

平成29年度
高レベル放射性廃棄物等の
地層処分に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
(第3分冊)

人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築

平成30年3月

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、経済産業省からの委託研究として、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、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の開発成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

当該報告書	分冊名	報告書の標題
	第1分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
	第2分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
○	第3分冊	人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
	第4分冊	処分システム工学確証技術開発 モニタリング関連技術の整備

目 次

第 1 章	はじめに	1-1
1.1	本事業の背景および目的	1-1
1.2	本事業の構成および全体計画	1-1
1.2.1	研究開発項目の構成	1-1
1.2.2	本事業における設定課題と 5 年間の計画	1-1
1.3	人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築	1-3
1.3.1	検討の背景、目的および概要	1-3
1.4	報告書の構成	1-4
第 2 章	研究計画	2-1
2.1	全体計画	2-1
2.1.1	概要	2-1
2.1.2	本研究の対象の選定	2-1
2.1.3	人工バリアの長期挙動に影響をおよぼす周辺環境因子	2-4
2.1.4	着眼点	2-6
2.1.5	3 カ年の全体計画	2-7
2.2	平成 29 年度の実施内容	2-9
2.2.1	平成 29 年度実施内容	2-9
2.3	THM 長期挙動評価手法の構築に向けて	2-9
2.3.1	処分システムの実現に向けた本検討の意義	2-10
2.3.2	長期挙動の解析的検討に対する評価手法	2-11
2.3.3	THM 長期挙動評価手法（骨子案）	2-15
2.4	共通の条件	2-25
2.4.1	数値解析コード	2-25
2.4.2	遠心力載荷試験装置	2-25
2.4.3	材料	2-25
2.4.4	試験対象	2-28
第 3 章	遠心模型試験	3-1
3.1	背景・目的	3-1
3.1.1	背景	3-1
3.1.2	目的	3-1
3.1.3	3 カ年の実施計画および本年度の実施内容	3-2
3.2	遠心模型試験における静的場の相似則	3-2
3.2.1	相似則	3-2
3.2.2	遠心模型試験の優位点	3-3
3.2.3	遠心模型試験の適用限界	3-4
3.2.4	長期挙動評価における遠心模型試験の意義	3-5

3.3	試験設備.....	3-6
3.3.1	超長期遠心載荷岩盤実験装置.....	3-6
3.3.2	圧力容器.....	3-8
3.3.3	X線CT装置.....	3-9
3.4	想定した施設および境界条件.....	3-9
3.4.1	想定した施設.....	3-9
3.4.2	境界条件.....	3-12
3.5	遠心模型試験.....	3-15
3.5.1	模型の作製.....	3-15
3.5.2	試験概要.....	3-43
3.5.3	結果.....	3-46
3.6	H29年度のまとめ.....	3-85
第4章	数値解析に連動した要素試験.....	4-1
4.1	背景・目的.....	4-1
4.2	試験方法.....	4-1
4.2.1	試験材料.....	4-1
4.2.2	試験の規格および数量.....	4-1
4.3	試験結果.....	4-5
4.3.1	物理・化学特性.....	4-5
4.3.2	膨潤特性.....	4-10
4.3.3	水分特性.....	4-15
4.3.4	熱特性.....	4-36
4.3.5	力学特性.....	4-50
4.3.6	統計処理.....	4-96
4.3.7	解析用物性値.....	4-103
4.4	H29年度のまとめ.....	4-115
第5章	数値解析.....	5-1
5.1	背景・目的.....	5-1
5.1.1	背景.....	5-1
5.1.2	目的.....	5-1
5.2	解析コードの概要.....	5-2
5.2.1	THM連成の支配方程式.....	5-2
5.2.2	緩衝材の膨潤モデル.....	5-5
5.2.3	THM連成ジョイント要素.....	5-7
5.2.4	剛性変化による弾性ひずみの再配分.....	5-7
5.2.5	LOSTUFのパラメータ.....	5-8
5.3	解析モデルの諸元・境界条件.....	5-9
5.3.1	H28年度遠心模型試験を対象とする解析モデル.....	5-9

5.3.2	H29 年度遠心模型試験を対象とする解析モデル.....	5-11
5.4	パラメータ.....	5-13
5.4.1	基本ケースの設定パラメータ.....	5-13
5.4.2	設定した解析ケース一覧.....	5-19
5.5	H29 年度の解析結果に対する考察とまとめ.....	5-22
5.5.1	H28 年度遠心模型試験モデルの各ケースの解析結果に対する考察.....	5-22
5.5.2	H29 年度遠心模型試験モデルの各ケースの解析結果に対する考察.....	5-25
5.5.3	遠心模型試験の数値解析結果のまとめ.....	5-27
第 6 章	まとめ.....	6-1
6.1	実施内容.....	6-1
6.2	本年度の成果.....	6-1
6.2.1	研究計画.....	6-1
6.2.2	遠心模型試験.....	6-2
6.2.3	数値解析に連動した要素試験.....	6-4
6.2.4	遠心模型試験の数値解析.....	6-5

目 次

図 2.1.2-1	ニアフィールドで生じる諸現象の概略図	2-2
図 2.1.2-2	本研究における評価期間および支配現象の概念図	2-3
図 2.1.3-1	人工バリアの長期挙動に影響を与える主要な環境因子の概念図	2-5
図 2.1.4-1	本研究の実施体制の概念図	2-6
図 2.3.1-1	将来変遷の概念と本研究の対象期間	2-11
図 2.3.2-1	長期挙動の評価手法の概念	2-12
図 2.3.2-2	ASEM V&V のフロー (左)、および長期挙動評価手法の構築へ向けた考え方 (右)	2-13
図 2.3.2-3	妥当性確認試験 (THM 模型試験) の概念	2-14
図 2.3.2-4	妥当性確認試験 (THM 模型試験) の評価期間のイメージ	2-15
図 2.3.3-1	実事業で想定される対象サイトに対する THM 長期挙動評価のフロー (骨子案)	2-17
図 2.3.3-2	数値解析の妥当性の確認の詳細なフロー (骨子案)	2-18
図 2.4.2-1	超長期遠心載荷岩盤実験装置のイメージ	2-25
図 2.4.3-1	岩盤サンプリング箇所。(左) 5 万分の 1 表層地質図、(右) サンプリングを行っ た電力中央研究所・横須賀地区構内図	2-27
図 2.4.3-2	防空壕内で実施した地質観察図	2-27
図 2.4.4-1	本研究における対象施設 (縦置き方式)	2-29
図 2.4.4-2	H29 年度で想定する境界条件の概念図	2-29
図 2.4.4-3	遠心模型試験で想定するオーバーパックの温度条件 (経時変化)	2-30
図 3.1.3-1	今フェーズにおける遠心模型試験の試験計画	3-2
図 3.3.1-1	超長期遠心載荷岩盤実験装置の概略図 (上) と装置全景 (下)	3-7
図 3.3.2-1	18cm 円柱用圧力容器の見取図、(左) 立断面、(右)、平断面	3-8
図 3.3.3-1	医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ	3-9
図 3.4.1-1	対象とした処分施設の概要[19]	3-10
図 3.4.1-2	試験条件のイメージ図	3-11
図 3.4.1-3	1/50 縮尺模型	3-12
図 3.4.2-1	載荷圧力の経時変化	3-14
図 3.4.2-2	オーバーパックの温度制御	3-15
図 3.5.1-1	オーバーパックの概要図 (上) と実際の模型 (下)	3-16
図 3.5.1-2	緩衝材および下部埋戻し材ブロックの断面図、平面図および分割状況	3-18
図 3.5.1-3	緩衝材・下部埋戻し材試料 (クニゲル V1、70wt%、混合ケイ砂 30wt%) 投入状 況	3-18
図 3.5.1-4	緩衝材および下部埋戻し材締固め機	3-19
図 3.5.1-5	作製した緩衝材および下部埋戻し材ブロック一覧	3-20
図 3.5.1-6	岩盤供試体の概略断面図	3-21

図 3.5.1-7	岩盤試料の整形状況	3-22
図 3.5.1-8	上部埋戻し材用圧縮容器	3-24
図 3.5.1-9	高剛性リング	3-24
図 3.5.1-10	上部埋戻し材圧縮状況	3-25
図 3.5.1-11	土圧計および水位センサー設置状況	3-26
図 3.5.1-12	非接触変位計用ターゲット設置状況	3-26
図 3.5.1-13	膨出センサー	3-27
図 3.5.1-14	水位センサー	3-28
図 3.5.1-15	ADVANTEC DRK632DB 送風定温乾燥機	3-30
図 3.5.1-16	岩盤供試体へのマーキング状況	3-30
図 3.5.1-17	使用したひずみゲージ、QFLA-5T-11-6FB-3LT	3-31
図 3.5.1-18	岩盤試料上端面の加工状況	3-31
図 3.5.1-19	ひずみゲージの貼付状況	3-32
図 3.5.1-20	ひずみゲージ貼付部分へのコーティング状況	3-32
図 3.5.1-21	水位センサー	3-33
図 3.5.1-22	水位センサーの設置状況	3-33
図 3.5.1-23	メンブレンゴムスリーブへの穴開け状況（赤丸部分）	3-34
図 3.5.1-24	KE-45-TS を使用しての止水処理状況	3-34
図 3.5.1-25	緩衝材ブロックの中心部加工状況	3-35
図 3.5.1-26	小型圧力計（東京測器製 PDA-3MPB）	3-35
図 3.5.1-27	膨出センサースライド治具	3-36
図 3.5.1-28	土圧計および膨出センサー設置状況	3-36
図 3.5.1-29	埋戻し材の設置状況	3-37
図 3.5.1-30	ガスケット材の設置状況	3-37
図 3.5.1-31	メンブレンの装着状況	3-38
図 3.5.1-32	メンブレン部の被覆状況	3-38
図 3.5.1-33	ステンレスメッシュ貼付状況	3-40
図 3.5.1-34	下部架台への設置状況（Oリング設置済）	3-40
図 3.5.1-35	Conax 社製、シーリンググランドへのリード線設置状況	3-41
図 3.5.1-36	sartorius 社製、MW2P1-150FE-L	3-41
図 3.5.1-37	高速スイッチボックスへの結線状況	3-42
図 3.5.2-1	本試験のセンサーレイアウト	3-45
図 3.5.3-1	模型上の水位センサーの設置位置（模型寸法）	3-47
図 3.5.3-2	水位センサー電圧出力の経時変化	3-47
図 3.5.3-3	各点における浸潤速度	3-48
図 3.5.3-4	オーバーパックの温度の入力値および計測値の経時変化	3-49
図 3.5.3-5	模型側面部軸方向の測温ゲージによって計測された温度の経時変化	3-50
図 3.5.3-6	模型側面部周方向の測温ゲージによって計測された温度の経時変化	3-51

図 3.5.3-7	模型処分孔内部の測温ゲージで計測した温度の経時変化.....	3-52
図 3.5.3-8	膨出センサーおよび水位センサー設置部で計測した温度の経時変化.....	3-53
図 3.5.3-9	温度測定位置のオーバーパックからの位置関係.....	3-54
図 3.5.3-10	膨出センサー、水位センサー処分孔内、模型側面で計測した温度の経時変化	3-54
図 3.5.3-11	模型側面軸方向のひずみ経時の変化.....	3-56
図 3.5.3-12	模型側面周方向のひずみの経時変化.....	3-57
図 3.5.3-13	処分孔壁のひずみの経時変化.....	3-58
図 3.5.3-14	水位センサー設置部分のひずみの経時変化.....	3-59
図 3.5.3-15	緩衝材の全応力と上端圧の経時変化.....	3-61
図 3.5.3-16	埋戻し材の全応力と上端圧の経時変化.....	3-63
図 3.5.3-17	膨出センサーのひずみの経時変化.....	3-65
図 3.5.3-18	膨出センサーのひずみの分布形状.....	3-66
図 3.5.3-19	下部ピストン（模型高さ）鉛直変位の経時変化.....	3-69
図 3.5.3-20	上部埋戻し材の鉛直変位の経時変化.....	3-70
図 3.5.3-21	オーバーパックの鉛直変位（補正值）の経時変化.....	3-71
図 3.5.3-22	オーバーパックの鉛直変位と膨出センサー（sw_1_3）のひずみの関係.....	3-72
図 3.5.3-23	試験後の含水比計測に使用した試料採取ロッド.....	3-74
図 3.5.3-24	試験後の緩衝材および下部埋戻し材の含水比試料採取地点（模型寸法）..	3-74
図 3.5.3-25	試験後の緩衝材および下部埋戻し材の含水比深度分布.....	3-75
図 3.5.3-26	試験後の緩衝材および下部埋戻し材の密度深度分布.....	3-75
図 3.5.3-27	試験後の上部埋戻し材の含水比試料採取地点.....	3-76
図 3.5.3-28	試験後の上部埋戻し材の含水比深度分布.....	3-76
図 3.5.3-29	試験後の上部埋戻し材の密度深度分布.....	3-77
図 3.5.3-30	撮影箇所の概要図.....	3-78
図 3.5.3-31	試験前の CT 撮影結果.....	3-79
図 3.5.3-32	試験前の各地点における CT 値.....	3-80
図 3.5.3-33	試験後の CT 撮影結果.....	3-81
図 3.5.3-34	試験後の各地点における CT 値.....	3-82
図 3.5.3-35	CT 値から換算した緩衝材の密度分布と試験後の緩衝材実測湿潤密度.....	3-83
図 3.5.3-36	処分孔周辺を拡大した試験後の CT 画像（濃淡強調）.....	3-84
図 3.5.3-37	試験後の上部埋戻し材（下端部、下部岩盤側）の写真.....	3-84
図 4.3.1-1	粒径加積曲線（クニゲル V1）.....	4-6
図 4.3.1-2	粒径加積曲線（ケイ砂 3 号：2mm アンダー）.....	4-6
図 4.3.1-3	粒径加積曲線（ケイ砂 5 号）.....	4-6
図 4.3.1-4	粒径加積曲線（周辺岩盤）.....	4-7
図 4.3.1-5	ベントナイトの浸出陽イオン量.....	4-8
図 4.3.1-6	ベントナイトのモンモリロナイト含有率.....	4-9

図 4.3.2-1	膨潤特性・透水特性試験装置.....	4-11
図 4.3.2-2	膨潤圧と経過時間の関係（緩衝材）.....	4-12
図 4.3.2-3	膨潤圧と経過時間の関係（埋戻し材）.....	4-13
図 4.3.2-4	平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係.....	4-14
図 4.3.3-1	透水特性の測定状況（緩衝材、埋戻し材）.....	4-16
図 4.3.3-2	吸水量と経過時間の関係（緩衝材）.....	4-17
図 4.3.3-3	給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係（緩衝材）.....	4-17
図 4.3.3-4	吸水量と経過時間の関係（埋戻し材）.....	4-18
図 4.3.3-5	給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係（埋戻し材）.....	4-18
図 4.3.3-6	透水係数と経過時間の関係（緩衝材）.....	4-20
図 4.3.3-7	透水係数と経過時間の関係（埋戻し材）.....	4-21
図 4.3.3-8	透水係数と有効粘土密度の関係.....	4-22
図 4.3.3-9	変水位透水特性の測定状況.....	4-23
図 4.3.3-10	変水位透水試験の測定装置（周辺岩盤）.....	4-23
図 4.3.3-11	透水係数と圧密応力の関係（周辺岩盤）.....	4-25
図 4.3.3-12	透水係数と間隙比の関係（周辺岩盤）.....	4-25
図 4.3.3-13	サイクロメータ及び恒温槽.....	4-26
図 4.3.3-14	化学ポテンシャルと飽和度の関係（緩衝材）.....	4-30
図 4.3.3-15	化学ポテンシャルと飽和度の関係（埋戻し材）.....	4-33
図 4.3.3-16	化学ポテンシャルと飽和度の関係（周辺岩盤）.....	4-35
図 4.3.4-1	熱伝導率の測定プローブ.....	4-36
図 4.3.4-2	測定供試体の穿孔状況.....	4-37
図 4.3.4-3	熱伝導率の測定状況.....	4-37
図 4.3.4-4	熱伝導率と飽和度の関係（緩衝材）.....	4-38
図 4.3.4-5	熱伝導率と飽和度の関係（埋戻し材）.....	4-39
図 4.3.4-6	熱伝導率と飽和度の関係（周辺岩盤）.....	4-40
図 4.3.4-7	断熱走査型比熱測定装置.....	4-41
図 4.3.4-8	比熱測定に用いた供試体.....	4-42
図 4.3.4-9	比熱と温度との関係（緩衝材：乾燥密度 1.6Mg/m ³ ）.....	4-44
図 4.3.4-10	比熱と温度との関係（埋戻し材：乾燥密度 1.8Mg/m ³ ）.....	4-44
図 4.3.4-11	比熱と温度との関係（周辺岩盤）.....	4-45
図 4.3.4-12	ひずみゲージを貼付した供試体.....	4-46
図 4.3.4-13	熱膨張ひずみと温度の関係（緩衝材：乾燥密度 1.5Mg/m ³ ）.....	4-47
図 4.3.4-14	熱膨張ひずみと温度の関係（緩衝材：乾燥密度 1.6Mg/m ³ ）.....	4-48
図 4.3.4-15	熱膨張ひずみと温度の関係（緩衝材：乾燥密度 1.7Mg/m ³ ）.....	4-48
図 4.3.4-16	熱膨張ひずみと温度の関係（埋戻し材：乾燥密度 1.8Mg/m ³ ）.....	4-49
図 4.3.4-17	熱膨張ひずみと温度の関係（周辺岩盤）.....	4-49
図 4.3.5-1	一軸圧縮試験の供試体（緩衝材）.....	4-50

図 4.3.5-2	一軸圧縮試験の状況（緩衝材：含水比 10%）	4-50
図 4.3.5-3	一軸圧縮強さと飽和度の関係（緩衝材、埋戻し材）	4-55
図 4.3.5-4	ヤング率と飽和度の関係（緩衝材、埋戻し材）	4-55
図 4.3.5-5	ヤング率の比較（緩衝材：乾燥密度 1.6Mg/m ³ ）	4-56
図 4.3.5-6	局所変位計及び外部変位計から得られるヤング率の比較	4-56
図 4.3.5-7	一軸圧縮試験時のひずみゲージ、横型 LDT の設置状況	4-57
図 4.3.5-8	ポアソン比と応力レベルの関係（緩衝材：乾燥密度 1.6Mg/m ³ ）	4-57
図 4.3.5-9	一軸圧縮試験装置	4-58
図 4.3.5-10	一軸圧縮応力とひずみの関係（周辺岩盤：乾燥状態）	4-59
図 4.3.5-11	一軸引張り試験装置	4-60
図 4.3.5-12	一軸引張り応力と引張軸ひずみの関係（周辺岩盤：自然含水状態）	4-61
図 4.3.5-13	三軸圧縮試験装置	4-62
図 4.3.5-14	軸差応力と軸ひずみの関係（緩衝材：不飽和状態）	4-63
図 4.3.5-15	モールの応力円（緩衝材：不飽和）	4-63
図 4.3.5-16	排水量と経過時間の関係（緩衝材：飽和状態）	4-66
図 4.3.5-17	圧密時の間隙比と圧密圧力との関係（緩衝材）	4-66
図 4.3.5-18	応力と外部軸ひずみの関係（緩衝材：飽和状態）	4-67
図 4.3.5-19	有効応力経路（緩衝材：飽和状態）	4-67
図 4.3.5-20	ヤング率と応力レベルの関係（緩衝材：飽和状態）	4-68
図 4.3.5-21	排水量と時間の関係（埋戻し材：飽和状態）	4-70
図 4.3.5-22	間隙比と圧密圧力との関係（埋戻し材）	4-70
図 4.3.5-23	応力と外部軸ひずみの関係（埋戻し材：飽和状態）	4-71
図 4.3.5-24	応力経路（埋戻し材：飽和状態）	4-71
図 4.3.5-25	割線ヤング率と応力レベルの関係（埋戻し材：飽和状態）	4-72
図 4.3.5-26	三軸圧縮試験装置（周辺岩盤）	4-73
図 4.3.5-27	ヤング率と飽和度との関係（周辺岩盤）	4-75
図 4.3.5-28	軸差応力と軸ひずみの関係（周辺岩盤：飽和状態）	4-75
図 4.3.5-29	軸差応力と軸ひずみの関係（周辺岩盤：乾燥状態）	4-76
図 4.3.5-30	ヤング率と軸ひずみの関係（周辺岩盤：飽和状態）	4-76
図 4.3.5-31	ヤング率と軸ひずみの関係（周辺岩盤：乾燥状態）	4-77
図 4.3.5-32	ヤング率と応力比の関係（周辺岩盤：飽和状態）	4-77
図 4.3.5-33	ヤング率と応力比の関係（周辺岩盤：乾燥状態）	4-78
図 4.3.5-34	ポアソン比と軸ひずみの関係（周辺岩盤：飽和状態）	4-78
図 4.3.5-35	ポアソン比と軸ひずみの関係（周辺岩盤：乾燥状態）	4-79
図 4.3.5-36	ピーク強度のモールの応力円（周辺岩盤）	4-79
図 4.3.5-37	モールの応力円（周辺岩盤）	4-80
図 4.3.5-38	圧密試験装置	4-81
図 4.3.5-39	圧密特性の測定結果	4-82

図 4.3.5-40	三軸クリープ試験装置.....	4-84
図 4.3.5-41	破壊時の軸差応力と平均有効応力の関係	4-86
図 4.3.5-42	弾性係数と有効拘束圧の関係.....	4-87
図 4.3.5-43	軸差応力で正規化した偏差ひずみ速度と経過時間との関係	4-87
図 4.3.5-44	偏差ひずみ速度と経過時間の関係	4-88
図 4.3.5-45	最小偏差ひずみ速度と3次クリープ開始時間の関係	4-88
図 4.3.5-46	最小偏差ひずみ速度の拘束圧依存性.....	4-89
図 4.3.5-47	応力比とダイレイタンス比の関係.....	4-89
図 4.3.5-48	供試体の採取状況.....	4-90
図 4.3.5-49	ピーク強度のモールの応力円（周辺岩盤：飽和状態、異方性）	4-91
図 4.3.5-50	ヤング率と応力レベルの関係（周辺岩盤：飽和状態、異方性）	4-92
図 4.3.5-51	ポアソン比と応力レベルの関係（周辺岩盤：飽和状態、異方性）	4-92
図 4.3.5-52	加熱試験用三軸セル	4-93
図 4.3.5-53	モールの応力円（周辺岩盤：飽和状態、温度依存性）	4-94
図 4.3.5-54	割線ヤング率と応力レベルの関係（周辺岩盤：飽和状態、温度依存性） ..	4-95
図 4.3.5-55	ポアソン比と応力レベルの関係（周辺岩盤：飽和状態、温度依存性）	4-95
図 4.3.6-1	物理試験結果のヒストグラム.....	4-97
図 4.3.6-2	化学試験結果のヒストグラム.....	4-98
図 4.3.6-3	平衡膨潤圧のヒストグラム	4-99
図 4.3.6-4	熱特性試験結果のヒストグラム	4-100
図 4.3.6-5	力学特性試験結果のヒストグラム	4-101
図 4.3.6-6	物性値と飽和度との関係を統計処理したヒストグラム.....	4-102
図 4.3.7-1	緩衝材の膨潤圧（作製時の目標乾燥密度：1.6Mg/m ³ ）	4-105
図 4.3.7-2	埋戻し材の膨潤圧（作製時の目標乾燥密度：1.8Mg/m ³ ）	4-105
図 4.3.7-3	緩衝材の保水特性（静的締固め）	4-107
図 4.3.7-4	埋戻し材の保水特性（静的締固め）	4-108
図 4.3.7-5	周辺岩盤の保水特性（排水過程）	4-108
図 4.3.7-6	緩衝材の熱伝導率.....	4-109
図 4.3.7-7	埋戻し材の熱伝導率	4-110
図 4.3.7-8	周辺岩盤の熱伝導率	4-110
図 4.3.7-9	緩衝材の平均熱膨張係数（解析用物性値）	4-111
図 4.3.7-10	緩衝材のヤング率（解析用物性値）	4-112
図 4.3.7-11	緩衝材のポアソン比（解析用物性値）	4-112
図 4.3.7-12	埋戻し材のヤング率	4-113
図 4.3.7-13	埋戻し材のポアソン比.....	4-113
図 4.3.7-14	周辺岩盤のヤング率	4-114
図 4.3.7-15	周辺岩盤のポアソン比.....	4-114
図 5.2.2-1	LOSTUFにおける緩衝材膨潤モデル.....	5-6

図 5.2.4-1	弾性ひずみの再配分の計算方法	5-7
図 5.3.1-1	H28 年度遠心模型試験を対象とする解析モデル図	5-9
図 5.3.1-2	H28 年度遠心模型試験の解析モデルの諸元と境界条件	5-10
図 5.3.2-1	H29 年度遠心模型試験を対象とする解析モデル図	5-11
図 5.3.2-2	H29 年度遠心模型試験の解析モデルの諸元と境界条件	5-12
図 5.4.1-1	各材料に設定した水分特性曲線	5-14
図 5.4.1-2	緩衝材の固有透過度	5-15
図 5.4.1-3	緩衝材に設定したポアソン比の飽和度依存性	5-15
図 5.4.1-4	緩衝材のヤング率と飽和度の関係 (勾配を一定としたモデル)	5-17
図 5.4.1-5	緩衝材のヤング率と飽和度の関係 (切片間隔を一定としたモデル)	5-17
図 5.5.3-1	全物性のばらつきを評価した H28 年度モデルの O/P 鉛直変位	5-29
図 5.5.3-2	全物性のばらつきを評価した H28 年度モデルの O/P 鉛直変位 (時間軸対数)	5-29
図 5.5.3-3	剛性のみばらつきを評価した H28 年度モデルの O/P 鉛直変位	5-30
図 5.5.3-4	剛性のみばらつきを評価した H28 年度モデルの O/P 鉛直変位 (時間軸対数)	5-30
図 5.5.3-5	全物性のばらつきを評価した H29 年度モデルの O/P 鉛直変位	5-31
図 5.5.3-6	全物性のばらつきを評価した H29 年度モデルの O/P 鉛直変位 (時間軸対数)	5-31
図 5.5.3-7	剛性のみばらつきを評価した H29 年度モデルの O/P 鉛直変位	5-31
図 5.5.3-8	剛性のみばらつきを評価した H29 年度モデルの O/P 鉛直変位 (時間軸対数)	5-32
図 5.5.3-9	H28 年度モデルにおけるベントナイト土圧の最大および最終値のばらつき	5-32
図 5.5.3-10	H29 年度モデルにおけるベントナイト土圧の最大および最終値のばらつき	5-33
図 5.5.3-11	H28 年度モデルにおける緩衝材の応力の最大および最終値のばらつき	5-33
図 5.5.3-12	H29 年度モデルにおける緩衝材の応力の最大および最終値のばらつき	5-34

表 目 次

表 1.2.2-1	5カ年の研究開発計画	1-2
表 2.1.5-1	本研究における3カ年計画の概要	2-8
表 2.2.1-1	平成29年度実施内容の概要	2-9
表 2.3.2-1	妥当性確認試験 (THM 模型試験) の特徴等	2-15
表 2.3.3-1	評価項目と影響要因の関係 (評価影響要因分析表)	2-21
表 2.3.3-2	比較・検討のための一般傾向データベース (遠心場室内模型実験の例)	2-24
表 2.4.3-1	HLW 第2次取りまとめの解析で使用された軟岩の物性値	2-27
表 3.2.1-1	静的場における遠心力場の相似測	3-3
表 3.2.4-1	ニアフィールドで生じる主要な現象と関係する物理量.....	3-6
表 3.5.1-1	緩衝材および下部埋戻し材ブロック作製に必要なクニゲル V1 とケイ砂の質量	3-18
表 3.5.1-2	作製した緩衝材および下部埋戻し材ブロックの諸元	3-19
表 3.5.1-3	作製した上部埋戻し材の諸元.....	3-25
表 3.5.3-1	各事象と対応する実物換算経過時間.....	3-66
表 4.2.2-1	物理・化学特性試験の一覧表.....	4-2
表 4.2.2-2	膨潤特性試験の一覧表.....	4-2
表 4.2.2-3	水分特性試験の一覧表.....	4-3
表 4.2.2-4	熱特性試験の一覧表	4-3
表 4.2.2-5	力学特性試験の一覧表.....	4-4
表 4.3.1-1	固相の物理特性 (人工バリア材料)	4-5
表 4.3.1-2	コンシステンシー特性 (クニゲル V1)	4-5
表 4.3.1-3	物理特性 (緩衝材、埋戻し材)	4-7
表 4.3.1-4	物理特性 (周辺岩盤)	4-7
表 4.3.1-5	ベントナイトの浸出陽イオン量の測定結果.....	4-8
表 4.3.1-6	ベントナイトのメチレンブルー吸着量の測定結果.....	4-9
表 4.3.2-1	膨潤特性の供試体の初期条件.....	4-10
表 4.3.2-2	膨潤特性の測定方法	4-10
表 4.3.2-3	膨潤特性の測定結果の一覧 (緩衝材)	4-12
表 4.3.2-4	膨潤特性の測定結果の一覧 (埋戻し材)	4-13
表 4.3.3-1	透水特性の測定方法 (緩衝材、埋戻し材)	4-15
表 4.3.3-2	透水試験の給排水圧力の条件 (緩衝材、埋戻し材)	4-15
表 4.3.3-3	透水特性の測定結果 (緩衝材)	4-19
表 4.3.3-4	透水特性の測定結果 (埋戻し材)	4-21
表 4.3.3-5	透水特性の測定条件 (周辺岩盤)	4-23
表 4.3.3-6	透水特性の測定結果 (周辺岩盤)	4-24
表 4.3.3-7	サイクロメータの諸元.....	4-26

表 4.3.3-8	保水特性の測定に用いた供試体	4-27
表 4.3.3-9	サイクロメータの測定結果（緩衝材：静的締固め供試体）	4-28
表 4.3.3-10	サイクロメータの測定結果（緩衝材：静的締固め供試体の排水過程）	4-29
表 4.3.3-11	サイクロメータの測定結果（緩衝材：飽和供試体）	4-29
表 4.3.3-12	サイクロメータの測定結果（緩衝材：飽和供試体の排水過程）	4-30
表 4.3.3-13	サイクロメータの測定結果（埋戻し材の静的締固め供試体）	4-31
表 4.3.3-14	サイクロメータの測定結果（埋戻し材：静的締固め供試体の排水過程） ..	4-32
表 4.3.3-15	サイクロメータの測定結果（埋戻し材：飽和供試体）	4-32
表 4.3.3-16	サイクロメータの測定結果（埋戻し材：飽和供試体の排水過程）	4-33
表 4.3.3-17	サイクロメータの測定結果（周辺岩盤）	4-34
表 4.3.4-1	熱伝導率測定器の諸元.....	4-36
表 4.3.4-2	熱伝導率の測定結果（緩衝材）	4-38
表 4.3.4-3	熱伝導率の測定結果（埋戻し材）	4-39
表 4.3.4-4	熱伝導率の測定結果（周辺岩盤）	4-40
表 4.3.4-5	断熱走査型比熱測定装置の諸元	4-41
表 4.3.4-6	比熱の測定結果.....	4-43
表 4.3.4-7	熱膨張の測定方法.....	4-46
表 4.3.5-1	一軸圧縮試験の結果（緩衝材：乾燥密度 1.5Mg/m ³ ）	4-51
表 4.3.5-2	一軸圧縮試験の試験結果（緩衝材：乾燥密度 1.6Mg/m ³ ）	4-52
表 4.3.5-3	一軸圧縮試験の結果（緩衝材：乾燥密度 1.7Mg/m ³ ）	4-53
表 4.3.5-4	一軸圧縮試験の結果（埋戻し材：乾燥密度 1.8Mg/m ³ ）	4-54
表 4.3.5-5	埋戻し材のポアソン比の結果.....	4-57
表 4.3.5-6	一軸圧縮試験の条件	4-58
表 4.3.5-7	一軸圧縮試験の結果（周辺岩盤：乾燥状態）	4-59
表 4.3.5-8	一軸引張り試験の条件.....	4-60
表 4.3.5-9	一軸引張り試験の結果（周辺岩盤：自然含水状態）	4-61
表 4.3.5-10	圧密非排気三軸圧縮試験の条件（緩衝材：不飽和状態）	4-62
表 4.3.5-11	圧密非排気三軸圧縮試験の結果（緩衝材：不飽和状態）	4-63
表 4.3.5-12	圧密非排水三軸圧縮試験の条件（緩衝材：飽和状態）	4-64
表 4.3.5-13	圧密非排水三軸圧縮試験の結果（緩衝材：飽和状態）	4-65
表 4.3.5-14	圧密非排水三軸圧縮試験の条件（埋戻し材：飽和状態）	4-68
表 4.3.5-15	圧密非排水三軸圧縮試験の結果（埋戻し材：飽和状態）	4-69
表 4.3.5-16	三軸圧縮試験の条件（周辺岩盤）	4-72
表 4.3.5-17	圧密排水(CD)三軸圧縮試験の結果（周辺岩盤）	4-74
表 4.3.5-18	圧密試験の条件一覧	4-81
表 4.3.5-19	圧密特性の測定結果	4-82
表 4.3.5-20	LOSTUFに必要なクリープ定数	4-83
表 4.3.5-21	クリープ試験の試験条件.....	4-84

表 4.3.5-22	弾性係数の一覧（周辺岩盤：飽和状態）	4-86
表 4.3.5-23	異方性のための三軸圧縮試験の条件（周辺岩盤：飽和状態）	4-90
表 4.3.5-24	異方特性の三軸圧縮試験の結果（周辺岩盤：飽和状態）	4-91
表 4.3.5-25	温度依存性の圧密排水(CD)三軸圧縮試験の条件（周辺岩盤：飽和状態） ..	4-93
表 4.3.5-26	温度依存性の圧密排水(CD)三軸圧縮試験の結果（周辺岩盤：飽和状態） ..	4-94
表 4.3.6-1	物理試験結果の統計処理の一覧	4-97
表 4.3.6-2	化学試験結果の統計処理の一覧	4-98
表 4.3.6-3	平衡膨潤圧の統計処理の一覧	4-99
表 4.3.6-4	熱特性試験結果の統計処理の一覧	4-100
表 4.3.6-5	力学特性試験結果の統計処理の一覧	4-101
表 4.3.6-6	物性値と飽和度との関数の統計処理の一覧	4-102
表 4.3.7-1	膨潤に関する解析物性値の一覧	4-103
表 4.3.7-2	解析物性値の一覧	4-104
表 4.3.7-3	透水係数の解析用物性値	4-106
表 4.3.7-4	保水特性の解析用物性値	4-107
表 4.3.7-5	熱伝導率の解析用物性値	4-109
表 4.3.7-6	熱膨張係数	4-111
表 5.2.5-1	解析パラメーター一覧（熱・水）	5-8
表 5.2.5-2	解析パラメーター一覧（力学）	5-8
表 5.4.1-1	解析パラメータ（隙間と接触面以外）	5-13
表 5.4.1-2	膨潤計算パラメータ	5-16
表 5.4.1-3	隙間と接触面のパラメータ	5-19
表 5.4.2-1	平均パラメータと標準偏差	5-20
表 5.4.2-2	各解析モデルの解析ケース一覧	5-21
表 5.5.3-1	遠心模型試験の数値解析結果のまとめ	5-28

第1章 はじめに

1.1 本事業の背景および目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が既に発生しており、その処理・処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、事業実施に向けた取組が進められており、処分技術のさらなる信頼性の向上にむけた基盤技術の開発が、事業の段階的なプロセスを考慮して実施されている。

これまでに、処分場の操業期間中におけるガラス固化体のオーバーパックへの封入・検査技術、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材の施工技術及び人工バリアのモニタリング技術等の要素技術について、必要となる基盤技術が整備されてきた。今後、さらなる処分技術の信頼性向上のためには実際の深部地下環境での活用を通して、これらの工学的な要素技術の信頼性を高める必要がある。さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、操業期間中における自然災害である巨大地震や巨大津波等の安全対策に関する基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

平成 27 年 5 月には“特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針”が改定され、「国および関係研究機関は、最終処分の安全規制・安全評価のために必要な研究開発、深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び最終処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくものとする。」ということが示された[1]。

本事業では、平成 25 年度から 5 年程度の期間で処分場の操業期間中から人工バリア定置後の再冠水過程を考慮して人工バリアの製作・施工技術およびモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設等を活用して確証していくとともに、自然災害に対する操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行う。

1.2 本事業の構成および全体計画

1.2.1 研究開発項目の構成

上記の目的を達成するために、本事業は以下の 5 つの研究開発項目で構成されている。各研究開発項目の内容については、それぞれの分冊に記載する。

- 1) (第 1 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
- 2) (第 2 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
- 3) (第 3 分冊) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
- 4) (第 4 分冊) モニタリング関連技術の整備
- 5) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発※

※平成 27 年度に取りまとめを実施した。

1.2.2 本事業における設定課題と 5 年間の計画

本事業では、地層処分における工学技術に対する信頼性を向上させるために、人工バリアのうちのオーバーパックおよび緩衝材の品質／健全性評価手法の構築やモニタリング関連技術の整備、自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発に取り組む。人工バリアに要求さ

れる機能は、それぞれが単独で達成するものではなく、各要素が相互に影響をおよぼし合い、人工バリアシステムとしての要求機能が達成される。そのため、平成 27 年度からは、周辺岩盤挙動を含めて人工バリアの長期挙動を評価するための手法の構築に向けた取り組みを開始した。本事業の 5 年間の年度展開を表 1.2.2-1 に示す。

一般的な構造物とは異なり、オーバーパックと緩衝材に対しては定置後の検査や必要に応じた補修を行うことが想定されていない。そのため、オーバーパックと緩衝材の品質/健全性は、定置前の段階で確認しておく必要がある。また、処分場の掘削・操業期間から人工バリア定置後の地下水位の回復に至る擾乱期（再冠水過程）には、緩衝材の流出や地下水の浸潤による状態変化などによる機能変化も想定される。したがって、検査や補修を必要とせずに人工バリアの健全性を確保するためには、定置後に想定される機能変化を考慮した上で要求される機能を満足できる設計を行い、製作・検査・施工の各プロセスで品質管理を実施することによりそれらの品質を保証する必要がある。

一方で、定置後の人工バリアの性能を確認するためには、処分場の環境条件を把握する必要がある。また、処分場の環境条件を把握することは、処分場閉鎖の判断要因の一つとして利用されることも考えられる。閉鎖後長期の安全性を確実にするために、処分事業が先行するフィンランドやスウェーデンでは、性能確認プログラムの一部としてモニタリングを位置付けた取り組みが進められている。

さらに、処分場の操業期間中に生じる自然災害に対しては、想定される災害事象に対する安全確保対策について検討しておくことが重要となる。

本事業では、長期間の健全性を有する人工バリアシステムの工学的実現性を示すために、オーバーパック、緩衝材、人工バリアの長期挙動、モニタリング、自然災害に対する安全対策の 5 つの検討項目について研究開発を進める。

表 1.2.2-1 5 カ年の研究開発計画

	H25	H26	H27(計画更新)	H28	H29
(1) 処分システム工学確証技術開発					
1) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築—オーバーパック	・判断指標の抽出 ・健全性評価モデル案の作成 ・研究開発計画策定	・判断指標に影響する劣化事象の抽出	・破壊評価に基づく限界欠陥寸法の提示	・材料劣化を考慮した品質評価法の提案	・品質評価/健全性評価手法の提案 ・健全性判断指標および基準値設定の考え方の例示
2) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材	・緩衝材の品質評価項目の抽出 ・研究開発計画策定	・エロージョンによる性能劣化事象(流入量、液種)の定量化	・ウォーターマネジメント(人工注水、グラウト等)の実施方法・課題の提案	・緩衝材の設計・施工仕様策定に資する指標範囲の提示	
3) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築			・試験研究計画の立案 ・遠心力模型試験による加速データの取得、および要素試験による解析パラメータの取得	データの検証および長期挙動評価手法への課題の提示	再冠水後の試験データによる長期挙動の評価方法論、および検証データの提示
3) モニタリング関連技術の整備	・性能確認モニタリングの課題抽出 ・研究開発計画策定	・操業安全等に関するモニタリングの課題抽出	・地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	・実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示
(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発	・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・火災事象に対する人工バリアの健全性の把握	・火災事象に対する施設設計画時の制約事項等の提案		

1.3 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築

1.3.1 検討の背景、目的および概要

(1) 背景

高レベル放射性廃棄物処分場において、『処分システムの将来にわたる安全性』という実時間で確認することのできないことを、できるだけ科学的説得力をもつ将来予測によって示していくことが求められている。これは地層処分におけるセーフティケース[2]の根本的役割ということができる。そこで予測する対象は、OECD/NEA の国際 FEP[3]の分類に準拠すれば、1)処分場設計、地質的事象、気象、人間活動などの外的事象、2)廃棄物容器でのプロセス、3)処分場でのプロセス、4)地圏でのプロセス、5)生物圏でのプロセスにわたる。

処分場のプロセスにおいては、その初期に発熱・冠水とそれに伴う比較的顕著な力学挙動が過渡的に発生したのちに定常的な状態に至ると考えられる。この過渡的な期間の現象は複雑であり現状では十分な検討がなされているとは言えない。初期の過渡的な期間に支配的と考えられる廃棄物容器、緩衝材、周辺岩盤の熱-水理-力学 (THM) の連成現象を適切に予測評価することが必要である。この連成現象は、設置から数百年程度の比較的早い期間内に収束するものと考えられる。そしてその収束した状態が処分システムの安全評価を行う際の初期状態となる。その後主に化学的・水理学的なプロセスによる変遷を評価し安全評価が行われる。そのため、数百年程度の比較的早い期間に収束すると考えられるニアフィールド (廃棄物容器、緩衝材、周辺岩盤) における熱-水-力の連成現象を予測評価することが、安全評価の信頼性を高めるために重要な課題となっている。ニアフィールドでの連成現象の予測の評価項目としては、例えば廃棄物容器の緩衝材中の移動・沈下や温度分布、水位分布の他に、岩盤の健全性に関わる事項や緩衝材の健全性に関わる事項が挙げられる。

廃棄物容器、緩衝材、周辺岩盤の熱-水-力の連成現象を実時間で検証することのできない将来にわたって予測評価するために、THM 連成解析機能を持つ数値解析を用いることが考えられている。その数値解析結果の妥当性は、各種の実験結果を数値解析と比較することによって示すしかない。しかし、従来このような検証に用いられる実験は実時間で行われており、長期の実験計測を行っても現実的には 10 年程度の検証である。これに対し、近年では遠心模型試験による相似則にもとづく時間縮尺の実験を行うことにより数百年程度の時間に相当する計測データを取得し、数値解析を検証しようとする手法が開発されてきている[4]-[6]。

(2) 目的および概要

人工バリアと岩盤の長期挙動のうち、前項で述べたように比較的早い期間に過渡的に発生し比較的大きな変化をしたのち数百年程度のうちには収束すると考えられるニアフィールドでの THM 連成現象の予測評価の信頼性を向上することを目指す。これによって、その後のより長期の化学的・水理学的な挙動評価、さらに安全評価の信頼性を向上することができるからである。

本研究の最終的な目的は、実プロジェクトのニアフィールドにおける人工バリアと周辺岩盤の数百年にわたる THM 連成挙動を数値解析で評価することである。数値解析手法の適用には、実験等による検証が必要不可欠である。本検討では、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法(骨子)の構築を目指し、遠心模型試験、数値解析、数値解析に連動した要素試験を実施する。長期

挙動評価手法の構築とは、すなわち解析結果がどのように検証されるか、ということである。

本年度は、評価手法（骨子）を提示する。遠心模型試験では、処分坑道を模擬した模型を作製し、透水、拡散、熱伝導などの現象に関して時間縮尺効果のある遠心力場の相似則に基づいて数百年程度に相当する THM 連成挙動データを提示し、数値解析の検証に資する。数値解析では、熱-水理-力学連成コードを用いた解析を行い、平成 28、29 年度に実施した遠心模型試験の計測結果と比較する。また、入力するパラメータ取得のための要素試験を行う。

1.4 報告書の構成

本報告書は、第 1 章から第 6 章までの 6 部構成となっている。

第 1 章では、本検討の背景、目的および概要を示した。

第 2 章では、研究計画と本年度の実施内容および、長期挙動評価手法（骨子）、本研究における共通の条件（実験条件、使用する材料特性）について示した。

第 3 章では、平成 28 年度に引き続き、数値解析の長期挙動評価の検証に資する遠心模型試験を行い、相似則に基づいて約 100 年に相当する人工バリアおよび周辺岩盤の力学的挙動に関するデータを取得し、結果を示した。

第 4 章では、数値解析に必要なパラメータについて、パラメータの整理、必要なパラメータ取得のための要素試験を実施し、その結果を示した。

第 5 章では、平成 27 年度に実施した感度解析、平成 28 年度に実施した数値解析の結果に基づいて、解析条件、解析モデルを設定した上で、平成 28、29 年度に実施した遠心模型試験の計測結果と比較を行い、その結果を示した。

第 6 章では、本年度実施内容のまとめを示した。

第1章 参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁, 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針, 平成 27 年 5 月 22 日閣議決定, (2015).
- [2] IAEA: The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste for protecting people and the environment, Specific Safety Guide., IAEA Safety Standards for protecting people and the environment, No. SSG-23 2012.
- [3] OECD/NEA-RWMC: Updating the NEA International FEP List, An IGSC Technical Note, Technical Note 2: Proposed Revisions to the NEA International FEP List, September 2012, NEA/RWM/R(2013)7, 2013.
- [4] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力载荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価 (その2) -ニアフィールドモデル試験法の確立と等方応力拘束条件下における長期挙動-, 電力中央研究所研究報告書, N11040, 2012.
- [5] 澤田昌孝, 岡田哲実, 西本壮志: 遠心力载荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価 (その3) -等温条件のモデル試験に対する水・応力連成解析-, 電力中央研究所研究報告, N11037, 2012.
- [6] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力载荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価 (その4) -加熱型廃棄体を用いた等方応力拘束条件下における熱-水-応力連成モデル実験-, 電力中央研究所研究報告書, N14003, 2014.

第2章 研究計画

2.1 全体計画

2.1.1 概要

高レベル放射性廃棄物処分において、オーバーパック及び緩衝材の製作・施工技術に対して深部地下環境を考慮した長期健全性の観点から工学的信頼性の向上を図るため、種々の判断指標の提示に向けた品質に係わる知見の拡充、および健全性評価技術の構築に係わる検討が実施されている[1]。この中で人工バリア材料であるオーバーパックや緩衝材の品質に係る実験、調査、検討が実施されている。特に緩衝材の検討では主に再冠水過程における膨潤挙動、湧水による流出、浸潤過程における変質（例えば、Ca型化など）といった緩衝材の機能を低下させる要因について検討されている。緩衝材の機能を低下させるもう一つの要因として、オーバーパックの浮上や沈降による厚さの変化、孔外への膨出による密度低下など、緩衝材の変形に因るものがある。さらに実処分環境での変形を考慮するためには人工バリア周辺の岩盤も対象に含めていく必要がある。

人工バリアの長期挙動を評価する手法として、実験による現象理解、モデル化、数値解析などが挙げられる。実験的手法では、実際に生じた現象を評価することが可能である一方で、数百年、数千年単位の長々期の現象を直接評価することが困難である。そのため長期挙動評価はモデル化や数値解析が必要であるが、解析による長期挙動評価の信頼性の向上には、解析手法の妥当性を確認する実験的な裏付けが必要である。

このような背景を受け、本研究の最終的な目標は、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法を構築することである。このため研究の目的は、人工バリアの定置後から再冠水過程における様々な環境条件を考慮した上で、熱-水理-力学（THM）現象が連成可能な数値解析と遠心力場の相似則に基づき時間加速実験が可能な遠心模型試験を通じて人工バリアおよび周辺岩盤の長期挙動を把握し、そのデータを取得することである。

今フェーズ（平成 27-29 年度）は、以下の項目を目的に据えた。

- ・ 比較的単純なモデルにより、閉鎖（再冠水）後の挙動を把握すること
- ・ 周辺岩盤も含め、上載圧による緩衝材の変形（≒膨出）を着眼点とすること
- ・ 数値解析結果の妥当性確認のための遠心模型試験データを取得すること
- ・ 数値解析コードの感度解析、試験の再現解析（含、ばらつきの評価）をすること
- ・ 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法（骨子）のを提示すること

2.1.2 本研究の対象の選定

(1) 現象

人工バリアと周辺岩盤を含むニアフィールドで生じる現象について、検討対象事項を抽出した（図 2.1.2-1）[2]。熱の作用としてオーバーパックに封入されたガラス固化体からの発熱、応力の作用として地圧による岩盤の変形、緩衝材の膨潤圧、オーバーパックの自重、処分孔堅置き定置方式の場合、処分坑道埋戻材の上載圧など、水理的作用として周辺岩盤からの地下水の浸潤が

挙げられる。

これらの作用により緩衝材の膨潤変形、オーバーパックの変位、岩盤の変形などと相互作用を含む力学的現象が進行する。さらにはオーバーパックの腐食や緩衝材の変質、岩盤の風化などの化学的な現象が生じると考えられる。また、突発的な地震などの発生にともなう地下水の流量、間隙水圧や水質、地圧の変化などが生じることも考えられる。

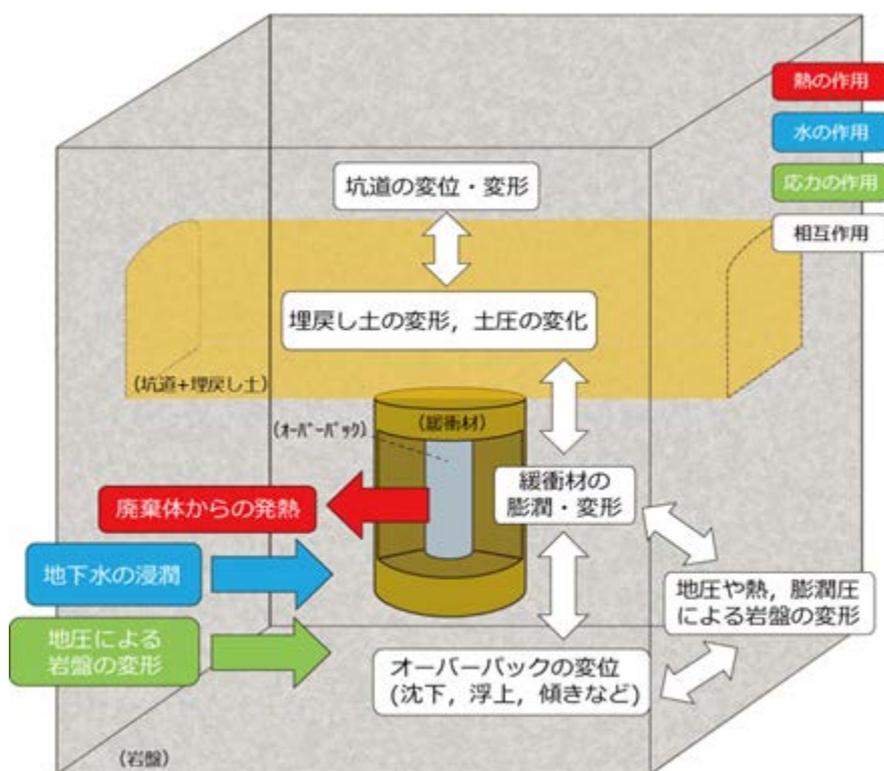


図 2.1.2-1 ニアフィールドで生じる諸現象の概略図

(2) 時間スケール

熱の作用であるガラス固化体からの発熱は定置初期が高く、時間の経過とともに徐々に低下する。水理的作用である周辺岩盤からの湧水は、地下施設が閉鎖され再冠水過程を経て地下水位が回復するにつれて本来の地下環境に戻っていく。初期の数十～百年は熱の影響、緩衝材の再冠水過程における膨潤などと、応力の作用である岩盤の変形が相互作用によって力学的に不安定な THM 連成現象が進行すると考えられる。一方、千年以上の長期間では、オーバーパックの腐食や緩衝材の変質、岩盤の風化などの化学現象とともに、拡散・浸透による物質移行が生じると考えられる。

安全評価では数万年にわたる長期の化学現象と拡散・浸透を評価する一方、その初期状態として、数百年程度までの初期に優位な力学的現象（力学的過渡状態）が将来の状態設定にどのように影響するかを正確に評価することが、安全評価の信頼性向上のために必要である。

図 2.1.2-2 に、ニアフィールドで生じる種々の現象について、オーバーパック、緩衝材、岩盤

それぞれに生じる現象と、熱、水、応力の作用を時間軸に対して整理したものを示す。長期側になると系は定常状態になり、化学や拡散浸透が支配的になる。一方、初期の再冠水過程では力学的現象が支配的である。

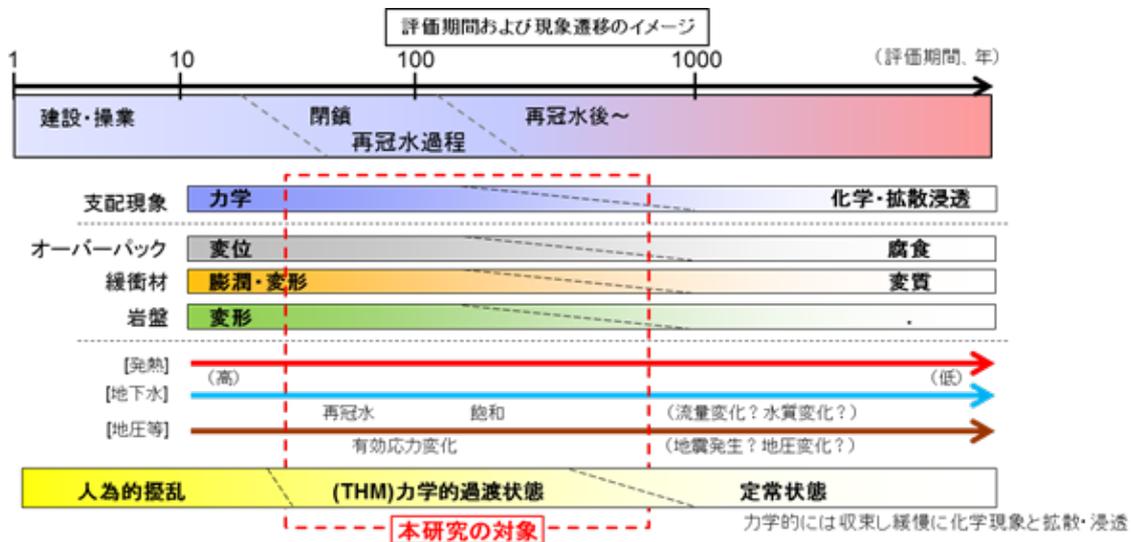


図 2.1.2-2 本研究における評価期間および支配現象の概念図

(3) 検討の対象とする現象と時間スケールの設定

人工バリアのうち、オーバーバックに生じる劣化現象は定置直後から周辺環境による腐食現象である。これについては、別途「人工バリア品質／健全性評価手法の構築 - オーバーバック」で検討されている。

緩衝材の安全機能である放射性核種の移行遅延は、低透水性、コロイドろ過性、放射性核種の収着性の3つ要件から成る。この他の要件も含めリファレンスケースの緩衝材の仕様[1]は、配合（ベントナイト：ケイ砂＝7：3）、密度（ $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ ）、厚さ（70cm）とされており、この状態が緩衝材の安全機能が期待される時期（1000年後）まで維持されているのかが重要である。つまり、緩衝材が健全である状態とは、所定の期間経過後にリファレンスケースの緩衝材の仕様通りに緩衝材が必要な場所に存在している状態と言い換えることが出来、この状態を損なう働きをする現象が緩衝材の劣化現象である。密度、配合、厚さの観点から緩衝材の品質を評価する場合、以下の4つが主たる検討対象と考えられる。

1) 流出

緩衝材が湧水等で所定の場所から持ち去られる現象である。緩衝材の量が減少するため、局所的な密度低下の要因となる物理的な現象である。

2) 変質

緩衝材を構成する鉱物のうち、緩衝材の機能を発揮するために必要な粘土（モンモリロナイト）が、高pHの地下水、地下水に含まれる化学成分、廃棄体からの熱等で別の鉱物に変化する現象である。機能を発揮するために必要な鉱物が不足する化学的な現象である。

3) 変形

オーバーパックの自重による沈降や浮力による上昇による緩衝材の厚さの変化、または孔外への膨出等で密度が低下する現象であり、力学的な作用により生じる現象である。

4) 密度差

施工時の生じた不均一性が残存し、部分的に緩衝材の密度に差が生じるものである。緩衝材の性能である透水係数や膨潤圧などは緩衝材の密度で決まるため、施工時に生じた密度差が長期性能に及ぼす影響を評価し、施工管理項目に反映させることが重要である。

以上のうち、「1)流出」、「2)変質」、「4)密度差」については、別途実施されている「人工バリア品質／健全性評価手法の構築 - 緩衝材」の検討の対象に含まれている。「3)変形」について知見を得ることで、緩衝材の健全性評価に必要な4つの要素を揃えることが出来る。また、図 2.1.2 2 に示したように、「3)変形」は数十年～数百年程度の比較的初期の段階で進行する力学的な現象である。この期間の現象は、相似則に基づいた遠心力縮尺模型試験である程度再現することが可能である。

以上より、本研究の対象を以下のように設定した。

現象： 周辺岩盤を含めた人工バリアの力学的な作用による変形挙動

期間： 定置後数十年～数百年

方法： 遠心模型試験による時間を加速させた挙動の取得

2.1.3 人工バリアの長期挙動に影響をおよぼす周辺環境因子

人工バリアの力学的長期挙動に影響をおよぼす周辺環境因子とは、すなわち、オーバーパックの移動量（変位や傾きなど）、緩衝材の品質（密度、透水係数など）に影響する可能性のあるものである。緩衝材の膨潤変形や周辺岩盤の変形による応力によりオーバーパックに変位が生じ、逆にその変位により緩衝材の厚みが変わるといった相互作用が生じることが考えられる。こういった現象に対して、緩衝材の品質確保に対する工学的な対策を実施する必要がある。そのためには、長期的にはどの程度オーバーパックの変位、緩衝材の膨潤変形、周辺岩盤の変形が生じるか等、人工バリアの長期挙動に影響する環境因子を明らかにする必要がある。

ニアフィールドを構成するオーバーパック、緩衝材、周辺岩盤において、オーバーパックの変位、緩衝材の膨潤変形、周辺岩盤の変形の観点から前述した力学的現象に大きな影響を与える可能性があるものとして主として以下の3つが考えられる（図 2.1.3-1）。

- ① 応力：埋戻し圧・上載圧（オーバーパックの鉛直変位量、緩衝材の密度変化）、地圧（孔の変形、緩衝材の密度変化）
- ② 水質：塩分濃度の割合（膨潤の抑制、緩衝材の密度変化）
- ③ 岩盤の不均質（孔の変形、緩衝材の密度変化）

本研究では、力学的長期現象の経時変化と現象の把握のために、緩衝材、周辺岩盤を均質な材料として実験、数値解析を実施する。このため、突発的な地震やそれともなう地下水流量・間隙水圧の急激な変化といった動的な現象、遠心模型試験では相似則上、十分に扱えない化学的な影響は除くものとする。その上で、本研究（平成 27～29 年度）では、特に①応力（埋戻し圧・上載圧、地圧）の影響に着目し、実施する。すなわち、上載圧による影響：緩衝材の変形（≒膨出）を着眼点として実施し、緩衝材の変形（膨出などを含む）とそれによるオーバーパックの移動量の変化を、遠心模型試験、数値解析およびパラメータ取得のための要素試験で評価する。

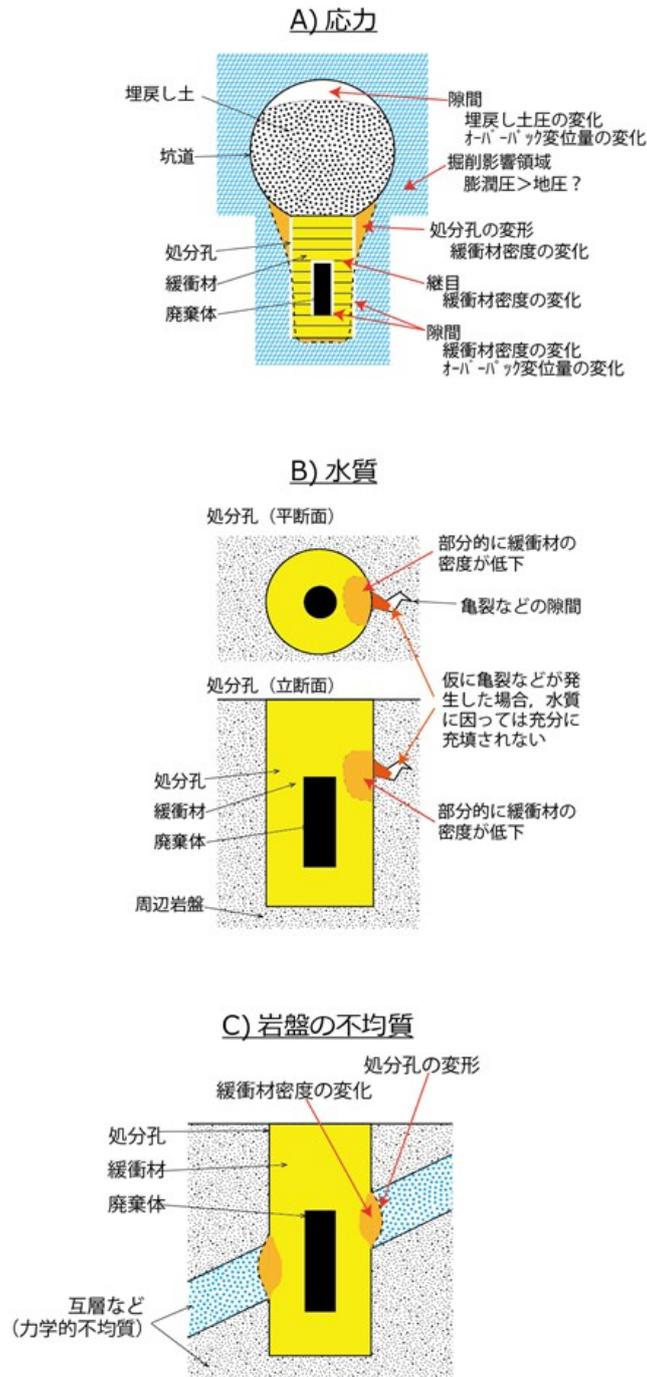


図 2.1.3-1 人工バリアの長期挙動に影響を与える主要な環境因子の概念図

2.1.4 着眼点

本研究の目的は、ニアフィールドの人為的な擾乱や再冠水が生じる初期数百年の THM 長期挙動を遠心模型試験と数値解析で把握することにある。このため平成 29 年度までの実施内容として前述の観点から、長期評価手法（骨子）の構築、および比較的単純化されたニアフィールドの模型を用いた、遠心模型試験の結果（数値解析結果の妥当性確認のためのデータ）を提示するものである。長期挙動評価手法の構築とはすなわち、解析結果がどのように妥当性確認されるか、ということである。

そのため、評価手法構築のための着眼点として、以下に示す項目から 3 カ年計画を策定した。

- ① 人工バリアの長期挙動に影響をおよぼす環境因子（熱、力学、水理等）を整理する。
- ② 数値解析コードは熱－水理－力学（THM）現象が連成可能なものを使用する。本研究では、電力中央研究所（以下、電中研、という）で開発している熱－水理－力学連成コードである LOSTUF（放射性廃棄物地層処分における地下空洞長期安定性解析プログラム）[3]を一例として用いる。
- ③ 長期挙動相当のデータは、人工バリアの定置後に曝される多様な環境条件を考慮し、遠心力場の相似則に基づき時間加速実験が可能な遠心模型試験を実施して得る。
- ④ 閉鎖後の再冠水により廃棄体周辺が飽和に向かう数十年程度の期間において力学的挙動が最も大きく生じると考えられる。このため遠心模型試験における評価期間は、飽和後の挙動もある程度示せるよう、100 年程度とする。
- ⑤ また、遠心模型試験は数値解析の妥当性確認のデータという位置づけだけではなく、数値解析では捕らえにくい、あるいは現れていない現象把握の観点でも検討する。
- ⑥ 解析の入力値のばらつきによる影響評価のため、遠心試験に使用する材料のデータを要素実験で取得、数値解析に入力し遠心模型試験と同様の環境・境界条件で解析を実施する（図 2.1.4-1）。
- ⑦ 本研究における数値解析は、パラメータの感度や入力値のばらつきに着目する（構成則等の修正・改良などは別途、本研究以外において検討するものとする）。
- ⑧ 数値解析と遠心模型試験の結果を比較し、長期挙動評価手法（骨子）の構築に資する。

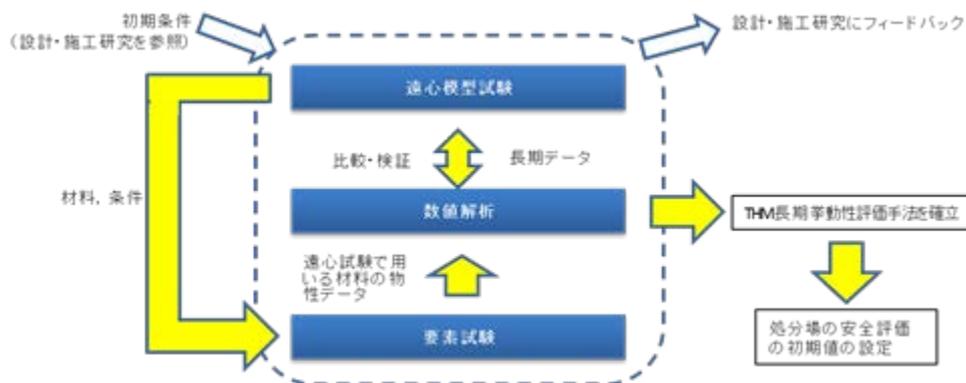


図 2.1.4-1 本研究の実施体制の概念図

2.1.5 3カ年の全体計画

本研究における3カ年計画について、表 2.1.5-1 に示す。本年度は、3カ年の取りまとめを行う。策定した研究開発計画に基づき、遠心模型試験と数値解析およびパラメータ取得のための要素試験を実施する。遠心模型試験は、坑道高さおよび埋戻し材を考慮した試験を実施する。数値解析は、平成28年度までに実施した解析結果に基づき、平成28年度、29年度の遠心模型試験結果と比較することで、解析結果の課題を整理する。なお、数値解析に必要なパラメータ取得を目的とした要素試験は平成28年度に引き続き実施する。

表 2.1.5-1 本研究における3カ年計画の概要

	H27	H28	H29
調査研究全体	全体計画立案	計画の更新	取りまとめ
(1) 研究計画			
長期挙動評価手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> 長期挙動、評価手法の構築に向けた課題の整理 環境因子、評価期間の設定 	<ul style="list-style-type: none"> 評価手法における課題の反映方法の検討 検証に資する技術等の情報収集 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心試験と数値解析の比較検討からの考察 評価手法の骨子の作成
計画	<ul style="list-style-type: none"> 研究計画の立案 遠心試験における加速対象の設定 遠心試験で目指す加速時間の設定 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心試験による結果と数値解析結果の比較 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心試験による結果と数値解析結果の比較 取りまとめ
(2) 遠心模型試験			
遠力模型試験	<ul style="list-style-type: none"> 縮尺模型の材料選定、設計 遠心試験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心試験の実施 (緩衝材の変形(膨出)に着目) 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心試験の実施 (埋戻し材・坑道の高さ方向全体を模擬した条件)
(3) 数値解析			
数値解析	<ul style="list-style-type: none"> 本解析に先立つ感度解析の実施(2次元) 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心試験(H27結果)の解析 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心試験(H28、29結果)の解析
数値解析と連動した要素試験	<ul style="list-style-type: none"> パラメータ取得のための要素試験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> パラメータ取得のための要素試験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> H27、28の数値解析結果を踏まえ、重要パラメータ追加取得のための要素試験の実施
各年度の成果目標	<ul style="list-style-type: none"> 評価手法骨子の提示に向けた大の抽出整理 感度解析結果の取得 要素試験による解析パラメータの取得 遠心模型試験による加速データ取得 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心試験結果と数値解析手法との比較によるデータの検証と課題の整理 評価手法適用における課題の提示 	<ul style="list-style-type: none"> 評価手法(骨子)の提示

2.2 平成 29 年度の実施内容

2.2.1 平成 29 年度実施内容

表 2.2.1-1 に平成 29 年度の実施内容の概要を示す。詳細は各章を参照されたい。

遠心模型試験では、数値解析の妥当性確認に資する遠心模型試験を行った。今年度は処分坑道（トンネル）の高さを模擬し、埋戻し材を処分孔上部に設置することによる緩衝材の変形（膨出）に着目、相似則に基づいて約 170 年に相当する人工バリアおよび周辺岩盤の力学的挙動に関するデータを取得し、結果を示した。

数値解析では、平成 28 年度までに実施した解析の結果に基づいて、解析条件、解析モデルを設定した上で、入力物性値のばらつきを考慮した解析を行った。対象は平成 28 年度、29 年度に実施した遠心模型試験であり、その結果を示した。また、数値解析に必要なパラメータについて、パラメータの整理、必要なパラメータ取得のための要素試験を実施し、その結果を示した。

表 2.2.1-1 平成 29 年度実施内容の概要

実施項目			第1四半期		第2四半期				第3四半期			第4四半期				
			4月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月			
(1) とりまとめ																
研究計画	取りまとめ															
	当年度計画の策定															
	長期挙動評価手法の構築															
		既往文献調査														
		評価骨子の作成														
(2) 数値解析																
① 数値解析の実施	パラメータの整理	着目パラメータの決定														
	解析モデルの検討	構成モデルなどの検討														
	模型実験との比較	平均パラメータによる解析														
		ばらつきを考慮した解析														
	感度解析(必要に応じて)	着目パラメータの検討														
		感度解析の実施														
② 解析に用いるパラメータの取得	文献調査・前年データ整理															
	パラメータ取得要素実験 (解析の整理結果に応じて)	物理特性試験														
		緩衝材の特性取得試験														
		熱特性試験														
		水分特性試験														
	力学特性試験															
		周辺岩盤材料の採取														
(3) 遠心力模型実験																
	既往文献の調査等															
	模型作製	模型形状の検討														
		境界条件の検討														
	遠心模型実験の実施	模型作製														
ISO9001 7.1「製品実現の計画」に準じた評価																
報告書	ドラフト版															
	正式版															

2.3 THM 長期挙動評価手法の構築に向けて

人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価には実現象のモデル化や数値解析が必要であるが、解析による長期挙動評価の信頼性の向上には解析手法の妥当性を確認する実験的な裏付けが必要である。そのような背景のもと、本研究は人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築に資するため、人為的な擾乱や再冠水が生じる初期数百年の THM 長期挙動を多様な環境条件を考慮し、遠心模型試験と数値解析により把握することを目的とした。

今フェーズ(平成 27 年度～29 年度)の実施内容は、比較的単純なモデルによる、再冠水後の THM 長期挙動を遠心模型試験と数値解析により把握することである。本研究の最終的な目標は、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法を構築することであり、処分事業のニアフィールドにおいて、安全評価における初期状態の設定に資することである。

本節では、処分システムの実現に向けた本研究の意義、概念、および長期挙動の評価手法構築に向けたその骨子について述べる。

2.3.1 処分システムの実現に向けた本検討の意義

図 2.3.1-1 に将来変遷の概念と本研究の対象期間には、豎置き型を例にとった処分システムの将来変遷の概念を文献[4]を参考にして示す。図示するように掘削、人工バリア定置を伴う建設・操業・埋戻し・閉鎖の全期間から、オーバーパック（OP）閉じ込め期間の一部までは、緩衝材や岩盤が人為的な攪乱を受けるとともに再冠水に至る過渡的な期間になる。この期間は熱、水理環境のもとでの THM 連成の複雑な力学現象が卓越する力学的に不安定な期間である。この後、OP 閉じ込め期間の後半から核種の漏出・移行の期間には既に力学的には安定し、緩慢な化学現象と浸透・拡散が支配的な期間となる。

放射性廃棄物地層処分施設に対する安全評価の直接的な対象の主たる部分は、力学的に安定した後の緩慢な化学現象と浸透・拡散現象のもとで進行する核種の漏出と移行を評価する。この安全評価の信頼性を向上するためには、人為的な攪乱と再冠水の過渡的期間に発生する力学的現象がどのようなものであるか、過渡期間に生じる力学変化により緩衝材や岩盤が健全であるか等の、いわば安全評価が対象とする期間の初期値（本検討では、安全評価の初期状態、という）としての人工バリアと周辺岩盤の状態を的確に評価することが肝要である。安全評価の初期値とは、すなわち、オーバーパックの位置であり、その位置を規定する緩衝材の厚さ・密度分布、緩衝材の挙動に影響を及ぼす周辺岩盤の変形状況、ニアフィールドの水理特性・温度分布の状態であると考える。

処分システムが成立するためには、処分場を設計、建設しようとする世代が直接に確認することのできない将来を評価し、その結果に信頼を獲得する必要がある。すなわち、本検討では図 2.1.2-2、図 2.1.4-1 図 2.3.1-1 にも示すように、人工バリア設置後数百年程度以内の人為的な攪乱・再冠水に伴う過渡的な期間の THM 連成現象を評価するが、この意義は、安全評価の初期状態としての人工バリアと周辺岩盤の状態を的確に評価することにより、処分システムに対する安全評価の信頼性を向上させることにある。

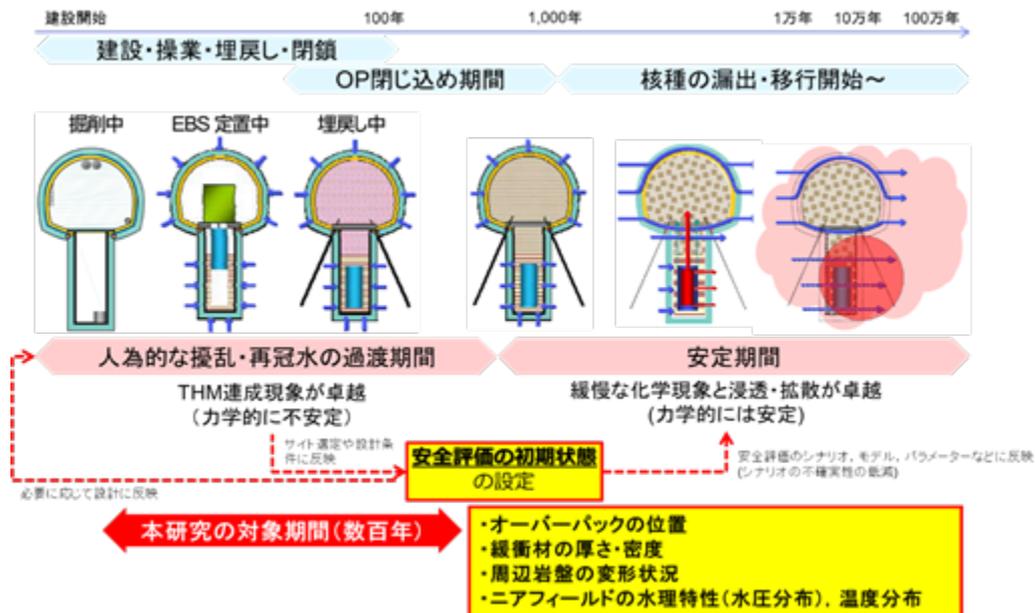


図 2.3.1-1 将来変遷の概念と本研究の対象期間

2.3.2 長期挙動の解析的検討に対する評価手法

(1) 概念

人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価の概念を図 2.3.2-1 に示す。開発された (複数の) THM 連成数値解析コードを人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価に適用する際、数値解析では評価対象とする処分施設の将来にわたる挙動を対象施設に対応したパラメータや解析モデルを用い解析的に評価する。一方、数値解析コードを用いて単に将来を数値計算したからといって長期挙動を評価したとは言えない。解析に対してはその妥当性確認が必要不可欠である。このため、緩衝材のような土質材料と周辺岩盤の間で生じる複雑な THM 連成現象に対して、対象施設と同じ材料を用い、類似の THM 環境下で試験を行い、その結果と比較・検討することで妥当性を確認することが考えられる。このように、数値解析結果の妥当性の確認を通じて初めて、人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価をその適用限界も踏まえて総合的に評価することができると考えられる。すなわち、人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価手法とは、長期挙動の解析的検討に対する妥当性確認手法を構築することとほぼ同義であると考えられる。

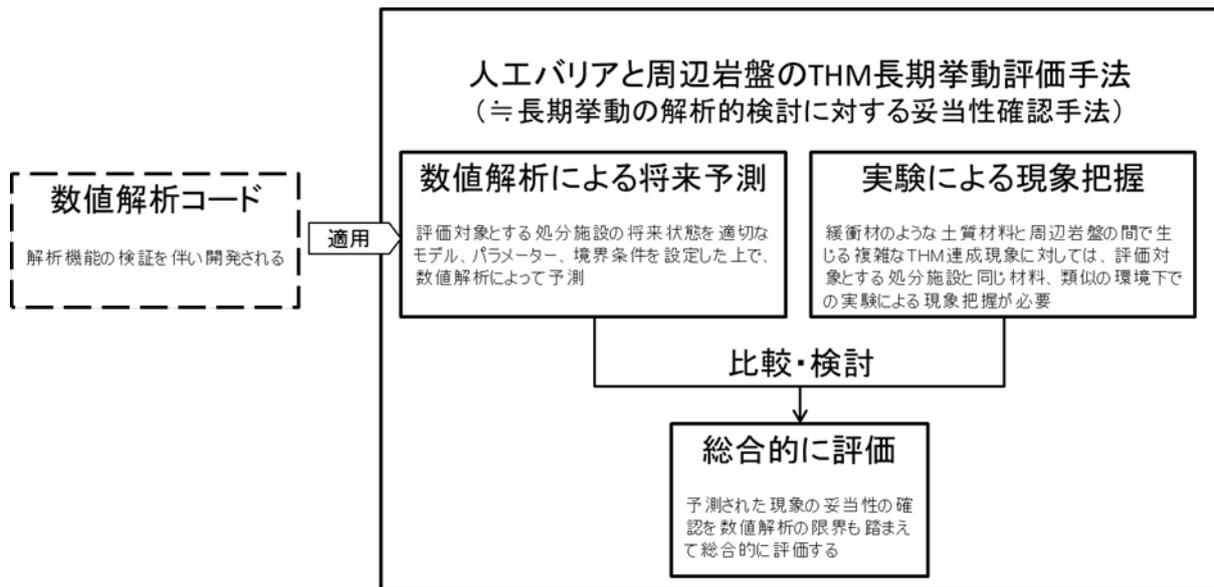


図 2.3.2-1 長期挙動の評価手法の概念

(2) 数値解析の検証と妥当性の確認

一般的に、数値解析結果に対してその品質を保証する必要がある（検証と妥当性の確認）。その考え方の一つとして、図 2.3.2-2 にアメリカ機械学会（ASME）が提示する数値解析の検証と妥当性の確認（Verification and Validation、以下、ASME V&V、という）のフロー[5]、およびその考え方を長期挙動評価手法に適用する際の考え方を示す。

ASME V&V では現実世界の問題に対して、物理的対象を階層構造の構成要素に分解し、部品モデル、部分組立品モデル、組立品モデル、システムモデルと下位層から順に重要な物理現象を抽出し検証と妥当性確認を行った上で、目的モデルを構築することが示されている。これは、初めから上位階層の計算モデルを構築しても信頼度が低く、最下層からの計算モデルの積み上げによってのみ信頼度のある目的モデルが構築できると言う考え方に基づくものである。

この考え方を長期挙動評価に対して適用すると、人工バリアと周辺岩盤の状態予測を対象として解析モデルを作成し、計算結果に対し理論解や数理モデルでの検証（Verification）を行う。その上で妥当性確認（Validation）のために妥当性確認試験（THM 模型試験）の結果と比較することが考えられる。なお図には本研究で実施している部分を薄緑でハッチングしている。

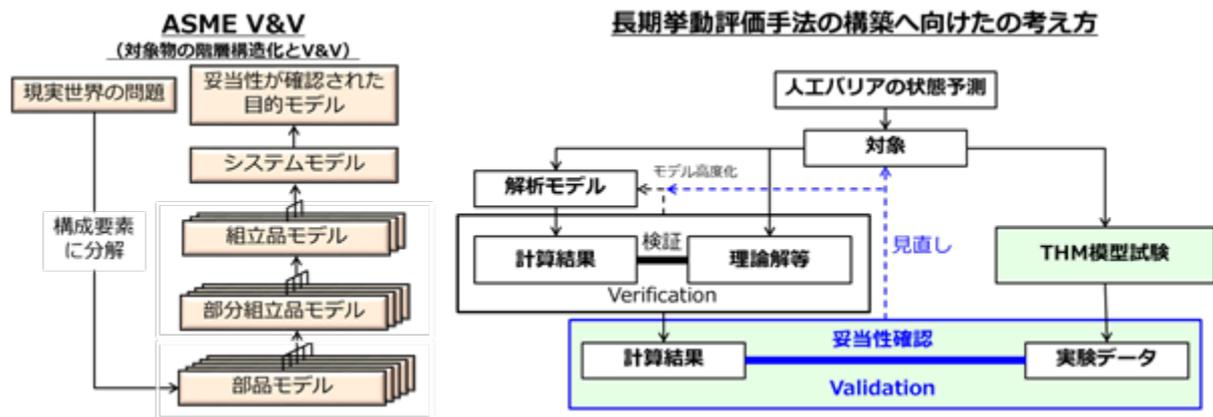


図 2.3.2-2 ASEM V&V のフロー（左）、および長期挙動評価手法の構築へ向けた考え方（右）

(3) THM 長期挙動評価における数値解析の妥当性確認

ニアフィールドの諸挙動の評価は、最終的には数値解析に頼らざるを得ないが、処分システムの安全評価の信頼性向上にはその妥当性の確認を説明性が高いものにする必要がある。なぜなら、一般の地盤工学等で行われている数値解析ではあまり扱われない、①評価時間が極めて長い点、②処分場が複数材料から成り、かつ THM 連成といった複雑な挙動が対象である点、が処分システムの評価において重要かつ必要だからである。①では、一般的に土木工学分野では数値解析の妥当性確認は実規模／縮尺模型実験等の結果との比較により確認されるが、例えば、数百年単位の挙動を評価するために処分システムを模擬した実規模試験を数百年実施することは現実的には極めて困難である。②では、ニアフィールドを構成する材料は金属（オーバーパック）、粘土（緩衝材、埋戻し材）、岩盤が一体となった異種複合材料であること、緩衝材と岩盤の間の隙間や岩盤の不均質性などの境界条件が複雑であること、かつ一般的な構造解析などには無い THM 連成現象を扱うため相互作用が複雑となること、が挙げられる。

数値解析の妥当性確認は試験との比較により行われる。ニアフィールドの諸挙動を対象とする場合においても数値解析と試験結果との比較を通じて確認される必要があり、THM 模型試験（室内模型試験ないし原位置実規模試験）を実施する必要がある。THM 模型試験としては、1G 場室内模型試験、遠心場室内模型試験（本研究の対象）、ないしは原位置実規模試験が考えられ、これらを組み合わせ、妥当性確認の信頼性を向上させる。図 2.3.2-3 に妥当性確認試験の概念、表 2.3.2-1 に妥当性確認試験の特徴、図 2.3.2-4 に妥当性確認試験の評価期間のイメージを示す。なお図表には本研究で実施している部分を薄緑でハッチングしている。

1G 場室内模型試験は、主に解析コードの研究開発～選定段階でその基本的な機能確認が対象となる。要素現象に着目し、単一材料、1～2 の挙動を対象とし実施する。模型（供試体）は小縮尺や部分模型であり、小型の試験機を用い実施される。小縮尺模型では模擬が困難な対象（例えば、隙間・継目、亀裂、不均質性など）がある場合は工学規模の中縮尺模型（実物の数分の 1）を用い稠密計測を行い、着目する単一の現象を把握することが考えられる。

遠心場室内模型試験（遠心模型試験）は、主に研究開発等の段階～実証段階における複数の重要挙動の確認が対象となる。複数の現象に着目し、複数材料を用いる。試験には遠心力载荷装置が用いられ、実物に対して数十分の 1 の小縮尺の模型（例えば、オーバーパック・緩衝材・岩盤

から成り、処分孔1孔など)である。最大の特徴は、遠心力場の相似則に基づいた時間加速効果により縮尺模型上で数百年に相当するデータが得られ、原位置実規模試験より長い時間に相当する挙動を評価できることである。

原位置実規模試験は、実事業を見据えた実証段階でコードのすべての機能確認が対象となる。精密調査用の坑道などで実施され、短期間(数年～十数年)の挙動を、稠密な計測で、実物のほぼ全ての挙動を把握する。また、例えば再冠水の速度を強制的に速くするなど、人為的に極端な境界条件を設定するなどして現象を加速させた環境下における評価もあり得る。

このような組み合わせによる THM 模型試験を実施することで、処分場建設初期から OP 閉じ込め期間に生じる現象やその期間などについて、隙間無く妥当性確認のためのデータを得ることができる。得られたデータとその数値解析の比較により、解析結果の妥当性確認を行うが、試験データの信頼性を向上させるため試験同士の比較による検討も考えられる。このような組み合わせによる複数の試験が必要な理由として、例えば支保に用いられている鋼材などの単一材料の力学現象は解析コードとして検証・妥当性の確認がなされていれば、それが同類の鋼材に対し広範囲に適用できる一方、緩衝材のような土質材料や岩盤では材料としての特性の幅が広い上(物性値のばらつき)に、透水や熱が連成した力学現象を呈するので、単に数値解析を行ったとしても実際の挙動を適切に再現できないことが多い。また、数百年単位の長期間の挙動に関する試験例、妥当性確認の例もほとんどなく、加えて解析コード特有の感度や境界条件の設定・物性値の与え方によっては解析結果に幅が生じる。このような問題に対しては、同じ材料、類似の環境条件において、要素単位の 1G 場室内模型試験、長期相当の挙動が評価可能な遠心場室内模型試験、実証的な原位置実規模試験を実施、それぞれの特徴を生かしながら結果を相補完しながら比較検討することが肝要である。これにより、メカニズムや THM 連成現象の理解が進み、解析機能や結果の妥当性の確認を行うことが信頼性向上のために必須である。

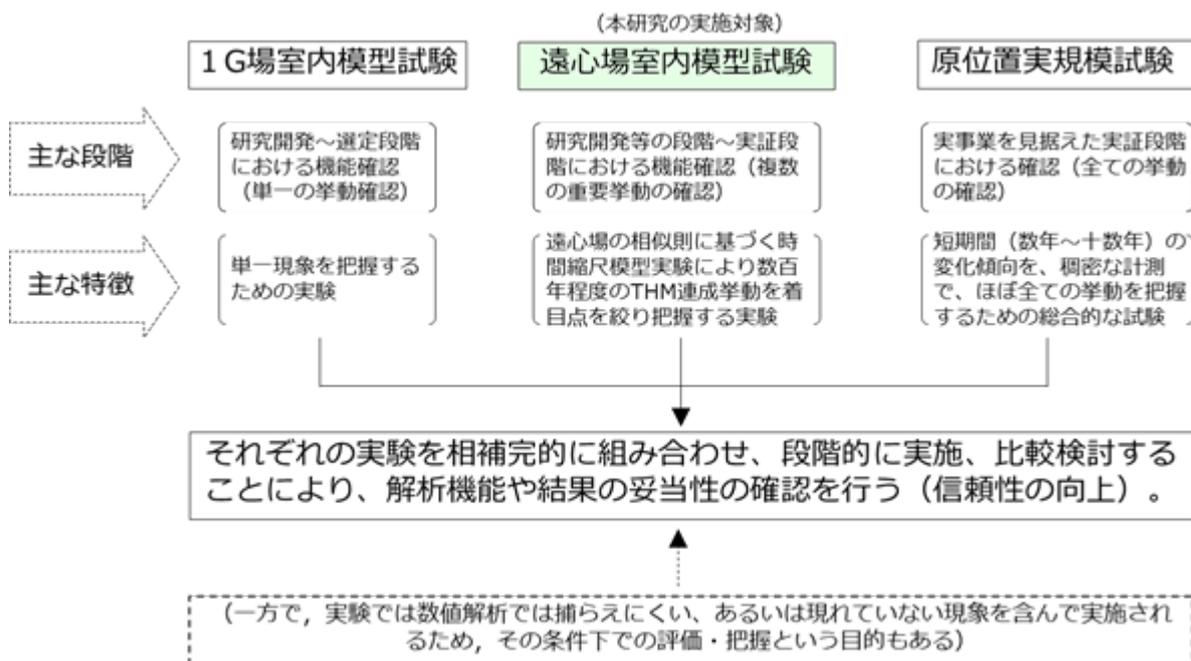


図 2.3.2-3 妥当性確認試験 (THM 模型試験) の概念

	1G場室内模型試験	遠心場室内模型試験	原位置実規模試験
室内/現場	室内(1G)	室内(遠心場)	原位置(1G)
対象時間	数日~数年	~数百年	~数十年
供試体サイズ等	小(~中)縮尺 部分模型(例えば、緩衝材の1/8、など)	小縮尺 部分模型(例えば、処分孔1孔など)	実規模
材料	単一材料	複数材料	現場および実材料相当
境界条件	単純な境界	複雑な境界 (実物相当を、着眼点を絞って模擬)	現場そのものの条件
対象挙動	1~2の挙動を対象	3つ以上の複数の連成挙動を対象 (実物を想定し、着眼点(評価対象)を絞る)	全ての連成挙動を対象
その他留意事項	<ul style="list-style-type: none"> ・TH, HMなどの連成についても対象とする ・縮尺サイズの制限で把握困難な現象は、工学模型実験(中縮尺:数分の1サイズ)における稠密計測で対応 ・数値モデルの感度を定量化 ・入力値データのばらつきを定量化(実験誤差や、平均値、統計処理後の範囲、中央値、最尤値など) 	<ul style="list-style-type: none"> ・既往研究で一般的な傾向として認められる確からしい挙動(影響の大きい項目)と比較 ・入力値データのばらつきを定量化 ・実験結果が、感度とばらつきを考慮した数値解析結果のどの範囲にあるかを確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・入力値データのばらつきを定量化 ・実験結果が、感度とばらつきを考慮した数値解析結果のどの範囲にあるかを確認 ・間隙水圧をコントロールするなど、人為的に極端な境界条件にする等の、現象を加速させた環境による評価もあり得る

表 2.3.2-1 妥当性確認試験 (THM 模型試験) の特徴等

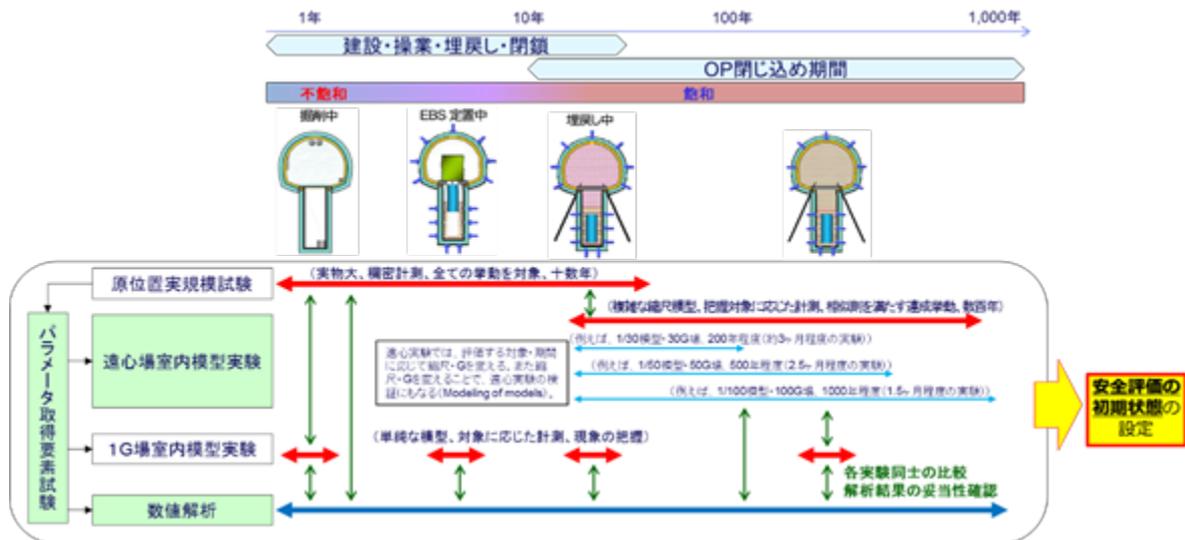


図 2.3.2-4 妥当性確認試験 (THM 模型試験) の評価期間のイメージ

2.3.3 THM 長期挙動評価手法 (骨子案)

(1) 骨子案 (妥当性確認のためのフロー図)

図 2.3.3-1 に、長期挙動評価を検討対象のサイトに対して行うことを想定して、THM 長期挙動評価手法 (骨子案) を、その具体的な実施フローとして提示する。まず、岩盤や水理などに関するサイト特性の設定が行われる。次にレファレンスケースなどに基づいて設計施工条件が設定され、その後サイトの材料を用いた THM 特性把握要素試験により数値解析に入力するパラメータが得られる。解析コードの選定においては、THM 連成解析機能の検証を伴いつつ開発された複数のコードが検討されると考えられる。

次に、選定された解析コードによる数値解析をサイト特性および設計施工条件に則してその妥当性確認を行う。THM 模型試験を実施することで、その結果に対して、解析コードで数値的にシミュレーションし試験結果と数値解析結果とを比較・検討することによって、数値解析の妥当性を評価対象サイトの実環境に則して確認する。

数値解析の妥当性確認の結果を踏まえて、サイト特性と設計施工条件に応じた最適な解析パラメータ、モデルを設定し、数値解析を行う。

数値解析の結果は必ずしもそのまま採用されるのではなく、以上のフローの中で得られた知見を用いて総合的に評価して、THM に関する長期挙動を評価する。この結果は必要に応じて設計施工条件の再設定にフィードバックされたり、また安全評価のための初期状態として安全評価に入力されたりする。

図 2.3.3-1 で示した「数値解析の妥当性の確認」について、詳細なフローを図 2.3.3-2 に示す。まず検討対象のサイトの THM 模型試験に先立ち、対象サイトの諸条件を考慮した上で、解析コードの基礎的な特性を確認するために、既往文献等の THM 模型試験で明らかになっている結果（一般的な傾向）に対する再現解析を行うことが考えられる（2.3.3 項 (3) 参照）。これは以下に示す理由から実施するものである。例えば遠心場室内模型試験は時間縮尺効果という他の実験手法にない特長があるが、模型寸法が小さいことなどの制約があるのでサイト条件や設計条件をそのまま完全に再現したモデルでの実験は困難である。もしそれが可能であるとしても、すべての影響要因が同時に作用するような系においては試験結果と解析結果の妥当性の評価が困難になることも考えられる。すなわち、遠心場室内模型試験においては単純化した系での実験を行い、そのような試験を再現できるかどうかの観点で個別に数値解析を行うことになる。また数値解析においては、評価対象の挙動の物理モデル化、モデル化における境界条件、などが妥当性を確認すべき点として挙げられる。挙動の物理モデル化ひとつをとっても、その内容は、膨潤特性、変形特性、破壊特性、これらと相互に影響し合う浸透水や熱の作用、また浸透水だけでなく水蒸気（ガス）も含めた挙動と作用などが挙げられる。これらの物理モデルで用いる各種の物性も緩衝材や岩盤においては非線形が大きいことが多く、その物性値や非線形の与え方が適切かどうか、また解析コードにはコード自体の感度も有し、入力パラメータ、特に岩盤ではその値にばらつきを有する。このような課題点を有する中で、あらかじめ文献情報として明らかな「確からしい」結果・傾向と先んじて比較検討しておくことで、解析コードの信頼性の向上や検討対象のサイトの THM 模型試験およびその数値解析の実施における効率化を計ることが出来ると考えられる。

数値解析の既往試験に対する基礎的な再現性を確認後、THM 模型試験で評価（計測）する項目を設定する。その際、確認すべき重要な点にしぼり、設定する必要がある。すなわち重要な点とは、人工バリアと周辺岩盤の将来状態に関する重要な評価項目であり、それに影響を及ぼす環境要因である（2.3.3 項 (2) を参照）。設定された評価・計測項目に従い、THM 模型試験の境界条件や模型形状などを決定、同条件の数値解析モデルを構築、実験・数値解析を実施、結果を比較・検討する。比較・検討の結果は、解析最適化のための知見、実サイト適用時の総合判断のための知見の観点から整理される。これらの知見は必要に応じて解析コードの高度化や設計施工条件の変更等へもフィードバックすることも考えられる。最終的には整理された結果に基づき、最

適化されたパラメータ・モデルによる数値解析を行い、長期挙動の評価、安全評価の初期状態が設定される。

なお、このフローによる THM 長期挙動評価のためには、それ以前に数値解析コードの開発も行っていく必要がある。数値解析コードの持つ個別の機能などについては開発段階に検証・妥当性の確認がなされておかなければならないだろう。そのような数値解析コードの個別機能の検証・妥当性確認を伴った開発のためにも、本研究が着目する遠心模型試験は大いに役立つと考えられる。

このような長期挙動評価はサイトが決定し最終的な評価を行う最終段階だけでなく、候補サイトが絞られていないジェネリックな段階や、サイトを絞っていくサイト選定段階でも、順を追って長期挙動評価を行いつつ、その評価手法の検討や設計施工オプションの検討などを行っていく際にも同様のフローに従い実施されることも考えられる。

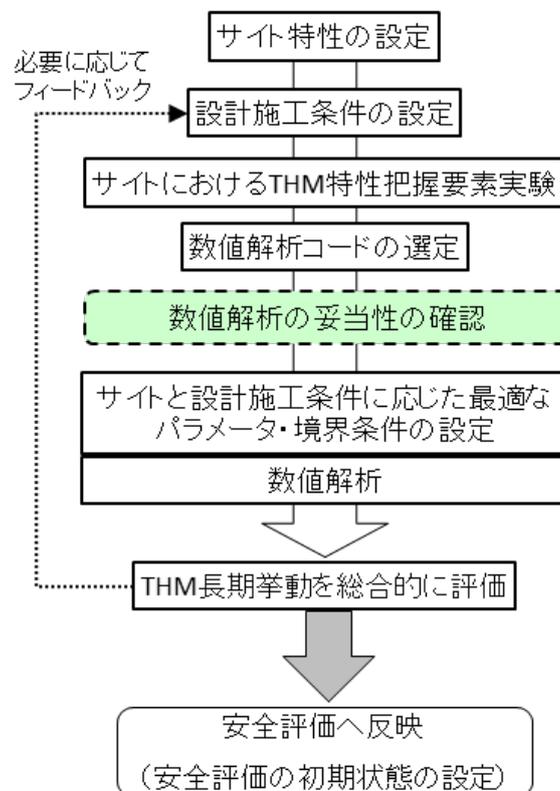


図 2.3.3-1 実事業で想定される対象サイトに対する THM 長期挙動評価のフロー（骨子案）

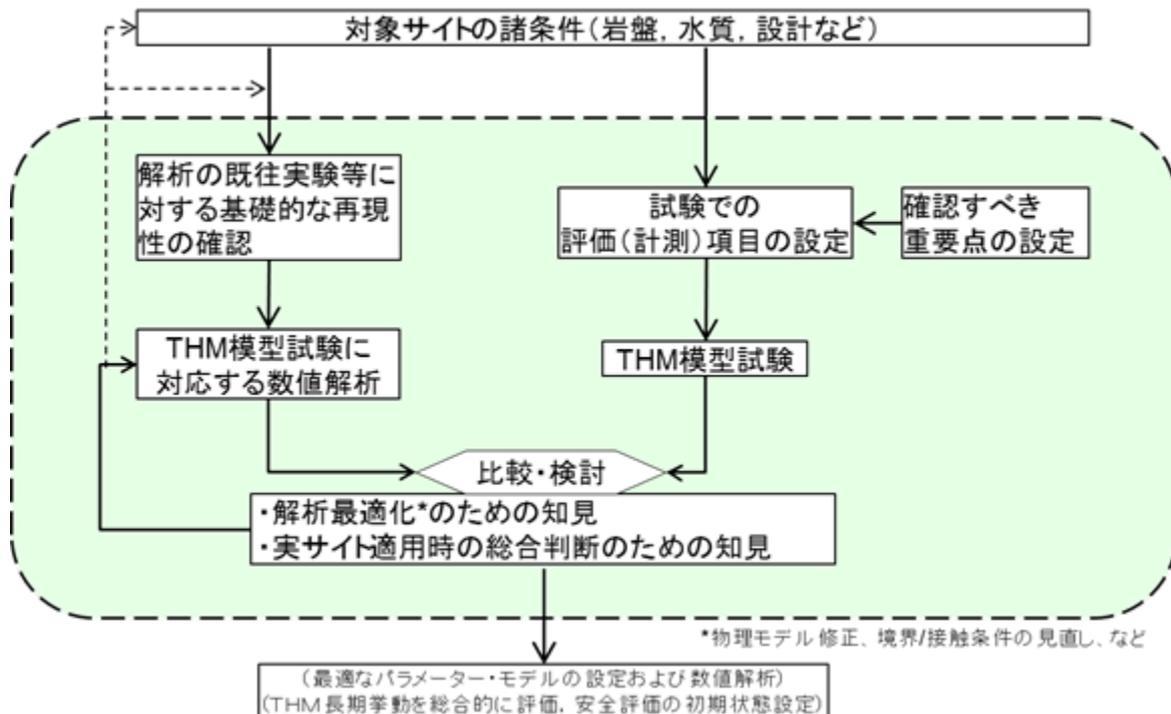


図 2.3.3-2 数値解析の妥当性の確認の詳細なフロー（骨子案）

(2) 評価項目、影響要因の抽出

前項で述べたように、数値解析と THM 模型試験の結果を比較・検討する際、人工バリアと周辺岩盤の将来状態に関する重要な評価項目と、それに影響を及ぼす環境要因を抽出する必要がある。(図 2.3.3-2 の「確認すべき重要点の設定」)

長期挙動評価手法における評価項目は、以下のものが挙げられる[4], [6]-[8]。

- ・ 廃棄体容器の緩衝材中の移動量（浮上・沈下）の評価
- ・ 緩衝材の密度変化、変形（膨出）、流出等の評価
- ・ 岩盤の亀裂開口、変形、破壊、透水性等の評価
- ・ ニアフィールドの水圧分布（水位分布／冠水時期）、温度分布の評価

評価項目とは、経時変化を生じる現象であり、サイト（ニアフィールド）の処分システムにおいて、THM 連成挙動が収束した段階での安全評価の初期状態として評価する項目である。

廃棄体容器の移動・沈下は、緩衝材の安全機能の確保のために一定の厚さが必要になることから評価するものである。これは重要な評価事項であり SKB 処分プロジェクトの安全検討でもキャニスタの沈下として検討されている[9]。緩衝材の健全性では、岩盤亀裂を通じた緩衝材流出や堅置き処分型の場合の坑道への膨出などの現象の有無を確認することが重要である。岩盤の健全性では、緩衝材の膨潤圧により岩盤に割目が発生したり、既存の弱面が開いたりなどすると周辺岩盤の透水性が増加することからそのような現象の有無を確認することが重要である。

次に、影響要因については以下のものが挙げられる[4], [6]-[8]。

- バリアの設計・施工条件
 - ・ 緩衝材・埋戻し材の仕様の影響
 - ・ 処分孔と緩衝材の隙間、緩衝材の継目、水みちなどの影響
 - ・ 初期の緩衝材・埋戻し材密度の不均質性（ばらつき）の影響
 - ・ 処分孔の塞ぎ方の影響

- 処分サイトの環境条件
 - ・ 岩盤の特性（物性、亀裂、不均質性等）
 - ・ 地圧（深度、異方応力）、水圧
 - ・ 水質
 - ・ 地温
 - ・ 動的な現象（湧水、地震等）

影響要因とは、処分サイトの初期に与えられる物性・境界条件（パラメータ）である。

評価項目に対し、サイト条件（岩盤の特性、水圧、水質など）が影響する。また、バリアの設計・施工条件（人工バリアの仕様や施工条件）が上記の評価項目に対してどのように影響するかという観点から、人工バリアの設計や施工計画のためにも必要となる。例えば、処分孔壁と緩衝材の隙間の影響、初期の緩衝材密度のばらつきの影響、処分孔の塞ぎ方の影響、などである。

以上の評価項目と影響要因から、その影響の大きさをまとめた一覧を表 2.3.3-1 に示す。注釈は特定の条件下においては影響が小さくなることを示している。また表の右列には、評価（検証）試験における評価可能な項目と期間もあわせて示す。本表で示す評価は、各評価項目に対し、個別の各要因の影響の大きさを示すものである。このため、評価項目間、あるいは複数の要因によって生じる相互作用の影響には別途考慮が必要である。

表において、特に重要と思われる影響（イエロー）と本研究の今フェーズ（H27～29年度）における着眼点（オレンジ）をハッチで示した。本研究で取り組む遠心模型試験において、以下の着眼点にしばり実施している。すなわち、緩衝材・埋戻し材の仕様、隙間・継目、孔蓋の有無、岩種、地圧による条件に対し、オーバーパックの移動、緩衝材の変形、岩盤の影響を評価する。このため今フェーズでは対象外としている影響が大きい事項（評価項目の緩衝材の経時変化により生じる密度不均質や流出、岩盤の亀裂開口など、影響要因の施工時の不均質や岩盤の亀裂、動的問題など）については、別途実施する必要がある。

原位置実規模試験等では実際とほぼ同じ形状・配置に対する評価が可能である。本研究で取り組む遠心模型試験のみでは原位置実規模試験等と比較して評価項目を十分に検討できない部分もあるだろう。評価項目によっては工学規模模型を用いた 1G 場室内模型試験を併用するなどのことが考えられる。一方で、遠心模型試験では他の試験には無い時間縮尺による百年単位に相当する挙動を得られるという大きな特長を生かした検討を行うことが出来る。人工バリアの設計・施

工条件の影響に関する検討についても、実物相当の詳細なモデル作成は困難な場合も考えられるが、評価の着眼点をしぼり単純化したモデルで設計・施工の参考になるようなデータ、数値解析の検証対象をしぼったデータを提示していくことにより、長期挙動評価の信頼性を向上することを目指すものである。

表 2.3.3-1 評価項目と影響要因の関係 (評価影響要因分析表)

本研究の着眼点	重要と思われる項目	影響要因 (設計施工)										影響要因 (環境)					
		緩衝材の埋戻し材の仕様					緩衝材の埋戻し材の不均質					静的			動的		
		埋戻し材の仕様	緩衝材の隙間、継目	緩衝材の埋戻し材の不均質	孔蓋の有無	岩種	地圧	亀裂	互層異方性、不均質	水圧	水質	地温	湧水	地震動			
	オーバーパッキング	○	○	△*1	○	○*2	○*3	○*3	△*3	○*4	△*4	△	○				
	移動量(沈下、浮上、傾き等)に影響を与えるか? また、移動量が緩衝材の設計仕様様の厚さの範囲内にあるか?	○	○	△*1	○	○*2	○*3	△*3	○*4	△*4	○	○	△				
	坑道へ膨出があるか? ある場合、膨出によって要求性能*の範囲内にあるか?	○	○	△*1	○	○*2	○*3	△*3	○*4	△*4	○	○	△				
	密度不均質が生じるか? 生じた場合、密度不均質が要求性能*の範囲内にあるか?	○	○	△	○	○*2	○*3	△*3	○*4	△*4	△	△	×				
	緩衝材	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	△				
	水みちが生じるか? 生じた場合、流出によって要求性能*の範囲内にあるか?	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	△				
	岩盤亀裂などへの流出生じるか? 生じた場合、要求性能*の許容範囲にあるか?	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○				
	変形が生じるか? 生じた場合、緩衝材が要求性能*の範囲内にあるか?	△	×	×	×	△*5	○*6	○*6	×	×	△	×	○				
	周辺岩盤 (緩衝材の外側)	△	×	×	×	△*5	○*6	○*6	×	×	×	△	○				
	亀裂開口が生じるか? 生じた場合、緩衝材が要求性能*の範囲内にあるか?	△	×	×	×	△*5	○*6	○*6	×	×	×	×	○				
	破壊が生じるか? 生じた場合、緩衝材が要求性能*の範囲内にあるか?	×	×	○	×	△*5	○*6	○*6	×	×	×	○	○				
	透水係数の変化が生じるか? 生じた場合、緩衝材が要求性能*の範囲内にあるか?	×	×	○	×	△*5	○*6	○*6	×	×	×	○	○				
	温度分布に影響を与えるか?	×	×	△*7	×	×	×	×	×	×	○	△	×				
	ニアフイールド	×	×	△*7	×	×	×	×	×	×	△	△	△				
	地下水圧分布に影響を与えるか?	×	×	△*7	×	×	×	○	×	×	△	△	△				

評価項目

(3) 数値解析の既往実験に対する基礎的な再現性確認

2.3.2 項(3)、2.3.3 項(1)で述べた数値解析と THM 模型試験の比較・検討は、前段 2.3.3 項(2)で示した評価項目と影響要因の観点から行う必要がある。図 2.3.3-2 に示した「解析の既往実験等に対する基礎的な再現性の確認」の具体化であり、本研究で実施している遠心模型試験（遠心場室内模型試験）を対象に、その具体的な内容を表 2.3.3-2 に示した。すなわち、妥当性確認のための比較・検討を行う項目（表 2.3.3 1 から抽出）、THM 模型試験で計測する項目、数値解析で着目すべき重要な因子（解析の物値モデル、境界条件、適用する構成則など）、および既往実験等で認められる傾向[11]-[16]を、一般傾向データベースとして示した。なお示した表では、比較・検討の項目に関連するものを抽出し、一般的傾向として確実性が高いもの（青字）、傾向が認められるがデータが少なく確実性が不明なもの（緑字）、データが極めて少ないあるいは無く傾向が不明なもの（赤字）、を示した。また、赤字斜字については、遠心模型試験では縮尺サイズの関係から実験が難しいものもあり、例えば今後別途行われる複数材料、複数の挙動を対象とした工学規模の 1G 場室内模型試験の結果の傾向から追記する必要がある。

遠心模型試験においては、模型寸法が小さいことなどの制約があるのでサイト条件や設計条件をそのまま完全に再現したモデルでの実験はできない。このため遠心模型試験ではある程度単純化した系での実験が実施されるが、このような実験をどのように再現できるかどうかの観点で個別に数値解析を行う。そのような観点を絞った比較・検討を行うことによって、数値解析の結果に信頼を得られるようにしていく。これらの比較・検討すべき点を網羅的に挙げることは容易でないし、また用いる数値解析手法によっても異なる。また、比較・検討すべき点は数値解析コードの開発段階で行うものと、特定サイト条件と設計条件を想定した段階で行うものがある。ここでは後者の段階を主な対象としている。

同表において具体的項目のひとつを例示し説明する。緩衝材についての一般傾向として「膨出拘束条件で、緩衝材の応力は拘束圧（地圧）に依存」[14]という項目がある。緩衝材の応力の経時変化については基本機能としては数値解析の開発段階で主に 1G 場室内模型試験等で妥当性確認されるべきものであるが、緩衝材の膨潤挙動は水質に依存し、加えて周辺の物質（岩盤）の強度変形特性に大きく依存することが明らかになっている[14]。このため、サイト条件・設計条件を想定した比較・検討が必要であるとして挙げている。また、緩衝材の変形を拘束する条件で発生する膨潤圧の経時変化を再現できる場合であっても、変形を許容した場合には解析される変形量が実際に発生した変形の 1/100 程度であったとの報告[8]もある。すなわち、緩衝材の変形挙動は水質だけでなく周辺岩盤やサイトの深度にも依存すると考えられ、サイト条件・設計条件を念頭に妥当性を確認すべき事象である。

岩盤に関しては、岩盤を含む条件でオーバーパックや緩衝材の諸挙動を評価した研究例が現状では少ない。例えば岩盤の不均質性や亀裂の影響について、これらは処分孔への水の流入条件に影響を与える可能性、岩盤の透水係数が変化する可能性、あるいは破壊部への緩衝材の流出に伴う緩衝材品質への影響の可能性が考えられることから重要な項目である。亀裂の影響に関しては、例えば岩の引張強度の測定方法には異なる複数の方法があり、方法によって値が異なることが指摘されることから重要な確認点とすることができる。解析で予測される現象が実際に発

生するか、また、解析では予測されない現象が発生しないか、というような確認の意味でも重要と考える。

以上のように、表 2.3.3-2 に遠心場室内模型試験と数値解析の比較・検討項目として現時点で挙げられるものを示している。表 2.3.3-2 に示す項目は、今後の研究の進展により得る新たな知見に基づき、必要な項目は加えると同時に削除できるものは削除していくものであり、1G 場室内模型試験や原位置実規模試験においても整備の必要があると考える。

表 2.3.3-2 比較・検討のための一般傾向データベース（遠心場室内模型実験の例）

比較・検討のための項目 (評価・環境要因影響表より)	計測項目	着目すべき重要な因子	遠心場室内模型実験での認められる傾向 (一般傾向データベース)
オーバーハック 移動量	<ul style="list-style-type: none"> 移動量(浮上, 沈下, 傾き) 温度 	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> ※着目すべき重要な因子を考慮し、計測値の経時変化等を数値解析結果と比較し、妥当性確認を行う </div>	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材の種類や密度に依らず、均質に膨潤し膨潤圧が同程度であれば沈下量も同程度を示す 埋戻し材の条件に依る(一定上載圧, 一定体積など)影響 緩衝材全体が同時に膨潤した場合、OP浮上量は抑制される 緩衝材の不均質による影響* 膨出を抑えた場合、OPの浮上は一定経過後に収束する 岩種の影響 緩衝材の膨出拘束条件で、OP変位は拘束圧(地圧)に依存する 岩盤の不均質性、亀裂の影響* OPの下部と上部で導水勾配が異なると、OP変位の収束時間が異なる 水質の影響 温度の急激な低下により、OPが沈下する
変形量 密度分布 透水性 (隙間, 水みちなど)	<ul style="list-style-type: none"> ひずみ(変形量) 膨潤圧 透水係数(間隙水の注入・排出量) 密度 含水比(飽和度) 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材の強度変形特性(飽和度依存性) 水質依存性 隙間の力学特性(透水・強度変形) 	<ul style="list-style-type: none"> 膨出拘束条件で、緩衝材の土圧は拘束圧(地圧)に依存する 密度は時間経過とともに鉛直分布が変化する 密度の鉛直分布は周辺の透水性(亀裂、隙間など)に依存する 埋戻し材の条件に依る(一定上載圧, 一定体積など)緩衝材の膨出の影響 岩種の影響 異方地圧の影響 岩盤の不均質性、亀裂の影響* 水圧の影響 水質の影響
流出			
変形量 亀裂開口 破壊	<ul style="list-style-type: none"> ひずみ(変位量) 透水係数(間隙水の注入・排出量) 密度 含水比(飽和度) 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の強度変形特性(飽和度依存性) 亀裂等の力学特性(透水・強度変形) 	<ul style="list-style-type: none"> 間隙が空気-水置換により有効応力に変化、引張りずみが発生する 岩種の影響 岩盤の不均質性、亀裂の影響* 異方地圧の影響 水圧の影響 水質の影響
透水性			
温度分布 水圧分布	<ul style="list-style-type: none"> 温度 水圧(水位) 	<ul style="list-style-type: none"> 温度分布 水圧分布 	<ul style="list-style-type: none"> 温度分布の傾向* 水圧分布の傾向*

青字: 一般的傾向として確実性が高いもの、**緑字**: 傾向が認められるが、データが少なく確実性が不明なもの、**赤字**: データが極めて少ない、あるいは無く、傾向が不明なもの
赤字については、遠心実験では縮尺サイズの関係から実験が難しいものもあり、今後別途行われる(行われた)工学規模模型試験(斜字*)の結果の傾向から抽出する必要がある。

*1 中村・田中 [10]、*2 Nishimoto et al. [11]、*3、4 (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター [12]、[13]

2.4 共通の条件

本研究において実施する数値解析および遠心模型試験について、材料特性、実験・解析条件を同一にすることによってより正確な検討を目指すことが実施内容の一つとなっている。以下に、本研究で実施する数値解析、数値解析のパラメータ取得のための要素実験、遠心模型試験における共通の材料、条件について示す。

2.4.1 数値解析コード

解析手法として電力中央研究所（以下、電中研という。）で開発している熱－水理－力学連成コードである LOSTUF（放射性廃棄物地層処分における地下空洞長期安定性解析プログラム）[15]を用いた。解析コードの詳細は「5.2 節 解析コードの概要」に示す。

2.4.2 遠心力载荷試験装置

妥当性確認のためのデータを取得するための遠心模型試験は、電中研が保有する超長期遠心载荷岩盤実験装置を使用した[11], [16]。図 2.4.2-1 に装置のイメージを示す。詳細については「3.3 節 試験設備」に示す。

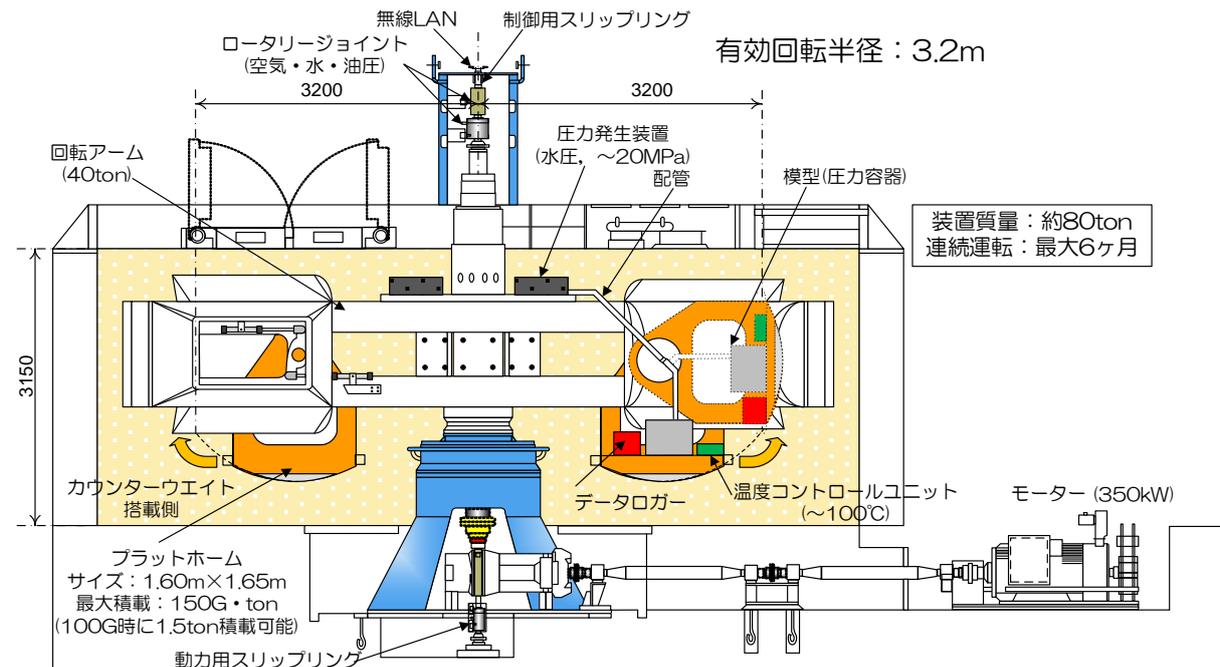


図 2.4.2-1 超長期遠心载荷岩盤実験装置のイメージ

2.4.3 材料

材料について、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次とりまとめ－」（以下、HLW第2次取りまとめ、という）[6]等を参照し、以下の通り選定した。

(1) オーバーパック

リファレンスケースのオーバーパックは炭素鋼製で、直径 820mm、長さ 1730mm（把持部除く）である。今回の試験では腐食現象を評価対象から外しているが、試験中に装置として劣化することを防ぐためステンレス鋼とする。密度は実物相当のガラス固化体を含めたオーバーパックの全密度から 6.35Mg/m^3 となるように設定した。

(2) 緩衝材

リファレンスケースの緩衝材と同一の配合、密度とした。配合は重量比でベントナイト：ケイ砂＝7:3、ケイ砂は 3 号および 5 号を重量比で 1:1 とする。ケイ砂の粒径は 1mm 以下とした。昨年度から粒径を変更（昨年度は 2mm）した理由について、昨年度までの 1/30 模型では 2mm ふるいを通過したケイ砂を使用した処分孔の直径に対するケイ砂の径の割合が 2.7%であった。H29 年度は 1/50 模型を用いるため処分孔の直径が 44.4mm であり、2mm ふるい通過のケイ砂を使用するとその割合が 4.5%となってしまう。そのため前年度までの割合と近い 1mm ふるいを通過したケイ砂 (2.25%) を使用した。初期含水比は 10%程度、膨潤後の平均乾燥密度を 1.60Mg/m^3 とする。

(3) 埋戻し材

配合は重量比でベントナイト：ケイ砂＝15：85、ケイ砂は 3 号および 5 号を重量比で 1：1 とする。ケイ砂の粒径は 1mm 以下とした。粒径を変更した理由は緩衝材と同様である。初期含水比は 7～8%程度、初期平均乾燥密度を 1.80Mg/m^3 以上とする。

(4) 周辺岩盤

2.1.2 項にて検討対象を緩衝材と周辺岩盤の変形挙動と設定した。そのため岩盤部は変形挙動がより顕著に現れる材料を選定した。HLW 第 2 次取りまとめでは、地層処分場の坑道形状や、坑道レイアウト、廃棄体の定置間隔について、硬岩と軟岩について検討されている。硬岩系の代表である結晶質岩は亀裂が多いことが想定されるため、亀裂の存在が試験結果に影響することが懸念される。一方、堆積岩は結晶質岩よりも弾性係数が低い軟岩系であり、変形挙動がより顕著に現れる、亀裂の影響が少ない比較的均質な材料と考えられる。

HLW 第 2 次取りまとめでは、軟岩の物性値として表 2.4.3-1 に示すような 5 種類のデータセットが解析に用いられている。このうち、SR-C～E は比較的一軸圧縮強度が小さく、変形が期待できる。

試験の目的を考慮した以上の検討から、用いる岩種は SR-C～SR-E に相当する軟岩とした。実際の試験では H27、28 年度と同様、三浦層群初声層の凝灰岩を採用した。

岩盤のサンプリングを行った場所は、電中研・横須賀地区内にある防空壕跡内に産出する新第三紀（前期鮮新世）の三浦層群初声層の含礫凝灰質砂岩（ts、以下、初声凝灰岩と呼ぶ）である（図 2.4.3-1）。図 2.4.3-2 に、防空壕内で実施した地質観察図を示す。同図に示す凝灰質砂岩（ts）は、褐色を呈し、主に中粒～粗粒の砂岩からなる。また、細礫～中礫（礫径は 3cm 以下）を含み、黒色のスコリア質凝灰岩を挟んでいる。

表 2.4.3-1 HLW 第 2 次取りまとめの解析で使用された軟岩の物性値

		SR-A	SR-B	SR-C	SR-D	SR-E
一軸圧縮強度	qu[MPa]	25	20	15	10	5
引張強度	σ_t [MPa]	3.5	2.8	2.1	1.4	0.7
弾性係数	E[MPa]	5,000	4,000	3,500	2,500	1,500
粘着力	C[MPa]	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
内部摩擦角	ϕ [deg]	30	29	28	27	25
ポアソン比	ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
有効間隙率	Ne[%]	15	20	30	45	60
飽和密度	ρ [Mg m ⁻³]	2.45	2.35	2.20	1.95	1.70

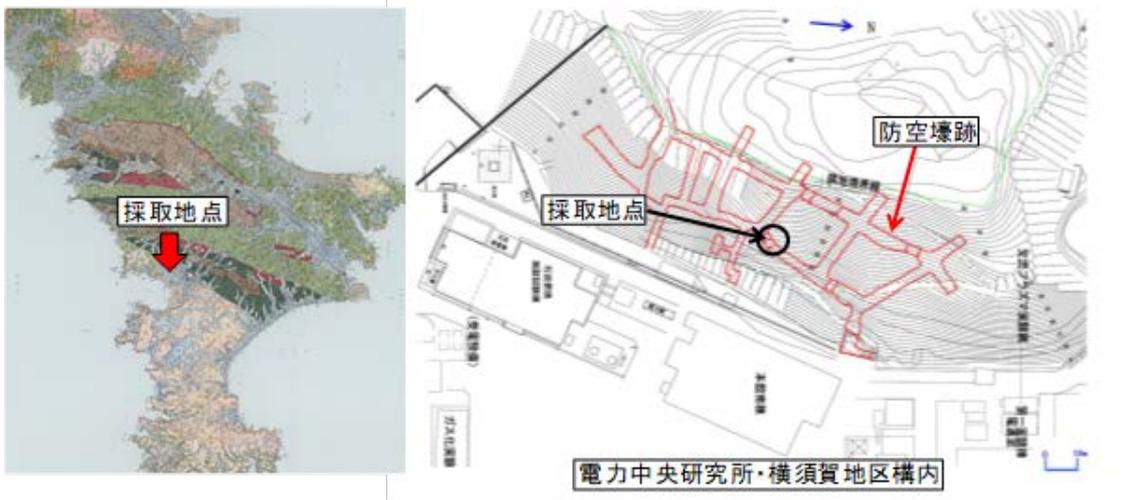


図 2.4.3-1 岩盤サンプリング箇所。(左) 5 万分の 1 表層地質図、(右) サンプリングを行った電力中央研究所・横須賀地区構内図

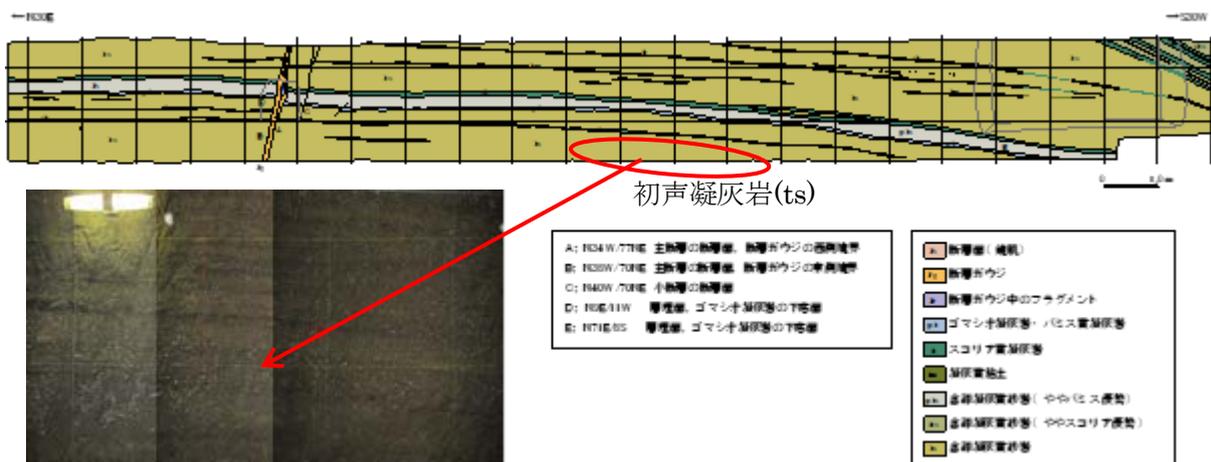


図 2.4.3-2 防空壕内で実施した地質観察図

2.4.4 試験対象

遠心模型試験の実施や数値解析モデルの作成に際して、適用する処分概念を選定した。

(1) 試験対象の定置概念

地層処分における廃棄体の定置方式は、定置位置と定置姿勢で分類される。定置位置には処分坑道または処分孔、定置姿勢は縦置きまたは横置きがある。HLW 第2次取りまとめでは、処分孔縦置き定置方式と、処分坑道横置き定置方式の2種類の方式が示されている。「処分坑道横置き方式」の構成要素は人工バリアと処分坑道である。一方「処分孔縦置き定置方式」の構成要素は人工バリア、坑道埋戻し材、処分孔、処分坑道である。処分孔縦置き定置方式は横置き方式に比べ構成要素が多く、オーバーパックの自重による浮沈、処分孔外へ緩衝材の膨出、坑道埋戻し材の上載圧の影響など力学的な様々な現象を評価の対象とすることが出来る。

以上の理由より、本検討では「処分孔縦置き定置方式」を対象とした(図 2.4.4-1) [6]。

(2) 境界条件 (図 2.4.4-2)

1) 試験対象の範囲

H28年度は、緩衝材の変形(膨出)に着目するため、坑道内の埋戻し材を一部含む模型(境界)を用い、埋戻し材の自重応力に相当する鉛直応力を負荷した。

本年度 H29年度は、処分坑道の高さ方向の空間を模擬し、その中に設置する埋戻し材を処分孔上部に設置した。また、埋戻し材の上部にはトンネル上部を模擬した岩盤を設置した。

2) 応力(周圧、軸圧、間隙水圧)

対象施設は軟岩系サイトとして深度 400m を想定した(飽和後の処分孔上端面の周方向の有効応力が 4.0MPa)。H29年度の実験は異方応力条件であるため、岩盤が破壊しない条件である必要がある。このため、試験における具体的な载荷応力は、H27年度に実施した岩盤の力学試験の結果から[12]、以下の通り設定した。

初期応力として、周圧を 5.0MPa、軸圧を 1.17MPa とした。

次に、模型下面からの間隙水の注入と同時に、模型軸方向の高さが変化しないように軸方向の変位が一定となるような制御を行った(軸圧は注水圧や緩衝材の膨潤挙動により可変)。

最終的に、注水圧は 0MPa から 1.07MPa、排水圧は 0MPa から 0.92MPa となるように制御し、飽和後において処分孔上端面で有効周圧がおおよそ 4.0MPa の条件を成立させた(詳細は 3.4 節を参照されたい)。

3) 水質

2.1 節で述べたように今フェーズでは実験における間隙水は蒸留水を使用する。

4) 温度 (図 2.4.4-3)

HLW 第2次取りまとめではニアフィールドの温度の経時変化が解析で示されている[6]。遠心模型試験で発熱させるオーバーパックの温度変化について、同解析結果のうち、処分孔縦置き方

式・隙間モデルの CASE.A (ガラス固化体-オーバーパック間、オーバーパック-緩衝材間、緩衝材-岩盤間の隙間の充填物が空気) の C_{xin} の経時変化を採用した (オーバーパック表面、最高上昇温度 94.5°C)。

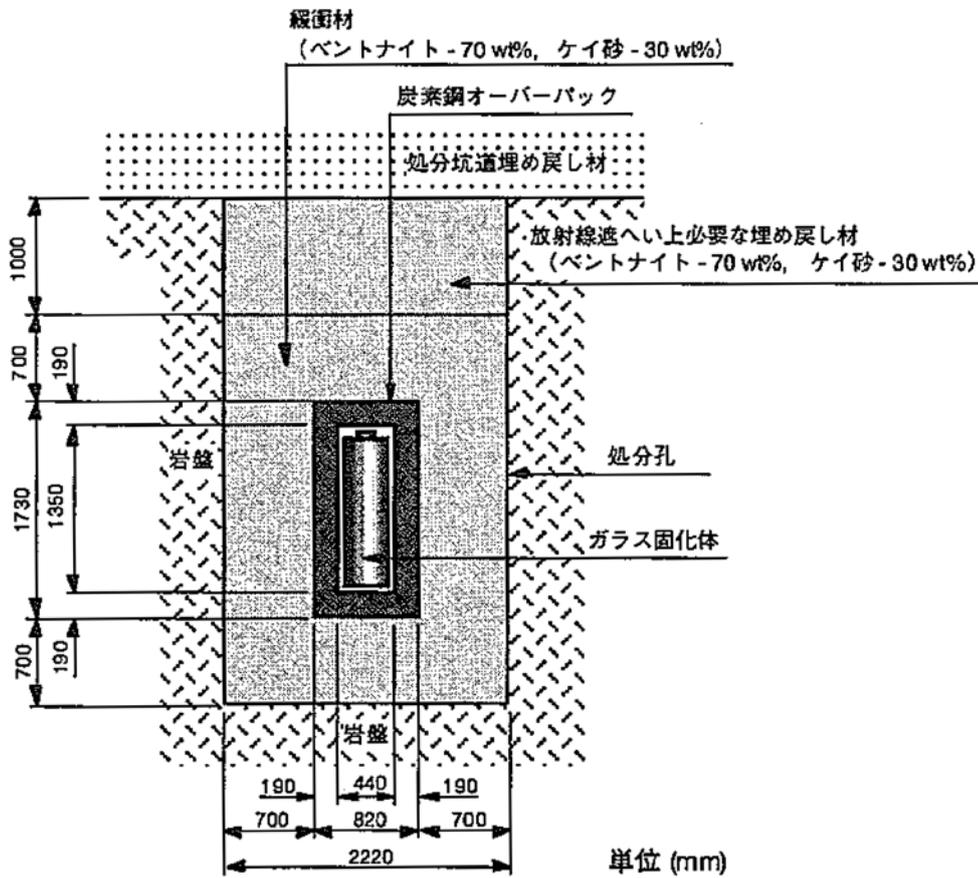


図 2.4.4-1 本研究における対象施設 (縦置き方式)

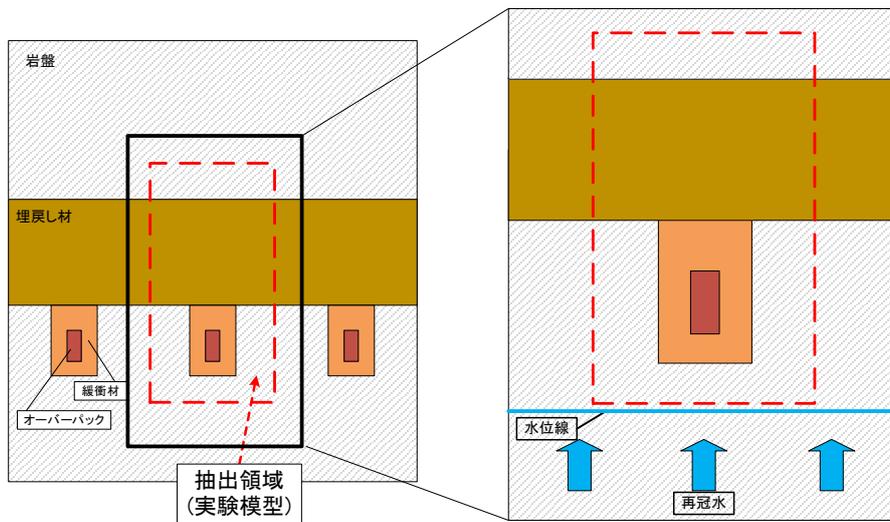


図 2.4.4-2 H29 年度で想定する境界条件の概念図

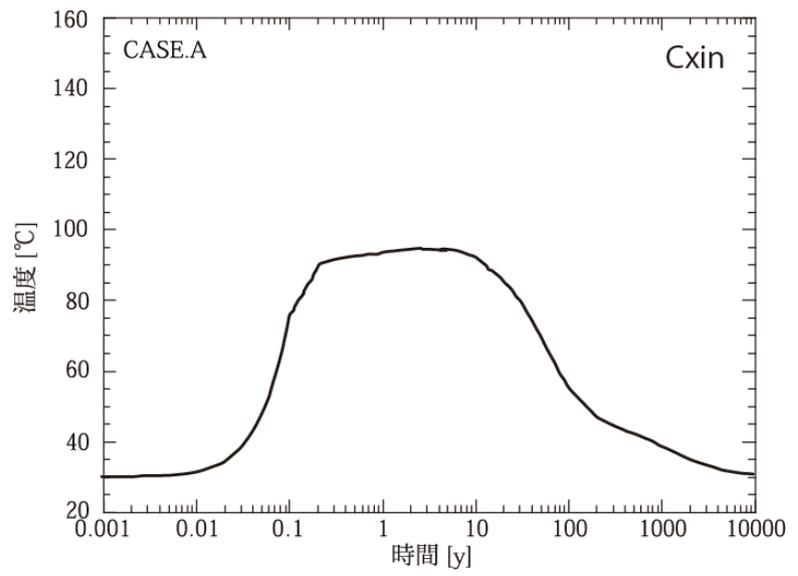
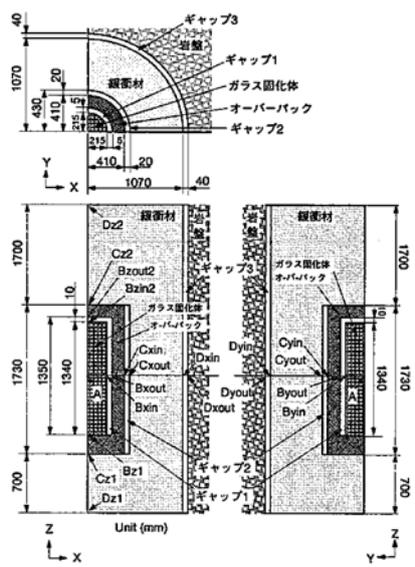


図 2.4.4-3 遠心模型試験で想定するオーバーバックの温度条件 (経時変化)

第2章 参考文献

- [1] (公財)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2分冊)ー人工バリア品質/健全性評価手法の構築ー緩衝材, 2015.
- [2] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物 処分場周辺の長期挙動評価(その2)ーニアフィールド模型試験法の確立と等方応力拘束条件下における長期挙動ー, 電力中央研究所報告, N11040, 41, 2012.
- [3] 澤田昌孝, 岡田哲実, 長谷川琢磨, 高レベル放射性廃棄物処分地下施設の 長期挙動予測評価プログラムの開発ー緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築ー, 電力中央研究所報告, N05028, 2006.
- [4] 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)ーNUMO-JAEA 共同研究報告書(2012年度)ー, 原子力発電環境整備機構 技術報告書, NUMO-TR-13, 2013.
- [5] L. Schwer, Guide for verification and validation in computational solid mechanics, Am. Soc. Mech. Eng., PTC 60, V&V 10, 1-15, 2006.
- [6] 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-, 1999.
- [7] 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業のための安全評価技術の開発(I)-シナリオ構築技術の高度化-, 原子力発電環境整備機構 技術報告書, NUMO-TR-10-09, 2011.
- [8] 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.
- [9] SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main Rep. SR-Site Proj., Volume II, Technical Report TR-11-01, 2011.
- [10] 中村邦彦, 田中幸久, ベントナイトの種類と密度がオーバーパックスの沈下量に与える影響, 土木学会論文集 C, 65, 1, 85-96, 2009.
- [11] S. Nishimoto, M. Sawada, T. Okada, New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 1: Test of Physical Modeling in Near Field Under Isotropic Stress-Constraint Conditions, Rock Mech. Rock Eng., 49, 8, 3323-3341, 2016.
- [12] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成27年度地層処分技術調査等事業「処分システム工学確証技術開発」報告書(第3分冊)ー人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築ー, 2016.
- [13] (公財)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)ー人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築ー, 2017.
- [14] 田中幸久, ベントナイトの吸水膨潤モデルによる 膨潤圧試験における試験条件の影響評

- 価, 土木学会論文集 C (地圏工学), 67, 4, 513-531, 2011.
- [15] 澤田昌孝, 岡田哲実, 長谷川琢磨, 高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発 -緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築-, 電力中央研究所報告, N05028, 2006.
- [16] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力载荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価 (その1) -超長期遠心载荷岩盤実験装置と遠心力模型試験法の開発-, 電力中央研究所報告, N10018, 41, 2011.

第3章 遠心模型試験

3.1 背景・目的

3.1.1 背景

人工バリアと周辺岩盤の熱-水-応力 (THM) 錬成長期挙動評価に関する研究において、実規模実証試験や数値シミュレーションが実施されている。日本原子力研究開発機構・幌延深地層研究センターにおいて、現在国内唯一の実規模実証試験「人工バリア性能確認試験」が地下 350m で実施されて、その数値シミュレーションが実施されている[1]-[3]。数値解析結果と実規模試験結果との比較・検討を行うことは数値解析モデルの高精度化や妥当性検証のために有効な手段の一つである。しかし、実規模実証試験を実施できる期間は長くても現実的には十数年程度であり、その試験結果を用いて百年単位の THM 長期挙動を予測する数値解析モデルの妥当性検証には限りがある。

遠心力場の相似則を利用した遠心模型試験は、実物と縮尺模型の応力の対応が良く、力学的・水理的挙動も実物に近い[4]。また遠心力場の相似則における時間加速の効果により、長時間の遠心模型試験を行うことで処分場周辺 (ニアフィールド) の THM 長期挙動の現象把握に対して有利である。ただし、実物と同じ材料で遠心模型試験を行った場合、岩盤等の骨格の粘弾性的な特性に基づく経時的な変形に関しては、一般的にいわゆる H2 則が成立しないことが広く知られている。しかし、そうした要因による影響が大きくないと仮定し、現象を的確に捉えるために評価する項目を絞って試験することで、実物の THM 長期挙動をある程度推定できる可能性がある。

電力中央研究所ではこの点に着目し、最長 6 ヶ月の連続運転、最大 1.5 ton の模型が搭載可能な遠心力载荷装置を開発し[5]、同装置を用いて、模擬廃棄体 (オーバーパック) 1 体、処分孔 1 孔、ベントナイト緩衝材、岩盤 (堆積軟岩) から成るニアフィールド模型を用いて、30G の遠心力場において最長約 200 年相当の模型試験を実施した[6]-[8]。試験は、拘束圧 (地圧) をパラメータとした応力拘束条件下において実施された。その結果、周辺岩盤の変形を考慮しない既往のひずみ拘束条件下の遠心模型試験結果と異なり、オーバーパックの変位量、ベントナイト緩衝材の土圧が拘束圧により変化し、かつ試験期間内において収束しないことが分かった。すなわち地圧と時間経過に応じた岩盤の変形挙動とベントナイト緩衝材の膨潤変形挙動の力学的相互作用によって、オーバーパックの変位量、ベントナイト緩衝材の土圧に地圧依存性・時間依存性が生じることを実験的に初めて明らかにした。

一方で上記試験は、処分孔上端面の排水圧が 0.5MPa、オーバーパックの温度が 95°C一定[7]と試験手法の開発の要素が強く、想定される施設の実環境とは異なる点がある。このため、より正確な長期挙動評価のデータを得るためには実環境を考慮した境界条件による試験が必要不可欠である。

3.1.2 目的

ニアフィールド模型を用い、廃棄体の発熱および近深部環境 (温度、地圧) を考慮した試験を行い、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動を推定する。

3.1.3 3カ年の実施計画および本年度の実施内容

今フェーズ（H27～H29）において対象とする環境因子は応力である。第2章で述べたように施設の深度は400mとしたため、処分孔上端面に作用する上載圧について着目する。上載圧は処分坑道の埋戻し材やプラグの状況によっては緩衝材の膨出に係わる重要な環境因子の一つと考えられる。

図3.1.3-1に今フェーズにおける遠心模型試験の3カ年計画を示す。H29年度は緩衝材の変形（膨出）に着目し、オーバーパック1体、処分孔1孔、および処分坑道を含んだ廃棄体周辺を抽出し、1/50の模型を用いて遠心力50G場において試験を実施する。模型サイズは、50Gにて実験を試験するため、前年度までの1/30模型を3/5の寸法にした。また解析を実施する上で計算時間の短縮を図るため、軸対称の模型とした。本研究の遠心模型試験における評価期間は、閉鎖後の再冠水により廃棄体周辺が飽和に向かう数十年程度の期間に併せて、飽和後もオーバーパックの変位や岩盤のひずみの挙動が収束に近い状態までをより長く示せるよう、170年程度相当とした。詳細な境界条件は後述の3.4.2項を参照されたい。

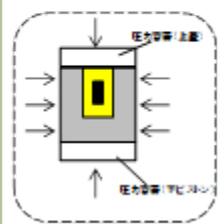
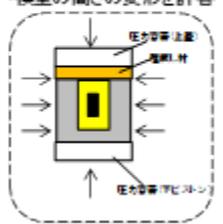
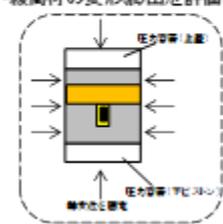
	H27	H28	H29
条件	<ul style="list-style-type: none"> ・1/30模型 ・処分孔1孔 ・熱-水-応力 ・等方位 ・模型の高さの変形を許容 	<ul style="list-style-type: none"> ・1/30模型 ・処分孔1孔+埋戻し材の自重応力を載荷 ・熱-水-応力 ・異方位 ・模型の高さの変形を許容 	<ul style="list-style-type: none"> ・1/50模型 ・処分坑道1本、処分孔1孔 ・熱-水-応力 ・異方位 ・模型の高さを固定 ・緩衝材の変形膨出を評価 
模型形状	 φ18cm (処分孔1孔)	 φ18cm (処分孔1孔)	 φ18cm (処分孔1孔、 坑道)

図 3.1.3-1 今フェーズにおける遠心模型試験の試験計画

3.2 遠心模型試験における静的場の相似則

3.2.1 相似則

遠心模型試験とは、遠心力を付与できる遠心力载荷装置に幾何学的に縮小（1/n）された小型模型を設置し、nGの遠心加速度が作用する場で小型模型の挙動を調べる「物理模型実験」の一つの手法である。このため化学的な挙動については原則、対象にしていない（物理式に換算できる現象についてはその限りではない）。

小型・大型、重力場・遠心力場等、ほかの物理模型実験と同様、その直接的な目的は対象で生じる相互作用（土木分野であれば、地盤あるいは地盤と構造物の相互作用など）を観測、解釈、解析することである。

物理模型実験において、模型と実物とを関連づけるために相似則が用いられる。相似則は従来様々な角度から解説されてきた（例えば、[4], [9], [10]）。

基本的に要約すると、

- ・ある現象に影響する独立なパラメータをすべてリストアップし、バッキンガムのΠ定理により関係する無次元量を求め、1つひとつの無次元量が縮尺模型と実物で共通な値を持つように相似率を決定する。
- ・現象を表現する構成関係（微分方程式）を模型と実物で共通に満足するように相似率を決定する。

である[11]。すなわち、単なる幾何学的相似則のみならず、力学的相似則を満足することが求められる。本研究における関連のある物理量について抽出を行い、その静的条件における遠心力場の相似則を表 3.2.1-1 に示す。なお相似則については、Garnier et al.[12]が 15 のカテゴリに分けて現状までの知見および未解決の課題について詳細な整理をしている。詳細はそちらを参照されたい。

表 3.2.1-1 静的場における遠心力場の相似測

物理量	無次元数	相似条件	相似率 (模型/実物)
加速度	a	$\Pi_a =$	n
模型寸法	l	$\Pi_l =$	$1/n$
土密度	ρ	$\Pi_\rho =$	1
土粒子寸法	d	$\Pi_d =$	1
間隙比	e	$\Pi_e =$	1
飽和度	S_r	$\Pi_{S_r} =$	1
液体密度	ρ_l	$\Pi_{\rho_l} = \Pi_\rho =$	1
表面張力	σ_t	$\Pi_{\sigma_t} = \Pi_\rho \Pi_a \Pi_d \Pi_l =$	1
毛管上昇	h_c	$\Pi_{h_c} = \Pi_{\sigma_t} \Pi_\rho^{-1} \Pi_a^{-1} \Pi_d^{-1} =$	$1/n$
粘性	η	$\Pi_\eta = \Pi_\rho \Pi_d \Pi_a^{1/2} \Pi_l^{1/2} =$	1
透水係数	k	$\Pi_k = \Pi_d^2 \Pi_\rho \Pi_a \Pi_\eta^{-1} =$	n
温度	T	$\Pi_T =$	1
土粒子摩擦角	ϕ	$\Pi_\phi =$	1
土粒子強度	σ_c	$\Pi_{\sigma_c} = \Pi_\rho \Pi_a \Pi_l =$	1
粘着力	c	$\Pi_c = \Pi_\rho \Pi_a \Pi_l =$	1
弾性率	E	$\Pi_E = \Pi_\rho \Pi_a \Pi_l =$	1
変位	δ	$\Pi_\delta =$	$1/n$
応力	σ	$\Pi_\sigma = \Pi_\rho \Pi_a \Pi_l =$	1
ひずみ	ε	$\Pi_\varepsilon =$	1
時間 (層流)	t_f	$\Pi_{t_f} = \Pi_l \Pi_k^{-1} =$	$1/n^2$
時間 (クリープ)	t_c	$\Pi_{t_c} =$	1

3.2.2 遠心模型試験の優位点

遠心模型試験の大きな優位点として、

- ①実物と相似な位置において等価な自重応力状態を再現できること。
- ②圧密やダルシー則を満たすような透水現象などの時間を加速して再現できる（実時間換算する）

と時間短縮の効果) こと。

である。

1 つめの自重応力が構造物や地盤におよぼす影響の問題に関しては、自重応力が実物と大きく違う模型実験では、実際の現象をうまく再現することが難しい。例えば、実物の地盤内で直径 10 m のトンネルを施工することは容易ではないが、縮尺を 1/100 にした直径 10 cm の穴を岩石試料に空けることは容易である。これは自重応力が小さい模型だからできることであり、逆に、実際の現場の実応力を小型の模型実験で検証することの難しさを表している。実規模レベルの大型模型実験や現場実験は、場所、時間、経済的な制約によって実施は必ずしも容易ではない。このような問題に関しては、実際に起こり得る事象を小型の模型実験で再現できる遠心模型試験が有効である。遠心模型試験は、縮尺 $1/n$ の模型に遠心加速度 nG を作用させることにより、実物と 1 : 1 対応の応力レベルを模型に発生させることができる。これにより、模型岩盤やオーバーパックの自重応力や水圧のヘッド差の違いなど粒子レベルでの挙動、模型全体での挙動が実現象と模型とで相似性が成立する。

2 つめの時間の加速とは、圧密現象や、ダルシー則が成立するような非常に緩やかな流れの場合において、地盤中を浸透する水の流れなどの現象の時間を模型上で加速して再現する。すなわち遠心場での実験を実現象に換算すると時間短縮の効果が得られる。簡単には、地盤中のゆっくりした水の浸透、圧密、膨潤等のゆっくりとした水の流れで現象が支配されるものについて、 $1/n$ に縮尺した小型模型に nG の遠心加速度を与える。これにより、距離が $1/n$ 、現象の速度(水頭差)が n 倍になるために、時間が $1/n^2$ に縮尺されることになるという、現象の時間を短縮している。なお、対象としている時間依存現象が、1つのプロセス(例えば、沈下、圧密、拡散、熱伝導など)に依存する場合は、重力場模型実験でも現象の観測は可能であるが、2つ以上の現象(例えば、移流・拡散問題)となると時間に関する相似率を合わせるためには、遠心模型は有効な手段となる。ただし、後述するように、全ての時間依存の現象に関する相似率が合うわけではないことに注意が必要である。

3.2.3 遠心模型試験の適用限界

ある実物に対する縮尺模型実験を行うには、モデル化にあたって何らかの近似を行い、幾つかの条件については実物と異なった設定をすることは避けられない。模型地盤には実物にはない実験容器という境界が存在することはその一例である。遠心模型試験においても相似則に関する幾つかの問題に加え、このような実験環境上の問題もある。

相似則が満足されないことが遠心模型試験結果に及ぼす影響を調べるには、**Modeling of prototype** や **Modeling of models** といった手法がとられる。**Modeling of prototype** は遠心模型と対応する実物を比較するものであり、**Modeling of models** は同一寸法の実物に対応する遠心模型試験を異なる縮尺比で行って比較するものである。前者は遠心模型の妥当性を検討する直接的な手法であり、最も信頼がおけるものといえるが、スケールが大きく異なるものを比較するため地盤条件や実験装置等の実験条件を両者で同一とすることが難しいという問題がある。一方、後者は異なる縮尺の遠心模型実験で整合した結果が得られれば、それを外挿して縮尺比=1の実物も整合した結果となることを期待するものである。**Modeling of models** では縮尺比をできるだけ広

い範囲に変化させることが重要である[11]。

遠心模型試験における代表的な問題として、相似則上のいわゆる粒子寸法効果がある。実物の土質材料と同じ強度・変形特性を有する相似粒度材料を得ることは一般的には困難であるため、通常、模型実験では実物と同じ材料が用いられるが、この場合粒子寸法に関する縮尺が模型の縮尺と一致しない。Tatsuoka et al.[13]では0.1~0.5mmの粒径からなる砂地盤模型を用い砂地盤上の帯基礎の支持力実験を重力場、遠心力場で実施した。重力場では基礎幅5~500mm、遠心力場では30mmに対して遠心加速度を変え(10~100G)実験を行った。その結果、同じ長さに対応するそれぞれの基礎幅において支持力係数には明確な差が見られ、寸法効果の影響が見られた。また、基礎幅が1000mm以上の大きな基礎幅ではその差が減少しており、粒子寸法効果が限られた範囲で顕著に現れることも示した。一方で、Kusasabe [14]は帯基礎を含む既往の基礎に関する遠心模型試験の結果をコンパイルし、Modeling of modelsの結果として示した。これによると、遠心加速度20~80G場においていずれの実験結果でも支持力は縮尺に因らず一定で、粒子寸法効果が認められなかった。このように、粒子寸法効果が実験結果に顕著に表れるとする意見や必ずしも顕著に表れないとする意見があり、必ずしも明確になっていないが、基礎のごく周辺で生じるせん断などの局所現象を再現する場合や、対象が土粒子径に比べ十分に大きくない場合には影響が現れる可能性がある[11], [13], [14]。すなわち、生じる局所現象や粒子径が評価対象より十分に小さく、人工材料や岩盤のような緻密な連続体であれば寸法効果は現れにくいと考えられる。

中村・田中 [15]では、電力中央研究所・電気事業連合会 [16]が提案した処分施設を対象に、緩衝材(ベントナイト)とオーバーパックからなる縮尺模型を作成し鋼製容器に封入した上で、模型に注水、30、50、100G場(1/30、1/50、1/100サイズの模型)においてオーバーパックの鉛直変位を計測するModeling of modelsを実施した。その結果、遠心力の大きさに依らず、実物換算変位量がほぼ等しく、沈下傾向が変化する時間がほぼ同じで、沈下の傾向が似通った挙動であったことを示した。このことは、ベントナイトにおいて透水、圧密、膨潤変形に関する相似則が成立することを示している。

このことから、本研究において用いる岩盤、緩衝材、オーバーパックからなるニアフィールド模型についても、同様の相似則が成立することが類推される。

3.2.4 長期挙動評価における遠心模型試験の意義

ニアフィールドで想定される力学的・水理的現象は、岩盤・土と間隙流体からなる二相混合体の挙動と考えることができ、実物と模型が同じ材料であると仮定した場合、遠心力場の相似則を適用したニアフィールド模型を用いた遠心模型試験の最大の意義は時間の加速にある。

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、縮尺模型上で表3.2.1-1で示した物理量に関連して、表3.2.4-1で示す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。

具体的には、実寸法の1/50の模型を遠心力50G場において実験を行えば、地下水の移動や圧密・膨潤にともなう応力や地盤の変形、温度の分布などが実物換算時間の1/2500に短縮されて、15日間の実験で約100年に相当する長期挙動のデータを得たことになる。

一方で、土または岩盤の骨格の粘弾性的な特性に基づく刑事的な変形に関しては一般的には相

似則が成立しないことが知られている。現段階ではクリープひずみ ϵ_c の明確な支配方程式は明らかでないが、例えば、 $\epsilon_c = A \cdot \exp[-(E/\epsilon_c) t]$ で表され（ A ：定数、 E ：ヤング率、 ϵ_c ：クリープ粘性係数、 t ：時間）[17]、実物と模型のヤング率が $E = E_m$ として $t = n^2 t_m$ （添え字の m は模型を表す）が成立し、実物と模型の幾何学的相似点において発生する応力が同じであれば $\eta_c = n^2 \eta_m$ の条件下で成立する。すなわち、実物と模型とで粘性の材料特性の異なる試料で実験を行う必要がある。さらに高温条件下における ϵ_c は常温下に比べその変形量は大きい傾向であることも知られている（例えば[18]）。

本研究においては実物と模型が同じ材料であるとして実験を行うことから、遠心模型試験で得られる結果は「ある小寸法の実物」における挙動として扱う、すなわち、相似則が成立しない現象についての定量的な評価は数値解析など他の手法に頼らざるを得ない。しかし、小寸法の実物ではそうした要因による影響が小さくないと仮定し、ニアフィールドにおける力学的挙動について推定するものである。

表 3.2.4-1 ニアフィールドで生じる主要な現象と関係する物理量

現象	関係する物理量	基礎方程式からみた成立性	実験により証明した事例
地盤の応力と変形	$l, \rho, d, e, Sr, \eta, T, \phi, \sigma_c, c, E, \delta, \sigma, \epsilon$	○	有
地下水の浸潤	$l, e, \rho_l, \sigma_l, h_c, \eta, T, k, \sigma, t_f$	○	有
緩衝材の圧密、膨潤	$l, \rho, d, e, Sr, \rho_l, \sigma_l, h_c, T, \eta, k, \sigma, t_f$	○	有
廃棄体から周辺地盤への熱	T, t_f	○	—
物質移動（移流・拡散）	$l, e, \rho_l, \sigma_l, h_c, T, \eta, k, \sigma, t_f$	○	—
岩盤のクリープ	$l, \rho, d, e, Sr, \eta, T, \phi, \sigma_c, c, E, \delta, \sigma, \epsilon_c, t_c$	要検討	—

3.3 試験設備

本研究における遠心模型試験は、遠心力载荷試験によるオーバーパックの変位量（浮上・沈下挙動）や緩衝材、埋戻し材の膨潤変形挙動、岩盤のひずみの計測と、X線CT撮影による遠心力载荷試験前後の模型の内部構造（オーバーパックの位置や緩衝材の膨出および継目、処分孔内の隙間、岩盤の亀裂の発生の有無等）の変化の把握である。このため、試験手順は、(1) 遠心力载荷試験前の模型のX線CT撮影、(2) 遠心力载荷試験、(3) 遠心力载荷試験後の模型のX線CT撮影、として実施した[7], [8]。本研究で使用する試験装置等について、以下に述べる。

3.3.1 超長期遠心载荷岩盤実験装置

本研究で使用した遠心力载荷装置は、(一財)電力中央研究所所有の超長期遠心载荷岩盤実験装置（日鉄住金レールウェイテクノス社製）で、回転アームが4柱ビーム式（模型搭載側、カウンターウエイト側固定）、総質量約80t、最大有効半径3.2mの装置であり、直径約10mのコンクリートピット内に格納している（図 3.3.1-1）[5]。本装置で付与できる最大遠心加速度は、静的条件で100G（167.2rpm）である。模型を搭載するプラットフォームの面積は、2.64m²（1.60m×1.65m）と同規模の遠心力载荷装置と比較して非常に広く、大型模型が搭載可能である。プラットフォームには最大で150G・ton（100G時に最大1.5ton）積載でき、任意の遠心加速度で着座できる油圧着座方式を採用している。バランス機構は、長期間の運転を考慮し複雑な制御を行わない手動カ

ウンターバランス方式を採用している。中心回転軸には動力用スリップリング(4極、AC200V/60A および 2極、AC100V/60A)、制御用スリップリング(17極)、通信用無線 LAN 機器(2セット)、油圧・水圧・空圧を付与できるロータリージョイント(各2ポート)を設置しており、機外から回転体内部へ電力や油圧等を供給できる。また、圧力容器の応力制御のために、回転軸付近のアーム上面に圧力発生装置(送水ポンプ)を8台搭載している。圧力発生装置の制御および試験データは無線 LAN を通じて計測室内の PC で制御・保存する。

本装置の最大の特徴は、最長6ヶ月間連続運転が出来る仕様である(既存の同規模の遠心力載荷装置は通常数時間~数十時間程度)。また、長期運転を行うことから、装置を格納しているコンクリートピット内は空気抵抗による温度上昇を防止するために大型空調設備による温度一定制御が可能である。加えて本体装置の瞬停対策用電源装置も備えている。

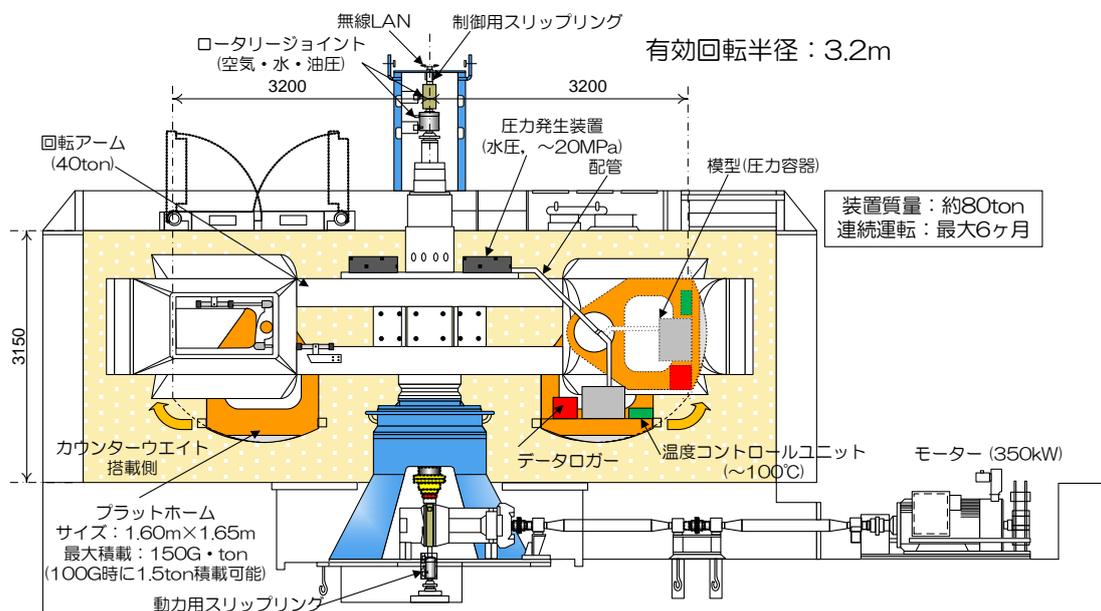


図 3.3.1-1 超長期遠心載荷岩盤実験装置の概略図(上)と装置全景(下)

3.3.2 圧力容器

本研究における遠心力場で実施する長期ニアフィールド模型試験は、地表から地下深部の処分施設までの全体を模型とするのではなく、廃棄体周辺を抽出した模型を使用する。このため、地圧相当の応力は圧力容器[5]による応力負荷で担保する。対象とする施設の深度相当の地圧を付加し、その上で抽出した模型の鉛直方向の応力分布を相似則によって担保した。図 3.3.2-1 に本研究で用いた圧力容器の概略図を示す。圧力容器はジュラルミン製で質量 67.82kg、周圧は水圧、軸圧はピストン構造（下部架台が水圧により作動する）によって負荷させる三軸タイプで、最大 10MPa の等方圧を負荷できる。圧力容器の下端・上端にそれぞれ透水試験用注水・排水口を設けており、模型にメンブレンゴムスリーブ（天然ラテックスゴム、厚さ 2mm）を被覆し止水することによって透水試験が可能である。試験では模型の上部岩盤に上部埋戻し材の鉛直変位量を計測する渦電流式非接触変位計と上部埋戻し材の土圧を計測するひずみゲージ式土圧計を設置した。これらを内蔵したセンサーケースは容器上蓋に剛結されている。土圧計の先端には厚さ約 3mm のシリコンシーラント層を設置しており、軸圧をかけた状態においても、土圧計にかかる応力は 0 となる構造となっている。容器内部下端には耐圧フィードスルーと貫通孔式フィードスルーを設置し、これを通じて模型に貼付されたひずみゲージ、発熱型オーバーパックの熱電対・ヒーターケーブルがプラットホームに設置しているスイッチボックス、データロガーおよび温度コントロールユニットに接続する。

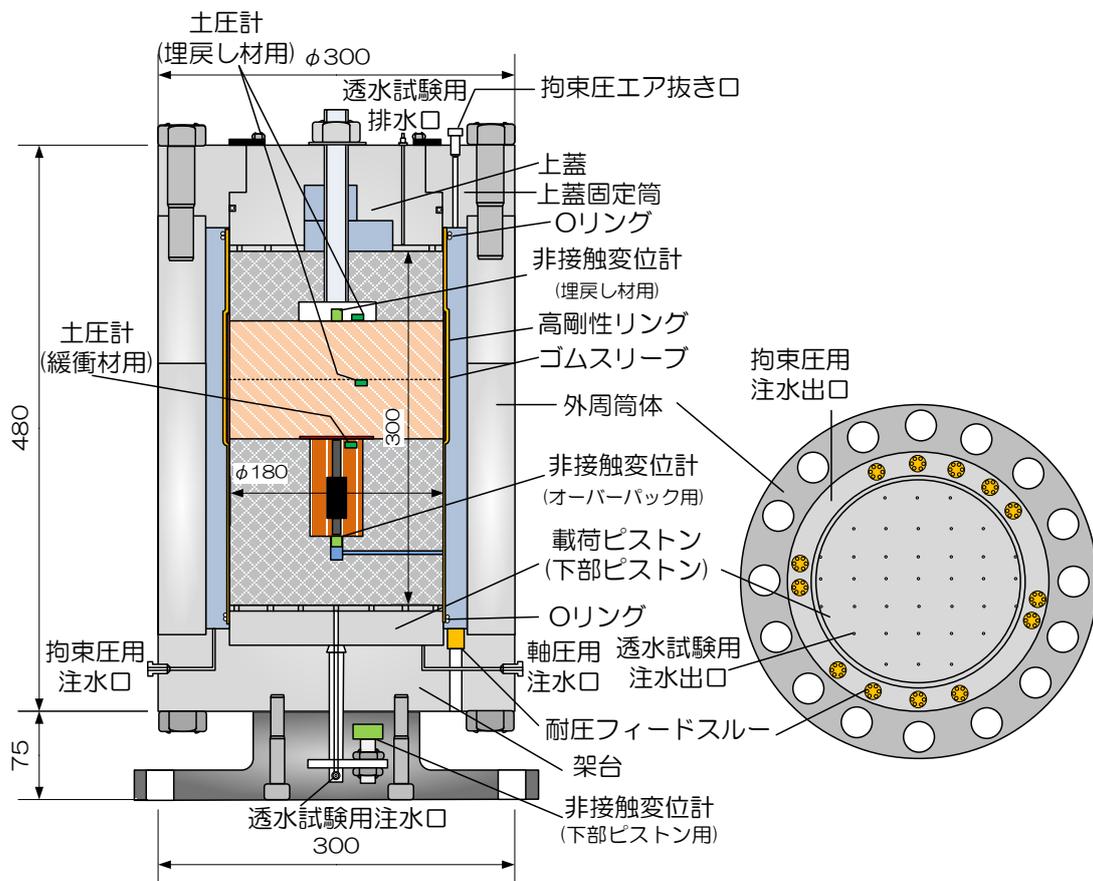


図 3.3.2-1 18cm 円柱用圧力容器の見取図、(左) 立断面、(右)、平断面

3.3.3 X線 CT 装置

X線 CT 撮影は、(一財)電力中央研究所 地球工学研究所所有の寝台が移動し X 線照射源と検出器が対象物の周囲を螺旋状に回転しデータを取得する医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ(東芝メディカルシステムズ社製、Aquilion64 TSX-10 1A)を使用し CT 画像を取得した(図 3.3.3-1)。Aquilion64 は同時に 64 列の断面データを収集でき、空間分解能は最小で 0.35mm である。ガントリー開口径は 72cm で最大撮影領域径は 50cm、最大積載可能質量は 200kg である。撮影時の管電圧は 135keV、撮影時間は試料の大きさにもよるが数秒程度である。



図 3.3.3-1 医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ

3.4 想定した施設および境界条件

3.4.1 想定した施設

本研究で用いるニアフィールド縮尺模型は、HLW 第 2 次取りまとめ[19]の縦置き方式の廃棄体周辺領域を抽出したものである(図 3.4.1-1)。

H29 年度は、H27 度の模型上に 5m 分(模型寸法で 100mm)の上部埋戻し材および上部埋戻し材の上方に位置する岩盤を設置することで、上部埋戻し材の膨潤によって生じる緩衝材の変形特性(膨出)や処分孔周辺岩盤の変形などがオーバーパックの変位に与える影響や、その時の緩衝材、下部埋戻し材、上部埋戻し材に発生する応力の発現状況、加えて、緩衝材の膨出状態の把握を目的としている。試験条件のイメージを図 3.4.1-2 に示す。模型は、オーバーパック、緩衝材、処分孔サイズ、坑道の 1/50 の大きさで、廃棄体 1 体、処分孔 1 孔および緩衝材、埋戻し材、周辺岩盤から構成される縮尺模型である(図 3.4.1-3)。なお本研究で述べる「供試体」とは整形された緩衝材、下部埋戻し材および上部埋戻し材、岩盤試料そのものを指し、「模型」とはオーバーパック、緩衝材供試体を下部岩盤供試体に削孔された孔に封入し、その上方に上部埋戻し材、トンネル天板に相当する岩盤を設置した状態の試験試料全体を指す。

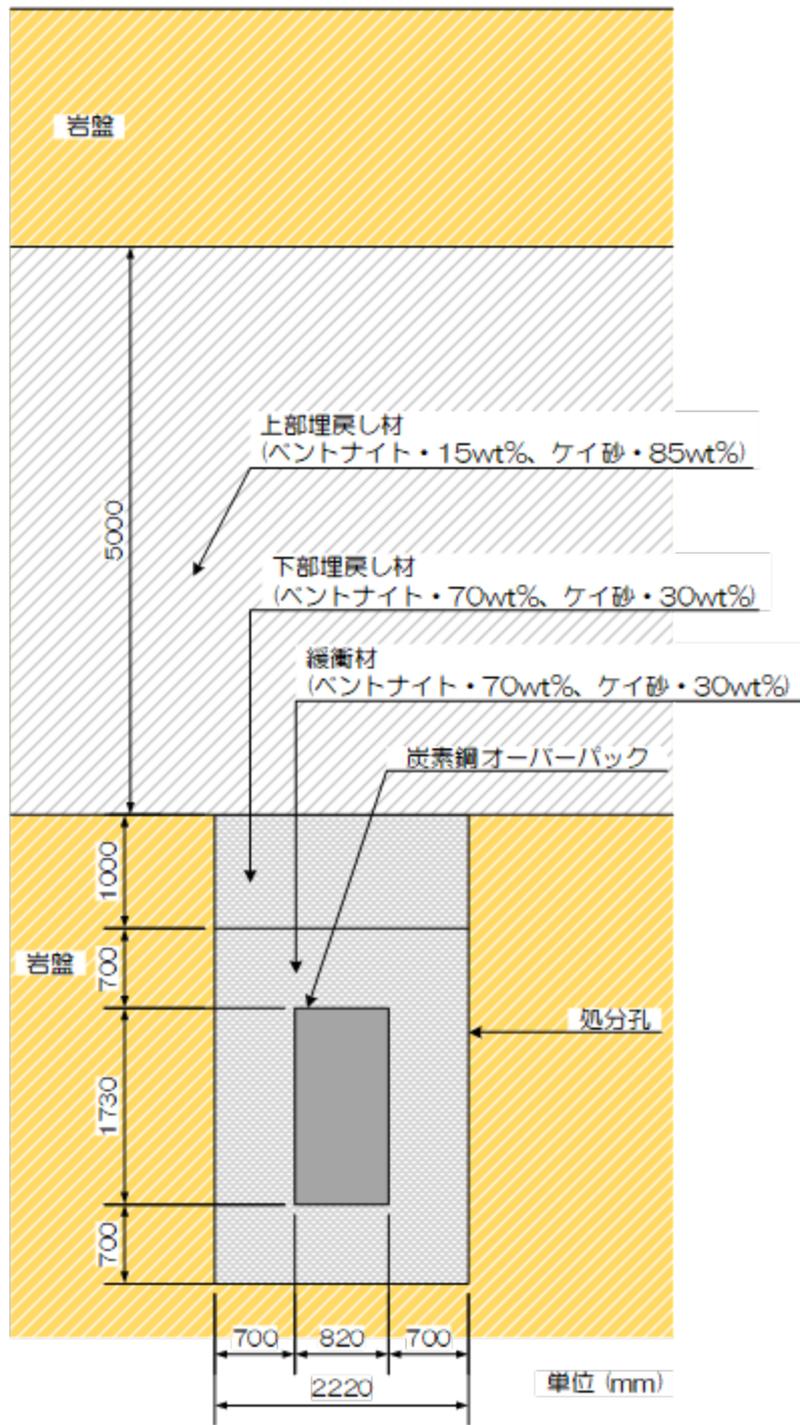


図 3.4.1-1 対象とした処分施設の概要[19]

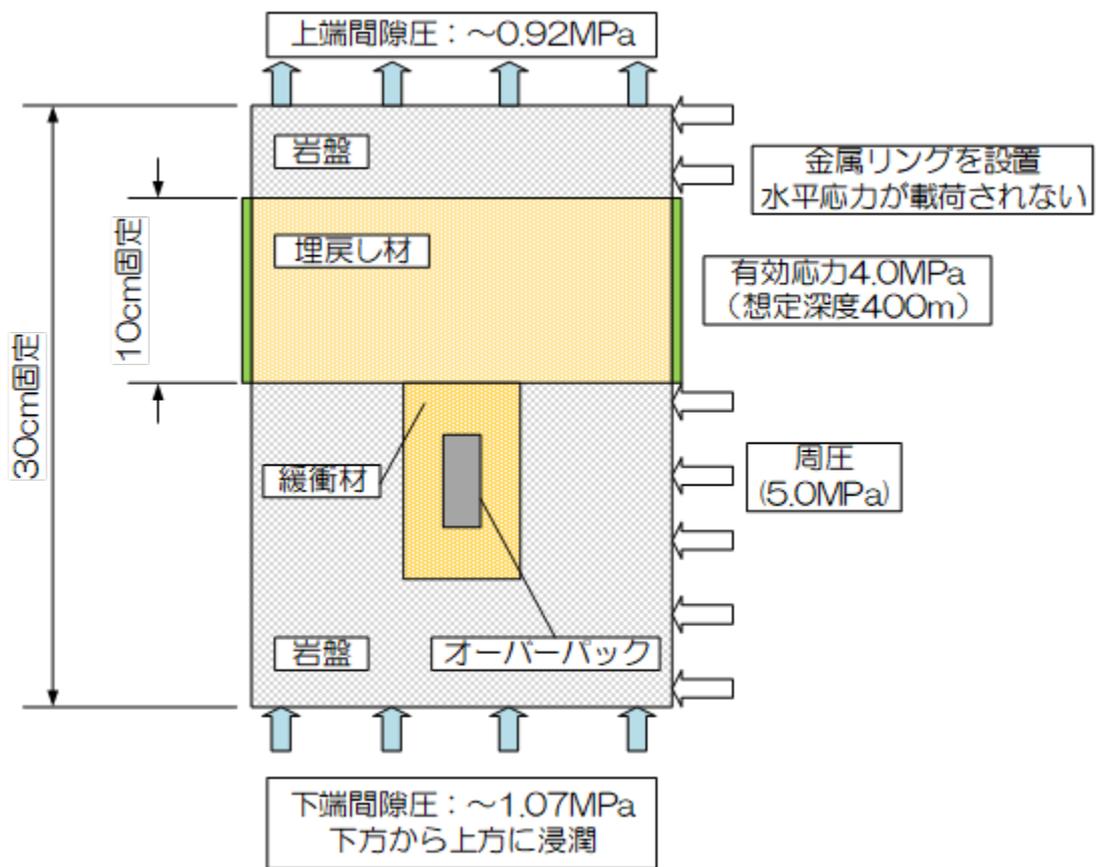
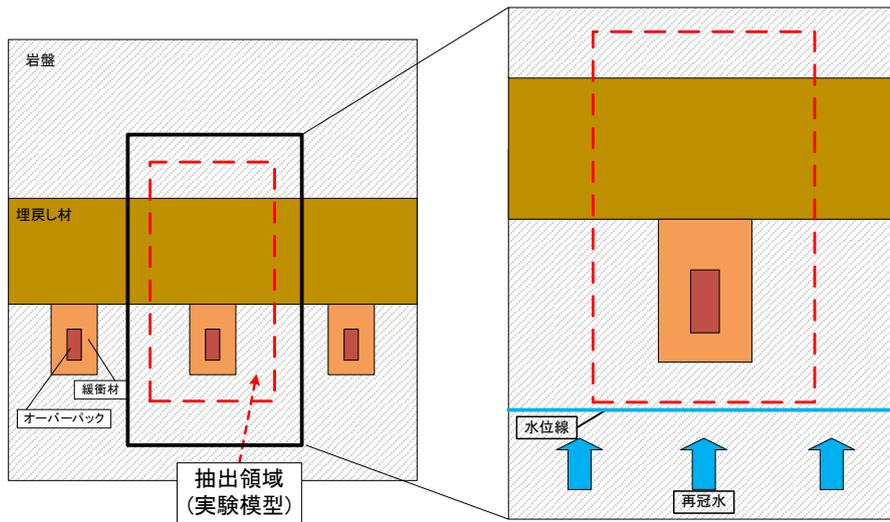


図 3.4.1-2 試験条件のイメージ図

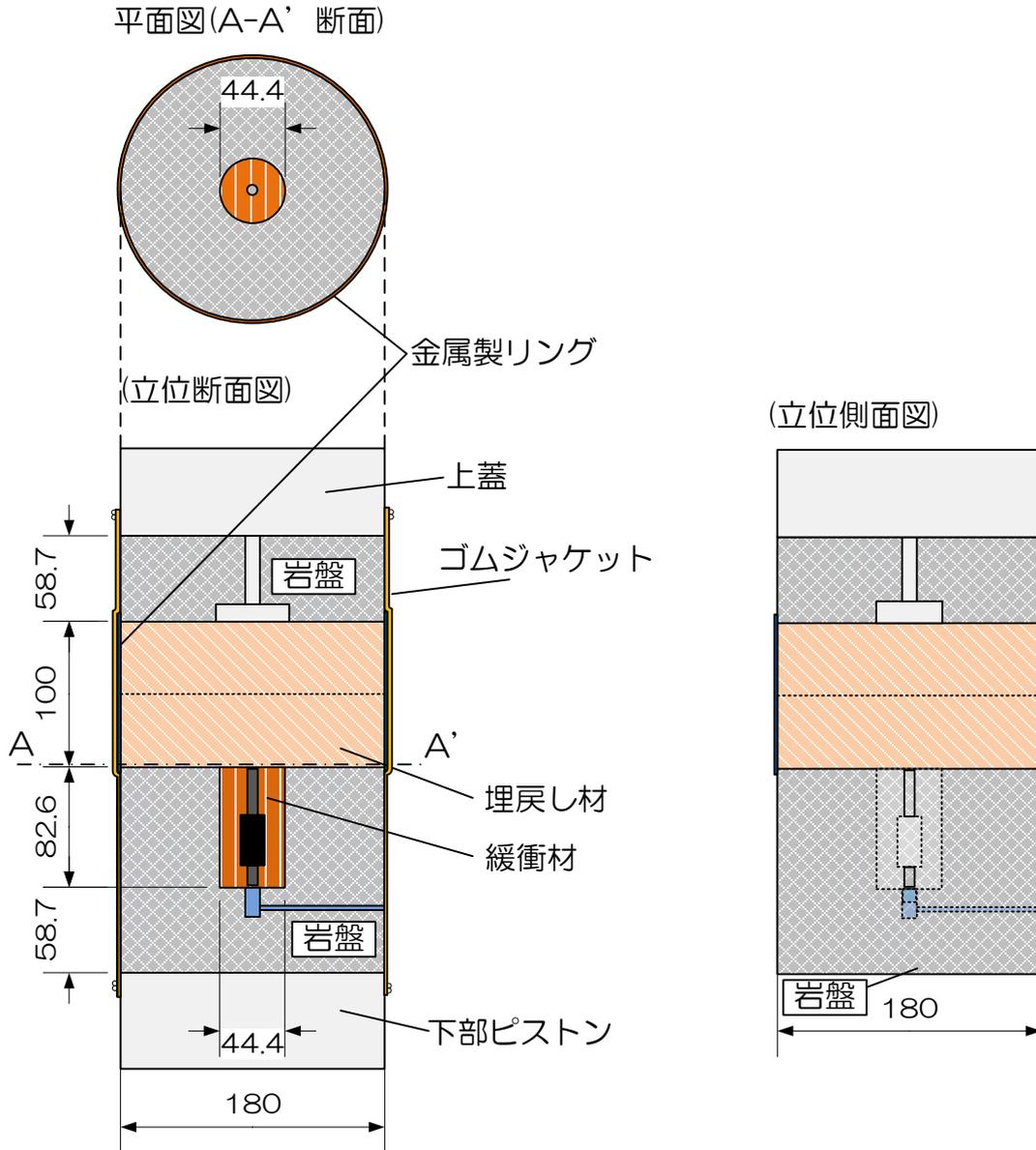


図 3.4.1-3 1/50 縮尺模型

3.4.2 境界条件

試験条件は、遠心加速度 50G 場において、模型処分孔の上端面を深度 400m 相当とした。前年度までの境界条件と合わせるため、模型処分孔の上端面では飽和後の深度 400m 相当の有効応力である 4.0MPa を満たすように周方向の拘束圧条件を決定した。処分坑道は坑道建設時に掘削され応力解放された後、トンネル壁面に応力再配分が生じる。また、閉鎖後も坑道内の埋戻し材（上部埋戻し材）の膨潤等による変形は、しばらくの間生じないと考えられる。また坑閉鎖後の初期には上部埋戻し材とトンネルの間には完全には密着しておらず、この隙間が膨潤により充填されるまでには時間がかかる。特に水平方向に地圧が作用するまでには相当の時間がかかると考えられる。従って、本試験では上部埋戻し材には周応力が作用しないように金属のリングを設置した（図 3.4.1-3）（詳細は、3.5.1 項（4））。また、上記の理由により試験条件として、間隙水圧が所定の圧

まで上昇し一定となった後は膜型の軸方向（高さ）を一定とする制御とした。

試験条件は、試験開始時は周圧 5.0MPa、軸圧 1.17MPa とした。処分孔上端面から模型下面までの距離が実物換算で 7.065m であるため、処分孔上端面の間隙水圧を 1.0MPa とするには模型下面からの間隙水圧（下端間隙水圧）を 1.07MPa とする必要がある。そのため、模型下面から負荷・注入する間隙水圧（下端圧という）は 0MPa から 1.07MPa まで 0.03MPa/min の速度で昇圧し、1.07MPa になると同時に一定圧力制御とした。また模型上端面の間隙水圧（上端間隙水圧、排水圧、背圧に相当）は試験開始時では 0MPa としており、模型下面からの間隙水の浸潤に伴い 0MPa から徐々に上昇する。処分孔上端面から模型上端面までの距離は実物換算で 7.935m であり、処分孔上端面での間隙水圧を 1.0MPa とするには、上端間隙水圧（上端圧という）が 0.92MPa である必要がある。そのため本試験での上端圧の制御は、初期は制御を実施せず、0.92MPa まで達した後は 0.92MPa の一定圧力制御とした。以上により、周圧 5.0MPa、下端圧 1.07MPa、上端圧 0.92MPa とすることにより、飽和後の処分孔上端面における周方向の有効応力が 4.0MPa となる。軸方向に関しては、下端圧が 1.07MPa 一定となった時点で模型の高さを一定とする制御とした。実際の圧力制御の経時変化を図 3.4.2-1 に示す。なお、一時的に各圧力（载荷応力）が低下している箇所があるが、これは圧力発生装置の給排水のために行ったバルブの開閉操作によって生じたものである。

オーバーパックの温度は HLW 第 2 次取りまとめの処分孔縦置き方式・隙間モデルの CASE.A（ガラス固化体－オーバーパック間、オーバーパック－緩衝材間、緩衝材－岩盤間の隙間の充填物が空気）の C_{xin} の経時変化を参照し、図 3.4.2-2 内の黒線（制御値）で示す温度変化に近くなるように昇温過程を設定し、制御を実施した。岩盤の境界温度は、実験室の常温（25℃）を地上の平均気温と仮定し、平均的な地温勾配（2℃/100m）[21]から深度 400m に相当する 33℃一定に設定した。

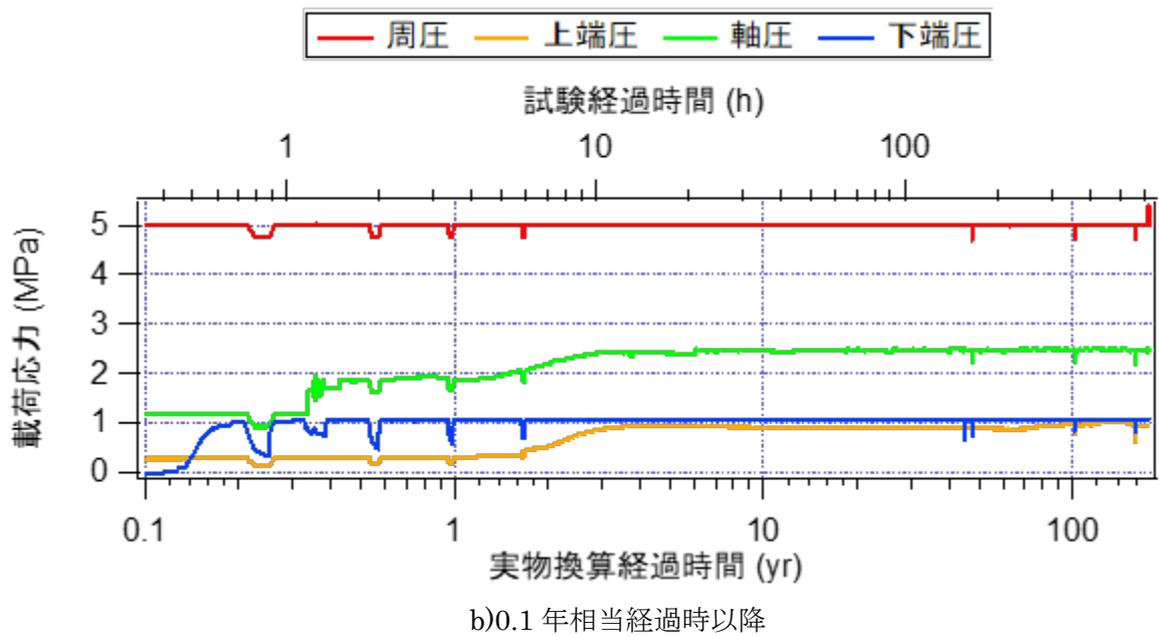
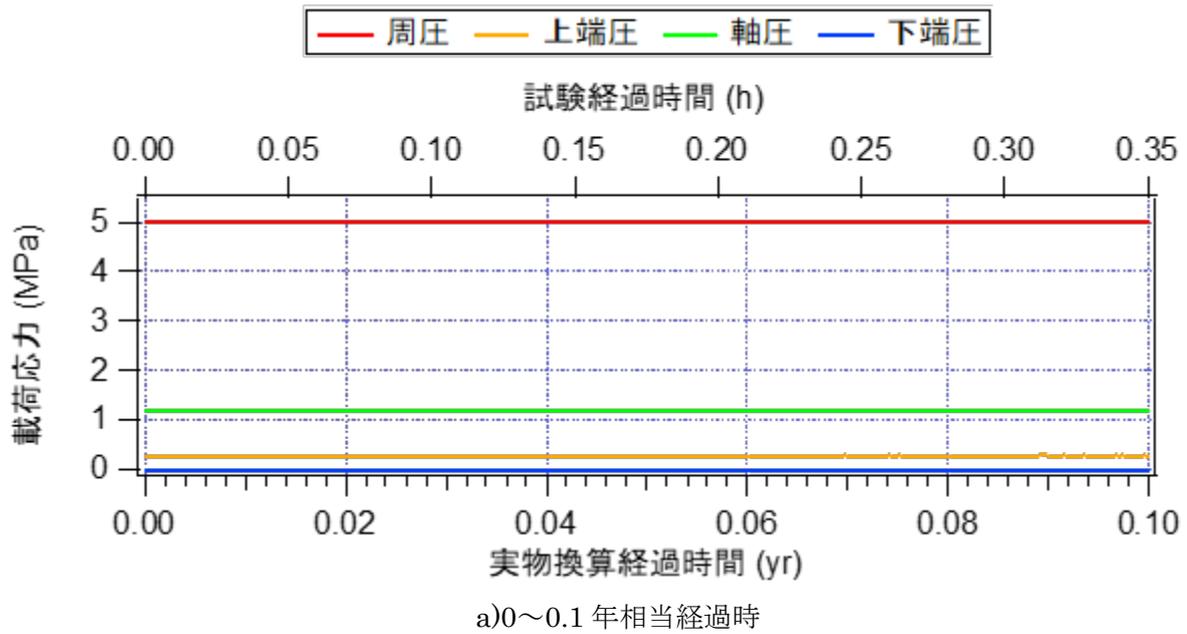
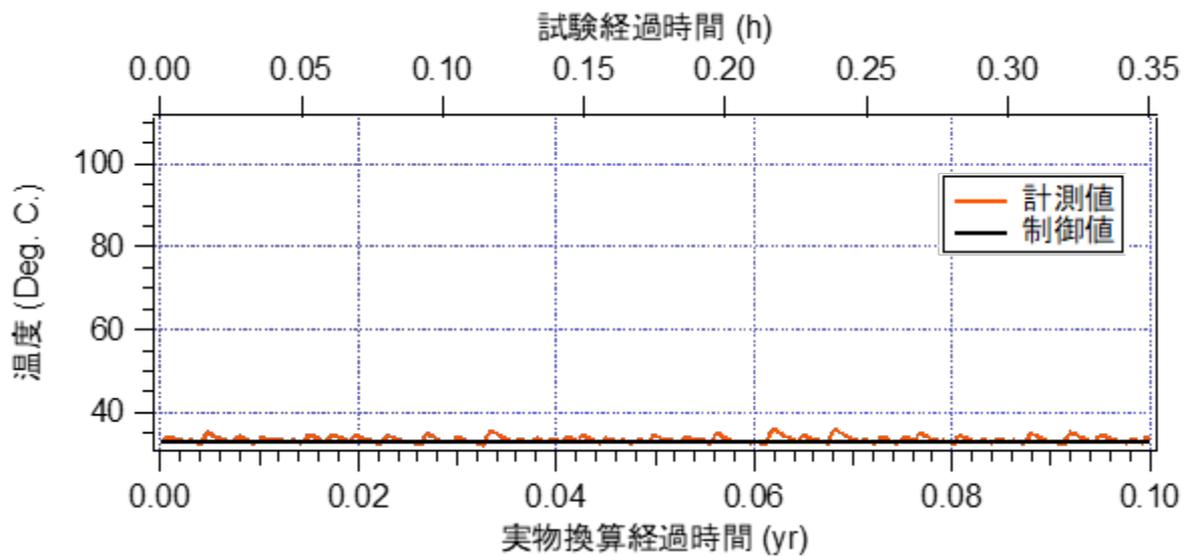
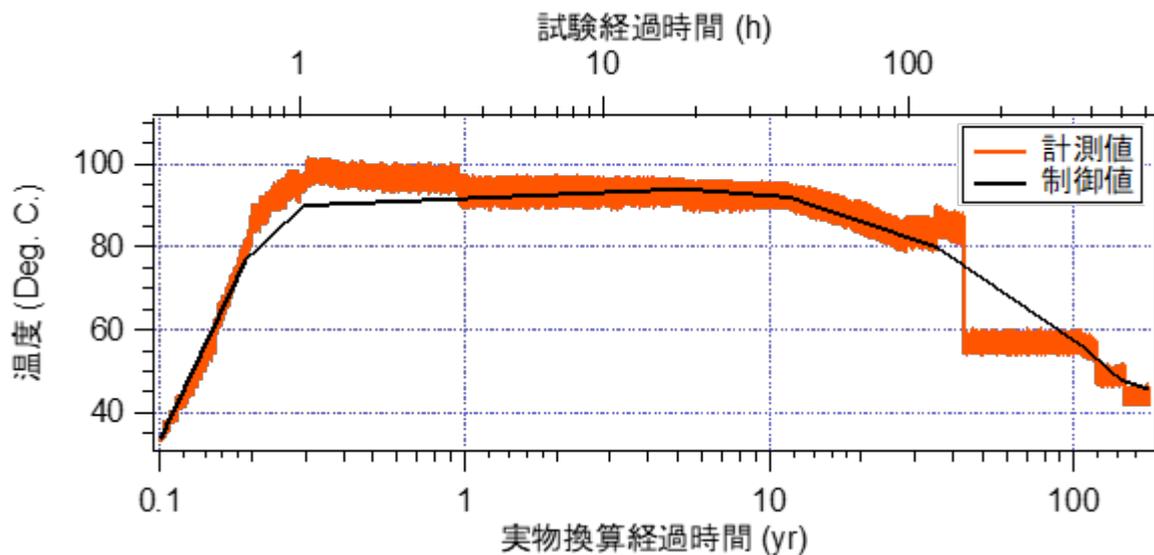


図 3.4.2-1 载荷圧力の経時変化



a)0~0.1年相当経過時



b)0.1年相当経過時以降

図 3.4.2-2 オーバーパックの温度制御

3.5 遠心模型試験

3.5.1 模型の作製

H29年度の模型は、オーバーパック、緩衝材および下部埋戻し材、処分孔が削孔された岩盤（下部岩盤という）、上部埋戻し材、上部埋戻し材の上方に設置する岩盤（トンネル天板に相当、上部岩盤という）から構成される。以下にその寸法、仕様、作製状況などの詳細を述べる。

(1) 模擬オーバーパック

オーバーパック模型は直径 16.4mm、高さ 57.67mm である（図 3.5.1-1）。密度は実物のオー

オーバーパックとガラス固化体を合わせた全密度と同じ 6.35Mg/m^3 である[19]。オーバーパックの材質はステンレス鋼とし、加温させるために、オーバーパック内部には、1 個の小型カートリッジヒーター、熱電対を封入し、隙間はエポキシ樹脂で充填している。これらを併せて上記密度となるようにステンレス鋼を質量調整し、オーバーパック模型を作製した。写真中のオーバーパック管体の上下にある突起物について、ヒーターケーブルと熱電対の取り出し用の芯棒および非接触なお変位計のターゲット用の芯棒である。なお、ステンレス鋼を使用した理由として、本試験ではオーバーパックの腐食を考慮しないためである。下記に各材料の詳細を示す。

- ・カートリッジヒーター

WATLOW 社製、FIREROD、C1A-7779、1/8 インチ×1 インチ 120V50W の出力のもので図 3.5.1 1 のとおりに中心部に 1 個配置した。本試験では、電圧 100V で使用するため、出力は $50\text{W} \times 100\text{V} / 120\text{V} = 41.7\text{W}$ となっている。

- ・熱電対

チノー社製、フッ素樹脂被膜熱電対 JK3 (K 型熱電対、直径 0.32mm、クラス 1)、常用限界温度は 200°C 、最高限度温度は 250°C で芯線の被覆にフッ素樹脂を使用した。

- ・隙間充填剤

共和電業社製、EP-34B、常温硬化するエポキシ系 2 液混合タイプの接着剤で、使用温度範囲は $-55^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ である。

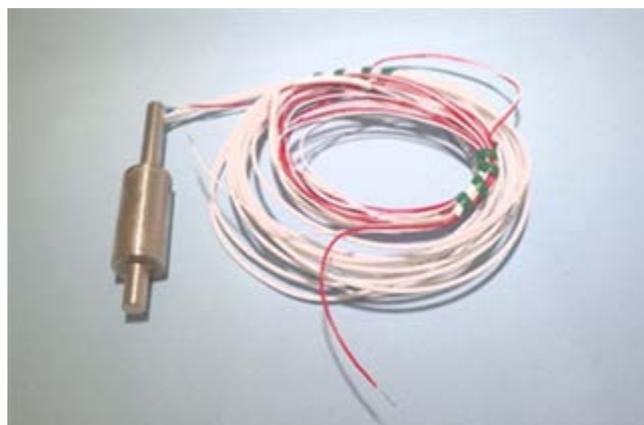
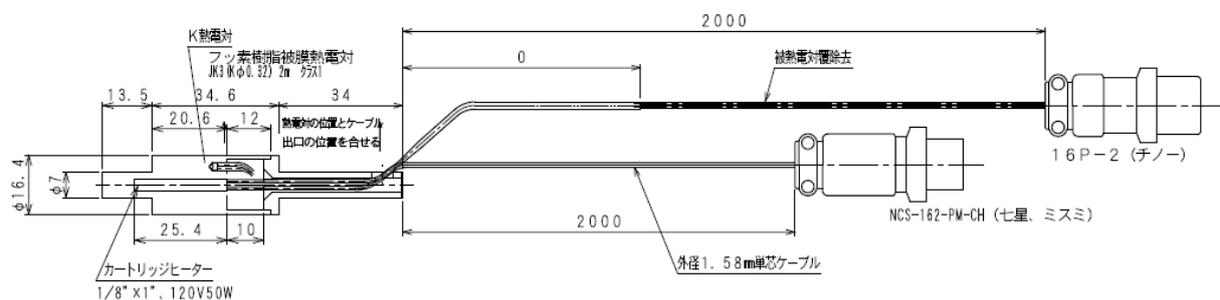


図 3.5.1-1 オーバーパックの概要図 (上) と実際の模型 (下)

(2) 緩衝材および下部埋戻し材

緩衝材は直径 44mm、高さ 62.6mm、下部埋戻し材は直径 44mm、高さ 20mm である。本研究では、緩衝材および下部埋戻し材は同じ材料とした。

材料にはベントナイト（クニミネ工業製、クニゲル V1）とケイ砂（愛知県八草産、乾燥ケイ砂 3号とケイ砂 5号を等量混合）を 7対3[19], [23]で混合した物を、緩衝材圧縮用モールドを用いて緩衝材を作製した。下記に作製方法を示す。

緩衝材および下部埋戻し材は、岩盤供試体の孔壁と緩衝材および下部埋戻し材供試体外周までの隙間を考慮し、膨潤後平均乾燥密度を 1.60Mg/m^3 [19], [23]となるように初期乾燥密度を設定しクニゲル V1 とケイ砂の量を調整した。緩衝材および下部埋戻し材ブロックは 5個に分割している（図 3.5.1-2）。図中の断面図内の①～②の位置に模擬オーバーパックの熱電対とヒーターのケーブルを収納した柱を③～④の位置には模擬オーバーパックを、⑤の位置に非接触式変位計用のターゲットの柱を静置する。

クニゲル V1 は、含水比が 13.67%であり、ケイ砂は含水比 1.0%である。また、ケイ砂は 1mmふるいを通したもののみを抽出し使用している。昨年度までの 1/30 模型では 2mmふるいを通したケイ砂を使用した処分孔の直径に対するケイ砂の最大径の割合が 2.7%であった。1/50 模型の処分孔の直径が 44.4mm であり、2mmふるい通過のケイ砂を使用するとその割合が 4.5%となってしまう。そのため前年度までの割合と近い 1mmふるいを通したケイ砂（2.25%）を使用した。各緩衝材試料に必要なクニゲル V1 とケイ砂の質量を表 3.5.1-1 に示す。必要なクニゲル V1 とケイ砂の質量を計量し、金属製のボウルにクニゲル V1 とケイ砂を投入し、葉さじを用いて均質になるまで混合する。混合の時間は 2～3 分である。

下部加圧板を設置したモールドはあらかじめ加圧板にテフロンシートを貼付しており、モールド内部にはシリコンスプレーで塗膜を形成してある。混合したクニゲル V1 とケイ砂をモールドに投入し（図 3.5.1-3）、表面が平坦になるように調整する。クニゲル V1 とケイ砂を投入したモールドに上部加圧板を静置し、緩衝材締め機（誠研舎社製、DAM-149）に設置する（図 3.5.1-4、左）。緩衝材および下部埋戻し材の作製には 10kN の荷重で載荷する必要がある。圧縮荷重は東京測器研究所社製、TC-31M を用いて計測した。緩衝材および下部埋戻し材ブロックの圧縮完了には 20 分以上必要である。

圧縮の終了したブロックは、下部加圧板とモールドを固定している板を取り外し、緩衝材および下部埋戻し材を取り出した。作製した緩衝材および下部埋戻し材ブロックの諸元を表 3.5.1-2 に作製された緩衝材および下部埋戻し材を図 3.5.1-5 に示す。

作製した緩衝材および下部埋戻し材ブロックのうち①、②に関しては、オーバーパック模型のヒーターおよび熱電対のケーブルを通すため、3mm 程度孔を大きくする追加工をした。

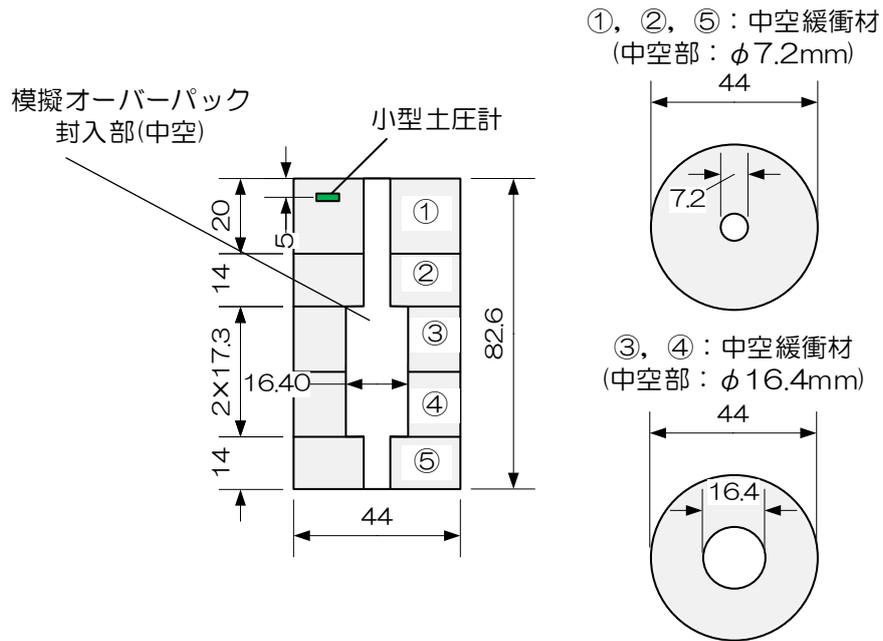


図 3.5.1-2 緩衝材および下部埋戻し材ブロックの断面図、平面図および分割状況

表 3.5.1-1 緩衝材および下部埋戻し材ブロック作製に必要なクニゲル V1 とケイ砂の質量

No	試料の質量 (g)			必要高さ (mm)
	クニゲル V1	ケイ砂	合計	
①	37.68	14.39	52.07	20.0
②	26.38	10.07	36.45	14.0
③	28.84	11.01	39.85	17.3
④	28.84	11.01	39.85	17.1
⑤	26.38	10.07	36.45	14.0



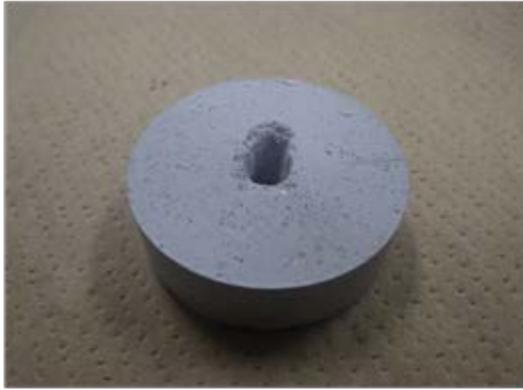
図 3.5.1-3 緩衝材・下部埋戻し材試料（クニゲル V1、70wt%、混合ケイ砂 30wt%）投入状況



図 3.5.1-4 緩衝材および下部埋戻し材締め機

表 3.5.1-2 作製した緩衝材および下部埋戻し材ブロックの諸元

	質量 (g)	平均高さ (mm)	初期含水比 (%)	初期密度 (Mg/m ³)	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	膨潤後乾燥密度 (Mg/m ³)
①	52.33	20.03	9.94	1.87	1.70	1.61
②	36.52	14.07	9.94	1.86	1.69	1.60
③	39.78	17.21	9.94	1.89	1.72	1.61
④	40.00	17.40	9.94	1.88	1.71	1.60
⑤	36.45	14.06	9.94	1.86	1.69	1.60



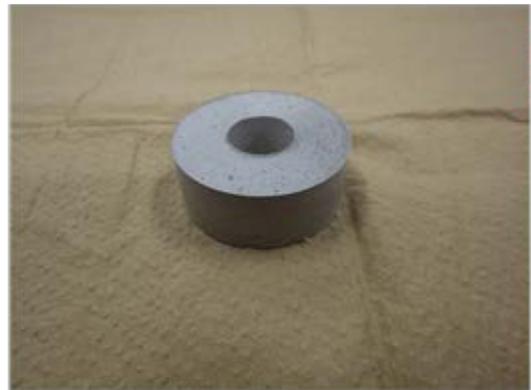
①中空下部埋戻し材(中空部 ϕ 7.2mm)



②中空緩衝材(中空部 ϕ 7.2mm)



③中空緩衝材(中空部 ϕ 16.4mm)



④中空緩衝材(中空部 ϕ 16.4mm)



⑤中空緩衝材(中空部 ϕ 7.2mm)

図 3.5.1-5 作製した緩衝材および下部埋戻し材ブロック一覧

(3) 岩盤供試体

本試験では初声凝灰岩を使用し、直径 180mm×高さ 141.3mm の円柱状に整形した岩盤試料に模擬処分孔を削孔した下部岩盤と、直径 180mm×高さ 58.7mm の円柱状に整形した岩盤試料に上部埋戻し材の変位と応力を計測するためのセンサーケースが設置できるように掘削した上部岩盤から成る（センサーケースは上部岩盤の吊り治具も兼ねる）。岩盤供試体の概略図を図 3.5.1-6 に示す。

・下部岩盤の整形

切断機に岩盤試料を設置し、岩盤試料の上下面を湿式で切断する。この際、岩盤試料の高さが 145mm 程度になるように切断面を設定する。岩盤試料の上下面を切断した後、端面整形機を用いて端面整形を実施する。岩盤試料の高さは $141.3 \pm 0.3\text{mm}$ 以下となっている。その後供試体を処分孔掘削機に設置し、固定する。直径 44mm のドリルを取り付け、岩盤試料中央にドリルがくするように位置を調整し、岩盤試料上端部から 82.6mm のところまで掘削する。

オーバーパック設置用孔は処分孔を掘削した後にドリルのヘッドを直径 10mm の物と交換し、15mm 掘削する。ノギスで 4 点深さを計測し、 $82.6\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$ であることを確認して模擬処分孔の作製を完了した（図 3.5.1-7 左側）。

・上部岩盤の整形

切断機に岩盤試料を設置し、岩盤試料の上下面を湿式で切断する。この際、岩盤試料の高さが 60mm 程度になるように切断面を設定する。岩盤試料の上下面を切断した後、端面整形機を用いて端面整形を実施する。岩盤試料の高さは $58.7 \pm 0.3\text{mm}$ 以下となっている。その後、上部岩盤試料をコアドリルに固定し、中心に直径 29mm の貫通孔を掘削する。直径 47mm の座繰り部分（センサーケース部）は、処分孔掘削機を使用し直径 44mm のドリルで 7mm 座繰りを掘削する。座繰りの不足径分は小型リューターを使用し研削することで直径 47mm の座繰り部の作製を完了した（図 3.5.1-7 右側）。

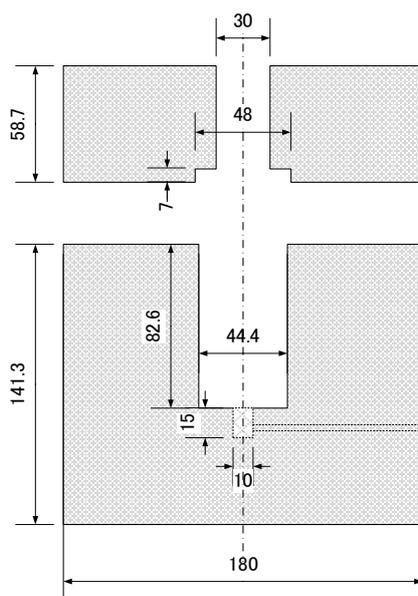


図 3.5.1-6 岩盤供試体の概略断面図

◎下部岩盤部作製方法

①岩盤試料切断



②平面研削



③模擬処分孔の掘削



④下部岩盤供試体



◎上部岩盤部作製方法

①岩盤試料切断



②平面研削



③貫通孔の掘削



④座繰り部の掘削



⑤上部岩盤供試体



図 3.5.1-7 岩盤試料の整形状況

(4) 上部埋戻し材

上部埋戻し材は直径 180mm、高さ 100mm である。材料にはベントナイト(クニミネ工業社製、クニゲル V1) とケイ砂(愛知県八草産、乾燥ケイ砂 3号とケイ砂 5号を等量混合) を 15対 85で混合した物を、治具を用いて上部埋戻し材を作製した。上部埋戻し材の作製方法を以下に示す。

上部埋戻し材は初期乾燥密度が 1.8Mg/m^3 以上になるように設定し、クニゲル V1 とケイ砂の量を計量した。クニゲル V1 は、含水比が 13.67%であり、ケイ砂は含水比 1.0%である。また、ケイ砂のうち 3号は 1mm ふるいを通過したもののみを抽出し、使用している。

所定量のクニゲル V1 とケイ砂を計量し、含水比調整のため、ケイ砂に所定量の加水を実施する。含水比調整を実施したケイ砂にクニゲル V1 を投入し、スコップを使用して攪拌を行う。また上部埋戻し材は、ベントナイトの量が少ないため、作製時にケイ砂に加水を実施し混合を行った。攪拌時間は 5分とした。

上部埋戻し材用圧縮容器(図 3.5.1-8) の下部加圧版に高剛性リング(図 3.5.1-9) を設置し、分割モールドを組み立てた。モールド側壁にはシリコンスプレーを塗布し全試料の半分の試料を投入し、表面を均等になるように調整した。試料を投入したモールドに上部加圧版を静置し(図 3.5.1-10)、緩衝材および下部埋戻し材締固め機(誠研舎社製、DAM-149) に設置した。その後、所定の高さになるように 120kN 程度の荷重を加え締固めを実施した。上部埋戻し材を作製するには、締固め後に所定の高さとなるように土圧計および水位センサーを埋め込んで整形する方法が考えられるが、120kN 程度の载荷を実施するため、中間部(50mm) に設置する土圧計(容量 3MPa、直径 6mm) が破損してしまう。そのため、上部埋戻し材は 50mm 厚のものを 2個作製し、下方の埋戻し材に土圧計および水位センサーを設置した後に上方の埋戻し材を設置した。

圧縮が終了した埋戻し材をモールドより取り外し、高さおよび質量の計測を実施した。計測結果を表 3.5.1-3 に示す。

下方の上部埋戻し材には土圧計と水位センサーを設置した(上部埋戻し材全体の中間位置)。加工状況を図 3.5.1-11 に示す。土圧計と水位センサーを設置した後に上方の上部埋戻し材をはめ込み、隙間にはシリコングリスを注入した。また、埋戻し材の鉛直変位計測用の非接触式変位計のターゲットを上端部中央に 3mm 座繰り設置した(図 3.5.1-12)。



図 3.5.1-8 上部埋戻し材用圧縮容器

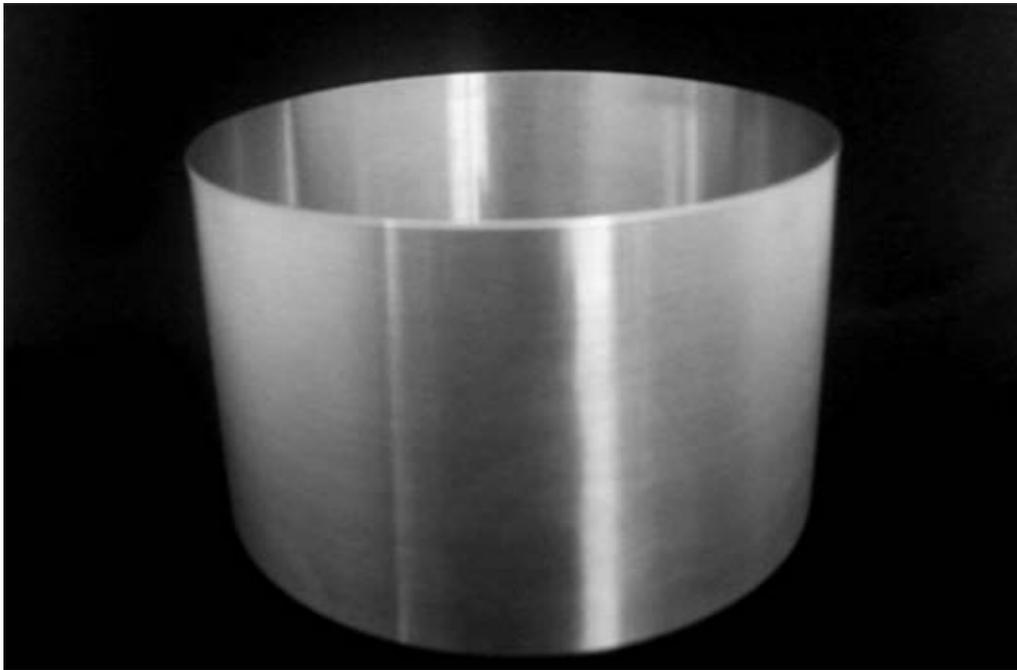


図 3.5.1-9 高剛性リング



図 3.5.1-10 上部埋戻し材圧縮状況

表 3.5.1-3 作製した上部埋戻し材の諸元

	高さ (mm)	平均高さ (mm)	重量 (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (Mg/m ³)	乾燥密度 (Mg/m ³)
上部埋戻し 材 (上方)	50.01	50.01	2473.11	7.95	1.95	1.81
	50.02					
	50.00					
上部埋戻し 材 (下方)	50.01	50.01	2473.63	7.83	1.94	1.80
	50.01					
	50.00					



図 3.5.1-11 土圧計および水位センサー設置状況



図 3.5.1-12 非接触変位計用ターゲット設置状況

(5) 膨出センサー

緩衝材および下部埋戻し材の膨出挙動を把握するために、処分孔上端部に膨出センサーを設置した（図 3.5.1-13）。膨出センサーはリン青銅板（幅 5mm、長さ 80mm、厚さ 0.1mm、材料：C5191）を母材としており、5 枚のひずみゲージ（東京測器研究所社製、FLG-02-11）をリン青銅板長手方向のひずみ（片面）が計測できるよう貼付してある。ゲージのうち 1 枚（5 枚並びの中心）は測温機能付ひずみゲージ（東京測器研究所社製、QFLA-2T-11-6FB-3LT）であり、温度が計測できる。防水のために 1 次コーティングとしてハマタイトを塗布、熱収縮チューブを被せ、内部に共和電業社製、C-5 を充填し収縮することで防水性を確保した。センサー端部の一方には、ピン支点として固定するための固定穴（直径 1.5mm）を設けた。



図 3.5.1-13 膨出センサー

(6) 水位センサー

ニアフィールドにおける間隙水の浸潤過程は、緩衝材および埋戻し材の膨潤挙動に強く影響を及ぼすため、これを把握することは非常に重要である。このため、模型の下部岩盤および上部埋戻し材に水位センサーを設置した。水位センサーは、幅 5mm、長さ 10mm、厚さ 0.2mm のステンレス板を電線で接着したセンサーで（図 3.5.1-14）、2 枚 1 組として設置し、コントローラに接続する。設置位置まで水位が到達するとセンサー間が短絡し、コントローラ内の回路によって電圧 6V を出力する。センサーの感度は、岩盤内の水位がセンサー部に到達した時点で電圧を出力することを模擬するため、飽和砂地盤に水位センサーを設置し、電圧が安定して 6V 出力する最低の感度に調節した。

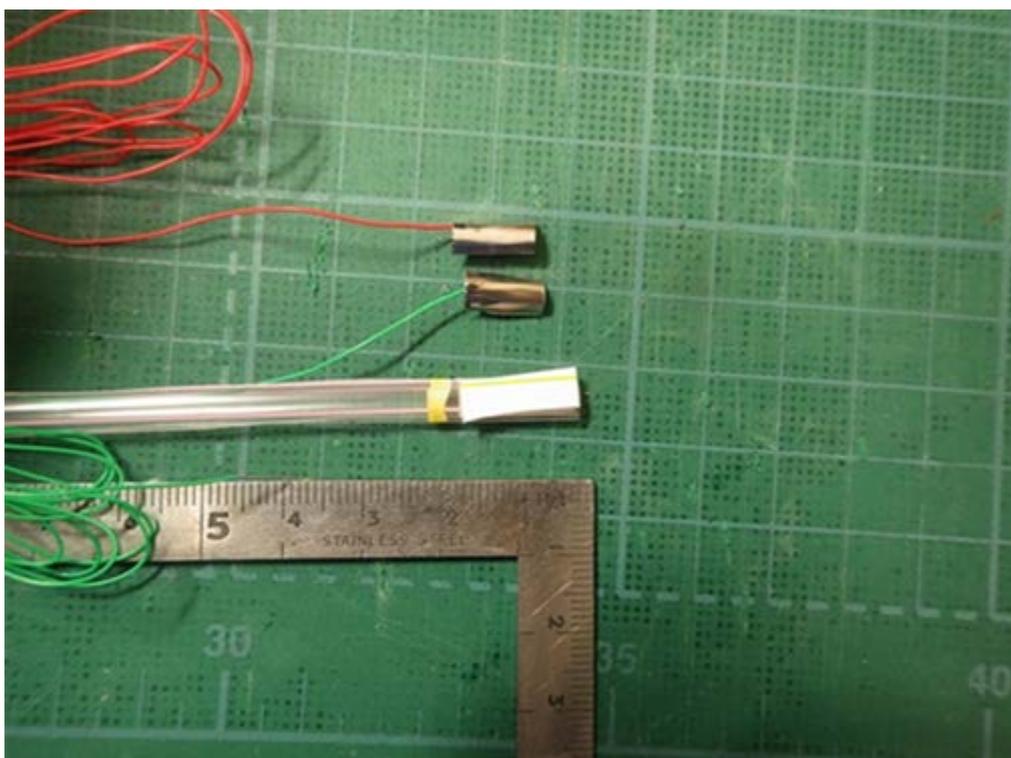


図 3.5.1-14 水位センサー

(7) 遠心模型試験用模型の準備

岩盤供試体を 50℃に設定した東洋製作所社製、ADVANTEC DRK632DB 送風定温乾燥機 (図 3.5.1-15) にて1週間乾燥を実施した。乾燥状態になった岩盤供試体にひずみゲージ貼付部のマーキングを行った (図 3.5.1-16)。使用したひずみゲージは、測温機能付きひずみゲージである東京測器研究所社製、QFLA-5T-11-6FB-3LT (図 3.5.1-17 下) が14枚である。後に実施する被覆のため、各ひずみゲージのナンバリングを行った。

処分孔内にゲージを貼付するため、ゲージ貼付位置を電動ペンリユーターで深さ 2mm になるように研削した。この際、ひずみゲージのリード線が岩盤にかかる部分と後に設置するオーバーパック模型のヒーターケーブルと熱電対、土圧計のリード線取出し用の溝、膨出センサー設置のための溝も併せて掘削した (図 3.5.1-18)。ひずみゲージを貼付する箇所にアラタイトラピッド (NICHIBAN 社製) を使用して厚さ 1mm の下地を作製した。下地剤が乾燥するのを待ち、ひずみゲージを CN 瞬間接着剤 (東京測器研究所社製) で貼付した (図 3.5.1-19)。ひずみゲージを貼付した後、1次コーティングとして KE-45-TS (信越化学工業社製) をゲージ部とひずみゲージのリード線の芯線露出部に塗布した。また、処分孔内ゲージ貼付部に関しては、ひずみゲージのリード線も先に掘削した溝に埋める必要があるため、測温機能付きひずみゲージのリード線 (FEP 被覆線) に表面処理剤 (潤工社製、テトラエッチ B) を塗布し、20秒放置後、スプレー式洗浄剤 (呉工業社製、パーツクリーナー) にて余分なテトラエッチ B を除去する下処理をして KE-45-TS を使用して溝に埋めた。1次コーティングの乾燥後、2次コーティングとして TSE-3843-W (モメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ・ジャパン合同会社製) を塗布した (図 3.5.1-20)。

本試験では、模型内の水位を確認するために水位センサー (図 3.5.1-21) を4カ所に設置した。

下部岩盤供試体の上端部から深さ 82.6mm（処分孔底部の高さ）に水位センサーを設置するために、直径 6.4mm、深さ 83mm の穴を、模型外縁部から 33.9mm 内側の位置にドリルによって掘削した。掘削孔の下端部に水位センサーを導電性エポキシ接着剤によって接着し、孔内はエポキシ接着剤を充填し、水みちとなることを防止した（図 3.5.1-22）。その他水位センサーは下部岩盤試料の上端部（模型外縁部から 33.9mm 内側の位置）、上部埋戻し材の中間部（埋戻し材下端部から 50mm 上方、模型外縁部から 33.9mm 内側の位置）、上部埋戻し材上端部（模型外縁部から 33.9mm 内側の位置）にそれぞれ設置した。また掘削孔の下端部、下部岩盤供試体の上端部、上部埋戻し材の上端部の水位センサー設置部の直近にはそれぞれ測温機能付ひずみゲージを設置した。

一連の作業後、150mm、長さ 320mm、厚さ 2mm のメンブレンゴムスリーブ（天然ラテックスゴム）を被覆した。この際、メンブレンゴムスリーブが岩盤供試体下部に 20mm 余分に出るように調整した。ひずみゲージのリード線、オーバーパックのヒーターケーブル、熱電対、土圧計のリード線、非接触式変位計のケーブルをメンブレンゴムスリーブから取り出すための 4mm の穴をメンブレンゴムスリーブの岩盤供試体側面下部に 6 か所、上部に 2 か所の計 8 か所に開けた（図 3.5.1-23）。岩盤供試体側面に貼付した測温機能付ひずみゲージは下部の 2 か所からリード線を取り出し、処分孔内に貼付した測温機能付ひずみゲージは下部の 2 か所の穴からリード線を取り出した。取り出したリード線のうち、測温機能付ひずみゲージのリード線についてはテトラエッチ B で前処理を行い、KS-45-TS でメンブレンゴムスリーブの穴を塞いだ。本試験は周圧を水压で 5MPa かけるため、リード線とメンブレンゴムスリーブとの間に僅かな弱部があるだけで止水することができなくなる。そのため、KS-45-TS を穴とリード線部分に 6 回以上重ね塗りを行った（図 3.5.1-24）。

緩衝材および下部埋戻し材とオーバーパックを処分孔内に設置するため、中心部に 7.2mm の穴が開いている緩衝材 2 個に加工を行った。ペンリユーターにて緩衝材および下部埋戻し材の中心部にヒーターおよび熱電対のケーブルが通るように孔を 3mm 程度大きくした（図 3.5.1-25）。一番上に設置される下部埋戻し材は、土圧計を設置するため、土圧計の大きさに合わせて溝を掘削した。メンブレンゴムスリーブを被覆した岩盤供試体を横に倒し、緩衝材および下部埋戻し材ブロックの底板部（中空部 7.2mm）と、16.4mm の穴が開いている円筒部の 2 個を模擬処分孔内に設置した。その後、中心部に 7.2mm の穴が開いている緩衝材 2 個をオーバーパックの配線柱部に設置した状態で処分孔内に静置した。静置後、土圧系（東京測器研究所社製、超小型圧力計 PDA-3MPB）（図 3.5.1-26）を設置し、岩盤部の溝にケーブルを固定した。ケーブルをテトラエッチ B で下処理を実施し、溝は KS-45-TS を用いて埋め、シーラント 40 を塗布した。膨出センサー設置のために下部埋戻し材の所定部分を削り、膨出センサーを設置、固定のためのピン（M1.4）を岩盤に埋め込んだ後、アラルダイトラピッドにて固定した。もう一方の端部は、スライドできるように同じ厚さのリン青銅板を用いて図 3.5.1-27 の機構を作成し、設置した。ケーブルが変位しても断線することの無いように養生し、メンブレンに開けた孔からケーブルを取り出した。土圧計および膨出センサーの設置状況を図 3.5.1-28 に示す。

下部岩盤および下部埋戻し材上部に、金属の高剛性リング内に設置された上部埋戻し材を設置した（図 3.5.1-29）。上部埋戻し材に設置した土圧計および水位センサーのケーブルは上部埋戻し

材上方より外に取り出した。その後、上部岩盤供試体とその中に接着したセンサーケースを兼ねた吊り治具を上部埋戻し材の上部に設置した。上部岩盤上方に導水用ステンレスメッシュ（200メッシュ/インチ、目開き 75 μ m）を設置し、岩盤と高剛性リングの接点部分に、PTFE ガasket（GORE Joint Sealant、日本ピラー工業株式会社製）を接着した（図 3.5.1-30）。メンブレンの破損防止のため、模型の下部 10cm を除いた部分のメンブレンを二重にした（図 3.5.1-31）。また、メンブレン同士の密着度を上げるため、上下端部をゴム糊で接着し、KE-45-TS をシリンジにてメンブレン間に注入した。その後、メンブレンの防水処理を行った。ひずみゲージを処理した際と同様で、ケーブルをテトラエッチ B で下処理を行い、KE-45-TS を 6 回以上重ね塗りした（図 3.5.1-32）。



図 3.5.1-15 ADVANTEC DRK632DB 送風定温乾燥機



図 3.5.1-16 岩盤供試体へのマーキング状況

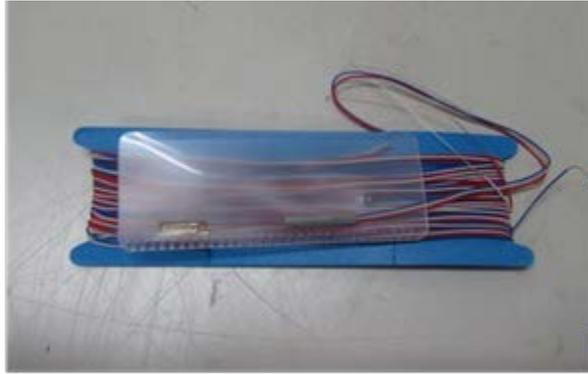


図 3.5.1-17 使用したひずみゲージ、QFLA-5T-11-6FB-3LT



図 3.5.1-18 岩盤試料上端面の加工状況

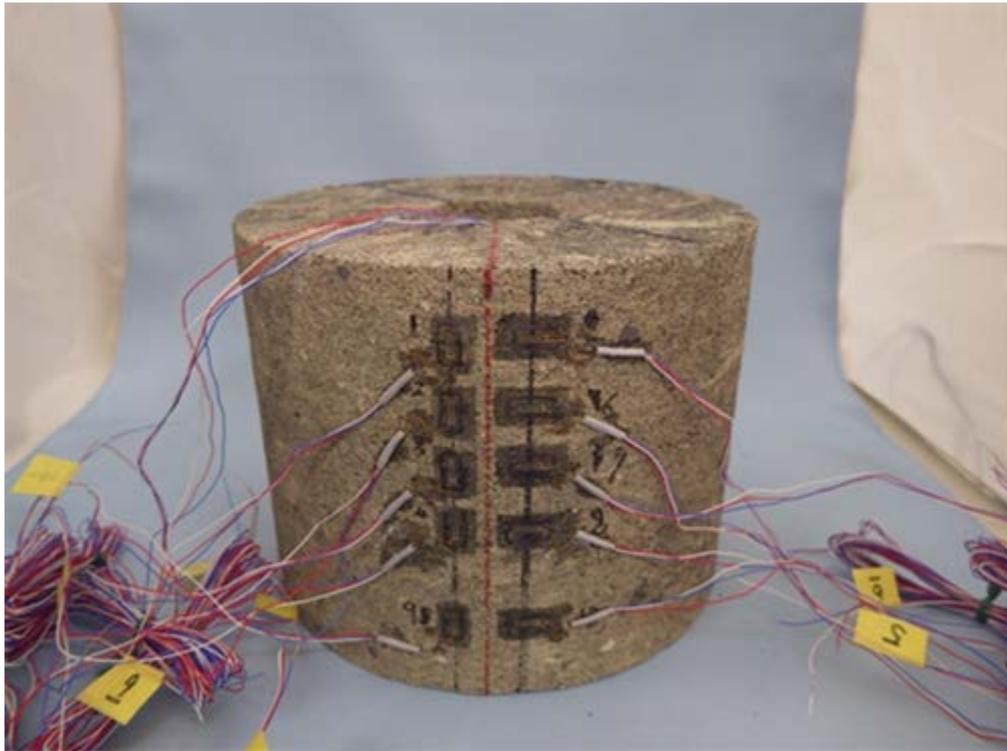


図 3.5.1-19 ひずみゲージの貼付状況



図 3.5.1-20 ひずみゲージ貼付部分へのコーティング状況

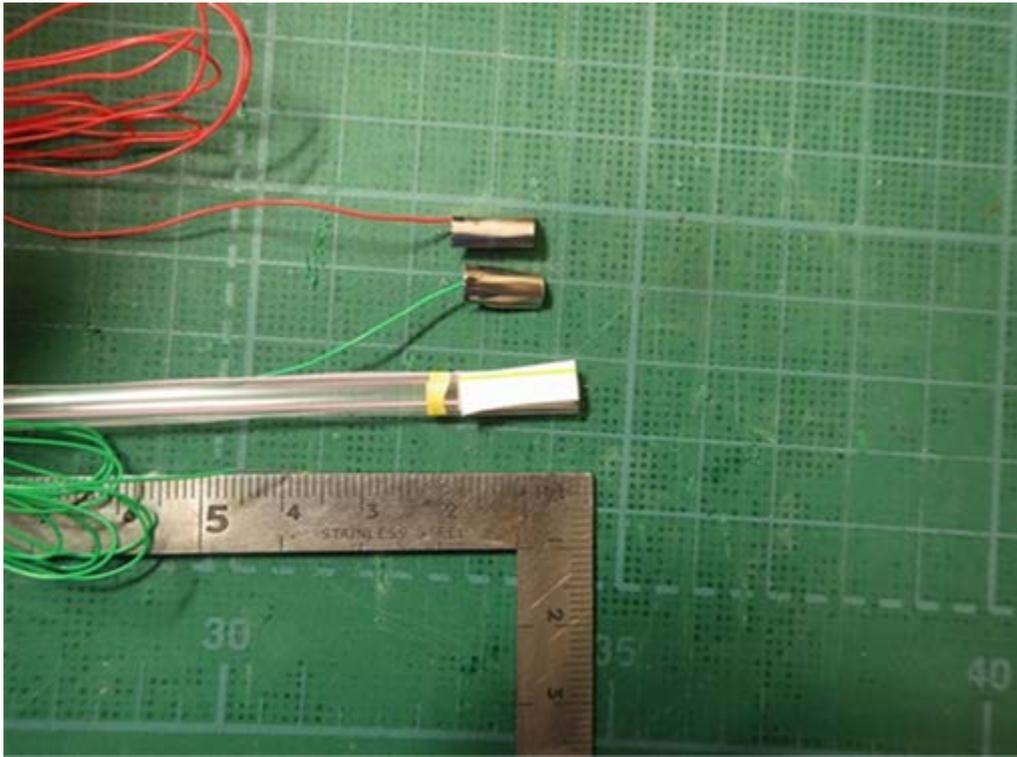


図 3.5.1-21 水位センサー



図 3.5.1-22 水位センサーの設置状況

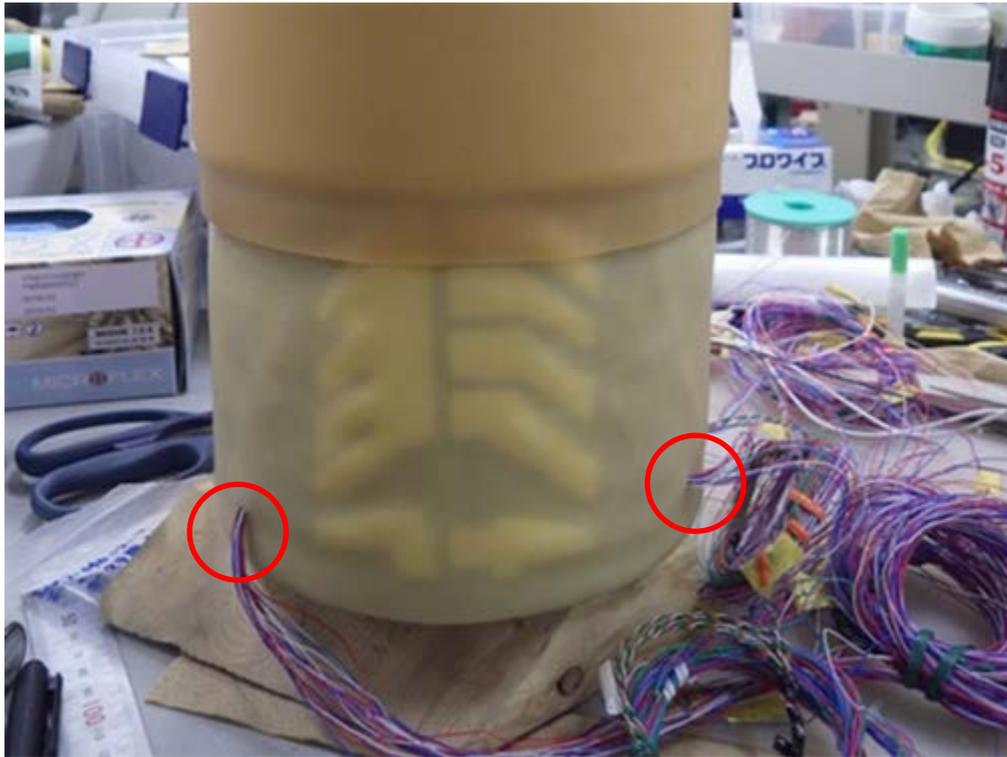


図 3.5.1-23 メンブレンゴムスリーブへの穴開け状況（赤丸部分）

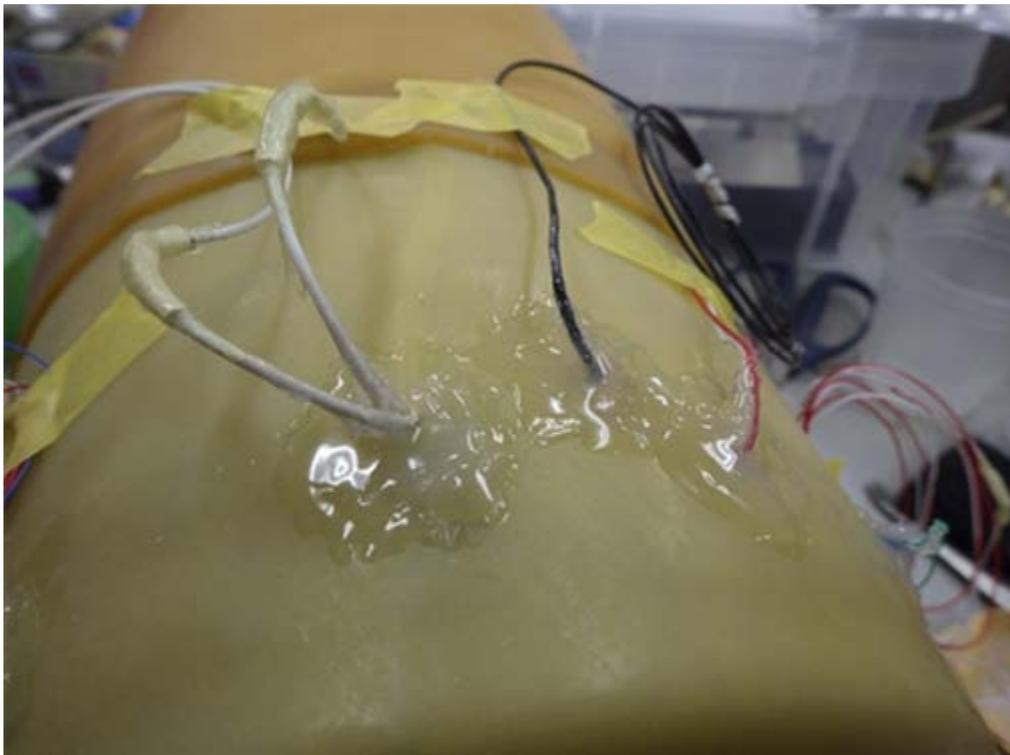


図 3.5.1-24 KE-45-TS を使用しての止水処理状況



図 3.5.1-25 緩衝材ブロックの中心部加工状況

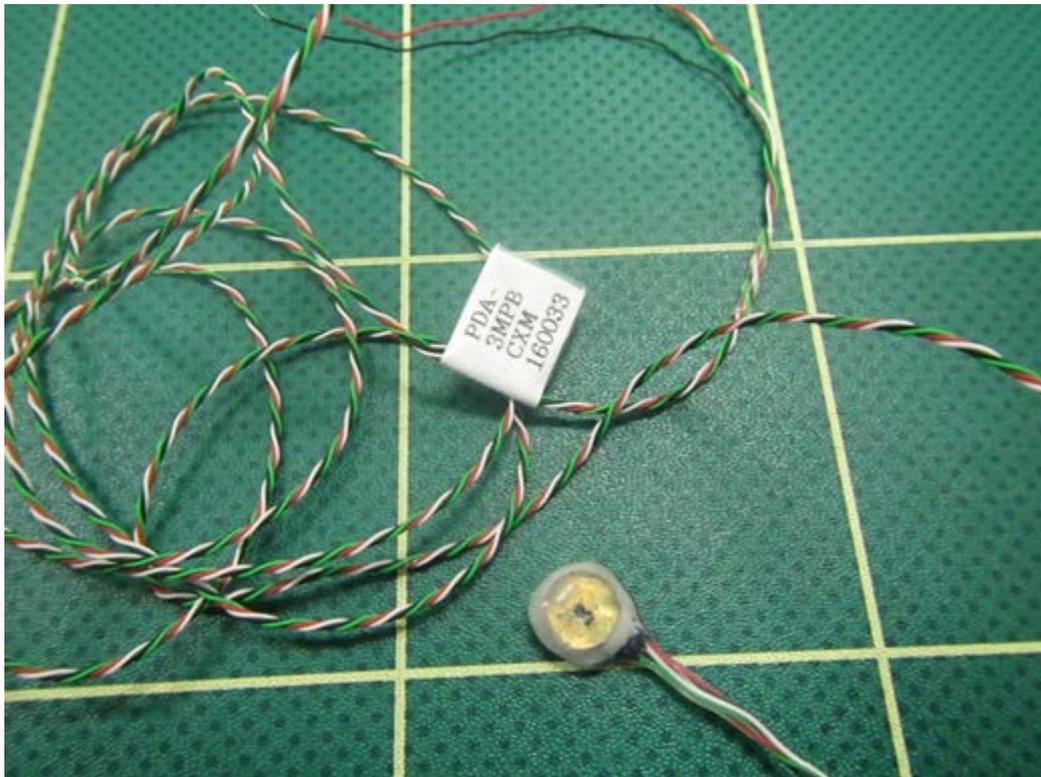


図 3.5.1-26 小型圧力計（東京測器製 PDA-3MPB）



図 3.5.1-27 膨出センサースライド治具



図 3.5.1-28 土圧計および膨出センサー設置状況



図 3.5.1-29 埋戻し材の設置状況



図 3.5.1-30 ガスケット材の設置状況

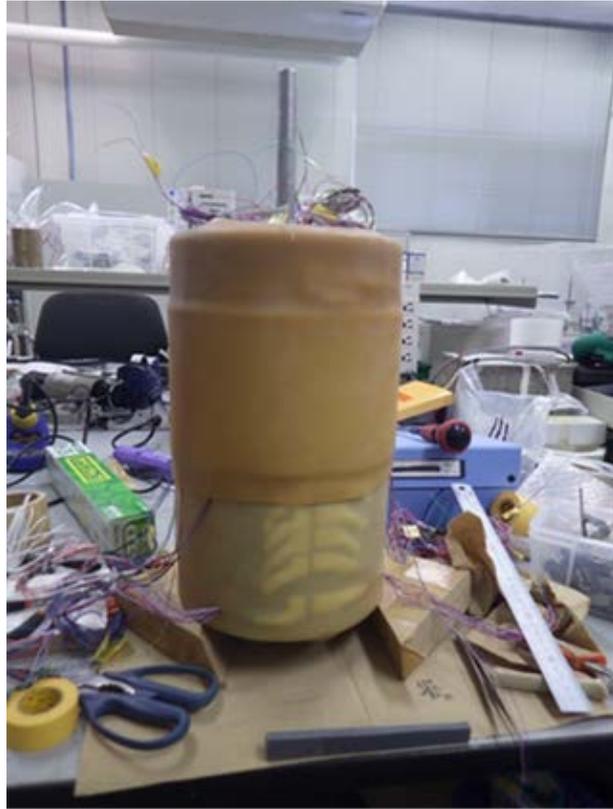


図 3.5.1-31 メンブレンの装着状況

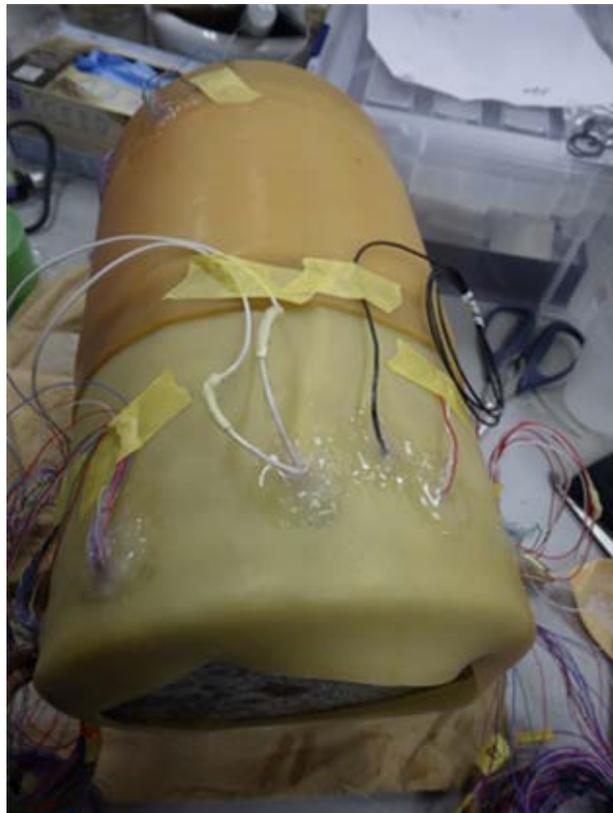


図 3.5.1-32 メンブレン部の被覆状況

(8) 圧力容器への設置

模型の設置において、まず圧力容器下部架台上にある载荷ピストン上面に導水用ステンレスメッシュ（200 メッシュ/インチ、目開き 75 μ m）を接着し、模型を設置した（図 3.5.1-33）。この際、メンブレンゴムスリーブと下部架台、上蓋がオーバーラップする箇所に、止水用の O リングをそれぞれ設置した（図 3.5.1-34）。センサー類のリード線は貫通孔式端子台（フィードスルー）を用いた。測温機能付きひずみゲージ、土圧系、膨出センサーのリード線については MHM2-020-A12-T、オーバーパックの変位を計測する非接触式変位計のリード線は MPG-047-A-V、熱電対とヒーターのリード線については MHM2-(032/2/062/2)-A4-T（以上、いずれも CONAX 社製、シーリンググランド）を使用して容器内部から容器外部へ配線した（図 3.5.1-35）。

配線の処理が完了した後、圧力容器外筒枠体を設置し、架台下部とボルトで密着させ、外筒中間枠体を設置し模型と外筒枠体および外筒中間枠体との間に周圧の圧力媒体である蒸留水を流入した。その後、上蓋固定筒を外筒枠体および外筒中間枠体をボルトで密着させることで模型の圧力容器への設置が完了した。

遠心力载荷装置に搭載するカウンターウエイト計算のため、模型設置後の圧力容器の質量計測を実施した。計測は sartorius 社製、MW2P1-150FE-L を用いた（図 3.5.1-36）。計測した質量と圧力容器の重心から、搭載するカウンターウエイトを計算することができる。

(9) 遠心力载荷装置への設置

圧力容器は、天井クレーンを用いて遠心力载荷装置の容器設置側のプラットホームに静置した。圧力容器とプラットホームをボルトで固定し、土圧計、測温機能付きひずみゲージ、膨出センサーを高速スイッチボックス（東京測器研究所社製、IHW-50G-05（S））に結線した（図 3.5.1-37）。オーバーパックの熱電対およびヒーターケーブルは温度コントロールユニットに接続し、渦電流式非接触変位計（電子応用社製、PU09-236-102：上部埋戻し材の鉛直変位量用、PU-09-322-102：オーバーパックの鉛直変位量用、PU-20：载荷ピストン鉛直変位量用、）および水位センサーは、プラットホーム上に設置した専用アンプへ接続した。遠心加速度 50G 場においては、計測器のケーブルであっても、自重が 50 倍となり、それによりケーブルが破断する可能性があるため、圧力容器上部から出るケーブルについては特に損傷防止のための養生をする必要がある。ケーブルの養生が終了した後、軸圧、周圧を载荷するためプラットホーム上の圧力供給口への配管を行い、配管内の空気、圧力容器周圧载荷部の脱気を行うため、圧力発生装置（送水ポンプ）から通水を行った。その後、カウンターウエイト側プラットホームに所定の重さのカウンターウエイトを搭載し、圧力容器の遠心力载荷装置への設置が完了した。

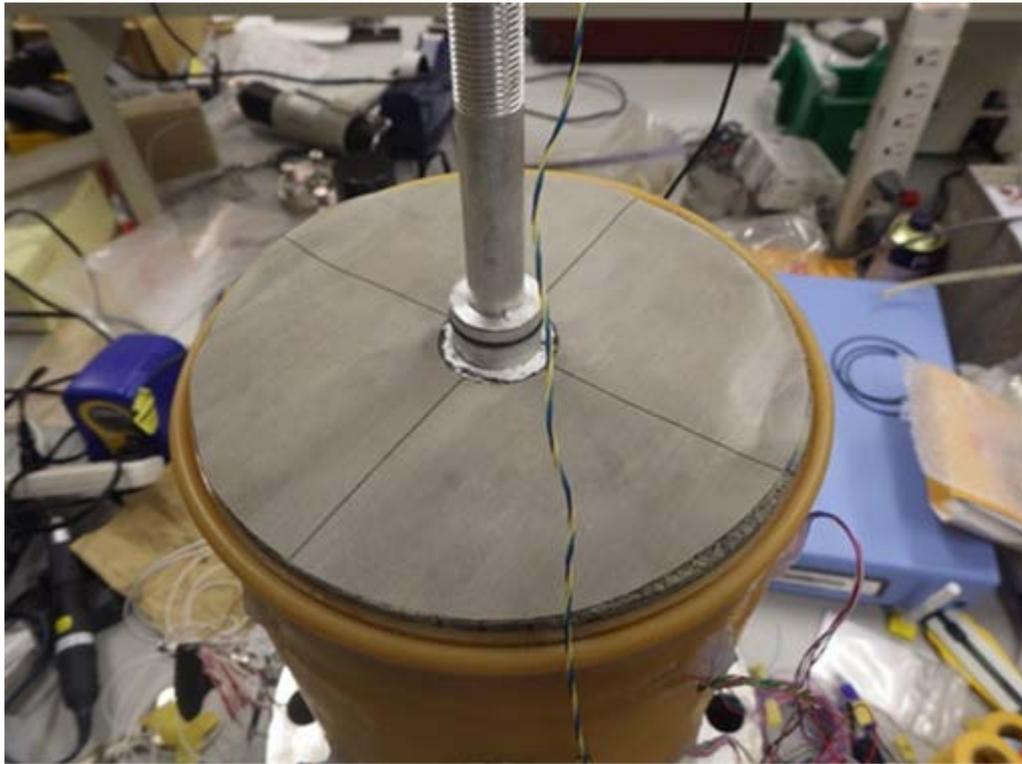


図 3.5.1-33 ステンレスメッシュ貼付状況

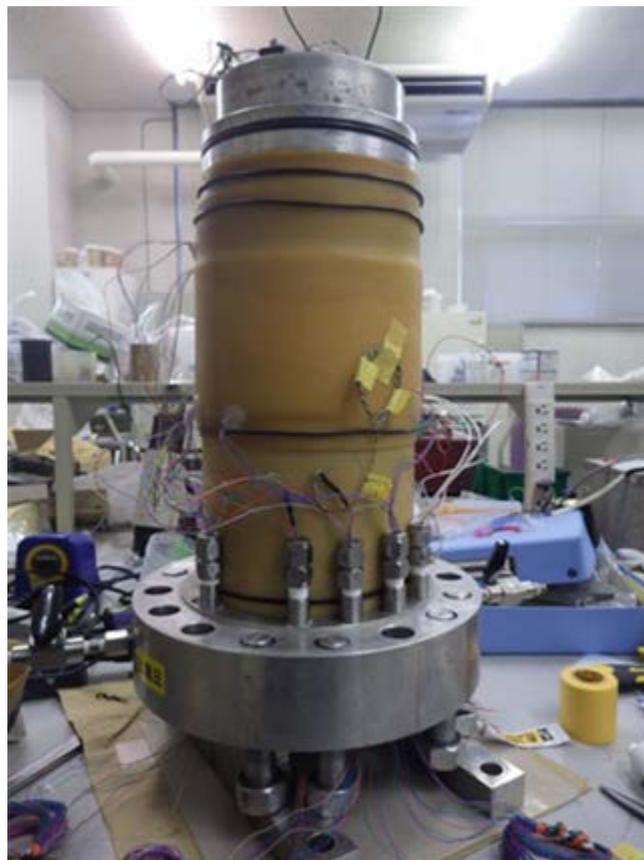


図 3.5.1-34 下部架台への設置状況 (Oリング設置済)

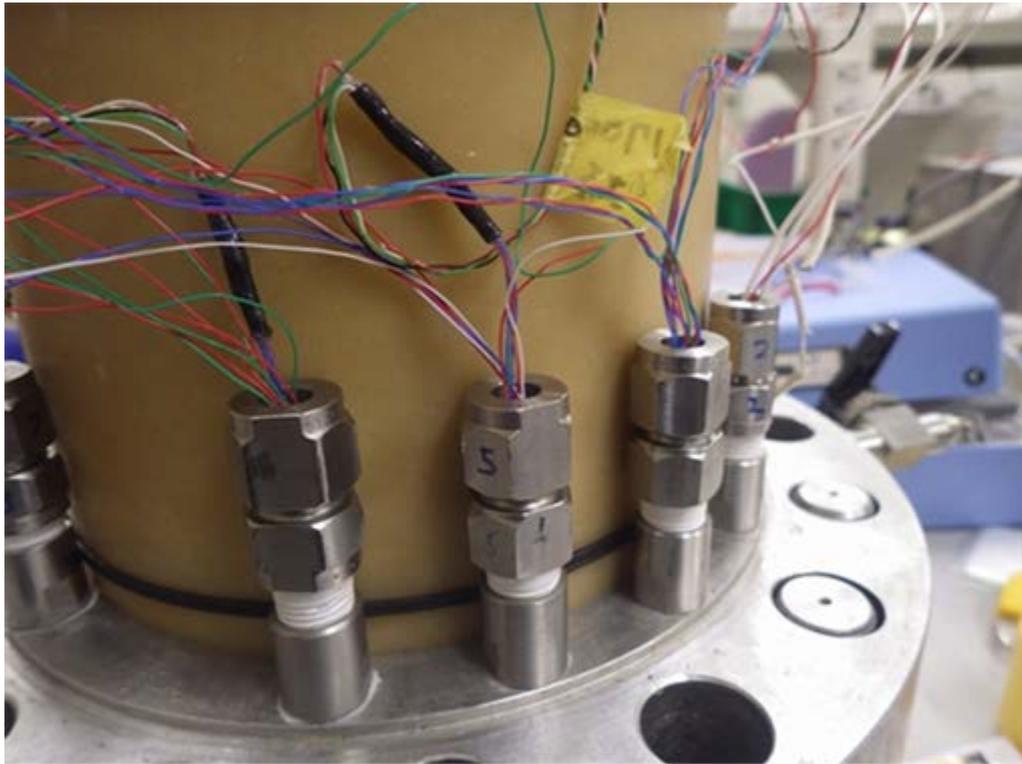


図 3.5.1-35 Conax 社製、シーリンググランドへのリード線設置状況



図 3.5.1-36 sartorius 社製、MW2P1-150FE-L

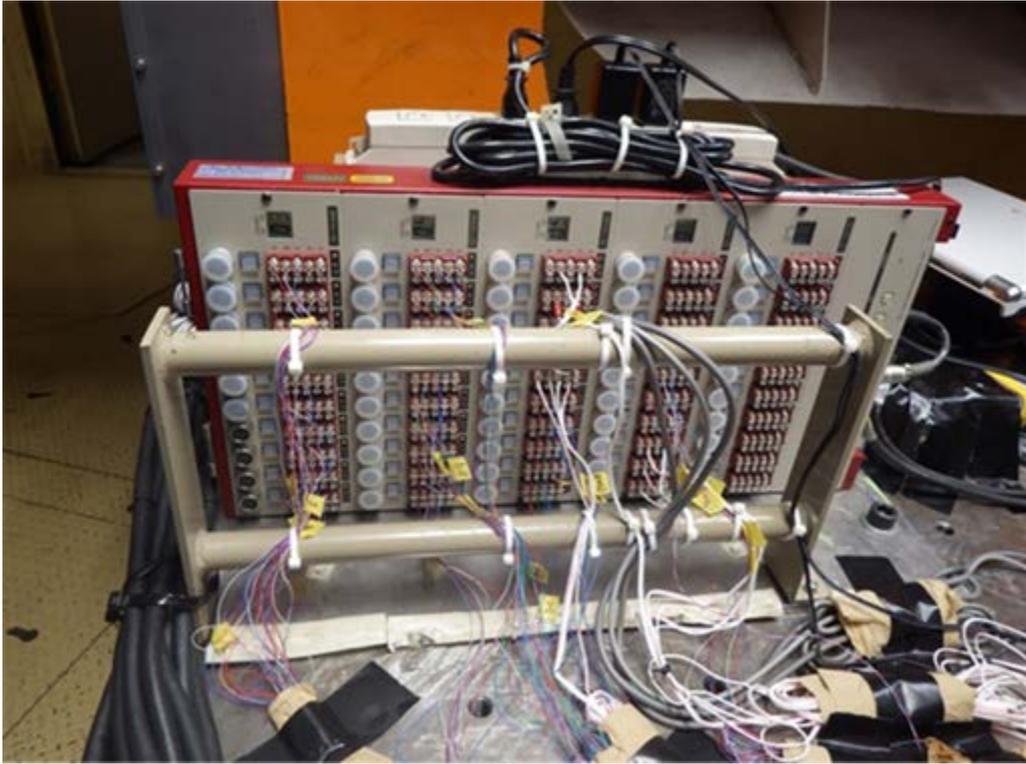


図 3.5.1-37 高速スイッチボックスへの結線状況

3.5.2 試験概要

(1) 条件

本試験では、岩盤供試体は整形後 50℃の乾燥炉で 1 週間静置している。模型へのひずみゲージ貼付・コーティング、止水用ゴムスリーブの被覆、圧力容器への組み込みまで数日を要する作業のため (3.5.1 項を参照)、岩盤供試体の初期条件を飽和状態とすると緩衝材や埋戻し材が作業中に吸水してしまい、正確な膨潤挙動を計測できない。このため本試験では岩盤供試体を乾燥状態として試験を開始した。実際の施設では、作業中は処分孔周辺の地下水をポンプアップし作業を進めると考えられる。そのため周辺岩盤は不飽和状態と考えられる。

拘束圧は 3.4.2 項においても述べたとおり、周圧は 5.0MPa、軸方向は初期に 1.17MPa を載荷し、上端圧が一定となった後は模型高さを一定とする制御とした。下端圧 (間隙注水圧) は、透水試験用注水口 (図 3.3.2-1) より蒸留水を模型下面から負荷し、試験開始時点は 0MPa として、0.03MPa/min の割合で 1.07MPa に上げその後は一定制御とする設定とした。下端圧は試験開始時に 0MPa であるが、遠心力の載荷によって圧力発生装置 (送水ポンプ) から模型を設置しているプラットフォームまでの水頭差によって 50G 場では 0.64MPa となる。模型上下端面には導水用ステンレスメッシュ (200 メッシュ/インチ、目開き 75 μ m) を設置しており、注入した水は模型下端面より間隙に流入し、上端面より排水する。

上端圧 (間隙排水圧、背圧に相当) は透水試験用排水口 (図 3.3.2-1) より模型端面に負荷し、圧力発生装置 (排水ポンプ) を一定圧制御する排水条件である。試験開始時点ではポンプ圧が 0MPa となるピストン位置でポンプを停止させている。模型をほぼ乾燥状態にして試験を開始していることから模型上端面には 0MPa の空気圧が負荷される。その後、注入された間隙水の模型内部への浸潤にともない下面-上面の間に圧力勾配 (圧力水頭) が生じ、上端圧が徐々に水圧となり、間隙水が模型上端面に到達すると、水の自重により上端圧が漸増する。この水圧が上昇して上端圧が 0.92MPa になったところで、上端圧を 0.92MPa とする排水ポンプの一定圧制御を開始した。

(2) 手順

具体的な手順は以下の通りである。

Step1 : 模型を圧力容器に設置後、周圧および軸圧を 0.05MPa/min でそれぞれ 5MPa、1.17MPa まで昇圧する。拘束圧を負荷した後、ひずみゲージの計測値が収束するまで、設定を保持した。

Step2 : ひずみゲージの計測値が収束したのち、遠心力載荷装置の運転を開始した。0.08rad/s² の角加速度で回転を加速、50G にする。50G に到達後、着座を行い、各センサーの値が安定するまで、状態を保持した。

Step3 : 各センサー値の安定を確認後、注水ポンプにより下端圧を 0.03MPa/min で 1.07MPa まで上げ、オーバーパックの温度制御を図 3.4.2-2 に従い開始した。下端圧が 1.07MPa に達した後は変位を一定にするように制御を実施した。

Step4 : 上端圧は、試験開始時点では排水ポンプの圧力が 0MPa となるピストン位置で停止さし

ている。注入した間隙水が模型を浸潤し上端圧が上昇、上端圧が 0.92MPa に達した後は排水ポンプを一定圧制御とした。

実際の载荷応力の制御経時変化については図 3.4.2-1 を参照されたい。

(3) 計測項目

本試験では、オーバーパックの鉛直変位量および緩衝材・上部埋戻し材の応力、上部埋戻し材上端面の変位、水位、緩衝材の膨出挙動、岩盤のひずみおよび温度を計測した。

オーバーパックの鉛直変位は処分孔底部に埋め込まれた非接触変位計、緩衝材の応力は緩衝材中に埋め込んだ小型土圧計、上部埋戻し材上端面の変位および応力は岩盤に埋め込まれた非接触式変位計と土圧計（センサーケースを圧力容器上蓋に剛結）、また上部埋戻し材中間部にも小型土圧計を埋め込んだ。岩盤のひずみはひずみゲージ、緩衝材の膨出挙動は膨出センサー、水位は水位センサーで計測した（図 3.5.2-1）。

なお、図 3.5.2-1 に示した G1T~14T は測温機能付きひずみゲージ（以下、測温ゲージ）であり、同じ場所のひずみと温度を計測した（温度について述べる場合は、例えば T_G01T と記して、ゲージ No の前に T を付けることとする）。水位センサー設置部のうち WG1、WG2、WG4 についても直近に測温機能付きひずみゲージを貼付してあり、ひずみと温度の計測を実施した（ひずみについて述べる時は例えば G_WG01、温度の場合は例えば T_WG1 とする）。同様に膨出センサーの sw13 も測温ゲージであり、温度計測を実施した（Tsw13 とする）。また、オーバーパック内部に埋め込んだ熱電対により、オーバーパックの温度の制御・計測を行った。

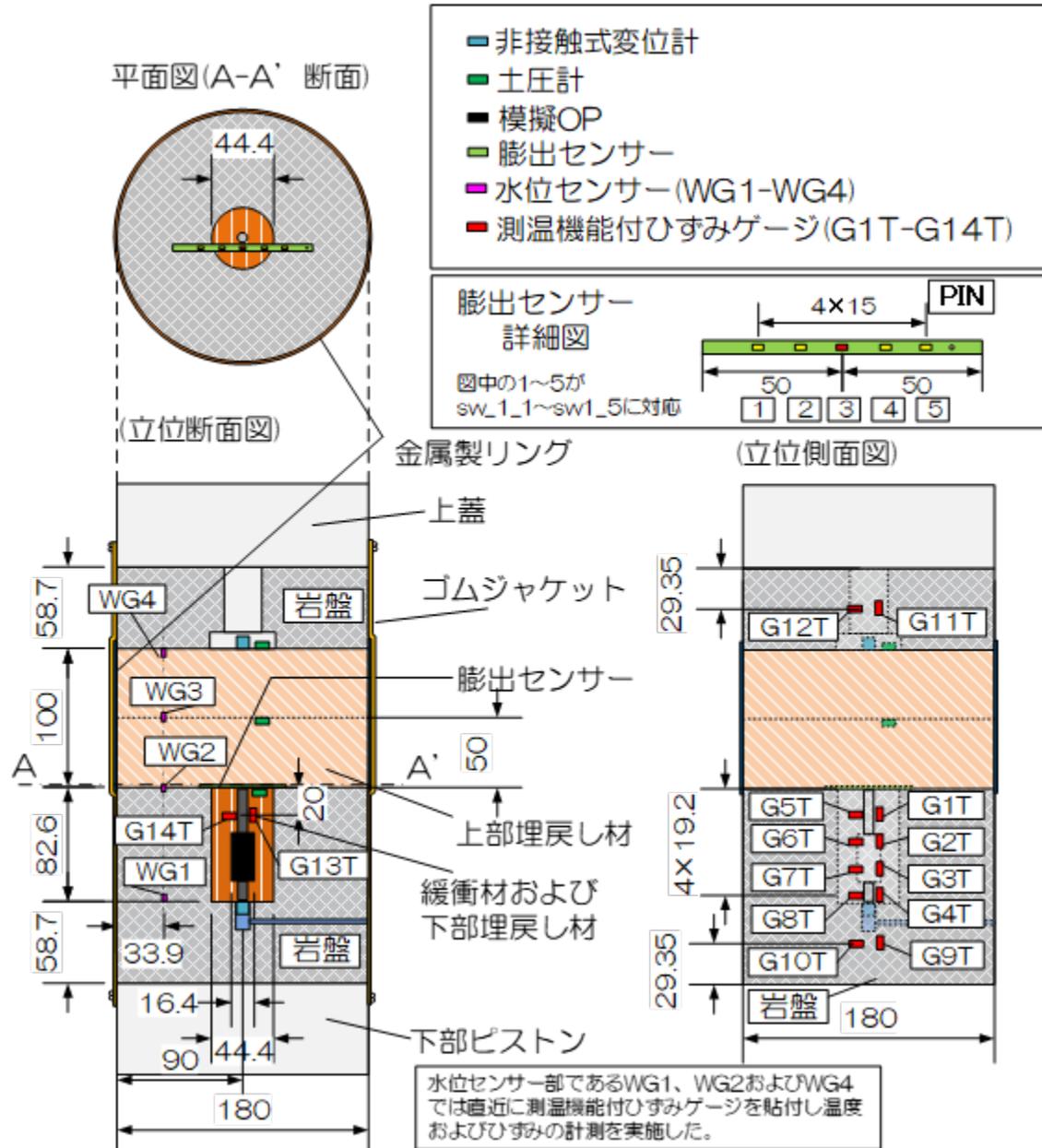


図 3.5.2-1 本試験のセンサーレイアウト

3.5.3 結果

(1) 遠心模型試験

以下、図中において、既定の遠心加速度 50G に到達し、注水（下端圧の負荷）およびオーバーパックの発熱を開始した時点（0 時間）とし、縦軸は計測値、下横軸は実物換算経過時間、上横軸は試験経過時間で示してある。文中で述べる際は、実物換算経過時間で記載してある。なお、オーバーパックの変位についてのみ、実物換算した値を記載してある（計測値の 50 倍）。また、各図の上図は 0 時間から 0.1 時間相当経過時までの経時変化（線形軸）、下図は 0.1 時間相当経過時以降の経時変化（横軸の片対数）を示した。

1) 岩盤内の水位

ニアフィールドにおける間隙水の浸潤過程は、緩衝材および埋戻し材の膨潤挙動に強く影響を及ぼすため、これを把握することは非常に重要である。本試験ではその水位を計測するために岩盤内部に 2 ヶ所、埋戻し材に 2 ヶ所、図 3.5.3-4 のとおり水位センサーを設置した。水位センサーは電極を使用したセンサーで、ステンレス製の板で寸法 5mm×10mm、厚さ 0.1mm である。岩盤内部の間隙水がセンサー部に到達すると電極間が通電して電圧（6V）を出力するように回路が設計されている。水位センサーのうち WG01、02、04 の直近には測温機能付ひずみゲージ（測温ゲージ）を貼付してあり、ひずみおよび温度の計測を実施した（WG01：下部岩盤の軸方向のひずみ、WG02：処分孔上端面の半径方向のひずみ、WG04：上部岩盤下端面の半径方向ひずみ）。

図 3.5.3-5 に水位センサーで計測した出力電圧の経時変化を示す。WG01 は 0.27 年相当経過時、WG02 が 0.63 年相当経過時、WG03 が 0.88 年相当経過時、WG04 が 1.09 年相当経過時にそれぞれ出力しており、間隙水が模型の下方から上方に順に浸潤していることがわかる。

模型下端面から WG01 間の実物換算距離を a、WG01 から WG02 間を b、WG02 から WG03 間を c、WG03 から WG04 間を d、WG04 から上部岩盤の上端面までを e として間隙水の浸潤速度を算出した。ここで浸潤速度とは、上記 a～e の距離を実物換算した水位センサーの出力時間で除した値である。図 3.5.3-6 に各点における浸潤速度を示す。距離 e では上部岩盤の上端面に水位センサーが設置されていないため、a での浸潤速度と同じと仮定した。a : $3.4 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、b : $3.64 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、c : $3.28 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、d : $3.73 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、e : $3.4 \times 10^{-7} \text{m/s}$ となった。岩盤の浸潤速度と埋戻し材の浸潤速度はほぼ同等なものとなった。

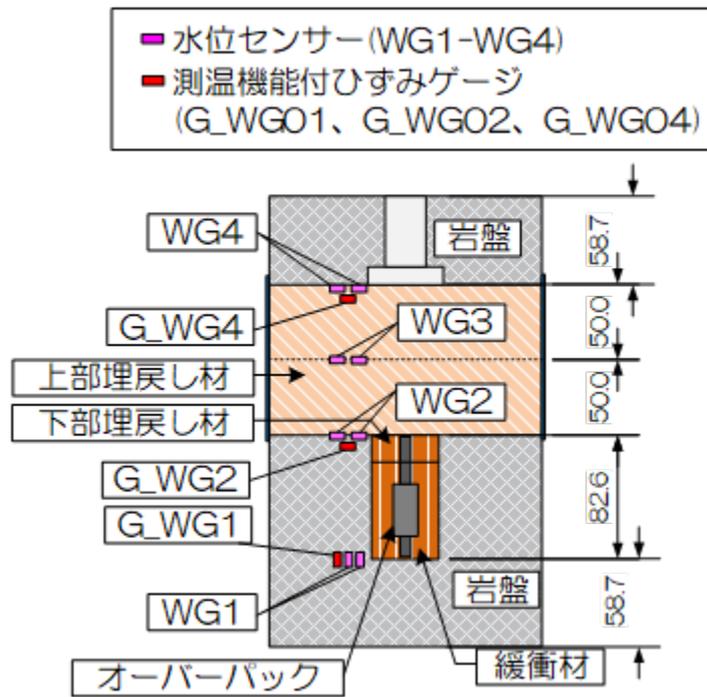


図 3.5.3-1 模型上の水位センサーの設置位置 (模型寸法)

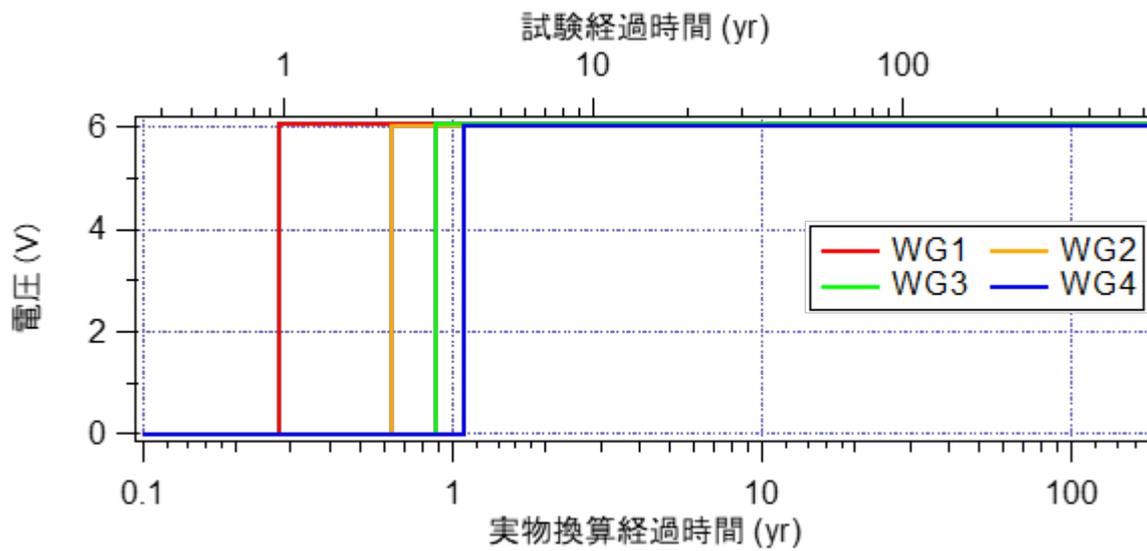


図 3.5.3-2 水位センサー電圧出力の経時変化

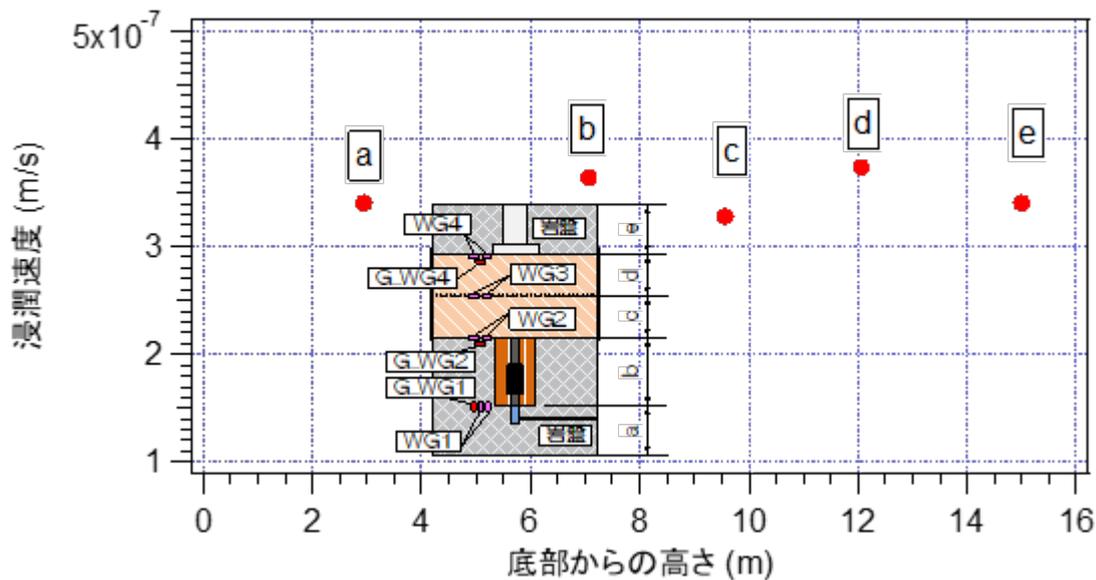


図 3.5.3-3 各点における浸潤速度

2) 温度

図 3.5.3-4 にオーバーパックの温度の制御値および計測値の経時変化を示す。オーバーパックの温度は入力に対して、最大 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ で制御している。計測箇所は図 3.5.2-1 を参照されたい。40年相当経過時に温度の急減が発生しているが、温度制御機器の仕様下限値を下回る設定値だったためである。なお、遠心力载荷装置の空調設備の不具合により試験開始時のピット内温度が 15°C となっている。

図 3.5.3-5 に模型側面軸方向に貼付した測温ゲージの温度の経時変化を示す。オーバーパックの加熱によって全ての測温ゲージの温度が上昇している。オーバーパックが最高温度に達するのは0.4年相当経過時であるが、全計測点で最高温度に達する時間は4年相当経過時となった。T_G01Tでは 35.6°C 、T_G04Tでは 35.1°C 、オーバーパックより離れた位置に設置したT_G09TおよびT_G11Tでは 34.1°C と 1°C 程度低い温度を計測した。その後はオーバーパックの温度の低下に伴い、全計測点での温度が 1°C 程度微減している。

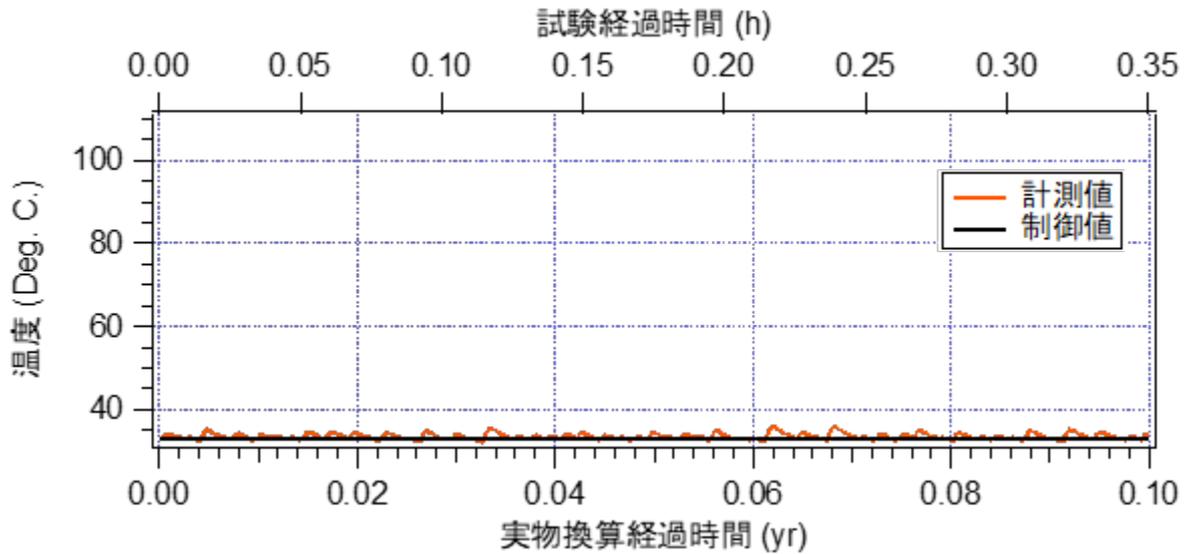
図 3.5.3-6 に模型側面周方向に貼付した測温ゲージの温度の経時変化を示す。模型側面軸方向に添付したゲージで計測した温度と同様な傾向を示している。T_G05T~T_G07Tの最高温度は 35.4°C とほぼ同じ温度、T_G08Tは 35.2°C と若干温度が低くなった。オーバーパックより離れた位置に設置したT_G10TおよびT_G12Tは 34°C 程度と 1.4°C の差が発現した。全てのゲージで、オーバーパックの温度の低下にともなってゲージで計測している温度が 1°C 程度下降している。

図 3.5.3-7 に処分孔内部に貼付したゲージの温度の経時変化を示す。模型側面の温度と同様にオーバーパックの昇温が始まると温度が上昇し、最高温度は4年相当経過時で 44.6°C となった。その後はオーバーパックの温度低下に伴い温度も低下しており、40年相当経過時におけるオーバーパックの急激な温度低下の影響を大きく受け 5.2°C 温度が低下した。

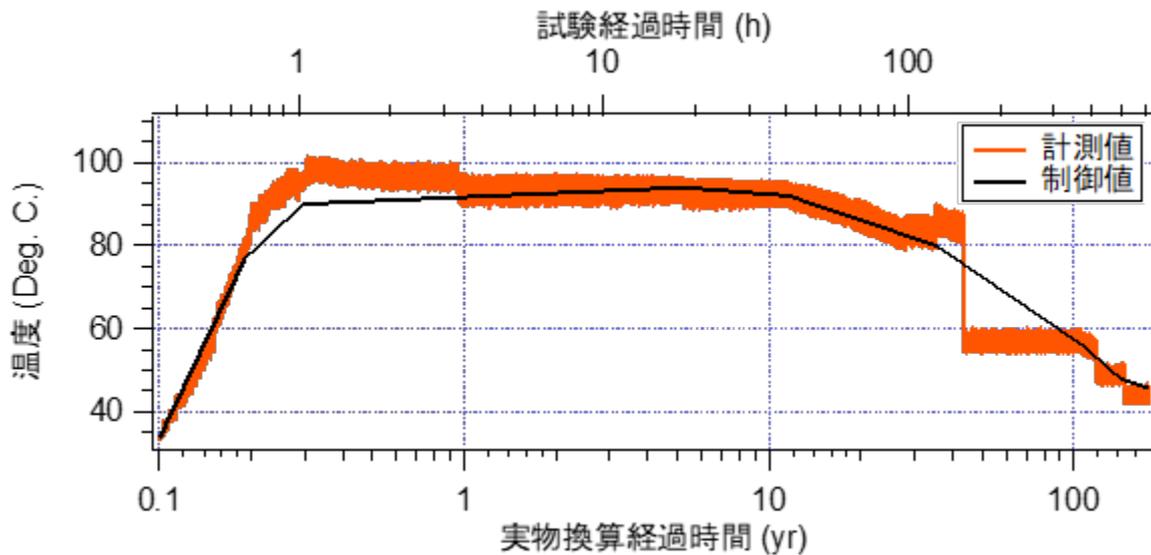
図 3.5.3-8 に膨出センサーおよび水位センサー設置部で計測した温度の経時変化を示す。膨出センサー部の測温ゲージ (T SW13) は他の部分より若干早く昇温が始まり最高温度は 41.5°C と

なった。水位センサー設置部の測温ゲージの最高温度は、T_WG01が40.2℃、T_WG02が35.9℃、T_WG04が34.4℃であった。最高温度の計測時間は各点ともほぼ同じで、4年相当経過時となった。

模型のほぼ同一高さ（図 3.5.3-9）における温度の経時変化を図 3.5.3-10 に示す。オーバーパックに一番近い T_G13T の温度が一番高く、距離が離れるほど温度が低くなっている。

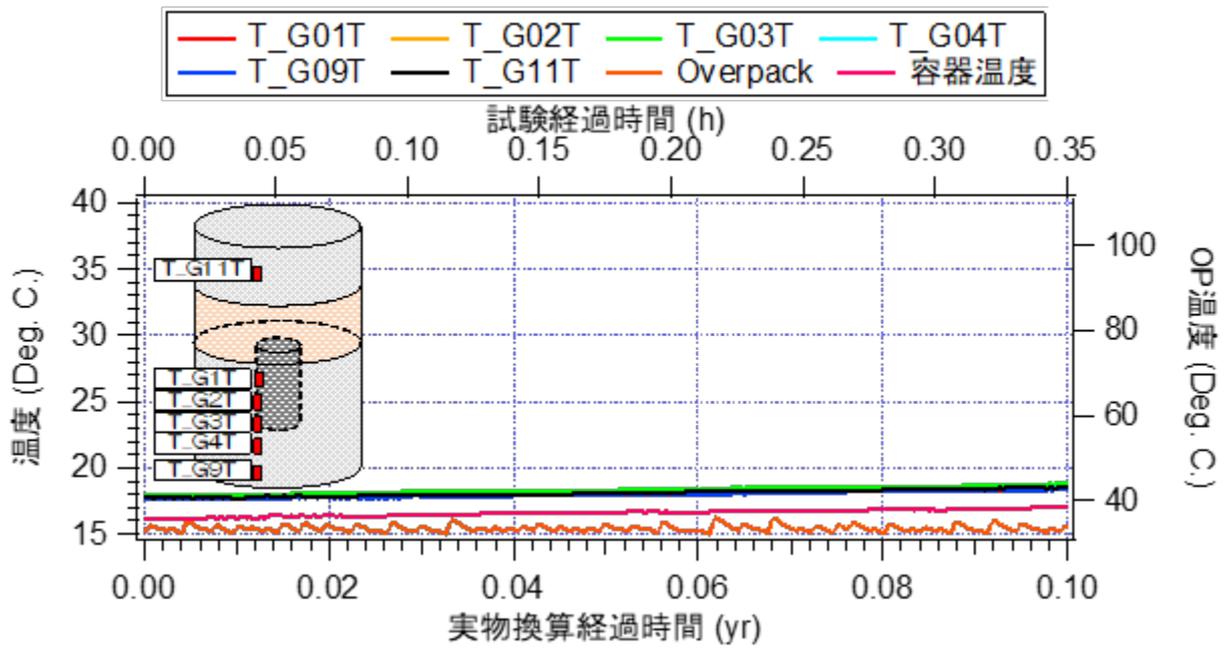


a) 0~0.1年相当経過時

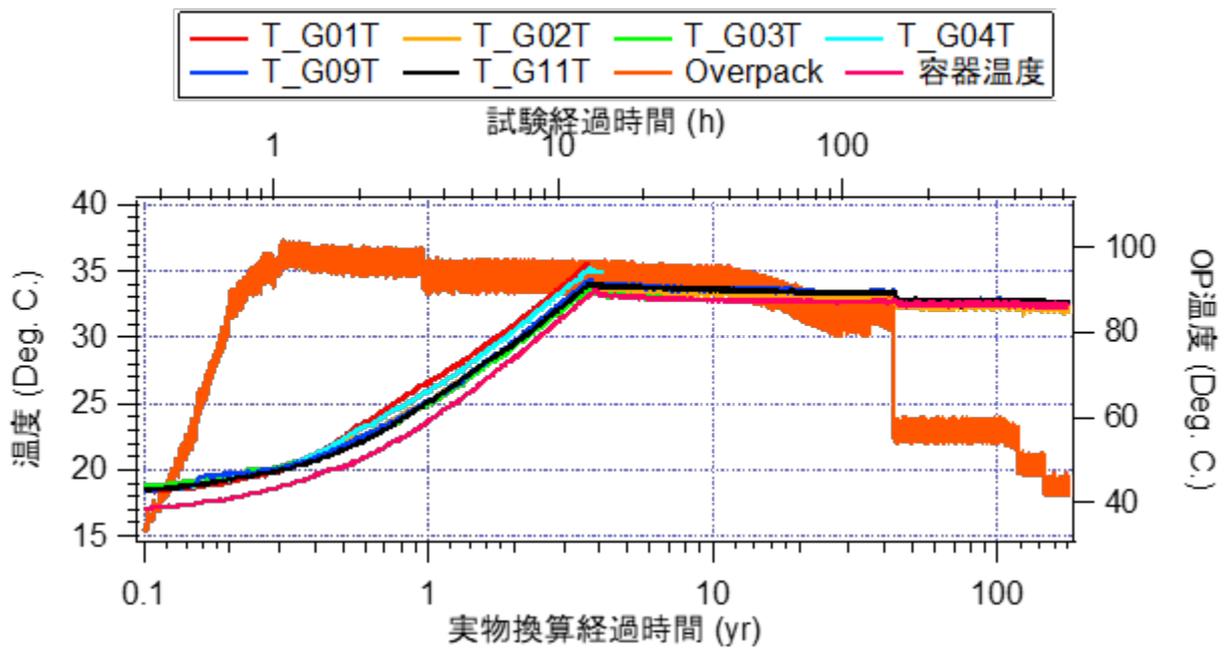


b) 0.1年相当経過時以降

図 3.5.3-4 オーバーパックの温度の入力値および計測値の経時変化

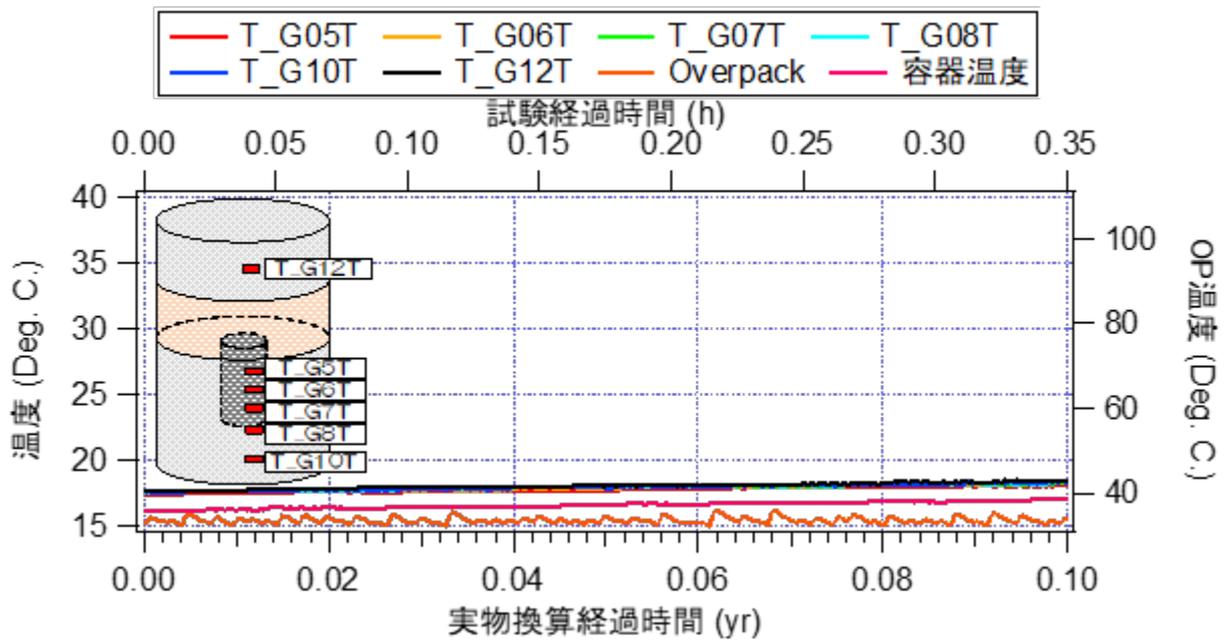


a) 開始から 0.1 年相当経過時

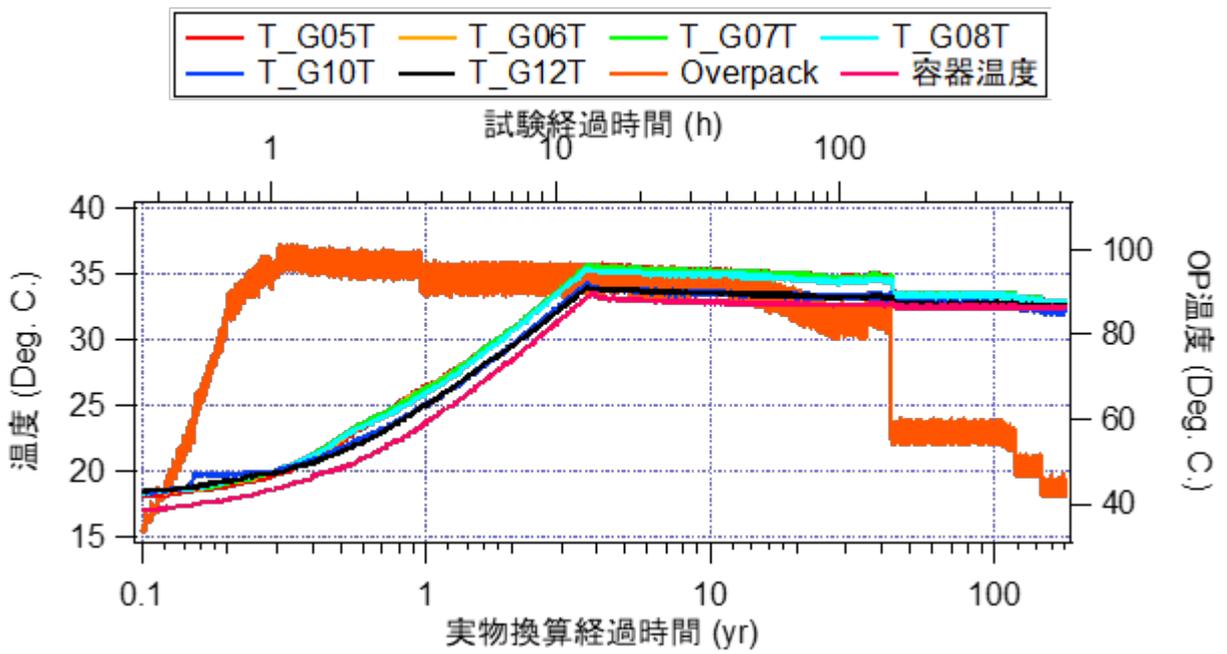


b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-5 模型側面部軸方向の測温ゲージによって計測された温度の経時変化

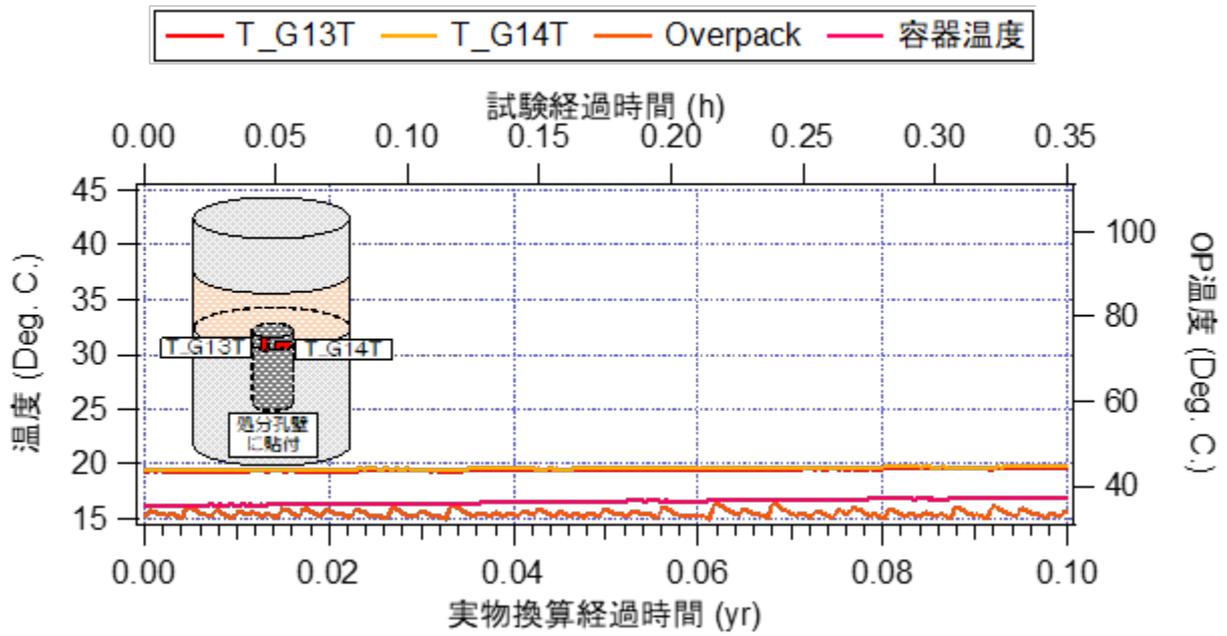


a) 開始から 0.1 年相当経過時

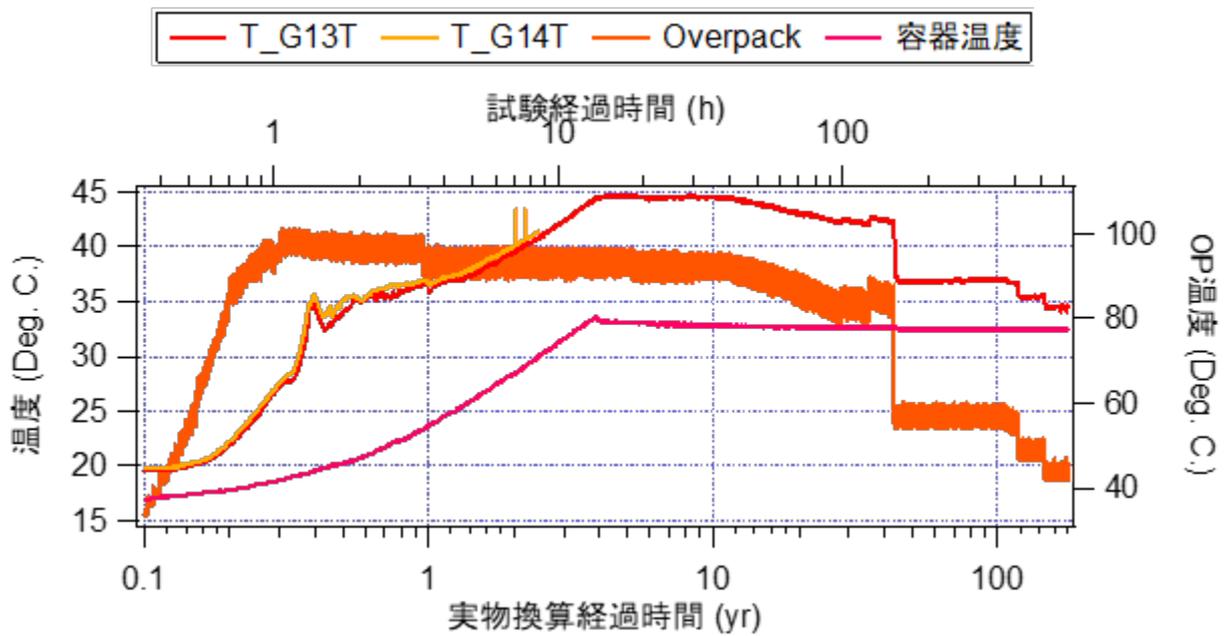


b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-6 模型側面部周方向の测温ゲージによって計測された温度の経時変化

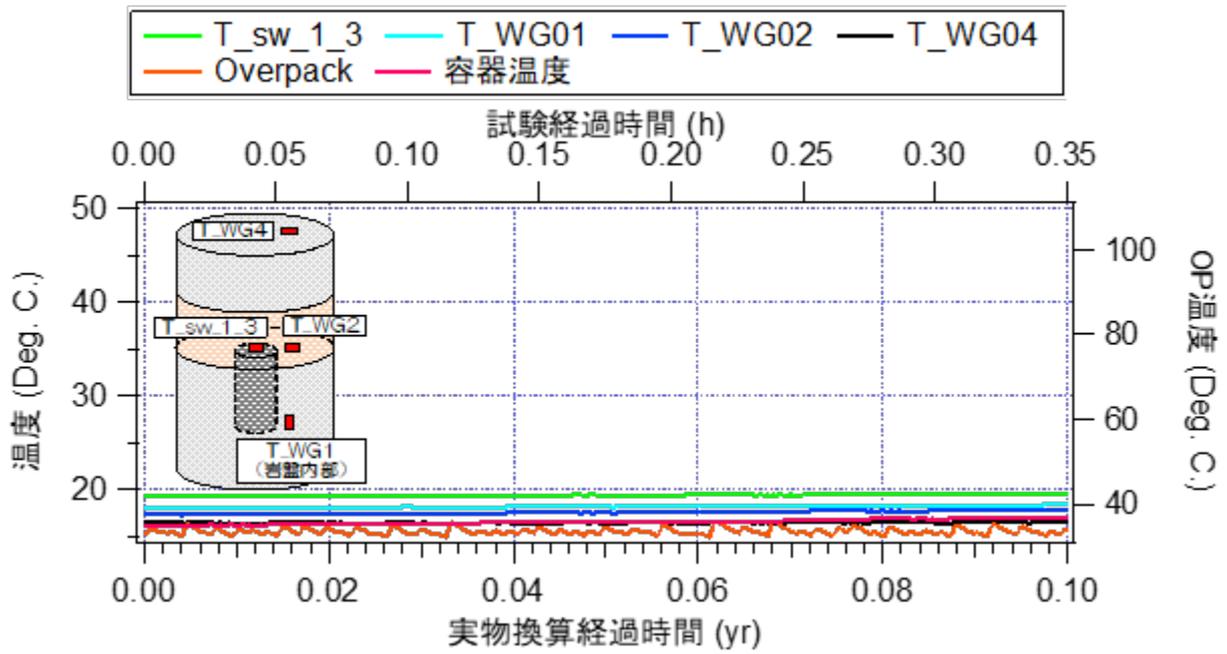


a) 開始から 0.1 年相当経過時

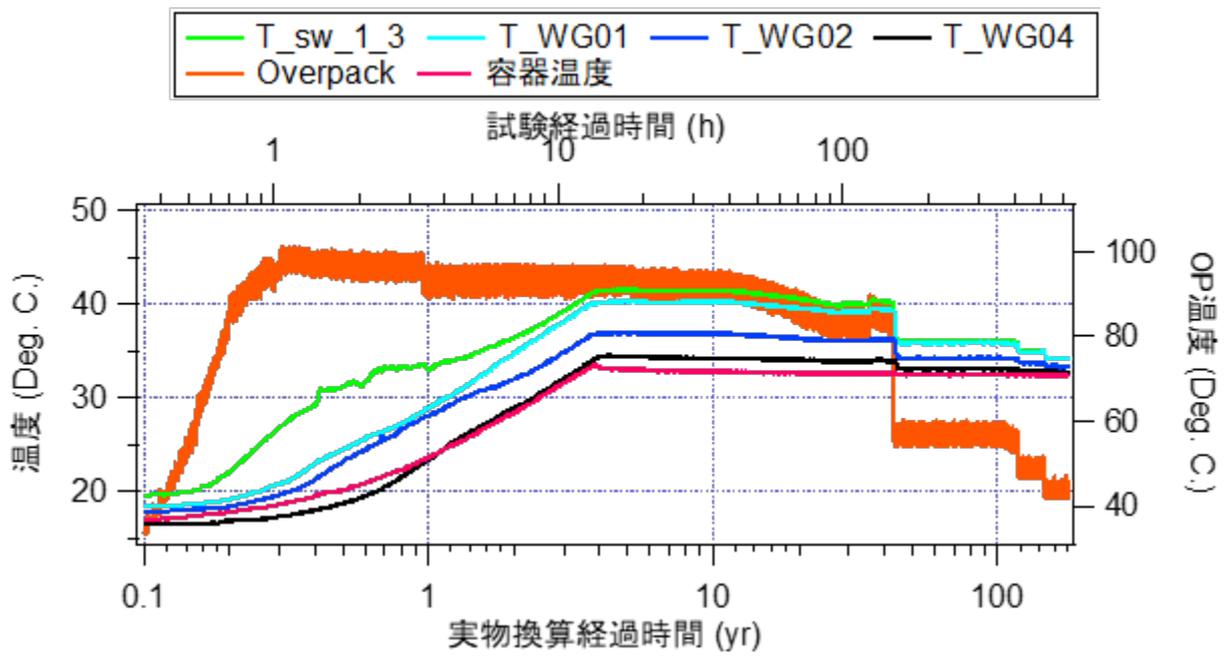


b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-7 模型処分孔内部の測温ゲージで計測した温度の経時変化



a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-8 膨出センサーおよび水位センサー設置部で計測した温度の経時変化

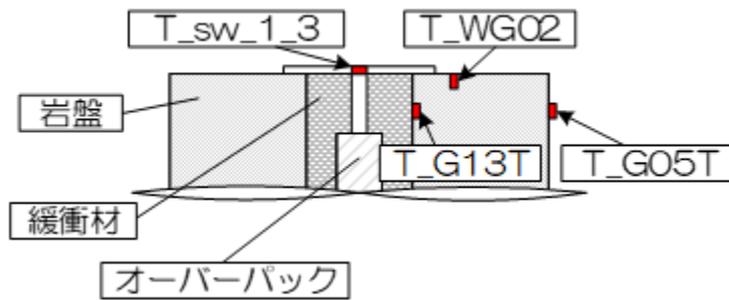


図 3.5.3-9 温度測定位置のオーバーパックからの位置関係

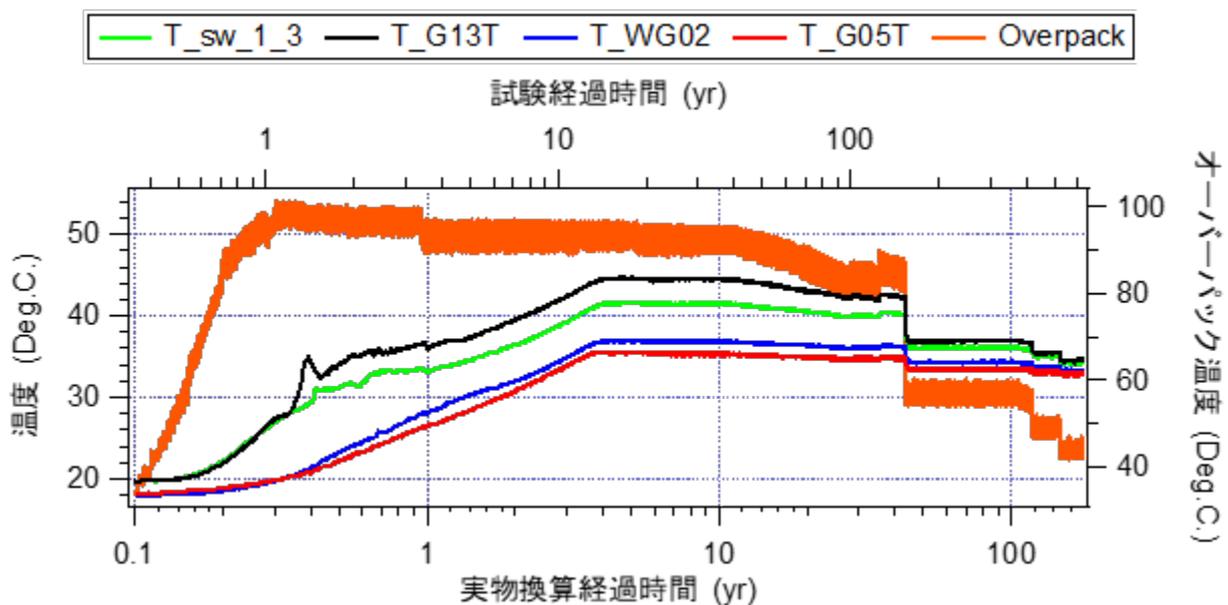


図 3.5.3-10 膨出センサー、水位センサー処分孔内、模型側面で計測した温度の経時変化

3) 岩盤のひずみ

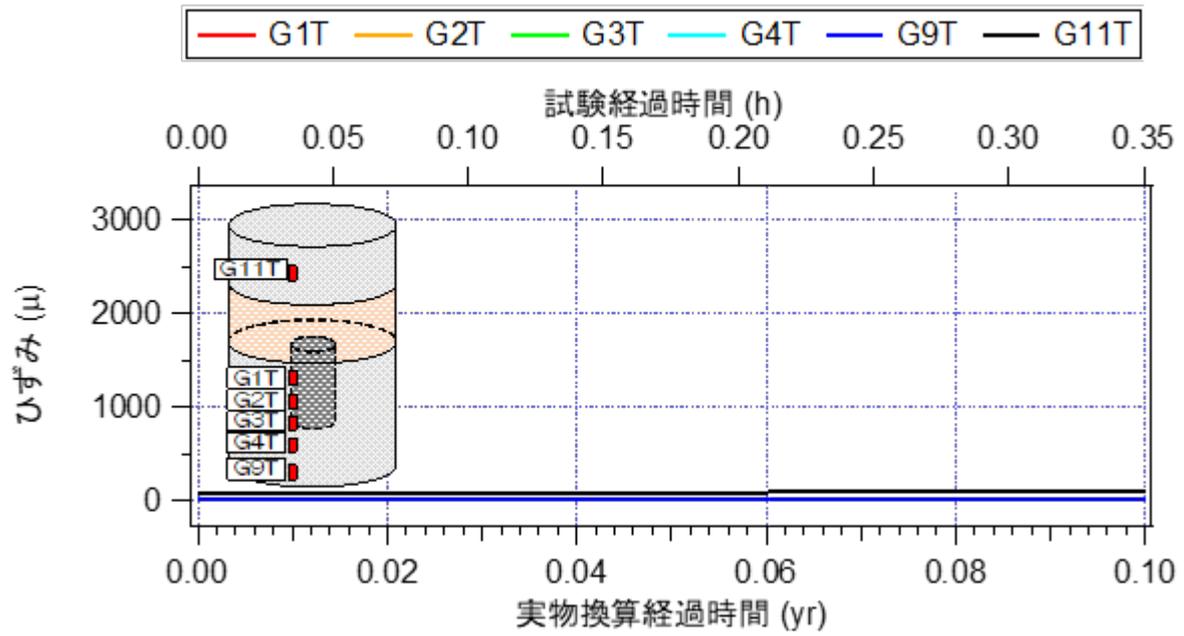
ひずみゲージの計測値を示した図において、プラスは引張（膨張）、マイナスは圧縮で示す。図 3.5.3-11 と図 3.5.3-12 に岩盤側面に貼付したひずみゲージの計測値を示す。図 3.5.3-11 は岩盤軸方向のひずみの経時変化である。試験開始直後から注水側（下端面）に近い G9T の値が増加し、G4T、G2T と順に、値の大小はあるが、値が増加している。G3T は試験開始初期から計測不能となっている。また、G1T と G4T は 4 年相当経過時に、G2T については 14.7 年相当経過時に防水処理が損傷し計測不能となった可能性がある。G9T は下端圧が一定となった時点で値が増加して 0.74 年相当経過時に最大値 2233μ を計測した。その後は漸減し、4 年相当経過時から漸増する傾向となり、29 年相当経過時から再度漸減、70 年相当経過時から再度漸増する挙動となった。G4T は 0.7 年相当経過時から値の増加が見られ、1.19 年相当経過時に 1376μ を計測し G9T と同様にその後は値が減少、漸増した。全体の傾向としては、間隙水の浸潤に伴って有効応力が低下することで引張ひずみが発生し値が増加したと考えられる。また本年度の試験は軸方向の模型高さを

一定とする制御をしているため、2年相当経過時より上端圧および軸圧が上昇することで岩盤が軸方向に圧縮されたため圧縮ひずみがより顕著に現れている。4年相当経過時には上端圧および軸圧が一定となったため再度飽和が進み、有効応力の低下によりひずみ値が再度漸増したものと考えられる。

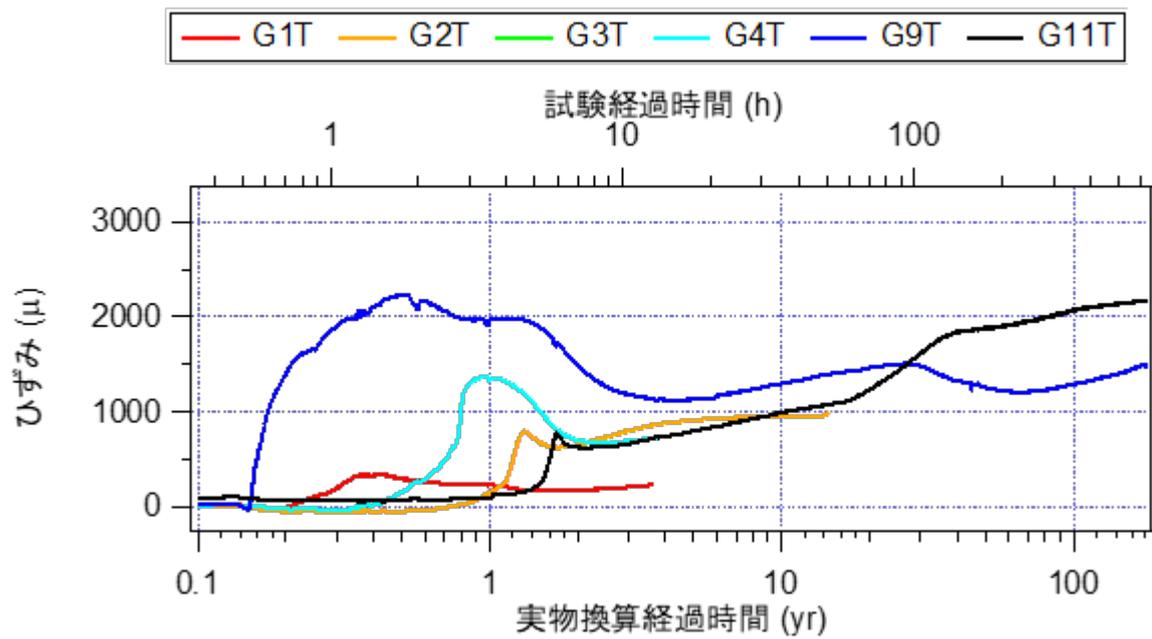
図 3.5.3-12 は岩盤周方向のひずみの経時変化である。試験開始初期では岩盤軸方向のひずみと同様な傾向を示しており、中水面に最も近い G10T から引張側に値が増加し G8T、G7T、G6T が順に値の増加が認められた。但し、G5T のみ傾向が違い、G8T の次に値が増加した。有効応力の低下を起因とする引張ひずみの増加、緩衝材の膨潤による岩盤の周方向への膨張に起因する引張ひずみの増加により値が増大する傾向にあるが、G7T については 27.2 年相当経過時以降、G12T については 41.6 年相当経過時以降値が減少している。この圧縮は、岩盤が不飽和から飽和状態に遷移する過程で岩盤の剛性が低下した影響と考えられる。

処分孔壁のひずみの経時変化を図 3.5.3-13 に示す。G13T は、注水開始とともに一旦値が減少し、圧縮傾向を示すが、注水圧が一定となった時点から値が増加し、10.34 年相当経過時で 1269 μ を計測し値が減少に転じた。引張側への値の増加は有効応力の低下や緩衝材の膨潤圧によるもの、圧縮側への傾向は岩盤の軟化の影響と考えられる。G14T は、試験開始直後から緩衝材の膨潤によって引張傾向を示し、0.58 年相当経過時から計測不能となった。

水位センサー設置部分のひずみの経時変化を図 3.5.3-14 に示す。G_WG1 は水位センサーを設置した孔内に貼付してあるゲージで、軸方向のひずみを計測しており、G_WG2 については処分孔上端面の半径方向、G_WG4 については埋戻し材上端面（上部岩盤下端面にひずみゲージを貼付）の半径方向ひずみを計測している。G_WG1、G_WG2、G_WG4 の順に値が増加し、引張側に推移した。G_WG2 のみ 8.95 年相当経過時から値が減少し圧縮側に推移した。

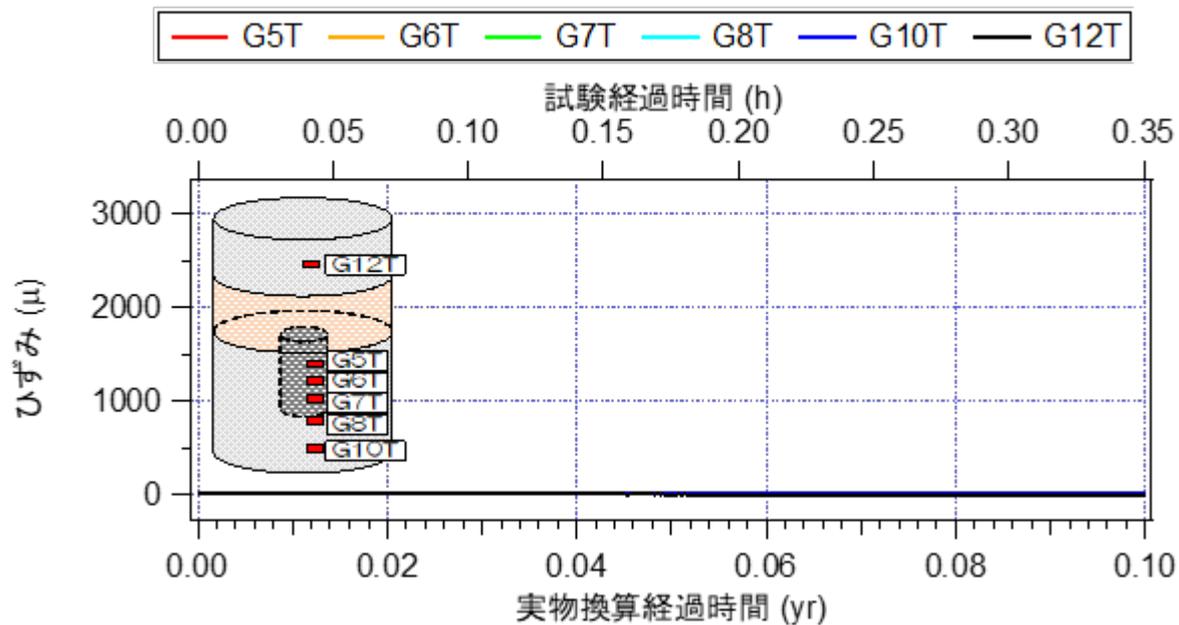


a) 開始から 0.1 年相当経過時

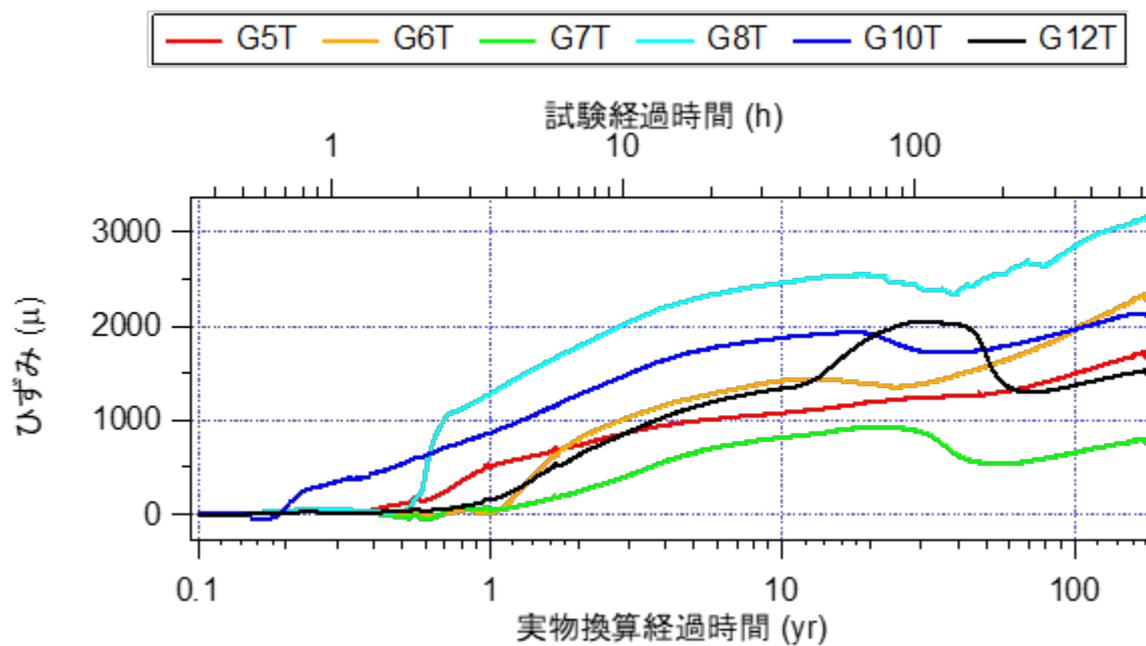


b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-11 模型側面軸方向のひずみ経時の変化

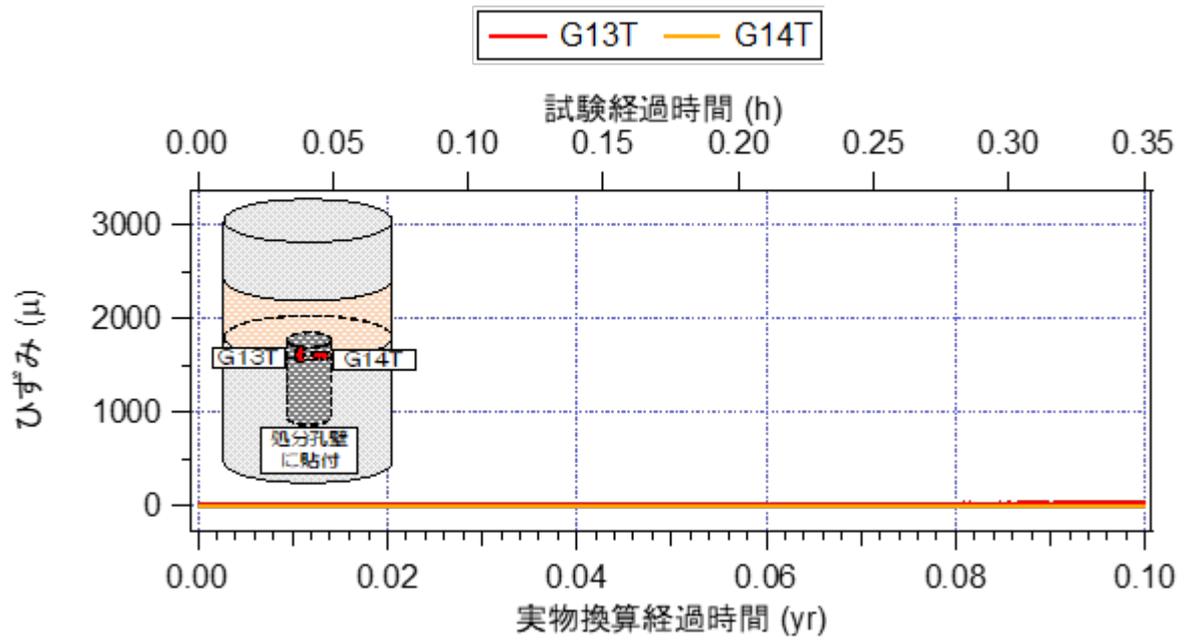


a) 開始から 0.1 年相当経過時

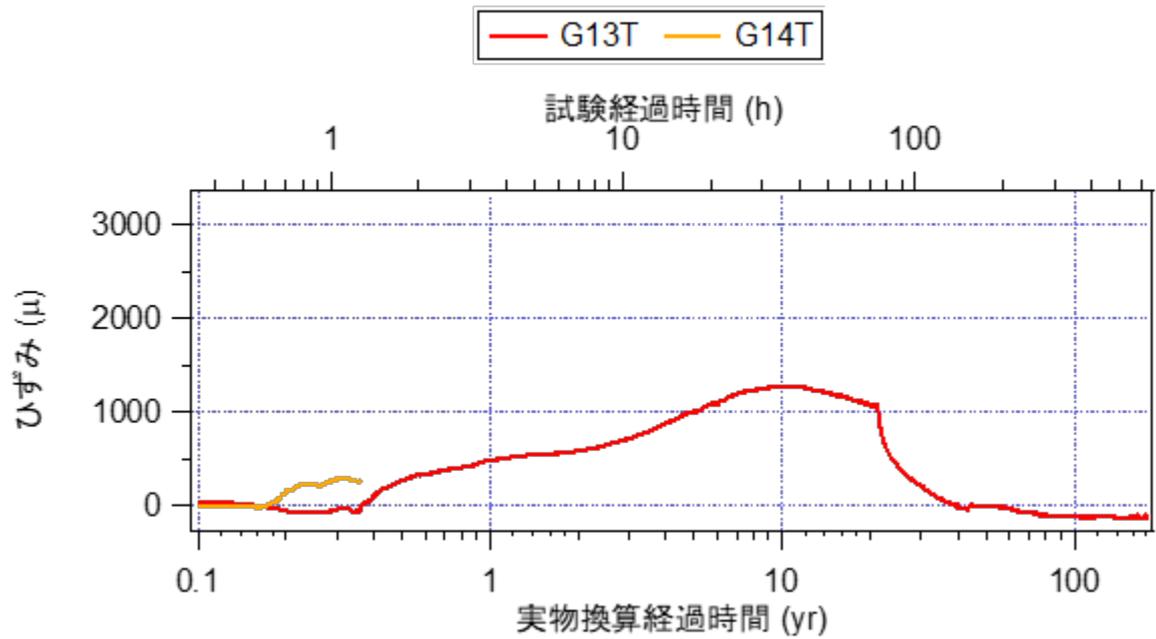


b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-12 模型側面周方向のひずみの経時変化

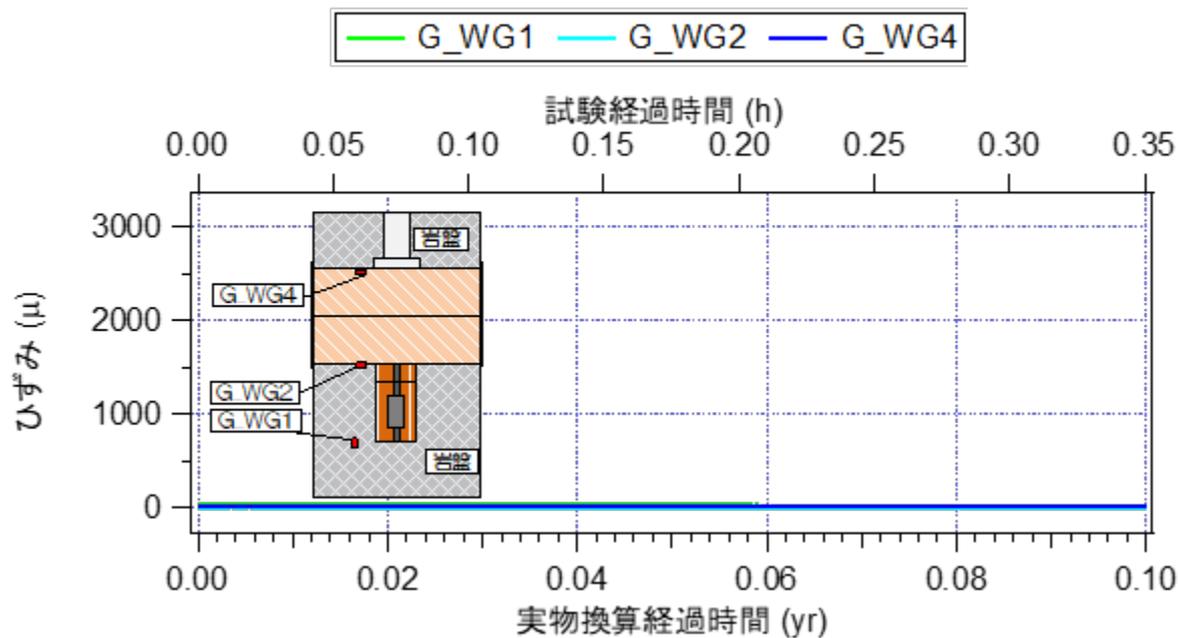


a) 開始から 0.1 年相当経過時

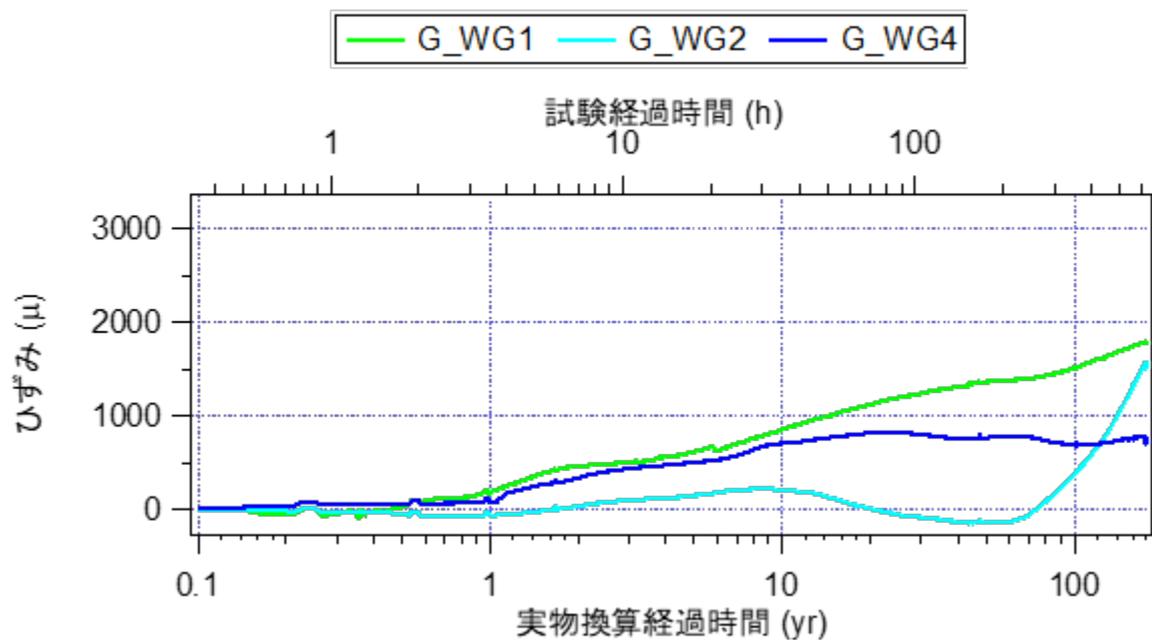


b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-13 処分孔壁のひずみの経時変化



a) 開始から 0.1 年相当経過時



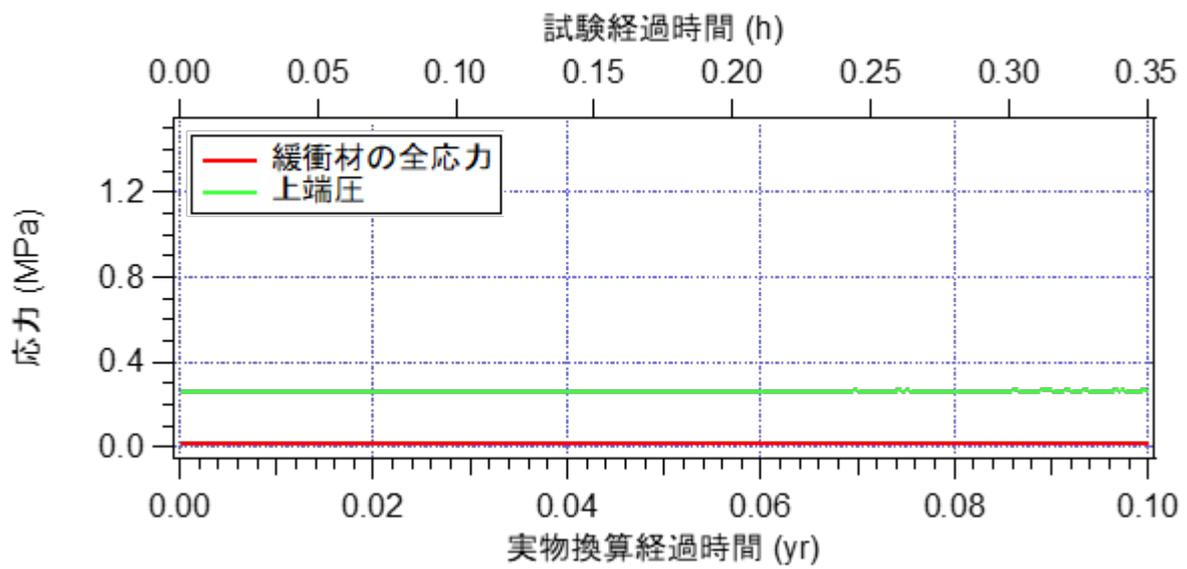
b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-14 水位センサー設置部分のひずみの経時変化

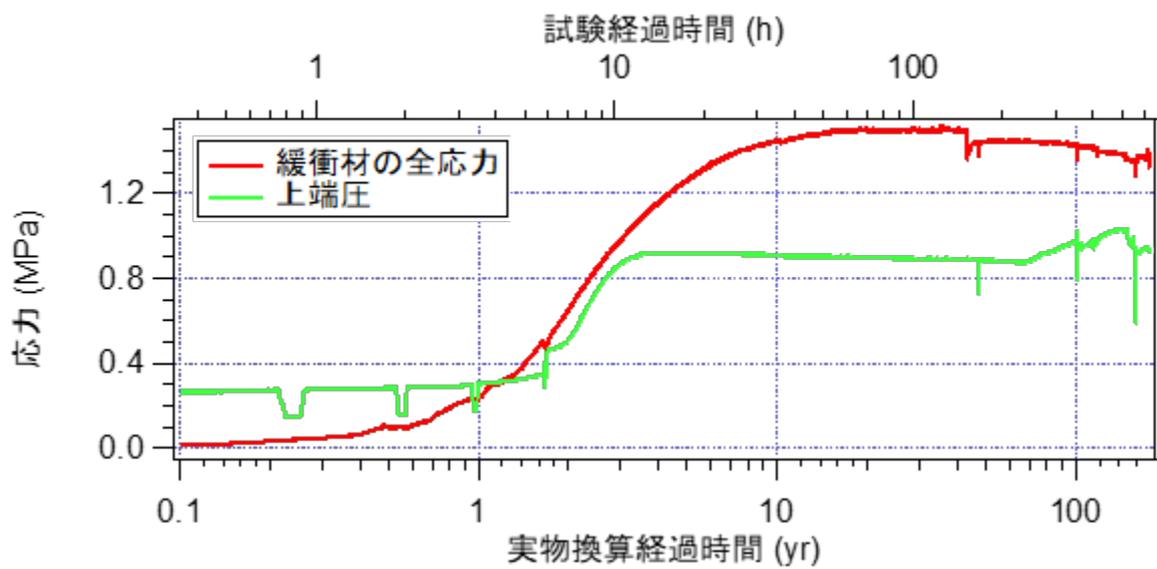
4) 緩衝材の全応力

緩衝材の膨潤挙動については緩衝材中に埋め込まれた土圧計で計測しているが、この計測値自体は「緩衝材の膨潤圧」あるいは「拘束圧の負荷による岩盤の変形で緩衝材に負荷される応力」、「埋戻し材の膨潤により緩衝材に負荷される応力」のいずれか大きい値と「軸圧」もしくは「間隙水圧」のいずれか大きい値との和である。このため、本試験ではこの計測値を「緩衝材の全応力」と定義し、緩衝材の膨潤挙動を評価した。

図 3.5.3-15 に土圧計で計測した緩衝材の全応力の経時変化を示す。緩衝材に設置した土圧計は、緩衝材を削って設置したことから隙間がある。このことから軸圧が土圧計に作用していない可能性がある。また同じくこの隙間の影響で、試験開始初期の緩衝材が間隙水の浸潤によって膨潤するまでは値の上昇は小さいと考えられる。水位が WG01 付近まで上昇した 0.27 年相当経過時に緩衝材の計測値（緩衝材の全応力）が上昇を開始した。緩衝材の全応力は試験開始後、0.35 年相当から 0.63 年相当までは、下方の緩衝材の膨潤による値の増加見られるが、その後模型上面の水位センサー（WG04）まで間隙水が浸潤し、模型上面の上端圧の増加が開始すると、値の増加傾向が大きくなった。約 20 年相当経過時から値が収束をしはじめていることから、緩衝材周辺が飽和に近づいていると考えられる。最大値は 20.6 年相当経過時で 1.498MPa となった。約 40 年相当経過時の急減はオーバーパック温度の急激な低下の影響であり、また、試験終了時の緩衝材の全応力は 1.37MPa となっている。



a) 開始から 0.1 年相当経過時



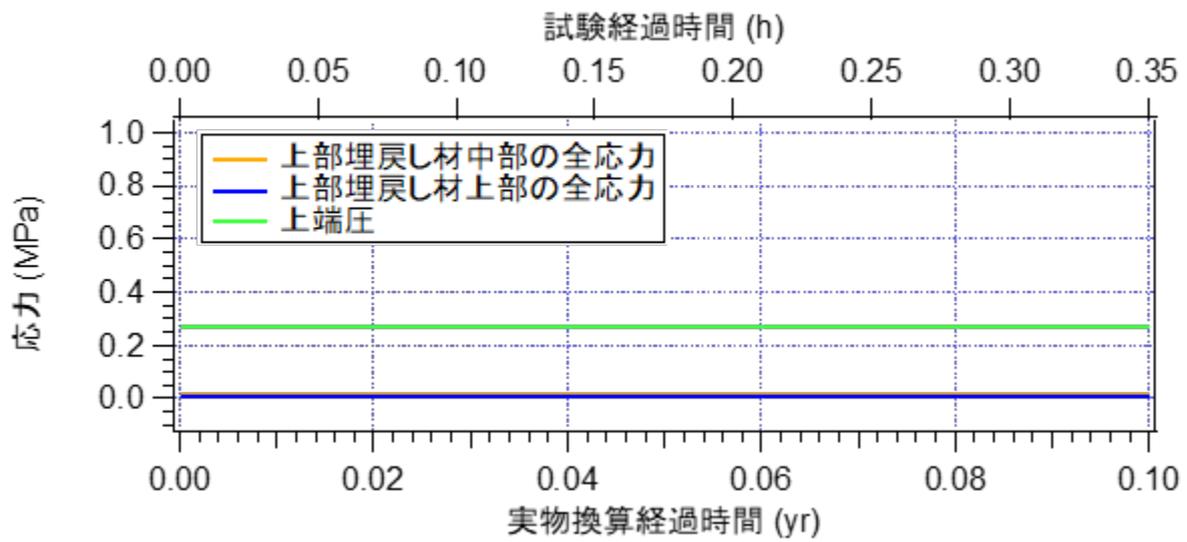
b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-15 緩衝材の全応力と上端圧の経時変化

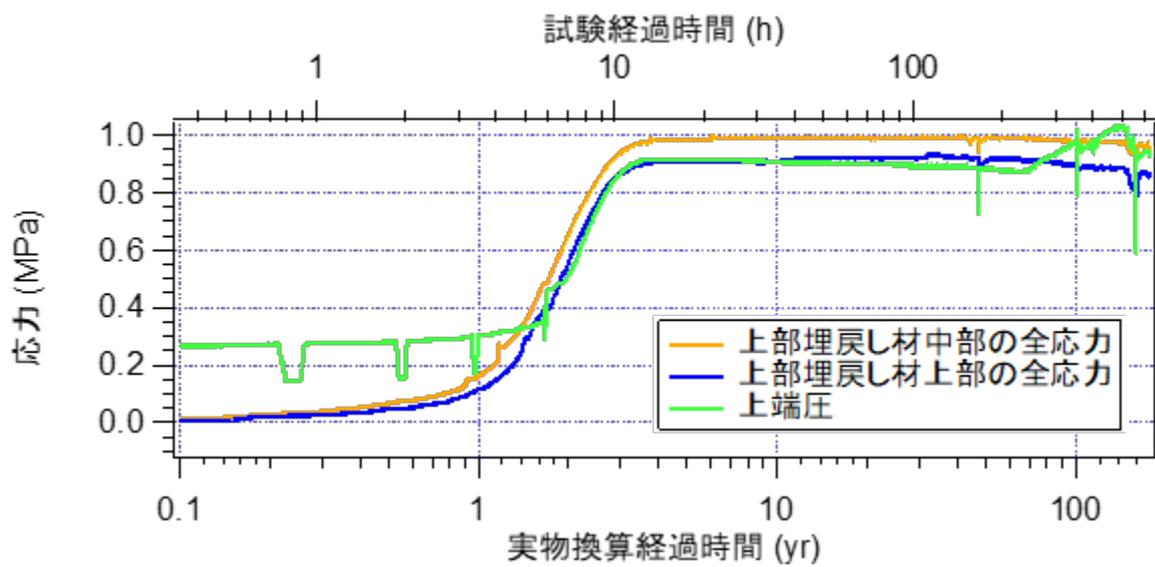
5) 上部埋戻し材の全応力

埋戻し材の膨潤挙動について上部岩盤に埋め込まれた土圧計（センサーケースを圧力容器上蓋に剛結。上部埋戻し材上部、という）および上部埋戻し材中部に設置した土圧計（上部埋戻し材中部、という）で計測しているが、この計測値自体は「埋戻し材の膨潤圧」あるいは「緩衝材の膨潤により負荷される応力」のいずれか大きい値と「軸圧」もしくは「間隙水圧」のいずれか大きい値との和である。このため、計測値を緩衝材と同様、「埋戻し材の全応力」と定義している。

図 3.5.3-16 に土圧計で計測した埋戻し材の全応力の経時変化を示す。土圧計の計測値は、緩衝材の全応力と同様な上昇傾向を示した。水位が WG02 付近に到達する 0.63 年相当経過時に全応力が上昇開始した。WG04 まで間隙水が浸潤した 1.09 年相当経過時から上端圧とともに膨潤が発生することで応力の上昇が増加し、上端圧の 0.91MPa に対し、上部埋戻し材上部の全応力は 0.90MPa、中部の全応力は 0.99MPa となった。また、値は 4 年相当経過時以降収束傾向を示した。



a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-16 埋戻し材の全応力と上端圧の経時変化

6) 膨出センサー

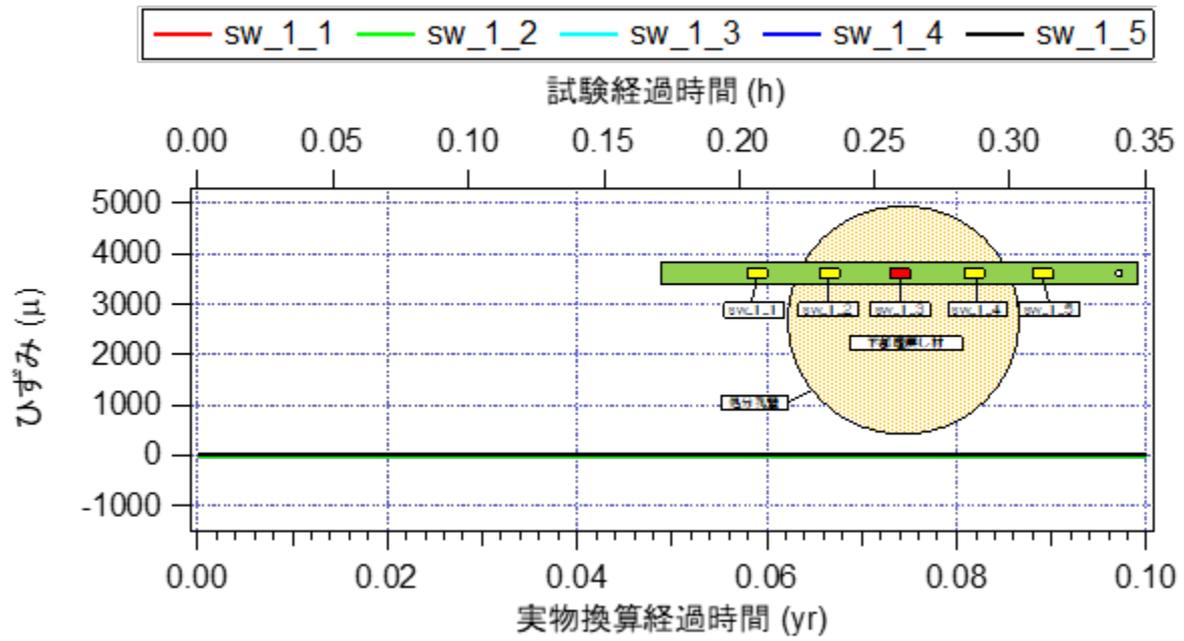
本試験では処分孔内の緩衝材・下部埋戻し材に対し、孔蓋・アンカー等で膨出を完全に抑制するのではなく、上部埋戻し材を設置しているため、緩衝材・下部埋戻し材の膨出が生じる可能性がある。このため、開発した膨出センサーを使用して膨出について評価した。

図 3.5.3-17 に膨出センサーに貼付してあるひずみゲージから計測されたひずみの経時変化を示す。ここで、sw_1_1 は、図 3.5.2-1 におけるスライド機構側に一番近いセンサーに対応、sw_1_2 はスライド機構側から二番目のセンサー、sw_1_5 が固定ピン支点側に一番目近いセンサーに対応する。膨出センサーが出力を始めた時刻は、0.53 年程度経過後となっている。sw_1_5 を除いて sw_1_3、sw_1_2、sw_1_4 の順にプラス方向に値が増加している。上端圧が一定となった 4 年相当経過時の値は sw_1_1 が 1285μ 、sw_1_2 が 1782μ 、sw_1_3 が 2185μ 、sw_1_4 が 5094μ 、sw_1_5 が 137μ となった。

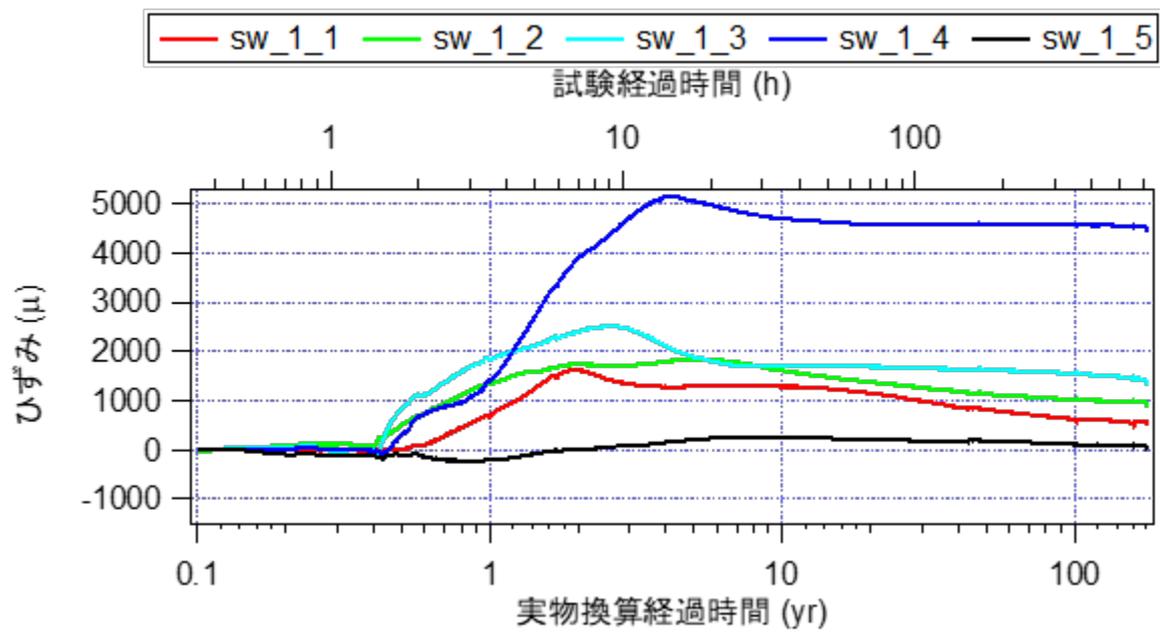
図 3.5.3-18 にある時間断面の膨出センサーのひずみ値(ある時間の定性的な膨出形状)を示す。凡例は実物換算経過時間であり、表 3.5.3-1 にその時間に対応する事象を示した。4 年相当時以降は適当な時間間隔である。また、横軸は膨出センサーの sw_1_1～sw_1_5 に対応している。各センサーのひずみ値は、リン青銅板に対する膨出による曲げや引っ張り、間隙水圧や膨潤圧の変化による圧縮ひずみを計測していると考えられる。sw_1_5 を除き、ひずみは増大する傾向にあり、特にオーバーパック浮上開始(0.55 年相当)以降ではひずみ値が急増し、水位が WG04(上部埋戻し材上端部)に到達した 1.09 年相当までのひずみの分布は、定性的には凸状に下部埋戻し材が膨出しているように見える。それ以降では sw_1_4 のひずみ量が急激に増加している。

ここで、リン青銅板(C5191)に生じる熱膨張、引張・圧縮の性質について述べる。熱ひずみは $18\mu/^\circ\text{C}$ であるので、試験開始時が 20°C に対し最高温度 41.5°C であるので、本試験の膨出センサー上で生じる熱膨張ひずみは最大で 387μ となる。引張・圧縮ひずみ、せん断ひずみについてはリン青銅の弾性係数より求まり、それぞれ $10\mu/\text{MPa}$ 、 $25\mu/\text{MPa}$ 程度である。また、膨出センサー(リン青銅板)は片端固定-片端スライド式であるので、これを単純な一端固定-他端単純支持梁と仮定し等分布荷重が作用した場合、中心部の曲げひずみは約 $700\mu/\text{MPa}$ となる。

sw_1_4 では最大で 5000μ 程度のひずみが計測されている。これは固定ピンに近い側であり、かつ岩盤と下部埋戻し材の境界部(処分孔端部)付近に位置していることから、勾配のきつい膨出に伴う曲げが生じている可能性がある。一方で sw_1_5 は、初期位置が下部岩盤上端面であり、かつ固定ピン直近であるため、膨出による曲げひずみが発生する可能性は小さく、間隙圧や上部埋戻し材の膨潤圧による圧縮ひずみ(約 2 年相当まで)や膨出センサーと接地面との摩擦による引張ひずみを生じている可能性が高い。



a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-17 膨出センサーのひずみの経時変化

表 3.5.3-1 各事象と対応する実物換算経過時間

事象	実物換算時間	事象	実物換算時間	事象	実物換算時間
注水開始	0.00年	WG02到達時	0.63年	OP変位最大値	2.32年
WG01到達時	0.27年	WG03到達時	0.88年	上端圧一定	4.00年
下端圧一定時	0.43年	WG04到達時	1.09年		
OP浮上開始直前	0.55年	上端圧上昇開始	1.66年		

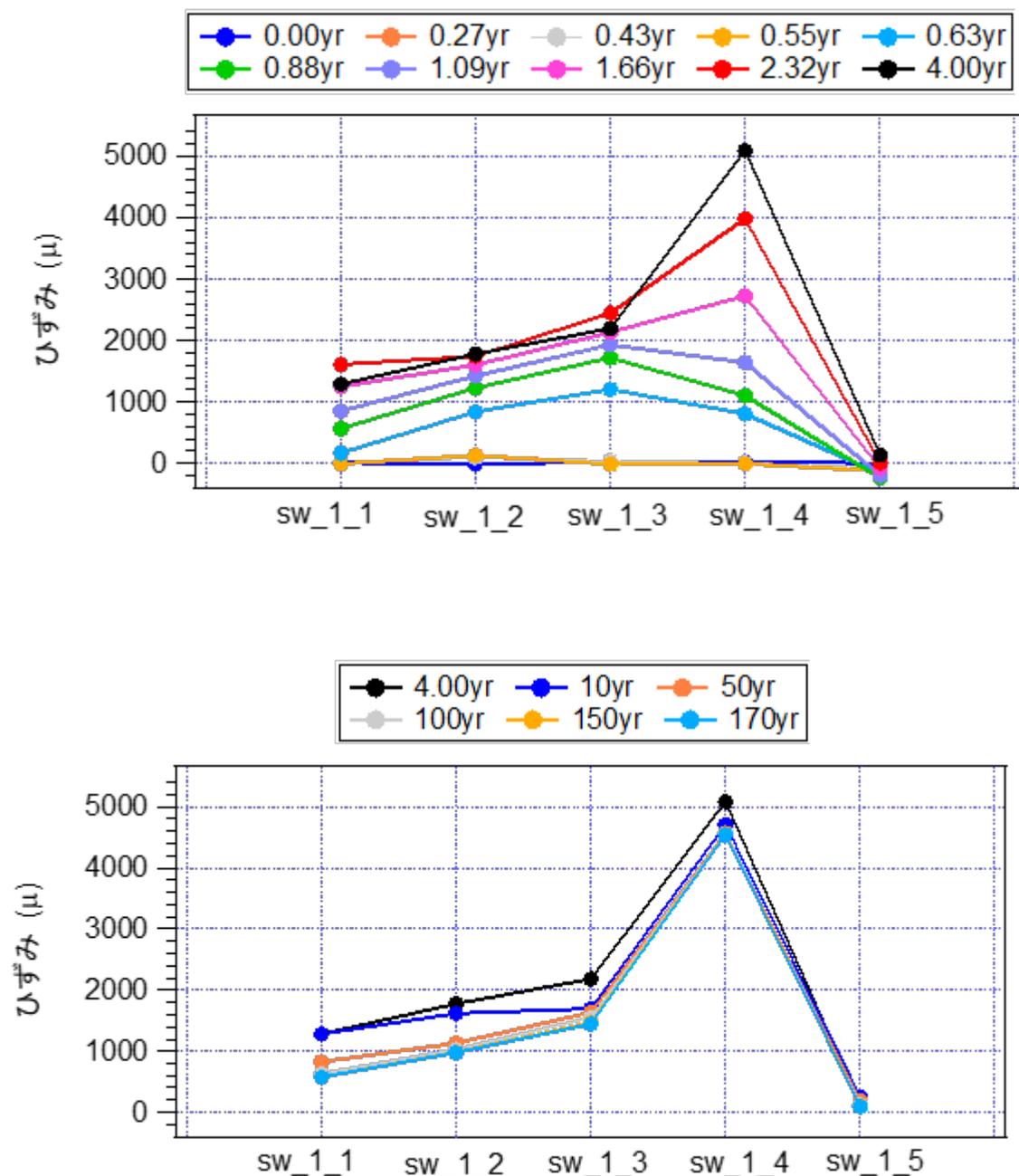


図 3.5.3-18 膨出センサーのひずみの分布形状

7) 鉛直変位

(a) 下部ピストンの鉛直変位 (模型高さの変位)

図 3.5.3-19 に非接触変位計によって計測した下部ピストンの鉛直変位の経時変化を示す。下部ピストンの鉛直変位は载荷ピストン部に設置されたセンサー (図 3.3.2-1 内、非接触変位計 (载荷ピストン用) に対応) で計測した値である。下部ピストンの変位におけるプラスはピストンが上昇 (軸圧の载荷) 方向であり、マイナスはピストンが下降 (軸圧の除荷) 方向である。この下部ピストンの変位は、模型の高さの変位に相当し、本年度の試験では、注水压 (下端圧) が一定となった後、この変位が一定となるような制御を行なった。このためこの変位を模型高さの変位と仮定し、図 3.5.3-19 では実物換算変位でその経時変化を示してある。注水を開始するとピストンは上昇方向に推移し、下端圧が 1.07MPa に達した後に 3.32mm を基準として軸方向の変位を制御して模型高さを一定とした。

(b) 上部埋戻し材上方の鉛直変位

図 3.5.3-20 に上部埋戻し材の鉛直変位の経時変化を示す。この鉛直変位は、上部岩盤に埋め込まれたセンサー (センサーケースを容器上蓋に剛結) (図 3.3.2-1 内、非接触変位計 (埋戻し材用) に対応) で上部埋戻し材上端面に設置したターゲットの鉛直変位を計測した値である。圧力容器の構造上、上蓋は動くことはない。鉛直変位でプラスはターゲットが上昇 (変位計に近づく)、マイナスは下降 (変位計から離れる) 方向である。この上部埋戻し材上端部の変位は、遠心力を载荷することで模型の自重応力が変化し圧縮する可能性があったため、その変化を監視するための役割と、上部埋戻し材が飽和に伴い圧密し、上部岩盤との間に隙間が生じるかどうかの確認のために計測した。注水開始とともに上昇が始まり、上端圧が上昇を開始すると急激に上昇している。実際の処分坑道では、上部埋戻し材の施工時に生じる可能性がある僅かな隙間が膨潤により充填される挙動が考えられるが、鉛直変位を計測するためのターゲットの設置の際、上部埋戻し材上端面を座繰り設置している。本試験で計測された挙動は、試験の境界設定による現象が大きいと考えられる。上端圧が一定となった時点での変位は 5.5mm の上昇であった。また、上部埋戻し材の応力の発現状況とも調和的であった。一方で、沈下挙動は計測されず、これは作製された上部埋戻し材が過圧密状態であったため、圧密沈下は生じなかったと考えられる。

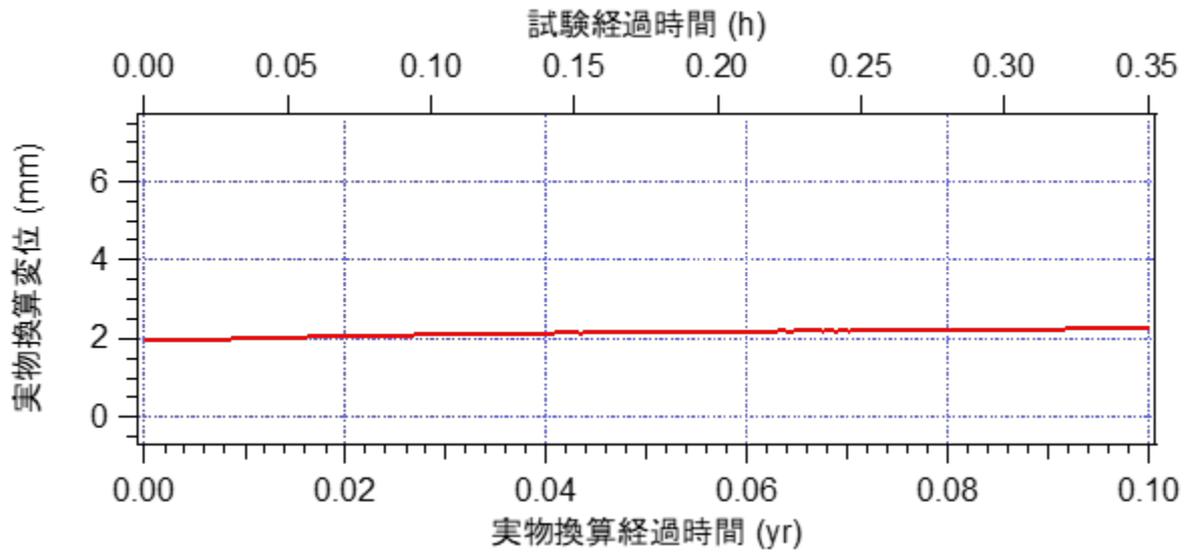
(c) オーバーパックの鉛直変位

オーバーパックの計測値は、処分孔底部の岩盤内に設置した非接触式変位計を使用している。H27、28 年度では、圧力容器上蓋に埋め込まれた変位計を使用し、容器上蓋は金属製のため変位計を不動点と考えることができた。一方、本試験では変形が生じる岩盤内に設置されているため、計測値から処分孔底部より下方の岩盤の変形量を差し引くことでオーバーパックの鉛直変位が算出できる。本試験では処分孔底部より下方の岩盤部分の鉛直変位を計測していないため、次の仮定に基づいて補正を実施した。まず、水位センサーWG01 まで水位が到達した時刻を処分孔底部より下方までの岩盤が飽和した時刻と仮定した。さらに岩盤の不飽和時のヤング率を乾燥時のヤング率と飽和時のヤング率から線形近似することで間隙水の浸潤過程における岩盤の変形量 (変位) を求め、それを差し引くことで補正を実施した。

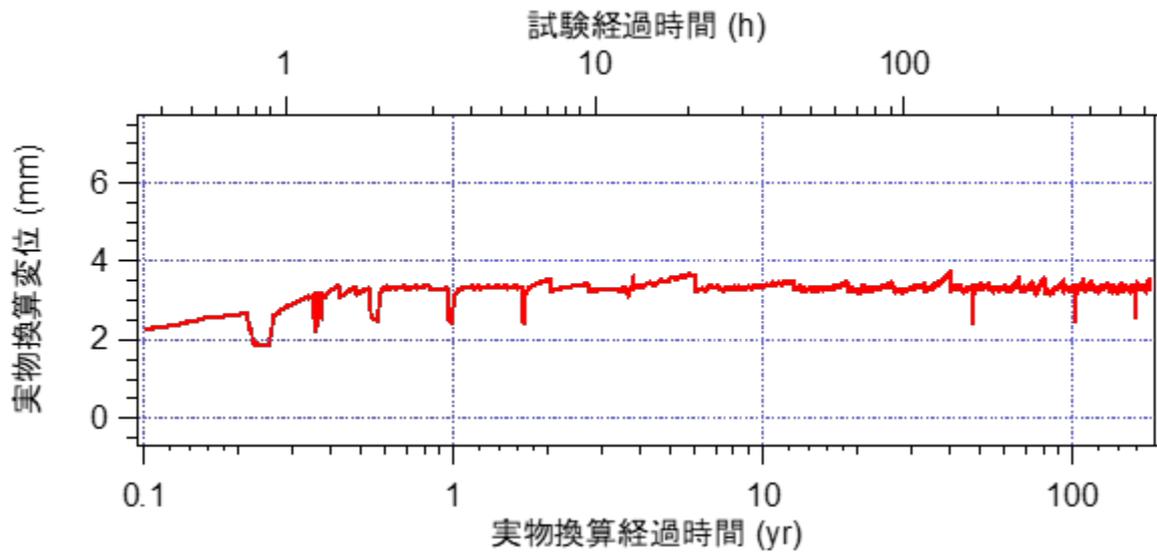
補正したオーバーパットの鉛直変位を図 3.5.3-21 に示す。0.16 年相当経過時からやや沈下傾向が認められるが、水位が処分孔底部（水位センサーWG01）まで到達するとオーバーパットは浮上を開始した。水位が処分孔上部（水位センサーWG02）まで到達すると浮上速度が大きくなり、上端圧が一定となった時刻で最大変位 6.94mm を計測した。その時点から緩衝材の上部および下部埋戻し材が膨潤することで下向きの応力が発生したため沈下に転じたと考えられる。43.6 年相当経過時には沈下傾向であったオーバーパットが浮上し、再度沈下する傾向が見られた。これは、オーバーパットの温度が急激に下がり有効応力が変化し、一時的に浮上したものと考えられる。

(d) 膨出センサーのひずみとオーバーパットの鉛直変位

オーバーパットの鉛直変位には緩衝材および下部埋戻し材の膨出も大きく影響を与えると考えられる。そこで、所定の時刻（表 3.5.3-1）におけるオーバーパットの鉛直変位と、膨出センサーのひずみ（sw_1_3）の関係を図 3.5.3-22 に示す。図上は経時変化の比較、図下はひずみと変位の関係である。sw_1_3 はセンサーの中心であり、またその初期位置は処分孔の中心部に位置し、オーバーパットの変位と相関が大きいと考えられることから着目した。なお変位は、プラス側が浮上、マイナス側を沈下としている。試験開始直後は処分孔底部より下方の岩盤の間隙水の浸潤による変位の発生のため変位がマイナスになるが、オーバーパットが浮上を始めるとともに sw_1_3 のひずみが増加している。その後もオーバーパットの変位が最大値を示すまで sw_1_3 のひずみは増加し、オーバーパットの変位が最大値を示した時刻以降はオーバーパットの沈下とともに sw_1_3 のひずみも減少している。特に、0.88～1.66 年相当時と 10～170 年相当時、および 1.66～2.32 年相当時と 4～10 年相当時の傾きがほぼ一致しており、膨出センサーのひずみ量とオーバーパットの変位は密接に関係している。

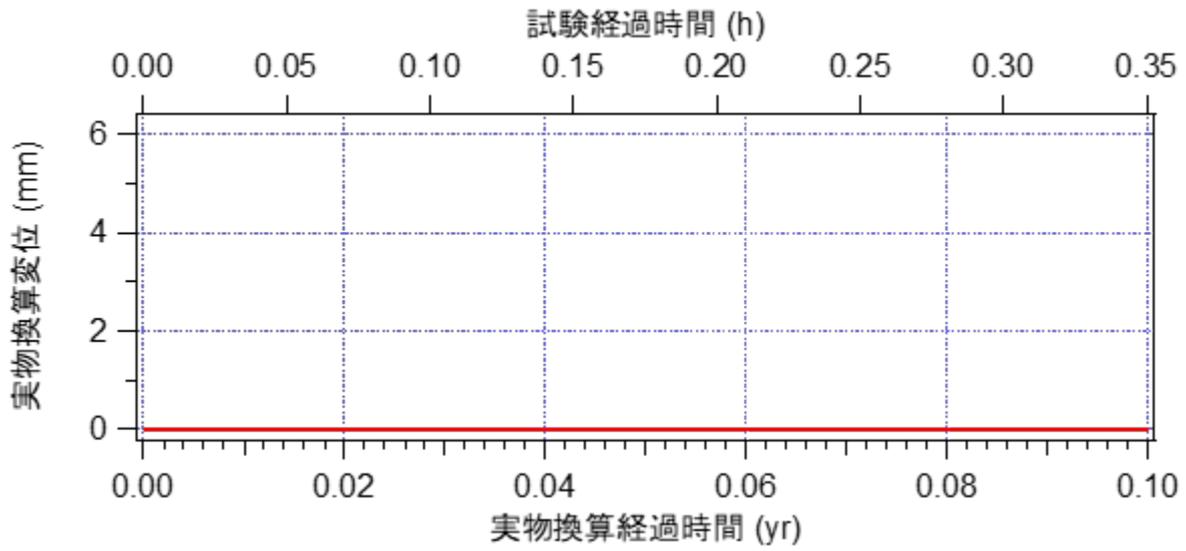


a) 開始から0.1年相当経過時

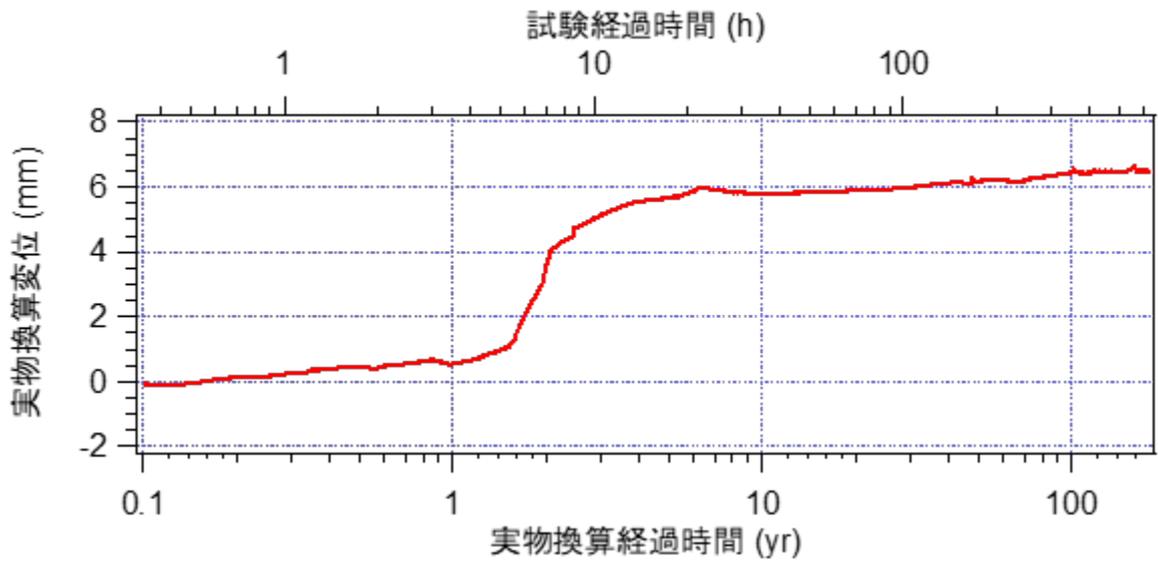


b) 0.1年相当経過時以降

図 3.5.3-19 下部ピストン（模型高さ）鉛直変位の経時変化

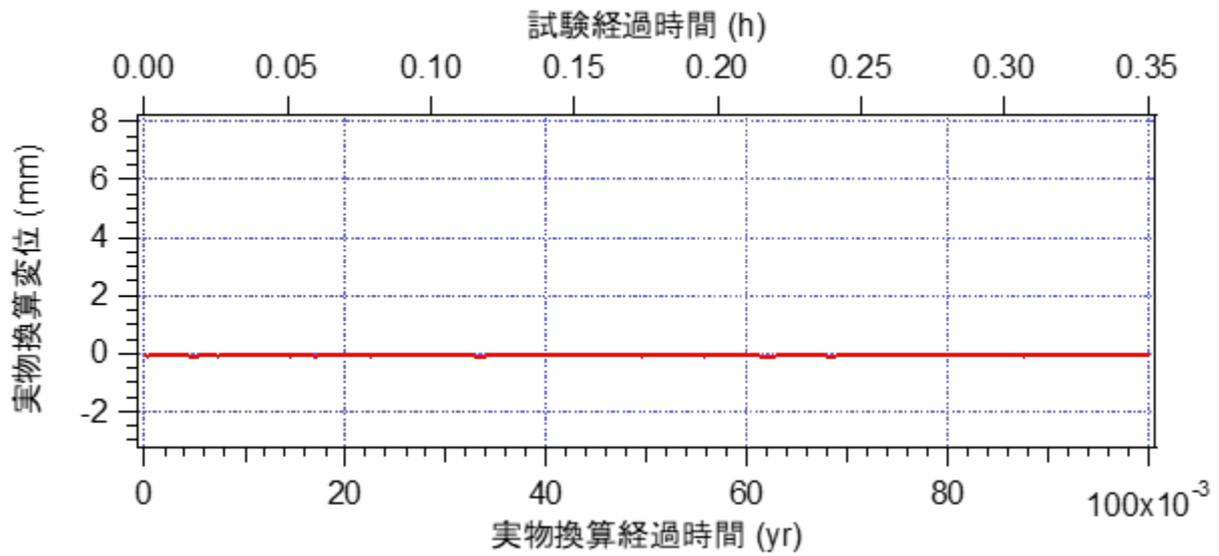


a) 開始から0.1年相当経過時

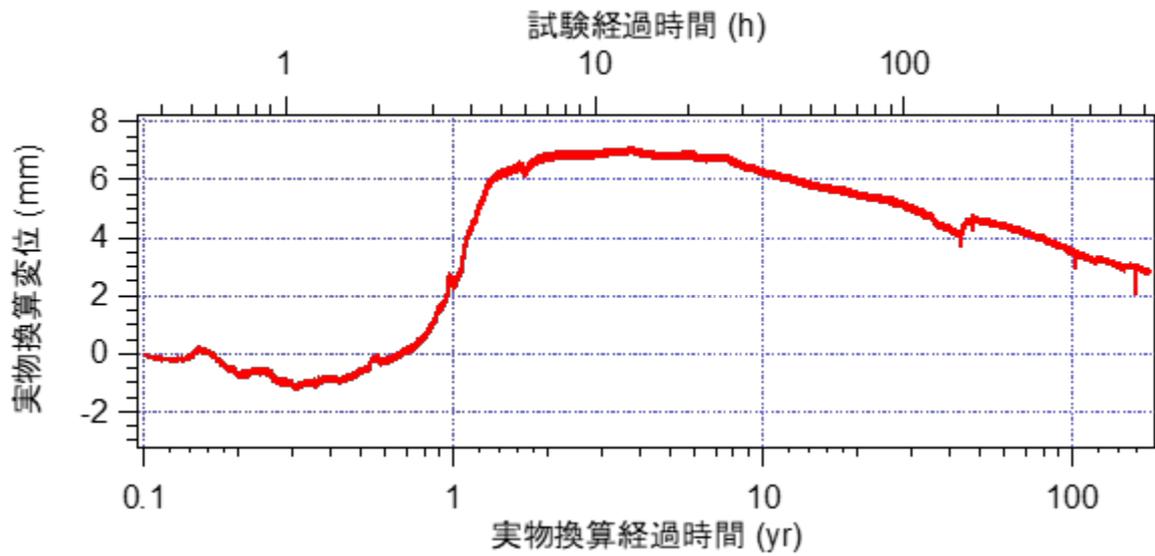


b) 0.1年相当経過時以降

図 3.5.3-20 上部埋戻し材の鉛直変位の経時変化



a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

図 3.5.3-21 オーバーパックスの鉛直変位（補正值）の経時変化

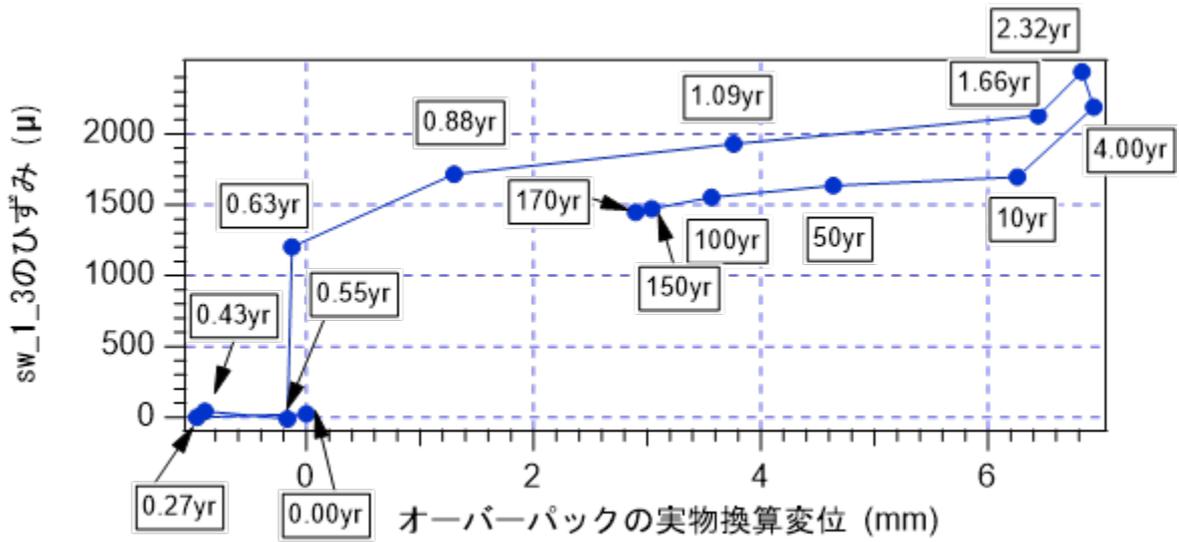
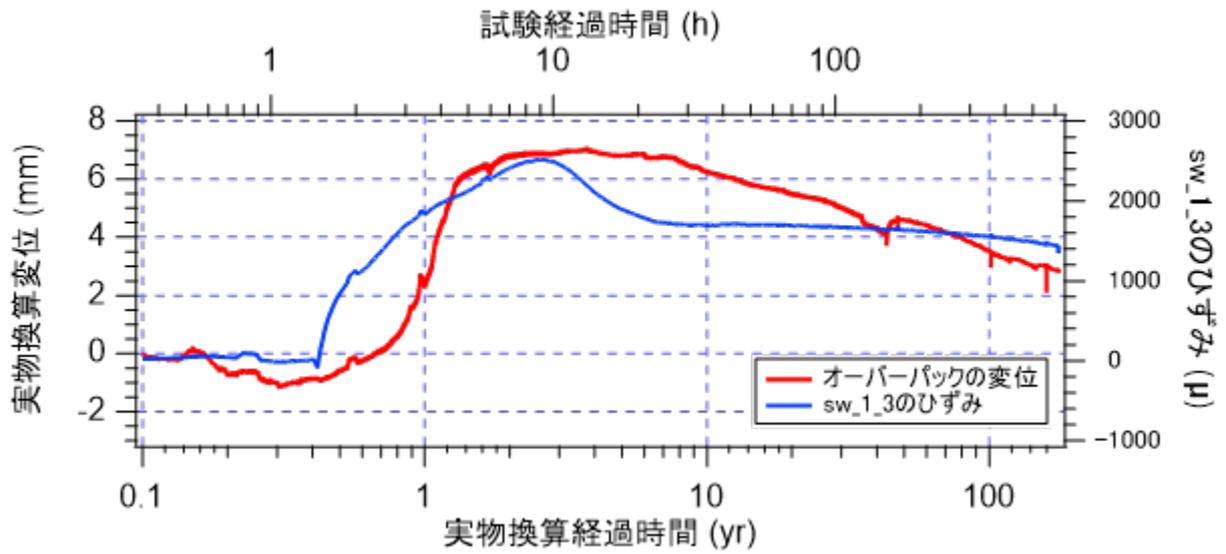


図 3.5.3-22 オーバーパックの鉛直変位と膨出センサー (sw_1_3) のひずみの関係

(2) 試験後の緩衝材密度、含水比測定および埋戻し材の含水比測定

1) 緩衝材および下部埋戻し材の密度・含水比

試験終了後に、緩衝材および下部埋戻し材を採取し、密度および含水比を測定した。採取は図 3.5.3-23 に示す、高さ 15mm、内径 9.8mm の試料採取ロッド（サンプリングロッド）を使用した。ロッドは金属製であるため、ロッドの内径、高さから容積がわかり、質量測定と合わせて湿潤密度、乾燥密度を求めることができる。試料採取には細心の注意を払うが、試料採取ロッドを打撃して試料の採取を実施するため、ロッド内に採取できる試料は少なからず圧縮した状態となっている可能性がある。図 3.5.3-24 に採取位置を示す。以下に示す図中の(a)～(d)は、図 3.5.3-25 の深さの (a) ～ (d) に対応している。

試験後の緩衝材および下部埋戻し材の含水比の深度分布を図に示す。含水比の最大値は処分孔上端部に近い (a) 点で 32.2% となり、次いで処分孔下端部に近い (d) 点の 29.9% であった分布の形状を見ると、処分孔上下端部の含水比が中部に比べると高い。これは、処分孔下端部 (d) では間隙水の供給元に近く、処分孔上端部 (a) では上部埋戻し材から間隙水の浸潤を受けるためと考えられる。

試験後の緩衝材および下部埋戻し材の密度の深度分布を図 3.5.3-26 に示す。乾燥密度、湿潤密度ともに処分孔上下端部 (a)、(d) での密度が低く、中部で密度が高くなっている。特に処分孔上端部 (a) での密度が低くなっており、上部埋戻し材から間隙水が浸潤することで下方の緩衝材とともに下部埋戻し材が膨潤し、膨出したことによる影響が考えられる。含水比の深度分布より処分孔上下端部での含水比が高いことが計測されており、その影響があることがわかる。

密度について、想定した膨潤後乾燥密度は 1.6Mg/m^3 であり、試験後の定体積サンプリングによって計測された平均の膨潤後乾燥密度は 1.51Mg/m^3 である。この 0.09Mg/m^3 の密度差に必要な質量は処分孔全体で 10.5g であり、処分孔内の緩衝材の全質量の 5.6% である。ここで、サンプリングによる誤差を考えると、ロッドの容積が 1.18cm^3 であるので 0.09Mg/m^3 の密度差では 0.11g の試料の欠損が必要である。砂粒 15 粒で 0.01g 程度であるので、0.11g の欠損は 160 粒程度に相当する。実際の試料の割合はベントナイト 7 に対し砂 3 であるためさらに少なくなる。同様に湿潤密度について、平均で 1.95Mg/m^3 となった。含水比は平均で 29.69% であったので膨潤後乾燥密度より求まる想定湿潤密度は 2.08Mg/m^3 となる。上記密度差をサンプラーの体積にあてはめると湿潤質量の差は 0.15g である。この差について、サンプリング試料の成形時の試料すり切りによる影響、作業中の水分蒸発による影響（サンプリングは後述の CT 撮影終了後の数時間後であったため）で誤差が生じた可能性がある。しかし、ロッドから欠損する可能性がある砂粒は、作業過程を考えた場合、多くても 10 粒程度であることから、サンプリングから求めた密度が低い原因は誤差以外の要因が考えられる。

2) 上部埋戻し材の密度・含水比

緩衝材および下部埋戻し材と同様に上部埋戻し材も密度および含水比の測定をした。サンプリングの方法は、緩衝材および下部埋戻し材と同様の方法である。図 3.5.3-27 に試料採取位置を示す。以下に示す図中の (a) ～ (i) は図 3.5.3-28 の位置の (a) ～ (i) に対応している。

上部埋戻し材の含水比の深度分布を図 3.5.3-28 に示す。分布の形状は下端部の含水比が一番高

く、上方になるに従って含水比が低くなった。この傾向は埋戻し材中心部から 2.25m、中心部から 4m での深度分布でも同様であった。これは、埋戻し材の組成がケイ砂 85%に対してベントナイト 15%であったため、水分の蒸発が非常に早く、サンプリングも埋戻し材下端から実施したために埋戻し材の上方の含水比が低くなってしまった可能性がある。

上部埋戻し材の密度の深度分布を図 3.5.3-29 に示す。湿潤密度、乾燥密度ともに同様な形状を示しており、下端面の密度が一番小さく、次いで上端面、中部の順となった。

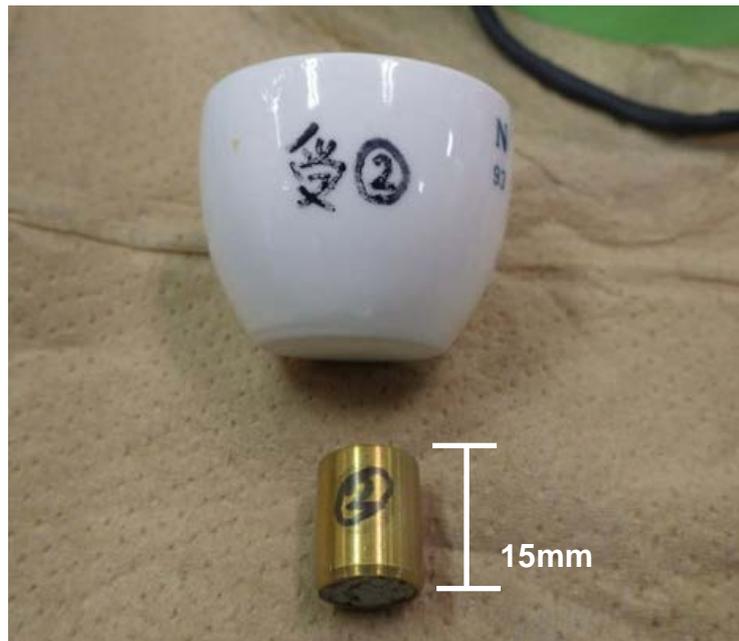


図 3.5.3-23 試験後の含水比計測に使用した試料採取ロッド

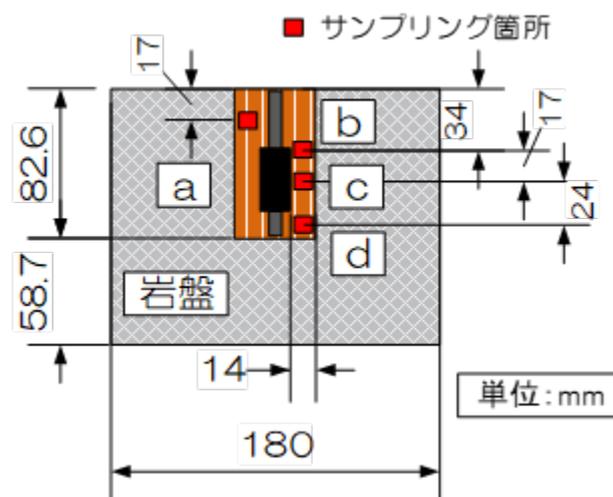


図 3.5.3-24 試験後の緩衝材および下部埋戻し材の含水比試料採取地点（模型寸法）

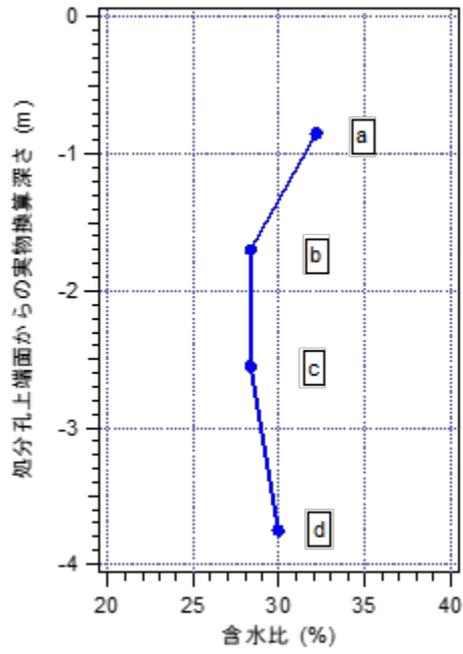


図 3.5.3-25 試験後の緩衝材および下部埋戻し材の含水比深度分布

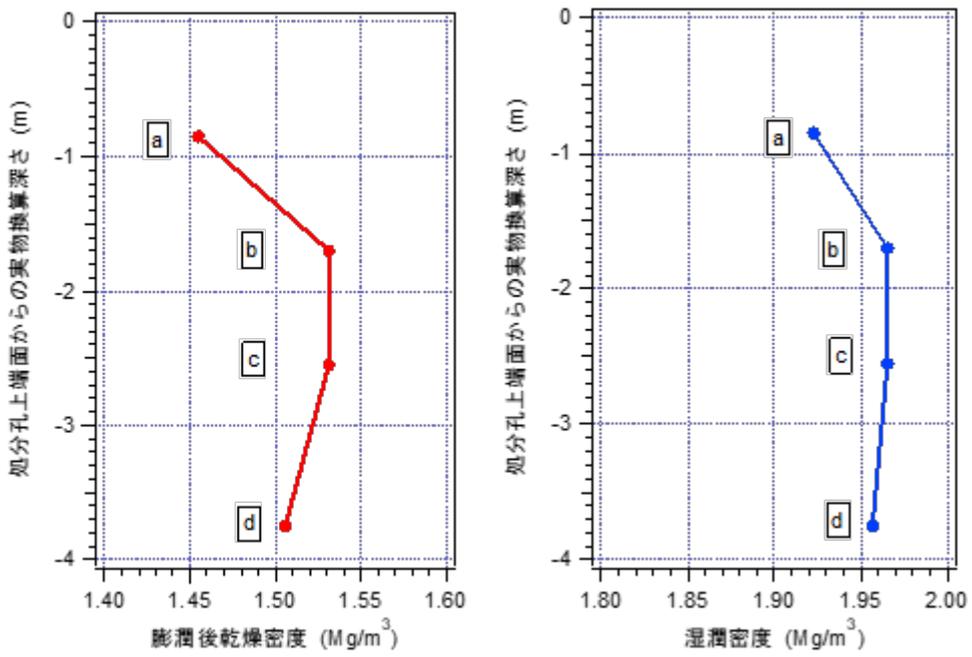


図 3.5.3-26 試験後の緩衝材および下部埋戻し材の密度深度分布

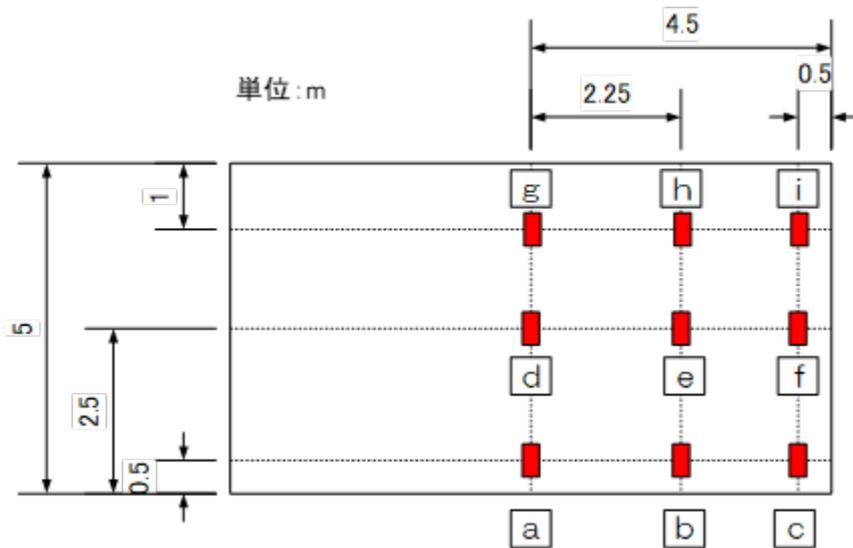


図 3.5.3-27 試験後の上部埋戻し材の含水比試料採取地点

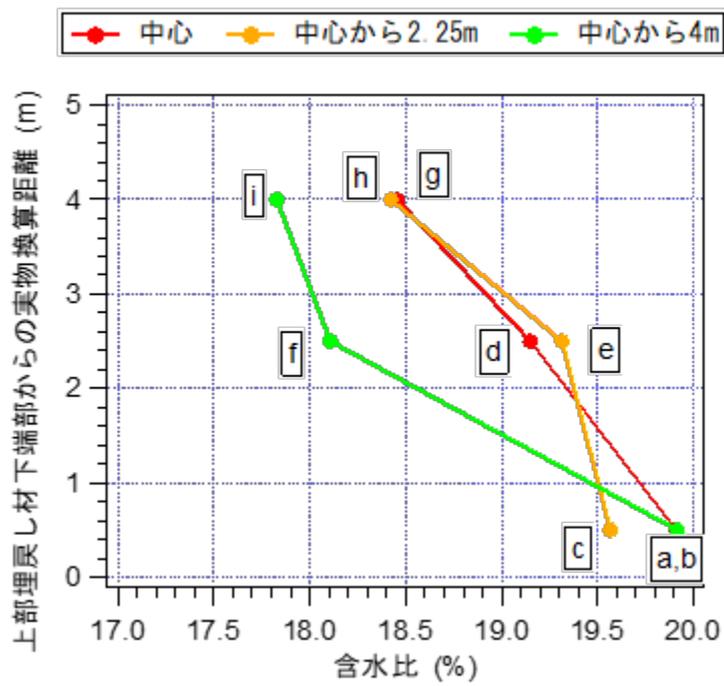


図 3.5.3-28 試験後の上部埋戻し材の含水比深度分布

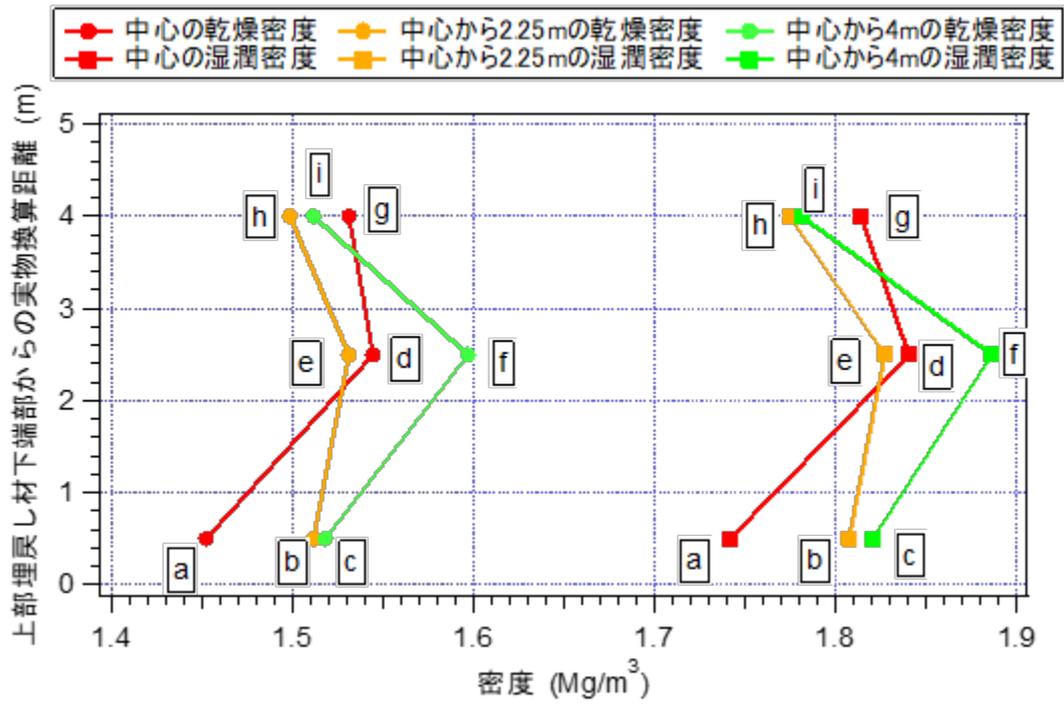


図 3.5.3-29 試験後の上部埋戻し材の密度深度分布

(3) X線 CT 撮影

X線 CT 撮影は、遠心模型試験前後の模型を撮影することで、模型の内部構造を把握することが目的である。図 3.5.3-30 に撮影箇所概要図を示す。

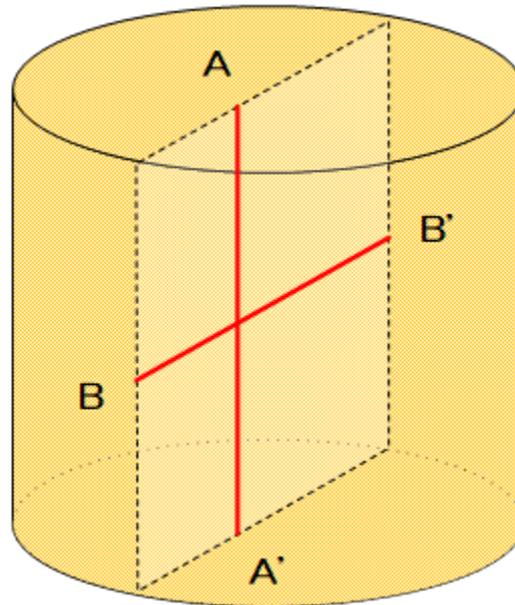


図 3.5.3-30 撮影箇所概要図

1) 試験前撮影

図 3.5.3-31 に図 3.5.3-30 で示した断面における撮影画像を示す。図中の A-A' や B-B' は図 3.5.3-32 に示す CT 値の分布に対応している。A-A' では、上部岩盤、上部埋戻し材、緩衝材（下部埋戻し材も含む）下部岩盤が明瞭に区別されている。また、B-B' を見ると下部岩盤、緩衝材、オーバーパックが明瞭に区別されていることが分かる。A-A' では CT 値が上部岩盤で 800～1000Hu、上部埋戻し材および下部埋戻し材を含んだ緩衝材で約 900Hu を示している。緩衝材および下部埋戻し材の密度が 1.86Mg/m^3 、上部埋戻し材の密度が 1.95Mg/m^3 であり密度値が小さいため、同程度の CT 値を示した。B-B' では、密度が 7.93Mg/m^3 のオーバーパック（金属）については 6500～9000Hu と大きな CT 値を示した。岩盤部には一部高い CT 値を示す箇所があるが、400～1300Hu 程度の CT 値を示し、岩盤内の鉱物や密度の違いにより、幅のある値を示した。

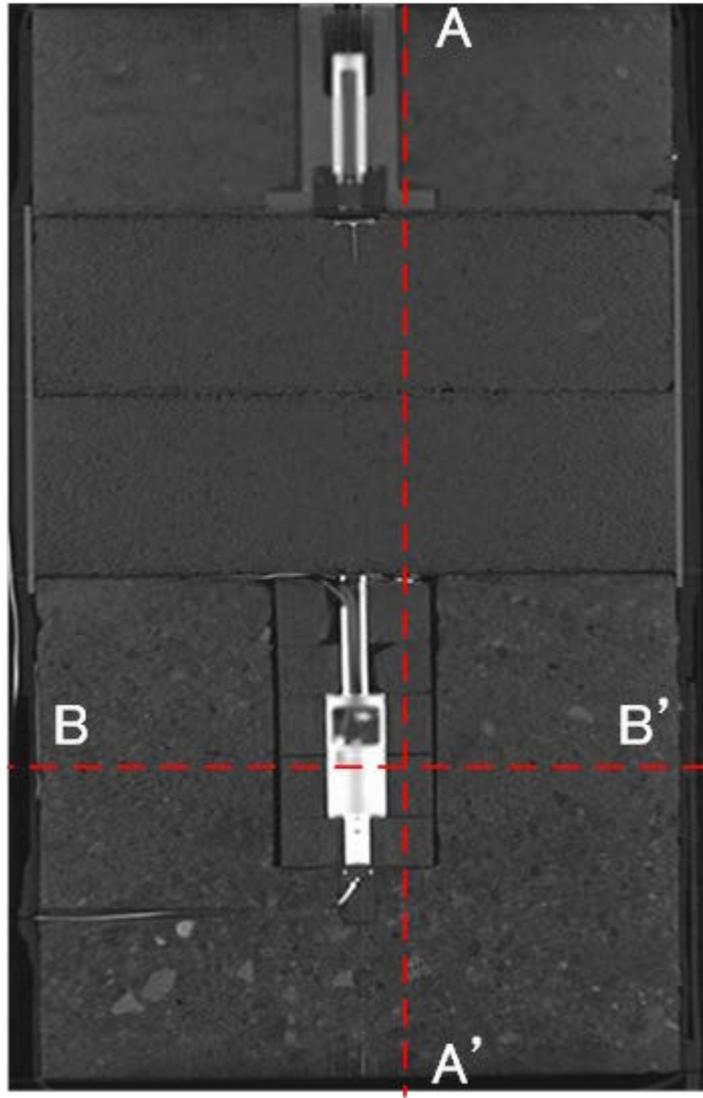


図 3.5.3-31 試験前の CT 撮影結果

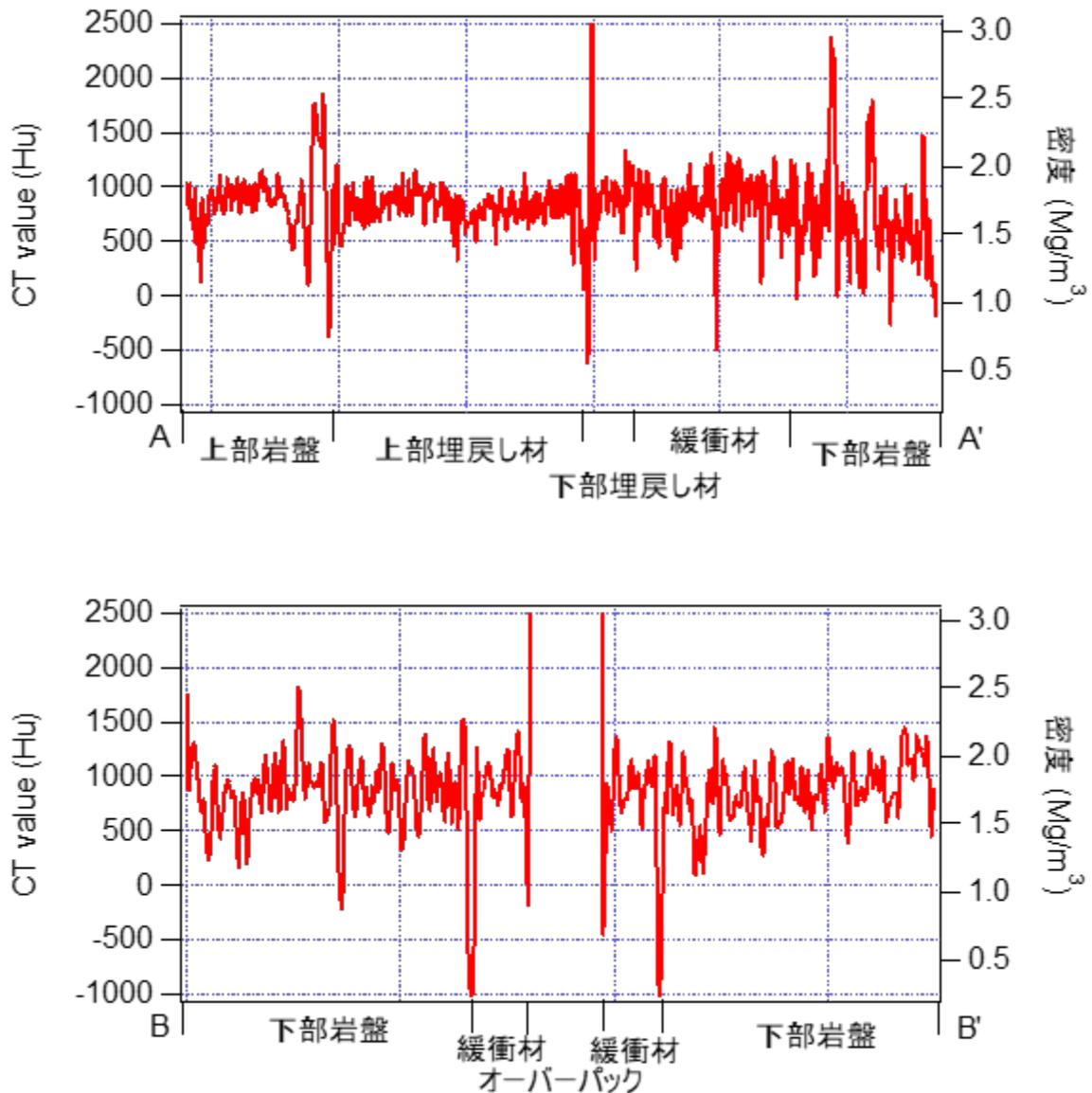


図 3.5.3-32 試験前の各地点における CT 値

2) 試験後撮影

本試験後に実施した X 線 CT 撮影の結果を図 3.5.3-33 に示す。図中の A-A' や B-B' は図 3.5.3-34 に示す CT 値の分布に対応している。なお模型の撮影は、圧力容器から開封（除荷）した上で撮影を行っている。この除荷の影響で、材料境界（岩盤と上部埋戻し材の間、岩盤と緩衝材の間、緩衝材とオーバーパックの間）に隙間が生じている。

試験前に撮影した CT 画像では、緩衝材や上部埋戻し材の継ぎ目が見られたが、試験後の CT 画像では継ぎ目が膨潤により充填されていることが分かる。A-A' および B-B' とともに試験前の CT と比べて値の変動が少なく、値も大きくなった。これは隙間に水が入り湿潤化したためと考えられる。

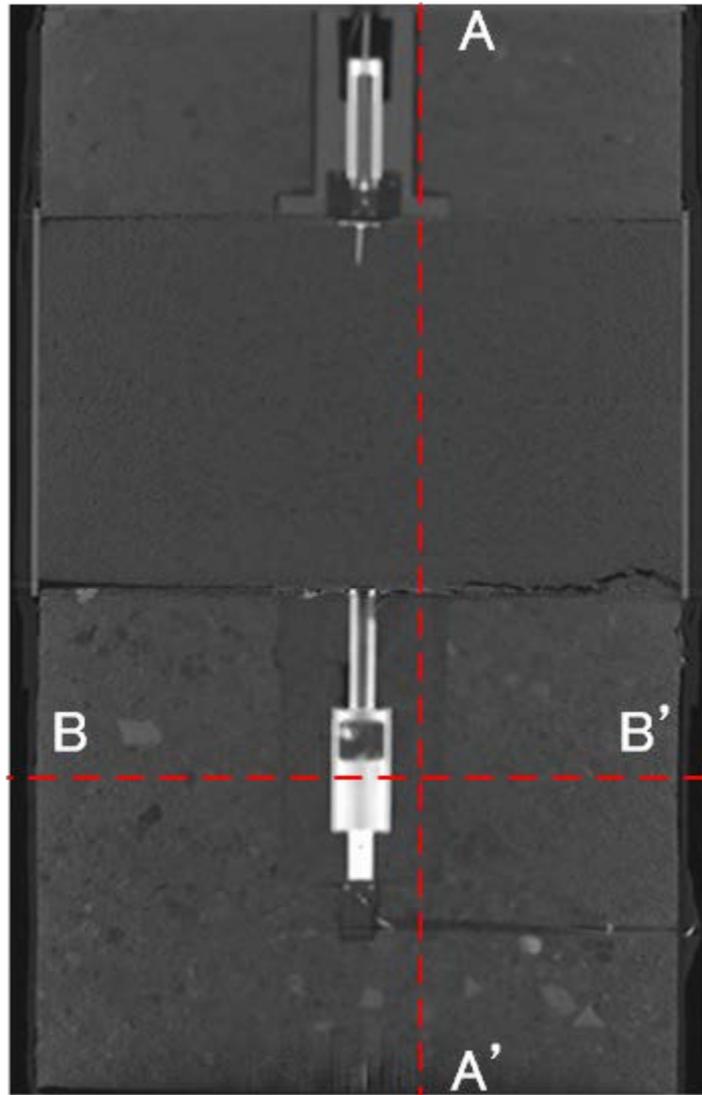


図 3.5.3-33 試験後の CT 撮影結果

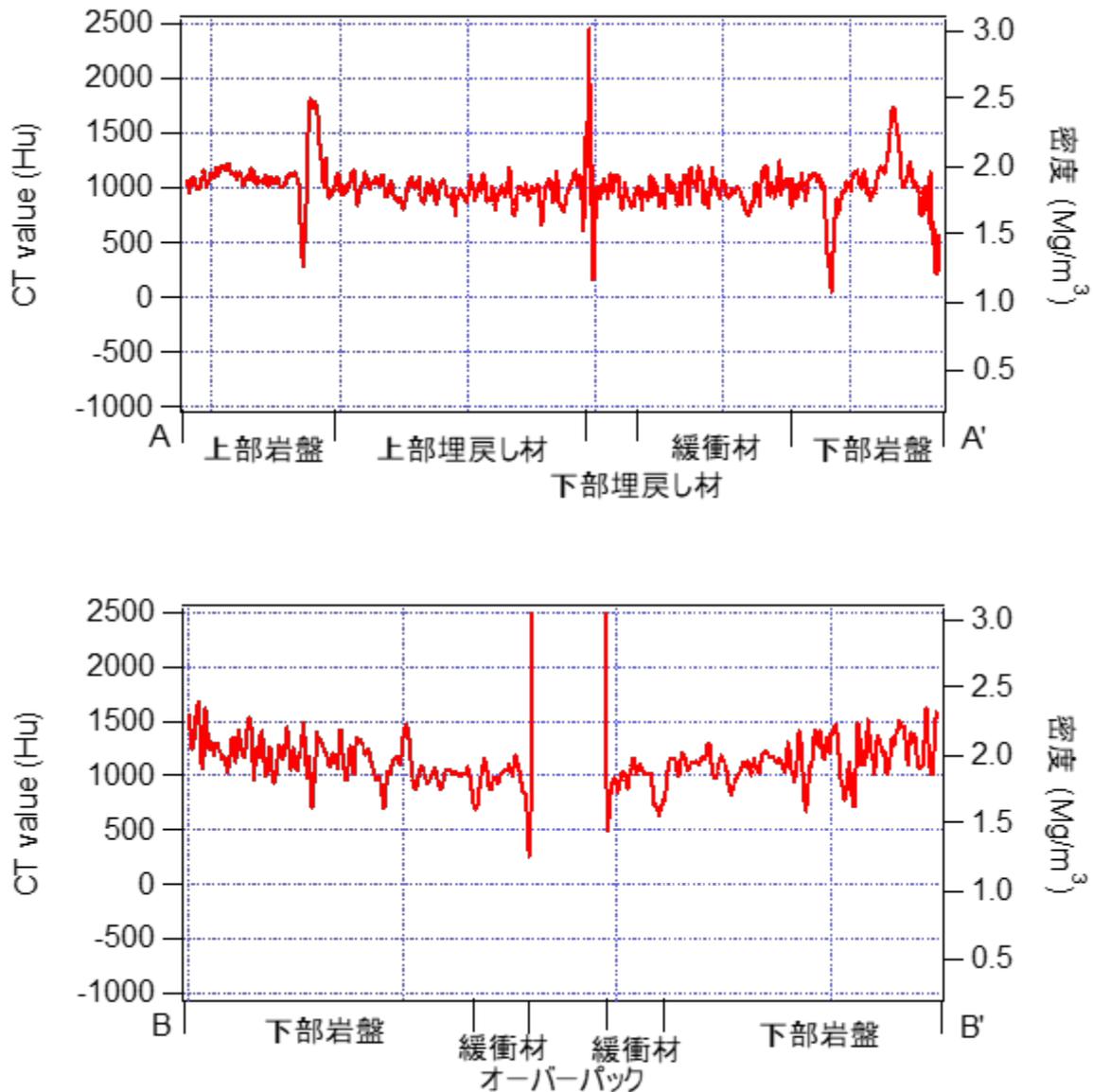


図 3.5.3-34 試験後の各地点における CT 値

3) CT 値より換算した密度と試験後の実測湿潤密度との比較

図 3.5.3-35 に試験後の CT から求めた緩衝材部密度の深度分布を示す。併せて試験後のサンプリングから得られた湿潤密度の深度分布を示す。試験後のサンプリングから得られた湿潤密度のプロットから伸びるラインは、サンプリングロッドの長さ（実物換算）を表している。CT 値から算出した密度は $1.75\sim 1.9\text{Mg/m}^3$ の間で分布している。対して試験後のサンプリングから得られた湿潤密度は $1.9\sim 1.95\text{Mg/m}^3$ の間に分布しており、CT 値から算出した密度に比べ若干高い傾向にある。これは、定体積サンプリングの際にはサンプリングロッドを打撃して埋め込む。そのため試料が圧縮した状態でサンプリングされ密度が高くなる可能性がある。以上のことを考慮すると、CT 値から算出した緩衝材の密度と試験後サンプリングから得られた緩衝材の湿潤密度の深度に対する変化の傾向は良く対応していると考えられる。

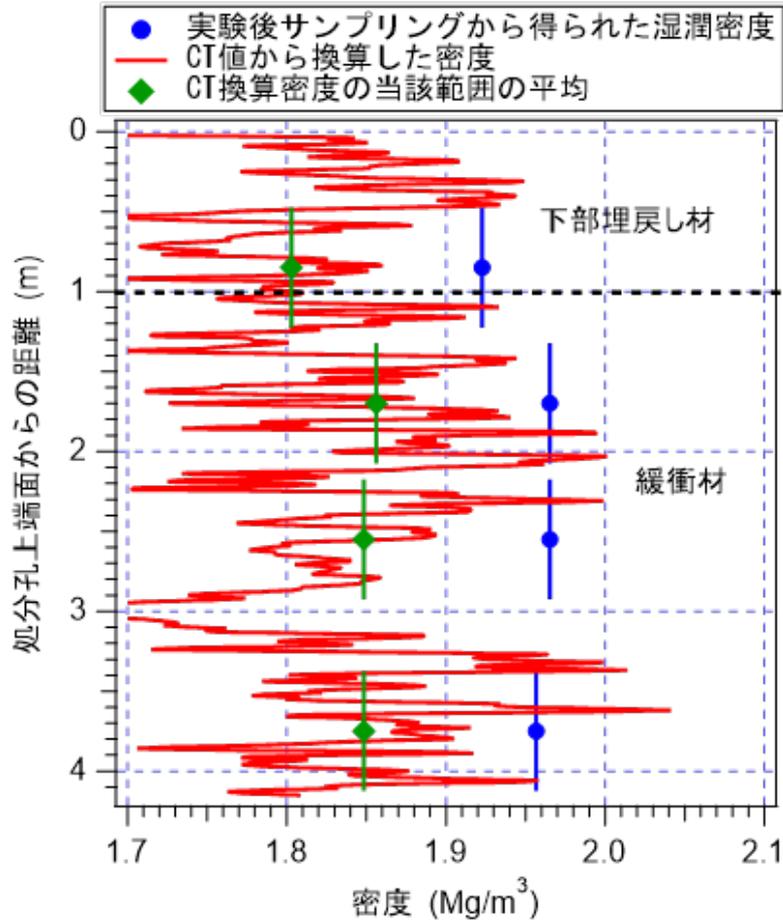


図 3.5.3-35 CT 値から換算した緩衝材の密度分布と試験後の緩衝材実測湿潤密度

4) 下部埋戻し材の状況

図 3.5.3-36 に下部岩盤上端～上部埋戻し材部を拡大した CT 画像と上部埋戻し材の CT 画像（濃淡強調）を示す。図 3.5.3-36 において、(a)～(e)は図中央の模型縦断面画像の左に示した矢印の位置での横断面である。なお(b)～(d)は、(b)より(c)、(d)とそれぞれ 0.7mm、1.4mm 下方の断面である。上部埋戻し材の CT 画像(a)では全体がほぼ同色（薄灰色）であり、(e)では岩盤、下部埋戻し材、オーバーパック（ケーブル取り出しの芯棒）が明確に区別できている。一方で、(b)～(d)の上部埋戻し材と下部岩盤上端部の境界付近の CT 画像では、上部埋戻し材とは異なる傾向（白色部）が処分孔とその周辺に見られる。またこれらの付着物が、上部埋戻し材の砂粒の粒間に浸入しているように見える。

ここで図 3.5.3-37 に、試験後に下部岩盤から取り外した上部埋戻し材の下端面（下部岩盤側）の写真（濃淡強調）を示す。下部埋戻し材の一部と思われる白い付着物（ベントナイト成分）が、処分孔が位置している箇所の周辺の上部埋戻し材に付着していることが目視で確認することができた（写真では、示した CT 画像とは写真の上下が逆になっている）。この白色部について、CT 値から見積もられる換算密度は最大で 2.4Mg/m³ 程度を示している。サンプリングによって計測された低い緩衝材・下部埋戻し材の乾燥密度やこれらの画像から、下部埋戻し材の一部の流出し、上部埋戻し材に押しつけられた可能性が考えられる。

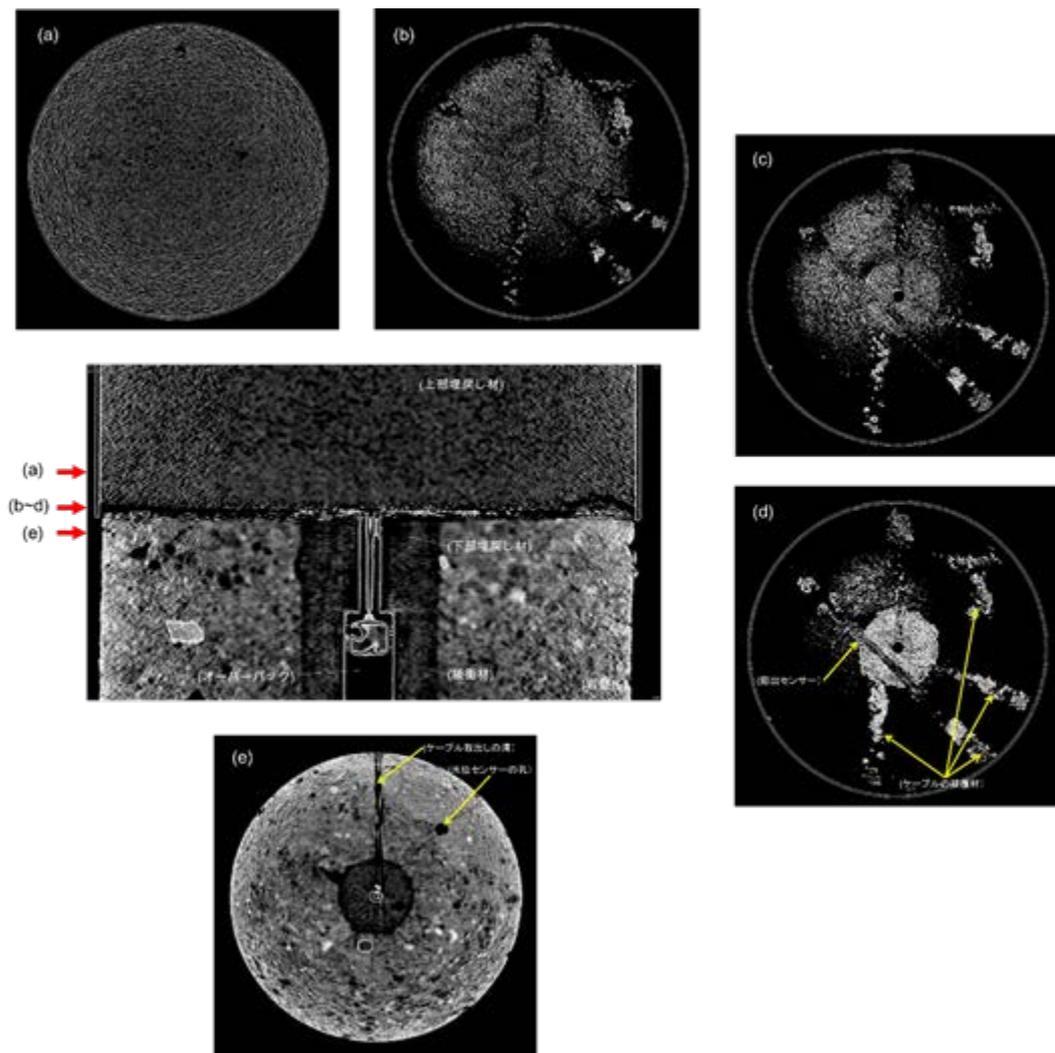


図 3.5.3-36 処分孔周辺を拡大した試験後の CT 画像（濃淡強調）

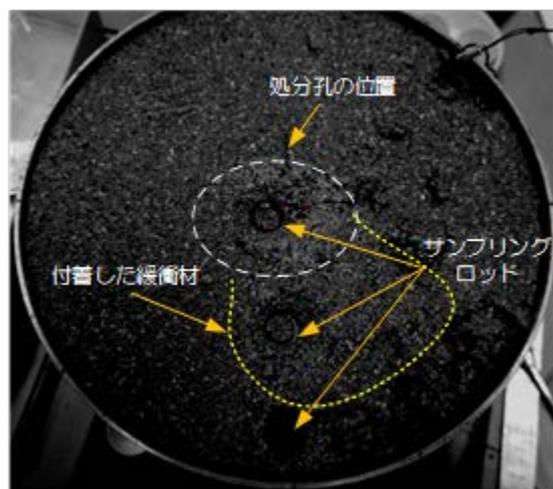


図 3.5.3-37 試験後の上部埋戻し材（下端面、下部岩盤側）の写真

3.6 H29年度のまとめ

処分坑道を含むニアフィールドのオーバーパックの挙動を検討するため、緩衝材の変形(膨出)に着目し、オーバーパック1体、処分孔1孔、および処分坑道を含んだ廃棄体周辺を抽出し、1/50の模型を用いて遠心力50G場において本試験(実物換算時間約170年相当)を実施した。坑道内の埋戻し材(上部埋戻し材)の存在によって生じる緩衝材および下部埋戻し材の変形がオーバーパックの鉛直変位に与える影響や、その時の緩衝材および下部埋戻し材、上部埋戻し材の応力の発現状況、緩衝材および下部埋戻し材の膨出状態を把握した。模型内部の水位、岩盤の温度、岩盤のひずみ、緩衝材および下部埋戻し材の応力、緩衝材および下部埋戻し材の膨出状況、上部埋戻し材の応力、埋戻し材の鉛直変位およびオーバーパックの鉛直変位を計測した。以下に結果のまとめを示す。

(1) 岩盤内部の水位

岩盤内の水位を把握するために水位センサーを岩盤内に設置し、計測点における水位の到達を確認できた。間隙水は下方から上方に順に浸潤し、間隙水が模型上方まで到達するには1.35年相当の時間が必要であった。また、各計測点間の実物換算距離を実物換算時間で除した浸潤速度は平均で $3.49 \times 10^{-7} \text{m/s}$ であった。

(2) 温度

処分孔内部、膨出センサー、水位センサー設置部、岩盤外縁部の順にオーバーパックから距離が離れるほどに計測した温度が低くなった。また、オーバーパック温度の下降に追従し、計測温度も下降した。

(3) ひずみ

岩盤のひずみは間隙水が浸潤することで有効応力が低下し、引張ひずみが発生する。水位が処分孔下端部から処分孔上端部まで上昇する間に値の増加が開始していることから、岩盤内の水位到達時間の結果とも良く対応している。また、軸方向のひずみは模型高さ方向の変位一定制御に切替え、上端圧が上昇し始めてから0.92MPaで一定になるまでは圧縮側にひずみが発生し、上端圧一定後は再度引張ひずみが発生する結果となった。

(4) 膨出の形状

緩衝材および下部埋戻し材の膨出状況を把握するために膨出センサーを設置した。間隙水が処分孔上端部まで浸潤した時刻付近でひずみが増加し、上端圧が一定になった時点でひずみが減少した。ひずみの分布形状は変形が小さい内は中心部が凸の形状を示したが、変形が大きくなると固定点に近く変形の大きい部分のひずみが大きくなった。上端圧一定後に膨出センサーのひずみが漸減した。

(5) 緩衝材および上部埋戻し材の応力

緩衝材の全応力は緩衝材直下まで水位が到達した後に昇圧を開始した。その後処分孔上端部ま

で水位が到達すると下部埋戻し材の膨潤が始まり、緩衝材の全応力の昇圧速度が大きくなった。上部埋戻し材の全応力は上部埋戻し材下端部まで水位が到達した後に昇圧を開始した。上部埋戻し材中部まで水位が到達すると上部埋戻し材中部の全応力の昇圧速度が大きくなり、その後上部埋戻し材上方の全応力の昇圧速度が大きくなった。また、上部埋戻し材の透水係数が大きいいため緩衝材の応力より早い時点で値が収束した。

(6) オーバーパックの鉛直変位

緩衝材直下まで水位が到達した後に下方の緩衝材の膨潤が始まるためオーバーパックは浮上を開始した。その後処分孔上端部まで水位が到達した時間付近から浮上速度が大きくなり、上端圧および上部埋戻し材の応力が一定になるとオーバーパックの沈下が始まった。

膨出センサーの出力とオーバーパックの鉛直変位との関係において、膨出センサーのひずみ値の増加とオーバーパックの浮上、上端圧が一定となった後の膨出センサーのひずみ値の低下とオーバーパックの沈下傾向は良く対応している。

(7) 試験後の緩衝材・下部埋戻し材の密度・含水比測定

試験後の緩衝材・下部埋戻し材の定体積サンプリングによる密度測定により、平均乾燥密度は上部と下部で低く、中部で高い傾向を示した。これは上部埋戻し材から間隙水が浸潤することで下方の緩衝材とともに下部埋戻し材が膨潤し、膨出したことによる影響が考えられる。含水比の深度分布より処分孔上下端部での含水比が高いことが計測されていることと調和的である。

(8) CT 撮影

試験前後に模型の CT 撮影を行い、その内部構造や密度分布を把握した。試験後の CT 撮影において、試験前には観察された緩衝材、埋戻し材の継目が膨潤により充填されていた。CT 値より換算された密度とサンプリングによって計測された密度は、値には差があるものの、深度方向の分布は類似の傾向を示した。また、下部岩盤と上部埋戻し材の境界には高い CT 値（高い密度）の領域が計測され、写真観察も含め、これは下部埋戻し材の一部が流出した可能性が指摘される。

第3章 参考文献

- [1] 中山雅, 澤田純之, 棚井憲治, 杉田裕, 幌延 URL における人工バリアの性能確認試験: (1) 試験計画の全体概要, 日本原子力学会 年会・大会予稿集, 529, 2013.
- [2] 中山雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人, 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験: 計測データ集 (平成 27 年度), JAEA-Data/Code, 2016-5, 2016.
- [3] 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.
- [4] R. N. Taylor, *Geotechnical Centrifuge Technology*. London: Blackie Academic & Professional, 1995.
- [5] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価 (その 1) - 超長期遠心載荷岩盤実験装置と遠心力模型試験法の開発 -, 電力中央研究所報告, N10018, 2011.
- [6] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物 処分場周辺の長期挙動評価 (その 2) - ニアフィールド模型試験法の確立と等方応力拘束条件下における長期挙動 -, 電力中央研究所報告, N11040, 41, 2012.
- [7] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物 処分場周辺の長期挙動評価 (その 4) - 加熱型廃棄体を用いた等方応力拘束条件下における 熱-水-応力連成模型実験 -, 電力中央研究所報告, N14003, 30, 2014.
- [8] S. Nishimoto, M. Sawada, T. Okada, *New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 1: Test of Physical Modeling in Near Field Under Isotropic Stress-Constraint Conditions*, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2016.
- [9] 木村孟, 日下部治, 講座 遠心模型実験 2.序論, 土と基礎, 35, 11, 68-74, 1987.
- [10] W. H. Craig, R. G. James, A. N. Schofield, *Centrifuges in soil mechanics*. Balkema Rotterdam, 1988.
- [11] 岡村未対, 竹村次朗, 上野勝利, 遠心模型実験-実験技術と実務への適用- 2.遠心模型の相似則、実験技術-利点と限界, 土と基礎, 52, 10, 37-44, 2004.
- [12] J. Garnier, C. Gaudin, S. M. Springman, P. J. Culligan, D. Goodings, D. Koning, B. Kutter, R. Phillips, M. F. Randolph, L. Thorel, *Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling*, *Int. J. Phys. Model. geotechnics*, 7, 3, 1-23, 2007.
- [13] F. Tatsuoka, S. Goto, T. Tanaka, K. Tani, Y. Kimura, *Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material, Deformation and progressive failure in geomechanics: IS-NAGOYA '97*. Pergamon, Nagoya, Japan, 133-138, 1997.
- [14] O. Kusakabe, *6. Foundations*, in *Geotechnical Centrifuge Technology*, R. N. Taylor, Ed. Blackie Academic & Professional, 1995.

- [15] 中村邦彦, 田中幸久, 高レベル放射性廃棄物処分孔での廃棄体の沈下挙動-遠心模型実験と簡易沈下予測法の提案-, 電力中央研究所研究報告書, U03074, 2004.
- [16] 緒方信英, 小崎明郎, 植田浩義, 朝野英一, 高尾肇, 高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術—その 4 人工バリアの設計と製作—, 原子力バックエンド研究, 5, 2, 103-121, 1999.
- [17] 地盤工学会, 堆積軟岩の工学的性質とその応用, in 土質基礎工学ライブラリー30, 堆積軟岩の工学的性質とその応力編集委員会, Ed. (社)地盤工学会, 1998.
- [18] 岡田哲実, 高温環境下における堆積軟岩の力学特性(その2) —一軸圧縮試験によるクリープ特性の温度依存性の評価, 電力中央研究所報告, N05057, 2006.
- [19] 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-, 1999.
- [20] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成27年度地層処分技術調査等事業「処分システム工学確証技術開発」報告書(第3分冊) —人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築—, 2016.
- [21] 田中明子, 山野誠, 矢野雄策, 笹田政克, 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2004.
- [22] 中村大, 後藤隆司, 伊藤陽司, 山下聡, 鈴木輝之, 岩石と土の凍上特性の差異に関する実験的検証, 土木学会論文集C, 66, 3, 472-486, 2010.
- [23] 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2分冊) —人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材, 2015.

第4章 数値解析に連動した要素試験

4.1 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、人工バリア周辺（ニアフィールド）が比較的安定するまでの期間（数百年）の現象を把握し、その挙動を予測することが必要である。長期挙動の予測には数値解析による評価が必要であるが、ニアフィールドの構成材料である緩衝材と周辺岩盤が受ける熱・水・応力条件の変化を正確に予測することは容易ではない。その理由の一つとして、単に解析のモデル化が複雑だけでなく、要素特性が熱・水・応力の相互影響を受ける可能性があるからである。さらに、現象が長期に渡ること（二次圧密やクリープ等の要素特性の時間依存性）、天然の周辺岩盤や人工的に作製された緩衝材に生じるばらつき等も予測を困難にする。よって、数値解析の妥当性の検証では、単に緩衝材と周辺岩盤（＝岩石）の熱特性、透水特性、力学特性に関する解析用の入力パラメータを得るという観点だけでなく、熱・水・応力の相互影響の観点、時間依存性の観点、ばらつきの観点等から要素特性を詳細に検討することが必要である。このためには、膨大な数の要素試験が必要であるが、解析の感度やばらつきの程度を考慮して試験・数量を選定した。

4.2 試験方法

4.2.1 試験材料

緩衝材の配合については、ベントナイト：ケイ砂=7:3の重量比とした。埋戻し材の配合については、ベントナイト：ケイ砂=15:85の重量比とした。ベントナイトには、クニゲルV1を使用した。ケイ砂の粒径は2mm以下とし、重量比は3号：5号=1:1とした。緩衝材の初期含水比は10(%)程度、初期乾燥密度は試験の項目により1.4(Mg/m³)、1.5(Mg/m³)、1.6(Mg/m³)、1.7(Mg/m³)から選択した。埋戻し材の初期含水比は8(%)程度、初期乾燥密度は1.8(Mg/m³)程度とした。

4.2.2 試験の規格および数量

緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤（初声凝灰岩）に関して、表 4.2.2-1～表 4.2.2-5 に示す規格・基準で要素試験を実施した。

表 4.2.2-1 物理・化学特性試験の一覧表

試験工程	試験方法 規格・基準・参考文献	対象材料		H27～	H29年度	H27～
				H28年度	試験数量	H29年度
土粒子の 密度試験	土粒子の密度試験方法 「JIS A1202:2009」	ベントナイト	クニゲルV1	5	5	10
		ケイ砂	3号 (2mmアンダー)	5	5	10
			5号	5	5	10
		緩衝材		5	5	10
		埋戻し材		5	5	10
		周辺岩盤		50	0	50
土の 粒度試験	土の粒度試験方法 「JIS A1203:2009」	ベントナイト	クニゲルV1	5	0	5
		ケイ砂	3号 (2mmアンダー)	5	0	5
			5号	5	0	5
		周辺岩盤		30	0	30
液性限界・ 塑性限界	土の液性限界・塑性限界試験方法 「JIS A1205:2009」	ベントナイト	クニゲルV1	3	0	3
湿潤密度 試験	土の湿潤密度試験方法 「JIS A1225:2009」	緩衝材 乾燥密度1.5Mg/m ³		15	0	15
		緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³		39	0	39
		緩衝材 乾燥密度1.7Mg/m ³		39	0	39
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³		25	0	25
	岩石の密度試験方法 「JGS 2132-2009」	周辺岩盤		50	0	50
メチレンブルー 吸着試験	ベントナイトのメチレンブルー吸着量の測定方法 「JBAS-107-91」	ベントナイト	クニゲルV1	10	5	15
陽イオン 交換容量	陽イオン交換容量(CEC)の試験方法 「粘土ハンドブック遠心沈殿法(Schofield法)」	ベントナイト	クニゲルV1	10	5	15

表 4.2.2-2 膨潤特性試験の一覧表

試験工程	試験方法 規格・基準・参考文献	対象材料		H27～	H29年度	H27～
				H28年度	試験数量	H29年度
膨潤圧測定	参考文献: 「電力中央研究所報告: N13005 Ca型ベントナイト混合土の透水試験方法(その1) -室内締固め供試体に対する剛性容器を用いた方法-[5]	緩衝材 乾燥密度1.4Mg/m ³	不飽和～飽和	1	0	1
		緩衝材 乾燥密度1.5Mg/m ³	不飽和～飽和	1	2	3
		緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	不飽和～飽和	3	2	5
		緩衝材 乾燥密度1.7Mg/m ³	不飽和～飽和	3	2	5
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	不飽和～飽和	2	4	6

表 4.2.2-3 水分特性試験の一覧表

試験工種	試験方法 規格・基準・参考文献	対象材料		H27～	H29年度	H27～
				H28年度	試験数量	H29年度
変水位 透水試験	参考文献: 「低透水性材料に対する透水試験方法」[4] 「電力中央研究所報告:NI3005 Ca型ベントナイト混合土の透水試験方法(その1) -室内締固め供試体に対する剛性容器を用いた方法-[5]	緩衝材 乾燥密度1.4Mg/m ³	飽和状態	1	0	1
		緩衝材 乾燥密度1.5Mg/m ³	飽和状態	1	2	3
		緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	飽和状態	1	2	3
		緩衝材 乾燥密度1.7Mg/m ³	飽和状態	1	2	3
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	飽和状態	2	4	6
		周辺岩盤	飽和状態	8	0	8
保水特性 試験	サイクロメータ法 「JGS 0151-2009」	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	不飽和状態 (静的締固め)	18	0	18
			飽和～不飽和	3	4	7
			飽和状態	0	4	4
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	不飽和状態 (静的締固め)	28	0	28
			飽和～不飽和	5	4	9
			飽和状態	0	4	4
		周辺岩盤	不飽和～飽和	38	0	38
			飽和～不飽和	36	0	36

表 4.2.2-4 熱特性試験の一覧表

試験工種	試験方法 規格・基準・参考文献	対象材料		H27～	H29年度	H27～
				H28年度	試験数量	H29年度
熱伝導率 測定	熱伝導率測定 IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements 「ASTM D5334-14」	緩衝材 乾燥密度1.5Mg/m ³	乾燥、不飽和、 飽和	8	0	8
		緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	乾燥、不飽和、 飽和	14	0	14
		緩衝材 乾燥密度1.7Mg/m ³	乾燥、不飽和、 飽和	8	0	8
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	乾燥、不飽和、 飽和	14	0	14
		周辺岩盤	乾燥、不飽和、 飽和	48	0	48
比熱測定	断熱法(長崎-高木法) 参考文献: 「高温に於ける比熱の測定法について」[9]	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	乾燥状態	5	5	10
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	乾燥状態	5	5	10
		周辺岩盤	乾燥状態	10	0	10
熱膨張測定	ひずみゲージ貼付による測定 参考文献: 「温度が変化する条件下における岩盤内部の ひずみ計測結果の補正」[10]	緩衝材 乾燥密度1.5Mg/m ³	初期の含水比 :10 %	0	10	10
		緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	初期の含水比 :10 %	0	10	10
		緩衝材 乾燥密度1.7Mg/m ³	初期の含水比 :10 %	0	10	10
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	初期の含水比 :8 %	0	10	10
		周辺岩盤	乾燥状態	0	10	10

表 4.2.2-5 力学特性試験の一覧表

試験工程	試験方法 規格・基準・参考文献	対象材料		H27～ H28年度 試験数量	H29年度 試験数量	H27～ H29年度 試験数量
一軸圧縮 試験	土の一軸圧縮試験方法 「JIS A 1216:2009」	緩衝材 乾燥密度1.5Mg/m ³	不飽和状態	15	0	15
		緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	不飽和状態	39	0	39
		緩衝材 乾燥密度1.7Mg/m ³	不飽和状態	39	0	39
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	不飽和状態	25	0	25
	岩石の一軸圧縮試験方法 「JGS 2521-2009」	周辺岩盤	乾燥状態	3	0	3
一軸引張り 試験	岩石の一軸引張り試験方法 「JGS 2552-2015」	周辺岩盤	不飽和状態	5	0	5
三軸圧縮 試験	参考基準: 土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験方法 「JGS 0522-2009」	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	初期の含水比 :10 %	4	0	4
		緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	飽和状態	0	3	3
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	飽和状態	0	3	3
	岩石の圧密排水(CD)三軸圧縮試験方法 「JGS 2534-2009」 参考文献: 「高温環境下における堆積軟岩の力学特性(その1)-三軸圧縮試験による温度依存性の把握-」[12]	周辺岩盤	飽和状態	8	0	8
			乾燥状態	4	4	8
			飽和状態 (異方性の確認)	0	2	2
			飽和状態 (温度80℃)	0	2	2
圧密試験	参考基準: 土の段階载荷による圧密試験方法 「JIS A 1217:2009」	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	飽和状態	0	1	1
		埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	飽和状態	0	3	3
		周辺岩盤	飽和状態	5	0	5
排水クリーブ 試験	参考文献:「電中研報告 N10002:体積軟岩における大規模空洞の掘削時挙動・長期挙動の解析的検討」[11]	周辺岩盤	飽和状態	3	6	9

4.3 試験結果

4.3.1 物理・化学特性

(1) 物理特性

1) 人工バリア材料

ベントナイトには、クニゲル V1 を使用した。緩衝材（ベントナイト：ケイ砂 7：3）及び埋戻し材（ベントナイト：ケイ砂 85：15）の作製に用いた材料の固相の物理特性を表 4.3.1-1、クニゲル V1 のコンシステンシー特性を表 4.3.1-2 に示す。図 4.3.1-1～図 4.3.1-3 に粒径加積曲線を示す。

表 4.3.1-1 固相の物理特性（人工バリア材料）

人工バリア材料	固相の密度 ρ_s Mg/m ³			粒度	
	クニゲルV1	ケイ砂 3号 (2mmアンダー)	ケイ砂 5号	均等係数 U _c	曲率係数 U _c '
個数	10	10	10	5	5
算術平均	2.759	2.637	2.635	1.72	0.9
中央値	2.758	2.633	2.632	1.7	0.9
標準偏差	0.025	0.008	0.008	0.04	0

表 4.3.1-2 コンシステンシー特性（クニゲル V1）

クニゲルV1	液性限界	塑性限界	塑性指数
	W _L (%)	W _P (%)	I _P
個数	3	3	3
算術平均	512.3	25.0	487.3

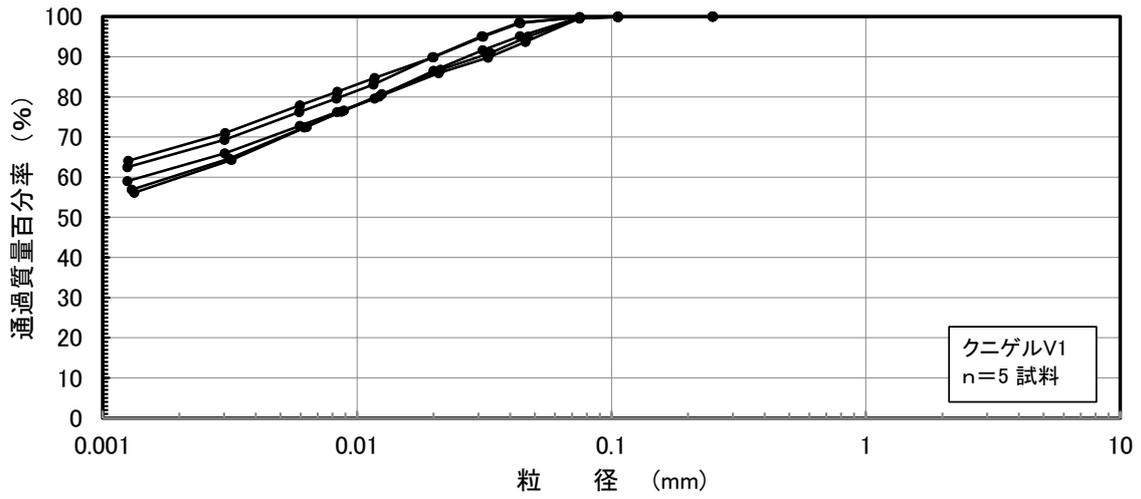


図 4.3.1-1 粒径加積曲線 (クニゲル V1)

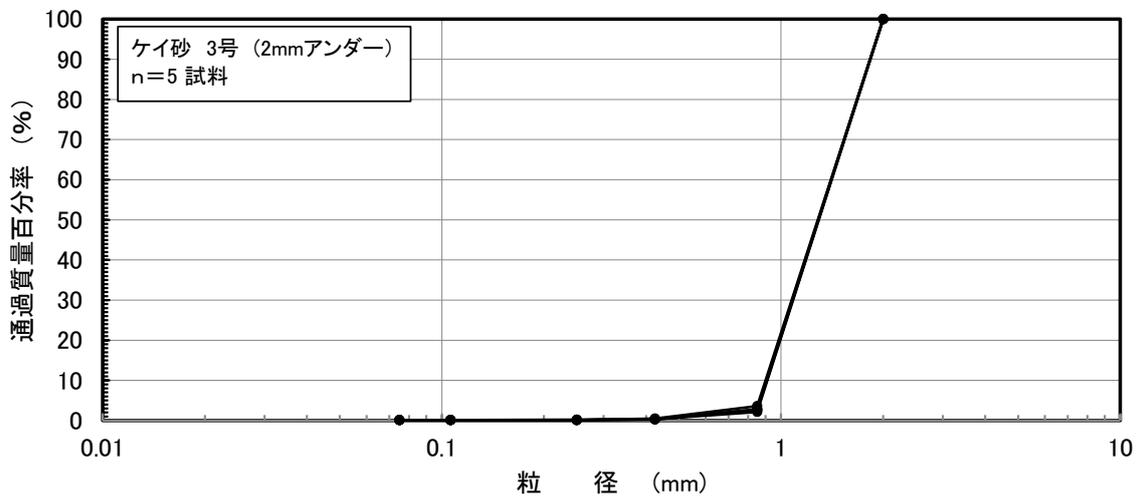


図 4.3.1-2 粒径加積曲線 (ケイ砂 3号 : 2mm アンダー)

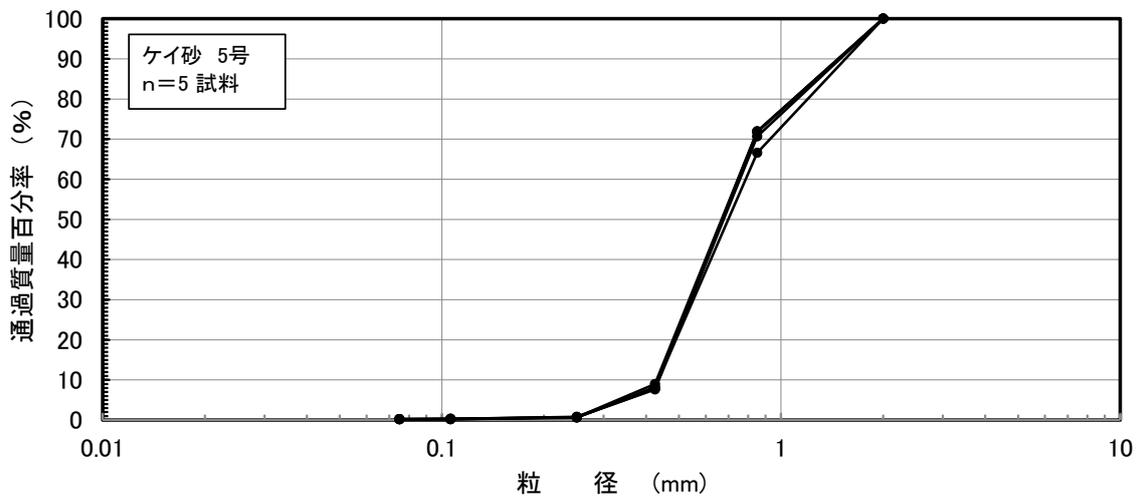


図 4.3.1-3 粒径加積曲線 (ケイ砂 5号)

2) 緩衝材、埋戻し材

緩衝材及び埋戻し材の物理特性を表 4.3.1-3 に示す。

表 4.3.1-3 物理特性 (緩衝材、埋戻し材)

人工バリア 材料	緩衝材 クニゲルV1:ケイ砂 7:3				埋戻し材 クニゲルV1:ケイ砂 15:85	
	固相の密度 ρ_s Mg/m ³	作製時の 目標乾燥密度 1.5 Mg/m ³	作製時の 目標乾燥密度 1.6 Mg/m ³	作製時の 目標乾燥密度 1.7 Mg/m ³	固相の密度 ρ_s Mg/m ³	作製時の 目標乾燥密度 1.8 Mg/m ³
個数	10	15	39	39	10	25
算術平均	2.711	1.494	1.591	1.698	2.651	1.797
中央値	2.711	1.496	1.589	1.695	2.651	1.797
標準偏差	0.009	0.007	0.017	0.017	0.006	0.006

3) 周辺岩盤

周辺岩盤の物理特性を表 4.3.1-4 に、粒径加積曲線を表 4.3.1-4 に示す。

表 4.3.1-4 物理特性 (周辺岩盤)

周辺岩盤	固相の密度 ρ_s Mg/m ³	湿潤密度 ρ_t Mg/m ³	乾燥密度 ρ_d Mg/m ³	間隙比 e	間隙率 $n=e/(1+e)$	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'
個数	50	50	50	50	50	30	30
算術平均	2.762	2.057	1.675	0.648	0.393	15.6	2.1
中央値	2.766	2.057	1.671	0.645	0.392	16.1	2.1
標準偏差	0.031	0.030	0.038	0.034	0.013	4.7	0.4

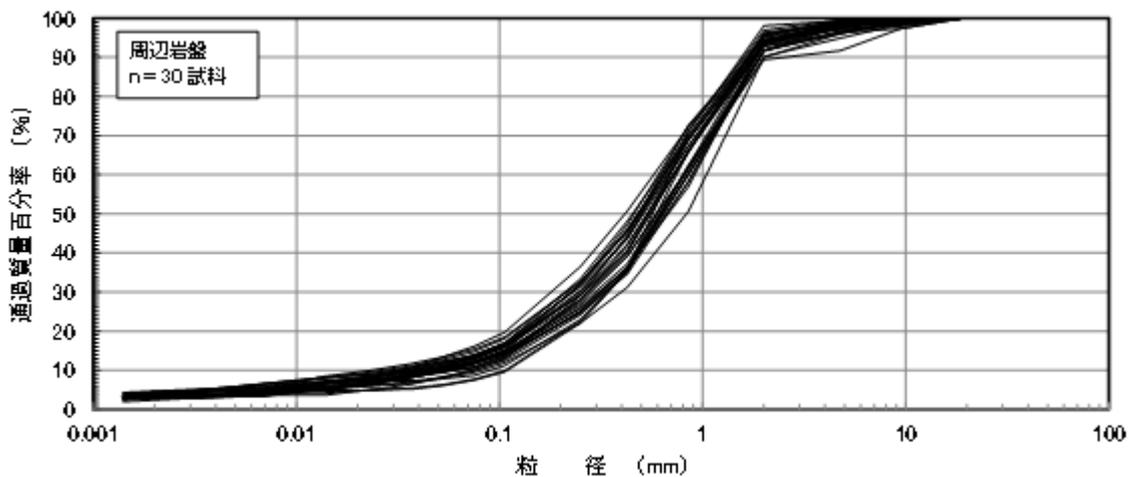


図 4.3.1-4 粒径加積曲線 (周辺岩盤)

(2) 化学特性

1) ベントナイト：クニゲルV1

ベントナイトの陽イオン交換容量の測定結果を表 4.3.1-5、浸出陽イオン量を図 4.3.1-5 に示す。ベントナイトのメチレンブルー吸着量の測定結果を表 4.3.1-6 に、モンモリロナイト含有率を図 4.3.1-6 に示す。モンモリロナイトの含有率については、モンモリロナイトのメチレンブルー吸着量を 140mmol/100g として算定した。各測定は 10 回ずつ行い、算術平均値を表中に示した。

表 4.3.1-5 ベントナイトの浸出陽イオン量の測定結果

実施年度	クニゲルV1 供試体番号	定容量(ml)	試料100g当りの溶出イオン量 (meq/100g)				
			Na	Ca	K	Mg	総陽イオン
H27	1	100	67	47	1.5	2.2	117.7
	2	100	68	49	1.5	2.2	120.6
	3	100	67	48	1.5	2.2	117.7
	4	100	68	48	1.5	2.2	119.2
	5	100	67	48	1.5	2.2	118.6
H28	6	100	67	44	1.5	2.0	113.9
	7	100	67	43	1.5	2.0	113.2
	8	100	68	44	1.5	2.1	115.5
	9	100	68	44	1.5	2.1	115.9
	10	100	68	44	1.5	2.0	115.1
H29	11	100	72	42	1.1	2.6	118.0
	12	100	74	41	1.2	2.8	119.8
	13	100	69	43	1.3	2.3	116.3
	14	100	69	44	1.3	2.0	116.4
	15	100	73	43	1.2	2.3	119.5
算術平均			69	45	1.4	2.2	117.2

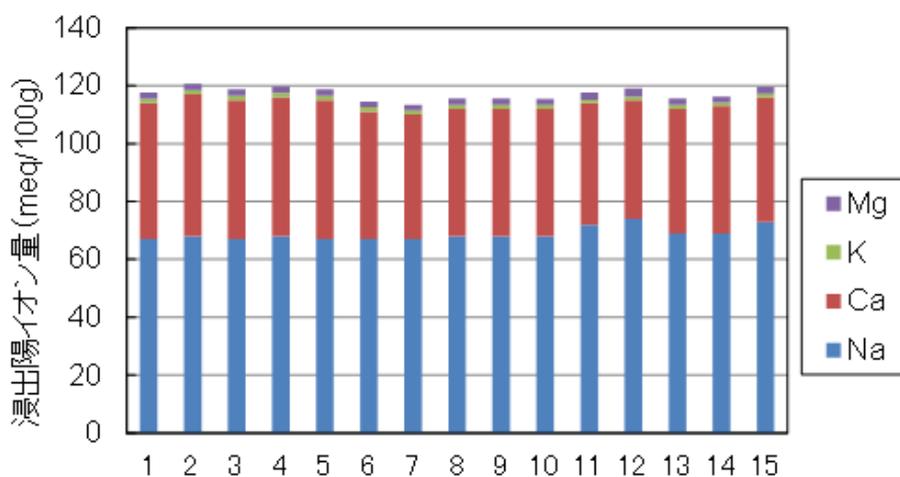


図 4.3.1-5 ベントナイトの浸出陽イオン量

表 4.3.1-6 ベントナイトのメチレンブルー吸着量の測定結果

実施年度	クニゲルV1 供試体番号	試料重量 (g-dry)	0.01M-MB消費量 (ml)	MB吸着量 (mmol/100g)	モンモリロナイト 含有率※ (%)
H27	1	0.5000	38	76.0	54
	2	0.5003	37	74.0	53
	3	0.5002	38	76.0	54
	4	0.5000	38	76.0	54
	5	0.5002	38	76.0	54
H28	6	0.5000	39	78.0	56
	7	0.5003	39	78.0	56
	8	0.5002	40	80.0	57
	9	0.5000	39	78.0	56
	10	0.5002	40	80.0	57
H29	11	0.5002	39	78.0	56
	12	0.5004	39	77.9	56
	13	0.4997	39	78.0	56
	14	0.5000	39	78.0	56
	15	0.5003	40	80.0	57
算術平均				77.6	55

※モンモリロナイトのメチレンブルー吸着量を140mmol/100gとして計算

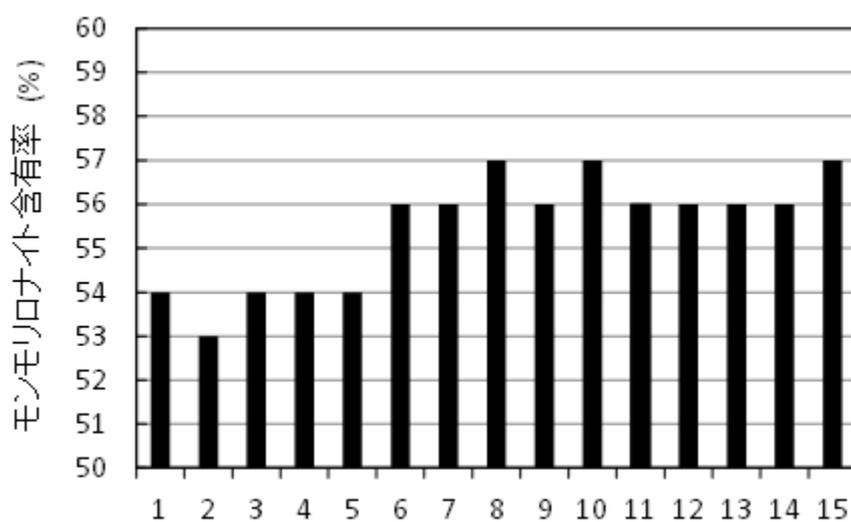


図 4.3.1-6 ベントナイトのモンモリロナイト含有率

4.3.2 膨潤特性

(1) 測定方法

膨潤特性の測定に使用した緩衝材及び埋戻し材の供試体の初期条件を表 4.3.2-1 に示す。緩衝材及び埋戻し材の膨潤特性の測定については、図 4.3.2-1 に示す装置を用いた。膨潤特性の測定方法を表 4.3.2-2 に示す。

表 4.3.2-1 膨潤特性の供試体の初期条件

項目	緩衝材	埋戻し材
供試体作製時の目標乾燥密度	1.4, 1.5, 1.6, 1.7 Mg/m ³	1.8 Mg/m ³
供試体作製時の目標含水比	10 %	8 %
供試体の寸法	直径 60×高さ 20 (mm)	

表 4.3.2-2 膨潤特性の測定方法

供試体の作製	<ul style="list-style-type: none"> ・所定の含水比に調整した材料を準備する。 ・所定の乾燥密度をもとに、計算した質量分の材料をモールドに入れる。 ・油圧ジャッキを使用して静的締固めにより供試体を圧縮する。
試験装置の準備	<ul style="list-style-type: none"> ・ポーラスメタルは事前に超音波で洗浄して、その後炉乾燥させておく。
供試体の設置	<ul style="list-style-type: none"> ・締め固めた供試体の上下に高分子フィルターを挟んで装置を組立てる。 ・供試体は上下蓋に接触しているため、荷重計の値を初期荷重として記録する。
試験の手順	<ul style="list-style-type: none"> ・排水側バルブは大気開放側、給水側バルブは閉じておく。 ・給水側ビュレットにイオン交換水を満たしておく。 ・給水側バルブを開放してイオン交換水を送水する。 ・給水側の圧力は、水頭圧(2~3kPa)のみで通水する。
膨潤圧の算定	<ul style="list-style-type: none"> ・荷重計の値から装置組み立て時の初期荷重を差し引いた値を供試体の断面積で除して膨潤圧とする。

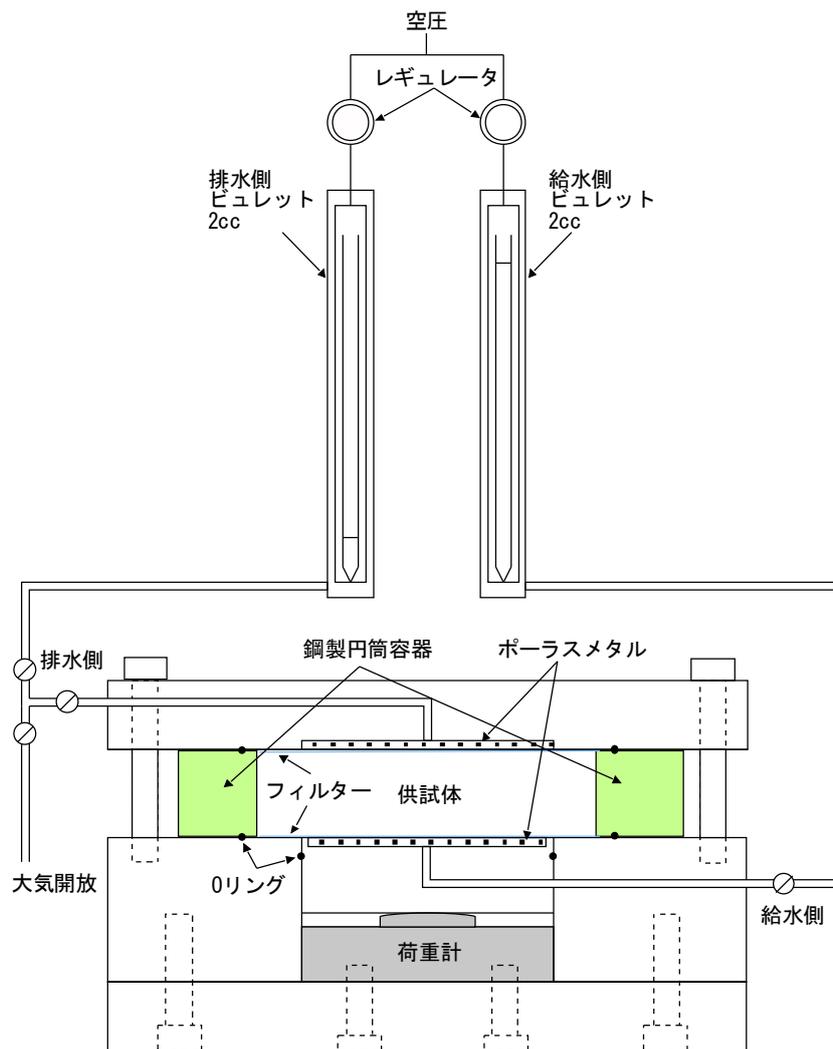


図 4.3.2-1 膨潤特性・透水特性試験装置

(2) 測定結果

緩衝材の膨潤特性の測定結果を表 4.3.2-3 に、膨潤圧と経過時間の関係を図 4.3.2-2 に示す。経過時間が 18,000min 以降では、膨潤圧がほぼ一定となり、30,000min 程度で測定を終了した。膨潤圧がほぼ一定となった 20,000min 以降から測定終了までの膨潤圧を算術平均して、平衡膨潤圧とした。膨潤圧と経過時間の関係では、測定開始から 1,000~2,000min 程度までは、勾配が大きく、その後は緩やかに上昇する傾向が確認できる。供試体作製時の目標乾燥密度が高いほど平衡膨潤圧が高い傾向を示す。

表 4.3.2-3 膨潤特性の測定結果の一覧（緩衝材）

実施年度	番号	目標乾燥密度 (Mg/m ³)	供試体の作製時の 乾燥密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	間隙比	平衡膨潤圧 (MPa)	有効粘土密度 (Mg/m ³)
H27	H27_1.4-1	1.4	1.395	10.4	0.939	0.30	1.161
	H27_1.5-1	1.5	1.497	10.2	0.807	0.41	1.263
	H27_1.6-1	1.6	1.600	10.0	0.691	0.67	1.370
	H27_1.7-1	1.7	1.702	9.9	0.589	1.24	1.478
H28	H28_1.6-2	1.6	1.608	9.6	0.683	0.67	1.378
	H28_1.6-3	1.6	1.600	10.0	0.691	0.70	1.370
	H28_1.7-2	1.7	1.706	9.7	0.585	1.37	1.483
	H28_1.7-3	1.7	1.701	10.0	0.590	1.32	1.477
H29	H29_1.5-2	1.5	1.501	10.0	0.802	0.47	1.268
	H29_1.5-3	1.5	1.497	10.2	0.812	0.37	1.264
	H29_1.6-4	1.6	1.598	10.2	0.692	0.67	1.368
	H29_1.6-5	1.6	1.603	9.9	0.687	0.57	1.373
	H29_1.7-4	1.7	1.688	10.7	0.602	1.27	1.463
	H29_1.7-5	1.7	1.695	10.2	0.600	1.28	1.471

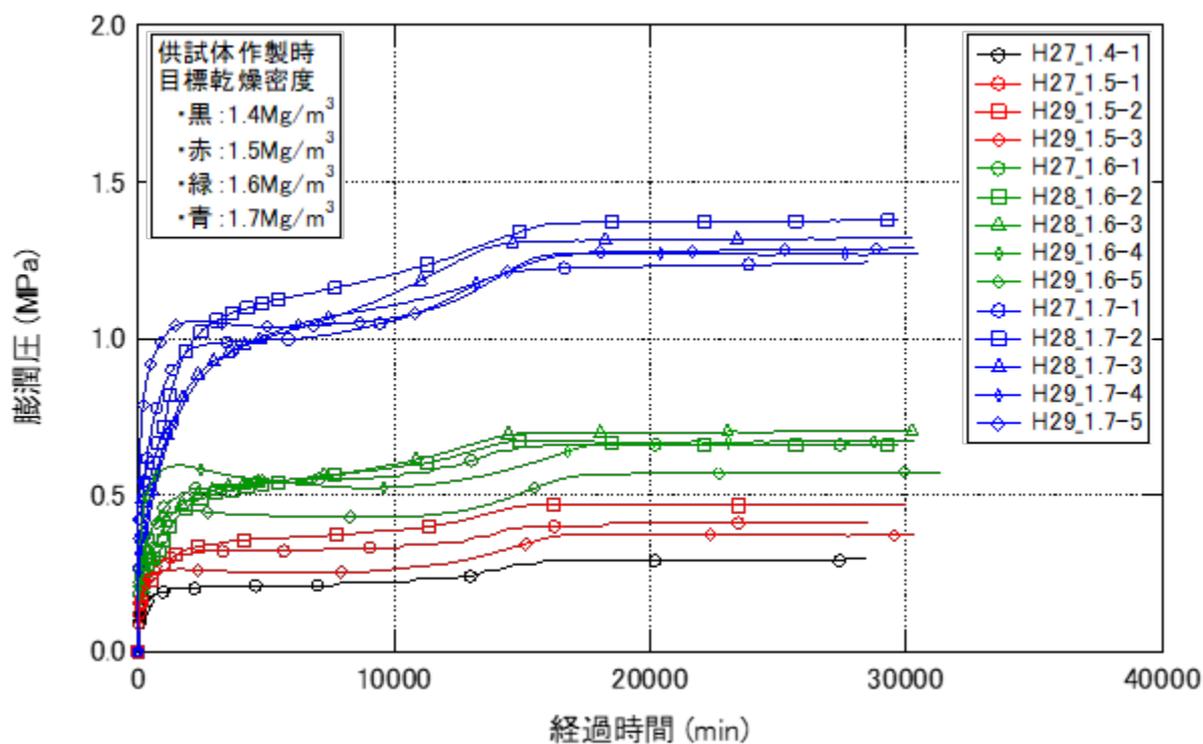


図 4.3.2-2 膨潤圧と経過時間の関係（緩衝材）

緩衝材の膨潤特性の測定結果の一覧を表 4.3.2-4 に、膨潤圧と経過時間の関係を図 4.3.2-3 に示す。膨潤圧がほぼ一定となった 20,000min 以降から試験終了までの膨潤圧を算術平均して、平衡膨潤圧とした。H28-1、H28-2 の測定時間の延長については、長期間での膨潤圧の変動を確認するために実施した。時間の延長に伴う膨潤圧の変動は少ない。H28-1 の平衡膨潤圧は他の測定結果より高いが、供試体の作製時の乾燥密度が若干高いことが影響している可能性が考えられる。

表 4.3.2-4 膨潤特性の測定結果の一覧（埋戻し材）

実施年度	供試体番号	供試体の作製時の乾燥密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	間隙比	平衡膨潤圧 (MPa)	有効粘土密度 (Mg/m ³)
H28	H28_1.8-1	1.810	7.5	0.462	0.14	0.653
	H28_1.8-2	1.809	7.5	0.463	0.18	0.652
H29	H29_1.8-3	1.801	7.9	0.469	0.13	0.645
	H29_1.8-4	1.798	7.9	0.472	0.15	0.643
	H29_1.8-5	1.796	8.1	0.473	0.14	0.641
	H29_1.8-6	1.802	8.1	0.468	0.14	0.646

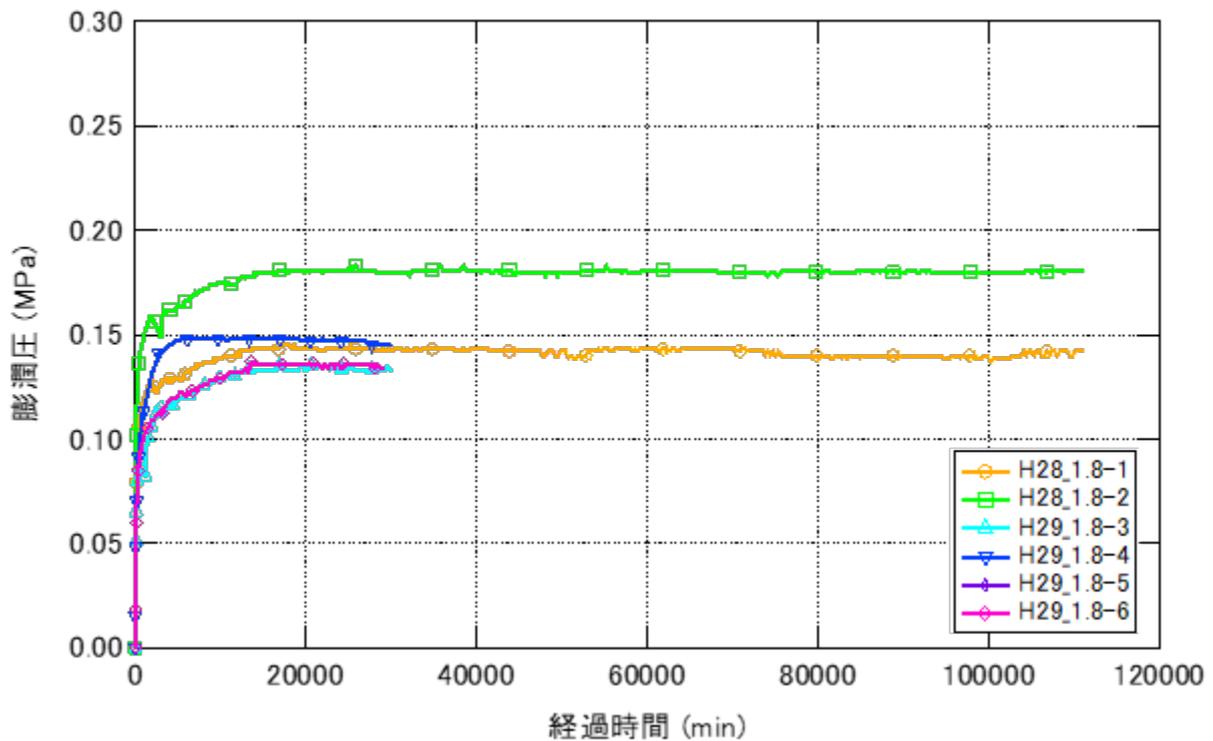


図 4.3.2-3 膨潤圧と経過時間の関係（埋戻し材）

本研究の数値解析に連動した要素試験の実施は、統計処理が可能な数量を確保することを目標とした。しかし、緩衝材及び埋戻し材の膨潤特性の測定においては、測定期間が長期にわたることから、緩衝材 14 本、埋戻し材 6 本の試験本数であった。そこで、本研究の膨潤特性の測定と同様の条件の結果を JAEA のデータベース[1][2][3]より取得して平衡膨潤圧の比較を実施した。共通の検索の条件として、ベントナイトはクニゲル V1、蒸留水またはイオン交換水、常温または 25℃を設定した。平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係を、図 4.3.2-4 に示す。有効粘土密度については、式(4.3.2 1)で算定した。モンモリロナイト含有率も同程度である JAEA のデータベースと比較すると、平衡膨潤圧は若干高いが、ばらつきの範囲程度であった。

$$\rho_e = \frac{\rho_d(1 - B_s)}{1 - \rho_d \frac{B_s}{G_s}} \quad \text{式(4.3.2-1)}$$

ここに、

- ρ_e : 有効粘土密度 (Mg/m³)
- ρ_d : 骨格混合体の乾燥密度 (Mg/m³)
- G_s : 混合砂の単位体積質量 (Mg/m³)
- B_s : 混合砂の混合率

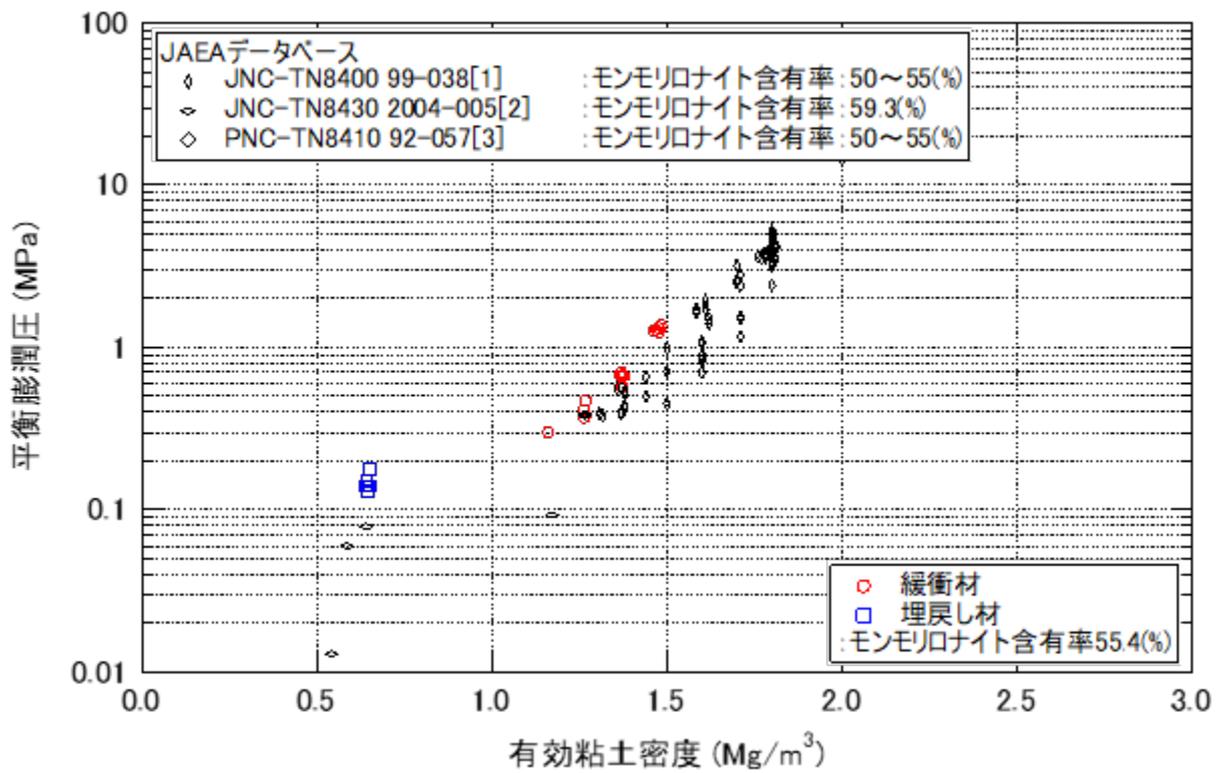


図 4.3.2-4 平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係

4.3.3 水分特性

(1) 透水特性（緩衝材、埋戻し材）

1) 測定方法（緩衝材、埋戻し材）

緩衝材及び埋戻し材の透水特性の測定方法については、「低透水性材料に対する透水試験方法（基準案）」[4]及び「Ca 型ベントナイト混合土の透水試験方法（その 1）」[5]による測定手法を参考にして実施した。試験装置には、給水側と排水側にビュレットが設置してあり、供試体の給水側と排水側に加圧しながら動水勾配を変化させることが可能となる。試験装置を図 4.3.2-1 に示す。

緩衝材及び埋戻し材の供試体は、膨潤特性の測定が終了した後の平衡膨潤圧状態の供試体を用いた。透水特性の測定方法を表 4.3.3-1 に、給水側と排水側の圧力の条件を表 4.3.3-2 に、図 4.3.3-1 に測定状況を示す。

表 4.3.3-1 透水特性の測定方法（緩衝材、埋戻し材）

供試体の飽和化 (平衡膨潤圧の供試体)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 給水側に加圧してイオン交換水を通水する。 緩衝材の給水側圧力：100 kPa 埋戻し材の給水側圧力：20 kPa ・ 含水比、土粒子密度、間隙比から飽和度 100%となる給水量を算定しておく。 ・ 飽和度 100%となる給水量以上のイオン交換水を通水する。 ・ 通水期間は 20 日以上とし、排水側からの流出を確認する。
透水試験の開始	<ul style="list-style-type: none"> ・ 排水側のビュレットにイオン交換水を満たす。 ・ 排水側のバルブを大気開放からビュレットに切り替える。 ・ 給水側と排水側に所定の圧力を負荷する。 ・ 給水側、排水側のビュレットの目盛を読み記録する。 ・ 給水量、排水量の関係が安定した後、次の段階に加圧する。 ・ 異なる給排水圧力の 3 段階で透水試験を実施する。
透水係数の算定	<ul style="list-style-type: none"> ・ 式(4.3.3-1)の変水位透水試験の式[4]から透水係数を算定する。

表 4.3.3-2 透水試験の給排水圧力の条件（緩衝材、埋戻し材）

供試体	給水側圧力 MPa	排水側圧力 MPa
緩衝材	0.10	0.05
	0.15	0.10
	0.20	0.15
埋戻し材	0.04	0.02
	0.06	0.04
	0.08	0.06

$$K_t = 2.303 \times \frac{(a_{in} \times a_{out})}{(a_{in} \times a_{out})A(t_2 - t_1)} \times \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{100} \quad \text{式(4.3.3-1)}$$

ここに、

- K_t : $T(^{\circ}\text{C})$ における透水係数 (m/s)
- a_{in} : 吸水側のビュレットの断面積 (cm^2)
- a_{out} : 排水側のビュレットの断面積 (cm^2)
- $t_2 - t_1$: 測定時間 (s)
- h_1 : 時刻 t_1 における水位差 (cm)
- h_2 : 時刻 t_2 における水位差 (cm)

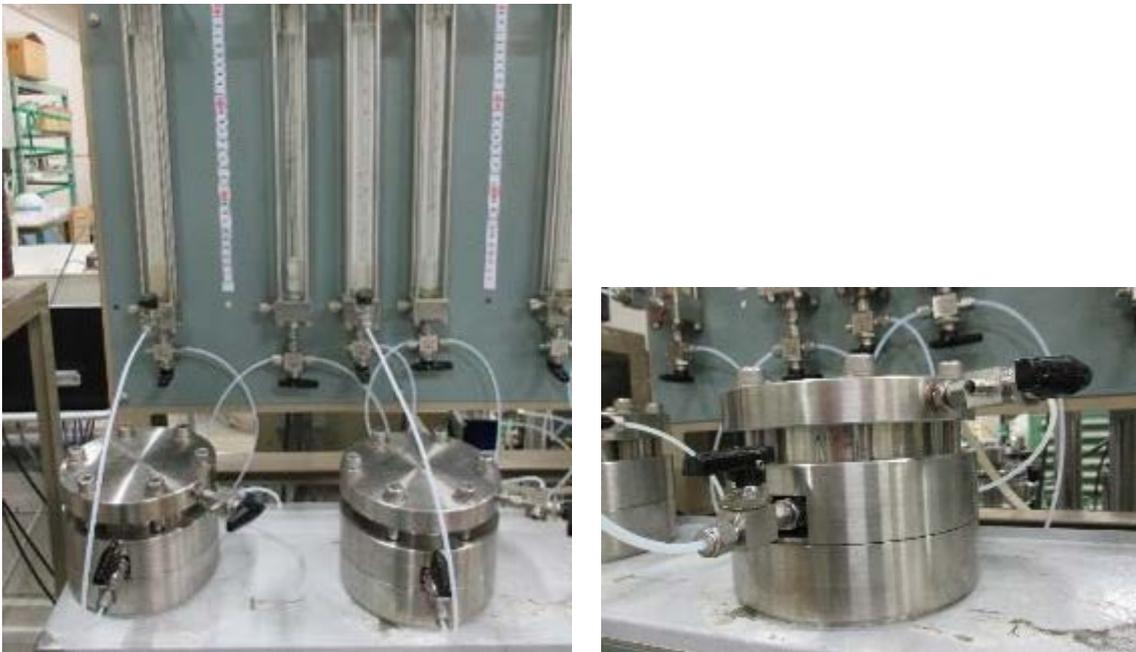


図 4.3.3-1 透水特性の測定状況（緩衝材、埋戻し材）

2) 測定結果（緩衝材、埋戻し材）

緩衝材の膨潤特性の測定時の吸水量と経過時間の関係については、吸水した浸潤を拡散現象とみなすと経過時間 (\sqrt{t}) の関数として評価できる[6]。吸水量と経過時間の関係を図 4.3.3-2 に示す。吸水された水が供試体に均一に分布すると仮定し、短い時間あたりの吸水量から含水比の変化を求め、供試体の飽和度を算定した。また、吸水の速度を見かけの透水係数として飽和度との関係を求めた。給水過程における見掛けの透水係数と飽和度の関係を図 4.3.3-3 に示す。

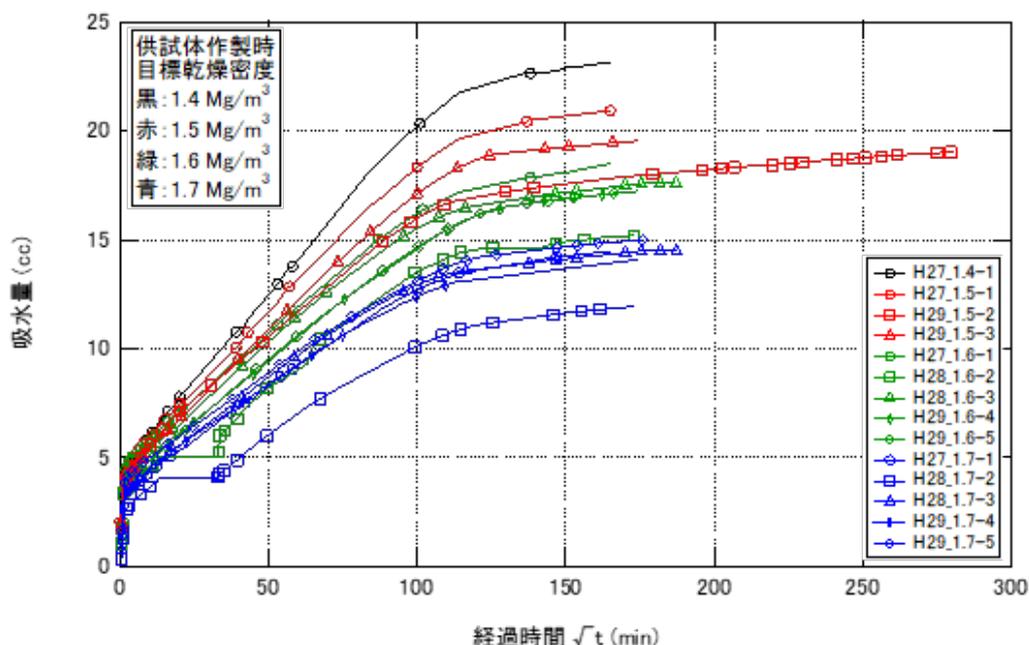


図 4.3.3-2 吸水量と経過時間の関係（緩衝材）

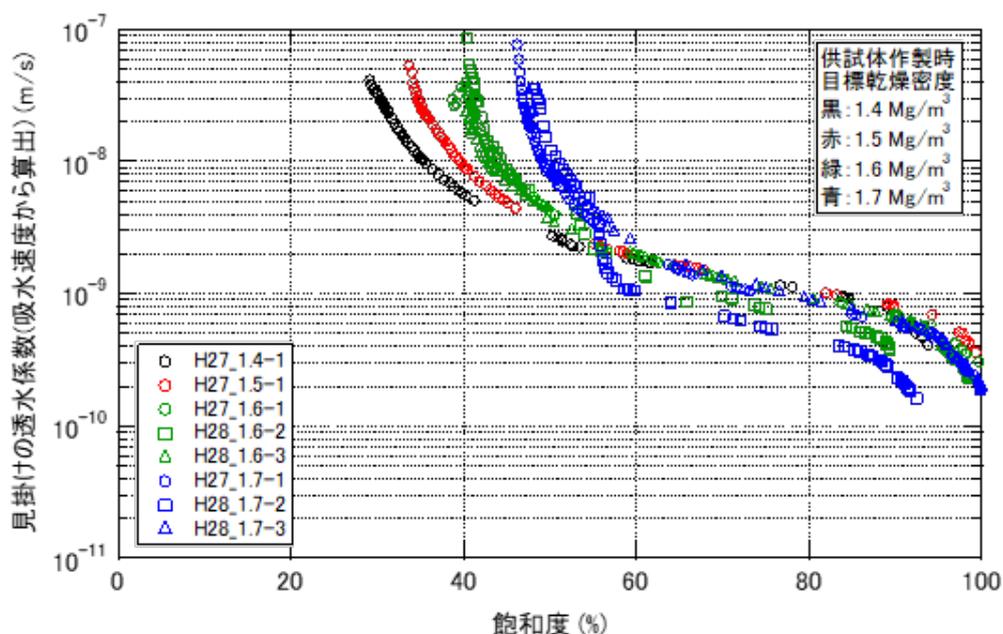


図 4.3.3-3 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係（緩衝材）

埋戻し材の膨潤特性の測定時の吸水量と経過時間 (\sqrt{t}) の関係を、図 4.3.3-4 に示す。給水過程において、吸水された水が供試体に均一に分布すると仮定し、短い時間あたりの吸水量から含水比の変化を求め、供試体の飽和度を算定した。また、吸水の速度を見掛けの透水係数として飽和度との関係を求めた。給水過程における見掛けの透水係数と飽和度の関係を図 4.3.3-5 に示す。

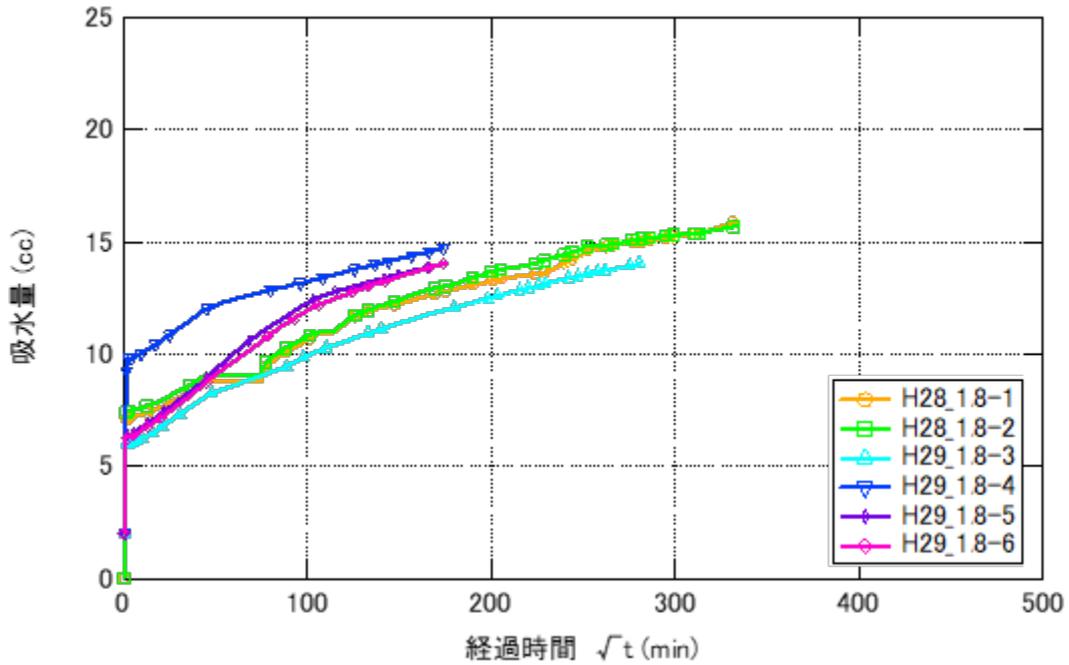


図 4.3.3-4 吸水量と経過時間の関係 (埋戻し材)

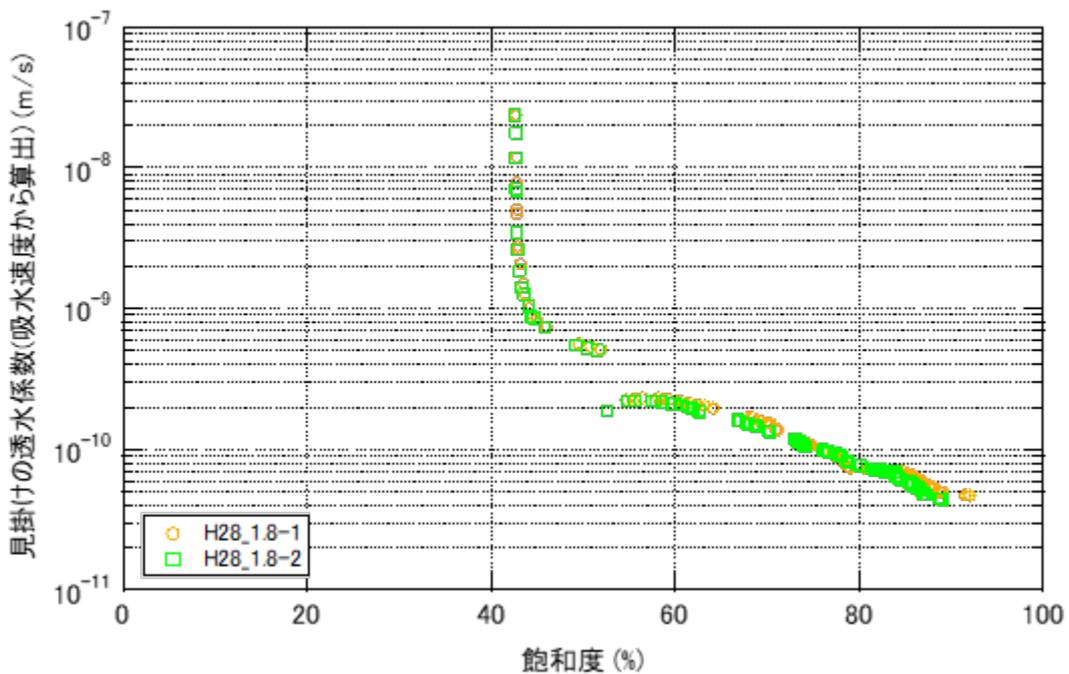


図 4.3.3-5 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係 (埋戻し材)

緩衝材の透水特性の測定結果を表 4.3.3-3 に、透水係数と経過時間の関係を

図 4.3.3-6 に示す。給水側と排水側圧力を変化させても透水係数の変化が小さいことを確認して供試体の飽和度が十分高いと判断し、飽和の透水係数とした。H29 年度では、一段階の試験期間を一週間程度とした。給水と排水の圧力を変化させた直後の透水係数のばらつきは大きい、ばらつきが収束した箇所を透水係数とした。

表 4.3.3-3 透水特性の測定結果（緩衝材）

供試体 作製時の 目標 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	供試体 番号	給水側 圧力 P_{in} (MPa)	排水側 圧力 P_{out} (MPa)	動水勾配 i	15°Cの 透水係数 k_{15} (m/s)	24°Cの 透水係数 k_{24} (m/s)	透水係数 k_{24} [供試体毎の 平均] (m/s)	供試体 作製時の 乾燥密度 (Mg/m ³)	有効 粘土密度 (Mg/m ³)
1.4	H27_1.4-1	0.10	0.05	255	8.96E-13	1.12E-12	1.12E-12	1.395	1.161
		0.15	0.10	255	8.96E-13	1.12E-12			
		0.20	0.15	255	9.04E-13	1.13E-12			
1.5	H27_1.5-1	0.10	0.05	255	6.22E-13	7.77E-13	8.00E-13	1.497	1.263
		0.15	0.10	255	6.31E-13	7.89E-13			
		0.20	0.15	255	6.66E-13	8.33E-13			
	H29_1.5-2	0.10	0.05	255	4.78E-13	5.98E-13	5.91E-13	1.501	1.267
		0.15	0.10	255	4.54E-13	5.68E-13			
		0.20	0.15	255	4.86E-13	6.08E-13			
H29_1.5-3	0.10	0.05	255	6.50E-13	8.12E-13	7.64E-13	1.497	1.263	
	0.15	0.10	255	6.28E-13	7.85E-13				
	0.20	0.15	255	5.55E-13	6.94E-13				
1.6	H27_1.6-1	0.10	0.05	255	4.08E-13	5.10E-13	5.17E-13	1.600	1.370
		0.15	0.10	255	4.12E-13	5.15E-13			
		0.20	0.15	255	4.22E-13	5.27E-13			
	H29_1.6-2	0.10	0.05	255	4.53E-13	5.66E-13	5.62E-13	1.598	1.368
		0.15	0.10	255	4.61E-13	5.76E-13			
		0.20	0.15	255	4.36E-13	5.45E-13			
	H29_1.6-3	0.10	0.05	255	5.28E-13	6.60E-13	6.82E-13	1.603	1.373
		0.15	0.10	255	5.41E-13	6.76E-13			
		0.20	0.15	255	5.68E-13	7.10E-13			
1.7	H27_1.7-1	0.10	0.05	255	2.98E-13	3.73E-13	3.42E-13	1.702	1.478
		0.15	0.10	255	2.75E-13	3.44E-13			
		0.20	0.15	255	2.47E-13	3.09E-13			
	H29_1.7-2	0.10	0.05	255	4.16E-13	5.20E-13	4.82E-13	1.688	1.463
		0.15	0.10	255	3.92E-13	4.90E-13			
		0.20	0.15	255	3.49E-13	4.36E-13			
	H29_1.7-3	0.10	0.05	255	3.73E-13	4.66E-13	4.81E-13	1.695	1.470
		0.15	0.10	255	4.03E-13	5.04E-13			
		0.20	0.15	255	3.79E-13	4.74E-13			

緩衝材 乾燥密度:1.4 Mg/m³
 H27_1.4-1
 ○ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 □ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 △ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa

緩衝材 乾燥密度:1.5 Mg/m³
 H27_1.5-1
 ○ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 □ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 △ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa
 H29_1.5-2
 ▽ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 ◁ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 ▷ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa
 H29_1.5-3
 ◊ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 ◈ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 ◊ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa

緩衝材 乾燥密度:1.6 Mg/m³
 H27_1.6-1
 ○ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 □ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 △ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa
 H29_1.6-2
 ▽ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 ◁ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 ▷ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa
 H29_1.6-3
 ◊ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 ◈ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 ◊ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa

緩衝材 乾燥密度:1.7 Mg/m³
 H27_1.7-1
 ○ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 □ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 △ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa
 H29_1.7-2
 ▽ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 ◁ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 ▷ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa
 H29_1.7-3
 ◊ P_{in} :0.10 MPa P_{out} :0.05 MPa
 ◈ P_{in} :0.15 MPa P_{out} :0.10 MPa
 ◊ P_{in} :0.20 MPa P_{out} :0.15 MPa

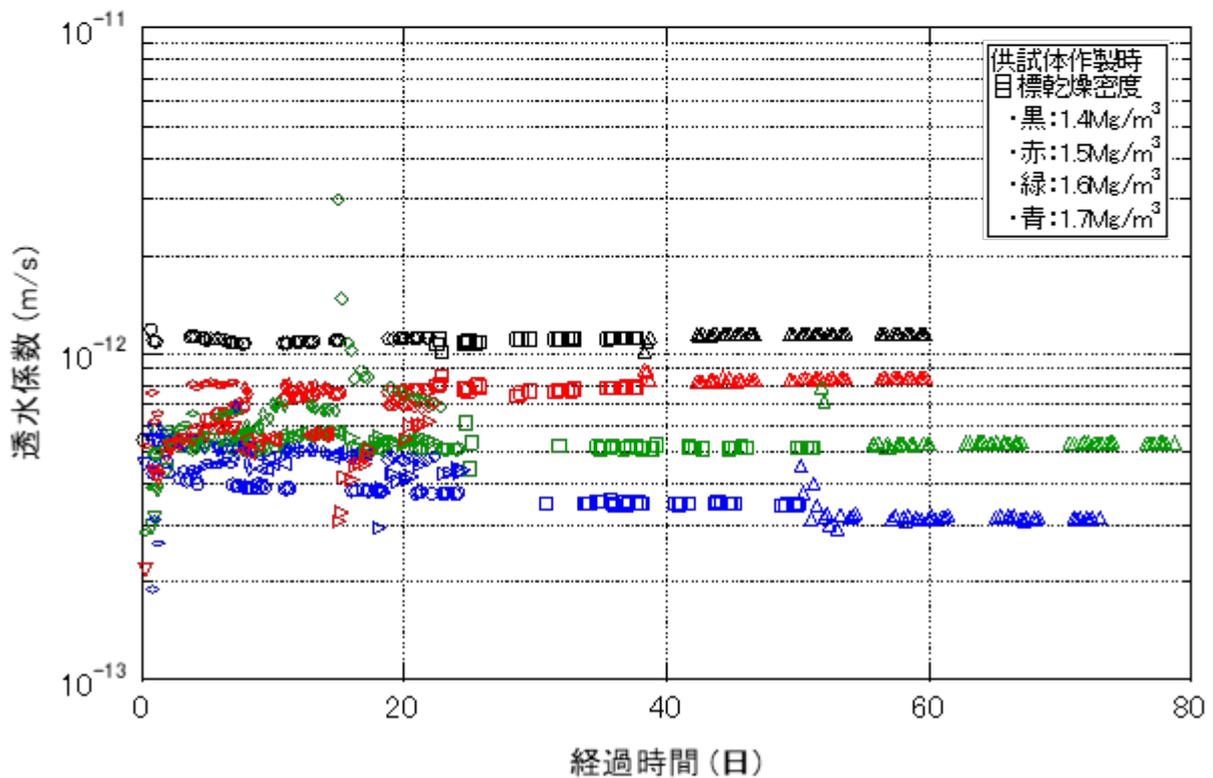


図 4.3.3-6 透水係数と経過時間の関係 (緩衝材)

埋戻し材の透水特性の測定結果を表 4.3.3-4 に透水係数と経過時間の関係を図 4.3.3-7 に示す。背圧を変化させた変水位透水試験における透水係数の変化が小さいことを確認して、供試体の飽和度が十分高いと判断し、飽和の透水係数とした。

表 4.3.3-4 透水特性の測定結果（埋戻し材）

供試体 作製時の 目標 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	実施 年度	供試体 番号	給水側 圧力 P_{in} (MPa)	排水側 圧力 P_{out} (MPa)	動水勾配 i	15°Cの 透水係数 k_{15} (m/s)	24°Cの 透水係数 k_{24} (m/s)	透水係数 k_{24} [供試体毎の 平均] (m/s)	供試体 作製時の 乾燥密度 (Mg/m ³)	有効 粘土密度 (Mg/m ³)
1.8	H28	H28_1.8-1	0.04	0.02	102	8.72E-12	1.09E-11	1.05E-11	1.810	0.653
			0.06	0.04	102	8.32E-12	1.04E-11			
			0.08	0.06	102	8.08E-12	1.01E-11			
		H28_1.8-2	0.04	0.02	102	9.20E-12	1.15E-11			
			0.06	0.04	102	8.32E-12	1.04E-11			
			0.08	0.06	102	8.40E-12	1.05E-11			
	H29	H29_1.8-3	0.04	0.02	102	5.86E-12	7.32E-12	7.05E-12	1.801	0.645
			0.06	0.04	102	5.54E-12	6.92E-12			
			0.08	0.06	102	5.54E-12	6.92E-12			
		H29_1.8-4	0.04	0.02	102	5.82E-12	7.27E-12	7.10E-12	1.798	0.643
			0.06	0.04	102	5.67E-12	7.09E-12			
			0.08	0.06	102	5.55E-12	6.94E-12			
		H29_1.8-5	0.04	0.02	102	6.53E-12	8.16E-12	7.77E-12	1.796	0.641
			0.06	0.04	102	6.06E-12	7.58E-12			
			0.08	0.06	102	6.06E-12	7.58E-12			
		H29_1.8-6	0.04	0.02	102	8.36E-12	1.05E-11	9.64E-12	1.802	0.646
			0.06	0.04	102	7.14E-12	8.92E-12			
			0.08	0.06	102	7.65E-12	9.56E-12			

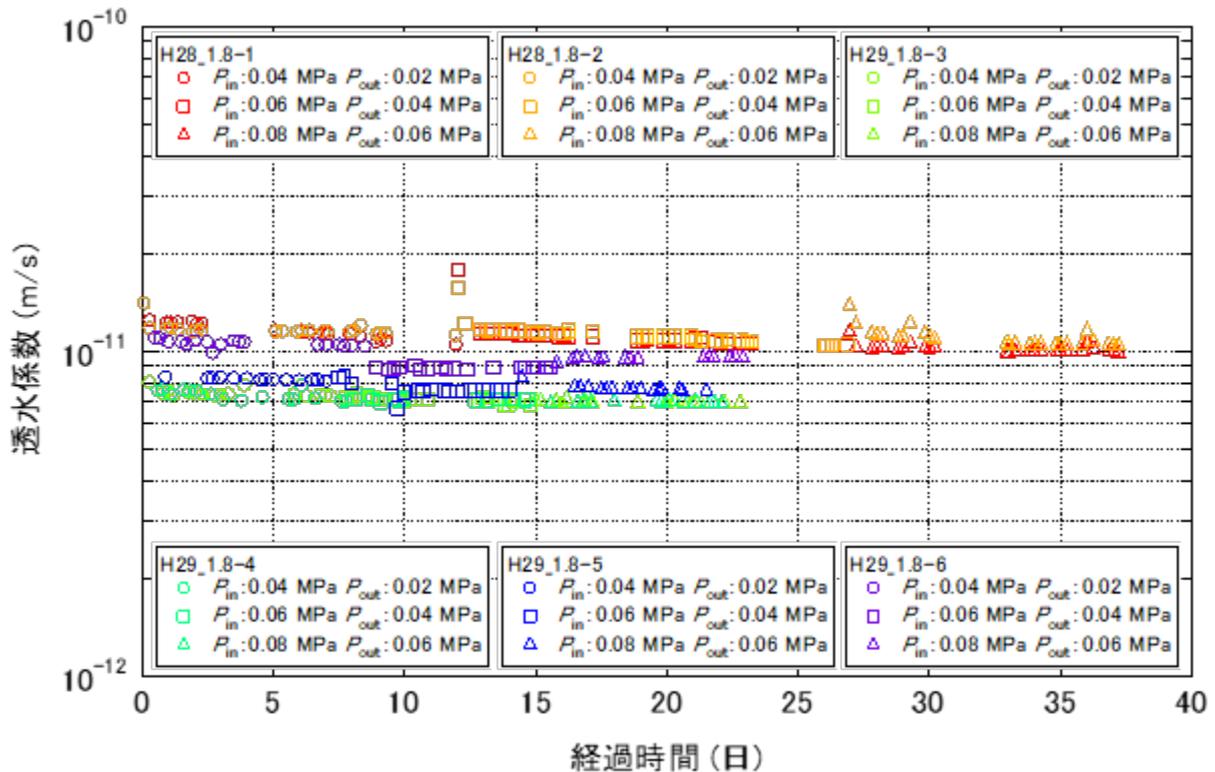


図 4.3.3-7 透水係数と経過時間の関係（埋戻し材）

本研究の数値解析に連動した要素試験の実施は、統計処理が可能な数量を確保することを目標とした。しかし、緩衝材及び埋戻し材の膨潤特性の測定においては、測定期間が長期にわたることから、緩衝材 10 本、埋戻し材 6 本の試験本数であった。そこで、本研究の透水特性の測定と同様の条件の結果を JAEA のデータベース[3][7]より取得して透水係数の比較を実施した。共通の条件として、ベントナイトはクニゲル V1、蒸留水またはイオン交換水、常温または 25°C を設定した。透水係数と有効粘土密度の関係を図 4.3.3-8 に示す。有効粘土密度については、式(4.3.2 1)より算定した。モンモリロナイト含有率が 50~55% の PNC-TN8410 92-057 と比較すると透水係数と有効粘土密度の関係は調和的な傾向である。

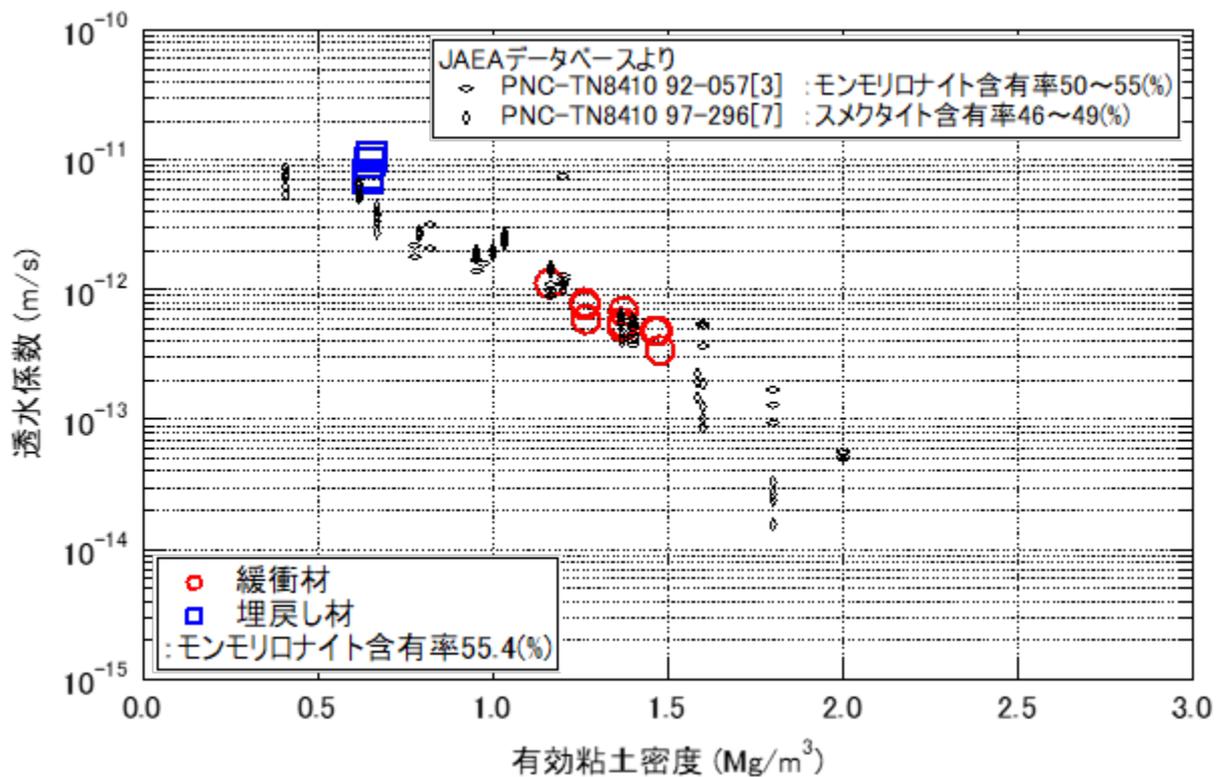


図 4.3.3-8 透水係数と有効粘土密度の関係

(2) 透水特性 (周辺岩盤)

1) 測定方法 (周辺岩盤)

周辺岩盤の透水試験については、「堆積岩の圧密現象に着目した透水係数推定の試み」[8]による測定方法を参考にした。測定条件を表 4.3.3-5 に、拘束圧の負荷が可能な変水位透水試験の試験装置を図 4.3.3-10 に示す。供試体の側面からの漏水防止として、供試体とメンブレンの間を弾性接着剤 (スーパーX) で接着した。透水係数の算定には、式(4.3.3 1)の変水位透水試験の式を用いた。

表 4.3.3-5 透水特性の測定条件 (周辺岩盤)

供試体の寸法	直径 50×高さ 100 mm
有効拘束圧(セル圧－給水側圧力)	1.5 , 3 , 5 , 7 MPa
給水側圧力	0.4 MPa
排水側圧力	0.2 , 0.35 MPa



図 4.3.3-9 変水位透水特性の測定状況

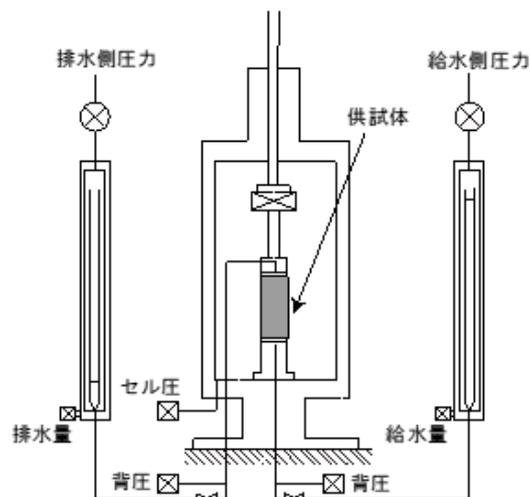


図 4.3.3-10 変水位透水試験の測定装置 (周辺岩盤)

2) 測定結果（周辺岩盤）

周辺岩盤の透水特性の測定結果を表 4.3.3-6 に、透水係数と圧密圧力の関係を図 4.3.3-11 に、透水係数と間隙比の関係を図 4.3.3-12 に示す。

周辺岩盤の透水係数と圧密圧力の関係では、圧密圧力が増加すると透水係数が若干低下する傾向を示した。個々の供試体の透水係数と間隙比の関係では、間隙比が大きくなると透水係数が大きくなる傾向を示した。

表 4.3.3-6 透水特性の測定結果（周辺岩盤）

供試体 番号	圧密圧力 σ_c' (MPa)	圧密後 間隙比	透水係数 (m/s)	温度補正 係数	透水係数 K_w (m/s)	透水係数 平均 (m/s)
H27-1	1.5	0.620	9.25E-11	0.839	7.76E-11	6.10E-11
	3	0.617	7.05E-11	0.859	6.06E-11	
	5	0.600	6.43E-11	0.880	5.65E-11	
H27-2	1.5	0.652	4.83E-11	0.819	3.96E-11	
	3	0.647	4.10E-11	0.819	3.36E-11	
	5	0.643	3.63E-11	0.819	2.97E-11	
	7	0.636	3.62E-11	0.819	2.97E-11	
H28-3	1.5	0.643	9.52E-11	0.800	7.62E-11	
	3	0.639	8.88E-11	0.800	7.10E-11	
	5	0.635	8.69E-11	0.800	6.95E-11	
H28-4	3	0.549	9.51E-12	0.800	7.61E-12	
	5	0.545	9.62E-12	0.800	7.70E-12	
H28-5	1.5	0.632	1.58E-10	0.800	1.26E-10	
	3	0.630	1.32E-10	0.800	1.06E-10	
	5	0.625	8.94E-11	0.800	7.15E-11	
H28-6	1.5	0.605	1.58E-10	0.800	1.26E-10	
	3	0.601	1.26E-10	0.800	1.01E-10	
	5	0.596	1.05E-10	0.800	8.40E-11	
H28-7	1.5	0.671	8.47E-11	0.800	6.78E-11	
	3	0.668	6.22E-11	0.800	4.98E-11	
	5	0.664	4.82E-11	0.800	3.86E-11	
H28-8	1.5	0.586	6.79E-11	0.800	5.43E-11	
	3	0.582	5.43E-11	0.800	4.34E-11	
	5	0.577	4.39E-11	0.800	3.51E-11	

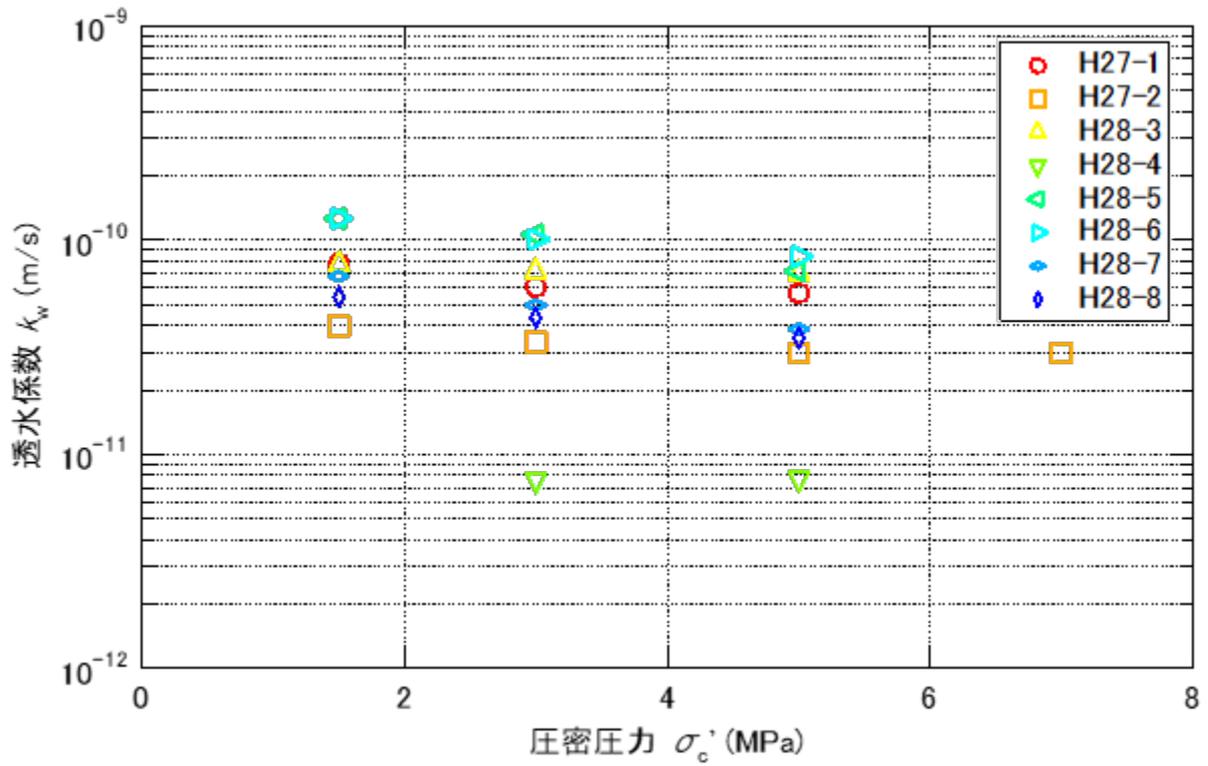


図 4.3.3-11 透水係数と圧密応力の関係 (周辺岩盤)

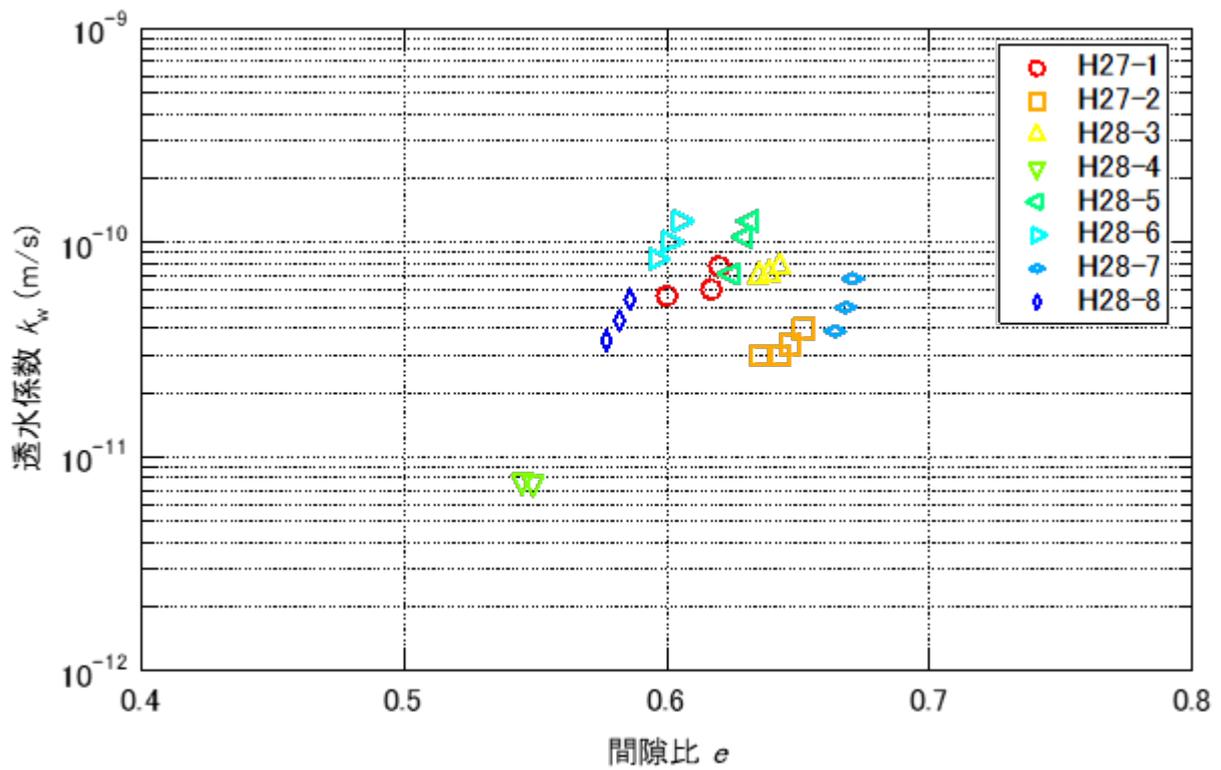


図 4.3.3-12 透水係数と間隙比の関係 (周辺岩盤)

(3) 保水特性

1) 測定方法

保水特性の測定については、サイクロメータを用いた。サイクロメータの諸元を表 4.3.3-7 に、装置の写真を図 4.3.3-13 に示す。測定結果を安定させる目的で 25℃に設定した恒温槽内にサイクロメータを設置した。

試験に用いた供試体の作製方法、水分状態、寸法を表 4.3.3-8 に示す。緩衝材と埋戻し材の排水過程では、脱水により供試体の体積が変化しているが、体積を再測定することによる密度の補正はしていない。

表 4.3.3-7 サイクロメータの諸元

製造	DECAGON 社製
型番	WP4-T
測定精度	±0.1MPa(0~-10MPa) ±1%(-10~-300MPa)
測定範囲	-0.1~-300 MPa
分解能	0.01 MPa
温度設定	15~40 °C (0.1 °C 単位設定)
測定センサ	チルドミラー露点センサ 赤外線サンプル温度センサ



図 4.3.3-13 サイクロメータ及び恒温槽

表 4.3.3-8 保水特性の測定に用いた供試体

供試体		実施 年度	供試体の作製方法	水分状態	寸法
緩衝材 乾燥密度 1.6 Mg/m ³	静的 締固め	H27	含水比を調整した試料を静 的に締固め	締固め	直径 35×高さ 4 mm
		H28	静的に締固めた供試体を気 中で自然乾燥	排水過程	縦 15×横 15×高さ 5 mm
	透水 試験後	H29	透水試験後の飽和した供試 体を整形	飽和状態	直径 20×高さ 5 mm
			透水試験後の供試体を気中 で自然乾燥	排水過程	
埋戻し材 乾燥密度 1.8 Mg/m ³	静的 締固め	H28	含水比を調整した試料を静 的に締固め	締固め	直径 35×高さ 4 mm
			静的に締固めた供試体を 気中で自然乾燥	排水過程	縦 15×横 15×高さ 5 mm
	透水 試験後	H29	透水試験後の飽和した供試 体を整形	飽和状態	直径 20×高さ 5 mm
			透水試験後の供試体を気中 で自然乾燥	排水過程	
周辺岩盤	H27	恒温槽に入れて水分を調整	排水過程	直径 35×高さ 4 mm	
		霧吹きで水分を調整	吸水過程		

2) 測定結果

緩衝材のサイクロメータの測定結果を表 4.3.3-9～表 4.3.3-12 に、化学ポテンシャルと飽和度の関係を図 4.3.3-14 に示す。H27 の静的締固め供試体と H28 の排水過程の化学ポテンシャルと飽和度の関係については、ほぼ同様の傾向を示した。H29 における飽和状態の供試体の試験後の飽和度は 109.0～117.5%となった。飽和状態からの排水に伴う水分特性の測定では、静的締固め供試体の化学ポテンシャルを補完する値を取得できた。

表 4.3.3-9 サイクロメータの測定結果（緩衝材：静的締固め供試体）

実施年度	吸排水過程	供試体番号	含水比(%)	化学ポテンシャル(MPa)	飽和度(%)
H27	静的締固め	H27_1.6-S1	5.4	43.52	20.2
		H27_1.6-S2	5.1	47.15	19.5
		H27_1.6-S3	5.3	64.12	20.1
		H27_1.6-S4	10.1	27.41	39.4
		H27_1.6-S5	9.9	29.95	38.5
		H27_1.6-S6	10.4	31.71	39.8
		H27_1.6-S7	14.9	11.14	59.1
		H27_1.6-S8	14.6	10.62	58.3
		H27_1.6-S9	15.5	8.59	60.7
		H27_1.6-S10	20.0	3.00	79.3
		H27_1.6-S11	20.6	2.92	79.9
		H27_1.6-S12	20.8	3.20	81.1
		H27_1.6-S13	21.9	3.24	87.4
		H27_1.6-S14	22.7	3.27	89.0
		H27_1.6-S15	20.2	2.33	82.7
		H27_1.6-S16	24.3	1.72	90.9
		H27_1.6-S17	24.1	1.93	91.9
		H27_1.6-S18	24.0	1.93	90.7

表 4.3.3-10 サイクロメータの測定結果（緩衝材：静的締固め供試体の排水過程）

実施年度	吸排水過程	供試体番号	含水比(%)	化学ポテンシャル(MPa)	飽和度(%)
H28	排水過程	H28_1.6-D1	21.1	2.00	79.6
			19.2	3.24	72.4
			17.4	3.59	65.6
			14.6	6.90	55.1
			12.2	12.47	46.0
			9.4	45.77	35.5
			7.0	72.98	26.4
			5.2	93.93	19.6
		3.3	183.49	12.4	
		H28_1.6-D2	20.5	1.98	77.1
			16.5	4.89	62.0
			13.6	9.44	51.1
			10.2	21.45	38.4
			8.5	46.70	32.0
			6.3	77.44	23.7
		4.0	101.53	15.0	
		H28_1.6-D3	23.7	1.52	87.5
			21.1	2.49	77.9
			17.8	3.24	65.7
			15.1	9.41	55.8
			12.5	23.16	46.2
9.9	56.77		36.6		
7.9	86.28		29.2		
4.6	219.50	17.0			

表 4.3.3-11 サイクロメータの測定結果（緩衝材：飽和供試体）

実施年度	吸排水過程	供試体番号	含水比(%)	化学ポテンシャル(MPa)	飽和度(%)
H29	飽和状態	H29_1.6-H1	29.1	1.01	111.0
		H29_1.6-H2	29.7	1.00	117.5
		H29_1.6-H3	28.7	1.04	117.1
		H29_1.6-H4	26	1.00	109.0

表 4.3.3-12 サイクロメータの測定結果 (緩衝材：飽和供試体の排水過程)

実施年度	吸排水過程	供試体番号	含水比(%)	化学ポテンシャル(MPa)	飽和度(%)
H29	排水過程	H29_1.6-H1	25.9	1.19	98.8
			24.7	1.68	94.4
			23.5	1.75	89.8
			22.7	1.90	86.7
		H29_1.6-H2	27.3	1.25	108.1
			26.2	1.46	103.6
			25.4	1.52	100.5
			24.2	1.71	95.8
			22.7	2.35	89.8
			21.1	2.98	83.4
			20.7	3.32	81.9
			26.7	1.44	109.3
		H29_1.6-H3	22.9	2.76	93.6
			22.1	2.63	90.3
			21.3	3.15	87.0
			24	1.12	100.8
			22.9	1.36	96.0
		H29_1.6-H4	21.7	1.45	91.0
			20.9	1.62	87.8
			19.4	1.94	81.3

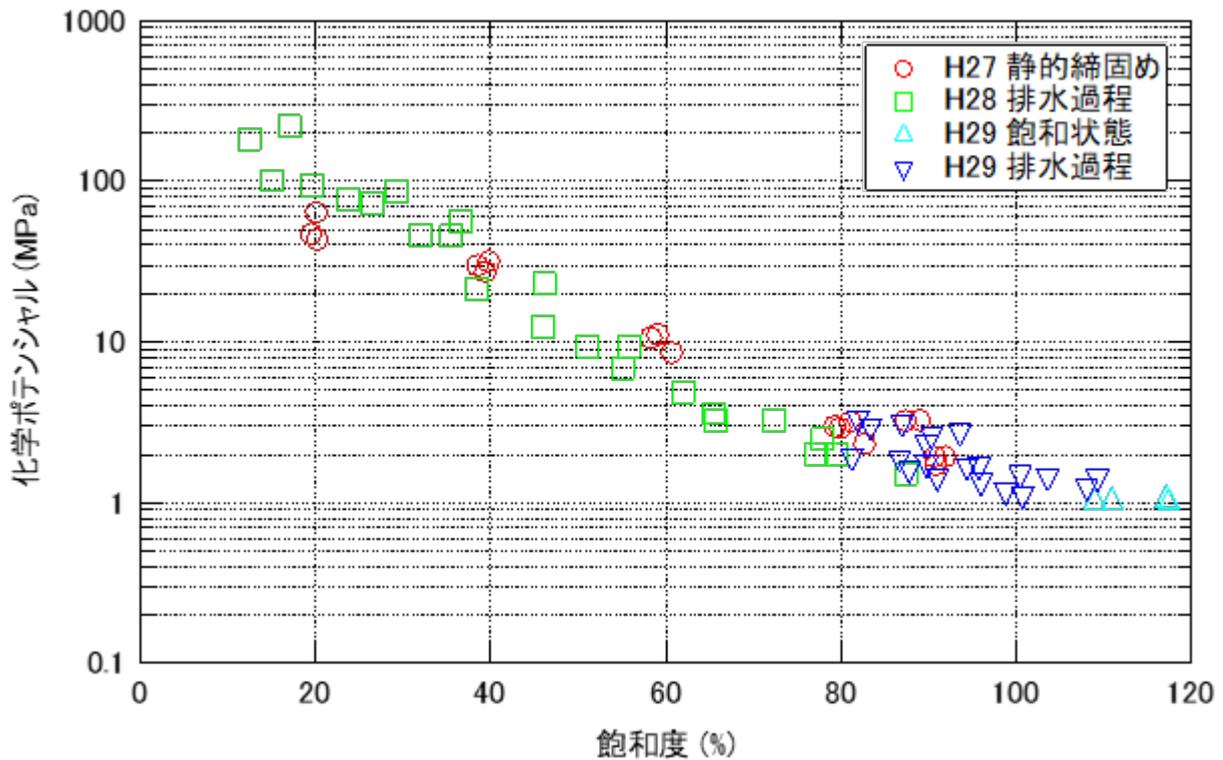


図 4.3.3-14 化学ポテンシャルと飽和度の関係 (緩衝材)

埋戻し材のサイクロメータの測定結果を表 4.3.3-13～表 4.3.3-16 に、化学ポテンシャルと飽和度の関係を図 4.3.3-15 に示す。H28 年度の静的締固めと H28 年度の排水過程の化学ポテンシャルと飽和度の関係では、ほぼ同様の傾向を示した。H29 年度の水分特性の測定では、飽和度 80% 以上の化学ポテンシャルが取得できた。

表 4.3.3-13 サイクロメータの測定結果（埋戻し材の静的締固め供試体）

実施年度	吸排水過程	供試体番号	含水比(%)	化学ポテンシャル(MPa)	飽和度(%)
H28	静的締固め	H28_1.8-S1	12.3	0.62	70.6
		H28_1.8-S2	12.7	0.53	72.1
		H28_1.8-S3	12.7	0.65	71.4
		H28_1.8-S4	11.6	0.62	66.6
		H28_1.8-S5	11.9	0.62	68.3
		H28_1.8-S6	10.5	0.80	61.5
		H28_1.8-S7	9.2	0.70	52.2
		H28_1.8-S8	9.2	0.86	53.9
		H28_1.8-S9	9.2	0.72	52.8
		H28_1.8-S10	7.9	0.88	44.4
		H28_1.8-S11	7.6	1.14	42.7
		H28_1.8-S12	7.8	1.02	44.8
		H28_1.8-S13	4.5	3.96	25.3
		H28_1.8-S14	6.2	2.03	34.1
		H28_1.8-S15	4.5	4.88	25.3
		H28_1.8-S16	1.8	72.35	8.2
		H28_1.8-S17	1.8	72.88	8.4
		H28_1.8-S18	2.1	45.51	11.2
		H28_1.8-S19	2.9	34.75	14.1
		H28_1.8-S20	0.0	159.19	0.0
		H28_1.8-S21	13.9	0.43	75.6
		H28_1.8-S22	13.2	0.46	71.1
		H28_1.8-S23	14.0	0.47	74.6
		H28_1.8-S24	13.9	0.35	75.6
		H28_1.8-S25	13.6	0.47	72.5
		H28_1.8-S26	13.6	0.52	72.5
		H28_1.8-S27	12.8	0.45	69.6
		H28_1.8-S28	12.4	0.40	68.8

表 4.3.3-14 サイクロメータの測定結果（埋戻し材：静的締固め供試体の排水過程）

実施年度	吸排水過程	供試体番号	含水比(%)	化学ポテンシャル(MPa)	飽和度(%)
H28	排水過程	H28_1.8-D1	13.8	0.36	71.2
			12.0	0.46	61.9
			9.5	0.67	49.0
			7.4	0.89	38.2
			5.7	1.43	29.4
			3.9	3.51	20.1
			1.8	85.56	9.3
		H28_1.8-D2	14.4	0.36	75.8
			13.3	0.32	70.0
			10.9	0.61	57.4
			7.4	0.89	39.0
			3.2	1.68	16.8
			3.9	5.14	20.5
			1.8	96.36	9.5
		H28_1.8-D3	14.4	0.55	75.8
			13.0	0.53	68.4
			9.5	0.67	50.0
			7.7	0.94	40.5
			5.6	1.66	29.5
			4.2	3.96	22.1
			2.1	68.59	11.1
		H28_1.8-D4	13.6	0.32	73.2
			11.8	0.45	63.5
			9.4	0.77	50.6
			7.0	0.93	37.7
			4.9	1.41	26.4
			2.4	7.18	12.9
			0.7	95.81	3.8
		H28_1.8-D5	14.4	0.45	75.8
			13.0	0.41	68.4
			10.9	0.53	57.4
			8.1	0.64	42.6
6.3	0.85		33.2		
4.2	2.04		22.1		
2.1	10.05		11.1		
0.4	107.89	2.1			

表 4.3.3-15 サイクロメータの測定結果（埋戻し材：飽和供試体）

実施年度	吸排水過程	供試体番号	含水比(%)	化学ポテンシャル(MPa)	飽和度(%)
H29	飽和状態	H29_1.8-H1	14.8	0.54	134.1
		H29_1.8-H2	14.8	0.50	131.0
		H29_1.8-H3	15.9	0.60	136.2
		H29_1.8-H4	12.7	0.55	117.5

表 4.3.3-16 サイクロメータの測定結果（埋戻し材：飽和供試体の排水過程）

実施年度	吸排水過程	供試体番号	含水比(%)	化学ポテンシャル(MPa)	飽和度(%)
H29	排水過程	H29_1.8-H1	13.9	0.66	125.5
			10.5	0.86	95.1
			9.6	0.92	86.7
		H29_1.8-H2	13.9	0.61	122.6
			10.5	0.92	92.6
			9.6	0.88	84.7
		H29_1.8-H3	15.0	0.79	128.4
			12.8	0.81	109.6
			11.6	1.06	99.3
		H29_1.8-H4	11.8	0.66	108.8
			8.7	0.81	80.2
			8.1	1.00	74.7

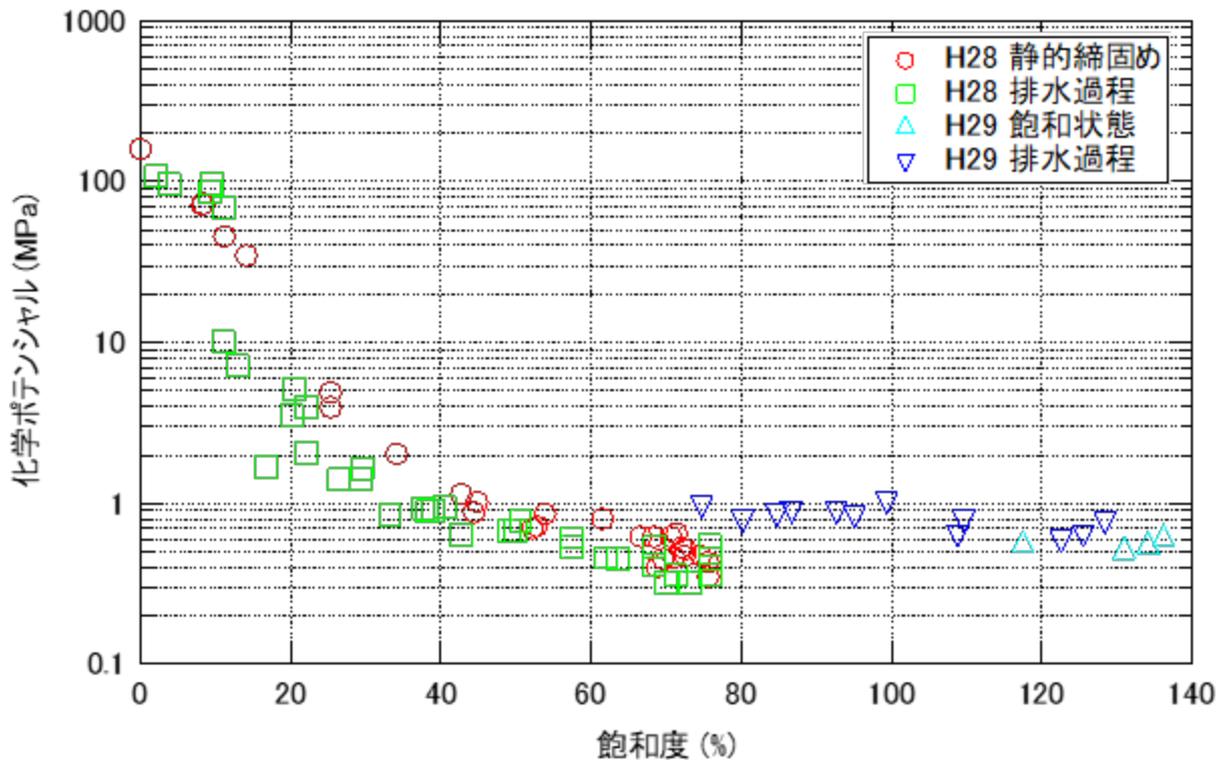


図 4.3.3-15 化学ポテンシャルと飽和度の関係（埋戻し材）

周辺岩盤のサイクロメータの測定結果を表 4.3.3-17 に、化学ポテンシャルと飽和度の関係を図 4.3.3-16 に示す。化学ポテンシャルと飽和度の関係は、排水過程と吸水過程のヒステリシスが確認出来た。

表 4.3.3-17 サイクロメータの測定結果（周辺岩盤）

吸水過程					排水過程				
実施年度	供試体番号	含水比 (%)	化学ポテンシャル (MPa)	飽和度 (%)	実施年度	供試体番号	含水比 (%)	化学ポテンシャル (MPa)	飽和度 (%)
H27	YTS4-2-2	21.7	0.04	74.5	H27	YTS4-2-1	27.7	0.08	92.1
	YTS4-2-3	15.7	0.70	59.0		YTS4-2-2	23.7	0.28	79.8
	YTS4-2-4	8.7	2.93	30.2		YTS4-2-3	17.6	1.31	64.1
	YTS4-2-5	6.6	8.67	27.2		YTS4-2-4	10.3	5.37	34.5
	YTS4-2-6	3.7	21.77	17.2		YTS4-2-5	8.0	14.04	32.1
	YTS4-2-7	2.4	47.83	9.0		YTS4-2-6	4.6	36.30	20.9
	YTS4-2-9	1.6	108.82	5.5		YTS4-2-7	3.5	58.91	12.9
	YTS4-2-11	2.9	27.73	11.7		YTS4-2-9	1.1	58.91	3.8
	YTS4-2-12	6.5	4.23	27.1		YTS4-2-11	2.9	51.64	11.7
	YTS4-2-13	8.6	2.21	35.2		YTS4-2-12	6.3	8.72	26.4
	YTS4-2-14	19.5	0.01	65.3		YTS4-2-13	8.8	4.73	36.0
	YTS4-2-8	1.3	23.99	5.3		YTS4-2-14	20.3	0.04	68.5
	YTS4-2-10	16.4	0.14	54.8		YTS1-4-1	16.4	0.85	70.8
	YTS1-4-1	16.6	0.06	71.7		YTS1-4-2	16.0	0.33	73.4
	YTS1-4-2	16.0	0.04	73.4		YTS1-4-3	19.9	0.14	72.5
	YTS1-4-3	17.6	0.07	63.8		YTS1-4-4	19.3	0.40	80.9
	YTS1-4-4	17.3	0.12	72.3		YTS1-4-5	18.9	0.04	79.3
	YTS1-4-5	15.6	0.11	65.2		YTS1-4-7	6.6	11.10	22.5
	YTS1-4-6	11.5	0.25	51.9		YTS1-4-8	17.8	0.15	76.4
	YTS1-4-7	7.8	3.42	26.5		YTS1-4-9	17.6	0.31	72.3
	YTS1-4-8	16.1	0.05	69.1		YTS1-4-10	18.8	0.50	69.1
	YTS1-4-9	15.9	0.06	65.6		YTS1-4-11	17.5	0.28	72.5
	YTS1-4-10	16.5	0.14	60.6		YTS1-4-12	17.3	0.21	72.2
	YTS1-4-11	14.7	0.17	60.4		YTS1-4-13	19.1	0.09	67.7
	YTS1-4-12	8.1	2.43	33.5		YTS1-3-1	14.2	0.44	58.6
	YTS1-4-13	11.7	0.47	41.5		YTS1-3-2	13.1	0.69	53.8
	YTS1-3-1	5.9	2.69	24.1		YTS1-3-3	11.2	1.93	43.7
	YTS1-3-2	9.2	1.05	37.8		YTS1-3-4	10.8	3.07	47.1
	YTS1-3-3	13.1	0.25	50.8		YTS1-3-5	10.5	2.44	44.6
	YTS1-3-4	11.5	1.11	49.8		YTS1-3-6	18.1	0.15	78.3
	YTS1-3-5	12.3	0.41	52.0		YTS1-3-7	23.1	0.05	89.4
	YTS1-3-6	17.6	0.05	75.8		YTS1-3-8	23.6	0.03	93.7
	YTS1-3-7	21.9	0.03	84.4		YTS1-3-9	23.4	0.04	92.5
	YTS1-3-8	21.9	0.01	86.5		YTS1-3-10	23.3	0.01	89.6
YTS1-3-9	21.3	0.01	84.2	YTS1-3-11	22.8	0.03	91.2		
YTS1-3-10	22.1	0.01	84.6	YTS1-3-12	21.8	0.03	90.3		
YTS1-3-11	21.4	0.01	84.8						
YTS1-3-12	20.0	0.01	82.8						

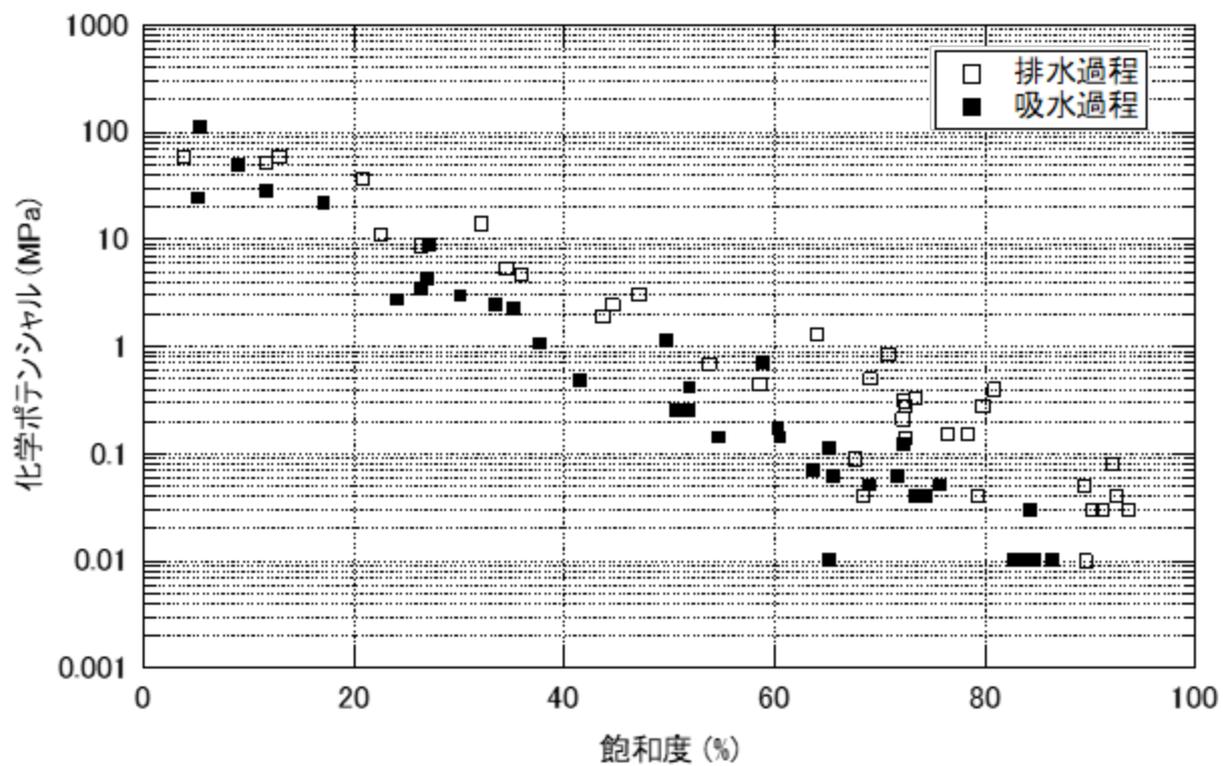


図 4.3.3-16 化学ポテンシャルと飽和度の関係 (周辺岩盤)

4.3.4 熱特性

(1) 熱伝導率

1) 測定方法

熱伝導率の測定については、非定常法のニードル方式を用いた。熱伝導率の測定については、供試体に挿入したプローブを加熱し、熱電対の温度差と時間の関係から算定した。

熱電率測定器の諸元を表 4.3.4-1 に測定プローブを図 4.3.4-1 に示す。

表 4.3.4-1 熱伝導率測定器の諸元

センサ部	ニードル方式
型番	CHF-TP08(クリマテック製)
測定範囲熱伝導率 (λ) :	0.1~6 W/m/K
測定温度範囲	-30~+180 °C
精度	±3 %
計測方法	供試体に φ1×90 mm を穿孔して、プローブを挿入する。
準拠する規格	ASTM D 5334-92、D 5930-97、IEEE 442-1981 の測定規格に準拠した製品
センサの較正方法	グリセリンの熱伝導率 0.286 W/m/K を測定し較正係数を求める $C = \frac{\lambda_{material}}{\lambda_{measured}}$ $\lambda_{material} = \text{較正材料の既知の熱伝導率}$ $\lambda_{measured} = \text{熱針プローブ装置で測定された材料の熱伝導率}$

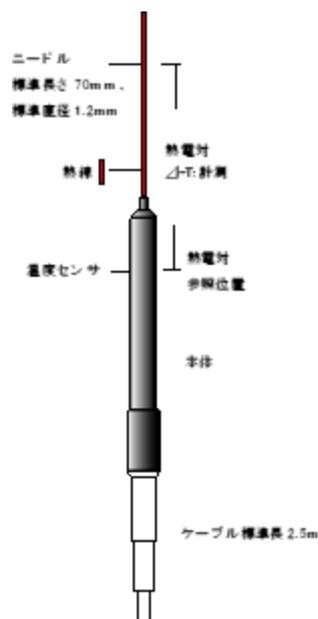
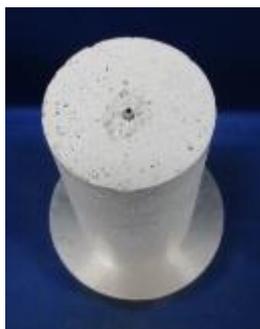


図 4.3.4-1 熱伝導率の測定プローブ

測定プローブを挿入するための穿孔状況を図 4.3.4-2 に、熱伝導率の測定状況を図 4.3.4-3 に示す。測定プローブの検定としてグリセリンの熱伝導率を測定し、熱伝導率計の動作を確認した。緩衝材の熱伝導率測定は、1.5、1.6、1.7 Mg/m³ の 3 種類の乾燥密度条件で作製した供試体を用いた。供試体については、所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト 7：ケイ砂 3 で混合）を設定した乾燥密度となるように質量測定を行い、静的締固めにより作製した。試験中の飽和度については、膨潤による体積変化を抑えることが困難であったため、試験前後の含水比を測定することとした。

埋戻し材の熱伝導率測定については、1.8 Mg/m³ の乾燥密度条件で作製した供試体を用いた。供試体については、所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト 15：ケイ砂 85 で混合）を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。

周辺岩盤の熱伝導率については、湿潤状態、乾燥状態及び含水比を調整した供試体を用いた。湿潤状態の測定では、測定中に含水比が変化しないように、供試体の上面まで蒸留水で満たしたプラスチック容器に供試体を収めて測定を実施した。乾燥状態の測定では、測定中に含水比が変化しないようにシリカゲルを入れたプラスチック容器に供試体を収めて測定を実施した。乾燥状態の熱伝導率を測定した後、供試体に給水を行い、任意の含水状態とした後、熱伝導率を測定した。



緩衝材



埋戻し材



周辺岩盤

図 4.3.4-2 測定供試体の穿孔状況



緩衝材



周辺岩盤（飽和状態）



周辺岩盤（乾燥状態）

図 4.3.4-3 熱伝導率の測定状況

2) 測定結果

緩衝材の熱伝導率の測定結果を表 4.3.4-2 に、熱伝導率と飽和度の関係を図 4.3.4-4 に示す。緩衝材の熱伝導率については、供試体作製時の乾燥密度に関わらず飽和度の上昇とともに増加する傾向が認められた。また、供試体の乾燥密度による差異は認められなかった。熱伝導率と飽和度との関係においては、飽和度 20%以下では、ほぼ一定値を示すのに対し、飽和度 30%を境に、飽和度の上昇とともに熱伝導率が大きくなる傾向が認められた。

表 4.3.4-2 熱伝導率の測定結果（緩衝材）

供試体作製時の乾燥密度: 1.5 (Mg/m ³)				供試体作製時の乾燥密度: 1.6 (Mg/m ³)				供試体作製時の乾燥密度: 1.7 (Mg/m ³)			
実施年度	供試体番号	飽和度 (%)	熱伝導率 (W/m/K)	実施年度	供試体番号	飽和度 (%)	熱伝導率 (W/m/K)	実施年度	供試体番号	飽和度 (%)	熱伝導率 (W/m/K)
H27	H27_1.5-1	0.0	0.43	H27	H27_1.6-1	0.0	0.53	H27	H27_1.7-1	0.0	0.61
	H27_1.5-2	0.0	0.42		H27_1.6-2	0.0	0.51		H27_1.7-2	0.0	0.62
	H27_1.5-3	35.0	0.75		H27_1.6-3	39.9	0.96		H27_1.7-3	46.1	1.13
	H27_1.5-4	33.7	0.74		H27_1.6-4	39.6	0.87		H27_1.7-4	46.4	1.07
	H27_1.5-5	53.0	1.09		H27_1.6-5	61.5	1.38		H27_1.7-5	53.7	1.33
	H27_1.5-6	69.3	1.20		H27_1.6-6	60.4	1.55		H27_1.7-6	69.4	1.72
	H27_1.5-7	83.9	1.79		H27_1.6-7	80.3	1.48		H27_1.7-7	90.9	1.80
H28	H28-1	18.5	0.46		H27_1.6-8	80.7	1.98	H28	H28_1.7-1	17.9	0.61
					H27_1.6-9	88.2	1.72				
					H27_1.6-10	88.6	1.69				
					H27_1.6-11	91.2	1.65				
					H27_1.6-12	89.5	1.91				
					H27_1.6-13	20.3	0.65				
					H27_1.6-14	19.7	0.55				

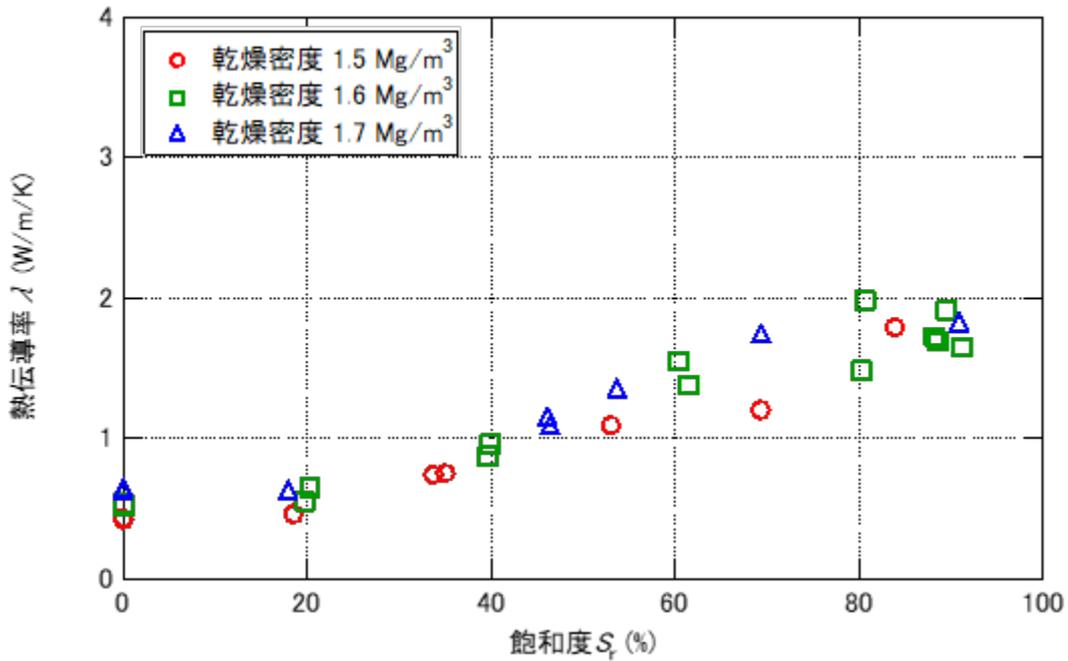


図 4.3.4-4 熱伝導率と飽和度の関係（緩衝材）

埋戻し材の熱伝導率の測定の結果を表 4.3.4-3 に、熱伝導率と飽和度の関係を図 4.3.4-5 に示す。熱伝導率と飽和度との関係においては、飽和度 20%以下では、ほぼ一定値を示すのに対し、飽和度 20%を境に、飽和度の上昇とともに熱伝導率が大きくなる傾向が認められた。

表 4.3.4-3 熱伝導率の測定結果（埋戻し材）

実施年度	供試体番号	飽和度 (%)	熱伝導率 (W/m/K)
H28	H28_1.8-1	0.0	0.96
	H28_1.8-2	0.0	0.98
	H28_1.8-3	17.5	0.86
	H28_1.8-4	17.4	0.95
	H28_1.8-5	37.7	2.06
	H28_1.8-6	37.1	1.78
	H28_1.8-7	56.0	2.59
	H28_1.8-8	55.5	2.15
	H28_1.8-9	63.8	2.75
	H28_1.8-10	64.3	2.41
	H28_1.8-11	72.8	2.62
	H28_1.8-12	73.5	2.80
	H28_1.8-13	83.1	3.25
	H28_1.8-14	84.5	3.16

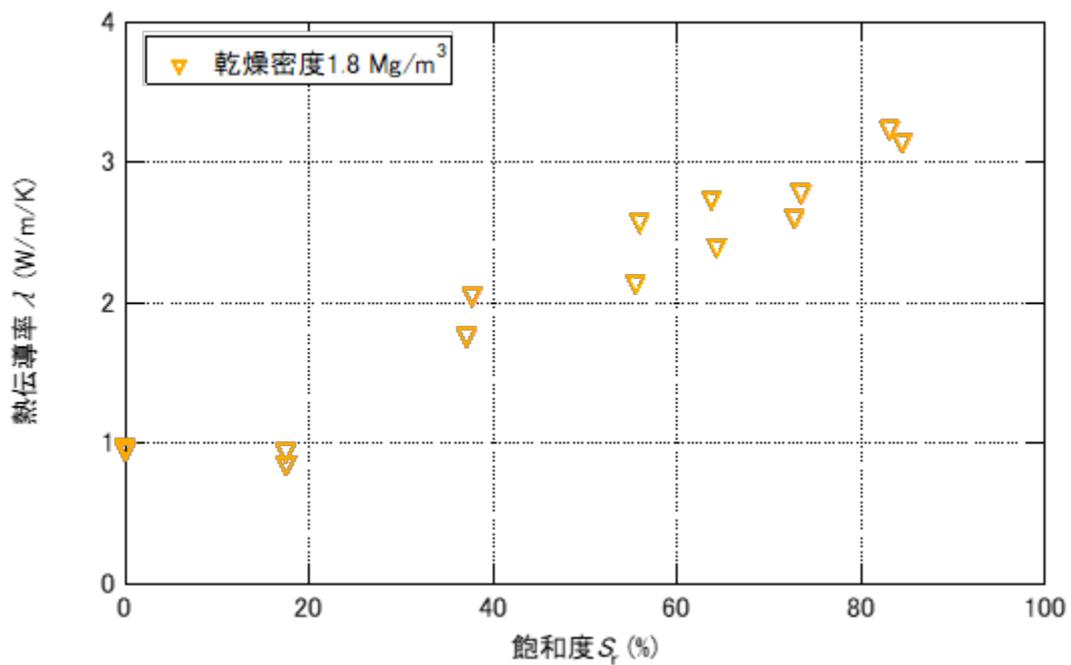


図 4.3.4-5 熱伝導率と飽和度の関係（埋戻し材）

周辺岩盤の熱伝導率の測定結果を表 4.3.4-4 に、熱伝導率と飽和度との関係を図 4.3.4-6 に示す。飽和度の上昇とともに熱伝導率が増加する傾向が認められた。

表 4.3.4-4 熱伝導率の測定結果（周辺岩盤）

実施年度	供試体番号	飽和度 (%)	熱伝導率 (W/m/K)	実施年度	供試体番号	飽和度 (%)	熱伝導率 (W/m/K)
H27	YTS1-1-2	95.3	1.20	H28	YTS2-1-3	83.5	1.07
		62.5	0.89			76.6	1.08
		39.5	0.60			65.6	0.89
		0.0	0.47			40.5	0.51
	94.3	1.18	20.1			0.51	
	YTS1-2-2	66.3	0.88		0.0	0.44	
		38.0	0.60		YTS2-1-4	87.5	1.09
		0.0	0.43			78.7	1.05
	93.4	1.16	65.7			0.95	
	69.9	0.96	41.3			0.67	
	YTS1-2-4	40.3	0.69		21.6	0.65	
		0.0	0.43		0.0	0.56	
		92.6	1.08		YTS1-4-1	87.2	1.10
		65.5	0.68			76.8	1.02
	49.6	0.62	65.3			0.93	
	0.0	0.40	43.6			0.72	
	YTS3-2-3	93.4	1.23		21.3	0.57	
		65.8	0.89		2.6	0.45	
		36.6	0.63		YTS2-4-1	83.9	0.93
	0.0	0.48	74.8			0.93	
90.8	1.19	65.9	0.86				
66.0	1.03	40.4	0.62				
YTS3-2-5	35.2	0.68	20.2	0.49			
	0.0	0.46	3.1	0.44			
	90.8	1.19					
	66.0	1.03					
YTS3-3-3	35.2	0.68					
	0.0	0.46					
	90.8	1.19					
	66.0	1.03					

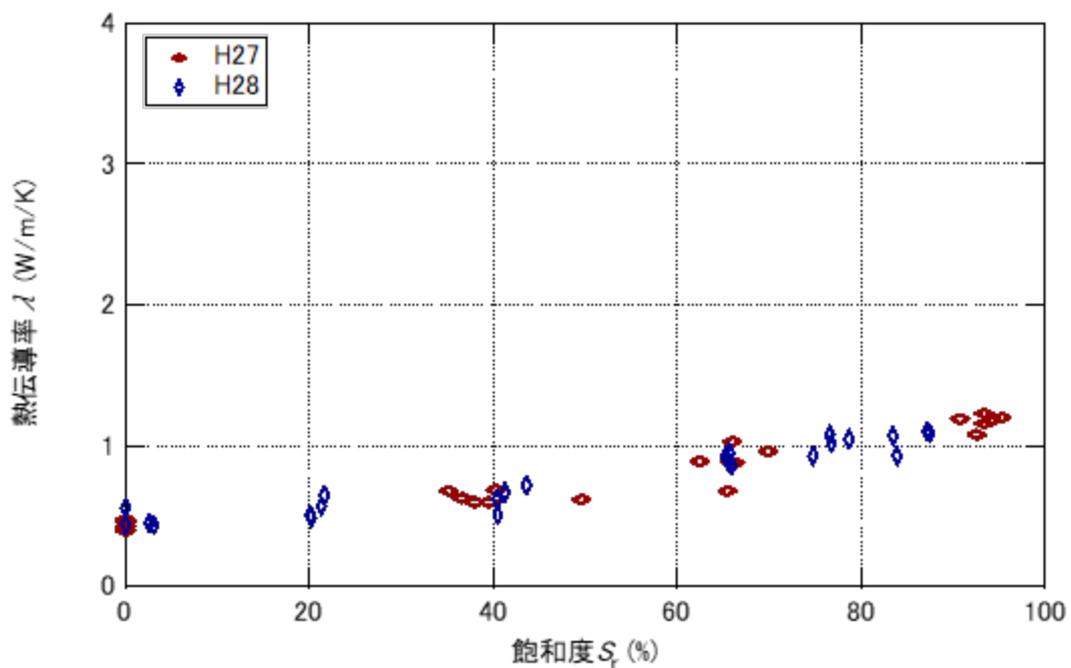


図 4.3.4-6 熱伝導率と飽和度の関係（周辺岩盤）

(2) 比熱

1) 測定方法

比熱の測定については、断熱走査型比熱測定装置 SH-3000L(真空理工株式会社製)を用いた。測定装置の諸元を表 4.3.4-5 に、装置を図 4.3.4-7 に示す。SH-3000Lは断熱法(長崎-高木法)[9]による比熱測定が可能であり、昇温速度は遅く熱平衡に近い状態で測定が可能である。

比熱の測定方法では、試料の入った断熱容器の内と外の温度を等温にしながら、昇温速度が一定となるように電力が調整されて測定される。

表 4.3.4-5 断熱走査型比熱測定装置の諸元

型番	SH-3000L(真空理工株式会社製)
測定温度範囲	-150~250 °C
熱電対	Kタイプ
供試体寸法	直径 16×高さ 31 mm
計測方法	供試体を断熱容器に入れて、一定の熱量を与えた際の供試体の温度上昇を計測
特徴	昇温速度が遅く、熱平衡に近い状態で測定可能
装置の検定方法	ニッケルの比熱(0.439J/g/K)を測定して計測のデータと比較



図 4.3.4-7 断熱走査型比熱測定装置

試料の温度が $(\theta - 1/2 \cdot \Delta\theta)$ °Cから、 $(\theta + 1/2 \cdot \Delta\theta)$ °Cまで、 $\Delta\theta$ °Cだけ温度上昇するのに Δt 秒の時間を要したとすると、試料の θ °Cにおける定圧比熱 C_p は、次式で表される。

$$C_p = \frac{w\Delta t}{M\Delta\theta} [J / (g \cdot K)] \quad \text{式(4.3.4-1)}$$

ここに、

- w : 加熱用の内部ヒーターの一定電力 (W)
- M : 試料の重さ (g)
- θ : 試料の温度 (°C)
- t : 時間 (s)

緩衝材の供試体については、含水比 10%に調整した混合土（ベントナイト 7：ケイ砂 3 で混合）を $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ （直径 15×高さ 30mm）となるように質量測定を行い、静的締固めにより作製した。埋戻し材の供試体については、含水比 8%に調整した混合土（ベントナイト 15：ケイ砂 85 で混合）を $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ （直径 15×高さ 30mm）の乾燥密度条件となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。

周辺岩盤の供試体については、直径 16×高さ 31mm に成形した。

比熱測定においては、作製した供試体を 110°Cで炉乾燥した後、常温まで冷まし、断熱走査型比熱測定装置にセットして 25～100°Cまで連続的に実施した。比熱測定に用いた供試体を図 4.3.4-8 に示す。

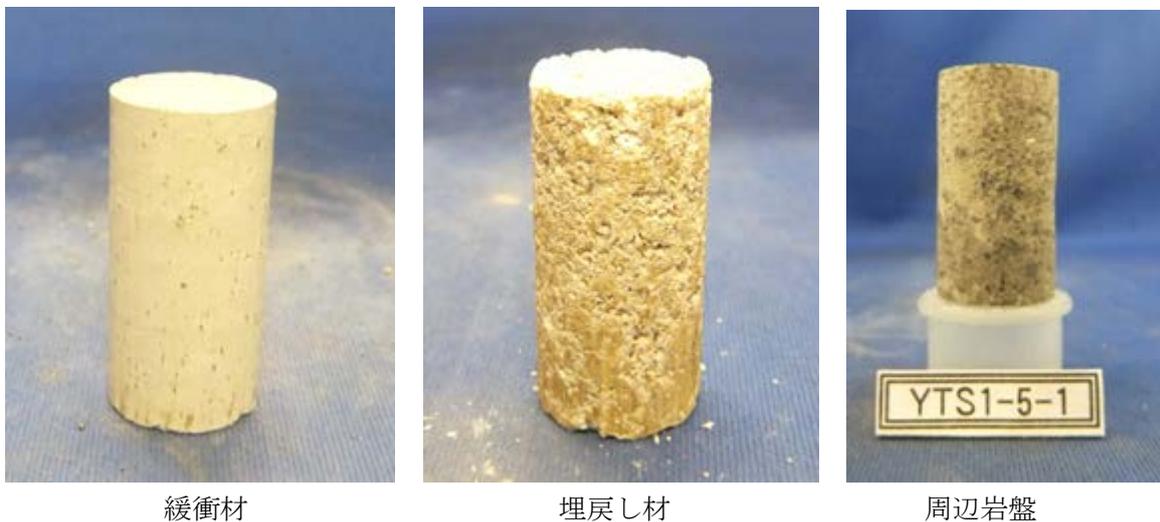


図 4.3.4-8 比熱測定に用いた供試体

2) 測定結果

断熱走査型比熱測定装置で測定した比熱と測定温度の関係をとりまとめ、緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤の比熱特性とした。

緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤の比熱の測定結果を表 4.3.4-6 に示す。緩衝材の比熱と温度の関係を図 4.3.4-9 に、埋戻し材の比熱と温度の関係を図 4.3.4-10 に、周辺岩盤の比熱と温度の関係を図 4.3.4-11 に示す。緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤の比熱については、 $\Delta \theta = 0.5^\circ\text{C}$ で算定したことから、計測値のばらつきは大きい。緩衝材と埋戻し材では、測定結果のばらつきは大きいと温度との明瞭な傾向は確認できない。周辺岩盤では、 60°C 前後での比熱と温度の関係の傾きに若干の差異が確認できる。比熱の値は、 $25\sim 100^\circ\text{C}$ までの測定結果の算術平均値とした。

表 4.3.4-6 比熱の測定結果

供試体番号	緩衝材 乾燥密度: 1.6 (Mg/m ³)	埋戻し材 乾燥密度: 1.8 (Mg/m ³)	周辺岩盤
1	855	845	885
2	828	835	854
3	853	817	835
4	882	790	884
5	872	816	909
6	916	861	901
7	962	796	888
8	875	816	811
9	887	807	901
10	909	795	878
個数	10	10	10
算術平均値 (J/kg/K)	884	818	875
中央値 (J/kg/K)	879	816	885
標準偏差 (J/kg/K)	36	22	30

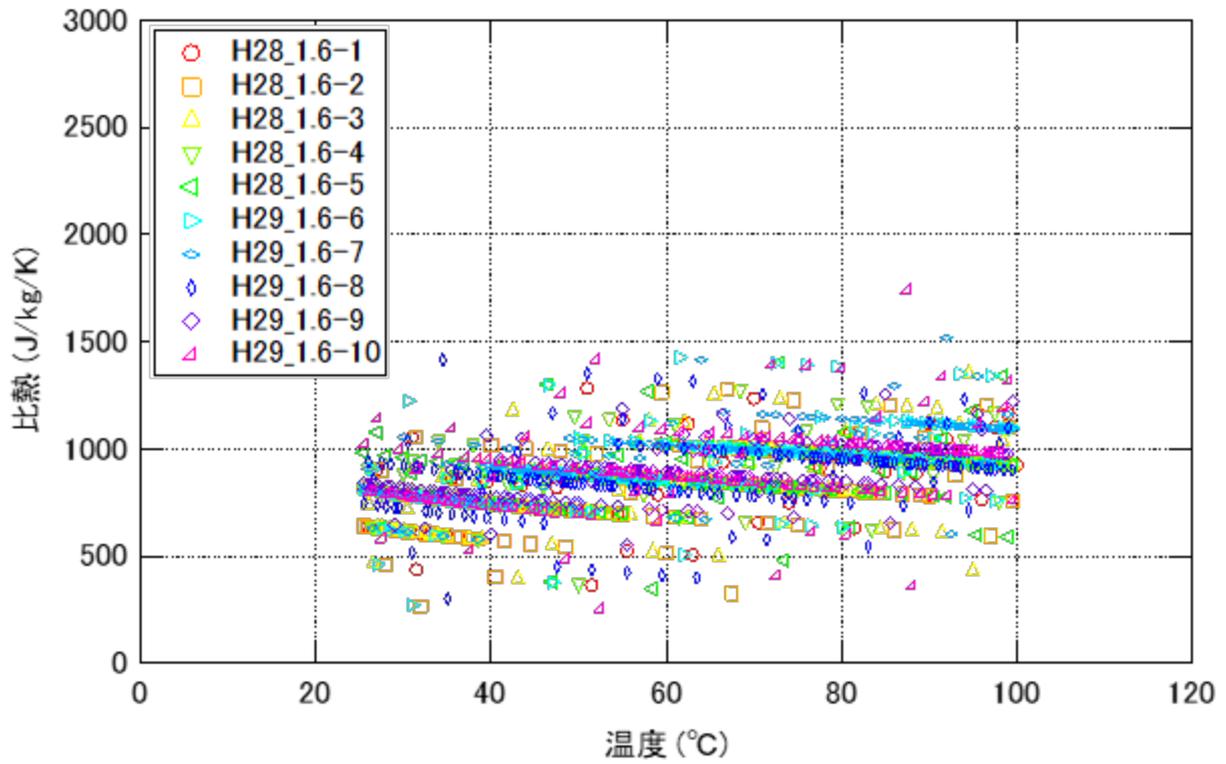


図 4.3.4-9 比熱と温度との関係 (緩衝材：乾燥密度 1.6Mg/m³)

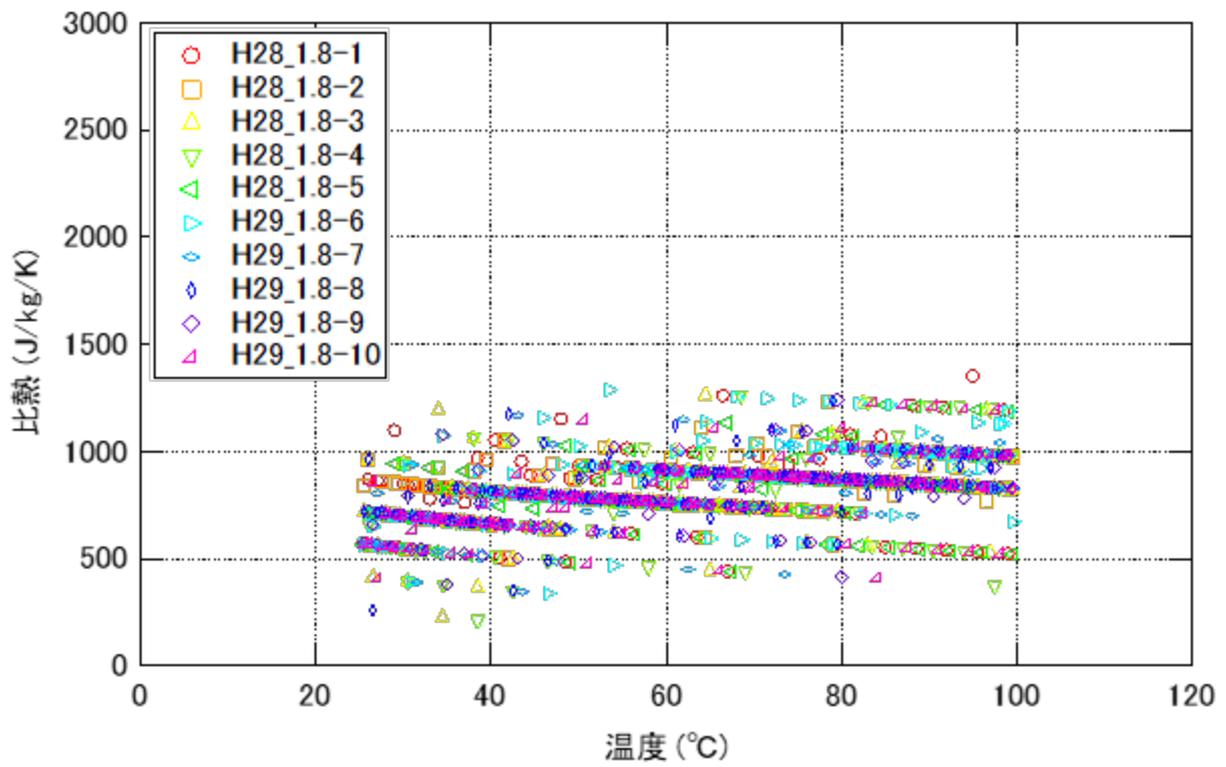


図 4.3.4-10 比熱と温度との関係 (埋戻し材：乾燥密度 1.8Mg/m³)

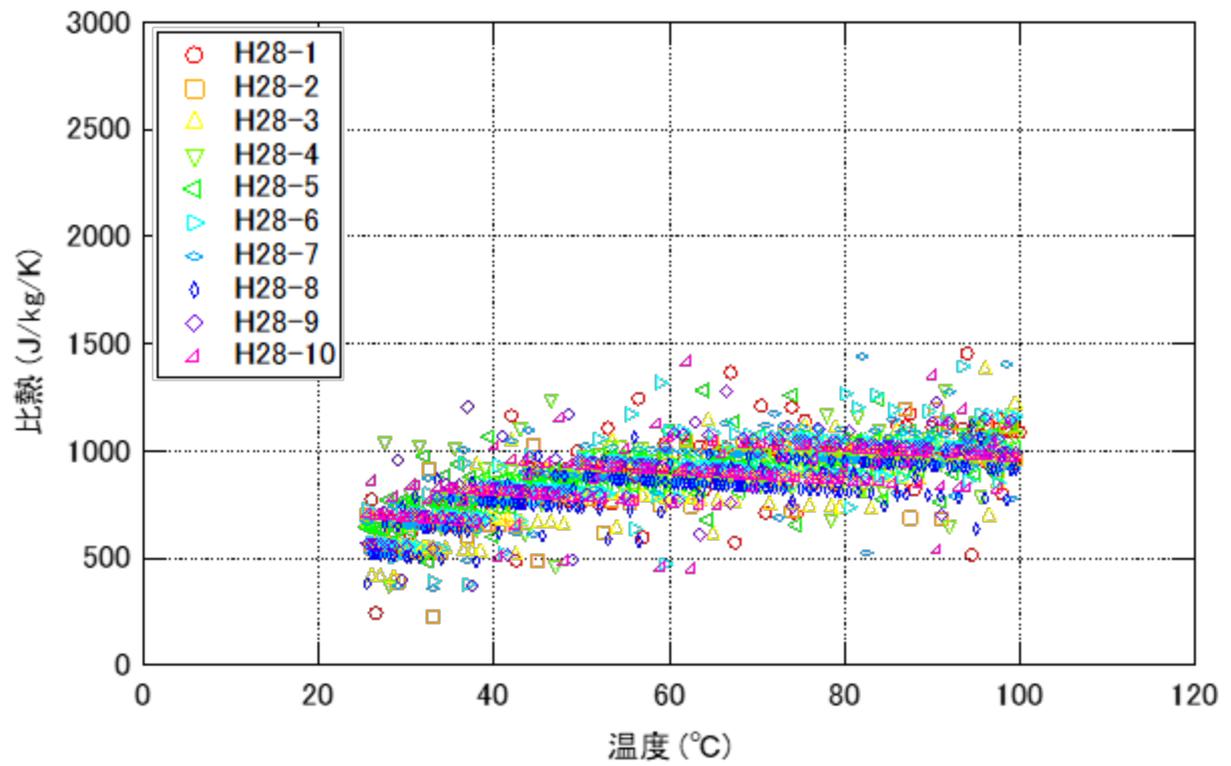


図 4.3.4-11 比熱と温度との関係 (周辺岩盤)

(3) 熱膨張

1) 測定方法

熱膨張の測定では、ひずみゲージを貼付した供試体を恒温槽内で加熱する方法とした。測定方法を表 4.3.4-7 に示す。

表 4.3.4-7 熱膨張の測定方法

ひずみゲージ	QFLA-30 (高温用ひずみゲージ) : 東京測器研究所製
温度範囲	室温~90℃程度
供試体寸法	直径 50×高さ 100 mm 程度
昇温速度	0.5℃/min 程度
測定方法	ひずみゲージを貼付した供試体を恒温槽内で加熱
ひずみゲージの温度補正方法	「温度が変化する場合における岩盤内部のひずみ計測結果の補正」[10]を参考にひずみゲージの値を補正。 温度補正したひずみを熱膨張ひずみと定義。
ひずみゲージの温度補正方法の有効性の確認	ひずみゲージを貼付した直径 50×高さ 100 mm の SS400 の試験結果と SS400 の文献値(熱膨張係数 11.8 μ/K)を比較

緩衝材の熱膨張の測定については、乾燥密度 1.5、1.6、1.7Mg/m³ で作製した供試体を用いた。含水比 10%に調整した混合土(ベントナイト 7 : ケイ砂 3)を設定した乾燥密度となるように質量を測定し、静的締固めにより供試体を作製した。

埋戻し材の熱膨張の測定については、乾燥密度 1.8Mg/m³ で作製した供試体を用いた。含水比 8%に調整した混合土(ベントナイト 15 : ケイ砂 85)を設定した乾燥密度となるように質量を測定し、静的締固めにより供試体を作製した。H28年度では供試体作製後に炉乾燥した供試体を用いたが、H29年度では含水比 8%の供試体で熱膨張を測定した。

周辺岩盤については、110℃の恒温槽で 24 時間程度乾燥させた供試体を固相の熱膨張として測定を実施した。

ひずみゲージについては、供試体の中央高さの対面する 2 か所に貼付した。ひずみゲージの貼付状況を図 4.3.4-12 に示す。



緩衝材(含水比 10%)



埋戻し材(含水比 8%)



周辺岩盤(乾燥状態)

図 4.3.4-12 ひずみゲージを貼付した供試体

2) 測定結果

加熱した供試体の熱膨張ひずみと温度の関係を、図 4.3.4-13~図 4.3.4-17 に示す。

緩衝材の熱膨張測定では、温度が高温になるに伴って熱膨張ひずみは膨張から収縮に転じる傾向となる。乾燥密度 1.6Mg/m^3 の緩衝材では、 60°C 付近までは熱膨張ひずみと温度の関係は膨張側にほぼ線形であるが、 $70\sim 80^\circ\text{C}$ からは収縮側に転じている。乾燥密度 1.7Mg/m^3 の緩衝材では、膨張から収縮に反転する温度が 50°C から 80°C 程度の範囲で供試体ごとにばらついている。熱膨張ひずみを測定している供試体の表面では、加熱されることにより固相や水分の膨張が生じ、さらに温度が高くなるにつれて水分が蒸発して乾燥することにより収縮に転じると考えられる。鉄に比べて熱伝導率が小さい地盤材料では供試体の内部へ温度が伝わりにくく、供試体の内部と外部で度差が生じている可能性が高い。

埋戻し材の熱膨張ひずみと温度の関係は線形で、ばらつきは小さい。緩衝材の熱膨張の特性とは挙動が異なっており、ベントナイトの配合割合が熱膨張の特性に影響していると思われる。

周辺岩盤の熱膨張ひずみと温度の関係は、ほぼ線形である。

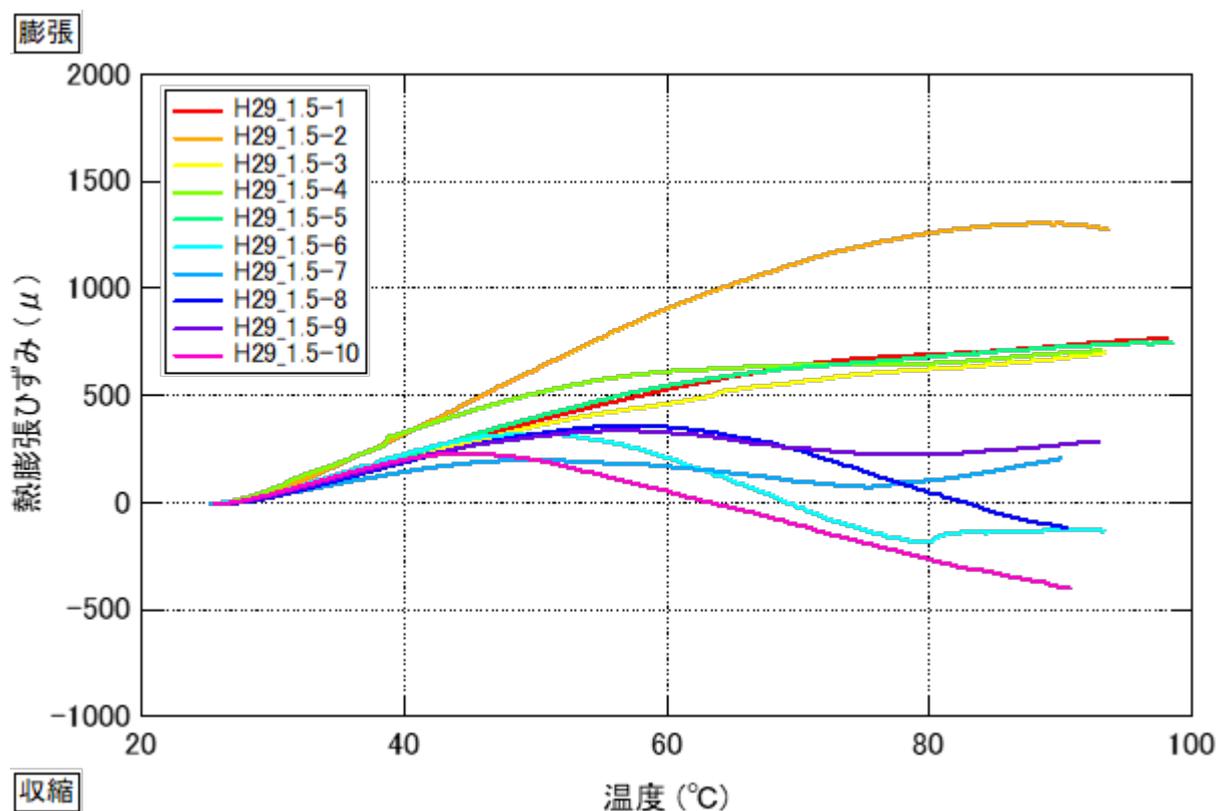


図 4.3.4-13 熱膨張ひずみと温度の関係 (緩衝材：乾燥密度 1.5Mg/m^3)

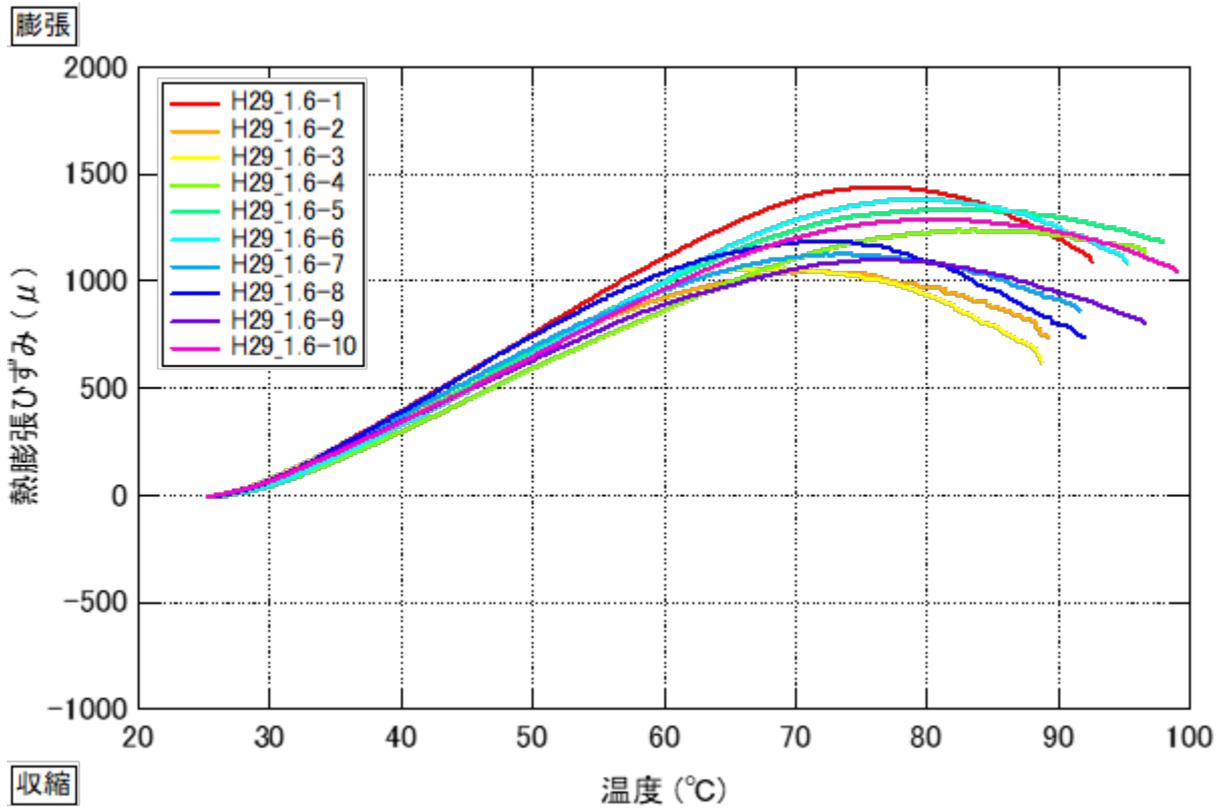


図 4.3.4-14 熱膨張ひずみと温度の関係 (緩衝材：乾燥密度 1.6Mg/m³)

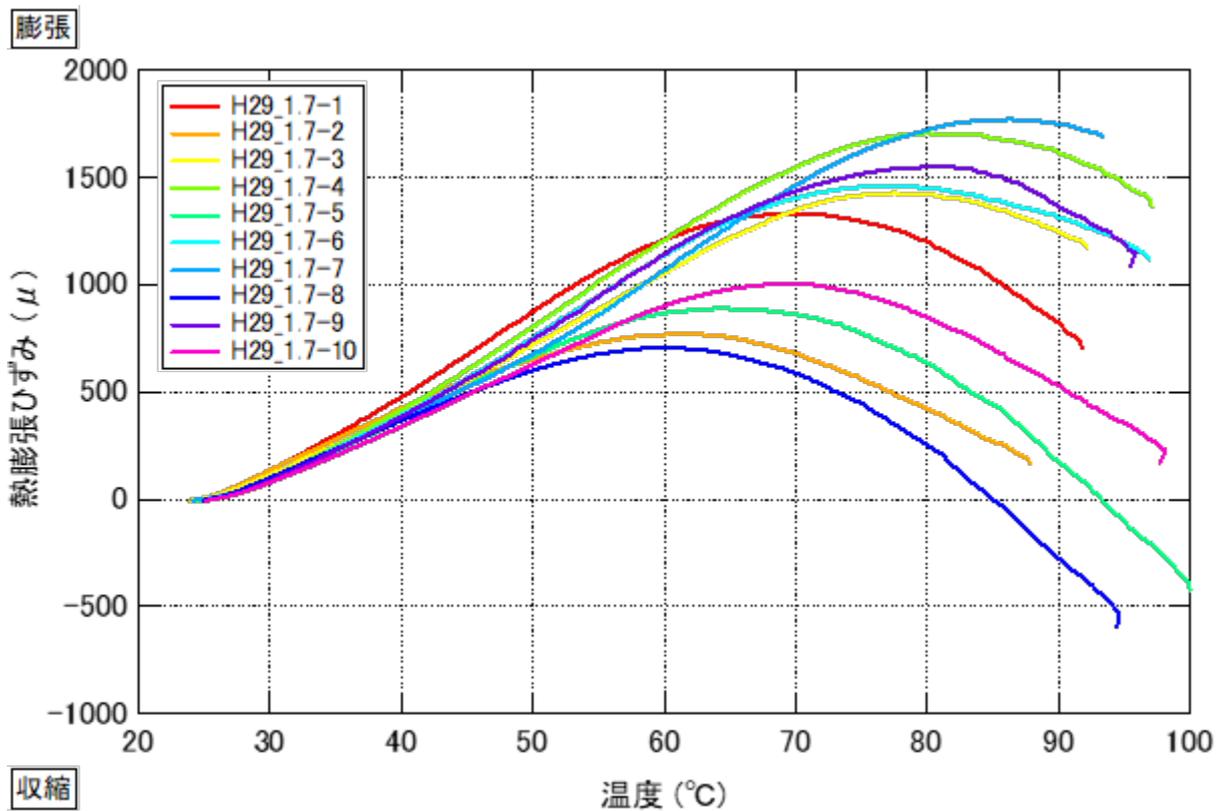


図 4.3.4-15 熱膨張ひずみと温度の関係 (緩衝材：乾燥密度 1.7Mg/m³)

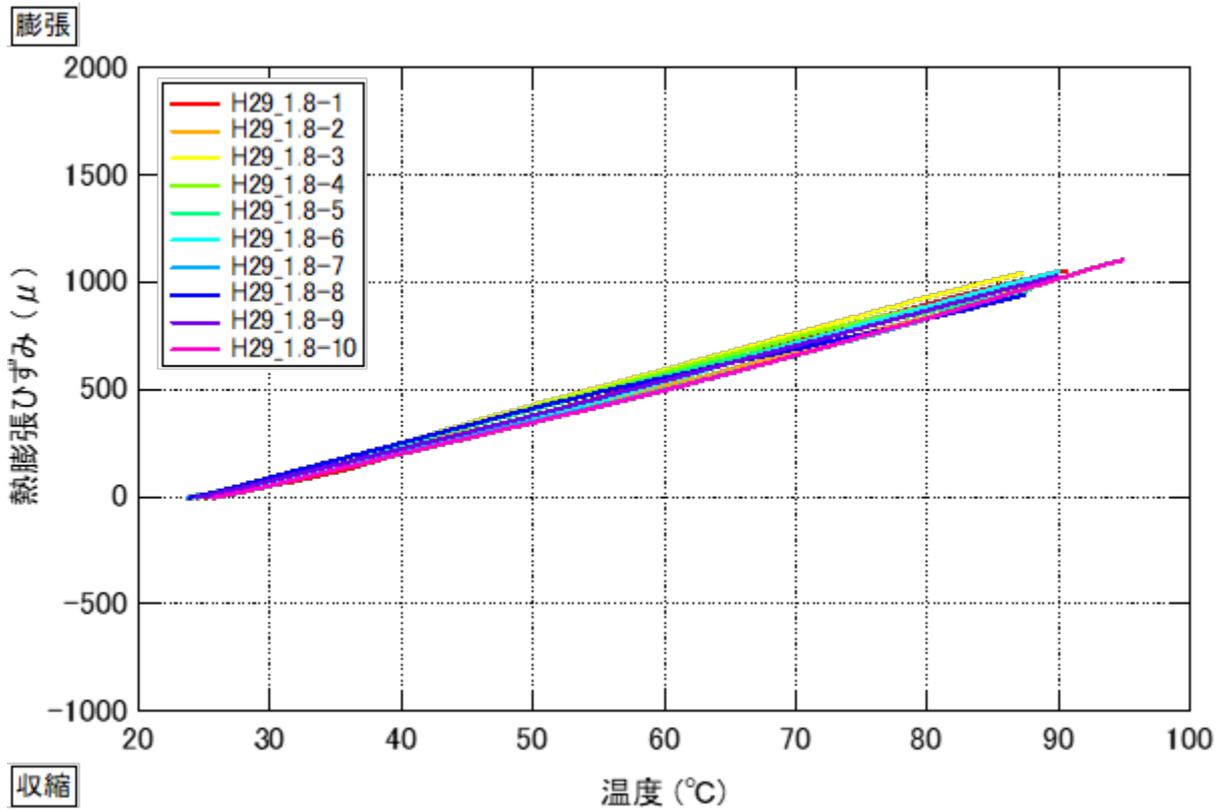


図 4.3.4-16 熱膨張ひずみと温度の関係 (埋戻し材：乾燥密度 1.8Mg/m³)

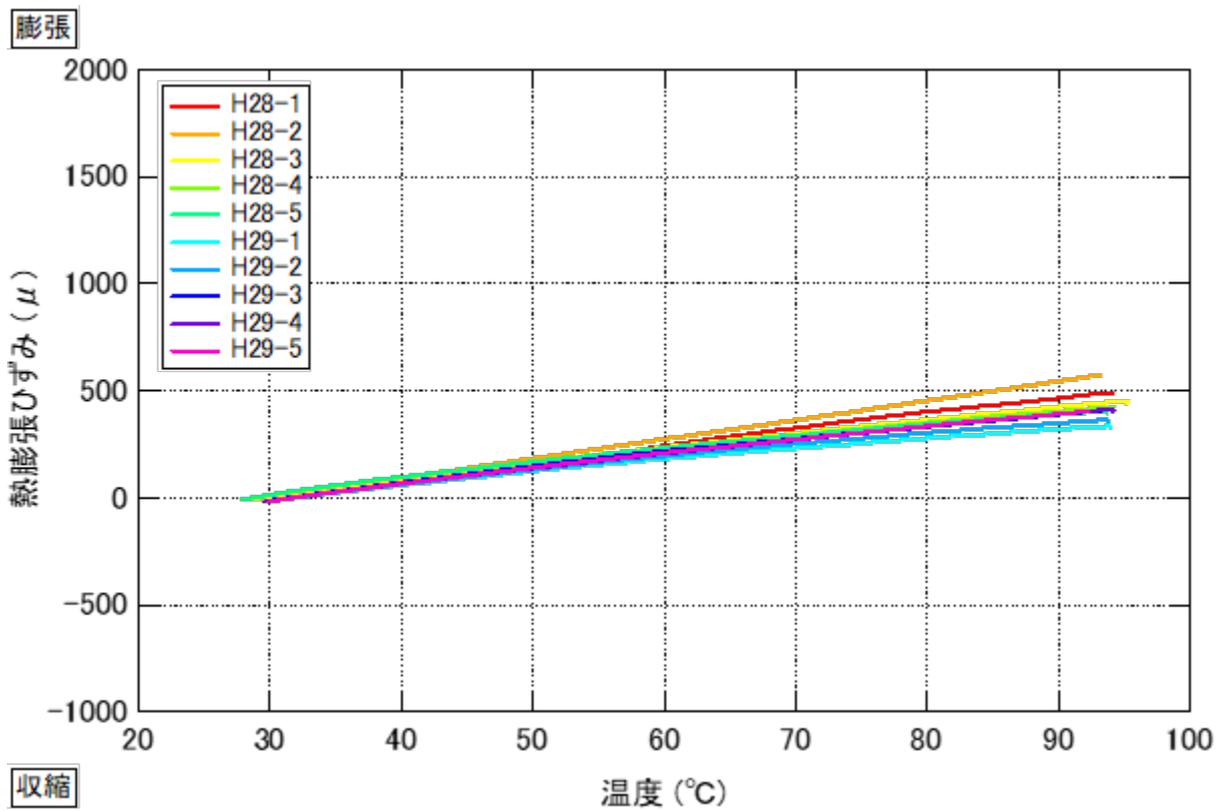


図 4.3.4-17 熱膨張ひずみと温度の関係 (周辺岩盤)

4.3.5 力学特性

(1) 一軸圧縮試験（緩衝材、埋戻し材）

1) 方法（緩衝材、埋戻し材）

緩衝材及び埋戻し材の一軸圧縮試験については、供試体作製時の飽和度（同一乾燥密度条件）が一軸圧縮強さ、ヤング率に与える影響を把握する目的で実施した。

緩衝材及び埋戻し材のヤング率は、圧縮荷重と変位計による軸変位量から算定している。変位計による計測については、外部変位計を基本とし、一部の試験では比較として供試体側面の局所変位の測定を実施している。載荷速度は 0.1%/min とした。

緩衝材の一軸圧縮試験においては、1.5、1.6、1.7Mg/m³の3種類の乾燥密度で作製した供試体を用いた。所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト 7：ケイ砂 3 で混合）を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより供試体を作製した。

埋戻し材の一軸圧縮試験においては、1.8Mg/m³の乾燥密度で作製した供試体を用いた。所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト 15：ケイ砂 85 で混合）を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより供試体を作製した。

含水比条件を変化させて作製した緩衝材の一軸圧縮試験の供試体を図 4.3.5-1 に、一軸圧縮試験の状況を図 4.3.5-2 に示す。



図 4.3.5-1 一軸圧縮試験の供試体（緩衝材）



一軸圧縮試験前



一軸圧縮試験後

図 4.3.5-2 一軸圧縮試験の状況（緩衝材：含水比 10%）

2) 結果 (緩衝材、埋戻し材)

緩衝材の一軸圧縮試験の結果を表 4.3.5-1～表 4.3.5-3 に、埋戻し材の一軸圧縮試験の結果を表 4.3.5-4 に示す。一軸圧縮強さと飽和度の関係を図 4.3.5-3 に、ヤング率と飽和度との関係を図 4.3.5-4 に示す。

緩衝材では、供試体作製時の乾燥密度が同じ条件で比較した場合、飽和度が高いほど一軸圧縮強さ及びヤング率が低下する傾向が認められた。その傾向は、乾燥密度 1.5Mg/m³ では小さい。

埋戻し材では、飽和度による一軸圧縮強さ及びヤング率の変化に大きな差異は認められない。

表 4.3.5-1 一軸圧縮試験の結果 (緩衝材：乾燥密度 1.5Mg/m³)

実施年度	作製時の目標含水比 (%)	供試体番号	乾燥密度 (Mg/m ³)	間隙比	飽和度 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	破壊ひずみ (%)	変形係数 $E_{50,ext}$ (MPa)
H27	7	H27_1.5-1	1.488	0.818	22.9	0.39	0.81	40
		H27_1.5-2	1.486	0.821	23.0	0.59	0.99	62
		H27_1.5-3	1.489	0.816	22.9	0.60	1.11	50
	10	H27_1.5-4	1.491	0.814	32.1	0.58	0.96	77
		H27_1.5-5	1.489	0.817	32.2	0.58	0.96	79
		H27_1.5-6	1.484	0.823	32.2	0.62	0.98	79
	12	H27_1.5-7	1.496	0.809	39.5	0.66	1.67	39
		H27_1.5-8	1.492	0.813	39.2	0.46	1.37	27
		H27_1.5-9	1.498	0.805	39.6	0.59	1.61	37
	15	H27_1.5-10	1.498	0.806	49.8	0.37	1.81	22
		H27_1.5-11	1.499	0.805	49.6	0.45	2.16	24
		H27_1.5-12	1.499	0.805	49.2	0.56	2.15	37
	18	H27_1.5-13	1.503	0.799	60.9	0.44	3.31	28
		H27_1.5-14	1.496	0.808	60.5	0.47	3.36	32
		H27_1.5-15	1.509	0.793	61.5	0.43	3.33	30

表 4.3.5-2 一軸圧縮試験の試験結果（緩衝材：乾燥密度 1.6Mg/m³）

実施年度	作製時の目標含水比 (%)	供試体番号	乾燥密度 (Mg/m ³)	間隙比	飽和度 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	破壊ひずみ (%)	変形係数 E _{50,ext} (MPa)	ポアソン比
H27	7	H27_1.6-1	1.568	0.725	26.1	0.93	0.86	124	-
		H27_1.6-2	1.564	0.730	25.9	0.93	0.90	108	-
		H27_1.6-3	1.562	0.732	25.9	0.95	0.89	122	-
	10	H27_1.6-4	1.571	0.721	37.1	0.91	0.96	98.0	-
		H27_1.6-5	1.571	0.721	37.1	1.00	0.99	138	-
		H27_1.6-6	1.575	0.718	36.9	0.95	0.95	124	-
		H27_1.6-7	1.576	0.717	38.4	0.95	1.36	69.0	-
		H27_1.6-8	1.577	0.716	38.2	1.05	1.24	97.0	-
		H27_1.6-9	1.581	0.711	37.9	0.95	1.04	113	-
	12	H27_1.6-10	1.590	0.701	43.7	0.68	1.04	74.0	-
		H27_1.6-11	1.579	0.713	45.8	0.82	1.12	134	-
		H27_1.6-12	1.585	0.707	44.8	0.56	1.18	51.0	-
		H27_1.6-13	1.584	0.708	45.5	0.84	1.47	65.0	-
		H27_1.6-14	1.596	0.695	46.6	0.96	1.34	102	-
		H27_1.6-15	1.628	0.662	48.2	1.02	1.34	115	-
	15	H27_1.6-16	1.587	0.705	57.6	0.54	1.56	65.0	-
		H27_1.6-17	1.591	0.700	56.8	0.57	1.63	73.0	-
		H27_1.6-18	1.591	0.700	57.3	0.67	1.81	70.0	-
	18	H27_1.6-19	1.588	0.703	69.0	0.55	3.22	35.0	-
		H27_1.6-20	1.589	0.702	68.8	0.54	3.08	39.0	-
		H27_1.6-21	1.629	0.660	73.3	0.65	3.31	47.0	-
		H27_1.6-22	1.592	0.699	68.3	0.56	2.88	49.0	-
		H27_1.6-23	1.613	0.677	70.9	0.63	3.18	50.0	-
		H27_1.6-24	1.593	0.698	68.5	0.57	2.89	50.0	-
H28	10	H28_1.6-25	1.589	0.707	38.0	1.04	1.02	123	0.37
		H28_1.6-26	1.585	0.711	37.4	0.94	0.92	119	0.38
		H28_1.6-27	1.586	0.711	37.8	1.04	1.06	127	0.41
	7	H28_1.6-28	1.581	0.716	25.8	0.96	0.92	130	0.30
		H28_1.6-29	1.581	0.716	25.8	1.01	0.91	123	0.29
		H28_1.6-30	1.582	0.715	25.4	0.77	0.84	103	0.28
	12	H28_1.6-31	1.590	0.706	46.1	0.76	1.00	91.0	0.28
		H28_1.6-32	1.590	0.706	46.5	0.80	1.18	92.0	0.34
		H28_1.6-33	1.591	0.705	46.2	0.76	1.12	102	0.33
	15	H28_1.6-34	1.621	0.673	57.6	0.76	1.74	75.0	0.33
		H28_1.6-35	1.619	0.676	56.6	0.76	1.75	72.0	0.30
		H28_1.6-36	1.603	0.692	56.1	0.71	1.81	68.0	0.30
	18	H28_1.6-37	1.615	0.680	67.4	0.62	2.20	51.0	0.43
		H28_1.6-38	1.609	0.686	67.2	0.63	2.44	53.0	0.44
		H28_1.6-39	1.622	0.673	68.6	0.69	2.28	58.0	0.49

表 4.3.5-3 一軸圧縮試験の結果（緩衝材：乾燥密度 1.7Mg/m³）

実施年度	作製時の目標含水比 (%)	供試体番号	乾燥密度 (Mg/m ³)	間隙比	飽和度 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	破壊ひずみ (%)	変形係数 $E_{50,ext}$ (MPa)	ポアソン比
H27	7	H27_1.7-1	1.701	0.590	27.4	1.98	1.21	163	-
		H27_1.7-2	1.700	0.592	27.3	1.96	1.22	161	-
		H27_1.7-3	1.697	0.594	27.3	1.75	1.14	154	-
	10	H27_1.7-4	1.686	0.604	44.8	1.54	1.33	110	-
		H27_1.7-5	1.683	0.607	44.1	1.62	1.28	139	-
		H27_1.7-6	1.682	0.608	44.6	1.67	1.32	132	-
	12	H27_1.7-7	1.679	0.611	52.7	1.32	1.59	102	-
		H27_1.7-8	1.679	0.611	53.0	1.29	1.85	71	-
		H27_1.7-9	1.695	0.596	54.0	1.38	1.94	73	-
		H27_1.7-10	1.687	0.603	51.3	1.39	1.29	158	-
		H27_1.7-11	1.686	0.605	51.6	1.40	1.35	158	-
		H27_1.7-12	1.689	0.602	50.9	1.39	1.27	157	-
	15	H27_1.7-13	1.710	0.582	69.7	1.12	2.65	61	-
		H27_1.7-14	1.748	0.548	73.3	1.29	2.72	70	-
		H27_1.7-15	1.732	0.562	71.4	1.25	2.58	70	-
		H27_1.7-16	1.693	0.598	66.2	1.04	2.39	59	-
		H27_1.7-17	1.703	0.589	67.6	1.12	2.64	54	-
		H27_1.7-18	1.704	0.587	66.2	1.07	2.33	69	-
18	H27_1.7-19	1.695	0.596	79.1	0.87	3.31	69	-	
	H27_1.7-20	1.695	0.596	79.1	0.89	3.65	68	-	
	H27_1.7-21	1.696	0.595	78.9	0.90	3.46	75	-	
H28	10	H28_1.7-22	1.678	0.620	44.4	1.57	1.10	172	0.37
		H28_1.7-23	1.683	0.620	43.9	1.70	1.18	184	0.34
		H28_1.7-24	1.688	0.619	44.6	1.71	1.13	199	0.36
	7	H28_1.7-25	1.674	0.617	29.7	1.54	0.96	173	0.26
		H28_1.7-26	1.674	0.612	29.7	1.65	0.99	187	0.31
		H28_1.7-27	1.676	0.608	29.4	1.68	1.03	192	0.29
	10	H28_1.7-28	1.718	0.579	47.3	1.81	1.45	147	0.36
		H28_1.7-29	1.722	0.576	47.1	1.91	1.49	157	0.40
		H28_1.7-30	1.716	0.581	47.1	1.89	1.48	156	0.44
	12	H28_1.7-31	1.693	0.603	52.7	1.30	1.32	136	0.35
		H28_1.7-32	1.694	0.602	51.9	1.30	1.26	142	0.36
		H28_1.7-33	1.705	0.591	54.6	1.34	1.40	141	0.49
	15	H28_1.7-34	1.727	0.571	67.9	1.18	2.05	105	0.43
		H28_1.7-35	1.702	0.594	66.2	1.07	1.79	104	0.36
		H28_1.7-36	1.709	0.587	65.6	1.09	1.86	105	0.39
18	H28_1.7-37	1.715	0.582	76.9	0.88	2.56	70	0.59	
	H28_1.7-38	1.711	0.586	77.8	1.03	2.92	66	0.50	
	H28_1.7-39	1.712	0.585	79.3	0.95	2.88	69	0.45	

表 4.3.5-4 一軸圧縮試験の結果（埋戻し材：乾燥密度 1.8Mg/m³）

実施 年度	作製時の 目標 含水比 (%)	供試体 番号	乾燥密度 (Mg/m ³)	間隙比	飽和度 (%)	一軸 圧縮強さ (MPa)	破壊 ひずみ (%)	変形係数 E_{50_ext} (MPa)	変形係数 E_{50_LDT} (MPa)	ポアソン比 (ゲージ)	ポアソン比 (LDT)
H28	8	H28_1.8-1	1.793	0.476	41.2	0.28	1.22	30.4	-	0.298	-
		H28_1.8-2	1.790	0.478	41.0	0.29	1.27	30.4	-	-	-
		H28_1.8-3	1.795	0.474	40.2	0.26	1.21	31.2	-	0.193	-
		H28_1.8-4	1.797	0.472	40.3	0.28	1.11	35.2	-	0.190	-
		H28_1.8-5	1.796	0.473	40.8	0.28	1.33	28.6	-	-	-
		H28_1.8-6	1.798	0.472	40.4	0.29	1.28	31.1	-	0.329	-
		H28_1.8-7	1.796	0.474	40.2	0.26	1.19	34.0	-	-	0.42
		H28_1.8-8	1.792	0.476	41.1	0.28	1.37	28.9	-	-	0.28
		H28_1.8-9	1.791	0.477	41.6	0.28	1.26	31.3	-	-	0.38
	10	H28_1.8-10	1.797	0.472	51.5	0.26	1.40	24.5	-	0.056	-
		H28_1.8-11	1.797	0.472	51.5	0.27	1.38	26.8	-	0.202	-
		H28_1.8-12	1.797	0.472	51.6	0.27	1.27	29.0	-	0.194	-
		H28_1.8-13	1.801	0.469	54.2	0.30	1.17	32.4	41.3	0.520	0.55
	6	H28_1.8-14	1.791	0.478	30.5	0.32	1.22	35.1	-	-	-
		H28_1.8-15	1.792	0.476	30.0	0.32	1.25	33.4	-	-	-
		H28_1.8-16	1.791	0.478	30.5	0.33	1.18	37.4	-	-	-
	7	H28_1.8-17	1.792	0.476	35.5	0.30	1.09	38.3	41.6	0.303	0.36
	3	H28_1.8-18	1.789	0.479	16.0	0.17	0.91	24.0	28.6	0.311	0.48
	12	H28_1.8-19	1.798	0.471	65.7	0.31	1.35	29.4	34.3	0.544	0.55
		H28_1.8-20	1.802	0.468	65.0	0.31	1.32	30.7	39.7	0.508	0.55
		H28_1.8-21	1.801	0.469	65.4	0.31	1.29	32.8	36.9	0.394	0.52
	13	H28_1.8-22	1.811	0.461	72.9	0.32	1.39	32.0	36.7	0.454	0.57
		H28_1.8-23	1.81	0.462	73.9	0.34	1.07	43.5	53.5	0.395	0.57
		H28_1.8-24	1.803	0.467	74.7	0.32	1.30	36.8	42.6	0.568	0.55
	15	H28_1.8-25	1.809	0.463	83.5	0.35	1.44	32.9	39.7	0.404	0.47

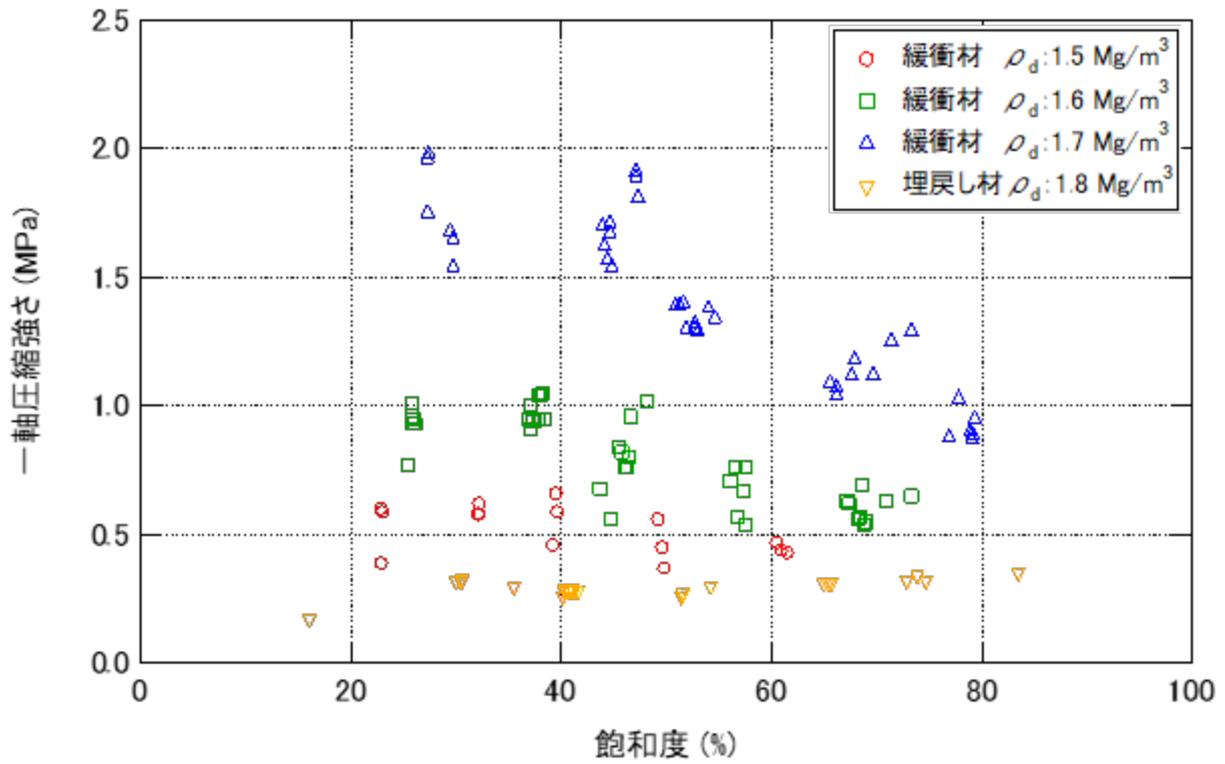


図 4.3.5-3 一軸圧縮強さと飽和度の関係 (緩衝材、埋戻し材)

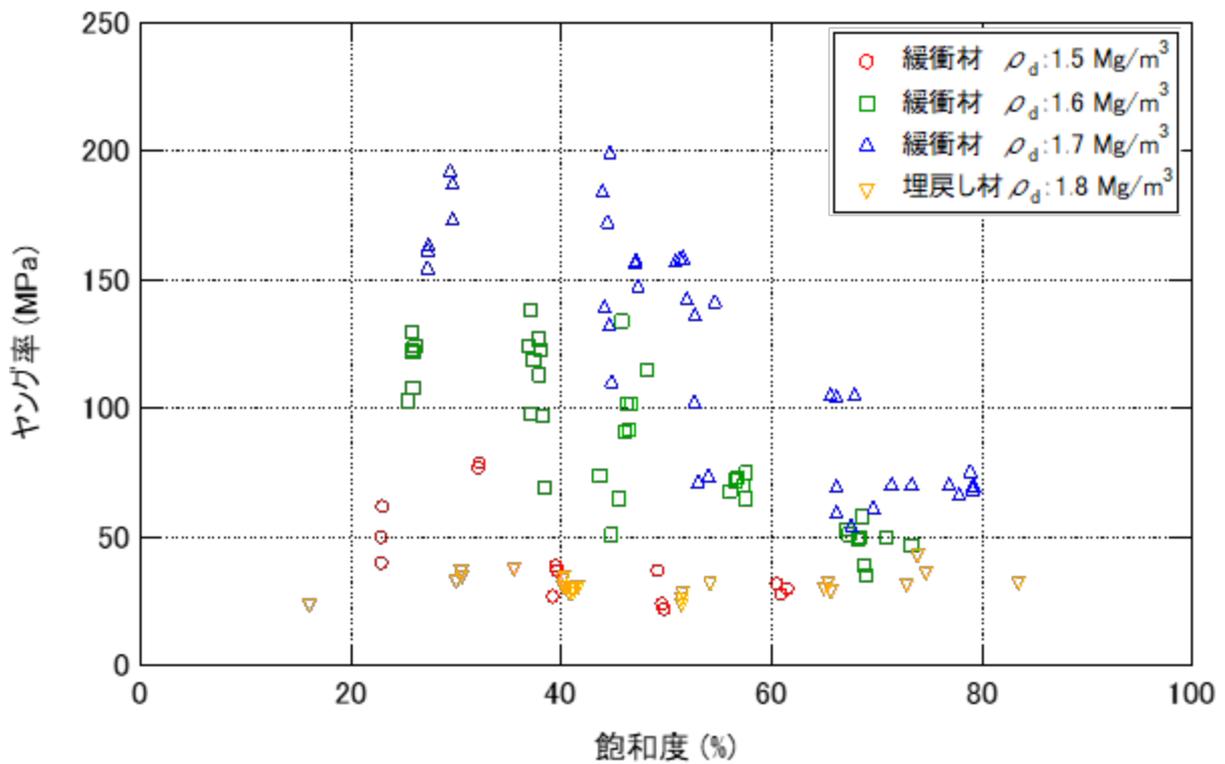


図 4.3.5-4 ヤング率と飽和度の関係 (緩衝材、埋戻し材)

割線ヤング率と最大軸応力に対する応力レベルの関係を図 4.3.5-5 に示す。緩衝材及び埋戻し材のヤング率では、0.4 以下の応力レベルの小さい領域において、かい離が認められるものの、割線ヤング率に大きな差異は認められない。ひずみ依存性を考慮したヤング率を解析に入力するには、微小ひずみ領域においての局所ひずみの取得が必要である。

緩衝材のヤング率 E50 の局所変位計と外部変位計の比較を図 4.3.5-6 に示す。外部変位計で算定したヤング率と局所変位計で算定したヤング率 E50 の差異は少ない。

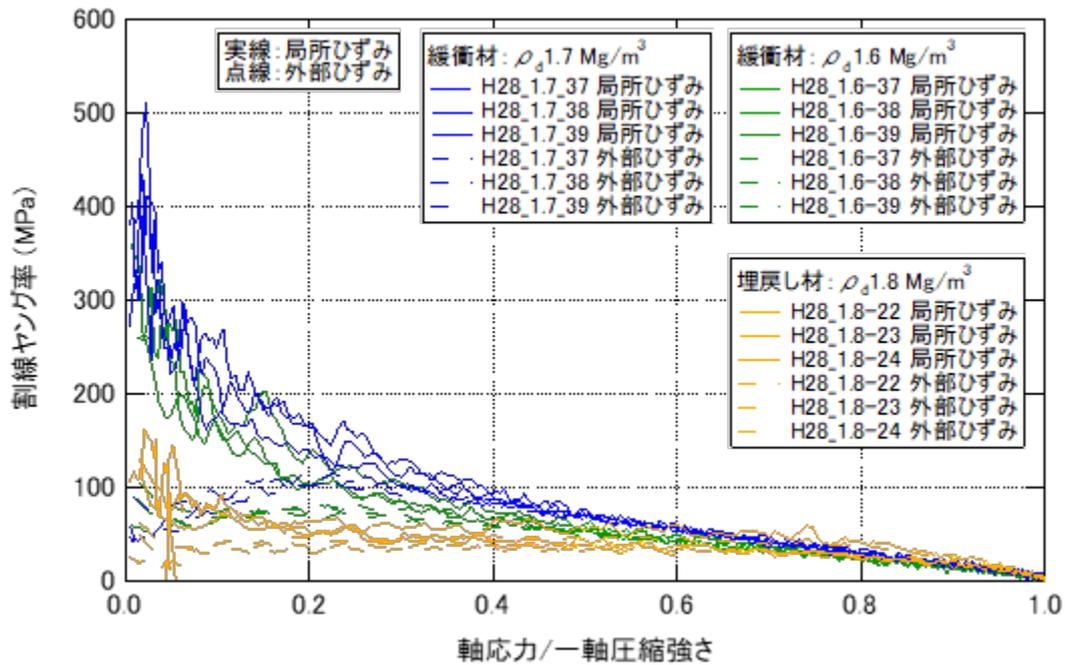


図 4.3.5-5 ヤング率の比較 (緩衝材：乾燥密度 1.6Mg/m³)

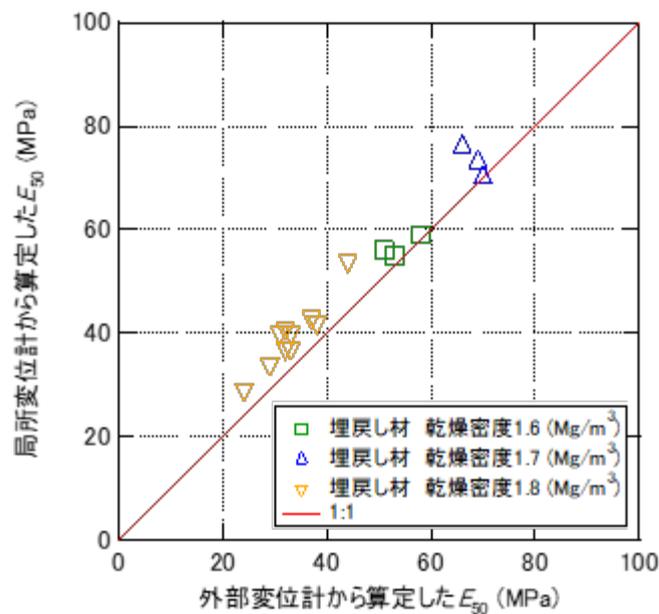


図 4.3.5-6 局所変位計及び外部変位計から得られるヤング率の比較

埋戻し材では、ひずみゲージと横型 LDT を併用して計測を行った。設置状況を図 4.3.5-7 に示す。埋戻し材のポアソン比の結果を表 4.3.5-5 に示す。ひずみゲージによるポアソン比に比べ、横型 LDT によるポアソン比の方が値は大きく、ばらつきは小さい結果となった。

乾燥密度 1.6 Mg/m^3 の緩衝材のポアソン比と応力レベルの関係を図 4.3.5-8 に示す。含水比 7% と 10% では、応力レベルが高くなるに伴ってポアソン比が高くなるのが確認できる。含水比が 12% と 15% では、応力が高くなるに伴ってポアソン比も高くなるが応力比が 0.6 を超えた付近からポアソン比の低下が確認できる。含水比 18% でのポアソン比は、全体的に 0.5 に近く飽和度が高いためであると考えられる。



図 4.3.5-7 一軸圧縮試験時のひずみゲージ、横型 LDT の設置状況

表 4.3.5-5 埋戻し材のポアソン比の結果

	ひずみゲージ	横型LDT
個数	17	13
平均値	0.34	0.48
標準偏差	0.14	0.09

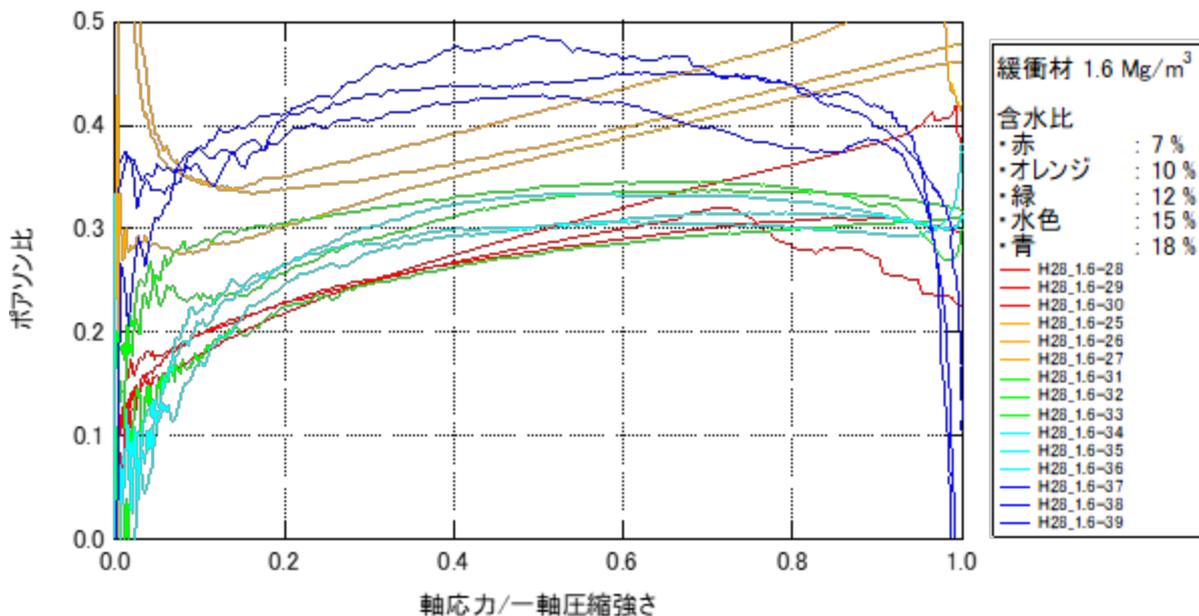


図 4.3.5-8 ポアソン比と応力レベルの関係 (緩衝材：乾燥密度 1.6 Mg/m^3)

(2) 一軸圧縮試験（周辺岩盤）

1) 方法（周辺岩盤）

周辺岩盤の一軸圧縮試験については、乾燥状態の強度・変形特性を把握する目的で実施した。試験条件を表 4.3.5-6 に、試験装置を図 4.3.5-9 に示す。供試体の側面には、ひずみゲージを貼付して軸方向の圧縮に伴う変形係数及びポアソン比を算定した。圧縮荷重については、三軸セル内部のロードセルの値で算定した。

表 4.3.5-6 一軸圧縮試験の条件

供試体の寸法	直径 50×高さ 100 mm
含水状態	乾燥
载荷速度	0.1 %/min



図 4.3.5-9 一軸圧縮試験装置

2) 結果 (周辺岩盤)

周辺岩盤の一軸圧縮試験の結果を表 4.3.5-7 に、一軸圧縮応力とひずみの関係を図 4.3.5-10 に示す。

表 4.3.5-7 一軸圧縮試験の結果 (周辺岩盤：乾燥状態)

供試体 番号	湿潤密度 ρ_t (Mg/m ³)	乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	一軸圧縮強さ q_u (MPa)	破壊ひずみ ε_f (%)	変形係数 E_{50} (MPa)	ポアソン比 ν
H27-1	2.072	1.711	15.6	0.88	2116	0.23
H27-2	2.050	1.679	17.3	0.79	2720	0.18
H27-3	2.079	1.737	17.4	0.46	4651	0.18
個数	3	3	3	3	3	3
平均	2.067	1.709	16.8	0.71	3162	0.20
標準偏差	0.012	0.024	0.8	0.18	1081	0.02

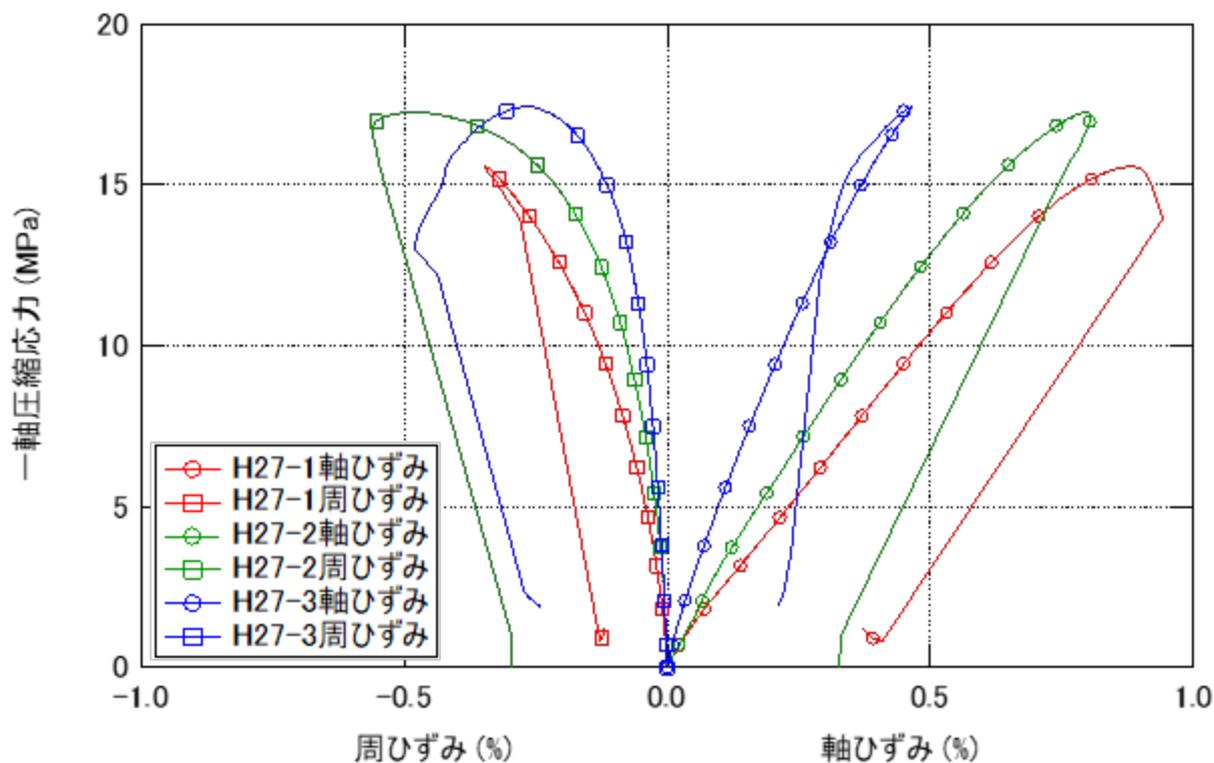


図 4.3.5-10 一軸圧縮応力とひずみの関係 (周辺岩盤：乾燥状態)

(3) 一軸引張り試験（周辺岩盤）

1) 方法（周辺岩盤）

周辺岩盤の引張り強度を把握する目的で一軸引張り試験を実施した。試験条件を表 4.3.5-8 に、装置を図 4.3.5-11 に示す。供試体の接着については、自然含水状態の供試体の端面を強制乾燥してエポキシ系の接着剤で接着した。試験装置には、供試体にかかる曲げモーメントや偏心の影響を低減させるために、荷重計と反対の位置に自在継手を使用している。供試体の側面には、ひずみゲージを貼付して軸方向の圧縮に伴う変形係数を算定した。圧縮荷重については、ロードセルの値で算定した。

表 4.3.5-8 一軸引張り試験の条件

供試体の寸法	直径 50×高さ 100 mm
含水状態	自然含水比
载荷速度	0.01 %/min



図 4.3.5-11 一軸引張り試験装置

2) 結果 (周辺岩盤)

一軸引張り試験の結果を表 4.3.5-9 に、一軸引張り応力と軸ひずみの関係を図 4.3.5-12 に示す。

表 4.3.5-9 一軸引張り試験の結果 (周辺岩盤：自然含水状態)

実施年度	供試体番号	湿潤密度 ρ_t (Mg/m ³)	乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	一軸引張強さ (MPa)	破壊ひずみ (%)	変形係数 E_{50} (MPa)
H27	H27-1	2.094	1.728	0.309	0.017	2030
	H27-2	2.046	1.663	0.439	0.019	3170
	H27-3	2.057	1.671	0.638	0.013	5630
H28	H28-4	2.059	1.723	0.819	0.016	2980
	H28-5	2.099	1.725	0.275	0.056	654
個数		5	5	5	5	5
平均		2.071	1.702	0.496	0.024	2893
標準偏差		0.021	0.029	0.206	0.016	1633

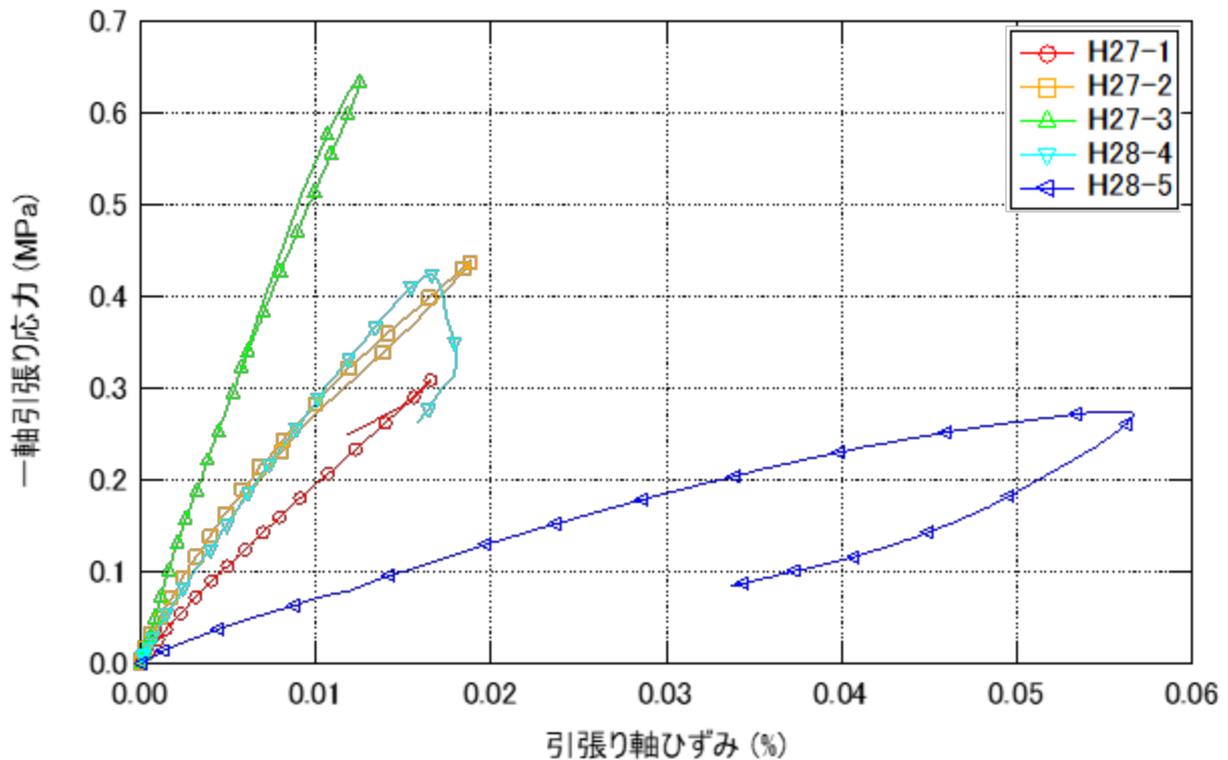


図 4.3.5-12 一軸引張り応力と引張軸ひずみの関係 (周辺岩盤：自然含水状態)

(4) 圧密非排水(CU)三軸圧縮試験 (緩衝材：不飽和状態)

1) 測定方法 (緩衝材：不飽和状態)

不飽和状態における緩衝材の非排水せん断強度と変形特性を把握する目的で、圧密非排水(CU)三軸圧縮試験を実施した。三軸圧縮試験の排水状態の測定については、不飽和の供試体を使用しているため背圧は負荷していない。試験条件を表 4.3.5-10 に示す。不飽和の緩衝材の圧密非排水三軸圧縮試験では、 1.6Mg/m^3 の乾燥密度条件で作製した供試体を用いた。供試体の作製においては、所定の含水比に調整した混合土(ベントナイト7:ケイ砂3)を設定した乾燥密度となるように質量測定を行い、静的締固めにより作製した。作製した供試体を不飽和状態のまま三軸試験装置に設置して所定の圧密圧力を負荷(圧密圧力負荷時は排気条件)した後、非排気状態を保持したまま軸載荷を行った。試験装置を図 4.3.5-13 に示す。

表 4.3.5-10 圧密非排気三軸圧縮試験の条件 (緩衝材：不飽和状態)

供試体作製時の目標乾燥密度	1.6 Mg/m ³
供試体作製時の目標含水比	10 %
供試体の寸法	直径 50×高さ 100 mm
載荷速度	0.1 %/min
有効拘束圧 σ_c'	1.5、3、5、7 MPa
背圧	なし

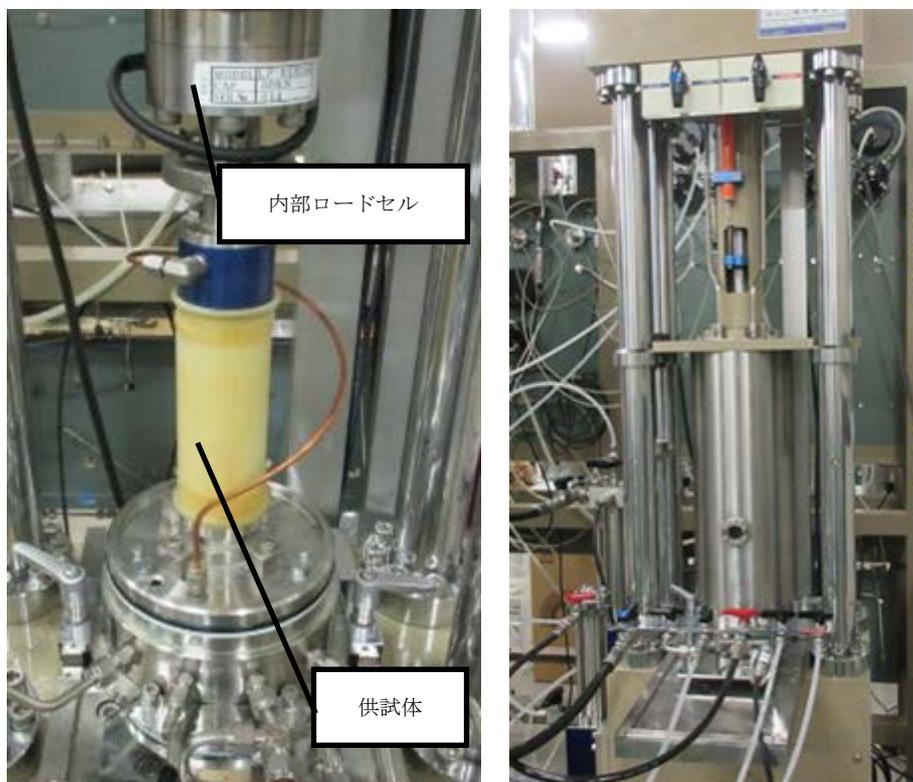


図 4.3.5-13 三軸圧縮試験装置

2) 結果 (緩衝材・不飽和)

不飽和状態の緩衝材の三軸圧縮試験の結果を表 4.3.5-11 に、軸差応力と軸ひずみの関係を図 4.3.5-14 に、モールの応力円を図 4.3.5-15 に示す。

表 4.3.5-11 圧密非排気三軸圧縮試験の結果 (緩衝材：不飽和状態)

供試体番号	圧密圧力(MPa)	最大軸差強度(MPa)	破壊ひずみ(%)
H27-1	1.5	3.2	15.0
H27-2	5.0	7.5	15.0
H27-3	3.0	5.6	15.0
H27-4	7.0	9.0	15.0

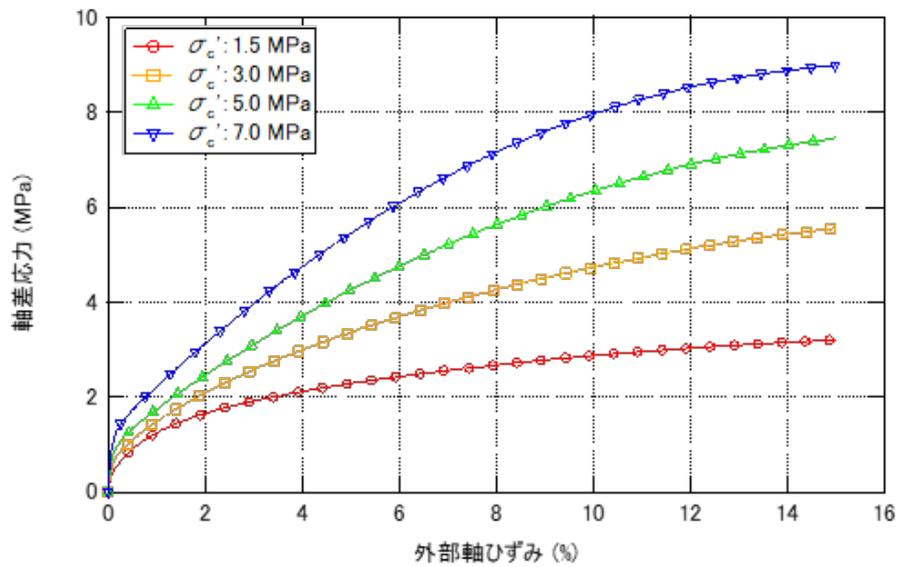


図 4.3.5-14 軸差応力と軸ひずみの関係 (緩衝材：不飽和状態)

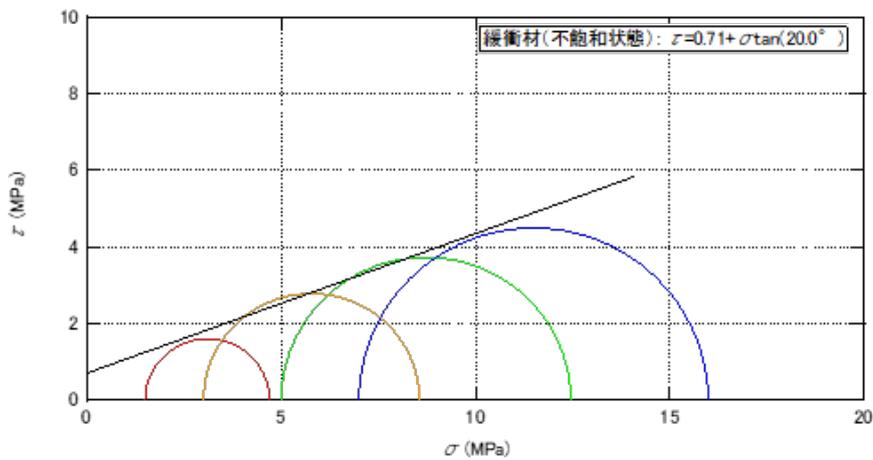


図 4.3.5-15 モールの応力円 (緩衝材：不飽和)

(5) 圧密非排水((CU))三軸圧縮試験 (緩衝材・飽和)

1) 測定方法 (緩衝材：飽和状態)

飽和状態の緩衝材の非排水せん断強度と変形特性を把握する目的で、圧密非排水((CU))三軸圧縮試験を実施した。試験条件を表 4.3.5-12 に示す。有効拘束圧については、乾燥密度 1.6Mg/m^3 の平衡膨潤圧の算術平均 0.66MPa 以上の 0.7MPa から設定した。以下に、試験の手順を示す。

- ① 目標の乾燥密度 1.6Mg/m^3 に質量を調整した材料 (ベントナイト 7 : ケイ砂 3) をモールドに入れて油圧ジャッキで静的に締め固めて供試体を作製する。
- ② 供試体の上下端面と周面に、材料の細粒分が流出しないように高分子フィルターを巻く。
- ③ 供試体の膨潤拘束のため高剛性の飽和用のモールド (供試体上下端が吸水面) に設置する。
- ④ 脱気したイオン交換水の中に、供試体高さの半分程度に飽和用モールドを浸水させる。
- ⑤ 真空ポンプを使用して供試体の中の空気を脱気する。
- ⑥ 供試体の脱気を一周間程度実施後に、飽和用モールド全体を浸水させる。
- ⑦ 定期的に脱気し、減圧した状態を維持する。
- ⑧ 飽和用モールドから気泡が出なくなるのを確認して試験に使用する。
- ⑨ 供試体が膨潤または乾燥しないように注意しながら飽和モールドを解体して、即時に供試体寸法と重量を測定し、メンブレンを供試体に被せる。
- ⑩ 装置やメンブレンと供試体の間隙の空気を除去しながら装置に設置する。
- ⑪ 背圧のバルブを開放して供試体からの排水量を計測する。
- ⑫ 圧力容器を被せてセル圧の加圧用の水を注入後、 0.7MPa のセル圧を負荷する。
- ⑬ 供試体の内部と外部に対して急激な圧力勾配が生じないように背圧 0.5MPa を 0.003MPa/min の速度で負荷する。
- ⑭ 有効拘束圧を 0.7MPa に保ちながらセル圧と背圧を付加する。
- ⑮ 排水量が一定になったら、B 値を測定する。
- ⑯ 所定の圧密圧力に到達後、 $0.01\%/\text{min}$ の載荷速度で圧縮試験を開始する。
- ⑰ 軸ひずみが 20% に達したら圧縮試験を終了する。

表 4.3.5-12 圧密非排水三軸圧縮試験の条件 (緩衝材：飽和状態)

供試体作製時の目標乾燥密度	1.6 Mg/m ³			
供試体作製時の目標含水比	10 %			
供試体の寸法	直径 20×高さ 40 mm			
載荷速度	0.01 %/min			
含水状態	飽和状態			
圧密圧力	有効拘束圧 σ_c'	1 段階目	2 段階目	3 段階目
	0.7 MPa	0.7 MPa		
	1.0 MPa	0.7 MPa	1.0 MPa	
	2.0 MPa	0.7 MPa	1.0 MPa	2.0 MPa
背圧	0.5 MPa			

2) 結果（緩衝材：飽和状態）

試験結果を表 4.3.5-13 に示す。圧縮試験後の供試体の含水比を測定して、供試体設置時と圧密試験後の乾燥密度、間隙比、飽和度を算定した。供試体の作製時の目標乾燥密度は 1.6Mg/m^3 であったが、供試体を試験装置に設置した時の計算上の乾燥密度は $1.516\sim 1.551\text{Mg/m}^3$ であった。飽和モールドの供試体収容部分の寸法が直径 50mm 、高さ 100mm より若干大きいため、供試体が飽和中に膨潤して密度が低下したものと考えられる。

圧密試験後の飽和度を把握するために B 値を測定した。昇圧時 ($\Delta P : 0.1\text{MPa}$) の B 値は、90%以上であった。降圧時の B 値では、間隙水圧が戻らない現象が見られ、圧密圧力が高いほど B 値が低下していく傾向が確認された (表 4.3.5-13)。しかし、試験後の供試体の含水比から算出される計算上の飽和度は 100%を超えていたので供試体は十分飽和していたと考えられる。降圧時に間隙水圧が所定圧に戻らない場合では、所定の間隙水圧に戻してから間隙経路を非排水にして圧縮試験を実施した。

圧密試験時の排水量と経過時間の関係を図 4.3.5-16 に、計算した間隙比と圧密圧力との関係を圧密試験の結果に重ねてプロットした図を図 4.3.5-17 に示す。H29_1.6-3 の圧密圧力が 0.7MPa と 1.0MPa での間隙比は大きいですが、その他の試験結果での間隙比は圧密試験結果と同等である。

軸差応力と外部ひずみの関係を図 4.3.5-18 に、有効応力経路を図 4.3.5-19 に示す。外部軸ひずみが 4~5%程度から限界状態に達している。載荷初期の間隙水の発生は小さく有効応力経路が上方に向かっている。その後の平均有効応力は、小さくなる挙動を示した。

割線ヤング率と最大軸差応力に対する応力レベルとの関係を図 4.3.5-20 に示す。応力レベル 0.5 でのヤング率の差異は小さいが、応力レベルが小さいほど拘束圧依存性が大きいのが確認できる。

表 4.3.5-13 圧密非排水三軸圧縮試験の結果（緩衝材：飽和状態）

供試体番号	項目	供試体設置時の状態	圧密試験後の供試体の状態			圧縮試験の σ_a / σ_r 最大時		ヤング率 E_{50} MPa
			0.7MPa	1.0MPa	2.0MPa	$(\sigma_a - \sigma_r)$	$(\sigma_a + 2\sigma_r) / 3$	
H29_1.6-1	乾燥密度(Mg/m^3)	1.550	1.603			0.256	0.641	35
	間隙比	0.749	0.691					
	飽和度(%)	108.7	109.4					
	B値(%)	-	91					
H29_1.6-2	乾燥密度(Mg/m^3)	1.551	1.579	1.614		0.282	0.84	73
	間隙比	0.748	0.717	0.680				
	飽和度(%)	108.4	108.8	109.3				
	B値(%)	-	91	65				
H29_1.6-3	乾燥密度(Mg/m^3)	1.516	1.528	1.558	1.672	0.581	1.566	163
	間隙比	0.788	0.774	0.740	0.621			
	飽和度(%)	103.1	103.2	103.3	103.9			
	B値(%)	-	90	70	47			

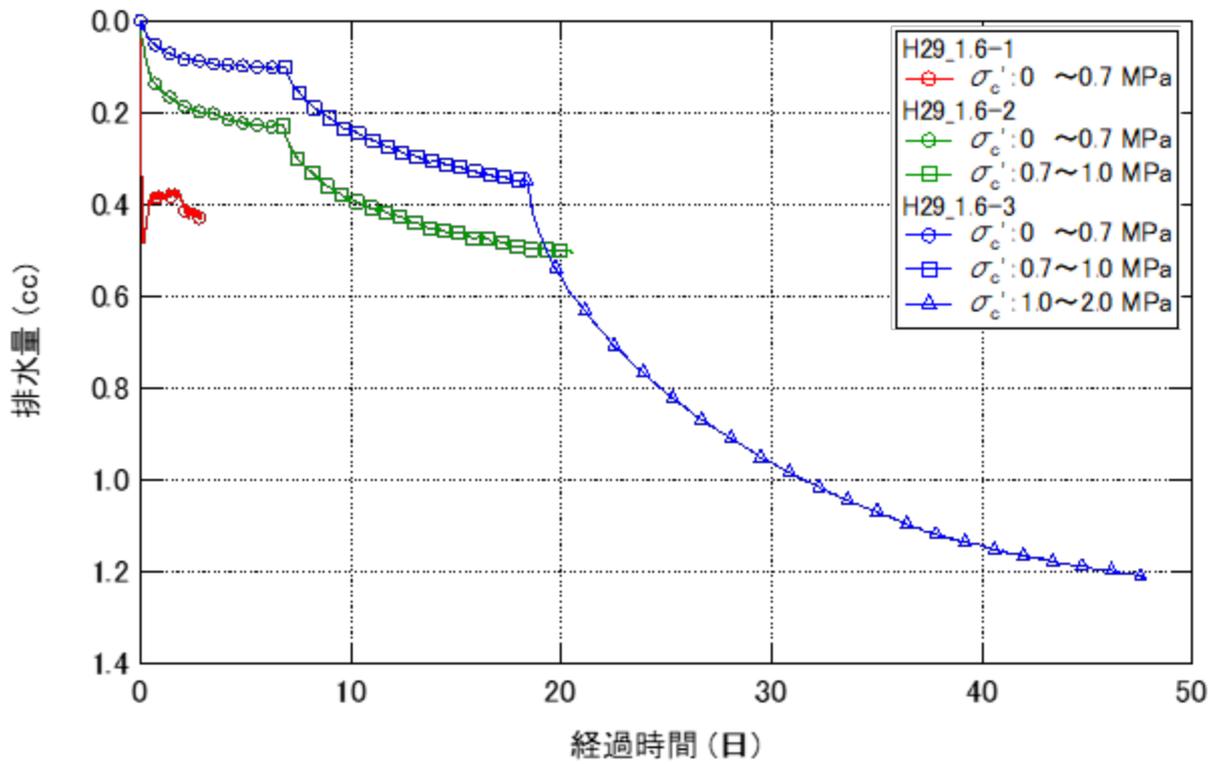


図 4.3.5-16 排水量と経過時間の関係 (緩衝材：飽和状態)

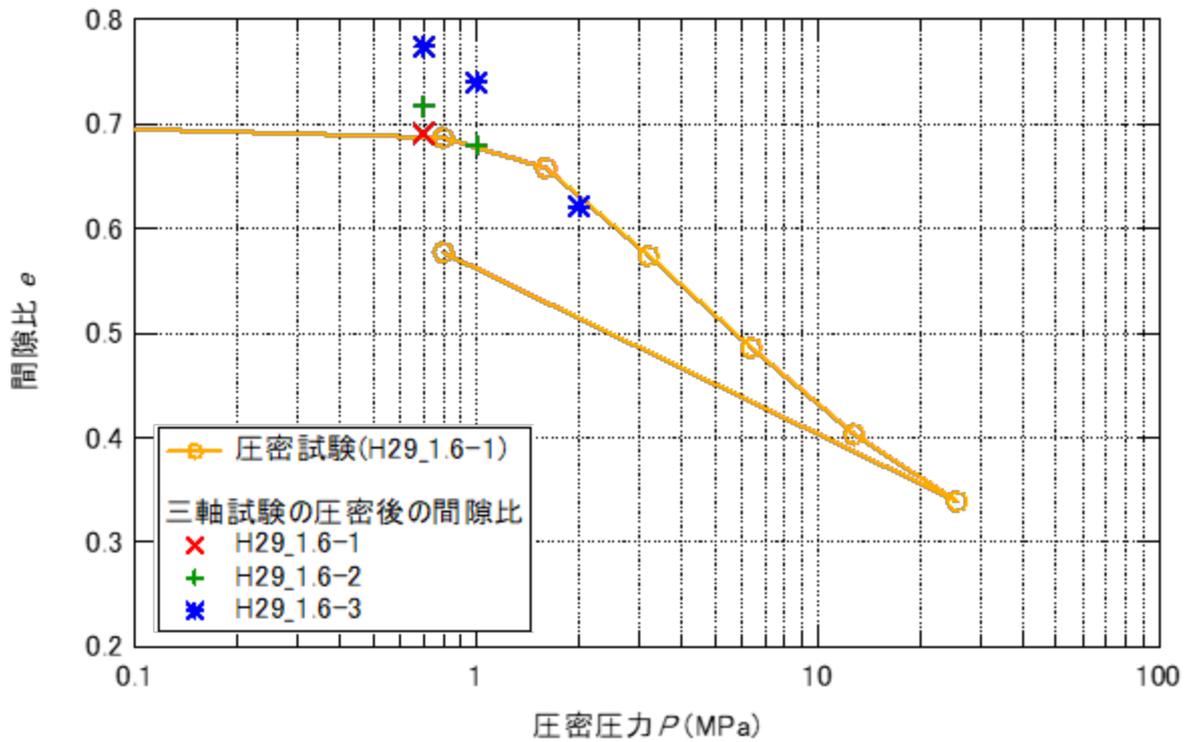


図 4.3.5-17 圧密時の間隙比と圧密圧力との関係 (緩衝材)

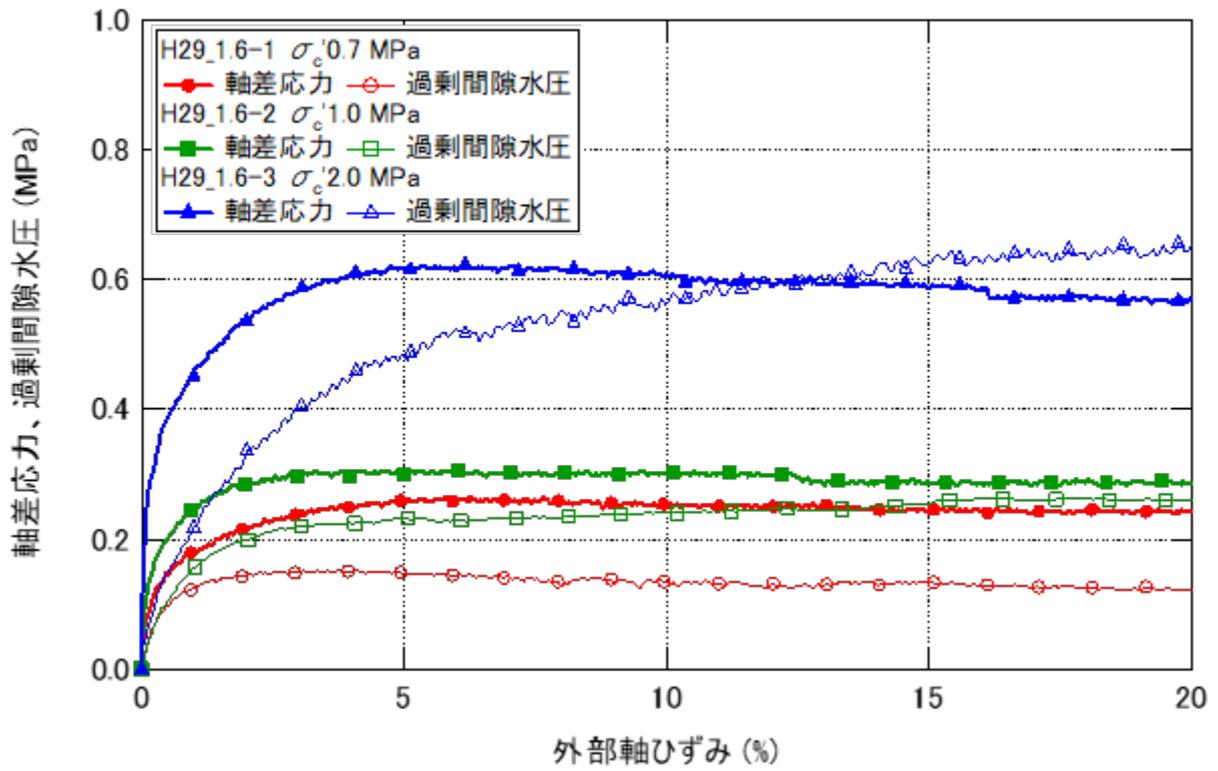


図 4.3.5-18 応力と外部軸ひずみの関係 (緩衝材：飽和状態)

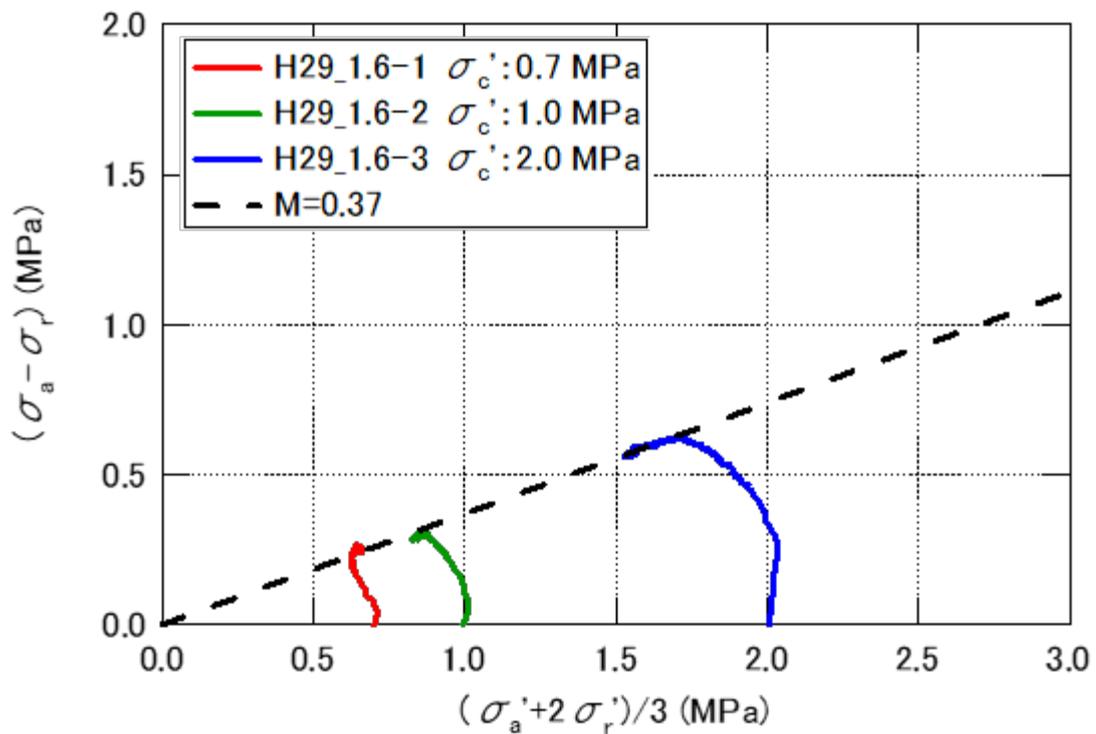


図 4.3.5-19 有効応力経路 (緩衝材：飽和状態)

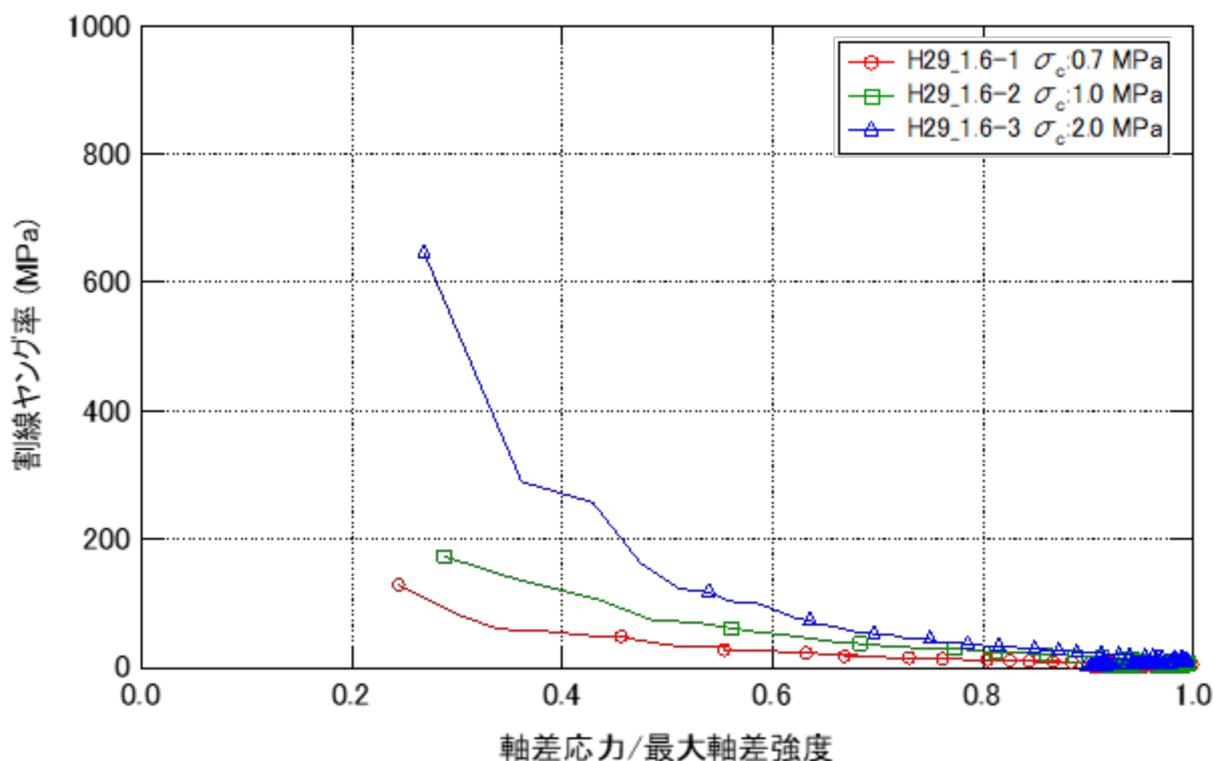


図 4.3.5-20 ヤング率と応力レベルの関係 (緩衝材：飽和状態)

(6) 圧密非排水(CU)三軸圧縮試験 (埋戻し材：飽和状態)

1) 測定方法 (埋戻し材：飽和状態)

飽和状態の埋戻し材の非排水せん断強度と変形特性を把握する目的で、圧密非排水(CU)三軸圧縮試験を実施した。三軸試験の条件については表 4.3.5-14 示す。4.3.5(5)項に示した試験方法と試験装置を使用した。

表 4.3.5-14 圧密非排水三軸圧縮試験の条件 (埋戻し材：飽和状態)

供試体作製時の目標乾燥密度	1.8 Mg/m ³
供試体作製時の目標含水比	8 %
供試体の寸法	直径 20×高さ 40 mm
载荷速度	0.01 %/min
含水状態	飽和状態
有効拘束圧 σ_c'	0.7, 1.0, 2.0 MPa
背圧	0.5 MPa

2) 結果 (埋戻し材：飽和状態)

圧密非排水三軸圧縮試験の結果を表 4.3.5-15 に示す。圧縮試験後の供試体の含水比を測定して、供試体設置時と圧密試験後の乾燥密度、間隙比、飽和度を算定した。供試体の作製時の目標乾燥密度は 1.8Mg/m³ であったが、供試体を試験装置に設置した時の計算上の乾燥密度は 1.720～1.753Mg/m³ であった。飽和モールドの供試体収容部分の寸法が直径 50mm、高さ 100mm より若干大きいために、供試体が飽和中に膨潤して密度が低下したものと考えられる。

圧密試験後の飽和度を把握するために B 値を測定した。昇圧時 (ΔP: 0.1MPa) の B 値は、90%以上であった。H29_1.8-2 の圧密圧力 0.7MPa の時の B 値は 72%であったが、その後の圧密圧力 1.0MPa の時は 97%であった。試験後の供試体の含水比から算出される計算上の飽和度は 100%を超えていたので供試体は十分飽和していると考えられる。圧密試験時の排水量と時間の関係を図 4.3.5-21 に、計算した間隙比と圧密圧力との関係を圧密試験の結果に重ねてプロットした図を図 4.3.5-22 に示す。H29_1.8-2 の間隙比は、圧密試験時の間隙比と圧密圧力との関係より小さい。圧密後の排水量が他の試験と比較して過大であったためと考えられるが、原因は特定できない。

軸差応力と外部軸ひずみの関係を図 4.3.5-23 に、応力経路を図 4.3.5-24 に示す。外部軸ひずみが 2～3%程度までは体積収縮の負のダイレイタンスを示し、その後は体積膨張の傾向に転じて、5%程度から限界状態となった。

割線ヤング率と最大軸差応力に対する応力レベルの関係を図 4.3.5-25 に示す。応力レベル 0.5 でのヤング率の差異は小さいが、応力レベルが小さいほど拘束圧依存性が大きいのが確認できる。

表 4.3.5-15 圧密非排水三軸圧縮試験の結果 (埋戻し材：飽和状態)

供試体番号	項目	供試体設置時の状態	圧密試験後の供試体の状態			σ _a /σ _r 最大時		ヤング率 E ₅₀ MPa
			0.7MPa	1.0MPa	2.0MPa	(σ _a -σ _r) MPa	(σ _a +2σ _r)/3 MPa	
H29_1.8-1	乾燥密度(Mg/m ³)	1.720	1.806			1.268	0.872	26
	間隙比	0.541	0.468					
	飽和度(%)	105.8	106.7					
	B値(%)	-	98					
H29_1.8-2	乾燥密度(Mg/m ³)	1.753	2.021	2.032		1.595	1.105	110
	間隙比	0.512	0.312	0.305				
	飽和度(%)	110.6	117.5	117.9				
	B値(%)	-	72	97				
H29_1.8-3	乾燥密度(Mg/m ³)	1.743	1.855	1.869	1.907	1.997	1.502	186
	間隙比	0.521	0.429	0.418	0.390			
	飽和度(%)	107.6	109.2	109.4	102.7			
	B値(%)	-	93	92	92			

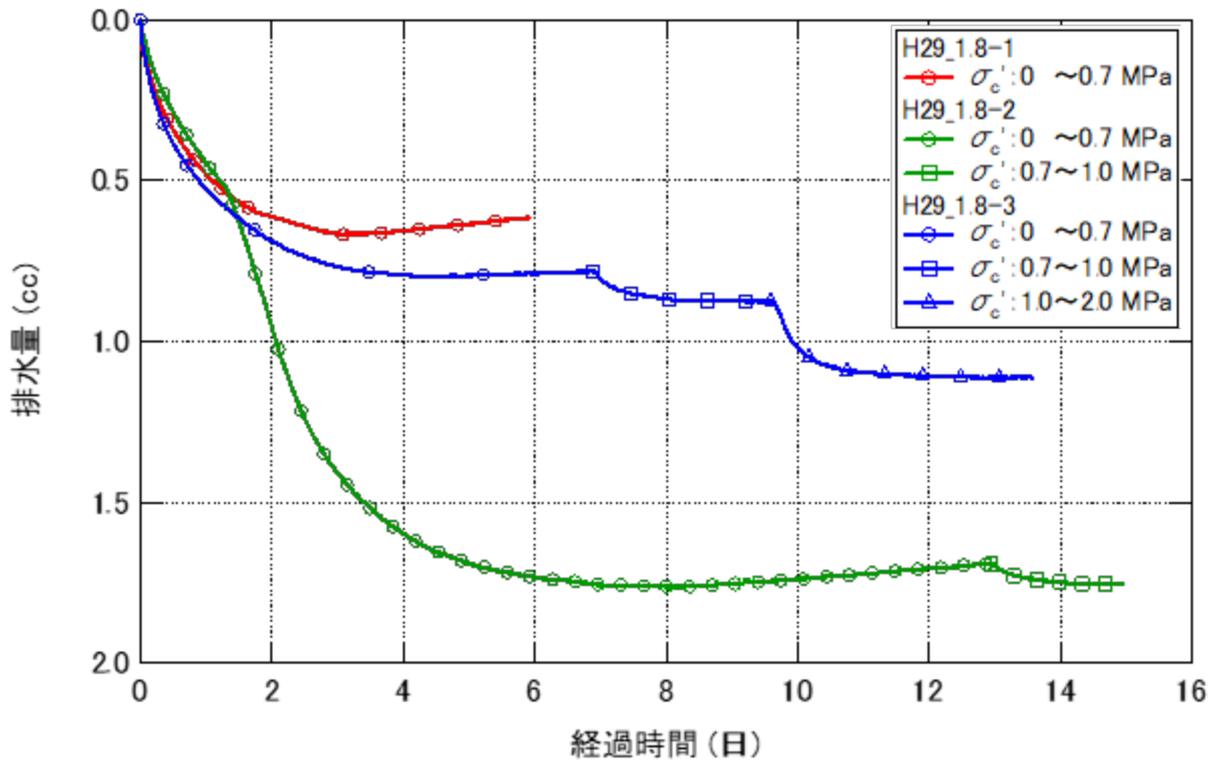


図 4.3.5-21 排水量と時間の関係 (埋戻し材：飽和状態)

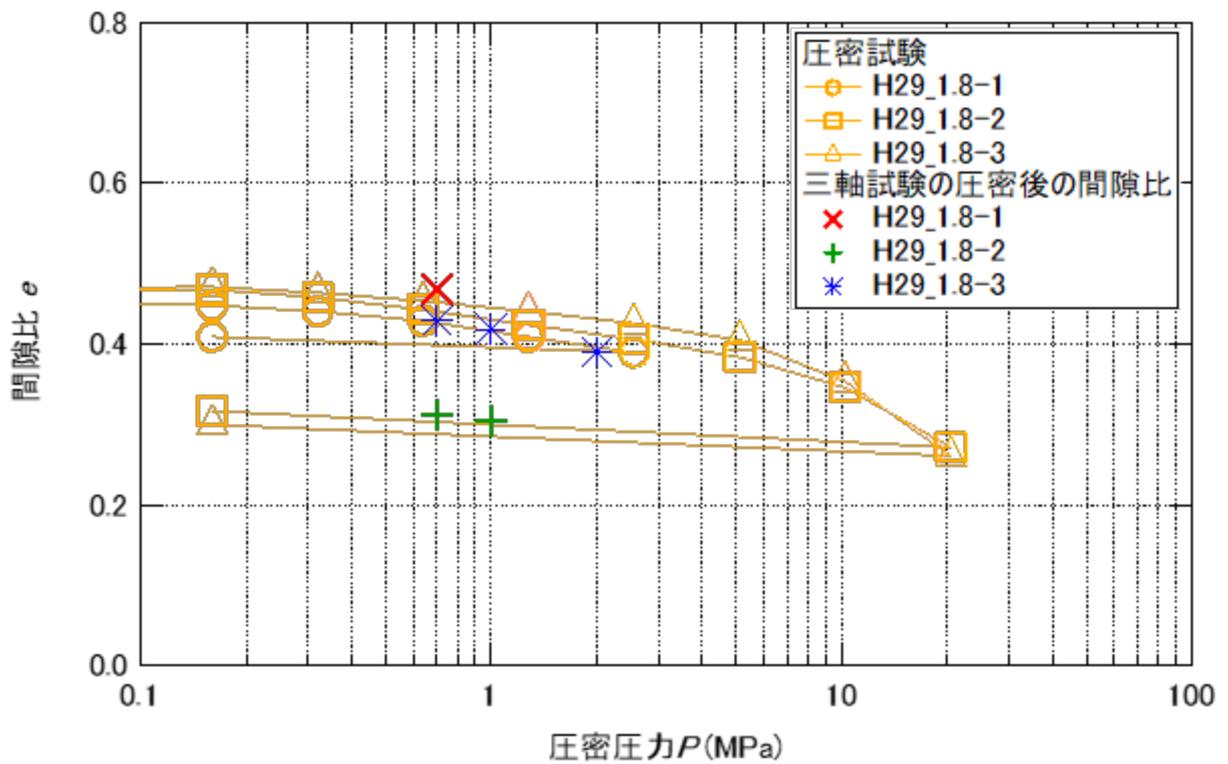


図 4.3.5-22 間隙比と圧密圧力の関係 (埋戻し材)

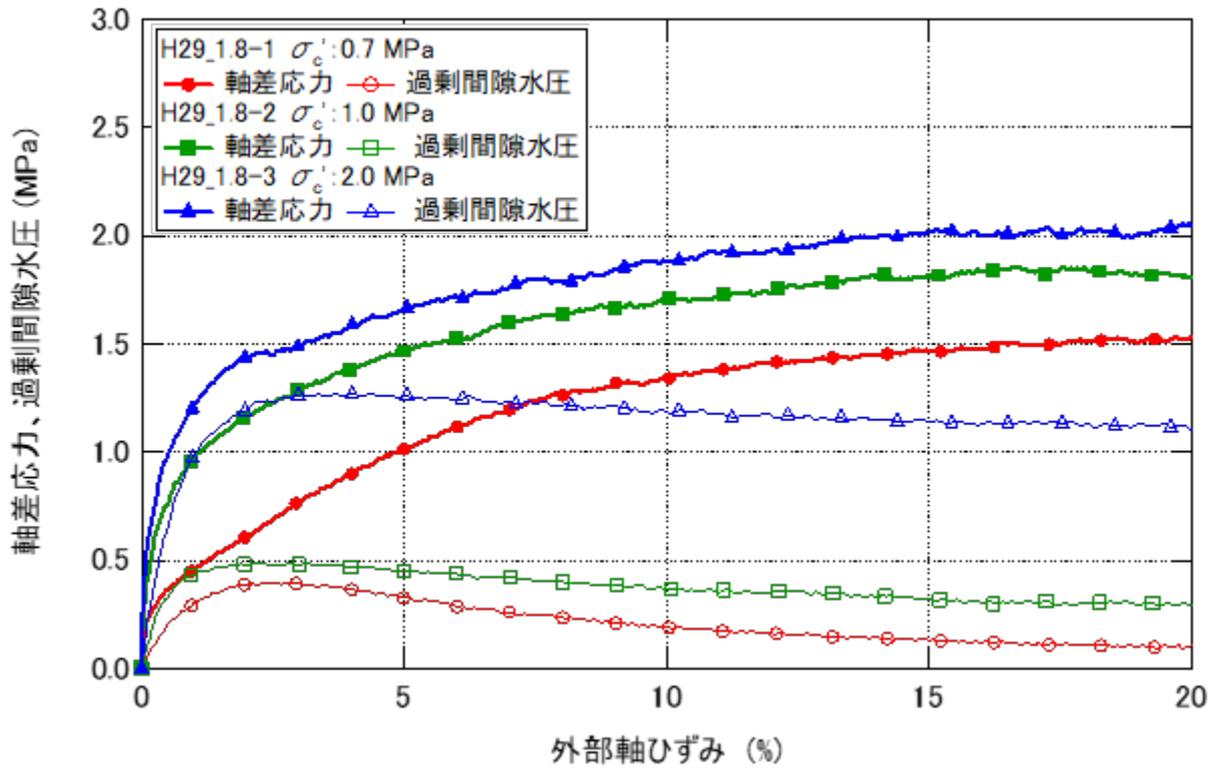


図 4.3.5-23 応力と外部軸ひずみの関係 (埋戻し材：飽和状態)

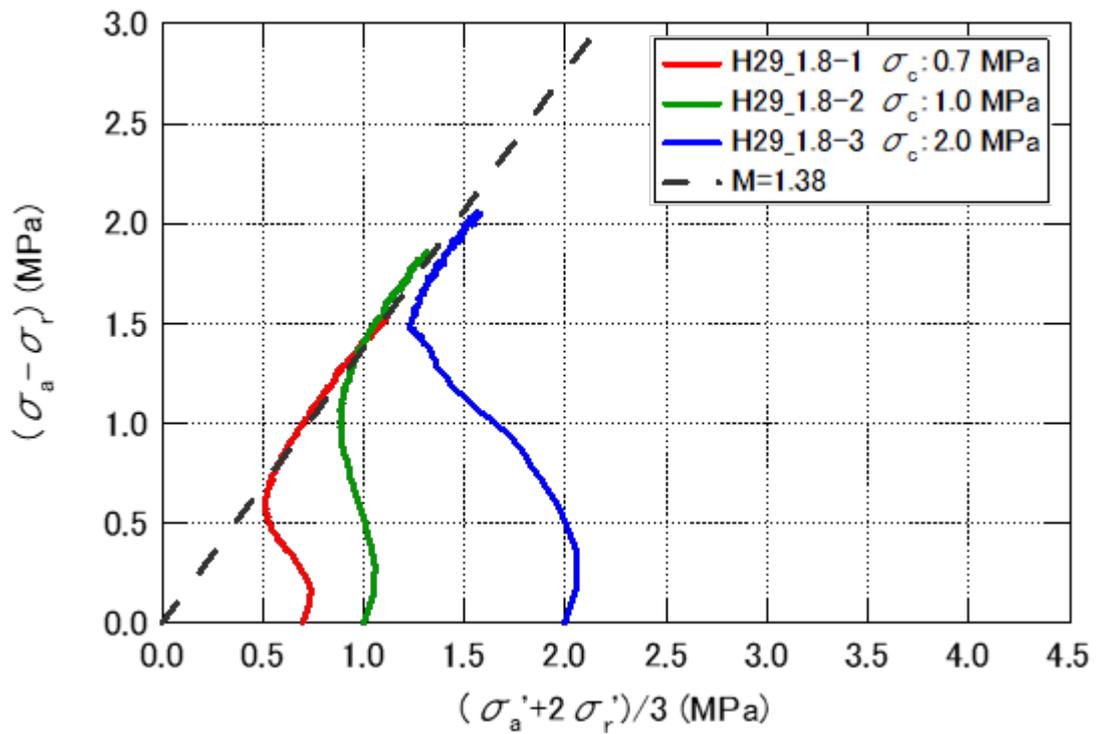


図 4.3.5-24 応力経路 (埋戻し材：飽和状態)

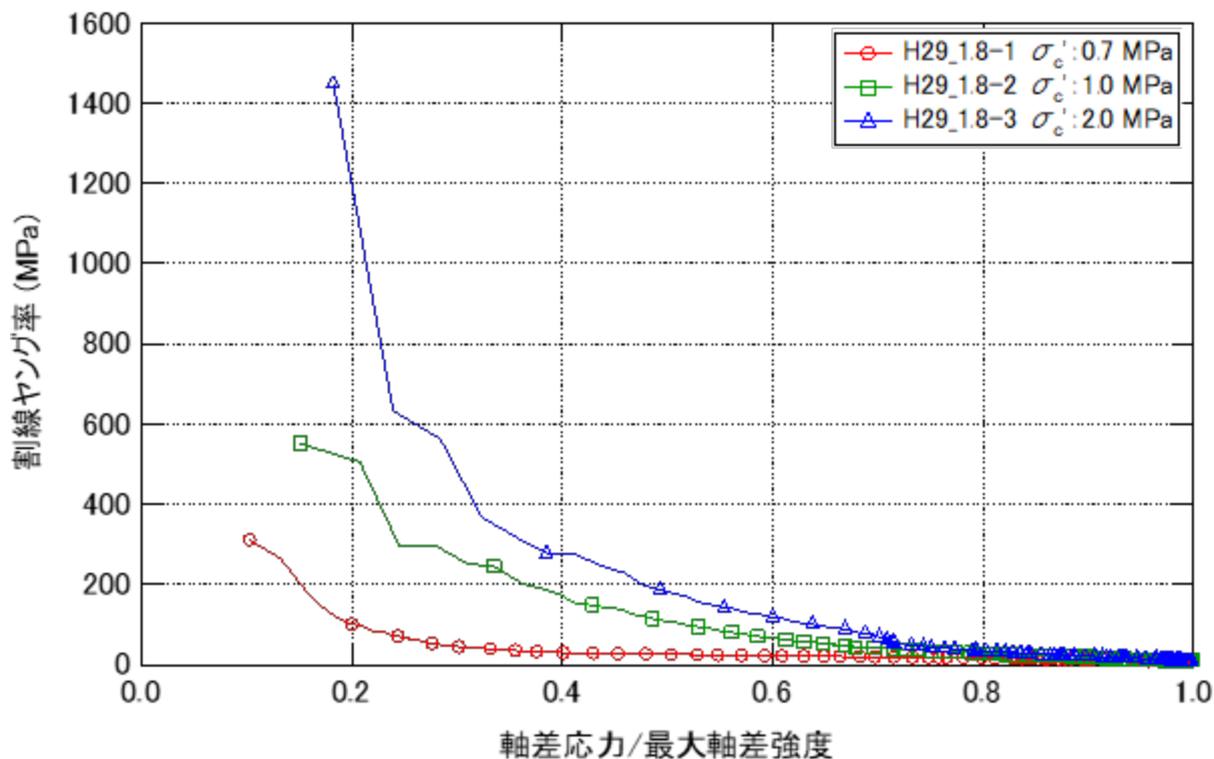


図 4.3.5-25 割線ヤング率と応力レベルの関係（埋戻し材：飽和状態）

(7) 圧密排水(CD)三軸圧縮試験（周辺岩盤）

1) 測定方法（周辺岩盤）

飽和状態の周辺岩盤の排水強度、変形特性を把握する目的で、圧密排水(CD)三軸圧縮試験を実施した。試験条件を表 4.3.5-16 に示す。供試体の側面には、ひずみゲージを貼付して軸方向の圧縮に伴う変形係数及びポアソン比を算定した。圧縮荷重については、セル内部のロードセルの値から算定した。試験装置を図 4.3.5-26 に示す。

表 4.3.5-16 三軸圧縮試験の条件（周辺岩盤）

含水状態	飽和状態	乾燥状態
供試体寸法	直径 50×高さ 100 mm	
有効拘束圧 σ'_c	1.5、3、5、7 MPa	
背圧	0.4 MPa	0 MPa
載荷速度	0.005 %/min	

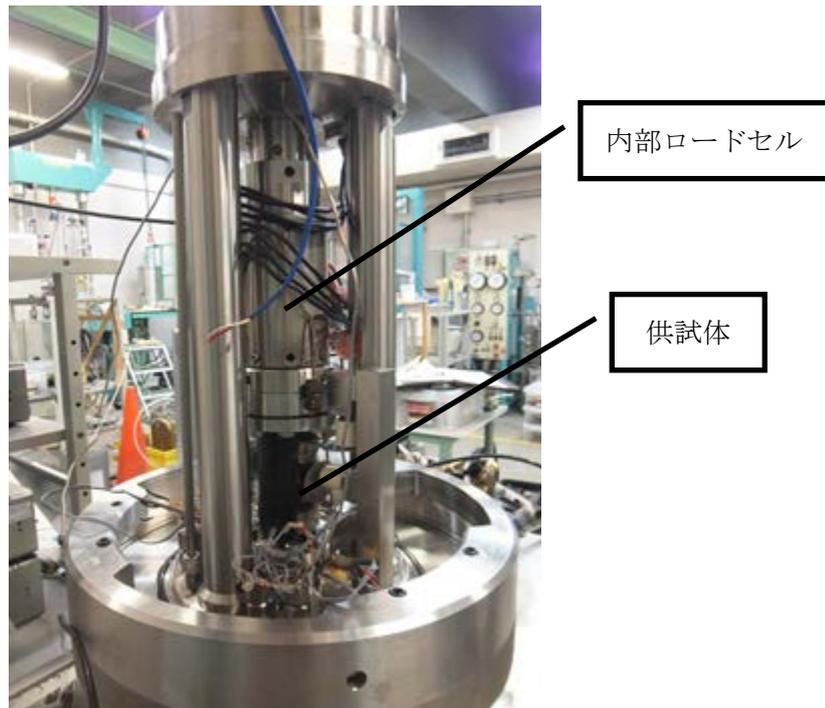


図 4.3.5-26 三軸圧縮試験装置（周辺岩盤）

2) 結果（周辺岩盤）

周辺岩盤の圧密排水(CD)三軸圧縮試験の結果を表 4.3.5-17 に、ヤング率と飽和度との関係を図 4.3.5-27 に示す。乾燥状態と飽和状態の周辺岩盤のヤング率の算術平均値の比較では、明確な差異が確認できた。飽和状態の軸差応力と軸ひずみの関係を図 4.3.5-28 に、乾燥状態の軸差応力と軸ひずみの関係を図 4.3.5-29 に示す。飽和状態の軸差応力と軸ひずみの関係においては、拘束圧が小さいほど塑性軟化の傾向が、拘束圧が高いほど塑性硬化の傾向が確認できる。乾燥状態の軸差応力と軸ひずみの関係においては、低拘束圧では塑性軟化が急勾配となり、高拘束圧では塑性軟化が緩勾配である。

飽和状態のヤング率と軸ひずみの関係を図 4.3.5-30 に、乾燥状態のヤング率と軸ひずみの関係を図 4.3.5-31 に示す。飽和と乾燥状態の供試体において、軸ひずみの増加とともにヤング率が低下している。

飽和状態のヤング率と最大軸差応力に対する応力レベルの関係を図 4.3.5-32 に、乾燥状態のヤング率と最大軸差応力に対する応力レベルの関係を図 4.3.5-33 に示す。飽和状態の有効拘束圧 7.0MPa では、ひずみの計測が途中で計測不能になっている。拘束圧が高いためひずみゲージの線が断線したと考えられる。飽和状態の有効拘束圧 7.0MPa では応力レベルの上昇に伴うヤング率の低下は急勾配であるが、低拘束圧ではヤング率の低下は緩やかとなっている。飽和状態において、応力比が 0.4 付近まではヤング率の有効拘束圧の依存性が確認できるが、応力比が 0.5 付近からは有効拘束圧の違いによるヤング率の差異は小さい。乾燥状態のヤング率と応力比の関係は、有効拘束圧 7.0MPa は、応力レベルの上昇に伴うヤング率の低下が急勾配であるが、低拘束圧ではヤング率の低下は緩やかとなっている。

飽和状態のポアソン比と軸ひずみの関係を図 4.3.5-34 に、乾燥状態のポアソン比と軸ひずみの

関係を図 4.3.5-35 に示す。飽和状態のポアソン比と軸ひずみの関係では、軸ひずみが 0.1%を超えた付近から急勾配となる。軸ひずみが 0.1%以下でもポアソン比は供試体毎にばらつきが確認できる。乾燥状態では、軸ひずみが 0.2%を超えた付近からポアソン比が上昇している。軸ひずみ 0.1%以下での乾燥状態のポアソン比では、飽和状態と比較してばらつきは小さい。

ピーク強度のモールの応力円を図 4.3.5-36 に、残留強度のモールの応力円を図 4.3.5-37 に示す。飽和状態のピーク強度については、乾燥状態のピーク強度と比較して、粘着力が小さく内部摩擦角がほぼ同等となった。飽和状態の残留強度については、乾燥状態の残留強度と比較して、粘着力はほぼ同等で、内部摩擦角が小さい結果となった。

表 4.3.5-17 圧密排水(CD)三軸圧縮試験の結果 (周辺岩盤)

供試体の状態	実施年度	試験体番号	有効拘束圧 (MPa)	圧密後間隙比	最大軸差強度 (MPa)	破壊ひずみ $\epsilon_{f,ext}$ (%)	変形係数 E_{50} (MPa)	ポアソン比 ν_{50}	残留強度 (MPa)	飽和度 (%)
飽和	H27	YTS3-3-1	1.5	0.637	9.31	1.56	1503	0.21	5.84	102.3
		YTS3-4-1	3.0	0.645	11.84	1.59	2721	0.21	9.35	101.8
		YTS3-4-5	5.0	0.620	14.44	8.83	2712	0.21	14.03	100.5
		YTS3-4-6	7.0	0.591	18.10	14.04	2669	0.06	18.02	99.0
	H28	YTS1-1-4	1.5	0.635	11.87	1.23	2062	0.40	6.41	96.4
		YTS2-4-4	3.0	0.581	13.10	3.19	1786	0.54	9.45	94.4
		YTS4-3-6	5.0	0.586	14.02	7.06	1494	0.08	13.15	91.7
		YTS3-3-5	7.0	0.554	18.27	15.65	890	0.23	18.22	96.1
乾燥	H28	YTS5-1-3	1.5	0.633	20.71	2.50	3507	0.10	13.73	0.0
		YTS5-1-6	3.0	0.661	21.19	3.37	3054	0.14	13.71	0.0
		YTS2-6-1	5.0	0.599	23.73	3.48	3309	0.15	16.72	0.0
		YTS6-4-7	7.0	0.673	25.01	6.61	4000	0.07	21.32	0.0
	H29	YTS6-7-8	1.5	0.646	16.05	2.34	2572	0.20	10.52	0.0
		YTS6-7-2	3.0	0.661	19.15	4.19	2130	0.14	12.14	0.0
		YTS6-7-3	5.0	0.639	21.78	4.20	2612	0.16	17.96	0.0
		YTS6-15-7	7.0	0.620	19.41	6.98	1522	0.28	16.03	0.0

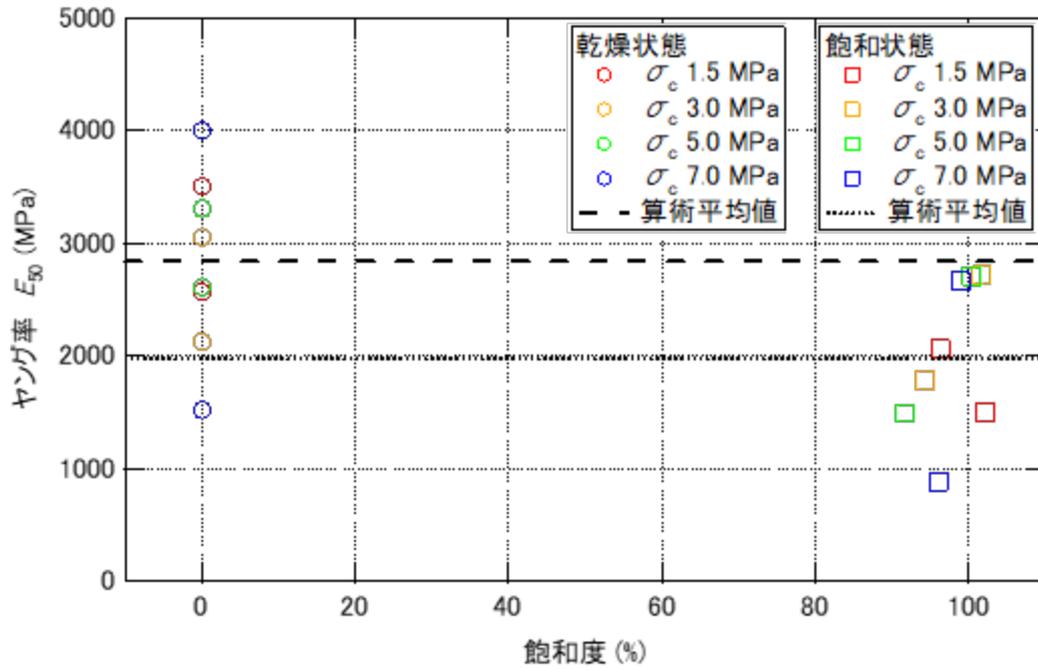


図 4.3.5-27 ヤング率と飽和度との関係 (周辺岩盤)

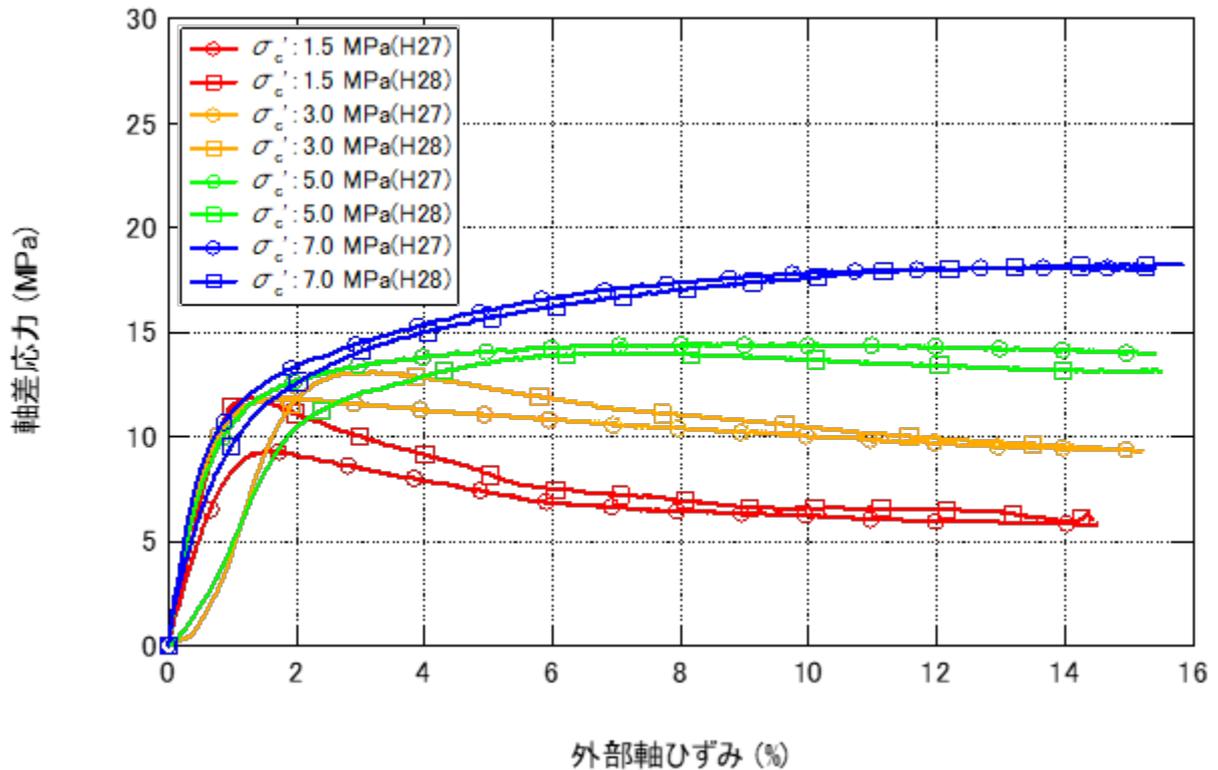


図 4.3.5-28 軸差応力と軸ひずみの関係 (周辺岩盤：飽和状態)

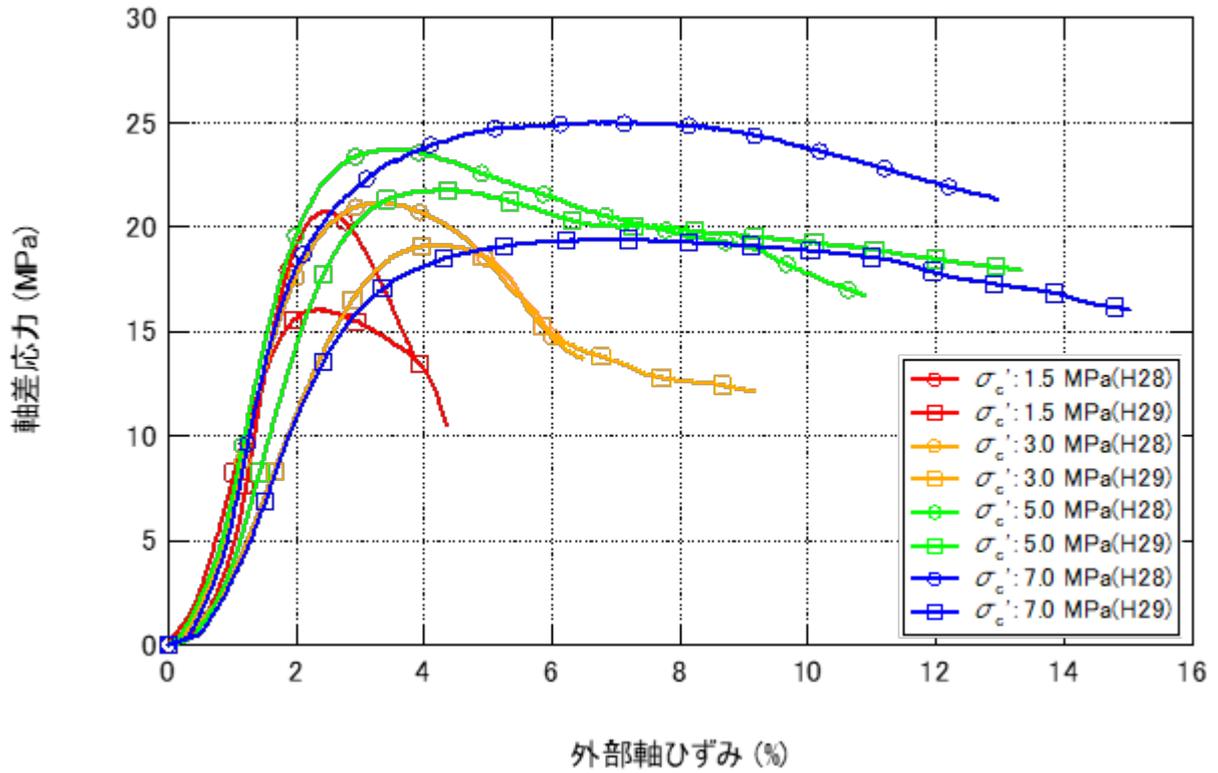


図 4.3.5-29 軸差応力と軸ひずみの関係 (周辺岩盤：乾燥状態)

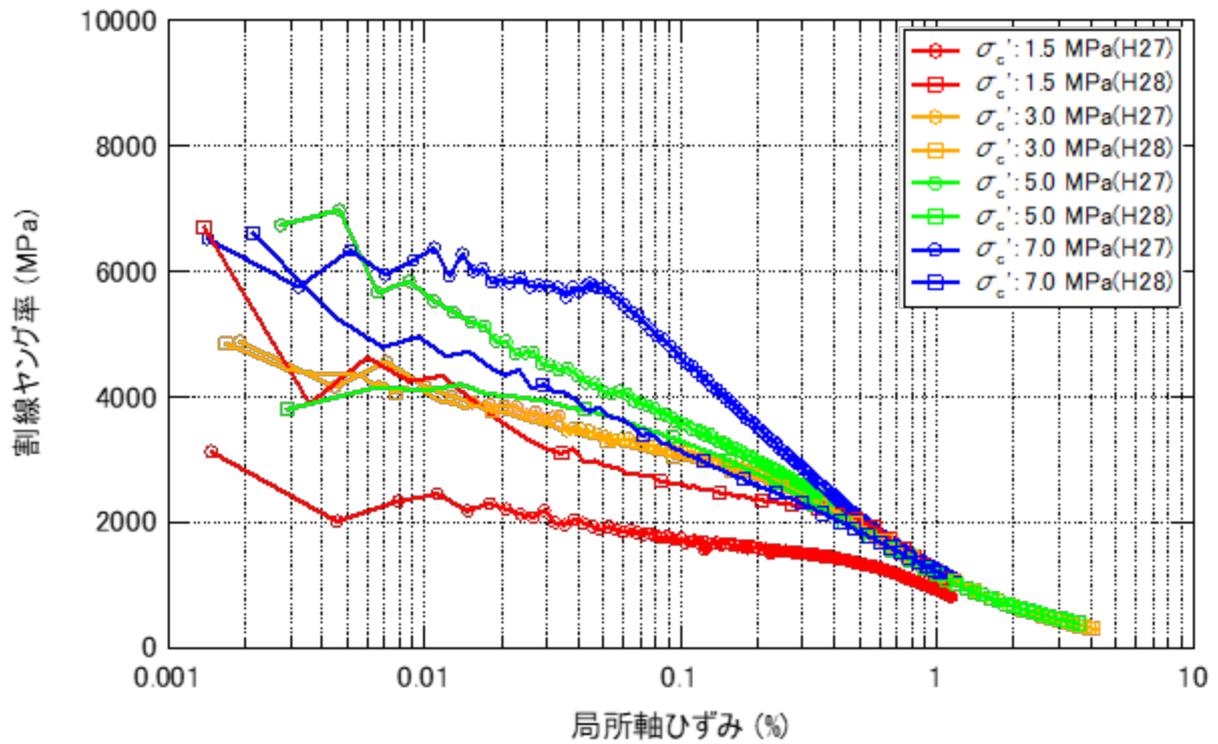


図 4.3.5-30 ヤング率と軸ひずみの関係 (周辺岩盤：飽和状態)

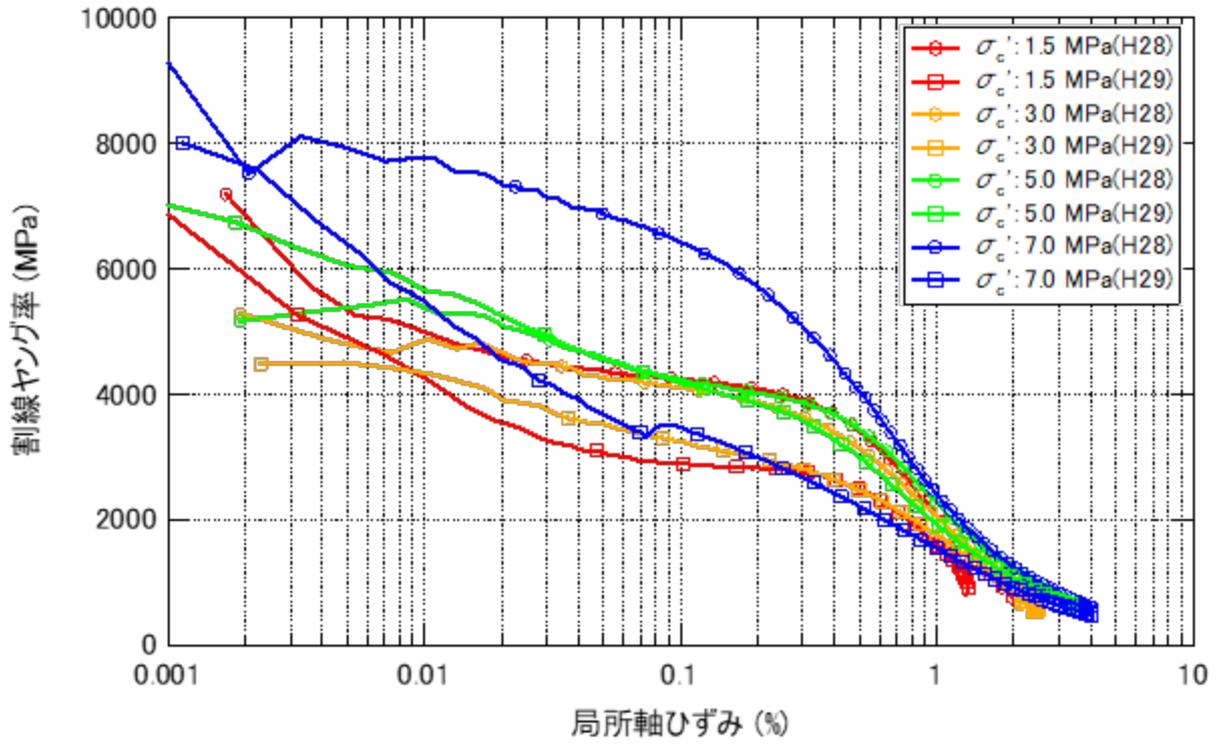


図 4.3.5-31 ヤング率と軸ひずみの関係 (周辺岩盤：乾燥状態)

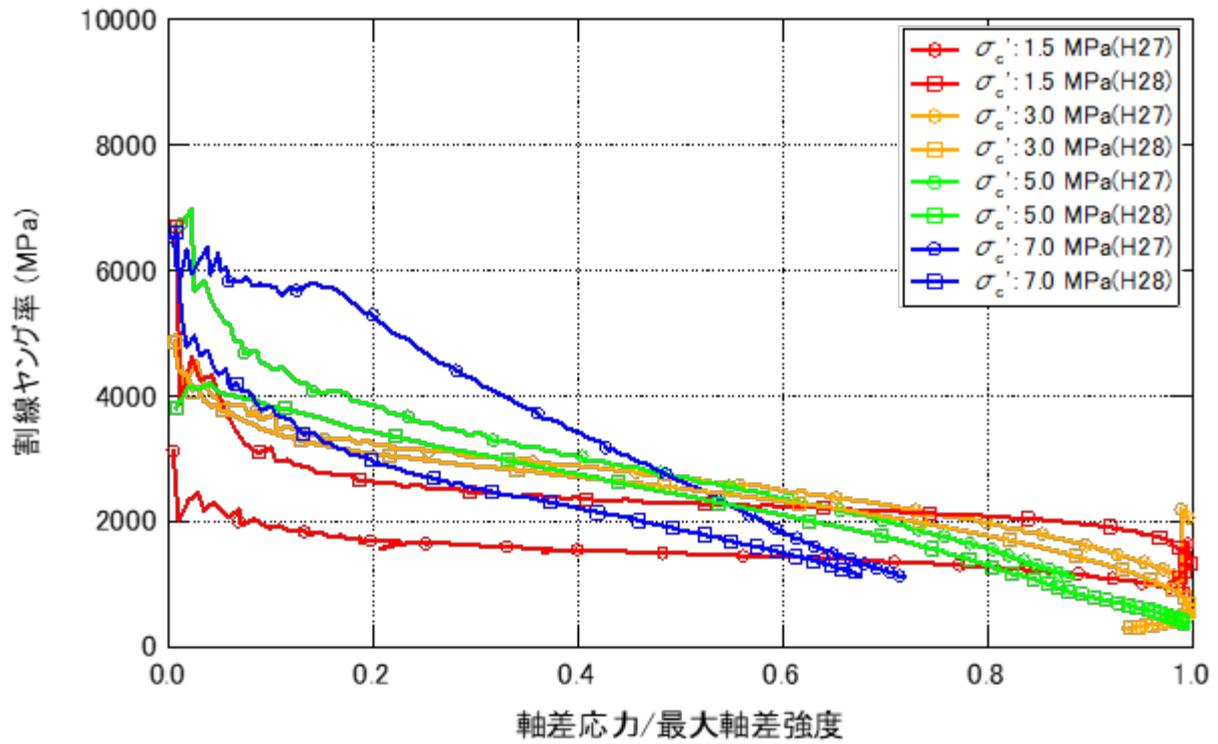


図 4.3.5-32 ヤング率と応力比の関係 (周辺岩盤：飽和状態)

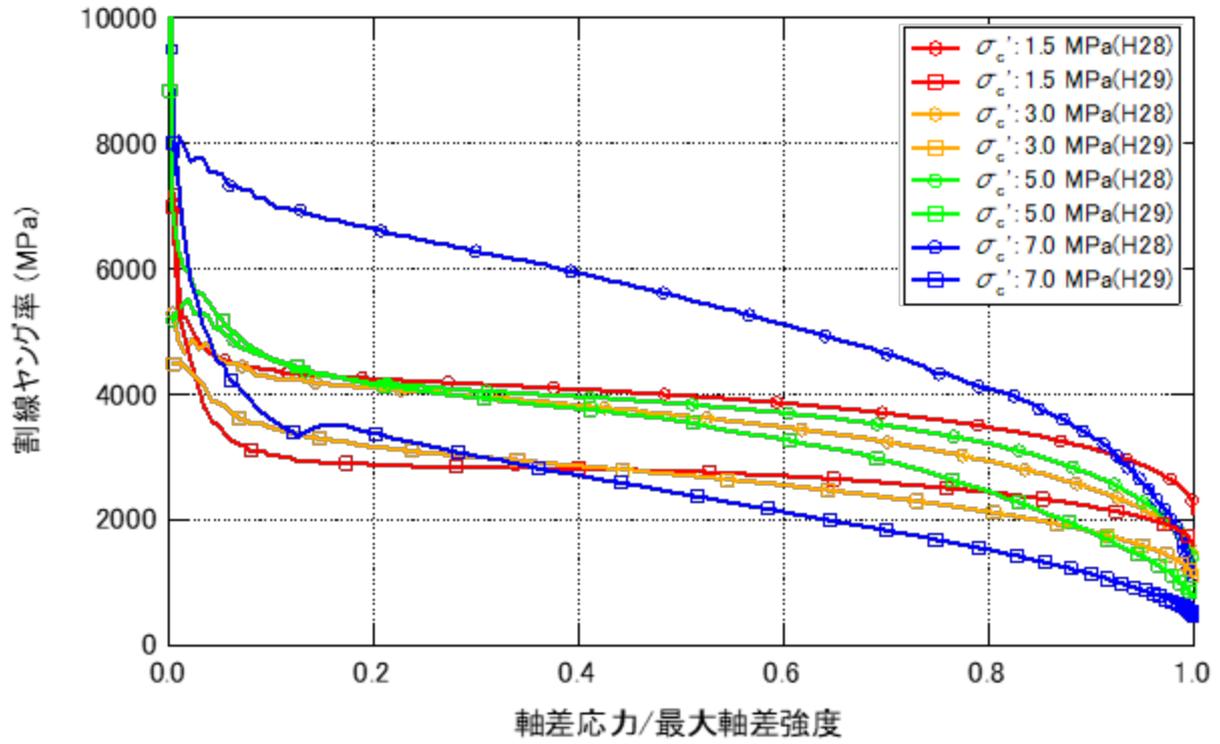


図 4.3.5-33 ヤング率と応力比の関係 (周辺岩盤：乾燥状態)

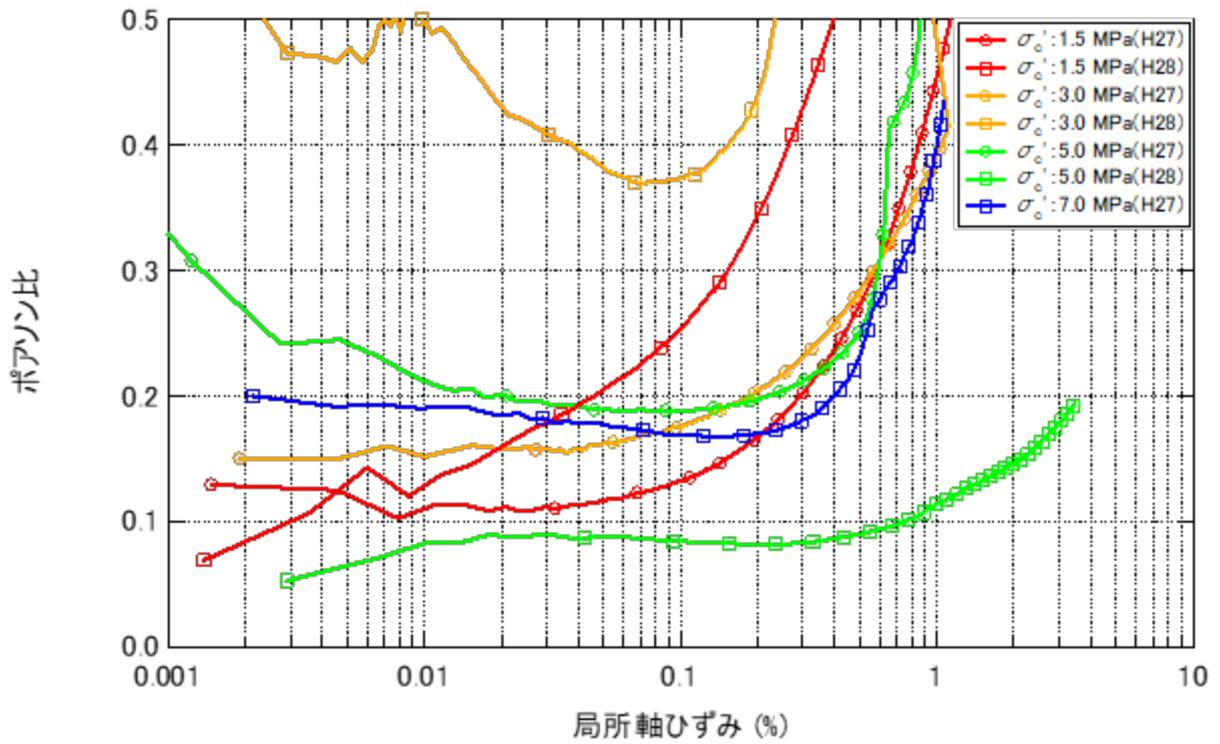


図 4.3.5-34 ポアソン比と軸ひずみの関係 (周辺岩盤：飽和状態)

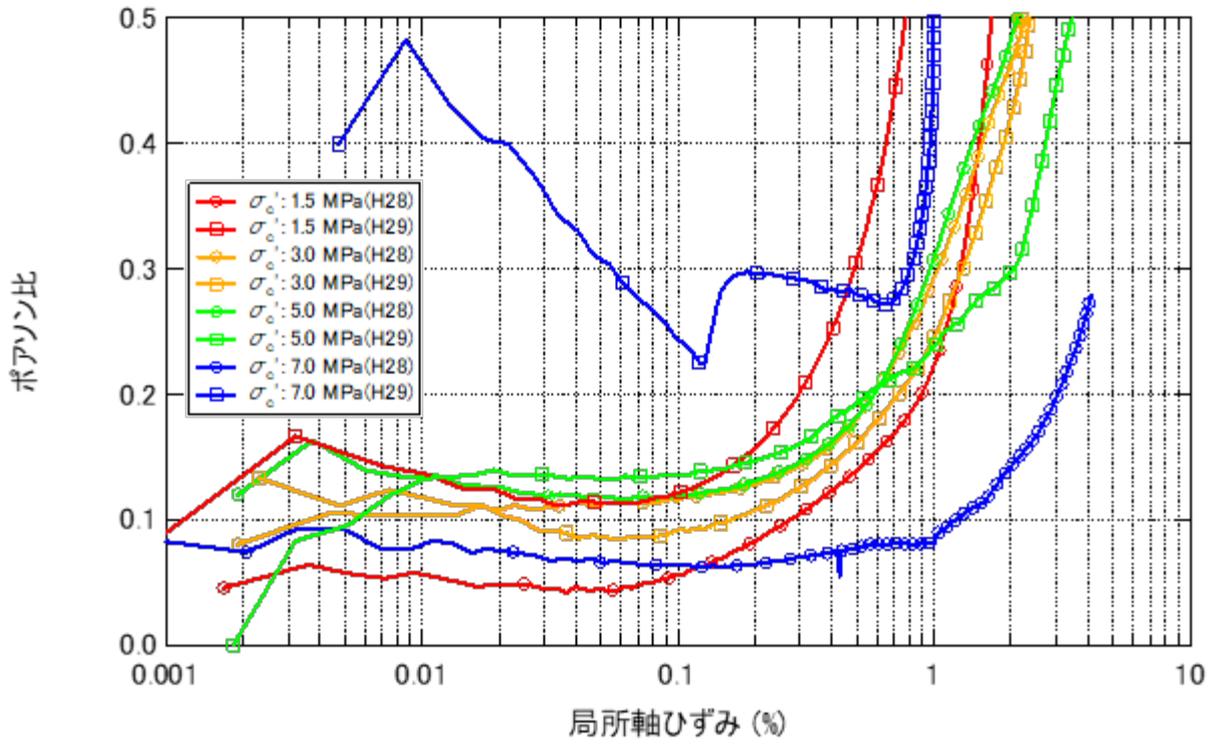


図 4.3.5-35 ポアソン比と軸ひずみの関係 (周辺岩盤：乾燥状態)

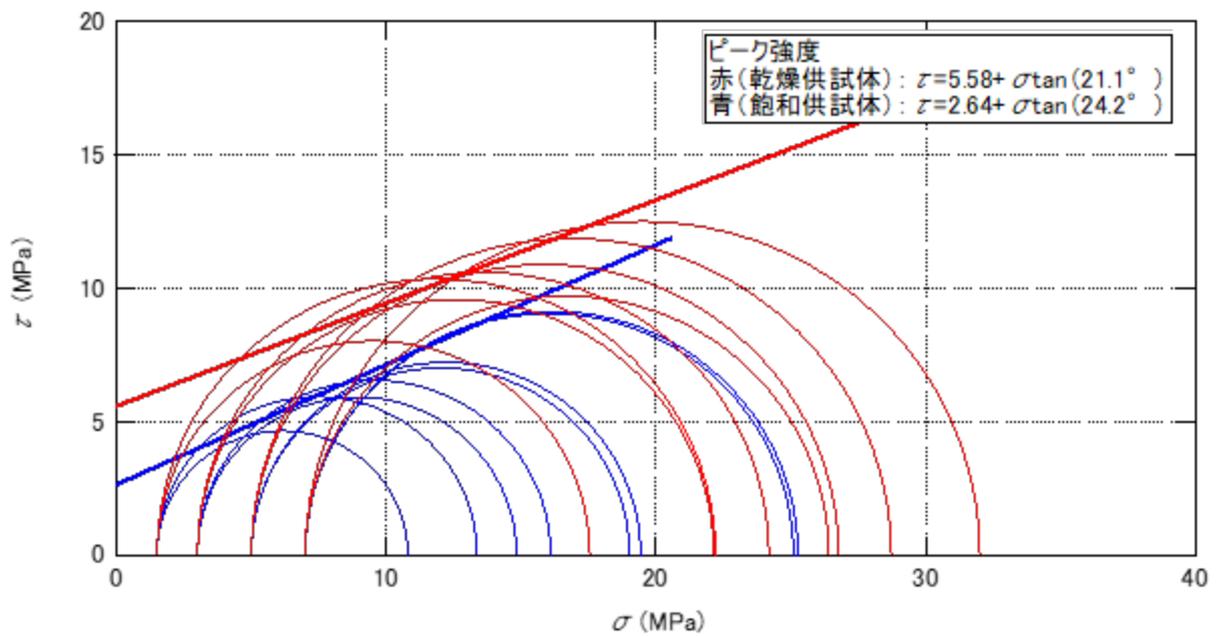


図 4.3.5-36 ピーク強度のモールの応力円 (周辺岩盤)

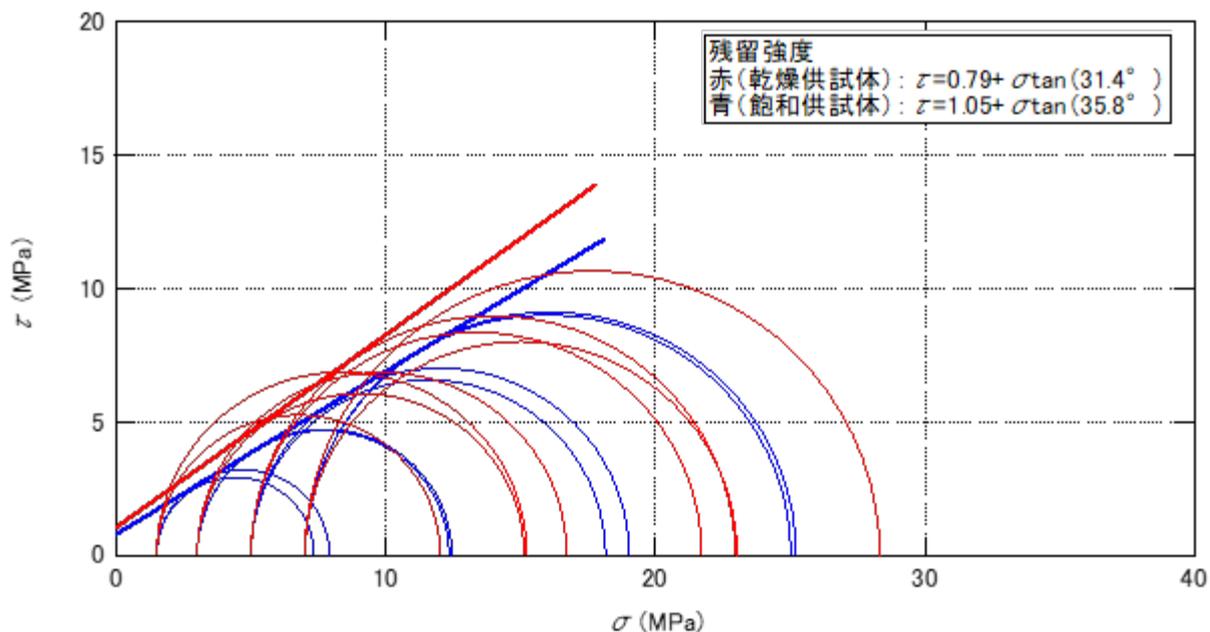


図 4.3.5-37 モールの応力円 (周辺岩盤)

(8) 圧密特性

1) 測定方法

圧密特性を把握する目的で、段階载荷による圧密試験を実施した。試験の条件を表 4.3.5-18 に、試験装置を図 4.3.5-38 に示す。試験方法については、JIS A 1217 を参考に実施した。

緩衝材では、所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト 7：ケイ砂 3 で混合）を、設定した乾燥密度 1.6Mg/m^3 となるように質量測定を行い、静的締固めにより寸法 $\phi 60 \times 20\text{mm}$ の供試体を作製した。埋戻し材では、所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト 15：ケイ砂 85 で混合）を、設定した乾燥密度 1.8Mg/m^3 となるように質量測定を行い、静的締固めにより寸法 $\phi 60 \times 20\text{mm}$ の供試体を作製した。周辺岩盤では、 $\phi 40 \times 20\text{mm}$ となるように整形した供試体を用いた。

緩衝材と埋戻し材の試験手順については、膨潤圧相当の圧密圧力を負荷してから、供試体の上下端面より給水した。試験装置は密閉型ではなく、供試体への水分の流入と流出量の測定はできず飽和の確認はしていない。供試体の吸水による膨潤が収まるまで 2 週間程度放置してから圧密試験の段階を開始した。

緩衝材の圧密試験の段階では、初期の圧密圧力を 0.8MPa に設定し、1 段階 14 日の段階载荷を 6 段階とし、最大圧密圧力を 2.56MPa まで载荷した。埋戻し材の圧密試験の段階では、初期の圧密圧力を 0.16MPa に設定し、1 段階 14 日の段階载荷を 8 段階とし、最大圧密圧力を 20.48MPa まで载荷した。周辺岩盤の圧密試験では、初期の圧密圧力を 0.3125MPa に設定し、1 段階 24 時間の段階载荷を 9 段階とし、最大圧密圧力を 80MPa まで载荷した。各試験の除荷過程では、最終圧密圧力の载荷終了後、初期圧密圧力まで除荷して、载荷過程と同じ時間を維持した。

表 4.3.5-18 圧密試験の条件一覧

圧密圧力 (MPa)	段階数										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
緩衝材	0.01	0.8	1.6	3.2	6.4	1.28	2.56	0.8			
埋戻し材	0.01	0.16	0.32	0.64	1.28	2.56	5.12	10.24	20.48	0.16	
周辺岩盤	0.0001	0.3125	0.625	1.25	2.5	5	10	20	40	80	0.3125



図 4.3.5-38 圧密試験装置

2) 測定結果

圧密特性の測定結果を表 4.3.5-19 に、間隙比と圧密圧力の関係を図 4.3.5-39 に示す。緩衝材、周辺岩盤では、圧密降伏後の直線の傾きから圧縮指数を算定した。埋戻し材では、最終段階の傾きを圧縮指数とした。

表 4.3.5-19 圧密特性の測定結果

材料	実施年度	供試体番号	土粒子の密度 ρ_s (Mg/m ³)	初期間隙比 e_0	圧縮指数 C_c
緩衝材	H29	H29_1.6-1	2.713	0.704	0.117
埋戻し材	H29	H29_1.8-1	2.646	0.467	0.027
	H29	H29_1.8-2	2.646	0.465	0.107
	H29	H29_1.8-3	2.646	0.47	0.134
周辺岩盤	H27	H27-1	2.788	0.657	0.401
		H27-2	2.753	0.720	0.457
	H28	H28-1	2.749	0.647	0.356
		H28-2	2.793	0.633	0.381
		H28-3	2.727	0.743	0.406

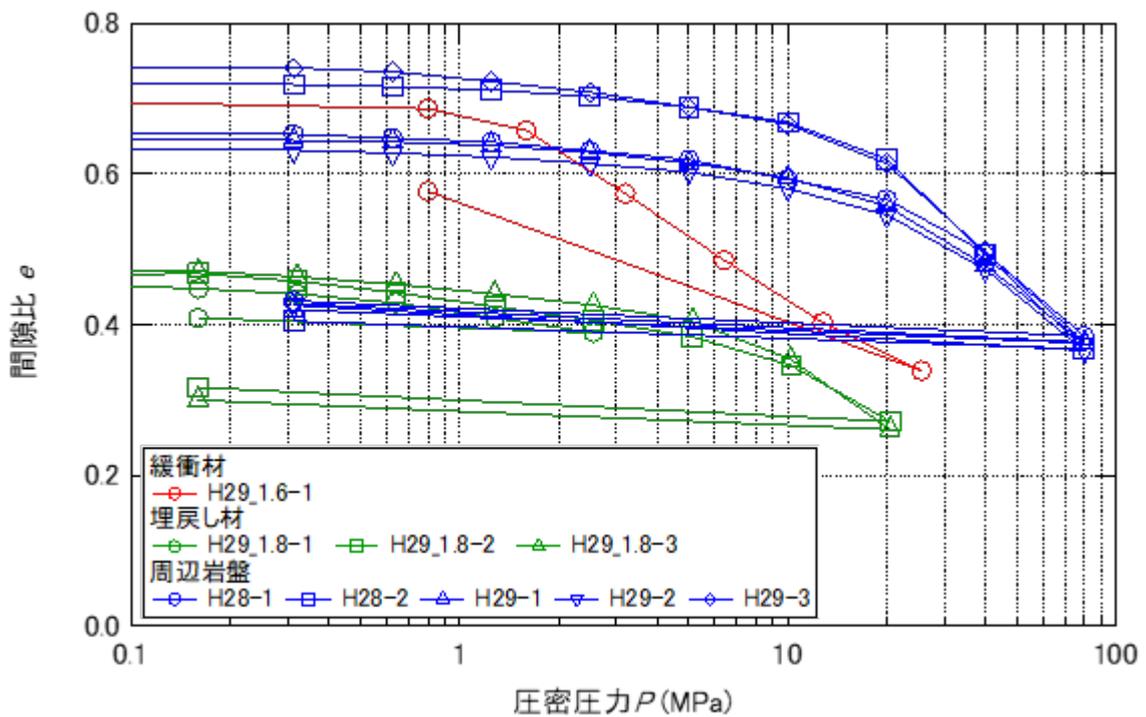


図 4.3.5-39 圧密特性の測定結果

(9) 圧密排水(CD)三軸クリープ試験 (周辺岩盤：飽和状態)

1) 測定方法 (周辺岩盤：飽和状態)

飽和状態の周辺岩盤の長期的な変形・強度特性を把握する目的で、圧密排水(CD)三軸クリープ試験を実施した。クリープ定数については、「堆積軟岩における大規模空洞の掘削時挙動・長期挙動の解析的検討」[11]を参考に算定した。解析コード LOSTUF に入力可能なクリープ定数を表 4.3.5-20 に示す。

圧密排水(CD)三軸クリープ試験の方法については、地盤工学会基準「圧密排水(CD)三軸圧縮試験方法(JGS 2534-2009)」を基本とし、圧縮試験の過程において軸荷重を一定にして1次クリープから3次クリープの特性を取得した。試験の条件を表 4.3.5-21 に示す。

三軸クリープ試験に使用した载荷装置は、てこの原理を利用して载荷する重錘式となっている。試験装置を図 4.3.5-40 に示す。

表 4.3.5-20 LOSTUF に必要なクリープ定数

項目	LOSTUFで 必要なクリープ定数	記号(単位)	算定の方法
強度に 関する定数	粘着力(ピーク強度)	c_p (MPa)	静的CD三軸圧縮試験のピーク強度
	せん断抵抗角(ピーク強度)	ϕ_p (deg.)	
	強度定数	β	
	粘着力(残留強度)	c_r (MPa)	静的CD三軸圧縮試験の残留強度
	せん断抵抗角(残留強度)	ϕ_r (deg.)	
	破壊余裕度定数	a b	静的CD三軸圧縮試験のヤング率とポアソン比
クリープ変形に 関する定数	せん断弾性係数	G_1 (MPa)	静的CD三軸圧縮試験のヤング率とポアソン比
	体積弾性係数	K_1 (MPa)	
	せん断弾性係数	G_2 (MPa)	残留強度以下の応力比で実施した CD三軸クリープ試験
	粘性係数	η_{G_2} (MPa min)	
	せん断弾性係数	G_3 (MPa)	
	粘性係数	η_{G_3} (MPa min)	
	限界偏差クリープひずみ	e_c	応力比を変化させたCD三軸クリープ試験
	定数	A^*	拘束圧を変化させたCD三軸クリープ試験
B^*			
M^*			
N^*			

表 4.3.5-21 クリープ試験の試験条件

σ_c' (MPa)	0.1	0.2	0.4	0.8
応力比R	0.9	0.9	0.9	0.9
	0.87	-	-	-
	0.86	-	-	-
	0.85	-	-	-
	0.8	-	-	-
	0.35	-	-	-



図 4.3.5-40 三軸クリープ試験装置

2) 結果 (周辺岩盤：飽和状態)

強度定数 β については、破壊時の軸差応力と平均有効応力の関係から最小二乗法を用いて算定した。飽和状態の周辺岩盤の圧密排水(CD)三軸圧縮試験の軸差応力と平均有効応力の関係を図 4.3.5-41 に示す。

弾性係数については、飽和状態の周辺岩盤の圧密排水(CD)三軸圧縮試験のヤング率とポアソン比の結果から算定した。軸ひずみが $10^{-3}\%$ 程度のひずみレベルを初期の弾性係数とした。弾性係数の一覧を表 4.3.5-22 に、弾性係数と有効拘束圧の関係を図 4.3.5-42 に示す。

有効拘束圧 0.1MPa、応力比 0.35 のクリープ試験から残留強度以下での粘性係数を算定した。軸差応力で正規化した偏差ひずみ速度と経過時間の関係を図 4.3.5-43 に示す。最初に、第 1 近似線、第 2 近似線の切片から粘性係数 η_{G2} 、 η_{G3} を算定する。第 1 近似線、第 2 近似線の傾きと粘性係数 η_{G2} 、 η_{G3} から、せん断弾性係数 G_2 、 G_3 を算定した。

クリープ定数のうち、粘性係数を求める 5 要素モデルは、以下の式で表される

$$\frac{\dot{\epsilon}}{(\sigma_a - \sigma_r)} = \frac{1}{3} \left[\frac{e^{-\left(\frac{G_2}{\eta_{G2}}\right)t}}{\eta_{G2}} + \frac{e^{-\left(\frac{G_3}{\eta_{G3}}\right)t}}{\eta_{G3}} \right] \quad (4.3.5-1)$$

ここに、

$\dot{\epsilon}$:	偏差ひずみ速度	(%/min)
$\sigma_a - \sigma_r$:	軸差応力	(MPa)
G_2, G_3 :	せん断弾性係数	(MPa)
η_{G2}, η_{G3} :	粘性係数	(MPa・min)
t :	時間	(min)

有効拘束圧は 0.1MPa とし、軸差応力の応力比を変化させたクリープ試験の結果の偏差ひずみ速度と経過時間の関係を図 4.3.5-44 に示す。限界偏差クリープひずみ ϵ_c については、最小偏差ひずみ速度と 3 次クリープ開始時間の関係から最小二乗法を用いて算定した。最小偏差ひずみ速度と 3 次クリープ開始時間の関係を図 4.3.5-45 に示す。

定数 A2 と B2 については、最小偏差ひずみ速度の拘束圧依存性から算定した。最小偏差ひずみ速度と応力比の関係を図 4.3.5-46 に示す。

定数 M と N については、応力比とダイレイタンシー比の関係から算定した。応力比とダイレイタンシー比の関係を図 4.3.5-47 に示す。

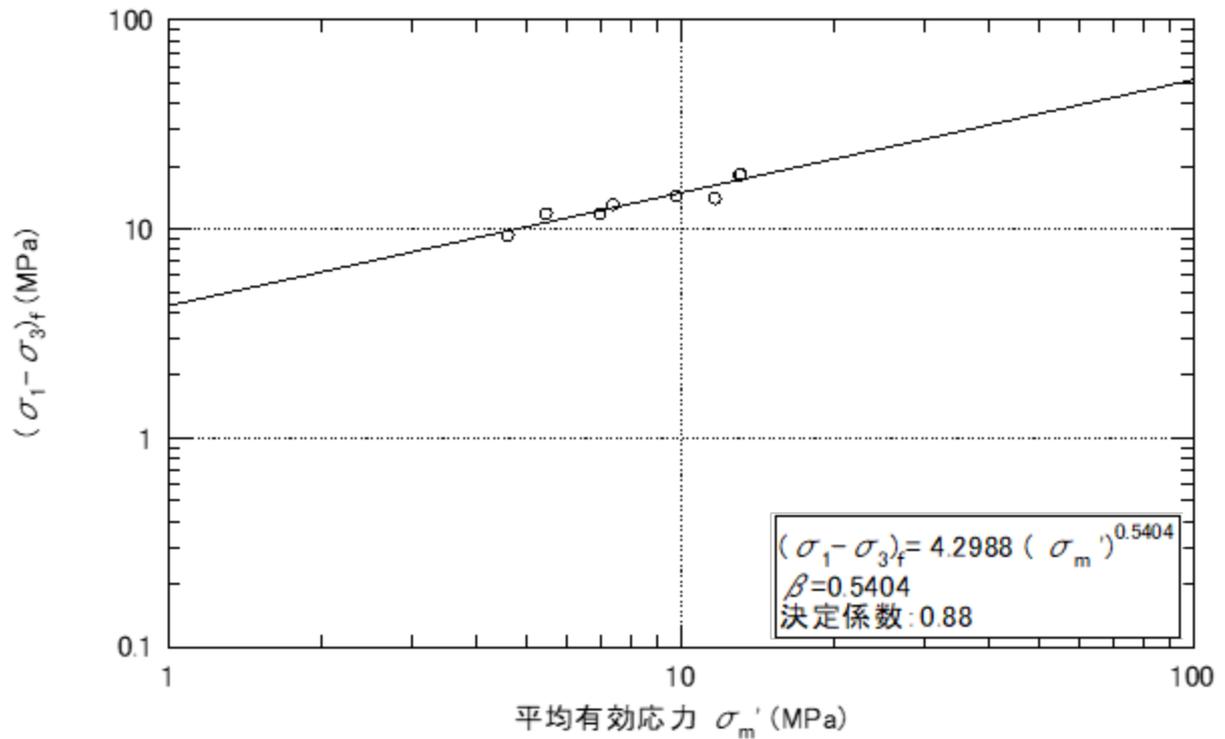


図 4.3.5-41 破壊時の軸差応力と平均有効応力の関係

表 4.3.5-22 弾性係数の一覧（周辺岩盤：飽和状態）

供試体 番号	σ_c' (MPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (MPa)	ε_a (%)	ε_1 (%)	ν	E (MPa)	G_1 (MPa)	K_1 (MPa)
YTS3-3-1	1.5	0.184	0.008	-0.001	0.10	2333	1058	978
YTS3-4-1	3	0.417	0.010	-0.002	0.15	4166	1809	1993
YTS3-4-5	5	0.510	0.009	-0.002	0.22	5842	2399	3445
YTS3-4-6	7	0.557	0.009	-0.001	0.07	6176	2876	2414
YTS1-1-4	1.5	0.369	0.009	-0.001	0.12	4252	1898	1866
YTS2-4-4	3	0.401	0.010	-0.005	0.50	4105	1368	-
YTS4-3-6	5	0.417	0.010	-0.001	0.08	4108	1897	1641
YTS3-3-5	7	0.471	0.009	-0.002	0.19	4960	2084	2667

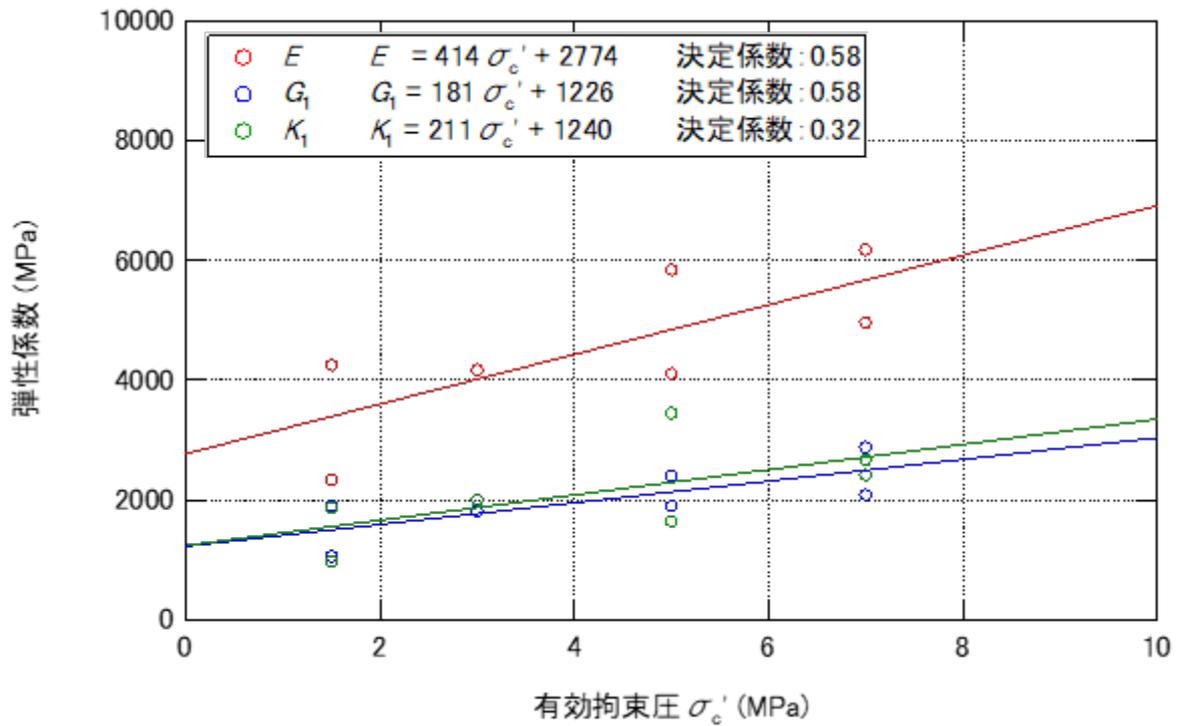


図 4.3.5-42 弾性係数と有効拘束圧の関係

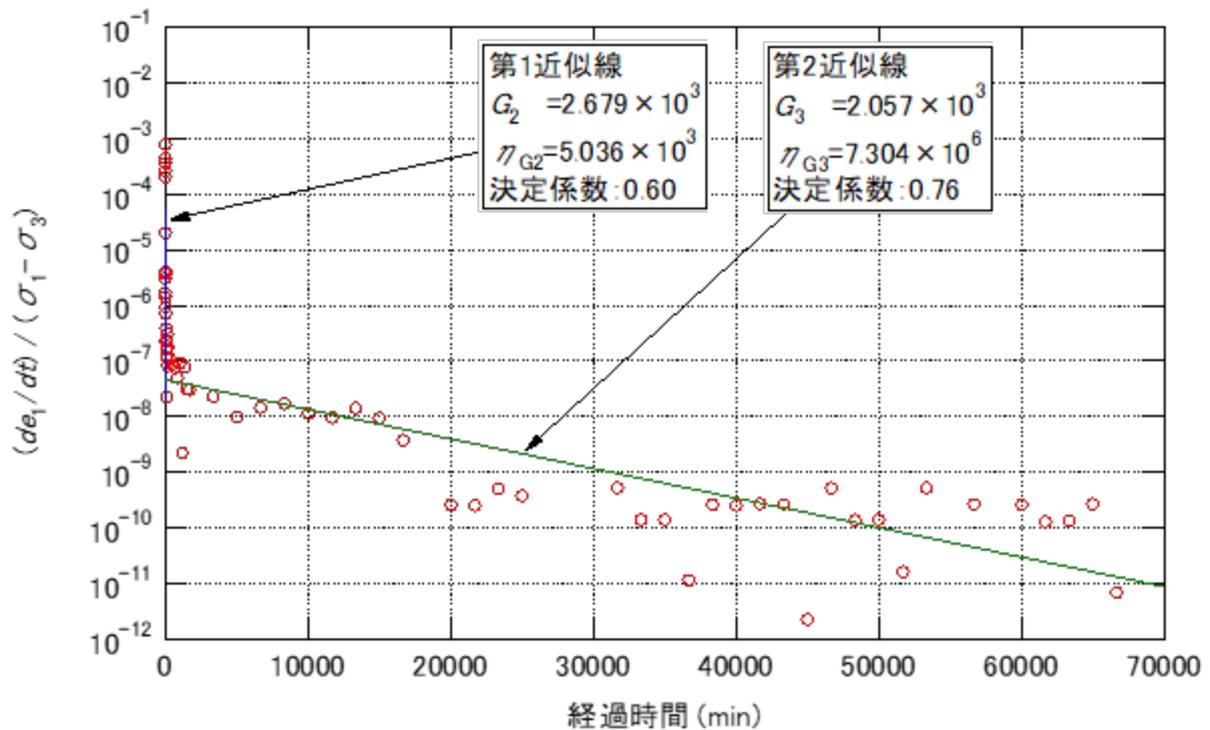


図 4.3.5-43 軸差応力で正規化した偏差ひずみ速度と経過時間との関係

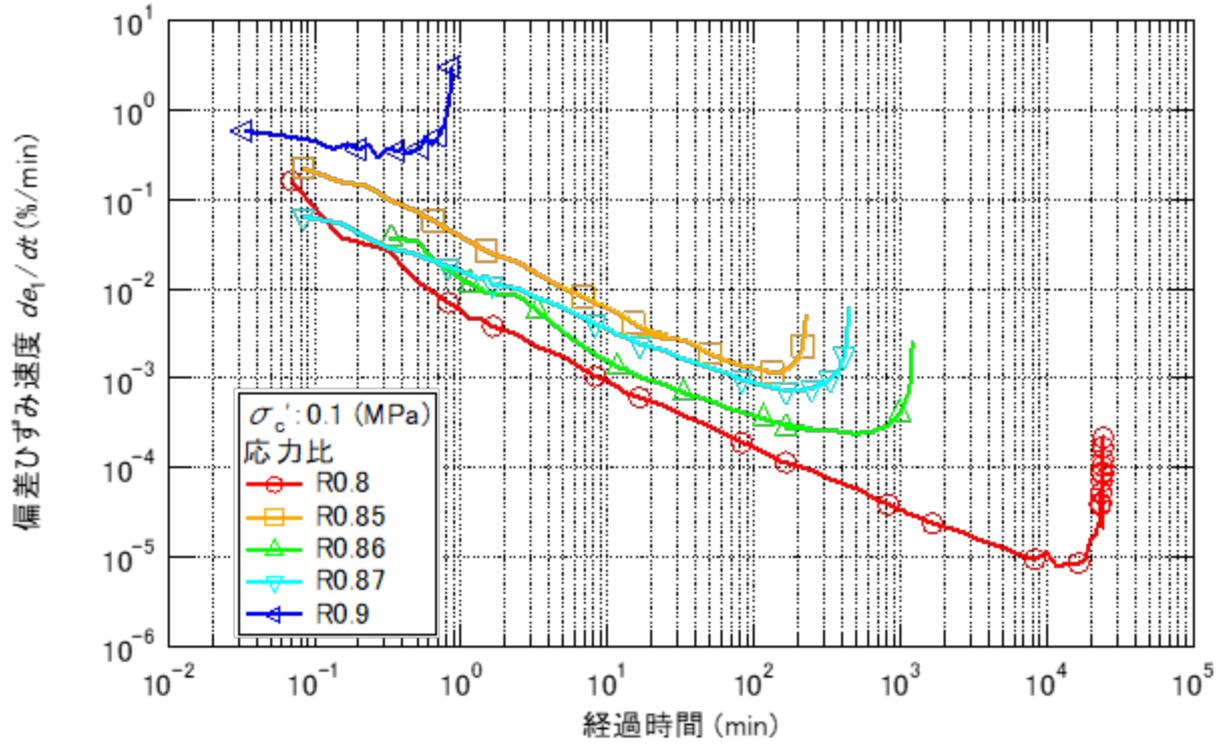


図 4.3.5-44 偏差ひずみ速度と経過時間の関係

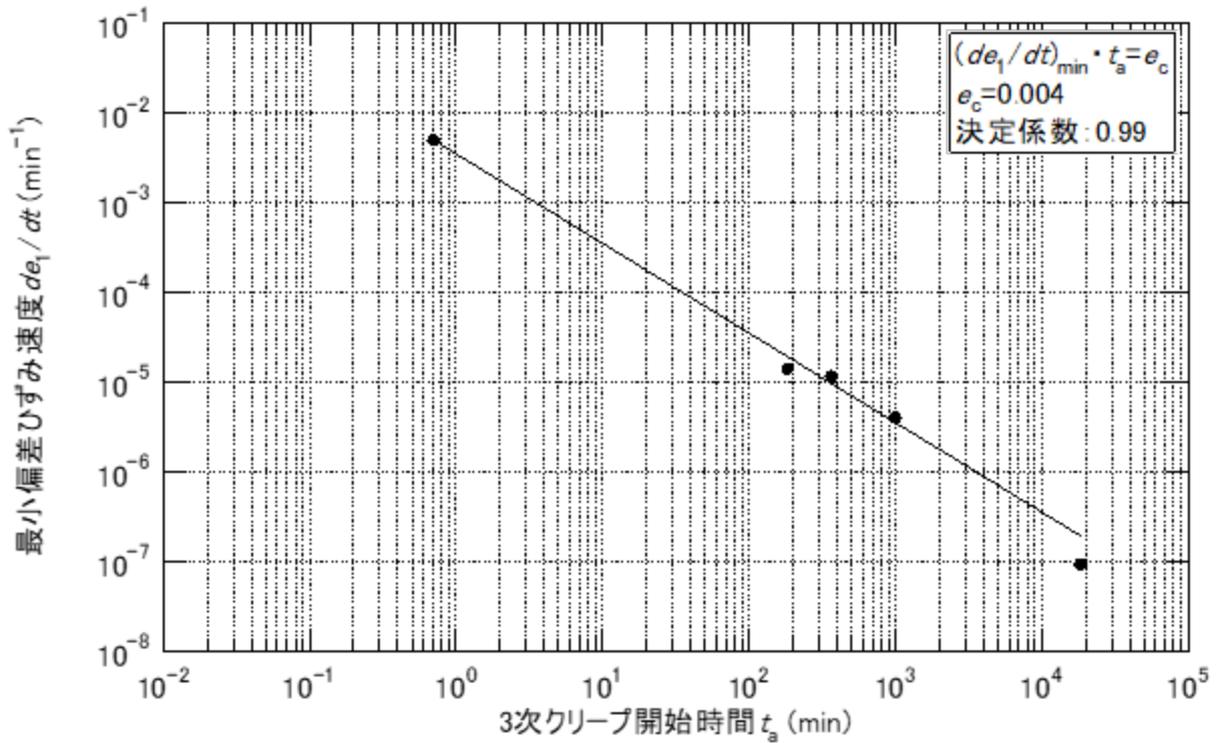


図 4.3.5-45 最小偏差ひずみ速度と3次クリープ開始時間の関係

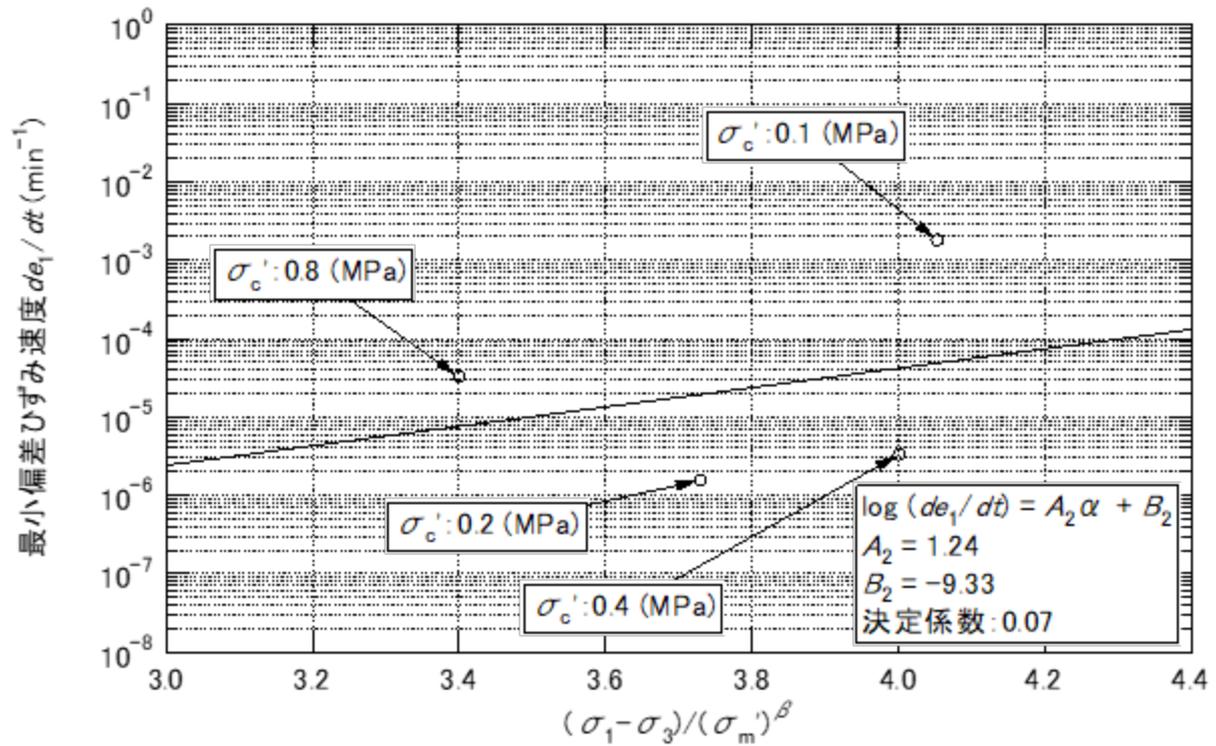


図 4.3.5-46 最小偏差ひずみ速度の拘束圧依存性

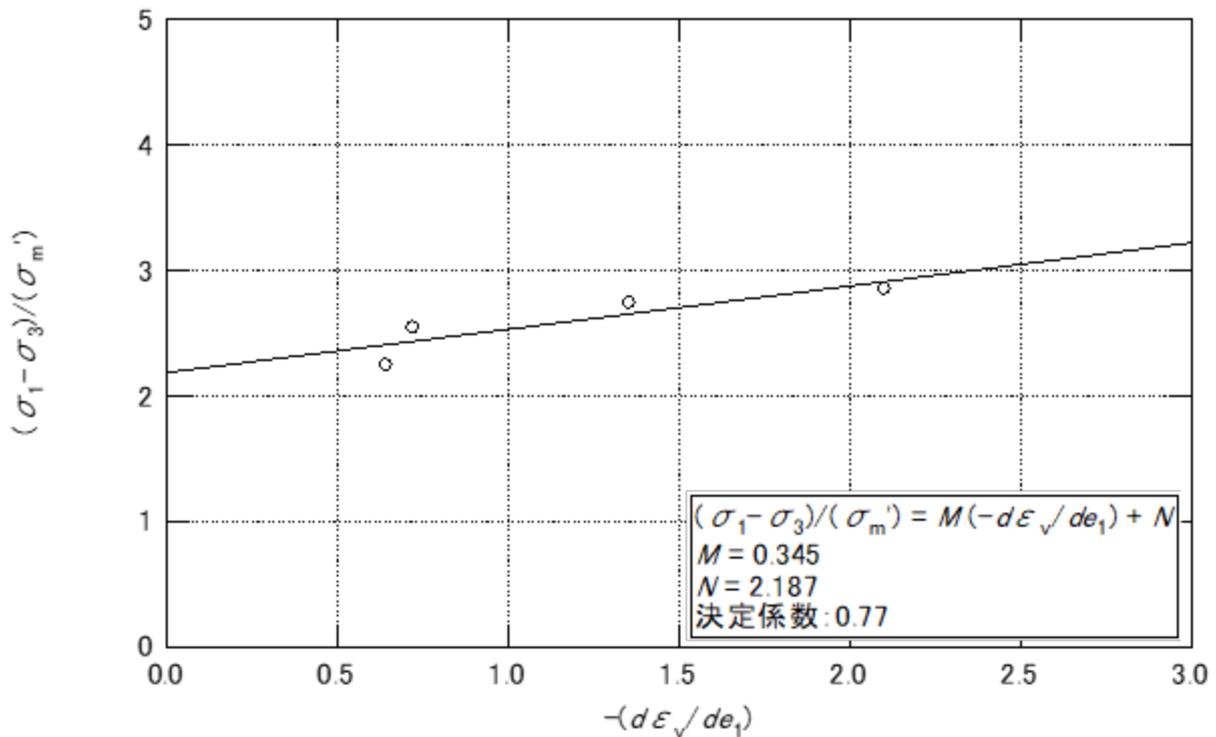


図 4.3.5-47 応力比とダイレイタンス比の関係

(10) 変形の異方特性（周辺岩盤：飽和状態）

1) 試験方法（周辺岩盤：飽和状態）

飽和状態の周辺岩盤の変形・強度の異方性を把握する目的で、圧密排水(CD)三軸圧縮試験を実施した。試験条件を表 4.3.5-16 に示す。供試体の側面には、ひずみゲージを貼付し、軸方向の圧縮に伴う変形係数及びポアソン比を算定した。圧縮荷重については、セル内部のロードセルの値を使用して算定した。

異方性の確認のために、南北の水平方向から供試体を採取した。採取状況を図 4.3.5-48 に示す。水平方向から採取した供試体と比較した鉛直方向の供試体については、4.3.5 (7)項の飽和状態の供試体となる。

表 4.3.5-23 異方性のための三軸圧縮試験の条件（周辺岩盤：飽和状態）

排水条件	排水
含水状態	飽和状態
供試体寸法	直径 50×高さ 100 mm
有効拘束圧 σ_c'	1.5 , 7 MPa
背圧	0.4 MPa
載荷速度	0.005 %/min



鉛直方向からの採取状況



水平方向からの採取状況

図 4.3.5-48 供試体の採取状況

2) 結果 (周辺岩盤)

鉛直方向と水平方向から採取した供試体の圧密排水(CD)三軸圧縮試験の結果を表 4.3.5-24 に、ピーク強度のモールの応力円を図 4.3.5-49 に、ヤング率と最大軸差応力に対する応力レベルの関係を図 4.3.5-50 に、ポアソン比と最大軸差応力に対する応力レベルの関係を図 4.3.5-51 に示す。水平方向から採取した供試体では、鉛直方向から採取した供試体と比較して、有効拘束圧 7.0MPa のピーク強度が若干高い。ヤング率とポアソン比の応力レベルの関係においては、異方性の影響は確認できない。

表 4.3.5-24 異方特性の三軸圧縮試験の結果 (周辺岩盤：飽和状態)

供試体の採取方向	実施年度	試験体番号	有効拘束圧 (MPa)	圧密後間隙比	最大軸差強度 (MPa)	破壊ひずみ $\epsilon_{f,ext}$ (%)	変形係数 E_{50} (MPa)	ポアソン比 ν_{50}
水平	H29	YTS6-12-3	1.5	0.651	10.74	0.52	2840	0.19
		YTS6-12-1	7.0	0.604	20.61	12.90	2291	0.19
鉛直	算術平均						1980	0.24
	標準偏差						638	0.15

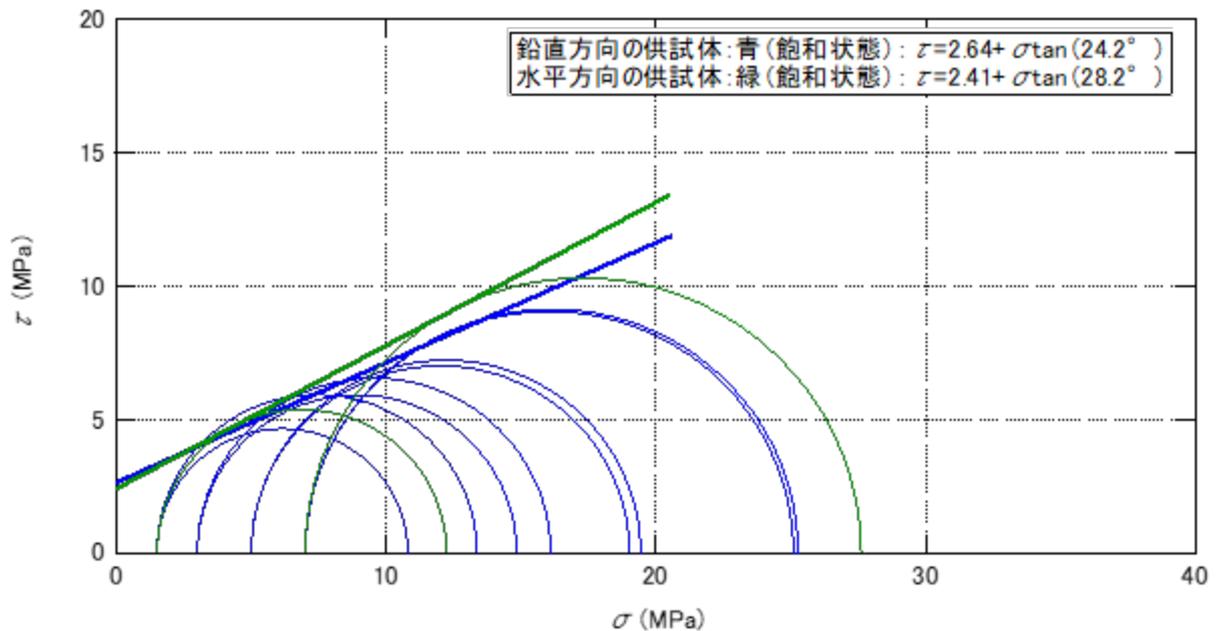


図 4.3.5-49 ピーク強度のモールの応力円 (周辺岩盤：飽和状態、異方性)

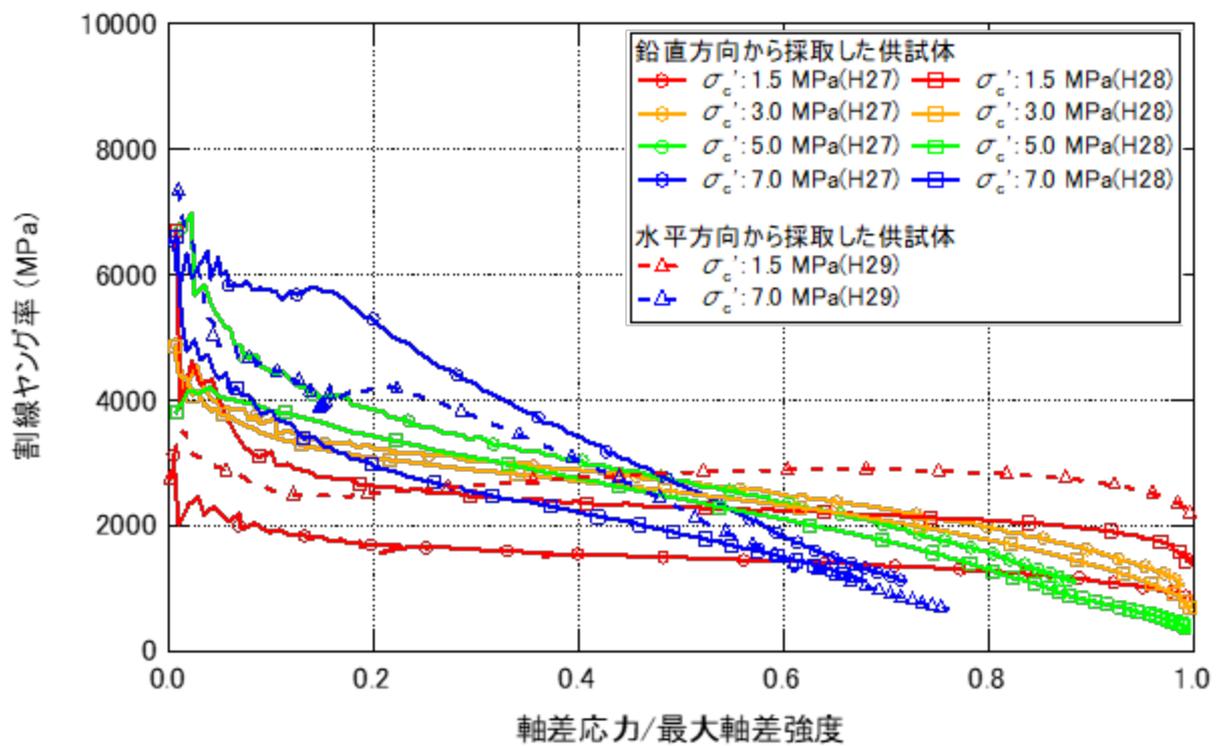


図 4.3.5-50 ヤング率と応力レベルの関係 (周辺岩盤：飽和状態、異方性)

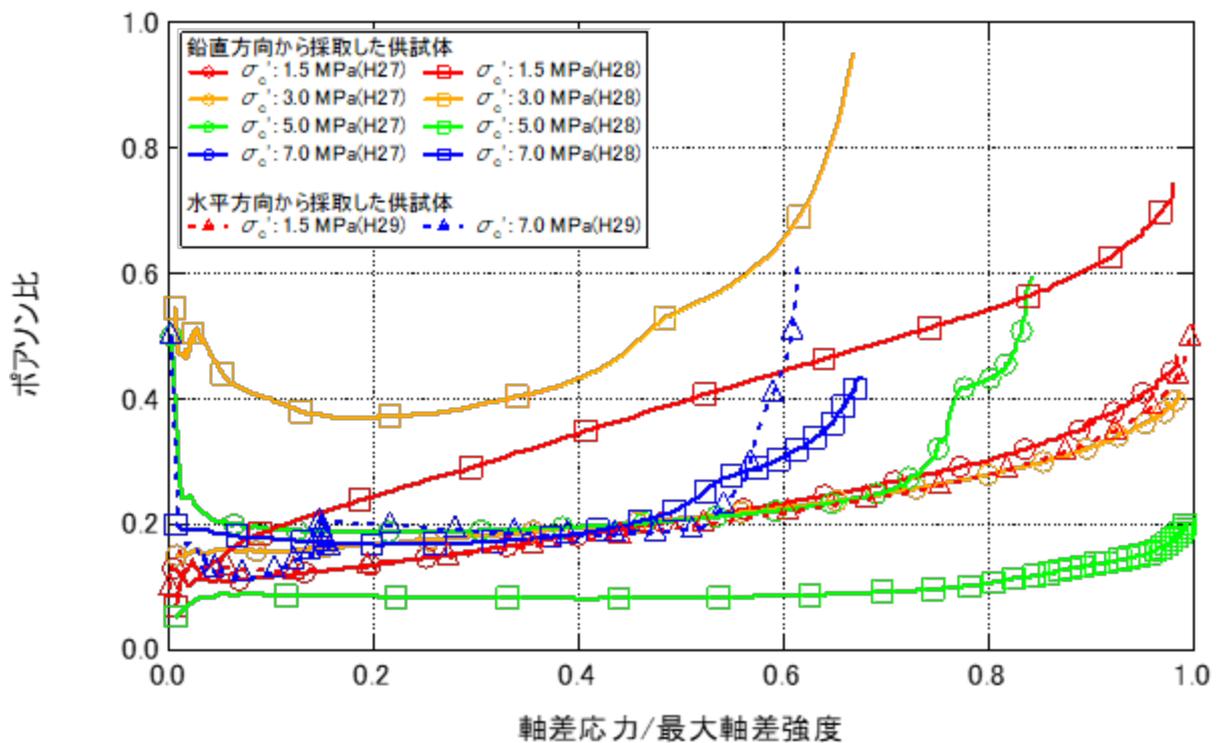


図 4.3.5-51 ポアソン比と応力レベルの関係 (周辺岩盤：飽和状態、異方性)

(11) 変形・強度の温度依存性（周辺岩盤：飽和状態）

1) 試験方法（周辺岩盤：飽和状態）

飽和状態の周辺岩盤の変形・強度の温度による影響を把握する目的で、圧密排水(CD)三軸圧縮試験を実施した。試験方法については、「高温環境下における堆積軟岩の力学特性（その1）-三軸圧縮試験による温度依存性の把握-」[12]を参考にした。試験条件を表 4.3.5-25 に示す。通常の圧密試験後にセル流体を 80℃まで加熱して、供試体に貼付したひずみゲージの値が一定になったところで圧縮試験を実施した。試験装置を図 4.3.5-52 に示す。三軸セルには、セル流体を加熱するヒーターと温度ムラを低減させるための攪拌プロペラが実装されている。供試体の側面には、ひずみゲージを貼付して軸方向の圧縮に伴う変形係数及びポアソン比を算定した。圧縮荷重については、セル内部のロードセルの値から算定した。

表 4.3.5-25 温度依存性の圧密排水(CD)三軸圧縮試験の条件（周辺岩盤：飽和状態）

排水条件	排水
含水状態	飽和状態
供試体寸法	直径 50×高さ 100 mm
加熱速度	0.5 °C/min
温度	80 °C
有効拘束圧 σ_c'	1.5 , 7 MPa
背圧	0.4 MPa
載荷速度	0.005 %/min

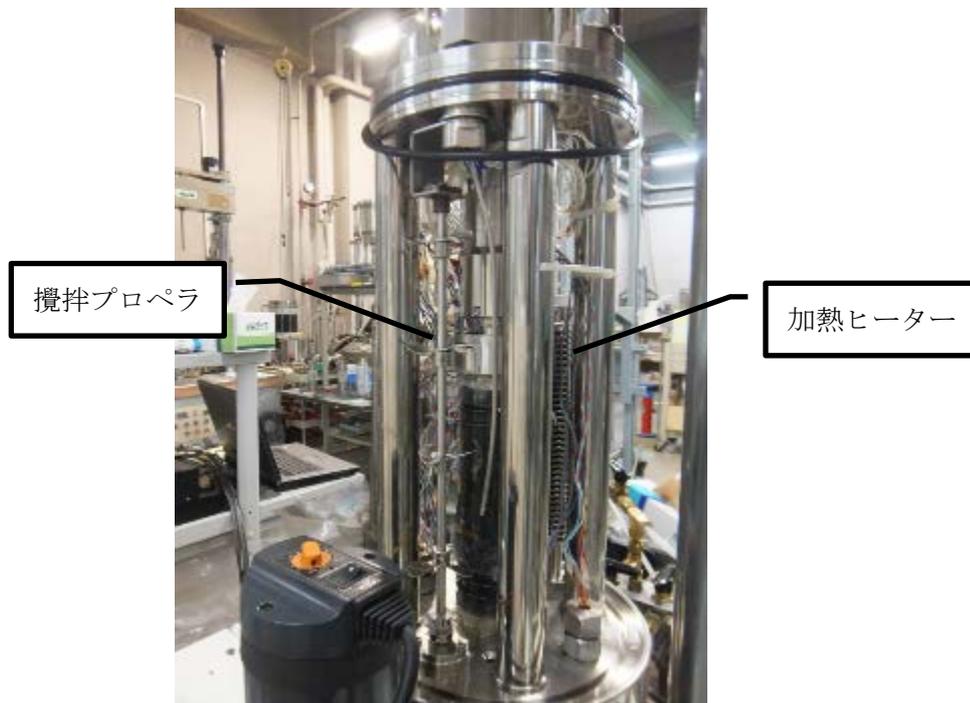


図 4.3.5-52 加熱試験用三軸セル

2) 結果 (周辺岩盤：飽和状態)

飽和状態の周辺岩盤の温度依存性についての三軸圧縮試験の結果を表 4.3.5-26 に示す。モールの応力円を図 4.3.5-53 に、ヤング率と最大軸差応力に対する応力レベルの関係を図 4.3.5-54 に、ポアソン比と最大軸差応力に対する応力レベルの関係を図 4.3.5-55 に示す。有効拘束圧 7.0MPa の試験の時には、ひずみゲージが破断したために、変形特性が測定不可能となった。ピーク強度では、24℃の時と試験結果とほぼ同等な結果となった。変形特性についても温度による影響が確認されなかった。

表 4.3.5-26 温度依存性の圧密排水(CD)三軸圧縮試験の結果 (周辺岩盤：飽和状態)

載荷時の温度	実施年度	試験体番号	有効拘束圧 (MPa)	圧密後間隙比	最大軸差強度 (MPa)	破壊ひずみ $\epsilon_{f,ext}$ (%)	変形係数 E_{50} (MPa)	ポアソン比 ν_{50}
80℃	H29	YTS6-15-1	1.5	0.554	10.01	1.27	1981	0.12
		YTS6-11-4	7.0	0.636	18.28	14.54	-	-
24℃	算術平均						1980	0.24
	標準偏差						638	0.15

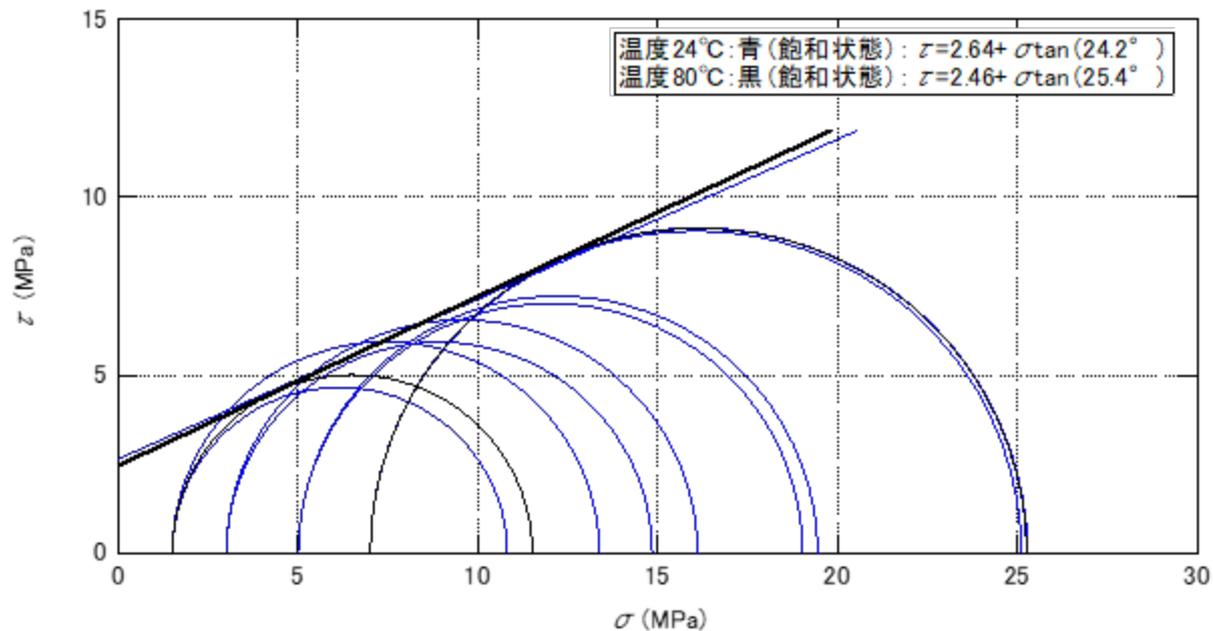


図 4.3.5-53 モールの応力円 (周辺岩盤：飽和状態、温度依存性)

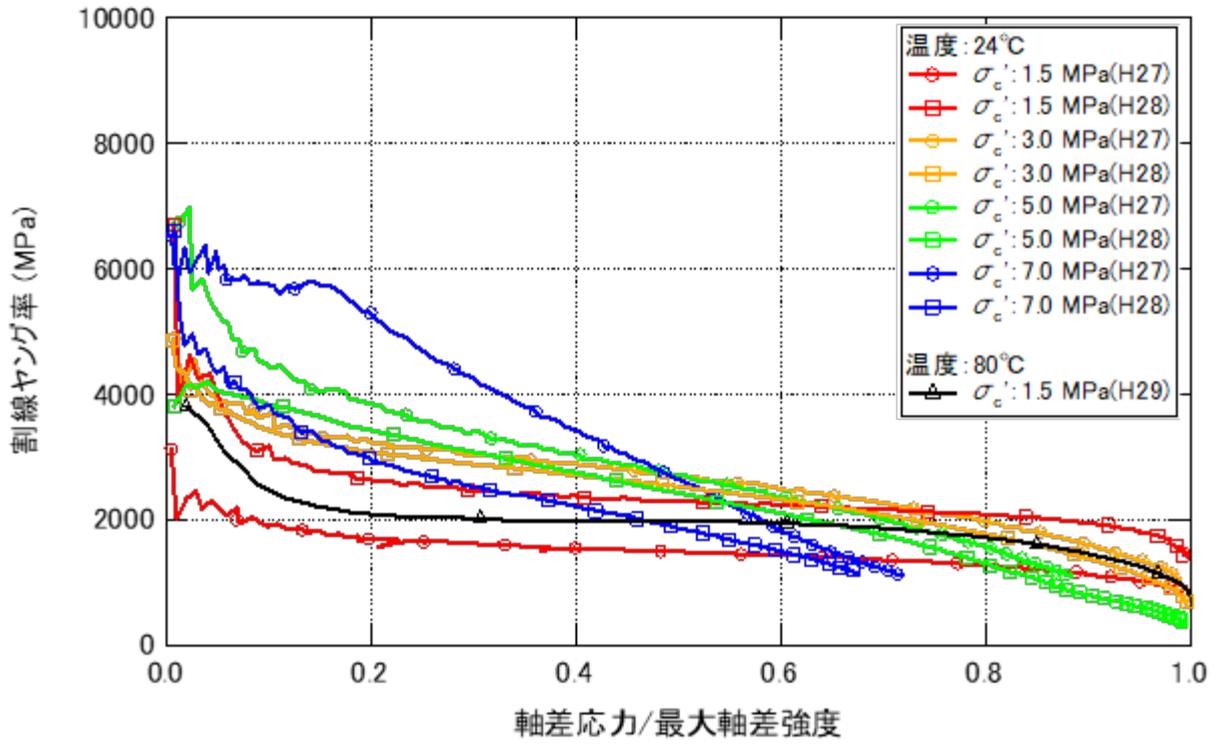


図 4.3.5-54 割線ヤング率と応力レベルの関係 (周辺岩盤：飽和状態、温度依存性)

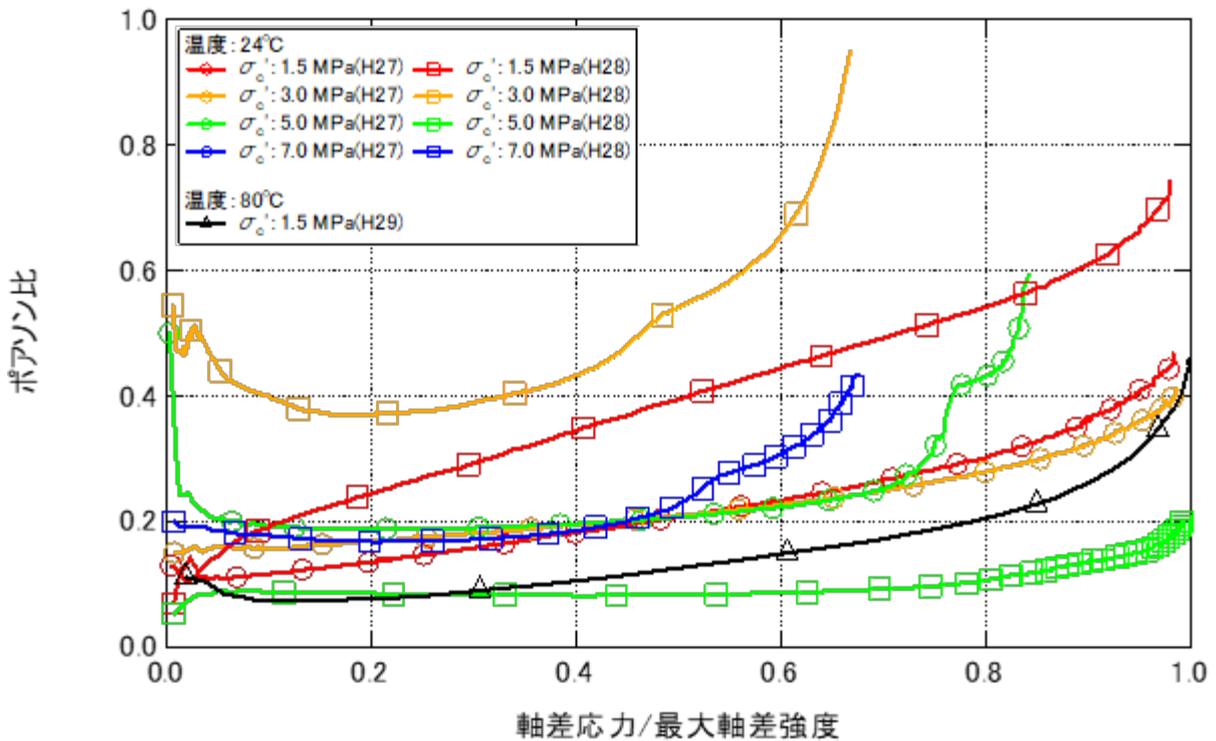


図 4.3.5-55 ポアソン比と応力レベルの関係 (周辺岩盤：飽和状態、温度依存性)

4.3.6 統計処理

高レベル放射性廃棄物処分施設における人工バリアの長期挙動を評価するには、数値解析にばらつきの評価を含む物性値を入力する必要がある。要素試験で取得した物性値の評価を算術平均、中央値、最頻値、標準偏差に加えて、ばらつきを比較する指標として標準偏差を算術平均で除した変動係数とした。また、要素集の結果が正規分布に従うと仮定して確率密度分布のグラフを整理した。

物理試験結果の統計処理の一覧を表 4.3.6-1 に、ヒストグラムを図 4.3.6-1 に示す。ヒストグラムの階級の幅は 0.2Mg/m^3 とした。変動係数の値は $0.00\sim 0.02$ の範囲にあり、物理試験結果のばらつきは小さいことが確認できた。

化学試験結果の統計処理の一覧を表 4.3.6-2 に、ヒストグラムを図 4.3.6-2 に示す。陽イオン交換容量（浸出陽イオン量）のヒストグラムでは、ICP 分析装置の精度が $\pm 5\%$ であることを考慮して階級幅を決定した。モンモリロナイト含有率のヒストグラムでは、メチレンブルーの吸着量の精度が 1mL であることから階級の幅を 2% とした。変動係数の値は $0.02\sim 0.09$ の範囲にあり、化学試験結果のばらつきは小さいことが確認できた。

平衡膨潤圧の統計処理の結果を表 4.3.6-3 に、ヒストグラムを図 4.3.6-3 に示す。変動係数の値は、 $0.03\sim 0.13$ の範囲であった。

熱特性試験結果の統計処理の一覧を表 4.3.6-4 に、ヒストグラムを図 4.3.6-4 に示す。比熱のヒストグラムの階級幅はすべての値が収まる 20J/kg/K とした。変動係数の値は、 $0.03\sim 0.04$ の範囲にあり、比熱のばらつきは小さいことを確認した。熱膨張係数のヒストグラムの階級幅は、ひずみゲージの分解能の 1μ とした。変動係数の値は、 $0.06\sim 0.15$ の範囲であった。

力学特性試験結果の統計処理の一覧を表 4.3.6-5 に、ヒストグラムを図 4.3.6-5 に示す。変動係数の値は、 $0.13\sim 0.63$ の範囲となり、物理・化学試験と比較してばらつきが大きいことを確認した。特に、天然の材料である周辺岩盤のばらつきが大きい。

保水特性と熱伝導率と緩衝材の変形特性については、飽和度との関係性があり関数で回帰した。取得した物性値を回帰式で正規した値を統計処理した。物性値と飽和度との関係の統計処理の一覧を表 4.3.6-6 に、ヒストグラムを図 4.3.6-6 に示す。階級の幅はすべての値がヒストグラム内に収まるように 0.2 とした。変動係数の値は、 $0.11\sim 0.30$ に範囲にあることを確認した。

表 4.3.6-1 物理試験結果の統計処理の一覧

統計処理の項目	統計処理の対象	個数	最大	最小	算術平均	中央値	最頻値	標準偏差	変動係数	尖度	歪度
土粒子の密度 (Mg/m ³)	ベントナイト [クニゲルV1]	10	2.804	2.722	2.759	2.758	-	0.025	0.01	-0.83	0.37
	珪砂 3号 [2mmアンダー]	10	2.652	2.630	2.637	2.633	2.631	0.008	0.00	-0.56	1.10
	珪砂 5号	10	2.651	2.628	2.635	2.632	2.631	0.008	0.00	0.96	1.48
	緩衝材	10	2.731	2.700	2.711	2.711	2.700	0.009	0.00	1.07	0.86
	埋戻し材	10	2.661	2.642	2.651	2.651	2.645	0.006	0.00	-1.10	0.36
	周辺岩盤	50	2.807	2.693	2.762	2.766	2.766	0.031	0.01	-0.99	-0.30
乾燥密度 (Mg/m ³)	緩衝材 乾燥密度1.5Mg/m ³	15	1.509	1.484	1.494	1.496	-	0.007	0.01	-0.13	0.38
	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	39	1.629	1.562	1.591	1.589	1.571	0.017	0.01	-0.07	0.71
	緩衝材 乾燥密度1.7Mg/m ³	39	1.748	1.674	1.698	1.695	1.695	0.017	0.01	0.59	0.80
	埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	25	1.811	1.789	1.797	1.797	1.801	0.006	0.00	0.20	0.89
湿潤密度 (Mg/m ³)	周辺岩盤	50	2.130	1.979	2.057	2.057	2.079	0.030	0.02	0.07	0.08

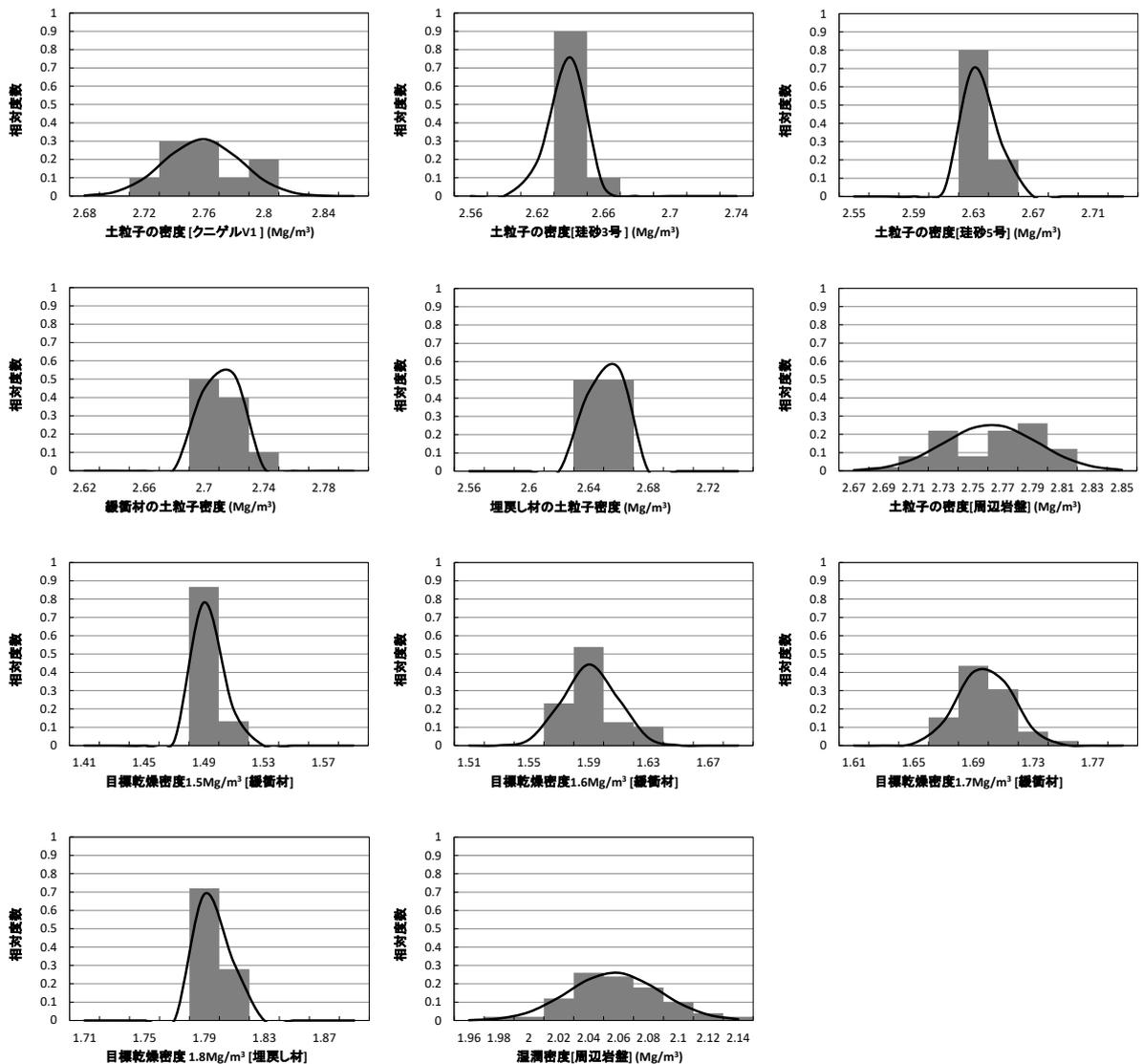


図 4.3.6-1 物理試験結果のヒストグラム

表 4.3.6-2 化学試験結果の統計処理の一覧

統計処理の項目	統計処理の対象	個数	最大	最小	算術平均	中央値	最頻値	標準偏差	変動係数	尖度	歪度
陽イオン交換容量 [CEC] (meq/100g)	浸出陽イオン量Na	15	74	67	69	68	67	2	0.03	0.91	1.45
	浸出陽イオン量Ca	15	49	41	45	44	44	2	0.04	-1.14	0.45
	浸出陽イオン量K	15	1.5	1.1	1.4	1.5	1.5	0.1	0.07	-0.29	-1.13
	浸出陽イオン量Mg	15	2.8	2.0	2.2	2.2	2.2	0.2	0.09	2.49	1.56
モンモリロナイト含有率 (%)	ベントナイト [クニゲルV1]	15	57	53	55	56	56	1	0.02	-0.99	-0.59

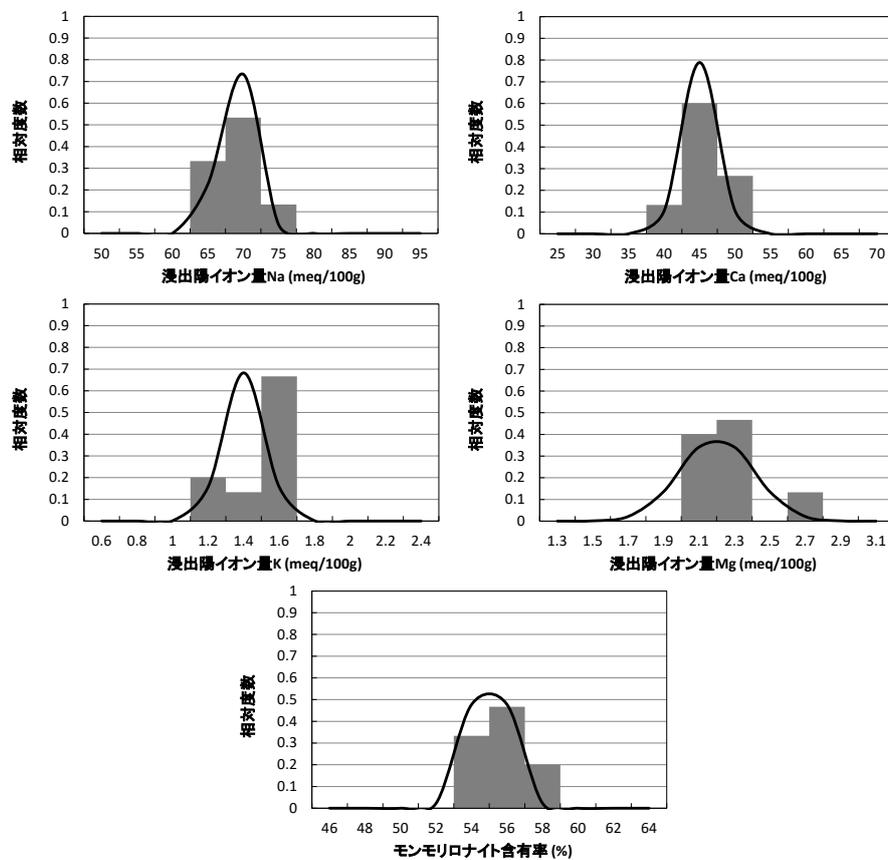


図 4.3.6-2 化学試験結果のヒストグラム

表 4.3.6-3 平衡膨潤圧の統計処理の一覧

統計処理の項目	統計処理の対象	個数	最大	最小	算術平均	中央値	最頻値	標準偏差	変動係数	尖度	歪度
平衡膨潤圧 (MPa)	緩衝材 乾燥密度1.5Mg/m ³	3	0.47	0.37	0.42	0.41	-	0.04	0.10	-	0.59
	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	5	0.70	0.57	0.66	0.67	0.67	0.04	0.06	3.90	-1.83
	緩衝材 乾燥密度1.7Mg/m ³	5	1.37	1.24	1.30	1.28	-	0.04	0.03	-0.06	0.73
	埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	6	0.18	0.13	0.15	0.14	0.14	0.02	0.13	3.56	1.76

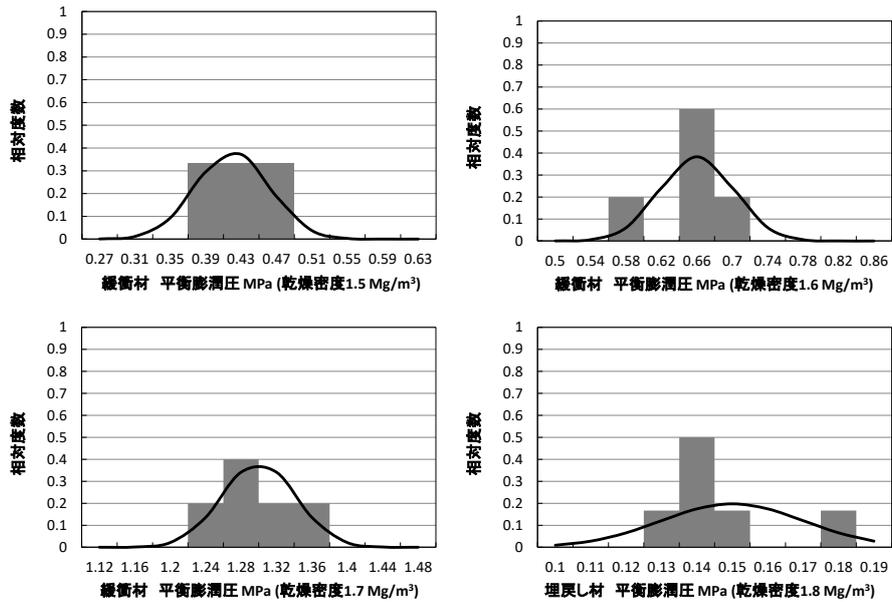


図 4.3.6-3 平衡膨潤圧のヒストグラム

表 4.3.6-4 熱特性試験結果の統計処理の一覧

統計処理の項目	統計処理の対象	個数	最大	最小	算術平均	中央値	最頻値	標準偏差	変動係数	尖度	歪度
比熱 (J/kg・K)	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	10	962	828	884	879	-	36	0.04	1.02	0.76
	埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	10	861	790	818	816	816	22	0.03	-0.32	1.00
	周辺岩盤	10	909	811	875	885	901	30	0.03	0.33	-1.08
熱膨張率 (μ/K)	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	10	35	28	31	31	30	2	0.07	-0.47	0.41
	埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³	10	17	15	16	16	16	1	0.06	-1.39	0.00
	周辺岩盤	10	9.0	5.4	6.8	6.6	6.6	1.0	0.15	1.95	1.27

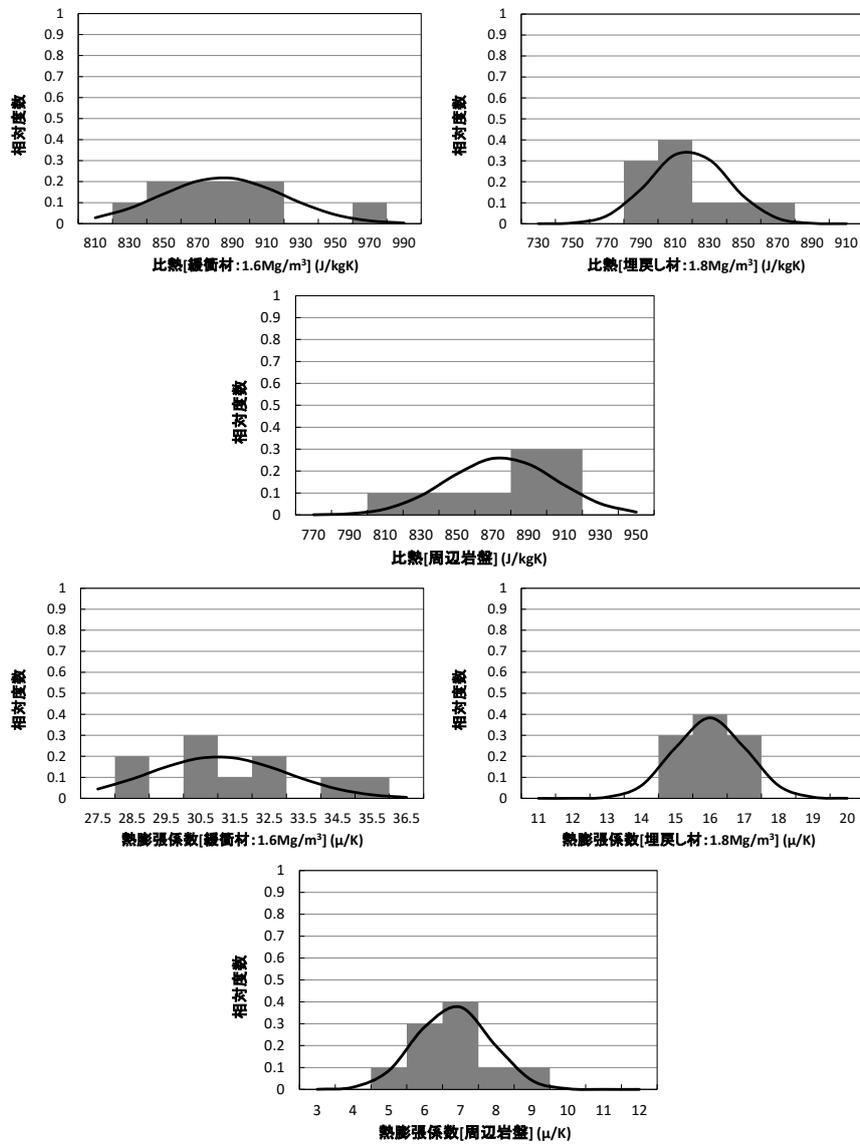


図 4.3.6-4 熱特性試験結果のヒストグラム

表 4.3.6-5 力学特性試験結果の統計処理の一覧

統計処理の項目	統計処理の対象		個数	最大	最小	算術平均	中央値	最頻値	標準偏差	変動係数	尖度	歪度
一軸圧縮試験	埋戻し材 乾燥密度 1.8Mg/m ³	E ₅₀ (MPa)	25	44	24	32	32	30	4	0.13	0.93	0.43
		ν_{50}	13	0.57	0.28	0.48	0.49	0.55	0.09	0.19	-0.07	-0.93
圧密排水 (CD)三軸圧縮 試験	周辺岩盤 [飽和]	E ₅₀ (MPa)	8	2721	890	1980	1924	-	638	0.32	-1.20	-0.24
		ν_{50}	8	0.54	0.06	0.24	0.21	0.21	0.15	0.63	0.75	0.97
	周辺岩盤 [乾燥]	E ₅₀ (MPa)	8	4000	1522	2838	2833	-	743	0.26	-0.32	-0.26
		ν_{50}	8	0.28	0.01	0.14	0.15	0.14	0.08	0.57	0.84	-0.03
圧縮指数	周辺岩盤		5	0.457	0.356	0.400	0.401	-	0.033	0.080	1.22	0.72
一軸引張り 強さ(MPa)	周辺岩盤		5	0.819	0.275	0.496	0.439	-	0.206	0.42	-1.34	0.65

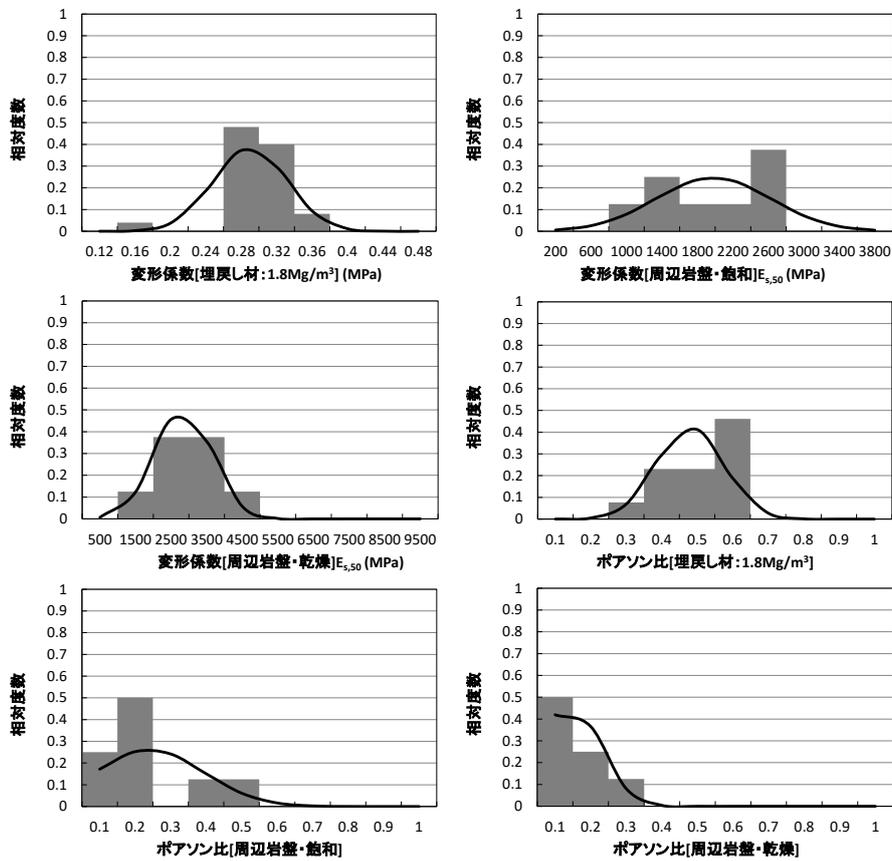


図 4.3.6-5 力学特性試験結果のヒストグラム

表 4.3.6-6 物性値と飽和度との関数の統計処理の一覧

統計処理の項目	統計処理の対象		個数	最大	最小	算術平均	中央値	最頻値	標準偏差	変動係数	尖度	歪度
保水特性	緩衝材(静的締固め) 乾燥密度1.6Mg/m ³		18	1.20	0.71	0.99	1.00	0.99	0.12	0.12	0.98	-0.85
	埋戻し材(静的締固め) 乾燥密度1.8Mg/m ³		28	1.76	0.00	1.05	1.04	-	0.31	0.30	4.82	-0.58
	周辺岩盤(排水過程)		36	1.29	0.19	0.95	0.97	-	0.20	0.21	4.68	-1.52
熱伝導率	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³		14	1.29	0.77	1.01	0.97	0.90	0.15	0.15	-0.83	0.46
	埋戻し材 乾燥密度1.8Mg/m ³		14	1.29	0.69	1.01	1.00	0.99	0.16	0.16	0.27	-0.20
	周辺岩盤		48	1.39	0.72	1.01	1.02	0.97	0.12	0.11	1.99	0.18
一軸圧縮試験	緩衝材 乾燥密度1.6Mg/m ³	E	39	1.47	0.55	0.99	0.99	0.98	0.18	0.18	0.78	0.00
		ν	15	1.37	0.78	0.99	0.92	0.79	0.19	0.19	-0.83	0.70

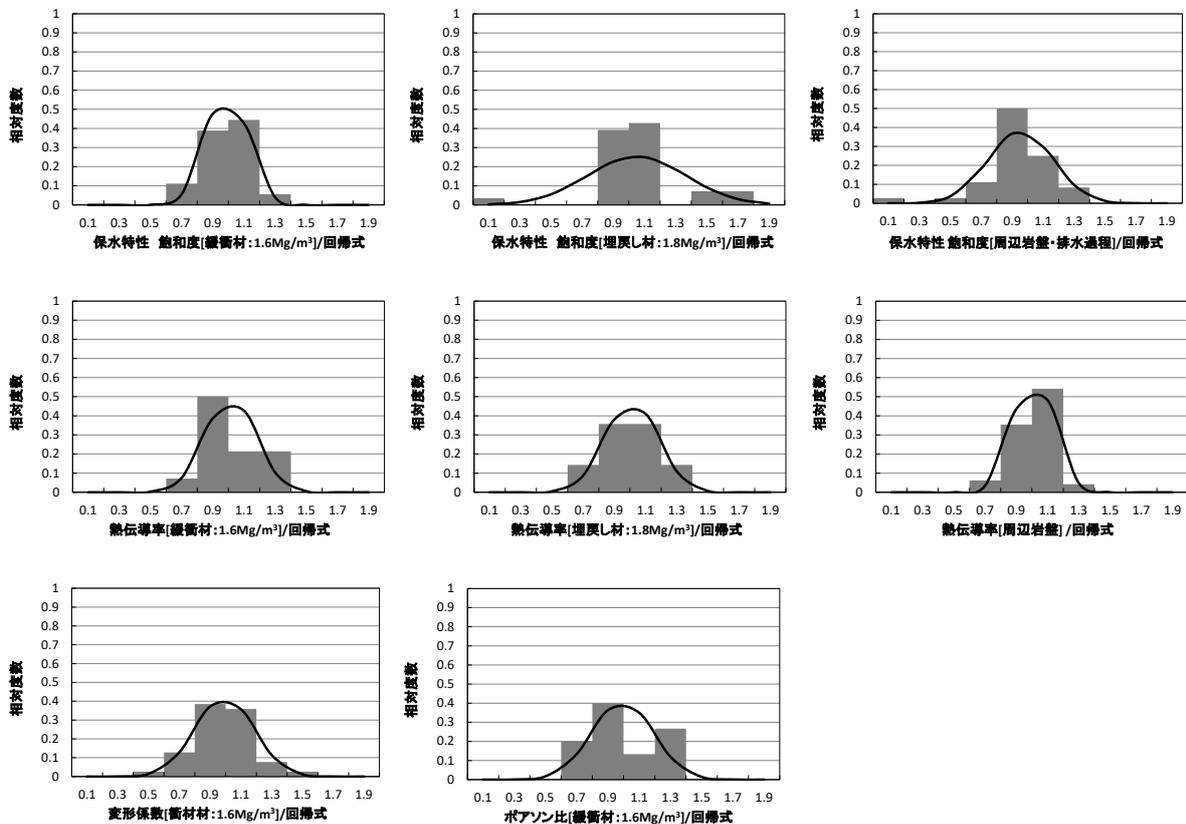


図 4.3.6-6 物性値と飽和度との関係を統計処理したヒストグラム

4.3.7 解析用物性値

平成 27～29 年度に実施した試験を基に、解析用物性値を更新した。膨潤に関する物性値の一覧を表 4.3.7-1、解析物性値の一覧を表 4.3.7-2 に示す。

表 4.3.7-1 膨潤に関する解析物性値の一覧

膨潤に関するパラメータ	解析物性値	解析物性値の算定方法
電子素量 (C)	1.62×10^{-19}	文献値
Boltzman定数 (J/K)	1.38×10^{-23}	文献値
Hamaker定数 (J)	2.2×10^{-22}	文献値
Avogadro's定数	6.023×10^{-23}	文献値
陽イオン交換容量 (mequiv./g)	1.172	試験結果の算術平均値
交換性Naイオン量 (mequiv./g)	0.688	試験結果の算術平均値
交換性Caイオン量 (mequiv./g)	0.448	試験結果の算術平均値
交換性Kイオン量 (mequiv./g)	0.014	試験結果の算術平均値
交換性Mgイオン量 (mequiv./g)	0.022	試験結果の算術平均値
NaイオンおよびKイオンのイオン価	1	文献値
CaイオンおよびMgイオンのイオン価	2	文献値
Naイオンの非水和イオン半径 (nm)	0.098	文献値
Caイオンの非水和イオン半径 (nm)	0.115	文献値
Kイオンの非水和イオン半径 (nm)	0.133	文献値
Mgイオンの非水和イオン半径 (nm)	0.085	文献値
モンモリロナイト粒子の厚さ (m)	9.60×10^{-10}	文献値
モンモリロナイト粒子の密度 (Mg/m^3)	2.77	文献値
ベントナイトの密度 (Mg/m^3)	2.76	試験結果の算術平均値
モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子の密度 (Mg/m^3)	2.75	試験結果の算術平均値
砂の土粒子密度 (Mg/m^3)	2.64	試験結果の算術平均値
緩衝材の乾燥密度 (Mg/m^3)	1.591	試験結果の算術平均値
モンモリロナイトの比表面積 (m^2/g)	810	文献値
モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積 (m^2/g)	0	文献値
ベントナイトのモンモリロナイト含有率 (%)	55.4	試験結果の算術平均値
ベントナイト配合率 (%)	70.0	模型試験の条件
間隙水の誘電率 ($\text{C}^2/\text{J}/\text{m}$)	$80 \times 8.8542 \times 10^{-12}$	文献値
間隙水のイオン濃度 (mol/m^3)	35.2	文献値
絶対温度 (K)	298.15	文献値
膨潤圧 (MPa)	0.66	試験結果の算術平均値

表 4.3.7-2 解析物性値の一覧

解析パラメータ	解析物性値			解析物性値の 算定方法
	緩衝材	埋戻し材	周辺岩盤	
間隙率	0.413	0.322	0.393	試験結果の算術平均値
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.591	1.797	1.675	試験結果の算術平均値
固相密度 (Mg/m ³)	2.711	2.651	2.762	試験結果の算術平均値
初期サクシヨン55MPa の飽和度 (%)	25.0	6.1	20.5	最小二乗法による回帰式
水分特性曲線 a (MPa ⁻¹)	0.244	2.978	13.6	最小二乗法による回帰式
水分特性曲線 n	1.53	1.55	1.24	最小二乗法による回帰式
透水係数 (m/s)	5.87×10^{-13}	8.80×10^{-12}	6.10×10^{-11}	試験結果の算術平均値
緩衝材のヤング率 (MPa)	$E=171-1.74 S_r$ $E=10[S_r>92(\%)]$			最小二乗法による回帰式
緩衝材のポアソン比	乾燥時 0.23 飽和時 0.49			最小二乗法による回帰式
ヤング率 (GPa)		0.03	1.98	試験結果の算術平均値
ポアソン比		0.48	0.24	試験結果の算術平均値
膨潤圧 (MPa)	0.66	0.15	-	試験結果の算術平均値
乾燥時の熱伝導率 (W/m/K)	0.41	0.76	0.400	最小二乗法による回帰式
飽和時の熱伝導率 (W/m/K)	1.95	3.58	1.17	最小二乗法による回帰式
比熱 (J/kg/K)	884	818	875	試験結果の算術平均値
熱膨張係数 (K ⁻¹)	3.1×10^{-5}	1.6×10^{-5}	6.8×10^{-6}	試験結果の算術平均値

物性値の決定に際しての根拠

試験結果の算術平均値 : 算術平均、中央値、最頻値の差異が小さいため算術平均値
 最小二乗法による回帰式 : 飽和度依存性により関数で回帰

(1) 平衡膨潤圧（緩衝材、埋戻し材）

緩衝材、埋戻し材の膨潤圧については、平衡膨潤圧の算術平均値とした。経過時間と膨潤圧の関係を図 4.3.7-1～図 4.3.7-2 に示す。

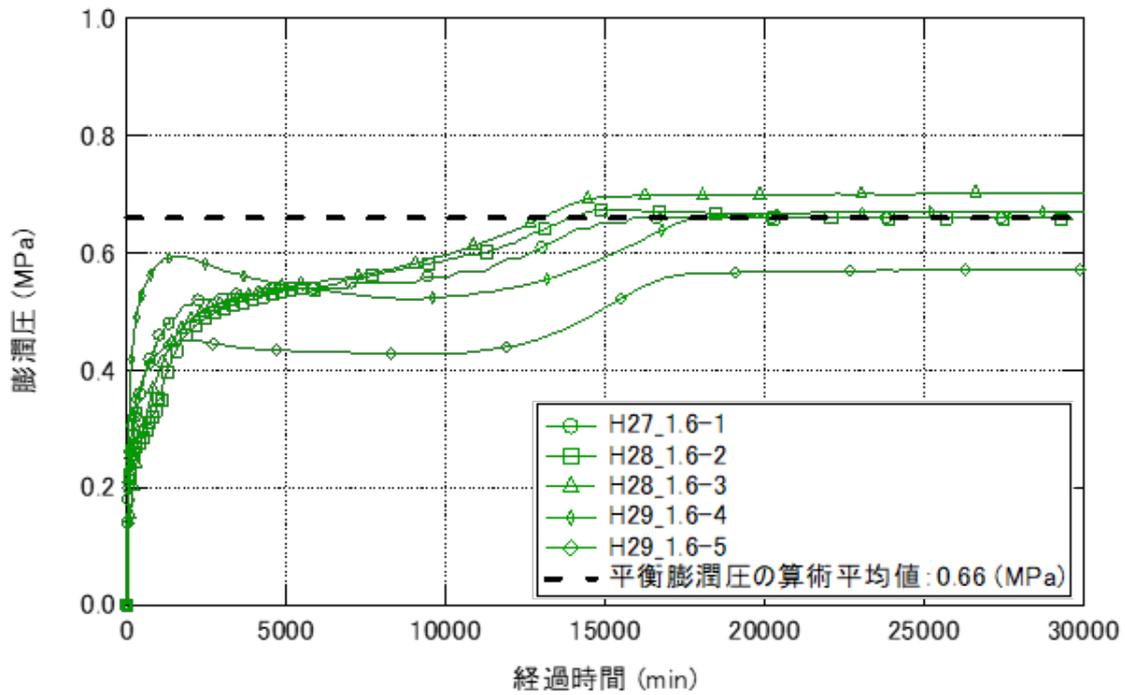


図 4.3.7-1 緩衝材の膨潤圧（作製時の目標乾燥密度：1.6Mg/m³）

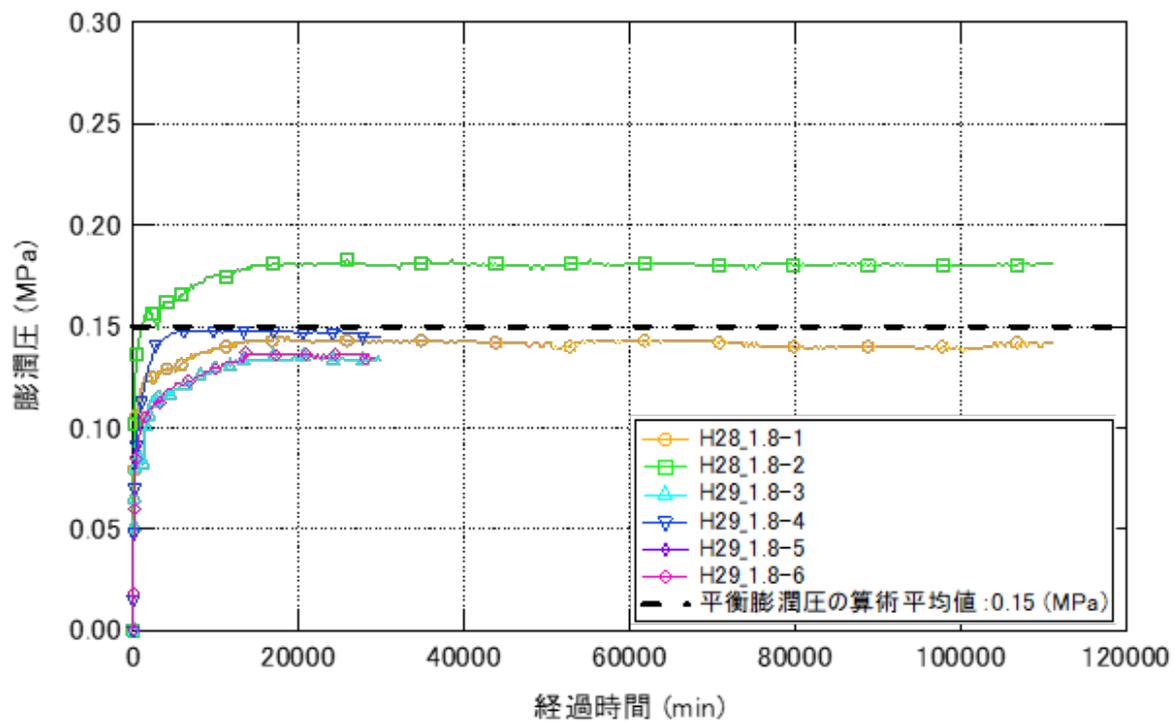


図 4.3.7-2 埋戻し材の膨潤圧（作製時の目標乾燥密度：1.8Mg/m³）

(2) 透水係数

透水係数の解析用物性値を表 4.3.7-3 に示す。透水係数の解析用物性値は、測定結果の平均値とした。

表 4.3.7-3 透水係数の解析用物性値

	緩衝材 乾燥密度 1.6(Mg/m ³)	埋戻し材 乾燥密度 1.8(Mg/m ³)	周辺岩盤
透水係数 (m/s)	5.87×10^{-13}	8.80×10^{-12}	6.10×10^{-11}

(3) 保水特性

保水特性の解析用物性値を表 4.3.7-4 に、化学ポテンシャルと飽和度の関係を図 4.3.7-3～図 4.3.7-5 に示す。

保水特性の解析用物性値は、van Genuchten の回帰式[13]によるパラメータとし、初期飽和度は、回帰式に初期サクションとして 55MPa を代入した値とした。

サイクロメータで測定した、化学ポテンシャルと飽和度の関係を取りまとめ、緩衝材及び周辺岩盤の保水特性とした。なお、保水特性は、van Genuchten の(4.3.7 1)により回帰を行った。

$$S_e = \{1 + (\alpha h)^n\}^{-m} \quad \text{式(4.3.7-1)}$$

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad \text{式(4.3.7-2)}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \text{式(4.3.7-3)}$$

ここに、

- S_e : 有効飽和度
- θ : 体積含水率(%)
- θ_r : 最小容水量 (本報告書では 0%と仮定)
- α : 定数
- n : 定数
- h : 化学ポテンシャル(MPa)

なお、本報告書では、最小容水量を 0%と仮定しており、有効飽和度 S_e =飽和度 S_r と表記している。

表 4.3.7-4 保水特性の解析用物性値

van Genuchtenの式 パラメータ	緩衝材 乾燥密度 1.6(Mg/m ³)	埋戻し材 乾燥密度 1.8(Mg/m ³)	周辺岩盤
α	0.244	2.978	13.6
n	1.53	1.55	1.24
m= 1-1/n	0.347	0.354	0.193
初期飽和度 - $\psi=55(\text{MPa})$ の値	25.0	6.1	20.5

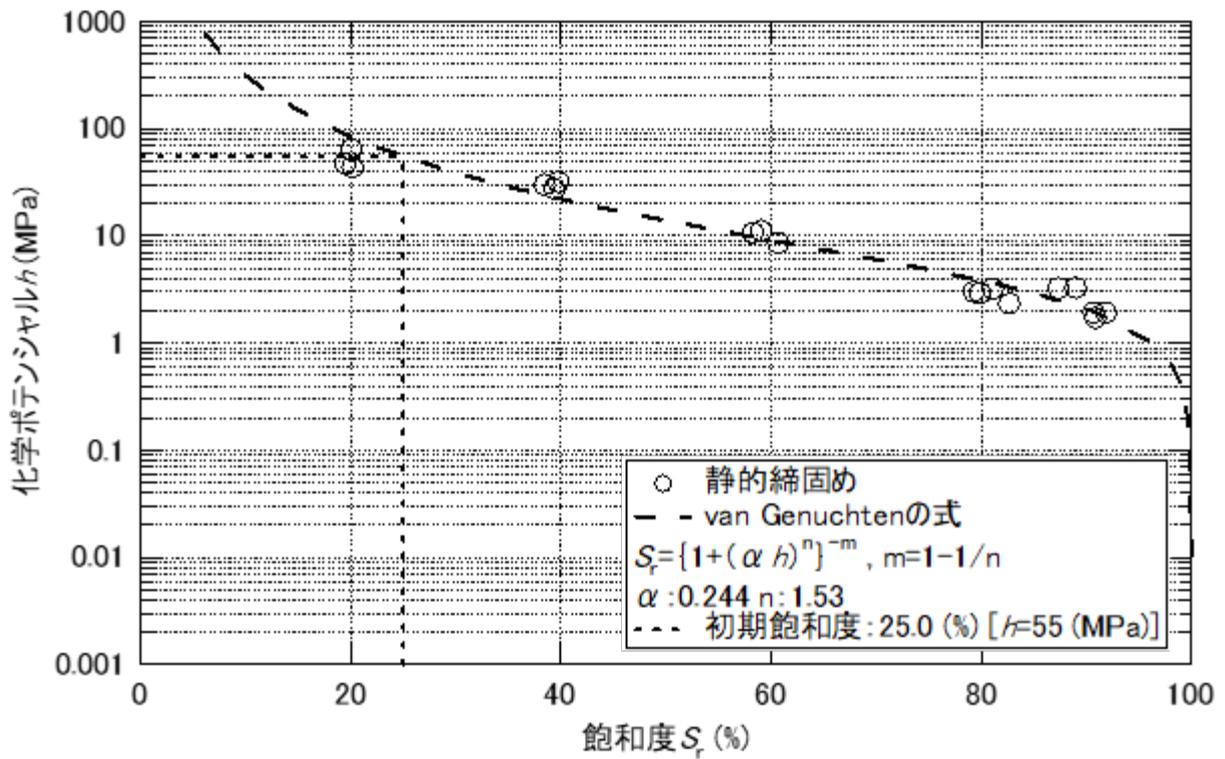


図 4.3.7-3 緩衝材の保水特性 (静的締固め)

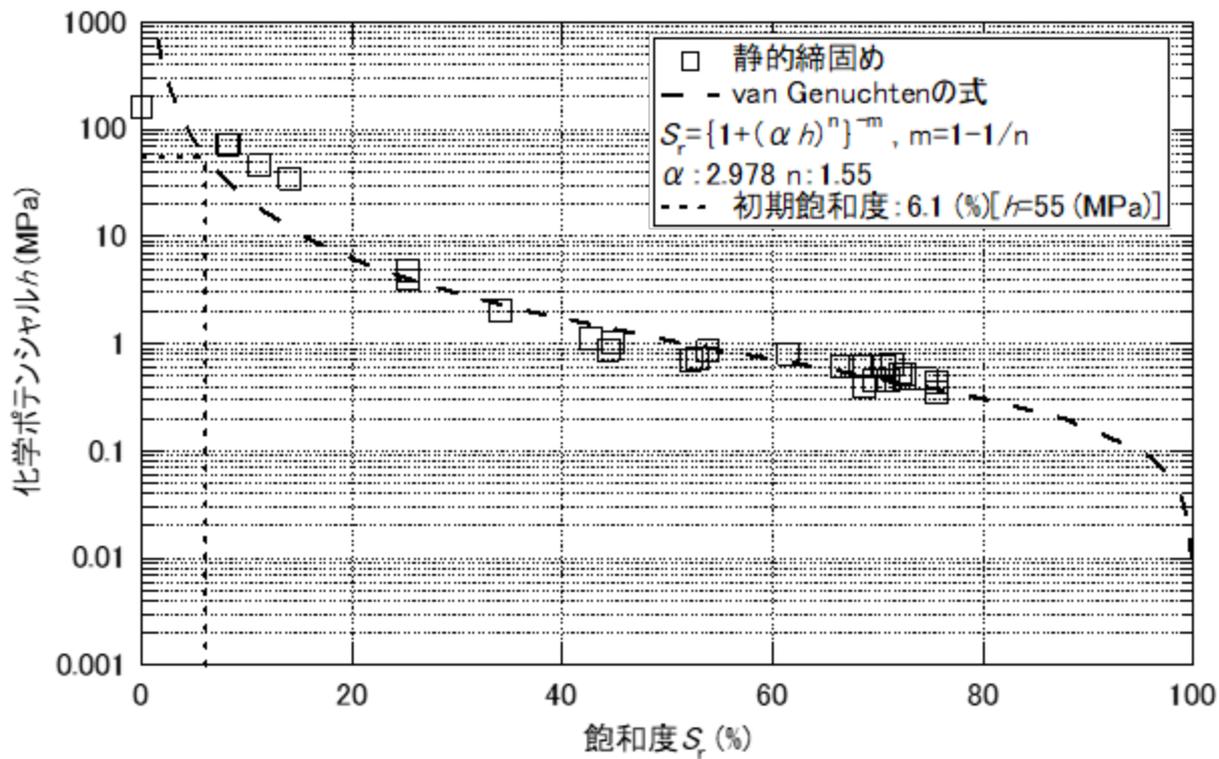


図 4.3.7-4 埋戻し材の保水特性 (静的締固め)

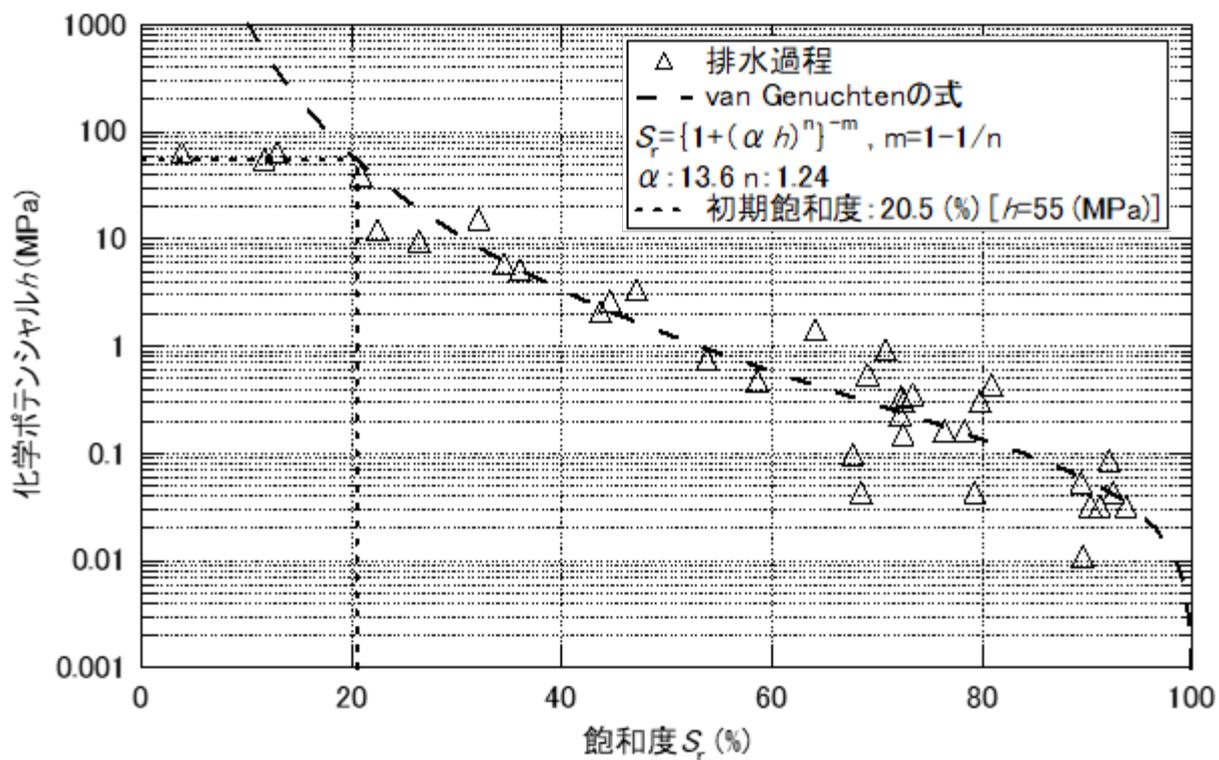


図 4.3.7-5 周辺岩盤の保水特性 (排水過程)

(4) 熱伝導率

熱伝導率の解析用物性値を表 4.3.7-5 に、図 4.3.7-6～図 4.3.7-8 に示す。

熱伝導率の解析用物性値については、飽和度依存性を考慮した一次回帰式とした。緩衝材と埋戻し材の熱伝導率は、飽和度 20%で以下ではほぼ一定値であるが、飽和度 0～100%の範囲と熱伝導率の関係から一次回帰した。

表 4.3.7-5 熱伝導率の解析用物性値

熱伝導率 (W/m/K)	緩衝材 乾燥密度 1.6(Mg/m ³)	埋戻し材 乾燥密度 1.8(Mg/m ³)	周辺岩盤
個数	14	14	48
λ_{dry}	0.41	0.76	0.40
λ_{sat}	1.95	3.58	1.17

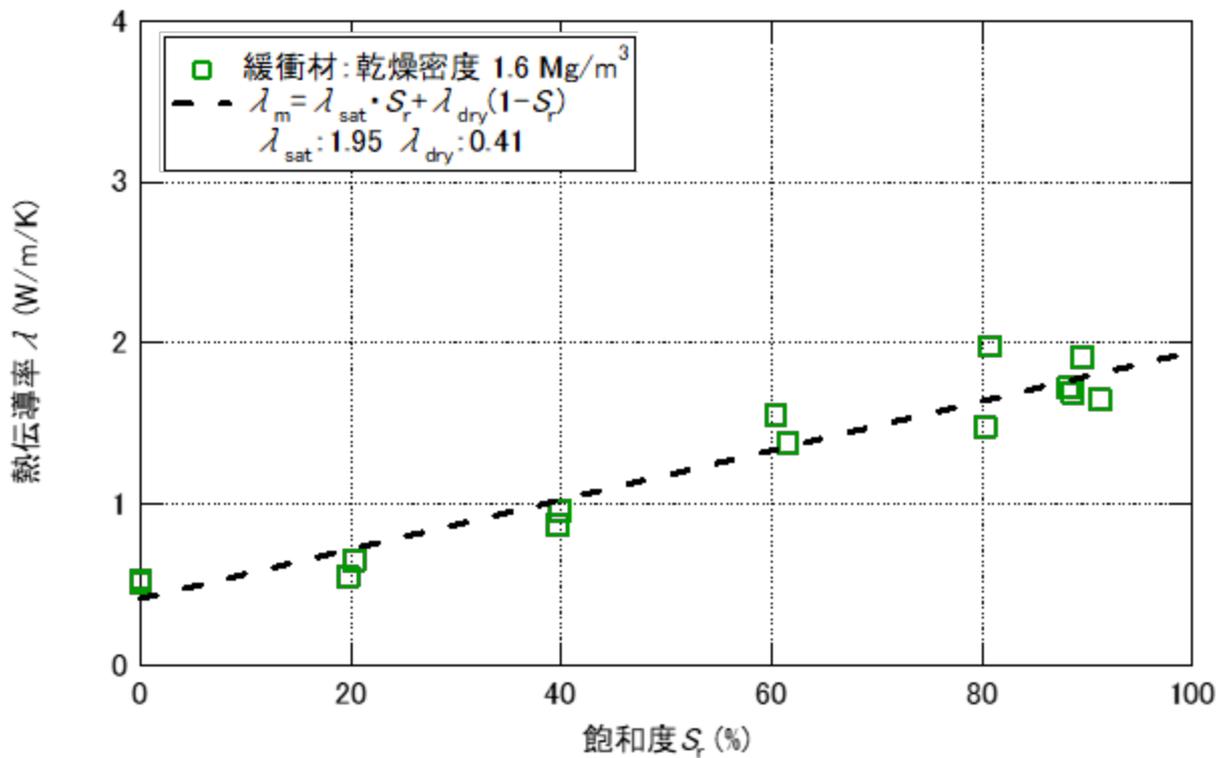


図 4.3.7-6 緩衝材の熱伝導率

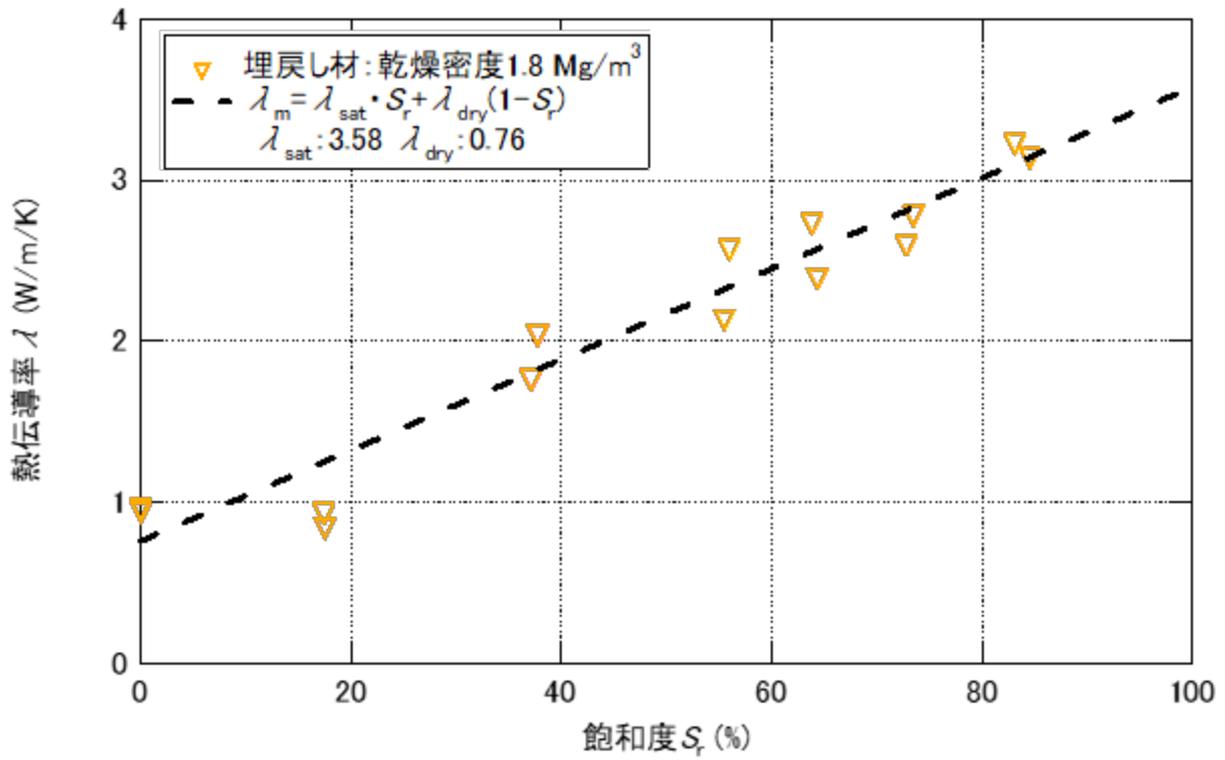


図 4.3.7-7 埋戻し材の熱伝導率

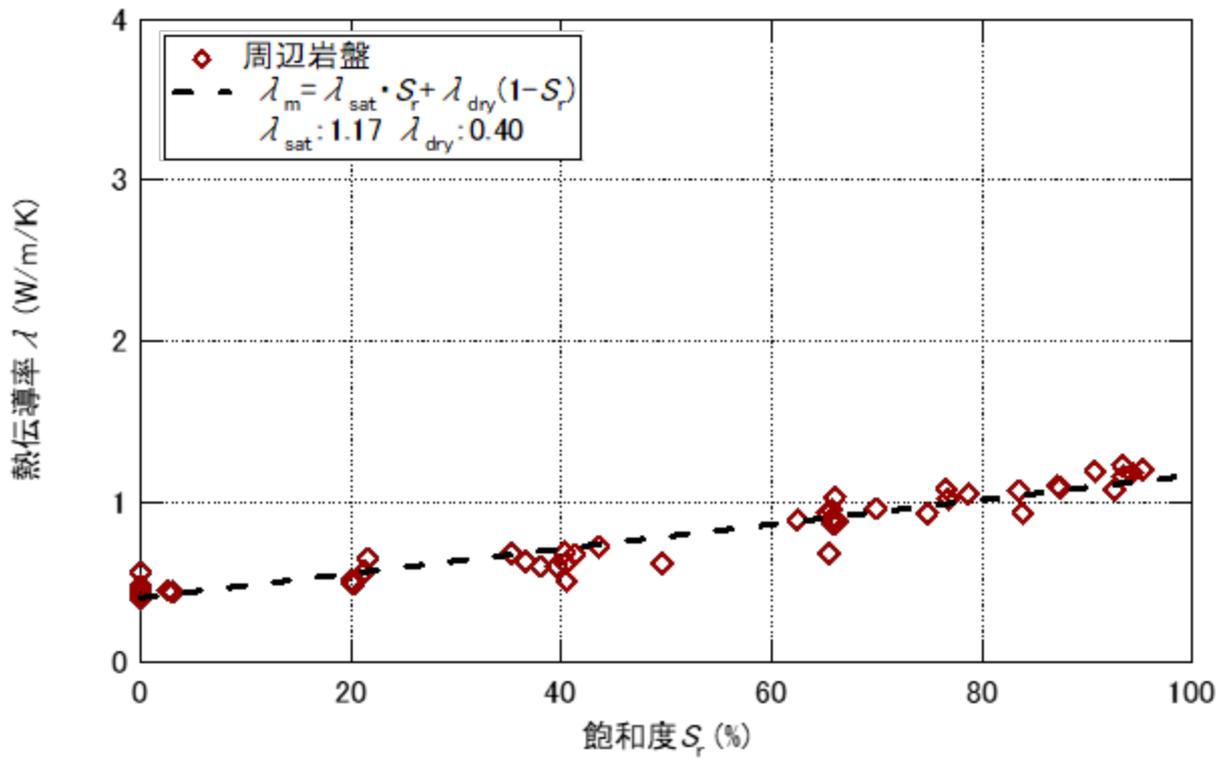


図 4.3.7-8 周辺岩盤の熱伝導率

(5) 熱膨張係数

ひずみゲージを貼付した供試体を加熱して、熱膨張ひずみと温度の関係から最小二乗法を用いて算定した傾きを熱膨張係数とした。乾燥密度 1.6Mg/m^3 の緩衝材では遠心模型試験による結果を考慮して $30\sim 60^\circ\text{C}$ の温度範囲から熱膨張係数を算定した。埋戻し材及び周辺岩盤については、熱膨張ひずみと温度の関係がほぼ線形であることから、すべての温度範囲から熱膨張係数を算定した (図 4.3.4-16、図 4.3.4-17)。算定した熱膨張係数を表 4.3.7-6 に示す。乾燥密度 1.6Mg/m^3 の緩衝材の熱膨張ひずみと温度の関係を図 4.3.7-9 に示す。

表 4.3.7-6 熱膨張係数

供試体 番号	緩衝材 乾燥密度 $1.6 (\text{Mg/m}^3)$	埋戻し材 乾燥密度 $1.8 (\text{Mg/m}^3)$	周辺岩盤
1	35	17	7.9
2	30	15	9.0
3	30	17	6.8
4	28	16	6.4
5	32	16	6.1
6	32	17	5.4
7	31	15	6.0
8	34	15	6.6
9	28	16	6.6
10	30	16	6.7
個数	10	10	10
平均 ($\mu/^\circ\text{C}$)	31	16	6.8
中央値 ($\mu/^\circ\text{C}$)	31	16	6.6
標準偏差 ($\mu/^\circ\text{C}$)	2.2	0.8	1.0

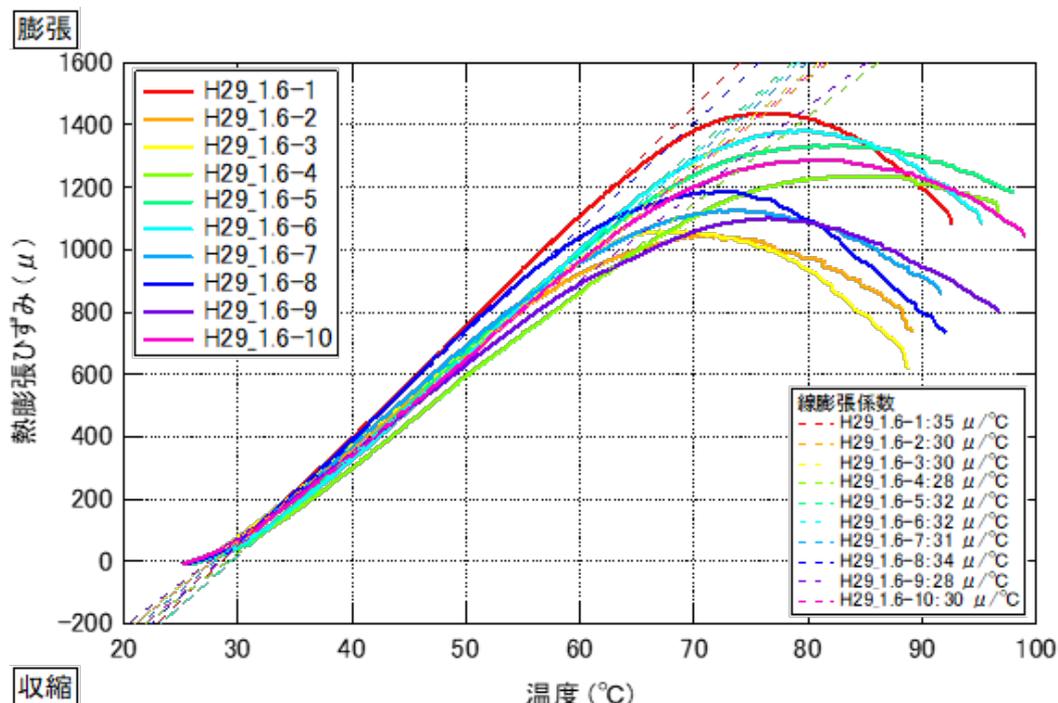


図 4.3.7-9 緩衝材の平均熱膨張係数 (解析用物性値)

(6) 変形特性（ヤング率及びポアソン比）

変形特性の解析用物性値を図 4.3.7-10～図 4.3.7-15 に示す。

緩衝材の解析用物性値については、飽和度依存性を考慮した一次回帰式とし、埋戻し材及び周辺岩盤においては、飽和度依存性が明瞭に確認できないことから測定結果の算術平均値とした。

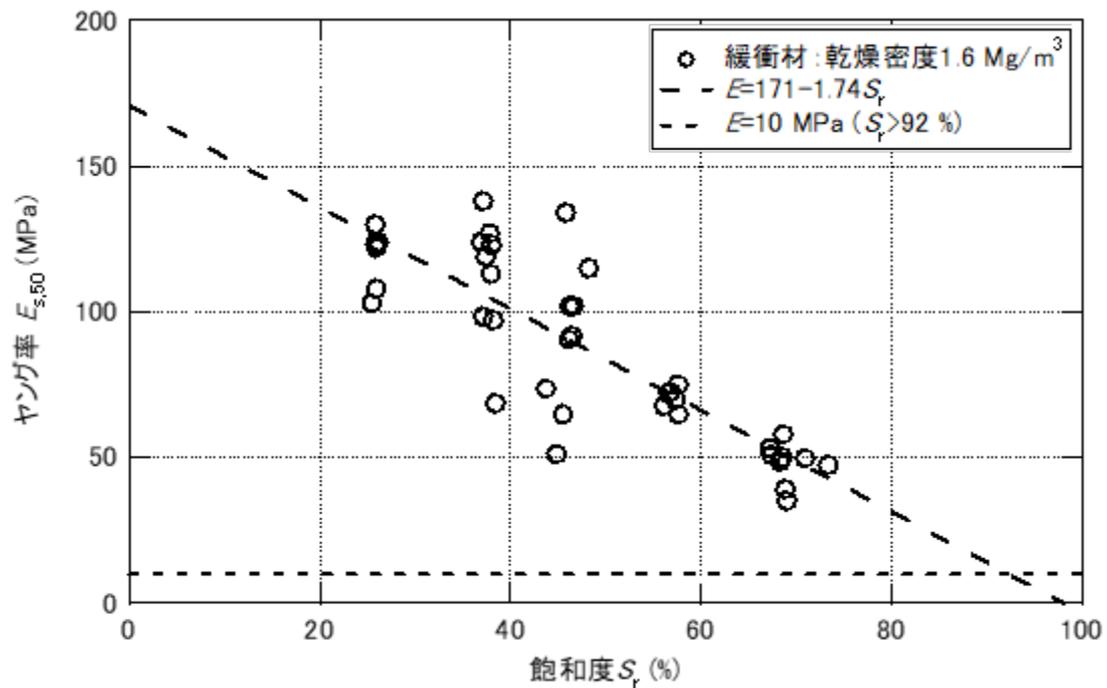


図 4.3.7-10 緩衝材のヤング率（解析用物性値）

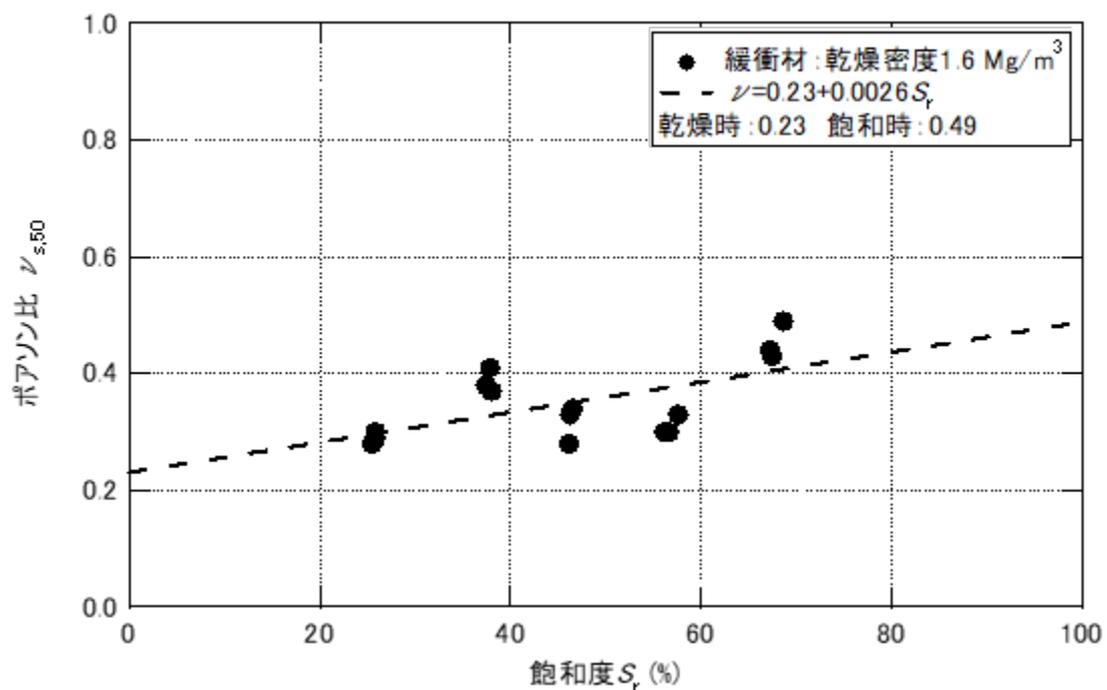


図 4.3.7-11 緩衝材のポアソン比（解析用物性値）

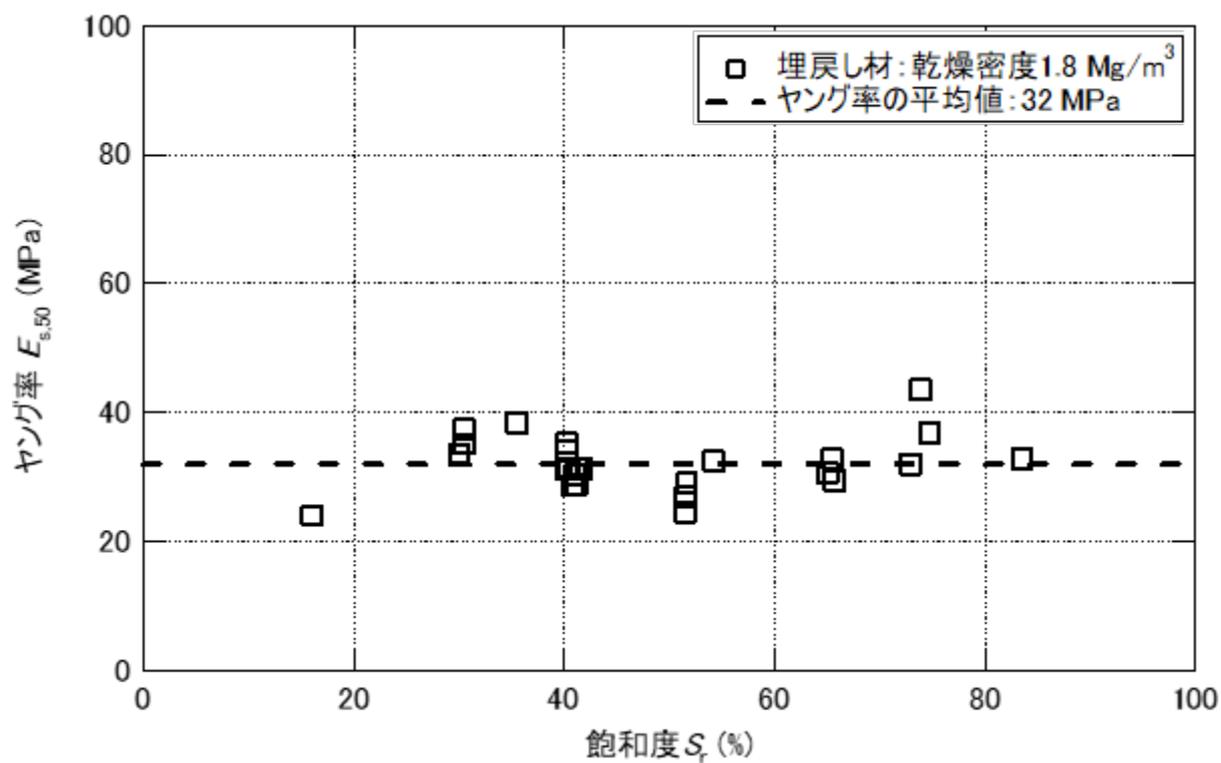


図 4.3.7-12 埋戻し材のヤング率

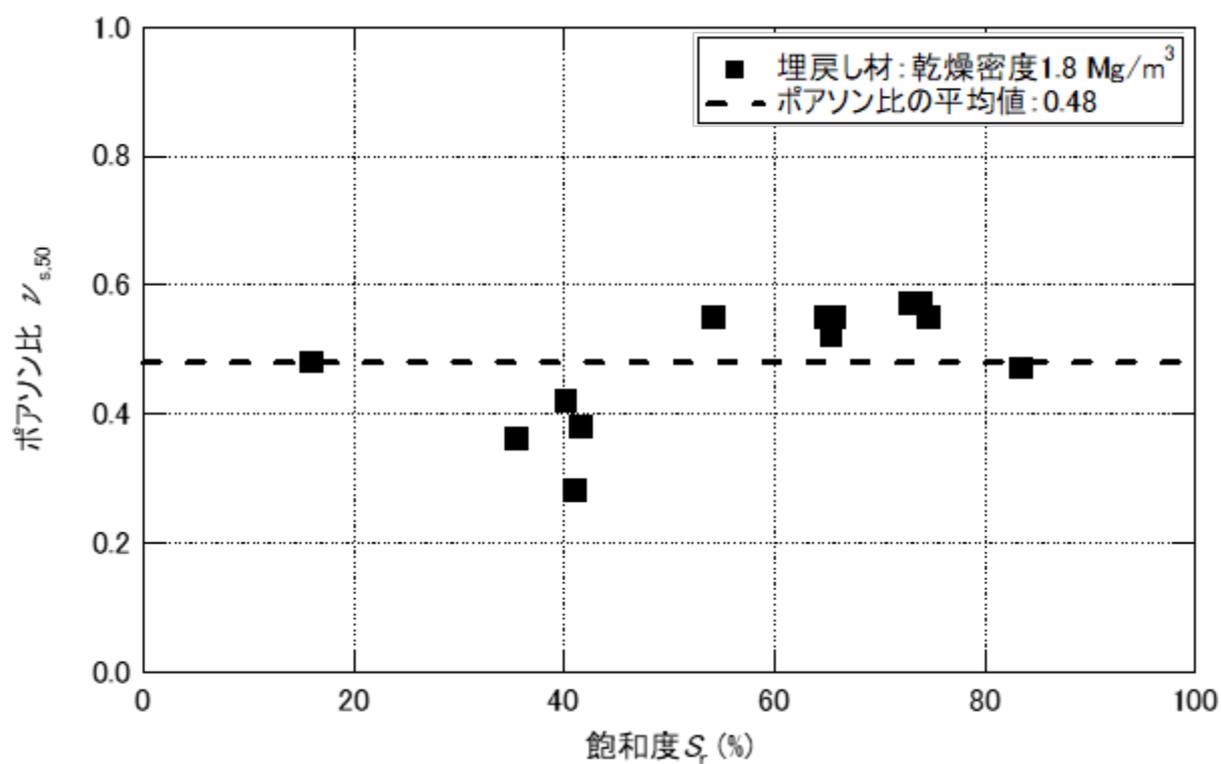


図 4.3.7-13 埋戻し材のポアソン比

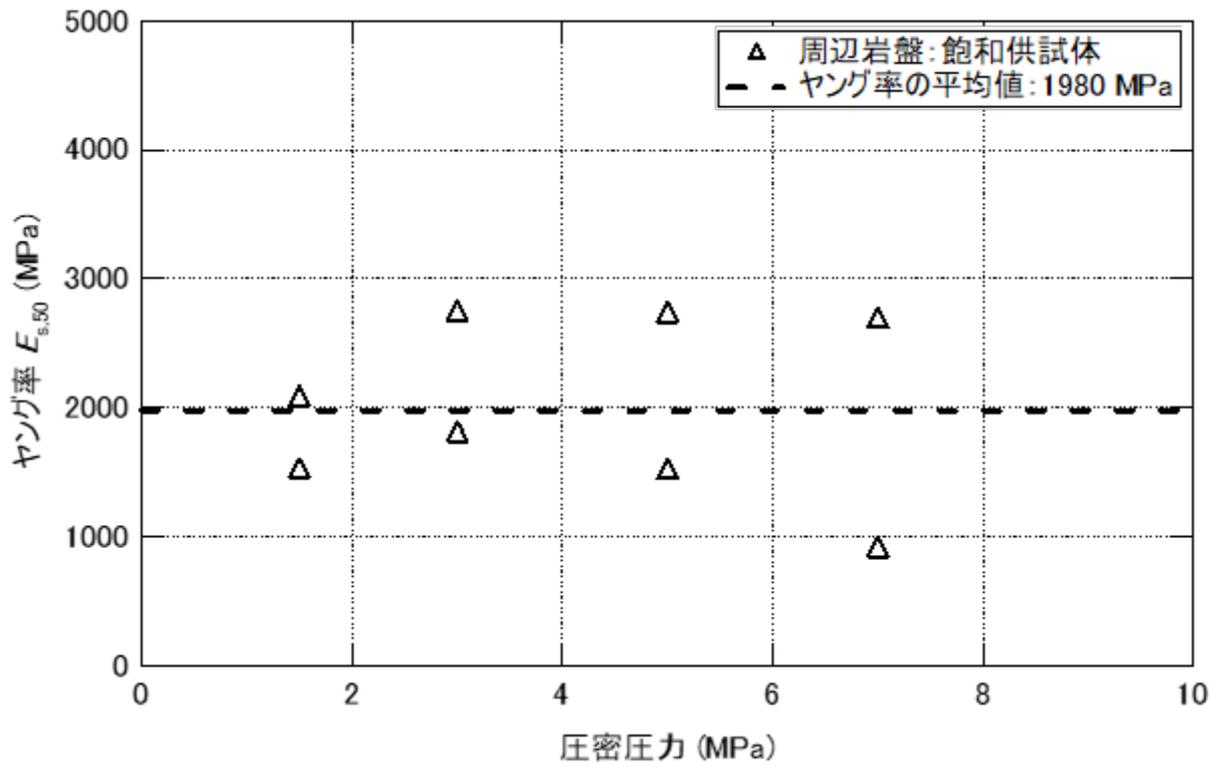


図 4.3.7-14 周辺岩盤のヤング率

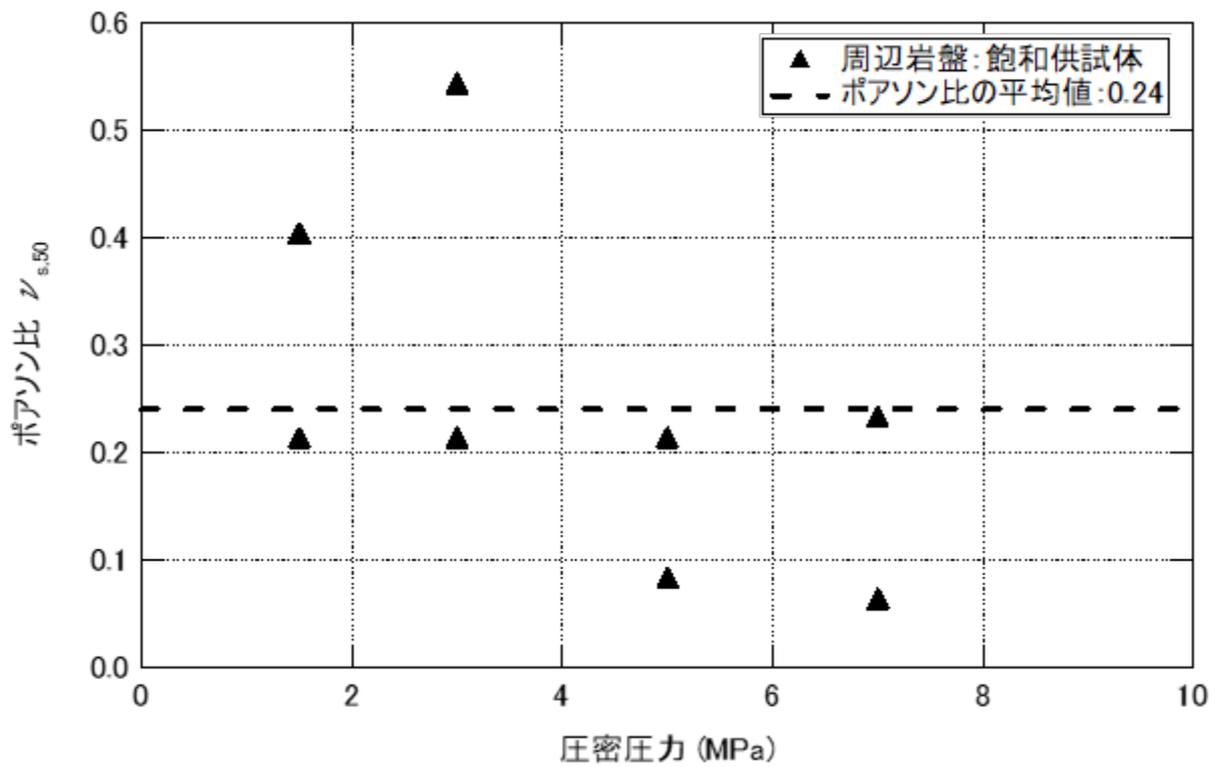


図 4.3.7-15 周辺岩盤のポアソン比

4.4 H29 年度のまとめ

(1) 物理・化学特性

クニゲル V1、ケイ砂、緩衝材、埋戻し材に対して土粒子の密度試験結果を追加取得した。クニゲル V1 に対してメチレンブルー吸着量の測定を追加してモンモリロナイト含有率を算定した。Na、Ca、M、K の陽イオン交換容量を追加取得した。

(2) 膨潤特性

緩衝材と埋戻し材に対して膨潤圧試験を追加し、平衡膨潤圧のばらつきが小さいことを確認した。ベントナイトのモンモリロナイト含有率を考慮すると、取得した平衡膨潤圧と JAEA のデータベースを比較して調和的であることを確認した。

(3) 水分特性

変水位透水試験を実施して緩衝材と埋戻し材の透水係数を追加した。ベントナイトのモンモリロナイト含有率を考慮すると、取得した透水係数と JAEA のデータベースを比較して調和的であることを確認した。

緩衝材と埋戻し材の保水特性試験については、透水試験終了後の飽和した供試体を使用して飽和度 80%以上の化学ポテンシャルの結果を取得した。

(4) 熱特性

比熱については、統計処理が可能な数量を取得し、ばらつきが小さいことを確認した。緩衝材と埋戻し材では、温度の依存性が小さいことを確認した。

熱膨張測定については解析用物性値を取得し、ばらつきが小さいことを確認した。緩衝材の熱膨張ひずみが 60°C程度から収縮傾向を示すことを確認した。埋戻し材と周辺岩盤では、熱膨張ひずみと温度の関係が線形であることを確認した。

(5) 力学特性

緩衝材に対して圧密非排水三軸圧縮試験を実施して非排水強度、変形特性を算定した。

埋戻し材に対して圧密非排水三軸圧縮試験を実施して非排水強度、変形特性を算定した。

乾燥状態の周辺岩盤に対して圧密排水三軸圧縮試験を実施して、湿潤状態の排水強度・変形特性と比較して飽和度依存性があることを確認した。

飽和状態の周辺岩盤の圧密排水三軸クリープ試験を実施して、時間依存性の物性値を取得した。

水平方向から採取した湿潤状態の周辺岩盤に対して圧密排水三軸圧縮試験を実施して、強度・変形特性の異方性が小さいことを確認した。

80°Cに加熱した湿潤状態の周辺岩盤に対して圧密排水三軸圧縮試験を実施して、強度・変形特性の温度依存性が小さいことを確認した。

(6) 統計処理

H27～H29 年に実施した要素試験に対して統計処理を実施して物性値のばらつきを変動係数により比較した。

(7) 解析用物性値

H27～H29 年に実施した要素試験から解析用物性値と標準偏差を算定して、解析用物性値の設定方法を示した。

第4章 参考文献

- [1] 鈴木英明, 藤田朝雄, 緩衝材の膨潤特性, 核燃料開発機構, JNC TN8400 99-038, 1999.
- [2] 菊池広人, 棚井憲治, 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験, 核燃料開発機構, JNC TN8430 2004-005, 2005.
- [3] 鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬, 緩衝材の特性試験 (I), 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN8410 92-057, 1992.
- [4] 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する委員会, 低透水性材料に対する透水試験方法 (基準案), 第60回地盤工学シンポジウム, 2016.
- [5] 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) -室内締固め供試体に対する剛性容器を用いた方法-, 電力中央研究所報告, N13005, 2013.
- [6] 長谷川琢磨, ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所報告, N04005, 2004.
- [7] 松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明, 緩衝材の飽和透水係数, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN8410 97-296, 1997.
- [8] 川崎了, 中川加明一郎, 小泉和広, 堆積岩の圧密現象に着目した透水係数推定の試み, 応用地質, Vol.39, No.3, pp.273-281, 1998.
- [9] 長崎誠三, 高木豊, 高温に於ける比熱の測定法について, 応用物理, 17, 5, 8-12, 1948.
- [10] 平野公平, 岡田哲実, 澤田昌孝, 高倉望, 池野谷尚史, 谷和夫, 田中悠一, 温度が変化する条件下における岩盤内部のひずみ計測結果の補正, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.
- [11] 澤田昌孝, 岡田哲実, 堆積軟岩における大規模空洞の掘削時挙動・長期挙動の解析的検討, 電力中央研究所報告, N10002, 2010.
- [12] 岡田哲実, 高温環境下における堆積軟岩の力学特性 (その1) -三軸圧縮試験による温度依存性の把握-, 電力中央研究所報告, N04026, 2005.
- [13] V. Genuchten, A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 5, 892-898, 1980.

第5章 数値解析

5.1 背景・目的

5.1.1 背景

人工バリア定置後のニアフィールドでは、廃棄体の発熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤などの現象が相互に影響する熱・水・応力連成現象（THM 連成現象）が発生する。このような連成現象を予測評価することは、ニアフィールド環境の明確化、処分孔・緩衝材の設計の観点から重要な課題の一つである。評価期間が長期に及ぶことから数値解析が不可欠となる。この連成現象の長期予測は世界的な課題となっている。そのため DECOVALEX[1]など、この課題の解決を目的とした国際共同研究が実施されている。電力中央研究所においても、緩衝材の膨潤特性に対する評価式を多様な条件の室内試験から導き、その評価式を数値モデル化した THM 連成解析コード LOSTUF[2]を開発した。

長期にわたるニアフィールドの挙動評価を行う数値解析モデルは、そのパラメータ取得やモデルの妥当性検証が必要不可欠である。パラメータ取得には、ニアフィールドを構成する種々の材料の力学・透水・熱特性を把握する試験、また、解析モデルの検証には主として実スケールのプロトタイプテストとのヒストリーマッチングが必要である。プロトタイプテストを実施できる個数、期間には限りがある。遠心模型試験は縮尺模型において実物との応力の対応が良く、力学・水理・伝熱挙動も実物に近い。このためニアフィールドの長期挙動を再現・評価できる可能性があり、数値解析の結果検証の対象として期待される[3]。

また、ニアフィールドの長期挙動は、材料パラメータのばらつきや種々の不確実性の影響を大きく受ける可能性があり、予測評価にあたってはその影響を予め検討しておく必要がある。

5.1.2 目的

本研究で実施する数値解析の目的は、遠心模型試験の再現解析を行うことで、ニアフィールドの THM 連成現象のモデル化方法や、その妥当性確認方法について検討し、また長期挙動評価において重要となるパラメータや条件について整理を行うことである。今年度は、昨年度にあたる平成 28 年度と、今年度の研究で実施した遠心模型試験の再現解析を行い、合わせて、平成 27 年度から実施している 3 ヶ年の数値解析で得られた成果についてまとめる。

5.2 解析コードの概要

本研究では、電力中央研究所で開発した「放射性廃棄物地層処分における地下空洞長期安定性解析プログラム (LOSTUF)」を使用する。LOSTUF は熱・水・応力 (THM) 連成解析コード[2] である。ここでは、LOSTUF の支配方程式および解析に必要なパラメータについて解説する。

5.2.1 THM 連成の支配方程式

LOSTUF では、地盤を粒子骨格と水・空気で満たされた空隙で構成される多相システムとして取り扱い、地下水の連続式、エネルギーの保存則、力の釣り合い式と、応力-ひずみ関係、透水挙動に関するダルシー則、熱伝導に関するフーリエ則、水蒸気の拡散挙動に関するフィック則等の各種構成則から導かれた支配方程式を用いている。間隙ガス圧は一定で大気圧に等しいとしている。支配方程式は、Rutqvist et al. (2001)[4] を参考に導出した。以下にその支配方程式について簡単に記す。以下の解説で「地盤」は固相、液相、気相を含めた多孔質媒体の系全体を表している。式の導出過程の詳細については文献[2]を参照されたい。

地下水の連続式から以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} \rho_l S_l \frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t} + \{ \rho_{l0} \phi S_l \beta_{Pl} + (\rho_l - \rho_v) C_{lP} + \rho_l C_{vP} \} \frac{\partial P_l}{\partial t} - (\rho_{l0} \phi S_l \beta_{Tl} - \rho_l C_{vT}) \frac{\partial T}{\partial t} \\ + \nabla \cdot \left\{ \left(-\rho_l \frac{\mathbf{k} k_{rl}}{\mu_l} - \rho_l D_{Pv} \mathbf{I} \right) \nabla P_l \right\} + \nabla \cdot \left\{ (-\rho_l D_{Tv} \mathbf{I}) \nabla T \right\} = Q_B + \nabla \cdot \left(\rho_l \frac{\mathbf{k} k_{rl}}{\mu_l} \mathbf{g} \right) \end{aligned} \quad \text{式(5.2-1)}$$

ここで、 ρ_l は水の密度、 ρ_v は水蒸気の密度、 S_l は飽和度、 ρ_{l0} は初期条件の水の密度、 ϕ は空隙率、 β_{Pl} は水の圧縮係数、 β_{Tl} は水の熱膨張係数、 \mathbf{k} は固有透過度テンソル、 k_{rl} は相対透水係数、 μ_l は水の粘性係数、 \mathbf{I} は単位テンソル、 Q_B は水のソース項、 \mathbf{g} は重力加速度ベクトルである。未知数は変位ベクトル \mathbf{u} 、空隙水圧 P_l 、温度 T であり、変位ベクトル \mathbf{u} により、ひずみテンソル $\boldsymbol{\varepsilon}$ および体積ひずみ ε_V が $\boldsymbol{\varepsilon} = 0.5(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^{tr})$ 、 $\varepsilon_V = \nabla \cdot \mathbf{u}$ と定義される。なお、不飽和状態において、サクシオン s は空隙水圧 P_l と空隙ガス圧 P_g により、

$$s = P_g - P_l \quad \text{式(5.2-2)}$$

と定義される。さらに LOSTUF では空隙ガス圧に大気圧を仮定しているので、 $s = -P_l$ となる。

また、 C_{lP} は水分特性曲線 (飽和度 S_l とサクシオン s の関係を表す曲線) から算出される係数で比水分容量と呼ばれる。 C_{vP} 、 C_{vT} はそれぞれ以下のように書ける。

$$C_{vP} = \frac{\phi S_g \rho_v}{\rho_l^2 R_v T} \quad \text{式(5.2-3a)}$$

$$C_{vT} = \frac{\phi S_g}{\rho_l} \frac{\partial \rho_{vs}}{\partial T} RH - \frac{\phi S_g P_l}{\rho_l^2 R_v T^2} \quad \text{式(5.2-3a)}$$

ここで、 S_g は空隙中の気体の体積占有率(= $1 - S_l$)、 R_v は水蒸気の比気体定数(= 461.5 J/kg K)、 ρ_{vS} は飽和水蒸気密度(温度の関数)、 RH は相対湿度である。

D_{Pv} および D_{Tv} は多孔質媒体中における等温下での水蒸気拡散係数、温度勾配による水蒸気拡散係数であり、水蒸気の拡散を表すフィック則を展開することで得られる。水蒸気の流束 q_{rv} は、間隙ガス圧が一定であるという仮定のもと、以下のフィック則で表せる。

$$q_{rv} = -D_v I \nabla \rho_v \quad \text{式(5.2-4)}$$

ここで、 D_v は水蒸気の分散係数であり、

$$D_v = \phi S_g \tau D_m \quad \text{式(5.2-5)}$$

と書ける。 τ は屈曲度を表す。 D_m は大気圧下での水蒸気分子拡散係数であり、温度の関数として以下の式を用いる。

$$D_m (\text{m}^2/\text{s}) = 2.16 \times 10^{-5} (T/273)^{1.8} \quad \text{式(5.2-6)}$$

水蒸気の密度 ρ_v は以下のように書ける。

$$\rho_v = \rho_{vS}(T) RH = \rho_{vS} \exp\left(\frac{P_l}{\rho_l R_v T}\right) \quad \text{式(5.2-7)}$$

ここで、 ρ_{vS} は飽和水蒸気密度であり温度の関数である。式(5.2-4)内の水蒸気密度の勾配は式(5.2-7)を用いて次のように展開できる。

$$\mathbf{q}_{rv} = -\rho_l (D_{Pv} I \nabla P_l + D_{Tv} I \nabla T) \quad \text{式(5.2-8)}$$

ここで、

$$D_{Pv} = \frac{D_v \rho_v}{\rho_l^2 R_v T} \quad \text{式(5.2-9a)}$$

$$D_{Tv} = D_v \left(\frac{RH}{\rho_l} \frac{\partial \rho_{vS}}{\partial T} - \frac{\rho_v P_l}{\rho_l^2 R_v T^2} \right) \quad \text{式(5.2-9b)}$$

である。

式(5.2-1)において、左辺の第1項は多孔質体の骨格変化、第2項は飽和度の変化、第3項は温度変化による間隙流体の密度変化、第4項は水分移動(ダルシー則およびフィック則からの展開)、第5項は温度勾配による水分移動(フィック則からの展開)を表す。

エネルギー保存則からは次の支配方程式が導かれる。

$$(1 - \phi)3K_D\beta_{TD}T \frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t} + (\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \left\{ T \left(\frac{\beta_{Tl}}{\beta_{Pl}} \right) \frac{\mathbf{k}k_{rl}}{\mu_l} + \rho_l L D_{pv} \mathbf{I} \right\} \nabla P_l - \nabla \cdot (\lambda_m \mathbf{I} \nabla T) + (c_l \mathbf{q}_l) \cdot \nabla T = Q_{TB} \quad \text{式(5.2-10)}$$

ここで、 K_D は固相の体積弾性係数（排水条件）、 β_{TD} は固相の熱膨張係数（排水条件）、 L は単位体積あたりの水蒸気の潜熱、 \mathbf{q}_l は流束ベクトル、 Q_{TB} は熱量のソース項である。 λ_m 、 $(\rho c)_m$ はそれぞれ地盤の熱伝導率、熱容量であり、次式で求まる。

$$\lambda_m = S_l \lambda_{sat} + (1 - S_l) \lambda_{dry} \quad \text{式(5.2-11)}$$

$$(\rho c)_m = \phi S_l \rho_l c_l + (1 - \phi) \rho_s c_s \quad \text{式(5.2-12)}$$

ここで、 λ_{sat} は飽和時の地盤の熱伝導率、 λ_{dry} は絶乾時の地盤の熱伝導率、 c_l は水の比熱、 c_s は固相の比熱、 ρ_s は固相の密度である。

式(5.2-10)において、左辺の第1項は多孔質体の変形による可逆的な内部エネルギーの変化、第2項は内部エネルギーの変化、第3項は間隙水圧の変化および水蒸気に相変化することによる内部エネルギーの変化、第4項は熱伝導による内部エネルギーの変化（フーリエ則）、第5項は熱移流による内部エネルギーの変化を表す。

次に応力の釣り合い式について述べる。有効応力を次式で定義する。

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{I} \bar{P} \quad \text{式(5.2-13)}$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}'$ は有効応力テンソル、 \bar{P} は間隙圧である。ここでは、間隙ガス圧が大気圧に等しいとしているので、

$$\bar{P} = \chi P_l + (1 - \chi) P_g = \chi P_l \quad \text{式(5.2-14)}$$

となる。 χ は Bishop の有効応力パラメータであり、通常飽和度の関数として定義する。本研究では、飽和時 $\chi = 1$ 、不飽和時 $\chi = 0$ を仮定する。模型実験に用いる緩衝材、岩石は非常に大きなサクシオンを持つ材料であるため、サクシオンを独立な応力成分とした。不飽和段階においてサクシオンの減少に伴って進行するベントナイトの膨潤については、後述するように応力ひずみ関係とは別に等価な節点力を作用させることでモデル化する。この仮定により、不飽和時の間隙圧は大気圧に等しくなる。この有効応力を用いて力学構成式は以下のように書ける。

$$d\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D} : (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}_T) = \mathbf{D} : (d\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{I} \beta_{TD} dT) \quad \text{式(5.2-15)}$$

ここで、 \mathbf{D} は固相の剛性テンソルで、等方線形弾性体を仮定する場合はヤング率 E とポアソン比

ν で定義できる。

また、式(5.2-13)および式(5.2-15)を応力の釣り合い式に代入することで以下の支配方程式が得られる。

$$\nabla \cdot \left\{ \mathbf{D} : \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} \right\} + \nabla \cdot \left(-\mathbf{I} \chi \frac{\partial P_l}{\partial t} \right) + \nabla \cdot \left\{ (-\mathbf{D} : \mathbf{I} \beta_{TD}) \frac{\partial T}{\partial t} \right\} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{g}) + \mathbf{F}_B \quad \text{式(5.2-16)}$$

ρ_m は地盤の湿潤密度、 \mathbf{F}_B は外力ベクトルである。膨潤については外力項を与えることでその効果を導入する。次小節でその取り扱いについて述べる。

式(5.2-16)において、左辺の第1項は弾性応力、第2項は間隙水圧、第3項は熱応力を表す。

5.2.2 緩衝材の膨潤モデル

LOSTUF に導入されている緩衝材の膨潤挙動モデルについて説明する。緩衝材の膨潤圧は、有効粘土密度の関数として表される（さらに同じ種類のベントナイト単体であれば、乾燥密度や間隙率の関数として表すことができる）。ある有効粘土密度の緩衝材について、与えられた平均応力 σ_m における最大膨潤ひずみ ε_{smax} が得られる。その関係を式で表すと以下のようになる。

$$\sigma_m = f(\varepsilon_{smax}) \quad \text{式(5.2-17)}$$

緩衝材の膨潤ひずみは外力項として取り扱う。水が浸透した要素（間隙水圧が上昇した要素）に対して膨潤計算を実施する（以下、膨潤要素と称す）。式(5.2-17)をグラフで表したものが図5.2.2-1の左上図である。これを用いて、膨潤要素に作用している応力状態から、その応力状態に対する飽和時の最大膨潤ひずみ ε_{smax} を式(5.2-17)により算出する。また、間隙水圧の上昇（負値～ゼロ、サクシジョンの低下）とともに膨潤が進行するとして、不飽和状態での最大膨潤ひずみ ω_{smax} を次式より算出する。

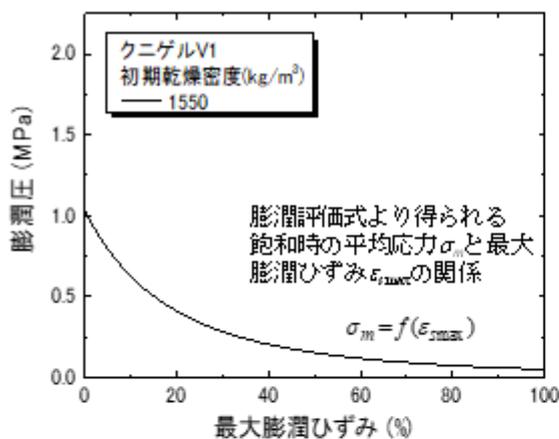
$$\omega_{smax} = \varepsilon_{smax} \left(\frac{|P_l - P_{l0}|}{|P_{l0}|} \right)^l \quad \text{式(5.2-18)}$$

ここで、 P_l は間隙水圧、 P_{l0} は基準となる間隙水圧（負値）、 l は不飽和時の膨潤の進行に関するパラメータである。これまでは $l = 1$ を仮定し、間隙水圧の上昇量と線形に ω_{smax} の値が決めるようにしてきた。算出された最大膨潤ひずみ ω_{smax} を発生させるための等価な節点力 \mathbf{F}_p を、膨潤要素を構成する節点に作用させ、変形、応力を計算する。計算された体積ひずみを累積膨潤ひずみ ε_{aw} とする。

$$\mathbf{F}_p = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} (\omega_{smax} - \varepsilon_{aw}) \mathbf{I} dV \quad \text{式(5.2-19)}$$

ここで、 B はひずみ-変位マトリクスである。最大膨潤ひずみが累積膨潤ひずみよりも大きければその差に相当するひずみを発生させるための等価な節点力を再び節点に作用させ、変形、応力を計算する。計算されたひずみを累積膨潤ひずみに加算する。以後、作用している応力での最大膨潤ひずみが累積膨潤ひずみを下回るまで膨潤計算を繰り返し、全膨潤要素において膨潤計算が終了したら次ステップへ移行する。この膨潤計算のフローおよび概念図を図 5.2.2-1 に示す。この膨潤計算の繰り返し中は温度および間隙水圧は固定している。前ステップからの間隙水圧の上昇がない場合、飽和後、作用している平均応力時の最大膨潤ひずみが既に発生している場合、膨潤は発生しない。

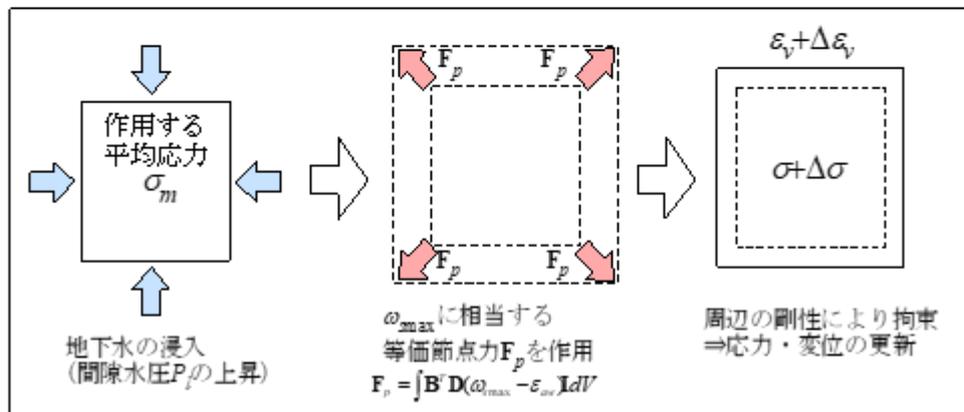
式(5.2 17)、図 5.2.2 1 左上図の関係については実験データから設定可能であるが、クニゲル V1 に対しては拡散二重層理論に基づく膨潤評価式 (小峯・緒方, 1999) [5]から設定してきた。



不飽和段階での最大膨潤ひずみ ω_{\max}

$$\omega_{s \max}(P_i) = \varepsilon_{s \max} \left(\frac{|P_i - P_{i0}|}{|P_{i0}|} \right)^l$$

- $\varepsilon_{s \max}$: 飽和時の最大膨潤ひずみ
- P_i : 間隙水圧 (不飽和時は負値)
- P_{i0} : 初期間隙水圧
- l : 膨潤の進行に関するパラメータ



累積膨潤ひずみ ε_{acc} が不飽和段階での最大膨潤ひずみ $\omega_{\max}(P)$ に達するまで繰り返し計算

図 5.2.2-1 LOSTUF における緩衝材膨潤モデル

5.2.3 THM 連成ジョイント要素

緩衝材と O/P や岩盤との間は接触面であり、ジョイント要素など不連続接触を取り扱える要素を用いてこれを表現する必要がある。地盤や岩盤と構造物の隙間や、断層面など弱層のモデル化に用いられる一般のジョイント要素では、THM 連成の現象は取り扱わないが、本研究におけるニアフィールドの長期挙動評価ではこれを考慮する必要がある。そこで、LOSTUF では熱・水と力学の相互作用を考慮した THM 連成ジョイント要素を導入している。この要素は、Zienkiewicz らによって導入されたジョイント要素と同様の定式化となっており、極薄いアイソパラメトリック要素に対して、前述の THM 連成系の支配方程式に基づく構成式を適用している。なお、ジョイント要素は本来、接触面をモデル化するものであることから、弾性体のポアソン効果がないことや、間隙率や熱膨張などの取り扱いについて、ソリッド要素とは幾つかの違いがある。しかし、基本的には剛性だけでなく水や熱の流れに対し、異方性の特性を設定可能なソリッド要素として導入されている。

5.2.4 剛性変化による弾性ひずみの再配分

緩衝材などの土質材料は土骨格の変形や水分作用により、剛性に関する材料非線形性を持っている。このような特性は、塑性ひずみを生じる不可逆なものであるが、一方で THM 連成問題においては弾性域内においても剛性が変化するような現象が考えられる。これは骨格構造が破壊されない範囲における温度上昇や含水率の増加に伴う剛性低下に相当するものであり、本研究では緩衝材や岩盤の含水による軟化を簡易的に検討するため、飽和度に依存して剛性が変化する等方線形弾性体を用いた検討も実施した。具体的には、図 5.2.4-1 に示されるように他に外力がない条件で剛性のみ変化する場合、発生した不平衡力により要素変形が生じ、拘束がない条件下では応力を変化せず弾性ひずみが再配分される。例えば、大深度の軟岩に圧縮応力が作用している条件を想定し、浸潤により剛性が低下すると仮定すると、飽和度の上昇に伴って剛性が低下することで圧縮ひずみが増大する結果が得られる。

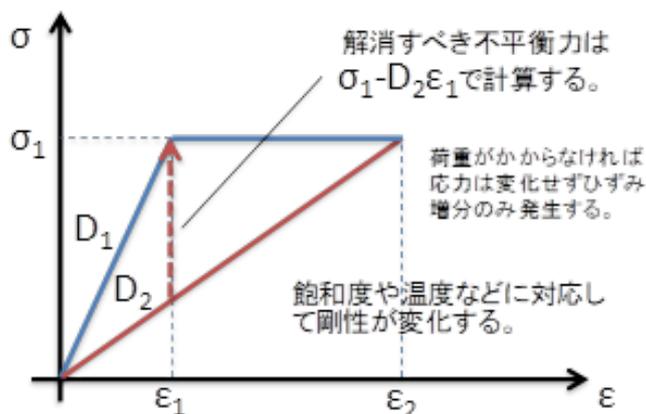


図 5.2.4-1 弾性ひずみの再配分の計算方法

5.2.5 LOSTUF のパラメータ

LOSTUF で必要となる熱・水関係の解析パラメータを表 5.2.5-1 に示す。解析領域を構成する各材料について決定する。力学モデルは等方線形弾性体として、力学関係のパラメータを表 5.2.5-2 に示す。膨潤評価式のパラメータについては文献[5]を参照されたい。なお、等方線形弾性体のほかにドラッカー・プラガー降伏基準バイリニアモデル、カムクレイモデル、関口-太田モデル、軟岩クリープモデル[6]が LOSTUF に導入されている。

表 5.2.5-1 解析パラメータ一覧 (熱・水)

記号	パラメータ	単位	試験による取得方法
μ_l	水の粘性係数	Pa s	物理量
ρ_l	水の密度	kg/m ³	物理量
ρ_v	水蒸気の密度	kg/m ³	物理量
ρ_{vs}	飽和水蒸気密度	kg/m ³	物理量
c_l	水の比熱	J/kg K	物理量
β_{lP}	水の圧縮係数	Pa ⁻¹	物理量
β_{lT}	水の熱膨張係数	K ⁻¹	物理量
L	水蒸気の潜熱	J/kg	物理量
R_v	比気体定数	J/kg K	物理量
D_m	水蒸気分子拡散係数	m ² /s	物理量
ρ_s	固相の密度	kg/m ³	重量分析など
ϕ	間隙率	-	水銀圧入法, 重量分析など
k	固有透過度	m ²	透水試験
k_{rl}	相対透水係数	-	三乗則, van Genuchten式(サイクロメータ法などの保水力試験)
$C_{lP} (= \rho_l g dS_l / dP_l)$	比水分容量	s/m ²	水分特性曲線, van Genuchten式(サイクロメータ法などの保水力試験)
τ	屈曲度	-	加熱浸透試験の解析による推定
λ_{sat}	熱伝導率(飽和)	W/mK	熱伝導試験
λ_{dry}	熱伝導率(乾燥)	W/mK	熱伝導試験
c_s	固相の比熱	J/kg K	熱拡散試験
β_{TD}	固相の熱膨張係数	K ⁻¹	線膨張係数の測定など

表 5.2.5-2 解析パラメータ一覧 (力学)

記号	パラメータ	単位	試験による取得方法
等方線形弾性体			
E	ヤング率	Pa	一軸圧縮試験, 三軸圧縮試験
ν	ポアソン比	-	一軸圧縮試験, 三軸圧縮試験
K_D	体積弾性率	Pa	E, ν より換算
λ	有効応力パラメータ	-	0(不飽和), 1(飽和)あるいは $c=SI$
膨潤計算パラメータ			
$\epsilon_{s \max}(\sigma_m)$	膨潤特性	-	膨潤圧試験, 膨潤変形試験, 膨潤評価式
l	膨潤進行パラメータ	-	膨潤圧試験, 膨潤変形試験の進行過程

5.3 解析モデルの諸元・境界条件

本研究で今年度実施した再現解析の解析モデルについて、諸元や計算条件の詳細を以下に示す。作成した解析モデルは、平成 28 年度および平成 29 年度に実施した遠心模型試験に対応し、対象とする実験に対して 2 つの解析モデルを作成している。なお、平成 28 年度の遠心模型試験についての詳細は過年度の処分システム工学確証技術開発報告書を参照されたい。これらの試験模型は、電中研・電事連の報告書[7]において提案されているものを対象として、廃棄体周辺のみを抽出したものである。これらの実験を対象とする各解析モデルについて以下に説明する。

5.3.1 H28 年度遠心模型試験を対象とする解析モデル

H28 年度遠心模型試験を対象として図 5.3.1-2 に示される軸対称モデルの FEM メッシュを作成した。なお、図の左端の中立軸付近でオーバーパックから細い芯棒部分が延びており、これはケーブルなどを通すために設けられている。

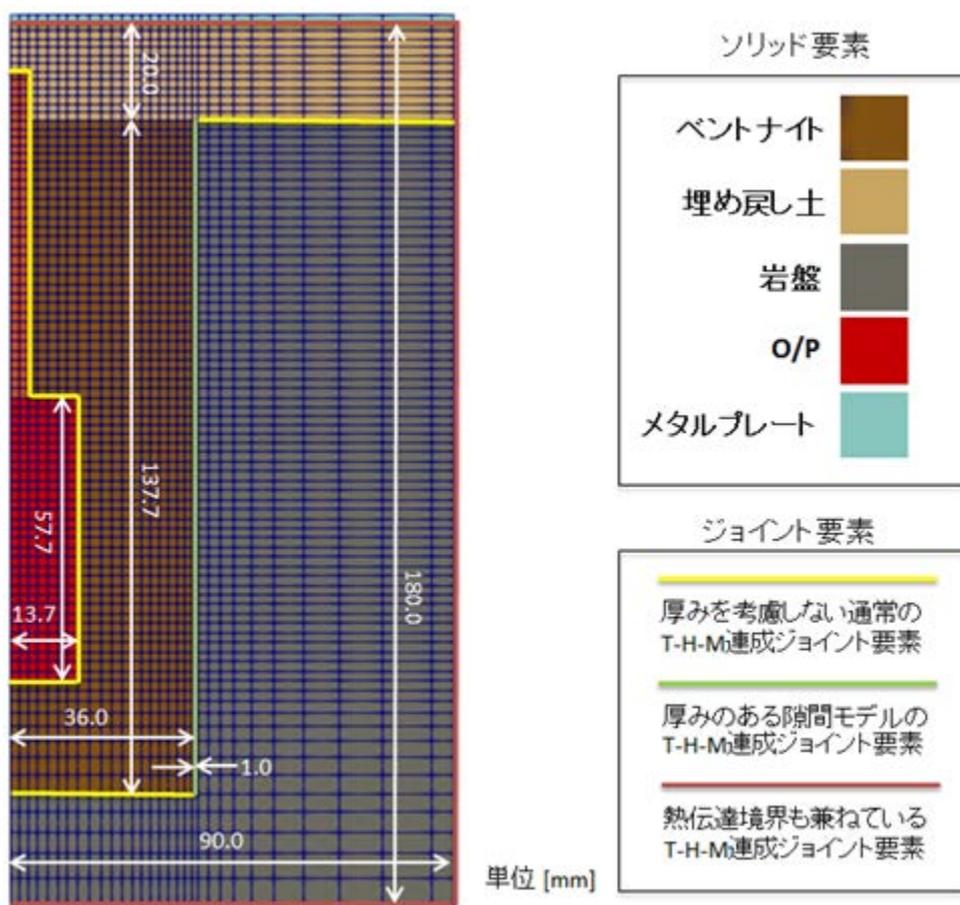


図 5.3.1-1 H28 年度遠心模型試験を対象とする解析モデル図

対象とする試験は 30G の遠心力場におけるニアフィールドを模擬した 1/30 模型に、底面からの注水と模擬 O/P の発熱を与え、約 40 日間に渡る経時変化を追うものであり、実寸換算で約 100 年間の現象に相当する。その詳細については平成 28 年度の報告書を参照されたい。本項では解析モデルに設定した境界条件について図 5.3.1-2 に示す。平成 28 年度の遠心模型では、緩衝材の膨出を考慮するために緩衝材の上部に埋戻し材を盛っており、解析についてもこれをそのままモデル化した。緩衝材と岩盤の間にある初期隙間についてもモデル化し、直径と高さが 180mm の試験模型をモデル化した。力学拘束は対称軸とモデル上面に配置するプレート上面をローラー支持とした。プレート厚は実際より薄くモデル化し、その代わりとして剛性を高く設定している。なお、上面プレートと埋戻し土の接触面にはジョイント要素を配置しており、摩擦や剥がれを考慮できるモデルとした。この他、模擬 O/P や岩盤と緩衝材や埋戻し土の間にもジョイント要素を配置している。また、岩盤外側からは 5MPa の周圧を考慮し、底面のプレートについては徐々に模型を押し上げる軸圧を考慮し、模型試験と同様に 1.1MPa まで漸増させた。

水理境界としてモデルの底面に位置する境界面は圧力 1.05MPa で一定とし、上面は間隙水圧が 1.0MPa を超えた段階で間隙水が自由に抜ける浸出面境界に設定した。なお、初期の乾燥した状態におけるサクション圧はモデル全体で 55MPa とし、これは要素試験結果を参考にして決定した。

温度境界条件については、モデルの上面と底面および側面境界に対し、雰囲気温度 33°C の熱伝達境界を設定した。なお、設定にあたってはジョイント要素でこれを実現し、熱伝達係数については、模型試験結果を参考に試験模型の熱の出入りを検討した。模擬 O/P の発熱については、試験装置の仕様から温度制御が行われており、解析についても試験結果より直接温度履歴を設定した。なお、温度履歴の設定は心棒を除いた O/P 本体の部分のみを対象とした。

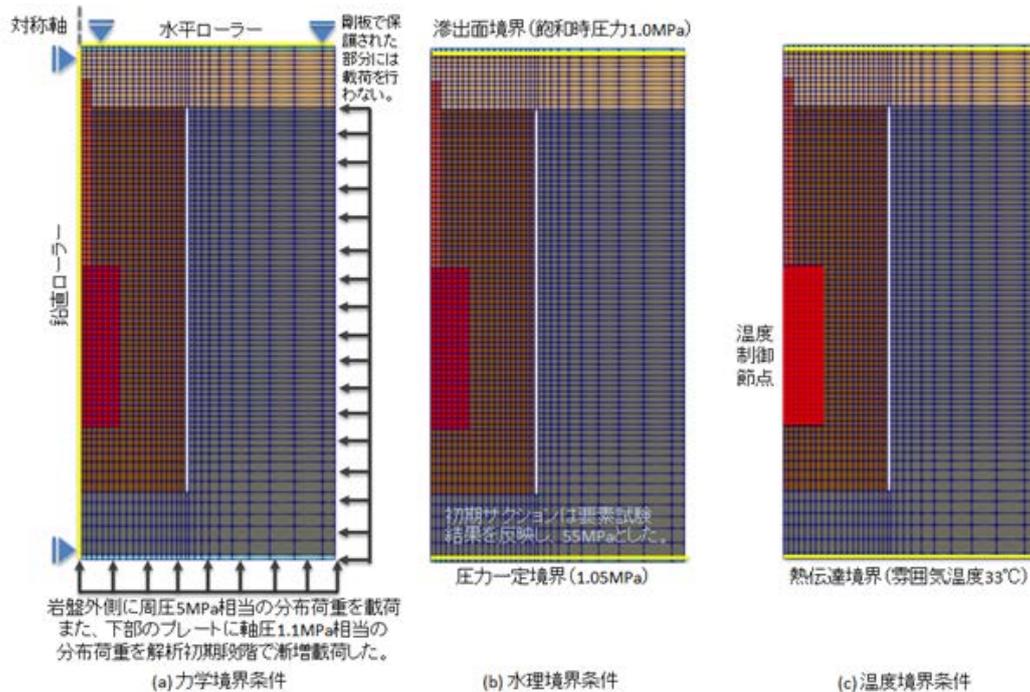


図 5.3.1-2 H28 年度遠心模型試験の解析モデルの諸元と境界条件

5.3.2 H29年度遠心模型試験を対象とする解析モデル

H29年度遠心模型試験を対象として図 5.3.2-1 に示される軸対称モデルの FEM メッシュを作成した。なお、H28 年度の遠心模型試験の解析モデルと同様に、図の左端の中立軸付近でオーバーパックから芯棒部分が延びている。

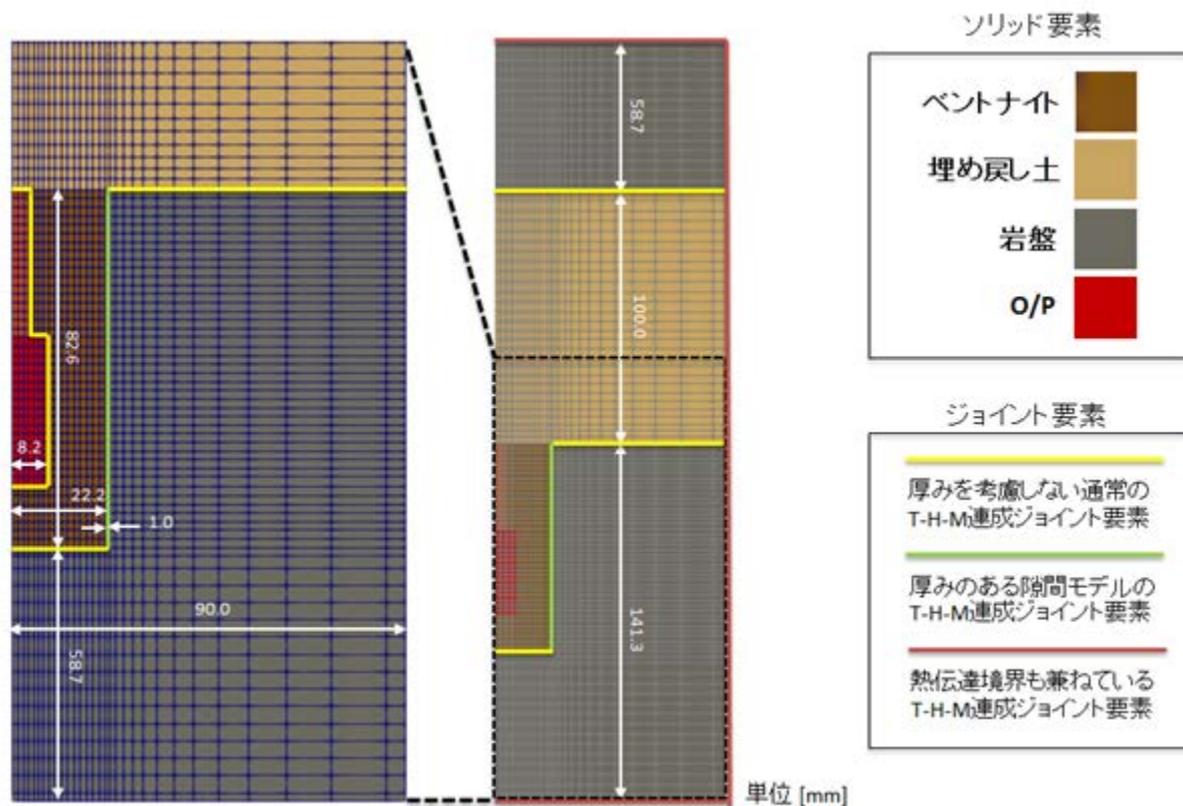


図 5.3.2-1 H29 年度遠心模型試験を対象とする解析モデル図

対象とする試験は 50G の遠心力場におけるニアフィールドを模擬した、直径 180mm、高さ 300mm の 1/50 模型に、底面からの注水と模擬 O/P の発熱を与え、約 30 日間に渡る経時変化を迫るものであり、実寸換算で約 200 年間の現象に相当する。この解析モデルに設定した境界条件は図 5.3.2-2 に示される。基本的なモデル化方針は H28 年度試験の解析モデルと同様である。H29 年度の実験では上部にも岩盤が配置されており、軸圧を載荷後の上下の岩盤の距離は一定に保たれている。解析では、緩衝材や埋戻し土、岩盤との間にある初期隙間などを分けてモデル化し、模擬 O/P や岩盤と土質材料の間にはジョイント要素を配置した。

基本的な境界条件は H28 年度モデルと共通であり、力学拘束は対称軸とモデル上面をローラー支持とし、周圧と軸圧載荷後の岩盤底面もローラー条件となる。先行して数値解析を実施した H28 年度モデルの検討で、底面の軸圧の漸増載荷により緩衝材の初期応力が大きくなり、緩衝材の膨潤を抑制する影響が見られたことから、H29 年度モデルでは条件の設定を一部改めている。岩盤外周部に周圧として 5MPa を載荷し、底面に軸圧 1.1MPa を漸増載荷した後、得られた応力を初期応力としてその後の解析に引き継いで計算を実施した。その際、緩衝材と埋戻し土に過剰な初

期応力が作用しないように、これらの要素の応力は自重相当とした。なお、この設定方法は昨年度に数値解析を実施した、H27年度試験モデルの検討と同様である。

水理境界については、モデルの底面に位置する境界面を圧力 1.07MPa で一定とし、上面は間隙水圧が 0.92MPa を超えた段階で間隙水が自由に抜ける浸出面境界に設定している。初期サクションについても H28 年度モデルと同様に、要素試験結果を参考にモデル全体で 55MPa とした。温度境界条件についても H28 年度モデルと同じであり、上面と底面および側面境界に雰囲気温度 33°C の熱伝達境界を設定した。なお、実験では初期段階で空調機器の不調から温度が想定より低くなっているが、解析では温度が安定して以降の値を雰囲気温度に設定した。また、オーバーパックの発熱についても H28 年度モデルと同様に、試験で設定した温度履歴は芯棒を除いた O/P 本体の部分にのみ設定した。

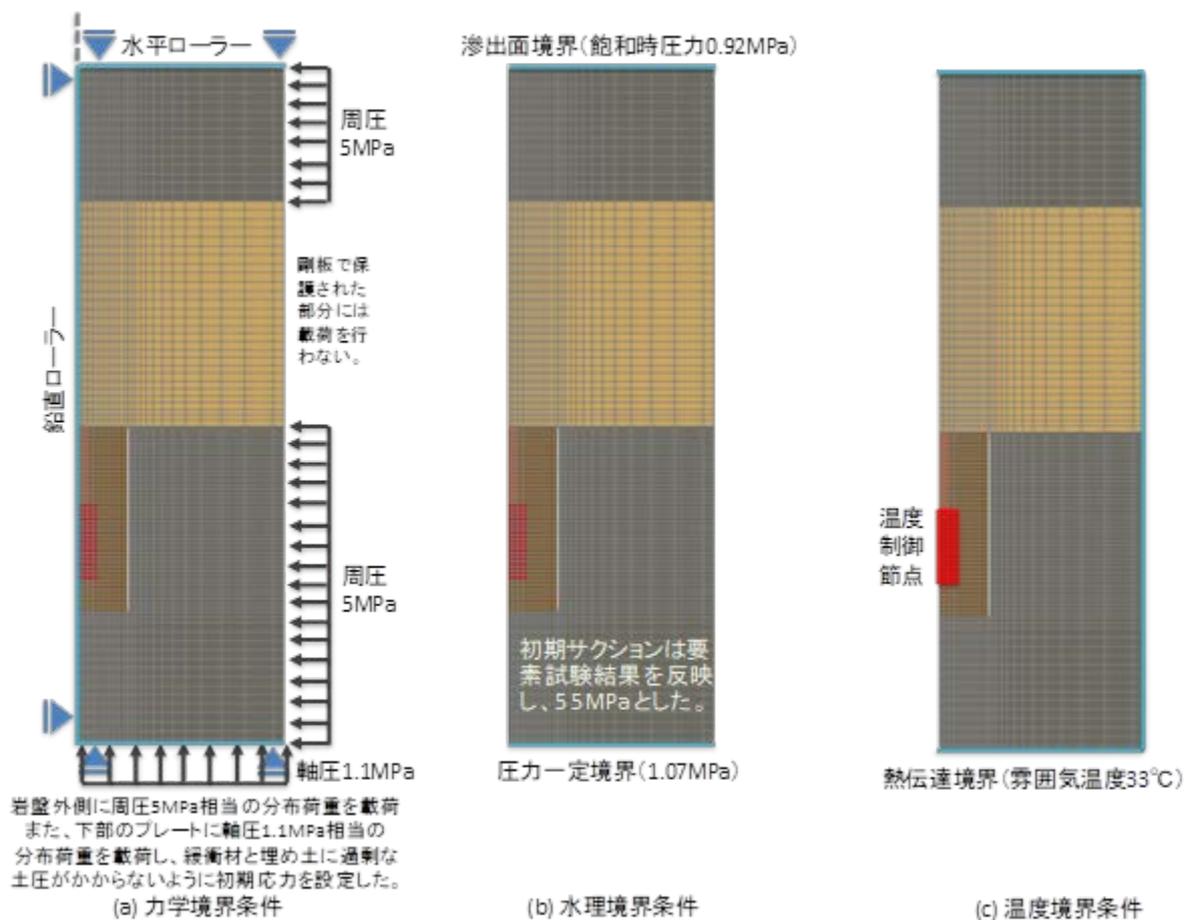


図 5.3.2-2 H29 年度遠心模型試験の解析モデルの諸元と境界条件

5.4 パラメータ

5.4.1 基本ケースの設定パラメータ

2つの遠心模型試験を対象とした再現解析では、3ヵ年の研究で実施した要素試験結果より平均値を基本として使用し、要素試験結果より得られた物性値のばらつきを考慮し、解析ケースのパラメータを振ることでその影響の検討を行った。本項では、基本ケースとしての平均値パラメータと、設定したばらつきの評価ケースについて説明する。

緩衝材、埋戻し土、岩盤は要素試験結果より設定し、一部要素試験結果の標本数の不足や、解析上の取り扱いの問題から平成27年度に実施した解析に引き続き文献値を用いた。また、緩衝材のポアソン比については飽和に至る過程で間隙水の作用により0.5に近づくと考えられる。不飽和時における間隙水の影響は、LOSTUFによる解析では前述の膨潤モデルに含まれるため、本研究では不飽和域の連成を考慮していない。従って、飽和に至る直前のポアソン比としては0.5に近い値を設定するべきであるが、飽和後に体積変形を過剰に拘束する問題を避ける必要もあり、後述の飽和度依存性を設定した。なお、模擬O/Pやプレートなどの金属材料については、構造や材質が明確でないことや、あまり重要でないと考えられることから全て共通の物性とし、前年度の研究に引き続き同じ値を用いた。

各ケースにて設定した基本的な物性値を表5.4.1-1に示す。隙間や接触面のモデル化にはジョイント要素を用いるため、表中からは除いている。なお、表中の式については後述する。

表 5.4.1-1 解析パラメータ（隙間と接触面以外）

条件・パラメータ	緩衝材	埋め戻し土	岩盤	廃棄体やプレート (ステンレス)
初期条件				
間隙率	0.414	0.321	0.393	0.001
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.591	1.797	1.675	6.350
固相密度 (Mg/m ³)	2.711	2.651	2.762	6.350
飽和度 (%) ※1	25.1	6.1	16.6	-
透水関係のパラメータ				
水分特性曲線 a (MPa ⁻¹)	0.244	2.978	93.8	-
水分特性曲線 n	1.53	1.55	1.21	-
固有透過度 (m ²)	式※2	1.05 × 10 ⁻¹⁸	-	-
透水係数 (m/s)	-	-	5.99 × 10 ⁻¹¹	-
力学関係のパラメータ				
ヤング率 (GPa)	0.01 (※3)	0.03 (※3)	3.026	193.0
ポアソン比	0.30 (※2)	0.48	0.24	0.30
膨潤圧 (MPa)	0.66	0.15	-	-
熱関係のパラメータ				
熱伝導率 (W/mK) ※4	1.180	2.169	0.785	16.7
比熱 (J/kg/K)	8.84 × 10 ²	8.18 × 10 ²	8.89 × 10 ²	5.90 × 10 ²
熱膨張率 (線膨張率) (K ⁻¹)	3.10 × 10 ⁻⁵	1.60 × 10 ⁻⁵	6.80 × 10 ⁻⁵	1.73 × 10 ⁻⁵

※1 初期サクシオン 55MPa 時の値

※2 JNC2000 年レポートより設定

※3 飽和時における平均値

※4 飽和度 50%における平均値

(1) 透水関係のパラメータ

緩衝材や岩盤の水分特性曲線はサイクロメータ法による保水試験結果から表中のパラメータを決定しており、図 5.4.1-1 に示す水分特性曲線を van Genuchten モデルから設定した。また、解析モデル全体に設定した初期サクシオンも同じデータから 55MPa に設定している。

$$S_l = \{1 + (\alpha s)^n\}^{-m}, k_r = S_l^2 \{1 - (1 - S_l^m)^2\}, m = 1 - 1/n \quad \text{式(5.4-1)}$$

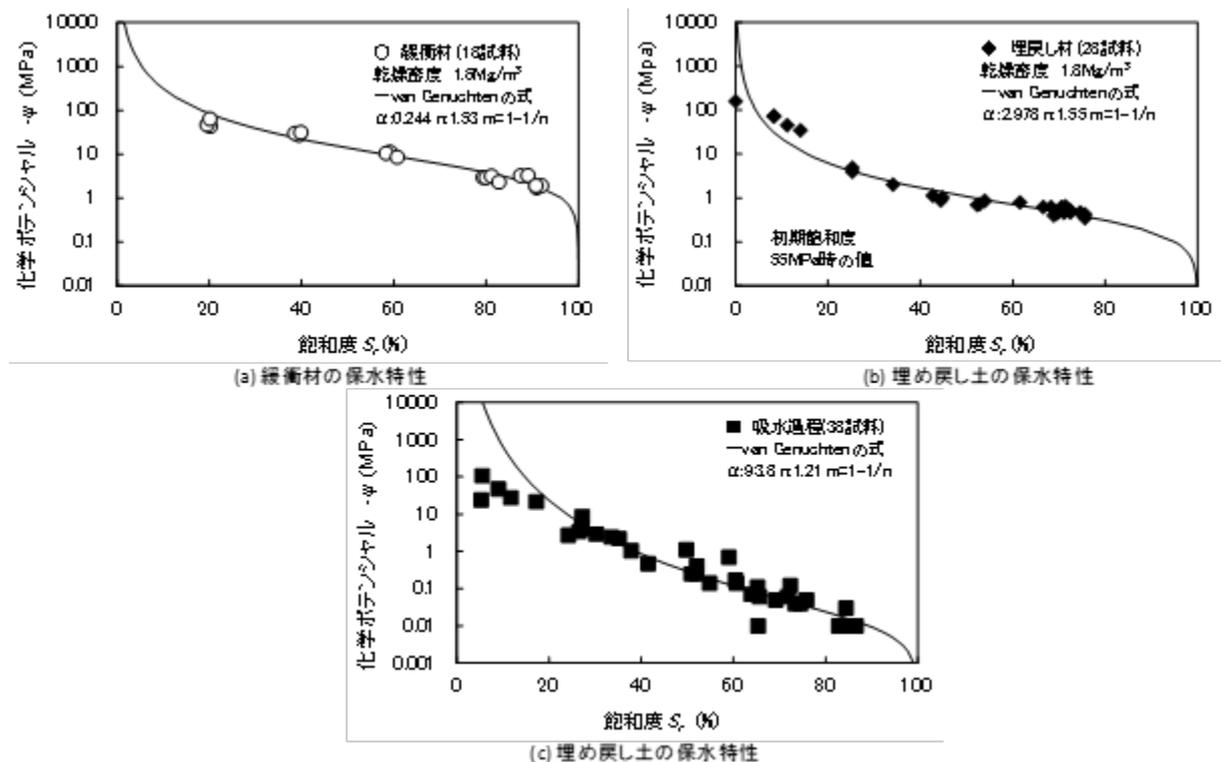


図 5.4.1-1 各材料に設定した水分特性曲線

岩盤および埋戻し土の固有透過度は要素試験結果に基づき設定した。なお、埋戻し土については標本数が少なく、ばらつきを評価することが出来なかったが、他に参照する値もないことから各ケースで同じ値を設定した。

緩衝材の固有透過度については、要素試験結果から平均値およびばらつきを評価するには標本数が十分ではないと考え、HLW 第 2 次取りまとめ[8]に示された式(5.4 2)の固有透過度 κ と有効粘土密度の関係を参照し、図 5.4.1-2 に示すように間隙率 ϕ が $0.3 < \phi < 0.6$ の範囲でフィットするように与えており、表 5.4.1-1 に示される固有透過度の計算式は式(5.4 3)に示される。

$$\kappa = \exp(-42.1 + 1.1447\rho_e - 2.1232\rho_e^2) \quad \text{式(5.4-2)}$$

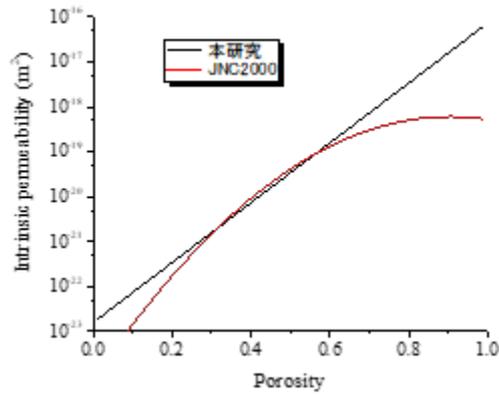


図 5.4.1-2 緩衝材の固有透過度

$$\kappa(\text{m}^2) = 10^{6.67\phi - 22.8} \quad \text{式(5.4-3)}$$

(2) 力学関係のパラメータ

岩盤、緩衝材、埋戻し土のヤング率は要素試験結果より設定を行った。岩盤と緩衝材については飽和度の変化による軟化を考慮し、埋戻し土については平成 28 年度に実施した要素試験結果より、飽和度依存性は小さいと判断して一定値を用いた。ポアソン比については、要素試験結果からばらつきを評価することが難しかったため、各ケースで同じ設定値を用いた。緩衝材のポアソン比については図 5.4.1-3 に示されるように、絶乾時に 0.3、飽和時に 0.49 とする飽和度依存性を設定した。なお、緩衝材の飽和時のポアソン比を 0.5 相当に設定する主な目的は、発生する膨潤圧を等方にするためであるが、飽和して以降に間隙水圧が発生することで体積変形を過剰に拘束する可能性がある。膨潤の生じない飽和時においては、ポアソン比を間隙水の作用を含まない乾燥時相当に戻すこともモデル化としては考えられる。しかしながら、一度上昇させたポアソン比を低下させることは変形解に振動を与え、不安定な変形を生じさせることが確認された。そのため、本研究では飽和して以降もポアソン比は 0.49 で一定とした。

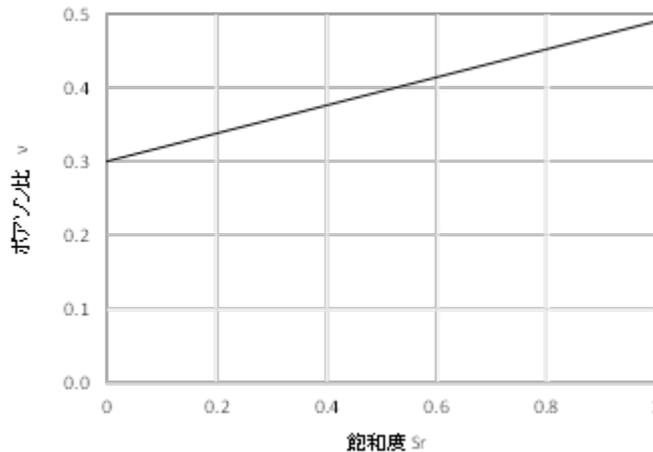


図 5.4.1-3 緩衝材に設定したポアソン比の飽和度依存性

膨潤計算に用いるパラメータは要素試験結果と小峯（2005）[10]を参考に表 5.4.1-2 に示す条件を設定した。膨潤計算パラメータについては、要素試験結果から多くのパラメータについてばらつきを評価する上での結果が得られているが、本検討では最も重要である最大膨潤圧にのみ着目し、間隙水のイオン濃度のみを調整することでこれを評価した。

表 5.4.1-2 膨潤計算パラメータ

基本的な物理定数	電子素量	1.602×10^{-19}	C
	Boltzmann 定数	1.38×10^{-23}	J/K
	Hamaker 定数	2.2×10^{-22}	J
	Avogadro's 数	6.023×10^{23}	
ベントナイトの組成	陽イオン交換容量	1.188	mequiv./g
クニゲルV1相当	交換性Naイオン量	0.673	mequiv./g
	交換性Caイオン量	0.478	mequiv./g
	交換性Kイオン量	0.015	mequiv./g
	交換性Mgイオン量	0.022	mequiv./g
	NaイオンおよびKのイオン価	1	
	CaイオンおよびMgのイオン価	2	
	Naイオンの非水和イオン半径	0.098	nm
	Caイオンの非水和イオン半径	0.115	nm
	Kイオンの非水和イオン半径	0.133	nm
	Mgイオンの非水和イオン半径	0.085	nm
	モンモリロナイト粒子の厚さ	9.60×10^{-10}	m
	モンモリロナイト粒子の密度	2.77	Mg/m ³
	モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度	2.81	Mg/m ³
	砂の土粒子密度	2.64	Mg/m ³
	緩衝材の乾燥密度	1.591 (埋め土は1.797)	Mg/m ³
	モンモリロナイトの比表面積	810	m ² /g
	モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積	0	m ² /g
	ベントナイトのモンモリロナイト含有率	54	%
	ベントナイト配合率	70.0 (埋め土は15.0)	%
その他	間隙水の誘電率	$80 \times 8.8542 \times 10^{-12}$	C ² /J/m
	間隙水のイオン濃度	33.9	mol/m ³
	絶対温度	298.15	K

緩衝材と岩盤については前述の弾性ひずみの再配分を考慮することによる剛性の飽和度依存性を考慮した検討も行った。緩衝材については、前年度までに実施した含水比区分毎の要素試験結果より、飽和度とヤング率のばらつきがある程度分かっており、飽和度依存性を考慮したばらつきの評価が可能である。

図 5.4.1-4 のグラフに示されるものは、含水比区分毎にヤング率に関する標準偏差を求め、それらの平均値をばらつきとして評価したものである。全標本データの一次回帰式について、勾配はそのままとして±3σのばらつきを評価した。また、図 5.4.1-5 は全標本データの一次回帰式に対する、各測定値のばらつきを求め、剛性の勾配を評価するものである。ヤング率が0となる点で一点に収束し、切片値が一定の間隔となるようにばらつきを設定している。後者のモデルは、±3σのばらつきを評価することで、全標本データを含むことが出来るため、本研究では緩衝材の

ヤング率に関する飽和度依存性としてこちらのモデルを採用した。岩盤については飽和度区分毎の剛性のばらつきは分からないため、要素試験結果で得られた乾燥時と飽和時のヤング率を直線補間するモデルを採用した。なお、岩盤については緩衝材や埋戻し土と異なりポアソン比に関する飽和度依存性は考慮していない。

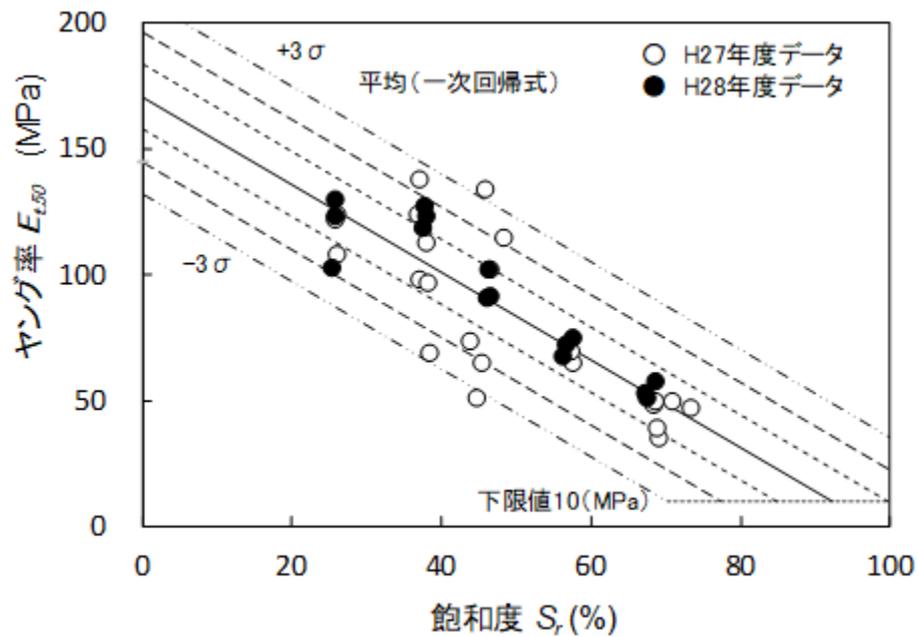


図 5.4.1-4 緩衝材のヤング率と飽和度の関係（勾配を一定としたモデル）

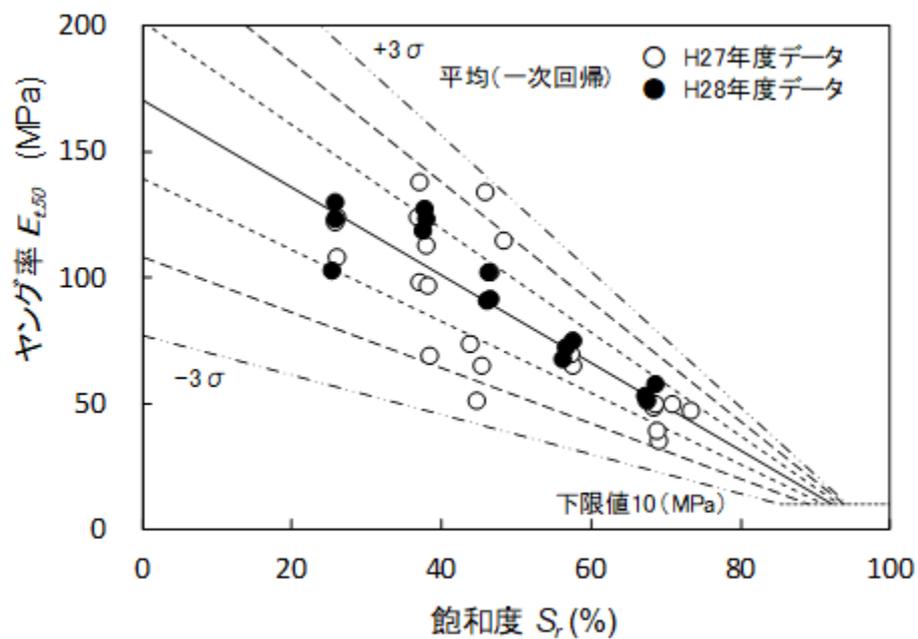


図 5.4.1-5 緩衝材のヤング率と飽和度の関係（切片間隔を一定としたモデル）

(3) 熱関係のパラメータ

各材料の熱伝導率や比熱は要素試験結果より、乾燥時と飽和時の値を設定し、飽和度で線形補間した。

(4) 接触面と隙間のパラメータ

緩衝材と O/P および岩盤の間には THM 連成ジョイント要素を配置しており、ソリッド要素とはパラメータが少し異なっている。モデル化の基本として、接触面ではより硬い方のソリッドの物性値を参照し、熱と水の流れについては簡単のため等方的なソリッドと同様の設定とした。前述のとおり、THM 連成ジョイント要素は極薄いソリッド要素として導入されているため、垂直剛性については O/P やプレートおよび岩盤の値をそのまま用いている。せん断剛性については、ジョイント要素が摩擦抵抗と滑動を考慮する非線形要素であることから、増分解析に対応して徐々にせん断応力を蓄積できるよう、垂直剛性に比べて小さな値を設定し、本研究では一律で垂直剛性の 1/10 倍とした。透水や熱伝導に関する物性値も参照するソリッド要素と同じ値を設定しているが、厚さが極薄く全体積が空隙であることから基本的に飽和条件となり、接触面の両側で同じ物理量を持つようなモデル化を行っている。

なお、緩衝材と岩盤の間にある隙間部分についても、同様にして THM 連成ジョイントでモデル化を行っているが、実物寸法で H28 年度モデルでは 30mm、H29 年度モデルでは 50mm ほどある隙間については閉塞を考慮する必要がある。LOSTUF では、このような隙間の閉塞を考慮する際、ジョイントの垂直変位に関する非線形剛性を定義することで、閉塞時に高剛性を発揮するモデル化が可能となっている。この隙間の閉塞モデルではジョイント面の非線形剛性は式(5.4-4)で評価される。

$$k = k_0 \left(\frac{T_L}{T_L - \delta_n} \right)^\alpha \quad \text{式(5.4-4)}$$

ここで、 k はジョイント要素の剛性、 k_0 は非常に小さな初期剛性、 T_L はジョイント要素に設定される厚さ、 δ_n は垂直変位である。また、 α は非線形性を調整するパラメータであり、本研究では隙間の閉塞の様子を事前検討して一律 2.0 に設定した。なお、このようなある程度厚みのあるジョイント要素の取り扱い、通常のソリッドと厚みのないジョイント要素の中間的な取り扱いとなり、水や熱の流れを考慮する上で参照したソリッドの物性と同じ空隙率を設定した。

なお、浸潤が進行する過程において、隙間に沿って多孔質体中とはオーダーの違う速度で水が移動することが考えられる。平成 28 年度に実施した数値解析による検討で、隙間の透水性が現象の再現に重要であることが分かっており、本研究では全ての検討ケースで隙間の透水性を参照する材料の 1000 倍に設定した。

表 5.4.1-3 に設定したジョイント要素のパラメータを示す。接触面については基本的により硬い方の物性に基づくが、隙間のモデル化については初期剛性として非常に小さい値を設定し、透水関係のパラメータは緩衝材相当とした。また、熱伝導率は緩衝材の飽和時の値、比熱は間隙水の値を設定した。なお、接触面の強度パラメータとしては摩擦係数と粘着力を設定するが、平成

28年度に実施した数値解析結果より、接触面強度の感度は小さいことが分かっており、過年度の検討で設定した基本ケースと同じパラメータを採用した。

表 5.4.1-3 隙間と接触面のパラメータ

条件・パラメータ	隙間	O/P周辺	岩盤接触面
透水関係のパラメータ			
間隙率	0.414	1	1
水分特性曲線 a (MPa ⁻¹)	0.244	0.001	13.6
水分特性曲線 n	1.53	1.43	1.24
固有透過度 (m ²)	3.58x 10 ⁻¹⁵	0	3.58x 10 ⁻¹⁸
力学関係のパラメータ			
垂直剛性 (GPa)	1.0×10 ⁻⁶ ※	193	2.7
せん断剛性 (GPa)	1.0×10 ⁻⁸ ※	1.93	0.027
摩擦係数	0.3	0.3	0.3
粘着力 (MPa)	0.0	0.0	0.0
熱関係のパラメータ			
熱伝導率 (W/mK)	2.188	16.7	0.45
比熱 (J/kg/K)	4200	590	887

※隙間の閉塞を考慮した非線形剛性モデルの初期剛性

5.4.2 設定した解析ケース一覧

前述の要素試験の平均値に基づいて条件を設定したものを基本ケースとし、物性パラメータのばらつきを考慮した比較検討を行った。なお、全ての解析条件についてパラメータのばらつきを考慮することは現実的ではなく、本研究では設定するパラメータ毎の標準偏差に対し、全てのパラメータを定数倍振った検討を実施した。

各解析パラメータについては、着目した現象に対して正の影響を与えるものと、負の影響を与えるものが考えられる。そこで、前年度までの検討結果と一般的な傾向を整理し、O/P 鉛直変位量に着目して解析ケースの設定を行った。

O/P 鉛直変位を抑制する方向を正とすると、剛性や拡散係数については正の寄与、最大膨潤圧については負の寄与があると考えられる。このような観点から、表 5.4.2-1 に示される平均値と±3σのばらつきを考慮した解析ケースを設定した。なお、ばらつきが大きいパラメータについては、一部パラメータが負値になるものなどがあり、そのようなパラメータは負値とならない最も条件に近いケースと同じ値を設定した。

表 5.4.2-1 平均パラメータと標準偏差

項目	岩盤	標準偏差	緩衝材	標準偏差	埋戻し土	標準偏差
間隙率	0.393	0.013	0.414	0.006	0.321	0.000
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.675	0.038	1.591	0.017	1.797	0.006
固相密度 (Mg/m ³)	2.762	0.031	2.711	0.009	2.651	0.006
透水係数 (m/s)	5.99x10 ⁻¹¹	3.07x10 ⁻¹¹	5.18x10 ⁻¹³	0.000	1.06x10 ⁻¹¹	0.000
熱伝導率(乾燥) (W/m・K)	0.404	0.11	0.414	0.15	0.758	0.16
熱伝導率(飽和) (W/m・K)	1.166	0.11	1.945	0.15	3.579	0.16
比熱 (J/g/K)	0.889	0.027	0.884	0.036	0.818	0.022
線膨張率 (μ/K)	6.8	1.0	31.0	2.0	16.0	1.0
ヤング率(乾燥) (MPa)	3026	591	☒ 5.4.1-5 参照	—	32	4
ヤング率(飽和) (MPa)	1980	638				
ポアソン比(乾燥)	0.14	0.04	☒ 5.4.1-3 参照	—	0.48	0.00
ポアソン比(飽和)	0.24	0.15				
最大膨潤圧 (MPa)	—	—	0.66	0.04	0.15	0.02

2つの遠心模型試験を対象に、実験およびケース間の比較をする上でのパラメータのばらつきに着目し、それぞれのモデルで7つの解析ケースを設定した。また、全てのパラメータを振ったケースに対し、比較のためにO/P変位に対して最も影響が大きいと考えられる剛性のみばらつきを設定し、その他のパラメータは平均値ケースとした比較ケースをそれぞれの実験モデルに対して6ケースずつ設定した（ケース名に-Sの付いているもの）。今年度、実施した全ての解析ケースの一覧は表5.4.2-2に示される。なお、各ケースの詳細については必要に応じてケース毎の考察で補足する。

表 5.4.2-2 各解析モデルの解析ケース一覧

ケース	内容
Case H28 Mean	H28 年度遠心模型試験モデル、平均値の物性を使用。
Case H28 +1Sigma	H28 年度遠心模型試験モデル、+1 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 -1Sigma	H28 年度遠心模型試験モデル、-1 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 +2Sigma	H28 年度遠心模型試験モデル、+2 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 -2Sigma	H28 年度遠心模型試験モデル、-2 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 +3Sigma	H28 年度遠心模型試験モデル、+3 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 -3Sigma	H28 年度遠心模型試験モデル、-3 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 Mean	H29 年度遠心模型試験モデル、平均値の物性を使用。
Case H29 +1Sigma	H29 年度遠心模型試験モデル、+1 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 -1Sigma	H29 年度遠心模型試験モデル、-1 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 +2Sigma	H29 年度遠心模型試験モデル、+2 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 -2Sigma	H29 年度遠心模型試験モデル、-2 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 +3Sigma	H29 年度遠心模型試験モデル、+3 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 -3Sigma	H29 年度遠心模型試験モデル、-3 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 +1Sigma-S	H28 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ+1 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 -1Sigma-S	H28 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ-1 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 +2Sigma-S	H28 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ+2 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 -2Sigma-S	H28 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ-2 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 +3Sigma-S	H28 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ+3 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H28 -3Sigma-S	H28 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ-3 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 +1Sigma-S	H29 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ+1 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 -1Sigma-S	H29 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ-1 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 +2Sigma-S	H29 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ+2 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 -2Sigma-S	H29 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ-2 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 +3Sigma-S	H29 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ+3 σ のばらつきを考慮した物性を使用。
Case H29 -3Sigma-S	H29 年度遠心模型試験モデル、剛性のみ-3 σ のばらつきを考慮した物性を使用。

5.5 H29 年度の解析結果に対する考察とまとめ

平成 28 年および 29 年度に実施した遠心模型試験を対象とし、平成 29 年度に実施した 2 つの解析モデルによる再現解析について、設定した各検討ケースの解析結果は参考資料として添付資料に一覧を掲載する。本節では、各ケースの比較結果に対する考察と、数値解析による検討を実施して得られた成果についてまとめており、剛性のみパラメータを振ったケースについては比較対象のケースに合わせて考察を簡単に加えている。なお、解析結果はすべて実寸換算を行った上で整理している。

5.5.1 H28 年度遠心模型試験モデルの各ケースの解析結果に対する考察

平成 28 年度モデルについて各ケースの結果を整理し、以下の考察を得た。

(1) Case H28 Mean

遠心模型試験の模型と同じ材料に対する要素試験結果の平均値に基づくケースであり、物性パラメータについて H28 年度モデルと H29 年度モデルに違いはない。試験結果との比較の観点からは、平均値ケースで最も現象の再現性が高くなると期待される。しかしながら、遠心模型試験と解析モデルでは境界条件などを完全に揃えることは出来ないため、現象には違いが見られている。特に、実験では早い段階で模型上面の上端圧が排水制御により一定となるのに対し、解析では最終時刻まで上端圧は一定となっていない。なお、昨年度に数値解析を実施した H27 年度モデルでは、実験より浸潤速度は遅いものの上端圧は一定となっており、大きな違いはモデル底面の注水圧の大きさにあることを確認している。H27 年度モデルは注水圧が約 4 倍であったために岩盤の浸潤速度が大きかったと考えられる。解析結果は全てのケースで実験より浸潤速度が遅いが、これは不飽和特性の違いによるところが大きいと考えられる。

O/P の鉛直変位について比較すると、実験と解析でともに初期に上昇が見られる。解析では主に岩盤底面にかかる軸圧により生じており、この軸圧は実験で水位の上昇とともに生じる膨張を抑え込むために載荷されている。実験では浸潤の進行に対応して軸圧をかけるようにしているため、軸圧は膨張の抑え込みにのみ作用し、O/P の上昇は主に緩衝材の膨潤によって生じている。一方で、解析では浸潤速度が遅いため、軸圧の作用によって実験より大きな変位が生じている。緩衝材に作用する全応力についても、初期に O/P 変位に対応する応力の上昇が認められ、軸圧制御によるものだと考えられる。なお、解析では約 1MPa の鉛直応力が生じているが、実験で測定された応力は小さく、3~4 分の一程度の値となっている。この理由も、解析では軸圧による応力が作用しているのに対し、実験では純粋に初期の膨潤圧が生じているためと考えられる。

実験では、1 年相当経過時以降は緩衝材の膨潤により応力が大きく上昇している。一方で解析では軸圧の作用により初期に緩衝材の最大膨潤圧を超える応力が生じているため、膨潤が拘束された結果として緩衝材に作用する全応力の上昇は見られない。また、O/P の鉛直変位については、実験と解析の両方で下降傾向にあることが確認できる。O/P が下降する原因は、上部の緩衝材および埋戻し土に水分が供給されることで膨潤が発生し、生じた応力により O/P が下降している。実験では上端圧が一定となる時期が早く、1 年相当経過時以降から上部の緩衝材と埋戻し土で膨潤現象の発生が考えられる。一方、解析では緩衝材と岩盤の隙間が高透水帯としての役割をなし、

上部の緩衝材や埋戻し土への給水が行われることで膨潤を発生していると考えられるが、下降の発生時期はより早く、岩盤の軸圧による上昇で圧縮された埋戻し土が孔内に侵入することで O/P が押し下げられている他、飽和度の上昇に伴い剛性が低下することで下部の緩衝材が圧縮する作用がある。実験では O/P の下降が実験終了時まで継続しているが、解析では下部の岩盤と緩衝材が膨潤と給水により膨れることで、10 年相当経過時以降に明瞭な上昇傾向が見られる。その後、上部の緩衝材の膨潤作用が顕著となると、20 年目以降は殆ど変化が見られなくなる。

なお、O/P 変位や緩衝材の全応力の発生について、経時変化に不連続な乱れが生じる時刻が認められるが、この変位や応力の変化は明らかに O/P の不連続な温度変化によって生じている。O/P 温度が急激に下がると、特に応力が一度下がった後に大きくなる傾向があり、温度が下がることで O/P 付近に浸潤が促されて膨潤に影響が生じていると予想される。しかし、一方で O/P 付近の緩衝材の飽和度変化に着目すると、解析では O/P 温度の低下時に飽和度が低下していることが確認できる。これは現象として理解することが難しい挙動であるが、O/P と緩衝材の熱収縮により、接触面としてモデル化されているジョイント要素が膨張し、O/P と接する緩衝材表面のサクションが大きくなった影響であり、モデル化に起因する問題だと考えられる。

岩盤の温度に着目すると、解析モデルの外周面は熱伝達境界を実現するために THM 連成ジョイントで覆われており、材料物性として与える熱伝達係数と雰囲気温度による影響を受ける。解析では、遠心模型の外周からの熱の流出が分からないため、熱伝達率を調整した検討を行っている。しかしながら、一様なパラメータを設定しているため、実験結果と解析結果には差が見られており、解析結果は概ね飽和時に実験結果と近くなるように経時変化している。

岩盤のひずみに着目すると、実験結果が複雑な履歴を経ているのに対し、解析結果は比較的単調な動きを示している。初期の段階では緩衝材などの膨張により圧縮を生じた後、浸潤の進行により剛性を低下させ、初期地圧の再配分により圧縮に転じている。その後、間隙水圧の上昇で再び膨張している傾向や O/P 温度の変化に対応した動きが確認できる。

(2) Case H28 +1Sigma

パラメータを 1σ ほど大きくしたケースであり、全体的に剛性が高くなっている他、浸潤や温度拡散の速度が速くなっている。O/P 変位は剛性が増した分は小さくなっているが、緩衝材に作用する全応力の変化や全体的な傾向も含め、平均値ケースと比べて大きくは変わらない。実験でも解析でも、初期に O/P が上昇した後に下降して行き、上部の埋戻し土や緩衝材に膨潤が生じるようになると急激に変位が大きくなることを確認できる。これは、透水性が大きくなっているためと考えられる。解析では、5 年相当経過時までは下降が生じ、その後は下部の緩衝材や岩盤の膨れによって O/P が大きく上昇している。平均値のケースと同様に、解析の後半で O/P の発熱の履歴反応に対応して鉛直変位や緩衝材の全応力の履歴に大きな影響が現れている。また、下部の岩盤や緩衝材に間隙水圧が作用してからの変形は、パラメータを大きく設定したケースほど高い剛性のためか見られない。岩盤の温度変化については、浸潤が早くなること、温度上昇が少し早くなっていることが確認されるが、平均値ケースとの大きな差異はない。岩盤のひずみについては剛性が上がっているため、ひずみ量は大きく異なるが全体的な傾向に大きな違いはない。

また、剛性のみ変化させた $+1\sigma$ ケースとの比較についても、経時変化の時刻に多少の違いが

見られること、緩衝材の応力や O/P 変位に多少の差が見られるくらいで、大きな差は認められない。

(3) Case H28 -1Sigma

パラメータを 1σ ほど小さくしたケースであり、全体的に剛性が低くなっている。 $+1\sigma$ のケースに比べ、初期の O/P 鉛直変位が大きくなっている他、水圧や温度の拡散速度が小さくなっている。結果的に上部の緩衝材や埋戻し土への給水が遅れ、O/P 鉛直変位が下降に転じて以降の変位量は平均値ケースに比べて小さくなっている。また、後半の下部緩衝材の膨潤による O/P 変位も、絶対的な変位は小さくなっている。岩盤ひずみに着目すると、全体的な変形量は大きくなっているが、傾向には大きな差異はない。岩盤の温度については、浸潤速度と熱伝導率が落ちることで温度の上昇に影響が生じており、定常的な温度については低下している。岩盤ひずみについては、剛性が低いケースほど違いが大きく、ひずみ量が大きくなっている。

剛性のみ変化させた -1σ ケースとの比較については、剛性を上げたケースより差異は大きく、連成作用による影響が顕著となる。

(4) Case H28 +2Sigma

$+1\sigma$ のケースと全体的な傾向は同じである。初期の O/P 変位は小さくなり、その後の下降が大きくなっている。また、浸潤速度の上昇により下部緩衝材の膨潤が大きく、また浸透力も強くなることから下降後に反転して O/P が大きく上昇している。緩衝材の全応力については $+1\sigma$ のケースと有意な差は見られない。岩盤のひずみについては、剛性が高いため小さくなり、温度についてはより高い温度まで上昇していることが確認される。

剛性のみ変化させた $+2\sigma$ ケースとの比較については、経時変化のずれ以外については剛性が高いために大きな違いは見られない。

(5) Case H28 -2Sigma

-1σ のケースと全体的な傾向は同じである。剛性が低いため初期の O/P 変位は大きく、上部の緩衝材への給水が遅いため、その後の下降は小さくなっている。緩衝材に作用する全応力については、全体的にはあまり差異はないが、応力の変化量が小さくなっている。岩盤ひずみについては、剛性が低いため、飽和して以降に極端な変形が生じている。また、浸潤速度と温度拡散が遅いため、温度自体の変化量が小さい。

剛性のみ変化させた -2σ ケースとの比較については、O/P 変位や緩衝材の応力については大きな差異はないが、剛性が低いため岩盤ひずみについては解析結果の違いが大きくなっている。

(6) Case H28 +3Sigma

基本的な傾向は $+1\sigma$ 、 $+2\sigma$ ケースと同様であり、初期に O/P が上昇した後に急激に下降している。その後、下部の緩衝材の膨潤により大きな上昇が認められる。岩盤の透水性が高いため、緩衝材への給水量が多く、膨潤による影響が強く生じている。また、岩盤のひずみについては最も小さく、温度については最も高くなっている。伝熱物性についてはパラメータを大きくしたケース

ほど実験結果に近くなる傾向がある。

剛性のみ変化させた+3 σ s ケースとの比較については、連成の影響と剛性の両方が大きいため、他のケースと傾向の違いはあまり見られない。

(7) Case H28 -3Sigma

基本的な傾向は-1 σ 、-2 σ ケースと同様であるが、剛性が非常に低いため極端な変形を生じているケースである。初期に O/P が上昇した後に急激に下降している。特に飽和して以降、急激な変形が見られ、緩衝材の応力についても大きくなっており、他のケースとは異なる変状を示している。剛性のみ変化させた-3 σ s ケースとの比較についても、他のケースと比べて結果の違いが大きくなっている。

5.5.2 H29 年度遠心模型試験モデルの各ケースの解析結果に対する考察

平成 29 年度モデルについて各ケースの結果を整理し、以下の考察を得た。

(1) Case H29 Mean

H29 年度モデルを用いた、要素試験結果の平均値に基づくケースであり、物性パラメータについて H28 年度モデルと H29 年度モデルに違いはない。H28 年度モデルとの比較で大きな違いは、埋戻し材の層厚が厚く、岩盤の上下面の変位が拘束されている点にある。この他、緩衝材や埋戻し土の初期応力が大きくなるように、H28 年度モデルとは異なり周圧と軸圧による拘束効果は初期応力によって設定を行っている。なお、模型高さが高いため、H28 年度モデルより水位が上端に達するのに要する時間は長く、H28 年度モデルと同様に最終時刻まで上端圧が一定に至っていない。なお、モデル外周部の熱伝達境界の設定や温度変化のタイミングを H28 モデルと共通としており、H29 年度モデルでは解析結果は初期段階を除いて温度がやや高い傾向にある。

O/P の鉛直変位について着目すると、初期段階では膨潤や熱ひずみの影響で上昇するが、換算時間で 4 ヶ月経過時以後に下降が生じる。その後 1 年経過時以後に浸潤の進展に伴い、下部の緩衝材が膨潤して浮上する傾向も同様である。これは過年度に実施した感度解析や平成 27 年度の模型試験を対象とした解析と同じ傾向であり、H28 年度モデルによる結果とは傾向が異なる。この傾向の違いは、緩衝材や埋戻し土に生じている初期応力の違いだと考えられる。その後、上部の緩衝材や埋戻し土が膨潤し、上部岩盤に支持された条件で膨らむことで O/P は大きく押し戻される。緩衝材や埋戻し土は O/P より上部に多くがあるため、浮上より沈下時の変位が大きく、その後飽和して以降に大きく上昇するが 200 年経過時までには O/P 変位に変化が見られる。緩衝材に作用する全応力については、初期膨潤による小さな応力を生じた後、1 年相当経過時以降に膨潤による応力変化が大きくなり、20 年相当経過した頃に最大の応力を生じている。最大の応力は解析条件として設定した最大膨潤圧相当であり、応力の測定部位が飽和後は全応力の低下が認められており、これは局所的な膨潤やひずみの発生により変形の斑が生じているものだと考えられる。

岩盤のひずみについては初期段階で熱ひずみによる膨張を生じた後、飽和度の上昇による剛性低下から収縮していることが分かる。飽和して以降に発生ひずみが反転する傾向にあるが、実験結果との乖離は大きい。なお、温度に着目すると初期温度や O/P 温度低下時刻のずれによる差異

が認められる他、実験結果に比べて温度がやや高いことが確認できる。

(2) Case H29 +1Sigma

パラメータを 1σ ほど大きく設定したケースであり、浸潤や温度拡散が速くなり、剛性が大きくなっている。なお、解析条件としての最大膨潤圧は小さくなっている。基本的に平均値ケースと同じ傾向であるが、剛性が大きいことで O/P の最大変位や最終変位との差、岩盤ひずみは小さくなり、ピークの発生時刻も早くなっている。浸潤過程や温度の変化についても早くなっており、温度のピークは高くなっている。初期の段階で生じる O/P の押し戻しも早く、浮上と沈下がはっきりとしている。剛性のみ変化させた $+1\sigma$ ケースとの比較では、浸潤が速いことと変位が小さいこと以外は同様の傾向であり、剛性のみ変化させたケースは平均値ケースと殆ど同じ結果となっている。

(3) Case H29 -1Sigma

パラメータを 1σ ほど小さく設定したケースであり、浸潤や温度拡散が遅くなり、剛性は小さくなり、最大膨潤圧は大きくなっている。平均値ケースと同様の傾向にあり、最大変位は大きくなり発生時刻も遅くなっている。温度の変化についても同様に遅くなっており、温度のピークも低下している。初期に浮上した O/P が沈下する傾向は変わらないが、剛性が小さいため沈下量は大きくなっている。上部の緩衝材や埋戻し土への水分供給が遅いため、飽和後の再浮上では 200 年経過時まで O/P の上昇が収束していない。剛性のみ変化させた -1σ ケースとの比較では、浸潤が遅い他、変位の絶対量が大きくなっている。

(4) Case H29 +2Sigma

パラメータを 2σ ほど大きく設定したケースであり、浸潤や温度拡散が速くなり、剛性はより大きく、最大膨潤圧はより小さくなることで、 $+1\sigma$ で見られた傾向がより強くなっている。剛性が高いため、O/P 変位は小さくなっているが、 $+1\sigma$ ケースとそれほど大きくは変わらない。緩衝材の全応力のピークは約 10 年相当経過時で見られる。剛性のみ変化させた $+2\sigma$ ケースとの比較では、浸潤速度の大幅に速い点と変位が小さくなっている。 $+2\sigma$ ケースは、剛性を 2σ ほど上げているが、平均値ケースより沈下量が大きくなっており、飽和度依存で低下する剛性の幅が大きくなっていることや、岩盤の変形のためと考えられる。

(5) Case H29 -2Sigma

パラメータを 2σ ほど小さく設定したケースであり、浸潤や温度拡散が遅くなり、剛性はより小さく、最大膨潤圧はより大きくなることで、 -1σ で見られた傾向がより強くなっている。O/P の押し戻しは 20 年経過時以降に生じ、浸潤の進行によって 120 年経過時以降に O/P は大きく浮上する。緩衝材の全応力のピークは約 50 年相当経過時で見られる。剛性のみ変化させた -2σ ケースとの比較では、浸潤速度が大幅に遅い点と O/P 変位の絶対量が大きくなっている。 -2σ ケースは、剛性は低いものの O/P の最大沈下量は $+2\sigma$ ケースと同じくらいである。

(6) Case H29 +3Sigma

パラメータを 3σ ほど大きく設定したケースであり、浸潤や温度拡散が速くなり、剛性はより大きく、最大膨潤圧はより小さくなっている。剛性が非常に高いため、O/P はほとんど浮上せず、飽和度の上昇による剛性低下と、上部の緩衝材と埋戻し土の膨潤により、沈下が顕著に見られる。基本的には+ 2σ のケースと同じ傾向である。剛性のみ変化させた 3σ s ケースとの比較では、浸潤が速いこと以外は同様の傾向であるが、剛性のみ変化させた方が O/P 変位は大きく、沈下量は+ 1σ s と- 3σ s を除いて剛性のみ振ったケースでは 10mm 程度となっている。

(7) Case H29 -3Sigma

パラメータを 3σ ほど小さく設定したケースであり、浸潤や温度拡散が遅く、剛性はより小さくなっている。剛性が非常に低いため、O/P 変位は非常に大きくなっている。基本的には- 2σ のケースと同じ傾向であるが、剛性が小さいため極端な変形のケースとなっている。剛性のみ変化させた- 3σ s ケースとの比較では、浸潤が遅いこと以外は同様の傾向であるが、剛性のみ変化させた方が変形は小さくなっている。なお、これらの剛性を非常に小さく設定したケースに限り、緩衝材に作用する全応力が時刻の進行に対して増加傾向にあり、飽和して以降に圧縮されていることが分かる。

5.5.3 遠心模型試験の数値解析結果のまとめ

本研究では、H28 年度および H29 年度に実施した遠心模型試験を対象に解析パラメータのばらつきを考慮した数値解析を行った。それぞれの解析モデルで平均値ケースと $\pm 3\sigma$ の物性パラメータのばらつきを与えた 7 ケースと、ばらつきを考慮する物性を剛性のみに限定した比較のための 6 ケースの解析を実施し、合計 26 ケースの数値解析を実施した。これらを整理して得られた結果を表 5.5.3-1 にまとめて以下に示す。

表 5.5.3-1 遠心模型試験の数値解析結果のまとめ

解析モデル	解析ケース	緩衝材全応力 (最大) [MPa]	最大土圧 発生時刻 [year]	緩衝材全応力 (最終) [MPa]	O/P鉛直変位 (最大) [mm]	最大鉛直変位 発生時刻 [year]	O/P鉛直変位 (最終) [mm]	岩盤内壁 周方向ひずみ (最終ひずみ) [μ]
H28モデル (全物性)	Mean	1.06	1.35	0.59	0.55	0.13	-5.39	-384.53
	+1 Sigma	1.07	0.86	0.42	0.80	0.13	-5.29	-113.95
	-1 Sigma	1.05	2.00	0.64	0.12	0.08	-6.96	-1130.00
	+2 Sigma	1.08	0.65	0.35	0.99	0.13	-4.48	4.54
	-2 Sigma	1.02	2.15	0.74	0.00	0.00	-4.76	-3547.10
	+3 Sigma	1.08	0.55	0.39	1.09	0.13	-3.92	63.69
	-3 Sigma	2.15	41.50	2.10	57.50	31.10	56.44	-50531.00
H29モデル (全物性)	Mean	0.70	19.50	0.29	1.36	6.50	-2.64	-413.27
	+1 Sigma	0.70	13.69	0.33	0.69	0.28	-5.51	-170.57
	-1 Sigma	0.72	41.50	0.33	1.17	17.39	-5.92	-873.36
	+2 Sigma	0.69	10.53	0.32	0.63	0.28	-7.33	-53.93
	-2 Sigma	0.74	51.25	0.38	1.64	20.55	-6.33	-2280.60
	+3 Sigma	0.68	9.75	0.30	0.57	0.26	-7.54	4.55
	-3 Sigma	1.25	200.02	1.25	16.13	155.01	11.13	-25649.00
H28モデル (剛性のみ)	+1 Sigma-S	1.10	1.25	0.57	0.72	0.13	-5.52	-138.00
	-1 Sigma-S	1.01	1.35	0.62	0.29	0.08	-6.04	-1013.20
	+2 Sigma-S	1.13	1.25	0.52	0.85	0.13	-5.46	-27.22
	-2 Sigma-S	0.95	1.40	0.68	0.00	0.00	-5.67	-3274.30
	+3 Sigma-S	1.17	1.25	0.45	0.96	0.15	-5.05	37.02
	-3 Sigma-S	1.97	22.13	1.83	33.87	100.00	33.87	-49717.00
H29モデル (剛性のみ)	+1 Sigma-S	0.72	18.97	0.29	0.83	6.50	-3.74	-223.74
	-1 Sigma-S	0.69	19.50	0.32	0.91	6.50	-5.25	-863.34
	+2 Sigma-S	0.73	18.97	0.28	0.75	6.50	-5.94	-128.51
	-2 Sigma-S	0.69	18.97	0.39	0.87	0.26	-7.10	-2418.70
	+3 Sigma-S	0.74	18.97	0.28	0.68	6.50	-5.49	-74.34
	-3 Sigma-S	1.16	200.02	1.16	5.92	70.00	-4.27	0.00

2つの解析モデルにおいて設定した検討ケースに基づき、得られた結果の整理を行い、これをまとめた考察を以下に示す。

(1) 各試験モデルにおける O/P 鉛直変位の発生メカニズムの整理

H28年度とH29年度の実験では、ともに初期段階でO/Pが上昇し、その後は下降が生じることを示す結果が得られている。実施した数値解析の結果についても、O/Pが上昇した後は下降が生じており、この傾向は昨年度実施したH27年度モデルの再現解析でも同様の結果が得られている。そこで、今年度実施した各解析モデルについて、O/P鉛直変位の発生メカニズムを整理する。

H28年度モデルを対象に実施した各ケースのO/P鉛直変位の経時変化を図5.5.3-1～図5.5.3-4に示す。物性のばらつきを考慮した何れのケースも初期に発生するO/Pの上昇量は実験と

比較して小さいが、実験では浸潤速度が非常に速いことを確認しており、緩衝材の膨潤作用の程度や、飽和時に土骨格にかかる間隙水圧の有無が関係している。

H28 年度モデルでは、実験と同様に下端のプレートを押圧で押し上げ、注水による膨張を抑制する手続きをそのままモデル化している。しかしながら、実験に比べて浸潤速度が遅いため、飽和度が低い段階で緩衝材および埋戻し土は圧縮されており、解析では不飽和時に想定される膨潤圧より応力の方が大きい状態にあると考えられる。これは膨潤による作用が生じにくくなっていることを意味する。なお、実験では下部の緩衝材が膨潤することで O/P が押し上げられ、遅れて上部の緩衝材や埋戻し土が浸潤し、徐々に膨潤することで弾性的に O/P を押し返す作用が生じていると考えられる。

以上のことから、H28 年度モデルで考えられる O/P 鉛直変位の主な要因は以下の通りである。

- 1) 軸圧による下端プレートの押し上げと緩衝材の変形によって上昇する。
- 2) 埋戻し土の圧縮によって上部の緩衝材を押し下げる効果が生じて下降する。
- 3) 軸圧による応力が生じている条件下で飽和度依存の剛性が低下し、O/P が下降する。
- 4) モデル全体が飽和し、各部の膨張や岩盤底部が下がることで O/P の上昇が見られる。

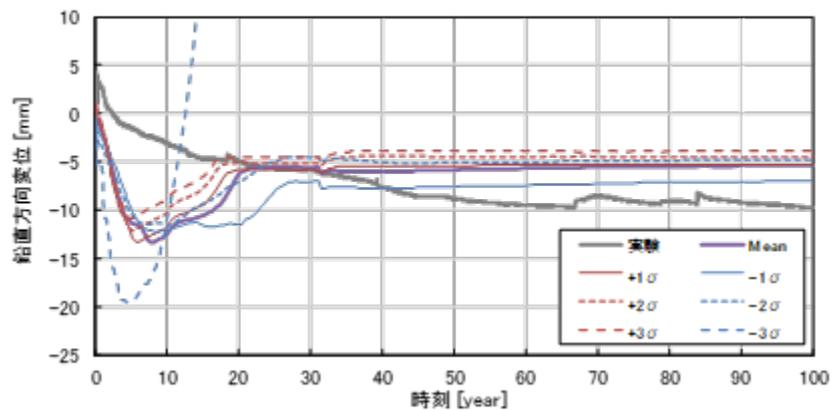


図 5.5.3-1 全物性のばらつきを評価した H28 年度モデルの O/P 鉛直変位

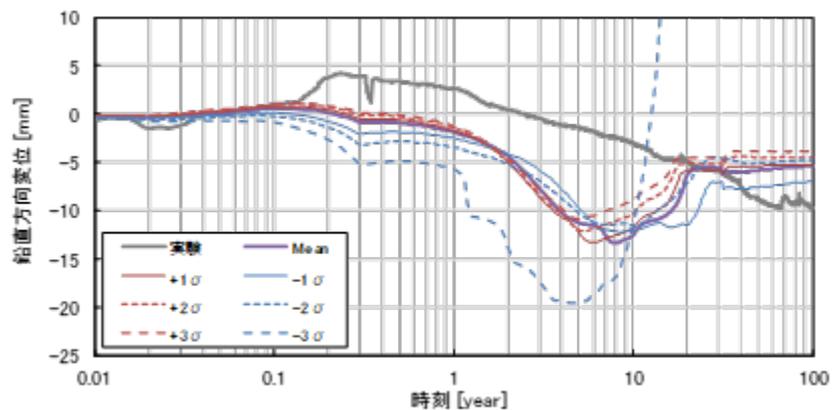


図 5.5.3-2 全物性のばらつきを評価した H28 年度モデルの O/P 鉛直変位（時間軸対数）

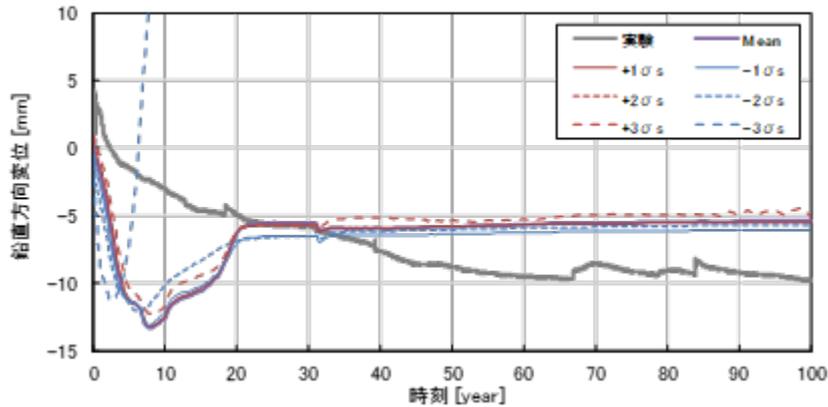


図 5.5.3-3 剛性のみばらつきを評価した H28 年度モデルの O/P 鉛直変位

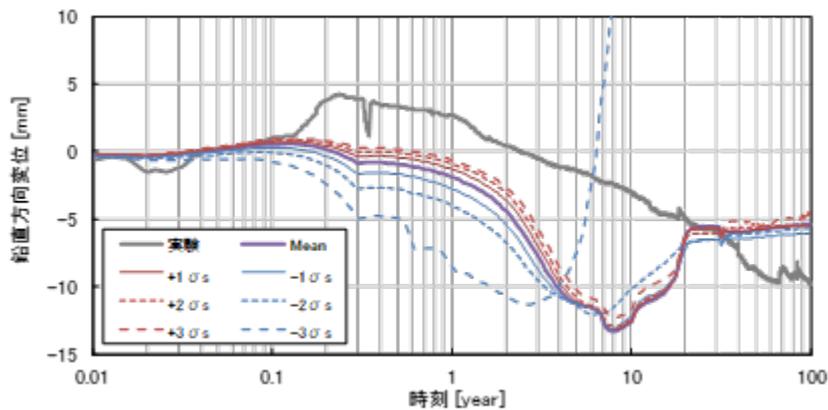


図 5.5.3-4 剛性のみばらつきを評価した H28 年度モデルの O/P 鉛直変位（時間軸対数）

H29 年度モデルを対象に実施した各ケースの O/P 鉛直変位の経時変化を図 5.5.3-5～図 5.5.3-8 に示す。H28 年度モデルの解析と比べ、特に全物性のばらつきを検討したケース間において O/P 鉛直変位の履歴に違いが大きいが、初期に上昇して後に下降する基本的な挙動に違いはない。物性のばらつきを考慮した何れのケースも初期に発生する O/P の上昇量が実験と比較して小さいことも同様である。

H29 年度モデルでは、H28 年度モデルで軸圧によって生じる初期応力により、緩衝材の膨潤が抑制されたと考えられることから、緩衝材や埋戻し土の初期応力を自重相当として解析を行っている。実験と比べて浸潤速度が遅いため、初期段階の O/P 上昇量は小さいが確かに生じており、その後は上部の緩衝材や埋戻し土の膨潤変形により、弾性的に押し下げられている。

以上のことから、H29 年度モデルで考えられる O/P 鉛直変位の主な要因は以下の通りである。

- 1) 下部の緩衝材の膨潤変形によって O/P が押し上げられて上昇する。
- 2) 上部の緩衝材や埋戻し土が膨潤変形することで、弾性的に押し下げられて下降する。
- 3) 飽和度依存の剛性が低下し、緩衝材や岩盤が収縮することによる O/P の上昇と下降。
- 4) モデル全体が飽和し、各部の膨張と岩盤底部が下がることで O/P に上昇が見られる。

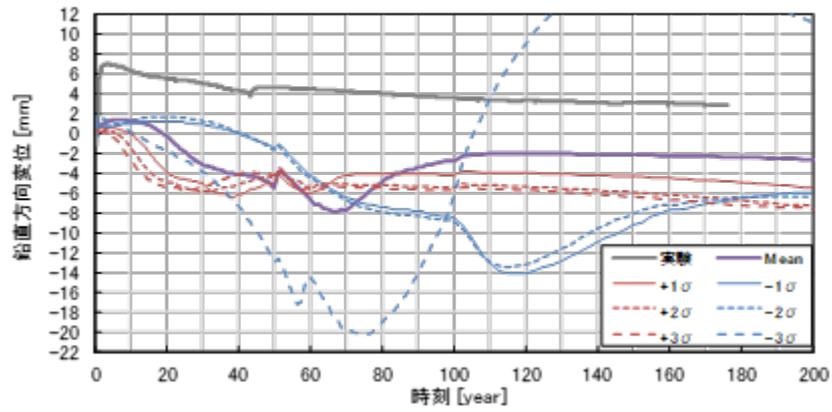


図 5.5.3-5 全物性のばらつきを評価した H29 年度モデルの O/P 鉛直変位

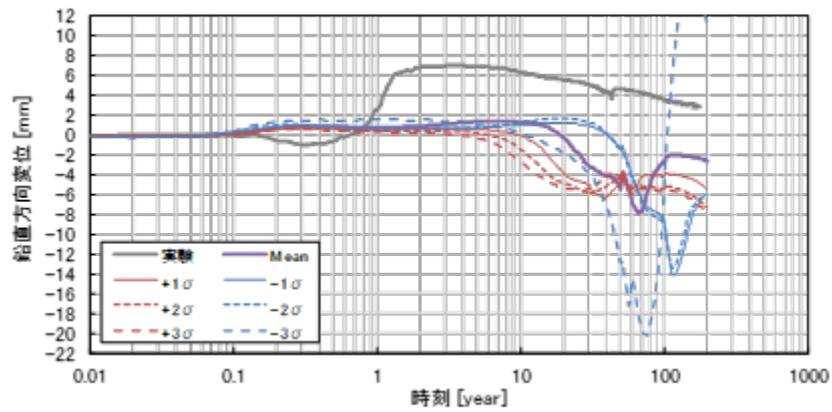


図 5.5.3-6 全物性のばらつきを評価した H29 年度モデルの O/P 鉛直変位 (時間軸対数)

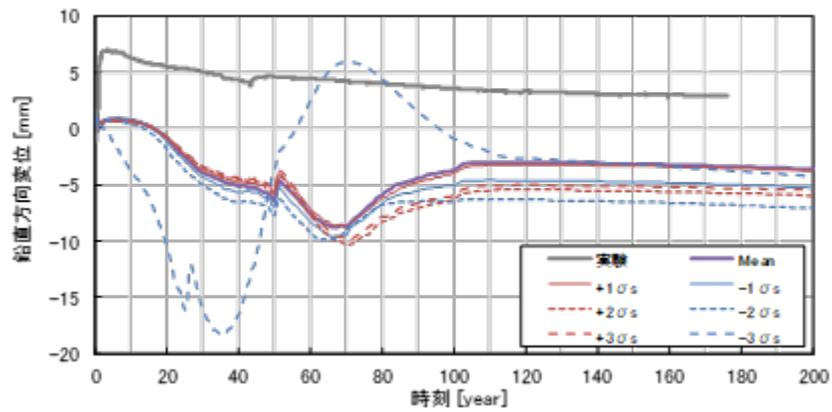


図 5.5.3-7 剛性のみばらつきを評価した H29 年度モデルの O/P 鉛直変位

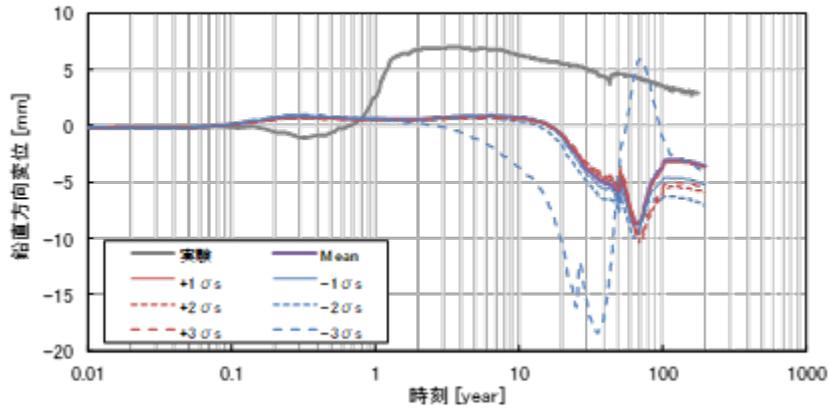


図 5.5.3-8 剛性のみばらつきを評価した H29 年度モデルの O/P 鉛直変位 (時間軸対数)

(2) パラメータのばらつきが O/P 変位に与える影響

境界条件や初期条件の異なる 2 つのモデルに、共通のパラメータを用いた 7 ケースと比較のための 6 ケースの解析を行い、それぞれの O/P 鉛直変位の最大と最終値をまとめた。

H28 年度モデルでは軸圧载荷の終了した段階で最も大きな変位が生じており、時刻に関するばらつきは殆ど見られない。最大変位は剛性の小さいケースほど大きく、最終変位は小さくなっている。-3 σ ケースは剛性が小さく、設定した膨潤圧は大きいため極端な変位を生じている。

H29 年度モデルについても-3 σ ケース以外には O/P 鉛直変位に大きなばらつきは生じていないが、最終変位についてはばらつきが大きくなっている。剛性が低く、浸潤が遅いケースほど最大値は大きくなっており、最終値にはその傾向は認められない。

全体的な傾向として、剛性が極端に低くなるケースを除いて、パラメータを大きく振っているのに対し、O/P 変位の大きさについてのばらつきは相対的に小さい。

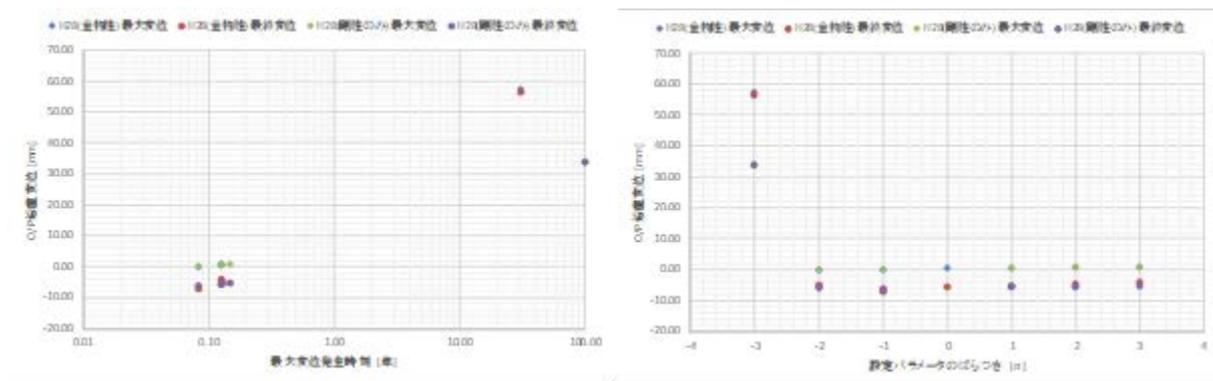


図 5.5.3-9 H28 年度モデルにおけるベントナイト土圧の最大および最終値のばらつき

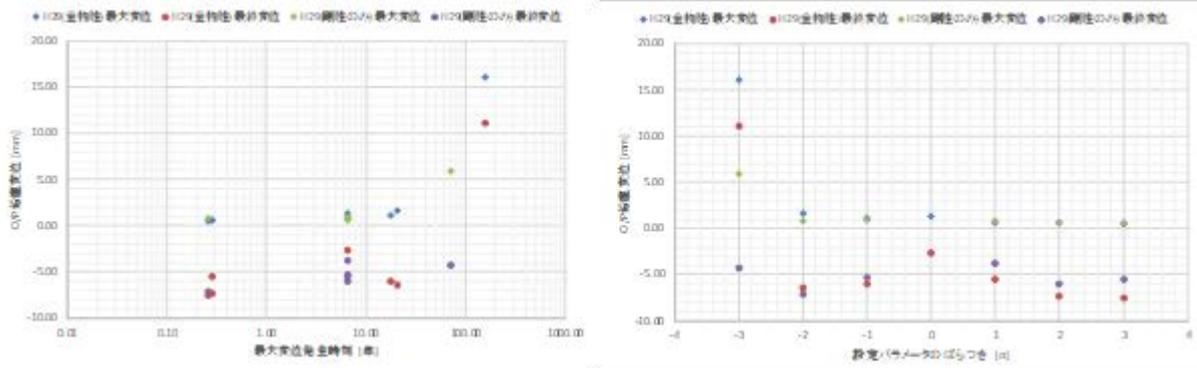


図 5.5.3-10 H29 年度モデルにおけるベントナイト土圧の最大および最終値のばらつき

(3) パラメータのばらつきが緩衝材応力に与える影響

同様に、H28 年度と H29 年度の 2 つのモデルに対する、共通のパラメータを用いた 7 ケースと比較のための 6 ケースの解析結果より、それぞれの緩衝材に作用する全応力の最大と最終値をまとめた。

H28 年度モデルでは最大圧が軸圧相当となるため、極端な変形を生じる -3σ ケースを除くとばらつきは小さい。その他のケースでは、浸潤が早く剛性の高いケースほど最終値が小さくなる傾向にあり、間隙水圧の作用で局所的に膨張していると考えられる。

H29 年度モデルについても -3σ ケースのみ他と大きく緩衝材全応力の大きさが異なり、他のケースはある程度の範囲内に収まった結果である。緩衝材の最大膨潤圧は解析物性としての最大膨潤圧にほぼ対応し、浸潤が遅く剛性が小さいケースほど大きく設定されている。全応力の最終値についても同様の傾向にある。

全体的な傾向として、剛性が極端に低くなるケースを除いて、パラメータを大きく振っているのに対し、緩衝材に生じる全応力の大きさについてのばらつきは相対的に小さい。

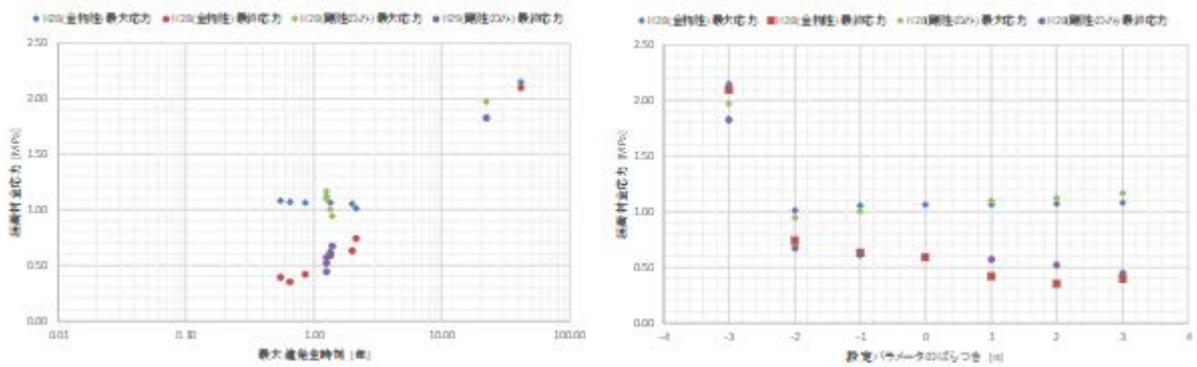


図 5.5.3-11 H28 年度モデルにおける緩衝材の応力の最大および最終値のばらつき

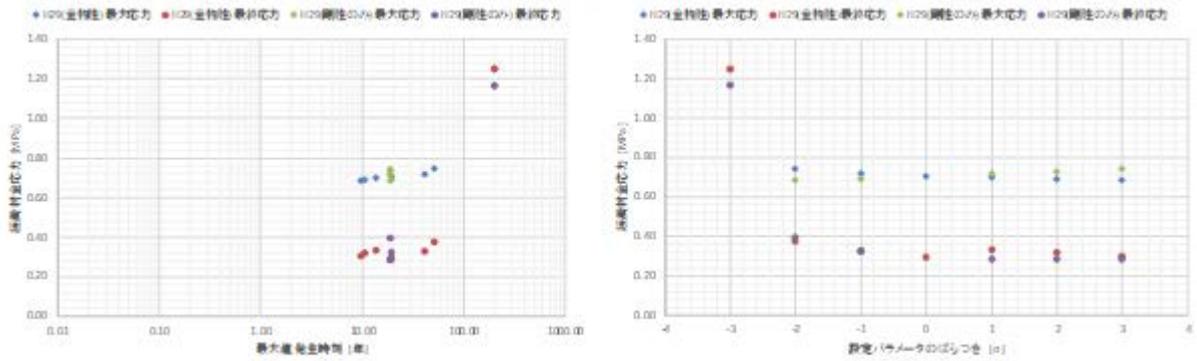


図 5.5.3-12 H29 年度モデルにおける緩衝材の応力の最大および最終値のばらつき

(4) 遠心模型試験との比較についてのまとめ

遠心模型試験の結果からは模型上面の排水圧が一定となる時刻が早く、解析結果に比べて浸潤が早い、または上部へ水分を供給する他の経路の可能性が考えられる。可能性としては緩衝材と岩盤間の隙間であるが、解析ではこの部分の透水性をある程度以上に設定しても有意な変化がないことを確認している。また、岩盤の厚さがあり、埋戻し材を挟んで上面にも岩盤が設けられた H29 年度モデルについても排水圧の上昇が早いこと、平成 29 年度の実験では水位センサーにより実際に水位の上昇速度が計測されており、実験と解析の間には大きな浸潤速度の差があることが確認されている。実験と解析の間に見られる浸潤速度の差の原因については、現時点で明らかではないが、不飽和域での浸透速度の違いから不飽和特性の評価に起因するものと考えられる。

上記の考察も踏まえ、2 つの実験と解析モデルの比較を行い、O/P の鉛直変位についてはある程度は同様の傾向が認められる。具体的に、下部緩衝材の膨潤により O/P が押し上げられた後に、上部の緩衝材や埋戻し土の膨潤により、O/P が沈下する傾向が実験と解析の両方で認められることは重要である。一方で、緩衝材の全応力については、解析では飽和して以降の間隙水圧発生時に大きく膨張する傾向があり、全応力で評価しても緩衝材の応力が小さくなることが確認されており、評価についてはよく検討する必要がある。

また、岩盤外側に貼り付けられたひずみゲージにて測定される温度の比較のため、解析では熱伝達境界を設定している。これは、遠心模型の圧力容器から流出する熱をモデル化するものであり、実験結果を参考にして境界面で一様な熱伝達係数を設定しているが、実験結果の再現は良好とは言えず、課題があることが分かった。また、岩盤に生じているひずみの比較についても差異は大きく、これについては飽和度依存の剛性低下などについて再検討と改良が必要と考えられる。

第5章 参考文献

- [1] Tsang, C.-F., Jing, L., Stephansson, O. and Kautsky, F.: The DECOVALEX III project: A summary of activities and lessons learned, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.42, pp.593-610, 2005.
- [2] 澤田昌孝, 岡田哲実, 長谷川琢磨: 高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発—緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築—, 電力中央研究所 研究報告, N05028, 2006.
- [3] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その1)—超長期遠心載荷岩盤実験装置と遠心力模型試験法の開発—, 電力中央研究所 研究報告, N10018, 2011.
- [4] Rutqvist, J., Börgesson, L., Chijimatsu, M., Kobayashi, A., Jing, L., Nguyen, T. S., Noorishad, J. and Tsang, C.-F.: Thermohydromechanics of partially saturated geological media: governing equations and formulation of four finite element models, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.38, pp.105-127, 2001.
- [5] 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 研究報告, U99013, 1999.
- [6] 澤田昌孝, 岡田哲実: 地下施設力学的相互作用解析のための軟岩クリープモデルの開発, 電力中央研究所 研究報告, N04028, 2005.
- [7] 緒方信英, 小崎明郎, 植田浩義, 朝野英一, 高尾肇: 高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術—その4 人工バリアの設計と製作—, *原子力バックエンド研究*, Vol.5, No.2, pp.103-121, 1999.
- [8] 核燃料サイクル機構: 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次とりまとめ 一分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1440 99-024, 1999.
- [9] 大久保誠介, 秋哲淵: 気乾状態と湿潤状態での田下凝灰岩ならびに大谷凝灰岩の一軸圧縮クリープ, *材料*, Vol.43, No.490, pp.819-825, 1994.
- [10] 小峯秀雄: 同一名称ベントナイトの産出年度による違いと膨潤特性理論評価式の適用性, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.251-252, 2005.
- [11] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その2)—ニアフィールド模型試験法の確立と等方応力拘束条件下における長期挙動—, 電力中央研究所 研究報告, N11040, 2012.

第6章 まとめ

6.1 実施内容

本検討では人工バリアと周辺岩盤の数百年程度の将来にわたる長期挙動評価手法の構築を目的として、人工バリアの定置後に曝される多様な環境条件を考慮した遠心模型試験と数値解析を通じ、数値解析手法の妥当性や解析手法を検証する実験データの取得方法を検討した。

本年度は、3カ年の取り纏めとして THM 長期挙動評価手法の骨子を提示した。遠心模型試験では、処分坑道およびその上部の埋戻し材を含む模型を作製し、遠心力場の相似則に基づいて百年程度に相当する THM 連成挙動データを提示した。数値解析では、熱-水理-力学連成コードを用いた解析を行い、平成 28、29 年度に実施した遠心模型試験の計測結果と比較した。また、入力するパラメータ取得のための要素試験を行った。

6.2 本年度の成果

本年度の成果は、以下の通りである。

6.2.1 研究計画

(1) 全体計画

H28 年度に更新した計画に基づき、下記の内容を実施した。

- ・ THM 長期挙動評価手法（骨子）の提示。
- ・ 処分坑道の高さ方向の空間を模擬し、その中に設置する埋戻し材を処分孔上部に設置した模型を用いた遠心模型試験。
- ・ H27、28 年度の数値解析結果をふまえ、入力する重要パラメータ追加取得のための要素試験。
- ・ H28、29 年度に実施した遠心模型試験の数値解析を実施し、その結果の比較検討。

(2) 長期挙動評価手法（骨子）の提示

最終的な目標である長期挙動評価手法の構築のために、今フェーズの成果としてその骨子を提示した。数値解析の妥当性確認の考え方、比較・検討対象の THM 模型実験の種類・特徴、妥当性確認におけるフロー、人工バリアと周辺岩盤の将来状態に関する重要な評価項目とそれに影響を及ぼす環境要因を抽出し、遠心場室内模型実験を例に具体化を行った。

(3) 共通の条件

本研究において実施する数値解析および遠心模型試験について、材料特性、実験・解析条件を同一にすることによってより正確な検討を目指すことが実施内容の一つとなっている。このため、H28 年度までと同様、実施する遠心模型試験、数値解析、数値解析のパラメータ取得のための要素試験における共通の材料、条件について検討した。

材料について、オーバーパックはステンレス鋼（ガラス固化体を含めた全密度を基準に重量調整）、緩衝材はベントナイト（クニゲル V1）70wt%+ケイ砂 30wt%とし初期含水比 10%程度、

膨潤後平均換装密度を 1.60Mg/m^3 とした。埋戻し材は、配合は重量比でベントナイト：ケイ砂＝15：85、ケイ砂は3号および5号を重量比で1：1、初期含水比は7～8%程度、初期平均乾燥密度を 1.80Mg/m^3 以上とした。周辺岩盤は堆積岩サイトを想定し、三浦層群初声層に産出する凝灰岩を選定した。以上の材料はH28年度までと同様である。

H29年度の遠心模型試験では、坑道の高さ方向の空間を模擬し、その中に設置する坑道内埋戻し材（上部埋戻し材）を処分孔上部に設置した模型を使用した。また、上部埋戻し材の上方にはトンネルの上部を模擬した岩盤を設置した。

境界条件は、応力については深度400mの施設を想定し、飽和後の処分孔上端面における周方向の有効応力が 4.0MPa 、軸方向については所定の軸圧を載荷後、模型下面からの間隙水圧注入と同時に模型高さが不変となる制御を行った。温度については、地度を 33°C 、オーバーパックの温度を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次とりまとめ—」に従い処分孔縦置き方式のオーバーパック表面の温度の経時変化を採用した（最高温度 94.5°C ）。

6.2.2 遠心模型試験

処分坑道を含むニアフィールドのオーバーパックの挙動を検討するため、緩衝材の変形（膨出）に着目し、オーバーパック1体、処分孔1孔、および処分坑道を含んだ廃棄体周辺を抽出し、1/50の模型を用いて遠心力50G場において長期試験（実物換算時間約170年相当）を実施した。坑道内の埋戻し材（上部埋戻し材）の存在によって生じる緩衝材および下部埋戻し材の変形がオーバーパックの鉛直変位に与える影響や、その時の緩衝材および下部埋戻し材、上部埋戻し材の応力の発現状況、緩衝材および下部埋戻し材の膨出状態を把握した。岩盤内部の水位、岩盤の温度、岩盤のひずみ、緩衝材および下部埋戻し材に作用する応力、緩衝材および下部埋戻し材の膨出状況、上部埋戻し材に作用する応力、埋戻し材の鉛直変位およびオーバーパックの鉛直変位を計測した。結果のまとめを以下に記す。

(1) 岩盤内部の水位

岩盤内の水位を把握するために水位センサーを岩盤内に設置し、計測点における水位の到達を確認できた。間隙水は下方から上方に順に浸潤し、間隙水が模型上方まで到達するには1.35年相当の時間が必要であった。また、各計測点間の実物換算距離を実物換算時間で除した浸潤速度は平均で $3.49 \times 10^{-7}\text{m/s}$ であった。

(2) 温度

処分孔内部、膨出センサー、水位センサー設置部、岩盤外縁部の順にオーバーパックから距離が離れるほどに計測した温度が低くなった。また、オーバーパック温度の下降に追従し、計測温度も下降した。

(3) ひずみ

岩盤のひずみは間隙水が浸潤することで有効応力が低下し、引張ひずみが発生する。水位が処

分孔下端部から処分孔上端部まで上昇する間に値の増加が開始していることから、岩盤内の水位到達時間の結果とも良く対応している。また、軸方向のひずみは模型高さ方向の変位一定制御に切替え、上端圧が上昇始めてから 0.92MPa で一定になるまでは圧縮側にひずみが発生し、上端圧一定後は再度引張ひずみが発生する結果となった。

(4) 膨出の形状

緩衝材および下部埋戻し材の膨出状況を把握するために膨出センサーを設置した。間隙水が処分孔上端部まで浸潤した時刻付近でひずみが増加し、上端圧が一定になった時点でひずみが減少した。ひずみの分布形状は変形が小さい内は中心部が凸の形状を示したが、変形が大きくなると固定点に近く変形の大きい部分のひずみが大きくなった。上端圧一定後に膨出センサーのひずみが漸減した。

(5) 緩衝材および上部埋戻し材の応力

緩衝材の全応力は緩衝材直下まで水位が到達した後に昇圧を開始した。その後処分孔上端部まで水位が到達すると下部埋戻し材の膨潤が始まり、緩衝材の全応力の昇圧速度が大きくなった。上部埋戻し材の全応力は上部埋戻し材下端部まで水位が到達した後に昇圧を開始した。上部埋戻し材中部まで水位が到達すると上部埋戻し材中部の全応力の昇圧速度が大きくなり、その後上部埋戻し材上方の全応力の昇圧速度が大きくなった。また、上部埋戻し材の透水係数が大きいため緩衝材の応力より早い時点で値が収束した。

(6) オーバーパックの鉛直変位

緩衝材直下まで水位が到達した後に下方の緩衝材の膨潤が始まるためオーバーパックは浮上を開始した。その後処分孔上端部まで水位が到達した時間付近から浮上速度が大きくなり、上端圧および上部埋戻し材の応力が一定になるとオーバーパックの沈下が始まった。

膨出センサーの出力とオーバーパックの鉛直変位との関係において、膨出センサーのひずみ値の増加とオーバーパックの浮上、上端圧が一定となった後の膨出センサーのひずみ値の低下とオーバーパックの沈下傾向は良く対応している。

(7) 試験後の緩衝材・下部埋戻し材の密度・含水比測定

試験後の緩衝材・下部埋戻し材の定体積サンプリングによる密度測定により、平均乾燥密度は上部と下部で低く、中部で高い傾向を示した。これは上部埋戻し材から間隙水が浸潤することで下方の緩衝材とともに下部埋戻し材が膨潤し、膨出したことによる影響が考えられる。含水比の深度分布より処分孔上下端部での含水比が高いことが計測されていることと調和的である。

(8) CT 撮影

試験前後に模型の CT 撮影を行い、その内部構造や密度分布を把握した。試験後の CT 撮影において、試験前には観察された緩衝材、埋戻し材の継目が膨潤により充填されていた。CT 値より換算された密度とサンプリングによって計測された密度は、値には差があるものの、深度方向の

分布は類似の傾向を示した。また、下部岩盤と上部埋戻し材の境界には高い CT 値（高い密度）の領域が計測され、写真観察も含め、これは下部埋戻し材の一部が流出した可能性が指摘される。

6.2.3 数値解析に連動した要素試験

要素試験では、H28 年度までの数値解析結果に基づき、数値解析で入力する重要パラメータとばらつき評価のためにデータを追加取得した。

試験は、緩衝材、埋戻し材及び岩盤について、物理特性（固相の密度、湿潤密度、含水比測定）、膨潤特性、熱特性、保水特性、圧密特性と力学特性（一軸圧縮強さ測定、せん断強度測定）を、日本工業規格及び地盤工学会基準・規格に基づき実施した。

(1) 物理・化学特性

クニゲル V1、ケイ砂、緩衝材、埋戻し材に対して土粒子の密度試験結果を追加取得した。クニゲル V1 に対してメチレンブルー吸着量の測定を追加してモンモリロナイト含有率を算定した。Na、Ca、M、K の陽イオン交換容量を追加取得した。

(2) 膨潤特性

緩衝材と埋戻し材に対して膨潤圧試験を追加し、平衡膨潤圧のばらつきが小さいことを確認した。ベントナイトのモンモリロナイト含有率を考慮すると、取得した平衡膨潤圧と JAEA のデータベースを比較して調和的であることを確認した。

(3) 水分特性

変水位透水試験を実施して緩衝材と埋戻し材の透水係数を追加した。ベントナイトのモンモリロナイト含有率を考慮すると、取得した透水係数と JAEA のデータベースを比較して調和的であることを確認した。

緩衝材と埋戻し材の保水特性試験については、透水試験終了後の飽和した供試体を使用して飽和度 80%以上の化学ポテンシャルの結果を取得した。

(4) 熱特性

比熱については、統計処理が可能な数量を取得し、ばらつきが小さいことを確認した。緩衝材と埋戻し材では、温度の依存性が小さいことを確認した。

熱膨張測定については解析用物性値を取得し、ばらつきが小さいことを確認した。緩衝材の熱膨張ひずみが 60°C 程度から収縮傾向を示すことを確認した。埋戻し材と周辺岩盤では、熱膨張ひずみと温度の関係が線形であることを確認した。

(5) 力学特性

緩衝材に対して圧密非排水三軸圧縮試験を実施して非排水強度、変形特性を算定した。

埋戻し材に対して圧密非排水三軸圧縮試験を実施して非排水強度、変形特性を算定した。

乾燥状態の周辺岩盤に対して圧密排水三軸圧縮試験を実施して、湿潤状態の排水強度・変形特

性と比較して飽和度依存性があることを確認した。

飽和状態の周辺岩盤の圧密排水三軸クリープ試験を実施して、時間依存性の物性値を取得した。水平方向から採取した湿潤状態の周辺岩盤に対して圧密排水三軸圧縮試験を実施して、強度・変形特性の異方性が小さいことを確認した。

80°Cに加熱した湿潤状態の周辺岩盤に対して圧密排水三軸圧縮試験を実施して、強度・変形特性の温度依存性が小さいことを確認した。

(6) 統計処理

H27～H29年に実施した要素試験に対して統計処理を実施して物性値のばらつきを変動係数により比較した。

(7) 解析用物性値

H27～H29年に実施した要素試験から解析用物性値と標準偏差を算定して、解析用物性値の設定方法を示した

6.2.4 遠心模型試験の数値解析

本研究では、H28年度およびH29年度に実施した遠心模型試験を対象に解析パラメータのばらつきを考慮した数値解析を行った。それぞれの解析モデルで平均値ケースと $\pm 3\sigma$ の物性パラメータのばらつきを与えた7ケースと、ばらつきを考慮する物性を剛性のみに限定した比較のための6ケースの解析を実施し、合計26ケースの数値解析を実施した。これらを整理して得られた結果を以下に示す。

(1) 各試験モデルにおけるO/P鉛直変位の発生メカニズムの整理

H28年度とH29年度の実験では、ともに初期段階でO/Pが上昇し、その後は下降が生じることを示す結果が得られている。実施した数値解析の結果についても、O/Pが上昇した後は下降が生じており、この傾向は昨年度実施したH27年度モデルの再現解析でも同様の結果が得られている。そこで、今年度実施した各解析モデルについて、O/P鉛直変位の発生メカニズムを整理した。

H28年度モデルを対象に実施した各ケースのO/P鉛直変位の経時変化について、物性のばらつきを考慮した何れのケースも初期に発生するO/Pの上昇量は実験と比較して小さいが、実験では浸潤速度が非常に速いことを確認しており、緩衝材の膨潤作用の程度や、飽和時に土骨格にかかる間隙水圧の有無が関係している。

H28年度モデルでは、実験と同様に下端のプレートを軸圧で押し上げ、注水による膨張を抑制する手続きをそのままモデル化している。しかしながら、実験に比べて浸潤速度が遅いため、飽和度が低い段階で緩衝材および埋戻し土は圧縮されており、解析では不飽和時に想定される膨潤圧より応力の方が大きい状態にあると考えられる。これは膨潤による作用が生じにくくなっていることを意味する。なお、実験では下部の緩衝材が膨潤することでO/Pが押し上げられ、遅れて上部の緩衝材や埋戻し土が浸潤し、徐々に膨潤することで弾性的にO/Pを押し返す作用が生じていると考えられる。

以上のことから、H28 年度モデルで考えられる O/P 鉛直変位の主な要因は以下の通りである。

- 1) 軸圧による下端プレートの押し上げと緩衝材の変形によって上昇する。
- 2) 埋戻し土の圧縮によって上部の緩衝材を押し下げる効果が生じて下降する。
- 3) 軸圧による応力が生じている条件下で飽和度依存の剛性が低下し、O/P が下降する。
- 4) モデル全体が飽和し、各部の膨張や、岩盤底部が下がることで O/P の上昇が見られる。

同様に、H29 年度モデルを対象に実施した各ケースの O/P 鉛直変位の経時変化について、H28 年度モデルの解析と比べ、特に全物性のばらつきを検討したケース間において O/P 鉛直変位の履歴に違いが大きいのが、初期に上昇して後に下降する基本的な挙動に違いはない。物性のばらつきを考慮した何れのケースも初期に発生する O/P の上昇量が実験と比較して小さいことも同様である。

H29 年度モデルでは、H28 年度モデルで軸圧によって生じる初期応力により、緩衝材の膨潤が抑制されたと考えられることから、緩衝材や埋戻し土の初期応力を自重相当として解析を行っている。実験と比べて浸潤速度が遅いため、初期段階の O/P 上昇量は小さいが確かに生じており、その後は上部の緩衝材や埋戻し土の膨潤変形により、弾性的に押し下げられている。

以上のことから、H29 年度モデルで考えられる O/P 鉛直変位の主な要因は以下の通りである。

- 1) 下部の緩衝材の膨潤変形によって O/P が押し上げられて上昇する。
- 2) 上部の緩衝材や埋戻し土が膨潤変形することで、弾性的に押し下げられて下降する。
- 3) 飽和度依存の剛性が低下し、緩衝材や岩盤が収縮することによる O/P の上昇と下降。
- 4) モデル全体が飽和し、各部の膨張と岩盤底部が下がることで O/P に上昇が見られる。

(2) パラメータのばらつきが O/P 変位に与える影響

境界条件や初期条件の異なる 2 つのモデルに、共通のパラメータを用いた 7 ケースと比較のための 6 ケースの解析を行い、それぞれの O/P 鉛直変位の最大と最終値をまとめた。

H28 年度モデルでは軸圧载荷の終了した段階で最も大きな変位が生じており、時刻に関するばらつきは殆ど見られない。最大変位は剛性の小さいケースほど大きく、最終変位は小さくなっている。-3 σ ケースは剛性が小さく、設定した膨潤圧は大きいため極端な変位を生じている。

H29 年度モデルについても-3 σ ケース以外には O/P 鉛直変位に大きなばらつきは生じていないが、最終変位についてはばらつきが大きくなっている。剛性が低く、浸潤が遅いケースほど最大値は大きくなっており、最終値にはその傾向は認められない。

全体的な傾向として、剛性が極端に低くなるケースを除いて、パラメータを大きく振っているのに対し、O/P 変位の大きさについてのばらつきは相対的に小さい。

同様に、H28 年度と H29 年度の 2 つのモデルに対する、共通のパラメータを用いた 7 ケースと比較のための 6 ケースの解析結果より、それぞれの緩衝材に作用する全応力の最大と最終値をまとめた。

H28 年度モデルでは最大圧が軸圧相当となるため、極端な変形を生じる-3 σ ケースを除くとばらつきは小さい。その他のケースでは、浸潤が早く剛性の高いケースほど最終値が小さくなる傾向にあり、間隙水圧の作用で局所的に膨張していると考えられる。

H29 年度モデルについても -3σ ケースのみ他と大きく緩衝材全応力の大きさが異なり、他のケースはある程度の範囲内に収まった結果である。緩衝材の最大膨潤圧は解析物性としての最大膨潤圧にほぼ対応し、浸潤が遅く剛性が小さいケースほど大きく設定されている。全応力の最終値についても同様の傾向にある。

全体的な傾向として、剛性が極端に低くなるケースを除いて、パラメータを大きく振っているのに対し、緩衝材に生じる全応力の大きさについてのばらつきは相対的に小さい。

(3) 遠心模型試験との比較についてのまとめ

遠心模型試験の結果からは模型上面の排水圧が一定となる時刻が早く、解析結果に比べて浸潤が早い、または上部へ水分を供給する他の経路の可能性が考えられる。可能性としては緩衝材と岩盤間の隙間であるが、解析ではこの部分の透水性をある程度以上に設定しても有意な変化がないことを確認している。また、岩盤の厚さがあり、埋戻し材を挟んで上面にも岩盤が設けられた H29 年度モデルについても排水圧の上昇が早いこと、平成 29 年度の実験では水位センサーにより実際に水位の上昇速度が計測されており、実験と解析の間には大きな浸潤速度の差があることが確認されている。実験と解析の間に見られる浸潤速度の差の原因については、現時点で明らかではないが、不飽和域での浸透速度の違いから不飽和特性の評価に起因するものと考えられる。

上記の考察も踏まえ、2 つの実験と解析モデルの比較を行い、O/P の鉛直変位についてはある程度は同様の傾向が認められる。具体的に、下部緩衝材の膨潤により O/P が押し上げられた後に、上部の緩衝材や埋戻し土の膨潤により、O/P が沈下する傾向が実験と解析の両方で認められることは重要である。一方で、緩衝材の全応力については、解析では飽和して以降の間隙水圧発生時に大きく膨張する傾向があり、全応力で評価しても緩衝材の応力が小さくなることが確認されており、評価についてはよく検討する必要がある。

また、岩盤外側に貼り付けられたひずみゲージにて測定される温度の比較のため、解析では熱伝達境界を設定している。これは、遠心模型の圧力容器から流出する熱をモデル化するものであり、実験結果を参考にして境界面で一様な熱伝達係数を設定しているが、実験結果の再現は良好とは言えず、課題があることが分かった。また、岩盤に生じているひずみの比較についても差異は大きく、これについては飽和度依存の剛性低下などについて再検討と改良が必要と考えられる。

添付資料 1

数值解析結果

目 次

添付図 1	Case H28 Mean	岩盤部分・間隙水圧分布.....	9
添付図 2	Case H28 Mean	岩盤部分・温度分布.....	9
添付図 3	Case H28 Mean	岩盤部分・主せん断応力分布	10
添付図 4	Case H28 Mean	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	10
添付図 5	Case H28 Mean	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	10
添付図 6	Case H28 Mean	岩盤部分・主せん断ひずみ分布.....	11
添付図 7	Case H28 Mean	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	11
添付図 8	Case H28 Mean	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	11
添付図 9	Case H28 Mean	緩衝材と埋戻し部分・飽和度分布	12
添付図 10	Case H28 Mean	緩衝材と埋戻し材部分・乾燥密度変化の分布.....	12
添付図 11	Case H28 Mean	鉛直変位分布	12
添付図 12	Case H28 Mean	O/P 鉛直変位の時刻歴	13
添付図 13	Case H28 Mean	緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	13
添付図 14	Case H28 Mean	温度時刻歴(岩盤外壁)	14
添付図 15	Case H28 Mean	温度時刻歴(内壁,上面)	14
添付図 16	Case H28 Mean	岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	15
添付図 17	Case H28 Mean	岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	15
添付図 18	Case H28 Mean	岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	15
添付図 19	Case H28 +1Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布	16
添付図 20	Case H28 +1Sigma	岩盤部分・温度分布	16
添付図 21	Case H28 +1Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布	17
添付図 22	Case H28 +1Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	17
添付図 23	Case H28 +1Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	17
添付図 24	Case H28 +1Sigma	岩盤部分・主せん断ひずみ分布.....	18
添付図 25	Case H28 +1Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	18
添付図 26	Case H28 +1Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	18
添付図 27	Case H28 +1Sigma	緩衝材と埋戻し材部分・飽和度分布	19
添付図 28	Case H28 +1Sigma	緩衝材と埋戻し材部分・乾燥密度変化の分布	19
添付図 29	Case H28 +1Sigma	鉛直変位分布	19
添付図 30	Case H28 +1Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴	20
添付図 31	Case H28 +1Sigma	緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	20
添付図 32	Case H28 +1Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	21
添付図 33	Case H28 +1Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	21
添付図 34	Case H28 +1Sigma	岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	22
添付図 35	Case H28 +1Sigma	岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	22
添付図 36	Case H28 +1Sigma	岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	22

添付図 37	Case H28 -1Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布	23
添付図 38	Case H28 -1Sigma	岩盤部分・温度分布	23
添付図 39	Case H28 -1Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布	24
添付図 40	Case H28 -1Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	24
添付図 41	Case H28 -1Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	24
添付図 42	Case H28 -1Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	25
添付図 43	Case H28 -1Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	25
添付図 44	Case H28 -1Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	25
添付図 45	Case H28 -1Sigma	緩衝材と埋戻し材部分・飽和度分布	26
添付図 46	Case H28 -1Sigma	緩衝材と埋戻し材部分・乾燥密度変化の分布	26
添付図 47	Case H28 -1Sigma	鉛直変位分布	26
添付図 48	Case H28 -1Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴	27
添付図 49	Case H28 -1Sigma	緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	27
添付図 50	Case H28 -1Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	28
添付図 51	Case H28 -1Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	28
添付図 52	Case H28 -1Sigma	岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	29
添付図 53	Case H28 -1Sigma	岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	29
添付図 54	Case H28 -1Sigma	岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	29
添付図 55	Case H28 +2Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布	30
添付図 56	Case H28 +2Sigma	岩盤部分・温度分布	30
添付図 57	Case H28 +2Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布	31
添付図 58	Case H28 +2Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	31
添付図 59	Case H28 +2Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	31
添付図 60	Case H28 +2Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	32
添付図 61	Case H28 +2Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	32
添付図 62	Case H28 +2Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	32
添付図 63	Case H28 +2Sigma	ベントナイト部分・飽和度分布	33
添付図 64	Case H28 +2Sigma	ベントナイト部分・乾燥密度変化の分布.....	33
添付図 65	Case H28 +2Sigma	鉛直変位分布	33
添付図 66	Case H28 +2Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴	34
添付図 67	Case H28 +2Sigma	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	34
添付図 68	Case H28 +2Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	35
添付図 69	Case H28 +2Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	35
添付図 70	Case H28 +2Sigma	岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	36
添付図 71	Case H28 +2Sigma	岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	36
添付図 72	Case H28 +2Sigma	岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	36
添付図 73	Case H28 -2Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布	37
添付図 74	Case H28 -2Sigma	岩盤部分・温度分布	37

添付図 75	Case H28 -2Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布	38
添付図 76	Case H28 -2Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)	38
添付図 77	Case H28 -2Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)	38
添付図 78	Case H28 -2Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布	39
添付図 79	Case H28 -2Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	39
添付図 80	Case H28 -2Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	39
添付図 81	Case H28 -2Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布	40
添付図 82	Case H28 -2Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布	40
添付図 83	Case H28 -2Sigma	鉛直変位分布	40
添付図 84	Case H28 -2Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴	41
添付図 85	Case H28 -2Sigma	緩衝材の全応力時刻歴(鉛直方向、圧縮：正)	41
添付図 86	Case H28 -2Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁)	42
添付図 87	Case H28 -2Sigma	温度時刻歴(内壁,上面)	42
添付図 88	Case H28 -2Sigma	岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴(引張：正)	43
添付図 89	Case H28 -2Sigma	岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴(引張：正)	43
添付図 90	Case H28 -2Sigma	岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴(引張：正)	43
添付図 91	Case H28 +3Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布	44
添付図 92	Case H28 +3Sigma	岩盤部分・温度分布	44
添付図 93	Case H28 +3Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布	45
添付図 94	Case H28 +3Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)	45
添付図 95	Case H28 +3Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)	45
添付図 96	Case H28 +3Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布	46
添付図 97	Case H28 +3Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	46
添付図 98	Case H28 +3Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	46
添付図 99	Case H28 +3Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布	47
添付図 100	Case H28 +3Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布	47
添付図 101	Case H28 +3Sigma	鉛直変位分布	47
添付図 102	Case H28 +3Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴	48
添付図 103	Case H28 +3Sigma	緩衝材の全応力時刻歴(鉛直方向、圧縮：正)	48
添付図 104	Case H28 +3Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁)	49
添付図 105	Case H28 +3Sigma	温度時刻歴(内壁,上面)	49
添付図 106	Case H28 +3Sigma	岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴(引張：正)	50
添付図 107	Case H28 +3Sigma	岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴(引張：正)	50
添付図 108	Case H28 +3Sigma	岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴(引張：正)	50
添付図 109	Case H28 -3Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布	51
添付図 110	Case H28 -3Sigma	岩盤部分・温度分布	51
添付図 111	Case H28 -3Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布	52
添付図 112	Case H28 -3Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)	52

添付図 113	Case H28 -3Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	52
添付図 114	Case H28 -3Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	53
添付図 115	Case H28 -3Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	53
添付図 116	Case H28 -3Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	53
添付図 117	Case H28 -3Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布.....	54
添付図 118	Case H28 -3Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布.....	54
添付図 119	Case H28 -3Sigma	鉛直変位分布.....	54
添付図 120	Case H28 -3Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴.....	55
添付図 121	Case H28 -3Sigma	緩衝材の全応力時刻歴(鉛直方向、圧縮：正).....	55
添付図 122	Case H28 -3Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	56
添付図 123	Case H28 -3Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	56
添付図 124	Case H28 -3Sigma	岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	57
添付図 125	Case H28 -3Sigma	岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	57
添付図 126	Case H28 -3Sigma	岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	57
添付図 127	Case H29 Mean	岩盤部分・間隙水圧分布.....	58
添付図 128	Case H29 Mean	岩盤部分・温度分布.....	58
添付図 129	Case H29 Mean	岩盤部分・主せん断応力分布.....	59
添付図 130	Case H29 Mean	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	59
添付図 131	Case H29 Mean	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	59
添付図 132	Case H29 Mean	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	60
添付図 133	Case H29 Mean	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	60
添付図 134	Case H29 Mean	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	60
添付図 135	Case H29 Mean	緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布.....	61
添付図 136	Case H29 Mean	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布.....	61
添付図 137	Case H29 Mean	鉛直変位分布.....	61
添付図 138	Case H29 Mean	O/P 鉛直変位の時刻歴.....	62
添付図 139	Case H29 Mean	緩衝材の全応力時刻歴(鉛直方向、圧縮：正).....	62
添付図 140	Case H29 Mean	温度時刻歴(岩盤外壁).....	63
添付図 141	Case H29 Mean	温度時刻歴(内壁,上面).....	63
添付図 142	Case H29 Mean	上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	64
添付図 143	Case H29 Mean	岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	64
添付図 144	Case H29 Mean	岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	64
添付図 145	Case H29 +1Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布.....	65
添付図 146	Case H29 +1Sigma	岩盤部分・温度分布.....	65
添付図 147	Case H29 +1Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布.....	66
添付図 148	Case H29 +1Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	66
添付図 149	Case H29 +1Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	66
添付図 150	Case H29 +1Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	67

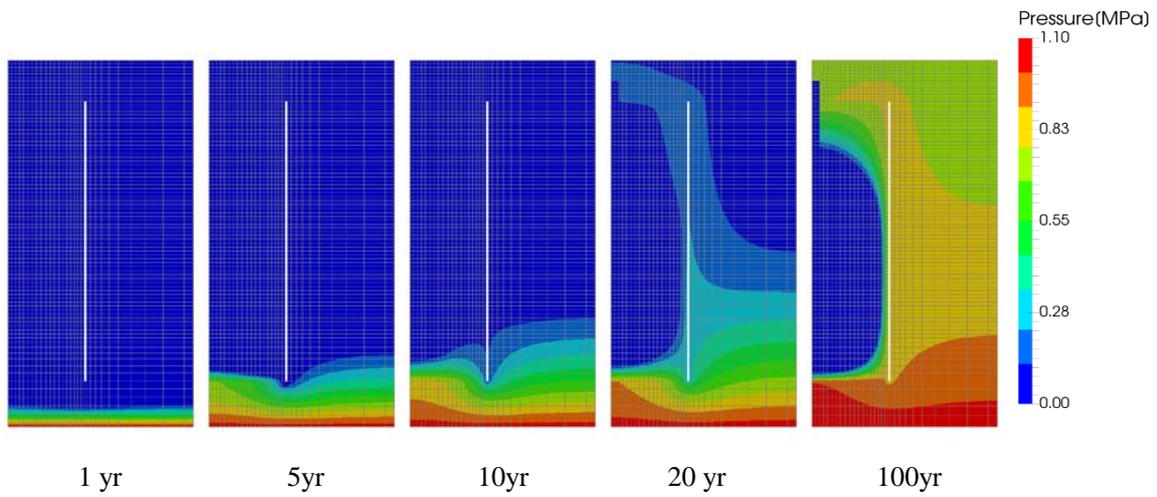
添付図 151	Case H29 +1Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	67
添付図 152	Case H29 +1Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	67
添付図 153	Case H29 +1Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布.....	68
添付図 154	Case H29 +1Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布.....	68
添付図 155	Case H29 +1Sigma	鉛直変位分布.....	68
添付図 156	Case H29 +1Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴.....	69
添付図 157	Case H29 +1Sigma	緩衝材の全応力時刻歴(鉛直方向、圧縮：正).....	69
添付図 158	Case H29 +1Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	70
添付図 159	Case H29 +1Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	70
添付図 160	Case H29 +1Sigma	上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	71
添付図 161	Case H29 +1Sigma	岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	71
添付図 162	Case H29 +1Sigma	岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	71
添付図 163	Case H29 -1Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布.....	72
添付図 164	Case H29 -1Sigma	岩盤部分・温度分布.....	72
添付図 165	Case H29 -1Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布.....	73
添付図 166	Case H29 -1Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	73
添付図 167	Case H29 -1Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	73
添付図 168	Case H29 -1Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	74
添付図 169	Case H29 -1Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	74
添付図 170	Case H29 -1Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	74
添付図 171	Case H29 -1Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布.....	75
添付図 172	Case H29 -1Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布.....	75
添付図 173	Case H29 -1Sigma	鉛直変位分布.....	75
添付図 174	Case H29 -1Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴.....	76
添付図 175	Case H29 -1Sigma	緩衝材の全応力時刻歴(鉛直方向、圧縮：正).....	76
添付図 176	Case H29 -1Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	77
添付図 177	Case H29 -1Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	77
添付図 178	Case H29 -1Sigma	上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	78
添付図 179	Case H29 -1Sigma	岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	78
添付図 180	Case H29 -1Sigma	岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴(引張：正).....	78
添付図 181	Case H29 +2Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布.....	79
添付図 182	Case H29 +2Sigma	岩盤部分・温度分布.....	79
添付図 183	Case H29 +2Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布.....	80
添付図 184	Case H29 +2Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	80
添付図 185	Case H29 +2Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	80
添付図 186	Case H29 +2Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	81
添付図 187	Case H29 +2Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	81
添付図 188	Case H29 +2Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	81

添付図 189	Case H29 +2Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布	82
添付図 190	Case H29 +2Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布.....	82
添付図 191	Case H29 +2Sigma	鉛直変位分布	82
添付図 192	Case H29 +2Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴.....	83
添付図 193	Case H29 +2Sigma	緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	83
添付図 194	Case H29 +2Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	84
添付図 195	Case H29 +2Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	84
添付図 196	Case H29 +2Sigma	上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	85
添付図 197	Case H29 +2Sigma	岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	85
添付図 198	Case H29 +2Sigma	岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	85
添付図 199	Case H29 -2Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布	86
添付図 200	Case H29 -2Sigma	岩盤部分・温度分布	86
添付図 201	Case H29 -2Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布.....	87
添付図 202	Case H29 -2Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	87
添付図 203	Case H29 -2Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	87
添付図 204	Case H29 -2Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	88
添付図 205	Case H29 -2Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	88
添付図 206	Case H29 -2Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	88
添付図 207	Case H29 -2Sigma	ベントナイト部分・飽和度分布	89
添付図 208	Case H29 -2Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布.....	89
添付図 209	Case H29 -2Sigma	鉛直変位分布	89
添付図 210	Case H29 -2Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴.....	90
添付図 211	Case H29 -2Sigma	緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	90
添付図 212	Case H29 -2Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	91
添付図 213	Case H29 -2Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	91
添付図 214	Case H29 -2Sigma	上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	92
添付図 215	Case H29 -2Sigma	岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	92
添付図 216	Case H29 -2Sigma	岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	92
添付図 217	Case H29 +3Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布	93
添付図 218	Case H29 +3Sigma	岩盤部分・温度分布	93
添付図 219	Case H29 +3Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布.....	94
添付図 220	Case H29 +3Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	94
添付図 221	Case H29 +3Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	94
添付図 222	Case H29 +3Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	95
添付図 223	Case H29 +3Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	95
添付図 224	Case H29 +3Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	95
添付図 225	Case H29 +3Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布	96
添付図 226	Case H29 +3Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布.....	96

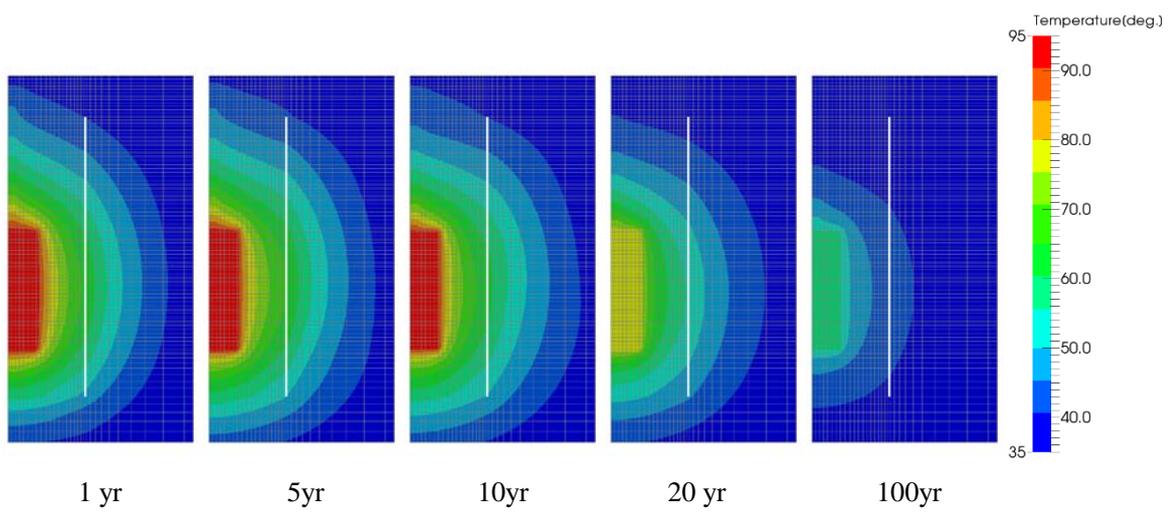
添付図 227	Case H29 +3Sigma	鉛直変位分布	96
添付図 228	Case H29 +3Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴	97
添付図 229	Case H29 +3Sigma	緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	97
添付図 230	Case H29 +3Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	98
添付図 231	Case H29 +3Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	98
添付図 232	Case H29 +3Sigma	上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	99
添付図 233	Case H29 +3Sigma	岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	99
添付図 234	Case H29 +3Sigma	岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	99
添付図 235	Case H29 -3Sigma	岩盤部分・間隙水圧分布	100
添付図 236	Case H29 -3Sigma	岩盤部分・温度分布	100
添付図 237	Case H29 -3Sigma	岩盤部分・主せん断応力分布.....	101
添付図 238	Case H29 -3Sigma	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	101
添付図 239	Case H29 -3Sigma	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	101
添付図 240	Case H29 -3Sigma	岩盤部分・主せん断応ひずみ分布.....	102
添付図 241	Case H29 -3Sigma	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	102
添付図 242	Case H29 -3Sigma	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	102
添付図 243	Case H29 -3Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布	103
添付図 244	Case H29 -3Sigma	緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布.....	103
添付図 245	Case H29 -3Sigma	鉛直変位分布	103
添付図 246	Case H29 -3Sigma	O/P 鉛直変位の時刻歴	104
添付図 247	Case H29 -3Sigma	緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	104
添付図 248	Case H29 -3Sigma	温度時刻歴(岩盤外壁).....	105
添付図 249	Case H29 -3Sigma	温度時刻歴(内壁,上面).....	105
添付図 250	Case H29 -3Sigma	上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	106
添付図 251	Case H29 -3Sigma	岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)	106
添付図 252	Case H29 -3Sigma	岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正).....	106

数値解析結果の一覧

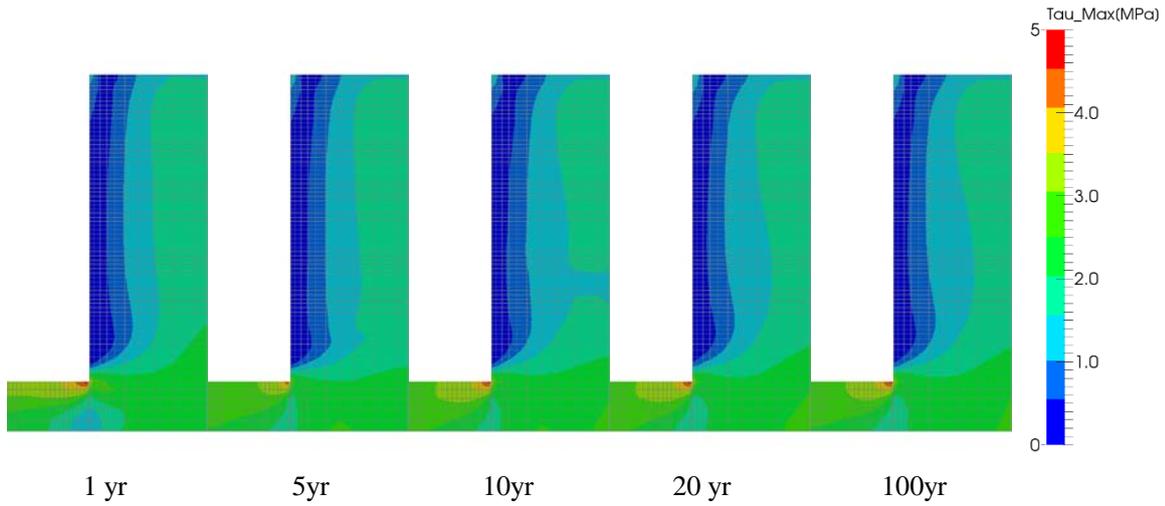
(1) Case H28 Mean



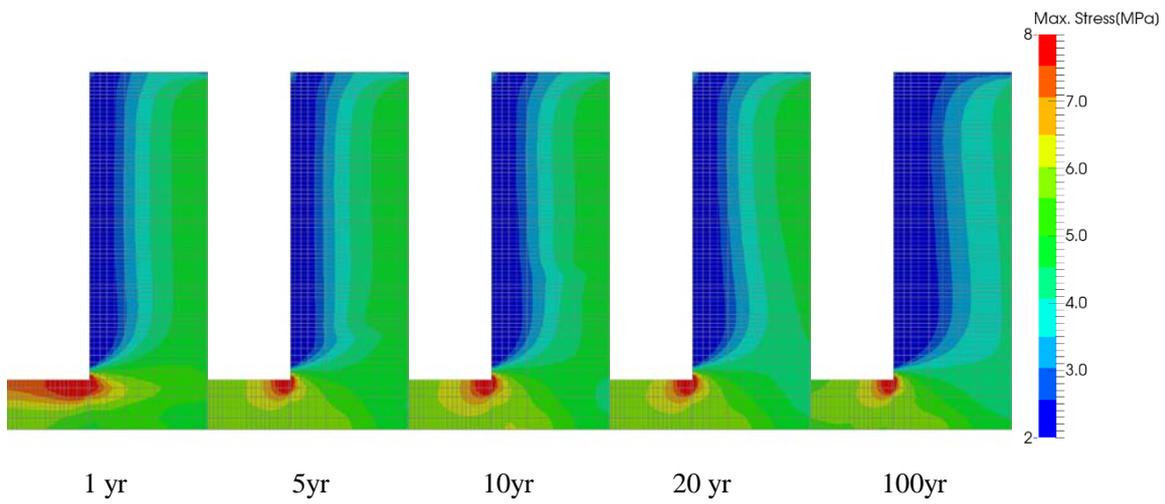
添付図 1 Case H28 Mean 岩盤部分・間隙水圧分布



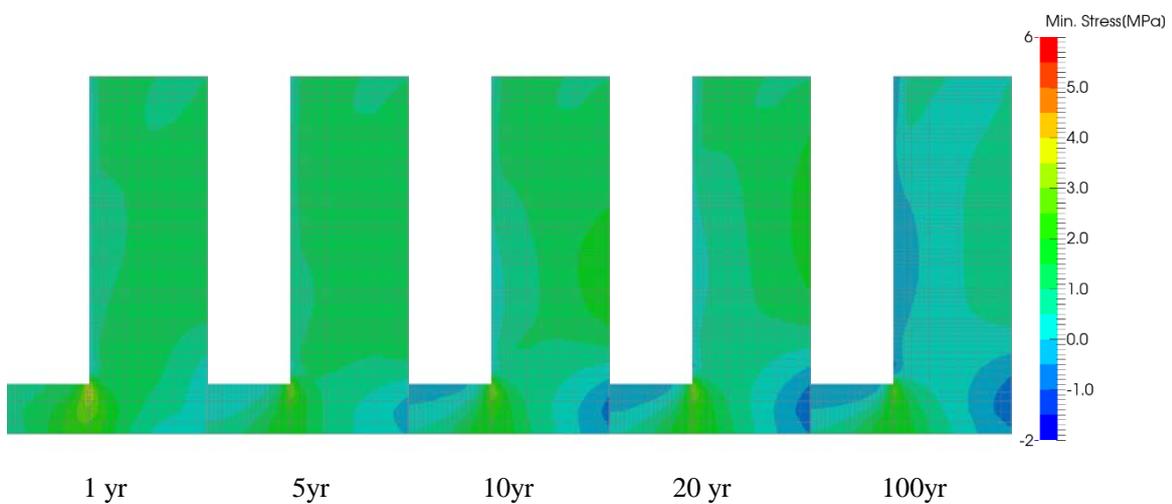
添付図 2 Case H28 Mean 岩盤部分・温度分布



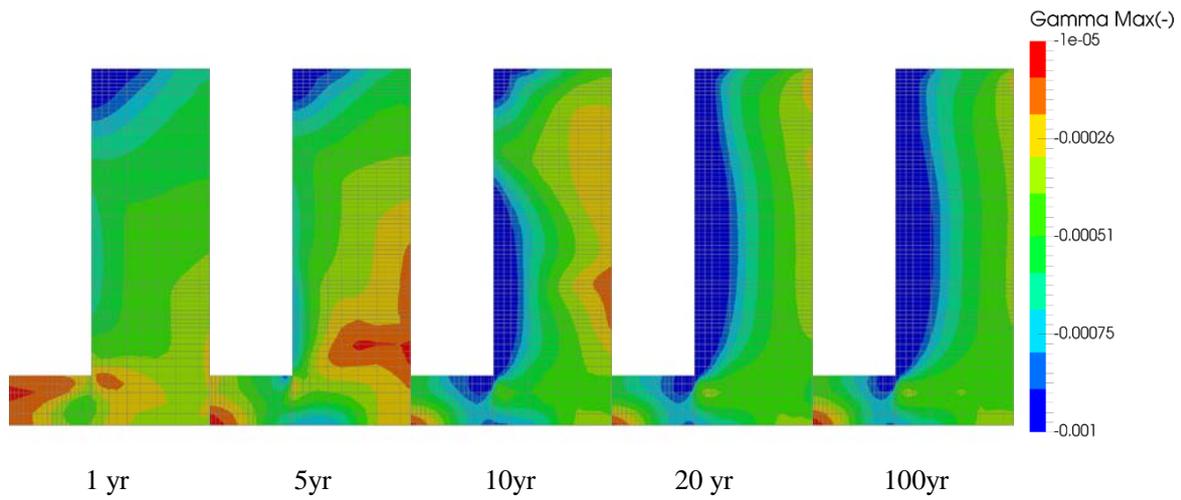
添付図 3 Case H28 Mean 岩盤部分・主せん断応力分布



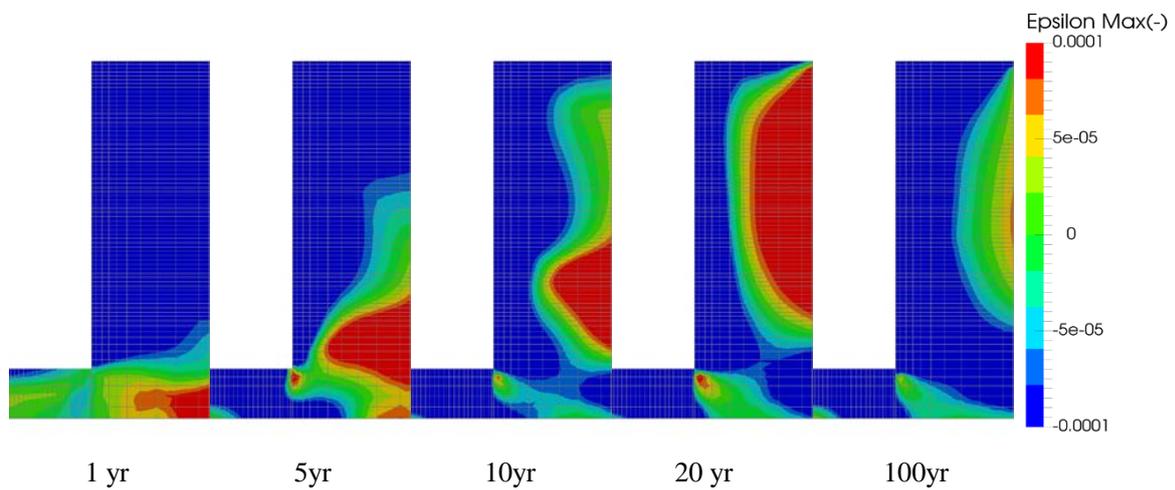
添付図 4 Case H28 Mean 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



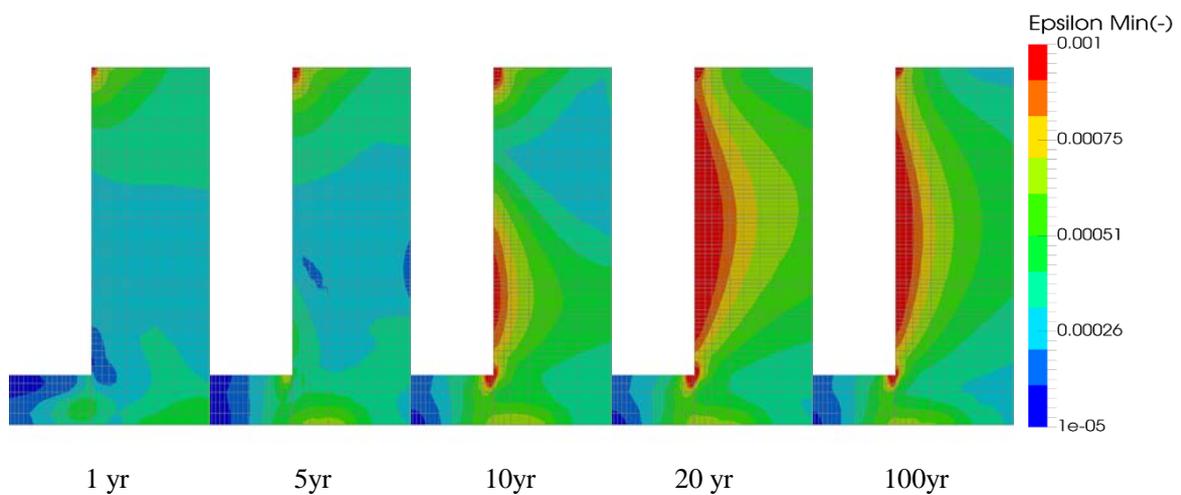
添付図 5 Case H28 Mean 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



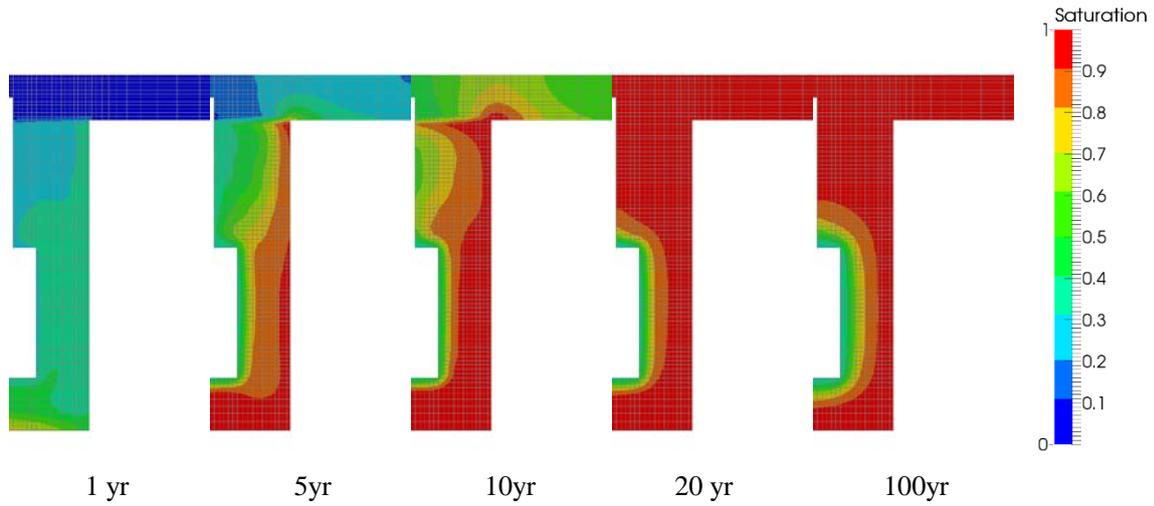
添付図 6 Case H28 Mean 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



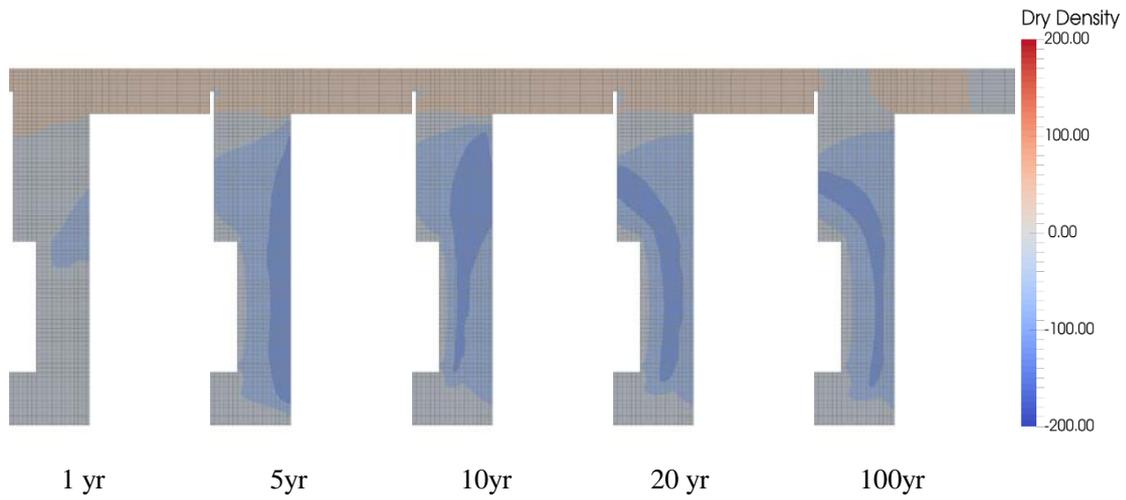
添付図 7 Case H28 Mean 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



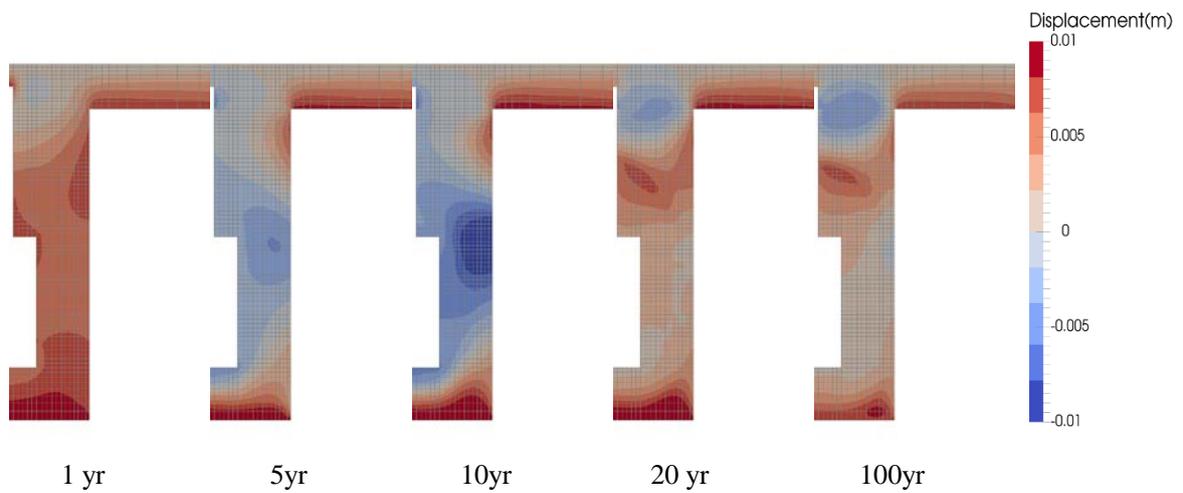
添付図 8 Case H28 Mean 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



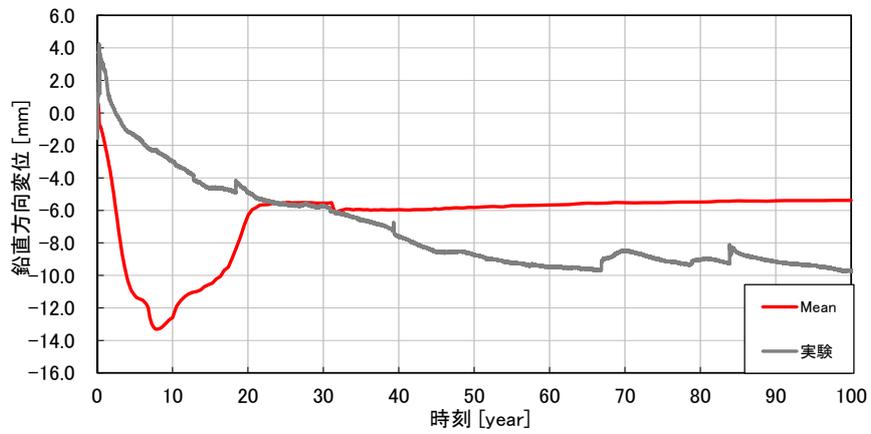
添付図 9 Case H28 Mean 緩衝材と埋戻し部分・飽和度分布



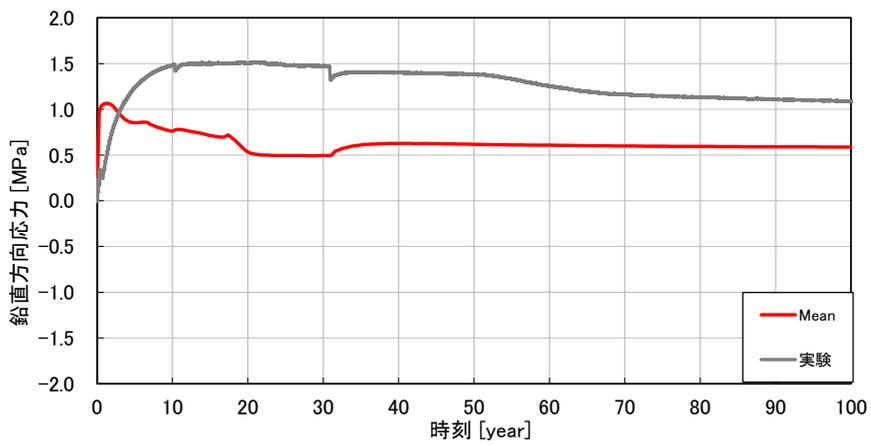
添付図 10 Case H28 Mean 緩衝材と埋戻し材部分・乾燥密度変化の分布



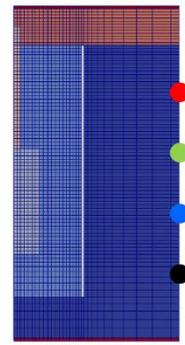
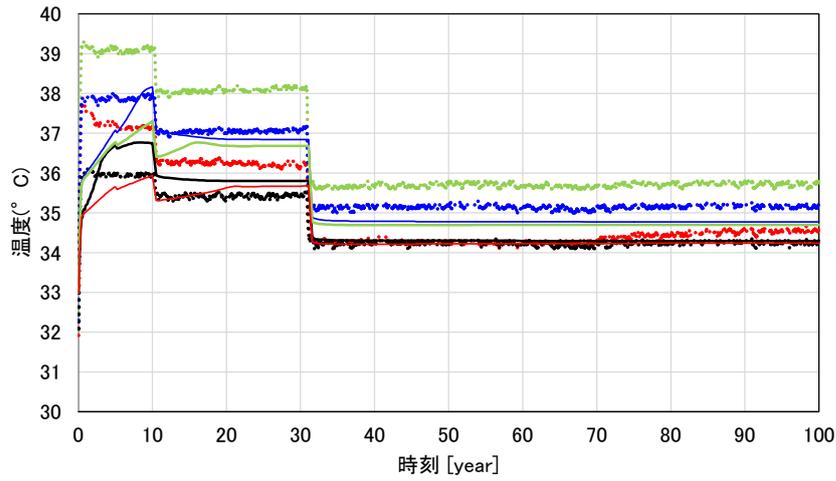
添付図 11 Case H28 Mean 鉛直変位分布



添付図 12 Case H28 Mean O/P 鉛直変位の時刻歴

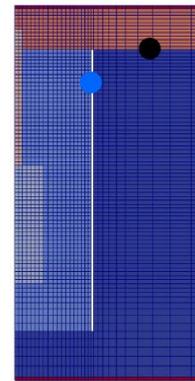
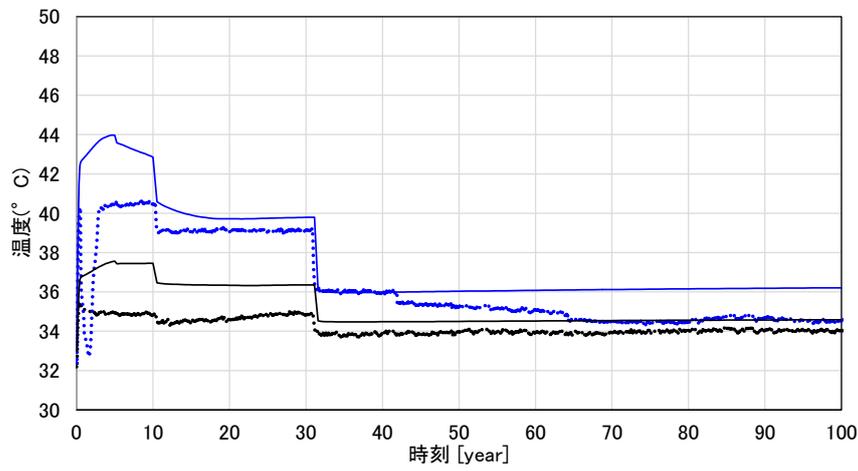


添付図 13 Case H28 Mean 緩衝材の全応力時刻歴（鉛直方向、圧縮：正）



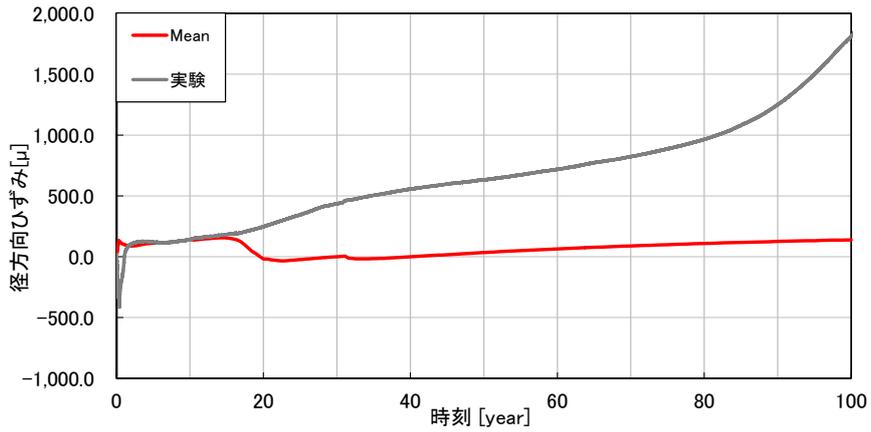
点線：実験
線：解析

添付図 14 Case H28 Mean 温度時刻歴(岩盤外壁)

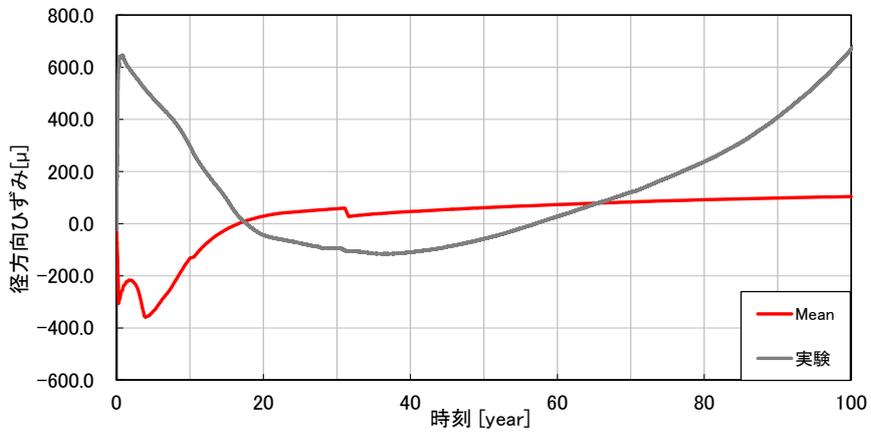


点線：実験
線：解析

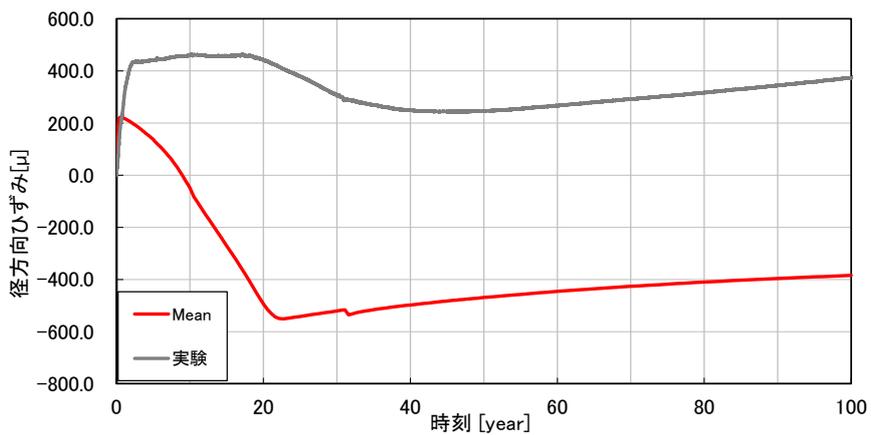
添付図 15 Case H28 Mean 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 16 Case H28 Mean 岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

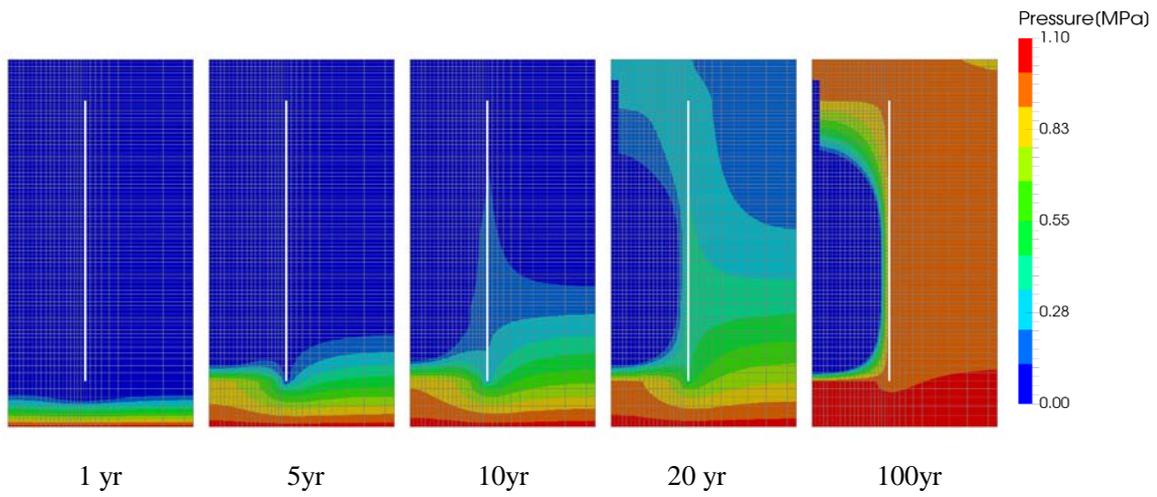


添付図 17 Case H28 Mean 岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

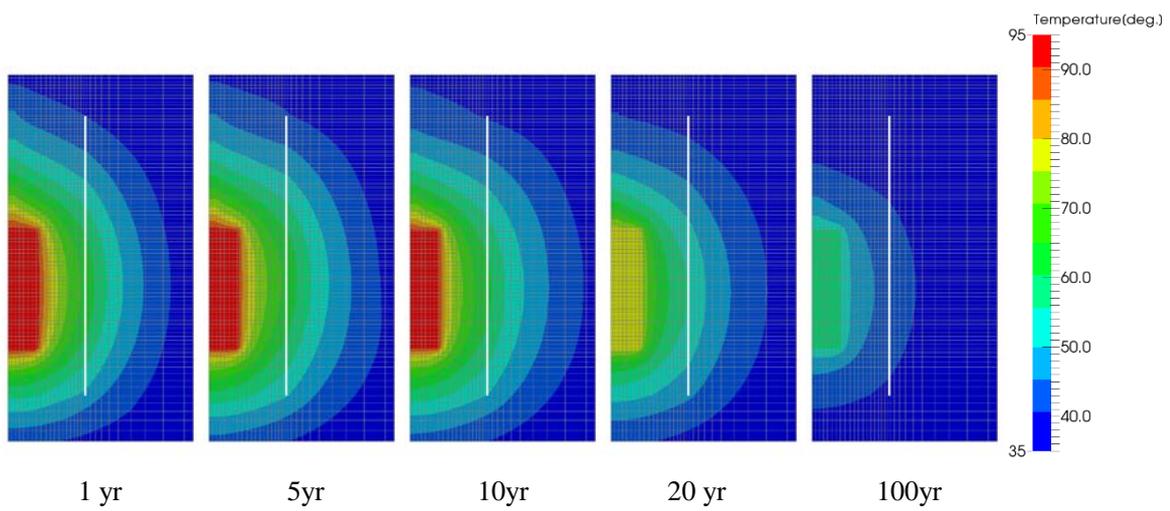


添付図 18 Case H28 Mean 岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

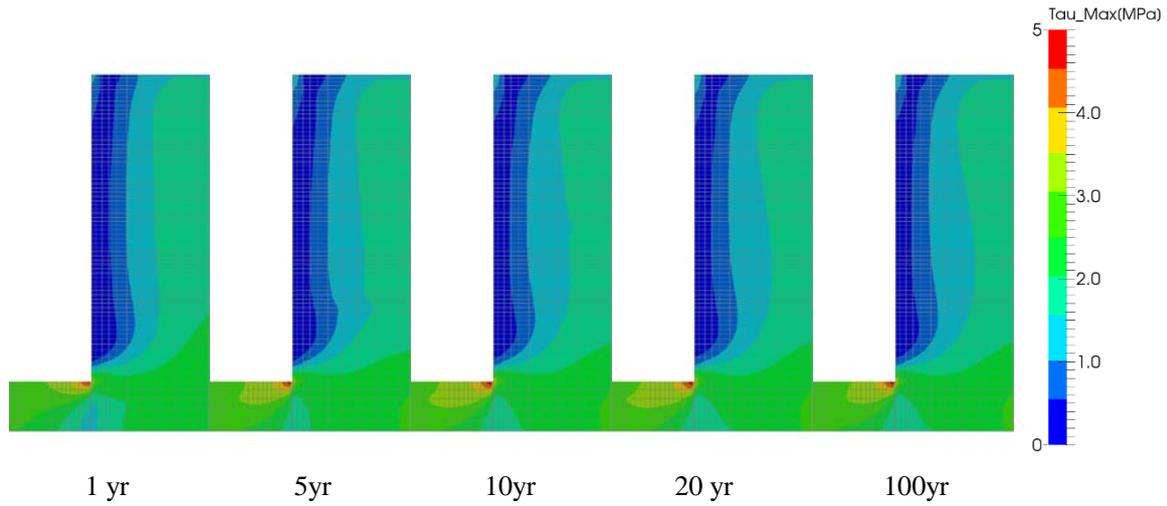
(2) Case H28 +1Sigma



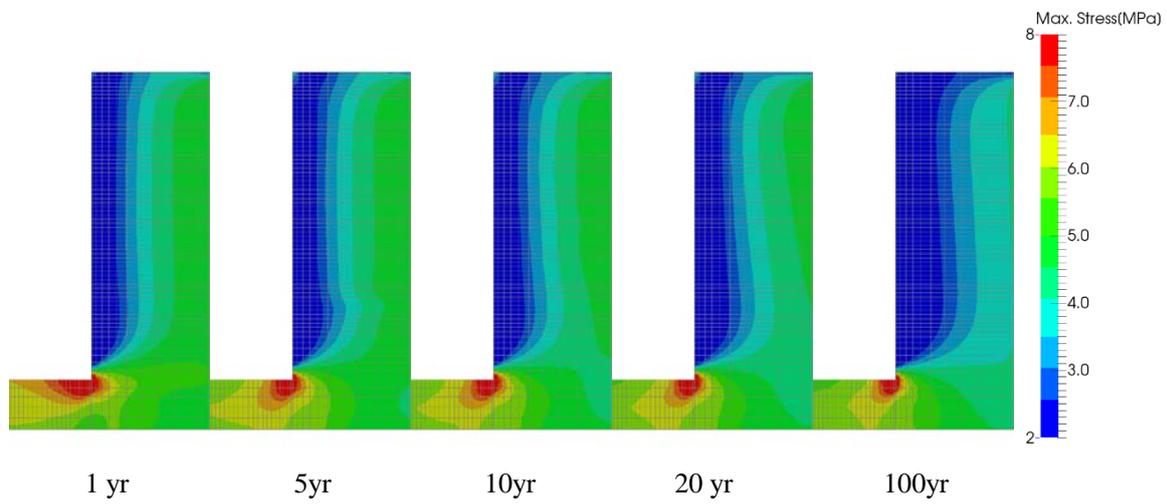
添付図 19 Case H28 +1Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



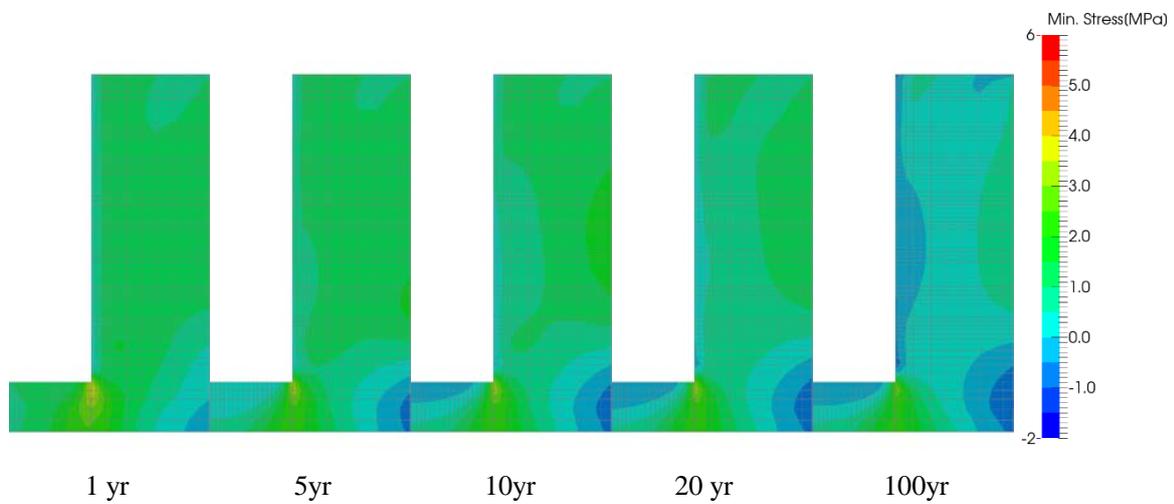
添付図 20 Case H28 +1Sigma 岩盤部分・温度分布



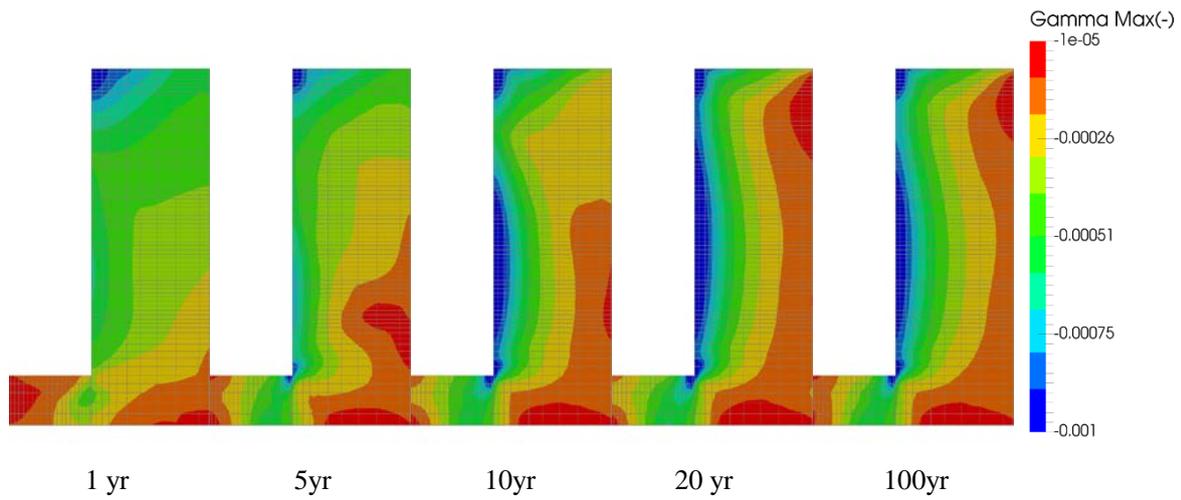
添付図 21 Case H28 +1Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



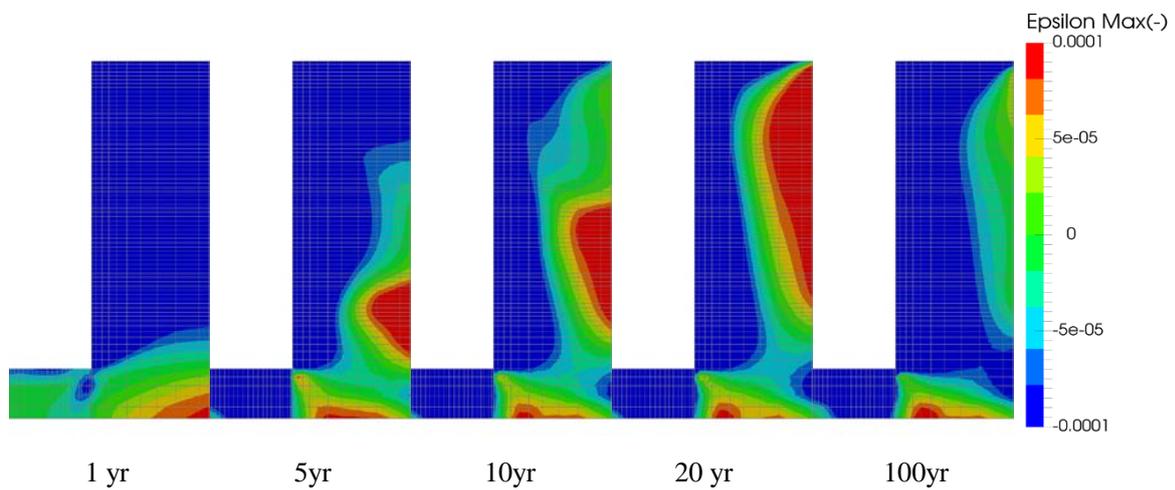
添付図 22 Case H28 +1Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



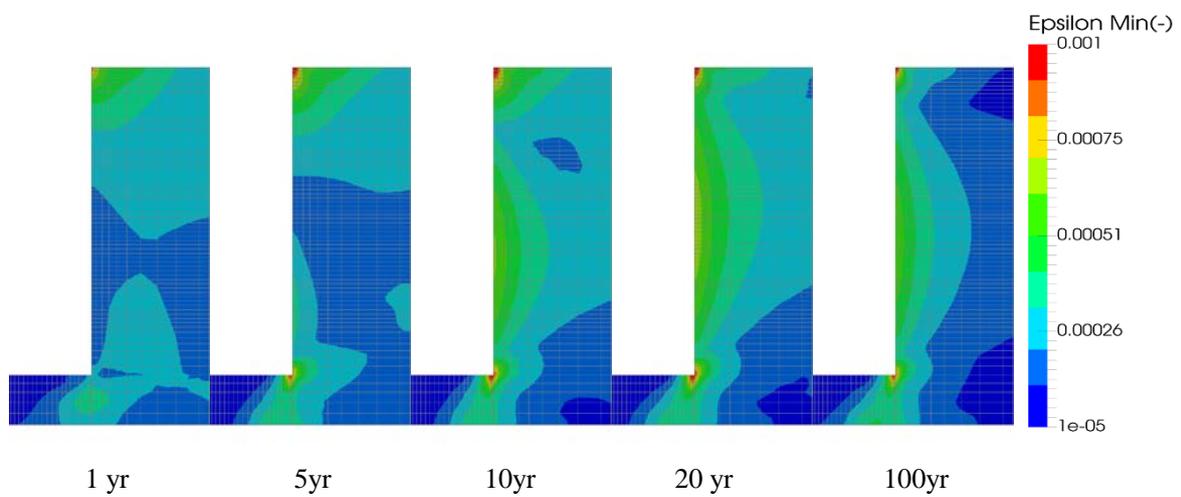
添付図 23 Case H28 +1Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



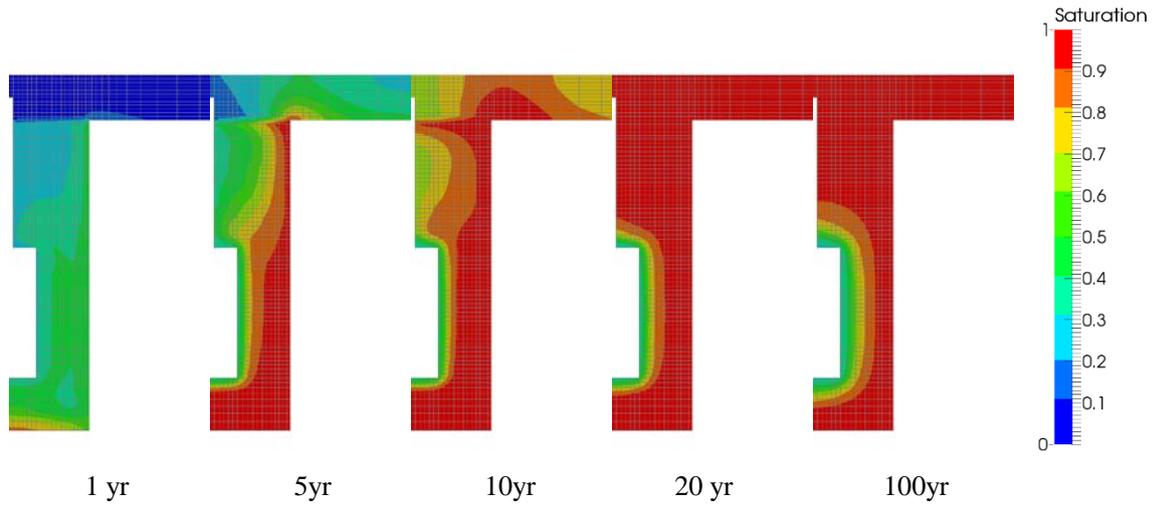
添付図 24 Case H28 +1Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



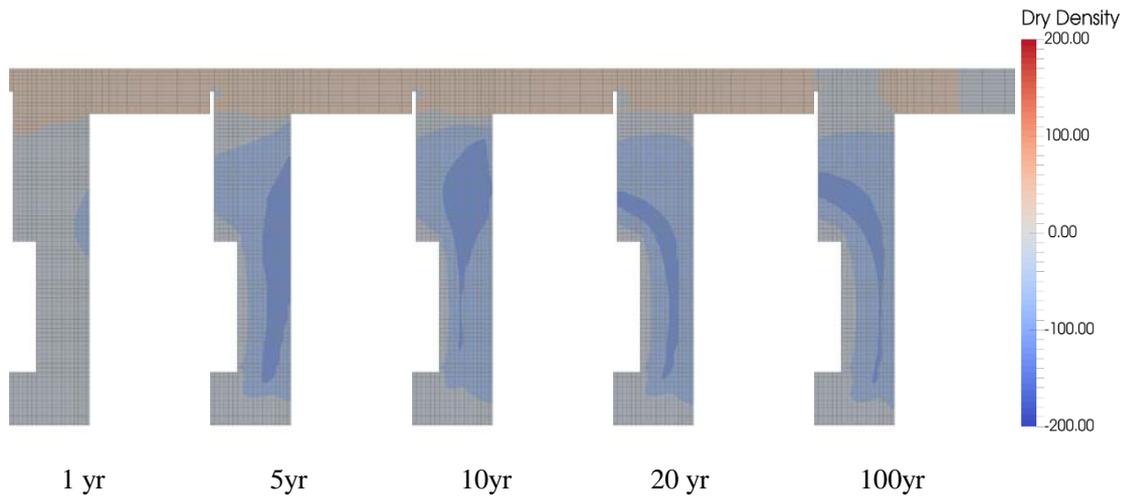
添付図 25 Case H28 +1Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



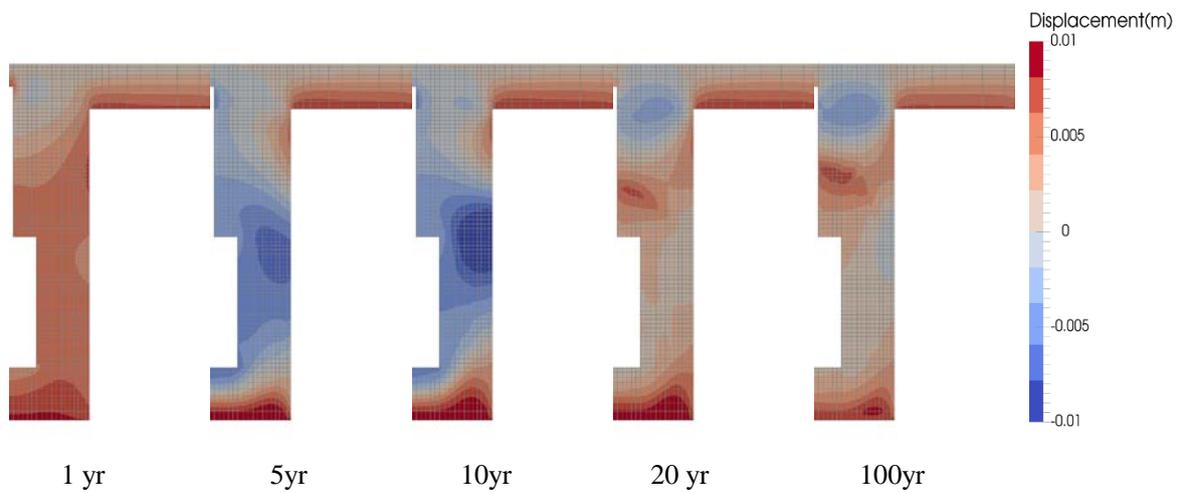
添付図 26 Case H28 +1Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



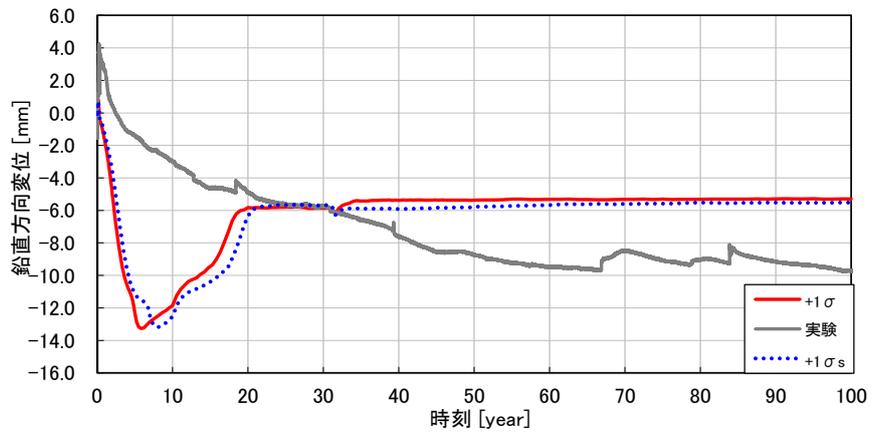
添付図 27 Case H28 +1Sigma 緩衝材と埋戻し材部分・飽和度分布



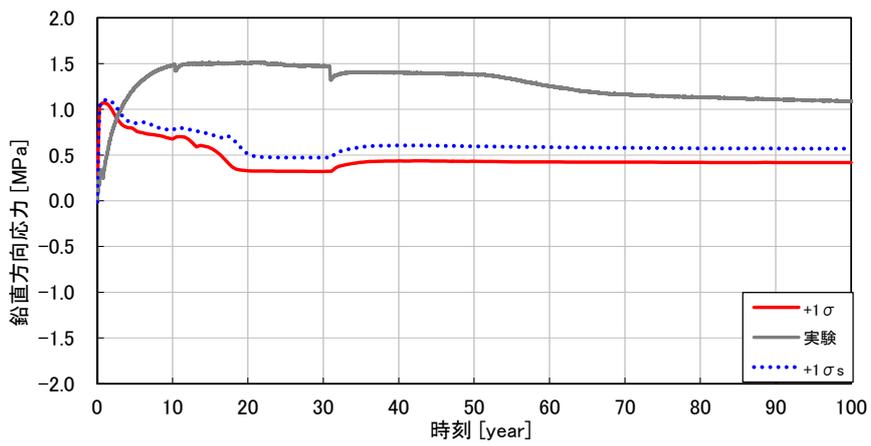
添付図 28 Case H28 +1Sigma 緩衝材と埋戻し材部分・乾燥密度変化の分布



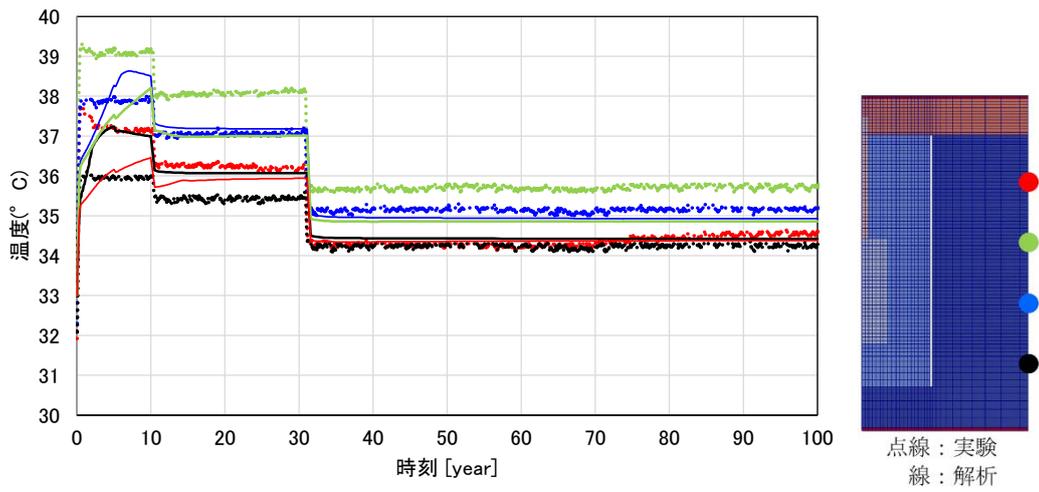
添付図 29 Case H28 +1Sigma 鉛直変位分布



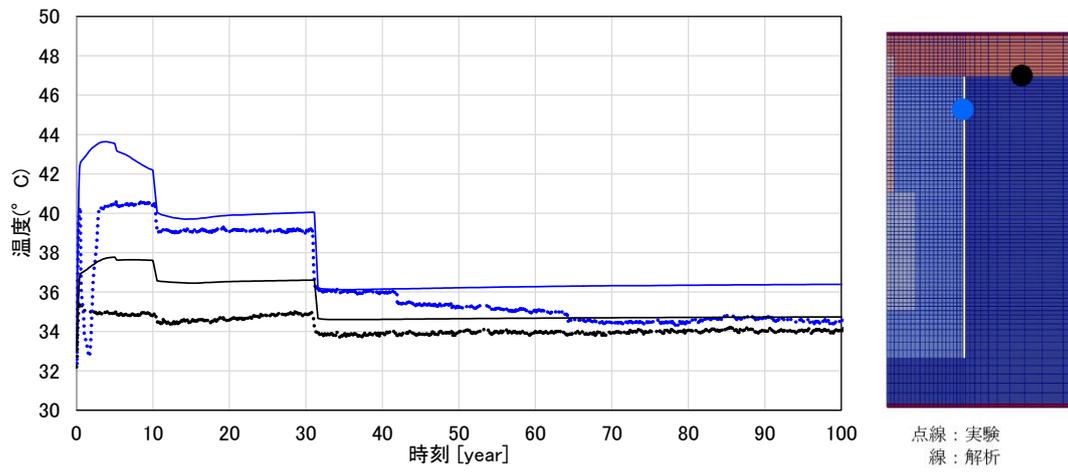
添付図 30 Case H28 +1Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



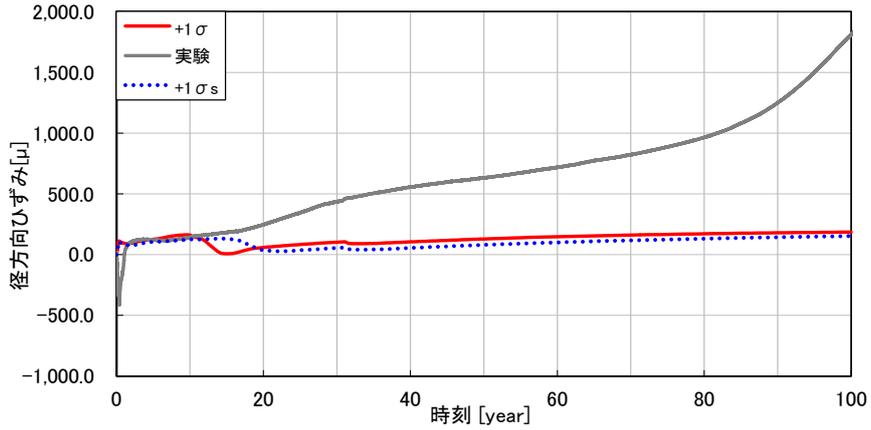
添付図 31 Case H28 +1Sigma 緩衝材の全応力時刻歴（鉛直方向、圧縮：正）



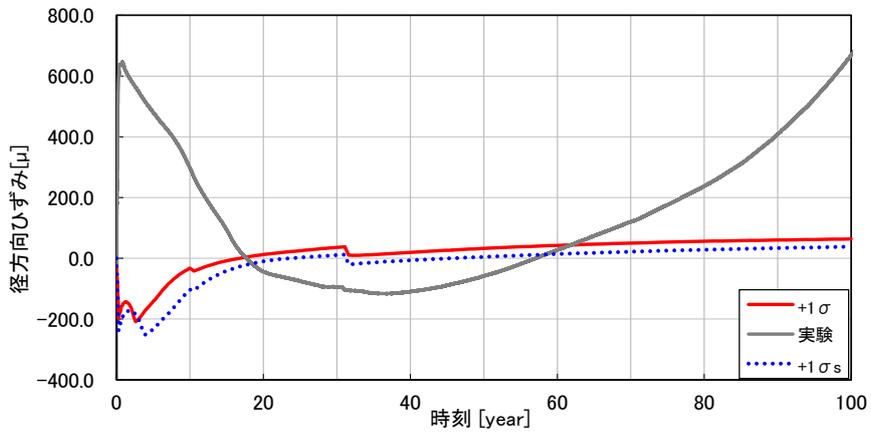
添付図 32 Case H28 +1Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



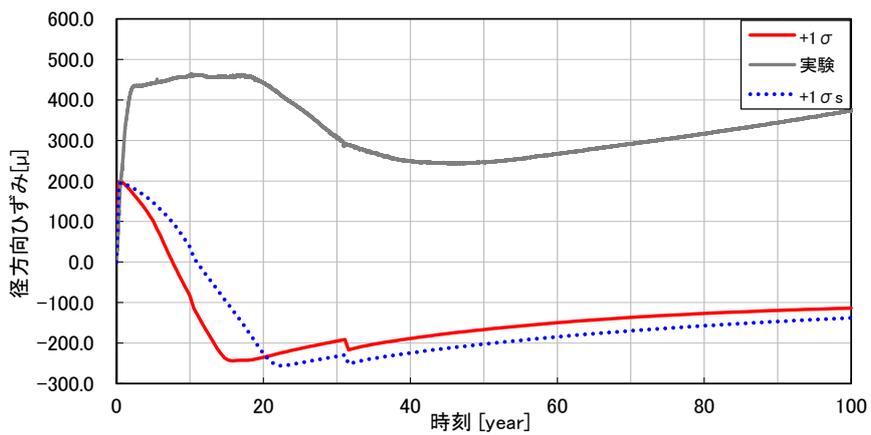
添付図 33 Case H28 +1Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 34 Case H28 +1Sigma 岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

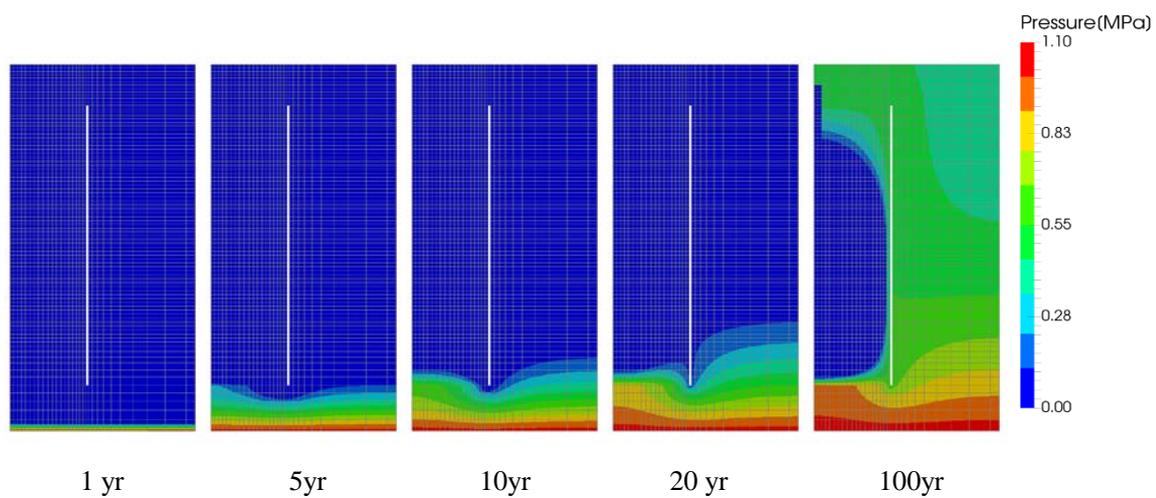


添付図 35 Case H28 +1Sigma 岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

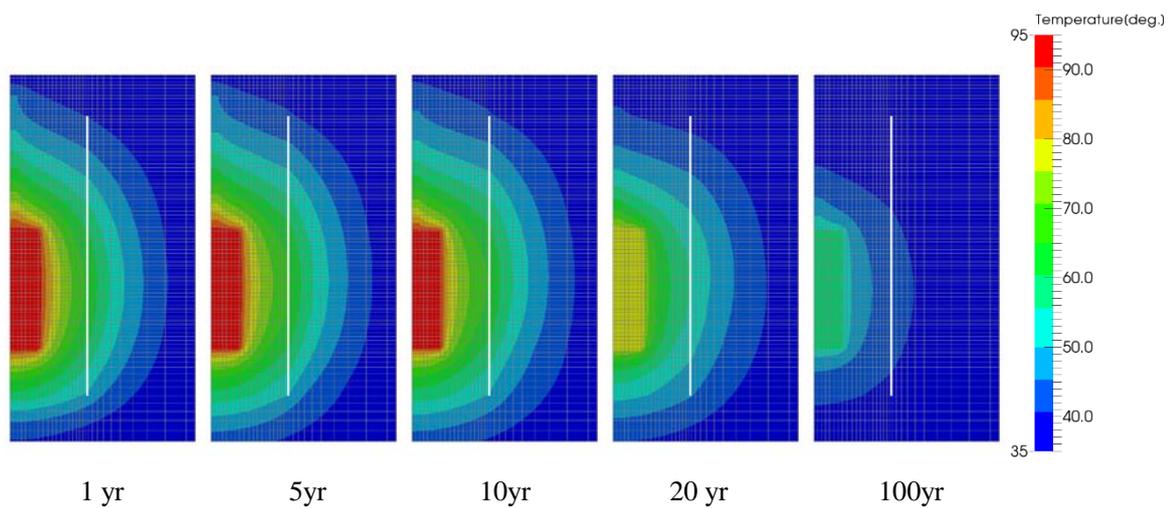


添付図 36 Case H28 +1Sigma 岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

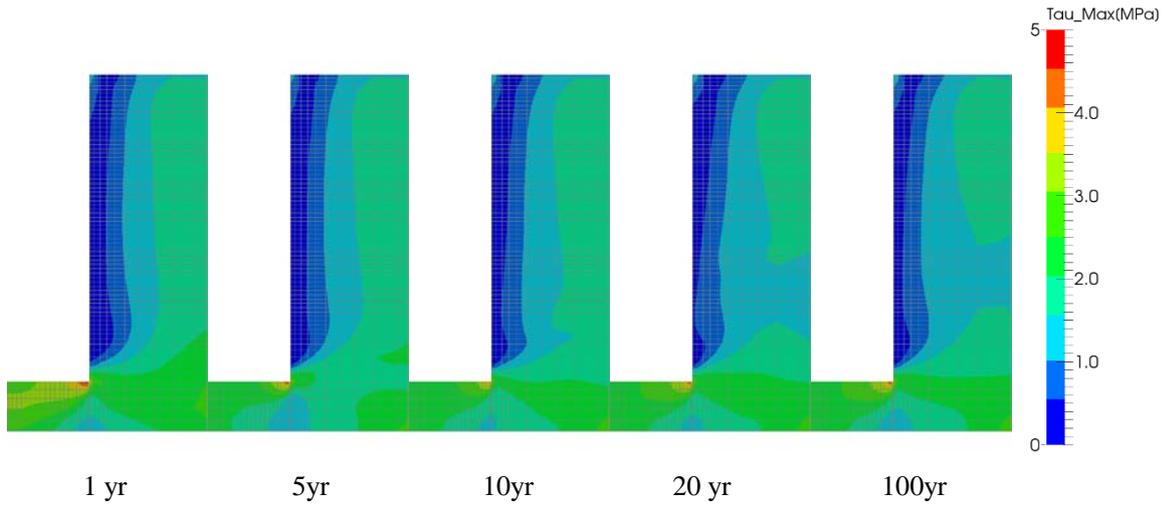
(3) Case H28 -1Sigma



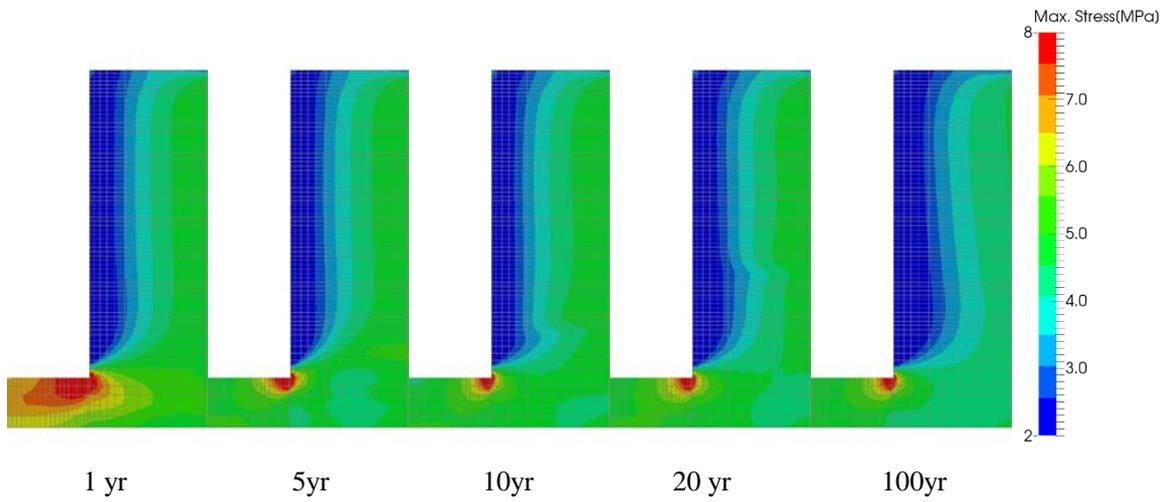
添付図 37 Case H28 -1Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



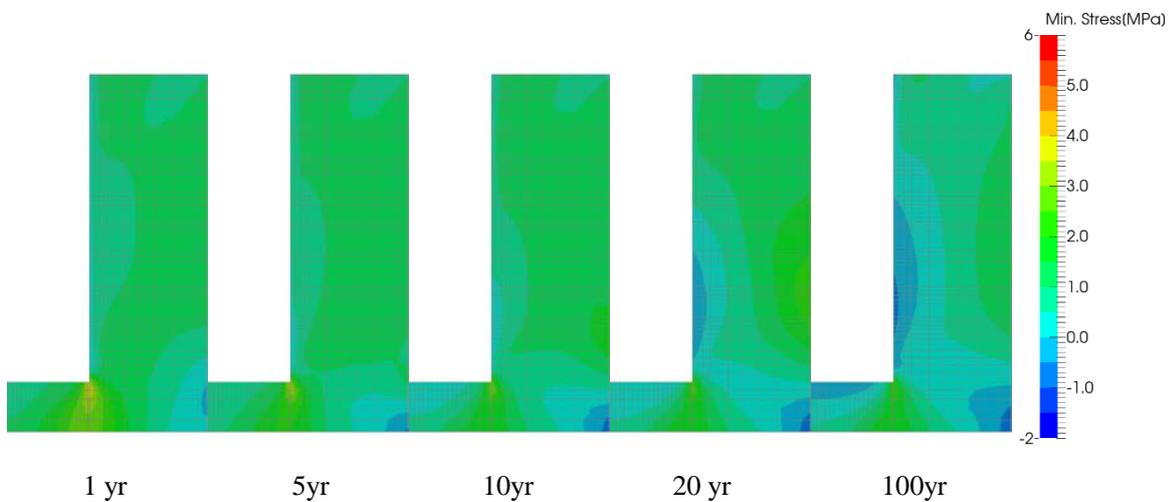
添付図 38 Case H28 -1Sigma 岩盤部分・温度分布



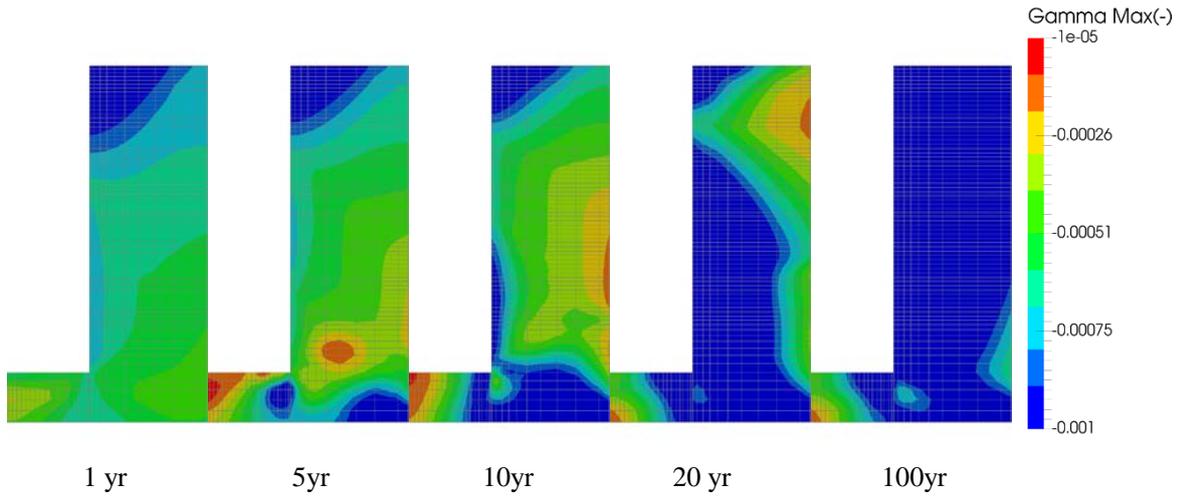
添付図 39 Case H28 -1Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



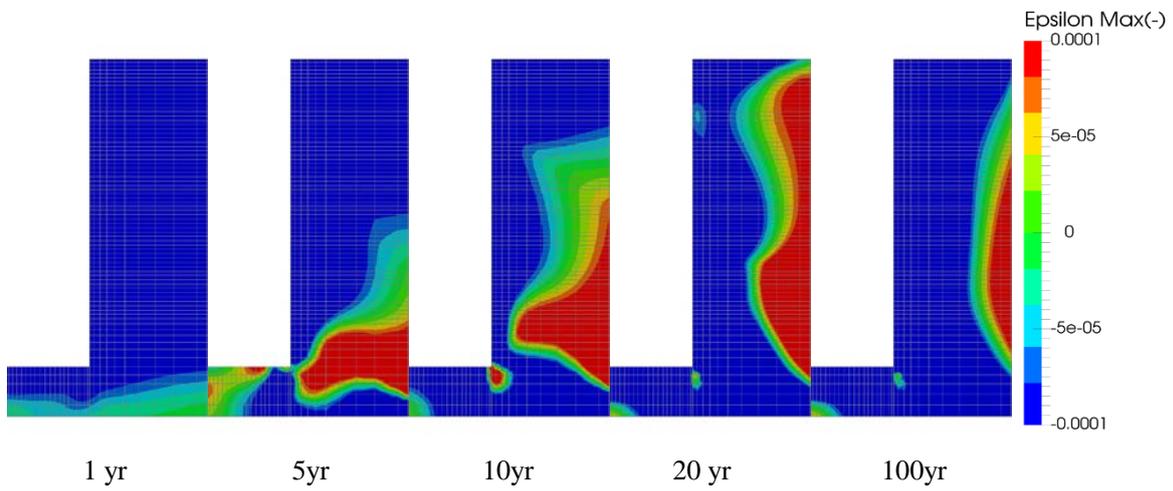
添付図 40 Case H28 -1Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



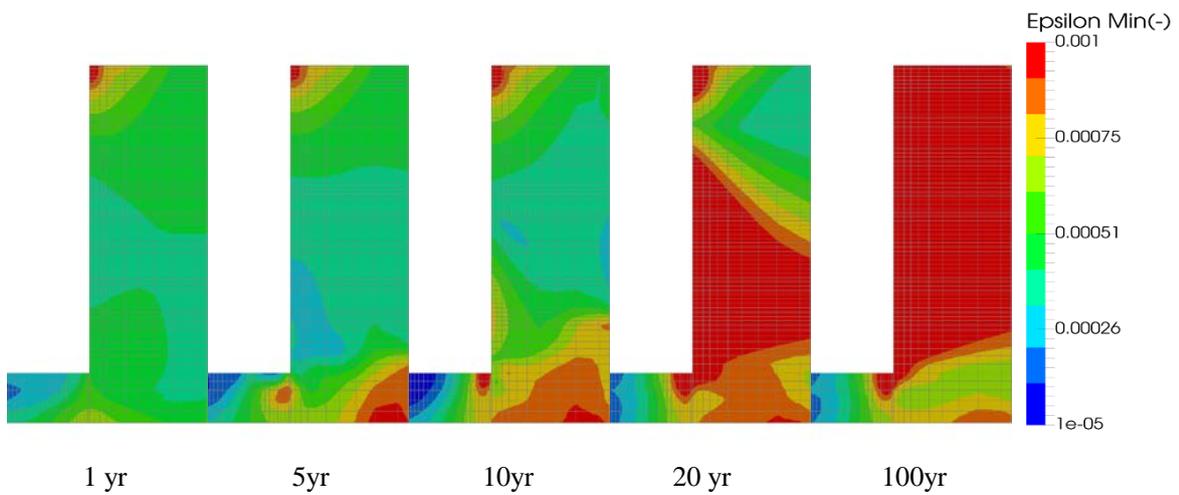
添付図 41 Case H28 -1Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



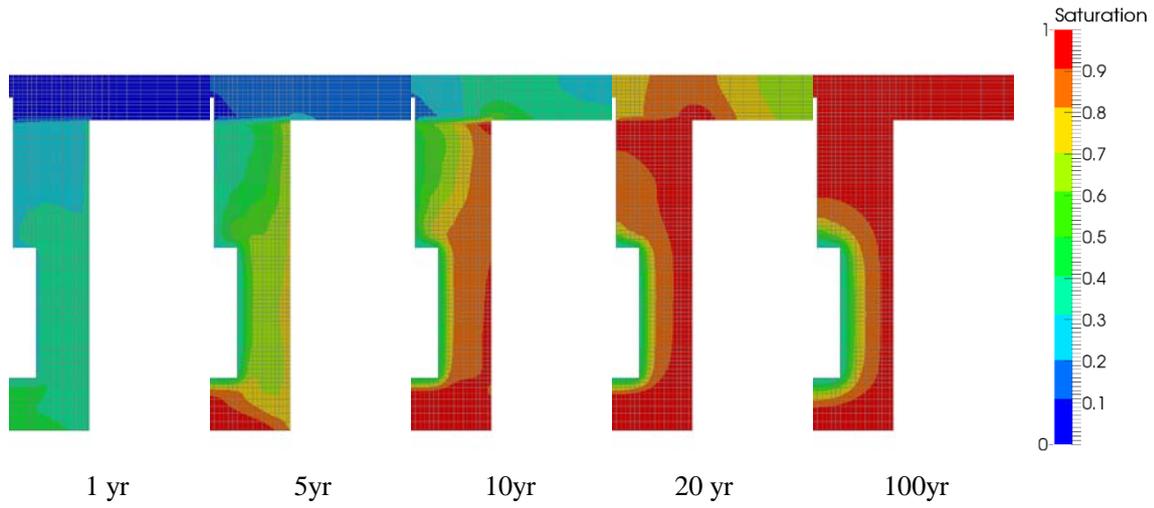
添付図 42 Case H28 -1Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



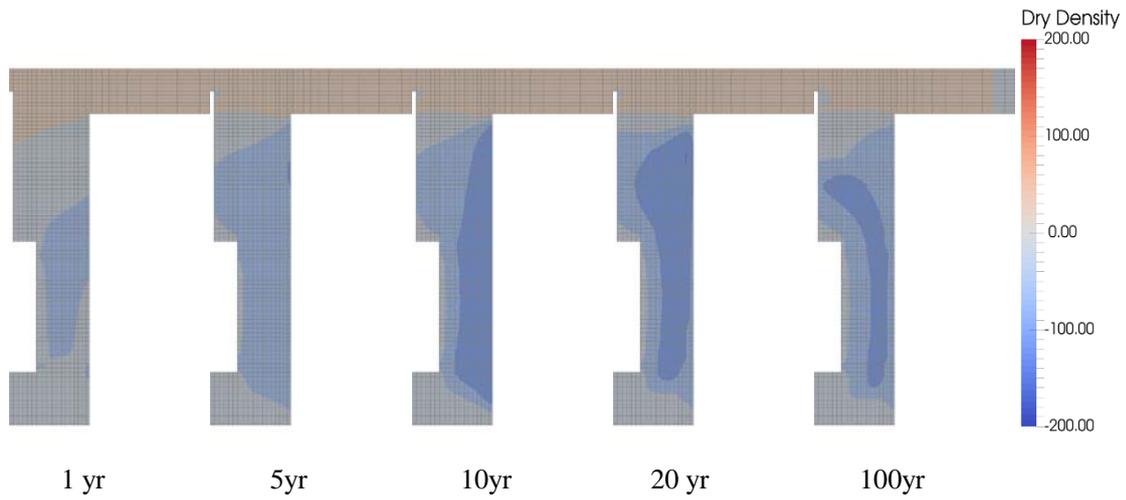
添付図 43 Case H28 -1Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



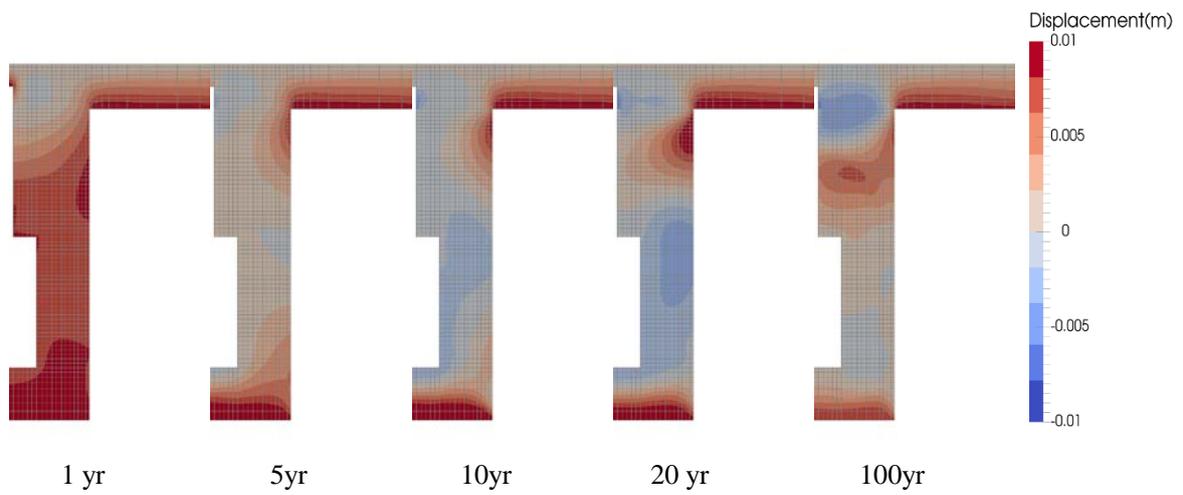
添付図 44 Case H28 -1Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



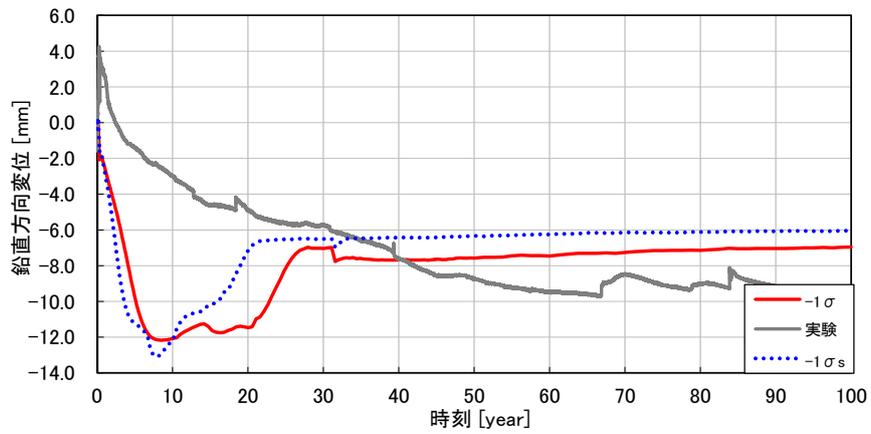
添付図 45 Case H28 -1Sigma 緩衝材と埋戻し材部分・飽和度分布



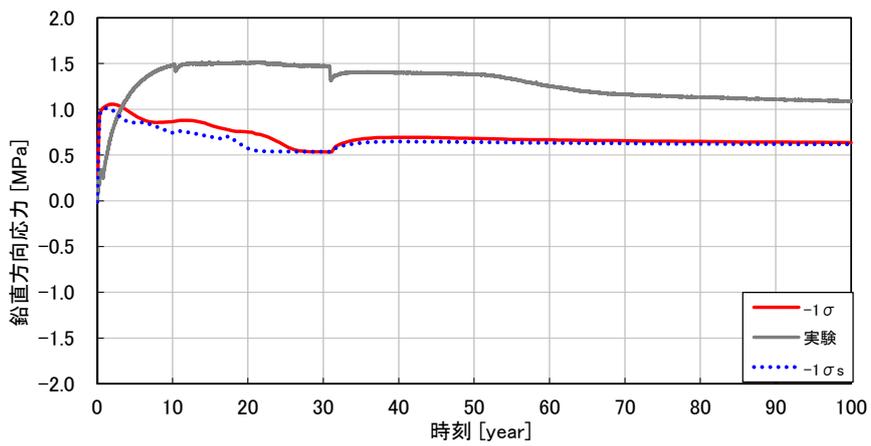
添付図 46 Case H28 -1Sigma 緩衝材と埋戻し材部分・乾燥密度変化の分布



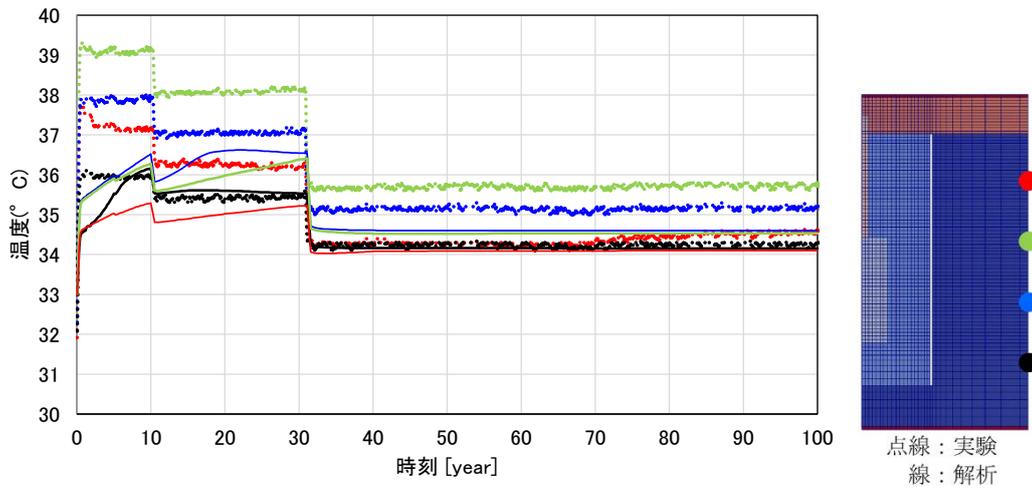
添付図 47 Case H28 -1Sigma 鉛直変位分布



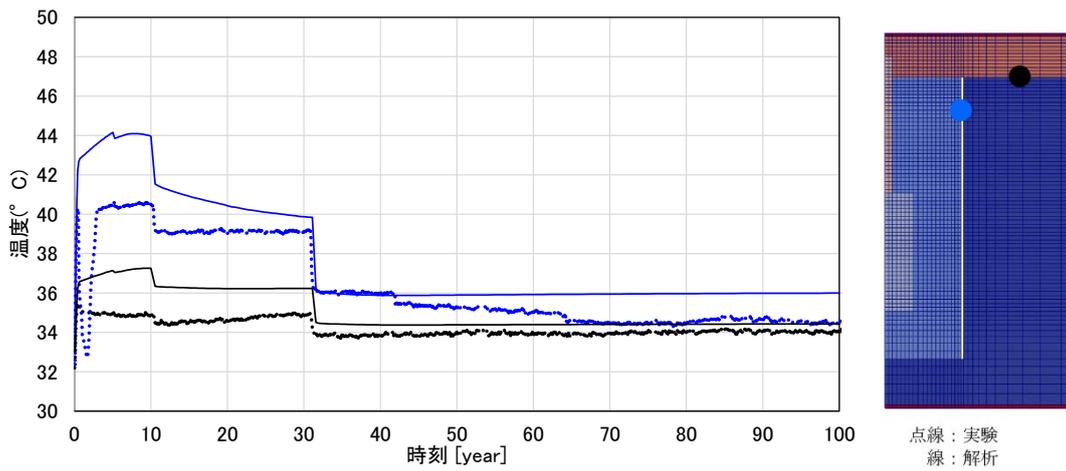
添付図 48 Case H28 -1Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



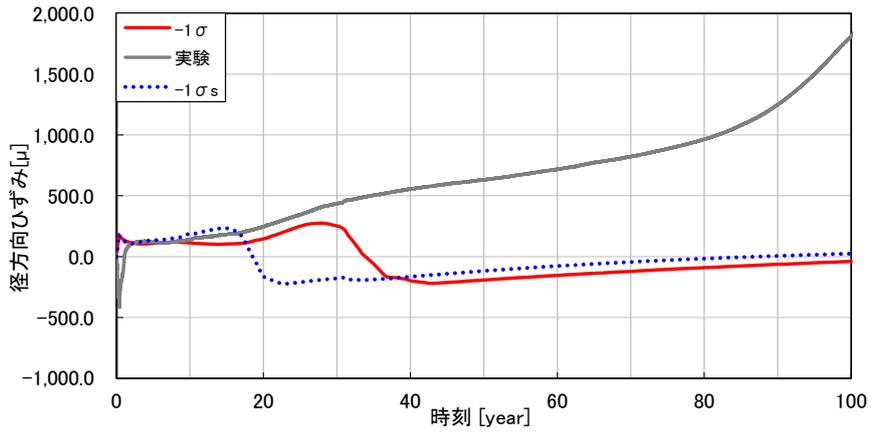
添付図 49 Case H28 -1Sigma 緩衝材の全応力時刻歴（鉛直方向、圧縮：正）



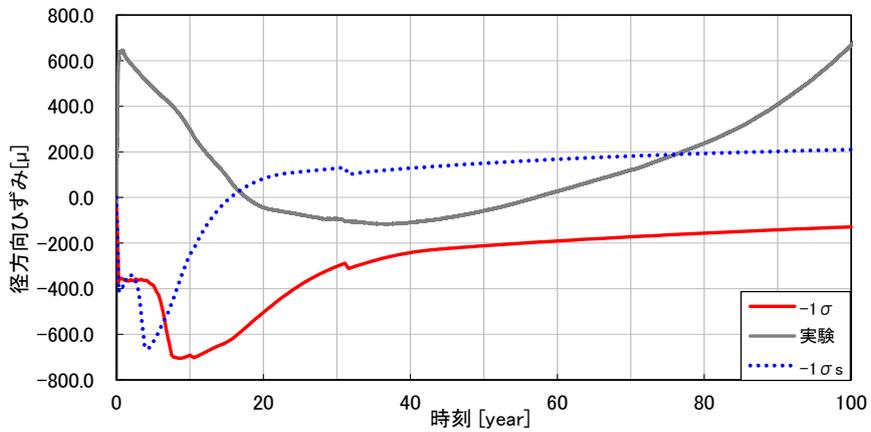
添付図 50 Case H28 -1Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



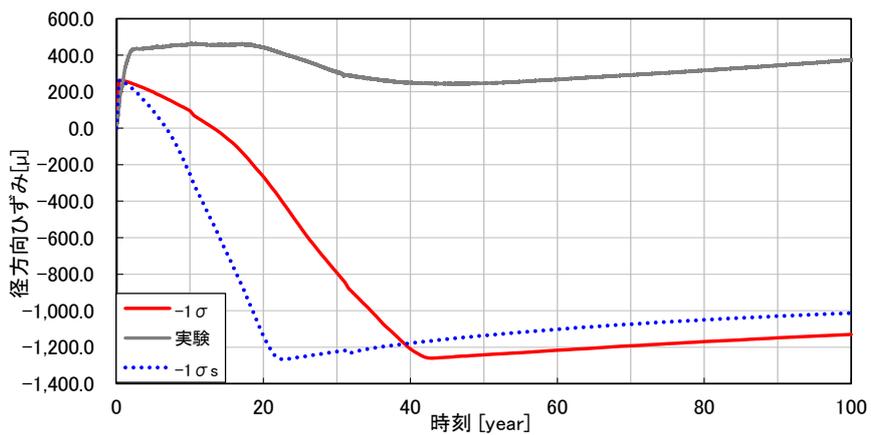
添付図 51 Case H28 -1Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 52 Case H28 -1Sigma 岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

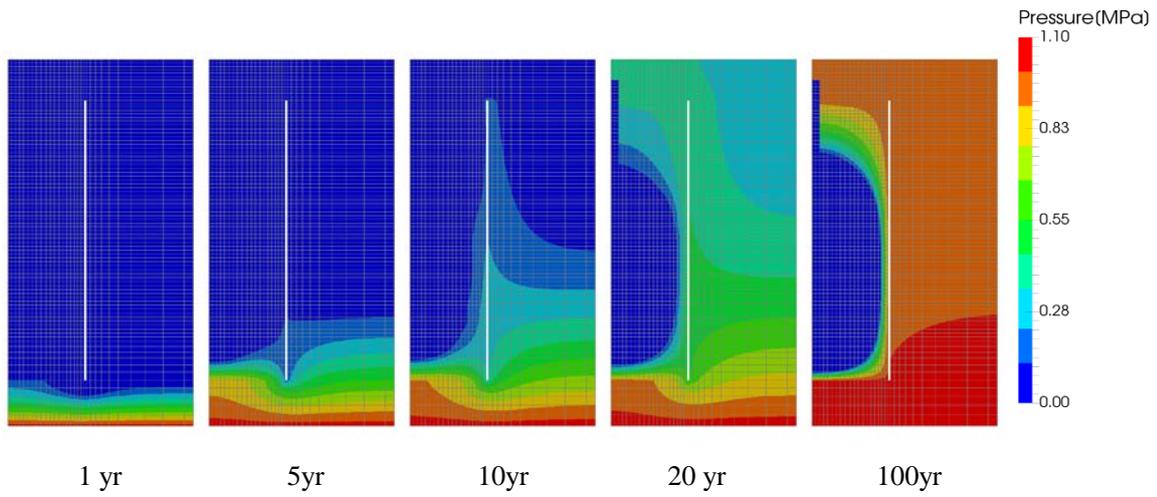


添付図 53 Case H28 -1Sigma 岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

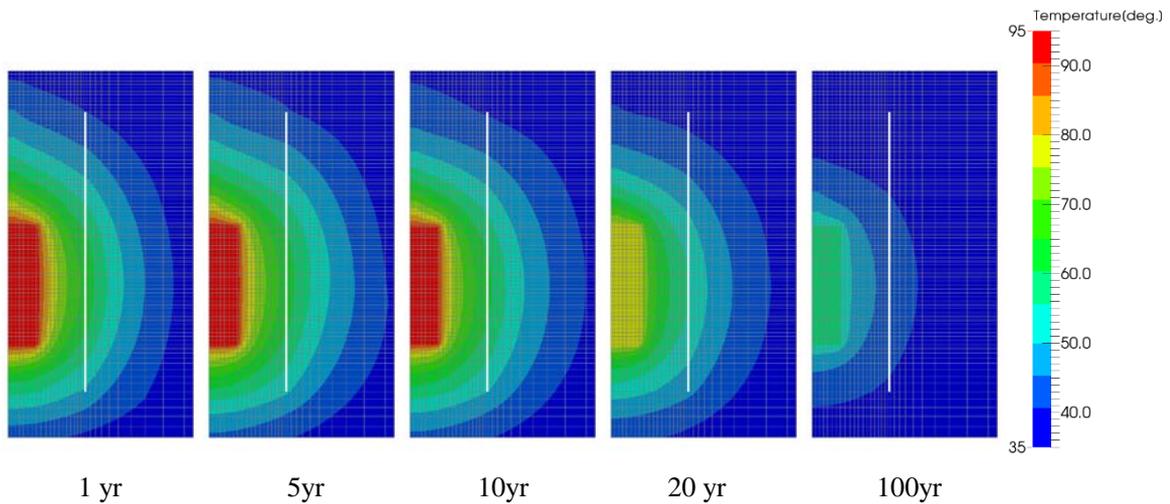


添付図 54 Case H28 -1Sigma 岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

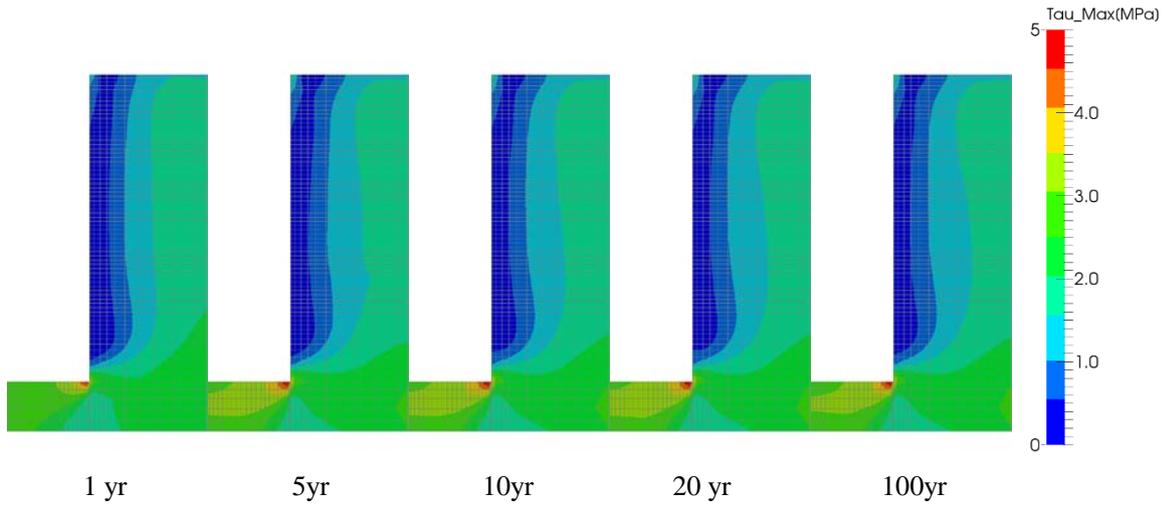
(4) Case H28 +2Sigma



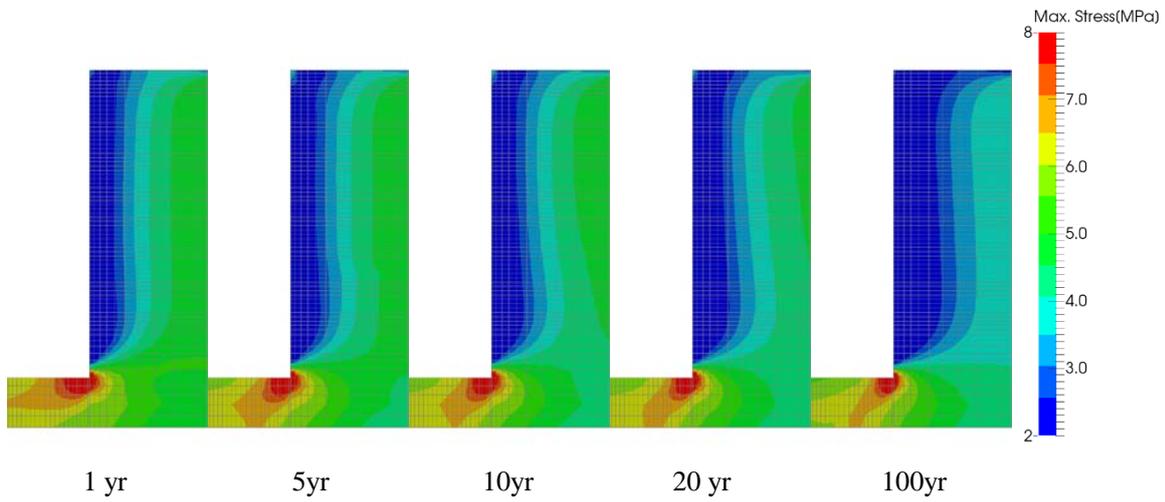
添付図 55 Case H28 +2Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



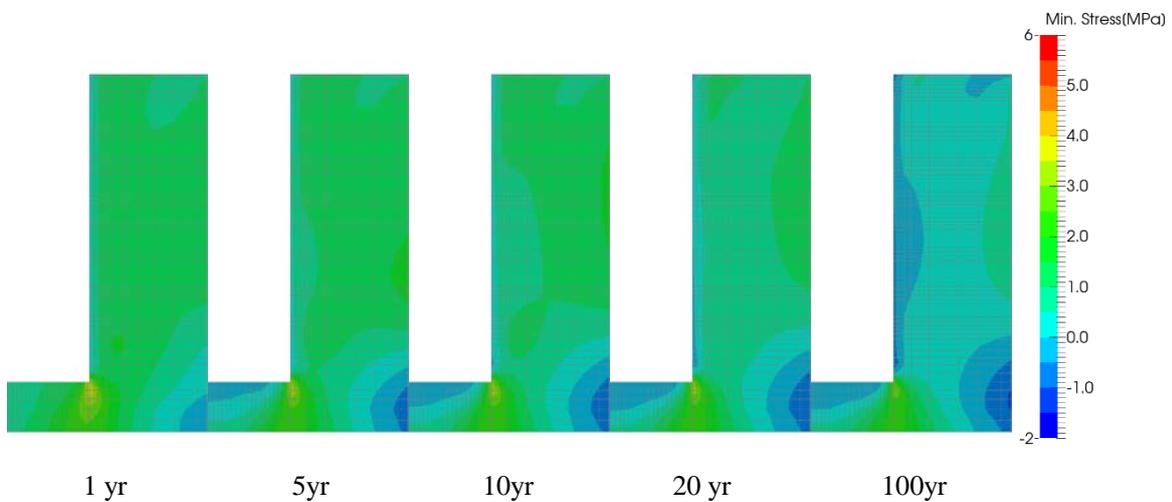
添付図 56 Case H28 +2Sigma 岩盤部分・温度分布



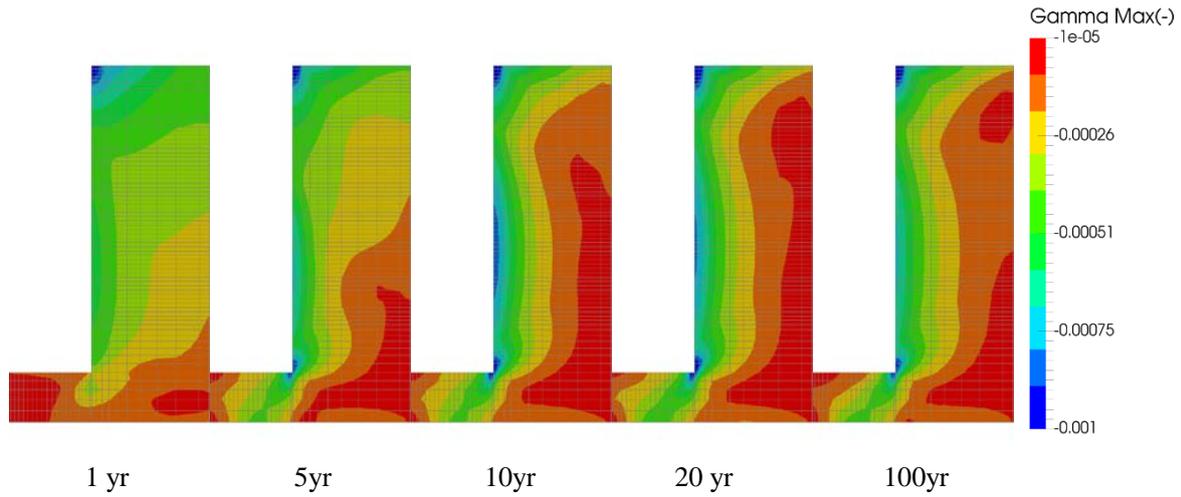
添付図 57 Case H28 +2Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



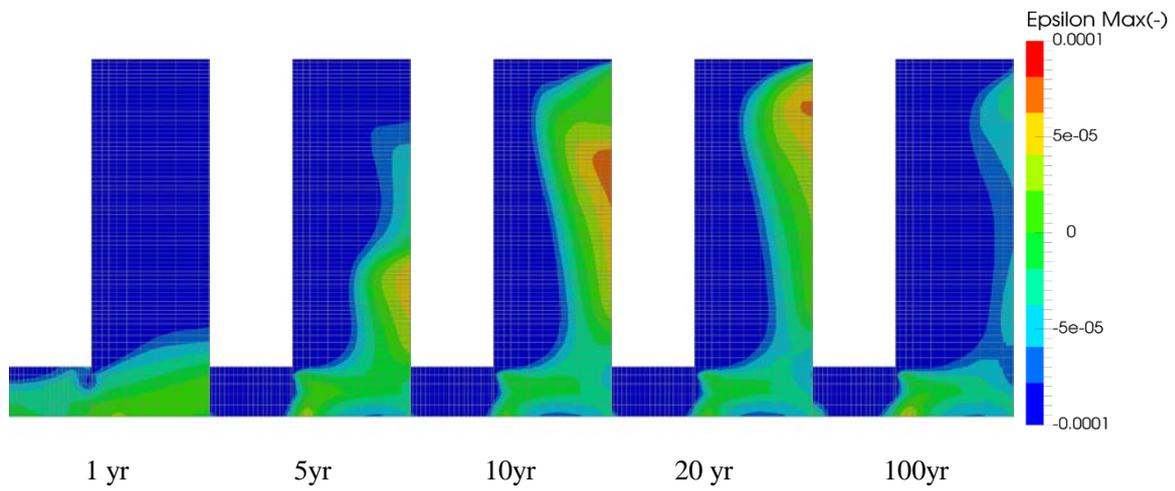
添付図 58 Case H28 +2Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



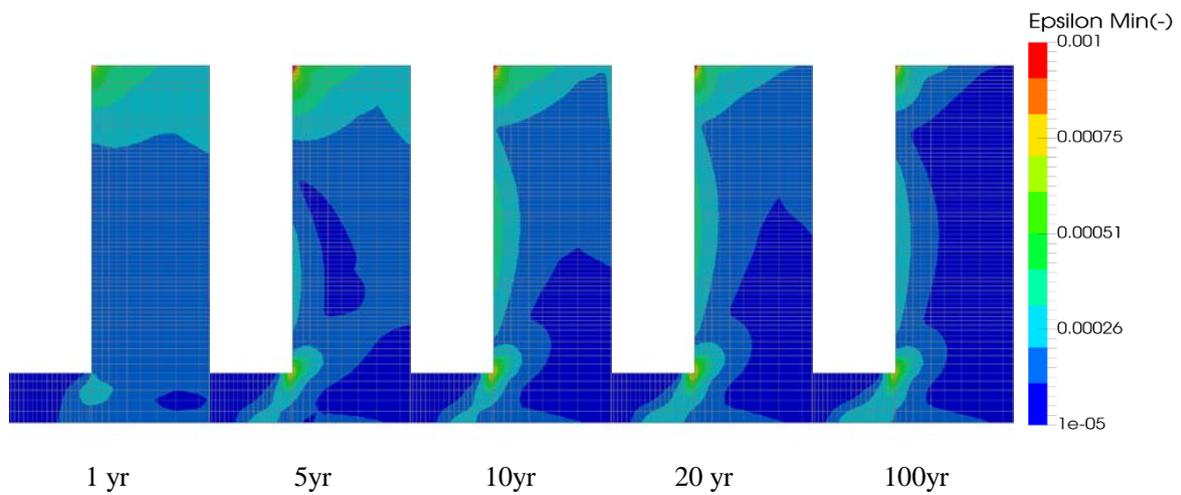
添付図 59 Case H28 +2Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



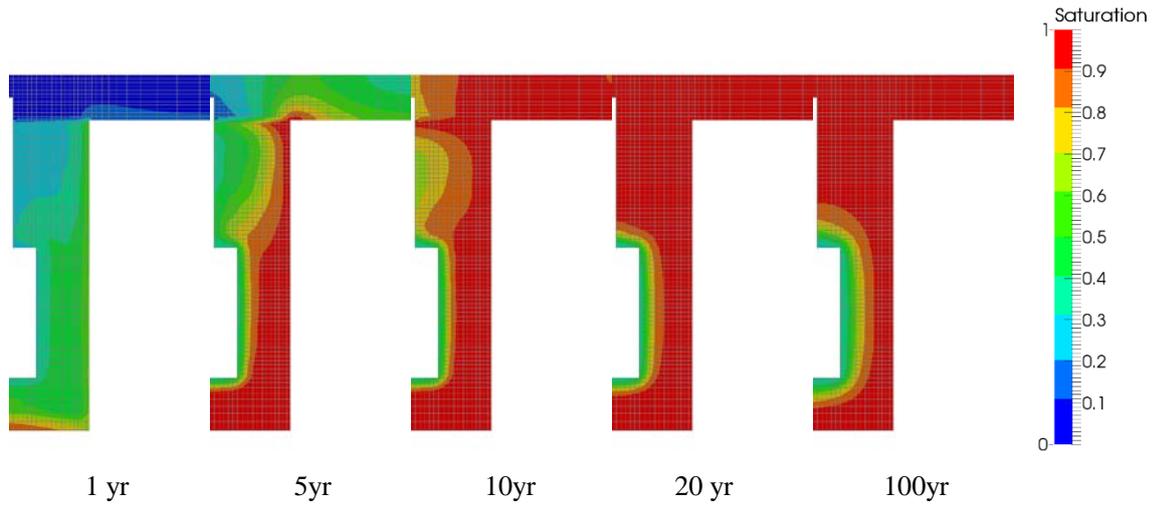
添付図 60 Case H28 +2Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



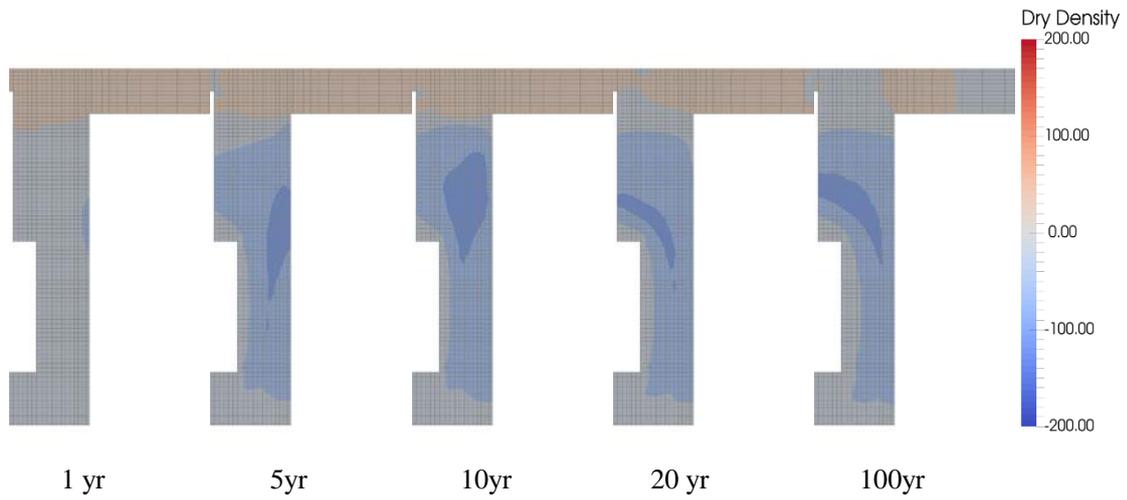
添付図 61 Case H28 +2Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



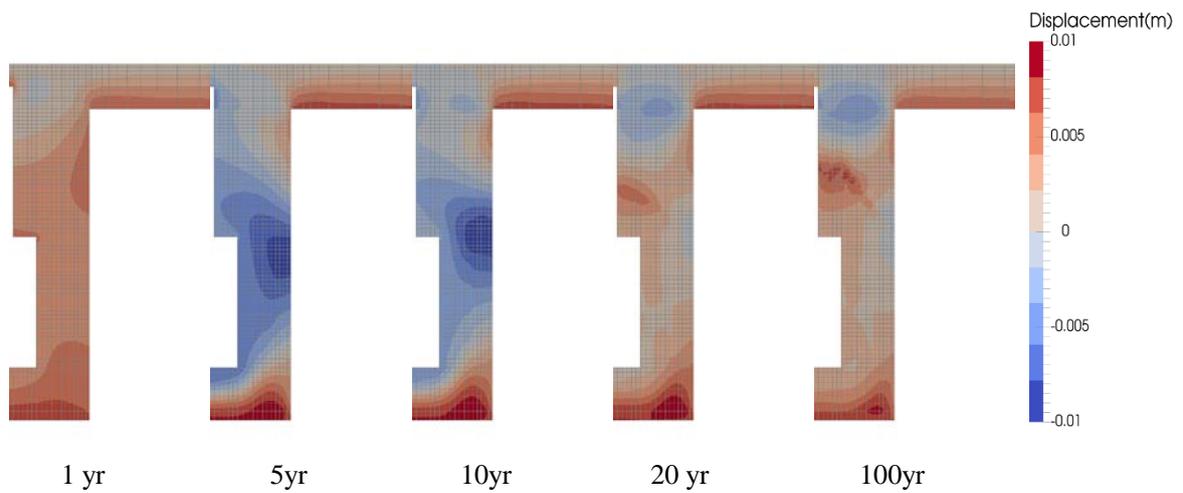
添付図 62 Case H28 +2Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



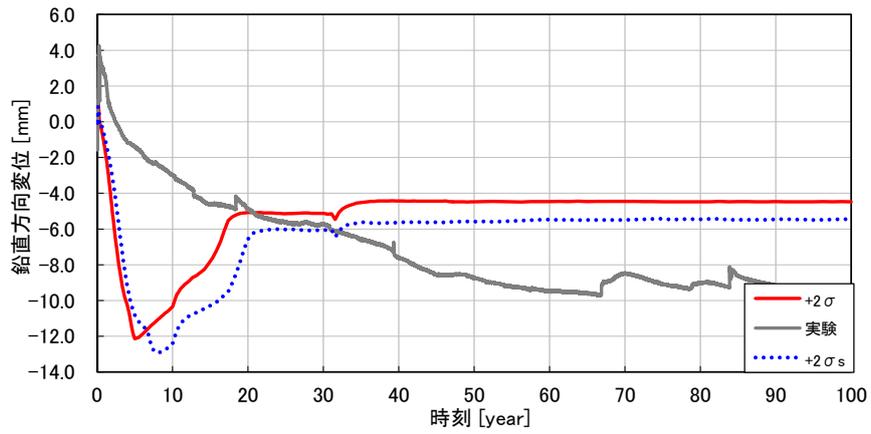
添付図 63 Case H28 +2Sigma ベントナイト部分・飽和度分布



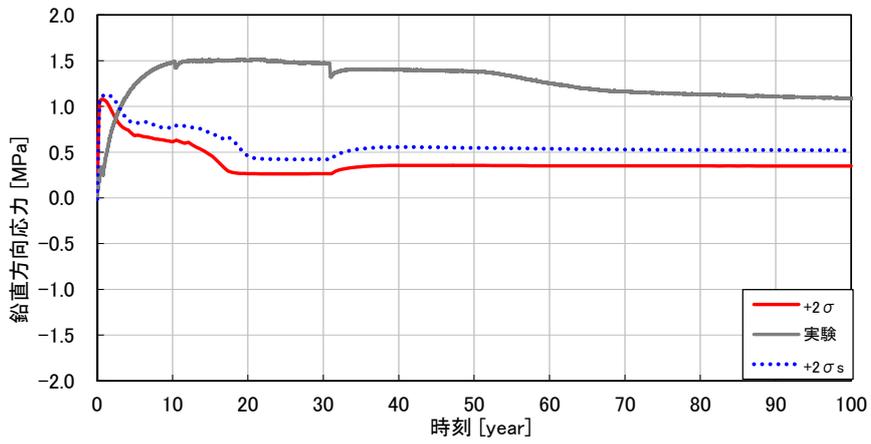
添付図 64 Case H28 +2Sigma ベントナイト部分・乾燥密度変化の分布



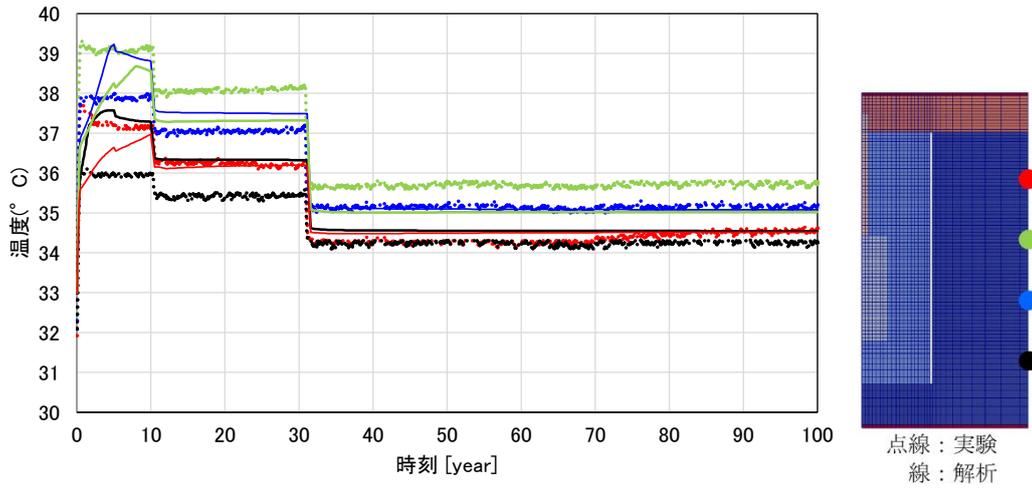
添付図 65 Case H28 +2Sigma 鉛直変位分布



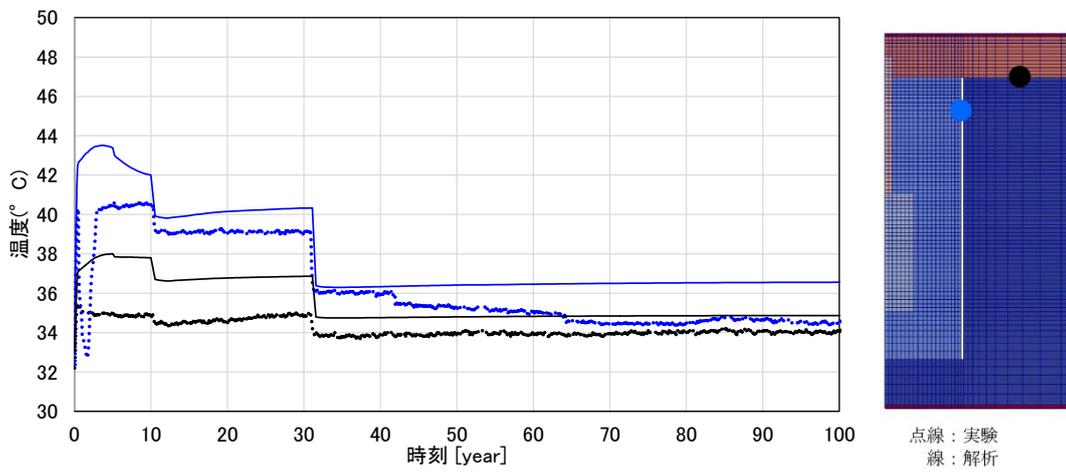
添付図 66 Case H28 +2Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



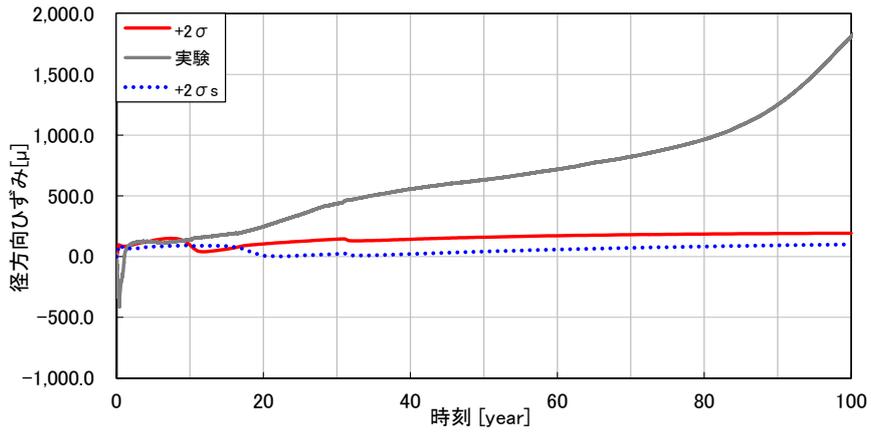
添付図 67 Case H28 +2Sigma ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)



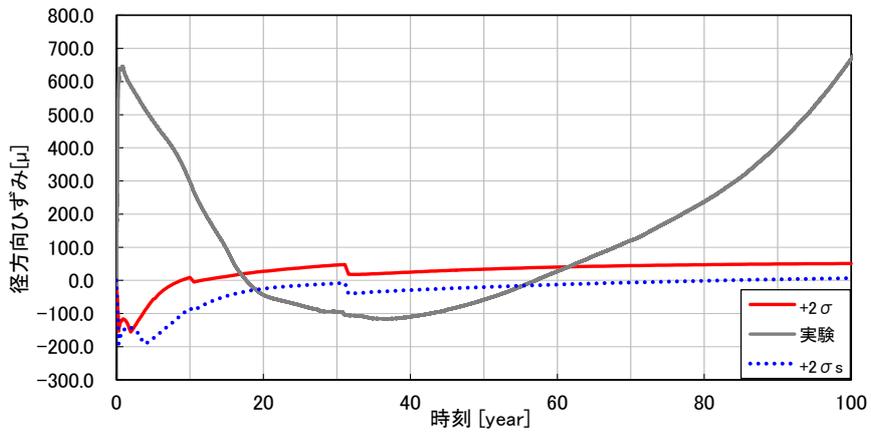
添付図 68 Case H28 +2Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



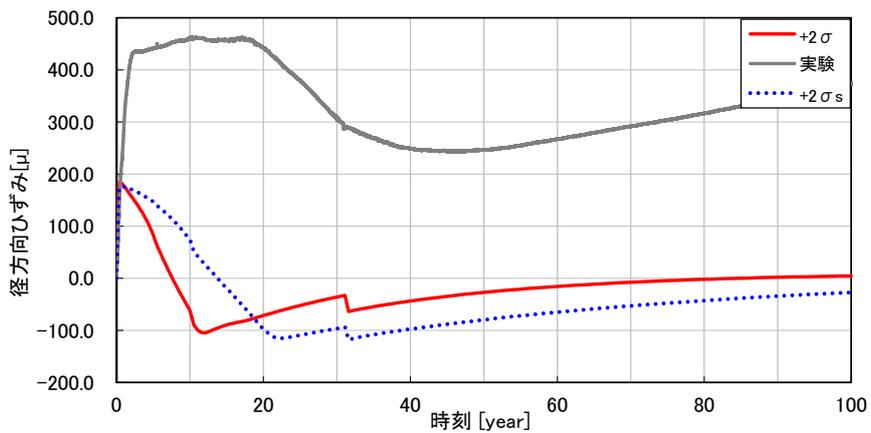
添付図 69 Case H28 +2Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 70 Case H28 +2Sigma 岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

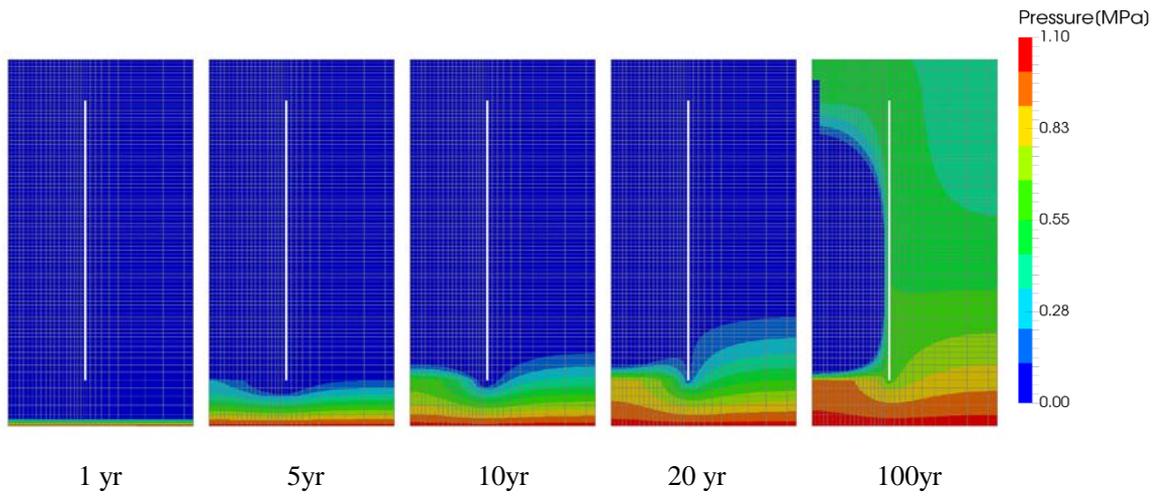


添付図 71 Case H28 +2Sigma 岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

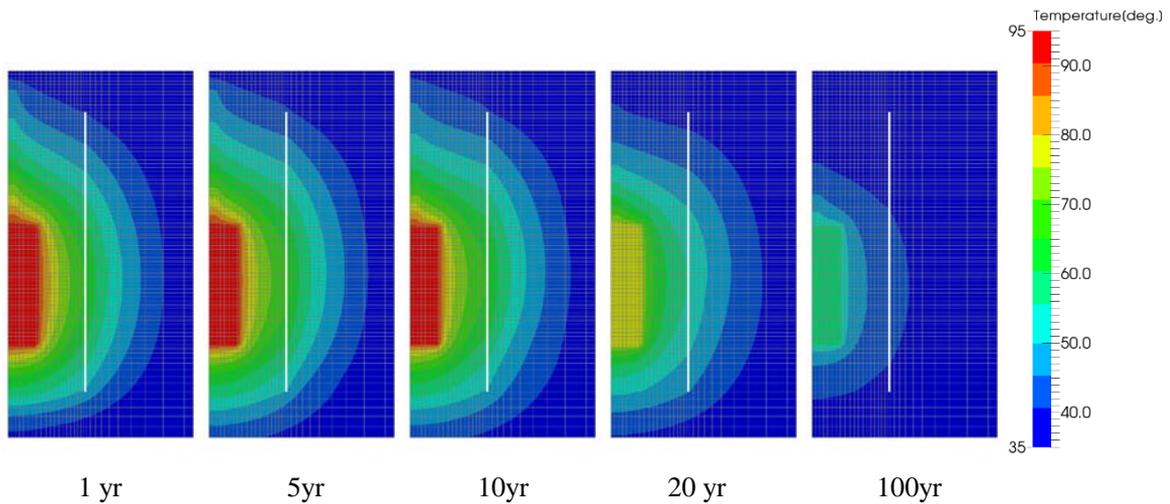


添付図 72 Case H28 +2Sigma 岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

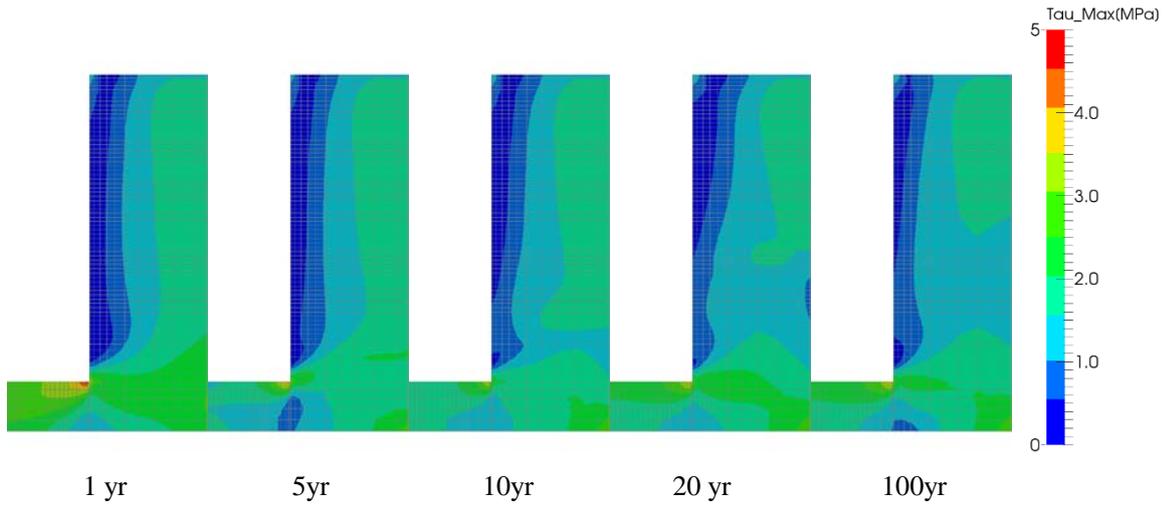
(5) Case H28 -2Sigma



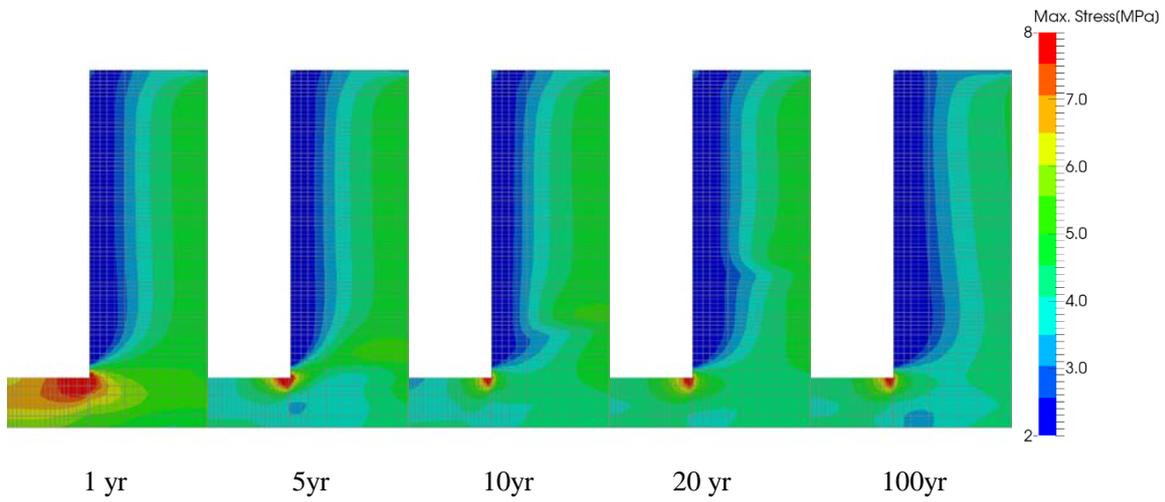
添付図 73 Case H28 -2Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



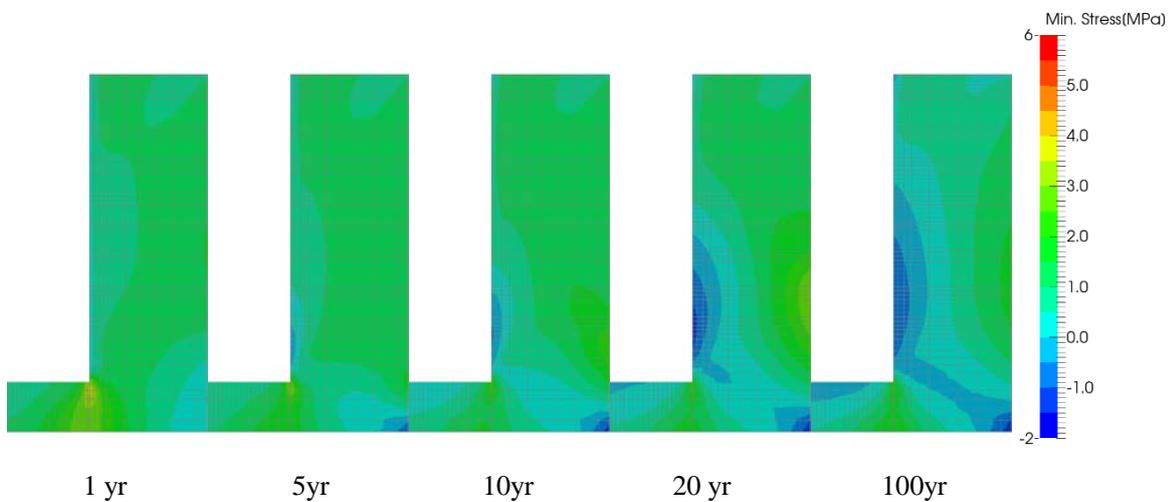
添付図 74 Case H28 -2Sigma 岩盤部分・温度分布



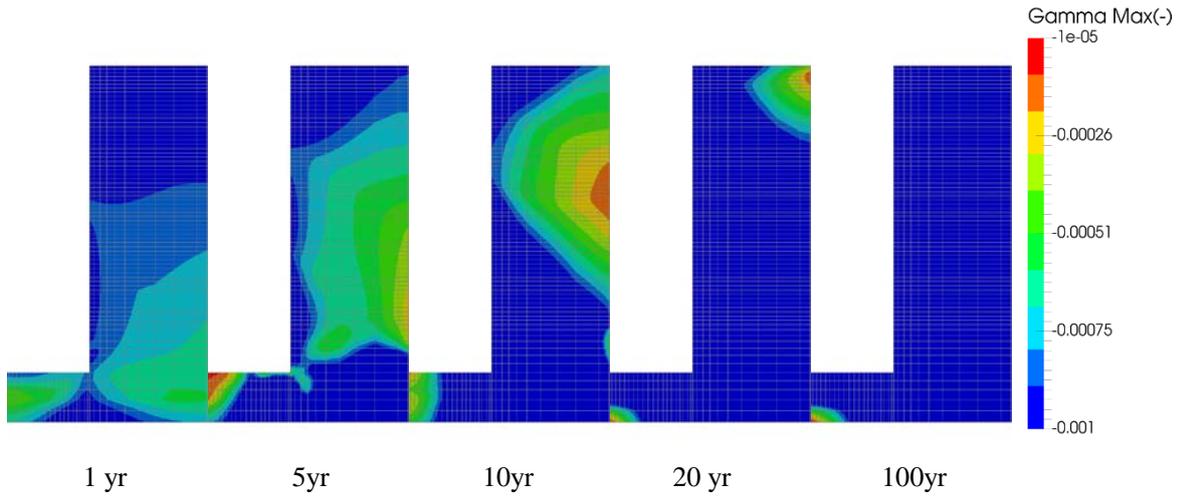
添付図 75 Case H28 -2Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



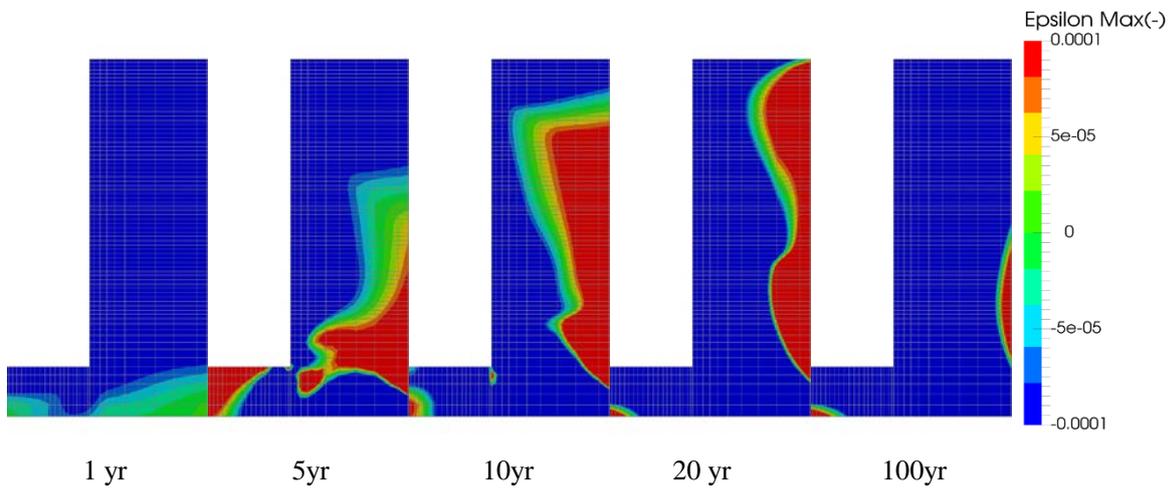
添付図 76 Case H28 -2Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



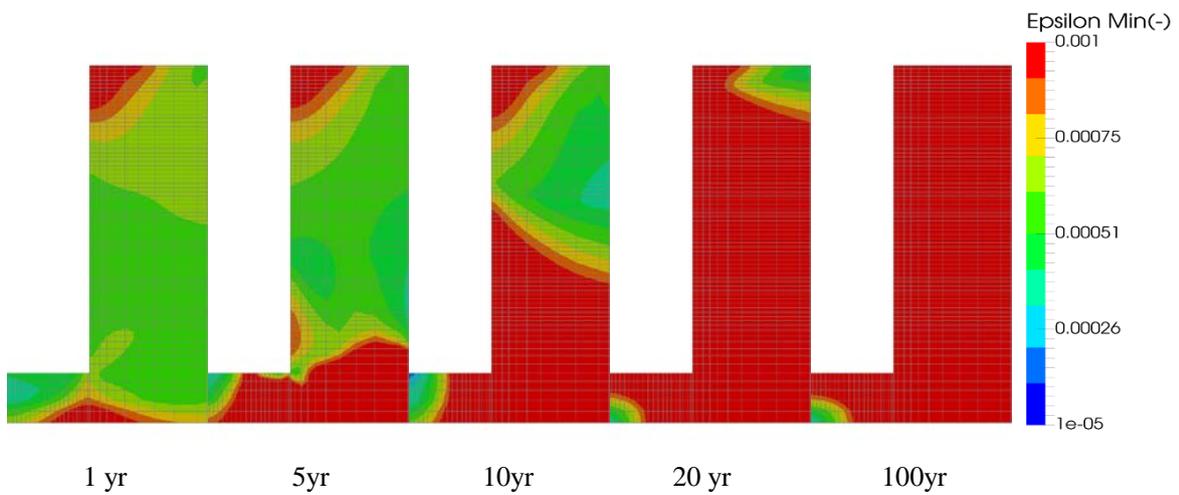
添付図 77 Case H28 -2Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



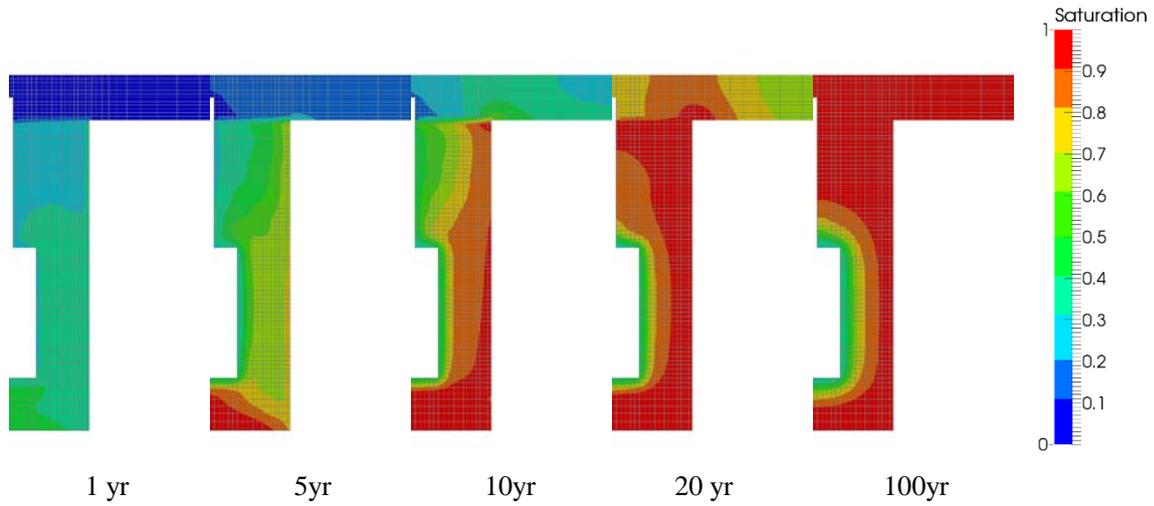
添付図 78 Case H28 -2Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



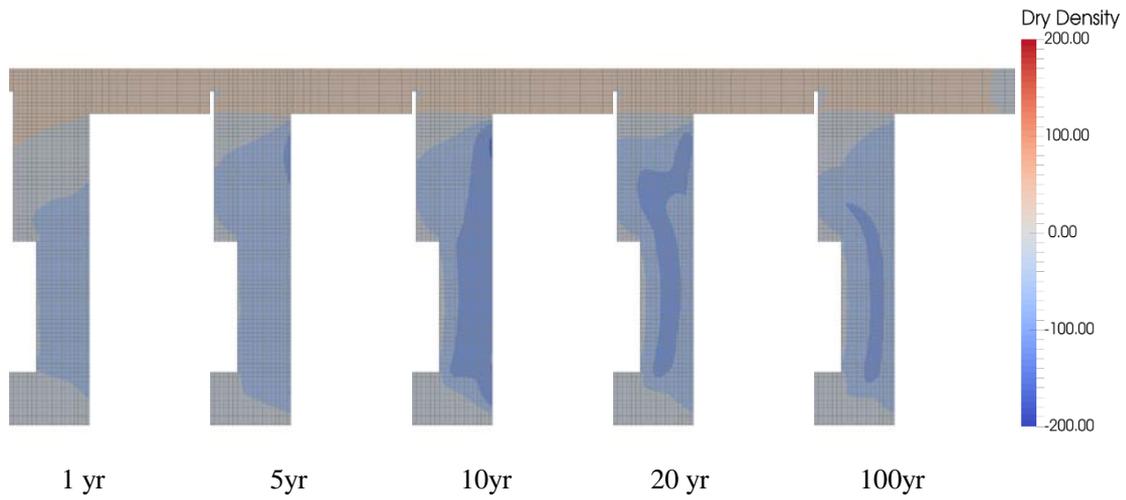
添付図 79 Case H28 -2Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



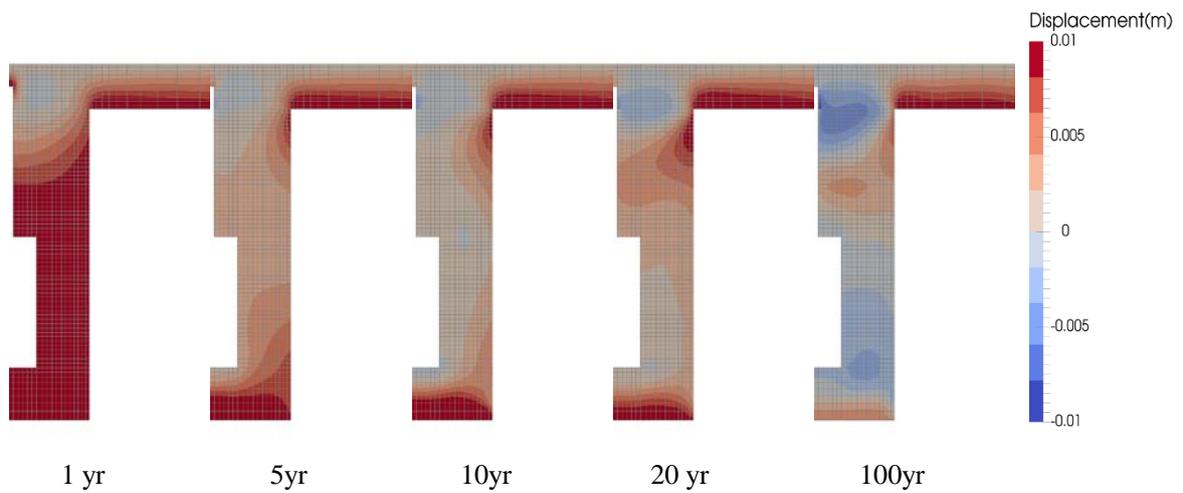
添付図 80 Case H28 -2Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



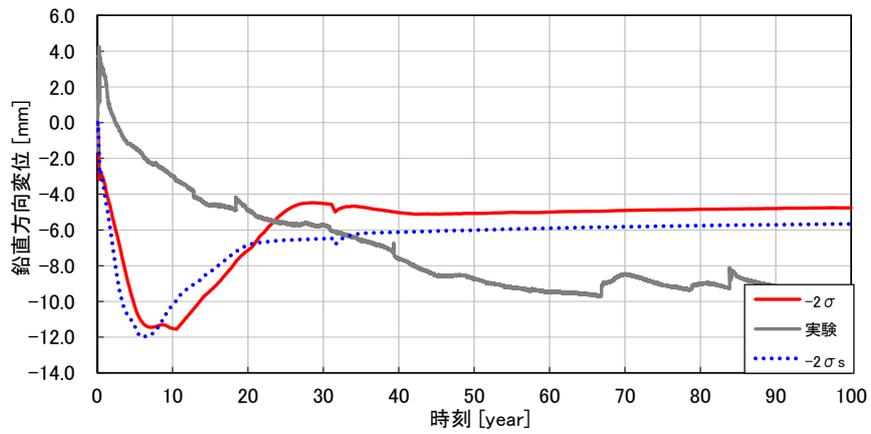
添付図 81 Case H28 -2Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布



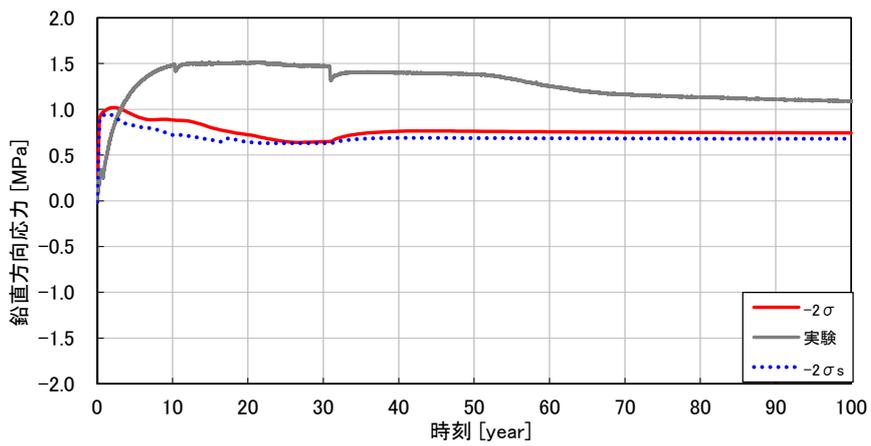
添付図 82 Case H28 -2Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



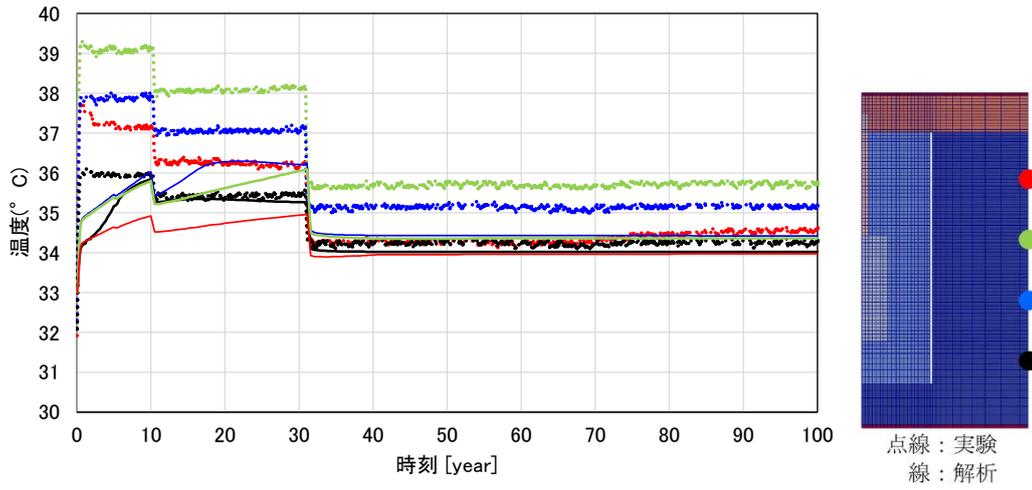
添付図 83 Case H28 -2Sigma 鉛直変位分布



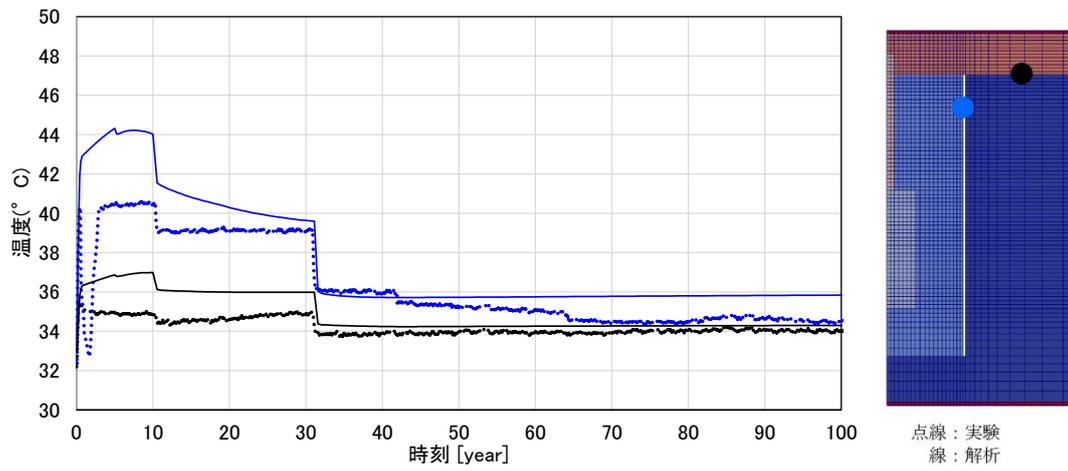
添付図 84 Case H28 -2Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



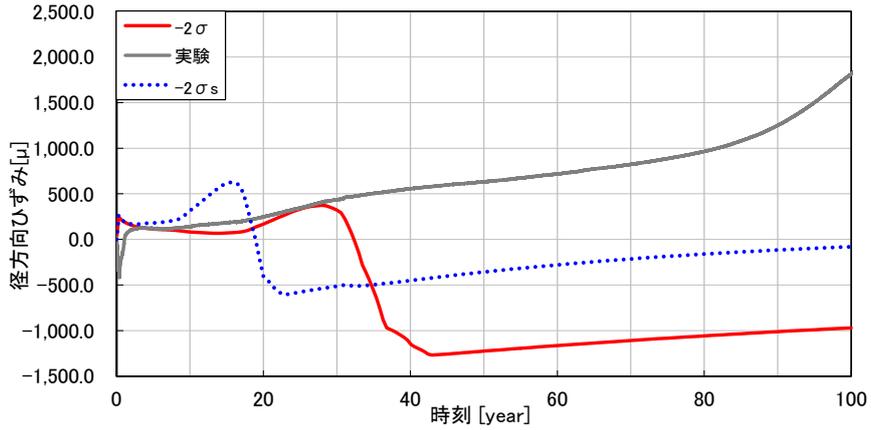
添付図 85 Case H28 -2Sigma 緩衝材の全応力時刻歴（鉛直方向、圧縮：正）



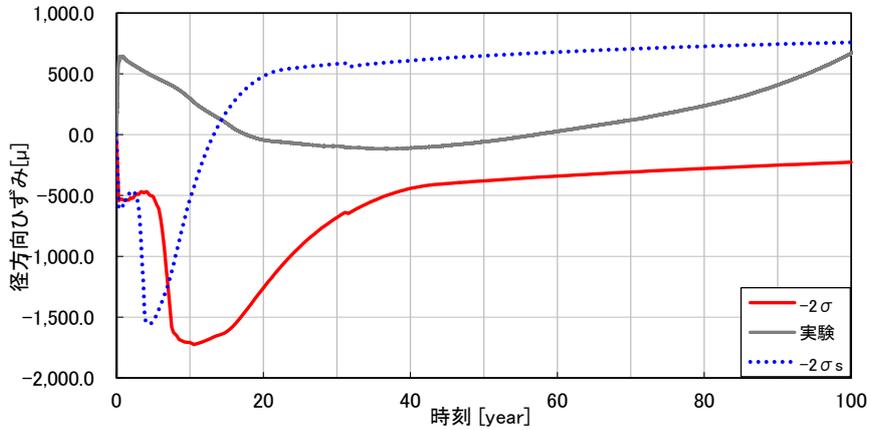
添付図 86 Case H28 -2Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



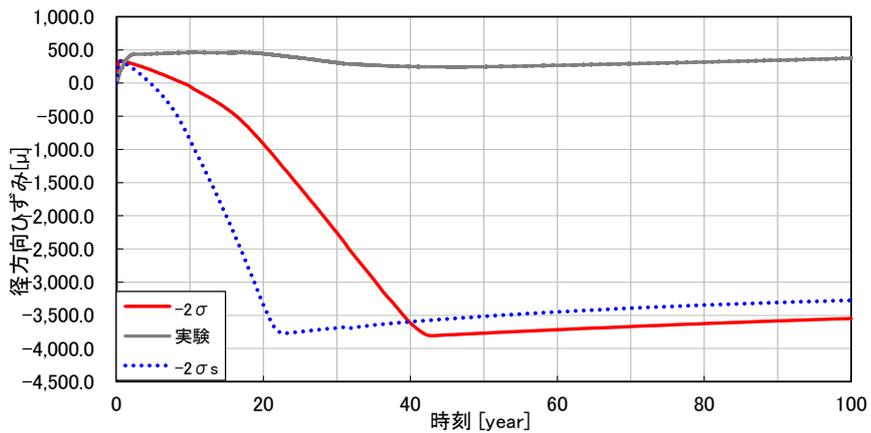
添付図 87 Case H28 -2Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 88 Case H28 -2Sigma 岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

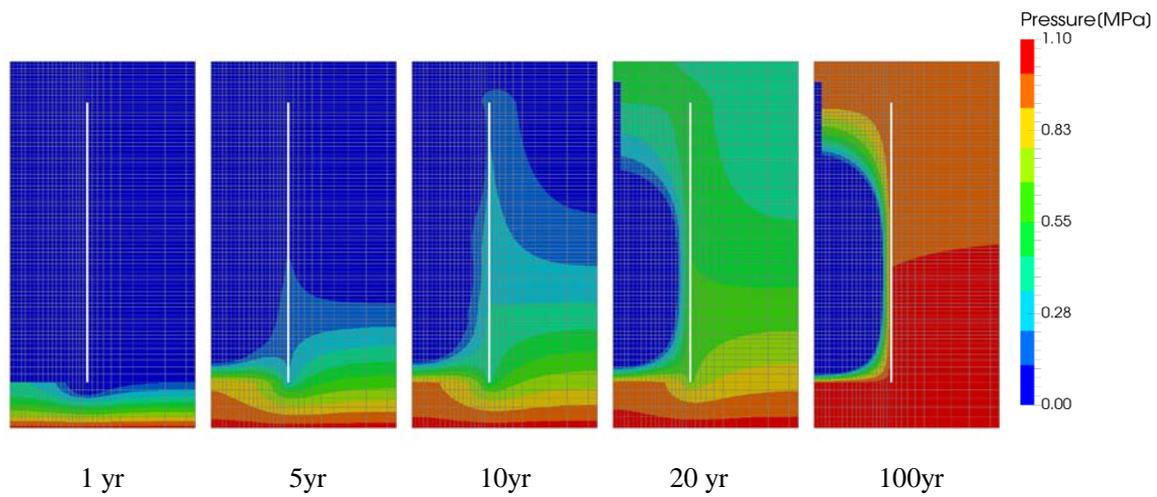


添付図 89 Case H28 -2Sigma 岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

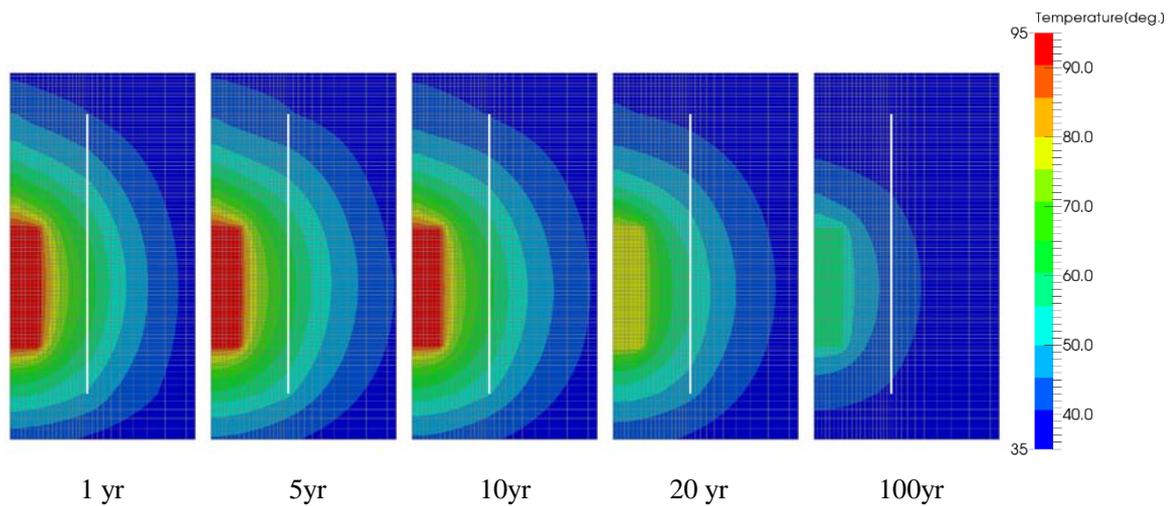


添付図 90 Case H28 -2Sigma 岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

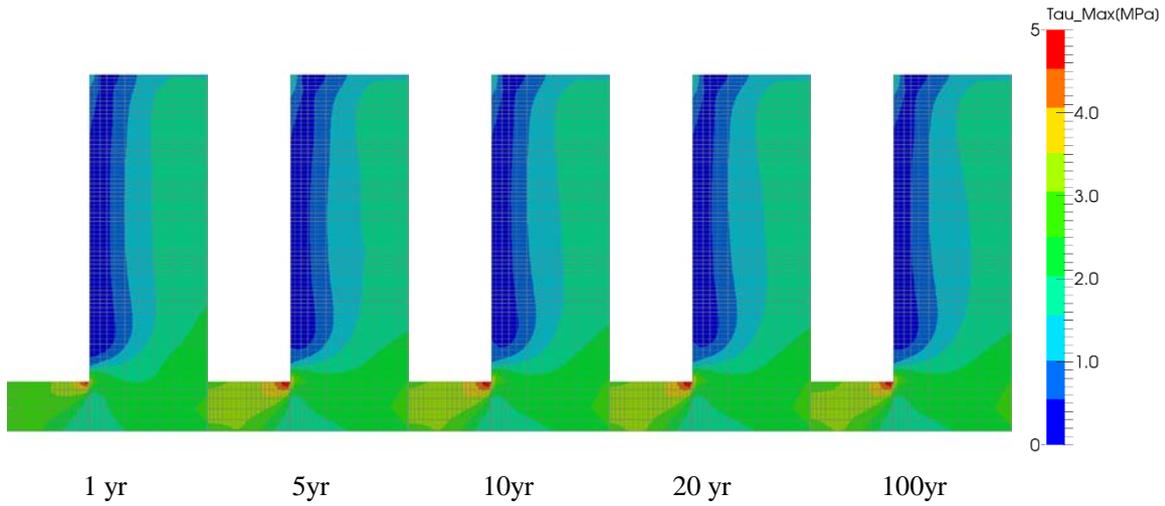
(6) Case H28 +3Sigma



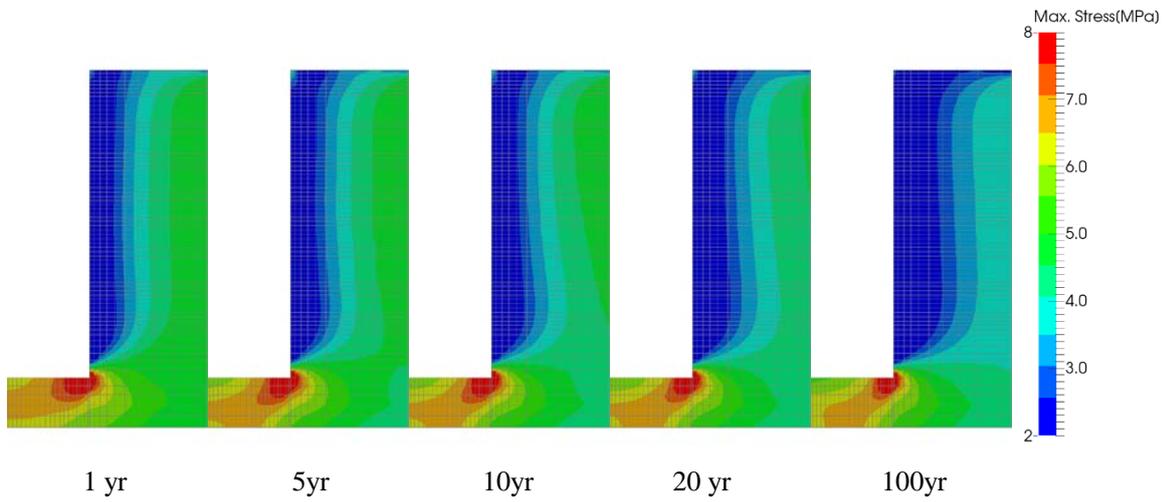
添付図 91 Case H28 +3Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



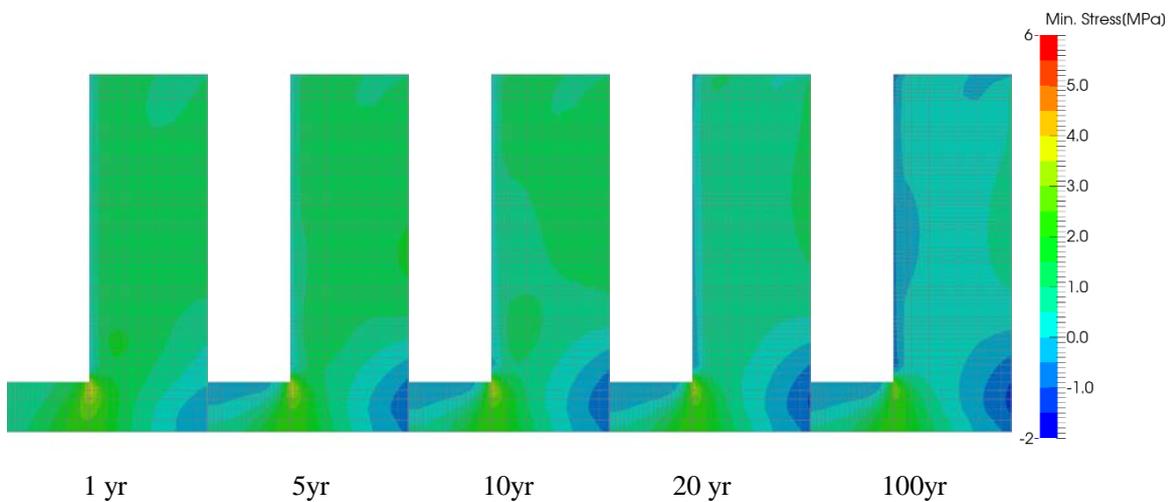
添付図 92 Case H28 +3Sigma 岩盤部分・温度分布



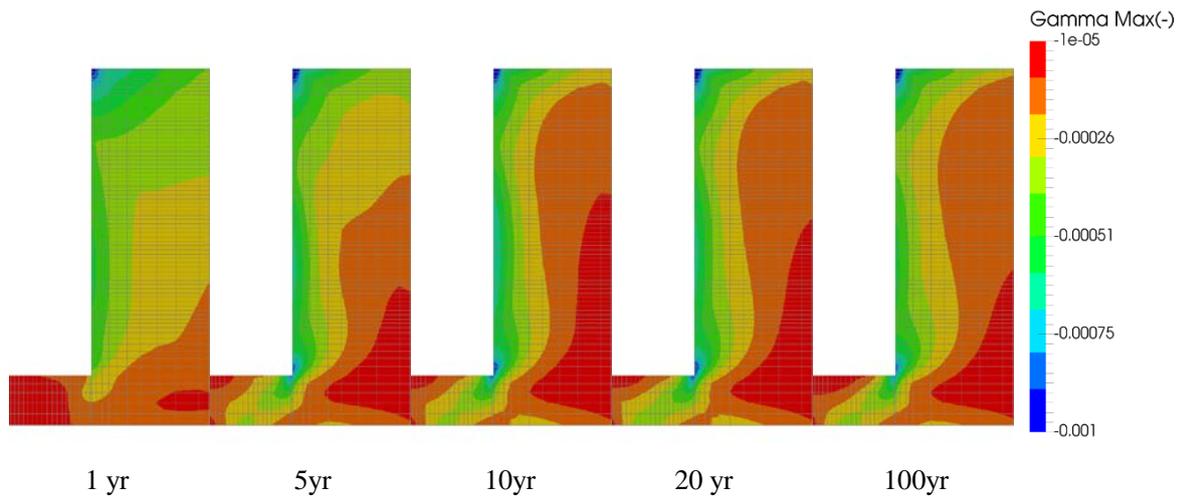
添付図 93 Case H28 +3Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



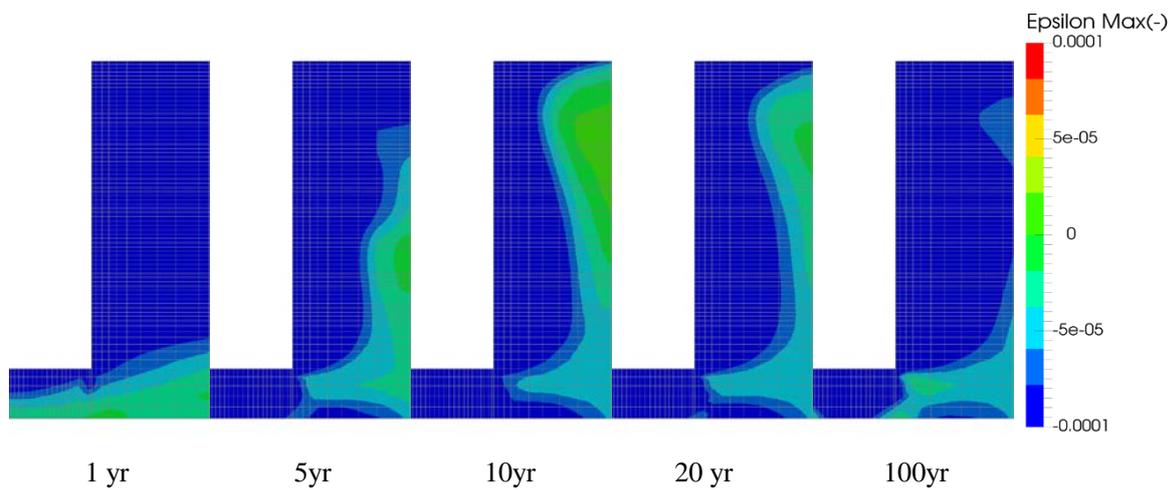
添付図 94 Case H28 +3Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



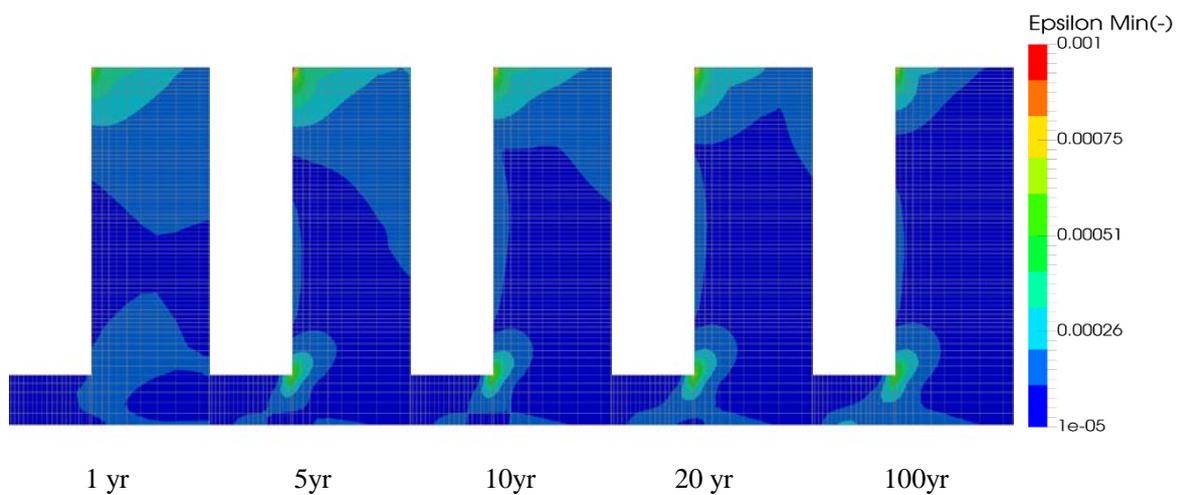
添付図 95 Case H28 +3Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



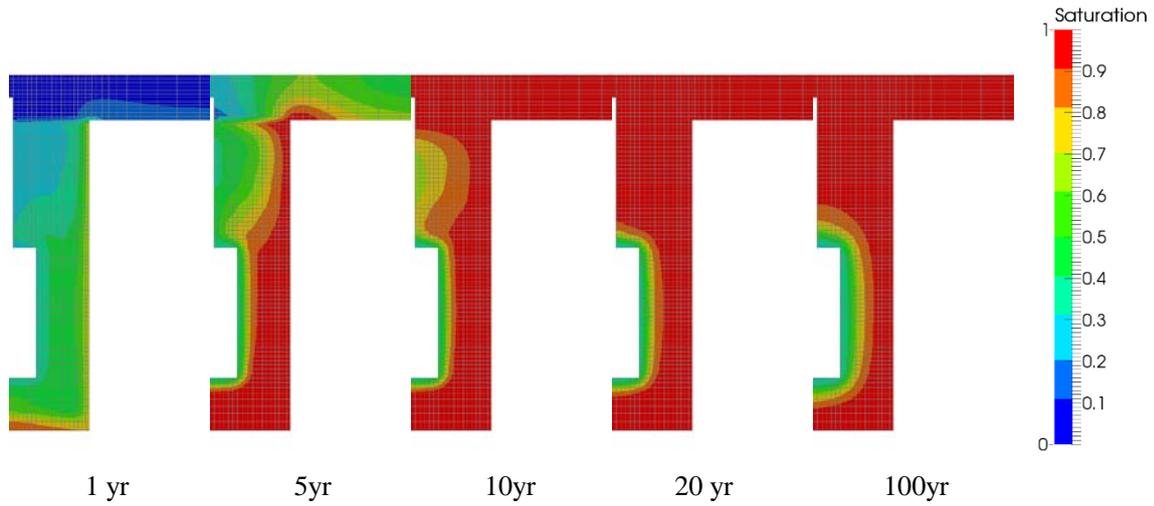
添付図 96 Case H28 +3Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



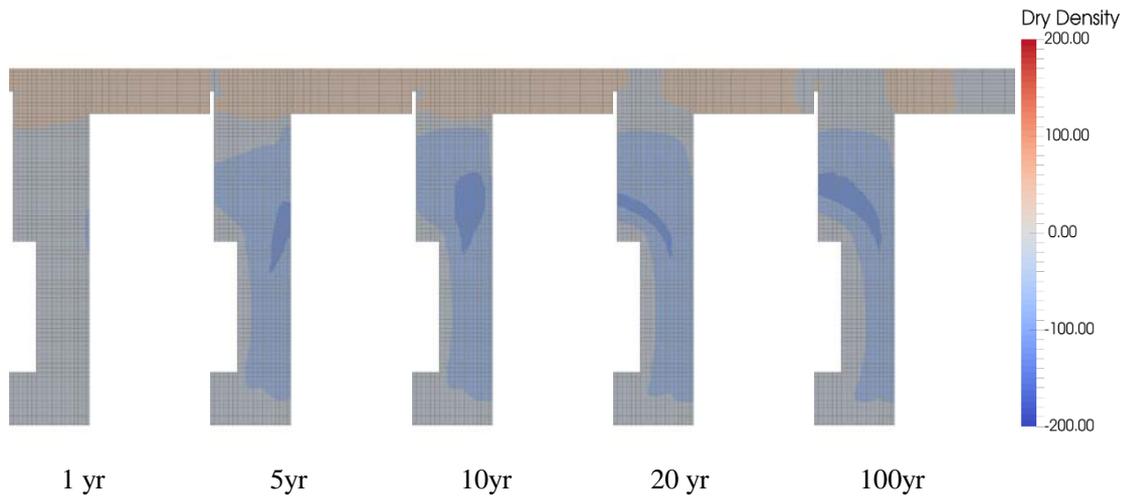
添付図 97 Case H28 +3Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



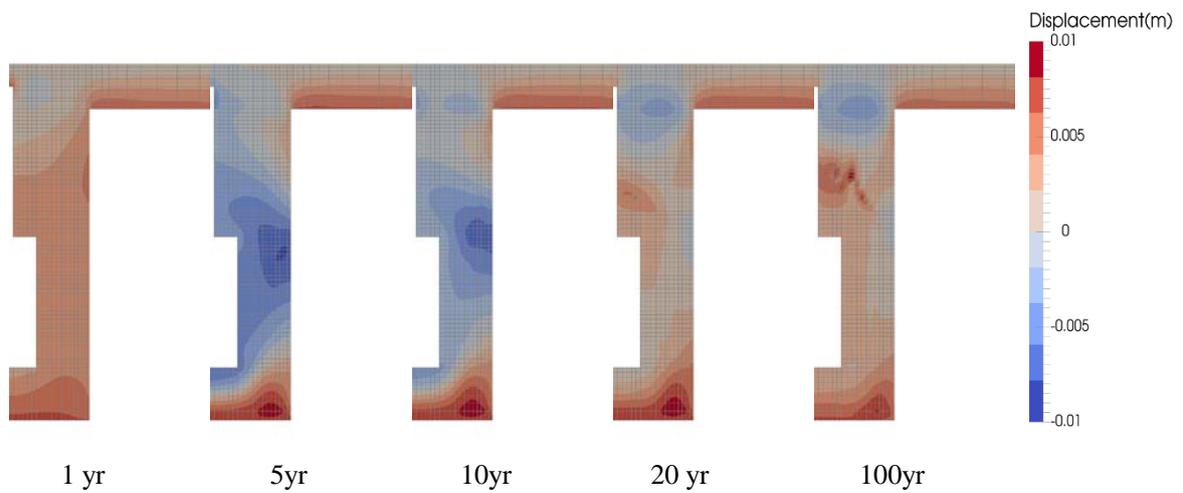
添付図 98 Case H28 +3Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



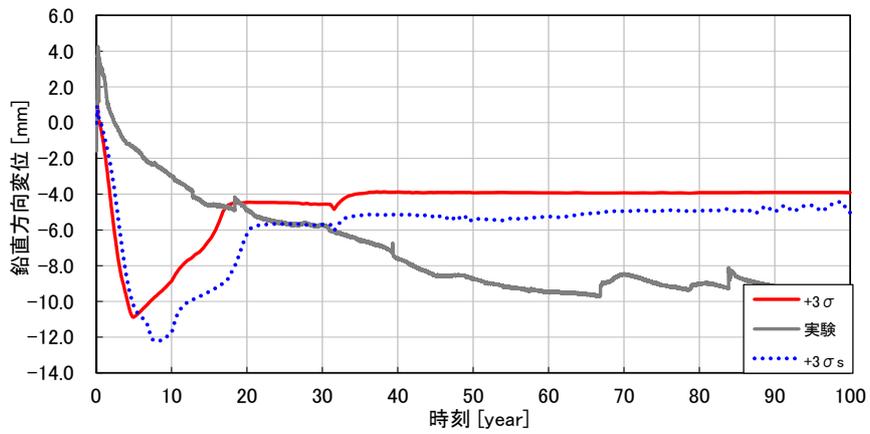
添付図 99 Case H28 +3Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布



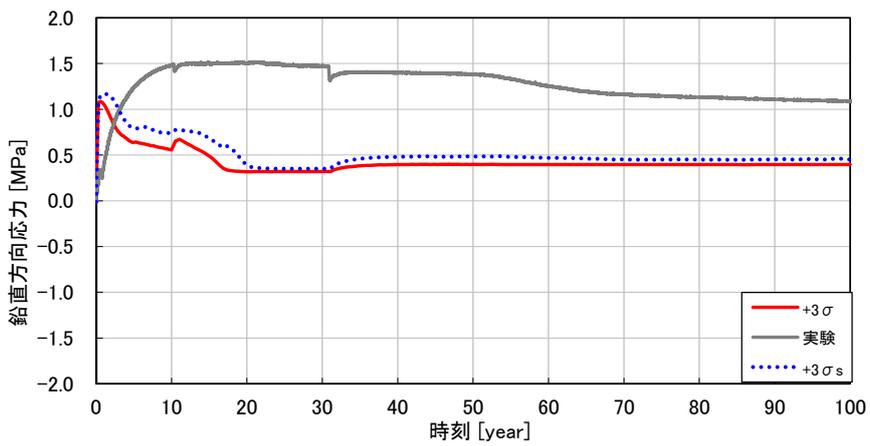
添付図 100 Case H28 +3Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



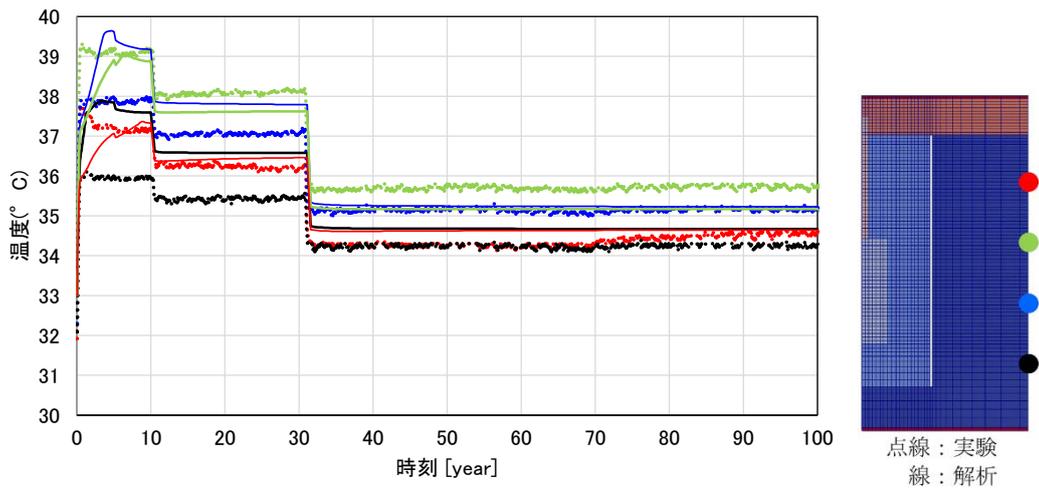
添付図 101 Case H28 +3Sigma 鉛直変位分布



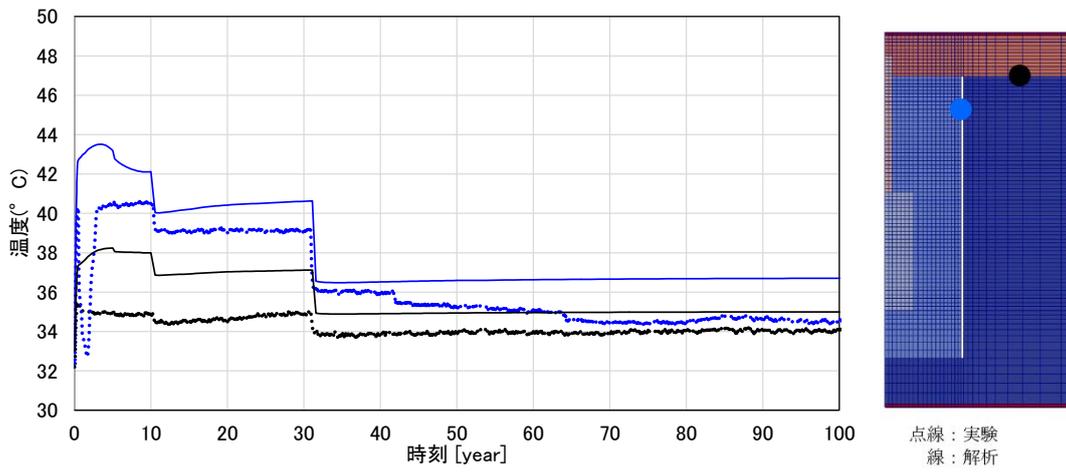
添付図 102 Case H28 +3Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



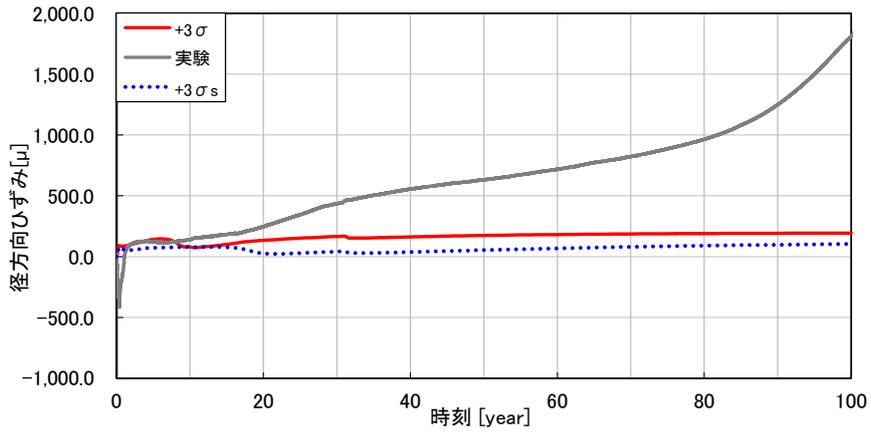
添付図 103 Case H28 +3Sigma 緩衝材の全応力時刻歴（鉛直方向、圧縮：正）



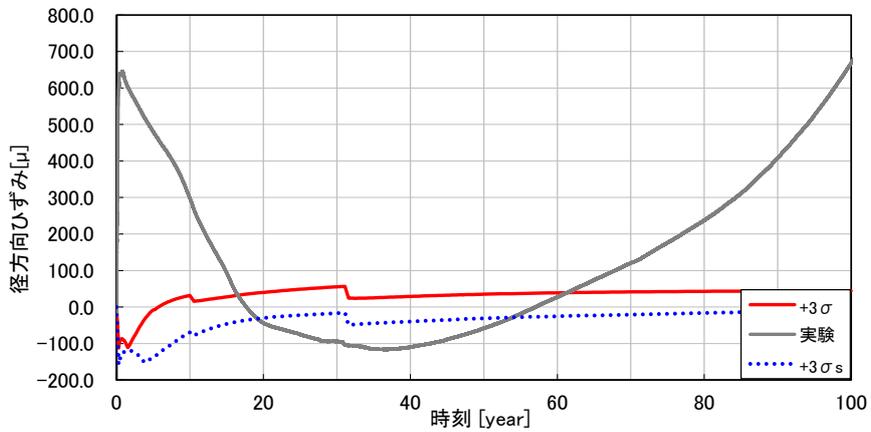
添付図 104 Case H28 +3Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



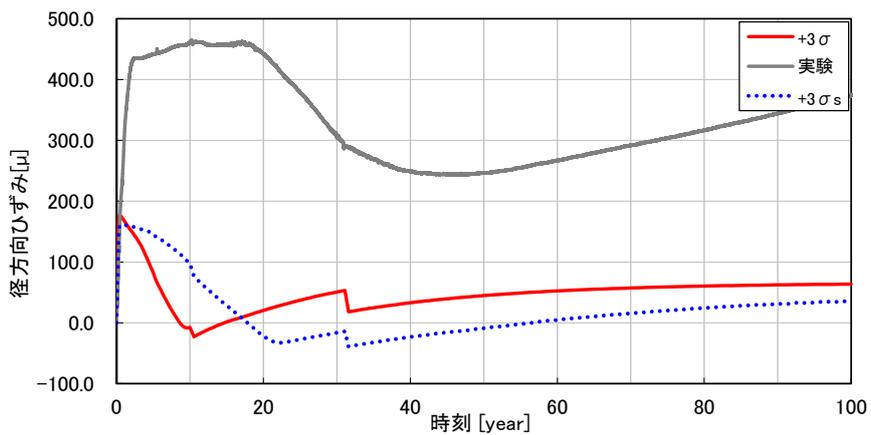
添付図 105 Case H28 +3Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 106 Case H28 +3Sigma 岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

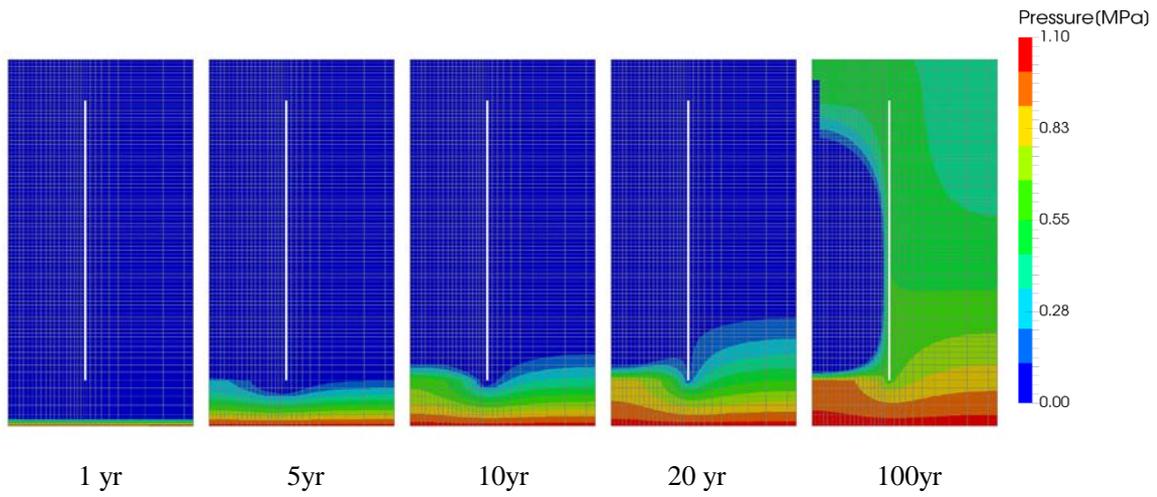


添付図 107 Case H28 +3Sigma 岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

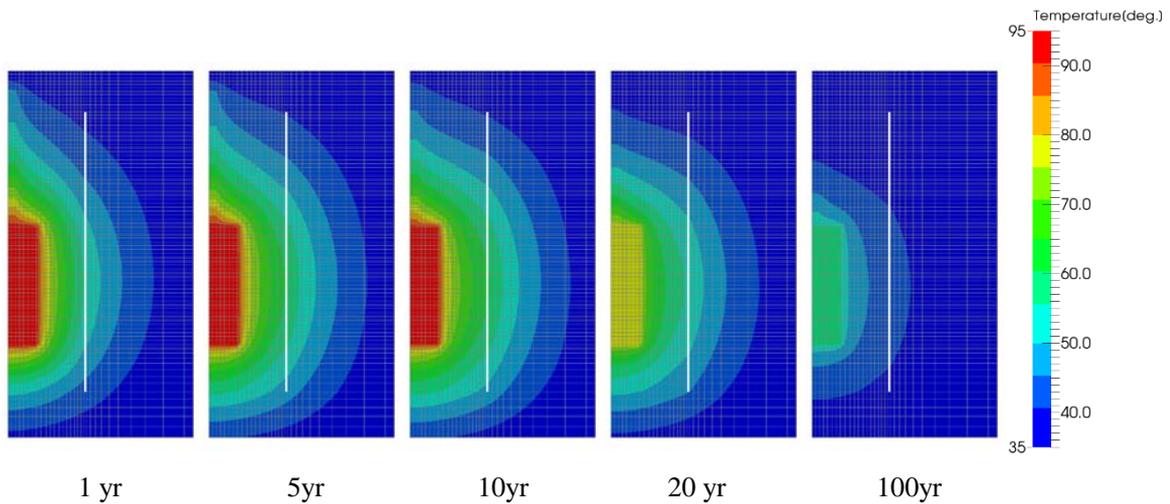


添付図 108 Case H28 +3Sigma 岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

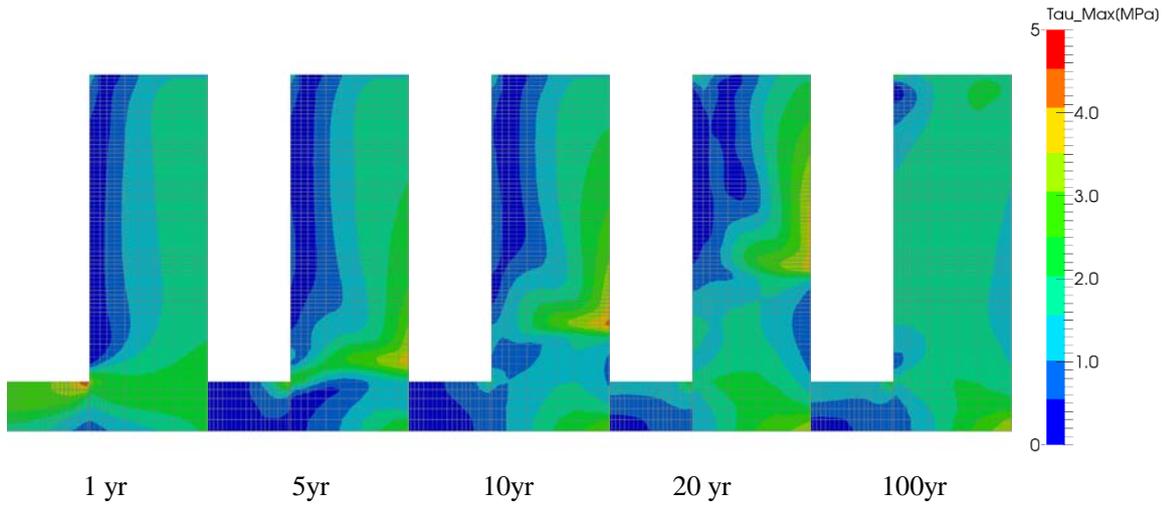
(7) Case H28 -3Sigma



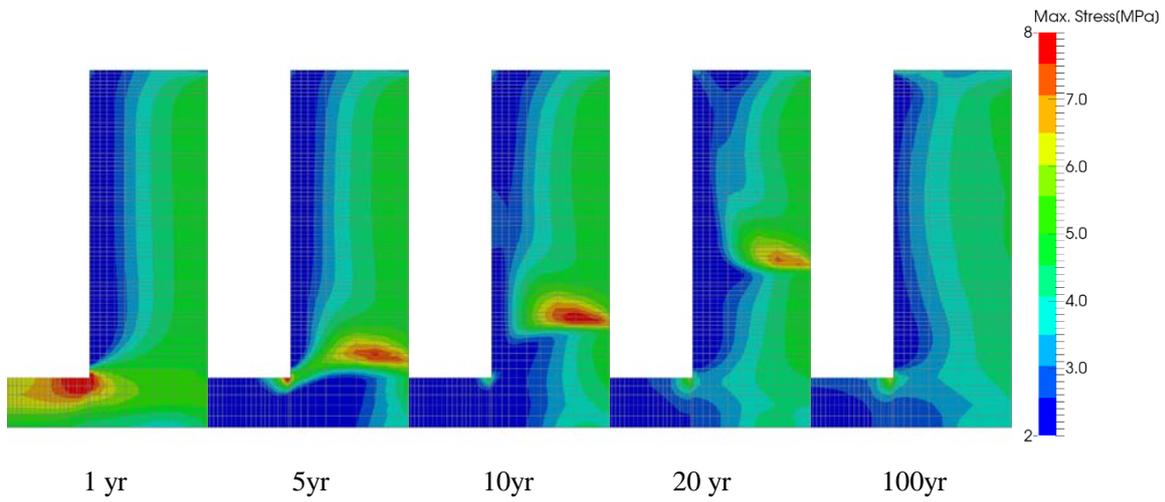
添付図 109 Case H28 -3Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



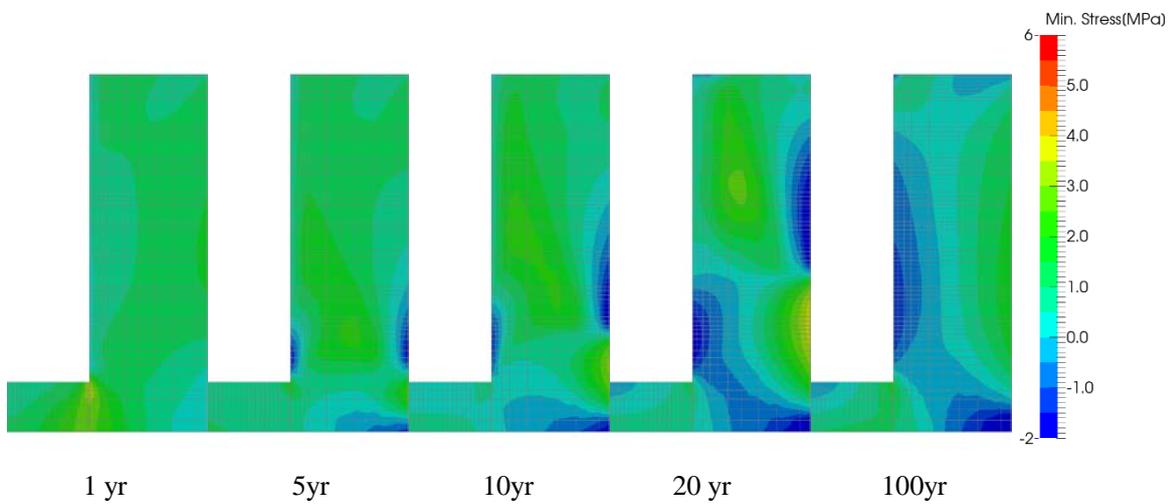
添付図 110 Case H28 -3Sigma 岩盤部分・温度分布



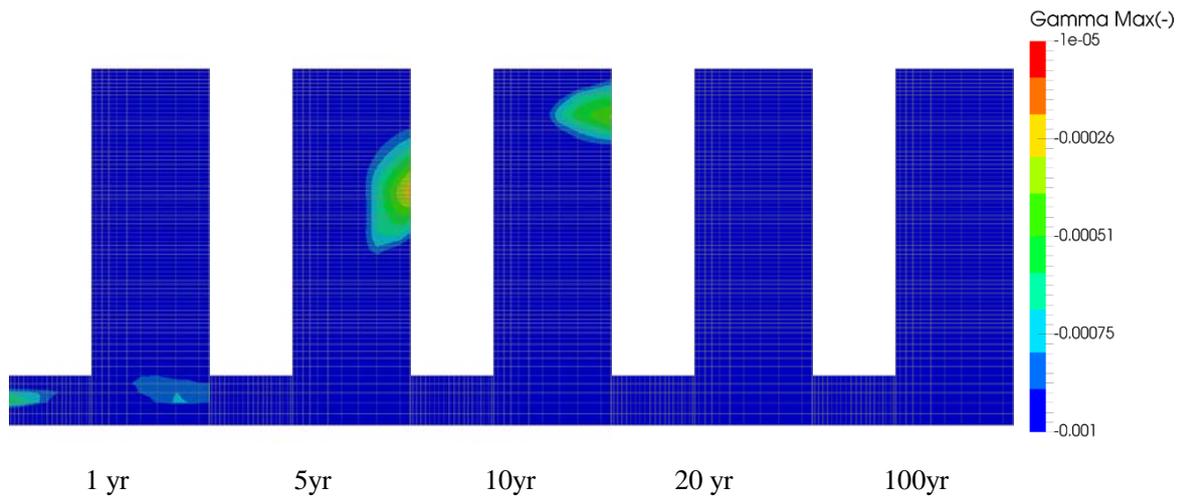
添付図 111 Case H28 -3Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



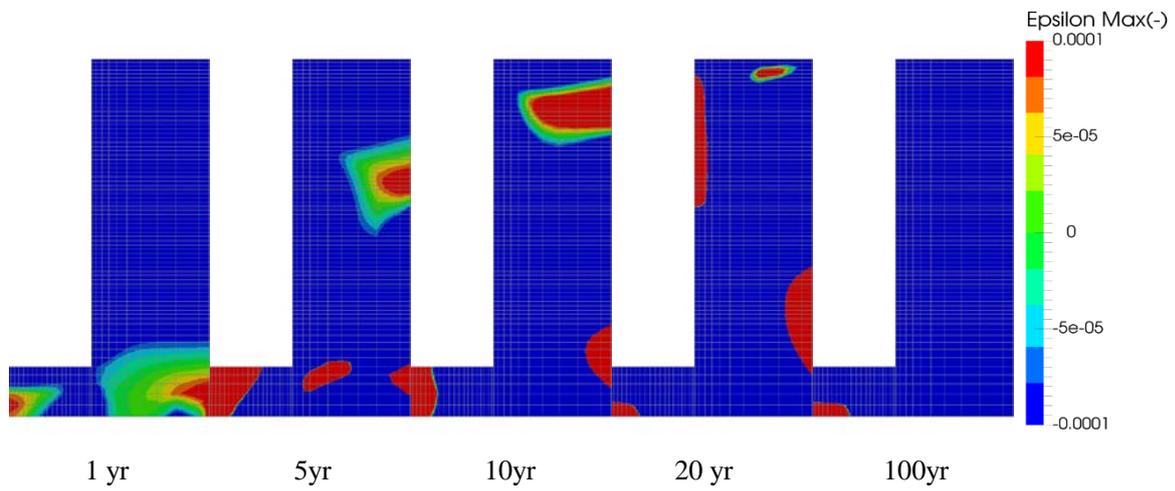
添付図 112 Case H28 -3Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



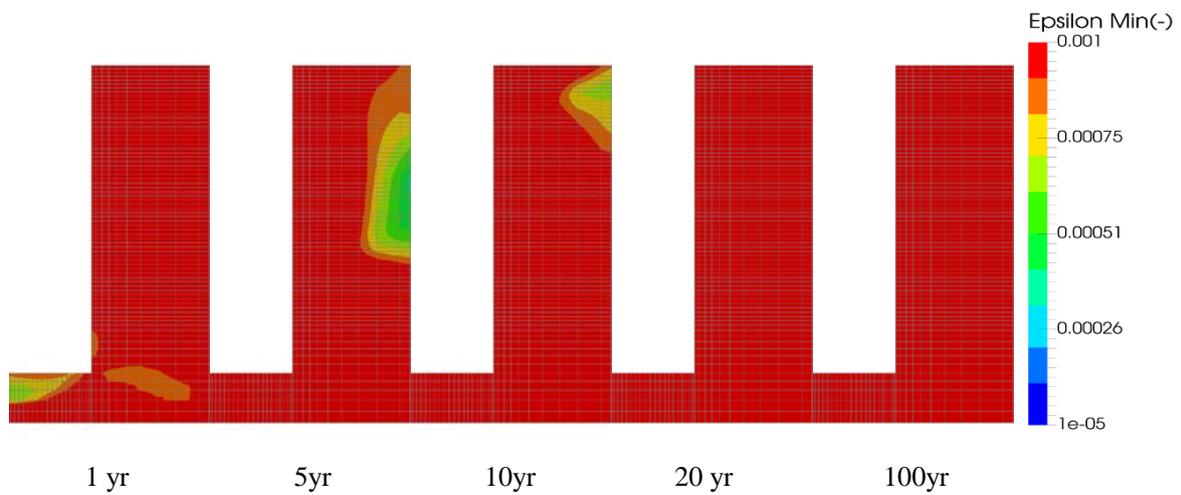
添付図 113 Case H28 -3Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



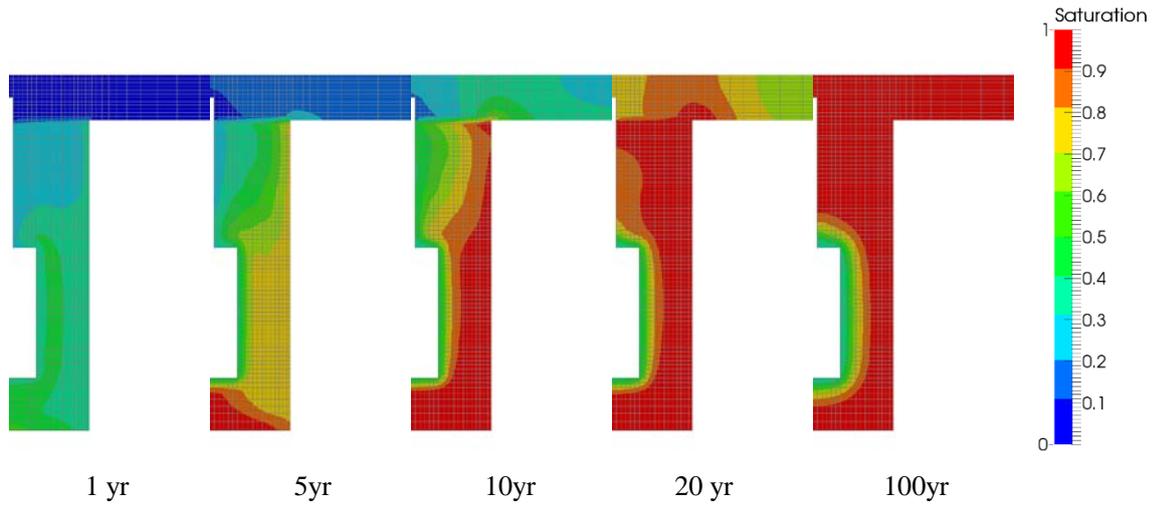
添付図 114 Case H28 -3Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



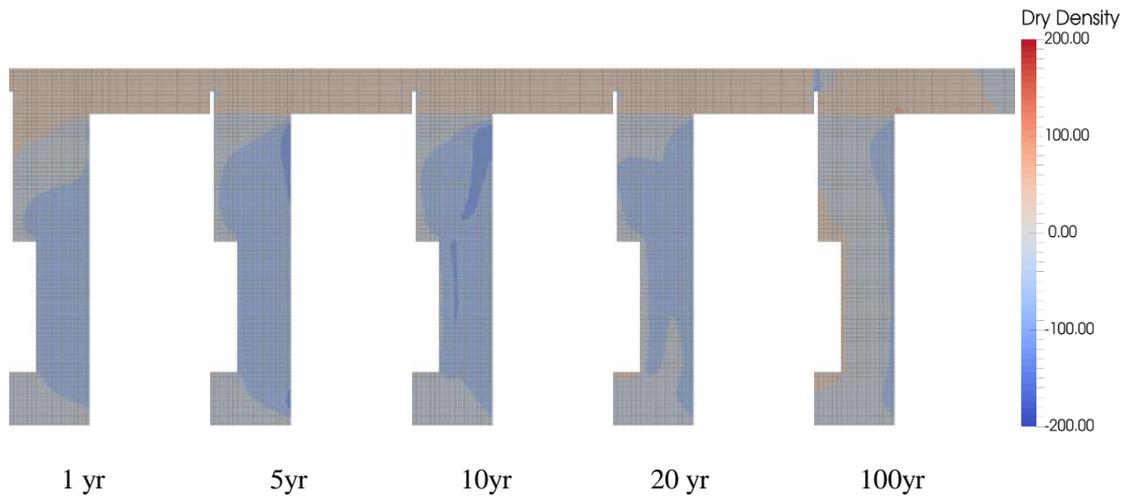
添付図 115 Case H28 -3Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



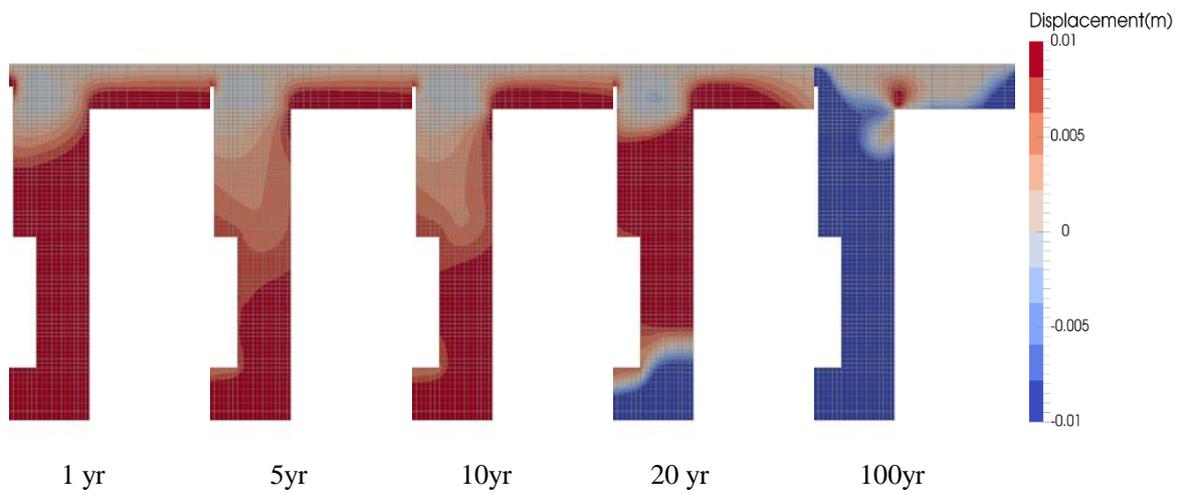
添付図 116 Case H28 -3Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



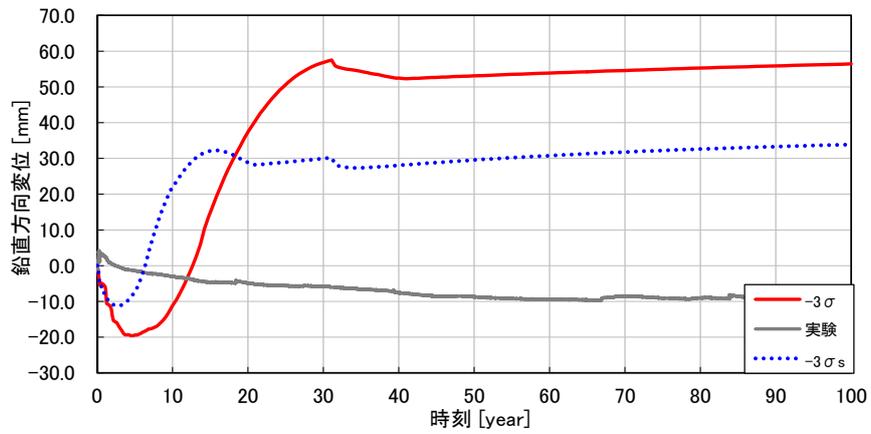
添付図 117 Case H28 -3Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布



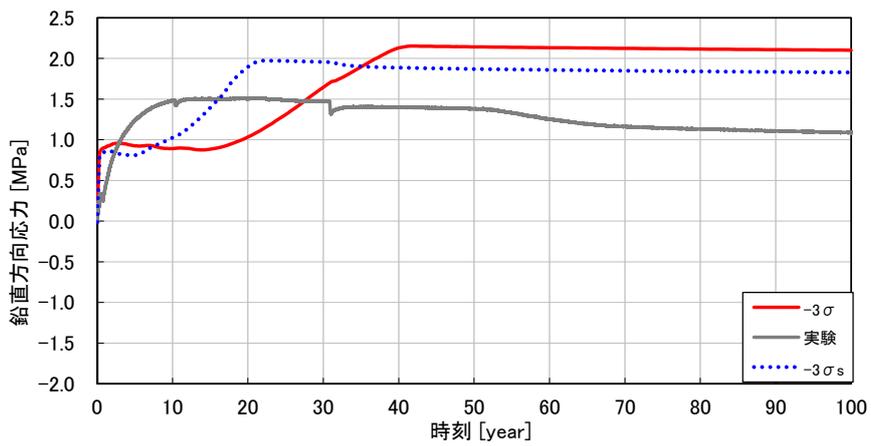
添付図 118 Case H28 -3Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



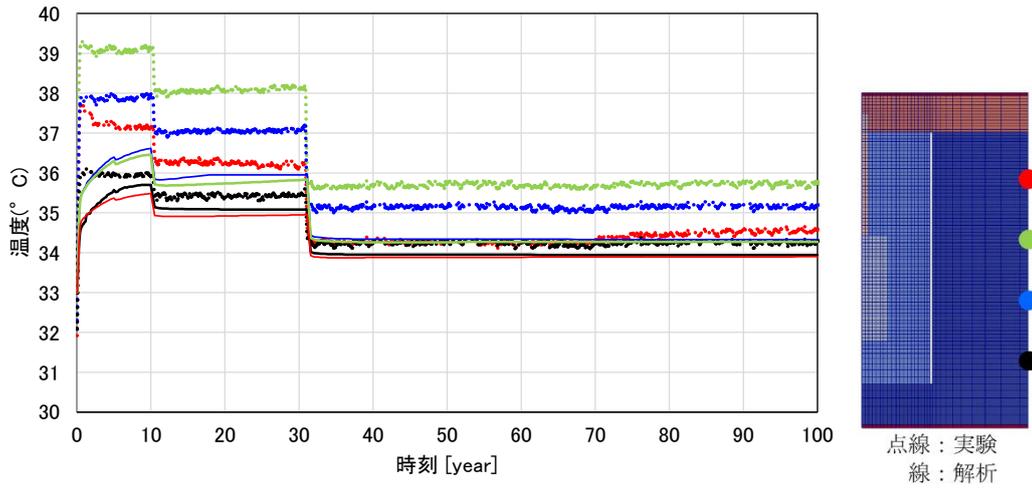
添付図 119 Case H28 -3Sigma 鉛直変位分布



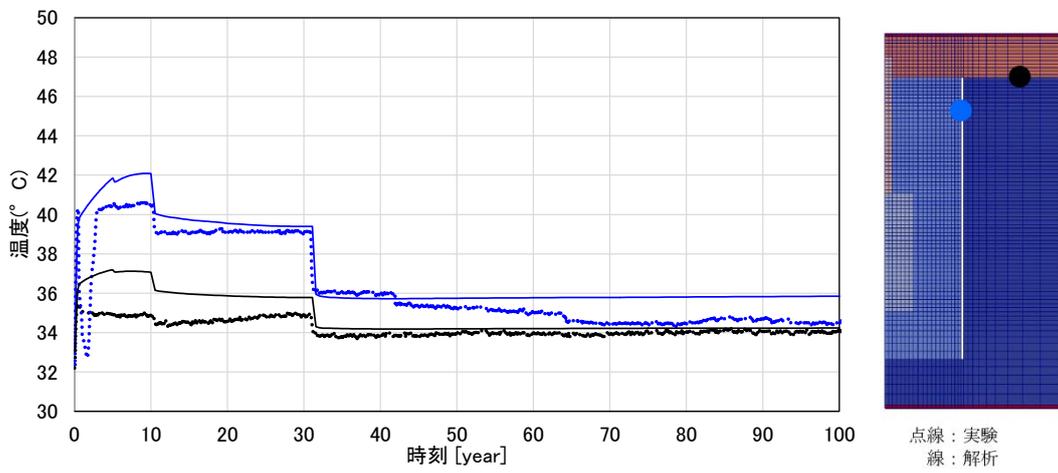
添付図 120 Case H28 -3Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



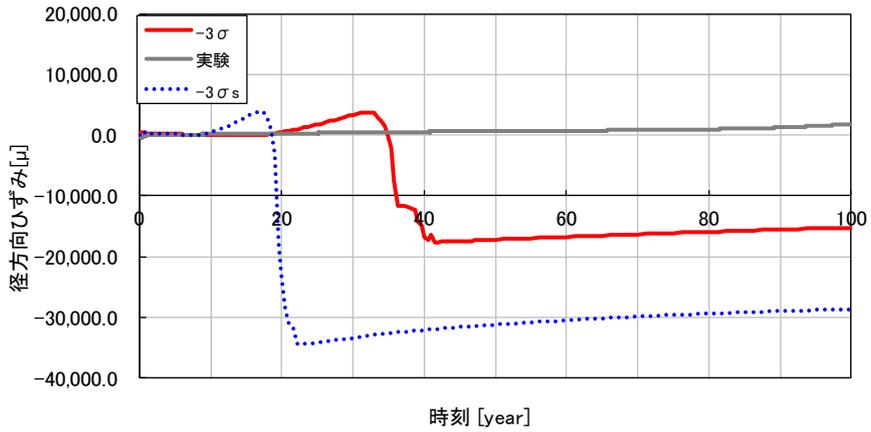
添付図 121 Case H28 -3Sigma 緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)



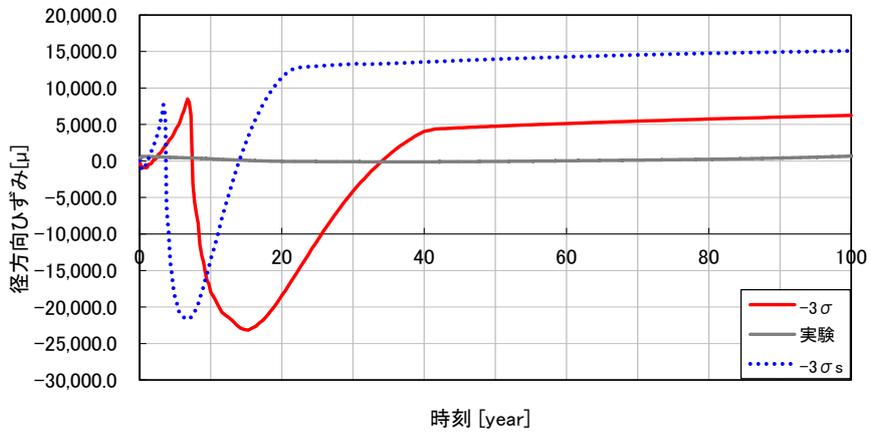
添付図 122 Case H28 -3Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



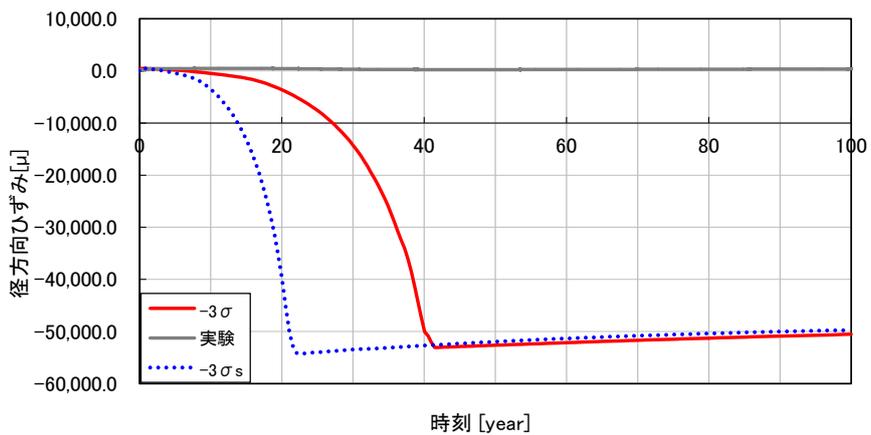
添付図 123 Case H28 -3Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 124 Case H28 -3Sigma 岩盤上面・径方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

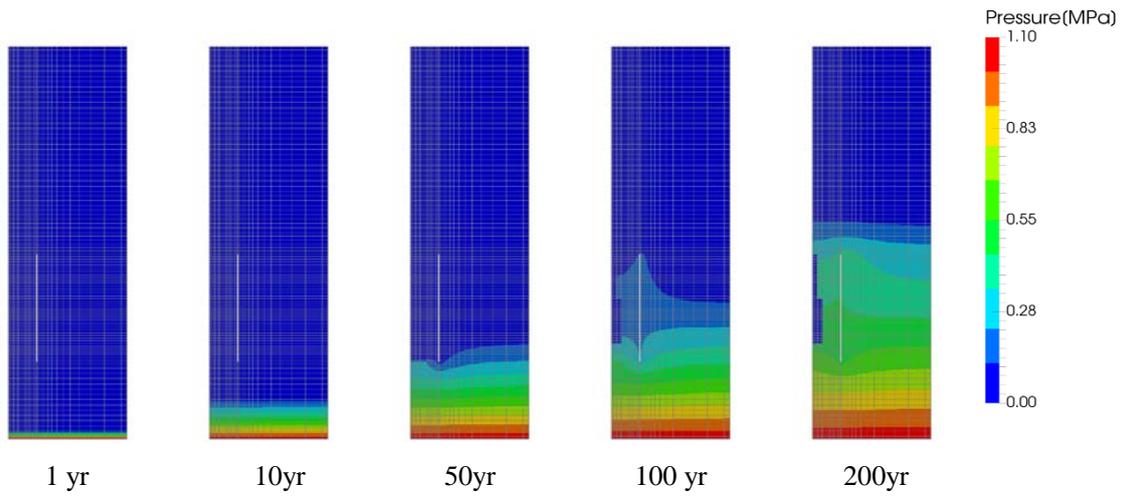


添付図 125 Case H28 -3Sigma 岩盤下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

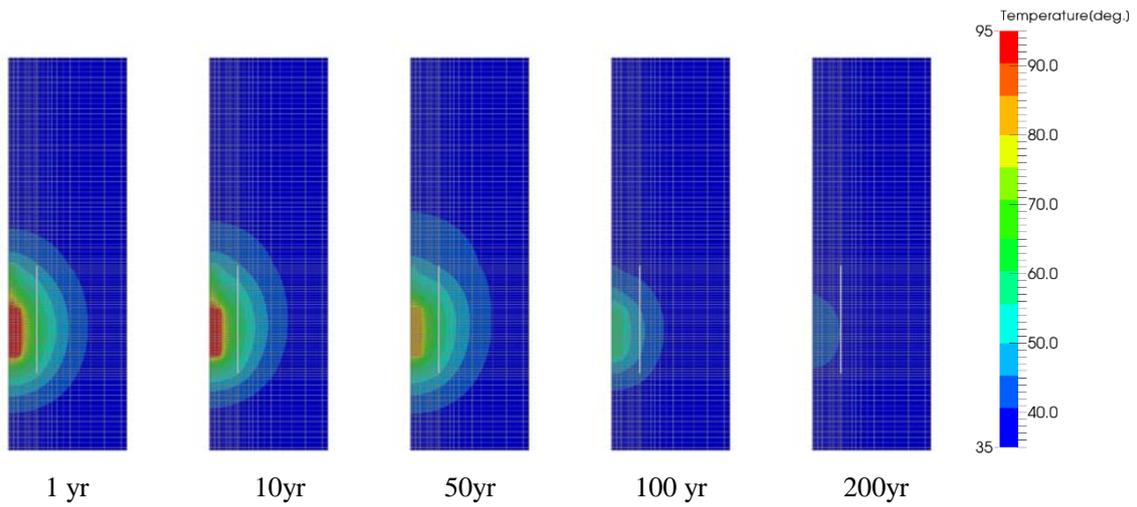


添付図 126 Case H28 -3Sigma 岩盤上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

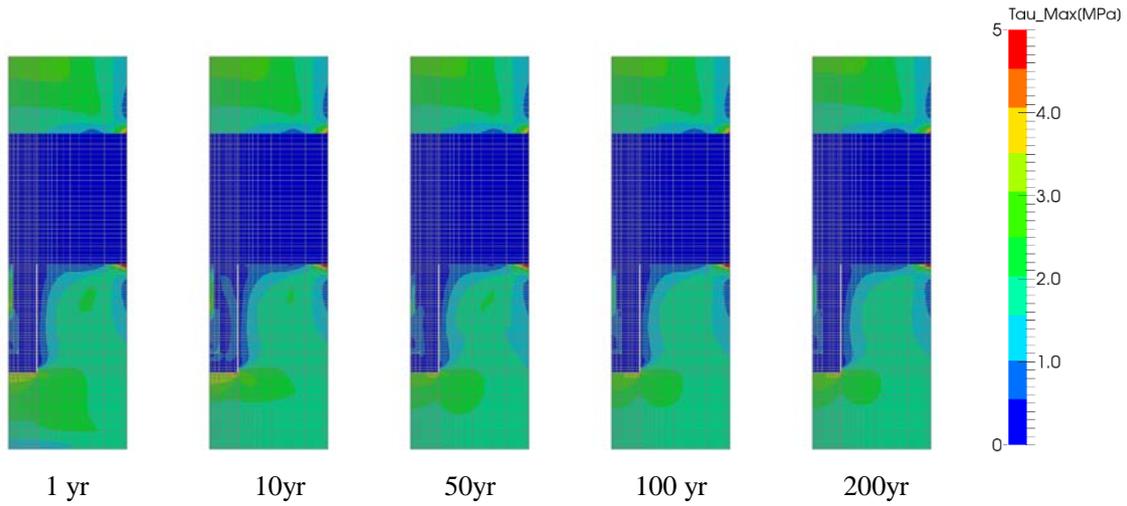
(8) Case H29 Mean



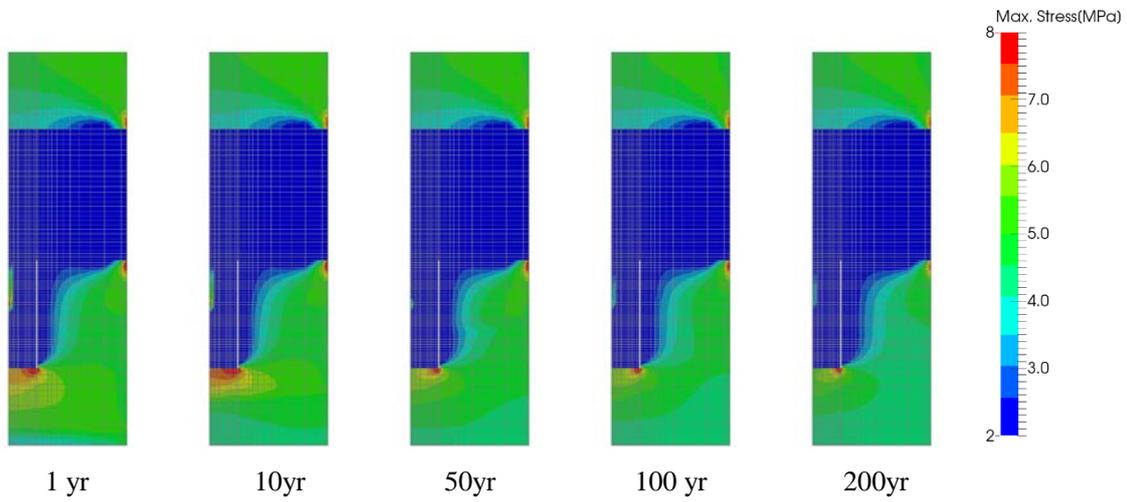
添付図 127 Case H29 Mean 岩盤部分・間隙水压分布



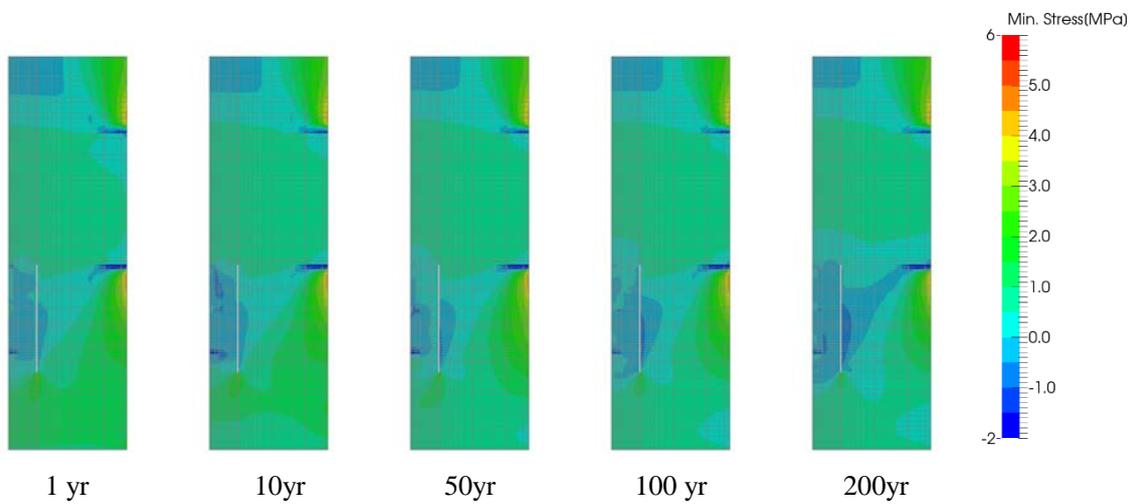
添付図 128 Case H29 Mean 岩盤部分・温度分布



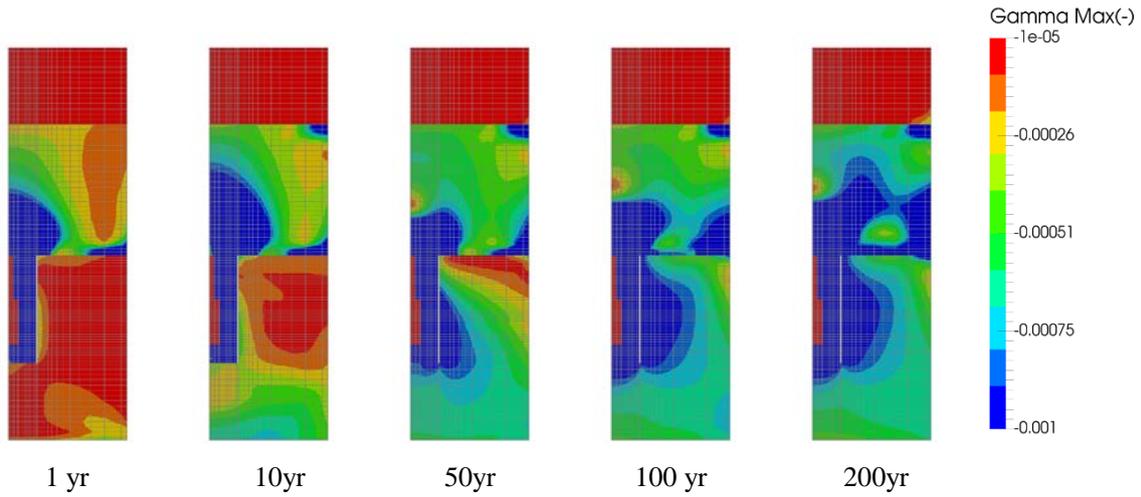
添付図 129 Case H29 Mean 岩盤部分・主せん断応力分布



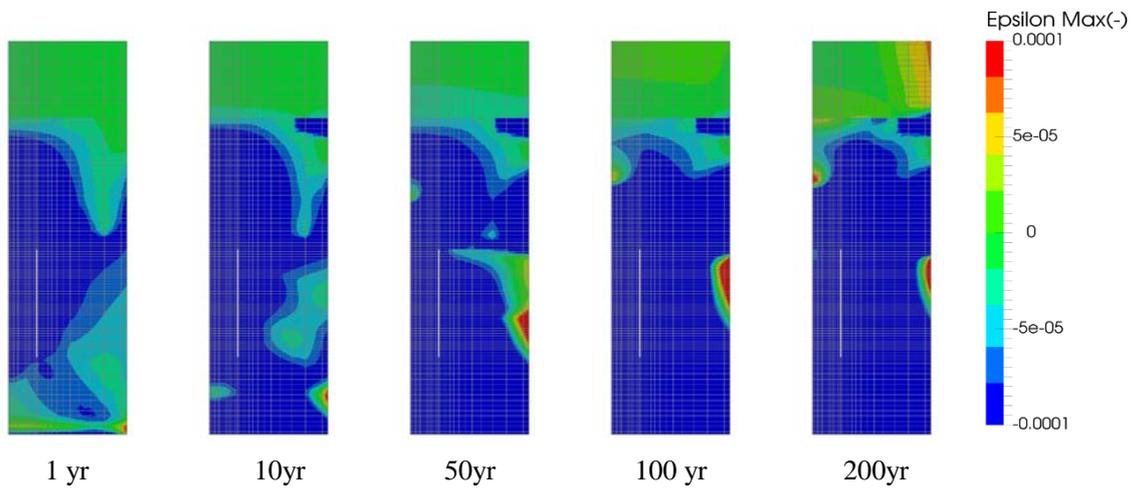
添付図 130 Case H29 Mean 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



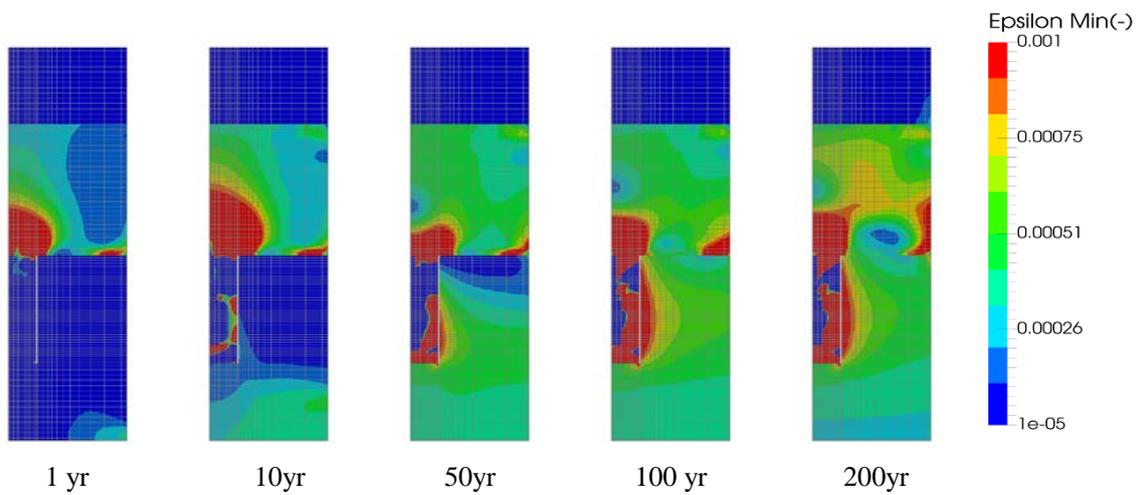
添付図 131 Case H29 Mean 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



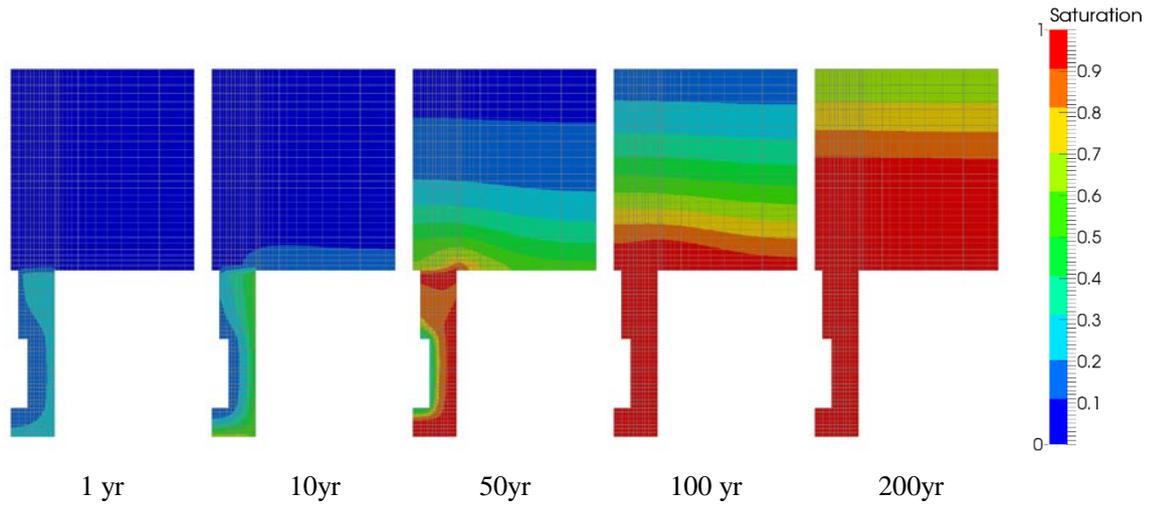
添付図 132 Case H29 Mean 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



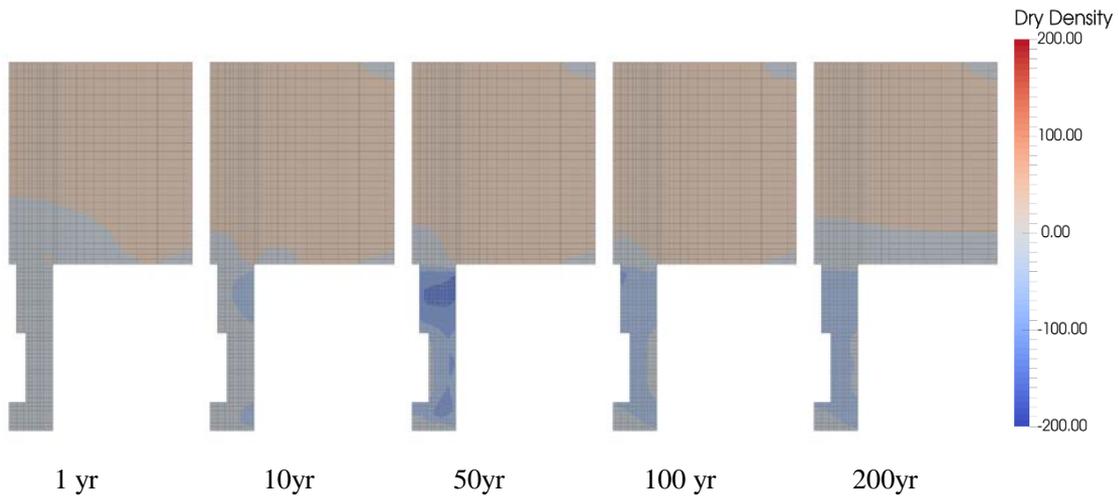
添付図 133 Case H29 Mean 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



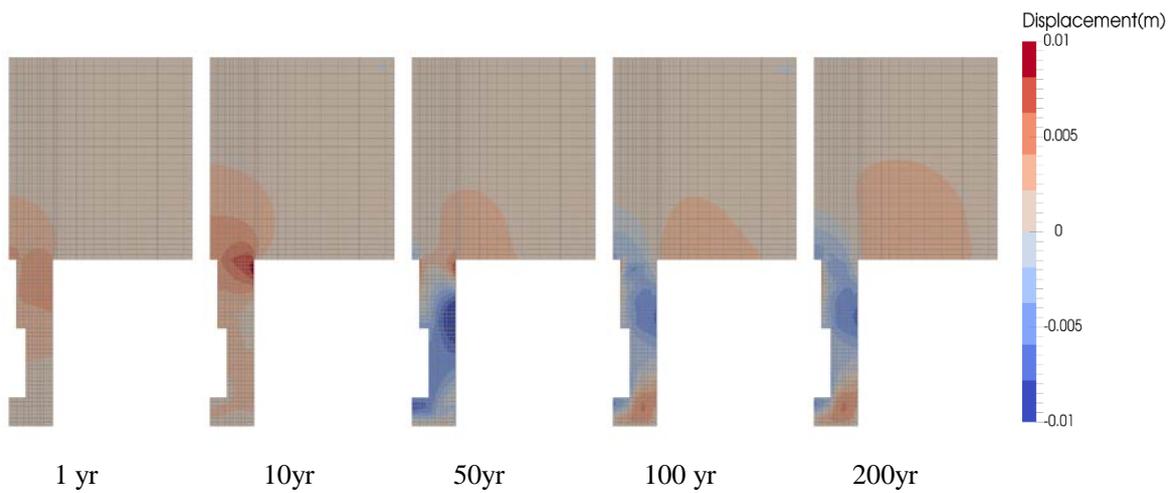
添付図 134 Case H29 Mean 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



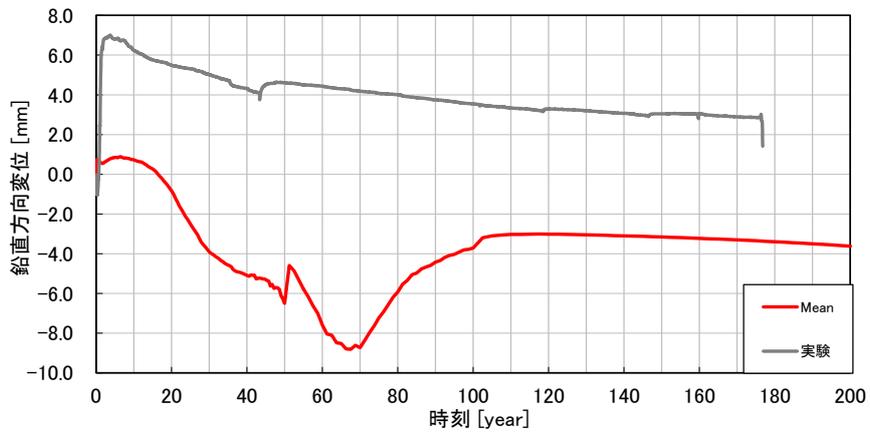
添付図 135 Case H29 Mean 緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布



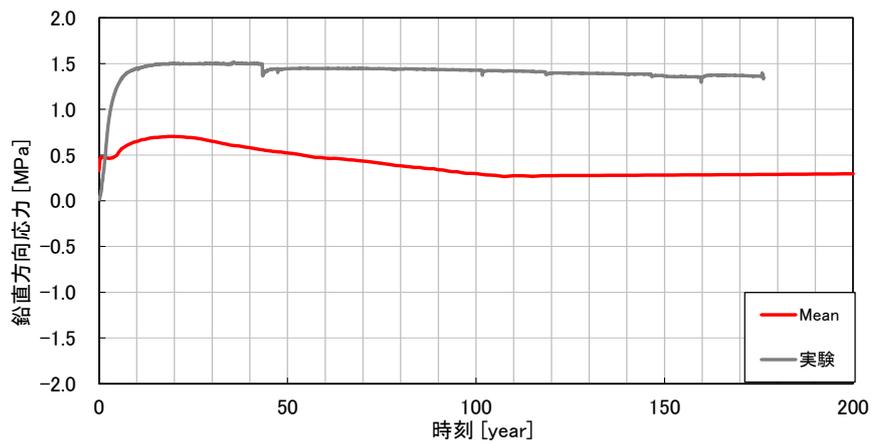
添付図 136 Case H29 Mean 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



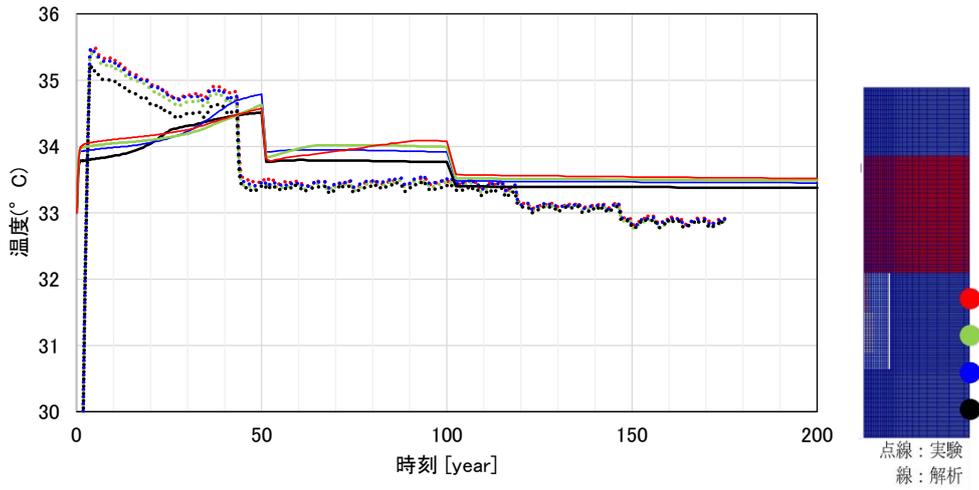
添付図 137 Case H29 Mean 鉛直変位分布



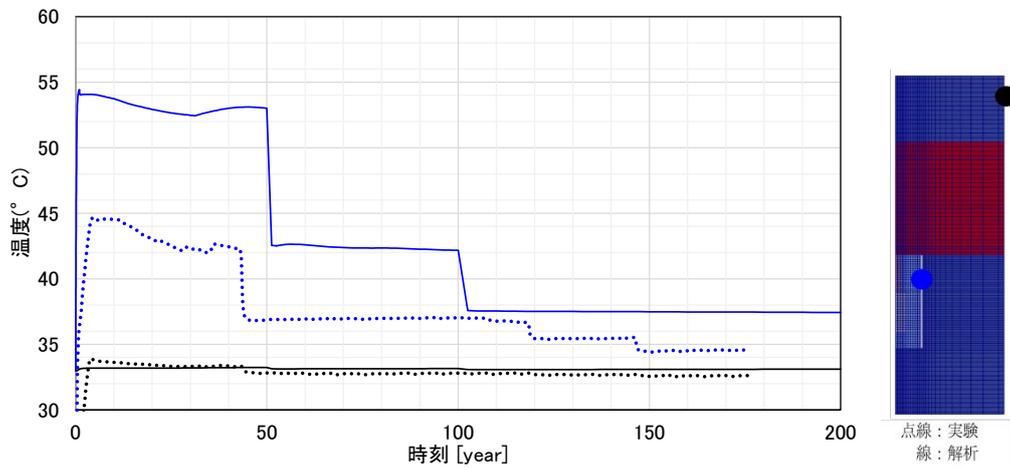
添付図 138 Case H29 Mean O/P 鉛直変位の時刻歴



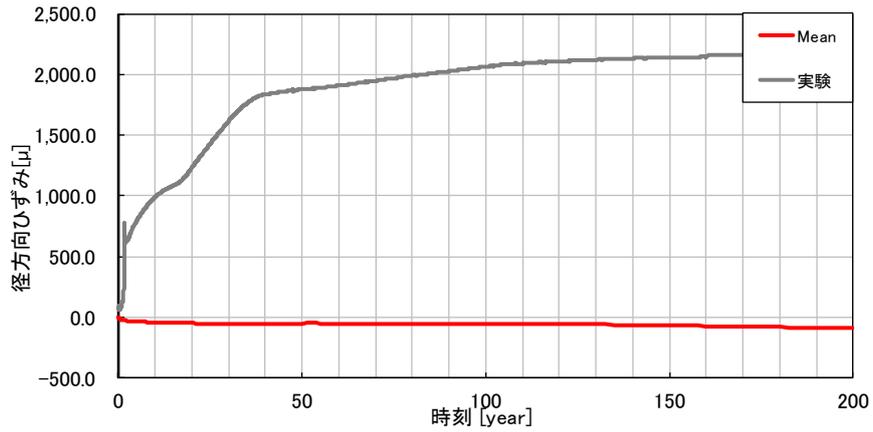
添付図 139 Case H29 Mean 緩衝材の全応力時刻歴（鉛直方向、圧縮：正）



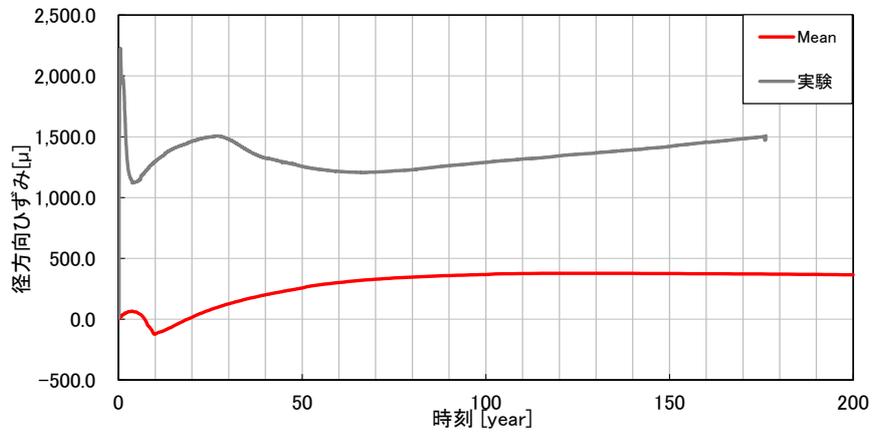
添付図 140 Case H29 Mean 温度時刻歴(岩盤外壁)



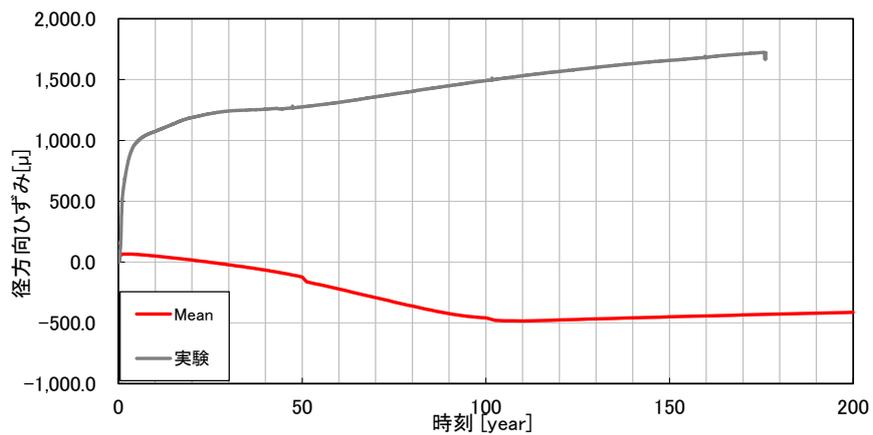
添付図 141 Case H29 Mean 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 142 Case H29 Mean 上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

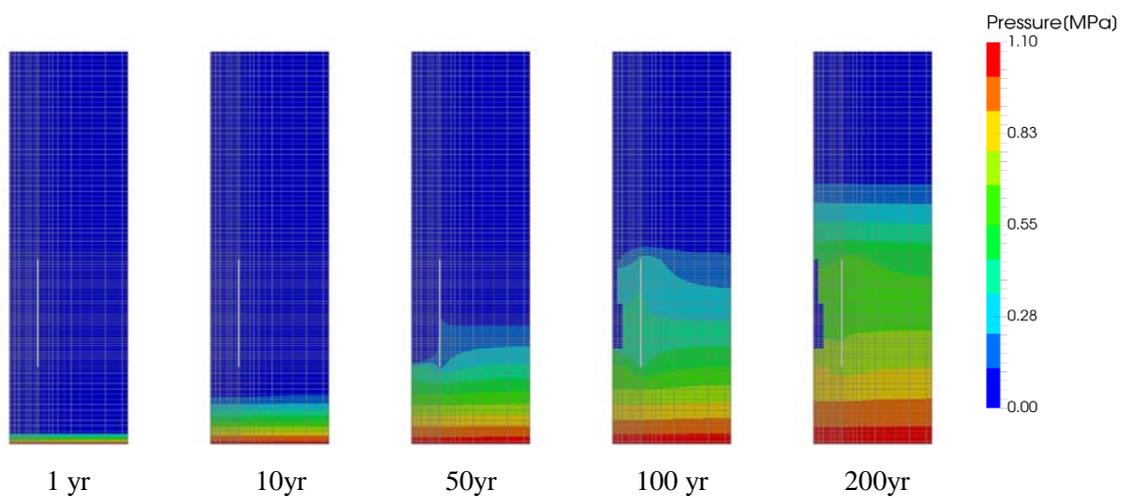


添付図 143 Case H29 Mean 岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

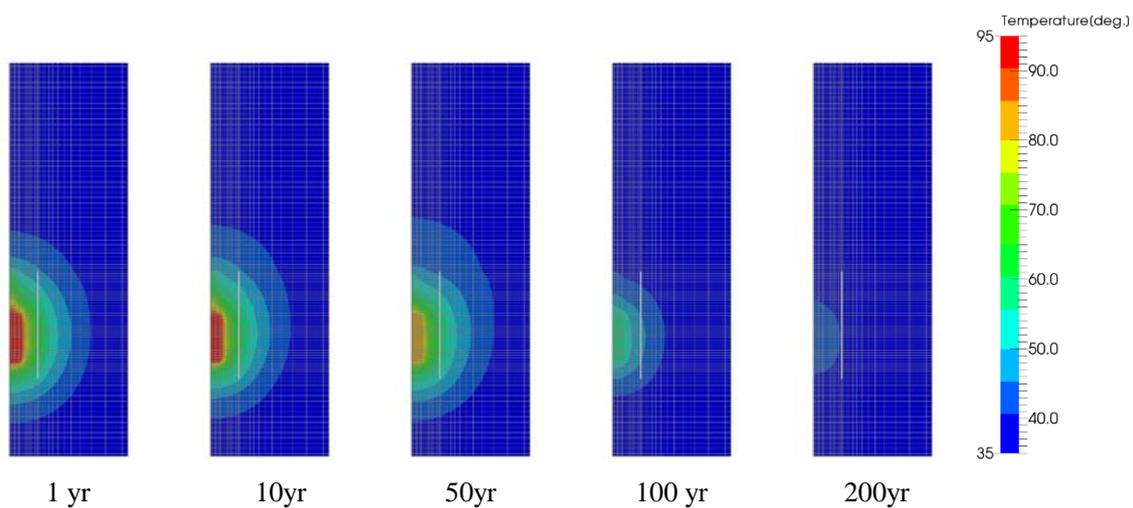


添付図 144 Case H29 Mean 岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

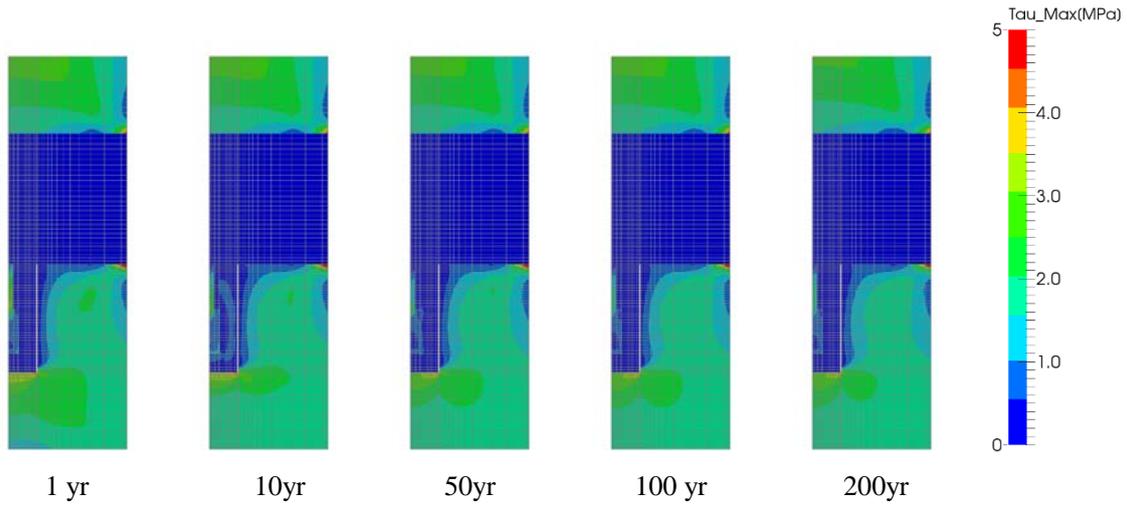
(9) Case H29 +1Sigma



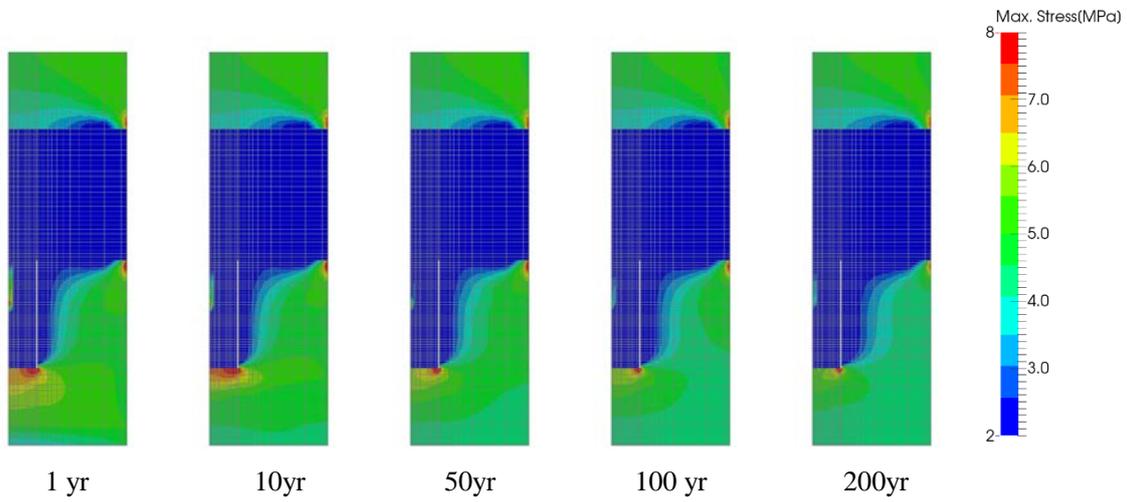
添付図 145 Case H29 +1Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



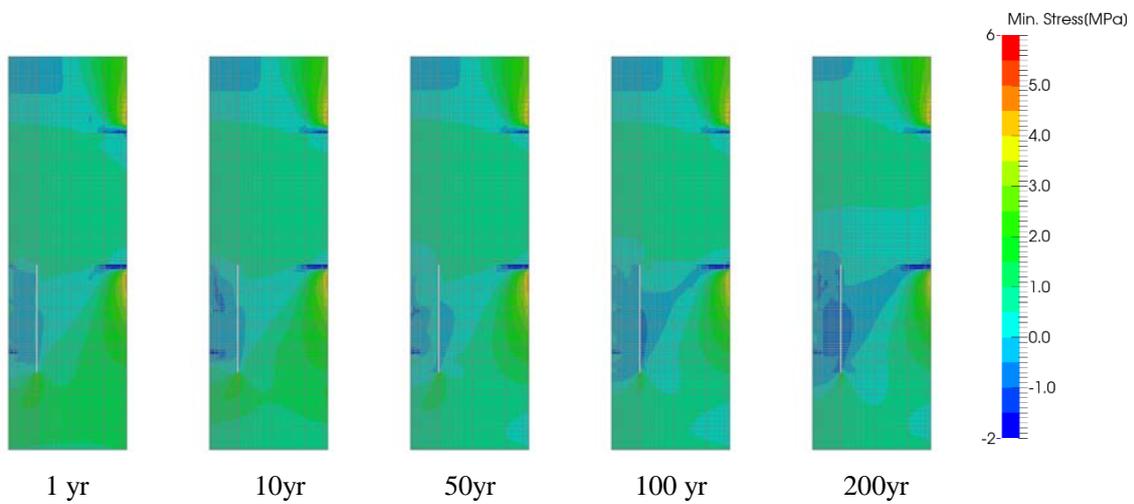
添付図 146 Case H29 +1Sigma 岩盤部分・温度分布



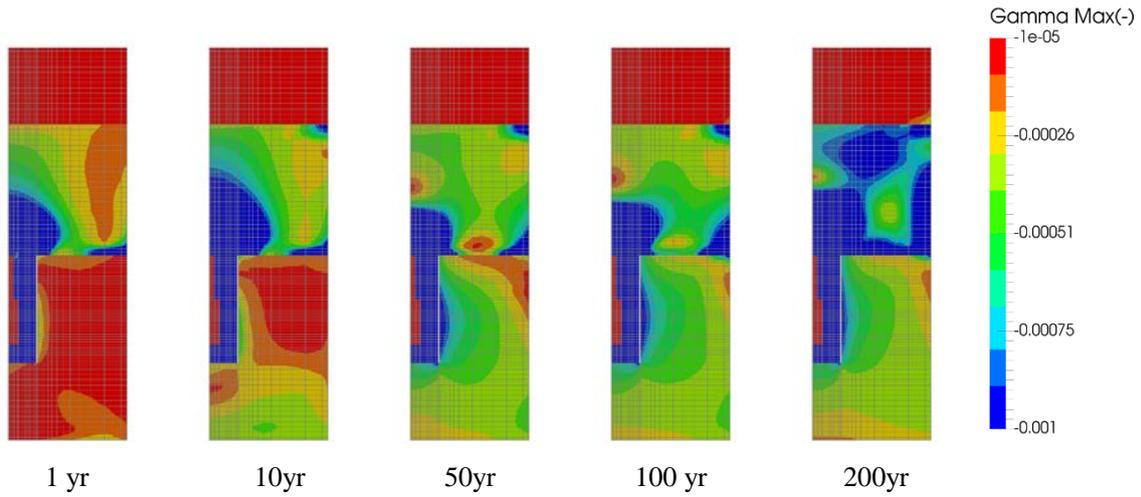
添付図 147 Case H29 +1Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



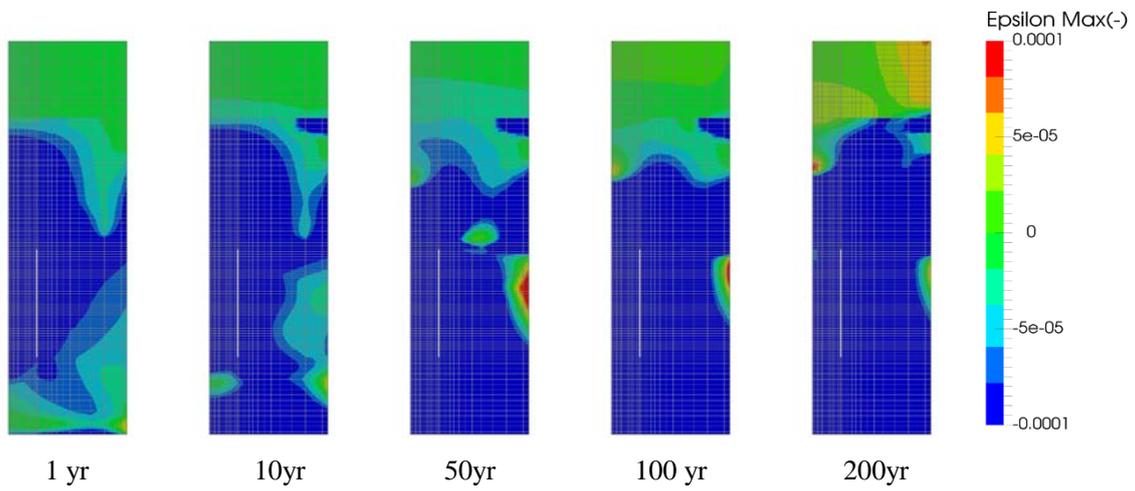
添付図 148 Case H29 +1Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



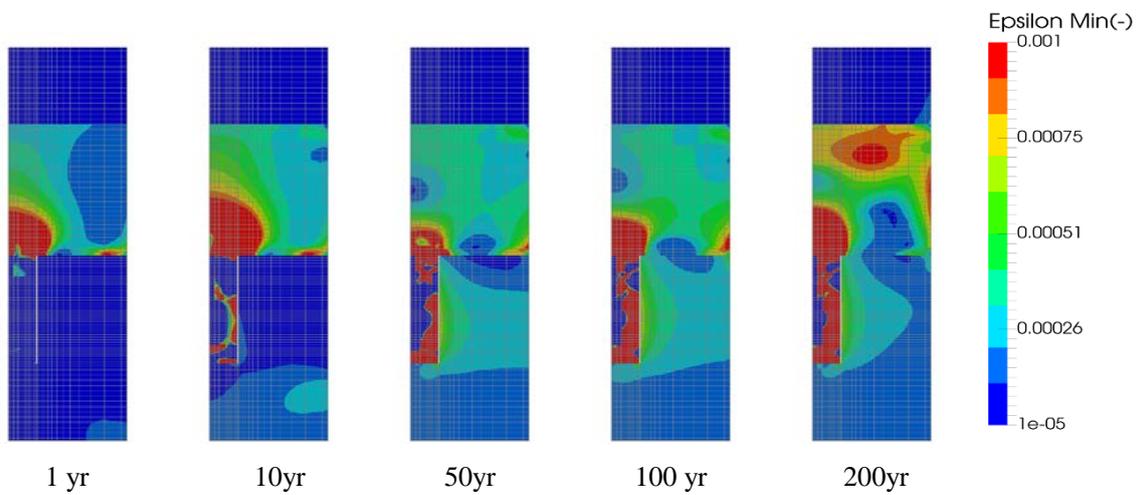
添付図 149 Case H29 +1Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



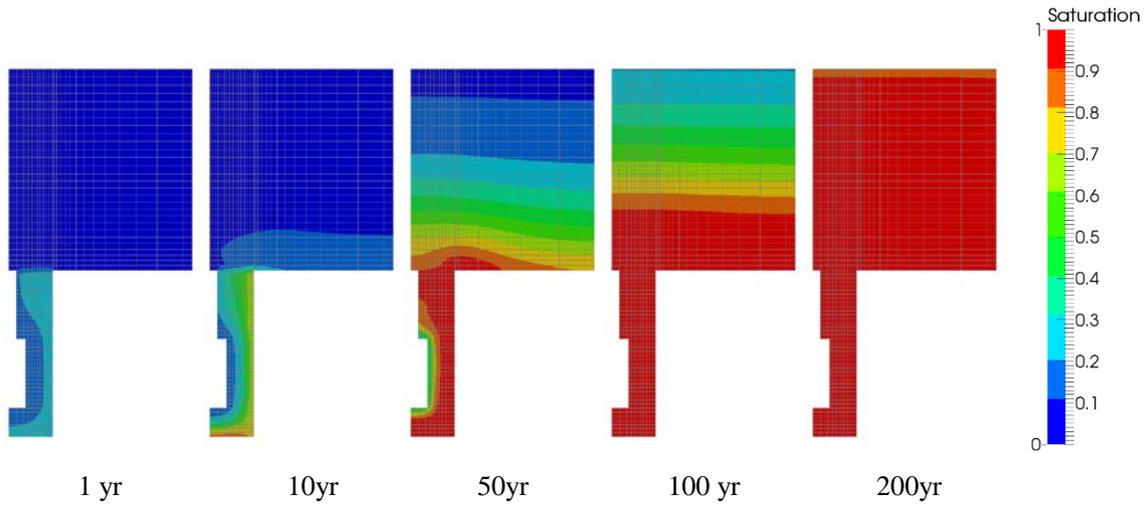
添付図 150 Case H29 +1Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



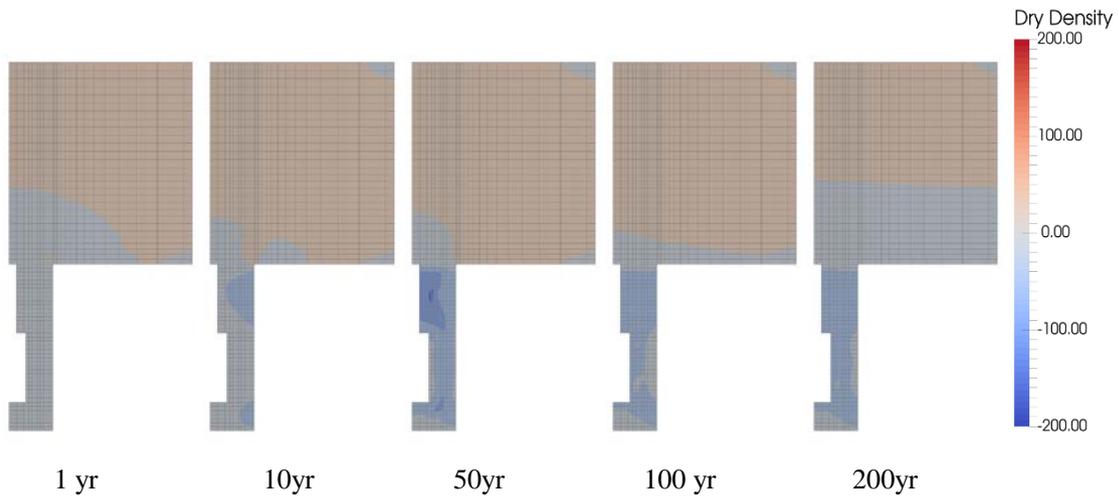
添付図 151 Case H29 +1Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



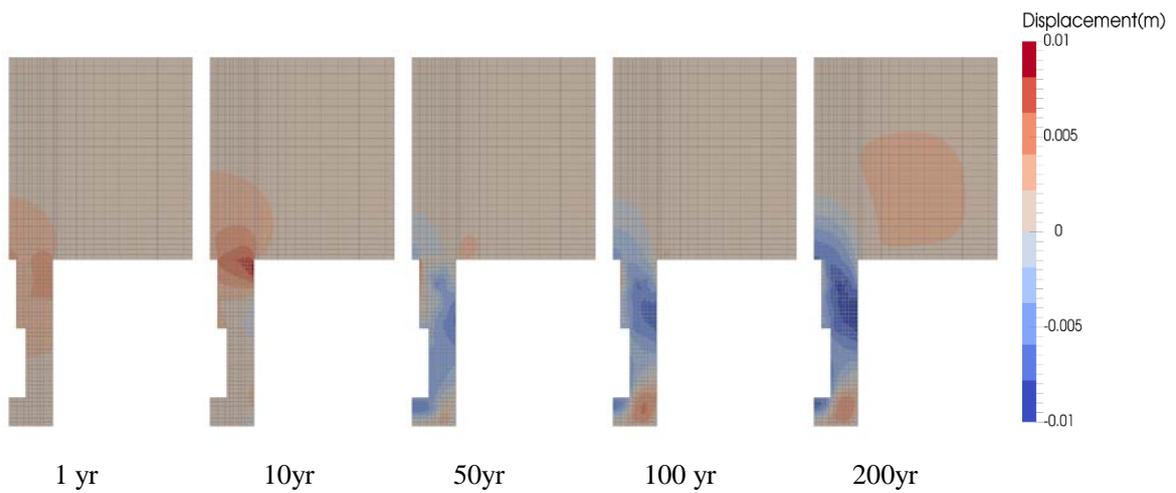
添付図 152 Case H29 +1Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



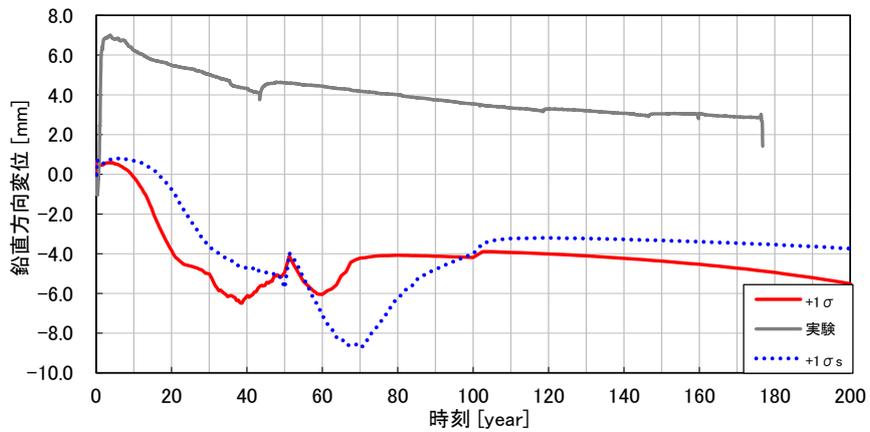
添付図 153 Case H29 +1Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布



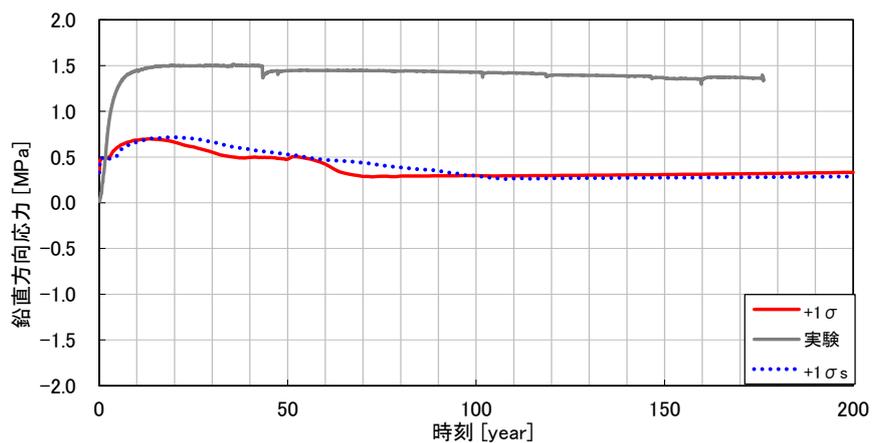
添付図 154 Case H29 +1Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



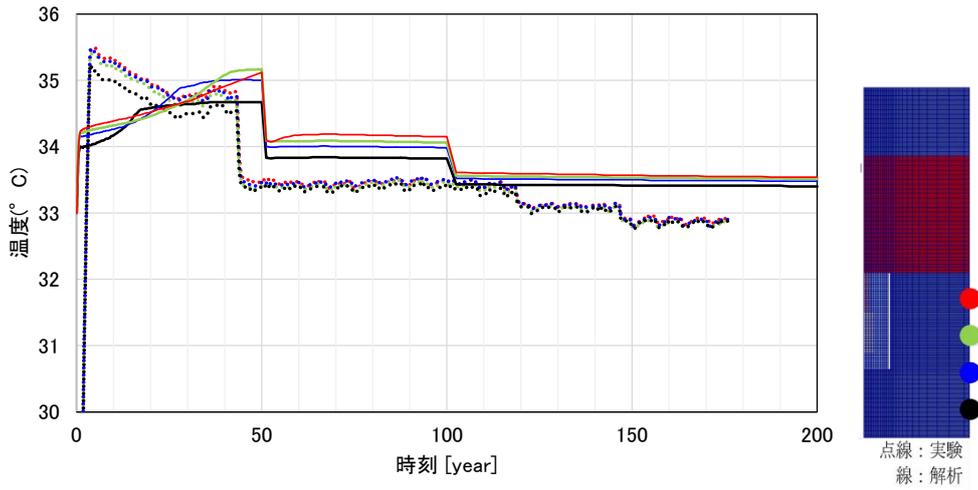
添付図 155 Case H29 +1Sigma 鉛直変位分布



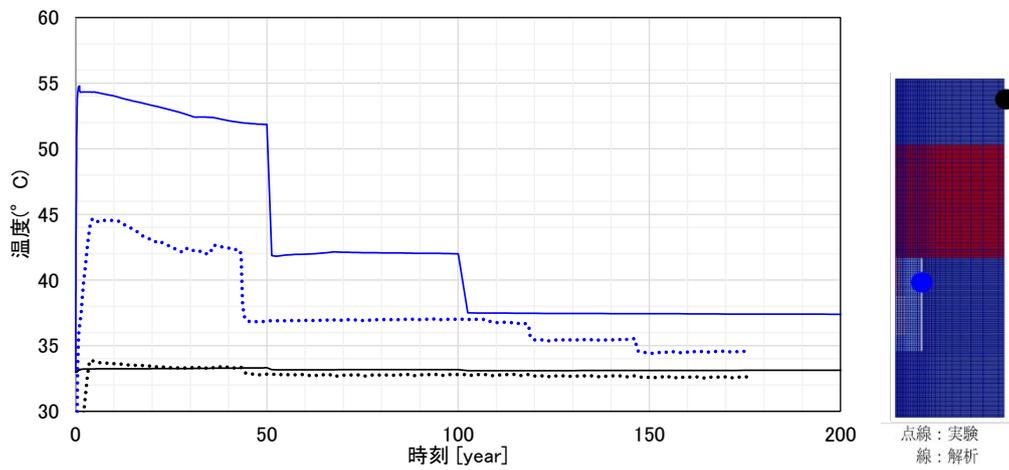
添付図 156 Case H29 +1Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



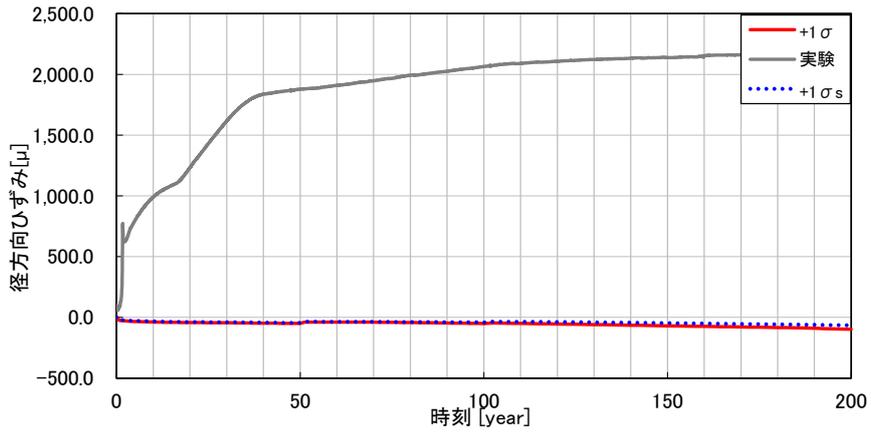
添付図 157 Case H29 +1Sigma 緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)



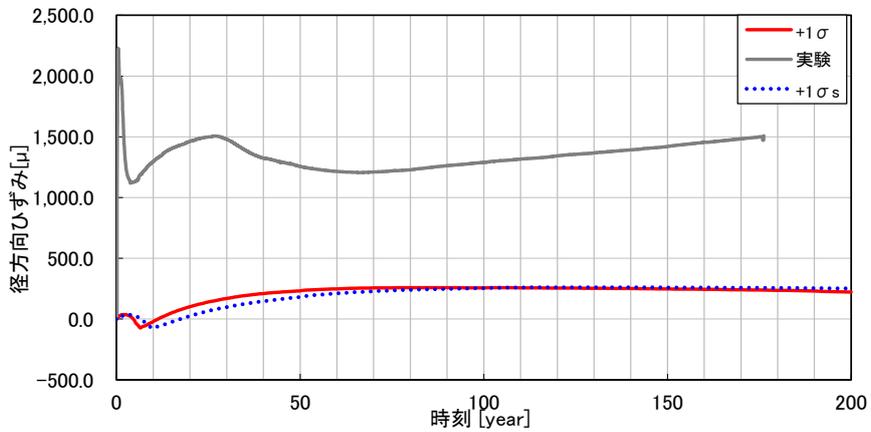
添付図 158 Case H29 +1Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



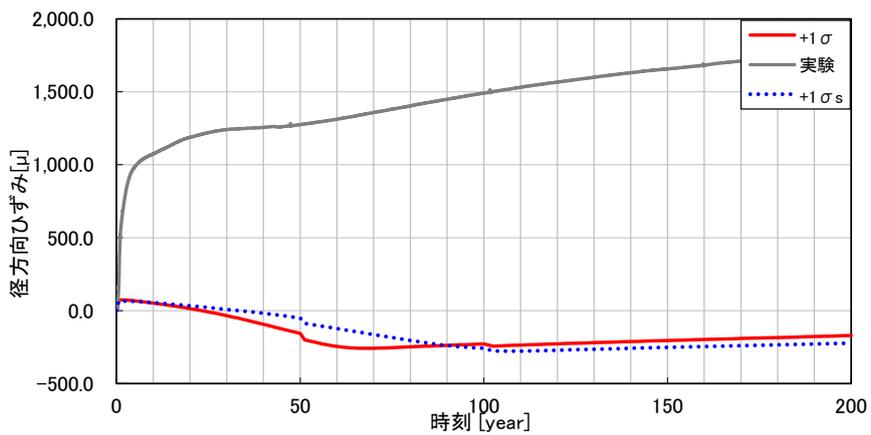
添付図 159 Case H29 +1Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 160 Case H29 +1Sigma 上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

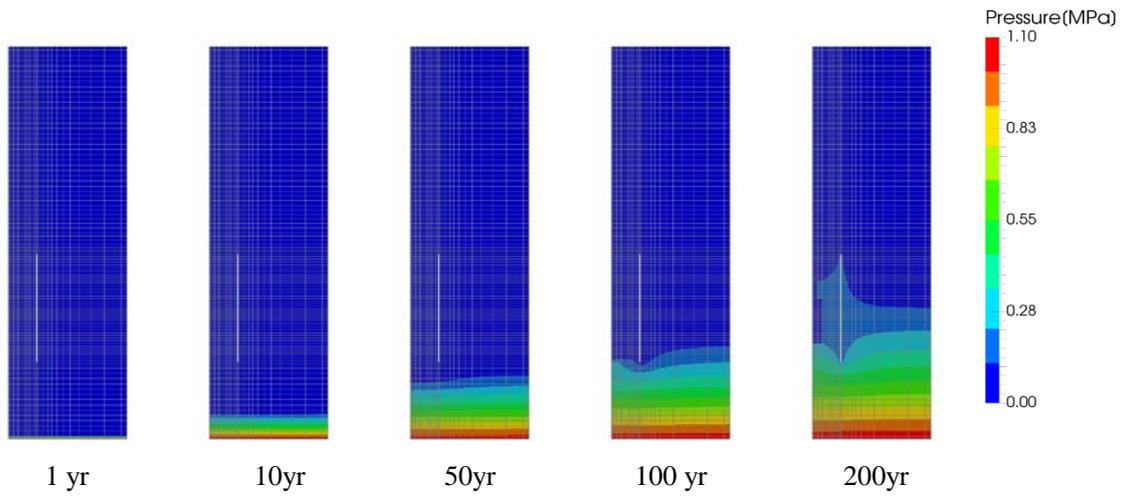


添付図 161 Case H29 +1Sigma 岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

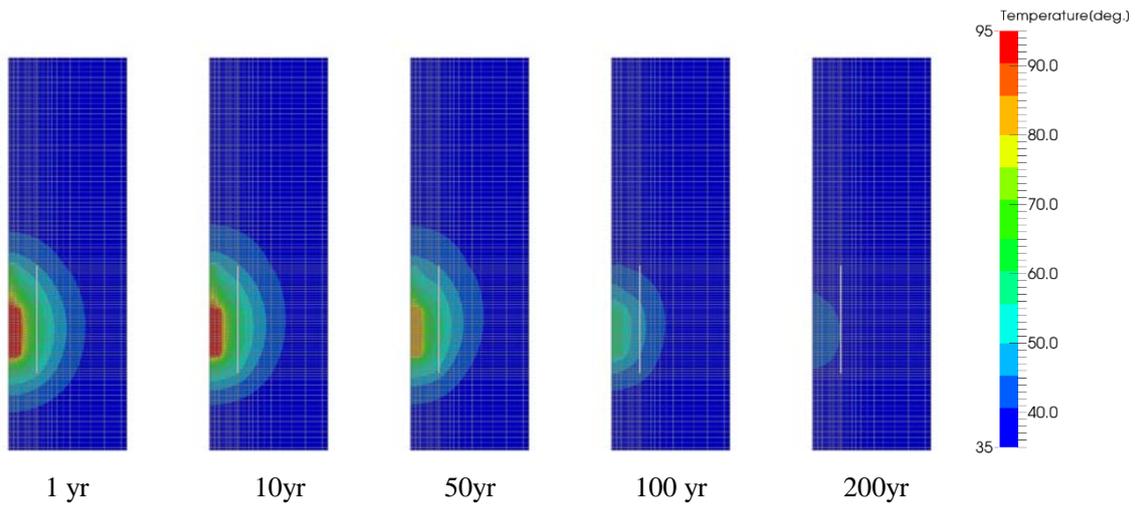


添付図 162 Case H29 +1Sigma 岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

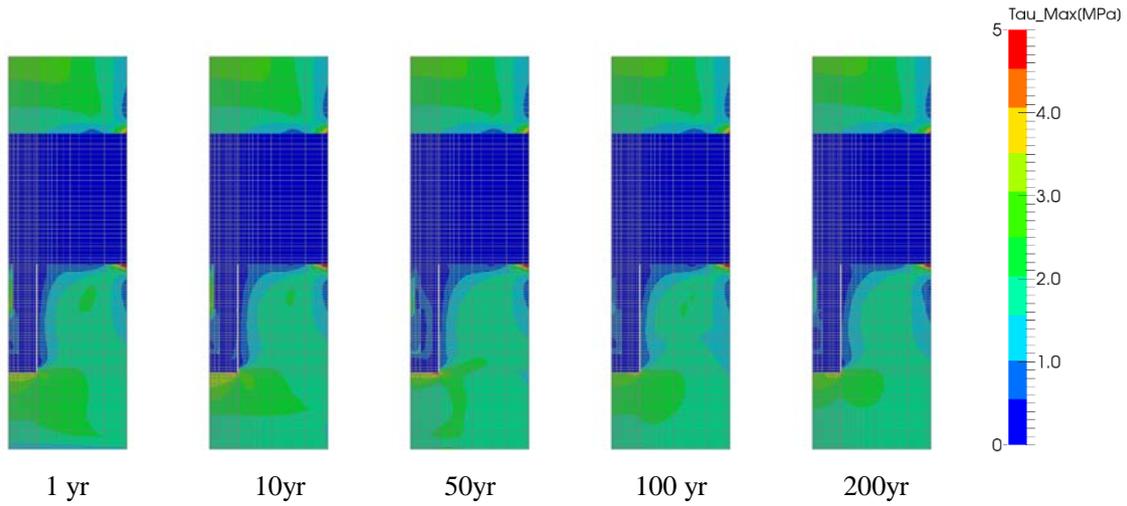
(10) Case H29 -1Sigma



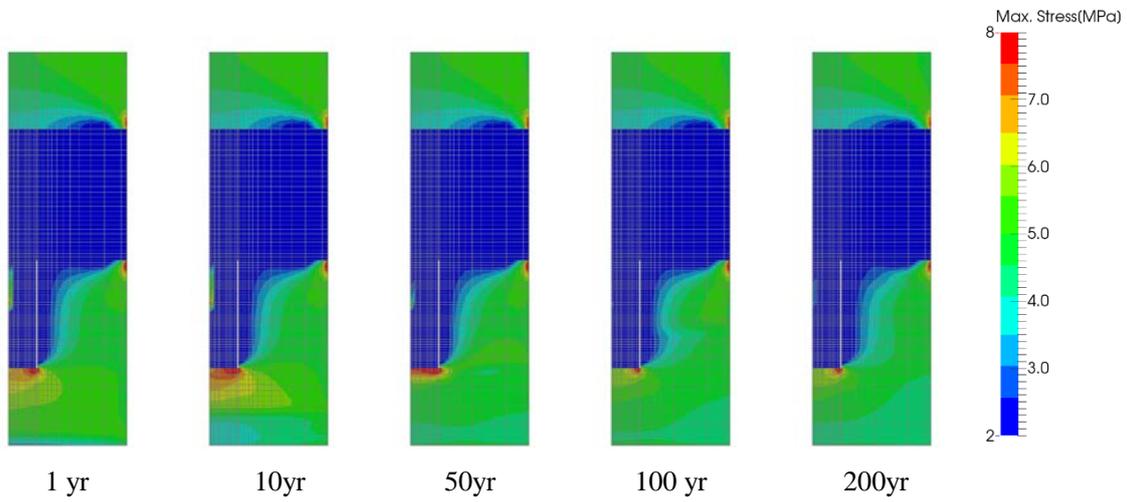
添付図 163 Case H29 -1Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



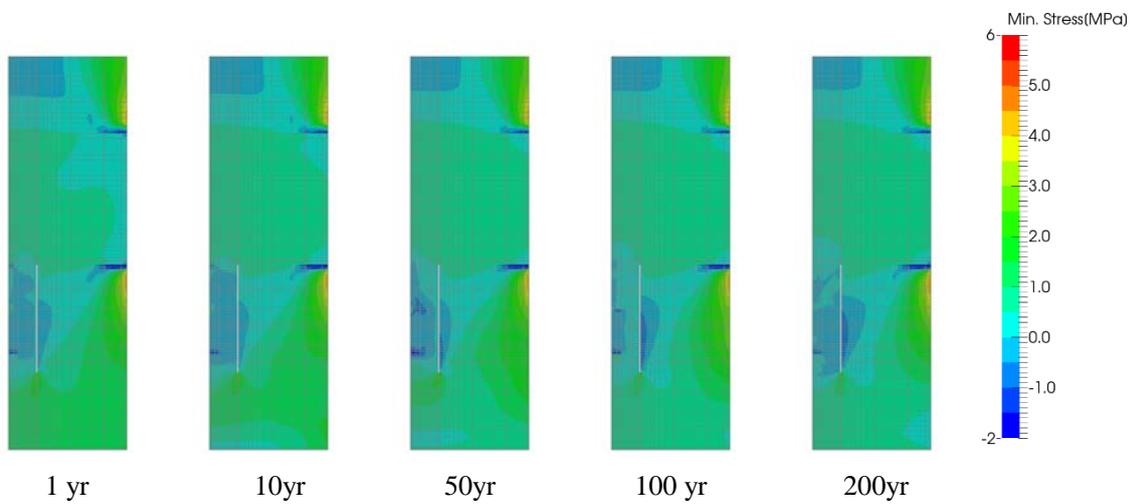
添付図 164 Case H29 -1Sigma 岩盤部分・温度分布



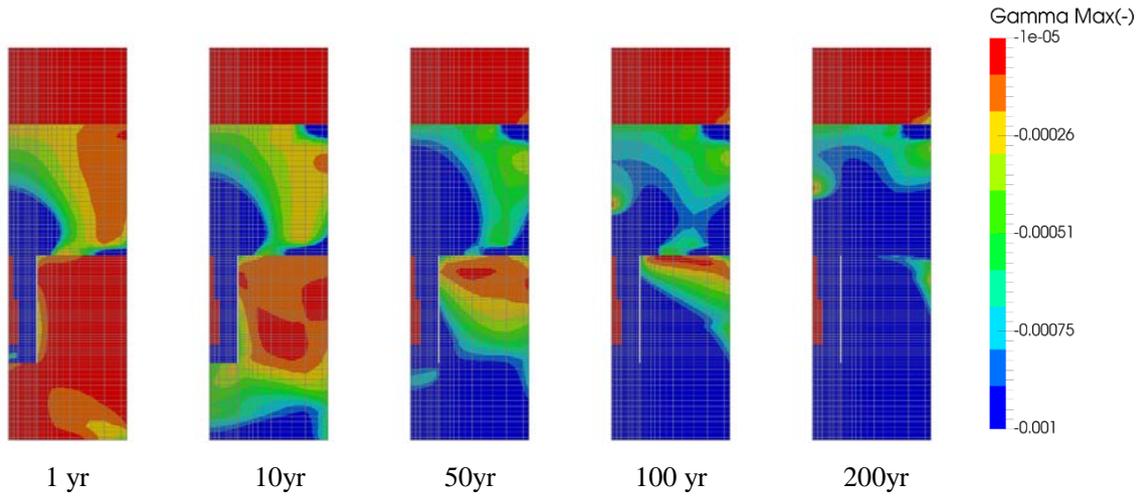
添付図 165 Case H29 -1Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



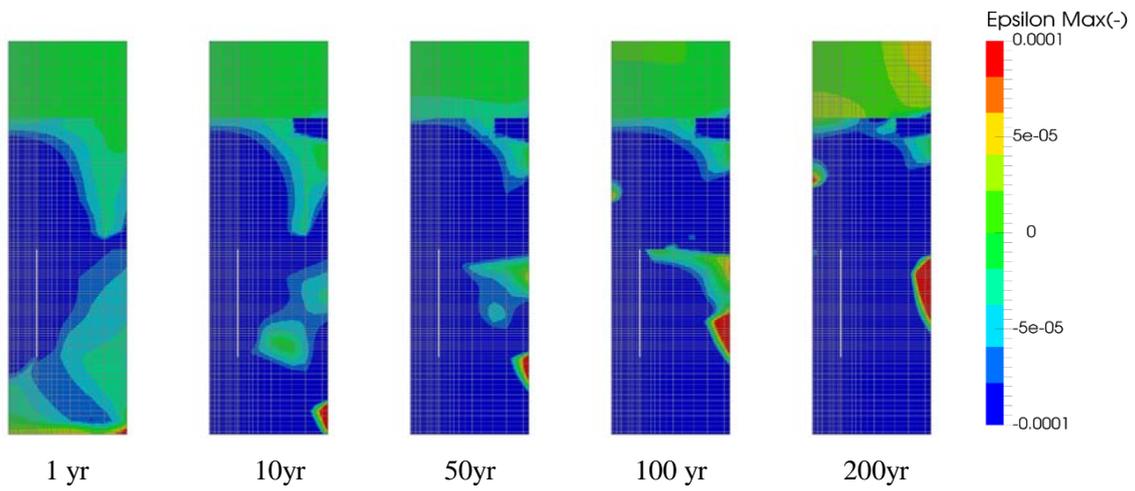
添付図 166 Case H29 -1Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



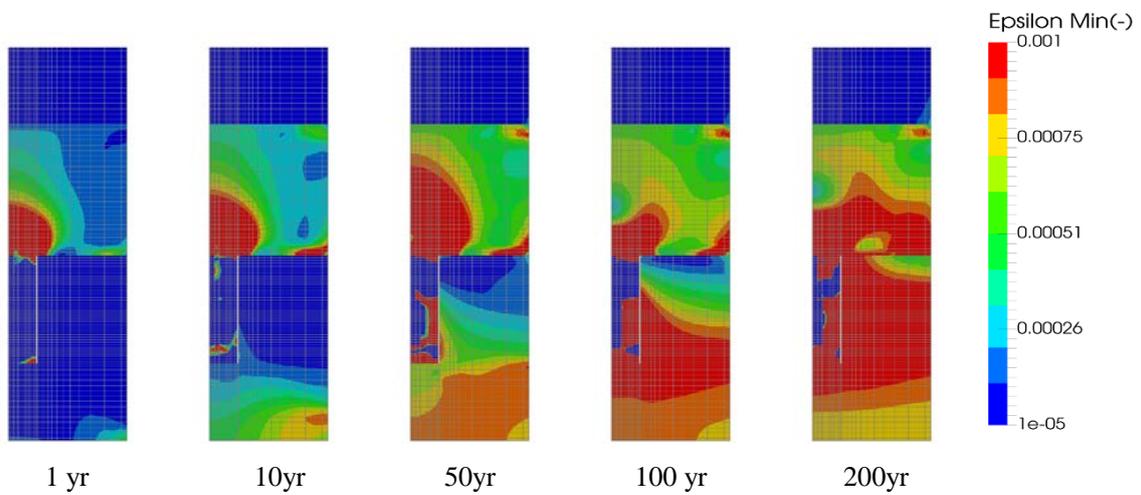
添付図 167 Case H29 -1Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



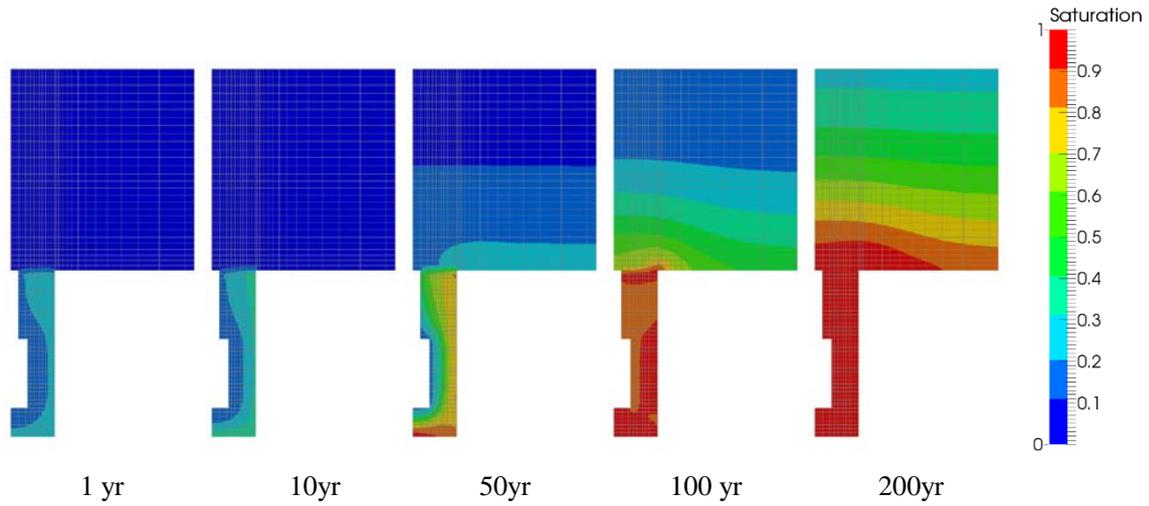
添付図 168 Case H29 -1Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



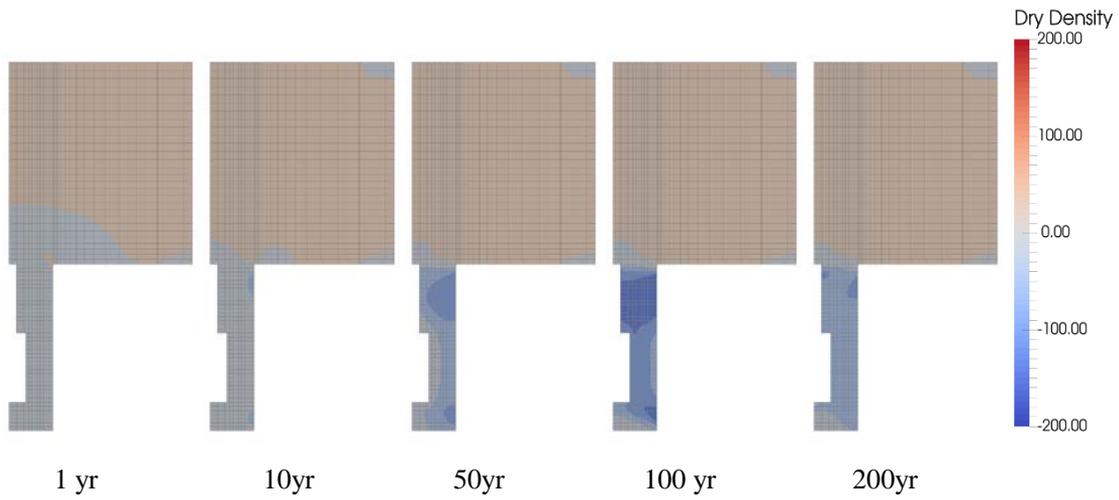
添付図 169 Case H29 -1Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



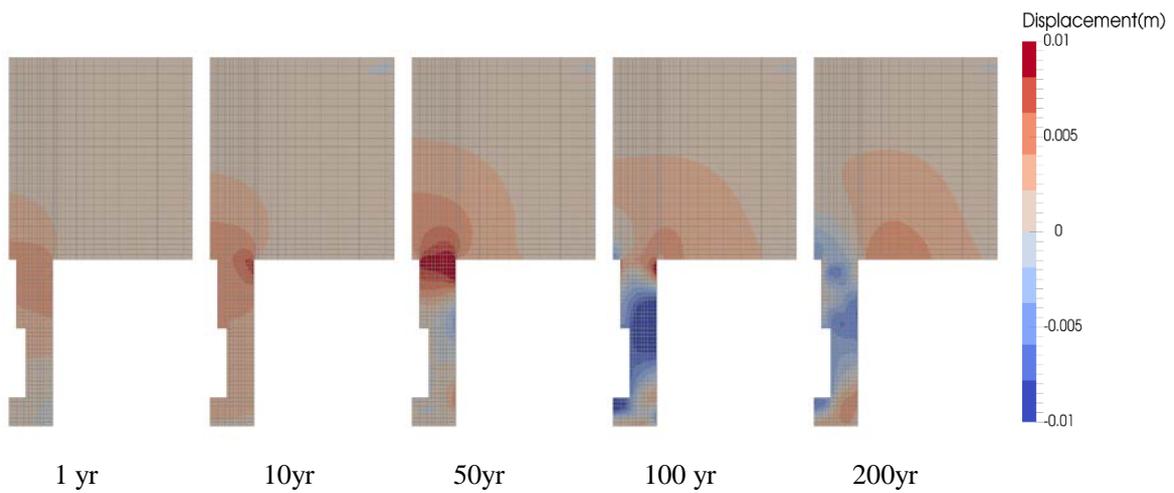
添付図 170 Case H29 -1Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



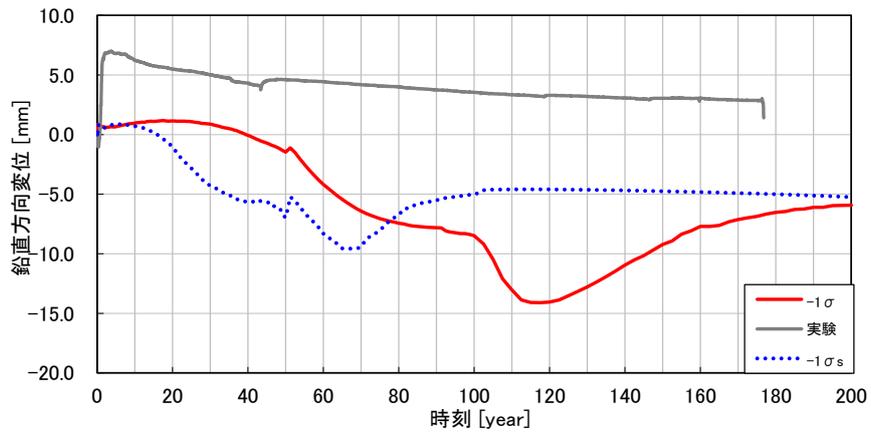
添付図 171 Case H29 -1Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布



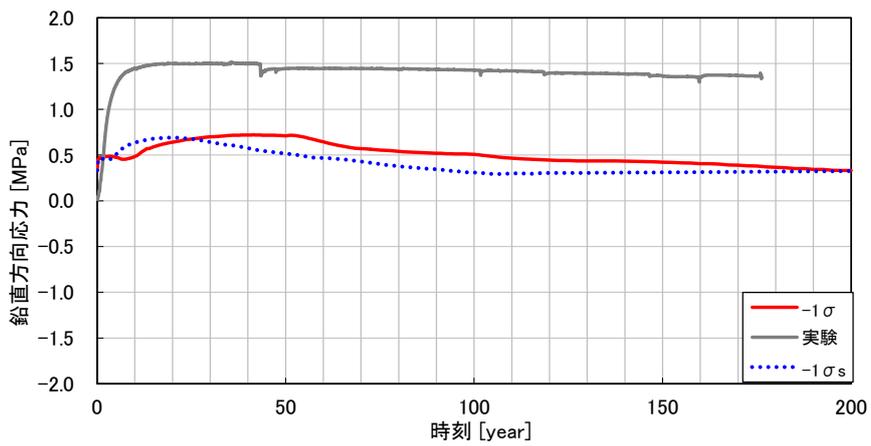
添付図 172 Case H29 -1Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



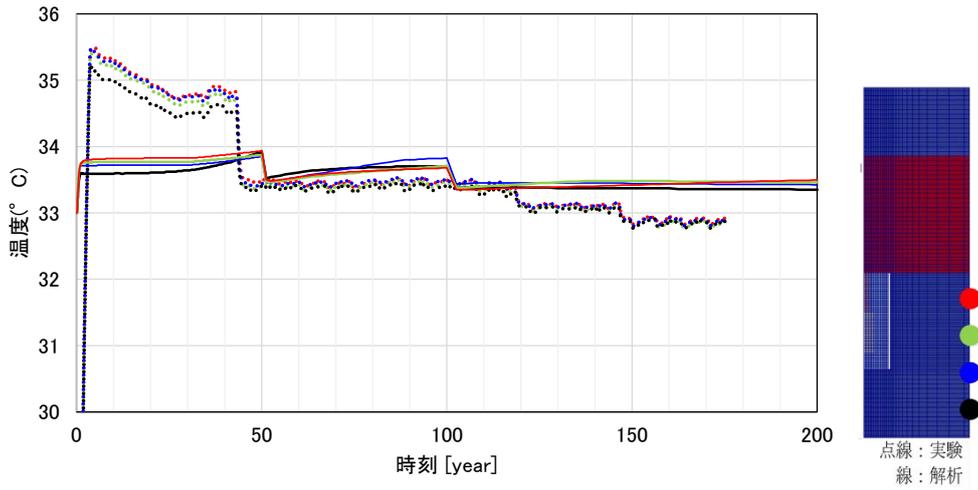
添付図 173 Case H29 -1Sigma 鉛直変位分布



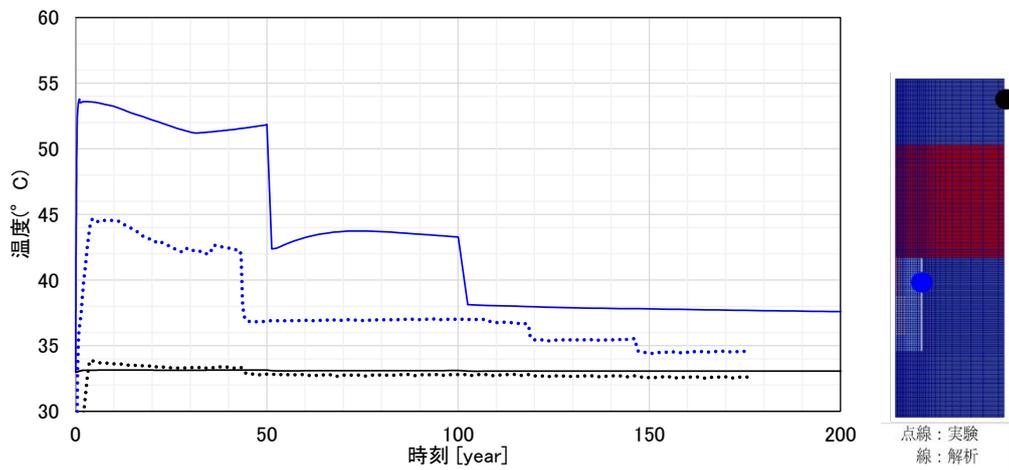
添付図 174 Case H29 -1Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



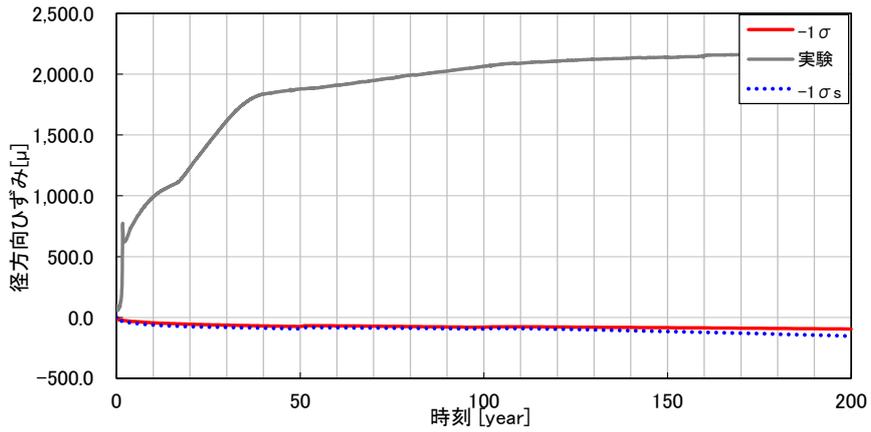
添付図 175 Case H29 -1Sigma 緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)



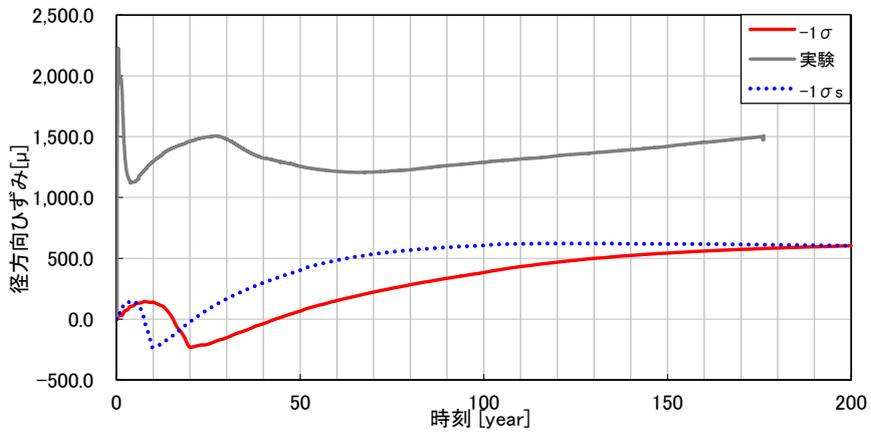
添付図 176 Case H29 -1Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



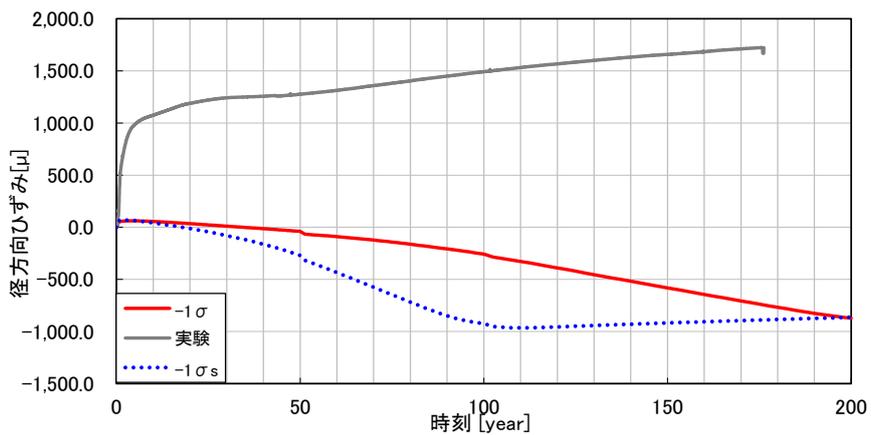
添付図 177 Case H29 -1Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 178 Case H29 -1Sigma 上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

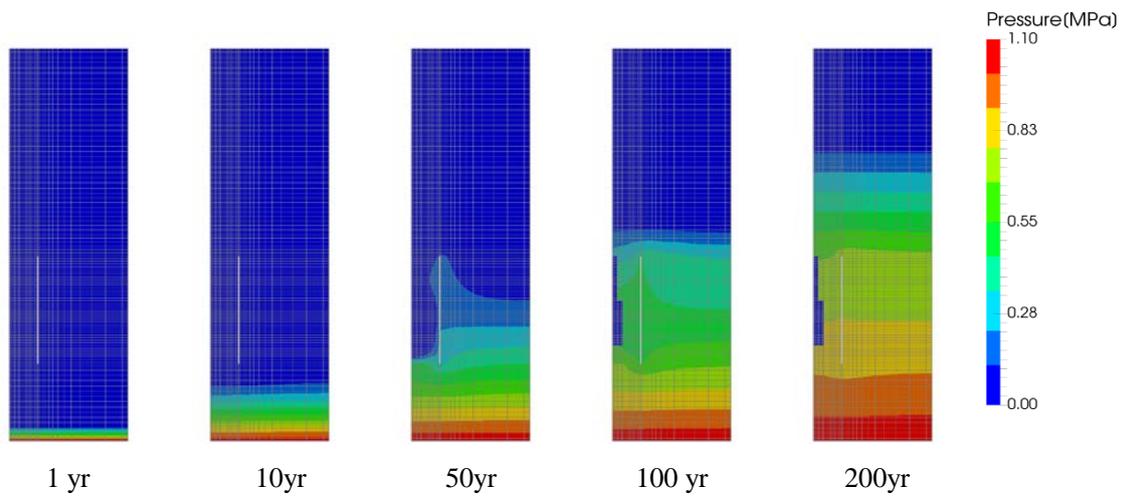


添付図 179 Case H29 -1Sigma 岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

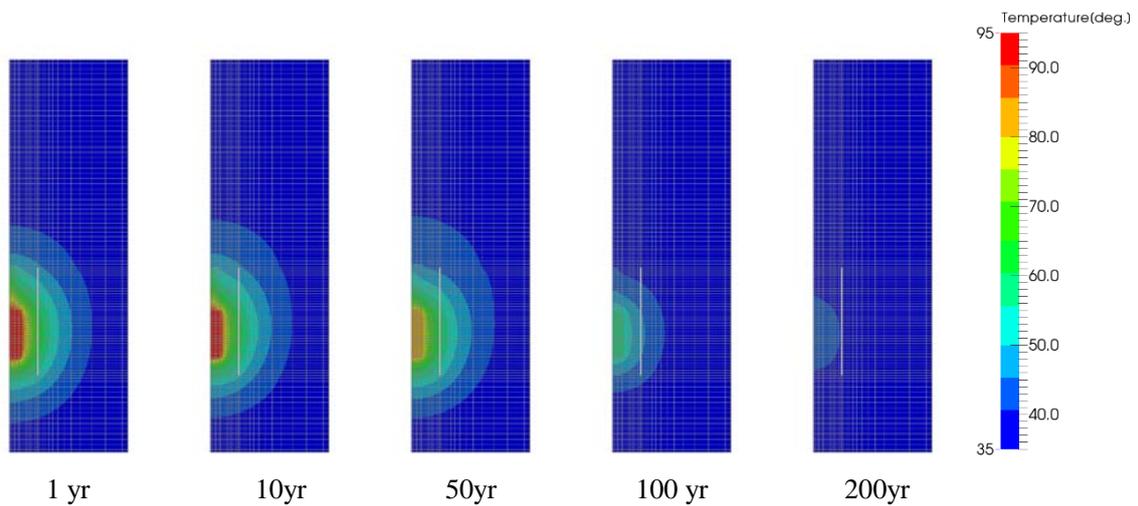


添付図 180 Case H29 -1Sigma 岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

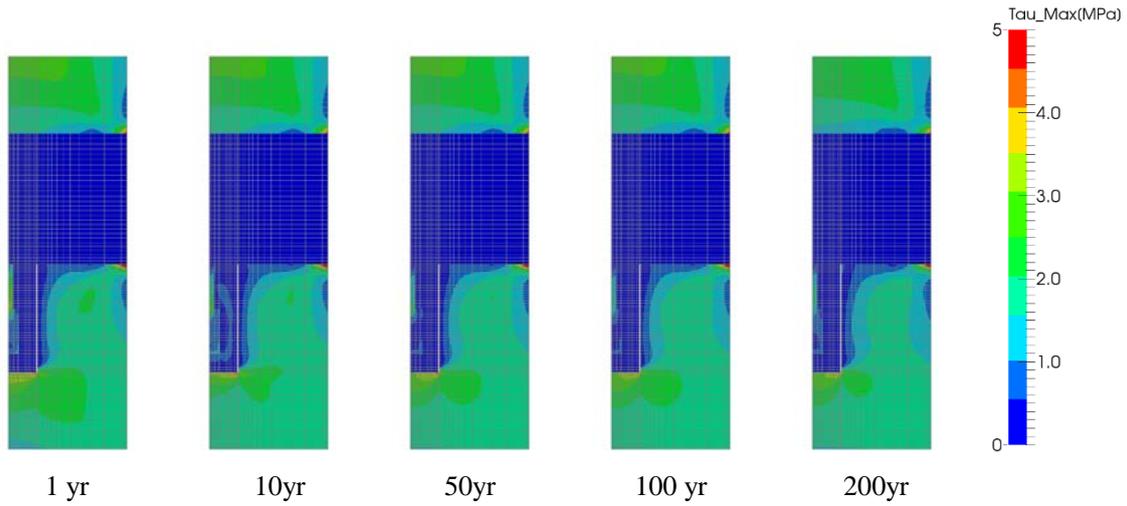
(11) Case H29 +2Sigma



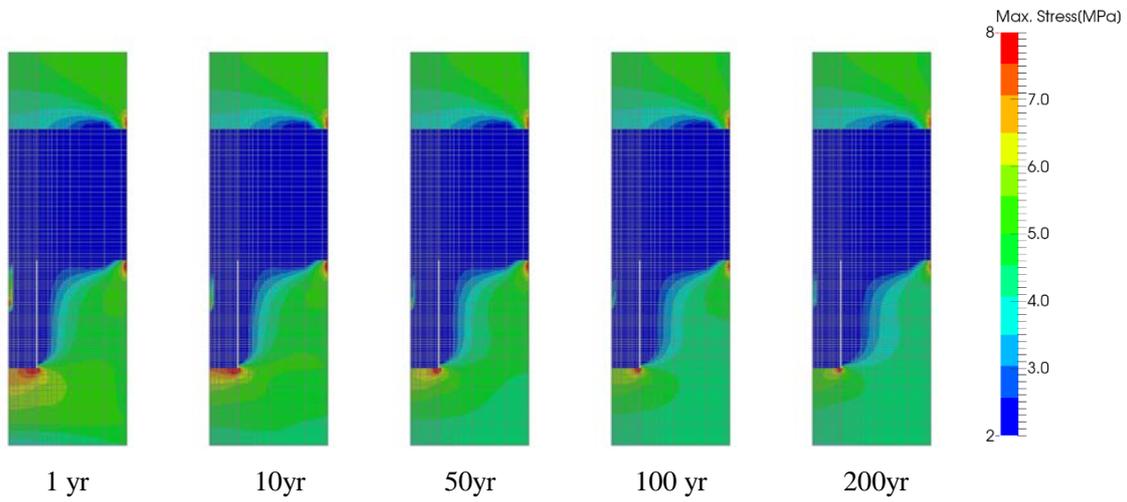
添付図 181 Case H29 +2Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



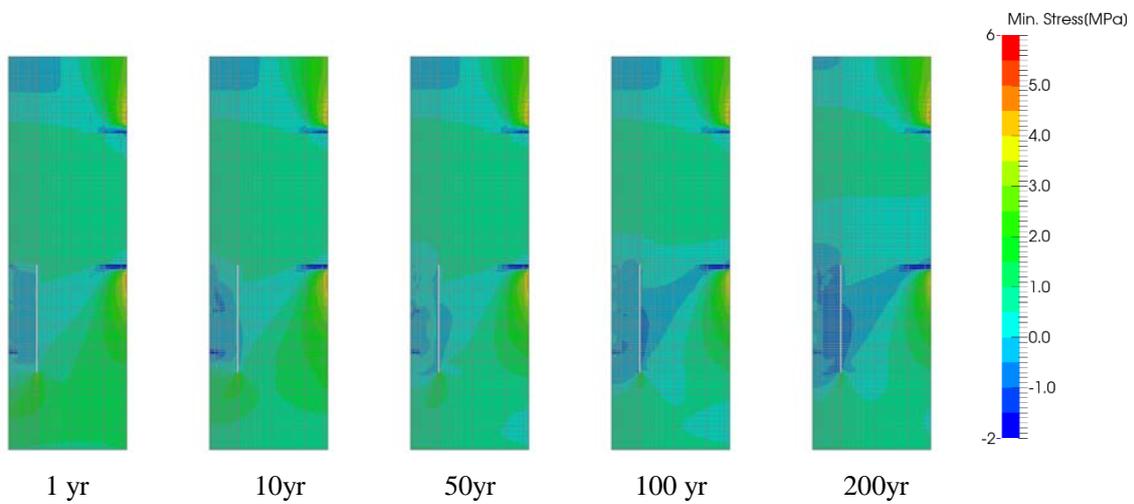
添付図 182 Case H29 +2Sigma 岩盤部分・温度分布



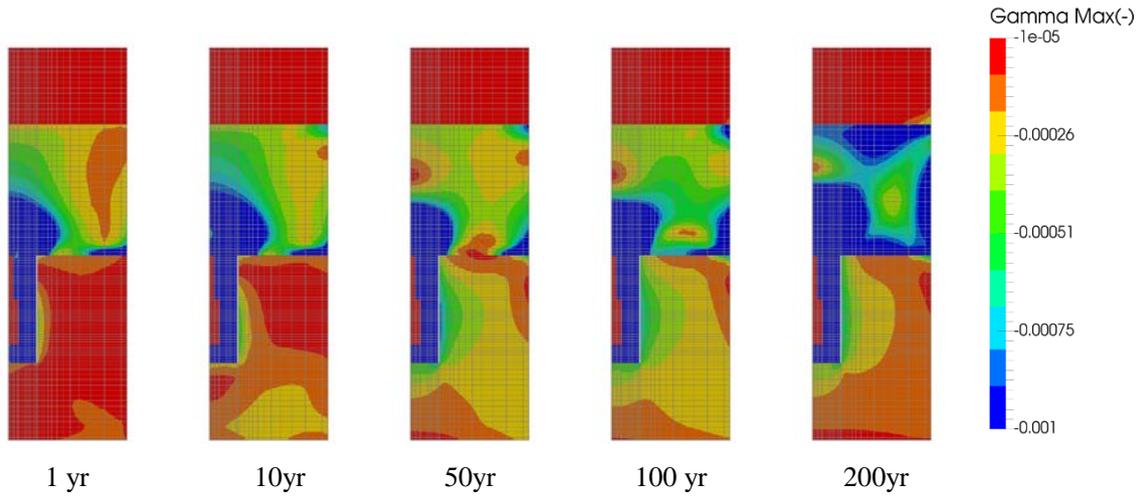
添付図 183 Case H29 +2Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



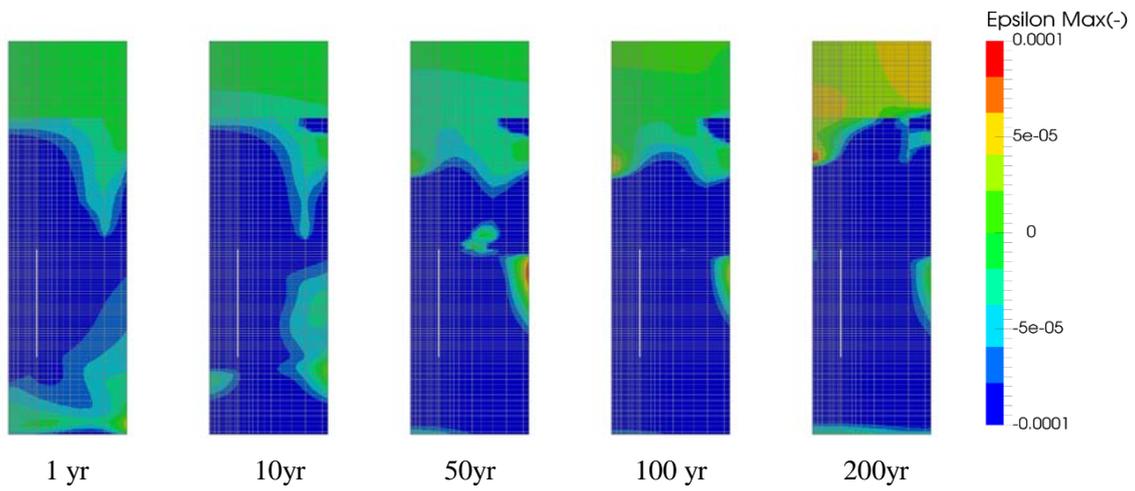
添付図 184 Case H29 +2Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



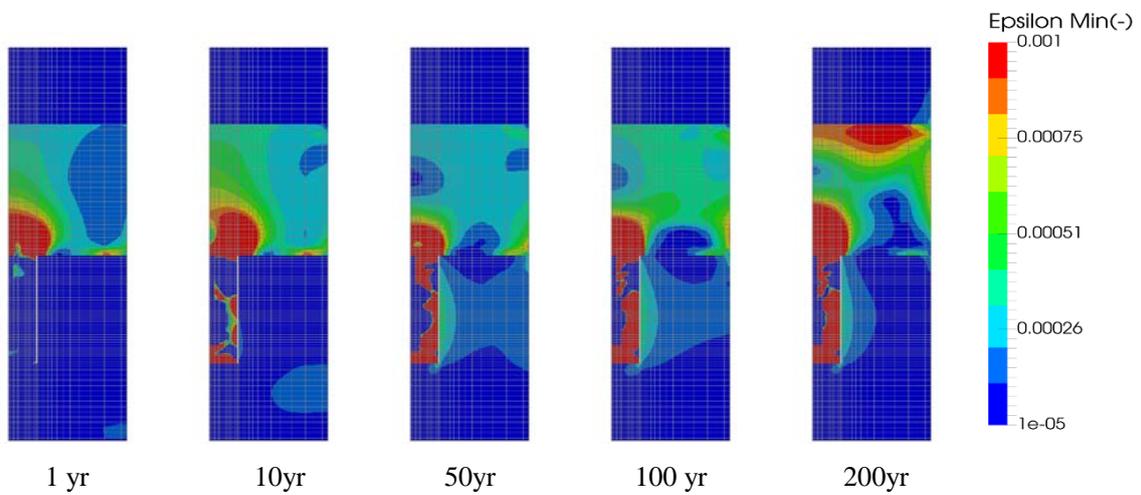
添付図 185 Case H29 +2Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



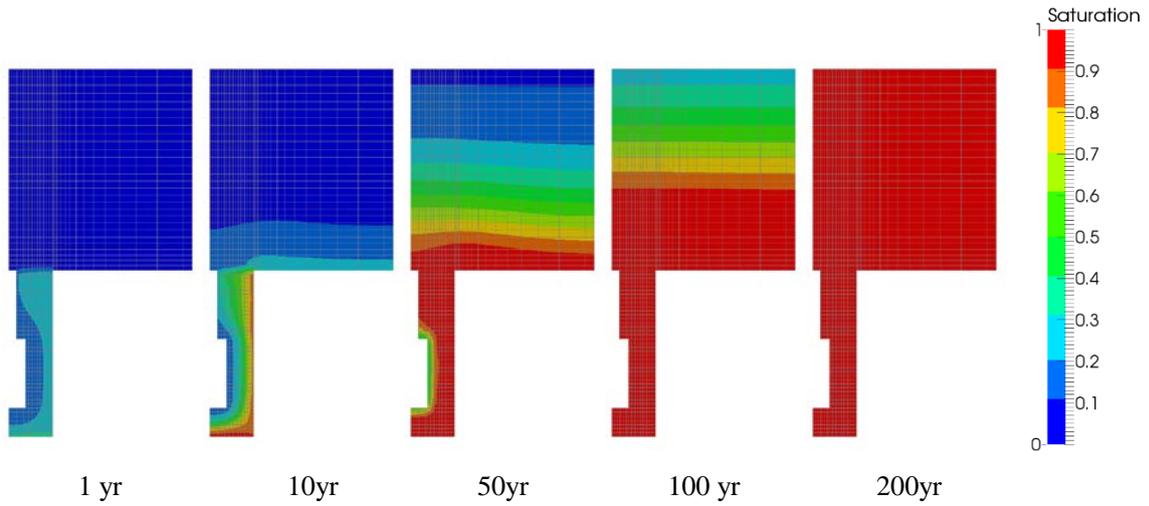
添付図 186 Case H29 +2Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



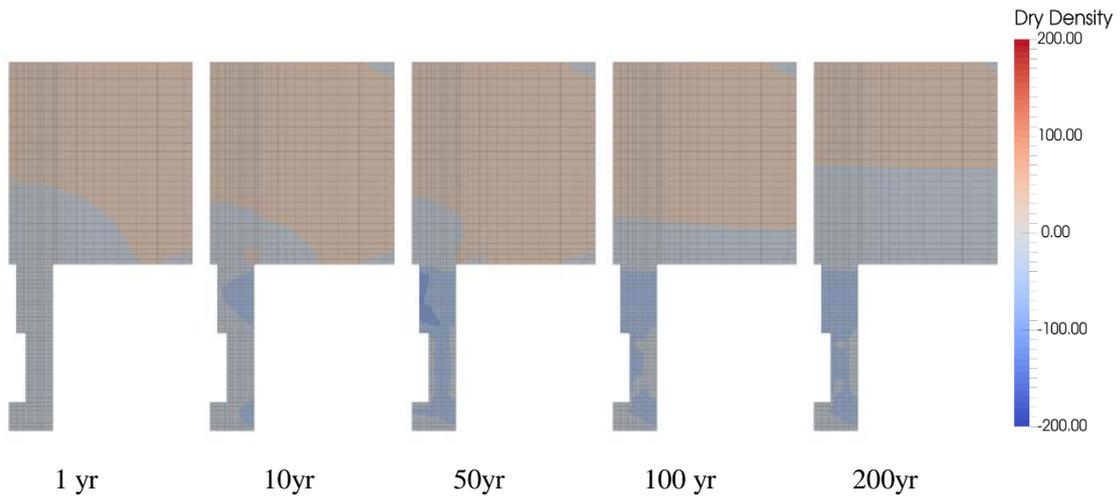
添付図 187 Case H29 +2Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



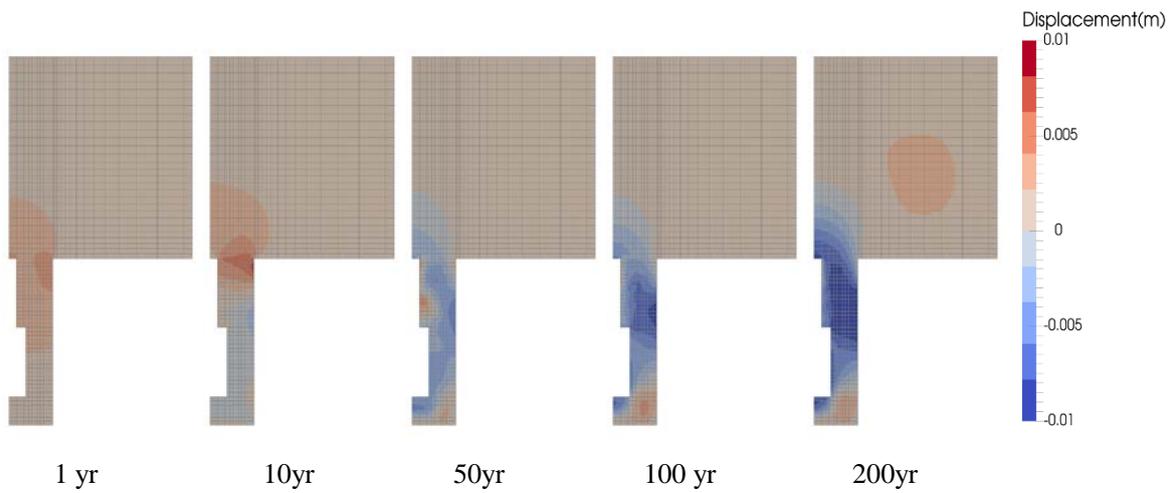
添付図 188 Case H29 +2Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



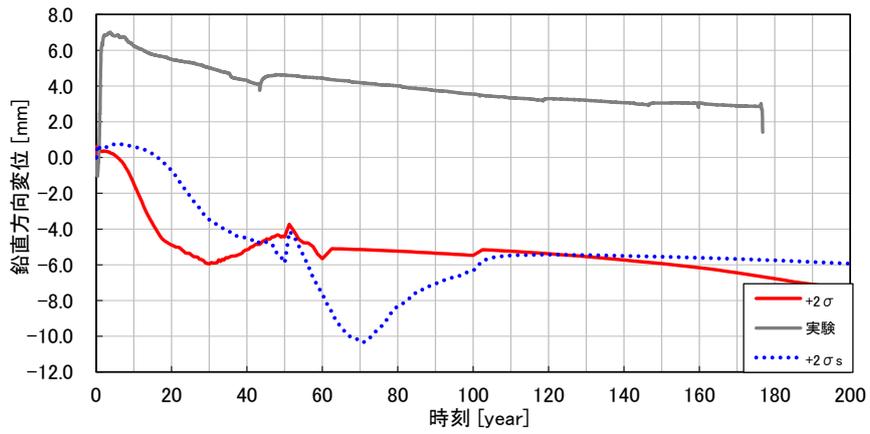
添付図 189 Case H29 +2Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布



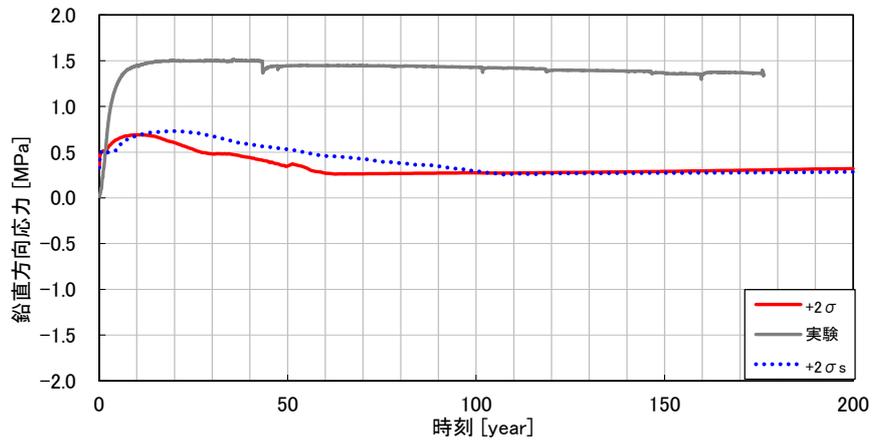
添付図 190 Case H29 +2Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



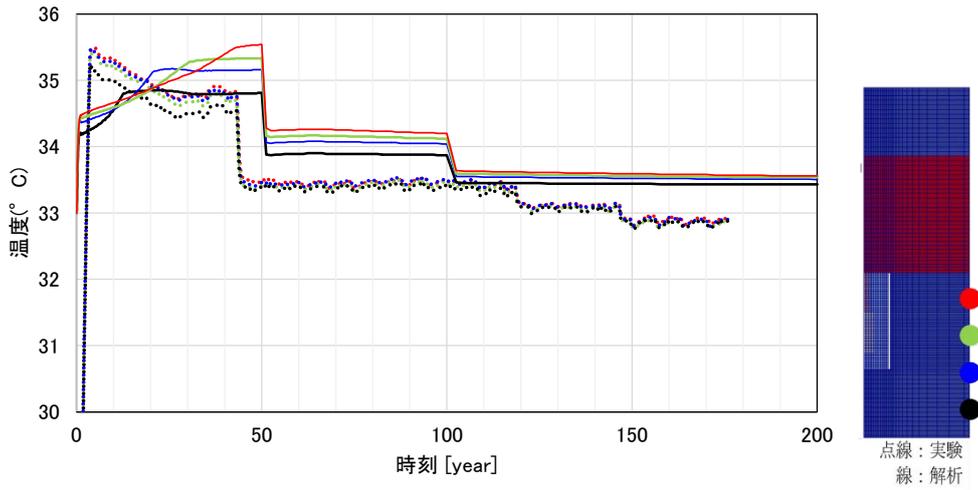
添付図 191 Case H29 +2Sigma 鉛直変位分布



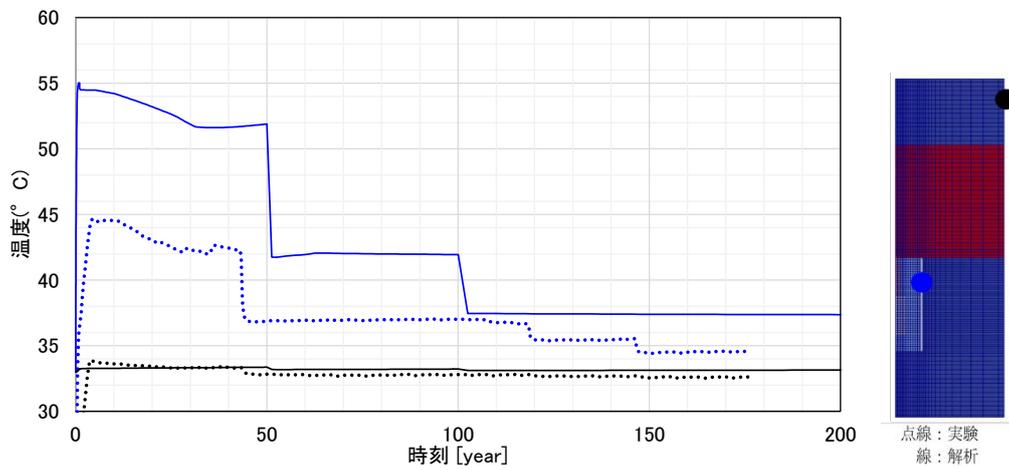
添付図 192 Case H29 +2Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



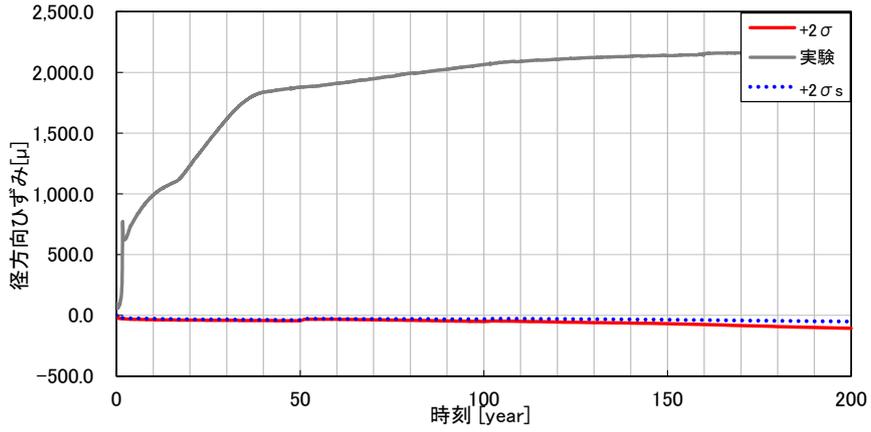
添付図 193 Case H29 +2Sigma 緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)



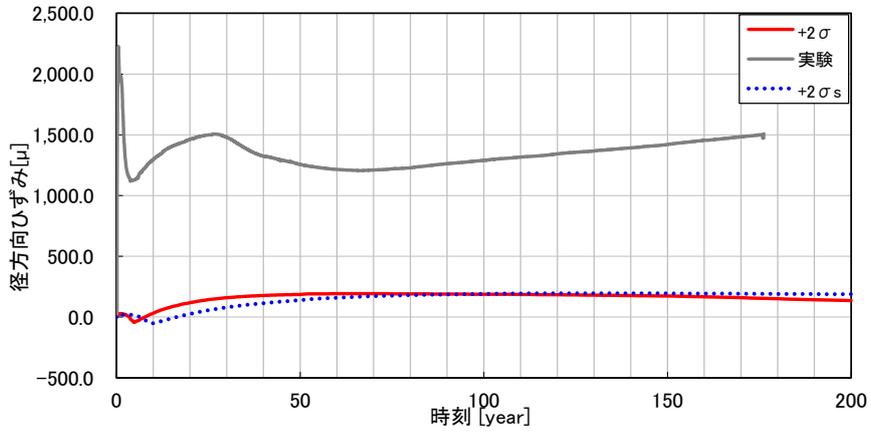
添付図 194 Case H29 +2Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



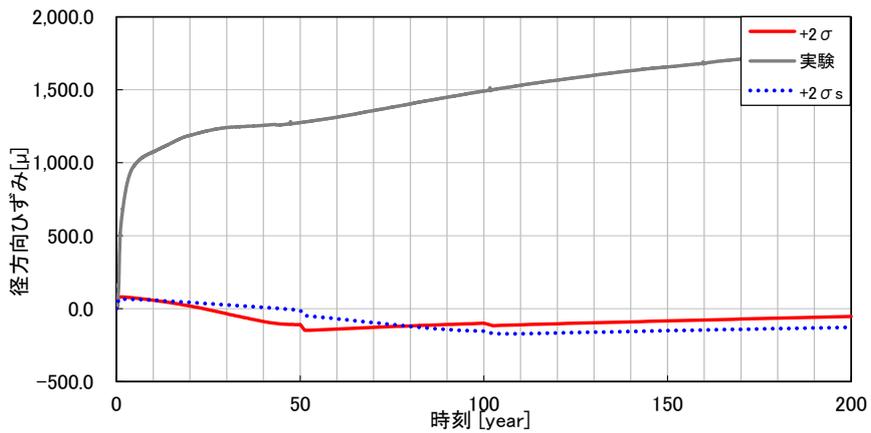
添付図 195 Case H29 +2Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 196 Case H29 +2Sigma 上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

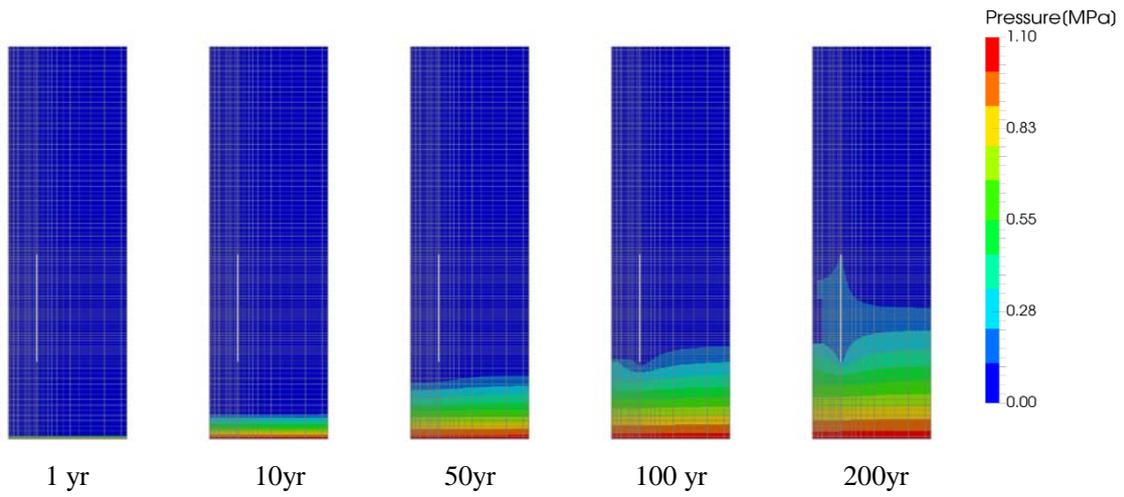


添付図 197 Case H29 +2Sigma 岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

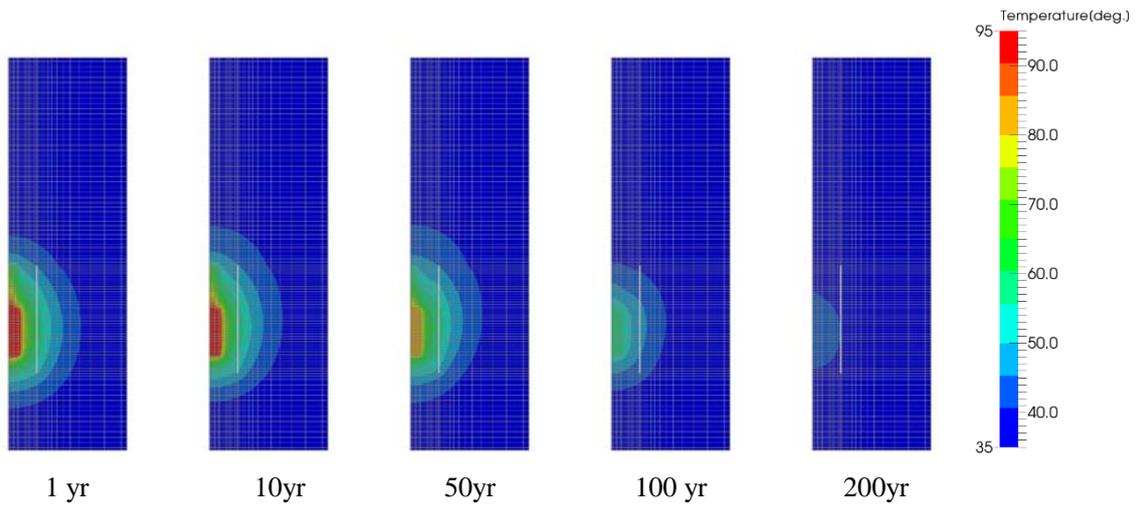


添付図 198 Case H29 +2Sigma 岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

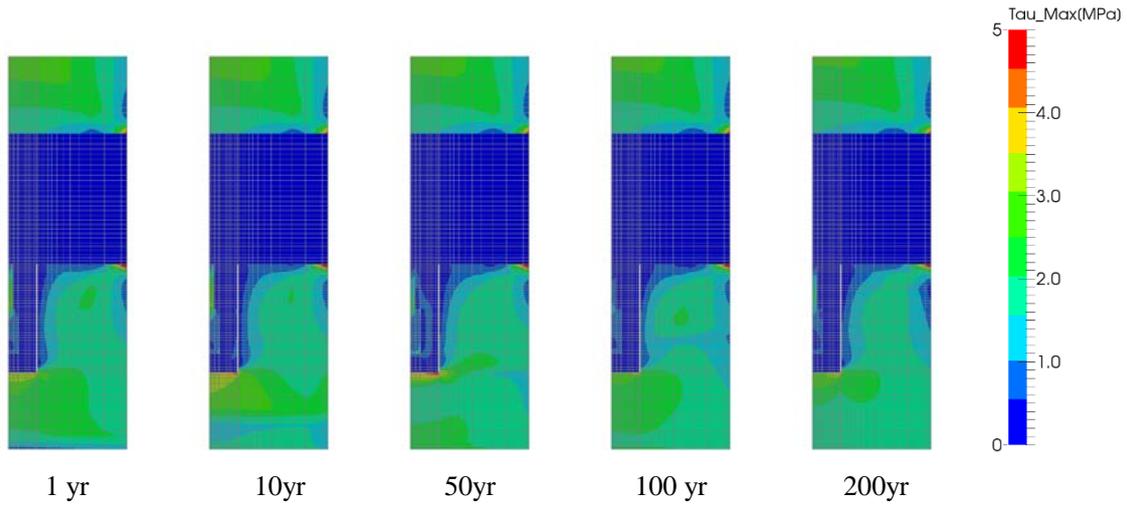
(12) Case H29 -2Sigma



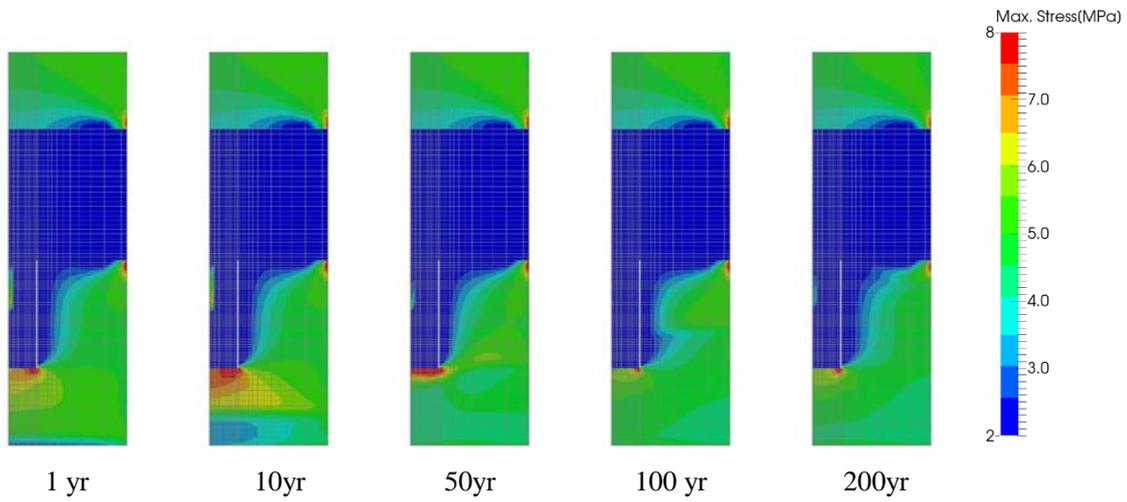
添付図 199 Case H29 -2Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



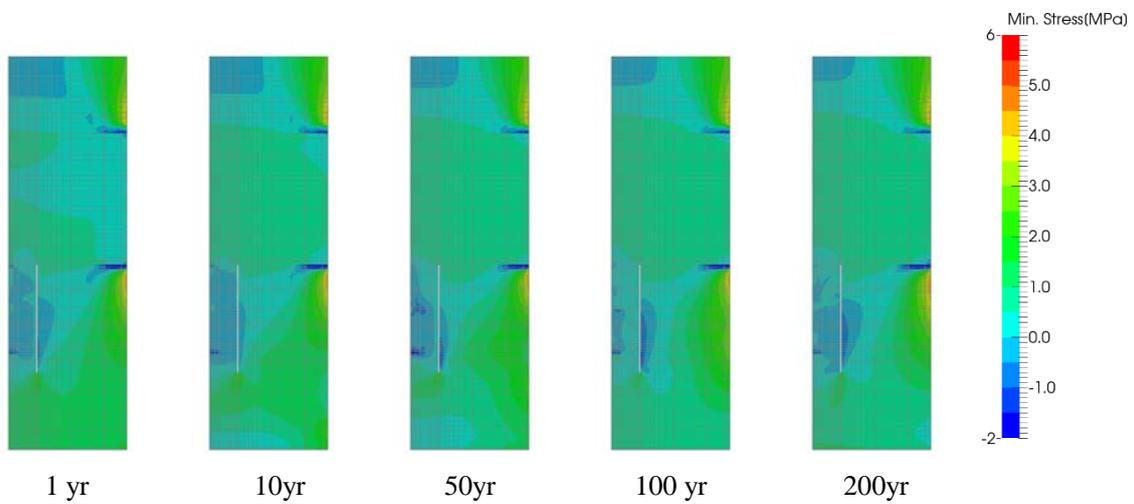
添付図 200 Case H29 -2Sigma 岩盤部分・温度分布



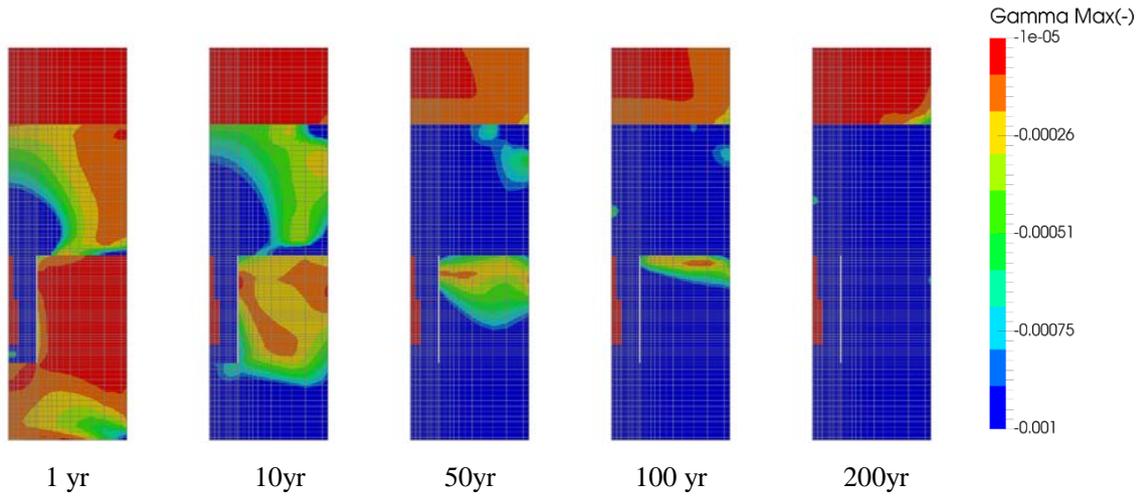
添付図 201 Case H29 -2Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



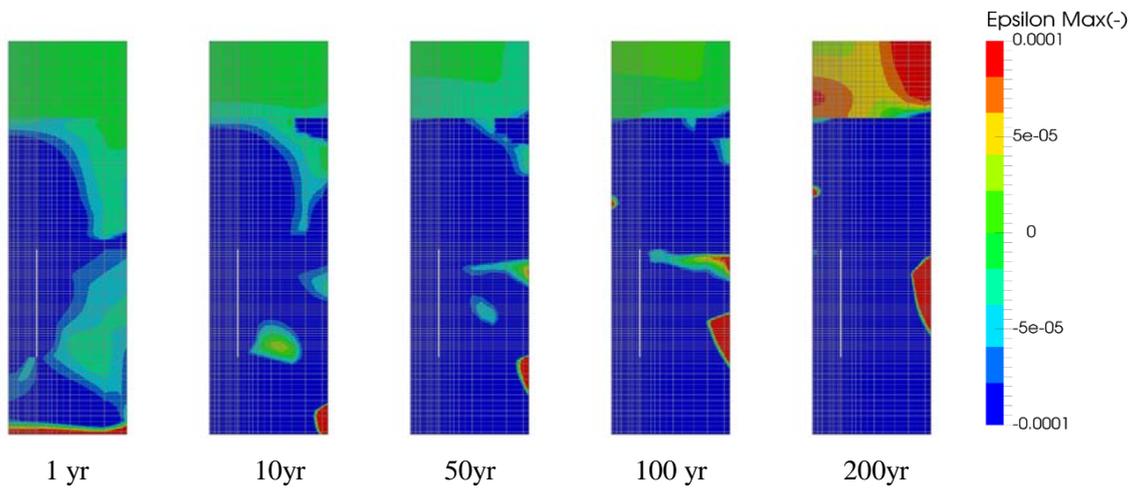
添付図 202 Case H29 -2Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



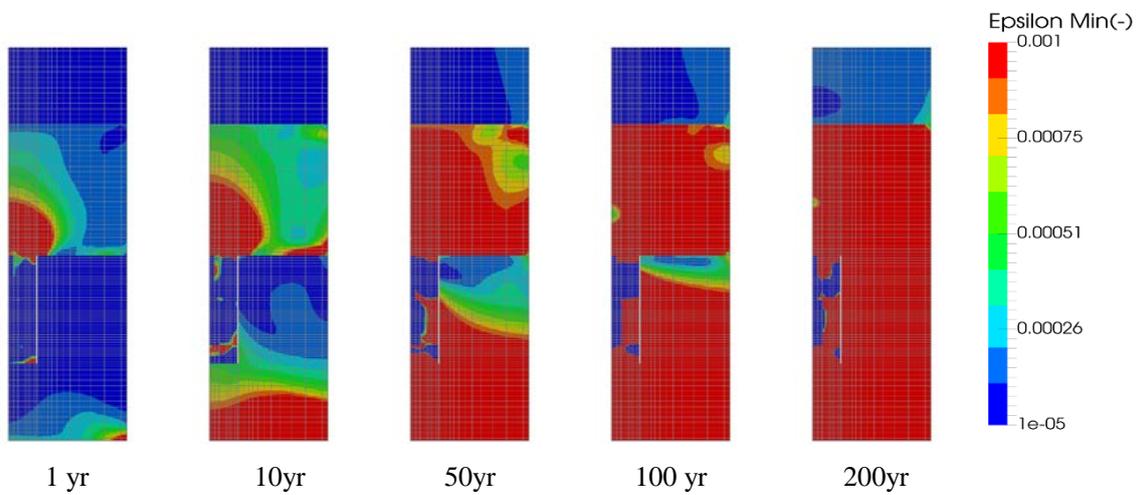
添付図 203 Case H29 -2Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



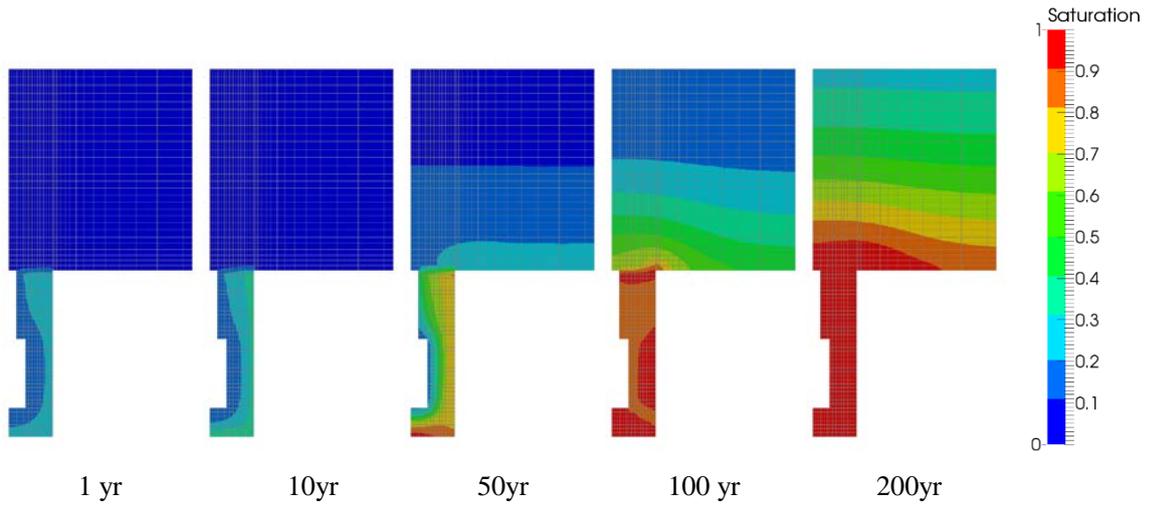
添付図 204 Case H29 -2Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



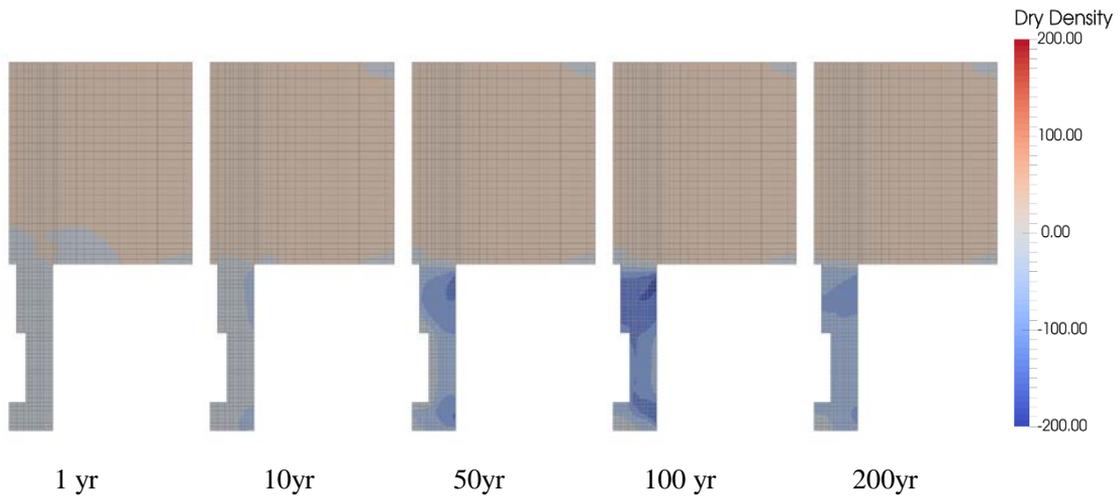
添付図 205 Case H29 -2Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



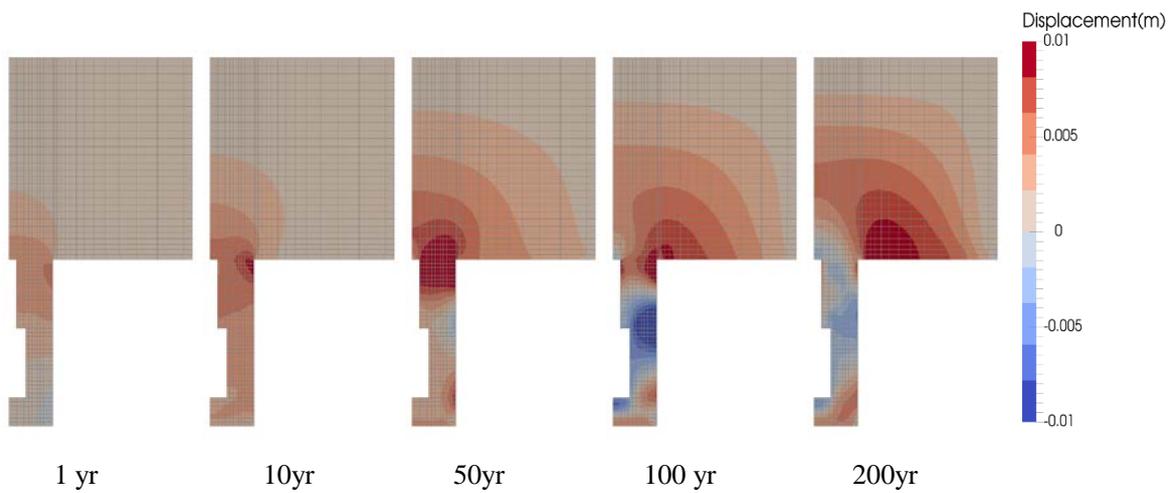
添付図 206 Case H29 -2Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



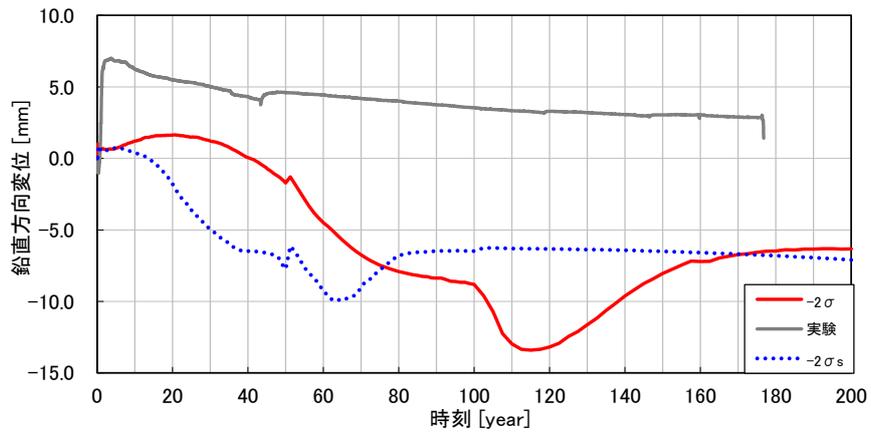
添付図 207 Case H29 -2Sigma ベントナイト部分・飽和度分布



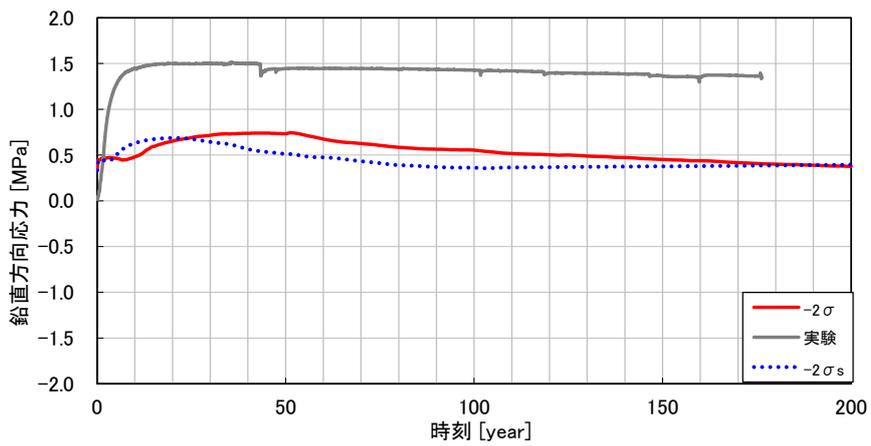
添付図 208 Case H29 -2Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



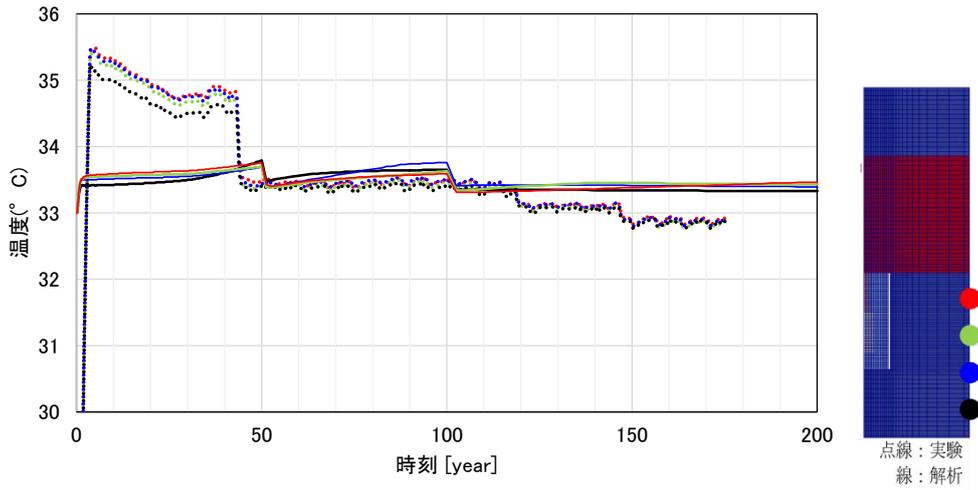
添付図 209 Case H29 -2Sigma 鉛直変位分布



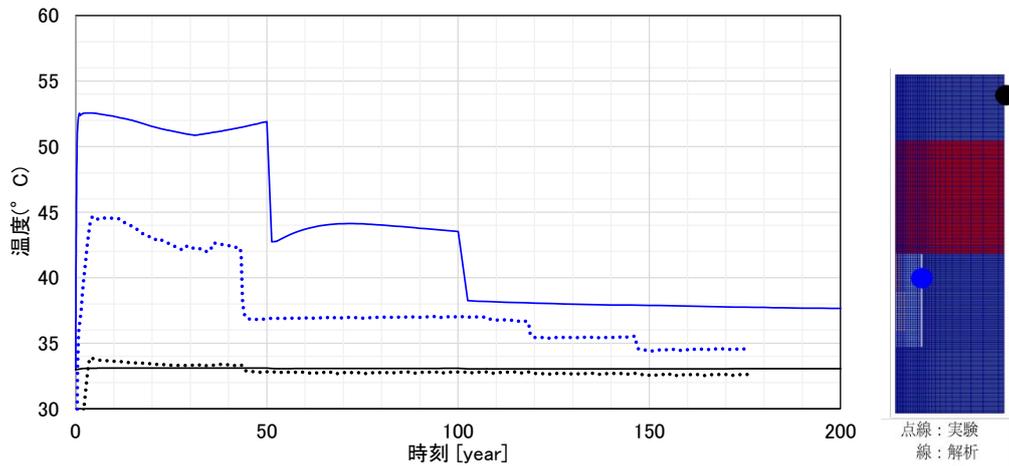
添付図 210 Case H29 -2Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



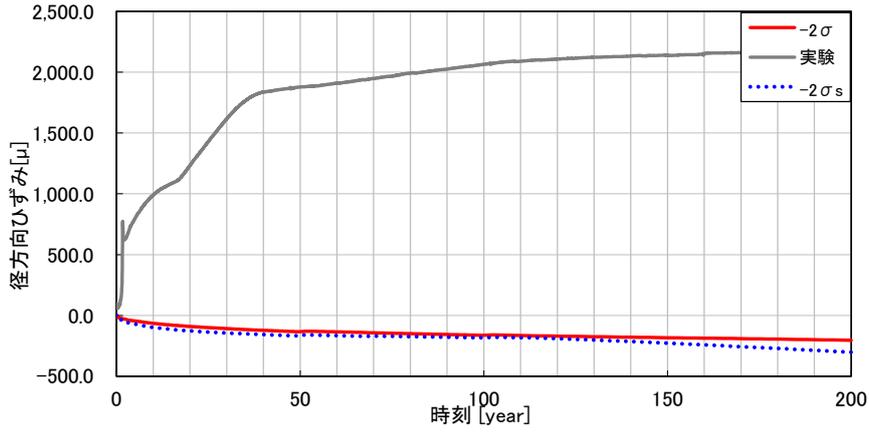
添付図 211 Case H29 -2Sigma 緩衝材の全応力時刻歴（鉛直方向、圧縮：正）



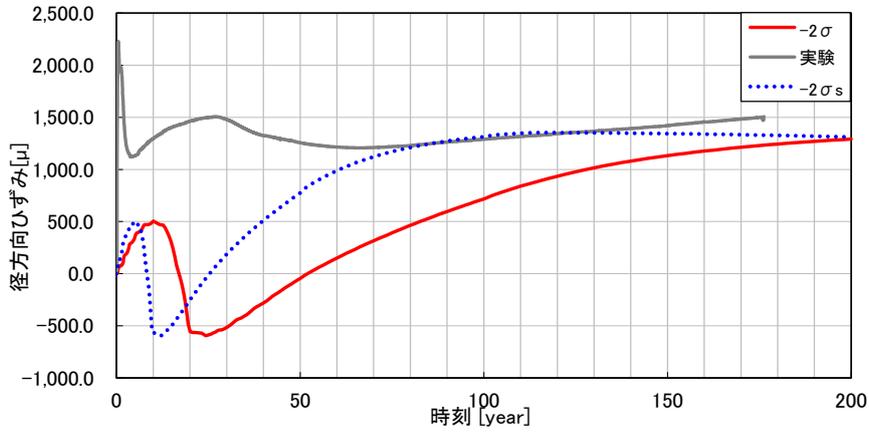
添付図 212 Case H29 -2Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



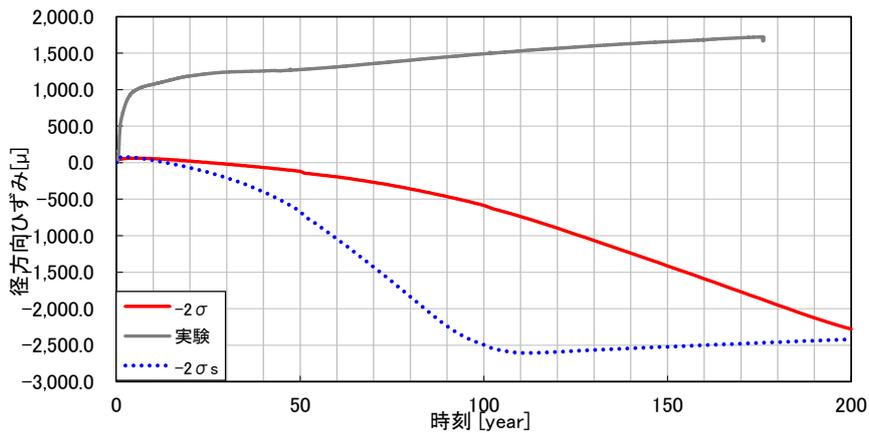
添付図 213 Case H29 -2Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 214 Case H29 -2Sigma 上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

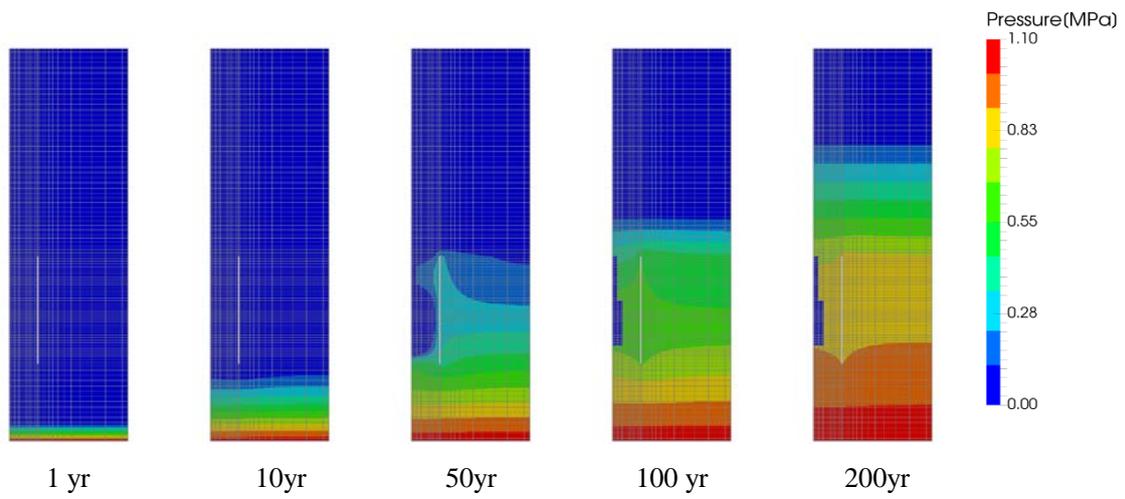


添付図 215 Case H29 -2Sigma 岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

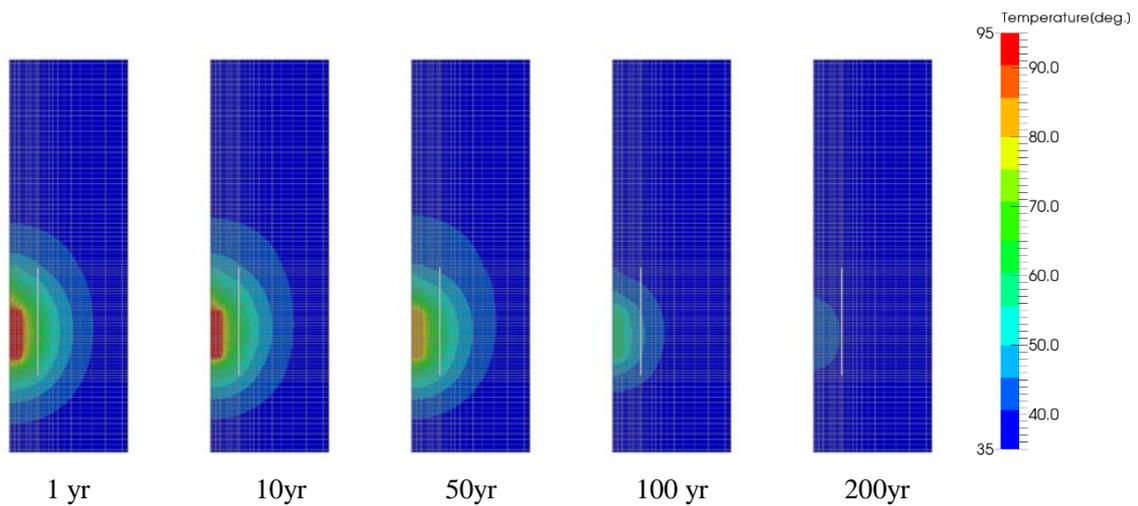


添付図 216 Case H29 -2Sigma 岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

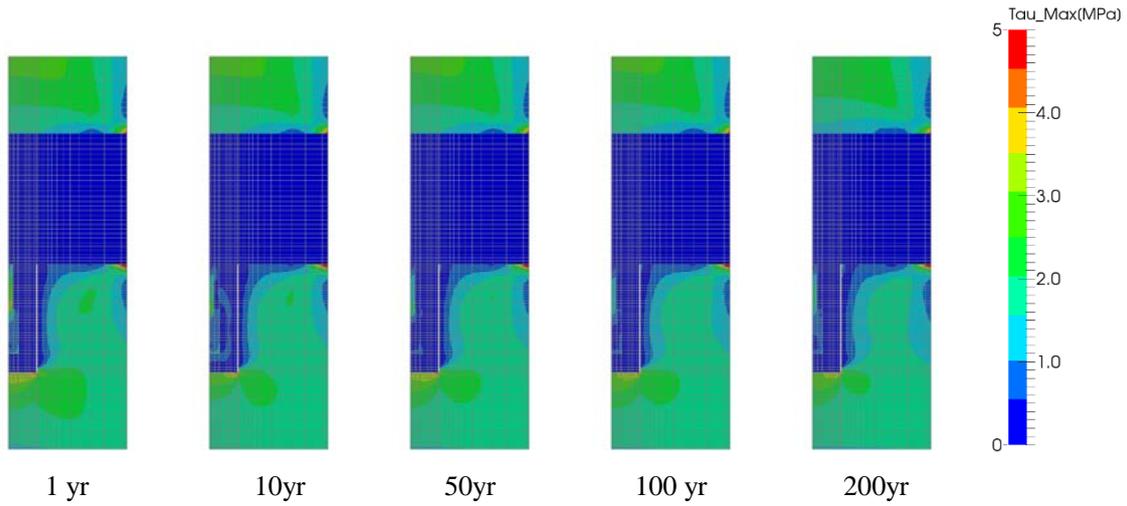
(13) Case H29 +3Sigma



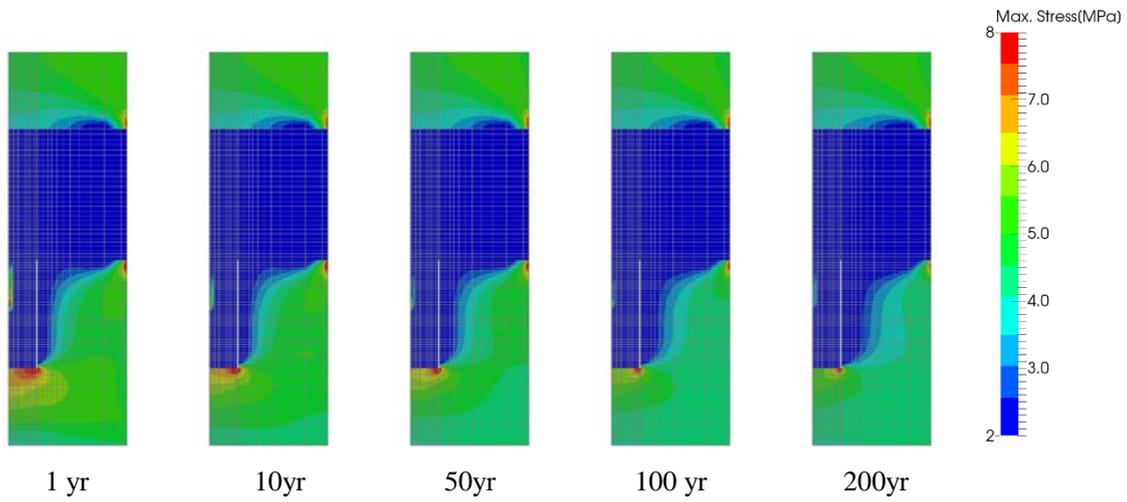
添付図 217 Case H29 +3Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



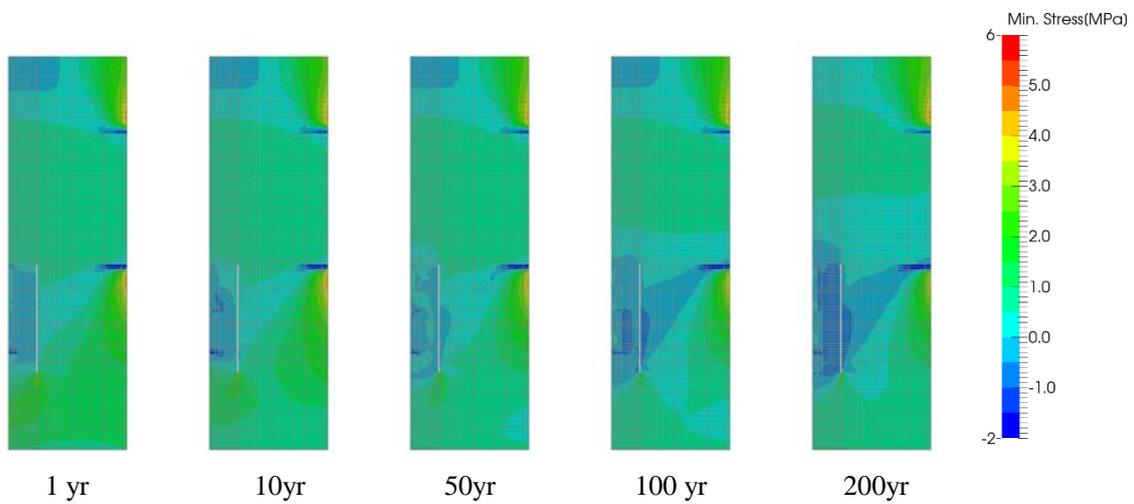
添付図 218 Case H29 +3Sigma 岩盤部分・温度分布



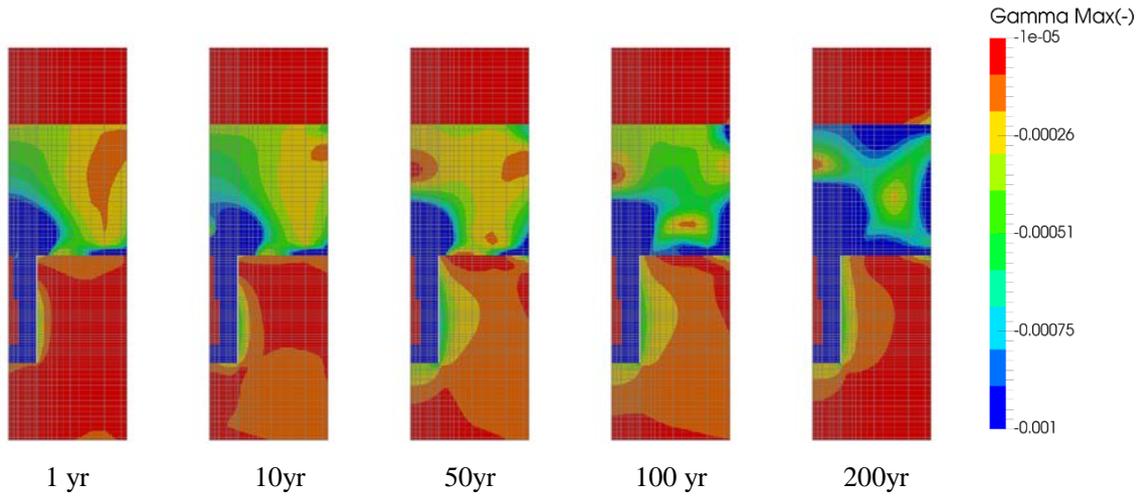
添付図 219 Case H29 +3Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



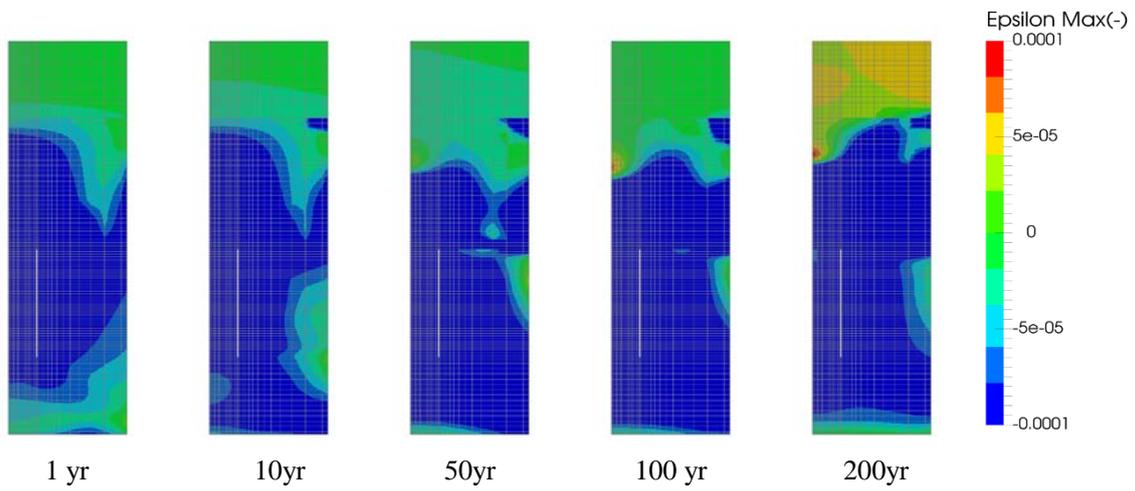
添付図 220 Case H29 +3Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



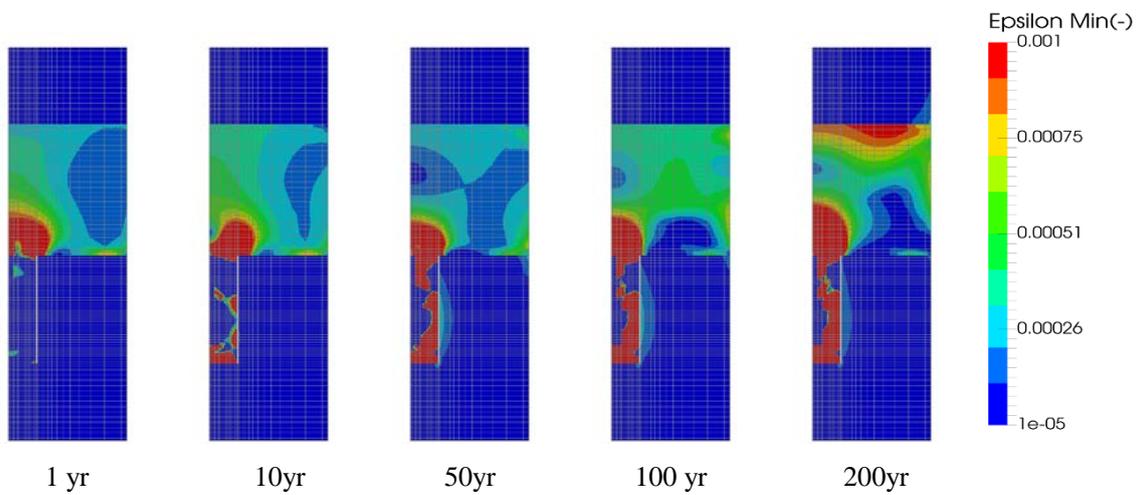
添付図 221 Case H29 +3Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



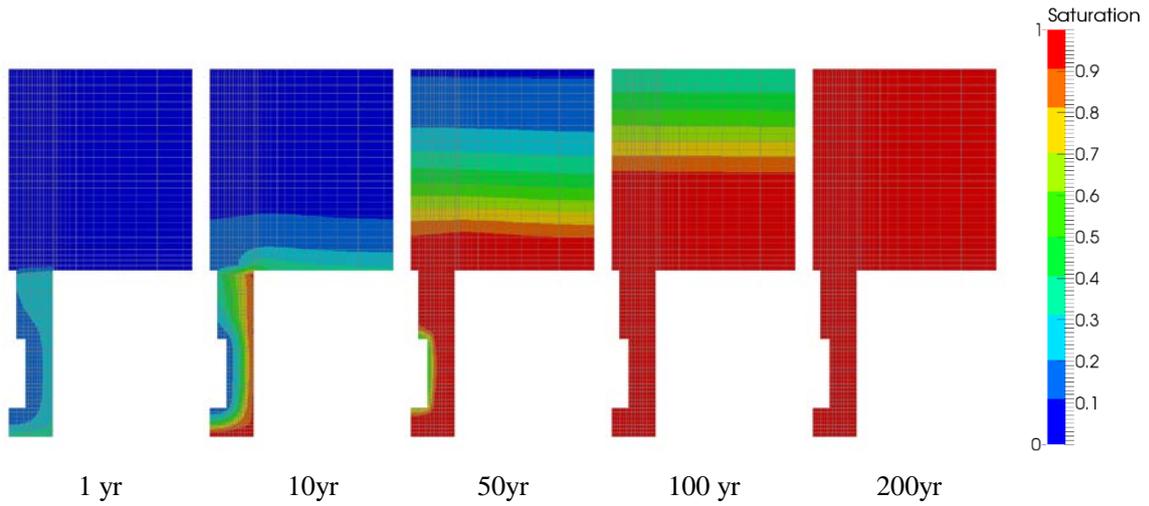
添付図 222 Case H29 +3Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



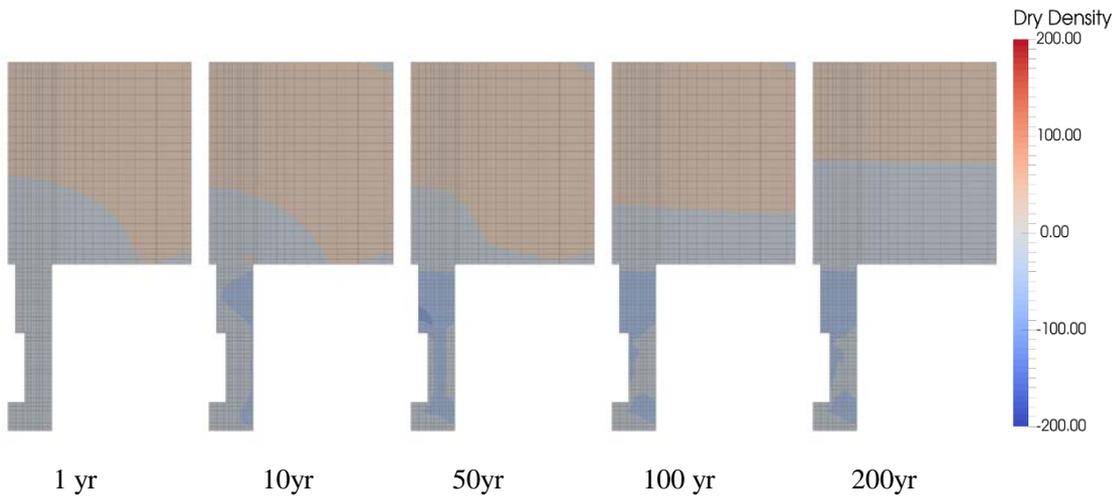
添付図 223 Case H29 +3Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



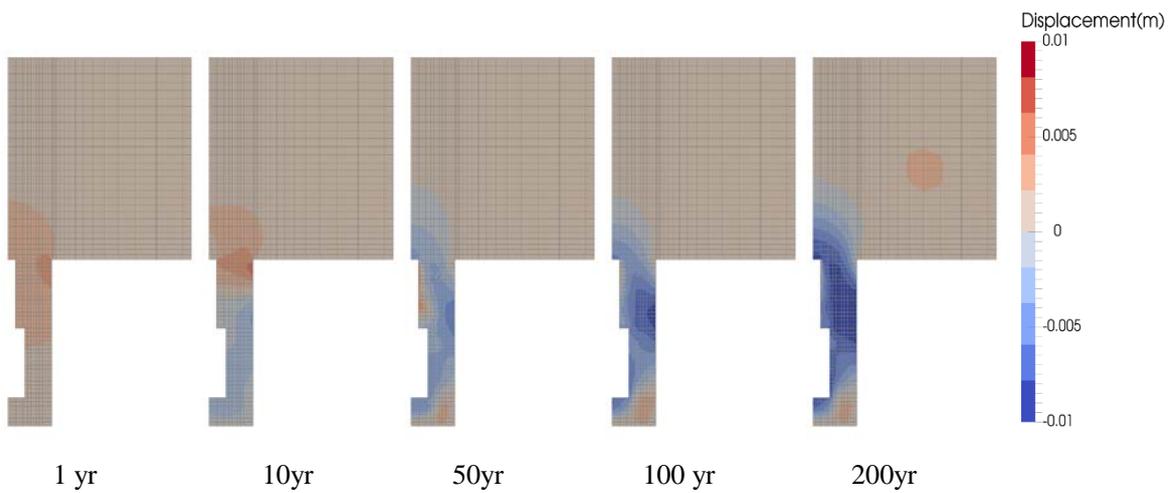
添付図 224 Case H29 +3Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



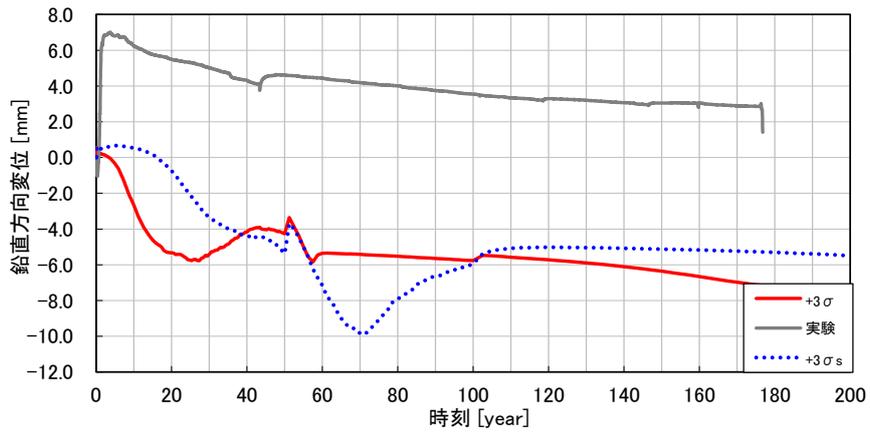
添付図 225 Case H29 +3Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布



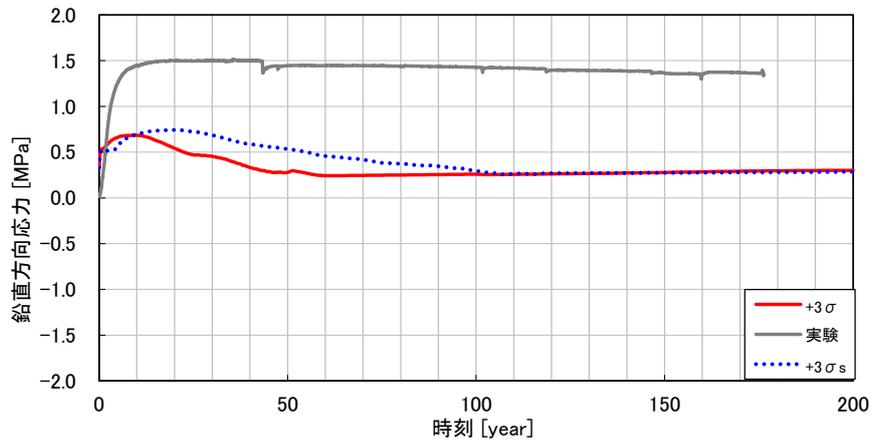
添付図 226 Case H29 +3Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



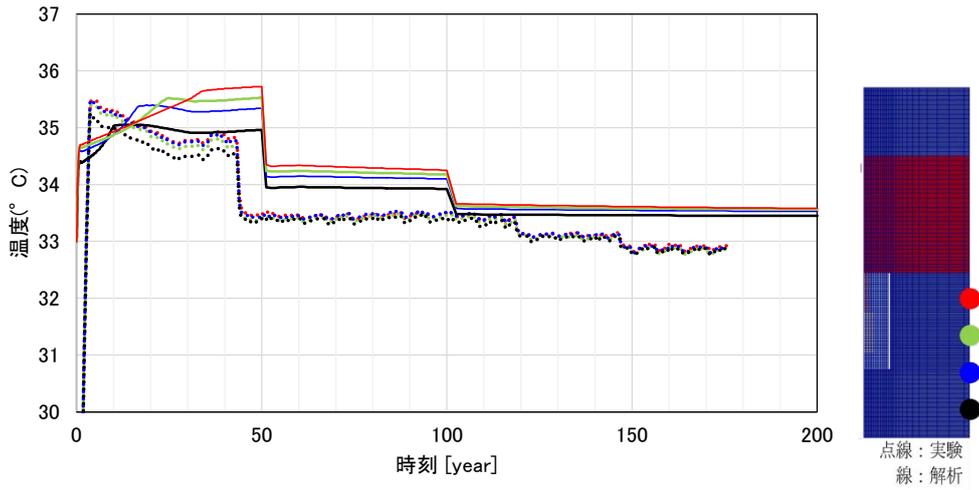
添付図 227 Case H29 +3Sigma 鉛直変位分布



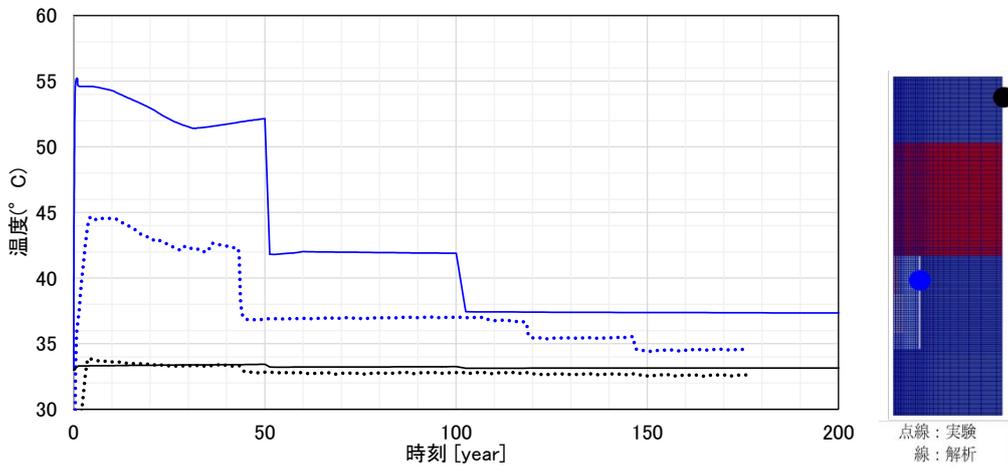
添付図 228 Case H29 +3Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



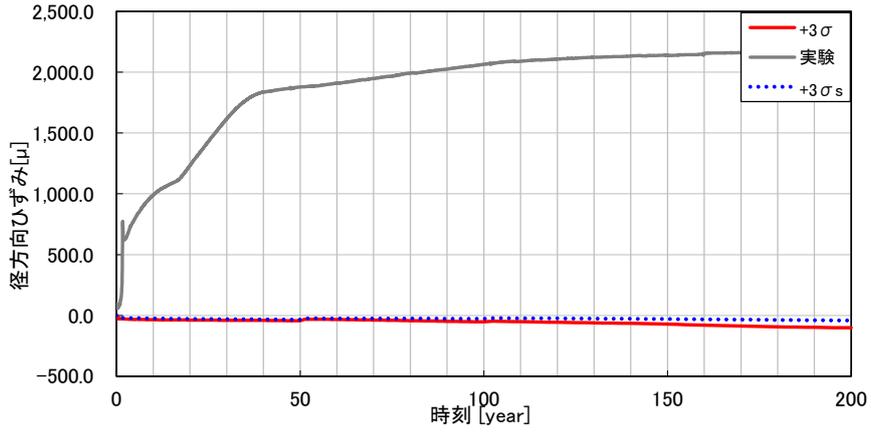
添付図 229 Case H29 +3Sigma 緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)



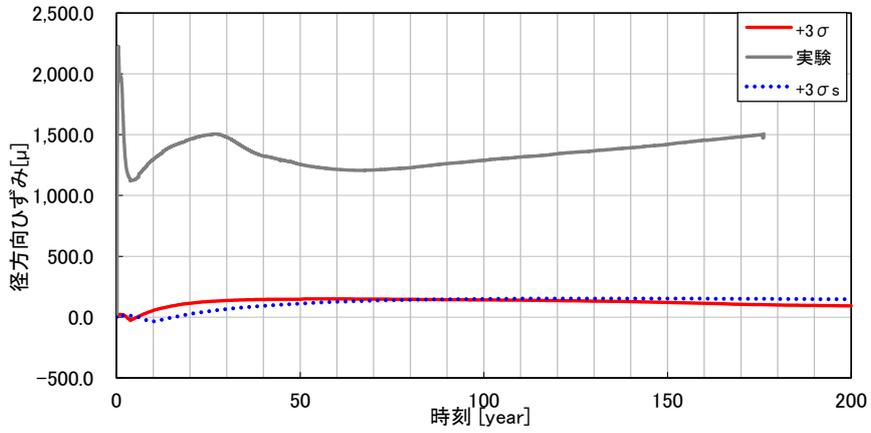
添付図 230 Case H29 +3Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



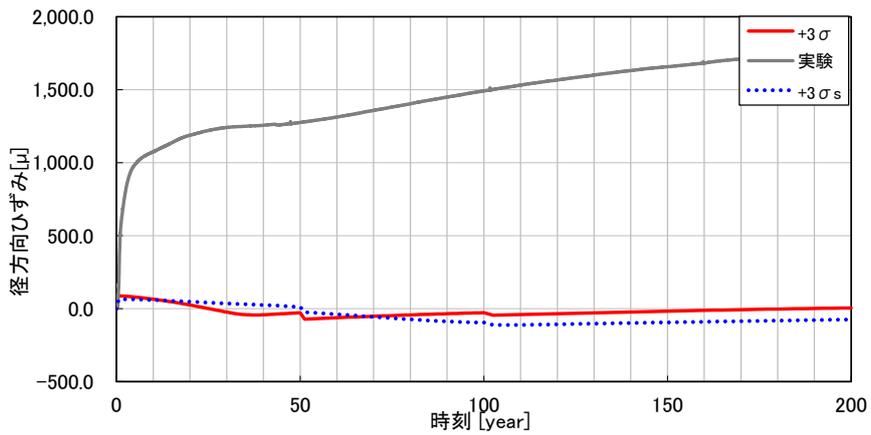
添付図 231 Case H29 +3Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 232 Case H29 +3Sigma 上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

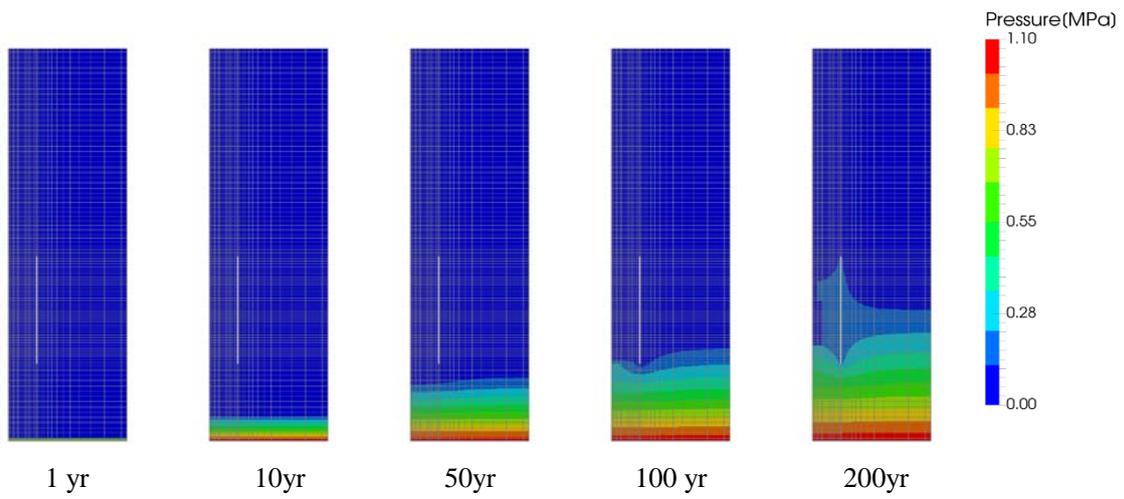


添付図 233 Case H29 +3Sigma 岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

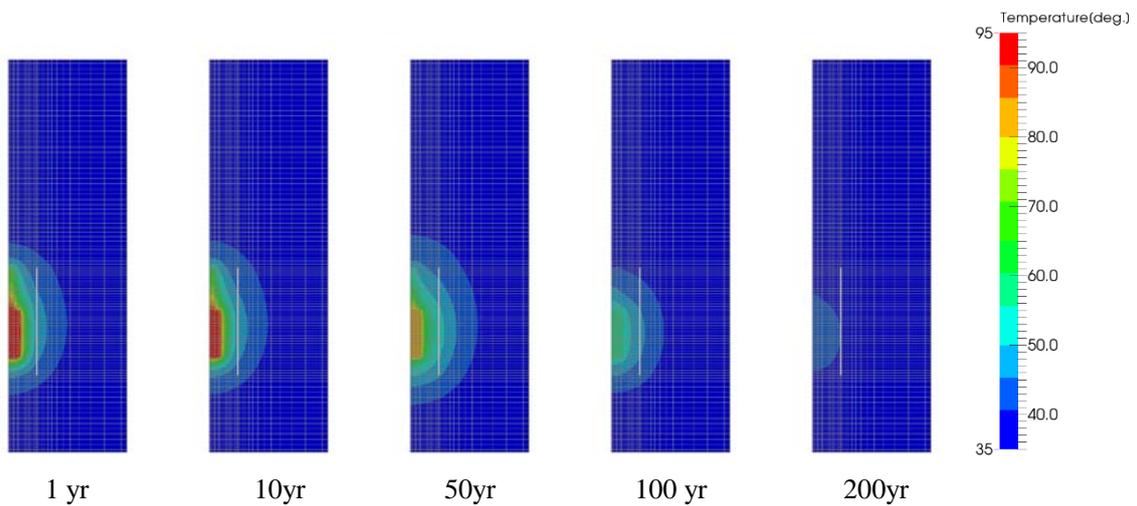


添付図 234 Case H29 +3Sigma 岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)

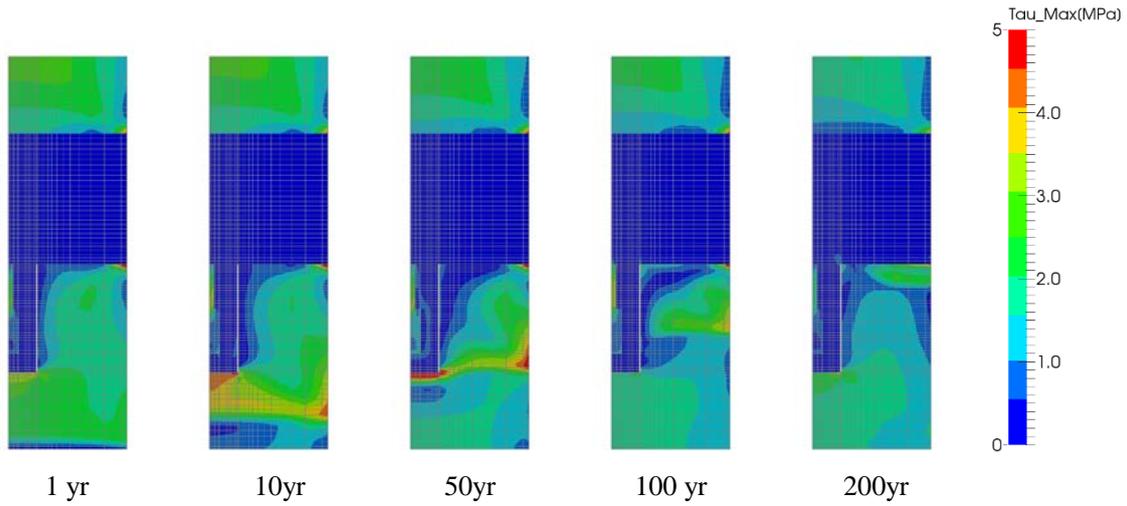
(14) Case H29 -3Sigma



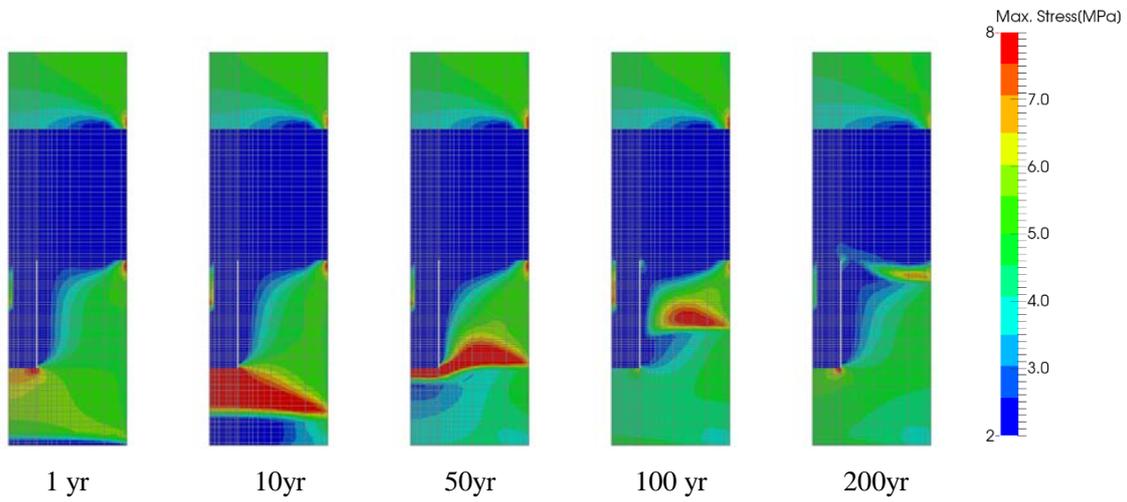
添付図 235 Case H29 -3Sigma 岩盤部分・間隙水圧分布



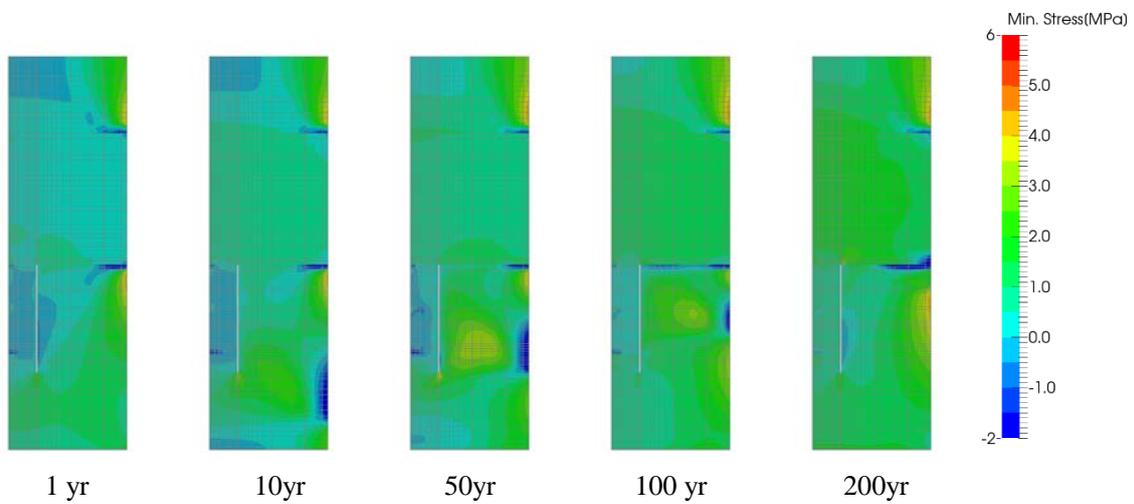
添付図 236 Case H29 -3Sigma 岩盤部分・温度分布



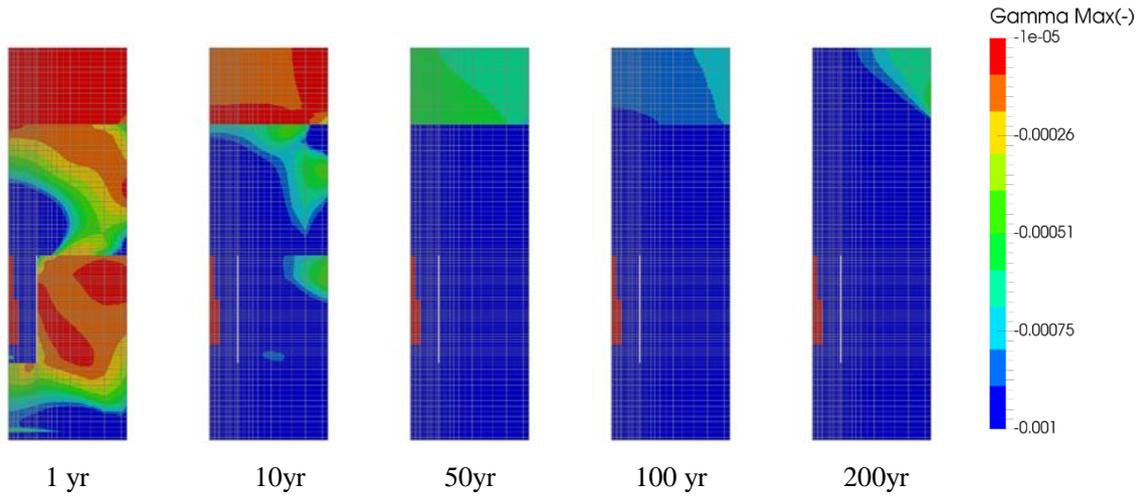
添付図 237 Case H29-3Sigma 岩盤部分・主せん断応力分布



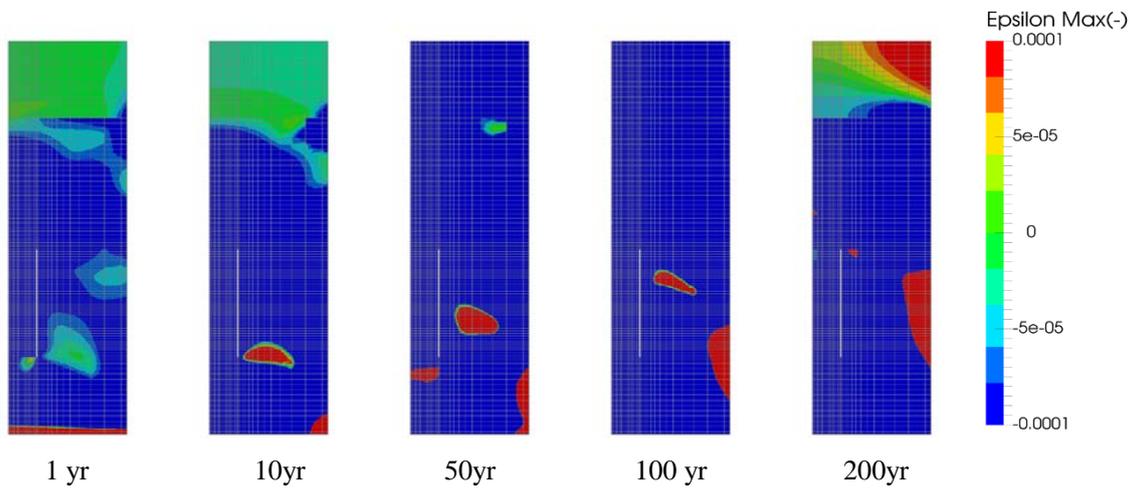
添付図 238 Case H29-3Sigma 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)



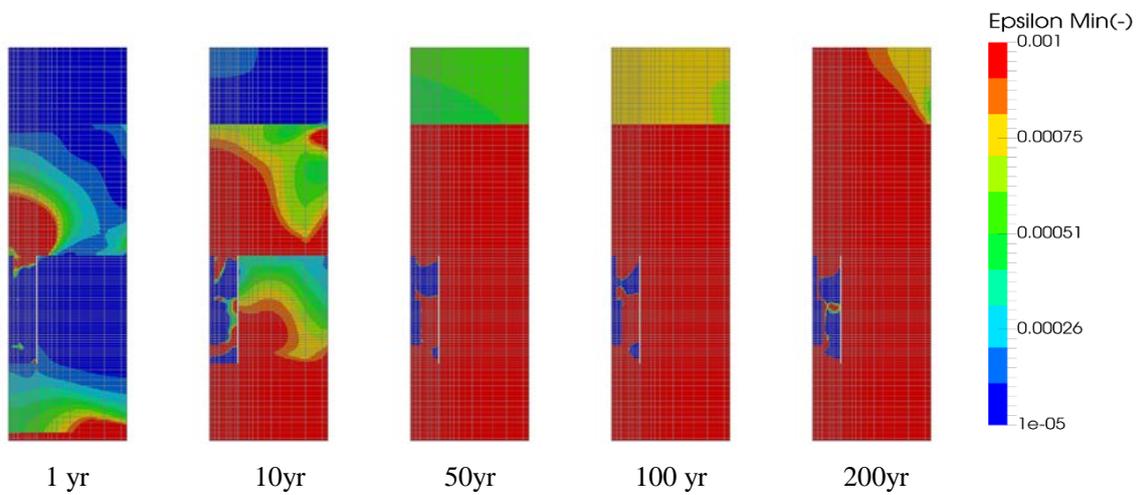
添付図 239 Case H29-3Sigma 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)



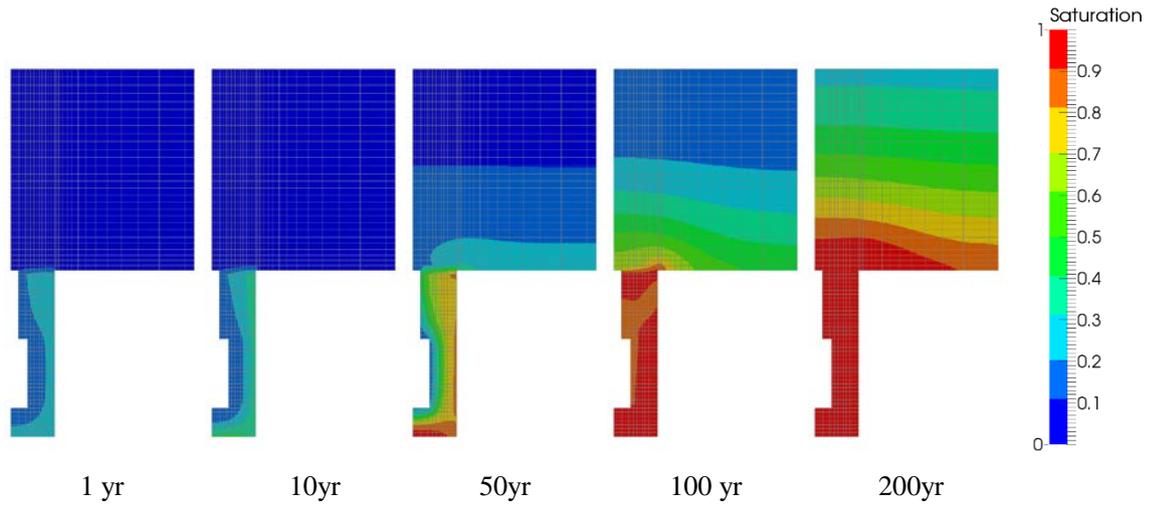
添付図 240 Case H29 -3Sigma 岩盤部分・主せん断応ひずみ分布



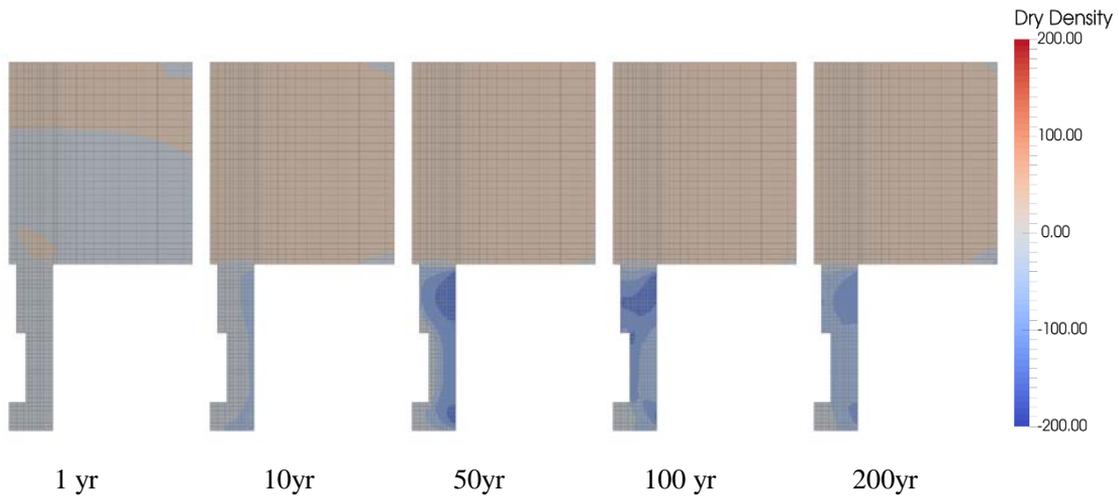
添付図 241 Case H29 -3Sigma 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)



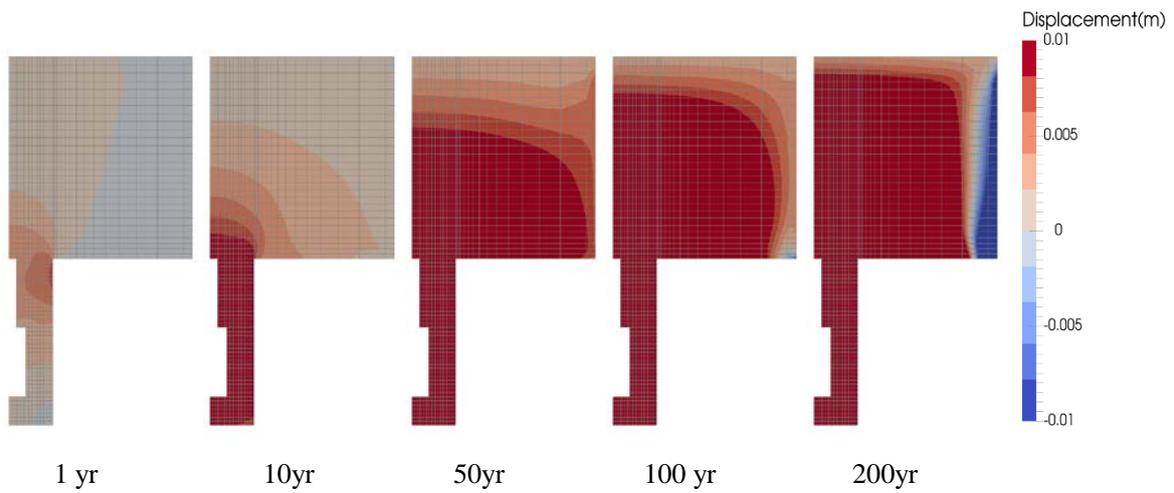
添付図 242 Case H29 -3Sigma 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)



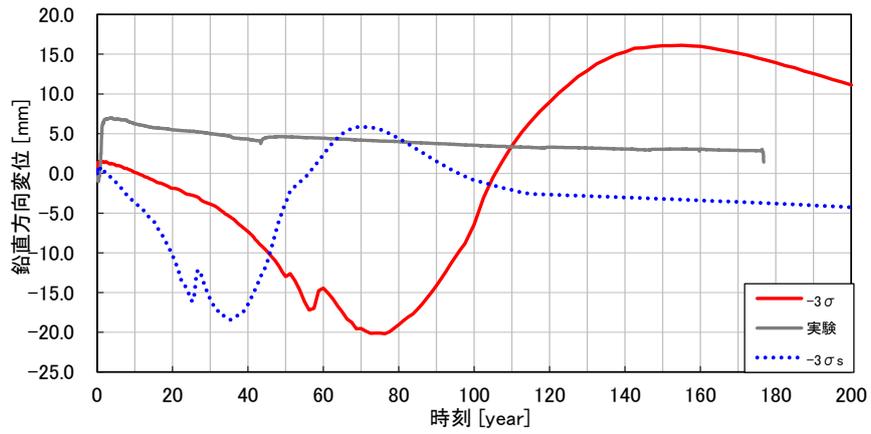
添付図 243 Case H29 -3Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・飽和度分布



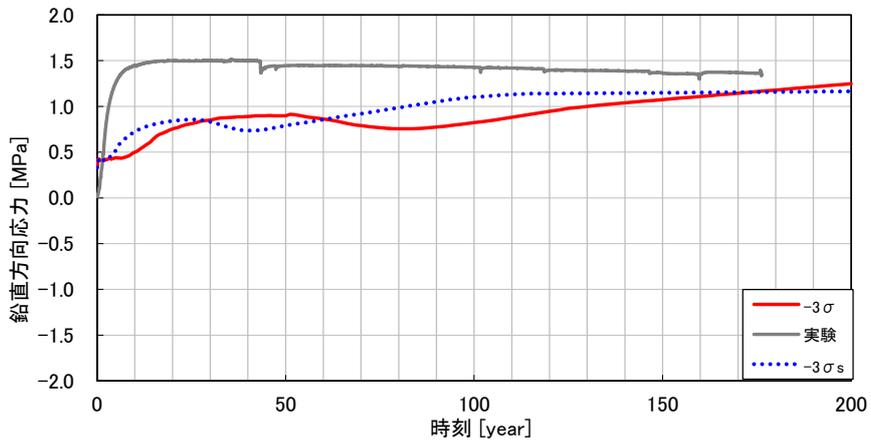
添付図 244 Case H29 -3Sigma 緩衝材と埋め戻し材部分・乾燥密度変化の分布



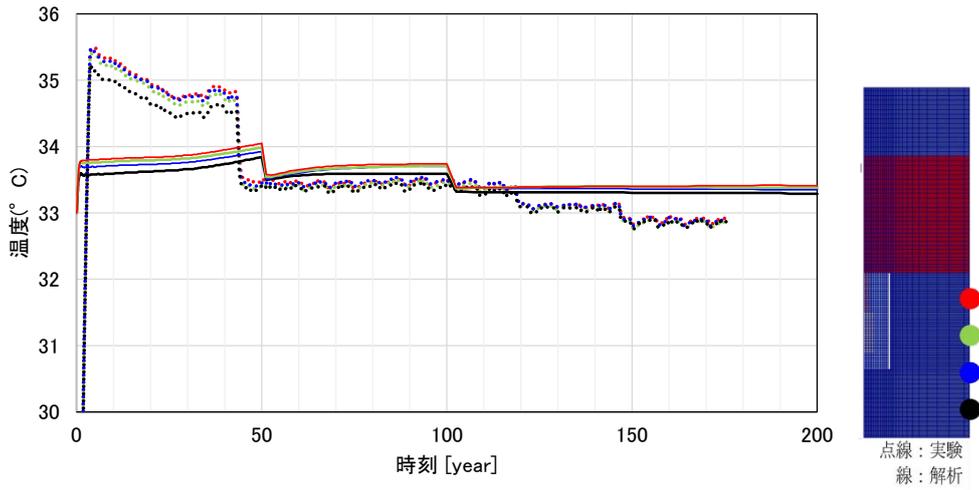
添付図 245 Case H29 -3Sigma 鉛直変位分布



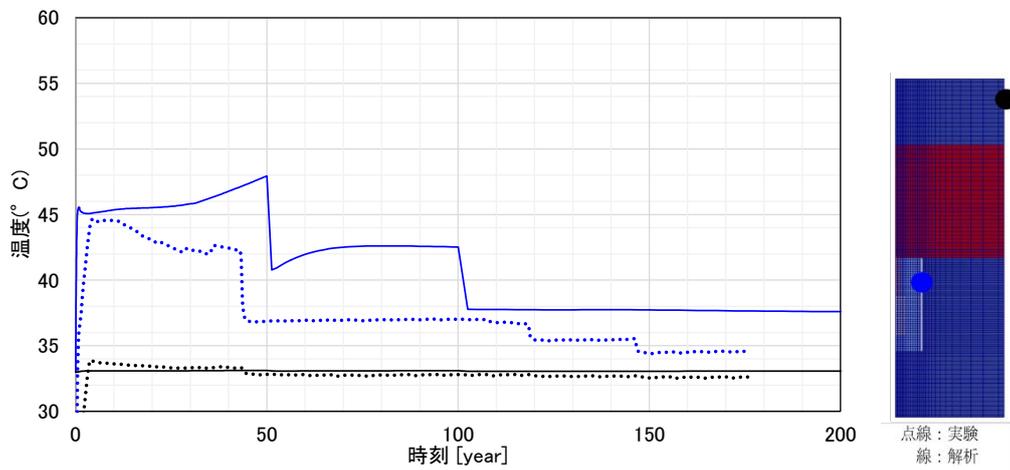
添付図 246 Case H29 -3Sigma O/P 鉛直変位の時刻歴



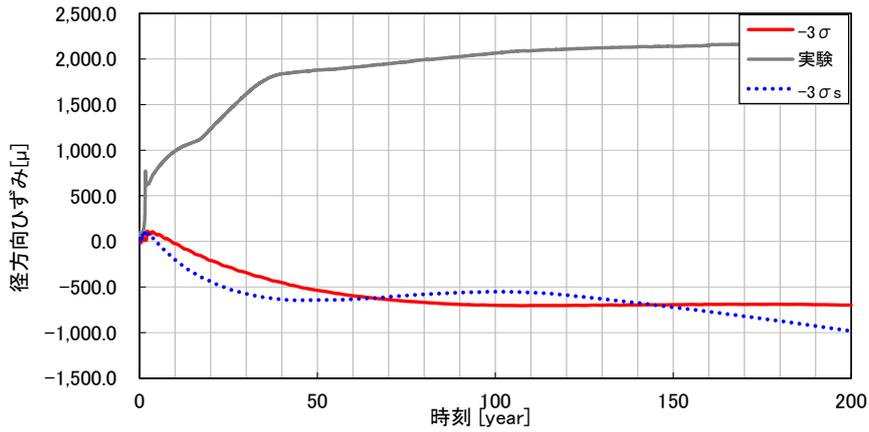
添付図 247 Case H29 -3Sigma 緩衝材の全応力時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)



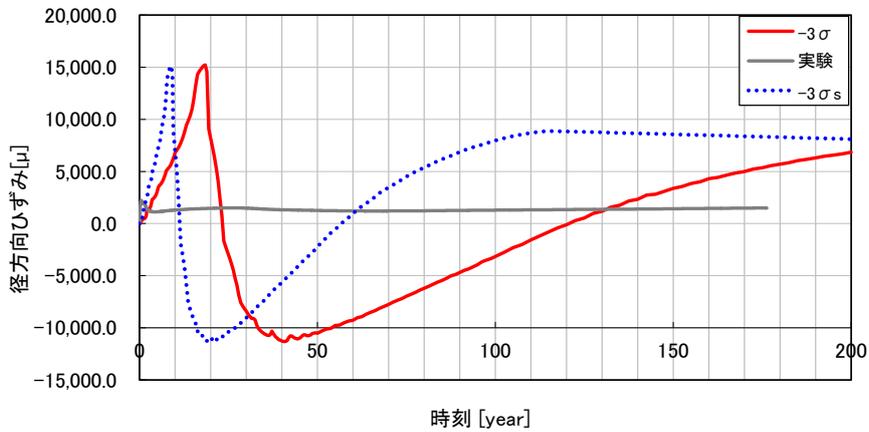
添付図 248 Case H29 -3Sigma 温度時刻歴(岩盤外壁)



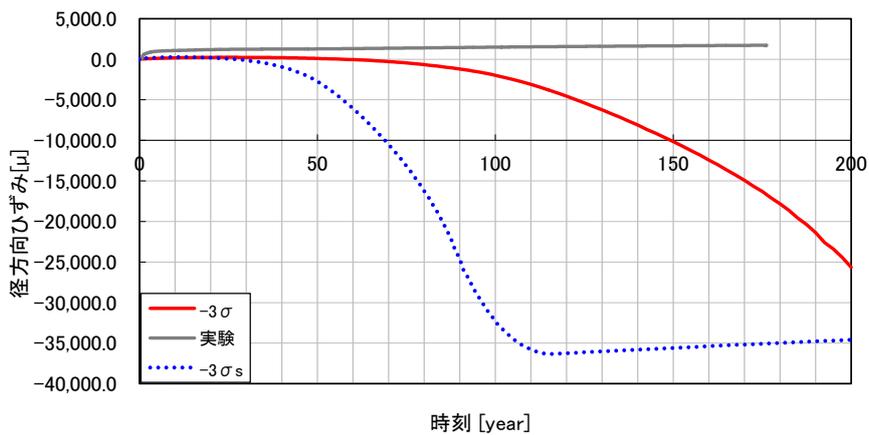
添付図 249 Case H29 -3Sigma 温度時刻歴(内壁,上面)



添付図 250 Case H29 -3Sigma 上部岩盤外壁・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)



添付図 251 Case H29 -3Sigma 岩盤外壁下部・鉛直方向ひずみ時刻歴 (引張：正)



添付図 252 Case H29 -3Sigma 岩盤外壁上部・周方向ひずみ時刻歴 (引張：正)