分システムの安全評価,JNC TN1400 99-

023, 1999b.

- 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.

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、埋め戻し材やプラグ、グラウトなどなどの工 学的対策(以下、シーリングシステム)を講ずることが考えられている。NUMOは、地層処分の 長期的な安全性を確保するための基本概念である放射性廃棄物の「隔離」と「閉じ込め」を実現 するために、処分システムの構成要素が有すべき具体的な安全機能を定めている(NUMO, 2021)。 このうち、埋め戻し材や止水プラグに対しては、処分場閉鎖後にシーリング部が放射性物質の移 行経路とならないよう、「坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑 制」を安全機能として定めている(NUMO, 2021)。また、これら安全機能を確保するために処分 場の設計フローに従い、処分システムに求めるべき要件を定めることとしている(NUMO, 2021)。 したがって、埋め戻し材や止水プラグに求める安全機能が長期的に維持されるかについては、安 全機能の変化に影響を与える現象の整理やその影響度を評価することは、地層処分の長期安全性 を確保する観点から重要である。坑道およびその周辺岩盤が卓越した移行経路となりうる可能性 や、その要因となる現象については、これまでに広く研究がなされてきており(図 2.1-1)、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。

7



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 に埋め戻し材に対しては、「放射性核種の移行の制限」に関する安全機能が設定されていることか ら、本事業においてシーリングシステムに求める安全機能として、「シーリング部において移流を 抑制すること」、「シーリング部において遅延性能を有すること」を設定することとした(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、仮に埋め戻し部(坑道埋め戻し、プラグ等)やその周辺岩盤が卓越した移行経路となる可 能性を想定したシナリオを抽出した。また、坑道/立坑およびその周辺岩盤が卓越した移行経路 となることへの影響を概括的に把握するために、各シナリオが生起した場合に生じるシーリング システムおよびその周辺岩盤の状態が人工バリアから天然バリアに放射性核種が移行した時点で 生じることを仮定した条件での水理・物質移行解析を実施した。その結果、基本シナリオに加え、 抽出したシナリオが処分システムに及ぼす影響を物質移行解析等により評価した。その結果、安 全機能にこれら評価結果に基づきこれら評価結果に基づき、設計・施工および安全評価の観点か らのシーリングシステムの性能の考え方を整理した(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め戻し材やプラグの安全機能が変化する可能性のある要因と して考えられる、坑道支保工のコンクリート成分の溶出や埋め戻し材の施工の結果生じる可能性 のあるモンモリロナイトの乾燥密度の不均質性が埋め戻し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、少なくとも埋め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提示した(原子力機構・原環センター,2021)。

令和3年度は、昨年度の検討に加え、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め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め戻し材の安全機能への影 響を評価した。さらに、昨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、昨年度の同様の手法 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。

2.1.3 令和3年度の成果

(1) シーリングシステムの長期変遷に関する現象理解

シーリングシステムの長期変遷により安全機能が低下しうるシナリオを検討する上では、その シナリオを構成する諸現象の理解が不可欠であり、これはシナリオの蓋然性を評価する上でも重 要である。昨年度の検討において、坑道支保工と埋め戻し材の境界部はコンクリート溶出成分の 再沈殿や埋め戻し材との反応によって生じる二次鉱物の形成によって間隙の閉塞が進行し、閉塞 に至った後はモンモリロナイトの変質は進行せず、地下水流入箇所である上流端や、透水性の高 い割れ目交差部に限定される可能性が示唆された(原子力機構・原環センター,2021)。一方で、 コンクリート溶出成分に起因した間隙閉塞は坑道支保工と岩盤境界部でも生じる可能性があるこ とが指摘された(原子力機構・原環センター,2021)。この場合、坑道支保工と埋め戻し材境界部 と同様に、地下水流入は制限されるものの、過年度の検討(原子力機構・原環センター,2020; 2021)で実施した、シーリングシステムの安全機能が失われた場合を仮定した物質移行解析にお いて、処分システムの長期性能に対して有利に機能すると考えられた坑道や立坑から割れ目を介 して岩盤中へ核種が移行する現象が生じにくくなる可能性がある。すなわち、コンクリート溶出 成分に起因した間隙閉塞は、処分システムの長期の安全性に対しては不利に働くプロセスとなり 得る可能性がある。

上記を踏まえ、今年度は、コンクリート溶出成分に起因した間隙閉塞、埋め戻し材の変質現象 について、岩盤、坑道支保工、埋め戻し材の材料間で生じる現象・プロセスの発生要因や影響度 に関して解析的な評価を行い、シナリオを更新するための諸条件を整理した。具体的には、下記 の2つの項目について検討を行った。

- 岩盤中の割れ目分布の不均質を考慮した上で、岩盤-坑道支保工境界面を含む反応輸送解析 を実施し、コンクリート材料の変質に起因した埋め戻し材中のベントナイトの変質の影響を 評価
- 上記解析結果について詳細分析を行い、時間変遷も考慮し、埋め戻し材中のベントナイトの 変質に影響を及ぼす諸条件の整理。

(a) 岩盤-坑道支保工境界面における反応輸送解析

過年度までの反応輸送解析で示したように、埋め戻し材中の移行が拡散支配であれば、コンク リート系材料である坑道支保工とベントナイト系材料である埋め戻し材の境界部には、CSH や カルサイト等をはじめとした二次鉱物が沈殿することにより間隙が閉塞し、低拡散性の被膜が形 成される。この時、両材料間での拡散が抑制されることでベントナイトの変質が抑制されると考 えられる(原子力機構・原環センター, 2021)。従って、①低拡散性の被膜が形成されない場合、 ②低拡散性の被膜が力学的な作用によって破壊される、のいずれかの状態になることで埋め戻し 材の劣化・変質が生じると考えられる。今年度の検討では、主に上記のうち①について検討を行

うこととする。低拡散性の被膜が形成されない要因として、地下水組成や坑道周囲の材料組成(コ ンクリートやベントナイトの材質)による影響が考えられるが、本検討では地下水組成はFRHP、 コンクリートは OPC、埋め戻し材はベントナイト系材料として検討を行うこととする。また、坑 道支保工内の流速が速い場合、低拡散性の被膜を形成する二次鉱物が地下水流れによって沈殿す る前に輸送されることも考えられる。本節では、上記の要因を考慮した反応輸送解析を実施する こととする。この時、昨年度実施した坑道1本を模擬した反応輸送解析による埋め戻し材中のモ ンモリロナイトの変質評価において、その変質の発生箇所は一様ではなく、地下水流入箇所との 距離に応じて異なることが示唆されていることを踏まえると、岩盤と坑道支保工の境界部で生じ 得る反応は坑道全体に一様に発生し得るものではないと考えられる。したがって、本検討におい ても、坑道1本を模擬した反応輸送解析を実施することとした。ただし、坑道1本を対象とし、 かつ、割れ目や境界変質層等の重要な細部を表現するために必要な解像度を持った三次元反応輸 送解析を実施することは、計算負荷の問題により現実的ではない。そこで、坑道1本において着 目すべき領域を適切な体系・次元で切り出し、領域毎に行った反応輸送解析結果を統合すること により、モンモリロナイトの変質が生じる箇所の不均質性や、岩盤中の割れ目分布の不均質性を 考慮可能な解析体系を適用した。具体的には、岩盤中の割れ目分布や割れ目の透水量係数分布の 不均質性を考慮した三次元水理解析を実施し、ここで得られた解析結果を反応輸送解析のインプ ット情報として与える方法を適用した。なお、過年度の検討では基 NUMO 包括的技術報告書の 深成岩類および深堆積岩類の2岩種を基本として検討をしてきたが、本検討では割れ目頻度が相 対的に大きい深成岩類を対象とした検討を実施することとする。

(i) 三次元水理解析

本検討で表現する三次元水理解析モデルと、昨年度構築した三次元物質移行解析モデルとの整 合性を図るため、坑道周辺に発生させた割れ目の透水量係数分布と、三次元物質移行解析モデル に設定した透水量係数分布の比較検証を行った。水理解析を実施する際に使用する透水係数分布 は、クラックテンソル法により設定された各セルの透水係数テンソルを参照しているものであり、 この時点で割れ目の情報は保持していない。そのため、水理解析に入力したセルと割れ目分布の 位置関係から、各セルに対応する割れ目を紐づけて、その情報を可視化用の後処理ツールである Paraview で表示させることとした。このような操作を行い、坑道と交差する割れ目の透水量係 数のヒストグラム(図 2.1-2)から設定した透水量係数の対数平均値である 1.0×10⁻⁹ m²/s およ び対数標準偏差 2.0 と概ね整合することを確認した。

図 2.1-3 に水理解析における支保工内の流速分布を示す。個々の割れ目(本解析では 365 本) の水理特性やそれに応じた水理場を後段の反応輸送解析にすべて反映することは現実的ではない ため今回の検討では坑道 1 本に対し、流速分布が大きく変わっていると考えられる 4 つの領域 (図 2.1-3 中の破線の領域)を抽出し、領域毎に坑道への地下水流出入量を分析することとした。

4 つの領域において、坑道支保工への地下水流入もしくは流出に最も寄与する割れ目は坑道上流 側の領域Aに分布する割れ目②(透水量係数:8.61×10⁻⁶ m²/s)および坑道下流側の領Cに分布 する割れ目⑤(透水量係数:1.36×10⁻⁴ m²/s)であった。したがって、後段の反応輸送解析にお いては、割れ目②および割れ目⑤をモデル化し、岩盤と坑道支保工の反応も考慮した評価を行う こととした。



図 2.1-2 坑道に交差する割れ目の透水量係数のヒストグラム



図 2.1-3 坑道支保工内の流速分布



図 2.1-4 領域 A および C における流速分布

(ii) 反応輸送解析

水理解析結果を踏まえつつ、下記に示す方針で反応輸送解析を実施した。

- 1. 割れ目②(領域 A)、割れ目⑤(領域 C)の二つの割れ目を対象にモデル化
- 2. 坑道支保工内の地下水流動の変化の有無を分析し、必要に応じ手順1. で再度モデル化
- 3. 坑道支保工内の地下水流動およびコンクリート材料の変遷をモデル化/解析し、埋め戻し 材中のモンモリロナイトの変質を評価
- 4. 埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質シナリオをストーリーボード形式で整理

1) 解析条件

割れ目②および割れ目⑤の反応輸送モデル概念および反応輸送モデルを図 2.1-5~図 2.1-8 に 示す。図 2.1-5 に示す反応輸送モデルでは、新鮮な地下水が割れ目②を介して坑道支保工内に直 接流入することを想定した。このとき、坑道支保工内では、割れ目②から流入する新鮮な地下水 と坑道支保工上流側から流入するコンクリート成分が溶出した地下水(以下、コンクリート反応 水)との反応により二次鉱物が生成されると考えられるが、この反応は割れ目②から流入する地 下水フラックス(主に炭酸成分のフラックス)に応じて変化すると想定される。割れ目②の支保 工内の割れ目開口幅は「コンクリート標準示方書」(土木学会,2002)の鋼材の腐食に対する許容 ひび割れ幅や水密性に対する許容ひび割れ幅の値を参考に、比較的大きめの開口幅である1.0mm の範囲で設定した。また、割れ目②からの地下水流入量、2.1-3(1)(a)(i)3次元水理解析の結果から 9.15×10⁻⁵ m²/s を設定し、坑道支保工内の流量は 2.1-3(1)(a)(i)3 次元水理解析における、割れ目 ②の交差前後のダルシー流速分布から、その前後の差分として 1.00×10⁻⁸ m³/s を設定した。設定 した水理パラメータを表 2.1-1 に示す。割れ目⑤については、割れ目⑤を介して、坑道支保工内 に流れる地下水が流出することを想定した。このとき、坑道支保工内の割れ目からのコンクリー ト反応水が割れ目⑤に流出し、二次鉱物が生成する可能性が考えられる。割れ目⑤の反応輸送モ デルを図 2.1-7 に示す。ここでは、支保工内の割れ目を図示しているが、解析モデルをより単純 化するため、支保工側はモデル化せず、濃度固定のコンクリート反応水が岩盤中の割れ目(割れ 目⑤) に流入するモデルを作成した。設定した水理パラメータを表 2.1-2 に示す。



図 2.1-5 割れ目②の反応輸送モデル概念



図 2.1-6 割れ目②の反応輸送モデル

パラメータ	設定値	設定根拠
亀裂開口幅	1 mm	コンクリート標準示方書(土木学会, 2002)よ
(坑道支保工)		り、鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅や水密
		性に対する許容ひび割れ幅を基に設定。
亀裂透水量係数	$9.15 imes 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	上記開口幅より Snow (1965) の三乗則により
(坑道支保工)		計算
割れ目②からの流入量	$3.75 \times 10^{-8} \text{ m}^{3/s}$	水理解析で得られたダルシー流速の値から実流
	$1.00 \times 10^{-8} \text{ m}^{3/8}$	速を計算して導出
5000人下工1000位重	1.00 × 10 m /5	実流速は、坑道支保工(厚さ5cm)内の亀裂開
		口幅を1mmとし、支保工内の全流量が1本の
		割れ目に集中していると仮定して計算

表 2.1-1 割れ目②の水理パラメータ







図 2.1-8 割れ目⑤の反応輸送モデル

パラメータ名	値	設定根拠
割れ目⑤の開口幅	23.3 mm	割れ目⑤の透水量係数(1.36×10-4 m2/s)か ら二乗則(経験則)(核燃料サイクル機構, 1999)で設定
割れ目⑤からの流出量	8.00×10 ⁻⁹ m ³ /s	水理解析で得られたダルシー流速の値から 導出 実流速は 支保工 (厚さ5cm) 内の割れ日間
坑道支保工内の流量 (割れ目⑤からの流出量の 算出に使用)	1.10×10 ⁻⁸ m ³ /s	ロ幅を1mmとし、坑道支保工内の全流量が 1本の割れ目に集中していると仮定して計算

表 2.1-2 割れ目⑤の水理パラメータ

割れ目⑤の開口幅は核燃料サイクル機構、1999における経験式を用いて設定した。反応輸送解 析に用いる熱力学パラメータについては、最新のJAEA-TDB(原子力機構・原環センター,2020; Walker et al., 2016)を用いた。また、地下水組成については、昨年度実施した反応輸送解析の結 果を踏まえ、相対的に埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質への影響が大きい降水系の地下水 を設定(Yui et al., 1999)することとした。坑道支保工のコンクリートの組成については、普通 ポルトランドセメント(OPC)を設定し、第2次TRUレポート(電事連・核燃料サイクル機構, 2005)における値に準拠し、以下の更新を図った。すなわち、原子力機構・原環センター(2018) では、クリンカー鉱物の組成をノルム計算によって算出し、得られたクリンカー鉱物について PHREEQCで水和反応計算を行い、初期水和物量を算出している。そこで、クリンカー鉱物は表 2.1-3に示す OPC の化学成分に基づき、以下の手順で算出した。

- ▶ MgOを全てペリクレース (Periclase) に配分する
- ▶ Na₂OをTay (1987)の方法に従ってNa₂SO₄(s)に配分し、残りのNa₂OをNa₂O(s)に配分する
- ▶ K2OをTay (1987)の方法に従ってK2SO4(s)に配分し、残りのK2OをK2O(s)に配分する
- ▶ 残りのSO₃を硬石膏(Anhydrite)に配分する
- ▶ Fe2O3をC4AF(フェライト)に配分する
- ▶ 残りのAl₂O₃をC₃A(アルミネート)に配分する
- ▶ CO₂をカルサイトに配分する
▶ 残りのSiO₂をC₃S(ケイ酸三カルシウム)に配分する

▶ 残りのCaOをβ-C₂S(ビーライト(β型))に配分する

PHREEQCの計算は温度:25℃、水・セメント比:55%、クリンカー鉱物量(無水換算):0.9892 kg、密度:3.18 g/cc で実施した。算出後に得られたクリンカー鉱物の組成を表 2.1-4 に示す。

	ig. loss*	${ m SiO}_2$	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO_3	Na ₂ O	K ₂ O	CO_2
wt%	0.73	21.57	5.3	2.76	64.3	1.95	1.95	0.26	0.46	0.365

表 2.1-3 OPC の化学成分

*Ignition Loss: 強熱減量

	重量分率	体積分率	モル濃度*
	[wt%]	[vol%]	[mol/kg]
Anhydrite	2.460	2.665	0.1807
C_2S_beta	22.382	21.604	1.2995
C ₃ A	9.375	9.937	0.3470
C_3S	52.295	53.807	2.2905
C_4AF	8.399	7.224	0.1728
Calcite	0.830	0.983	0.0829
$K_2O(s)$	0.046	0.063	0.0049
$K_2SO_4(s)$	0.766	0.924	0.0440
Lime	0.000	0.000	0.0000
Na ₂ O(s)	0.143	0.185	0.0231
$Na_2SO_4(s)$	0.268	0.861	0.0189
Periclase	1.950	1.747	0.4838

表 2.1-4 クリンカー鉱物の組成

*PHREEQC input. Temp = 25 degree, w/c ratio = 0.55, anhydrous clinker mass = 0.9892 kg, density = 3.18 g/cc.

表 2.1-4 に示すクリンカー鉱物組成に基づき、PHREEQC で水和反応計算を行いセメントペーストの初期水和物濃度が算出した。コンクリート、モルタルの組成は、セメントペーストの組成と表 2.1-5 に示す配合を用いて算出した。得られた初期水和物組成を表 2.1-6 に示す。

		, .	
	単位セメント量	単位水量	細・粗骨材
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
コンクリート	300	165	1877
モルタル	483	266	1449

表 2.1-5 セメント系材料(W/C=55%)の配合

	コンクリー	· F	モルタル		セメントペ	ースト
	体積分率	モル濃度	体積分率	モル濃度	体積分率	モル濃度*
	[%]	[mol/kg]	[%]	[mol/kg]	[%]	[mol/kg]
Portlandite	4.858	1.150	7.385	1.749	15.938	3.774
CSH165	10.106	1.022	15.361	1.554	33.154	3.353
Monosulfate_Al	2.903	0.074	4.413	0.112	9.525	0.241
Monocarbonate_Al	0.845	0.025	1.285	0.038	2.773	0.083
Katoite_AlSi08	0.637	0.035	0.968	0.053	2.089	0.115
Katoite_FeSi084	1.001	0.053	1.522	0.080	3.285	0.173
Hydrotalcite_M6A	0.716	0.025	1.088	0.037	2.348	0.081
間隙率	9.415		14.312		30.888	

表 2.1-6 セメント系材料の初期水和物量(OPC)

セメントの初期間隙水組成は、表 2.1-6 に示すセメント系材料の初期水和物と Yui et al. (1999) で設定された降水系地下水との平衡計算によって算出した。表 2.1-7 にセメントペーストの初期 間隙水組成を示す。

	ペースト		
	(FRHP)		
	[mol/dm3]		
pH	13.4		
Al	2.1E-04		
С	2.1E-05		
Са	1.0E-03		
Cl	1.5E-05		
К	1.8E-01		
Mg	5.1E-11		
Na	1.6E-01		
S	1.3E-03		
Si	7.7E-05		

表 2.1-7 OPC セメントペーストの初期間隙水組成(FRHP)

坑道支保工および埋め戻し材中の初期鉱物および二次鉱物については、昨年度と同様(原子力 機構・原環センター,2021)とした。岩盤の初期鉱物組成及び二次鉱物については、NUMO包括 的技術報告書(NUMO,2021)におけるセメント影響による母岩の変質解析の深成岩類で設定し たものを用いた。岩盤の初期鉱物および二次鉱物を表 2.1-8および表 2.1-9に示す。埋め戻し材 およびコンクリート内の初期間隙水の水質および坑道支保工および埋め戻し材の実効拡散係数は 昨年度と同様(原子力機構・原環センター,2021)に設定した。各鉱物の反応速度式についても 昨年度と同様(原子力機構・原環センター,2021)とした。

	······································	
鉱物名	体積分率 [%]	反応
Albite	12	マトリクスのみ溶解
Anorthite	12	マトリクスのみ溶解
K-Feldspar	29	マトリクスのみ溶解
Muscovite	5.5	マトリクスのみ溶解
Phlogopite (Biotite)	7.5	マトリクスのみ溶解
Quartz	30	マトリクスのみ溶解沈殿
Calcite	1	全域で溶解沈殿
Tremolite	2.2	不活性
Porosity	0.8	_

表 2.1-8 深成岩類の初期鉱物組成 (NUMO、2021)

表 2.1-9 深成岩類における二次鉱物の設定

(NUMO, 2021)

鉱物群	深成岩類
ゼオライト	
C-S-H,	CSH165~CSH055, Katoite-Al,
C-A-S-H	Katoite-AlSi040, Katoite-AlSi080, C4AH13, C4AH19
その他	Calcite

2) 解析ケース

坑道支保工内を含む割れ目内で生じる二次鉱物の沈殿は各鉱物の反応速度に依存するとともに、 昨年度の検討を踏まえると地下水の流速(例えば、移流支配か拡散支配か等)にも依存すると考 えられる。このうち、コンクリート成分に起因した CSH やカルサイト等の鉱物生成に関する検 討事例は多い(例えば、電事連・核燃料サイクル機構,2005;原子力機構,2016等)。そこで、本 検討では、地下水の流速を指標とした感度解析を合わせて実施することとした。レファレンスと なるケース0では、前述のように三次元水理解析の結果から地下水流入出量をするが、これが変 化した場合の影響も評価するため、地下水流流出量を変化されたケースを設定した。解析ケース を表 2.1-10 に示す。

	ケース名	割れ目②からの流入量	坑道支保工内の流量
		[m ³ /s]	[m ³ /s]
割れ目②	Case1-0 (レファレンス)	$3.75 imes 10^{-8}$	
	Case1-1	$3.75\! imes\!10^{ ext{}10}$	
	Case1-2	$3.75 imes 10^{-9}$	$1.00 imes 10^{-8}$
	Case1-3	$3.75 imes 10^{.7}$	
	Case1-4	$3.75 imes 10^{-6}$	
割れ目⑤	Case2-0 (レファレンス)	$8.00 imes 10^{-9}$	
	Case2-1	$8.00 imes 10^{-11}$]
	Case2-2	$8.00 imes 10^{-10}$	
	Case2-3	8.00×10 ⁻⁸	
	Case2-4	8.00×10^{-7}	

表 2.1-10 解析ケース

3) 解析結果

a) レファレンスケース (Case1-0)

坑道支保工割れ目内及びマトリクス部(表層の第一マトリクス及び、表層から最も遠い第三マ トリクス部)の鉱物組成を図 2.1-9、図 2.1-10 および図 2.1-11 に示す。割れ目内は主に CSH が 二次鉱物として沈殿しており、解析初期(0.01 年後)で既に最上流部が閉塞しており(図 2.1-9)、 1年後には割れ目内の地下水流入部から1mまでが閉塞する結果となった。マトリクス部につい ても同様の時間スケールで鉱物組成を示したが、1 年経過時点では間隙率の大きな変化はない。 マトリクス部の深さ方向は表層部の厚さを1cmとし、3セルに分割しているが、最も割れ目に近 いセルはポルトランダイトが溶解し、また初期水和物として設定していた。CSH165が CSH145 や CSH135 などの低 Ca/Si 比の CSH に置き換わっていた。これらはいずれも Ca が下流側で溶 脱し、また地下水側から Si が供給されていることを示唆している。一方で、解析初期で、Ca/Si 比が異なる CSH が同時に沈殿している。通常、液相側の Ca/Si 比に応じて生成する CSH の Cs/Si 比が異なると考えられるが、坑道支保工割れ目の上流側は一定の水質の地下水が流れると考えら れるため、本来は単一の CSH が生成すると推定される。今回の反応輸送解析では、解析結果の 安定性向上のため、各鉱物の単位面積当たりの反応速度を一律1 mol/(m2・y)に設定しているも のの、この値が小さく、異なる Ca/Si 比の複数の CSH 鉱物の反応速度が上限に達してしまった ため、同一時間断面で複数の Ca/Si 比を有する CSH 鉱物が沈殿したものと想定される。この点 については、上述した単位面積当たりの反応速度の設定値を変更することにより、改善する可能 性があるが、CSH の沈殿の有無そのものに影響を与えるものではないため、間隙が二次鉱物によ って閉塞するという結果そのものを変えるものではないと考えられる。割れ目内の pH 変遷を図 2.1-12 に示す。解析初期(0.01 年~0.1 年)で pH の低下が生じているのは、流入した地下水と 坑道支保工からの供給されるセメント成分が反応しているためと考えられる。







図 2.1-10 坑道支保工第一マトリクス部鉱物組成変遷



図 2.1-11 坑道支保工第三マトリクス部鉱物組成変遷



図 2.1-12 坑道支保工割れ目内の pH 分布

b) 地下水流入量変更ケース(Case1-1~Case1-4)

レファレンスケース(Case1-0)では坑道支保工割れ目内に CSH をはじめとした二次鉱物が析 出し、少なくとも地下水流入箇所から1mまでは割れ目が閉塞するという結果になった。本解析 では割れ目内の間隙率が0となった状態でも地下水が流れる設定となっているが、割れ目内の実 流速が変化する場合、二次鉱物の生成反応速度によっては、沈殿するより早く地下水流れによっ てそのソースとなるコンクリート溶脱成分や岩盤からのSi成分が流される可能性があり、結果 として二次鉱物が沈殿せず、間隙閉塞が生じない可能性が考えられる。そこで、地下水流入量変 更ケースでは、坑道支保工割れ目への地下水流入量を変化させた解析を実施した。図2.1-13に 4ケースにおける最上流部および再下流部の間隙率の時間変化を示す。地下水流入量がレファレ ンスケースより2桁大きい、Case1-4では他のケースより間隙閉塞が遅れているものの、いずれ も1年以内で1m下流までの割れ目セルの間隙が閉塞するという結果になった。以上より、坑道 支保工の材料として OPC を想定し、開口幅1mmの割れ目(坑道支保工内)に降水系地下水 (FRHP)が流入する場合、比較的早期に地下水流入部が閉塞することが確認できた。



図 2.1-13 坑道支保工内割れ目の最上流部(左図)および再下流部(右図)の間隙率変化

c) レファレンスケース (Case2-0)

岩盤割れ目内の鉱物組成を図 2.1-14 に示す。Case1-0 と同様に、岩盤割れ目内は主に CSH が 二次鉱物として沈殿しており、0.01 年時には既に最上流部が閉塞していることがわかり、1 年後 には岩盤割れ目内が完全に閉塞した。また、岩盤マトリクスについても、Case1-0 と同様に1年 経過時点では間隙率に大きな変化はなく、初期の鉱物組成からの変化もほとんどなかった。なお、 解析初期で異なる Ca/Si 比をもつ CSH が上流側から不連続に分布しているのは、レファレンス ケース (Case-1-0) で記載した理由と同様である。

岩盤割れ目内の pH 分布を図 2.1-11 に示す。Case1-0 と異なり、初期から1 年後にかけて pH が上昇する結果となった。





d) 地下水流出量変更ケース(Case2-1~Case2-4)

上述のように、Case2-0 では岩盤割れ目内に CSH をはじめとした二次鉱物が析出し、1 年以内 に少なくとも 1 m まで割れ目が閉塞するという結果になった。前述の地下水流入量変更ケースと 同様に、地下水流出量を変更した解析を 4 ケース実施した。図 2.1-16 に各ケースにおける岩盤 割れ目への流入点から下流側 1 m までの割れ目閉塞までにかかる時間の比較を示す。Case1 の場 合と異なり、流量の依存性が確認された。地下水流出量がレファレンスケース (Case2-0) よりも 2 桁小さい Case2-1 では 60 年程度、1 桁小さい Case2-2 では 6 年程度、流出量がレファレンス ケースより大きい Case2-3 と Case2-4 では 0.1 年以内に閉塞している。すなわち、流出量が小さ いほど岩盤割れ目の最上流部における間隙閉塞に時間を要する傾向が確認された。なお、坑道支 保工直近のセル (厚さ 1 cm) においてはいずれのケースでも非常に早期に割れ目が閉塞する結果 となった。以上のように、反応輸送解析の結果、深成岩を想定した開口幅が約 2 cm の岩盤割れ 目 (地下水は FRHP) に OPC と反応したセメント反応水を流入させた場合、最上流部では非常 に早期に割れが閉塞するものの、1 m 下流部での閉塞時期はセメント反応水の流入量に依存する という結果が得られた。Case1 より流入量の依存性が大きい理由は、Case1 の支保工割れ目より Case2 の岩盤割れ目の方が、開口幅が 20 倍程度大きく、閉塞までに必要な二次鉱物の量が大き いためと考えられる。



図 2.1-16 岩盤割れ目の最上流部(左図)および再下流部(右図)の間隙率変化

e) 地下水流出入部における反応輸送解析のまとめ

Case1 の結果から、地下水が坑道支保工に流入する部分では比較的早期に割れ目(割れ目②) が閉塞すると考えられ、この段階で地下水流出部の閉塞の有無に関係なく坑道支保工内の地下水 流量は低下すると考えられる。一方、地下水流出部の割れ目(割れ目⑤)の閉塞時間は割れ目内 の流量に依存すると考えられ、先行して地下水流入部が閉塞し、坑道支保工内の地下水流量が低 下した場合、地下水流出部の割れ目の閉塞に要する時間は地下水流入部と比較して相対的に長い 可能性がある。

(b) 坑道支保工の地下水流動を反映した埋め戻し材の変質評価

先の検討において坑道支保工割れ目への地下水流入部及び岩盤割れ目へのコンクリート反応水 流出部における反応輸送解析を実施した結果、坑道支保工の割れ目は特に上流部で非常に早期に 閉塞し、地下水流出部の閉塞の有無に関係なく坑道支保工内の流量は低下すると考えられる。し たがって、埋め戻し材中のベントナイトの変質の影響評価にあたっては、坑道支保工内を高透水 性とならない想定で解析を実施することとした。

(i) 三次元水理解析

1) 解析条件

三次元水理解析は 2.1.3(1)(a)(i)三次元水理解析と同様に実施し、坑道支保工の透水係数を 1.0 ×10⁻⁷ m/s であるとし、埋め戻し材、EDZ、止水プラグ、緩衝材、廃棄体については昨年度の三 次元水理解析と同様の透水係数(原子力機構・原環センター, 2021)を設定した。

2) 解析結果

坑道支保工を低透水性と仮定した場合の水理解析結果と任意線上の地下水流速分布を図 2.1-17に示す。坑道支保工内の地下水流速分布には幅があるものの、概ね 1.0×10⁻⁹~10⁻⁷ m/s の 範囲で分布していることがわかる。そのため、後述の反応輸送解析においては、坑道支保工内の 流速をこの幅で変化させ、埋め戻し材の変質に与える影響を評価することとした。





(ii) 反応輸送解析

1) 解析モデル

数値計算負荷を低減するために、坑道を模した円筒状ではなく、図 2.1-18 に示すような準二 次元モデルを構築した。坑道支保工の厚さは NUMO 包括的技術報告書(NUMO, 2021)の深成 岩類における設定値(5 cm)、埋め戻し材の厚さは 1 m とした。





2) 解析ケース

設定した解析ケースを表 2.1-11 に示す。Case3-1, 3-2, 3-3 は Case1 および Case2 と同様に坑 道支保工内の流速の影響を評価するために設定したケースであり坑道長を 10 m に制限すること とした。Case3-4 は先の三次元水理解析とスケールをそろえるため坑道長を 200 mに設定した。

	坑道支保工内流速 [m/s]	坑道長 [m]
Case3-1	$1.0 imes 10^{-9}$	10
Case3-2	1.0×10^{-8}	10
Case3-3	$1.0 imes 10^{-7}$	10
Case3-4	1.0×10^{-8}	200

表 2.1-11 解析ケース

3) 解析結果

a) Case3-1

1,000年後までのpH、モンモリロナイト残存率、間隙率の変化をそれぞれ図 2.1-19、図 2.1-20、 および図 2.1-21 に示す。pH については、10年~100年の間はポルトランダイトが溶解し,平衡 となる液相のpH が 12.5程度となる、いわゆる RegionII の領域にあることがわかる。その後、 1,000年にかけてポルトランダイトが溶解し、CSHの溶解や変質が生じつつpH が地下水程度ま で低下する。ただし、1,000年後でもpH が低下する領域は上流側の1m程度であり、それより 下流の部分はまだポルトランダイトが残存している。モンモリロナイトは、坑道支保工境界部に 近いほど、また下流側ほど残存率が低下しているが、1,000年の時点では全領域で初期の半分以 上が残存している。残存率が70%を下回るのは下流側の坑道支保工境界部数 cm程度の領域に限 られている。間隙率については、図 2.1-21において坑道支保工の上流側から(ポルトランダイト の溶解に対応して)間隙率が低下していることがわかるが、これだけでは境界部の二次鉱物生成 による間隙率変化がわかりにくいため、坑道支保工境界部セルの間隙率分布の変化を図 2.1-22示 す。100年以降、数十 cmより下流の領域では間隙率が解析上の下限値として設定した 1%に達し ているが、それより上流では下限値には至っていない。ただし、1,000 年では最上流部において も 1%となっており、地下水との反応による二次鉱物の生成によって間隙閉塞にむかっているも のと考えられる。



図 2.1-20 Case3-1:モンモリロナイト残存率の変遷



図 2.1-21 Case3-1:間隙率の変遷



図 2.1-22 坑道支保工境界部の間隙率の変化(Case3-1)

b) Case3-2

1,000 年後までの pH、モンモリロナイト残存率、間隙率の変化をそれぞれ図 2.1-23、図 2.1-24 および図 2.1-25 に示す。

まず pH については、100 年時の状態が Case3-1 の 1,000 年時点の状態に近く、上流側から地 下水程度まで pH が低下した領域が拡がりつつあることがわかる。その後上流側からこの領域が 順当に拡がり、1,000 年後に RegionII 相当の pH になっているのは下流側半分程度の領域であ る。坑道支保工内の流量が大きくなったことによって pH の低下(すなわち、セメント成分の溶 脱)領域が大きくなっていることがわかる。

モンモリロナイトは、100年後までは Case3-1 とあまり変わらない。1,000年後もそれほど大 きな違いはないが、下流側の坑道支保工境界部以外に、上流側の支保工境界部も僅かに残存率が 低下していることが見て取れる。これは、後述するようにこの領域では境界部の間隙率が低下し きっておらず、地下水の成分が拡散で埋め戻し材領域に移行することでモンモリロナイトが溶解 しているものと考えられる。地下水とベントナイト系材料の反応でモンモリロナイトが溶解する 可能性については、モンモリロナイトの変質挙動を評価する上で重要であるものの少なくとも、 1,000年までの解析では初期のモンモリロナイトは大部分が残存している。

間隙率については、図 2.1-26 に示すように、Case3-1 よりも上流側の 1%より間隙率の大きい 領域が増えていることがわかる。また、坑道支保工全体の間隙率も Case3-1 より増加しており、 pH の変化と合わせ、坑道支保工内の流速を大きくしたことで溶脱が早く進んでいることがわか る。



図 2.1-23 Case3-2: pHの変遷



図 2.1-24 Case3-2:モンモリロナイト残存率の変遷



図 2.1-25 Case3-2:間隙率の変遷



図 2.1-26 坑道支保工境界部の間隙率の変化(Case3-2)

c) Case3-3

200年後までのpH、モンモリロナイト残存率、間隙率の変化をそれぞれ図 2.1-27、図 2.1-28 および図 2.1-29 に示す。pH については、Case3-3 の 100 年後の状態が Case3-2 の 1,000 年時 点の状態に近く、Case3-1, 3-2 と比較してさらに下流域まで pH が低下する領域が拡がっている ことがわかる。モンモリロナイト残存率については、若干の減少傾向が見られるものの、200 年 後までの解析ではほとんど残存する結果となった。間隙率については、図 2.1-30 に示すように、 Case3-1 や Case3-2 よりも 1%より間隙率の大きい領域が増えており、再下流部のセルだけで 1% に達しているのみである。また、坑道支保工全体の間隙率も Case3-1 より増加しており、坑道支 保工内の流速を大きくしたことで溶脱の進行が速くなっていることがわかる。



図 2.1-28 Case3-3:モンモリロナイト残存率の変遷







図 2.1-30 坑道支保工境界部の間隙率の変化(Case3-3)

d) Case3-4

本ケースは坑道支保工内の流速は Case3-2 と同様であるが、坑道の長さを 200 m としたケー スである。pH、モンモリロナイト残存率、間隙率の変化を図 2.1-31、図 2.1-32 および図 2.1-33 に示す。坑道が長くなることにより、同じ流速の Case3-2 では、例えば坑道支保工の高 pH 部分 は坑道最上流から 5 m 程度の範囲で影響をおよぼしていたが、Case3-4 ではこれより下流部のセ メント成分が残存していることがわかる。モンモリロナイトの溶解も、セメント影響が長く続く 下流の方がやや進展しているが、全体としては 1,000 年時点ではあまり変質が進んでいないこと がわかる。



図 2.1-32 Case3-4:モンモリロナイト残存率の変遷



図 2.1-33 Case3-4:間隙率の変遷

(c) 埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質に及ぼす諸条件の整理

過年度に実施した反応輸送解析結果を含め、埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質に影響を 及ぼす諸条件を整理する。整理にあたっては埋め戻し材周囲の主要な構成要素である岩盤および 坑道支保工に分け、それぞれの影響について水理、地球化学、力学の観点で分類して記載を行っ た。また、埋め戻し材への影響の様式は坑道支保工の存在やコンクリート成分の溶脱の有無や程 度によって変化すると考えられるため、このような状態の違いについても分けて記載することと した。岩盤、坑道支保工それぞれについて、表 2.1-12 および表 2.1-13 に示す。

-	埋め戻し材への影響の有無	関連する本検討の成果
水理	● 坑道支保工の存在を仮定する場合、岩盤の地下水流	Case1, Case2
	動場が直接埋め戻し材の変質に影響する可能性は	
	小さい。岩盤割れ目と坑道支保工が交差する場合、	
	坑道支保工への地下水流入部や坑道支保工からの	
	地下水流出部においてCSHをはじめとした二次鉱	
	物が生成することにより間隙や割れ目が閉塞し、支	
	保工内の地下水流れを抑制する。	
	● 坑道支保工が存在しない場合やコンクリート成分	検討していない
	が溶脱しきった後は、岩盤からの地下水流入もしく	
	は岩盤への地下水流出量など応じて埋め戻し材中	
	のモンモリロナイトの変質に影響を及ぼす可能性	
	がある。	
地球化学	● 坑道支保工にコンクリート成分が残存する場合、岩	Case3
	盤の地下水水質は基本的には坑道支保工と反応し、	
	平衡状態に達するため、地下水水質そのものが直接	
	影響することはないと考えられる	
	● 坑道支保工のコンクリート成分が存在しない場合、	昨年度円筒座標系予察
	地下水が直接埋め戻し材に流入することが考えら	解析 (原子力機構·原環
	れるが、基本的には地下水の組成で埋め戻し材が大	センター, 2021)
	きく変質することはないと考えられる(ただし、ゼ	
	オライト系鉱物等、反応輸送解析の入力条件である	
	二次鉱物の設定次第で埋め戻し材中のモンモリロ	
	ナイトが変質する可能性もある)	
力学	● 岩盤クリープや地震動等で坑道支保工や埋め戻し	検討していない
	材が変形することが考えられる。坑道支保工につい	
	てはひび割れ形成、埋め戻し材の場合は間隙の形成	
	により高透水性となることが考えられる。	

表 2.1-12 岩盤の影響因子

	埋め戻し材への影響の有無	関連すろ本検討の成果
水理	● 坊道支保工のコンクリート成分が変脱しきろ前け	Cases
	6 が道文保工のニックク 「成分が福加しとも前は、 「「道支保工内の水理場の状態が埋め豆」材との音	Caseo
	現道文体工作の赤柱物の状態が生め戻し物との発	
	小前にわりる二人動初化殿に起因りる低加取性の	
	被朕の形成に影響りる。 現道又休工にいい割れが光 生した損人は地工セレの日本によって開催する可	
	生しに場合は地下水との反応によって闭塞する可	
	能性が高いか、主に拡散文配で地下水が流れる場合	
	は、セメント溶脱と被膜の形成が同時に進行するこ	
	とが考えられる。それぞれの進行の程度は流速によ	
	って変化する。	
	● 坑道支保工のコンクリート成分が溶脱しきった後	昨年度上部空隙を想定
	は、坑道支保工が高透水性となり、二次鉱物沈殿に	した解析(原子力機構・
	起因する低拡散性の被膜も形成しにくいと考えら	原環センター, 2021)
	れる。埋め戻し材と坑道支保工の境界部がモンモリ	
	リロナイトの変質によって部分的にでも高透水性	
	になっている場合、高透水性部分に地下水が流入	
	し、モンモリロナイトの変質が進行する可能性が考	
	えられる。	
地球化学	● 坑道支保工のコンクリート成分が残存する場合、コ	昨年度 OPC と HFSC
	ンクリート成分が直接埋め戻し材中のモンモリロ	の比較解析(原子力機
	ナイトの変質に影響する可能性がある。OPCの場合	構・原環センター,
	は坑道支保工と埋め戻し材境界部に二次鉱物沈殿	2021)
	が生じて間隙が閉塞する可能性があるものの低ア	
	ルカリ性セメントであるHFSCの場合上記の間隙閉	
	寒が生じず、モンモリロナイトが変質しやすい可能	
	性がある。	
	● 坑道支保工のコンクリート成分が残存しない場合、	
	影響はない	
力学	● 特になし	

表 2.1-13 坑道支保工の影響因子

(2) シーリングシステムの劣化を想定したシナリオの具体化

- ①前項の検討結果を踏まえ、シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼし得るシナリオの要因の一つとして考えられる、コンクリート成分の溶出に起因した埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質に至るプロセスおよび状態設定を細分化しシナリオとして再記述した。本シナリオに関連するプロセスや状態は表 2.1・12 および表 2.1・13 に示したように、岩盤や坑道支保工における水理、力学、地球化学的現象が相互に関係し合うことから、想定し得るこれらの因子を網羅的に整理した後に、過年度実施した反応輸送解析結果や(1)(a)(ii)節で実施した反応輸送解析結果に基づき、整理した因子が生じ得るかを分析することで、細分化されたシナリオとして整理した。また、反応輸送解析におけるモンモリロナイトの変質の程度や時間変遷も考慮しつつ、シナリオと埋め戻し材中の核種移行挙動との関連性についても併せて評価を行う。具体的には以下の手順で検討を進めた。想定されるシーリングシステムの現象・状態変遷を整理する。
- ②上記の変遷を関連する反応輸送解析の結果と合わせて整理し、シーリングシステムの安全機 能が変化するようなシナリオを抽出する。
- ③上記の変遷シナリオと核種移行挙動との関連性を整理する。

(a) 坑道支保工と埋め戻し材の状態整理

(i) コンクリート影響による劣化シナリオ

コンクリート影響による劣化シナリオでは、坑道支保工と埋め戻し材の状態により、表 2.1-14 で示す6つの状態が考えられる。すなわち、坑道支保工については健全、ひび割れによる高透水 な状態、セメント溶脱による高透水な状態の3つの状態、埋め戻し材については健全、コンクリ ート影響による劣化の2つの状態である。上記の6つの状態を概念的に示したのものが図 2.1-34 である。さらに、これら状態間の遷移を、表 2.1-15 で示した考え方に従いまとめたものが図 2.1-35 である。表 2.1-16 では、 左列の 状態から 上行の 状態に 遷移 する 場合、 2 つの 状態間の 遷移 があるかどうか、ある場合はどのような遷移が想定されるかをまとめている。表 2.1-16 では、あ くまでも2つの状態間の遷移のみを考えており、例えば1-Aの状態(坑道支保工も埋め戻し材も 健全な状態)から 2-B の状態(埋め戻し材の変質と坑道支保工のひび割れを想定)に遷移する場 合には、まず支保工のひび割れか、埋め戻し材の変質のうちどちらか1つだけが生じるものと考 えて整理している。図 2.1-35 では埋め戻し材が変質に至るためには状態 1-B (坑道支保工のひび 割れの発生)もしくは状態 1-C(坑道支保工のセメント溶脱による)を経由する必要があり、坑 道支保工が健全な場合は埋め戻し材の変質は抑制されることを示している。これは、昨年度実施 した円筒座標系軸対称な系における解析のうち、支保工が拡散場である場合、埋め戻し材と坑道 支保工境界及び坑道支保工に FRHP の地下水が接する境界に二次鉱物が沈殿(カルサイト及び C-S-H ゲル)し、埋め戻し材の変質が抑制されるという結果(原子力機構・原環センター,2021) と坑道支保工が移流場である場合コンクリート溶脱成分が地下水によって流され、コンクリート 支保工と埋め戻し材境界の坑道支保工側及び坑道支保工と岩盤境界の閉塞が生じないため、埋め 戻し材の変質が抑制されない(原子力機構・原環センター, 2021)という結果に基づいている。

		坑道支保工		
		健全(低透水の状態、ひび割れ発生後に	劣化(ひび割れの発生による高透水性の	劣化(コンクリート成分の溶脱による高
	-	閉塞した場合も含む)	状態を想定)	透水性の状態を想定)
埋め	健全	(状態 1-A):初期状態として想定可能	(状態 1-B):初期状態として想定可能	(状態 1-C)
反反		 ● 支保工・埋め戻し材全体が拡散場を 	 ■ 埋め戻し材が健全で坑道支保工内 	● 埋め戻し材が健全で坑道支保工内
しせ		継続する場合	にひび割れが発生して高透水性と	がコンクリート成分の溶脱により
123		● 境界部における二次鉱物の沈殿に	なる場合	高透水性となる場合
		伴って発生する間隙閉塞により、埋	 ● 境界部の間隙閉塞の有無により埋 	● コンクリート成分が溶脱している
		め戻し材へのコンクリート影響は	め戻し材へのコンクリート影響が	ため埋め戻し材への影響はなし
		抑制される	変化	
	コンクリ	(状態 2-A)	(状態 2-B)	(状態 2-C)
	ート影響	● コンクリート影響で埋め戻し材が	● コンクリート影響で埋め戻し材が	● コンクリート影響で埋め戻し材が
	による劣	変質するが、支保工内の割れ目閉塞	変質し、坑道支保工内の割れ目が閉	変質し、坑道支保工内のコンクリー
	化	等で低透水性に戻った場合	塞しなかった場合、または再開口し	ト成分が溶脱した場合
		● 境界部の間隙閉塞の有無により埋	た場合	● コンクリート成分が溶脱している
		め戻し材へのセメント影響が変化	 ● 境界部の間隙閉塞の有無により埋 	ため埋め戻し材への影響はなし
		 ● 埋め戻し材劣化部への地下水流入 	め戻し材へのコンクリート影響が	 ● 埋め戻し材劣化部への地下水流入
		の影響も考慮する必要あり	変化	の影響も考慮する必要あり
			● 埋め戻し材劣化部への地下水流入	
			の影響も考慮する必要あり	

表 2.1-14 坑道支保工と埋め戻し材の状態(コンクリート影響による劣化シナリオ)



図 2.1-34 コンクリート影響による劣化シナリオで考えられる状態



図 2.1-35 コンクリート影響による劣化シナリオの状態遷移

表 2.1-15 セメント影響による劣化シナリオにおける 2 つの状態間の遷移の考え方

	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C
1-A	-	力学的要因による	支保工内のセメン	想定しない	想定しない	想定しない
		ひび割れ発生	ト成分の溶脱・流出	(1 - B か 1 - C を経	(1 - B か 1 - C を経	(1 - B か 1 - C を経
			(埋め戻し材未変	由)	由)	由)
			質)			
1-B	地下水とセメント	-	支保工内のセメン	想定しない	ひび割れ未閉塞の	想定しない
	成分の反応による		ト成分の溶脱・流出	(2 - B を経由)	まま	(2-A か 2-B を経
	ひび割れ閉塞		(埋め戻し材未変		埋め戻し材変質	由)
	(埋め戻し材未変		質)			
	質)					
1-C	想定しない	力学的要因による	-	想定しない	想定しない	埋め戻し材変質
	(溶脱支保工の健	ひび割れ発生		(溶脱支保工の健	(1 - B か 2-C を経	
	全化はあり得ない)			全化はあり得ない)	由)	
2-A	想定しない	想定しない	想定しない	-	力学的要因による	支保工内のセメン
	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健		ひび割れ発生	ト成分の溶脱・流出
	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)			
2-B	想定しない	想定しない	想定しない	地下水とセメント	-	支保工内のセメン
	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	成分の反応による		ト成分の溶脱・流出
	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	ひび割れ閉塞		
2-C	想定しない	想定しない	想定しない	想定しない	力学的要因による	-
	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	(溶脱支保工の健	ひび割れ発生	
	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)		

(ii) 上部空隙発生を想定したシナリオ

上部空隙を想定したシナリオについても、セメント影響による劣化シナリオと同様の整理を行った。表 2.1-16 に坑道支保工と埋め戻し材の状態、図 2.1-36 に各状態の概念図、図 2.1-37 に 状態変遷図、表 2.1-17 に 2 状態間の遷移の考え方を示す。コンクリート影響による劣化シナリ オと異なるのは、初期の 3-A の状態(埋め戻し材上部空隙のみが高透水性になる)からでも埋め 戻し材が変質する状態に遷移できる点である。これは、埋め戻し材と坑道支保工の間に移流が発 生する場合、埋め戻し材の変質を抑制するために必要な間隙閉塞が生じないと考えられるためで ある。

		坑道支保工		
		健全(低透水の状態、ひび割れ発生後に 閉塞した場合も含む)	劣化(ひび割れの発生による高透水性の 状態を想定)	劣化(セメント溶脱による高透水性の状 能を想定)
 埋め戻し材	上部空隙 発生	 (状態 3-A):初期状態として想定可能 埋め戻し材上部空隙のみが高透水 性になる場合 境界部の間隙閉塞の有無により埋 め戻し材へのコンクリート影響が 変化 埋め戻し材上部空隙への地下水流 入の影響も考慮する必要あり 	 (状態 3-B):初期状態として想定可能 埋め戻し材が健全で坑道支保工内 (ひび割れ)と埋め戻し材上部空隙 が高透水性となる場合 境界部の間隙閉塞の有無により埋 め戻し材へのコンクリート影響が 変化 埋め戻し材上部空隙への地下水流 	 しまでにた) (状態 3·C) 埋め戻し材が健全で坑道支保工内 (セメント溶脱)と埋め戻し材上部 空隙が高透水性となる場合 コンクリート成分が溶脱している ため埋め戻し材への影響はなし 埋め戻し材上部空隙への地下水流 入の影響も考慮する必要あり
			人の影響も考慮する必要あり	
	上部空隙	(状態 4-A)	(状態 4-B)	(状態 4-C)
	発生	● 埋め戻し材上部空隙と埋め戻し材	● 支保工内(ひび割れ)と埋め戻し材	● 坑道支保工内(コンクリート成分の
	+	劣化部が高透水性になる場合	上部空隙・埋め戻し材劣化部が高透	溶脱)と埋め戻し材上部空隙・埋め
	コンクリ	 ● 境界部の間隙閉塞の有無により埋 	水性になる場合	戻し材劣化部が高透水性になる場
	ート影響	め戻し材へのコンクリート影響が	 ● 境界部の間隙閉塞の有無により埋 	合
	による劣	変化	め戻し材へのコンクリート影響が	● コンクリート成分が溶脱している
	化	● 埋め戻し材上部空隙及び劣化部へ	変化	ため埋め戻し材への影響はなし
		の地下水流入の影響も考慮する必	● 埋め戻し材上部空隙及び劣化部へ	● 埋め戻し材上部空隙及び劣化部へ
		要あり	の地下水流入の影響も考慮する必	の地下水流入の影響も考慮する必
			要あり	要あり

表 2.1-16 坑道支保工と埋め戻し材の状態(上部空隙発生を想定したシナリオ)



図 2.1-36 上部空隙発生を想定したシナリオで考えられる状態



図 2.1-37 上部空隙発生を想定したシナリオにおける状態遷移

	3-A	3-B	3-C	4-A	4-B	4-C
3-A	-	力学的要因による	支保工内のセメン	埋め戻し材変質	想定しない	想定しない
		ひび割れ発生	ト成分の溶脱・流出		(1-B か 1-C を経	(1-B か 1-C を経
			(埋め戻し材未変		由)	由)
			質)			
3-B	地下水とセメント	-	支保工内のセメン	想定しない	ひび割れ未閉塞の	想定しない
	成分の反応による		ト成分の溶脱・流出	(2 - B を経由)	まま	(2-A か 2-B を経
	ひび割れ閉塞		(埋め戻し材未変		埋め戻し材変質	由)
	(埋め戻し材未変		質)			
	質)					
3-C	想定しない	力学的要因による	-	想定しない	想定しない	埋め戻し材変質
	(溶脱支保工の健	ひび割れ発生		(溶脱支保工の健	(1-B か 2-C を経	
	全化はあり得ない)			全化はあり得ない)	由)	
4-A	想定しない	想定しない	想定しない	-	力学的要因による	支保工内のセメン
	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健		ひび割れ発生	ト成分の溶脱・流出
	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)			
4-B	想定しない	想定しない	想定しない	地下水とセメント	-	支保工内のセメン
	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	成分の反応による		ト成分の溶脱・流出
	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	ひび割れ閉塞		
4-C	想定しない	想定しない	想定しない	想定しない	力学的要因による	-
	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	(埋め戻し材の健	(溶脱支保工の健	ひび割れ発生	
	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)	全化はあり得ない)		

表 2.1-17 上部空隙発生を想定したシナリオにおける2状態間の遷移の考え方 (左列の状態から上行の状態に遷移することを想定した場合)

(b) 埋め戻し材の劣化に至るシナリオの整理

(i) コンクリート溶脱成分による埋め戻し材劣化シナリオ

2.1.3(3)(a)で実施した反応輸送解析から、坑道支保工のひび割れが生じても、地下水との反応 によりひび割れが早期(1年以内)に閉塞する可能性があることから(例えば、図 2.1-9)、ひび 割れにより坑道支保工が高透水性の状態なることは生起しにくいと考えられる。坑道支保工の透 水性が上昇する要因としてはコンクリート成分の溶脱が考えられるため、この現象に起因して埋 め戻し材が変質するシナリオが考えられる。本シナリオの状態変遷を図 2.1-38 に示す。



図 2.1-38 コンクリート成分の溶脱による埋め戻し材劣化シナリオ (シナリオ A)

(ii) ひび割れの断続的発生による埋め戻し材劣化シナリオ

2.1.3(3)(a)で実施した反応輸送解析では力学的な影響を考慮できていない。例えば、地震動な どの外的要因によって坑道支保工が断続的にひび割れを起こす場合を想定すると、結果として坑 道支保工内が低透水性になりにくいと考えられる。この場合は図 2.1-39 に示すシナリオが想定 可能である。



図 2.1-39 ひび割れの断続的発生による埋め戻し材劣化シナリオ (シナリオ B)

(iii) 上部空隙発生による埋め戻し材劣化シナリオ

原子力機構・原環センター(2021)で実施した反応輸送解析から、埋め戻し材の上部に空隙が 存在することを想定した場合、埋め戻し材が変質することが示唆されている。このシナリオは図 2.1-40のように示される。



図 2.1-40 上部空隙発生による埋め戻し材劣化シナリオ (シナリオ C)

(c) 各シナリオの生起可能性や核種移行への影響度の分析

(i) 埋め戻し材変質への影響

シナリオA(コンクリート成分の溶脱による埋め戻し材劣化シナリオ)は、コンクリート成分 の溶脱がある程度起こった後に坑道支保工の透水性が上昇し、その後埋め戻し材が変質するシナ リオである。対して、シナリオB(ひび割れの断続的発生による埋め戻し材劣化シナリオ)では、 坑道支保工が化学的に変質(コンクリート成分の溶脱に起因した二次鉱物の生成)する前にひび 割れ発生によって高透水性となる可能性があり、その場合シナリオAに比べて埋め戻し材の変質 の程度は相対的に大きくなると考えられる。シナリオC(上部空隙発生による埋め戻し材劣化シ ナリオ)についても、シナリオBと同様、コンクリート成分が溶脱する前にコンクリート反応水 が上部空隙を介して埋め戻し材の変質を引き起こす可能性があるため、シナリオAと比べて相対 的に埋め戻し材変質への影響度は大きいと思われる。

(ii) 核種移行への影響

各シナリオが仮に生起しシーリングシステムが劣化した場合の核種移行への影響は、核種が岩 盤に移行しやすいかどうかという観点で比較することが可能である。すなわち、シーリングシス テムが劣化している状態で核種が岩盤に移行しにくい場合は坑道内が核種の主要な移行経路とな り、安全評価上顕著な影響が発現する可能性がある。各シナリオを比較すると以下のことが考え られる。

- シナリオA…埋め戻し材変質が生じるのはセメントが溶脱した後である。この時には核種の 岩盤への移行を阻害する要因として挙げられるのは、地下水流出側の坑道支保工と岩盤割れ 目交差部における割れ目の閉塞である。
- シナリオB…埋め戻し材変質が生じる際にある程度坑道支保工のコンクリート成分が残存しており、地震動等によって坑道支保工の透水性は断続的に大きいものとしている。シナリオAと同様、地下水流出側の坑道支保工と岩盤割れ目交差部における割れ目の閉塞によって核種の岩盤への移行が阻害することが考えられるが、坑道支保工のひび割れが断続的に発生しているような場を想定しているため、シナリオAで想定される坑道支保工と岩盤割れ目の閉塞が開口する可能性がある。
- シナリオC…坑道支保工が健全な状態で埋め戻し材変質が生じる可能性がある。この場合は 核種が埋め戻し材領域のみを経由して下流部に移行する状態が最も安全評価上影響を及ぼし 得る状態であると考えられる。

(iii) 生起の可能性

ひび割れの断続的発生は地震動等の確率的事象に起因すると考えられる他、応力場の変化が生 じた場合のひび割れの入りやすさ、それによる透水性への影響等について検討する必要があると 考えられる。このような現象が仮に発現する場合、2.1.3(3)(a)で実施した反応輸送解析では地下 水と坑道支保工の反応によるひび割れ閉塞の可能性も示したが、閉塞したひび割れ部分が再開口 する可能性も考えられる。一方で、上記の現象が生じない場合はシナリオAの生起可能性を評価 する必要があると考えられる。したがって、地震動や応力場の変化によるひび割れ発生の可能性 等を検証することによって、シナリオ A やシナリオ B の生起可能性が評価可能であると考えら れる。シナリオ C については、埋め戻し材の施工方法や品質保証により、間隙を生じにくくする 対策が適用可能であり、このような施工上の対策の確実性などを含めて評価する必要がある。
(d) まとめと今後の課題

・力学的な挙動を反映した解析

ここまで示したように、坑道支保工内が高透水性になる原因として考えられるのは坑道支保工 のコンクリート成分の溶脱とひび割れであり、より埋め戻し材の変質シナリオを想定した場合に 重要となるのはひび割れ等による力学的影響あることが示唆された。ひび割れは基本的には応力 場の変化により発生すると考えられるため、坑道支保工を対象とした力学的挙動の解析と、それ を反映させた水理・化学連成解析の実施が必要であると考えられる。

また、坑道支保工だけではなく、上部空隙が発生した場合の埋め戻し材膨潤挙動についての検 討も必要である。これについては、空隙部分の境界条件の取り扱い等を含め検討が必要であると 考えられる。

・ベントナイト変質挙動の研究

ベントナイト変質挙動については、ベントナイトの反応速度式や二次鉱物の生成設定等の不確 実性によって大きく変化すると考えられる。この点について最新の室内試験や原位置試験、ナチ ュラルアナログ事例のエビデンスを拡充し、本現象の長期的な変遷に含まれる不確実性をより低 減していく取り組みは埋め戻し材の劣化シナリオの生起可能性を検証するために必要であると考 えられる。

(3) シーリングシステムの劣化が安全評価に有意な影響を及ぼす条件の把握

昨年度までの検討では NUMO 包括的技術報告書(NUMO, 2021)における深成岩及び新第三 紀堆積岩の地質環境情報をベースに、簡略化された処分パネル(数本の処分坑道及び処分孔)及 び立坑をモデル化し、閉鎖後初期から埋め戻し材及びプラグの透水性が上昇するという条件で解 析を行った。その結果、高透水性割れ目の頻度が相対的に低い岩盤(NUMO, 2021 における新第 三紀堆積岩)の場合は立坑を介して地表面に到達する粒子の割合が相対的に多いものの、立坑の 配置や大局的な地下水流動方向に対する処分坑道の向きが変わることにより、その割合を低減で きる可能性が示唆された。本検討では(2)(b)埋め戻し材の劣化に至るシナリオの整理において検 討したコンクリート材料の変質に起因したシナリオが生起した場合を想定した物質移行解析を実 施し、本シナリオが安全評価へ及ぼす影響を評価する。

(a) 解析モデル・条件

解析モデルの形状の考え方は原子力機構・原環センター(2021)と同様であるが、今年度は坑 道形状をさらに実際の処分場に近づけるように更新した。具体的には NUMO 包括的技術報告書

(NUMO, 2021)における処分施設の設計を参考にし、処分パネル1枚の処分坑道本数を51本、 坑道長を約800mとしてモデル化した。、また処分坑道の形状は、NUMO(2021)を参照し、廃 棄体及び緩衝材等の低透水領域を2.5mの円筒形でモデル化し、周囲に高透水性の領域である EDZ及びコンクリート領域を厚さ1.3m(EDZ:1m、コンクリート厚:30cmでモデル化した。 主要坑道の形状は、処分坑道と同様である。

処分施設においては、連絡坑道(処分施設における通気口や資材や廃棄体等の搬入・搬出口に 繋がるアクセス坑道への連絡路)が設置されることが計画されているため、本検討の解析モデル では、処分パネルの周囲にパネルから 100 m 離隔した位置に配置し主要坑道と 2 箇所で連結す るようモデル化した。地表への移行経路となりうる立坑は、連絡坑道の 2 箇所に昨年度同様パネ ルの対角に配置した。連絡坑道及び立坑は、処分坑道よりも坑道径が大きく低透水領域径:4 m、 高透水領域厚み:1.4 m でモデル化している。連絡坑道と主要坑道をつなぐ坑道(主要坑道と同 じ形状)には止水プラグを設置した。作成したモデルを図 2.1-41~図 2.1-43 に示す。境界条件 は昨年度と同様とし(原子力機構・原環センター, 2021)、水理・物質移行パラメータについては 表 2.1-18 に示す。



図 2.1-41 解析モデル (上:鳥観図、中:平面図、下:立面図)



図 2.1-42 解析モデル (立坑周辺の拡大図)



図 2.1-43 解析モデル構成要素計上 (上:処分坑道、左下:連絡坑道、右下:立坑)

表 2.1-18 水理・物質移行解析設定パラメータ

領域	透水係数	備考
処分坑道埋め戻し材(緩衝材) +廃棄体	$5.0 imes 10^{-12}$	NUMO 包括的技術報告書 (NUMO, 2021) 深成岩類に おける処分坑道埋め戻し材 設定
その他坑道埋め戻し材 (主要坑道、連絡坑道、立坑)	1.0×10 ⁻⁸	NUMO 包括的技術報告書 (NUMO, 2021) で考慮され ている、ベントナイトの Ca 型化を考慮して、処分坑道よ り透水性を上げて設定
吹付+EDZ 領域	1.0×10 ⁻⁶	NUMO 包括的技術報告書 (NUMO, 2021)における"砂 並み(1.0×10·5 m/s)"の吹付 と EDZ (母岩の 100 倍の透 水性) から代表して設定
止水プラグ	$5.0 imes 10^{-13}$	NUMO 包括的技術報告書 (NUMO, 2021) における止 水プラグ透水係数

(b) 解析ケース

2.1.3(3)(a)で実施した反応輸送解析の結果から、コンクリート溶脱成分と埋め戻し材中のベントナイト反応により、坑道支保工や埋め戻し材との境界部が閉塞する可能性が考えられる。このような坑道支保工の目詰まりを反映して、坑道支保工領域の透水性をより低透水に設定した解析を行った。

(c) 解析結果

NUMO 新第三紀堆積岩の吹付(及び EDZ)領域の透水性を低下(1/10 倍)させた場合での物 質移行解析結果の粒子軌跡を図 2.1-44 に示す。岩盤との境界面にあたる吹付け部の透水性が低 下し、より岩盤の透水性に近づいたことから、レファレンスケースと比べ岩盤に移行する粒子の 割合が相対的に大きくなった。したがって、2.1.3(3)(b)埋め戻し材の劣化に至るシナリオの整理 で検討した、コンクリート成分の溶脱による埋め戻し材劣化シナリオ(シナリオ A)が生起する ことを想定した場合は、立坑や水平坑道を介した核種の移行の影響が少ない可能性が示唆される。



(a)レファレンスケース
 (b)吹付けの透水性 1/10 倍ケース
 図 2.1-44 吹付け+EDZ 領域の透水性を変更した場合の物質移行解析

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

昨年度においては、リスク論的な観点から、想定したシナリオの影響レベル(安全機能への影響)とエビデンスの充足性(シナリオで想定する現象・プロセスが生起するか否かを判断するためのエビデンスが十分かどうか)に着目した整理を行った(原子力機構・原環センター、2020)。

その結果、種々の評価、工学的対策を講じることにより、深成岩及び新第三紀堆積岩の双方において、仮にコンクリート材料の変質に起因したシナリオが生起した場合においても、安全評価への影響が顕在化する可能性は低くなることが示唆された。今年度は、昨年度に引き続き、提案されたリスクに対する回避・予防策の有効性を検証した。また、回避・予防策の有効性も踏まえ、(1)から(3)の検討結果を踏まえた上で、具体化したシナリオの成立条件、個別プロセスの起こりやすさ、安全機能へのインパクトなど複数の軸を考慮しつつ、昨年度までに整理したシナリオの蓋然性や重要度について再評価を行った。さらに、シナリオの蓋然性、シナリオの重要度、シナリオの回避・予防策の3つの観点からシーリングシステムの安全機能の考え方について再整理を行った。

(a) 検討の方針

IRGC (2017) によれば、リスクマネジメントにおけるリスク因子は単純な(ランダムな)リ スクに加えて、複雑なリスク、不確実性の高いリスク、及び多義的なリスクに分類できるとして いる。本検討で問題にするシーリングシステムの機能低下に関するリスクマネジメントにおいて も、これらのリスク分類を参照し、検討を進めることとした。具体的には、IRGC (2017) を参 考に図 2.1-45 のようにリスクを分類した。



図 2.1-45 シーリング機能低下についてのリスク要因や対応策の例

(b) シーリング機能低下のリスク

(i) 複雑なリスク

1) モンモリロナイト溶解反応

ベントナイトを構成する鉱物はその配合によっても変わり得るが、その止水性や膨潤性は基本 的には粘土鉱物であるモンモリロナイトによるものである。従って、ベントナイトの溶解・変質 挙動を理解する上ではモンモリロナイトの溶解反応の理解が重要である。モンモリロナイトの反 応速度式として Sato-Cama 式 (Sato et al.,2004)、Oda 式 (小田ほか、2013) および Marty 式 (Marty et al., 2015)などが挙げられるが、pH 依存性の観点では Marty > Sato-Cama > Odaの 順番に大きく、Oda 式は平衡近傍での溶解速度が大きいといった特徴がある。また、モンモリロ ナイトの溶解速度測定のためには液相の組成を明確にすること、及び処分場における圧縮ベント ナイトと同等の固液比で実施することが必要であり、液相の組成を明確にするためには低い固液 比での試験を行わざるを得ず、圧縮ベントナイトと同等の固液比で実施することを優先すると圧 密状態での間隙水の液相の分析ができないという根本的な難しさがある。このような難しさが要 因でモンモリロナイトの速度式についてのコンセンサスは確立されているとは言い難い状況であ ると考えられる

2) 反応速度式によるベントナイト変質挙動の違い

(1)で示した反応速度式を比較する目的で行ったベントナイト緩衝材の変質解析の事例を図 2.1-46 および図 2.1-47 に示す。この際、前述の3種類のモデル(Sato-Cama 式、Oda 式、Marty 式)について評価したが、Marty 式と Sato-Cama 式の結果は類似していたため、ここでは Marty 式と Oda 式を用いた結果のみ示す。

Oda 式の結果ではモンモリロナイトが全量バイデライトに変質してしており、ベントナイトの 止水性や膨潤性は変化することが考えられる。ベントナイト変質評価の不確実性要因としてはゼ オライト系鉱物の設定に起因する不確実性や使用する熱力学データベースに起因する不確実性な どが存在する。これらの要因のうち、前者のゼオライト系鉱物の設定についてはコンセンサスが 得られているとは言い難いもので、反応速度式同様、ベントナイト変質挙動が複雑なリスクであ ることを示唆している。



(鉄ーベントナイト相互作用を考慮)



(鉄ーベントナイト相互作用を考慮)

3) セメント系材料との相互作用によるベントナイトの溶解・変質についてのこれまでの知見の 整理

昨年度までの解析結果や情報整理結果を踏まえると(原子力機構・原環センター,2021)、セメント系材料との相互作用によるベントナイトの溶解・変質挙動については以下のように整理される。本項では、移行、これらのエビデンスとなる解析結果や文献調査の結果について記載する。

- 1. <u>拡散場でのベントナイト変質挙動</u>…埋め戻し材及びその周囲が拡散支配であれば、モンモリ ロナイト溶解速度式及び熱力学データベースのいずれを用いても長期間にわたって大きな変 質は生じず、止水性を期待することができる
- 2. <u>移流場でのベントナイト変質挙動</u>…埋め戻し材は低透水性であっても劣化した坑道支保等の 外周部が移流場となった場合、モンモリロナイト溶解速度式(Oda式)と熱力学パラメータ の組み合わせによっては、数万年程度の時間スケールで埋め戻し材中のモンモリロナイトの ほぼ全量が溶解・変質する結果が得られる場合がある
- 3. コンクリート影響を受けた場合の埋め戻し材周辺の水理学的状況
 - a. 坑道支保工内の割れ目(施工時の初期割れ目やその後の変形に伴い生じた割れ目)はセ メントからの溶出成分と地下水中の炭酸やシリカ等の反応によって生ずる二次鉱物(カ ルサイトや CSH ゲル等)によって閉塞し地下水の流動が抑制されることが解析及び実 験で確認されている
 - b. 坑道と交差する岩盤割れ目についても、同様に、二次鉱物によって閉塞し地下水の流動 が抑制されることが解析及び実験で確認されている
 - c. コンクリート及び岩盤中の割れ目における二次鉱物による閉塞部は、地震動等の外力に よって壊され再開口する可能性があるが、当該イベント後速やかに再閉塞するものと予 想される(マカーリンのナチュラルアナログ事例等)。すなわちほぼ常時拡散支配の場と なることが予想される

a) 拡散場でのベントナイト変質挙動についてのエビデンス

昨年度の検討において、コンクリート製坑道支保と埋め戻し材の化学的相互作用に関する2次 元軸対称円筒座標系での反応輸送解析を実施している。溶質の移動は拡散のみによって生じるも のとし、支保外側は濃度固定境界条件(FRHP地下水の水質)を適用している。モデルの中で想 定している化学反応は、液相反応、ベントナイトの溶解、セメント溶出、及び二次鉱物沈殿を想 定している。図 2.1-48 は 45,000 年後の鉱物組成である。コンクリート支保工と埋め戻し材の境 界では、カルサイトの沈殿によってコンクリート表面付近の間隙がほぼ完全に閉塞しており、溶 質の移動が制限されるため、埋め戻し材の変質は抑制されている。図 2.1-48 で示している 45,000 年後においても、モンモリロナイトの溶出はコンクリートとの境界近傍において僅かに生じてい るに過ぎず、埋め戻し材の止水性への影響は無視し得るほど小さいと考えられる。

なお、移流が顕著ではない状況においてコンクリートとベントナイトの境界部がカルサイト等 によって閉塞しベントナイトの変質が抑制されることは、第2次 TRU 取りまとめ(電事連・核 燃料サイクル機構, 2005)や NUMO 包括的技術報告書(NUMO, 2021)でも述べられている。



図 2.1-48 拡散場を想定した反応輸送モデル及びその結果の概要 (原子力機構・原環センター, 2021)

b) 移流場でのベントナイト変質挙動についてのエビデンス

前項で示した解析と同様に、昨年度の検討において実施した、コンクリート製坑道支保と埋め 戻し材の化学的相互作用に関する2次元軸対称円筒座標系での反応輸送解析(原子力機構・原環 センター,2021)を引用した。前項の解析では系全体において溶質の移動は拡散のみによって生 じるものと仮定していたが、以下で示す解析では、坑道支保工及び埋め戻し材上部間隙では移流 を仮定した(埋め戻し材中の溶質の移動は拡散のみ考慮)。また、この移流を想定した部分に上流 側から流入する地下水は常に、セメント(ポルトランダイト)平衡であると仮定した。

図 2.1-49に示す通り、モンモリロナイトのイオン型はNa型のまま変化していないが図 2.1-48 と異なり、境界部の間隙閉塞は生じず、モンモリロナイトの溶解領域は拡大しており、10万年時 点ではモンモリロナイトが完全に溶解している。以上のように、移流によってベントナイト溶解 生成物が散逸する一方、上流側からセメント溶出成分(特に水酸基)が継続して流入するという 条件においては、ベントナイトの溶解が抑制されないという結果は合理的なものと考えられる。

ただし、「上流側からセメント溶出成分(特に水酸基)が継続して流入する」という仮定は、移 流支配の場でもコンクリート表面付近の間隙が閉塞してアルカリソースとしての強度が低下する という 2.1.3(3)(a)で実施した反応輸送解析結果(Case3-4)を踏まえれば、過度に保守的な仮定で ある可能性がある。





図 2.1-49 セメント平衡水の流入を想定した反応輸送モデル及びその結果の概要 (原子力機構・原環センター, 2021)

- c) コンクリート影響を受けた場合の埋め戻し材周辺の水理学的状況についてのエビデンス
- i) 坑道支保内の割れ目閉塞

Rooij et.al. (2012) によれば、施工後のコンクリートの割れ目がカルサイトやエトリンガイト 等の沈殿によって閉塞する現象は 19 世紀から良く知られており、20 世紀以降に海中のコンクリ ート構造物中の塩素等の実効拡散係数が時間とともに低下すること等からも炭酸塩鉱物等による 閉塞部が緻密で止水性や低拡散性を有することが推定されていた。時間を経たコンクリート構造 物における炭酸塩鉱物による割れ目の閉塞については多くの観察事例が報告されている(例えば、 Rooij et al. (2013)。コンクリート中の割れ目の閉塞(自己シール)が生ずるためには、二次鉱物 による閉塞が可能な比較的小さい開口幅(条件にもよるが例えば 100 ミクロンオーダー以下)で あることが必要とされている。通水試験によるコンクリート試料の割れ目閉塞の事例も報告され ている。Fukuda ら (2012) では、厚さ 15 mm で開口幅 0.1 mm の割れ目を有する円盤状の FRC 試料 (Fiber Reinforced Concrete、繊維補強コンクリート、割れ目開口幅が制限されるようなコ ンクリート材料として注目されている)を用いて通水試験を行った結果、7 週間後までに下流端 付近でカルサイトによる閉塞が生じたことを報告している。

また、既往の反応輸送解析でもコンクリート支保内の割れ目が閉塞する事例が存在する。原子 力機構(2014;2015)では坑道支保を貫通する割れ目における溶質の移流、及び割れ目と隣接し たコンクリートマトリクス内での拡散の双方を考慮した一次元二重空隙媒体モデルによる割れ目 やコンクリートマトリクスの変質解析を実施している。ここでは割れ目内及びマトリクスの間隙 水中での液相反応や固相反応(セメントの溶解や炭酸塩鉱物等の二次鉱物の沈殿)を考慮した反 応輸送解析モデルを構築している。また、割れ目上流端から常に地下水(水質はFRHP一定)が 流入(動水勾配 0.01)するものと仮定している。解析結果は割れ目開口幅 0.1 mm 及び 0.3 mm のいずれの場合も1年以内にカルサイト及びCSH系鉱物によって割れ目が閉塞している。また、 閉塞の生じた位置は上流端から数 cm であり、割れ目のあるコンクリート試料の通水試験と整合 的である。原子力機構(2015)では上記のモデルを用いて種々の条件における解析が行われてい るが、いずれの場合も割れ目の閉塞が生じている。また、前項で述べた通水試験や既存のコンク リートの観察事例とも整合的であるため一定の信頼性を有すると考えられるが、長期予測に付随 した不確実性(地震動等の外力によって割れ目閉塞部が繰り返し破壊される場合の再生の可能性 等)についても今後考慮する必要があると考えられる。

ii) 岩盤割れ目の内の割れ目閉塞

岩盤割れ目がコンクリート影響によって閉塞する現象について、原子力機構・原環センター (2019;2020)において以下のように考察されている。まず、セメント中の Ca の形態に着目す ると、一般的に全 Ca 中の 25%が Ca(OH)₂、75%が C-S-H に含まれるという知見があるととも に、Ca(OH)₂の方が C-S-H よりも溶解性が高い(横関ほか,2002)。また、Ca(OH)₂と HCO³と の反応に関する知見(柴田ほか,2002)や、通水後の水質として pH が大きく上昇しなかったこ とおよび通水する供試体を Ar パージした状態として大気中の CO₂の影響を排除していることを 踏まえると、ポルトランダイトの溶解と方解石の形成が支配的であるとしている。

このような知見が、図 2.1-50 に示す概念モデルとして整理されている。この概念モデル自体 はグラウトを想定したセメント・岩盤間の間隙への二次鉱物(この場合方解石)の沈殿を示してい るが、同様の反応でセメント影響により岩盤割れ目が閉塞することも示唆されている。



図 2.1-50 グラウチングに伴うグラウト材と岩盤との相互作用メカニズムの変遷に係る概念 モデル (原子力機構・原環センター, 2019)

iii) 閉塞割れ目が再開口した場合

閉塞割れ目が地震動等によって再開口した場合のナチュラルアナログ事例としては、ヨルダン・ マカーリンの事例が存在する。ここでは、天然のセメント成分によって亀裂が一度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亀裂が再開口したと考えられている。 その再開口部に沿って高アルカリ溶液が流下し、再び反応を開始して亀裂充填物の生成等の反応 が起こると考えられている(核燃料サイクル機構, 2005)。この検討では、亀裂に流入する水が 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、あるいは地下水(FRHP を想定)の場合には再閉塞しないことが示されている。

(ii) 不確実性の高いリスク

1) 埋め戻し材施工時の上部間隙の形成

転圧工法と吹付工法による空洞内充てん材の施工試験の事例があり(秋山ほか,2016)、使用材料は、ベントナイト(クニゲルV1)と砂を乾燥質量比15:85で混合したベントナイト混合土である。空洞内充てん材は、施工後の沈下により空洞上部に間隙が発生する可能性があるとして、沈下量の計測を行っている。沈下量と温度が2014年から2017年にかけてモニタリングされており、最大6mm程度の沈下が認められている。沈下量の周期的な変動については温度に季節変動に伴うものと考えられている。ただし、上記の結果は埋め戻し材膨潤前であるため、仮に上部埋戻し材天端部に沈下による空隙が発生した場合でも、閉鎖措置段階以降には、地下水浸潤に伴いベントナイト系材料が膨潤するため、空隙が閉塞する可能性も考えられる。

2) 埋め戻し材の再冠水・膨潤挙動

埋め戻し後の坑道が地下水によって再冠水する際には、坑道の外部から内側に非常に大きな圧

カ差が生ずることから、流入する地下水による埋め戻し材中のベントナイトの侵食や流出が懸念 されている。前出のコンクリート影響によるベントナイト溶解・変質についての複雑なリスクを 抑止するために処分坑道においてセメント系材料の使用を回避することを設計要件としているス ウェーデンやフィンランドではこのリスクが問題となっている。

なお、我が国においては、コンクリート製坑道支保及びグラウトによって深部の静水圧が埋め 戻し材に直接働くことは考えにくいが、今後、原位置試験等で確認し、適宜、ジオテキスタイル の使用等の対策技術を検討する必要があると考えられる。

この点について、Sandén and Börgesson (2014) は流入量の評価や対策の検討を実施してい る。その結果、Forsmark でのリファレンス設計では、長さ 300 メートルの処分坑道に対する最 大流入量は 5 m/min、長さ 6m のセクションへの最大流入量は 0.1 L/min と設定され、上記の制 限を超える場合は、安全な方法で埋め戻しの施工ができるようにするための措置を講じなければ ならない、としている。Börgesson et al. (2014) によってモデル計算により評価された、処分坑 道及び処分孔への地下水流入量の計算によると、流入量 5 L/min 以上の坑道は約 50 本、流入量 1 L/min 分以上の坑道は約 90 本存在する。Sandén and Börgesson (2014) では、上述のような 坑道への地下水流入に対する対策として以下の 3 つを示している。

- 流入量そのものを減らす対策: Pre-groutingやPost-grouting、また地下水を凍らせる対策等
- 地下水の排水
- 流入地下水の保持:ペレットを用いる方法、坑道の一部に砕石埋め戻しセクションを設ける 方法等

上記のペレットを用いた地下水保持の場合、ジオテキスタイルを用いて、ペレットへの地下水 流入を均一にすることが考えられる。Sandén et al (2018)では KBS・3V 処分坑道の埋め戻し材 設置時の流入地下水への対処方法のオプションの1つとしてジオテキスタイルを用いる方法を検 討している。ここでは、鋼製のトンネル試験装置を用いた給水試験を行っており、透水性亀裂と の交差部などにおける卓越した給水を想定した場合にベントナイト(ペレット及びブロック)に パイピングが生ずるか否か、そして、ジオテキスタイルによって給水部を均一化してパイピング を回避することができる否かを検証している。その結果、給水部付近に集中していたベントナイ トペレットへの水の浸透が、ジオテキスタイル(厚さ 1.2 mm のガラス繊維)を坑壁との間に設 置することによって広い領域に平坦化されることが確認された。また、坑道内部への水の破過が 生ずるまでの給水量も増加しパイピングが回避できていることが示している。

このような検討を通じて、ジオテキスタイルに止水能力があることを示したが、以下のような 点が長期性能評価の観点から指摘されている。

- 止水のために使用するジオテキスタイルの量を把握しておくこと。使用するジオテキスタイルの量は坑道に交差する亀裂の本数でも変わりうるため、注意が必要。
- ジオテキスタイルの透水係数を把握すること。設置後のジオテキスタイルの透水係数は高い と予想されているので、水みちになってしまうことが懸念されている。

(iii) その他のリスク

上述の複雑なリスク、不確実性の高いリスク以外のリスクとして、単純(ランダム)なリスク 及び多義的なリスクについて述べる。

・単純 (ランダム) なリスク

施工時に生ずる埋め戻し材の密度やベントナイト含有率等の特性の空間的不均質性やコンクリート支保施工時の初期割れ目などがランダムなリスクとして想定される。これらのリスクについては、通常の施工時の品質管理が有用と考えられる。すなわち、施工確認の頻度などを適切に設

定することが必要と考えられるが、コスト面についても考慮の必要があると思われる。

・多義的なリスク

シーリングシステム機能喪失を想定した保守的なシナリオに対して、ICRP 等の定める「確ら しさ」を考慮した線量基準のどれを適用すべきかについて、規制当局との対話に基づく合意形成 が必要と考えられる。

(c) ボウタイモデルによる予防策や影響緩和策の整理

シーリングシステムの性能劣化を回避するための予防策・影響緩和策の有効性の検証及びシー リングシステムの安全機能を確保する上での施工との連携の在り方検討にあたっては、これまで の検討成果を踏まえて昨年度作成したボウタイモデル(原子力機構・原環センター, 2021)を見 直すこととした。

昨年度実施した検討においては、ボウタイ分析を通じて、本年度はシーリングシステムの止水 性低下をもたらす可能性のある影響因子としての埋め戻し材の施工ムラの予防策の効果と、シー リングシステムの止水性低下が実際に生じた場合の影響緩和策の効果について重点的に検討を行 った(原子力機構・原環センター, 2021)。

これに対し、今年度見直したボウタイモデルを図 2.1-51 に示す。今年度見直した点は以下の 通りである。

- リスク要因を複雑なリスクと不確実性の高いリスクに分けて考え、本検討で複雑なリスク を中心に考えることをボウタイモデルに明記した。
- 「ベントナイト侵食・流出」の予防バリアとして昨年度まであった「コンクリート反応によるベントナイトゾル化領域の回避」については、ゾル化が生じるようなイオン強度の低い地下水と埋め戻し材が接触する可能性は低いことを昨年度示したため除外した。代わりに「グラウト及び支保による坑道内部への水圧の緩和」という工学的な対策を追加した。
- 埋め戻し材施工ムラについては、昨年度まではベントナイト膨潤や、材料協会での保護的 境界形成といった点を安全評価の視点から検討することを挙げていたが、今年度は単純に ベントナイト膨潤の部分のみを設計・施工における対策として考慮することとしている。



図 2.1-51 今年度改訂したボウタイモデル

(d) ESL モデルによるシナリオの蓋然性評価

昨年度の検討と同様の方法(原子力機構・原環センター, 2021)により、セメント影響による 埋め戻し材変質について、ESLモデルを用いた蓋然性の評価を行った。

今回の検討では、「コンクリート影響を考慮しても坑道埋め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」を主命題とした。このとき、以下の3つの点について評価し、こ れを主要命題の下位命題(第2階層の命題)として考えることとした。

①埋め戻し材の周囲が拡散場となる

②拡散場において埋め戻し材の変質が顕著とはならない

③移流場において埋め戻し材の変質が顕著とはならない

以下、上記のそれぞれについてさらに ESL モデルを作成し、最終的に 3 つの ESL モデルを組 み上げて主命題「コンクリート影響を考慮しても坑道埋め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」を評価する。作成した 3 つの ESL モデルを図 2.1-52、図 2.1-53 お よび図 2.1-54 に示す。また、各 ESL モデルの下位命題への重み設定の考え方と設定理由を表 2.1-19、表 2.1-20 および表 2.1-21 に示す。

ESL モデルによる主命題である「コンクリート影響を考慮しても坑道埋め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」について、Ratio plot で表現すると、「命題が成立することの方が確からしいが不確実性は残っており、確言はできない」という領域に位置し、シーリングシステムが劣化することへの蓋然性は「低い」と判断された(図 2.1-55)。



図 2.1-52 「埋め戻し材の周囲が拡散場となる」の ESL モデル



周囲が拡散支配の場合に埋め戻し材の変質は顕著なものにはならない



図 2.1-53 「拡散場において埋め戻し材の変質が顕著とならない」の ESL モデル



周囲が移流場の場合に埋め戻し材の変質は顕著なものにはならない



移流場において埋め戻し村の定覧が顕著とはならない v1 (2022/01/17)

図 2.1-54 「移流場において埋め戻し材の変質が顕著とならない」の ESL モデル

表 2.1-19 重み設定の考え方と設定理由(1/3)

		支持の重み	否定の重み	備考
上位命题	コンクリート支保との相互作用により抗道埋め戻し材の周囲はほ ぼ常時拡散場となる			
下什么丽	コンクリート溶脱に伴う二次鉱物沈殿で支保及び近傍岩盤の透水 性が低下し拡散場となる	中程度	とても高い	抗道埋め戻し材の周囲がほぼ常時拡散場となるための必要条件ではあるが長期的安定性まで考える と十分条件ではない
L. J.T. ob 201	将来地震動等により割れ目閉塞部が破壊されても二次鉱物沈蝦に よって自己修復される	高い	高い	長期にわたって抗道埋め戻し村の周囲がほぼ常時拡散場となるために必要十分な条件である
		支持の重み	否定の重み	備考
上位命题	コンクリート溶脱に伴う二次鉱物沈殿で支保及び近傍岩盤の透水 性が低下し拡軟場となる			
	コンクリート支保の割れ目は二次鉱物で閉塞し透水性が低下する	中程度	高い	埋め戻し材外周の直近に位置するため拡敵場となるための必要十分条件に近い。ただし、支保と埋 め戻し材の境界部など割れ目以外の可能性もゼロではないことから支持の重みは中程度とした
下达会历	坑道近傍の岩盤内の割れ目は二次鉱物で閉塞し透水性が低下する	低い	中程度	岩盤は直接埋め戻し材と接していないため支持の重みは低いとした。岩盤割れ目が透水性の場合コ ンクリート支保の劣化が進む懸念があるため否定の重みは中程度に引き上げた
17.117.119.108	抗道スケールの反応輸送解析で抗道内及び近傍の岩盤が拡散場に なることが示されている	中程度	高い	支保の状況及びそれに影響を与える岩盤割れ目の閉塞状況を整合的に予測するためエビデンスとし ての重みは高い。ただし、長期予測の不確実性を考慮して支持については中程度と引き下げた
	地下研究施設で坑道埋戻し後コンクリート支保及び近傍岩盤内の 割れ目開塞が観察されている	中程度	高い	支保の状況及びそれに影響を与える岩盤割れ目の閉塞状況を整合的に予測するためエビデンスとし ての重みは高い。ただし、試験期間の制約を考慮して支持については中程度と引き下げた
	F	支持の重み	否定の重み	備考
上位命題	将来地震動等により割れ目閉塞部が破壊されても二次鉱物沈殿に よって自己修復される			
下从合愿	コンクリート割れ目閉塞部が繰り返し開口しても都度二次鉱物に よって自己修復される	中程度	高い	埋め戻し材外周の直近に位置するため拡散場となるための必要十分条件に近い。ただし、支保と埋 め戻し材の境界部など割れ目以外の可能性もゼロではないことから支持の重みは中程度とした
1.177 年1月18日	岩盤割れ目閉塞部が繰り返し開口しても都度二次鉱物によって自 己修復される	低い	高い	岩盤は直接埋め戻し材と接していないため支持の重みは低いとした。岩盤耐れ目が透水性の場合コ ンクリート支保の劣化が進む懸念があるため否定の重みは中程度に引き上げた

表 2.1-20 重み設定の考え方と設定理由(2/3)

		支持の重み	否定の重み	師考
上位命题	コンクリート支保の割れ目は二次鉱物で閉塞し透水性が低下する			
工作会感	割れ目のあるコンクリート試料の通水試験で閉塞が生じた	中程度	高い	実際の現象に近いためエビデンスの重みは大きいと考えられる。ただし、試験条件と原位置での条 件の差異(割れ目表面形状や動水勾配など)を考慮して支持の重みは中程度とした
F 112 47 #B	反応輸送解析でコンクリート内の割れ目が閉塞することが示され ている	低い	高い	考慮すべき主要な現象を全てモデル化しているためエビデンスの重みは大きい。ただし、長期予測 の不確実性と上流領境界の水質に関する設定が明確にし難いことをから支持の重みは低いと考えた
		支持の重み	否定の重み	備考
上位命題	坑道近傍の岩盤内の割れ目は二次鉱物で閉塞し透水性が低下する			
下位会路	割れ目のある岩石資料のコンクリート反応水の通水試験で閉塞が 生じた	中程度	高い	実際の現象に近いためエビデンスの重みは大きいと考えられる。ただし、試験条件と原位置での条 件の差異(割れ目表面形状や動水勾配など)を考慮して支持の重みは中程度とした
F 152 HP RDS	反応輸送解析でアルカリブルームとの反応で岩盤内の割れ目が閉 塞することが示されている	低い	高い	考慮すべき主要な現象を全てモデル化しているためエビデンスの重みは大きい。ただし、長期予測 の不確実性と上流側境界の水質に関する設定が明確にし難いことをから支持の重みは低いと考えた
		支持の重み	否定の重み	偏考
上位命题	コンクリート割れ目閉塞部が繰り返し開口しても都度二次鉱物に よって自己修復される			
	反応輸送解析によって再開口したコンクリート割れ目閉塞部の自 己修復が示されている	低い	中程度	再開口の具体的なメカニズム及び再開口時の割れ目の状態が不明確でありエビデンスとしての重み は中程度にとどまる。さらに、長期予測の不確実性と上流領境界の水質に関する設定が明確にし難 いことをから支持の重みは低いと考えた
下位命題	割れ目を持つコンクリート試料の通水試験で再開口した開塞部の 自己修復が示されている	中程度	高い	ー旦閉塞したコンクリート試料を地震動などを模した外力で破壊して再通水することを想定しエビ デンスの重みは大きいと考えた
1	NA事例において再開口したコンクリート割れ目閉塞部の自己修復 が観察されている	低い	中程度	割れ目の閉塞と再開口を長期間繰り返した結果を反映している一方天然の類似物とコンクリートと の組成や性状の差異もあるためエビデンスとしての重みは中程度とした。さらに、閉塞しなかった 割れ目付近では岩石の溶解が進んで観察されていない可能性もあるため支持の重みは低いと考えた
	1	支持の重み	否定の重み	
上位命题	岩盤割れ目閉塞部が繰り返し開口しても都度二次鉱物によって自 己修復される			
	反応輸送解析によって再開口した岩盤割れ目閉塞部の自己修復が 示されている	低い	中程度	再開口の具体的なメカニズム及び再開口時の割れ目の状態が不明確でありエビデンスとしての重み は中程度にとどまる。さらに、長期予測の不確実性と上流倒境界の水質に関する設定が明確にし難 いことをから支持の重みは低いと考えた
下位命题	割れ目を持つ岩盤試料の通水試験で再開口した閉塞部の自己修復 が示されている	中程度	高い	ー旦閉塞した岩石試料を地震動などを模した外力で破壊して再通水することを想定しエピデンスの 重みは大きいと考えた
	NA事例において再開口した岩盤割れ目閉塞部の自己修復が観察さ れている	低い	中程度	割れ目の閉塞と再開口を長期間繰り返した結果を反映している一方天然事例と処分場の母岩との組 成や性状の差異もあるためエビデンスとしての重みは中程度とした。さらに、閉塞しなかった割れ 目付近では岩石の溶解が進んで観察されていない可能性もあるため支持の重みは低いと考えた

表 2.1-21 重み設定の考え方と設定理由(3/3)

		支持の重み	否定の重み	備考
上位命题	周囲が拡散支配の場合に埋め戻し材の変質は顕著なものにはなら ない			
	反応輸送解析の結果は拡散支配の場合に埋め戻し材の変質は顕著 ではないことを示す	低い	中程度	モンモリロナイト溶解速度モデル及び想定する二次鉱物の機類に関してコンセンサスが得られてい ないためエビデンスとしての重みは中程度とした。さらに、間隙閉塞をもたらす準安定な二次鉱物 の長期的安定性に不確実性があるため支持の重みは低いと考えた
下位命题	コンクリートとベントナイトを接触させた室内試験結果は変質は 顕著ではないことを示す	中程度	高い	実際の現象を再現することが可能であるためエビデンスとしての重みは高いと考えた。ただし、間 隙閉塞をもたらす準安定な二次鉱物の長期的安定性に不確実性があるため支持の重みは中程度に引 き下げた
	粘土層中のトンネルでの考古学的アナログにおいて変質は顕著で はないことが観察されている	低い	中程度	試験等の時間スケールを超えて長期的な挙動を反映している一方処分場との条件の差異もあるため エビデンスとしての重みは中程度とした。さらに、間隙閉塞をもたらす準安定な二次鉱物の(考古 学的時間スケールを超えた)長期的安定性に不確実性があるため支持の重みは低いと考えた
		支持の重み	否定の重み	借考
上位命题	岩盤割れ目閉塞部が繰り返し開口しても都度二次鉱物によって自 己修復される			
	周囲が移流場の場合に埋め戻し材の変質は顕著なものにはならな い	低い	中程度	モンモリロナイト溶解速度モデル及び想定する二次鉱物の種類に関してコンセンサスが得られてい ないためエビデンスとしての重みは中程度とした。さらに、間隙閉塞をもたらす準安定な二次鉱物 の長期的安定性に不確実性があるため支持の重みは低いと考えた
下位命題	コンクリート反応水を用いた通水試験結果はベントナイトの変質 が顕著ではないことを示す	中程度	高い	実際の現象を再現することが可能であるためエビデンスとしての重みは高いと考えた。ただし、間 隙閉塞をもたらす準安定な二次鉱物の長期的安定性に不確実性があるため支持の重みは中程度に引 き下げた
	NAや考古学的アナログにおいて周囲が移流場でもペントナイトの 変質が顕著ではない	低い	中程度	試験等の時間スケールを超えて長期的な挙動を反映している一方処分場との条件の差異もあるため エビデンスとしての重みは中程度とした。さらに、間隙閉塞をもたらす準安定な二次鉱物の(考古 学的時間スケールを超えた)長期的安定性に不確実性があるため支持の重みは低いと考えた



ESL評価結果のRatioplot

0.01



(e) リスクマトリクスを用いたシナリオの影響レベルやエビデンス充足度の可視化

シーリングシステム劣化時の対処バリアによる影響緩和効果を評価するために、想定される状況における三次元物質移行解析等の結果を、処分システムの安全機能の有無に着目して、昨年度と同様に表 2.1-22 に示す 5 つの段階に区分することとした。また、シーリングシステムが劣化したことを想定した場合の物質移行への影響や影響緩和策の効果については、昨年度検討した 3 次元物質移行解析の結果(原子力機構・原環センター, 2021)を参照することとした。

星/湖田 本"山	安全機能			/# *
	影音レヘル 人工バリア インタフェイス* 天然バリア		₩ ^r 5	
4	×	×	×	多重バリアシステムの安全機能はいずれも期待できず、廃 棄体から溶出する核種が速やかに生活圏に至る
3	0	×	×	人工バリアの安全機能(容器の閉じ込め、緩衝材の止水性 や移行遅延)は期待できるが、人工バリアから外部に移行 する核種のうちアクセス坑道を介して速やかに地表に至るも のの割合が多い(10%のオーダー)
2	0	×	•	人工バリアの安全機能(容器の閉じ込め、緩衝材の止水性 や移行遅延)が期待でき、人工バリアから外部に移行する 核種の大半は天然バリアに進入するがアクセス坑道を介し て速やかに地表に至る割合が無視できない(1%オーダー)
1	0	×	Δ	人工バリアの安全機能(容器の閉じ込め、緩衝材の止水性 や移行遅延)が期待でき、人工バリアから外部に移行する 核種の大半は天然バリアに進入するが、バネル内での短絡 や坑道と交差する大規模透水性構造に集中する等のため 天然バリア性能が影響される可能性がある
0	0	0	0	人工バリア及び天然バリアの安全機能が期待でき、また、 バネル内の短絡や大規模な透水性構造が卓越した移行経 路となることを避けてより低透水性・小規模な割れ目ネット ワークを移行する

表 2.1-22 多重バリアシステムの安全機能の有無を想定した場合の影響レベル (原子力機構・原環センター、2020)

(i) 深成岩におけるリスクマトリクス

昨年度構築したリスクマトリクス(原子力機構・原環センター,2021)では、埋め戻しをしな い場合を仮に想定した無対策の場合を出発点とし、立坑及び地下坑道のベントナイト系材料によ る埋め戻しという対策を取る場合にどのように影響レベルが改善するかを示していたが、今回の 検討では、立坑及び地下坑道のベントナイト系材料による埋め戻しという対策を取る場合を出発 点として記載した。まず、以下のような基盤研究によってエビデンスを拡充することにより、エ ビデンスの充足性を「肯定的なエビデンスが十分ある」に向上させることを目指す。

・モンモリロナイト溶解速度モデルの信頼性向上

移流場(劣化支保に相当)と接した埋め戻し材のコンクリート溶液による変質試験

また、工学的対策(予防策)として支保材料の変更(鋼製支保あるいは低アルカリセメント)を 検討することも考えられる。さらに、工学的対策(影響緩和策)として、上下流の立坑配置の最 適化やパネル1枚の閉ループ(袋小路)化等の対策を検討することで影響レベルを引き下げるこ とが考えられる。以上を考慮した、深成岩のリスクマトリクスを図 2.1-56 に示す。



図 2.1-56 深成岩におけるリスクマトリクス

(ii) 新第三紀堆積岩におけるリスクマトリクス

深成岩の場合と同様、立坑及び地下坑道のベントナイト系材料による埋め戻しという対策を取 る場合にどのように影響レベルが改善するかという観点でリスクマトリクスを作成した。

深成岩同様に以下のような基盤研究によるエビデンスの拡充がリスク低減策として考えられる。

・モンモリロナイト溶解速度モデルの信頼性向上

移流場(劣化支保に相当)と接した埋め戻し材のコンクリート溶液による変質試験

また、深成岩同様、工学的対策(予防策)として支保工材料の変更(鋼製支保あるいは低アルカ

リセメント)を検討することが考えられる。

さらに、工学的対策(影響緩和策)として、以下に示す対策等を検討することが考えられる。

- ・ アクセス坑道パネル片側配置によるバイパス形成
- ・ バイパスと処分パネル間の止水プラグ設置

以上を考慮した新第三紀堆積岩におけるリスクマトリクスを図 2.1-57 に示す。



図 2.1-57 新第三紀堆積岩におけるリスクマトリクス

(5) まとめ

今年度の成果を以下にまとめる。

- 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
 埋め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。
- コンクリート成分の溶脱により埋め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るとともに、既往の検討結果からも、コンクリート内や割れ目が閉塞することが支持されていることから、シナリオの生起可能性は低いと考えられる。ただし、鉱物の反応速度式の選択や熱力学データの充足性に起因し、主に長期の予測解析に対する不確実性は残るため、このような不確実性を念頭に置いた上で長期の安全性への影響を評価する必要がある。
- 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、今年度の反応輸送解析の結果から、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ている。一方で、

閉塞した間隙が外的要因によって再度開口し、これが断続的に生じた場合は坑道支保工内 のコンクリート成分が枯渇するまで、地下水と反応し結果として高アルカリの地下水が埋 め戻し材に作用する可能性も考えられる。このような力学的な相互作用を考慮した反応輸 送解析の実施は、ひび割れに起因した埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質シナリオの 蓋然性を評価する上で重要であると考えられる。

- 埋め戻し材上部の間隙形成に起因して埋め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、埋め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を実施することが重要であると考え られる。
- 今年度までの検討を踏まえ、上述したシナリオが仮に生起し、保守的にシーリングシステムの安全機能が喪失することをリスクとした場合の評価を、NUMO包括的技術報告書における深成岩および新第三紀堆積岩を対象としたリスクマトリクスを構築することにより実施した。相対的にリスクが高い新第三紀堆積岩においては、種々の影響緩和策や予防策を講じることにより、リスクを低減することが可能である一方で、これら対策がその効果や合理的な対策であるかについては、設計・施工の観点から再評価する必要があると考えられる。このような評価を行うことで、仮に安全機能が喪失するという保守的な想定をした場合においても、処分システムの長期安全性が確保可能であり、このような評価を含めてシーリングシステムの安全機能の考え方が提示可能になると考えられる。

- Börgesson L., Sandén T., Dueck A., Andersson L., Jensen V., Nilsson U., Olsson S., Åkesson M., Kristensson O., Svensson U., Consequences of water inflow and early water uptake in deposition holes. EVA-project. SKB TR-14-22, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2014.
- Fukuda et.al., In vestigation of self sealing in high strength and ultra low permeability concrete in water using micro focus X ray CT, Hokkaido University, http://hdl.h andle.net/2115/51047, 2012. (2022 年 1 月 29 日参照)
- IRGC, INTRODUCTION TO THE IRGC RISK GOVERNANCE FRAMEWORK, Revised Version 2017.
- Marty N.C., Claret F., Lassin A., Tremosa J., Blanc P., Madé B., Giffaut E., Cochepin B. and Tournassat C., A database of dissolution and precipitation rates for clay-rocks minerals. Applied Geochemistry, 55, pp.108-118, 2015.
- Rooij et.al., Self Healing Phenomena in Cement Based Materials, Springer, 2013.
- Sandén T, Börgesson L, System design of backfill. Methods for water handling. SKB R-14-09, Svensk Kärnbräsnlehantering AB, 2014.
- Sandén T., Marjavaara P., and Fritzell A., Water handling during backfilling, Development report, Posiva SKB Report 05, 2018.
- Sato, T. et al., Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions. Proc. Int. Work-shop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environ., 14-16 April 2004, Tokyo, NUMO-TR-04-05, A3-38 –A3-41 2004.
- Snow. D.T., A parallel plate model of fractured permeable media. Ph. D. Thesis, University of California., Berkley, California, 1965.
- Tay, J.H., Sludge ash as filler for portland cement concrete, J. Envir. Engrg. Div., ASCE, Vol. 113, No. 2, pp.345-351, 1987.
- Yui, M., Sasamoto H., and Randolph C.A., Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment (PA) Report, JNC TN8400 99-030, 1999.
- Walker C.S., Arthur R.C., Wakiya A., Sutou S., Sasamoto H., Oda C., Mihara M., and Honda A., The JAEA thermodynamic database for reactions between groundwater, cement, clay, zeolite, and/or rock forming minerals. Goldschmidt2016, 26th June-1st July 2016, Yokohama, Japan, 2016.
- 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.
- 小田治恵,本田明,高瀬博康,小曽根健嗣,佐々木良一,山口耕平,佐藤努,セメント系材料由 来のアルカリ性条件における緩衝材の鉱物学的変遷シナリオに基づく化学反応・物質移動連 成解析,粘土科学 第 51 巻 第 2 号, pp34-49, 2013.
- 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.
- 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, 1999.

- 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: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 TRU 廃棄物処理・処分に関する技術開発 報 告書、2020.
- 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.
- 柴田真仁,芳賀和子,広永道彦,地下水成分によるセメント硬化体の変質に関する研究 -HCO₃-イオンの影響-,土木学会第57回年次学術講演会,499-500,2002.
- 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.
- 電気事業連合会,核燃料サイクル開発機構,TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次TRU 廃棄物 処分研究開発取りまとめ-,JNC TY 1400 2005 013, 2005.
- 土木学会, 2002 年制定 コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002.
- 日本原子力研究開発機構,平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高 度化開発報告書, 2014.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高 度化開発報告書, 2015.
- 日本原子力研究開発機構,平成 27 年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開 発報告書,2016.
- 日本原子力研究開発機構,平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム評価確証技術開発 5 ヵ年成果報告書,2018.
- 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 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告 書,2019.
- 日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,平成31年度高レベル放射性 廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告 書 2020a.
- 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,2020b.
- 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.
- 横関康佑,渡邉賢三,古澤靖彦,大門正機,大即信明,久田 真,カルシウムイオンの溶出に伴う コンクリートの変質に関する実態調査と解析的評価,土木学会論文集 No.697, Vol. 654, 51-64, 2002.

2.2 埋め戻し材の再冠水挙動、ベントナイトの流出・侵入

2.2.1 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分坑道やアクセス坑道といった地下空間が卓 越した放射性核種の移行経路とならないように、ベントナイト系材料である埋め戻し材で埋め戻 すことが検討されている(例えば、NUMO, 2021)。埋め戻し材はベントナイト系材料が有する膨 潤性や低透水性などが発揮されることにより、放射性核種の移行を妨げることが期待されている。 既往の研究(原子力機構・原環センター、2019:2020)では、埋め戻し材やプラグといったシー リングシステムが長期変遷によってその安全機能が失われる状態に至る際の現象・メカニズムの 整理を行っており、その中で、埋め戻し材中のベントナイトがパイピング(piping)や浸食(erosion) によって流出し、その結果ベントナイトの乾燥密度の低下が生じることが、埋め戻し材に期待す る安全機能を損なう可能性のある現象として抽出されている。スウェーデンの SKB では、特に 施工初期から再冠水までの期間における、パイピングや浸食のメカニズムや発生条件(湧水量、 材料等)を把握するための検討がなされており、そのメカニズムには不確実性が多分に含まれる ことから継続した検討が必要としつつも、坑道の再冠水により埋め戻し(Backfill)全体の動水勾 配が解消されることで、最終的にパイピングや浸食によって生じた間隙は閉塞することが指摘さ れている(例えば、SKB, 2010)。また、パイピングや浸食が生じる要因の一つとして施工方法や 手順に係る事象についても指摘されている。SKB では埋め戻し材の施工に関し、ベントナイトの ブロックとペレットを併用して充填する方法がとられており、特に湧水量が 0.25L/min~ 1.0L/min である場所については、ジオテキスタイルによる湧水の分散(Sandén and Börgesson, 2014)や排水対策を講じる必要があることが指摘されている。わが国でも、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, 2019)、 岩盤からの湧水量との関係性の評価等が原位置試験等を通じて進められてきている。我が国では、 処分場の設計フローに従い、埋め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、埋め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。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め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 れる埋め戻し材の施工概念はもとより、埋め戻し材の設計要件等の決定や、長期的な埋め戻し材 の性能を評価する際の初期条件を設定するための重要な知見となり得る。

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

2.2.2 令和3年度の実施内容

昨年度の検討を踏まえると、埋め戻し材の施工初期段階では、静水圧相当の水圧を保持する地 下水が大気圧開放状態の坑道に向かって流れるため、岩盤(坑道支保工)と埋め戻し材の間には

一定の水圧差が生じ、両材料の境界部には一定の流速で地下水が流れる。このようなプロセスに よって、施工した埋め戻し材が地下水のせん断力によって流出することが考えられる。一方、埋 め戻し材の施工が進み、坑道端部に力学プラグが施工された段階では、力学プラグの外側(埋め 戻し材未施工部)への地下水流量が制限されるとともに、埋め戻し材の膨潤が進行し、埋め戻し 部が低透水性に向かうことから、坑道内の地下水流れも制限される。この時、施工初期段階のベ ントナイトの流出によって選択的な水みちが生じ、かつ維持される場合、ベントナイトの流出が 継続する可能性があるものの、徐々に坑道内の水圧は静水圧に向かって回復することから、地下 水流速が低下し、結果として流出も低減する可能性がある。上記を踏まえると、施工初期におけ る坑道への湧水量(間隙水圧、流速に起因)がベントナイトの流出あるいは選択的な水みちを形 成することへの影響を評価するとともに、選択的な水みちが形成された場合、これが閉塞するか の確認や、最終的なベントナイト流出量が埋め戻し材の止水性に与える影響を評価することが、 重要であると考えられた。これに基づき、予察的な室内試験を実施し、上述した埋め戻し材の周 辺環境条件が再現可能かつこれらの条件がベントナイト流出量に与える影響を評価可能な試験系 の検討を行った。また、試行的に水頭差や材料仕様等を変化させた室内試験を実施し、ベントナ イトの流出が生じ得る条件を概括的に把握した。その結果、ベントナイトの流出現象を再現する ためには、ある程度長尺の試験系を構築する必要があるとともに、材料仕様(ペレットの粒径、 ブロック)や水質(淡水、海水)の違いによって、間隙閉塞の挙動が異なる可能性が示唆された。

令和3年度は、昨年度の検討結果を踏まえ、ベントナイトの流出現象が再現可能な長尺の試験 系を構築し、埋め戻し材の止水性能への影響に対するキーとなる因子の特定を図った。

2.2.3 令和3年度の成果

- (1) 流出・侵入試験
- (a) 試験条件
- (i) 試験装置

図 2.2・1 に試験装置の概要を示す。ベントナイト供試体の格納容器(アクリルチューブ)は長 さ1m、内径 100 mmの円筒系とした。アクリルチューブ内への通水は定水位注水と定圧注水の 2 系統構築した。定水位注水の場合は、給水タンク内のポンプをコントロールし、注水タンク内 水位を一定に保てるようにし、アクリルチューブ内へ定水位で注水できるようにした。水位条件 は、注水タンクの高さを調整することによって変化可能だが、実験室内の天井の高さに制限があ るため、500 cm 以上の水頭差をアクリルチューブに付加する場合は、注水ラインを高圧タンクに 切り替え、設定する水頭に相当する圧力をコンプレッサによって注水可能となっている。後述す るように、注水ラインを端部注水ラインおよび頂部注水ラインの2系統を設け、注水箇所の設定 に応じて、ラインを繋ぎかえた。注水流量を計測するための流量計は楕円ギア式流量計(愛知時 計電機(株)製:OF05ZZWN)およびバッテリー式流量計(アズワン製:DigiFlow6710M)を 設置し、流量に応じて切り替えが可能となっている。同様の流量計はアクリルチューブ下流側の 流出流量を計測するために、排水タンク手前にも設置した。下流側に到達した流出水を定期的に 分取し、ベントナイト流出量を算出した。

(ii) ベントナイト供試体

本試験では、埋め戻し材の施工オプションのうちペレット充填およびブロック施工を模擬する ため、供試体としてベントナイトペレットおよびベントナイトブロックを使用した。ベントナイ トペレットは充填時の間隙状態の違いに着目するため、粒径 15 mm および 1 mm (清水建設制 球形ペレット: クレイパール)(中島ほか, 2014)の2種類を使用した。ベントナイトペレットの 仕様を表 2.2-1 に示す。ベントナイトブロックは昨年度製作したものと同様に、乾燥密度 1.2 Mg/m3 となるように、ベントナイト(クニゲル V1)と泥岩(稚内層:幌延深地層研究センターの地下施設、深度 350 m 坑道で採取)を 40:60 で混合し、含水比 36%に調整して圧縮成型した。



図 2.2-1 流出・侵入試験装置

	$1 \mathrm{mm}$ ペレット	15 mm ペレット
ベントナイト	クニゲル V1	クニゲル V1
含水比 (%)	8.7	8.7
乾燥密度 (mg/m ³)	2.00	1.90

表 2.2-1 ベントナイトペレットの仕様

(iii) 試験水

昨年度と同様に、精製水(正起薬品工業株式会社: Lot No. 030203)および人工海水(富田製 薬株式会社:マリンアート SF-1)を使用した。

(iv) 供試体充填方法

ペレットはアクリルチューブを立ててロートとホースを用い、上部から重力落下で充填した。 充填したペレットの重量を測定し、充填密度を算出した。後述する混合ペレットを充填する場合 は、15 mmペレットを充填高さ 5 cm 程度となるように重力落下で充填し、1 mmペレットをそ の後充填した。この手順を充填高さ (アクリルチューブ高さ) 1 m になるため 20 回繰り返した。

ベントナイトブロックは内径 100 mm、高さ 125 mm の円筒容器内で、突き固めで製作した。 製作したベントナイトブロックの側部 10 mm をトリミングし、順次アクリルチューブに挿入し た。ベントナイトブロックの充填方法を図 2.2-2 に示す。



図 2.2-2 ベントナイトブロックの充填方法

(v) 流出水の分析

流出水に含まれるベントナイト流出量については、昨年度と同様、①濁度、②電気伝導度、③ 乾燥残渣重量、④ナトリウムおよびカルシウムのイオン濃度、の4つの項目を分析した。濁度の 計測はHANNA Instruments 社製のポータブル濁度計(HI93703)、電気伝導度の計測はHORIBA 社製の電気伝導度計(D-54)と使用した。ナトリウムおよびカルシウムのイオン濃度はサーモフ ィッシャー製のイオンクロマトグラフィ(ICS-1600C)を使用した。

(b) 試験ケース

今年度は、ベントナイトの流出・侵入現象が生じ得る条件を広範に探索するために、材料仕様、 水質、水頭差を変化させた試験ケースを設定した。材料間および材料とアクリルチューブ間(実 際の坑道では埋め戻し材と岩盤(支保工境界))の間隙の状態によって、実流速が異なり、地下水 流れのせん断力等によるベントナイトの流出挙動が異なることが想定されることから、試験供試 体内での間隙状態を変化させるため、ペレットの粒径、混合ペレット(粒径1mm+粒径15mm) および、ベントナイトブロックを使用することとした。また、岩盤からの地下水が埋め戻し材に 作用する場合は、面的に一様に流れるのではなく、局所的に流れることが想定されることから、 試験供試体への注水方法を端部、頂部の2種類で実施することとした。表 2.2-2 に試験ケースを 示す。

ケース名	材料形態	試験水	注水位置	水頭差
1	ペレット (1 mm)	精製水	端部	10 cm の水頭差から注水を行い、ア
2	ペレット (15 mm)			クリルチューブ下流側から水の流
3	ペレット (混合)			出が確認できない場合は順次 50
4	ブロック			cm→1 m→0.05 MPa→0.1 MPa \geq
5	ペレット (1 mm)	人工海水		水頭差を上げ、最大で 50 m まで上
6	ペレット (15 mm)			昇させた。
7	ペレット (混合)			
8	ブロック			
9	ペレット (混合)	精製水	頂部	
10	ペレット (15 mm)			
11	ブロック			
12	ペレット (15 mm)	人工海水		
13	ブロック			

表 2.2-2 試験ケース

(c) 試験結果

(i) ケース1(1 mm ペレット・精製水・端部注水)

表 2.2-3 にケース1の試験結果概要を示す。水頭差 10cm で通水を開始してから2分後までは 水の浸潤が進行するものの、その後は浸潤が停滞し5分後には目視で確認できる範囲での水の浸 潤は止まった(図 2.2-3)。浸潤した距離は最上流部から最大で水 10 cm 程度であった。水頭差 10 cm を1時間継続しても水の浸潤が進行しなかったので、その後、段階的に水圧を上昇させた。 水頭差を50 cm、100 cm、0.05 MPa と段階的に昇圧するものの、供試体下流側への流出は確認 できず、水頭差 0.1 MPa に昇圧した段階で、急激に供試体への水の浸潤が進行した。その後、約 18分でタンク内の水が尽きたため試験を終了した。

図 2.2・4 に示すように、0.1 MPa に昇圧時の流量は破過直後に 0.5 L/min であったが徐々に増加し昇圧から 15 分後に 1.7 L/min 前後となった。また、破過時に採取した流出水の濁度、電気伝導度、残渣濃度、ナトリウムイオンおよびカルシウムイオン濃度の分析結果を

表 2.2-4 に示す。いずれの分析結果についても、破過直後から時間の経過とともに、減少する 傾向が確認できた。これは、破過直後においては、瞬間的に閉塞部に高い圧力が作用し、それに 応じた地下水流れのせん断力によって流出するベントナイト量が多くなるものの、閉塞が解消さ れた後は局所的に作用する水圧が低減することで、ベントナイト流出量が少なくなると推察され る。なお、流出流量が大きくなるのは、閉塞の解消されることによって、試験系全体に水が流れ るようになったためと考えられる。

83

経過時間	水頭差	アクション	状態
00:00	10 cm	注水開始	
00:05			10 cm 程度水が浸入して止まる
01:00	$50~{ m cm}$	水位上昇	水の流出無し(60分間)
02:00	100 cm	水位上昇	水の流出無し(60分間)
03:00	$0.05 \mathrm{MPa}$	高圧タンク切り替え	水の流出無し(60分間)
04:00	0.1 MPa	昇圧	水が急激に侵入
04:03			下流端まで水が到達
04:21		終了	流出が 18 分継続しタンクが空になる

表 2.2-3 ケースの試験概要(1 mm ペレット・精製水・端部注水)



図 2.2-3 水頭差 10 cm 時の浸潤距離 (左図:1分後、中図:2分後、右図:30分後)



図 2.2-4 水頭差 10 cm 時の浸潤距離 (左図:1分後、中図:2分後、右図:30分後)

0.1 MPa 昇圧からの	3 分後	13 分後	20 分後
経過時間			
濁度 (FTU)	718.5	633.0	467.5
換算濃度 (ppm)	18.9	3.3	2.5
電気伝導度(mS/m)	46.6	10.6	7.7
換算濃度 (ppm)	22843	5176	3750
残渣濃度 (ppm)	18562		
Na+濃度 (ppm)	109		34
Ca ²⁺ 濃度 (ppm)	0.268		0.183

表 2.2-4 0.1 MPa の昇圧時における流出水の分析結果

*換算濃度:濁度、電気伝導度から換算したベントナイト濃度

(ii) ケース2(15 mm ペレット・精製水・端部注水)

表 2.2-5 に試験結果の概要を示す。また、試験時の供試体の全景を図 2.2-5 に示す。水頭差 10 cm で通水を開始した後、16 分程度で流出側から排水が始まった。通水流量は図 2.2-6 に示すように、流入側は流量計で計測し、流出側はメスシリンダーによる流量測定もしくは電子天秤で計測した流出量の差分から求めた流量で測定した。流出開始直後は 100 mL/min 程度であったが 1 時間程度で急激に流量が低下し、その後も徐々に流量が低下し、試験開始から 10 時間までに 7~8 mL/min の流量まで低下した。その後は夜間のため無人となり 10 時間後以降のデータは取得できていないが、翌日の 19.5 時間後には流出が止まっているのを確認した。累計流出量を計測していた電子天秤の指示値から時間を推定したところ、流出が止まった時間 11 時間 39 分後と推定された。その後、段階的に通水圧力を上げて流出の再開を確認したが、0.5 MPa の圧力に設定した場合も流出は始まらなかった。

試験開始から7時間後までに採取した流出水について、濁度および電気伝導度を計測し、ベントナイト流出量の同定を試みた。図2.2-7に濁度および電気伝導度の変化を示す。濁度と流量には逆の相関がみられ、流量が多いときに濁度が小さい傾向が確認された。逆に電気伝導度は流量が多いときに高い値を示しており、濁度とは逆の傾向がある。図2.2-8に濁度および電気伝導度から算定したベントナイト濃度および乾燥残渣計測から算出したベントナイト濃度を示す。電気伝導度については、粒子そのものとベントナイトから溶出した陽イオンの双方の影響を反映している可能性があり、これが濁度および乾燥残渣計測から算出したベントナイト濃度との乖離の要因となっている可能性が考えられる。そのため、流出したベントナイトの流出量については、濁度もしくは乾燥残渣に基づいて評価することが適切であると考えられる。

経過時間	水頭差	アクション	状態
00:00	10 cm	注水開始	
00:01			下流端まで水が侵入
00:16			水の流出開始
(11:39)			水の流出が止まったと推定される時間
19:30	$50~{ m cm}$	水位上昇	水の流出無し(15 分間)
19:45	100 cm	水位上昇	水の流出無し(16分間)
20:01	0.05 MPa	高圧タンク切り替え	水の流出無し(15分間)
20:16	0.1 MPa	昇圧	水の流出無し(15分間)
20.31	$0.5 \mathrm{MPa}$	昇圧	3 滴の水の流出を確認しその後は流出無し
			(14 分間)
20:45		終了	

表 2.2-5 試験結果概要 (ケース 2:15 mm ペレット・精製水・端部注水)



図 2.2-5 試験体全景 (ケース 2)



図 2.2-6 10 cm 水頭差による通水流量 (ケース 2)


図 2.2-7 流出水の濁度および電気伝導度測定結果



図 2.2-8 濁度、電気伝導度および残渣重量から算定したベントナイト濃度(ケース 2)

(iii) ケース3(混合ペレット・精製水・端部注水)

表 2.2-6 に試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始した後、5 分程度で浸潤が止ま った。浸潤した距離は図 2.2-9 で確認できるように 10~15 cm 程度であった。水頭差 10 cm の 状態を 1 時間継続し、水の浸潤が進行しなかったので、その後、段階的に水圧を上昇させた。0.05 MPa での注水を経て 0.1 MPa に移行した段階までは、水の浸潤が再開することはなかった。0.1 MPa から 0.5 MPa に昇圧する段階で、供試体内を水が通過する破過状態が生じた。0.3 MPa 前 後で破過が継続した。その後 0.5 MPa まで昇圧し、約 8 分で高圧タンク内の水が尽きるまで通水 を続けた。破過時の流量は、流入側に設置した流量計で計測したところ、図 2.2-10 に示すように 破過直後から上昇し、最後は 5 L/min 程度を示した。また、破過時に採取した流出水を各種の方 法で分析した結果を表 2.2-7 に示す。破過直後の 1 分後の採取水のベントナイト濃度に比べて、 終了直前の 7 分後の採取水では 1/3~1/4 程度と低い値を示した。イオン濃度について、ナトリウ ムイオン、カルシウムイオンともに、同様の傾向が認められた。

経過時間	水頭差	アクション	状態
00:00	10 cm	注水開始	
			上流端から 10~15 cm 程度水が侵入
01:30	$50~{ m cm}$	水位上昇	水の流出無し(60分間)
02:35	100 cm	水位上昇	水の流出無し(79分間)
03:54	0.05 MPa	高圧タンク切り替え	水の流出無し(56分間)
04:50	0.1 MPa	昇圧	水の流出無し(60分間)
05:50	$0.5 \mathrm{MPa}$	昇圧	昇圧過程(0.3 MPa 時)で急激に水が侵入
05:58		終了	

表 2.2-6 ケース 3 の試験結果概要(混合ペレット・精製水・端部注水)



試験前



試験開始直後



 1 分後
 5 分後

 図 2.2-9 水頭 10 cm 通水で 5 分後に浸潤が止まるまでの状態変化 (黄色破線部が供試体への水の浸潤位置)



図 2.2-10 0.3~0.5 MPa 通水段階で破過したときの流量

表 2.2-7 破過時の流出水の分析結果 (ケース3:混合ペレット・精製水・端部注水)

0.3 MPa 昇圧からの	1 分後	7 分後
経過時間		
濁度 (FTU)	702.0	975.0
換算濃度 (ppm)	18513	5142
電気伝導度(mS/m)	50.8	17.9
換算濃度 (ppm)	24902	8755
残渣濃度 (ppm)	16728	-
Na+濃度 (ppm)	125	57
Ca ²⁺ 濃度 (ppm)	0.4	0.2

(iv) ケース4(ブロック・精製水・端部注水)

表 2.2-8 に試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始した後、24 分程度で流出側か ら水が排水を始めた。通水流量の時間変化を図 2.2-11 に示す。通水初期に流量の変化が見られた 後、3 時間後から 8 時間後まで期間で 30 mL/min 程度の流出量が確認された。その後は、徐々に 流出量が低下し、10~12 mL/min の流出量が継続した。図 2.2-12 に流出水の分析結果を示す。 本ケースでは常に下流端への水の流出が継続したが、ベントナイト流出量は一定ではなく、通水 開始 6 時間までは、流出量が増大した後にベントナイト流出量が増える傾向が見られた。一方で、 通水開始 12 時間移行は、流出量の増加と逆の相関を示し、試験終了まで徐々にベントナイト流 出量が増加する傾向が見られた。これは供試体内の上部関係の閉塞状態に応じて、供試体内を流 れる流速が異なることが要因の一つとして考えられる。

経過時間	水頭差	アクション	状態
00:00	10 cm	注水開始	上流端下部から水が侵入
00:05			上流端上部から水が侵入
00:06			上流端下部から 70 cm 程度水が侵入
00:10			下流端まで水が到達
00:24			水の流出が開始
29:10		終了	水の流出が継続

表 2.2-8 ケース4の試験概要(ブロック・精製水・端部注入)



図 2.2-11 10 cm 水頭差による通水流量 (ケース 4)



図 2.2-12 ケース4の流出流量およびベントナイト流出濃度

(v) ケース5(1 mm ペレット・人工海水・端部注入)

表 2.2・9 に試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始した後、1~2 分程度で浸潤が 止まり、その浸潤距離は5 cm 程度であった。図 2.2・13 に供試体内の水の浸潤の様子を示す。水 頭差 10 cm の状態で1時間継続し、50 cm に昇圧し、さらに1時間継続し、次に 100 cm に昇圧 した後は 20 時間程度水圧の維持を行ったが、水が浸潤しない状態に変化はなかった(図 2.2・13 (a))。その後、30 分おきに、0.1 MPa 刻みで昇圧した。0.2 MPa で浸潤が再開したが、30 cm の 位置で再び浸潤がとまった(図 2.2・13 (b))。さらに、0.4 MPa で 40 cm の位置まで瞬時に浸潤 が進行し(図 2.2・13 (c))、0.5 MPa では緩やかに水が浸潤している状況が確認できるものの(図 2.2・13(d))2 時間後には浸潤しなくなり試験を終了した。なお、0.2 MPa に昇圧した段階で供試 体が下流側に押され、アクリルチューブ最上流部と供試体の間に間隙が生じ、この間隙はさらに 昇圧するごとに広がる現象が確認された。本ケースでは、流出側で排水が確認できなかったこと から、流出流量およびベントナイト流出濃度は計測できなかった。

経過時間	水頭差	アクション	
00:00	10 cm	注水開始	下流端下部から 10 cm まで侵入し止まる
01:00	$50~{ m cm}$	水位上昇	水の流出無し(60分間)
02:00	100 cm	水位上昇	水の流出無し(20 時間 40 分間)
22:40	0.05 MPa	高圧タンク切り替え	水の流出無し(30分間)
23.10	0.1 MPa	昇圧	水の流出無し(30分間)
23:40	0.2 MPa	昇圧	水の侵入が再開し 10 分程度で下流端から
			30 cm まで侵入し止まる。下流端近傍でベ
			ントナイトの崩壊が始まる
24:10	0.3 MPa	昇圧	
24:40	0.4 MPa	昇圧	下流端から 40 cm まで水が侵入し止まる
25.10	$0.5 \mathrm{MPa}$	昇圧	緩やかに水が侵入するものの2時間後に止
			まる
27:10		終了	

表 2.2-9 ケース5の試験概要(1 mm ペレット・人工海水・端部注水)



(a) 水頭 10 cm 通水の 2 分後の状況



(b) 0.2 MPa 通水の 3 分後の状況



(c) 0.4 MPa 通水の 3 分後の状況



(d) 0.5 MPa 通水の 3 分後の状況 図 2.2-13 供試体内の水の浸潤の様子

(vi) ケース6(15 mm ペレット・人工海水・端部注水)

表 2.2-10 にケース 6 の試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始した後、28 分後に 流出水が確認されたものの 48 分後にはほぼ流出が停止した。以降は、段階的に 0.5 MPa まで昇 圧したが、流出が再開することはなかった。流出水は注水開始から 28 分後の一点のみ採取が可 能であった。流出水の分析結果を表 2.2-11 に示す。

経過時間 アクション 状態 水頭差 注水開始 下流端下部から 10 cm まで侵入し止まる 00:00 10 cm 01:00 50 cm水位上昇 水の流出無し(60分間) 水の流出無し(20時間40分間) 02:00 100 cm 水位上昇 高圧タンク切り替え 水の流出無し(30分間) 22:40 0.05 MPa 0.1 MPa 昇圧 水の流出無し(30分間) 23:1023:40 0.2 MPa 昇圧 水の侵入が再開し 10 分程度で下流端から 30 cm まで侵入し止まる。下流端近傍でベ ントナイトの崩壊が始まる 昇圧 24:100.3 MPa 昇圧 下流端から 40 cm まで水が侵入し止まる 0.4 MPa 24:40昇圧 緩やかに水が侵入するものの2時間後に止 25:10 $0.5 \mathrm{MPa}$ まる 終了 27:10

表 2.2-10 ケース6の試験概要(15 mm ペレット・人工海水・端部注水)

表	2.2-11	流出水の分析結果	(ケース 6)
---	--------	----------	--------	---

注水開始からの	28 分後
経過時間	
濁度 (FTU)	157.5
換算濃度 (ppm)	813
電気伝導度(mS/m)	4080
換算濃度 (ppm)	-
残渣濃度 (ppm)	-
Na+濃度 (ppm)	10551
Ca ²⁺ 濃度 (ppm)	713.4

(vii) ケース7(混合ペレット・人工海水・端部注水)

表 2.2-12 に試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始した後、8 分後には浸潤が止まり、その浸潤距離は図 2.2-14 に示すように 5 cm 程度であった。その後、1 時間~30 分の間隔 で 0.5 MPa まで昇圧するが、再び浸潤が進行することはなかった。なお、このケースでは、水の 通水も破過も生じなかったため、分析すべき流出水は採水できなかった。

経過時間	水頭差	アクション	状態
00:00	10 cm	注水開始	
00:10			下流端から5cmまで侵入し止まる
01:00	$50~{ m cm}$	水位上昇	変化なし
02:00	100 cm	水位上昇	変化なし
04:00	$0.05 \mathrm{MPa}$	高圧タンクに変更	変化なし
04:30	0.1 MPa	昇圧	変化なし
05:00	0.2 MPa	昇圧	変化なし
05:30	0.3 MPa	昇圧	下流端でベントナイトの崩壊が始まる
06:00	0.4 MPa	昇圧	下流端のベントナイトの崩壊が継続
06:30	$0.5 \mathrm{MPa}$	昇圧	
07:00		終了	

表 2.2-12 ケース7の試験概要(ケース7:混合ペレット・人工海水・端部注水)



図 2.2-14 水頭 10 cm 通水の 8 分後の状況 (黄色破線部が水の浸潤位置)

(viii) ケース8(泥岩ブロック・人工海水・端部注水)

表 2.2-13 に試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始し、27 分後に排水が始まった。 通水流量を図 2.2-15 に示す。流出直後に流量の大きい変化があった後、8 時間後まで 20 mL/min 程度で排水が安定し、その後は次第に流量が低下し、28 時間後に 3 mL/min の流量を示したが排 水が止まることはなかった。流出水中の濁度は試験期間通じて、計測されなかった。また、電気 伝導度については、人工海水相当の電気伝導度が計測されており、ベントナイトの流出に起因し た陽イオン等の影響を検出することはできなかった。なお、Na+および Ca2+についても同様で ある。

経過時間	水頭差	アクション	状態
00:00	10 cm	注水開始	
00:06			上流端から 25 cm まで侵入
00:18			上流端から 75 cm まで侵入
00:27			下流端から流出が開始
26:00		終了	下流端からの流出が継続

表 2.2-13 ケース8の試験概要(泥岩ブロック・人工海水・端部注水)



図 2.2-15 10 cm 水頭差による流量の変化 (ケース 8)

(ix) ケース9(混合ペレット・精製水・頂部注水)

表 2.2-14 に試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始した直後、水の浸潤が止まり、 27 分後に排水が始まった。その後、20 分間隔で段階的に昇圧した結果、0.3 MPa に昇圧する段 階の 0.28 MPa で一気に水が浸入し 8 分間で高圧タンク内の水が尽きた。通水時の流量は概ね 4 L/min 程度であった。0.2 MPa から 0.3 MPa に昇圧段階での流出水の分析結果を表 2.2-14 に示 す。1 分後の電気伝導度から換算したベントナイト濃度が残渣濃度や濁度換算濃度に比べて高い ものの、徐々にベントナイト濃度が低下する傾向が確認された。この傾向は、イオン濃度につい ても同様であった。

-				
	経過時間	水頭差	アクション	状態
_	00:00	10 cm	注水開始	水の流出無し(20分間)、上流端近傍で水
				の侵入が止まる
	00:20	$50~\mathrm{cm}$	水位上昇	水の流出無し(20分間)
	00:40	100 cm	水位上昇	水の流出無し(20分間)
	01:00	0.05 MPa	高圧タンク切り替え	水の流出無し(20分間)
	01:20	0.1 MPa	昇圧	水の流出無し(20分間)
	01:40	0.2 MPa	昇圧	水の流出無し(20分間)
	02:00	0.3 MPa	昇圧	昇圧過程(0.28 MPa)で急激に水が侵入
	02:01			下流端から流出が開始
	02:08		終了	

表 2.2-14 ケース9の試験概要(混合ペレット・精製水・頂部注水)

表 2.2-15 破過時の流出水の分析結果(ケース 9:混合ペレット・精製水・頂部注水)

0.28 MPa 昇圧からの	1 分後	2 分後	4 分後	6 分後	8分後
経過時間					
濁度 (FTU)	314.5	208.0	121.0	737.0	543.5
換算濃度 (ppm)	16588	10970	6382	3887	2867
電気伝導度(mS/m)	62.1	24.3	15.0	10.6	8.7
換算濃度 (ppm)	30441	11912	7348	5176	4260
残渣濃度 (ppm)	14382	-	-	-	-
Na+濃度 (ppm)	139	-	57	-	38
Ca ²⁺ 濃度 (ppm)	19.5	-	0.4	-	0.2

(x) ケース 10(泥岩ブロック・精製水・頂部注水)

表 2.2-16 に試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始した後、22 分程度で流出側か ら流出が始まった。通水流量の経時変化を図 2.2-16 に示す。流出初期に 20 mL/min の前後で変 動していた流量は、4 時間経過時点で 30 mL/min に増加した後、17 時間後までに 10~15 mL/in に低下し、その後はその流量で流れ続けたと考えられる。図 2.2-17 に濁度および電気伝導度か ら換算したベントナイト濃度を示す。時間の経過とともにベントナイト濃度は低下する傾向を示 すが、電気伝導度から求めた値は、濁度から求めた値に対して 100 倍程度大きく、流出水の乾燥 残渣から求めたベントナイト濃度は濁度から求めた値と概ね一致している。流出水の Na+および Ca²⁺についても時間とともに低下する結果となった(図 2.2-18)。

表 2.2-16 ケース 10 の試験概要(ケース 10:泥岩ブロック・精製水・頂部注水)

-



図 2.2-16 10 cm 水頭差による通水段階の流量(ケース 10)



図 2.2-17 濁度および電気伝導度から換算したベントナイト濃度(ケース 10)



図 2.2-18 流出水のイオン濃度(ケース 10)

(xi) ケース 11 (15 mm ペレット・人工海水・頂部注水)

表 2.2-17 に試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始して 47 分経過時点で水の浸 潤が止まった(図 2.2-19)。1 時間経過時点まで水の浸潤に動きがないことを確認し、50 cm に 水頭差を上昇させたところ、その3分後に流出側からの排水が始まった。50 cm 水頭差では水み ちの発生も確認でき(図 2.2-20)、1 時間経過しても水が止まる兆候がみられなかったため、再度 10 cm に降圧し、閉塞により水が止まるかを確認した。その結果、3 時間 26 分後に水が止まった。さらにその後、50 cm、100 cm と段階的に昇圧した段階では通水は再開しなかったが、0.05 MPa (500 cm) にした段階で再度、流出が再開した。図 2.2-21 に水頭差の変遷と流量の変化を示す。

図 2.2-22 に濁度から求めたベントナイト濃度を示す。0.05 MPa 昇圧直後に多くのベントナイトが流出しするものの次第に流出量が減少する傾向が確認された。

経過時間	水頭差	アクション	状態
00:00	10 cm	注水開始	
00:47			下流端まで水が到達
01:00	$50~{ m cm}$	水圧上昇	下流端から水の流出開始
01:03			下流端から水の流出開始
01:08			注入頂部から右下半分の位置で水の侵入が
			止まる
02:00	10 cm	水位下降	
03:26			
03:43	$50~{ m cm}$	水位上昇	水の流れ無し(30 分間)
04:10	100 cm		水の流れ無し(30分間)
04:40	0.05 MPa	高圧タンク切り替え	水の流れが再開、注水頂部から左半分にも
			水が侵入
04:42			下流端から流出開始
05:08		終了	

表 2.2-17 試験結果概要 (ケース 11:15 mm ペレット・人工海水・頂部注水)



図 2.2-19 10 cm 水頭における水の浸潤の状況(47 分後)



図 2.2-20 水みちの発生状況 (ケース 11: 通水試験 2 時間後)



図 2.2-21 流量と水頭差の変化 (ケース 11)



図 2.2-22 濁度および電気伝導度から算定したベントナイト濃度(ケース 11)

(xii) ケース 12(泥岩ブロック・人工海水・頂部注水)

表 2.2-18 に試験結果の概要を示す。水頭差 10 cm で通水を開始し、20 分後に排水が始まった。 流出開始は 10 mL/min 程度の流量であったが、流量が上昇し 6 時間後までに急激に流量が低下 し、その後は非常に小さい流量に落ち着く結果となった(図 2.2-23)。なお 24 時間を経過しても 流出は止まらなかった。図 2.2-24 に濁度から換算したベントナイト流出濃度を示す。流出量が 大きい 6 時間までは変動はあるもののベントナイトの流出濃度が高くその後、次第に低下する傾 向が確認された。

経過時間	水頭差	アクション	状態						
00:00	10 cm	注水開始							
00:15			下流端まで水が到達						
00:20			下流端から流出開始						
25:00		終了	流出が継続						

表 2.2-18 ケース 12 の試験概要(泥岩ブロック・人工海水・頂部注水)



図 2.2-23 10 cm 水頭差による流量の変化 (ケース 12)



図 2.2-24 濁度から換算したベントナイト濃度 (ケース 12)

(xiii) ケース 13 (15 mm ペレット・精製水・頂部注水)

表 2.2-19 に試験結果の概要を示すとともに、図 2.2-25 に流出水の流量変化を示す。水頭差 10 cm で通水を開始し、1 時間程度で排水が始まった。その後、2 時間程度経過した時点で数分間だけ閉塞により水の流れがとまったが、直ちに再開し、流量の変動はあるものの、25 時間経過後で も水の流れは止まらなかった。濁度、電気伝導度および残渣重量から換算したベントナイト流出 濃度を図 2.2-26 に示す。流出水が大きい初期にベントナイト流出量が高く、その後は流出水の 流量と同様に徐々にベントナイト流出濃度が低下する傾向が確認された。

経過時間	水頭差	アクション	状態							
00:00	10 cm	注水開始								
00:10			下流端まで水が到達							
01:04			下流端から流出開始							
01.55			流出量がほぼなくなる							
02:30			流出が再開							
25:30		終了	流出が継続							

表 2.2-19 試験結果概要(ケース 13:15 mm ペレット・精製水・頂部注水)



図 2.2-25 10 cm 水頭差による流量の変化



図 2.2-26 濁度、電気伝導度、残渣重量から換算したベントナイト濃度(ケース 13)

(d) 試験結果のまとめ

上述の13ケースの流出試験について、3つの観点から試験結果の整理を行った。

・閉塞および流出水の有無に関する評価

精製水よりも人工海水の方が閉塞しやすい傾向があった。最も隙間が大きく、かつ膨潤力が小 さい泥岩ブロックを使用したケースで、精製水を通水したケース4と人工海水を通水したケース 8の流量の変化に着目する。図 2.2・11 (精製水:ケース4) では10時間後以降は10mL/minで 29時間程度まで流量がほぼ一定値を示しており、閉塞の進行が遅くなっているが、ケース8では 7時間後から25時間後までほぼ直線的に流量が低下し、25時間後で3~4mL/minを示している (図 2.2・15)。すなわち人工海水の方が閉塞の進行が速いことがわかる。次に、隙間の大きい15 mmペレットを使用したケース2とケース6を比較すると、ケース2では閉塞完了までに12時 間弱を要していたが (図 2.2・6)、ケース6では通水開始から48分、排水開始からは20分で通 水が止まっている。さらに、供試体が最も緻密な状態となっている混合ペレットの場合には、10 cm 水頭差で通水した段階で、精製水(ケース3)と人工海水(ケース7)の両方ともに、5~10 cm 位置までしか浸潤しなかったが、その後通水圧を上げていった段階では、精製水のケースは 0.3 MPa 付近で破過に到ったが、人工海水の場合は0.5 MPa でも破過に到らなかった。このこと からも、人工海水の方が間隙の閉塞の進行が速い傾向にあることがわかる。

・埋め戻し材の流出に関する評価

15 mm ペレットを使用した場合で比較すると、ケース2(精製水)の流出水のベントナイト濃度は初期を除き4,000~5,000 ppm あるのに対して(図 2.2・8)、ケース6(人工海水)では1点のみであるが831 ppm である(表 2.2・11)。ブロックの場合、ケース4の濁度から換算したベントナイト濃度は最大で400 ppm であり(図 2.2・13)、人工海水の場合(ケース8)の場合は計測されなかった。このことから、電解質濃度が高い水(例えば、人工海水など)の場合は、ベントナイトの微粒子が運びさられにくく、すなわち、流出しにくい傾向にあることが示唆される。

・水みちの発生と閉塞について

今回の試験は段階的に水頭差を上げていく試験手順で計画した。この中で、ケース 11 のみは 50 cm 水頭差で通水している状態から、水頭差を 10 cm に降下させた手順を試した。50 cm 水頭 差での通水状況は、優位な水みちも観察されており、水頭差を降下させても閉塞はしないとの予 測があったが、実際には水頭差を 10 cm にすることで、水みちも細くなり止水に至る可能性が示 唆された。試験条件としては、15 mm ペレットに人工海水を通水する試験ケースであった。また、 注水箇所の違いに着目すると、ケース 6 では、水みちの形成や昇圧途中で流出が開始するなどの 現象が見られなかったことから、注入箇所や流出端までの距離(供試体の長さ)によっても、閉 塞状況は異なり、注水箇所から一定程度、埋め戻し部の距離があれば有意な流出が生じないか可 能性が示唆された。

(2) 流出侵入現象の X 線 CT 評価試験

(a) 目的

(1)流出・侵入試験において確認されたように、ベントナイトペレット粒子間に存在する間隙は ベントナイトの膨潤により閉塞の方向に向かうものの、埋め戻し材の施工初期に生じ得る条件と して、ベントナイトの膨潤に伴い間隙が閉塞することにより、局所的に高い間隙水圧が作用する 場合、再度選択的な水みちとして閉塞が解消され、同じ水理条件が継続する場合、水みちが残り 続ける可能性も考えられる。このような現象は、地下水が供給される坑道壁面に近い材料界面で 相対的に生じやすいと考えられるものの、埋め戻し材の内部においても同様の事象は生じ得ると 考えられる。特に、埋め戻し材としてベントナイトペレットを用いる場合は、埋め戻し材–壁面 (コンクリート支保工もしくは岩盤)のみならず、施工初期においてもペレット粒間において不 均質に間隙が分布することが想定されることから、このような選択的な水みちが生じ得るかを確 認することは、ベントナイトペレットを用いて埋め戻し材を施工する場合の初期性能に係る品質 保証の観点で重要であると考えられる。一方、このような間隙分布すなわち、埋め戻し材の密度 分布の過渡的な状況の不均質性を把握するには、サンプリング等による擾乱の影響を排除する観 点から、非破壊試験で評価できることが望ましい。本検討では、湿潤密度と相関があると報告さ れている(例えば、棚井ほか,2003)X線CT値により、埋め戻し材としてベントナイトペレット を用いた場合の、施工初期の膨潤過程における選択的な水みちの形成有無の評価を行う。

(b) 試験条件

水質の違いによる流出侵入現象の違いを確認するために、通水する水はイオン交換水および(1) 流出・侵入試験で使用した人工海水の2種類を用いて実施した。図2.2-27に試験装置の概念図 を示す。試験容器は図2.2-28に示すように、縦200mm、横200mm、深さ80mmの容器とし、 上下面を多孔質フィルタ(ポーラストン:株式会社日本金剛砥石製作所製)で挟み込む形でベン トナイトペレット(クニゲルV1)を充てんした。ベントナイトペレットの粒径は15mmであり、 ペレット単体の平均含水比が12.4%、平均乾燥密度が1.94 Mg/cm³である。ベントナイトペレッ トの充てんは重力落下によって行い、充填密度は精製水通水ケースで、1.32 Mg/m³、人工海水通 水ケースで1.34 Mg/m³であった。通水は、図2.2-27に示すように、マリオットタンクを用いた 定圧注水とし、適宜マリオットタンクに給水しながら試験を実施した。試験実施中は、通水量測 定、ベントナイト流出量測定、流出水分析を実施した。ベントナイトの流出量は、流出水の電気 伝導度、濁度および流出水の残渣の乾燥重量を測定することにより把握した。流出水の電気伝導 度計測には電気伝導度計(HORIBA 社製:WQ-320、300-C-2)を、濁度計測には濁度計(KRK 社製:TR-55)をそれぞれ用いた。残渣の乾燥重量は、流出水を炉乾燥さて測定した。流出水分 析では、イオンクロマトグラフィにより、Na、Ca等の主要イオンの濃度計測を実施した。



図 2.2-27 試験装置の概念図



図 2.2-28 試験容器(左図:試験容器寸法、右図:多孔質フィルタの設置状況)

(c) 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(注水圧:10kPa)し、通水量の経時変化を 記録した。通水量の経時変化を図 2.2-29 および図 2.2-30に示す。なお、マリオットタンクの容 量制限により、定期的に給水が必要であり、一定頻度で通水を停止している。したがって、図 2.2-29 および図 2.2-30 中の横軸は、通水を停止している期間を差し引くことで補正し、実際の 通水時間として記載している。イオン交換水条件の供試体では通水から4日目でフランジのボル ト部分からの漏水を確認した(図 2.2-29)。これはベントナイトの膨潤圧で塩ビ製のフランジに たわみが生じ、止水用のOリングが機能しなくなったためと考えられる。漏水後も通水は継続し て行ったもの、通水開始から4日目以降はフランジ上部からの採水ができず、ベントナイト流出 量やイオン濃度分析結果を取得できなかった。

人工海水条件では、蒸留水条件よりも初期の通水量の増加速度が緩やかだった。ベントナイト

の膨潤の進行に応じ壁面に数本の水みちが観察された。この水みちは最終的には壁面近傍に1本のみ残ったため、継続して通水が可能であり、これにより通水が継続したと考えられる。 人工海水条件の供試体は上述の水みちの閉塞挙動を観察するため、3回目のX線CT計測後に、 注水圧を0.5m水頭(5kPa)に下げ、通水を継続した。



図 2.2-29 イオン交換水条件の通水量の経時変化



図 2.2-30 人工海水条件の通水量の経時変化

電気伝導度および濁度に基づく、ベントナイト濃度の経時変化を図 2.2-31 に示す。ベントナ イト粒子の存在量に起因する電気伝導度の変化に対し、人工海水そのものの電気伝導度が非常に 大きいため、ここではイオン交換水条件の結果のみ示す。なお、濁度および電気伝導度からベン トナイト濃度への換算は、事前にイオン交換水条件での検量線を作成し、この検量線に基づき換 算を行った。ベントナイト濃度に乖離はあるものの、通水直後にベントナイトが急激に流出し、 その後濃度が低下する傾向が確認された。ただし、換算されたベントナイト濃度は電気伝導度と 濁度間で乖離が見られた。これは、濁度計測ではベントナイト粒子そのものを計測しているのに 対し、電気伝導度はベントナイト粒子そのものに加え、ベントナイトから溶出する陽イオンの影 響を受けることが要因と考えられる。また、本試験では、通水方向が下方から上方であり、重力 によって流出分が上流側に到達しにくかったことも要因の一つとして考えられる。

流出水の残渣の乾燥重量は、流出水 50 ml を金属製のシャーレに入れ、炉乾燥させて析出した 固体分を測定することにより取得した。試験結果を表 2.2・20 と表 2.2・21 に示す。ブランク(通 水前の試験水)の試験結果がイオン交換水では残渣が 0g であったのに対し、人工海水では 1.731 g となった。これは人工海水中の溶存塩が析出したためである。今回の試験ではベントナイトの 流出重量を測定対象としているため、人工海水条件では溶存塩の影響を補正して濃度を算出した。 具体的には、ブランクの残渣重量を試験水の重量と残渣質量から差し引いて補正濃度を算出した。 一部補正濃度がマイナスとして算出されたが、これは試験水である人工海水の溶存塩の重量のば らつきが原因であると考えられる。

イオン交換水の残渣の乾燥重量の結果(表 2.2-20)から、ベントナイトの流出量は試験開始直 後に多く、その後は半分以下に流出量が落ちることが明らかとなり、これは、濁度および電気伝 導度から換算したベントナイト濃度の経時変化と同様の傾向であった。人工海水試料では、イオ ン交換水条件ほどベントナイトの流出が発生していないことが明らかとなった(表 2.2-21)。イ オン交換水中の濃度は濁度から算出した濃度と近い値を示す。そのためイオン交換水条件におけ るベントナイト流出濃度は、電気伝導度よりも濁度の方がより適切な濃度を示していると考えら れる。一方、人工海水条件では濁度から換算した濃度よりも10倍近い値を示した。



図 2.2-31 電気伝導度および濁度から換算したベントナイト濃度の経時変化

イオン交換水条件	ブランク※	2021/11/17	2021/11/19	2021/11/21
試験水の質量 (g)	50.041	50.007	50.03	50.009
乾燥残留質量(g)	0.000	0.098	0.033	0.034
濃度(mg/L)	0.0	1959.7	659.6	679.9

表 2.2-20 イオン交換水条件の流出水の濃度

※通水前の試験水

人工海水条件	ブランク※	2021/11/17	2021/12/6	2022/1/14	備考
試験水の質量 (g)	50.03	50.022	50.027	50.025	1
残渣質量(g)	1.731 (③)	1.784	1.717	1.743	2
試験水の補正質量(g)	48.30	48.29	48.30	48.29	④ (①-③)
補正残渣質量 (g)	0.000	0.053	-0.014	0.012	5 (2-3)
濃度 (mg/L)	34599.2	35664.3	34321.5	34842.6	①②より計算
補正濃度(mg/L)	0.0	1097.5	-289.9	248.5	④⑤より計算

表 2.2-21 人工海水条件の流出水の濃度

※通水前の試験水

イオンクロマトグラフによる主要イオン濃度の計測結果を表 2.2-22 に示す。イオン交換水条 件では、溶液内の Na⁺と SO₄²濃度の上昇が確認された。これはベントナイトの交換性陽イオン の溶出や硫酸塩鉱物の溶解などが要因と考えられる。

人工海水条件の試料では、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Cl⁻、Br⁻、SO₄²のイオン濃度が通水直後に上昇 し、通水を継続するにつれブランクの濃度に収束する傾向が見られた。イオン濃度の上昇は、イ オン交換水の時と同様にベントナイトの吸水膨潤に伴うベントナイトの交換性陽イオンの溶出や 硫酸塩鉱物の溶解などが要因と考えられる。しかしながら、人工海水の場合は、イオン交換水の 場合に比べて吸水膨潤の程度が相対的に小さく、水みちが形成後は反応に寄与する比表面積が減 少するため陽イオン交換や硫酸塩鉱物の溶解などによる影響が水みち形成前と比べて起きにくく なっていると考えられる。

109

試驗水	ケーフタ	这十年生	Li+	Li ⁺ Na ⁺ NH ₄ ⁺ K ⁺ Mg ²⁺ Ca ²⁺						Cl-	Br [.]	$\mathrm{SO}_{4^{2^{-}}}$					
动物人	り 一 へ 名	1本/八吋 为1	mg/L														
	ブランク	_	0.001	1.25	0.004	0.32	0.16	0.18	0.0	2.0	n.a.	n.a.					
イオン	21.11.17	通水開始直後	0.003	18.12	n.a.	0.18	0.06	0.15	n.a.	2.0	0.1	1.8					
交換水	21.11.19	通水2日後	0.005	15.85	n.a.	0.14	0.05	0.26	n.a.	1.4	n.a.	2.7					
	21.11.21	漏水前	0.001	18.41	n.a.	0.19	0.03	0.08	n.a.	1.4	0.1	2.8					
	ブランク	_	0.480 8960.60		4.50	375.10	1057.91	446.35	0.5	16231.2	139.5	2115.0					
人工	21.11.17	通水開始直後	0.262	9505.71	n.a.	372.94	1192.27	719.41	n.a.	17081.0	144.4	2636.5					
海水	21.12.6	試験途中	0.235	0.235 8992.57		472.97	1166.90	775.92	n.a.	16377.1	140.1	2547.2					
	22.1.14	試験終了前	0.191	8926.00	2.30	620.08	1086.10	561.99	n.a.	16254.8	138.3	2225.2					

表 2.2-22 主要イオン濃度分析結果

※NO2⁺、NO3⁻、PO4³⁻は計測、検出限界以下のため省略

(d) X線CT画像の評価

X線CT計測は、ベントナイトの膨潤による密度分布の変遷を確認するために、①ペレットを 試験容器に充てんした時点(試験前)、②通水開始後、通水量が落ち着いた時点(試験途中)、③ 通水を継続しペレットの膨潤が進んだ時点(試験後)の3段階で計測を実施した。X線CT画像 は東芝社製(Alexion)の装置を用いた。スライス間隔は2mm、画素数は512×512である。試 験に先立ち、製作した試験容器の外周の素材が試験容器内部の材料のCT画像に影響を及ぼし得 るかを確認するために予備計測を行った。予備計測結果を図 2.2-32に示す。平面図、断面図とも に、鮮明な画像を取得できたことから、試験容器外周の素材の影響は小さいことが確認できた。 X線CT撮影は(b)通水試験の供試体を対象にすることから、撮影時は一度通水を止め、止水のた めに試験容器の上流および下流端に塩ビ製のキャップを取り付けた。予備計測時はキャップの凹 凸を避けるため試験容器の上下を逆転して測定を行ったが、後述する本測定の際は上下逆転せず、 木製の台座を設けて測定を行った。

計測状況

平面図

断面図



図 2.2-32 X線CT画像の予備計測

両通水条件における供試体の端部と中央部における X 線 CT 画像、CT 計測値およびヒストグ ラムを図 2.2-33~図 2.2-37 に示す。試験前の X 線 CT 画像から、ベントナイトペレットの充て ん状況は端部と中央部で明確な差があることが確認された。CT 計測の側線と画像から、個々の ベントナイトペレットの CT 値は 500~1500 に分布しており (図 2.2-33)、このばらつきはベン トナイトペレット内部での乾燥密度分布のばらつきを反映していると考えられる。試験途中およ び試験後では、イオン交換水条件と人工海水条件ともにベントナイトペレットの最大 CT 値が 1100 程度まで、最小 CT 値が 400 程度まで減少した (図 2.2-34~図 2.2-37)。これは膨潤によ りベントナイトペレットの密度が低下したためであると考えられる。このようにベントナイトペ レットの膨潤によって生じる密度変化およびこれに起因した供試体内の密度分布の不均質性を CT 値によって判別することが可能であり、通水過程における供試体の飽和状況を定性的に評価 することが可能であることが示唆された。















上述した CT 計測の結果を膨潤の変遷も考慮し、定量的に評価するために、通水試験後の供試体を 20 mm 角の直方体ブロックに分割し、含水比試験を行った。各供試体の含水比、湿潤密度、 乾燥密度の測定結果を表 2.2・23~表 2.2・25 に示す。供試体の最上部を1層目、最下部を4層目 とした。また、1層の厚さは 2 cm である。含水比試験の結果、4 層目の含水比の平均値が最も高 く、続いて1層目が高い結果となった。含水比試験に使用した通水試験用の供試体は通水試験中 に膨潤圧により塩ビ製のフランジが膨らんだが、上側の方が下側より膨らんでいる(試験容器を 置いた台の拘束が無い分)ため、1 層目の含水比も高くなったと考えられる。含水比と乾燥密度 の分布を図 2.2・38 に示す。各層ともに中心部よりも周辺部で含水比が相対的に高い結果となっ た。特に 2 層目、3 層目の内部の含水比が低く、ベントナイトペレットが膨潤し内部への通水経 路が断たれた後は、周辺部から中心部にかけて徐々に飽和が進んだためと考えられる。1 層目と 4 層目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かった。これ は前述した上下フランジのたわみの影響が考えられる。2 層目、3 層目ではこのような傾向は見 られなかったが、乾燥密度が高い部分や低い部分が層内で連続する傾向が見られた。これは飽和 する前に発達した水みちや隣り合うブロックで発生した膨潤圧の影響をある程度のまとまりをも って受けている可能性が考えられる。

な乱は	1 層目	2 層目	3 層目	4層目
和它百丁们里。	(最上部)	(上部)	(下部)	(最下部)
平均值(%)	60.4	50.2	51.9	67.7
中央値(%)	59.9	49.5	51.3	65.9
標準偏差	3.71	2.71	2.83	5.11
変動係数	0.06	0.05	0.05	0.08
最大値(%)	71.6	64.1	62.0	84.8
最小値(%)	46.9	46.0	47.9	60.7
幅(%)	24.7	18.1	14.1	24.1
標本数	100	100	100	100

表 2.2-23 含水比測定の結果

表 2.2-24 湿潤密度の測定結果

統計値	1層目	2 層目	3 層目	4 層目
平均值(Mg/m ³)	1.7	1.5	1.9	2.0
中央值(Mg/m ³)	1.7	1.5	1.9	2.0
標準偏差	0.19	0.33	0.29	0.18
変動係数	0.11	0.22	0.16	0.09
最大值(Mg/m ³)	2.1	2.2	2.7	2.4
最小值(Mg/m ³)	1.3	0.8	1.2	1.5
幅(Mg/m ³)	0.8	1.3	1.5	0.9
標本数	100	100	100	100

統計値	1層目	2 層目	3 層目	4 層目
平均值(Mg/m ³)	1.1	1.0	1.2	1.2
中央值(Mg/m ³)	1.1	1.0	1.2	1.2
標準偏差	0.14	0.22	0.19	0.12
変動係数	0.13	0.22	0.16	0.11
最大值(Mg/m ³)	1.3	1.4	1.7	1.5
最小值(Mg/m ³)	0.8	0.6	0.8	0.8
幅(Mg/m ³)	0.6	0.9	0.9	0.6
標本数	100	100	100	100

表 2.2-25 乾燥密度の測定結果

					1 屑	暑目									2 屑	暑日									3月	暑目									4 脣	夏日				
	65.0	632	62.0	62.9	68.4	63.1	63.8	64.1	65.9	66.8	50.5	50.9	51.4	54.1	52.9	50.3	51.0	52.6	52.0	55.7	51.8	54.7	53.3	55.6	54.0	55.1	54.3	51.8	54.0	59.8	69.0	65.8	68.8	74.6	79.0	77.6	77.3	69.5	70.3	84.8
	61.9	60.5	60.5	58.5	61.0	62.0	60 2	60.2	60.5	65.7	53.3	50.5	48.3	48.6	50.1	48.8	49.9	51.4	49.3	50.6	54.5	51.5	50.7	51.5	51.5	50.0	49.4	51.8	51.9	53.9	65.2	60.7	62.7	65.6	65.5	67.3	64.1	66.1	65.6	69.5
	63.3	57.8	58.3	60.5	61.6	60.0	46.9	55.0	53.5	64.9	52.4	49.3	48.4	49.4	48.1	47.4	47.1	49.3	50.2	50.5	52.4	51.0	51.3	48.5	52.4	48.1	48.2	49.9	52.0	54.8	62.6	72.1	62.3	62.1	63.1	63.0	64.6	63.8	62.7	71.4
含	61.2	57.9	58.3	63.3	59.5	59.3	55.3	61.3	61.5	59.2	51.5	46.6	47.6	46.6	48.4	47.3	48.5	48.3	47.4	50.3	55.6	50.7	50.2	47.9	48.8	48.0	48.6	50.1	51.3	54.0	73.1	65.3	64.5	61.0	64.4	62.8	64.8	64.3	66.5	73.8
水	61.5	592	59.8	57.7	63.7	57.5	58.4	56.0	59.9	63.2	52.3	49.8	48.3	47.0	48.7	48.3	46.8	48 2	49.0	52.5	54.6	51.3	51.2	51.1	49.7	49.3	48.7	50.1	51.6	54.5	81.6	70.0	66.8	64.0	66.1	65.7	66.4	69.9	71.7	80.9
比	69.1	59.9	55.5	56.6	59.6	58.1	56.7	59.4	59.7	64.2	64.1	50.4	47.9	48.0	49.0	49.4	46.0	49.5	47.7	55.3	62.0	50.3	51.3	49.7	51.8	51.3	51.7	50.5	60.7	56.2	83.2	68.6	67.8	65.1	65.6	65.0	63.5	65.7	68.7	79.8
	70.6	59.3	57.9	55.4	59.2	57.2	58 2	59.5	61.9	60.9	53.2	49.3	48.0	49.7	47.4	49.0	48.0	49.3	48.2	51.6	54.7	51.3	50.2	51.9	48.6	50.3	50.1	49.3	50.4	56.7	71.4	67.6	65.3	65.1	66.0	65.9	63.8	67.6	66.3	74.5
	63.1	592	57.3	62.6	60.4	59.8	56.9	55.2	59.7	61.6	53.8	49.9	48.1	48.0	52.5	49.7	49.2	50.1	49.8	52.4	54.0	50.9	49.8	49.7	49.6	48.7	51.8	49.7	49.0	53.9	69.7	63.9	63.5	65.4	66.5	64.8	66.3	63.1	64.1	70.5
	62.9	59.4	56.3	59.0	58.8	57.9	54.4	53.6	58.4	59.8	53.1	50.2	49.5	48.9	49.3	47.8	47.7	49.3	49.1	53.1	54.0	50.4	50.7	49.8	49.2	50.4	50.6	50.0	51.9	60.7	67.4	62.0	61.3	63.9	64.1	63.6	65.9	65.2	65.4	77.0
	71.6	63.5	63.2	63.3	60.3	61.0	62.3	59.3	62 2	66.4	56.5	54.8	51.7	53.8	51.5	49.4	54.0	54.3	51.6	55.7	55.1	52.8	53.4	51.9	50.5	51.3	53.6	51.2	52.7	58.9	72.1	66.3	66.9	67.5	68.4	74.8	72.7	65.5	65.1	73.8
	0.865	0.910	0.911	0.998	0.918	0.965	1.004	1.041	0.871	0.786	1.074	1.069	1.269	1.383	1.400	1.210	1.225	1.219	1.393	1.393	1.10	0 1.15	4 1.186	6 1.119	1 2 7 3	1.351	1.315	1.355	1.335	1.450	1.219	1.169	1.135	1.154	1.030	0.941	0.974	1.079	1.065	0.821
	0.903	0.913	0.836	1.184	0.967	1.106	1.235	1.220	1.120	0.919	1.088	1 2 1 0	1.423	1.351	1.289	1.345	1.183	1.065	1.109	1.246	1.00	9 1.30	3 1.358	3 1.300	1.171	1.390	1.570	1.529	1.656	1.739	1.371	1.126	1 2 3 6	1.205	1.114	1.125	1.170	1.098	1.153	1.321
	0.965	1.140	1.090	1.183	1.111	1.175	1.214	0.991	1.171	1.014	1.184	1.191	1.151	1.106	1.359	1.316	1.343	1.056	1.148	1.178	1.10	0 1.04	8 1.01	1.224	1.188	0.985	0.815	0.974	1.081	1.023	1.456	1.165	1.355	1.318	1.181	1.329	1.235	1.164	1.234	0.983
乾	1.160	1.266	1.284	1.055	1.173	1.103	1.180	1.004	0.858	1.254	0.859	0.836	0.978	0.716	1.125	1.095	0.886	0.738	0.923	1.105	1.09	6 1.31	4 1.115	5 1.314	1.136	1.191	1.153	1.088	1.094	1.121	1.096	1.265	1.174	1.300	1.295	1.234	1.258	1.250	1.379	1.168
燥	0.858	1.254	1.098	1.253	0.974	1 2 3 8	1.190	1.349	1.063	1.020	0.983	0.911	0.979	0.741	0.901	0.991	0.890	0.638	0.904	1.070	0.98	4 0.95	5 0.976	6 0.940	0.955	1.073	1.063	1.046	1.225	1.128	1.096	1.193	1.179	1.358	1.370	1.009	1.295	1.208	1.188	0.931
密	0.941	1.100	1.241	1.241	1.046	1.033	1.210	1.250	1.198	1.086	0.870	0.935	0.906	0.820	0.840	0.840	0.913	0.686	1.016	1.160	1.32	1 1.28	9 1.314	1.538	1 2 5 9	1.231	1.600	1.660	1.574	1.353	1.111	1.206	1.191	1.290	1.426	1.123	1.280	1.264	1.043	0.825
度	0.979	1.096	1.208	1.208	1.325	1.318	1.293	1.288	0.911	0.891	1.013	1.095	0.904	0.798	0.830	0.973	0.861	0.685	0.936	1.311	1 2 2	0 1.31	0 1.243	3 1.204	1 2 5 5	1.129	1 2 5 6	1.349	1.196	1.040	1.049	1.120	1.119	1.263	1.175	1.148	1.295	1.323	1.210	0.990
	1.014	1.096	1.115	1.183	1.173	1.091	1.256	1.198	1.098	0.958	0.793	1.021	0.863	0.865	0.645	0.941	0.760	0.701	0.909	1.301	1.09	1 1.13	9 1.116	6 1.463	1.409	1.556	1.434	1.474	1.258	1.081	1.209	1.125	1.171	1.345	1.260	1.243	1.138	1.173	1.236	1.130
	1.010	1.124	1.058	1.033	1.099	1 208	1.298	1.160	1.044	1.024	0.831	1.013	0.849	0.716	0.631	0.613	0.621	0.558	0.685	0.821	1.42	9 1.48	3 1.334	4 1.433	1.336	1.554	1.495	1.551	1.115	0.949	1.090	1.066	1.144	1.036	1.034	1.070	1.030	0.998	1.266	0.974
	0.800	0.846	0.913	0.926	1.000	1.070	1.021	1.068	0.953	0.795	0.708	0.860	1.131	0.978	0.973	1.155	0.974	0.837	1.226	1.220	1 20	6 1.06	0 0.970	0 1.185	1.314	1.218	1 2 4 0	1.266	1.154	0.951	1.216	1.173	1 273	1.103	1.051	1.015	1.006	1.133	1.296	0.979
																											1													
凡																																								
例															亅	是大	値	: 青	、 「	中央値	直:	白、	最	小佰	直::	赤														
													(〔4 層	合	計し	た	際0)最	大値	、中	□央	値、	最	小値	を	使用])												
	-													×	2	.2-3	8	含	水比	と乾	ī燥	密度	の	空間	分科	ति														

(3) まとめ

- 流出・侵入試験およびX線CT評価試験結果のまとめは以下の通りである。
- ・ 今回の供試体の長さあるいは、通水時間においては精製水に比べ人工海水の方が間隙の閉 塞の進行が速い傾向にあることが分かった。
- ベントナイトの充填密度が相対的に低い15 mmペレットを使用した場合や上部間隙を残し たブロックを使用した場合においては、人工海水の方が精製水に比べ、相対的にベントナ イトの流出がしにくい傾向にあることが示唆された。
- ・ 埋め戻し材の施工初期において、坑道およびその周辺岩盤の水位回復に応じ埋め戻し材に 作用する間隙水圧が変遷することを模擬し、段階的に水頭差を上げていく試験を実施した。
 その結果、仮に埋め戻し材の膨潤過程で選択的な水みちが形成されたとしても、局所的に 膨潤が進み、間隙閉塞に伴って水みちを流れる流速が小さくなった場合、この水みちが細くなるあるいは止水に至る可能性が示唆された。また、注入箇所や流出端までの距離(供試体の長さ)によっても、閉塞状況は異なり、注水箇所から一定程度、埋め戻し部の距離があ れば有意な流出が生じない可能性が示唆された。
- 1m水頭で通水試験を実施し通水量を測定の結果、イオン交換水条件よりも人工海水条件の 方が通水量は大きい結果となった。人工海水条件の試料は試験終了まで約7週間通水を継続 したが、最後まで水みちが閉塞することはなかった。
- イオンクロマトグラフィによる流出水のイオン分析を実施したところ、試験水条件や元素ごとで異なる濃度の変化傾向が見られた。これらに関しては、分析時の分析試料の取り扱いや、給水時の人工海水における元素の濃度の均一性の確認を含め、通水経路や供試体の飽和状況と合わせたより詳細な分析が必要である。
- ・ X線CT画像の分析の結果、CT値違いや変化量により、ベントナイトの膨潤過程の間隙の違いやその変化を評価でき得ることが示唆された。各供試体の通水からの経過時間や水質の違い考慮し、CT画像からベントナイト供試体の間隙状態を定性的に分析した結果、イオン交換水と人工海水でベントナイトペレット内部の飽和状況に明らかに異なり、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残ったままであることが分かった。
- 今後は、含水比や湿潤密度分布とCT画像(CT値)との関係性を分析し、CT値からこれら 膨潤特性を類推可能な評価手法を整備する予定である。また、このような評価手法を整備 することにより、ベントナイトペレットを埋め戻し材として使用した場合にベントナイト の膨潤の不均質性やこれによって生じ得る乾燥密度分布の不均質性やその変遷を考慮した 上で、これら現象や状態が埋め戻し材の止水性能へ与える影響を定量的に評価可能である と考えられる。
- ・ 今回の試験では埋め戻し材の種類、通水する水の違い、水頭差条件などの試験条件を変えることにより、各条件が埋め戻し材の閉塞挙動や流出現象に及ぼす影響が異なり、埋め戻し材の止水性能に最も影響を及ぼす可能性のあり得る条件を概ね整理することできた。今後は流出・侵入に影響を及ぼす条件の詳細化あるいは定量化を図るために、流出経路や水頭差に着目した評価を行う必要がある。また、X線CT画像からの定量化手法と合わせ、埋め戻し材の止水性能への影響も考慮し、流出・侵入現象を取り扱う際の懸念すべき条件の有無を検討する予定である。

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.
- 棚井憲治,松本一浩,菊池広人:X線CT法の適用性に関する検討,核燃料サイクル開発機構, JNC TN8430 2003-001, p5, 2003.
- 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.

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—

止水プラグや埋め戻し材それぞれの構成要素、さらにはそれらを組み合わせたシーリングシ ステムの性能を室内試験や工学規模の試験を通じて検証する。具体的には、坑道シーリングの 構成要素として考えられる埋め戻し材、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、埋め戻し材を充填することにより緩衝材が坑道側へ膨出 することを抑制する。埋め戻し材の設計においては、乾燥密度や材料配合を埋め戻し材に設定 し、設定した仕様が評価項目である「緩衝材の膨出抑制」に対して適切であることの確認が求め られている(NUMO, 2021)。そのため、埋め戻し材の仕様に対する緩衝材の膨出量や膨出に伴 う乾燥密度の変化の評価が必要となる。

平成 30 年度から令和 2 年度までの 3 年間にわたり、緩衝材と埋め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、緩衝材と埋め 戻し材を組み合わせた縮尺模型を用いた室内試験により力学的相互作用下の膨潤挙動に関する 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、緩衝材や埋め戻し材に供給される水の水質などの化学的事象が緩衝 材の膨潤挙動や埋め戻し材の膨出抑制機能に及ぼす影響を考慮に入れた検討を実施している。 また、緩衝材と埋め戻し材の膨潤変形量や膨潤圧、乾燥密度の変化などの計測可能な項目によ り埋め戻し材の膨出抑制機能を評価する方法を検討する。

令和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、緩衝材の膨潤挙動を含めた熱-水-応力(THM)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直上の領域 と坑道部分は埋め戻し材により埋め戻している。

原位置試験を例にみると、緩衝材と埋め戻し材の間では緩衝材の膨潤圧や埋め戻し材の自重 相当の荷重が相互に作用しており、緩衝材の膨出挙動はこれらの力学的な相互作用の影響を受 ける。そこで、力学的相互作用を踏まえた緩衝材の膨出挙動を把握し埋め戻し材の設計・評価手 法へ反映することを目的として、緩衝材と埋め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。
令和3年度は、緩衝材や埋め戻し材に供給される水の塩分濃度が膨潤挙動に及ぼす影響を把握するために、塩水条件における緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型を用いた室内試験を実施し、膨潤変形量や膨潤圧の計測、緩衝材と埋め戻し材の境界部における膨潤変形挙動の理解などに取り組む。また、気相が緩衝材の膨潤挙動などの連成現象に及ぼす影響を把握するための室内試験に着手する。



図 3.1-1 人工バリア性能確認試験の概要

3.1.2 膨潤挙動小規模試験

(1) 小規模模型試験の概要

緩衝材と埋め戻し材の相互作用下において、埋め戻し材の乾燥密度の違いが緩衝材の膨潤挙 動に及ぼす影響を把握するために、人工バリア性能確認試験の約 1/24 スケールの模型(以下、 小規模模型)を用いた試験を実施した。小規模模型試験では、原位置試験における人工バリアと その直上の埋め戻し材の領域を緩衝材と埋め戻し材を模擬した。小規模模型試験で使用した試 験装置を図 3.1-2 に示す。小規模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。

- ▶ 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。
- ▶ 埋め戻し材は、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め戻し材の自重に相当する荷重と同等の鉛直圧を埋め戻し材の小規模模型上部より作用させる。 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 号珪砂と5 号ケイ砂を重量 比でそれぞれ 50%の割合で混合している。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/m³、初期含水比を 10.5%として作製した。 埋め戻し材の小規模模型は、直径 100 mm、高さ 87 mm である。材料は、クニゲル V1 と幌 延の掘削ズリを重量比で 40%と 60%の割合で混合したものを用いた。掘削ズリは、粒径が 20 mm 以下となるように調製している。埋め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①1.20 Mg/m³ と②1.40 Mg/m³の 2 種類として静的締 固めにより作製した。

小規模模型試験装置は、一定の鉛直荷重を作用させながら試験用水を給水することにより、 緩衝材や埋め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。



図 3.1-2 小規模模型試験装置の概要

(2) 小規模模型の作製

(a) 緩衝材

緩衝材の小規模模型は、6個の緩衝材ブロックに分割して作製した。1個のブロックは直径93 mm、高さ29 mmである。クニゲルV1、3号ケイ砂及び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よりイオン交換水をケイ砂に加えた。その後、ビニール袋にクニゲルV1を投入し、十分に混合した後に1日程度養生し

た。含水比を調整した材料は、圧縮成型用のモールドに投入し、圧縮成型装置に設置した。圧縮 成型装置では、ブロックの高さが 29 mm となるまで静的載荷(圧縮速度:1 mm/min)を行っ た。ブロックが所定の高さとなったことを確認した後、20 分程度その状態を保持した。

(b) 埋め戻し材

埋め戻し材の小規模模型は、内径 100 mm の試験容器内に 3 層に分割して静的に圧縮するこ とにより作製した。1 層あたりの高さは 29 mm である。まず、クニゲル V1 と掘削ズリのそれ ぞれについて①乾燥密度 1.20 Mg/m³、初期含水比 35.0%もしくは②乾燥密度 1.40 Mg/m³、初 期含水比 30.0%の埋め戻し材の 1 層分に必要な重量を計量した。ビニール袋に掘削ズリを投入 し、初期含水比となるように霧吹きよりイオン交換水を掘削ズリに加えた。その後、ビニール袋 にクニゲル V1 を投入し、十分に混合した後 1 日程度養生した。埋め戻し材の 1 層目は、試験 容器内に設置した緩衝材ブロックの上に材料を投入し、平坦になるように敷き均した。2 層目以 降は、前の層の埋め戻し材の上に材料を投入した。試験容器を圧縮成型装置に設置し、1 層分の 高さが 29 mm となるまで静的載荷(圧縮速度:1 mm/min)を行った。所定の高さとなったこ とを確認した後、10 分程度その状態を保持した。以上の手順を、3 層目の埋め戻し材の高さが 87 mm となるまで繰り返した。

(3) 試験手順

試験装置の組立状況を図 3.1-3 示す。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。ケイ砂の充填完了後には、緩衝材ブロックの上のろ紙を取り 除き、埋め戻し材の材料を投入し所定の乾燥密度となるまで静的締固めにより圧縮した。

緩衝材と埋め戻し材の小規模模型の作製後、試験容器上部に載荷板を設置し試験装置を組み 立てた。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、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、試験孔直上の埋め戻し材の自重 に相当する 0.087 MPa の鉛直圧を埋め戻し材の小規模模型に作用させ、20 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。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。





緩衝材ブロックの設置

スペーサーの挿入





ケイ砂の充填作業

埋め戻し材の材料投入



埋め戻し材の締固め



帝固め 小規模試験装置の組立状況
図 3.1-3 小規模試験装置の組立状況

(4) 小規模模型の解体手順

小規模模型の解体状況を図 3.1-4 に示す。試験終了後には、緩衝材模型は含水比と乾燥密度 を埋め戻し材模型は含水比をそれぞれ計測した。まず、ベロフラムシリンダによる鉛直圧を除 荷し、荷重を取り除いたことによる緩衝材の膨潤変位量(リバウンド量)を変位計により計測し た。その後、注水を止め載荷装置から試験容器を取り出し、埋め戻し材側が下になるように模型 押し出し装置に設置した。緩衝材の解体は押し出し機を用いて、試験容器から緩衝材を10mm 程度押し出し、ヘラやワイヤーソー等を用いて円盤状にカットした。カットした緩衝材は中央 部を長さ30mm、幅10mmの大きさで9個の小ブロックに分割した。分割した小ブロックは 3辺の長さを計測した後、一部をパラフィン法または3Dスキャナ(KEYENCE製)により乾 燥密度計測を実施した。また、全ての小ブロックについて炉乾燥法による含水比計測を行った。 緩衝材の押し出しと小ブロックへの分割を緩衝材と埋め戻し材の境界面が現れるまで繰り返し た。埋め戻し材は試験容器から全て取り出し高さ方向に3個のブロックに分割した。埋め戻し 材の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。



緩衝材の解体(1)

緩衝材の解体(2)



埋め戻し材の解体(1)埋め戻し材の解体(2)図 3.1-4 小規模模型の解体状況

(a) パラフィン法

パラフィン法による乾燥密度測定は、「土の湿潤密度試験方法」(JIS A 1225:2020)に記載 の手順に基づいて湿潤密度を測定し、炉乾燥法により求めた含水比を用いて乾燥密度を算出し た。パラフィン法による測定状況を図 3.1-5 に示す。まず、緩衝材の小ブロックを溶融したパ ラフィン液中に浸し、小ブロック表面に被膜を作る。パラフィン塗布後の小ブロックの質量を 測ったのち、つり皿に小ブロックを載せて水中での見かけ重量を測る。測定後には、式 3.1-1 の 関係から小ブロックの体積を算出する。

$$V = \frac{m_1 - m_3 + m_2}{\rho_w} - \frac{m_1 - m}{\rho_p}$$
式 3.1-1
V:小ブロックの体積(cm³)
m:小ブロックの質量(g)
m₁:パラフィン塗布後の供試体の質量(g)
m₂:水中でのつり皿の見かけの質量(g)
m₃:水中での供試体及びつり皿の見かけの質量(g)
 ρ_w :温度T(°C)での水の密度(g/cm³)
 ρ_p :パラフィンの密度(g/cm³)
湿潤密度については、上記で求めた小ブロックの体積Vと小ブロックの質量mを用いて式 3.1-

2の関係より算出した。

$$\rho_t = \frac{m}{V}$$
 式 3.1-2

 $\rho_t: 小ブロックの湿潤密度 (g/cm³)$

さらに、乾燥密度は小ブロックの湿潤密度と含水比を用いて式 3.1-3の関係より算出した。

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}}$$

 ρ_d :小ブロックの乾燥密度 (g/cm³) w:小ブロックの含水比(%)

AND GX-8K

溶融パラフィン



水中重量測定状況



パラフィン塗布後の質量測定



水中での見かけ質量測定 図 3.1-5 パラフィン法による測定状況

₹ 31 -1

(b) 3D スキャナ

3D スキャナによる乾燥密度測定は、三次元測定機 VL-500 (KEYENCE 製)を用いて行った。 3D スキャナによる測定状況を図 3.1-6 に示す。測定は分割した小ブロックを蒸発皿の上に乗せ た状態で実施した。1 つのブロックに対して、まず1回測定を行った後、ブロックを裏返して再 度測定し、合計 2 回の測定を実施した。2 回の測定で得られたデータを専用のソフトで処理す ることで小ブロックの 3D モデルを作成した。この 3D モデルから小ブロックの体積を算出し、 小ブロックの乾燥質量を用いて乾燥密度を求めた。



3D スキャナによる小ブロックの形状計測 小ブロックの 3D モデル 図 3.1-6 3D スキャナによる測定状況

(5) 実施内容

(a) 試験条件

試験条件を表 3.1-1 に示す。令和 3 年度は、埋め戻し材の乾燥密度 1.40 Mg/m³の条件で 3 ケ ース(Case1~Case3)、乾燥密度 1.20 Mg/m³の条件で 2 ケース(Case4、Case5)の試験を実 施した。また、令和 2 年度に実施した小規模試験(埋め戻し材の乾燥密度 1.20 Mg/m³)を Case6 として試験結果を比較した。いずれの試験ケースでも緩衝材の乾燥密度は 1.80 Mg/m³とし、試 験用水にはイオン交換水を用いた。原子吸光光度計(日立製作所製, Z-2010)を用いて水質分析 を実施した。水質分析の結果を表 3.1-2 に示す。小規模模型試験では試験中のビュレット内の 水位と変位計の値を計測した。また、試験終了後には、緩衝材と埋め戻し材を小ブロックに分割 して含水比計測を実施した。Case1 と Case2 については一部のブロックについてパラフィン法 と 3D スキャナによる乾燥密度測定を実施しており、Case3 は半分のブロックを対象に、Case4 と Case5 については全ブロックを対象に 3D スキャナによる乾燥密度測定を実施した。埋め戻 し材については、Case1~Case5 のすべてで埋め戻し材を高さ方向に 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。Case1~Case5 の緩衝材の 含水比、乾燥密度及び飽和度の計測結果と埋め戻し材の含水比の計測結果は付録 1 に示す。

ケース名		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	
実施年度		令和3年	令和3年	令和3年	令和3年	令和3年	令和2年	
乾燥密度			1.00					
經活动	(Mg/m^3)		1.80					
版闺竹	含水比	10.5						
	(%)							
	乾燥密度		1.40		1.20			
埋め戻し	(Mg/m^3)	20.0 25.0						
材	含水比							
	(%)	50.0			55.0			
試験日数(日)		47	43	42	7	11	50	

表 3.1-1 小規模模型試験の試験条件

表 3.1-2 小規模模型試験における試験溶液の水質分析結果

	Na ⁺	K+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
イオン交換水	0.16	< 0.1	0.01	< 0.1

※表中の<印は、定量下限値未満を示す。

(b) 膨潤変形率

緩衝材と埋め戻し材の膨潤による上方への変位量を変位計で計測しているが、埋め戻し材の 膨潤による変位量が緩衝材に比べて非常に小さいことから、変位計により計測された変位量は すべて緩衝材の膨潤変形によるものとして整理した。また、緩衝材の初期高さである 174 mm に対する上方への変位量の割合を膨潤変形率と定義して膨潤変形挙動を評価した。

図 3.1-7 に膨潤変形率の経時変化を示す。まず、埋め戻し材の乾燥密度を 1.40 Mg/m³とした ケースでは、試験終了時の変位量と膨潤変形率がそれぞれ Case1 で 2.97 mm と 1.71%、Case2 で 3.81 mm と 2.19%、Case3 で 5.43 mm と 3.12%となり、最終的な値に多少のばらつきがみ られる結果となった。Case2 と Caes3 の膨潤変形率の経時変化を比較すると、試験開始 12 日 後までは同じような膨潤変形率の増加傾向を示しているが、その後は Case3 の膨潤変形率が大 きく増加した。図 3.1-8 に Case3 における膨潤変形率とベロフラムシリンダによる載荷荷重を 示す。ベロフラムシリンダによる載荷荷重は試験装置の下にロードセルを設置して計測してお り、その出力の値を示している。小規模模型試験に用いたベロフラムシリンダは、1 つのコンプ レッサから最大 4 系統同時に空気圧を分配できる構造となっており、試験の開始及び終了時に 載荷や除荷を行った際に別系統の空気圧も影響を受ける。図 3.1-8 より、同時に実施していた 他の試験の載荷荷重を設定した①試験開始7日ごろ、②試験開始12日ごろ、③試験開始18日 ごろに Case3 の載荷荷重が大きくなっている。膨潤変形率をみると、載荷荷重が大きくなって いる期間は上方への変位が止まり一定の値を示していることがわかる。その後、載荷荷重が元 の値へと戻った後に、再び上方への変位する挙動を示している。このことから、拘束圧として作 用させたベロフラムシリンダからの載荷荷重の変動が Case2 と Case3 の膨潤変形率の違いに 影響を及ぼした可能性が考えられる。

埋め戻し材の乾燥密度を 1.20 Mg/m³ としたケースでは、試験終了時の変位量と膨潤変形率が それぞれ Case4 で 8.11 mm と 4.66%、Case5 で 5.38 mm と 3.34%となった。Case4 は試験開 始7日で、Case5は試験開始11日で試験を終了しているが両ケースともに同じような膨潤変形率の増加傾向を示しており、また、令和2年度に実施したCase6の試験初期段階における膨潤変形率と同様の増加傾向を示していることから再現性のある結果が得られていると考えられる。 埋め戻し材の乾燥密度の違いの観点で膨潤変形率の経時変化を比較すると、乾燥密度が1.40 Mg/m³と高いCase1~Case3で膨潤変形率が低くなる傾向がみられた。



図 3.1-7 小規模模型試験の膨潤変形率



図 3.1-8 Case3 における膨潤変形率と載荷荷重

(c) 含水比及び乾燥密度の測定

(i) 埋め戻し材の乾燥密度 1.40 Mg/m³のケース

Case1 と Case3 ともに緩衝材を高さ方向に 12 層に分割し、各層の中央部を 9 個のブロック に分割した。緩衝材の底部を 1 層目として埋め戻し材に最も近い側を 12 層目とした。また、ブ ロックの番号については向かって左を 1 番とし最も右のブロックを 9 番とした。Case1 につい ては、1,3,5,7,9,12 層目のすべてのブロックをパラフィン法と 3D スキャナにより乾燥密度を計 測した。Case3 については、全ての層の 5 番目~9 番目のブロックを 3D スキャナにより乾燥密 度を計測した。また、Case1 と Case3 ともに乾燥密度の測定が終了した後に全てのブロックの 含水比を炉乾燥法により計測した。

図 3.1-9 に Case1 と Case3 の緩衝材中の含水比分布を示す。図 3.1-9 では、パラフィン法に よる乾燥密度測定を実施したブロックを太枠で示している。各層の水平方向の含水比をみると、 給水のために設けたケイ砂層と接している外周部に位置する 1 番や 9 番のブロックの含水比が 高く、4~6 番の中心に近いブロックの含水比が低い傾向を示した。高さ方向の含水比分布につ いては、Case3 で埋め戻し材との境界面に近い上部の含水比が高く、中央部や下部には含水比 が低い領域が残っていることが確認できる。一方、Case1 ではパラフィン法で乾燥密度を実施 した層の含水比がその上下の層と比較して含水比が 1%~3%程度低い傾向がみられた。パラフ ィン法では、測定試料の表面にパラフィン皮膜を形成するために溶融したパラフィンに試料を 浸すため、測定の過程において試料中の水分が蒸発してしまうことが考えられる。本試験にお ける含水比の測定試料は長さが約 30 mm、幅が約 10 mm、高さが約 10 mm のブロックであり、 試料中に含まれる水の質量が 0.1 g 変化するだけで含水比は 2%程度変化するため、パラフィン 法を実施した影響により含水比が低くなった可能性がある。

図 3.1-10 に Case1 における緩衝材の乾燥密度分布を示す。3D スキャナとパラフィン法で得 られた乾燥密度の値を比較すると、特に1層目で顕著であるように、3D スキャナで得られた乾 燥密度が低い値を示す傾向にある。両方法ともに緩衝材のブロックの体積を計測して乾燥密度 を算出しているため、乾燥密度が低い値と示すことは 3D スキャナではパラフィン法に比べて ブロックの体積を大きめに計測する傾向があるということになる。3D スキャナで得られる乾燥 密度の計測精度については今後の確認が必要と考える。

図 3.1-11 に Case1 における緩衝材中の飽和度分布を示す。飽和度は、各ブロックの含水比と それぞれの方法で得られた乾燥密度から式 3.1-4 の関係により算出した。

$$S_r = \frac{G_S \cdot W_c}{(\frac{G_s}{\rho_d} - 1)}$$

式 3.1-4

 $S_r: ベントナイトブロックの飽和度(%)$ $G_s: ベントナイトの土粒子密度(Mg/m³)$ $W_c:ベントナイトブロックの含水比(%)$ $\rho_d: ベントナイトブロックの乾燥密度(Mg/m³)$

ここで、ベントナイトの土粒子密度は*G_s*=2.712 Mg/m³とした。緩衝材の初期乾燥密度である 1.80 Mg/m³よりも高い乾燥密度の値を示したブロックについては、乾燥密度が正確に計測でき ていないと判断し飽和度算出の対象外とした。飽和度の分布は、含水比の分布と同様にケイ砂 層と接している外周部と埋め戻し材との境界に近い部分で高い値を示す傾向がある。

また、2 つの方法で得られた飽和度を比較すると、式 3.1-4 からも明らかなように乾燥密度を 低く見積もる傾向のある 3D スキャナの飽和度が低い値を示す傾向がある。なお、Case1 で得 られた飽和度については、パラフィン法による乾燥密度測定を行ったブロックで算出している ため、実際の試験終了時の飽和度よりも低い値を示している可能性があることに留意が必要で ある。



図 3.1-9 小規模模型試験 Case1 及び Case3 の緩衝材中の含水比分布



図 3.1-10 小規模模型試験 Case1 における緩衝材の乾燥密度分布



図 3.1-11 小規模模型試験 Case1 における緩衝材中の飽和度分布

(ii) 埋め戻し材の乾燥密度 1.20 Mg/m³のケース

Case4 では緩衝材を高さ方向に 14 層に分割し、緩衝材の底部を 1 層目として埋め戻し材に最 も近い側を 14 層目とした。Case5 では、緩衝材を高さ方向に 13 層に分割し、緩衝材の底部を 1 層目として埋め戻し材に最も近い側を 13 層目とした。両ケースともに、各層の中央部を 9 個 のブロックに分割、ブロックの番号については向かって左を 1 番、最も右のブロックを 9 番と した。緩衝材をブロックに分割した後には、Case4 と Case5 ともに 3D スキャナですべてのブ ロックの乾燥密度を計測した後に含水比を炉乾燥法により計測した。

図 3.1-12 に Case4 と Case5 の緩衝材中の含水比分布を示す。各層の水平方向の含水比をみ ると、給水のために設けたケイ砂層と接している外周部に位置する1番や9番のブロックの含 水比が高く、4~6番の中心に近いブロックの含水比が低い傾向を示した。高さ方向の含水比分 布については、埋め戻し材との境界面に近い上部とポーラスメタルと接している底部の含水比 が高く、中央部の含水比が低いことが確認できる。Case4 では、試験開始7日目に含水比計測 を実施しており、緩衝材の中央部には初期含水比の10.5%に近い低含水比の領域が広い範囲で 残っていることが確認できる。一方で、Case5 については、試験開始11日目に含水比計測を実 施しており、Case4 と比べて、全体の含水比が高くなるとともに、低含水比の領域が狭くなっ ていることが確認できる。この結果より、時間の経過とともに緩衝材の周囲から均質に水の浸 潤が進すむことで内部の含水比が高くなっていると考えられる。

図 3.1-13 に Case4 と Case5 の緩衝材の乾燥密度分布を示す。Case4 では、ケイ砂層と接し ている外周部に位置するブロックの乾燥密度が低くなっている傾向がみられる。これは、試験 用水の浸潤により緩衝材の外周部から膨潤が進行していくことと整合的な結果である。Case5 でも同様に、外周部に位置するブロックの乾燥密度が低くなっている傾向がみられる。なお、 Case4 においては一部に初期乾燥密度である 1.80 Mg/m³ よりも極端に乾燥密度が高いブロッ クや 1.0 Mg/m³を下回るブロックが確認できる。また、Case5 においても、例えば 5 層目のよ うに乾燥密度が低いブロックがみられる。Case5 の 5 層目の緩衝材の解体状況を図 3.1-14 に示 す。図 3.1-14 にみられるように試験期間が 11 日と短い Case5 においては、緩衝材の中心部で は含水比が低い状態であり解体調査時に小ブロックが崩れてしまった。そのため、崩れたブロ ックの一部を用いて 3D スキャナでの体積計測を行っており、測定するブロックが小さくなっ た分、体積計測の誤差が大きくなり乾燥密度を低く評価した可能性がある。

図 3.1-15 に Case4 及び Case5 の緩衝材中の飽和度分布を示す。飽和度の算出は、Case1 と 同様の方法で行い、1.80 Mg/m³よりも高い乾燥密度の値を示したブロックについては飽和度算 出の対象外とした。飽和度の分布は、含水比の分布と同様にケイ砂層と接している外周部と埋 め戻し材との境界に近い部分で高い値を示す傾向があることが確認できる。一方、緩衝材の中 心部の飽和度は低い値を示しているが、その中に初期飽和度よりも低い飽和度のブロックが存 在している。これは、緩衝材の中心部で乾燥密度を低く評価されていることより、式 3.1-4 から 算出される飽和度が低い値を示したと考えられる。

135



図 3.1-12 小規模模型試験 Case4 及び Case5 の緩衝材中の含水比分布



図 3.1-13 小規模模型試験 Case4 及び Case5 の緩衝材の乾燥密度分布



図 3.1-14 Case5 における緩衝材の5層目の解体状況



図 3.1-15 小規模模型試験 Case4 及び Case5 の緩衝材中の飽和度分布

3.1.3 縮尺模型試験

(1) 縮尺模型試験の概要

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把握するため、人工バリア性 能確認試験の 1/20 スケールの模型(以下、縮尺模型)を用いた試験を実施した。縮尺模型試験 装置を図 3.1-16 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。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面と側面より供給される構造とした。
- ▶ 埋め戻し材は、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する埋め戻し材の自重に相当する荷重と同等の鉛直圧を埋め戻し材の縮尺模型上部より作用させる。

緩衝材の縮尺模型は直径 113 mm、高さ 210 mm である。材料は、クニゲル V1 とケイ砂を 重量比で 70%と 30%の割合で混合したものを用いた。ケイ砂は、3 号珪砂と5 号ケイ砂を重量 比でそれぞれ 50%の割合で混合している。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/m³、初期含水比を 10.5%として作製した。 埋め戻し材の縮尺模型は直径 120 mm、高さ 105 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。埋め戻し材は初期乾燥密度 1.20 Mg/m³となるように静的締固 めにより作製した。

試験装置は、一定の上載荷重を作用させながら給水を行い、緩衝材や埋め戻し材の縮尺模型 への水の浸潤に伴い生じる変形や圧力などの経時変化を把握するものである。試験装置上部に 設置した載荷板を介してベロフラムシリンダの制御により上載荷重を作用させた。試験装置の 底部にはポーラスメタルを設置しており、二重管ビュレットより自然水頭で給水した試験用水 はポーラスメタル及びケイ砂を通じて縮尺模型の底部と側面より供給される。試験装置には、 変位計、荷重計、土圧計、を設置した。縮尺模型の膨潤による上方への変形量を計測するため に、試験装置上部に最大容量 50 mm、最小目盛り 0.005 mm の変位計を設置した。鉛直下向き に発生する圧力を計測するために、試験装置の最下部に最大容量 19.61 kN、最小目盛り 0.0049 kN のロードセルを設置した。試験装置の側面には、縮尺模型の膨潤によって生じる側圧を計測 するために、最大容量 5 MPa、最小目盛り 0.0018 MPa の土圧計を設置した。土圧計は、緩衝 材の縮尺模型の下端から 52.5 mm、122.5 mm、192.5 mm、227.5 mm の位置にそれぞれ 2 個 ずつ設置している。



図 3.1-16 縮尺模型試験装置の概要

(2) 縮尺模型の作製

(a) 緩衝材

緩衝材の縮尺模型は、6 個の緩衝材ブロックに分割して作成した。1 個のブロックは直径 113 mm、高さ 35 mm である。クニゲル V1、3 号ケイ砂及び 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よりイオン交換水をケイ砂 に加えた。その後、ビニール袋にクニゲル V1 を投入し、十分に混合した後 1 日程度養生した。 含水比を調整した材料は、圧縮成型用のモールドに投入し、圧縮成型装置に設置した。圧縮成型 装置では、ブロックの高さが 35 mm となるまで静的載荷(圧縮速度:1 mm/min)を行った。 ブロックが所定の高さとなったことを確認した後、20 分程度その状態を保持した。

(b) 埋め戻し材

埋め戻し材の縮尺模型は、内径 120 mm の試験容器内に 3 層に分割して静的に圧縮すること により作製した。1 層あたりの高さは 35 mm である。まず、クニゲル V1 と掘削ズリのそれぞ れについて乾燥密度 1.20 Mg/m³、初期含水比 35.0%の埋め戻し材 1 層分に必要な重量を計量し た。ビニール袋に掘削ズリを投入し、初期含水比となるように霧吹きよりイオン交換水を掘削 ズリに加えた。その後、ビニール袋にクニゲル V1 を投入し、十分に混合した後 1 日程度養生し た。埋め戻し材の 1 層目は、試験容器内に設置した緩衝材ブロックの上に材料を投入し、平坦 になるように敷き均した。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。以上の手順を、3 層目の埋め戻し材の高さが 105 mm となるまで繰り 返した。

(3) 試験手順

試験装置の組立手順を図 3.1-17 に示す。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。ケイ砂の充填完了後には、緩衝材ブロックの上のろ紙を取り 除き、埋め戻し材の材料を投入し所定の乾燥密度となるまで静的締固めにより圧縮した。

緩衝材と埋め戻し材の縮尺模型の作製後、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、試験孔直上の埋め戻し材の自重に相当する 0.087 MPa の鉛直圧を埋め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。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。試験中は、ビュレット 内の水位と変位計、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。



緩衝材ブロックの設置



ケイ砂の充填作業



ケイ砂の充填状況



埋め戻し材の締固め作業





埋め戻し材の作成完了 図 3 1-1

乍成完了 縮尺模型試験の設置状況 図 3.1-17 縮尺模型試験装置の準備状況

(4) 縮尺模型の解体手順

試験終了後には、緩衝材模型は含水比と乾燥密度を埋め戻し材模型は含水比をそれぞれ計測 した。図 3.1-18 縮尺模型試験の解体作業の状況を示す。まず、ベロフラムシリンダによる鉛直 圧を除荷し、荷重を取り除いたことによる緩衝材の膨潤変位量(リバウンド量)を変位計により 計測した。その後、注水を止め載荷装置から試験容器を取り出し、埋め戻し材側が下になるよう に模型押し出し装置に設置した。緩衝材の解体は押し出し機を用いて、試験容器から緩衝材を 10 mm 程度押し出し、ヘラやワイヤーソー等を用いて円盤状にカットした。カットした緩衝材 は中央部を長さ 30 mm、幅 10 mm の大きさで 12 個の小ブロックに分割した。分割した小ブロ ックは 3 辺の長さを計測した後、一部をパラフィン法または 3D スキャナ(KEYENCE 製)に より乾燥密度測定を実施した。また、全ての小ブロックについて炉乾燥法による含水比計測を 行った。緩衝材の押し出しと小ブロックへの分割を緩衝材と埋め戻し材の境界面が現れるまで 繰り返した。埋め戻し材は試験容器から全て取り出し高さ方向に 3 個のブロックに分割した。 埋め戻し材の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。



緩衝材の解体状況(1)

緩衝材の解体状況(2)



 埋め戻し材の解体状況(1)
 埋め戻し材の解体状況(2)

 図 3.1-18 縮尺模型の解体状況

(5) 縮尺模型試験の結果

(a) 試験条件及び測定結果

令和3年度は、イオン交換水(以下、イオン交換水-1)と0.2 mol/LのNaCl水溶液(以下、0.2M-NaCl)を試験用水としてそれぞれ1試験ずつ実施した。

試験用水の水質分析の結果を表 3.1-3 に示す。いずれの試験ケースでも緩衝材の乾燥密度は 1.80 Mg/m³とし、埋め戻し材の乾燥密度は 1.20 Mg/m³とした。

縮尺模型試験ではビュレット内の水位、上方への変位量、側面土圧及び底面土圧を計測した。 また、試験終了後には、緩衝材と埋め戻し材を小ブロックに分割して含水比計測を実施した。 0.2M-NaCl では緩衝材の一部のブロックの乾燥密度を 3D スキャナとパラフィン法により計測 しており、イオン交換水・1 では緩衝材全体の半数のブロックの乾燥密度を 3D スキャナにより 計測した。縮尺模型解体時のリバウンド量の計測結果は付録 1 に示す。

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

表 3.1-3 縮尺模型試験における試験用水の水質分析結果

※表中の<印は、定量下限値未満を示す。

(b) 膨潤変形率

縮尺模型の上方への変位量は試験装置上部に設置した変位計で計測しているが、埋め戻し材 がほとんど膨潤しないものと仮定して計測された変位量はすべて緩衝材の膨潤変形によるもの として整理した。ここでは膨潤変形率を緩衝材の初期高さである 210 mm に対する上方への変 位量の割合としている。イオン交換水-1 と 0.2M-NaCl の結果に加えて、令和 2 年度に実施した 縮尺模型試験(以下、イオン交換水-2; 原子力機構・原環センター, 2021)を比較した。各試験 ケースの試験日数と試験用水を表 3.1-4 に示す。

図 3.1-19 に膨潤変形率の経時変化を図 3.1-20 に注水量の経時変化を示す。イオン交換水-1 とイオン交換水-2の2ケースでは、注水量の増加に伴い増加し、20日を経過したころから増加 が緩やかになる傾向を示す。イオン交換水-1では最大変位量が15.25 mmで膨潤変形率は7.32% であり、イオン交換水-2 では変位量が15.01 mm、変形率が7.15%となった。イオン交換水-1 は試験終了時においても膨潤による変位が続いている傾向を示しているが、イオン交換水-2の 変形率の経時変化と同様の水位を示しており、また、注水量の経時変化がほぼ一定の値へと収 束していることから、変形率の値は収束するものと考えられる。

0.2M-NaClでは、8日を経過したころから変形率の増加が緩やかになる傾向を示し、30日経 過時点で変形率は一定の値へと収束した。試験終了時には、変位量が9.65mmで膨潤変形率が 4.59%であった。令和2年度に実施した小規模試験(原子力機構・原環センター,2021)の結果 と同様に、イオン交換水とNaCl水溶液では、NaCl水溶液の変位量が小さい結果となった。

ケース名	イオン交換水-1	イオン交換水・2	0.2M-NaCl	
実施年度	令和3年度	令和2年度	令和3年度	
試験日数(日)	35	89	49	
試験用水	イオン	交換水	0.2 mol/L NaCl 水溶液	

表 3.1-4 縮尺模型試験における試験条件



図 3.1-19 膨潤変形率の経時変化



図 3.1-20 注水量の経時変化

(c) 側面土圧

図 3.1-21 に土圧計及びロードセルの設置位置を示す。図 3.1-22 に土圧計による側面土圧の 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。イオン交換水-1 と 0.2M-NaCl の両ケー スにおいて、土圧計 1~6 では試験開始直後に急激に圧力が増加した後、1~2 日経過したころ に最大値を示すピークが現れ、その後減少傾向に転じた。ピークを示すまでの時間は、緩衝材の 上部、中部、下部の順番に早かった。緩衝材下部に位置する土圧計 1、2 は同じ高さに設置して いるのにもかかわらず、計測されている側面土圧の値が異なっている。この理由としては、試験 容器内の緩衝材の位置や土圧計周辺のケイ砂層の充填状況の違いにより、緩衝材が膨潤して土 圧計に接触するまでの時間が異なることが理由の一つとして考えられる。

埋め戻し材に設置した土圧計 7、8 では最大で 0.2 MPa 程度の土圧を示した。平成 31 年度に 実施した埋め戻し材の膨潤圧試験(原子力機構・原環センター, 2020)では膨潤圧は約 0.03 MPa であったことから、土圧計 7、8 で計測した圧力は埋め戻し材の膨潤によるものではなく、埋め 戻し材が上方へ変位した際に埋め戻し材の中に含まれる粒径の大きな掘削ズリが接触し、圧力 の増加が計測された可能性が考えられる。

図 3.1-23 に同じ高さに設置した土圧計で計測した側面土圧を比較した結果を示す。膨潤変形率の経時変化と同様にイオン交換水・2 の結果も併せて示した。緩衝材下部に設置した土圧計1、2 では、イオン交換水に比べて 0.2M-NaCl で側面土圧の値が高くなっている。図 3.1-19 の膨 潤変形率の経時変化の結果より、変位量が小さい 0.2M-NaCl で側面土圧は大きな値を示していることがわかる。一方で、埋め戻し材との境界面に近い緩衝材上部に設置した土圧計5、6 では、 試験用水の水質による側面土圧が示す値にはほとんど違いがないことがわかる。

図 3.1-24 に試験装置底部に設置したロードセルより計測した底面土圧を経時変化を示す。底面土圧は緩衝材の鉛直方向の膨潤圧を示していると考えられ、側面土圧と同様にイオン交換水に比べて 0.2M-NaCl で高い値を示している。



図 3.1-21 土圧計及びロードセルの設置位置





土圧計7,8の比較

図 3.1-23 側面土圧の比較



図 3.1-24 底面土圧の経時変化

(d) 含水比分布

(i) 縮尺模型の解体状況

試験終了後に、緩衝材と埋め戻し材の縮尺模型を試験容器から取り出して含水比計測を実施 した。イオン交換水-1では図 3.1-25 に示すように載荷板を取り外した際に、埋め戻し材の上部 まで試験用水が溜まっている様子が確認できた。埋め戻し材上部の水は 40 ml 程度溜まってお り、採水して水質分析を実施した。水質分析の結果を表 3.1-5 に示す。試験後の試験用水の Na⁺ の濃度は 1500 mg/L となり表 3.1-3 に示す試験前の試験用水の水質と比べて、大幅に増加して いることが確認できる。これは、緩衝材や埋め戻し材と接触した試験用水中にベントナイトか ら溶出した Na⁺イオンが含まれているためと考えられる。

イオン交換水-1 では緩衝材を高さ方向に 20 層(1 層の平均厚さは 9.17 mm~12.92 mm) に 分割し、緩衝材の底部を 1 層目、埋め戻し材に最も近い側を 20 層目とした。イオン交換水-2 で は緩衝材を高さ方向に 16 層(10.67 mm~18.42 mm)に、0.2M-NaCl では緩衝材を高さ方向 に 19 層(11.04 mm~13.75 mm)に分割した。いずれのケースにおいても、水平方向には 12 個のブロックに分割した。



図 3.1-25 イオン交換水-1の解体状況

表 31-5	イオン交換水-1	から採取し	た試験用水のフ	k質分析結果
10.10	- / / ノ () / / / / / / / / / / / / / / / / / /		//////////////////////////////////	い 見 ノノ リル ルロノ

	Na ⁺	K+	Mg^{2+}	Ca ²⁺
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
イオン交換水-1	1500	13	170	270

(ii) 緩衝材の含水比分布

炉乾燥法により計測した緩衝材の含水比の分布を図 3.1-26 に示す。水平方向の含水比は、縮 尺模型への給水のために設けたケイ砂層と接している外周部の含水比が高く、中央部の含水比 が低い傾向を示した。高さ方向の含水比分布を見ると埋め戻し材との境界面に近い上部の含水 比が高く、中央部や下部には含水比が低い領域が残っていることが確認できる。

また、0.2M-NaCl では図 3.1-26 内で太枠のブロックとして示している高さ方向の奇数番目 の層及び 18 層目のブロックについてパラフィン法による乾燥密度測定を実施した。同じ高さの 層パラフィン法を実施していないブロックと含水比の値を比較すると、パラフィン法による測 定を実施したブロックでは含水比が 1%~2%程度低い値を示している。パラフィン法では、測 定試料の表面にパラフィン皮膜を形成するために溶融したパラフィンに試料を浸すため、測定 の過程において試料中の水分が蒸発してしまうことが考えられる。本試験における含水比の測 定試料は長さが約 30 mm、幅が約 10 mm、高さが約 10 mmの小ブロックであり、試料中に含 まれる水の質量が 0.1 g 変化するだけで含水比は 2%程度変化するため、パラフィン法を実施し た小ブロックの含水比は実際の試験終了時から低い値となっている可能性がある。





(iii) 埋め戻し材の含水比分布

埋め戻し材の含水比分布を図 3.1-27 に示す。埋め戻し材は、高さ方向に3層に分割し、各層 の中央部と外周部に分けて含水比を計測した。イオン交換水-1 では図 3.1-24 に示した通り、埋 め戻し材上部まで試験用水が浸潤しており、含水比は埋め戻し材の上部側が最も高い値となっ た。一方で、0.2M-NaCl では緩衝材との境界面に近い埋め戻し材の下部で最も高い含水比を示 した。



図 3.1-27 埋め戻し材の含水比分布

(iv) 緩衝材の乾燥密度及び飽和度分布

イオン交換水・1 については、緩衝材の 1 番から 6 番のブロックを全層にわたり 3D スキャナ による乾燥密度計測を実施した。図 3.1・28 にイオン交換水・1 における緩衝材の含水比、乾燥密 度及び飽和度の分布を示す。乾燥密度の分布をみると、小規模模型試験と同様にケイ砂層と接 している外周部に位置するブロックの乾燥密度が低くなっている傾向がみられる。これは、試 験用水の浸潤により緩衝材の外周部から膨潤が進行した結果、乾燥密度が低下したものと考え られる。飽和度の分布をみると、含水比の分布と同様にケイ砂層と接している外周部と埋め戻 し材との境界に近い部分及びポーラスメタルと接している緩衝材底部で飽和度が 90%以上とな っている。一方で、緩衝材の中央に近い部分では飽和度が 60%~70%程度の比較的飽和が進ん でいない領域が残ったままとなっている。

0.2M-NaCl については、緩衝材の1、3、5、7、9、11、13、15、17、18 層目の1番から6番 までのブロックをパラフィン法と3D スキャナにより乾燥密度を計測した。図3.1-29 に0.2M-NaCl における緩衝材の乾燥密度の分布を示す。ケイ砂層と接している外周部に位置するブロッ クの乾燥密度が低くなっている傾向がみられる。これは、試験用水の浸潤により緩衝材の外周 部から膨潤が進行していくことと整合的な結果である。また、埋め戻し材との境界に近い17 層 目、18 層目の乾燥密度が低くなっている。3D スキャナで計測した乾燥密度は、一部のブロック で1.80 Mg/m³よりも高い値を示した。

図 3.1-30 に 0.2M-NaCl における緩衝材の飽和度の分布を示す。1.80 Mg/m³よりも高い乾燥 密度の値を示したブロックについては飽和度算出の対象外とした。飽和度の分布は、含水比の 分布と同様にケイ砂層と接している外周部と埋め戻し材との境界に近い部分で高い値を示す傾 向があることが確認できる。



図 3.1-28 イオン交換水-1 における緩衝材の含水比、乾燥密度及び飽和度の分布



図 3.1-29 0.2M-NaCl における緩衝材の乾燥密度の分布



図 3.1-30 0.2M-NaClにおける緩衝材の飽和度の分布

3.1.4 気相を考慮した連成試験

(1) 気相を考慮した連成試験の概要

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、緩衝材の膨潤挙動を含めた熱-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。既往の解析検討では、発熱によって生じた 水蒸気により、発熱部近傍の緩衝材の飽和度の低下を引き起こすとともに、水蒸気発生にとも なう間隙圧の増加により、有効応力、間隙率、変位などといった力学現象へも影響を及ぼす可能 性が示唆されている(佐藤ほか,2020)。これらの現象を正確に把握するためは、解析検討に加 えて室内試験によるデータ取得が必要となる。そこで、発熱部近傍の緩衝材中の気相が解放さ れる条件と密閉される条件を想定した室内試験を実施することとした。令和3年度は、予備試 験による試験装置の適用性確認と、連成試験によるデータの取得状況を確認した。

(2) 試験仕様

試験は岩盤から廃棄体間の緩衝材を一次元的に切り出した縮小モデルを考え、廃棄体側を想定した片方を加熱し、岩盤側を想定したもう片方から注水する試験系とした。図 3.1-31 に試験装置の概要を示す。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、加熱・注水を行う機構を設けるとともに、温度、相対湿度、間隙圧を連続計測するためのセンサを設置した。設置した各計測機器の仕様を表 3.1-6 に示す。試験装置の円筒セルと上板の材質は、強度が強く、線膨張係数が小さいという特性をもつ材料に着目をして、ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)を選定した。なお、円筒セルを力学的に補強するために外周部はステンレス製(SUS304)の補強リングを設置した。なお、試験装置上端部は気相が透過及び不透過である境界条件設定できるような機構とした。



図 3.1-31 試験装置概要

計測機器	計測精度	計測項目	
注水装置	最大容量: 500 mL		
(二重管ビュレット)	最小目盛:1.0 mL		
美工計	最大容量:10 kPa	供封体内への注水島を計測	
上口	最小目盛: 0.0033 kPa	医两种疗 的 在 小 重 之 时 例	
ロードセル	最大容量:19.61 kN	底面十正を計測	
	最小目盛:0.0049 kN		
問附工計	最大容量: 3.4 MPa	供試体の間隙圧を計測	
[月][水/二-日]	最小目盛: 0.017 MPa		
	最大容量:100%(相対湿度)		
泪湿 由計	最小目盛:0.04%(相対湿度)	供試体の相対湿度と湿度を計測	
1皿1业/交司	最大容量:85℃(温度)	医時件の恒利征度と価度で計測	
	最小目盛:0.0625℃(温度)		

表 3.1-6 計測機器の分解能

(3) 予備試験

試験開始前に予備試験を実施し、試験装置及び計測機器が試験時に、構造的に満足し、間隙圧 や温度、湿度などを正常に計測可能であることを検証した。予備試験では、主に試験容器の密閉 性確認(試験容器から外部への空気漏れの有無の確認)、計測機器(間隙圧計、温湿度計)の動 作確認、加熱面の温度分布の確認を実施した。

(a) 試験容器から外部への空気漏れの有無の確認及び間隙圧計の動作確認

空気漏れの有無の確認は、試験容器を空の状態で試験容器を密閉し、試験容器底面から 0.5MPaの圧力で空気を注入し、漏れの音の確認、リークチェック、間隙圧計の計測値を確認し た。空気漏れが確認された際は、漏れの箇所を確認し装置の改良を実施した。最終的に、注入空 気圧 0.5 MPa に対する計測結果(図 3.1-32)から空気漏れが無いことを確認した。また、6つ の間隙圧計の計測値は、空気圧 0.5 MPa 程度に対して最大 10 kPa の個体差を示すことを確認 した。最終的には、この結果に基づき個々の間隙圧計の校正係数を補正して試験結果を評価す ることとする。



図 3.1-32 間隙圧計測結果

(b) 温湿度計の動作確認

温湿度計の動作確認は、環境条件の異なる 3 つの場所に温湿度計(計 7 個)を設置し、温湿 度計の個体差や温湿度計が環境温度、湿度に正常に反応するかを検証した。設置した場所は、温 度、相対湿度が制御されていない室内(A)、温度 25 ℃、相対湿度 60%RH に制御された恒温・ 恒湿の試験室内(B)、温度 20 ℃、相対湿度 90%RH に制御された養生室(C)とした。なお、 動作確認時の温湿度計の計測間隔は 5 分に 1 回の計測とした。

図 3.1-33 及び図 3.1-34 に温湿度計による温度と相対湿度の計測結果を示す。温度の計測結 果は概ね設定温度と同程度となり、温湿度計が正常に反応していることを確認した。相対湿度 の計測結果は条件 A 及び条件 B では概ね設定した相対湿度と同程度であり、温湿度計が正常に 反応していることを確認した。一方で、条件 C では 5%程計測値に差が見られた。養生室は制御 盤にて相対湿度を 90%RH に制御しており、動作確認時は養生室内の同じ箇所に温湿度計を設 置していた。よって、高湿度条件となるとセンサによって、若干のばらつきが出る可能性が示唆 された。各温湿度計の計測値は温度で最大約 0.2 ℃、相対湿度で約 5%RH の差(高湿度条件) となっており、各温湿度計において、温湿度計の個体差は高湿度条件以外小さいことを確認し た。高湿度環境下における計測値については、ばらつきの幅の確認など別途検証が必要である。



図 3.1-33 温湿度計による温度計測結果



図 3.1-34 温湿度計による湿度計測結果

(c) 加熱面の温度分布

加熱面の温度分布の確認は、温度調節器にて設定した温度が加熱面にどのように反映されているかを検証した。確認方法は、加熱面の温度を赤外線サーモグラフィ(テストー製:testo872) にて計測した。本予備試験で用いた赤外線サーモグラフィ及び確認状況を図 3.1-35、サーモグラフィの分解能を表 3.1-7 に示す。

図 3.1-36 に本予備試験のサーモグラフィの計測結果(経時変化)を示し、図 3.1-37 にサー モグラフィのコンター図を示す。結果から温度調節器を設定温度(70℃)に調整後、概ね 30 分 程度で加熱面の表面温度は設定温度よりも少し低い 60℃~70℃を示すことが確認された。コン ター図では、間隙圧計及び温湿度計部分の温度が大きいが、これは隙圧計及び温湿度計部分に はポーラスメタルを設置しており、ヒーターユニット(SUS 製)表面の反射率とポーラスメタ ルの反射率が異なるため、間隙圧計及び温湿度計の計測温度が大きく評価されたと考えられる。



図 3.1-35 サーモグラフィ(テストー製: testo872)及び確認状況

計測機器	計測精度	計測項目
サーモグラフィ	最大容量:100 ℃	と、クーマーンしま云泪座
(testo 872)	最小目盛 : -30 ℃	ヒーターユーット衣面温度

表 3.1-7 サーモグラフィ 分解能



図 3.1-36 サーモグラフィ計測結果(経時変化)



サーモグラフィ計測面



16 分後

33 分後

図 3.1-37 サーモグラフィ計測結果

(4) THM 連成試験結果

本検討で用いるベントナイト(クニゲル V1)の物性値を表 3.1-8 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。

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 1.2 Mg/m³、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、ヒーターの加熱温度はセンサの温度適用範囲を考慮し 70℃に設定した。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。試験条件を表 3.1-9 に示す。

試料名	クニゲル V1
土粒子密度(Mg/m ³)	2.743
液性限界(%)	488.6
塑性限界(%)	26.0
塑性指数(-)	462.6
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

表 3.1-8 クニゲル V1 物性値

表 3.1-9 試験条件

項目	内容
試験種別	THM 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	1.20 Mg/m^3
初期飽和度	20%
試験水	イオン交換水(脱気水)
試験期間	60 日
ヒーター設定温度	70°C
(a) 計測結果

図 3.1-38 に温度の計測結果を示す。計測値は加熱開始から数時間程度温度上昇が続き、その 後ヒーター部で平均 62℃、側面上段で平均 37℃、側面下段で平均 28℃で一定となった。同断 面に設置したセンサはほぼ同様の値を示すことから、上端部(ヒーター)から下端部にかけて供 試体中にも温度勾配が形成されていると考えられる。また、ヒーター部の温度は設定温度 70℃ に対し 8℃ほど低く、予備試験と同様の傾向が確認された。この結果を踏まえ、解析検討では、 設定温度とヒーター部で計測された温度の差が連成現象にどの程度影響を及ぼすかを事前に確 認するなどの検討が必要である。

図 3.1-39 に相対湿度の計測結果を示す。同断面に設置したセンサはほぼ同様の傾向を示し、 ヒーター部付近では温度上昇に伴い相対湿度が低下し、最終的には 20%付近に漸近した。これ は、温度勾配によって加熱面近傍の水分が下側へ移動した結果であると考えられる。側面下段 の相対湿度は試験水の浸潤により上昇し、注水開始後約 40 日後には 100%となった。また、側 面上段の相対湿度は試験開始後初期に一時的に上昇した後、下降傾向を示し、その後緩やかに 上昇傾向に転じることが確認された。これは、温度勾配による水分の移動と浸潤面からの水分 の移動の両者の影響を受けた結果であると考えられる。

図 3.1-40 に間隙圧の計測結果を示す。試験開始時は、試験装置上端部の気相の条件が不透過 である場合のデータの取得状況を確認する想定であったが、間隙圧のデータはそれぞれのセン サで変動が見られるものの、数 10 kPa 程度の変動に収まっていることが確認できる。これは、 上蓋部(ヒーター加熱部)から空気が透過したため間隙圧の上昇があまりみられなかった可能 性がある。一方で、ヒーター部の間隙計の1つは漸増が継続しており、上蓋部からの空気の透 過が多少あった可能性があるが、ヒーター部から側面上段部分(供試体上部)では間隙圧の蓄圧 が 60 日以降に本格化する可能性もある。今後は、温度勾配環境下における装置の密閉性を確認 するとともに、より試験期間の長い条件で試験を実施するなどの検討が必要である。一方で、今 回取得されたデータは間隙圧が上昇しない条件(開放系)に近い試験結果である可能性が高く、 連成解析結果や異なる条件での試験結果との比較検証により詳細を確認する。



図 3.1-38 温度計測結果



図 3.1-39 相対湿度計測結果



図 3.1-40 間隙圧計測結果

(b) 解体調查結果

試験終了後は、供試体高さ150 mm を 7 層(1~5 層目 25 mm、6~7 層目 12 mm)に分けて 供試体をカットし、含水比分布を確認した(図 3.1-41)。結果は、温湿度計で計測された相対湿 度の傾向と同様に、ヒーター側の含水比は初期含水比(9.38%)よりも低く、浸潤側の含水比は ほぼ飽和を示すことが確認された。また、解体調査時に計測した各層の含水比分布から本供試 体への注水量を算出すると 229 ml となり、試験時の注水量の計測結果(約 239 ml)とほぼ一 致する結果となった。



3.1.5 まとめ

令和3年度は、力学的相互作用下の膨潤挙動を把握することを目的として、緩衝材と埋め戻 し材を組み合わせた小規模模型試験及び縮尺模型試験、気相の影響を把握するための室内試験 検討を実施した。主な成果を以下に示す。

- ▶ 緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた小規模模型試験
 - ・ 埋め戻し材の乾燥密度を1.40 Mg/m³では、小規模模型の膨潤変形率が埋め戻し材の乾燥密度1.20 Mg/m³の場合に比べて低い値を示すことを確認した。
 - 緩衝材では試験用水が供給されるケイ砂層と接している外周部において、乾燥密度が 低下して飽和度が高くなっていることから、吸水膨潤が緩衝材の外側から進んでいる ものと考えられる。

埋め戻し材の乾燥密度が高い場合に、膨潤変形率が低くなる傾向が確認された。今後は、 縮尺模型試験を実施して、側面土圧の値を計測するなど、緩衝材の膨潤を抑制する要因の 理解を進める。

▶ 緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験

縮尺模型試験の結果より、以下の知見が得られた。

- 令和3年度に実施した、イオン交換水とNaCl水溶液の試験終了時の膨潤変形率を比較 すると、イオン交換水で7.32%、NaCl水溶液で4.59%となり、NaCl水溶液の膨潤変形 率が低い結果となった。
- ・ 側面土圧は、緩衝材の下部が最も高く、上部で最も低い値を示した。また、イオン交換水とNaCl水溶液で比較すると、緩衝材の下部や中部では、NaCl水溶液で高い側面土圧が計測された。
- ・ 底面土圧についても、膨潤変形率が低いNaCl水溶液で高い土圧が計測された。
- 試験終了後の緩衝材の緩衝密度の分布をみると、ケイ砂層と接している緩衝材外周部 および埋め戻し材との境界部に近い緩衝材上部の乾燥密度が低く飽和度が高い領域が 存在している。

上記のことから、膨潤変形率と底面土圧の計測結果より膨潤による変形が抑えられている場

合に発生する圧力が大きくなることが確認できた。また、緩衝材の上部、中部および下部で得ら れた側面土圧では、緩衝材の下部では土圧が高く、上部で低くなっていた。これらのことより、 緩衝材の下部では、膨潤による変形が抑えられているため側面土圧が高く、上部では膨潤によ り変形しているため側面土圧が低いことが推察される。緩衝材の解体調査において、乾燥密度 が低く、飽和度が高い領域が緩衝材の上部に存在することからも緩衝材の上部からベントナイ トの吸水による膨潤が進んでいると考えられる。すなわち、縮尺模型試験のように緩衝材の側 面から水が浸潤するような状況においては、緩衝材全体が一様に膨潤するのではなく、不均質 に膨潤する可能性があると考えられる。

▶ 気相を考慮した連成試験

予備試験や連成試験により、試験装置やセンサの特性、温度、相対湿度、間隙圧のデータ取 得状況を確認し、今後の試験条件設定や解析検討のベースとなる情報を取得した。今後のと りまとめに向けて、気体が密閉された条件での室内試験を中心にデータの拡充を行い、今回 の試験結果との比較検証や解析的な検討により、現象のメカニズムの理解や連成解析コード の検証を進める。

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

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

止水プラグの設計や施工の考え方を提示する上では、ベントナイト系材料からなる止水プラ グが岩盤の種類や地下水の組成などの地質環境条件に応じてどの程度の地下水移行抑制機能を 有するか把握しておくことが重要となる。そこで、堆積岩かつ塩水系地下水が分布する幌延深 地層研究センターの地下施設において、止水プラグの有する地下水移行抑制機能をより明確化 することを目的とした EDZ シーリング原位置試験を平成 30 年度より 3 年間にわたり実施して きた(原子力機構・原環センター, 2019; 2020; 2021)。EDZ シーリング原位置試験では幌延 深地層研究センターの地下施設の 350m 調査坑道において、図 3.2-1 に示すように、止水プラ グの切り欠き部分の規模を縮小して模擬した粘土止水壁を構築した。粘土止水壁を対象に透水 試験を実施し透水係数を算出することで、EDZ を含む領域における粘土止水壁の構築前後の透 水性の変化を調査した。その結果、EDZ を含む区間の透水係数の値が、粘土止水壁構築から 1 ⁶ m/s オーダーから施工後には 10⁻⁹ m/s オーダーへと低下するとともに、粘土止水壁構築から 1 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、上記で述べたように EDZ の連続性を遮断する構造物として成立するた めには、要求する性能を発揮できる品質(乾燥密度)で確実に施工できる方法が必要となる。例 えば、締固め工法で施工する場合には、坑道の天端部や側壁部で岩盤と止水プラグの境界部や その近傍において締固め不足による乾燥密度の低下が生じる可能性があり、ブロック工法の場 合では、岩盤と止水プラグの境界部において空隙が生じる可能性があり、施工方法に起因する 事象により要求する透水係数が確保できる乾燥密度が達成できないことが懸念される。そこで 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 するベントナイト系材料の施工方法として、吹付け施工の適用性を検討することとした。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施工に係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試験を実施し、天端部や側壁部といった 切欠き上部へのベントナイトの吹付けによる施工の見通しを得た。



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3年度は、ベントナイトの吹付け施工の適用性を確認するため、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、岩盤を掘削して設けた切欠き部に対して吹付けの手順や 吹付け材料の管理方法を確認するとともに、吹付け後のベントナイトの含水比や乾燥密度に生 じるばらつきなどの施工品質に係るデータの取得を実施した。また、令和2年度までに実施し てきた試験坑道3の底盤に構築した粘土止水壁を対象とした透水試験を継続して実施し、止水 壁を含む領域の透水係数を評価した。

令和3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
- ・ 地上吹付け施工試験において、吹付け材料の乾燥密度を高めるためのノズルの形状やリ バウンドの回収方法などの対策について検討
- ・ 原位置吹付け施工試験において、幌延深地層研究センターの350m試験坑道2の側壁面に 切欠きを掘削し、切欠き部を対象とした吹付け試験により岩盤に対するベントナイトの 吹付施工に係るデータ(乾燥密度、ベントナイト混合率など)の取得や作業のサイクル タイムの評価を実施
- ▶ 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原位置吹付け施工確認試験

(1) 切欠き型枠吹付け試験の概要

令和 2 年度には、止水プラグの側壁部および天端部への吹付けによるベントナイト施工を想 定し、坑道の切欠き部の一部を再現した鋼製模擬型枠を対象とした地上吹付け試験(以下、切欠 き型枠吹付け試験)を実施した(図 3.2-2)。

切欠き型枠吹付け試験では、粉体ベントナイトであるクニゲル V1 もしくは粒状ベントナイ

トであるクニゲルGXをケイ砂と混合して作製した材料を吹付けに用いた(表 3.2-1)。

吹付け後のベントナイト材料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 を設定し、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。この透水係数の施工目標値を達成できるベントナイト系 材料の有効粘土密度として 1.20 Mg/m³を目標値とした。

有効粘土密度は次のように定義されている。

$$\rho_e = \frac{\rho_d (100 - R_s)}{100 - \frac{\rho_d}{\rho_s} R_s}$$
 $\ddagger 3.2-1$

 $\rho_e: 有効粘土密度(Mg/m³)$

 $\rho_d:$ 乾燥密度(Mg/m³)

 $\rho_s: 砂の土粒子密度(Mg/m³)$

R_s:乾燥質量での砂の混合率(%)

式 3.2-1 に基づき、表 3.2-1 に示す吹付けに使用した材料について、有効粘土密度 1.20Mg/m³ を達成できる乾燥密度を算出し、施工目標値として 1.43 Mg/m³を設定した。

切欠き型枠吹付け試験の結果を図 3.2-3 に示す。V1-70 では、最適含水比に近い含水比で作 製した材料においてたびたび吹付け機が閉塞したため、試験の途中で材料の含水比を高めに設 定した材料を作製して吹付けを実施した。その結果、吹付け後の平均乾燥密度が 1.41 Mg/m³ と 施工目標の 1.43 Mg/m³を下回る結果となった。一方、GX-70 では、平均乾燥密度が 1.50 Mg/m³ と施工目標を十分に上回る結果となった。しかしながら、GX-70 リバウンド率は 37%と V1-70 の 22%よりも高い値となった。切欠き型枠吹付け試験をとおして、ベントナイトの吹付け施工 に係る課題点を以下のように整理した。

- V1-70のように最適含水比よりも大幅に高い含水比の材料を吹付けた場合には、施工後の乾燥密度が目標乾燥密度に達しない。
- 含水比をなるべく均一にするためにはよく混錬する必要があるが、混練時間が長すぎると ミキサーの羽への材料が付着し、材料のロスや含水比の低下につながると考えられる。
- 吹付けの密度を向上させるため吹付け面に対してノズルの向きが垂直になるように細かく 調整することや吹付け面が平らになるように薄い層を重ねるように吹付けるなどハンドリ ングの面での工夫も必要となる。



図 3.2-2 令和 2 年度に実施した切欠き型枠吹付け試験の状況 (原子力機構・原環センター, 2021)

ケーフタ		目標乾燥密度		
クシス名	クニゲル V1	クニゲル GX	ケイ砂	(Mg/m^3)
V1-70	70	-	30	1.43
GX-70	-	70	30	1.43

表 3.2-1 試験ケース一覧



(原子力機構・原環センター(2021)に加筆)

(2) 地上吹付け施工試験

(a) 試験概要

令和2年度の切欠き型枠吹付け試験において、クニゲルV1において吹付け作業中に吹付け 機の閉塞が頻繁に生じたことや施工後の乾燥密度が目標乾燥密度に達しなかったこと、また、 クニゲルGXではリバウンド率が高かったことが課題として残った。そこで、幌延深地層研究 センター350m調査坑道における原位置吹付け施工確認試験に先立ち、原位置吹付け施工試験 における材料選定や材料の作製手順および吹付け手順を確認することを目的とした地上吹付け 試験を実施した。

(b) 実施内容

(i) 使用材料

地上吹付け施工試験では、表 3.2-1 示す令和 2 年度に実施した切欠き型枠吹付け試験と同様 に、粉体ベントナイトであるクニゲル V1 もしくは粒状ベントナイトであるクニゲル GX をケ イ砂と混合して作製した材料を吹付けに用いた。作製した材料は、ベントナイトの混合率を 70% として、ケイ砂は 3 号ケイ砂と 5 号ケイ砂を同じ割合で混合したものを用いた。使用した材料 の基本物性を表 3.2-2 に示す。吹付けに用いた材料の粒度分布を図 3.2-4 に、それぞれの材料 に対して実施した締固め試験の結果を図 3.2-5 に示す。材料作製時の目標含水比は、締固め試 験の結果より締固めエネルギーが 2Ec の場合の最適含水比として V1-70 で 18.62%、GX-70 で 18.27%を設定した。

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

表 3.2-2 材料の基本物性値







V1-70

GX-70

図 3.2-5 締固め試験結果 (原子力機構・原環センター, 2021)

(ii) 使用機械

地上吹付け施工試験では吹付け施工のための機械として、吹付け機、アーム付き汎用重機、ふるい機、強制二軸ミキサーを用いた。幌延深地層研究センター西立坑建屋へ材料製造プラント と吹付け機を配置し、木製型枠に対して吹付け試験を実施した。各機械の詳細を以下に示す。



図 3.2-6 地上吹付け施工試験の使用機器配置図

1) 強制二軸ミキサー

材料の混合(空練り)および含水比の調整のための混錬に強制二軸ミキサー(北川鉄工所 W-500)を使用した。ミキサーの仕様を表 3.2-3 に、外観を図 3.2-7 に示す。

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

表 3.2-3 強制二軸ミキサーの仕様



図 3.2-7 強制二軸ミキサー (W-500)

2) ふるい機

本試験では、ミキサーにより含水比調整した材料はベルトコンベアで運搬し、目開き 25 mm のふるいにかけて団粒化した含水比が高い材料(ダマ材)を取り除いた。ふるいの外観を図 3.2-8 に示す。



図 3.2-8 ふるい(目開き 25 mm)

3) 吹付け機

吹付け機にはニードガン 2000 (AGC プライプリコ)を使用した。この吹付け機は乾式吹付け および湿式吹付けの両工法に対応可能であり、安定かつ連続的な材料供給が可能である。本吹 付け機は、ベントナイト系材料の吹付け施工において使用実績がある。吹付け機の仕様を表 3.2-4 に、外観を図 3.2-9 に示す。地下施設用の圧縮空気ラインに接続して吹付け機への圧縮空 気の供給を行った。

メーカー		日本プライブリコ		
機種		ニードガン 2000		
材料ホース内	F径(mm)	63.5		
材料吐出量	(m³/hr)	20		
所要空気量	(m³/mi)	20		
所要空気圧力	J (MPa)	0.74		
材料送り最大距離(m)		水平 200 垂直 100		
吹付け可能最大粒径 (mm)				
吹付け可能最	是大粒径(mm)	15		
吹付け可能量 駆動	是大粒径(mm)	15 220V 3 相 7.5kw インバーターモーター		
吹付け可能 ^量 駆動 回転数(rpn	最大粒径(mm) n)	15 220V3相 7.5kw インバーターモーター 5~16.5 (常用使用回転数)		
吹付け可能 ^量 駆動 回転数(rpn 質量(kg)	最大粒径(mm) n)	15 220V 3 相 7.5kw インバーターモーター 5~16.5 (常用使用回転数) 約 1200		
吹付け可能 ^量 駆動 回転数 (rpn 質量 (kg)	 表大粒径(mm) n) 全長 L 	15 220V 3 相 7.5kw インバーターモーター 5~16.5 (常用使用回転数) 約 1200 1845		
吹付け可能 ^量 駆動 回転数 (rpn 質量 (kg) 寸法 (mm)	 表大粒径(mm) n) 全長 L 全幅 W 	15 220V 3 相 7.5kw インバーターモーター 5~16.5 (常用使用回転数) 約 1200 1845 990		

表 3.2-4 吹付け機の仕様



図 3.2-9 吹付け機 (ニードガン 2000)

4) アーム付き汎用重機

本試験では、吹付けノズルをアーム付き汎用重機(Husqvarna DXR140)に取り付け、オペレーターの操作により吹付け位置の制御を行った。アーム付き汎用重機の仕様を表 3.2-5 に、 外観を図 3.2-10 に示す。

メーカー		Husqvarna
型式		DXR140
	全長 L	1932
寸法(mm)	全幅 W	771
	全高 H	1215
到達距離(m)	前・上方	3.7
質量(kg)		967

表 3.2-5 アーム付き汎用重機の仕様



図 3.2-10 アーム付き汎用重機 (DXR140)

5) 木製型枠

地上吹付け試験では、木製の型枠を対象に吹付けを実施した。型枠の寸法は幅1m、高さ50 cm、奥行き50 cm である。図 3.2-11 に型枠の外観を、図 3.2-12 に寸法を示す。



図 3.2-11 木製型枠の外観



図 3.2-12 木製型枠の寸法

(iii) 木製型枠への吹付け

地上吹付け試験では、表 3.2-6 に示す 4 ケースの吹付け試験を実施した。令和 2 年度の切欠 き型枠吹付け試験で目標乾燥密度を下回った V1-70 については、リバウンド回収の有無やノズ ル形状が施工後の乾燥密度に与える影響を確認するために 3 ケース (V1-70_A~C)の試験を実 施した。V1-70_A および GX-70 は令和 2 年度に実施した切欠き型枠吹付け試験と同様の条件で 試験を実施しており、吹付けノズルの吐出口の内径(以下、ノズル径)が 30 mm であり材料を 1 バッチ吹付けるごとに木製型枠の周辺に飛散したリバウンド材を回収した。V1-70_B ではノ ズル径を 30 mm のままで試験を実施し、途中でリバウンド材を回収することなく、2 バッチ分 の材料を連続して吹付けた。V1-70_C では、ノズル径を 50 mm に変更し、1 バッチ吹付けるご とに木製型枠の周辺に飛散したリバウンド材を回収して試験を実施した。

		使用材料				
ケース	クニゲル V1 (粉体)	クニゲル GX (ペレット)	ケイ砂	目標密度 (Mg/m ³)	その他条件	備考
V1-70_A	70	-	30	1.43	_	ノズル径:30mm
V1-70_B	70	-	30	1.43	リバウンド回収無し	ノズル径:30mm
V1-70_C	70	-	30	1.43	ノズル形状変更	ノズル径:50mm
GX-70	-	70	30	1.43	_	ノズル径:30mm

表 3.2-6 地上吹付け施工試験の試験ケース一覧

(iv) 品質管理項目

地上吹付け試験における、品質管理項目を表 3.2-7 に示す。

材料作製時には、ベントナイトとケイ砂の初期含水比および混合材料の含水比とメチレンブ ルー吸着量を測定した。

吹付け終了後には、図 3.2-13 に示すように各ケースにおいて 9 か所にステンレス試料円筒 (50 ml)を用いてサンプリングを行った。サンプリングした試料を用いて乾燥密度、含水比お よびメチレンブルー吸着量を測定し、吹付け後の品質を確認した。また、吹付け後の出来形体積 (吹付け体積)を 3D スキャナ(Leica Geosystems 社製 BLK360)により測定した。

	項目	確認方法	数量		
材料作製時	含水比 (ベントナイト)	赤外線水分計	1点/バッチ		
	含水比 (ケイ砂)	赤外線水分計	1点/ケース		
	含水比	赤外線水分計	1点/バッチ		
	(混合材料)	JISA1203	3点/バッチ		
	メチレンブルー吸着量	JISZ2451	3点/ケース		
吹付け施工後	乾燥密度	サンプリング	9点/ケース		
	含水比	JISA1203	9点/ケース		
	メチレンブルー吸着量	JISZ2451	3点/ケース		
	出来形体積	3次元計測	-		

表 3.2-7 地上吹付け施工試験の品質管理項目



図 3.2-13 サンプリング位置

(c) 実施結果

(i) 混合材料の作製

地上吹吹付け施工試験の材料作製方法を以下に示す。

- ① 所定の重量のベントナイトとケイ砂をミキサーに投入する
- ② 30秒間の空練りを行う
- ③ 約20 L/minの量の水を所定の量になるまで加えながら混練を行う
- ④ 加水終了後、5秒間の混錬を行う。
- ⑤ ミキサーから排出

地上吹付け施工試験の材料作製時には、混合前のベントナイトとケイ砂の含水比を赤外線水 分計により、混合材料の含水比を赤外線水分計および炉乾燥法(JISA1203)により測定した。 地上吹付け施工試験における材料作製時の含水比測定結果を表 3.2-8 に示す。1 バッチあた りの混合材料の乾燥重量を約 330 kg として、クニゲル V1 およびクニゲル GX それぞれの混合 材料の目標含水比に必要な加水量を算出した。ベントナイトの自然含水比は約 7%~11%、ケイ 砂の自然含水比は 1%であり、混合材料の含水比を調整するのに必要な加水量はクニゲル V1 で 39 L~46 L 程度、クニゲル GX で 33 L 程度となった。令和 2 年度の切欠き型枠吹付け試験よ り、クニゲル V1 については、材料作製時に算出した加水量をそのまま投入すると混合材料の一 部の水分量が多くなり団粒化した状態の材料 (ダマ)になり、ダマ以外の材料の水分量が少ない 状態となることが確認された。そのため、本試験においては、算出した加水量に 10 L~25 L 程 度を加えた量を実際の加水量とした。各バッチの作製実績は付録 2 に示す。混合材料の目標含 水比は V1-70 で 18.62%、GX-70 で 18.27%であったものの、実際に作製した材料の含水比はあ る程度のばらつきを有する結果となった。

JISA 1203 に基づいて炉乾燥法にて測定した含水比は、サンプリングした材料を3分割して 含水を測定していることから同一バッチ内での含水比に差は見られなかった。GX-70の1バッ チ目については、水分を多く含んで団粒化した部分をサンプリングしたため含水比が35%程度 と極端に高い値を示したと考えられる。

		含水比(%)				
ケーフタ	制件以外生	混合	合前	混合	混合後	
リース名	要垣ハツフ	ベントナイト	ケイ砂	混合材料	混合材料	
		赤外線	赤外線	赤外線	JIS A 1203	
					18.3	
	1	8.4		18.3	18.0	
V1-70 A			1.0		18.2	
V1-70_A			1.0		14.1	
	2	9.4		16.6	14.2	
				14.4		
					18.4	
V1 70 D	1	7.6		18.4	18.6	
			0.0		18.2	
V1-70_D	2	7.2	0.9	17.3	15.7	
					16.4	
					16.0	
	1	6.7	6.7 20.2 1.3 17.3	20.2	22.1	
					21.9	
V1-70 C				21.7		
V1-70_C				17.3	18.8	
	2	6.7			18.5	
					18.2	
					35.0	
	1	11.5		16.2	34.5	
CV-70			1.0		34.5	
GA-70			1.0		17.2	
	2	11.2		17.1	17.6	
					17.4	

表 3.2-8 混合土の含水比測定結果

(ii) サンプリングによる乾燥密度および含水比の測定

地上吹付け試験は、V1-70_A、GX-70、V1-70_B、V1-70_Cの順に実施した。混合材料の吹付 け後の出来形の状況を図 3.2-14 に示す。各ケースの吹付け供試体表面にマーキングした位置で サンプリングを実施した。サンプリング試料の乾燥密度と含水比の測定結果は付録 2 に示す。 含水比と乾燥密度の関係を図 3.2-15 に示す。

V1-70_A では、目標乾燥密度である 1.43 Mg/m³を下回るサンプリング箇所もあったものの、 9 か所の平均乾燥密度は 1.446 Mg/m³と目標値を上回る値となった。含水比は 20.6%~26.3% の値を示しその平均値は 20.9%であり目標含水比より 2%程度高い含水比を示した。

V1-70_B では、全てのサンプリング箇所で目標乾燥密度である 1.43 Mg/m³を上回る乾燥密度となり、9 か所の平均乾燥密度は 1.514 Mg/m³と目標値を上回る値となった。含水比は 21.4%
 ~23.7%とばらつきが少なく、その平均値は 21.7%と目標含水比より 3%程度高い値であった。
 V1-70_C では、全てのサンプリング箇所で目標乾燥密度である 1.43 Mg/m³を下回る乾燥密

度となり、9か所の平均乾燥密度は 1.177 Mg/m³と目標値を大幅に下回る値となった。含水比は 19.5%~26.9%の範囲にあり、平均値は 21.4%と目標含水比より約 3%高い値であった。

GX-70 では、全てのサンプリング箇所で目標乾燥密度である 1.43 Mg/m³ を上回る乾燥密度 となり、9 か所の平均乾燥密度は 1.655 Mg/m³ と 4 ケースで最も高い乾燥密度であり目標値を 上回る値となった。含水比は 17.9%~18.8%と 1%以内の範囲に収まっており、その平均値も 18.3%とほとんど目標含水比の値を示した。

クニゲル V1 について、ノズル径 30 mm で実施した V1-70_A と V1-70_B については、それ ぞれの平均乾燥密度が 1.446 Mg/m³ および 1.514 Mg/m³ と令和 2 年度の実績(1.41 Mg/m³)よ りも高い乾燥密度となり目標乾燥密度を上回る値であった。一方で、ノズル径を 50mm とした V1-70_C については 1.177 Mg/m³ と目標値を大幅に下回る結果であった。

クニゲル GX については、最適含水比に近い含水比で吹付けができており、令和 2 年度の実績(1.50 Mg/m³)よりも高い乾燥密度で施工できていることが確認できた。



V1-70_A





V1-70_C(表面整形後)

GX-70

図 3.2-14 吹付け後の出来形



図 3.2-15 含水比と乾燥密度の関係

(iii) ベントナイト混合率の測定

地上吹付け施工試験では表 3.2-9 に示す条件の下、メチレンブルー吸着量試験(JIS Z 2451) を実施し、ベントナイト混合率を算出した。メチレンブルー吸着量は表 3.2-7 の品質管理項目 に示す通り各試験ケースにおいて、材料作製時に 3 試料の測定を、吹付け後に 3 試料の測定を 実施した。ベントナイト混合率の算出には、ケイ砂(ベントナイト混合率 0%)とベントナイト のみ(クニゲル V1 混合率 100%)のメチレンブルー吸着量を測定して作成した検量線を用いた。 作成した検量線は付録 2 に示す。

ベントナイト混合率の測定結果を表 3.2-10 に示す。クニゲル V1 の 3 ケースについては、材 料作製時のベントナイト混合率はいずれのケースにおいても約 60%となり、目標混合率の 70% を下回る結果となった。この原因としては、混合材料の含水比調整のために加水混合を行った 際にベントナイトが凝集して団粒化しており、その部分を取り除いたために作製時のベントナ イト混合率が低くなったものと考えられる。また、吹付け後については 80%に近いベントナイ ト混合率となっており、材料作製時のベントナイト混合率より高い値を示している。この理由 としては、吹付け時に混合材料中で比較的粒径の大きいケイ砂部分がリバウンドしやすいこと から、吹付けた供試体中のベントナイトの割合が相対的に増加し、ベントナイト混合率が増加 したと考えられる。

クニゲル GX については、クニゲル V1 でのベントナイト混合率の算出に用いた検量線を用いて評価しているため混合率は参考値ではあるが、吹付けの前後でベントナイト混合率はほとんど変化していないことがわかる。

条件
ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法(JIS Z 2451)
スポット法
煮沸法
ADVANTEC No.131
本測定は混合材料に対して実施したため、乾燥試料に対して吸着量の 測定を行った
 ベントナイト以外にケイ砂が含まれた材料であり、混合材料の乾燥試料を振動カップミルで粉砕し、粒径が0.106mm以下となるようにした

表 3.2-9 メチレンブルー吸着量の測定条件

ц ц ц ц ц ц ц ц ц ц к	ケース名		メチレンブルー吸着量	ベントナイト混合率
サンノリンク			(mmol)	(%)
	1.1.1.1		52	59.8
	V1-70_A	Iハツフ日	50	57.5
		2 バッチ目	50	57.5
		1 バッチ日	52	59.8
	V1-70_B	1///	54	62.1
材料作制味		2 バッチ目	52	59.8
初杆臣敌时		1 バッチ日	52	59.8
	V1-70_C	1///	54	62.1
		2 バッチ目	52	59.8
	GX-70	1 バッチ日	54	65.2 \times
		1///	60	72.7※
		2 バッチ目	52	62.7※
	V1-70_A		68	78.2
			70	80.5
			70	80.5
			68	78.2
	V1-'	70_B	68	78.2
吹付け後			68	78.2
気持り後			66	75.9
	V1-'	70_C	66	75.9
			68	78.2
			54	65.2 \times
	GX-7	0**	54	65.2 \times
			60	72.7※

表 3.2-10 ベントナイト混合率の測定結果

※クニゲル V1 についての検量線を用いてベントナイト混合率を算出

※※GX-70の吹付け後についてはリバウンド材料のメチレンブルー吸着量を測定

(iv) 地上吹付け試験の施工品質管理

地上吹付け試験で実施した 4 ケースの試験における吹付け時の材料重量を表 3.2-11 に示す。 各材料重量の定義は以下の通りである。

- 作製材料重量:混合材料を作成するためにミキサーに投入したベントナイト、ケイ砂および水の総重量
- ▶ 吹付け重量:吹付け作業の直前の各材料バッチのフレコンバッグ重量
- ▶ 出来形重量: 吹付けにより木製型枠内に付着した重量であり、吹付け重量とリバウンド 重量の差として算出
- ▶ リバウンド重量:リバウンドにより木製型枠周りに飛散した材料の重量
- ▶ ダマ除去・ロス量 : ミキサーへの付着、ベルトコンベアからの落下などのロス量

ここでは、リバウンド率は、吹付け重量に対するリバウンド重量として式 3.2-2 のように定義 している。

地上吹付け施工試験における吹付けの施工品質と施工能力を表 3.2-12 に示す。クニゲル V1 のリバウンド率は 42%~47%となり、クニゲル GX では 51%となった。令和 2 年度に実施した 木製型枠を対象とした吹付け試験 (原子力機構・原環センター, 2021) ではクニゲル V1 で 40%、 クニゲル GX で 55%であり、本年度の試験においても同程度のリバウンド率であった。

吹付け速度は、出来形体積と吹付け作業に要した施工時間(以下、吹付け時間)により1時間当たりの吹付け体積として算出した。この吹付け時間には、材料作製の時間や吹付け機械等の清掃の時間は含まれていない。地上吹付け施工試験では、出来形体積は3Dスキャナを用いて 算出した体積を使用し、吹付け時間は手動計測による吹付け作業の時間を使用した。吹付け体積の算出に用いた3D点群データについては付録2に示す。

クニゲル V1 の吹付け速度は $0.58 \sim 0.68 \text{ m}^3/\text{hr}$ となり、クニゲル GX では $0.91 \text{ m}^3/\text{hr}$ であった。令和 2 年度に実施した木製型枠を対象とした吹付け試験ではクニゲル V1 が $0.8 \text{ m}^3/\text{hr}$ 、クニゲル GX が $0.6 \text{ m}^3/\text{hr}$ であった。本年度の試験の各ケースにおいて吹付け速度に顕著な違いは確認できなかった。

	作製材料重量 (kg)	吹付け重 量 (kg)	出来形重 量 (kg)	リバウンド重量 (kg)	ダマ除去・ロス 量 (kg)
V1-70_A	826	721	385	336	105
V1-70_B	816	726	424	303	89
V1-70_C	816	582	329	253	243 🔆
GX-70	788	676	329	347	112

表 3.2-11 吹付け時の材料重量(地上吹付け試験)

※V1-70_Cのロス量には残材料を含む

	平均乾燥密度	リバウンド率	吹付け体積	吹付け時間	吹付け能力	
	(Mg/m^3)	(%)	(m^{3})	(min)	(m^{3}/hr)	
V1-70_A	1.446	47	0.2407	21.2	0.68	
V1-70_B	1.514	42	0.2519	18.4	0.58	
V1-70_C	1.177	43	0.3286	23.8	0.64	
GX-70	1.655	51	0.1766	21.6	0.91	

表 3.2-12 吹付けの施工品質と施工能力(地上吹付け試験)

(d) 地上吹付け施工試験のまとめ

地上吹付け施工試験ではクニゲル V1 とクニゲル GX と対象として、それぞれケイ砂と混合 した材料を吹付け材料とした吹付け試験を実施し、原位置吹付け施工試験における吹付け材料 の選定や目標乾燥密度を達成できる材料作製手順および吹付け手順を確認した。

クニゲル V1 では、吹付けノズルの径を 30 mm とした V1-70_B のケースで乾燥密度の平均 値が最も高い 1.514 Mg/m³となり、目標乾燥密度を上回ることを確認した。一方で、ノズル径 を 50mm とした V1-70_C では乾燥密度が 1.177 Mg/m³となり、ノズル径が細い場合に高い乾 燥密度で施工できることを確認した。クニゲル GX では、乾燥密度の平均値が 1.655 Mg/m³と なり、令和 2 年度の試験と同様にクニゲル V1 よりも高い値を示した。リバウンド率で比較す ると、クニゲル V1 で 42%~47%、クニゲル GX で 51%と材料による差は見られないものの高 い値を示している。

以上の結果より、原位置吹付け施工試験における吹付け材料としては、クニゲル V1 でもノズ ル径 30mm の条件で目標乾燥密度である 1.43 Mg/m³を上回ったこと、また、令和 2 年度に実 施した切欠き型枠吹付け試験でクニゲル GX のリバウンド率が 37%と高い値を示したことから、 クニゲル V1 を用いることとした。

(3) 原位置吹付け施工試験

原位置吹付け施工試験では、幌延深地層研究センターの350m 試験坑道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。

(a) 側壁部の切欠き掘削

(i) 実施概要

幌延深地層研究センターの試験坑道 2 (図 3.2-16) において坑道の側壁部分の吹付けコンク リートと岩盤を掘削して切欠きを設ける。原位置吹付け施工試験実施前の試験坑道 2 の状況を 図 3.2-17 に示す。掘削施工を実施する試験坑道 2 は、図 3.2-18 に示すように、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 1.5 m の間隔で設置され、岩盤の表面 は吹付けコンクリートで覆われている。掘削施工位置は図 3.2-18 中に赤色で示す試験坑道 2 の 南側の側壁の鋼製支保工 10 基目、11 基目の間であり、吹付け施工試験で必要となる切欠きの 必要範囲として高さが約 2.0 m、幅が約 1.0 m、奥行きが約 1.0 m 程度の範囲にある吹付けコン クリートと岩盤の掘削を行う。その際の掘削数量は、最大で吹付けコンクリートが 0.6 m³程度、 岩盤が 2.2 m³程度と想定していた。表 3.2-13 に掘削に用いた資機材を示す。図 3.2-19 に示す ように掘削作業は防爆型電動バックホウの先端に取り付けたブレーカを用いて実施した。掘削 したコンクリートや岩盤はフレコンバックへ積み込み搬出した。



図 3.2-16 原位置吹付け施工試験実施場所



図 3.2-17 試験実施前の試験坑道2の様子



図 3.2-18 試験坑道2の切欠き施工図(必要範囲)

項目	仕様	備考	
電動油圧ショベル	0.11m ³ ZX35U	1台	防爆型
ブレーカ	1t 級 FX-45	1台	
フレコンバッグ	$0.3 \mathrm{m}^3$	14 袋	0.3m³/1 袋

表 3.2-13 掘削に使用した資機材一覧



図 3.2-19 掘削に使用したバックホウとブレーカ

(ii) 掘削作業

切欠きの掘削作業の状況を図 3.2-20 および図 3.2-21 に示す。掘削作業の具体的な手順については以下に箇条書きで示す。

- 準備作業の実施
- ▶ 試験坑道2底盤部に自然湧水がたまっているため電動ポンプにて排水する
- ▶ 電動バックホウを試験坑道2の10基目付近に移動させる
- ▶ その他送風機・風管設置、照明設置等の必要な準備作業を実施する
- 吹付けコンクリートのはつり作業
- ▶ 吹付け面にスプレーではつり範囲をマーキングする
- ▶ 電動バックホウにブレーカを装着し、吹付けコンクリート(t=150)のはつり作業を実施 する
- 金網についてブレーカで破壊できない場合にはクリッパー(大型切断カッター)で切断 する
- ・ 電動バックホウにバケットを装着し、はつったコンクリートをフレコンバッグに積みいれる
- 岩盤掘削作業
- ▶ 電動バックホウにブレーカを装着し、岩盤の破砕、掘削を行う
- ・ 掘削ズリがある程度堆積した段階でバケットを装着してフレコンバッグにズリを入れる
- ▶ 所定の深度まで上記作業を繰り返す





掘削位置の確認



吹付けコンクリートの斫り作業(1/2)

バックホウの配置



吹付けコンクリートの斫り作業(2/2)



吹付けコンクリートの斫り終了 図 3.2-20 切欠きの掘削作業の状況(1/2)







岩盤の掘削作業(2/2)



フレコンバックへの掘削ズリの積み込み



掘削ズリ搬出状況



切欠きの掘削完了 図 3.2-21 切欠きの掘削作業の状況(2/2)

(b) 切欠きへの吹付け施工試験

試験坑道 2 の側壁面を掘削して設けた切欠きに対してベントナイト系材料の吹付けを実施した。試験では吹付けの手順の確認と吹付けた材料の品質確認を目的とした。評価の観点は以下の通りである。

- ▶ 吹付け施工による目標乾燥密度(1.43 Mg/m³)の確保
- ▶ 吹付け供試体のベントナイト混合率や含水比などの吹付け品質の評価
- ▶ 吹付け速度やリバウンド率など吹付け性能の評価

(i) 使用材料

原位置吹付け施工試験における材料仕様を表 3.2-14 に示す。地上吹付け施工試験の結果より、 粉体ベントナイトであるクニゲル V1 を用いてベントナイト混合率を 70%としたベントナイト とケイ砂の混合材料を吹付け材料とした。ケイ砂には 3 号および 5 号を使用し、その割合は 3 号:5号=50:50とした。材料の目標含水比は地上吹付け施工試験と同様に、締固め試験の結 果より締固めエネルギーが 2Ec の場合の最適含水比である 18.62%とした。

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

表 3.2-14 原位置吹付け施工試験における材料仕様

(ii) 使用機械

原位置吹付け施工試験時の機械配置を図 3.2-22 に示す。材料作製プラントは幌延深地層研究 センター西立坑建屋に整備した。材料作製プラントの配置状況を図 3.2-23 に示す。また、吹付 けプラントは、試験坑道 2 付近の東周回坑道に整備した。吹付け時の吹付けプラントの配置状 況を図 3.2-24 に示す。使用機械の一覧を表 3.2-15 に示す。主な使用機械は以下の通りである。

1) 強制二軸ミキサー

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

2) ふるい機

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

3) 吹付け機

地上吹付け施工試験と同様に、吹付け機にはニードガン 2000 (AGC プライプリコ)を使用した。

4) アーム付き汎用重機

地上吹付け施工試験と同様に、吹付けノズルはアーム付き汎用重機(Husqvarna DXR140) に取り付け、オペレーターの操作により吹付け位置の制御を行った。



図 3.2-22 原位置吹付け試験時の機械配置



図 3.2-23 材料作製プラントの配置状況



吹付け機械の配置状況 吹付けプラントの配置状況 図 3.2-24 吹付け時の吹付けプラントの配置状況

使用用途	使用機械	仕様	台数	
吹付けプラ ント (350m 東周 回坑道)	吹付け機	ニードガン 2000 : AGC プライブリコ	1	
	コンプレッサ	使用無し、坑内圧縮空気ラインを使用	-	
	ホッパー			
	吹付けロボット	電動汎用重機	1	
	外内のロホット	ハスクバーナ・ゼノア社製	1	
	ノズル	ノズル径:30 mm	1	
	ホース	内径:75mm、ホース長:20m	1	
	ふるい機	目開き 2.5 cm	1	
材料作製プ	ミキサー	二軸強制ミキサー(W-500)	1	
ラント	クレーン	西立坑建屋の建屋クレーン	1	
(西立坑建	水中ポンプ			
屋)	流量計			
	ベルトコンベア	7 m	2	

表	3.2-15	原位置吹付け施工試験の使用機械ー	- 暫
-1-	0.2.10		- 57

(iii) 試験手順

原位置吹付け施工試験における1作業日あたりの吹付け作業のフローチャートを図 3.2-25 に 示す。各作業日では、午前中に混合材料の作製と350 m 坑道への搬入を行い、混合材料は試験 坑道 2 周辺へ保管した。午後には作製した混合材料の切欠きへの吹付け作業を行い、全ての材 料の吹付けが終了した後に3D スキャナを用いた出来形計測を実施した。その後、サンプリング により試料を採取する面まで吹付けが完了していた場合には、サンプリング作業を実施した。 一連の切欠きへの吹付け作業は6日間にわたり実施した。原位置吹付け施工試験の作業実績を 表 3.2-16 に示す。各作業の概要については、以下に示す。





	1日目			2日目			3日目			4 日 目			5 日 目			6 日 目								
	A	М	Р	М	A	Μ	Р	М	A	М	P	М	А	М	P	Μ	A	М	P	М	A	М	P	М
材料作製																								
吹付け																								
サンプリング																								
3次元計測																								
吹付け数量		3バ	ッチ			6バ	ッチ			9バ	ッチ			7バ	ッチ			4バ	ッチ			4バ	ッチ	

表 3.2-16 原位置吹付け施工試験の作業実績

1) 混合材料の作製

ベントナイトとケイ砂の自然含水比を赤外線水分計で測定し、混合材料の目標含水比である 18.62%に必要な加水量を算出した。ベントナイトの自然含水比は約7%~10%、ケイ砂の自然含 水比は1%であり、混合材料の含水比を調整するのに必要な加水量は40L~46L程度となった。 令和2年度に実施した切欠き型枠吹付け試験において、材料作製時に算出した加水量をそのま ま投入すると混合材料の一部の水分量が多くなり団粒化した状態の材料(ダマ)になり、ダマ以 外の材料の水分量が少ない状態となることが確認された。そのため、本試験においては、算出し た加水量に20Lを加えた約60L程度を実際の加水量とした。混合材料の作製実績は付録2に 示す。

材料作製および地下への搬入時の状況を図 3.2-26 に示す。1 バッチ当たりの混合材料の乾燥 重量を約 330 kg と設定し、所定の重量のベントナイトとケイ砂を建屋クレーンによりミキサー へと投入した。混合材料の混錬作業ではまず、30秒間空練りを行った。その後、混錬しながら約 20 L/min の水を約 60 L の水を 3 分強かけてミキサーに投入した。水の加水終了後に 5 秒間 混練を行い、ミキサーから吹付け材料を排出した。

ミキサーで含水比を調整した材料は、ベルトコンベアでふるいまで運搬し目開き 25 mm のふ るいにかけることにより、ダマを取り除いた。取り除いたダマはフレコンバックに集めて収納 した。ふるいにかけた後の材料はベルトコンベアで運搬しフレコンバック収納した。フレコン バックに収納した材料は、東立坑から 350 m 坑道へと搬入し、試験坑道 2 近くの東周回坑道へ と運搬した。



ミキサーへのクニゲル V1 の投入



含水比調整後の材料のふるい



 350 m 坑道への材料の搬入
 東周回坑道での保管

 図 3.2-26
 材料作製および地下への搬入時の状況



ミキサー内への水の投入



作製したベントナイト混合土



2) 吹付け施工

吹付け時の作業状況を図 3.2-27 に示す。吹付けの際にはホッパーに投入した材料をベルトコ ンベアで運搬し、ニードガンへ投入した。ニードガンへの材料投入が過多になると吹付け機が 閉塞する可能性があったため切欠き型枠吹付け試験時の 58.0 kg/min に対して、本試験では約 6 割に材料の投入量を調整し 34.0 kg/min とした。地下施設の圧縮空気ラインを用いてニード ガンに投入された吹付け材料をホース内に圧送し、アーム付き汎用重機の先端に取り付けた吹 付けノズルより噴射しスリットへの吹付けを行った。吹付けの際にはニードガンに 1 名、吹付 け機械に 1 名のオペレーターを配置した。ニードガンのオペレーターは、ニードガンへの材料 投入量の調整およびエア量の調整を行った。コンプレッサのエア量は 12~13 m³/min に設定し、 ニードガンの回転数は 5 rpm とした。また、吹付け機械のオペレーターは吹付けノズルの位置 や角度の調整を行った。吹付けノズルの先端と吹付け面との距離は 1.2 m 以内としてオペレー ターの目視により制御した。吹付けノズルの角度は吹付け面に対して直角となるように操作し た。



ホッパーへの材料投入



ニードガンの操作状況





吹付け機械の操作状況切欠図 3.2-27 吹付け時の作業状況

切欠き部への吹付け状況

3) 出来形の計測

出来形計測の状況を図 3.2-28 に示す。1 日の吹付け作業の終了時に、3D スキャナ(Leica Geosystems 社製 BLK360)を用いて吹付けたベントナイトの体積計測を実施した。1 日の吹付 け体積は前日に計測して得られた 3D 点群データとの差分から算出した。各作業日に得られた 3D 点群データを付録 2 に示す。





3D スキャナによる吹付け体積の測定 図 3.2-28 出来形計測の状況

3D 点群データ

4) サンプリング

吹付け供試体から容積 50 ml のステンレス試料円筒を使用してサンプリングを行った。サン プリングの実施状況を図 3.2-29 に示す。サンプリングは図 3.2-29 に示すように、スリット正 面から見て 1 断面につき 9 点の場所を選び、奥行方向に 2 断面で実施した。採取したサンプル を用いて乾燥密度および含水比を測定した。含水比は土の含水比試験方法 (JIS A 1203: 2020) に従って測定を実施した。また、乾燥密度の測定とは別にベントナイト混合率の測定用にサン プルを採取した。ベントナイト混合率はメチレンブルー吸着量試験 (JIS Z 2451: 2020) に則 り測定した。



サンプリングの状況 サンプリング位置 図 3.2-29 原位置吹付け施工試験のサンプリング

(iv) 品質管理項目

原位置吹付け施工試験における品質管理項目を表 3.2-17 に示す。材料作製時には、ベントナ イトとケイ砂の初期含水比を赤外線水分計により測定し、混合材料の含水比を作製時には赤外 線水分計によりサンプリングした試料については炉乾燥法により測定した。また、メチレンブ ルー吸着量を測定した。吹付け施工後には、ステンレス試料円筒(50 ml)を用いて 18 か所の サンプリングを行った。サンプリングした試料を用いて乾燥密度、含水比およびメチレンブル ー吸着量を測定し、吹付け後の品質を確認した。

掘削完了後の切欠き部の形状と1作業日ごとの出来形体積を3Dスキャナにより測定した。

	項目	確認方法	数量							
	含水比 (ベントナイト)	赤外線水分計	1 点/バッチ							
材料製作時	含水比 (ケイ砂)	赤外線水分計	1 点							
	含水比	赤外線水分計	1点/バッチ							
	(混合材料)	JISA1203	3点/バッチ							
	メチレンブルー吸着量	JISZ2451	3 点							
	乾燥密度	サンプリング	18 点							
ゆけけたて必	含水比	JISA1203	18 点							
欧竹け旭工夜	メチレンブルー吸着量	JISZ2451	9 点							
	出来形体積	3次元計測	1式							

表 3.2-17 原位置吹付け施工試験の品質管理項目

(v) 実施結果

1) 混合材料の含水比

原位置吹付け施工試験の材料製作時には、混合前のベントナイトとケイ砂の含水比を赤外線 水分計により、混合材料の含水比を赤外線水分計および炉乾燥法(JIS A 1203)により測定し た。含水比の測定結果を表 3.2-18 に示す。混合材料の目標含水比は 2Ec のエネルギーで締固め 試験を実施した時の最適含水比である 18.62%としていたが、材料作製の現場で赤外線水分計を 用いて測定した含水比は 14%~21%の範囲にありその平均値は 17.0%であった。作製した混合 材料をサンプリングして後に炉乾燥法により測定した含水比は 16%~25%の範囲にありその平 均値は 19.3%であった。

図 3.2-30 に混合材料の赤外線水分計により測定した含水比と炉乾燥法により測定した含水 比を示す。図 3.2-30 より、赤外線水分計により測定した含水比が低く測定されている材料が多 いことがわかる。これは、ベントナイトが高い保水性を持つため赤外線水分計による測定では 水分を十分に蒸発させることができず含水比を低く見積もっている可能性が考えられる。

炉乾燥法による含水比測定では、各材料バッチにおいて1か所からサンプリングした試料を 3分割して測定していることから、各材料バッチの3点の含水比の測定結果は同程度の値を示 しているものの、バッチ間では含水比がある程度ばらつく結果となった。

材料	含水比											
バッチ番号	ベントナイト	ケイ砂	混合材料		混合材料							
*	赤外線	赤外線	赤外線		JIS A 1203							
1	7.0		18.3	16.5	16.8	16.8						
2	6.7		16.6	17.4	17.6	17.6						
3	6.8		20.7	17.4	17.5	17.6						
4	8.8		16.3	16.5	16.9	16.6						
5	8.7		16.3	17.0	17.2	17.0						
6	7.9		14.1	16.0	16.1	16.4						
7	7.1		17.3	22.1	22.4	21.8						
8	7.5		17.2	16.3	17.2	16.6						
9	8.0		14.6	25.3	25.0	24.9						
10	8.0		14.1	24.6	25.6	25.2						
11	9.3		16.7	16.9	16.6	16.8						
12	7.1		17.7	21.4	20.3	20.9						
13	7.1		15.5	16.1	16.3	16.3						
14	7.1		16.5	23.9	23.8	23.1						
15	9.4		15.0	17.2	17.4	17.4						
16	7.0		17.0	16.4	16.3	16.5						
17	6.9	1.0	15.8	21.1	21.5	21.2						
18	7.8		21.4	18.0	17.8	17.8						
19	9.8		15.7	18.4	18.3	18.0						
20	10.2		17.5	19.4	19.4	19.0						
21	7.0		18.6	21.0	20.9	21.4						
22	6.7		18.6	19.7	20.0	19.4						
23	6.8		16.1	20.6	20.5	20.4						
24	7.1		17.6	23.1	23.1	23.3						
25	7.3		18.6	15.9	15.9	15.9						
27	6.8		15.3 17.7		17.7	18.0						
28	6.8		18.4	22.7	23.4	23.0						
29	6.4		19.3	18.2	17.8	17.5						
30	6.8		15.7	24.9	24.4	24.0						
32	6.4		17.9	19.1	19.3	19.8						
33	6.3		18.0	17.5	17.5	17.1						
36	6.9		17.2	18.1	17.8	18.9						
37	6.2		16.5	20.1	20.0	20.1						
平均	7.4		17.0		19.3							

表 3.2-18 作製材料の含水比測定結果

※バッチ番号 26、31、34、35 は作製したが吹付けには使用していない



図 3.2-30 赤外線水分計と炉乾燥法による含水比の比較

2) サンプリングによる乾燥密度および含水比の測定

原位置吹付け施工試験における乾燥密度の測定箇所を図 3.2-31 および図 3.2-32 に示す。掘 削した切欠きの深さ約 1.3 m の半分程度まで吹付けが終了した作業 3 日目の終了時に、1 断面 目の 9 か所のサンプリングを行い、吹付けコンクリート面付近まで吹付けが終了した作業 6 日 目に 2 断面目の 9 か所のサンプリングを実施した。2 つの断面からサンプリングした 18 個の試 料を用いて測定した乾燥密度と含水比を表 3.2-19 に示す。また、令和 2 年度に実施した切欠き 型枠吹付け試験の V1-70 (原子力機構・原環センター, 2021) および原位置吹付け施工試験にお ける含水比と乾燥密度の関係を図 3.2-33 に示す。

切欠き型枠吹付け試験では、吹付け時に吹付け機とホースが閉塞する事象が度々発生したため、その対策として吹付け材料の含水比を最適含水比よりも高く設定しており、図 3.2-33 に青色のプロットで示す乾燥密度の平均値は 1.41 Mg/m³で目標乾燥密度である 1.43 Mg/m³を下回る結果となった。

原位置吹付け施工試験でサンプリングした18か所の乾燥密度の平均値は1.55 Mg/m³であり、 目標乾燥密度である 1.43 Mg/m³を下回った場所は 1 か所のみであった。含水比の平均値は 20.5%であり、材料作製時の含水比の平均値の 19.3%よりも高い値となった。


図 3.2-31 乾燥密度測定箇所(1断面目)



図 3.2-32 乾燥密度測定箇所(2断面目)

サンプル来早	乾燥密度	含水比
リマノル宙々	(Mg/m^3)	(%)
1	1.537	20.5
2	1.534	22.0
3	1.657	17.4
4	1.537	20.6
5	1.547	23.5
6	1.399	20.0
7	1.552	20.4
8	1.487	23.4
9	1.461	19.2
10	1.622	18.6
11	1.507	18.6
12	1.624	21.4
13	1.536	19.9
14	1.668	21.0
15	1.620	19.8
16	1.548	20.0
17	1.535	21.6
18	1.549	21.4
平均	1.551	20.5

表 3.2-19 サンプリング試料の乾燥密度および含水比の測定結果



図 3.2-33 含水比と乾燥密度の関係

3) ベントナイト混合率の測定

原位置吹付け施工試験においてもメチレンブルー吸着量試験を地上吹付け施工試験と同様の 条件で実施し、その条件を表 3.2-20 に再掲した。ベントナイト混合率の測定は、9 か所からサ ンプリングした試料を用いて実施した。サンプリング位置を図 3.2-34 示す。MB①、MB⑧およ び MB⑨はそれぞれ乾燥密度測定位置の④、⑩および⑮と同じ位置からサンプリングした。ま た、MB②~MB⑦のサンプリングは作業4日目の吹付け作業終了時にサンプリングを実施した。

表 3.2・21 にベントナイト混合率の測定結果を示す。ベントナイト混合率は、ケイ砂(ベント ナイト混合率 0%) とベントナイトのみ(クニゲル V1 混合率 100%)のメチレンブルー吸着量 を測定して作成した検量線を用いてメチレンブルー吸着量から換算した値である。材料作製時 のベントナイト混合率は地上吹付け施工試験と同様に、目標ベントナイト混合率の 70%よりも 低い値であった。一方、吹付け後のベントナイト混合率は、72.7%もしくは 75.2%となっており 吹付け前の材料よりも混合率が高くなっている。令和 2 年度に実施した切欠き型枠吹付け試験 においても吹付け後のベントナイト混合率が高くなる傾向を示しており、その理由としては、 吹付けの際に混合材料中で比較的粒径の大きなケイ砂がリバウンドで多く跳ね返ることで吹付 け供試体中のクニゲル V1 の割合が高くなったと考えられる。

吹付け後のベントナイト混合率は、72.7%もしくは 75.2%であったがこれはメチレンブルー 吸着量の測定値としては 60 mmol/100g もしくは 62 mmol/100g であり、メチレンブルー溶液 の滴下量としてはわずか 1 滴分の差であることから、いずれもサンプリング試料も均一な混合 率の値であると判断でき、吹付けの結果として均質なベントナイト混合率で施工できたと考え られる。

項目	条件
規準	ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法(JIS Z 2451)
測定方法	スポット法
分散法	煮沸法
ろ紙の種類	ADVANTEC No.131
その他特記事項	 本測定は混合材料に対して実施したため、乾燥試料に対して吸着量の 測定を行った ベントナイト以外にケイ砂が含まれた材料であり、混合材料の乾燥試 料を振動カップミルで粉砕し、粒径が0.106 mm以下となるようにし た。

表 3.2-20 メチレンブルー吸着量の測定条件(再掲)





1 断面目におけるサンプリング位置

メチレンブルー吸着量測定用サンプリング位 置



2 断面目におけるサンプリング位置 図 3.2-34 メチレンブルー吸着量測定用試料のサンプリング位置

サンプリング	計制反	メチレンブルー吸着量	ベントナイト混合率		
927929		(mmol)	(%)		
	原位置吹付け施工①	54	65.2		
材料作製時	原位置吹付け施工②	50	60.2		
	原位置吹付け施工③	52	62.7		
	MB①	60	72.7		
	MB2	62	75.2		
	MB3	60	72.7		
	MB④	60	72.7		
吹付け後	MB ⁽⁵⁾	60	72.7		
	MB6	62	75.2		
	MB⑦	62	75.2		
	MB®	62	75.2		
	MB9	60	72.7		

表 3.2-21 ベントナイト混合率の測定結果(原位置吹付け施工試験)

4) 地上吹付け試験の施工品質管理

表 3.2-22 に原位置吹付け施工試験における材料のバッチ毎の施工重量を示す。それぞれの施工重量の定義は以下の通りである。

- ▶ 作製材料重量 :混合材料を作成するためにミキサーに投入したベントナイト、ケイ砂 および水の総重量
- ▶ 吹付け重量:吹付け作業の直前の各材料バッチのフレコンバッグ重量
- 出来形重量:吹付けにより切欠き内に付着した重量であり、吹付け重量とリバウンド重量の差として算出
- ▶ リバウンド重量:リバウンドにより切欠き周りに飛散した材料の重量
- ▶ ダマ除去・ロス量 : ミキサーへの付着、ベルトコンベアからの落下などのロス量

吹付け施工の性能評価としてリバウンド率を算出した。リバウンド率は、地上吹付け施工試験と同様に式 3.2-3 のように吹付け重量に対するリバウンド重量として定義している

$$Uバウンド率 = \frac{Uバウンド重量}{吹付け重量} = \frac{Uバウンド重量}{H R R \pi \pm d + U バウンド重量} \times 100$$
式 3.2-3

作業日毎のリバウンド率を表 3.2-23 に示す。原位置吹付け施工試験における吹付け対象であ る切欠き部は地上吹付け施工試験の木製型枠に比べて体積が大きいことから吹付けノズルの位 置や角度、吹付け対象までの距離の調整が容易であり、吹付け面に対して垂直にノズルを向け るよう操作が可能である。そのため、リバウンド率は地上施工試験の47%から大幅に改善され、 作業日毎ごとのリバウンド率が 8~30%、原位置吹付け施工試験の全体のリバウンド率は 25% となり、令和2年度に実施した切欠き型枠吹付け試験のリバウンド率 22%と同程度となった。

また、施工効率の評価のために吹付け速度を算出した。吹付け速度は単位時間当たりの吹付 け体積と定義して、本試験では、作業日毎の3Dスキャナにより計測した吹付け体積と手動計測 した吹付け時間から算出した。吹付け時間には、材料の吹付けに要した時間のみを考慮してお り、材料作製や閉塞時のホースの清掃などの時間は考慮していない。

さらに、吹付け体積と供試体重量を用いて作業日毎の乾燥密度を算出した。作業日毎に 3D ス

キャナにより測定した吹付け体積と吹付け速度および乾燥密度の結果を表 3.2-24 に示す。

吹付け速度は作業日毎に多少のばらつきがあり 0.58~0.82 m³/hr となり、原位置吹付け施工 試験全体での平均は 0.72 m³/hr となった。令和 2 年度に実施した切欠き型枠吹付け試験では吹 付け速度が 1.51 m³/hr であり、本試験では半分以下の吹付け速度となっているが、この理由と しては吹付け機やホースの閉塞を避けるために材料投入量を 58.0 kg/min から 34.0 kg/min へ と減らしたためと考えられる。

乾燥密度については、1日目が1.41 Mg/m³と目標乾燥密度を下回る値となったが、2日目以降は1.51 Mg/m³~1.70 Mg/m³と目標乾燥密度を大きく上回っており、全体としても1.57 Mg/m³となりサンプリングから算出した値である1.55 Mg/m³と整合的な結果となった。

佐光	材料	佐制せお手	吹付け重	出来形重	リバウンド	ダマ除去・
1F未 口	バッチ番号	1F我树科里里 (lrg)	量	量	重量	ロス量
Н	*	(Kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
	1	415	411			
1日目	2	415	371	力重 出来形重 リバウンド 量 重量 g) (kg) (kg) 1 1,057 96 1 1,057 96 1 1,057 96 3 9 1 9 1,802 445 1 1,802 445 1 2 445 3 2 2 8 2 981 6 8 9 9 2,560 981 6 8 1 8 2 1,934 754 8 1,934 754 1 1,108 421 8 1,108 421 1 1,047 518	93	
	3	415	371			
	4	415	333			
	5	415	439			
9日日	6	415	389	1 809	445	946
2 H H	7	415	353	1,002	440	240
	8	416	351			
	9	415	382			
	10	416	408			
	11	415	393			
	12	415	385			
	13	416	388			
	14	417	389	2,560	981	207
	15	417	391			
	16	416	386			
	17	415	408			
	18	417	393	Image: second		
	19	417	358			
	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	392				
fræ μ fræ $\chi_{y} = f = f = f (kg)$ (kg) (kg)						
	754	226				
	415	382				
	390					
	25	416	391	10 単 出来形型 リハリンド タマ 量 量 量 重量 「 kg) (kg) (kg) (kg) (111 $\frac{111}{171}$ 1,057 96 $\frac{111}{171}$ 1,047 518 $\frac{111}{171}$ 1,047 518 $\frac{1111}{171}$ 1,047 518 $\frac{1111}{171}$ 1,047 518 $\frac{1111}{171}$ 1,057 518 $\frac{1111}{171}$ 1,057 51		
	27	415	378			
5日日	28	415	382	1 108	491	199
Онц	29	415	381	1,100	421	100
	30	415 411 415 371 415 371 415 333 415 333 415 389 415 353 416 351 415 382 416 408 415 383 416 385 416 388 417 389 417 391 416 386 417 393 417 393 417 393 417 393 417 393 417 393 417 393 417 393 417 393 415 388 415 382 415 381 415 381 415 381 415 384 415 384 415 394 417 391 419 395				
	32	415	385			
	33	415	394	1.047	51 0	109
ОЦЦ	36	417	391	1,047	910	109
	37	419	395			

表 3.2-22 バッチ毎の施工重量

※バッチ番号 26、31、34、35 は作製したが吹付けには使用していない

	吹付け重量	リバウンド量	リバウンド率
	(kg)	(kg)	(%)
1日目	1,153	96	8
2 日目	2,247	445	20
3 日 目	3,541	981	28
4 日目	2,688	754	28
5 日 目	1,529	421	28
6 日 目	1,565	518	33
全体	12,723	3,215	25

表 3.2-23 作業日毎の施工重量

表 3.2-24 吹付け体積と吹付け速度および乾燥密度の結果

	吹付け体積	吹付け時間	吹付け速度	供試体重量	乾燥密度
	(m^{3})	(min)	(m^{3}/hr)	(kg)	(Mg/m^3)
1日目	0.622	未計測	-	1,057	1.41
2 \exists \exists	0.879	79	0.67	1,802	1.70
3日目	1.409	103	0.82	2,560	1.51
4 日目	1.044	80	0.78	1,934	1.54
5日目	0.591	54	0.66	1,108	1.56
6 日 目	0.569	59	0.58	1,047	1.53
全体	5.027	374.05	0.72	9,508	1.57

(c) 原位置吹付け施工試験のまとめ

原位置吹付け施工試験では、ベントナイト混合率を 70%としたクニゲル V1 とケイ砂の混合 材料を吹付け材料とした。

吹付け施工後の乾燥密度の平均値は 1.55 Mg/m³であり、目標乾燥密度である 1.43 Mg/m³を 上回る結果となった。リバウンド率については、施工試験の全体のリバウンド率が 25%となり、 令和2年度に実施した切欠き型枠吹付け試験のリバウンド率 22%と同程度となった。

吹付け機への材料投入量を令和2年度の実績値である58.0 kg/minから34.0 kg/min へ変更 したことにより吹付け機やホースの閉塞はみられなかったものの、吹付け速度は令和2年度の 実績値である1.51 m³/hrから0.72 m³/hrとなり施工効率が半分となったことが課題点として あげられる。

3.2.3 EDZ シーリング試験

(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350m試験坑道3にて実施したEDZシーリン グ試験においては、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2年度には、粘土止水壁の施工から1年以上経過した後でEDZの区間を対象と した透水試験を実施し、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2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することを目的とした。 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 3.2-35 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 0.5 m 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 3.2-36 に示すように EDZ を対 象とした区間(区間①)において透水試験を実施した。

区間①ではダブルパッカー方式の定圧注水試験を実施した。EDZ-1 孔においては、BTV 観察の結果より 1.40 mabh の深さまで掘削影響により生じたと思われる亀裂を確認しており、試験区間は EDZ の領域を含むようにパッカーを設置した。上部パッカーの下端の深度を 0.31 mabh、下部パッカー上端の深度を 1.70 mabh として試験区間の長さは 1.39 m であった。

透水試験では、350m 調査坑道付近の地下水の水質を模擬した模擬地下水を注水した。模擬地 下水の組成を表 3.2-25 に示す。定圧注水試験では、約 0.1 MPa の一定圧力で注水を行い、一定 期間注水した後、注水を停止して回復試験を実施した。



図 3.2-35 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 3.2-36 透水試験におけるパッカーの設置位置

云 0.2 Z0 庆废地千小恒风												
元素	Na+	K+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Li+	Cl-	$\mathrm{SO}_{4^{2-}}$	TIC				
mg/L	3400	65	79	54	8.7	4000	0.15	580				

表 3.2-25 模擬地下水組成

(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。非定常解析の 結果として、本年度の EDZ 区間を対象とした定圧注水試験における derivative plot を図 3.2-37 に示す。

平成 31 年度から本年度にかけて実施した透水試験の結果を表 3.2-26 に示す。EDZ(区間①) を対象とした定圧注水試験の結果より算出した透水係数は、定常解析で 4.78×10⁻⁹ m/s、非定常 解析で 3.50×10⁻⁹ m/s であった。昨年度までに得られた粘土止水壁構築後の EDZ 区間の透水係 数は、定常解析と非定常解析のいずれも 10⁻⁹ m/s オーダーの値であった。Hvorslev の式より算 出した透水係数の経時変化を図 3.2-38 に示す。本年度の試験は粘土止水壁の構築から約 2 年が 経過した時点であるが、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。



図 3.2-37 Jacob and Lohman の方法における Derivative plot (区間①)

試驗対象 試驗時期 試驗方法		試験方法	試験区間長 (mabh)		初期圧	最大圧	差圧	定常解析	非定常解析		
			上端	下端	(MPa)	(MPa)	(MPa)	Hvorslev	Jacob	Cooper	Agarwal
EDZ	止水壁施工前	宁达县	1	39	0.0104	0.0655	0.0551	1 20×10-6	1 79×10-6	_	匈托田難
(区間①)	2019年11月1日	足佩里	0.31	1.7	0.0104	0.0655	0.0551	1.80×10 °	1.72×10%	-	丹牛竹 124 美田
EDZ	止水壁施工後	今 亡	1		0.0101	0.0004	0.0400	0.50×10-9	1 45 × 10-9		砌长用識
(区間①)	2020年1月27日	止 上	0.31	1.7	0.0131	0.0624	0.0492	2.70×10 °	1.47×10 ⁹	-	所¥7打 达 美 臣
EDZ	止水壁施工後	安正	1	.39	0.0004	0.1556	0.0000	0.00×10-0	1.61×10 ⁻⁹	-	$1.72 imes 10^{-9}$
(区間①)	2021年1月28日	<u> </u> 上 上	0.31	1.7	0.0864		0.0692	2.00×10 5			
EDZ	止水壁施工後	安正	1	39	0.1020	0.9010	0.0080	4.76×10-9	2 50×10-9	_	9.87×10-9
(区間①)	2021年12月13日	龙江	0.31	1.7	0.1050	0.2010	0.0980	4.76^10*	5.50^10*		2.87~10*
区間の	止水壁施工後	パルス	0).55	0 1025	0 1168	0.0143	3 40×10-9	-	解析困難	_
	2021年2月3日		2.25	2.8	0.1020	0.1100	0.0140	0.40/10		лтищж	-
区期间	止水壁施工後	10 1 7	0).55	0.1000	0.1549	0.0489	1.01×10-9		砌长用離	
2021年	2021年2月3日		2.25	2.8	0.1066	0.1548	0.0482	1.81×10 %	-	円牛171 1251 美田	-
区間の	止水壁施工後	~T	0).55	0.1000	0.1760	0.0670	0 4.44×10 ⁻⁹	9 F7×10-0		
区间区	2021年2月4日	止 上	2.25	2.8	0.1099	0.1769			2.57×10'9	-	1.89×10 ⁻⁹

表 3.2-26 原位置透水試験の結果





(3) 浸透流解析

粘土止水壁の止水性を評価することを目的に粘土止水壁の透水係数を推定するための浸透流 解析を実施した。浸透流解析は、試験坑道底盤のコンクリート、コンクリート下のズリ層、ボー リング孔、EDZ、健岩部および粘土止水壁を含む領域を3次元でモデル化しDtransu·3D・EL を用いて実施した。3次元解析モデルを図 3.2·39に示す。ボーリング孔の孔径は削孔径より76 mmとし、長さは定圧注水試験の試験区間に合わせて1.39mとした。解析モデルの各要素の透 水係数を表 3.2·27に示す。路盤コンクリートは、コンクリート標準示方書(土木学会,2002) に記載の水セメント比-透水係数の関係より、水セメント比を46.9%として透水係数を3.3× 10⁻¹¹ m/sと設定した。ズリおよび EDZ の透水係数は、平成31 年度の EDZ シーリング試験の 中で実施した解析(原子力機構・原環センター,2020)と同様の値をそれぞれ設定した。健岩 部の透水係数については、令和2 年度に実施した図 3.2·36 の区間②を対象とした定圧注水試験 の結果に基づき、2.57×10⁻⁹ m/s を設定した。

本浸透流解析では、表 3.2-28 示す令和 3 年度に実施した EDZ を対象とした定圧注水試験の 結果を再現できる粘土止水壁の透水係数を推定した。また、結果の比較のために令和 2 年度に 実施した EDZ を対象とした定圧注水試験についても、解析条件を見直したうえで再度浸透流解 析を実施し、結果を再現できる粘土止水壁の透水係数を推定した。粘土止水壁の透水係数の推 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、それぞれの定圧注水試 験における試験開始時と定常時の水圧差(水位低下量)を再現する粘土止水壁の透水係数を探 索した。水位低下量が浸透流解析の値と定圧注水試験の値が 10 mm の精度で一致した場合に、 浸透流解析により再現したとみなした。

浸透流解析結果を表 3.2-29 に示す。令和3年度に実施した定圧注水試験では、粘土止水壁の 透水係数を 3.41×10⁻¹⁰ m/s とした場合、領域全体の透水係数が 4.76×10⁻⁹ m/s となるととも に、水位低下量は 10.01 m となり透水試験の結果に対して 0.01 m の精度で水位低下量が一致 した。これより粘土止水壁の透水係数は、3.41×10⁻¹⁰ m/s と推定した。 令和 2 年度に EDZ を対象とした定圧注水試験の再解析では、粘土止水壁の透水係数を 1.00×10⁻¹⁰ m/s とした場合、領域全体の透水係数が 1.99×10⁻⁹ m/s となるとともに水位低下量は 7.08 m となった。定圧注水試験の結果に対して 0.01 m の精度で水位低下量が一致しなかった ものの領域全体の透水係数が実測値に最も近い値となったことから粘土止水壁の透水係数を、 1.00×10⁻¹⁰ m/s と推定した。前年度推定した粘土止水壁の透水係数と比べると、令和 3 年度の浸 透流解析から推定した粘土止水壁の透水係数はやや高い結果となった。この差異が解析条件の 違いに起因するものか、粘土止水壁の透水性の変化に起因するものかについては、次年度以降 の結果を踏まえて考察する予定である。なお、令和 2 年度の浸透流解析では、粘土止水壁の透 水係数の値を 1.75×10⁻¹⁰ m/s (原子力機構・原環センター, 2021) と推定しており、浸透流解析 の解析条件を見直したことにより、差異が生じた可能性があるものの、粘土止水壁の止水性能 を大きく変え得る違いではないと考えられる。



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	$2.98 imes 10^{-6}$
健岩部	2.57×10^{-9}
粘土止水壁	今回推定

表 3.2-27 解析モデルの各要素の透水係数の設定値

表 3.2-28 EDZ を対象とした定圧注水試験の結果

	透水係数	試験開始時との水位差				
	(m/s)	(m)				
令和3年度 (2021年12月13日)	4.76×10^{-9}	10.02				
令和2年度 (2021年1月28日)	2.00×10^{-9}	7.061				

表 3.2-29 浸透流解析の結果

粘土止水壁 解 透水係数 水位低下量 (m/s) (m)	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)		
令和3年度	3.41×10^{-10}	10.01	4.76×10^{-9}	10.02	4.76×10^{-9}	
令和2年度	1.00×10^{-10}	7.08	1.99×10^{-9}	7.061	2.00×10^{-9}	

3.2.4 まとめ

本年度は、岩盤を掘削して設けた切欠き部に対するベントナイトの吹付け施工の適用性確認 のための原位置吹付け施工試験と EDZ シーリング原位置試験における透水試験を実施した。

▶ 原位置吹付け施工試験

- 本試験では、クニゲルV1とケイ砂を乾燥重量比70:30で混合した材料を用いて切欠き部への吹付けを実施した。吹付け後の乾燥密度は、サンプリングした試料の平均乾燥密度が 1.55 Mg/m³、吹付けた混合材料の重量と3Dスキャナによる吹付け体積の測定値から計算 した乾燥密度が1.57 Mg/m³となり、施工目標として設定した1.43 Mg/m³を十分に上回る ことを確認した。
- 施工性能の評価として、リバウンド率や吹付け速度の算出を行った。リバウンド率については、本施工試験の全体のリバウンド率は25%となり、令和2年度に実施した切欠き型枠吹付け試験のリバウンド率22%と同程度となった。本施工試験では、吹付け機やホースの閉塞を防ぐために吹付け機への材料投入量を令和2年度の実績値である58.0 kg/minから

34.0 kg/minへ変更したことにより、吹付け速度が令和2年度の実績値である1.51 m³/hr から半分以下の値である0.72 m³/hrとなった。その結果として本施工試験では、吹付け機 やホースの閉塞はみられなかったものの施工効率が半分となったことが課題点としてあ げられる。

- ▶ EDZシーリング原位置試験
- ・ EDZを含む領域を対象に定圧注水試験を実施した。対象とした試験領域の透水係数は定常 解析で2.57×10⁻⁹ m/s、非定常解析で4.76×10⁻⁹ m/sであった。粘土止水壁の設置から2年 程度経過した時点においても同等の透水係数が得られており粘土止水壁による止水性能 が維持されていると考えられる。
- ・ 浸透流解析を実施し、EDZを対象とした定圧注水試験の結果を再現できる粘土止水壁の透水係数を3.41×10⁻¹⁰ m/sと推定した。

3.3 掘削損傷領域の連続性等に関わる調査技術開発

処分場の閉鎖後に坑道周辺の掘削影響領域(Excavation disturbed zone)・掘削損傷領域 (Excavation damaged zone)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 350 m 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。

安地西日		R	22		R3			R4				
夫爬項日		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										1	\rightarrow	
2.EDZ 等の連続性調査技術の高度化						1						
・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						l	!					
・物性値取得							\vdash					
・経時変化の評価												\rightarrow

表 3.3-1 実施工程表

3.3.1 EDZ の物理特性の取得

岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を目的として、令和2年度に製作したプロトタイプ(試験装置)の改良・高度化を図り、整備サイトのボーリング孔に適用し弾性波及び比抵抗を測定する物性値調査を実施した。

(1) 物性値調査の概要

調査の範囲(断面)は、既存のT-1 孔と新たに掘削したW-1、W-2、W-3 孔の鉛直ボーリング 3 孔(L=7.0 m、内径約 86 mm)の孔間とし、坑道のコンクリート路盤下 0.5 m から深度 7.0 m までの 6.5 m を調査測線とした。この範囲は、令和 2 年度のトモグラフィ調査による弾性波 (P 波)の低速度部分と、既知の割れ目(後述のボーリング調査の章を参照)の部分に相当し、 坑道周辺の EDZ による物性値の変化領域に相当する。

調査ボーリング孔の配置及び調査領域(断面)を図 3.3-1 に示す。



図 3.3-1 ボーリング配置と調査領域(断面図)

(2) 弾性波

(a) 弾性波の測定

坑道周辺の EDZ 領域の弾性波データを取得し、屈折法及び反射法地震探査の手法により割れ 目の位置を検知する調査を実施した。

弾性波速度の測定は、弾性波試験装置(弾性波ボアホールプローブ)をボーリング孔に挿入 し、発受振素子をゴムチューブの空気により孔壁に圧着させた後、5個の発振素子(電磁弁)を 順次起振させ、同時に24個の受振素子(圧電素子)で弾性波動を記録した。発振素子は、S波 の起振構造をもつ電磁弁(ソレノイドバルブ)を使用し、受振素子は周波数10~15kHzの圧電 式振動センサを10cm間隔で配置し、弾性波の伝播波動を31.25μsecのサンプルレートで深度 を変えながら記録した。

弾性波の調査方法を図 3.3-2 に示し、主要機器の仕様を表 3.3-2 に示す。





名称	規格・性能	数量	
測定装置 DAQ Link4	24ch、A/D 分解能 24bit		
	サンプルレート: 31.25 μ sec,	1台	
	ダイナミックレンジ:118 dB 以上		
	受振素子:圧電タイプ VS-AV203(トーキン製)		
	周波数:10~15000 Hz	24 個	
	感度:20 mV/m/s2		
	寸法(mm): φ 14 H 6.8		
	重さ:5.5 g		
弾性波ボアホールプローブ	発振素子 : 電磁バルブ 3V1-06(AOMAG 社)		
	繰返しレート:10 Hz	5 個	
	駆動電圧: DC 12 V		
	保護等級 : IP65		
	寸法(cm): 6.6×3.0×2.2		
	重さ:136 g		
電源装置	DC12V	2 台	

表 3.3-2 弾性波調査の主要機器

(b) 弾性波の解析方法

屈折法地震探査(弾性波探査)は、地下の地層境界から屈折して伝播した波動データから地下 の速度構造を求める手法であり、反射地震探査は、地下から反射した波動を受振し、データ処理 により地下構造を反射断面として可視化する物理探査手法である。これらの手法を適用し、岩 盤中の連続性の高い割れ目の検知を指向し、取得した弾性波データについて、各種の補正処理 (一次処理)の後、波形の周波数解析と振幅解析、弾性波解析(屈折法)及び反射法解析を実施 した。

(i) **一次処**理

データファイルを読込み、発振位置、受振位置と時刻のずれを補正、同一の測定位置データを スタック(平均化)してまとめ、各トレースを並べ替える。

一次処理の流れを図 3.3-3 に示す。

(ii) 周波数解析·振幅解析

取得データの補正処理(一次処理)後に、波形データのパワースペクトル及び発振点に最も近 い受振点波形(ニアトレース波形)を用い振幅強度を求めた。

(iii) 弾性波解析(屈折法)

屈折初動走時から屈折面の速度分布を求めた。



(iv) 反射法解析

反射法の解析手順を以下に示す。

- ・手順1:一次処理後の各トレース振幅を標準偏差で正規化
- ・手順2:NMO(Normal Move Out correction)補正
- 発振・受振間のオフセット距離を補正してゼロオフセットと同等の記録とする。

・手順 3: CMP(Common Middle Point: 共通反射点) 重合

反射記録は、振動点と受振点の中点が共通で、振動点から受震点までの距離が異なる反射 波形の集まり(CMP アンサンブル)である。発振・受振点の中点が共通するデータを重合(足 し合わせ)することで反射波を強調する。

・手順4:深度変換

速度を一様と仮定し、時間(往復走時)軸を深度軸に変換し反射断面を作成。

(c) 弾性波の解析結果

(i) 一次処理結果

発振 5 回の受振波形をチャンネルごとに並べ発振時刻のずれを補正し、同じ測定位置の受振 データをスタック(平均化)した。

時刻補正例を図 3.3-4 に、スタック波形を振幅強度で表示した図 3.3-5 に示す。

図 3.3-4 は、発振位置 (P2) に最も近いニアトレース (R6,R7) が補正前 (上) に比べ補正後 (下) に波形が揃っている。

図 3.3-5 は、スタック前(上)に比べて、スタック処理後(下)の波形振幅の S/N(信号/雑音)比が高い。







図 3.3-4 発振時刻の補正例









(ii) 周波数解析·振幅解析結果

1) 周波数解析

W-1 孔の発振データごとに全受振データを周波数解析したパワースペクトルを図 3.3-6 に示 す。パワースペクトルの上部が発振スペクトル、下部が背景ノイズである。発振周波数は 1100 ~1300 Hz を示す。



図 3.3-6 受振データのパワースペクトル(W-1孔)

2) 振幅解析

振幅解析は、発振点に最も近い受振点のニアトレース波形を用い、ニアトレースの初動部分2 ミリ秒間のデータの平均二乗平方根(RMS)を振幅値とした。

振幅解析結果を図 3.3-7 に示す。 発振チャンネルごとのばらつきが大きいが、5m以深から振幅が大きくなる傾向を示す。



図 3.3-7 ニアトレースの振幅

(iii) 弾性波解析(屈折法)

受振波形の屈折初動走時を解析し、屈折面の弾性波速度を推定した。単一孔内の発振・受振から波線の屈折が見られないことから、初動走時の平均的な傾きを最小二乗法で求めて弾性波速度の分布を調べた。また、各発振で求まった速度から、3次の多項式によるフィッティングにより弾性波速度の深度分布とした。これらの解析から推定される弾性波速度は約0.6~1.6 km/s を示す。

初動走時の平均的な傾きを図 3.3-8 に示し、弾性波速度の深度分布を図 3.3-9 に示す。



図 3.3-8 初動走時の傾き(平均)



図 3.3-9 弾性波の速度分布

(iv) 反射法解析

一次処理後のデータに、NMO 補正、CMP 重合、深度変換の処理過程で、一様な速度を仮定 して解析した。深度変換は、初動走時の解析により求めた弾性波速度から、S 波速度を約1km/s、 P 波速度を 1.75 km/s(前年度の試験結果)とし、速度を時間(往復走時)で割り、2 倍するこ とで時間を深度に変換した。

弾性波速度の反射断面を図 3.3-10 に示す。

測定データのニアトレースは、発振周波数がノイズより卓越しているが、発振に対して受振 位置が離れるほど S/N 比が低くそれらが重合断面に影響している。反射断面から、坑道の床面 に垂直なボーリング孔に平行(床面に垂直)する反射面(連続する割れ目)は確認できない。





(3) 比抵抗

(a) 比抵抗の測定

坑道周辺の EDZ 領域のデータを取得し、比抵抗法探査によりその位置を検知する調査を実施 した。比抵抗法(二次元比抵抗探査)は、それぞれが一対の電流電極(C1,C2)と電位電極(P1,P2) の4本の電極を組み合わせ配置(電極配置)し、2極法配置により岩盤の電位差を測定する。 ボーリング孔に、電極の間隔10cm、電極数30本の比抵抗試験装置(比抵抗ボアホールプロ ーブ)を挿入し、ゴムチューブの空気圧により電極を孔壁に圧着させた後、電流電極と電位電極 の電極間隔を変えて電位差(見掛比抵抗)を測定した。1回あたりの最大電極間隔を1.1m、電

極配置による測定点は 264 点とし、孔底から孔口までプローブの深度を 4 回変えて合計 1,056 点の電極配置で測定した。電流(C2)及び電位(P2)の遠電極は、調査孔から 30m 程度離れた 坑道内の側溝に設置した。

比抵抗の調査方法を図 3.3-11 に示し、主要機器の仕様を表 3.3-3 に示す。



図 3.3-11 比抵抗の調査方法

名称	規格・性能	数量
測定装置 (McOHM Profiler4)	通電電流:2、20、60、120 mA(定電流) 最大通電電圧:400 V (800Vpp) 通電周期:1、2、4、8 秒 測定チャンネル数:4 A/D 分解能:24 bit 内蔵スキャナ:32 極	1 台
比抵抗プローブ	ステンレス電極数:30 寸法(mm):W60×H60×L1,200 重さ:1.5 kg	1台
電源装置	DC12V	2 台

表 3.3-3 比抵抗調査の主要機器

(b) 比抵抗の解析方法

4回の測定データは、電極番号を深度順に割り当て、電流電極と電位電極が同じ配置である測 定抵抗値を平均して統合した。取得したデータは、2極法配置及び4極法配置(ウェンナー法配 置)に並び替えて2通りの解析を実施した。最大電極間隔(探査深度)は、2極法配置は1.1m、 4極法配置は0.5mである。

2極法及び4極法配置の最大電極間隔を図 3.3-12 に示す。



図 3.3-12 2 極法及び4 極法配置の最大電極間隔

測定データの電極配置(C1,C2,P1,P2)、電流値、電位値、抵抗値から、見掛比抵抗値 pa を次 式で計算し、

$$\rho a = G \frac{V}{I}$$
 式 3.3-1

$$V:$$
電位

I:電流

 $G = 2\pi a$: 電極配置係数(2極法、4極法ウェンナー配置ともに同じ係数)

見掛比抵抗(疑似)断面図から異常値を除外し、見掛比抵抗値の平均値を用いた一様構造の初期 比抵抗モデルから、有限要素法(Finite Element Method, FEM)による理論電位計算値と測定 値との残差を求め、残差が十分に小さくなるまでモデルの修正を繰り返す逆解析(インバージ ョン)により比抵抗分布を推定した。

比抵抗の解析の流れを図 3.3-13 に示す。



図 3.3-13 比抵抗解析の流れ

(c) 比抵抗の解析結果

2 極法及び 4 極法配置の比抵抗の解析結果から、ボーリング孔毎の比抵抗分布を図 3.3-14 に 示し、逆解析の収束時の RMS 残差(実行値)を図 3.3-14 に示す。

2 極法配置は深度方向(孔壁からの距離方向)、4 極法配置は水平方向(探査孔深度方向)の 比抵抗変化の把握に適し、ともに全体的な比抵抗は低い約1~8Ωmを示す。



図 3.3-14 比抵抗分布図

孔 No.	2 極法 RMS 残差(Ωm)	4 極法 RMS 残差(Ωm)
W-1	9.12	7.98
W-2	5.78	7.55
W-3	4.62	11.1

表 3.3-4 逆解析の収束 RMS 残差

(4) まとめ

岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を目的として、令和2年度に製作したプロトタイプ(試験装置)の改良・高度化を図り、整備サイトのボーリング孔に適用し弾性波及び比抵抗を測定する物性値調査を実施した。

調査孔毎に、トモグラフィによる弾性波分布及び割れ目の位置と、本年度の調査結果を並べて、岩盤の損傷(割れ目)に伴う物性の変化領域を検討した。

各調査の結果断面を図 3.3-15、図 3.3-16、図 3.3-17 に示す。

割れ目の位置とトモグラフィによる弾性波分布は概ね整合するが、割れ目の位置と反射断面 及び比抵抗分布断面の変化領域に関連性は認められない。EDZの物理特性を取得するに当たっ て今後の課題を以下にまとめた。

・弾性波について

弾性波(地震波)を用いた反射法地震探査は、地下の地層構造分布に適し、屈折法地震探査は 地下の速度分布の把握に適していることから、これらの探査手法を適用して、岩盤中の連続性 の高い割れ目を検知する解析を実施した

反射法の断面から、連続する反射面が確認できないことは、それに対応する割れ目が存在し ないことを表している。孤立した反射面を捉える方法として、デコンボリューション及びマイ グレーション等の処理による反射波の S/N 比の向上や補正効果が期待できる。

屈折法では、弾性波トモグラフィと同様の波線理論に基づく解析で速度分布が得られる。今回は、SN 比が低いことから最小二乗法による統計的な解析を実施した。初動波形の速度差を正確に測定し、走時曲線の屈曲点や傾きを解析することにより割れ目の検知が期待できる。

取得する弾性波は、振源波形や計測システムの特性等の様々な影響を受けており、堆積岩に おける割れ目の検知には、現在(1.2 kHz)より高周波(2-3 kHz 程度)な発振による S/N 比の 向上と適切な計測手法を検討する必要がある

・比抵抗について

比抵抗値が低い堆積岩の測定において、電極の接地抵抗を低減し、岩盤の計測に影響を及ぼ す地下水や工事用水等の地質環境の条件を考慮した解析手法の検討が必要である。

各試験孔の電気伝導度を表 3.3-5 に示す。

孔 No.	T-1	T-2	T-3	W-1	W-2	W-3	地下水	工事用水
電気電導度 (mS/m)	1400	1592	1585	1109	1433	1485	1590	15.7

表 3.3-5 試験孔の電気伝導度












3.3.2 EDZ 等の連続性調査技術の高度化

(1) 調査の概要

幌延の新第三紀堆積岩を対象に、非破壊調査技術を高度化して、EDZの範囲および物性・連続性を定量的に把握する試験サイトを地下施設の深度 350 m 調査坑道に整備した。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。

整備サイトにおいて、グラウト注入による EDZ の改善効果を可視化することを指向して、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 等を実施しそれら調査手法の適用性を評価する。

本年度は、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)およ び水理試験を実施して、グラウト注入の可否を検討した。

既存孔:T-1,2,3 W-1 新規孔: W-1,2,3,G-1 T-3 T-2 -1.0 試験孔ボーリング、圧力応答観測 -2.0 BTV, 孔径検層、孔曲がり -2.0 -3.0 割れ目 グラウト前透水試験 -4.0 グラウト注入 BTVによる孔内確認 EDZの物性値調査 グラウト後透水試験 -9.0 R4トモグラフィ -10.0 令和3年度 原位置調査フロー P波速度 (km/s)

ボーリング位置および調査フローを図 3.3-18 に示す。

ボーリング孔配置および弾性波分布



(2) ボーリング調査

(a) 調査の内容

深度 350 m 調査坑道の東周回坑道において、水理試験孔(W-1~3)およびグラウト注入孔(G-1)をオールコアでボーリングし、削孔後に BTV 観測(W-1,2,3、G-1、T-1)、孔径検層(W-1,2,3、G-1)、孔曲がり測定(W-1,2,3、T-1,2,3)を実施するとともに、採取したボーリングコアについてはコア観察を実施した。また、グラウト注入後には、BTV 観測(W-1,2,3、T-1)により割れ目へのグラウト注入効果を確認した

ボーリング孔の配置および写真を図 3.3-19 に示し、ボーリングの内容を表 3.3-6 に示し、各 種検層の内容を表 3.3-7 に示す。





図 3.3-19 ボーリング配置及び写真

孔 No.	仕様	摘要	
	公古下向き23 引径96 mm	水理試験孔	
W-1, W-2, W-3		(深度 0.0~0.5 m/コアドリル削孔、深度	
		0.5~6.0 m/回転式ボーリング機械削孔)	
	公古下向き1Ⅰ Ⅰ 𝔅 𝔅𝔅 mm	グラウト注入孔	
G-1		(深度 0.0~0.5 m/コアドリル削孔、深度	
	$L = 1.0 \text{ m}, \exists = 10 \exists 1$	0.5~6.0 m/回転式ボーリング機械削孔)	

表 3.3-6 ボーリングの内容

表 3.3-7 検層の内容

実施	項目	仕様	摘要
BTV 削孔後 孔 全検層 孔曲がり測気	BTV	高解像度ボアホール カメラシステム (BIP-6)	W-1,W-2,W-3,G-1,T-1 4 孔×6.8m+1 孔×10.4m=37.6m
	孔径検層	2 軸(XY)方式	W-1,W-2,W-3,G-1 4 孔×6.8m=27.2m
	孔曲がり測定	位置精度 1/400~1/500 (誤差/距離) ジャイロ式	W-1,W-2,W-3,T-1,T-2,T-3 5.7m,5.8m,5.8m,9.5m,9.8m,9.8m=46.4m
注入後	BTV	高解像度ボアホール カメラシステム (BIP-6)	W-1,W-2,W-3,T-1 3 孔×6.8m+1 孔×10.4m=30.8m

(b) ボーリング

地下施設深度 350 m 調査坑道は建設過程で、床盤下に砕石材が敷設されている。回転式ボー リング機械を用いて、坑道の床盤面から鉛直方向へのボーリング(裸孔、清水掘り)では、これ らの砕石がボーリング孔に落下して孔壁が崩壊し掘削の障害となる。よって、坑道床盤から岩 盤まで孔壁を保護するために、コアドリル削孔しモルタルを注入して硬化した後、回転式ボー リング機械で水理試験孔(W-1,W-2,W-3)およびグラウト注入孔(G-1)を削孔した。

ボーリング方法および主要機器の詳細は付録に示した。コアドリル削孔の概念を図 3.3-20 に 示し、コアドリル削孔及びボーリング状況を図 3.3-21 に示す。



図 3.3-20 コアドリル削孔図



図 3.3-21 コアドリル削孔及びボーリング状況

(c) コア観察

水理試験孔(W-1,2,3)孔およびグラウト注入孔(G-1)のボーリングコアは、コア箱に整理 した後、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、色調等のコア 観察を実施した。

ボーリングコアの割れ目は、密着しているか、分離しているものの割れ目沿いの風化変質は 認められないものが殆どである。

コア観察の方法および結果の詳細は付録に示し、各ボーリングコアの割れ目の状態をまとめて表 3.3-8 に示す。

Bo.No	割れ目の性状・RQD
	・割れ目本数は0本/m~8本/m、平均4本/mであり、割れ目の集中する区間は、
W-1	深度 0.50~0.96m、1.51~1.93m 区間の 2 区間に認められた。
	・RQD は 20~100%を示し、全体の平均は 82%である。
	・割れ目本数は1本/m~11本/m、平均4本/mであり、割れ目の集中する区間は、
W-2	深度 0.71~0.91m、1.51~1.91m、2.46~2.59m 区間の 3 区間に認められた。
	・RQD は 25~100%を示し、全体の平均は 74%である。
	・割れ目本数は0本/m~10本/m、平均3本/mであり、割れ目の集中する区間は、
W-3	深度 0.56~0.85m、1.65~1.93m、2.35~2.49m 区間の 3 区間に認められた。
	・RQD は 36~100%を示し、全体の平均は 80%である。
	・割れ目本数は0本/m~13本/m、平均4本/mであり、割れ目の集中する区間は、
G-1	深度 0.60~0.93m、1.27~1.98m の 2 区間に認められた。
	・RQD は 33~100%を示し、全体の平均は 77%である。

表 3.3-8 ボーリングコアの割れ目状態

(i) 割れ目の分類と評価

ボーリングコアの観察では、割れ目の特徴を詳細に観察し、割れ目の面構造とその成因(吉野 ほか,2019、藤井他,2011)を以下のように分類し評価した。

1) EDZ(掘削損傷割れ目):

掘削により発生した引っ張り割れ目(T)。割れ目表面全体に羽毛状構造が認められる(羽毛 状構造の出発点が割れ目内に認められない)割れ目。

2) PE (既存割れ目、Pre-Existence fracture):

初生的に存在している剪断割れ目(S)もしくは引張り割れ目(T)。引張り割れ目は上述の EDZと同様に割れ目全体に羽毛状構造が認められる。今回の調査では、EDZに起因する割れ目 と区別が困難であり、深部で引張り割れ目の分布が確認できないことから全てを EDZ 割れ目と して記録した。剪断割れ目は、鏡肌、条線やステップ構造が認められる。一般的にはほとんどが 剪断割れ目である。

3) CD (機械的割れ目およびコアディスキング):

コアの掘削やその後の取り扱いにより機械的に生じた割れ目(D)。 これらの割れ目の特徴とイメージを表 3.3-9 に示す。

割れ目面の特徴	明瞭/不明瞭	割れ目写真	評価
F:割れ目面全体に羽毛状構造が認められる	明瞭	1	EDZ
F:羽毛状構造がコア内部に起点がある	不明瞭	3	CD
S:ステップ構造など	明瞭	2	PE
特徴無し	-	4	CD

表 3.3-9 割れ目面の特徴とイメージ



(ii) 割れ目の整理と区分

コア観察および BTV 観測の孔壁展開画像から、割れ目の性状と層理を整理しリストにした。 層理は BTV 画像から約5 cm 毎の代表的な箇所の走向傾斜とし、割れ目の性状については、中 央深度、上端、下端記載深度、走行傾斜、割れ目タイプ(吉野ほか,2019)、割れ目面の特徴、 岩質、成因を記載し、前述の(a)により分類・評価した。 分類および整理方法の詳細と割れ目リストを付録に示し、ボーリング孔毎の割れ目の本数を 表 3.3-10 に示す。

	EDZ	PE	CD	全体
W-1 孔	8	7	11	26
W-2 孔	23	8	3	34
W-3 孔	15	7	4	26
G-1 孔	20	4	5	29

表 3.3-10 割れ目本数一覧表

(iii) 割れ目と層理の方向性

各孔のそれぞれの割れ目の方向性を図 3.3-22 ステレオネット(南半球投影)に示した。

層理(FO)の方向性は、各孔とも概ね NW-SE/中角 SW であり、試験箇所周辺で構築された 地質モデル(佐藤他、2017)から読み取れる稚内層の走向傾斜である N45E/35-45SW と整合的 である。

EDZ 割れ目 (EDZ) の方向性は、孔によって若干異なるが、卓越方向は NNE-SSW~NE-SW/ 低角~中角 SE である。

PE割れ目(**PE**)の方向性は、G-1 孔を除くと **E-W~NE-SW**/中角~高角 **NW** の傾向が認められる。

CD 割れ目(CD)は、比較的低角な傾斜を示すものが多い。



図 3.3-22 ステレオネット図

(d) BTV 観測

水理試験孔(W-1,2,3)、グラウト注入孔(G-1)、既存孔(T-1)において、岩盤中の割れ目・ 堆積構造の方向およびグラウト注入前後の変化を把握するために、ボアホールカメラによる孔 壁観測を実施した。

ボアホールカメラによる孔壁展開画像は、亀裂や地層境界などの面構造がサインカーブで表 され、カーブが下に凸になる方向が最大傾斜方向となる。

観測方法および結果の孔壁展開画像については、付録に示し、画像解析の概念を図 3.3-23 に 示し、各観測孔で確認された割れ目の一覧を表 3.3-11 に示す。



図 3.3-23 ボアホール画像解析概要図

71 平	確認深	ŧ度(m)	走向(真北)	傾斜
九省	上端	下端	(°)	(°)
W/- 1	0.63	0.72	N 20E	45W
VV-1	5.23	5.25	N 70E	12N
	0.71	0.73	N 50E	28S
W-9	0.73	0.79	N 47E	40S
VV-Z	0.79	0.91	N 53E	40S
	5.74	5.79	N 72W	50N
	0.60	0.64	N 25E	45N
W-3	0.70	0.75	N 25E	45N
	0.80	0.85	N 25E	45N
	1.09	1.13	N 25E	38W
	5.36	5.45	N 20E	$50\mathrm{W}$
	0.67	0.71	N 30E	38W
	0.87	0.93	N 25E	$54\mathrm{W}$
G-1	5.01	5.03	N 40W	20S
	5.24	5.30	N 73W	40N
	5.40	5.42	N 10E	22E
T-1	4.08	4.20	N 75W	45N

表 3.3-11 割れ目一覧表

(e) 孔径検層

孔径検層は、掘削深度に対する孔径の変化を連続的に測定記録し、孔内における空洞および 崩壊の位置やその形状・程度を把握することを目的として、水理試験孔(W-1,2,3)、グラウト注 入孔(G-1)で実施した。

検層方法および結果の詳細を付録に示し、各孔の検層結果をとりまとめ表 3.3-12 に示す。

Bo.No	孔径状況
W-1	孔径は、X 変位 81.2~109.6 mm、Y 変位 80.9~109.0 mm の範囲を示す。孔口 付近~深度 1.6 m 間、4.0~5.0 m 間で一部孔径の拡大が認められたが、上記以外 の深度では概ねビット径と同等の孔径を示し、空洞や崩壊は確認されない。
W-2	孔径は、X 変位 81.2~106.3 mm、Y 変位 80.9~107.6 mm の範囲の孔径を示す。 孔口付近~深度 1.5 m 間で一部孔径の拡大が認められたが、上記以外の深度では 概ねビット径と同等の孔径を示し、空洞や崩壊は確認されない。
W-3	孔径は、X変位 80.6~118.1 mm、Y変位 80.7~123.7 mmの範囲の孔径を示す。 孔口付近~深度 2.0 m 間で一部孔径の拡大が認められた。0.5~0.6 m 間ではコン クリートと岩盤の境界付近が乱れていたためビット径 2~5 mm 程度の拡大が認められた。他の深度では概ねビット径と同等の孔径となっている。
G-1	孔径は、X 変位 63.3~115.1 mm、Y 変位 59.1~113.9 mm の範囲の孔径を示す。 孔口付近~深度 1.0 m 間で孔径の拡大が認められたが、上記以外の深度では概ね ビット径と同等の孔径を示し、空洞や崩壊は確認されない。

表 3.3-12 孔径検層結果

※W-1,2,3 (掘削ビット径: φ87 mm)、G-1 (掘削ビット径: φ87 mm)

(f) 孔曲がり検層

孔曲がり検層は、ボーリングの精度管理を目的として、水理試験孔(W-1,2,3)、既存孔(T-1,2,3)で実施した。

検層方法および結果の詳細を付録に示し、各孔の検層結果をとりまとめ表 3.3-13 及び図 3.3-24 に示す。

测学项目	孔番						
例足項日	W-1	W-2	W-3	T-1	T-2	T-3	
測定深度(mm)	5700	5800	5800	9500	9800	9800	
X 変位(mm)	33.00	-1.80	-15.70	-5.70	174.00	97.00	
Y 変位(mm)	-84.00	-27.00	-7.30	-196.00	-281.00	-92.00	
総変位(mm)	90.70	27.77	17.41	198.93	331.94	135.08	

表 3.3-13 孔曲がり測定結果



図 3.3-24 孔曲がり測定結果

(g) グラウト注入効果の確認

グラウト前後の BTV 画像を比較して、割れ目へのグラウト充填状況を確認した。グラウト注入 入社 G-1 孔で、注入区間は 2~7 m、グラウト材料は平均粒径、約 4 μm の超微粒子セメントを使用している。

グラウト後の BTV 画像から、T-1 孔および W-1 孔の深度 5.6 m の割れ目に白色脈が認められ るが他の W-1、W-2、W-3 孔の割れ目には認められない。

各ボーリング孔のグラウト注入前後の BTV 比較画像を、図 3.3-25、図 3.3-26、図 3.3-27、 図 3.3-28 に示す。





T-1孔注入後





















図 3.3-28 W-3 孔グラウト注入前後の比較画像

(3) 水理試験

(a) 水理試験の概要

深度 350 m 調査坑道の東周回坑道において、グラウト注入による EDZ の改善効果を高精度 な三次元トモグラフィ調査で可視化することを指向して、昨年度に掘削した T-1 を円芯とした 円弧状の試験孔で、応答観測及びグラウト注入試験と透水試験を実施して、グラウト注入の可 否を検討した。

各試験孔の平面配置を図 3.3-29 に示し、水理試験の流れを図 3.3-30 に示す。





図 3.3-29 水理試験孔の配置状況

(i) 応答観測

応答観測は、新規孔(W-1~W-3、G-1)の掘削時にT-1と連通する割れ目の分布を把握する ために実施した。応答観測の方法は、T-1孔にパッカーを設置して掘削中の間隙水圧測定を行う ことによりT-1の圧力応答時刻と掘削深度を比較して応答区間を確認し、BTV 孔壁画像やコア 観察結果から連通する割れ目を同定した。

(ii) グラウト注入前透水試験

透水試験は定流量注水試験により、グラウト注入前の発信孔の透水性を把握し、受信孔の圧 力応答の有無を確認した。

(iii) グラウト注入試験

連通する割れ目へG-1からグラウト材を注入し、硬化期間を約1か月とした。

(iv) グラウト注入後透水試験

グラウト注入効果を確認する透水試験は、発信孔・受信孔の組み合わせ及び注水方法はグラ ウト注入前の試験と同様とした。



図 3.3-30 水理試験の流れ

(b) 試験の方法

(i) 応答観測

応答観測は、T-1 孔へ間隙水圧測定ラインを設けたパッカーを設置し、圧力センサおよび収録 装置を取り付けた後、パッカー拡張タンク内の水をコンプレッサで加圧し送水しパッカーを拡 張して実施した。拡張圧力は、間隙水圧との差圧が+1 MPa以上を目途とし、パッカー拡張後 の間隙水圧の安定状態を確認して、ボーリング終了までの間隙水圧を自動測定した。

応答観測の概要を図 3.3-31 に示す。





(ii) グラウト注入試験

グラウト注入試験を以下の手順で実施した。

・手順1:グラウトの配合と撹拌

超微粒子セメントと水を配合したグラウトの材料を用いて、割れ目への浸透を考慮して粘 度の低い配合と高い配合の異なる配合比で2回に分けての注入(圧入)とした。

・手順2: 孔内水の置換

孔内をグラウト材で充填するため、孔底まで挿入した送水ホースからグラウト材を注入し て孔内水をグラウト材へ置換した。

・手順3:パッカーの設置

グラウト材を圧入するためのパッカーを孔内へ設置して区間を密閉した。設置深度(注入 対象深度)は、応答観測および透水試験結果から決定した。

・手順4:グラウト材の圧入

グラウト材は、スクイズポンプを用いた圧力 0.9~1.2 MPa での圧入とした。 グラウト注入手順を図 3.3-32 に示す。



図 3.3-32 グラウト注試験の概要

(iii) 透水試験

透水試験は、応答観測結果および割れ目の位置を考慮して発信孔(注水)を選定し、他の孔を 受信孔として実施した。また、グラウト注入前の試験では、開放状態にある G-1 孔にもパッカ ーを設置して間隙水圧の観測を実施した。

透水試験(定流量注水試験)は、HPLCポンプを用いた定流量注水試験とし、本試験の前に、 適切な注水量の目途を付けるために予備試験を実施した。なお、透水係数は注水孔の単孔試験 として解析を行った。

グラウト注入前後の透水試験の概要を図 3.3-33 に示す。



図 3.3-33 透水試験の概要

(c) 試験結果

(i) 応答観測

新規ボーリング孔 (W-1,2,3、G-1) の掘削時に T-1 孔と連通する割れ目の検知を目的として、 T-1 孔にパッカーを設置して観測した。

T-1 孔の圧力応答グラフの間隙水圧は、パッカー設置直後から大きく上昇した後、10/23 以降 は孔口開放による減圧状態からの回復が概ね収束したと考えられる。掘削が始まった 10/21 以 降で間隙水圧の特徴的な変化は、10/28 の圧力減少および 10/30 以後の不規則な上昇と下降の 繰り返しである。この不規則な変化はボーリングの掘削が完了した 2 日後に発生しており、掘 削応答ではなく、遊離ガスなどの影響と考えられる。一方、図中に赤丸で示す 10/28 に発生し た圧力減少は G-1 の掘削日時と重複している。掘削中の G-1 ボーリング孔は大気開放状態であ り、1MPa 以上の高水頭を持つ T-1 孔から G-1 孔へ圧力が抜けた現象と考えられ、G-1 と連通 した割れ目を介した圧力伝搬の可能性が高いと考えられる。他の W-1~W-3 孔での掘削応答は 確認できない。

圧力応答のグラフを図 3.3-34 に示す。



図 3.3-34 T-1 孔の応答観測結果

3/28のT-1 孔の圧力応答とG-1 孔の掘削進捗を図 3.3-35 に示した。

掘削進捗は、コアチューブ1回の掘進ごとの時刻を示している。掘削深度が水平な部分はコ アの抜き取りやロッド昇降などの掘進以外の作業時間に相当する。

G-1 孔の深度 5~6 m 掘進時に、T-1 孔の間隙水圧が大きく減少していることから、深度 5 m を過ぎた位置に T-1 孔と連通する割れ目の存在が推定される。



図 3.3-35 圧力応答と掘削進捗

(ii) グラウト注入試験

グラウト注入は、孔内全体の容量分(約170)を地下水からグラウト材へ置換し、その後パッカーを GL-2 m に設置してグラウトポンプにて圧入した。

1回目のグラウト注入は、割れ目への浸透を考慮して粘性の低い配合比(C:W=1:4)に設定 し、2回目の注入では粘性の少し高い配合比(C:W=1:3)として再注入した。いずれの配合比 の圧入においても数リットルの少ない注入量であった。グラウト材には、超微粒子セメント材 を使用し、分散材等は用いなかった。グラウトの注入の翌日にボーリング孔口付近の空隙へ急 結材を混ぜたセメントを埋め込み完全に閉塞した。

グラウト材の仕様を表 3.3-14 示し、G-1 孔へのグラウト注入状況を表 3.3-15 および図 3.3-36 に示す。

材料	密度	比表面積	平均粒径	特徴			
超微粒子セメント	3.00	8,000 (cm²/g) 以上	4.0 (μm)	平均粒径、約4 μmの超微粒子 長期にわたる強度の伸びが持続 硬化体の高耐久性・止水性			

表 3.3-14 グラウト材の仕様

表 3.3-15 グラウト注入状況

作業項目	実 績	備考
パッカー設置深度	GL-2 m	注入区間:深度 2~7 m
1回目グラウト圧入	元最大注入圧力:約0.9 MPa,注入量数リットル 配合比=セメント:水=1:4	区間を閉鎖して 2 時間放置
2回目グラウト圧入	元最大注入圧力:約1.2 MPa,注入量数リットル 配合比=セメント:水=4:3	約1時間加圧保持



図 3.3-36 グラウト注入状況

(iii) 透水試験

グラウト注入の前後に、T-1 孔および W-1,2,3 孔、G-1 孔で間隙水圧測定および定流量注水試験を実施した。グラウト注入に用いる G-1 孔を除いた孔間距離の近い W-2 を発信孔とし、T-1、W-1、W-3 を主要な受信孔とした。また、パッカー深度は、圧力応答の対象割れ目を拡張する目的で、孔口近くの深度 2 m とした。

各試験孔の配置とパッカー深度(測定区間)を図 3.3-37 に示す。



図 3.3-37 試験孔配置とパッカー深度

1) 間隙水圧測定

間隙水圧の観測結果を表 3.3-16 に示す。

表の T-1 孔および G-1 孔の間隙水圧は、W-1,2,3 孔に比べ値が 2,3 倍高い。T-1 孔は、他の 孔より 4 m 長い部分の岩圧の影響差と考えられ、G-1 孔は T-1 孔と割れ目の連通が応答観測に より認められることから同様に高い間隙水圧を示している。一方、W-1,2,3 孔の間隙水圧は、各 孔に差異は少なく 0.3~0.4 MPa に分布している。

グラウト注入後の間隙水圧は、グラウト注入の前に比べ1割程度の低下を示し、注入効果に よるものと考えられる。

武騎 孔 名 (G:		深度 m)	区間長	グラウト注入前 間隙水圧	グラウト注入後 間隙水圧	備考
	上端	下端	(m)	(MPa)	(MPa)	
W-1	2.10	7.00	4.90	0.4208	0.3800	受信孔
W-2	2.10	7.00	4.90	0.3296	0.2836	注入孔
W- 3	2.10	7.00	4.90	0.3872	0.3836	受信孔
T-1	2.10	11.00	8.90	1.1256	1.0484	受信孔
G-1	2.40	7.00	4.60	0.8730	_	注入後に閉塞

表 3.3-16 間隙水圧の観測結果

2) 透水試験

表 3.3-17 に W-2 孔の定流量注水試験により算出した水理定数の一覧を示す。

水理定数(透水量係数、貯留係数)は、定流量注水試験の注水過程(Cooper-Jacob 法)、および回復過程(Agarwal 法)の2つの解析式から求めた。回復過程の解析結果は、片対数グラフに良好な直線勾配が認められ、注水過程よりも信頼性が高い。

グラウト注入後の透水量係数は、グラウト注入前に比べ 6 割程度まで減少し、グラウト効果 による透水性の低減効果と考えられる。

グラウト注入前		グラウト注入後		
透水量係数 T (m ² /sec)	貯留係数 (-)	透水量係数 T (m ² /sec)	貯留係数 (-)	解析方法
7.40E-10	1.40E-04	5.30E-10	1.50E-04	注水過程
1.30E-09	4.30E-05	8.10E-10	2.90E-05	回復過程

表 3.3-17 W-2の注水試験結果

(4) まとめ

本年度は、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た、 ボーリング調査および水理試験、各種検層等を実施して、グラウト注入の可否を検討した。

ボーリング調査で判別した各試験孔の深度3m付近までの割れ目と、トモグラフィ調査によ る弾性波の低速度分布は概ね整合的である。また、掘削中の応答観測により、ボーリング孔間の 連通する割れ目を確認してグラウト注入を実施するとともに、透水試験によりグラウト注入に よる透水性の低減効果を確認した。

弾性波の低速度分布と割れ目の位置を図 3.3-38 に示し、応答観測で確認した連通する割れ目 の位置及び BTV の孔壁展開画像を図 3.3-39 に示す。

今後は、整備した実験サイトにおいてグラウト注入後のトモグラフィを実施し、岩盤中の連 続性の高い割れ目の検知に対して高精度化した物理探査技術の適用性を確認する。



図 3.3-38 ボーリング孔の割れ目及び弾性波の断面分布



T-1孔の孔壁展開画像 T-1孔とG-1孔の割れ目分布



3.3.3 使用した岩石試料と測定方法

本年度の物性値測定では、飽和度を変化させながら物性値を測定する必要がある。予備試験を実施し該当条件での適切な測定手順を検討した後、本試験を実施した。

(1) 試料の採取場所

本年度の測定では、深度 350 m の稚内層の岩石の物性値計測を実施する。予備試験では、令和 2 年度に掘削した T-2 孔の深度 7 m 付近から採取された約 15 cm コアから試料を作成した。 本試験においては、本年度掘削した W-1 および W-2 孔の深度 7 m 付近で採取したコアを使用 した。なお本試験では、より良い状態のコアから試料を作成するために 30 cm 程度連続してい るコアを使用した。試料の形状は、比抵抗および弾性波測定装置に併せて、高さ 5.6 cm から 5.7 cm 程度、直径 6.5 cm から 7 cm 程度の円柱形とした。図 3.3-40 にコアの採取場所を、表 3.3-18 に作成した試料の情報を示す。

なお、深度 250 m および 140 m の声問層の岩石における同様の測定は、窪田ほか(2018)によ り実施されている。



幌延深地層研究センター地下施設 青色は未施工

ホーリンク孔配置平面図

表 3.3-18 作成した試料の情報							
Bor.	試料番号	地質					
T-2	T-1	7.0 m 付近	粘性土				
T-2	T-2	7.0 m 付近	粘性土				
W-1	C-1-1	6.4~6.7 m 上部	粘性土				
W-1	C-2-1	6.7~7.0 m 上部	粘性土				
W-2	C-3-1	6.7~7.0 m 上部	粘性土				
W-1	C-1-2	6.4~6.7 m 下部	粘性土				
W-1	C-2-2	6.7~7.0 m 下部	粘性土				
W-2	C-3-2	6.7~7.0 m 下部	粘性土				

义	3.3-40	測定に用い	いた試料	の採取場所
---	--------	-------	------	-------

255

(2) 試料の密度特性および間隙率

弾性波および比抵抗測定時の飽和度を算出するために、測定の各々の段階で試料の重量および体積を測定し、式 3.3-2 および式 3.3-3 を用いて重量から飽和度を算出した。

$$S_w = \frac{\omega \rho_s}{e \rho_w}$$
 $\ddagger 3.3-2$

$$\omega = 100 \times \frac{W - W_d}{W_d}$$
 \$\tilde{\text{t}} 3.3-3

ここで、Swは飽和度、ωは含水比、psは土粒子密度、eは間隙比、pwは水の密度、W はある 時点の試料の重量、Wa は乾燥重量である。なお、乾燥密度 pa は式 3.3-4 により、間隙比 e は式 3.3-5 により求められる。

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{\omega}{100}}$$
 $\overrightarrow{x} 3.3-4$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$
 $\ddagger 3.3-5$

ρt は湿潤密度で計測時に測定した重量および体積より求められる。土粒子密度は、試料形成時の削りくずを使用して土粒子の密度試験を実施して取得し、乾燥重量はすべての測定終了後に試料を強制乾燥し測定した。これら試験により取得された各試料の土粒子密度、乾燥密度および間隙比を表 3.3-19 にまとめる。

	T-1	T-2	C-1-1	C-1-2	C-2-1	C-2-2	C-3-1	C-3-2
土粒子密度	2.466		2.474	2.441	2.463	2.451	2.449	2.452
[Mg/m ³]								
乾燥密度	1 41 4	1 497	1 400	1 909	1 495	1 202	1 401	1 400
[Mg/m ³]	1.414	1.437	1.406	1.383	1.435	1.595	1.401	1.408
間隙比	0.744	0.716	0.76	0.765	0.716	0.76	0.748	0.741

表 3.3-19 試料の密度特性および間隙率

(3) 採取したコアの飽和および乾燥

本研究では、岩石試料を一度飽和させた後、乾燥させることで飽和度を変化させながら比抵 抗および弾性波速度を計測した。計測の実施前に岩石試料を完全に飽和させるため、試料を水 に浸し容器を真空引きして試料飽和させた(図 3.3・41)。予備試験では、真空引きした状態で飽 和させるのに必要な時間を見積もるために水浸中の水中重量の変化を計測した。図 3.3・42 は、 試料の水中重量の時系列変化である。試料の水中重量は、浸水させた直後より顕著な変化が確 認されないことより、掘削直後には概ね飽和状態にあると考えられるが、試料を確実に飽和さ せるため本試験の際は4日間水浸させた。試料を飽和させるために使用する水は、幌延の深度 350 m付近の地下水の電気伝導度に近い値である1500 mS/mに純水を NaCl で調整した水を 用いた。

過去の声問層から採取した試料を用いて実施した同様の試験では、岩石試料が飽和した状態 から飽和度が80%程度まで変化する間にP波速度が著しく変化し、それより低い飽和度では緩 やかにP波速度が変化することが確認されている(窪田ほか,2018)。飽和度80%程度までの弾 性波速度および比抵抗を密に測定するために、C-1-1, C-2-1 および C-3-1 の試料では飽和度 80% 程度までは室温で乾燥させ、それ以降は約 100℃の乾燥炉内で乾燥させた。乾燥炉で乾燥させ た場合、飽和度が 70%程度まで低下した段階で全ての試料にクラックが生じたためそれ以降は ドライヤーを用いて風乾させた。また、乾燥時のクラックの発生を防ぐため、C-1-2, C-2-2 およ び C-3-2 では乾燥炉を使わずドライヤーを用いた風乾のみにより乾燥させた。この場合、資料 へのクラックは確認されなかった。なお、予備試験は飽和状態から約 2 時間 30 分間に関しては 室温で乾燥させ、それ以降は乾燥炉で乾燥させた。予備試験においても、飽和度が 70%程度ま で低下した段階で試料にクラックが発生した(図 3.3-43)。





図 3.3-41 試料を飽和している様子





図 3.3-43 乾燥により試料に生じたクラック

(4) 比抵抗・弾性波測定

図 3.3・44 に弾性波速度の測定の概略図と測定時の写真を、図 3.3・45 に比抵抗測定の概略図 と測定時の写真を示す。、試料の上下端に電極および送受信子を設置し、弾性波および比抵抗を 測定した。弾性波速度は Sonic Viewer2i(OYO 社製)を、比抵抗の測定は McOHM・EL2i(OYO 社 製)を用いて測定した。弾性波測定に用いた機材のスペックを表 3.3・20 に、比抵抗測定に用い た機材のスペックを表 3.3・21 に示す。比抵抗測定では、受信電極と送信電極の間に濾紙を設置 し、4 極法で測定した。また、比抵抗は温度に依存するため、温度による比抵抗への影響を低減 させるために炉乾させた試料は 10 分程度室温で冷却してから測定を実施した。



図 3.3-44 弾性波速度の測定の概略図(左)と測定中の写真(右)







図 3.3-45 比抵抗の測定の概略図(左)と測定中の写真(右)

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

表 3.3-20 弾性波速度測定に使用した機材

表 3.3-21 比抵抗測定に使用したね

機器名	製作所	仕様
	ОУО	出力電圧:1~400V
		出力電流:1mA~200mA
比抵抗探查装置		出力波形:矩形波
MCOHM-EL2i		測定電位:最大 5V
		分 解 能:1µV
		入力インピーダンス:10ΜΩ
電極		銅板
その他		電極ケーブル、バッテリー、ホルダー

3.3.4 測定結果

(1) 飽和度変化に伴う比抵抗の変化

図 3.3・46 に測定された比抵抗と飽和度の関係を示す。測定された比抵抗は、飽和状態では 4 **Ω・m** 程度と低い値を示す。また、飽和状態における比抵抗の値のバラつきは小さい。岩石試料 の比抵抗は、飽和度とともに上昇しており、飽和度が低下するにつれて測定値のバラつきは大 きくなるもののどのサンプルも同様な傾向を示している。比抵抗値は飽和度が 80%程度までは 緩やかに上昇し、80%以下においては飽和度に対する増加量が大きくなっている。なお、飽和度 が 70%以下においては、乾燥により生じたクラックを含む岩石試料と含まない岩石試料から抵 抗値が測定されているが、これらクラックの有無によると考えられる顕著な測定値の変化は認 められない。



図 3.3-46 測定された比抵抗と飽和度の関係

(2) 飽和度と弾性波速度の関係

図 3.3・47 に測定された P 波速度と飽和度の関係を示す。P 波速度は、飽和した状態から飽和 度が 80%程度付近までは飽和度の低下に伴い単調に減少しているものの、飽和度が 80%から 50%程度の領域においては飽和度に関わらず概ねほぼ 1800 m/s 程度の値を示している。C-1-1 の試料では、飽和度 70%付近でその値が他の試料で測定された値から大きく乱れるものの、そ れ以外の測定結果においては同程度の値および傾向を示しており、P 波速度の測定結果におい ても乾燥により発生したクラックによると考えられる顕著な測定値の変化は認められない。



図 3.3-48 に測定された S 波速度と飽和度の関係を示す。すべての試料において飽和状態から 飽和度 50%程度までの領域において飽和度の低下に伴い S 波速度は単調に上昇している。S 波 速度に関しても、乾燥時に発生したクラックによる顕著な測定値の変化は認められない。



図 3.3-48 測定された S 波速度と飽和度の関係

(3) 比抵抗と P 波速度の関係

物理探査による EDZ の経時変化の調査では、比抵抗トモグラフィによる比抵抗分布と弾性波 速度トモグラフィにより P 波速度分布を取得している。従って、取得された比抵抗分布と P 波 速度分布の関係を、室内試験により得られた健岩部の比抵抗と P 波速度の関係と比較すること により、取得された物理探査結果から健岩部の領域を推定する解釈が可能である。図 3.3-49 は、 室内試験により取得された深度 350 m に位置する稚内層の健岩部における比抵抗と P 波速度の 関係である。飽和度の値も併せて表示している。飽和状態から飽和度が 80%程度までの領域に おいて、比抵抗の値は概ね 4 Q・m の値を示す一方で P 波速度は著しく低下しており、比抵抗 よりも P 波速度の方が飽和度の変化に対する感度が高いと考えられる。飽和度が 80%を下回る 領域においては、P 波速度は 1800 m/s 程度の一定の値を示す一方で、飽和度の低下に伴う顕著 な比抵抗の増加を示すことから、この領域における比抵抗は P 波速度よりも飽和度に対する感 度が高いと考えられる。



図 3.3-49 測定された P 波速度と比抵抗の関係

(4) 試料成形直後の比抵抗および P 波速度

人工的に電気伝導度を調整した水で飽和させた状態から飽和度を低下させながら実施した比 抵抗および弾性波測定に加え、試料形成直後にもその状況を評価することを目的として測定を 実施した。なお、今回測定に使用したコアは、採取直後にラップ等で保護し、さらに真空パック で外気に触れない状況で保存していたことから、その物性値はボーリングコア掘削直後の物性 値に近い値を有すると考えられる。

図 3.3-50 に、試料成形直後の比抵抗および P 波速度と飽和度の関係を示す。なお、同時に調整した水で飽和させたあとに測定した結果も併せて示してある。形成直後の試料は、全ての試料で飽和度は 97%以上であり、予備試験で実施した水中重量の測定結果から予測された通り飽和状態に近い状態であった。形成直後に測定した P 波速度は、電気伝導度を調整した水で一度

飽和させた後に測定した P 波速度と同じトレンド上に分布した。他方、試料成形直後の比抵抗 値はすべての試料において、一度電気伝導度を調整した水で飽和させた後に測定した値よりも 大きな値が測定されており、またその飽和度に対する傾向も大きく異なっている。



3.3.5 岩石モデルによる測定値のモデル化

測定した健岩部における比抵抗と P 波速度を関連付ける数式の導出を目的として、岩石モデ ルを測定データに適用することで飽和度と比抵抗および弾性波速度の関係を導出する。

(1) アーチ—の式による比抵抗のモデル化

岩石試料の比抵抗は、式 3.3-6 および式 3.3-7 に示される Archie の式 (Archie, 1942) および固液境界における伝導を考慮した以下の式でモデル化できる。

 $F = a\phi^{-m}$

式 3.3-7

ここで、 σ は岩石全体の電気伝導度、 σ_w は間隙流体の電気伝導度、Fはフォーメーションファ クタ、nは飽和指数、 Σ_s は表面伝導、 φ は空隙率、mは膠結係数を示す。ここで、式 3.3-6 の右 辺の第一項は空隙中の流体を流れる電流の電気伝導度を示し、第 2 項は空隙の固液境界を流れ る電流の電気伝導度を示しており、これらが並列に結合したモデルとなっている (Patnode and Wyllie, 1950)。式 3.3-6 に含まれる表面伝導 Σ_s に関して、間隙流体の電気伝導度が大きい場合 にはその寄与が小さくなり、その値が 1000 S/m 以上の場合は無視できる (高倉, 2009)。今回 試験に使用した水の電気伝導度は 1500 mS/m と比較的高い値であることから、表面伝導の項を 無視しモデル化した。

図 3.3-51 は、測定された飽和度と比抵抗の関係を式 3.3-6 を用いて試料毎にモデル化した結果で、図 3.3-52 は、全ての測定データを用いてモデル化した結果である。なお、近似は Powell

法を用いて行った(Powell, 1964)。また、表 3.3-22 に試料毎に近似した場合のフォーメーショ ンファクタおよび n の値を示す。また、全ての測定データを用いてモデル化した場合、F は 4.9 で n は 1.78 となった。



図 3.3-51 各試料に対して飽和度と比抵抗をアーチ—の式でモデル化した結果

			H- 4-1 1 - 3 4					
	T-1	T-2	C-1-1	C-1-2	C-2-1	C-2-2	C-3-1	C-3-2
F	4.61	4.99	4.82	5.26	4.72	5.04	4.73	4.91
n	1.94	2.29	1.61	1.37	1.73	1.53	2.04	1.68

表 3.3-22 試料毎のフォーメーションファクタとn



図 3.3-52 全試料から得られる全てのデータを用いて飽和度と比抵抗をアーチ—の式でモデル 化した結果

(2) Wyllie の式による P 波速度のモデル化

岩盤の P 波速度を近似するモデルの一つに Wyllie のモデルがある(Wyllie et al., 1956)。このモデルは、間隙中の液相および気相と固相を伝搬する P 波速度をそれぞれ並列に結合して岩盤の P 波速度を構成するモデルであり、式 3.3-8 で記述される。

式 3.3-8

$$\frac{1}{V_{n}} = \frac{1 - \phi}{V_{n,w}} + \frac{\phi S_{w}}{V_{n,w}} + \frac{\phi (1 - S_{w})}{V_{n,g}}$$

ここで、 V_p は岩石、 $V_{p,m}$ は岩石の固相、 $V_{p,w}$ は間隙中の液相、 $V_{p,a}$ は間隙中の気相の P 波速 度を示している。ここで、 $V_{p,w}$ を 1500 m/s、 $V_{p,a}$ を 331.45 m/s、 φ を物理試験により取得した 間隙率の平均値である 0.425 とし、Vp,m および Sw を未知数および変数として取得された岩石 の P 波速度と飽和度速度の関係をモデル化した。

図 3.3-53 は、 $V_{p,m} \varepsilon$ 1,000 m/s から 10,000 m/s まで変化させた場合に式 3.3-8 に基づいて 計算した P 波速度および測定値を示す。なお、 $V_{p,m}$ が 4,606 m/s のときに、計算によりモデル 化される P 波速度は測定値に最も近いものとなっている。Wyllie の式を用いて計算した P 波速 度は飽和度とともに上昇する傾向を示すものの、測定された P 波速度と比較して飽和度に対す る変化が大きく測定値とは大きく異なる傾向を示している。



図 3.3-53 測定データと Wyllie の式による P 波速度と飽和度の関係

(3) Gassman-Biot の式による弾性波速度のモデル化

弾性波速度のモデルとして、多孔質媒体論に基づいて弾性係数を計算しその値から P 波速度 および S 波速度を計算する Gassman-Biot のモデル(Biot, 1941; Gassmann, 1951)を用い てモデル化を行った。弾性波動方程式より岩石の P 波速度および S 波速度は以下の式で記述で きる。

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_t}}$$
 $\ensuremath{\vec{x}} 3.3-10$

ここで、K は岩石の体積弾性率、µ は岩石の剛性率である。岩石の体積弾性率 K は Biot の多 孔質媒体論に基づき以下の式で記述できる (Han and Batzle, 2004)。

$$K = K_{dry} + \frac{K_{min} \left(1 - \frac{K_{dry}}{K_{min}}\right)^2}{1 - \phi - \frac{K_{dry}}{K_{min}} + \phi \frac{K_{min}}{K_{fl}}}$$
 \implies 3.3-11

ここで、K_{dry}は岩石の排水条件における体積弾性率、K_{min}は岩石を構成する粒子の体積弾性 率、K_fは間隙流体の体積弾性率である。湿潤密度ρ_tは以下の式 3.3-12 から計算される。

また、Biot の多孔質媒体論では剛性率は飽和度に依存しないことが導かれる(Berryman, 1999)。Gassman-Biot の式を用いた弾性波速度のモデル化は、測定された S 波速度と式 3.3-
10を用いて剛性率を算出し、取得した剛性率および式 3.3-9を用いて測定された P 波速度をモデル化する体積弾性率を推定する手順で実施した。

(a) Gassman-Biot の式による S 波速度のモデル化

図 3.3-54 および図 3.3-55 に、式 3.3-10 および式 3.3-12 を用いて計算した S 波速度と測定 された S 波速度を示す。図 3.3-54 は、各試料の測定結果に対して S 波速度をモデル化した結 果で、図 3.3-55 は全試料から取得されたすべてのデータを用いて S 波速度をモデル化した結果 である。なお、計算に必要な間隙率および土粒子密度は、物理試験により取得された値を用い、 全てのデータを用いて近似する場合にはそれらの平均値を使用した。モデル化された S 波速度 は測定された S 波速度と同様に飽和度の低下に伴い上昇している。これは、式 3.3-10 および式 3.3-12 で示される通り、剛性率が飽和度に依存しない一方で飽和度の低下に伴い湿潤密度が低 下するためである。表 3.3-23 に S 波速度より推定された各試料の剛性率を示す。また、全デー タを用いて計算された剛性率は 1.70 GPa であった。これらの値は、岩石試験により取得されて いる既存の値と整合的である(山本ほか, 2004)。



図 3.3-54 各試料に対して測定された飽和度とS波速度の関係をモデル化した結果



図 3.3-55 全試料から測定されたデータを用いて飽和度とS波速度をモデル化した結果

	衣 5.5-25 ビアル 旧によ 外接足 C 10/2 日 武林の 阿 住牛								
	T-1	T-2	C-1-1	C-1-2	C-2-1	C-2-2	C-3-1	C-3-2	
μ [GPa]	1.66	1.59	1.64	1.70	1.79	1.74	1.73	1.74	

表 3.3-23 モデル化により推定された各試料の剛性率

(b) Gassman-Biot の式による P 波速度のモデル化

式 3.3-9、式 3.3-11 および式 3.3-12 を用いて測定された P 波速度のモデル化を行う。なお、 P 波速度のモデル化において、Mavko and Mukerji (1998)を参考に岩石試料中の水分の分布を 考慮したモデル化を実施した。図 3.3-56 は、モデル化する水分の分布を概念化した図である。 1 つ目のモデルは、空隙中の飽和度が一様であると仮定して弾性波速度をモデル化したもので、 Uniform model と呼ばれる。もう一方のモデルは、岩石中において完全に飽和している場所と 完全に乾燥している場所がまばらに存在していると仮定したモデルで、Patchy model と呼ばれ るものである。

Uniform model の計算は、ある飽和度を有する間隙流体の体積弾性率 K_{fl}を計算し、その値を 式 3.3-11 および式 3.3-9 に代入することで P 波速度をモデル化する。間隙流体の体積弾性率 K_{fl}は Domenico (1976)に基づき、式 3.3-13 から求めた。

$$\frac{1}{K_{fl}} = \frac{1 - S_w}{K_{air}} + \frac{S_w}{K_{water}}$$

式 3.3-13

ここで、Kair は空気の体積弾性率で 1.4×10⁻⁴ GPa、Kwater は水の体積弾性率で 2.2 GPa である。



図 3.3-56 岩盤内部の飽和度の分布の概念図。Uniform model (左)と Patchy model(右)

Patchy model を用いて計算する場合、式 3.3-11 を用いて間隙が完全に飽和した場合の岩石の体積弾性率 Ksatair および完全に乾燥している場合の岩石の体積弾性率 Ksatwater を各々算出し、それら体積弾性率を飽和度を考慮して合成することで岩石の代表的な体積弾性率を求め、式 3.3-9 より P 波速度を計算する。Pacthy model における体積弾性率の合成は、Hill (1963)に基づき式 3.3-14 より計算した。

$$\frac{1}{K + \frac{4}{3}\mu} = \frac{1 - S_w}{K_{sat-air} + \frac{4}{3}\mu} + \frac{S_w}{K_{sat-water} + \frac{4}{3}\mu}$$

$$\vec{x} \ 3.3-14$$

P 波速度のモデル化において、岩石の体積弾性率と岩石を構成する粒子の体積弾性率を同時 に推定した場合、安定的に推定できないため、宮澤ほか(2011)を参考に Biot-Willis 定数 α を 0.97 とし、これら 2 パラメータを関連付けて解析を実施した。

図 3.3-57 および図 3.3-58 に、Uniform model および Patchy model により計算した P 波速 度と測定された P 波速度を示す。図 3.3-57 は、各試料の測定結果に対して P 波速度をモデル 化した結果で、図 3.3-58 は全試料から取得されたすべてのデータを用いて P 波速度をモデル 化した結果である。計算に必要な間隙率および土粒子密度は、物理試験により取得された値を 用い、全てのデータを用いて近似する場合にはそれらの平均値を使用した。

Uniform model を使用してモデル化した場合、計算された P 波速度は飽和度が 100%付近で 急激に低下しそれ以降は飽和度の低下に伴い徐々に増加しており、測定結果とは大きく異なる 傾向を示す。他方 Patchy model を使用した場合、P 波速度は飽和度に応じて徐々に低下してお り、測定されたデータとよく一致している。なお、窪田ほか(2018)による声問層の P 波速度と 飽和度の関係は、Uniform model に近い傾向を示している。

表 3.3-24 に Patchy model による P 波速度のモデル化により推定された各試料の排水条件下 における体積弾性率を示す。また、全データを用いて計算された排水条件下における体積弾性 率は 1.17 GPa であり、これらの値は、岩石試験により取得されている既存の値と整合的である (山本ほか, 2004)。



図 3.3-57 測定データと各試料毎にモデル化した P 波速度と飽和度の関係



図 3.3-58 全試料から測定されたデータを用いてモデル化した P 波速度と飽和度の関係

							-	
	T-1	T-2	C-1-1	C-1-2	C-2-1	C-2-2	C-3-1	C-3-2
Kd [GPa]	1.38	1.21	1.00	1.01	1.26	1.17	1.12	1.24

表 3.3-24 モデル化により推定された各試料の体積弾性率

(4) 比抵抗と P 波速度の関係

3.3.5(1) および 3.3.5(3) に示した通り、比抵抗と飽和度の関係はアーチーの式で、P 波速 度と飽和度の関係は Gassman-Biot モデルの Patchy model により概ね記述することができた。 これら2つの式からP波速度と比抵抗を求めた結果を図 3.3-59 に示す。なお、パラメータの決定方法の違いよるモデル化への影響を考慮するため、飽和度と比抵抗、S波速度およびP波速度の関係からパラメータを推定した場合を Case1、図 3.3-59 に示す P波速度と比抵抗の関係および飽和度とS波速度、P波速度の関係から推定した場合を Case2、P波速度と比抵抗の関係および飽和度とS波速度の関係から推定した場合を Case3、全てのパラメータをP波速度と比抵抗の関係から推定した場合を Case4 として、モデル化を行った。表 3.3-25 に各ケースの解析条件を示す。また、表 3.3-26 に推定されたパラメータを示す。

Case1 から4 において、推定されるパラメータに違いはみられるものの、モデル化により計算される P 波速度と比抵抗の関係に大きな違いは認められなかった。また、全ての結果において比抵抗が8Q・m以上の領域では、モデル化により推定される P 波速度は測定された P 波速度を過小評価する結果となった。



	F	n	μ [GPa]	Kd [GPa]
Case 1	Resistivity/Saturation	Resistivity/Saturation	Vs/Saturation	Vp/Saturation
Case 2	Vp/Resistivity	Vp/Resistivity	Vs/Saturation	Vp/Saturation
Case 3	Vp/Resistivity	Vp/Resistivity	Vs/Saturation	Vp/Resistivity
Case 4	Vp/Resistivity	Vp/Resistivity	Vp/Resistivity	Vp/Resistivity

表 3.3-25 モデル化ケースと使用したデータ

	12 0.0-20	日7 へのより推定さ		
	\mathbf{F}	n	μ [GPa]	Kd [GPa]
Case 1	4.89	1.77	1.70	1.17
Case 2	5.15	1.49	1.70	1.17
Case 3	6.20	3.47	1.70	1.07
Case 4	5.28	2.15	1.20	1.56

表 3.3-26 各ケースのより推定されたパラメータ

(5) 考察・まとめ

室内試験により深度 350 m に位置する稚内層の健岩部の比抵抗および弾性波速度と飽和度の 関連を示すデータを取得した。また、取得したデータに対して岩石モデルを適用することで、測 定された比抵抗は Archie の式で、P 波速度は Gassman-Biot モデルの Patchy model により再 現することが出来た。

測定した P 波速度に関して、比抵抗が 10 Q・m を下回る場合に約 1800 m/s の速度を下回る ことはなかった。原位置において推定されている比抵抗構造において、10Ω・m を上回る領域 がほとんど存在しないことを考慮すると、弾性波速度が 1800 m/s を下回る領域は岩盤が損傷し ていると解釈することが可能である。岩石の比抵抗に関して、今回の測定では飽和度を変化さ せながら比抵抗を測定したが、岩石の比抵抗は飽和度以外に間隙流体中の電気伝導度にも依存 する。特に幌延の深度 350 m においては、岩石は 1500 mS/m 程度と非常に高い電気伝導度を 有する地下水を含有している。図 3.3-50 に示す通り、成形直後の岩石試料の比抵抗は、電気伝 導度を調整した水で飽和させた後に成形直後と同程度の飽和度に調整した場合よりも高い比抵 抗を示す一方で、P波速度はそれら各々の状況において同程度の値を示す。これは、式 3.3-5 お よび式 3.3-8 より間隙中の地下水の電気伝導度が原因であると考えられる。これらの試料を作 成したコアを採取したボーリング掘削では、電気伝導度が 20 mS/m と幌延の地下水よりも電気 伝導度の低い工事用水を使用しており、試料成形直後には掘削時に使用した工事用水の影響が 残っていると考えられる。このように、岩石の比抵抗は、岩石が含有する水質にも大きく影響さ れるため、比抵抗分布の解釈に際しては、掘削時や調査時に使用した水と地下水の電気伝導度 の違いの影響も考慮して解釈する必要がある。これらの考察から、幌延深地層研究センターの 深度 350 m において、比抵抗および P 波速度の関係から可能な解釈を図 3.3-60 にまとめる。

P 波速度のモデル化に関して、今回の測定において岩石の乾燥の状況を考慮すると、試料の 周辺から乾燥が進むため、試料外側では乾燥が進む一方で試料内部では飽和している部分が残 っていると考えられる。このような状況は、Uniform model で仮定している水分の分布状況よ りも Patchy model で仮定している状況に近いと考えられる。従って、計測されたデータは Patchy model により再現できたと考えられる。原位置で取得された結果に対してこれら岩石モ デルを用いた解釈を行う場合、坑道壁面から乾燥が進行することや亀裂中の透水性に不均質性 が存在することを考慮すると、Patchy model による P 波速度のモデル化は Uniform model よ りも適用性が高い岩石モデルと考えることができる。一方で、例えば幌延のように地下水から の脱ガス現象の影響等も考慮する必要がある場合には、空隙内に一様に気体が生じる場合も想 定されため Uniform model で仮定されている条件に近い状況となる可能性も予測される。岩石 内部の物理的な状況をモデル化した岩石モデルでは、こうした点を適宜切り替えてモデル化で きるため、状況に応じた解析や解釈が可能になるメリットがある。比抵抗に関して、Archie の 式により概ね測定された比抵抗を再現できた一方で、このモデルは Gassman-Biot によるモデ ル化のような間隙中の水分の分布等を考慮したモデルとなっていない。比抵抗のモデルに関し ても、例えば阿部ほか(2012)や小峯(1993)のように岩石の内部の状況を考慮したモデル化 を行うことにより、原位置の状況に応じた解析や解釈が可能となることが期待できる。物理探 査で取得できる解像度と岩盤内部の状況を考慮しながら岩盤物性をモデル化し、そのモデルを 物理探査結果の解釈に利用することで物理探査の高度化が期待できる。

異なる種類の物理探査が同一箇所で実施されている場合、各々の探査結果を別々に解析しそれらを比較しながら解釈するだけでなく、これらの調査結果を組み合わせて同時に解析するジョイント・インバージョンが適用可能である(図 3.3-61)。ジョイント・インバージョンでは、 単一の物理探査手法で生じうる逆解析結果の不確実性や逆解析時における解の非唯一性の問題

272

を低減できる(Vozoff and Jupp, 1975; Bobe et al., 2020)。この手法では、異なる物理探査手 法で取得される物性値を関連付けて解析する必要があるが、異なる種類の物性値の地下構造の 形状を似た形状にする Cross Gradient 法(例えば、Shi et al., 2017; Pak et al., 2017)や、異な る物性値の関連性を考慮する Petrophysical joint inversion 法(例えば、Gao et al., 2012; Sun and Li, 2017)により同時に解析することが可能である。EDZ の経時変化を対象とした調査で は、同一箇所で弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィが実施されていることや、今年 度の調査で P 波速度と比抵抗の関連性付けるデータが取得されている。従って、これらのデー タを利用したジョイント・インバージョンによる解析が可能であり、今後その適用により解析 手法の高精度化が期待できる。



ョン (右)

3.4 ボアホールシーリング試験

3.4.1 背景・目的・実施内容

(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、概要調査から精密調査にかけて掘削される地 上からのボーリング孔はそれ自体が地上へ直結する水みちとならないよう、適切な方法で閉塞 することが求められている(NUMO, 2021)。処分場の建設段階で坑道内からボーリング孔が掘 削される場合もあり、これらのボーリング孔が放射性核種の短絡経路となることや、地層処分 システムの安全性に影響を及ぼさないよう、適切な方法で閉塞することが求められると考えら れる。

諸外国においても、処分施設の封じ込めや保持特性を損なうことがないようにボーリング孔 を閉塞することが求められており(Luterkort et al., 2012)、特に、閉塞に用いられる材料の一 般的な要件として、低透水性や長期的な安定性などの項目が示されている(Chanplow, 2011)。 このような要件を満たす材料として、低透水性や膨潤特性、物質の吸着特性などを有するベン トナイトの使用が広く検討されており、閉塞する具体的な方法が検討・検証されてきている(例 えば、Pusch et al, 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 動水勾配が大きい地下環境において、ボーリング孔への地下水流入量が比較的多い中での作業 が想定されるため、高水圧、高湧水量条件下で閉塞が適用可能な技術が必要となる。しかしなが ら、諸外国を含め、ボーリング孔の閉塞に関する検討事例の多くが地上からのボーリング孔を 対象としたものであり、坑道内からのボーリング孔、特に、水平に近い向きのボーリング孔を対 象とした検討は十分ではない。以上のような状況を踏まえると、坑道内から水平に近い向きに 掘削されたボーリング孔の閉塞においては、既往のボーリング孔の閉塞に係る検討の成果を踏 まえつつ、日本の地質環境条件への適用可能な材料仕様および施工方法を検討することが重要 と考えられる。また、現在の日本のように、ボーリング孔の閉塞に関する具体的な設計要件およ び安全性の要件が明確に規定されていない状況においては、具体的に達成可能な性能を把握し た上で、複数の施工オプションを提示することは今後、ボーリング孔の閉塞方法を具体化して いく段階において重要な知見になると考えられる。

(2) 実施内容

3.4.1(1)に示す背景から、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する。

令和2年度は、海外の研究開発事例の文献調査によりボーリング孔の閉塞技術に係る考慮す べき事項や現状の課題点を抽出し整理した(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。 ベントナイトブロックによるボーリング孔の閉塞では、ブロックを作製する際に寸法や重量 を定めることが可能であることから、ブロックの挿入時にベントナイトの充填量や設置深度の 管理が容易にできることである。一方で、ボーリング孔内に地下水の流入がある場合には、挿入 時にベントナイトブロックと地下水が接触することにより、挿入途中での膨潤による閉塞やブ ロックの侵食や損傷などが懸念される。そのため、ベントナイトブロックは遮水性を有するコ ンテナ等に収納して、定置直前まで地下水と接触しない構造が必要になると考えられる。例え ば、ブロックを収納した密閉容器を設置場所まで輸送し、容器のふたを外してブロックをボー リング孔へと排出する方法が考えられる。

ベントナイトペレットによる方法では、個々のペレットの粒径が小さいため隙間の充填性や ボーリング孔の形状への追従性が高いことが利点として考えられる。一方で、ボーリング孔内 に地下水の流入がある場合には、ペレットの輸送時に地下水と接触することにより膨潤し、輸 送途中で孔壁に付着してブリッジを形成することで目的とする場所に充填できず、不完全に閉 塞してしまうことが懸念される。そこで、親水遅延の処理を施したペレットを用いて、ボーリン グ孔内に挿入した充填管に注水し、その水の流れによってペレットを輸送する方法が考えられ る。

令和3年度は、ベントナイトブロックを対象に、ボーリング孔の閉塞に係るブロックの特性 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。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。

3.4.2 ベントナイトブロックを対象とした室内試験

(1) 実施概要

室内試験を行う上で、閉塞対象とするボーリング孔や使用するベントナイトブロックについ てその条件を次のように設定した。

- ▶ 対象とするボーリング孔は、水平に近い向きに掘削した内径100 mm程度のボーリング 孔とする。
- ▶ ボーリング孔には、塩水系地下水が流入する。
- ▶ 充填するベントナイトにはクニゲルV1を使用する。
- ▶ 充填したベントナイトの透水係数は、膨潤してボーリング孔を閉塞した後に周辺の岩盤 と同程度の10⁻¹⁰ m/sの透水係数を確保するものとする。

室内試験においては、対象とするボーリング孔の内径に合わせて試験装置の内径を 100 mm とした。塩水系地下水としては、表 3.4-1 に示す幌延の地下施設の 250 m 調査坑道における地 下水組成を模擬した試験用水を使用した。試験では、ボーリング孔内に設置したベントナイト ブロックの膨潤の状況と膨潤後の閉塞性能を確認するために、膨潤状況の確認、透水試験、膨潤 圧測定および膨潤後のベントナイトの密度、含水比測定を実施した。上記のように、室内試験で は確認項目が複数あることからそれぞれの確認項目に対して試験装置とブロック供試体を用意 して試験を実施した。

Na ⁺	K+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Li+	Cl-
(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
1900	49	40	25	4.7	1920

表 3.4-1 250 m 調査坑道の地下水組成

(2) 実施内容

(a) 室内試験装置

室内試験装置は、試験体の膨潤状況が把握できるようにアクリル製とした。図 3.4-1 に室内 試験装置の概要図を示す。試験装置は、アクリルパイプの両端にフランジを取り付けることに より構築した。試験装置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(図 3.4-2)を用いて軸方向の内側の長さが 100 mm となるように調整した。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。

膨潤圧測定用の試験装置には、装置の上面側に土圧計を取り付けた。土圧計としては、小型圧 カセンサ(KYOWA 製、PGM-10KE)と超小型圧力計(東京測器製、PDA-1MPB)の2種類を 用いた。小型圧力センサは試験装置の上面に設置用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側の表面付近へと設置した(図 3.4-3)。図 3.4-4 に小型 圧力センサの取り付け概略図を示す。2 つの小型圧力センサはそれぞれのセンサの中心を 60 mm 離して設置した。また、超小型圧力計は計試験装置の内側に圧力計を貼付してリード線を フランジ部から試験装置の外側へ取り出す方法で設置した(図 3.4-5)。図 3.4-6 に超小型圧力 計の取り付け概略図を示す。超小型圧力計は4 つを試験装置の内側に貼付した。

透水試験用の試験装置には、膨潤したベントナイトと試験装置の境界面の密着性を高める目 的で試験装置内側表面にサンドペーパーを用いて界面処理を行った。



図 3.4-1 室内試験装置の概要図



ワイヤメッシュ(左)とスペーサ(右)(①) 試験装置端部のイメージ(②)
 図 3.4-2 スペーサ、ワイヤメッシュおよびフランジ



図 3.4-3 小型圧力センサの設置状況



図 3.4-4 小型圧力センサの取り付け概略図



図 3.4-5 超小型圧力計の設置状況



図 3.4-6 超小型圧力計の取り付け概略図

(b) 試験条件

室内試験に使用するベントナイトブロックはクニゲル V1 (クニミネ工業株式会社製)を直径 75 mm、高さ 100 mm、乾燥密度が 1.6 Mg/m³となるように締固めて作製したものを使用した。

室内試験では前述の通り、膨潤状況の確認、透水試験、膨潤圧測定および膨潤後のベントナイトの密度、含水比測定と複数の確認・測定項目があることからそれぞれの項目に対して1個または複数個の試験装置とブロック供試体を準備して試験を実施することとし、合計7個のブロック供試体を用いて試験を実施した。確認・測定項目と試験装置番号、ブロック供試体の緒元の対応を表 3.4-2 に示す。

膨潤状況の確認は目視確認を基本とし連続写真によりその状況を記録した。そのため、ブロック供試体 No.1 の試験装置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、試験装置の高さが 116 mm となっている。

膨潤圧測定では、ブロック供試体 No.2 と No.3 の 2 つを準備した。試験装置の内側に土圧計 を貼付したブロック供試体 No.3 の試験装置でリード線を試験装置の外側に取り出す際にスペ ーサが干渉したため、片方のスペーサを設置しておらず試験装置の高さが 108 mm となってい る。

密度・含水比測定用としてブロック供試体 No.4 と No.5 の 2 つを準備した。また、透水試験 用としては、ブロック供試体 No.6 と No.7 の 2 つを準備したが、No.6 については透水試験を実施せず密度・含水比測定用として用いた。

それぞれの試験装置の準備状況を図 3.4-7 に室内試験の実施状況を図 3.4-8 に示す。室内試 験はアクリル製の試験装置にベントナイトブロックを充填した後に、試験装置を水槽内に設置 して浸水させた。膨潤状況の確認と膨潤圧試験についてはベントナイトブロックが試験容器の 内側全体に十分に密着した状態を確認した時点で終了とし、72 日間継続した。

4+€++1		壮卑古々	, ,	ベントナイト	、ブロック		
供訊体No	確認・測定項目	表 直 向 さ (mm)	作製前含水比	平均高さ	平均直径	乾燥密度	備考
/# INU.		(11111)	(%)	(mm)	(mm)	(Mg/m^3)	
1	膨潤状況の確認	116	22.1	100.40	74.98	1.597	ワイヤメッシュおよびスペーサを設置していない
							・ + 下計 9 台・ 小刑 下力 センサ (KVOWA 制
2	膨潤圧測定	100	22.1	100.35	75.05	1.595	PGM-10KE)を試験装置上面に設置
							土圧計4台:超小型圧力計(東京測器製、PDA-
0	陆公田 广治山子	100	22.1	100.00		1 200	1MPB)を試験装置内壁に設置
3	膨润上測正	108	22.1	100.23	75.04	1.596	土圧計のリード線を試験装置外側へ取り出す
							ために、スペーサを設置していない
4	密度・含水比測定	100	22.2	100.60	75.03	1.591	
5	密度・含水比測定	100	22.2	100.53	75.03	1.592	
							試験装置内側表面を#320 のサンドペーパーで
6	透水試験	100	22.2	100.70	75.04	1.589	界面処理を実施
							透水試験は実施しせず密度・含水比測定を実施
7	添水試驗	100	<u> </u>	100.28	75.03	1 596	試験装置内側表面を#40 のサンドペーパーで
· ·	<u>人</u> 2/JN 时代词失	100	22.2	100.20	75.05	1.550	界面処理を実施

表 3.4-2 試験装置と確認・測定項目の対応



供試体 No.1 断面



供試体 No.2 断面



供試体 No.3 断面



供試体 No.6 上面___



供試体 No.1 上面



供試体 No.2 上面



供試体 No.3 上面



供試体 No.7 上面

図 3.4-7 試験装置の準備状況



図 3.4-8 室内試験の実施状況

(c) 膨潤状況の確認

浸水させたベントナイトブロックは、試験開始直後から徐々に膨潤していく様子が確認された。図 3.4-9 に装置断面からの膨潤状況を示す。装置断面で見た場合、試験開始後 15 日目には ほぼ周面全体まで膨潤している様子が確認されている。15 日目以降は装置断面の状況に大きな 変化はなかった。また断面の下側部分に隙間が確認されたが、時間経過とともに徐々に小さく なった。

図 3.4-10 に装置側面からの膨潤状況を示す。装置側面を見た場合、試験開始後 15 日目の段 階では装置上側まで膨潤していない状態であり、装置断面に比べ膨潤が進んでいない様子が確 認された。その後 21~30 日目頃には装置上側まで膨潤したが、一方でブロック上側に複数の亀 裂が確認された。その後も観察を続けたが、亀裂は試験終了の 72 日目まで消失することはなか った。また、亀裂は試験装置上側に集中しており、側面や底面で大きな亀裂は確認されなかった (図 3.4-11)。室内試験では装置内部に強制的な注水を行っておらず、両端のフランジに設けた 貫通孔周辺のベントナイトブロックが膨潤することにより貫通孔が塞がれると試験装置内部へ の試験用水の供給がなくなり、亀裂付近のベントナイトへの水の供給が不足しすることで膨潤 の進行が抑制されたと考えられる。



試験開始時



15 日目



5日目



25 日目





45 日目 試験終了時 図 3.4-9 ベントナイトブロックの膨潤状況(試験装置断面)



試験開始時



5日目



15 日目



29 日目





42 日目 試験終了時 図 3.4-10 ベントナイトブロックの膨潤状況(装置側面、装置上面)





試験装置側面 試験装置底面 試験装置底面 図 3.4-11 試験終了時のベントナイトブロックの膨潤状況(試験装置側面、底面)

(d) 膨潤圧測定

試験中の膨潤圧計測の結果を図 3.4-12 に示す。なお、試験容器 No.3 に取付けた土圧計のうち2 台は、試験中にセンサケーブル等への浸水が原因と考えられる挙動を示したため、試験結果から除外した(試験容器 No.3-1 および No3-3)。

試験中の膨潤圧は、試験開始後15日目頃から増加し始め、40日目頃には膨潤圧は0.014 MPa ~0.022 MPa となり、それ以降は増加の傾向が緩やかになった。試験終了時には膨潤圧は0.019 MPa~0.030 MPa であった。試験容器 No.3の上面の状況は、試験開始後15日目にはベントナイトブロックが土圧計受圧面付近まで膨潤しており、21日目頃に容器上面に密着した様子が確認された。また21日目にはブロック上側に複数の亀裂が生じており、試験終了まで亀裂が存在したままになっていた(図3.4-13)。

4 台の土圧計の違いを見た場合、最大で 0.01 MPa 程度の差はあるが、全体的な傾向に大きな 差はなく、土圧計の種類や取り付け方法の違い、計測箇所による明確な差は確認されなかった。









21 日目



51 日目 試験終了時 図 3.4-13 土圧計設置位置付近の状況(試験装置 No.3)

(e) 透水試験

透水試験の概用を図 3.4-14 に示す。透水試験は地盤工学会の基準(低透水性材料の透水試験 方法、JGS 0312-2018)に準じて実施した。ベントナイトの透水性が小さく、試験に長期間を要 することが想定されるため、試験の促進を目的としてコンプレッサを用いて加圧することで動 水勾配を高くした。透水試験には、浸水後 51 日目の試料(試験容器 No.7:図 3.4-15)を使用 した。試験はビュレット内水位を 1.3 m とし、動水勾配の確保のため、コンプレッサで 0.1 MPa 加圧した状態で実施した。

試験開始直後に、試験容器内の亀裂の一部が拡大するとともに、それ以外の亀裂が閉じる様子が確認された。水位変化では、試験開始後45分で73mmの水位低下(通水量は126.6mL)が確認された。拡大した亀裂が水みちになっており、透水試験が成立していないと判断し試験を中止した。

透水試験後、供試体の両端を閉鎖して経過観察をした。試験後2日頃には透水試験中に拡大 した亀裂が閉鎖する様子が確認され、時間とともに亀裂が小さくなる様子が確認された(図 3.4-16)。このため、試験後21日後に再度透水試験を実施した。

2回目の透水試験では、試験中の加圧を段階的に上げる方法とした。自然水頭の条件(ビュレットの水頭圧:1.31m)から開始してから、0.03 MPa、0.06 MPaと昇圧し、360時間(15日間)実施した時点で終了した。試験結果を表 3.4-3 に示す。

自然水頭条件および 0.03 MPa に加圧した状態では 48 時間で水位変化は確認できなかった。 0.06 MPa に加圧した状態では 24 時間で 1 mm 程度の水位変化が確認された。この状態で透水 係数を算出すると 1.8×10⁻¹¹ m/s~3.4×10⁻¹¹ m/s となった。これより、膨潤したベントナイトブ ロックは低透水性を有すると考えられる一方で、非常に低い動水勾配条件での試験結果である ことに留意する必要がある。



透水試験の概略図





透水試験の実施状況



透水試験前 図 3.4-15 透水試験前後のブロック供試体の状況



透水試験後





透水試験終了2日後 透水試験終了16日後図 3.4-16 透水試験後のブロック供試体の状況

加丁タル	経過時間	水位低下量	透水係数
加庄朱忤	(hour)	(mm)	(m/s)
水頭圧	24	0	-
(1.312 m)	48	0	-
水頭圧+30 kPa	24	0	-
	96	0	-
	24	1	3.44×10^{-11}
	48	2	3.44×10^{-11}
水頭圧+60 kPa	96	3	$2.58 imes 10^{-11}$
	168	5	$2.46 imes 10^{-11}$
	360	8	1.84×10^{-11}

表 3.4-3 透水試験の実施結果

(f) 密度·含水比測定

密度および含水比の計測は、試験終了後に容器内のブロック供試体から計測用試料を採取して実施した。以下に計測手順を記載する

1. ブロック供試体から一定体積の計測用試料を採取し重量を計測する

2. 重量を計測した試料を完全に乾燥させる。乾燥は 100°C で 24 時間程度とする。

3. 乾燥後の重量を計測する

4. 試料を再度乾燥させる。乾燥は 100°C で 24 時間程度とする。

5. 乾燥後の重量を計測する

上記 4,5 は試料が完全に乾燥したことを確認するために実施し、試料の重量変化がなくなる まで繰り返し実施する。

計測用試料の採取は、ブロック供試体の円周方向の上段、中段、下段の3か所で実施した(図 3.4-17)。計測用試料は内径19mmのSUSパイプをベントナイト供試体に深さ10cmまで挿 入して採取した。密度および含水比の計測は、計測用に準備したブロック供試体2個(No.4,5) に加え、膨潤圧測定用のブロック供試体(No.2,3)および透水試験用のブロック供試体(No.6, 7)のについても実施した。

ブロック供試体の密度および含水比の測定結果を表 3.4-4 に示す。なお膨潤圧計測用のブロック供試体から採取した試料(No.2 と No.3)は採取した試料の長さが 10 cm よりも短かかっ

たが、乾燥密度を算出する際に試料長さを 10 cm としたため、乾燥密度が低い値を示している と考えられる。

密度・含水比計測用としたブロック供試体(No.4, 5, 6)では測定した値に大きな差はみられ なかった。含水比を見るとブロック供試体の上段は100%~110%であったのに対し、中段と下 段では45%~64%と明確な違いがみられた。ブロック供試体が均一に膨潤した場合の乾燥密度 は0.9 Mg/m³となるが、試験後の乾燥密度は上段で0.7 Mg/m³程度であったのに対し、中段で 1.0 Mg/m³程度、下段で1.2 Mg/m³程度となった。この結果から、上段では膨潤が進んでおら ずブロック供試体内で乾燥密度が不均一な状態となっている。膨潤状況の観察においてブロッ ク供試体の上面に生じた亀裂が試験終了まで消失しなかった結果をあわせて考えると、上段の 乾燥密度が低い値を示していることは、試験用水の供給が不足し膨潤が十分に進行していない ためと考えられる。

透水試験に使用したブロック供試体(No.7)の含水比や乾燥密度についても、他の供試体の 測定結果と同様に上段で含水比が高く、乾燥密度が低い結果であった。

以上のように、水平なボーリング孔に設置したベントナイトブロックには膨潤の過程におい て、ブロック内の上下方向に密度差が生じることを確認した。



図 3.4-17 密度・含水比計測用試料の採取状況

ブロッカ供封住N	松馬佐里	含水比	湿潤密度	乾燥密度
ノロツク 供訊 (本 NO.	採取位直	(%)	(Mg/m^3)	(Mg/m^3)
/#≢₽/+ N_ 0	上段	91.1	1.06	0.56
供訊件 N0.2	中段	55.5	1.29	0.83
(膨伸)工例足用)	下段	45.0	1.26	0.87
仕封休 No 9	上段	95.8	1.32	0.67
(膨潤工測字田)	中段	63.9	1.07	0.65
	下段	54.5	1.07	0.69
	上段	110.0	1.44	0.69
供試体 No.4	中段	58.8	1.67	1.05
	下段	46.8	1.75	1.20
	上段	106.4	1.45	0.70
供試体 No.5	中段	55.4	1.65	1.06
	下段	45.6	1.75	1.21
供封体 Na C	上段	100.0	1.44	0.72
	中段	61.5	1.65	1.02
(超小武族を天旭とり)	下段	45.5	1.73	1.19
世計休 No 7	上段	98.0	1.46	0.74
(浜水 注 除 公)	中段	60.7	1.63	1.01
(迈小动歌位)	下段	47.0	1.67	1.14

表 3.4-4 室内試験における密度・含水比測定の結果

3.4.3 ベントナイトブロックを対象としたモックアップ試験

(1) 実施概要

モックアップ試験ではベントナイトブロックをボーリング孔内に設置する方法として、ブロ ックを収納したコンテナによる設置手順を具体化するとともに、その手順を室内の模擬ボーリ ング孔で確認した。

モックアップ試験においても閉塞対象とするボーリング孔や使用するベントナイトブロック について室内試験と同様の条件を設定した。設定した条件を再度、以下に示す。

- ▶ 対象とするボーリング孔は、水平に近い向きに掘削した内径100 mm程度のボーリング れとする。
- ▶ ボーリング孔には、塩水系地下水が流入する。
- ▶ 充填するベントナイトにはクニゲルV1を使用する。
- 充填したベントナイトの透水係数は、膨潤してボーリング孔を閉塞した後に周辺の岩盤 と同程度の10⁻¹⁰ m/sの透水係数を確保するものとする。

モックアップ試験では、設置手順の確認を目的に設置作業を繰り返し実施し3m分のベント ナイトブロックを模擬ボーリング孔に設置した。また、設置作業の際には、ボーリング孔へ地下 水が流入する状況を再現するために、模擬ボーリング孔へ注水を行いながら作業を行った。模 擬ボーリング孔への注水した試験用水は、室内試験と同様に表 3.4-5 に示す幌延の地下施設の 250m 調査坑道における地下水組成を模擬した試験用水を使用した。また、注水を継続しながら 模擬ボーリング孔に設置したベントナイトブロックの膨潤状況を確認するとともに、注水終了 後には閉塞性を確認するための加圧試験を実施した。全ての試験終了後には密度・含水比計測 を実施した。

Na ⁺	K+	Ca ²⁺	${ m Mg}^{2+}$	Li+	Cl-
(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
1900	49	40	25	4.7	1920

表 3.4-5 250 m 調査坑道の地下水組成

(2) 設置手順の検討

ベントナイトブロックの設置方法は、既往の検討(原子力機構,2019)を基に密閉可能なコン テナにベントナイトブロックを収納する方法を具体化した。図 3.4-18 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、ロッド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。この方法においては、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 3.4-18 コンテナを用いたベントナイトブロックの設置概念

(3) 実施内容

(a) 模擬ボーリング孔

モックアップ試験における模擬ボーリング孔は対象とするボーリング孔の内径にあわせて内 径を100 mm とし、3 m 分のベントナイトブロックを設置するために必要な模擬ボーリング孔 の長さとして4 m とした。試験では、ベントナイトブロック設置時の状況および設置後の膨潤 の状況を目視により確認するために、長さ1 m の透明塩化ビニル管を4本接続して模擬ボーリ ング孔を構築した。模擬ボーリング孔の概略図を図 3.4-19 に、模擬ボーリング孔の外観を図 3.4-20 に示す。透明塩化ビニル管は、外径が 114 mm、内径が 100.8 mm、長さが 1000 mm で あった。また、模擬ボーリング孔の両端は図 3.4-21 に示すように O リングシールを有するフ ランジ構造とした。

モックアップ試験時にはボーリング孔に存在する亀裂から地下水が流入する状況を再現する ため、模擬ボーリング孔の底部から注水可能な構造とした。そのため、模擬ボーリング孔の端部 の片側は継手接続部を有するブラインドフランジを使用した。



図 3.4-19 模擬ボーリング孔の概略図



図 3.4-20 模擬ボーリング孔の外観



図 3.4-21 端部閉塞用のブラインドフランジ

(b) ベントナイトブロック設置装置

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として、コンテナ方式の設置装置を 構築した。ベントナイトブロック設置装置の概略図を図 3.4-22 にブロック設置装置の外観を図 3.4-23 に示す。

設置装置は、内径 100 mm の模擬ボーリング孔で使用することから外径 90 mm とし、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。動作方法は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、 コンテナ内部のピストンを移動させることで、孔内にベントナイトブロックを押し出す形式で ある。

設置装置のコンテナ端部にフタを取付け、コンテナ内部に地下水が侵入しないように密閉構 造とした。使用するフタはベントナイトブロック設置時には孔内に残置となるため、ガラス製 とした。図 3.4-24 に示す通り、コンテナ端部の内側には O リングを取り付けて内部への水の 浸入を防ぐとともに、フタの固定にはガラスピンを使用した。実際の作業においては、ガラスピ ンの脱落を防ぐためにコンテナの外側にビニルテープを巻き付けるとともに、空気穴はシール テープを巻き付けた六角ボルトにより塞いだ。ピストン動作時にガラスピンを破断させること によりフタをボーリング孔へ排出する構造とした。

ブロック設置装置構築後に動作確認試験を実施した。動作確認試験の状況を図 3.4-25 に示す。 動作確認試験では樹脂製のフタおよびベントナイトブロックと同一寸法の樹脂製ダミーブロッ クを使用した。ピストン付きロッドを動作させる際の注水にはチャンバータンクとコンプレッ サを使用し、注水圧力 0.6 MPa 程度でガラスピンが破断することを確認した。また、ベントナ イトブロック 1m 分の排出に要した注水量は約 4.5 L であった。

動作確認後の試験装置には破損等は確認されなかった。破断したガラスピンの一部は設置装置内に残っていたが、ピン周辺の O リングや装置内部に傷等は確認されなかった。以上の結果から、構築したベントナイトブロック設置装置は正常に動作し、想定した通りにフタとダミーブロックを模擬ボーリング孔内に設置できることを確認した。



図 3.4-22 ブロック設置装置の概略図



図 3.4-23 ブロック設置装置の外観



設置装置端部内側の状況



ガラスフタとガラスピン



ガラスピンの設置状況 図 3.4-24



伏況 ガラスフタの設置完了状況 図 3.4-24 設置装置端部の状況



図 3.4-25 動作確認試験の状況

(c) ブロック供試体

モックアップ試験に用いるベントナイトブロックは、室内試験で使用したブロックと同様に クニゲル V1 を直径 75 mm、高さ 100 mm、乾燥密度 1.6 Mg/m³ となるように締固めて作製し たものを使用した。モックアップ試験では、3 m 分のベントナイトブロックを設置することを 計画していることからブロック供試体は 30 個作製した。モックアップ試験で用いたベントナイ トブロックの外観を図 3.4-26 に、緒元を表 3.4-6 に示す。



図 3.4-26 ベントナイトブロックの外観

<u> </u>				
供試体 No	作製前含水比	平均高さ	平均直径	乾燥密度
	(%)	(mm)	(mm)	(Mg/m^3)
11	22.2	100.38	75.03	1.595
12	22.2	100.45	75.03	1.593
13	22.2	100.48	75.03	1.592
14	22.5	100.18	75.03	1.594
15	22.5	100.30	75.05	1.589
16	22.5	100.30	75.04	1.590
17	22.5	100.53	75.02	1.588
18	22.5	100.30	75.03	1.591
19	22.5	100.33	75.03	1.590
20	22.5	100.23	75.02	1.593
21	22.6	100.13	75.05	1.591
22	22.6	100.13	74.99	1.595
23	22.6	100.15	75.05	1.591
24	22.6	100.18	75.02	1.593
25	22.6	100.15	75.00	1.595
26	22.6	100.28	75.08	1.588
27	22.6	100.28	75.08	1.589
28	22.6	100.15	75.08	1.591
29	22.6	100.23	75.07	1.591
30	22.6	100.33	75.08	1.588
31	22.6	100.30	75.08	1.589
32	22.6	100.28	75.04	1.590
33	22.6	100.35	75.03	1.588
34	22.4	100.23	75.07	1.591
35	22.4	100.25	75.03	1.593
36	22.4	100.33	75.03	1.592
37	22.4	100.23	75.09	1.591
38	22.4	100.23	75.08	1.591
39	22.4	100.33	75.08	1.590
40	22.4	100.30	75.08	1.591

表 3.4-6 モックアップ試験におけるベントナイトブロックの緒元

(d) モックアップ試験システム

モックアップ試験では、ボーリング孔内に地下水が流入する状況を再現するために、模擬ボ ーリング孔の孔底側から注水を行いながら試験を実施することとした。ベントナイトブロック の設置後の膨潤状況を確認する際に、試験期間が長期間に及ぶと注水する試験用水の量が非常 に多くなるため、排水された試験用水を循環して使用できるシステムを構築した。

試験用水循環システムの概略図を図 3.4-27 に示す。また、試験用水循環システムの整備状況 を図 3.4-28 に示す。模擬ボーリング孔への注水は模擬地下水用タンクに溜めてある試験用水を 注水用ポンプ (ダイヤフラムポンプ)を用いて行い、ポンプの脈動の影響を低減するためにポン プの下流側に水道ホースを接続した。水道ホースの下流側には圧力逃し弁を設置し、ベントナ イトブロックの膨潤により模擬ボーリング孔の閉塞が進行した際に、注水圧力が上昇して試験 装置が破損することを防止する構造とした。圧力逃し弁の設定圧力は模擬ボーリング孔の耐圧 性能等を考慮して 0.4 MPa とした。圧力逃し弁の下流側には流量計と圧力計を設置し、それぞ れの試験中の値はデータロガーにより測定した。模擬ボーリング孔の孔口側から排水された試 験用水は模擬地下水用タンクへ戻るように整備した。この模擬ボーリング孔からの排水にはベ ントナイトの細粒分が含まれ注水用ポンプにつまりが生じる可能性があることから注水用ポン プの上流側にカートリッジフィルタを接続して細粒分を取り除く構造とした。カートリッジフ ィルタを交換する際にも連続して注水できるように 2 台のフィルタを接続し、切り替えて使用 できる構成とした。



図 3.4-27 試験用水循環システムの概略図



注水用ポンプ、流量計、圧力計 図 3.4-28 試



流量計、圧力計 模擬地下水用タンクとカートリッジフィルタ 図 3.4-28 試験用水循環システムの整備状況

(e) ベントナイトブロック設置試験

構築したベントナイトブロック設置装置を用いて、ベントナイトブロックの設置手順の確認 を実施した。長さ4mの模擬ボーリング孔を水平下向き5度の傾斜をつけて設置した。ベント ナイトブロック設置試験の作業概要を図 3.4-29に示す。試験では、ボーリング孔に地下水の流 入がある環境下での作業を想定して、模擬ボーリング孔の孔底から試験用水を100 mL/minの 一定流量で注入しながら設置作業を行った。本試験では、3m分のベントナイトブロック 30 個 を設置することとして、ベントナイトブロックを 10 個ずつ設置する作業を3回繰り返して実施 した。1回の設置作業では設置装置を模擬ボーリング孔の設置箇所まで挿入した後に、ピストン 付きロッドの上部にチャンバータンクとコンプレッサを用いて注水することでベントナイトブ ロックを模擬ボーリング孔内に排出した。

ベントナイトブロックの設置状況を図 3.4-30 に示す。事前に実施した動作確認試験と同様に 1 m 分のベントナイトブロックをボーリング孔に排出することができた。また、排出時にはベ ントナイトブロックが地下水と接触するが、ベントナイトブロックは破損することなく設置で きた。設置後の状況を図 3.4-31 に示す。2 回目以降のベントナイトブロックの設置作業では、 前に設置したベントナイトブロックの上にフタが排出されるが、フタとベントナイトブロック の間に隙間が残ることなく設置されたことを確認した。設置作業時のベントナイトブロックの 排出に係る注水圧力および注水量を表 3.4-7 に示す。設置作業時の注水圧力および注水量はい ずれも 4.5L 程度であり事前の動作確認試験時とほぼ同じであった。以上のように、設置したベ ントナイトブロック作 業が正常に行われたと判断した。



図 3.4-29 ベントナイトブロック設置試験の作業概要



図 3.4-30 ベントナイトブロックの設置状況



図 3.4-31 ベントナイトブロック設置後の状況

	注水圧力	注水量
 	(MPa)	(L)
1回目	0.65	4.51
2 回目	0.65	4.47
3回目	0.65	4.54

表 3.4-7	ベントナイ	トブロッ	クの排出に係る	っ注水圧力および注水量
---------	-------	------	---------	-------------

(f) ベントナイトブロック設置後の膨潤状況の確認

ベントナイトブロックの設置後は試験孔底部からの試験用水の注水は継続して実施し、目視 による膨潤状況の観察を実施した。膨潤状況観察時の試験装置の状況を図 3.4-32 に示す。ベン トナイトブロックの設置後から時間経過とともに膨潤している様子が確認された。模擬ボーリ ング孔内のベントナイトブロックの状況を図 3.4-33~図 3.4-41 に示す。

ベントナイトブロックの模擬ボーリング孔内の周面方向への膨潤状況は、孔底部のベントナ

イトブロックでは試験開始後 10 日目に周面全体にほぼ密着した様子が確認されたが(図 3.4-33)、ブロック中間や上端側では模擬ボーリング孔とベントナイトブロックの間に隙間があ る状態であった。その後、試験開始後 16 日目にはブロック中間で(図 3.4-34)、18 日目にはブ ロック上端付近でもベントナイトブロックが膨潤して模擬ボーリング孔にほぼ密着した(図 3.4-35)。ベントナイトブロックの周面方向への膨潤に時間差が生じたのは、孔底部に近いベン トナイトブロックほど上部に位置するベントナイトブロックの重量が加わることで、模擬ボー リング孔の軸方向への膨潤が抑えられることにより周面方向への膨潤が進んだためと考えられ る。

ベントナイトブロックが周面全体にほぼ密着した後にベントナイトブロック表面に水みちが 形成されている様子が確認された。水みちは試験開始後 16 日目に孔底部付近で確認された後 (図 3.4-36)、時間の経過とともにブロック上端側でも確認されるようになり、22 日目~24 日 目にはブロック全体で確認された(図 3.4-37)。また、試験開始後 22 日目では孔底部付近付近 の水みちは幅 10 mm 程度であったが、30 日目には幅 5 mm 程度になっていた。

模擬ボーリング孔の軸方向への膨潤状況は、ブロック上端側では試験開始後から孔口側へ 徐々に膨潤してゆく様子が確認され、ベントナイトブロックが周面方向にほぼ密着した 18 日目 では試験開始から 40 mm 膨潤していた(図 3.4-38)。それ以降も膨潤が進む様子が確認され、 注水を終了した 35 日目では 75 mm となっていた。また、22 日目ごろからはブロック先端部が 崩れる様子が確認され、24 日目以降にはブロック上端よりも孔口側の模擬ボーリング孔にベン トナイトが沈殿している様子が確認された(図 3.4-39)。この沈殿したベントナイトには水みち を通して流出したものも含まれていると考えられる。一方、孔底部付近では模擬ボーリング孔 の軸方向への膨潤はほとんど確認されず、注水終了直前の試験開始後 32 日目では、膨潤したベ ントナイトによりガラスフタの周囲が隙間を埋めている様子が確認されたものの、孔底部のケ イ砂側への膨潤は確認できなかった(図 3.4-40)。ブロック中間部では、試験開始からの経過と ともに、ガラスフタと模擬ボーリング孔の隙間にベントナイトが膨潤していく様子が確認され た。注水終了直前の試験開始 32 日目では、隙間がおおよそ埋まっている様子が確認されたが、 一部は隙間が残っている状態であった(図 3.4-41)。



図 3.4-32 膨潤状況観察時の試験装置の状況





孔底部から 2m 付近孔底部付近図 3.4-33 モックアップ試験開始後 10 日目の状況





孔底部から 2m 付近孔底部付近図 3.4-34 モックアップ試験開始後 16 日目の状況





ブロック上端付近孔底部付近図 3.4-35 モックアップ試験開始後 18 日目の状況







試験開始 16 日目



試験開始 24 日目 図 3.4-36 孔底部付近の水みちの状況



試験開始 30 日目



ブロック上端付近 図 3.4-37 試験開始 24 日目の水みちの状況



孔底部から 2m 付近




試験開始 18 日目 試験開始 35 日目 図 3.4-38 ブロック上端の膨潤状況



図 3.4-39 模擬ボーリング孔孔口付近のベントナイトの沈殿状況



試験開始7日目



試験開始 32 日目

図 3.4-40 孔底部の膨潤状況





図 3.4-41 孔底部から1m付近の膨潤状況

(g) 注水圧力および注水流量測定

モックアップ試験時の注水圧力と注水流量を図 3.4-42 に示す。注水流量は試験開始時に 100 mL/min の一定流量に調整し、それ以降の流量調整は行わず試験を実施した。

モックアップ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低 下した。これはベントナイトブロックの膨潤が進んで模擬ボーリング孔内の水みちが狭くなっ たためと考えられる。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 となっていた。その後、注水流量がほぼ 0 mL/min となるとと もに、注水圧力が急激に上昇することにより、試験用水の注水系統の接続が外れて注水が終了 した。

注水終了前後の注水圧力と注水流量を図 3.4-43 に示す。注水終了の約 90 分前にカートリッ ジフィルタの切り替えを行った際にチューブ内に気泡が混入したため、注水を一度中断しチュ ーブを外して気泡を除去したうえで注水を再開した。注水再開後、注水圧力が 0.25 MPa~0.3 MPa まで上昇し、注水流量が 28 mL/min となった。その後、注水圧力が急激に上昇し、注水流 量がほぼ 0 mL/min に低下した後に注水系統の接続が外れたため模擬ボーリング孔への注水が 終了した。注水が終了した後も模擬ボーリング孔内の水位は維持されたままとなっており、ベ ントナイトブロックは地下水と接触した状態であった。図 3.4-44 に示すように、注水終了から 3 日が経過した試験開始 35 日目には、注水終了前にベントナイトブロック表面に存在した水み ちが膨潤により閉塞していることが確認された。







図 3.4-43 注水終了前後の注水圧力と注水流量



試験開始 32 日目(注水終了前)試験開始 35 日目(注水終了後)図 3.4-44 注水終了前後の水みちの状況(孔底部付近)

(h) 閉塞性確認試験

注水終了後の試験開始35日目には、膨潤により水みちが閉塞したことを確認し、模擬ボーリ ング孔がベントナイトブロックにより閉塞されたと考えられたことから、閉塞性を確認するた めの試験を実施した。試験では、模擬ボーリング孔底部の注水孔から模擬ボーリング孔内を加 圧し、その後の模擬ボーリング孔内の圧力の経時変化を測定することで閉塞性を確認した。

まず、閉塞性確認試験1として注水孔に接続したテストポンプにより加圧し、テストポンプ 側のバルブを速やかに閉じた後の模擬ボーリング孔内の圧力の経時変化を測定した。閉塞性確 認試験1の概略を図3.4-45に示す。テストポンプによる加圧は0.15 MPaとして、繰り返し3 回の試験を実施した。バルブを閉じた後の圧力の測定時間は、それぞれの試験で30分、60分 および17時間であった。

確認試験時の模擬ボーリング孔内圧力の経時変化を図 3.4・46 に示す。また、試験結果の一覧 を表 3.4・8 に示す。加圧後 30 分の圧力低下量を比較すると、1 回目の試験で 0.039 MPa、2 回 目の試験で 0.019 MPa、3 回目の試験で 0.010 MPa となり、試験の繰り返しとともに圧力低下 量が小さくなっていた。また、3 回目の試験では加圧後 17 時間経過後においても 0.127 MPa の 圧力が維持されていた。いずれの試験においても模擬ボーリング孔内の圧力が波打つ傾向がみ られるが、これは試験室内の空調の影響であると考えられ、空調停止後の 3 回目試験の経過時 間 100 分以降では確認されていない。この結果から、模擬ボーリング孔がベントナイトブロッ クの膨潤により閉塞していると考えられる。

続いて、ベントナイトブロックがどの程度の閉塞性能を有しているかを確認するために、閉 塞性確認試験 2 として、コンプレッサを用いて模擬ボーリング孔内を連続的に加圧する試験を 実施した。閉塞性確認試験 2 の概略を図 3.4-47 に示す。模擬ボーリング孔への加圧はマリオッ トタンクを用いて連続的に実施し、模擬ボーリング孔への注水量はマリオットタンクの重量変 化から確認した。模擬ボーリング孔内の圧力は、0.1 MPa から 0.1 MPa ずつ段階的に昇圧し、 各段階で圧力を 30 分程度維持した。また、試験時には孔口側を開放した状態にして排水量を測 定した。

図 3.4-48 に閉塞性確認試験 2 における注水圧力とマリオットタンク重量を、図 3.4-49 に注 水圧力と注水量を示す。注水量は各圧力段階の総量として示した。注水圧力 0.1 MPa での注水 量は 3 mL であり、0.2 MPa~0.5 MPa での注水量は 15 mL~29 mL であったが、これらの注 水量のほとんどは加圧直後の数分間の変化であり、昇圧後 5 分経過時点では注水量はほぼ 0 mL となっていた。また、注水圧力 0.5 MPa までは、孔口からの排水は確認されなかった。しかし、 注水圧力 0.6 MPa に昇圧した直後から注水量が増加するとともに、孔口からの排水が確認され た。その後も注水量が増加し続けたため、昇圧開始後 9 分で加圧を終了した。その間の注水量 は 145 mL であり、孔口からの排水量は 120 mL であった。なお、加圧終了後の試験孔内部の 圧力は 0.5 MPa 程度を維持していた。この時も孔口側の排水孔は開放状態であり、注水終了後 も模擬ボーリング孔はベントナイトブロックにより閉塞された状態を維持していたと考えられ る。

閉塞性確認試験2における模擬ボーリング孔内のベントナイトブロックの状況を図 3.4-50に 示す。注水圧力 0.3 MPa の段階で、孔底部から1m 程度の範囲において、ベントナイトブロッ クに複数の亀裂が確認された。その後、注水圧力を 0.4 MPa、0.5 MPa と上昇させると亀裂は 増加した。また、注水圧力 0.5 MPa では孔底部から2m付近のベントナイトブロックにも亀裂 が生じた。注水圧力 0.6 MPa では、孔底部から2m付近の亀裂が大きく拡大するとともにブロ ックの上端も孔口側に 15 mm 程度移動した様子が確認された。この時ベントナイトブロックに 生じた亀裂のうち、模擬ボーリング孔の断面方向に生じた亀裂は孔底部から1m および2m付 近であり、ベントナイトブロック設置時にガラスフタが残置された箇所であった。

ベントナイトブロックの状況から、注水圧力 0.3 MPa の段階で、孔底部から 1 m 程度までブ ロック内部に亀裂が生じ、注水圧力の増加とともにブロック上方に亀裂が伸展したと考えられ る。注水圧力 0.6 MPa の段階では、孔底部から 2 m 付近の亀裂に注水された水が滞留し、亀裂 よりも孔口側に位置するベントナイトブロック全体と押し出す結果となった。なお、計測され た排水量 120 mL は、ブロックの移動した 15 mm 分の体積である 117.8 mL とほぼ同じであっ た。このことからベントナイトブロックの上端付近には水みちとなる亀裂は生じておらず、ベ ントナイトブロックが押し上げられた分の水が排水されたものと考えられる。







	模擬ボーリング孔内圧力 (MPa)								
	加圧直後	30 分後	30 分後の圧力低下 量	試験終了時					
1回目	0.153	0.114	0.039	0.114					
2 回目	0.158	0.139	0.019	0.133					
3回目	0.159	0.150	0.010	0.127					

表 3.4-8 閉塞性確認試験1の試験結果



図 3.4-47 閉塞性確認試験2の概略



図 3.4-48 注水圧力とマリオットタンク重量(閉塞性確認試験 2)



図 3.4-49 注水圧力と注水量(コンプレッサを用いた閉塞性確認試験)



孔底部から1m付近(注水圧力0.3 MPa)







孔底部から2m付近(注水圧力0.5 MPa)
 孔底部から2m付近(注水圧力0.6 MPa)
 図 3.4-50 ベントナイトブロックの状況(閉塞性確認試験2)

(i) ベントナイトブロックの密度確認

閉塞性確認試験の終了後にベントナイトブロックから試料を採取し、乾燥密度および含水比 を測定した。測定は、3.4.2(2)(f)と同様の手順で実施した。

乾燥密度および含水比計測用の試料は、ベントナイトブロックの上端、中間、孔底部付近から 採取し(図 3.4-51)、各箇所で円周方向の上段、中段、下段の3か所の試料を採取した(図 3.4-52)。 試料は内径 19 mm の SUS パイプをベントナイトに深さ 10 cm まで挿入して採取した。 ベントナイト試料の乾燥密度および含水比の計測結果を表 3.4-9 に示す。ベントナイトブロ ックの上端と中間では、含水比はベントナイトブロック上端の上段試料では 154%、中間の上段 試料では 98%と、それぞれ中段試料と下段試料に対して高く値を示した。乾燥密度も上段試料 は約 0.5 Mg/m³~0.8 Mg/m³に対し中段試料、下段試料では 1.1 Mg/m³~1.3 Mg/m³となり、上 段試料のみ乾燥密度が低い値を示した。モックアップ試験の実施中にはベントナイトブロック の上段に近い部分に水みちが確認されており、ベントナイトが周面方向に膨潤した後は、注水 された試験用水は水みち部分のみに流れたため、ブロックの上段のみ含水比が高くなったと考 えられる。

一方で孔底部付近では上段試料と中段試料、下段試料での含水比や乾燥密度の差は小さくな る結果となった。ベントナイトブロック下段は注水孔から近く、ブロックの周面方向における 膨潤状況の差が小さいかったためと考えられる。また確認試験における注水の影響により孔底 部付近では、ベントナイトブロック上端および中間よりも膨潤が進行していたことも考えられ る。



ベントナイトブロック上端

ベントナイトブロック中間

孔底部付近

図 3.4-51 乾燥密度および含水比測定用試料の採取位置(黄色テープ付近)



図 3.4-52 乾燥密度および含水比測定用試料の採取状況

サンプリング位置		含水比 (%)	湿潤密度 (Mg/m ³)	乾燥密度
ベントナイトブロック	上段	154.1	1.34	0.53
	中段	66.1	1.89	1.14
	下段	48.8	1.81	1.22
ベントナイトブロック	上段	97.7	1.47	0.75
「シートノートノーック」	中段	47.3	1.58	1.07
山山	下段	39.0	1.80	1.29
	上段	87.5	1.53	0.82
孔底部付近	中段	54.8	1.62	1.05
	下段	58.6	1.64	1.03

表 3.4-9 モックアップ試験における密度・含水比測定結果

3.4.4 まとめ

令和3年度は、ベントナイトブロックをボーリング孔内に設置する方法として、ベントナイ トブロックを収納したコンテナによる設置手順を具体化するとともに、その手順を室内の模擬 ボーリング孔で確認した。

- ベントナイトブロックを収納した密閉可能なプローブをボーリング孔に挿入することにより、地下水が存在する場合においてもベントナイトブロックをボーリング孔に充填することが可能である。
- 入径100 mmのボーリング孔に対して、直径75 mm、長さ100 mm、乾燥密度1.6 Mg/m³ のベントナイトブロックを充填することで、ベントナイトブロックの膨潤によりボーリ ング孔が閉塞する見通しを得た。ただし、ボーリング孔内の地下水の流れ条件によって は閉塞までに必要な時間が異なるなど、形成された水みちが残存するおそれがあり、今 後の検討が必要である。
- ▶ ボーリング孔が閉塞確認は、注水圧力の経時変化を計測することで実施できる見通しを 得た。

実際の地下環境下に掘削されたボーリング孔を対象とした、より長距離でのベントナイトブ ロックの充填手順の確認と、岩盤を対象としたベントナイトブロックの閉塞性能の確認につい ては今後検討する必要がある。

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

3.5.1 背景·目的

本事業では、EDZ シーリングシステム構築のための材料としてベントナイト系材料を用いた 止水プラグ等の施工技術の実証的な技術開発を実施してきた。これにより、ベントナイト系材 料を用いた場合の EDZ シーリング技術については、施工時の品質管理手法も含め、概ね構築さ れたと考えている。

一方で、ベントナイト系材料を用いた EDZ シーリング技術では、EDZ を含む岩盤壁面にベントナイト系材料を施工するために必要な空間をあらかじめ掘削する必要があり、この時点で 最初の EDZ に対するさらなるダメージやその範囲の拡大なども懸念されているため、このよう な施工を要しない EDZ への注入型の止水技術についても検討する必要があった。

本研究開発項目では、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。

名古屋大学を中心とするグループは、長年にわたる自然界に存在するコンクリーションの研 究成果に基づき、それを人工的に作成する方法を開発し 2020 年に国際特許(国際公開番号:WO 2020/040243 AI)(図 3.5-1)として申請するとともに、名大を中心としたグループは人工的に コンクリーションを生じさせることが可能な充填材(コンクリーション化充填材、以降コンシ ードと称す)を開発(https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2021/10/post-91.html) し、JAEA と名古屋大学との共同研究(以下、先行研究と称す)として幌延深地層研究所深度 350 m 坑道周辺の EDZ を対象に充填試験などを実施した(図 3.5-2)。

この充填材は、粘土材料を用いたプラグで課題となるような上記デメリットを解消しうる他、 コンクリーションで生成された物質は非常に緻密・硬質でありかつ均質性が高く、自然界にお けるコンクリーションの事例から超長期的にも安定な物質であることが証明されていることか ら、地層処分の閉鎖システムに求められる超長期的な性能維持要件も満足するとともに、さら に以下のようなメリットも考えられる。

- ・堆積軟岩のような比較的力学的な強度・変形特性が低い岩盤においては、EDZのように損 傷等により力学的物性が低下した状態を初期状態の岩盤と同等以上に回復させられる可能 性があり、坑道の埋め戻し材等への周辺岩盤の超長期的な変形(クリープ等)の影響を低減 もしくは無視しえる程度にできる可能性があること
- ・任意の場所に充填しコンクリーションを生成できるため、EDZのみならず規模の大きい水みちや処分場近傍で移行経路となりえる場所に充填することにより、天然バリア中の放射性物質の移行抑制効果が期待でき、かつ、コンクリーションは化学反応であるが非常に短期間に生じるため、地層処分システムの安全・安心感の醸成にも貢献できる可能性があること

このように、コンシードは、地層処分システムの安全確保の観点から様々なメリットが期待 できる材料である一方、実際の地質環境下で EDZ シーリングの観点での適用性は未知の状況で あり、実施工時に必要なコンシードの物性等に関する情報なども不足している。このため、本事 業の中で、ベントナイト系材料の代替材料としての基礎的な検討を令和3年度から2か年で実 施することとした。

なお、以降の記載内容の中で「受託外」となっているものは、名古屋大学と中部電力との共同 研究で取得されたデータをご提供いただいたものであり、謝意とともにここに記しておく。



*図は、開示された国際特許出願資料(国際公開番号W 2020/040243 AI)より転載。文章については同資料から引用しつつ一部加筆・修正

図 3.5-1 コンシードに係る基礎的研究の情報



図 3.5-2 先行研究における試験の状況(幌延深地層研究所深度 350 m 試験坑道 5 内)

3.5.2 実施方法

コンシードは開発されて間もない材料であること、2か年で EDZ シーリング材料としての適 用性を概ね把握するという観点から、以下のような形で進めることとした。

- •2か年の短期間で実際の地質環境に対する適用性を検討するため、地質環境の状態が概ね 把握できている先行研究を実施しているサイト、すなわち幌延の深度350mに掘削され ている試験坑道5を試験場所とする。
- ・本事業で別に実施している EDZ シーリング試験と比較できるような試験を実施するとともに、今後この材料を用いる地下の岩盤を対象とした種々の設計施工を念頭におき、土木工学で標準的な要素試験を実施し、基礎的なデータを取得する。
- 上記を踏まえた、2か年の実施内容を以下のように設定し、検討を進めることとした。

【令和3年度】

幌延深度 350 m 試験坑道内からボーリング掘削、原位置岩盤の EDZ の透水試験(初期値)・ 充填材注入および充填材の基礎物性試験

【令和4年度】

EDZ の透水試験(シーリング効果の把握)および充填材注入による強度回復等に関する検討

令和3年度の原位置試験の概要を図3.5-3に示す。本事業内でベントナイト系材料を用いて 実施しているEDZシーリング試験は、床盤および側壁部にスリットを掘削した上で、ベントナ イト系材料の施工(ベントナイトペレット充填や吹付けによる施工)を実施している。先行研究 では、側壁部のEDZを対象として試験を実施していたことや、完全に飽和している状況下での 注入状況の把握が重要と考え、底盤部からボーリング孔を掘削して注入することとした。なお、 本事業で実施してきた底盤部のEDZシーリング試験では、円形のスリットの中心に掘削した試 験孔で透水試験を実施することにより、ベントナイト系材料の止水効果を把握していることか ら、同様の評価が可能となるようセンター孔と注入孔を配置した。注入孔の孔間距離は、名古屋 大学を中心としたグループの検討結果から、コンクリーション化により2か年で注入孔間の透 水部分を閉塞する可能性がある距離としている。



図 3.5-3 原位置試験イメージ

原位置試験では、注入孔、センター孔の掘削・コア採取とセンター孔における EDZ の初期透 水係数の測定の他、注入前の BTV 観察も実施し、次年度にコンクリーション化が原位置岩盤中 で伸展している状況の把握も行えるようにした。今回の試験では、先行研究と異なり表 3.5-1 の 材料を混合したコンシードを水没下のボーリング孔に注入するため、充填を確実に行う観点か ら先行研究よりも粘性を下げた配合としている。なお、コンシードの作成・注入作業は受託外で 実施した。

品名	用途および形態	メーカー 型番
硬化性樹脂	充填材(ベース材)	積水化学工業社
イオン放出材料	無機塩(2種類)	ナカライデスク

表 3.5-1 コンクリーション化充填材の仕様

以下、ボーリング孔掘削、透水試験等で用いた使用機材の仕様を表 3.5-2~表 3.5-4 に示す。 なお、定圧での透水試験が実施できなかった場合の透水性の評価や、コンシード注入後の硬化 に伴う発熱による影響を見るためのモニタリングも実施した。使用した装置の仕様を表 3.5-6 に示す。

 資機材名
 メーカー,等

 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

 ハンドミキサー
 日立工期 LM1 22000

 セメント
 太平洋セメント 普通ポルトランドセメント

表 3.5-2 ボーリング孔掘削で使用する機材一覧表

表 3.5-3 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	ODS-Scope
メーカー	レアックス
プローブ孔径	$\phi 26 \text{ mm}$
防水圧	20 気圧
照明	白色 LED 照明
適用口径	$\phi 30 \text{ mm} \sim \phi 60 \text{ mm}$
ナわ山力	展開画像プリント
土な山刀	不連続面一覧表

品名	用途,等	メーカー型番				
フタティックガン	(250 ∞ × 2)	POWERPUSH7000				
	电朝八 (250 cc ~ 2)	(米国メーカー製)				
スタティックノズル	スタティックミキサー	Ratio-Pak 社製 MC13-32				
ノブル田学ナット		Ratio-Pak 社製専用ミキサー取り付ナット				
		RN 型				
カートリッジ,	$950 \text{ as } \times 9 / \text{tr} \text{ w}$	Patio Dala				
ピストン, キャップ	250 CC × 2/ E 9 F					
占上增投燃	エーター デ 増 坪 烨 100 V	AXEL 高速撹拌機				
早上19月1111波	1.10 V 1.10111 100 V	3000 rpm ST-200				
片面離型	<i>悼 65</i> 0×1 m	ニッパ(株) PET-50×1-V0				
PET フィルム	111 1 × 060 田平	(シリコン系離型剤)				
サミット缶	$\Phi50 imes100~{ m mm}$	住商セメント サミット缶 SC5×10				
離型スプレー	管内面離型剤	信越化学工業 KF965SP				
卓上計量器	電池式	AND HT-5000				
ゴム硬度計		テクロック GS-719G タイプA				

表 3.5-4 注入用コンシード作製の使用機材一覧表(受託外)

表 3.5-5 透水試験の使用機材、材料諸元一覧表

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 材質・ステンレス	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-SS2A 測定範囲:0~2 L/min 精度:±1%FS	キーエンス社製
圧力計 (UNIK5000 シリーズ)	型式:PMP5033-TB-A3-CA-H0-PF 測定範囲:0~2 MPa 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 (IR シリーズ)	型式:IR1020-01BG-R 設定圧力範囲:0.01 MPa~0.8 MPa 設定感度:±0.2%FS	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
スーパーエアコンプレッサ	型式:AK-HH1250E2 エアータンク容量:27 L 圧力制御最大値:4.4 MPa	マックス社製

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 ↓38 mm, ラバー長 70 mm 材質:ステンレス	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-SS2A 測定範囲:0~200 ml/min 精度:±1%FS	キーエンス社製
大気圧補正用センサ (S&DL mini バロメータ)	型式:model-4900 測定範囲:1.5 m 精度:±5 mm	応用地質社製
絶対圧力水位計 (S&DL mini)	型式: Model-4900 (水温計含む) 測定範囲: 0~9 m (水頭換算) 精度: ±0.1%FS	応用地質社製
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 3.5-6 モニタリングの使用機材

充填材の基礎物性試験は、今回の注入試験で用いるコンシードを使い、実際の設計・施工に資するため土木工学で標準的なサイズの供試体(Φ5 cm×高さ 10 cm)を作成し、ベースとなる弾性波速度(P,S 波)、弾性係数、強度特性等を把握するための室内試験を実施した。室内試験で用いた装置類の仕様を表 3.5-7 に、供試体の作成方法等を図 3.5-4 に示す

メーカー・型番 試験 主な仕様 インストロン・ジャ 一軸圧縮試験 最大荷重容量 100 kN,最少荷重レンジ 1 N パン社製 MODEL 試験速度範囲 0.005~1000 mm/min 圧裂引張試験 1185・トランスミッタ部 応用地質株式会社 振動子駆動パルス幅 $6\mu \sec \pm 2\mu \sec$ 製 ・レシーバー部 ソニックビュアー 利得 1, 2, 5, 10, 50, 100, 200 倍 弹性波速度測定 SX 周波数帯域 下限值 10kHz±2kHz, 上限值 1000kHz±200kHz 振動子 ローパスフィルター fc=200±40kHz, 1000±200 k Hz OYO P-500K サンプルレート 50, 100, 200m, 500, 1000, 2000nsec OYO S-100K 振動子 P波 500Hz, S波 100Hz

表 3.5-7 室内物性試験で使用した機器



a)硬化性樹脂材料とイオン放出材料の攪拌状況



c)サミット缶への材料充填状況 図 3.5-4



b)供試体(上:硬化性樹脂のみ,下:コンシード)



料充填状況 d)サミット缶からの取り出し状況 図 3.5-4 室内試験用供試体の作成状況

3.5.3 位置試験および室内試験結果

(1) 原位置試験

①ボーリング孔掘削および地質観察、BTV 観察

図 3.5-5、図 3.5-6 に各ボーリング孔の掘削位置を示す。ボーリング掘削長は、EDZ を対象 とするためセンター孔は 1m、注入孔は 1.5m とし、試験坑道 5 掘削時の坑壁地質観察結果を参 照しこれらのボーリング孔に規模の大きい不連続構造が含まれる可能性が少ない場所を選定し た。また、坑道底盤はインバートが施工されており、底盤直下には掘削ズリ等が存在していたた め、掘削後の試験や注入作業に支障がないようその部分をフルホールセメンチングした後、ボ ーリング孔掘削を進めた。なお、ボーリング孔掘削は、原位置岩盤中の EDZ の透水性を正確に 把握するため、最初にセンター孔を掘削し、EDZ の透水試験を実施したのち、8 本の注入孔を 掘削する手順で実施した。

注入孔含め全孔で実施した BTV 観察結果を図 3.5-7~図 3.5-9 に示す。図 3.5-7 から、各孔 でモニター孔と同じ 1m 区間内で観察できた割れ目の本数は、10本前後で大きな差はない。 また、図 3.5-8 のトレース図や図 3.5-9 シュミットネットの投影図を見ると、センター孔含め 卓越方向は N50W40NE 前後に集中しており、孔別に差はない。坑道周辺部で最大化する接線 方向の応力は坑道の形状に沿った形で作用方向が変化するため、この割れ目分布からはこの応 力のみが原位置岩盤中の割れ目の形成に関与した可能性は小さいと考えられる。

図 3.5-10 に採取したコアの写真を示すが、最初に掘削したセンター孔のコアで見られる割れ 目の分布状況等は BTV のトレース図と同様の割れ目分布と類似するが、各注入孔のそれは原位 置の割れ目分布に比べ著しく破砕している部分が多い。

これらのことから、コアで観察された割れ目は、試験坑道5を掘削した際の応力集中等により、堆積岩中の潜在的な弱面である層理面が受けていたダメージが、非常に狭い範囲に多数の ボーリング孔を掘削したことなどにより拡大・分離したと想定され、原位置岩盤中の EDZ のダ メージも同様に拡大した可能性が高いと考えられる。





図 3.5-5 試験坑道 5 坑口側枝坑内におけ るボーリング孔の位置

図 3.5-6 各ボーリング孔の位置関係と孔名 (中心モニター孔および No.1~No.8 孔)

		No.1孔
No.5孔	1	
No. 記録深度 走向模斜 区分 開口量 形状 状態 備考		1 0.480 NGW27NE BLD 0 7/>
1 0.436 NS7WS7NE R.H.D 0 72->	8	2 0.511 NOSW22NE MIR.II 0 X777 3 0.605 NOSW22NE MICHINE 1 7/2-2
2 0.467 NIBEJ7N NR.B 0 7V-2 3 0.550 N60W285 R.L.B 0 7V-2	50mm (I)	4 0.701 N45W40NE 第九日 0 71-2
4 0.555 NOWLEN NAL 0 70-2		6 0.768 N66W54N 第九日 0 ブレーン
	E E E E E E E E E E E E E E E E E E E	7 0.850 PMPM.0ME 単化目 0 パレン 8 0.860 N27W44E 単れ目 0 プレン
9 0.824 N29W33E 第九日 0 75->	3	10 0.952 N42W4NE RAI 0 7/->
11 1.004 N54W52NE 第九日 0 7シーン 12 1.073 N554E 第九日 0 スキップ	7	11 1.000 NORWONE 11.11 0 20-2
13 1.100 N71W30N 創れ目 0 ステップ 14 1.174 N71W32N 創れ目 0 ブレーン	○	13 1371 BRANKORE MILERIA 1 71-7 14 1244 R42W41NE RALI 0 71-7
15 1.241 N22W22E 朝れ日 0 プレーン 16 1.269 N71W23N 朝れ日 0 プレーン	() $() $ $() $ 3	15 1.322 NBEWSJN 利化目 0 ヨーフ 16 1.339 N43ES0NW 被辞紙 0 プレーン 上間
17 1.306 N33W44NE 例れ目 0 プレーン 18 1.333 N30W40E 例れ目 0 プレーン 19 1.435 N30W40E 例れ目 0 プレーン		17 1.445 ND4E30HW 報幹部 0 71> 下重 N.a. 2.72
	中心モニター孔	NO.25L
		No. 記録深度 走向模斜 区分 開口量 形状 状態 儀寺
1 0.500 N4790059 10.77 (mm) 19-00 00.19 11 1		1 0.464 N54W25NE 単れ目 0 7レーン 2 0.478 N23W23NE 単れ目 0 3ープ
2 0.514 NETWISIN R.I.B 0 8-7 3 0.508 NETWISIN R.I.B 0 72-2	() ⁶ ().	3 0.480 N32W30NE #R.B 0 71
4 0.728 N4W46NE R.B. 0 71-> 5 0.768 N4W62NE R.B. 0 71->	\bigcirc \bigcirc 4	5 0.572 N60W49N 第れ目 0 7レーン 波生期れ目付援 5 0.671 N50W49N 第れ目 0 7レーン 波生期れ目付援
6 0.808 N25944H 単九目 0 ブレーン 7 0.827 N339445NE 単九目 0 ブレーン	5	
8 0.901 N5W22E 単れ目 0 プレーン 9 0.945 N41W32NE 単れ目 0 プレーン	5	9 0.763 N76642N MAL
10 0.977 N52W3ENE 単れ目 0 プレーン 11 0.996 N32W37NE 第れ目 0 プレーン		10 0.018 NEUWORN 第八日 0 7レーン 11 0.849 NEUWORN 第九日 0 7レーン
12 1.085 NSW52E 用れ目 0 プレーン 13 1.145 NSSW17NE 用れ目 0 プレーン		12 0314 NSTWARE RAI 0 72-2
14 1.100 NGW23N 97.0 0 75-2 15 1.217 N30W31NE 97.0 0 75-3		14 1.090 N40W42NE 第九日 0 7レーン 15 1.184 N42W4CNE 第九日 0 7レーン
10 1200 NOWLE REAL 0 70-7		16 1255 N22W1E MR.II 0 71-5 17 1346 N32W12NE MR.II 0 71-5
19 1.250 NGM42E EAB 0 72-2	中 シェー クーブ	18 1.374 NS4W39NE 第15日 0 71> 19 1.412 NEWWEN 第15日 0 71> 派生新れ目付援
21 1.482 N19E44W MR.B 0 75-5	中心モーターれ	20 1.473 N28E37W 接待部 0 カーブ 上間 21 1.512 N41E42NW 植谷部 0 アレーン 下面
No.7孔	No 記録深度 走向倾斜 区分 開口量 彩纹 纹袍 備表	No.3孔
No. 記録要度 (m) 走向傾斜 区分 間口量 (mm) 形状 状態 備考	(m) (mm) (mm)	No. 記録深度 走向倾斜 区分 開口量 彩纹 纹钢 爆合
1 0.518 N37W5NE 第10月1日 2 プレーン 2 0.579 N43W45NE 第15月 0 プレーン	2 D500 NORWONE #10 0 70-2	(m) more interesting the second secon
2 0.755 MASASSANE MICHIER 1 70-5	* ·····	1 0.431 M62W42N 第れ目 0 7レン
4 0.612 N52W3INE 第4日 0 7レーシ	3 0.587 N52W56NE 新九田 0 プレーン 4 0.679 N51W32NE 新九田 0 プレーン	1 0.431 M2W42N R.R.B 0 71> 2 0.471 M5W44HE R.R.B 0 71> 3 0.575 M2H41E R.R.B 0 71>
	3 0.587 HOXWORE 単九目 0 ブレーン 4 0.879 HS1WG2NE 単九目 0 ブレーン 5 0.722 HS3WHE 単九目 0 ブレーン	10 0431 M2W42N 新九日 0 7レーン 2 0471 N3994965 新九日 0 7レーン 2 0471 N3994965 新九日 0 7レーン 4 0552 N1997165 新九日 1 7レーン 4 0552 N1997165 新九日 1 7レーン
	3 0.547 N52W60KE 単九目 0 71-> 4 0.79 N67K25K 単九目 0 71-> 5 0.72 N67W61KE 秋九目 0 71-> 6 0.644 N17921E 秋九目 0 71-> 7 0.69 N67W61KE 秋九目 0 71-> 7 0.69 N67W61KE 秋九日 0 71->	1 0.611 ΝΕΧΝΕΙΣ 0 70-> 2 0.611 ΝΕΧΝΕΙΣ 0 70-> 3 0.315 ΝΕΥΚΗΕ ΝΕΛΒ 0 70-> 4 0.332 ΝΕΥΚΗΕ ΝΕΛΒ 0 70-> 5 0.765 ΝΕΥΚΗΕ ΝΕΛΒ 0 70-> 5 0.765 ΝΕΥΚΗΕ ΝΕΛΒ 0 70-> 6 0.764 ΝΕΛΗΕ ΝΕΛ 0 70->
4 0.312 NEWHIN ■ R.E.B. 6 7/-> 5 0.46 NEWHIN ■ R.E.B. 6 7/-> 6 0.465 NUMMEN ■ R.E.B. 6 7/-> 0 0.465 NUMMEN ■ R.E.B. 0 7/-> 0 0.465 NUMMENT ■ R.E.B. 0 7/-> 0 0.467 NUMMENT ■ R.B. 0 7/-> 0 1.467 NUMMENT ■ R.B. 0 7/-> 0 1.467 NUMENT ■ R.B. 0 7/->	3 0.547 0539908 ● ■ FAB 0 75-2 4 0.579 N5190291 ● ■ FAB 0 75-2 5 0.722 N53941NE ■ FAB 0 75-2 6 0.644 N19931E ■ FAB 0 75-2 7 0.440 N19941N ■ FAB 0 75-2 8 0.447 N19941N ■ FAB 0 75-2 8 0.447 N19941N ■ FAB 0 75-2	
4 64 64 74 84 9 9 77 5 542 MARCH 61 9 77 1 7 543 MARCH 61 9 77 1 7 543 MARCH 61 8 77 1 9 543 MARCH 61 8 77 1 9 142 MARCH 61 8 77 1 10 102 MAR 61 8 77 1	3 0.547 0539500E 0714日 0 71-2 4 0.079 N5195050E 0714 072-2 5 0.722 N5594410E 0714-7 5 0.722 N5594410E 0714-7 7 0.469 N779721E 0714-7 8 0.947 N779721E 0714-7 8 0.947 N779721E 071-2 8 0.947 N779721E 071-2 8 0.947 N779721E 071-2	
4 64 64 74 84 8 9 772 5 646 WARNER 61 6 772 1 5 648 WARNER 61 6 772 1	3 0.887 M379698 ₩7.88 0 72-> 4 0.079 M3782984 ₩7.88 0 72-> 5 0.722 M378498 ₩7.88 0 72-> 7 0.864 M378718 ₩7.88 0 72-> 8 0.967 M3792985 ₩7.8 0 72-> 1 /81	
4 6 617 KEA2 6 7/27 5 548 WANNER R.B. 6 7/27 6 5493 WANNER R.B. 6 7/27 5 1612 N.TWER R.B. 6 7/27 10 162 N.TWER R.B. 6 7/27 11 124 W.TWER R.B. 6 7/27 11 124 W.TWER R.B. 6 7/27 11 124 W.TWER R.B. 7 7 24 R.B. 1919 12 123 N.WER R.B. 7 7 24 R.B. 1919 13 134 WARK R.B. 7 7 24 R.B. 1918	3 0.847 05/19696 01 01 0 70-2 5 0.722 NOTICENE 10 77-2 5 0.722 NOTICENE 10 70-2 5 0.724 NTYREE 10 70-2 7 0.440 NTYREE 15.5 0 70-2 7 0.440 NOTICENE 15.5 0 70-2 8 0.447 NOTICENE 15.5 0 70-2 15.5 0 70-	
4 6 610 000	3 0.567 05795056 010 010 010 010 010 010 010 010 010 01	1 641 MCMM F.R.B 6 7/-2 3 535 NURGE F.R.B 6 7/-2 3 535 NURGE F.R.B 6 7/-2 4 535 NURGE F.R.B 6 7/-2 5 535 NURGE F.R.B 6 7/-2 6 538 MURGES F.R.B 6 7/-2 6 538 MURGES F.R.B 6 7/-2 6 538 MURGES F.R.B 6 7/-2 1 542 MURGES F.R.B 6 7/-2 1 542 MURGES F.R.B 6 7/-2 1 112 MURGES F.R.B 6 7/-2 13 112 MURGES F.R.B 6 7/-2 13 112 MURGES F.R.B 6 7/-2 13 112 MURGES F.R.B 6 7/-2
4 6 6 7 7 7 7	3 0.587 0559508 単れ目 6 70-2 4 0.679 M5100000 単れ目 0 70-2 5 0.722 M5004106 単れ目 0 70-2 6 0.644 N170216 単れ目 0 70-2 7 0.640 M119410 単れ目 0 70-2 8 0.647 M019410 単れ目 0 70-2	1 0.437 MERINA P.R.B 0 7/-> 3 535 NUTRIA P.R.B 0 7/-> 3 535 NUTRIA P.R.B 0 7/-> 4 535 NUTRIA P.R.B 0 7/-> 5 535 NUTRIA P.R.B 0 7/-> 5 536 NUTRIA P.R.B 0 7/-> 5 538 MERCEN P.R.B 0 7/-> 1 1 538 MERCEN P.R.B 0 7/-> 1 1 538 MERCEN P.R.B 0 7/-> 1 1 10 MERCEN P.R.B 0 7/-> 1 1 11 MERCEN P.R.B 0 7/-> 1 1 11 MERCEN P.R.B 0 7/-> 1 1 11 MERCEN P.R.B 0 7/-> 1
-0 0.012 ΝΕΧΝΙΤΙΚ ΝΕΛ.21 0 Γ/22 0 0.012 ΝΕΛΙΤΙΚΟ 0 Γ/22 10 0.012 ΝΕΛΙΤΙΚΟ 0 Γ/22 10 10.012 ΝΕΛΙΤΙΚΟ 0 Γ/22 110 10.012 ΝΕΛΙΤΙΚΟ 0 Γ/22 111 10.012 ΝΕΛΙΤΙΚΟ 0 Γ/22	3 0.087 0.08900000 単木目 6 70-> 5 0.722 NORMENTER 単木目 0 70-> 5 0.722 NORMENTER 単木目 0 70-> 6 0.642 NT/NGL ● 70-> 8 0.647 NT/NGL ● 70-> 9 0.647 NT/NGL ● 70-> 1 第0.816.0 ○ 70-> 1 第0.816.0 ● 70-> 1 第0.816.0 ● 70-> 1 ● 要/math ● 70->	1 0.431 MERRIN 単月目 0.70-2 2 0.375 NUTREN 単月目 0.70-2 3 0.375 NUTREN 単月目 0.70-2 4 0.828 NUTREN 単月目 0.70-2 5 0.978 NUTREN 単月目 0.70-2 6 0.988 NUTREN 単月目 0.70-2 7 0.998 NUTRENS 単月目 0.70-2 1 0.882 NUTRENS 単月目 0.70-2 1 0.898 NUTRENS 単月目 0.70-2 1 1.888 NUTRENS 単月目 0.70-2 1 1.888 NUTRENS 単月目 0.70-2 1 1.888 NUTRENS 単月目 0.70-2 1 1.818 NUTRENS
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	3 0.647 0.05990000 単大目 6 7/0-2 5 0.722 MORPHYLIE 単大日 0 7/0-2 5 0.722 MORPHYLIE 単大日 0 7/0-2 6 0.844 MITHYLIE 単大日 0 7/0-2 7 0.849 MITHYLIE 単大日 0 7/0-2 8 0.849 MITHYLIE ● 7/0-2 ● 9 1.849 MITHYLIE ● 7/0-2 ● 9 1.849 1.450 0.500	1 0.017 0 MOREMENT NUMBER MER 0 72-2 2 0.013 NUTRICE MORAL 0 72-2 3 0.013 NUTRICE MORAL 0 72-2 4 0.013 MORAL MORAL MORAL NUTRICE NUTR
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	3 0.049 0.0190000 単れ目 0 72->> 5 0.722 1007407000 単れ目 0 72->> 5 0.722 1007407000 単れ目 0 72->> 7 0.664 M171411 単れ目 0 72->> 8 0.667 M171411 野れ日 0 72->> 1 第030010 東北日 0 72-> >> 1 第03010 東北日 0 72-> >> 1 第03010 二 第12-0 72-> >> 1 第03010 二 第12-0 72-> >> 1 第0310-10 一 第12-0 72-> >> >> 1 第0310-10 三 第12-0 72-> >> >> 1 第0310-10 三 第12-0 72-> >> >> 1 第1310-10 三 第12-0 72-> >> >> 1	1 0.047 MERRAL F.R.B 0 77-2 3 0.055 NUTREL F.R.B 0 77-2 3 0.055 NUTREL F.R.B 0 77-2 4 0.058 NUTREL F.R.B 0 77-2 5 0.058 NUTREL F.R.B 0 77-2 5 0.058 MUTREL F.R.B 0 77-2 5 0.058 MUTREL F.R.B 0 77-2 5 0.058 MUTREL F.R.B 0 77-2 10 1.058 MUTREL F.R.B 0 77-2 10 1.058 MUTREL F.R.B 0 77-2 10 1.058 MUTREL F.R.B
	3 0.087 0.0890000 単れ目 0 70->> 5 0.722 NORMANE 単れ目 0 70->> 5 0.722 NORMANE 単れ目 0 70->> 6 0.644 NT/NGL 単れ目 0 70->> 6 0.645 NT/NGL 単れ日 0 70->> 6 0.647 NT/NGLM 単れ日 0 70->> 6 0.647 NT/NGLM 単れ日 0 70->> 7 0.050 NT/NGLM ● 70->> ● 1 第の目 ● 70-> ● ● ● 1 第の目 ● 70-> ● ● ● ● ● ● ● ● <	0.431 MERGIN MERGIN<
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	3 0.687 0.05970000 単大目 6 70-> 5 0.722 MONHANE 単大目 0 70-> 5 0.724 MONHANE 単大目 0 70-> 8 0.840 MONHANE 単大目 0 70-> 7 0.840 MONHANE 単大目 0 70-> 8 0.840 MONHANE 単大目 0 70-> 8 0.840 MONHANE 単大目 0 70->	1 0.041 MCR04 MCR 0 2/2-2 3 0.053 NUTREE MCR.0 7/2-2 1 4 0.053 NUTREE MCR.0 7/2-2 1 5 0.053 NUTREE MCR.0 7/2-2 1 5 0.059 NUTREE MCR.0 7/2-2 1 6 0.051 MCR.022 MCR.0 7/2-2 1 6 0.052 MCR.022 MCR.0 7/2-2 1 6 0.052 MCR.022 MCR.0 7/2-2 1 1 0.052 MCR.0 7/2-2 1 1 1 0.052 MCR.0 7/2-2 1 1 1 1.052 NUTREE MCR.0 7/2-2 1 1 1.052 NUTREE MCR.0 7/2-2 1 1 1.052 NUTREE MCR.0 7/2-2 1 1 1.052 NUTREE MCR.0
4 6 612 MERTING 6 7-2- 5 542 MARCENE 6.7 7-2- 5 542 MARCENE 6.7 7-2- 5 543 MARCENE 6.7 7-2- 5 101 513 MARCENE 6.7 7-2- 10 103 MARCENE 6.7 7-2- ####.87168 10 103 MARCENE 7-2- ###	3 0.087 0.089008 単れ目 0 72->> 5 0.722 105941402 単れ目 0 72->> 5 0.722 105941402 単れ目 0 72->> 5 0.622 10794124 単れ目 0 72->> 5 0.682 10797124 単れ目 0 72->> 5 0.692 10799244 単れ目 0 72->> 6 0.692 10799244 単れ目 0 72-> 1 第回時初に目のうびらっことの様わり 10 10 第回時 10 第回 10 第回時 10 第に 10 10 10 10 10 第ロ目 10 第日 10	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
4 6 6.01 ME.2 0 <i>D</i> -2 5 6.62 MARCENE 0.1 0 <i>D</i> -2 5 6.62 MARCENE 0.1 0 <i>D</i> -2 5 6.63 MARCENE 0.1 0 <i>D</i> -2 10 6.63 MARCENE 0.1 0 <i>D</i> -2 10 10.01 0.01 0 <i>D</i> -2 1 11 10.01 0.02 0 <i>D</i> -2 1 11 10.01 0.02 0 <i>D</i> -2 1 12 10.01 0.02 0 <i>D</i> -2 1 1.01 12 10.01 0.02 0.02 0 <i>D</i> -2 1 1.01 <td>3 0.687 0.0597 0.0599 第月日 0 72-> 1 5 0.722 NORMENTER 第月日 0 72-> 1 6 0.642 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.642 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.644 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.644 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.645 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.645 NTYPEL # 月日 0 72-> 1 6 0.647 NTYPEL # 月日 72-> 1 1 10 NTA # 1</td> <td>0.431 MURRAL MURRAL NURRAL NURRA NURRA NURRA</td>	3 0.687 0.0597 0.0599 第月日 0 72-> 1 5 0.722 NORMENTER 第月日 0 72-> 1 6 0.642 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.642 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.644 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.644 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.645 NTYPEL # 第月日 0 72-> 1 6 0.645 NTYPEL # 月日 0 72-> 1 6 0.647 NTYPEL # 月日 72-> 1 1 10 NTA # 1	0.431 MURRAL MURRAL NURRAL NURRA NURRA NURRA
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	3 0.687 0.0599(100) 単大日 6 70-2 5 0.722 M599(20) 単大日 0 70-2 5 0.722 M599(20) 単大日 0 70-2 7 0.469 M199(20) 単大日 0 70-2 7 0.469 M199(20) 単大日 0 70-2 8 0.447 M199(20) 単大日 0 70-2 7 0.469 M199(20) 単大日 0 70-2 8 0.447 M199(20) 単大日 0 70-2 8 0.447 M199(20) 単大日 0 70-2 8 0.447 M1019(20) 単大日 0 70-2 9 0.447 M1019(20) 単大日 10 10 9 0.447 M1019(20) 単大日 10 10 9 0.449 10 10 10 10 10 9 0.449 10 10 <td>0.41 MCR04 M.B. 0.2/2 3 0.51 NUTLER 0.2/2 4 0.51 NUTLER 0.2/2 5 0.51 NUTLER 0.2/2 6 0.51 NUTLER 0.2/2 1 0.52 NUTLER 0.2/2 1 0.52 NUTLER 0.2/2 1 0.52 NUTLER 0.2/2 1 1.52 NUTLER 0.2/2</td>	0.41 MCR04 M.B. 0.2/2 3 0.51 NUTLER 0.2/2 4 0.51 NUTLER 0.2/2 5 0.51 NUTLER 0.2/2 6 0.51 NUTLER 0.2/2 1 0.52 NUTLER 0.2/2 1 0.52 NUTLER 0.2/2 1 0.52 NUTLER 0.2/2 1 1.52 NUTLER 0.2/2

図 3.5-7 BTV 観察結果(1) (検知された割れ目情報一覧)



図 3.5-8 BTV 観察結果(2) (割れ目のトレース図)



図 3.5-9 BTV 観察結果(3) (検知された割れ目の卓越方向)



図 3.5-10 コア写真(中心モニター孔および注入孔8孔)

(2) 原位置透水試験

EDZ の初期値を調べるために実施した原位置透水試験結果を以下に示す。幌延では地下水中 に多量の溶存ガスが賦存していることから、回復法のような圧力を下げる方法ではなく、定圧 注水法で実施した。図 3.5-11 は試験の概要を、図 3.5-12~図 3.5-14 は透水試験時の注入圧、 注入流量変化である。

透水係数は、以下に記す Hvorslev 定常式より求めた。

$$K = \frac{2.3 \times Q}{2 \times \pi \times \Delta s \times L} \log\left(\frac{2L}{D}\right)$$
 $\ddagger 3.5-1$

ここで,K:透水係数 (m/sec),Q:注水量 (m³/sec),L:試験区間長 (m)、D:試験孔直径 (m), Δs:水頭差 (m) である。

表 3.5-8 に、各ステップにおいて算出した透水係数を示す。なお、透水係数の解析に用いる 注水流量および注水圧の値は、各ステップの終了直前 1 分間の平均値を採用した。また、初期 間隙水圧はステップ①開始直前の値を採用した。また、算出される透水係数の精度を確認する ため、注入圧力を変えて全4回の注水試験を実施した。注入孔周辺の地質環境に影響を与えな いよう注入圧力の上昇幅は 0.01 MPa 程度に抑えている。

図 3.5-14 より、すべてのステップで算出した透水係数が、ほぼ直線関係にあり、各ステップ における透水係数のばらつきが小さいことから、本試験における透水係数の代表値は、各ステ ップの平均値である 4.95×10⁻⁷ m/sec とした。



マニップ	コーニー 試験開始 試験終了 試験時間		Æ	圧力(MPa)			透水係数	区間長	半径	試験区間		
~~~/	時刻	時刻	<b>(時間)</b>	初期圧	注水圧	差圧	(mL/min)	(m/sec)	(m)	(m)	(mabh)	
Ŵ	2021/10/1	2021/10/1	1:00	0.0088	0.0405	0.0317	117.0	4 81 8-07	0.650	0.025	0.490	1.070
<b>U</b>	9:50	10:50	1.00	1.00 0.0088	0.0088 0.0405 0	0.0017	117.0	4.01E 07	0.050	0.025	0.420	1.070
0	2021/10/1	2021/10/1	1:00	0.0000	0.0569	0.0474	179.7	4.012-07	0.650	0.025	0.490	1.070
4	10:50	11:50	1.00	0.0000	0.0502	0.0474	170.7	4.912.07	0.050	0.025	0.420	1.070
0	2021/10/1	2021/10/1	1:00	0.0099	0.0770	0.0699	964.9	5 05 <b>F</b> -07	0.650	0.025	0.420	1.070
0	13:30	14:30	1.00	0.0000	0.0770	0.0082	204.2	5.05E 07	0.050	0.025	0.420	1.070
	2021/10/1	2021/10/1	1:00	0.0088	0.0060	0.0979	225 7	5 01 E-07	0.650	0.005	0.490	1.070
4	14:40	15:40	1.00	0.0088	0.0960	0.0872	əəə. I	5.01E-07	0.650	0.025	0.420	1.070
	《数平均值	4.95E-07										

表 3.5-8 透水試験結果(中心モニター孔における EDZ の初期値計測)



図 3.5-12 透水試験中の透水試験区間圧の変化(初期値計測)



図 3.5-13 透水試験中の注水圧、注水流量の変化(初期値計測)



図 3.5-14 注水圧-注水流量関係(初期値計測)

また、図 3.5-15 は、受託外で実施された透水試験結果を含め、コンシード充填前からのセン ター孔周辺岩盤中の透水性変化を示したものである。なお透水係数は、上述と同様の形で試験 結果が得られたため、表 3.5-8 と同様平均値をプロットしている。

注入孔掘削直後に実施した透水試験では、10⁵ m/sec オーダーまで透水係数が増加したが、これ は前述の原位置岩盤のダメージの増加に起因すると判断される。コンシード注入直後に実施し た試験では1オーダー、注入後4か月弱で2オーダー程度低下し、初期の EDZ の透水性程度ま で改善した。

このことから、短期間ではあるが、コンシードの注入による原位置岩盤中の EDZ の透水性低 減効果は有意に認められると考えられ、先行研究の状況(吉田ほか, 2021)も踏まえると、岩盤 中のコンクリーション化の進行により今後もさらに透水係数が低減する可能性が高いと想定さ れる。



図 3.5-15 センター孔周辺岩盤の透水係数の経時変化

#### (3) 室内物性試験

今回は、室内試験として主に力学物性のデータ取得を目的とし、前述の供試体を用いて弾性 波速度測定(P波、S波)、一軸圧縮試験および圧裂引張試験を実施した。なお、コンシードは 時間経過に伴い硬化が進む材料であることから、コンクリートと同様の期間での物性把握、す なわち材令1日後、7日後、28日後および90日後に試験を実施した。また、混合材料であるこ とから、コンシードに加えベースの樹脂部分のみでの供試体も作成し試験を行っている。

試験結果を、表 3.5-9、

表 3.5-10 および図 3.5-16 に示す。全体的にはすべてのパラメータについて時間経過ととも に平均値は増加し、平均値に対するバラつきの範囲も小さくなる傾向にある。また、大きな違い はないものの、樹脂部分のみに比ベコンシードの方が時間経過に伴う材料硬化が顕著であるよ うに見える。参考として、試験サイトを構成する幌延の稚内層の力学物性値を記載しているが、 材令 90 日後のコンシードの弾性波速度や強度は、概ねその値に近く、静弾性係数以外の力学特 性は 3 か月程度で幌延の堆積岩と同等に達することが確認できた。

図 3.5-17 は、材令 90 日のコンシード供試体を用いて実施した一軸繰り返し載荷試験の結果 を、図 3.5-18 は一軸圧縮試験後の供試体の状況と圧裂引張試験中の供試体の状況の例を示して いる。図 3.5-17 から、コンシードは、破壊後にひずみ軟化・硬化を示さない完全弾塑性体の挙 動を示すが、これは試験後の供試体でせん断破壊面が生じていないためと考えられる。一方、圧 裂引張試験中の供試体には視認できる割れ目が発生するため、引張応力が常時作用する環境下 では強度を越えると引張亀裂は存在しつづける可能性はあるが、除荷した後はほぼ完全に閉じ たため透水性の変化はほとんど生じないものと考えられる。塑性化すると、静弾性係数が低下 すること、軸ひずみと横ひずみの関係からポアソン比が 0.5 の完全に均質な物質であることも 確認された(権内層の岩石のポアソン比は 0.17)。

これらのことから、設計・施工に際してコンシードの力学挙動評価が必要な場合は、その挙動 は比較的単純な弾塑性体としてのモデル化で評価できるものと考えられる。

	弾性波速度			一軸圧約	一軸圧縮強さ		係数	圧裂引張強さ		
材令	P波(r	n/s)	S波(	(m/s)	(MF	a)	(M	Pa)	(MPa)	
	1,778		706		4.598		84.8		1.11	
1日	1,857	1,815	657	677	1.651	2.82	17.2	41.4	0.803	0.878
	1,810		667		2.218		22.2		0.721	
	1,919		790		7.56		172		3.00	
7日	1,748	1,827	720	746	7.26	7.48	121	145	2.75	2.76
	1,814		729		7.62		143		2.53	
	2,058		893		12.5		377		5.30	
28 日	2,059	2,066	947	927	15.80	14.7	614	533	5.14	5.23
	2,081		940		15.7		607		5.26	
00 □	2,352		919		21.109		578		6.39	
90日 (2小日)	2,501	2,378	926	935	22.048	21.8	499	566	5.48	5.99
しい方	2,281		958		22.356		620		6.11	

表 3.5-9 コンシードの室内試験結果

壮今		弾性波	速度		一軸圧	一軸圧縮強さ		系数	圧裂引張強さ	
יד נייו	P波(n	n/s)	S 波	(m/s)	(MI	Pa)	(MPa)		(M	Pa)
	1,909		1,299		0.267		2.15		0.0409	
1 日	1,924	1,916	1,301	1,301	0.867	0.541	7.27	4.30	0.152	0.125
	1,916		1,304		0.488		3.48		0.181	
	2,040		1,508		6.48		104		1.73	
7 日	2,018	2,033	1,514	1,515	5.66	6.43	96.6	111	1.61	1.78
	2,040		1,524		7.16		133.36		1.98	
	2,010		1,443		11.4		326		4.48	
28 日	1,978	2,002	1,468	1,435	6.02	9.74	53.7	248	7.40	5.43
	2,018		1,393		11.8		364		4.42	
90 E	2,064		1,527		12.8		320		5.23	
(2 去日)	2,034	2,074	1,500	1,536	11.6	12.6	245	305	6.69	5.54
(さか月)	2,124		1,582		13.4		349		4.69	

表 3.5-10 コンシードの硬化性樹脂材料のみの室内試験結果







図 3.5-17 一軸繰り返し圧縮試験結果(コンシード、材令 90 日)



図 3.5-18 圧縮試験後および試験中の供試体状況

# (4) センター孔におけるモニタリング

前述の通り、定圧での透水試験が実施できなかった場合の透水性の評価や、コンシードの注入後の硬化に伴う発熱による影響を見るためのモニタリングも実施した(図 3.5-19)。図 3.5-20 にコンシードの注入後のセンター孔からの湧水流量の時間変化を示す。

値のばらつきは大きいが、平均的には概ね 20 ml/min で推移している。ばらつきの要因は、 地下水に含まれているメタンガスが気化し間欠的に吐出した影響と考えられる。なお、 2021/11/4~11/13 の期間(図中の矢印期間)については,試験坑道 5 の別区画(直線距離で 8 m 程度離れた場所)に設置されたボーリング孔(Φ500 mm×深さ 1.5 m 程度)を対象として 孔内水排水等の作業が行われていた期間と一致した。これは、坑道周辺の EDZ は、従来から言 われるように連続性が高い岩盤の損傷部分になっていることと整合的である。



a)モニタリング概要図

b)水位計取付け状況

(S&DLmin



c)装置設置状況 図 3.5-19 モニタリング状況



図 3.5-20 中心モニター孔における孔口湧水量の経時変化

コンシード硬化による周辺への温度変化の影響に関する経時変化を図 3.5-21 に示す。参考の ため、当該試験場所(試験坑道 5 の枝坑内)の気温も併せて示した。図より,10/12~10/27 は 中心モニター孔内の水温が急激に上昇しており、8 孔に注入したコンシードの硬化に伴う温度 上昇の影響により孔内水の水温が上昇したものと考えられる。室内での温度測定では,コンシ ードは硬化に伴い一時的(数時間程度)に高温になることがわかっているが,原位置環境下では 初期の地下水水温(18℃程度)に戻るまでは、約2週間程度の時間を要しており、かつ周辺に地下 水がある状況下でのコンシードの硬化に伴う温度変化は室内のそれとは異なる可能性もあるが、 今後原位置での施工管理等の観点からは、コンシード注入孔を熱源とした熱伝導解析を行い原 位置環境下での発熱状況を評価することが望ましい。



## (5) その他

表 3.5-11 に、コンシード注入後、底面から注入部分上面までの距離を測定した結果を示す。 この測定は受託外で実施しており、名古屋大学からデータ提供を受けたものである。注入 1 日 後から測定を開始したが、どの孔も数 mm 程度、大きいもので 10 mm 程度上端面が上昇して いる。また、注入孔孔口部の目視観察では、注入直後(2021 年 10 月)には、メタンガスの気 泡が上端部で見られたが、2022 年 1 月の時点では全ての孔で気泡は観察されなかった。

これらのことから、コンシードは、EDZ のようなダメージを受けた荒い孔壁においても、硬 化に伴う膨張によりボーリング孔壁に隙間なく密着し、短期間で完全にボーリング孔をシーリ ングできることが示唆される。ただし、使用する状況によっては、膨張によって発生する孔壁へ の膨張圧が岩盤にダメージを与える可能性があるため、どの程度の圧力が発生するかも今後確 認することも重要と考える。

测空口味			/# <del>*</del> /							
则正口时	1	2	3	4	5	6	1	8	加方	
2021/10/13 9:20	-35	- 70	-30	-20	-65	-15	-55	-20	注入1日後	
2021/11/4 14:00	- 30	- 70	-30	-20	-65	-15	-55	-25		
2021/12/3 16:40	-25	-68	-25	-12	-60	-13	-44	-17		
2022/1/6 10:00	-27	-68	-23	-10	-58	-12	-44	-17		
2022/2/4 9 20	-25	-68	-25	-10	-58	-12	-43	-17		
測定位置図	(鏡面側)									

## 表 3.5-11 各注入孔における底盤部とコンシード上端面距離の経時変化(単位:mm)

## 3.5.4 まとめと残される課題

今年度から開始した、EDZ シーリング代替え材料としてコンシードの適用性の検討について は、これまでの試験結果から、ベントナイト系材料による EDZ のシーリング効果と同様の効果 を得られる可能性が示されており、かつ実際の地質環境下において注入工法での施工が可能で あることも確認された。また、原位置で本材料を用いる場合の設計・施工に資する力学的特性 についても基礎的なデータ取得を行い、材料としての力学特性が概ね把握できたと考える。次 年度、透水係数の低減効果とともに、岩盤へのコンクリーションの伸展状況を確認することで、 コンシードを用いた場合のシーリング効果のメカニズム等についてもある程度把握できると考 えられる。

また、大量の溶存ガスが賦存するような地下環境下でも、ボーリング孔自体のシーリングも できる可能性も示され EDZ シーリングのみならずボアホールシーリングにも適用できる可能 性がある。

一方で、当初あまり想定していなかった、コンシードの硬化に伴う膨張圧の発生や、坑道近傍の EDZ ではない岩盤中の断層破砕帯のような高水圧の大規模不連続構造のような水みちのシ ーリングに対する適用性は、次年度までに明らかにすることはできないため、本事業の次フェ ーズ以降の課題になると考える。

- Aoyagi K, Miyara N, Ishii E, Nakayama M, Kimura S, Evolution of the excavation damaged zone around a modelled disposal pit; Case study at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of 13th SEGJ International Symposium, 2019.
- Archie G-E, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, 146, 54-62, 1942.
- Berryman J-G, Origin of Gassmann's equation, Geophysics, 64(5), 1347-1656, 1999.
- Biot M-A, General theory of three dimensional consolidation, J. Appl. Phys., 12, 155-164, 1941.
- Blumling, P. and Adamas, J., Grimsel Test Site investigation phase IV Borehole Sealing, Nagra Technical Report 07-01, 2008.
- Bobe C, Hanssens D, Hermans, T, Van De Vijver E, Efficient Probabilistic Joint Inversion of Direct Current Resistivity and Small-Loop Electromagnetic Data, Algorithms, 13(6), 144, 2020.
- Chaplow, R., Site Characterisation Project REVIEW OF REQUIREMENTS FOR SEALING INVESTIGATION BOREHOLES, P/1035/TR1/2010, 2011.
- Domenico S-N, Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir, Geophysics, 41, 882-894, 1976.
- Gao G, Abubakar A, Habashy, T-M, Joint petrophysical inversion of electromagnetic and full-waveform seismic data, Geophysics, 77, WA3-WA18, 2012.
- Gassmann F, Über die Elastizität poröser Medien, Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gessellschaft in Zurich, 96, 1-23, 1951.
- Han D-H, Batzle M, Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities, Geophysics, 69(2), 398-405, 2004.
- Hill R, Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles, J. Mech. Phys. Solids, 11, 357-372, 1963.
- 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 flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, Trans. American geophysical Union, vol.33, no.4, pp.559-569, 1952.
- 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.
- Mavko G, Mukerji T, Bounds on low-frequency seismic velocities in partially saturated rocks, Geophysics, 63(3), 981-924, 1998.
- Pak Y, Li T, Kim G, 2D data-space cross-gradient joint inversion of MT, gravity and magnetic data., Journal of Applied Geophysics, 143, 212-222, 2017.
- Patnode H-W, Wyllie M-R-J, The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation, Trans. AIME, 189, 47-52, 1950.
- Powell M-J-D, An efficient method for funding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives, Comput. J., 7, 155-162, 1964.
- 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.

- Shi Z, Hobbs R-W, Moorkamp M, Tian G, Jiang L, 3-D cross-gradient joint inversion of seismic refraction and DC resistivity data, J. Appl Geophys, 141, 54-67, 2017.
- Schuster, K, Amann, F, Yong, S, Bossart, P and Connolly, P, High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland), Swiss Journal of Geosci, pp.213-231, 2017.
- Sun J, Li, Y, Joint inversion of multiple geophysical and petrophysical data using generalized fuzzy clustering algorithms, Geophys. J. Int., 208(2), 1201-1216, 2017.
- Vozoff K, Jupp D-L-B, Joint Inversion of Geophysical Data, Geophys. J. Int., 42(3), 977-991, 1975.
- Wyllie M-R-J, Gregory A-R, Gardner L-W, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, Geophysics, 21(1), 41-70, 1956.
- 青柳和平,津坂仁和,窪田健二,常盤哲也,近藤桂二,稲垣大介,幌延深地層研究所の250m調 査坑道における掘削損傷領域の経時変化に関する検討,土木学会論文集 C,70(4),412-423,2014.
- 青柳和平, 津坂仁和, 常盤哲也, 近藤桂二, 稲垣大介, Geomechanical assessment of excavation damaged zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, 第13回岩 の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), p.905 910, 2013.
- 青柳和平, 窪田健二中田英二, 末永弘, 野原 慎太郎, 幌延深地層研究施設における掘削影響領 域の評価, 深度 250m を対象とした試験(共同研究), JAEA-Research 2017-004, p.91, 2017.
- 青柳和平, 宮良信勝, 石井英一, 中山雅, 木村駿, Evolution of the excavation damaged zone around a modelled disposal pit, Case study at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of 13th SEGJ International Symposium (USB Flash Drive), 5 Pages, 2018.
- 阿部聡,小峰秀雄,村上哲,セメント系薬液注入により改良された地盤の一軸圧縮強さおよび透水係数に基づく改良効果の評価と電気比抵抗との関係,第10回地盤改良シンポジウム論文 集木学会論文集,367-372,2012.
- 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ー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.
- 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.
- コンクリーション化による岩盤亀裂シーリング実証試験に成功!~地下水透水性亀裂長期閉塞 技術の実用化に目処~、https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2021/10/post-91.html(参照日 2022.3.4).
- 佐藤伸,大野宏和,棚井憲治,山本修一,深谷正明,志村友行,丹生屋純夫,熱・流体・応力連 成解析による水蒸気が及ぼす再冠水時のバリア性能への影響,地盤工学ジャーナル, Vol.15, No.3, 529-541, 2020.

- 佐藤稔紀, 笹本広, 石井英一, 松岡稔幸, 早野明, 宮川和也, 藤田朝雄, 棚井憲治, 中山雅, 武 田匡樹, 横田秀晴, 青柳和平, 大野宏和, 茂田直孝, 花室孝広, 伊藤洋昭, 幌延深地層研究 計画における坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階(第2段階: 深度 350m まで), JAEA-Research 2016-025, 313 Pages, 2017.
- 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.
- 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,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,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.
- 宮澤大輔,真田祐幸,木山保,杉田裕,石島洋二,幌延地域に分布する珪質岩を対象とした間隙 弾性パラメータの取得と室内試験法の提案,J.MMIJ,127(3),132-138,2011.
- 山本卓也,青木智幸,瀧治雄,城まゆみ,堆積軟岩の長期挙動に関する調査試験研究(その 2), JNC TJ5400 2003-005, 2004.
- 吉田英一 他, コンクリーション化による EDZ および水みち割れ目の自己シーリングに関する 研究,日本応用地質学研究発表会要旨集,2021.
- 吉野浩光, 佐俣洋一, 丹生屋純夫, 石井英一, 幌延深地層研究計画における 350m 試験坑道掘 削影響領域を対象とした透水試験, 1, JAEA-Data/Code 2018-015, p.169, 2019.

### 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め戻し材 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め戻し材の施工試験

・埋め戻し材の特性を踏まえた施工オプションの整備

小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験については、平成 30 年度に地下研究施設 (瑞浪超深地層研究所)の深度 500 m の坑道を対象とした埋め戻し材の全断面吹付け施工試験 等を実施した。令和元年度には、吹付け施工後の埋め戻し領域から採取した試料を用いて密度 試験や透水試験等を実施し、それらの分析結果から埋め戻し材の吹付け施工の品質管理手法の 適切性を確認した(原子力機構・原環センター, 2020)。

埋め戻し材の材料特性を踏まえた施工技術オプションの整備については、多様な地質環境条 件や要求性能等に対して柔軟に対応できるように埋め戻し材の材料バリエーションや施工技術 オプションを整備することを目的として、令和2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室内試験および撒き出し・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、埋め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、埋め戻 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。

令和3年度は、埋め戻し材の製造・施工プロセス管理における管理項目や管理指標を抽出す ることを目的として、埋め戻し材の配合をパラメータとした透水試験、転圧工法と吹付け工法 による施工試験及びスクリュー工法とブロック工法による要素試験を実施した。また、埋め戻 し材を対象とした浸潤試験を実施して、浸潤挙動を予測するための解析手法の適用性を確認す るためのデータを取得した。

#### 4.2 埋め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の実証試験では、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, 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施 工が可能な材料製造と施工のプロセス及び施工後の品質が確認されることになると考えられる。 閉鎖に関する工学技術のうち埋め戻しについては、埋め戻し材の仕様を決めるために必要な母 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は、精密調査段階前半 までのボーリング調査等により詳細化されることになる。そのため、図 4.2・1 に示すように文 献調査から概要調査の段階では、埋め戻し材に要求される透水係数を仮設定して、模擬掘削土 を用いた室内試験や施工試験等により埋め戻し材の製造及び施工時の管理項目、管理指標、プ ロセス管理フロー等を整備することになる。これらの情報を整備しておくことにより、精密調 査段階前半に地質環境条件が詳細化された段階で埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法を 効率的に構築することができると考えられる。



図 4.2-1 埋め戻し材の製造・施エプロセス管理手法の構築までの流れ

埋め戻し材については、表 4.2-1 に示すように坑道内が卓越した地下水の流動経路にならな いことが設計要件の一つとして要求されており、埋め戻し材の低透水性の指標として、透水係 数に"母岩の平均的な透水係数の 10 倍以下"が現在のジェネリックな段階において設定されて いる。また、埋め戻し材にはベントナイトと掘削土の混合土を利用することが考えられており、 例えば、竪置き・ブロック方式ではベントナイト 15%、掘削土 85%で乾燥密度 1.8 Mg/m³が埋 め戻し材の仕様例として設定されている。ただし、処分サイトが決定していないジェネリック な現段階では、この埋め戻し材の仕様例は、掘削土の物性をケイ砂で代用した場合の例であり、 将来の候補サイトの掘削土の特性によって配合などの仕様は変わることになる (NUMO, 2021)。 そのため、本章では、埋め戻し材の透水係数の暫定的な目標値を 1×10⁹ m/s、表 4.2-2 に示す 材料構成を基本とした。

表 4.2-1 埋め戻し材の設計要件

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

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 %		

表 4.2-2 埋め戻し材の基本仕様

埋め戻し材に要求される透水係数は、候補サイトの地質環境条件及び地質環境条件に応じた 処分場の設計などによって異なるため、複数の候補サイトがある場合には、それぞれの地質環 境や設計に応じた埋め戻し材の仕様が設定される。また、多様な地質環境や処分場の設計オプ ションに対して柔軟かつ迅速に対応するためには、複数の施工技術とそれぞれの施工技術に応 じた施工管理方法を予め準備しておくことが効果的である。さらに、処分場の閉鎖後に埋め戻 し材が期待した性能を発揮することを示すためには、再冠水して飽和に至るまでの埋め戻し材 の状態変化の過程を予測評価することが重要となる。以上を踏まえると、段階的なサイト選定 プロセスの各節目において柔軟かつ迅速な対応を行うためには、次のような情報や技術を予め 整備しておくことが望まれる。

○坑道を埋め戻した後に水みちの発生を防止できる埋め戻し材の施工技術オプション

○埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法

○多様な地質環境に応じた施設設計のバリエーションに対して、柔軟に対応可能な埋め戻し 材の材料特性データ

○埋め戻し材への地下水の浸潤解析結果の妥当性確認

埋め戻し材の施工技術オプションとその施工プロセス管理手法を整備するためには、埋め戻 し材の基本的な材料データを取得するための室内試験、施工可能な配合や施工した埋め戻し材 の品質及びそのばらつきを把握するための小規模施工試験、さらに実際の坑道スケールにおけ る施工技術の適用性や施工品質などを確認するための地上試験施設での実規模施工試験、実際 の地下環境を想定した地下試験施設での実規模試験など、これらの試験を段階的に組み合わせ で取り組んでいくことで、施工技術オプション及び製造・施工プロセス管理手法を効果的に整 備することができる。

室内試験では、埋め戻し材の幅広い範囲の配合を対象として締固め性や透水性などに関する 試験データを拡充することで、多様な地質環境を対象とした処分場設計に対して柔軟に対応可 能な埋め戻し材の材料特性データを整備することができる。また、複数の施工技術を念頭にお いた小規模な施工試験によって、施工方法に応じて施工可能な掘削土の最大粒径などを把握す ることができる。埋め戻し材の施工プロセス管理方法は、一般土木分野における施工管理方法 や国内外の放射性廃棄物処分分野における施工管理方法を参考にしつつ、地上試験施設での実 規模施工試験による埋め戻し材の施工品質の評価などを通して施工プロセス管理手法の案を構 築する。そして、地下施設での実規模施工試験を実施して、製造・施工プロセス管理方法(案) の適用性を確認するとともに、地下施設の坑道を対象とした施工品質の管理に関する課題を抽 出する。得られた課題については、地上施設での施工試験計画に反映して課題の解決方法につ いて検討を行い、再び地下施設での実規模施工試験を実施する。このような反復プロセスによ り施工技術を高度化して、最終的な施工プロセス管理方法が構築されると考えられる。

本事業では、埋め戻し材の材料構成や乾燥密度等をパラメータとして、基本的な材料データ を取得するとともに、埋め戻し材の施工技術オプションとして、撒き出し・転圧工法、吹付け工 法、スクリュー工法、ブロック工法の4つの工法について、それぞれの製造・施工プロセス管 理手法の構築に向けた要素試験や施工試験等を実施する。また、埋め戻し材への水の浸潤を対 象とした小規模な浸潤試験を実施し、浸潤解析結果の妥当性確認に資するデータを取得する。

## 4.3 埋め戻しに関する室内試験及び施工試験

# 4.3.1 室内試験による埋め戻し材の材料特性データの拡張

## (1) 目的

埋め戻し材にはベントナイトと掘削土の混合土が用いられる(NUMO, 2021)。埋め戻し材の 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。そのため、模擬掘削土として玄武岩を用い、粒度分布をパラメータとした 埋め戻し材の透水試験を実施して、掘削土の粒度分布が埋め戻し材の透水係数に及ぼす影響を 把握する。

#### (2) 試験条件

透水試験に使用した材料を表 4.3-1 に示す。ベントナイトには Na 型のクニゲル V1、模擬掘 削土には 4 種類の粒度の玄武岩を用いた。クニゲル V1 と各粒度の玄武岩を表 4.3-2 に示す配 合で混合して 7 種類の埋め戻し材を準備した。各粒度の玄武岩と 7 種類の埋め戻し材の粒度分 布を図 4.3-1 に示す。図 4.3-1 (b)の凡例は、埋め戻し材の配合を表しており、例えば、KV(15)-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%、砕砂細目 (FS) が 85%、砕砂粗目 (CS) が 0%、微粉末 (P) が 0%を表している。

埋め戻し材の締固め試験をA法(1.0Ec)及びC法(4.5Ec)で実施し、A法における締固め 度(最大乾燥密度に対する割合)95%、85%及び75%、締固め試験C法における締固め度95% の4条件の乾燥密度で透水試験の供試体を作製した。試験には、イオン交換水(DW)と人工海 水(SW)の2種類を使用した。透水試験は、低透水性材料の透水試験方法(JGS 0312-2018) に基づいて実施した。各配合で1ケース当たり3回の透水試験を実施した。

名称	記号	仕様
ベントナイト	KV	Na 型ベントナイト(クニゲル V1) ベントナイト混合率
	G	砕石(粒径 20 mm~5 mm)
模擬掘削土	$\mathbf{CS}$	砕砂粗目(最大粒径 5 mm)
(玄武岩)	$\mathbf{FS}$	砕砂細目(最大粒径 2.5 mm)
	Р	微粉末
计段次达	DW	イオン交換水
武映 俗 攸	SW	人工海水

表 4.3-1 室内試験の使用材料
	混合率* (%)							
No.	ベントナイト		模擬掘削土(BA)					
	(KV)	砕石 (G)	砕砂粗目 (CS)	砕砂細目 (FS)	微粉末 (P)	小計	合計	
1	15	0	0	85	0	85	100	
2	15	0	85	0	0	85	100	
3	15	25.5	59.5	0	0	85	100	
4	15	51	34	0	0	85	100	
5	15	76.5	8.5	0	0	85	100	
6	15	0	0	72.25	12.75	85	100	
7	15	42.5	25.5	0	17	85	100	

表 4.3-2 室内試験(透水試験)で用いた埋め戻し材の配合

*混合率:乾燥質量の比率。ベントナイトと砕砂の乾燥質量の合計を100%とする。



図 4.3-1 使用材料及び埋め戻し材の粒度分布

## (3) 試験結果

イオン交換水及び人工海水を用いた透水試験の結果から求めた透水係数と埋め戻し材の乾燥 密度の関係を図 4.3-2 及び図 4.3-3 に示す。イオン交換水を使用したケースは 7 配合、人工海 水を使用したケースは 5 配合の結果を示す。人工海水を使用したケースの透水係数は、イオン 交換水を使用したケースより 2~6 オーダー程度大きく、クニゲル V1 の混合率が 15%では、人 工海水に対して低透水性(例えば、10⁻⁹ m/s)を確保することが難しいという結果が得られた。



図 4.3-2 透水係数と乾燥密度の関係 (イオン交換水)



図 4.3-3 透水係数と乾燥密度の関係 (人工海水)

## (4) 透水係数に及ぼす粒度分布の影響

今回の透水試験で使用した 7 種類の粒度分布の埋め戻し材の透水係数は、乾燥密度一定の条 件では概ね 1 オーダー程度の範囲内に収まった。砕石と砕砂の混合割合の違いが透水係数に顕 著に影響することはなかったことから、15%以上のベントナイト混合率であれば埋め戻し材製 造時における掘削土の粒度分布は厳密に管理する必要はなく、粒度分布にある程度の幅をもた せた管理ができる可能性があることがわかった。ただし、粒度分布に幅をもたせて管理する場 合には、埋め戻し材の設計などに用いる透水係数としては、例えば、図 4.3-2 の乾燥密度に対 する透水係数の最大値を用いるなど裕度を考慮することが必要である。

#### 4.3.2 撒き出し・転圧工法による埋め戻し施工試験

(1) 目的

撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の構築に向けて、材料製造と施工段階における管理項目及び管理指標を抽出することを目的として、令和2年度からの3か年の計画で室内試験や施工試験等に取り組んでいる。令和2年度には、図4.3・4に示す模擬坑道内での埋め戻し施工試験を実施して、施工後の乾燥密度や歩掛等のデータを取得して、製造・施工プロセス管理手法の素案を作成した。一方で、転圧施工における以下の課題が明らかになった。

- ✓ 坑道の妻部や側部など転圧施工が難しい部分への対策
- ✓ 転圧層内の上下の密度差の対策
- ✓ 埋め戻し材の乾燥密度のばらつきを考慮した透水性の評価

令和3年度は、これらの課題への対応及び製造・施工プロセス管理手法の更新を行うための 埋め戻し施工試験を実施した。上記の課題のうち「坑道の妻部や側部など転圧施工が難しい部 分への対策」については、吹付け工法を併用することで対応した。

転圧層内の上下の密度差は、撒き出し厚さの影響が大きいと考えられたため、予備試験で適切な撒き出し厚さと転圧回数を設定して施工試験を行った。施工試験では12層の転圧施工を行い、各層の乾燥密度や測量などのデータを取得するとともに施工や品質確認に要した時間なども把握した。また、施工試験で取得した乾燥密度に基づいて、複数の浸透流解析モデルを作成し 巨視的透水性の評価手法の検討を行った。これらの試験等の結果を反映して、製造・施工プロセス管理手法の素案を更新した。



図 4.3-4 撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験の対象(実規模模擬坑道)

#### (2) 試験条件及び試験方法

#### (a) 試験条件

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。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。また、模擬掘削土には砕石と砕砂を乾燥質量比 6:4 で混合したものを用いた。

施工試験に用いる埋め戻し材の締固め試験の結果を図 4.3-5 に示す。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%であった。同じ配合の埋め戻し材に対して小型振動ローラを用いた施工試験の結果 では、2.1 Mg/m³程度の乾燥密度が得られたため(原子力機構・原環センター, 2019)、今回の 施工試験では締固め試験 C 法の結果に基づいて埋め戻し材の含水比を 9%(最適含水比 *wo*pt+1%) に設定した。また、図 4.3-2 に示した埋め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施工目標値を1.8 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。

転圧施工試験の試験条件を表 4.3·3 に示す。乾燥密度の施工目標値を満足できる施工をする ために、予備試験で埋め戻し材の撒き出し厚さと転圧回数を設定した。含水比 9%の埋め戻し材 を用いて、撒き出し厚さを 200 mm と 250 mm、転圧回数を最大 8 パスとして、各 1 層の転圧 施工を行い、施工後に砂置換法で乾燥密度を求めた。また、材料製造時における含水比のばらつ きが施工後の乾燥密度に及ぼす影響を把握するために、設定含水比 9%に対して 5%、7%、13% の埋め戻し材を用いた予備試験を実施した。予備試験の結果を踏まえて、施工試験における撒 き出し厚さ、転圧回数を設定した。



図 4.3-5 埋め戻し材の締固め試験結果

ベントナイト	模擬掘削土	撒き出し厚さ	含水比	備考
クニゲル V1 (15%)		200 mm	00/	設定含水比
	砕石(51%) 砕砂(34%)	250  mm	9%	
		250 mm	5%	設定含水比-4%
			7%	設定含水比-2%
			12%	設定含水比+3%

表 4.3-3 転圧施工試験の試験条件

※()内は各材料の混合率

#### (b) 試験方法

模擬坑道における施工試験の対象範囲を図 4.3-6 に示す。模擬坑道の妻側から、長さ5m、幅5m、高さ2mの範囲を転圧工法及び吹付け工法で埋め戻し材を施工した。施工試験の実施 状況を図 4.3-7 に示す。吹付け工法による施工試験の結果については、4.3.2(4)に後述する。

転圧施工試験で使用した機材を表 4.3・4 に示す。施工試験では、質量を予め測定しておいた フレコンバッグから埋め戻し材を出し、バックホウで塊をほぐした後、ホイルローダーで模擬 坑道内に埋め戻し材を運搬した。撤き出した埋め戻し材を人力で敷き均し、レベル測量で所定 の撒き出し厚さになっていることを確認して、転圧施工を行った。転圧機械には図 4.3・8 に示 す小型振動ローラ(仕様は付録4を参照)を用いた。1層の転圧を実施するごとに、3D計測に よる出来形管理、砂置換法による埋め戻し材の乾燥密度測定、ブロックサンプリング等により 施工品質を確認した。施工試験中には、転圧により模擬坑道に作用する土圧やひずみを測定し、 模擬坑道に過剰な負荷や変形が生じていないことを確認した。

砂置換法による乾燥密度測定及び透水試験用試料のサンプリングの位置を図 4.3-9 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。また、 乾燥密度の空間的な相関性の有無を確認するために、第1層と第8層については、図 4.3-9(b) に示す 25 カ所で乾燥密度の測定を行った。さらに、第8層目の施工時には、トータルステーシ ョン(以下、TS)を用いた転圧回数の管理を実施した。



図 4.3-6 撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験の概要



図 4.3-7 撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験の状況

使用機器	仕様	数量	単位	備考
バックホウ	0.25 m ³	1	台	材料ほぐし用
ホイルローダー	0.4 m ³	1	台	材料撒き出し用
小型振動ローラ	1.5 t	1	台	一般部転圧用
タンピングランマー	—	1	台	妻部転圧用 (予備試験のみ)

表 4.3-4 撒き出し・転圧工法で使用した機材



図 4.3-8 小型振動ローラの外観



図 4.3-9 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) 埋め戻し材の製造

埋め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 V1:23t、砕石: 64t、砕砂粗目:68tに対して、クニゲル V1は60試料、砕石は42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 V1:8.0%、砕 石:1.7%、砕砂粗目:5.1%)を用いて加水量を設定した。

埋め戻し材の製造にはアイリッヒミキサー(DE-22、付録4参照)を用いた。回転しているミ キサー内にベルトコンベアで砕石と砕砂を供給した。所定量の半分ミキサー砕石、砕砂を供給 した時点で所定量のクニゲルV1をミキサー内に投入して、15秒間の空練りを行った。その後、 ミキミキサー転させながら所定量の加水を行い、加水終了後に30秒間の混錬(本練り)を行っ て埋め戻し材を製造した。製造した埋め戻し材の含水比の測定結果を図 4.3-10に示す。

製造後の埋め戻し材は、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。





## (4) 埋め戻し材の施工試験

#### (a) 予備試験結果

施工試験における転圧回数 (パス数) 及び埋め戻し材の撒き出し厚さを設定するために、撒き 出し厚さ 200 mm と 250 mm の 2 ケースで予備試験を実施した。予備試験では、埋め戻し材の 撒き出し後に無振動で 2 パスの転圧を行い、その後、振動有りで 8 パスの転圧を行った。撒き 出し厚さ 250 mm におけるパス数と転圧層の厚さの関係を図 4.3・11 に示す。転圧後の埋め戻 し材の圧縮率(=転圧後厚さ/撒き出し厚さ)は、6 パスで 46.3%、8 パスで 45.3%であった。 8 パスの転圧後に砂置換法で測定した埋め戻し材の乾燥密度を図 4.3・12 に示す。撒き出し厚さ 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、撒き出し厚さ 200 mm と 250 mm における乾燥密度のばらつきは同程度であっ た。そのため、小型振動ローラでは撒き出し厚さ 250 mm でも締固めエネルギーが層の下部に まで伝わったと考えられる。図 4.3・12 は 8 パス転圧後の乾燥密度を示しているが、転圧回数 6 パスと 8 パスにおける圧縮率の差 1.0%に相当する乾燥密度は 0.052 Mg/m³ であことから、6 パ スでも十分に施工目標の乾燥密度を満足する施工ができる。以上の予備試験の結果から、転圧施工試験は表 4.3-5 の条件で実施することとした。

また、埋め戻し材製造時の含水比のばらつきが施工後の乾燥密度に及ぼす影響を把握するために、含水比が5%~12%の埋め戻し材を用いて予備試験を実施した。予備試験は、表 4.3-5 に示した条件で実施した。施工後に砂置換法で測定した乾燥密度を図 4.3-13 に示す。埋め戻し材の含水比が5%~9%では、概ね 1.9 Mg/m³以上の乾燥密度であったが、含水比が 12%では、乾燥密度が大きく低下する傾向が見られた。締固め試験の結果でも最適含水比よりも湿潤側では乾燥密度の低下量が大きいことから、転圧施工では事前の予備試験で施工目標乾燥密度を上回る施工が可能な含水比の範囲を把握しておき、特に含水比の上限値を上回らないように材料製造時の含水比を管理する必要があると考えられる。



図 4.3-12 撒き出し厚さをパラメータとした乾燥密度と含水比の関係

表 4.3-5 転圧施工試験の仕様

転圧機	撒き出し厚	転圧回数*	転圧レーン数
小型振動ローラ	$250~\mathrm{mm}$	・無振動転圧 2Pass ・振動転圧 6Pass	9

*Pass:転圧レーン(車線)あたりのローラの転圧回数。2Passは、往復の転圧を意味する。



図 4.3-13 埋め戻し材の含水比のばらつきと乾燥密度の関係

(b) 施工試験結果

# (i) 埋め戻し施工後の乾燥密度

転圧施工試験後に砂置換法で埋め戻し材の乾燥密度を測定した結果を図 4.3-14 に示す。小型 振動ローラを用いて撒き出し厚さ 250 mm で施工することで、測定した全ての位置で目標乾燥 密度を達成できることが確認できた。また、乾燥密度の頻度分布を図 4.3-15 に示す。乾燥密度 の平均値は 2.018 Mg/m³、標準偏差は 0.054 Mg/m³であり、その分布形状は正規分布であった。



図 4.3-15 撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の乾燥密度の頻度分布

## (ii) サンプリング試料を用いた透水試験結果

転圧施工試験後にブロックサンプリングした試料(計11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 4.3・16に示す。図には、転圧施工 試験で使用した埋め戻し材と同じ配合における室内透水試験の結果(KV(15)-BA(G51-CS34-P0))を併せて示した(表 4.3・1及び表 4.3・2参照)。施工試験後の埋め戻し材の透水係数は1× 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一致した。サンプリング試 料のうち、乾燥密度の施工目標値 1.81 Mg/m³を下回る 2 つの試料があったが、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 やすいと考えられる。なお、乾燥密度のばらつきによる透水係数への影響は、後述する巨視的透 水係数の評価において検討した。



図 4.3-16 撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の乾燥密度と透水係数の関係

#### (iii) かさ密度の算出結果

施工試験後の埋め戻し材のかさ密度は、撒き出した埋め戻し材の乾燥質量を埋め戻し材の出 来形の体積で除して求めた。事前にフレコンバッグ毎に埋め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め戻し材を撒き出した。撒き出し厚さ 250 mm になった段階で余った埋め戻し材の質量を測定して、フレコンバッグから出した埋め戻し材の 乾燥質量と余った埋め戻し材の乾燥質量の差を撒き出した埋め戻し材の乾燥質量とした。出来 形の体積は、3D スキャナを用いた形状計測の結果から算出した。計測結果の例として、4 層目 の転圧完了から5 層目の転圧完了までの出来形の形状を図 4.3-17 に示す。

転圧施工後の埋め戻し材のかさ密度の算出結果を表 4.3・6 に示す(かさ密度の計算の詳細は 付録4参照)。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。また、表中の施 工単位の番号は、転圧層の番号を表しており、1・3 は転圧層 No.1 から No.3 までの累積の値を 示す。撒き出した埋め戻し材の乾燥質量、出来形体積の合計は、それぞれ 70,511 kg、33.8 m³ 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、-0.2%~+4.4%であ った。かさ密度を正確に算出するためには、撒き出した埋め戻し材の質量を正確に測定する必 要があるが、坑道内での材料運搬時のこぼれなど、幾つかのプロセスで材料のロスが生じる可 能性がある。そのため、撒き出した埋め戻し材の質量は過大評価になる傾向にある。表 4.3・6 では、初期の段階では-0.2%の誤差となった。この原因としては、含水比の誤差、埋め戻し材 の転圧の範囲とアクセス路(砕石)との境界のあいまいさ(施工容積が実際より大きくなるた め、かさ密度がみかけ減少するなど)が誤差に結びついた可能性がある。そのほか、かさ密度 の誤差の要因としては、含水比をサンプリングの平均値としたことがあげられる。



4 層目の転圧完了





5 層目の撒き出し完了 5 層目転圧完了 5 層目転圧完了 2 4.3-17 3D スキャナによる出来形計測

	かさ密度	砂置換乾燥密度	差	誤差	
	(Mg/m ³ )	(Mg/m ³ )	(Mg/m ³ )	(%)	
1	2.019	2.023	-0.004	-0.2	
1-2	2.046	2.018	0.029	1.4	
1-3	2.060	2.008	0.052	2.6	
1-4	2.098	2.016	0.083	4.1	
1-5	2.107	2.018	0.090	4.4	
1-6	2.085	2.023	0.063	3.1	
1-7	2.083	2.020	0.062	3.1	
1-8	2.079	2.018	0.061	3.0	
1-9	2.079	2.014	0.065	3.3	
1-10	2.071	2.016	0.056	2.8	
1-11	2.083	2.017	0.066	3.3	
1-12	2.087	2.018	0.069	3.4	

表 4.3-6 各層施工後の累積でのかさ密度と砂置換による密度測定結果の比較

備考) 誤差は砂置換による乾燥密度を基準として求めた。かさ密度の計算の詳細は付録参照。

## (iv) トータルステーションを用いた転圧回数の管理

転圧施工では、撒き出し厚さが一定ならば転圧回数が少ないほど埋め戻し材の乾燥密度は小 さくなる。施工後の乾燥密度のばらつきを小さくするためには、施工する領域を一定の回数以 上で転圧する必要があり、転圧回数は施工プロセス上の重要な管理項目である。そのため、第8 層目の転圧時にトータルステーション(TS: Total Station)を用いて転圧回数の管理を試みた。 TS は測量機器の一種であり、距離を測る光波測距儀と角度を測るセオドライトを組み合わせた 装置である。TS で測定した対象物の距離と角度から、対象物の平面上の位置を求めることがで きる。小型振動ローラには、TS のターゲットとなるプリズムを設置した。

TS で測定した小型振動ローラの走行軌跡を図 4.3-18 (a)に示す。走行軌跡から小型振動ロー ラの機体幅を考慮して転圧回数を測定した結果を図 4.3-18 (b)-(d)に示す。妻壁近傍で転圧回数 が不足している部分が見られるが、トータルステーションを用いることにより転圧回数を自動 で管理できることが確認できた。ただし、現状ではソフトウェアの制約から転圧した領域を 500 mm 四方のメッシュで表現しているため、転圧した個所を厳密に表現するためには空間分解能 を向上させる必要がある。



図 4.3-18 トータルステーションによる転圧回数の管理

(v) 施工速度

撒き出し・転圧工法による埋め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 4.3-7 に示す(施工速度の算出に用いた施工歩掛等の情報については付録 4 を参照)。表の上段 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した。また、表には令和2年度に実施した4tタンデムローラ を用いた施工速度も併せて示した。4tタンデムローラに比べて1レーン当たりの小型振動ロー ラの転圧範囲が狭いため、令和2年度の施工試験よりも今回の施工速度は低かった。

施工管理に 3D スキャナを用いた場合は、レベル測量と砂置換法を用いた場合よりも 1.5 倍以 上速く施工できることになる。施工管理方法として 3D スキャナを用いることができれば、坑道 内での作業量を減少させるとともに施工速度を向上させることができる。そのためには、従来 の砂置換法による施工品質確認ではなく、かさ密度での施工管理が可能な施工プロセス管理手 法を構築する必要がある。

作業内容	令和2年度	令和3年度		
敷き均し、予備転圧、振動転	施工時間	hr/層	3.46	3.94
圧、レベル測量、現場密度試	施工体積	m³/層	4.49	2.82
験(砂置換法)	施工速度	m³/hr	1.32	0.73
あさわり 予告にて 振動症	施工時間	hr/層	2.34	1.84
敖さ均し、「備転圧、振動転 □ □ 2D スキャナ	施工体積	m³/層	4.49	2.82
$(\pm, 3D \land (+, 7))$	施工速度	m³/hr	2.01	1.55

表 4.3-7 転圧工法による埋め戻しの施工速度

#### (5) 巨視的透水係数の評価

## (a) 巨視的透水係数評価手法の概要

転圧施工後の埋め戻し材の乾燥密度には、図 4.3-14 に示したようにばらつきが見られた。今回の施工試験では、砂置換法で測定した位置の乾燥密度は全て施工目標値を上回ったが、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、今回の施工 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。

埋め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 坑道を対象と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)、局所的な埋め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評価することができると考えられる。ここでは、 撒き出し・転圧工法の施工試験結果に基づき、埋め戻し材の巨視的透水係数の評価を行う。評価 の手順を以下に示す。

①埋め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乾燥密度の空間相関性を分析

③乾燥密度の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め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

#### (b) 透水係数の空間分布モデルの作成

巨視的透水係数の計算モデルには、施工試験における第1層及び第8層の乾燥密度のデータ を用いた(図 4.3-19 (a))。乾燥密度の空間相関性の分析では、各層の測定点のペアに対し、乾 燥密度の差の二乗と距離を求め、距離とセミバリオグラムの関係を整理した(図 4.3-19 (b))。 図 4.3-19 が示すように、セミバリオグラムは測定点ペアの距離と相関が見られないことから、 乾燥密度の空間的相関性はないと判断した。

巨視的透水係数を計算する際の乾燥密度の空間分布のモデルは、乾燥密度の平均値と標準偏 差を用いてランダムに乾燥密度を振り分けるモデルとした。乾燥密度と透水係数の空間分布モ デルの例を図 4.3-20 に示す。透水係数は、以下に示す乾燥密度と透水係数の関係式から求めた (図 4.3-16)。

# $k = 5 \times 10^{-9} \mathrm{e}^{-3.402 \rho_d}$

## 式 4.3-1

ここに、k:埋め戻し材の透水係数(m/s)、 $ho_d$ :埋め戻し材の乾燥密度( $Mg/m^3$ )である。



(a) 測定点の配置(第1層、第8層) 図 4 3-19

、第8層) (b) 埋め戻し材の乾燥密度のセミバリオグラム 図 4.3-19 埋め戻し材のセミバリオグラム



乾燥密度の空間分布モデルの例

#### 透水係数の空間分布のモデルの例

## (c) 巨視的透水係数の算出

## (i) 巨視的透水係数の算出方法

透水係数の空間分布のモデルを用いて浸透流解析を実施し、巨視的透水係数を計算した。浸透流解析は飽和定常流として計算し、通過流量*Q*を通過断面積*A*と動水勾配*i*で除して巨視的透水係数を求めた。浸透流解析コードは、Dtransu3D-ELを用いた。

計算に用いたモデルのメッシュと境界条件を図 4.3・21 に示す。解析領域は、施工試験の範囲から、5m×5m×2mの直方体とした。メッシュの各要素の水平方向のサイズは、空間相関性がないことを確認した距離の最小値 0.5mとし、鉛直方向のサイズは転圧による仕上がり高さに合わせて 0.125m とした。解析に適用する境界条件は、図 4.3・21の矢印のように水平方向の流れを動水勾配iが 0.1 となるよう設定し、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。



図 4.3-21 巨視的透水係数の解析モデルと境界条件

図 4.3-20 乾燥密度と透水係数の空間分布モデル

## (ii) 解析ケース

浸透流解析の解析ケースを表 4.3-8 に示す。ケース1は、施工試験で測定した乾燥密度の平 均値と標準偏差を適用したケースである。ケース2は、乾燥密度の平均値がケース1より10% 低いケース、ケース3は、乾燥密度の平均値がケース1より10%低く、さらに標準偏差をケー ス1の2倍としたケースである。各計算ケースで設定した乾燥密度の確率密度を図 4.3-22 に示 す。1ケース当たり10,000 個の透水係数の空間分布モデルを作成した。

K . 7	乾燥密周	空間分布			
	平均值	標準偏差	モデル数		
1	2.018	0.054			
2	1.810	0.054	10,000		
3	1.810	0.108			

表 4.3-8 浸透流解析の解析ケース



図 4.3-22 浸透流解析の計算ケース別の乾燥密度の確率密度

#### (iii) 巨視的透水係数の計算結果

巨視的透水係数の計算結果を図 4.3-23~図 4.3-25 に示す。左図には、透水係数の空間分布モ デル(以下、空間分布モデル)の頻度分布図、右図には、巨視的透水係数の頻度分布図を示した。 空間分布モデルの頻度分布は、乾燥密度の頻度分布が正規分布であり、透水係数が乾燥密度の 指数関数(式 4.3-1)で求められることから、対数正規分布である。巨視的透水係数と空間分布 モデルの頻度分布形状は同様であることから、巨視的透水係数の頻度分布は対数正規分布であ る。巨視的透水係数の対数値の範囲は、-12~-10(真数:10⁻¹²~10⁻¹⁰ m/s)となり、低透水性 (例えば、10⁻⁹ m/s 以下)を有することが確認できた。ケース1と2の巨視的透水係数の平均 値は、透水係数の空間分布モデルの平均値とほぼ一致するが、ケース3の平均値は、空間分布 モデルの平均値より小さい。ケース3の対数標準偏差は他のケースの2倍であることから、対 数標準偏差が大きい場合には巨視的透水係数の平均値低減する傾向があると考えられる。

巨視的透水係数の対数標準偏差は、いずれのケースにおいても空間分布モデルの対数標準偏差の約 1/40 であることから、今回の空間分布モデルの場合、巨視的透水係数の対数の分布幅は、 空間分布モデルの 1/40 程度になる。

透水係数では真値の議論が難しいため、式 4.3-1 を用いて巨視的透水係数を乾燥密度に換算 し、解析条件と比較した(表 4.3-9)。対象ケースは、ばらつきが最も大きいケース3とした。 最大値及び最小値は、各々平均値+4σ、平均値-4σとした。巨視的透水係数から求めた乾燥 密度の分布幅(最大値-最小値=8 σ) 0.022 Mg/m³は、その標準偏差が解析条件の標準偏差の約 1/40 であることから、解析条件の分布幅 0.864 Mg/m³の約 1/40 となる。したがって、ケース 3 のように乾燥密度の標準偏差を施工試験結果の数倍程度に設定しても、巨視的透水係数にはほとんど影響が生じない。

以上の結果は、模擬坑道の一部を対象とし、施工試験に基づく均質な埋め戻し材の施工を想 定した。今後の課題として模擬坑道全体を対象とした評価及び低密度領域の連続を仮定した保 守的なケースの検討などがあげられる。





щ	乾燥密度(1	備考	
坦日	解析条件	巨視的透水係数の換算値	(巨視的透水係数)
平均值	1.810	1.802	$1.089 \times 10^{-11} \text{ m/s} (-10.963)$
標準偏差	0.108	0.0028*	(0.0041)
最大値	2.242	1.813	$1.048 \times 10^{-11}$ m/s (-10.947)
最小値	1.378	1.791	$1.131 \times 10^{-11}$ m/s (-10.979)
分布幅	0.864	0.022	

表 4.3-9 解析条件と巨視的透水係数から求めた乾燥密度 (ケース 3)

注)最大値は平均値+4 σ。最小値は平均値-4 σ。巨視的透水係数の()内の値は対数値 分布幅は最大値-最小値。巨視的透水係数から求めた乾燥密度の標準偏差は、平均値、最大値、 最小値を用いて算出。

## (6) 製造・施エプロセス管理手法の更新

令和2年度に作成した転圧工法による製造・施工プロセス管理手法(案)を更新した結果を 表4.3-10~表4.3-12に示す。プロセス管理手法における管理項目、管理指標及び管理方法の記 載内容を、管理対象プロセス・特性、管理の判断に用いる情報、管理の判断の方法、に分けて記 載内容を具体化した。さらに、施工試験で得られた知見をもとに以下に示す項目を追記した。

- ・ 混練り後の埋め戻し材の含水比のばらつきの管理
- 製造後の埋め戻し材の保管方法
- かさ密度の精度向上策
- ・ 巨視的透水係数の評価手法

埋め戻し材の含水比が高含水比側にばらつくと乾燥密度が低下する傾向にあることが予備試 験の結果でわかったため、製造プロセスでは、バッチ毎に埋め戻し材の含水比が許容範囲にあ ることを確認することとした。また、埋め戻し材の保管方法については、管理項目として埋め戻 し材の保管仕様を追加し、その管理方法として、耐候性フレコンの使用、最大積み重ね数の確認 などを追加した。

埋め戻し施工後のかさ密度の測定精度を向上させるための方策として、埋め戻し材製造時の 湿潤質量及び含水比を管理指標に追加した。かさ密度は砂置換法で求めた乾燥密度の平均値よ りも大きくなる傾向にあると考えられることから、施工管理ではこの誤差をマージン(裕度)と して配慮することをプロセス管理手法に追加した。

施工試験で得られた乾燥密度データに基づく巨視的透水係数評価では、巨視的透水係数の平 均とばらつき(対数標準偏差)は小さかったが、計算メッシュや密度分布の設定などの妥当性に ついては、今後も継続して検討を進める必要がある。巨視的透水性の評価は、開発段階に実施す る項目のため、開発段階の管理指標として巨視的透水係数の評価及び評価に必要になるデータ を追加した。

# 表 4.3-10 撒き出し・転圧工法における製造・施工プロセス管理(開発段階)

開発・製造・施工フロー	管理対象(プロ セス、手順)	管理項目(材料等 の特性)	管理指標(管理の判断に用いる数値、 特性など)	管理方法(管理の判断の方法)
①開発(試験による管理 <u></u> 歩 標の設定)	<ol> <li>①製造・施工管</li> <li>理指標の設定</li> </ol>	・開発段階	<ul> <li>・ 全指標</li> </ul>	<ul> <li>・設計仕様(包括的技術報告書含む)</li> <li>・規格・基準</li> </ul>
相保の成化	①-1混錬試験	・ 配合	<ul> <li>・ベントナイト、骨材(砕石・砕</li> <li>砂)、水質及び有害物質</li> <li>・骨材混合率など配合割合</li> </ul>	<ul> <li>・材料ごとの品質保証書の確認</li> <li>・締固め試験結果などを参考に判断</li> </ul>
		・混錬仕様	・ミキサー仕様、投入手順、回転数、 混錬時間	・材料の均質性の評価結果を基に判断
①-1 混練試験		・材料の均質性	<ul> <li>・含水比(ばらつき)</li> <li>・骨材の粒度分布(ばらつき)</li> </ul>	<ul> <li>・製造精度で品質を担保する</li> <li>・粒径のばらつきの影響評価を基に判断</li> </ul>
		・保管	<ul> <li>・埋め戻し材料の識別</li> <li>・団粒化の抑制</li> </ul>	<ul> <li>・フレコンの識別番号で管理</li> <li>・経験実績によるフレコンの最大積み重ね数</li> </ul>
	①-2室内試験	・乾燥密度	<ul> <li>・乾燥密度と透水係数の関係</li> <li>・粒度のばらつきの許容範囲</li> </ul>	<ul> <li>・目標透水係数を満たす目標乾燥密度を設定</li> <li>・粒度調整した材料の締固め試験に基づき判断</li> </ul>
		・含水比	・含水比のばらつきの許容範囲	・締固め試験に基づき判断
①-2 室内試験 ◀	①-3施工試験	・転圧仕様	<ul> <li>・目標乾燥密度</li> <li>・転圧機械の仕様、撒き出し厚、転圧</li> <li>回数</li> </ul>	<ul> <li>施工予備試験に基づき目標乾燥密度を満たす仕様を設定。転圧回数については、振動ローラの 軌跡で管理。</li> </ul>
		<ul> <li>・埋め戻し材の均</li> <li> ^{哲性} </li> </ul>	<ul> <li>・乾燥密度・含水比の基本統計量</li> <li>・乾燥密度の空間的相関性</li> </ul>	<ul> <li>・転圧層の現場密度試験結果から算定</li> <li>・乾燥密度のセミバリオグラムに基づき判断</li> </ul>
①-3 施工試験		ЯĽ	<ul> <li>・含水比のばらつきの許容範囲</li> <li>・巨視的透水係数と乾燥密度のばらつ</li> <li>きの関係</li> </ul>	<ul> <li>・含水比の異なる材料の施工試験に基づき判断</li> <li>・巨視的透水係数の評価(感度解析含む)に基づき設定</li> </ul>
製造・施工の管理指標の		・かさ密度	<ul> <li>・出来形(体積)</li> <li>・開封した埋め戻し材及び回収した埋め戻し材の湿潤質量・含水比</li> </ul>	<ul> <li>・検査証明付きの3Dスキャナの測定記録の確認</li> <li>・質量は検査証明付きの計量器による計測、含水 比はサンプルの含水比試験で確認</li> </ul>
設定		・頂部空隙の閉塞	<ul> <li>かさ密度のマージン</li> <li>(撒き出し・転圧工法では頂部が埋め戻せないため、対象外)</li> </ul>	<ul> <li>かさ密度と乾燥密度との差の評価を基に設定</li> </ul>

表 4.3-11	撒き出し・	転圧工法における	製造・施エプ	『ロセス管理	(製造段階)
----------	-------	----------	--------	--------	--------

開発・製造・施工フロー	管理対象(プロ	管理項目(材料等	管理指標(管理の判断に用いる情	管理方法(管理の判断の方法)
	セス、手順)	の特性)	報)	
②製造	2製造	・製造段階	<ul> <li>全指標</li> </ul>	<ul> <li>・設計仕様(包括的技術報告書含む)</li> <li>・規格・基準</li> </ul>
	②-1材料調達	・原材料の品質	<ul> <li>・ベントナイト、骨材(砕石・砕</li> <li>砂)及び水の種類と有害物質</li> </ul>	<ul> <li>・材料ごとの品質保証書</li> <li>・発生地層が変化するたびに品質確認試験を実施</li> </ul>
②-1 材料調達	②-2一時貯蔵	・骨材の含水状況	<ul> <li>・ 骨材の含水比</li> <li>・ 一時貯蔵場所の湿度</li> </ul>	<ul> <li>・発生地層ごとの骨材の定期的な含水比試験</li> <li>・貯蔵場所の湿度測定</li> </ul>
	②-3混錬	・配合	<ul> <li>ベントナイト混合率、骨材混合</li> <li>率、含水比など配合割合</li> </ul>	・1バッチ当たりの材料の投入質量で管理
		・混練仕様	<ul> <li>・ミキサー仕様(回転数含む)、投入手順、混錬時間</li> </ul>	・開発段階で定めた仕様を遵守
		・材料の均質性	・ 含水比 (はらつさ) ・ 骨材の粒度分布 (ばらつき)	<ul> <li>ハッナことの含水比及び粒度分布か計容範囲であることを確認</li> <li>材料の均質性は、開発段階で定めた配合、ミキサー仕様や骨材の含水比計測によって確保</li> </ul>
②-2 一時貯蔵 ↓ ②-3 混錬	②-4貯蔵	• 保管方法	・埋め戻し材の保管の仕様	<ul> <li>・耐候性フレコンの使用</li> <li>・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</li> <li>・埋め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</li> <li>・製造記録ごとの材料保管状況を確認</li> <li>・屋内保管であることを確認</li> </ul>
②-4 貯蔵				

表 4.3-12 撒	:き出し・転圧コ	1法における製造・	施エプロセス管	<b>ਆ理(施工段階)</b>
------------	----------	-----------	---------	-----------------

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目(特性ま	管理指標(管理の判断に用いる数	管理方法(管理の判断の方法)
		たはプロセス)	値、特性など)	
③施工	③施工	・施工段階	・全指標	<ul> <li>・設計仕様(包括的技術報告書含む)</li> </ul>
				・ 規格・基準   ・ 開発段階の埋め戻し材の配合、転圧仕様
	③-1埋め戻し材	・材料搬入・保管	・埋め戻し材保管袋の識別番号	・配合など製造記録と施工仕様の一致を確認
	の搬入・保管		・埋め戻し材の含水比	・製造記録及びサンプルの試験結果が含水比、粒度
③-1 埋め戻し材の搬			・埋め戻し材の粒度	分布の許容範囲内であることを確認
入・保管			・団粒化の抑制	・最大積み重ね数を管理
	③-2埋め戻し材	・材料の収支	・開封した埋め戻し材(開封材料)	・材料の製造記録で湿潤質量と含水比を確認
	の供給・回収		の湿潤質量、含水比	・湿潤質量の計量は回収のたびに行い、含水比はサ
<b>↓</b>			・回収した埋め戻し材(回収材料)	ンプルの含水比試験結果に基づき確認。回収漏れ
③-2 埋め戻し材の供			の湿潤質量、含水比	は、目視、画像などで確認。
給	③-3撒き出し	・撒き出し仕様	・ ③-4転圧の転圧仕様を参照	<ul> <li>・③-4転圧の転圧仕様を参照</li> </ul>
	③-4転圧	・転圧仕様	・転圧機械の仕様、撒き出し厚、転	・転圧の仕様が開発段階と同等であることを確認。
L			上回数 出版版 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	転圧回数はTS等による転圧ローラの軌跡管理や目
			・出来形(体積、仕上がり局さ)	視で確認。
③-3 撤ぎ出し				・3Dスキャナなどによる各層の出来形(体積)から
↓		) ( <u>+</u> +		者な个陸か生しないことを確認
③-4 転圧	(3)-5埋め戻し材	・かさ密度	・転上材料(開封材料ー回収材料)の	・転生材料(乾燥質重)を出米形(体積)で除した
	の密度		- 乾燥賞重 	他から開発段階で設定したマーンンを差し引いて 得されてかと密告の計算されます。
			・田米形((平槓)	侍られるかさ密度の計算を確認
↓ ↓		四ルヨレサのチ	・ かさ密度(乾燥密度)	
③-5 囲め戸 \ 密度	③-6理の戻し材	・理め戻し材の透	・ 巴怳的透水除数(開発段階)	・ 肥上で待られたかさ省度か、開発技術の巨虎的透
③ 5 <u>至</u> 0 天 C 伍 及	の均質性	水性のはらつき		小休致の計画で忍足した計谷範囲に収まることを
③-6 均質性		の影響		17世前心
		1		

## 4.3.3 吹付け工法による埋め戻し施工試験

(1) 目的

吹付け工法による埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の構築に向けて、材料製造と施工 段階における管理項目及び管理指標を抽出することを目的として、令和2年度からの3か年の計 画で室内試験や施工試験等に取り組んでいる。

令和2年度までに、吹付け箱試験及び小規模施工試験を実施して、施工後の乾燥密度や歩掛等 のデータを取得して、製造・施工プロセス管理手法の素案を作成した。一方で、吹付け施工にお ける以下の課題が明らかになった。

- ✓ 材料製造時における埋め戻し材の含水比の分布、粒度分布の許容範囲
- ✓ 施工品質に及ぼす材料供給量の影響
- ✓ 連続施工の中断につながるホースなどでの埋め戻し材の目詰まりの低減
- ✓ リバウンド率の低減
- ✓ 施工品質確認のための3次元スキャナを用いたかさ密度の測定精度

令和3年度は、これらの課題への対応及び製造・プロセス管理手法の更新を行うために施工試験を実施する。上記の課題のうち、リバウンドと目詰まりの低減については、含水比の調整が効果的であることが知られている。しかし、リバウンドと目詰まりの低減に効果的な含水比は異なるため、双方の課題を同時に解決することは難しい。そこで、リバウンドと目詰まりのそれぞれに効果的な含水比に着目し、目詰まりの低減を目的とする試験(試験I)とリバウンドの低減を目的とする試験(試験I)を実施した。試験Iと試験IIの概要を表 4.3-13 に示す。

試験名	試題	試験Ⅱ		
埋め戻し材仕様	配合 I (目詰	配合Ⅱ(リバウンド低減用)		
吹付機器の仕様	仕様I(目詰	まり低減用)	仕様Ⅱ(リバウンド低減用)	
	吹付け箱	小規模模擬坑道	実規模模擬坑道	
試験対象	ノズル 0.5m 0.5~1m 0.5m 吸付箱	1500mm 1500mm		
試験概要	<ul> <li>・目詰まりの低減効果が期 待できる配合の埋め戻し 材を小型の吹付箱(縦0.5 m×横0.5 m×奥行0.2 m) に吹き付ける試験</li> </ul>	<ul> <li>・目詰まりの低減効果が期 待できる配合の埋め戻し 材をアーチカルバート内 (幅1.5 m×高さ1.5 m)に 定量(3.6 t or 10 t) 吹付け る試験</li> </ul>	・リバウンド率の低減効果 が期待できる配合の埋め 戻し材を実規模模擬坑道 (幅5.0m×高さ5.0m)の 妻部と側壁部に吹付ける 試験	
	・材料製造時における埋め	・目詰まりの低減効果	・リバウンド率の低減効果	
	戻し材の含水比の分布、粒	・3Dスキャナによるかさ密度の測定精度		
試験確認項目	度分布の許容範囲	・埋め戻し材の乾燥密度のばら	・埋め戻し材の乾燥密度のばらつき	
	・施工品質に及はす材料供		- とっ体理で注示文目的	
	桁重の 影響	・ 吹付け 上法の 製造・ 施上 プロ	コセス官埋手法の適用性	

表	4.3-13	吹付け工法の施工試験の概要
---	--------	---------------

#### (2) 試験条件及び試験方法

#### (a) 試験条件

埋め戻し材の基本仕様を表 4.3-14 に示す。これまでの吹付け試験の結果から、模擬掘削土の 最大粒径が 10 mm 程度以上では、粒径の大きな砕石がリバウンドするため、模擬掘削土の最大 粒径は 5 mm とした。模擬掘削土には、購入可能な岩種として玄武岩を選択した。

埋め戻し材の締固め試験結果を図 4.3-26 に示す。試験 I では、吹付けのエネルギーが高いことから締固め試験 C 法に基づいて、設定含水比は最適含水比の平均値  $w_{opt}$  (8.6 %)を基に2種類の含水比  $w_{opt}$ -1.5%と  $w_{opt}$ -3.0%、乾燥密度の施工目標は 1.80 Mg/m³ (締固め度  $D_{c}$ =85%)とした。試験 II では、吹付けのエネルギーが低いことから、締固め試験 A 法に基づき、設定含水比は最適含水比  $w_{opt}$  (13.4%)から 13%、乾燥密度の施工目標は 1.82 Mg/m³ (締固め度  $D_{c}$ =95%)とした。

埋め戻し材の配合を表 4.3·16 に示す。配合 I は、吹付けノズルとホースの目詰まりの抑制の ために、目詰まりの原因となる含水比を低めに設定し、かつ吹付け時の圧力を高めに保持する吹 付けシステムの仕様に適した配合であり、試験 I に適用する。試験 I では、掘削土の粒度のばら つきが施工品質に及ぼす影響を確認するために、粒度の異なる模擬掘削土とクニゲル V1 を混合 した埋め戻し材を吹付け箱に吹付け、サンプリング試料を用いて透水試験を実施した。使用した 模擬掘削土は、最大粒径 5 mm の砕砂、最大粒径 2.5 mm の砕砂、ならびに最大粒径 2.5 mm の 砕砂と 2.5mm~5.0mm の砕砂を 6.5:3.5 でブレンドした材料(以下、ブレンド材)の 3 種類と した(表 4.3·17)。模擬掘削土の粒度分布を図 4.3·27 に示す。配合 II は、リバウンド材の低減の ために、付着を促進するように含水比を高めに設定し、かつホースの圧力を低めに保持する吹付 けシステムの仕様に適した配合であり、試験 II に適用する。

試験 I では、吹付け箱試験と図 4.3-28 に示す小規模模擬坑道を対象とした施工試験を実施した。小規模模擬坑道の吹付け工法の試験では、坑道の片側に設置した型枠に向かって配合 I の埋め戻し材の所定量(湿潤質量で 3.6 t または 10.0 t)を吹付けた。

試験Ⅱで対象とする実規模模擬坑道における吹付け工法の適用範囲を図 4.3・29 に示す。撒き 出し・転圧工法では施工が難しい坑道の妻部と壁部に対して、配合Ⅱの埋め戻し材を5回に分け て約19tの吹付け施工を実施した。以下、5回の吹付けの施工単位をブロック(記号 BL)、吹付 け順序を数字で表す。令和3年度は、最初の2回を妻部、残り3回を側部に吹付けたことから、 妻部はブロック1~2(BL01~BL02)、側部はブロック3~5(BL03~BL05)と表記する。

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(砕砂 最大粒径 5 mm)			
混合率*	ベントナイト 15 %、砕砂 85 %			

表 4.3-14 埋め戻し材の基本仕様

*乾燥質量の比率(ベントナイトと砕砂の乾燥質量の合計を100%とする)



締固め試験C法:試験Iに適用 締固 図 4.2.26 埋め豆し 材の統国の討



図 4.3-26 埋め戻し材の締固め試験結果

表 4.3-15	<b>悝の戻し材の乾燥密度の施工目標と設定含水比</b>	Ś

項目	試験 I	試験Ⅱ	
施工目標 乾燥密度	$1.800 \text{ Mg/m}^3$	$1.820 \mathrm{~Mg/m^3}$	
設定含水比	$w_{opt}$ -3.0 : 5.6 % $w_{opt}$ -1.5 : 7.1 %	13.0 %	

注)試験Iは締固め試験C法の結果に基づく。試験IIは締固め試験A法に基づく。

表 4.3-16 埋め戻し材の基本配合

反升	日伯	今水比(0/)	混合	准步		
泊你	ЦЦУ	百八比(%)	砕砂 ²⁾	ベントナイト 3)	调石	
配合 I	目詰まり低減	$W_{ m opt}$ -3.0 : 5.6% ⁴⁾	85	15	計験」に適用	
		$W_{ m opt}$ -1.5 : 7.1% ⁴⁾	85	15	武阙Ⅰ(こ週月	
配合Ⅱ	リバウンド低減	$w_{ m opt}: 13.0\%^{5)}$	85	15	試験Ⅱに適用	

1)乾燥質量の割合、2)最大粒径 5 mm 以下の玄武岩、3)クニゲル V1、4)締固め試験 C 法、5)締固め試験 A 法

表 4.3-17	模擬掘削土の均等係数と曲率係数	(試験 I )
----------	-----------------	---------

模擬掘削土	均等係数 Uc	曲率係数 Uc'
最大粒径 5 mm (配合 I )	11.6	2.3
最大粒径 2.5 mm	9.6	1.2
2.5 mm: 2.5~5.0 mm=6.5: 3.5 (ブレンド材)	13.8	1.6



図 4.3-27 模擬掘削土の粒度分布(試験 I)





(b) 妻部

(a) 全景 (b) 図 4.3-28 小規模模擬坑道の断面図(試験 I)



図 4.3-29 実規模模擬坑道における吹付け工法の施工範囲(試験Ⅱ)

#### (b) 試験方法

吹付け工法は、材料供給機に投入された吹付け材料がベルトコンベアを介してローター式吹付 け機内に一定供給量で供給され、コンプレッサの圧縮空気によってホース内を圧送される。さら に吹付けノズル内で速度エネルギーが増加されて吹付けられる工法である(図 4.3-30)。

吹付け工法の施工試験では、2種類の配合に対して図 4.3·31 と図 4.3·32 に示す異なる吹付け システムの仕様を採用した。吹付けシステムの仕様 I は、配合 I (含水比低めの配合)に対する 吹付け機器の仕様であり、材料供給機により吹付け材料の供給量の調整が行えるとともに、高い 空気圧での吹付けが可能な機器構成である。吹付けシステムの仕様 II は、リバウンドの低減を目 的とした配合 II (含水比高めの配合)に対する吹付け機器の仕様であり、低い圧力を用いること で吹付けのエネルギーを低減し、目詰まりが生じたときの復旧作業が容易なシンプルな機械構成 とした。吹付けシステムの仕様の詳細を付録4に示す。

吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度の測定位置を表 4.3-18 及び図 4.3-33 示す。配合 I に ついては、施工時に凸部を 5 か所吹付けてこれをサンプリングするとともに、施工後に吹付け面 と奥行き方向で各々3 か所ずつブロックサンプリングして乾燥密度を測定した。配合 II について は、妻部で 12 か所、側壁部で 18 か所からサンプリングして乾燥密度を測定した。



図 4.3-30 吹付け工法の機器構成例





(a) 吹付けシステム外観
 (b) 吹付け状況
 図 4.3-31 吹付けシステム外観と吹付け状況(仕様 I)



^{ナ機} (a) 吹付けシステム外観 (b) 吹付け状況

図 4.3-32 吹付けシステム外観と吹付け状況(仕様Ⅱ)

	試験 I (小規模模擬坑道)	試験Ⅱ(実規模模擬坑道)
サンプリング箇所	1 つの配合あたり最大 19 か所	妻部と側壁部の合計 30 か所
	・施工時 : 吹付面 5×2回*=10か所	・妻部:6×2 ブロック=12 か所
	・施工後:吹付け面 3×奥行き方向 3=9 か所	・側壁部 : 6×3 ブロック=18 か所
サンプリング方法	施工時:採取用の凸部のサンプリング	シンウォールサンプリング
	施工後:ブロックサンプリング	
試料の体積測定方法	施工時:シリコーンオイル法	サンプラーの体積(ノギスで測定)
	施工後:パラフィン法	

表 4.3-18 乾燥密度の測定位置

*10 t 吹付けのケースの値。6 t 施工完了時及び 10 t 施工完了時の 2 回行う。3.6 t 吹付けのときは 1 回。





(a) 施工時のサンプリング箇所(b) 施工後のサンプリング箇所図 4.3-33 小規模模擬坑道試験の施工後の乾燥密度の測定位置(試験 I)

(3) 埋め戻し材の製造

埋め戻し材の製造にはアイリッヒミキサー(DE-22)を使用した。製造方法及び材料の保管の 詳細については、付録4に示した。埋め戻し材の含水比はリバウンドや目詰まりと密接に関係す るため、埋め戻し材の製造時にはバッチ毎に含水比の測定を実施した。さらに、配合Iについて は、吹付け工法による施工品質に対する含水比の影響を把握するために、模擬掘削土の自然含水 比をバッチ毎に管理した。

配合 I、配合 IIの製造後の埋め戻し材の含水比の頻度分布図を図 4.3-34 に示す。配合 I、配合 II ともに埋め戻し材の含水比の平均値及び中央値は、設定含水比とほぼ一致した。配合 I は、設定含水比±0.6%、配合 II は設定含水比±1.2%の範囲に収まった。



(a) 配合 I (w_{opt}-3.0%)
 (b) 配合 I
 図 4.3-34 埋め戻し材の製造後の含水比の頻度分布図

## (4) 埋め戻し材の吹付け試験結果

## (a) 吹付け箱試験結果

模擬掘削土の粒度分布をパラメータにした埋め戻し材の吹付け後の乾燥密度を表 4.3-19 に示 す。表には、サンプリング試料を用いて実施した透水試験の結果を併せて示した。粒度分布の違 いにより乾燥密度に差はあるが、いずれの条件でも透水係数は 10⁻¹² m/s オーダーであった。ま た、最大粒径 5 mm 及びブレンド材については、*wopt*-3%と *wopt*-1.5%の透水係数が同一オーダー であることから、吹付け工法を対象とする埋め戻し材の含水比のばらつきとして、1.5%程度は許 容されると考えられる。

また、吹付け施工時の材料供給量の影響を把握するために、試験Iにおいて吹付け箱試験を実施した。材料供給量と乾燥密度の関係を図 4.3-35 に示す。材料供給量と乾燥密度の関係が単調減少であることがわかる。この原因としては、コンプレッサから供給される空気圧は一定であるが、材料供給量の増加に伴い、埋め戻し材の単位質量当たり負荷されるエネルギーが減少したことがあげられる。

模擬掘削土	含水比 乾燥密度(Mg/m ³ )		透水係数(m/s)
最大粒径 2.5 mm*	Wopt-3 (7.2%)	1.881	$6.33  imes 10^{-12}$
旱十粒汉 5 mm*	wopt-3 (6.4%)	1.943	$7.64\! imes\!10^{-12}$
取八栏住 0 mm"	wopt-1.5 (7.9%)	1.925	$7.41  imes 10^{-12}$
$2.5~\mathrm{mm}:2.5{\sim}5~\mathrm{mm}$	Wopt-3 (5.6%)	1.784	$3.75  imes 10^{-12}$
=6.5:3.5(ブレンド材)	Wopt-1.5 (7.1%)	1.826	$6.50\! imes\!10^{-12}$

表 4.3-19 模擬掘削土の粒度の違いと埋め戻し材の透水係数の関係(試験I)

*透水試験結果は令和2年度の吹付け箱試験の結果





## (b) 施工試験結果

#### (i) 乾燥密度の測定結果

吹付け工法により施工した埋め戻し材の乾燥密度のばらつきを把握するために、小規模模擬坑 道において試験Ⅰ、実規模模擬坑道において試験Ⅱを実施した。試験Ⅰと試験Ⅱの埋め戻し材(付 着材)の乾燥密度の頻度分布を図 4.3-36 に示す。いずれの試験においても乾燥密度の頻度分布 のピークは明瞭であり、その分布形状は正規分布に近かった。

試験 I (*wopt*-3%、2インチ)の付着材の乾燥密度の平均値は、1.990 Mg/m³、標準偏差は 0.031 Mg/m³であった。乾燥密度の最小値は、施工目標 1.800 Mg/m³を満足した。試験 Ⅱ による乾燥密

度の平均値 1.828 Mg/m³ は試験 I の結果より小さく、標準偏差 0.053 Mg/m³ は試験 I の結果よ りも大きかった。また、測定したデータのうち 9 個のデータは、施工目標 1.802 Mg/m³ を下回っ た。

吹付け工法による埋め戻しでは、吹付ける面に対して垂直に同一のエネルギーで吹付けること ができれば、乾燥密度の空間的なばらつきが生じにくいと考えられる。図 4.3-37 は、小規模模擬 坑道における乾燥密度の空間分布を示す。図の横軸の前、中、後は、小規模模擬坑道の縦断方向 の位置、①~③は小規模模擬坑道の横断方向の位置を表す(図 4.3-33)。縦断方向、横断方向の いずれにおいても乾燥密度のばらつきの幅は 0.1 Mg/m³程度であり、単調増加などの傾向は見ら れず、ランダムなばらつきを示している。以上のことから、吹付け工法では埋め戻し材の空間的 なばらつきが生じにくいことが確認できた。

以上の結果は小規模模擬坑道における比較的少ないデータに基づいたものであり、実規模模擬 坑道試験において再度確認する。



試験 I (*w_{opr}*3% 2 インチ)
 図 4.3-36 吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度の頻度分布図



図 4.3-37 吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度の空間分布(試験 I)

#### (ii) 埋め戻し材のリバウンド率

試験 I と試験 II における埋め戻し材のリバウンド率をそれぞれ表 4.3・20 及び表 4.3・21 に示 す。試験 II のリバウンド率(平均 17.4%)は、試験 I のリバウンド率(平均 61.0%)より小さい。 試験 II ではリバウンドの対策として含水比の大きい配合 II を用いており、配合(含水比)による リバウンド低減の効果が確認できた。試験 I においても同様に、*wopt*-1.5%のリバウンド率 53.0% ~57.1%が、*wopt*-3.0%のリバウンド率 66.2~67.5%より小さいことから、含水比の増大に伴うリ バウンド低減の効果が確認できた。 試験 I の令和 3 年度の含水比 wopt-3%のケースのリバウンド率は、令和 2 年度の結果を上回った(表 4.3-20)。その原因として、人力施工を機械施工に変更した点があげられる。リバウンド低下には、吹付け面に対してノズルを垂直に向けて施工することが有効であるが、機械施工では小規模模擬坑道の狭隘箇所の操作性に課題が残る(図 4.3-38)。なお、実規模坑道の場合には、スケール効果により機械施工の操作性の影響は緩和されると考えられる。

	令和2年度			令和3年度		
ケース	Wopt ⁻ 3 2インチ	Wopt 3 2インチ	Wopt 3 2.5 インチ	Wopt-1.5 2インチ	Wopt 1.5 2.5 インチ	平均
リバウンド率	42.7%	66.2%	67.5%	53.0%	57.1%	61.0
備考	人力施工*	機械施工	機械施工	機械施工	機械施工	

表 4.3-20 埋め戻し材のリバウンド率(試験 I)

*令和2年度の施工試験であり参考値。最適含水比 Wortは令和2年度9.4%、令和3年度8.6%。

表 4.3-21 埋め戻し材のリバウンド率(試験Ⅱ)

施工単位	BL01	BL02	BL03	BL04	BL05	平均
リバウンド率	19.6%	21.3%	13.3%	16.2%	16.4%	17.4%
備考	機械施工	機械施工	機械施工	機械施工	機械施工	



図 4.3-38 機械施工における小規模模擬坑道の狭隘箇所施工の状況(試験I)

#### (iii) 吹付けノズル及びホースの目詰まりの低減

試験 I の小規模模擬坑道の施工試験ではホースなどで目詰まりが生じることなく、最大 10 t の 連続施工ができた。一方、試験 II の実規模模擬坑道の施工試験ではホース内で目詰まりが生じた。

試験 I では、目詰まりの対策として含水比の低い配合 I を用いており、その効果により目詰まりが低減できた。また、令和 2 年度に目詰まりが見られた *wopt*-1.5%のケースでも目詰まりが生じなかったことから、令和 3 年度に改善したホースの配置(ホースの屈曲をできる限り低減:図4.3-39)が、目詰まりに対して有効であると言える。

試験Ⅱの目詰まりの多くは施工直後に発生した。ホース内の埋め戻し材の付着状況と排出され た閉塞材の塊を図 4.3-40 に示す。目詰まりした場合には、ホースの外側から衝撃を加えて閉塞 した箇所をほぐすとともに、ホース内への古布の圧送による清掃を実施した。作業を中断すると きも同様に、古布の圧送によるホース内清掃を実施した。また、埋め戻し材の輸送用のベルトコ ンベア上で埋め戻し材の団粒化の有無を確認し、必要に応じて材料をほぐした。こうした対策に より、目詰まりが生じながらも施工性はある程度確保できることがわかった。





(a) 改良前:ホースが屈曲し目詰まりの可能性が高い
 (b) ホース配置の改善の状況
 図 4.3-39 ホースの配置(屈曲)の改善の状況





(a) 付着状況 (b) 排出された閉塞材の塊 図 4.3-40 ホース内部の埋め戻し材の付着状況(試験I)

## (iv) 吹付け施工後の埋め戻し材の透水係数

試験 I 及び試験 II の透水試験結果を図 4.3・41 に示す。図の凡例のうち、KV(15)-BA(G0-CS85-P0)は、吹付け用の埋め戻し材の配合を示す(表 4.3・1 及び表 4.3・2 参照)。近似曲線は、KV(15)-BA(G0-CS85-P0)の結果から求めた。試験 I では小規模模擬坑道において、2 種類の含水比(*wopt*-1.5%、*wopt*-3.0%)、2 種類のホース径(2 インチ、2.5 インチ)を組み合わせた 4 ケースの施工試験を実施し、それぞれ 2 か所(頂部、側壁下部)、計 8 か所の透水係数を測定した。試験 II では実規模模擬坑道において施工試験を行い、坑道の妻部及び側壁部の吹付けの仕上がり面(ブロック3 及びブロック 5)の中央部において各々3 か所、計 6 か所の透水係数を測定した。

試験Ⅱの2点を除けば、吹付けの付着材の透水係数は、室内試験結果から求めた近似曲線による推定値より小さいことがわかる。近似曲線の上に位置する結果に関しては、施工初期の値であることから、施工不慣れによるものであると考えられる。それ以外の測定点の透水係数が近似曲線を下回った理由としては、リバウンドにより付着材のベントナイト混合率がみかけ増加したことがあげられる。

なお、試験 I の一部の乾燥密度は、図 4.3-36 に示す試験 I の乾燥密度の頻度分布の範囲から 逸脱している。この原因としては、頂部や側壁下部でのノズル操作の微調整が機械施工では困難 であることにより発生した可能性がある。ただし、透水係数は、透水性の基準 1×10⁻⁹ m/s より 2 オーダー低いことから、低透水性については目標をクリアしている。締固め試験 C 法を基に締 固め度 85%として設定した目標乾燥密度は、透水係数に関しては余裕のある設定であると考えら れる。透水試験時の乾燥密度の測定は、供試体整形により体積の誤差が生じやすいと考えられる ことから、現場密度試験とは切り離し、その用途を透水係数と乾燥密度との関係性の整理に限定することが好ましい可能性もある。



図 4.3-41 吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度と透水係数の関係

#### (v) 施工後のかさ密度

かさ密度は、付着材の乾燥質量を出来形体積で除して求められる。

出来形体積は、3Dスキャナで求めた。試験I(小規模模擬坑道)及び試験II(実規模模擬坑道)の出来形体積の測定結果を図 4.3-42 に示す。試験I、試験IIともに出来形の表面形状が再現できている。

付着材の乾燥質量は、使用した埋め戻し材から、リバウンド材及び目詰まりした材料(ホース 内の付着材料)などを差し引いて求める。このとき、埋め戻し材、リバウンド材などの湿潤質量 と含水比のデータが必要になる。使用した埋め戻し材の含水比は、製造時にフレコンごとに管理 できるものの、リバウンド材などの含水比は、施工状況により変化する。そのため、付着材の乾 燥質量は誤差が生じやすい。

試験Ⅰでは、埋め戻し材の含水比をフレコンごとに測定し、リバウンド材の含水比を複数回測 定し、埋め戻し材とリバウンド材の乾燥質量を求めた。一方、試験Ⅱでは、含水比としてブロッ クごとの平均含水比を用いて埋め戻し材とリバウンド材の乾燥質量を簡易的に求めた。

試験 I と試験 II のかさ密度の計算結果をそれぞれ表 4.3-22、表 4.3-23 に示す。誤差は、各々の現場密度試験結果の平均値を基準として求めた。かさ密度の誤差は、試験 I と試験 II の双方で数%程度に収まった。かさ密度の計算の詳細は付録 4 に示す。

試験Ⅱは、試験Ⅰより誤差が大きく、埋め戻しが進行するにつれて誤差が減少する傾向が見られる。試験Ⅰより誤差が大きい原因として、含水比の求め方の違いがあげられる。埋め戻しが進行するにつれて誤差が減少する傾向の理由としては、リバウンド回収、目詰まり対策など吹付け 作業の慣れに伴うスキル向上が考えられる。

かさ密度の誤差は、試験I、試験Iの双方において、プラス側に偏っている。付着材の乾燥質 量の求め方(=埋め戻し材の乾燥質量 - 付着しなかった分の乾燥質量)を踏まえると、埋め戻し 材の乾燥質量は管理しやすいため、誤差の主な原因は、付着しなかった分の乾燥質量となる。付 着しなかった分の乾燥質量の回収は100%未満であるため、その分、付着材の乾燥質量はみかけ 増える。そのため、かさ密度の誤差はプラス側に偏ると考えられる。かさ密度の誤差の対策とし ては、開発段階でかさ密度と現場密度試験結果の平均値との差が数%程度に収まることを確認し、 施工段階のかさ密度の目標値に誤差分を上乗せしたマージンを加味する方法が考えられる。





(a) 試験I(w_{opt}-3%_2インチ)
 (b) 試験I(妻部と側部の施工完了時)
 図 4.3-42 3D スキャナによる出来形体積測定結果

ケース名	かさ密度	現場密度試験*による	差	誤差					
	$(Mg/m^3)$	乾燥密度(Mg/m ³ )	$(Mg/m^3)$	(%)					
W _{opt} -1.5%_2インチ	2.071	1.987	+0.084	+0.4					
W _{opt} -1.5%_2.5インチ	2.025	1.967	+0.058	+3.0					
<i>W_{opt}</i> -3%_2インチ	2.069	1.998	+0.071	+3.5					
W _{opt} -3%_2.5インチ	1.903	1.942	-0.039	-2.0					

表 4.3-22 7	かさ密度の精度	(試験I)
------------	---------	-------

*シリコーンオイル法による現場密度試験

施工単位(累積)	かさ密度	現場密度試験*による	差	誤差					
	$(Mg/m^3)$	乾燥密度(Mg/m ³ )	$(Mg/m^3)$	(%)					
BL01	1.905	1.764	+0.141	+8.0					
BL01-02	1.978	1.840	+0.138	+7.5					
BL01-03	1.922	1.841	+0.081	+4.4					
BL01-04	1.938	1.860	+0.078	+4.2					
BL01-05	1.939	1.862	+0.077	+4.1					

表 4.3-23 かさ密度の精度(試験Ⅱ)

*シンウォールサンプリングによる現場密度試験

## (vi) 施工速度

全施工時間(吹付けの施工時間、リバウンド回収時間、ホース内清掃など目詰まりの対応の時間)に現場密度試験の時間を加えた場合と全時間に 3D スキャナの測定時間を加えた場合の 2 通りで施工速度を求めた(表 4.3-24、表 4.3-25)。なお、施工速度の算定で用いた施工歩掛は、付録 4 に示す。

試験 I で求めた施工速度を表 4.3-24 に示す。試験 I の現場密度試験はサンプリングが容易な シリコーンオイル法であるために、現場密度試験のケースと 3D スキャナのケースに差は生じて いない。ホース径 2 インチとホース径 2.5 インチをそれぞれ使用したケースの施工時間は、ほぼ 一致しており、ホース径による施工速度への影響は見られなかった。

試験 I の人力施工の施工速度 0.93~0.99 m³/hr(令和2年度)に対して、機械施工の施工速度は 0.24~0.35 m³/hr であり、人力施工の方が機械施工よりも歩掛がよい。その原因は、人力施工

では吹付けとリバウンドの回収作業を並行して行えたが、機械施工では、安全上、吹付けとリバ ウンド回収作業が並行して行えなかったためである。機械施工では、リバウンドによる施工速度 への影響が大きいことがわかった。

試験Ⅱにおける施工速度の算定結果を表 4.3-25 に示す。シンウォールサンプリングによる密 度測定時間は、3Dスキャナを測定する時間より長いため、3Dスキャナのケースの施工速度は現 場密度試験のケースより速い。試験Ⅱは、リバウンド率が低かったものの、ホースの目詰まりの 発生に伴う施工の中断によって施工時間を要したため、施工速度は平均 0.51~0.57 m³/hr とな り、試験Ⅰの人力施工の施工速度より遅い。なお、ブロックの番号が増えるにつれて、すなわち、 吹付け施工量が増えるにしたがい、施工速度の増加傾向が見られる。その原因として、吹付け施 工の慣れなど、吹付けの施工スキルの向上があげられる。早い段階での施工スキルの向上は、施 工速度を高める上で重要であると考えられる。

ケース			w _{opt} -3 2 インチ	w _{opt} -3 2 インチ	Wopt-3 2.5 インチ	w _{opt} -1.5 2 インチ	w _{opt} -1.5 2.5 インチ
吹付け、材料回収(目詰ま	施工時間	hr/BL	0.98	5.73	5.90	2.31	2.04
り対応含む)、現場密度試	施工体積	m³/BL	0.97	1.38	1.53	0.76	0.72
験 施工速度 m ³ /hr		0.99	0.24	0.26	0.33	0.35	
吹付け お約回収(日誌ま	施工時間	hr/BL	1.04	5.69	5.86	2.37	2.10
吹付り、材料回収(目詰よ り対応会ta) 2D 測量	施工体積	m³/BL	0.97	1.38	1.53	0.76	0.72
	施工速度	m³/hr	0.93	0.24	0.26	0.32	0.34

表 4.3-24 吹付け工法による埋め戻しの施工速度(試験 I)

注)ハイライト部は令和2年度の施工試験結果。現場密度試験はパラフィン法。

表 4.3-25 吹付け工法による埋め戻しの施工速度(試験Ⅱ)

作業単位			BL01	BL02	BL03	BL04	BL05	平均
吹付け、材料回収(目詰	施工時間	hr/BL	5.08	3.66	2.25	2.58	1.58	-
まり対応含む)、現場密	施工体積	m³/BL	1.51	1.37	1.29	1.52	1.15	-
度試験	施工速度	m³/hr	0.30	0.37	0.57	0.59	0.73	0.51
吹付け、材料回収(目詰	施工時間	hr/BL	4.83	3.33	2.00	2.33	1.42	-
まり対応含む)、3D 測	施工体積	m³/BL	1.51	1.37	1.29	1.52	1.15	-
量	施工速度	m³/hr	0.31	0.41	0.65	0.65	0.81	0.57

注)現場密度試験は砂置換法。

## (vii) 吹付け工法の自動化・遠隔化

令和3年度は機械施工を採用し、機械施工の課題を整理した。

試験 I による小規模模擬坑道の施工試験では、機械施工で生じたリバウンドは、人力施工より も大幅に増大した。その原因として、狭隘な位置でのノズルの微調整が困難であったことがあげ られる。スケールの大きな実規模模擬坑道の施工試験では、操作性の向上が期待できるため、リ バウンドの低減が期待できる。その一方で、試験 II では、施工進捗に伴い施工速度が増大する傾 向が見られたことから、機械施工のスキルの向上と維持が、施工速度を確保する上で重要と考え られる。

試験Ⅰと試験Ⅱの双方で、リバウンドの回収作業は人力で対処している。そのため、回収作業

は、安全上、機械施工による吹付けと同時に行うことができないため、全施工時間が割り増しと なっている。今後、回収作業の機械化が実現できれば、吹付けとの同時作業を可能とすることで 施工速度の向上のみならず、かさ密度の精度向上にも期待できると考えられる。

リバウンド材の表面を吹付けた場合、表層に付着した埋め戻し材は締め固められているが、リ バウンド材そのものは、締固められることなく、弱層のまま残る(図 4.3-43)。かさ密度を用い た埋め戻し材の施工管理の場合には、こうした局所的な弱層の有無の判別がしづらい。そのため、 吹付け工法の自動化にあたっては、リバウンド材の回収作業の効率化に加えて、リバウンド材の 回収率を高める工夫が不可欠であると考えられる。





図 4.3-43 リバウンド材を吹付けた状況

## (5) 製造・施エプロセス管理手法の更新

令和2年度に、埋め戻し材の要求品質「低透水性」を確保するための製造・施工プロセス管理 手法(案)を検討した。

令和3年度は、プロセス管理手法の管理項目、管理指標及び管理方法の記載内容について、管 理対象のプロセス・特性、管理の判断に用いる情報、管理の判断の方法に分けて記載内容を具体 化した。令和3年度に更新した製造・施工プロセス管理手法(案)を表 4.3-26~表 4.3-28 に示 す。施工段階の管理はかさ密度管理を行うことを前提とし、その課題を開発段階で予めフォロー する内容に変更した。具体的には、かさ密度では、乾燥密度のばらつきが扱えないため、開発段 階において乾燥密度のばらつきを求めるとともに、乾燥密度のばらつきのデータを用いて巨視的 透水係数の評価を行うことを追加した。さらに、令和3年度の施工試験で得られた知見をもとに 以下に示す項目を追記した。

- ・ 混錬後の埋め戻し材の含水比精度の向上策
- 製造後の埋め戻し材の保管方法
- かさ密度の精度向上策

令和2年度及び令和3年度の検討により、模擬掘削土の含水比は採取時期、採取位置によりば らつくことが明らかとなった。令和3年度は、試験Iにおいて埋め戻し材の製造時に模擬掘削土 の含水比を高頻度で計測した。その結果、試験Iにおいて製造後の埋め戻し材の含水比のばらつ きは少なく、安定した埋め戻し材(誤差±0.5%)が製造できた。この結果を踏まえて掘削土の含 水比管理を製造段階のプロセス管理に追加した。

製造された埋め戻し材はフレコンに投入され、屋根付きの倉庫へ一時保管される。通常のフレ コンでは気温や湿度などの環境により埋め戻し材の品質に影響を及ぼす可能性があることから、 耐候性のフレコンを使用する必要がある。また、所定のスペースに必要な数量を保管するには、 フレコンの段積みが望まれる。フレコンを段積みすることで、保管数量を確保できる一方、自重
や上載荷重による団粒化が懸念される。令和3年度までの実績を踏まえ、開発・製造段階のプロ セス管理に耐候性フレコンを使用すること及び団粒化を避けるための最大の段積み数を追加した。 令和3年度は、試験Iにおいて埋め戻し材の含水比、リバウンドした埋め戻し材の含水比の測 定を高頻度で実施し、かさ密度の精度向上を図った。その結果、かさ密度の誤差は、数%程度に 抑えられることがわかった。そこで、かさ密度の精度向上のためリバウンドした埋め戻し材及び 埋め戻し材の双方の含水比を高頻度で計測することをプロセス管理に追記した。さらに、かさ密 度の誤差は、プラス側に偏る傾向を踏まえて、その誤差をかさ密度のマージン(裕度)とするこ とをプロセス管理手法に追記した。

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目(特性、 プロセス)	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)
	<ol> <li>製造・施工管理指 標の設定</li> </ol>	開発段階	<ul> <li>・ 全指標</li> </ul>	<ul> <li>・設計仕様(包括的技術報告書含む)</li> <li>・規格・基準</li> </ul>
①開発(試験による管 理指標の設定)	①-1混錬試験	・配合	・ベントナイト、骨材(砕砂)、水 質及び有害物質	・材料ごとの品質保証書の確認
		・混錬仕様	<ul> <li>・ 肯材混合率など配合割合</li> <li>・ ミキサー仕様、投入手順、回転</li> <li>粉 混錬時間</li> </ul>	<ul> <li>・ 締固め試験結果などを参考に判断</li> <li>・ 材料の均質性の評価結果を基に判断</li> </ul>
		・材料の均質性	<ul> <li>・含水比(ばらつき)</li> <li>・骨材の粒度分布(ばらつき)</li> </ul>	<ul> <li>・製造精度で品質を担保する</li> <li>・粒径のばらつきの影響評価を基に判断</li> </ul>
①-1混練試験 ←-		・保管	<ul><li>・埋め戻し材料の識別</li><li>・団粒化の抑制</li></ul>	<ul> <li>・フレコンの識別番号で管理</li> <li>・経験実績によるフレコンの最大積み重ね数</li> </ul>
	①-2室内試験	・乾燥密度	<ul> <li>・乾燥密度と透水係数の関係</li> <li>・粒度のばらつきの許容範囲</li> <li>・ 含本比のばこのきの許容範囲</li> </ul>	<ul> <li>・目標透水係数を満たす目標乾燥密度を設定</li> <li>・粒度調整した材料の吹付け試験に基づき判断</li> <li>・ 結果は計算にまでき判断</li> </ul>
	①-3施工試験	・吹付け仕様	<ul> <li>・目標乾燥密度</li> <li>・吹付けシステムの仕様</li> </ul>	<ul> <li>・施工試験(小規模坑道試験を含む)に基づき目標</li> <li>乾燥密度を満たす仕様、手順などを設定</li> </ul>
①-2室内試験			<ul> <li>・ 吹付け手順</li> <li>・ 材料の回収の頻度、手順</li> <li>・ 目詰まりの点検頻度、対応手順</li> </ul>	
		・ 埋め戻し材の均 質性	<ul> <li>・乾燥密度・含水比の基本統計量</li> <li>・付着材の有効粘土密度</li> <li>・乾燥密度の空間的知期##</li> </ul>	<ul> <li>付着した埋め戻し材の現場密度試験結果から算定</li> <li>付着した埋め戻し材、リバウンドした埋め戻し材</li> </ul>
①-3施工試験			<ul> <li>・含水比のばらつきの許容範囲</li> <li>・巨視的透水係数と乾燥密度のばら つきの関係</li> </ul>	<ul> <li>・ (転圧工法の空間的相関性を引用)</li> <li>・ 含水比の異なる材料の施工試験に基づき判断</li> <li>・ 巨視的透水係数の評価(感度解析含む)に基づき</li> </ul>
		・かさ密度	<ul> <li>・出来形(体積)</li> <li>・開封材料及び回収材料の質量・含</li> </ul>	<ul> <li>設定</li> <li>・検査証明付きの3Dスキャナの測定記録確認</li> <li>・          ・</li></ul>
▶ 製造・施工の管理指標 の設定		・頂部空隙の閉塞	・かさ密度のマージン ・ベントナイト混合率(配合)	<ul> <li>         ・ かさ密度と乾燥密度との差の評価を基に設定         ・ ②-3製造の配合を参照     </li> </ul>

# 表 4.3-26 吹付け工法における製造・施工プロセス管理(開発段階)

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目(特性、 プロセス)	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)
②製造	2製造	製造段階	・全指標	<ul> <li>・設計仕様(包括的技術報告書含む)</li> <li>・規格・基準</li> </ul>
	②-1材料調達	・材料	<ul> <li>・ベントナイト、骨材(砕石・砕</li> <li>砂)及び水の種類と有害物質</li> </ul>	<ul> <li>・材料ごとの品質保証書</li> <li>・発生地層が変化するたびに品質確認試験を実施</li> </ul>
②-1材料調達	②-2一時貯蔵	・骨材の含水状況	<ul><li>・骨材の含水比</li><li>・一時貯蔵場所の湿度</li></ul>	<ul> <li>・発生地層ごとの骨材の定期的な含水比試験</li> <li>・貯蔵場所の湿度測定</li> </ul>
	②-3混錬	・ 配合	・ベントナイト混合率、骨材混合 率、含水比など配合割合	・1バッチ当たりの材料の投入質量を管理
		・混練仕様	<ul> <li>・ミキサー仕様(回転数含む)、</li> <li>投入手順、混錬時間</li> </ul>	・開発段階で定めた仕様を遵守
		・材料の均質性	<ul> <li>・含水比(ばらつき)</li> <li>・骨材の粒度分布(ばらつき)</li> </ul>	<ul> <li>バッチごとの含水比及び粒度分布が許容範囲であることを確認</li> <li>         ・ 対判の物質性は         ・ 関発段階で定めた配合         ・ またせ     </li> </ul>
			四北三计社会归然会儿送	一仕様や骨材の含水比計測によって確保
②-2一時貯蔵 ↓ ②-3混錬	(2)-4貯蔵	• 保官方法	・理め戻し材の保官の仕様	<ul> <li>・          ・          ・</li></ul>
②-4貯蔵				

# 表 4.3-27 吹付け工法における製造・施工プロセス管理(製造段階)

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目(特性、 プロセス)	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)
③施工	③施工	施工段階	<ul> <li>・ 全指標</li> </ul>	<ul> <li>・設計仕様(包括的技術報告書含む)</li> <li>・規格・基準</li> </ul>
	③-1埋め戻し材の 搬入・保管	・材料搬入・保管	<ul> <li>・埋め戻し材保管袋の識別番号</li> <li>・埋め戻し材の含水比</li> </ul>	<ul> <li>・開発段階の埋め戻し材の配合、吹付け仕様</li> <li>・配合など製造記録と施工仕様の一致を確認</li> <li>・製造記録及びサンプルの試験結果が含水比、粒度</li> </ul>
③-1埋め戻し材の搬  入・保管	-		<ul> <li>・埋め戻し材の粒度</li> <li>・団粒化の抑制</li> </ul>	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
	③-2埋め戻し材の 供給	<ul> <li>・使用材料</li> <li>・</li> </ul>	<ul> <li>・使用した埋め戻し材(使用材)</li> <li>の湿潤質量、含水比</li> </ul>	<ul> <li>材料の製造記録で湿潤質量と含水比を確認</li> </ul>
▼ ③-2埋め戻し材の供 給	③-3吹付け	・吹付け仕様	<ul> <li>・ 吹付けシステムの仕様、吹付け 手順</li> <li>・ 出来形(体積、平均層厚)</li> </ul>	<ul> <li>・ 吹付けシステムの仕様が開発段階と同等であることを確認。手順は目視、画像などで確認</li> <li>・ 3Dスキャナなどによる吹付け層の出来形(体積)から求めた平均層厚などが開発段階とほぼ一</li> </ul>
↓ ③•3吹付け	③-4材料回収及び 目詰まり対応	・吹付け仕様	<ul> <li>・材料の回収の頻度と手順、目詰 まり点検頻度と対応手順</li> </ul>	<ul><li></li></ul>
		・リバウンドした 埋め戻し材	・リバウンドした埋め戻し材の湿 潤質量、含水比、粒度分布	<ul> <li>リバウンドした埋め戻し材の質量計量、含水比試 験、粒度試験で確認</li> </ul>
③-4材料回収ほか	③-5埋め戻し材の 密度	・かさ密度	<ul> <li>・付着材(開封材料と回収材料の</li> <li>差)の乾燥質量</li> <li>・出来形(体積)</li> <li>・かさ密度</li> <li>・かさ密度</li> </ul>	<ul> <li>・付着材の乾燥質量を出来形(体積)で除した値から開発段階で設定したマージンを差し引いて得られるかさ密度の計算を確認</li> <li>・かさ密度が巨視的透水係数の評価の範囲内であることを確認</li> </ul>
③-5埋め戻し密度	③-6埋め戻し材の	・埋め戻し材の透	・巨視的透水係数(開発段階)	・施工で得られたかさ密度が、開発段階の巨視的透
③-6均質性	均質性 	水性のはらつき の影響	<ul> <li>・かさ密度</li> </ul>	水除数の評価で想定した許容範囲に収まることを 確認
③-7未充填空隙	③-7未充填空隙	・頂部空隙の閉塞	・ベントナイト混合率	<ul> <li>・②-3製造の配合を参照</li> </ul>

# 表 4.3-28 吹付け工法における製造・施工プロセス管理(施工段階)

# 4.3.4 スクリューエ法による埋め戻し要素試験

# (1) 背景及び目的

スクリュー工法による埋め戻し材の製造・施工プロセス管理手法の構築に向けて、材料製造と 施工段階における管理項目及び管理指標を抽出することを目的として、令和2年度からの3か年 の計画で室内試験や要素試験に取り組んでいる。スクリュー工法は、図 4.3-44 に示すように複 数のスクリューフィーダを用いて坑道を埋め戻す工法であり、令和2年度には、スクリュー工法 に適した埋め戻し材の配合について検討するとともに、1本のスクリューを用いた要素試験によ り達成可能な埋め戻し材の乾燥密度を把握した。令和3年度は、坑道の天端や隅角部に対する充 填性等を確認するために、2本のスクリューで構成する要素試験装置を用いて坑道天端を模擬し た試験土槽を対象とした充填試験を実施した。



図 4.3-44 スクリュー充填装置の概略図

# (2) スクリューエ法に関する研究開発計画

令和2年度に実施した1本のスクリューを用いた要素試験から、以下の課題があげられた。

- ・ 要素試験の結果、埋め戻し材の粗粒分が分離して下方に集積する傾向が確認された。粗粒 分の集積部位では、埋め戻し材に要求される止水性が確保されないことが懸念されるため、 材料分離の抑制が課題となった。
- 要素試験におけるスクリュー管内の充填率は約60%で、設計段階で想定した90%より低い 値となった。この充填率は、充填速度(施工速度)に直接的に影響することから、原因の 把握と設計時における適切な充填率の予測手法の開発が課題となった。
- プロセス管理手法(開発段階)では、本工法の特性(圧縮力による締固めをおこなわない、 低い含水比の流動性の高い埋め戻し材を使用する、現場での施工時に調整対応できる管理 項目が少ないなど)から、製造時の均質性の確保、要求される乾燥密度の達成、坑道アー チ天端及び隅角部への充填性、設計の管理項目への影響の確認などが課題として挙げられ た。
- これらの課題を踏まえて、更新した令和4年度までの研究開発計画を表 4.3-29に示す。

実施項目	令和2年度	令和3年度	令和4年度
オエキに海した畑			
本エムに過じた理	配合設計(透水係数の		配合設計の改善(2)(分
め戻し材の検討	達成・スクリュー施工		
	に適した含水比)	の抑制)	離の抑制)
要表試験による木			
	フクリー 二単仕	スクリュー(複数)	スクリュー(複数)
工法の埋め戻しへ		(アーチ中央・側壁隅角	(アーチ中央・側壁隅角
の適用性の検討	(乾燥密度・允項速度の	部の充埴性確認の転	部の充埴性向上 配置・
	確認)	方向の影響)	後退速度の影響
			反应还及 () 彩音/
畑め豆   設備の設	フクリュ 単体記計	実施工用の概念設計	実施工用の基本設計
生め戻し設備の改	スクリュー単体設計	(抗道今新西太対象と	(抗道今新面を対象と
計	(埋め戻しへの適用	小坦王町回で内家と	(別道王)川山で対象と
	株、大坊は安の水河)	したスクリュー配直	したスクリュー配直
	性・允禩迷度の確認)	(1))	(2)、王要周辺装置)
───────────────────────			
ス管理手法の構築	構築	更新	更新(2)
	1	1	1

表 4.3-29 スクリューエ法研究開発工程(案)

坑道アーチ中央部への充填性の確認だけであればスクリュー1本での試験で対応が可能である が、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 めには、2本のスクリューを配置して、埋め戻し材を押し上げる(あるいは押し込む)効果を確 認する必要あることから、2本のスクリューを用いた要素試験を計画した。

令和2年度の要素試験結果をもとに、スクリューの充填速度を基に計算した結果、坑道全断面 は14本のスクリューで埋め戻すことが可能と考えた。これを基にしたスクリュー配置の案及び そこから充填性を確認すべき坑道の部位を取り出したものを図4.3-45に示す。この部位をスク リューで埋め戻す条件として、図4.3-46に示すように、坑道アーチ中央部及びアーチ両端部の 両方が、埋め戻し材の安息角(令和2年度の実績より、約40度)で斜面が形成された場合の3角 形の中に納まることで充填が可能となるという仮説を立てて、スクリューの左右の位置を決定し た。

スクリュー左右位置の線上における、スクリューの上下位置は、スクリューの埋め戻し材の押 し上げ可能高さを想定(図ではスクリュー中央を天端中央から350mm下に仮定した結果、押し 上げ高さはスクリュー管上面から557mmとなる)して決定した。この考え方では、スクリュー の上下位置は、スクリューによる埋め戻し材の押し上げ可能な高さによりスクリューを上下に移 動して対応することとなる。

スクリューの上下位置を決定するための埋め戻し材の押し上げ高さについては、スイス・モン テリ試験場の FE 試験のための予備試験において、約 30 cm までの範囲であれば、スクリュー先 端の埋め戻し材(ベントナイト 100%のフレーク状)への挿入深さとほぼ同様という実績がある (Nagra, 2019)。これは、押し上げられた埋め戻しの頂点がスクリュー先端直上にあり、埋め戻

し材が斜面を形成する安息角を約45度とすると成り立つ仮定である。

今回の計画では、図 4.3-50 に示すように 557 mm の押し上げ高さが必要となり、560 mm 程 度スクリュー先端を挿入することにより図 4.3-46 に示すような充填が可能と考えて、スクリュ ーの上下位置と、試験時の挿入深さを設定した。同様に、アーチ両端部についても、押し上げに より土槽天端に沿って埋め戻し材が流動して充填されると予想した。 なお、令和2年度の自由落下による充填試験の結果から、側壁下部の隅角部については、スク リューからの埋め戻し材の自由落下により適切な充填がなされるものと考えた。



<u> 及び充填性を確認する部位</u>

図 4.3-45 スクリュー配置の案及び充填性を確認すべき坑道の部位



図 4.3-46 埋め戻し材の押し上げによるアーチ中央部・端部の充填の概念

## (3) スクリュー充填要素試験装置

スクリュー要素試験装置は、スクリュー充填装置(充填用スクリュー、埋め戻し材供給ホッパー、反力・後退用ジャッキで構成)、埋め戻し材供給装置(埋め戻し材供給ホッパーに埋め戻し材 を供給)、試験土槽で構成されている。製作したスクリュー装置、埋め戻し材供給用ホッパー、反 カジャッキ及び架台の構造を図 4.3・47 に示す。2本のスクリューは、試験土槽に向かって右側を 「スクリューNo.1」、左側を「スクリューNo.2」とする。また、装置の主要部分の外観を表 3.2-7 に示す。



図 4.3-47 スクリュー要素試験装置の概要図







(b) スクリュー及びホッパー





(c) ホッパー及び反力・後退用ジャッキ
 (d) 試験土槽(スクリュー設置後)
 図 4.3-48 スクリュー要素試験装置の主要部分の外観

# (a) スクリュー充填装置

スクリュー充填装置は、令和2年度に実施したスクリュー要素試験装置の設計(原子力機構・ 原環センター,2021)に基づき製作した。スクリュー充填装置の基本仕様を表 4.3-30に示す。埋 め戻し材として用いる最大粒径20mmの砕石に対応するために、スクリュー本体の外径はφ300 mmとした。また、試験土槽中でスクリューの先端位置が調整できるように、スクリューの角度 を調節する機構を設けた。

スクリューの設置位置よりも上方の坑道天端部分を充填するためには、スクリュー先端を埋め 戻し材に挿入した状態で埋め戻し材を押し上げる必要がある。この際、押し込み力に対する反力 がスクリュー本体に作用する。また、一定の押し込み力を維持するためには、埋め戻し材の充填 の進展に合わせてスクリュー本体を適切な速度で後退させる必要がある。そのため、スクリュー 充填装置の後部に油圧ジャッキを設置し、油圧により装置の後退速度を調整することとした。図 4.3-49 に示すように、油圧ジャッキ本体を固定し、油圧による抵抗で反力を維持するとともに、 反力に対して適切な油圧を設定することにより後退速度を調整する。

この後退速度については、同じく図 4.3・49 に示すように、令和 2 年度の要素試験で得られた

スクリュー1本の単位時間当たりの充填量(4.23 m³/hr)と後退過程で土槽に充填するスクリュー1本あたりの埋め戻し材(図中の黄色の部分)の体積(3.03 m³)から、充填に要する時間を3.03/4.23 = 0.716 hr = 43.0 min とし、この重量を充填する場合に必要な後退長 1.10 m から、後退速度は $1.10 \times 100/43.0 = 2.6 \Rightarrow 3$  cm/min と設定した。なお、スクリューの充填速度は、単位時間当たりの充填量の違い(押し込み状況に影響されるスクリュー管内の充満率の影響が大きい)によっても変化するため、試験の状況に合わせて適宜調整することとした。



図 4.3-49 スクリュー反力の支持と後退速度の調整

スクリュ	一収納管	スクリュー本体			
内径	外径	外径	シャフト径	シャフト長さ	
304.7	318.5	300	190	100	4,591

表 4.3-30 スクリュー充填装置の基本仕様(単位:mm)



図 4.3-50 土槽天端中央及び両側の隅角部を充填するためのスクリュー配置案

## (b) 埋め戻し材供給装置

埋め戻し材供給装置は、ベルトコンベアを用いて埋め戻し材を連続的にスクリュー充填装置の 受け入れホッパーに供給できる機構とした。当初は、図 4.3-51 (a)に示すように2本のスクリュ ーに繋がる受け入れホッパーの中央に材料を落下させる供給方式としたが、後述するケース1の 試験の結果、充填された埋め戻し材のスクリューNo.1 側には細粒分が多く含まれ、スクリュー No.2 側には粗粒分が多く含まれる傾向が見られた。これは、材料供給時に埋め戻し材の細粒分と 粗粒分が分離して受け入れホッパーに供給されていたことが原因と判明したため、ケース2の試 験では、図 4.3-51 (b)に示すようにベルトコンベアに材料を振り分ける機構を追加して、2本の スクリューに対して個別に材料を供給する方式に変更した。



## (c) 試験土槽

2本のスクリューを用いて坑道天端部分の充填性を確認するために、図 4.3-45 に示した坑道上 部を模擬した試験土槽に対して充填試験を実施する。試験土槽のアーチ部の半径は、現時点で深 成岩類及び先新第三紀堆積岩類の竪置き・ブロック方式で検討されている処分坑道や主要坑道の 断面形状 (NUMO, 2021)を参考にして R = 2,500 mm とした。試験土槽の形状を図 4.3-52 に 示す。

試験土槽の幅については、図 4.3-45 の左図に示したように坑道の幅 5,000 mm に対して 4本 のスクリューで充填することを想定すると、スクリュー1本当たりの充填範囲は 1,250 mm とな ることから、坑道最上部の 2本のスクリューが充填する範囲として試験土槽の幅は 2,500 mm と した。また、土槽奥行き長さは、図 4.3-49 に灰色で示した坑道妻部を想定した初期の埋め戻し範 囲を除き、黄色で示した定常的に後退しながらの埋め戻しができる長さ 1,000 mm 以上(後退充 填の試験時間 40 分程度)を確保する目的で 3,500 mm とした。

なお、図 4.3-52 に示すように、土槽の妻部付近は充填要素試験の結果に影響しない範囲で、埋め戻し材の量を低減するために、底板を安息角(令和 2 年度の要素試験の実績から約 40 度)よりやや小さい 35.05 度(安息角より大きいと初期の妻部埋め戻しが滑落して安定しない可能性があるため)の傾斜を有する斜面とした。

図 4.3-53 に示すように、試験土槽には、充填要素試験後に試料採取するための透水試験用充

填モールドを設置するとともに、充填状況を観察するための観察窓などを設置した。

○試料採取

試料採取による埋め戻し材の乾燥密度、粒度分布、含水比及び透水係数を測定するために、 円筒形サンプラーに加えて、試験土槽には下記を設置した。

- ・ サンプリング用開口窓:土槽アーチ中央部に500 mm間隔で3か所、250 mm×250 mmの 開口窓を設置し、充填要素試験後にここから試料を採取する。
- 透水試験用充填モールド:試験土槽側壁の隅角部に外付けの箱を4か所設置し、充填後にここから透水試験用の試料を採取する。このモールドを設けたのは、スクリューから自由落下で隅角部に堆積した状態の試料を採取するためである。モールド側面は充填状況を観察するために透明アクリル製とした。

#### ○観察窓

充填状況を観察するための透明アクリル製の観察窓を試験土槽の両側面に各3か所(窓中心 が妻板よりそれぞれ1,125 mm、1,925 mm 及び2,725 mm の位置)、アーチ天端に3か所(窓 中心が妻板よりそれぞれ700 mm、1,200 mm 及び1,700 mm の位置)設置した。

○土槽内面格子

試験土槽内面を 100 mm 間隔の格子で区切り、充填された埋め戻し材と土槽内面との交線位 置及び土槽奥行き方向の7本のライン上の埋め戻し表面と土槽アーチとの距離を定量的に把握 する。土槽内面の格子及びその測定ラインの位置を図 4.3-54 示す。なお、土槽最奥部の壁を妻 面として、土槽奥行き方向の位置は、妻面からの水平距離で定義する。





図 4.3-52 試験土槽形状寸法



図 4.3-53 試験土槽の試験用開口部



<u>A~G: 土槽奥行き方向の形状計測ライン</u>



# 図 4.3-54 土槽内面の格子及び測定ラインの位置

# (4) 試験条件及び試験方法

# (a) 埋め戻し材の配合及び製造

埋め戻し材の透水係数については、表 4.3·31 に示す 1×10⁻⁹ m/s を達成することを目標とする。

表 4.3-31 埋め戻しに要求する透水係数の目標値

設計要件*	指標※	基準※	透水係数の暫定的な目標値
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

※NUMO、包括的技術報告書、NUMO-TR-20-03、2021.

また、スクリューによる埋め戻し材の充填時における材料分離の抑制を目的として、表 4.3-32 に 示す基本仕様に従い埋め戻し材の配合の検討を行った。令和2年度にはベントナイト原鉱石破砕 品を含む混合土を埋め戻し材として使用したが、充填中における原鉱石の粒子破砕による埋め戻 し材の粒度分布の変化を防止するために、ベントナイト原鉱石破砕品を使用しないこととした。 配合の検討は以下の手順で実施した。

- ・ 1 次検討として、ベントナイトを混合せずに、砕石 2005(最大粒径 20 mm)、1005(同 10 mm)、砕砂及び珪砂 6 号を用いて複数の配合を試行し、粒度分布の滑らかさ及び目視による混合状況から、候補となる配合を複数決定する。
- 2 次検討として、候補配合にベントナイトを混合して、粒度分布の滑らかさ及び目視によ る混合状況を確認して、締固め、透水などの土質試験の対象とする配合を決定する。
- ・ 3 次検討として、土質試験の結果をもとに、配合や材料管理の簡素化を考慮した最終的な 候補配合を決定する。

埋め戻し材の配合の検討結果を付録4に示す。付録4に示した候補材料を用いて事前の室内透水 試験で求めた透水係数を表 4.3-33 に示す。検討の結果、スクリュー充填要素試験では、以下の材 料を使用することとした。

- ・ベントナイト: クニゲル V1
- ・砕石 2005 (JIS A 5005): 高槻産硬質砂岩 (表面乾燥状態: 含水比 1%以下)
- ・砕石 1005 (JIS A 5005): 高槻産硬質砂岩 (表面乾燥状態: 含水比 1%以下)

・砕砂(JISA 5005):高槻産硬質砂岩(表面乾燥状態:含水比 2%以下に調整) 材料の混合後の外観及び粒径加積曲線を図 4.3-55 に示す。

表 4.3-32 埋め戻し材の基本仕様

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およびクニゲ ルGXの単独あるいは混合) 模擬掘削土:最大粒径 20 mm 以下、火成岩類または堆積岩類
混合率	乾燥質量比でベントナイト混合率 15%程度を目安に適切に選定

表 4.3-33 スクリュー充填要素試験に用いる埋め戻し材の透水試験結果

締固め度(A 法)	乾燥密度	有効粘土密度	透水係数
及び含水比	$Mg/m^3$	$Mg/m^3$	m/s
締固め度 100%	1.940	0.737	$3.64  imes 10^{-11}$
最適含水比			
締固め度 90%			$4.94 \times 10^{-11}$
最適含水比	1 746	0.575	4.24 ^ 10 **
締固め度 90%	1.740	0.575	$5.49 \times 10^{-11}$
自然含水比			$0.40 \times 10^{11}$
締固め度 80%	1 559	0.451	$7.09 \times 10^{-11}$
最適含水比	1.002	0.451	7.08 × 10 11



図 4.3-55 スクリュー充填要素試験に用いる埋め戻し材の配合

埋め戻し材の混錬は、2 軸バッチ式ミキサーを使用した。混錬時間が短いと粗粒分が埋め戻し 材の中で偏る(沈むあるいは浮き上がる)傾向が見られた。そのため、混錬中にミキサー内の3 か所から試料採取を行い、混錬時間と2mmふるい通過率の平均値の関係を調べた。その結果と 配合設計値を比較して、混錬時間を120秒に設定した。

埋め戻し材の混錬中には毎日2回の含水比測定を実施して、配合検討時の含水比との変化が小 さいことを確認した。埋め戻し材製造後には、分析試料を採取するとともにフレキシブルコンテ ナに入れ、降雨などの影響を受けないよう屋内に保管した。合計16,500kgの埋め戻し材(=フ レキシブルコンテナ 660kg/袋×25袋)を製造した。

## (b) 試験パラメータ及び試験ケース

2本のスクリューによるアーチ部の充填性を確認するために、図 4.3-45 に示したように、スク リューの回転方向の組み合わせをパラメータとして充填要素試験を実施する。試験ケースは、ア ーチ端部への充填に有利と考えられる、両外側へ押し上げるような回転の組み合わせ(ケース1)、 アーチ中央部への充填に有利と考えられる、両スクリューが土槽中央に向かって押し上げるよう な回転の組み合わせ(ケース 2)とする。これは、スイス・モンテリにおける先行事例において 回転方向による埋め戻し材の押し上げ効果に差が見られたという報告(Nagra, 2019)にもとづ き、試験パラメータとして設定した。

埋め戻し充填要素試験の試験ケースを表 4.3-34 に示す。スクリューの回転数は、令和 2 年度 に実施した要素試験と同様に、10.10 rpm(想定充填速度は、スクリュー1 本あたり 4.23 m³/hr) とする。

ケース	スクリューの回転方 向	スクリューの回 転数	想定充填速度	試験開始時のスクリュー後 退速度
1	No.1 : 反時計方向 No.2 : 時計方向	10.10	9.4€3/h(9 ★)	3 cm/min
2	No.1 : 時計方向 No.2 : 反時計方向	10.10 rpm	ð.46 m9/nr(2 本)	3 cm/min⇒4 cm/min ※ケース1の結果から変更

表 4.3-34 埋め戻し充填要素試験の試験ケース

※スクリュー:土槽開口側から妻面を見て右側が No.1、左側が No.2

## (c) 試験方法

要素試験は以下の手順で実施する。また、試験で取得する情報を表 4.3-35 に示す。

- 充填準備:試験設備を所定の位置に配置する。スクリューは、図 4.3-56における「停止状態での埋め戻し時」の位置とする。
- ② 妻部埋め戻し:図 4.3-56に示すように、スクリューの埋め込み長さが560 mmとなるまで、 スクリューを後退させずに充填する。これにより、図 4.3-46の右図に示したように、スク リューのトルクにより埋め戻し材の押し上げ高さ560 mmに相当する量の埋め戻し材を 上向きに押し込むことを期待する。
  - 充填開始より、5分ごとに埋め戻し材の充填重量(全体)を土槽下に設置した重量計で計 測する。
  - ・ 充填状況をビデオ撮影する(以後継続)。
  - 4回目の計測毎(20分経過後)に、埋め戻し材の充填重量に加えて、埋め戻し材の充填形状の計測及びシンウォールサンプラーによる試料採取を実施する。
  - ・ 上記5分ごとの計測を、スクリュー埋め込み深さが560 mmになるまで繰り返し、停止状態における埋め戻しの最終形状を計測する。
- ③ 後退埋め戻し:スクリューの埋め込み長さが560 mmとなったところで、30 mm/minの速 度でスクリューを後退させながら充填を継続する。
- ・ ②と同様に、5分ごとの埋め戻し材の充填重量計測及び2回目の計測毎(10分経過後)の 充填形状計測と試料採取を継続する。
- ④ 埋め戻し完了:埋め戻し材の下端が試験土槽端部に到達したところで充填を終了する。その後、最終の埋め戻し材の充填形状を計測し、試料を採取する。
- ・ サンプリング用開口窓及び透水試験用充填モールドから試料を採取する。
- ⑤ 採取した試料を各種の試験により分析する。



义	4 3-56	埋め戻Ⅰ	時のスクリ	リュー後退計画概念図
	4.0-00	生めたし	パックノン	/工 这些可凹侧心心回

取得目的	取得情報	取得方法 (試料採取方法はb)で記載)	計測頻度・利用方法など
i)スクリュー	埋め戻し材充填	埋め戻し材重量の増分を土槽下	・5 分ごとの計測
充填速度の計	重量及び充填時	に設置した重量計で計測	
算	間		
ii)かさ密度	埋め戻し材充填	・i)で計測する重量	<ul> <li>・10 分あるいは 20 分ご</li> </ul>
の計算	重量及び埋め戻	・土槽内面と埋め戻し材の交線	とに計測
	し形状	の形状及び埋め戻し斜面の形状	・スクリュー埋め込み体
		をメジャーで計測	積を控除
			・採取試料の含水比を使
			って乾燥密度へ変換
iii)埋め戻し	埋め戻し材採取	底部事前設置あるいはアーチ部	・採取試料の iv)で計算
材の乾燥密度	試料の重量	後挿入のサンプラーに詰まった	した含水比を使って乾燥
の計算		埋め戻し材の湿潤重量を計測	密度へ変換
iv)埋め戻し	埋め戻し材採取	埋め戻し材から試料を採取して	・試験前後の含水比を比
材の含水率の	試料の重量と水	炉乾燥により含水比を計測	較
変化量の把握	分量		・乾燥密度の計算に使用
v)埋め戻し材	埋め戻し材採取	ふるい分け試験によりサンプラ	・試験前後及び部位ごと
の材料分離程	試料の粒度分布	ーに詰まった埋め戻し材あるい	の粒径加積曲線を比較
度の把握		は埋め戻し材から採取した試料	
		の粒径分布を取得	
Vi)埋め戻し	埋め戻し材採取	試験によりサンプラーに詰まっ	・配合検討における透水
材の透水係数	試料の透水係数	た埋め戻し材あるいは埋め戻し	試験結果及び部位ごとの
の把握		材から採取した試料を密度調整	透水係数との比較
		したものの透水係数を取得	

表 4.3-35 要素試験で取得する情報及び取得方法

試料採取方法は、採取部位、採取する試験の段階のそれぞれに適合した方法を採用する。また 試験の結果、適切な試料採取ができない場合の補完措置も計画した。

試料採取は次の位置、方法で実施した。

- ・ 混錬直後の埋め戻し材(製造時):フレキシブルコンテナからスコップで試料を採取
- ・ 試験開始時のスクリュー先端:スクリュー先端からの吐出が安定した時点で、バケツにより試料を採取
- ・ 土槽アーチ中央部の開口部:充填完了後、3か所の開口部から、①密度試験に用いられるシンウォール・サンプラー(金属製薄肉の円筒形状)の挿入及び②スコップでの回収、との2通りで試料を採取
- ・ 埋め戻し材が形成する斜面(図 4.3-57参照):試験ケースごとに、斜面の形状計測のために充填を停止した際に、①スコップによる試料採取及び②土層底板上に透水試験用モールドを設置してモールドに充填された試料を充填完了後にモールドごと回収、の2通りで試料を採取(図 4.3-58参照)。取得目的ごとの斜面からの試料採取計画を表 4.3-36に示す。このうち、灰色で着色した欄の試料採取は透水試験モールドを用い、それ以外はスコップによる採取である。なお、試料採取位置は充填を停止した位置により、前後するとともに、試料採取断面も増加する可能性がある。
  - 表のうち、No.2ライン上・L段におけるモールドによる採取が適切に実施できない可能性 も予想されたため(その場合、透水試験用試料を得られないこととなる)、透水試験用試 料のNo.1ライン上・L段については、その補完を目的に、次の方法で試料を調整する。 ①当該部位からスコップにより試料をできるだけ乱さないように採取する
    - ②この材料を、透水試験用モールド内で、別途計測した当該部位の乾燥密度と同じ乾燥密 度となるように調整し、透水試験体を作成する
    - ③比較のために、同様に試料採取時点でのかさ密度となるように調整したものについても、 透水試験体を作成する





試料採取各面における試料採取位置

図 4.3-57 モールド/スコップによる埋め戻し斜面からの試料採取計画(ケース 2)

抠面且的	No.2 側ライン上		中央ライン上			No.1 側ライン上			
休取日的	U 段	M 段	L段	U 段	M 段	L段	U 段	M 段	L段
乾燥密度	_	—	a, b,c	—	—	—	-	—	
粒度分布 含水比	d	a,b,c,d	d	d	a,b,c,d	d	d	a,b,c,d	d
透水試験	_	_	a,b,c	_	_	_	_	_	a,b

表 4.3-36 埋め戻し斜面からの試料採取計画(ケース 2)

着色は透水試験モールドによる採取



図 4.3-58 透水試験用モールドの設置(左)及び回収(右)

# (5) 埋め戻し充填要素試験結果

# (a) 要素試験の実施記録

埋め戻し充填要素試験の実施記録を概説する。なお、ここでは主にケース2の試験結果について記載し、ケース1の結果については付録4に記載した。

# (i) 充填量及び充填形状の経時記録

試験ケース 2 の経時記録(試験中のイベント及び充填重量の変化)を表 4.3-37 に示す。各イベントの内容は下記の通りである。

- ・ 埋め戻し材重量計測:充填を停止しない状態で試験土槽の重量を台秤で測定し、埋め戻し
   材の無い状態の重量を差し引く。埋め戻し材の重量は湿潤重量である。
- ・ 埋め戻し斜面形状計測:充填を停止した状態で、図 4.3-54に示す各格子点における埋め戻 し材が形成する斜面の高さを計測し、斜面の形状を3次元的に把握した。
- ・ 斜面からの試料採取及び透水試験用モールドの回収:充填を停止した状態で、表 4.3-36に 示す試料を採取した。
- モーター電流負荷上限による停止(ケース2のみ):ケース1の結果から、反力・後退速 度調整ジャッキの固定部を補強してケース2の試験を実施した。スクリューを後退させな い充填の過程において、埋め戻し材を「押し込む」ためのスクリューを回転させるモータ ーへの負荷が設計上限値に近づいたため、充填を停止し、この段階で後退充填へ移行し た。その後同様の理由で、負荷を軽減するためにスクリューの後退速度を3 cm/min⇒4 cm/min⇒6 cm/minと変更した。

你又 \ 同 田士 目目		埋め戻し材湿			
栓迴时间		潤重量 (kg)			
5分	埋め戻し材重量計測	525			
10分	充填停止:埋め戻し材重量・埋め戻し斜面形状計測	1,970			
15 分	埋め戻し材重量計測	3,035			
20 分	充填停止:埋め戻し材重量・埋め戻し斜面形状計測	4,140			
25 分	埋め戻し材重量計測	5,335			
	停止状態の充填終了(モーター電流負荷上限による停止):				
96公55秒	埋め戻し材重量・埋め戻し斜面形状計測、斜面からの試料採取(断	5 795			
20 77 55 19	面 a)、スクリュー埋め込み深さ計測(スクリュー管上部で計測:	5,735			
	No.1は360mm、No.2は320mm)				
26分55秒	スクリュー後退充填開始(後退速度設定値 3 cm/min⇒ケース 1 の	の ) 5,735			
20 )] 00 19	結果、モーター負荷が計画より大きいことから4 cm/min へ変更)				
29分35秒	充填停止(モーター電流負荷上限による停止):埋め戻し材重量計	6 100			
	測	0,100			
29分35秒	スクリュー後退充填開始(モーターへの負荷軽減のため 4 cm/min	6,100			
	⇒6 cm/min へ変更)				
34分35秒	充填停止:埋め戻し材重量・埋め戻し斜面形状計測、斜面からの試	7,055			
	料採取(断面 b)				
39分35秒	埋め戻し材重量計測	8,370			
44分35秒	充填停止:埋め戻し材重量・埋め戻し斜面形状計測	9,465			
47分19秒	充填停止:斜面からの試料採取(断面 c)				
49分35秒	埋め戻し材重量計測	10,700			
52分35秒	充填停止:埋め戻し材重量・埋め戻し斜面形状計測、斜面からの試	11,430			
	料採取(断面 d)				

表 4.3-37 試験経時記録 (ケース 2)

## (ii) ケース2における条件変更

ケース1の試験を通じて、当初の試験計画及び試験設備から変更すべき条件が下記のとおり明 らかとなったため、ケース2では下記の変更を行った。

- ・ 埋め戻し材のホッパーへの供給方法:後述のように、ケース1では、スクリューNo.1側と No.2側における埋め戻し材の粒度分布が視覚的に異なる状況が観察された。画像による分 析の結果、ホッパーへのベルトコンベヤからの供給時に、埋め戻しを構成する素材それぞ れの重量の違いにより、材料の分離が発生していることが判明した(重い大粒径砕石は早 く落下し、軽いベントナイト、砕砂は遠くへ落下する傾向があった)ため、投入方法をベ ルトコンベヤによる随時供給から、振り分けシュートによるバッチ供給へと変更し、ケー ス2の試験を実施した。
- スクリューの押し込み力を制約する条件:ケース1試験中に、反力・後退速度調整ジャッキの固定部の変形が生じたため、ケース2ではこの部位を補強した。この部位が試験遂行上の制限となることを回避した。これによりジャッキはより大きな反力を支えることが可能となったが、その結果、スクリューの押し込み力の上限は、ケース2ではスクリューを回転させるモーターへの電流負荷の上限が制約条件となった。

# (b) 充填状況及び充填形状

試験ケース 2 の充填状況を図 4.3-59 に示す。また、埋め戻し材充填時における斜面形状の測定結果を図 4.3-60 に、土槽アーチ中央部及びスクリューNo.1 側のアーチ端部の埋め戻し形状・充填高さとスクリュー先端位置の変化を図 4.3-61 にそれぞれ示す。なお、図 4.3-60 及び図 4.3-61 の基となったデータは付録 4 に記載した。

充填状況及び充填形状に関する主な知見は次の通り。

- ・ 土槽アーチ中央部及びアーチ端部の両方とも、土槽妻面から約1.0 mの範囲においては、 ほぼ隙間なく充填が行われた(図 4.3-59:①、③、⑤-1、⑥-1、図 4.3-61:①)。
- ・ 充填形状全体としては土層中心から左右に概ね対称となっており、スクリューNo.1と No.2の充填が偏りなく進行したことを示している(図 4.3-60)。
- ・ 土槽アーチ中央部においては、スクリューの後退開始後、後退速度4 cm/minの範囲(34 分35秒まで)では、埋め戻し材の隙間の無い充填が行われたが、後退速度6 cm/minに増 加後(34分35秒以降)は、土槽アーチとの間に隙間を残すこととなり(図 4.3-59:④、
   ⑤-2)、さらに土槽妻面からの距離150cmの埋め戻し材が、前段階の計測と比較して、6 cm沈下することとなった。
- ・ 土槽アーチ端部においても同様の傾向が観測され、土槽妻面からの距離100 cmの埋め戻 し材が、スクリューが後退することにより、5 cmの沈下を生じている(図 4.3-61③)。
- No.1スクリューの土槽側壁側直近(計測ラインE)では、土槽中央部や土槽端部とは傾向が異なり、アーチとの隙間がない充填がなされているとともに、スクリューの後退による沈下も見られなかった。また、埋め戻し材の下り勾配の開始点がスクリュー先端とほぼ一致している
- ・ 埋め戻し材の斜面勾配は、全ての計測ラインで停止充填中が後退充填中を上回った。また勾配の値は、全体としては計画時に想定した40度をやや下回るものであった。
- スクリュー直下の埋め戻しは、図 4.3-59の③のスクリュー直下の埋め戻し材が谷状の窪 みを形成していること、スクリュー直下には空洞も確認されることから、スクリューから直接充填されたものではなく、スクリューの左右より流れ込む埋め戻し材によるものであることがわかる。

<u>アーチ端部(スクリューNo.1側)</u>





①停止状態での充填終了(26分55秒)

②充填完了時(52分35秒)



③停止状態での充填終了(26分55秒)



④充填完了時(52分35秒)

⑤アーチ中央部観察窓(充填完了時)





<u>⑥側部観察窓(スクリューNo.1 側、充填完了時)</u>



図 4.3-59 充填状況 (ケース 2)



図 4.3-60 充填形状の経時変化 (ケース 2)





# (c) かさ密度及び充填速度

充填重量及び充填体積から、全体の湿潤充填重量(表 4.3-37 参照)を充填形状から計算した充 填体積で除して求める。充填開始後の時間経過、充填重量、充填体積及び各計測時間で区切った 時間間隔中のかさ密度(湿潤、乾燥)並びに充填速度を表 4.3-38 に示す(各時間経過段階での試 験イベント詳細は表 4.3-37 参照)。なお、含水比は、先に述べたようにスクリュー先端から回収 した試料の平均値を用いた。

計測 時間	時間 間隔	イベント概要	湿潤重 量(kg)	充填体 積(m ³ )	湿 潤 か さ 密 度 (Mg/m ³ )	含水 比 (%)	乾 燥 か さ密度 (Mg/m ³ )	充填速 度 (m ³ /hr)
10 分	10分 00秒	充填停止	1,970	1.026	1.92	2.2	1.88	6.16
20 分	10分 00秒	充填停止	4,140	2.607	1.37	2.2	1.34	9.48
26 分 55 秒	6分 55秒	停止状態の充填終了 スクリュー後退充填 開始 (速度 4cm/min)	5,735	3.456	1.88	2.2	1.84	7.37
29 分 35 秒	2分 40秒	ここから後退速度 4cm/min⇒6cm/min	6,100	-	-	-	-	-
34 分 35 秒	5分 00秒	充填停止	7,055	4.372	1.44	2.2	1.41	7.13
44 分 35 秒	10分 00秒	充填停止	9,465	5.632	1.91	2.2	1.87	7.56
52 分 35 秒	8分 00秒	充填停止	11,430	6.715	1.81	2.2	1.78	8.12
試験工程全体のかさ密度及び平均充 填速度		11.430	6.715	1.70	2.2	1.67	7.66	

表 4.3-38 かさ密度及び充填速度(ケース 2)

かさ密度及び充填速度に関する主な知見は次の通り。

- ・ 試験開始~10分:かさ密度が大きく、充填速度は低い。図 4.3-61①③によれば、スクリュー 先端がまだ埋め戻し材に埋まっていない段階である。
- ・ 10分~20分:かさ密度が低下、充填速度が上昇している。図 4.3-61①③によれば埋め戻し材 天端がスクリュー先端に到達し、埋め戻し材に埋まり始めた段階である。
- ・ 20~26分55秒:かさ密度が上昇し、充填速度が低下している。充填速度はこれ以降に大きく 変動していない。スクリューの埋め戻し材への埋め込み深さが徐々に増加して、表 4.3-37に 示すようにスクリュー上側で32~36cmまで埋め戻し材に埋まった段階である。
- 26分55秒~34分35秒:スクリューは後退を開始(途中で加速)し、かさ密度が低下した。
- ・ 34分35秒~52分35秒:かさ密度が上昇し、スクリューが後退を開始する前のレベルに復帰した。また、充填速度が徐々に増加している。

# (d) スクリューの埋め込み深さ及びスクリューへの充填反力

試験計画において、スクリューの埋め戻し材への埋め込み深さは、埋め戻し材の押し上げ高さ に影響することが予想され、アーチ部への充填性を予測する際の重要なパラメータである。また、 令和2年度の結果より、埋め込み深さが増すことにより、スクリューからの埋め戻し材の充填抵 抗が大きくなることがわかっている。この充填抵抗はスクリューを駆動するモーターへの負荷と 図 4.3-49 に示すスクリューを支えるジャッキへの反力にも影響することから、本要素試験にお いても試験の制約条件となった。

後退速度から計算したスクリュー先端位置及び埋め戻しの斜面形状(図 4.3-61 の計測ライン E)から推定したスクリュー中心での埋め込み深さ及び後退速度を制御するジャッキの反力を表 4.3-39に示す。

スクリューの埋め込み深さ及びスクリューへの反力に関する主な知見は次の通り。

- ・ 埋め込み深さの増加に伴い、ジャッキ反力も増加する。
- 後退充填への移行によっても、一定時間充填後にはジャッキ反力は増加し、後退速度の増加によってもその傾向は変わらない。
- スクリューの後退速度6cm/minへの増加により、埋め込み深さが減少しており、最終段階
   における埋め戻し天端の沈下と関連している可能性がある。
- ・ また、後退速度6cm/minにおいては、表 4.3-38に示すように充填速度が徐々に増加しており、充填反力と関連している可能性がある。

		妻面からの	スクリュ	油圧ジャ	
計測時間	イベント概要	スクリュー先端 (中心線)	スクリュー中心 線と埋め戻し斜 面との交点	一連の込 み深さ (cm)	ッキ反力 (MPa)
10分	充填停止	46(計測値)	-*	0	1.0
20分	充填停止	46(計測値)	78	32	2.1
26分55秒	停止状態の充填終了: 後退充填開始(速度 4cm/min)	46(計測値)	102	56	0(解放)
29分35秒	後退速度(4cm/min⇒ 6cm/min	—	_	—	2.5
34分35秒	充填停止	87(計算値)	136	49	12.0
44分35秒	充填停止	147(計算値)	186	39	#
52分35秒	充填停止	195(計算値)	220	25	#

表 4.3-39 スクリューの埋め込み深さ及びジャッキ反力

※10分の段階では埋め戻しはスクリューの高さまで到達していない # データ取得できず

## (e) 試料採取による分析結果

表 4.3-36 に示す計画に従い試料採取及び試料分析を実施した。ケース2は4断面で試料を採 取した。ケース2の試料採取断面位置は図 4.3-57を参照されたい(a、b、c、dは計測断面、U、 M、Lは各計測断面での上段、中段、下段の試料採取位置を表す)。

## (i) 粒度分布

妻面に近い方から a、b、c (それぞれ図 4.3-57 の M 段から採取)、d (UML 各段から採取)の 4 断面について、土槽中央及びスクリューNo.1・No.2 両側から採取した試料、混錬直後の試料及 びアーチ中央開口部から採取した試料を分析した。図 4.3-62 に各試料採取断面における U、M、 L 相互、試料採取断面相互及びスクリューNo.1 側及び No.2 側の粒径加積曲線の比較を示す。

粒度分布に関する主な知見は次の通り。

- ・ 図 4.3-62の②より、採取断面相互の粒度分布の差は小さく、スクリューの停止あるいは後 退の違いによる粒度分布への影響は小さい。
- ・ 同図③より、土槽中央ラインにおいては、アーチ中央部上端から埋め戻し中段付近までの 粒度分布の差は小さい。また、試験前の混錬直後の粒度分布と比較すると、細粒分の比率 が大きくなっている。埋め戻し最下段では、細粒分が大きく減少し、粗粒分の比率が大き くなっている。つまり、細粒分が上段~中段に多く留まって粗粒分が下段に集まったこと

を示している。

 同図①は、充填完了後の斜面からの試料の分析結果であり、No.1~中央~No.2は左右の分 布、U~M~Lは上下の分布を比較することとなる。全般的には、No.1が他と比較して粗粒 分の比率が高く、逆にNo.2は粗粒分の比率が低い傾向が見られる。このことから、スクリ ューNo.1~供給された埋め戻し材は、No.2~供給されたものと比較して粗粒分の比率が高 かったのではないかと考えられる。







# (ii) 含水比

含水比の分析結果は、ケース1の結果とともに付録4に記載した。

## (iii) 乾燥密度

埋め戻し材中に設置したモールド及びアーチ中央の開口からシンウォールにより採取した試料 を用いて乾燥密度を計算した。なお、土層全体の密度(かさ密度)については c)で述べる。 試料から求めた湿潤密度及び先に求めた乾燥密度を表 4.3-40 に示す。

封約夜史行品	アーチ中央開口		土槽中央		スクリューNo.2 側			
	(図 4.3-53)		(下段)		(下段)			
(町面位直は 図 4.3-57参 照)	<ol> <li>①妻面</li> <li>に近い</li> </ol>	②中央	③妻面 から遠 い	a 断面	b 断面	a 断面	b 断面	c断面
湿潤密度	1.01	0.00 <b>-</b>	0.000	1 505		1.054	1.054	1.0.40
(Mg/m ³ )	1.915	2.005	2.028	1.737	1.744	1.654	1.674	1.643
含水比(%)	2.3	2.2 2.3 1.3%		1.3※		$1.0$ $\times$		
乾燥密度	1.872	1.962	1.982	1.715	1.722	1.638	1.657	1.627
(Mg/m ³ )	平均值:1.939		平均值:1.719 平均值:1.641					
※下段の含水比は、d 断面のみで計測されているため、d 断面の値を使用								

表 4.3-40 採取試料より計算した乾燥密度(ケース 2)

# (iv) 透水係数

土槽内に設置した透水試験用モールド(図 4.3-58 参照)を用いた採取試料による透水試験結果(ケース 2)を表 4.3-41 に示す。この表のうち、試料採取位置の No.2 はスクリューNo.2 側の 土槽下端隅角部を指す。断面は図 4.3-57 の試料採取計画図に示す各試料採取位置(土槽奥から 順に a、b、c)である。

試料採取位置·断面	湿潤密度(Mg/m ³ )	含水比(%)	乾燥密度(Mg/cm ³ )	透水係数(m/s)
No.2_a	1.654	1.0	1.638	$4.23  imes 10^{-9}$
No.2_b	1.674	1.0	1.657	$6.45  imes 10^{-8}$
No.2_c	1.643	1.0	1.627	$3.28  imes 10^{-6}$

表 4.3-41 透水試験結果 (ケース 2)

## (6) スクリューエ法による埋め戻し材の充填性に係る考察

以下に、目標性能としての透水係数、充填性、かさ密度、充填速度及び充填の均質性に関して、 それらに影響するパラメータとの関連性を考察し、今後の方針を検討するための目標性能とパラ メータとの相互関係をまとめる。

## (a) 充填した埋め戻し材の透水係数

埋め戻し材の配合検討時に実施した透水試験結果(表 4.3·33)では、乾燥密度 1.552 Mg/m³の 試料の透水係数は 7.08×10⁻¹¹ m/s であった。しかし、土槽底部から採取した試料の乾燥密度は 1.65 Mg/m³程度であったが、その透水係数は暫定的な目標値として設定した 1×10⁻⁹ m/s を上回 った。充填要素試験中には、粒径の大きな模擬掘削土が斜面を滑落する様子が見られ、図 4.3·62 (a)に示したように充填試験後の土槽底盤部の埋め戻し材には粗粒分が多く含まれていることが わかる。土槽底盤部に粒径の大きな模擬掘削土が多いため乾燥密度は大きくなったが、ベントナ イト混合率が相対的に小さくなったため、透水係数は 1×10⁻⁹ m/s を上回ったと考えれれる。

このことから、充填中の材料分離はスクリュー工法により施工された埋め戻し材の透水係数を 確保するための重要な要因であることがわかった。埋め戻し材の材料分離を埋め戻し材の配合の 変更で抑制するには限界があるため、施工装置や施工方法の改善についても検討する必要がある。。

## (b) 土槽アーチ中央部及び両端部への充填性

充填要素試験の結果、試験ケース 1 及び 2 ともにスクリューの位置を固定した状態での充填 (妻部の充填)では、試験土槽のアーチ中央部については隙間なく充填することができたが、ア ーチ端部(隅角部)については、試験ケース1では隙間が残った。また、試験ケース2では、ス クリューを後退させるとアーチ端部に隙間が残る結果となった。

## (i) スクリューの回転方向の影響

アーチ端部の試験ケースごとの充填可否は、スクリューの回転方向(の組み合わせ)に依存す る結果となった。充填完了時の妻面から150 cm 位置における、埋め戻し材の充填形状を図 4.3-63 に示す。スクリュー先端より土槽に供給された埋め戻し材は、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っていることが判明した。したがって、坑道全断面を埋め戻すため のスクリュー配置を決める際には、各スクリューの埋め戻し分担領域の特性(隅角部や大きな凹 凸の有無)とスクリューとの位置関係を基に各スクリューの位置や回転方向を設定することで対 処できる可能性がある。



図 4.3-63 埋め戻し材の充填形状(充填完了時、妻面より 150 cm 断面)

## (ii) スクリューの埋め込み深さ

先に述べたように、本試験計画における、スクリューより上方にあるアーチ中央部及び側方に 離れている端部の充填性確保方策は、スクリューの埋め戻し材押し上げ効果と埋め戻し材の安息 角の活用によるものであった(図 4.3・46 参照)。試験の結果、スクリュー上方の空間が限られて いる土槽では、発生する押し上げ高さは計画値(56 cm)より大幅に低いため、安息角の活用によ る充填状況には至らず、さらに図 4.3・63 に示すように、回転方向に影響されて、本来スクリュー 直上に想定したような押し上げが形成されていない結果となった。

この結果、押し上げ力が十分に作用したアーチ中央部では、表 4.3-40 に示すように、1.9 Mg/m³ 程度の比較的大きな乾燥密度が得られた半面、押し上げのアーチ到達後の埋め戻し材の側方流動 が十分に発生しておらず、着目部位への充填が達成できなかったとともに、充填圧力が大きく上 昇し、充填に支障を生じることとなった。

したがって、スクリューの上方・側方への充填を達成しつつ、充填圧力が過大とならない埋め 込み深さを両者のバランスを踏まえて調整・決定する必要があるが、上記のスクリューの回転方 向の影響への対処と同様に、スクリューの配置で解決できる可能性もあり、実際の使用時におけ る運転パラメータの調整に係る負荷にも留意して、適切な対処策を検討することが望まれる。

## (iii) 埋め戻し材の流動特性

本試験で用いた埋め戻し材は、締固めない状態では約 40 度の安息角を有する斜面を形成し、 試験でもそれを利用した充填計画とした。しかしながら、試験の結果では、押し上げられた埋め 戻し材が土槽アーチで抑えられて上述のように締まった状態となり、側方への流動性が低下した 可能性が考えられる。特に、粒度の大きい砕石が押し込められて、流動性の低下に大きく関与し た可能性もある。したがって、スクリュー側方への充填性を向上させるためには、土槽アーチに 対して過大な力で埋め戻し材を押し付けないような埋め戻し計画及び必要に応じて流動性を高め ることが可能な埋め戻し材の配合の見直しが必要と考える。なお、流動性を高めることに加えて、 前述したスクリューの配置による対処の可能性にも留意して検討することが望まれる。

## (c) かさ密度及び充填速度(充填効率)

今年度の試験の結果、埋め戻し材のかさ密度及び充填速度は、スクリュー先端の埋め戻し材への埋め込み深さ及び後退速度との関係性が深いことが判明した。この2つの要因は、スクリューへの充填反力及び充填速度(充填効率)とも関係がある重要なパラメータである。

(i) かさ密度

本試験では、全試験工程を通じた平均の乾燥かさ密度 1.67 Mg/m³を得た。しかしながら、試験工程の中には、最も低い乾燥かさ密度 1.3~1.4 Mg/m3 程度を示す段階もあり、その段階での 試験の実施内容とかさ密度の関係を考察することにより、より安定したかさ密度を確保する方策 への参考情報とする。

## 1) 初期段階(坑道妻面近傍)

充填開始初期のかさ密度が大きいのは、スクリュー先端からの自由落下エネルギーによる密度 上昇の影響と考えられ、これは定性的ではあるが令和2年度の要素試験の成果と整合する。この 効果は、妻面近傍に限らず、坑道埋め戻しの際の最下段のスクリューによる坑道底部への充填密 度の確保にも貢献する。

また、図 4.3・61①~③によれば、充填開始 10~20 分の間は、埋め戻しの天端がスクリュー下 端に到達し、徐々に埋まりつつある段階であり、自由落下による密度上昇の効果が徐々に失われ るとともに、先端の埋め込みによる締固め効果がまだ十分に発揮されていない段階である。その ため、この段階での埋め戻しは充填密度が低くなる可能性がある。汎用的なスクリュー工法は充 填による締固め効果を期待するような工法ではないため、充填に伴い密度を向上させることがで きるような技術の高度化ができれば、本試験で課題となった、先端の埋め込み深さ及びスクリュ ー反力維持などのパラメータに強く依存しない安定した密度確保が可能となる可能性がある。

## 2) 停止充填段階(坑道妻面近傍)

前述した課題もあるものの、埋め戻し材を押し込むことにより一定の運転条件や範囲において 密度の向上を図ることができることが判明した。しかしながら、充填反力の充填装置への負荷が 大きく、試験遂行上の制約条件となった。このような埋め込み深さの管理及び大きな充填反力は (特にその値が坑道断面内に複数配置されたスクリュー毎にばらつく可能性がある場合では)、 処分坑道での実施工においても施工管理上の負荷となりうるとことから、前述したように、これ らのパラメータに強く依存しない(浅い埋め込み深さを許容し、充填反力を低いレベルで維持す る)システム設計を志向することが望まれる。

## 3) 後退充填段階

充填後退速度が、充填かさ密度に影響することが明確となった。特に、後退速度を大きくした 場合の密度低下及びアーチ部への充填性低下は回避すべき現象である。表 4.3-38 に示したよう に、後退速度を増加させた際のかさ密度の大きな低下とその後の回復は、後退速度の増加による スクリューの先端の充填圧力が低下した後に、下記の現象が生じたのではないかと推察される。

- ①後退速度が増加した直後は、スクリュー先端の充填圧により維持されていたスクリュー管内の埋め戻し材の充填率(管断面積に対して埋め戻し材の占める割合)が低下して、スクリューの搬送能力¹が低下した。
- ②その後、先端が再度埋め戻し材に埋め込まれることで、充填率が回復するが、速度増加前と 比較して埋め込みが浅いことから、充填圧力が低く、充填しやすい状態となった。

このことから、スクリューにより押し出される充填力、埋め戻し材からの抵抗としての充填圧 ならびにスクリュー鞘管内の充填率の3つのパラメータは相互に依存しており、その結果が充填 速度とかさ密度に大きく影響することが明らかとなった。したがって、目標値としてのかさ密度 と坑道全断面への充填性を確保できる後退速度の適切な設定方法を検討することが望まれる。

#### (ii) 充填速度(充填効率)

本試験における充填速度(表 4.3-38 参照)をスクリュー1本あたりの設計値(4.23m3/hr、管 内充填率 90%と設定)と比較すると、いずれも停止充填中の充填速度が最小となる初期の先端が 埋め込まれていない開始 10 分までの時間帯で約 0.73 倍(管内充填率換算で約 66%)、充填速度 が最大となる開始 10 分~20 分の時間帯で約 1.12 倍(管内充填率換算で約 100%)となる。後退 充填中では、充填速度が最大となる充填終了直前の時間帯で約 0.96 倍(管内充填率換算で約 86%) であった。

充填速度は先に示したいくつかのパラメータの影響を受け、試験の目標値としての制御が困難 であったため、今回の試験では制御対象としていない。しかしながら、処分坑道の埋め戻しにお いては、充填速度(スクリュー工法の場合は直接的に歩掛に換算できる)は施工工程に直接影響 するパラメータであることから、データを蓄積して、スクリュー先端の埋め込み状態、充填反力、 後退速度などのパラメータとの関係を分析することにより、信頼性のある充填速度の設定が可能 となり、埋め戻しシステムの設計と埋め戻し方法を確立することができる。

## (iii) 埋め戻しの均質性

## 1) 粒度分布の偏り

試験結果から埋め戻し材中の粗粒分(特に砕石 2005 の粒径の大きい成分)が下方に集中する (逆に粗粒分が上方に留まる)傾向が明らかとなった。今年度はこの現象を改善すべく、令和 2 年度の埋め戻し材の配合を見直してた。配合検討と材料試験の段階では、この効果はある程度得 られたが、実際の試験ではその効果は明確とはならなかった。令和 2 年度からの検討経緯から、 配合によりこの偏りを回避するためには、配合の見直し(主に砕石混合率の大幅な低減、最大粒 径を小さくしても効果は限定的)が必要となる。

実施工における埋め戻し材の配合が確定してない現段階では、配合による対応をさらに進める ことは現実的ではないことから、施工法による対応策の検討を優先させ、その観点からは次のよ うな要因に対する検証が必要である。

¹ 今年度の設計は、回転数 10.10 rpm、充填率 90%において搬送能力 6.15 m³/hr。令和 2 年度 の試験結果から、同回転数で充填率約 60%、搬送能力を 4.33 m³/hr と設定して試験を計画。

- ○充填押し込み力による大粒径砕石の浮き出し:硬く粒径の大きい砕石は力を受けやすく、ス クリュー先端を埋め戻し材に埋め込んで強く充填した場合は、先端からの力を受けた「スク リュー先端と斜面表面との間にある砕石」が斜面表面に押し出されて落下するため、押し込 み力の低減、後退速度の適正化などによりこの現象を回避する必要がある。
- ○斜面表面における埋め戻し材(砕石)の上部から下部への落下:落下する全ての砕石が最下 部に集積することを避けるために、①斜面表面をシートあるいは鋼板などで覆って、砕石の 下方への移動を制限する、②スクリューを多段として下段側のスクリューの充填を先行させ ることで、上段からの砕石の落下を下段スクリューの高さ位置で留める、③充填押し込み力 により締固められた埋め戻し材は、安息角よりも大きい角度で斜面を形成する可能性があり、 結果として砕石の落下を促進することになるため、安息角よりも大きい角度を形成させない ような押し込みの制御をおこなう。

以上のような対応でも不十分な場合(坑道下部の止水性に課題が残る場合)には、最下段のス クリューのみ配合を変更する(砕石を使用しないなど)ことも検討課題となる。

#### 2) 密度の偏り

密度の偏りは、上記の粒度分布の偏りを除けば、スクリューによる押し込み力が効果的に作用 する一部の領域(スクリュー先端及び直上)とそれ以外の領域(埋め戻し材が流動することによ り埋め戻される多くの部位)との差が主なものとなる。本施工法は、締固めによる密度向上効果 に多くを期待しないことが特徴の一つであり、そのため、自然充填によりある程度の密度が確保 できる配合の検討が進められてきた。

試験において、いくつかの弊害の原因となった過大な押し込み力を軽減した場合でも、埋め戻 し材が流動することにより充填される全ての部位の密度が向上するわけではない。この観点での 唯一の解決策は、スクリューの受け持ち範囲を狭くする、つまりスクリュー本数を増やすことと 考えられる。その場合には、(本施工法は機械施工であるため)施工管理への負荷は大きく変わら ないものの、コスト、施工空間ならびに材料搬送能力などの制約により本数が制限されることも 考えられるため、今後はスクリュー間隔と密度の偏りに関する更なる検討を進め、スクリュー配 置と密度のばらつきに関するデータを蓄積して、許容値と照合しつつ適切な設計を行うことが望 まれる。

## (d) 坑道全断面を埋め戻し対象としたスクリュー配置の要点

要素試験より得られた知見及び前述までの考察をもとに、処分坑道全断面の埋め戻しに対する スクリューの配置検討における要点を整理する。

- ・ 押し上げ効果による埋め戻し材の充填性能の見直し:押し上げ量を抑制して自然の流動に より埋め戻し材を充填させることを基本として、スクリュー上方の充填性の低下に対して 最上段のスクリューを坑道アーチ部に近接設置するなどの対策を施す。
- アーチ中央部と端部への充填に適したスクリュー回転方向の設定:アーチ中央部と端部への充填のためのスクリューは兼用とせずに、端部への充填スクリューの回転方向は今年度の試験のケース2と同様とし、中央部については専用のスクリューを配置する。回転方向は問わないが回転慣性を小さくする充填方法等(例えば回転速度を低くする)により、できるだけ左右均等な充填をおこなう。
- スクリューの多段配置:既述のとおり、砕石の落下距離を抑制するために、スクリュー本数を増やすとともに多段配置とする(1本あたりの充填量、全体の施工速度などの調整を要する)。

配置以外の施工法での対応としては、スクリューの充填順を最下段から順に進める、充填斜面 に砕石落下防止対策(シートや抑え板など)を施す、スクリューの受け持ち範囲毎に埋め戻し材 の材料配合を変えるなどが挙げられる。

これまでの成果を基に、坑道全体のスクリュー配置を検討した概念案を図 4.3-64 に示す。配置の考え方は以下の通りである。

○全段共通:

- ① スクリュー先端は埋め戻し材にスクリューの直径相当の30 cm程度埋め込むことにより、 埋め戻し材の密度の向上を図るとともに、スクリュー上方約30 cmの高さに押し上げる。
- ② 後続の段は埋め戻し材の安息角(約40度)の法尻が先行の段の法肩より50~60 cm程度後 方に位置するように充填開始タイミングを調整する。これにより、粒径の大きい砕石が先 行の段の下まで落下することを抑制するとともに、先行の段の押し上げを阻害しないよう にして粗粒分が充填圧により埋め戻し材の中から押し出されることを抑制する。
- ③後退速度はすべて共通とする。
- ④ スクリューの配置を各段で互い違いとして、下段の押し上げによりスクリュー管下面への 流れ込み量の不足を補う。
- ⑤ A段とF段を除き、スクリュー1本あたりの充填速度(埋め戻しの供給量)はほぼ同じとす ることにより、管理を容易とするとともに供給ホッパーを共用する。
- ○A 段:底部専用として埋め戻し材の自由落下高さと各スクリューの担当範囲を制限することにより、粗粒分が落下蓄積することを抑制する。本数を増やして、ある程度の押し込み力を加えることにより、密度の向上を図るとともに、スクリューの回転速度を低く抑えてスクリューの回転方向による埋め戻し形状の偏向を抑制する。

○B、C、D 段:スクリューの分担面積及び埋め戻し速度は概ね同じとする。

○E段:アーチ(端)部専用とし、できるだけアーチに近い位置に配置する。

○F段:アーチ中央部専用とし、充填圧力で密度の向上を図る。

なお、図に示すように、埋め戻しはA段より順に進行して最後はF段となる。また、埋め戻し 材斜面には、粒径の大きい砕石の落下防止策(シートや抑え板など)を各段のスクリューに取り 付けることも今後検討する。



図 4.3-64 坑道全体を埋め戻す場合のスクリュー配置概念案

## (7) 埋め戻し材の製造・施エプロセス管理手法の更新

令和 2 年度に構築したスクリュー工法のプロセス管理手法のうち、開発段階のものについて、 今年度の要素試験成果を反映して更新する。

## (a) 今年度の成果から反映すべき事項

主に、開発段階における①-1 埋め戻し材の配合、①-3 混錬及び①-5 施工確認試験において、下 記のような事項を反映した。

- ①-1 埋め戻し材(配合):令和2年度の要素試験では粗粒分の分離が確認されたため、材料配合の再検討を行い、室内試験レベルでの改善を確認した。新たに3段階の試験での検討を提案した。
- ①-3 混錬:混錬時間を変えた試験により、埋め戻し材の均質の程度が異なることを把握した。 一定時間ごとに試料を採取し、細粒分の設計値との差を定量的に求めて、最適な混錬時間を 決定する方法を提案・実施した。
- ①-5施工確認試験:施工における、埋め戻しの品質に影響する複数のパラメータが存在することを試験で確認し、パラメータの相互影響と品質への影響を整理した。パラメータの絞り込みと適切なパラメータの設定は次度以降の課題とした。

# (b) プロセス管理手法の更新

今年度の成果を反映して開発段階のプロセス管理手法を更新したものを表 4.3-42 に示す。表 中、今年度の成果による更新には「R3」と表示している。
表 4.3-42 スクリューエ法における製造・施エプロセス管理(開発段階)

開発・製造・施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
<ol> <li>①開発(試験による管 理指標の設定)</li> </ol>	<ol> <li>①製造・施工管理 指標の設定</li> </ol>	開発段階全体の管理	<ul> <li>・各開発段階での適切な品質保証</li> <li>・各開発段階間の整合性</li> </ul>	<ul> <li>・開発各段階での品質保証により、段階全体の品 質保証を達成する</li> <li>・上流段階への遡及及び再試験を含む段階移行時 の合理的マネジメントを実施する</li> </ul>
①-1配合	①-1埋め戻し材 (配合)	<ul> <li>ベントナイト・骨材の</li> <li>配合比率、骨材(有害</li> <li>物質、強度、密度)・</li> <li>粒度分布</li> </ul>	<ul> <li>・設計の要求仕様への適合</li> <li>・①-3性能目標(止水性、空隙充 填性)達成との整合性</li> <li>・施工性、経済性に優れた配合</li> </ul>	<ul> <li>・設計上の規定があればそれに従う</li> <li>・学会などの基準に沿った試験方法</li> <li>・JISなどの品質保証下の骨材を選定する</li> <li>○R3:材料分離を軽減するための配合の再検討を3</li> <li>段階で実施し、検討手順を提案</li> </ul>
①-2水分量 ①-3混錬	①-2 埋め戻し材 (水分量)	含水比	<ul> <li>①-3性能目標(止水性、空隙充 填性)達成との整合性</li> <li>・含水比-乾燥密度の情報</li> </ul>	<ul> <li>・ 学会などの基準に沿った試験方法</li> <li>・ 変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階の 管理負荷の低減</li> <li>○R3:水分無調整での目標達成を確認</li> </ul>
	①-3 混錬	材料の均質性 ミキサー選定 混錬時間・回転数	<ul> <li>・均質性(骨材の均質な分布)</li> <li>・混錬時間</li> </ul>	<ul> <li>・均質性を得る混錬時間の管理</li> <li>・混錬後材料の粒度分析による確認</li> <li>○R3:ミキサー混錬時間の試験(試料採取・粒度 分析)による確認</li> </ul>
①-4室内試験 ◀	①-4埋め戻し性能 目標(室内試験)	透水係数 膨潤性	<ul> <li>・乾燥密度</li> <li>・膨潤による充填可能な見積り空</li> <li>隙量に対応した有効粘土密度</li> </ul>	<ul> <li>・ 学会などの基準に沿った試験方法</li> <li>・ 既往知見との整合性</li> <li>・ 変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階管 理負荷の低減</li> <li>○R3:締固め度 85%での目標透水係数達成を確認</li> </ul>
①-5施工確認試験 働造・施工の管理指標	①-5埋め戻し性能 目標(施工確認試 験)	<ul> <li>・乾燥密度</li> <li>・残留空隙</li> <li>・埋め戻しの均質性</li> <li>・スクリューフィーダの設計と施工による</li> </ul>	<ul> <li>・室内試験で規定された要求乾燥</li> <li>密度の達成(隅角部、天端など</li> <li>充填困難部位含む)</li> <li>・残留空隙、材料分離</li> <li>・スクリューフィーダによる各管</li> </ul>	<ul> <li>・サンプリングによる乾燥密度、材料組成、粒度 分布の測定と学会などの基準に沿った試験方法</li> <li>・観察による未充填空隙の把握</li> <li>・スクリュー充填装置を使うことによる各管理項 目への影響の把握と必要に応じた改善</li> <li>・実施工時に計画している品質管理手法(バルク での密度評価、空隙感知・密度評価技術)の適</li> </ul>
		合官理項日への影響	<ul> <li> </li></ul>	用性の確認 ○R3: スクリュー埋め込み深さ、後退速度など品 質に影響するパラメータの抽出

#### (c) 今後の課題

今年度の要素試験をとおして、下記のような課題が明らかとなった。

- ・ 坑道アーチ部及び底板部への埋め戻しの品質を確保するためには、埋め込み深さや後退速 度など、相互に影響する多くの要因について、その関連性を明らかとするとともに、施工 の合理化と計画の具体化に資するパラメータの絞り込みを行い、重要パラメータを対象と した試験検討により、早期に開発の方向性を定める必要がある。
- ・試験方法については、試料採取の方法、埋め戻しの形状計測、充填反力の測定、映像などによる定性的な情報の取得範囲の拡大と規格化などによる試験の品質向上を進める。
- 前記のパラメータに対する評価については、それぞれのパラメータの特性に応じた個別の
   要素試験により、より広いパラメータの範囲で多くの情報を取得し、試験の適用範囲を拡
   大するとともに、大型試験でのパラメータの絞り込みを行う必要がある。

試験及び考察結果をもとに、埋め戻し品質及び施工工期の観点から、制御パラメータによる他 のパラメータ及び埋め戻し品質との関係について定性的に評価したものを表 4.3-43 に示す。今 年度の要素試験で設定した、埋め込み深さ(大きい押し上げ高さを得るために深めに設定)、後退 速度(充填速度を低めに見積もったため遅めに設定)という組み合わせは、品質面では得失が相 反しており、両者の適切なバランスが必要であることがわかる。また、充填設備の耐荷性能の向 上は多くの面で有利な条件を創出するため、当初より大きめの裕度をもった設計とすべきである。

今後は、これらの関係を試験などにより定量化することにより、それぞれのパラメータの充填 品質に与える影響度からの優先度を明らかにし、スクリュー工法の設備及び施工方法の合理化の 検討を進める。その結果をもとに品質管理項目・方法を明確にして、埋め戻し製造・施工のため のプロセス管理手法を更新するとともに、設備・施工方法のさらなる合理化を進めることが望ま れる。

影響されるパラメータ			埋め戻し品質への影響			主な影響要因					
			抽めえる		答内去植		スクリュー	埋め戻しの	均質性	充垣谏度	
		深さ		充填抵抗	率	かさ密度	上方・側方の 充填性	粒度分布 (粗粒分押 出し)	密度分布		
	埋め込み深	大		増大	向上	やや向上	向上	悪化	やや偏り が増加		充填抵抗の増減
	さ	小		減少	低下	やや低下	低下	改善	やや偏り が減少	充填率增	
	後退速度	速	減少	減少	低下	低下	低下	改善	やや偏り が減少	減 と 元 填 減 花 概 ね 相 殺	充填抵抗の増減及び 後退により生じる空 間と埋め戻し材供給 量との関係
制		遅	増加	増大	向上	向上	向上	悪化	やや偏り が増加		
御 •	スカリュー	大		増大	やや低下	やや向上	向上	悪化	やや偏り が増加	向上	充填速度(埋め戻し材 供給量)の増減による
	回転数※	小	(影音は無い)	減少	やや向上	やや低下	低下	改善	やや偏り が減少	低下	2次的影響
メータ	スクリュー[ 向	回転方		(影響)	は無い)		回転方向に より部位ご との充填性 が異なる		(影響は無い)	)	回転力の慣性による 充填方向の偏り
	スクリュー (スクリュ 置)	- 配置 - 一位		(影響)	は無い)		<ul><li>充填対象部</li><li>位との位置</li><li>関係により</li><li>異なる</li></ul>		(影響は無い)	)	各スクリューへの分 担領域の割り当て
	充填設備の	大	増加が可 能	増加が可 能	増加が可 能	やや向上	向上		(影響け無い)		許容充填抵値の増減
耐荷性能小	上限が低 下	上限が低 下	上限が低 下	やや低下	低下		いが昔は赤い	,	による2次的影響		

# 表 4.3-43 制御・設計パラメータの品質への影響

※本要素試験の試験対象パラメータではなく検証が必要。

・着色はそれぞれの項目単独で有利となるもの

### 4.3.5 ブロック工法に関する要素試験

# (1) 目的

ブロック工法による製造・施工プロセス管理手法(案)の構築、及び材料製造と施工段階にお ける管理項目(評価指標を含む)の設定など、柔軟かつ迅速な埋め戻し材の施工技術の選択を可 能にするための基盤情報を整備する。本年度は、埋め戻し材ブロックの品質として「低透水性」 と「自己シール性」に関するデータとして透水係数と最大膨潤率について整理し,自己シール性 の評価方法について検討した。また,埋め戻し材ブロックの製造から定置までの作業手順につい て具体化するために主要坑道の埋め戻しを例に条件を整理し検討した。これらより得られた知見 から令和2年度に検討した埋め戻し材ブロック工法に関する製造・施工管理プロセスを更新した。

### (2) 埋め戻し材ブロックの透水係数と最大膨潤率

埋め戻し材ブロックを想定して貧配合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(1.1 Mg/m³以下)の範囲で静的に締固めて作製した供試体を対象に透水試験と 膨潤変形試験を実施した。透水試験は有効粘土密度、乾燥密度、混合材料の粒度分布をパラメー タとし,透水係数との関係について整理した。膨潤変形試験では、低有効粘土密度におけるベン トナイト混合土の最大膨潤率を求め、混合材料とした模擬掘削土が膨潤変形に与える影響につい て検討した。

#### (a) 使用材料

本試験で使用した埋め戻し材の材料構成を表 4.3・44 に示す。混合材料となる掘削土は処分場を 設置する母岩固有のものであるが、現段階では特定できないため模擬掘削土として玄武岩を用い た。掘削土は施工性の向上を目的に破砕し粒度調整することが想定される。そのため、模擬掘削 土にはコンクリート用骨材として使用されている玄武岩の砕石と砕砂を準備し、これらの乾燥質 量比(砕石(Gravel)、砕砂(Sand)の頭文字を取って、GS[砕石:砕砂]とする)を管理して配 合することで粒度調整を行った。具体的には、GS[0:10]、[2:8]、[4:6]、[6:8]とした4種類 の模擬掘削土を準備した。粒度調整した模擬掘削土の粒度試験結果を表 4.3-45 と図 4.3-65 に示 す。初期含水比、土粒子密度等その他データは付録4に示す。

対象	仕様
ベントナイト	Na 型ベントナイト(クニゲル V1)
模擬掘削土	玄武岩:砕石(粒径 5~20 mm)、砕砂(粒径 5 mm 以下)
ベントナイト混合率	乾燥質量比で、ベントナイト混合率 15%、30%

表 4.3-44 試験に使用した埋め戻し材の材料構成

	模排	模擬掘削土中の砕石(G)と砕砂(S)の乾燥質量比				
	GS [0:10]	GS [2:8]	GS [4:6]	GS [6:8]		
60%粒径 D ₆₀	2.0	2.7	4.3	7.1		
30%粒径 D30	0.65	0.94	1.5	2.8		
10%粒径 D ₁₀	0.16	0.20	0.28	0.48		
均等係数 Uc	12	13	16	15		
曲率係数 U'c	1.3	1.6	2.0	2.3		

表 4.3-45 模擬掘削土の粒度試験結果



#### (b) 透水試験

包括的技術報告書(NUMO,2021)では、混合材料をケイ砂(3号:5号=1:1)、ベントナイ ト混合率30~70%とした高配合のベントナイト混合土の透水係数と有効粘土密度の関係について 取りまとめられている。埋め戻し材ブロックについてはベントナイト混合率を15~30%、有効粘 土密度は0.8 Mg/m³以上を想定しており包括的技術報告書(NUMO,2021)で取りまとめられた 条件の異なるデータと同様の傾向にあるか確認する必要があると考えた。また、埋め戻し材の仕 様の1例として、混合材料を模擬掘削土(玄武岩)としたベントナイト混合土の透水係数に混合 材料の最大粒径や粒度分布、供試体の乾燥密度が与える影響について確認した。

透水試験(地盤工学会,2020; JGS 0312-2018 低透水性材料の透水試験方法に準拠)の仕様を 表 4.3-46 に、材料調整、供試体作製、試験手順等については付録 4 に示す。試験には蒸留水を使 用し、供試体は直径 100 mm×高さ 100 mm、初期含水比は令和 2 年度の静的締固め試験より得 られた最適含水比とした。表 4.3-47 に試験ケースの一覧を、表 4.3-48 に透水試験より得られた 透水係数を示す。試験ケース名は、「模擬掘削土の混合割合-ベントナイト混合率-目標有効粘土密 度」の順に条件を示すものとした。また、取得した透水係数の比較として既往の結果(原子力機 構・原環センター,2020)を表 4.3-49 に示す。

	仕様			
	供試体寸法	φ100 mm×H100 mm		
	ベントナイト混合率	15%、30%		
		砕石:砕砂=0:10	8.6%	
	初期含水比;ベントナイト混合率15%	砕石:砕砂=2:8	7.9%	
	(成型圧力 10 MPa 時の最適含水比*)	砕石:砕砂=4:6	7.6%	
供試体仕様		砕石:砕砂=6:4	8.5%	
	初期含水比;ベントナイト混合率30%	动云·动动一0·10	11 00/	
	(成型圧力 5 MPa 時の最適含水比*)	4年4月:4年49-0:10	11.0%	
	目標有効粘土密度	$0.6$ , $0.8$ , $1.0 \text{ Mg/m}^3$		
	作製方法	3層、静的締固め		
	飽和方法	真空飽和槽、下部からの自然給水		
試験仕様	水質	蒸留水		

表 4.3-46 透水試験仕様

*静的締固め試験(原子力機構・原環センター, 2021)より設定

試験ケース名	模擬掘削土 混合割合 砕石:砕砂	ベントナイト 混合率 (%)	目標有効粘土密度 (目標乾燥密度) (Mg/m ³ )	目標含水比 (%)
GS[0:10] -B15-0.6	0:10	15	0.6 (1.808)	8.6
GS[0:10] -B15-0.8	0:10	15	0.8 (2.038)	8.6
GS[0:10] -B15-1.0	0:10	15	1.0 (2.206)	8.6
GS[2:8] -B15-0.6	2:8	15	0.6 (1.808)	7.9
GS[2:8] -B15-0.8	2:8	15	0.8 (2.038)	7.9
GS[2:8] -B15-1.0	2:8	15	1.0 (2.206)	7.9
GS[4:6] -B15-0.6	4:6	15	0.6 (1.808)	7.6
GS[4:6] -B15-0.8	4:6	15	0.8 (2.038)	7.6
GS[4:6] -B15-1.0	4:6	15	1.0 (2.206)	7.6
GS[6:4] -B15-0.6	6:4	15	0.6 (1.808)	8.5
GS[6:4] -B15-0.8	6:4	15	0.8 (2.038)	8.5
GS[6:4] -B15-1.0	6:4	15	1.0 (2.206)	8.5
GS[0:10] -B30-0.6	0:10	30	0.6 (1.334)	11.0
GS[0:10] -B30-0.8	0:10	30	0.8 (1.601)	11.0
GS[0:10] -B30-1.0	0:10	30	1.0 (1.819)	11.0

表 4.3-47 透水試験ケース

試験ケース名	有効粘土密度(乾燥密度)(Mg/m ³ )	透水係数 (m/sec)
GS[0:10] -B15-0.6	0.6 (1.808)	$4.83  imes 10^{-12}$
GS[0:10] -B15-0.8	0.8 (2.038)	$2.08  imes 10^{-12}$
GS[0:10] -B15-1.0	1.0 (2.206)	$2.74  imes 10^{-12}$
GS[2:8] -B15-0.6	0.6 (1.808)	$1.28  imes 10^{-11}$
GS[2:8] -B15-0.8	0.8 (2.038)	$5.79  imes 10^{-12}$
GS[2:8] -B15-1.0	1.0 (2.206)	$3.69  imes 10^{-12}$
GS[4:6] -B15-0.6	0.6 (1.808)	$1.22  imes 10^{-11}$
GS[4:6] -B15-0.8	0.8 (2.038)	$8.31  imes 10^{-12}$
GS[4:6] -B15-1.0	1.0 (2.206)	$2.54  imes 10^{-12}$
GS[6:4] -B15-0.6	0.6 (1.808)	$2.00  imes 10^{-11}$
GS[6:4] -B15-0.8	0.8 (2.038)	$1.09 \times 10^{-11}$
GS[6:4] -B15-1.0	1.0 (2.206)	$2.17  imes 10^{-12}$
GS[0:10] -B30-0.6	0.6 (1.334)	$2.36  imes 10^{-11}$
GS[0:10] -B30-0.8	0.8 (1.601)	$1.30 \times 10^{-11}$
GS[0:10] -B30-1.0	1.0 (1.819)	$3.39  imes 10^{-12}$

表 4.3-48 透水試験の結果

表 4.3-49 既往の透水試験の結果

(原子力機構・原環センター, 2020)

带枪把到于	ベントナイト	有効粘土密度(乾燥密度)	透水係数
<b>快艇</b> 1411	混合率(%)	$(Mg/m^3)$	(m/sec)
砕砂細目	5	0.30 (1.985)	$3.77  imes 10^{-9}$
$(0 \sim 2.5 \text{mm})$	15	0.56 (1.756)	$1.48  imes 10^{-11}$
	15	0.78 (2.024)	$1.68  imes 10^{-11}$
	30	1.18 (1.986)	$2.99  imes 10^{-12}$
	50	1.35 (1.822)	$2.30  imes 10^{-12}$
砕石・砕砂粗目	15	0.61 (1.812)	$1.27 \times 10^{-11}$
$(0\sim 20 \text{mm})$	15	0.83 (2.067)	$5.64  imes 10^{-12}$

# (i) 低有効粘土密度のベントナイト混合土における透水係数と有効粘土密度の関係

図 4.3・66 に透水係数と有効粘土密度の関係を示す。今回の試験結果と同材料を使用した既往の 結果(原子力機構・原環センター,2020)との比較を示した。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ている。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 かった。有効粘土密度 0.6、0.8 Mg/m³では、有効粘土密度 1.0 Mg/m³ほど同程度の値ではなかっ たが、透水係数は 10⁻¹²~10⁻¹¹ m/sec オーダーであり大きなばらつきはなかった。



### (ii) 模擬掘削土(混合材料)の粒度分布が透水係数に与える影響

図 4.3-67 に透水係数と模擬掘削土の砕石、砕砂の配合割合との関係を示す。いずれの模擬掘削 土においても透水係数は 10⁻¹²~10⁻¹¹ m/sec オーダーであり、試験で用いた模擬掘削土では粒度分 布が透水係数へ与える影響は小さいことが確認できた。なお、同一の砕石、砕砂の配合割合での 透水係数のばらつきは有効粘土密度の差に起因するものである。



### (iii) 供試体の乾燥密度と間隙比が透水係数に与える影響

図 4.3-68 に透水係数と乾燥密度の関係を示す。今回の試験結果と同材料を使用した既往の結果 (原子力機構・原環センター,2020)との比較を示しており、全体の傾向として乾燥密度が高くな るほど透水係数が小さくなる傾向が確認できた。ベントナイト混合率が異なる場合は、有効粘土 密度を同一とした場合でも乾燥密度が低くなるため、ベントナイト混合率が異なる条件を含む場 合は一律に乾燥密度との関係から透水係数を評価することは難しい。図 4.3-69 に間隙比と透水係 数の関係を示す。間隙比が大きいほど透水係数が大きくなる傾向を示した。



#### (c) 膨潤変形試験

包括的技術報告書(NUMO, 2021)では、有効粘土密度 1.1 Mg/m³以上の範囲に対して、蒸留 水及び人工海水を用いた場合の最大膨潤率が整理されている。ここでは、有効粘土密度 1.1 Mg/m³ 以下の範囲のデータを拡充することを目的に膨潤変形試験を実施した。膨潤変形試験は、供試体 と試験装置の摩擦の影響を受けやすいため供試体の高さは 5 mm 程度とすることが望ましい。し かし、本試験では混合材料に砕砂(粒径 5 mm 以下)を用いていることから、供試体高さは最大 粒径の 5 倍の 25 mm とした。そのため、供試体の高さが膨潤変形量に与える影響を確認した上 で、有効粘土密度 1.1 Mg/m³以下のベントナイト混合土の最大膨潤率と混合材料の影響について 整理した。なお、膨潤変形試験は規格化された試験ではないため、既往の研究(小峯ほか, 2007; 小峯・緒方, 2001;小峯・緒方, 1999;田中・中村, 2005)を参考に試験装置を製作し試験を実施 した。

試験の仕様を表 4.3-50 に示す。供試体は直径 60 mm×高さ 25 mm または 5 mm、初期含水比 はベントナイト 100%については 7~10% (実験室内保管含水比)、ベントナイト混合土について は静的締固め試験結果 (原子力機構・原環センター, 2021)を参考に決定した。試験ケースの一覧 を表 4.3-51 に示す。試験ケース名は「ベントナイト混合率-目標有効粘土密度-混合材料」の順に 条件を示すものとした。また、材料調整、供試体作製、試験手順等については付録 4 に示す。

	仕様					
	供試体寸法	φ60 mm×H25 mm、5 mm				
供試体仕様	初期含水比	ベントナイト:100%	7~10% (実験室内保管含水比)			
		ベントナイト :15% 玄武岩(砕砂):85% ケイ砂 :85%	6.7% (成型圧力 40MPa 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				
学校生生	水質	蒸留水				
武駛江俅	上載荷重	9.8 kPa				

表 4.3-50 膨潤変形試験仕様

*令和2年度の静的締固め試験結果(原子力機構・原環センター, 2021)より設定

	混	合率 (%)		目標有効粘土密度		供試体
試験ケース名	ベントナイト	模擬掘削土*	ケイ 砂	(目標乾燥密度) (Mg/m ³ )	目標含水比 (%)	高さ (mm)
B100-0.8-H5	100	0		0.8 (0.8)	実験室内 保管含水比	5
B100-1.1-H5 B100-1.1-H25	100	0	_	1.1 (1.1)	実験室内 保管含水比	525
B100-1.3-H5	100	0	_	1.3 (1.3)	実験室内 保管含水比	5
B15-0.8-H25-GS	15	85	_	0.8 (2.038)	6.7	25
B15-0.95-H25-GS	15	85	—	0.95 (2.169)	6.7	25
B15-1.1-H25-GS	15	85	_	1.1 (2.275)	6.7	25
B15-0.8-H5-S	15	_	85	0.8 (2.038)	6.7	5
B15-0.95-H5-S	15	_	85	0.95 (2.169)	6.7	5
B15-1.1-H5-S	15	_	85	1.1 (2.275)	6.7	5
B15-0.8-H25-S	15		85	0.8 (2.038)	6.7	25
B15-0.95-H25-S	15	_	85	0.95 (2.169)	6.7	25
B15-1.1-H25-S	15	—	85	1.1 (2.275)	6.7	25

表 4.3-51 膨潤変形試験ケース

* 砕砂最大粒径 5 mm

### (i) 供試体の高さが最大膨潤率に与える影響

既往の研究(小峯ほか, 2007;小峯・緒方,2001;小峯・緒方,1999;田中・中村,2005)で は供試体高さは5、10 mm で試験が実施されているが、本検討では混合材料の最大粒径の関係か ら高さ25 mm で実施した。そこで、供試体高さが最大膨潤変形率へ与える影響について確認を行 った。また、新しく製作した試験装置の再現性確認も併せて行った。図 4.3-70 にベントナイト 100%、供試体高さ5 mm 及び、25 mm における最大膨潤変形率と有効粘土密度の関係を示す。 なお、供試体高さ25 mm では膨潤変形率が期間内に定常化に至らなかったため、双曲線近似によ り最大膨潤変形率を求めた。

有効粘土密度 1.3 Mg/m³について、既往の結果(田中・中村, 2005)と比較してほぼ同程度の 値であることを確認した、今回製作した試験装置の再現性についても確認できた。また、本検討 対象である低有効粘土密度領域における既往の結果がないため、膨潤特性理論評価式を用いて確 認した結果、既往の結果及び膨潤特性理論評価式が示す結果と同じ傾向を示した。

図 4.3-71 にはベントナイト 15%、ケイ砂 85%、供試体高さ5mm 及び、25mm における最 大膨潤変形率と有効粘土密度の関係を示す。なお、有効粘土密度 0.95、1.1 Mg/m³、供試体高さ 25mm では膨潤変形率が定常化に至らなかったため、双曲線近似により求めた最大膨潤変形率を 示した。図中には、膨潤特性理論評価式を用いてベントナイト 15%にける最大膨潤変形率を併せ て記載した。最大膨潤変形率は 30~40%と低い値であるが、供試体高さ5mm 及び 25mm にお いて最大膨潤変形率は同程度であり、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 とを確認した。

以上より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。





### (ii) 混合材料が最大膨潤率に与える影響

図 4.3-72 にベントナイト 15 %、混合材料が玄武岩(砕砂)及びケイ砂における最大膨潤変形 率と有効粘土密度の関係を示す。なお、玄武岩(砕砂)では最大粒径の関係により供試体高さ 25 mmのみを実施し、ケイ砂において実施した高さ 5 mm及び 25 mmの結果と比較を行った。ケ イ砂では供試体の高さに依らず同程度の最大膨潤変形率となることを確認している。一方、玄武 岩(砕砂)では、同ベントナイト混合率にも関わらずケイ砂を混合材料としたケースと比較して 最大膨潤変形率が 3~5 割低度低くなっている。ケイ砂による結果から最大膨潤変形率に高さの 影響がないと仮定した場合、模擬掘削土の最大粒径が最大膨潤変形率へ影響を与えていると推察 される。供試体が膨潤変形する際に試験装置との間に生じる摩擦が、混合材料の最大粒径の影響 でより大きくなり膨潤変形量が小さくなった可能性が考えられる。以上より、本検討条件におい ては混合材料の最大粒径により最大膨潤変形率が異なる可能性が示唆された。



## (3) 自己シール性の評価方法の検討

緩衝材ブロックの自己シール性に関する設計要件(NUMO, 2021)では、自己シール性に対す る設計での確認方法、指標及び基準を表 4.3-52 のように示している。

表 4.3-52 設計要件の確認方法(自己シール性)

(NUMO, 2021)

設計要件	確認方法	指標	基準
自己シール性	施工時の隙間を充填可能な膨潤性を有してい ることを確認する	膨潤率/隙間体積比	2以上

自己シール性に関する指標及び基準としては、緩衝材の膨潤量が施工時にできる隙間体積の2倍 以上となることとして式 4.3-2を基準に設定している。

 $\varepsilon \geq 2\theta$ 

ε:緩衝材ブロックの最大膨潤率(%)

式 4.3-2

θ:隙間体積比(緩衝材周りの隙間体積/緩衝材ブロックの初期体積×100)(%)

ここで緩衝材ブロック及び埋め戻し材ブロック周りの隙間について、図 4.3-73 に示すような状態を仮定した。既往の検討(NUMO, 2021)において緩衝材ブロックは、図 4.3-73 (a)に示すように鉛直方向は完全に拘束されているものと仮定し、水平方向の膨潤変形のみを評価している。 そのため、小峯ほか(1999)や田中・中村(2005)によって実施されている一次元膨潤変形試験から得られた膨潤変形率を指標値として使用している。一方で、埋め戻し材ブロックの場合は、図 4.3-73 (b)に示すように鉛直方向と水平方向の二方向に膨潤変形することや、ブロックの自重による拘束の影響を考慮した最大膨潤変形率を考える必要がある。

そこで、緩衝材ブロックの評価方法を参考に、「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理 論評価式(以下、膨潤特性理論評価式と記載)」(Komine and Ogata, 2004)を用いた埋め戻し 材ブロックの最大膨潤変形率の算出方法について検討した。



### (a) 埋め戻し材ブロック膨潤変形率の検討モデル

検討に用いた埋め戻し材ブロックのモデルを図 4.3-74 に示す。定置した埋め戻し材ブロック は、対称性から軸対象モデルとし、中心軸と埋め戻し材ブロック底面との交点を原点とした。定 置した全体の埋め戻し材ブロック高さは 4.9 m、幅は 2.4 m とした。次に、計算に用いた埋め戻 し材ブロックの各パラメータの値を表 4.3-53 に示す。使用したパラメータは埋め戻し材ブロック の検討のために仮設定した値である。ベントナイト混合率は 15%、有効粘土密度は 0.8、1.1 Mg/m³ の2条件とした。その他計算に用いるパラメータについて、既往の研究(Komine and Ogata, 2004) では試験結果に基づき設定している。本検討ではモンモリロナイト含有率 57%(小峯ほか、2018)、 材料パラメータ、物理定数、環境条件パラメータ等は既往の研究(小峯・緒方、1999)の値を参 考にした。また、間隙水のイオン濃度 noの設定について、既往の研究では最大膨潤率で間隙水の イオン濃度 no=20 mol/m³、最大膨潤圧で no=40~50 mol/m³の 2条件を使用して最大膨潤変形 率の検討を行った。



図 4.3-74 検討モデル

### (b) 埋め戻し材ブロック膨潤変形率の算出方法

膨潤特性理論評価式(詳細は付録4に示す)は、ベントナイトの一次元膨潤現象を対象として いる。そのため、二方向に膨潤変形する埋め戻し材ブロックの膨潤変形率を求めるために、後述 するように鉛直・水平方向それぞれに分けて計算した結果を組み合わせることとした。なお、奥 行き方向に残存する隙間は鉛直・水平方向と比較して小さいと考えられるため考慮しないことと した。埋め戻し材ブロックの最大膨潤変形率については、以下に示す手順で検討した。図 4.3-74 に示すように、埋め戻し材ブロックが設置される範囲を任意のサイズで格子状に分割し、それぞ れの格子中心位置における最大膨潤変形率を膨潤特性理論評価式から求めた。この時、全領域は 一様に飽和しているものと仮定し、格子内の最大膨潤変形率は一定とした。計算対象とする格子 中心位置の座標を(X₀, Z₀)としたとき、鉛直方向の拘束圧は(X=X₀, Z>Z₀)の範囲に位置す るブロックの自重、水平方向の拘束圧は(X>X₀, Z>Z₀)の範囲に位置するブロックの自重相当 とした(図 4.3-75)。膨潤特性理論評価式より、鉛直方向および水平方向のそれぞれの最大膨潤変 形率を算出し、これらを式 4.3-3 及び式 4.3-4 を用いて案分した値を、二方向に膨潤変形した時 の最大膨潤変形率とした。二方向に膨潤変形した場合の評価手順を図 4.3-76 に示す。



図 4.3-75 拘束圧の設定

$$\begin{split} \varepsilon_{\nu} &= \varepsilon_{\nu}' (\frac{\varepsilon_{\nu}'}{\varepsilon_{\nu}' + \varepsilon_{h}'}) & \vec{x} \ 4.3-3 \\ \varepsilon_{h} &= \varepsilon_{h}' (\frac{\varepsilon_{h}'}{\varepsilon_{\nu}' + \varepsilon_{h}'}) & \vec{x} \ 4.3-4 \end{split}$$

ε_v:鉛直・水平方向に膨潤変形時の鉛直方向の最大膨潤変形率(%)

ε_h:鉛直・水平方向に膨潤変形時の水平方向の最大膨潤変形率(%)

ε_ν:水平方向拘束時の鉛直方向の最大膨潤変形率(%)

εh: 鉛直方向拘束時水平方向の最大膨潤変形率(%)

【埋め戻し材ブロックにおける鉛直・水平二方向への膨潤変形を考慮した計算手順】 前提:埋め戻し材ブロックは、鉛直・水平の二方向に膨潤変形する(二次元)

ベントナイト系緩衝材・埋め戻し材の 膨潤特性理論評価式では膨潤変形 率を任意の1方向の値として評価	$\varepsilon_{smax} = \varepsilon_v + \varepsilon_h + \varepsilon_d$ $= \varepsilon'_v \text{ or } \varepsilon'_h \text{ or } \varepsilon'_d$	$  $
	$\bigtriangledown$	
二方向の膨潤変形率を検討するため に、鉛直と水平方向の膨潤率をそれぞ れの拘束条件と膨潤特性理論評価 式から計算	$\begin{cases} \varepsilon_{smax} = \varepsilon'_{v} + 0 + 0\\ \varepsilon_{smax} = 0 + \varepsilon'_{h} + 0 \end{cases}$	
上記で求めた鉛直,水平それぞれ1 方向の膨潤変形率を案分することで、 2方向(鉛直・水平)の膨潤率に換算	$\begin{cases} \varepsilon_{smax} = \varepsilon_{v} + \varepsilon_{h} \\ \varepsilon_{v} = \varepsilon'_{v}(\varepsilon'_{v}/\varepsilon'_{v} + \varepsilon'_{h}) \\ \varepsilon_{h} = \varepsilon'_{h}(\varepsilon'_{v}/\varepsilon'_{v} + \varepsilon'_{h}) \end{cases}$	ε _v :案分した鉛直方向の膨潤変形率 ε _h :案分した水平方向の膨潤変形率 (鉛直・水平方向を考慮した二次元の膨潤変形率)

図 4.3-76 埋め戻し材ブロックにおける鉛直・水平方向への膨潤変形を考慮した計算手順

# (c) 埋め戻し材ブロック膨潤変形率の検討結果

図 4.3-77 に、膨潤特性理論評価式より求めた有効粘土密度 0.8 Mg/m³における鉛直方向及び 水平方向の最大膨潤変形率分布図を示す。なお、図中の「鉛直方向」「水平方向」では、記載した 方向のみの膨潤変形率を示している。



次に、図 4.3-77 で求めた鉛直方向及び水平方向の最大膨潤変形率の値を用いて、式 4.3-3 及び 式 4.3-4 より二方向に案分したの最大膨潤変形率を求めた。図 4.3-78 および図 4.3-79 に二方向 に膨潤変形した時の最大膨潤変形率分布図を示す。





これよりブロック上部の任意格子における最大膨潤変形率は、有効粘土密度 0.8 Mg/m³、間隙 水のイオン濃度 no=20 mol/m³では最大膨潤変形率 35%、no=50 mol/m³では最大膨潤変形率 17%となった。有効粘土密度 1.1 Mg/m³については、間隙水のイオン濃度 no=20 mol/m³で最大 膨潤変形率 42%、no=50 mol/m³では最大膨潤率最大膨潤変形率 29%となった。次に、本検討の ために仮設定した隙間体積と埋め戻し材ブロックの膨潤変形量の比較を行った。ここでは、図 4.3-78 (a) に示したベントナイト混合率 15%、有効粘土密度 0.8Mg/m³の条件について最大膨潤 変形率と格子体積の積から各格子の膨潤変形量を算出し、格子の列毎に鉛直方向の膨潤変形量の 合計値(式 4.3-5)、格子の行毎に水平方向の膨潤変形量の合計値(式 4.3-6)を求めた。そして、 図 4.3-80に示す隙間体積に対し、行及び列毎に自己シール性の判断を行った。埋め戻し材ブロッ クの自己シール性の判断として、式 4.3-2 を参考に式 4.3-7 を設定した。なお、ブロックと坑道 の隙間は、過去の検討事例(原子力機構, 2019; SKB, 2015)を参考に 100 mm に設定した。

$$\Delta v_{j} = v_{0} \sum_{i=1}^{n} \frac{(\varepsilon_{v})_{ij}}{100}$$
 式 4.3-5  

$$\Delta h_{i} = h_{0} \sum_{j=1}^{m} \frac{(\varepsilon_{h})_{ij}}{100}$$
 式 4.3-6  

$$\Delta v_{j} : j \mathcal{D}$$
に位置する格子の鉛直方向の膨潤変形量(mm)  

$$\Delta h_{i} : i 行に位置する格子の水平方向の膨潤変形量(mm)$$
  

$$v_{0} : 鉛直方向の格子サイズ(mm)、h_{0} : 水平方向の格子サイズ(mm)$$
  

$$(\varepsilon_{v})_{ij} : i 行 j \mathcal{D}$$
に位置する格子の氷平方向の膨潤変形率(%)  

$$(\varepsilon_{h})_{ij} : i 行 j \mathcal{D}$$
に位置する格子の水平方向の膨潤変形率(%)  

$$\gamma \geq 2$$
 式 4.3-7  
: 膨潤変形量/隙間体積(-)

γ



図 4.3-80 本検討のために仮設定した埋め戻し材ブロック及び隙間の仮体積

図 4.3・81 に、鉛直・水平方向それぞれに対する間隙水のイオン濃度 no=20 mol/m³の条件において想定される坑道の隙間に対する埋め戻し材ブロックの膨潤変形量を可視化した図を示す。また、図 4.3・82 には設定した行及び列毎の自己シール性の判断結果を示す。有効粘土密度が 0.8 Mg/m³のケースでは鉛直方向(トンネル上部の隙間)においては 24 列中 19 列がγ > 2 となったが、水平方向(トンネル側部)では 56 行中 49 行がγ < 2 となった。本評価方法を用いることで、既存のパラメータから短時間でかつ容易に埋戻し材ブロックにおける自己シール性を評価できる見通しが得られた。ただし、現実では浸潤過程における膨潤変形や水圧、坑道壁面による拘束といった条件が加わるため本評価結果の妥当性については、数値解析や模型実験等による確認が必要ある。





(b) 有効粘土密度 1.1 Mg/m³ 図 4.3-82 設定した行及び列毎の自己シール性の判定(鉛直・水平方向)

# (4) 埋め戻し材ブロック工法における作業手順の検討

埋め戻し材ブロックに求められる性能、製作、保管、施工等といったそれぞれの観点から要求 機能・品質について抽出した。また、抽出された要求機能・品質を満足するための埋め戻し材ブ ロックの寸法、製造装置、定置装置について主要坑道の埋め戻しを例に検討し、埋め戻し材ブロ ックの製造から定置までの作業手順について具体化することで、埋め戻し材ブロック製造・施工 プロセス管理手法を更新した。

# (a) 埋め戻し材ブロックの寸法と製造、定置方法の検討

# (i) 埋め戻し材ブロックの寸法

埋め戻し材ブロックの寸法については主要坑道の埋め戻しを例に4つの寸法の埋め戻し材ブロックの適性を比較し、適切と考えられる寸法を検討した。比較対象とした4つの寸法(表 4.3-54) は国内で製作もしくは検討実績がある埋め戻し材ブロックを参考に主要坑道形状(NUMO, 2021) に収まる高さと幅の寸法に設定した。

名称 (寸法 [mm])	実績・選定理由 等
小型ブロック (300×300×100)	<ul> <li>・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め戻し材として使用された</li> <li>・人力で搬送・定置が可能な寸法・重量である</li> </ul>
中型ブロック (650×500×350)	<ul> <li>・大型ブロックと小型ブロックの中間サイズ</li> <li>・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</li> </ul>
大型ブロック 1 (972×1,000×481)	<ul> <li>・中深度処分の処分坑道の側部埋め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)</li> <li>・坑道形状に合わせて<u>幅を 1,000 mm から 972 mm</u>、高さを 500 mm か ら 481 mm にリサイズした</li> </ul>
大型ブロック 2 (972×1,000×972)	<ul> <li>・中深度処分の処分坑道の側部埋め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)</li> <li>・坑道形状に合わせて<u>幅を 1,000 mm から 972 mm</u>、高さを 1,000 mm から 972 mm</li> </ul>

表 4.3-54 比較する埋め戻し材ブロックの寸法

#### (ii) 定置レイアウトと必要個数

表 4.3-54 に示す寸法の埋め戻し材ブロックの必要個数等を把握するために埋め戻し材ブロックの定置レイアウトを検討した。検討に際しては以下の5項目を考慮した。

- ・ブロック配置は高さ方向に千鳥配置とした
- ・ブロック間は横方向に 10 mm の隙間が残存するものとした
- ・ブロックと坑道の隙間は100 mm以下となるように寸法が異なるブロックを設置した
- ・寸法の異なるブロックを組み合わせる場合、高さか幅のどちらかの寸法を短くした
- ・主要坑道の床面凹凸についてはブロック定置前にペレットで敷き均すため考慮しない

主要坑道における各埋め戻し材ブロックの定置レイアウトを図 4.3-83 に示す。検討した定置レ

イアウトから断面当たりに必要なブロック個数と1日当たりの施工速度を4m/dayした場合に必要となるブロック個数を試算した。試算結果を表 4.3-55 に示す。





主ブロック名称 ブロック寸法(主) (ブロック寸法(副)) [mm]	1日当たり 施工断面数 ^{*1} [断面]	1 断面当たりの個数	1日当たり 必要なブロック数,* ³
小型ブロック 300×300×100 (250×300×100) (200×300×100) (150×300×100) (100×300×100)	14	300×300×100: 636 個 250×300×100: 32 個 200×300×100: 4 個 150×300×100: 10 個 100×300×100: 38 個	300×300×100: 8,904 個 250×300×100: 448 個 200×300×100: 56 個 150×300×100: 140 個 100×300×100: 532 個
中型ブロック 600×500×350 (500×500×350) (300×500×350) (200×500×350) (100×500×350)	8	600×500×350: 88 個 500×500×350: 3 個 300×500×350: 8 個 200×500×350: 6 個 100×500×350: 4 個	600×500×350: 704 個 500×500×350: 24 個 300×500×350: 64 個 200×500×350: 48 個 100×500×350: 32 個
大型ブロック1 972×1,000×481 (481×1,000×481) (400×1,000×481)	4	972×1,000×481: 38 個 481×1,000×481: 4 個 400×1,000×481: 8 個	972×1,000×481: 152 個 481×1,000×481: 16 個 400×1,000×481: 32 個
大型ブロック 2 972×1,000×972 (481×1,000×972) (350×1,000×481)	4	972×1,000×972: 17 個 481×1,000×972: 6 個 350×1,000×481: 6 個	972×1,000×972:68 個 481×1,000×972:24 個 350×1,000×481:24 個

表 4.3-55 埋め戻し材ブロックの必要個数

*1施工速度(4m/day)÷ブロックの奥行き長さから算出(算出結果の小数点以下は切り上げ)

# 1) 主要坑道を対象とした埋め戻し材ブロックの寸法の選定

各埋め戻し材ブロックのレイアウト、性能、製作、保管、運用に対する適性のまとめを表 4.3-56、 表 4.3-57 に示す。埋め戻し材ブロックの定置作業工数は、1日の施工速度 4 m/day で坑道を埋め 戻し材ブロックのみで埋め戻すとした場合、小型ブロック (300×300×100) では 8,904 個、中 型ブロック (600×500×350) では 704 個、大型ブロック 1 (972×1,000×481) では 152 個、 大型ブロック 2 (972×1,000×972) では 68 個となる。工場の生産能力や品質管理の観点から現 実的には百数十個程度が最適と考えられるため、大型ブロック 1 または大型ブロック 2 が妥当で あると考えられる。また、大型ブロック 1 と 2 を比較した場合、空間が制約される処分坑道内で は大型ブロック 1 の方が施工性の面で有利である。

ブロック生産設備は、埋め戻し材ブロックの製作量が坑道形状と施工速度で拘束されることか ら、大型ブロックであれば設備の大型化、小型ブロックであればライン数の増加が必要となる。 プレス時間などの製作性についても寸法の違いによる製作速度の差は小さいと考えられる。これ らから埋め戻し材ブロックの寸法の違いによる製作設備に与える影響は小さいと考えられる。 埋め戻し材ブロックと処分坑道壁面に隙間が残存するが、隙間は埋め戻し材ブロックの膨潤変形 によって閉塞されることが望ましい。そのため隙間は小さい方が有利であり、この目安となる充 填率(ブロック定置面積/坑道断面積×100%)をそれぞれのレイアウトで比較すると小型ブロッ クで 85.6%、中型ブロックで 82.9%、大型ブロック 1 で 79.7%、大型ブロック 2 で 72.0%となり、 ブロック寸法が小さい方が充填率は高くなる。ただし、隙間には図 4.3・83 に示すようにサイズの 異なる埋め戻し材ブロックやベントナイトペレットを併用することで対応することが可能である ため、寸法の差による埋め戻し材の性能に与える影響は小さいと考えた。上記より大型ブロック 972×1,000×481)を使用することを前提として以後の検討を進めた。

ブロックの性能・設備・製作性・		設備・製作性・		備考			
	運用性に係	くうりょう	大型ブロック 2(972×1,000×972)	大型ブロック1 (972×1,000×481)	中型ブロック (600×500×350)	小型ブロック(300×300×100)	U114 U
		目標密度 (1.8Mg/m ³ )*4 への到達	O 長 所:— 短 所:— その他:目標密度は到達可能	O 長 所:— 短 所:— その他:目標密度は到達可能	O 長 所: 短 所: その他:目標密度は到達可能	O 長 所:— 短 所:— その他:目標密度は到達可能	円形ブロックでは H(高さ)/D(直径)が大きくなるとブロック隅角部の高さ方向に密度差が生じる。密度は止水性に影響を与える。※本検討では H/D はブロック高さ÷長辺で算出した。
	フロック内 密度	ブロック内 密度分布	△ 長 所:— 短 所:止水能力が不均一 その他:H/D=0.97 対策例:二軸圧縮(上下方向)を採用する 打ち継ぎ回数を増やす	△ 長 所:— 短 所:止水能力が不均一 その他:H/D=0.48 対策例:二軸圧縮(上下方向)を採用する 打ち継ぎ回数を増やす	△ 長 所:一 短 所:止水能力が不均一 その他:H/D=0.58 対策例:二軸圧縮(上下方向)を採用する 打ち継ぎ回数を増やす	O 長 所:止水能力が均一 短 所:— その他:H/D=0.33	
性能		ブロック間の 隙間の大きさ		ブロック間の隙間の大きさはブロック (ただし、ブロックの	の大きさによる影響をほぼ受けない。 定置精度に依存する)		ブロック間の隙間の大きさによりブロックの止水能力に影響 を与える可能性がある。
	止水能力 (隙間に対す る膨潤特性)	ブロックと坑 道壁面間の 隙間の大きさ	△ 長 所:— 短 所:トンネル端 72.0% 隙間処理後充填率*2 89.1%	○ 長 所:トンネル端部までブロックで充填 可能 短 所:- その他:充填率*1 79.7% 隙間処理後充填率*2 90.7%	○ 長 所:トンネル端部までブロックで充填 可能 短 所:- その他:充填率 ^{*1} 82.9% 隙間処理後充填率 ^{*2} 91.5%	○ 長 所:トンネル端部までブロックで充填 可能 短 所:− その他:充填率*1 85.6% 隙間処理後充填率*2 91.6%	ブロックと抗道壁面間の隙間の大きさは、ブロックのサイズと 定置方法により決定される。大型ブロックを使用した場合、ブロ ックと坑道壁面間の隙間が大きくなる。
設備	製作設備	プレス機等設 備	△ 長 所:— 短 所:プレス機等設備の大型化 その他:— 対策例:大型化を考慮した作業スペース を確保	△ 長 所:— 短 所:プレス機等設備の大型化 その他:— 対策例:大型化を考慮した作業スペースを 確保	△ 長 所: 短 所:プレス機等設備の大型化 その他: 対策例:大型化を考慮した作業スペースを 確保	O 長 所:プレス機等設備の小型化 短 所:— その他:—	ブロックが大型化することで必要な成形圧が増加するため、プ レス機及び金型等設備が大型化する。 小型ブロック(10ton プレス機):1.4m×0.9m×3m 中型・大型ブロック(2000ton プレス機):11m×4.5m×13m
		金型	△ 長 所: 短 所:金型 or スペーサの交換数が多い その他:検討したブロック配置例(表 4.3-55)では3種類のブロックで 構成される。(3種のうち1種は 幅と厚さの異なるブロック) 対策例:各種ブロックの専用ラインの構築	<ul> <li>○</li> <li>長 所:金型 or スペーサの交換数頻度が 少ない</li> <li>短 所:-</li> <li>その他:検討したブロック配置例(表 4.3-55)では3種類のブロックで 構成される。</li> </ul>	△ 長 所: 短 所:金型 or スペーサの交換数が多い その他:検討したブロック配置例(表 4.3-55)では5種類のブロックで 構成される。 対策例:金型交換の自動化	△ 長 所: 短 所:金型 or スペーサの交換数が多い その他:検討したブロック配置例(表 4.3-55)では5種類のブロックで 構成される。 対策例:金型交換の自動化	埋め戻しに使用するブロック種類が増加することで、金型やスペーサの交換工程が増加する。また各ブロック製作数のバランス 次第では専用ラインが必要となる。
		運用人数	● 長 所:運用コスト(人件費)の低下 短 所:- その他:運用人数 3名/プレス機 68個/1日*3	● 長 所:運用コスト(人件費)の低下 短 所:- その他:運用人数 3名/プレス機 152個/1日*3	○ 長 所:運用コスト(人件費)の低下 短 所:- その他:運用人数 3名/プレス機 704個/1日*3	△ 長 所:- 短 所:運用コスト(人件費)の増加 その他:運用人数 2名/プレス機 8,904個/1日*3 対策例:製作作業の自動化、プレス機当た りのブロック製作数の増加	1 奥行き当たりブロックの製作個数が増加することで、プレス 機が増加し、必要な作業員数が増加する。
	搬运	送設備	△ 長 所:一 短 所:人力でのハンドリング不可能 その他:候補ブロック質量 1984.0kg 対策例:搬送設備の増設	△ 長 所:- 短 所:人力でのハンドリング不可能 その他:候補ブロック質量 981.8kg 対策例:搬送設備の増設	△ 長 所:一 短 所:人力でのハンドリング不可能 その他:候補ブロック質量 220.5kg 対策例:搬送設備の増設	O 長 所:人力でのハンドリング可能 短 所:— その他:候補ブロック質量 18.9kg	ブロックが大型化することでブロックの移動等に天井クレー ンやフォークリフトなどの搬送機材が必要となる。

# 表 4.3-56 仮設定した埋め戻し材ブロックに対する適性の検討(1/2)

 *1
 表 4.3-55 に記載されているブロックのみで埋め戻した場合の充填率

 *2
 表 4.3-55 に記載されているブロックと寸法の異なるブロックで埋め戻した場合の充填率

 *3
 施工速度を 4m/day で候補ブロックのみで埋め戻した場合の1 日当たりの候補ブロックの個数

 *4
 NUMO
 包括的技術報告:我が国における安全な地層処分の実現一適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築一 第4章 処分場の設計と工学技術 付属書 4-43 埋め戻し材設計要件に対する仕様の検討に示されている製作施工性 1.8Mg/m³を目標密度とした。

# 表 4.3-57 仮設定した埋め戻し材ブロックに対する適性の検討(2/2)

	ブロッ:	クの性能・設備・製作・		備老			
		運用に係る項目	大型ブロック 2(972×1,000×972)	大型ブロック1 (972×1,000×481)	中型ブロック (600×500×350)	小型ブロック (300×300×100)	「田 ~つ
	材料の充填高さ		△ 長 所:- 短 所:作業性の悪化 その他:充填高さ1,617 mm 対策例:架台の増設 打ち継ぎ回数を増やす 材料投入ならし作業の追加	O 長 所:作業性の向上 短 所:— その他:充填高さ 808.5mm	O 長 所:作業性の向上 短 所:— その他:充填高さ577.5mm	O 長 所:作業性の向上 短 所:— その他:充填高さ165.0mm	ブロックが大型化することで充填高さ(成形前の材料を充填後 の金型底から材料上面までの高さ)が高くなる。 充填高さは System design of backfill Full scale production test of backfill blocks (SKB P-14-24)の記載されているブロック 高さ×1.65 で算出した。
		圧縮時間		ブロック成型時の圧縮時間はブロック	の大きさによる影響をほぼ受けない。		ブロック圧縮時間はプレス機のピストンの降下速度とピスト ンのストロークから決定する。
		圧縮保持時間		ブロック成型時の圧縮保持時間はブロッ	クの大きさによる影響をほぼ受けない。		過去の実績から小型ブロックで数十秒、大型で数分程度。
	ブロッ 製作	ブロック1個当た りの製作時間	△ 長 所: 短 所:製作時間が長い その他: 対策例:製造ラインの増設	△ 長 所: 短 所:製作時間が長い その他: 対策例:製造ラインの増設	△ 長 所:- 短 所:製作時間が長い その他:- 対策例:製造ラインの増設	O 長 所:製作時間が短い 短 所:— その他:—	ブロック1個当たり圧縮時間はブロックが大型化するほど長く なる。
製作		歩掛り・生産能力	O 長 所:ブロック製作数が少ない 短 所:1ブロック当たりの製作に時間が 長い その他:68 個/1 日*1	O 長 所:ブロック製作数が少ない 短 所:1ブロック当たりの製作に時間が 長い その他:152 個/1 日*1	△ 長 所: 短 所:ブロック製作個数が多い 1ブロック当たりの製作に時間 が長い その他:704個/1日*1 対策例:製造ラインの増設	△ 長 所:1ブロック製作が早い 短 所:ブロック製作個数が多い その他:8,904 個/1 日 ^{*1} 対策例:製造ラインの増設	単位時間当たりのブロックの製作量は、大型ブロックであるほ ど多くなる。
	ブロッ 面状態	ク表 エッジの欠け	△ 長 所:— 短 所:ブロックの隙間の増加 その他:—	△ 長 所: 短 所:ブロックの隙間の増加 その他:	△ 長 所: 短 所:ブロックの隙間の増加 その他:	O 長 所:ブロックの隙間の減少 短 所:— その他:—	ブロックが大型化することで、端部が欠けやすくなることが報告されている。
	●     ○     長 所:製作後寸法変化量が少ない     短 所:一     その他:H/D=0.97     ○		○ 長 所 : 製作後寸法変化量が少ない 短 所 : — その他 : H/D=0.97	○ 長 所:製作後寸法変化量が少ない 短 所:— その他:H/D=0.48	○ 長 所:製作後寸法変化量が少ない 短 所:— その他:H/D=0.58	△ 長 所:— 短 所:製作後寸法変化量が大きい その他:H/D=0.33 対策例:寸法変化量を考慮した施工を実 施する	ブロック高さ寸法変化はブロックの大きさによる影響をほぼ 受けない。(ただし、ブロックの形状、高さにより、寸法の経時 変化(スプリングバック)へ影響する可能性がある) H/D が小さいほど、脱型後のブロック高さの増加する比率が大 きくなる。 例えば、φ300 ベントナイト:ケイ砂=50:50、含水比 9% H/D=1.00 高さ変化量(H に対する変化率)=5.9mm(2.0%) H/D=0.43 高さ変化量(H に対する変化率)=5.0mm(4.0%) H/D=0.13 高さ変化量(H に対する変化率)=4.1mm(10.5%)
	品質確	<ul> <li>●</li> <li>●<td><ul> <li>○</li> <li>長 所:作業工数の減少 データ管理数が少ない</li> <li>短 所:一</li> <li>その他:検討したブロック配置例では3種 類のブロックで構成される。</li> <li>152 個/1 日*1</li> </ul></td><td>△ 長 所:</td><td>△ 長 所: 短 所:作業工数の増加 データ管理数が多い その他:検討したブロック配置例では5 種類のブロックで構成される。 8,904 個/1 日^{*1} 対策例:検査等効率化及び簡略化</td><td>ブロックが大型化すると、製作するブロック数が減少するため、作業工数が減少し、管理するデータ量も少量となる。ブロック種類が増加すると、品質管理のための検査が複雑化する。</td></li></ul>		<ul> <li>○</li> <li>長 所:作業工数の減少 データ管理数が少ない</li> <li>短 所:一</li> <li>その他:検討したブロック配置例では3種 類のブロックで構成される。</li> <li>152 個/1 日*1</li> </ul>	△ 長 所:	△ 長 所: 短 所:作業工数の増加 データ管理数が多い その他:検討したブロック配置例では5 種類のブロックで構成される。 8,904 個/1 日 ^{*1} 対策例:検査等効率化及び簡略化	ブロックが大型化すると、製作するブロック数が減少するため、作業工数が減少し、管理するデータ量も少量となる。ブロック種類が増加すると、品質管理のための検査が複雑化する。
保 管	ブロック保管		○ 長 所:パッキング工数の減少 短 所: その他:68個/1日*1	○ 長 所:パッキング工数の減少 短 所: その他:152個/1日*1	△ 長 所:- 短 所:パッキング工数の増加 その他:704個/1日*1 対策例:アセンブリ単位でのパッキング	△ 長 所: 短 所:パッキング工数の増加 その他:8,904 個/1 日*1 対策例:アセンブリ単位でのパッキング	パッキング:保管や搬送時に周辺環境によるブロック含水比へ の影響を最小限とすることを目的として、ラップ 等で梱包すること。 アセンブリ単位:ブロックの1日当たりに必要な個数と坑道内 の作業スペースを考慮して決定する。
運用	定置	作業工数	○ 長 所:作業工数の減少 短 所:— その他:68個/1日*1	○ 長 所:作業工数の減少 短 所:— その他:152個/1日*1	△ 長 所:- 短 所:作業工数の増加 その他:704個/1日*1 対策例:アセンブリ化及びアセンブリ作業 設備の増設	△ 長 所:- 短 所:作業工数の増加 その他:8,904個/1日*1 対策例:アセンブリ化及びアセンブリ作業 設備の増設	ブロックを大型化すると一度の定置作業で定置できる埋め戻 し材量が増加し、工数が減少する。
	<b>一</b> 作 業	摩擦	△ 長 所:- 短 所:摩擦力が大きい その他:ブロック質量 1984.0kg 対策例:押し出し装置の高出力化	△ 長 所:- 短 所:摩擦力が大きい その他:ブロック質量 981.8kg 対策例:押し出し装置の高出力化	<ul> <li>○ (△※)</li> <li>長 所:摩擦力が小さい</li> <li>短 所: —</li> <li>その他:ブロック質量 220.5kg</li> <li>※アセンブリ化した場合、大型ブロック同様の摩擦力が生じるため、判断は△となる。</li> </ul>	<ul> <li>○ (△※)</li> <li>長 所:摩擦力が小さい</li> <li>短 所: —</li> <li>その他:ブロック質量 18.9kg</li> <li>※アセンブリ化した場合、大型ブロック同様の摩擦力が生じるため、判断は△となる。</li> </ul>	フロックに生じる摩擦力は、ブロック自重に比例して増加する。
コフ	トイン	ペクト項目	イニシャルコスト:ブロック製作施設(プ ランニングコスト:ブロック製作施設の運	レス機、金型、工場内搬送装置)、ブロック [。] 用人数、工場内インフラ	保管施設(保管場所、保管施設内搬送装置)	、ブロック搬送装置、ブロック定置装置	
						固程度が最適と考えられるため、大型ブロック以上が妥当だと考え このことから本検討では大型ブロック1 (972×1,000×481)を検	

*1 前項での文献調査結果から施工速度を 4m/day で候補ブロックのみで埋め戻した場合の1日当たりの候補ブロックの個数

#### 2) 埋め戻し材ブロック製作装置

埋め戻しブロックの製作・運搬・保管工程から生じる要求機能・品質を表 4.3-58 に示す。ここ では「金型の清掃が容易に行えること」や「点検が容易にできること」といった作業を容易に行 うためのものと、「製作品質が良いこと」や「位置決め精度が良いこと」といった作業精度を向上 させるものや記録管理などの項目が挙げられた。ただし、これらについては機械側への反映が難 しく、地上では有人での運用や作業エリアへの制限が小さいため、運用方法や作業員の練度の側 から解決することが出来る。そのためこれらの要求機能・品質についてはブロックの製作装置に は反映させないこととした。これらを満足するために埋め戻し材ブロック製作装置は、装置の構 成が単純でかつ実績のある片押し方式による圧縮成型が適していると考えられる。また金型から の埋め戻し材ブロックの取り出しについては圧縮装置の占有時間を短くするために、プレス機で 脱型作業を行わずに別途脱型装置を用意し、これを用いて埋め戻し材ブロックを取り出す方式が 考えられる。埋め戻し材ブロック製作装置に用いるプレス機は大型ブロックに対応するために公 称圧力 20.000 kN のものが必要であると考えられ、金型をプレス機に固定する際には、金型底部 にある位置決め用の孔を使用して位置決め固定できるものが望ましい。金型の移動や脱型装置へ の据付を考慮して、金型上部には吊り上げ用のボルト設置孔や脱型時の摩擦で金型が持ち上がる ことを防止するために、金型側面の溝を固定するロック機能を設けることが考えられる。検討し た埋め戻し材ブロック製作装置のイメージ図を図 4.3-84 に示す。



図 4.3-84 埋め戻し材ブロック製作装置のイメージ図

		装置の機能及び仕様の仮設定		壮思が供えていた西本修む 日所の長山	要求機能・品質から
		機能	仕様	装直が備えるへざ要求機能・品質の抽出	選定した機材等
	①圧縮成型機、金型の点検、	清掃	機械式除去	金型の清掃が容易に行えること	
	清掃			金型に材料が付着しにくいこと	
		点検	ITV 方式	点検が容易にできること	
			目視	点検記録が残ること	
		金型寸法測定機能	ゲージ方式	取扱が容易であること	
			レーザ距離計		
		金型質量測定機能	ロードセル方式	-	—
	②材料の混合	混合材料計量機能	材料配合	埋戻しブロックの要求性能を満足する材料配	-
				合であること	
			製作能力	製作品質が良いこと	_
				早く製作できること	_
			投入質量	精度よく計量できること	_
			混合材料荷姿	ブロック種類ごとに小分けされていること	_
埋戻し材				ハンドリングが容易な荷姿であること	_
ブロック	③金型への材料投入、	投入機能	フィーダー方式	精度よく計量できること	_
の製作、	敷き均し	敷き均し機能	スクレーパ方式	敷き均し面(凹凸)の測定ができること	_
運搬、保				敷き均しの記録が残ること	_
管	④圧縮成型、圧縮保持	圧縮機能	圧縮力	圧縮力に余裕があること	_
			圧縮速度	材料が噴出しない圧縮速度であること	_
				脱気が十分できる圧縮速度であること	_
			圧縮保持時間	脱気が十分できる圧縮保持時間であること	_
			圧縮高さ位置決め	位置決め精度が良いこと	_
				圧縮成形記録が残ること	_
	⑤金型からブロックの脱型	脱型機能	金型分解/	目視確認ができること	プレス機で脱型作業を行わずに別途脱型装置
			押し出し方式		を準備することで作業を効率化する
		払出機能	機械式把持方式	脱型記録が残ること	
	⑥ブロックのかさ密度、外観 の確認	本年度の検討対象外		本年度の検討対象外	
	⑦ブロック梱包、識別	本年度の検討対象外		本年度の検討対象外	
	<ul><li>⑧ブロック運搬、保管</li><li>(処分サイトへ)</li></ul>	本年度の検討対象外		本年度の検討対象外	

# 表 4.3-58 埋め戻し材ブロック製作、運搬、保管 要求機能・品質まとめ

### 3) 埋め戻し材ブロック定置装置

### a) 埋め戻し材ブロックの定置工程から生じる要求機能・品質

埋め戻し材ブロックの定置工程から生じる要求機能・品質を表 4.3-59、表 4.3-60、表 4.3-61 に示す。ここでは「坑道に干渉しないサイズであること」や「坑道の屈曲や交差に合わせた動き ができること」といった作業空間に関するものや、「数種類あるブロックを必要に応じ切り替え、 選択できること」といった機械の汎用性に関するもの、「(坑道との隙間が)精度よく測定できる こと」や「位置決め精度が良いこと」といった作業精度を向上させるもの、記録管理やカメラ、 照明の監視機能などの項目がみられた。埋め戻し材ブロックの定置工程は、前述の製作・運搬・ 保管工程とは異なり、作業空間や人の出入りが制限される地下施設内で実施するため、これらの 要求機能・品質については機械側へ反映させた。作業空間や機械の汎用性に関する要求機能・品 質については、空間を有効に活用でき、数種類のブロックサイズに対応しやすい装置は必要とな る。作業精度の向上に関する要求機能・品質については、装置に測定機器を組み込むことで対応 する。

		装置の機能及び仕様の仮設定		壮果が使きていた西北機能、日所の抽山	要求機能・品質からに対して
		機能	仕様	装直が備えるへさ要求機能・品質の抽出	選定した機材・方式
	①ブロックの運搬	本年度の検討対象外		本年度の検討対象外	
	(地下坑道へ)				
	②梱包材の取り外し	本年度の検討対象外		本年度の検討対象外	
	③ブロックの定置	定置方式	深成岩類堅置きブロック方式	ブロック間の隙間を小さくできること	—
		ブロック把持方式	フォーク型プッシュプル方式		—
		埋戻し対象	主要坑道	_	—
		埋戻しパネル	アクセス坑道から最も遠いパネル	_	—
		坑道形状	幌型	坑道に干渉しないサイズであること	フォークリフト(定置装置)
		走行機能	主要坑道最小曲げ R	坑道の屈曲や交差に合わせた動きができること	フォークリフト(定置装置)
			移動距離	_	—
		操業条件	主要坑道埋戻し期間	_	—
			作業日数	_	—
			主要坑道延長	_	—
			主要坑道埋戻し量	_	—
埋戻し材			1パネルの埋戻し量	_	—
ブロック			1日当りの埋戻し延長	十分な処理速度を持つこと	—
の施工			1日の実作業時間	連続運転可能なこと	—
			ペレット敷き均し	安定して走行可能であること	—
			ブロック配置	設置予定箇所にアクセスできること、定置に十	—
				分なリーチを持つこと	
			埋戻しブロック種類	サイズ違いの取り扱いができること	—
			ブロック配置湿潤質量		—
		1	ブロック数	記録できること	記録装置(移動式制御機)
			坑道との隙間	精度良く測定できること	測定装置(移動式制御機)
			ブロック間隙間	精度良く測定できること	測定装置(移動式制御機)
			埋戻しブロック定置精度	位置決め精度が良いこと	測定装置(移動式制御機)、
					測定装置 (定置装置)
		装置の能力	電子記録	定置作業の進捗状況を管理できること	記録·管理装置(移動式制御機)
		(管理機能)	記録の保存	記録を保持でき、取り出すことができること	記録·管理装置(移動式制御機)
				モニタ機能(カメラ)をもつこと	カメラ(移動式制御機、定置装置)
				照明装置をもつこと	ライト(移動式制御機、定置装置)

表 4.3-59 埋め戻し材ブロックの施工要求機能・品質まとめ 1/3

		装置の機能	と及び仕様の仮設定		要求機能・品質からに対して
		機能			選定した機材・方式
		装置の能力 (ブロック定置機能)	操作方法	ブロック定置の手順(完全手動/半自動/ 自動)を任意に切り替え可能なこと	—
			ブロックの取扱	数種類あるブロックを必要に応じ切り替 え、選択できること	フォークリフト(定置装置)
			ロードセル式	保持したブロックの重量を測定できること	—
				保持中及び定置の際にブロックの健全性を 損なわないこと	—
			油圧式	ブロックの押し出し機能をもつこと	ブロック押出装置(定置装置)
				作業中、任意の停止が可能なこと、また再開 可能なこと	_
			断面に対する定置方法	計画通りに設置できること	昇降機構、サイドシフト機構 (定置装置)
	③ブロックの定置		奥行方向に対する定置方法	計画通りに設置できること	定置ガイドセンサ、定置ガイドスライド 装置、ブロック押出装置(定置装置)
		装置の能力	光学式センサ	所定の位置に位置合わせできること	—
相互しな		(位置合わせ機能)	油圧式 or 打擊式	ブロック定置後の位置の微修正(ブロック の押し付け・横スライド等)ができること	ブロック押出装置、サイドシフト機構(定 置装置)
理庆し初 ブロック の施工		装置の能力(本体)	自走式	自走機能を持つこと、停止時に十分な安定 性があること	フォークリフト (定置装置)
				装置がコンパクトもしくは保守・点検が容 易であること	フォークリフト (定置装置)
		清掃	機械式除去	ブロックに直接触れる部分はブロックくず が付着し難く、清掃しやすい構造とするこ と	清掃装置 (定置装置)
		ブロックの定置位置測 定機能	レーザー測量	定置後の状況を記録できること	レーザー距離計 (定置装置・移動式制御機)
			履歴の記録	各ブロックを坑道内のどこに定置したか記 録でき、データを取り出す事ができること	記録装置(移動式制御機)
		ブロック定置後のかさ	各記録からの算出	坑道サイズの測定ができること	3次元計測機(移動式制御機)
		密度測定機能		各ブロックの品質(質量・寸法・含水比等) を記録できること	記録・管理装置(移動式制御機)
				作業の進捗距離(坑道方向)がわかること	測定装置(移動式制御機)
				定置したブロックに不具合があった場合に 除去することができること	カメラ・ライト (定置装置)
		ブロック設置と隙間充 填の切替		隙間充填装置との切り替えに支障が無いよ うにする	-

表 4.3-60 埋め戻し材ブロックの施工 要求機能・品質まとめ 2/3

		装置の機能及び仕様の仮設定		壮思い供える シャーン 「「「「「「」」」	要求機能・品質からに対して
		機能	仕様	爰直か 備 え る へ さ 安 水 機 肥 ・	選定した機材・方式
		隙間処理の方法	小型ブロックを定置する場合	ブロック定置装置の切替ができること	—
			充填量	充填した量がわかること	—
			空隙率	空隙率がわかること	—
			充填速度	充填速度が分かること	—
	<ul> <li>④ブロックと坑道壁面と</li> <li>の隙間処理</li> </ul>		吹付量	吹付量が分かること	—
埋戻し材		隙間処理後の最終的な かさ密度算出機能	各記録からの算出	坑道寸法測定ができること	—
ブロック				各ブロックの品質 (質量・寸法・含水比等)	—
の施工				を記録できること	
				各ブロックを坑道内のどこに定置したか記	—
				録できること	
				作業の進捗距離がわかること	—
				使用した隙間処理材の量がわかること	—
		未充填空隙	光学式距離センサ	ブロックの沈下量を測定できること(モニ	—
				タリング装置の設置)	

表 4.3-61 埋め戻し材ブロックの施工 要求機能・品質まとめ 3/3

# b) 埋め戻し材ブロック定置装置の遠隔制御

埋め戻し材ブロック定置装置は、遠隔施工を想定して移動式制御機(図 4.3-85)によって制御 されるものを検討した。移動式制御機は定置装置の位置や埋め戻し材ブロックの定置位置を把握 して定置装置をコントロールすることを目的としており、それぞれの位置情報を確認するために 三次元計測器やレーザー計測器などによる計測機能、記録管理機能が必要であり、坑道内作業や ブロック搬送などの動線の妨げとならない様に坑道を断面方向に跨ぐ形状であることや、定置装 置と移動式制御機のデータの授受は無線方式によって管理されることが適していると考えれる。



図 4.3-85 定置装置用移動式制御機のイメージ図

## c) 埋め戻し材ブロック定置装置

埋め戻し材ブロック定置装置のブロック把持部分は吊り具、クランプ、真空把持、プッシュプ ルの4つ一般的な把持方式を、以下に示す条件で比較検討した。

- ・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

比較検討内容を表 4.3-62 に示す。これより、プッシュプル方式を定置方式が埋め戻し材ブロックの定置装置に適していると考えた。

	把持方式					
条件	吊り具	クランプ	真空把持	プッシュプル		
	×	0	0	0		
ブロック上面の吊	吊り代が必要となるた	把持部を薄くすれば対	片持ち方式であれば吊	片持ち方式であれば吊		
り代は小さいこと	め適さない	応することができる	り代を小さくすること	り代を小さくすること		
			ができる	ができる		
定置済みブロック	×	×	×	0		
や坑道天井、壁面に	把持機構がブロック上	把持部が定置済みブロ	把持装置が坑道天井部	ブロック底面部で把持		
定置装置が干渉し	面に存在るため適さな	ックと干渉するため適	分と干渉するため適さ	するため定置済みのブ		
ないこと	V)	さない	ない	ロックと干渉しない		
	0	0	×	0		
	クレーン装置のみであ	把持部と動力は一体化	把持装置とは別に真空	把持部と動力は一体化		
佐要テリアが小さ	るため作業エリアを圧	できるため作業エリア	ポンプがあり、真空ポ	できるため作業エリア		
作業エリアが小さ	迫しない	を圧迫しない	ンプと真空把持装置間	を圧迫しない		
V'_C			をパイプでつなぐ必要			
			があり作業空間が圧迫			
			される			
ゴロックルノブに	×	0	×	0		
フロックサイスに	把持面と重量次第では	ブロックサイズに応じ	把持面と重量から真空	ブロックサイズに応じ		
応して装直の切り	把持具を変更する必要	た装置の切り替えは必	パットの大きさや数を	た装置の切り替えは必		
省えかないこと	がある	要ない	変更する必要がある	要ない		

表 4.3-62 把持方式の選定

埋め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 め戻し材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があり、これらの制約を考慮してカウンターウェイトを搭載したフォー クリフト方式が適していると考えられる。さらにフォークリフトには定置作業の遠隔制御と設置 後のブロック定置状態を確認するために作業状況の確認のためのカメラとライトが必要となる。 検討した埋め戻し材ブロックの定置装置(案)を図 4.3-86 に示す。





### (i) 埋め戻し材ブロックエ法の製造から定置までの作業フロー

埋め戻し材ブロックの製作手順、定置手順を詳細化することを目的に、埋め戻し材ブロックの 寸法、製造装置、定置装置を検討した。これらの条件から作成した埋め戻し材ブロックの製作か ら定置までの作業フローを図 4.3・87 に示す。図 4.3・87 のうち①~④(青枠部分)はブロック製 作の流れを示しており、①では埋め戻し材ブロック金型への材料投入、②では金型の材料の敷き 均し、③ではブロック成形圧縮と保持を行う。金型にブロックが入った状態で脱型装置へ移動し、 ④で脱型装置によるブロックの脱型を行う。⑤~⑥では製作したブロックの品質確認と梱包の工 程を示している。製作したブロックは⑤でかさ密度と外観確認し、⑥でブロック搬送コンテナに 梱包を行う。また必要に応じてブロックは地上で保管される。⑧でブロック搬送コンテナから定 置装置を使用してブロックを取り出す。⑨~⑩(赤枠部分)は埋め戻し材ブロックの定置工程を 示している。⑨でブロックを定置する。⑩では定置後の隙間処理を行う。

これらの作業の中で、埋め戻し材ブロック工法において特に品質に関連する「埋め戻し材ブロ ックの製造(①~④)」と「定置(⑨)」についてはさらに詳細に作業手順を検討した。



図 4.3-87 埋め戻し材ブロック 製作・搬送・保管・定置の作業手順 (青枠:ブロック製作工程 図 4.3-88 参照、赤枠:ブロック定置工程)

# 1) 埋め戻し材ブロック製作手順

検討した埋め戻し材ブロック製作手順を図 4.3・88 に示す。ブロックの製作手順として、まず材 料充填設備にて金型へ材料を必要量投入し、金型を 20,000 kN のプレス機に設置し、圧縮成型す る。金型をプレス機から取り外して、脱型装置へ移動し、金型を固定した後、油圧シリンダによ り埋め戻し材ブロックを脱型する。脱型後金型は洗浄され、脱型装置を使用して底板をはめ込み、 再度材料投入工程へ回される。



図 4.3-88 埋め戻し材ブロック製作手順

# 2) 埋め戻し材ブロック定置手順

埋め戻し材ブロックはトンネル軸方向に対してブロック間の隙間が連続した水みちにならない ように、図 4.3-89 の左上図と右上図が坑道の軸方向に対して交互となるように定置する。また、 埋め戻し材ブロックが手前側に崩れることを防止するために奥側と手前側を交互に定置すること とした。具体的には図 4.3-89 下図に示すように、

坑道奥側に5段ブロックと積んだ状態からその手前側に5段を積む(図中A)

- ⇒奥側の5段積みのブロックの上に5段積む(図中B)
- ⇒Aの手前側に5段積み(図中C)、
- ⇒Aの上に5段積む(図中D)

⇒その手前側に5段積む(図中E)、これを坑口まで繰り返す。



図 4.3-89 埋め戻し材ブロックの定置順序と配置レイアウト
図 4.3-87 (赤枠) の⑨の定置工程の詳細な作業手順を図 4.3-90 に埋め戻し材ブロック定置作 業のイメージ図を図 4.3-91 に示す。



図 4.3-90 埋め戻し材ブロック定置手順



図 4.3-91 ブロック定置作業イメージ図 (左:下段部分定置作業、右:上段部分定置作業)

# (5) 埋め戻し材ブロック製造・施工プロセス管理手法(案)

過年度の検討では、プロセス管理手法が備えるべき要件として、以下の3要件を設定し、これ らの要件がプロセス管理を更新する際の要求事項とした。

①品質目標を達成すること

②安定した品質目標管理を低コストで達成すること

③施工技術開発及び目標乾燥密度の変更などへの対応を可能とする柔軟な管理方法であること

また、プロセス管理の段階として、「開発段階」、「製造段階」、「施工段階」にわけ、各段階での 品質管理を明確に定義された指標に沿って実施し、その管理が具体的な記録により追跡可能であ る必要があると考えた。管理指標の設定を目的とした開発段階においても、原則として同様の段 階管理を適用することにより、「手戻り」を防ぐとともに、開発・試験過程を通じて、実施工のプ ロセス管理の根拠となるデータの品質を保証することができる。上記の考え方に基づき、埋め戻 し材ブロック工法における「開発段階」、「製造段階」、「施工段階」のプロセス管理の検討例を示 した。

埋め戻し材ブロックの製造・施工プロセス管理では、表 4.3-63 に示す課題が挙げられている。 本年度は、主に①、②及び④の課題を解決するために「開発段階」のプロセス整備の一環として 埋め戻し材ブロックの低透水性や自己シール性、製造、定置装置に関する検討を実施した。これ らの検討から得られた知見を反映し、更新した埋め戻し材ブロック工法の製造・施工プロセス管 理手法を表 4.3-64~表 4.3-69 に示す。表 4.3-64~表 4.3-69 中の「管理項目」は主として定性 的な管理項目、「管理指標」は管理項目の判断に用いる数値、代替指標、規定すべき工法等、「管 理方法」は管理指標の管理・確認方法等、と定義して全体的な更新を行った。

# 表 4.3-63 埋め戻し材ブロックエ法における製造・施工プロセスの管理上の特徴・課題

管理上の特徴	特徴の説明及び管理上の課題・対応方法
①製造の品質管理が工場で完結するため、その後	◆ ベントナイトの <u>自己シール性(膨潤)を考慮</u>
のブロックの運搬・定置時の <u>ブロックの角欠</u>	したうえで、設計要件(低透水性)を満足で
け・ひび割れなどの許容値及び発生防止への管	<u>きる角欠け・ひび割れの管理許容値を設定</u>
理が重要	するとともに、破損防止を可能とする管理
	方法を開発する。
	⇒自己シール性に関する検討として、膨潤変形試
	験、評価方法の検討に着手
② <u>ブロック定置の許容誤差に沿った定置を行う</u>	◆ <u>ブロック相互の隙間については、ブロック</u>
<u>必要がある。例えば、隣接するブロック間、ブ</u>	の密度-隣接するブロック間の隙間量-透
<u>ロックと坑壁との許容隙間寸法の規定が必要</u>	水性の関係を把握し、管理指標として、設計
である。	<u>要件 (低透水性) を満足する最大の隙間量を</u>
	<u>設定する。</u>
	⇒低透水性に関する検討として、透水試験に着手
	◆ 管理指標を満足できない場合の、隙間への
	対処方法(工法)を検討・選定し、選定した
	工法の管理方法を定める。
③ベントナイトを貧配合とした埋め戻し材ブロ	◆ 試験により設計要件(低透水性)を満たすブ
ックについては、製造可能な最大寸法に限界が	ロックの設計仕様(材料の種類、構成、施工
あることが予想される。	直後に成立可能な密度)を明確にし、管理指
	標とする。
④施工速度の向上及び定置の効率化を考慮して、	◆ <u>大型ブロックあるいはブロックの束を対象</u>
<u>製造寸法を決定する必要がある。</u>	<u>とした、運搬・定置に関する施工機械を開</u>
	<u>発・準備し、施工プロセス管理手法(品質・</u>
	<u>工法規定)を確立し、それに沿った管理を行</u>
	<u>ð.</u>
	⇒大型ブロックの製作装置・定置装置の概念検討
	(予備設計)に着手
⑤ブロック内に密度差が生じる可能性があり、そ	◆ ブロック内密度差と透水性・頑強性などの
の密度差が性能上問題となる場合は、ブロック	性能の関係を評価し、管理の必要性及び管
内の均質性の確保を管理する必要がある。	理の指標を決定する。圧縮成型によるブロ
	ック製作試験において、ブロック内に生じ
	る密度差の範囲を把握し、管理指標を満足
	する製作万法を設定する。
(6)ブロック上法では、埋め戻し材の設計要件を達	◆ 地上施設でのブロック製作時のブロセス管
成するための主たる管理項目(ベントナイト混	理は、現有技術による高いレベルでの管理
合率、フロックのかざ密度など)に係る管理が、	が可能である。
はとんど地上施設で完了する。地下の坑道内で	◆ 最終品質は、定置の品質管理により決定さ
の作業は、フロックの定置のみであり、切迫内	れることから、最終品質評価のためには、定
での施上時の管理を簡略化できる可能性があ	置万法と設備に応じた管理万法と管理指標 の記念び必要した?
	の設正か必要となる。
(0) ロック 製作時の 成型 圧力 などの 調整により、	◆ 様々なフロックの設計仕様(低透水性・製作
ノロック 密度の 調整 か柔軟にできる 可能性が	他上性)に対し、殺症ノロセス管理に必要な は知た散使ナス これた其に 亜土性性に広告
向い。 特に、 埋の 戻し 材の 仕様において、 尚裕	「雨報を登加りる。てれを基に、安水性能に応じた、空水性能に応じた、空水性でも、いった、安水性能に応じていた。
皮か必要となる場合への対応か柔軟にできる     司他性がます     コ	した官理指標を設正し、それに沿った管理
り能性かめる。	を行う。

(原子力機構ほか, 2021 を参照)

表 4.3-64 ブロックエ法における製造・施エプロセス管理(開発段階 その1)

製造・施工フロー	管理対象	管理項目 (主として定性的な項目)	管理指標 (管理項目の判断に用いる数値、代替指 標、 規定すべき工法等)	管理方法 (管理指標の管理/確認方法等)
①開発 (試験による管理指標の設定)	<ul><li>①開発 (試験による管理指標の設定)</li><li>① 製造・定置管理指標 の 設定</li></ul>		_	<ul> <li>・開発各段階での品質保証により、段階全体の品質保証を達成する</li> <li>・上流段階への遡及及び再試験を含む段階移行時の合理的マネジメントを実施する</li> </ul>
①1配合・水分量		<ul> <li>・設計要件(低透水性、製作施工性、 自己シール性)とブロック仕様の 整合性</li> </ul>	<ul> <li>①-3、①-4の管理項目、管理指標の達成 との整合性</li> </ul>	<ul> <li>反復的技術開発による管理</li> <li>OR3:低透水性、自己シール性に関する室内試験の実施、製作施工性のうち、製作装置、定置装置の予備設計を実施</li> </ul>
①-2 混練試験 ①-2 混練試験 ①-3 室内試験 ●	①-1 ブロック材の配 合・水分量	・材料の基本特性	<ul> <li>・材料の土粒子密度、自然含水比、粒度分布</li> <li>・母材の種類</li> <li>・ベントナイトと骨材の混合比率</li> <li>・含水比-乾燥密度の関係</li> <li>・供給水(地下水)のイオン濃度</li> <li>・材料のモンモリロナイト含有率</li> </ul>	<ul> <li>・設計上の規定があればそれに従う</li> <li>・学会等の基準に沿った試験方法</li> <li>・JISなどの品質保証下の骨材を選定する</li> <li>○R2: 骨材は規格品使用(品質確認書類あり)で適切な製作性が得られることを確認</li> <li>○R3:低透水性、自己シール性(膨潤性)には、ベントナイト混合土の間隙水のイオン濃度が関連することから、供給水(地下水)のイオン濃度を管理指標に追加、同様に、材料のモンモリロナイト含有率を指標に追加</li> </ul>
①-4 ブロック製造		・製作性、経済性に優れた配合	・材料ロス率他	<ul> <li>管理指標に対する変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階の</li> <li>管理負荷の低減</li> </ul>
11年1127日11月7日		・混練機械(プラント)の適切性	・ 点検方法、手順(工法規定)	・機械(プラント)の較正記録
①-5 ブロック定置 IT験	①-2 混練	・混練方法の適切性	<ul> <li>・材料の計量値</li> <li>・混練時間、回転数</li> <li>・材料投入順序、加水方法等の混練方法、</li> <li>手順(工法規定)</li> </ul>	・計量値の記録 ・混練時間、回転数の記録 〇R2:既往の知見によるミキサー選定、混練方法、時間設定により適 切に混練可能なことを確認
		<ul> <li>・混練後の材料の品質</li> <li>(材料の均質な分布、団粒化の抑制)</li> </ul>	<ul> <li>・混練後の含水比、ベントナイト混合率、 かさ密度</li> </ul>	<ul> <li>・学会等の基準に沿った試験方法(含水比試験、細粒分含有率試験、メチレンブルー吸着量試験等)</li> <li>・反復的技術開発による管理(混練方法と均質性の相関)</li> </ul>
製造・定置管理指標 の設定 ①-	①-3 室内試験	・低透水性(透水係数)	<ul> <li>・透水係数(開発段階では透水試験)</li> <li>・(透水係数の代替指標として)</li> <li>有効粘土密度、乾燥密度他</li> </ul>	<ul> <li>・学会等の基準に沿った試験方法</li> <li>・既往知見との整合性</li> <li>○R2:ブロック製作が見込まれる密度を基に、既往知見に基づき目標とする透水係数達成を確認</li> <li>○R3:ブロック製作を見込む貧配合のベントナイト混合土の仕様で透水試験により、透水係数を確認、代替指標の候補との相関を整理</li> </ul>
	(ノロツク1上标)	・自己シール性(膨潤性)	<ul> <li>・膨潤変形率(膨潤変形試験、膨潤特性理 論評価式による算出等)</li> <li>・膨潤率/隙間体積比</li> <li>・(膨潤変形率の代替指標として) 有効粘土密度他</li> </ul>	<ul> <li>・学会等の基準に沿った試験方法</li> <li>・既往知見との整合性</li> <li>OR3:ブロック製作を見込む貧配合のベントナイト混合土の仕様で、</li> <li>膨潤変形試験により膨潤変形率を確認、膨潤特性理論評価式を基に、ブロック定置後の坑道の残存空隙に対する2方向の膨 潤変形率の算出に着手</li> </ul>

# 表 4.3-65 ブロックエ法における製造・施エプロセス管理(開発段階 その2)

製造・施工フロー	管理対象	管理項目 (主として定性的な項目)	管理指標 (管理項目の判断に用いる数値、代替指 標、 規定すべき工法等)	管理方法 (管理指標の管理/確認方法等)
①開発		・圧縮成型機、金型の適切性	<ul> <li>・点検方法、手順(工法規定)</li> <li>・金型寸法、重量、強度</li> </ul>	<ul> <li>・圧縮成型機の較正記録</li> <li>・金型寸法、重量の計測記録、強度に関する設計図書</li> <li>○R3:ブロックの製作装置、定置装置の概念検討より、管理指標、</li> <li>管理方法を更新</li> </ul>
<ul> <li>(試験による管理指標の設定)</li> <li>①-1 配合・水分量</li> </ul>		・製造方法の適切性	<ul> <li>・材料投入量</li> <li>・敷均し面の平坦さ</li> <li>・成型圧力、圧縮速度、圧縮保持時間</li> <li>・ブロック製造方法、手順(工法規定)</li> </ul>	<ul> <li>・材料投入量の記録</li> <li>・敷均し面の高さの記録</li> <li>・成形圧力、圧縮速度、圧縮保持時間の記録</li> <li>○R3:ブロックの製作装置、定置装置の概念検討より、管理指標、 管理方法を更新</li> </ul>
①-2 混練試験		・製造後のブロックの低透水性	<ul> <li>・透水係数(開発段階では透水試験)</li> <li>・(透水係数の代替指標として)</li> <li>有効粘土密度、乾燥密度他</li> </ul>	<ul> <li>・学会等の基準に沿った試験方法</li> <li>・既往知見との整合性</li> <li>・坑道の残存空隙の処理方法を加味したうえで、低透水性を満足する管理指標の管理</li> </ul>
①-3 室内試験	□-4 ブロック製造 確認試験	<ul> <li>・製造後のブロックの自己シール</li> <li>性(膨潤性)</li> </ul>	<ul> <li>・膨潤変形率(モックアップ試験、原位置 試験、膨潤特性理論評価式による算出 等)</li> <li>・膨潤率/隙間体積比</li> <li>・(膨潤変形率の代替指標として) 有効粘土密度他</li> </ul>	<ul> <li>・学会等の基準に沿った試験方法</li> <li>・既往知見との整合性</li> <li>・坑道の残存空隙の処理方法を加味したうえで、自己シール性を満足する管理指標の管理</li> <li>○R3:ブロックの製作装置、定置装置の概念検討より、管理指標、 管理方法を更新</li> </ul>
①-4 ブロック製造 確認試験		・製造後のブロックの製作施工性	<ul> <li>・脱型後の角欠け率</li> <li>・脱型後の形状維持(自重による変形量)</li> <li>・強度(引張、せん断、曲げ強度)</li> </ul>	<ul> <li>・サンプルブロック製作による角欠け率の把握、管理指標の設定</li> <li>・反復的技術開発による管理(製造方法と形状維持の相関)</li> <li>・学会等の基準に沿った試験方法</li> <li>○R2:目標密度が達成できることを確認</li> <li>○R3:ブロックの製作装置、定置装置の概念検討より、管理指標、 管理方法を更新</li> </ul>
①-5 ブロック定置 試験		・製造後のブロックの均質性	<ul> <li>・ブロックのかさ密度(乾燥密度)</li> <li>・ブロック内の含水比、密度、ベントナイト混合率の分布</li> </ul>	<ul> <li>・乾燥密度、サンプリングによる材料組成の測定</li> <li>・学会などの基準に沿った試験方法</li> </ul>
↓ 製造・定置管理指標 の設定		<ul> <li>・製作性、経済性に優れたブロック</li> <li>製造</li> </ul>	<ul> <li>・イニシャルコスト、ランニングコスト</li> <li>・材料ロス率等</li> </ul>	<ul> <li>・管理指標に対する変動幅の確認と裕度の考慮による実施工段階の 管理負荷の低減</li> <li>○R3:ブロックの製作装置、定置装置の概念検討より、管理指標、 管理方法を更新</li> </ul>
		・梱包、運搬の適切性	<ul> <li>・梱包、運搬時に、設計要件に関わる管理 指標が逸脱しないこと</li> <li>・梱包、運搬方法、手順(工法規定)</li> </ul>	・梱包、運搬前後での管理指標の変化の有無の確認 ○R3:ブロックの製作装置、定置装置の概念検討より、管理指標、 管理方法を更新

# 表 4.3-66 ブロックエ法における製造・施エプロセス管理(開発段階 その3)

製造・施工フロー	管理対象	管理項目 (主として定性的な項目)	管理指標 (管理項目の判断に用いる数値、代替指 標、 規定すべき工法等)	管理方法 (管理指標の管理/確認方法等)		
<ul> <li>①開発 (試験による管理指標の設定)</li> <li>①-1 配合・水分量</li> </ul>		・ブロック配置レイアウト	<ul> <li>・坑道容積とブロックの合計重量より算出するかさ密度(乾燥密度または、有効粘土密度)</li> <li>※ブロック間の残存空隙、ブロックと坑道壁面との残存空隙を考慮したうえで、設計要件(低透水性、自己シール性)を満足するかさ密度</li> <li>・(残存空隙処理を行う場合)坑道容積とブロック+充填材の合計重量より算出するかさ密度(乾燥密度)</li> </ul>	<ul> <li>・設定したブロックの仕様、配置レイアウトを基に計算により設計上のかさ密度を算出</li> <li>OR3:4案の候補ブロックに対し、左記管理項目の比較検討を実施し、定置作業で想定される1日当たりの必要ブロック数、製作工場での生産能力、坑道内の空頭制限、坑道への充填率等を勘案して予備検討の対象とするブロックの寸法、形状を仮設定</li> <li>OR3:想定される施工精度としてブロック相互間の隙間を10mm、坑道壁面とブロックとの離隔を50mmと仮設定、ブロックの定置位置(配置)は、高さ方向及び坑道軸方向に対しブロック断面毎に千鳥配置を仮設定、これらの検討により、管理指標、管理方法を更新</li> </ul>		
①-2 混練試験 ◀		・定置装置の適切性	・点検方法、手順(工法規定)	・定置装置の点検記録		
			<ul> <li>・ブロックの定置位置</li> <li>(ブロック個数、ブロック間の隙間長、</li> <li>坑道壁面とブロックとの距離)</li> </ul>	・測量等による定置位置の測定、確認		
①-3 至内試験			・ブロック重量	・定置装置に付帯する重量測定用ロードセル等で測定		
①-4 ブロック製造	①5 ブロック定置試験 	)-5 ブロック定置試験 ・ブロック定置方法の適切性 (欠損や亀裂等によるブロックの 品質を低下させたい定置方法と	・定置後の角欠け率	<ul> <li>・定置に関するモックアップ試験による角欠け率の把握、管理指標の設定</li> <li>・反復的技術開発による管理(定置方法と角欠けの相関)</li> </ul>		
<ul> <li></li></ul>				それ	それを実現する設備の仕様)	<ul> <li>・定置後のかさ密度</li> <li>・ブロックの定置方法、手順(工法規定)</li> <li>※例えば、小型ブロックの事前集積したものを定置する方式(スタック方式)、大型ブロックを個別に定置する方式等、定置方式に応じた方法、手順を規定</li> </ul>
制造・空里焼畑や畑		<ul> <li>・残存空隙(ブロックと坑道壁面との隙間を想定)の処理方法の適</li> </ul>	<ul> <li>・残存空隙処理部のかさ密度(乾燥密度、 有効粘土密度)</li> <li>・残存空隙処理方法、手順(工法規定)</li> </ul>	・空隙容積、充填材重量からかさ密度を算出		
☆ / / / / / / / / / / / / / / / / / / /	<ul> <li>製造・定置管理指標</li> <li>の設定</li> <li>の設定</li> </ul>	切性	・残存空隙処理後のかさ密度	<ul> <li>・ブロック定置によるかさ密度(乾燥密度、有効粘土密度)と残存</li> <li>空隙処理によるかさ密度を合計した、残存空隙処理後のかさ密度</li> </ul>		
		・ブロック定置後の空隙	・例えば、ブロックまたは、残存空隙の充 填材の沈下量	・モニタリング装置による測定、測量による測定		

表 4.3-67 ブロックエ法における製造・施エプロセス管理(ブロック製造段階 その 1)

製造・施工フロー	管理対象	管理項目 (主として定性的な項目)	管理指標 (管理項目の判断に用いる数値、代替指 標、 規定すべき工法等)	管理方法 (管理指標の管理/確認方法等)
	<ol> <li>製造段階全体の管理</li> </ol>	<ul> <li>・開発段階で設定した製造に関する</li> <li>管理指標</li> </ul>	_	<ul> <li>・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</li> <li>・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)</li> </ul>
② 製造(その1)	②-1 材料調達 (ベントナイト)	・材料の基本特性	<ul> <li>・モンモリロナイト含有率</li> <li>・有害物含有量等</li> <li>・ベントナイトの土粒子密度</li> <li>・含水比</li> </ul>	<ul> <li>・製造元がJIS等の品質保証を得ていること</li> <li>・製造元発行のロット毎の分析管理シート</li> <li>・立入検査(適宜)</li> <li>・学会等の基準に沿った試験方法</li> </ul>
<ul> <li>②-11~4材料調達</li> <li>③-1ベントナイト</li> <li>③-2砕石・砂等</li> </ul>	②-2 材料調達 (砕石・砂等)	・材料の基本特性	<ul> <li>・有害物含有量</li> <li>・材料の土粒子密度、自然含水比、粒度分布</li> <li>・母材の種類、強度</li> <li>・ベントナイトと母材の混合比率</li> <li>・含水比-乾燥密度の関係</li> <li>・供給水(地下水)のイオン濃度</li> <li>・材料のモンモリロナイト含有率</li> </ul>	<ul> <li>・発生地層及び一定量毎の試験</li> <li>・学会等の基準に沿った試験方法</li> <li>・粒度調整前の目視、バッチ毎の計量(密度推定)</li> <li>○R3:低透水性、自己シール性(膨潤性)には、ベントナイト混合土の間隙水のイオン濃度が関連することから、供給水(地下水)のイオン濃度を管理指標に追加</li> </ul>
②-3 粒度調整 ②-4 水	②-3 粒度調整	・粒度調整後の材料の基本特性	<ul> <li>・粒度分布、最大粒径</li> <li>・含水比</li> </ul>	・篩目の確認 ・一定量毎の粒径分布測定 ・学会などの基準に沿った試験方法
②-5一時貯蔵	②-4 水     ・設計要件に影響及ぼす項目		・有害物質量、イオン濃度	・供給元がJISなどの品質保証をえていること ・供給元発行の分析管理シート ・分析検査(適宜) ・学会等の基準に沿った試験方法
★ ②-6混練	②-5 一時貯蔵	・保管場所、保管方法の適切性	・温湿度 ・保管方法、手順(工法規定)	<ul> <li>・保管環境の管理と継続的測定</li> <li>・工法規定に関する立入検査(適宜)</li> </ul>
②-7 貯蔵 ②-6 混練 ・汎		<ul> <li>・混練機械(プラント)の適切性</li> <li>・混練方法の適切性</li> <li>・混練後の材料品質 (材料の均質分布、団粒化の抑制)</li> </ul>	<ul> <li>・混練機械の点検方法、手順(工法規定)</li> <li>・材料の計量値、混練時間、回転数</li> <li>・混練方法、手順(工法規定)</li> <li>・混練後の含水比、ベントナイト混合率、か さ密度</li> </ul>	<ul> <li>・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えていること)</li> <li>・工法規定に関する立入検査(適宜)</li> <li>・混練に関する記録のチェックと保管</li> <li>・学会等の基準に沿った試験方法</li> </ul>
	②-7 貯蔵	・保管場所、保管方法の適切性	・温湿度 ・保管方法、手順(工法規定)	・全ての保管バッチに②-1~6の製造記録が付帯すること ・保管環境の管理とランダムサンプリングによる確認 ・工法規定に関する立入検査(適宜)

表 4.3-68 ブロックエ法における製造・施エプロセス管理(ブロック製造段階 その2)

製造・施工フロー	管理対象	管理項目 (主として定性的な項目)	管理指標 (管理項目の判断に用いる数値、代替指 標、 規定すべき工法)	管理方法 (管理指標の管理/確認方法等)
	<ol> <li>製造段階全体の管理</li> </ol>	<ul> <li>・開発段階で設定した製造に関する</li> <li>管理指標</li> </ul>	_	<ul> <li>・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</li> <li>・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)</li> </ul>
<ol> <li>② 製造 (その2)</li> <li>③-8~9 製造設備</li> </ol>	②-8 圧縮成形機	<ul> <li>・圧縮成型機の適切性</li> <li>・適切に維持管理され、正確な作動と 制御がなされること</li> </ul>	・点検方法、手順(工法規定) ・圧縮力等	<ul> <li>・製造者の点検管理シート</li> <li>・工法規定に関する立入検査(適宜)</li> <li>・圧縮成型機の較正記録(圧縮力等)</li> <li>・ITV(監視カメラ)による点検</li> </ul>
②-8 圧縮成型機 ②-9 金型 2-9 金型 2-9 金型	<ul> <li>・金型の適切性</li> <li>・圧縮力に耐え得る強度と剛性を有すること</li> </ul>	<ul> <li>・点検方法、手順(工法規定)</li> <li>・金型形状、寸法、強度</li> <li>・重量</li> </ul>	<ul> <li>・製造者の点検管理シート</li> <li>・工法規定に関する立入検査(適宜)</li> <li>・ITV(監視カメラ)による確認</li> <li>・圧縮成型機の較正記録</li> <li>・金型寸法、重量の計測記録、強度に関する設計図書</li> <li>・寸法測定はゲージ方式又はレーザー距離計による測定</li> <li>・金型重量はロードセル方式による測定</li> </ul>	
②-10材料投入	②-10 材料投入	<ul> <li>材料投入方法の適切性</li> <li>(材料の均質な分布)</li> </ul>	・材料投入量 ・投入後の敷均し面の高さ(平坦性)	<ul> <li>・材料投入量の記録</li> <li>・目視による材料の均質性の確認</li> <li>・敷均し面の高さ測定</li> </ul>
<ul> <li>②-11 圧縮成型</li> <li>・圧縮</li> <li>・ブロ</li> <li>圧縮</li> </ul>	<ul> <li>・圧縮成型方法の適切性</li> <li>・ブロック内の脱気が十分にできる</li> <li>圧縮成形方法</li> </ul>	<ul> <li>・成型圧力、圧縮速度、圧縮保持時間</li> <li>・圧縮成型方法・脱型方法手順(工法規定)</li> </ul>	<ul> <li>・成形圧力、圧縮速度、圧縮保持時間の記録</li> <li>・工法規定に関する立入検査(適宜)</li> <li>・ブロック毎に2-10、11の記録を付帯</li> </ul>	
②-12ブロックの品質 確認	②-12 ブロックの品質 確認	<ul> <li>・低透水性</li> <li>・自己シール性</li> <li>・製作施工性</li> </ul>	<ul> <li>・ブロック寸法、重量</li> <li>・ブロック単体のかさ密度 (有効粘土密度、乾燥密度)</li> <li>・ひび割れ、破損の有無</li> </ul>	・外観検査(欠損、ひび割れ、母材の剥落) ・脱型後ブロックの重量測定、採寸に基づく、かさ密度 ・全てのブロックに②-10~12の記録を付帯
②-13搬出	②-13 搬出	<ul> <li>・ブロックの梱包、識別の適切性</li> <li>・輸送時の破損、湿潤を防止する梱包</li> <li>・全てのブロックの保全管理</li> </ul>	・梱包、運搬方法、手順(工法規定)	<ul> <li>・工法規定に関する立入検査(適宜)</li> <li>・全ての保管バッチに②-10~13の記録を付帯</li> </ul>
(2)-14 貯蔵	②-14 貯蔵	・保管場所、保管方法の適切性	・温湿度 ・保管方法、手順(工法規定)	<ul> <li>・工法規定に関する立入検査(適宜)</li> <li>・保管環境の管理状況、記録の確認</li> <li>・全ての保管バッチに②-10~13の記録を付帯</li> </ul>

# 表 4.3-69 ブロックエ法における製造・施エプロセス管理(施工段階)

製造・施工フロー	管理対象	管理項目 (主として定性的な項目)	管理指標 (管理項目の判断に用いる数値、代替指 標、 規定すべき工法)	管理方法 (管理指標の管理/確認方法等)
	③ 施工段階全体の管理	・開発段階で設定した施工に関する 管理指標	_	<ul> <li>・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</li> <li>・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)</li> </ul>
③ 施工	③-1 ブロックの運搬	<ul> <li>・運搬方法の適切性</li> <li>・ブロックの破損、湿潤防止を考慮した運搬方法</li> <li>・ブロックの管理記録</li> </ul>	・梱包、運搬方法、手順(工法規定)	<ul> <li>・工法規定に関する立入検査(適宜)</li> <li>・運行記録等による試行により確認された運搬方法が行われていることの確認</li> <li>・運搬する全ブロックに関する品質管理記録の確認</li> </ul>
③-1 運搬	③-2 定置準備	<ul> <li>・開包後のブロックの品質</li> <li>・定置用スタックが正確に構築されていること(スタック化(小型ブロックの事前集積化)する場合)</li> </ul>	・有意なひび割れ、破損の有無 ・ブロック重量の変化量	<ul> <li>・目視(画像)によるブロック品質の確認</li> <li>・ブロック番号、スタック形状、寸法、重量及び安定性の確認</li> </ul>
<ul> <li>③-2定置準備</li> <li>③-3定置</li> <li>③-4 空陰充填</li> </ul>	③-3 定置	<ul> <li>・定置装置の適切性</li> <li>・定置方法の適切性</li> <li>・設定したかさ密度に合致した定置が行われること</li> </ul>	<ul> <li>・定置装置の点検方法、手順(工法規定)</li> <li>・定置方法、手順(工法規定)</li> <li>・ブロックの定置位置 (ブロック個数、ブロック間の隙間長、 坑道壁面とブロックとの距離)</li> <li>・定置後のかさ密度</li> <li>・定置後の残存空隙容積</li> </ul>	<ul> <li>・工法規定に関する立入検査(適宜)</li> <li>・3D情報システムによるブロックの空間的位置情報の確認、記録</li> <li>・坑道全体に対するかさ密度の確認</li> <li>・空間位置情報に基づく、空隙位置と空隙容積の確認</li> <li>・残存空隙容積が許容値以下であることの確認</li> </ul>
③-4 空隙充填	③-4 空隙充填	<ul> <li>・残存空隙の処理方法の適切性</li> <li>・開発段階で選定した充填材及び充 填設備の仕様</li> <li>・残存空隙処理を加味したうえで、設 定したかさ密度が達成されること</li> </ul>	<ul> <li>(残存空隙処理を行う場合)</li> <li>・空隙容積、充填材重量</li> <li>・空隙処理後の坑道容積に対するかさ密度</li> <li>(乾燥密度)</li> <li>・沈下量</li> </ul>	<ul> <li>・埋め戻し箇所の空間位置情報に基づく、充填容積と充填重量の管理</li> <li>・埋め戻し箇所の空間位置情報に基づく、空隙処理後のかさ密度</li> <li>・モニタリング装置による測定(製造・施工プロセス管理を順守し、 開発段階に決定した管理指標を満足する場合に、沈下量が0または 所定範囲内となることが把握できている場合は、モニタリングは不 要)</li> </ul>

#### 4.3.6 埋め戻し材の浸潤解析結果の妥当性確認に資するデータ取得

#### (1) 背景及び目的

精密調査段階後半に実施される地下調査施設の実証試験では、施工技術や施工品質の適切性を 確認するために埋め戻し材中に複数の計測機器を設置することが考えられる。計測機器の選定、 設置位置及び計測スケジュールなどを適切に計画するためには、事前の解析などにより地下水の 埋め戻し材への浸潤挙動を把握しておくことが望ましい。そのための解析手法としては、一般的 に広く実施されている飽和・不飽和浸透流解析に加えて、気相の挙動を考慮した気液二相流解析 などが挙げられる。

一方で、埋め戻し材の浸潤パラメータの取得や解析手法の適用性の確認のために坑道スケール の浸潤試験を実施することは、埋め戻し材の浸潤に長時間を要すること及び境界条件の適切な制 御が困難なため現実的ではない。そのため、小規模な試験から段階的に規模を大きくした試験と それに対する浸潤解析結果を比較することで解析手法の適用性を確認し、適用性が確認された手 法により坑道スケールの浸潤挙動を予測する必要がある。

その第一段階として、境界条件を制御した浸潤試験を実施して埋め戻し材の浸潤挙動を把握し、 上記の2種類の手法による解析結果と比較することにより、解析手法の適用性を確認する。

#### (2) 埋め戻し材を対象とした浸潤試験

#### (a) 試験装置及び試験条件

#### (i) 試験装置

令和 2 年度に作製した浸潤試験装置の全体構成を図 4.3-92 に示す。試験装置は浸潤容器、浸 潤液供給装置及び計測・記録用機器で構成されている。浸潤容器の構造を図 4.3-93 に示す。浸潤 容器の底板及び上部フレームはステンレス製であり、天板は浸潤状況が観察できるようにガラス 製とした。浸潤液は O リングで止水された内外円筒の間に供給され、内部円筒に設けられた貫通 穴(直径 2 mm)から、内部の供試体へ供給される。底部空気穴は、後述の試験境界条件の制御 に用いられる。浸潤液供給装置は、定圧試験用のマリオット管及び高圧試験用の圧力容器(二重 管ビュレット)を用いた。

埋め戻し材中の間隙水圧、間隙空気圧及び含水率(飽和度)を計測するためのプローブの配置 を図 4.3-94 に示す。これら計測プローブは、供試体中の水の移動をできる限り阻害しないよう に、供試体への貫入長を短くし設定した(間隙水圧・空気圧については 14 mm、FDR-V(水分量 計)については 20 mm)。試験では、これらのデータに加えて供試体への積算浸潤量も計測した。



図 4.3-92 浸潤試験の全体構成



図 4.3-93 浸潤容器構造図



図 4.3-94 計測プローブの設置位置

(ii) 試験条件

供試体の諸元を表 4.3-70 に示す。浸潤試験装置で得られるデータの妥当性を確認するために、 埋め戻し材の試験に先立って、豊浦砂による試験を実施した。なお、後述の豊浦砂に対する試験 結果については、付録4に記載した。埋め戻し材には、クニゲル V1 と 6 号珪砂の混合土を用い た。試験装置内の供試体と容器が接する上下端面には、厚さ約1 mm の Na 型ベントナイト (ク ニゲル V1)を敷いた。これは膨潤させることで供試体との隙間を流れる水を抑制し、容器表面が 水みちにならないようにするためである。試験液種は蒸留水とした。

試験ケースを表 4.3-71 に示す。試験では、気相の浸潤挙動に与える影響を確認するために、底 部空気穴を開放したケースと閉鎖したケースを実施した。

夕敌	おおして	土粒子密度	乾燥密度	初期	初期水
石怀	전 자꾸 스 빔니 ㅋ	(Mg/m ³ )	(Mg/m ³ )	含水比(%)	飽和度(%)
豊浦砂	豊浦珪砂 100%	2.63	1.53	5	19
畑水弓)材	クニゲル V1 15%	2.76	1 75	10	C1
埋め戻し材	三河珪砂 6 号 85%	2.66	1.70	14	01

表 4.3-70 供試体の諸元

供封休	ケース		供試体充てん部の	浸潤液圧力	供去
供訊得	通番	名称	下端空気穴	(kPa)	加石
电活动	1	S-O-1	開放	0.8	仕得れた記載
豆佣砂	2	S-C-1	閉鎖	9.8	17] 東水 4 (こ言し単)
冊み言しせ	3	B-O-1	開放	500	
理め戻し材	4	B-C-1	閉鎖	500	

表 4.3-71 浸潤試験ケース

# (iii) 供試体からの試料採取方法

試験終了後に装置を解体し、供試体に直径 φ 20 mm、高さ 15 mm の定容サンプラーを挿入し て試料を採取し、それらの密度、含水比および体積含水率を測定した。試料は 3 つの高さの平面 内で、供試体中心から 20 mm 幅で同心円状に区切り、各領域から 2 個ずつ採取した。試料の採 取位置を図 4.3-95 に示す。



凶 4.3-95 武科休取1

# (b) 試験結果

#### (i) 浸潤状況の観察結果

供試体上面より観察した浸潤状況は次のとおりである。

# ①試験ケース B-O-1 (空気穴開放)

図 4.3-96 には、開放条件の試験の浸潤液圧力上昇過程において、容器上面の観察窓から確認 された浸潤前線の進行を示す。なお、浸潤前線の位置は写真の明暗差から目視で判断しているた め、誤差を含んでいる可能性がある。蒸留水は試験容器の外周から埋め戻し材に浸潤させている ため、時間の経過とともに埋め戻し材の中心に向かって浸潤前線が進行していることがわかる。 浸潤前線の進行は、供試体中心から1時および6時の方向においては比較的早いが、7時半および10時半の方向では比較的遅く、中心からの方向により差異が見られた。





(a) 試験開始から 34.0h 後(浸潤液圧力 0.50 MPa)
 (b) 3 つの時点における浸潤前線
 図 4.3-96 装置上面の観察窓から確認された浸潤前線の進行(開放条件)

②試験ケース B-C-1 (空気穴閉鎖)

試験開始から 250 時間まで低圧のまま上面に敷いたベントナイト部分の浸潤を促し、全面に浸 潤したことを確認した。

## (ii) 間隙水圧及び空気圧

間隙水圧および間隙空気圧の測定値の変化を図 4.3-97 及び図 4.3-98 に示す。同図では、横軸 を浸潤容器への注水完了時からの経過時間とし、プローブによる圧力測定値は大気圧下での計測 値との差異(ゲージ圧力)として示した。なお、閉鎖条件(ケース B-C-1)の試験では、圧力の 増加前に供試体上下端のベントナイトを膨潤させる時間を長く取っているため、横軸の始まりが 250h となっている。また、水圧によるプローブの不具合のため、一部データが欠損している。



図 4.3-97 間隙水圧及び空気圧測定値の変化(ケース B-O-1 空気穴開放)



図 4.3-98 間隙水圧及び空気圧測定値の変化(ケース B-C-1 空気穴閉鎖)

ケース B-O-1 における間隙水圧は、初期に-80 kPa から-65 kPa 程度の負圧を示した。これは 供試体の間隙水のポテンシャルをある程度反映した値と考えられる。中心から 50 mm の位置で は、34h 以降に値が上昇し始め、75h まで比較的大きな増加率を示した後は、徐々に増加率が低 下した。中心から 30 mm の位置の測定値は、50 mm よりも遅れて緩やかに上昇し、約 140h に 最大の増加率を示した後は、徐々に増加率が低下した。

ケース B-C-1 における間隙水圧計の測定値は、中心から 50 mm、30 mm のいずれの位置でも、 最終圧力(500 kPa)を設定した後の 290h 頃から増加し始め、375h 頃に約 437 kPa の最大値に 達した。一方、間隙空気圧は間隙水圧よりも遅れて増加した。中心から 30 mm の位置では 325h 頃から、0 mm の位置では 330h 頃から増加し始め、後者の方が増加は緩やかであった。なお、 中心から 30 mm の位置の空気圧の測定値は 366h 以降に、0 mm の位置では 403h 以降にそれぞ れ増加率が大きくなっており、これらの時点でプローブ内に水が入り、正しい空気圧の測定が困 難となった可能性が高いと考えられる。

#### (iii) 比誘電率(FDR-Vによる計測)

試験中における比誘電率の測定値の変化を図 4.3-99 及び図 4.3-100 に示す。解放条件(ケース B-O-1)では、中心から 70 mm、30 mm の位置では、測定値がそれぞれ 23h、37h に急上昇した。これらの位置では、測定値が急上昇した時点でプローブの周りに水が浸入した可能性が高いと考えられる。また、中心から 50 mm の位置計測値は、25h から徐々に上昇し、34h に最大の増加率を示した。その後はわずかずつ上昇を続け、83h に最大値を示した後はほぼ一定値となった。

間隙水圧は、中心から 50 mm の位置では 50h~60h の間に正圧に転じており、この時点で飽 和に近い状態になっていると推察されるが、比誘電率計測値もこの時点で最終的な値に近くなっ ており、中心から 50 mm の位置での両者の計測値は整合的であると判断される。

閉鎖条件(ケース B·C·1)では、中心から遠い順に、周面浸透液圧を 0.5 MPa まで上昇させる 途中段階及びその直後に上昇した。開放条件での試験結果と異なり、測定値の急上昇は見られな かった。3 つの位置の中では、中心に最も近い 30 mm の位置の測定値の変化が最も緩やかであっ た。

間隙水圧は、中心から 50 mm、30 mm の位置では 290h 頃から圧力が上昇し始めており、こ の時点で飽和に近い状態になっていると推察される。中心から 50 mm の位置の比誘電率測定値 もこの時点で最大値に近くなっており、この位置での間隙圧力の変化と比誘電率の変化は整合的 である。一方、中心から 30 mm の位置の比誘電率測定値はこの時点でまだ上昇中であり、間隙 水圧変化の方がやや遅くなっている。



図 4.3-99 試験中の比誘電率測定値の変化(ケース B-O-1 空気穴開放)



図 4.3-100 試験中の比誘電率測定値の変化(ケース B-C-1 空気穴閉鎖)

## (iv) 供試体への浸潤量

給水管の水位変化から求めた供試体への積算浸潤量の変化を図 4.3-101 及び図 4.3-102 に示 す。解放条件(ケース B-O-1)では、供試体への浸潤速度は、給水圧力を 0.1 MPa にした際に急 激に大きくなり、この圧力を保持した期間に徐々に小さくなった。その後の段階的な昇圧期間に おいては、浸潤速度ほぼ一定の大きな値であった。その後、試験終了までに浸潤速度は緩やかに 低下している。

閉鎖条件(ケース B-C-1)では、供試体への浸潤は、給水圧力を 0.98 kPa に保持した期間に 徐々に進み、積算浸潤量は 258.5h までに約 150 mL に達した。その後の 0.1 MPa から 0.5 MPa までの段階的な昇圧期間において、浸潤速度ほぼ一定の大きな値であった。給水圧力が最終的な 値(0.5MPa)に達した後、浸潤速度は徐々に低下し、400h 後までに積算浸潤量はほぼ一定値と なった。



図 4.3-101 供試体への積算浸潤量の変化(ケース B-O-1 空気穴開放)



図 4.3-102 試体への積算浸潤量の変化(ケース B-C-1 空気穴閉鎖)

# (v) 試料採取による乾燥密度及び含水率計測

試験後の供試体からの採取試料を用いた埋め戻し材の乾燥密度及び体積含水率の計測例(採取 位置は図 4.3-95の深さ 50 mm(水平方向断面)及び N-E 方向(鉛直方向断面))を図 4.3-103 及び図 4.3-104に示す。他の断面からの採取試料については、付録 4 に記載した。

解放条件(ケース B-O-1)では、乾燥密度は、高さ 20 mm で周面側ほど小さくなる傾向が見 られるが、その他の高さでは径方向の差異は不明瞭であった。なお、高さ 20 mm で乾燥密度が 大きく、中央から上で低くなる傾向が見られた。体積含水率は、浸潤側である周面でわずかに高 くなる傾向が認められた。特に、高さ 80 mm では周面側ほど高くなる傾向が見られた。

なお、装置解体後時に供試体を観察したところ、供試体は装置底板と接する下端近傍の含水量 が多く、ほぼ飽和状態であり、それ以外の部分はより含水量が少ない状況であった。また、装置 解体後の底板の空気穴には、膨潤したベントナイトが流入していた。これらから、本試験では供 試体の高さ方向で浸潤が一様に進行していなかった可能性があり、その原因として下端空気穴の 閉塞の影響が考えられる。

閉鎖条件(ケース B-C-1)では、乾燥密度は、いずれの高さでも浸潤面である周面近くで小さ くなる傾向が認められた。上下方向の差異については、下側でやや大きくなる傾向が認められた。 体積含水率は中心付近まで初期設定値を上回り、周面に近いほど高くなる傾向が認められた。高 さ方向の差異については、採取方向によっては下側ほど高くなる傾向が見られたが、明らかな差 異が認められないものもあった。

なお、装置解体後時に供試体を観察したところ、供試体の下端近傍の含水量が高い状況は目視 では確認できなかった。このことから、本試験では供試体の高さ方向の浸潤速度の差異が小さか ったと推察される。



図 4.3-103 供試体の乾燥密度及び体積含水率 (ケース B-O-1 空気穴解放)



図 4.3-104 試体の乾燥密度及び体積含水率(ケース B-C-1 空気穴閉鎖)

(c) 試験結果の考察

# (i) 空気穴開放条件

開放条件(ケース B-O-1)の試験では、間隙空気圧の測定値と、中心から 70 mm 及び 30 mm の FDR-V 水分計の計測値に急激な変化が見られた。これらは、プローブ設置箇所への水の流入 に起因すると推察され、供試体底面の一部にプローブ設置箇所へ向かう選択的な流れ(水みち)が生じた可能性がある。また、装置解体後に容器の底板を外して供試体を観察した際に、供試体 の底面付近に含水量の高い領域が認められた。このことからも、供試体の底面近傍で集中的に浸潤が生じた可能性が考えられる。

一方、間隙水圧の測定値の変化は緩慢であり、また中心から 50 mm の水分計計測値の変化は、 同じく中心から 50 mm の間隙水圧の変化と整合的であった。これらのことから、供試体中には 選択的な流れの影響を受けていない浸潤もまた生じていた可能性がある。

以上のことから、開放条件の試験における間隙空気圧や一部の水分計の測定結果は、選択的な 流れの影響を受けた可能性が高く、解析結果と比較する場合、間隙水圧の変化や中心から 50 mm の水分計測定値の変化に着目することが望ましいと考えられる。

#### (ii) 空気穴閉鎖条件

閉鎖条件(ケース B-C-1)の試験では、開放条件の試験で見られたような計測値の急激な変化 は認められず、FDR-V水分計や間隙空気圧計の測定値の変化が生じた順序も、浸潤の進行方向と 整合的であった。さらに、装置解体後に供試体を観察した際には、供試体中に水分量が特に多い 箇所は認められず、浸潤試験終了後の体積含水率の分布も浸潤の進行方向と整合的であった。以 上のことから、この試験で供試体底面付近に選択的な流れ(水みち)が生じていた可能性は低い と考えられる。一方で、間隙水圧の測定値は中心からの距離によらず、ほぼ同様の変化を示した。 このことから、供試体の一部に透水性の異なる部分があり、その影響により浸潤速度に差異が生 じた可能性が考えられる。

以上のことから、閉鎖条件の試験における間隙水圧、間隙空気圧および水分計の測定結果は、 一部に透水性の差異の影響が見られるものの、基本的には全体的な浸潤の進行を反映していると 判断される。

#### (3) 水理解析の実施

上述した浸潤試験と同様の条件で、水理解析を実施した。開放条件では飽和・不飽和浸透流解 析と気液二相浸透流解析を実施し、閉鎖条件では気液二相浸透流解析のみを実施した。飽和・不 飽和浸透流と気液二相浸透流の支配方程式については付録4に記載した。

#### (a) 解析コード及び解析条件

#### (i) 解析コード

解析コードとして、飽和・不飽和浸透流解析には、TOUGH3の飽和・不飽和浸透流解析用モジ ュールである EOS9 を用いた。また、気液二相浸透流解析には、TOUGH3の気液二相浸透流解 析用モジュールである EOS3 を用いた。なお、オリジナルの EOS3 では気相と液相の絶対浸透率 を同一とする仕様になっているため、気相と液相に異なる絶対浸透率を設定できるよう、プログ ラムの一部を修正したものを用いた。これは、試験によって取得したベントナイトと模擬掘削土 の混合土において液相及び気相のそれぞれで絶対浸透率が異なることが示唆されたためである (詳細は付録4に記載した)。

#### (ii) 解析条件

解析領域は、浸潤試験で用いた供試体と同一(直径 16 cm×高さ 10 cm の円柱)とした。また、 浸潤試験の供試体は円柱形であり、浸潤の状況は回転軸対称であるため、解析モデルは、供試体 中心を対称軸とした二次元軸対称とした。解析モデルの概略図を図 4.3-105 (a) に示す。また、 解析メッシュを図 4.3-105 (b) に示す。開放条件の二相流解析では、装置下端の中央部にある空 気穴をモデル化した。

解析に用いたパラメータを表 4.3-72 に示す。浸潤試験に用いたクニゲル V1 (15 wt%) とケイ 砂 (85 wt%) を混合した埋め戻し材の液相絶対浸透率は、飽和透水試験で取得した値(飽和透水 試験の詳細は付録4に示す)を、気相絶対浸透率は透気試験で取得した値(原子力機構・原環センター, 2019)のうち飽和度 10%の値とした(なお、この透気試験では飽和度 0%のデータを取 得していないため、ここでは、最も小さい飽和度である 10%の値を代用した)。水分特性曲線は、 保水性試験で取得した値(原子力機構・原環センター, 2019)を van Genuchten モデルで表すこととし、モデルのパラメータαとnは、原子力機構・原環センター (2020)にて検討した値のうち 最適と考えられる値とした(モデルの説明は付録4に示す)。解析に用いた水分特性曲線を図 4.3-106に示す。比透水係数および比透気係数は、Mualem-van Genuchten モデルで表すこととし、パラメータnについては、水分特性曲線と同一の値とした(モデルの説明は付録4に示す)。 残留飽和度は、水分特性曲線と比透水係数では考慮しなかったが、比透気係数について、液相の 残留飽和度と気相の残留飽和度を考慮することとし、これらの値は室内透気試験値をフィッティ

ングして求めた値とした。解析に用いた比透水係数及び比透気係数を図 4.3-107 に示す。解析は 表 4.3-73 に示すケースで実施した。



図 4.3-105 解析モデル

〒4.3-72 埋め戻し材の館	印・不飽和浸透流およひ	「気液二相流の解析用パラメータ
-----------------	-------------	-----------------

パラメータ	記号	設定方法	設定値
間隙率	φ	乾燥密度と土粒子密度から計算	0.3465
液相絶対浸透率	K _w	飽和透水試験による測定	$6.119  imes 10^{-18}  [m^2]$
気相絶対浸透率	Ka	透気試験による測定(飽和度 10%)	$3.42  imes 10^{-13}  [ ext{m}^2]$
比透水係数	1.	Mualem-van Genuchten モデルを	n = 1.4
(液相の相対浸透率)	κ _{rw}	仮定し、モデルのパラメータnの値	$S_{lr} = 0.0$
业迷生这新		には、水分特性曲線の van	$S_{lr} = 0.346$
11.15×115×12	$k_{ra}$	Genuchten モデルに用いた値を使	$S_{gr} = 0.1$
(X(相切相对反选举)		用	n = 1.4
水八時州曲約		保水性試験による測定値を	$\alpha = 9.785 \times 10^{-2} [m^{-1}]$
小刀村注曲禄	$p_c$	van Genuchten モデルで表現	n = 1.4







図 4.3-107 比透水係数及び比透気係数

供試体	解析ケース	供試体部分 の空気穴	<ul><li>浸潤液の圧力</li><li>(ゲージ圧)</li></ul>	解析手法	解析コード	周面境界
	B-O-1-U		高圧 2.0 MDa	<ul><li>飽和・不</li><li>飽和流</li></ul>	TOUGH2(EOS9)	一定圧力
	B-O-1-T		3.0 MPa	気液二相流	TOUGH3(EOS3)	一定圧力
	P-O-9-U	開放		飽和・不飽	TOUCH9(FOS0)	浸潤試験
埋め戻     B-O-2-U       し材     B-O-2-T		低圧	和流	100GH2(E059)	と同一	
	<b>Р-О-9-</b> Т	DONT	$0.5 \mathrm{MPa}$	与海二相法	TOUCH9(FOG9)	浸潤試験
	B-0-2-1			×\112 → 7日 //L	100GH3(E083)	と同一
	$\mathbf{P}_{\mathbf{C}}$		高圧	与海二相法	TOUCH9(EOG9)	一定压力
B-C-1-	P-C-1-1	<b>月月</b> 公出	3.0 MPa	×U11X — 个目初L	100GH3(E0S3)	一定庄力
	Р.С.9.Т	利頼	低圧	启进了扣达		試験に基
	D-0-7-1		$0.5 \mathrm{MPa}$	×\f1X	100GH3(E053)	づく条件

表 4.3-73 解析ケース

#### (iii) 初期条件及び境界条件

周面境界圧は、(2)の浸潤試験における浸潤液の圧力変化(絶対圧の形式で表現、絶対圧とは、 大気圧を101.325 kPaとした時の圧力)とした(設定圧については付録4に記載した)。

初期条件として、飽和・不飽和浸透流解析においては初期飽和度 61%をモデル全体に与えた。 また、気液二相浸透流解析においては、初期気相飽和度 39.4%と気相の圧力(101.325 kPa)を モデル全体に与えた。

#### (b) 解析結果

解析結果の例として解析ケース B-O-2-U、B-O-2-T、B-C-1-T 及び B-C-2-T の結果を図 4.3-108 ~図 4.3-111 に示す。その他のケースについては、付録4に記載した。

#### (i) 飽和・不飽和浸透流解析と気液二相流解析の結果の差異

解析ケース B-O-2-U 及び B-O-2-T の解析結果を図 4.3-108 及び図 4.3-109 に示す。カラム深 度中央で飽和に至るまでの時間は、飽和・不飽和流解析でおよそ 40h であるのに対し、気液二相 流解析では、およそ 90h であり、飽和・不飽和流解析と気液二相流解析で差が見られた。

## (ii) 閉鎖条件における気液二相流解析

解析ケース B-C-1-T 及び B-C-2-T の解析結果を図 4.3-110 及び図 4.3-111 に示す。低圧の B-C-2-T では、カラム中央高さでは、試験終了時刻の 903h 後も飽和に至らず、気相が残存する結果となった。また、中心からの距離が 0.04 m 付近で 482h 後の体積含水率よりも 903h 後の体積 含水率が減少している。これは、供試体内の気相が浸潤により圧縮されて、周面境界圧よりも気 相圧力が大きくなり、浸潤方向と逆向きに気相が移動するためである。

高圧の B-C-1-T では、低圧での解析ケースと同様に、モデル中心付近に気相が残存している。 気相が残存する領域は周面境界の設定圧が 0.5 MPa のケースよりも中心付近に偏っていること が分かる。また、0.5 MPa のケースと同様に液相の浸潤が充分に進行した段階で気相圧が上昇し、 気相が液相の浸潤方向と逆向きに移動している。



図 4.3-108 カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況および間隙水圧(B-O-2-U)



図 4.3-109 カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況、間隙水圧、気相圧力(B-O-2-T)



図 4.3-110 カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況、間隙水圧、気相圧力(B-C-1-T)



図 4.3-111 カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況、間隙水圧、気相圧力(B-C-2-T)

## (4) 浸潤挙動を対象とした予測解析手法としての適用性の検討

浸潤試験結果と解析結果の整合性を評価し、要素試験により得られた浸潤特性に基づく飽和・ 不飽和浸透流解析及び気液二相浸透流解析について、浸潤挙動の予測手法としての適用性を検討 した。

#### (a) 浸潤試験結果と解析結果との比較

開放条件と閉鎖条件のそれぞれにおける間隙水圧の解析結果と試験結果を図 4.3-112 (a)、図 4.3-113 (a)に示す。間隙水圧はゲージ圧力(大気圧を0とした圧力)で表した。閉鎖条件の試験 では、低圧の状態で供試体上下端のベントナイトを膨潤させる時間を長くとっているため、横軸 の始まりを 250h としている。また、解析結果における水飽和度と試験における比誘電率をとも に示したものを、開放条件については図 4.3-112 (b)に、閉鎖条件については図 4.3-113 (b)に示 す。ただし、同グラフにおいて水飽和度と比誘電率は1:1 に対応していないため、比較において は両者の最大値までの変化の傾向に着目した。

#### (i) 空気穴解放条件での比較

#### 1) 間隙水圧の比較

開放条件において、間隙水圧の解析結果と試験結果を比較すると、飽和・不飽和浸透流解析よ りも気液二相浸透流解析の方が試験結果により近い結果となったが、どちらの解析結果も試験結 果と比較し浸潤が速かった(図 4.3-112 (a))。この原因として、供試体と浸潤容器の境界部にお いて水が他の領域よりも早く浸潤したことにより、浸潤容器の底面に敷設したベントナイトが膨 潤して空気孔を塞ぎ、浸潤容器内からの空気の排出が妨げられて浸潤しにくくなった可能性が考 えられる。

#### 2) 比誘電率の比較

開放条件において、比誘電率(試験結果)及び水飽和度(気液二相浸透流解析結果)の立ち上 がり時刻に着目すると、浸潤が中心から70mmの位置から30mmの位置に至るまでの時間は、 試験では約15時間であるのに対し、解析では約40時間とより遅くなっていたが、中心から70 mmの立ち上がり時刻は、解析結果の方が試験結果よりも早かった(図4.3-112(b))。このよう に、計測箇所によって試験の方が解析よりも浸潤が速い場合も遅い場合もあるのは、特にセンサ を設置した底面付近において、水の流れ(水みち)が選択的になった影響があると考えられる。 実規模レベルの浸潤を解析で予測する際には、坑道壁面付近の選択的な水の流れによって浸潤時 間が解析と異なる可能性があることに留意する必要がある。

# (ii) 空気穴閉鎖条件での比較

#### 1) 間隙水圧の比較

閉鎖条件において、気液二相浸透流解析による間隙水圧の解析結果と試験結果を比較すると、 中心から 50 mm の位置については解析結果の方が試験結果よりも早かったものの、中心から 30 mm の位置については解析により試験結果をほぼ再現できていた(図 4.3-113 (a))。また、水飽 和度の立ち上がり時刻は、いずれの計測箇所についても比誘電率(試験結果)の立ち上がり時刻 とほぼ同じであった。これより、閉鎖条件における埋め戻し材の浸潤状況は、気液二相浸透流解 析手法によりある程度再現されており、同解析手法は浸潤挙動の予測手法として適用性があると 判断される。

#### 2) 比誘電率の比較

浸潤試験における比誘電率測定値の変化と、飽和・不飽和流解析及び気液二相流解析により得 られた水飽和度の変化を比較したものを図 4.3-113(b)に示す。飽和・不飽和流解析による水飽和 度の変化は、中心から 70 mm 及び 50 mm の位置において、試験結果における比誘電率の変化と 同じ傾向にあり、中心から 30 mm の位置においては、試験結果よりも若干遅い変化となった。 なお、中心から 30 mm の位置において、解析結果では約 375h 以降に圧縮された気体の移動によ って飽和度が低下しているのに対し、同位置における試験結果では比誘電率の変化は見られない という違いがある。

#### (b) 浸潤挙動の予測解析手法の適用性

開放条件の場合、気相は容易に供試体外へと放出されるものと考えて、気相を考慮しない飽和・ 不飽和流解析でモデル化することが多い。しかし、開放条件においても気相の移動速度が小さい 場合、液相の動きを阻害する可能性が考えられるため、開放条件の解析において飽和・不飽和流 解析に加えて気液二相流解析も実施し、開放条件における両解析手法の適用性について検討した。

#### (i) 空気穴解放条件

飽和・不飽和流解析で求めた浸潤状況は、浸潤試験結果よりも大幅に早く、また、試験終了時 の水分分布についても、試験結果を再現できていなかった。一方、気液二相流解析により得られ た浸潤の進行は、一部の水分計の変化を良く再現しているものの、間隙水圧計の変化から推察さ れる浸潤状況と比較すると、全般的に試験結果よりも早かった。また、試験終了時の水分分布に ついても、試験結果を再現できていなかった。

解析結果が試験結果を再現できなかった原因として、試験における間隙空気圧計及び水分計の 計測値が急激な変化を示していることから、選択的な水の流れ(水みち)の影響が考えられる。 また、埋め戻し材を用いた浸潤試験では、供試体が容器と接する上下端面に厚さ約1mmの100% ベントナイトを敷き、これを膨潤させることで供試体との隙間を流れる水を抑制しようとしたが、 この膨潤したベントナイトが容器底盤中央に設けた空気穴を通じた空気の排出を妨げ、容器が良 好な開放状態になっていなかった影響により、浸潤が遅くなった可能性が考えられる。

#### (ii) 空気穴閉鎖条件

気液二相流解析により得られた浸潤の進行は、水分計の変化と試験終了後の水分分布について は概ね試験結果を再現していた。また、間隙水圧の変化については、中心から 50 mm の位置に ついては試験結果よりも早く、再現できなかったものの、中心から 30 mm の位置の計測結果を ほぼ再現していた。一方、間隙空気圧の変化については、2 つの計測位置のいずれにおいても、 解析結果は試験結果を再現できなかった。

以上のことから、閉鎖条件における埋め戻し材の浸潤状況は、二相流解析手法によりある程度 再現されており、同解析手法は浸潤挙動の予測手法として適用性があると判断される。解析によ る間隙空気圧の変化が試験結果を再現できなかった原因としては、設置したプローブ内の空気と 供試体内の間隙空気との連続性が悪かった可能性が考えられる。







(a) 間隙水圧、(b) 比誘電率と水飽和度

## 4.4 まとめ

埋め戻し材の製造・施工プロセス管理における管理項目や管理指標を抽出することを目的とし て、埋め戻し材の配合をパラメータとした透水試験、転圧工法と吹付け工法による施工試験及び スクリュー工法とブロック工法による要素試験を実施した。また、埋め戻し材を対象とした浸潤 試験を実施して、浸潤挙動を予測するための解析手法の適用性を確認するためのデータを取得し た。

埋め戻し材の製造時における掘削土の粒度分布のばらつきが透水係数に及ぼす影響を確認する ために、砕石(最大粒径 20 mm)と砕砂(最大粒径 5 mm、2.5 mm)の配合を変えた7種類の 模擬掘削土とクニゲル V1(15wt%)を混合した供試体を用いた透水試験を実施した。今回の模擬 掘削土の配合の範囲では、乾燥密度が一定の条件で埋め戻し材の透水係数は1桁程度の範囲に収 まっており、15%以上のベントナイト混合率であれば埋め戻し材製造時における掘削土の粒度分 布は厳密に管理する必要はなく、粒度分布にある程度の幅をもたせた管理ができる可能性がある ことがわかった。ただし、粒度分布に幅をもたせて管理する場合には、埋め戻し材の設計などに 用いる透水係数としては、乾燥密度に対する透水係数の最大値を用いるなど裕度を考慮すること が必要である。

転圧工法による埋め戻し施工試験では、予備試験で設定した撒き出し厚さと転圧回数で転圧して、各転圧層の乾燥密度を求めた。施工試験で求めた乾燥密度の平均値や分散に基づく解析モデルを用いて、浸透流を実施して埋め戻し領域の巨視的透水係数を求めた。その結果、乾燥密度の分散が2倍に増加したとしても、巨視的な透水係数に及ぼす影響は小さいことがわかった。

吹付け工法による埋め戻し施工試験では、施工時における連続施工性の向上(ノズルの閉塞の 抑制)とリバウンド率の低減のために、含水比の異なる埋め戻し材を用いた吹付け試験を実施し た。吹付け機からノズルまでをできる限り直線的に配置して含水比を低めに設定した埋め戻し材 を用いることで連続施工性を向上させることはできたが、リバウンド率は50%を上回った。一方 で、含水比を高めに設定した埋め戻し材を用いることでリバウンド率は20%程度に改善できたが、 ノズルの閉塞への対処のために施工速度は低下した。吹付け施工では、乾燥密度のばらつきの少 ない埋め戻し施工ができたため、材料製造プロセスにおける含水比の設定が重要な管理項目であ ることがわかった。

スクリュー工法による要素試験では、坑道の天端や隅角部に対する充填性等を確認するために、 2本のスクリューで構成する要素試験装置を用いて坑道天端を模擬した試験土槽を対象とした充 填試験を実施した。スクリューの回転方向をパラメータ試験では、土槽のアーチ中央部は充填で きたが、アーチ両端部には空隙が残るケースがあった。また、スクリューの後退速度が充填性に 影響を及ぼす重要なパラメータとなる可能性があることがわかった。

ブロック工法については、埋め戻し材ブロックの自己シール性評価手法について検討するとと もに、評価に必要な最大膨潤変形率を膨潤変形試験で取得した。また、埋め戻し材ブロックの製 造及び施工装置の概念設計を実施して製造・施工プロセス管理手法を更新した。

埋め戻し材の浸潤解析結果の妥当性確認に資するデータ取得については、境界条件を制御した 浸潤試験を実施して埋め戻し材の浸潤挙動に関するデータを取得した。また、飽和・不飽和浸透 流解析及び気液二相流解析による浸潤試験の再現解析を実施し、試験容器の空気穴が解放されて いる条件、閉塞されている条件ともに気液二相流解析の方が試験結果の再現性が高かった。ただ し、試験中にベントナイトが空気穴に侵入することで空気穴の一部が閉塞した可能性があり、試 験の状態を完全に解析モデルで考慮できなかったことも考えられる。

479

- Komine, H. and Ogata, N.: Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 33-1, pp.11-22, 1996.
- Komine, H. and Ogata, N.: Predicting swelling characteristics of bentonites. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), 130, No. 8, pp.818-829.2004.
- NAGRA, Implementation of the Full-scale Emplacement Experiment at Mont Terri: Design, Construction and Preliminary Results, NTB15-02, 2019.
- 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, 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.
- 地盤工学会,低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会研究報告書,2016. 地盤工学会:地盤材料試験の方法と解説(第一回改訂版)-二分冊の1-,2020.
- 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.

# 5. 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの政策・施工技術の開発 --製作・施工技術に係る品質保証体系及びモニタリング技術の整備---

5.1 はじめに

地層処分の閉鎖後の長期安全性は人の能動的な管理ではなく、天然バリア及び人工バリアを組 み合わせた受動的なシステムを構築することにより確保される。処分場の操業段階から閉鎖措置 に移行する段階では、第一種廃棄物埋設施設の評価(閉鎖措置計画認可の際の評価)が実施され る。第一種廃棄物埋設施設の評価を実施するためには、最新の技術的知見を踏まえて人工バリア を含む地下構成要素(以下、地下構成要素という)の製作・施工に係る品質や、施工後の状態変 遷をより確からしく予測するための情報が必要になると考えられる。

「地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30 年度~令和4年度)」(地層処分研究開発調整 会議,2020)では、構築された人工バリアが閉鎖後長期の安全性を確保できることを示すための 品質保証体系の整備に向けて、施工プロセス管理による品質管理方法の具体化とそれを補完する モニタリング技術の開発等の重要性が示されている。本事業では、これまでに地下構成要素の状 態や機能の変遷挙動を予測するための性能評価とその入力情報を取得するための取組(例えば、 原位置でのモニタリングなど)について国際共同研究や諸外国の先行事例を対象として調査を実 施してきた。諸外国では閉鎖後長期の安全性が確保された処分場であることを示すために、人工 バリア等の施工品質の保証や必要に応じてモニタリングなどを実施する予定であり、これらの取 組を製造・施工プロセス管理、モニタリング戦略、性能確認プログラムといった名称で整理した (原子力機構・原環センター,2020;2021)。

本章では、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の構築に向けて、地下構 成要素を対象とした品質管理プログラム、性能確認プログラムの素案を作成するために、性能評 価や FEP などについて調査して品質保証体系に必要な入力情報を整理する。また、埋め戻し材 を先行検討事例として、品質管理プログラム及び性能確認プログラムに有益な情報を提供できる と考えられる計測技術について要素試験等により適用性を確認する。

## 5.2 製造・施工技術に係る品質保証体系の具体化に向けた基盤整備

#### 5.2.1 背景及び目的

地層処分における処分場の閉鎖の判断に資する品質保証体系を具体化するために、本事業では これまでに品質保証体系を品質管理プログラム(既往検討では「品質保証プログラム」としてい たが、整理を進める中で実態と合わせるために変更した)と性能確認プログラムに分けて整理す る方針を示した(原子力機構・原環センター,2020;2021)。閉鎖の判断に向けた2つのプログラ ムで構成される品質保証体系の関係性について図 5.2-1 に示す。



#### 閉鎖の判断

# 図 5.2-1 閉鎖の判断に至るまでの流れと品質保証体系の関係

品質保証体系は、閉鎖の判断(閉鎖措置計画認可)を適切に実施するために、サイト調査段階 から建設・操業を経て閉鎖に至るまでの事業期間において得られる情報・データを体系的に取り まとめ、処分場が意図した要件や仕様を満たし、閉鎖後の長期にわたり期待する性能を発揮でき ることを示すものである。閉鎖の判断に至るまでには、まず閉鎖後長期の安全性が確保できる仕 様が設計で定められ、その仕様を満足するように地下構成要素が製造・施工される。さらに、施 工後の地下構成要素の状態・機能の変遷を性能評価として評価し、核種移行評価・線量評価を含 む安全評価を実施した結果を受けて閉鎖の判断がなされる。このような閉鎖の判断に至る流れの 中で、ここでは、仕様を満足する製造・施工の方法の決定および施工の実施に関する取組を品質 管理プログラム、性能評価に資するより確からしい情報・データを取得するための取組を性能確 認プログラムと定義した。品質保証体系はこの品質管理プログラムおよび性能確認プログラムに よって得られた情報・データを体系的に取りまとめたものである。

2 つのプログラムにおいて情報・データを取得する期間はそれぞれ異なる。品質管理プログラ ムは、仕様を満足する地下構成要素を製造・施工することが目的であるため、実際に地下構成要 素の製造・施工が始まる建設から施工までの期間が対象である。一方、性能確認プログラムは、 施工された地下構成要素(および影響を及ぼす周辺母岩)の状態や性能の変遷を見ることから施 工後~閉鎖措置計画認可までの変遷挙動に関連する情報が対象である。事業の進展過程における 2 つのプログラムの経時的な関係性を図 5.2-2 に示す。


図 5.2-2 品質管理プログラム及び性能確認プログラムの経時的な関係性

上述したように、品質保証体系の運用は閉鎖措置計画の認可を申請するまでの建設・操業期間 となるが(認可後の閉鎖措置も品質管理の対象となり得る)、これを建設開始とともに運用するた めには、予め適用する品質保証体系を確立し、取得する必要のある情報・データおよびその取得 方法を具体化しておく必要がある。精密調査段階の後半では地下調査施設が建設され、施工技術 の実証や処分場と同様の地質環境データの取得や試験が実施される。ここで得られる情報・デー タならびに施工技術とともに実証される品質管理技術は、品質保証体系を構成する重要なものと なることを踏まえると、より早い段階で取得する情報・データを明確にし、その取得方法を具体 化する必要がある。このような情報・データの具体化を含む品質保証体系は、事業段階が進むに つれて精緻化されるサイト情報や処分概念・設計を踏まえながら必要に応じて適時にアップデー トされ、そこで得られる情報・データは、事業許可申請や操業中の定期安全レビュー、閉鎖措置 計画の認可など、事業の各節目に取りまとめられるセーフティケースに反映される。

令和3年度は、竪置きブロック方式を対象として品質保証体系の具体化に向けた検討を進める。 本検討では地下構成要素のうち、まずは閉鎖後長期の安全性を考慮して仕様が設定されているオ ーバーパック、緩衝材、埋め戻し材を先行検討対象として、品質管理プログラム(製造・施工管 理の方法、扱われる情報・データなど)や性能確認プログラムとして扱われる情報・データなど を整理する。なお、品質保証体系で扱われる情報・データは、設計および性能評価で考慮されて いる項目であることから、これらの現状把握のため NUMO 包括的技術報告書(NUMO, 2021) で示されている設計や性能評価に関する記述を調査した。調査結果からパラメータを抽出し、品 質管理プログラムが対象とするパラメータと性能確認プログラムが対象とするパラメータについ て検討する。品質保証体系の情報・データを取得する方法を検討するためには、処分場の設計に 加えて建設・操業工程のタイムラインが必要であることから、包括的技術報告書などを参考にし て操業タイムラインを仮設定し、それに基づき、整理したパラメータを取得する場所、取得する タイミングなどを整理することでそれぞれのプログラムの具体化に資する知見を整理する。

#### 5.2.2 品質保証体系で用いられるパラメータの整理

品質保証体系で取得すべき情報・データの整理に向けて、NUMO包括的技術報告書(NUMO, 2021)を参照し、竪置きブロック方式のオーバーパック、緩衝材、埋め戻し材を対象として、閉鎖の判断に必要と考えられる設計や性能評価に必要なパラメータを整理した。

# (1) 調査方針

NUMO 包括的技術報告書では、地下構成要素に割り当てられる安全機能を起点として、設計 要件、評価項目、状態変数と呼ばれる項目へと展開されている。それぞれを対象に、記載されて いる確認方法や評価方法について調査・整理した。なお、設計要件、評価項目、状態変数は次の ように定義・説明されている(NUMO, 2021)。

- 設計要件:閉鎖後長期の処分場に求められる安全機能を処分場が担う安全機能として内容を より細分化したもの
- 評価項目:設計要件を充足するように設計された仕様に対して、安全機能の喪失や低下につ ながる可能性のある影響要因を想定して設定される項目
- 状態変数:処分場の構成要素の安全機能に直接的な影響を与え、構成要素の将来の状態を変 化させる可能性のある特性

#### (2) 調査対象項目

堅置きブロック方式の OP、緩衝材、埋め戻し材を対象として、それぞれに設定されている設計要件、評価項目、状態変数について調査、整理した。各構成要素の調査対象項目を表 5.2-1 ~表 5.2-3 に示す。調査対象項目の抽出根拠は付録 5 に示す。整理する便宜上、地下構成要素ごと ID を付した。

例えば OP であれば、表 5.2・1 に設計要件として示した「耐食性」に関して、必要腐食代、必 要耐圧代、必要遮蔽代の項目が展開され、必要腐食代に対して埋設後初期の残存酸素や残存酸素 消費後の水の還元による腐食が評価される。このように、設計の観点からは、表 5.2・1 に整理し た上位の項目が水平展開(細分化)され、個々の評価項目を辿ることで必要となるパラメータを 抽出する。また、性能評価(安全評価)の観点からは、腐食の挙動そのものを扱う FEP を抽出 し、腐食挙動に影響を及ぼす可能性のある状態変数をパラメータとして抽出する(本調査・整理 では、基本シナリオと変動シナリオで考慮すべき FEP に限定して整理を進めた)。

このように表 5.2-1~表 5.2-3 に示す調査対象項目を起点とした調査は一旦広範囲に広がるが、 重複などによって抽出するパラメータの数は収斂していくと想定される。

ID	調査対象項目	ID	調査対象項目		
	設計要件に関する項目		評価項目に関する項目		
才-1	耐食性	才-4	緩衝材の偏膨潤などに対する構造健全		
			性		
オ・1・①	残存酸素量による腐食	才-5	溶接欠陥に対する構造健全性		
オ・1・②	低酸素環境における腐食(水の還	才-6	地震動に対する構造健全性		
	元による腐食)				
才-1-③	応力腐食割れ、水素脆化割れ	状態変数に関する項目			
才-1-④	微生物腐食	オ-7	腐食生成物間隙水水質		
オ・1・⑤	溶接欠陥の耐食性への影響	才-8	温度		
オ・1・⑥	廃棄体の発熱に伴う温度変化	才-9	応力		
オ-2	構造健全性	才-10	鉄表面の状態		
才-3	耐食性に対する放射線影響の抑制	才-11	OP外表面と水との接触状態		
		オ-12	強度,厚さ/形状		

表 5.2-1 品質保証体系におけるパラメータの調査対象リスト(OP)

表 5.2-2 品質保証体系におけるパラメータの調査対象リスト(緩衝材)

ID	整理項目	ID	整理項目
1	設計要件に関する整理項目		状態変数に関する整理項目
緩-1	低透水性	力	x射性物質の移流による移行の抑制
緩-2	コロイドろ過能	緩-9	間隙構造
緩-3	自己シール性	緩-10	間隙水水質
緩-4	自己修復性		コロイド移行の抑制
緩-5	微生物影響の防止	緩-11	間隙構造
緩-6	物理的緩衝性	緩-12	間隙水水質
1	評価項目に関する整理項目		放射性物質の収着
緩-7	ニアフィールドの状態変化に対す	緩-13	温度
	る力学的安定性		
緩-7-①	自重による長期沈下挙動	緩-14	間隙水水質
緩-7-②	岩盤クリープと OP の腐食膨張に		
	よる影響		
緩-8	地震動に対する力学的安定性		

# 表 5.2-3 品質保証体系におけるパラメータの調査対象リスト(埋め戻し材)

ID	整理項目	ID	整理項目		
設計要件に関する整理項目			状態変数に関する整理項目		
埋-1	低透水性	坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移			
			経路となることの抑制		
評価項目に関する整理項目			鉱物組成		
埋-2	緩衝材及び止水プラグの膨出抑制	埋-4	密度		
		埋-5	温度		
		埋-6	間隙構造		
			間隙水水質		

# (3) 調査結果

表 5.2-1、表 5.2-2、表 5.2-3 において ID を付けた項目すべてに対し、その項目が示す内容、 その項目で検討する指標や基準、評価方法などを調査し、一件一葉の形でまとめた。一例として、 埋め戻し材の低透水性に関する調査結果に関する整理結果を表 5.2-4 に示す(各整理結果は付録 5 に示した)。

ID	埋-1	対象となる	構成要素	埋め戻し材		
対応する安全機能	坑道及びその属	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		
調査対象	低透水性					
内容	坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないこと。					
指標	透水係数		基準	母岩の平均的な透水係数の10倍以下		
確認方法	【坑道内が卓却	或した地下水	の流動経路にな	よらないように、埋め戻し材の密度を設定す		
	る。】					
	● 埋め戻し	材の設計の記	设定手順			
	①材料を選知	È				
	② 埋め戻し	材の締固め物	寺性や坑道に応1	じた施工方法を考慮		
	③         設計要件	の基準を充足	<b>さするように、</b> ち	里め戻し材の密度と材料の配合を設定		
	(1) 材料の選(	定				
	▶ 材料調	達の谷易性と	: 経済性の観点な	いら、坑迫掘削に伴い大量発生する掘削土を		
	利用	[【山田 ) テルい]	トマルヨ市西			
	○掘削	工利用におり ハナ 目期に	しる帷祕争頃 1笠にトマルヴォ	5.4の知八シュニュ の影響		
	▲皮	万Ͳ、文朔団 歴確促のため	マ目による16子多 シーベントナイト	(10)処方シスノムへの影響 、な浪へ		
	<ul> <li>(2) 仕様設定</li> </ul>	圧陥床のため	「重佰	2 伊口		
	(2) 正禄設定(	の性状	(手)员			
	<ul> <li>&gt; 地下水</li> </ul>	条件(低 Cl⁻	- 濃度/高 Cl⁻濃д	()		
	▶ 支保工	等コンクリー	- ト製の坑道内死	~ 浅置物から溶出する成分によるベントナイト		
	の Ca ⁴	型化				
	(3) 設計要件	を充足する配	1合、乾燥密度、	有効粘土密度の設定		
	▶ EDZの地下水流動解析による感度解析の結果より、坑道及びその周辺の地下水					
	流動の抑制のためには、EDZ に対する直接的な対策が必要であり適切な位置に					
	止水プラグを設置することで対応する(埋め戻し材の性能で対応できる範囲に					
	一定の限界がある)					
	▶ 保守的に、局 CI-濃度などの地下水条件に対しても有効粘土密度から推定され スートラーはの承担係料が回出の変換性な差担係料の 10 位以てになるトント					
	る理め戻し材の透水係数か母君の平均的な透水係数の 10 倍以下になるように 乳安					
	より配合割合を設定					
	※ジェネラルな段階である包括的技術報告書において掘削十はケイ砂の物性で代用 ベ					
	※シェイノルな技術でのる色品的20個報合音において強的工なタイルの初任で代用、、 いたナイトは カーゲル V1 で絵封					
パラメータの階層	1         日常           1         母岩の透	水係数				
関係	<ol> <li>2 埋め戻し</li> </ol>	材の透水係数	, Z			
	3 上地下水	組成および濃	と			
	4 └材料の	配合(ベント	、ナイトと掘削土	しの乾燥重量比)		
	5 └埋め戻	し材の乾燥密	的			
	6 └埋め戻	し材の有効料	占土密度			
	7 └埋め戻	し材の含水比	í l			
	8 「材料の	特性				
	9 レベン	トナイトの朝	<b>立燥密度</b>			
	10 「掘削」	土の粒度分析	]			
	□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□	主の化学特性	E PT T Y V M F ++	約の町久(ぶいしよくしし振動しのお場手具		
取侍の対象となる	母右の逸水係3	2、地下水組。 せの乾燥感	成及い 涙皮、 Mi 産 - 囲い 戸 L tt	科の配合(ヘントデイトと畑則土の乾燥里重 の方効料土密度「畑カ豆」はの会水比」ベン		
	レノ、生の戻し	レベン 取除者) 品本 市 「 堀 削	良、埋め戻し树	の有効柏工名及、 達の 戻し 初の 古小比、 ペン		
	<ul> <li>● 句括的技</li> </ul>	術報告書本編	<u>工。242</u> 00000000000000000000000000000000000			
	<ul> <li>● 包括的技</li> </ul>	術報告書 右	「属書4-43 4.1			
	<ul> <li>● 包括的技</li> </ul>	術報告書 在	「属書4-43 図2			

表 5.2-4 (埋-1) 埋め戻し材の低透水性に関する調査結果

各調査項目での整理結果のうち、評価方法の中で示された全てのパラメータを品質保証体系の 検討に必要なパラメータとして抽出した。さらに、上述した上位の項目からの展開を念頭に置き、 パラメータ間での相関性や、あるパラメータを構成する要素的なパラメータなどの関係性を階層 的に整理し、下位のパラメータが分かれば上位のパラメータも分かるような整理を試みた。

例えば、表 5.2・4 に抜粋、例示した「埋め戻し材の低透水性」は、埋め戻し材の透水係数が評価の指標となるが、これは①地下水組成及び濃度、②材料の配合、③埋め戻し材の乾燥密度、④ 埋め戻し材の有効粘土密度、⑤埋め戻し材の含水比、さらに材料の特性として⑥ベントナイトの 乾燥密度、⑦掘削土の粒度分布、⑧掘削土の化学特性によって評価される。埋-1 についてはこの 8 つのパラメータが品質保証体系で取得すべきパラメータであると考えた。各調査項目で選定されたパラメータに関する考察は 5.2.4(1)で行う。

## 5.2.3 品質保証体系の具体化のための建設・操業工程のタイムラインの設定

品質保証体系を具体化するにあたり、対象となる処分場を想定する必要がある。品質保証体系 はその運用を建設・操業段階に行うことから、処分場設計のみならず、建設・操業の工程や手順 も関連する。ここでは本検討のために、処分場の設計および建設・操業工程のタイムラインを仮 設定し、これを前提として以降のプログラムの具体化を試みる。

タイムラインの設定に当たっては、NUMO 包括的技術報告書 (NUMO, 2021) を参照しつつ、 不足する情報については第二次とりまとめや JAEA レポートならびに諸外国事例等を参照して 補完した。

# (1) 対象とする処分場の設計

NUMO包括的技術報告書では、地下への搬送・定置技術の信頼性、品質管理の容易さ、回収可 能性等の地層処分への適用性の観点から、地下深部へのアクセス方法を坑道型処分として、HLW の定置方法は分散定置の竪置き方式と横置き・PEM 方式を検討している。本検討ではまず竪置 き方式の処分概念について検討する。

堅置き方式については、ブロック状に成形した緩衝材を処分孔に積み上げ、オーバーパックを その中に定置する竪置き・ブロック方式を検討対象とする。NUMO 包括的技術報告書に示され ている竪置き・ブロック方式におけるオーバーパック、緩衝材、埋め戻し材の仕様や条件を以下 に示す。

○ オーバーパックの仕様

- 材料は炭素鋼(JIS G 3201炭素鋼鍛鋼品(SF)のうちSF340A)
- 形状は円筒形
- 内空寸法;直径440 mm×高さ1,350 mm(ガラス固化体の寸法;直径430 mm×高さ1,340 mm)
- 厚さは耐食性(埋設後初期の残存酸素による腐食、残存酸素消費後の水の還元による腐食)、
   構造健全性、耐食性に対する放射線影響の抑制を考慮して190 mm
- 蓋は落し蓋構造、溶接深さ190 mm
- 把持部の高さは150 mm
- 緩衝材の仕様
  - Na型ベントナイトのクニゲルV1とケイ砂の混合土(7:3)による圧縮ブロック
  - 飽和膨潤により隙間充填された状態で乾燥密度1.6 Mg/m³として有効粘土密度1.4 Mg/m³
  - 製作時の状態で乾燥密度1.8 Mg/m³として有効粘土密度1.6 Mg/m³
  - 緩衝材ブロックの厚さ700 mm

- 緩衝材ブロック1つ当たりの高さ350 mm
- 岩盤と緩衝材の隙間40 mm、緩衝材とオーバーパックの隙間20 mm
- 隙間に充填材は用いない。
   ただし、緩衝材は水に触れると直ちに膨潤を開始するため、内空変形によりオーバーパックの定置が困難になったり、緩衝材自体が膨出したりするなどが懸念されるため、湧水対策が必要である。

# ○ 埋め戻し材の仕様

- 調達のしやすさ、経済性の観点から坑道の掘削に伴い発生する大量の掘削土を利用
- 掘削土は施工性の向上のため必要に応じた粒度調整を実施
- 掘削土は埋め戻し材として利用するまでに地上施設における長期保管を想定
   保管中の化学的な変化が処分システムに大きな影響を及ぼすものではないことを確認する。
- 対象となるサイトが特定されていない現段階ではケイ砂の物性値で代用
- 低透水性を確保するためベントナイト(クニゲルV1)を混合
- 埋め戻し材の低透水性の指標は、母岩の平均的な透水係数の10倍以下であることから、 NUMO包括的技術報告書で扱われる地質環境モデルの母岩の中で最も低い透水係数を念 頭に乾燥都度1.8 Mg/m³を上限値に設定。配合は施工法によって異なる。

# (2) 対象とする処分場での建設、操業に関する条件

上述した地下構成要素の仕様に加え、品質保証体系を具体化する際に必要となる処分場の建設・ 操業工程や手順・タイムラインに関連する条件等を以下に示す。

- 地下構成要素の製造にかかわる地上施設以外(排水処理施設等)は対象外
- 処分区画形状は並行に配置した処分坑道を周回するように主要坑道を設置するパネル型とす る
- ガラス固化体を封入したオーバーパック及び緩衝材の定置装置はレール方式とし、主要坑道 と処分坑道の取付部を曲線とするため、坑道同士の交差角度を鈍角とする。その結果パネル は平行四辺形となる。
- パネルは6区画とし、最初の処分区画を建設後は、建設と操業は異なる処分区画で、同時進行 で実施する。
- パネル内の操業のタイムラインは試行的に1つで検討
- 1本の処分坑道のすべての緩衝材及びオーバーパックの施工が終了した後に、一方の処分坑 道端部に力学プラグを設置、埋め戻しを開始する。
- 処分坑道の長さは約672m
- 処分坑道1本あたりの廃棄大数は139体
- 廃棄体の搬送・定置は一度に2本程度とし、緩衝材をあらかじめ定置した処分孔に定置
- 処分坑道への定置作業は遠隔操作で実施

# (3) 品質保証体系の具体化検討で対象とする処分場タイムラインの設定

上記で示した条件を踏まえ、本検討において、処分場のタイムラインを図 5.2-3 のように設定 した。なお、湧水処理や処分孔壁面処理など、将来の実環境に依存したオプションとして考慮さ れている作業や手順については点線で示した。以降の具体化ではこのタイムラインや条件を念頭 に実施する。



図 5.2-3 品質保証体系の具体化で仮設定した処分場のタイムライン

実施		
実施		
材充填	処分坑道支保の撤 去作業	力学プラグ 設置
呆は、		

# 5.2.4 品質保証体系を構成するプログラムの具体化

### (1) 品質保証体系で確認すべき情報・データの分類

5.2.2 において調査・整理した設計や性能評価に関わるパラメータを、品質保証体系で確認すべき情報・データとして再度整理、分類する。

5.2.2 において安全機能を起点に選定した調査対象項目から展開・抽出したパラメータは、OP、 緩衝材、埋め戻し材のいずれかの評価をするために必要なパラメータであるが、一部のパラメー タには他の地下構成要素を対象としたものもある。例えば、オーバーパックの耐食性(オ・1)を 評価するために緩衝材や埋め戻し材の間隙比が用いられる。また、オーバーパックの鉄表面の状態(オ・10)や強度、厚さ/形状(オ・12)、緩衝材のニアフィールドの状態変化に対する力学的安定 性(緩・7)の評価には吹付けコンクリートの透水係数が用いられる。このように、オーバーパッ ク、緩衝材、埋め戻し材の評価に必要なパラメータでも他の地下構成要素を対象とするものがあ り、ある一つのパラメータが複数の評価に用いられることもある。以上のように、抽出されたパ ラメータは調査対象項目間を横断的に重複するものがあることから、パラメータの整理方法の工 夫や集約を行い、品質保証体系で確認すべき情報・データ(案)として整理した。その結果、パ ラメータの対象は表 5.2・5 に示すように、人工バリアを含む地下構成要素とそれ以外のものに分 類された。このように再整理した品質保証体系で確認すべき情報・データ(案)の一覧は付録 5 に整理している。

人工バリアを含む地下構成要素(人工構造物)	人工構造物以外	
● ガラス固化体	● ガラス固化体の設置環境	
• OP	● OPの設置環境	
● 緩衝材	<ul> <li>● 緩衝材の設置環境</li> </ul>	
● 埋め戻し材	● 岩盤	
● 吹付けコンクリート	● 地下水	
● インバート		
● 処分場	● その他	

表 5.2-5 集約したパラメータの対象

上表の分類が示すように、人工構造物以外には岩盤や地下水といったいわゆる地質環境特性を 示す情報のほかに、ガラス固化体、OP、緩衝材の設置環境が挙げられた。それぞれの「設置環境」 には間隙水に関するパラメータや微生物活動等が含まれる。これらの地質環境や設置環境に関す るパラメータは、例えば緩衝材の膨潤圧に影響を及ぼす地下水組成およびその濃度のように、地 下構成要素の変遷挙動に影響を与える。「その他」には、水の単位体積重量や空気中の酸素の体積 割合などの物理定数などが含まれる。人工構造物に分類した「処分場」は、処分深度や処分坑道 の断面積などの処分場設計に関わるものと、地温あるいは掘削によって持ち込まれる酸素量など の処分場全般の環境に関するものが含まれる。

個々のパラメータの多くは、設計や仕様が決まった段階で決定する寸法や係数であり、変遷を 考慮する必要のあるパラメータはそれほど多くない。付録5のパラメーター覧表では、変遷を考 慮する必要のあるパラメータが分かるようにチェックを付けた。

処分場の建設・操業段階には、酸素の流入や地下水の引き込みなどに伴い地下環境に擾乱が起 こる。一方で、閉鎖後は水圧等が徐々に初期ベースライン(精密調査段階の前半までの地質環境 調査等で得られる処分場建設前の初期状態)への復旧に向かい、擾乱に伴う過渡期の急激な変遷 挙動は緩慢になると予想される。設計は、閉鎖後長期の変遷を考慮してある程度の幅(裕度)を 持って仕様が決定される。本検討では設計で実施される評価も調査対象にしたことから、このような地質環境調査が対象とする初期ベースラインに関するパラメータも含まれる結果となった。

品質保証体系は品質管理プログラムと性能確認プログラムで構成され、それぞれのプログラム の特性から、設計や仕様を満足する製造・施工ができたことを確認するためのパラメータは品質 管理プログラム、施工後の変遷を考慮する必要のあるより確からしい性能評価に資するパラメー タ(付録5でチェックのついたパラメータ)は性能確認プログラムの対象と考えた。本検討にお ける整理結果として抽出されたパラメータは、品質管理プログラムが対象とするパラメータが多 く、設計や仕様を満足する製造・施工方法やその品質を保証するための品質管理プログラムの開 発が重要といえる。

# (1) 品質管理プログラムの具体化

品質管理プログラムは、設計・仕様を満足するように製造・施工ができたことを示すための取 組であり、製造・施工方法に係る技術開発の一環として取り組まれる要素試験や実証試験も含ま れる。また、これらの試験をとおして開発される目標品質を満たすことを確認し保証するための 製造・施工管理手法(工程ごとの検査など)も含まれる。過年度の検討から、品質管理プログラ ムについては、原位置でのサンプリング等による破壊的な検査ではなく、規定された施工プロセ スと検査で管理することで施工直後の品質が確保(保証)できる製造・施工プロセス管理手法を 指向することとしている。

令和2年度の検討では、埋め戻し材を先行検討事例として、4つの施工技術オプションごとに 開発段階、製造段階、施工段階からなる段階的なプロセス管理について表形式で取りまとめた(原 子力機構・原環センター, 2021)。

令和3年度は、その形式を踏襲しながらオーバーパック及び緩衝材の製造・施工プロセス管理 の素案を具体化する。製造・施工プロセスの検討においては、5.2.3項で設定したタイムラインを 考慮する。なお、令和2年度までに整備した埋め戻し材の製造・施工プロセス管理方法(素案) については、本年度の施工試験等で得られた結果や知見を踏まえて更新しており、詳細について は4章を参照されたい。

#### (a) オーバーパックの製造・施工プロセス管理手法(素案)の整備

# (i) オーバーパックの製造・施工プロセス管理手法が備えるべき要件

オーバーパックは閉鎖後長期の安全機能として「廃棄体と地下水の接触の防止」が設定されて いる。この安全機能の確保に必要な設計要件として「耐食性」、「構造健全性」、「耐食性に対する 放射線影響の抑制」がある。オーバーパックの品質管理目標として、廃棄体と地下水の接触を防 止するために、「十分な厚みを持ったオーバーパックにガラス固化体を適切に封入し、適切に定置 すること」が挙げられる。ここで「十分な厚み」は設計要件を考慮した仕様として決定されるこ とから、品質管理プログラムでは設計段階で決定された仕様を満たす管理方法を検討する。

#### (ii) 製造・施工プロセス管理手法素案作成の対象となるオーバーパック

NUMO 包括的技術報告書等を踏まえ、本検討の対象となるオーバーパックの材料や製作方法 等を以下のように設定する。

- 材料:炭素鋼(JIS G3201炭素鋼鍛鋼品SF SF340A)
- 形状:円筒形
- 厚さ:19 cm
- 製作方法:鍛造及び機械加工

製造プロセスについて、決められた厚さを満足する製造方法及び検査方法を整理する。オーバーパックは胴体と蓋部で構成され、胴体は中実状の鍛造材から円筒部と底部を一体で成形することとする。ガラス固化体が胴体に挿入された後に蓋部が溶接される。また、蓋部には搬入、定置の際に用いられる把持部が溶接で取り付けられる。本検討におけるオーバーパックの溶接部のイメージを図 5.2-4 に示す。



図 5.2-4 オーバーパックの溶接部イメージ

オーバーパックの製造プロセスにはガラス固化体の封入が含まれるが、ここではガラス固化体の取り扱いは対象外とし、蓋部の溶接工程について検討する。第二次取りまとめでは蓋部の溶接 方法で考慮すべき事項として、以下を挙げている(核燃料サイクル開発機構,1999)。

- 1) 高品質な溶接が可能なこと
- 2) ガラス固化体に有意な熱影響を与えないこと
- 3) 溶接能率が高いこと
- 4) 遠隔自動化が可能なこと

第二次とりまとめ以降、TIG 溶接、MAG 溶接、電子ビーム溶接を対象とした実規模の蓋構造試 験体を用いた溶接試験が実施されている(原環センター、2017)。本検討では落し蓋構造の TIG 溶接2を対象として製造プロセス管理の具体化を進める。

また、施工プロセスでは、ガラス固化体が封入され、製造プロセスで品質が保証されたオーバ ーパックを地下処分場まで輸送し、緩衝材とともに処分孔に定置するまでを扱う。ガラス固化体 の封入後に遠隔作業で各種搬送設備への積み替え及び定置作業を経たオーバーパックが、毀損す ることなく定置されることが重要となる。

### (iii) オーバーパックの製造・施工において懸念される品質不良とその検査方法

オーバーパックの製造・施工プロセスに含まれる鍛造(胴体の製造)及び蓋部の溶接は地層処 分特有のものではなく、一般産業で実施される品質管理を応用することができる。また、ガラス 固化体の封入後は放射線管理区域として管理される。ここでは、それぞれの工程に対して適用が 可能と想定される、一般産業分野等で実施されている品質管理方法について説明する。

² TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接とは、空気中の放電現象(アーク放電) を利用した溶接方法の一種であり、消耗しない素材であるタングステンを電極棒に使用して別の溶加材(溶接棒)をアーク中で溶融して溶接する方法

# 1) 鍛造

鍛造は強い力で塑性加工するため、材料の結晶粒がつぶれたり、変形したりすることがある。 これにより、材料の機械的性質にばらつきが発生することがある。また、加工時の強い圧縮を受 けて、残留応力が残ることがあり、割れや変形の原因となる場合がある。これらを防ぐためには 熱処理の加熱温度と冷却温度、冷却時間を適切に管理することが重要である。また、残留応力が 鍛造の硬化によって脆くなったところに作用して表面割れが発生する場合がある。これについて は鍛造後しばらくたってから発生することもあるため、出荷時の検査など、製造直後以降にも検 査が必要である。

### 2) 溶接

溶接の欠陥を減らし、品質を高めるためには、溶接設計の段階で用途に適した素材・工法を採 用することが重要である。一方で、適切に設計されていても、溶接の工程で欠陥が発生すると品 質に大きな影響を与える。例えばビード(接合面にできた盛り上がり部分)の欠陥は外観だけで なく強度にも影響する。溶接工程では、図面通りに接合することに加えて、溶接部の外観や強度 などの溶接品質を担保することが必須である。溶接品質は「溶接部外観検査基準(JASS6-20011)」 において、それぞれの表面欠陥に対する管理許容差や限界許容差が定義されている。欠陥に該当 するか否かの判断には精度の高い検査が求められる(KEYENCE, 2022)。

オーバーパック溶接部の品質は、オーバーパックの要件から機械特性(強度層)と腐食特性(耐 食層)が考えられる。前者については、溶接試験終了後に継手性能試験と呼ばれる一連の試験(放 射線透過試験・超音波探傷試験などの非破壊検査、引張試験・硬さ試験・側曲げ試験・衝撃試験 などの破壊試験)を実施して適切な溶接がなされたことを確認することにより、溶接条件が妥当 であることを確認する。後者については、溶接試験片から腐食試験片を切り出し、設計段階で検 討された炭素鋼の腐食シナリオに基づいて腐食形態を抽出し、それに対する腐食試験を立案、耐 食性評価試験を実施し、腐食寿命に影響を及ぼす様々な腐食形態を母材と比較する(原環センタ ー,2008)。これらの試験を開発段階に実施することによって設計仕様を確実に満たす溶接方法 が決定される。製造プロセスではこれらの試験で設定された条件を遵守することに加え、一部の 非破壊検査を併用することで品質を保証することができる。

オーバーパックの溶接検査は封入部位の最終的な健全性確認のために実施され、第二次とりま とめでは有望な方法として放射線透過試験(RT)、超音波探傷試験(UT)磁器探傷試験(MT)、 浸透探傷試験(PT)が挙げられている(核燃料サイクル開発機構,1999)。また、オーバーパッ クの漏れ試験として加圧法や減圧法が検討されており、その際使用するガスはオーバーパックに 有意な影響を与えないヘリウムガスが有望であるとされている。

## 3) 放射線管理区域における品質管理

地層処分場の地上施設として廃棄体の受入・検査・封入施設が想定されている。中間貯蔵 50 年 を経たガラス固化体の表面線量は 160,000 mSv/h、その時点でオーバーパックに封入した時の表 面線量は 2.7 mSv/h となり、適切な放射線管理が必要である。ガラス固化体の受入・検査・封入 施設は、廃棄物管理施設などの類似施設の安全規制(「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基 準に関する規則」(原子力規制委員会、2016))を踏まえて設計される。

### (iv) オーバーパックの製造・施工プロセス管理手法素案

上記を踏まえ、オーバーパックの製造・施工プロセス管理手法の素案を作成した。作成した素 案を以下に示す。

開発フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
1.1_製造(鍛造)試験	製造・施工管理指標 の設定	開発段階全体の管理	<ul> <li>・各開発段階での適切な品質保証</li> <li>・各開発段階の整合性</li> </ul>	<ul> <li>・開発段階での品質保証により、段階前代の品質 保証を達成する</li> <li>・上流段階への遡及及び再試験を含む段階移行時 の合理的マネジメントを実施する</li> </ul>
1.2_溶接試験 1.3_定置試験 製造・施工の管理	1.1_オーバーパッ クの寸法(製造(鍛 造)試験)	<ul> <li>・切り出しサイズ</li> <li>・加熱温度</li> <li>・加圧圧力</li> <li>・加圧回数</li> <li>・冷却温度</li> <li>・冷却時間 など</li> </ul>	<ul> <li>・ 設計の要求仕様への適合</li> <li>・ 厚さの均一性</li> </ul>	<ul> <li>・ JISなどの基準に沿った加工を実施する</li> <li>・ 管理項目と出来形の関係性を確認し、寸法(厚 さ)に関する変動幅や裕度を考慮して実施工プ ロセスを決定</li> </ul>
	1.2_溶接部特性(溶 接試験)	<ul> <li>・溶加材の組成</li> <li>・溶接方法</li> <li>・溶接部の機械特性</li> <li>・溶接部の腐食特性</li> </ul>	<ul> <li>溶接部の機能がオーバーパックに 求められる機能と同等以上である こと</li> </ul>	<ul> <li>・継手性能試験(放射線透過試験、超音波探傷試験、引張試験、硬さ試験、側曲げ試験、衝撃試験など;JISなどの基準に合った試験方法)</li> <li>・腐食試験(設計で想定された腐食シナリオに沿った試験計画)</li> </ul>
	1.3_定置試験	<ul> <li>・定置方法、設備</li> <li>・定置位置</li> <li>・把持部の強度</li> </ul>	<ul> <li>割れや欠損などによるオーバーパ ックの品質を低下させない搬送及 び定置方法であること</li> <li>把持部が6tを超えるオーバーパッ クを持ち上げる強度を持つこと</li> <li>オーバーパックと緩衝材間の空隙 が仕様の許容範囲内であること</li> <li>緩衝材の欠損など、品質を低下さ せないこと</li> <li>上記を遠隔操作で実現させる設備 環境であること</li> </ul>	<ul> <li>・搬送試験及び定置試験前後のオーバーパックの 品質確認</li> <li>・定置前後の緩衝材の品質確認</li> <li>・定置位置の確認(3D計測など)</li> </ul>

表 5.2-6 オーバーパックの製造・施工プロセス管理(開発段階)

2_製造フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
1.1_製造(鍛造)試験	製造・施工管理指標 の設定	開発段階全体の管理	<ul> <li>・各開発段階での適切な品質保証</li> <li>・各開発段階の整合性</li> </ul>	<ul> <li>・開発段階での品質保証により、段階前代の品 質保証を達成する</li> <li>・上流段階への遡及及び再試験を含む段階移行 時の合理的マネジメントを実施する</li> </ul>
1.2_溶接試験       1.3_定置試験       製造・施工の管理	1.1_オーバーパッ クの寸法(製造(鍛 造)試験)	<ul> <li>・切り出しサイズ</li> <li>・加熱温度</li> <li>・加圧圧力</li> <li>・加圧回数</li> <li>・冷却温度</li> <li>・冷却時間 など</li> </ul>	<ul> <li>・ 設計の要求仕様への適合</li> <li>・ 厚さの均一性</li> </ul>	<ul> <li>・ JISなどの基準に沿った加工を実施する</li> <li>・ 管理項目と出来形の関係性を確認し、寸法(厚 さ)に関する変動幅や裕度を考慮して実施工プ ロセスを決定</li> </ul>
指標の設定	1.2_溶接部特性(溶 接試験)	<ul> <li>・溶加材の組成</li> <li>・溶接方法</li> <li>・溶接部の機械特性</li> <li>・溶接部の腐食特性</li> </ul>	<ul> <li>溶接部の機能がオーバーパックに求められる機能と同等以上であること</li> </ul>	<ul> <li>・継手性能試験(放射線透過試験、超音波探傷試験、引張試験、硬さ試験、側曲げ試験、衝撃試験など;JISなどの基準に合った試験方法)</li> <li>・腐食試験(設計で想定された腐食シナリオに沿った試験計画)</li> </ul>
	1.3_定置試験	<ul> <li>・定置方法、設備</li> <li>・定置位置</li> <li>・把持部の強度</li> </ul>	<ul> <li>・割れや欠損などによるオーバーパッ クの品質を低下させない搬送及び定 置方法であること</li> <li>・把持部が6tを超えるオーバーパッ クを持ち上げる強度を持つこと</li> <li>・オーバーパックと緩衝材間の空隙が 仕様の許容範囲内であること</li> <li>・緩衝材の欠損など、品質を低下させ ないこと</li> <li>・上記を遠隔操作で実現させる設備環 境であること</li> </ul>	<ul> <li>・搬送試験及び定置試験前後のオーバーパックの品質確認</li> <li>・定置前後の緩衝材の品質確認</li> <li>・定置位置の確認(3D計測など)</li> </ul>

表 5.2-7 オーバーパックの製造・施工プロセス管理(製造段階)

3_施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
3.1_地下への搬送 3.1.1_搬送装置への積み替え	3_施工段階全体の 管理	搬送 定置	<ul> <li>・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</li> <li>・性能目標達成を施工品質管理 で保証すること</li> <li>・遠隔操作で可能であること</li> </ul>	<ul> <li>・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</li> <li>・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)</li> </ul>
	3.1.1/3.2.1_装置 への積み替え		<ul> <li>オーバーパックの毀損に配慮 した積み替えであること</li> </ul>	<ul> <li>・ 運搬前後の目視</li> <li>・ 適宜ランダムサンプリング検査</li> <li>・ 全OPに関する品質管理記録の確認</li> </ul>
	3.1.2_搬送	搬送方法	・オーバーパックの毀損に配慮 した搬送方法であること	・ 画像目視によるオーバーパック表面の確認 ・ 搬送設備・環境の確認
(綾町村の足直) 3.2.1_定置装置への積み替え 3.2.2_定置 (緩衝材及び埋め戻し材の定置)	3.2.2_定置	定置位置	<ul> <li>・計画位置との設置誤差が許容 値以下であること</li> </ul>	・測量による位置の管理(3Dスキャナーな ど)と結果の保管

表 5.2-8 オーバーパックの製造・施エプロセス管理(施工段階)

### (b) 緩衝材の製造・施エプロセス管理手法(素案)の整備

# (i) 緩衝材の製造・施工プロセス管理手法が備えるべき要件

緩衝材には、閉鎖後長期の安全機能「放射性物質の移行抑制」に対して「放射性物質の移行の 抑制」「コロイド移行の抑制」「放射性物質の収着」が設定されている。緩衝材の品質管理目標と して、溶出した放射性物質の移行を抑制するために低透水性などの材料特性を十分にもつ緩衝材 を適切に定置することが考えられる。

### (ii) 製造・施工プロセス管理手法素案作成の対象となる緩衝材

NUMO 包括的技術報告書等を踏まえ、本検討の対象となる緩衝材の材料や製作方法等を以下のように設定する。

- 材料:ベントナイト(クニゲルV1)70%、ケイ砂30%
- 形状:1段が8個の扇形ブロック(厚さ35cm)を12段積む
- ブロック製作方法:一軸プレス機
- ブロック定置方法:真空吸引法

緩衝材はその機能を材料特性に依存するため、製造プロセスにおける材料調整に重きが置かれる。また、圧縮成型時には材料条件を考慮したうえで、圧縮時間や速度、圧縮力の保持時間を定める必要があるほか、型枠から取り出す際の寸法変化や亀裂の発生なども考慮する。

施工プロセスでは、地上・地下での積み下ろし、積み替え、処分孔への定置作業時に緩衝材ブ ロックへ損傷を与えず、かつ、狭隘な空間で精度よくブロックを定置する必要があり、そのため に真空吸引技術を採用する。処分孔と緩衝材の隙間は 40mm と狭く、定置の正確性が求められ る。緩衝材と処分孔の隙間に特別な処理は行わず、地下水の浸潤に伴う緩衝材の膨潤によってこ の隙間は埋まるものとする。なお、ベントナイトペレットやケイ砂を隙間に充填する方法や、定 置時の偏膨潤を防ぐために防水シートを張るなどのオプションも検討されている (NUMO, 2021)。

### (iii) 緩衝材の製造・施工上懸念される品質不良とその検査方法

緩衝材の構成材料であるベントナイトは天然に産出する鉱物資源であるため、主成分であるモ ンモリロナイトの含有量や含水比などの品質にムラがある。緩衝材に要求される低透水性やコロ イドろ過能などはベントナイトの膨潤性によるものであり、ベントナイト材料の品質が重要にな るため、信頼できるメーカーから品質が保証されているベントナイトを入手するのに加え、検品 時チェックの必要がある。検査の項目としてはモンモリロナイトの含有量と含水比が考えられる。 モンモリロナイト含有量は、メチレンブルー吸着量による測定方法(JIS Z 2451)により求める のが一般的である。

また、わが国の緩衝材の仕様では、締固め特性、熱伝導性、緩衝材の流出、経済性などの観点 からケイ砂を混合することとしており、その配合は有効粘土密度から求められる。ケイ砂を混合 する場合、含水比調整を含めた練り混ぜ具合の均一性が求められる。これはミキサーの性能と合 わせて事前に確認する必要がある。緩衝材は水に触れると直ちに膨潤を開始するため水分管理が 重要である。製作時のベントナイト及びケイ砂の含水比を把握したうえでの加水調整に加え、製 造してから施工するまでの保管(地上、地下)時の湿度管理にも留意が必要である。

堅置きブロック方式における緩衝材ブロックは一軸プレス機による圧縮成形が検討されている。 圧縮成型時には材料の条件を考慮した圧縮時間や速度、圧縮保持時間などを考慮する。型枠の脱 型時には脱型による寸法変化や緩衝材ブロックに亀裂や欠けが発生することがある。このような 欠損などは緩衝材ブロック間や緩衝材-処分孔間の隙間となったり、運搬・定置時の妨げになっ たりする可能性があることから、このような欠損などを抑制できる脱型方法について事前に検討 する必要がある。

なお、以上のようなばらつきや欠損等は、ブロックの搬送に影響がない範囲で、緩衝材の膨潤 で対応できれば問題はないと考えられるため、欠損として扱う隙間の大きさに関して検討してお く必要がある。また、膨潤の偏りについては材料等の偏りに加え、水の侵入具合に左右される可 能性もあり、定置した緩衝材ブロックの界面から水を均一に浸潤させる措置などの検討も必要と 考えられる。

また、緩衝材は OP に先駆けて設置される。OP と緩衝材の隙間は 20 mm しかなく、内空がず れると設置できない可能性がある。また処分孔との隙間も 40 mm と小さいことから正確な施工 が求められる。

# (iv) 緩衝材の製造・施工プロセス管理手法素案

5.2.3(3)で設定したの処分場のタイムラインを参考に、緩衝材の材料調達から施工までの各工程 に対して、管理すべき項目の検討を行った。検討結果を表 5.2-9~表 5.2-11 に示す。

開発フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
▶ 1.1_材料試験	製造・施工管理 指標の設定	<ul> <li>開発段階全体の管理</li> </ul>	<ul> <li>・各開発段階での適切な品質 保証</li> <li>・各開発段階の整合性</li> </ul>	<ul> <li>・開発段階での品質保証により、段階前代の品質保証を達成する</li> <li>・上流段階への遡及及び再試験を含む段階移行時の合理的マネジメントを実施する</li> </ul>
▶ 1.2_圧縮試験	1.1_ベントナイ         トの特性(材料         試験)	<ul> <li>・ モンモリロナイト含有量</li> <li>・ 土粒子密度</li> <li>・ 含水比 など</li> </ul>	<ul> <li>材料品質が緩衝材ブロックの製作に適していること</li> </ul>	・ JISなどの基準に沿った試験の実施
1.3_膨潤試験	1.1_ケイ砂の特 性(材料試験)	<ul> <li>・ 土粒子密度</li> <li>・ 粒度分布</li> <li>・ 含水比 など</li> </ul>	<ul> <li>材料品質が緩衝材ブロックの製作に適していること</li> </ul>	・ JIS等の規格に沿っているかの確認
	1.1_水の特性 (材料試験)	<ul> <li>・ 含有有害成分 など</li> </ul>	<ul> <li>・緩衝材の機能への悪影響の ある成分とその濃度の特定</li> </ul>	・ JIS等の規格に沿っているかの確認
製造・施工の管理 指標の設定	1.1_練り混ぜ (材料試験)	<ul> <li>配合</li> <li>最適含水比</li> <li>練り混ぜ時間</li> <li>ミキサー性能 など</li> </ul>	<ul> <li>・ 設計の要求仕様(乾燥密 度、有効粘土密度)への適 合</li> </ul>	・ JISなどの基準に沿った試験の実施
	1.2_圧縮特性 (圧縮試験)	<ul> <li>・ 投入量</li> <li>・ 圧縮成型圧力</li> <li>・ 圧縮時間、速度</li> <li>・ 圧縮保持時間 など</li> </ul>	<ul> <li>・ 設計の要求仕様(かさ密 度)への適合</li> </ul>	・ JISなどの基準に沿った試験の実施
	1.2_脱型及び出 来形(圧縮試 験)	<ul> <li>・ 脱型方法</li> <li>・ 寸法変形</li> <li>・ 亀裂・欠け</li> <li>・ 寸法、質量 など</li> </ul>	<ul> <li>・ 脱型後有意な変形、亀裂、</li> <li>欠けがないこと</li> </ul>	<ul> <li>結果に応じて、必要ならば材料試験に立ち戻る</li> </ul>
	1.3_ブロックの       膨潤特性(膨潤       試験)	<ul> <li>・ 膨潤量</li> <li>・ 隙間への充填率</li> <li>・ 透水係数 など</li> </ul>	<ul> <li>原位置の地下水組成に対し</li> <li>て、想定した膨潤を示し、</li> <li>隙間を充填できること</li> </ul>	<ul> <li>JIS などの基準に沿った試験の実施</li> <li>結果に応じて、必要ならば材料試験に立ち戻る</li> </ul>
	1.4_保管方法 (定置試験)	<ul><li>・ 梱包方法</li><li>・ 温湿度 など</li></ul>	<ul> <li>保管時に緩衝材の膨潤等に</li> <li>影響しないこと</li> </ul>	<ul> <li>・保管前後の緩衝材の品質確認</li> <li>・温湿度との関係確認</li> </ul>
	1.4_運搬・定置 方法(定置試 験)	<ul> <li>運搬方法</li> <li>・ 梱包の解き方</li> <li>・ 定置方法 など</li> </ul>	<ul> <li>・地上・地下での積み替え、</li> <li>処分孔への定置作業時に緩</li> <li>衝材ブロックが損傷しない</li> <li>運搬・定置方法であること</li> </ul>	<ul> <li>運搬・搬送前後の緩衝材の品質確認</li> <li>定置前後の緩衝材の品質確認</li> <li>定置位置の確認(3D計測など)</li> <li>結果に応じて、必要ならば圧縮試験に立ち戻る</li> </ul>

表 5 2-0	<b>綵衝材ブロックの</b> 勧浩施エプロセス管理	(開発段階)
衣 3.2-9	版側例 ノロックの表迫加上ノロセス官理	(開光段泊)

製造フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
2.1_材料の調達 2.1.1_ベントナイト	2_製造フロー の全体管理	<ul> <li>材料品質</li> <li>材料調整</li> <li>圧縮成型</li> <li>保管</li> </ul>	<ul> <li>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</li> <li>施工に適した状態で材料を供給できること</li> </ul>	<ul> <li>事前の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</li> <li>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)</li> </ul>
2.1.2_ケイ砂       2.1.3水	2.1材料の 調達	(ベントナイト)     (ケイ砂)       ・ 含水比     ・ 含水比       ・ メチレン     ・ 粒径分       ブルー吸     布       着量     (ケイ砂)	<ul> <li>事前の開発段階で設定した範囲に収まっていること</li> </ul>	<ul> <li>・製造元がJISなどの品質保証を得ていること</li> <li>・製造元発行のロット毎の分析管理シート</li> <li>・学会などの基準に沿った試験方法</li> </ul>
2.2_材料の混合       2.3_圧縮成型       2.3.1_圧縮成型機の準備	2.1.3_水 (水分調整を 行う場合の み)	• 有害物質	<ul> <li>事前の開発段階で設定した範囲に収まっていること</li> </ul>	<ul> <li>・供給元がJISなどの品質保証を得ていること</li> <li>・供給元発行の分析管理シート</li> <li>・適宜分析検査</li> <li>・学会などの基準に沿った試験方法</li> </ul>
2.3.2_材料投入 2.3.3_圧縮 2.4_保管	<ul> <li>2.2_ベントナ イト及びケイ 砂混合</li> <li>2.3.1_圧縮成</li> </ul>	<ul> <li>・ ミキサーの制御</li> <li>・ 材料の計量</li> <li>・ 配合</li> <li>・ 粒径分布</li> <li>・ 含水比</li> <li>・ 均質性</li> <li>・ 圧縮機の状態や設定</li> </ul>	<ul> <li>・ ミキサーの有意な汚れの有無</li> <li>・ 開発段階で設定した方法、手順 に従っていること</li> <li>・ 混錬時間</li> <li>・ 事前の開発段階で設定した混 合土の均質性や含水比</li> <li>・ 圧縮機の有意な汚れの有無</li> </ul>	<ul> <li>・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)</li> <li>・バッチ毎の計量混合記録のチェックと保管</li> <li>・適宜分析検査</li> <li>・</li> <li>・</li> <li>製造者の点検管理シート</li> </ul>
	型磯の準備 2.3.2_材料投 入 2.3.3_圧縮	<ul> <li>材料の均質性</li> <li>投入量</li> <li>圧縮成型機の制御</li> <li>圧縮後の有効粘土密度</li> <li>重量</li> <li>ブロックの寸法</li> </ul>	<ul> <li>・ 性能を発揮できること</li> <li>・ 事前の開発段階で設定した範囲に収まっていること</li> <li>・ 事前の開発段階で設定した圧力、圧力保持時間等に従っていること</li> <li>・ 設計要件を満足する値に収まっていること</li> </ul>	<ul> <li>・ 適宜動作試験、圧縮刀の検定など</li> <li>・ 目視による均質性</li> <li>・ 投入量の重量測定</li> <li>・ 目視、圧力表示などの制御系の確認</li> <li>・ 圧縮後に計測器によって計測</li> <li>・ ブロックごとに2.3の記録を付帯</li> </ul>
	2.4_保管	<ul> <li>保管状態(乾湿)</li> <li>保管形態</li> </ul>	<ul> <li>・乾湿の影響を受けないこと</li> <li>・変形しない積み上げ段数であること</li> </ul>	<ul> <li>1 ブロックずつのラップ梱包</li> <li>ID 番号記載(寸法、重量など)</li> <li>保管環境の管理と継続的測定</li> </ul>

# 表 5.2-10 緩衝材ブロックの製造施エプロセス管理(製造段階)

施工フロー	管理対象	管理項目	管理指標	管理方法
	3_施工段階全体	<ul> <li>ブロック品質</li> </ul>	<ul> <li>事前の開発段階で設</li> </ul>	<ul> <li>開発段階で決定した管理指標</li> </ul>
3.1 地下への搬送	の管理	・ 運搬、定置	定した管理指標を満	を遵守するための管理方策
		・ 定置後の品質	足すること	・ 許認可に耐える品質保証の実
3.1.1_搬送装置への積み替え			・ 性能の達成を施工品	践 (品質保証記録の整備、承認
3.1.2_搬送			質管理で保証するこ	と保管)
·			<u>ک</u>	
32加公式への定署	3.1_地下への搬	· 搬送装置	・ ブロックの毀損、湿潤	・ 運行記録などによる試行によ
0.2_20月10、00定值	送	· 搬送方法	防止に配慮した搬送	り確認された運搬方法が行わ
3.2.1_処分孔の状態確認			方法であること	れていることの確認
			・ブロック管理記録が	<ul> <li>・ 全運搬ブロックに関する品質</li> </ul>
			保持されること	管理記録の確認
3.2.3_底部ブロック、リングブロック定置	3.2.1_ 定 置 前 の	・ 処分孔の寸法(直径深さ、	<ul> <li>事前の開発段階で設</li> </ul>	・ 目視(画像)による処分孔壁面
(オーバーパックの定置)	状態確認	垂直性)	定した管理指標を満	の状態確認
		・ 有意な亀裂の有無	足すること	· 3D情報システムなどによる
3.2.3_上部ブロックの定置		・ 有意な湧水量の有無		処分孔の直径や深さの寸法、
(上部埋め戻し材の定置)		・処分孔の有意な凹凸の有無		壁面の角度の確認
		・ ブロックの有意な亀裂や欠		・ 目視 (画像) によるブロック品
		けの有無		質の確認
	3.2.3_底部ブロ	・ 処分孔壁面との隙間の寸法	• 目標に合致した空隙	· 3D情報システムによる、ブロ
	ック、リングブロ		での定置がおこなわ	ックの空間的位置情報の確
	ックの定置		れること	認、記録
			<ul> <li>計画位置との設置誤</li> </ul>	・ 位置情報に基づく、空隙位置
			差が許容値以下であ	と空隙量の定量化、空隙が許
			ること	容値以下であることの確認
	3.2.4_上部ブロ	・ 処分孔壁面との隙間の寸法	<ul> <li>目標に合致した空隙</li> </ul>	· 3D情報システムによる、ブロ
	ックの定置		での定置がおこなわ	ックの空間的位置情報の確
			れること	認、記録
			<ul> <li>計画位置との設置誤</li> </ul>	・ 位置情報に基づく、空隙位置
			差が許容値以下であ	と空隙量の定量化、空隙が許
			ること	容値以下であることの確認

表 5.2-11 緩衝材ブロックの製造施エプロセス管理(施工段階)

# (2) 性能確認プログラムの具体化

性能確認プログラムは、より確からしい性能評価に資する情報・データを取得する取組であり、 原位置での取得のほか、環境を模擬した試験や解析等が含まれる。品質保証体系は処分場の閉鎖 の判断に資するものであるため、本検討では閉鎖後モニタリングなどは検討の対象外としている。 すなわち、閉鎖措置計画認可が成立するまでの建設・操業段階で得られる情報・データを用いて 閉鎖後長期の安全性を示すこととなる。

性能確認プログラムに含まれる情報・データの取得方法のうち、建設・操業中の処分場の原位 置で測定する方法(現物確認)はもっとも確からしい情報・データを得る可能性が高いが、人工 バリア等の性能を低下させる水みちの形成などを避けるため、最小限にすることが望ましい。原 位置測定を最小化にするために、他の代替的な方法よりも原位置で取得することが効果的かつ重 要となるパラメータについて整理する。

前述の通り、本検討における性能確認プログラムで情報を取得できるのは閉鎖措置計画認可が 成立するまでである。このため原位置で測定・取得する必要のあるパラメータは、変遷を考慮す る必要のあるパラメータの中でも建設・操業期間中に変化すると考えられるものが選定される。 また、5.2.4(1)におけるパラメータの抽出・整理では、せん断力とせん断応力のように、地下構成 要素に対して変遷の駆動力として働くパラメータとそれに対する抵抗力を示すパラメータという 関係性が見られた。地上・地下の研究施設における試験や解析を充実させ、変遷後の状態をより 確からしく予測評価する方法が確立できれば、原位置では駆動力のみ測定することで性能評価に 資する十分な情報・データを取得できると考えられる。性能確認プログラムにおいて原位置での 測定を最小化する考え方を図 5.2-5 に示す。



図 5.2-5 原位置での測定を最小限にする性能確認プログラムの考え方(概念)

駆動力となるパラメータは、せん断力や地下水組成及び濃度、地下静水圧など地質環境に関わ るものである。間隙水水質なども駆動力として働くが、例えば OP-緩衝材間の間隙水を操業中 に取得することは現実的ではない。駆動力となる地質環境情報を原位置で取得する場合、得られ る情報の空間的なばらつき等に対して、どの程度の範囲で代表性が得られるのかを明らかにする ことが重要である。例えば、地下水の組成及び濃度のうち、塩分濃度は緩衝材の厚さや膨潤挙動 を左右する重要なパラメータであるが、緩衝材の膨潤挙動が想定を超えてしまうような変化が処 分れスケールで起きるのか、パネルスケールで起きるのかによって測定箇所や数が変わる。仮に、 処分場スケールでの変化が考えられない場合、処分場に隣接する地下調査施設が構築できるなら そこで測定する方法も考えられる。また、そのような変化が起きる時間スケールを考慮すること で測定頻度も決定できる。このように性能確認プログラムで取得すべきパラメータに対して原位 置での測定を最小化するためには、工学的な評価の結果から許容できる閾値や許容値を考慮した うえで、そのパラメータを適切に評価するために必要最低限の測定場所、測定数および測定頻度 を地質環境調査によって得られる情報を考慮して検討する必要がある。

以上のような検討を踏まえ、集約されたパラメータを試行的に分類したところ、岩盤に関する パラメータ(せん断力、残存酸素量、クリープ変形量)、処分場に関するパラメータ(坑道掘削時 に導入された酸素量、処分坑道内の温度、地温、地温勾配)、地下水に関するパラメータ(地下水 組成及び濃度、溶存酸素量、地下静水圧、動水勾配、地下水流量)が、原位置測定が必要とされ る可能性のあるパラメータとして挙げられた。

原位置での測定を最小化する場合、試験や解析の高度化は不可欠である。性能確認プログラム における試験や解析は、サイト調査の結果を踏まえた設計仕様と精密調査段階の地下調査施設や 処分場で取得される地質環境情報(駆動力)を入力情報として、閉鎖までに取得する情報・デー タによって、閉鎖後長期の変遷をより確からしく予測することが目的となる。このような個々の 試験や解析は、過去の様々な検討で実施されている(詳細は付録5参照)が、閉鎖の判断に資す るためにどのような情報・データをどの程度の精度で必要かという視点で整理する必要がある。

# 5.3 地下構成要素を対象とした計測関連技術の整備

# 5.3.1 埋め戻し材の乾燥密度の測定技術の高度化

### (1) 背景及び目的

埋め戻し材には低透水性が要求され、その透水係数は乾燥密度などの指標と相関があること が確認されている。土質材料の乾燥密度は、砂置換法やサンプリング試料を用いて測定される ことが一般的である。これらの測定方法により、埋め戻し施工試験後における局所的な乾燥密 度を把握することはできるが、低密度の領域が存在しないことを確認するためには、例えば、 転圧工法の場合、施工した転圧層全体に対して乾燥密度の測定を行う必要があり、測定の手間 などを考えると現実的ではない。

ベントナイト材料の乾燥密度を非破壊かつ多点の測定が可能な方法として、光ファイバ技術 を利用する研究が進められている(鵜山・榊,2020、Sakakiら,2018)。この測定手法では、 土質材料の熱伝導率が乾燥密度に応じて変化することを利用して、加熱部を有する光ファイバ ケーブルで測定した温度の時間変化から熱伝導率を算出して、光ファイバケーブルに沿った任 意の位置における乾燥密度を推定することができる。本項では、ベントナイトと砕石および砕 砂の混合土である埋め戻し材の乾燥密度の測定方法としての本手法の適用性を確認することを 目的として、令和2年度からの3年間の計画で要素試験等を実施している。埋め戻し材の乾燥 密度測定技術の開発フローを図 5.3-1に示す。

令和2年度は、含水比が比較的低い埋め戻し材(スクリュー工法の要素試験で用いた混合土、 含水比3%程度)を対象として3段階の乾燥密度に対して、加熱式光ファイバによる温度測定 結果から熱伝導率を算出し、その乾燥密度が推定可能なことを示した。令和3年度は、撒き出 し転圧工法で検討している、含水比が比較的高い埋め戻し材(含水比9%程度)に対する加熱式 光ファイバによる乾燥密度の推定方法としての適用性を確認する。その際、令和2年度の要素 試験において測定を繰り返し実施した際の再現性確保が課題として挙げられたため、試験方法 の改善を行った。なお、令和3年度に実施した土壌水分計を用いて埋め戻し材の乾燥密度を推 定する方法についての試験結果は付録6に示す。



図 5.3-1 埋め戻し材の乾燥密度測定技術の開発フロー

# (2) 加熱式光ファイバによる温度の測定原理と乾燥密度の推定方法

光ファイバケーブルに温度変化が生じると、その熱膨張により図 5.3・2 (a)に示すグレーティン グ(Grating)の間隔が変化し、レーザー光源からの入射光の波長に対して、反射光の波長が変化 する。その反射光の波長を干渉計により計測することで、温度の変化量を求めることができる。 また、グレーティングの位置が決まっているため、その温度変化が生じたケーブル上の位置を特 定することもできる。本技術により埋め戻し材の乾燥密度を推定するためには、埋め戻し材に温 度変化を生じさせる必要があるため、図 5.3・2 (b)に示すように FBG (Fiber Bragg Grating)ケ ーブルの周囲に発熱用銅線を配置したケーブルを用いる。発熱用銅線を加熱した時の温度を光フ ァイバケーブルで測定し、温度と時間の関係からケーブル周囲の埋め戻し材の熱伝導率を算出す る。埋め戻し材の熱伝導率は含水比が一定であれば、密度により変化するため、算出した熱伝導 率から乾燥密度を推定することができる。なお、本研究ではレイリー散乱光を利用した OFDR 法 ³を利用しており、その測定位置の精度は 6 mm 程度と高いが、測定可能延長は約 40m である。 試験に使用した連続 FBG ファイバケーブル⁴の仕様を表 5.3-1 に示す。

光ファイバケーブルで測定した温度と時間の関係の例を図 5.3-3 に示す。図中のp1、p2、p3 は 乾燥密度を表しており、それぞれの乾燥密度に対して温度と時間の関係が求まる。この関係を用 いて、熱伝導率を算出してケーブル周囲の埋め戻し材の乾燥密度を推定する。加熱による温度上 昇はケーブル周りの温度勾配が安定するまでは非線形性を示すため、熱伝導率の計算の対象とす る時間範囲は、温度変化が安定して ln(t)あたりの温度上昇量(傾き a)が直線性を示す(定常温 度上昇)区間を選定する必要がある。この対象とする区間の直線性については、熱伝導率評価の 信頼性にも影響するため確認が必要な事項である。

メーカー/型式 中心波長 コア径(モードフィールド径)	クラッド径	被覆材質					
OFS/GS87100 1550 $\pm 2nm$ 10.5 $\pm 1\mu m$	$125\pm1\mu m$	アクリル樹脂					

表 5.3-1 連続 FBG ファイバケーブルの仕様



(a) FBG の構造

2 C R. Gruting周朔, 1. 27 温矿平, λ: Bragg波長(反射波長)



(b) 加熱式光ファイバケーブルの断面図

図 5.3-2 FBG の構造と加熱式光ファイバケーブルの断面図



図 5.3-3 温度変化と熱伝導率の関係

波長可変光源のレーザー光を光源ユニットより光ファイバに入射し、レイリー散乱反射を光干 渉計により測定、ファイバに加わったひずみと温度を分布的に測定する方法。

⁴ FBG:ファイバブラッググレーティング(Fiber Bragg Grating)

³ OFDR: 光ファイバ周波数領域反射法(Optical Frequency Domain Reflectometry )

光ファイバのコア部(図 5.3-2 参照)に周期的な幅で屈折率変化(グレーティング)が形成 されたもの。ひずみ・温度が加わるとグレーティングの幅、屈折率が変化するので、それを検知 することでひずみ・温度が計測できるとともに位置が特定される。

# (3) 試験条件及び試験方法

# (a) 試験条件

埋め戻し材には、埋め戻し材の転圧施工試験(第4章参照)で使用した材料(クニゲルV1:砕石:砕砂=15:51:34、含水比約9%)を使用した。図 5.3-4に示す土槽に埋め戻し材を締め固め、その乾燥密度は1.3、1.5、1.7及び1.9 Mg/m³の4条件とした。

土槽の側板と底板の材質は、断熱性の高い木製とし、天板はコンクリート製とした。土槽の内 空断面は 150 mm×150 mm、全長約 1,800 mm であり、4 条件の乾燥密度の埋め戻し材を設置 するために塩化ビニル板で土槽を4 区画に分割した。それぞれの区画の長さは、左右の土槽(あ るいは外気)からの温度の干渉区間を除いても十分な計測データが取得できる長さとして両端は 496 mm、中間は 396 mm とした。また、試験中に室温の変化が測定結果に及ぼす影響を抑制す るために土槽の外面は断熱材で覆った。試験中の土槽の外観および締固め後の埋め戻し材の状況 を図 5.3-5 に示す。



図 5.3-4 乾燥密度計測試験土槽寸法



ρ1 (1.3 g/cm³) ρ2 (1.5 g/cm³) ρ3 (1.7 g/cm³) ρ4 (1.9 g/cm³)

(b) 埋め戻し材設置後の状況

図 5.3-5 試験中の土槽の外観と埋め戻し材設置後の状況

### (b) 試験方法

埋め戻し材は4層段階に分けて土槽中に締め固めた。埋め戻し材を2層目まで締固めた後、加 熱式光ファイバケーブルを土槽中央に敷設した。その後、埋め戻し材を4層目まで締固めた。光 ファイバケーブルはOFDR 計測システム(レーザー光源ユニット、光干渉計及びデータ処理 PC で構成)、発熱銅線はヒーティング用直流電源装置にそれぞれ接続した。測定システムの概要を図 5.3-6 に示す。試験中は、FBG ケーブルの発熱用銅線に一定量の電流を印加してケーブル周辺の 埋め戻し材を加熱し、光ファイバにより温度の時間変化を測定した。

また、加熱式光ファイバケーブルとは別に、試験土槽およびレファレンス土槽(試験土槽とは 別に加熱しない土槽(図 5.3-7 参照))の中に白金測温抵抗体(Pt100)設置して、土槽中の埋め 戻し材の温度を測定した。Pt100の設置位置を図 5.3-8に示す。試験土槽中の測定位置①③⑤⑦ 及びレファレンス土槽中の⑩の温度データは、加熱開始前の埋め戻し材の初期温度(ベースライ ン温度)が十分に低下していることを確認するために使用した。測定位置②④⑥⑧の温度データ は、加熱開始後に土槽外縁部に熱が到達する時間を把握するために使用した。土槽外縁部の温度 が上昇し始めた時間以降は、土槽容器表面と外気の熱交換の影響が測定値に含まれるため、埋め 戻し材の熱伝導率の計算には用いなかった。また、室温の変化が小さいことを確認するために、 ⑨で室温を測定した。

測定システムが適切に動作していることを確認するための予備測定を実施した後、測定結果の 再現性を確認するために本測定を4回実施した。加熱電流は、予備測定を10.5 W/m(令和2年 度と同様)及び本測定を17 W/mとした。本測定では、温度上昇量が少ない場合に測定値に現れ るノイズの影響を避けるために加熱電流を大きくした。なお、電流を過剰に大きくすると高温に より光ファイバケーブルの被覆に変形や劣化が生じることと、高温による埋め戻し材中の水分移 動の影響が懸念されるため、17 W/mを上限とした。試験ケースを表 5.3-2 に示す。

各測定回における測定は、図 5.3・3 に示した温度上昇曲線において熱伝導率の算出に必要な十 分な長さの直線部分が確保され、大きな温度上昇速度が見られなくなったことを確認して終了す る。次回の測定は、試験体とケーブルの温度が室温に戻り、ベースライン温度に等しくなったこ とを確認しから開始する。今回の試験では、温度低下に確実性を期すために計測は1日1回とし、 全ての計測回は試験室内の温度が比較的安定する午前中に実施した。



図 5.3-6 乾燥密度の測定システム



土槽中心の非加熱時の レファレンス温度を測定

図 5.3-7 レファレンス土槽



図 5	5.3-8	ベースライン及び土槽外縁部の測定
-----	-------	------------------

測定回数	加熱条件(W/m)※	レファレンス土槽・室温測定	ベースライン測定		
予備測定	10.5	0	0		
1回目	17.0	0	0		
2回目	17.0	0	0		
3回目	17.0	0	0		
4回目	17.0	0	0		
※令和2年度の試験では加熱熱量は10W/m(令和3年度の予備試験と同様)であったが、					
熱伝導率の計算に必要な温度変化図(図 5.3-11 参照)の直線部をより明確とするため、加熱速					
度を上げるために 17 W/m とした。					

表 5.3-2	乾燥密度測定試験ケー	ース
---------	------------	----

### (4) 試験結果

# (a) 白金測温抵抗体によるベースライン及びレファレンス土槽の温度測定結果

本測定におけるベースライン及びレファレンス土槽の温度測定結果のうち、2回目と4回目の 温度と時間の関係を図 5.3-9に示す。本測定1回目~4回目におけるレファレンス土槽と加熱開 始前のベースラインの温度差は最大で 0.32°C であり、試験開始前に土槽中の埋め戻し材の温度 が十分に低下していることを確認した。また、加熱を開始して 30 分以降に土槽端部の温度が上 昇し始めたため、加熱開始後 30 分以降のデータは熱伝導率の算出に用いないこととした。



図 5.3-9 ベースライン、レファレンス土槽及び室温の測定結果

# (b) 光ファイバによる温度測定結果

加熱開始後に光ファイバで測定した埋め戻し材の温度上昇量の時間変化を図 5.3-10 に示す。 土槽中で4分割した区画の境界付近では、隣接する区画の温度の影響を受けており、また、仕切 り板の近傍では十分な締固めができず乾燥密度が一定になっていない可能性があった。そのため、 これらの境界付近の範囲を除外して、各測定区間(乾燥密度 1.3~1.9 Mg/cm³)における温度上 昇量の平均値と時間の関係を図 5.3-11 に示す。加熱式光ファイバケーブルが理想的な線熱源で あれば、加熱開始直後の温度上昇量は時間と直線的な関係になるが、熱源(光ファイバケーブル) 自体の温度上昇に熱エネルギーが消費されるため、初期の温度は非線形に上昇した。また約 30 分 経過後に、土槽端部の温度が上昇し始めると、熱エネルギーが土槽容器の外に放出されるため、 その後の温度上昇と時間の関係は直線的ではなくなる。土槽容器外縁の温度については、図 5.3-9 に示したベースライン測定②④⑥⑧の結果に示した通り、加熱開始後 30 分程度で上昇すること が確認できている。そのため、熱伝導率の算出に使用するデータ範囲は、温度上昇量と時間(対 数表示)の関係に直線性が見られる「熱伝導率算出範囲」(図 5.3-11 における加熱開始後 3 分か ら 30 分の範囲)とした。



図 5.3-10 全土槽の加熱時間ごとの試験土槽内の温度分布





(c) 熱伝導率の算出

図 5.3・3 に示した熱伝導率の計算式と加熱開始後 3 分~30 分の温度上昇量と時間の関係を用 いて埋め戻し材の各乾燥密度における熱伝導率を計算した結果を表 5.3・3 及び図 5.3・12 に示す。 今回の試験で対象としたベントナイトと砕石・砕砂の混合土である埋め戻し材においても、乾燥 密度は熱伝導率には相関あり、乾燥密度の増加にともない熱伝導率は大きくなった。また、埋め 戻し材の乾燥密度が大きくなると、熱伝導率のばらつきが大きくなる傾向が見られた。図 5.3・11 に示したように、埋め戻し材の乾燥密度が大きいほど温度上昇量と時間の関係を表す直線の傾き が小さくなるため、乾燥密度が低い条件に比べて温度の測定誤差が熱伝導率の算出結果に及ぼす 影響が大きくなった。

乾燥密度	測定回数				亚均
(Mg/cm ³ )	1回目	2回目	3回目	4回目	平均
1.3	0.270	0.255	0.252	0.262	0.260
1.5	0.345	0.333	0.323	0.311	0.328
1.7	0.516	0.475	0.460	0.431	0.470
1.9	0.887	0.779	0.782	0.705	0.788

表 5.3-3 埋め戻し材の熱伝導率の計算結果(W/mK)



#### (5) 埋め戻し材の乾燥密度の推定手法としての適用性評価及び今後の課題

#### (a) 測定値の品質確保

令和2年度に実施した要素試験(スクリュー工法で検討している低含水比の埋め戻し材を対象) では、測定回ごとの熱伝導率の算出値のばらつきが大きく、その信頼性を確保することが課題と なった。ばらつきが生じた原因は明確になっていないが、潜在的に原因となり得る複数の要因が 抽出されたことから、令和3年度はそれらへの対応を行ったうえで要素試験を実施した。ここで は、下記の潜在的な要因に対して、今回の要素試験で実施した品質確保の対策の効果と令和3年 度の測定値の信頼性について評価する。

#### (i) 前測定回の残熱の影響

令和2年度の要素試験では、埋め戻し材の加熱終了後、光ファイバケーブルでの測定温度が加 熱前の温度まで低下したことを確認してから、次の試験のための加熱を開始した。埋め戻し材を 加熱終了後の冷却期間においても、周囲の埋め戻し材と比較して加熱源である光ファイバケーブ ルの近傍の方が、温度が高い状態が維持されると考え、光ファイバケーブルで温度低下を確認す ることにより前回の試験の加熱の影響を回避できると考えた。しかしながら、図 5.3-2(b)に示し たように光ファイバの周囲には発熱用銅線が配置されており、銅の高い熱伝導率により埋め戻し 材よりも光ファイバケーブルの方が早く温度が低下する可能性も考えられる。次回測定時に埋め 戻し材の内部に熱が残っている場合には、光ファイバケーブルの温度上昇が早まり、見かけ上の 熱伝導率が小さく算出されることになる。

令和3年度は、この影響を排除するために、試験を1日1回として冷却時間を十分に確保した。さらに、図5.3-9に例示したようなベースライン温度計測を実施し、光ファイバケーブル近傍及び土槽外縁部においても十分に温度が低下し、さらに土槽中央部と外縁部の温度差が小さい事を確認した。令和3年度の4回の試験結果では、この対応策により概ねベースラインに近い温度測定値を得ることができた。

#### (ii) 室温の影響

令和2年度に実施した要素試験では、室温が比較的に安定した室内で実施したことから、室温 の変化が埋め戻し材の温度に及ぼす影響は考慮しなかった。しかし、実際には、試験室において も室温の日較差及び径日変化があり、これらの違いが埋め戻し材の温度上昇に影響し、結果として熱伝導率の算出結果に影響した可能性も考えられる。

令和3年度は、前述のベースラインの測定に加えて、試験土槽とは独立かつ加熱しないレファレンス土槽を設置し、室温が埋め戻し材の温度に与える影響が生じた場合は、その影響を評価に考慮することとした。図 5.3-9 に示すように、各測定回においては、室温と埋め戻し材の温度には最大で1℃程度の差が見られるものの、レファレンス土槽を含む土槽の中心と試験土槽外縁部及び各土槽間の初期温度の差は小さく、試験中に顕著な変化も観られなかったことから、測定回間の比較の際にも、室温の影響を考慮する必要はないと判断した。

なお、図 5.3-9 に示したグラフのうち、第4回目の室温(黄線)は、第2回目と比較して1℃ 程度低いが、試験土槽及びレファレンス土槽の温度への影響は軽微であった。これは、土槽を断 熱材で包んだ効果と考えられる。

# (iii) 測定回数

令和2年度の要素試験では、2回の温度測定を行ったが、2回の測定値には比較的大きな差が あり測定結果の妥当性が確認できなかった。そのため、令和3年度は測定回数を4回(予備計測 は除く)とし、データをより多く収集することで、測定値の信頼性を高められるようにした。室 内で実施する要素試験の場合は、室温が一定になっていることや土槽の温度が十分に低下したこ とを確認することで埋め戻し材の熱伝導率の算出誤差を低減することができると考えられる。一 方で、地上施設や地下施設における施工試験で埋め戻し材の乾燥密度を推定するためには、その 環境における事前の要素試験で環境温度の影響や加熱後の適切な冷却時間を複数回の測定を実施 して確認したうえで、熱伝導率の算出結果の信頼性を確保することが必要である。

### (b) 埋め戻しの乾燥密度推定への適用性の評価

#### (i) 乾燥密度の推定における測定感度

令和2年度に実施した含水比3%の埋め戻し材の乾燥密度の推定に加えて、令和3年度は、よ り高い含水比の埋め戻し材への適用性を確認するために、撒き出し転圧工法で検討されている埋 め戻し材(含水比約9%、乾燥密度は4段階)を対象に、要素試験を実施した。図5.3-10及び図 5.3-11に示したように、含水比が約9%の埋め戻し材における温度上昇量及び上昇速度(及び結 果としての熱伝導率)は、乾燥密度0.2 Mg/m³の違いでも明確な差が生じることがわかった。令 和2年度に実施した低含水比の埋め戻し材を対象とした要素試験においても同様の傾向が見られ た。とくに、埋め戻し材の乾燥密度が高い範囲では熱伝導率の変化量が大きいため、本手法によ り実用的に乾燥密度を推定できると考えられる。

## (ii) 隣接領域の影響

令和3年度の要素試験では、土槽の各区画のうち、中心部付近の最大約30cmが隣接区画の温 度変化の影響が小さいと考えて、その範囲のデータを用いて熱伝導率を算出した。図5.3-11に示 したように測定値は埋め戻し材の乾燥密度の違いを捉えていたことから、このデータ処理対象区 間長の考え方は、概ね妥当であったと考えられる。その一方で、規模の大きな埋め戻し施工試験 では乾燥密度が連続的に変化することから、熱伝導解析などにより光ファイバケーブル沿いに乾 燥密度が不均一な場での測定についての妥当性などを確認しておく必要がある。

# (c) 今後の課題

# (i) 乾燥密度の推定範囲の確認

加熱式光ファイバケーブルを用いて、一定の乾燥密度で埋め戻しされた範囲に対して、温度の 測定値から乾燥密度を推定する見通しが得られた。しかし、例えば転圧工法では、施工した範囲 の乾燥密度は一定ではなく、連続的に変化すると考えられる。加熱式光ファイバを用いた乾燥密 度の推定は、光ファイバケーブルに沿った評価区間長/L ごとの熱伝導率を連続的に算出し、ケ ーブルの周囲の乾燥密度の分布を推定することになる。海外ではこのような適用事例が報告され ており(Sakaki ほか, 2018)、粒状ベントナイトを対象とした試験ではケーブルを中心とする直 径 10 cm 程度が乾燥密度の測定範囲であることが確認されている(榊ほか, 2017)。これらを参考 にして、埋め戻し材の乾燥密度の測定範囲を把握するなど、乾燥密度分布を推定する手法を確認 する必要がある。

#### (ii) 埋め戻し施工試験への適用を想定したデータの整備

埋め戻し施工試験では大量の埋め戻し材を製造することになり、材料製造時の含水比にはある 程度のばらつきが想定される。埋め戻し材の熱伝導率は、乾燥密度だけでなく含水比によっても 変化するため、埋め戻し施工試験に本手法を適用するためには、含水比のばらつきを考慮したう えで乾燥密度を推定する方法について検討する必要がある。これらを踏まえ、埋め戻し施工試験 への本手法の適用について、次のような手順による進め方を提案する。

- ・ 埋め戻し材製造時の含水比のばらつきを把握したうえで、含水比と乾燥密度をパラメータとして埋め戻し材の熱伝導率を測定する。埋め戻し材の熱伝導率は、JIS規格などで規定された方法で測定することもできると考えられる。この結果、埋め戻し材の含水比ごとに図5.3-12のような乾燥密度-熱伝導率の関係が得られる。
- 施工試験中の埋め戻し材に加熱式光ファイバケーブルを設置し、施工試験の途中または終了後に埋め戻し材の加熱及び温度測定を実施してケーブル沿いの埋め戻し材の熱伝導率を算出する。事前に取得した乾燥密度一熱伝導率の関係からケーブル周囲の乾燥密度分布を推定する。この時、図 5.3-13に示すように埋め戻し材の乾燥密度が一定ならば、含水比の増加にともない熱伝導率は増加するため、材料製造時に想定される含水比の最低値を用いて乾燥密度を推定することも考えられる。

さらに、異なる含水比の埋め戻し材に対する測定データを幅広く整備しておくことにより、埋 め戻し施工後の熱伝導率の変化から埋め戻し材の飽和度のおおよその変化を把握することもでき、 浸潤挙動を把握するためにも利用できると考えられる。



図 5.3-13 乾燥密度-熱伝導率の比較

# 5.3.2 埋め戻し天端の隙間検知のための測定技術の高度化

### (1) 背景及び目的

埋め戻し材には、坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないことが求められており、低透 水性に係る要件が設定されている(NUMO,2021)。他方、埋め戻し材の施工後に、自重による沈 下や地下水の浸潤にともなう圧密による沈下により埋め戻し材と坑道アーチ部の間に空隙が発生 する可能性が懸念されている。事前の施工試験等で坑道の天端に隙間が生じることが確認される ような場合には、埋め戻し材の設計にフィードバックして、埋め戻し材上部のベントナイト混合 率を増加させるなどの対応により、低透水性に影響を及ぼす可能性のある隙間の発生・維持を防 止することができる。

本項では、施工した埋め戻し材と坑道界面の隙間を検知するための技術の確立を目的として、 加熱式光ファイバケーブル及びケーブル TDR を用いた要素試験を実施する。これらの測定方法 では、ケーブル自体がセンサとして機能するため、点測定ではなくケーブル線に沿って空間的に 連続したデータの取得が可能である。図 5.3-14 に埋め戻し材の施工境界における隙間検知のた めの測定技術の開発フローを示す。令和2年度までに、これらの測定方法により温度または抵抗 値の変化からケーブルに沿った隙間のおおよその長さと位置が推定可能なことを示した。令和3 年度は、隙間の深さ方向(隙間の大きさ)の検知能力を把握するために、上下2段に設置したケ ーブルを用いて、埋め戻し材と坑道壁面を模擬したコンクリート板との間に3段階の隙間を設定 した要素試験を実施した。



図 5.3-14 埋め戻し隙間検知のための測定技術の開発フロー

# (2) 加熱式光ファイバ及びケーブル TDR による空隙の測定原理

加熱式光ファイバについては、5.3.1(2)に記載した測定原理と同様の方法であり、FBG ケーブ ルの発熱用銅線に一定量の電流を印加して発熱させ、光ファイバにより測定した温度の時間変化 の応答の違いから空隙の位置を把握する。

ケーブル TDR では、図 5.3-15 に示す 300 Q 平行フィーダ線を使用し、パルス波をケーブルに 印加して、電気伝導度の異なる面で反射して戻る波をオシロスコープで観測する。このときに、 ケーブル周りの材料の比誘電率により波の速度が変化する(誘電率が高いほど速度は低下する) ことから、反射波を観測し、周波数領域の電圧値として得られるものを時間領域に変換すること によりケーブルに接する材料のケーブル延長方向の比誘電率の分布を求めることができる。ケー ブルの延長方向の距離については、測定値が時間-電圧値で表示されるため、時間に速度を乗じ ることにより把握することができる。例えば、空気は誘電率が低いことから、ケーブルが露出し ている場合は、パルス波の示す電圧及び速度が大きくなる。誘電率が高い(密度が高い、水分量 が多い)物質がケーブルの周囲にある場合には、電圧及び速度が小さくなり、その差から隙間の 存在を検知することができる。





# (3) 試験条件及び試験方法

### (a) 試験条件

試験で用いた試験土槽の構造寸法、隙間と埋め戻し材の関係を図 5.3-16 に、土槽外観・締固め 後の埋め戻し材の写真を図 5.3-17 に示す。計測の対象とする埋め戻し材料の配合については、 令和2年度に実施した試験結果と比較するため、同じ材料(配合(質量比)_ベントナイト(クニ ゲル V1):ベントナイト(クニゲル GX):砕石:砕砂=7:8:35:50、含水比_約 3%)を対象と した。また、計測する埋め戻し材の乾燥密度は、締固めにより、令和2年度の試験における最大 密度である 1.88Mg/cm³となるように調整した。

検知の対象とする空隙は、坑道壁面から埋め戻し材までの空隙量を100mm、50mm、25mm 及び0mm(空隙無し)の4段階で設定し、それを検知するためのケーブルは、坑道アーチ及び 壁面を模擬したコンクリート板の内面(上段ケーブル)及び50mm離れた位置(下段ケーブル) それぞれに、加熱式光ファイバケーブル及びケーブル TDRを1本ずつ平行に同断面に設置した (合計4本のケーブルを使用)。土槽断面内の位置としては、図 5.3-16に示すように、加熱式光

ファイバケーブルは土槽中心、ケーブル TDR は中心より 40 mm ずらして設置した。

埋め戻し材を充填する土槽の材質は、天板は坑道覆工を模擬したコンクリート製、側板・底板 は、断熱性の高い木製、仕切り板は熱伝導率の低い塩ビ製とした。土槽は、全長 1,800 mm の土 槽を 900 mm ずつの 2 区画に分割し、それぞれの区画において、計測時に土槽外気及び隣接土槽 の温度影響を受ける端部 200 mm については、計測は行うが解析の対象としない区間とした。試 験室の気温変化の土槽内温度への影響を抑制するために外面を断熱材で覆った。


図 5.3-16 隙間検知測定試験の土槽寸法



(a) 試験ケース1(左:区画 A-空隙 100 mm、右:区画 B-空隙 50 mm)



(b) 試験ケース2(左:区画 C-空隙25 mm、右:区画 D-空隙0 mm))
 図 5.3-17 土槽外観及び締固め後の埋め戻し材(上面)

### (b) 試験方法

計測システムの概要を図 5.3-18 に示す。加熱式光ファイバケーブルの計測システムは、5.3.1 項と同様に、OFDR 計測システムを使用した。光ファイバケーブルの発熱用銅線に一定量の電流 を印加することで周囲の材料を加熱し、光ファイバで温度の時間変化を測定した。ケーブル TDR については、図 5.3-18 に示すように前述の並行フィーダ線の片端にパルス波を発生・分析する TDR 計測器 (パルスの発生と反射波の分析の両方の機能を有する)を使用して、時間領域に変換 された TDR ケーブルの電圧を測定した。

前出の図 5.3-16 に示したように、隙間の大きさが異なる 2 ケースの試験を設定し、光ファイ バケーブル及びケーブル TDR とも 4 回の測定を実施した。温度測定の信頼性を向上させるため に、試験期間をとおして、①②ベースライン温度、③試験室温及び④レファレンス土槽温度の測 定も行った。光ファイバケーブルの加熱電流は 11.7 W/m とし、加熱時間は 30 分とした。1 ケー スの加熱試験終了後の冷却時間は 6 時間以上とし、各試験の開始前にベースラインの温度を確認 して土槽内温度が安定していることを確認した。

試験では、加熱式光ファイバケーブルの温度測定結果から熱伝導率を計算し、ケーブル周囲の 密度の状況から、ケーブル周りの隙間の有無を推定した。空気は埋め戻し材と比較して熱伝導率 が小さいことから、気中のケーブルは温度上昇量が大きくなる。ケーブル TDR については、前 述のようにケーブル周りの誘電率を測定することにより、その分布からケーブル周囲の状況を推 定した。空気は埋め戻し材と比較して誘電率が低い(絶縁性が高い)ことから、パルス波の電圧 低下が小さく、気中のケーブルは高い電圧と速度を測定することとなる。



### (4) 試験結果

### (a) 光ファイバケーブルによる温度測定結果

全4回の測定のうち、試験ケース1及びケース2それぞれの2回目の測定における各土槽の温度の変化を図 5.3-19 に、土槽区画温度の平均値の経時変化を上段ケーブル及び下段ケーブル相互に比較したものを図 5.3-20 に示す(計測1回目及び3・4回目の試験結果は付録6参照)。また、図 5.3-3 に示した計算式と、図 5.3-20 に示す温度変化の傾きを用いて各計測区画の熱伝導率を計算した結果を表 5.3-4 に示す。

全体的な傾向として、気中にケーブルがある場合(上段ケーブルの区画 A・B・C、下段ケーブルの A) は温度上昇量が大きく、ケーブルが埋め戻し材に埋まる(かぶりが生じる)場合には温度上昇が抑制された。空気と埋め戻し材に触れる場合(下段ケーブルの B)の温度上昇量はその中間であった。

上段ケーブルについては、埋め戻し材に接する区画 D の温度が最も低かった。また、空隙量の 異なる区画 A と C は概ね同じ温度変化を示しており、さらに区画 B の方が区画 A・C に比べて 温度上昇量が大きかったことから、空隙量に対して加熱式光ファイバの感度は低いと考えられる。 なお、区画 B と区画 A・C の温度が高くなる結果となったのは、ケーブルとコンクリート製蓋と の接触状況が影響していることが原因であると推察される。

下段ケーブルについては、区画 B のように埋め戻し材に埋まらずに表面に接するだけの場合で も、気中に設置された区画 A と比べて温度上昇量は抑制されていることがわかる。ただし、区画 B と区画 A 及び C との比較で分かるように、区画 B の温度は区画 C (埋め戻し材かぶり)より も区画 A (気中)に近い値を示しており、埋め戻し材に接するケースでは埋め戻し材に熱が伝わ る効果よりも、空気の断熱性の影響の方が大きい結果となった。また、区画 C と D の比較では、 かぶり深さの違い (2.5 cm 及び 5.0 cm)は温度変化に及ぼす影響が小さいことがわかった。



図 5.3-19 加熱式光ファイバ計測による各土槽の加熱時間と温度変化



図 5.3-20 加熱式光ファイバ計測による各土槽平均温度の時間変化

			+ 計測回					
ケーブル 位置	ケース	「槽区間	1回目	2回目	3回目	4回目	平均	光ファイバ ケーブルの状態
上印	1	А	0.493	0.515	0.558	0.603	0.542	気中 (10 cm)
「レクリート	1	В	0.415	0.450	0.464	0.513	0.461	気中 (5 cm)
板密着)	0	С	0.498	0.517	0.602	0.534	0.538	気中 (2.5 cm)
	2	D	0.591	0.575	0.700	0.570	0.609	埋め戻し材密着
	1	А	0.278	0.271	0.270	0.283	0.276	気中
下段		В	0.275	0.266	0.260	0.284	0.271	埋め戻し材接触
(コンクリート 板 5cm 下)	2	С	0.507	0.478	0.501	0.429	0.479	2.5 cm かぶり
		D	0.609	0.592	0.610	0.538	0.587	5 cm かぶり

表 5.3-4 隙間検知試験 - 熱伝導率計算結果 (W/mK)

### (b) ケーブル TDR による電圧測定結果

全4回の測定のうち、試験ケース1及びケース2それぞれの2回目の計測における各土槽の上 段・下段ケーブルそれぞれの電圧値と伝送時間(片道に換算)との関係を図 5.3-24 に示す(計測 1回目及び3・4回目の試験結果は付録6参照)。

全体的な傾向として、気中にケーブルがある場合は電圧値が高く、伝送時間の短縮(つまり伝送速度の低下)が見られ、逆にケーブルが埋め戻し材に埋まっている場合には、電圧値が低く、 伝送時間の延伸(伝送速度の増加)が見られた。この結果は、TDRセンサ周囲の電気伝導度を測定する評価方法(空気のように伝導度が低い物体に囲まれている場合は、高い電圧を維持しつつ速い速度でパルスが伝達し、水分の多い土壌などでは逆となる)と整合する。また、上段の区画 A~C、下段の区画 Bのデータについて不安定な波形が観測された。このいずれの区画にも共通することは、空気以外の物質(コンクリート製蓋あるいは埋め戻し材)に埋まらずに接していることであり、接触状況がデータの安定性に影響を及ぼしたと考えられる。

上段ケーブル(コンクリート蓋面に設置)で隙間の深さが異なる区画 A~C については、概ね 同様の電圧レベルと伝送時間が測定されており、隙間幅の違いは測定値に有意な影響を与えなか った。埋め戻し材と接触する(隙間が無い)区画 D では、他の3区画と比較して電圧値の低下が 測定されており、埋め戻し材との接触の影響が表れていると考えられる。下段ケーブル(蓋の下 方5cm に設置)において、埋め戻し材表面への接触の有無について区画 A 及び B の測定値に明 確な違いは見られなかった。また、区画 C 及び D の電圧値と伝送速度は概ね同様の値を示して おり、埋め戻し材のかぶり深さの影響は小さかった。

### (5) 坑道界面の隙間検知に対する適用性の評価

埋め戻し材と坑道界面の隙間を対象としたケーブル型センサによる測定の概念を図 5.3-21 に 示す。埋め戻し材の施工結果として、坑道の覆工近傍にこのような空隙が不規則に分布する可能 性がある。令和 2 年度の試験では、加熱式光ファイバケーブル及びケーブル TDR に沿って隙間 (25、50、100 cm)が存在する状況で測定を行い、隙間幅(図中の a や d)を測定できることを 確認した。令和 3 年度の試験では、沈下量(図中の c1 や c2)の測定可能性について検討した。



図 5.3-21 2 段配置の加熱式光ケーブルによる隙間計測の概念



図 5.3-22 空隙の厚さと熱伝導率の関係

# (a) ケーブルの設置位置による計測データのばらつきに関する検討

加熱式光ファイバを用いた測定結果から、空隙の厚さと熱伝導率との関係を図 5.3・22 に整理 した。加熱式光ファイバケーブルの各区画における 1~4 回の温度測定結果 k から求めた熱伝導 率の値は、下段ケーブルと比較して、上段ケーブルにおいてばらつきがやや大きかった。この原 因は、ケーブルとコンクリート製蓋との接触状態がケーブルの熱膨張に影響し、両端で固定され ているケーブルが土槽内で移動したために測定回ごとに熱伝導率が変化したと推定される。また、 上段ケーブルの区画 A の値が区画 B よりも大きいことについても、ケーブルとコンクリート製 蓋との接触状態が異なることによる影響が表れているものと考えられる(区画 A の方が区画 B よ りも密着性が高い)。これと比較して、下段ケーブルの値のばらつきは小さかった。これは、下段 ケーブルの区画 A は気中であり、さらに区画 B~D では埋め戻し材との接触状態が良好であった ためと考えられる。ケーブル TDR については図 5.3・24 で示した通り、コンクリートに接触する 上段ケーブル及び埋め戻し材に接触する下段ケーブルの区画 B のデータにおいて不安定な波形 が見られ、ケーブルの接触状態に対してより敏感であることが分かった。

以上のことから、測定結果に対する信頼性向上のためには、ケーブルと測定対象が均質に密着 した接触した状態にすることが重要であり、ケーブルの設置時にはこれらに留意して施工する必 要がある。

### (b) 埋め戻し天端の隙間検知への適用性の評価

加熱式光ファイバの測定結果について、下段ケーブルの区画 A 及び B で熱伝導率には差が見 られず、空気に触れているかどうか、すなわち空隙があるかどうかの判定が可能であることがわ かった。ケーブル TDR については、上段ケーブルの区画 A~C と下段ケーブルの区画 A・B は 他の区画に比べて電圧値が高く、またパルスの伝送時間が短縮しているとから、電気伝導度の低 い空気と接触している、すなわち空隙であると判定できることが分かった。

以上の結果から、加熱式光ファイバ及びケーブル TDR を用いることにより空隙の存在を検知 することができると考えられる。また、覆エコンクリート下の隙間幅 a・d (図 5.3-21 参照)の 定量的な把握も可能と考えられる。加熱式光ファイバの測定方法(レイリー後方散乱を利用する 方法、以下、レイリー法)は、位置検知能力が 1 cm 以下であることから、1~数 cm 程度の隙間 幅(及びその位置)の定量的な検知も可能と考えられる。

## (c) 沈下量測定への適用性の評価

加熱式光ファイバの測定結果では、上段ケーブルから得られた熱伝導率と隙間の深さに感度が ある可能性が示された。隙間の定量化という観点からは、空隙の厚さが5 cm 以上になると熱伝 導率に変化はみられなかったが、空隙の厚さが2.5 cm では5 cm と0 cm の中間的な熱伝導率の 値が得られたことで、5 cm 程度以下の隙間であればその大きさを把握できる可能性がある。ケー ブルの熱が空気の対流あるいはケーブルからの輻射により、2.5 cm 離れた埋め戻し材にある程度 の熱が伝達された結果と考えられる。同様の結果は下段ケーブルでより顕著であり、空隙0 cm か らケーブルが露出する空隙5 cm までの沈下量 c1 を定量的に把握できる可能性が示された。ただ し、埋め戻し材に接触している区画 B の状態と気中にある区画 A との差異が認められなかった ことから、ケーブルの設置位置よりも深い空隙(沈下量 c2)の計測は困難であることがわかった。 これは空気の断熱性が大きく、それに比較して埋め戻し材への熱伝導効果が小さいためと考えら れる。ケーブル TDR は、上段ケーブルの A~C 及び下段の C・D から分かるように、隙間の深 さやかぶりの厚さに対して感度が見られず、沈下量の定量的な測定は困難であった。

#### (6) 埋め戻し材の施工試験等における測定への適用方法と課題

#### (a) 適用する際の留意点と対策

5.3.1 及び 5.3.2 で示した埋め戻し材の乾燥密度及び隙間検知の計測技術について、実規模実証 試験へ適用する際の留意点と対策について以下に整理する。

#### (i) 埋め戻し材に設置する光ファイバケーブルの健全性の確保

土木や建設分野などにおける施工中の光ファイバセンサの利用は限定的であるが、対象物が完成した後に設置する場合でも、直接、ケーブルに荷重や衝撃を与えない設置方法が採用される。 他方、ここで期待する埋め戻し材の乾燥密度の推定のためには、埋め戻し材の中にケーブルを設置する必要があるため、埋め戻し施工中に埋設することとなる。そのため、撒き出し・転圧工法では転圧重機の荷重や振動、吹付け工法では吹付け圧、スクリュー工法では充填圧や埋め戻し材の流動圧などが作用した場合のケーブルの健全性の確保が必要となる。

これを確認するために、撒き出し・転圧工法で使用した小型振動ローラーと埋め戻し材を用いた転圧荷重に対する耐力確認試験を行った。転圧は、埋め戻し材の覆土がないケース(転圧後の埋め戻し材の上にケーブルを直接設置し、小型振動ローラーで直接転圧)と覆土があるケース(ケーブルの上に撒きだし25cmの覆土の上から転圧)の両方で実施した。なお、試験対象としたケーブルは、後述の埋め戻し天端の隙間検知で使用するケーブルを含む、加熱式光ファイバ、300Ω

平行フィーダならびに比較のための同軸ケーブル(3C-2V及び1.5D-2V)の4種類とした。







(c) 覆土なしでの転圧後の加熱式光ケーブル(d) ケーブル設置状況図 5.3-23 計測ケーブル耐力確認試験

耐力確認試験の結果を図 5.3-23 に示す。なお、試験後のケーブルの写真は付録6 に掲載した。

- ・ 覆土なしの転圧では、光ファイバの保護管が潰れる箇所があった。光ファイバ素線の断線 は避けられたが、荷重増など条件が変われば断線する危険性があると判断された。
- ・ 同じく覆土なしの転圧で、同軸ケーブル(1.5D-2V)が複数個所潰れて、通電結果ではその 場所での微小なパルスが観測されたが、センサケーブルとして使用するレベルでは、この 影響は小さかった。
- ・ 覆土ありの転圧では、どのケーブルも目立った損傷及び通電抵抗への影響は見られなかった。

以上のことから、これらのケーブルについては、覆土の無い状態での転圧を行うことは望まし くないが、覆土が撒きだし厚 25 cm 程度確保できれば、測定に影響するような健全性の低下には 至らないことがわかった。ただし、今回は小型振動ローラーを用いた試験の結果であるため、転 圧機械が異なる場合には別途試験で確認する必要である。したがって、模擬坑道での測定では、 ケーブル敷設後に必ず覆土を行ってから転圧を行うこと、撒き出し時に重機などでケーブルを踏 まないことなどを考慮した試験計画とする必要がある。

		ケーブルの種類				
確認	覆土	加熱式光ファイ	300Ω平行フィー	同軸ケーブル	同軸ケーブル	
方法	有無	バケーブル	ダ	(3C-2V)	(1.5D-2V)	
	なし	ステンレス管の	目立った損傷は無	目立った損傷は無	イか正海わ	
外観		へこみ、被覆損傷	い	<i>V</i>		
確認	あり	目立った損傷は	目立った損傷は無	目立った損傷は無	目立った損傷は無	
		無い	V)	V)	V)	
通電	なし	- (非導電性のた め実施せず)	波形に影響は見ら れない	波形に影響は見ら れない	潰れた箇所での微 小な反射パルス観 測	
抵抗	あり	- (非導電性のた め実施せず)	波形に影響は見ら れない	波形に影響は見ら れない	波形に影響は見ら れない	

表 5.3-5 ケーブルの耐力確認試験結果

### (ii) ケーブル敷設密度と測定方法

ケーブル型のセンサを採用する利点として、測定対象に対して連続的に線状の測定が可能なこ とが挙げられる。加熱式光ファイバケーブルのレイリー法では、計測の位置精度が1 cm 以下で あることから、詳細な乾燥密度分布を推定することが可能である。したがって、ケーブル配置方 法への位置精度からの制約はないため、ケーブル間の温度干渉の可能性などを考慮したうえで、 品質管理上必要な情報を得られるだけの設置密度としなければならない。

また、加熱式光ファイバケーブルによる温度測定においては、複数回の繰り返し測定を行うこ と、連続して測定する場合には適切な冷却期間を確保する必要があることに留意する必要がある。 測定区間をより長くしたい場合は、今回採用したレイリー法(測定延長は最大で 40 m 程度)で はなく、ラマン法(位置精度は1m程度に低下するが、測定延長は数百 m~km 単位まで拡大可 能)の採用も考えられる。この埋め戻し材の品質管理上の密度測定は、埋め戻し施工法の特性や 規制対応などの観点から、有益な情報を提供できる可能性がある。

# (iii) ケーブル配置と測定のタイミング

ケーブルあるいは測定システムのトラブルへの対応策などの観点から、測定ラインを2系統以 上に分割し、測定はそれらと光計測システムとの接続を適宜つなぎ変えて実施するのが良いと考 えられる。ケーブルの配置と測定のタイミングは、施工法と試験の目的によって異なる。撒き出 し・転圧工法であれば、設置後第一層〜最終層の各層ごとに設置し、各層の転圧直後に測定する ことで、層ごとの乾燥密度のほか、層を重ねることによる密度の変化等の確認ができる。

# (b) 試験計画策定上の課題

実規模試験に適用する場合には次のような課題に対し、必要に応じた対策を講じる必要がある。 ケーブルの健全性確保

- 重機の重量及び埋め戻し材中の砕石、吹付け圧(特に砕石の衝突)による損傷が懸念事項と なる。施工者と十分な調整を行い、ケーブルの状態を目視で常に確認するとともに、通電あ るいは光パルスなどによる健全性の確認を行う。
- ・ 含水比の変化

長期間の測定では埋め戻し材の乾燥により含水比が変化する可能性にも留意して測定値の評価を行う。

隙間の発生、増加

TDRによる測定では、アーチ部における隙間の発生あるいは残存を測定することが目的となる。確実に検知するためには、設置時のコンクリート面との密着性を十分に確保するとともに、測定にあたっては不均質な密着に伴う測定ノイズの識別にも十分に注意する。



### 5.3.3 埋め戻し材の膨潤により発生する圧力の測定技術

### (1) 背景及び目的

埋め戻し材の施工後に自重や圧密による坑道天端の隙間が発生する可能性がある場合には、例 えば坑道天端付近に施工する埋め戻し材のベントナイト混合率を増加させるなどの設計対応を行 うことで、地下水の浸潤にともない隙間を閉塞させることができる。坑道天端付近に施工する埋 め戻し材のベントナイト混合率は、施工試験で検知された隙間を模擬した室内試験等で膨潤によ り発生する圧力を測定し、別途、室内試験で取得した埋め戻し材の膨潤に伴う圧力と乾燥密度の 関係から設定することができると考えられる。このように、埋め戻し材の品質や性能を確認する ために、膨潤による圧力を指標とすることは諸外国でも見られる。SKBでは埋め戻し材に坑道内 の移流輸送の制限を安全機能として求めており、これを満たす透水係数を保証するために規定し た膨潤圧を満たすことを要件としている(Posiva and SKB, 2017)。埋め戻し材施工後の変遷挙 動である隙間の閉塞の有無について、確実に閉塞することを確認或いは保証することが性能確認 プログラムなどに含まれる可能性がある。

埋め戻し材の膨潤により発生する圧力およびその分布状況を把握するための計測技術に関して 先行研究の調査・分析を実施し、連続的な分布測定が可能かつセンサの埋設数量を必要最低限に 抑制できることが期待できる光ファイバセンサを選定した。さらに、2本の光ファイバの被覆条 件の違いによるひずみ計測値の差分から、温度などの成分を除去して圧力成分のみを抽出する計 測方法が試験的に検討されている(原環センター,2020)。本研究では、この技術を用いて埋め戻 し材の膨潤にともなう圧力測定に取り組んでいる。このような先進的な研究では、要素試験によ るメカニズム解明等の基礎性能の確認および計測方法の構築が必要であり、図 5.3-25 の開発フ ローに沿って進めている。

令和2年度は要素試験として、機械的に光ファイバケーブルの上下方向に荷重を加えたところ、 光ファイバの出力値と圧力に相関があることを確認した。令和3年度は、光ファイバによる圧力 の測定メカニズムを解明するために、水圧による等方的な圧力を光ファイバケーブルに負荷する 要素試験(以下、水圧式加圧試験)および水圧式加圧試験の再現解析を実施し、圧力と光ファイ バケーブルに生じるひずみの関係を調べた。また、埋め戻し材の膨潤により発生する圧力の測定 に向けて、光ファイバケーブルの配置間隔を把握するための解析を実施した。



### (2) 光ファイバセンサの測定原理と圧力測定方法

分布型光ファイバセンサは、光ファイバ自体がセンサとして機能し、温度やひび割れ等の発生 によるひずみ等を光ファイバケーブルに沿った分布として測定することができるセンサである (保立・村山, 2012)。分布型光ファイバセンサでは、光ファイバ内で発生した光の特性(散乱光、

複屈折、光の損失)から必要な情報を抽出する必要があり(Schenato, 2020)、本研究では計測方 法がシンプルかつ市販の測定機器を適用できる汎用性の観点、ならびに精度の高さが期待できる ことから、散乱光のうちレイリー散乱光を用いた TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry)方式を選択した(原子力機構・原環センター, 2021)。

分布型光ファイバセンサの出力には、①設置状況によって光ファイバ自体が受けるひずみ、② 温度によるひずみ、③圧力によるひずみが含まれる。①~③のひずみと周波数シフトは、式 5.3-1 で表される。ここで、 $\Delta \nu$ は周波数シフト、 $C_{\Gamma}$ は温度換算定数、 $C_{\epsilon}$ はひずみ換算定数、 $C_{p}$ は圧力 換算定数、 $\Delta T$ は温度の変化量、 $\Delta \epsilon$ はひずみの変化量、 $\Delta P$ は圧力の変化量を示す。 $C_{\Gamma}$ 、 $C_{\epsilon}$ 、  $C_{p}$ は、光ファイバセンサごとに与えられる係数であり、事前の室内試験等で求めることができる。

埋め戻し材の膨潤により発生する圧力を測定するためには、③圧力によるひずみのみを抽出す る必要があるが、①設置状況によって光ファイバ自体が受けるひずみ、②温度によるひずみと比 較して③圧力によるひずみの値は小さいことが知られている。また、分布型光ファイバセンサを 使った圧力測定では、光ファイバのコア部(石英ガラス部)のみと比べて、コア部の被覆材の材 質や厚さによって応答感度が変化することが知られている(例えば、Budiansky et al., 1979)。 これらの特性を考慮すれば、被覆条件の異なる2本の光ファイバセンサを用いることで圧力成分 のみを抽出できると考えられる。つまり、①設置状況によって光ファイバ自体が受けるひずみと ②温度によるひずみは被覆条件によらず一定であるため、2本の光ファイバの出力の差分を取る ことにより、①と②で発生するひずみを除去して圧力に起因するひずみのみを抽出することがで きると考えられる(図 5.3-26)。



図 5.3-26 被覆条件の異なる光ファイバの周波数シフトの差分

# (3) 光ファイバによる圧力計測メカニズムの検討

# (a) 水圧式加圧試験による圧力測定

被覆条件の異なる光ファイバケーブルに圧力を段階的に負荷して光ファイバに生じる周波数シ フトからひずみを求めた。加圧試験では、水圧を調整することにより光ファイバケーブルに均一 な圧力を負荷した。

### (i) 水圧式加圧試験装置

使用した試験装置の概略図及び外観を図 5.3-27 に示す。耐圧容器は、内径 110 mm、高さ 1,000 mm の円筒型とした。耐圧容器の上蓋に設けた貫通孔から光ファイバケーブルを通して容器内に ケーブルを設置した。光ファイバケーブルを通した後の貫通孔の隙間は、止水のためにエポキシ 樹脂系の接着剤を充填した。耐圧容器内の水圧の調整は、シリンジポンプで制御し、シリンジポ ンプ吐出口付近に設置したデジタル圧力センサと耐圧容器の下蓋部に設置した圧力ゲージで耐圧 容器内の水圧を測定した。





# (ii) 試験条件

試験に用いた光ファイバケーブルの仕様を表 5.3-6 に示す。光ファイバにはシングルモードフ ァイバを用い、そのクラッド直径は 0.125 mm である。クラッドを被覆する材質や厚さの違いに より出力されるひずみの大きさへの影響を把握するため、被覆を含めた外径は 0.15~0.90 mm、 被覆素材はポリイミド樹脂と UV 硬化樹脂を使用した。

光ファイバケーブルに負荷する水圧は、最大 1.0 MPa として、0.1 MPa 間隔で測定を行った。 また、測定結果の再現性を確認するために、水圧の昇圧/降圧サイクルで2回の測定を実施した。

光ファイバの出力値に及ぼす温度の影響を低減するために、試験は20℃に設定した恒温室内で 実施した。試験中の温度は、耐圧容器表面の下部、中部、上部に設置した熱電対で測定した。

試料名	<b>外径</b> [mm]	クラッド径 [mm]	被覆厚 [mm]	被覆材質	メーカー	型式
$\phi~0.15$ mm	0.15	0.125	0.0125	ポリイミド樹脂	古河電工(㈱	BF05717
$\phi0.25$ mm	0.25	0.125	0.0625	UV 硬化樹脂	住友電工㈱	0.25SM(PARB)
$\phi~0.50$ mm	0.50	0.125	0.1375	UV 硬化樹脂	古河電工(株)	F24659
$\phi 0.90$ mm	0.90	0.125	0.3875	UV 硬化樹脂	古河電工(株)	C80920

表 5.3-6 試験に用いた光ファイバケーブルの仕様



図 5.3-28 試験に用いた光ファイバの断面模式図

#### (iii) 試験結果

水圧 0 MPa における周波数スペクトルを基準値として、各水圧で測定した周波数スペクトル と基準値の差分をひずみに換算した。測定機器の空間分解能は 5 cm、試験対象区間は 1 m であ るため、20 箇所の周波数スペクトルが得られるが、試験対象区間の中央位置におけるデータを試 験代表値とした。

図 5.3-29 に水圧に対するひずみ換算値を示す。水圧に対して最も感度が高い光ファイバは $\phi$  0.90 mm のケーブルであり、1 MPa の水圧に対してひずみ換算値は約-35  $\mu \epsilon$ であった。他の 3 つのケーブル ( $\phi$  0.15 mm、 $\phi$  0.25 mm、 $\phi$  0.50 mm) は、 $\phi$  0.90 mm と比べて水圧に対する感 度は低く、1 MPa の水圧に対してひずみ換算値は-8  $\mu \epsilon$ 以下であった。なお、4 つのケーブルと も水圧の昇圧/降圧サイクルに対するひずみ換算値は、同様の履歴を辿ることを確認した。

圧力に対して最も感度が高かったのは $\phi$ 0.90 mm のケーブルであったことから、 $\phi$ 0.90 mm の ケーブルとその他の3本のケーブル( $\phi$ 0.15mm、 $\phi$ 0.25mm、 $\phi$ 0.50mm)の圧力とひずみ換算 値の差分の関係を図 5.3-30 に示す。圧力に対する3本の光ファイバ( $\phi$ 0.15 mm、 $\phi$ 0.25 mm、  $\phi$ 0.50 mm)の感度は低かったことから、3つの光ファイバの組み合わせで得られたひずみ換算 値の差分は同程度であった。したがって、圧力測定のための分布型光ファイバケーブルを構成す る2本の光ファイバの組合せのうち、小径のものについては取扱の容易さや流通量(入手しやす さ)、コスト等を考慮して選定することが合理的と考えられる。



図 5.3-29 水圧とひずみ換算値の関係



図 5.3-30 ひずみ換算値の差分と水圧の関係

### (b) 水圧式加圧試験の再現解析

光ファイバに圧力が作用した時、被覆材とコアが一体で変形すると仮定すると、半径方向及び 周方向、軸方向にひずみが生じる。この時軸方向のひずみは被覆のポアソン効果により生じると 考えられる。これらのひずみの総和が、③圧力によるひずみになる。

試験結果からこれらの方向性の異なるひずみを分離することは難しいため、水圧式加圧試験を 再現解析して、どの方向性のひずみ成分がレイリー散乱光へ与える影響が大きいかを検討するた めに水圧式加圧試験の再現解析を実施した。再現解析では、DIANA 社により開発された有限要 素法(以下、FEM)解析コード DIANA10.5 を使用した。本解析コードでは、必要に応じてベン トナイト等の材料の非線形性を扱えることに加えて、光ファイバに温度、ひずみ(ひび割れ)な らびに外部圧力等を同時に加えることが可能である。

# (i) 解析条件

外部圧力に対して最も感度の高かった ¢ 0.90 mm の光ファイバを解析対象として、光ファイバ を一次のソリッド要素(六面体、五面体)、光ファイバのコア部と被覆部の間はインターフェース 要素で表現した。光ファイバを構成する各要素には、表 5.3-7 に示す材料物性値を設定した。光 ファイバのコア部と被覆部の間は、外部圧力(応力)によってせん断が生じない(コアと樹脂の 変位のずれが生じない)ように、インターフェース要素に十分な剛性を与えた(表 5.3-8)。なお、 光ファイバの被覆部のヤング率(表 5.3-7)に対して外部圧力の値は極めて小さいため、線形解 析として実施した。

解析モデルでは、水圧式加圧試験の光ファイバの一部(φ=0.90 mm、L=1000 μm)をモデル 化し、0.1 MPa の水圧を負荷した圧力条件ならびに光ファイバ断面の一方の端部を固定端(軸方 向の変位のみを拘束)、他方を自由端(構成要素の硬さによる軸方向変位を均一化)とした境界条 件を与えた(図 5.3-31)。

材質	径 (mm)	ポアソン比 v	ヤング係数 <i>E</i> (GPa)
樹脂	0.90	0.38	2.4
石英ガラス	0.125	0.17	73.0

表 5.3-7 光ファイバケーブルの被覆材の材料物性値

表 5.3-8 石	英ガラスと樹脂の	間の面インダ	ヌーフェース	要素の材料物性値
-----------	----------	--------	--------	----------

法線方向剛性(GPa/mm)	周方向せん断剛性(GPa/mm)	軸方向せん断剛性(GPa/mm)
1.0E+5	1.0E+5	1.0E+5



図 5.3-31 再現解析のモデルに与える各種条件

# (ii) 解析結果

解析では、0.1 MPa の水圧によって光ファイバのコア部に生じるひずみ $\epsilon_{zg}$ 、 $\epsilon_{rg}$ 、 $\epsilon_{\theta g}$ を計算した。ここで、 $\epsilon_{zg}$ は軸方向のひずみ、 $\epsilon_{rg}$ は半径方向のひずみ、 $\epsilon_{\theta g}$ は周方向のひずみを示す。なお、水圧を負荷する際、光ファイバの「周面のみ」「周面+軸方向」の2ケースで検討した。表 5.3-9 に計算結果を示す。

ひずみ値が正である場合は引張ひずみ、負である場合は圧縮ひずみを示す。水圧を周面のみに 負荷した場合は、光ファイバのコア部の半径方向および周方向に圧縮ひずみ、軸方向に引張ひず みが生じた。一方、周面+軸方向に負荷した場合は、いずれの方向においても圧縮ひずみが生じて おり、半径方向および周方向と比べて軸方向に圧縮ひずみが1オーダー大きくなった。

表 5.3-9 0.1 MPa	浄水圧下における 0.90	(mm 光ファイバ(	のひずみ(F	FEM 解析結果)
-----------------	---------------	------------	--------	-----------

	解析結果			
	静水圧 0.1 MPa:	静水圧 0.1 MPa:		
	周面のみ (μ)	周面+軸方向(µ)		
軸方向 $\epsilon_{zg}$	20.0	-6.65		
半径方向 $\mathcal{E}_{rg}$	-4.76	-0.134		
周方向 E _{0g}	-4.76	-0.134		

(c) 圧力により変化するひずみ成分

# (i) 被覆厚と軸方向ひずみの関係

被覆条件の異なる4本の光ファイバを対象に水圧式加圧試験を実施し、水圧によって光ファイバに生じるひずみの関係を整理した結果、被覆の厚さに応じてひずみは変化し(図 5.3・29)、被 覆が厚いほど光ファイバのコア(石英ガラス)に生じるひずみの値が大きくなった。水圧により 被覆材の径方向に変形が生じると、ポアソン効果により軸方向にも変形が生じる。水圧一定の条件では、被覆材が厚くなるほど径方向の変形量は大きくなる(ただし、変形量に限界はある)と 考えられ、被覆材のポアソン比は一定であるため、被覆材が厚くなれば軸方向の変形量が大きく なる。そのため、被覆材が厚くなるほど光ファイバのコアに生じるひずみが大きくなると考えられる。

### (ii) 理論式、水圧式加圧試験および FEM 解析で得られたひずみ値の比較

水圧で生じる光ファイバのコア部のひずみについて、Budiansky et al.(1979)により理論式が 整理されている。コア部ー被覆部界面の半径方向の変位が等しい前提条件では、コア部のひずみ は式 5.3・2~式 5.3・4 で表される。この理論式を用いて、水圧 0.1 MPa で  $\phi$  0.90 mm の光ファイ バのコア部に生じるひずみを計算し、FEM 解析 (水圧式加圧試験の再現解析)の結果及び水圧式 加圧試験の結果と比較した。

理論式で求めたひずみは圧縮ひずみであり、「周面+軸方向」に水圧を負荷した FEM 解析結果 と同様の結果となった。一方、水圧式加圧試験では、各成分(r, θ, z)のひずみの合計として出 力されるため、解析結果と単純に比較することはできない。Burnett and Ong(1987)は、静水圧 を受ける海底ケーブルでは、半径方向及び軸方向(ケーブル断面方向)に圧縮ひずみが生じるこ とを報告している。このことから、水圧式加圧試験で測定した軸方向のひずみが圧縮ひずみ(負 の値)になったことは妥当な結果だと考えられる。また、ひずみの各成分の合計値で比較すれば、 「周面+軸方向」の FEM 解析結果や理論式による計算結果と試験結果は整合した。したがって、

「周面+軸方向」に水圧を負荷した条件の FEM 解析で、水圧式加圧試験の結果は再現できたと考えられる。

$$q = \left[\frac{2(1-\nu_p^2)}{(1-f)E_p} - \frac{(\nu_p - \nu_g)(1-2\nu_g)}{fE_g + (1-f)E_p}\right]\frac{p}{B}$$
  $\vec{x}$  5.3-3

$$B = \frac{(1 + v_p^2)[1 + f(1 - 2v_p)]}{(1 - f)E_p} + \frac{1 - v_g - 2v_g v_p}{E_g} + \frac{2(v_p - v_g)\left[\frac{(1 - f)v_p E_p}{E_g} + fv_p\right]}{fE_g + (1 - f)E_p}$$
  $\vec{x} \ 5.3-4$ 



図 5.3-32 理論式の座標系とパラメータの定義

表 5.3-10 0.1 MPa の水圧下における  $\phi$  0.90 mm の光ファイバのひずみ

	理論式	FEM 解析結果		試験結果
	静水圧 0.1MPa	静水圧 0.1 MPa:	静水圧 0.1 MPa:	静水圧 0.1 MPa
	(μ)	周面のみ (μ)	周面+軸方向(µ)	(μ)
軸方向 <i>E</i> zg	-6.60	20.0	-6.65	
半径方向 Erg	-0.137	-4.76	-0.134	-5 程度
周方向 ε _{θg}	-0.137	-4.76	-0.134	

Schenato(2020)は、圧力によって光ファイバのコア部にひずみを生じさせ、レイリー散乱光に 影響を与える要因として以下の3点を挙げている。

(ア) 被覆材のポアソン効果による長軸方向のひずみ変化

光ファイバを被覆する素材が圧力を受けたとき、長軸方向にひずみが変化する。

(イ) 光ファイバの屈折率変化

光ファイバを被覆する素材が圧力を受けたとき、コア(石英ガラス)が方解石のような工 学的異方性を示し、ファイバ内に複屈折現象を生じさせる。

(ウ) 光ファイバの分散の変化

光ファイバが圧力を受けたとき、コア(石英ガラス)形状に起因して光の分散(光の波長 ごとに石英ガラスの屈折率が異なる性質によって、光路差を生じさせる現象)が変化する。

なお、(ウ) 光ファイバの分散の変化によるレイリー散乱光への影響は、(ア) 及び(イ)と比べて極めて小さく無視できる(例えば、Hocker, 1979, Bucaro and Hickman, 1979)。したがって、圧力測定のメカニズムは、(ア) 被覆部のポアソン効果による長軸方向のひずみ変化及び(イ) 光ファイバの屈折率変化によるものと推定され、式 5.3-5 で示される(Schenato, 2020)。ここで、 $\Delta \phi / \phi$ はコア(石英ガラス)のひずみの総和、 $\epsilon_{zg}$ は軸方向のひずみ、 $\epsilon_{rg}$ は半径方向のひずみ、nは石英ガラスの屈折率、pは石英ガラスの光弾性定数を示す。

式 5.3-5 の右辺第一項は(ア) 被覆材のポアソン効果による長軸方向のひずみ変化、右辺第二 項は(イ) 光ファイバの屈折率変化を表す。Schenato(2020)によると、石英ガラスの光弾性定数 は *p*¹¹ = 0.13、*p*⁴⁴ = 0.075 と近似できる。石英ガラスの屈折率は 1.47 として、式 5.3-5 に代入す ると以下の式が得られる。

式 5.3-6 より、(イ) 光ファイバの屈折率変化は、半径方向のひずみと軸方向のひずみから構成されることが分かる。ここに、水圧式加圧試験の再現解析で得られたひずみ(表 5.3-10)を代入すると、(ア)被覆部のポアソン効果による長軸方向のひずみ変化は約-6.65  $\mu \epsilon$ 、(イ) 光ファイバの屈折率変化は約 0.15  $\mu \epsilon$ となる。したがって、(ア) 被覆部のポアソン効果による長軸方向のひずみ変化による影響が大きいことが分かる。

以上より、光ファイバに圧力が作用したときに発生するひずみは、理論式、水圧式加圧試験お よび FEM 解析より軸方向のひずみが最も影響を与えていることから(表 5.3-10)、光ファイバ 被覆材のポアソン効果による長軸方向のひずみ変化が、レイリー散乱光に影響を与える主要因で あると考えられる。

#### (4) 埋め戻し材の膨潤時の圧力測定への適用に向けた測定方法の検討

光ファイバケーブルに圧力を負荷すると光ファイバのコア(石英ガラス)部に軸方向のひずみ が生じて、そのひずみによる周波数シフトから圧力を換算することになる。また、光ファイバの コア部を被覆する素材が厚くなるとコアの軸方向ひずみが大きくなり、圧力に対する感度が大き くなることがわかった。光ファイバで圧力を精度よく測定するためには、光ファイバの出力から 温度と設置後のひずみの影響を除去する必要があり、温度と設置後のひずみは被覆厚さには依存 しないことから、被覆条件の異なる2本の光ファイバを組み合わせることで圧力成分だけを抽出 できると考えられる。今回の水圧加圧試験の結果から、 $\phi$ 0.15 ~0.50 mmの光ファイバケーブ ルの圧力感度は大きく変わらなかったため、圧力に対して最も感度の高い $\phi$ 0.90 mm と $\phi$ 0.15~ 0.50 mmの光ファイバケーブルを用いることで圧力測定が実施できると考えられる。

以上のことより、等方圧力下における圧力測定の見通しが得られたため、埋め戻し材の膨潤時 の圧力測定への分布型光ファイバセンサの適用を見据えて、FEM 解析により 2 本の光ファイバ ケーブルの設置間隔等について検討した。

FEM 解析は、図 5.3-33 に示すフローに沿って実施した。

- Step.0:水圧式加圧試験の結果を、光ファイバに圧力が均等にかかるモデルで再現解析する。 (既出の(3)で実施済み)
- Step.1: 埋め戻し材相当の材料とコンクリートの界面に1本の分布型光ファイバケーブルを 設置し、一方向から圧力をかけるモデル(以下、一方向圧力モデル)で解析し、埋め戻し材 の膨潤により発生する圧力によって生じるひずみ値を求める。
- Step.2: 埋め戻し材相当の材料とコンクリートの界面に2本の分布型光ファイバセンサを設置し、一方向から圧力をかけるモデル(以下、二心線一方向圧力モデル)で解析し、埋め戻し材の膨潤により発生する圧力によって2本の光ファイバに生じるひずみが相互干渉しない離隔を決定する。



図 5.3-33 FEM 解析の実施フロー

# (a) 解析条件

一方向圧力モデル(Step.1)では圧力に対して最も感度の高かった 0.90 mm、二心線一方向圧 カモデル(Step.2)では、0.90 mm と 0.25 mm の光ファイバを解析対象とした。光ファイバ、 埋め戻し材およびコンクリートは、一次のソリッド要素(六面体、五面体)、光ファイバのコア部 と被覆材の間は、インターフェース要素で表現した。光ファイバを構成する各要素は、水圧式加 圧試験の再現解析(Step.0)と同様、表 5.3-7に示す材料物性値を設定した。光ファイバのコア 部と被覆材の間については、圧力によってせん断が働かない(コアと樹脂の変位のずれが生じな い)ように、インターフェース要素に十分な剛性を与えた(表 5.3-11)。

光ファイバと接触する埋め戻し材およびコンクリート(坑道)の材料物性値を表 5.3-12 に示 す。埋め戻し材及びコンクリートと光ファイバの間のインターフェース要素は、剥離の影響を考 慮するため、表 5.3-13 に示す材料物性値を設定した。

一方向圧力モデル(Step.1)及び二心線一方向圧力モデル(Step.2)のモデルに設定した条件 を図 5.3-34、図 5.3-35に示す。解析モデルでは、光ファイバの外径の3倍程度の範囲を設定し、 解析モデルの下面は完全な拘束条件とした。解析モデルの側方部は、水平方向への変位を拘束す る条件としたが、光ファイバの片端は自由端(構成要素の硬さによる軸方向変位を均一化)とし た。埋め戻し材相当の材料の膨潤により発生する圧力については、モデルの上方から一定圧力を 負荷する条件で模擬した。

			•		
法線方向剛性	(GPa/mm)	周方向せん断剛性	(GPa/mm)	軸方向せん断剛性	(GPa/mm)
1.0E-	+5	1.0E+5		1.0E+5	

表 5.3-11 石英ガラスと樹脂の間のインターフェース要素の材料物性(再掲)

	ポアソン比 v	ヤング係数 <i>E</i> (GPa)
コンクリート	0.2	27.53
埋め戻し材(飽和度 90%)	0.3	0.04

表 5.3-12 光ファイバと接触するコンクリート及び埋め戻し材の材料特性

表 5.3-13 埋め戻し材及びコンクリートと光ファイバの間のインターフェース要素の材料特性

	法線方向剛性円周方向せん断剛性軸方向せん断剛性				
	(GPa/mm)	(GPa/mm)	(GPa/mm)		
接触時	$1.0 \times 10^{5}$	0	0		
剥離時	0	0	0		



図 5.3-34 一方向圧力モデル (Step.1) に与える各種条件



図 5.3-35 二心線一方向圧力モデル(Step.2)に与える各種条件

# (b) 解析結果

# (i) Step.1 一方向圧力モデル

軸方向ひずみ	半径方向ひずみ <b>ɛ</b> rg		周方向ひずみ <b>ɛ</b> өg	
${\mathcal E}_{ m zg}$	Y 軸方向	Y 軸方向 X 軸方向		X 軸方向
234	-89.6	-24.3	-18.8	-87.9

表 5.3-14 一方向圧力モデルにおける各成分のひずみ(0.90 mm)



図 5.3-36 一方向圧力によって生じたひずみ成分(模式図)

(ii) Step.2 二心線一方向圧力モデル

◆0.90 mm と ◆0.25 mm の光ファイバを併設した二心線一方向圧力モデルについて、図 5.3-37 に示すような 3 通りの離隔ケースを設定した。2 本の光ファイバにかかる外的要因(温度、設置 後のひずみ(ひび割れ等))が同様に作用するように、離隔距離を設定した。

- ・離隔距離0.575 mmのケース:2本の光ファイバの半径の和(0.45+0.125=0.575 mm)
- ・離隔距離0.2875 mmのケース:2本の光ファイバの半径の和/2((0.45+0.125)/2=0.2875 mm)
- ・離隔距離0mmのケース:2本の光ファイバが接触

以上の離隔ケースにおいて、一方向(上方)から圧力(1 MPa)を加えたとき、光ファイバコ ア(石英ガラス)部に生じたひずみを表 5.3-15~表 5.3-17 及び図 5.3-38 に示す。  $\phi$  0.90 mm の 光ファイバでは、ひずみの成分によらず離隔が 0.2875 mm 以上ではひずみの変化は小さかった。  $\phi$  0.25 mm の光ファイバでは、離隔が大きくなるとひずみの絶対値が大きくなる傾向が見られた。 すなわち、 $\phi$  0.25 mm の光ファイバは離隔距離が小さいほどひずみの絶対値は変化しやすいため、 両者の距離をとることで、ひずみの変化量を抑制できる。

以上の結果より、  $\phi$  0.90 mm と  $\phi$  0.25 mm の 2 本の光ファイバケーブルを一定の間隔以上で 配置することで光ファイバに生じるひずみの相互干渉を低減でき、その離隔は 0.575 mm 以上必 要であることがわかった。



図 5.3-37 2本の光ファイバの離隔ケース

表 5.3-15	離隔 0.575 mm	における光ファ・	イハのひすみ
----------	-------------	----------	--------

離隔	ファイバ径	軸方向ひずみ	半径方向ひずみ <i>E</i> rg		周方向ひずみ <i>ε</i> _{θg}	
(mm)	(mm)	$\mathcal{E}_{ m zg}$	Y軸方向	X 軸方向	Y 軸方向	X 軸方向
0 575	0.90	230.8	-88.9	-24.2	-18.8	-87.2
0.979	0.25	33.2	-57.4	2.7	17.4	-39.6

表 5.3-16 離隔 0.2875 mm における光ファイバのひずみ

離隔	ファイバ径	軸方向ひずみ	半径方向ひずみ <i>E</i> rg		周方向ひずみ $\mathcal{E}_{ heta g}$	
(mm)	(mm)	$\mathcal{E}_{ m zg}$	Y軸方向	X 軸方向	Y軸方向	X 軸方向
0.9975	0.90	230.2	-88.5	-24.2	-18.8	-87
0.2875	0.25	30.5	-53.6	3.2	17.3	-37.1

表 5.3-17 離隔0mm (接触) における光ファイバのひずみ

離隔	ファイバ径	軸方向ひずみ	半径方向ひずみ <b>ɛ</b> rg		周方向ひずみ $\mathcal{E}_{ heta g}$	
(mm)	(mm)	$\mathcal{E}_{ m zg}$	Y 軸方向	X 軸方向	Y 軸方向	X 軸方向
0	0.90	231.3	-87.7	-25.2	-20.4	-86.5
(接触)	0.25	25	-39.4	-0.5	9.9	-26.2



# (5) 分布型光ファイバによる圧力測定の展望

分布型光ファイバケーブルに圧力を負荷すると、被覆材が厚いほど軸方向のひずみが増加する ことがわかった。これは、被覆材が厚いほど圧力に対して半径方向の変形量が大きくなるとポア ソン効果によって軸方向の変形量が大きくなるため、光ファイバの軸方向のひずみが大きくなっ たと推察された。また、圧力測定時における温度や設置後に生じるひずみの影響を除去するため に、 φ 0.90 と φ 0.25 mm の 2 本の光ファイバケーブルを設置する場合には、光ファイバケーブ ルの離隔を 0.575 mm 以上とする必要があることがわかった。

分布型光ファイバを用いて埋め戻し材の膨潤により発生する圧力を測定するためには、ベント ナイトを用いた加圧試験により、乾燥密度をパラメータとして膨潤により光ファイバに生じるひ ずみ及び圧力の関係を把握しておく必要がある。埋め戻し材と坑道界面の隙間が閉塞することを 実規模スケールの試験で確認することは試験期間等の観点から容易ではないが、隙間を模擬した 室内試験で膨潤により発生する圧力を測定することにより、測定した圧力から坑道上部の埋め戻 し材の乾燥密度を推定することができると考えられる。

# 5.3.4 地下環境における無線給電技術の高度化

#### (1) 背景及び目的

処分場の長期的な安全性が担保される見通しであることを確認するために、モニタリングには 一定の役割が期待されており、「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、事業許可以降 20 年を超えない期間ごとに安全性に関する定 期的な評価(安全レビュー)を行うことが規定されている。原位置モニタリングを実施する場合 の懸念事項の1つとして、IAEA は「モニタリング機器の設置に伴うバリアを通過する経路の形 成(処分場内または周辺における放射性核種の移行ポテンシャルの増加)」を挙げており、モニタ リング機器や通信ケーブルにより核種移行経路が形成される可能性について懸念されている

(IAEA, 2001)。計測ケーブルを敷設せずに計測結果を坑外へ通信する無線伝送技術および計器 等へ無線で給電する無線給電技術は、その懸念に対する対応策の1つであり、計測項目の種類に 関わらず利用できるモニタリング共通の技術課題と考えられる。

本事業では無線伝送システムに対する信頼性を向上させるために、原子力機構幌延深地層研究 センター(以下、幌延 URL)で実施されている人工バリア性能確認試験に無線伝送装置を設置し (原環センター, 2014)、平成 26 年 11 月から令和 4 年 3 月までの約 8 年半にわたって継続的に データ伝送ができていることを確認している(図 5.3-39)。処分場や上記のような中長期的な実 証試験等におけるモニタリングにおいて、センサ寿命及び電源寿命を向上させて計測機器の長期 の運用性を確保することができれば、定期安全レビューや閉鎖の判断に資するための品質保証体 系に係る取組の一環として取得される可能性のある原位置データに係る戦略や計画の立案・実践 に寄与することができると考えられる。

モニタリング機器に対して長期的に電力を供給することが可能な技術の一つとして、国際共同 研究 Modern2020 などでは電磁界や電磁波で電力を供給する無線給電技術が検討されている

(Modern2020, 2019)。本事業では無線給電技術の検討として磁界共振結合方式による無線給電 装置の地層処分事業への適用について検討しており、これまでにベントナイトや塩水等の媒体を 介した給電効率等に関するデータを取得し、給電効率に差はあるものの、これらの媒体を介した 給電が可能であることを確認した(原環センター, 2018)。これらの媒体のうち、特に金属を介 した給電において有意な給電効率の低下が確認されている(原環センター, 2021)。一方、実証 試験等において、埋め戻した処分坑道に設置した計測システムなどへの電力供給を無線給電シス テムで行う場合には、鉄筋を含む力学プラグを介して送受電コイルを設置することも考えられる。

令和3年度は、力学プラグ等の鉄筋を介した無線給電において給電効率の低下を抑制するため の対策案を提示することを目的として、鉄筋の有無、鉄筋とコイル間の距離、鉄筋交差部の絶縁 のなどの条件で要素試験を実施して給電効率等に関するデータを取得した。



## (2) 鉄筋を介した給電時における給電効率低下の要因

磁界共振結合による無線給電は、送受電コイルを共振器として利用し、電源の周波数、送電器 (コイルとコンデンサで構成)の共振周波数、受電器の共振周波数の3つの周波数を一致させる ことで高効率に給電できるシステムである。送電器のコイルに電流を流すことで発生した磁束を 受電器のコイルで受け取ることから、給電距離(コイル間距離)が短い方が受電器で受け取るこ とができる磁束が多くなるため、給電効率(受電コイルで受けとる電力/送電コイルで送る電力× 100)は高くなる。

一方で、送受電コイル間に導電体(自由電子を含む金属など)が存在する場合には、送電コイルで発生した磁束が導電体を透過する時に渦電流が発生し、導電体中で発生した渦電流は熱として消費されるため、結果として給電効率が低下する。

一般的な鉄筋は、導電体である鉄筋同士の交差部を直接的に結束することにより組まれること が多く、この結束により鉄筋同士は電気的に接続される。そのため、図 5.3-40 に示すように、送 受電コイル間に磁束が透過する時に各格子部において渦電流が発生することにより給電効率が低 下すると考えられる。



図 5.3-40 鉄筋における磁界による渦電流の発生

# (3) 鉄筋コンクリートを介した給電効率向上の検討

給電効率に及ぼす鉄筋の影響を把握するために、送受電コイル間に鉄筋無しのケース、鉄筋あ りのケース、鉄筋交差部を絶縁したケースで試験を実施した。各試験では、送受電コイル間の距 離、電源周波数等をパラメータとして給電効率を算出した。

#### (a) 給電効率の理論式

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) の送受電器1対1による無線給電では、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 り給電効率を算出することができる。本研究で用いる無線給電システムの等価回路を図 5.3・41に 示す。 $L_m$ は相互インダクタンス、Lは自己インダクタンス、Cはキャパシタンス、 $R_L$ は負荷抵抗、 Rは内部抵抗を表している。添え字の1は送電側、2は受電側を表す。S·S方式における給電効率 は、負荷抵抗 $R_L$ が最適負荷 $R_{Lopt}$ のときに最大効率 $\eta_{max}$ となることが知られている。最大効率と最 適負荷抵抗は式 5.3・7及び式 5.3・8 で算出することができる。



図 5.3-41 送受電コイルと置き換えた等価回路の関係

式 5.3-8

$$R_{Lopt} = R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}$$

ここで、Qは周波数fにおけるコイルの性能を表す指標であり、式 5.3-9 で表される。

kは結合係数であり、0≦k≦1である。結合係数は式 5.3-10で表される。

以上により、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及びコイル性能 のが必要なことが分かる。

結合係数k及びコイル性能Qは送受電コイルを正対した状態に対して定められるパラメータであり、コイルの仕様や給電距離等によって変化する。そのため、実際に給電試験を実施してk及び Qの値を求める必要がある。

### (b) 給電試験の試験条件及び試験方法

#### (i) 試験条件

送受電コイルの外観を図 5.3-42 に示す。直径 500 mm のアクリルパイプにリッツ線(240 ヨ リ*0.1 mm)を 15 回巻くことで送受電コイルを製作した。

給電試験におけるコイル間距離(給電距離)は、250 mm~750 mmの範囲の5条件とした。 コイル間距離を表 5.3-18 に示す。給電効率はコイル間距離とコイル直径の比で無次元化できる ため、表にはコイル間距離/コイル直径の値を併せて示した。これらの条件において鉄筋の有無及 び絶縁体を巻いたケースで給電試験を実施した。 鉄筋のピッチは、100 mm、200 mm 及び 300 mm の 3 条件とした。図 5.3-43 に鉄筋試験体 の組み立て図を示す。鉄筋同士の交差部は鉄線を用いて結束した。また、鉄筋交差部を絶縁した 条件では、鉄筋組み立て前に全ての交差部に絶縁テープを巻いたうえで、鉄筋試験体を組み立て た。絶縁に使用したテープ及び鉄筋交差部の状態を図 5.3-44 に示す。絶縁テープを巻いた鉄筋 の組み立て後には、テスターの導通モードで全ての鉄筋交差部が絶縁されていることを確認した。



図 5.3-42 無線給電試験に使用したコイル

コイル間距離 mm	コイル間距離/コイル直径
250	1/2
375	3/4
500	1
625	5/4
750	3/2

表 5.3-18 給電試験におけるコイル間距離



鉄筋のビッチ100mm



図 5.3-43 鉄筋試験体の組み立て図



鉄筋のビッチ300mm



(a) 使用した絶縁テープ 図 5 3-44

絶縁テープ (b) 絶縁テープを貼り付けた鉄筋交差部 図 5.3-44 絶縁テープと鉄筋交差部の絶縁状況

# (ii) 試験方法

結合係数k及びコイル性能Qの測定にはインピーダンスアナライザ(型式 E4990A)を用いた。 kはコイル間距離に対して、電子機器用高周波コイル及び中間周波変成器試験方法(JIS C5321) に基づいて測定した。また、給電効率については、ベクトルネットワークアナライザ(以下、VNA) ⁵を用いた方法と既往の電力変換用の回路基板を用いた方法の 2 つの方法での測定値から算出し た。インピーダンスアナライザ及び VNA を用いた測定状況の例を図 5.3-45 に示す。

VNA を用いることで送電コイルに印加する電源の周波数を任意に設定することができる。 VNA を利用した給電試験のブロックを図 5.3-46 に示す。VNA の周波数の設定範囲は 50~150 kHz とした。一方で、将来的な無線給電システムの利用では、VNA ではなく電力変換用の基板 などが使用されると考えられるため、既往の基盤回路を用いた給電試験も実施した。既往の回路 基板を用いた試験のブロック図を図 5.3-47 に示す。図 5.3-46 で示した VNA を用いた試験の送 電部の上流側に既往の回路基板としてインバータ、下流に整流回路を追加した形となる。なお、 既往の回路基板を用いた給電試験の結果については付録 6 に示した。



図 5.3-45 インピーダンスアナライザ及び VNA による測定状況

⁵ ネットワークアナライザは、電子回路網を解析するためにインピーダンスと減衰量を測定する装置 である。特にベクトルネットワークアナライザは、振幅に加えて位相の測定が可能であり、より高精 度の周波数特性の測定に対応できる。



図 5.3-46 VNA を用いた給電効率の測定のブロック図及び共振コンデンサ



図 5.3-47 既往の回路を用いた給電効率の測定のブロック図

# (c) 給電試験結果

### (i) 鉄筋無しの給電試験結果

インピーダンスアナライザを用いて送受電コイルの 100 kHz における結合係数kとコイル性能 Qを測定した結果を表 5.3-19 に示す。表には、測定した結合係数kとコイル性能Qを用いて式 5.3-7 で算出した給電効率の理論値を併せて示した。

コイル間距離	結合係数	コイルの内部抵抗	コイル性能	給電効率の理論値
[mm]	k	[ohm]	$\mathbf{Q}$	[%]
250	0.088	0.336	468	95.3
375	0.050	0.370	427	91.1
500	0.027	0.352	450	85.1
625	0.017	0.332	476	77.8
750	0.011	0.334	474	68.1

表 5.3-19 鉄筋無しにおけるkと0及び給電効率(100 kHz)

VNAを用いて測定した周波数と給電効率の関係を図 5.3・48 に示す。コイル間距離が長くなる と給電効率は低下した。また、送受電コイルの製作時に設定した共振周波数である 100 kHz で給 電効率は概ね最大になった。各コイル間距離に対して周波数 100 kHz における給電効率及び最大 給電効率と周波数を表 5.3・20 に示す。また、コイル間距離と給電効率の関係を図 5.3・49 に示す。 コイル間距離が長くなると、周波数 100 kHz における給電効率と給電効率の理論値及び最大給電 効率の差は大きくなった。また、コイル間距離が長くなると、最大給電効率になる周波数の前後 での変化量は大きかった。そのため、コイル間距離が長くなるとわずかな周波数のずれが給電効 率に及ぼす影響が大きくなった。給電効率の理論値は、送受電コイルともに完全に共振している 条件で算出したものであるが、給電試験で求めた最大給電効率は受電コイルの共振周波数のずれ を考慮していないため、コイル間距離が大きくなると理論値と最大値の差が大きくなったと考えられる。





コイル間距離	給電効率 (%)			
(mm)	周波数 100kHz のときの値	最大給電効率と周波数		
250	95.0	95.1 (99.6 kHz)		
375	90.0	90.4 (99,4 kHz)		
500	81.2	83.4 (99.1 kHz)		
625	66.9	72.7 (99.1  kHz)		
750	48.4	58.6 (98.9  kHz)		

表 5.3-20 鉄筋無しにおけるコイル間距離と給電効率



図 5.3-49 鉄筋無しにおけるコイル間距離と給電効率の関係

### (ii) 鉄筋を介した給電試験結果

鉄筋ピッチをパラメータとしてインピーダンスアナライザを用いて送受信コイルの 100 kHz における結合係数kとコイル性能Qを測定した結果を表 5.3・21 に示す。表には、測定した結合係数kとコイル性能Qを用いて式 5.3・7 で算出した給電効率の理論値を併せて示した。また、鉄筋ピッチごとのコイル間距離と給電効率の理論値の関係を図 5.3・50 示す。図には、鉄筋無しケースも併せて示した。

鉄筋ピッチが狭くなるにつれて結合係数、給電効率ともに低下した。特に鉄筋ピッチ 200 mm と 100 mm の差が大きかった。また、鉄筋ピッチ 100 mm における給電効率の理論値とコイル間 距離の関係は、鉄筋ピッチ 200 mm 以上とは傾向が異なり、コイル間隔がおおよそ 400 mm 以上 では給電効率の更なる低下は見られなかった。

コイル間に鉄筋を設置して VNA を用いて測定した周波数と給電効率の関係を鉄筋ピッチごと に図 5.3-51 に示す。鉄筋を介した給電では、給電効率が最大になる周波数は本来の共振周波数 である 100 kHz からずれる傾向にあり、コイル間隔が概ね 500 mm より小さいと高周波数側、 大きいと低周波側で給電効率は最大になった。

給電効率とコイル間隔の関係を鉄筋ピッチごとに図 5.3-52 に示す。鉄筋ピッチが大きくなる と給電効率は高くなった。また、コイル間隔が大きくなるにつれて給電効率は小さくなった。

# (iii) 鉄筋交差部を絶縁した給電試験

鉄筋交差部を絶縁したうえで VNA を用いて測定した給電効率と周波数の関係を図 5.3-53 に 示す。図 5.3-51 と比較すると、鉄筋交差部を絶縁することで、最大給電効率になる共振周波数か らのずれが小さくなるとともに、給電効率が大幅に向上した。その効果は、鉄筋ピッチが狭いほ ど大きかった。さらに絶縁することにより、最大給電効率に対応する周波数の前後の変化量が小 さくなり、周波数のずれに対する給電効率への影響が小さくなった。また、誘電効率とコイル間 距離の関係を図 5.3-54 に示す。図 5.3-52 と比較して、絶縁を施すことによる給電効率のコイル 間隔による変化率(グラフの勾配)については、大きな差は見られなかった。

鉄筋ピッチ	コイル間距離	結合係数	給電性能	給電効率の理論値
[mm]	[mm]	k	Q	[%]
	250	0.041	39.0	30.8
	375	0.016	77.5	22.2
100	500	0.009	123.4	19.8
	625	0.006	176.9	20.0
	750	取得できず	取得できず	-
	250	0.069	62.1	62.9
	375	0.034	97.2	55.2
200	500	0.012	130.5	47.3
	625	0.011	170.1	35.7
	750	0.006	210.9	24.9
	250	0.079	88.7	75.3
	375	0.041	144.8	71.5
300	500	0.024	208.7	67.7
	625	0.014	264.3	58.8
	750	0.009	319.7	50.3

表 5.3-21 鉄筋を介した場合におけるkとQおよび給電効率の関係(周波数 100 kHz)



図 5.3-50 鉄筋を介した場合の鉄筋ピッチごとのコイル間距離と給電効率の理論値


(c) 鉄筋ピッチ 300 mm

図 5.3-51 VNA を用いた各鉄筋ピッチにおけるコイル間距離ごとの周波数と給電効率の関係



図 5.3-52 VNA を用いた各鉄筋ピッチにおけるコイル間距離と給電効率の関係





図 5.3-53 鉄筋に絶縁措置を施した場合のコイル間距離ごとの周波数と給電効率の関係 (左:絶縁したケース、右:絶縁していないケース)



#### (c) 鉄筋ピッチ 300 mm

図 5.3-54 各鉄筋ピッチにおけるコイル間距離と給電効率の関係 (左:絶縁したケース、右:絶縁していないケース)

#### (d) 給電効率に及ぼす鉄筋の影響

コイル近傍に鉄筋が存在するとコイル性能(Q値)の低下及び共振周波数からのずれが生じることがわかった。コイル性能と共振周波数 $f_0$ は、それぞれ式 5.3-9及び式 5.3-11で表され、インダクタンスLを用いて算出される。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式 5.3-11

給電試験の結果から求めた送電コイルのインダクタンスとコイル間距離の関係を図 5.3-55 に 示す。鉄筋がない場合の送電コイルのインダクタンスは、コイル間距離にかかわらず約 252 µH で一定であったが、鉄筋ピッチが狭く、コイルと鉄筋の距離が近い場合はインダクタンスが低下 した。一方、鉄筋を絶縁した場合には、インダクタンスの低下はみられなかった。これらのこと から、コイル近傍に存在する鉄筋は、インダクタンスを変化させてコイル性能を低下させるとと もに、給電システムの設計時に設定した共振周波数からの周波数のずれを生じさせることがわか る。鉄筋交差部の絶縁は、共振周波数からの周波数のずれを抑制するとともに、渦電流による損 失を低減する効果があることがわかった。

以上のことから、力学プラグなどの鉄筋を含む構造物を介して無線給電を実施する場合には、 鉄筋交差部を絶縁することにより給電効率の低下を抑制することができると考えられる。絶縁に は、今回の給電試験のように絶縁テープを交差部に巻く簡易な方法も考えられるが、電力を供給 する測定機器の使用期間に応じて絶縁部の耐久性を予め確認しておく必要がある。



図 5.3-55 鉄筋の存在による送信コイルのインダクタンス変化

#### (4) 実証試験等への適用に向けた無線給電システムの検討

実証試験等における測定機器への電力供給方法として無線給電システムを適用するためには、 その設計手法について検討をする必要がある。令和3年度は、設計に当たり検討すべき課題を抽 出するために、日本原子力研究開発機構が幌延深地層研究センターで実施されている人工バリア 性能確認試験を参考にして無線給電システムの概念設計を行った。

#### (a) 既往の知見から得られる給電システム設計で考慮すべき課題

実証試験等における測定データの信頼性を確保するためには、センサやケーブル類の存在が測 定結果に及ぼす影響を最小限に抑制することが望ましい。また、測定機器を設置する環境条件や 測定期間に留意したシステム設計が必要になる。実証試験等における測定方法に関して現段階の 知見に基づく課題の概要を表 5.3-22 に示す。ここでは、これらの課題のうち、無線給電システム の設計で特に留意すべき課題に関する対応方針を検討するとともに、システム設計の流れ及び設 計上の留意点を整理する。無線給電システムの設計で特に留意すべき課題と対応案を表 5.3-23 に 示す。

表 5.3-22 実証試験等における測定機器に関する課題

対 久山 西山 (十里 西山 無線給電			無線給電システム	
象	余件・要件	結果・要求	対応策	対応課題
人 工		ケーブルをできるだけ 使用しない	コイルによる長 距離の給電	長いコイル間隔での給電
バ リ ア	水みち創出の防止	連続した水みちとしな い、水の流動方向と直 交させる	ケーブルの方向 の工夫	コイル配置の工夫
	多数のセン サ	大きい電力消費量 ケーブル延伸による送 電ロス	給電の大電力化	地上からの電力供給能力向上、 給電効率向上(コイル性能(大き さ、数)、回路性能、鉄筋影響、 コイル間距離適性化など)、パー ツ・システムの大電力対応
	多種多様な センサ	計測タイミングと頻度 が多様	供給タイミング の適正化	センサとの協調と最適化方法 受電側への蓄電システムの導入 による対策
モニタリングシステム		<ul><li>作動電圧・必要電流が</li><li>多様</li><li>電力の質への要求が多</li></ul>	<ul><li>供給バリエーションの最適化</li><li>安定した電力供</li></ul>	<ul><li>受電側での変圧・整流システム</li><li>導入方法</li><li>受電側での整流、安定化電源導</li></ul>
	モニタリン グへの無線 伝送の採用	様無線への影響回避	給 無線伝送への影 響低減	<ul><li>入方法</li><li>コイル磁気の無線への影響の評</li><li>価と回避方法</li></ul>
	冗長性・多重 化	電力供給ラインの多重 化	給電システムの 多重化	複数システムの設置・運用方法
	電源に起因 する 故障の 予防	安定した電力供給	耐停電システム 停電時対応シス テム	システムの信頼性向上 バックアップ電源の導入方法
	長期間の計 測	長期耐久性	コイル・回路の 耐久性	水・温度・水溶性分などへの材料 と装置の耐性
地 下	高温(地温、 廃棄体発熱) 多湿	温度・湿度に対する耐 久性・安定性	コイル・回路の 耐久性	<ul><li>温度・湿度への材料と装置の耐</li><li>性</li><li>給電効率への影響</li></ul>
環 境	地下水化学 成分	塩分その他の影響	コイル・回路の 耐久性	塩分への材料と装置の耐性 給電効率への影響
	大深度	電力供給ラインの延伸	(施設の電力シス	テムで対応)
歮	コンクリー トプラグ	鉄筋コンクリートを挟 んだ供給	鉄筋の影響 	鉄筋の給電効率への影響低減
心設条仕	ベントナイ ト系緩衝材	緩衝材を挟んだ供給	緩衝材の影響	緩衝材の給電効率への影響低減
	金属材料	オーバーパック近傍で の供給	金属の影響	金属材料の給電効率への影響低 減

課題	設計面での対応案
コイル性能の強化	コイルの大径化、コイル数の増加
	コイル間距離の延長
多数のセンサへの電力供給	多段コイルのシステム
水みちの防止	コイル/ケーブルの配置による水みちの防止
大電力化への対応	既往の電子回路による給電効率の向上
	パーツ、回路の大電力への対応
受給電回路の性能向上	共振周波数の適正化(電源周波数、インバータ回路、コイルのイ
	ンダクタンス、鉄筋の影響、整流回路、受電側電子負荷)。
	設計時だけでなく、センサ設置後の最終調整が可能なシステムの
	導入。
安定した給電	地下施設内への蓄電システムの導入
	電力安定化システムの導入
	無線伝送システムへの給電
無線伝送への影響回避	無線機器との距離の確保、磁気シールドの導入
鉄筋の影響	鉄筋交差部の絶縁化、鉄筋量の少ない部位へのコイル配置

表 5.3-23 無線給電システムの設計で特に留意すべき課題と対応案

#### (b) 無線給電システムの設計検討手順

将来の実証試験或いは精密調査や実事業において無線給電システムを導入するための設計手順 の具体化に向けて、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が幌延深地層研究センターで実施 中の人工バリア性能確認試験を例題として、設計手順の検討を進めた。

設計の全体の流れとしては、条件の明確化、適用技術の選択、要素設計、システム設計及び模 擬施設における試験による技術の確認、実施設計となる。設計検討手順案を図 5.3-56 に示す。同 フローに示される個々の要素の設計では、これまでの検討成果として得られた次のような知見を 反映・参照することでより合理的に進めることができる(原環センター, 2018;原子力機構・原 環センター, 2019; 2020; 2021)。これらの知見は、ある一定の条件下での試験などによる成果で あるため、適用にあたっては設計の対象となる要素や条件等に合わせた確認が必要である。

- ・ コンクリート中及びベントナイト中の給電効率の検討結果
- ・<br />
  鉄筋が介在する場合の給電効率向上手法
- 給電効率の観点から評価したコイルの寸法とコイル間距離の関係
- 給電効率向上のための共振周波数の調整手法
- ・ 既往の(大電力を可能とする)電子回路による給電効率の把握と向上
- ・ コイルのパッケージングの検討結果

これまでの研究開発では、主に室内要素試験による給電効率の向上策を検討してきたが、実証 試験等への適用を目指す場合には、段階的な試験あるいはモデル解析などによる設計の高度化が 必要となる。また、設計に基づき製作した無線給電システムは、使用する環境を模擬した試験、 地下研究施設などにおける実証試験などによる適用性の確認が必要となる。



図 5.3-56 無線給電システム導入時の設計検討手順案

#### 5.4 まとめ

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の構築に向けて、地下構成要素を対 象とした品質管理プログラム、性能確認プログラムの素案を作成するために、性能評価や FEP な どについて調査して品質保証体系に必要な入力情報を整理し、その取得方法について検討した。 また、埋め戻し材を先行検討事例として、品質管理プログラム及び性能確認プログラムに有益な 情報を提供できると考えられる計測技術について要素試験等により適用性を確認した。

品質保証体系は閉鎖の判断に資するものであり、閉鎖後長期の安全性を考慮して設定されてい る処分場の機能や性能の変遷挙動を評価するための性能評価が参考となる。そのため、包括的技 術報告書を参考にして品質保証体系で取得すべきパラメータを抽出して、人工バリアを含む地下 構成要素の品質や変遷に関するパラメータとそれらに対して変遷の駆動力として作用する地下水 条件などの地質環境に関するパラメータに大別した。本事業では、品質保証体系を地下構成要素 の施工直後の品質を保証する品質管理プログラムと性能評価に資する情報を取得する性能確認プ ログラムの2つに分けて検討を進めており、それぞれのプログラムの特性から、設計や仕様で決 まったパラメータは品質管理プログラム、施工後の変遷を考慮する必要のあるパラメータは性能 確認プログラムの対象となる。品質管理プログラムでは、製造・施工におけるプロセスを管理す ることで品質を保証する製造・施工プロセス管理手法を指向している。品質管理プログラムを含 めた品質保証体系の運用は、閉鎖措置計画の認可を申請するまでの建設・操業が対象期間となる が、これを建設開始とともに運用するためには、予め適用する品質保証体系を確立し、取得する 必要のある情報・データおよびその取得方法を具体化しておく必要がある。以上を踏まえると品 質管理プログラムにおいては、地上や地下の研究施設や精密調査段階に建設される地下調査施設 における実証試験で製造方法および施工方法を確認することが重要である。これらの実証試験で 取得される情報・データも品質保証体系の一部であり、試験におけるデータの取得方法について も検討、具体化する必要がある。その一例として、試行的に埋め戻し材の実証試験での活用が期 待される測定技術の研究開発を実施した。

埋め戻し材に要求される低透水性を確保するための指標となる乾燥密度及び施工直後に発生す る可能性がある坑道天端との隙間を測定、検知できる技術について要素試験を実施した。乾燥密 度測定については、FBG (Fiber Bragg Grating)ケーブルの周囲に発熱用銅線を配置した加熱式 光ファイバを対象とし、比較的含水比の高い埋め戻し材(転圧締固め工法の埋め戻し材を想定し 約 9%)における温度上昇量及び上昇速度(及び結果としての熱伝導率)は、乾燥密度 0.2 Mg/m3 の違いでも明確な差が生じ、乾燥密度の推定が可能であることが分かった。次の段階として実規 模試験での適用性試験によって、広範囲における乾燥密度分布の推定方法を検討する必要がある。 坑道壁との隙間については、隙間の有無及び平面方向の隙間の位置や大きさが測定できる見通し は得られたものの、深さ方向の検知については困難であることがわかった。

埋め戻し材と坑道壁との隙間が発生する可能性がある場合には、例えば坑道付近に施工する埋 め戻し材のベントナイト混合率を増加させるなどの設計対応を行うことで、発生した隙間を閉塞 させることができる。このような埋め戻し材の膨潤に伴う圧力を計測する技術として、被覆厚さ の異なる2本の光ファイバを併設させることで測定結果であるひずみ値から圧力成分のみを抽出 する方法について検討した。水圧による試験、解析及び理論値を比較することで、この測定方法 のメカニズムは被覆材のポアソン効果による軸方向ひずみが支配的であることによるためと推察 された。無線給電技術については、力学プラグなどに含まれる鉄筋を対象として鉄筋の有無、鉄 筋とコイルの距離などをパラメータとした要素試験を実施して、給電効率に関する詳細なデータ を取得するとともに、鉄筋の存在による給電効率の低下を抑制する対策を示した。 参考文献

- B. Budiansky, D.C. Drucker, et al., Pressure sensitivity of a clad optical fiber, Applied Optics, Vol.18, No.24, pp.4085-4088, 1979.
- D. Burnett, Chung-Chun Ong, Shortening of submerged ocean cables due to hydrostatic pressure, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 12 (1), pp.281-288, 1987.
- G.B. Hocker, Fiber-optic sensing of pressure and temperature, Applied Optics, Vol.18, No.9, pp1445, 1979.
- IAEA, Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA-TECDOC-1208, 2001.
- J.A. Bucaro, T.R. Hickman, Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection, Applied Optics., Vol.18, No.6, pp.938-940, 1979.
- L. Schenato, A. Galtarossa, A. Pasuto, L. Palmieri, Distributed optical fiber pressure sensors, Optical Fiber Technology, Vol.58, 2020.
- Modern2020, Deliverable D3.3 Long-term power supply sources for repository monitoring, 2019.
- Posiva and SKB, Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group, Posiva SKB report 01, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2017.
- Sakaki.T, First.B, Vogt.T, Feasibility Experiments for Monitoring the State of Granulated Bentonite Mixtures using Heated Fiber-optic Cables Contribution to the MoDeRn 2020 Final Report: WP3 Task 4, Nagra NAB 18-37, 2018
- 鵜山雅夫, 榊利博, アクティブヒーティングを利用した OFDR 計測によるベントナイト密度測定 (密度固定レファレンスを用いた高精度熱伝導率計測)、日本機械学会論文集, Vol.86, No.882, 2020.
- 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,JNCTN140099-022,1999.
- KEYENCE, 溶接革命, https://www.keyence.co.jp/ss/products/measure/welding/, 2022 年 1 月 6 日現在.
- 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―,TR-20-02,2021.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 19 年度 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)一遠隔操作技術高度化開発—(1/2), 2008.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 25 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, 2014.
- 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3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3分冊)モニタリング関連技術の整備,2018.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成31年度低レベル放射性廃棄物の処分に関する技

術開発事業 地下空洞型処分施設機能確認試験 5 か年取りまとめ報告書, 2020.

- 原子力規制委員会,廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則,平成二十五年原 子力規制委員会規則第三十一号,2016.
- 榊利博, B. F. Lüthi, T. Bogt, 光ファイバ熱伝導率計の計測範囲の実験的評価, 土木学会第72 回年次学術講演会, 2017.
- 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~令和 4 年度), 2018, 2020 改訂.
- 中山雅,大野宏和,幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験-350m 調査坑道にお ける人工バリアの設置および坑道の埋め戻し-,日本原子力研究開発機構,JAEA-Research 2019-007, 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.

保立和夫,村山英晶,光ファイバセンサ入門,光防災センシング振興協会,2012.

#### 6.1 令和3年度の主な成果

本事業において、得られた主な成果を以下に記述する。

2、3、4章では、「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」について、それぞれ「坑道シ ーリングの設計・評価技術の整備」、「坑道シーリング技術の性能確認」および「坑道シーリング に係わる施工技術の整備」を実施した結果について述べた。

2章「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」のうち、「坑道シーリングの設計・評価技術の整備」では、「シーリングシステム長期性能評価技術開発」として、シーリングシステムの長期変遷に関する現象理解、シーリングシステムの安全機能が低下することを想定した物質移行解析、シーリングシステムの性能劣化の影響回避や緩和策の検討を踏まえた性能の考え方の整理を実施した。

シーリングシステムの長期変遷に関する現象理解では、埋め戻し材が顕著に変質する可能性が 高いのは、坑道と新鮮な地下水が接触し続けるような坑道最上流部や、岩盤亀裂との交差部のよ うな領域のみであることがこれまでに示唆されてきた。これは、坑道支保工および埋め戻し材の 境界面の閉塞性に起因するものである一方で、岩盤と坑道支保工境界の閉塞性によって埋め戻し 材の変質挙動が異なる可能性が指摘された。令和3年度は、「コンクリート成分の溶脱に起因し たモンモリロナイトの溶解/変質」に関し、岩盤との相互作用を含めた埋め戻し材の周辺環境の 状態変遷を再整理し、埋め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するとと もに、反応輸送解析により、整理した状態変遷および関連する諸現象の発生可能性を分析し、シ ナリオの埋め戻し材の安全機能への影響を評価した。その結果、支保工内に乾燥ひび割れ等の初 期割れ目が存在し、地下水流れが移流支配である場合おいても、カルサイトや CHS の沈殿によ り、間隙は初期に閉塞することから、埋め戻し材中のモンモリロナイトの溶解/変質に与える影 響は小さい可能性が示唆された。一方で、一度閉塞した間隙が力学的な要因によって、再度開口 する場合は、支保工との反応によって形成された高 pH 地下水が埋め戻し材と接触し続ける可能 性があり、その結果埋め戻し材の変質が相対的に進行しやすくなる可能性があることが示唆され た。上記の検討結果を踏まえた上でリスク論的な手法(ボウタイモデル、ESL モデル、リスクマ トリクス)を用い、シーリングシステムの安全機能が変化するシナリオが安全評価に及ぼす影響 を、その発生可能性や影響度を軸に再評価を行った。その結果、安全評価への及ぼす影響は依然 として低く、種々のリスク回避策を講じることでさらにその影響を低減できる可能性があるとい う、これまでの考え方を支持する結果となった。

また、現象理解の一環として令和2年度から開始した、埋め戻し材の流出・侵入の検討につい ては、昨年度の予備的な室内試験結果を踏まえ、材料形態(ペレット、ブロック)、地下水流速(水 頭差)、水質(塩分濃度)および施工方法(ブロック施工の場合における坑道一埋め戻し材間の間 隙)をパラメータとして流出・侵入現象に引き起こす条件の抽出を目的とした室内試験を実施し た。その結果、定性的には、埋め戻し材を密に充填することにより、地下水水質によらず間隙が 閉塞(流出・侵入による影響は小さい)することが示唆されたともに、埋め戻し材の止水性能に 影響を及ぼす可能性のあり得る条件を概ね抽出することできた。今後は流出・侵入に影響を及ぼ す条件の詳細化あるいは定量化を図るために、流出経路や水頭差に着目した評価を行う必要があ る。また、X線CT画像からの定量化手法と合わせ、埋め戻し材の止水性能への影響も考慮し、 流出・侵入現象を取り扱う際の懸念すべき条件の有無を検討する予定である。

処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備の中では、膨潤挙動評価試験、EDZ シーリング試 験、掘削影響領域の連続性等に関わる調査技術開発、ボアホールシーリングに関する技術開発、 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、小規模模型試験を継続し、緩衝材・埋め戻 し材の力学的相互作用評価に必要な基礎的データを収集するとともに、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室内試験を追加した。その 結果、変位量や側面土圧、飽和度分布、乾燥密度分布のデータを整理し試験で生じている現象の メカニズムの考察を行うとともに、熱的影響を含む気相の影響についての基礎的データが取得で きる状況となったため、今後は解析的な検討も加え現象のメカニズムの理解を進める。

EDZ シーリング試験では、令和元年度までに底盤部に施工した EDZ の遮水のための粘土止水 壁の性能が維持されていることを確認するための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、幌延深地層研究所 の試験坑道側壁部に切り欠きを掘削し原位置施工試験を実施した。その結果、底盤部については 透水性が維持されており、施工した粘土止水壁の性能は保たれていること、側壁部についても吹 付け工法により目標とした仕様を満足できる施工が可能であることを実証的に提示した。次年度 は、施工した側壁部の吹付け領域に関する品質の詳細調査を実施する。

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)を含む EdZ(掘削影響領域)の拡がりや、それら の経時変化を高精度に把握するための技術開発として、Mini-seismic プロトタイプの製作と性能 試験、同一領域を対象とした高精度物理探査、地質調査、水理調査とそれらの結果の総合的解釈 による物理探査の高精度化の効果と課題の抽出を行うとともに、坑道周辺の EDZ の経時変化の データの蓄積とデータ評価手法に関する基礎的な検討を実施してきた。令和3年度は、次年度に 予定している高精度化した物理探査手法の適用性評価のため、水みちとしての連結性が確認され ている箇所へのグラウト材の注入、孔間透水試験などによる効果の確認、水没しているボーリン グ孔におけるプロトタイプの適用性の確認を深度 350m 坑道の試験サイトで実施するとともに、 非常にわずかな EDZ 等の経時変化の評価手法の構築を目標とした、弾性波・比抵抗トモグラフ ィー調査結果を用いた同時逆解析手法の構築およびそれに必要なデータ取得を実施した。

坑道内から掘削したボアホールのシーリング技術開発では、令和2年度の諸文献調査や室内試 験等を踏まえ、室内モックアップ試験を実施するとともに幌延深地層研究所における原位置試験 計画を策定した。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開始している。

埋め戻し材の施工技術オプション及び製造・施工プロセス管理手法の整備では、撒き出し・転 圧工法について、模擬坑道における実スケールでの施工試験等の結果に基づいて、施工時に生じ る埋め戻し材の乾燥密度のバラつきが坑道全体の巨視的な透水性に与える影響について解析的に 検討し、乾燥密度の分散が2倍になっても巨視的透水係数及ぼす影響は小さいことを示した。吹 付け工法については、連続施工性の向上とリバウンドの抑制に向けて含水比をパラメータとした 施工試験を実施した。吹付け施工では、乾燥密度のばらつきの少ない埋め戻し施工ができたが、 連続施工性とリバウンドの抑制の観点から、材料製造プロセスにおける含水比の設定が重要な管 理項目であることがわかった。また、スクリュー工法については2本のスクリューを用いた要素 試験により、スクリューの回転方向と後退速度が充填性能に影響するパラメータであることを確 認した。ブロック工法については、自己シール性の評価方法を提案するとともに、評価に必要な 最大膨潤率のデータの取得に着手した。埋め戻し材の浸潤解析結果の妥当性確認に資するデータ 取得については、境界条件を制御した浸潤試験を実施して埋め戻し材の浸潤挙動に関するデータ を取得した。

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2年度までの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等を踏まえて、我が国に適用可能な品 質管理プログラムおよび性能確認プログラムの構築に向けた網羅的な情報の整理を行った。また、 これらのプログラムに関連する地下構成要素の品質保証及び状態把握に係る技術開発として、埋 め戻し施工を検討対象に計測技術の高度化を継続した。具体的には、光ファイバセンサを用いた 埋め戻し材の乾燥密度測定、坑道天端の空隙検知、膨潤により発生する圧力測定に関する要素試 験を実施して、施工試験に適用できる見通しが得られた。、無線給電技術については、力学プラグ などに含まれる鉄筋を対象とした要素試験を実施して、鉄筋の存在による給電効率の低下を抑制 する対策を示した。

#### 6.2 現フェーズにおける本事業のとりまとめに向けた検討

令和4年度は、資源エネルギー庁より公表された「地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30年度~ 令和4年度)」に示された研究開発計画に従い、平成30年度から実施してきた5か年 の技術開発の最終年度であることから、事業の成果のとりまとめを実施する予定としており、そ のための検討を令和3年度から開始した。

過去の事業のとりまとめを参考としつつ、今回のとりまとめに当たっては、以下の事項を考慮 して実施することを検討している。

- ・個々の技術開発項目に関する事業成果について、本事業の目標である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・施工技術の開発の内容が、事業主体であるNUMOが検討している処分場の設計・操業・閉鎖とどのように関連しているかを、初めて見る方にもできるだけ理解しやすいように配慮する。
- ・その上で、個々の技術開発項目と事業目標と関係性を明示するとともに、個々の技術開発項目の成果に関するトレーサビリティを確保しつつ、それを単純に紐解けるようにするため、
   第一次情報となる技術開発項目毎に関連する外部公開されている技術情報を明示する。

なお、本事業で実施してきた技術開発は、主に埋め戻し材、止水プラグの設計施工といった閉 鎖時に人工的に構築する構造物にかかわるものであることから、閉鎖時の地質環境状況が想定と 著しく異なる(Ex.処分坑道等への湧水が多い等)場合を除き、基本的にはサイトジェネリックに 適用可能なものである。

これらを踏まえ、作成したとりまとめ報告書の骨格として考えている案を図 6.3-1~図 6.3-3 及び表 6.3-1 に示す。図 6.3-1 は、平成 31 年度に一度事業成果のとりまとめを行った際に提示 したものをその後の技術開発の状況に合わせ変更したものである。これらについては、令和 3 年 度第 2 回委員会に資料として提示し、各委員から好意的な受け止めを頂いたことから、次年度の とりまとめに当たっては、これらをベースとして進めることとするが、次年度の最終とりまとめ 時には変更されうることは付記しておく。以下に、図 6.3-2 に関する個別の技術開発項目毎の現 時点での成果概要を示す。

#### 6.2.1 埋め戻し材の設計

#### (1) 要求性能の設定

埋め戻し材については、本事業では主に廃棄体竪置き方式をイメージした技術開発を進めてき ているが、要求性能の設定は処分場の閉鎖後に埋め戻し領域が選択的な水みちとならない、すな わち処分場が位置する岩盤の透水性と同等以下になることが設計時の基本的な要件となる。この 考え方は、瑞浪超深地層研究所(今は埋め戻されている)の深度 500m 坑道で実施した吹付け施 工試験や模擬空洞を用いて実施されてきた実スケールの転圧・締固めの施工試験などでも同様で あり、本事業では、NUMO 包括的報告書などで示されている情報(ベントナイトの有効粘土密度 と埋め戻し材の透水性の関係等)に基づき設定している。実事業では、対象サイトの母岩の透水 性との兼ね合いで設定されると考えられるが、現状はジェネリックな地質環境を対象とした研究 開発であるため、埋め戻し材を構成するベントナイト以外の材料について、わが国に分布する様々 な岩石を用いた埋め戻し材を作成し要素試験を実施して、それらの埋め戻し材としての利用可能 性に関するデータを蓄積した。従って、事業者が選定したサイトにおける最初の検討情報として 活用できるデータが取得・整備されている。(【坑道シーリングに関わる施工技術の整備】埋め戻 し材の特性を踏まえた施工技術オプションの整備、小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工 試験)

#### (2) 材料仕様の設定

(1)を満足する材料の基本仕様(具体的には実施工時の管理のベースとなる埋め戻し材の密度)を設定した後、埋め戻し後に生じるであろう埋め戻し材の長期的な変遷の影響(坑道閉鎖時の残置物との相互作用も含む)や、本事業では考慮外である経済性等の観点も含め、実際に施工に利用される材料仕様の候補が設定される。これについては、本事業では、地上での工学規模試験で施工の効率性も含めた形で最終的な材料仕様を設定しており、実際の地層処分事業においても同様のプロセスを取ることが推奨される。さらに、竪置き方式の場合、坑道の埋め戻し材と人工バリア周辺に設置される緩衝材との相互作用といったものが閉鎖後の長期変遷の中で発生する可能性もあるため、その現象を把握し閉鎖システムへの影響を評価するための技術の提示を目標として、膨潤挙動相互作用試験のような実スケールの縮尺模型試験を実施してきており、様々な地質環境を想定し基礎データの取得が進んでいる。このような事象が埋め戻し材・緩衝材の両者の性能に影響を与えうる場合は、設計上それを考慮する上での基礎的知見として活用できる。(【坑道シーリング技術の性能確認】膨潤挙動相互作用試験)

#### (3) 要求性能を満足する施工方法の検討

施工方法の選定は、材料や埋め戻し領域の品質のみならず、実処分場の設備や対象の地質環境 (幌延のように可燃性溶存ガスが多量に賦存するような場合など)も重要な要素であり、現実的 には、材料選定とほぼ平行して進むと想定される。このため、施工方法をあらかじめ設定し、実 機を用いた工学規模試験を行うことが必須となる。本事業では、竪置き・横置きの処分概念に対 応できるよう、現状考えられる施工方法(撒きだし・転圧工法、吹付け工法、ブロック定置、ス クリュー工法)に関する実スケールでの技術実証的な試験や工学規模試験を行い、実施工時の品 質管理手法も含め(1)の要求性能を満足する NUMO が利用可能なレベルの技術を提示してきて いる。図中の表は、本事業の期間内にわが国の地質環境を対象としてこれまで技術的な成立性が 確認された施工方法や上述のステップのどの程度まで進んできたかをまとめたものである。(【坑 道シーリングに関わる施工技術の整備】埋め戻し材の特性を踏まえた施工技術オプションの整備、 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験)

#### 6.2.2 止水プラグの設計

地下深部の岩盤中に坑道等を掘削すると、その影響により岩盤の初期物性が低下する範囲が坑 道沿いに連続的に発生する(EDZ:掘削損傷領域)。このため、閉鎖に伴う坑道埋め戻し後に、EDZ の部分が選択的な物質移動経路にならないようにするための工学的対策として止水プラグ、施工 された埋め戻し材が初期の品質(密度)を維持するための対策として力学プラグの設置が考えら れている。このうち、止水プラグについては、坑道周辺部の EDZ を包含する形での設置が必要と なることから、埋め戻し材と同様の恒久的な透水性の維持性能とともに、施工の難易度が高い。 また、前述の埋め戻し材の検討とは異なり、EDZ を含めた環境を地上で再現することは現実的に 不可能であるため、本事業では、止水プラグの設計・施工に関して、幌延深地層研究所の坑道を 活用した技術開発を進めて来た。

#### (1) 要求性能の設定

止水プラグに求められる要求性能は、閉鎖後に EDZ が周辺岩盤よりも早い物質移動経路にな らないことであり、EDZ の流れを途中でせき止め、結果として周辺岩盤の透水性と同等以下の速 度にすることである。このため、プラグの材料については、埋め戻し材と同様の考え方で設定す ることになるが、本事業では、埋め戻し材同様ベントナイト混合材料を検討対象とした。(【坑道 シーリング技術の性能確認】EDZ シーリング試験)

#### (2) 材料仕様の設定

これも先の埋め戻し材と同様の観点で仕様を検討することになるが、閉鎖後の状態では EDZ 内は健全な岩盤や埋め戻された坑道部分と比べ相対的に物質の流れる速さが早いことが想定され るため、止水プラグとしての長期的な性能を維持するためには材料に含まれるベントナイトの量 を増やす必要がある。材料仕様の設定にあたっては、室内試験および地上での工学規模試験を通 じて設定しており、その手法は実際の事業でも参考となるものである。(【坑道シーリング技術の 性能確認】EDZ シーリング試験)

一方、ベントナイト系材料を用いた止水プラグの構築には、規模の大きな岩盤掘削とその後の 施工が必要となることから、ボーリング孔からの注入により同様の効果を得られるような材料と その施工方法が望まれてきた。名古屋大学を中心としたグループは、長年実施してきた自然界に 存在するコンクリーションの研究成果に基づき、それと類似の効果を発揮するコンシードと呼ば れる新材料を開発した。コンシードが有する特性は、閉鎖後長期の変化も考慮すると止水プラグ で求められる性能と同等以上であり、かつ材料は溶液型であるため注入工法での施工が可能であ る。このため、令和3年度からコンシードの注入施工により止水プラグ同様の効果が得られるか を確認するための原位置試験を開始し、今年度末までの結果から同様の効果が得られる見通しが 得られている。(【坑道シーリング技術の性能確認】EDZ シーリングのための代替材料に関する基 礎的検討)

#### (3) 移行抑制にもっとも効果的なプラグ形状・配置場所の検討

止水プラグは、局所的に配置されるものになるため、移行抑制にもっとも効果的なプラグ形状 を決定するためには、EDZ の幅を特定することは勿論、プラグ自体の大きさ(プラグの長さ)や その形状の設定も設計上必要な情報となる。本事業では、これらの点について、プラグの幾何学 形状を考慮した 2 次元の物質移動感度解析を実施し、形状としては矩形の形状の方が移行抑制の 面では好ましいことや、施工されたプラグと岩盤境界部の状態がプラグを回りこむような物質の 移動を妨げる意味で重要であることが示し、実際のサイトが決定した後の設計に際しての検討に も活用できる知見を提示した。(【坑道シーリングの設計評価技術の整備】)

後述するプラグの施工試験等では、矩形形状に近い形で岩盤掘削がなされているが、この岩盤 掘削に伴う元々の EDZ の損傷範囲の拡大やそれを最小化する掘削工法等については本フェーズ 以降の課題となる。また、止水プラグの設計・施工では対象となる設計条件となる EDZ の範囲や 物性を定量的に把握する必要があるが、実際の処分事業を考慮すると、これらの情報は非破壊調 査で得られることが望ましい。また、幌延のような堆積軟岩の地質環境は、弾性波の到達距離が 短い、バックグラウンドの比抵抗が低いといった特徴とともに岩盤の長期変形に伴う EDZ の範 囲や物性の経時的な変化も想定されることから、地盤岩盤調査で一般に適用されるトモグラフィ 一調査をベースとしその高度化を行ってきた。具体的には、3 次元でのトモグラフィー解析技術 の適用性の検討、高密度での孔内検層型のプロトタイプの製作とその性能試験、EDZ の範囲や物 性の経時変化を客観的に把握・評価するための新たな逆解析技術の開発を行っており、次年度の 物理探査と解析をもって、今回高度化した物理探査技術の有効性や適用範囲等を評価する予定で ある。(【坑道シーリング技術の性能確認】掘削影響領域の連続性等に関する調査技術開発)

#### (4) 施工方法の検討

既往の研究事例では、国外とわが国でプラグの形状などが異なることもあり、施工方法についてほとんど前例がなかったため、本事業では、本来坑道全周にわたって施工される必要があるプラグを底盤部と側壁部にわけ、ペレット充填と吹付けによる施工試験を行うとともに、先行実施した底盤部の止水プラグを模擬した粘土止水壁の性能を経時的に調べてきた。本事業では、底盤部はラインドリリングで、側壁部はブレーカ掘削で設定した形状の空間を構築しているため、掘削そのものによる EDZ を含む物理的損傷は抑えられていると推定される。これらの施工試験の結果、ペレット充填で構築した底盤部の粘土止水壁は、坑道開放状態であるため最も物質移動が速いと考えられる現状下でも施工後3年程度の間低透水性の性能を維持していることを確認するとともに、側壁部のプラグ施工についても、吹付け工法が適用可能であることを品質管理手法を含む形で実証した。なお、プラグ施工は局部的であることから、適用可能な施工オプションは少ない。プラグの構成材料の状態変化を細かく知るためには、構築した粘土止水壁の解体・分析を行う必要があるため、底盤部は今後も継続的な透水性調査が可能な状態とし、側壁部に施工したものについて次年度解体調査を行う予定である。(【坑道シーリング技術の性能確認】 EDZ シーリング試験)

#### 6.2.3 その他閉鎖技術に関連する技術開発

#### (1) 坑道内からのボーリング孔の閉鎖に関する技術開発

実際の処分場では、先進ボーリング調査のような処分場建設時にボーリング孔が残らない形の もの以外で、坑道内からの調査時にボーリング孔を掘削する可能性は低いと考えているが、実施 された場合は、そのボーリング孔自体が閉鎖後長期に水みちにならないような閉塞措置を行う必 要があり、それに対する要求性能は、埋め戻し材や止水プラグと同等レベルのものとなると想定 される。また、坑道内からのボーリング孔では、坑道壁面と孔奥の水圧差が大きい(高差圧)た め、高い圧力勾配の下で確実な閉塞が行える技術が必要となる。この観点で、本事業では、ボア ホールシーリング技術の開発も進めてきており、これまでに文献調査、室内試験やモックアック 試験を通じてボアホールシーリングのための具体的な材料選定、施工方法の検討を行ってきてい る。実証試験は令和4年度に実施する予定であり、この結果からボアホールシーリングに関する 品質管理を含む一連の技術開発成果を提示できると考えている。(【坑道シーリング技術の性能確 認】ボアホールシーリング試験)

#### (2) 社会的受容性の向上、安全規制の考え方に依存した対応

本事業以前より実施されていた長期モニタリング技術開発に関連する研究成果等を踏まえ、わ

が国における実際の処分事業の進め方も見据えた上で、閉鎖措置計画認可(閉鎖の判断)を効率 良く円滑に行うための方法論として、特にサイト調査段階から建設・操業段階までの間の品質管 理プログラム(調査・設計・施工時に適用)と性能確認プログラム(主に施工後の品質確認に適 用)の構築を進めている。また、後者については、構築している性能確認プログラムに基づき、 開発項目を絞り込んできており、光ファイバーを用いて埋め戻し材の密度や埋め戻し領域とその 外側の境界部の状態変化を把握する技術や、伝送ケーブル等を使わずに処分場などで長期にモニ タリングを行うための無線給電技術開発を進め、本事業における技術開発を通じそれらの適用範 囲が明確になるとともに実用化に向けた目途も立ちつつある。光ファイバー関係については、次 年度に模擬坑道における埋め戻し試験の際に適用し実証試験を行う予定である。(【製作・施工技 術に係る品質保証体系及びモニタリングの整備】)

閉鎖後長期の変遷過程で、閉鎖後の処分システムの安全性に影響を与える可能性がある事象を 事前に検討し対策を提示することは、地層処分に対する安心感の醸成とそれに伴う社会的受容性 の向上に重要であると考え、本事業では時間の経過により埋め戻し材の流出等で坑道内の埋め戻 し領域と外側境界に隙間が生じるあるいは閉鎖時に残置が想定される支保工そのものが劣化し EDZ 以外で物質が移動する経路になりうる可能性について、物質移動に関する最新の反応輸送解 析手法を用いた解析的検討を進め、それらの事象が閉鎖後の処分システムの安全性に影響を与え る可能性は低いことを示すとともに、どのような条件下でそのような事象が発生するかを検討す るための室内試験やその結果も考慮した形で、より保守的にそのような事象の影響が生じないよ うにするための工学的対策についても合わせて検討・提示する予定である。ただし、この対策に ついては、実際にその実施が可能かどうかも含め今後専門家間での議論・認識共有が重要と考え られる。(【坑道シーリングの設計評価技術の整備】シーリングシステム長期性能評価技術開発、 埋め戻し材の再冠水挙動、ベントナイトの流出・侵入)

#### 6.3 おわりに

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁から日本原子力研究開発機構および原子力環境整備 促進・資金管理センターが受託を受け、地層処分施設閉鎖技術の高度化や基盤情報の整備を目的 として実施した技術開発の、令和3年度の技術開発成果を取りまとめたものであり、コロナ禍の 影響はあったものの、関係諸氏のご協力により、令和3年度までの事業計画が計画通り達成でき た。また、令和3年度も、幾つかの項目について国内外での学会(土木学会,原子力学会、The 14th SEGJ International Symposium)への個別成果の公表を行ったが、地層処分施設の閉鎖技 術の信頼性向上に資するとともに、地層処分が信頼に足るものとして社会に受け入れられる一助 となるよう、今後も積極的な外部への情報発信を行っていく。



図 6.3-1 本事業の成果を踏まえ処分場の閉鎖にあたり提案する設計体系(案)



図 6.3-2 提案する設計体系(案)と本事業における個別技術開発との関連(1)

ち術の整備】 オプションの整備						
	ベントナ	F7F	締固め			
	種類	混合率(%)	エネルギー			
	Na型 (クニゲルV1) Ca型 (クニボンドRW)	5, 15, 30, 40, 50	1, 2, 4.5Ec			

●:概ね実用に耐える成果が

(必要がない場合も含む)



図 6.3-3 提案する設計体系(案)と本事業における個別技術開発との関連(2)

### 表 6.3-1 閉鎖技術開発の進捗等に関する整理表(案)

対象となる閉 鎖構成要素	設計項目	求められる性能・条件	その他の考慮事項	関連する本公募事業での成果(H30~R2年度)	R4年度までに得られる 本公募事業での成果 (見込み)	関連する既公開資料(H31年度~R3年度まで)
埋め戻し村	要求性能の設定	坑道部全体の恒久的な低透水性 場の維持	人工パリア構成(縦置き、横置き、PEM)およ び母岩の地質環境特性(主に透水性)	・岩種・地下水およびペントナイトの種類を変えた室内試験によ り、多様な地質環境を想定した問題時の埋め戻し村仕様に関する 基礎的データを収集しデータベース化(H30~R1) ・環度500mの実際の地質環境下における坑道埋め戻し試験のた め、母岩の透水性を考慮した埋め戻し材の透水性の目標設定や関 連した室内物性試験を実施(H30~R1)	同左	小栗光、千々松正和、川久保政洋:地層処分における埋め戻し材料の締固め性および透水性、令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演 会, CS12-24.
	材料仕様の設定	閉鎖後長期に渡り低透水性が維 持できること	混合土の使用が前提(施工性、経済性などの 観点から)	<ul> <li>・ 深度500mの実際の地質環境下における坑道埋め戻し試験時の材料選定等を地上での予備試験に基づき実施(H30~R1)</li> <li>・ 室内試験により、人工パリアとなる緩価材の挙動に対する地下水組成や内在する空気の影響に関するデータを取得するとともに、縮尺模型試験により、埋め戻し材ー緩低材間の力学的相互作用に関する基礎データを取得(H30~R2)</li> </ul>	同左	木村駿、木野田君公、杉田裕、森岩寛稀, 丹生屋純夫, 志村友行, 埋め戻し材との力学的相互作用を考慮した緩衝材の膨潤挙動に関する検討, 日本原 子力学会2020年春の年会, ID-06.
	要求性能を満足する施工方法の検討	坑道部全体にわたって均質に施 工が可能	地下施設内での不測の事態にも対応可能な施 工方法	<ul> <li>・深度500mの実際の地質環境下における坑道埋め戻し試験では、 坑道全域の埋め戻しを吹付け工法で実施し、施工時の品質管理方 法を含む同工法の有効性を実証(H30~R1)。</li> <li>・模型空洞を利用した実規模試験により、撒きだし・転圧工法で 目標とする密度等を達成できることを実証(R1~R2)</li> <li>・室内試験、地上での工学規模試験により、スクリュー工法の適 用性を確認(R1~R2)</li> </ul>	・スクリューエ法を用いた実規模での 適用性の確認	H. MATSUII, R. YAHAGI, H. ISHIZUKA & T. TOGURI: IN-SITU BACKFILLING EXPERIMENT OF THE SMALL SCALE DRIFT BY SPRAY METHOD IN MIZUMAMI UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY, JAPAM, Baste Management and the Environment X, pp. 145-pp. 159, 2020. 失我良二、石塚光, 戸栗智仁, 松井裕哉, 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験(1) -実証試験に向けた材料、機械の選定-、令和元年度土木学会全国大 (業務:74回年次字解請演会):11-164. 石塚光, 安永良二, 戸栗智仁, 松井裕哉, 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験(2) - 瑞浪超深地層研究所を活用した実証試験-, 令和元年度土木学会全国大 (業務:74回年次字解請演会):11-164. 石塚光, 新賀美会, S12-36. 川久保昌平, 千々松正和、今井久: 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験(3) -事後調査の概要-, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次字解講演会, S12-37. 山母ネジギ構講演会, S12-37. 上田祥夫, 川久保昌平, 千々松正和、公井裕哉、尾崎裕介: 小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験(4) -事後調査における室内試験結果-、令和3年度土木学会全国大会第76回年次学解講演会, S12-37. 上田祥夫, 川久保二, 千年楷講演会, S12-38. 小果, 伊藤, 山田, 千々松, 川久保、阿斯, 微吉出し,転任工法による坑道の埋め戻しに開する小規模施工試験, 令和3年度土木学会全国大会第75回年次学解講演会, CS12-38. 小果, 伊藤, 山田, 千々松, 川久保、阿斯, 勤舎出し,転任工法による坑道の埋め戻しに開する小規模施工試験, 令和3年度土木学会全国大会第75回年次学解講演会, CS12-39. 森路違, 伊喜斯参, 川久保改洋: 視艇坑道を対象とした地層処分場の埋め戻し村の転工試験、令和3年度土木学会全国大会第76回年次学解講演会, CS12-39. 森路違, 伊書斯参, 川久保改洋: 視板坑道を対象とした地層処分場の埋め戻し村の転工試験、令和3年度土木学会全国大会第76回年次学解講演会, CS12-39. 森路違, 小生屋純大, 森野弘之, 川久保政洋, 深谷正明: スクリューフィーダーによる地層処分場が道理の戻し技術の開先, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学解读演会, CS12-40.
止水ブラグ	要求性能の設定	EDZ領域の恒久的な移行抑制機能		・底盤部でのEDZシーリング試験において、粘土止水壁の経時的な 透水性を評価し、施工後2年経過後も性能が維持されていることを 確認(H30~R2)	・底盤部の粘土止水壁の性能確認 (R3,R4)	武田匡樹、木村駿、本島貴之、壇英恵、粘土系材料が有するEDZシーリング機能の検証(2)原位置試験による透水性評価、日本原子力学会2020年秋 の大会、10-13. 壇英恵、本島貴之、木村駿、武田匡樹、粘土系材料が有するEDZシーリング機能の検証(3)浸透流解析による透水性評価、日本原子力学会2020年秋 の大会、10-14. 壇 英恵、本島 貴之、木村 駿、武田 匡樹:粘土系材料が有するEDZのシーリング機能の検証(4)原位置試験および浸透流解析による透水性評価、 日本原子力学会2021年秋の大会
	材料仕様の設定	閉鎖後長期に渡りEDZ領域の移行 抑制機能が維持できること	EDZ自体の長期的な変化の有無にも柔軟に対応 できること	・底盤部でのEDZシーリング試験において、粘土止水壁の経時的な 透水性を評価し、施工後2年経過後も性能が維持されていることを 確認(K30~R2) ・物理探査技術の高度化の一環として、既に形成されているEDZの 経時変化を調査し、10年程度にわたってその範囲や物性に大きな 変化がないことを確認するとともに、吹付けコンクリートがトモ グラフィー開査結果に反応すま愛について親祈的に検討(R1)	<ul> <li>・底盤部の粘土止水壁の性能確認 (R3, R4)</li> <li>・EDZの経時変化に関する物理探査お よびR2の室内試験結果を踏まえた調査 の再検討</li> </ul>	Yusuke Ozaki, Nobukatsu Miyara: Evaluation of time lapse behavior of excavation damaged zone by first arrival tomography in Horonobe underground research laboratory, The 14th SEGJ International Symposium. 18-21, October. E
	移行抑制に最も効果的なブラグ形状の検 討	最小限の数量で、開鎮後長期に 渡り処分システムとしてのEDZ領 域の移行抑制機能が発揮できる こと	極端な条件の変動の可能性(動水勾配の方向 が逆転するなど)	<ul> <li>・地質環境およびブラグの幾何学的形状(寸法、位置など)をパ ラメータとして、ブラグを隔にモデル化した物質移動感度解析を 実施し、相対的に効果的が高い形状は実形であることや、他のパ ラメータの変動と移流抑制効果との関係に関する知見が得られた (R1)</li> <li>・物理探査技術の高度化の一環として、各種トモグラフィー調査 や高精度物理探査のためのブロトタイブを開発・適用し、新第三 熱堆積とおいても既存のトモグラフィー技術により坑道周辺の 狭い範囲に分布するEDZを概略的に捉えられること、ブロトタイプ により、より高精度な範囲の特定や物性評価が行える見通しが得 られた(R1~R2)</li> </ul>	・物理探査で取得できる物性と透水性 との関係性の検討および、割れ目への グラウト注入とその領域における高群 度物理探査結果を詰まえた、同手法の 解像度の把握(R3, R4)	松井裕哉、田中達也、戸谷成寿、奥木さくら、橋本秀爾:止水ブラグの設計に関する数値解析的検討、令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術 講演会、CS12-14
	施工方法の検討	止水ブラグとしての機能を満足 する品質で、EDZの拡大などを生 じないこと	地下施設内での不測の事態にも対応可能な施 工方法	・底盤部におけるEDZシーリング試験では、実際の地質環境下にお いてベントナイトベレット充填を行い、目標とする密度での施工 が可能であることを実証(R1)	<ul> <li>・ 側壁部におけるEDZシーリング試験 による、止水ブラグ構築のための吹付 け工法の適用性の把握(R3)</li> </ul>	木村駿,武田匡樹,本島貴之,垣英恵,粘土系材料が有するEDZシーリング機能の検証(1)材料選定に資する基礎物性の取得,日本原子力学会2020 年秋の大会,10-12. * 木村 駿,武田 匡樹,本島 貴之,壇 英恵:止水ブラグを対象としたベントナイト系材料の吹付け施工性確認試験(1)地上吹付け試験におけるベン トナイトの吹付け特性データの取得,日本原子力学会2021年秋の大会
その他閉鎖技術 に調達する技術 開発	坑道内からのポーリング孔の閉鎖に関す る技術開発	将来の処分場建設等で掘削され る可能性がある坑道内からの ボーリング孔が閉鎖後物質移動 の短絡経路とならないこと	ボーリング孔の閉塞が他の閉鎖要素に与える 影響	坑道内からのボアホールシーリングの基本的考え方を提示すると ともに使用可能な株補材料の基礎的物性を把握(R2~R3)	原位置試験による、左記の適用性の把 握 (R4)	
	社会的受容性の向上、安全規制の考え方 に依存した対応	非常に発生確率が低いと思われ		閉鎖後長期に可能性は非常に低いが発生しうる事象(例えば、支 保エコンクリートからの化学成分の消出によるコンクリート部分 の高速水性や、消出成分による違の長し村等の性能%化など) を仮定し、多様な地質環境を想定した物質移動解析を実施し、抽 出した事象による処分システムへの影響はほどんどないと考えら れることを示すとともに、それへ対策が求められた場合の具体的 な対処方法の例示(HSO~R3)	左記に加え、コンクリート成分の溶出 に起因した埋め戻し材や止水プラグの 安全機能が変化することが非常に生起 しにくいシナリオであること、what if的にこのようなシナリオを考慮した 場合に取り得る工学的対策を提示	<ul> <li>杉田裕、武田匡樹、大野宏和、若杉圭一郎、高瀬博康、シーリングシステムの長期劣化が安全機能に与える影響評価(1)FEPの整理、日本原子力学会2020年秋の大会、1003.</li> <li>三津山和朝、武田匡樹、杉田裕、大野宏和、若杉圭一郎、高瀬博康、高橋博一、橋本 朋子、シーリングシステムの長期劣化が安全機能に与える影響評価(2)シナリオ設定、日本原子力学会2020年秋の大会、10-04.</li> <li>高橋博一、武田匡樹、杉田裕、大野宏和、芳杉圭一郎、高瀬博康、三津山和朗、橋本朋子、シーリングシステムの長期劣化が安全機能に与える影響評価(3)物資移行解析、日本原子力学会2020年秋の大会、10-05.</li> </ul>
		処分システムの安全性の評価期 間も念頭に、その安全性を担保 できることを説明するための開 鎖システムの品質保証体系の提 示		処分事業が進む国外の情報を整理・検討した上で、わが国の多様 な地質環境を想定し、サイトが特定された場合に適用可能な処分 場閉鎖後の支生性を担保するための関連システム構成要素の品質 保証体系や性能確認の考え方および性能確認のための関連ハード 技術の基礎的検討を実施(H30~R3)	処分事業が進む国外の情報を整理・検 おした上で、わが国の多様な地環環は を想定し、サイトが特定された場合に 適用可能な処分場閉鎖後の安全性を担 保するための閉鎖システム構成要素の 品買保証や性能施認の体系および性能 確認のための関連ハード技術の実用化 の見通しを提示	江藤、九州大学大学院工学研究院環境社会部門 島岡研究室主催 勉強会、放射性廃棄物の地層処分における地中無線モニタリング技術の研究,2019. 江下,可逆性・回収可能性の維持に伴う技術的対応と性能評価に向けた工学技術の役割、2019年度原子力環境整備促進・資金管理センター研究発表 会、2019. 江中,可逆性を担保する回収可能性に関する技術的対応と性能評価に向けた工学技術の役割~(2)より確からしい性能評価に向けた工学技術の役割 ~、日本原子力学会誌、Vol. 62, No. 7, pp. 389-394, 2020. 須山、升元、栗原、川久保、蓮井、地下環境における長距離無線伝送技術の適用性の検討、令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会、 2020.

## 付録 1 膨潤挙動相互作用試験

# 目次

1. 膨潤举動相互作用試験	付 1-2
<ol> <li>小規模模型試験の解体調査</li> </ol>	付 1-2
<b>2.1</b> 小規模模型試験の試験条件	付 1-2
<b>2.2</b> 解体調査時のリバウンド量	付 1-2
2.3 緩衝材の解体調査	付 1-3
2.4 埋め戻し材の解体調査	
<ol> <li>縮尺模型試験の解体調査</li> </ol>	付 1-12
3.1 縮尺模型試験の試験条件	付 1-12
<ol> <li>3.2 解体調査時のリバウンド量</li> </ol>	付 1-12

#### 1. 膨潤挙動相互作用試験

令和3年度の膨潤挙動相互作用試験で実施した小規模模型試験及び縮尺模型試験で得られた計 測データについて本付録資料に示す。

#### 2. 小規模模型試験の解体調査

#### 2.1 小規模模型試験の試験条件

小規模模型試験における緩衝材は、直径 93 mm、高さ 174 mm として 6 個の緩衝材ブロック に分割して作製した。1 個のブロックは直径 93 mm、高さ 29 mm である。緩衝材ブロックは、 クニゲル V1 とケイ砂を 70:30 の割合で混合した材料を乾燥密度 1.80 Mg/m³、初期含水比 10.5% となるように静的に締固めた。

小規模模型試験における埋め戻し材は、内径 100 mm の試験容器内に 87 mm の高さとなるように作製した。作製時には、1 層あたりの高さを 29 mm として 3 層に分割して静的に圧縮した。 クニゲル V1 と掘削ズリを 40:60 の割合で混合した材料を①乾燥密度 1.40 Mg/m³、初期含水比 30.0%もしくは②乾燥密度 1.20 Mg/m³、初期含水比 35.0%となるように作製した。

付表 2-1 に小規模模型試験で実施した試験ケースの試験条件を示す。Case1~Case3 を埋め戻し材の乾燥密度 1.40 Mg/m³で Case4 と Case5 を埋め戻し材の乾燥密度 1.20 Mg/m³で実施した。

ケース名		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	
	乾燥密度	1.80					
緩衝材	$(Mg/m^3)$	1.80					
	含水比		10.5				
	(%)	10.3					
埋め戻し材	乾燥密度	140 19			20		
	$(Mg/m^3)$	1.40		1.20			
	含水比	30.0			25.0		
	(%)				55.0		
試験日数(日)		47	43	42	7	11	

付表 2-1 小規模模型試験の試験条件

#### 2.2 解体調査時のリバウンド量

小規模模型試験の終了時にベロフラムシリンダによる鉛直圧 0.087 MPa を除荷し、鉛直圧を 取り除いたことによる緩衝材の膨潤変位量(リバウンド量)を変位計により計測した。付図 2-1 に計測したリバウンド量を示す。



付図 2-1 小規模模型試験におけるリバウンド量

#### 2.3 緩衝材の解体調査

緩衝材の解体は押し出し機を用いて、試験容器から緩衝材を10 mm 程度押し出し、ヘラやワ イヤーソー等を用いて円盤状にカットした。高さ方向の分割数は、Case1が12層、Case2が18 層、Case3が12層、Case4が14層、Case5が13層である。さらに、カットした緩衝材は中央 部を長さ約30 mm、幅約10 mmの大きさで9個の小ブロックに分割した。緩衝材の底部を1層 目として埋め戻し材との境界に近づくほど大きな番号となるようにした。水平方向については、 ブロックの番号を左から1番、2番・・・とし、最も右のブロックを9番とした。

緩衝材ブロックの乾燥密度はパラフィン法(JISA1225:2020)と3Dスキャナ(KEYENCE 社製, VL-500)により実施した。Case1とCase2については一部のブロックについてパラフィン 法と3Dスキャナによる乾燥密度測定を実施した。また、Case3は半分のブロックを対象に、 Case4とCase5については全ブロックを対象に3Dスキャナによる乾燥密度測定を実施した。 付図 2-2~付図 2-11にCase1~Case5の乾燥密度計測結果および飽和度算出結果を示す。



付図 2-2 Case1 における 3D スキャナおよびパラフィン法による乾燥密度計測結果



付図 2-3 Case1 における 3D スキャナおよびパラフィン法による飽和度算出結果



付図 2-4 Case2 における 3D スキャナおよびパラフィン法による乾燥密度計測結果



付図 2-5 Case2 における 3D スキャナおよびパラフィン法による飽和度算出結果



付図 2-6 Case3 における 3D スキャナによる乾燥密度計測結果







付図 2-8 Case4 における 3D スキャナによる乾燥密度計測結果







付図 2-10 Case5 における 3D スキャナによる乾燥密度計測結果



付図 2-11 Case5 における飽和度算出結果

#### 2.4 埋め戻し材の解体調査

埋め戻し材については、Case1~Case5のすべてで埋め戻し材を高さ方向に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。付図 2-12~付図 2-16に埋め戻し材の含水比分布を示す。



付図 2-12 Case1 における埋め戻し材の含水比分布



付図 2-13 Case2 における埋め戻し材の含水比分布



付図 2-14 Case3 における埋め戻し材の含水比分布



付図 2-15 Case4 における埋め戻し材の含水比分布



付図 2-16 Case5 における埋め戻し材の含水比分布

#### 3. 縮尺模型試験の解体調査

#### 3.1 縮尺模型試験の試験条件

縮尺模型試験における緩衝材は、直径 113 mm、高さ 210 mm として 6 個の緩衝材ブロックに 分割して作成した。1 個のブロックは直径 113 mm、高さ 35 mm である。緩衝材ブロックは、ク ニゲル V1 とケイ砂を 70:30 の割合で混合した材料を乾燥密度 1.80 Mg/m³、初期含水比 10.5%と なるように静的に締固めた。

縮尺模型における埋め戻し材は、内径 120 mm の試験容器内に 105 mm の高さとなるように 作製した。作製時には 1 層あたりの高さを 35 mm として 3 層に分割して静的に圧縮した。クニ ゲル V1 と掘削ズリを 40:60 の割合で混合した材料を乾燥密度 1.20 Mg/m³、初期含水比 35.0%と なるように作製した。

付表 3-1 に縮尺模型試験で実施した試験ケースの試験条件を示す。イオン交換水-1 は試験用水 にイオン交換水を用いて実施した。0.2M-NaCl では、0.2 mol/L の NaCl 水溶液を試験用水に用 いた。

ケース名		イオン交換水-1	0.2M-NaCl	
	乾燥密度	1.0	0	
經產社	$(Mg/m^3)$	1.0	0	
极阳初	含水比	10	F	
	(%)	10.5		
	乾燥密度	1.20		
囲み豆しな	$(Mg/m^3)$			
星の戻し肉	含水比	25	0	
	(%)			
就要田本		イオン応摘水	0.2 mol/L	
中气 闷火 八	7/17	イオン文換示	NaCl 水溶液	
試験日数(日)		35	49	

付表 3-1 縮尺模型試験の試験条件

#### 3.2 解体調査時のリバウンド量

縮尺模型試験の終了時にベロフラムシリンダによる鉛直圧 0.087 MPa を除荷し、鉛直圧を取 り除いたことによる緩衝材の膨潤変位量(リバウンド量)を変位計により計測した。付図 3-1 に 計測したリバウンド量を示す。



付図 3-1 縮尺模型試験におけるリバウンド量計測

## 付録 2 EDZ シーリング試験

# 目次

1. はじめに	
2. 地上吹付け施工試験	
2.1 地上吹付け施工試験の試験ケース一覧	付 2-2
2.2 材料投入量及び加水量	付 2-2
2.3 サンプリングによる乾燥密度測定および含水比測定	付 2-3
2.4 メチレンブルー吸着量測定	付 2-5
2.5 3D スキャナによる吹付け体積測定	付 2-5
3. 原位置吹付け施工試験	
3.1 材料投入量及び加水量	
3.2 3D スキャナによる吹付け体積測定	
#### 1. はじめに

令和3年度のEDZシーリング試験で実施した地上吹付け施工試験及び原位置吹付け施工試験 で得られた計測データについて本付録資料に示す。

## 2. 地上吹付け施工試験

#### 2.1 地上吹付け施工試験の試験ケース一覧

付表 2-1 に地上吹付け施工試験の試験ケースを示す。地上吹付け施工試験では、クニゲル V1 とケイ砂を 70:30 の割合で混合した材料(V1-70)およびクニゲル GX とケイ砂を 70:30 の割合 で混合した材料(GX-70)を用いて施工試験を実施した。V1-70 については、リバウンド回収の 有無やノズル形状が施工後の乾燥密度に与える影響を確認するために 3 ケース(V1-70_A~C)の試験を実施した。

		使用材料				
ケース	クニゲル V1 (粉体)	クニゲル GX (ペレット)	ケイ砂	目標密度 (Mg/m ³ )	その他条件	備考
V1-70_A	70	-	30	1.43	—	ノズル径:30 mm
V1-70_B	70	-	30	1.43	リバウンド回収無し	ノズル径:30 mm
V1-70_C	70	-	30	1.43	ノズル形状変更	ノズル径 : 50 mm
GX-70	-	70	30	1.43	_	ノズル径:30 mm

付表 2-1 地上吹付施工試験の試験ケース一覧

### 2.2 材料投入量及び加水量

地上吹付け施工試験における、混合材料作製時のベントナイト(クニゲル V1 (V1)、クニゲル GX (GX))、3 号ケイ砂(#3)および5 号ケイ砂(#5)の乾燥重量、自然含水比、加水量を付表 2-2 に示す。

		乾燥重量       バッチ       (kg)			自然含水比			加水县 佐制杜松香县		
ケース	バッチ					(%)			加小里	(]
		V1	GX	#3	#5	V1	GX	ケイ砂*	(kg)	(Kg)
V1-70 A	1	233	-	50	50	8.4	-	1.0	51.5	405
V1-70_A	2	233	-	50	50	9.4	-	1.0	64.1	420
V1-70 P	1	233	-	50	50	7.6	-	0.9	58.6	410
V1-70_B	2	233	-	50	50	7.2	-		54.3	405
V1-70 C	1	233	-	50	50	6.7	-	1.9	60.4	410
V1-70_C	2	233	-	50	50	6.7	-	1.5	55.7	405
GX-70	1	-	233	50	50	-	11.5	1.0	33.1	394
	2	-	233	50	50	-	11.2	1.0	33.8	394

付表 2-2 材料作製時の乾燥重量、自然含水比および加水量

*ケイ砂の自然含水比は3号と5号の混合後に測定

## 2.3 サンプリングによる乾燥密度測定および含水比測定

地上吹付け試験においては、付図 2-1 に示すように吹付け後の供試体の 9 か所でサンプリング を行った。サンプリングは、ステンレス試料円筒(50 ml)を用いて実施した。

各試験ケースでサンプリングした試料から測定した湿潤密度、乾燥密度および含水比を付図 2-2~付図 2-5 に示す。



付図 2-1 地上吹付け施工試験におけるサンプリング位置

山いプリンガ亚日	湿潤密度	乾燥密度	含水比	
リンノリンク留亏	$(Mg/m^3)$	$(Mg/m^3)$	(%)	
1	1.793	1.486	20.7	
2	1.706	1.409	21.1	
3	1.822	1.506	21.0	
4	1.669	1.376	21.3	
5	1.736	1.424	21.9	
6	1.792	1.486	20.6	
7	1.664	1.345	23.7	
8	1.893	1.513	25.1	
9	1.861	1.473	26.3	
平均	1.771	1.446	20.9	

付図 2-2 V1-70 Aにおける乾燥密度および含水比の測定結果

<b>エンプリンガ</b> 亚日	湿潤密度	乾燥密度	含水比
サンノリンク番号	$(Mg/m^3)$	$(Mg/m^3)$	(%)
1	1.838	1.514	21.4
2	1.916	1.576	21.6
3	1.863	1.526	22.1
4	1.794	1.450	23.7
5	1.861	1.511	23.2
6	1.824	1.496	21.9
7	1.819	1.479	23.0
8	1.902	1.565	21.5
9	1.841	1.510	21.9
平均	1.851	1.514	21.7

付図 2-3 V1-70_Bにおける乾燥密度および含水比の測定結果

付図 2-4 V1-70_Cにおける乾燥密度および含水比の測定結果

サンプリング来旦	湿潤密度	乾燥密度	含水比
リンノリンク留石	$(Mg/m^3)$	$(Mg/m^3)$	(%)
1	1.463	1.213	20.6
2	1.362	1.121	21.5
3	1.389	1.138	22.1
4	1.505	1.217	23.7
5	1.554	1.287	20.7
6	1.722	1.357	26.9
7	1.322	1.106	19.5
8	1.251	1.040	20.3
9	1.351	1.111	21.6
平均	1.435	1.177	21.4

## 付図 2-5 GX-70 における乾燥密度および含水比の測定結果

サンプリンガモロ	湿潤密度	乾燥密度	含水比
リンノリンク留方	$(Mg/m^3)$	$(Mg/m^3)$	(%)
1	1.936	1.634	18.5
2	1.936	1.637	18.3
3	1.962	1.661	18.1
4	1.982	1.681	17.9
5	1.977	1.664	18.8
6	1.925	1.622	18.7
7	1.975	1.668	18.4
8	1.978	1.675	18.1
9	1.959	1.652	18.6
平均	1.959	1.655	18.3

#### 2.4 メチレンブルー吸着量測定

地上吹付け試験においては、メチレンブルー吸着量試験(JIS Z 2451)を実施し、ベントナイト混合率を算出した。メチレンブルー吸着量の測定条件を付表 2-3 に示す。ベントナイト混合率の算出には、ケイ砂(ベントナイト混合率0%)とベントナイトのみ(クニゲル V1 混合率100%)のメチレンブルー吸着量を測定して作成した検量線を用いた。作製した検量線を付図 2-6 に示す。メチレンブルー吸着量はケイ砂で0 mmol/100g であり、ベントナイトのみで 87 mmol/100g だった。

項目	条件
準拠法	ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法 (JIS Z 2451:
	2019)
測定方法	スポット法
分散法	煮沸法
ろ紙の製造業者及び型番	ADVANTEC No.131
特記事項	メチレンブルー吸着量は乾燥試料当たりに換算している。

付表 2-3 メチレンブルー吸着量の測定条件



付図 2-6 ベントナイト混合率算出のための検量線

### 2.5 3D スキャナによる吹付け体積測定

地上吹付け施工試験においては、吹付け後の出来形体積(吹付け体積)を 3D スキャナ(Leica Geosystems 社製 BLK360)により測定した。付表 2-4 に BLK360 の主な仕様を示す。

また、付図 2-7 に吹付け部のメッシュを示す。容器部の寸法を 0.5 m×1.0 m×0.5 m として、 2.5 mm ピッチの点群を発生させて容器部点群を作成した。各試験ケースの吹付け終了後に測定 した点群から吹付け部のメッシュを作成し、容器部点群との差分より吹付け体積を算出した。算 出した吹付け体積の結果を付表 2-5 に示す。

外観	
ハウジング	アルマイト加工処理アルミニウム
寸法	高さ:165 mm / 直径:100 mm
重量	1 kg
電力	充電式内蔵リチウムイオンバッテリー(Leica GEB212)
レーザースキャニングシン	ステム
レーザータイプ	高速タイムオブフライト方式のレーザー、ウェーブフォームデジタイジ
	ング(WFD)テクノロジー搭載
レーザークラス	1 (IEC 60825-1:2014)
レーザー波長	830 nm
スキャン範囲	水平 360° / 鉛直 300°
測定範囲*	最小 0.6 m-最大 60 m
スキャンスピード	最大 360,000 点/秒
測距精度*	4 mm @10 m / 7 mm @20 m
スキャンモード	Low (20 mm @10 m), Mid (10 mm @10 m), High (5 mm @10 m)
動作環境	
仕様	屋内及び屋外用
動作温度	$+5^{\circ}C \sim +40^{\circ}C$
防塵/防水	IP54 (IEC 60529)

付表 2-4 BLK360の主な仕様



(a) 作成した容器部点群





(c) V1-70_B



(d) V1-70_C



(e) GX-70 付図 2-7 地上吹付け施工試験における吹付け部メッシュ

付表 2-5 「	吹付け体積算出結果	f
----------	-----------	---

学校ないで		1メッシュ当たりの表面積	領域体積
武徳クース	メツシュ剱	$(mm^2)$	$(m^3)$
V1-70_A	5,512,678	0.7026	0.2407
V1-70_B	5,064,752	0.6800	0.1766
V1-70_C	6,003,508	0.7015	0.2519
GX-70	6,194,402	0.6976	0.3286

## 3. 原位置吹付け施工試験

## 3.1 材料投入量及び加水量

原位置吹付け施工試験では、クニゲル V1 とケイ砂を 70:30 の割合で混合した材料 (V1-70) を 吹付け材料とした。各作業日ごとの混合材料作製時のクニゲル V1 (V1)、3 号ケイ砂 (#3) およ び5 号ケイ砂 (#5) の乾燥重量、自然含水比、加水量を付表 3-1 に示す。

	バッチ*	乾燥重量			自然含水比				
作業日			(kg)		(%)			加水量	作製材料車量
		V1	#3	#5	V1	#3*	$#5^{*}$	(kg)	(kg)
	1	233	50	50	6.95	1	1	64.8	415
1日目	2	233	50	50	6.71	1	1	65.4	415
	3	233	50	50	6.77	1	1	65.3	415
	4	233	50	50	8.79	1	1	60.6	415
	5	233	50	50	8.71	1	1	60.7	415
	6	233	50	50	7.85	1	1	62.7	415
2	7	233	50	50	7.06	1	1	64.6	415
	8	233	50	50	7.46	1	1	64.7	416
	9	233	50	50	8.00	1	1	62.4	415
	10	233	50	50	7.96	1	1	63.5	416
	11	233	50	50	9.26	1	1	59.5	415
	12	233	50	50	7.05	1	1	64.6	415
	13	233	50	50	7.05	1	1	65.6	416
3日目	14	233	50	50	7.14	1	1	66.4	417
	15	233	50	50	9.43	1	1	61.1	417
	16	233	50	50	7.04	1	1	65.6	416
	17	233	50	50	6.89	1	1	65.0	415
	18	233	50	50	7.78	1	1	64.9	417
	19	233	50	50	9.76	1	1	60.3	417
	20	233	50	50	10.19	1	1	59.3	417
	21	233	50	50	6.99	1	1	64.8	415
4日目	22	233	50	50	6.75	1	1	66.3	416
	23	233	50	50	6.77	1	1	65.3	415
	24	233	50	50	7.09	1	1	64.5	415
	25	233	50	50	7.32	1	1	65.0	416
	27	233	50	50	6.75	1	1	65.3	415
E D H	28	233	50	50	6.80	1	1	65.2	415
9 H H	29	233	50	50	6.39	1	1	66.2	415
	30	233	50	50	6.76	1	1	65.3	415
	32	233	50	50	6.44	1	1	66.0	415
C D H	33	233	50	50	6.30	1	1	66.4	415
онн	36	233	50	50	6.86	1	1	67.1	417
	37	233	50	50	6.17	1	1	70.7	419

付表 3-1 材料作製時の乾燥重量、自然含水比および加水量

*バッチ番号 26、31、34、35 は作製したが吹付けには使用していない

## 3.2 3D スキャナによる吹付け体積測定

体積計算に用いた各作業段階での点群データを付図 3-1 および付図 3-2 に示す。

原位置吹付け施工試験では、該当する作業段階の点群とその前工程の点群から算出したい吹付 け領域を囲い込むメッシュを作成し体積を算出した。体積計算に用いた各施工段階のメッシュを 付図 3-3 および付図 3-4 に示す。

原位置吹付け施工試験における各施工段階のメッシュの概要と、算出した体積の一覧を付表 3・2に示す。全吹付け領域メッシュは切欠き掘削後と最終吹付け(6日目午後完了時)の差分領域で ある。なお、各作業段階の個別の領域体積の合計と、全吹付け領域の体積に若干の差があるのは、 計測誤差や各作業日のリバウンドの除去状況によるものと考えられる。



(a) 切欠き掘削前



(c) 2 日目午前(1 日目吹付け完了時)



(b) 切欠き掘削後



(d) 2 日目午後完了時



(e) 3 日目午後完了時 (f) 3 日目サンプリング完了時 付図 3-1 各作業段階における点群データ(1/2)



(a) 4 日目吹付け完了時



(c) 5 日目吹付け完了時



(b) 4 日目サンプリング完了時



(d) 6 日目午前吹付け完了時



(e) 6 日目午後吹付け完了時 付図 3-2 各作業段階の点群データ(2/2)



(a) 切欠き部メッシュ



(c) 2 日目完了時吹付け領域メッシュ



(b)1日目完了時の吹付け領域メッシュ



(d) 3 日目完了時吹付け領域メッシュ



(e) 4 日目完了時吹付け領域メッシュ(f) 5 日目完了付図 3-3 吹付け領域メッシュ (1/2)



(f) 5 日目完了時吹付け領域メッシュ 域メッシュ (1/2)



(a) 6 日目午前完了時吹付け領域メッシュ



(b) 6 日目午後完了時吹付け領域メッシュ



(c) 全吹付け領域メッシュ付図 3-4 吹付け領域メッシュ (2/2)

	インシント教	1メッシュ当たりの表面積	領域体積				
旭上戌陌	トリンエ数	$(mm^2)$	$(m^3)$				
切欠き掘削後	5,533,232	4.494	4.761				
2日目午前(1日目吹		2 100	0.000				
付け完了)	5,066,250	3.100	0.622				
2日目午後完了時	3,360,386	3.274	0.879				
3日目午後完了時	6,380,297	2.134	1.409				
4日目午後完了時	5,477,184	2.720	1.044				
5日目午後完了時	3,381,038	3.224	0.591				
6日目午前完了時	5,412,218	1.014	0.260				
6日目午後完了時	3,624,474	2.598	0.309				
全吹付け	5,496,948	4.501	5.207				

付表 3-2 吹付け体積計算結果

# 付録3 掘削損傷領域の連続性等に関わる調査技術開発

# 目次

1. はじめに	
2. 調査の方法	
2.1 ボーリング	
2.2 コア観察	
2.3 割れ目の整理	
2.4 BTV 観測	
2.5 孔径検層	
2.6 孔曲がり測定	
3. 調査結果	
3.1 コア観察結果	
3.2 BTV 観測結果	
3.3 孔径検層結果	付 3-43
3.4 孔曲がり測定	付 3-48

#### 1. はじめに

これは、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)の報告書、3.3.2 EDZ等の連続性調査技術の高度化、本文中に記載できなか ったものを補足資料として示す。

#### 2. 調査の方法

#### 2.1 ボーリング

足場、やぐら等は作業完了まで資機材類を安定かつ効率的な作業が行える状態に据付け、資機 材類は安全かつ使いやすい位置に配置し、ボーリングや原位置試験等に要する作業空間を良好に 確保するよう設置し、ボーリング孔の掘削に使用する機械は、防爆仕様の回転式ボーリング機械 とし、所定の方向、深度に対して十分な能力を有するものとした。

ボーリング調査に使用した主要機械の一覧を付表 2-1 に示す。

名称・型式	仕様・規格	数量	単位	備考
ドリル本体ダイモドリル TS-255PR0/シブヤ	最大穿孔能力 210 mm (10 i n), 質量 18.9kg 無負荷回転数:1,050/47m i n ⁻¹ A ロッド/ビット取付けネジ	1	式	コアドリル削孔
ビット・チューブ・ カップリング	外径 3.5in,5in	1	式	11
延長ロッド	∟300 mm, ∟500 mm	1	式	11
支柱		1	式	//
ハンマードリル		1	台	"
その他工具類		1	式	
試錐機 東邦 DM−03	最大巻上げ能力 3.9KN(400Kgf) H140×L120×W120(cm),500 kg	1	台	ボーリング機械 削孔
同原動機	防爆型,2.2KW モーター仕様、200V 24×28×40 (cm),55 kg	1	台	"
試錐ポンプ 東邦 PA-5	最大吐出量 70 ㎏/min H70×L120×W70(cm), 200kg	1	台	"
ロッド	40.5JiS使用(030m・0.50m・1.0m)	1	式	11
コアチューブ	コア内径 70mm、 (Ф87 mmアイジーチューブ)	1	式	チューブ長 (0.50m・1.0m)
水中ポンプ	2″ 100V	1	台	"
デリバリーホース	2″高圧ホース(耐圧 50Map)	1	本	長さ10.00m〃
サクションホース	3″ 低圧ホース	1	本	長さ2.0m〃
足場用鋼材・止め具		1	式	"

## 付表 2-1 ボーリングの主要機械

#### 2.2 コア観察

ボーリングで得られた採取コアはコア箱に整理した後、速やかに岩種、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、ボーリング柱状図作成要領(全 地連,2015)に基づき各孔の柱状図を作成した。

コアの判定基準を付表 2-2~付表 2-7 に示す。なお、岩盤等級に関しては、表-3.1.1 の岩級区 分(吉野ほか, 2019))を参考に分類を行った。

記号	硬軟区分
А	極硬 ハンマーで容易に割れない
в	硬 ハンマーで金属音
С	中硬 ハンマーで容易に割れる
D	軟 ハンマーでボロボロに砕ける
E	極軟 マサ状 粘土状

付表 2-2 コア硬軟判定表

付表 2-3 コア形状区分判定表

記号	模式図	コ ア 形 状
I	)	50cm 以上の棒状コア
П		50~15cmの棒状コア
Ш	SSZVICZ	15~5cmの棒状~片状コア
IV	75858588792481	5cm 以下の棒状~片状コアでかつコアの外周の一部が認められるもの。
v	SECTOR DE CONTRACTOR DE CONTRACTÓR DE CONTRACT	主に角礫状のもの
VI		主に砂礫状のもの
VII		主に粘土状のもの
VIII		コアの採取できないもの、スライムも含む

付表 2-4 コア割れ目状態判定表

記号	割れ目状態区分
A	密着している、あるいは分離しているが割れ目沿いの風化・変質は認められない。
В	割れ目沿いの風化・変質は認められるが、岩片はほとんど風化・変質していない。
с	割れ目沿いの岩片に風化・変質が認められ軟質となっている。
d	割れ目として認識できない角礫状、砂状、粘土状コア。

記号	風化の程度
w1	非常に新鮮である。
w2	新鮮である。層理面、片理面にそって僅かに変色があり割れやすい。
_w 3	弱風化している。層理面、片理面にそって風化している。
_w 4	風化している。岩芯まで風化している。ハンマーで簡単に崩せる。
_w 5	強風化している。黄褐色化し、指先で簡単に壊すことができる。

付表 2-5 泥質岩の風化区分

付表 2-6 変質区分

記号	変質区分	変質状況
h 1	非変質	肉眼的に変質鉱物の存在が認められないもの。
h 2	弱変質	原岩組織を完全に残し、変質程度(脱色)が低いもの、あるいは非変質部の割合が高 いもの(肉眼で 50%以上)。
h 3	中変質	肉眼で変質が進んでいると判定できるが、原岩組織を明らかに残し、原岩判定が容 易なもの。または非変質部を残すものおよび網状変質部。
h 4	強変質	構成鉱物、岩片などが変質鉱物で完全に置換され、原岩組織を全く〜ほとんど残さ ないもの。

付表 2-7 岩	·級区分
----------	------

地層	岩盤等級	割れ日	ヘアー	岩石コアの特徴		
区分			クラック			
D D				カッターの刃が2mm以上刺さる。		
	U	_	_	コアは角礫状〜岩片状〜粘土状を示す。		
		L	_	カッターの刃が1mm程度刺さる。		
吉明岡			_	コアは角礫状〜岩片状を示す。		
一户门眉	CL	L M H	有・無	カッターの刃が1mm程度刺さる。		
	UL			コアは概ね10cm未満の短柱状を主体とする。		
			有・無	カッターの刃が1mm程度刺さる。		
				コアは概ね10cm以上の長柱状~棒状を主体とする。		
					_	カッターの刃で傷がつく程度。
		L		コアは角礫状〜岩片状を示す。		
我中国	СМ	М	有・無	カッターの刃で傷がつく程度。		
椎内唐				コアは概ね10cm未満の短柱状を主体とする。		
		Н	有・無	カッターの刃で傷がつく程度。		
				コアは概ね10cm以上の長柱状~棒状を主体とする。		

**RQD**は、単位掘削長に占める1片10 cm以上のコアの累計長の割合であり、次式により求めた。なお、単位掘削長は100 cmとした。

・コア写真撮影

コア写真撮影の準備として、水に浸した布でコアの汚れをぬぐい取り、更にコアに噴霧器など で水を吹き付け細かい汚れを取り除き、木札で掘削深度位置を表示した。

コアの写真撮影はコア1箱毎に実施した。コア箱全体が入るようにコア写真撮影セットを用いて、画角・光量を一定に保って撮影を実施した。撮影時は、専用の照明のみを使用し、窓からの太陽光を防いだ状態で撮影を行った写真撮影には、2000万画素以上の高解像度撮影が可能なデジタル一眼レフカメラ(SONYa7II)を使用した。コア観察が終了したコアについて、1m毎に真空パッキングを実施した。

コア写真撮影の概念を付図 2-1 に示す。



付図 2-1 コア写真撮影の概念図

#### 2.3 割れ目の整理

割れ目リストには割れ目と代表的な層理を記録した。割れ目はコアにより観察された割れ目の 性状を記載した。層理はコアではほぼ確認が不可能であったが、BTV 画像で確認できたため、 BTV 画像の情報を記録した。

割れ目、層理を併せて深度に沿って番号付けを行い、さらに層理と割れ目ごとに深度に沿って 番号付けを行った。

割れ目の性状については、既存の作成要領(吉野ほか,2019)に準じて、中央深度、上端、下端 記載深度、割れ目タイプ、割れ目面の特徴、岩質、成因を記載し、これらの情報に基づき割れ目 を

①EDZ: EDZ 領域に生じた引っ張り割れ目

②PE;既存割れ目

③CD:コアディスキングおよび機械的割れ目

に区分・評価した。

層理については、BTV 画像から約 50 cm 毎に代表的な層理の走向傾斜を計測し記録した。また、BTV 画像で確認できる割れ目はその走向傾斜を計測し、コアと対比した上で相当する割れ目

の走向傾斜として記載するとともに、それらの割れ目についてはリスト上に赤字でハイライトした。

赤字でハイライトした割れ目のうち、一部に CD と評価した割れ目が存在するが、CD と評価した割れ目は、掘削後に生じた割れ目であり BTV 画像で確認できないため、CD との評価を再確認 する必要がある。

BTV で方向性が確認できなかった割れ目は、以下の方法によりその方向性を計測した。

①採取されたコアの不連続面(割れ目)の上端面と下端面をぴったりと繋いでコアの方向性を合わせて、コアに仮の基準線を引く。本作業は通常 1m 毎に実施した。

②BTV 画像により割れ目やコアと対比できる特徴(例えば貝化石や生痕化石など)の方位を計測 し、それらと基線の関係から基線の方位を決定する。

③それぞれのコアにおいて決定された基線の方位から、それぞれの割れ目の走向を求めるととも に、傾斜角を計測し、走向傾斜を決定する。

割れ目の方向性の確認状況を付図 2-2 に示す。



付図 2-2 割れ目の方向性の確認

なお、方向性のうち走向は BTV 画像の北(磁北)を基準に計測しているため、偏角を考慮して真 北に補正した。

## 2.4 BTV 観測

BTV 観測は、調査地点において高解像度ボアホールカメラ BIP-6 (㈱レアックス)を用いて実施した。主要機器の仕様を付表 2-8 に示し、観測の概念を付図 2-3 付図 2-3 に示す。

	BIP-6
画像出力	Digital/NTSC、USB2.0
水平解像度	360/720/1440/2880 pixel
深度解像度	0. 1mm
計測スピード	108m/h(深度解像度:0.5mm)
プローブセンサー	方位/重カセンサー
プローブサイズ	外径 $\phi$ 50mm、全長970mm、重量6kg
計測長	200m(最大 500m)
電源	AC100-240V
駆動方式	モータ駆動(降下/引上げ)/手動

付表 2-8 BIP-6 仕様一覧表



付図 2-3 BTV 観測の概念

## 2.5 孔径検層

孔径検層は、X,Yの2軸対応のキャリパー検層システム(㈱村田製作所)を用いて実施した。 主要機器の仕様を付表 2-9 に示し、検層の概念を付図 2-4 に示す。

キャリパー検層システム			
インターフェース仕様			
外形寸法	$210$ mm $\times$ $280$ mm $\times$ $99$ mm		
電源電圧	AC100V		
プローブ電源	DC96V 30mA		
A/D 分解能	16bit		
サンプリング	約 30Hz		
データ取得	1cm 単位(深度)		
出力	デジタル-USB シリアル出力		
キャリパーセンサー仕様			
センサー外径	$\phi$ 45mm × 1, 600mm		
使用温度	0~80°C		
測定範囲	50mm~400mm		
使用圧力	Max15MPa		
特記事項	センサーA/D 内蔵型 デジタル伝送方式		

付表 2-9 孔径検層システム 仕様一覧表



付図 2-4 孔径検層の概念

## 2.6 孔曲がり測定

孔曲がり測定は、調査孔の品質管理の一環として、削孔精度管理を目的に実施した。測定はジャイロオンラインシステム(㈱村田製作所)を用いて実施した。

測定器の仕様を付表 2-10 に示し、孔曲がり測定の概念を付図 2-5 付図 2-5 示す。

インターフェース仕様		ジャイロセンサー仕様			
外形寸法	210mm × 280mm × 99mm	センサー外径	$\phi$ 54mm × 2, 000m		
電源電圧	AC100V	使用温度	標準 0~60°C		
プローブ電源	DC96V 30mA		耐熱 0~250℃		
A/D 分解能	16bit	ロール角精度	±0.1		
サンプリング	約 30Hz	傾斜角精度	±0.1		
データ取得	1cm 単位(深度)	計測精度	1/400~1/500		
出力	デジタル-USB シリアル出力	計測方向	全方位		

付表 2-10 ジャイロオンラインシステム 仕様一覧表



付図 2-5 孔曲がり測定の概念

#### 3. 調査結果

#### 3.1コア観察結果

水理試験孔である W-1 孔、W-2 孔、W-3 孔およびグラウト注入孔である G-1 の計 4 孔についてコア観察を実施した。

コア観察結果を以下に述べ観察結果から、柱状図を付図 3-5~付図 3-8 に示し、割れ目リスト を付表 3-1~付表 3-3 に示す。

#### ・岩相・風化・変質

水理試験孔、グラウト注入孔ともに、コアは褐灰色を呈する珪質泥岩(新第三紀中新世稚内層) を主体としている。全体的に均質で砂・礫等の粗粒砕屑物の混入は少ない。堆積構造は不明瞭で、 一部の区間で乱堆積構造や生痕が認められた。全体的にコアは、非常に新鮮で風化および変質鉱 物の存在は認められなかった。

#### RQD および割れ目性状

①W-1

- ・割れ目本数は0本/m~8本/m、平均4本/mであり、割れ目の集中する区間は、深度0.50~0.96m、1.51~1.93m区間の2区間に認められた。割れ目は密着しているか、分離しているものの割れ目沿いの風化変質は認められないものが殆どである
- ・RQDは20~100%を示し、全体の平均は82%である。

@W-2

- ・割れ目本数は1本/m~11本/m、平均4本/mであり、割れ目の集中する区間は、深度0.71~0.91m、1.51~1.91m、2.46~2.59m区間の3区間に認められた。割れ目は密着しているか、分離しているものの割れ目沿いの風化変質は認められないものが殆どである
- ・RQDは25~100%を示し、全体の平均は74%である。

3W-3

- ・割れ目本数は0本/m~10本/m、平均3本/mであり、割れ目の集中する区間は、深度0.56~
   0.85m、1.65~1.93m、2.35~2.49m 区間の3区間に認められた。割れ目は密着しているか、 分離しているものの割れ目沿いの風化変質は認められないものが殆どである
- ・RQDは36~100%を示し、全体の平均は80%である。

(4)G-1

- ・割れ目本数は0本/m~13本/m、平均4本/mであり、割れ目の集中する区間は、深度0.60~ 0.93m、1.27~1.98mの2区間に認められた。割れ目は密着しているか、分離しているものの割れ目沿いの風化変質は認められないものが殆どである
- ・RQDは33~100%を示し、全体の平均は77%である。

## ・コア形状および岩盤等級

①W-1

- ・2.3m まで、短柱状コアを主体とし、2.3m 以深では棒状コアを主体とする。
- ・全体的にコアはハンマーで容易に割れる程度の硬さである。
- ・4.5m、5.0m付近、岩片状を呈する。4.5~5.0m区間、乱堆積構造が発達する。
- ・3.6mに径 30~40 m程度のノジュールが認められる。
- ・岩盤等級は、4.45~4.50m、4.95~5.05m 区間が CM-L、0.50~1.00m 区間が CM-M、 1.00~4.45m、4.50~4.95m、5.05~7.00m 区間が CM-H であった。
   コア写真を付図 3-1 に示す。



付図 3-1 ₩-1 孔のコア写真

@W-2

- ・3.3m まで、短柱状コアを主体とし、3.3m 以深では棒状コアを主体とする。
- ・全体的にコアはハンマーで容易に割れる程度の硬さである。
- ・5.6~5.8m付近、鋭角な割れ目が発達し、割れ目沿いに岩片状を呈する。
- ・2.55~2.70m区間、コアディスキングが認められる。
- ・岩盤等級は、0.60~0.80m、5.58~5.82m 区間が CM-L、0.80~2.20m 区間が CM-M、
   2.20~5.58m、5.82~7.00 区間が CM-H であった。
   コア写真を付図 3-2 に示す。



付図 3-2 ₩-2 孔のコア写真

3W-3

- ・2.5m まで、短柱状コアを主体とし、2.5m 以深では棒状コアを主体とする。
- ・全体的にコアはハンマーで容易に割れる程度の硬さである。
- ・5.4m付近、岩片状を呈する。
- ・4.8m 付近に径 30~50mm 程度のノジュールが発達する。
- ・岩盤等級は、0.55~2.10m、5.40~5.60m 区間が CM-M、2.10~5.40m、5.60~7.00 区間が CM-H であった。

コア写真を付図 3-3に示す。



付図 3-3 ₩-3 孔のコア写真

(4)G-1

- ・2.2m まで、短柱状コアを主体とし、2.2m 以深では棒状コアを主体とする。
- ・全体的にコアはハンマーで容易に割れる程度の硬さである。
- ・1.5~2.0m区間、コアディスキングが認められる。
- ・5.0m付近、岩片状を呈する。5.0~6.0m区間、乱堆積構造が発達する。
- ・岩盤等級は、0.60~2.20m、4.90~5.40m 区間が CM-M、2.20~4.90m、5.40~7.00 区間が CM-H であった。

コア写真を付図 3-4 に示す。



付図 3-4 G-1 孔のコア写真

ボ	- リ:	ング名			W	/ - 1					調査位置		地下施言	没深度:	350	m 調	查坑计	首			北		<b>緯</b> 4	$5^{\circ}$	2'	40	. 3	168	32"
発	注	機関											調査期間	令和 3	年 1	0月	22日	~ 3年	10月	26日	東		経1	41°	5	1'3	7.6	556	13"
調	査 業	者名									主任技師		現 場 代理人				コ 鑑 定	ア 者			ボ- 責	ーリン 任	·グ 者						
孔		標高	-349.	517m	角	180° 上	) 9	0°	方	270°	北 0° <b>地</b> ° 90° <b>盤</b> _{叭 水平0°} 1	使 用	試 錐 機						東 邦	D M ·	- 3								
総	掘	進長	7.0	00m	度	_℃	ナ 0	P	向	西 1	$\begin{array}{c c} \hline & \mu \\ 180^{\circ} & \mu \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} \mathbf{J} \\ \mathbf{J}$	機種	エンジン	3.7	ΚW	防炸	暴 モ ー	ター	ポン	ンプ			東	邦	ΡA	- 3			
標	! ! 楞	[ 深	柱	岩	色	硬	コ	割	風	変	記		コア採耳	文率 岩	孔	(	ルジオ	ン 標	準貫入	) 헕	、験	原	室		掘	進	状	t U	兄
								n					<u> </u>	6)	内		$(P \sim Q)$	N値~深	度) 図			協	日設						:¥ HE
				種			P						最大コス	ア長級	位	$\frown$	[]:ル ():摘	ジオン値 管ルジオ	ン値			試	験	11出1	相任	訠	回臣	「広」	医195 水 水
一尺	一	;   度	状					В					_ <b>⊸</b> c	m	(m)	N	《》:限	异/ ) 〈 界圧力	2 旧			颗		進	速 (mm	辺	王数	(圧	量量
				区			形	$\mathcal{O}$					RQ	D区	洄										~ /  ]	1.J	$\neg \mid \frown$		$\widehat{1} \widehat{1}$
								状						61	定	$\smile$								月	一壁		(Pa rp	mMPa	
(m)	) (m	) (m)	V	分	調	歃	*	能	14	啠	重				月	檑		N fé	1 mm					l_l	時保	12			分分
	-2.4			フンク	H/H)	77	1			~			0 50	100		비브	0 1	0 20	) 30	40	50		$\smile$		)	1		+	
E	-34	).02 0.5	0	リート					_		床盤コンクリート		Q10	(100)aCM										10 3	360		60 380		漬 20 20 20
E	1 -35	0.52 1.0	0	1175-70			Ш		-			/		I M										$\square$	_	-	+	0.4	25 25
E							п							<u>_(100)</u> 本											316		60 380		20 20
E	2 _35	1.82 23	0	-			"							•3J											_		+	0.4	20 20
Ē		1.02 2.0									新鮮で比較的硬質な珪質泥岩。	. स्ट	450	(100)ACM										4	100	861	60 380		20 20 2 2 25 25
E	3										10mまで海細な割れ日が照著	E7 BI		H										-	_	7	+	0.1	20 20
Ē				珪	2月		Ι				1.0mまで仮細な割れ日が顕者。 2.3mまで、短柱状コアを主体とするが	ŝ.	7	₹1001¢										4	129 87	利根	60 380		20 20 2 2 25 25
Ē	4			員泥	阪	С		а	w1	h1	2.3m以深では棒状コアを主体とする。 4.5m、5.0m付近、岩片状を呈する。			CM										-	_	С	+	0.4	20 20
Ē	-35	3.02 4.5	0 	岩			IV				3.6m付近、径30~40mm程度のノジュー が発達する。	-12	450	(100)4CM											375	19	60 380		20 20 2 25 25
E	5 -35	1:37	8	•							層理面は不明瞭(傾斜45°程度)。6. 7.0m区間では他と比べて若干明瞭。	0~												-	_		+	0.4	20 20
Ē	-35	5.07 5.5	5				Ш				4.5~5.0m区間、乱堆積構造が発達す。	る。	450	(100) [95] CM										4	162		60 380	$0 \begin{vmatrix} 0.3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 4 \end{vmatrix}$	20   20 2 25   25
E	6												+++++											-	_		+		
Ē	_95	3.59 7.0					I							(100) H										10	100		60 380	$\begin{bmatrix} 0.3 \\ 2 \\ 0.4 \end{bmatrix}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

付図 3-5 W-1 孔柱状図

ボ	- IJ	ンク	「名			V	V - 2	2				調査位置		地下施設洋	<b>羅度3</b>	50 m	調	查坑道	自			北		<b>緯</b> 4	$5^{\circ}$	2	41	0.2	299	4"
発	注	機	関									· · ·		調査期間 令	和 3年	手 10	月	21日 ~	~ 3年	- 10月	22 🗄	東		経1	41°	5	1'3	7.6	538	56"
調	查	業 者	名									主任技師		現 場 代 理 人			1.4	⊐ 濫 定	ア 者			ボ- 責	ーリン 任	·グ 者						
孔		標	高	-349.5	520m	角	180° 上	) 9	00°	方	270	北 0° 地 90° 盤 ₍₁₀ 水平0°	使用	試 錐 機						東 邦	D M -	- 0 3								
総	掘	進	長	7.0	0m	度	_↓	ナ 0	)°	向	西	■ 180° 南 <b>囚</b> ¹ <b>1</b> <b>1</b> <b>1</b> <b>1</b> <b>1</b> <b>1</b> <b>1</b> <b>1</b>	機種	エンジン	3.7H	ΚWβ	方 爆	モー	ター	ポ	ンプ			東	邦]	ΡA	- 3			
						1	1													-										
標	ł	票	深	柱	岩	色	硬	コ	割	風	変	記		コア採取率	[岩]	孔	(	ルジオ	ン 標	準貫入	) 言	式 験	原	寚		掘	進	状	: ?	己
尺	. ī	高	度	状	種			ア	れ 目 の					→ (%) 最大コア長 → cm	級	内水位 (1)/11/11/11/11/11/11/11/11/11/11/11/11/1		<ul> <li>(P~Q</li> <li>[]:ル</li> <li>():換</li> <li>():限</li> </ul>	N値~深 ジオン値 算ルジオ 界圧力	度)図 ン値			「「「「」」、「」」、「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「	い試験(	据其其	和 住 東 夏 (	フチューブ		送水圧(	送水量(
					X			形	壮						′∣≚∣∣	測   定  〜	-								月日	) 孔 翌 窟		Paro	mMPa	
(m)	(	m)	(m)	図	分	調	軟	状	態	化	質	事			分	月 日 佰	٤,	10	N値 ) 20	[ ) 30	) 4(	— <del>—</del>		$\overline{}$	日	,   保             	レント			分分 () ()
	-3 -3 -3	49.82 50.12 50.32	0.30 0.60 0.80		コンク リート 砕石							床盤コンクリート		φ ¹⁵ (100	DACM								_		10 21 3	360		60 380	0.2 2 0.25	灢 20 25 25 25 25
	1 	51.02	1.50					П						¢10 [70] (100											3	333		60 380	0.35 2 0.6	20 20 2 25 25
	2 -3 -3 -3	51.72 52.02 52.37	2.20 2.50 2.85					П Ш				新鮮で比較的硬質な珪質泥岩。 全体的に均質で、砂・礫等の粗粒 の混入は少ない。 層理面は不明瞭(価約45° 程度)。	砕屑物	25 [60] (100	.) <b>∳</b>										2	286	861 G	60 380	0.35 2 0.6	20 20 2 2 25 25
	3 <u>-3</u>	52.80	3.28		珪質	褐	С	Ш	а	w1	h1	4.50~4.70区間、不明瞭な乱堆積 認められる。 2.55~2.70m区間 コアディスキン 3.mまでは 比較的短期状況マスキン	構造が	70 <del>9 (100</del> [95]	расм I										3	316 87	/ 利 根 C	60 380	ງ 0.35 ) ? 0.6	20 20 25 25
	5				泥岩	灰		Ι				5.6~5.8m付近で鋭角な割れ目が発	エーC 体とす 達する	*	H H										3	300	19	60 380	ງ 0.35 2 0.6	20 20 2 2 25 25
	-3 -3	55.10 55.34	5.58 5.82					IV				割れ目沿いに岩片状を呈する。 全体的に径3~10mm程度の扁平なノ ルが含まれる。	ジュー	55 [70] (100											4	129		60 380	) 0.35 } 0.6	20 20 2 25 25
	-3	55.82 56.52	6.30 7.00					I						700 (100	CM H										10 22	353		60 380	ງ 0.35 ) 2 0.6	20 20 25 25

付図 3-6 W-2 孔柱状図

ボ -	-リン	ブ名			V	V - 3	3				調査位置	ţ	地下施言	設 深 度	3350	)m 課	間査坑証	首			北	养	<b>緯</b> 4	5°	2'	40	. 2 9	42	4"
発	注機	関										ii)	周査期間	令和	3年	10月	20日	~ 3年	10月	21日	東	养	径 1	41°	51	' 3 '	7.63	101	3"
調	査 業 者	うわん おうしん うちん おうしん おうしん おうしん おうしん あんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん し									主任技師	现代	見 場 も理人				コ 鑑 定	ア 者			ボ- 責	-リン? 任 i	グ 者						
孔	口標	高	-349.5	525m	角	180° 上		90°	方	270	北 0° <b>地</b> 使 90° 盤 ₍₄₀ 水平0° <b>用</b>		式錐機						東邦日	О М -	03								
総	掘進	長	7.0	0m	度		$\mathcal{T}$		向	西	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	E	<b>∟</b> ンジン	3.	7 K V	V防,	爆モー	ター	ポン	ィプ			東	邦F	• A -	- 3			
+===	1 and	2015	++-	ш	17.	TE		क्रम	ल	र्याह	÷1		コア採用	<b></b> 市家 山	7	(	1.2%+		₩ <del>1</del> -1	45 (	EA	E	<u>ل</u> ے		42	`任:	44	٥r	1
悰	一惊	泺	灶	宕	巴		1	割	風	发	<b>青</b> C			∿平 宕 %)	九		(P~Q	<ul> <li>/ 信:</li> </ul>	毕貝八 (唐) 図	)武	映		至内計		加	一.		UT.	: 
				種			ア	和し					最大コン	ア長級	水  位	$\square$	[]:ル ():換	ジオン値 算ルジオ	ン値			<b>直</b> 武 輪	験	掘り	乱任	コアチー	山	送近水7	^医 排 水水
尺	高	度	状					л П					c	m		Ν	《》:限	界圧力				$\sim$		進度			□数/	圧直	直量
				X			形	状							測定									月C	避壁	ブレル	a rpm ?	] MPa	
(m)	(m)	(m)	図	分	調	軟	状	態	化	質	事			。」分	月   日	値	0 1	N值	30	40	-0		$\smile$	目し	∮保 ∠護	礼		-5	分分
E	-349.83	0.30		コンク リート							床盤コンクリート		10	(100)4 -										10 24	45	6	0 380	0.2	義 20
-	1 -350.68	1.15		(砕石)		$\vdash$	Ш						[36]	СМ	[									20	-			).25 2	25 25
	9 -351.63	2.10					1						20 [60]	(100) M										27	'5	6	0 380	0.2 2	25 25
	-352 33	2.10					П				新鮮で比較的硬質な珪質泥岩。 全体的に均質で、砂・礫等の粗粒砕屑物		30	20 ⁽¹⁰⁰⁾										30	ю	861 6	0 380		20 20
	3	2.00		哶							<ul> <li>の混入は少ない。</li> <li>層理面は不明瞭(傾斜45°程度)。</li> <li>4.00~4.10m区間 1世接請構造が発達する</li> </ul>	z			r l										-	G / 一 利	+	0.3 2	20 20
	4			「質」	褐	с		а	w1	h1	2.5mまでは比較的短柱状コアを主体とし 2.5m以深からは棒状コアを主体とし。	~		[100]										33	3 87	根 6 C _	J 380	∂ 0.3 2	25 25
	1			泥岩	灰		1				5.4m付近では岩片状コアを呈する。 割れ目の角度は上部よりも低角。 一部、扁平なノジュールが含まれる。			(1959) (1959) (197										33	33	19 6	0 380	0.2 2	20 20 25 25 25
E_	5	5.40									4.8m付近にφ30~50mm程度のノジュール を含む。		45	СМ														0.2 2	20 20
	6	5.60									5.30m付近で鏡肌が不規則にみられる。			[95] M CM													3 380	0.3 2	25 25
	-356.53	7.00					Ι						450	_{5]} (100) <mark>↑</mark> H										10 21 35	j3	6	0 380	0.2 2 2 2 0.3 2	0 20 25 25

付図 3-7 W-3 孔柱状図

ボ -	-リン	グ名			G	- 1					調査位置		地下施	設深度	350	m 調	査 坑 i	首			北	i	<b>緯</b> 4	5°	2'	40	. 3 1	32	8"
発	注機	と 関										i	調査期間	令和 3	年]	10月	27日	~ 3年	三 10月	28日	東	i	経1	41°	5	1'3	7.6	255	58"
調	査 業	者 名									主任技師		現 場 代理人				コ 鑑 定	ア 者			ボー 責	-リン 任	グ 者						
孔	口樽	ま 高	-349.5	522m	角	180° 上	) 9	0°	方	270°	北 0° <b>地</b> 使 。 90° 盤 _{い 水平0°} 用	吏 月	試 錐 機						東 邦	D M -	03								
総	掘進	隹 長	7.0	0m	度	_下 [	ナ 0	0	向	西 1	→ 東 <b>勾</b> 置 機 180°南 <b>配</b> 90° 積	幾「	エンジン	3.7	ΚW	/ 防り	暴モー	ター	ポン	ノプ			東	邦	ΡA	- 3			
Lat	(art	Vart	12.		4	****		de la					って拉丁	反家 山		(	-2 - 2 - L	- )	WH:	1.← (	) FA				103	14	- 11	21	
標	標	深	柱	宕	色	便	-	割	風	发	記				内	(	ルンオ (P~0	-ン 標 N値~22	(年員人 () (回	)訊	、騻	県   住	筆り	$\vdash$	加	進	沢 一	U T	2
				種			P	<i>х</i> і н					最大コン	ア長級	水  位	$\frown$	():換	ジオン催 算ルジオ	(Q) 凶 [ 「ン値			直試験	殿	掘	<b>屈</b> 孔 生 径	灵	治回 転	送江	排 水  水
尺	高	度	状										<b></b> c	m	(m)	Ν	《》:限	界圧力				一		進	螷[	쮜	王数	圧	量量
				X			形	本 ())					RQ	D区	測定									月	()孔殿	Ĭ,	Dolm		$\widehat{1}$
(m)	(m)	(m)	অ	公	調	歃	#	小能	w	啠	重				月	店		Νĺ	ŧ.					l	時保	- ビー	1 at pm		; 分分
	-349.8	2 0.30		コンク	нич	47	11	愿		д	中部コンクリート	_	0 50	100		10	0 1	0 2	0 30	40	50		$\smile$		)	1			
Ē	-350.1	2 0.60		<u>リート</u> 砕石					_		小益 - ン ク リ 一 ト		<b>10</b> [33]	(100)										27	386		50 380	0.4 2 0.6	展 20 25 25 25
	-350.9	2 1.40 2 1.60					Ш						20	CM											214		60 380	0.4	灢 20 変0 ₹
Ē.	2 -351.7	2 2.20					Ш							M											-	-	+	0.6	25 25
Ē											新鮮で硬質な珪質泥岩。 9.9mまでは毎甘サコア - 9.9m以源抜サ-	_		³ <del>⊘100)</del> ▲ [100]										4	100	66I G	80 380	0.6	表 20 25 25 25
Ē	3			珪			Т				2.2mまでは湿柱(ハコノ、2.2m以保神ハー アを主体とする。 全体的に均質で、砂・礫等の粗粒砕屑物	物	550	CM											129 67	/	80 380	0.4	灢 20 索 20
	4			質泥	褐   灰	С		а	w1	h1	の混入は少ない。 1.5~2.0m区間 コアディスキング。		<i>/</i>	[100] H											_	低 C	+	0.6	25 25
Ē	-354.4	2 4.90		岩							5.0m付近で岩片状を呈する。 層理は不明瞭(傾斜45°程度)。 一部、扁平なノジュールが含まれる。		450	(100)A [90]										6	567	19	80 380	0.4	裏 20 25 25 25
	5 -354.9	2 5.40					Ш				5.0~6.0m付近、乱堆積構造が発達する。	5.	600	(100)4 M											567		80 380	0.4	演 20 30 ~
Ē	6													CM											_		+	0.6	25 25
	-356.5	2 7.00												(100)20 H [100]										10 28	750		80 380	0.4	展 20 25 25 25 25

付図 3-8 G-1 孔柱状図

## 付表 3-1 W-1 孔の割れ目リスト

孔番号:	W-1													
종묘	割れ目	層理	中央深度	記載深	₹度(m)	カイプ	種類	走向(南半球投	走向	傾斜	割れ日面の特徴	上后	き田	=w/#
留写	番号	番号	(mabh)	上端	下端	×17	(FO/FR)	形:磁北,3bU 表 記)	(真北)	(° )	割れ日田の村倒	石貝	成凶	a千1叫
W-1-1	c-1		0.51	0.50	0.52	f	FR	-	-	10	SS	-	S	PE
W-1-2	c-2		0.56	0.55	0.57	f	FR	100	N10E	14W	F(一部)	-	D	CD
W-1-3	c-3		0.68	0.63	0.72	f	FR	110	N20E	45W	F	-	Т	EDZ
W-1-4	c-4		0.69	0.65	0.73	f	FR	-	-	50	FE	-	Т	EDZ
W-1-5	c-5		0.82	0.78	0.86	f	FR	280	N10E	45E	F(不明瞭)	層理面発達	D	CD
W-1-6	c-6		0.84	0.80	0.88	f	FR	280	N10E	45E	F(不明瞭)	同上	D	CD
W-1-7	c-7		0.88	0.84	0.92	f	FR	280	N10E	45E	F(不明瞭)	-	D	CD
W-1-8	c-8		0.96	0.95	0.96	o-f	FR	74	N16W	12W	-	-	D	CD
W-1-9	c-9		0.98	0.94	1.02	o-f	FR	130	N40E	58W	ST/SL(290°)	-	S	PE
W-1-10	c-10		-	-	-	-	FR	-	-	-	-	1.0mまで微細な割れ目が顕著	_	-
W-1-11	c-11		1.03	1.00	1.05	f	FR	100	N10E	47W	FE	-	Т	EDZ
W-1-12		f-1	1.05	-	-	-	FO	162	N18W	44W	-	-		
W-1-13	c-12		1.15	1.11	1.18	f	FR	190	N10E	47W	ST/SL(30°)	-	S	PE
W-1-14	c-13		1.45	1.43	1.47	f	FR	155	N25W	32W	FE	-	Т	EDZ
W-1-15		f-2	1.50	-	-	-	FO	146	N34W	39SW	-	-		
W-1-16	c-14		1.53	1.51	1.55	f	FR	155	N25W	28W	FE	-	Т	EDZ
W-1-17         c-15         1.72         1.70         1.73         f         FR         121         N59W         24S         FE														EDZ
W-1-18	c-16		1.86	1.84	1.87	f	FR	121	N59W	24S	ST/SL(250°)	-	ST	PE
W-1-19		f-3	1.90	-	-	-	FO	124	N56W	45SW	-	-		
W-1-20	c-17		1.94	1.93	1.95	f	FR	121	N59W	28S	ST/SL(250°)	-	ST	PE
W-1-21	c-18		1.99	1.98	2.00	f	FR	160	N20W	22S	FE	-	Т	EDZ
W-1-22	c-19		2.25	2.24	2.26	f	FR	115	N65W	14S	FE(不明瞭)	2.3mまで、短柱状コアを主体	Т	EDZ
W-1-23		f-4	2.35	-	-	-	FO	125	N55W	50SW	-	2.3m以深では棒状コアを主体		/
W-1-24	c-20		2.73	2.73	2.73	f	FR	107	N73W	8S	F(一部)	-	D	CD
W-1-25		f-5	2.78	-	-	-	FO	153	N27W	40SW	-	-		/
W-1-26	c-21		2.89	2.87	2.90	f	FR	-	-	22	ST60	-	ST	PE
W-1-27	c-22		2.99	2.98	3.00	f	FR	-	-	20	F(不明瞭)	-	D	CD
W-1-28		f-6	3.25	-	-	-	FO	123	N57W	38W	-	-		
W-1-29	c-23		3.75	3.73	3.76	f	FR	-	-	18	F(不明瞭)	3.6m付近、後30~ 0mm程度のノジュール	D	CD
W-1-30		f-7	3.90	-	-	-	FO	145	N35W	43SW	-	-		
W-1-31		f-8	4.10	-	-	-	FO	131	N49W	32SW	-	-	$\sim$	$\sim$
W-1-32	c-24		4.52	4.44	4.60	0-f	FR	225	N45E	20W	粘土化・碟状化したものが付着	岩片状	D	CD
W-1-33		f-9	4.55	-	-	-	FO	125	N55W	48SW	-	.5~5.0m区間、乱堆積構造が発達		
W-1-34		f-10	4.85	-	-	-	FO	119	N61W	55S	-	層理面発達	$\sim$	$\sim$
W-1-35	c-25		4.95	4.95	4.95	f	FR	280	N80W	52N	F(不明瞭)	岩片状	D	CD
W-1-36	c-26		5.24	5.23	5.25	f	FR	250	N70E	12N	ST/SL(190°)	層理面発達	ST	PE
W-1-37		f-11	5.30	-	-	-	FO	155	N25W	21W	-	同上		
W-1-38	c-27		5.58	5.54	5.62	f	FR	250	N70E	56N	FE(一部かつ、不明瞭)	同上	D	CD
W-1-39		f-12	5.85	-	-	-	FO	125	N55W	45SW	-	同上		
W-1-40		f-13	6.05	-	-	-	FO	122	N58W	39SW	-	同上		$\sim$
W-1-41	-41 f-14 6.65 FO 155 N25W 42SW													
<記載深度														
<タイプ>	軟定と到れ日の上下端の法反 材プンf 非癒差割れ日、o-f 開口割れ日 FD7 探剖描傷割れ日													
<種類>FC	) Formation	n(層理面)。	FR Fracture	(割れ目)								CD 機械的割れ目及びコア	'ディスキン	ノグ
<割目面の	特徴>SS 翁		0 条線のレ-ク角	, ST スリ	ッケンステ	ップから判	定した上盤の	)移動方向				FO 層理面		
<成因>S	剪断割れ目	, T 引張書	別れ目, ST・	TS 剪断性	· 引張性複音	合割れ目(前	者の記号が個	[勢), D 機械的割	れ目			赤字 BTVで確認された割	れ目	
<評価>PE	E 既存割れ	∃, CD ⊐	アディスキン	グ, EDZ ‡	屈削損傷割れ							<ul> <li>判別不能</li> </ul>		
1 11 17														

付表 3-2 W-2 扎の割れ日リスト	付表	3-2	W-2 孔の割れ目リスト
---------------------	----	-----	--------------

孔番号:	W-2													
釆무	割れ目	層理	中央深度	記載深	¿度(m)	カイプ	種類	走向(南半球投	走向	傾斜	割ゎ日両の焅黴	半臂	武田	亚価
首ク	番号	番号	(mabh)	上端	下端	メイン	(FO/FR)	彩:蠍北,500 永 記)	(真北)	(°)	育り10日田 ツ1寸は	石具	170,123	āтіш
W-2-1	c-1		0.58	0.56	0.60	o-f	FR	295	N25E	57S	-	-	D	CD
W-2-2	c-2		0.62	0.60	0.63	f	FR	350	N80E	22S	F(不明瞭)、湾曲	-	Т	EDZ
W-2-3	c-3		0.65	0.61	0.68	o-f	FR	310	N40E	50S	ST/SL(60°)	-	S	PE
W-2-4	c-4		0.72	0.71	0.73	f	FR	320	N50E	28S	F(一部)	=	Т	EDZ
W-2-5	c-5		0.76	0.73	0.79	f	FR	317	N47E	50S	ST/SL(220°)	=	S	PE
W-2-6	c-6		0.85	0.79	0.91	f	FR	323	N53E	50S	ST/SL(310°)、F(一部)	-	ST	PE
W-2-7	c-7		1.02	1.01	1.03	f	FR	-	-	45	ST/SL(70°)、不明瞭	-	S	PE
W-2-8	c-8		1.13	1.10	1.16	f	FR	142	N52E	45N	F	-	Т	EDZ
W-2-9		f-1	1.15	-	-	-	FO	90	N10W	37W	-	-		
W-2-10	c-9		1.15	1.12	1.17	f	FR	135	N45E	45N	F	=	Т	EDZ
W-2-11		f-2	1.68	-	-	-	FO	63	N37W	39SW	-	-		
W-2-12	c-10		1.18	1.15	1.20	f	FR	110	N20E	45W	F	-	Т	EDZ
W-2-13	c-11		1.38	1.36	1.39	f	FR	142	N52E	22N	F	-	Т	EDZ
W-2-14	c-12		1.52	1.51	1.53	f	FR	132	N42E	22W	F	-	Т	EDZ
W-2-15	c-13		1.56	1.55	1.57	f	FR	129	N39E	22N	F、他の割れ目と交差	=	Т	EDZ
W-2-16	c-14		1.67	1.65	1.69	f	FR	190	N80W	24N	F	-	Т	EDZ
W-2-17	c-15		1.81	1.79	1.83	f	FR	151	N61E	45N	F	-	Т	EDZ
W-2-18	c-16		1.90	1.89	1.91	f	FR	161	N71E	24N	F	-	Т	EDZ
W-2-19		f-3	1.92	-	-	-	FO	40	N60W	38S	-	-		
W-2-20	c-17		1.93	1.92	1.94	f	FR	161	N71E	24N	F	-	T	EDZ
W-2-21	c-18		2.06	2.05	2.07	f	FR	10	N80W	20S	F	-	Т	EDZ
W-2-22	c-19		2.09	2.08	2.10	f	FR	10	N80W	17S	F	-	Т	EDZ
W-2-23	c-20		2.19	2.17	2.20	f	FR	10	N80W	30S	F	-	Т	EDZ
W-2-24		f-4	2.25	-	-	-	FO	80	N20W	33W	-	-		
W-2-25	c-21		2.47	2.46	2.48	f	FR	10	N80W	22S	F	-	T	EDZ
W-2-26	c-22		2.53	2.52	2.54	f	FR	29	N61W	24S	F	-	Т	EDZ
W-2-27	c-23		2.58	2.57	2.59	f	FR	10	N80W	22S	F	-	Т	EDZ
W-2-28		f-5	2.60	-	-	-	FO	90	N10W	36W	-	-		
W-2-29	c-24		2.77	2.76	2.78	f	FR	10	N80W	24S	F	-	T	EDZ
W-2-30	c-25		2.81	2.80	2.82	f	FR	10	N80W	24S	F	-	Т	EDZ
W-2-31	c-26		3.21	3.02	3.40	f	FR	111	N21E	16W	F	-	Т	EDZ
W-2-32	c-27		3.24	3.22	3.26	f	FR	53	N37W	30S	F	-	Т	EDZ
W-2-33	c-28		3.29	3.27	3.30	f	FR	95	N5E	25W	F	3.3mまでは、比較的短柱状コアを主体	Т	EDZ
W-2-34		f-6	3.30	-	-	-	FO	65	N35W	30SW	-	3.3m以深からは棒状コアを主体		
W-2-35		f-7	3.45	-	-	-	FO	40	N60W	365	-	-	$\sim$	$\sim$
W-2-36		f-8	3.73	-	-	-	FO	42	N58W	31SW	-	_		
W-2-37		f-9	4.25	-	-	-	FO	65	N35W	50SW	_	層理面発達	$\sim$	$\sim$
W-2-38		f-10	4.60	-	-	-	FO	50	N50W	48SW	_	50~ .70区間、不明瞭な乱堆積構造	$\sim$	$\sim$
W-2-39	c-29		4.83	4.82	4 84	f	FR	90	NS	22W	-	層理面発達	D	CD
W-2-40	0.20	f-11	4 95		-	-	FO	62	N38W	37SW	-	同上	/	/
W-2-41		f-12	5.25	_	-	-	FO	70	N30W	42SW	-	同上		$\sim$
W-2-42		f-13	5.60	-	-	-	FO	59	N41W	27SW	-	同上	$\sim$	$\sim$
W-2-43	c-30	1 10	5.58	5.56	5 59	o-f	FR	157	N67E	22N	ST/SL(110°), 小岩片付着	単金の単位の単位の単位の単位の単位の単位の単位の単位の単位の単位の単位の単位の単位の	S	PF
W-2-44	c-31		5.00	5.65	5.80	o-f	FR	157	N67E	65N	ST/SL(210°) SS	風神南登達	ST	PF
W-2-45	c-32		5.77	5.74	5.79	f	FR	198	NI72W	40N	ST/SL(210 ), 00	信柱山元庄	S	PE
W 2-46	0-32	f 1/	5.85	3.14	5.15		FO	61	NISOW	401V	31/3L(210 )			
W-2-40	0.33	1-14	5.05	5.97	5.99	f	FR	166	N76F	20N				CD
W-2-41	6-33	£ 15	5.50	0.91	0.99		FN	100	NICOL	4000	-			
W-2-40	- 24	C1-1	0.10	6.26	6.26		FU	220	NS2W	425W	- CT/CL(40°)	间上	~	
W-2-49	C-34	6.10	0.51	0.20	0.30	0-1	FR	220	NUCH	30E	S1/SL(40)	-	~	PC
W-2-50	-	1-10	6.50	-	-	-	FU	55	N45W	405vv	-			
<記載深度	就深度>割れ目の上下端の深度           PE 現存割れ目(剪断割れ目?)													
<タイフ>1	非癒着制	れ目, o-t m	開口割れ日	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								EDZ 掘削損傷割れ日	-	
<種類>+0	Formation	1(層理面), 1	FR Fracture	(割れ目)								CD 機械的割れ目及ひコア	ディスキン	17
<割目面の	侍徴≥SS ∯	鏡肌, SL ≶	条線のレ-ク角	, ST スリ	ッケンステ	ップから判	定した上盤の	移動方向				FO 層理面		
<成因>S	剪断割れ目	, T 引張害	リれ目, ST・	TS 剪断性	・引張性複合	合割れ目(前	者の記号が優	「勢),D 機械的害	川れ目			赤字 BTVで確認された割	れ目	
< 評価 > PF	町友割わ	- CD -	アディスキン	グ FD7 ま	虚削損傷割れ	18						<ul> <li>– 判別不能</li> </ul>		

## 付表 3-3 W-3 孔の割れ目リスト

-

<b>孔</b> 畨号:	VV-3					1	dani dana	+				1		
番号	割れ目	層理	中央深度	記載深	:度(m)	タイプ	種類	定回(闸丰球投 影:磁北.360°表	走向	傾斜	割れ目面の特徴	岩質	成因	評価
	番号	番号	(mabh)	上端	下端		(FO/FR)	(5番	(真北)	(°)				ļ
W-3-1	c-1		0.59	0.56	0.62	f	FR	120	N30E	45N	F	-	Т	EDZ
W-3-2	c-2		0.62	0.60	0.64	f	FR	115	N25E	45N	F	-	T	EDZ
W-3-3	c-3		0.73	0.70	0.75	f	FR	115	N25E	45N	F	-	Т	EDZ
W-3-4	c-4		0.83	0.80	0.85	f	FR	115	N25E	45N	F	-	Т	EDZ
W-3-5	c-5		1.03	1.00	1.06	f	FR	108	N18E	40W	F	-	Т	EDZ
W-3-6	c-6		1.11	1.09	1.13	f	FR	115	N25E	38W	ST/SL(30°)、不明瞭	-	S	PE
W-3-7	c-7		1.33	1.32	1.34	f	FR	115	N25E	35W	F(不明瞭)	-	Т	EDZ
W-3-8	c-8		1.40	1.40	1.40	f	FR	17	N73W	0	-	-	D	CD
W-3-9	c-9		1.50	1.47	1.52	f	FR	98	N8E	32W	-	-	D	CD
W-3-10		f-1	1.60	-	-	-	FO	67	N33W	22W	-	-		
W-3-11	c-10		1.67	1.65	1.68	f	FR	138	N48E	10N	F	-	Т	EDZ
W-3-12	c-11		1.72	1.70	1.73	f	FR	140	N50E	10N	F	-	Т	EDZ
W-3-13	c-12		1.78	1.76	1.79	f	FR	130	N40E	30N	F(比較的明瞭)	-	Т	EDZ
W-3-14	c-13		1.90	1.89	1.91	f	FR	132	N42E	20N	F	-	Т	EDZ
W-3-15	c-14		1.93	1.92	1.93	f	FR	138	N48E	30N	F(不明瞭)	-	Т	EDZ
W-3-16		f-2	1.95	-	-	-	FO	36	N64W	41S	-	-		
W-3-17	c-15		2.06	2.05	2.07	f	FR	126	N36E	12W	-	層理発達	D	CD
W-3-18 c-16 2.08 2.07 2.09 f FR 126 N36E 12W - 同上 D C														CD
W-3-19 f-3 2.25 FO 17 N83W 36S - 同上														
W-3-20	c-17		2.37	2.35	2.39	f	FR	123	N33E	30W	F	同上	T	EDZ
W-3-21	c-18		2.39	2.37	2 41	f	FR	118	N28F	30W	F	同上	Т	FD7
W-3-22	c-19		2.48	2.47	2.49	f	FR	113	N23E	25W	F	25mまで短柱状コア主体	Т	EDZ
W-3-23	0 15	f-4	2.65	-	-	-	FO	41	N59W	43SW	-	2.5m以深棒状コア主体	-	
W-3-24	c-20		2.00	2.76	2 78	f	FR	126	N36E	2/1/	F	Z.5m以休住()雪/工作 届田登達	T	FD7
W-3-25	0.20	f-5	3.05	2.10	2.10		FO	/1	NEQW	35SW	-	同上	-	
W-3-26		f_6	3.35		_		FO	52	N/8W	26W	_	同上		
W-3-27		f_7	3 90	_	_	_	FO	91	NINGW	281	_	1 供積構造		$\sim$
W-3-28		f_8	4.30	_	_	_	FO	92	NIOSW	2/1//	_	届甲登凌		$\sim$
W 3 20		fQ	4.00				FO	61	NI30W	2210/		/自地元社		
W 3 20	o 21	13	4.30	1 03	5.03	f	FP	151	N61E	66W	CT/CI(00°) 下般欠加	展田 <u>政</u> 法	ST	DE
W 3 31	0-21	f 10	5.20	4.55	5.05		FO	71	NI20W	2010/	31/31(30 八 下靈入如	眉埕光连	51	
W 3 32	c 22	1-10	5.20	5.36	5.45	f	FP	110	N20F	50W		/ 信 廷 光 连	ST	DE
W 3 33	c 23		5.63	5.50	5.40	f	FP	180	NR1W	32N	ST/SI (340°) SS	<u>ал 1</u> ,	ST	DE
W 2 24	0.20		5.05	5.55	5.70	f	ED	105	NOIW	5211	51/32(340 )、33		51	DE
W 3 35	0-24	f 11	5.03	5.55	5.70	1	FO	67	VI33/W	32///	111/00月14日140日	居田改法	-	
W 3 36		f 12	5.00	-	-	-	FO	18	NE2W	305///	-	眉柱光连		
W 3 37		f 13	6.30	-	-	-	FO	327	N/7E	305W	-	同上		
W-3-37	o 25	1-13	6.49	6 1 1	6 51	-	FR	120		J23L	ST/SL(00°)	四上	~	
W-3-30	0-20	6.14	0.40	0.44	0.51	-		70		4ZIN	31/3L(90 )	-		FL
W-3-39	- 20	1-14	0.50	-	- 01	-	FU	10		21 W		-		
W-3-40	3-40 c-26 6.73 6.64 6.81 f FR 180 EW 60N ST/SL(10°) - S PE													
VV-3-41	3-41 f-15 6.75 FO 54 N46W 46SW													
<記載深度	載深度>割れ目の上下端の深度     野白山目(剪断割れ目?)     日の上下端の深度     日の上下端の沿れ目の     日の上下端の深度     日の     日の													
<タイプ>	f 非癒着割;	れ目, o-f l	開口割れ目									EDZ 掘削損傷割れ目		
<種類>FC	Formation	1(層理面),	FR Fracture	(割れ目)								CD 機械的割れ目及びコア	ディスキン	グ
<割目面の	特徴>SS 翁	鏡肌, SL ≗	条線のレ-ク角	, ST スリ	ッケンステ	ップから判	定した上盤の	移動方向				FO 層理面		
<成因>S	剪断割れ目	, T 引張書	別れ目, ST・	TS 剪断性	・引張性複合	計れ目(前	者の記号が優	ē勢),D 機械的割	れ目			赤字 BTVで確認された割	h目	
<評価>PE	既存割れ	∃, CD ⊐	アディスキン	グ, EDZ 打	屈削損傷割れ	旧						- 判別不能		

付表 3-4 G-1 孔の割れ目リス	۲
--------------------	---

孔番号:	G-1													
44.0	割れ目	層理	中央深度	記載深	健(m)	h 1 -	種類	走向(南半球投	走向	傾斜	刺れ日本の林湾	ш <i>ह</i> г	-+	=w/≖
留亏	番号	番号	(mabh)	上端	下端	217	(FO/FR)	彩:蚔北,360°表 記)	(真北)	(°)	割れ日国の特徴	石貝	成回	青千1四
G-1-1	c-1		0.62	0.60	0.63	f	FR	110	N20E	35W	F		Т	EDZ
G-1-2	c-2		0.69	0.67	0.71	f	FR	120	N30E	38W	F		Т	EDZ
G-1-3	c-3		0.77	0.75	0.78	f	FR	115	N25E	40W	F,ST/SL(190°)		ST	-
G-1-4	c-4		0.90	0.87	0.93	f	FR	115	N25E	54W	F,ST/SL(215°)		ST	-
G-1-5	c-5		1.00	0.97	1.03	f	FR	115	N25E	46W	F		Т	EDZ
G-1-6	c-6		1.09	1.08	1.10	f	FR	-	-	-	F、2本の割れ目が交差	層理発達	Т	EDZ
G-1-7	c-7		1.24	1.22	1.26	f	FR	133	N43E	32N	F	同上	Т	EDZ
G-1-8		f-1	1.25	-	-	-	FO	39	N61W	35S	-	同上		
G-1-9	c-8		1.29	1.27	1.30	f	FR	130	N40E	32W	F	同上	T	EDZ
G-1-10	c-9		1.31	1.29	1.33	f	FR	130	N40E	34W	F	同上	T	EDZ
G-1-11	c-10		1.39	1.36	1 41	f	FR	140	N50F	37N	F	 同上	Т	ED7
G-1-12	c-11		1.61	1.59	1.62	f	FR	137	N47F	23W	F	同上	T	EDZ
G-1-13	c-12		1.67	1.66	1.68	f	FR	137	N47E	20W	F	同上	т	EDZ
G-1-14	c-13		1.07	1.00	1.00	f	FR	1/3	N53E	18N	F(不明瞭)	同上	т	EDZ EDZ
G 1 15	0.14		1.79	1.74	1.70	f	FP	122	NI32E	19//	F(コア滋曲)	同上	т	EDZ
G 1 16	0-14	f 2	1.70	1.11	1.75		FO	122	N57W	346/	「(ゴノ/弓曲)	同上	-	
G-1-10	0.15	1-2	1.00	1 95	1 07	-	FU	43	NI27E	1914/	-	同上	T	ED7
0-1-17	- 10		1.00	1.00	1.07	1		127	NUTE	1000	г Г		т Т	EDZ
G-1-18	C-10		1.91	1.90	1.92	T (	FR	130	N40E	1200	F	回上	і т	EDZ
G-1-19	C-17		1.94	1.93	1.95	Ť	FR	110	N2UE	1200	F	同上	 	EDZ
G-1-20	C-18		1.98	1.97	1.98	t	FR	110	N20E	10W		同上	-	EDZ
G-1-21	c-19		2.02	2.01	2.03	t	FR	-	-	12	FE(コアに起点あり)	同上	-	EDZ
G-1-22	c-20		2.15	2.14	2.16	t	FR	-	-	18	F	2.2mまでは短柱状コア主体		EDZ
G-1-23		f-3	2.20	-	-	-	FO	39	N61W	47S	-	2.2m以深、棒状コア主体	$\leq$	
G-1-24		f-4	2.60	-	-	-	FO	35	N65W	35S	-	層理発達		
G-1-25	c-21		2.90	2.88	2.91	f	FR	-	-	22	湾曲したステップST,SL80°、一部FE	同上	-	PE
G-1-26	c-22		3.03	3.03	3.03	f	FR	-	-	0	特徴なし	同上	-	CD
G-1-27		f-5	3.25	-	-	-	FO	39	N61W	38S	-	同上	$\leq$	$\angle$
G-1-28		f-6	3.50	-	-	-	FO	79	N21W	31W	-	同上		
G-1-29	c-23		3.54	3.53	3.55	f	FR	108	N18E	24W	F	同上	Т	EDZ
G-1-30		f-7	4.15	-	-	-	FO	67	N33W	34SW	-	同上		
G-1-31	c-24		4.42	4.40	4.43	f	FR	229	N41W	32E	特徴なし	同上	-	CD
G-1-32		f-8	4.50	-	-	-	FO	60	N40W	47SW	特徴なし	同上		
G-1-33	c-25		4.91	4.89	4.92	f	FR	257	N13W	32E	特徴なし	同上	-	CD
G-1-34	c-26		4.96	4.95	4.97	f	FR	253	N17W	20E	特徴なし	同上	-	CD
G-1-35	c-27		4.98	4.97	4.99	f	FR	27	N63W	33S	SS(交差)	同上	ST	PE
G-1-36	c-28		5.02	5.01	5.03	f	FR	50	N40W	20S	F(不明瞭で荒い)	岩片状	Т	EDZ
G-1-37	c-29		5.22	5.19	5.24	f	FR	197	N73W	40N	特徴なし	乱堆積構造	-	CD
G-1-38	c-30		5.27	5.24	5.30	f	FR	197	N73W	40N	ST,SL(50°)	同上	S	PE
G-1-39		f-9	5.30	-	-	-	FO	33	N67W	24S	-	同上		
G-1-40	c-31		5.39	5.38	5.40	f	FR	358	N88E	20S	SS	同上	ST	PE
G-1-41	c-32		5.41	5.40	5.42	f	FR	10	N10E	22E	SS	同上	ST	PE
G-1-42		f-10	5.90	-	-	-	FO	32	N68W	31S	-			
G-1-43		f-11	6.30	-	-	-	FO	64	N36W	43SW	-			/
G-1-44		f-12	6.75	-	-	-	FO	58	N42W	42SW	-			
G-1-45         C-33         6.99         6.98         7.00         f         FR         88         N2W         20W         / ジュ-ルを境界に分離         D         CI														CD
<記載深度	1-45         c-33         6.99         6.98         7.00         f         FR         88         N2W         20W         / ジュールを境界に分離         D         CD           載深度 > 割れ目の上下端の深度         PF         既存割れ目の上下端の深度         PF         既存割れ目の上下端の深度         PF         既存割れ目の上下端の深度         PF         既存割れ目の上下端の深度         PF         既存割れ目の上下端の深度         PF         既有割れ目の上下端の深度         PF         既有割れ目の上下端の深度         PF         販売割れ目の上下端の深度         PF         販売割れ目の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上の上													
<タイプ>	載床及>割れ日の上下端の床及 イブ>f 非産差剤れ日、o-f 開口剤れ日           FD7         期間福倉割れ日													
<種類>F0	Formation	(層理両) に	FR Fracture	(割れ日)								CD 機械的割れ日及びコア	'ディスキ`	バ
く割日面の	・ ionnauor 法微 > cc 《	い/言・生山/,『 暗印 CI 4	、 indcufe S細のI. ヶ本	ST 7	いケンマニ	ップかんギ	定したと般の	移動方向				FO 層理面		,
、町日回の	111以~33 11	т ллет	〒14日 07 7	, Ji 入り TC 前端44	· ファイスア	→ ノ ハ ワ 刊 > 刺 ね 戸 ( 兰	~ した上塗の 来の詞早 <i>お</i> 酒		140 15			ま字 RTVで確認された刺	わ日 わ日	
~ 成四 ~ 5	予めずれ日	, 「 513成者	946日, SI・1 マゴノマナ・	いう 労断性	・ ウ15px11土(援合 (1)水11月/1811年1月)	1894に日(別	ヨツ記方が傷	:557, レ (筬(帆山)吉	946 <b>H</b>			95.5. DIV C唯能され/2割- 期別工作	1.4	
< 評価 > PE	<ul><li>・ 成仔割れ</li></ul>	∃, CD ⊐	/ ティスキン	ν, EDZ 3	出則損1陽割れ	гн						- 刊別个肥		

## 3.2 BTV 観測結果

各観測孔で確認された割れ目一覧を付表 3-5 に示し、グラウト注入前の展開画像を付図 3-9~ 付図 3-19 に示し、グラウト注入後の展開画像を付図 3-20~付図 3-28 に示す。

71	確認深	₹度(m)	走向(真北)	傾斜
九田	上端	下端	(°)	(°)
W_1	0. 63	0. 72	N20E	45W
W-1	5. 23	5. 25	N70E	12N
	0. 71	0. 73	N50E	28S
W_2	0. 73	0. 79	N47E	40S
W-2	0. 79	0. 91	N53E	40S
	5. 74	5. 79	N72W	50N
	0. 60	0. 64	N25E	45N
	0. 70	0. 75	N25E	45N
W-3	0.80	0. 85	N25E	45N
	1.09	1. 13	N25E	38W
	5.36	5. 45	N20E	50W
	0. 67	0. 71	N30E	38W
	0. 87	0. 93	N25E	54W
G-1	5. 01	5. 03	N40W	20S
	5. 24	5. 30	N73W	40N
	5.40	5. 42	N10E	22E
T-1	4. 08	4. 20	N75W	45N

付表 3-5 割れ目一覧表



付図 3-9 グラウト注入前 W-1 孔


付図 3-10 グラウト注入前 W-1 孔



付図 3-11 グラウト注入前 W-2 孔



付図 3-12 グラウト注入前 W-2孔



付図 3-13 グラウト注入前 W-3孔



付図 3-14 グラウト注入前 W-3孔







付図 3-17 グラウト注入前 T-1 孔



付図 3-18 グラウト注入前 G-1 孔







付図 3-20 グラウト注入後 W-1 孔



付図 3-21 グラウト注入後 W-1孔



付図 3-22 グラウト注入後 W-2孔







付図 3-24 グラウト注入後 W-3孔



付図 3-25 グラウト注入後 W-3孔







付図 3-27 グラウト注入後 T-1 孔



付図 3-28 グラウト注入後 T-1 孔

#### 3.3 孔径検層結果

孔径検層は、深度に対して孔径の変化を連続的に測定記録し、孔内における空洞、崩壊の位置 やその形状・程度を把握することを目的とした。

検層結果を付図 3-29~付図 3-32 に示す。各孔の掘削時のビット径は、W-1~W-3 は \$ 87mm、 G-1 は \$ 67mm である。

#### 1 W-1

本孔の孔径は、X 変位 81.2~109.6mm、Y 変位 80.9~109.0mm の範囲を示す。孔口付近~深 度 1.6m 間、4.0~5.0m 間で一部孔径の拡大が認められたが、上記以外の深度では概ねビット径 と同等の孔径を示し、空洞や崩壊は確認されなかった。

#### 2 W-2

本孔の孔径は、X 変位 81.2~106.3mm、Y 変位 80.9~107.6mm の範囲の孔径を示す。孔口付 近~深度 1.5m 間で一部孔径の拡大が認められたが、上記以外の深度では概ねビット径と同等の 孔径を示し、空洞や崩壊は確認されなかった。

#### 3 W-3

本孔の孔径は、X 変位 80.6~118.1mm、Y 変位 80.7~123.7mm の範囲の孔径を示す。孔口付 近~深度 2.0m 間で一部孔径の拡大が認められた。0.5~0.6m 間ではコンクリートと岩盤の境界 付近が乱れていたためビット径 2~5mm 程度の拡大が認められた。他の深度では概ねビット径と 同等の孔径となっている。

### ④ G-1

本孔の孔径は、X 変位 63.3~115.1mm、Y 変位 59.1~113.9mm の範囲の孔径を示す。孔口付 近~深度 1.0m 間で孔径の拡大が認められたが、上記以外の深度では概ねビット径と同等の孔径 を示し、空洞や崩壊は確認されなかった。

#### (5) G-1

本孔の孔径は、X 変位 63.3~115.1mm、Y 変位 59.1~113.9mm の範囲の孔径を示す。孔口付 近~深度 1.0m 間で孔径の拡大が認められたが、上記以外の深度では概ねビット径と同等の孔径 を示し、空洞や崩壊は確認されなかった。。



付図 3-29 孔径検層図 (W-1)







## 3.4 孔曲がり測定

孔曲がり測定は、ボーリングの削孔精度管理を目的とした。本調査においては、水理試験孔 W-1,W-2,W-3 と既存孔 T-1,T-2,T-3 の計 6 孔で実施した。

結果をまとめて付表 3-6 に示し、それぞれの測定結果を付図 3-33~付図 3-38 に示す。

	孔番					
	W-1	W-2	₩–3	T-1	T-2	T-3
測定深度(mm)	5700	5800	5800	9500	9800	9800
X 変位(mm)	33.00	-1.80	-15. 70	-5. 70	174.00	97.00
Y 変位(mm)	-84.00	-27.00	-7. 30	-196.00	-281.00	-92.00
総変位(mm)	90. 70	27.77	17. 41	198.93	331.94	135.08
換算角度(°)	0. 903	0. 272	0. 170	1. 203	1. 939	0. 788

付表 3-6 孔曲がり測定結果一覧表

① W-1

本孔は、孔底までの変位が X 変位 33 mm、Y 変位-84 mm 程度を示す。測定深度 5700 mm と 総変位 90.70 mm からの換算角度が 0.903°と概ね地盤から垂直方向を示す。

## 2 W-2

本孔は、孔底までの変位が X 変位-1.8 mm、Y 変位-27 mm 程度を示す。測定深度 5,800 mm と総変位 27.77 mm からの換算角度が 0.272°と概ね地盤から垂直方向を示す。

#### 3 W-3

本孔は、孔底までの変位が X 変位-15.7 mm、Y 変位-7.3 mm 程度を示す。測定深度 5,800 mm と総変位 17.41 mm からの換算角度が 0.170°と概ね地盤から垂直方向を示す。

## ④ T-1

本孔は、孔底までの変位が X 変位-5.7 mm、Y 変位-196 mm 程度を示す。測定深度 9,500 mm と総変位 198.93 mm からの換算角度が 1.203°と概ね地盤から垂直方向を示す。

⑤ T-2

本孔は、孔底までの変位が X 変位 174 mm、Y 変位-281 mm 程度を示す。測定深度 9,800 mm と総変位 331.94 mm からの換算角度が 1.939°と概ね地盤から垂直方向を示す。

#### ⑥ T-3

本孔は、孔底までの変位が X 変位 97 mm、Y 変位-92 mm 程度を示す。測定深度 9,800 mm と 総変位 135.08 mm からの換算角度が 0.788°と概ね地盤から垂直方向を示す。



付図 3-33 孔曲がり測定 (W-1)



付図 3-34 孔曲がり測定 (W-2)



付図 3-35 孔曲がり測定 (W-3)



付図 3-36 孔曲がり測定(T-1)



付図 3-37 孔曲がり測定 (T-2)



付図 3-38 孔曲がり測定 (T-3)

参考文献

- 一般社団法人全国地質調査業協会連合会,社会基盤情報標準化委員会,ボーリング柱状図作成及 びボーリングコア取扱い・保管要領(案)・同解説,2015.
- 吉野浩光,佐俣洋一,丹生屋純夫,石井英一,幌延深地層研究計画における 350m 試験坑道掘削 影響領域を対象とした透水試験(その1), JAEA-Data/Code 2018-015, p.169,

## 付録4 坑道シーリングに関わる施工技術の整備

# 目次

1. 撒き出し・転圧工法	付 4-3
1.1. 施工試験方法	付 4-3
1.2. 埋め戻し材の製造	付 4-4
1.3. 施工試験結果	付 4-5
1.3.1. 転圧層の層厚	付 4-5
1.3.2. かさ密度の計算	付 4-6
1.3.3. 施工速度	付 4-7
1.3.4. 撒き出し・転圧工法と吹付け工法の併用について	付 4-9
1.4. 施工技術オプションの選択における評価項目	付 4-9
2. 吹付け工法	付 4-11
2.1. 施工試験方法	付 4-11
2.2. 埋め戻し材の製造	付 4-16
2.3. 施工試験結果	付 4-17
2.3.1. 吹付け箱試験結果	付 4-17
2.3.2. 施工試験結果	付 4-18
2.4. 施工技術オプションの選択における評価項目	付 4-24
3. スクリュー工法	付 4-25
3.1. 埋め戻し材の配合検討	付 4-25
3.1.1.1 次検討:模擬掘削土の配合選定	付 4-25
3.2. 試料採取計画	付 4-30
3.3. 試験実施状況	付 4-30
3.3.1. 充填量及び充填形状の経時記録	付 4-30
3.3.2. 充填状況及び充填形状	付 4-31
3.3.3. かさ密度及び充填速度	付 4-35
3.3.4. 試料採取による分析結果	付 4-35
3.3.5. ケース2の埋め戻し高さ及び斜面勾配データ	付 4-38
4. ブロック工法	付 4-40
4.1. 埋め戻し材ブロックの透水係数と最大膨潤率	付 4-40
4.1.1. 使用材料	付 4-40
4.1.2. 透水試験	付 4-42
4.1.3. 膨潤変形試験	付 4-54
4.1 自己シール性の評価方法の検討	付 4-59
5. 埋め戻し材の浸潤解析結果の妥当性確認に資するデータ取得	付 4-61
5.1. 試験装置及び試験手順に関する補足	付 4-61
5.1.1. 試験装置のうち計測・記録用機器	付 4-61
5.1.2. 試験装置の準備	付 4-62
5.2. 豊浦砂を用いた試験	付 4-63

5.2.1. 試験条件	付 4-63
5.2.2. 試験ケース S-O-1 (空気穴解放)	付 4-63
5.3. 解析における周面境界の設定圧	付 4-65
5.4. 飽和・不飽和浸透流解析と気液二浸透流解析の支配方程式	付 4-66
5.5. 飽和透水試験	付 4-67
5.5.1. 供試体の作製	付 4-67
5.5.2. 試験方法	付 4-67
5.6. 液相と気相の絶対浸透率の違い	付 4-69
5.7. Van Genuchten モデル及び Mualem-van Genuchten モデル	付 4-69
5.8. 解析結果	付 4-70
5.9. 試料採取による乾燥密度及び含水率計測	付 4-71

#### 1. 撒き出し・転圧工法

本章では、撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験に係る本編の補足情報を示す。

## 1.1. 施工試験方法

撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験は、令和2年度と同様の手順で実施した。撒き出し・転圧工法の施工試験の手順を付表 1-1 に示す。

施工試験で使用する小型振動ローラは、本来トレンチ状の溝掘削場所における底面転圧に使用 される振動ローラであり、構造上、壁際までの締固めが可能である。小型振動ローラの仕様を付 表 13に示す。小型振動ローラは、同クラスの振動ローラに比べて振幅や起振力が大きい。また ローラは、標準仕様では凹凸をもつが、これを平滑なローラに変更し、壁コンクリート保護のた めの防護材を貼付けた仕様とした。

手順	工種	内容	使用機器類	場所	
1	測量	初期高さを測量する	レベル、3D スキャナ	施工試験場所	
2	フレコン解砕	フレコン底を鎌で切り裂く	天井クレーン、鎌	模擬坑道前平場	
3	材料の解し	材料が固まっている場合は解す	バックホウ	模擬坑道前平場	
4	混合土の撒き出し	ホイルローダーのバケットですくい	ホイルローダー、ス	模擬坑道前平場	
		坑道内に材料を撒き出す	コップ	⇒施工試験場所	
5	混合土の敷均し	坑道内の材料を規定の高さに平滑に	レーキ、	施工試験場所	
5		均す	レーザーレベル		
手順4	4~5 は、レーキが届く	く1~2m程度ごとで繰り返す。			
6	計量	載を松正をおりの紛星を乱見せて	h1. 1.7 k	フレコン単位で計	
		<u> 新さ均した材料の総重を計重する</u>		測しておく	
7	斜路の撒き出し・	ホイルローダーで砕石を撒き出し、	ホイルローダー、	模擬坑道内(5.5m	
/	敷均し	バックホウで敷均しを行う	バックホウ	~10m)	
0	斜路の転圧		小刑垢動ロニラ	模擬坑道内(5.5m	
0			小主派到中一人	~10m)	
9	混合土無振動転圧	混合土の無振動転圧を行う。	小型振動ローラ	施工試験場所	
10	海へしゃだもだだ			长子补照旧式	
10	混合土の振動転圧	混合土の振動転圧を行う	小型振動ローフ	施上試験場所	
11	測量	所定の Pass 数の転圧後、高さを測	レベル 20 フキャナ	施工試驗坦正	
		量する		加工 സ秋 物 171	
12	品質管理	砂置換・キャスポルで現場密度・含	砂置換測定用治具、	砂罟摘たどの試験	
		水比測定を行う。透水試験用のブロ	キャスポル、ハンマ	箇所	
		ックサンプリングを行う。	ドリル		
13	品質管理箇所の埋	混合土で砂置換測定箇所、サンプリ	ハンマドリル笙	砂置換などの試験	
	め戻し	ング箇所を埋め戻す		箇所	
次の層に移行、上記手順を繰り返し約 2m 高さまで施工する。					

付表 1-1 撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験の手順

使用機械	小型振動ローラ				
	機体長	1,500mm	機体高	1,200mm	
	機体幅	610mm~850mm	機体質量	1,548kg	
山井	周期	32Hz	振幅	2.1mm	
1上休求	起振力	80kN	エンジン	空冷2気筒ディーゼル	
	速度	0~20m/min	車輪幅	278×2~398×2	
	操作	リモートコントロール			

付表 1-2 転圧機(小型振動ローラ)の仕様

施工試験で取得するデータと測定方法を付表 1-3 に示す。レベル測量は、付図 1-1 に示す測定 位置で実施した。3D スキャナ測量による出来形体積は、次のような手順で算出した。施工面積を メッシュで分割し、メッシュ内の点群の高さの平均値を代表値として取得する。施工の前後の代 表値の差分からメッシュ 1 個あたりの体積を算出し、施工面積分のメッシュの体積を合算して算 出する。メッシュサイズは、令和 2 年度と同様に 0.1m とした。

施工試験	正伯 ゴ カ		測定頻度	
の段階	取侍アータ	測正力法(規格・基準)		
製造	ベントナイト混合率	IIC A 1999	15 占/久泪〇廿半	
	(細粒分含有率)	515 A 1225	13 点石在日内村	
	含水比	JIS A 1203	30 点/各混合材料	
	粒度分布	JIS A 1204	10 点/各混合材料	
撒き出	投入量	材料の投入量	1 点/各層	
し・転圧	起口回粉	目視確認	8層目以外転圧時	
施工	料/工回数	TS による軌跡管理	8層目転圧時	
	施工層厚	レベル測量	1 点/m ²	
	出来形測定	3D スキャナ測量	1回/各層(転圧後)	
	施工速度	歩掛	各施工段階	
	乾燥密度	JISA1214(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)	2 点/各層	
	透水係数	JGS 0312-2018	1点/各層	

付表 1-3 施工試験で取得するデータと測定方法

*1 層と8層は、乾燥密度の空間相関性を分析するために25 点とした。

## 1.2. 埋め戻し材の製造

埋め戻し材の製造では 1.5m³ (1,500 リットル)の埋め戻し材の混練りが可能なアイリッヒミキ サーを用いた。アイリッヒミキサーの仕様を付表 1-4 に示す。


予備試験等のレベル測定点 施工試験用のレベル測定点(吹付け範囲を除外) 付図 1-1 レベル測量の測定点の配置図

メーカー	アイリッヒ
名称	アイリッヒ・インテンシブ・ミキサー
装置タイプ	攪拌付回転容器型
ミキサータイプ	DE22
最大混練量	1,500 リットル
回転数:アジテータ	550/分
パンの周速	1m/s

付表 1-4 埋め戻し材の製造用ミキサーの仕様

### 1.3. 施工試験結果

#### 1.3.1. 転圧層の層厚

転圧層の仕上がり高さの分布図を付図 1-2 に示す。転圧層の仕上がり高さは、トンネル軸(トンネルの入り口から妻部に向けての方向)の中心の転圧後の高さを示している。施工試験で転圧した 12 層のいずれも、上下の不陸が小さいことがわかる。

転圧層(計12層)の層厚の頻度分布図を付図 1-3 に示す。平均値は122mm であり、分布形状 は正規分布形状を示している。標準偏差は12mm である。



#### 1.3.2. かさ密度の計算

撒き出した埋め戻し材の乾燥質量は、使用した(開封した)埋め戻し材(開封材料)の乾燥質 量から、残った材料(回収材料)の乾燥質量を差し引いて求める。そのためには、開封材料と回 収材料の湿潤質量と含水比のデータが必要になる。12層の転圧層のかさ密度の計算の詳細を付表 1-5に示す。

かさ密度の誤差の要因と内容を付表 1-6 に示す。今回の撒き出し・転圧工法による施工ではか さ密度は一部の層を除いて砂置換による現場密度の平均値より大きくなる傾向にあり、その要因 はかさ密度を算出した際の埋め戻し材の質量が実際の質量より多いためであると考えられる。ま た一部、かさ密度が砂置換法による乾燥密度より小さくなったケースは、埋め戻し材の含水比が 全数測定ではなく、サンプリングの測定結果の平均値を採用したことによる影響があるのではな いかと考えられる。

施工単位	使用した埋め 戻し材の湿潤 質量 <b>(kg)</b>	含水比 (%)	使用した埋め 戻し材の乾燥 質量 <b>(kg)</b>	出来形体積 (m ³ )	かさ密度 (Mg/m³)
1	5277	9.0	4,841	2.4	2.019
1-2	10743	8.9	9,863	4.8	2.046
1-3	16931	8.8	15,566	7.6	2.060
1-4	22659	8.7	20,841	9.9	2.098
1-5	28889	8.8	26,555	12.6	2.107
1-6	35118	8.7	32,304	15.5	2.085
1-7	41466	8.8	38,112	18.3	2.083
1-8	48297	8.8	44,387	21.4	2.079
1-9	55299	8.8	50,823	24.4	2.079
1-10	62117	8.8	57,076	27.6	2.071
1-11	69312	8.9	63,670	30.6	2.083
1-12	76729	8.8	70,511	33.8	2.087

付表 1-5 撒き出し・転圧工法による埋め戻し材のかさ密度

注)施工単位は、累積を示す。例えば、1-5は1層から5層までを累積した埋め戻し材であることを示す。

No.	項目	誤差の要因	誤差の内容
1	開封材料及び回収材料の	荷重計の誤差	測定誤差
	湿潤質量		→かさ密度はばらつく
2	回収材料の湿潤質量	フレコンバッグに埋め戻し材が	埋め戻し材の質量がみかけ増大
		残った	→かさ密度は増大
3	回収材料の湿潤質量	仮置きした場所に埋め戻し材が	埋め戻し材の質量がみかけ増大
		残った	→かさ密度は増大
4	回収材料の質量	運搬時に埋め戻し材が埋め戻し	埋め戻し材の質量がみかけ増大
		範囲外にこぼれ落ちた	→かさ密度は増大
5	回収材料の質量	アクセス路(斜面など)は砕石か	埋め戻し材の質量がみかけ増大
		らなり、アクセス路と埋め戻し範	→かさ密度は増大
		囲との境界が固定されていない	
		ことで、撒き出し時に砕石の領域	
		へ埋め戻し材がこぼれ落ちた	
6	回収材料の質量	重機に埋め戻し材が付着し、埋め	埋め戻し材の質量がみかけ増大
		戻し範囲から外に出された	→かさ密度は増大
7	開封材料及び回収材料の	含水比測定(JISA 1203)の誤差	測定誤差
	含水比		→かさ密度はばらつく
8	開封材料及び回収材料の	全数測定ではなく、サンプリング	推定誤差
	含水比	の測定結果の平均値を採用した	→かさ密度はばらつく
			サンプリング数が少ないときに誤差は
			大きい。
9	転圧された埋め戻し材の	3D スキャナの誤差	測定誤差
	出来形体積		→かさ密度はばらつく
10	転圧された埋め戻し材の	アクセス路(斜面など)は砕石か	体積がみかけ減少
	出来形体積	らなり、アクセス路と埋め戻し範	→かさ密度は増大
		囲との境界が固定されていない	
		ことで、砕石が埋め戻し材へはみ	
		出した(こぼれ落ちた)	
11	転圧された埋め戻し材の	アクセス路(斜面など)は砕石か	体積の誤差が生ずる
	出来形体積	らなり、斜面と埋め戻し範囲との	→かさ密度はばらつく
		境界が固定されていない	
12	転圧された埋め戻し材の	斜面(アクセス路)は砕石からな	体積がみかけ減
	出来形体積	る。より大きな転圧エネルギーを	→かさ密度は増大
		受ける埋め戻し材が斜面側には	砕石側にはみ出た分の境界の移動が考
		み出る。	慮されていない。

## 付表 1-6 かさ密度の誤差の要因

## 1.3.3. 施工速度

撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工速度の算定根拠となった施工歩掛りを付表 1-7 に 示す。参考として、撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工歩掛の割合を付図 1-4 に示す。

加举夕						施工	上時間(min	/層)				
,	旧未泊	2 層	3層	4 層	5 層	6 層	7 層	9 層	10 層	11 層	12 層	平均
	敷均し	50	65	50	55	43	45	35	48	40	71	50.2
施工	予備転圧	5	5	30	8	15	13	35	15	12	10	14.8
	振動転圧	20	25	28	36	35	38	49	41	41	56	36.9
	3D スキャナ	10	10	11	20	17	15	10	8	7	10	11.8
品質管理	レベル測量	35	25	16	18	21	27	31	37	20	17	24.7
	現場密度試験	105	95	85	92	79	89	90	104	100	75	91.4
施工、レ~ 度試験	ドル測量、現場密	225	225	220	229	210	227	250	253	220	239	229.8
施工、3D	スキャナ											

付表 1-7 撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工歩掛

注) 1 層と8 層は空間的相関性を分析するために現場密度試験の測点数が多いことから、施工歩掛ではこれらのデータを省いた。





付 4-8

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218.0 min/層(3.63 hr/ 層)となる。品質管理として3Dスキャナを行う場合は、113.7 min/層(1.90 hr/層)となり、現 場密度試験と比較して大幅に施工時間が短縮されることがわかる。

#### 1.3.4. 撒き出し・転圧工法と吹付け工法の併用について

今年度の施工試験では、撒き出し・転圧工法と吹付け工法を併用することで次の2点の確認を 行った。

①令和2年度の施工試験で課題として挙げられた妻部の施工密度の低さを克服できるか
 ②施工が進み坑道上部の転圧に差しかかった際に、振動ローラが側壁まで寄れなくなるため
 側壁近傍の施工を吹付施工で代替可能か

①に対しては、適切な施工管理ができれば施工目標密度を満たすことを確認できた。また小型 振動ローラでの転圧の際も吹付箇所の近傍まで高品質で転圧することができたため、適切な吹付 角度を選定することで吹付部と転圧部の境界に水みちができるということも考えにくい。

②に対しても同様に適切な吹付角度を選定し、適切な施工管理ができれば施工目標密度を満た すことを確認できた。吹付時のリバウンド量を抑制するためには、ノズルの向きを吹付面と垂直 に保つことが重要である。その際、側部の吹付は妻部の吹付と比較して吹付機械の空間的制限が 大きいことに配慮する必要がある。また小型振動ローラでの転圧の際は吹付箇所の近傍まで寄っ て、吹付面に擦り付けて転圧することが重要である。吹付面に接触しないように転圧すると吹付 箇所と転圧箇所の間に未転圧部が生じることになる。

撒き出し・転圧工法と吹付け工法を併用した際のデメリットとして以下の3点が考えられる。

#### a.機械盛替えの手間やコストが増加する

b.材料撒き出し時の土量計算が困難

c.側部の吹付をすると坑道の断面積が減少し、人と重機の接触の危険が増す

a.については現状、吹付工法の材料供給には据え置き型のベルトコンベアを使用している。令和3年度の施工試験では天井クレーンによる設置が可能であったが、実環境では自走式のベルコンの採用やユニック車による設置が必要となり、盛替えに時間とコストがかかると考えられる。

b.に対しては、CAD 上であらかじめ推定撒き出し量を算出することで対応できる。

c.については、坑口側に照明を設置している場合、作業場所が吹付箇所や施工機械の影となることも危険要因である。そのため慎重な安全対策を実施する必要がある。

これらの撒き出し・転圧工法と吹付け工法を併用した際のメリット・デメリットを検討したう えで安全面・工程面・コスト面を満足できれば積極的に導入するべきであると考える。

#### 1.4. 施工技術オプションの選択における評価項目

令和3年度の撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工試験結果のまとめとして、施工技術 オプションの選択における評価項目を整理した結果を付表1-8に示す。

施工技術オプションの選択における評価項目		働き出し、転工工法	
区分	項目	1取さ山し・転江上伝	
	ベントナイト混合率	$15{\sim}100\%^{1)}$	
適用可能な材料範囲	掘削土の最大粒径	20mm	
	含水比	9.0 %3)	
	乾燥密度(平均値)	$2.018 \mathrm{~Mg/m^3}$	
達成可能な施工品質	密度分布 (標準偏差)	$0.054~{ m Mg/m^3}$	
	施工可能範囲	坑道の下半部 2)	
	製造管理	配合管理(バッチ毎)	
品質保証の容易性	佐丁竺珊 (ふ、そ広庄)	誤差 -0.2~+4.4%	
	旭工官理 (から名度)	使用材・ロス材の湿潤質量と含水比、出来形体積	
<b>歩</b> 丁 丹	施丁油庄 3)	1.55 m³/h	
加山工工	旭山延皮 "	(2.01 m³/h)	

付表 1-8 施工技術オプションの選択における評価項目:撒き出し・転圧工法

備考) 1)国内実績を考慮、2)吹付け工法を併用することで天端から 2.0m 下がりの高さまで施工が可能 3)施工速度は、現場密度試験の代わりに 3D スキャナで管理した場合の速度。

施工速度の()内の値は令和2年度の結果を示す。

### 2. 吹付け工法

本章では、吹付け工法による埋め戻し材の施工試験に係る本編の補足情報を示す。

### 2.1. 施工試験方法

令和3年度は、令和2年度の吹付け施工における課題への対応及び製造・プロセス管理手法の 更新を行うために施工試験を実施する。課題のうちリバウンドと目詰まりの低減については、含 水比の調整が効果的であることが知られている。しかし、リバウンドと目詰まりの低減に効果的 な含水比は異なるため、双方の課題を同時に解決することは難しい。そこでリバウンドと目詰ま りのそれぞれに効果的な含水比に着目し、目詰まりの低減を目的とする試験(試験I)とリバウ ンドの低減を目的とする試験(試験II)を実施した。試験Iと試験Ⅱの概要を付表 2-1 に示す。

試験 I (小規模模擬坑道試験)の手順を付図 2-1 に示す。この手順は、埋め戻し材の含水比により施工数量が異なることを踏まえた手順である。吹付け箱試験の手順は、3D スキャナを含まない点と施工数量が異なる点を除き、同様の手順で実施した。

試験Ⅱ(実規模模擬坑道試験)の手順を付表 2-2 に示す。吹付けの試験は、手順 1~8 を 5 回 繰り返した。1回当たりの施工単位をブロックと称する。最初に坑道の妻部を 2 ブロック施工し、 続いて側部を 3 ブロック施工した。

試験名	試測	¢Ι	試験Ⅱ
埋め戻し材仕様	配合 I (目詰	まり低減用)	配合Ⅱ(リバウンド低減用)
吹付機器の仕様	仕様I(目詰	まり低減用)	仕様Ⅱ(リバウンド低減用)
	吹付け箱	小規模模擬坑道	実規模模擬坑道
試験対象	パル 0.5m 0.5~1m 0.5m 0.5m	1500mm 2000mm	
試験概要	<ul> <li>・目詰まりの低減効果が期 待できる配合の埋め戻し 材を小型の吹付箱(縦0.5m ×横0.5m×奥行0.2m)に 吹き付ける試験</li> </ul>	<ul> <li>・目詰まりの低減効果が期 待できる配合の埋め戻し 材をアーチカルバート内 (幅1.5m×高さ1.5m)に 定量(3.6t or 10t) 吹付け る試験</li> </ul>	・リバウンド率の低減効果 が期待できる配合の埋め 戻し材を実規模模擬坑道 (幅5.0m×高さ5.0m)の 妻部と側壁部に吹付ける 試験
	・材料製造時における埋め	・目詰まりの低減効果	・リバウンド率の低減効果
	戻し材の含水比の分布、粒	・3Dスキャナによるかさ密度の測定精度	
試験確認項目	度分布の許容範囲	・埋め戻し材の乾燥密度のばら	っつき
	・施工品質に及ぼす材料供	・施工速度	
	給量の影響	・吹付け工法の製造・施工プロ	コセス管理手法の適用性

付表 2-1 吹付け工法による埋め戻し材の施工試験の概要



付図 2-1 吹付け工法による埋め戻し材の施工試験の手順(試験I:小規模模擬坑道)

手順	工種	内容	使用機器類	場所	
1	測量	初期形状を測量する	3D スキャナ	吹付施工試験場所	
2	フレコン解砕	フレコン底を鎌で切り裂く	天井クレーン、鎌	ベッセル内	
3	計量	投入した材料の総量を計量する	クレーンスケール	フレコン単位で計	
5	п±			測しておく	
1	泪会上の吹付	吹付システムを用いて混合土の吹付	吹付システム	吃什族工建险担正	
4	低百工の外付	施工を行う	バックホウ	外们爬工码硬场別	
5	リバウンド材の回		スコップ、クレーン	吃什坎丁封齡担訴	
5	収	リハリンド材を回収し、計重を11.5	スケール	<u> </u>	
(	)川目.	施工箇所の形状を測量し、施工体積	Datut	吸母步士教醉相影	
6		を算出する	3D ~+~)	吹付施上試驗場所	
_	口际炊油	コアカッター法で現場密度・含水比	コアカッター測定用	用相应库测合体式	
/	而筫官埋	測定を行う	治具	現場密度測正固別	
0	品質管理箇所の埋	吹付システムを用いて混合土を吹付	吹付システム	电电应声测力体式	
8	め戻し	施工し、密度測定箇所を埋め戻す	バックホウ	現場密度測正固加	
手順:	~8を5回(5ブロッ	ク分)繰り返す。		·	

試験Ⅰ、試験Ⅱで用いる吹付けシステムの仕様をそれぞれ仕様Ⅰ、仕様Ⅱとする。仕様Ⅰ及び 仕様Ⅱのシステムの仕様の詳細を付表 2-3 に示す。

仕様名		仕様 I	仕様Ⅱ
適用する試験名		試験 I	試験Ⅱ
試験の目的		目詰まり低減 (連続施工性)	リバウンド低減
適用する埋め戻し材の	配合	配合 I	配合Ⅱ
試験対象		小規模模擬坑道 吹付け箱	実規模模擬坑道
材料ホース内径(mm)		50.8 or $63.5$	40.0
	種別	ドライコンプレッサ	ドライコンプレッサ
コンプレッサ	吐出圧力(MPa)	0.7	0.7
コンプレッサ	吐出空気量 m³/分	19.4	11.0
	出力(PS)	190	110
	種別	ロータ式吹付け機	ロータ式吹付け機
11年7月1月1日	材料吐出量(m³/hr.)	20.0	5.0
外国の成	所要空気圧力(MPa)	0.74	$0.3 \sim 0.4$
	ローター回転数 (rpm)	30	18
	供給量の調整方法	掻き落とし回転数で制御	
******	材料吐出量(m³/hr.)	4	該当た
1911年1月11日	回転数 (rpm)	10	政当なし
	ホッパー容積(m ³ )	1.4	
	燃聖夕新	PPOKK	後方小旋回バックホウ
N	1成台 1 1小	BROKK	$0.07 { m m}^3$
	機体重量 (kg)	1,600	1,650
ノヘル探作里機	最小横幅 (mm)	1080	990
	最小高さ (mm)	1254	2,250
	出力(kW)	24	11.8

付表 2-3 吹付けシステムの仕様一覧

材料供給機は試験 I で用いた。材料供給機(グラニュレータ)を付図 2-2 に示す。一般的に湿 潤状態の粉体材料は、ホッパー内でアーチ効果によるブリッジを形成し、材料の定量供給を困難 にする。そのため、この材料供給機では、ブリッジ除去用の回転シャフトを設置している。さら に、ホッパーの排出部付近に落とされた材料を一定速度で強制的に掻落し・造粒部でベルトコン ベアに排出することによって一定供給性を実現している。この機械を通過した材料は、ゆるい団 粒物となるが、圧縮空気で吹付け機から吹付けノズルに至るまでのホース内を搬送される間に再 び解砕される程度の硬さになるように、掻落し・造粒部の歯の間隔を調整している。供給量は、 掻落し・造粒部の回転数によって制御することができる。

コンプレッサは、ドライコンプレッサを使用した。試験 I で用いたコンプレサを付図 2-3 に示 す。吹付け機は、ロータ式吹付け機を用いた。ロータ式吹付け機を付図 2-4 に示す。

令和3年度の吹付け工法による埋め戻し材の施工試験では、小規模模擬坑道を対象とする試験 Iと実規模模擬坑道を対象とする試験Ⅱの2種類の試験を行う。試験I及び試験Ⅱで取得するデ ータの一覧表を付表2-4~付表2-5に示す。

令和3年度の吹付け工法の締固め試験を整理するときに用いる土粒子密度は、令和2年度までの吹付け工法と撒き出し・転圧工法の土粒子密度試験結果の平均値2.801 Mg/m³とした(付表 2-6 参照)。



付図 2-2 試験 I 用の材料供給機



付図 2-3 試験 I 用のコンプレサ(190HP ドライ、PDS670SD)



ニードガン 2000(試験 I )

アリバ AL257(試験Ⅱ)

付図 2-4 ロータ式吹付け機

施工試験 の段階	取得データ	測定方法(規格・基準)	測定頻度
室内試験	土粒子密度	JIS A 1202	3点/各混合材料
	粒度分布	JIS A 1204	1 点/各混合材料
	最大乾燥密度、最適含水比	JIS A1210 : C 法	2~3点/各混合材料
	メチレンブルー吸着量	JIS Z 2451	2点/ベントナイト材料
製造	ベントナイト混合率 (細粒分含有率)	JIS A 1223	1点/バッチ
	模擬掘削土含水比	ASTM D4959:赤外線水分計	3点/バッチ
	押み司し社会セル	ASTM D4959:赤外線水分計	2点/バッチ
	埋め戻し村吉小比	JIS A 1203	3 点/バッチ
	粒度分布	JIS A 1204	1点/バッチ
吹付け箱	粒度分布	JIS A 1204	1 施工単位
試験	材料供給量	材料供給機による制御	1 施工単位
	リバウンド量	材料のリバウンド量 (ホース内付着量含む)	1 施工単位
	乾燥密度	シリコーンオイル法	1 施工単位
	透水係数	JGS 0312-2018	2 点
小規模模	連則施工時間	ホース等の目詰まりによる作業休止の有無	1 施工単位
擬坑道試	投入量	材料の投入量	1 施工単位
験	リバウンド量	材料のリバウンド量 (ホース内付着量含む)	1 施工単位
	粒度分布	JIS A 1204	1 施工単位
	出来形測定	3D スキャナ測量	1 施工単位
	施工速度	歩掛	1 施工単位
	乾燥密度	シリコーンオイル法 or パラフィン法	5~10 点/1 施工単位
	含水比	JIS A 1203	同上
	透水係数	JGS 0312-2018	8点

# 付表 2-4 試験 I の取得データと測定方法

施工試験 の段階	取得データ	測定方法(規格・基準)	測定頻度	
製造	ベントナイト混合率 (細粒分含有率)	JIS A 1223	15 点/各混合材料	
	含水比	JIS A 1203	30 点/各混合材料	
実模模擬	投入量	材料の投入量	1施工単位	
坑道試験	リバウンド量	材料のリバウンド量(ホース内付着量含む)	1施工単位	
	ベントナイト混合率	JIS A 1223	1 点/1 施工単位	
	(細粒分含有率)			
	出来形測定	3D スキャナ測量	1 施工単位	
	施工速度	歩掛	1 施工単位	
	乾煸宓庻	JISA 1214(単位体積質量法;コアカッター	6占/1 施工畄位	
	和床面反	法)	0 氚/1 爬工半位	
	含水比	JIS A 1203	同上	
	透水係数	JGS 0312-2018	6 点	

付表 2-5 試験Ⅱの取得データと測定方法

付表 2-6 土粒子密度

種別	玄武岩	クニゲル V1	埋め戻し材
撒き出し・転圧工法(平成 30 年度)	$2.797 \text{ Mg/m}^3$	$2.782 \text{ Mg/m}^3$	$2.796 \text{ Mg/m}^3$
撒き出し・転圧工法(令和2年度)	$2.826 \text{ Mg/m}^3$	$2.804 \text{ Mg/m}^3$	$2.823 \text{ Mg/m}^3$
吹付け工法(令和2年度)	$2.788 \text{ Mg/m}^3$	$2.754 \text{ Mg/m}^3$	$2.783 \mathrm{~Mg/m^{3}}$
平均	$2.804 \text{ Mg/m}^3$	$2.782 \text{ Mg/m}^3$	$2.801 \text{ Mg/m}^3$

#### 2.2. 埋め戻し材の製造

埋め戻し材の製造には、撒き出し・転圧工法と同様に、埋め戻し材の均質な混合で実績のある アイリッヒミキサ(DE-22)を使用した(付表 1-4)。

試験 I における埋め戻し材の製造の手順を付図 2-5 に示す。試験 Ⅱの埋め戻し材の製造手順については、撒き出し・転圧工法の埋め戻し材の製造手順と同様とした。

試験Iにおいては、模擬掘削土の含水比は、3 試料/バッチ(袋の上中下それぞれ1 試料)の含水比計測を実施し、埋め戻し材の製造精度を確保した。製造前、製造後の含水比計測には、即時に結果の出る赤外線水分計を採用した(付図 2-6)。

試験Ⅱについては、模擬掘削土の含水比は各材料の含水比測定結果の平均値(クニゲル V1 は 8.0%、砕砂粗目は 5.1%)を用いて、所定の混合率、含水比になるようにベントナイト混合土の 製造を行った。

製造された埋め戻し材はフレコンに投入され、屋根付きの倉庫へ一時保管される。通常のフレ コンでは気温や湿度などの環境により埋め戻し材の品質に影響を及ぼす可能性があることから、 耐候性のフレコンを使用する必要がある。また、所定のスペースに必要な数量を保管するには、 フレコンの段積みが望まれる。フレコンを段積みすることで、保管数量を確保できる一方、自重 や上載荷重による団粒化が懸念される。令和3年度までの実績を踏まえ、開発・製造段階のプロ セス管理に耐候性フレコンを使用すること及び団粒化を避けるための最大の段積み数を追加した。



付図 2-5 埋め戻し材の製造手順



付図 2-6 赤外線水分計(島津製作所製: MOC63u)

## 2.3. 施工試験結果

## 2.3.1. 吹付け箱試験結果

模擬掘削土の粒度分布と吹付け工法のリバウンド率との関係を付図 2-7 に示す。粒度分布の代表値として、曲率係数を用いた(付表 2-7)。

模擬掘削土	均等係数 Uc	曲率係数 Uc'						
最大粒径 5 mm (配合 I )	11.6	2.3						
最大粒径 2.5mm	9.6	1.2						
2.5 mm: 2.5~5.0 mm=6.5: 3.5 (ブレンド材)	13.8	1.6						

付表 2-7 模擬掘削土の均等係数と曲率係数(試験 I)

*令和2年度の結果を用いた。

含水比 *wopt*-3%と含水比 *wopt*-1.5%のいずれのケースにおいても、ブレンド材のリバウンド 率は、最大粒径 5mm の値より数%~10%程度低く、最大粒径 2.5mm のデータと比較してもほぼ 同等以下であった。このことから、ブレンド材を使用することで、リバウンド率の数%程度の低減 が期待できる可能性があると考えられる。 埋め戻し材の材料供給量とリバウンド率の関係を付図 2-8 に示す。模擬掘削土は最大粒径 5mm (配合 I)を用いた。wopt-1.5%のときは、材料供給量とリバウンド率の関係は単調減少の傾向 を示した。一方、wopt-3.0%のときは、材料供給量とリバウンド率の関係は凸の形状を示してお り、材料供給量 7.5 kg/10sec のリバウンド率が最小となったものの、材料供給量 15 kg/10sec の リバウンド率との差は数%である。このことから、wopt-1.5%と wopt-3.0%の双方の配合におい てリバウンド率の低減に有効な材料供給量は、15 kg/10sec であると判断し、試験 I の小規模模擬 坑道の施工試験では、材料供給量を 15 kg/10sec に設定した。



 w_{opt}-3%
 w_{opt}-1.5%

 付図 2-7 模擬掘削土の粒度(曲率係数)とリバウンド率の関係(試験 I)



付図 2-8 材料供給量とリバウンド率の関係(試験 I)

#### 2.3.2. 施工試験結果

### (1) 乾燥密度の測定結果

吹付け工法により施工した埋め戻し材の乾燥密度のばらつきを把握するために、小規模模擬坑 道において試験 I を実施した。ここでは、ホース径が乾燥密度のばらつきに及ぼす影響を把握す るために行ったホース径 2.5 インチのケースの結果を示す。ホース径 2 インチ及び 2.5 インチの 試験 I の付着材の乾燥密度の頻度分布図を付図 2-9 に示す。ホース径 2 インチで施工した場合の 付着材の乾燥密度の平均値 1.990 Mg/m³は、2.5 インチで施工した付着材の平均値 1.932 Mg/m³ より若干大きい。また、ホース径 2 インチで施工した場合の付着材の乾燥密度の標準偏差 0.034 Mg/m³は、2.5 インチで施工した付着材の標準偏差 0.031 Mg/m³より若干大きい。吹付けの圧力 は、ホース径によらず一定であるが、埋め戻し材の単位質量あたりのエネルギーはホース径が大 きい方が小さくなる。そのため、付着材の平均値は、2.0 インチの方が大きくなり、標準偏差につ いては 2.0 インチの方が小さくなったと考えられる。ただし、平均値と標準偏差の差はともに小さく、ホース径が付着材の乾燥密度に与える影響は比較的小さいと考えられる。



付図 2-9 吹付け工法による埋め戻し材の乾燥密度の頻度分布図(試験 I)

付図 2-10 は、試験 I による小規模模擬坑道における乾燥密度の空間分布の状況を示す。本編で は省かれていた配合(wopt-1.5%)の結果を加え、含水比とホース径を組み合わせた 4 ケースの 結果を示す。図の横軸の前、中、後は、小規模模擬坑道の縦断方向の位置、①~③は小規模模擬 坑道の横断方向の位置を表す。wopt-1.5%_2.5 インチの縦断方向「前」の位置における横断のば らつきが若干大きいが、縦断方向、横断方向のいずれにおいても乾燥密度のばらつきの幅は 0.1Mg/m³程度であり、単調増加などの傾向は見られず、ランダムなばらつき状況を示しているよ うに見える。吹付け工法による埋め戻し材の空間的ばらつきが生じにくいことが確認できた。



(2) かさ密度

かさ密度は、付着材の乾燥質量を出来形体積で除して求められる。出来形体積は、3Dスキャナ で求めた。試験 I (小規模模擬坑道) 及び試験 II (実規模模擬坑道)の出来形体積の測定結果を それぞれ付図 2-11、付図 2-12 に示す。試験 I 、試験 II ともに出来形の表面形状が再現できてい る。試験 I と試験 II のかさ密度の計算結果を付表 2-8 及び付表 2-9 に示す。



*w_{opt}*-3%_2インチ





*w_{opt}*-3%_2.5 インチ



*w*_{opt}-1.5%_2インチ *w*_{opt}-1.5%_2インチ 付図 2-11 3D スキャナによる出来形体積測定結果(試験 I)



妻部施工完了(BL01~BL02)



側壁部施工完了(BL03~BL05) 付図 2-12 3D スキャナによる出来形体積測定結果(試験Ⅱ)

~~ 7		乾燥質	昰(kg)		出来形体積	かさ密度
<i><i>J</i> – <i>X</i></i>	投入量	リバウンド	その他ロス	付着量	(m ³ )	(Mg/m ³ )
W _{opt} -1.5%_2インチ	3,527	1,951	2	1,574	0.76	2.071
Wopt-1.5%_2.5インチ	3,542	2,084	0	1,458	0.72	2.025
<i>W_{opt}</i> -3%_2インチ	9,320	6,465	0	2,855	1.38	2.069
Wopt-3%_2.5インチ	9,391	6,479	0	2,912	1.53	1.903

付表 2-8 かさ密度の計算結果(試験 I)

k 7		乾燥質量	出来形体積	かさ密度		
<i>ŋ</i> – Ҳ	投入量	リバウンド	その他ロス	付着量	(m ³ )	(Mg/m ³ )
BL01	3,737	707	150	2,880	1.512	1.905
BL01-02	7,470	1,471	301	5,698	2.881	1.978
BL01-03	10,271	1,828	420	8,023	4.174	1.922
BL01-04	13,946	2,412	499	11,035	5.695	1.938
BL01-05	16,753	2,853	625	13,275	6.848	1.939

付表 2-9 かさ密度の計算結果(試験Ⅱ)

注)BLは施工単位(ブロック)を表す。BL01-0nは、1ブロックからnブロックまでの累積量を表す。

#### (3) 坑道頂部の隙間

試験 I において各ケース施工完了後に吹き付けた埋め戻し材の自重沈下による小規模坑道との 隙間を計測した。計測箇所は付図 2-13 (左図) に示すように 7 か所とした。最大粒径 5 mm、*wopt* -1.5%のケースについては、施工完了から 60 時間(2.5 日)残置してから計測した。その他のケ ースに関しては施工完了から 0.5 時間~1 時間程度で計測した。

施工直後から 0.5~1 時間程度の時間経過であれば埋め戻し材の沈下は確認されなかった。最大 粒径 5 mm、*w_{opt}*-1.5%のケースの 60 時間後の沈下量は最大 0.35 mm であった(付図 2-13:右 図)。



沈下測定箇所



60h 経過の①の状況

付図 2-13 沈下計測結果(試験I)

#### (4) 施工速度

吹付け工法による埋め戻し材の施工速度の算定根拠となった施工歩掛りを付表 2-10~付表 2-11 に示す。撒き出し・転圧工法による埋め戻し材の施工歩掛の割合を付図 2-14~付図 2-15 に示す。

試験 I では、令和 2 年度の施工歩掛の割合(原子力機構・原環センター, 2021)と令和 3 年度の施工歩掛の割合が大きく異なる。これは、リバウンド率が増大し、かつ吹付け施工が機械施工であるため、これと併行してリバウンド材が回収できなかったためである。

試験Ⅱでは、吹付けの時間にリバウンド材の回収と目詰まりの対応の時間が含まれている。この吹付けの割合は、令和2年度の試験Ⅰの吹付けとリバウンド材の回収の時間を加えた割合と類似した。双方のリバウンド率が20%程度であることがその理由かもしれない。

		施工時間(hr)						
	作業名	wopt-3%	$W_{opt}=3\%$	$W_{opt}$ -3%	$W_{opt}$ -1.5%	$W_{opt}$ -1.5%		
		2インチ*	2インチ	2.5インチ	2インチ	2.5 インチ		
施工	吹付け	0.73	1.79	1.73	0.97	0.91		
	リバウンド回収**	0.16	3.75	3.98	1.25	1.04		
品質管理	3D スキャナ	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15		
	現場密度試験	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09		
施工+現場密度試験		0.98	5.73	5.90	2.31	2.04		
施工+3D スキャナ		1.04	5.69	5.86	2.37	2.10		

付表 2-10 吹付け工法による埋め戻し材の施工歩掛(試験I)

*令和2年度の試験結果(原子力機構・原環センター, 2021) **清掃時間を含む

付表 2-11 吹作	†けエ法による埋め戻	し材の施工歩掛	(試験Ⅱ)
------------	------------	---------	-------

作業々			施工時間 (hr)							
	11未名	BL01	BL02	BL03	BL04	BL05	平均			
施工	吹付け	4.67	3.17	1.83	2.16	1.25	2.62			
	リバウンド回収*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
品質管理	3D スキャナ	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17			
	現場密度試験	0.42	0.50	0.42	0.42	0.33	0.42			
施工+現場密度試験		5.09	3.67	2.25	2.58	1.58	3.04			
施工+3D スキャナ		4.84	3.34	2.00	2.33	1.42	2.79			

*吹付け作業に含めた



令和2年度(*w_{opt}*-3% 2インチ)
 令和3年度(*w_{opt}*-3% 2インチ)
 付図 2-14 吹付け工法による埋め戻し材の施工歩掛の割合(試験Ⅰ)



付図 2-15 吹付け工法による埋め戻し材の施工歩掛の割合(試験Ⅱ)

## 2.4. 施工技術オプションの選択における評価項目

令和3年度の吹付け工法による埋め戻し材の施工試験結果のまとめとして、施工技術オプションの選択における評価項目の整理結果を付表 2-12に示す。

施工技術オプションの	)選択における評価項目	吹付け工法	吹付け工法	
区分	項目	(試験 I )	(試験Ⅱ)	
	ベントナイト混合率	$15{\sim}100\%^{1)}$	$15 \sim 100\%^{1)}$	
適用可能な材料範囲	掘削土の最大粒径	5mm	5mm	
	含水比	低め (5.6 %及び 7.1 %)	高め(13.0%)	
	乾燥密度(平均値)	$1.932{\sim}1.990~{ m Mg/m^3}$	$1.828~{ m Mg/m^3}$	
達成可能な施工品質	密度分布(標準偏差)	$0.031{\sim}0.034~{ m Mg/m^3}$	$0.053~\mathrm{Mg/m^3}$	
	施工可能範囲	坑道全面	坑道全面	
	製造管理	配合管理(バッチ毎)	配合管理(バッチ毎)	
品質保証の容易性	抜丁焙理 (かそ密度)	誤差 -2.0~+3.5%	誤差 +4.1~+8.0%	
	旭工官垤(かさ宿及)	使用材・ロス材の湿潤質量と含水比、出来形体積		
	井平  ロ フ	リバウンド率 61.0%	リバウンド率 17.4%	
长于	初程ロス	目詰まり 小	目詰まり 大	
//世山江	施丁油 <u></u> 在 2)	$0.24 \sim 0.34 \text{ m}^{3/\text{h}}$	$0.31 \sim 0.57 \text{ m}^{3/\text{h}}$	
	旭上还皮 "	$(0.93 \sim 0.99 \text{ m}^3/\text{h})$		

付表 2-12 施工技術オプションの選択における評価項目:吹付け工法

備考) 1)国内実績を考慮、2)施工速度の()内の値は令和2年度の結果を示す。

#### 3. スクリューエ法

本編で記載を省略した埋め戻し材の配合検討及び要素試験ケース1について、ケース2と異な る試験計画及び試験結果に関する情報並びに両試験ケースの比較を考察する。

#### 3.1. 埋め戻し材の配合検討

配合は次に示すように3段階で検討を進めた。

#### 3.1.1.1 次検討:模擬掘削土の配合選定

模擬掘削土を構成する4種の材料について、後述の検討手順に従い、に示す組み合わせによる 選定検討を実施する。

各材料の規定は下記の通りである。

(コンクリート用)砕石 2005 A: JIS A 5005: 2020 の表-1(粒の大きさの範囲 20~5mm) (コンクリート用)砕石 1005 A: JIS A 5005: 2020 の表-1(粒の大きさの範囲 10~5mm) (コンクリート用)砕砂 A: JIS A 5005: 2020 の表-1(粒の大きさの範囲 5mm以下)

(モルタル用骨材) 珪砂 6号: 粒の大きさ約 0.2~0.4mm

付表 3-2 に示す検討ケースのうち、一例としてケース 1-1、2-4 及び 3-1 の混合物の状況(混合 したものをパレットの上に展開した状況)並びに粒径加積曲線を、それぞれの構成材料の粒径加 積曲線・Fuller 曲線1とともに付図 3-1 に示す。また、基礎的データとして、各材料の土粒子密度 と含水比を付表 3-1 に示す。

検討の結果、Fuller 曲線との整合性が高く、展開時に比較的分離が少ない状況が観察された、 ケース 2-4 及び 3-1 を模擬掘削土の配合ケースとして選定した。

特性値	クニゲル V1	砕石 2005	砕石 1005	砕砂	珪砂 6 号			
土粒子密度(Mg/m ³ )	2.750	2.728	2.727	2,722	2.640			
含水比(%)	6.7	0.3	1.1	1.7	0.0			

付表 3-1 使用材料の土粒子密度と含水比

#### a) 2次検討:ベントナイトを含む配合の選定

模擬掘削土の配合候補として選定された配合ケース 2-4 及び 3-1 について、付表 3-3 に示すように、細粒分(珪砂 6 号)のうち 15%をベントナイトに置き換えて、最終的な配合候補を決定する(それぞれ、ケース 2-4-2、3-1-2 とする)。付図 3-2 に両ケースの混合物の状況並びに粒径加積曲線を示す。

検討の結果、両ケースとも Fuller 曲線との整合性及び展開時の状況とも大きな差は見られない ことから、製造管理の簡素化を目的に、埋め戻し材配合材料の種類を少なくするというために、 砕石 1005 を含まないケース 2-4-2 を土質試験の対象として選定した。

1 Fuller 曲線:次式で表される、粒子を最密充填にするための粒度分布曲線。 $p_i = \left(\frac{d_i}{p}\right)^{0.50}$ 

ここに、 $p_i: i$ 番目のふるいを通過する比率、 $d_i: i$ 番目のふるい目寸法、D: 最大粒径

毛	ケ	ケ 配合比率(質量%)				
順		砕石	砕石	工九工小	珪砂 6	手順設定の考え方
//K		2005	1005	和干量少	号	
	1-1	45	0	35	20	砕石 2005 を多く含む(大粒径利用
1	1-2	45	15	40	0	による、埋め戻し材の製造コストダ
	1-3	45	10	25	20	ウン効果)
	2-1	30	30	40	0	防て 2005 たぼくし て 防て 1005 た
9	2-2	30	25	25	20	昨日 2003 を減らして、昨日 1003 を   タノ会ま。(知時ルに下てまれ)八碗瓶
	2-3	20	40	40	0	多く占む(神社化による材料力離別 制効果の検討)
	2-4	20	30	30	20	前初末以後前
						砕石 2005 を使用しない(さらなる
3	3-1	0	40	40	20	細粒化による材料分離抑制効果の検
						討)

付表 3-2 1次検討:模擬掘削土の配合検討ケース

付表 3-3 2次検討:ベントナイトを含む配合検討ケース

5-7		西	合比率(質量%)	)	
ケース 砕石 2005 砕石 1005	砕砂	珪砂6号	ベントナイト		
2-4-2	20	30	30	5	15
3-1-2	0	40	40	5	15



付図 3-1 1次検討:模擬掘削土の配合検討(混合物の状況並びに粒径加積曲線)



付図 3-2 2次検討:ベントナイトを含む配合検討(混合物の状況並びに粒径加積曲線)

## b) 3次検討:土質試験による配合の決定

土質試験の候補配合として選定されたケース 2-4-2 について、配合と品質管理の簡素化(及び コストダウン)を目的に、ベントナイトとともに粒度分布における細粒分の役割を担っている珪 砂の必要性について検討する。

ケース 2-4-2 の配合について、珪砂 6 号の有無の 2 ケース(それぞれケース 2-4-2、2-4-3 とする)について、土質試験を実施した。なお、ケース 2-4-3 については、細粒分(珪砂 6 号)を省いた結果、中粒分(砕砂)の領域が上に凸となって Fuller 曲線との乖離が大きくなったため、円滑な曲線とするために砕砂分を 5%削減し、珪砂と砕砂の削減分合計 10%を砕石 1005 を増やした。ケース 2-4-3 の検討ケースを付表 3-4 に示す。また、付図 3-3 にケース 2-4-3 の混合物の状況並びに粒径加積曲線を示す(参考として令和 2 年度の埋め戻し材の粒径加積曲線も追記した)。

次の土質試験を実施した。

- 含水比: JISA 1203 土の含水比試験方法
- · 土粒子密度: JISA 1202 土粒子密度試験方法
- ・ 粒度: JISA 1204 土の粒度試験方法
- ・ 締固め: JISA 1210 突き固めによる土の締固め試験方法(A-c法)

・ 透水性: JISA 1218 土の透水試験方法(変水位透水試験)

このうち、締固め試験及び透水試験の結果一覧を付表 3-5 に、締固め曲線を付図 3-4 に示す。 この結果、珪砂の有無による乾燥密度及び透水係数への影響は小さいことが判明した。ここでは、 埋め戻し材製造時の品質管理 b の負荷をできるだけ軽減するために、混合材種数を減らすことを 目的に、珪砂の無い配合ケース 2-4-3 を今年度の要素試験で使用する埋め戻し材の配合とした。

5-7		西	合比率(質量%)	)	
	砕石 2005	砕石 1005	砕砂	珪砂6号	ベントナイト
2-4-2	20	30	30	5	15
2-4-3	20	40	25	0	15

付表 3-4 3次検討: 珪砂有無の検討ケース



付図 3-3 3次検討: 珪砂を含まない配合(混合物の状況並びに粒径加積曲線)

	土の締固	め試験	締固め度ごとの乾燥密度(Mg/m ³ )・透水係数(10 ⁻¹¹ m/s)						
ケース	最大乾燥	最適含	10	0%	90	)%	80	)%	
	密度 (Mg/m ³ )	水比(%)	乾燥密度	透水係数	乾燥密度	透水係数	乾燥密度	透水係数	
2-4-2	1.936	11.8	1.936	3.86	1.742	5.10	1.549	8.32	
2-4-3	1.940	11.6	1.940	3.64	1.746	4.24	1.552	7.08	

付表 3-5 配合候補の締固め試験及び透水試験結果



#### 3.2. 試料採取計画

ケース1では、ケース2と比較して時埋め戻し充填量が少ないことから、付図3-5及び付表 3-6に示すように試料採取は3断面で実施した。



試料採取断面と試料採取のおおよその高さ L,M,U

試料採取各面における試料採取位置

付図 3-5 モールド/スコップによる埋め戻し斜面からの試料採取計画 (ケース 1)

採取目的	No.2 側ライン上			中央ライン上			No.1 側ライン上		
	U 段	M 段	L段	U 段	M 段	L段	U 段	M 段	L段
乾燥密度			a, b				-		—
粒度分布 含水比	с	a,b,c	с	с	a,b,c	с	с	a,b,c	с
透水試験	_	_	a,b	_	_	_	_	_	a,b

付表 3-6 埋め戻し斜面からの試料採取計画 (ケース 1)

着色は透水試験モールドによる採取

### 3.3. 試験実施状況

#### 3.3.1. 充填量及び充填形状の経時記録

2 ケース実施した要素試験のうち、ケース 1 の経時記録(試験中のイベント及び充填重量の変化)を付表 3-7 に示す。ケース 1 とケース 2 の主な相違点は次の通りである。

- ・ スクリューの回転方向が逆
- ・ 後退充填速度が低い(v=3cm/min、ケース2はv=4→6cm/min)

 スクリューホッパへの材料投入方法(ケース1では一括投入方式のため、粗粒分の スクリューNo.1への落下割合が高く、ケース2ではバッチ投入式としたため、スク リューNo.1と No.2への投入材料の偏りは小さい)

ケース1に特徴的なイベントは次の通り。

反力ジャッキの固定部の変状(ケース1のみ):スクリューを後退させない充填の過程において、スクリューの充填に伴う反力の値が、当初の設計値より大きく、反力ジャッキの固定部の変状をもたらしたため充填を停止し、この段階で後退充填へ移行した。

⟨又、□□□=↓目目		埋め戻し材湿
雅迥时间		潤重量 (kg)
5分	埋め戻し材重量計測	2, 135
10分	埋め戻し材重量計測	3, 195
15 分	埋め戻し材重量計測	4,275
20分	充填停止:埋め戻し材重量・埋め戻し斜面形状計測、斜面からの	5,055
	試料採取	
21分10秒	停止状態の充填終了(反力ジャッキの固定部の変状):	5, 235
*	埋め戻し材重量計測、スクリュー埋め込み深さ計測(スクリュー	
	管上部 270mm)	
21分10秒	スクリュー後退泰慎闘始 (3cm/min)	5 235
*		0,200
26分10秒	埋め戻し材重量計測	6,375
31分10秒	充填停止:埋め戻し材重量計測	7,280
36分10秒	埋め戻し材重量計測	8,510
37分42秒	充填停止:斜面からの試料採取	
41分10秒	充填停止:埋め戻し材重量・埋め戻し斜面形状計測、斜面からの	8,845
	試料採取	

付表 3-7 試験経時記録 (ケース 1)

※データ紛失のため、直前の充填速度と充填量からの推定値とした

#### 3.3.2. 充填状況及び充填形状

ケース1とケース2の充填状況を比較したものを付図 3-6 に、ケース1における充填形状の経時変化を付図 3-7 及び付図 3-8 に示す。ケース2と比較すると、付図 3-6 に示すように、坑道ア ーチ中央部と比較して坑道アーチ端部の充填が不十分である。この違いは本編中でも述べたよう に、スクリューの回転方向の影響と考える。付図 3-83にも同様の傾向が表れている。

また、ケース2で後退充填時に観察された天端の沈下が見られないが、これはスクリューの充 填後退速度が3cm/min とケース2と比較して低いことによる違いではないかと考える。

スクリュー直下の充填状況は、ケース1とケース2の比較においても差は見られない。両ケー スともスクリューを回り込むように埋め戻し材が流動して充填される状況は同じであり、写真で 観察されるスクリュー下の空洞は、スクリューの後退とともに埋め戻し材が流入して充填される と考える。



付図 3-6 充填状況 (ケース1とケース2の比較)







③土槽端部(スクリューNo.1 側、計測ラインG) ※スクリュー先端位置はスクリュー中心の土槽妻面からの距離(高さは土槽底面から 90cm) 付図 3-8 充填高さ・形状の経時変化(ケース1:土槽アーチ中央部及びアーチ端部)

#### 3.3.3. かさ密度及び充填速度

本編のケース2同様にかさ密度と充填速度を計算したものを付表 3-8 に示す。ケース2同様、含水比(付表 3-9参照)はスクリュー先端から直接採取した試料により求めたものを用いた。

ケース2同様、充填開始20分までの停止充填中の充填速度は比較的大きい。また、後退充填 中に充填速度は低下したがかさ密度は大きくなり、先端の充填抵抗が増大して押し込み力による 締固めが発生している可能性を示唆している。

なお、停止充填中のスクリュー管内充填率は設計値(90%)に対して 89%、後退充填中は 58%となり、ケース2における後退充填の最終段階における管内充填率 86%と比較して小さい 値となった。

計測 時間	時間 間隔	イベント概要	湿潤重 量(kg)	充填体 積(m ³ )	湿 潤 か さ 密 度 (Mg/m ³ )	含 水 比 (%)	乾燥か さ密度 (Mg/m ³ )	充填速 度 (m ³ /hr)
20分	20分 00秒	充填停止	5,055	2.772	1.82	2.5	1.78	8.32
21分 10秒	1分 10秒	停止状態の充填終了 スクリュー後退充填 開始(速度 3cm/min)	5,235	3.325	0.33※	2.5	0.32※	28.4※
41分 10秒	20分 00秒	充填完了	8,845	5.154	1.97	2.5	1.93	5.49
試験工 填速度	程全体	のかさ密度及び平均充	8,845	5.154	1.72	2.5	1.67	7.51

付表 3-8 かさ密度及び充填速度(ケース 1)

※停止・再充填の時間間隔が狭く、誤差が大きくなった可能性がある

### 3.3.4. 試料採取による分析結果

#### (1) 粒度分布

ケース1の各計測断面において採取された試料の粒径加積曲線を比較したものを付図 3-9 に 示す。a、b、c は計測断面、U、M、L は各計測断面での上段、中段、下段の試料採取位置を表 す(付図 3-5 参照)。付図 3-9①にあるように、埋め戻し材最下段には、粒度の大きい砕石が集 積する傾向があり、ケース2と同様の傾向を示している。ただし、ケース2ではすべての測定ラ インの最下段においてこの傾向が顕著であったが、ケース1では中央部への砕石の集積は顕著で はなく、むしろ混錬直後の分布に近い曲線形状を示している。前述のように、ケース1における 埋め戻し材のスクリューホッパへの投入時の粗粒分の分離は発生し、スクリューNo.2 へ多くの 粗粒分が集中したことを示している。その結果、スクリューNo.2 では中段の粒度分布も極端に 粗粒側へ偏ることとなった。

同図②の土槽中央計測ライン中段の長手方向の分布では、最も土槽妻面に近い断面 a における 粗粒分の集中が見られるが、これはおそらく充填初期の停止状態での充填において、大きい充填 圧力が発生して、大粒径の砕石が埋め戻しの中から押し出された結果と考える。したがって、後 退充填中の断面 b 及び c ではこの傾向が見られない。

同図③の土槽中央部の観測窓・上段中段下段の比較では、概ね類似の分布形を示しており、中 央部においては粗粒分の下部への極端な集中が発生していないことを示している。本編に示した ケース2では、中央下段の粗粒分の比率が高くなっており、異なる傾向となった。



## (2) 含水比

含水比は、ケース2の結果も併せて示す。

前述のように、充填後では断面の上下で粒度分布が大きく異なる結果となり、粗粒分の含水比 が細粒分と比較して低いことから、それぞれの採取試料の粒度組成が異なることにより含水比も 大きくばらつくこととなった(砕石は含水比が低いため)。含水比計測結果を付表 3-9 及び付表 3-10 に示す。このため、かさ密度(乾燥密度)の計算に用いる含水比は、スクリュー先端から 直接採取した試料より求めた平均値 2.2%を使用する。

試料採	埋め戻し斜面の採取位置								
取 断 面	No.1			土槽中央			No.2		
*	U	Μ	L	U	Μ	L	U	Μ	LXX
a	-	2.2	-	-	1.2		-	1.0	-
b	-	2.2	-	-	2.9	-	-	1.5	-
с	2.5	2.7	2.1	2.4	2.6	2.3	2.1	0.7	0.5
アーチ中央開口より採取 ①妻面に近い:2.0、②中央:2.3、③2妻面から遠い:1.9									
スクリュー先端から採取 1回目:2.4、2回目:2.6 平均2.5									
※L(下段	とスクリュ	—No.2 俱	リから採	取した試料	斗は粗粒ケ	(砕石)	の比率が	高い(単位	立:%)

付表 3-9 含水比計測結果 (ケース 1)

付表 3-10 含水比計測結果(ケース 2)

試料採		埋め戻し斜面の採取位置								
取 断 面	No.1			土槽中央			No.2			
*	U	М	LXX	U	М	LX	U	Μ	LXX	
a	-	2.0	-	-	2.0	-	-	1.8	-	
b	-	2.0	-	-	2.2	-	-	2.0	-	
с	-	2.1	-	-	2.2	-	-	2.2	-	
d	2.0	2.0         2.1         0.7         2.2         2.0         1.3         2.3         2.3         1.0								
アーチ中央開口より採取 ①妻面に近い:2.3、②中央:2.2、③2妻面から遠い:2.3										
スクリュー	ー先端から	っ採取 1	回目:2.4	、2回目	:2.0 平	均 2.2				

※L(下段)から採取した試料は粗粒分(砕石)の比率が高い(単位:%)

## (3) 乾燥密度

ケース2と同様に、粗粒分の多い下段の乾燥密度は小さい値となり、細粒分を多く含むアーチ 開口部では充填時の押し上げ効果により比較的大きい値を示した。

封制拉币位置		アーチ中央開口	スクリューNo.2 側 (下段)		
武州北以江里	<ol> <li>①妻面に近</li> <li>い</li> </ol>	②中央	③妻面から遠 い	a断面	b 断面
湿潤密度	1 000	1 00 4	1 00 4	1 550	1 559
(Mg/m ³ )	1.892	1.884	1.884	1.552	1.553
含水比(%)	2.0	2.3	1.9	0.	5※
乾燥密度	1.85	1.84	1.85	1.54	1.54
(Mg/m ³ )	平均值:1.85			平均值:1.54	
※c 断面のみで計測されており、その値を適用した					

付表 3-11 乾燥密度測定結果

## 3.3.5. ケース2の埋め戻し高さ及び斜面勾配データ

本編の図 4.3-15 及び図 4.3-16 の基となった埋め戻し材の形状データを付表 3-12 及び付表 3-13 に示す。

計測	大古吐胆			±.	槽妻面から	5の距離(c	m)		
位置	尤埧吋间	0	50	100	150	200	250	300	350
+	10分00秒	75	77	47	2	0	0	0	0
槽	20分00秒	115	112	72	27	0	0	0	0
$\widehat{\mathbf{H}}$	26分55秒	125	125	105	64	21	0	0	0
U チ 山	34分35秒	125	125	125	89	45	7	0	0
央	44分35秒	125	125	125	116	83	42	0	0
沿台	52分35秒	125	125	125	110	110	72	31	0
ス	10分00秒	75	75	33	0	0	0	0	0
風 ク 壁 リ	20分00秒	115	115	73	29	0	0	0	0
してしていました。 し	26分55秒	115	115	92	50	15	0	0	0
近 <mark>と</mark>	34分35秒	115	115	115	80	42	0	0	0
.1 + (E)	44分35秒	115	115	115	115	80	36	0	0
槽	52分35秒	115	115	115	115	105	67	32	0
ク土	10分00秒	31	33	13	0	0	0	0	0
リ槽ユア	20分00秒	86	83	57	21	0	0	0	0
	26分55秒	91	91	75	37	4	0	0	0
o.1 端	34分35秒	91	91	86	61	24	0	0	0
側部	44分35秒	91	91	91	83	55	20	0	0
1 ¹¹ x	52分35秒	91	91	86	83	78	47	14	0

付表 3-12 埋め戻し材充填高さ(ケース 2 : 計測ライン D、E、G)

※着色カラムは埋め戻しが土槽アーチ面まで到達した計測点を示す。赤枠はスクリューの後退により沈下したデータを示す

				最大値				
		停止充填		後退充填 (v=4→ 6cm/min)	後退充填(v=6cm/min)		停止充填	後退充填
計測ライン	10分00秒	20分00秒	26分55秒	34分35秒	44分35秒	52分35秒		
坑道端部(A)	20	31	36	32	31	32	36	32
100cm(B)	32	33	37	34	35	37	37	37
75cm(C)	37	38	40	35	35	38	40	38
坑道中心(D)	37	40	40	39	37	38	40	38
70cm(E)	37	41	38	36	38	36	41	38
100cm(F)	29	37	37	35	35	36	37	36
坑道端部(G)	18	32	35	32	32	33	35	33
							())	(片, 座)

付表 3-13 埋め戻し材の計測ラインに沿った傾斜 (ケース 2)

(単位:度)

#### 4. ブロック工法

### 4.1. 埋め戻し材ブロックの透水係数と最大膨潤率

埋め戻し材ブロックを想定して貧配合ベントナイト混合土(ベントナイト配合率15~30%)を、 低有効粘土密度(1.1 Mg/m³以下)の範囲で静的に締固めて作製した供試体を対象に透水試験と 膨潤変形試験を実施した。付録では、各試験に用いた材料と試験手順の詳細について示す。

#### 4.1.1. 使用材料

本試験で使用した埋め戻し材の材料構成を付表 4-1 に示す。ベントナイトは、Na 型ベントナ イト (クニゲルV1)を用いた。混合材料となる掘削土は処分場を設置する母岩固有のものである が、現段階では特定できないため模擬掘削土として玄武岩を用いた。ベントナイトと玄武岩の初 期含水比と土粒子密度を付表 4-2 に、ベントナイトのメチレンブルー吸着量試験の結果を付表 4-3 に示す。メチレンブルー吸着量 140 mmol/100g の場合にモンモリロナイト含有率を 100 %と した場合 (動力炉・核燃料開発事業団, 1993)、付表 4-3 に示したメチレンブルー吸着量 82 mmol/100g から、モンモリロナイト含有率を推定すると 59%となった。この値は、既往研究にお ける報告値 (例えば、小峯, 2005) と同程度である。

掘削土は施工性の向上を目的に破砕し粒度調整することが想定される。そのため、模擬掘削土 にはコンクリート用骨材として使用されている玄武岩の砕石と砕砂(付図 4·1)を準備し、これ らの乾燥質量比(砕石(Gravel)、砕砂(Sand)の頭文字を取って、GS[砕石:砕砂]とする)を 管理して配合することで粒度調整を行った。具体的には、GS[0:10]、[2:8]、[4:6]、[6:8]と した4種類の模擬掘削土を準備した。粒度調整した模擬掘削土の粒度試験結果を付表 4-4と付図 4-2に示す。

対象	仕様					
ベントナイト	Na 型ベントナイト(クニゲル V1)					
模擬掘削土	玄武岩:砕石(粒形 5~20 mm)、砕砂(粒形 5 mm 以下)					
ベントナイト配合率	乾燥質量比で、ベントナイト配合率 15%、30%					

付表 4-1 試験に使用した埋め戻し材の材料構成

#### 付表 4-2 土粒子密度と初期含水比

	ベントナイト	模擬掘削土	(玄武岩)
	(クニゲル V1)	砕石	砕砂
土粒子の密度(Mg/m ³ )	2.747	2.803	2.803
初期含水比(%)	11.5	1.1	2.6

#### 付表 4-3 ベントナイト (クニゲル V1) メチレンブルー吸着量試験結果

	平均	1回目	2回目	3回目
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	82	82	82	82


砕石(粒形 5~20 mm)
 付図 4-1 模擬掘削土(玄武岩)の砕石と砕砂

	模	模擬掘削土中の砕石(G)と砕砂(S)の乾燥質量比					
	GS [0:10]	GS [2:8]	GS [4:6]	GS [6:8]			
60%粒径 D ₆₀	2.0	2.7	4.3	7.1			
30%粒径 D ₃₀	0.65	0.94	1.5	2.8			
10%粒径 D ₁₀	0.16	0.20	0.28	0.48			
均等係数 Uc	12	13	16	15			
曲率係数 U'c	1.3	1.6	2.0	2.3			

付表	4-4	模擬掘削土の粒度試験結果

D₆₀、D₃₀、D₁₀:通過百分率が 60、30、10%の時の粒径

均等係数 Uc = 
$$\frac{D_{60}}{D_{10}}$$
  
曲率係数 U'c =  $\frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$ 



付図 4-2 模擬掘削土の粒度分布

ベントナイト混合率は15%と30%の2ケースとし、付表 4-4に示す粒度分布の異なる4ケースの 模擬掘削土と混合して計6ケースのベントナイト混合土を製造した。製造したベントナイト混合土

の突き固めによる土の締固め試験結果を付表 4-5に示した。

ベントナイト 混合率 (%)	模擬掘削土中の 砕石(G)と砕砂(S)の 乾燥質量比	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 [最大有効粘土密度] (Mg/m ³ )
	GS[0:10]	9.2	$2.090 \ [0.856]$
1 -	GS[2:8]	9.0	2.171 [0.953]
10	GS[4:6]	8.5	2.168 [0.949]
	GS[6:4]	8.0	$2.175\ [0.958]$
20	GS[0:10]	9.9	2.067 [1.282]
50	GS[6:4]	9.5	2.116 [1.346]

付表 4-5 ·	ベントナイ	ト混合土の突き固めによ	る土の締固め試験結果	(C-c 法、	4.5Ec)
----------	-------	-------------	------------	---------	--------

## 4.1.2. 透水試験

## (1) 材料調整·供試体作成方法

使用したベントナイト混合土の作製手順及び供試体作製方法を以下に示す。

- ① ベントナイト混合土の作製
  - 1) ベントナイト及び模擬掘削土の自然含水比を測定
  - 2) 設定したベントナイト混合率の含水比に基づき、必要となる各材料の質量と加水量を計算
  - 3) 所定量のベントナイト及び模擬掘削土をビニール袋に入れ、人力にて混合
  - 4) 模擬掘削土が砕石砕砂混合条件の場合は、小型ミキサにて攪拌混合を行った材料(粒径 9.5mm以下の材料)と粒径9.5mm以上の材料をビニール袋内で、人力にて5分程度混合
  - 5) 混合を完了した試料(ベントナイト混合土)の質量計測
  - 6) ビニール袋内で密封養生(24時間以上)
  - 7) 養生後、試料の質量を計測し、質量に変化がないことを確認
- ② 供試体の作製
  - 1) 所定量の試料をモールド内に投入、天端をヘラ等により敷均し後、付着防止シート設置
  - 2) 試験機の操作により、試料を静的に締固め
  - 3) 設定した高さとなる時点で押込み軸の稼働を停止
  - 4) 1分間静置後、押し込み軸を除荷
  - 5) 寸法及び質量を測定
  - 6) 測定した寸法、質量及び含水比から乾燥密度等を算出

## (2) 試験手順

透水試験の状況を付図 4·3 に示す。透水試験は剛性容器を使用し、供試体の流入側と流出側の それぞれにビュレット及び空気圧載荷装置を接続して透水試験を実施した。以下に試験手順を示 す。

- 1) 供試体の上下面に孔径0.25 µmの高分子フィルタを敷き、作製した供試体を設置
- 2) 試験装置を組立て、飽和促進のため水を張った真空脱気層に浸漬
- 3) 一定期間浸漬後に供試体を取り出し、供試体上下部の通水ラインに接続
- 4) 供試体上部通水ラインを大気圧開放し、供試体下部から蒸留水を供給
- 5) 間隙水圧が大気圧に戻ったことと、二重管ビュレットを用いて吸水が収まったことを確認
- 6) 排水を確認した時点から、二重管ビュレットを用いて給水量、排水量を測定
- 7) 給水量/排水量が±0.25以内となったとき飽和状態とみなす(渡邊ほか,2013)
- 8) 飽和状態を確認後、通水を継続させて透水係数を取得



付図 4-3 透水試験状況

#### (3) 透水係数の経時変化

付図 4-4~付図 4-8 に各ケースの透水係数の経時変化を示す。また透水係数の取得に当たり、 既往の研究(渡邊ほか,2013)において給水量と排水量が一致する場合、供試体は飽和状態にある としてその時の透水係数を採用している。今回の試験においても付図 4-9~付図 4-13 に示した 通り給水量と排水量を確認し、飽和状態における透水係数を取得した。なお、付図 4-4~付図 4-8 に示した経過時間は、給水量/排水量が±0.25%以内に収まってからの値であり、透水試験を開始 (通水開始)した全期間ではない。



付図 4-4 ベントナイト混合率 15%、砕石:砕砂(0:10)の透水係数と経過時間の関係



付図 4-5 ベントナイト混合率 15%、砕石:砕砂(2:8)の透水係数と経過時間の関係



付図 4-6 ベントナイト混合率 15%、砕石:砕砂(4:6)の透水係数と経過時間の関係



付図 4-7 ベントナイト混合率 15%、砕石:砕砂(6:4)の透水係数と経過時間の関係



付図 4-8 ベントナイト混合率 30%、砕石:砕砂(0:10)の透水係数と経過時間の関係



付図 4-9 ベントナイト混合率 15%、砕石:砕砂(2:8)の給水量/排水量



付図 4-10 ベントナイト混合率 15%、砕石:砕砂(2:8)の給水量/排水量



付図 4-11 ベントナイト混合率 15%、砕石:砕砂(2:8)の給水量/排水量



付図 4-12 ベントナイト混合率 15%、砕石:砕砂(2:8)の給水量/排水量



付図 4-13 ベントナイト混合率 30%、砕石:砕砂(0:10)の給水量/排水量

4.1.3. 膨潤変形試験

## (1) 材料調整·供試体作製方法

透水試験の材料調整・供試体作製方法と同様の方法で作製した。ただし、ベントナイト 100%、 有効粘土密度 0.8、1.1 Mg/m³の供試体は以下の手順で作製した。

ベントナイト100%供試体の作製

- 1) 所定量の試料をモールド内に投入、天端をヘラ等により敷均し後、付着防止シート設置
- 2) モールド直径と同サイズの締固め棒を用いて所定の高さになるよう軽く押込む
- 3) 寸法及び質量を測定
- 4) 測定した寸法、質量及び含水比から乾燥密度等を算出

## (2) 試験手順

膨潤変形試験の実施状況を付図 4-14 に示す。膨潤変形試験は SUS の剛性容器を使用し、供試体の上下方向から給水させて実施した。以下に試験手順を示す。

- 1) 供試体の上下面に孔径0.25 µmの高分子フィルターを敷き、作製した供試体を設置
- 2) 試験装置を組立て、最後に供試体上部の載荷板を介して9.8kPaの重錘により載荷
- 3) 変位計を設置し供試体の高さを計測
- 4) 蒸留水を供試体上下部から供給
- 5) 水位を確認しながら、水位減少が落ち着くまで給水を行う
- 6) 静置し膨潤変形量を計測



## 付図 4-14 膨潤変形試験状況

#### (3) 膨潤変形試験結果

膨潤変形試験は、給水開始前から供試体の一次元膨潤変形量を計測している。膨潤変形率は式 4・1 に示すように、一次元膨潤変形量を試験開始前の供試体高さで除し、その百分率で表示したものである。

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{H_0} \times 100$$
 (%) 式 4-1  
 $\varepsilon_0$ : 膨潤変形率 (%)

ΔS: 鉛直方向の膨潤変形量 (mm)

*H*₀:試験前供試体高さ(mm)

また、既往の研究(小峯・緒方,1999)では、最大膨潤変形率を双曲線近似により求めている。 最大膨潤変形率は、試験により得られた膨潤変形率の経時変化を式 4-2 で近似し、その漸近線か ら式 4-3 を用いて求められる。そして、膨潤変形率が双曲線近似により求めた最大膨潤変形率の 95%以上に達した時点で試験を終了とした。

$$\varepsilon_s(time) = \frac{time}{a+b\ time}$$
 (%)  $\vec{x} \ 4-2$ 

$$\varepsilon_{smax} = \lim_{time \to \infty} \varepsilon_s(time) = \lim_{time \to \infty} \left( \frac{1}{a/time + b} \right) = \frac{1}{b} \quad (\%)$$

$$\vec{x} \quad 4-3$$

time:時間 (min)

 $\varepsilon_s(time):時間における膨潤変形率(%)$ 

a、b:近似により求められる定数

付図 4-15~付図 4-19 に各ケースの膨潤変形率と経過時間の関係を示す。また、付表 4-6~付 表 4-9 には膨潤変形試験の結果を示す。付図 4-16 に示すベントナイト 100%、高さ 25mm の条 件では、双曲線近似による最大膨潤変形率が 95%以上となるまでに要する期間が 30,000 時間 (42 か月)と推測されたため途中で試験を終了した。供試体高さ 5mm の条件では試験は 10 日間程 度、高さ 25mm では 2 か月程度の試験期間を要した。給水開始直後の初期の膨潤変形率の立ち上 がりについては差があるものの、いずれの条件においても最終的な膨潤変形率は有効粘土密度の 高い順に大きくなる傾向を示した。



付図 4-15 膨潤変形率と経過時間の関係(ベントナイト 100%、高さ 5mm)



(b) 経過時間:0~30000時間(双曲線近似による最大膨潤率算出)付図 4-16 膨潤変形率と経過時間の関係(ベントナイト 100%、高さ 25mm)



付図 4-17 膨潤変形率と経過時間(ベントナイト 15%、珪砂 85%、高さ 5mm)



付図 4-18 膨潤変形率と経過時間(ベントナイト 15%、珪砂 85%、高さ 25mm)



付図 4-19 膨潤変形率と経過時間(ベントナイト 15%、玄武岩(砕砂) 85%、高さ 25mm)

	B100-	B100-1.1-5	B100-1.3-5	B100-1.1-25
	0.8-5			
供試体高さ		5mm		25mm
a	0.027	0.036	0.021	5.257
b	0.009	0.007	0.005	0.006
1/b:最大膨潤変形率	115.99	146.60	196.95	181.60
実験値:最大膨潤変形率	113.30	143.30	192.60	133.68

付表 4-6 膨潤変形試験結果(ベントナイト 100%、高さ 5mm、25mm)

	B15-0.8-S-5	B15-0.8-S-5	B15-0.95-S-5	B15-1.1-S-5
供試体高さ		5mi	n	
а	0.046	0.063	0.047	0.063
b	0.032	0.031	0.028	0.025
1/b:最大膨潤変形率	31.61	32.31	35.85	40.55
実験値:最大膨潤変形率	31.40	31.80	35.40	39.72

## 付表 4-7 膨潤変形試験結果(ベントナイト 15%、珪砂 85%、高さ 5mm)

## 付表 4-8 膨潤変形試験結果(ベントナイト 15%、珪砂 85%、高さ 25mm)

	B15-0.8-S-25	B15-0.95-S-25	B15-1.1-S-25		
供試体高さ	25mm				
a	0.986	4.365	3.823		
b	0.032	0.029	0.026		
1/b:最大膨潤変形率	30.97	34.67	39.11		
実験値:最大膨潤変形率	29.52				

## 付表 4-9 膨潤変形試験結果(ベントナイト 15%、玄武岩(砕砂) 85%、高さ 25mm)

	B15-0.8-G-25	B15-0.95-G-25	B15-1.1-G-25
供試体高さ	25mm		
a	7.326	5.940	4.797
b	0.058	0.038	0.037
1/b:最大膨潤変形率	17.25	26.33	27.15
実験値:最大膨潤変形率	16.42	25.04	25.96

#### 4.1 自己シール性の評価方法の検討

埋め戻し材ブロックの自己シール性を検討する際に用いたベントナイト系緩衝材・埋め戻し材 の膨潤特性理論評価式の概要についてまとめた。

#### (1) ベントナイト系緩衝材・埋め戻し材の膨潤特性理論評価式の概要

本検討では Komine and Ogata (2003, 2004) が提案した「ベントナイトを含有する緩衝材・ 埋め戻し材の膨潤評価式」により、埋め戻し材ブロックの膨潤率を検討した。これより、使用し た膨潤特性理論評価式は式 4-4、式 4-5~式 4-15 に示すとおりである。式 4-5~式 4-8 は、拡散 二重層理論に基づく粘土鉱物結晶間の反発力を評価するものである。式 4-9 は、結晶層間の引力 を評価する van der Waals 力に関する理論式である。これに加え、砂とベントナイトの質量比率 に関するパラメータであるベントナイト配合率を導入した「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」 の計算式 (式 4-10~式 4-12)を用いることにより、砂とベントナイトの配合割合を考慮できる。 なお、ベントナイト配合率は全試料の乾燥質量に対するベントナイトの乾燥質量の百分率である。 式 4-13 は、粘土鉱物結晶層間の距離と上記の「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」の関係式で あり、式 4-14 及び式 4-15 はそれぞれ、粘土鉱物周辺の間隙水の水質変化及び粘土鉱物結晶の比 表面積を評価する式である。

$$p = \frac{1}{CEC} \sum_{\substack{i=Na^+, Ca^{2+}, K^+, \\ Mg^{2+}}} [EXC_i\{(f_r)_i - (f_a)_i\}]$$

$$\vec{x} \quad 4-4$$

$$(f_r)_i = 2nkT(\cosh u_i - 1) \times 10^{-3}$$
 \$\pi 4-5\$

$$\kappa_i = \sqrt{\frac{2nv_i^2 e'^2}{\varepsilon kT}}$$
  $\vec{x}$  4-7

$$z_i = 2sinh^{-1} \left(96.5 \times \frac{EXC_i}{S} \sqrt{\frac{1}{8\varepsilon nkT}}\right)$$
  $\ddagger 4-8$ 

$$\varepsilon_{sv}^{*} = \left\{ e_{0} + \frac{\varepsilon_{smax}}{100} (e_{0} + 1) \right\} \left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_{m}} - 1\right) \frac{\rho_{m}}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1\right) \frac{100}{C_{m}} \frac{\rho_{m}}{\rho_{sand}} \right\} \times 100 \qquad \text{ $\vec{x}$ 4-10}$$

100 100

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1\right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1\right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}}$$
  $\vec{z}$  4-12

$$d_i = \frac{\varepsilon_{sv}^*}{100} \{ t + (R_{ion})_i \} + (R_{ion})_i$$
  $\ddagger 4-13$ 

$$n = \frac{n_0 \times N_A}{1 + \frac{\varepsilon_{sv}^*}{100}}$$
  $\ddagger 4-14$ 

p:ベントナイトを含有する緩衝材・埋め戻し材の発生する圧力(kPa)(なお、pは反発を正とする)

 $(f_r)_i$ : 交換性陽イオン iに起因する反発力(kPa)(iは Na⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺のいずれかの 交換性陽イオンを示す。いかに記述される iはこれと同様の意味である。)

 $(f_a)_i$ : 交換性陽イオン iに起因する引力(kPa)

 $EXC_i$ : 交換性陽イオン iの交換容量 (mequiv./g)

CEC: 陽イオン交換容量 (mequiv./g)

*d_i*:交換性陽イオン*i*の結晶相関距離の1/2(m)

 $v_i$ : 交換性陽イオンiの価数

*ε*':電子電荷(=1.602×10⁻¹⁹C)

k: Boltzmann 定数 (=1.38×10⁻²³J/K)

T:絶対温度(K)

n:緩衝材・埋め戻し材中の間隙水の補正イオン濃度(個数/m³)

n₀:緩衝材・埋め戻し材中の間隙水のイオン濃度(mol/m³)

ε:間隙水中の誘電率(C²J⁻¹M⁻¹)

 $A_h$ : Hamaker 定数(モンモリロナイトの場合、= $2.2 \times 10^{-20}$ J)

t:モンモリロナイトの結晶層厚(=9.60×10⁻¹⁰m)

*ε_{smax}*:緩衝材・埋め戻し材の最大膨潤率(%)

e₀:緩衝材・埋め戻し材の初期間隙比

 $C_m$ : ベントナイトのモンモリロナイト含有率(%)

ρ_{d0}:緩衝材・埋め戻し材の初期乾燥密度(Mg/m³)

α:緩衝材・埋め戻し材のベントナイト配合率(%)(全土質材料の乾燥質量に対するベント オイトの乾燥質量の互()索)

ナイトの乾燥質量の百分率)

 $\rho_m: モンモリロナイトの土粒子密度(Mg/m³)$ 

 $<math>
 \rho_{nm}
 :
 モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度(Mg/m³)$ 

 $\rho_{sand}: 砂粒子密度 (Mg/m³)$ 

(R_{ion})_i:モンモリロナイト結晶層間中の交換性陽イオン iの非水和半径(m)

 $N_A$ :アボガドロ数 (=6.023×10²³)

S: ベントナイトの比表面積 (m²/g)

 $S_m$ :モンモリロナイトの比表面積 (m²/g)

 $S_{nm}$ :モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積( $m^2/g$ )

## 5.1. 試験装置及び試験手順に関する補足

# 5.1.1. 試験装置のうち計測・記録用機器

圧力計測・記録用機器の一覧と諸元を付表 5-1 に示す。同じく水分量計測・記録用機器の一覧 と諸元を付表 5-2 に示す。

名称	細目	メーカー	製品名	仕様等
間隙水圧計	圧力センサ	共和電業(株)	PGM-50KD	フラッシュダイヤフラム型
(プローブ)				SUS 製 受圧面 $\phi$ 8.2mm
				定格容量 5 MPa
	フィルタ付	(株)ダイヤコン	名称なし	SUS 製焼結フィルタ付き
	きアダプタ	サルタント		
間隙空気圧計	圧力センサ	共和電業 (株)	PGM-50KD	フラッシュダイヤフラム型
(プローブ)				SUS 製 受圧面 $\phi$ 8.2mm
				定格容量 5 MPa
	フィルタ付	(株)ダイヤコン	名称なし	SUS 製焼結フィルタ付き、
	きアダプタ	サルタント		前面に疎水性メンブレン
データロガー	本体	共和電業(株)	UCAM-60B-AC	静ひずみデータロガー
				測定項目:ひずみ、DCV,
				DCA, TK, RTD
	スキャニン	共和電業(株)	USS-62B	NDIS 4102 コネクタ
	グユニット			10 チャンネル/ユニット
制御用機器	PC	VAIO(株)	VAIO Pro PG	略
			111	
	制御ソフト	共和電業(株)	UCS-60B	UCAM-60A/B/C 用
	ウェア			

付表 5-1 圧力計測・記録用機器

#### 付表 5-2 水分量計測・記録用機器

名称	細目	メーカー	製品名	仕様等
FDR-V プロー	_	(株)安藤・間	名称なし	プローブ長 100mm
ブ				プローブ部直径 φ6mm
ネットワーク	_	アンリツ(株)		
アナライザ				
スイッチボッ	—	非公開		
クス				
制御用機器	PC	マウスコンピュー		
		ター(株)		
	専用制御ソ	非公開		
	フトウェア			

間隙水圧・空気圧計の構造図を付図 5-1 に示す。間隙水圧・空気圧計は、圧力センサの受圧面 が土粒子に接触するのを防止するため、センサの前面に焼結フィルタ付きのアダプタを取り付け た構造である。なお、間隙空気圧計の場合は、焼結フィルタの孔径を粗くし、その前面に疎水性 のメンブレンフィルタを貼り付け、水の浸入を防ぐようにした。



#### 5.1.2. 試験装置の準備

### (1) 供試体の充填とプローブの設置

浸潤容器に充填する供試体材料を5層(各高さ20mm)分に分け、それぞれ所定の水分量になるよう調整し、ビニール袋に入れ封をして、豊浦砂の場合は12時間以上、模擬埋め戻し材の場合は3日以上養生した。

上下を逆さにした浸潤容器の内筒に、水分調整済みの供試体材料を所定の乾燥密度で充填した。 充填には、豊浦砂の場合は金属製の詰め棒を、模擬埋め戻し材の場合はランマを用いた。なお、 模擬埋め戻し材を用いた試験では、供試体の上下に100%ベントナイト(クニゲルV1)の風乾粉 末を厚さ1mm程度敷き、供試体と容器上下面との隙間を伝わる水の流れを防止するようにした。

充填終了後、容器底盤を容器に固定し、計測器(間隙空気圧計、間隙水圧計及び FDR-V)のプローブを容器底盤から供試体へ挿入して設置した。プローブ挿入に当たっては、容器底盤の設置 個所からプローブ径とほぼ等しいか、やや小さい穴をコルクボーラーやドリルにより穿孔した。

#### (2) 測定初期値の確認と装置の反転

プローブをデータロガーや測定機に接続し、間隙水圧、間隙空気圧及び比誘電率の初期値を測 定した。なお、初期値を取得して以降、試験が終了するまで、これらのデータは自動的に取得し 続けた。その後、クレーンを用いて浸潤容器全体を上下反転させ、試験時の状態にした。

#### (3) 容器外筒部への注水

浸潤容器の下部の給水栓の1つにマリオット管を接続し、及び外側円筒上部の空気抜き栓を開

放して、水頭差により内部円筒と外部円筒の間の空間に浸潤溶液(本試験では蒸留水)を注水し た。注水完了に空気抜き栓を閉じ、豊浦砂を対象とした試験ではそのまま試験を開始した。模擬 埋め戻し材を対象とした試験では、給水栓のもう1つを圧力容器に接続した。

#### 5.2. 豊浦砂を用いた試験

#### 5.2.1. 試験条件

模擬埋め戻し材による試験に先立ち、膨潤性を有しない材料として豊浦砂による試験を実施し た。供試体条件を付表 5-3 に、試験条件を付表 5-4 に示す。

反折	++*: ], =] 人	土粒子密度	乾燥密度	初期	初期水		
石竹	M科と配合 (Mgn		(Mgm ⁻³ )	含水比(%)	飽和度(%)		
豊浦砂	豊浦珪砂 100%	2.63	1.53	5	19		

付表 5-3 供試体の諸元

/#⇒₽/₩	P	アース	供試体充てん部	浸潤液圧力	供求
供訊件	通番	名称	の下端空気穴	(kPa)	佣朽
曲油动	1	S-0-1	開放	0.9	
豆佣砂	2	S-C-1	閉鎖	9.8	

付表 5-4 浸潤試験の条件

#### 5.2.2. 試験ケース S-O-1 (空気穴解放)

#### (1) 圧力測定値の変化

試験中の間隙水圧および間隙空気圧の測定値の変化を付図 5-2 に示す。同図において、時刻は 浸潤容器の内側円筒と外側円筒の間への注水開始からの経過時間、圧力測定値は供試体へのプロ ーブ設置後に計測された初期圧力との差として示した。なお、計測の時間間隔は10sとした。



付図 5-2 試験中の供試体中の間隙水圧・空気圧測定値の変化(豊浦砂、開放条件)

間隙水圧の計測値は、供試体中心から 50mm, 30mm のいずれの位置でもほぼ同じ時刻に変化 し、注水完了時刻とほぼ同じ 5 min 40 s (340 s)頃に最大値に達した。間隙水圧の変化する時刻 が設置位置によらず同一なのは、計測時間間隔に比して浸潤速度が速いことによるものと推察さ れる。なお、間隙空気圧計も同じく 5 min 40 s 分後に値が上昇し、その後は一定値を保った。

#### (a) 体積含水率測定値の変化

試験中の供試体の体積含水率測定値の変化を付図 5-3 に示す。これは豊浦砂の比誘電率と体積 含水率の校正曲線に基づく変換値ではなく、計測された比誘電率(実部)ε を式 5-1 に示す Topp の式(経験式)を用いて体積含水率 θに変換した推定値である。

 $\begin{aligned} \theta &= a_3 \varepsilon^3 + a_2 \varepsilon^2 + a_1 \varepsilon + a_0 \\ (a_3 &= 4.3 \times 10^{-6}, a_2 = -5.5 \times 10^{-4}, a_1 = 2.92 \times 10^{-2}, a_0 = -5.3 \times 10^{-2}) \end{aligned} \quad \ \ \vec{x} \ \ 5\text{-}1 \end{aligned}$ 



付図 5-3 供試体の供試体中の体積含水率測定値の変化(豊浦砂、開放条件)

各プローブによる体積含水率の測定値は、供試体の周面から中心方向へ向かう順に上昇しており、周面からの浸潤と定性的に一致していた。また、供試体中心から 50mm, 30mm の位置における体積含水率の上昇は、注水開始から 2~3 分の間であり、この変化の時点は圧力測定値の変化のそれとほぼ一致していることから、両者の測定値の変化には整合性があると判断される。

#### (2) 閉鎖条件

閉鎖条件では供試体下端中央の空気穴を閉じたものの、浸潤容器への注水段階では供試体が注 水用の空気穴を介して大気と連絡しているため、開放条件と変わらないこととなる。豊浦砂を用 いた開放条件の試験では、装置への注水が完了するまでに供試体全体が飽和してしまうため、同 じ試験装置を用いる限り、両者の計測値に差異は見られなかった。このため、ここでは計測結果 を割愛した。

## 5.3. 解析における周面境界の設定圧

解析における周面境界の設定圧を、試験値とともに、開放条件は付図 5-4 に閉鎖条件は付図 5-5 に示す(試験値については、大気圧下(101.325kPa)での計測値とした)。閉鎖条件の試験では、 供試体の上下に敷いたベントナイトの膨潤がより確実に進行するように、初期における低圧の維 持期間を長くした。



付図 5-4 解析における周面境界の設定圧(開放条件)



付図 5-5 解析における周面境界の設定圧(閉鎖条件)

#### 5.4. 飽和・不飽和浸透流解析と気液二浸透流解析の支配方程式

水の飽和・不飽和浸透流の支配方程式は、ダルシーの法則を不飽和状態に拡張したバッキンガム-ダルシー則(Buckingham–Darcy Law)と、非圧縮性流体を仮定した連続の式とを連立させることで得られる。これは、水の圧力を水頭表示した場合、次の式 5-1 のように表すことができる。

ここに、 $C_s$ は比水分容量、 $\alpha$ は飽和領域で 1、不飽和領域で 0 となるスイッチング・パラメー ター、 $S_s$ は比貯留係数、 $S_w$ は水飽和度、hは間隙水圧(水頭値)、 $k_{r_w}(S_w)$ は比透水係数で水飽和度  $S_w$ の関数、 $K_{s_w}$ は透水係数テンソル、 $x_3$ は重力方向上向きの座標、そして $q_w$ は体積流量で表した 源泉項である。

気液二相浸透流については、運動方程式と連続の式を個別に示す。ここでは、間隙流体を構成 する  $\beta$ 相に成分  $\kappa$ が含まれていると考える(気液二相であれば、 $\beta$ 相とは気相または液相である。 そして、水と空気を考える場合、成分  $\kappa$ は水または空気である)。 $\beta$ 相の流れの運動方程式は、多 相流に拡張したバッキンガム - ダルシー則(式 5-2)で表される。

ここに、添え字  $\beta$ は  $\beta$ 相のものであることを示し、 $\mathbf{F}_{\beta}$ は質量フラックス (ベクトル量)、 $\rho_{\beta}$ は 密度、 $q_{\beta}$ は体積フラックス (ベクトル量)、Kは絶対浸透率テンソル、 $k_{r_{\beta}}(S_{\beta})$ は相対浸透率で飽 和度 $S_{\beta}$ の関数、 $\mu_{\beta}$ は粘性係数、 $p_{\beta}$ は圧力、 $\rho_{\beta}$ は流体の密度、そしてgは重力加速度である。

成分 $\kappa$ の移流による質量フラックス $\mathbf{F}^{\kappa}$ は、 $\beta$ 相に含まれる成分 $\kappa$ の質量フラックスを全ての相について合計したものであり、次の式 5-3 で表される。

ここに、 $X_{\beta}^{\kappa}$ は  $\beta$ 相中の成分 $\kappa$ の質量割合である。成分 $\kappa$ の流体中の総質量 $M^{\kappa}$ は、次の式 5-4 で表される。

成分κについて、連続の式を積分形式で示すと、次の式 5-5のようになる。

ここに、 $V_n$ は多孔質媒体中の任意の閉領域、 $\Gamma_n$ は領域  $V_n$ の境界である閉曲面、 $\mathbf{n}$ は閉曲面  $\Gamma_n$ の 微小部分 $d\Gamma_n$ の内向き法線ベクトル、 $q^{\kappa}$ は領域  $V_n$ 内の成分  $\kappa$ の吸い込み・湧きだし速度である。 なお、気液二相の場合、それぞれの飽和度と圧力に次の拘束条件がある。

$S_w + S_a = 1$	式 5-6

 $p_a = p_w + p_c \qquad \qquad \qquad \vec{x} \ 5-7$ 

付 4-66

ここに、 $S_w$ ,  $S_a$ はそれぞれ液相、気相の飽和度、 $p_a$ は気相の圧力、 $p_w$ は液相の圧力、 $p_c$ は気液 界面の張力である。なお、 $p_c$ は解析において設定する必要があり、液相の飽和度 $S_w$ の関数とした 水分特性曲線 $p_c(S_w)$ の形で設定される。

#### 5.5. 飽和透水試験

回帰に用いる浸透特性をもとめるために、Na型ベントナイト(クニゲル V1) 混合率 15 wt% と模擬掘削土(ケイ砂 6 号)の混合土に関して、「低透水性材料の透水試験方法」(地盤工学会基 準: JGS 0312-2018) に沿って、飽和透水試験を実施した。

試験手順を以下に示す。

#### 5.5.1.供試体の作製

- a) 供試体を締固めて作製する場合には、JISA1201に規定する方法によって得られた試料 を、よく混合して含水比が均一になったものを準備する。
- b) 試料の土粒子の密度ρ_s(Mg/m³)を JISA 1202 に規定する方法によって求める。
- c) 透水円筒の内径をはかり、断面積A (mm²) を求める。
- d) 透水円筒を有孔板に固定し、フィルタを設置する。
- e) 試料をフィルタの上に規定の厚さに入れ、層状に締固める。
  - **注記1** JISA1210 または静的締固めによってモールド内に締固めた試料を、そのまま 透水試験用供試体として使用することができる。
  - **注記2** 2 層目以降の締固めでは、各層の間の密着をよくするために締固めた各層の上面にへらなどで縦横に線を刻む。
  - 注記3 試料の最大粒径の10倍以上の直径および高さとすることを基本とする。ただし、粒径幅の広い試料に対しては、最大粒径の5倍以上であれば許容してもよい。
- f) 締固め後の供試体の長さ L (mm)、質量 m (g) をはかり、試料の初期含水比 w₀ (%)
   を JIS A 1202 に規定する方法によって求める。

#### 5.5.2. 試験方法

- a) 透水円筒の流入側にビュレットを連結する。飽和透水試験の状況を付図 5-6 に示す。
- b) ビュレットの断面積 a (mm²) を求め、流出側の水面から測った高さ h₁ (mm) を設定する。
- c) 時刻 fu における hu を記録してから、バルブを開いて時刻 fu における hu を記録する。
- d) b)から c)の操作を繰り返し、算出される飽和透水係数の値がほぼ一定となったことを確認した後、3回以上の測定を行う。測定値の平均値からの変動が±50%におさまることでほぼ一定とみなす。
- e) ビュレットと同条件で設置された水の水温 T(℃)をはかる。
- f) 試験後の供試体の含水比 wr(%)を求める。

次式により飽和透水係数を算出する。

$$k_T = 2.303 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{1000}$$

ここに、k_T: T(℃)における飽和透水係数 (m/s) a: ビュレットの断面積 (mm²) L:供試体の長さ (mm) A:供試体の断面積 (mm²) t₂-t₁: 測定時間 (s) h₁: 時刻 t₁における水位差 (mm)

*h*₂:時刻 *t*₂における水位差 (mm)

2.303:対数の底の変換による係数

1/1000:単位を換算するための係数



付図 5-6 透水試験の状況

飽和透水試験を実施した結果、Na 型ベントナイト(クニゲル V1)混合率 15 wt%と模擬掘削 土(ケイ砂 6 号)の混合土の飽和透水係数は  $6.27 \times 10^{-11}$ m/s となった。液相絶対浸透率  $K_w$ は、 飽和透水係数  $k_T$ より次式により算出することができる。

$$K_w = \frac{\mu}{\rho g} k_T$$

ここに、 $k_T: T(^{\mathbb{C}})$ における飽和透水係数 (m/s)

ここでは、 $\rho \in 997.8 \text{ kg/m}^3$  (22℃の水の密度)、g を 9.80665 m/s²、 $\mu \in 9.55 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (22℃ の水の粘性係数) とする。

Na型ベントナイト(クニゲル V1)混合率 15 wt%と模擬掘削土(ケイ砂 6 号)の混合土の液

式 5-8

式 5-9

5.7. Van Genuchten モデル及び Mualem-van Genuchten モデル

飽和度と圧力の関係を規定する水分特性曲線pc(Sw)については、飽和・不飽和流解析および気液 二相流解析ともに van Genuchten モデル(Van Genuchten、1980) (以下、VG モデルとする。) で表現した。VGモデルは以下の式 5-10 で定義される。

$$S_e = [1 + (-\alpha p_w)^n]^{-(1-\frac{1}{n})}$$

ここで、 $S_e$ は有効飽和度、 $p_w$ は、毛管圧である。また、 $\alpha$  [1/Pa]および、n [·]は、いずれもフィ ッティングパラメーターである。有効飽和度Seについては、以下の式 5-11 で定義される。

ここで、 $S_w$ は水飽和度、 $S_{lr}$ は残留水飽和度である。

液相および気相の相対浸透率は、いずれも Mualem-van Genuchten モデル (Mualem、1976) (以下、M-VG モデルとする。) で表現した。

液相の浸透率krwについては、M-VG モデルにより、以下の式 5-12 で表される。

ここで、nおよびlは、フィッティングパラメーターである。nについては、VGモデルのパラメー ターnと共通である。lについては、経験的に 0.5 とされており (Mualem、1976)、本検討でもl= 0.5とした。

気相の浸透率kraについては、M-VG モデルにより、以下の式 5-13 で表される。

$$k_{rg} = (1 - S_{eg}^2)(1 - S_{eg})^2$$
 式 5-13

ここで、Segは気相を考慮した有効飽和度であり、式 5-14により定義される。

付 4-69

 $k_{r_{w}} = S_{e}^{l} \left[ 1 - \left[ 1 - S_{e}^{\frac{1}{\left(1 - \frac{1}{n}\right)}} \right]^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)} \right]^{1 - \frac{1}{n}}$ 式 5-12

相絶対浸透率Kは、6.119×10⁻¹⁸m²となる。

## 5.6. 液相と気相の絶対浸透率の違い

5.5 より、Na型ベントナイト(クニゲル V1)混合率 15 wt%と模擬掘削土(ケイ砂6号)の混 合土について、3.より液相絶対浸透率 Kwは 6.119×10⁻¹⁸ m²、透気試験による測定結果(原子力 機構・原環センター、2019)より気相絶対浸透率 Kaは、3.42×10⁻¹³ m² とそれぞれの相で絶対浸 透率が異なった(なお、この透気試験では飽和度0%のデータを取得していないため、ここでは、 最も小さい飽和度である10%での値を代用した)。

$$S_{eg} = \frac{S_w - S_{lr}}{1 - S_{lr} - S_{gr}}$$

式 5-14

ここで、 $S_{lr}$ は残留水飽和度であり、 $S_{gr}$ は残留気相飽和度である。

## 5.8. 解析結果

解析結果のうち、本編に記載しなかったケース B-O-1-U 及び B-O-1-T の結果を付図 5-7 及び 付図 5-8 に示す。カラム深度中央で飽和に至るまでの時間は、飽和・不飽和流解析でおよそ 3h で あるのに対し、気液二相流解析では、およそ 5h であり浸潤速度に差があることが分かる。



付図 5-7 カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況および間隙水圧(B-O-1-U)



付図 5-8 カラムの中央高さにおける浸潤前線の進行状況、間隙水圧および気相圧(B-O-1-T)

## 5.9. 試料採取による乾燥密度及び含水率計測

本編に記載されていない、計測結果(採取位置は供試体天端からの深さ 20mm 及び 80mm(水 平方向断面)及び S-W 方向(鉛直方向断面)、ケース B-O-1 及び B-C-1)を付図 5-9 及び付図 5-10 に示す。



付図 5-9 供試体の乾燥密度及び体積含水率 (ケース B-O-1 空気穴解放)



付図 5-10 供試体の乾燥密度及び体積含水率(ケース B-C-1 空気穴閉鎖)

- van Genuchten, M. Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils., Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp. 892-898 (1980).
- Komine, H. and Ogata, N.: New equations swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, Canadian Geotech, Vol.40, No.2, pp.460-475, 2003.
- Komine, H. and Ogata, N.: Predicting swelling characteristics of bentonites, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol.130, No.8, pp.818-829, 2004.

Mualem, Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media., Water Resour. Res., 12, pp. 513-522 (1976).

- POSIVA, Emplacement of Small and Large Buffer Blocks, WR2010-29, 2010.
- SKB, Backfilling and closure of the deep repository Assessment of backfill concepts, R-04-53, 2004.
- SKB, System design of backfill Full scale production test of backfill blocks, P-14-24, 2015.
- 原子力環境整備促進·資金管理センター, 平成 14 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, 2003.
- 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),2021.
- 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-,2021.
- 原子力発電環境整備機構:地層処分事業の安全確保(2010年度版) 確かな技術による安全な地 層処分の実現のために-, NUMO-TR-11-01, 2011.
- 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 土木学会第 60 回年次学術講演会, 2005.
- 高尾肇,上坂文哉,宇津野二士,増田良一,多田浩幸,ベントナイト緩衝材ブロックの摩擦特性 に関する研究 第39回地盤工学研究発表会,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.
- 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,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,緩衝材および埋め戻し材の製作-,JAEA-Research, 2016-010, 2016.
- 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め戻し-, JAEA-Research, 2019-007, 2019.
- 渡邊保貴,田中幸久,中村邦彦,廣永道彦: Ca型ベントナイト混合土の透水試験方法(その1) 一室内締固め供試体に対する剛性容器を用いた方法一,電力中央研究所報告,2013.

# 付録5 製造・施工技術に係る品質保証体系の具体化

# 目次

1. はじめに	付 5-2
2. 品質保証体系で用いられるパラメータの整理	付 5-2
2.1 調査対象項目設定の根拠	付 5-2
2.1.1 オーバーパックの調査対象項目	付 5-3
2.1.2 緩衝材の調査対象項目	付 5-4
2.1.3 埋め戻し材の調査対象項目	付 5-5
2.2 調査結果	付 5-6
3. 品質保証体系で確認すべき情報・データの分類	付 5-89
4. パラメータの取得方法に関する調査	付 5-99

#### 1. はじめに

「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」の「5.2 製造・施工秘術に係る品質保証体系の具体化に向けた基盤整備」 で示された情報の詳細な調査結果などを記述した。

#### 2. 品質保証体系で用いられるパラメータの整理

報告書 5.2.2 に示すように、閉鎖の判断を実施するために取得される情報・データを、品質保 証体系の中で整理する必要がある。ここでは報告書 5.2.2 で調査した NUMO 包括的技術報告書 の「安全機能」を起点とした調査結果について示す。

#### 2.1 調査対象項目設定の根拠

ここでは調査対象項目の設定根拠を示す。

NUMO 包括的技術報告書 (NUMO, 2021) において、地層処分の概念的な説明とサイト選定、 処分場の設計および安全評価などの実際的な作業を直接対応させるうえで重要な役割を持つもの として「安全機能」が地下構成要素ごとに定められている。閉鎖の判断に資する品質保証体系も 設計や性能評価などの実際的な作業と密接に関係するものであることから、安全機能を起点に調 査することとした。

安全機能は、処分場がどのようにして安全性を提供するかを役割として表現したものであり、 安全確保の基本概念である「隔離」と「閉じ込め」を実現するために有すべき具体的な安全機能 が地下構成要素ごとに示されている。また、安全機能は閉鎖前の安全機能と閉鎖後長期の安全機 能に分けられているが、本業務では閉鎖の判断に資する品質保証体系を検討するため閉鎖後長期 の安全機能を調査の対象とした。処分場を適切に設計し、建設・操業・閉鎖することによって、 閉鎖後の長期にわたる安全機能があらかじめ備えられるとされている。

調査の結果、構成要素ごとの安全機能はさらに以下の観点で展開されていることが分かった。 安全機能と「設計要件」「評価項目」「状態変数」の関係性について以降に示す。

設計の観点から「設計要件」及び「評価項目」

● 安全評価の観点から「状態変数」

処分場の設計の目的は、閉鎖後長期の数万年以上にわたる安全性を確保可能な処分場の仕様を 提示することである。処分場に求められる多面的な要求事項は設計因子として取りまとめられて おり、その一つに閉鎖後長期安全性の安全機能が含まれている。設計因子「閉鎖後長期の安全性」 に含まれる要求事項は「自然現象の著しい影響からの防御」「人の接近の抑制」「放射性物質の溶 出抑制」「放射性物質の移行抑制」である。この設計因子に関わる要求事項の下位の属性として「設 計要件」が構成要素ごとに展開されている。

設計要件を充足するように設計した仕様に対しては、処分場の閉鎖後長期において構成要素の 機能喪失や低下に繋がる可能性がある影響要因を想定して「評価項目」を設定し、影響要因に対 して必要な機能(安全機能)が維持できるかどうかを確認するとしている。処分場の安全機能に かかわる影響要因については、構成要素の熱的、水理学的、力学的、化学的な状態(THMC 状態) の変化に関係すると考えられるふるまいに対して抽出しており、それぞれに対して、物理・化学 的現象に関する数値解析(現象解析)を実施して安全機能への影響を評価している。この現象解 析は処分場の設計に利用されるほかに、安全評価の手順の一部として、安全機能が閉鎖後長期間 にわたってどのように発揮されると考えられるかを地層処分システムのふるまいとして記述する ために用いられる。処分システムのふるまいの記述が本事業における性能評価に値する。

NUMO 包括的技術報告書では、処分システムのふるまいについて、可能性が最も高いと考え
られるふるまい(基本シナリオ)と、それに対する不確実性を考慮したふるまい(変動シナリオ) を区分するために「状態変数」(処分場の各構成要素が有する安全機能を規定する物理・化学的諸 量のことであり、構成要素の安全機能に直接的な影響を与え、構成要素の将来の状態を変化させ る可能性がある特性のこと)を用いた検討を実施している。シナリオを具体的に作成するために、 要因分析としてそれぞれの安全機能に関する状態変数に対して影響を及ぼす可能性があると考え られる要因を NUMO FEP リストの FEP から抽出し関係づけている。抽出された FEP を適切に 統合し、これらが状態変数に与える影響について最も可能性が高いと考えられる影響の仕方と、 それに対して科学的な合理性をもって想定される不確実性を分析する(影響分析)。この分析を踏 まえて前者を基本シナリオ、後者を変動シナリオに設定している。影響分析の結果として、「安全 機能の最も確からしい状態」と、それに付随する「シナリオ上考慮すべき不確実性」、FEPの「シ ナリオ上の取り扱い区分」について、安全機能ごとに一覧表(以下、「影響分析表」という)が取 りまとめている。影響分析表のうち、シナリオ上の取り扱い区分においては、基本シナリオ、変 動シナリオの他に稀頻度事象シナリオの区分がある。稀頻度事象シナリオは隔離機能などに著し い影響を及ぼすと考えられるが、サイト選定と処分場の設計が適切に行われることによって想定 の必要がないほど発生の可能性が極めて低いシナリオである。本検討では、サイト選定と処分場 の設計は適切に行われていると想定し、基本シナリオと変動シナリオに区分されたシナリオに関 連する状態変数及び FEP を調査対象とした。

以下に、令和3年度の調査対象とした竪置きブロック方式のオーバーパック、緩衝材、埋め戻 し材に関する「設計要件」「評価項目」「状態変数」について示し、個々の調査項目を選定した経 緯を示す。

# 2.1.1 オーバーパックの調査対象項目

オーバーパックに関する調査対象のリストを付表 2-1 に示す。

ID	調査対象項目	ID	調査対象項目	
設計要件に関する項目			評価項目に関する項目	
才-1	耐食性	才-4	緩衝材の偏膨潤などに対する構造健全	
			性	
オ・1・①	残存酸素量による腐食	才-5	溶接欠陥に対する構造健全性	
オ・1・②	低酸素環境における腐食(水の還	才-6	地震動に対する構造健全性	
	元による腐食)			
オ・1・③	応力腐食割れ、水素脆化割れ		状態変数に関する項目	
才-1-④	微生物腐食	オ-7	腐食生成物間隙水水質	
オ・1・5	溶接欠陥の耐食性への影響	才-8	温度	
オ・1・⑥	廃棄体の発熱に伴う温度変化	才-9	応力	
才-2	構造健全性	才-10	鉄表面の状態	
才-3	耐食性に対する放射線影響の抑制	オ-11	OP外表面と水との接触状態	
		オ-12	強度,厚さ/形状	

### 付表 2-1 品質保証体系におけるパラメータの調査対象リスト(OP)

(本文 表 5.2-1 再揭)

設計要件に関連する調査対象項目は、OPの厚さの設定に至る設計要件とその詳細項目を対象とした。OPの設計因子「閉鎖後長期の安全性」の要求事項(安全機能)には「廃棄体と地下水の接触の防止」が設定されている。これに対する設計要件として、「耐食性」(オ-1)、「構造健全性」

(オ-2)、「耐食性に対する放射線影響の抑制」(オ-3)が設定されている。これらの設計要件によって、それぞれ「必要腐食代」、「必要耐圧代」、「必要遮蔽代」が決まり、OPの厚さが決定される。これらのうち、必要腐食代は残存酸素の消費前後で見積り方法が異なるため、「埋設後初期の 残存酸素による腐食に対する必要腐食代(オ-1-①)」と「残存酸素消費後の水の還元による腐食 に対する必要腐食代(オ-1-②)」に分けて検討されている。さらに、「耐食性」の評価では「応力 腐食割れ/水素脆化割れ」(オ-1-③)及び「微生物腐食」(オ-1-④)も検討している。また、OP への影響要因のうち「溶接欠陥の耐食性への影響」(オ-1-⑤)と「廃棄体の発熱に伴う温度変化」 (オ-1-⑥)は設計要件「耐食性」で対応すると示されている。

評価項目に関連する調査対象項目は、OP の機能喪失や機能低下につながる可能性がある影響 要因を想定し、設計によって対応すべき事象が設定されている。その結果「緩衝材の偏膨潤など に対する構造健全性」(オ-4)、「溶接欠陥に対する構造健全性」(オ-5)、「地震動に対する構造健 全性」(オ-6)が設定されている。

OPの影響分析表には、安全機能「廃棄体と地下水の接触の防止」に関する状態変数として「腐 食生成物間隙水水質」(オ-7)、「温度」(オ-8)、「応力」(オ-9)、「鉄表面の状態」(オ-10)、「OP 外 表面と水との接触状態」(オ-11)、「強度、厚さ/形状」(オ-12)が設定され、それぞれに関連した FEP が示されている。関連する統合 FEP267 項目のうち、基本/変動シナリオに区分されてい る FEP 項目は 9 項目であり、それぞれの状態変数ごとに該当する項目の現象解析について整理 した。

# 2.1.2 緩衝材の調査対象項目

緩衝材に関する調査対象のリストを付表 2-2 に示す。

ID	整理項目	ID	整理項目
設計要件に関する整理項目		状態変数に関する整理項目	
緩-1	低透水性	方	<b>牧射性物質の移流による移行の抑制</b>
緩-2	コロイドろ過能	緩-9	間隙構造
緩-3	自己シール性	緩-10	間隙水水質
緩-4	自己修復性		コロイド移行の抑制
緩-5	微生物影響の防止	緩-11	間隙構造
緩-6	物理的緩衝性	緩-12	間隙水水質
	平価項目に関する整理項目		放射性物質の収着
緩-7	ニアフィールドの状態変化に対す	緩-13	温度
	る力学的安定性		
緩-7-①	自重による長期沈下挙動	緩-14	間隙水水質
緩-7-②	岩盤クリープと OP の腐食膨張に		
	よる影響		
緩-8	地震動に対する力学的安定性		

### 付表 2-2 品質保証体系におけるパラメータの調査対象リスト(緩衝材)

(本文 表 5.2-2 再揭)

設計要件に関連する調査対象項目は、緩衝材の有効粘土密度の設定に至る設計要件とその詳細 項目を対象とした。緩衝材の設計因子「閉鎖後長期の安全性」の要求事項(安全機能)には「放 射性物質の移流による移行の抑制」「コロイド移行の抑制」「放射性物質の収着」が設定されてい る。また、所定の期間オーバーパックの設計要件「耐食性」「構造健全性」を維持することも求め られている。これらの安全機能を確保するための設計要件として「低透水性」(緩-1)、「コロイド ろ過能」(緩-2)、「自己シール性」(緩-3)、「自己修復性」(緩-4)、「微生物影響の防止」(緩-5)、 「物理的緩衝性」(緩-6)が設定されている。

評価項目に関連する調査対象項目は、OP と同様に緩衝材の機能喪失や機能低下につながる可 能性がある影響要因を想定し、設計によって対応すべき事象が設定されている。その結果、緩衝 材の力学的な長期健全性の維持及びオーバーパックの損傷防止の観点から「ニアフィールドの状 態変化に対する力学的安定性」(緩・7)、「地震動に対する力学的安定性」(緩・8)が設定されてい る。

NUMO 包括的技術報告書で示されている緩衝材の要因分析によると、緩衝材の3つの安全機能に対して状態変数は以下のように設定されている。

安全機能	状態変数
放射性物質の移流による移行の抑制	鉱物組成、厚さ、密度、温度、間隙構造、間隙水水質
コロイド移行の抑制	鉱物組成、厚さ、密度、温度、間隙構造、間隙水水質
放射性物質の収着	鉱物組成、厚さ、密度、温度、間隙水水質

付表 2-3 緩衝材の安全機能と状態変数

一方で、影響分析表において状態変数それぞれに関連する FEP とその変遷を踏まえたシナリオ 区分を確認すると、その多くは基本/変動シナリオに含まれず、FEP267項目のうち 256項目は 稀頻度事象シナリオなどに分類されることが分かった。したがって、本検討で調査対象となる状 態変数は、放射性物質の移流による移行の抑制のうち「間隙構造」(緩-9)及び「間隙水水質」(緩-10)、コロイド移行の抑制のうち「間隙構造」(緩-11)及び「間隙水水質」(緩-12)、放射性物質 の収着のうち「温度」(緩-13)及び「間隙水水質」(緩-14)であった。

# 2.1.3 埋め戻し材の調査対象項目

埋め戻し材の調査対象項目のリストを付表 3-1 に示す。

ID	整理項目	ID	整理項目
設計要件に関する整理項目		状態変数に関する整理項目	
埋-1	低透水性	坑道及	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
Hill Hill	平価項目に関する整理項目	埋-3	鉱物組成
埋-2	緩衝材及び止水プラグの膨出抑制	埋-4	密度
		埋-5	温度
		埋-6	間隙構造
		埋-7	間隙水水質

付表 2-4 品質保証体系におけるパラメータの調査対象リスト(埋め戻し材)

設計要件に関連する調査対象項目は、緩衝材と同様に、有効粘土密度の設定に至る設計要件と その詳細項目を対象とした。埋め戻し材は止水プラグと適切に組み合わせることによって設計因 子「閉鎖後長期の安全性」の要求事項(安全機能)「坑道及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」を達成するように設置される。この安全機能を確保するための設計 要件として「低透水性」(埋-1)が設定されている。 埋め戻し材は、その設置される場所によって、隣接する緩衝材や止水プラグの機能低下を抑制 することが求められることから、評価項目「緩衝材及び止水プラグの膨出抑制」(埋-2)が設定 されている。

埋め戻し材に対する要因分析によれば、安全機能「坑道及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」に関連する状態変数は「鉱物組成」(埋-3)、「厚さ」、「密度」(埋-4)、「温度」(埋-5)、「間隙構造」(埋-6)、「間隙水水質」(埋-7)である。ただし、影響分析表で 示されている FEP とシナリオの区分によれば、「厚さ」に関連する FEP はすべて稀頻度事象シ ナリオ等に分類されることから本検討の対象項目から除外した。

#### 2.2 調査結果

調査の整理結果と、そこから抽出されたパラメータの整理結果を示す。

NUMO 包括的技術報告書の調査結果について、上記で示した調査対象項目ごとに整理表を作成した。それぞれの整理表には ID、対象となる構成要素(OP、緩衝材、埋め戻し材)、対応する 安全機能、調査対象項目、その内容を共通事項として最初に示し、その評価方法等の要約をその 後に示した。評価方法等の要約で出てきた個々のパラメータについて、それらの因果関係等を考 慮して階層構造で整理し、その階層構造の最下層となったパラメータが品質保証体系で検討すべ き情報・データであることからそれらを再度抽出した。

OP に関する調査結果を付表 2-5~付表 2-21 に、緩衝材に関する調査結果を付表 2-22~付表 2-35 に、埋め戻し材に関する調査結果を付表 2-36~付表 2-42 に示す。

付表 2-5 (オ-1-①)オーバーパックの耐食性(残存酸素量による腐食)の調査結果

ID	オ-1-① 対象となる構成要素 OP		
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触の防止		
整理対象	耐食性		
内容	埋設後の所定の期間、腐食によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能		
	が損なわれないこと		
検討事項	残存酸素量による腐食		
検討方法	【埋設後初期の残存酸素による腐食に対する必要腐食代の設定方法】		
	1. OP1体あたりの腐食に寄与する残存酸素量		
	緩衝材及び埋め戻し材の、間隙に存在する酸素と、ベントナイト表面に吸着		
	した酸素を合算して、OP1体あたりの腐食に寄与する残存酸素量を見積もる。		
	1.1 単位体積あたりの緩衝材及び埋め戻し材中の残存酸素量		
	● 緩衝材及び埋め戻し材の間隙に存在する酸素量		
	単位体積あたりの緩衝材及び埋め戻し材中の間隙に存在する酸素量		
	(mol/m ³ ):緩衝材などの間隙率 η (%) / 緩衝材の間隙における標準状態酸素の		
	モル体積(24.5×10 ⁻³ m ³ /mol)×空気中の酸素の体積割合(0.209)		
	<ul> <li>● 緩衝材及び埋め戻し材のベントナイトに吸着している酸素量</li> </ul>		
	単位体積あたりの緩衝材などに吸着している酸素量(mol/m ³ ):ベントナイト		
	の重量あたりの酸素吸着量(6.27 mol/Mg)×単位体積あたりのベントナイト重		
	量(Mg/m ³ )		
	1.2 OP 1体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量		
	定置方法及び岩種により緩衝材などの使用量が異なるため、OP1体あたり		
	の緩衝材などの体積重を昇足する。		
	1.3 OP 1 体あたりの残仔酸素量		
	上記 1.1 及び 1.2 から OPI 体めにりの残存酸素重(moi)を求める。		
	2. 残存酸素による腐食の平均腐食深さの算定		
	上記 1.3 で求めた残存酸素量から以下の式を用いて鉄の腐食量(mol)を見積		
	もる。ここから鉄の原子量、密度、OPの表面積から平均腐食深さ(mm)を算出		
	する。		
	$\mathrm{Fe} + 1/2\mathrm{O}_2 + \mathrm{H}_2\mathrm{O} \rightarrow \mathrm{Fe}(\mathrm{OH})_2$		
	3. 残存酸素による腐食の平均腐食深さと最大腐食深さの関係		
	上記 3. で求めた平均腐食深さに対して、腐食の局在化を考慮し、最大腐食深		
	さを検討する。		
	● 不均一全面腐食(水溶液中、ベントナイトスラリー中)		
	▶ 人工海水及び人工淡水(NaCl、NaHCO₃[mol/L])の試験溶液中での浸		
	漬試験が行われ、全面腐食における平均腐食深さと孔食係数のデータが 「「」、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、		
	得られている【データ①】		
	▶ 幌処地域における地下水組成に基づいて作成された模擬地下水中でも		
	回禄の試験を実施し、テータが得られている。 - スターナキキ (いなばす)		
	● 扎食・すきま腐食(水溶液中)		
	▶ 曖素共存トの局pH環境において、炭素鋼は不動態化する可能性がある。		

	▶ 仮に不動態化が生じた場合を想定し、不動態化し、かつ孔食・すきま腐		
	食が生じる環境である緩衝材非共存下のアルカリ性水溶液中における		
	浸漬試験が行われており、平均腐食深さと孔食係数のデータが得られて		
	いる。【データ②】		
	● 不均一全面腐食(不飽和緩衝材中)		
	▶ ブロック間の継ぎ目を模擬したスリットが付与された緩衝材で浸漬試		
	験が実施されており、平均腐食深さと孔食係数のデータが得られている		
	● 天然環境中における腐食		
	▶ 土壌中、熱帯環境、石油タンク底面のそれぞれの腐食データが得られて		
	いる		
	【データ①】と【データ②】の極値統計解析結果に基づいて、実規模 OP に		
	おける最大腐食深さを平均腐食深さから推定する方法が検討されている。*		
	データ①:P=Xm+7.5Xm ⁰⁵		
	データ②:P=Xm+6.4Xm ^{0 25}		
	ここで P:実機推定最大腐食深さ[mm]		
	Xm:平均腐食深さ [mm]		
	※OP 表面積を 5.56 m ² 、信頼率を 0.99 と設定		
パラメータの階層	※OP表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定       1 残存酸素量における腐食		
パラメータの階層 関係	<ul> <li>※OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定</li> <li>1 残存酸素量における腐食</li> <li>2 └緩衝材などの間隙に存在する酸素量</li> </ul>		
パラメータの階層 関係	※OP表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 └緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 └緩衝材及び埋め戻し材の間隙率		
パラメータの階層 関係	**OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積		
パラメータの階層 関係	<ul> <li>※OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定</li> <li>1 残存酸素量における腐食</li> <li>2 └緩衝材などの間隙に存在する酸素量</li> <li>3 └緩衝材及び埋め戻し材の間隙率</li> <li>4 └緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積</li> <li>5 └空気中の酸素の体積割合</li> </ul>		
パラメータの階層 関係	**OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量		
パラメータの階層 関係	**OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量         7 「OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量		
パラメータの階層 関係	**OP表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量         7 「OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量         8 「平均腐食深さ		
パラメータの階層 関係	**OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量         7 「OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量         8 「平均腐食深さ         9 「鉄の腐食量		
パラメータの階層 関係	**OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量         7 「OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量         8 「平均腐食深さ         9 「鉄の腐食量         10 「最大腐食深さ		
パラメータの階層 関係 取得の対象となる	**OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量         7 「OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量         8 「平均腐食深さ         9 「鉄の腐食量         10 「最大腐食深さ         緩衝材及び埋め戻し材の間隙率、緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル		
パラメータの階層 関係 取得の対象となる 最下層のパラメー	*:OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量         7 「OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量         8 「平均腐食深さ         9 「鉄の腐食量         10 「最大腐食深さ         緩衝材及び埋め戻し材の間隙率、緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル         体積、空気中の酸素の体積割合、ベントナイトに吸着している酸素量、OP1 体		
パラメータの階層 関係 取得の対象となる 最下層のパラメー タ	**OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量         7 「OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量         8 「平均腐食深さ         9 「鉄の腐食量         10 「最大腐食深さ         緩衝材及び埋め戻し材の間隙率、緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル         体積、空気中の酸素の体積割合、ベントナイトに吸着している酸素量、OP1 体         あたりの緩衝材及び埋め戻し材の間隙率、緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル		
パラメータの階層 関係 取得の対象となる 最下層のパラメー タ 参考文献	**OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量         7 「OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量         8 「平均腐食深さ         9 「鉄の腐食量         10 「最大腐食深さ         緩衝材及び埋め戻し材の間隙率、緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル         体積、空気中の酸素の体積割合、ベントナイトに吸着している酸素量、OP1 体         あたりの緩衝材及び埋め戻し材の間隙率、緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル         体積、空気中の酸素の体積割合、ベントナイトに吸着している酸素量、OP1 体         あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量、鉄の腐食量、最大腐食深さ         ● 包括的技術報告書本編 表4.4-1		
パラメータの階層 関係 取得の対象となる 最下層のパラメー タ 参考文献	**OP 表面積を 5.56 m²、信頼率を 0.99 と設定         1 残存酸素量における腐食         2 「緩衝材などの間隙に存在する酸素量         3 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率         4 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積         5 「空気中の酸素の体積割合         6 「ベントナイトに吸着している酸素量         7 「OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量         8 「平均腐食深さ         9 「鉄の腐食量         10 「最大腐食深さ         9 「鉄の腐食量         10 「最大腐食深さ         9 「鉄の腐食量         10 「日報の酸素の体積割合、ベントナイトに吸着している酸素量、OP1体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の間隙率、緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル         体積、空気中の酸素の体積割合、ベントナイトに吸着している酸素量、OP1体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量、鉄の腐食量、最大腐食深さ         ● 包括的技術報告書本編 表4.4・1         ● 包括的技術報告書 付属書4・4		

付表 2-6 (オ-1-②)オーバーパックの耐食性(低酸素環境における腐食)の調査結果

ID	オ-1-② 対象となる構成要素 OP		
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触の防止		
整理対象	耐食性		
内容	埋設後の所定の期間、腐食によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能		
	が損なわれないこと		
検討事項	低酸素環境における腐食		
検討方法	【残存酸素消費後の水の還元による腐食に対する必要腐食代の設定】		
	1. 低酸素環境における腐食試験		
	● 低酸素濃度下での人工海水(pH8.5、Cl [:] : 5.6×10 ⁻¹ mol/L、HCO ³ :: 2.4×		
	10 ⁻³ mol/Lなど) 及び人工淡水 (pH8.5、NaCl: 2.5×10 ⁻³ mol/L、NaHCO ³ :		
	2.5×10 ⁻³ mol/L)の飽和した緩衝材中における炭素鋼の最大約10年間の浸		
	漬試験を実施		
	● 平均腐食速度は、べき乗則または直線則を用いて近似して評価する。		
	2. 低酸素環境における腐食の平均腐食深さと最大腐食深さの関係		
	● 実機推定最大腐食深さPは最終的に以下の式で表される。		
	$P = \lambda + \alpha \ln(S/s) - \alpha \ln(-\ln a)$		
	ここで、λ:位置パラメータ(最頻値)		
	a:尺度パラメータ		
	S:対象とする実機(ここでは OP)の表面積		
	s:腐食試験に用いた試験片の面積		
	a:信頼率		
	● 低酸素環境下の圧縮ベントナイト中における自然浸漬試験及び定電流加		
	速試験により得られた平均腐食深さXmと最大腐食深さのデータを極値統		
	計解析し、その結果得られた平均腐食深さとa、λの関係をまとめている。		
	$ \sim \alpha = k_1 X_m^n (k_1, n(t \in \mathfrak{X})) $		
	$\rightarrow$ $\lambda = X_m + k_2 X_m^n$ (k2、 n' は定数)		
パフメータの階層	1		
関係			
	4 「美機推正取人閥役保さ」 =		
	- Gumbel 万市の条槓万市関数の位直ハフメータ(取頭値) $ C = - C = C = C = C = C = C = C = C = C$		
	6 -Gumbel 万和の条積万和関数の八度ハノメータ		
取得の対象とたる	り 旧根十 地下水組成及び濃度 亚均庭食連度 Cumbal 分布の思積分布関数の位置パラメ		
取得の対象となる 最下層のパラメー	$- \phi$ (最頻値) Gumbel 分布の思積分布関数の尺度パラメータ OP の表面		
以「1100000000000000000000000000000000000	1 積 腐食試験に用いた試験片の面積 信頼率		
参考文献	<ul> <li>● 包括的技術報告書本編 表4 4-1</li> </ul>		
	● 包括的技術報告書 付属書4-4		
	● 包括的技術報告書 付属書4-7		

付表 2-7 (オ-1-③)オーバーパックの耐食性(応力腐食割れ、水素脆化割れ)の調査結果

ID	オ-1-③	対象となる構成要素	OP	
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触の防止			
整理対象	耐食性			
内容	埋設後の所定の期間、腐食によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能			
	が損なわれないこと			
検討事項	応力腐食割れ	応力腐食割れ、水素脆化割れ		
検討方法	【応力腐食割	れ、水素脆化割れの発生	可能性の評価】	
	<b>OP</b> の材料	に応力腐食割れや水素脆化	と割れが生じる環境条件を評価し、OP の	
	設置環境がそ	の環境条件とならないこ	とを確認する。もしくは、応力腐食割れ	
	や水素脆化害	や水素脆化割れの原因となる溶接部の引張残留応力を低減もしくは圧縮場に		
	転換する。			
	水素脆化の	水素脆化の影響がある場合には、脆化を考慮したうえで、溶接欠陥の構造健		
	全性への影響を評価する。			
	1. 応力腐食	割れの発生可能性の評価		
	応力腐食割	lれ(SCC)は、腐食性の現	環境におかれた金属材料に引張応力が作	
	用した場合に	生起する割れ現象であり、	、材料条件、環境条件、応力条件の3条	
	件が揃った場	件が揃った場合にのみ生起する。		
	则分境境下 () 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	処分環境下で想定される炭酸化学種による SCC (高 pHSCC、NNpHSCC		
	(Near Neutral pH SCC))及び孔食・隙間腐食経由型 SCC について、SCC			
	か生起する塚	が生起する環境条件と応力条件を示し、SCCの発生可能性の評価を行う		
	● 向pnSC 理培条件及			
	環境未件及び応力余件の両方の観点から尚 pHSCC か生起する可能性は低い 広力条件に関して 亀裂に発生する広力拡大係粉 K (MPo m05) が広力府			
	全国れの下限	に因して、電表に光上9%		
	能性がある	角裂寸法(mm) 引張	・ 2 通えるこれの構成的なが起版するす 実留応力及び応力拡大係数の関係が整理	
	されており、	この関係から K ₁ sccを招	える引張残留応力が求められる。	
	<ul> <li>NNpHS</li> </ul>	CC		
	▶ 環境条件	:		
	埋設ライン	パイプ鋼の環境では希薄	な炭酸化学種濃度(10 ⁻³ ~10 ⁻² mol/L オ	
	ーダー)で、]	oH5.5~7.5 の環境におい	て発生する可能性が報告されている。地	
	層処分環境に	おいて緩衝材間隙水の炭	酸化学種濃度はこの範囲に含まれる。	
	▶ 応力条件	:		
	溶接部の腐食代に相当する範囲の引張残留応力は、熱処理により十分に低			
	減、もしくは圧縮応力場に転換できる見通しがある。			
	● 孔食・隙	间腐食経由型SCC		
	環境条件及	び応力条件の両方の観点	から孔食・隙間腐食経由型 SCC が生起	
	する可能性は	低い		
	2. 水素脆化	割れの発生可能性の評価		
	水素脆化割	れの発生も SCC 同様に :	3条件が揃った場合にのみ生起する。環	
	境条件及び応	力条件の両方の観点から	水素脆化割れが発生する可能性は低い。	

	なお、環境条件は材料の降伏強度(MPa)と材料中の拡散性水素濃度(ppm)
	で評価される。
パラメータの階層	1 応力腐食割れ
関係	2 └材料条件
	3 └環境条件
	$4 \qquad {}^{\perp}pH$
	5 └炭酸化学種濃度
	6 └応力条件
	7 □ □ 亀裂寸法
	8 山引張残留応力
	9 「応力拡大係数
	10 水素脆化割れ
	2 └材料条件
	11 └環境条件
	12 ^L 材料(OP)の降伏強度
	13 └拡散性水素濃度
	14 └応力条件
取得の対象となる	材料条件、pH、炭酸化学種濃度、亀裂寸法、引張残留応力、応力拡大係数、材
最下層のパラメー	料(OP)の降伏強度、拡散性水素濃度、応力条件
Ø	
参考文献	● 包括的技術報告書本編 4.4
	● 包括的技術報告書本編 表4.4-1
	● 包括的技術報告書 付属書4-4
	● 包括的技術報告書 付属書4-8

付表 2-8 (オ-1-4) オーハーハックの耐良性	(偸生物腐良)	の調査結果
----------------------------	---------	-------

ID	オ-1-④ 対象となる構成要素 OP		
対応する安全	廃棄体と地下水の接触の防止		
機能			
整理対象	耐食性		
内容	埋設後の所定の期間、腐食によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能が		
	損なわれないこと		
検討事項	微生物腐食		
検討方法	【OPの微生物腐食の評価】		
	緩衝材中で腐食に影響を及ぼす微生物の活性がないことを確認し、OP 表面で微		
	生物に起因する局部腐食が起こる可能性は低いことを確認する。一方、緩衝材の		
	外での腐食に影響を及ぼす微生物の活動は保守的に考慮し、硫酸塩還元菌の活動		
	により地下水中の硫酸イオンが硫化物イオンに還元され、その硫化物イオンが緩		
	衝材中を拡散して OP と反応すると仮定したとしても腐食量は微量であることを		
	確認する。もしくは腐食代を付加する。		
	1. OP表面における微生物活動		
	<ul> <li>● 炭素鋼の腐食に影響する代表的な微生物である硫酸塩還元菌(嫌気性細菌)</li> </ul>		
	は、ベントナイト/水比が大きくなると硫酸塩還元菌の生菌数は低下し、乾		
	燥密度0.74 Mg/m³以上ではほとんど増殖できない。現在の仕様(乾燥密度1.6		
	Mg/m ³ )の緩衝材中では、硫酸塩還元菌は活性を維持することができない。		
	● SKBでも3種類の嫌気性の硫酸塩還元菌、6種類の好気性細菌に対して原位置		
	試験が実施され、長期的には全ての菌が死滅すると評価している。		
	2. 緩衝材の外における微生物活動		
	● 緩衝材の外における微生物活動により生成された代謝副産物が、OP表面まで		
	拡散して腐食反応が起こることを想定し、それによる腐食量を見積もった。		
	<ul> <li>● 硫酸塩還元菌により地下水中のSO₄²がすべてHS⁻/S²に還元され、そのHS⁻/S²</li> </ul>		
	が緩衝材中を拡散しOPと反応することを想定した。		
	● 単純化のため円筒座標系における一次元定常拡散を仮定し、単位時間、単位		
	長さあたりのHS/S ² の定常状態での供給量Jは以下の式により表される。		
	$J = 2 \pi D(C_1 - C_0) / \ln(r1 / r0)$		
	ここで、C ₀ :緩衝材内面の HS ⁻ /S ² 濃度		
	C ₁ :緩衝材外面の HS ⁻ /S ² 濃度		
	D:緩衝材中の HS [:] /S ² の拡散係数		
	r ₀ :中心軸から緩衝材内側までの距離		
	r1:中心軸から緩衝材外側までの距離		
	● この式から1,000年間のOP表面へのHS [·] /S ² の供給量を求め、FeSとしての腐		
0	食を仮定し、半均腐食深さに換算した結果0.02 mmとなった。		
パラメータの			
階層関係	2 □緩衝材の初期(製造時)の乾燥密度		
	3 └OP 表面の菌数		
	4 └HS ⁻ /S ²⁻ 供給量		

	5 山地下水中の SO4 ²⁻ が微生物により還元された後の緩衝材内外面 HS ⁻ /S ²⁻ 濃度
	6 └地下水中の SO4 ²⁻ が微生物により還元された後の緩衝材中 HS ⁻ /S ²⁻ 拡散係数
	7 └緩衝材内側および外側から OP 中心軸までの距離
	8 └平均腐食深さ
取得の対象と	緩衝材の初期(製造時)の乾燥密度、OP 表面の菌数、地下水中の SO4 ²⁻ が微生物に
なる最下層の	より還元された後の緩衝材内外面 HS ⁻ /S ²⁻ 濃度、地下水中の SO4 ²⁻ が微生物により還元さ
パラメータ	れた後の緩衝材中 HS ⁻ /S ² -拡散係数、緩衝材内側および外側から OP 中心軸までの
	距離、平均腐食深さ
参考文献	● 包括的技術報告書本編 4.4
	● 包括的技術報告書本編 表4.4-1
	● 包括的技術報告書 付属書4-4
	● 包括的技術報告書 付属書4-9

付表 2-9 (オ-1-5)オーバーパックの耐食性(溶接欠陥の構造健全性への影響)の調査結果

ID	オ-1-⑤ 対象となる構成要素 OP		
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触の防止		
整理対象	耐食性		
内容	埋設後の所定の期間、腐食によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能		
	が損なわれないこと		
検討項目	溶接欠陥の構造健全性への影響		
検討方法	【溶接部の腐食代への許容欠陥寸法を設定し、許容欠陥寸法分の厚さを溶接部の腐食代		
	に加算する。】		
	溶接欠陥が構造健全性に与える影響を評価し、溶接部の必要腐食代でない部分		
	に許容できる欠陥の寸法を見積もった。		
	1. 破壊靱性値、引張残留応力及び限界亀裂寸法の関係		
	「応力腐食割れ、水素脆化割れの評価」と同じ		
	2. OPの静的破壊靭性値		
	<ul> <li>● 静的破壊靱性値K₁c (MPa m⁰⁵) は、最も脆い傾向にある</li> </ul>		
	電子ビーム溶接部において、最低100 MPa m ⁰⁵ と測定され		
	ている。これに対して、OPの埋設後長期における破壊靱性		
	値の低下の懸念として、水素脆化及び照射脆化が考えられ		
	る。		
	● 水素脆化を保守的に考慮した場合には、静的破壊靭性値は最		
	低71 MPa m 05と評価されている。		
	● 照射脆化は保守的に計算しても無視できるレベルである。な		
	お、脆化量は照射速度などの依存性がある。		
	3. 許容欠陥寸法の評価		
	<ul> <li>● 埋設後1,000年後の静的破壊靭性値が60 MPa m⁰⁵に低</li> </ul>		
	下し、溶接部の後熱処理後も保守的に、必要腐食代でな		
	い部分において200 MPa残留していると仮定する。こ		
	の場合の限界亀裂寸法は55 mm程度と判断することが		
	できる。		
パラメータの階層	1 溶接欠陥の構造健全性への影響		
関係	2 └破壊靭性値(「オ-1-③ 耐食性」に同じ)		
	3 └応力腐食割れ		
	4 └材料条件		
	5 └環境条件		
	6 └pH		
	7 □ □炭酸化学種濃度		
	8		
	<b>9</b>		
	10 └引張残留応力		
	11 上応力拡大係数		
	12 └水素脆化割れ		
	13 └材料条件		

	14 └環境条件
	15 ^L 材料 (OP) の降伏強度
	16 上拡散性水素濃度
	17 上応力条件
	18 └引張残留応力(「オ-1-③ 耐食性」に同じ)
	3 「応力腐食割れ
	4 └材料条件
	5 └環境条件
	6 └pH
	7 └炭酸化学種濃度
	8
	9 — — — — — — — — — — — — — — — — — — —
	10 上引張残留応力
	11 上応力拡大係数
	12 山水素脆化割れ
	13 └材料条件
	14 └環境条件
	15 ^L 材料 (OP) の降伏強度
	16 └拡散性水素濃度
	17 上応力条件
	19 └ (中性子) 照射速度
	20 └静的破壞靱性値
	21 └限界亀裂寸法
取得の対象となる	pH、炭酸化学種濃度、亀裂寸法、引張残留応力、応力拡大係数、材料(OP)
最下層のパラメー	の降伏強度、拡散性水素濃度、(中性子)照射速度、限界亀裂寸法
Я Я	
参考文献	● 包括的技術報告書本編 4.4
	● 包括的技術報告書本編 表4.4-1
	● 包括的技術報告書 付属書4-4
	● 包括的技術報告書 付属書4-12

ID	オ-1-⑥	対象となる構成要素	OP
対応する安全機能	廃棄体と地下	水の接触の防止	
整理対象	耐食性		
内容	埋設後の所定	の期間、腐食によって廃棄	棄体と地下水の接触を防止する安全機能
	が損なわれな	いこと	
検討事項	廃棄体の発熱は	こ伴う温度変化	
検討方法	【廃棄体の発	熱に伴う温度変化による	耐食性への影響】
	● 経時的な	は温度条件の変化を考慮し	、保守側の温度条件となるように考慮し
	て耐食性	この評価を行う。	
	● 緩衝材の	)変質を防ぐ目的で設定さ	れた最高温度 100℃を上回らない範囲
	とする。		
パラメータの階層	1 廃棄体の	)発熱に伴う温度変化	
関係	2 └廃棄体	の発熱に伴う温度	
取得の対象となる	廃棄体の発熱に	こ伴う温度	
最下層のパラメー			
Þ			
参考文献	● 包括的技	反術報告書本編 4.4	
	● 包括的技	运術報告書本編 表4.4-1	
	● 包括的技	反術報告書 付属書4-4	

付表 2-10 (オ-1-⑥)オーバーパックの耐食性(廃棄体の発熱に伴う温度変化)の調査結果

付表 2-11 (オ-2)オーバーパックの構造健全性の調査結果

ID	オ-2	対象となる構成要素	OP		
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触の防止				
整理対象	構造健全性				
内容	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止				
	埋設後の所定	の期間、腐食によって廃棄	棄体と地下水の接触を防止する安全機能		
	が損なわれな	いこと			
検討事項	<b>OP</b> の耐圧代	OP の耐圧代			
検討方法	【静水圧、緩	【静水圧、緩衝材の膨潤圧を考慮して、耐圧設計を行う。また、偏膨潤による			
	偏圧を考慮して構造健全性評価を行う。】				
	1. OPに作	用する外圧			
	1.1 静水圧				
	<ul> <li>地下水静</li> </ul>	浄水圧(MPa)は、深成岩舞	領及び先新第三紀堆積岩類に対しては処		
	分深度1	,000m、新第三紀堆積岩類	に対しては処分深度500mに対応するも		
	のとして	こ設定した。それぞれの静	水圧は9.8MPa、4.9MPaである。		
	1.2 緩衝材の	)膨潤圧			
	● 緩·6 物	理的緩衝性」と同じ			
	<ul> <li>● 新第三刹</li> <li>■ 新第三刹</li> </ul>	● 新第三紀堆積岩類については、1,000年間の岩盤クリープ変形量を第2次			
	取りまとめにおける岩盤クリープ解析結果を参考に20 mmと設定				
	2.1 平板の板岸(広部、 査部) ● 亚振の改善振興はいての主(記社・ 建乳相核の「DVE-2410 亚転の原本)				
	の規定」より、クラスMC容器の平板の必要板厚は以下の式(PVE-38)に				
		$t = d \sqrt{\frac{s_m}{s_{mc}}}$			
	ここで d : 平板の直径 [mm]、P : 最高使用圧力 [MPa]、				
	$S_{mc}$	:最高使用温度における発	電用原子力設備規格 材料規格のPart3		
		第1章 表3及び表5にて規	定する値(許容引張応力 S)の1.1倍と、表		
		6にて規定する値(設計路	≰伏点 Sy)の0.9倍のうち小さいほうの値		
		[MPa]			
	K	: 平板の取り付け方法によ	る係数(PVE-3410より)		
	※係	数Kは蓋板と胴本体との接合	状態によって決定するが, 今回想定した0P平		
	7	版取り付け構造に対応するKG	D値が定められていないため,最も保守的な		
		値である「その他」の場合の	0.5とした。		
	2.2 円筒部の	D板厚			
	● 円筒部0	D必要板厚tは以下の式(F	VE-5.4)による。		
		t=	<u>3PD₀</u>		
			4 <i>B</i>		
	Do:胴の外往		要における材料規格 Part3 第3章 図1		
	から図 20 ま	でにより求めた値、P:外	面に受ける最高の圧力 [MPa]		

	3. 溶接部の必要耐圧代
	● 設計・建設規格の「PVB-3115 純せん断荷重評価」に基づき、溶接部の必
	要耐圧代を設定した
	<ul> <li>● 供用状能∆における亚均壮ん断広力・け以下であることが定められてい</li> </ul>
	$\sim 0.00$ $\sim 0.00$ $\sim 0.0$
	$\tau \ge 0.6$ Sm = 62.7 MPa
	ここで、Sm: $Min(S \times 1.1, Sy \times 0.9) = Min(104.5, 145.8) = 104.5 MPa$
	S :許容引張応力(SF340A 100℃の場合95 MPa)
	Sy :設計降伏点(SF340A 100℃の場合162 MPa)
	<ul> <li>         平均せん断応力 τ は以下の通り計算される。     </li> </ul>
	$\tau = \mathbf{Q} \diagup \mathbf{A}$
	ここで、 Q:せん断力 [N]、A :断面積 [mm²]
	<ul> <li>溶接部の必要耐圧代をt [mm]とすると、断面積(溶接面)Aは、460πt</li> </ul>
	[mm²]と表され、上記の2式から t を求める。
	● なお、操業期間中にOPの吊り上げ荷重が負荷されるが、それによるせん断
	力は以下のとおり外圧によるせん断力よりも小さいので、溶接部の必要耐
	圧代は上記の外圧によるせん断力を用いて設定
パラメータの階層	1 <b>OP</b> の耐圧代
関係	2 └緩衝材の応力
	3 └緩衝材の初期(製造時)乾燥密度(有効粘土密度)
	4 └水の単位体積重量
	5 上庄密応力
	6 山北下水静水庄
	7 └(岩盤)クリープ変形量
	8 母材の必要耐圧代(必要板厚)
	9 「平板 (蓋部と底部を指す)の直径
	10 └半板の取り付け方法による係数
	11 - 円筒部の板厚
	13 「東高便用温度にわける材料規格 14 液境如の改善時に供
	10 - 平均セん)が応力 16 - 「- 本次の引張広力
	10 一計谷灯派心刀 17 上記卦欧伊占
	19 $\Box$ OPの断面積(溶接面)
取得の対象となる	緩衝材の初期(製造時)乾燥密度(有効粘土密度)、水の単位体積重量、圧
最下層のパラメー	密応力、地下水静水圧、(岩盤)クリープ変形量、平板の取り付け方法によ
	る係数、胴の外径、最高使用温度における材料規格、平均せん断応力、許容
<i>A</i>	引張応力、設計降伏点、せん断力、OPの断面積(溶接面)
参考文献	● 包括的技術報告書本編 4.4
	● 包括的技術報告書本編 表4.4-1
	● 包括的技術報告書 付属書4-4
	● 包括的技術報告書 付属書4-5
	● 包括的技術報告書 付属書4-10
	● 包括的技術報告書 付属書4-16

付表 2-12 (オ-3) オーバーパックの耐食性に対する放射線影響の抑制に関する調査結果

ID	オ-3     対象となる構成要素     OP		
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触の防止		
整理対象	耐食性に対する放射線影響の抑制		
内容	埋設後の所定の期間、腐食によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能		
	が損なわれないこと		
検討事項	耐食性に対する放射線影響の抑制		
検討方法	【地下水の放射線分解によって発生する酸化性化学種が腐食挙動に顕著に影響を与え		
	ないように、OP に遮蔽厚さを設けることなどにより、放射線による腐食影響に対処す		
	る。 】		
	● 3~500 Gy/hのγ線照射環境下で、低酸素環境における人工海水中及び人		
	工海水で飽和させた圧縮ベントナイト中の腐食試験が行われている。		
	● 人工海水中では吸収線量率が低くなるにつれ腐食の加速比率が小さくな		
	り、3 Gy/h程度で加速がほとんど無くなること、人工海水で飽和した圧縮		
	ベントナイト中ではいずれの吸収線量率においても加速がないことが示		
	されている。		
	● OP厚さをパラメータとしたOP表面における水の吸収線量率を、遮蔽解析		
	により求め、3 Gy/h以下となるための遮蔽代を評価		
	<ul> <li>● 遮蔽解析には以下の解析コードを使用した</li> </ul>		
	▶ 解析コード: MCNP5(三次元連続エネルギーモンテカルロ法)		
	▶ 核データライブラリ: ENDF/B-VI (MCNP5に付属)		
	● 解析モデルは以下の通り		
	深成岩類中に処分孔竪置き定置方式で廃棄体を定置した場合を想定		
	して、緩衝材周囲の側部及び底部には花崗岩が存在し、緩衝材上部に		
	は埋め戻し材が存在するものとした		
	> OPなどは健全な状態を想定した		
	▶ OPの遮蔽代は、50 mm刻みで50~200 mmの4 種類とした		
	▶ カフス固化体部分の形状・寸法は、若移はかの計算モアルに倣った		
	▶ 埋め戻し材の厚みは1,000 mmとし、組成は緩衝材と同じ組成とした		
	● 解析条件は以下の通り		
	<ul> <li>              カフス固化体のγ線源強度分布は包括的技術報告書             付属書2-3の値      </li> </ul>		
	を用いた		
	▶ カフス回化体の組成は右杉はかを用いた。 ▶ OPの対撃は出き網でなるが、Cなどの独身に会される二書は韶振し無		
	▶ OPの材料は灰茶動であるか、Oなどの做重に含まれる元素は脾析上無 担し、知識は純粋しした		
	・ 四級山区」 くのる。 $\chi_{a}(2) \chi_{y}(a) \phi(a) \phi(a) \phi(a)$ の水の吸収線量率け 水の質量エネルギー吸		
パラメータの階層	1         耐食性に対する放射線影響の抑制		

関係	2 └γ線による水の吸収線量率
	3 └緩衝材(飽和状態)の密度
	4 └緩衝材(飽和状態)の組成
	5 └岩盤の密度
	6 └岩盤の組成
	7 └吸収線量率への換算係数
取得の対象となる	γ線による水の吸収線量率、緩衝材(飽和状態)の密度、緩衝材(飽和状態)
最下層のパラメー	の組成、岩盤の密度、岩盤の組成、吸収線量率への換算係数
タ	
参考文献	● 包括的技術報告書本編 4.4
	● 包括的技術報告書本編 表4.4-1
	● 包括的技術報告書 付属書4-11
	● 若杉圭一郎、宮原要、牧野仁史、石黒勝彦、澤村英範、根山敦史、西村和
	哉(2003):ガラス固化体からの放射線量に関する検討(研究報告)、JNC
	TN8400 2003-022.

付表 2-13	(才-4)	緩衝材の偏膨潤な	どに対す	る構造健全性に関す	る調査結果
---------	-------	----------	------	-----------	-------

ID	オ-4	対象となる構成要素	OP
対応する安全機能	廃棄体と地下	水の接触の防止	
整理対象	緩衝材の偏	「膨潤などに対する構成	告健全性
内容	埋設後の所定	この期間、腐食によって廃棄	案体と地下水の接触を防止する安全機能
	が損なわれな	いこと	
検討事項	膨潤圧の作用	]	
検討方法	【不均質な言	含水による緩衝材の偏膨潤	や局所的な腐食膨張の偏りにより生じ
	る不均一な荷	「重により、構造健全性が	損なわれないこと】
	● 緩衝材の	D偏膨潤やOPの腐食膨張	の局所的な偏りによって不均一な荷重
	(偏圧)	が作用することを想定す	るものである。
	● 偏圧係数	女K をパラメータとした有	限要素法解析を行い、OPが過大に変形
	するとう	予想される荷重Pを算出し	た(解析モデルは第2次取りまとめ 図
	4.1.1-22	に記載されているが、パラ	ラメータの詳細は記載されていない)
	● OPに対	して極端な不均一荷重を仮	反定したとしても、塑性化する領域はOP
	内面から	o外面まで連結しないとい	う評価結果が得られている。
パラメータの階層	1 膨潤圧の	)作用	
関係	2 └荷重		
	3 └偏日	E係数	
取得の対象となる	偏圧係数		
最下層のパラメー			
<i>9</i>			
参考文献	<ul> <li>● 包括的技</li> </ul>	技術報告書本編 4.4	
	<ul> <li>● 包括的技</li> </ul>	友術報告書 表4.4-2	
	● JNC(核	を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	分の技術的信頼性-地層処	会研究開発第2次取りまとめー分冊 2
	地層処分	うの工学技術,JNC TN14	00 99-022, 1999

付表 2-14 (オ-5)オーバーパックの溶接欠陥対する	)構造健全性に関する調査結果
------------------------------	----------------

ID	オ-5	対象となる構成要素	OP
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触の防止		
整理対象	溶接欠陥に対する構造健全性		
内容	埋設後の所定の期間、腐食によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能		
	が損なわれな	いこと	
検討事項	溶接欠陥		
検討方法	【溶接欠陥の存在により、溶接部の構造健全性が損なわれないこと】		
	● 溶接残留	]応力やOP作用する外力を	と考慮して、溶接欠陥が構造健全性に与
	える影響	<b>撃を評価し、溶接部の必要</b> 様	虏食代でない部分に許容できる欠陥の寸
	法を見積	<b>ぎ</b> る。	
	<ul> <li>● 詳細は</li> </ul>	OP-1-5「耐食性 溶接欠陥	の構造健全性への影響」
パラメータの階層	1 溶接欠陥	るの構造健全性への影響	
関係	2 └破壊戦	9性値(「オ・1・③ 耐食性	」に同じ)
	3 「応力	」腐食割れ	
	4 上标	†料条件	
	5 └璟	環境条件	
	6	-рН	
	7	-炭酸化学種濃度	
	8 └応	5力条件	
	9	-亀裂寸法	
	10	-引張残留応力	
	11	-応力拡大係数	
	12 上水素瓶	も化割れ	
	13 └材料	ŀ条件	
	14 └境境		
	15 -校	「料(OP)の降伏強度	
		【散性水素濃度 - タ 仙	
	17 5心人		
	18 51 張歿		性」に同し)
		服民制化	
	4 72		
		。現本計 -nH	
	0 7 L	pH 	
	/   & └☆	次酸化子僅嚴及 5 力 条 件	
	9	-亀裂寸法	
	10 L	-引張残留応力	
	11 L	-応力拡大係数	
	12 └水素賄	自化割れ	
	13 └材彩	<b> </b> 条件	
	14 └環境	6条件	

	15 ^L 材料 (OP) の降伏強度
	16 └拡散性水素濃度
	17 上応力条件
	19 └ (中性子) 照射速度
	20 └静的破壊靱性値
	21 □限界亀裂寸法
取得の対象となる	pH、炭酸化学種濃度、亀裂寸法、引張残留応力、応力拡大係数、材料(OP)
最下層のパラメー	の降伏強度、拡散性水素濃度、(中性子)照射速度、限界亀裂寸法
タ	
参考文献	● 包括的技術報告書本編 4.4
	● 包括的技術報告書 表4.4-2
	● 包括的技術報告書 付属書4-12

付表 2-15 (オ-6)オーバーバックの地震動に対する構成	造健全性に関する調査結果
--------------------------------	--------------

ID	才-6	対象となる構成要素	OP	
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触の防止			
整理対象	地震動に対する構造健全性			
内容	埋設後の所定の期間、腐食によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能			
	が損なわれないこと			
検討事項	地震動			
検討方法	【大規模な地震動に対しても、構造健全性が損なわれないこと】			
	● 人工バリ	ア全体で健全性の評価を	行っており、国内最大級の地震動を想定	
	した場合においても、OPに作用する荷重は降伏応力の 1/100 程度と十分			
	に小さく、巨大な地震動を考慮してもOPは破壊には至らない			
	● 緩-8「地	震動に対する力学的安定	生」と同じ	
パラメータの階層	1 緩衝材の	破壊接近度および OP の N	Mises 応力	
関係	2 ^L OP の	材料定数		
	3 └密度	F .		
	4 └弾性	<b>长係数</b>		
	5 レポア	イソン比		
	6 └降伊	6 └降伏応力		
	7 └ガラス固化体の材料定数			
	8			
	9 └弾性係数			
	10 レポア	10 「ホアソン比 11 地路の 北北字教		
	11 地盤の杉	<b>打料定数</b>		
	12 └密度	F 2		
	13 「弾性	E係数		
	14 -せん	)断弹性係数		
	15 Lホア	ソン比		
		表定数 79度按 4		
	17 □ 八音   10   ½L音	1) 学 擦 用		
	18 ^上 祏看	「ノ」		
	19 一版倒化	100村村庄剱		
	20 - 配湯	R 田 皮		
	21 间隙 99 上正兹			
	22 /⊥州 93 └膨涠	11日女		
	23 版件 94 └硝树	山奴		
	24 FL 25 Lポア	マンド		
	26 └限界	2、12		
	27 L内音	·····································		
		F E 密降伏応力		
	29 └材彩	定数(下負荷面モデル周	有のパラメータ)	
	30 □回載	云硬化限界面の定数 一		

	31 「回転硬化発展則の定数
	32 上透水係数
	以下は解析の結果得られるパラメータ
	33 牡鹿波・伯太波
	34 └速度応答スペクトル
	35 └強震記録波形
	36 「耐専波・牡鹿波・伯太波における水平変位
	37 └緩衝材の体積ひずみ
	38 └緩衝材の過剰間隙水圧
	39 「緩衝材の破壊接近度の最大応答値
	40 └OP の降伏応力
取得の対象となる	(OP の)密度、 (OP の)弾性係数、 (OP の)ポアソン比、 (OP の)降伏
最下層のパラメー	応力、(ガラス固化体の)密度、(ガラス固化体の)弾性係数、(ガラス固化
Þ	体の)ポアソン比、(地盤の)弾性係数、(地盤の)密度、(地盤の)せん断
	弾性係数、(地盤の)ポアソン比、(地盤の)減衰定数、(地盤の)内部摩擦
	角、(地盤の)粘着力、(緩衝材の)乾燥密度、(緩衝材の)間隙比、(緩衝
	材の)圧縮指数、(緩衝材の)膨潤指数、(緩衝材の)弾性係数、(緩衝材の)
	ポアソン比、(緩衝材の)限界状態応力比、(緩衝材の)内部摩擦角、(緩衝
	材の)先行圧密降伏応力、(緩衝材の)材料定数、(緩衝材の)回転硬化限界
	面の定数、(緩衝材の)回転硬化発展則の定数、(緩衝材の)透水係数、速度
	応答スペクトル、強震記録波形、耐専波・牡鹿波・伯太波における水平変位、
	緩衝材の体積ひずみ、緩衝材の過剰間隙水圧、緩衝材の破壊接近度の最大応答
	値、OPの降伏応力
参考文献	● 包括的技術報告書 4.4
	● 包括的技術報告書 表4.4-2
	● 包括的技術報告書 付属書4-12
	● 山本陽一、鈴木覚、佐藤伸、伊藤浩二(2015): 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.

付表 2-16 (オ-7)オーバー	-バックの腐食生成物間隙水水質に関す	る調査結果
-------------------	--------------------	-------

ID	オ-7	対応となる構成要素	ОР	
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触防止			
整理対象	腐食生成物間隙水水質			
(状態変数)				
内容	OPの腐食に関して、液相の水質や共存する固相の影響を受けて生成する二次鉱物			
	や保護被膜の安定性などにより、腐食反応が変化する。「腐食生成物間隙水水質」			
	の影響として以下がある。			
	● 緩衝材中	● 緩衝材中、人工海水や高炭酸溶液の浸漬試験では、シデライト(FeCO ₃ )また		
	はFe2(O	H) ₂ CO ₃ のような炭酸塩を	含むFe(Ⅱ)の腐食生成物が同定されたの	
	に対し、	人工淡水における浸漬試験	では、3年間まではシデライトのみであった	
	が、10年	間ではマグネタイト(Fe ₃ O ₄ )	のピークが観察され、シデライトのピークは	
	見られな	かった。		
	● その他の	影響として、極低溶存酸素	条件では炭素鋼が局部腐食を起こさないと	
	ある。			
指標(統合 FEP)	11.熱プロセン	ス		
現象解析	基本シナリ	オにおいては、本 FEP (	こ係る処分場の熱的変遷は腐食生成物の	
	間隙水質を想	間隙水質を想定する上で考慮される。		
	OPの表面温度は埋設後数十年以内に最高 90℃付近まで上昇するが、その後			
	低下して、1,000 年後には深成岩で約 60℃、新第三紀堆積岩類で約 40℃とな			
	り、更に地温まで低下する。この条件では、ベントナイトは長期的に安定であ			
	り、ほぼ一定	の間隙水水質で推移する	ことが想定されるので、OP の腐食環境	
	としての間隙	秋水質に大きな変化はな	い。(付属書 4-39)	
	上記の熱伝	、導解析は解析コード「CO]	MSOL Multiphysics ver5.2a (COMSOL	
	AB)」が用い	いられた。熱伝導解析に用い	いた OP の物性値は日本機械学会に基づ	
	き 300K での	炭素鋼の値を設定した。		
	熱伝導率λ	: 51.6 [W/m K]		
	比熱 c: 0	.47 [kJ/kgK]		
	密度 $\rho$ : 7.86 [Mg/m ³ ]			
	なお、解析モデルの詳細(処分深度、各人工バリアの寸法)は包括的技術報			
	告書 付属書 4-39 図 3 及び図 4 にまとめられている。解析に用いた詳細条件			
	の記載は参考	文献を含めて記載はなか	った。	
パラメータの階層	1 OP の表	面温度		
関係	$2  \Box OP \mathcal{O}$	物性値		
	3 └熱位	<b>云</b> 導率		
		ą -		
		は国化体の発熱量		
	7 「処分符	天医		
		Nリナ の谷狸 寸仏 の内原		
	ןט ⊂OP	v)内字 Sttの回々		
	10 └───────────────────────────────────	「Nの厚さ		

	11 ^L 埋め戻し材の厚さ
	12 └吹付けコンクリートの厚さ
取得の対象となる	(OPの)熱伝導率、(OPの)比熱、(OPの)密度、ガラス固化体の発熱量、
最下層のパラメー	処分深度、OP の肉厚、緩衝材の厚さ、埋め戻し材の厚さ、吹付けコンクリー
タ	トの厚さ
指標(統合 FEP)	12.再冠水/脱飽和
現象解析	再冠水時の残存酸素の消費は、基本シナリオ上の腐食が関与する水質形成の
	前段プロセスであり、酸素による腐食メカニズムとして考慮する。
	緩衝材や埋め戻し材中に残留した酸素は浸潤してきた地下水に溶解し、緩衝材
	中のパイライトや鉄・腐食生成物に消費され、還元性の間隙水が形成される。設計上
	は、保守的に残存酸素のすべてが鉄と反応したとして腐食代を設定している。評価
	方法は「オー1-①」参照。
パラメータの階層	13 残存酸素量における腐食(オ-1-①「残存酸素量における腐食」に同じ)
関係	14 └緩衝材などの間隙に存在する酸素量
	15 「緩衝材及び埋め戻し材の間隙率
	16 「緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積
	17 「空気中の酸素の体積割合
	18 「ベントナイトに吸着している酸素量
	19 └OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量
	20 └平均腐食深さ
	21
	22 「最大腐食深さ
取得の対象となる	緩衝材の間隙における標準状態の酸素のモル体積、空気中の酸素の体積割合、
最下層のパラメー	ベントナイトに吸着している酸素量、OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の
	体積量、平均腐食深さ、最大腐食深さ
指標(統合 FEP)	15. 水化子
現象解析	基本シナリオでは、緩衝材と反応して浸透してきた中性から弱アルカリ性の地下水
	水質を前提とし、還元環境下での全面腐食が緩慢に進行するものとしている。
	地下水が緩衝材と反応し、腐食生成物を介してOPと接する。初期の残存酸素は、
	緩衝材中のパイライトやOPの腐食時に消費されて負の酸化還元電位(Eh)を有する
	低酸素濃度の間隙水環境(以下、「低酸素環境」と言う)となる。低酸素環境の間隙
	水水質においては、OPは緩慢な全面腐食が進行する領域にある。
パフメータの階層	23 地下小が被倒材と反応し、腐食生成物を介してOPと接触 24 「地下水組成および濃度
	25 └残存酸素量
	26 「低酸素環境における腐食生成物間隙水水質
取得の対象となる	地下水組成および濃度、残存酸素量、低酸素環境における腐食生成物間隙水水
最下層のパラメー	
タ	
指標(統合 FEP)	16.腐食/18.溶解/19. 沈殿反応/20.化学的性質
現象解析	基本シナリオにおいては、閉鎖後、残存酸素による腐食を経て速やかに還元性
	芬囲気か形成され、遠元性雰囲気での全面腐食が緩慢に進行することを想定す   ス
	● 地下水が緩衝材と反応し、腐食生成物を介してOPと接する。地下水中の初

	期の残存酸素は、緩衝材中のパイライトやOPの鉄及びその腐食生成物と 反応して消費される。溶存炭酸イオン濃度はSCCを誘引する濃度よりも十 分に低い。長期的には、地下水、緩衝材、鉄腐食生成物の反応で形成され る低酸素環境の間隙水中で緩慢な全面腐食が進行する。 ● 低酸素環境中の固相表面では、Fe(OH)₂を経て Fe ₃ O₄が生成するが、炭酸			
	イオンの存在下では FeCO3またはFe2(OH)2CO3が支配的な固相となる。			
	● OP表面に接触する緩衝材中の間隙水のpHが10.5 を超えると不動態化が 起こって局部庭食のⅡスクが生じるが、セメント影響などの高pH間隙水			
	が緩衝材中に浸潤しても、緩衝材などとの反応によりその影響は限定的な			
	ものとなる			
パラメータの階層	27 還元性雰囲気での緩慢な全面腐食			
関係	28 一残仔飯糸里 $(4 - 1 - 2)$   耐良性」に同し) 99 「任酸素環境におけろ腐食			
	30 [∟] 地下水組成及び濃度			
	31 └平均腐食速度			
	32 上実機推定最大腐食深さ			
	33 「Gumbel 分布の累積分布関数の位置パラメータ(最頻値)			
	34 └Gumbel 分布の累積分布関数の尺度パラメータ			
	30     -Or の衣面積       36     □腐食試験に用いた試験片の面積			
	36 - 腐 () 試験に用いた試験月 () 面積 97 - L/ご 話家			
	- 37 □ ¹			
	$39  ext{LpH}$			
取得の対象となる	Gumbel 分布の累積分布関数の位置パラメータ(最頻値)、Gumbel 分布の累			
最下層のパラメー	積分布関数の尺度パラメータ、OPの表面積、腐食試験に用いた試験片の面積、			
<i>y</i>	信頼率、溶存炭酸イオン濃度、pH			
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-6 3.3			
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 2			
	包括的技術報告書 付属書 4-7			
	包括的技術報告書 付属書 4-8			
	包括的技術報告書 付属書 4-14			
	包括的技術報告書 付属書 4-15			
	包括的技術報告書 付属書 4-39			
	包括的技術報告書 付属書 4-40			

ID	オ-8     対応となる構成要素     OP		
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触防止		
整理対象	温度		
(状態変数)			
内容	付属書6-6などを確認したが特に記載がない。		
指標(統合 FEP)	11.熱プロセス		
現象解析	基本シナリオでは、下記の設計上の設定に基づいた OP 表面温度を考慮し、		
	腐食速度の評価を行う。		
	OPの表面温度は埋設後数十年以内に最高 90℃付近まで上昇するが、その後		
	低下して、1,000 年後には深成岩で約 60℃、新第三紀堆積岩類で約 40℃とな		
	り、更に地温まで低下する。この温度領域で炭素鋼の腐食速度に顕著な変化は		
	ないことが知られている。(付属書 4-39)		
	上記の熱伝導解析は「オ-7 11. 熱プロセス」と同じ。		
	また、谷口らにより 50℃及び 80℃における 0.25~10 年間の腐食試験 (浸漬		
	試験)が実施された。試験の結果、温度の低い条件のほうが明らかに腐食量は		
	小さいものの、腐食進展の抑制は小さく、10 年後腐食量は 50℃と 80℃でほぼ		
	同程度となった。平均腐食速度はいずれも時間とともに低下する傾向があっ		
	た。詳細な実験手順は谷口ら(2008年)「2.2実験手順」参照(原子力機構、		
	2008)。		
パラメータの階層	1 OP の表面温度(解析) (オ-7 に同じ)		
関係	2 └OP の物性値		
	3 └熱伝導率		
	4 └比熱		
	5 └密度		
	6 ^L ガラス固化体の発熱量		
	7 └処分深度		
	8 「人工バリアの各種寸法		
	9 └OP の肉厚		
	10 └緩衝材の厚さ		
	11 「埋め戻し材の厚さ」		
	12 └ 吹付けコンクリートの厚さ		
	13 OPの表面温度(試験)		
	14 └浸漬試験に用いた試験溶液(人工海水、高炭酸水・高塩化物水溶液、低炭		
	酸水・低塩化物水溶液)の組成、濃度		
	15 └地温を想定した試験温度(50℃、80℃)		
	16 └緩衝材仕様(乾燥密度、ケイ砂混合率)		
	17 └雰囲気(窒素、大気)		
取得の対象となる	(OP の) 熱伝導率、(OP の) 比熱、(OP の) 密度、ガラス固化体の発熱量、		
最下層のパラメー	処分深度、OP の肉厚、緩衝材の厚さ、埋め戻し材の厚さ、吹付けコンクリー		

付表 2-17 (オ-8) オーバーパックの温度に関する調査結果

Я	トの厚さ、浸漬試験に用いた試験溶液(人工海水、高炭酸水・高塩化物水溶液、
	低炭酸水-低塩化物水溶液)の組成、濃度、地温を想定した試験温度(50℃、
	80℃)、緩衝材仕様(乾燥密度、ケイ砂混合率)、雰囲気(窒素、大気)
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-6 3.3
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 2
	包括的技術報告書 付属書 4-7
	包括的技術報告書 付属書 4-39
	包括的技術報告書 付属書 4-40
	原子力機構,緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討 I ―10 年間の
	浸漬試験結果に基づく腐食進展挙動の検討一,2008年.

ID	才-9	対応となる構成要	素	OP
対応する安全機能	廃棄体と地下	水の接触防止		
整理対象	応力			
(状態変数)				
内容	ガラス固化体	に地下水が接触する	らに至る	OPの破損については、水圧や地圧、膨潤
	圧などの「応力	り」が関係する。応力	に影響	ずるものとしては、水圧や地圧、膨潤圧の
	ほか、ガス圧、	腐食による体積膨弛	長などが	ある。
指標(統合 FEP)	12.再冠水/月	兑飽和		
現象解析	再冠水によ	る応力負荷の進行	は、基	本シナリオにおける状態変遷の前段プロ
	セスとして考	慮する。		
	地下水の緩	衝材への浸潤やそ	れに伴	う緩衝材の膨潤が進むに従って、緩衝材
	の膨潤圧、地	1下水の静水圧が徐	々に0	Pに負荷するようになる。
パラメータの階層	1 緩衝材の	)膨潤による OP へ	の負荷	
関係	2 └緩衝杉	†の膨潤圧		
	3	くの静水圧		
取得の対象となる	緩衝材の膨潤	圧、地下水の静水	圧	
最下層のパラメー				
タ				
参考文献	包括的技術報	告書 付属書 6-6	3.3	
	包括的技術報	告書 付属書 6-9	表 2	

付表 2-18 (オ-9)オーバーパックの応力に関する調査結果

ID	才-10	対応となる構成要素	OP
対応する安全機	廃棄体と地下れ	水の接触防止	
能			
整理対象	鉄表面の状態		
(状態変数)			
内容	実際の OP の履	腐食に関して、液相の水質	(「腐食生成物間隙水水質」)や共存す
	る固相の影響を	を受けて生成する二次鉱物	や保護皮膜の安定性(「鉄表面の状態」)
	などにより、履	腐食反応が変化する。	
指標(統合 FEP)	11.熱プロセス		
現象解析	基本シナリオ	では、下記の設計上の設定	に基づいた OP 表面温度を考慮し、腐食
	速度の評価を行	亍う。	
	OP の表面温厚	度は埋設後数十年以内に最	高 90℃付近まで上昇するが、その後低
	下して、1,000	年後には深成岩で約 60℃	こ、新第三紀堆積岩類で約 40℃となり、
	更に地温まで低	低下する。この温度領域で	炭素鋼の腐食速度に顕著な変化はないこ
	とが知られてい	いる。	
	上記の熱伝導解	<b>裈析、浸漬試験結果は「オ</b>	·7 11. 熱プロセス」と同じ。
パラメータの階	1 OP の表面	「温度(オ-8 FEP11. 熱	プロセス」と同じ)
層関係	2 └OP の物	加性值	
	3 └熱伝導	率	
	4 └比熱		
	5 └密度		
	6 └ガラス[	固化体の発熱量	
	7 └処分深月	<b></b>	
	8 「人工バ	リアの各種寸法	
	9 $\Box OP \sigma$	D肉厚	
	10 └緩衝材	材の厚さ	
	11 「埋め」	<b>戻し材の厚さ</b>	
	12 └吹付は	ナコンクリートの厚さ	
	13 OP の表面	<b>「温度(試験)</b>	
	14 └浸漬試験	験に用いた試験溶液(人工	[海水、高炭酸水·高塩化物水溶液、低炭
	酸水-低塩化物	水溶液)の組成、濃度	
	15 └地温を想	想定した試験温度(50℃、	80°C)
	16 「緩衝材化	士様(乾燥密度、ケイ砂浜	合率)、
	17 □雰囲気	(窒素、大気)	
取得の対象とな	(OPの) 熱伝	、導率、(OPの)比熱、	(OPの)密度、ガフス固化体の発熱量、
る最下層のパフ	処分深度、OP	の肉厚、緩衝材の厚さ、	理め戻し材の厚さ、吹付けコンクリート
メーダ	の厚さ、浸頂詞	、 既に用いた試験浴液(人₂	上海水、局灰酸水・局塩化物水溶液、低灰
	◎ 飯小 105塩112物		温価を忍止した武鞅価度(500、800)、 
上 些 一 ( な へ FFP)	阪側竹仙体(早	4)深省皮、ワイ (0)低合平) 	、分四风 (至糸、八风)
1日伝(配百 <b>FEF</b> ) 	10. 谷砳の发 * FFD は 世	レー・オンナリナマシンティー・	~ の名共亡ものプロセラし」 イギ虐キム
児豕脌忉	平 F E P は、基	キンテリオにおける OP	「「「貝何応力のノロセスとして考慮され

付表 2-19 (オ-10)オーバーパックの鉄表面の状態に関する調査結果

	న్,
	OP に負荷する応力(緩衝材の膨潤圧、地下水の静水圧、岩盤のクリープ変形や
	容器の腐食膨張による緩衝材の圧密応力)を考慮して、OP の耐圧設計がなされ
	ている。圧縮した緩衝材中の炭素鋼の腐食試験において、緩慢な全面腐食が観察
	されており、表面状態及び鉄腐食速度への影響は無視できるものと考えられる。
	OP に自荷する広力のうち 緩衝材の膨潤圧 地下水の静水圧はオ-2「OP の耐
	F代」及び経-G「物理的経衛性」にそれぞれまとめた ここでけ「岩般のクリー
	プ変形や突哭の庭食膨脹による経衛材の圧容広力」についてまとめる
	腐民膨張脾例では、OFの腐民膨張による応力の増加に対しても被関的が破壊に 至さず OP な空空して主体できることな確認する
	土りり $OF$ を女圧して文付てきることを確認する。 廃金膨脹によれ $OP$ に佐田士で加力な出船なり、プの影響(新第三幻世辞出の相
	解析ゲースは地質環境モナル(保成岩類、新弗二紀堆積岩類)、人上ハリア方式
	(竪置き・フロック万式、横置き・PEM 万式)、地下水の水質(淡水、塩水)
	から選定して実施した(詳細は付属書 4-17 表 3)。
	解析コードは汎用非線形有限要素法解析コード Abaqus を使用した。
	岩盤及び人上パリアのそれそれの材料要素に適用した構成モアルと材料パフメ
	ータは、付属書 4-17 付録 B にまとめられている。
	OPの腐食膨張量は、腐食部の体積の3倍になると仮定した OPの腐食膨張量は、腐食部の体積の3倍になると仮定した
	OPの腐食量と緩衝材の変位量の関係、OPに作用する応力(OP上面・低面・側
	面に作用する接触圧「地下静水圧と緩衝材の応力の合計」)と腐食量の関係が示
	されている。
	さらに、設置から腐食膨張完了に至る緩衝材部分の破壊接近度の分布が示されて
	いる。破壊接近度とは、破壊接近度は応力比を限界状態応力比で除して正規化し
	たもので、0~1 の値を取り、1 に近いほど限界状態に近いことを表す指標であ
	る。 
	容器の腐食による減肉が進み、外圧に耐えられなくなった段階で容器の変形、破
	損に至るが、十分に裕度を持たせた肉厚が設定されているので、さまざまな不確
	実性を考慮しても破損まで少なくとも 1,000 年以上の期間を要する。オ-2「OP
	の耐圧代」を参照すること。
パラメータの階	18 OP に負荷する応力
層関係	19 「岩盤のクリープ変形や容器の腐食膨張による緩衝材の圧密応力
	20 └OP の腐食量
	21 「緩衝材の変位量
	22 「作用する接触圧(地下静水圧と緩衝材の応力の合計)
	23 山市静水庄
	24 「緩衝材の応力」
	25 └破壊接近度
	26 └OP の材料パラメータ
	27 └密度
	28 単性係数
	29 「ポアソン比
	30

31	└ガラス固化体の材料パラメータ
32	└密度
33	└弾性係数
34	Lポアソン比
35	└緩衝材の材料パラメータ
36	└砂混合率
37	└乾燥密度
38	└有効粘土密度
39	└土粒子密度
40	└初期間隙比
41	└圧縮指数
42	└膨潤指数
43	Lポアソン比
44	└限界状態応力比
45	└透水係数
46	└モデルパラメータ
47	└先行圧密応力
48	└初期有効応力
49	└初期静止土圧係数
50	└埋め戻し材の材料パラメータ
51	└砂混合率
52	└乾燥密度
53	└有効粘土密度
54	└土粒子密度
55	└初期間隙比
56	└圧縮指数
57	└膨潤指数
58	Lポアソン比
59	└限界状態応力比
60	└透水係数
61	└先行圧密応力
62	└初期有効応力
63	└初期静止土圧係数
64	└岩盤の物性パラメータ
65	└(深成岩類の場合)
66	└飽和密度
67	└弾性係数
68	レポアソン比
69	└粘着力
70	└内部摩擦角
71	└透水係数
72	└(新第三紀堆積岩類の場合)
73	└飽和密度

74 └弾性係数
75 「ポアソン比
76 └──軸圧縮強度
77 └引張強度
78 └延性パラメータ
79 「時間依存性パラメータ
80 「ピーク強度到達時間
81 レインバートの材料パラメータ
82 上設計基準強度
83 上単位体積重量
84
86 ^L ポアソン比
86 「透水係数
87 「吹付けコンクリートの材料パラメータ
89 上設計基準強度
89
90 └弾性係数
91 ^L ポアソン比
92透水係数
93 「緩衝材の応力と地下水静水圧の合計(緩・6「物理的緩衝性」に同じ)
94 └緩衝材の応力
95 └緩衝材の初期(製造時)乾燥密度
96 山水の単位体積重量
97
98 └地下水静水圧
<b>99 OP</b> の耐圧代(オ-2「 <b>OP</b> の耐圧代」に同じ)
100 └緩衝材の応力
101 └緩衝材の初期(製造時)乾燥密度(有効粘土密度)
102 山水の単位体積重量
103 └圧密応力
104 └地下水静水圧
105 └ (岩盤) クリープ変形量
106 母材の必要耐圧代(必要板厚)
107 └平板 (蓋部と底部を指す)の直径
108 「平板の取り付け方法による係数
109 └円筒部の板厚
110 └胴の外径
111 └最高使用温度における材料規格
112 溶接部の必要耐圧代
113 └平均せん断応力
114 └許容引張応力
115 └設計降伏点
116 └せん断力

	117 └OP の断面積(溶接面)
取得の対象とな	OPの腐食量、緩衝材の変位量、作用する接触圧(地下静水圧と緩衝材の応力の
る最下層のパラ	合計)、破壊接近度、(OPの)密度、(OPの)弾性係数、(OPの)ポアソン
メータ	比、(OPの)降伏応力、(ガラス固化体の)密度、(ガラス固化体の)弾性係
	数、(ガラス固化体の)ポアソン比、(緩衝材の)砂混合率、(緩衝材の)乾燥
	密度、(緩衝材の)有効粘土密度、(緩衝材の)土粒子密度、(緩衝材の)初期
	間隙比、(緩衝材の)圧縮指数、(緩衝材の)膨潤指数、(緩衝材の)ポアソン
	比、(緩衝材の)限界状態応力比、(緩衝材の)透水係数、(緩衝材の)モデル
	パラメータ、(緩衝材の)先行圧密応力、(緩衝材の)初期有効応力、(緩衝材
	の)初期静止土圧係数、(埋め戻し材の)砂混合率、(埋め戻し材の)乾燥密度、
	(埋め戻し材の)有効粘土密度、(埋め戻し材の)土粒子密度、(埋め戻し材の)
	初期間隙比、(埋め戻し材の)圧縮指数、(埋め戻し材の)膨潤指数、(埋め戻
	し材の)ポアソン比、(埋め戻し材の)限界状態応力比、(埋め戻し材の)透水
	係数、(埋め戻し材の)先行圧密応力、(埋め戻し材の)初期有効応力、(埋め
	戻し材の)初期静止土圧係数、(深成岩の)飽和密度、(深成岩の)弾性係数、
	(深成岩の)ポアソン比、(深成岩の)粘着力、(深成岩の)内部摩擦角、(深
	成岩の)透水係数、(新第三紀堆積岩の)飽和密度、(新第三紀堆積岩の)弾性
	係数、(新第三紀堆積岩の)ポアソン比、(新第三紀堆積岩の)一軸圧縮強度、
	(新第三紀堆積岩の)引張強度、(新第三紀堆積岩の)延性パラメータ、(新第
	三紀堆積岩の)時間依存性パラメータ、(新第三紀堆積岩の)ビーク強度到達時
	間、(吹付けコンクリートの)設計基準強度、(吹付けコンクリートの)単位体
	積重量、(吹付けコンクリートの)弾性係数、(吹付けコンクリートの)ボアソ
	ン比、(吹付けコンクリートの)透水係数、緩衝材の初期(製造時)乾燥密度、
	上密応力、地下水静水圧、緩衝材の初期(製造時)乾燥密度(有効粘土密度)、 たの逆にたまま見、医療広告、地工たわた医、(出航)を出、プ変形見、悪振の
	水の単位体積単重、圧密応力、地下水静水圧、(石盛)クリーク変形重、平板の
	取り付け力法による係数、胴の外径、東高使用温度にわける材料規格、平均せん 戦広力
指標(統合 FFP)	95 材料の休藉恋化
	25. 初村の仲積変に 本 FEP け其木シナリナにおける OP への負荷広力のプロセスとして考慮され
51357771	ス OPに負荷する広力(緩衝材の膨潤圧 地下水の静水圧 岩盤のクリープ変
	形や容器の腐食膨張による緩衝材の圧密応力)を考慮し、OPの耐圧設計がなさ
	れている。圧縮した緩衝材中の炭素鋼の腐食試験において、緩慢な全面腐食が観
	察されており、表面状態及び鉄腐食速度への影響は無視できると考えられる。
パラメータの階	18 OP に負荷する応力
層関係	19 「岩盤のクリープ変形や容器の腐食膨張による緩衝材の圧密応力
	20 └OP の腐食量
	21 「緩衝材の変位量
	22 「作用する接触圧(地下静水圧と緩衝材の応力の合計)
	23 └地下静水圧
	24
	25 上破壊接近度
	26 └OP の材料パラメータ

27	└密度
28	└弾性係数
29	└ポアソン比
30	└降伏応力
31	└ガラス固化体の材料パラメータ
32	└密度
33	└弾性係数
34	└ポアソン比
35	└緩衝材の材料パラメータ
36	└砂混合率
37	└乾燥密度
38	└有効粘土密度
39	└土粒子密度
40	└初期間隙比
41	└圧縮指数
42	└膨潤指数
43	└ポアソン比
44	└限界状態応力比
45	└透水係数
46	Lモデルパラメータ
47	└先行圧密応力
48	└初期有効応力
49	└初期静止土圧係数
50	└埋め戻し材の材料パラメータ
51	└砂混合率
52	└乾燥密度
53	└有効粘土密度
54	└土粒子密度
55	└初期間隙比
56	└圧縮指数
57	└膨潤指数
58	^L ポアソン比
59	└限界状態応力比
60	└透水係数
61	└先行圧密応力
62	└初期有効応力
63	└初期静止土圧係数
64	└岩盤の物性パラメータ
65	└(深成岩類の場合)
66	└飽和密度
67	└弾性係数
68	Lポアソン比
69	└粘着力

70 └内部摩擦角
71 └透水係数
72 「(新第三紀堆積岩類の場合)
73 └飽和密度
74 └弾性係数
75 「ポアソン比
76 └一軸圧縮強度
77 └引張強度
78 └延性パラメータ
79 「時間依存性パラメータ
80 「ピーク強度到達時間
81
82 上設計基準強度
83 上单位体積重量
84 上弹性係数
86 「ポアソン比
86 上透水係数
87 「吹付けコンクリートの材料パラメータ
89 上設計基準強度
89
90 └弾性係数
91 「ポアソン比
92 └透水係数
93 「緩衝材の応力と地下水静水圧の合計(緩・6「物理的緩衝性」に同じ)
94 └緩衝材の応力
95 └緩衝材の初期(製造時)乾燥密度
96 山水の単位体積重量
97
98 山地下水静水圧
99 OPの耐圧代(オ-2「OPの耐圧代」に同じ)
100 └緩衝材の応力
101 「緩衝材の初期(製造時)乾燥密度(有効粘土密度)
102 山水の単位体積重量
103 └ 圧密応力
104 └地下水静水圧
105 └ (岩盤) クリープ変形量
106 母材の必要耐圧代(必要板厚)
107 └平板(蓋部と底部を指す)の直径
108 「平板の取り付け方法による係数
109 └円筒部の板厚
110 └胴の外径
111 └最高使用温度における材料規格
112 溶接部の必要耐圧代
-------------
取得の対象とな
る最下層のパラ
メータ
الملي الملي
参考文献

付表 2-20 (:	オ-11)オー	-バーパック	の外表面と水の	の接触状態に関す	る調査結果
------------	---------	--------	---------	----------	-------

ID	才-11	対応となる構成要素	OP			
対応する安全機能	廃棄体と地下	水の接触防止				
整理対象	OP 外表面と水の接触状態					
(状態変数)						
内容	還元性条件での腐食は水が介在するので、腐食面における水との接触状態が腐食					
	の進展に影響する					
指標(統合 FEP)	12.再冠水/肪	2.1000000000000000000000000000000000000				
現象解析	再冠水時の	残存酸素の消費は、基本	シナリオにおける水質形成の前段プロセス			
	及び初期の腐	食メカニズムとして考慮され	ている。			
	再冠水時に	地下水が緩衝材中に浸潤	し、鉱物との反応によって間隙水水質が形			
	成される。再冠	配水時は不飽和状態と考え	られるので溶存酸素による腐食の局在化も			
	想定されるが、	腐食量の評価ではその影	響は考慮される。溶存酸素は、緩衝材中の			
	パイライトや鉄	・腐食生成物に消費され、	再冠水が終了後には還元性の雰囲気が想			
	定される。	定される。				
必要なパラメータ	● オ-1-①	「残存酸素量における腐食	こ」より			
	緩衝材などの	間隙に存在する酸素量、	緩衝材及び埋め戻し材の間隙率、ベント			
	ナイトに吸着している酸素量、OP1 体あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積					
	量、鉄の腐食	量、平均腐食深さ、最大	腐食深さ			
パラメータの階層	1 残存酸素における腐食(オ-1-①「残存酸素量における腐食」に同じ)					
関係	2 └緩衝材	などの間隙に存在する酸	素量			
	3 └緩衝	材及び埋め戻し材の間隙	率			
	4 └緩衝	材の間隙における標準状	態の酸素のモル体積			
	5 └空気	中の酸素の体積割合				
	6 └ベント	ナイトに吸着している酸	素量			
	7 └OP1 体	sあたりの緩衝材及び埋め	反し材の体積量			
	8 └平均腐	食深さ				
	9 └鉄の	腐食量				
	10 └最大	腐食深さ				
取得の対象となる	緩衝材及び埋	め戻し材の間隙率、緩衝	材の間隙における標準状態の酸素のモル			
最下層のパラメー	体積、空気中の	の酸素の体積割合、ベン	トナイトに吸着している酸素量、OP1 体			
タ	あたりの緩衝材及び埋め戻し材の体積量、鉄の腐食量、最大腐食深さ					
指標(統合 FEP)	16.腐食/19.2	沈殿反応/20.化学的変質				
現象解析	基本シナリオに	こおいて、本FEPのプロセス	に基づき、閉鎖後速やかに還元性雰囲気			
	が形成され、緩	爰慢な全面腐食が進行する	ことを想定する。			
	<ul> <li>● 坑道掘削時に導入された酸素は、緩衝材中のパイライトや鉄腐食生成物に消</li> </ul>					
	費され、遺	還元性の雰囲気が形成され	る。			
	<ul> <li>地下水が</li> </ul>	緩衝材と反応し、腐食生成	戈物を介してOPの鉄と反応する。 初期の溶			
	存酸素や	緩衝材から溶出する硫酸塩	塩還元成分は初期の腐食で消費される。溶			
	存炭酸イ	オン濃度はSCC影響濃度。	ちりも十分に低い。地下水、緩衝材、鉄腐食			
	生成物の	反応で形成される還元環	竟下の間隙水中で緩慢な全面腐食が進行			
	する。					

	● 還元雰囲気で淡水条件の固相表面では、Fe(OH)2を経てFe3O4が生成するが、
	炭酸イオンの存在下ではFeCO3またはFe2(OH)2CO3が支配的な固相となり、緩
	衝材との界面に緩衝材との反応層を形成する可能性がある。これらの腐食生成
	物が緻密で安定である保護的な皮膜を形成するときFe ²⁺ イオンやO ²⁻ イオンの拡
	散が腐食の律速過程と考えられ、腐食速度は経時的に低下する。
	● OP表面に接触する緩衝材中の間隙水のpHが10.5を超えるとその箇所が不動
	態化し、局部腐食のリスクが生じるが、地下水水質やセメント影響などの外部要
	因によるpHの上昇はない
必要なパラメータ	坑道掘削時に導入された酸素量、溶存酸素、緩衝材から溶出する硫酸塩還元 成分、溶存炭酸イオン濃度、Fe ²⁺ イオン、O ²⁻ イオン、腐食速度、OP 表面に接 触する緩衝材中の間隙水の pH
パラメータの階層	11 緩慢な全面腐食
関係	12 「坑道掘削時に導入された酸素量」
	13 └溶存酸素
	14 └緩衝材から溶出する硫酸塩還元成分
	10 「浴仔灰陂イスン涙皮 16 「地工水畑式みび濃度の $\mathbf{F}_{2}$ *イオン
	10 「地下小組成及い候長の $\Gamma e^{-\gamma} / \gamma >$ 17 「地下水組成及び濃度の $\Omega e^{-\gamma} / \gamma >$
	17 地下小組成及 $0$ 很及 $0$ 很及 $0$ 不及 $0$
	19 └OP 表面に接触する緩衝材中の間隙水の pH
取得の対象となる	坑道掘削時に導入された酸素量、溶存酸素、緩衝材から溶出する硫酸塩還元
最下層のパラメー	成分、溶存炭酸イオン濃度、地下水組成及び濃度の Fe ²⁺ イオン、地下水組成及び
9	濃度のO ²⁻ イオン、腐食速度、OP 表面に接触する緩衝材中の間隙水の pH
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-6 3.3
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 2
	包括的技術報告書 付属書 4-6

付表 2-21 (才-12)	オーバー	パックの強度、	厚さ/形状に関す	る調査結果
----------------	------	---------	----------	-------

ID	オ-12	対応となる構成要素	OP		
対応する安全機能	廃棄体と地下水の接触防止				
整理対象	強度、厚さ/形状				
(状態変数)					
内容	ガラス固化体に地下水が接触するに至るOPの破損については、水圧や地圧、				
	膨潤圧などの	「応力」とともに「強度、厚さ	5/形状」が関係する。		
指標(統合 FEP)	13.容器の変形	形			
現象解析	本 FEP は 基本	シナリオの想定上考慮される	õ.		
	● OPに負荷する応力(緩衝材の膨潤圧、地下・水の静水圧、岩盤のクリープ変形				
	や容器の	)腐食膨張による緩衝材の日	E密応力)を考慮して、OPの耐圧設計がな		
	されているので、想定される寿命期間内での容器の変形はない。				
	● 容器の腐食による減肉が進み、外圧に耐えられなくなった段階で容器の変形、				
	破損に至るが、十分に裕度を持たせた肉厚が設定されているので、さまざまな				
	不確実性	を考慮しても破損まで少な。	くとも1,000年以上の期間を要する		
	評価方法は、	オ-10 鉄表面の状態 「約	統合FEP 13. 容器の変形」と同じ		
パラメータの階層	<ol> <li>容器の変</li> </ol>	そ形(オ-10 「鉄表面の状!	態FEP 13. 容器の変形」に同じ)		
関係	2 $\Box$ OP $\bowtie$	負荷する応力			
	3 上岩盤の	)クリープ変形や容器の腐	食膨張による緩衝材の圧密応力		
	4 LOP	の腐食量			
	5 └緩衝	所材の変位量			
	6 └作月	目する接触圧(地下静水圧	と緩衝材の応力の合計)		
	7 上地	下静水圧			
	8 □緩	衝材の応力			
	9 └破壞	· 法法 · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
	10 LOP	の材料パラメータ			
	11 「治				
	12 「明	『性係数			
	13 一才	バアソン比			
	14 「座    15 「ガニ	「大心力」	27		
	10 「ルノ  10 」 点		2		
	16 ^一 径	的反			
	17 ⁻ た				
	10 小/ 10 L經循	ティント			
	13 版目				
	20 ¹ 1 21 └虧	行起空中			
	□1 → 22 └右	1.秋田及 百劲粘十密度			
	23 -4	- 粉子密度			
	 24  └萩				
	25 上日	三縮指数			
	26 └膅	/潤指数			

 r	
27	Lポアソン比
28	└限界状態応力比
29	└透水係数
30	Lモデルパラメータ
31	└先行圧密応力
32	└初期有効応力
33	└初期静止土圧係数
34	└埋め戻し材の材料パラメータ
35	└砂混合率
36	└乾燥密度
37	└有効粘土密度
38	└土粒子密度
39	└初期間隙比
40	└圧縮指数
41	└膨潤指数
42	Lポアソン比
43	└限界状態応力比
44	└透水係数
45	└先行圧密応力
46	└初期有効応力
47	└初期静止土圧係数
48	└岩盤の物性パラメータ
49	└(深成岩類の場合)
50	└飽和密度
51	└弾性係数
52	Lポアソン比
53	└粘着力
54	└内部摩擦角
55	└透水係数
56	└(新第三紀堆積岩類の場合)
57	└飽和密度
58	└弾性係数
59	Lポアソン比
60	└──軸圧縮強度
61	└引張強度
62	└延性パラメータ
63	└時間依存性パラメータ
64	└ピーク強度到達時間
65	└インバートの材料パラメータ
66	└設計基準強度
67	└単位体積重量
68	└弾性係数
69	└ポアソン比

	70 └透水係数
	71 └吹付けコンクリートの材料パラメータ
	72 上設計基準強度
	73 上単位体積重量
	74 └弾性係数
	75 「ポアソン比
	76 └透水係数
	77 └緩衝材の応力と地下水静水圧の合計(緩・6「物理的緩衝性」に同じ)
	78 └緩衝材の応力
	79 └緩衝材の初期(製造時)乾燥密度
	80 山水の単位体積重量
	81 上庄密応力
	82 山地下水静水圧
	83 OPの耐圧代(オ-2「OPの耐圧代」に同じ)
	84 └緩衝材の応力
	85 「緩衝材の初期(製造時)乾燥密度(有効粘土密度)
	86 山水の単位体積重量
	87
	88
	89 └(岩盤) クリープ変形量
	90 母材の必要耐圧代(必要板厚)
	91 「平板 (蓋部と底部を指す)の直径
	92 「平板の取り付け方法による係数
	93 └円筒部の板厚
	94 「胴の外径
	95 上最高使用温度における材料規格
	96 溶接部の必要耐圧代
	97 └平均せん断応力
	98 └許容引張応力
	99 └設計降伏点
	100 └せん断力
	101 └OP の断面積(溶接面)
取得の対象となる	OP の腐食量、緩衝材の変位量、地下静水圧、と緩衝材の応力、破壊接近度、
最下層のパラメー	(OP の)密度、(OP の)弾性係数、(OP の)ポアソン比、(OP の)降伏
9	応力、(ガラス固化体の)密度、(ガラス固化体の)弾性係数、(ガラス固化
	体の)ポアソン比、(緩衝材の)砂混合率、(緩衝材の)乾燥密度、(緩衝材
	の)有効粘土密度、(緩衝材の)土粒子密度、(緩衝材の)初期間隙比、(緩
	衝材の) 上縮指数、(緩衝材の) 膨潤指数、(緩衝材の) ボアソン比、(緩衝
	<b>材の)限界状態応力比、(緩衝材の)透水係数、(緩衝材の)モデルパラメー</b>
	期前止工生除数、(理の戻し材の) 砂混合率、(理め戻し材の) 乾燥密度、(埋 は言いせの) たかいしの声 (埋い言いせの) したこの声 (埋い言いせの)
	忉朔间际比、 (埋の戻しかの) 圧陥拍数、 (埋の戻しかの) 膨潤指数、 (埋め)

	戻し材の)ポアソン比、(埋め戻し材の)限界状態応力比、(埋め戻し材の)
	透水係数、(埋め戻し材の)先行圧密応力、(埋め戻し材の)初期有効応力、
	(埋め戻し材の)初期静止土圧係数、(深成岩の)飽和密度、(深成岩の)弾
	性係数、(深成岩の)ポアソン比、(深成岩の)粘着力、(深成岩の)内部摩
	擦角、(深成岩の)透水係数、(新第三紀堆積岩の)飽和密度、(新第三紀堆
	積岩の)弾性係数、(新第三紀堆積岩の)ポアソン比、(新第三紀堆積岩の)
	一軸圧縮強度、(新第三紀堆積岩の)引張強度、(新第三紀堆積岩の)延性パ
	ラメータ、(新第三紀堆積岩の)時間依存性パラメータ、(新第三紀堆積岩の)
	ピーク強度到達時間、(吹付けコンクリートの)設計基準強度、(吹付けコン
	クリートの)単位体積重量、(吹付けコンクリートの)弾性係数、(吹付けコ
	ンクリートの)ポアソン比、(吹付けコンクリートの)透水係数、緩衝材の初
	期(製造時)乾燥密度、圧密応力、地下水静水圧、緩衝材の初期(製造時)乾
	燥密度(有効粘土密度)、水の単位体積重量、圧密応力、地下水静水圧、(岩
	盤)クリープ変形量、平板の取り付け方法による係数、胴の外径、最高使用温
	度における材料規格、平均せん断応力、許容引張応力、設計降伏点、せん断力、
	OPの断面積(溶接面)
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-6 3.3
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 2
	包括的技術報告書 付属書 4-7
	包括的技術報告書 付属書 4-10
	包括的技術報告書 付属書 4-16
	包括的技術報告書 付属書 4-17

ID	緩-1	対象となる構成要素	緩衝材			
対応する安全機能	放射性物質の移流による移行の抑制					
	コロイド移行	コロイド移行の抑制				
整理対象	低透水性					
内容	緩衝材中の地	1下水の流れを抑制し、放	射性物質の移行を遅延すること			
指標	ペクレ数	基準	0.1 以下			
確認方法	【緩衝材中の放射性物質の移行が拡散によって支配されるように、緩衝材の密					
	度を設定する。】					
	● 緩衝材の低透水性は次式、ペクレ数Pe[-]を指標として評価する。					
	$P_e = \frac{kiL}{D_e}$					
	k:透水係数[m/s]、i:動水勾配[·]、L:地下水流れに対する物体の代表長					
	さ(緩衝材厚さ)、D _e :実効拡散係数[m²/s]					
	● ペクレ数が1より小さい時、緩衝材中の核種の移行は拡散が支配的になり、					
	低透水性	<b>たが確保されると判断でき</b>	る。			
	● 包括的技	<b>ស術報告書では、動水勾配</b>	(i)を0.05、実効拡散係数(De)を1.0×10 ⁻¹⁰			
	m²/sとし	、たうえで、緩衝材の厚さ	を設定している。			
	● 透水係数	女に及ぼす地下水組成及び	> 濃度の影響を有効粘土密度に対して整			
	理してお	5り、淡水条件、塩水条件)	及びCa型化に対する有効粘土密度の下限			
	を設定し	ている。				
必要なパラメータ	透水係数、初	]期(製造時)有効粘土密	度、地下水組成及び濃度(淡水、塩水、			
	Ca型化)、	Ca 型化)、緩衝材厚さ、動水勾配、実効拡散係数				
パラメータの階層						
関係						
	3 └初期(製造時)有効粘土密度					
	4 └動水勾配					
		5 └緩衝材厚さ				
	3 ► 小期(製造時)有効粘土密度					
		、小祖风わよい侲皮	ロイントマン連府、教士の町、公金井市な			
取付の対象となる	初期(要迫时	) 月刻柏上名及、地下小カ ミトバ連座	出 成 わ よ い 儀 皮 、 動 小 勾 配 、 核 倒 材 厚 さ 、			
取 T le 07 ( ) / 一 タ		みい(候)ない				
参考文献	● 包括的技	支術報告書本編 表4.4-6				
	● 包括的技	技術報告書 付属書4-15	4.1			

付表 2-22 (緩-1) 緩衝材の低透水性に関する調査結果

	付表 2-23	(緩-2)緩衝材のコロイドろ過能に関する調査結果
--	---------	--------------------------

I D	緩-2	対象となる	方構成要素	緩衝材			
対応する安全機能	コロイド移行の抑制						
整理対象	コロイドろ	過能					
内容	放射性物質が	ジコロイドと	して移行する	ことを防	ち止すること		
指標	コロイド透過	コロイド透過率 基準 0					
確認方法	【コロイドが	緩衝材中を	透過しないよ	うに、綬	<b>餐衝材の密度を設定する</b> 】		
	• ベントナ	● ベントナイトとケイ砂混合土に対し、金コロイド(15 nm)に対する透					
	過試験結果を整理し、淡水条件下でケイ砂混合率に関わらず有効粘土密度						
	0.8 Mg/i	0.8 Mg/m ³ 以上であればコロイドろ過能が期待できることが報告されてい					
	ろ(Kur	rosawa et al	., 2006) $_{\circ}$				
	● 塩水条件	やCa型化に	こついては乾燥	密度1.6	SMg/m ³ (ケイ砂混合率30%)で		
	コロイト	「が透過しな	いことを確認	している	るが、下限値設定が決まるほどの		
	データカ	ぶない。ただ	し、このよう	な条件下	でコロイド粒子は凝集してより		
	大きな粒	立子になるこ	とから透過し	難くなる	ると考えられる。		
必要なパラメータ	初期(製造時	)有効粘土	密度、初期(	製造時)	乾燥密度、初期(製造時)のケ		
	イ砂混合率、	地下水組成	及び濃度				
パラメータの階層	1 コロイト	、透過率					
関係	2 └乾燥密	的方法					
	3 上製造時のケイ砂混合率						
	4 └初期(製造時)有効粘土密度						
	5 └地下水組成及び濃度						
取得の対象となる	製造時のケイ	砂混合率、	初期(製造時)	)有効粘	出土密度、地下水組成及び濃度		
最下層のパラメー							
<i>У</i>							
参考文献	<ul> <li>● 包括的技</li> </ul>	友術報告書	本編 表4.4-6	5			
	<ul> <li>● 包括的技</li> </ul>	友術報告書	付属書4-15	4.3			
	• Kurosav	va et al., Tl	he Effect of M	[ontmor	rillonite Partial Density on the		
	Role of 0	Colloid Filtr	ation by a Be	ntonite	Buffer, 2006.		

付表 2-24 (緩-3)緩衝材の自己シール性に関する調査結果

ID	緩-3	対象となる構成要素	緩衝材		
対応する安全機能	放射性物質	の移流による移行の抑制			
	コロイド移	行の抑制			
整理対象	自己シーク	自己シール性			
内容	OP や岩盤。	との隙間など、施工時にで	きる隙間を充填可能な膨潤性を有するこ		
	と				
指標	膨潤率/隙間	体積比 基準	2以上		
確認方法	【施工時の	隙間を充填可能な膨潤性を	有していることを確認する。】		
	● 指標と	なる膨潤特性として、最大	膨潤率は有効粘土密度が高いほど増加す		
	る一方	で、塩分濃度(Cl ⁻ 濃度);	が高くなると低下する傾向がある。これ		
	は陰イ	オンに帯電した緩衝材に対	けし陽イオンが入ってしまうことを危惧		
	してい	るため、イオン強度とイオ	ン種の把握、及び陽イオン交換容量がパ		
	ラメー	タになる			
	● 定置時	の隙間体積比(施工時にで	きる隙間体積/緩衝材初期体積) θ [-]		
	θ - (	$D_B + d_B + R_{OP} + d_{OP})^2 - R_B$	$\frac{2}{OP}$ – 1		
	$D = (D_i)$	$(R_{OP} + R_{OP})^2 - (R_{OP} + d_{OP})^2$	_{OP} ) ²		
	D _B :緩	衝材厚さ、R _{OP} :OP半径、	d _B :緩衝材と岩盤の隙間、d _{OP} :緩衝材		
	とOPの	隙間			
	<ul> <li>● 緩衝材</li> </ul>	において、膨潤はベントナ	イトにおいて生じるものであり、緩衝材		
	にケイ	砂を配合する場合を考える	と、膨潤時の緩衝材の体積ひずみεv[·]		
	と緩衝	材中のベントナイトの体積	ひずみεvb[·]の関係は以下の通り。		
	$\varepsilon_v = \frac{1}{1}$	$\frac{1-R_s}{-R_s+R_s\rho_e/\rho_s}\varepsilon_{vb}$			
	Rs:乾	燥質量でのケイ砂混合率[-]	、ρ _e :有効粘土密度[Mg/m ³ ]、ρ _s :ケイ砂		
	の土粒	子密度[2.64Mg/m ³ ]			
	<ul> <li>● 自己シ</li> </ul>	ール性に関する指標として	、緩衝材の膨潤量が施工時にできる隙間		
	体積の	2倍以上になること、つま	り上記の式を用いてεv≧2θを基準とし		
	て設定	)			
	• ε vbは~	ベントナイトの最大膨潤率	と初期(製造時)有効粘土密度の関係か		
	ら与え	られ、淡水条件、塩水条件、	Ca型化についてそれぞれ一時式で近似		
	できる	とする。この関係から有効	粘土密度の下限と緩衝材厚さとの関係を		
	示すこ	とができる。			
	<ul> <li>● 自己シ</li> </ul>	ール性を確保するために必	公要な有効粘土密度の下限は緩衝材が厚		
	い場合	ほど低くなる。			
パラメータの階層	1 膨潤率				
関係	2 上地下	水組成および濃度			
	3 「膨潤	時の緩衝材の体積ひずみ			
	4 上乾	燥質量でのケイ砂混合率			
	5 山初	期(製造時)有効粘土密度			
	6 └ケ	イ砂の土粒子密度			
	7 「 上べ	ントナイトの最大膨潤率			

	8 隙間体積比
	9 └緩衝材厚さ
	10 └OP 半径
	11 └緩衝材と岩盤の隙間
	12 └緩衝材と OP の隙間
取得の対象となる	地下水組成および濃度、乾燥質量でのケイ砂混合率、初期(製造時)有効粘土
最下層のパラメー	密度、ケイ砂の土粒子密度、ベントナイトの最大膨潤率、緩衝材厚さ、OP 半
<i>A</i>	径、緩衝材と岩盤の隙間、緩衝材と OP の隙間
参考文献	● 包括的技術報告書本編 表4.4-6
	<ul> <li>● 包括的技術報告書 付属書4-15 4.2</li> </ul>

ID	緩-4 対象となる	る構成要素 緩衝材	-	
対応する安全機能	放射性物質の移流による移行の抑制			
	コロイド移行の抑制			
整理対象	自己修復性			
内容	ガス発生による亀裂が緩	資 衝 材 に 生 じ た と し て *	も閉塞できること	
指標	破過前後の透水係数の	基準	1以下	
	増加割合			
確認方法	【ガス発生による亀裂が	ぶ緩衝材に生じたとし~	ても、閉塞することのできる密度	
	を確認する】			
	● ガス破過前後のベン	/トナイト混合土の透	水性の変化を調べると、有効粘土	
	密度が0.64 Mg/m ³	より低い場合では破避	後の透水係数が破過前に対して	
	増加する領域となっ	っていることが、試験に	より求められている(穂刈ほか、	
	1996)。上記試験に	こおいては、供試体の多	条件として乾燥密度や含水比、混	
	合割合などが示され	いている(穂刈ほか、	1996_表1 参照)。	
	● 有効粘土密度1.2~	1.6 Mg/m ³ の範囲でい	すれも破過後の透水係数は破過	
	前に比べてやや小さ	くなった(田田ほか、		
	● 塩水条件やCa型化	に対して有効粘土密度	こと 破 過 前 後 の 透 水 係 数 に 関 す る	
	知見はなく、淡水徐	件で設定した有効粘	こ密度で発揮される膨潤応刀と同	
		別枯土密度を設定した。 たの逆加速1人(地工セン	シンドナーの日本	
ハフメータの階層		Qの増加割合 (地下水) こかれ上密度	が 後水の場合)	
	2 「初期(聚垣时)作 9 「知期(制迷時)も	1 幼柏工名及		
	4 初期(表垣時)日	の混合家		
	<ul> <li>6 └地下水組成および</li> </ul>	∧""""""""" ◎""""		
	7         膨潤応力(地下水)	「歳及 ぶ塩水の場合)		
	6 └地下水組成およて	「濃度		
	2 └初期(製造時) 有	<b></b> 「劾粘土密度		
取得の対象となる	初期(製造時)有効粘土	:密度、初期(製造時)	乾燥密度、初期(製造時)含水	
最下層のパラメー	比、ベントナイトと砂の	)混合率、地下水組成#	るよび濃度	
Я				
参考文献	● 包括的技術報告書本	云編 表4.4-6		
	● 包括的技術報告書	付属書4-15 4.4		
	● 穂刈ほか, ベントナ	イト混合土の自己修復	夏性に関する考察, 1996.	
	<ul> <li>● 田中ほか, 飽和した</li> </ul>	こ高密度ベントナイト	のガス移行メカニズムとそのモ	
	デル化,2009			

付表 2-25 (緩-4)緩衝材の自己修復性に関する調査結果

付表 2-26 (緩-5)	緩衝材の微生物影響の防止に関する調査結果
---------------	----------------------

ID	緩-5	対象となる構成要素	緩衝材	
対応する安全機能	廃棄体と地下	「水の接触防止		
	(OPの設計要件「耐食性」「構造健全性」が対象とする安全機能)			
整理対象	微生物影響	『の防止		
内容	OP の腐食に	影響を与える緩衝材中の微	数生物活動を抑制すること	
指標	菌体数	基準	増殖しないこと	
確認方法	【緩衝材内て	微生物活動が生じないこ	とを確認する】	
	● OPの腐食に影響を及ぼす代表的な微生物と考えられる硫酸還元菌のベン			
	トナイト中における増殖挙動を調べたところ、ベントナイト/水比が、			
	1,000 g/L以上ではほとんど増殖できないことを確認している(谷口ほか、			
	$2001)$ $_{\circ}$			
	● ベントナ	「イト/水比=1 Mg/L相当ズ	から勘案して、微生物影響を防止する緩	
	衝材の有	<b>前効粘土密度の下限値を地</b>	下水条件それぞれに対して設定	
パラメータの階層	1 菌体数			
関係	2 レベント	、ナイト/水比		
	3 └初期	月(製造時)有効粘土密度		
	4 上地	也下水組成および濃度		
取得の対象となる	地下水組成お	よび濃度		
最下層のパラメー				
タ				
参考文献	● 包括的技	友術報告書本編 表4.4-6		
	● 包括的技	友術報告書 付属書4-15	4.5	
	● 谷口ほか	ゝ, ベントナイト中におけ	る硫酸塩還元菌の活性と硫化水素によ	
	るオーバ	バーパック材料の腐食への	影響, 2001	

## 付表 2-27 (緩-6)緩衝材の物理的緩衝性に関する調査結果

ID	緩-6	対象となる構成要素	緩衝材
対応する安全機能	廃棄体と	L 也下水の接触防止	
	(OP の影	設計要件「耐食性」「構造	健全性」が対象とする安全機能)
整理対象	物理的統	爰衝性	
内容	OP の腐食	ま膨張による力学的な影響	を緩和して、OP を保護するように物理
	的な緩衝	生を有すること	
指標	緩衝材の	芯力と地下 基準	OPの耐圧強度を下回り、急増
	水静水圧の	の合計	しないこと
確認方法	【OP の廢	<b>1</b> 食膨張により増加する緩	衝材の応力と地下水静水圧の和が OP の
	耐圧強度	を下回ることを確認する。	]
	● OP腐	食膨張後の緩衝材の応力	は、緩衝材の間隙比e と圧密試験におけ
	る載	荷応力(以下、圧密応力と	いう) p'の対数の関係で表される圧密線
	(е -	log p') から求めている	(JNC, 1999) 。
	● また:	塩分濃度やCa 型化の影響	<b>撃を調べたベントナイトの圧密試験結果</b>
	から、	、ベントナイトの圧密線に	ついて、ベントナイトの正規圧密状態に
	おけ	る圧密線はCa型化や塩分	農度によらず唯一存在するなどの知見が
	得られ	れている。	
	<ul> <li>● 圧密;</li> </ul>	線は、次式で示す乾燥密度	度と圧密応力の関係で表すことができる
	(7)	林ほか、2007)。	
	$P_d/F$	$P_w = 0.156 \ln p' + 1.45$	
	Pd:	乾燥密度(製造時)[Mg/n	h ³ ]、P _w : 水の単位体積重量 [Mg/m ³ ]、
	p':)	土密応刀[MPa] したくし渡るしの広索性ト	
		トナイト混合土の圧密特性	Eから、ヘントナイトか構造の主体とな
	る 範!	囲において、 ρe‐log p'  これい声値間係お出去去:	第係で表される正規圧密線に砂分百有率
	によ	らない単稼険除か成立する	ことろんられ、この関係は上式の乾燥省 こことでちょこれで
		月別柏上省及に就み省ん。 ・ 作田オス地下 <u>払水</u> 広け	) ことくサんり40分。 国辺巴般にとり思わる
パラメータの陛屋間	● OFに 1 緩衝	11F用りる地下靜水圧は、 材の広力と地下水静水圧0	可应右盗により共なる。 )合計
(人) クロ酒園	2 上緩	衝材の応力	
	3 ∟;	緩衝材の初期(製造時)車	5燥密度
		水の単位体積重量 工変広力	
	5 □) 6 □±批	王密応刀 下水静水圧	
取得の対象となる最	緩衝材の	列期(製造時)乾燥密度、	圧密応力、地下水静水圧
下層のパラメータ			
参考文献	● 包括	的技術報告書本編 表4.4	6
	● 包括	的技術報告書 付属書4-1	6
	• JNC	,わが国における高レベ/	~放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性
	一地層	処分研究開発第2次取りる	ミとめ-, 1999
	● 小林	ほか,等含水比線と等飽種	□度線を用いた締固めベントナイトの圧
	縮・周	膨潤挙動の解釈, 2007	

ID		緩-7 対象となる構成要素 緩衝材					
整理	対象	ニアフィールドの状態変化に対する力学的安定性					
内容		長期的なニアフィールドの状態変化に対する力学的な相互作用を考慮しても、					
		長期にわたり廃棄体を支持し、設計要件を満足する緩衝材の密度と厚さの範囲					
		にあること					
	指標	緩衝材厚さ基準450 mm 以上					
目重	確認方法	【長期の圧密現象により沈下が継続したとしても、設計要件を満足する緩衝材					
に		の密度と厚さの範囲に収まることを確認する】					
よる		●粘性土の圧密現象において時間依存の粘性挙動を表現可能な構成モデル(関					
長期		ロ・太田モデル, 1977)を適用して評価					
沈		●自重による緩衝材の圧密沈下挙動への影響を評価するので、岩盤クリープと					
↓ 「 単		OPの腐食膨張を伴う複合的な現象は扱わない。					
動		●地下水条件(淡水/塩水)の2ケースを実施					
	パラメー	1 長期沈下挙動後の緩衝材厚さ(解析による算出)					
	タの階層	2 └OPの材料パラメータ					
	関係	3 └密度					
		4 └弾性係数					
		5 └ポアソン比					
		6 └降伏応力					
		7 └ガラス固化体の材料パラメータ					
		8 └密度					
		9 └弾性係数					
		10 「ポアソン比					
		11 └緩衝材の材料パラメータ					
		12 └砂混合率					
		13 └乾燥密度					
		14 └有効粘土密度					
		15 └土粒子密度					
		16 └初期間隙比					
		17 └圧縮指数					
		18 └膨潤指数					
		19 「ポアソン比					
		20					
		21 └透水係数					
		22 └先行圧密応力					
		23 └初期有効応力					
		24 └初期静止土圧係数					
		25 └二次圧密係数					
		26 └─次圧密終了時間					
		27 山初期体積ひずみ速度					
		28 「埋め戻し材の材料パラメータ					

付表 2-28 (緩-7) 緩衝材のニアフィールドの状態変化に対する力学的安定性の調査結果

	29
	30 └乾燥密度
	31 └有効粘土密度
	32 上土粒子密度
	33 └初期間隙比
	34 └圧縮指数
	35 └膨潤指数
	36 「ポアソン比
	37 └限界状態応力比
	38 └透水係数
	39 └先行圧密応力
	40 └初期有効応力
	41 └初期静止土圧係数
	42 └二次圧密係数
	43 └一次圧密終了時間
	44 └初期体積ひずみ速度
	45 └岩盤の物性パラメータ
	46 └飽和密度
	47 └弾性係数
	48 「ポアソン比
	49 └透水係数
	50 └インバートの材料パラメータ
	51 └設計基準強度
	52 └単位体積重量
	53 └弾性係数
	54 「ポアソン比
	55 └透水係数
	56 └吹付けコンクリートの材料パラメータ
	57 └設計基準強度
	58 山单位体積重量
	59 └弾性係数
	60 ^L ポアソン比
	61 └透水係数
取得の対	(OPの)密度、(OPの)弾性係数、(OPの)ポアソン比、(OPの)降伏応
象となる	力、(ガラス固化体の)密度、(ガラス固化体の)弾性係数、(ガラス固化体の)
最下層の	ポアソン比、(緩衝材の)砂混合率、(緩衝材の)乾燥密度、(緩衝材の)有効
パラメー	粘土密度、(緩衝材の)土粒子密度、(緩衝材の)初期間隙比、(緩衝材の)圧
タ	縮指数、(緩衝材の)膨潤指数、(緩衝材の)ポアソン比、(緩衝材の)限界状
	態応力比、(緩衝材の)透水係数、(緩衝材の)先行圧密応力、(緩衝材の)初
	期有効応力、(緩衝材の)初期静止土圧係数、(緩衝材の)二次圧密係数、(緩
	衝材の)一次圧密終了時間、(緩衝材の)初期体積ひずみ速度、(埋め戻し材の)
	砂混合率、(埋め戻し材の)乾燥密度、(埋め戻し材の)有効粘土密度、(埋め
	戻し材の)土粒子密度、(埋め戻し材の)初期間隙比、(埋め戻し材の)圧縮指

0	14.100	数、(埋め戻し材の)膨潤指数、(埋め戻し材の)ポアソン比、(埋め戻し材の) 限界状態応力比、(埋め戻し材の)透水係数、(埋め戻し材の)先行圧密応力、 (埋め戻し材の)初期有効応力、(埋め戻し材の)初期静止土圧係数、(埋め戻 し材の)二次圧密係数、(埋め戻し材の)一次圧密終了時間、(埋め戻し材の) 初期体積ひずみ速度、(岩盤の)飽和密度、(岩盤の)弾性係数、(岩盤の)ポ アソン比、(岩盤の)透水係数、(インバートの)設計基準強度、(インバート の)単位体積重量、(インバートの)弾性係数、(インバートの)ポアソン比、 (インバートの)透水係数、(吹付けコンクリートの)設計基準強度、(吹付け コンクリートの)単位体積重量、(吹付けコンクリートの)適性係数、(吹付け コンクリートの)ポアソン比、(吹付けコンクリートの)透水係数
〕岩盤クリー	<b></b> 招 悰	後面材の応力を地下水静水圧の 合計 緩面材の破壊接近度                途価材の破壊接近度                   塑性状態に至ったとしても1未満で あること(部分的な限界状態は許容)
-プとOPの腐食膨張による影響	確認方法	【OPの腐食膨張や岩盤の変形による力学的な相互作用を考慮しても、長期にわたり物理的緩衝性を維持し、廃棄体を安定的に支持できることを、緩衝材仕様に対して確認する】 ・腐食膨張解析によって、OPの腐食膨張による応力の増加に対して緩衝材が破壊に至らずOPを安定して支持できることを確認 ・腐食膨張によりOPに作用する外力を岩盤クリープの影響を考慮して求める ・解析ケースは地質環境モデル(深成岩類、新第三紀堆積岩類)と地下水条件(淡水/塩水)の計4ケース ・解析コードは汎用非線形有限要素法解析コードAbaqus
	パラメータの階層関係	<ol> <li>緩衝材の応力と地下水静水圧の合計、及び緩衝材の破壊接近度</li> <li>└OPの材料パラメータ</li> <li>└密度</li> <li>└弾性係数</li> <li>└ポアソン比</li> <li>└がラス固化体の材料パラメータ</li> <li>└がうス固化体の材料パラメータ</li> <li>└がアソン比</li> <li>レ弾性係数</li> <li>レポアソン比</li> <li>レポアソン比</li> <li>レ報慮合率</li> <li>□乾燥密度</li> <li>└転線密度</li> <li>└主粒子密度</li> <li>└打列期間隙比</li> <li>「上癰指数</li> <li>「膨潤指数</li> <li>レポアソン比</li> </ol>

	20	└限界状態応力比
	21	└透水係数
	22	└モデルパラメータ
	23	└先行圧密応力
	24	└初期有効応力
	25	└初期静止土圧係数
	26	└埋め戻し材の材料パラメータ
	27	└砂混合率
	28	└乾燥密度
	29	└有効粘土密度
	30	└土粒子密度
	31	└初期間隙比
	32	└圧縮指数
	33	└膨潤指数
	34	└ポアソン比
	35	└限界状態応力比
	36	└透水係数
	37	└先行圧密応力
	38	└初期有効応力
	39	└初期静止土圧係数
	40	└岩盤の物性パラメータ
	41	└(深成岩類の場合)
	42	└飽和密度
	43	└弾性係数
	44	レポアソン比
	45	└粘着力
	46	└内部摩擦角
	47	└透水係数
	48	└(新第三紀堆積岩類の場合)
	49	└飽和密度
	50	└弾性係数
	51	└ポアソン比
	52	└─軸圧縮強度
	53	└引張強度
	54	└延性パラメータ
	55	└時間依存性パラメータ
	56	□ピーク強度到達時間
	57	レインバートの材料パラメータ
	58	└設計基準強度
	59	└単位体積重量
	60	└···· 単性係数
	61	レボアソン比
	62	└透水係数

		63 └吹付けコンクリートの材料パラメータ
		64 └設計基準強度
		65 └単位体積重量
		66 └弾性係数
		67 ^L ポアソン比
		68 └透水係数
	取得の対	(OPの)密度、(OPの)弾性係数、(OPの)ポアソン比、(OPの)降伏応
	象となる	力、(ガラス固化体の)密度、(ガラス固化体の)弾性係数、(ガラス固化体の)
	最下層の	ポアソン比、(緩衝材の)砂混合率、(緩衝材の)乾燥密度、(緩衝材の)有効
	パラメー	粘土密度、(緩衝材の)土粒子密度、(緩衝材の)初期間隙比、(緩衝材の)圧
	タ	縮指数、(緩衝材の)膨潤指数、(緩衝材の)ポアソン比、(緩衝材の)限界状
		態応力比、(緩衝材の)透水係数、(緩衝材の)モデルパラメータ、(緩衝材の)
		先行圧密応力、(緩衝材の)初期有効応力、(緩衝材の)初期静止土圧係数、(埋
		め戻し材の)砂混合率、(埋め戻し材の)乾燥密度、(埋め戻し材の)有効粘土
		密度、(埋め戻し材の)土粒子密度、(埋め戻し材の)初期間隙比、(埋め戻し
		材の) 圧縮指数、(埋め戻し材の) 膨潤指数、(埋め戻し材の) ポアソン比、(埋
		め戻し材の)限界状態応力比、(埋め戻し材の)透水係数、(埋め戻し材の)先
		行圧密応力、(埋め戻し材の)初期有効応力、(埋め戻し材の)初期静止土圧係
		数、(深成岩の)飽和密度、(深成岩の)弾性係数、(深成岩の)ポアソン比、
		(深成岩の)粘着力、(深成岩の)内部摩擦角、(深成岩の)透水係数、(新第
		三紀堆積岩の)飽和密度、(新第三紀堆積岩の)弾性係数、(新第三紀堆積岩の)
		ポアソン比、(新第三紀堆積岩の)一軸圧縮強度、(新第三紀堆積岩の)引張強
		度、(新第三紀堆積岩の)延性パラメータ、(新第三紀堆積岩の)時間依存性パ
		ラメータ、(新第三紀堆積岩の)ピーク強度到達時間、(インバートの)設計基
		準強度、(インバートの)単位体積重量、(インバートの)弾性係数、(インバ
		ートの)ポアソン比、(インバートの)透水係数、(吹付けコンクリートの)設
		計基準強度、(吹付けコンクリートの)単位体積重量、(吹付けコンクリートの)
		弾性係数、(吹付けコンクリートの)ポアソン比、(吹付けコンクリートの)透
		水係数
参考	文献	· 包括的技術報告書 本編 表4.4-7
		・ 包括的技術報告書 付属書4-17、付録A
		・ 包括的技術報告書 付属書4-17、付録B

付表 2-29 (緩-8)緩衝	町材の地震動に対する力学I	的安定性に関する調査結果
-----------------	---------------	--------------

ID	緩-8	対象となる構成要素 緩衝材			
整理対象	地震動に対する力学的安定性				
内容	大規模な地震動に対しても、OP や緩衝材が力学的な安定性を損なわないこと				
指標	緩衝材の破壊が	接近度	基準	塑性状態に至ったとしても1未満である	
				こと(部分的な限界状態は許容)	
	OP の Mises 応	动	-	降伏強度以下	
確認方法	【大規模な地震	<b>貢動に対し</b>	ても、OP や緩	衝材が力学的な安定性を損なわないこ	
	とを、人工バリアの仕様に対して確認する。】				
	●人工バリアの力学的安定性を最新の方法により評価するため、緩衝材を二相				
	系の連成問題	夏として取	り扱った有効応	力法による三次元弾塑性地震応答解析	
	を実施。OP、	ガラス固	]化体、地盤、緩	衝材の材料定数は山本ほか(2015)の	
	表-3~-6を参	照。			
	●検討用地震重	hには、国	内最大級のプレ	ート間地震動となる2011年東北地方太	
	平洋沖地震に	おける牡	<b>鹿波、内陸地殻</b>	内地震動に2000年鳥取県西部地震にお	
	ける伯太波を	·選定。			
	● 距離減衰式に基づいた経験的な方法で最も大きな速度応答スペクトルを与う				
	る地震動(以下、耐専波という)をモデル化。耐専波・牡鹿波、伯太波を比較				
	<ul> <li>● OP、ガラス固化体、緩衝材、地盤(岩盤)の材料パラメータを用いてモデル</li> </ul>				
	を構築し、増	幅処置を	施した牡鹿波と	伯太波を入力し、結果として水平変異、	
	緩衝材の体積	むずみ、	緩衝材の過剰間 - 471-15	隙水圧、緩衝材の破壊接近度の最大応	
		峰仄応 月々 取異さ	ご解析。	は、マネボナウの地球に共して但方向	
	●解析は処分れの検討になる	」笠直さ・ うと考えら	フロック万式に れる処分坑道横	比べて水平方向の加振に対して保守側 置き方式を対象。	
	<ul> <li>●緩衝材は地下</li> </ul>	「水の浸透	により飽和し膨	潤して隙間が充填されている状態を仮	
	定。				
	<ul> <li>OPの腐食膨張は緩衝材に対しては拘束圧を高めて地震時のせん断抵抗を増加させる方に作用すると考えられるので、ここではOPが腐食膨張していない状態が解析評価の対象。</li> <li>地質環境モデルは地震時の変形に対して保守側の検討になると考えられる新第三紀堆積岩類を対象とし、人工バリアの設置深度は深度500mを設定。</li> </ul>				
パラメータの階層	1 緩衝材の研	皮壊接近度	E及び OP の Mis	ses 応力	
関係	2 └OP の枝	料定数			
	3 └密度				
	4 └弾性係	系数			
	5 レポアン	ノン比			
	6 └降伏ӣ	芯力			
	7 └ガラス	国化体の材	料定数		
	8 └密度				

	9 └弾性係数					
	10 「ポアソン比					
	11 地盤の材料定数					
	12 └密度					
	13 └弾性係数					
	14 「せん断弾性係数					
	15 「ポアソン比					
	16 └減衰定数					
	17 └内部摩擦角					
	18 └粘着力					
	19 └緩衝材の材料定数					
	20 └乾燥密度					
	21					
	22					
	23					
	24 └弾性係数					
	25 └ポアソン比					
	26 □限界状態応力比					
	27 └内部摩擦角					
	28 上先行圧密降伏応力					
	29  └材料定数(下負荷面モデル固有のパラメータ)					
	30 「回転硬化限界面の定数					
	31 「回転硬化発展則の定数					
	32 上透水係数					
	以下は解析の結果得られるパラメータ					
	33 牡鹿波・伯太波					
	34 └速度応答スペクトル					
	35 └強震記録波形					
	36 「耐専波・牡鹿波・伯太波における水平変位					
	<b>37</b> └緩衝材の体積ひずみ					
	38 「緩衝材の過剰間隙水圧					
	39 └緩衝材の破壊接近度の最大応答値					
	40 └OP の降伏応力					
取得の対象となる	( <b>OP</b> の)密度、( <b>OP</b> の)弾性係数、( <b>OP</b> の)ボアソン比、( <b>OP</b> の)降伏					
最下層のパラメー	応力、(ガラス固化体の)密度、(ガラス固化体の)弾性係数、(ガラス固化					
A	体の)ポアソン比、(地盤の)弾性係数、(地盤の)密度、(地盤の)せん断					
	弾性係数、(地盤の)ボアソン比、(地盤の)減衰定数、(地盤の)内部摩擦					
	用、(地盤の)粘着刀、(緩衝材の)乾燥密度、(緩衝材の)間隙比、(緩衝					
	Nの) 上稲指茲、(綾餌材の) 膨潤指茲、(綾餌材の) 弾性係茲、(緩衝材の)					
	小ノノンに、(板餌材の) 限界状態応力に、(板餌材の) 内部摩擦角、(綾餌					
	Nの) 元1」上省降仄応刀、(綾餌Nの)回転硬化限界面の足剱、(綾餌材の) 回転運化及屋町の会教 (緩蛋社の) 透え低教					
	回転映16 完成則のた数、(被側的の)遊水係数 油鹿亡ダラペクトル。 強電記程連邦 - 副車連 - 私車連 - 位十連におけてよます					
	还皮心合ヘンソ トル、 畑辰 記述 仮形、 順守 仮・ 壮 虎 彼・ 旧 人 彼 に わ け る 水 半 炎					

	位、緩衝材の体積ひずみ、緩衝材の過剰間隙水圧、緩衝材の破壊接近度の最大				
	応答値、OPの降伏応力				
参考文献	· 包括的技術報告書 本編 表4.4-7				
	・ 包括的技術報告書 付属書4-17				
	山本ほか,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,				
	2015				
	• 防災科学技術研究所:強振観測網(K-net, KiK-net)				

17衣 2-30 (筱-9) 祓慣材の夜流による移行の抑制に除る间隙伸迫の	†表 2-30	)移流による移行の抑制に係る間隙構造の調査結果
---------------------------------------	---------	-------------------------

ID	緩-9	対応となる構成要素	緩衝材	
対応する安全機能	放射性物質の移流による移行の抑制			
整理対象	間隙構造			
(状態変数)				
内容	地下水の浸潤	間に伴う膨潤と、施工におい	て生じた隙間や周辺岩盤の亀裂に対する	
	自己シール性	により、低透水性の場が達成	成され、緩衝材中の物質移動は拡散支配と	
	なる。しかしな	がら、緩衝材の主成分である	るベントナイト(モンモリロナイト)の層構造に	
	変化が生じた場合には、移流による移行が起こる可能性がある。			
指標(統合 FEP)	12.再冠水/脱	飽和		
現象解析	基本シナリオでは、設計通り緩衝材の膨潤によって隙間の閉塞がなされること			
	を想定する。			
	● 坑道閉鎖	肖後緩衝材中に地下水が流	入する際、施工時の緩衝材ブロックと坑	
	壁間、C	Pとベントナイトブロック	7間などの隙間を冠水時の膨潤によって	
	自己シー	ールする。塩分濃度の影響・	やコンクリート残置物などから溶出する	
	Caイオ	ンによる緩衝材のCa型化で	も考慮した緩衝材設計上の対策がなされ	
	ている。			
	⇒自己シ	~ール性と同様のパラメー	タとなる。	
パラメータの階層	FEP 12.再冠	水/脱飽和(緩-3に同じ)		
関係	1 膨潤率			
	2 山地下水組成及び濃度			
	3 □ 膨潤時の緩衝材の体積ひずみ			
	4 └乾焞	<b>操質量でのケイ砂混合率</b>		
	5 └初期	明(製造時)有効粘土密度		
	6 レケイ	、 砂の土粒子密度		
	7 レベン	、トナイトの最大膨潤率		
	8 隙間体利	責比		
	10 └OP 半径			
	11 └緩衝材と岩盤の隙間			
	12 └緩衝移	すとOPの隙間		
取得の対象となる	地下水組成及	び濃度、乾燥質量でのケ	イ砂混合率、初期(製造時)有効粘土密 2015年1月1日(1915年1月1日)	
最下層のパフメー	度、ケイ砂の土粒子密度、ベントナイトの最大膨潤率、緩衝材厚さ、OP 半径、			
	緩衝材と岩盤の隙間、緩衝材とOPの隙間			
指標(統合 FEP)	22.カス相の			
現象解析	<ul> <li>● 鉄谷器0</li> <li>→ → → → →</li> </ul>	)腐食や放射線分解により	を生する水素カスなどの透気によって緩衝	
	材中にス	ノイ移行栓路か生成されてき	の、   疲   飯   個   材   の   日   仁   修   復   性   に   よ   つ   く   闭   基   さ   れ	
	る。目亡	修復性に関しては、温分濃	度やCa型化も考慮した緩衝材設計上の対	
	東かなさ	れている。 で毎時し日達のプラス なしま	N7	
	→日亡修	変換1生と回体のハフメーダとな	<る。 	
	● ガスの透	気による緩衝材間隙水の排	<b>甲し出しによる核種移行の影響は有意では</b>	

	ないと評価されている。					
	⇒影響は有意ではないため、対象外とする。					
パラメータの階層	FEP 22.ガス相の形成(緩-4 に同じ)					
関係	1 破過前後の透水係数の増加割合(地下水が淡水の場合)					
	2 └初期(製造時)有効粘土密度					
	3 └初期(製造時)乾燥密度					
	4 └初期(製造時)含水比					
	5 レベントナイトと砂の混合率					
	6 └地下水組成及び濃度					
	7 膨潤応力(地下水が塩水の場合)					
	6 └地下水組成及び濃度					
	2 └初期(製造時)有効粘土密度					
取得の対象となる	初期(製造時)有効粘土密度、初期(製造時)乾燥密度、初期(製造時)含水					
最下層のパラメー	比、ベントナイトと砂の混合率、地下水組成及び濃度					
R						
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-6 3.6.2					
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 5					
	包括的技術報告書 付属書 4-15 4.2、4.4					

付表 2-31 (緩	<b>[-10</b> )	緩衝材の移流によ	る移行抑制に係る	る間隙水水質の調査結果
------------	---------------	----------	----------	-------------

ID	緩-10	対応となる構成要素	緩衝材		
対応する安全機能	放射性物質の移流による移行の抑制				
整理対象	間隙水水質				
(状態変数)					
内容	地下水と緩衝材の反応などによるイオン強度の変化に伴う「間隙水水質」の変				
	化により、モンモリロナイト層間の微細構造が変化する。これにより透水性が				
	変動し、放射	性物質の移流による移行の	の抑制機能に影響を与えることが考えら		
	れる。				
指標(統合 FEP)	12.再冠水/脱飽和				
現象解析	再冠水時の残存酸素の消費は、基本シナリオにおける水質形成の前提プロセス				
	として考慮されている。				
	● 再冠水時	● 再冠水時に地下水が緩衝材中に浸潤し、鉱物との反応によって間隙水水質が			
	形成され	るが、初期の不飽和の段階	皆では残留酸素の影響で酸化性環境であ		
	● 溶存酸素は、緩衝材中のパイライトや鉄腐食生成物、OPの腐食などによって消				
	費され、	次第に還元性の雰囲気が形	成される。この段階で緩衝材の膨潤と隙間		
	の閉塞が進行する。				
	⇒初期の不飽和の段階における残存酸素量については、緩衝材の間隙に存				
	在する酸素量及びベントナイトに吸着している酸素量が示されている。				
	▶ 緩衝材の間隙に存在する酸素量				
	緩衝	対の間隙に存在する酸素:	量は、以下の式により算出できる。		
	間隙率	🛙 / 標準状態におけるモル	体積 × 空気中の酸素の体積割合		
	また	間隙率は、以下の式によ	り算出できる。		
	(1-乾	燥密度 / 土粒子密度)×1	00 [%]		
	> ベント	・ナイトに吸着している酸	素量		
	石川は	もか(1992)によれば、上	記「間隙に存在する酸素量」の4倍の酸		
	素が~	シトナイトに吸着をして	いる結果が試験により得られている。よ		
	って、	パラメータは間隙に存在	する酸素量と同様とした。		
	● 温度勾酉	己が大きい再冠水期に塩濃	縮が発生し局所的に緩衝材間隙水に影響		
	を与える可能性があるが、その影響は無視できる。				
	⇒本状態変数への影響は無視できる程度とあるため、品質保証体系への影				
	響もほ	ほぼ無いと考えられるため	、パラメータからは除外する。		
パラメータの階層	1         再冠水時の残存酸素量				
関係	2 上緩衝标	すの間隙に存在する酸素量			
	3 └緩衝	所材の間隙における標準状	態の酸素の体積		
	4 └空気	気中の酸素の体積割合			
	5 └緩衝	所材の間隙率			
	6	刃期(製造時)乾燥密度			
	7 └Ⅎ	上粒子密度			
	8 「緩衝标	オ中のパイライトや鉄腐食	生成物による酸素の消費量		
	9 └OPの腐食による酸素の消費量				

	10 「周辺に存在する微生物の活動による酸素の消費量				
取得の対象となる	緩衝材の間隙における標準状態の酸素の体積、空気中の酸素の体積割合、初期				
最下層のパラメー	(製造時)乾燥密度、土粒子密度、緩衝材中のパイライトや鉄腐食生成物によ				
タ	る酸素の消費量、OP の腐食による酸素の消費量、周辺に存在する微生物の活				
	動による酸素の消費量				
指標(統合 FEP)	23.水の輸送				
現象解析	「水の輸送」は間隙水水質の形成に関与するプロセスとして、基本シナリオに				
	おいて考慮される。				
	● EDZ領域に流入した地下水が緩衝材中に浸潤して緩衝材中の鉱物と反応しな				
	がら緩衝材間隙水を形成する。				
	⇒ミキシングモデルによる解析。付属書 6-15_表2を参照。				
	● セメント系材料の支保工がある場合には、セメントと反応した地下水が緩衝材と				
	反応して間隙水を形成するが、影響はセメント/緩衝材界面に限定的である。 ⇒影響が限定的とあるため、対象外とする。				
	● OPなどの鉄容器材料の近傍では、緩衝材間隙水は鉄腐食生成物とも反応が				
	進んでいる状態にあることが想定される。				
	⇒ミキシングモデルによる解析。付属書 6-15_表3を参照。				
パラメータの階層	11 └緩衝材間隙水水質				
関係	12 └pH				
	15 $-En$ 14 $- (- イオン強度)$				
	15 ^L 各元素濃度				
	17 └ガラス固化体と OP の間隙水水質				
	18 LpH				
	19 「Eh 20 「イオン商店				
	21 └各元素濃度				
取得の対象となる	(緩衝材間隙水の) pH、(緩衝材間隙水の) Eh、(緩衝材間隙水の) イオン強				
最下層のパラメー	度、(緩衝材間隙水の)各元素濃度、(ガラス固化体と OP の間隙水の) pH、				
タ	(ガフス固化体と OP の間隙水の)Eh、(ガフス固化体と OP の間隙水の)イ オン確度 (ガラス国化体と OP の間隙水の)冬元麦濃度				
	为了强反、(为了六面化体2 OI 的间隙小约)在几条碳反 包括的技術報告書 付属書 6-6 3.6.2				
	包括的技術報告書 付属書 $6-9$ 表 5				
	包括的技術報告書 付属書 4-6 3.1.1、3.1.2				
	包括的技術報告書 付属書 4-14 3.2.3 (3)				
	包括的技術報告書 付属書 6-15 3.3、3.5				
	石川ほか、オーバーパックと候補材料選定と炭素鋼オーバーパックの寿命評				
	価, 1992.				

ID	緩 <b>-</b> 11	対応となる構成要素	緩衝材		
対応する安全機能	コロイド移行の抑制				
整理対象	間隙構造				
(状態変数)					
内容	地下水によっ	て緩衝材が浸食されると	、緩衝材の「密度」や「厚さ」が減少		
	し、間隙が拡	大することでコロイドは	緩衝材領域を通過する可能性が考えら		
	れる。他に、地下水圧上昇によるパイピングに伴って緩衝材の「間隙構造」				
	が変化し、水	みちが形成されることで	コロイドろ過性が低下する可能性があ		
	る。				
指標(統合 FEP)	12.再冠水/脱	飽和			
現象解析	基本シナリオ	では、設計通り緩衝材の開	彭潤によって隙間の閉塞がなされること		
	を想定する。				
	● 坑道閉鎖	後緩衝材中に地下水が流	入する際、施工時の緩衝材ブロックと坑		
	壁間、OPとベントナイトブロック間などの隙間を冠水時の膨潤によって				
	自己シー	自己シールする。塩分濃度の影響やコンクリート残置物などから溶出する			
	Caイオン	ーによる緩衝材のCa型化	も考慮した緩衝材設計上の対策がなされ		
	ている。				
	⇒自己シール性と同様のパラメータとなる。				
パラメータの階層	FEP 12.再冠水/脱飽和 (緩·3 に同じ)				
関係	1 膨潤率				
	2 └地下水	、組成及び濃度			
	3 └膨潤時	Fの緩衝材の体積ひずみ			
	4 └乾燷	<b>峰質量でのケイ砂混合率</b>			
	5 └初期	1(製造時)有効粘土密度			
	6 レケイ	砂の土粒子密度			
	7 レベン	、トナイトの最大膨潤率			
	8 隙間体積	手比			
	9 └緩衝を	「厚さ			
	10 └OP 半径				
	11 └緩衝材と岩盤の隙間				
	12 └緩衝材と OP の隙間				
取得の対象となる	地下水組成及	び濃度、乾燥質量でのケ	イ砂混合率、初期(製造時)有効粘土密		
最下層のパフメー	度、ケイ砂の	主粒子密度、ベントナイ	トの最大膨潤率、緩衝材厚さ、OP 半径、		
ダ 松畑 (対t A DDD)	緩衝材と岩盤の隙間、緩衝材と OP の隙間				
指標(統合 FEP)	22.カス相の計				
現象解析	<ul> <li>● 鉄谷器//</li> </ul>	の腐食や放射線分解により多	を生する水素カスなどの透気によって緩衝		
	材中にカ	ス移行経路か生成されても	の、緩餌材の目己修復性によって閉塞され		
	る。 目 に ( 年 ぶ チンチン	修復性に関しては、温分濃 ねていて	度~La空化も考慮しに綾餌材設計上の対		
	東かなさ	46しいる。	1. + 1 Z		
	⇒目己修	12世と回様のハフメータ	これる。		

付表 2-32 (緩-11) 緩衝材のコロイド移行抑制に係る間隙構造の調査結果

	● ガスの透気による緩衝材間隙水の押し出しによる核種移行の影響は有意では					
	ないと評価されている。					
	⇒影響は有意ではないため、対象外とする。					
パラメータの階層	FEP 22.ガス相の形成(緩-4に同じ)					
関係	1 破過前後の透水係数の増加割合(地下水が淡水の場合)					
	2 └初期(製造時)有効粘土密度					
	3 └初期(製造時)乾燥密度					
	4 └初期(製造時)含水比					
	5 レベントナイトと砂の混合率					
	6 └地下水組成及び濃度					
	7 膨潤応力(地下水が塩水の場合)					
	6 └地下水組成及び濃度					
	2 └初期(製造時)有効粘土密度					
取得の対象となる	初期(製造時)有効粘土密度、初期(製造時)乾燥密度、初期(製造時)含水					
最下層のパラメー	比、ベントナイトと砂の混合率、地下水組成及び濃度					
タ						
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-6 3.6.1					
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 4					
	包括的技術報告書 付属書 4-15 4.2、4.4					

付表 2-33	(緩-12)	緩衝材のコロイ	ド移行の抑制に係る	間隙水水質の調査結果
---------	--------	---------	-----------	------------

ID	緩-12	対応となる構成要素	緩衝材
対応する安全機能	コロイド移行の抑制		
整理対象	間隙水水質		
(状態変数)			
内容	コロイドの安定性が変化するとコロイドのサイズが変化することから、間隙水		
	が低イオン強	度水質になった場合には	、分散性が高まりコロイド粒径が微小化
	してコロイト	「ろ過性に影響を与える可	能性がある。
指標(統合 FEP)	12.再冠水/脱飽和		
現象解析	再冠水時の残存酸素の消費は、基本シナリオにおける水質形成の前提プロセス		
	として考慮さ	れている。	
	<ul> <li>再冠水時に地下水が緩衝材中に浸潤し、鉱物との反応によって間隙水水質</li> </ul>		
	が形成されるが、初期の不飽和の段階では残留酸素の影響で酸化性環境で		
	ある。		
	● 溶存酸素は、緩衝材中のパイライトや鉄腐食生成物、OPの腐食などによっ		
	て消費され、次第に還元性の雰囲気が形成される。この段階で緩衝材の膨		
	潤と隙間の閉塞が進行する。		
	⇒初期の不飽和の段階における残存酸素量については、緩衝材の間隙に存		
	在する酸素量、及びベントナイトに吸着している酸素量が示されてい		
	る。		
	▶ 緩衝材の間隙に存在する酸素量		
	緩衝材の間隙に存在する酸素量は、以下の式により算出できる。		
	間隙率 / 標準状態におけるモル体積 × 空気中の酸素の体積割合		
	また間隙率は、以下の式により算出できる。		
	(1-乾燥密度 / 土粒子密度)×100 [%]		
	▶ ベントナイトに吸着している酸素量		
	石川に	モか(1992)によれば、上	記「間隙に存在する酸素量」の4倍の酸
	素が~	ジトナイトに吸着をして	いる結果が示されている。よって、パラ
	メータ	は間隙に存在する酸素量	と同様である。
	● 温度勾酉	己が大きい再冠水期に塩濃	と縮が発生し局所的に緩衝材間隙水に影
	響を与え	とる可能性があるが、その	影響は無視できる。
	→本状態変数	なへの影響は無視できる程	度とあるため、品質保証体系への影響も
	ほぼ無いと考	デえられるため、パラメー	タからは除外する。
パラメータの階層	FEP 12.再冠水/脱飽和 (緩・10_FEP.12 再冠水/脱飽和に同じ)		
関係	1 再冠水時	手の残存酸素量	
	2 └緩衝杉	オの間隙に存在する酸素量	
	3 └緩復	所材の標準状態におけるモ	ル体積
	4 上空気	気中の酸素の体積割合	
	5 └緩御	所材の間隙率	
	6 └祣	リ朝(製造時)乾燥密度	
		二粒子密度	
	8 └緩衝を	す中のパイライトや鉄腐食	生成物による酸素の消費

	9 └OP の腐食による酸素の消費
	10 「周辺に存在する微生物の活動による酸素の消費
取得の対象となる	緩衝材の間隙における標準状態の酸素の体積、空気中の酸素の体積割合、初期
最下層のパラメー	(製造時)乾燥密度、土粒子密度、緩衝材中のパイライトや鉄腐食生成物によ
9	る酸素の消費量、OP の腐食による酸素の消費量、周辺に存在する微生物の活
	動による酸素の消費量
指標(統合 FEP)	23.水の輸送
 現象解析	
	おいて考慮される。
	● EDZ領域に流入した地下水が緩衝材中に浸潤して緩衝材中の鉱物と反応
	1 かがに経衛材閉防水を形成する
	しながら被国的间际小で形成する。
	→ ミインング モブルによる 座付。 竹 属 音 6·13 <u></u> 衣 2 を Ø 照。
	● カイントで対対の古伊工がたて相合には、カイントトロウトを地下せが深
	● ビメント示材料の又休工がめる場合には、ビメントと反応した地下小が液
	(個材と反応して同原水を形成りるか、影響はセメントノ 被倒材 外面に限止 サイナス
	⇒影響が限定的とあるため、対象外とする。
	● OPなどの鉄容器材料の近傍では、緩衝材間隙水は鉄腐食生成物とも反応
	が進んでいる状態にあることが想定される。
	→ミキシングモデルによる解析。付属書6-15表3を参照。
パラメータの階層	FEP 23.水の輸送(緩-10_ FEP 23.水の輸送に同じ)
関係	
	12 - pn 13 - Eh
	14 └イオン強度
	15 └各元素濃度
	16 └ガラス固化体とOPの間隙水水質
	17 LpH
	18 上LLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLLL
	19 └4 7 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
	20 日兄来被受 (緩衝材間隙水の)pH、(緩衝材間隙水の)Eh、(緩衝材間隙水の)イオン強
取内シカ家となる	度、(緩衝材間隙水の)各元素濃度、(ガラス固化体とOPの間隙水の)pH、
	(ガラス固化体と OP の間隙水の)Eh、(ガラス固化体と OP の間隙水の)イ
<i>'</i>	オン強度、(ガラス固化体と OP の間隙水の)各元素濃度
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-6 3.6.1
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 4
	包括的技術報告書 付属書 4-6 3.1.1、3.1.2
	包括的技術報告書 付属書 4-14 3.2.3 (3)
	包括的技術報告書 付属書 6-15 3.3、3.5
	石川ほか、オーバーパックと候補材料選定と炭素鋼オーバーパックの寿命評
	価, 1992.

ID	緩-13	対応となる構成要素	緩衝材	
対応する安全機能	放射性物質の収着			
整理対象(状態変数)	温度			
内容	収着反応は熱力学的に発熱反応であるため、「温度」が高くなるほど収着量が			
	小さくなり分	小さくなり分配係数も小さくなる。		
指標(統合 FEP)	11.熱プロセン	11.熱プロセス		
現象解析	設計で想定し	た緩衝材の温度変化に基	づきシナリオを設定し、その間の収着	
	特性の温度依	存性は有意でないので、	地温での収着特性を想定する。	
	●発熱性の廃	●発熱性の廃棄物の場合は、緩衝材の最高温度が制限温度である100℃を超え		
	ないように	廃棄物の定置条件など設置	計上の対策がなされる。最も高温とな	
	る高レベル放射性廃棄物処分場の場合には、埋設後数十年以内に最高90℃			
	付近まで上昇するがその後低下して、1,000年後に地温付近の温度(深成岩			
	類:約60℃、新第三紀堆積岩類:約40℃)となり、さらに地温まで低下す			
	る。この条件では、ベントナイトは長期的に安定であり、イライト化など			
	の鉱物変質は生じない。室温~60℃程度の温度範囲では、収着特性の温度			
	依存性は顕著でないと考えられている。			
	⇒解析コード	⇒ 解析 コードは COMSOL Multiphysics ver5.2a(COMSOL AB)を使用。		
	解析に用いる物性値値は、付属書 4-39 の凶 2、表 2、表 3、付録 B を参照。			
パラメータの階層				
関係	2 └処分坊	「道の断面構造		
	3 └地卜施	記設置深度		
		~ 正直间隔		
	5 └処分り	し但中心距離		
	6 └ 宕種   7 │ 次日	- 巴粘, - 土 本 卒 二 幻 + 任 丰 巴	拓	
		く石頬・元初 另二 礼 埋 惧 石 5 三 幻 堆 葀 亗 粨	<del>大</del> 只	
	0 √17 9 └問隙水	7——礼华慎石 短 〈温度		
	10 └緩衝杉	* 埋め戻し材の仕様		
	10 ————————————————————————————————————	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
	12 └ケイ	、□ ≪ 7 砂混合率		
	13 「含水	、比		
	14 上熱伝導	享率		
	15 上比熱			
取得の対象となる	処分坑道の断面構造、地下施設設置深度、廃棄体定置間隔、処分坑道中心距離、			
最下層のパラメー	間隙水温度、	(緩衝材の)乾燥密度、	(緩衝材の)ケイ砂混合率、(緩衝材の)	
<i>A</i>	含水比、(緩	衝材の)熱伝導率、(埋め	5戻し材の) 乾燥密度、(埋め戻し材の)	
	ケイ砂混合率	🔍 (埋め戻し材の)含水	比、(埋め戻し材の)熱伝導率	
参考文献	包括的技術報	8告書 付属書 6-6 3.6.3		
	包括的技術報	告書 付属書 6-9 表 6		
	包括的技術報	R告書 付属書 4-39 5.2、	付録 B	
	包括的技術報	8告書 本編 6.4.1 項(2)	$(\mathbf{v})$ $(\mathbf{a})$ (1)	

1) 衣 2-33  (歳-14) 炭質材の放射性物員の収着に除る间隙/
--------------------------------------

ID	緩 <b>-</b> 14	対応となる構成要素	緩衝材	
対応する安全機能	放射性物質の収着			
整理対象	間隙水水質			
(状態変数)				
内容	収着プロセスは pH やイオンの濃度などの「間隙水水質」に依存する。例えば、			
	陽イオン形態	陽イオン形態をとる核種は、イオン交換反応が主な収着機構と考えられ、液相		
	中に存在する	陽イオンの増加に伴い、	収着性が低下する傾向がみられる。	
指標(統合 FEP)	11.熱プロセン	11.熱プロセス		
現象解析	熱プロセスは、緩衝材間隙水水質の設定の前提として考慮される。			
	● 発熱性の	● 発熱性の廃棄物の場合は、緩衝材の最高温度が制限温度である100℃を超		
	えないよ	えないように廃棄物の定置条件など設計上の対策がなされる。最も高温と		
	なる高レベル放射性廃棄物処分場の場合には、埋設後数十年以内に最高			
	90℃付近まで上昇するがその後低下して、1,000年後に地温付近の温度(深			
	成岩類:約60℃、新第三紀堆積岩類:約40℃)となり、さらに地温まで低			
	下する。この条件では、ベントナイトは長期的に安定であり、イライト化			
	などの鉱物変質は生じない。			
	⇒解析コードは COMSOL Multiphysics ver5.2a (COMSOL AB)を使用。			
	解析に用いる物性値は、付属書 4-39 の図 2、表 2、表 3、付録 B を参			
	照。			
	●			
	⇒ ~ 柵 6.4.1 頃(2)(v)(a) しより、 深成岩類及び无新第二紀堆積岩類 (地下振訳の記墨源庫 1 000…) では 45℃ - 新第二約世球出版(地下状			
	(地ト施設の設置深度 1,000m)では 45℃、新第二紀堆積岩類(地下施			
パラメータの叱屎	<u> </u>			
パノメータの階層	$\Gamma D\Gamma II. ボノロヒク(板 IO_ \Gamma D\Gamma II. ボノロビクに回し)1 経衛はの泪座$			
医尿	1 版图初 ·	道の断面構造		
	2 ² 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	T型型的面体型 T型設置空度		
		上 成 成 世 休 及 太 定 置 間 隔		
	1 5 ^上 如分均	這中心距離		
	6 └岩種			
	7 上深成	え岩類・先新第三紀堆積岩	類	
	8 「新第	亨三紀堆積岩類		
	9 └間隙オ	く温度		
	10 「緩衝标	す、埋め戻し材の仕様		
	11 「乾燉	桑密度		
	12 レケィ	,砂混合率		
	13 「含才	〈比		
	14 上熱伝導	<b>享</b> 率		
	15 └比熱			
取得の対象となる	処分坑道の脚	「面構造、地下施設設置深」	度、廃棄体定置間隔、処分坑道中心距離、	

最下層のパラメー	間隙水温度、(緩衝材の)乾燥密度、(緩衝材の)ケイ砂混合率、(緩衝材の)		
タ	含水比、(緩衝材の)熱伝導率、(埋め戻し材の)乾燥密度、(埋め戻し材の)		
	ケイ砂混合率、(埋め戻し材の)含水比、(埋め戻し材の)熱伝導率		
指標(統合 FEP)	15.水化学		
現象解析	高レベル放射性廃棄物処分場における緩衝材中の核種の収着や拡散に対して、		
	地下水と緩衝材との反応による間隙水水質と Ca 型化の進展度を考慮する。		
	● 高レベル放射性廃棄物処分場の場合は、地下水が緩衝材と反応して還元性		
	の緩衝材の間隙水水質を形成し、pH、Ehイオン強度などが影響を受ける。		
	この時、地下水組成によってはモンモリロナイトのCa型化も進展する場合		
	がある。		
	⇒ミキシングモデルによる解析を実施。解析に用いる化学反応パラメータ		
	は付属書 6-15 の表 1 を参照。		
パラメータの階層	16 緩衝材間隙水水質の変化		
関係	17 └緩衝材仕様		
	18 「厚さ		
	19 「膨潤後の有効粘土密度		
	20 └イオン交換反応		
	21 「陽イオン交換容量		
	22 「初期の交換性陽イオン組成		
	23 「イオン交換反応選択係数		
	24 「可溶性不純物含有量		
	25 └平衡鉱物		
	26 └表面酸・塩基解離反応		
	27 └表面酸・塩基解離定数		
	28 「表面サイト数		
	29 「表面サイト有効比表面積		
	30 └間隙水の温度		
取得の対象となる	(緩衝材の)厚さ、(緩衝材の)膨潤後の有効粘土密度、(緩衝材の)イオン		
最下層のパラメー	交換反応、(緩衝材の)陽イオン交換容量、(緩衝材の)初期の交換性陽イオ		
タ	ン組成、(緩衝材の)イオン交換反応選択係数、(緩衝材の)可溶性不純物含		
	有量、(緩衝材の)平衡鉱物、(緩衝材の)表面酸・塩基解離反応、(緩衝材		
	の)表面酸・塩基解離定数、(緩衝材の)表面サイト数、(緩衝材の)表面サ		
	イト有効比表面積、(緩衝材の)間隙水の温度		
指標(統合 FEP)	23.水の輸送		
現象解析	「水の輸送」は間隙水水質の形成に関与するプロセスとして、基本シナリオに		
	おいて考慮される。		
	● EDZ領域に流入した地下水が緩衝材中に浸潤して緩衝材中の鉱物と反応		
	しながら緩衝材間隙水を形成する。		
	⇒ミキシングモデルによる解析。付属書 6-15_表2を参照。		
	● セイントで対判の古伊工がたて担合には セイントトロウトを地工ナが必		
	■ ビクンドボ州村の又体上がのる場合には、ビグンドと区心しに地下水が核 価材し反応して間隙かな形式するが、影響はキョンレレノ経営が用工に明空		
	週初と以心して同院小を形成するか、影響はビアマ下/ 被倒材 芥田に限止		

	的である。		
	⇒影響が限定的とあるため、対象外とする。		
	● ODなどの鉄宏聖材料の近傍では、経衛材開踏水は鉄府会生式物トナ 反応		
	● OFなどの政谷品的科の処防では、版图的间隙小は妖腐良生成物とも反応		
	が進んでいる状態にあることが想定される。		
	⇒ミキシングモデルによる解析。付属書6-15_表3を参照。		
パラメータの階層	FEP 23.水の輸送(緩-10_ FEP 23.水の輸送に同じ)		
関係	31 緩衝材間隙水水質		
D.d.b.I.	$32  {}^{\perp}pH$		
	33 └Eh		
	34 └イオン強度		
	35 └各元素濃度		
	36 ガラス固化体とOPの間隙水水質		
	37 └pH		
	38 ^L Eh		
	39 レイオン強度		
	40 └各元素濃度		
取得の対象となる	(緩衝材間隙水の)pH、(緩衝材間隙水の)Eh、(緩衝材間隙水の)イオン強		
最下層のパラメー	度、(緩衝材間隙水の)各元素濃度、(ガラス固化体と OP の間隙水の)pH、		
タ	(ガラス固化体と OP の間隙水の)Eh、(ガラス固化体と OP の間隙水の)イ		
/	オン強度、(ガラス固化体と OP の間隙水の)各元素濃度		
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-6 3.6.3		
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 6		
	包括的技術報告書 付属書 4-39 5.2、付録 B		
	包括的技術報告書 付属書 6-15 3.2.1、3.3、3.5		
	包括的技術報告書 本編 6.4.1 項(2)(v)(a)①		

付表 2-36 (埋-1) 埋め戻し材の低透水性に関する調査結果

ID	埋-1	対象となる構成要素	埋め戻し材	
対応する安全機能	坑道及びその	同辺が卓越した放射性物	質の移行経路となることの抑制	
調査対象	低透水性			
内容	坑道内が卓越	さした地下水の流動経路に	ならないこと。	
指標	透水係数	基準	母岩の平均的な透水係数の 10 倍以下	
確認方法	【坑道内が卓	i越した地下水の流動経路	にならないように、埋め戻し材の密度を	
	設定する。】			
	● 埋め戻し	し材の設計の設定手順		
	① 材料を達	選定		
	② 埋め戻し	② 埋め戻し材の締固め特性や坑道に応じた施工方法を考慮		
	③ 設計要件の基準を充足するように、埋め戻し材の密度と材料の配合を設定			
	(1) 材料の選定			
	▶ 材料調達の容易性と経済性の観点から、坑道掘削に伴い大量発生する掘			
	削土を利用			
	○掘削土利用における確認事項			
	私度万印、     大明休官による     化子変化の     処分ン     人丁ムへの     影響     、     低添水性     確保の     ため、     ベント     ナイト     た返			
	<ul> <li>▶ 個. 透小性 唯体 り に の、 ハントワイトを 低合</li> <li>(9) 仕 構設 定 に おけ ろ 孝 庸 車 頂</li> </ul>			
	(4) □□な収定にわりる与思事項 ▶ 掘削十の性状			
	<ul> <li>□/□日り120/124/Λ</li> <li>▶ 地下水冬化(低Cl⁻濃産/真Cl⁻濃産)</li> </ul>			
	<ul> <li>▶ 支保工築コンクリート制の抗省内建置励から溶出する成分によるベン</li> </ul>			
	<ul> <li>スホエラー・フラー F 茶の処理的及直初から俗山りる成刀によるパントナイトの Ca 型化</li> </ul>			
	(3) 設計要件を充足する配合 乾燥密度 有効粘土密度の設定			
	► EDZ	の地下水流動解析による	或度解析の結果より、坑道及びその周辺	
	の地下水流動の抑制のためには、EDZ に対する直接的な対策が必要で			
	あり適	回な位置に止水プラグを	設置することで対応する(埋め戻し材の	
	性能で	対応できる範囲に一定の	限界がある)	
	▶ 保守的	」に、高 Cl-濃度などの地	下水条件に対しても有効粘土密度から推	
	定され	る埋め戻し材の透水係数	が母岩の平均的な透水係数の 10 倍以下	
	になる	ように設定		
	≻ 掘削土	とベントナイト混合土の	締固め特性(乾燥密度、含水比、配合の	
	関係性	:) より配合割合を設定		
	※ジェネラル	ンな段階である包括的技術	所報告書において掘削土はケイ砂の物性	
_	で代用、ベン	✓トナイトは、クニゲル V	1 で検討	
パラメータの階層	1 母岩の <b></b> 母岩の B	专水係数		
関係	<ol> <li>2 埋め戻し</li> </ol>	材の透水係数		
	3 -地下水	く組成および濃度		
		)配合(ペントナイトと掘 F」 Han 新潟安立	則土の乾燥重量比)	
		そし付の乾燥省度		
	0 ⁻ -埋め身   7 └冊み言	ミレ州 10 月 別 柏 工 省 度 ヨー 廿 の 今 水 比		
	7 └埋め身	そし材の含水比		

	8 └材料の特性
	9 レベントナイトの乾燥密度
	10 「掘削土の粒度分布
	11 「掘削土の化学特性
取得の対象となる	母岩の透水係数、地下水組成及び濃度、材料の配合(ベントナイトと掘削土の
最下層のパラメー	乾燥重量比)、埋め戻し材の乾燥密度、埋め戻し材の有効粘土密度、埋め戻し
タ	材の含水比、ベントナイトの乾燥密度、掘削土の粒度分布、掘削土の化学特性
参考文献	<ul> <li>● 包括的技術報告書本編 表4.5-8 図4.5-11</li> </ul>
	● 包括的技術報告書 付属書4-43 4.1
	● 包括的技術報告書 付属書4-43 図2
# 付表 2-37 (埋-2) 埋め戻し材の緩衝材及び止水プラグの膨出抑制に関する調査結果

ID	埋-2	対象となる構成要素 埋め戻し材		
整理対象	緩衝材	1及び止水プラグの膨出抑制		
内容	連絡坑	連絡坑道において、再冠水後の緩衝材および止水プラグ(ベントナイト製の場		
	合)の	合)の膨出を抑制する		
指標	緩衝材	の有効粘土密度 基準 1.014 / 2011		
	止水プ	ラグの有効粘土密度		
確認方法	【再冠	水後の緩衝材及び止水プラグ(ベントナイト製のプラグ)の膨出を抑制		
	し、緩	動材及び止水プラグの有効粘土密度が設計要件を満足する範囲にあるこ		
	_ とを、 ● _ 1トオ	とを、設定した埋め戻し材の仕様に対して確認する。】 ● ルオプラグについては 経衛社と同じ密度・町合の仕様 ししていてため 頌		
	● 血力 衝刺	に関する評価を反映		
	● 緩種	所材の膨出による緩衝材の密度低下について、有限要素法による三次元		
	弾性	E解析を実施		
		緩衝材の膨潤圧による膨出→膨出に伴う緩衝材の密度低下→密度低下 による膨調にの低下による膨出→応用す。		
		こよる服領圧の低下一服領圧の低下による服山重の兄直し を収采す ろまで繰り返し計算		
		解析に用いる物性値は、緩衝材及び埋め戻し材の乾燥密度、弾性係数、		
		ポアソン比		
	*NUN	※NUMO-SC では保守的に、緩衝材の初期膨潤応力のみを作用させ、OP の腐 金膨脹の囲み見したの感測に力は表慮していない。		
パライータの眺層	我那玩     1 #	や生め戻し材の膨個応力は考慮していない 		
パノメークの酒層	1 生	の戻し何の社稼		
	2 9 L			
		理め戻し初の転線査及 押め戻し材の右効料十変度		
	4 5 正	生の床し初の有効相工在反 冠水後の経衝材(止水プラグ)の有効粘土密度		
	6 4	経衛材の物性値		
	7			
	8	└緩衝材の弾性係数		
	9	「緩衝材のポアソン比		
	10 -	埋め戻し材の物性値		
	3	└埋め戻し材の乾燥密度		
	11	└埋め戻し材の弾性係数		
	12	└埋め戻し材のポアソン比		
	13 -	緩衝材の初期膨潤応力		
	14 -	埋め戻し材の初期膨潤応力		
	15 └	OPの腐食膨張圧力		
取得の対象となる	緩衝材	の膨潤圧、緩衝材の乾燥密度、緩衝材の弾性係数、緩衝材のポアソン比、		
最下層のパラメー	埋め戻	し材の初期(製造時)乾燥密度、埋め戻し材の弾性係数、埋め戻し材の		
<i>A</i>	ポアソ	ポアソン比、ベントナイトと掘削土の乾燥重量比、埋め戻し材の初期(製造時)		
	乾燥密	度、埋め戻し材の有効粘土密度		
参考文献	• 包	括的技術報告書 本編 表4.5-9		
	• 包	括的技術報告書 付属書4-45、付属書4-47		
	<ul><li>・ 杉</li></ul>	田裕、藤田朝雄、棚井憲治、長谷川宏、古市光昭、奥津一夫、三浦一彦		
	(	1999):地層処分場における地下施設の埋め戻し、JNC TN8400 99-039		

付表 2-38 (埋-3) 埋め戻し材の鉱物組成に関する調査結果

ID	埋·3	対応となる構成要素	埋め戻し材		
対応する安全機能	坑道及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				
整理対象	鉱物組成				
(状態変数)					
内容	埋め戻された坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経路とならない				
	よう、埋め戻	夏し材には、緩衝材と同様	にベントナイトを材料に用い、低透水性		
	を確保する。	したがって、緩衝材の安全	全機能「放射性物質の移流による移行の		
	抑制」と同じ	影響要因によってベント	ナイトの性能が影響を受け、埋め戻し材		
	の安全機能が	影響を受けることになる	o		
	<緩衝材の安	全機能「放射性物質の移	流による移行の抑制」の影響要因>		
	<ul> <li>以下の要</li> </ul>	長因によるベントナイト(	モンモリロナイト)の層構造の変化		
	▶ 緩御	衛材の地下水への流出によ	る密度低下		
	> パイ	イピングに伴う間隙構造の	変化や厚さ減少による間隙の増加		
	<ul> <li>● 以下の要</li> </ul>	夏因による透水性の増加			
	> OP	やセメント系材料との相互	<b>五作用</b>		
	▶ モンモリロナイトのイオン交換 (Ca型化など) に伴う鉱物組成の変化				
	● 温度上昇による緩衝材の熱変質				
	● 間隙水水質の変化(地下水と緩衝材の反応などによるイオン強度の変化な				
	ど)	ど)			
指標(統合 FEP)	15.水化学				
現象解析	基本シナリオにおける埋め戻し材の変質については、坑道や処分場など、埋				
	め戻し材が使用される対象部位の設計条件(埋め戻し材の有効粘度密度や影響				
	を与える処分坑道の吹付けコンクリートや力学プラグのセメント量など)や変				
	質速度の不確実性を考慮して保守的な状態設定を行う。				
	<ul> <li>坑道の吹付けコンクリート、力学プラグなどのセメント材料に起因する</li> </ul>				
	高pH間隙水により、処分坑道やアクセス・連絡坑道の埋め戻し材中のモ				
	ンモリロナイトや随伴鉱物が溶解する。溶解に伴い、二次鉱物が沈殿し				
	て鉱物変質が起きるが、変質の程度は使用されるセメントの量や初期の				
	有効粘度密度に依存する。				
	● 緩衝材や止水プラグと比べ、埋め戻し材は有効粘度密度が低いので、吹				
	付けコンクリートなどのセメント量が多い処分坑道やアクセス坑道な				
	どにま	どにおいては鉱物変質の進行が早いが、モンモリロナイトは残存し一定			
	の低速	<b>⑥</b> 水性は維持される。ただ	し、高レベル放射性廃棄物処分場(竪置		
	き・フ	「ロック方式)など、使用	するセメント量が比較的少ない場合には		
	鉱物婆	5質の影響は小さい。			
	● 埋め戻	夏し材はセメント系材料(	支保工など)と接触しているため、長期		
	にわた	とる相互作用による埋め房	<b>ミし材の状態の変遷について解析を通じ</b>		
	て検診	すを行う。概念モデルについ	いては、緩衝材と同様のものを適用する。		
	解析コードは化学物質・物質移行連成解析コードQPAC (Quintessa,				
	2013)	を使用する。			
	→化学物質	ぼ・物質移行連成解析コー	ドQPACによる解析。		

	解析の詳細は付属書6-12の表1(コード略称MINARET)及び表5を参照。
パラメータの階層	1 初期(製造時)有効粘土密度
関係	2 「処分坑道内の設定温度
	3 └埋め戻し材の鉱物組成(埋め戻し材を組成する各鉱物の1m ³ あたりの分
	子量及び体積分率)
	4 └地下水組成及び濃度
	5 レモンモリロナイトの溶解速度
	6 └実効拡散係数
	7 └埋め戻し材の間隙率
	8 └地下水流量
取得の対象となる	処分坑道内の設定温度、埋め戻し材の鉱物組成(埋め戻し材を組成する各鉱物
最下層のパラメー	の 1m ³ あたりの分子量及び体積分率)、地下水組成及び濃度、モンモリロナイ
Þ	トの溶解速度、実効拡散係数、埋め戻し材の間隙率、地下水流量
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-8 2.3.3 及び 4.1~4.3
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 7
	包括的技術報告書 付属書 6-12 表1及び表5

ID	埋-4	対応となる構成要素	埋め戻し材	
対応する安全機能	坑道及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			
整理対象	密度			
(状態変数)				
内容	埋め戻された坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経路とならない			
	よう、埋め戻	し材には、緩衝材と同	同様にベントナイトを材料に用い、低透水性	
	を確保する。	したがって、緩衝材の	D安全機能「放射性物質の移流による移行の	
	抑制」と同じ	影響要因によってベン	、トナイトの性能が影響を受け、埋め戻し材	
	の安全機能が	影響を受けることにな	なる。	
	<緩衝材の安	全機能「放射性物質の	D移流による移行の抑制」の影響要因>	
	<ul> <li>● 以下の要</li> </ul>	因によるベントナイ	ト(モンモリロナイト)の層構造の変化	
	▶ 緩衝	おの地下水への流出し	による密度低下	
	> パイ	ピングに伴う間隙構i	造の変化や厚さ減少による間隙の増加	
	<ul> <li>● 以下の要</li> </ul>	因による透水性の増加	חל	
	> OP	やセメント系材料との	相互作用	
	> モン	モリロナイトのイオ	ン交換 (Ca型化など) に伴う鉱物組成の変化	
	● 温度上昇	による緩衝材の熱変質		
	● 間隙水水	.質の変化 (地下水と綴	<b>愛衝材の反応などによるイオン強度の変化な</b>	
	ど)			
指標(統合 FEP)	15.水化学 1	6.腐食 18.溶解 19.	.沈殿反応 20.化学的変質	
現象解析	基本シナリオにおける埋め戻し材の変質については、対象部位の設計条件(有			
	効粘度密度や	影響を与えるセメン丨	ト量など)や変質速度の不確実性を考慮して	
	保守的な状態設定を行う。			
	⇒ID:埋∹	Bに同じ。化学物質・特	物質移行連成解析コードQPACによる解析。	
	解析コー	ドの詳細は付属書6-1	2の表1 (コード略称MINARET) 及び表5を	
	参照。			
パラメータの階層	FEP 15.水化	学(埋-3に同じ)		
関係	1 初期(集	[造時) 有効粘土密度		
	<ol> <li>2 └処分坊</li> </ol>	道内の設定温度		
	3 └埋め戻	し材の鉱物組成(埋め	り戻し材を組成する各鉱物の 1m3 あたりの	
	分子量及	び体積分率)		
	4 └地下水	組成及び濃度		
	5 ビモンモ	リロナイトの溶解速度	变	
	6 └実効拡	散係数		
	7 └埋め戻	し材の間隙率		
	8 山地下水	流量		
取得の対象となる	処分坑道内の	設定温度、埋め戻し林	オの鉱物組成(埋め戻し材を組成する各鉱物	
最下層のパラメー	の1m³あたり	の分子量及び体積分響	率)、地下水組成及び濃度、モンモリロナイ	
タ	トの溶解速度	、実効拡散係数、埋め	め戻し材の間隙率、地下水流量	
参考文献	包括的技術報	告書 付属書 6-8 2.	3.3 及び 4.1~4.3	
	包括的技術報	告書 付属書 6-9 表	そ7、付属書 6-12 表1及び表5	

付表 2-39 (埋-4) 埋め戻し材の密度に関する調査結果

ID	埋-5 対応となる構成要素 埋め戻し材		
対応する安全機能	坑道及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		
整理対象			
(状態変数)			
内容	埋め戻された坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経路とならない		
	よう、埋め戻し材には、緩衝材と同様にベントナイトを材料に用い、低透水性		
	を確保する。したがって、緩衝材の安全機能「放射性物質の移流による移行の		
	抑制」と同じ影響要因によってベントナイトの性能が影響を受け、埋め戻し材		
	の安全機能が影響を受けることになる。		
	<緩衝材の安全機能「放射性物質の移流による移行の抑制」の影響要因>		
	● 以下の要因によるベントナイト(モンモリロナイト)の層構造の変化		
	▶ 緩衝材の地下水への流出による密度低下		
	▶ パイピングに伴う間隙構造の変化や厚さ減少による間隙の増加		
	● 以下の要因による透水性の増加		
	➢ OPやセメント系材料との相互作用		
	▶ モンモリロナイトのイオン交換(Ca型化など)に伴う鉱物組成の変化		
	● 温度上昇による緩衝材の熱変質		
	● 間隙水水質の変化(地下水と緩衝材の反応などによるイオン強度の変化な		
	ど)		
指標(統合 FEP)	11.熱プロセス		
現象解析	基本シナリオでは、設計上の想定に基づいて、埋め戻し材や止水プラグの温		
	度変遷を考慮するが、長期的には地温での推移を想定する。		
	● 緩衝材の最高温度は制限温度である100℃を超えないように廃棄物の定		
	置条件など設計上の対策がなされる。埋め戻し材の温度変化は緩衝材を		
	超えることはなく、温度が高い条件でも埋設後数十年後の最高温度で		
	80℃程度、1,000年後で地温付近(深成岩類の場合で60℃)まで低下す		
	る。この条件では、ペントナイトは長期的に安定であり、イフイト化な		
	● 局レヘル放射性廃業物処分(登直さ・ノロック方式)の処分坑道中心間 販産の恐宅におけて成本体対影響の検討において、力学的空空性な確保		
	此種の設たにわりる焼栗体熱影響の使討にわいて、刀子的女た性を確依 した如八坑道及び人工が出てた対角に効に道敏にた実施し 経衛社の具		
	同価度が前限価度を何定することを確応する。 脾例 ユートはCOMSOL Multiphysics vor5 2p (COMSOL AB) を使用する 解析に使用する物		
	Multiplysics ver5.2a (COMSOLAD) を使用する。解析に使用する初 性値け付届 $\pm 4-39$ の表3 一世め豆し材の執伝道率及び比執の設定根拠け		
	付属書4-39の付録Bを参昭		
	→執伝導解析。解析コードの詳細は付属書 6-12 の表 1 及び表 2 を参照。		
パラメータの階層	1 緩衝材の最高温度		
関係	2 「緊 置き・ブロック方式の廃棄体定置間隔及び処分坑道中心間距離		
	3		
	4 山地温勾配		
	5 └ガラス固化体の発熱量の経時変化		

付表 2-40 (埋-5) 埋め戻し材の温度に関する調査結果

	6 └ガラス固化体の物性値
	7 └熱伝導率
	8
	9 上密度
	10 └OP の物性値
	11 上熱伝導率
	12
	13   └密度
	14 └緩衝材の物性値
	15 └熱伝導率
	16
	17 └密度
	18 └充填材(緩衝材周りの)の物性値
	19 └熱伝導率
	20
	21 └ 密度
	22 「埋め戻し材の物性値
	23 上熱伝導率
	24
	25 └密度
	26 └支保・インバートの物性値
	27 上熱伝導率
	28 上比熱
	29 上密度
	30 「岩盤(深成岩類、新第三紀堆積岩類どちらか)の物性値
	31 └熱伝導率
	32 上比熱
	33 └密度
取得の対象となる	堅置き・ブロック方式の廃棄体定置間隔及び処分坑道中心間距離、地表面温度、
最下層のパラメー	地温勾配、ガラス固化体の発熱量の経時変化、(ガラス固化体の)熱伝導率、
8	(ガラス固化体の)比熱、(ガラス固化体の)密度、(OPの)熱伝導率、(OP
	の)比熱、(OPの)密度、(緩衝材の)熱伝導率、(緩衝材の)比熱、(緩衝
	材の)密度、(充填材(緩衝材周り)の)熱伝導率、(充填材(緩衝材周り)
	の)比熱、(充填材(緩衝材周り)の)密度、(埋め戻し材の)熱伝導率、(埋
	め戻し材の)比熱、(埋め戻し材の)密度、(支保・インバートの)熱伝導率、
	(文保・インバートの)比熱、(文保・インバートの)密度、(岩盤の)熱伝
	導率、(岩盤の)比熱、(岩盤の)密度
指標(統合 FEP)	
况家胜灯	▲ 4 ン 7 リ 3 ごは、 埋 Ø 戻 し 材 Ø 似 透 亦 性 か 免 見 さ れ る 前 提 フ ロ セ ス と し て 老 虐 士 z
	与思りる。
	● 丹枢小洄住にわいて地下小が埋め戻し材に浸潤し膨潤が生しる適程で、 水約和底が増まし効に道索も増加ます。 原始的なプロセスですようたな味
	小曍州皮が増りと款伝导率も増加する。適便的なノロセムであるため時

	間的な不確実性があるので、埋め戻し材を含む熱解析は保守的な熱伝導		
	率を用いて評価している。		
	⇒ID:埋-5 11.熱プロセスに同じ。		
パラメータの階層	FEP 12.再冠水/脱飽和(上記 FEP 11.熱プロセスに同じ)		
関係	1 緩衝材の最高温度		
	2 「竪置き・ブロック方式の廃棄体定置間隔及び処分坑道中心間距離		
	3 └地表面温度		
	4 └地温勾配		
	5 「ガラス固化体の発熱量の経時変化		
	6 └ガラス固化体の物性値		
	7 └熱伝導率		
	8		
	9 └密度		
	10 └OP の物性値		
	11 └熱伝導率		
	12 上比熱		
	13 └密度		
	14 └緩衝材の物性値		
	15 └熱伝導率		
	16 上比熱		
	17 └密度		
	18 └充填材(緩衝材周りの)の物性値		
	19 └熱伝導率		
	20		
	21 └ 密度		
	22 「埋め戻し材の物性値		
	23 上熱伝導率		
	24		
	25 └密度		
	26 └支保・インバートの物性値		
	27 └熱伝導率		
	28		
	29 └密度		
	30 └岩盤(深成岩類、新第三紀堆積岩類どちらか)の物性値		
	31 └熱伝導率		
	32		
取得の対象となる	竪 置き・フロック万式の 廃棄 体 定 置 間 隔 及 ひ 処 分 坑 迫 甲 心 間 距離、 地 表 面 温 度、 地 泪 勾 配 ・ ガ ラ ス 田 ル 休 の 発 執 景 の 怒 時 亦 ル ・ ( ガ ラ ス 田 ル 休 の ) 執 伝 道 索		
最下層のパラメー	(ガラス固化体の)比熱、(ガラス固化体の)密度、(OPの)熱伝導率、(OP		
9	の)比熱、(OPの)密度、(緩衝材の)熱伝導率、(緩衝材の)比熱、(緩衝		
	材の)密度、(充填材(緩衝材周り)の)熱伝導率、(充填材(緩衝材周り)		
	の) 比熱、(充填材(緩衝材局り)の) 密度、(埋め戻し材の) 熱伝導率、(埋め) おうしおの) 比熱 (埋め豆) おの) 密度 (支保・インバートの) 熱伝道率		

	(支保・インバートの)比熱、(支保・インバートの)密度、(岩盤の)熱伝 道率 (学般の)比熱 (学般の)密度
参考文献	包括的技術報告書 付属書 2-3 図 8
	包括的技術報告書 付属書 4-39
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 7
	包括的技術報告書 付属書 6-12 表 1、表 2

付表 2-41 (埋-6)埋め	こし材の間隙構造に関する調査結果
-----------------	------------------

ID	埋-6	対応となる構成要素	埋め戻し材	
対応する安全機能	坑道及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			
整理対象	間隙構造			
(状態変数)				
内容	埋め戻された坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経路とならない			
	よう、埋め戻	し材には、緩衝材と同様に	こベントナイトを材料に用い、低透水性	
	を確保する。	したがって、緩衝材の安全	全機能「放射性物質の移流による移行の	
	抑制」と同じ	影響要因によってベント [、]	ナイトの性能が影響を受け、埋め戻し材	
	の安全機能が	影響を受けることになる。	, ,	
	<緩衝材の安	全機能「放射性物質の移	流による移行の抑制」の影響要因>	
	<ul><li>以下の</li></ul>	要因によるベントナイト	(モンモリロナイト)の層構造の変化	
	▶ 緩衝	所材の地下水への流出によ	る密度低下	
	▶ パイ	<b>・</b> ピングに伴う間隙構造の	変化や厚さ減少による間隙の増加	
	<ul> <li>以下の</li> </ul>	要因による透水性の増加		
	> O P	やセメント系材料との相	互作用	
	▶ モンモリロナイトのイオン交換 (Ca型化など)に伴う鉱物組成の変化			
	● 温度上昇による緩衝材の熱変質			
	● 間隙水水質の変化(地下水と緩衝材の反応などによるイオン強度の変化			
-	など)	など)		
指標(統合 FEP)	12.再冠水/脱貨	泡和		
現象解析	基本シナリオでは、設計通りに埋め戻し材の膨潤によって低透水性が発揮され			
	ることを想定する。			
	<ul> <li>● 坑道に</li> </ul>	地下水が流入するに伴っ	て、埋め戻し材は徐々に浸潤して膨潤が	
	進み、	隙間を閉塞して低透水性の	の状態に至る。地下水の塩分濃度の影響	
	ヤUa型化も考慮した設計上の対策かなされている。 →ID・田1 低添ませた同様の現色細転(確認ませ、したす			
	⇒ID : 埋-1	低透水性と同様の現象	解析(確認方法)となる。	
パラメータの階層	FEP 12. 冉冠	水/脱飽和(埋-1)低透水(	生」に同じ)	
関係	1 初期(製	と (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	水係数	
	2 「材料の		<b>壬</b> 目11.	
		ドナイトと拙則主の乾燥	<u>単重</u> 比	
		し材の速定材料の特性		
		の遊水係剱		
		・小租风及い張皮 (制と味)の囲め言しせの	大动业上家庄	
		(衆垣時)の埋め戻し材の	有刻柏工名及	
	9 · · · ·	トノイトの紀床員里		
	10 Lベン	トナイトの存領		
	11 12 レベン	トナイトの前帰の存領		
	13 L埋め	- / - · · · · · · · · · · · · · · · · ·	粒子密度	
	10 ^上 乾慢	管量での埋め戻し材に含	まれる砂の混合率	
取得の対象となる	ベントナイト	と掘削土の乾燥重量比、	母岩の透水係数、地下水組成及び濃度、	

最下層のパラメー	ベントナイトの乾燥質量、ベントナイトの容積、ベントナイトの間隙の容積、
タ	ベントナイトの乾燥密度、埋め戻し材に含まれる砂の土粒子密度、乾燥質量で
	の埋め戻し材に含まれる砂の混合率
指標(統合 FEP)	15.水化学
現象解析	基本シナリオでは、埋め戻し材の変質については、坑道や処分場など、埋め
	戻し材が使用される対象部位の設計条件(有効粘度密度や影響を与えるセメン
	ト量など)や変質速度の不確実性を考慮して保守的な状態設定を行う。
	● ベントナイト中の間隙水水質は、基本的には地温レベルの温度における
	地下水とベントナイトとの反応できまる。高イオン強度の条件(塩水条
	件)でも埋め戻し材(緩衝材の挙動に準じる)の低透水性は有効に発揮
	されるよう設計上の考慮がなされている(付属書4-43参照)。
	● 処分場のセメント/ベントナイト反応において、変質層の生成はセメン
	ト材料との界面に限定される。埋め戻し材の場合は、その有効粘土密度
	に応じて変質の程度が異なる。Na型モンモリロナイトのCa型化への変
	遷も考えられるが、設計上の対策(付属書4-43参照)がなされているの
	で低透水性は維持される。高レベル廃棄物処分場(竪置き・ブロック方
	式)においては、セメント使用量が少ないので、TRUなど廃棄物処分場
	の場合よりもこのプロセスの影響は小さい。
	⇒ID:埋-1 低透水性と同様の現象解析(確認方法)となる。
	● 地下水組成及び濃度によってもCa型化が進展する場合もあるが(付属書
	6-15参照)、この場合も低透水性への影響はない。
	⇒埋め戻し材には緩衝材と同じベントナイトが掘削土と混合されて用いら
	れること、地下水組成及び濃度を大きく変えるような掘削土は使用しない
	ことから、人工バリア内の水質形成において大きな影響を与えるとは考え
	られないとし、水質設定において考慮しない。
	<ul> <li>● 鉄容器の腐食に起因する緩衝材の変質は、鉄容器との界面に限定され</li> </ul>
	る。その結果、緩衝材の大半は未変質のままであり、間隙構造の有意な
	変化はない。
パラメータの階層	FEP 15 水化学(埋-1「低透水性」に同じ)
関係	1 初期(製造時)の埋め戻し材の透水係数
	2 「材料の配合
	4 レベントナイトと掘削土の乾燥重量比
	5 「埋め戻し材の選定材料の特性
	6 └母岩の透水係数
	7 └地下水組成及び濃度
	8 「初期(製造時)の埋め戻し材の有効粘土密度
	9 レベントナイトの乾燥質量
	10 レベントナイトの容積
	11 レベントナイトの間隙の容積
	12 レベントナイトの乾燥密度

	13 「埋め戻し材に含まれる砂の土粒子密度
	14 「乾燥質量での埋め戻し材に含まれる砂の混合率
取得の対象となる	ベントナイトと掘削土の乾燥重量比、母岩の透水係数、地下水組成及び濃度、
最下層のパラメー	ベントナイトの乾燥質量、ベントナイトの容積、ベントナイトの間隙の容積、
タ	ベントナイトの乾燥密度、埋め戻し材に含まれる砂の土粒子密度、乾燥質量で
	の埋め戻し材に含まれる砂の混合率
参考文献	包括的技術報告書 付属書 4-43
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 7
	包括的技術報告書 付属書 6-12
	包括的技術報告書 付属書 6-15 3.2.1

# 付表 2-42 (埋-7) 埋め戻し材の間隙水水質に関する調査結果

ID	埋-7	対応となる構成要素	埋め戻し材			
対応する安全機能	坑道及びその	同辺が卓越した放射性物	質の移行経路となることの抑制			
整理対象	間隙水水質					
(状態変数)						
内容	埋め戻された坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経路とならない					
	よう、埋め戻し材には、緩衝材と同様にベントナイトを材料に用い、低透水性					
	を確保する。	したがって、緩衝材の安全	全機能「放射性物質の移流による移行の			
	抑制」と同じ影響要因によってベントナイトの性能が影響を受け、埋め戻し材					
	の安全機能が	影響を受けることになる。				
	<緩衝材の安	全機能「放射性物質の移	流による移行の抑制」の影響要因>			
	<ul> <li>● 以下の</li> </ul>	)要因によるベントナイト	(モンモリロナイト)の層構造の変化			
	▶ 緩衝	<b>新材の地下水への流出によ</b>	る密度低下			
	> パイ	<b>、</b> ピングに伴う間隙構造の	変化や厚さ減少による間隙の増加			
	<ul> <li>● 以下の</li> </ul>	)要因による透水性の増加				
	➢ OP ·	やセメント系材料との相互	五作用			
	▶ モン	/モリロナイトのイオン交	換 (Ca型化など) に伴う鉱物組成の変化			
	● 温度上	● 温度上昇による緩衝材の熱変質				
	● 間隙水水質の変化(地下水と緩衝材の反応などによるイオン強度の変化					
	など)					
指標(統合 FEP)	12.再冠水/脱	飽和				
現象解析	基本シナリオでは、埋め戻し材が低透水性を発現する前段のプロセスとして考					
	慮される。					
	● 再冠水	、時に地下水が埋め戻し材	に浸潤し、鉱物との反応によって間隙水			
	水質が形成されるが、初期の不飽和の段階では残留酸素の影響で酸化性					
	環境である。溶存酸素は、ベントナイト中のパイライトや鉄腐食生成物					
	に消費され、次第に還元性の雰囲気が形成される。この段階で、ベント					
	ナイト	、の膨潤による低透水性の	発現が始まる。			
	⇒初期の不	「飽和の段階における残存」	酸素量については、埋め戻し材の間隙に			
	存在する酸素量、及びベントナイトに吸着している酸素量が示されてい					
	る。					
	▶ 埋め戻	し材の間隙に存在する酸	素量			
	埋め戻	し材の間隙に存在する酸	素量は、以下の式により算出できる。			
	間隙率	1 標準状態におけるモル	体積 × 空気中の酸素の体積割合			
	また間	隙率は、以下の式により	算出できる。			
	(1-乾燥密度 / 土粒子密度)×100 [%]					
	N	上ノレレロギレマシュア	★ 目.			
		フィトに败者している酸;	奈里			
		い (1992) によれは、上	記   间限に仔仕りる酸素重] の4倍の酸			
	素がべ	シトアイトに敗着をして	いる結果か試験により得られている。よ			
	って、	ハフメータは間隙に存在	りる酸素重と同様とした。			

パラメータの階層	1         再冠水時の残存酸素量
関係	2 「埋め戻し材の間隙に存在する酸素量
	3 「埋め戻し材の間隙率
	4 └初期(製造時)乾燥密度
	5 └土粒子密度
	6 「埋め戻し材の間隙における標準状態の酸素のモル体積
	7 「空気中の酸素の体積割合
	8 レベントナイトに吸着している酸素量
	3 上埋め戻し材の間隙率
	4 └初期(製造時)乾燥密度
	5 └土粒子密度
	9 └埋め戻し材中のパイライトとの反応による酸素の消費量
	10 「周辺に存在する微生物の活動による酸素の消費量
取得の対象となる	初期(製造時)乾燥密度、土粒子密度、埋め戻し材の間隙における標準状態の
最下層のパラメー	酸素のモル体積、空気中の酸素の体積割合、埋め戻し材中のパイライトとの反
Я	応による酸素の消費量、周辺に存在する微生物の活動による酸素の消費量
指標(統合 FEP)	15.水化学
現象解析	基本シナリオでは、埋め戻し材の変質については、対象部位の設計条件(有・
	効粘度密度や影響を与えるセメント量など)や変質速度の不確実性を考慮して
	保守的な状態設定を行うが、有意な間隙水水質の変化は想定しない。
	<ul> <li>・ 坑道の吹付けコンクリートや力学プラグなどのセメント系材料に起因</li> </ul>
	する高pH間隙水により、処分坑道やアクセス・連絡坑道の埋め戻し材や
	止水プラグ中のモンモリロナイトや随伴鉱物が溶解する。溶解に伴い、
	二次鉱物が沈殿して鉱物変質も起きるが、変質の程度は使用されるセメ
	ントの量や初期の有効粘度密度に依存する。
	● 埋め戻し材の場合は緩衝材と比べて有効粘度密度が低いので、吹付けコ
	ンクリートなどのセメント量が多い処分坑道やアクセス坑道などにお
	いては、鉱物変質の進行が早いが、モンモリロナイトは残存し一定の低
	透水性は維持される(付属書6-8 4.1~4.3参照)。ただし、高レベル放
	射性廃棄物処分場(竪置き・ブロック方式)など、使用するセメント量
	が比較的少ない場合には鉱物変質の影響は小さい。
	⇒ID:埋-3に同じ。化学物質・物質移行連成解析コードQPACによる解析。
	解析コードの詳細は付属書6-12の表1(コード略称MINARET)及び表5を
	参照。
パラメータの階層	FEP 15 水化学(埋-3「坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経
関係	路となることの抑制_鉱物組成」に同じ)
	11 初期(製造時)有効粘土密度
	12 山処分坑道内の設定温度
	13 └埋め戻し材の鉱物組成(埋め戻し材を組成する各鉱物の 1m ³ あたりの
	分子量及び体積分率)
	14 └地下水組成及び濃度
	15 └モンモリロナイトの溶解速度

	16 └実効拡散係数
	17 └埋め戻し材の間隙率
	18 └地下水流量
取得の対象となる	処分坑道内の設定温度、埋め戻し材の鉱物組成(埋め戻し材を組成する各鉱物
最下層のパラメー	の 1m ³ あたりの分子量及び体積分率)、地下水組成及び濃度、モンモリロナイ
タ	トの溶解速度、実効拡散係数、埋め戻し材の間隙率、地下水流量
参考文献	包括的技術報告書 付属書 6-8 4.1~4.3
	包括的技術報告書 付属書 6-9 表 7
	石川ほか、オーバーパックと候補材料選定と炭素鋼オーバーパックの寿命評
	価, 1992.

# 3. 品質保証体系で確認すべき情報・データの分類

本付録の 2.2 で示した調査結果に対し、品質保証体系で確認すべき情報・データとして再度整 理、分類を実施した。再整理の方針は本編 5.2.4(1)に示す通り、調査項目間で重複しているパラ メータを、パラメータの対象ごとに整理した。また、そのパラメータを用いる評価項目(ID)を 付した。それぞれのパラメータについて、変遷を考慮する必要のあるものについては●を記載し た。再整理の結果を付表 3-1 に示す。

|--|

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
	ガラス固化		才-6	
	体		才-10	
1		iii ht 孩 *h	才-12	
1		冲任际效	緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	
	ガラス固化		才-6	
	体		才-10	
			才-12	
2		密度	緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	
			埋-5	
	ガラス固化		オ-7	
3	体	発熱量	才-8	
			才-10	
4	ガ ラ ス 固 化 体	発熱に伴う温度	才-1-⑥	
5	ガラス固化 体	発熱量の経時変化	埋-5	•
6	ガラス固化 体	熱伝導率	埋-5	
7	ガラス固化 体	比熱	埋-5	
	ガラス固化		才-10	
0	体	ポマソン世	才-12	
8		小ノノノ比	緩-7-①	
			緩-7-②	
	ガラス固化		緩-10	
9	体の設置環	間隙水の pH	緩-12	$\bullet$
	境		緩 <b>-</b> 14	
	ガラス固化		緩-10	
10	体の設置環	間隙水の Eh	緩-12	$\bullet$
	境		緩-14	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
	ガラス固化		緩-10	
11	体の設置環	間隙水のイオン強度	緩-12	•
	境		緩-14	
	ガラス固化		緩-10	
12	体の設置環	間隙水の各元素濃度	緩-12	•
	境		緩-14	
	OP		才-6	
			才-10	
19		产生 1 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	才-12	
15		伸出示数	緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	
	OP		才-6	
			オ-7	
			才-8	
			才-10	
14		密度	才-12	
			緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	
			埋-5	
	OP		才-7	
15		執伝道家	才-8	
10			才-10	
			埋-5	
	OP		才-7	
16		12	才-8	
10			オ-10	
			埋-5	
	OP		才-6	
17			オ-10	
		ポアソンド	才-12	
1 1			緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
	OP		オ-1-①	
18		最大腐食深さ	オ-7	$\bullet$
			オ・11	
19	OP	平均腐食深さ	オ・1・④	
	OP		オ-1-③	
20		引張残留応力	オ-1-5	
			才-5	
	OP		才-2	
21		許容引張応力	才-10	
	0.D		オ-12	
	OP		才-6	
			才-10	
22		降伏応力	ス・12 終-7-①	
			版-7-① 经-7-①	
			破 1 ② 經-8	
	OP		板 0 オ-9	
23	01	設計降伏占	オ-10	
20		成时阵风杰	オ 10 オ-12	
	OP		x-1-3	
24	01	応力拡大係数	オ-1-5	
			才-5	
	OP		才-2	
25		平均せん断応力	才-10	
			才-12	
	OP		オ・1・③	
26		拡散性水素濃度	才-1-⑤	
			才-5	
97	OP	应 食 <b>量</b>	才-10	
41			オ-12	•
28	OP	腐食速度	才-11	
29	OP	平均腐食速度	オ-1-②	
30	OP	亀裂寸法	オ-1-③	
	OP		オ-1-5	
31		限 が 単 殺 寸 法	オ-5	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
	OP		オ・1・③	
32		降伏強度	才-1-⑤	
			才-5	
33	OP	表面積	オ・1・2	
	OP		才-2	
34		断面積(溶接面)	才-10	
			才-12	
	OP		才-2	
35		胴の外径	才-10	
36	OP	緩衝材内側から OP 中心軸までの 距離	才-1-④	
37	OP	緩衝材外側から OP 中心軸までの 距離	才-1-④	
	OP		オ-7	
			才-8	
			才-10	
38		肉厚	緩-3	
			緩-9	
			緩-11	
	OP(設置環		オ・1・③	
39	境)	炭酸化学種濃度	オ・1・⑤	
			才-5	
	OP(設置環		オ・1・③	
10	境)		才-1-⑤	
40		pH	才-5	•
			オ-7	
41	OP (設置環 境)	OP表面の菌数	才-1-④	•
	OP (設置環	OP 表面に接触する緩衝材中の間		-
42	境)	隙水の pH	才-11	•
49	OP(設置環	緩衝材から溶出し、OP 腐食で消	+ 11	
43	境)	費される硫酸塩還元成分	⊿ •11	•
4.4	OP(設置環	低酸素環境における腐食生成物間		
44	境)	隙水水質	2-7	•

No.	対象とする 構成要素	パラメータ	対応する ID	変遷の 老庫
46	OP (設置環 境)	OP 表面酸・塩基解離定数	緩 <b>-</b> 14	J MEX
47	OP (設置環 境)	OP 表面サイト数	緩-14	
48	<ul><li>OP(設置環</li><li>境)</li></ul>	OP 表面サイト有効比表面積	緩-14	
49	緩衝材	緩衝材と OP の隙間	緩-3 緩-9 緩-11	
50	緩衝材	弾性係数	才-6 埋-2	
51	緩衝材	ポアソン比	才-6 オ-10 オ-12 緩-7-① 緩-7-② 緩-8 埋-2	
52	緩衝材	熱伝導率	緩-13 緩-14 埋-5	
53	緩衝材	比熱	緩-13 緩-14 埋-5	
54	緩衝材	材料定数	才-6	
55	緩衝材	実効拡散係数	緩-1	
56	緩衝材	密度	埋-5	
57	緩衝材	初期乾燥密度	緩-2 緩-4 緩-6 緩-7-① 緩-7-② 緩-8 緩-9 緩-10	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
			緩-11	
			緩-12	
			緩-13	
			緩-14	
			埋-2	
	緩衝材		オ-10	
			才-12	
			緩-1	
			緩-2	
58		有効粘土密度	緩-3	
00			緩-4	
			緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-9	
			緩-11	
	緩衝材		オ-10	
59		十粒子密度	才-12	
00			緩-7-①	
			緩-7-②	
	緩衝材		緩-3	
			緩-9	
60		ケイ砂の土粒子密度	緩-10	
			緩-11	
	1.4.4.1.1		緩-12	
61	緩衝材	飽和状態の密度	才-3	
	緩衝材		才-6	
			オ-10	
69			オ-12	
			緩-1	
			緩-4	
02		×2/11/01/8A	緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	
			緩-9	
			緩-11	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の	N
	構成要素		ID	考慮	
	緩衝材		才-6		
			オ-10		
63		膨潤指数	才-12		
00			緩-7-①		
			緩-7-2		
			緩-8		
64	緩衝材	膨潤圧	才-9	•	
01			埋-2	-	
	緩衝材		緩-3		
65		ベントナイトの最大膨潤率	緩-9		
			緩-11		
	緩衝材		緩-4		
			緩-9		
66		初期(製造時)含水比	緩-11		
			緩-13		
			緩-14		
67	緩衝材	内部摩擦角	才-6		
07		了印刷不用	緩-8		
68	緩衝材	休痔れずみ	才-6		
00		平慎 U· y or	緩-8		
69	緩衝材	初期体積ひずみ速度	緩-7-①		
70	緩衝材	神徳海底度の見た広めば	才-6		]
70		収壊按坦度の取入応合値	緩-8		
= 1	緩衝材	同志博ル四田元のウ料	才-6		
71		回転硬化限界面の定剱	緩-8		
-	緩衝材	同志再ルジロ町のウ料	才-6		
72		回転硬化発展則の足剱	緩-8		
-	緩衝材		才-6		
			オ-10		
-		FT 002 +1-3 4/L	オ-12		
73		上稲指釵	緩-7-①		
			緩-7-②		
			緩-8		
	緩衝材		才-6		1
74		限界状態応力比	才-10		
			オ-19		

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
			緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	
	緩衝材		才-10	
75		初期静止十圧係数	才-12	
			緩-7-①	
	10010-11		緩-7-2	
	緩衝材		才-10	
76		初期有効応力	オ-12	
			緩-7-①	
	V72/47:++			
	<b></b>		⊿ -10 +-19	
77		先行圧密応力		
			极了① 綏-7-②	
78	緩衝材		·波··包 綏-8	
70	経衝材		經-7-①	
19	· 版画们		版 - 1 ①	
80		一次上密終了時間	緩-7-①	
81	緩衝材	圧密応力	緩-6	
82	緩衝材	変位量	オ-10	
	100 100 1		オ-12	
83	緩衝材	応力	オ-10	
	10010-11		オ-12	
84	緩衝材	組成	才-3	
	緩衝材		オ-7	
			才-8	
			才-10	
85		厚さ	緩-1	
			緩-3	
			緩-9	
	经金融		板-11	
	· 拔 餌 忆		オ-8	
86		ケイ砂混合率	ス・10 経-9	
			- 阪⁻⊿ 經-9	
			版⁻ə	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
			緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-9	
			緩-11	
			緩-13	
			緩-14	
	緩衝材		緩-3	
87		緩衝材と岩盤の隙間	緩-9	
			緩-11	
	緩衝材		才-1-①	
88		間隙率	オ-7	
			才-11	
	緩衝材		才-6	
			才-10	
			才-12	
89		初期間隙比	緩-6	
			緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	
	緩衝材	ベントナノーに四美していて融ま	オ・1・①	
90		ハントリイトに吸着している酸素	オ-7	
		重	才-11	
01	緩衝材の設	「「「「「」」」「「」」」」	才-6	
91	置環境	· 週 釈 间 隙 水 庄	緩-8	•
0.0	緩衝材の設	<u> </u>	緩-13	
92	置環境	间隙水温度	緩-14	•
	緩衝材の設		緩-10	
93	置環境	間隙水の pH	緩-12	
		-	緩-14	
	緩衝材の設		緩-10	
94	置環境	間隙水の Eh	緩-12	
			緩-14	-
	緩衝材の設		緩-10	
95	置環境	間隙水のイオン強度	緩-12	
			緩-14	-

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
	緩衝材の設		緩-10	
96	置環境	間隙水の各元素濃度	緩-12	$\bullet$
			緩-14	
98	緩衝材の設 ^{要理接}	緩衝材間隙水の陽イオン交換容量	緩 <b>-</b> 14	
		※ 新井間 附水の 知期の 古梅州 阻ノ		
99	版 倒 初 の 設 置環境	被 国 材 间 隙 小 の 初 易 の 父 換 住 陽 イ オン 組 成	緩 <b>-</b> 14	
	緩衝材の設	緩衝材間隙水のイオン交換反応選	<i>(</i> <b>1</b> ,	
100	置環境	択係数	緩-14	
101	緩衝材の設	緩衝材間隙水の可溶性不純物含有	緩-14	
101	置環境	量		•
102	緩 衝 材 の 設 置環境	緩衝材間隙水の平衡鉱物	緩 <b>-</b> 14	•
	緩衝材の設	経衛はの問題における博進出能の	才-1-①	
103	置環境	版 個 的 の 间 隙 に わ り る 保 毕 八 態 の	オ-7	
		販売のモル体損	オ・11	
	緩衝材の設	地下水中の SO4 ²⁻ が微生物により		
104	置環境	還元された後の緩衝材中 HS ⁻ /S ²⁻	オ・1・④	
		拡散係数		
	緩衝材の設	地下水中の SO4 ²⁻ が微生物により		
105	置環境	還元された後の緩衝材内外面 HS ⁻	オ・1・④	$\bullet$
		/S ²⁻ 濃度		
	埋め戻し材		オ-10	
			才-12	
106		ポアソン比	緩-7-①	
			緩-7-②	
			埋-2	
	埋め戻し材		才-10	
107		<b>下縮指数</b>	才-12	
101			緩-7-①	
			緩-7-2	
	埋め戻し材	実効拡散係数	埋-3	
108			埋-4	
			埋-7	
109	埋め戻し材	執伝道率	緩-13	
100			緩-14	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	<b></b> 悌		 坦-5	考慮
	押め豆し材		·王·0 緩-13	
110	星の戻し内		緩-14	
110			埋-5	
111	埋め戻し材	密度	埋-5	
	埋め戻し材		才-10	
			才-12	
110		<b>苏</b>	緩-7-①	
112		乾燥密度	緩-7-②	
			埋-2	
			埋-7	
	埋め戻し材		才-10	
			オ-12	
119		右动牡土密度	緩-7-①	
110		有观和工证及	緩-7-②	
			埋-2	
			埋-6	
	埋め戻し材		才-10	
			才-12	
114		土粒子密度	緩-7-①	
			緩-7-②	
			埋-7	
115	埋め戻し材	掘削十の十粒子密度	埋-1	
110			埋-6	
	埋め戻し材		才-10	
116		限界状態応力比	才-12	
			緩-7-①	
			緩-7-2	
117	理め戻し材	初期体積ひずみ速度	緩-7-①	
118	埋め戻し材	· 弹性係数	埋-2	
	埋め戻し材	埋め戻し材の鉱物組成	埋-3	
119			埋-4	
			埋-7	

3.7	114 3 3 4		11.1.2.2.2.2.4	
No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
-	構成要素		ID	考慮
	埋め戻し材	モンモリロナイトの溶解速度	埋-3	
120			埋-4	
			埋-7	
	埋め戻し材		オ-10	
			オ-12	
			緩-7-①	
121		掘削土混合率	緩-7-②	
			埋-1	
			埋-2	
			埋-6	
	埋め戻し材		才-10	
100		如期 問 附 比	才-12	
144		初刻间积圮	緩-7-①	
			緩-7-②	
	埋め戻し材		才-1-①	
			才-7	
199		<u>問</u> ) 問 ) 家	才-11	
125		间际中	埋-3	
			埋-4	
			埋-7	
	埋め戻し材		才-10	
194		<u>如期熟止于国係粉</u>	才-12	
124		仍夠靜並上注係数	緩-7-①	
			緩-7-②	
	埋め戻し材		才-10	
195		初期右动内力	才-12	
120		初期有初心刀	緩-7-①	
			緩-7-②	
	埋め戻し材		才-10	
100		生行正弦内力	才-12	
126		元11庄留心刀	緩-7-①	
			緩-7-②	
197	埋め戻し材	一次正常核粉	緩-7-①	
127		一八江省际剱	緩-7-②	
128	埋め戻し材	一次圧密終了時間	緩-7-①	

No.	対象とする 構成要素	パラメータ	対応する ID	変遷の 考慮	No.
	埋め戻し材		オ-10	5 %EK	
129		透水係数	才-12 經-7-①		
			緩-7-① 緩-7-②		
	埋め戻し材		オ・10		142
130		膨潤指数	オ-12		
100			緩·7·①		
-	押め戻し材	問題における標準状態の酸素のチ	<i>骸~7~</i> ②		14
131	の設置環境	ル体積	埋-7		
132	埋め戻し材	埋め戻し材中のパイライトとの反	埋-7		
102	の設置環境	応による酸素の消費量	·		14
133	埋 め 戻 し 材 の設置環境	周辺に仔仕する微生物の活動によ る酸素の消費量	埋-7	●	
134	埋め戻し材	ベントナイトの乾燥質量	埋-1		
101			埋-6		14
135	理め戻し材	ベントナイトの谷植	理-1 埋-6		
	埋め戻し材	ベントナイトの間隙の容積	埋 0 埋·1		
136			埋-6		14
137	埋め戻し材	ベントナイトの乾燥密度	埋-1		14
107			埋-6		
190	吹付けコン		オ-7 ナ-9		
138	29 <b>9</b> -F		⊿-8 オ-10		14'
	吹付けコン		ス 10 オ-10		
190	クリート		オ-12		
139		ホノラン比	緩-7-①		14
			緩-7-②		11
	吹付けコン		才-10 十 10		1.4
140	クリート	設計基準強度	オ・12 経-7-①		14
			·波·① 緩-7-②		150
1.4.1	吹付けコン		オ-10		15
141	クリート	毕心????""惧里里	オ-12		152

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
			緩-7-①	
			緩-7-②	
	吹付けコン		オ-10	
142	クリート	弾性係数	オ-12	
			緩-7-① 縦 <b>-</b> ◎	
			<i>裱-7-2</i>	
	吹付けコン		才-10 士 10	
143	クリート	透水係数	ス・12 終-7-①	
			液┓┓-の 綏-┓-の	
	インバート		板12	
	1 2 1 - 1		オ-10 オ-19	
144		ポアソン比	习 1 <u>2</u> 緩-7-①	
			<b>緩-7-</b> ②	
	インバート		オ-10	
			オ-12	
145		設計基準強度	緩-7-①	
			緩-7-②	
	インバート		才-10	
146		并位休藉重量	才-12	
140		<b>半位仲積里里</b>	緩-7-①	
			緩-7-②	
	インバート		オ-10	
147		弹性係数	才-12	
			緩-7-①	
			緩-7-2	
	インバート		才-10 十 10	
148		透水係数	ス・12 終-7-①	
			被•7•① 經-7-①	
1.40	インバート	<b>劫</b> 仁道	〒1℃	
149		款(広等半)		
150	1 2/1-1	比然	理-5	
151	インバート	密度	埋-5	
152	岩盤	組成	オ-3	
153	岩盤	密度	才-3	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
			埋-5	
154	岩盤	熱伝導率	埋-5	
155	岩盤	比熱	埋-5	
156	岩盤	偏圧係数	才-4	
	岩盤		才-6	
			才-10	
		~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	才-12	
		押任你数	緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	
157	岩盤	せん断弾性係数	才-6	
101			緩-8	
	岩盤		才-2	
158		せん断力	才-10	
	u chen.		オ-12	
	岩盤		才-6	
			才-10 十 10	
159		内部摩擦角	ス・12 経-7-①	
			版-7-① 経 -7- ①	
			緩-8	
160	岩盤	減衰定数	大-6	
100	岩盤		オ-6	
			オ-10	
		19	才-12	
161		ホアソン比	緩-7-①	
			緩-7-②	
			緩-8	
	岩盤		才-6	
			才-10	
162		粘着力	オ-12	
104			緩-7-①	
			緩-7-2	
	di én.		緩-8	
163	宕盤	残存酸素量	オ-7	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
164	岩盤	強震記録波形	才-6	
165	岩盤	速度応答スペクトル	才-6	
1.0.0	岩盤	(耐専波牡鹿波伯太波における)	才-6	
166		水平変位	緩-8	
167	岩盤	破壞接近度	才-10	
107			オ・12	
	岩盤		オ-2	
168		圧密応力	才-10	
	li con		才-12	
169	石盤	雰囲気(窒素、大気)	才-8 士 10	
	ப்பத்த		₹-10 + 10	
170	石盛	(新第三紀堆積岩類の)ピーク強	⊿ -10 ★-19	
170		度到達時間	ス-12 経-7-の	
	毕般		成10	
	白笛		ス 10 オ-12	
171		飽和密度	杀·7-①	
			緩-7-2	
	岩盤		才-10	
			オ-12	
179		沃水区粉	緩-7-①	
172		透小休毅	緩-7-②	
			埋-1	
			埋-6	
	岩盤	(新第三紀堆積岩類の)延性パラ	才-10	
173		メータ	才-12	
	li con		緩-7-2	
154	石盤	(新第三紀堆積岩類の)時間依存	才·10 十 19	
174		性パラメータ	⊼-12 ⊮-7-0	
			夜72	
175	石溢	(新第三紀堆積岩類の)一軸圧縮	ス-10 ナ-19	
110		強度	ス 14 緩-7-②	
	岩般		太-10	
176		(新第三紀堆積岩類の)引張強度	オ-12	
		I	·,	

付 5-97

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
			緩-7-②	
	岩盤		才-2	
177		クリープ変形量	才-10	•
			才-12	
	処分場		オ-7	
			才-8	
178		処分深度	才-10	
			緩-13	
			緩-14	
179	処分場	処分坑道の断面構造	緩-13	
	処分場		緩-13	
180		廃棄体定置間隔	緩-14	
			埋-5	
	処分場		緩-13	
181		処分坑道中心距離	緩-14	
			埋-5	
182	処分場	坑道掘削時に導入された酸素量	オ-11	
	処分場	処分坑道内の温度	埋-3	
183			埋-4	•
			埋-7	
184	処分場	地表面温度	埋-5	
185	処分場	地涅	オ-8	
100			オ-10	
186	処分場	地温勾配	埋-5	•
	地下水		オ-7	
			才-8	
			才-10	
			オ-1-②	
187		地下水組成及7%濃度	オ・11	
101			緩-1	-
			緩-2	
			緩-3	
			緩-4	
			緩-5	

No.	対象とする	パラメータ	対応する	変遷の
	構成要素		ID	考慮
			緩-9	
			緩-11	
			埋-1	
			埋-3	
			埋-4	
			埋-6	
			埋-7	
188	地下水	溶存炭酸イオン濃度	オ-7	
100			才-11	
189	地下水	溶存酸素	才-11	•
	地下水		才-2	
			オ-7	
			才-8	
190		地下静水圧	才-10	\bullet
			才-12	
			緩-6	
			緩-7-2	
191	地下水	動水勾配	緩-1	•
	地下水	地下水流量	埋-3	
192			埋-4	\bullet
			埋-7	
193	その他	水の単位体積重量	緩-6	
	その他		オ・1・①	
104		空気中の酸素の体理制合	オ-7	
194		至风中の酸系の体積割百	才-11	
			埋-7	
	その他		才-2	
195		水の単位体積重量	才-10	
			才-12	
196	その他	吸収線量率への換算係数	才-3	
107	その他	山州スの昭射海産	オ・1・⑤	
197		1111101111111111111111111111111111111	才-5	

4. パラメータの取得方法に関する調査

品質保証体系の具体化では、確認すべき情報・データの明確化に加え、そのパラメータの取得 方法について検討する必要がある。ここでは各研究機関で実施されている試験やプロジェクトで 実施されているパラメータの取得方法について整理する。

付表 4-1 OP の還元腐食により発生するガスの圧力の取得方法に関する調査結果

構成要素:OP	取得するパラメータの項目: OP の還元腐食により発生するガスの圧力
参考文献	幌延地層研究所計画における人工バリア性能確認試験(原子力機構、2019)
パラメータの取得方法:	炭素鋼腐食センサーによる取得
炭素鋼腐食センサーに	は、OPの材料である炭素鋼(SFVC1)の腐食速度を把握するために設置す
る。センサーは炭素鋼電	『極、参照電極(カーボン電極)及び対極(チタン)から構成されており、
模擬OP 製造時に採取し	、た炭素鋼を使用して製作した。本センサーは、光学式pH 計と同様に、資
源エネルギー庁の委託事	事業である「地層処分技術調査など事業処分システム評価確証技術開発」に
て開発し、交流インピー	-ダンス法により分極抵抗を測定し、炭素鋼電極の腐食速度を求める。炭素
鋼腐食センサーは「Fig	.34」にて記載されている。

付表 4-2 OPの腐食速度の取得方法に関する調査結果

構成要素:OP	取得するパラメータの項目:OPの腐食速度
参考文献	幌延深地層計画 令和元年度調查研究成果報告(原子力機構、2020)
パラメータの取得方法:室内	試験による取得
緩衝材の下から 2 段目、6	段目、10 段目に設置した炭素鋼腐食センサーにより交流インピーダ

緩衝材の下から2 段目、6 段目、10 段目に設置した炭素鋼腐食センサーにより交流インビータンスを測定し、腐食の速度などを評価する。また、計測終了後に試験体を回収し、模擬 OP の表面の実際の腐食状況や緩衝材への地下水の浸潤状況などを確認する。

腐食センサーによる取得

センサーに埋め込まれた炭素鋼電極(模擬 OP と同じ材料で製作)に生じた腐食生成物の分析を 実施した。腐食センサーは模擬 OP 近傍の緩衝材中に設置されていたため、模擬 OP と類似した環 境で腐食が進展していたものとして扱うことができる。

回収した試験体による腐食状況や緩衝材への地下水の浸潤状況

炭素鋼電極表面を X 線回折により分析するとシデライト(FeCO₃:菱鉄鉱と呼ばれる炭酸塩鉱物)のピークが確認された。ラマン分光法により、X 線回折で確認されたシデライト(FeCO₃:菱 鉄鉱と呼ばれる炭酸塩鉱物)に加えて、マグネタイト(Fe₃O₄:磁鉄鉱と呼ばれる酸化鉱物)とゲー サイト(FeOOH:針鉄鉱と呼ばれる水酸化鉱物)と思われるピークが観察された。環境条件が変遷 した状態では腐食の進展も不均一化しやすい。不均一な腐食では、腐食の進展が確率的にばらつく ため、そのばらつきを考慮して最大値を推定する必要がある。

模擬 OP の腐食深さ測定データを活用して統計的な解析

今回の OP 腐食試験の環境条件を想定した場合の実際の OP で推定される不均一な腐食による最 大腐食深さの推定を試みた。極値統計解析と呼ばれる解析手法を用いて実寸大の OP で観察される 最大腐食深さを推定した。

付表 4-3 OPの破損に及ぼす因子の取得方法に関する調査結果

構成要素: OP	取得するパラメータの項目:OPの破損に及ぼす因子
	(1) 処分環境での不動態化
	(2) 全面腐食, 孔食・すきま腐食(酸素による)
	(3) 応力腐食割れ
	(4) 全面腐食(水素発生型)
	(5) 水素脆化
	(6) 微生物による影響
	(7) マグネタイトによる腐食加速
	(8) 放射線による影響
参考文献	概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化(その1)(NUMO、2012)

(1) 処分環境での不動態化について

パラメータの取得方法:室内試験による取得

支保として用いられることが想定されるセメントによる地下水の高pH化の影響等を考慮してア ルカリ性環境を模擬した水溶液や、緩衝材仕様(乾燥密度1.6g/cm3,ケイ砂30%混合)に対して、 炭酸塩濃度0.1M以下とした水溶液において、pHをパラメータとして炭素鋼の不動態化条件を検討 した浸漬試験がなされている。

(2) 全面腐食、孔食・すきま腐食(酸素による)

パラメータの取得方法:式による取得

酸素による腐食量の上限は処分場に持ち込まれた酸素量から見積もることができる。この腐食量 は OP の表面積から平均腐食深さに換算できる。酸素が存在する環境では腐食の不均一化が生じや すく、その不均一性を考慮して最大腐食深さを推定する必要がある。

全面腐食、孔食・すきま腐食の最大腐食深さ P(mm)は平均腐食深さ Xm(mm)の関数としてそれぞ れ以下のように表されている。

全面腐食 : P=Xm+7.5Xm⁰⁵ 孔食・すきま腐食: P=Xm+6.4Xm0²⁵

(3) 応力腐食割れ

パラメータの取得方法:室内試験による取得

溶接部、熱影響部における応力腐食割れ(SCC)感受性について検討が行われている。炭酸塩溶 液中における SSRT 試験(低ひずみ速度引張試験)が行われる。

(4) 全面腐食(水素発生型)

パラメータの取得方法:室内試験による取得

●浸漬試験

緩衝材の候補材料であるベントナイト共存下で長期の腐食試験が行われており、これまでに試験 期間が 10 年間までの結果が提示されている。浸漬 1 年まで、及び 1 年以降の腐食深さ経時変化の 傾きから算出された腐食速度も示した。80℃の試験では初期には数 μ m/y 以上の腐食速度であるが、 1 年以降の腐食速度として 1 μ m/y 以下の値が示されている。50℃の試験では浸漬初期には 80℃ よりも腐食量が小さいものの、10 年後では同等の腐食量となっており、長期的には 80℃よりもや や大きな 1.4 μ m/y の腐食速度が得られている。これは 50℃の方がが緻密な皮膜が形成されにくい ことに起因すると考えられる。

●TIG、MAG、EBW による溶接部付きの試験片を用いた試験

TIG 及び MAG 溶接金属部において軽微な選択的な腐食が観察されているものの,酸化性雰囲

気で観察された顕著な選択的腐食は見られず、腐食速度は母材とほぼ同等である。

(5) 水素脆化

パラメータの取得方法:室内試験による取得

酸素のない環境でのカソード反応は、水素発生反応(例えば、2H₂0+2e→20H+2H)であり、水 素原子の一部が鋼中に浸入して水素脆化を起こす。鋼中の水素のうち、水素脆化に関与する水素は 拡散性水素といわれている。この拡散性水素量と材料強度に応じた脆化を起こす臨界水素量の比較 から水素脆化の可能性が評価できる。緩衝材中に浸漬した炭素鋼の試験片中の拡散性水素濃度を測 定できる。試験片には母材単独及び溶接部付きをそれぞれ用い、浸漬3年間までの結果が得られて いる。

(6) 微生物による影響

パラメータの取得方法:室内試験による取得

微生物の影響については、処分後初期の酸化性期間は、酸素量に基づいて腐食量の上限を見積も る手法を用いれば、微生物の活動の有無に関わらず保守的な評価ができる。好気性菌が活性になれ ば酸素を消費するため、その影響を見込んだ場合、トータルの腐食量はむしろ小さくなると考えら れる。腐食局在化についても、微生物による影響を定量的に評価することはデータが乏しいため困 難であるが、孔食・すきま腐食などの腐食局在化の大きい腐食形態に関するデータに基づいて評価 することにより保守的な評価が可能と考えられる。また、天然の土壤中で得られたデータは微生物 の影響を受けたものが含まれていると考えられ、そのデータとの比較検討により保守性を確認する ことが可能と考えられる。酸素が消費されて低酸素濃度環境がもたらされた後は、嫌気性細菌によ る影響が懸念される。炭素鋼の腐食に影響を及ぼす代表的な嫌気性細菌である硫酸塩還元菌につい ては、圧縮ベントナイト中では活性を維持できないという実験結果を示す一方、緩衝材中の硫酸塩 量と地下水から緩衝材を通って供給される硫化物のフラックスより腐食量が推定されている。

(7) マグネタイトによる腐食加速

パラメータの取得方法:室内試験による取得

低酸素濃度環境において安定な腐食生成物の一つにマグネタイトが挙げられる。模擬腐食生成物 として粉末試薬のマグネタイトを炭素鋼表面に付与すると腐食速度が増加し、加するマグネタイト 量が多いほど腐食速度も大きくなるという現象が試験により確認されている。

(8) 放射線による影響

パラメータの取得方法:室内試験による取得

放射線による影響については、十分な遮蔽厚さの設定により腐食への影響を回避することを基本 的な考え方としている。炭素鋼 OP 仕様では、150mm の遮蔽厚さが確保されている。これは、 γ 線 の放射線分解で生じる酸化性化学種による腐食速度が約 0.1μ m/y を十分下回る値となるよう設定 された。また、この厚さにおける OP 表面での線量率は数十 mGy/h であり、既往のデータに基づい た下限界線量率 (~3Gy/h) よりも十分小さく、遮蔽厚さの設定が過度に安全側になっている可能性 もある。このため、合理的な遮蔽厚さ設定に資するための検討が進められている。緩衝材中での炭 素鋼の腐食に及ぼす γ 線の影響について知見も得られており、緩衝材中では数 100Gy/h まで照射 による腐食速度の増加は観察されていない。

付表 4-4 緩衝材ブロックの品質に関する情報の取得方法に関する調査結果

構成要素:緩衝材ブロック	取得するパラメータの項目:緩衝材ブロックの品質
	(1)緩衝材材料混合前の含水比、メチレンブルー吸着量
	(2)ブロック製造後の品質確認項目
参考文献	幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験(原子力機構、
	2016)
(1)緩衝材材料混合前の含水比	ム、メチレンブルー吸着量について
<u>パラメータの取得方法:試験</u>	による取得
ベントナイトとケイ砂の混	合土に関する品質管理として、「Table 13」にて、メチレンブルー吸
着量や含水比などの検査項目	や、検査頻度の記述が見られる。

(2)ブロック製造後の品質確認項目について

パラメータの取得方法:サンプリングなどによる検査による取得

ブロック製造時の品質管理項目として、「Table 18」や「Fig. 17」にて基準となる重量や成形圧 力などの確認項目や検査頻度の記述が見られる。

付表 4-5 緩衝材の物性に関するデータの取得方法に関する調査結果

構成要素:緩衝材ブロック	取得するパラメータの項目:
	(1)緩衝材の膨潤圧
	(2)緩衝材の熱物性
参考文献	幌延地層研究計画で得られた掘削土を用いた埋め戻し材の特性試験
	(原子力機構、2020a)

(1)緩衝材の膨潤圧について

パラメータの取得方法:室内試験による

試験装置を用いて同一供試体による膨潤圧試験及び透水試験として、試験装置の概略図が「図 3.1」に示されている。

試験装置は以下に示すとおり、コンプレッサー(圧縮空気圧:0.1~0.7 MPa)、加圧タンク(材 質:透明アクリル)、ロードセル付き反力枠、試験セル、変位計、電子天秤(測定精度:±0.001 [g])、から構成される。試験セルには、滑らかに稼働するピストンも設け、圧力を検知するため のロードセルを反力枠で固定した構造とした。また、材質は、剛性や腐食性を考慮し、ステンレス 鋼材(材料:SUS316)を用いた。供試体に試験溶液を給水させるための多孔板には孔径5µmの 金属焼結フィルター(材質:SUS316)を用いた。

(2)緩衝材の熱物性について

パラメータの取得方法:測定器による

熱物性測定を実施する際には、以下の二つの方法を用いることができる。

一つは、通常の非定常線熱源法よりも素早く、概略的な評価に簡便な測定法として広く利用されている迅速熱伝導率計(Quick Thermal Conductivity Meter 昭和電工製:「図4.1」)

もう一つは、センサーがニッケルの二重ら旋構造の面状で、測定の際に試料表面の場を平均的に加 熱することができ、且つ温度上昇に伴う水分の蒸発や部分的な試料の不均一性に伴う測定誤差が少 ないと考えられている非定常面熱源法を応用したホットディスク熱物性測定装置

(Thermophysical PropertiesAnalyzer 京都電子製:「図4.2」)。

付表 4-6 緩衝材の流出に関する情報の取得方法に関する調査結果

構成要素:緩衝材ブロック	取得するパラメータの項目:
	(1)パイピング
	(2)母岩中の亀裂への緩衝材の侵入、地下水による浸食及びコロイドとしての散逸
参考文献	概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化(その2)(NUMO、
	2013)

(1)パイピングについて

パラメータの取得方法:試験による取得

パイピングの発生とそれに伴う浸食は、以下の要因に影響を受けることが知られている。

▶ 緩衝材材料

パイピングの発生は緩衝材の持つ膨潤特性、不飽和での透水(浸潤)特性に依存するため、緩衝 材としてケイ砂混合ベントナイトを用いる場合にはケイ砂混合率、ベントナイト材料の種類、緩衝 材密度、初期含水比などの影響を受ける。

緩衝材及び緩衝材空隙の幾何学構造

この現象は、緩衝材と処分孔壁面との間に隙間が存在する場合や、ペレット状に加工したベント ナイトが充填されている場合など、卓越した流路となり得るような連続した空隙があらかじめ存在 する場合に発生しやすくなる。また、これらの隙間の形状やペレットの充填の状況に影響を受ける。

▶ 地下水圧、流入速度

上述のとおり、この現象には高い地下水圧と速い地下水流速が必要である。

▶ 地下水水質

地下水水質は、緩衝材の膨潤性能や粘土の分散性に影響を与える。このように、パイピングの現 象が発生する理由に関して定性的な理解は進んできているが、実際の処分環境下ではいくつもの要 因が複雑に影響を及ぼし合うと考えられるため、これらの要因の影響を定量的に評価に取り込むに は到っていない。

(2)母岩中の亀裂への緩衝材の侵入、地下水による浸食及びコロイドとしての散逸について パラメータの取得方法:試験による取得

上記のパイピング及びそれに伴う浸食が緩衝材の再冠水の初期の現象であるのに対し、母岩中の 亀裂への緩衝材の侵入、地下水による浸食及びコロイドとしての散逸は緩衝材が十分に含水、膨潤 した後に発生する現象である。

亀裂への緩衝材の侵入とその先での流出あるいはコロイドとしてのモンモリロナイト粒子の散逸 についての概念は「図 4.5.2-3」に示されている。

構成要素:埋め戻し材 取得するパラメータの項目: (1)敷均し・転圧による埋め戻し材の単位体積の重量変化 (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工 参考文献 廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領(全国都市清掃会議、 2020) (1)敷均し・転圧による埋め戻し材の単位体積の重量変化について パラメータの取得方法:転圧前後の単位体積重量変化の試験 埋立機材ごと(コンパクタ、ブルドーザ)に転圧前後の単位体積重量の変化を試験により取得し ている(「表 4.1・2」参照) (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3・47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリングし、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3・16」、「表 5.3・17」参照)。		
(1)敷均し・転圧による埋め戻し材の単位体積の重量変化 (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工 参考文献 廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領(全国都市清掃会議、2020) (1)敷均し・転圧による埋め戻し材の単位体積の重量変化について パラメータの取得方法:転圧前後の単位体積重量変化の試験 埋立機材ごと(コンパクタ、ブルドーザ)に転圧前後の単位体積重量の変化を試験により取得し ている(「表 4.1・2」参照) (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3・47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリングし、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3・16」、「表 5.3・17」参照)。	構成要素:埋め戻し材	取得するパラメータの項目:
(2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工 参考文献 廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領(全国都市清掃会議、2020) (1)敷均し・転圧による埋め戻し材の単位体積の重量変化について パラメータの取得方法:転圧前後の単位体積重量変化の試験 埋立機材ごと(コンパクタ、ブルドーザ)に転圧前後の単位体積重量の変化を試験により取得している(「表 4.1・2」参照) (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3・47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリングし、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3・16」、「表 5.3・17」参照)。		(1)敷均し・転圧による埋め戻し材の単位体積の重量変化
参考文献 廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領(全国都市清掃会議、 2020) (1)敷均し・転圧による埋め戻し材の単位体積の重量変化について パラメータの取得方法:転圧前後の単位体積重量変化の試験 埋立機材ごと(コンパクタ、ブルドーザ)に転圧前後の単位体積重量の変化を試験により取得し ている(「表 4.1・2」参照) (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3・47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリング し、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3・16」、「表 5.3・17」参照)。		(2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工
2020) (1)敷均し・転圧による埋め戻し材の単位体積の重量変化について <u>パラメータの取得方法:転圧前後の単位体積重量変化の試験</u> 埋立機材ごと(コンパクタ、ブルドーザ)に転圧前後の単位体積重量の変化を試験により取得し ている(「表 4.1-2」参照) (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について <u>パラメータの取得方法:試験による取得</u> 「図 5.3-47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリング し、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3-16」、「表 5.3-17」参照)。	参考文献	廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領(全国都市清掃会議、
 (1)敷均し・転圧による埋め戻し材の単位体積の重量変化について パラメータの取得方法:転圧前後の単位体積重量変化の試験 埋立機材ごと(コンパクタ、ブルドーザ)に転圧前後の単位体積重量の変化を試験により取得し ている(「表 4.1・2」参照) (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3・47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリング し、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3・16」、「表 5.3・17」参照)。 		2020)
 パラメータの取得方法:転圧前後の単位体積重量変化の試験 埋立機材ごと(コンパクタ、ブルドーザ)に転圧前後の単位体積重量の変化を試験により取得し ている(「表 4.1・2」参照) (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3・47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリング し、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3・16」、「表 5.3・17」参照)。 	(1)敷均し・転圧による埋め房	毛し材の単位体積の重量変化について
埋立機材ごと(コンパクタ、ブルドーザ)に転圧前後の単位体積重量の変化を試験により取得し ている(「表 4.1・2」参照) (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3・47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリング し、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3・16」、「表 5.3・17」参照)。	パラメータの取得方法:転圧	前後の単位体積重量変化の試験
ている(「表 4.1・2」参照) (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について <u>パラメータの取得方法:試験による取得</u> 「図 5.3・47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリング し、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3・16」、「表 5.3・17」参照)。	埋立機材ごと(コンパクタ、ブルドーザ)に転圧前後の単位体積重量の変化を試験により取得し	
 (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3-47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリングし、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3-16」、「表 5.3-17」参照)。 	ている(「表 4.1-2」参照)	
 (2)土質遮水工(ベントナイト混合土)の製造施工について パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3・47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリングし、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3・16」、「表 5.3・17」参照)。 		
 パラメータの取得方法:試験による取得 「図 5.3-47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリングし、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3-16」、「表 5.3-17」参照)。 	(2)土質遮水工(ベントナイト	・混合土)の製造施工について
「図 5.3-47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリングし、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3-16」、「表 5.3-17」参照)。	パラメータの取得方法・試験による取得	
「図 5.3-47」に示されているノローの通りに試験を実施。ノローの各項目においてサンクリングし、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3-16」、「表 5.3-17」参照)。		
し、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表 5.3-16」、「表 5.3-17」参照)。	「図 5.3-47」に示されているフローの通りに試験を実施。フローの各項目においてサンプリンク	
5.3-16」、「表 5.3-17」参照)。	し、密度や含水比、透水係数などの管理項目に対して管理値を満足しているかなどの検査を行う(「表	
	5.3-16」、「表 5.3-17」参照)。	

付表 4-7 埋め戻し材の施工に関する情報の取得方法に関する調査結果

付表 4-8 埋め戻し材の品質管理に関する方法の調査結果

構成要素:埋め戻し材	取得するパラメータの項目:
	(1)BMSL(ベントナイトと現地発生土や購入土などの土砂とを撹拌混
	合したベントナイト混合土)の品質管理
	(2)ベントナイト混合率の管理方法
	(3)乾燥密度の測定
	(4)透水試験
参考文献	管理型最終処分場におけるベントナイト混合土施工事例(新井靖典ら、
	2005)

(1)BMSL の品質管理について

パラメータの取得方法:サンプリングによる各種試験などによる取得

ベントナイトと現地発生土や購入土などの土砂とを撹拌混合したベントナイト混合土(BMSL)の 施工時及び施工後それぞれの確認項目や実施する試験内容は、「表-3」にてまとめられている。施工時 には原材料土の含水比試験や、ベントナイト混合率を計測するために、ファンネル粘性試験やメチレ ンブルー吸着試験などが実施されている。

施工後にはスケールによる層厚試験や、透水係数を計測するためにサンプルを用いた室内試験が実施される。

(2)ベントナイト混合率の管理方法について

パラメータの取得方法:サンプリングによる種試験による取得

ベントナイト混合率の管理は、ファンネル粘性試験(以下 Fv 試験と記す)、メチレンブルー溶液 吸着試験(以下 MBC 試験と記す)を併用して行ってきた。Fv 試験は簡便性に優れ、短時間で測定 することができるため、日常の品質管理に適用し、MBC 試験は自走式土質改良機のキャリブレーシ ョン時などに実施するのが一般的である。しかし、これまでの工事経験から、Fv 試験は試験方法の 性質上、原料土の性状のばらつきによる影響を除去できないため、現地発生材を使用する現場におい ては適用が困難であることがわかってきた。そのため、現地発生材を使用する場合は、日常管理につ いても性状のばらつきの影響を受けにくい MBC 試験を適用することが妥当であると考える。このよ うな観点から、原料土の性状に左右されにくく、短時間でベントナイト混合率を判別できる BMSL 懸 濁液の電気伝導率を指標とした管理手法を開発中である。試験に用いる器具は「写真・3」参照。

(3)乾燥密度の測定について

パラメータの取得方法:試験による取得

砂置換法は、測定結果が試験者の熟練度に左右されやすいことに加えて、測定時間が長く、その場 で確認することができない。一方、RI法は測定者による誤差が少なく、測定結果もその場で確認する ことができるため、RI法を用いて乾燥密度を管理することを基本とする。

(4)透水試験について

パラメータの取得方法:試験による取得

BMSL の透水係数は、現場透水試験またはブロックサンプルを用いた室内透水試験により得られる。

処分場では、BMLS が難透水性であるため測定に時間を要すること、現場透水試験の実施が困難な ことなどの理由から、主に後者が適用されている。

付表 4-9 埋め戻し材の変遷挙動に関する情報の取得方法に関する調査結果

構成要素:埋め戻し材	取得するパラメータの項目: (1)埋戻し材(緩衝材)の膨潤変形挙動 (2)埋め戻し材(緩衝材)の熱、水理、力学挙動解析 (2)転口焼用め抜工確認試験について
	(初転江神回の旭工准認识硬について
参考文献	平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事
	業処分システム工学確証技術開発報告書(原環センター、2018)

(1)埋め戻し材(緩衝材)の膨潤挙動について

パラメータの取得方法:試験による取得

遠心模型試験による実物と同じ材料の縮尺模型に遠心加速度を付与することで、縮尺模型上での 物理量に関連して、ニアフィールドで生じる主要な現象について、実物の応力状態を再現して長期 挙動に相当するデータが得られる。これにより、緩衝材の膨潤(埋め戻し材の試験の場合)や地下 水圧などを模擬した条件による緩衝材の膨潤挙動を得ることができる。

(2)埋め戻し材(緩衝材)の熱、水理、力学挙動解析について

パラメータの取得方法:解析による取得

熱・水・応力(THM)連成解析コード(LOSTUF)によりパラメータが取得できる。LOSTUFは 表 5.2.5-1~表 5.2.5-2、表 5.4..1-4の物性値や、岩盤との境界条件などを組み込むことにより、埋め 戻し材(緩衝材)から発生する応力や、時間による温度変化、飽和度の分布などが取得できる。

(3)転圧締固め施工確認試験について

パラメータの取得方法:サンプルなどによる検査

施工前の品質確認として、掘削土(ズリ)及びベントナイトに対してで、含水比、土粒子密度、見かけの乾燥密度、粒度、メチレンブルー吸着量の試験を行っている(Table 34 参照)。また Table 34 には、JIS などで定められた試験方法を用いていることが記述されている。

転圧締め固め施工確認試験は、項目として乾燥密度、仕上がり厚、転圧回数が定められており (Table 37 参照)、転圧後の乾燥密度の確認方法として砂置換法やブロック資料による密度算出が 挙げられている(Table 38 参照)。

付表 4-10 埋め戻し材の施工管理に関する情報の取得方法に関する調査結果

構成要素 : 埋め戻し材	取得するパラメータの項目:
	(1)転圧締固め施工後の湿潤密度及び含水比
	(2)転圧締固め施工後の乾燥密度
	(3)転圧締固め施工後の投入量及び仕上がり厚さ
参考文献	幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験(原子力機構、
	2016a)

(1)転圧締固め施工後の湿潤密度及び含水比について パラメータの取得方法:試験による取得

転圧締固め後の埋め戻し材の湿潤密度及び含水比は、RI 法による測定ができる。RI 法は、ガン マ線にて土の密度を、中性子線にて含水比を測定できる。また砂置換法に比べて、以下のような特 徴を持つ。

- ▶ 短時間の測定で結果が直ちに得られる
- ▶ 測定値に個人による誤差が少ない
- ▶ 同一箇所で繰り返し測定できる

(2)乾燥密度について

パラメータの取得方法:試験による取得

熱伝導率法(QTM)による乾燥密度の測定方法が示されている。熱伝導率法(QTM)とは、既知の含水比を持った埋め戻し材の熱伝導率を事前に測定し、検量線を作成することで、現場で測定した熱伝導率から転圧締め固め施工を実施した埋め戻し材の含水比を求め、他の方法で測定した湿潤密度から乾燥密度を求める手法である。

(3)転圧締固め施工後の投入量及び仕上がり厚さについて

パラメータの取得方法:試験による取得

転圧締固めの施工において、面積及び仕上がり厚さから目標乾燥密度を達成するための投入量(設計投入量)を以下の式で算出する。

設計投入量=乾燥密度×体積×(1+含水比/100)

構成要素:埋め戻し材 取	Q得するパラメータの項目:
	1) 緩衝材および埋め戻し材の膨潤
	2) 埋め戻し材定置時の乾燥密度
(:	3) 緩衝材の膨張への反作用
(4	4) 材料組成(潜在的に有害な物質)
()	5) 材料組成(元素組成及び鉱物組成)
	6) 埋め戻し材の膨潤圧及び透水係数
('	7) 埋め戻し材製造時における含水率
(8	8) 埋め戻し材製造時の粒度分布
(9	9) 埋め戻し材製造時の圧縮特性
	10) 埋め戻しブロック及びペレットの引張強度
	11) ペレットの強度
	12) 坑道の幾何学的形状
	13) 埋め戻しブロックの定置時乾燥密度
	14) ペレットの乾燥密度
	15) 埋め戻し材定置時の平均密度
	16) 埋め戻しブロック製造試験
	17) ペレット基盤層に関する試験

付表 4-11 埋め戻し材の性能に関する情報の取得方法に関する調査結果

	(18) 地下水の流入対策
	(19) 埋め戻し材の施工
	(20) 埋め戻し試験及びプラグ試験
	(21) 定置孔及び処分坑道における埋め戻し材の密度及び含水率
参考文献	SKB's monitoring strategy and approaches to ensure construction
	quality for tunnel backfill (SKB、2021)
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

(1) 緩衝材および埋め戻し材の膨潤について

<u>パラメータの取得方法: THMモデル化による取得</u>

THMモデルに関する詳細な記述は本文献には見られず、"SKB TR-10-11"にて示されている。

(2) 埋め戻し材定置時の乾燥密度について

パラメータの取得方法: 定置された埋め戻し材の質量と処分坑道の容積から取得

坑道内での定置時の乾燥密度は、定置された質量を用いて表現され、処分坑道の容積及び当該処 分坑道に設置される埋め戻し材物質の総質量に左右される。定置時の乾燥密度は2つの定置孔間の 平均距離ごとに、SKBの場合は6mと定義される坑道区間ごとに計算される。

(3) 緩衝材の膨張への反作用について

パラメータの取得方法:有限要素プログラム「Abaqus」を用いたモデル計算による取得

このモデルにおいて、緩衝材の水飽和フェーズに緩衝材が埋め戻し材を圧縮するのに伴って発生 する膨潤の規模や、定置後の熱-水-力学連成プロセスに起因する緩衝材の膨張によって最大で40 mmの喪失が想定されることなどが示されている。

(4) 材料組成(潜在的に有害な物質)

パラメータの取得方法:試験(燃焼分析)による取得

キャニスタの腐食に影響を及ぼす可能性のある主な物質として、硫黄(特に硫化物の形態のもの)と微生物の栄養分となる可能性のある有機炭素が挙げられる。さまざまな形態の硫黄や炭素は、燃焼分析法を用いて比較的容易に検査することができる。一般に元素分析計では、酸素気流中でサンプルに点火し、放出されたSO₂やCO₂などのガスを、赤外線セルを用いて測定する。

(5) 材料組成(元素組成及び鉱物組成)について

パラメータの取得方法:試験による取得

ベントナイト材料の到着時に、汚染物質がベントナイト層に入り込むことがないようにするため、ベントナイト材料の放射能検査が実施される。この検査にはたとえば市販のガンマ放射線検出用のポータルを使用することができる。ベントナイトの鉱物学的組成とスメクタイト(すなわち膨潤性粘土物質)の含有率は、測定は「X線回折法」(XRD)や「蛍光X線分析法」(XRF)を用いて行われる。これらの方法はいずれも粘土材料の特性評価に古くから用いられている確立された方法である。

(6) 埋め戻し材の膨潤圧及び透水係数

パラメータの取得方法:試験による取得

通水装置やロードセルを用いて、次の手順にて実施する。

1.ベントナイトを適正な密度に圧縮する(試験セル内又は外部の金型を使用する)

2.試験セル内のベントナイトを膨潤圧が安定するまで脱イオン水で飽和させる

3.試験セルに水を用いて加圧し、サンプルを通じた流動速度によって透水係数が与えられる

4.外部溶液を水から1M CaCl₂溶液に替え(図4-1参照)、状態が安定した時点で膨潤圧を文書に記録する

5.塩溶液を用いて透水係数を測定する。

(7) 埋め戻し材製造時における含水率について

パラメータの取得方法:計算による取得

1個目のベントナイト・サンプルを、清潔かつ空の状態のアルミ缶にて保管し、重量を計測する。 2つ目のサンプルを105℃±5℃の乾燥オーブン内で24時間にわたり乾燥させる。少なくとも24時

間にわたる乾燥の後で、アルミニウム缶と乾燥したサンプルの合計重量を測定する。ベントナイト・ サンプルの全体的な含水率(wc)は、以下の式を用いて計算される。 $wc = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_c} \cdot 100 = \frac{m_w}{m_{tot}} \cdot 100$ ここで、wc:含水率(全般)(%)、m1:サンプル容器の質量+未乾燥サンプルの質量 (g)、m2:サ ンプル容器の質量+乾燥サンプルの質量(g)、mc:サンプル容器の質量(g)、 mw: 間隙水の質量 (g)、mtot: 間隙水+粒の総質量 (g) ベントナイト・サンプルの含水比(w)は、以下のように算出される。 $w = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_c} \cdot 100 = \frac{m_w}{m_c} \cdot 100$ ここで、W:含水比(地盤工学的なもの)(%)、Mw:間隙水の質量(g)、Ms:粒子粒の質量 (\mathbf{g}) (8) 埋め戻し材製造時の粒度分布について パラメータの取得方法:試験による取得 試験による分析手順は以下のようになっている。 1.約5 kgのサンプルを使用する(このサンプルは大きな袋の上表面から採取するのではなく、2~3 cm程度掘り下げた部分から採取する)。 2.このサンプルをいわゆる「分割装置」に流し込み、試験サンプルが500g程度になるまで分割す る。 3.ふるい分けには、以下のメッシュサイズの使用が推奨されている:16、8、5.6、4、2、1、0.5、 0.25、0.125及び0.075 mm。 粒の損傷を防ぐため、手作業のふるい分け方法のみを使用する(機械は使用しない)。 (9) 埋め戻し材製造時の圧縮特性について パラメータの取得方法:試験、及び圧縮曲線の作成による取得 さまざまな試験で含水率と圧縮圧力を系統的に変化させ、含水比及び圧縮圧力のプロットし、ベ ントナイト材料の圧縮曲線を作成する。 (10) 埋め戻しブロック及びペレットの引張強度について パラメータの取得方法:試験による取得 引張強度の確認に使用可能な方法としては、ビーム試験による3点曲げ試験又は割裂引張強度が 挙げられる。これらは国際標準に従って実施されるすでに確立された手順である。 (11) ペレットの強度について パラメータの取得方法:試験による取得 埋め戻し材ペレットの強度は、振とう及びふるい分けを行うことによって確認され、その後で微 細粒の比率が明らかにされる。これは SKB 社が独自に開発した検査方法の一つである。 (12) 坑道の幾何学的形状について パラメータの取得方法:測定による取得 基準点が設定したうえでの測地測量法を用いた測定が行われる。こうして入手された点群から当 該岩盤空間の3次元モデルが作成される。この3次元モデルでは、幾何学的形状(すなわち総容 積、最大断面積、処分坑道床面の凹凸状況など)を確認することができる。 (13) 埋め戻しブロックの乾燥密度について パラメータの取得方法:測定による取得 ·幾何学的形状

ブロックのプレス加工との関連において、当該ブロックの長さ、幅及び高さに関するチェック

が、ランダムチェック法を用いて、あるいはすべてのブロックが組立ライン上でレーザー・メータ ーを通過することによって行われる。

・質量

ブロックのプレス加工との関連において、ブロックの質量のチェックが、ランダムチェック方により、あるいはすべてのブロックがベルトコンベア上でウェーブを通過することにより行われる。

(14) ペレットの乾燥密度について

パラメータの取得方法:測定による取得

・水分含有率

ペレットのプレス加工後にサンプルを採取し、含水比を測定する。この測定は、セクション 4.3 で 述べた方法によって行われる。

・定置後の質量

従来型の装置を用いて行われる。(どのような装置かは記載なし)

(15) 埋め戻し材定置時の平均密度について

パラメータの取得方法:計算による取得

埋め戻し材定置時の平均密度を明らかにするために必要な入力情報の一つは、処分坑道の幾何学 的形状である(埋め戻しロボットは、それ自体の位置だけでなく設置されたブロックの位置も連続 して記録している)。こうした記録された情報に基づき、設置されたブロックの幾何学的形状(し たがって同時に容積も)をリアルタイムで追跡し、ブロックの乾燥密度に関するデータと併せて、 定置後のブロックの乾燥密度を算出することができる。

ブロック定置されない壁との隙間は、ペレットの設置が完了するたびに、充填されたペレットの 最前部の位置が、埋め戻しロボットのレーザー・スキャニング装置によって測定される。設置され たペレットの質量とペレット充填物の含水比の記録の助けを借りて、ペレット充填物の設置状態の 乾燥密度を算出し、それと同時に坑道内の総設置乾燥密度を計算することができる。

(16) 埋め戻しブロック製造について

パラメータの取得方法:試験による取得

ラボ施設規模と実規模の両方においてさまざまなパラメータ設定を用いたブロック製造が行われた。試験されたパラメータとして、充填高さ、含水比、圧縮圧力、脱気などに関するものが挙げられる。

(17) ペレット基盤層について

パラメータの取得方法:試験による取得

ペレット基盤層が沈降を起こすことなくブロックを支持する上で十分な安定性を備えているかど うかに関して、いくつかの不確実性が存在した。したがってこのペレット基盤層がどの程度まで機 能するのか明らかにするための、さらにはこの基盤層が現実的な条件のもとで機能することを実証 するための試験が行われることになった。試験では、基盤層の厚さが関連する系にどのような影響 を及ぼすのかに関する評価を行うために、異なる厚さの基盤層が用いられた。現実の処分場では坑 道床に凹凸があることが予想されるため、ペレット基盤層の厚さは場所によって変化することにな る。また、実際の処分場の場合と同様の条件で水が侵入してきた場合にも基盤層が所定の機能を果 たすかどうかを調査するために、模擬的な形で水が追加された。

- エスポHRLにある1本の坑道に設置されたペレット基盤層の上にブロックを設置され、凸凹を伴う床に設置されたペレット基盤層に水が流入した場合の挙動の評価が行われた(図5-3 参照)。
- ペレット基盤層の設置作業の実現可能性を検証するために、プロトタイプ装置が設計され、試験 された。この装置は、ペレットを基盤層沿いに運ぶスクリューと、基盤層の表面を平らにするス クレーパーで構成されている(図5-4 参照)。この装置は、ブロックの積み重ねが継続される前 に約1mの基盤層を設置する設備に取り付けられている。
(18) 地下水の流入対策について

パラメータの取得方法:試験による取得

ペレット基盤層自体は、使用されている物質の間隙孔が大きいことから、こうした水の分散を実 現するのにきわめて適している。こうした大きな間隙孔のおかげで、ペレットが膨潤してシーリン グ効果が発揮されるまでの期間に、大きな水流が比較的長い距離にわたって移動することが可能と なる。また、水の流量がペレットの水処理能力を上回る場合などにジオテキスタイルを適用するこ とが提案されている。ジオテキスタイルは主として一つの断面における岩盤の壁沿いに設置され流 入する水をより広い範囲に分散させる。このジオテキスタイルは埋め戻し後も坑道内に残される。

充填後のペレットが破損し、ペレット充填物に微粉が生じることがあり、これらの微粉はペレット充填物が流入する水を分散させる能力に影響を及ぼす可能性がある。したがって基盤層において 受け入れ可能な微粉量に関する規準を明らかにするための試験が行われた。結論として、ペレット の含水率がペレット充填物の水貯留量に対して一定の影響を与えるというものであった。この試験 結果に基づき、次に示す提言が行われた。

- ペレットは設置前にふるいにかけるべきである。
- ペレット設置装置では、ペレット設置作業時にできるだけ微粉の発生量が少なくなるような設定 が採用されるべきである。
- 水の貯留能力を最適化するためには、ペレットの含水率が20%を超えるべきではない。

(19) 埋め戻し材の施工について

パラメータの取得方法:実規模施工試験による取得

この試験の目的の一つは、当該概念が仕様とおりの生産及び設置作業を実現できることを示すこ とにあった。この試験では、長さ12mの処分坑道区画の埋め戻しが行われた。この試験において 設置が意図したとおりに行えることが確認されたものの、いくつかの弱点も確認された。これらの 弱点は主として、望ましい設置速度を実現できなかった設置装置にかかわるものであった。またブ ロックのスキャニングには予想以上の時間を要し、ペレット設置作業の速度は目標されていたペー スを大きく下回っていた。同様に、使用されたロボットが特定の場所のブロックに到達するのが困 難であったり、吊り上げ手段が岩盤壁に接近した時点でロックボルトに引っかかってしまったりな ど、プログラミング上の問題もあった。ブロックの生産過程における問題も明らかになった。粗く 不均一な材料が原因となってブロックの高さに大きなばらつきが生じ、比較的多くのブロックが廃 棄されることになったためである。こうした粗い材料はまた、ブロックの透気係数を高め、特定の ブロックにおいて真空吊り上げ装置による吊り上げ時に問題が生じた。

(20) 埋め戻し試験及びプラグ試験について

パラメータの取得方法:試験による取得

「埋め戻し及びプラグ試験」は、埋め戻し材物質及び定置方法に関する試験と、実規模プラグ試 験が含まれている。この試験は、発破法で掘削された処分坑道において、埋め戻し材物質及びニア フィールド岩盤の総合的な機能を検証するために実施されたものである(図5-7 参照)。またこ の試験では、プラグが備える水理学的及び力学的な機能に関する試験も行われている。この試験の 主な目的として次のものが挙げられる。

- 発破法で掘削された坑道の埋め戻しに使用するさまざまな材料及び圧縮手法の開発及び試験を行うこと。
- 発破法で掘削された坑道における埋め戻し材の機能とこの埋め戻し材と周辺岩盤との相互作用に 関する試験を行うこと。
- ・ 坑道プラグの設置手法を開発し、その機能を試験すること

長さ28mの坑道断面の埋め戻しを行い、計装が施された。坑道の長さの半分をベントナイト 30%及び砕石70%の混合物(30/70)で埋め戻し、残りの半分を砕石(0/100)で埋め戻した上 で、天盤部分にベントナイトブロックが配置された。床から天盤までの全区間で傾斜圧縮工法が採 用されており、層の傾斜は約35度とされている。埋め戻し材は2mおきに透水性マットで分割さ れた。その目的は、埋め戻し材を人工的に水飽和状態とした上で、マット間の区間で流動試験のた めの動水勾配を実現できるようにすることにあった。埋め戻し材とその周辺の岩盤には、主として 水圧、全圧及び含水率の測定を行うために約200個の測定・転送装置が設置された。試験区間の 末端には、厚さ0.5mのベントナイト製Oリングが取り付けたコンクリート製坑道プラグが設置 された。

(21) 定置孔及び処分坑道における埋め戻し材の密度及び含水率について パラメータの取得方法:測定、および試験による取得

定置孔と処分坑道の両方において、密度及び含水率の原位置測定が行われた。また含水率測定の ためのサンプルも採取された。密度測定の大部分に「RI 試験機」(nuclear gauge)が使用されて いる。「貫入試験器」(penetrometer)は、RI 試験機が使用できない場所で、すなわち坑道の天盤 や壁に近い場所で使用された。貫入試験器の原理は、鋼鉄製の棒を測定対象となる物質内に押し込 む際に生じる抵抗を測定するものである。ある一定の含水比を備える特定の材料のさまざまな密度 における平均抵抗を較正することができる。これは大雑把な測定方法の一つであり、埋め戻し材の 密度の見積りを行うために使用される。貫入試験器では 1,450 kg/m3 までの密度しか測定するこ

- Kurosawa Susumu, Tanaka Satoru, Scott C. James and Mikazu Yui, The Effect of Montmorillonite Partial Density on the Role of Colloid Filtration by a Bentonite Buffer, 2006.
- SKB, SKB's monitoring strategy and approaches to ensure construction quality for tunnel backfill, Fiscal year 2021 Prepared for Radioactive Waste management Funding and Research Center (RWMC) by SKB International AB, Sweden, Final Report, SKB International Report 233, 2021.
- 新井靖典,山崎貴博,成島誠一,三村卓,管理型最終処分場におけるベントナイト混合土施工事 例,2005.
- 石川博久,本田明,鶴留浩二,井上邦博,小畑政道,佐々木憲明,オーバーパックと候補材料選 定と炭素鋼オーバーパックの寿命評価,1992.
- 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,JNCTN140099-022,1999.
- 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 (第1分冊)
 - ー人工バリア品質/健全性評価手法の構築・オーバーパック , 2018a.
- 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 2 分冊) -人工バリア品質/健全性評価手法の構築- 緩衝 材, 2018b.
- 原子力発電環境整備機構,概要調査段階における設計性能評価手法の高度化(その1),NUMO-TR-12-03, 2012.
- 原子力発電環境整備機構,概要調査段階における設計性能評価手法の高度化(その2),

NUMO-TR-13-06, 2013.

- 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―,TR-20-02, 2021.
- 小林ほか,等含水比線と等飽和度線を用いた締固めベントナイトの圧縮・膨潤挙動の解釈,2007 杉田裕,藤田朝雄,棚井憲治,長谷川宏,古市光昭,奥津一夫,三浦一彦,地層処分場における 地下施設の埋め戻し,JNC TN8400 99-039, 1999.
- 全国都市清掃会議,廃棄物最終処分場整備の計画設計管理要領 2010年改訂版, 2020.
- 田中幸久,廣永道彦,工藤康二,飽和した高密度ベントナイトのガス移行メカニズムとそのモデ ル化,2009
- 谷口直樹,川崎学,藤原和雄,ベントナイト中における硫酸塩還元菌の活性と硫化水素によるオ ーバーパック材料の腐食への影響,2001
- 日本原子力研究開発機構, 緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討 I —10 年間の浸漬試 験結果に基づく腐食進展挙動の検討—, 2008.
- 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-坑道の埋め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、緩衝材および埋め戻し材の製作-,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め戻し-, JAEA-Research-2019-007, 2019.
- 日本原子力研究開発機構, 幌延深地層研究計画で得られた掘削土を用いた埋め戻し材の特性試験, JAEA-Data-Code-2020-017, 2020a.
- 日本原子力研究開発機構, 幌延深地層研究計画 令和元年度調査研究成果報告, JAEA-Review-2020-042, 2020c.
- 穂刈利之,沖原光信,石井卓,小島圭二,ベントナイト混合土の自己修復性に関する考察,1996. 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.
- 若杉圭一郎, 宮原要, 牧野仁史, 石黒勝彦, 澤村英範, 根山敦史, 西村和哉, ガラス固化体から の放射線量に関する検討(研究報告), JNC TN8400 2003-022, 2003.

付録6 地下構成要素を対象とした計測関連技術の整備

目次

1. 乾燥密度測定のための計測技術の高度化	付 6-2
1.1. 測定機器	付 6-2
1.2. 要素試験	付 6-2
2. 埋め戻し天端の隙間検知のための計測技術の高度化	付 6-3
2.1. 加熱式光ファイバケーブルによる計測結果	付 6-3
2.1.1. 温度計測結果	付 6-3
2.1.2. 熱伝導率の評価	付 6-7
2.2. ケーブル TDR による計測結果	付 6-8
3. 埋め戻し材の膨潤により発生する圧力に関する計測技術の研究開発	付 6-10
3.1. 水圧式加圧試験の再現解析の結果	付 6-10
3.2. 一方向圧力モデルの解析結果	付 6-11
3.3. 二心線一方向圧力モデルの解析結果	付 6-13
4. 処分環境を想定した無線給電技術の研究開発	付 6-17
4.1. 鉄筋を介在しない場合のコイル間距離と給電効率の理論値	付 6-17
4.1.1. 理論式	付 6-17
4.1.2. 試験による結合係数kとコイル性能Qの取得及び理論式による給電効率の算知	崔 付 6-18
4.2. 共振周波数のずれと給電効率の関係	付 6-20
4.2.1. 共振周波数のずれ	付 6-20
4.2.2. 既往の電力変換用の回路基板を用いた測定によるコイル間距離と給電効率の	>関係付6-21
4.2.3. 鉄筋がコイル近傍にある場合におけるコイルのインダクタンス変化	付 6-22
4.2.4. 最大給電効率と周波数の関係	付 6-23

1. 乾燥密度測定のための計測技術の高度化

ここでは、加熱式光ケーブルによる試験に先行して実施した、EC-5(誘電式土壌水分計)による試験についての概要と試験結果を示す。

1.1. 測定機器

本編で報告する加熱式光ケーブルは、ケーブル自体をセンサとして使用し、ケーブルの延長方 向全体の埋め戻し材の熱伝導率を計測することにより乾燥密度を推定するものであるが、EC-5 は TDR と同様の誘電理論を用いて、点計測により埋め戻し材の乾燥密度を推定するものである。い ずれの方法でも、含水比の異なる埋め戻し材の乾燥密度と計測値の関係を事前に計測して、校正 曲線を取得する必要がある。

EC-5 は付図 1-1 に示すように、2本の約5 cm の電極を有し、この電極が挿入された周囲の土 壌の誘電率を測定する。誘電率は土壌中の水分量により変化することから、土壌中の水分の測定 に用いられることが多い。埋め戻し材の含水比が既知(一定)であれば、誘電率の違いは乾燥密 度の差を表すこととなる。

EC-5 による計測では、3V の電圧を印加したときの電極周辺の静電容量から得られる電圧値を デジタル値に変換した無次元値が出力(計測値)として得られる。



付図 1-1 土壤水分計 EC-5

1.2. 要素試験

加熱式光ケーブルによる要素試験同様に、撒き出し転圧工法で使用される埋め戻し材を用いて、 4段階の乾燥密度(1.3、1.5、1.7、1.9 Mg/m³)となるように、試験カラムに材料を詰めて計測を 実施した。埋め戻し材の密度は、に示すように4段階で充填・締固めてそれぞれ調整した。



付図 1-2 EC-5 を用いた要素試験のための4段階の充填締固め

EC-5 による計測値と乾燥密度の関係を付図 1-3 に示す。試験の結果、EC-5 による計測では、 乾燥密度が低い領域(1.5 Mg/m³以下)において、乾燥密度の増加に対する計測値の増加が小さ く、この領域における乾燥密度の違いを計測することが難しいことを表している。その一方で、 乾燥密度が高い領域(1.5 Mg/m³以上)においては、乾燥密度の増加に対する計測値の増加も大 きく、乾燥密度の違いに対する計測値の感度が高いことがわかる。





2. 埋め戻し天端の隙間検知のための計測技術の高度化

ここでは、今年度実施した、加熱式光ファイバケーブル及びケーブル TDR による計測結果のうち、本編で掲載していない計測1回目及び3・4回目の計測結果を示す。

2.1. 加熱式光ファイバケーブルによる計測結果

2.1.1. 温度計測結果

加熱開始後 30 分までの計測結果のうち、計測1回目、3回目及び4回目の結果を付図 2-1~付 図 2-3 に示す。本編の2回目計測も含め、すべての計測結果が極めて近似しており、令和2年度 の課題であった計測の安定性確保が達成されたと考える。



付図 2-1 加熱式光ファイバ計測による各土槽の加熱時間と温度変化(計測1回目)



付図 2-2 加熱式光ファイバ計測による各土槽の加熱時間と温度変化(計測3回目)



付図 2-3 加熱式光ファイバ計測による各土槽の加熱時間と温度変化(計測4回目)

2.1.2. 熱伝導率の評価

温度の経時変化データより、熱伝導率を計算するための、計測1回目、3回目及び4回目の時間-温度変化図を付図 2-4 に示す。



2.2. ケーブル TDR による計測結果

計測1回目の計測結果を付図 2-5 に示す。また、全計測回の計測値を重ね書きしたものを付図 2-6 に示す。この図から、全ての計測回の計測値は極めて近似しており、安定した計測が実施できたと考える。





付図 2-6 ケーブル TDR の測定結果(計測1回目~4回目重ね書き)

3. 埋め戻し材の膨潤により発生する圧力に関する計測技術の研究開発

3.1. 水圧式加圧試験の再現解析の結果

内径 110 mm、高さ 1,000 mm の円筒型の耐圧容器内を満水にさせ、被覆条件の異なる 4本の 光ファイバに水圧を与える試験(以下、水圧式加圧試験)を実施した。4本の光ファイバのうち、 最も圧力感度の高かった 0.90 mm の光ファイバを解析対象とし、水圧式加圧試験の再現解析を実 施した。光ファイバに水圧を与える際、光ファイバの「周面のみ」と「周面+軸方向」の 2 ケー ス(付図 3-1)で解析を実施した。実施報告書本編では再現解析によるひずみ値のみを示してい るため、ここでは光ファイバに生じたひずみのコンター図を示す(付図 3-2~付図 3-4)。なお、 ひずみ値のうち正の値は引張ひずみ、負の値は圧縮ひずみを示す。



周面のみ

周面+軸方向

付図 3-1 光ファイバに与える水圧条件



付図 3-2 軸方向のひずみ分布



付図 3-3 半径方向のひずみ分布



付図 3-4 周方向のひずみ分布

3.2. 一方向圧力モデルの解析結果

埋め戻し材中に光ファイバセンサを設置することを見据え、埋め戻し材の膨潤による圧力を一 方向からの圧力を与えたモデル(以下、一方向圧力モデル)として、FEM 解析を実施した。外部 圧力に対して最も圧力感度の高かった 0.90 mm の光ファイバを解析対象とし、処分坑道の底盤コ ンクリートと埋め戻し材の界面に敷設されていることを想定した。実施報告書本編では、モデル 解析によるひずみ値のみを示しているため、ここでは光ファイバに生じたひずみのコンター図を 示す(付図 3-5~付図 3-7)。なお、ひずみ値のうち正の値は引張ひずみ、負の値は圧縮ひずみを 示す。



試験系全体のひずみコンター

石英ガラス部のひずみコンター





試験系全体のひずみコンター

石英ガラス部のひずみコンター

付図 3-6 周方向のひずみ分布



3.3. 二心線一方向圧力モデルの解析結果

埋め戻し材中に2本1組の分布型光ファイバセンサを設置することを見据え、埋め戻し材の膨 潤による圧力を一方向からの圧力を与えたモデル(以下、二心線一方向圧力モデル)として、FEM 解析を実施した。外部圧力に対する圧力感度および入手容易性の観点から0.90 mm と0.25 mm の光ファイバを解析対象とし、2本の光ファイバに生じたひずみが相互干渉しない最適な離隔を 検討した。実施報告書本編では、モデル解析によるひずみ値のみを示しているため、ここでは光 ファイバに生じたひずみのコンター図を示す。付図 3-8~付図 3-11 は離隔 0.575 mm、付図 3-12 ~付図 3-15 は離隔 0.2875 mm、付図 3-16~付図 3-19 は離隔 0 mm のひずみ分布を示す。な お、ひずみ値のうち正の値は引張ひずみ、負の値は圧縮ひずみを示す。



水平方向のひずみコンター 鉛直方向のひずみコンター 付図 3-8 試験系全体のひずみ分布(離隔 0.575 mm)







Υ

►Z

外径 0.25 mm 光ファイバの

石英ガラス部のひずみコンター

2.100e-05

1.800e-05

1.500e-05

0.000e+00

1.500e-04 1.200e-04

9.000e-05

6.000e-05

3.000e-05

0.000e+00

Υ

Z

外径 0.90 mm 光ファイバの

石英ガラス部のひずみコンター

付図 3-12 試験系全体のひずみ分布 (離隔 0.2875 mm)





水平方向のひずみコンター 鉛直方向のひずみコンター 付図 3-16 試験系全体のひずみ分布(離隔0mm)



付図 3-17 半径方向のひずみ分布 (離隔0mm)





4. 処分環境を想定した無線給電技術の研究開発

4.1. 鉄筋を介在しない場合のコイル間距離と給電効率の理論値

4.1.1. 理論式

本研究で採用している、磁界共振結合の S-S 方式(コイルと回路の共振用コンデンサを直列に 接続する方式)の送受電コイル1対1による無線給電では、送受電コイルなどを等価回路に置き 換えて回路解析を行うことにより給電効率が理論的に算出できる。等価回路の考え方を付図 4-1 に示す。Lmは相互インダクタンス、Lは自己インダクタンス、Cはキャパシタンス1、RLは負荷抵 抗、Rは内部抵抗を表している。添え字の1は送電側、2は受電側を表す。S-S方式での無線給電 の給電効率は、負荷抵抗 R_L が最適負荷 R_{Lopt} (4.1-2)のときに最大効率 η_{max} (4.1-1)となることが知ら れている。



付図 4-1 送受電コイルと置き換えた等価回路との関係

¹ キャパシタンス:静電容量。絶縁された2つの導体間の電位差に対する与えた電荷の比で表 す。コンデンサなどが相当する。

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{\left(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}\right)^2} \tag{4.1-1}$$

$$R_{Lopt} = R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2} \tag{4.1-2}$$

ここで、Q値はある周波数fにおけるコイルの性能を表す指標²である。Q値は(4.1-3)で表される。 $Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}$ (4.1-3)

kは誘導結合係数(以下、結合係数)³であり、 $0 \leq k \leq 1$ である。結合係数は(4.1-4)で表される。

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

(4.1-4)

これらより、無線給電の給電効率を理論式で計算するためには、インダクタンスから決まる結 合係数kとコイル性能Qが必要なことが分かる。ここでは、次のようにkとQの値を試験により取得 した。

4.1.2. 試験による結合係数kとコイル性能Qの取得及び理論式による給電効率の算定

試験用に製作したコイルを付図 4-2 に示す。送受電コイルは、直径 500 mm のアクリルパイプ にリッツ線(240 ヨリ*0.1 mm)の 15 回巻きとした。

製作した送受電コイルの*k*と*Q*の測定には、インピーダンスアナライザ(型式 E4990A、付図 4-3 参照)を用いた。*k*は送受電コイルを正対にした状況でコイル間距離を付表 4-1 に示す 5 パター ンで変化させ、JIS C5321 に沿って付図 4-3 に示すような方法で測定した。

100 kHz におけるkとQの測定結果を用いて算出した給電効率を付表 4-2 に示す。結合係数とコイル間距離の関係及び給電効率とコイル間距離の関係を付図 4-4 に示す。



付図 4-2 結合係数kとコイル性能Qの取得試験のための試験用コイル

² Q 値:コイルは直列に抵抗成分を持っているため、抵抗のない理想コイルとどれだけ近い特性 を持っているかを示す指標として用いる。

³ 結合係数:2つのコイル間の結合度合いを示す。1に近いほど磁気漏れが少なく効率が高い。

	•	
パターン名	コイル間距離(mm)	コイル間距離/コイル直径
パターン1	250	1/2 (= 0.5)
パターン 2	375	3/4. (= 0.75)
パターン 3	500	1
パターン 4	625	5/4. (= 1.25)
パターン 5	750	3/2 (= 1.5)

付表 4-1 kとQを測定する際のコイル間距離





コイル間距離 250 mm コイル間距離 750 mm 付図 4-3 インピーダンスアナライザを用いた*kとQ*の測定状況例

		č – – – – – – – – – – – – – – – – – – –		
コイル間距離 [mm]	結合係数k	コイルの内部抵抗 [ohm]	Q	給電効率 [%]
250	0.088	0.336	468	95.3
375	0.050	0.370	427	91.1
500	0.027	0.352	450	85.1
625	0.017	0.332	476	77.8
750	0.011	0.334	474	68.1

付表 4-2 鉄筋を介在しない条件でのkとQおよび給電効率の関係(100 kHz)





測定したkとQを用いて算出した給電効率と コイル間距離の関係(理論値)



4.2. 共振周波数のずれと給電効率の関係

4.2.1. 共振周波数のずれ

共振器の共振周波数と各パラメータの関係を(4.2·1)に示す。共振周波数は、送受電コイルのインダクタンス(L)と共振用コンデンサのキャパシタンス(C)により設定でき、LかCの値が変わると共振周波数がずれて、給電効率が低下する。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f: 共振周波数

L:インダクタンス

C: 共振用コンデンサのキャパシタンス

磁界共振結合方式の無線給電で利用するコイルのインダクタンスは、(4.2-2)で示され、コイル 周囲の透磁率がコイルのインダクタンスに影響を与える。

$$L = \frac{k\mu SN^2}{l}$$

(4.2-2)

(4.2-1)

L:インダクタンス [H] *N*:巻数

k: 長岡係数 S:	コイルの断面積	$[m^2]$
------------	---------	---------

μ:透磁率 [H/m] S: コイル長 [m]

式(4.2·2)に示すように、コイル近傍に何もない(空気中)時には、空気の透磁率のみを考え ればインダクタンスを計算することができる。一方、コイル近くに金属があると、金属の透磁率 と空気の透磁率の2つを考慮する必要があり、コイル近傍に金属がない場合と比べて透磁率が高 くなる。この透磁率の変化により、コイル近傍に金属がある場合コイルのインダクタンスが高く なる。その結果、本編の共振周波数が変化するため、給電効率が低下する。ここでは、このコイ ル近傍に金属があることで生じる共振周波数のずれと、給電効率の関係を室内試験で明らかにす る。



付図 4-5 コイルと磁束の関係(左:金属がない場合、左:金属がある場合)

4.2.2. 既往の電力変換用の回路基板を用いた測定によるコイル間距離と給電効率の関係 (1) 鉄筋が介在しない給電試験

本編に記載した VNA を用いた給電試験と同様に、既往の電力変換用の回路基板を用いた試験の結果を以下に示す。

測定は、電子負荷における電流を0.1 ピッチで可変することで受電コイルの電流を変化させて、 その時の送受電コイルの電流電圧を計測し、その値より給電効率を算出した。コイル間距離と給 電効率の関係を付図 4-6 に示す。VNA を使用した場合と比較して給電効率は低くなり、コイル間 距離が大きくなるほどその差は増大する。



付図 4-6 既往回路による鉄筋を介在しない場合のコイル間距離と給電効率

(2) 鉄筋が介在する給電試験結果

鉄筋間隔ごとのコイル間隔と給電効率の関係を付図 4-7 に示す。参考のために、VNA による計 測値のうち、共振周波数 100 kHz における給電効率を重ね書きした。

鉄筋間隔が狭く、コイル間隔が広いほど給電効率は小さい。鉄筋の無い試験と同様、VNAと比較して給電効率は大幅に低くなっている。



付図 4-7 鉄筋が介在する場合の既往の回路基板を用いたコイル間隔と給電効率の関係

4.2.3. 鉄筋がコイル近傍にある場合におけるコイルのインダクタンス変化

鉄筋の有無、鉄筋の絶縁の有無と環境を変化した場合における送電コイルのインダクタンスを 付図 4-8 に示す。これより、鉄筋の量が多く、コイルと鉄筋の位置が近い場合はインダクタンス が低下していくことが分かる。一方、鉄筋が無い場合や絶縁をした鉄筋がコイル近傍にある場合 は、コイルのインダクタンスは 252 uH 周辺でほぼ一定である。ここから、鉄筋がコイル近傍に あるときには、インダクタンスが変化して、共振周波数がずれることが理解できる。また、鉄筋 の交差部を絶縁することにより、この周波数のずれが、ほぼ無くなり効率よく伝送できる。



付図 4-8 鉄筋によるコイルのインダクタンス変化

4.2.4. 最大給電効率と周波数の関係

本編において検討した、共振のターゲット周波数を100kHzとし、鉄筋を介在する場合及び介 在しない場合の給電試験で得られた、コイル間隔と鉄筋間隔の関係を付表 4-3~付表 4-5に示す。

付表 4-3	鉄筋を介在しない場合	のコイル間距離と給電効率の関係

マイル 明明 ()	周波数 100kHz 時の	最高給電効率時		
ユイノレ同正時(mm)	給電効率(%)	給電効率(%)	周波数(kHz)	
250	95.0	95.1	99.63	
375	90.0	90.4	99.44	
500	81.2	83.4	99.13	
625	66.9	72.7	99.06	
750	48.4	58.6	98.88	

付表 4-4 交差部を絶縁しない鉄筋を介在する場合のコイル間距離と給電効率の関係

鉄筋間隔		周波数 100kHz 時	最高給電	電効率時
(mm)		(%)	給電効率(%)	周波数(kHz)
	250	40.2	51.6	103.25
	375	37.7	46.7	101.06
100	500	39.3	41.1	100.19
	625	28.3	32.0	99.75
	750	12.2	17.8	99.44
200	250	65.7	71.9	103.06
	375	61.5	64.3	100.88
	500	53.2	53.3	99.94
	625	37.9	41.8	99.50
	750	24.4	30.8	99.25
300	250	78.4	81.1	102.44
	375	73.3	74.0	100.63
	500	63.7	64.2	99.75
	625	48.4	52.6	99.31
	750	35.2	43.3	99.06

鉄筋間隔	ー ノ 北 目 町 南份()	周波数 100kHz 時	最高給電	電効率時
(mm)	ユイノレ间距離(mm)	(%)	給電効率(%)	周波数(kHz)
	250	81.9	82.4	99.00
	375	76.9	78.6	99.06
100	500	69.2	72.6	99.00
	625	53.9	60.8	99.00
	750	41.8	50.9	99.00
200	250	90.9	91.0	99.31
	375	84.9	85.6	99.00
	500	73.7	76.4	99.00
	625	57.7	64.0	99.00
	750	40.4	49.6	99.00
300	250	91.0	91.1	99.31
	375	84.7	85.2	99.00
	500	76.0	78.0	99.00
	625	58.2	63.2	99.00
	750	41.0	48.7	99.00

付表 4-5 交差部を絶縁した鉄筋を介在する場合のコイル間距離と給電効率の関係

コイル間距離、給電効率が最大となる周波数、鉄筋や絶縁の有無の関係を付図 4-9 に示す。こ れより、空気中と絶縁した鉄筋を送受電コイルの間に入れた給電試験における給電効率の最大値 の周波数は、コイル間距離にかかわらず、ほぼ 99 kHz 付近で一定であり、この周波数付近が、空 気中と交差部を絶縁した鉄筋の環境における共振周波数であることが分かる。一方、交差部を絶 縁しない鉄筋を送受電コイルの間に入れた給電試験における給電効率の最大値の周波数は、コイ ル間距離が短くなると周波数が高くなり、コイル間距離が 250 mm の時に 102~103 kHz と 99 kHz から 4 kHz 程度ずれてしまっており、給電効率も低下していることが分かる。このように、 鉄筋がコイル近傍にある場合は、コイル間距離に応じて共振周波数がずれてしまい給電効率が低 下する。つまり、この周波数のずれを修正しないまま電力伝送を行うと、損失が大きくなる。ま た、交差部を絶縁した鉄筋を利用した場合は、コイル間距離による周波数のずれが起こらず設計 が簡単である。

この共振周波数のずれが、送受電コイルで同じ値で起こっている場合(送電コイルと鉄筋およ び受電コイルと鉄筋の位置関係が対称である場合)は、電源の周波数を変化させることで、共振 が再度起こり、周波数ずれに起因する損失を低減できるが、そうではない場合は、電源の周波数 を変化させるだけでは、共振を回復することができない。

コンデンサのC(キャパシタ)やL(インダクタンス)が可変できる仕組みを事前に導入してお けば、インダクタンスの値が変化しても、CやL変化させることで、共振周波数の変化を抑えるこ ともできる。



付図 4-9 鉄筋間隔及び絶縁有無の違いによる共周波数とコイル間距離の関係

- Stephens, A. F., Busch, A., Salamonsen, R. F., Gregory, S. D. and Tansley, G. D., Rotary Ventricular Assist Device Control With a Fiber Bragg Grating Pressure Sensor. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020.
- Mikhailov, S., Zhang, L., Geernaert, T., Berghmans, F. and Thévenaz, L., Distributed hydrostatic pressure measurement using phase-OTDR in a highly birefringent photonic crystal fiber. Journal of Lightwave Technology, vol. 37, no. 18, pp.4496-4500, 2019.
- Puzrin, A.M., Rabaiotti, C., Hauswirth, D., Fischli, F., Tsirantonaki, D., Iten, M., Facchini, M., Friedrich, E., Distributed fiber optic strain sensing in pavements. Research report to grant VSS 2014/501, 2019.
- Kishida, K., Yamauchi, Y., and Guzik, A.: Study of optical fibers strain-temperature sensitivities using hybrid Brillouin-Rayleigh System, Photonic sensors, 4(1), 1-11, 2014.
- 原子力環境整備促進·資金管理センター,平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関 する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発 平成 25 年度~平成 29 年度の取りまとめ報 告書,2018
- 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.
- 藤田盛行,田中正俊,山取真也,鈴木聰人,小柳繁樹,山本哲也,フォトニック結晶ファイバ(1) -光学特性-,三菱電線工業時報 第99号,2002
- 三宅和幸, 八若正義, 田中正俊, 遠山修, 山口俊一郎, フォトニック結晶ファイバ(2)-非線形特 性と応用-, 三菱電線工業時報 第101号, 2002