

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

平成27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のうち、処分システム工学確証技術開発 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築の開発成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

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
	第5分冊	自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発

目次

第1章	研究の目的及び概要	1-1
1.1	処分システム工学確証技術開発の背景及び目的	1-1
1.1.1	開発の背景	1-1
1.1.2	本事業の構成.....	1-1
(1)	処分システム工学確証技術開発	1-1
(2)	自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発	1-1
1.1.3	研究開発項目の相互関係.....	1-2
1.1.4	平成27年度の実施内容.....	1-3
(1)	処分システム工学確証技術開発	1-3
(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.....	1-4
1.2	人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築.....	1-5
第2章	研究計画の策定.....	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.....	2-2
(1)	現象.....	2-2
(2)	時間スケール.....	2-2
(3)	検討の対象とする現象と時間スケールの設定.....	2-3
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	2-5
2.1.4	着眼点	2-7
2.1.5	3カ年の全体研究計画	2-8
2.2	平成27年度の実施内容	2-9
2.3	長期挙動評価の検証手法の構築.....	2-10
2.3.1	処分システムの実現に向けた本研究の意義	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
2.4	共通の条件	2-14
2.4.1	数値解析コード	2-14
2.4.2	遠心力载荷試験装置.....	2-14
2.4.3	材料.....	2-15
(1)	オーバーパック	2-15
(2)	緩衝材	2-15
(3)	岩盤.....	2-15
2.4.4	試験対象.....	2-17
(1)	試験対象の定置概念.....	2-17
(2)	境界条件.....	2-17
第3章	数値解析	3-1

3.1	感度解析.....	3-1
3.1.1	背景・目的.....	3-1
(1)	背景.....	3-1
(2)	実施内容.....	3-1
3.1.2	解析コードの概要.....	3-1
(1)	THM 連成の支配方程式.....	3-1
(2)	緩衝材の膨潤モデル.....	3-5
(3)	LOSTUF のパラメータ.....	3-7
3.1.3	解析モデルの諸元・境界条件.....	3-8
(1)	解析モデル.....	3-8
3.1.4	パラメータ.....	3-10
(1)	基本ケースの設定パラメータ.....	3-10
3.1.5	感度解析のケースの設定.....	3-14
(1)	水分特性曲線 (THM-3、HM-3 に関連).....	3-15
(2)	膨潤の進行に関するパラメータ (THM-6 に関連).....	3-15
(3)	簡易な膨潤モデル (THM-7 に関連).....	3-16
(4)	岩盤のクリープモデルに関するパラメータ (THM-10 に関連).....	3-16
(5)	ベントナイトの不飽和域における水分拡散 (HM-4 に関連).....	3-17
(6)	隙間のモデル化について (HM-5、HM-6 に関連).....	3-17
3.1.6	感度解析の結果.....	3-19
3.1.7	各ケースの解析結果に対する考察.....	3-20
(1)	THM-0 (基本ケース) 「6.1.4 参照」.....	3-20
(2)	THM-1 「6.1.5 参照」.....	3-20
(3)	THM-2 「6.1.6 参照」.....	3-20
(4)	THM-3 「6.1.7 参照」.....	3-21
(5)	THM-4 「6.1.8 参照」.....	3-21
(6)	THM-5 「6.1.9 参照」.....	3-21
(7)	THM-6 「6.1.10 参照」.....	3-21
(8)	THM-7 「6.1.11 参照」.....	3-21
(9)	THM-8 「6.1.12 参照」.....	3-22
(10)	THM-9 「6.1.13 参照」.....	3-22
(11)	THM-10 6.1.14 参照」.....	3-22
(12)	HM-0 (基本ケース) 「6.1.15 参照」.....	3-22
(13)	HM-1 「6.1.16 参照」.....	3-23
(14)	HM-2 「6.1.17 参照」.....	3-23
(15)	HM-3 「6.1.18 参照」.....	3-23
(16)	HM-4 「6.1.19 参照」.....	3-23
(17)	HM-5 「6.1.20 参照」.....	3-23

(18)	HM-6 「6.1.21 参照」	3-24
(19)	感度解析結果のまとめ	3-25
3.1.8	感度解析結果から得られた結論	3-29
(1)	温度変化を考慮することによる影響	3-29
(2)	ベントナイトの膨潤が岩盤に与える影響	3-29
(3)	透水性の影響	3-29
(4)	ベントナイトの力学特性の影響	3-29
(5)	膨潤挙動のモデル化の影響	3-30
(6)	隙間をモデル化することによる影響	3-30
(7)	感度解析より得られた重要パラメータ	3-30
3.2	数値解析に連動した要素実験	3-31
3.2.1	取得する各材料の物性値	3-31
3.2.2	実施結果	3-32
(1)	物理特性	3-32
(2)	緩衝材の膨潤特性	3-36
(3)	熱特性	3-38
(4)	保水特性	3-42
(5)	透水特性	3-49
(6)	圧密特性	3-58
(7)	力学特性	3-59
3.2.3	まとめ	3-80
(1)	物理特性	3-80
(2)	緩衝材の膨潤特性	3-80
(3)	熱特性	3-80
(4)	保水特性	3-80
(5)	透水特性	3-80
(6)	力学特性	3-80
第4章	遠心力模型実験	4-1
4.1	背景・目的	4-1
4.1.1	背景	4-1
4.1.2	目的	4-1
4.1.3	3カ年の実施計画および本年度の実施内容	4-1
4.2	遠心模型実験における静的場の相似則	4-3
4.2.1	相似則	4-3
4.2.2	遠心力模型実験の優位点	4-4
4.2.3	遠心力模型実験の適用限界	4-4
4.2.4	長期挙動評価における遠心力模型実験の意義	4-5
4.3	実験概要	4-6

4.3.1	実験設備.....	4-6
(1)	超長期遠心载荷岩盤実験装置.....	4-6
(2)	圧力容器.....	4-9
(3)	X線CT装置.....	4-10
4.3.2	想定した施設および模型.....	4-11
4.3.3	模型の作製.....	4-12
(1)	模擬オーバーパック.....	4-12
(2)	緩衝材.....	4-13
(3)	岩盤供試体.....	4-18
(4)	遠心力载荷実験用模型の準備.....	4-20
4.3.4	模型の設置.....	4-28
(1)	圧力容器への設置.....	4-28
(2)	遠心力模型実験装置への設置.....	4-28
4.3.5	実験方法.....	4-32
(1)	条件.....	4-32
(2)	手順.....	4-33
4.4	結果.....	4-36
4.4.1	遠心力载荷実験.....	4-36
(1)	温度.....	4-36
(2)	ベントナイトの土圧.....	4-41
(3)	オーバーパックの鉛直変位.....	4-44
(4)	岩盤のひずみ.....	4-47
(5)	岩盤のひずみと温度の関係.....	4-52
(6)	ひずみゲージの応力応答確認.....	4-52
4.4.2	実験後の密度、含水比測定.....	4-54
4.4.3	X線CT撮影.....	4-58
(1)	実験前撮影.....	4-59
(2)	実験後撮影.....	4-62
4.5	まとめおよび今後の課題.....	4-64
4.5.1	まとめ.....	4-64
4.5.2	今後の課題.....	4-65
第5章	まとめ.....	5-1
5.1	実施内容.....	5-1
5.2	本年度の成果.....	5-1
5.2.1	研究計画.....	5-1
(1)	全体計画.....	5-1
(2)	長期挙動評価手法の構築.....	5-1
(3)	共通の条件.....	5-2

5.2.2	数値解析.....	5-2
(1)	感度解析.....	5-2
(2)	数値解析に連動した要素実験.....	5-3
5.2.3	遠心力模型実験.....	5-4
(1)	遠心力模型実験.....	5-4
第6章	参考資料	6-1
6.1	数値解析（パラメータの感度解析結果）.....	6-1
6.1.1	解析モデル.....	6-1
6.1.2	感度解析のケース一覧.....	6-3
6.1.3	実施結果.....	6-4
6.1.4	THM-0.....	6-5
6.1.5	THM-1.....	6-10
6.1.6	THM-2.....	6-15
6.1.7	THM-3.....	6-20
6.1.8	THM-4.....	6-25
6.1.9	THM-5.....	6-30
6.1.10	THM-6.....	6-35
6.1.11	THM-7.....	6-40
6.1.12	THM-8.....	6-45
6.1.13	THM-9.....	6-50
6.1.14	THM-10.....	6-55
6.1.15	HM-0.....	6-60
6.1.16	HM-1.....	6-65
6.1.17	HM-2.....	6-70
6.1.18	HM-3.....	6-75
6.1.19	HM-4.....	6-80
6.1.20	HM-5.....	6-85
6.1.21	HM-6.....	6-90
6.2	要素試験 供試体.....	6-95
6.2.1	熱伝導率測定供試体（緩衝材）.....	6-95
6.2.2	一軸圧縮試験供試体（周辺岩盤）.....	6-101
6.2.3	熱伝導率測定供試体（周辺岩盤）.....	6-103
6.2.4	一軸圧縮試験供試体（緩衝材）.....	6-106
6.2.5	一軸引張試験供試体（周辺岩盤）.....	6-110
6.2.6	三軸圧縮試験供試体（緩衝材）.....	6-113
6.2.7	三軸圧縮試験供試体（周辺岩盤）.....	6-114

図 表 番 号

図	1.1.3-1 処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係[1]	1-2
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・現象遷移の概念図	2-3
図	2.1.3-1 人工バリアの長期挙動に影響を与えうる主要な環境因子の概念図	2-6
図	2.1.4-1 長期挙動評価における不確実性低減のための概念図	2-7
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	2-11
図	2.3.2-2 対象サイトに対する THM の長期挙動評価のフロー (例)	2-12
図	2.4.2-1 超長期遠心載荷岩盤実験装置のイメージ	2-14
図	2.4.3-1 岩盤サンプリング箇所。(左) 三浦半島の 5 万分の 1 表層地質図、	2-16
図	2.4.3-2 防空壕内で実施した地質観察図	2-16
図	2.4.4-1 本研究で想定する境界条件の概念図	2-18
図	2.4.4-2 遠心力模型実験で想定するオーバーパックの温度条件 (経時変化) [6]	2-18
図	3.1.2-1 LOSTUF における緩衝材膨潤モデル	3-6
図	3.1.3-1 解析モデルの諸元と境界条件	3-8
図	3.1.3-2 感度解析モデルの FEM メッシュ図 (1798 要素・1887 節点)	3-9
図	3.1.4-1 緩衝材と岩盤の水分特性曲線	3-11
図	3.1.4-2 緩衝材の固有透過度	3-11
図	3.1.4-3 緩衝材の熱伝導率	3-13
図	3.1.5-1 設定したベントナイトの水分特性曲線	3-15
図	3.1.5-2 本検討で適用した岩盤のクリープモデル	3-16
図	3.1.5-3 拘束圧の差による処分孔の初期変形量の違い (変形倍率 10 倍)	3-18
図	3.1.6-1 解析結果の出力部位と出力位置	3-19
図	3.1.7-1 各ケースの結果よりベントナイト冠水時刻と最大ベントナイト土圧の関係	3-25
図	3.1.7-2 各ケースの結果よりベントナイト冠水時刻とオーバーパックの最終変位の関係	3-26
図	3.1.7-3 加熱を考慮したケースの上部ベントナイト最内周要素の鉛直応力履歴 (全応力)	3-27
図	3.1.7-4 加熱を考慮したケースの上部ベントナイト最外周要素の鉛直応力履歴 (全応力)	3-27
図	3.1.7-5 加熱を考慮したケースの冠水時上部ベントナイトの鉛直応力分布 (全応力)	3-27
図	3.1.7-6 加熱を考慮しないケースの上部ベントナイト最内周要素の鉛直応力履歴 (全応力)	3-28
図	3.1.7-7 加熱を考慮しないケースの上部ベントナイト最外周要素の鉛直応力履歴 (全応力)	3-28

.....	3-28
図 3.1.7-8 加熱を考慮しないケースの冠水時上部ベントナイトの鉛直応力分布 (全応力)	3-28
.....	3-33
図 3.2.2-1 モンモリロナイト含有率.....	3-33
図 3.2.2-2 陽イオン交換容量のまとめ.....	3-34
図 3.2.2-3 周辺岩盤の粒径加積曲線.....	3-35
図 3.2.2-4 膨潤圧測定に用いた透水試験装置の概要.....	3-36
図 3.2.2-5 膨潤圧測定状況 (供試体下部より給水).....	3-36
図 3.2.2-6 供試体作成時の乾燥密度を変化させた緩衝材の吸水膨張圧力の経時変化.....	3-37
図 3.2.2-7 供試体作成時の乾燥密度を変化させた緩衝材の平衡膨潤圧.....	3-37
図 3.2.2-8 測定プローブの概要	図 3.2.2-9 測定供試体の穿孔状況.....
.....	3-39
図 3.2.2-10 熱伝導率の測定状況.....	3-39
図 3.2.2-11 緩衝材の熱伝導率測定結果.....	3-40
図 3.2.2-12 周辺岩盤の熱伝導率測定結果.....	3-41
図 3.2.2-13 サイクロメータ及び恒温槽.....	3-42
図 3.2.2-14 作成した緩衝材供試体(直径 35mm×高さ 4mm程度).....	3-43
図 3.2.2-15 周辺岩盤供試体 (直径 35mm×高さ 4mm程度).....	3-43
図 3.2.2-16 緩衝材の保水特性.....	3-45
図 3.2.2-17 周辺岩盤の保水特性 (排水過程).....	3-48
図 3.2.2-18 周辺岩盤の保水特性 (吸水過程).....	3-48
図 3.2.2-19 透水試験装置の概要.....	3-49
図 3.2.2-20 変水位透水試験装置.....	3-49
図 3.2.2-21 吸水量と経過時間の関係.....	3-50
図 3.2.2-22 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係.....	3-51
図 3.2.2-23 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係.....	3-51
図 3.2.2-24 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係.....	3-52
図 3.2.2-25 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係.....	3-52
図 3.2.2-26 三軸試験装置を用いた変水位透水試験装置.....	3-53
図 3.2.2-27 変水位透水試験の方法.....	3-53
図 3.2.2-28 加圧力 50kPa 時の透水試験結果.....	3-54
図 3.2.2-29 加圧力 100kPa 時の透水試験結果.....	3-55
図 3.2.2-30 加圧力 100kPa 時の透水係数と供試体作成時の乾燥密度の関係.....	3-56
図 3.2.2-31 透水係数と動水勾配の関係.....	3-56
図 3.2.2-32 周辺岩盤の変水位透水試験結果.....	3-57
図 3.2.2-33 圧密試験装置.....	3-58
図 3.2.2-34 周辺岩盤で実施した圧密試験結果.....	3-59
図 3.2.2-35 含水比条件を変化させた緩衝材の一軸圧縮試験供試体.....	3-60
図 3.2.2-36 緩衝材の一軸圧縮試験状況 (含水比 10%の供試体の例).....	3-60

図 3.2.2-37	含水比条件を変化させた緩衝材（乾燥密度 1.6Mg/m ³ ）の一軸圧縮試験結果	3-61
図 3.2.2-38	含水比条件を変化させた緩衝材（乾燥密度 1.7Mg/m ³ ）の一軸圧縮試験結果	3-62
図 3.2.2-39	含水比条件を変化させた緩衝材（乾燥密度 1.5Mg/m ³ ）の一軸圧縮試験結果	3-63
図 3.2.2-40	飽和度で整理した一軸圧縮強さ、変形係数の関係	3-64
図 3.2.2-41	作成時の初期含水比に着目した一軸圧縮強さ、変形係数の関係	3-65
図 3.2.2-42	一軸圧縮試験装置	3-66
図 3.2.2-43	一軸圧縮試験結果（強制乾燥状態）	3-67
図 3.2.2-44	一軸圧縮試験結果（強制乾燥状態）	3-67
図 3.2.2-45	一軸圧縮試験結果（強制乾燥状態）	3-68
図 3.2.2-46	一軸圧縮試験供試体の状況	3-68
図 3.2.2-47	一軸引張試験装置	3-69
図 3.2.2-48	一軸引張試験後の供試体状況	3-69
図 3.2.2-49	一軸引張試験結果	3-70
図 3.2.2-50	三軸圧縮試験装置	3-71
図 3.2.2-51	緩衝材の三軸圧縮（圧密非排気）試験結果	3-72
図 3.2.2-52	三軸圧縮試験装置	3-73
図 3.2.2-53	周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果（軸差応力～軸ひずみ関係）	3-74
図 3.2.2-54	周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果（体積ひずみ～軸ひずみ関係）	3-75
図 3.2.2-55	周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果（強度特性）	3-75
図 3.2.2-56	軸差応力～ひずみの関係（YTS3-3-1,oc' : 1.5MPa）	3-76
図 3.2.2-57	割線変形係数～軸差応力比の関係（YTS3-3-1,oc' : 1.5MPa）	3-76
図 3.2.2-58	軸差応力～ひずみの関係（YTS3-4-1,oc' : 3.0MPa）	3-77
図 3.2.2-59	割線変形係数～軸差応力比の関係（YTS3-4-1,oc' : 3.0MPa）	3-77
図 3.2.2-60	軸差応力～ひずみの関係（YTS3-4-5,oc' : 5.0MPa）	3-78
図 3.2.2-61	割線変形係数～軸差応力比の関係（YTS3-4-5,oc' : 5.0MPa）	3-78
図 3.2.2-62	軸差応力～ひずみの関係（YTS3-4-6,oc' : 7.0MPa）	3-79
図 3.2.2-63	割線変形係数～軸差応力比の関係（YTS3-4-6,oc' : 7.0MPa）	3-79
図 4.1.3-1	今フェーズにおける遠心力模型実験の実験計画	4-2
図 4.3.1-1	超長期遠心載荷岩盤実験装置の概略図（上）と装置全景（下）	4-8
図 4.3.1-2	18cm 円柱用圧力容器の見取図、（左）立断面、（右）、平断面	4-9
図 4.3.1-3	医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ	4-10
図 4.3.2-1	対象とした処分施設の概要[16]	4-11
図 4.3.3-1	土圧計付発熱型オーバーパットの概要図（左）と実際の模型（右）	4-12
図 4.3.3-2	緩衝材ブロックの断面図、平面図および分割状況	4-14
図 4.3.3-3	緩衝材試料（クニゲル V1、70wt%、混合ケイ砂 30wt%）	4-15

図 4.3.3-4	ベントナイト締固め機（左）、圧縮ベントナイト取出し機（右）	4-15
図 4.3.3-5	作製した緩衝材ブロック一覧	4-17
図 4.3.3-6	岩盤供試体の概略断面図	4-18
図 4.3.3-7	岩盤試料の整形状況	4-19
図 4.3.3-8	ADVANTEC DRK632DB 送風定温乾燥機	4-21
図 4.3.3-9	岩盤供試体へのマーキング状況	4-22
図 4.3.3-10	使用したひずみゲージ、KFG-10-120-C1-11N50C3（上）、QFLA-5T-11-6FB-3LT（下）	4-22
図 4.3.3-11	岩盤試料上端面の加工状況	4-23
図 4.3.3-12	下地剤塗布状況	4-23
図 4.3.3-13	ひずみゲージの貼付状況	4-24
図 4.3.3-14	ひずみゲージ貼付部分へのコーティング状況	4-24
図 4.3.3-15	メンブレンゴムスリーブへの穴開け状況（赤丸部分）	4-25
図 4.3.3-16	KE-45-TS を使用しての止水処理状況	4-25
図 4.3.3-17	ベントナイト貼付用ひずみゲージへのコーティング状況	4-26
図 4.3.3-18	緩衝材ブロックの切断状況	4-26
図 4.3.3-19	緩衝材・模擬オーバーパックの処分孔への設置状況	4-27
図 4.3.3-20	オーバーパックケーブル類埋設状況	4-27
図 4.3.4-1	ステンレスメッシュ貼付状況	4-29
図 4.3.4-2	下部架台への設置状況（Oリング設置済）	4-29
図 4.3.4-3	ひずみゲージのリード線の防水処理状況	4-30
図 4.3.4-4	土圧計リード線の防水処理状況	4-30
図 4.3.4-5	Conax 社製、シーリンググランドへのリード線設置状況	4-31
図 4.3.4-6	sartorius 社製、MW2P1-150FE-L	4-31
図 4.3.4-7	高速スイッチボックスへの結線状況	4-32
図 4.3.5-1	オーバーパックの温度制御	4-34
図 4.3.5-2	実験条件のイメージ図	4-34
図 4.3.5-3	本実験のセンサレイアウト	4-35
図 4.4.1-1	オーバーパックの温度経時変化（温度制御値）	4-37
図 4.4.1-2	模型側面部軸方向ゲージによって計測された温度経時変化	4-38
図 4.4.1-3	模型側面部周方向ゲージによって計測された温度経時変化	4-39
図 4.4.1-4	模型上端部と処分孔壁のゲージで計測した温度経時変化	4-40
図 4.4.1-5	土圧計で計測された圧力と背圧の経時変化	4-42
図 4.4.1-6	ベントナイトの土圧経時変化	4-43
図 4.4.1-7	ギャップセンサで計測された変位経時変化	4-45
図 4.4.1-8	オーバーパックの変位経時変化	4-46
図 4.4.1-9	模型側面部軸方向のひずみ経時変化	4-48
図 4.4.1-10	模型側面部周方向のひずみ経時変化	4-49

図 4.4.1-11	G10T および G12T のひずみ経時変化.....	4-50
図 4.4.1-12	処分孔内のひずみ経時変化	4-51
図 4.4.1-13	ひずみの経時変化と温度変化.....	4-52
図 4.4.1-14	岩盤側面のゲージの応力応答確認.....	4-53
図 4.4.1-15	岩盤上端面のゲージの応力応答確認	4-53
図 4.4.2-1	実験後の含水比計測に使用した試料採取ロッド	4-55
図 4.4.2-2	実験後の採取地点.....	4-56
図 4.4.2-3	緩衝材密度の深度分布	4-56
図 4.4.2-4	緩衝材含水比の深度分布.....	4-57
図 4.4.2-5	緩衝材飽和度の深度分布.....	4-57
図 4.4.3-1	撮影箇所の概要図.....	4-58
図 4.4.3-2	実験前の CT 撮影結果.....	4-59
図 4.4.3-3	実験前の各地点における CT 値	4-60
図 4.4.3-4	CT 画像より構築した実験前の模型の三次元図	4-61
図 4.4.3-5	実験後の CT 撮影結果.....	4-62
図 4.4.3-6	実験後の各地点における CT 値	4-63
図 6.1.1-1	解析モデルの諸元と境界条件.....	6-1
図 6.1.1-2	感度解析モデルの FEM メッシュ図 (1798 要素・1887 節点)	6-2
図 6.1.3-1	解析結果の出力部位と出力位置	6-4
図 6.1.4-1	THM-0 岩盤部分・間隙水圧分布	6-5
図 6.1.4-2	THM-0 岩盤部分・温度分布.....	6-5
図 6.1.4-3	THM-0 岩盤部分・主せん断応力分布	6-5
図 6.1.4-4	THM-0 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-6
図 6.1.4-5	THM-0 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-6
図 6.1.4-6	THM-0 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-6
図 6.1.4-7	THM-0 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-7
図 6.1.4-8	THM-0 ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-7
図 6.1.4-9	THM-0 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-7
図 6.1.4-10	THM-0 鉛直方向の変位時刻歴.....	6-8
図 6.1.4-11	THM-0 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-8
図 6.1.4-12	THM-0 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-8
図 6.1.4-13	THM-0 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-9
図 6.1.4-14	THM-0 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-9
図 6.1.4-15	THM-0 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-9
図 6.1.5-1	THM-1 岩盤部分・間隙水圧分布	6-10
図 6.1.5-2	THM-1 岩盤部分・温度分布	6-10
図 6.1.5-3	THM-1 岩盤部分・主せん断応力分布	6-10
図 6.1.5-4	THM-1 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-11

図 6.1.5-5	THM-1	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-11
図 6.1.5-6	THM-1	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-11
図 6.1.5-7	THM-1	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-12
図 6.1.5-8	THM-1	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-12
図 6.1.5-9	THM-1	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-12
図 6.1.5-10	THM-1	鉛直方向の変位時刻歴	6-13
図 6.1.5-11	THM-1	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-13
図 6.1.5-12	THM-1	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-13
図 6.1.5-13	THM-1	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-14
図 6.1.5-14	THM-1	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-14
図 6.1.5-15	THM-1	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-14
図 6.1.6-1	THM-2	岩盤部分・間隙水圧分布	6-15
図 6.1.6-2	THM-2	岩盤部分・温度分布	6-15
図 6.1.6-3	THM-2	岩盤部分・主せん断応力分布	6-15
図 6.1.6-4	THM-2	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-16
図 6.1.6-5	THM-2	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-16
図 6.1.6-6	THM-2	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-16
図 6.1.6-7	THM-2	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-17
図 6.1.6-8	THM-2	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-17
図 6.1.6-9	THM-2	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-17
図 6.1.6-10	THM-2	鉛直方向の変位時刻歴	6-18
図 6.1.6-11	THM-2	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-18
図 6.1.6-12	THM-2	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-18
図 6.1.6-13	THM-2	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-19
図 6.1.6-14	THM-2	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-19
図 6.1.6-15	THM-2	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-19
図 6.1.7-1	THM-3	岩盤部分・間隙水圧分布	6-20
図 6.1.7-2	THM-3	岩盤部分・温度分布	6-20
図 6.1.7-3	THM-3	岩盤部分・主せん断応力分布	6-20
図 6.1.7-4	THM-3	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-21
図 6.1.7-5	THM-3	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-21
図 6.1.7-6	THM-3	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-21
図 6.1.7-7	THM-3	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-22
図 6.1.7-8	THM-3	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-22
図 6.1.7-9	THM-3	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-22
図 6.1.7-10	THM-3	鉛直方向の変位時刻歴	6-23
図 6.1.7-11	THM-3	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-23
図 6.1.7-12	THM-3	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-23

図 6.1.7-13	THM-3	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-24
図 6.1.7-14	THM-3	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-24
図 6.1.7-15	THM-3	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-24
図 6.1.8-1	THM-4	岩盤部分・間隙水圧分布	6-25
図 6.1.8-2	THM-4	岩盤部分・温度分布	6-25
図 6.1.8-3	THM-4	岩盤部分・主せん断応力分布	6-25
図 6.1.8-4	THM-4	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-26
図 6.1.8-5	THM-4	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-26
図 6.1.8-6	THM-4	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-26
図 6.1.8-7	THM-4	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-27
図 6.1.8-8	THM-4	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-27
図 6.1.8-9	THM-4	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-27
図 6.1.8-10	THM-4	鉛直方向の変位時刻歴	6-28
図 6.1.8-11	THM-4	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-28
図 6.1.8-12	THM-4	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-28
図 6.1.8-13	THM-4	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-29
図 6.1.8-14	THM-4	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-29
図 6.1.8-15	THM-4	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-29
図 6.1.9-1	THM-5	岩盤部分・間隙水圧分布	6-30
図 6.1.9-2	THM-5	岩盤部分・温度分布	6-30
図 6.1.9-3	THM-5	岩盤部分・主せん断応力分布	6-30
図 6.1.9-4	THM-5	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-31
図 6.1.9-5	THM-5	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-31
図 6.1.9-6	THM-5	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-31
図 6.1.9-7	THM-5	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-32
図 6.1.9-8	THM-5	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-32
図 6.1.9-9	THM-5	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-32
図 6.1.9-10	THM-5	鉛直方向の変位時刻歴	6-33
図 6.1.9-11	THM-5	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-33
図 6.1.9-12	THM-5	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-33
図 6.1.9-13	THM-5	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-34
図 6.1.9-14	THM-5	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-34
図 6.1.9-15	THM-5	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-34
図 6.1.10-1	THM-6	岩盤部分・間隙水圧分布	6-35
図 6.1.10-2	THM-6	岩盤部分・温度分布	6-35
図 6.1.10-3	THM-6	岩盤部分・主せん断応力分布	6-35
図 6.1.10-4	THM-6	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-36
図 6.1.10-5	THM-6	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-36

図 6.1.10-6	THM-6	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-36
図 6.1.10-7	THM-6	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-37
図 6.1.10-8	THM-6	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-37
図 6.1.10-9	THM-6	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布.....	6-37
図 6.1.10-10	THM-6	鉛直方向の変位時刻歴.....	6-38
図 6.1.10-11	THM-6	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-38
図 6.1.10-12	THM-6	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-38
図 6.1.10-13	THM-6	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-39
図 6.1.10-14	THM-6	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-39
図 6.1.10-15	THM-6	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-39
図 6.1.11-1	THM-7	岩盤部分・間隙水圧分布.....	6-40
図 6.1.11-2	THM-7	岩盤部分・温度分布.....	6-40
図 6.1.11-3	THM-7	岩盤部分・主せん断応力分布.....	6-40
図 6.1.11-4	THM-7	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-41
図 6.1.11-5	THM-7	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-41
図 6.1.11-6	THM-7	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-41
図 6.1.11-7	THM-7	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-42
図 6.1.11-8	THM-7	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-42
図 6.1.11-9	THM-7	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布.....	6-42
図 6.1.11-10	THM-7	鉛直方向の変位時刻歴.....	6-43
図 6.1.11-11	THM-7	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-43
図 6.1.11-12	THM-7	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-43
図 6.1.11-13	THM-7	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-44
図 6.1.11-14	THM-7	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-44
図 6.1.11-15	THM-7	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-44
図 6.1.12-1	THM-8	岩盤部分・間隙水圧分布.....	6-45
図 6.1.12-2	THM-8	岩盤部分・温度分布.....	6-45
図 6.1.12-3	THM-8	岩盤部分・主せん断応力分布.....	6-45
図 6.1.12-4	THM-8	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-46
図 6.1.12-5	THM-8	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-46
図 6.1.12-6	THM-8	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-46
図 6.1.12-7	THM-8	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-47
図 6.1.12-8	THM-8	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-47
図 6.1.12-9	THM-8	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布.....	6-47
図 6.1.12-10	THM-8	鉛直方向の変位時刻歴.....	6-48
図 6.1.12-11	THM-8	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-48
図 6.1.12-12	THM-8	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-48
図 6.1.12-13	THM-8	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-49

図 6.1.12-14	THM-8	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-49
図 6.1.12-15	THM-8	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-49
図 6.1.13-1	THM-9	岩盤部分・間隙水圧分布	6-50
図 6.1.13-2	THM-9	岩盤部分・温度分布	6-50
図 6.1.13-3	THM-9	岩盤部分・主せん断応力分布	6-50
図 6.1.13-4	THM-9	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-51
図 6.1.13-5	THM-9	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-51
図 6.1.13-6	THM-9	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-51
図 6.1.13-7	THM-9	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-52
図 6.1.13-8	THM-9	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-52
図 6.1.13-9	THM-9	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-52
図 6.1.13-10	THM-9	鉛直方向の変位時刻歴	6-53
図 6.1.13-11	THM-9	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-53
図 6.1.13-12	THM-9	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-53
図 6.1.13-13	THM-9	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-54
図 6.1.13-14	THM-9	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-54
図 6.1.13-15	THM-9	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-54
図 6.1.14-1	THM-10	岩盤部分・間隙水圧分布	6-55
図 6.1.14-2	THM-10	岩盤部分・温度分布	6-55
図 6.1.14-3	THM-10	岩盤部分・主せん断応力分布	6-55
図 6.1.14-4	THM-10	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-56
図 6.1.14-5	THM-10	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-56
図 6.1.14-6	THM-10	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-56
図 6.1.14-7	THM-10	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-57
図 6.1.14-8	THM-10	ベントナイト部分・飽和度分布.....	6-57
図 6.1.14-9	THM-10	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-57
図 6.1.14-10	THM-10	鉛直方向の変位時刻歴	6-58
図 6.1.14-11	THM-10	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正).....	6-58
図 6.1.14-12	THM-10	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正).....	6-58
図 6.1.14-13	THM-10	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正).....	6-59
図 6.1.14-14	THM-10	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正).....	6-59
図 6.1.14-15	THM-10	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正).....	6-59
図 6.1.15-1	HM-0	岩盤部分・間隙水圧分布.....	6-60
図 6.1.15-2	HM-0	岩盤部分・温度分布.....	6-60
図 6.1.15-3	HM-0	岩盤部分・主せん断応力分布.....	6-60
図 6.1.15-4	HM-0	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正).....	6-61
図 6.1.15-5	HM-0	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正).....	6-61
図 6.1.15-6	HM-0	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正).....	6-61

図 6.1.15-7	HM-0	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-62
図 6.1.15-8	HM-0	ベントナイト部分・飽和度分布	6-62
図 6.1.15-9	HM-0	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-62
図 6.1.15-10	HM-0	鉛直方向の変位時刻歴	6-63
図 6.1.15-11	HM-0	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)	6-63
図 6.1.15-12	HM-0	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)	6-63
図 6.1.15-13	HM-0	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)	6-64
図 6.1.15-14	HM-0	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)	6-64
図 6.1.15-15	HM-0	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)	6-64
図 6.1.16-1	HM-1	岩盤部分・間隙水圧分布	6-65
図 6.1.16-2	HM-1	岩盤部分・温度分布	6-65
図 6.1.16-3	HM-1	岩盤部分・主せん断応力分布	6-65
図 6.1.16-4	HM-1	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)	6-66
図 6.1.16-5	HM-1	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)	6-66
図 6.1.16-6	HM-1	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-66
図 6.1.16-7	HM-1	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-67
図 6.1.16-8	HM-1	ベントナイト部分・飽和度分布	6-67
図 6.1.16-9	HM-1	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-67
図 6.1.16-10	HM-1	鉛直方向の変位時刻歴	6-68
図 6.1.16-11	HM-1	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)	6-68
図 6.1.16-12	HM-1	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)	6-68
図 6.1.16-13	HM-1	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)	6-69
図 6.1.16-14	HM-1	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)	6-69
図 6.1.16-15	HM-1	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)	6-69
図 6.1.17-1	HM-2	岩盤部分・間隙水圧分布	6-70
図 6.1.17-2	HM-2	岩盤部分・温度分布	6-70
図 6.1.17-3	HM-2	岩盤部分・主せん断応力分布	6-70
図 6.1.17-4	HM-2	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)	6-71
図 6.1.17-5	HM-2	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)	6-71
図 6.1.17-6	HM-2	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-71
図 6.1.17-7	HM-2	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-72
図 6.1.17-8	HM-2	ベントナイト部分・飽和度分布	6-72
図 6.1.17-9	HM-2	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-72
図 6.1.17-10	HM-2	鉛直方向の変位時刻歴	6-73
図 6.1.17-11	HM-2	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)	6-73
図 6.1.17-12	HM-2	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)	6-73
図 6.1.17-13	HM-2	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)	6-74
図 6.1.17-14	HM-2	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)	6-74

図 6.1.17-15	HM-2	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)	6-74
図 6.1.18-1	HM-3	岩盤部分・間隙水圧分布	6-75
図 6.1.18-2	HM-3	岩盤部分・温度分布	6-75
図 6.1.18-3	HM-3	岩盤部分・主せん断応力分布	6-75
図 6.1.18-4	HM-3	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)	6-76
図 6.1.18-5	HM-3	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)	6-76
図 6.1.18-6	HM-3	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-76
図 6.1.18-7	HM-3	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-77
図 6.1.18-8	HM-3	ベントナイト部分・飽和度分布	6-77
図 6.1.18-9	HM-3	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-77
図 6.1.18-10	HM-3	鉛直方向の変位時刻歴	6-78
図 6.1.18-11	HM-3	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)	6-78
図 6.1.18-12	HM-3	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)	6-78
図 6.1.18-13	HM-3	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)	6-79
図 6.1.18-14	HM-3	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)	6-79
図 6.1.18-15	HM-3	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)	6-79
図 6.1.19-1	HM-4	岩盤部分・間隙水圧分布	6-80
図 6.1.19-2	HM-4	岩盤部分・温度分布	6-80
図 6.1.19-3	HM-4	岩盤部分・主せん断応力分布	6-80
図 6.1.19-4	HM-4	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)	6-81
図 6.1.19-5	HM-4	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)	6-81
図 6.1.19-6	HM-4	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-81
図 6.1.19-7	HM-4	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-82
図 6.1.19-8	HM-4	ベントナイト部分・飽和度分布	6-82
図 6.1.19-9	HM-4	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-82
図 6.1.19-10	HM-4	鉛直方向の変位時刻歴	6-83
図 6.1.19-11	HM-4	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)	6-83
図 6.1.19-12	HM-4	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)	6-83
図 6.1.19-13	HM-4	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)	6-84
図 6.1.19-14	HM-4	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)	6-84
図 6.1.19-15	HM-4	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)	6-84
図 6.1.20-1	HM-5	岩盤部分・間隙水圧分布	6-85
図 6.1.20-2	HM-5	岩盤部分・温度分布	6-85
図 6.1.20-3	HM-5	岩盤部分・主せん断応力分布	6-85
図 6.1.20-4	HM-5	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)	6-86
図 6.1.20-5	HM-5	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)	6-86
図 6.1.20-6	HM-5	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-86
図 6.1.20-7	HM-5	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-87

図 6.1.20-8	HM-5	ベントナイト部分・飽和度分布	6-87
図 6.1.20-9	HM-5	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-87
図 6.1.20-10	HM-5	鉛直方向の変位時刻歴	6-88
図 6.1.20-11	HM-5	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、引張：正)	6-88
図 6.1.20-12	HM-5	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、引張：正)	6-88
図 6.1.20-13	HM-5	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)	6-89
図 6.1.20-14	HM-5	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)	6-89
図 6.1.20-15	HM-5	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)	6-89
図 6.1.21-1	HM-6	岩盤部分・間隙水圧分布	6-90
図 6.1.21-2	HM-6	岩盤部分・温度分布	6-90
図 6.1.21-3	HM-6	岩盤部分・主せん断応力分布	6-90
図 6.1.21-4	HM-6	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)	6-91
図 6.1.21-5	HM-6	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)	6-91
図 6.1.21-6	HM-6	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-91
図 6.1.21-7	HM-6	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)	6-92
図 6.1.21-8	HM-6	ベントナイト部分・飽和度分布	6-92
図 6.1.21-9	HM-6	ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布	6-92
図 6.1.21-10	HM-6	鉛直方向の変位時刻歴	6-93
図 6.1.21-11	HM-6	ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、引張：正)	6-93
図 6.1.21-12	HM-6	ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、引張：正)	6-93
図 6.1.21-13	HM-6	ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)	6-94
図 6.1.21-14	HM-6	ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)	6-94
図 6.1.21-15	HM-6	ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)	6-94
表 2.1.5-1		本研究における3カ年計画の概要	2-8
表 2.1.5-1		平成27年度実施内容の概要	2-9
表 2.4.3-1		第2次取りまとめの解析で使用された軟岩の物性値	2-15
表 3.1.2-1		解析パラメータ一覧 (熱・水)	3-7
表 3.1.2-2		解析パラメータ一覧 (力学)	3-7
表 3.1.4-1		感度解析に使用したパラメータ	3-10
表 3.1.4-2		膨潤計算パラメータ	3-12
表 3.1.5-1		解析ケース番号と内容	3-14
表 3.1.5-2		岩盤クリープモデルの設定パラメータ	3-17
表 3.1.7-1		感度解析結果のまとめ	3-25
表 3.2.1-1		数値解析に連動した要素特性の一覧表	3-31
表 3.2.2-1		混合材料の物理特性 (ベントナイト：クニゲルV1)	3-32

表 3.2.2-2	混合材料の物理特性 (珪砂)	3-32
表 3.2.2-3	ベントナイトのメチレンブルー吸着量及び陽イオン交換容量の測定結果	3-32
表 3.2.2-4	モンモリロナイト含有率	3-33
表 3.2.2-5	ベントナイトの陽イオン交換容量	3-33
表 3.2.2-6	緩衝材の物理特性	3-34
表 3.2.2-7	周辺岩盤の物理特性	3-35
表 3.2.2-8	周辺岩盤の物理特性 (超音波伝播速度測定)	3-35
表 3.2.2-9	土壌熱伝導率測定器の諸元	3-38
表 3.2.2-10	サイクロメータの諸元	3-42
表 3.2.2-11	緩衝材の保水特性	3-45
表 3.2.2-12	周辺岩盤の保水特性 (排水過程)	3-46
表 3.2.2-13	周辺岩盤の保水特性 (吸水過程)	3-47
表 3.2.2-14	加圧力 50kPa 時の透水試験結果	3-54
表 3.2.2-15	加圧力 100kPa 時の透水試験結果	3-55
表 3.2.2-16	凝灰質砂岩の変水位透水試験結果	3-57
表 3.2.2-17	周辺岩盤で実施した圧密試験結果	3-58
表 3.2.2-18	含水比条件を変化させた緩衝材 (乾燥密度 1.6Mg/m ³) の一軸圧縮試験結果	3-61
表 3.2.2-19	含水比条件を変化させた緩衝材 (乾燥密度 1.7Mg/m ³) の一軸圧縮試験結果	3-62
表 3.2.2-20	含水比条件を変化させた緩衝材 (乾燥密度 1.5Mg/m ³) の一軸圧縮試験結果	3-63
表 3.2.2-21	周辺岩盤の一軸圧縮試験結果 (強制乾燥状態)	3-66
表 3.2.2-22	一軸引張試験結果	3-70
表 3.2.2-23	緩衝材の三軸圧縮 (圧密非排気) 試験条件	3-71
表 3.2.2-24	緩衝材の三軸圧縮 (圧密非排気) 試験結果	3-72
表 3.2.2-25	三軸圧縮 (圧密排水) 試験条件	3-73
表 3.2.2-26	周辺岩盤の三軸圧縮 (圧密排水) 試験結果	3-74
表 4.2.1-1	静的場における遠心力場の相似測	4-3
表 4.2.4-1	ニアフィールドで生じる主要な現象と関係する物理量	4-6
表 4.3.3-1	緩衝材ブロック作製に必要なクニゲル V1 とケイ砂の質量	4-14
表 4.3.3-2	作製した緩衝材ブロックの諸元	4-16
表 6.1.2-1	解析ケース一覧	6-3

第1章 研究の目的及び概要

1.1 処分システム工学確証技術開発の背景及び目的

1.1.1 開発の背景

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（ガラス固化体）については、地層処分に向けた取組が行われており、処分技術の信頼性向上に関する基盤技術の開発が、最終処分のサイト選定プロセスを考慮して段階的に実施されている。

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操業期間中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。

処分システム工学確証技術開発（以下、本事業という。）では、上記状況を踏まえ、平成 25 年度から 5 年程度の期間で処分場の操業期間中における人工バリアの製作・施工技術及びモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設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。

1.1.2 本事業の構成

本事業は平成 25 年度から 5 か年の計画として実施している。平成 25 年度に 5 ヶ年の研究計画を策定し調査研究を実施しており、本年度は計画の 3 年目である。本年度より、緩衝材の変形や長期挙動評価手法の構築を目的とした項目が追加された。以下の本事業を構成する 5 つの研究開発テーマを示す。

(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
- 2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
- 3) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
- 4) モニタリング関連技術の整備

(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発

本事業では、これら 5 のテーマごとに詳細な検討を実施するだけでなく、テーマ間の繋がりを意識した研究開発を進め、地層処分事業の操業から閉鎖後長期におよぶ安全機能の確保の方法論の設定に資する知見を提示する。

1.1.3 研究開発項目の相互関係

図 1.1.3-1は本事業が開始された平成 25 年度に作成した処分システム工学確証技術開発の全体概要と検討課題の関連である。

人工バリアを構成する要素には、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材がある。人工バリアに要求される機能はそれぞれが単独で達成できるものではなく、各要素が相互に関連しシステムとしての要求機能を達成するものである。よって一つの人工バリアが機能を満たさなくなれば、人工バリアシステム全体としての安全機能が損なわれる可能性がある。

地層処分の人工バリアは、一般的な構造物とは異なり、定置後の検査や必要に応じた補修を行うことは困難であるから、定置後の検査や補修がなくとも人工バリアの健全性を確保されるよう受動的な安全機能の確保が前提である。そのためには地層処分環境において人工バリアに想定される劣化や破損事象を考慮した設計を行い、製作・検査・施工の個々のプロセスで品質管理を実施する必要がある。そして、各プロセスで品質が確保されていることを判断するための指標が必要である。この指標は人工バリアの長期挙動を考慮した健全性評価により設定される。

一方で、人工バリアの設計のための地質環境条件の取得、定置された人工バリアが所定の性能を発揮していることを示すための性能確認プログラムの一環、建設操業による周辺環境の変遷の評価や評価の基準となるベースラインの取得などを目的とした状態把握技術も地層処分事業では重要な役目を担う。そのためには人工バリアの健全性評価と把握すべきパラメータを相互に共有して検討を進める必要がある。

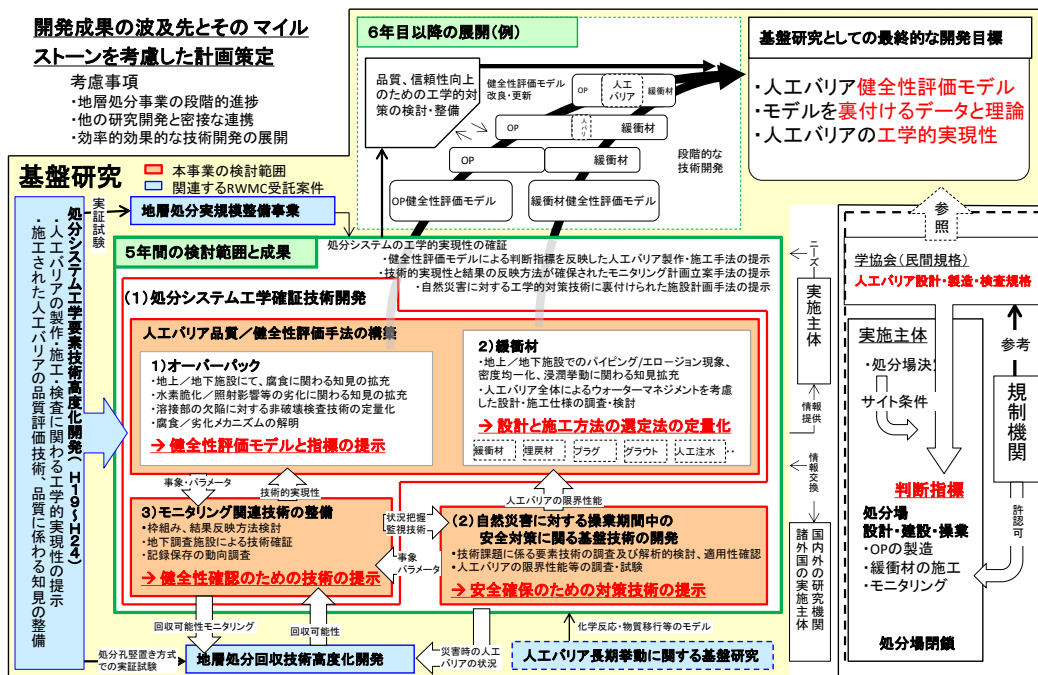


図 1.1.3-1 処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係[1]

1.1.4 平成27年度の実施内容

本事業において平成25年度に立案した5か年計画の3年目として、以下の研究開発を実施する。

(1) 処分システム工学確証技術開発

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、種々の判断のための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を行う。また、モニタリング技術の整備の一環として地下研究施設での適用性確認等を行う。

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

平成26年度は、地上及び地下研究施設でのオーバーパック溶接部耐食性評価試験を開始するとともに、耐食性におよぼす溶接組織の影響を評価するための知見を電気化学試験により取得した。また、計算コードを用いてオーバーパックへのガラス固化体からの照射線量を取得するとともに、オーバーパックの脆化が、長期健全性に影響するか否かを判断するための方法について検討した。さらに、材料の欠陥については、非破壊検査による欠陥寸法測定精度向上に関する検討を実施した。

平成27年度は、地下研究施設を活用したオーバーパック溶接部耐食性試験を継続実施するとともに、機械的強度に対する材料劣化や溶接欠陥を考慮した健全性評価手法について検討を実施する。また、緩衝材との境界条件を考慮したオーバーパックの健全性評価に関する検討を実施する。さらに、腐食評価と構造評価を合わせて、オーバーパックの健全性確保のための判断指標の具体化を進める。

2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材

平成26年度は、地下研究施設および地上でのパイピング／エロージョンに関する試験を開始し、塩水環境下における緩衝材の密度分布の残留現象、パイピング／エロージョン現象を定量的に評価するとともに、平成25年度に検討したパイピング／エロージョンに対する工学的対策の有効性を検討した。その結果に基づき、人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に資するデータを整備した。

平成27年度は、再冠水時の処分環境を考慮した緩衝材の挙動評価のために、これまでに実施されている地上での試験結果などと比較しつつ、地下研究施設を活用した試験データに基づく緩衝材の流出等の挙動及び工学的対策の効果について検討を行う。また、緩衝材の設計・施工仕様の策定に資する判断指標の具体化に向けて検討を進める。

3) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築

平成27年度より3年間で実施する。実施目的・内容は、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築のため、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力模型実験と数値解析を通じ、数値解析手法・実験結果の妥当性や実験データの取得方法を検討することである。

平成27年度は先ず3ヵ年の研究開発計画を策定する。数値解析については長期挙動を評価するための熱－力学－水理連成解析コードを用いて、次年度以降実施する長期挙動を考慮

した数値解析に先立ち、パラメータの感度解析と要素試験を通じ必要な解析パラメータの取得を行う。遠心力模型試験については、策定した試験計画に基づいて試験を実施する。

4) モニタリング関連技術の整備

平成26年度は、バリア性能の確認に対するモニタリング結果の反映方法について検討を実施するとともに、操業期間中の安全性および廃棄体の回収可能性に関連するモニタリングについて検討を実施した。また、研究開発成果や文献調査結果を反映する技術メニューについて、見直しを含む整備を実施した。さらに、地中無線モニタリング技術については、地下研究施設における適用試験等を実施し、技術的成立性を実証した。記録保存に関しては、引き続きOECD/NEAにおける検討状況の調査を継続実施した。

平成27年度は、人工バリアの健全性に関わる状態の把握・確認について、調査研究計画の更新を行う。人工バリアの健全性に対する信頼性を向上させるため、適用技術に関する整理を行うとともに、地中無線モニタリング技術について地下研究施設における適用性試験等を継続して実施し、埋設後の状態把握の実現に向けた検討を実施する。さらに、記録保存に関して引き続きOECD/NEAにおける検討状況の調査を実施する。

(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

平成26年度は、処分パネルの解析モデルによる気流解析及び避難シミュレーション解析を実施し、火災事象等に対する安全確保対策の検討にあたっての解析的手法の適用性等を検討し、火災事象等に対する安全確保対策の検討課題を整理した。また、火災等により高温履歴を受けた人工バリア材料の力学的な物性値実験により取得し、また津波被害を想定したキャニスタの腐食評価のための温度条件を解析により取得した。

平成27年度は、平成26年度までに行った解析及び検討の結果に基づき、操業安全に関わる施設計画技術については、抽出された課題に対する具体的な対応策の検討と取りまとめを行う。また、自然災害等による人工バリアへの影響については、想定した災害事象に対する評価手法についての適用性の検討と整理を行う。

1.2 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築

人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築のため、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力模型実験と数値解析を通じ、数値解析手法・実験結果の妥当性や実験データの取得方法を検討する。

平成27年度は長期挙動データ（数百年相当）を取得するための研究開発計画を策定する。数値解析については長期挙動を評価するための熱-力学-水理連成解析コードを用いて、次年度以降実施する長期挙動を考慮した数値解析に先立ち、パラメータの感度解析と要素試験を通じ必要な解析パラメータの取得を行う。遠心力模型試験については、策定した試験計画に基づいて試験を実施する。

第 1 章の参考文献

- [1] (公財) 原環センター、平成 25 年度処分システム工学確証技術開発 報告書 (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、平成 26 年 3 月、

第2章 研究計画の策定

2.1 全体計画

2.1.1 概要

高レベル放射性破棄物処分において、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を実施している[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、検討を実施している。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は、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把握・評価することが可能であるが、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により評価する手法が一般的に用いられている。一方、解析結果は実験データによって検証することで妥当性や信頼性を裏付けることが必要である。

このような背景を受け、本事業では以下の項目を目的に据えた。

- ・周辺岩盤も含めた人工バリア挙動の評価
- ・数値解析による長期挙動の把握
- ・数値解析結果を検証するための実験データの取得
- ・人工バリアの変形を対象とした長期挙動評価手法の構築

本研究で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、実験と数値解析を通じ、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することを目的とした。検討においては、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、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力模型実験に着目し、検証データを整備する。

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起こる現象から検討対象を抽出した。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が挙げられる。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、処分孔縦置き定置方式の場合、処分坑道埋戻材の上載圧などが挙げられる。水の作用として周辺岩盤からの地下水の浸潤が挙げられる。試験孔1つに着目したこれらの作用の関係を（図 2.1.2-1）[2]に示す。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。

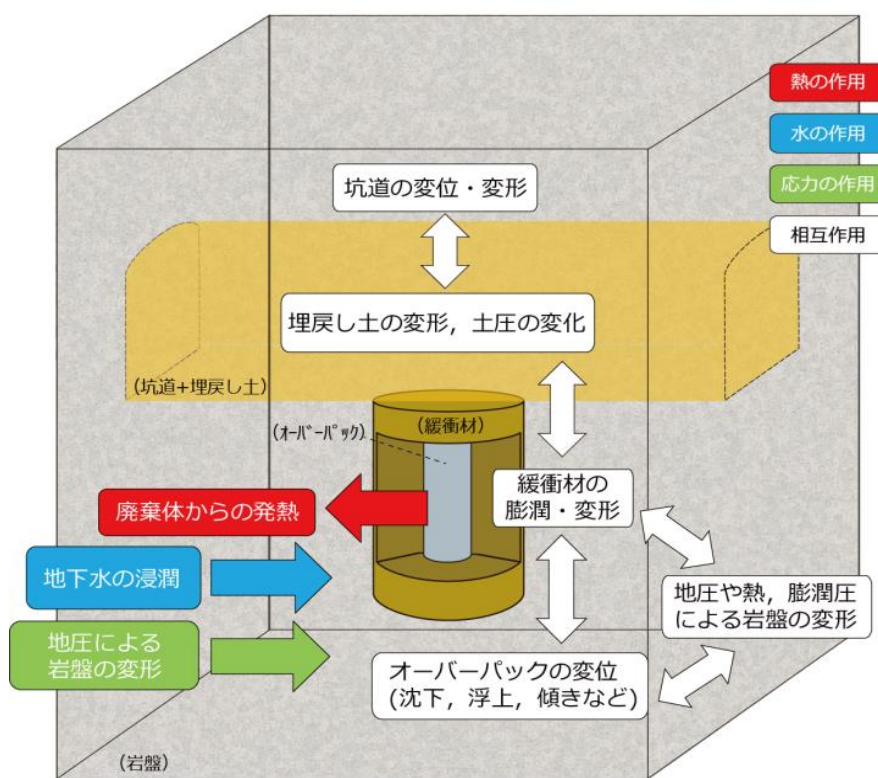


図 2.1.2-1 ニアフィールドで生じる諸現象の概略図

(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。また水の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、水との相互作用による力学的な現象が進行すると考えられる。一方、数百～数千年の超長期間では、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的な現象が生じると考えられる。性能評価では数千年単位の超長期の挙動評価も対象と

する一方、超長期の評価においても初期に優位な力学的現象が将来の状態設定にどのように影響するか、評価する必要がある。

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図 2.1.2-2 に示す。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。

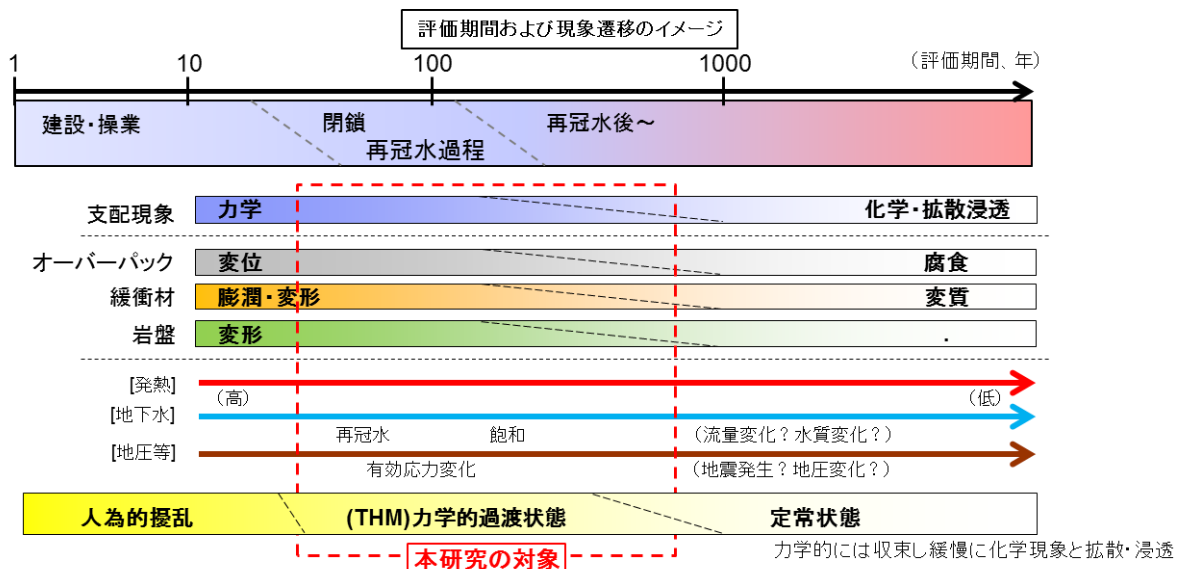


図 2.1.2-2 本研究における評価期間および支配現象・現象遷移の概念図

(3) 検討の対象とする現象と時間スケールの設定

本事業で検討対象としている人工バリアのうち、オーバーパ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、「人工バリア品質／健全性評価手法の構築 - オーバーパック」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は、配合（ベントナイト：ケイ砂＝7：3）、密度（1.6Mg/m³）、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、本事業で別途実施している「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、遠心力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、本検討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： 遠心力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、オーバーパックスの移動量（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スに変位が生じ、逆にその変位により緩衝材の厚みが増加す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スの変位、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ス、緩衝材、周辺岩盤において、オーバーパックスの変位、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 に模式図を示す。

- ① 応力：埋戻し圧・上載圧（オーバーパックスの鉛直変位量、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に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、遠心力模型実験では相似則上、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、今フェーズ（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、研究を実施する。

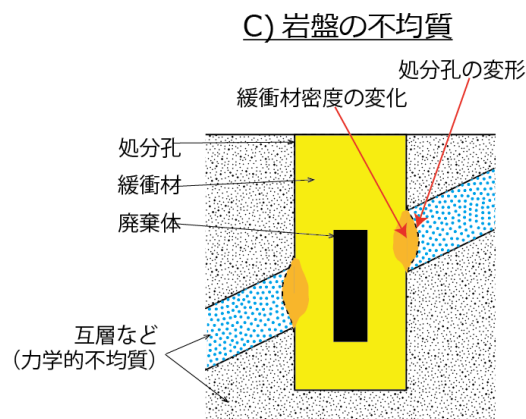
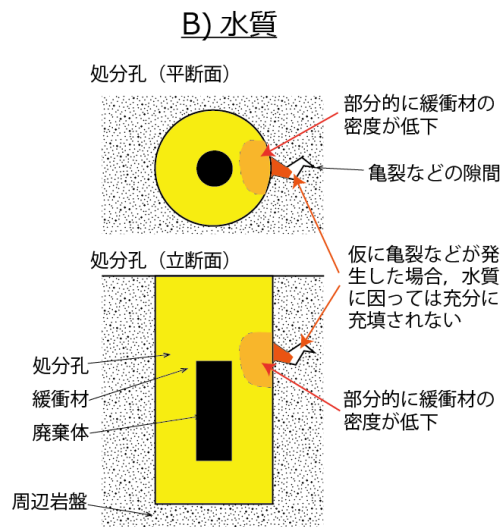
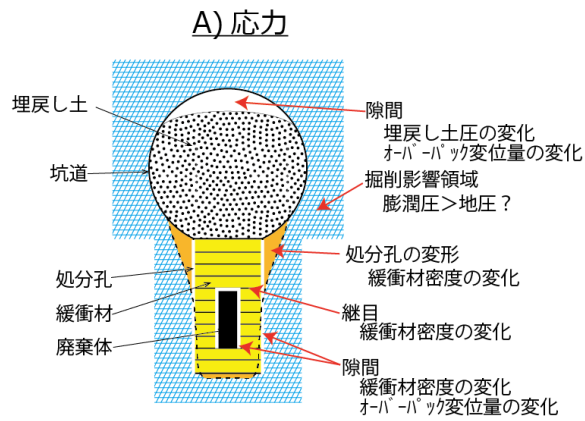


図 2.1.3-1 人工バリアの長期挙動に影響を与える主要な環境因子の概念図

2.1.4 着眼点

2.1.1 に述べたように、本検討では力学的な作用による変形挙動の取得だけではなく、長期健全性評価技術の検証手法の構築も目的の一つである。このため前述の観点から、ほぼ均一な系を対象とした閉鎖後の長期健全性評価の検証手法の骨子および遠心力模型実験の結果（検証データ）を提示することを平成 29 年度までの目標に設定した。そのため、検証手法構築のための以下に示す項目を3カ年の研究計画の策定における着眼点とした。

- ① 人工バリアの長期健全性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。
- 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力模型実験を実施して得る。
- 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。このため遠心力模型実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、遠心力模型実験は数値解析の検証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 数値解析の入力値の不確実性の低減のため、模型実験に使用する材料のデータを要素実験で取得、数値解析に入力し再現解析を実施する（図 2.1.4-1）。
- ⑦ 本研究における数値解析の高精度化は、パラメータの感度による不確実性に着目する（構成則等の修正・改良などの「評価技術」（数値解析コード）そのものの高精度化は「検証手法」の構築とは別途、本研究以外において検討するものとする）。
- ⑧ 数値解析と遠心力模型実験の結果を比較し解析コードを検証し、長期健全性評価技術の構築に資する。

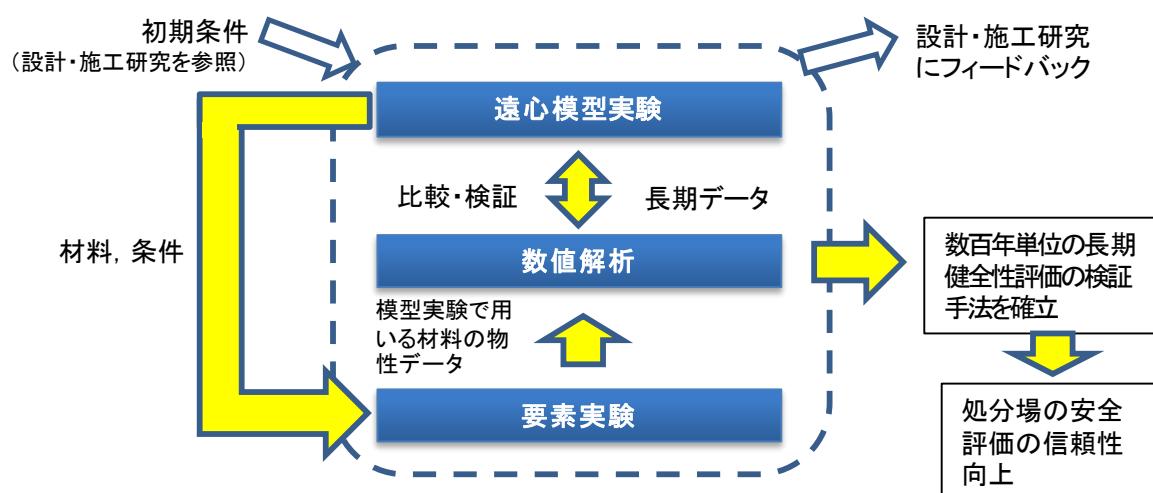


図 2.1.4-1 長期挙動評価における不確実性低減のための概念図

2.1.5 3カ年の全体研究計画

本研究における3カ年計画について、表 2.1.5-1 に示す。なお策定した計画は随時更新し、成果をよりよいものとするPDCAサイクルを回して進めていくものとする。

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			
全体計画	<ul style="list-style-type: none"> モデル実験における加速対象の設定 モデル実験で目指す加速期間の設定 研究計画の立案 	<ul style="list-style-type: none"> モデル実験による加速試験結果と数値解析結果の比較 	<ul style="list-style-type: none"> モデル実験による加速試験結果と数値解析結果の比較 取りまとめ
長期健全性評価技術(力学)の検証手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> 長期挙動 評価検証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"> 検証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"> モデル実験と数値解析の比較検討からの考察 検証手法の骨子の作成
(2) 数値解析			
①数値解析による感度解析	<ul style="list-style-type: none"> 本解析に先き立つ感度解析(2次元)の実施 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型実験の解析(事前解析を含む) 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型実験の解析(事前解析を含む)
②数値解析と連動した要素試験	<ul style="list-style-type: none"> パラメータの取得実験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> パラメータの取得実験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> パラメータの取得実験の実施
(3) 遠心力模型実験			
遠心力模型実験による長期挙動評価	<ul style="list-style-type: none"> 遠心力模型実験の実施 縮尺模型の材料選定、設計 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心力模型実験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心力模型実験の実施
各年度の成果目標	<ul style="list-style-type: none"> 検証手法骨子の提示に向けた課題の抽出・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 遠心力模型実験による加速データの取得 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心実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 検証手法適用における課題の提示 	<ul style="list-style-type: none"> 検証手法の骨子の提示

2.2 平成 27 年度の実施内容

表 2.2-1 に平成 27 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。

本年度は遠心力模型実験による長期挙動を想定したデータを取得するための研究計画を策定し、策定した試験計画に基づいて実験を実施した。

数値解析手法による人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価に先立ち、数値解析コードのパラメータスタディによる感度解析を行った。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、要素実験で取得するための手法の整理を行い、実験を実施した。

数値解析の長期挙動評価の検証に使用する遠心力模型実験を行い、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た。

表 2.2-1 平成 27 年度実施内容の概要

実施項目		第2四半期			第3四半期			第4四半期			
		7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
(1) 試験計画の立案等											
研究計画	3カ年	■									
	当年度	■									
	既往成果調査・検討、評価手法検討 取りまとめ	■						■			
(2) 数値解析											
① 数値解析による感度解析	重要パラメーターの整理	■									
	解析モデルの検討	■									
	感度解析	■									
② 感度解析と連動した要素試験	既往文献の調査・検討	■									
	パラメーター取得要素実験	■									
(3) 遠心力模型実験											
遠心力模型実験による長期挙動評価	模型材料の検討	■									
	実験条件の検討	■									
	長期実験				■						

2.3 長期挙動評価の検証手法の構築

2.1 では本研究の当面の計画として平成 27 年度～29 年度の 3 カ年の全体計画の概要を述べた。2.1.1 に述べたように、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価に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を検証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、遠心模型実験と数値解析を通じ、熱・水理・力に関わる THM 連成挙動の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することを目的とした。

そして今フェーズ（平成 27 年度～29 年度）の目標を、ほぼ均一な系を対象とした閉鎖後の長期挙動の評価手法の骨子および遠心実験結果（検証データ）の提示とした。そして最終的な目標を、施工品質や周辺環境要因を考慮した、長期挙動の解析的検討に対する検証手法、検証データの提示とした。

本節では、処分システムの実現に向けた本研究の意義、および本研究で提示しようとする長期挙動の評価手法の骨子ないし長期挙動の解析的検討に対する検証手法についてその概念を述べる。

2.3.1 処分システムの実現に向けた本研究の意義

図 2.3.1-1 将来変遷の概念と本研究の対象期間には、縦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[3]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、OP（オーバーパック）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主たる部分は、力学的に安定したあと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な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、いわば安全評価が対象とする期間の初期値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。処分場を設計し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ためには、将来評価に有効と考えられる遠心手法も用いた検討は大いに助けになるはずである。すなわち、本研究では 1 章と図 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、安全評価が対象とする期間の初期値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するということである。安全評価が対象とする期間の初期値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の向上を図る。

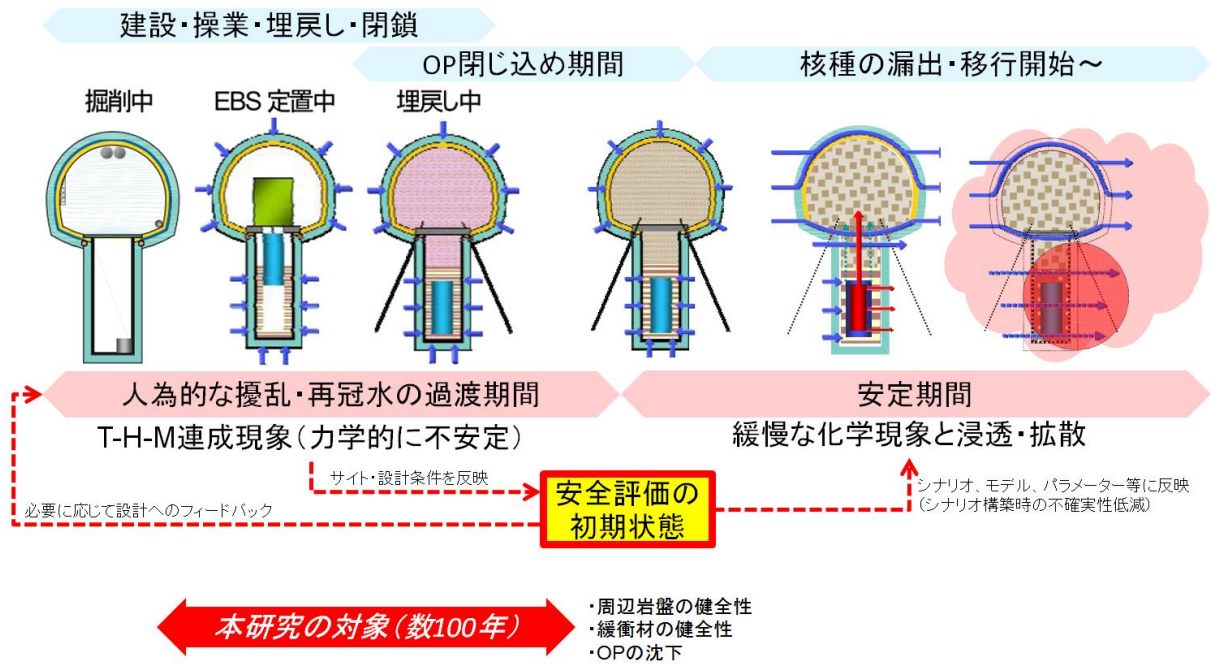


図 2.3.1-1 将来変遷の概念と本研究の対象期間

2.3.2 長期挙動の解析的検討に対する評価手法

人工バリアの長期挙動の評価を、解析手法による数値評価と、実験的手法による検証を踏まえて総合的に評価する手法を構築することが目的の一つである。この概念を図 2.3.2-1 に示す。

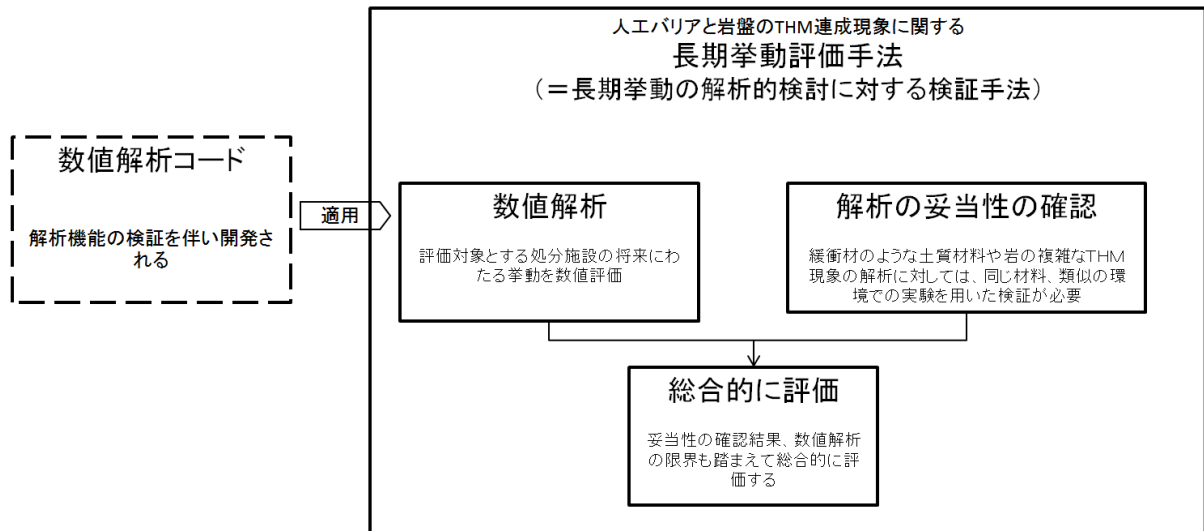


図 2.3.2-1 長期挙動の評価手法の概念

図 2.3.2-2 に、上に述べた長期挙動の評価を検討対象のサイトに対して行うことを想定して、その実施のフロー例を示す。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る。次には、用いようとする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検証するために、サイトの岩盤試

料を用いた THM 連成実験が行われる。THM 連成解析コードは解析機能の検証を伴いつつ開発された複数のものが検討されると考えられる。また THM 連成実験としては、精密調査用の坑道で行う実規模実験や本研究で用いる遠心载荷模型実験、さらに THM 連成の要素現象に着目したその他の実験が一般に考えられる。これら THM 連成実験を用いようとする複数の THM 連成解析コードで数値的にシミュレーションし実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岩盤に則して確認する。支保に用いられている鋼材などの力学現象は解析コードとして検証されていれば、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。このような問題に対しては、同じ材料、類似の環境での実験を用いた検証が必須である。

数値解析の妥当性の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る。

なお、このフローによる THM に関する長期挙動の評価のためには、それ以前に THM 数値解析手法の開発も行っていく必要がある。数値解析手法の持つ個別の機能などについては開発段階に検証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手法の個別機能の検証を伴った開発のためにも、本研究が着目する遠心载荷模型実験は大いに役立つと考えられる。

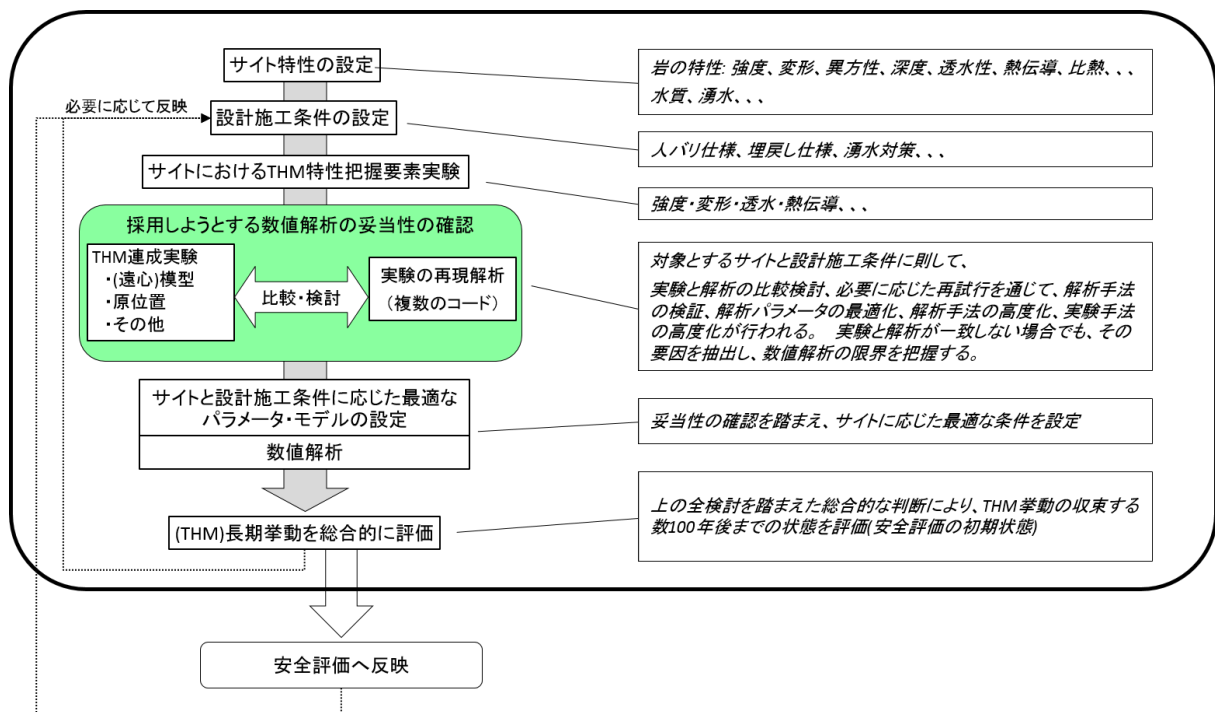


図 2.3.2-2 対象サイトに対する THM の長期挙動評価のフロー (例)

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ことが一般に考えられる。

ニアフィールドの長期挙動評価における主な評価項目は以下のものが挙げられる。

- 廃棄体容器の緩衝材中の移動・沈下
- 水位分布／冠水時期の評価
- 温度分布の評価
- 岩盤の健全性（孔壁破壊など）の評価
- 緩衝材の健全性（均一性、流出など）の評価
（流出：亀裂への浸入、縦置きでの坑道への膨出など）

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。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[5]。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く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。緩衝材の健全性では、岩盤亀裂を通じた緩衝材流出や縦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。

これらの評価項目には、まずサイト条件（地圧、岩の特性、水質など）が影響する。また、バリア設計施工条件（人工バリア仕様や施工条件）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も、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。

本検討で取り組む遠心力模型実験手法だけで、上に挙げた評価項目を十分に検討しうるものではないかも知れない。評価項目によっては別の手法も併用するなどのことが考えられる。本検討では特に遠心力模型実験による時間縮尺の特長を生かした検討を行う。人工バリア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、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を提示していくことを目指すものである。

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力模型実験について、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。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、遠心力模型実験における共通の材料、条件について示す。なお数値解析については、本年度の実施内容がパラメータスタディによる感度解析であること、共通の材料に関する必要な物性値がそろっていないことから、次年度以降の再現解析での適用となる。

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。）で開発されてきている 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）[4]を用いた。解析コードの詳細は「3.1.2 解析コードの概要」に示す。

2.4.2 遠心力载荷試験装置

検証データを取得するための遠心力模型模型試験は、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。図 2.4.2-1 に装置のイメージを示す。詳細については「4.3.1 実験設備」に示す。

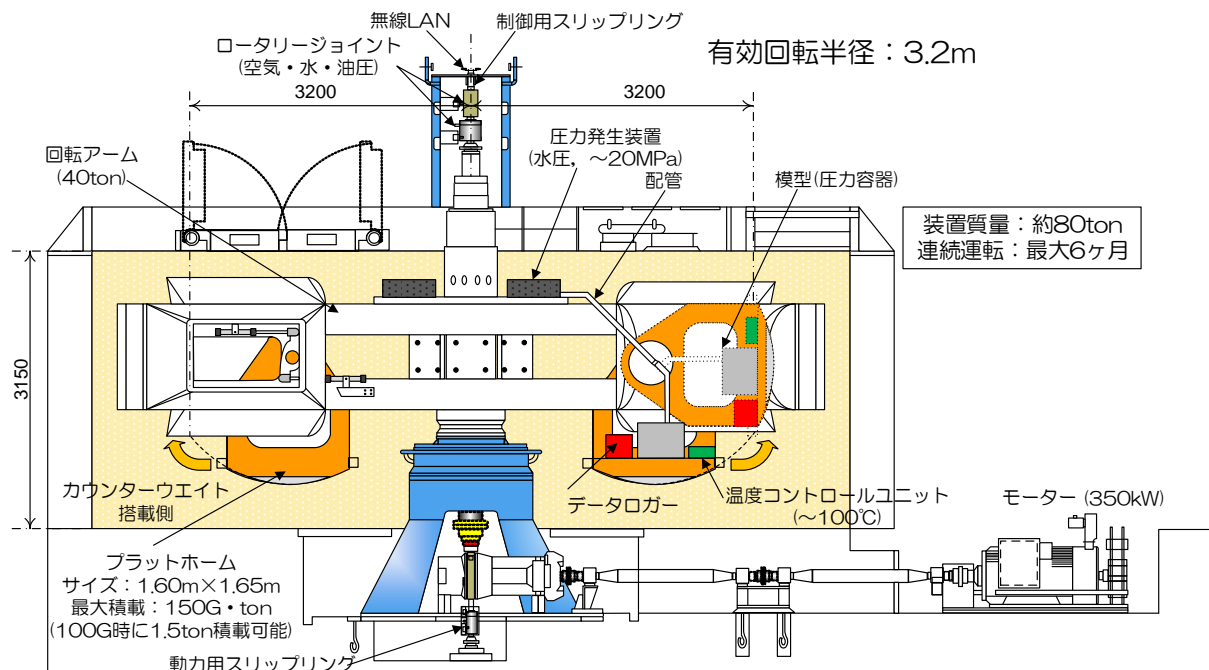


図 2.4.2-1 超長期遠心载荷岩盤実験装置のイメージ

2.4.3 材料

数値解析のパラメータを取得するための要素実験、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]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/m³ 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2mm以下とした。初期含水比は10%程度、膨潤後の平均乾燥密度を1.60Mg/m³とする。

(3) 岩盤

2.1.2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種類の軟岩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。

表 2.4.3-1 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

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）。エラー! 参照元が見つかりません。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、褐灰色を呈し、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。

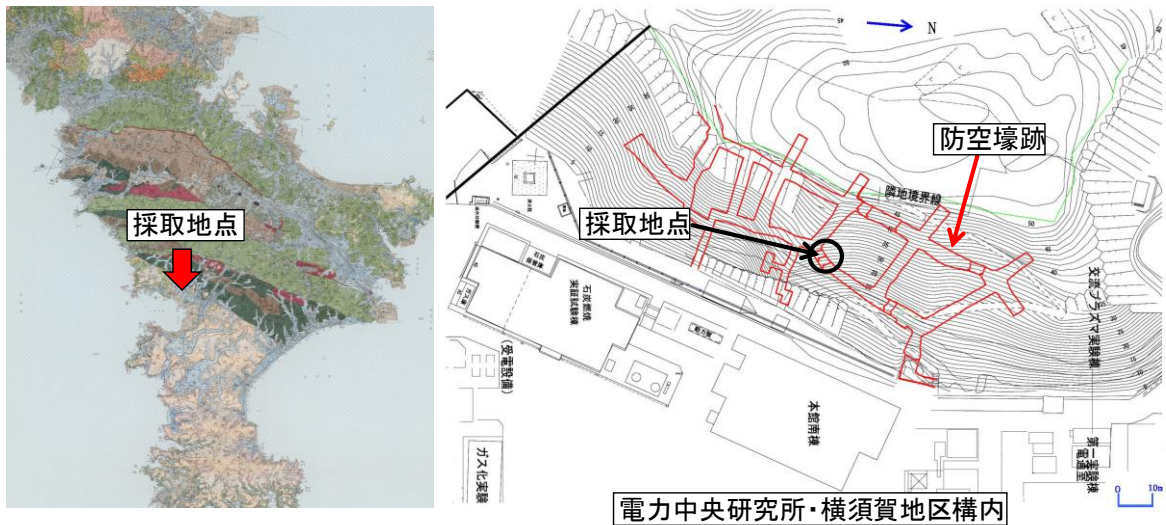


図 2.4.3-1 岩盤サンプリング箇所。(左) 三浦半島の 5 万分の 1 表層地質図、(右) サンプリングを行った電力中央研究所・横須賀地区構内図

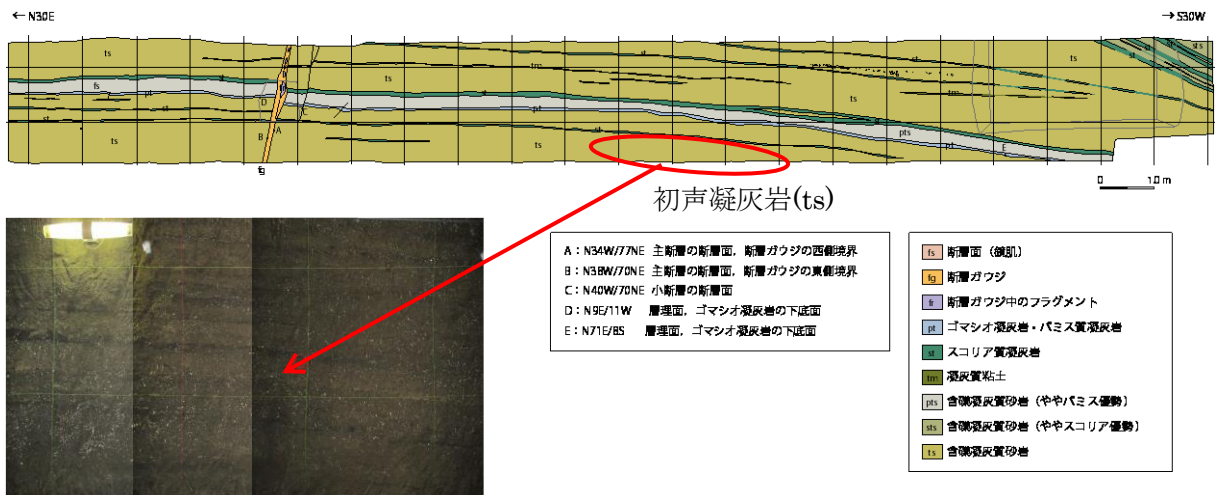


図 2.4.3-2 防空壕内で実施した地質観察図

2.4.4 試験対象

遠心力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、坑道埋戻材、処分孔、処分坑道である。処分孔縦置き定置方式の方が構成要素が多く、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。

(2) 境界条件

遠心力模型試験における試験条件の設定や、数値解析における境界条件を以下のように設定した。境界条件のイメージを図 2.4.4-1 に示す。

1) 応力

HLW 第2次取りまとめにおける処分坑道の支保工厚の概略検討において、SR-C 相当の岩盤自体の支持力で処分坑道が安定して支保工が不要な深度として 400m が設定されている[6]。岩盤の密度を 2.0Mg/m³ とした場合、地圧（土被り）は 8MPa に相当する。

2) 間隙水圧、水質

水の密度を 1.0Mg/m³ とした場合、深度 400m における間隙水圧は 4.0MPa に相当する。実験では水位の回復を考慮して、処分孔下方より再冠水する状況を模擬する。本研究の実験条件では、深度 400m を処分坑道床面（処分孔上端面）とする。本検討では化学影響は考慮しないため、実験における間隙水は蒸留水を使用する。

3) 温度（図 2.4.4-2）

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]。遠心力模型実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 Cxin 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℃）。

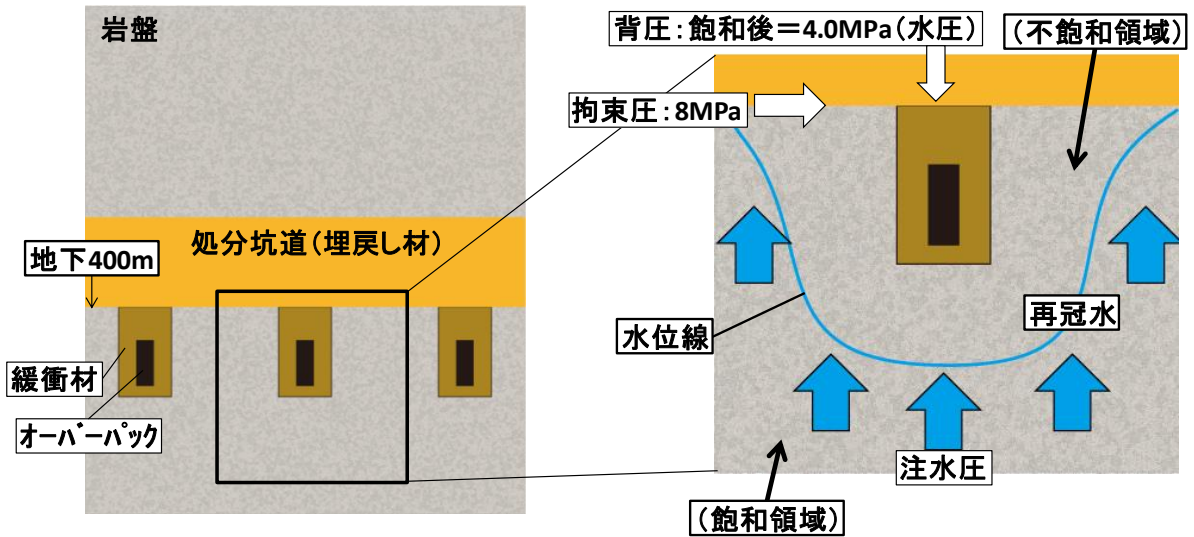


図 2.4.4-1 本研究で想定する境界条件の概念図

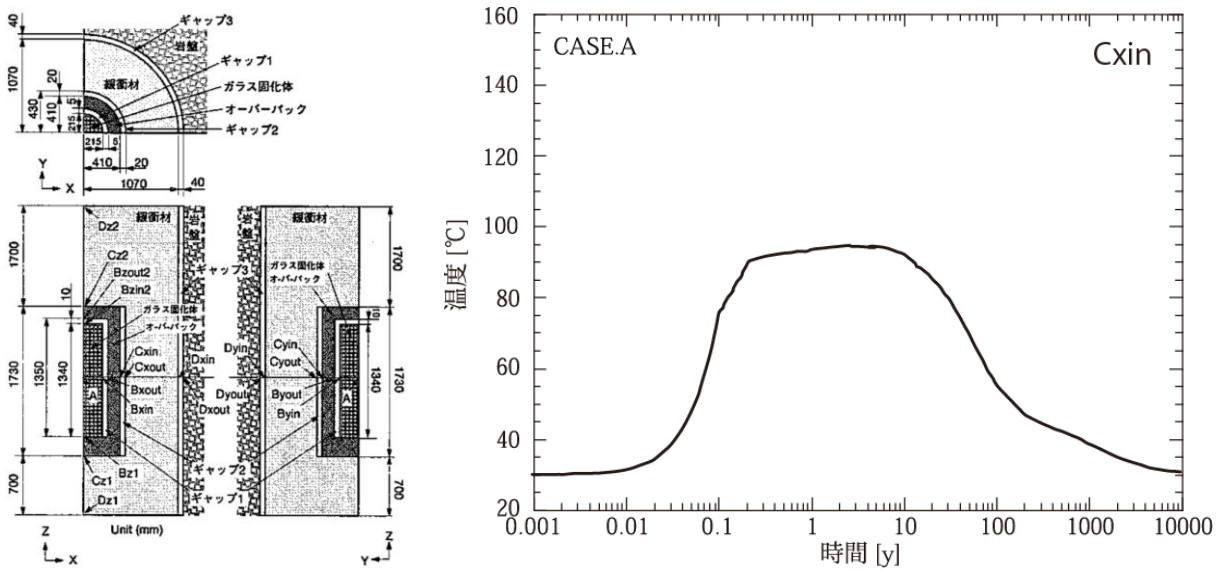


図 2.4.4-2 遠心力模型実験で想定するオーバーパックの温度条件（経時変化） [6]

第2章 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 原子力発電環境整備機構：概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化（その2）－NUMO-JAEA 共同研究報告書（2012年度）－，原子力発電環境整備機構 技術報告書，NUMO-TR-13-06，2013.
- [4] 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書，N05028 2006.
- [5] SKB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Volume II, Technical Report TR-11-01, 2011.
- [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－ 分冊2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-22, 1999.

第3章 数値解析

3.1 感度解析

3.1.1 背景・目的

(1) 背景

人工バリア定置後は、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）がニアフィールドで発生する。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。

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。遠心力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できる[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。

(2) 実施内容

今年度の数値解析は長期挙動評価において重要となるパラメータの抽出を目的とし、ニアフィールドの THM 連成現象の材料パラメータや境界条件に対する感度解析を実施した

3.1.2 解析コードの概要

本研究では電中研で開発された「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）」を解析コードとして使用した。LOSTUF は熱・水・応力（THM）連成解析コード[2]である。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、以下に示す。

(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 らの報告[4]を参考に導出されている。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。

地下水の連続式から以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} & \rho_l S_l \frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t} + \{\rho_{l0} \phi S_l \beta_{Pl} + (\rho_l - \rho_v) C_{lP} + \rho_l C_{vP}\} \frac{\partial P_l}{\partial t} - (\rho_{l0} \phi S_l \beta_{Tl} - \rho_l C_{vT}) \frac{\partial T}{\partial t} \\ & + \nabla \cdot \left\{ \left(-\rho_l \frac{\mathbf{k} k_{rl}}{\mu_l} - \rho_l D_{pv} \mathbf{I} \right) \nabla P_l \right\} + \nabla \cdot \{ (-\rho_l D_{Tv} \mathbf{I}) \nabla T \} = Q_B + \nabla \cdot \left(\rho_l \frac{\mathbf{k} k_{rl}}{\mu_l} \mathbf{g} \right) \end{aligned} \quad 3-1$$

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 は間隙率、 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} 、間隙水圧 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 は間隙水圧 P_l と間隙ガス圧 P_g により、

$$s = P_g - P_l \quad 3-2$$

と定義される。さらに LOSTUF では間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 C_{lP} は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。

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

$$C_{vT} = \frac{\phi S_g}{\rho_l} \frac{\partial \rho_{vS}}{\partial T} RH - \frac{\phi S_g P_l}{\rho_l^2 R_v T^2} \quad \text{b}$$

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（ $= 461.5 \text{ J/kg K}$ ）、 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。

$$q_{rv} = -D_v I \nabla \rho_v \quad 3-4$$

ここで、 D_v は水蒸気の分散係数であり、

$$D_v = \phi S_g \tau D_m \quad 3-5$$

と書ける。 τ は屈曲度を表す。 D_m は大気圧下での水蒸気の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。

$$D_m(\text{m}^2/\text{s}) = 2.16 \times 10^{-5}(T/273)^{1.8} \quad 3-6$$

水蒸気の密度 ρ_v は以下のように書ける。

$$\rho_v = \rho_{vS}(T)RH = \rho_{vS} \exp\left(\frac{P_l}{\rho_l R_v T}\right) \quad 3-7$$

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 3-4 内の水蒸気密度の勾配は式 3-7 を用いて次のように展開できる。

$$\mathbf{q}_{rv} = -\rho_l(D_{Pv}\mathbf{I}\nabla P_l + D_{Tv}\mathbf{I}\nabla T) \quad 3-8$$

ここで、

$$D_{Pv} = \frac{D_v \rho_v}{\rho_l^2 R_v T} \quad 3-9a$$

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

である。

式 3-1 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。

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

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。

$$\lambda_m = S_l\lambda_{sat} + (1-S_l)\lambda_{dry} \quad 3-11$$

$$(\rho c)_m = \phi S_l \rho_l c_l + (1-\phi)\rho_s c_s \quad 3-12$$

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 3-10 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。

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - I\bar{P} \quad 3-13$$

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、

$$\bar{P} = \chi P_l + (1 - \chi)P_g = \chi P_l \quad 3-14$$

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。模型実験に用いるベントナイト、岩石は非常に大きなサクションを持つ材料であるため、サクションを独立な応力成分とした。不飽和段階においてサクショ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た力学構成式は以下ようになる。

$$d\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D}:(d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}_T) = \mathbf{D}:(d\boldsymbol{\varepsilon} - I\boldsymbol{\beta}_{TD}dT) \quad 3-15$$

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 3-13 および式 3-15 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。

$$\nabla \cdot \left\{ \mathbf{D} : \frac{\partial(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^{tr})}{\partial t} \right\} + \nabla \cdot \left(-I\chi \frac{\partial P_l}{\partial t} \right) + \nabla \cdot \left\{ (-\mathbf{D} : I\boldsymbol{\beta}_{TD}) \frac{\partial T}{\partial t} \right\} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{g}) + \mathbf{F}_B \quad 3-16$$

ρ_m は地盤の湿潤密度、 \mathbf{F}_B は外力ベクトルである。式 3-16 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。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。

(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示す。

緩衝材の膨潤圧は、有効粘土密度の関数として表され、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。

$$\sigma_m = f(\varepsilon_{smax}) \quad 3-17$$

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 3-17 をグラフで表したものが図 3.1.2-1 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 3-17 により算出される。また、間隙水圧の上昇（負値～ゼロ、サクシヨンの低下）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} は次式より算出される。

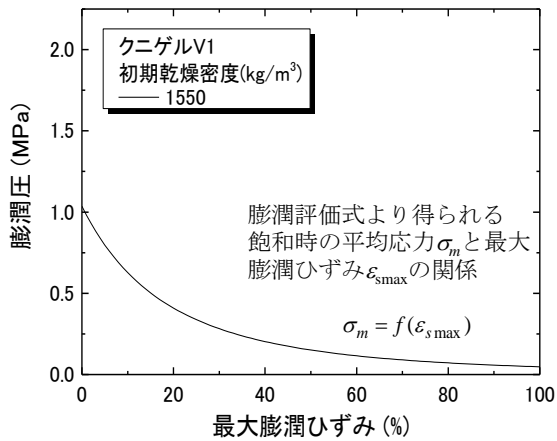
$$\omega_{smax} = \varepsilon_{smax} \left(\frac{|P_l - P_{l0}|}{|P_{l0}|} \right)^l \quad 3-18$$

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} の値が決まるようにされている。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、応力が計算される。計算された体積ひずみを累積膨潤ひずみ ε_{aw} とする。

$$\mathbf{F}_p = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D}(\omega_{smax} - \varepsilon_{aw}) \mathbf{I} dV \quad 3-19$$

ここで、 \mathbf{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、応力が計算される。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 3.1.2-1 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されている。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 3-17、図 3.1.2-1 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[5]から設定されている。



不飽和段階での最大膨潤ひずみ ω_{smax}

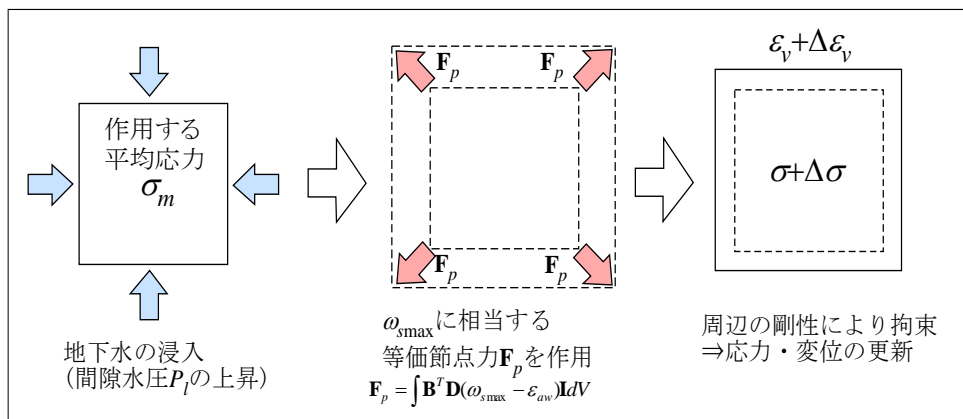
$$\omega_{smax}(P_l) = \varepsilon_{smax} \left(\frac{|P_l - P_{l0}|}{|P_{l0}|} \right)^l$$

ε_{smax} : 飽和時の最大膨潤ひずみ

P_l : 間隙水圧 (不飽和時は負値)

P_{l0} : 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_{av} が不飽和段階での最大膨潤ひずみ $\omega_{smax}(P_l)$ に達するまで繰り返し計算

図 3.1.2-1 LOSTUF における緩衝材膨潤モデル

(3) LOSTUF のパラメータ

解析領域を構成する各材料について設定した。LOSTUF で必要となる熱・水関係の解析パラメータを表 3.1.2-1 に、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 3.1.2-2 に示す。なお、等方線形弾性体のほかにドラッガー・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 3.1.2-1 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	水蒸気の分子拡散係数	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)
$C_{IP}(=\rho_l g d S_l / d P_l)$	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 3.1.2-2 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 $c=S_l$
膨潤計算パラメータ			
$\varepsilon_s \max(\sigma_m)$	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

3.1.3 解析モデルの諸元・境界条件

本研究で実施した感度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。

(1) 解析モデル

2.4.4(1)で述べたように本業務で実施する遠心力模型試験、および数値解析による挙動評価の対象は、HLW 第2次取りまとめに示した「処分坑道堅置き定置方式」である。感度解析についてもリファレンスケースの人工バリアをモデル化して評価することが必要である。一方、これまでに実施された遠心力模型試験による人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価では、リファレンスケースとは異なる仕様の人工バリア[7]を対象として実施されており、多くの知見が整備されている。本年度の数値解析は、長期挙動評価において重要となるパラメータの感度解析による抽出を目的としており、人工バリアの形状の違いはあまり影響しないと考えられる。また既往の知見との比較により、本年度の成果の妥当性を検証することが出来る。以上の理由より、本年度実施した感度解析に用いる解析モデルは、リファレンスケースの人工バリアではなく、既往の知見で実施したものを採用した。

図 3.1.3-1 に解析モデルの寸法と境界条件を示す。これは既往の報告[7]において提案されている実物寸法をモデル化したもので、廃棄体周辺のみを抽出した軸対称モデルである。この解析モデルでは埋戻し材と緩衝材および初期隙間を区別し、直径と高さが 5.4m の範囲をモデル化した。力学拘束は対称軸とモデル上面をローラー支持とし、上面と底面および側面境界の温度を 35°C で一定、水理境界としてモデルの下半分に相当する外側境界面を圧力 3MPa で一定とし、上面は間隙水が自由に抜ける浸出面境界に設定した。オーバーパックの発熱は温度を 95°C で一定とした。なお、人工バリアの定置前の岩盤外側に 6MPa の拘束圧を考慮し、これに相当する初期応力を設定した。

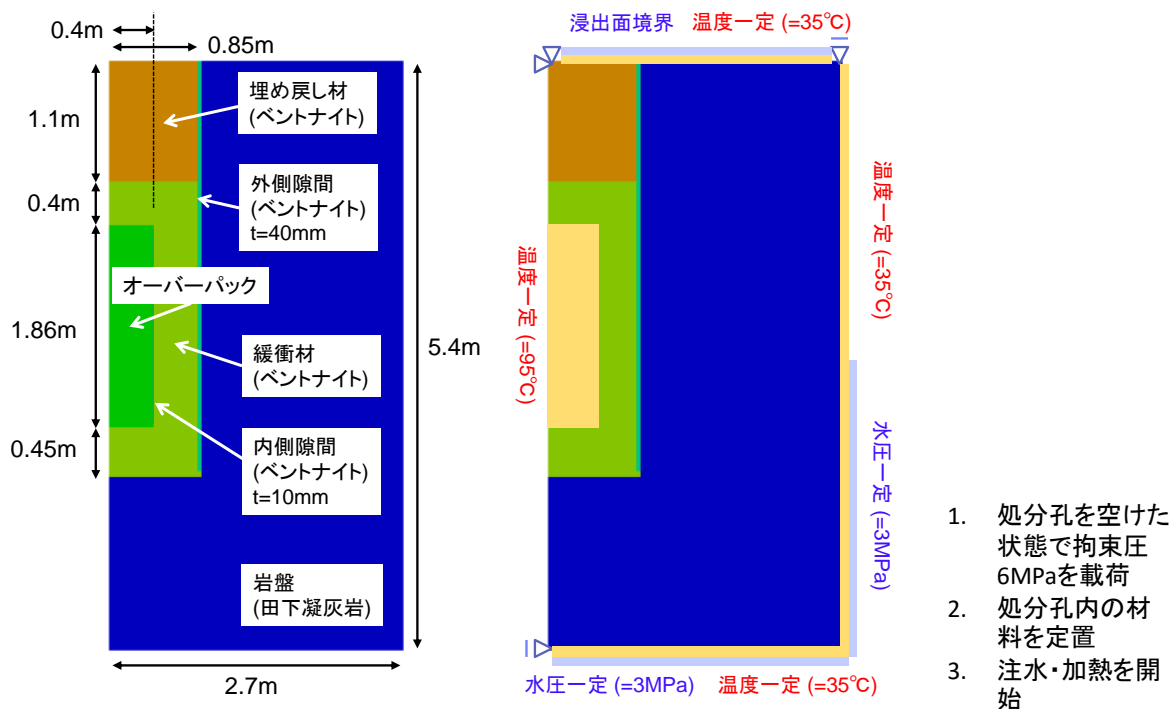


図 3.1.3-1 解析モデルの諸元と境界条件

感度解析に用いた FEM メッシュを図 3.1.3-2 に示す。

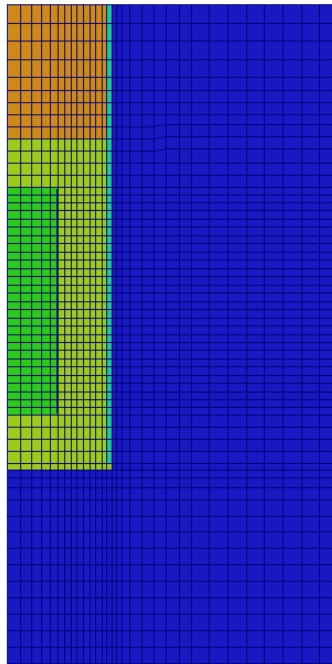


図 3.1.3-2 感度解析モデルの FEM メッシュ図 (1798 要素・1887 節点)

3.1.4 パラメータ

(1) 基本ケースの設定パラメータ

各パラメータの感度は基本ケースの感度解析と比較することで評価した。基本ケースにおける緩衝材は隙間が無く均質で飽和した状態と設定した。また処分孔内の上部埋戻材については緩衝材と同一の材料が使用されているものとし、緩衝材の材料物性を適用した。設定した基本的な物性値を

表 3.1.4-1 に示す。処分孔と緩衝材の間や、オーバーパックと緩衝材の間の隙間の影響も感度解析の対象としたため、均質化を仮定しないベントナイトと隙間の物性も合わせて示す。

表 3.1.4-1 感度解析に使用したパラメータ

条件・パラメータ	ベントナイト (均質)	ベントナイト	模擬廃棄体	隙間	岩盤
初期条件					
間隙率	0.44	0.38	0.001	0.98	0.25
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.55	1.74	6.16	0.001	1.67
飽和度 (%)	12	14	0	0	10
透水関係のパラメータ					
水分特性曲線 a (MPa ⁻¹)	0.198	0.727	0.001	5.00	0.967
水分特性曲線 n	1.57	1.72	1.43	2.50	1.43
固有透過度 (m ²)	1.4 × 10 ⁻²⁰	式	1.0 × 10 ⁻³⁰	1.0 × 10 ⁻¹⁶	4.2 × 10 ⁻¹⁸
力学関係のパラメータ					
ヤング率 (GPa)	0.01	0.01	200	1.0 × 10 ⁻⁶ -> 200 (内側) -> 2.6 (外側)	2.6
ポアソン比	0.3	0.3	0.3		0.25
膨潤圧 (等体積、飽和時) (MPa)	1.07	2.00	—	—	—
熱関係のパラメータ					
乾燥時の熱伝導率 (W/mK)	0.56	0.56	3.18 × 10 ³	0.56	0.96
飽和時の熱伝導率 (W/mK)	1.46	1.46	3.18 × 10 ³	1.46	1.11
比熱 (J/kg/K)	323.0	323.0	460.0	323.0	681.4
熱膨張率 (K ⁻¹)	1.0 × 10 ⁻⁵	1.0 × 10 ⁻⁵	1.64 × 10 ⁻⁵	0	8.70 × 10 ⁻⁵

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で取得されている。図 3.1.4-1 に示す水分特性曲線に対し、van Genuchten モデルによる近似曲線を適用して表 3.1.4-1 のパラメータを設定した。なお、隙間をモデル化しベントナイトの均質化を仮定しないケースでは、水分特性曲線のパラメータは基本ケースと異なる値を用いた。

$$S_l = \{1 + (\alpha s)^n\}^{-m}, k_r = S_l^{\frac{1}{2}} \{1 - (1 - S_l^{\frac{1}{m}})^m\}^2, m = 1 - 1/n \quad 3-20$$

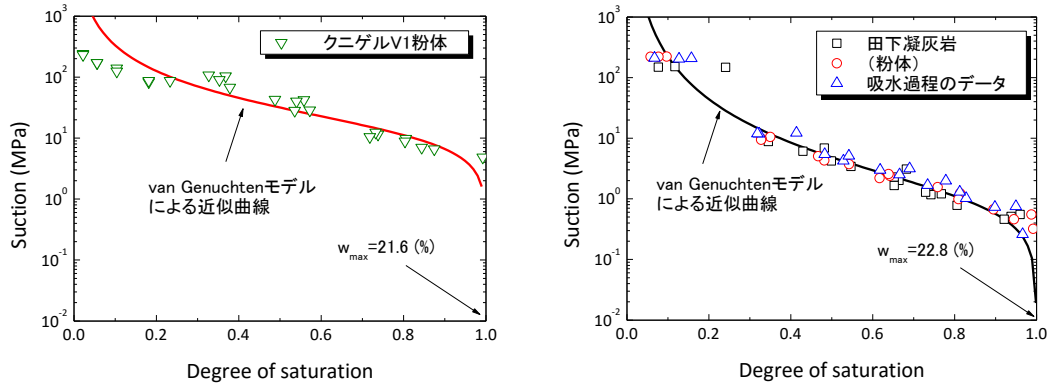


図 3.1.4-1 緩衝材と岩盤の水分特性曲線

緩衝材の固有透過度は、HLW 第 2 次取りまとめ[8]に示された式 3-21 の固有透過度 K と有効粘土密度 ρ_c の関係を適用し、図 3.1.4-2 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式 3-22 を与えることで設定した。表 3.1.4-1 に示されるとおり、間隙率の変化の小さい基本ケースでは一定の値を設定し、隙間を考慮した均質化を仮定しないケースでは式 3.22 から直接計算した。また、岩盤の固有透過度は高下ら[9]を参考にして設定した。

$$K = \exp(-42.1 + 1.1447\rho_c - 2.1232\rho_c^2) \quad 3-21$$

$$\kappa(\text{m}^2) = 10^{6.67\phi - 22.8} \quad 3-22$$

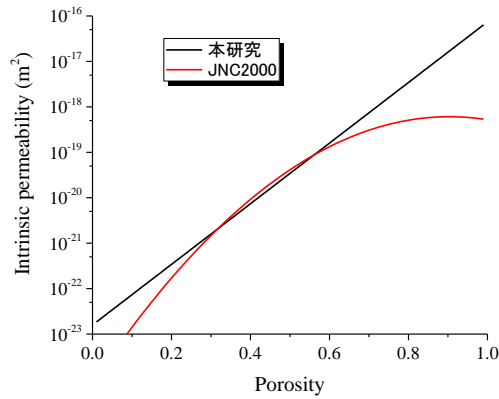


図 3.1.4-2 緩衝材の固有透過度

2) 力学関係のパラメータ

緩衝材のヤング率は HLW 第2次取りまとめ[8]より乾燥密度 1.6Mg/m³のベントナイト単体の飽和時の弾性係数を設定し、岩盤のヤング率は大久保らの報告[10]を参照して田下凝灰岩の飽和時の値を設定した。ポアソン比は一般的な値を設定した。膨潤計算に用いるパラメータは小峯の報告[11]を参考に表 3.1.4-2 に示す条件を設定した。

表 3.1.4-2 膨潤計算パラメータ

基本的な物理定数	電子素量	1.62 x 10 ⁻¹⁹ C
	Boltzman定数	1.38 x 10 ⁻²³ J/K
	Hamaker定数	2.2 x 10 ⁻²² J
	Avogadro's数	6.023 x 10 ⁻²³
ベントナイトの組成 クニゲルV1相当	陽イオン交換容量	1.166 mequiv./g
	交換性Naイオン量	0.631 mequiv./g
	交換性Caイオン量	0.464 mequiv./g
	交換性Kイオン量	0.030 mequiv./g
	交換性Mgイオン量	0.041 mequiv./g
	NaイオンおよびKイオンのイオン価	1
	CaイオンおよびMgイオンのイオン価	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	0.1115 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 x 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	2.82 Mg/m ³
	砂の土粒子密度	2.66 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	57 %	
その他	間隙水の誘電率	80 x 8.8542 x 10 ⁻¹² C ² /J/m
	間隙水のイオン濃度	45 mol/m ³
	絶対温度	298.15 K

3) 熱関係のパラメータ

緩衝材の熱伝導率は HLW 第 2 次取りまとめ[8]より乾燥密度 1.8Mg/m^3 のベントナイトの熱伝導率-含水比関係を参考にして図 3.1.4-3 に示す飽和度依存性を設定した。また、同様に固相の比熱 $c_s=0.323$ を得て式 3-23 から熱容量を計算した。岩盤については、田下凝灰岩の熱伝導率・熱拡散率の測定結果より、同様に条件を設定した。

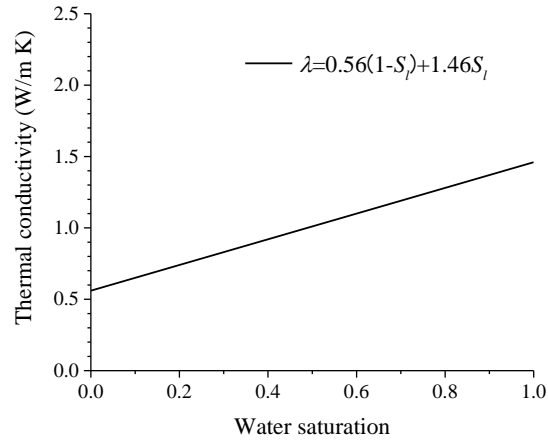


図 3.1.4-3 緩衝材の熱伝導率

$$(\rho C)_m = \phi S_l \rho_l c_l + (1 - \phi) \rho_s c_s$$

3-23

3.1.5 感度解析のケースの設定

前述の基本ケースを THM-0 とし、透水性や剛性などの基本的なパラメータの他、膨潤モデルや岩盤のクリープ挙動の影響などを比較するための解析ケースを表 3.1.5-1 に示すように設定した。また、オーバーパックの発熱の影響を確認するため、熱を考慮しない基本ケース HM-0 を別に加え、これと比較する熱を考慮しない検討ケースを設定した。THM-0～3 と HM-0～3 はそれぞれ加熱の有無以外に条件に相違がなく、加熱の影響を比較することができる。この他、処分孔と緩衝材の間にある隙間の影響を考慮したケースを設定し、境界の拘束圧を変えることでその影響を確認した。隙間を考慮していないケースでは前述のとおり、隙間が緩衝材の膨潤により潰れた後を想定しており、均質化した後の乾燥密度を初期条件として設定している。

表 3.1.5-1 解析ケース番号と内容

ケース	内容
THM-0 (基本ケース)	加熱あり、隙間なし・ベントナイト均一
THM-1	ベントナイトの固有透過度 1/2
THM-2	岩盤の固有透過度 1/10
THM-3	水分特性曲線 JNC2000
THM-4	ベントナイトの固有透過度を 2 倍とする
THM-5	岩盤の固有透過度を 10 倍とする
THM-6	膨潤の進行に関するパラメータ※1 を 1.0→3.0
THM-7	後述するより簡易な膨潤モデルの採用
THM-8	ベントナイトのポアソン比を飽和時のもの※2 とする
THM-9	ベントナイトのヤング率を乾燥時のもの※3 とする
THM-10	岩盤のクリープを考慮
HM-0 (基本ケース)	加熱なし、隙間なし・ベントナイト均一
HM-1	ベントナイトの固有透過度 1/2
HM-2	岩盤の固有透過度 1/10
HM-3	水分特性曲線 JNC2000
HM-4	ベントナイトの吸水挙動を水分拡散とする
HM-5	処分孔の隙間を考慮、拘束圧 6 MPa、水圧 3 MPa
HM-6	処分孔の隙間を考慮、拘束圧 10 MPa、水圧 5 MPa

※1 式 3-18 中のパラメータ l

※2 $\nu=0.49$

※3 基本ケースの 20 倍のヤング率

設定した感度解析ケースのうち、設定値や計算モデルなどに関して、基本ケースとの違いに特に説明が必要なものを以下に示す。

(1) 水分特性曲線 (THM-3、HM-3 に関連)

感度解析ではベントナイトの膨潤の発生過程に大きな影響があると考えられ、岩盤およびベントナイトの水理特性に多くのパラメータを振っている。水分特性曲線についても基本ケースと異なるケースを設定しており、THM-3 と HM-3 では HLW 第 2 次取りまとめ[8]を参考に、式 3-24 で示される水分特性曲線をベントナイトに設定した。

$$\begin{aligned} \omega_{mon} &= \omega / R_{mon} \\ \psi &= \rho g [(-1.37 \times 10^3 T + 1.23 \times 10^5) \times \exp(-9.5 \times 10^{-3} (\omega_{mon} R_{mon})^2) + 3.5 \times 10^4 (\omega_{mon} R_{mon})^{-0.95}] \end{aligned} \quad 3-24$$

ここで、 ω は含水率、 ω_{mon} はモンモリロナイト含有率で正規化した含水比であり、 R_{mon} はモンモリロナイト含有率である。

図 3.1.5-1 に設定した水分特性曲線を四角のマーカで示す。

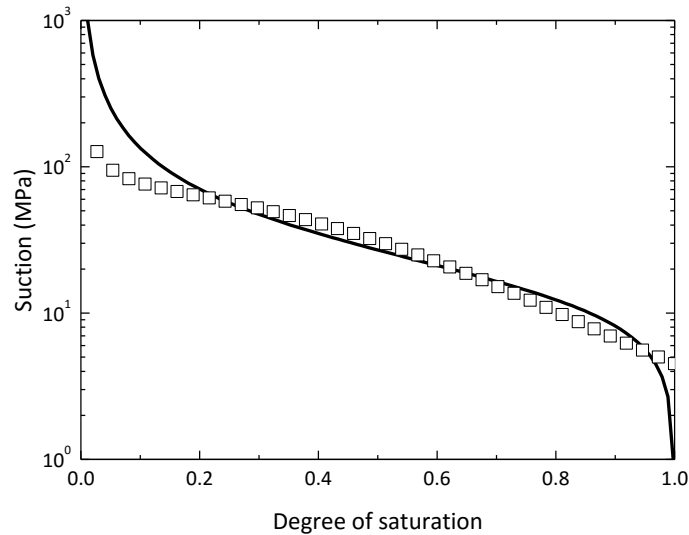


図 3.1.5-1 設定したベントナイトの水分特性曲線

(2) 膨潤の進行に関するパラメータ (THM-6 に関連)

LOSTUF の膨潤モデルでは、膨潤評価式より得られる飽和時の最大膨潤ひずみ ϵ_{smax} に対し、不飽和時の最大膨潤ひずみ ω_{smax} を式 3-18 によって評価している。従って膨潤の進行はサクシヨンの変化量によって決まり、水分特性曲線の影響を強く受ける。式中の l は基本として $l = 1$ を採用しているが、浸潤過程の初期段階で膨潤の進行が実際に比べて早いことが分かっている。そこで、設定した THM-6 ではこのパラメータを変更し、その影響を確認した。

(3) 簡易な膨潤モデル (THM-7 に関連)

膨潤評価式と式 3-18 から膨潤ひずみを計算する膨潤モデルでは繰り返し計算が必要となる。ベントナイトに発生する最大膨潤圧 $P_{sw,max}$ が既知である場合、飽和時に既定の最大膨潤圧を発生する相当外力を要素毎に載荷する式 3-25 示される簡易な膨潤モデルによる検討を行った。

$$P_{sw} = \Delta S_l \cdot P_{sw,max} \cdot I \quad 3-25$$

ここで ΔS_l は初期飽和度から飽和に至るまでの飽和度の変化率である。実際に発生する最大膨潤圧は既知ではないため、THM-7 では膨潤評価式から計算される等体積条件下での最大膨潤圧を設定した。なお、この簡易な膨潤モデルでは膨潤の進行がサクションではなく飽和度で制御されるため、水分特性曲線による影響が他のケースとは異なると考えられる。

(4) 岩盤のクリープモデルに関するパラメータ (THM-10 に関連)

LOSTUF には堆積軟岩地山中の坑道の長期安定性を検討するため、軟岩の 2 次以降のクリープを考慮可能なモデルが導入されている。本モデルでは、残留強度をクリープ破壊が生じる限界の応力状態と考え、図 3.1.5-2 に示されるように応力レベルにより変形継続型と変形収束型の 2 種類の力学モデルから構成されている。

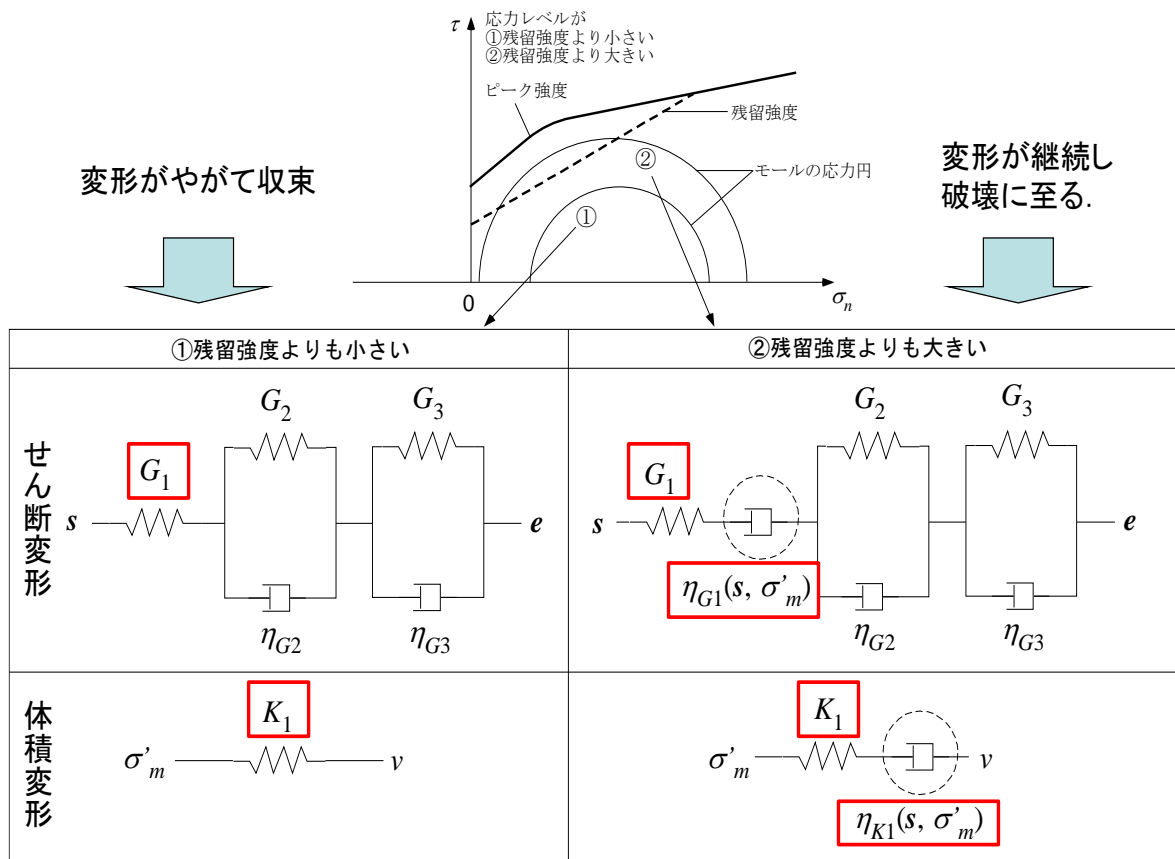


図 3.1.5-2 本検討で適用した岩盤のクリープモデル

感度解析ケースのうち THM-10 において、岩盤のクリープ変形が変形収束型となることを想定し、表 3.1.5-2 に示すクリープモデルのパラメータを設定した。

表 3.1.5-2 岩盤クリープモデルの設定パラメータ

G_2 (MPa)	η_{G2} (MPa s)	G_3 (MPa)	η_{G3} (MPa s)
3.49×10^3	2.16×10^7	1.93×10^4	4.33×10^9

(5) ベントナイトの不飽和域における水分拡散 (HM-4 に関連)

LOSTUF の支配方程式のうち地下水の連続式は式 3-1 に示される。この式中の第 4 項はダルシー則とフィック則に基づく拡散項であり、圧力勾配の発散で示される。しかしながら、不飽和域におけるベントナイトの吸水過程は水分量の拡散で示す方がより自然であり、感度解析ケースのうち HM-4 については不飽和時における第 4 項を以下のように置き換えた計算を実施した。

$$\nabla \cdot \{(-\rho_l D_\theta C_{IP}) \nabla P_l\} \quad 3-26$$

ここで D_θ は水分拡散係数であり、本研究では $D_\theta = 4.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ を設定した。水分量の拡散項は水分拡散係数に比貯留係数 C_{IP} を乗じることで変数変換が行われ、元の支配方程式に組み入れることができる。なお、このケースにおいては重複を避けるため、水蒸気の拡散係数を 0 と設定している。

(6) 隙間のモデル化について (HM-5、HM-6 に関連)

基本ケースでは処分孔と緩衝材間にある隙間が、ベントナイトの膨潤によって埋まり均質化した条件を想定している。しかしながら、実際の浸潤過程においては膨潤の発生時刻のずれや、オーバーパックの移動などからベントナイトの密度に多少のむらが発生することが考えられる。また、岩盤にかかる拘束圧から処分孔が変形し、最終的なベントナイトの乾燥密度に岩盤の拘束圧依存性があるものと考えられる。このような状況を模擬して隙間をモデル化したケース HM-5 および HM-6 を設定した。

HM-5 および HM-6 では、岩盤とオーバーパックに接する緩衝材に、表 3.1.4-1 中に示される非常に小さい剛性を設定し、隙間が潰れた段階でそれぞれ岩盤相当 (外側) およびオーバーパック相当 (内側) の剛性を与えるバイリニア型のソリッド要素によって隙間のモデル化を行った。なお、隙間要素は設定した初期間隙率 0.98 と等しい体積ひずみが生じた際に体積が 0 となるが、本研究では安全を見て体積ひずみが 0.90 となった段階で隙間が無くなったと判定した。また、岩盤の拘束圧依存性を確認するため、HM-5 では基本ケース相当の 6MPa の拘束圧を、HM-6 ではより大きい 10MPa の拘束圧を設定している。図 3.1.5-3 に基本ケースおよび HM-5 と HM-6 の岩盤の拘束圧と処分孔の初期変形の違いを示す。隙間を設定していないケースでは初期変形は考慮していないため、拘束圧依存性は HM-5 と HM-6 の比較により行った。

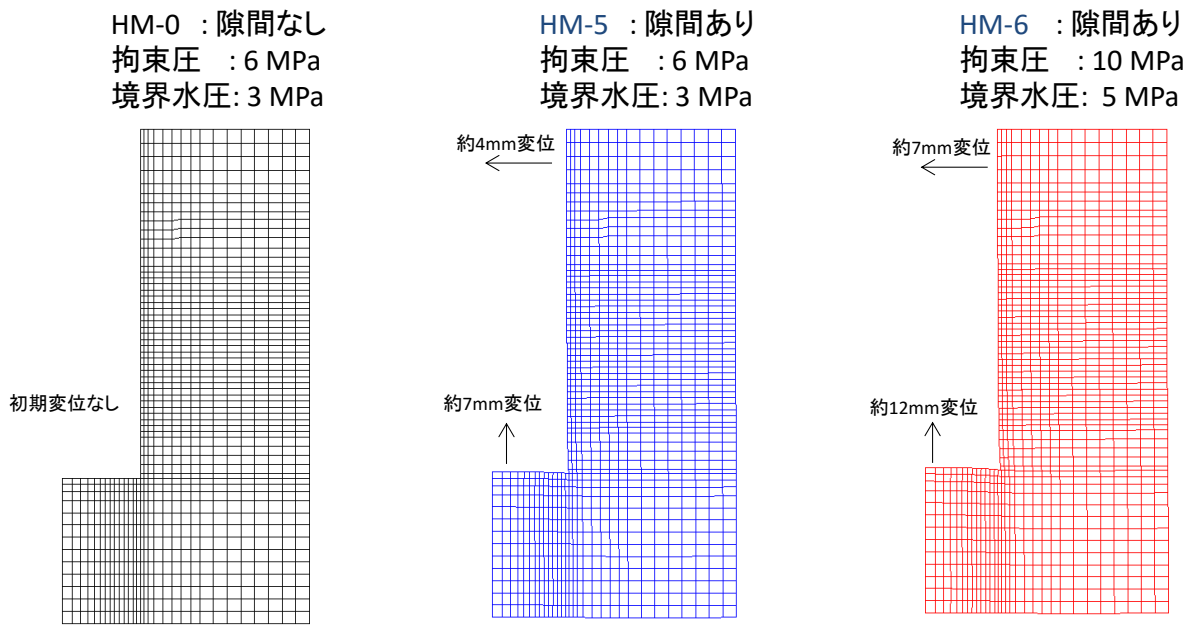


図 3.1.5-3 拘束圧の差による処分孔の初期変形量の違い (変形倍率 10 倍)

3.1.6 感度解析の結果

各ケースの解析結果を、モデル全体の間隙水圧分布、温度分布、岩盤の応力とひずみの分布、およびベントナイト部の飽和度と乾燥密度の変動分布についてその経過時変化の履歴を出力して図示した。なお、加熱を考慮していないケースの温度分布は、等温条件であることを確認するためにそのまま一定温度の図として示している。また緩衝材の膨潤挙動に各設定条件が与える影響を見るため、モデル上面拘束位置付近のベントナイトの鉛直土圧とオーバーパック鉛直変位履歴、および岩盤上部の各位置において発生するひずみの履歴を確認した。具体的な出力部位と位置を図 3.1.6-1 に示す。ベントナイト土圧は上部の要素応力の平均で評価しており、オーバーパックの鉛直変位についても上面節点の平均から評価している。経時変化を比較する上での基本ケースは、加熱を考慮するケースに THM-0、考慮しないケースについては HM-0 を設定している。

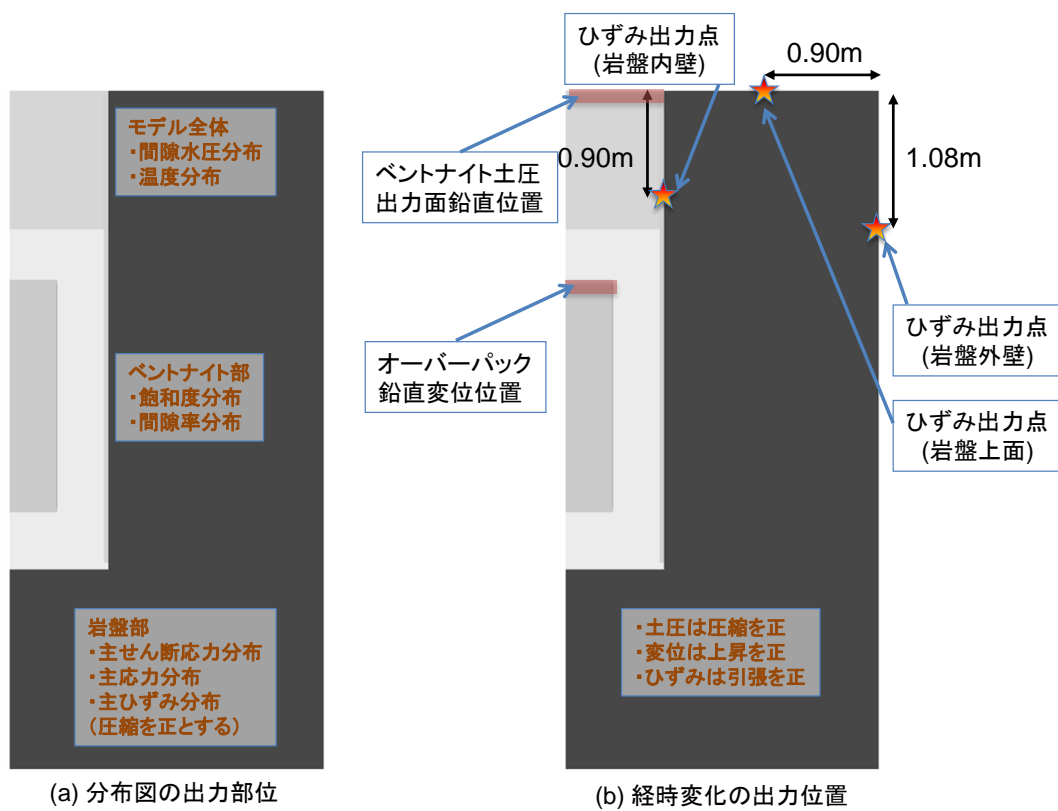


図 3.1.6-1 解析結果の出力部位と出力位置

各ケースにおける、解析結果を 6.1 に示す。

3.1.7 各ケースの解析結果に対する考察

(1) THM-0 (基本ケース) 「6.1.4 参照」

他のケースと比較する上での基本ケースである。岩盤内で浸潤が徐々に進行し、膨潤が発生して行く過程が分かる。加熱を考慮しているため温度分布があるが、1年経過時以降の温度分布の変化は小さいことが確認できる。岩盤に生じている応力に着目すると、初期応力として考慮した人工バリア定置前の拘束圧による初期せん断が、膨潤による岩盤内壁の押し戻しによって解消していることが確認できる。

ベントナイト部に着目すると1年目の飽和度分布から高温部に乾燥が認められる。浸潤過程にもこの温度勾配の影響が生じており、オーバーパックの表面付近の飽和時刻が他の部位より遅れている。

ベントナイト土圧は熱応力を含む全応力の鉛直成分を示しており、ポアソン比と力学的な拘束条件の関係から鉛直成分が他の成分より大きくなっている。なお、上部のベントナイトまで浸潤が進む時刻にベントナイト土圧に一時的な落ち込みが認められるが、これは本研究における解析では不飽和域ではサクションと応力の連成を考慮していないことから、飽和時に間隙水圧が作用することで有効応力が不連続となるためである。この理由は、LOSTUFの膨潤モデルではサクションの作用が膨潤評価式に含まれているためである。

オーバーパックの鉛直変位に着目すると初期の膨潤の立ち上がりでベントナイトが飽和に至る付近で鉛直変位の下降が認められる。これは膨潤の不均質が解消する過程で見られるものであり、はじめに下部のベントナイトが膨潤して生じた上昇分の一部が押し戻されて生じている。なお、押し戻されている時刻とベントナイト土圧の上昇量が大きい時刻は整合している。

(2) THM-1 「6.1.5 参照」

基本ケース THM-0 からベントナイトの固有透過度を小さくしたケースであり、ベントナイト部の飽和度分布の履歴から明らかに浸潤が遅くなっていることが認められる。この影響はオーバーパックの鉛直変位で顕著であり、ベントナイト土圧に与える影響は相対的に小さいといえる。しかし、相対透水係数の大きくなる飽和に至る前の時刻ではベントナイト土圧や岩盤の周方向ひずみ履歴に基本ケースとの明瞭な差が生じており、膨潤の進行が遅いことが確認できる。しかしながら、これらの土圧やオーバーパック鉛直変位、岩盤のひずみなどのピーク値や最終値は基本ケースと殆ど違いはなく、力学挙動に与える影響は小さいことが確認できる。

(3) THM-2 「6.1.6 参照」

基本ケース THM-0 から岩盤の固有透過度を 1/10 に設定したケースであり、岩盤内の浸潤過程が大幅に遅いことが間隙水圧分布から確認できる。膨潤の進行が遅れることでベントナイト土圧やオーバーパックの鉛直変位の進行が基本ケースと比較して遅れることが分かる。加熱を考慮したケースであるが、基本ケースでは認められる水蒸気拡散の影響が初期段階では全く見られず、高温部への水の供給自体が遅れていることが分かる。特にモデル上部への水の供給が遅れるため、オーバーパックの鉛直変位のピークが基本ケースと比較してやや大きくなっている。しかし、他の透水物性を修正したケース全般に共通して、ベントナイト土圧およびオーバーパック鉛直変位のピーク値および最終値に与える影響は小さい。

(4) THM-3 「6.1.7 参照」

基本ケース THM-0 からベントナイトの水分特性曲線を変更したケースである。固有透過度の設定値自体は基本ケースと同じであるが、不飽和特性の違いから浸潤は早くなっていることが確認できる。これについて、ベントナイト部の飽和度分布の履歴から、絶乾に近い状態ではやや浸潤が遅れ、それ以降は浸潤速度が基本ケースより早いことが見て取れる。そのため、ベントナイト土圧やオーバーパック変位、岩盤のひずみの履歴など力学挙動が定常となる時刻が早くなっているが、ピーク値や最終値については大きく変わらないことが分かる。

(5) THM-4 「6.1.8 参照」

THM-1 とは逆に、基本ケース THM-0 からベントナイトの固有透過度を 2 倍に変更したケースである。岩盤部の固有透過度は基本ケースと共通であるため、初期の浸潤過程には殆ど影響しないが、ベントナイト部に水位線が到達してからの浸潤速度には有意な差が認められる。このケースは THM-3 とよく似た傾向を示し、ベントナイト土圧やオーバーパック変位、岩盤のひずみの履歴など力学挙動が定常となる時刻が早くなっているが、ピーク値や最終値についてはやはり影響が小さい。

(6) THM-5 「6.1.9 参照」

THM-2 とは逆に、基本ケース THM-0 から岩盤の固有透過度を 10 倍に変更したケースである。岩盤内の浸潤速度が非常に早く、1 年経過時には既にベントナイト部へ水位線が達している。このケースと浸潤の遅い THM-2 では他のケースとの間に 1 年経過時における岩盤内温度分布に小さな違いが認められる。他のケースでは岩盤内の温度分布が定常となる前の 1 年経過時において、水位線が岩盤境界とベントナイト部の中間層にあることから、水位線付近を境に伝熱特性が大きく異なることに起因して温度勾配に不連続な部位が認められる。一方で、岩盤内の浸潤が他に比べて非常に遅い THM-2 と速い THM-5 ではこの時刻における岩盤内の伝熱特性に差が殆ど生じないことから、連続した温度分布となっている。

初期の段階からベントナイトに間隙水が供給されるため、ベントナイト土圧の発生が早い、ベントナイト内部の浸潤速度は速くないため、ベントナイト土圧やオーバーパック変位などの力学挙動におけるピークの発生時刻は基本ケースと大きく変わらない。また、ピーク値や最終値についてもやはり影響は小さい。

(7) THM-6 「6.1.10 参照」

基本ケース THM-0 から膨潤の進行に関するパラメータを修正したものであり、初期の段階におけるサクション変化で発生する膨潤の発生が大幅に抑制されるケースである。膨潤の発生の初期段階においてはベントナイト土圧が殆ど発生せず、オーバーパックの鉛直変位が少し大きくなっていることが認められる。これは、パラメータの修正により、サクションの変化に対して発生させる膨潤量が小さくなり、進行が遅れたためだと考えられる。なお、その後の浸潤が進行した段階では基本ケースとの差は殆ど認められない。また、浸透流および熱伝導に関する非定常解に基本ケースとの有意な差は認められない。

(8) THM-7 「6.1.11 参照」

基本ケース THM-0 から膨潤モデルをより簡易なものに修正したケースである。浸潤過程は基本ケースとほぼ同様であるにも関わらず、膨潤の進行が非常に遅く、ベントナイト土圧自体

も大きいことが確認できる。このケースで使用している膨潤モデルは、周囲の応力に関係なく既定の膨潤圧を発生するものであり、等体積条件下における最大膨潤圧を飽和時に必ず生じることから発生土圧が大きくなっている。なお、膨潤の進行が遅れる原因については、本ケースが膨潤の進行を飽和度で制御しているためであり、水分特性曲線の影響が他のケースと大きく異なる点に関係している。オーバーパックの鉛直変位履歴も基本ケースと有意に異なるが、ベントナイト土圧と比較すると相対的にその影響は小さい。

(9) THM-8 「6.1.12 参照」

ベントナイトのポアソン比を飽和時のものに変更したケースであり、具体的には 0.49 を設定している。本来、浸潤の進行に伴うポアソン比の変化は間隙水圧の作用によって生じるものであり、T-H-M 連成解析においては特別の取り扱いは必要ないと考えられる。しかし、LOSTUF の膨潤モデルにおいては間隙水による作用は膨潤評価式に含まれており、不飽和域においては間隙水圧との連成作用を切っている。また、膨潤相当の作用力は個々の要素剛性から計算することからポアソン比の設定が重要となる。

このケースについてはベントナイト土圧とオーバーパック変位には非常に大きな影響が生じている。等体積条件となることからベントナイト土圧が大きく、オーバーパックの鉛直変位は非常に小さくなっている。なお、膨潤相当の作用力が等方的な条件となるため、他のケースに比べてベントナイト土圧の鉛直方向と径方向に見られる軸差が解消していることが確認できる。

(10) THM-9 「6.1.13 参照」

ベントナイトの剛性を乾燥時のものに変更したケースであり、飽和時の剛性を仮定した基本ケースと比較して 20 倍の剛性を設定している。THM-8 と同様に、間隙水の浸潤過程には殆ど影響が見られない一方で、ベントナイト土圧とオーバーパック変位には非常に大きな影響が生じている。剛性が高いため土圧が大きく、オーバーパックの鉛直変位は非常に小さくなっている。なお、発生している土圧は、ベントナイトの初期乾燥密度から想定される膨潤圧より明らかに大きい。また、膨潤ひずみが生じないことから岩盤を押し戻す効果が小さく、ひずみ履歴などからその影響が確認できる。

(11) THM-10 6.1.14 参照」

岩盤にクリープモデルを採用したケースであり、結果として基本ケースとの差異は殆ど見られない。これは岩盤の境界部に载荷した拘束圧による初期せん断があまり小さくなく、またベントナイトの膨潤圧が発生することによりせん断応力が解消する方向にあるためと考えられる。岩盤の構成モデル以外に基本ケースとの違いはないため、解析結果に有意な違いは殆ど見られない。

(12) HM-0 (基本ケース) 「6.1.15 参照」

加熱を考慮しないケースと比較するための基本ケースである。加熱の有無以外は THM-0 と同じ条件であり、温度変化によって生じる影響を確認できる。なお、温度変化を考慮していないため温度分布図は一定温度を示している。岩盤内の浸潤速度は THM-0 より少し早いことが分かるが、大きな変化は生じていない。また、岩盤の応力等に大きな影響は見られない。

加熱を考慮していないため、オーバーパックの表面付近が乾燥することはなく、ベントナイト部の飽和度分布の変化も THM-0 と比較して単調である。なお、加熱を考慮していないケー

ス全般について、水理特性が同等であれば加熱を考慮したケースよりもベントナイトが冠水(全飽和)する時刻が遅くなる傾向が認められる。これは加熱を考慮したケースではベントナイトおよび岩盤の温度が高くなるため、間隙水の粘度が低下し、実質的な透水係数が大きくなるためであると考えられる。

THM-0と比較するとベントナイト土圧の上昇は遅く、一方でオーバーパックの鉛直変位の発生は早くなっている。また、上昇と下降の量も大きくなっている。これは本ケースでは熱応力が生じないこと、THM-0では生じる水蒸気の蒸気拡散が考慮されないため、オーバーパック側部のベントナイトの膨潤が遅れ、初期段階で生じる下部に位置するベントナイトの膨潤が一方向的に発生するためだと考えられる。そのため初期段階では一時的にオーバーパックは大きく上昇し、その後の均質化の過程でTHM-0と同じ高さまで下降している。なお、最終的な鉛直変位はTHM-0より上昇量が大きい。

(13) HM-1 「6.1.16 参照」

THM-1と同様にベントナイトの固有透過度を小さくしたもので、加熱を考慮していないため基本ケースはHM-0が相当する。THM-1とTHM-0の間に見られる差と同様の傾向が本ケースとHM-0の間にも確認できる。加熱を考慮したTHM-1とは異なり、最終的なオーバーパックの鉛直変位には基本ケースとの差が殆ど見られず、基本ケースとの差異はより小さい。

(14) HM-2 「6.1.17 参照」

THM-2と同様に岩盤の固有透過度を1/10に設定したケースとしており、加熱を考慮しないケースである。岩盤内の浸潤過程が大幅に遅いことはTHM-2と同様であり、加熱を考慮していない本ケースの方がオーバーパック付近のベントナイトの浸潤は少し遅い。しかし、他の加熱を考慮していないケースと同様に、全てのベントナイト要素が飽和に至る時刻は加熱を考慮したケースより早い。また、加熱を考慮したTHM-2と異なり、最終的なオーバーパックの鉛直変位量は基本ケースであるHM-0と一致する。

(15) HM-3 「6.1.18 参照」

THM-3と同様にベントナイトの水分特性曲線を変更したものであり、加熱を考慮していないケースである。THM-3見られたように絶乾時以降の浸潤が早くなる傾向が確認でき、基本ケースとの違いはオーバーパック変位と岩盤のひずみのピークの発生時刻を除いて小さい。

(16) HM-4 「6.1.19 参照」

他の感度解析ケースと異なり、ベントナイトの吸水挙動を水分量の拡散で設定したケースであり、本ケースでは加熱は考慮していない。このケースは全ての感度解析ケースの中で最もベントナイトの冠水時刻が早いケースとなった。しかしHM-3と同様に、基本ケースとの違いはオーバーパック変位と岩盤のひずみのピークの発生時刻を除くと小さい。

(17) HM-5 「6.1.20 参照」

本ケースは隙間をモデル化し、岩盤にかかる拘束圧により処分孔の初期変形を考慮したケースである。ベントナイトの初期の乾燥密度が基本ケースと大きく異なり、ベントナイト土圧の発生やオーバーパックの変位履歴など力学挙動に見られる差異が非常に大きい。また、間隙率の違いから固有透過度や水分特性曲線が他のケースと異なり、冠水時刻などにも大きな違いが認められる。ベントナイト土圧のピーク値は基本ケースに比べて非常に大きく、これは上部の

ベントナイトの乾燥密度がベントナイトの冠水時刻においても大きいためである。冠水時刻は基本ケースに比べて大幅に遅れており、100年経過時においても冠水しておらず、上部のベントナイトは膨潤中であると考えられる。下部のベントナイトについては100年経過時には乾燥密度が大きく低下しており、ほぼ均質化を仮定したケースと同等のレベルまで下がっている。その後、上部のベントナイトが冠水することで均質化が進み、上部ベントナイトの土圧とオーバーパック変位が低下している。なお、ベントナイト土圧が大きいため、基本ケースに比べてポアソン比によって生じる土圧の軸差が大きい。また、岩盤部の間隙水圧分布に基本ケースとの差異が認められる。この他、このケースでは冠水時に発生する岩盤の径方向ひずみの変化が、間隙水圧とベントナイト土圧が拮抗するためか、他のケースに比べて有意に小さい結果となった。

(18) HM-6 「6.1.21 参照」

本ケースはHM-5と同様に隙間をモデル化したケースであり、岩盤にかかる拘束圧がHM-5より大きい10MPaとなっている。従って、処分孔の初期変形がより大きく、ベントナイトの最終的な乾燥密度がより高くなるケースである。岩盤の境界面に設定した間隙水圧も大きく、5MPaを設定している。しかし、ベントナイトの冠水時刻などはHM-5と同じであり、ベントナイト土圧の発生やオーバーパック変位の履歴などは似た傾向を示す。しかしながら、発生する土圧や変位のピーク値は乾燥密度がより大きくなることから更に大きく、基本ケースとの差異は拡大している。なお、HM-5との比較より、拘束圧が大きくなることでベントナイト土圧が大きくなる傾向は実験などから得られる事実と整合している。100年経過時におけるベントナイトの乾燥密度の変動分布からはHM-5以上にむらが大きいたことが確認できる。この隙間をモデル化したケースに見られる膨潤変形のむらは、ベントナイトの剛性として飽和時の値を設定していることに起因していると考えられる。なお、HM-5では冠水時に見られる岩盤のひずみの変化が他のケースに比べて小さくなっていたが、境界の間隙水圧が大きい本ケースでは他のケースと同様の傾向となった。

(19) 感度解析結果のまとめ

加熱を考慮した11ケース、加熱を考慮しない7ケースの計18ケースの感度解析を実施した。これらを整理して得られた結果を表 3.1.7-1 にまとめた。

表 3.1.7-1 感度解析結果のまとめ

ケース	内容	ベントナイト飽和時刻 [year]	ベントナイト土圧(最大) [MPa]	ベントナイト土圧(最終) [MPa]	O/P鉛直変位(最大) [mm]	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]
THM-0 (基本ケース)	加熱あり、隙間なし・ベントナイト均一	34	1.16	1.16	24.4	10.9	1462
THM-1	ベントナイトの固有透過度 1/2	50	1.16	1.16	23.4	12.1	1425
THM-2	岩盤の固有透過度 1/10	58	1.17	1.17	26.9	11.5	1492
THM-3	水分特性曲線 JNC2000	18	1.11	1.11	25.2	9.2	1596
THM-4	ベントナイトの固有透過度を2倍とする	24	1.14	1.12	25.2	11.1	1477
THM-5	岩盤の固有透過度を10倍とする	34	1.16	1.16	23.5	10.1	1461
THM-6	膨潤の進行に関するパラメータ※を 1.0→3.0	36.9	1.19	1.19	24.8	10.7	1502
THM-7	膨潤評価式によるモデル以外の膨潤モデルによる計算	33	1.4	1.4	25.8	10.1	1494
THM-8	ベントナイトのポアソン比を飽和時の値とする	32	1.66	1.57	6.8	4.4	1361
THM-9	ベントナイトのヤング率を乾燥時のものとする	32	1.53	1.53	0.1	-0.3	1177
THM-10	岩盤のクリープを考慮	37	1.16	1.16	24.6	11.1	1510
HM-0 (基本ケース)	加熱なし、隙間なし・ベントナイト均一	49	1.16	1.13	24	12.9	1375
HM-1	ベントナイトの固有透過度 1/2	90	1.16	1.15	23.2	12.7	1369
HM-2	岩盤の固有透過度 1/10	80	1.17	1.09	27.3	13	1414
HM-3	水分特性曲線 JNC2000	22	1.14	1.14	23.7	10.5	1492
HM-4	ベントナイトの吸水挙動を水分拡散とする	21	1.14	1.14	20.2	10.8	1315
HM-5	処分孔の隙間を考慮、拘束圧 6 MPa、水圧 3 MPa	190	2.09	2.08	48.5	43	1056
HM-6	処分孔の隙間を考慮、拘束圧 10 MPa、水圧 5 MPa	190	2.64	2.5	71	58.5	1640

1) 冠水時刻と力学挙動の関係

得られた結果から、ベントナイトの冠水時刻が大きく異なるケースについても、力学特性や膨潤圧に影響するモデルの修正を行わなければ、ベントナイト土圧やオーバーパックの変位量には大きな差がないことを確認した。

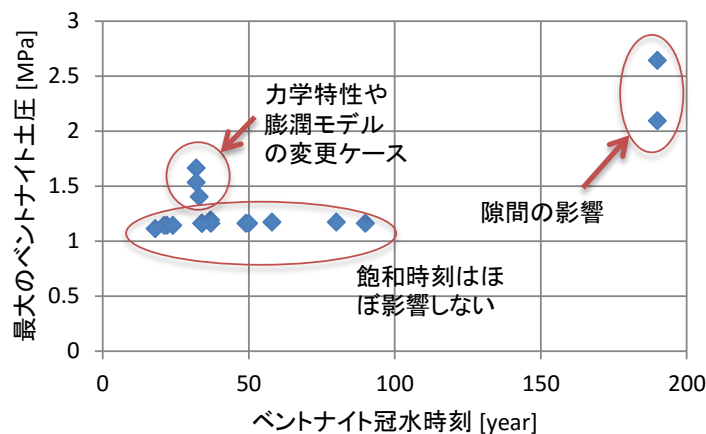


図 3.1.7-1 各ケースの結果よりベントナイト冠水時刻と最大ベントナイト土圧の関係

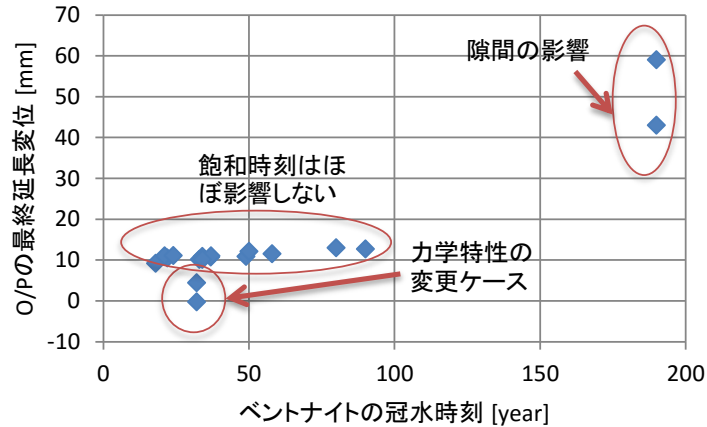


図 3.1.7-2 各ケースの結果よりベントナイト冠水時刻とオーバーパックスの最終変位の関係

2) ベントナイト土圧の分布と発生時刻歴

ベントナイト土圧のピークや最終値には間隙水の浸潤過程があまり関係しないことが確認されているが、その発生に関する時刻歴や土圧分布には設定条件が大きく影響すると考えられる。そこで、図 3.1.7-3 に加熱を考慮した各ケースの上部ベントナイト際内周要素における鉛直方向全応力の履歴を、図 3.1.7-4 に最外周要素の履歴、図 3.1.7-6 に最終時刻 1000 年経過時における上部ベントナイトの鉛直方向全応力の径方向分布を示す。また同様に、図 3.1.7-7～図 3.1.7-8 に加熱を考慮しないケースの整理結果を示す。

これらの結果より、岩盤による拘束が強い外周部では急激に立ち上がり最終的な土圧も大きくなる一方で、冠水時には間隙水圧の影響をあまり受けないこと、内周部では逆にベントナイト土圧は徐々に立ち上がり、冠水時には拘束が小さくことから大きな変動が生じていることが認められる。この飽和域における間隙水圧による応力の不連続は、前述のとおり不飽和域ではサクシオン圧による連成を切っていることに起因する。また、加熱の有無に関係なく最終的な土圧分布はほぼ一様となるが、岩盤による拘束をより強く受ける外周部で土圧が大きくなる傾向がある。

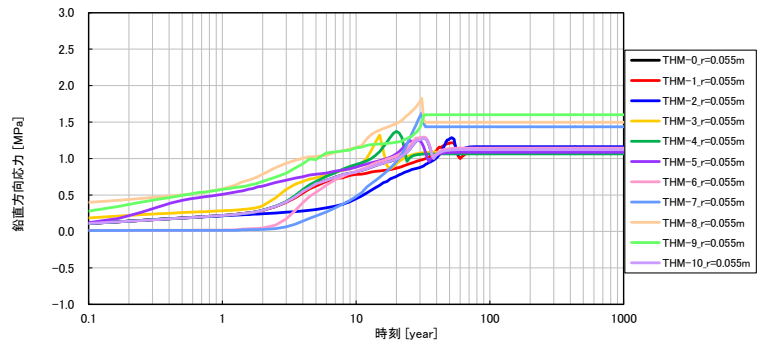


図 3.1.7-3 加熱を考慮したケースの上部ベントナイト最内周要素の鉛直応力履歴（全応力）

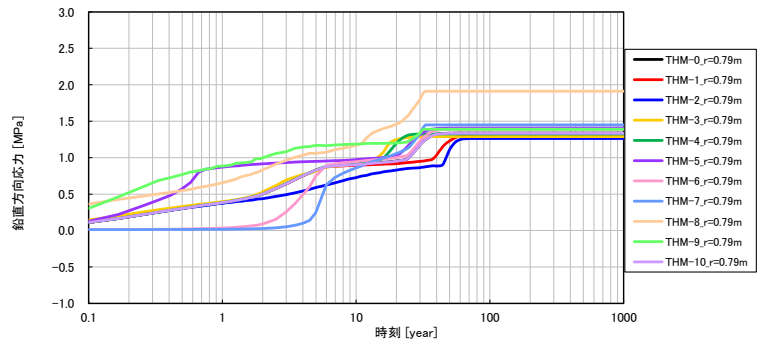


図 3.1.7-4 加熱を考慮したケースの上部ベントナイト最外周要素の鉛直応力履歴（全応力）

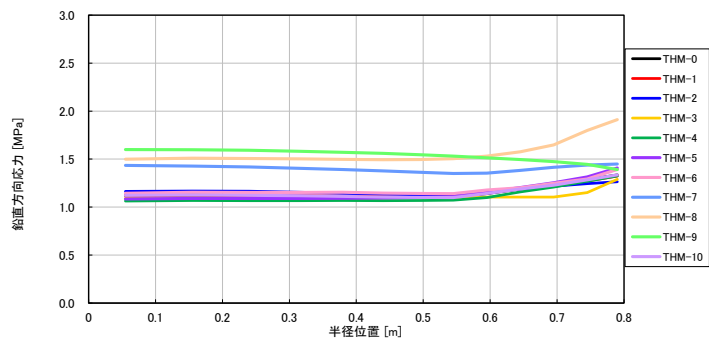


図 3.1.7-5 加熱を考慮したケースの冠水時上部ベントナイトの鉛直応力分布（全応力）

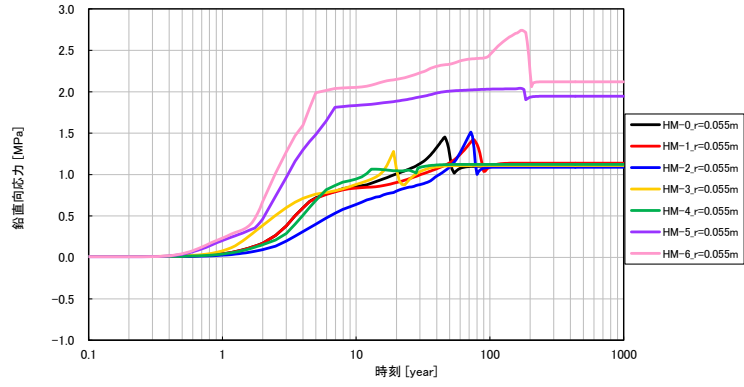


図 3.1.7-6 加熱を考慮しないケースの上部ベントナイト最内周要素の鉛直応力履歴（全応力）

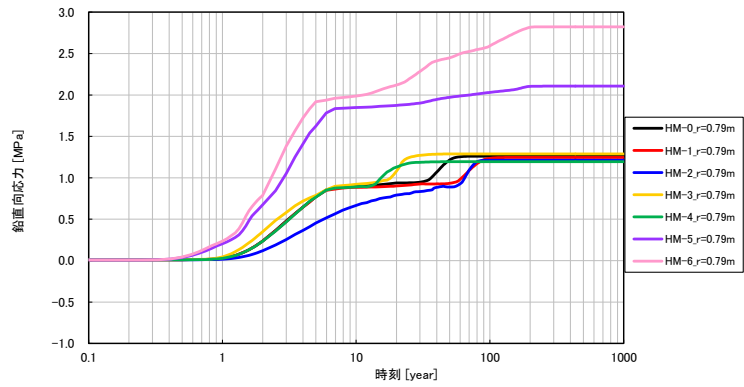


図 3.1.7-7 加熱を考慮しないケースの上部ベントナイト最外周要素の鉛直応力履歴（全応力）

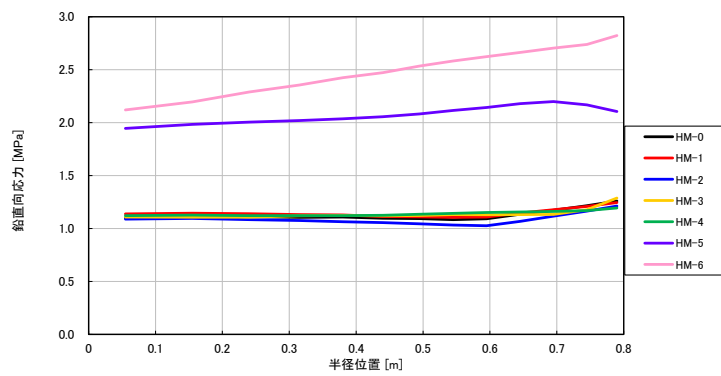


図 3.1.7-8 加熱を考慮しないケースの冠水時上部ベントナイトの鉛直応力分布（全応力）

3.1.8 感度解析結果から得られた結論

本研究では人工バリア定置後のニアフィールドの長期挙動評価を行う上で、THM 連成による数値解析を適用する際に、考慮すべき計算条件の優先度を確認するために感度解析を実施した。基本ケースと各ケースの結果を整理し、比較することで以下に述べる事項が明らかとなった。最後に感度解析結果より得られた重要パラメータについて示す。

(1) 温度変化を考慮することによる影響

岩盤やベントナイトの水蒸気拡散に関係し浸潤速度に影響がある。特にオーバーパックスの付近で乾燥し飽和時刻を遅らせる影響が大きい。しかしながら、最終的なベントナイトの冠水時刻は加熱を考慮したケースで一様に早くなった。これは温度上昇により間隙水の粘土が低下するためと考えられる。また、岩盤を含めたモデル全体に対する影響はあまり大きくないが、熱応力の発生による拘束圧の変化などの影響が見られ、オーバーパックスの最終的な鉛直変位量などベントナイト部の挙動に多少の影響が見られた。

(2) ベントナイトの膨潤が岩盤に与える影響

浸潤が進行すると人工バリア定置前に生じている拘束圧が解消する方向に膨潤圧が発生するため、初期せん断が解消する傾向が認められる。このため、岩盤にクリープモデルを設定したケースにおいてもその影響は殆ど見られなかった。しかし、極端に膨潤圧が大きくなる条件下などでは岩盤自体を破壊することも考えられる。また、本研究における感度解析では、隙間を考慮したケースでベントナイト土圧が大きくなり、岩盤の間隙水圧分布などにもその影響が見られた。

(3) 透水性の影響

浸潤速度が変わることで膨潤の進行過程に影響する他、定常に至る前の岩盤の温度分布などに多少の影響が見られる。また、ベントナイトの土圧やオーバーパックス変位に与える影響は、岩盤物性を修正したケースよりベントナイト物性自体を修正した方がその影響は大きい。しかしながら、浸潤速度はベントナイト土圧の発生履歴には影響を与えるが、最終的な発生土圧やその分布、オーバーパックスの変位量などに与える影響は小さい。

(4) ベントナイトの力学特性の影響

ベントナイトの剛性が高いと膨潤変形しにくい条件となり、オーバーパックスの変位などは殆ど見られなくなる。これはポアソン比を大きく設定した際も同様であった。ベントナイトの剛性が膨潤挙動に与える影響は大きく、浸潤の過程で変化するベントナイトの物性を評価することは重要である。なお、浸潤に伴いポアソン比が大きくなる効果は応力と間隙水圧との連成により達成されるが、本検討では膨潤相当外力に生じる軸差を解消する意図で設定しており、この目的は達成されている。

(5) 膨潤挙動のモデル化の影響

ベントナイトの膨潤がニアフィールドに与える影響は大きく、解析においてこの部分のモデル化は重要である。膨潤の進行に伴う膨潤の発生についてはサクション圧や飽和度などの変化から制御を行っているがその影響は大きく、水分特性曲線の形に大きく影響を受ける。また、最終的な膨潤圧が既知である場合にはより簡易なモデルを導入することができるが、実際の膨潤挙動は周囲の拘束圧やベントナイトの密度変化の影響を受けるため、あくまで簡便な評価といえる。

(6) 隙間をモデル化することによる影響

処分孔およびオーバーパックと緩衝材間にある隙間をモデル化することで、浸潤過程におけるベントナイト密度のむらを考慮することが可能になり、その影響を確認することができる。本研究では基本として飽和時のベントナイト剛性を設定していることから均質化しにくく、ベントナイト上部で乾燥密度が大きくなり、均質化ケースと比べて大きなベントナイト土圧を発生した。しかし、岩盤の拘束圧が大きい場合にベントナイト土圧が大きくなる傾向や、オーバーパックより上部のベントナイト土圧が大きくなる傾向は実験と整合している。

(7) 感度解析より得られた重要パラメータ

以上の結果より、ニアフィールドにおける長期挙動評価、特に発生する応力と変形に着目した検討において最も重要なパラメータは剛性やポアソン比などの力学特性であり、次に膨潤評価のモデルや隙間のモデル化などによる影響が大きいことが確認された。また、岩盤の拘束圧や境界水圧なども重要と考えられる。一方で、水理特性や伝熱特性が岩盤等の変形に与える影響は相対的に小さく、パラメータに多少のばらつきが生じていたとしてもニアフィールドの定常的な応力状態に与える影響は小さい。

3.2 数値解析に連動した要素実験

遠心力模型試験の結果を数値解析で評価するため、解析に必要な材料ごとの特性値を取得する要素試験を実施した。要素特性の取得においては、データのばらつきを統計処理できる数量のデータ数を確保することとした。

3.2.1 取得する各材料の物性値

緩衝材及び周辺岩盤（初声凝灰岩）に関して、表 3.2.1-1 に示す規格・基準で要素実験を行い、要素特性を取得した。

表 3.2.1-1 数値解析に連動した要素特性の一覧表

特性値	試験工程	要素試験方法 規格・基準		対象材料	実施数量
物理特性	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	3
				緩衝材	3
				周辺岩盤	62
	含水比試験	土の含水比試験方法	JIS A1203:209	ベントナイト	2
				岩石の含水比試験方法	JGS 2134-2009
	粒度試験	土の粒度試験方法	JIS A1204:2009	周辺岩盤	30
	土の液性限界・塑性限界試験	土の液性限界・塑性限界試験方法	JIS A1205:2009	ベントナイト	1
	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	5
	陽イオン交換容量	土の陽イオン交換容量(CEC)の試験方法	JGS 0261-2009	ベントナイト	5
	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1.6Mg/m ³)	36
				緩衝材 (乾燥密度1.7Mg/m ³)	26
緩衝材 (乾燥密度1.5Mg/m ³)				20	
	岩石の密度試験方法	JGS 2132-2009	周辺岩盤	43	
超音波伝播速度測定	パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法	JGS 2110-2009	周辺岩盤	18	
膨潤特性	膨潤圧測定	岩石の吸水膨張試験方法	JGS 2121-2009	緩衝材	4
熱特性	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	28
				周辺岩盤	12
保水特性	保水特性試験	サイクロメータ法	JGS 0151-2009	緩衝材	18
				周辺岩盤 (排水過程)	36
				周辺岩盤 (吸水過程)	38
透水特性	変水位透水試験	変水位透水試験	JIS A 1218:2009を参考	緩衝材	4
		三軸透水試験	JIS A 1218:2009を参考	周辺岩盤	2
圧密特性	圧密試験	土の段階載荷による圧密試験方法	JIS A 1217:2009を参考	周辺岩盤	2
力学特性	一軸圧縮試験	土の一軸圧縮試験方法	JIS A 1216:2009	緩衝材	60
		岩石の一軸圧縮試験方法	JGS 2521-2009	周辺岩盤	3
	一軸引張試験	岩石の一軸引張り試験方法	JGS 2552-2015	周辺岩盤	3
	三軸CU試験	土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験方法	JGS 0522-2009を参考	緩衝材	4
	三軸CD試験	岩石のCD三軸圧縮試験	JGS 2534-2009	周辺岩盤	4

3.2.2 実施結果

(1) 物理特性

1) 材料の物理特性

緩衝材（ベントナイト：珪砂 7：3）作成に用いた混合材料の物理特性を表 3.2.2-1～表 3.2.2-2 に示す。

表 3.2.2-1 混合材料の物理特性（ベントナイト：クニゲル V1）

物理特性	固相の密度 ρ_s (Mg/m ³)	含水比 w_n (%)	液性限界 W_L (%)	塑性限界 W_P (%)	塑性指数 I_p
個数	3	2	1	1	1
平均	2.786	8.5	522.0	22.6	499.4
標準偏差	0.016	0.1	---	---	---

表 3.2.2-2 混合材料の物理特性（珪砂）

物理特性	固相の密度 ρ_s (Mg/m ³)	珪砂 3号 (2mmアンダー)	珪砂 5号
		2.645	2.633

2) ベントナイトの特性

混合材料に用いたベントナイトのメチレンブルー吸着量及び陽イオン交換容量の測定結果を表 3.2.2-3～表 3.2.2-5 及び図 3.2.2-1～図 3.2.2-2 に示す。

表 3.2.2-3 ベントナイトのメチレンブルー吸着量及び陽イオン交換容量の測定結果

メチレンブルー 吸着量	モンモリロナイト 含有率※	陽イオン交換容量				
		(meq/100g)				
(mmol/100g)	(%)	Na	Ca	K	Mg	総陽イオン
5	5	5	5	5	5	5
75.6	54.0	67.29	47.77	1.52	2.21	118.79

※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

表 3.2.2-4 モンモリロナイト含有率

試料名		メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	モンモリロナイト 含有率※(%)
クニゲルV1- RW	①	76.00	54.29
	②	73.96	52.83
	③	75.97	54.26
	④	76.00	54.29
	⑤	75.97	54.26
	平均	75.6	54.0

※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

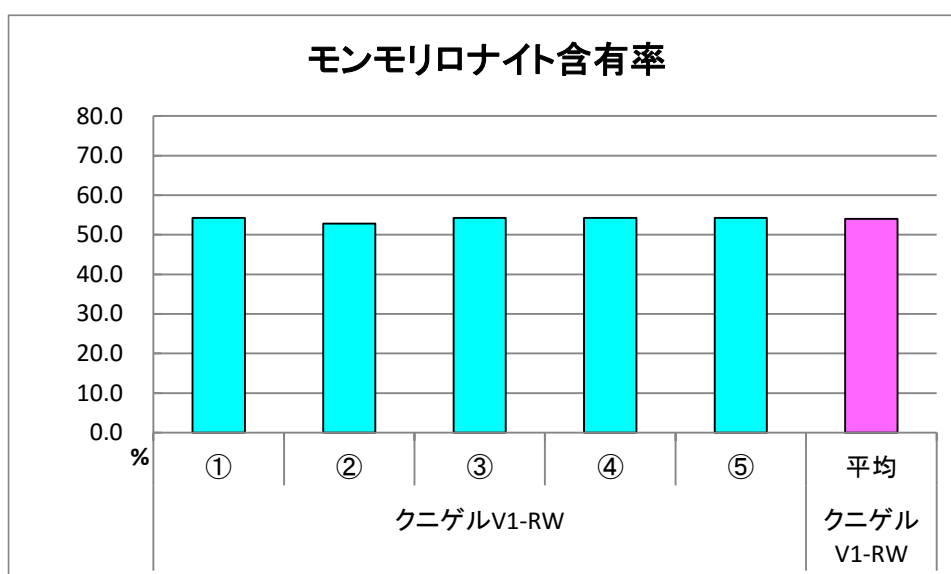


図 3.2.2-1 モンモリロナイト含有率

表 3.2.2-5 ベントナイトの陽イオン交換容量

試料名		試料100g当りの浸出イオン量 (meq/100g)					浸出イオン量の割合 (%)				
		Na	Ca	K	Mg	総陽イオン	Na	Ca	K	Mg	総陽イオン
クニゲル V1-RW	①	66.96	46.99	1.54	2.18	117.67	56.91	39.94	1.31	1.85	100.00
	②	68.00	48.94	1.55	2.24	120.73	56.33	40.54	1.28	1.86	100.00
	③	66.52	47.52	1.54	2.20	117.78	56.48	40.35	1.31	1.87	100.00
	④	67.69	47.78	1.52	2.21	119.20	56.79	40.08	1.28	1.85	100.00
	⑤	67.27	47.62	1.48	2.20	118.57	56.73	40.16	1.25	1.86	100.00
	平均	67.29	47.77	1.52	2.21	118.79	56.64	40.21	1.28	1.86	100.00

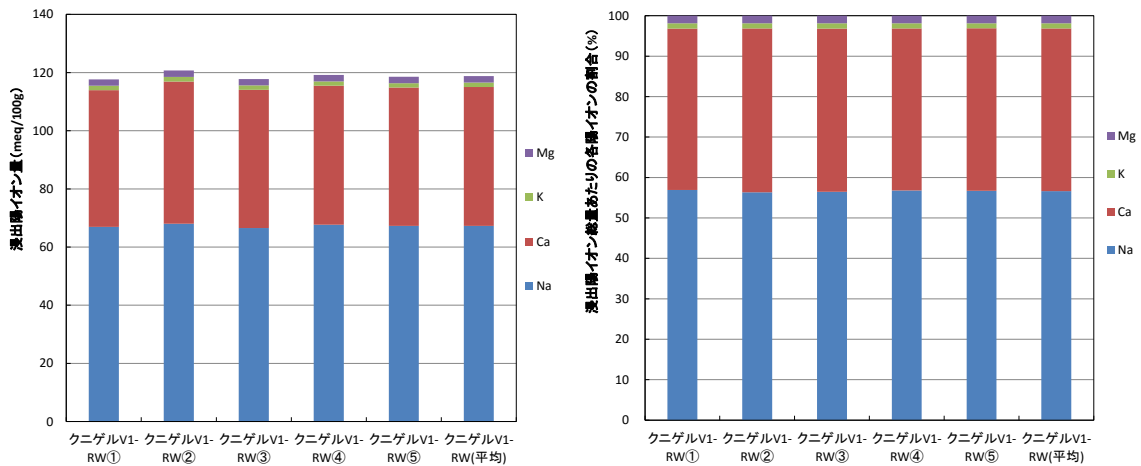


図 3.2.2-2 陽イオン交換容量のまとめ

3) 緩衝材の物理特性

緩衝材の物理特性を表 3.2.2-6 に示す。

表 3.2.2-6 緩衝材の物理特性

物理特性	固相の密度 ρ_s (Mg/m ³)	作成時 目標密度 1.6Mg/m ³		
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	間隙比 e	間隙率 $n=e/(1+e)$
個数	3	36	36	36
平均	2.705	1.585	0.706	0.414
標準偏差	0.004	0.016	0.017	0.006

物理特性	作成時 目標密度 1.7Mg/m ³			作成時 目標密度 1.5Mg/m ³		
	乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	間隙比 e	間隙率 $n=e/(1+e)$	乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	間隙比 e	間隙率 $n=e/(1+e)$
個数	26	26	26	13	13	13
平均	1.695	0.596	0.373	1.496	0.808	0.447
標準偏差	0.016	0.015	0.006	0.007	0.009	0.003

4) 周辺岩盤の物理特性

周辺岩盤の物理特性を表 3.2.2-7～表 3.2.2-8 及び図 3.2.2-3 に示す。

表 3.2.2-7 周辺岩盤の物理特性

物理特性	固相の密度 ρ_s (Mg/m ³)	含水比 w_n (%)	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 $n=e/(1+e)$
個数	62	62	43	43	43	43
平均	2.760	22.9	2.060	1.678	0.645	0.392
標準偏差	0.030	1.3	0.029	0.037	0.033	0.012

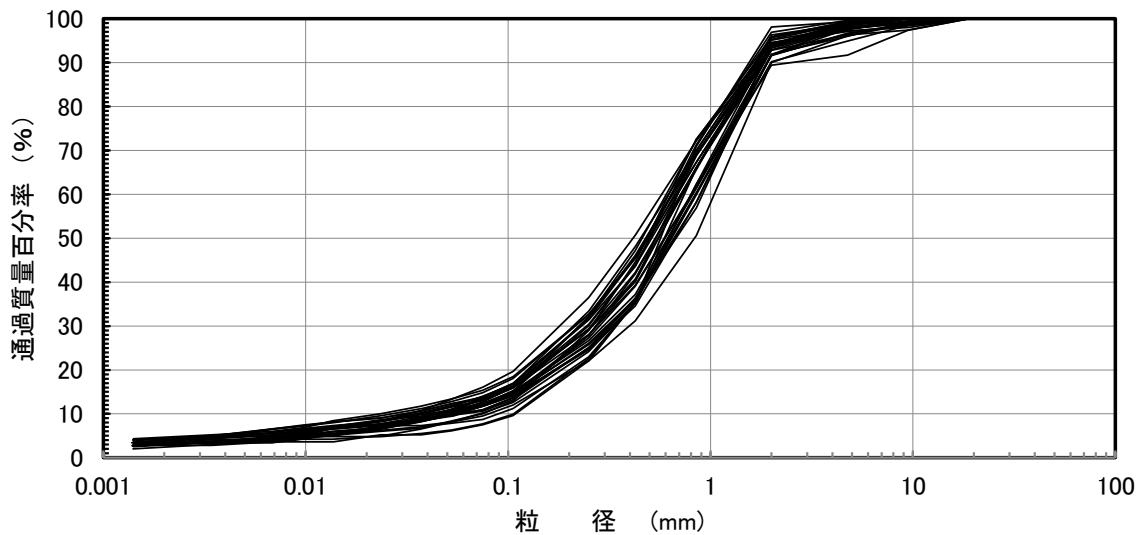


図 3.2.2-3 周辺岩盤の粒径加積曲線

表 3.2.2-8 周辺岩盤の物理特性 (超音波伝播速度測定)

物理特性	P波伝播速度 V_p (m/s)	S波伝播速度 V_p (m/s)	動弾性係数 E_d (Mpa)	動せん断弾性係数 G_d (Mpa)	動ポアソン比 ν_d
個数	18	18	18	18	18
平均	2487	979	5745	2063	0.40
標準偏差	238	186	2133	806	0.03

(2) 緩衝材の膨潤特性

1) 緩衝材の膨潤圧測定

緩衝材の膨潤圧測定は、図 3.2.2-4 に示す透水試験装置を用いた。供試体の乾燥密度は 1.4, 1.5, 1.6, 1.7Mg/m³ の 4 種類とした。

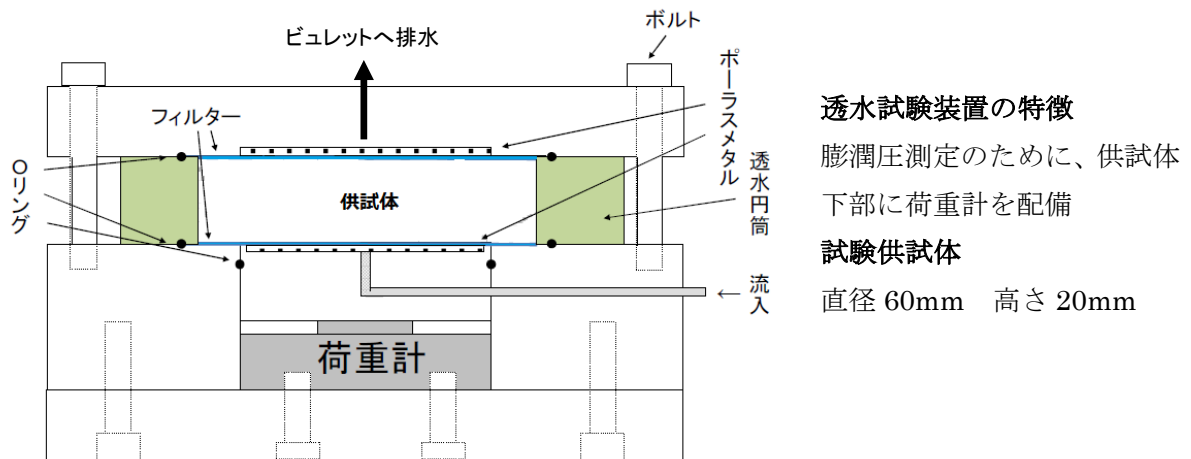


図 3.2.2-4 膨潤圧測定に用いた透水試験装置の概要



流入量・流出量の計測

流入量、流出量は、二重管ビュレット (2cm³) で計測する

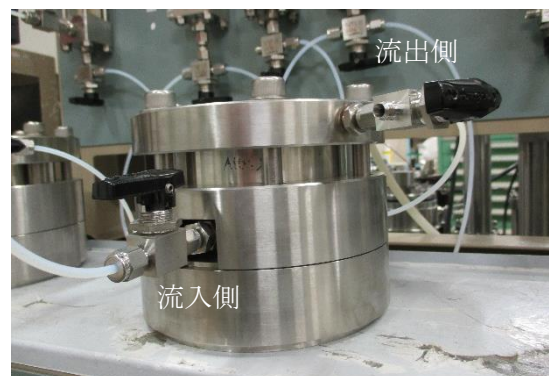


図 3.2.2-5 膨潤圧測定状況 (供試体下部より給水)

所定の乾燥密度に圧縮成形した供試体を透水試験装置にセットした後、供試体下部のビュレットより給水（図 3.2.2-5 参照）を行い、膨潤圧を測定した。圧力が一定値を示した時点で測定を終了し、緩衝材の平衡膨潤圧とした。

図 3.2.2-6 に供試体作成時の乾燥密度を変化させた緩衝材の吸水膨張圧力の経時変化を示す。図 3.2.2-7 に供試体作成時の乾燥密度と膨潤圧との関係を示す。供試体の乾燥密度の増加とともに、膨潤圧も増加する傾向が認められた。

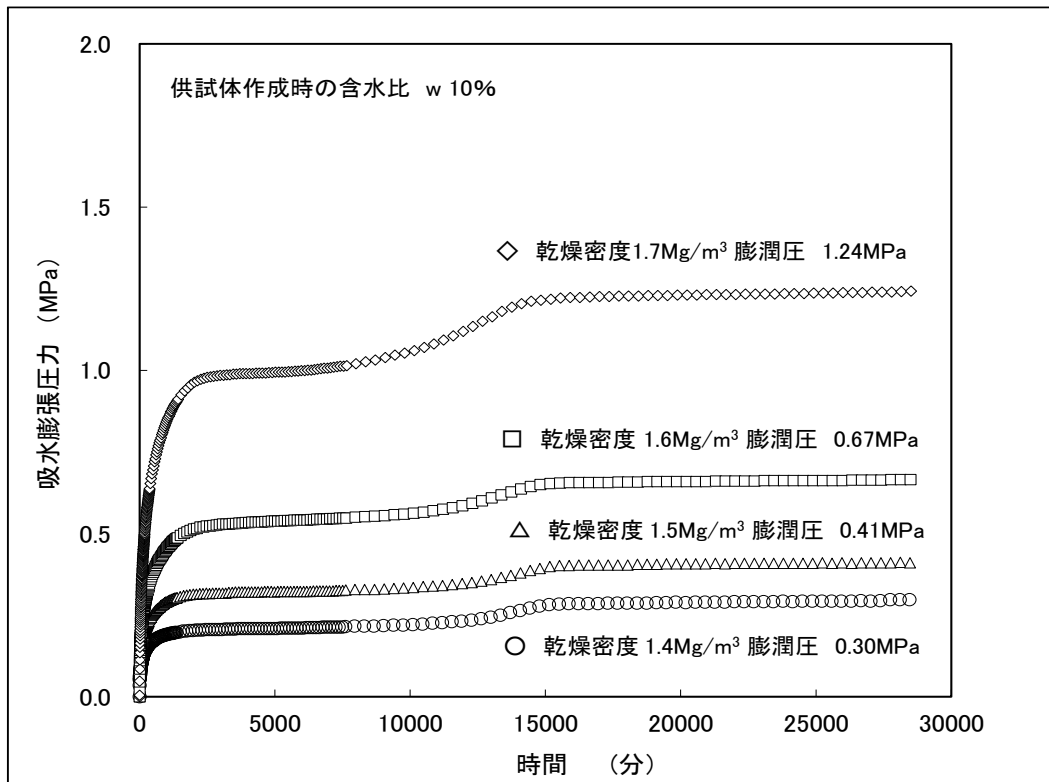


図 3.2.2-6 供試体作成時の乾燥密度を変化させた緩衝材の吸水膨張圧力の経時変化

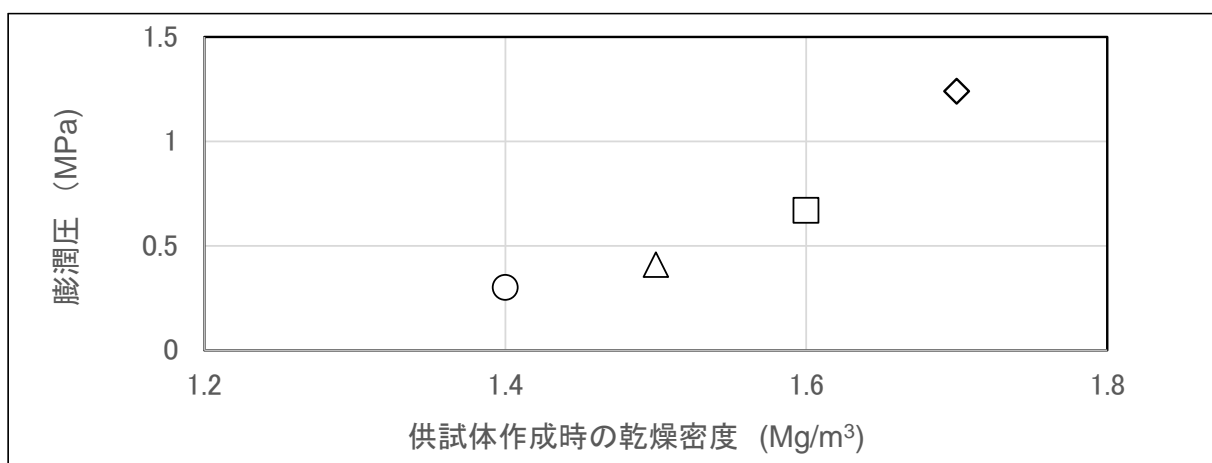


図 3.2.2-7 供試体作成時の乾燥密度を変化させた緩衝材の平衡膨潤圧
(供試体作成時の含水比 : 10%)

(3) 熱特性

1) 熱伝導率の測定方法

熱伝導率の測定は、プローブ式(クリマテック製 CHF-TP08)の土壤熱伝導率測定器を用いて実施した。熱伝導率は、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求めた。

土壤熱電率測定器の諸元を表 3.2.2-9 に測定プローブの概要を図 3.2.2-8 に示し、熱伝導率測定のための供試体の穿孔状況を図 3.2.2-8 に、熱伝導率の測定状況を図 3.2.2-10 に示す。

表 3.2.2-9 土壤熱伝導率測定器の諸元

センサ部	プローブ式
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 $\phi 1 \times 90(\text{mm})$ 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
センサの検定方法	グリセリンの熱伝導率 0.3(W/mK)を確認する。

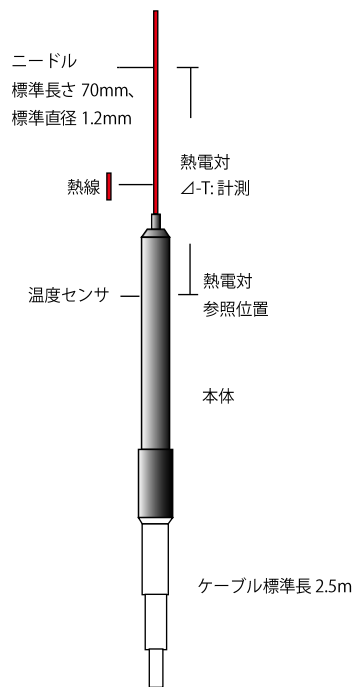
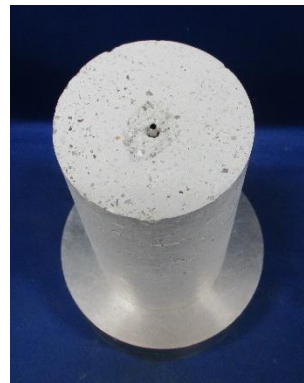


図 3.2.2-8 測定プローブの概要

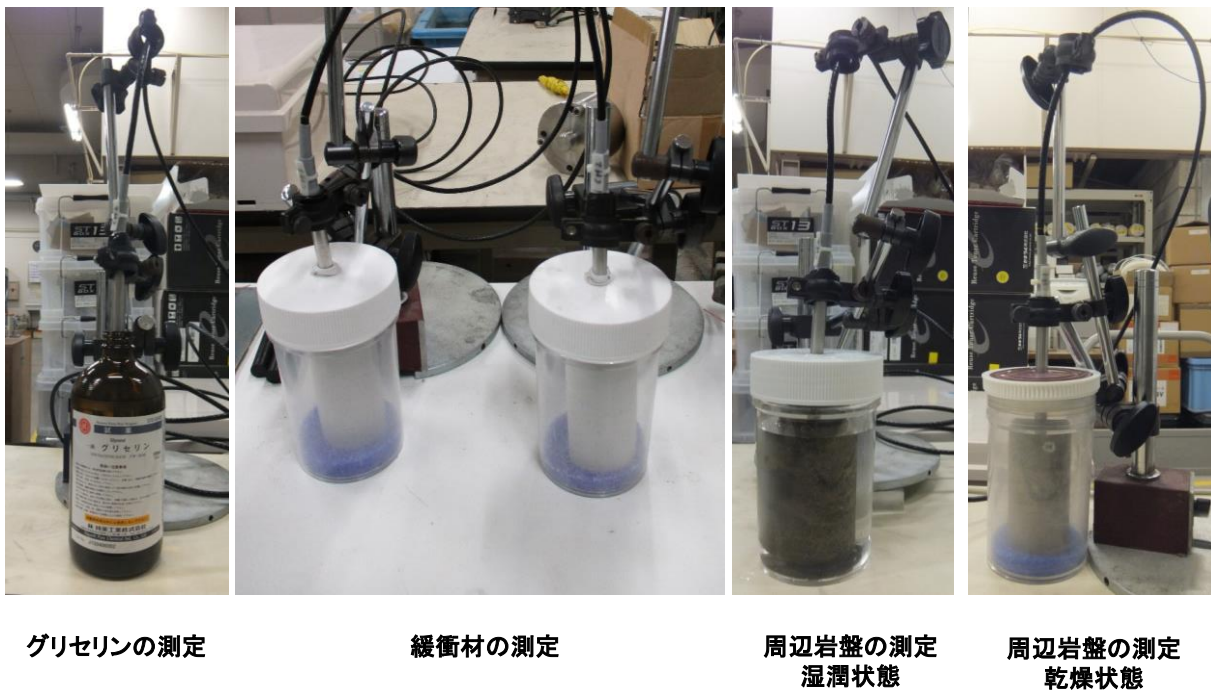


周辺岩盤



緩衝材

図 3.2.2-9 測定供試体の穿孔状況



グリセリンの測定

緩衝材の測定

周辺岩盤の測定
湿潤状態

周辺岩盤の測定
乾燥状態

図 3.2.2-10 熱伝導率の測定状況

熱伝導率の測定時には、グリセリン(0.3W/mK程度)の熱伝導率を測定し、熱伝導率計の動作確認を行った。緩衝材の熱伝導率測定は、1.5、1.6、1.7Mg/m³の3種類の乾燥密度条件で作成した供試体を用いて測定した。供試体は、所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト7：珪砂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、静的締固めにより作成した。周辺岩盤の熱伝導率は、湿潤状態、乾燥状態及び任意の含水比状態で測定した。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、乾燥供試体に加水を行い、任意の含水比状態とした後、熱伝導率を測定した。

2) 熱特性

土壌熱伝導率測定器で測定した熱伝導率と飽和度の関係を取りまとめ、緩衝材及び周辺岩盤の熱特性とした。緩衝材の熱伝導率測定結果を図 3.2.2-11 に示す。緩衝材の熱伝導率は、供試体作成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い。熱伝導率と飽和度との関係においては、低含水比状態では、結晶層間に優先的に水が入ることから、飽和度の変化に対する熱伝導率の変化が小さくなるのに対し、飽和度が高くなるとマクロ間隙に水が溜まることから、間隙中の水が支配するような線形的な挙動になり、非線形的な挙動になったものと推定される。

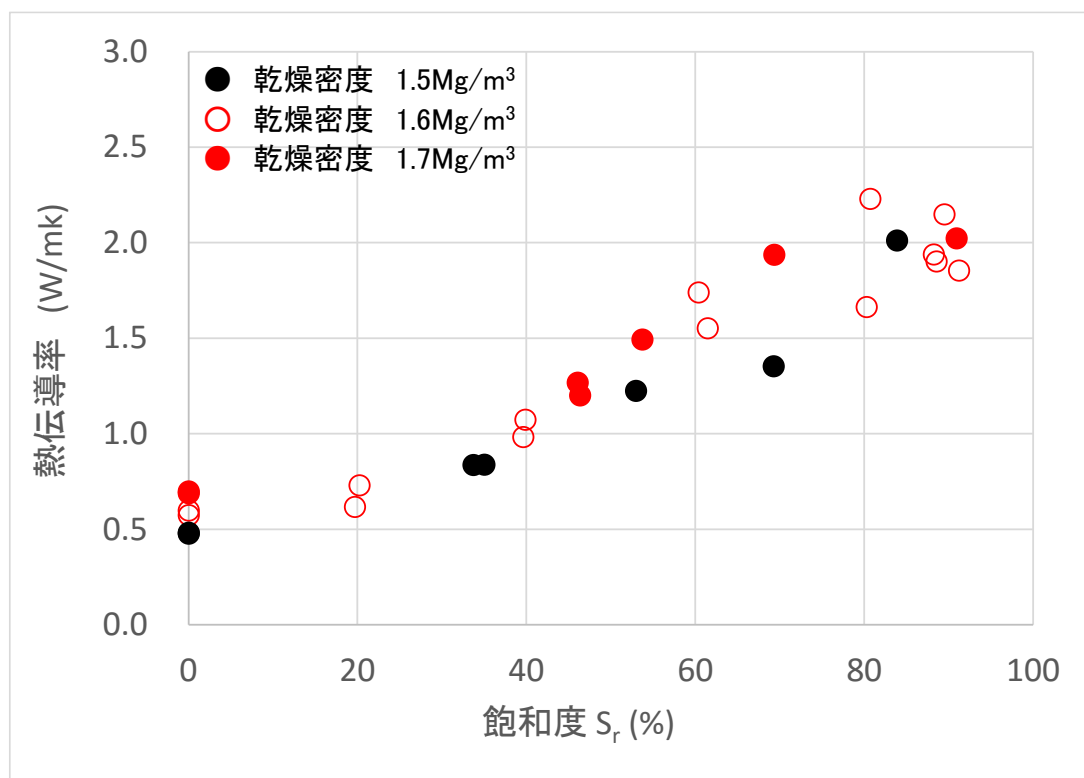


図 3.2.2-11 緩衝材の熱伝導率測定結果

周辺岩盤の熱伝導率測定結果を図 3.2.2-12 に示す。 周辺岩盤の熱伝導率は、飽和度の上昇とともに増加する傾向が認められた。熱伝導率と飽和度との関係は、固相（周辺岩盤）の剛性が十分大きく飽和度に関係なく固相の間隙率が一定であることから、間隙中の水が支配するような線形的な挙動になったものと推定される。

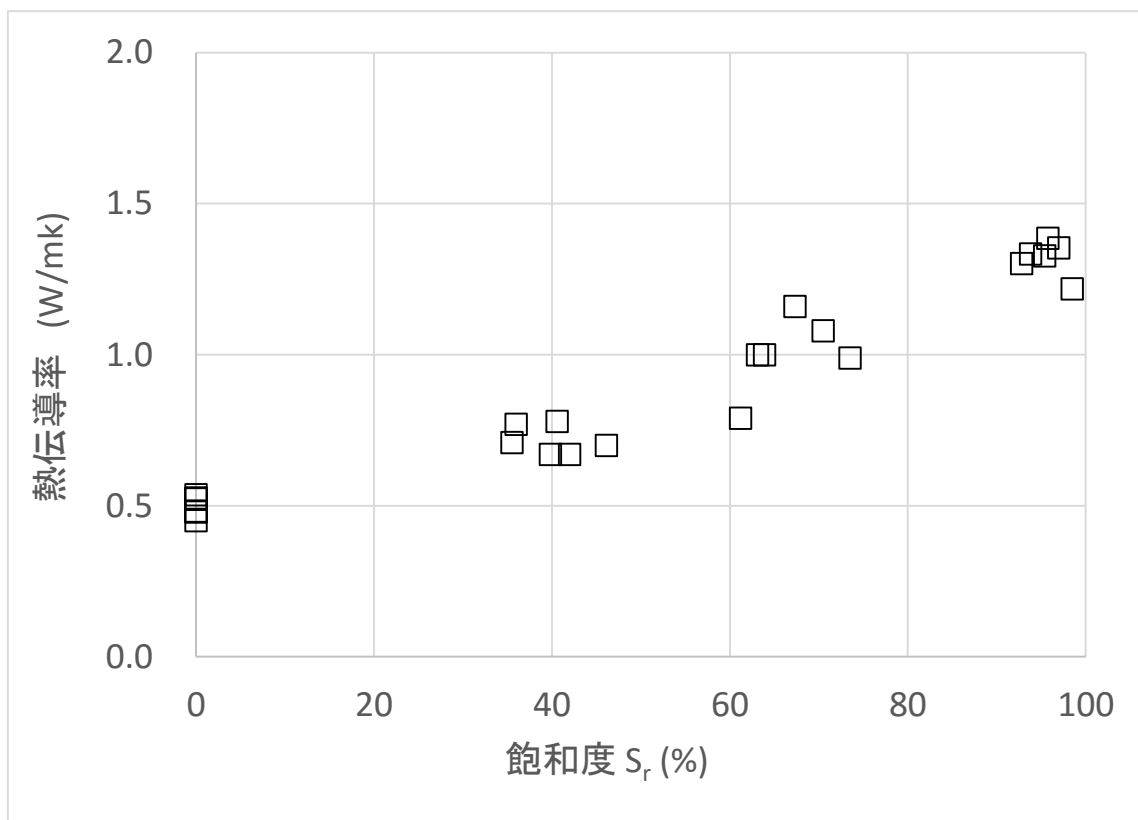


図 3.2.2-12 周辺岩盤の熱伝導率測定結果

(4) 保水特性

1) 保水特性の測定方法

保水特性の測定は、サイクロメータ（DECAGON 製 WP4-T）を用いて実施した。なお、測定結果の安定性を向上させる目的で恒温槽内にサイクロメータを設置した。サイクロメータの諸元を表 3.2.2-10 に恒温槽及びサイクロメータを図 3.2.2-13 に示す。

表 3.2.2-10 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~-300MPa
分解能	0.01MPa
温度設定	15~40℃ 0.1℃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 3.2.2-13 サイクロメータ及び恒温槽

2) 供試体の作成方法

緩衝材の保水特性は、 1.6Mg/m^3 の乾燥密度条件で作成した供試体を用いて測定した。供試体(図 3.2.2-14 参照)は、所定の含水比に調整した混合土(ベントナイト7: 珪砂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、静的締固めにより作成した。



図 3.2.2-14 作成した緩衝材供試体(直径 35mm×高さ 4mm程度)

周辺岩盤の保水特性は、図 3.2.2-15 に示すように、内径 $\phi 35(\text{mm})$ のダイヤモンドコアドリルでくり抜いたコアをダイヤモンドカッターで厚さ4(mm)程度にカットして作成した。周辺岩盤の保水特性は、2種類の飽和度調整方法(排水過程による調整、吸水過程による調整)で任意の含水比状態に調整した供試体を用いて測定した。排水過程による飽和度調整では、湿潤状態の試料を 110°C 恒温乾燥炉に入れ、乾燥時間を調節することにより任意の水分に調整を実施した。吸水過程による飽和度調整では、 110°C 炉乾燥試料に、重量測定を行いながら霧吹きで水を与えることにより任意の水分に調整を実施した。



湿潤状態



110°C 炉乾燥状態

図 3.2.2-15 周辺岩盤供試体 (直径 35mm×高さ 4mm程度)

3) 保水特性

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 の式 (式 3.2.3-2) により回帰を行った。

$$S_e = \{1 + (\alpha h)^n\}^{-m} \quad \text{式 3.2.2-1}$$

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad \text{式 3.2.2-2}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \text{式 3.2.2-3}$$

ここに、

S_e : 有効飽和度

θ : 体積含水率(%)

θ_r : 最小含水量 (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)

緩衝材の保水特性を表 3.2.2-11 及び図 3.2.2-16 に、周辺岩盤の保水特性を表 3.2.2-12～表 3.2.2-13 及び図 3.2.2-7～図 3.2.2-18 に示す。

緩衝材及び周辺岩盤の保水特性は Van Genuchten の式によく一致する結果となった。周辺岩盤においては、有効飽和度 S_e が低い領域で回帰式と測定結果にかい離現象が認められた。これは、有効飽和度の低い領域では、化学ポテンシャル値が大きく、サイクロメータの測定限界 (測定限界: -300MPa) が影響したものと考えられる。化学ポテンシャルの大きい領域 (有効飽和度の低い領域) においては、緩衝材及び周辺岩盤ともに、蒸気圧法による測定を併用し、保水特性の精度向上を図る必要がある。

表 3.2.2-11 緩衝材の保水特性

供試体 乾燥密度 (Mg/m ³)	供試体 含水比 w (%)	化学ポテンシャル -ψ (Mpa)	温度 (°C)	体積含水率 θ (%)	飽和度 S _e (%)
1.571	5.4	43.52	25.1	8.5	20.2
1.586	5.1	47.15	25.1	8.1	19.5
1.579	5.3	64.12	25.1	8.4	20.1
1.597	10.1	27.41	25.1	16.1	39.4
1.596	9.9	29.95	25.1	15.8	38.5
1.586	10.4	31.71	25.1	16.5	39.8
1.608	14.9	11.14	25.2	24.0	59.1
1.613	14.6	10.62	25.2	23.5	58.3
1.600	15.5	8.59	25.2	24.8	60.7
1.608	20.0	3.00	25.2	32.2	79.3
1.594	20.6	2.92	25.2	32.8	79.9
1.597	20.8	3.20	25.2	33.2	81.1
1.612	21.9	3.24	25.2	35.3	87.4
1.601	22.7	3.27	25.2	36.3	89.0
1.629	20.2	2.33	25.2	32.9	82.7
1.570	24.3	1.72	25.2	38.2	90.9
1.583	24.1	1.93	25.2	38.2	91.9
1.576	24.0	1.93	25.2	37.8	90.7

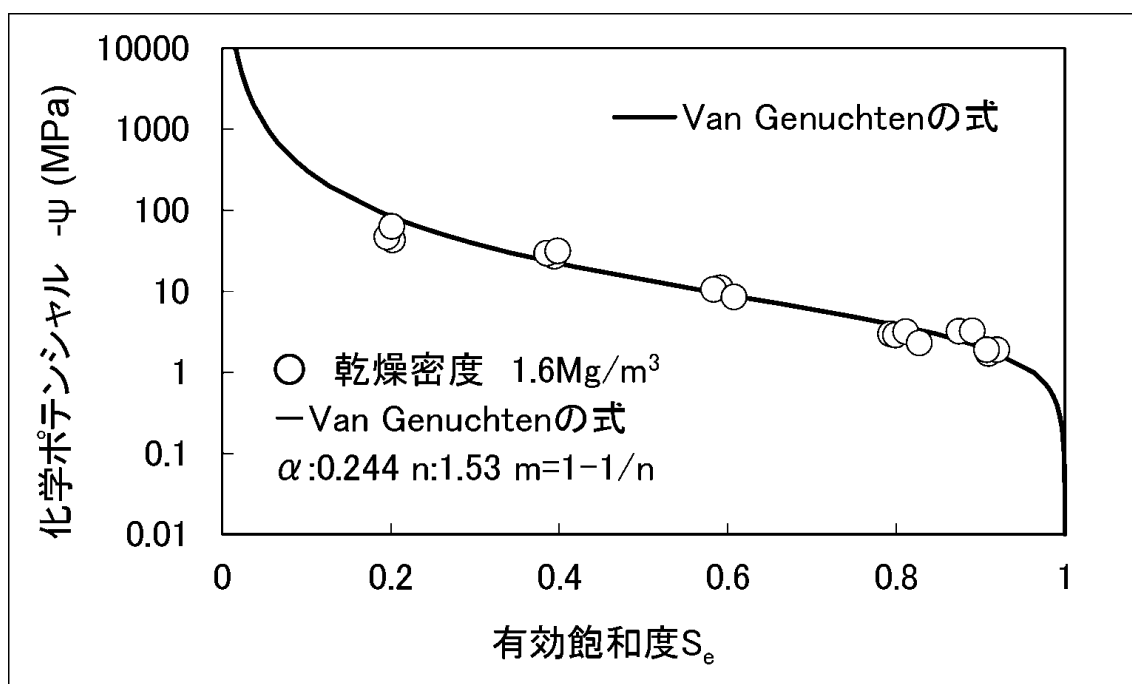


図 3.2.2-16 緩衝材の保水特性

表 3.2.2-12 周辺岩盤の保水特性（排水過程）

供試体 乾燥密度 (Mg/m ³)	供試体 含水比 w (%)	化学ポテンシャル - ψ (Mpa)	温度 (°C)	体積含水率 θ (%)	飽和度 S _r (%)
1.508	27.7	0.08	25.1	41.9	92.1
1.517	23.7	0.28	25.2	36.1	79.8
1.570	17.6	1.31	25.2	27.7	64.1
1.514	10.3	5.37	25.1	15.6	34.5
1.635	8.0	14.04	25.2	13.1	32.1
1.717	4.6	36.30	25.1	7.9	20.9
1.579	3.5	58.91	25.1	5.5	12.9
1.532	1.1	58.91	25.1	1.7	3.8
1.639	2.9	51.64	25.1	4.8	11.7
1.664	6.3	8.72	25.2	10.5	26.4
1.648	8.8	4.73	25.1	14.5	36.0
1.518	20.3	0.04	25.1	30.9	68.5
1.684	16.4	0.85	25.2	27.7	70.8
1.723	16.0	0.33	25.2	27.7	73.4
1.570	19.9	0.14	25.1	31.3	72.5
1.664	19.3	0.40	25.2	32.2	80.9
1.665	18.9	0.04	25.1	31.6	79.3
1.526	6.6	11.10	25.2	10.1	22.5
1.680	17.8	0.15	25.2	30.0	76.4
1.651	17.6	0.31	25.2	29.1	72.3
1.576	18.8	0.50	25.2	29.7	69.1
1.656	17.5	0.28	25.2	29.1	72.5
1.661	17.3	0.21	25.2	28.8	72.2
1.552	19.1	0.09	25.2	29.7	67.7
1.654	14.2	0.44	25.2	23.6	58.6
1.651	13.1	0.69	25.2	21.7	53.8
1.616	11.2	1.93	25.2	18.2	43.7
1.690	10.8	3.07	25.2	18.3	47.1
1.673	10.5	2.44	25.2	17.6	44.6
1.685	18.1	0.15	25.2	30.6	78.3
1.611	23.1	0.05	25.1	37.3	89.4
1.628	23.6	0.03	25.1	38.5	93.7
1.625	23.4	0.04	25.1	38.1	92.5
1.607	23.3	0.01	25.1	37.6	89.6
1.633	22.8	0.03	25.1	37.3	91.2
1.656	21.8	0.03	25.1	36.2	90.3

表 3.2.2-13 周辺岩盤の保水特性 (吸水過程)

供試体 乾燥密度 (Mg/m ³)	供試体 含水比 w (%)	化学ポテンシャル ψ (Mpa)	温度 (°C)	体積含水率 θ (%)	飽和度 S_r (%)
1.530	21.7	0.04	25.2	33.3	74.5
1.591	15.7	0.70	25.2	25.1	59.0
1.538	8.7	2.93	25.2	13.4	30.2
1.652	6.6	8.67	25.2	10.9	27.2
1.733	3.7	21.77	25.1	6.4	17.2
1.590	2.4	47.83	25.1	3.8	9.0
1.527	1.6	108.82	25.1	2.5	5.5
1.639	2.9	27.73	25.1	4.8	11.7
1.661	6.5	4.23	25.2	10.8	27.1
1.648	8.6	2.21	25.2	14.2	35.2
1.513	19.5	0.01	25.1	29.6	65.3
1.641	1.3	23.99	25.2	2.1	5.3
1.511	16.4	0.14	25.1	24.9	54.8
1.684	16.6	0.06	25.2	28.0	71.7
1.723	16.0	0.04	25.1	27.7	73.4
1.567	17.6	0.07	25.1	27.7	63.8
1.662	17.3	0.12	25.2	28.8	72.3
1.662	15.6	0.11	25.1	26.0	65.2
1.713	11.5	0.25	25.2	19.8	51.9
1.523	7.8	3.42	25.2	11.9	26.5
1.680	16.1	0.05	25.1	27.1	69.1
1.654	15.9	0.06	25.2	26.4	65.6
1.576	16.5	0.14	25.2	26.1	60.6
1.651	14.7	0.17	25.2	24.3	60.4
1.655	8.1	2.43	25.2	13.4	33.5
1.552	11.7	0.47	25.2	18.2	41.5
1.648	5.9	2.69	25.2	9.8	24.1
1.651	9.2	1.05	25.2	15.2	37.8
1.613	13.1	0.25	25.1	21.2	50.8
1.685	11.5	1.11	25.2	19.4	49.8
1.670	12.3	0.41	25.1	20.6	52.0
1.682	17.6	0.05	25.1	29.7	75.8
1.608	21.9	0.03	25.1	35.3	84.4
1.625	21.9	0.01	25.1	35.7	86.5
1.625	21.3	0.01	25.1	34.7	84.2
1.604	22.1	0.01	25.1	35.6	84.6
1.627	21.4	0.01	25.1	34.9	84.8
1.656	20.0	0.01	25.1	33.2	82.8

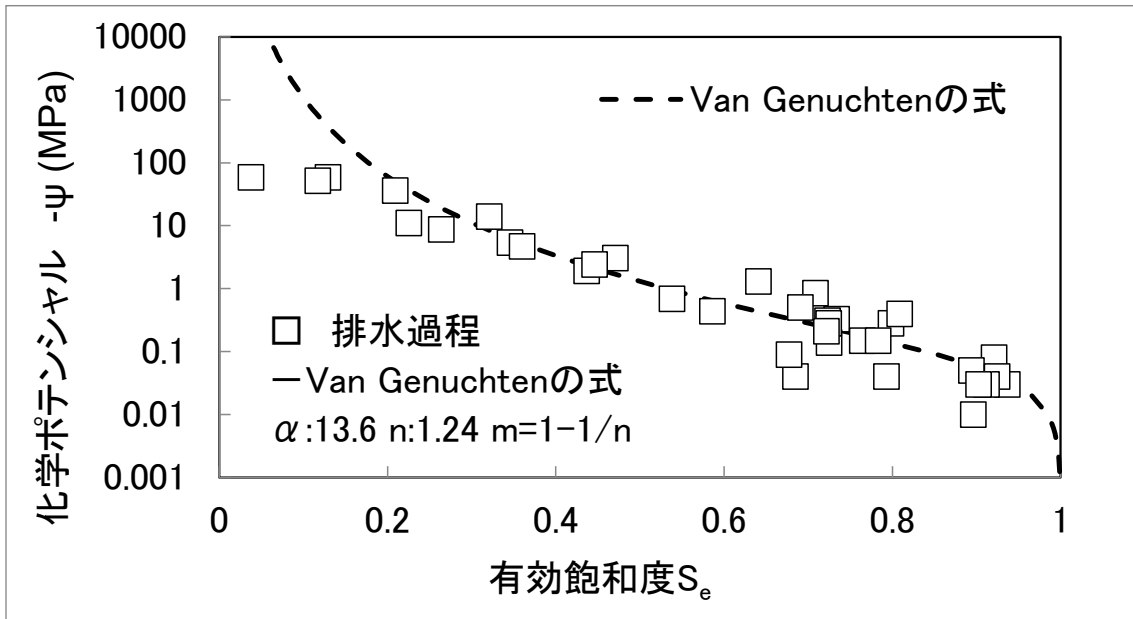


図 3.2.2-17 周辺岩盤の保水特性（排水過程）

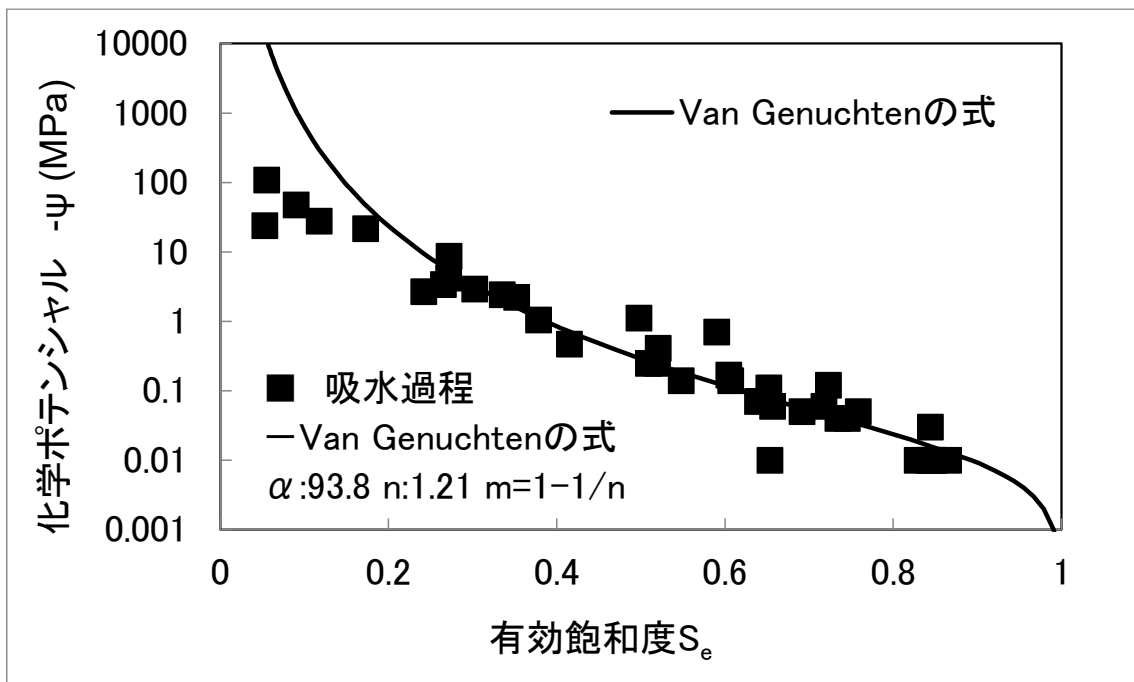


図 3.2.2-18 周辺岩盤の保水特性（吸水過程）

(5) 透水特性

1) 透水係数の測定方法（緩衝材）

周辺岩盤の透水試験は、JIS A 1218:2009 を参考に、図 3.2.2-19～図 3.2.2-20 に示す透水試験装置を用いた変水位透水試験を実施した。透水係数は、供試体下部及び供試体上部に二重管ビュレットを配備していることから、式 3.2.3-4 に示す変水位透水試験の式を用いて算出した。

$$K_T = 2.303 \frac{(a_{in} \times a_{out})L}{(a_{in} + a_{out})A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{100} \quad \text{式 3.2.2-4}$$

ここに、

K_t : T(°C)における透水係数 (m/s)

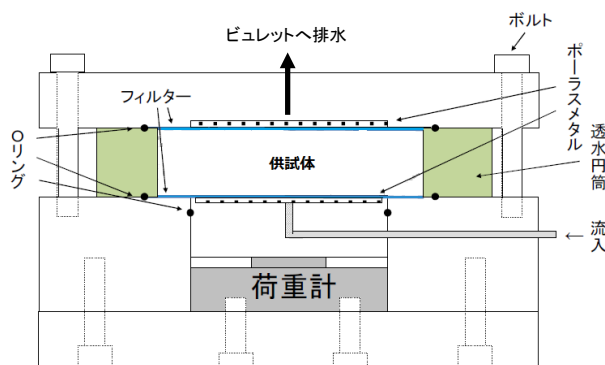
a_{in} : 流入側のビュレットの断面積 (cm²)

a_{out} : 流出側のビュレットの断面積 (cm²)

$t_2 - t_1$: 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)



透水試験装置の特徴

膨潤圧測定のために、供試体

下部に荷重計を配備

試験供試体

直径 60mm 高さ 20mm

図 3.2.2-19 透水試験装置の概要



透水試験装置の特徴

直径 60mm 高さ 20mm

二重管ビュレット (2cm³)

で流量を計測

流入側、流出側ともに圧力付加が可能

図 3.2.2-20 変水位透水試験装置

2) 緩衝材の給水過程

緩衝材の給水過程においては、所定の乾燥密度条件(4種類)で作成した供試体を透水試験装置にセットした後、供試体下部のビュレットより給水を行い、時間の経過に伴う吸水量を測定した。供試体作成時の初期空隙量より飽和度 100%時の吸水量と供試体下部より給水される総吸水量が等しくなり、かつ、同時に計測している吸水膨張圧力が一定値を示した時点において吸水過程の測定を終了した。図 3.2.2-21 には、吸水量と経過時間 (\sqrt{t}) の関係を示す。

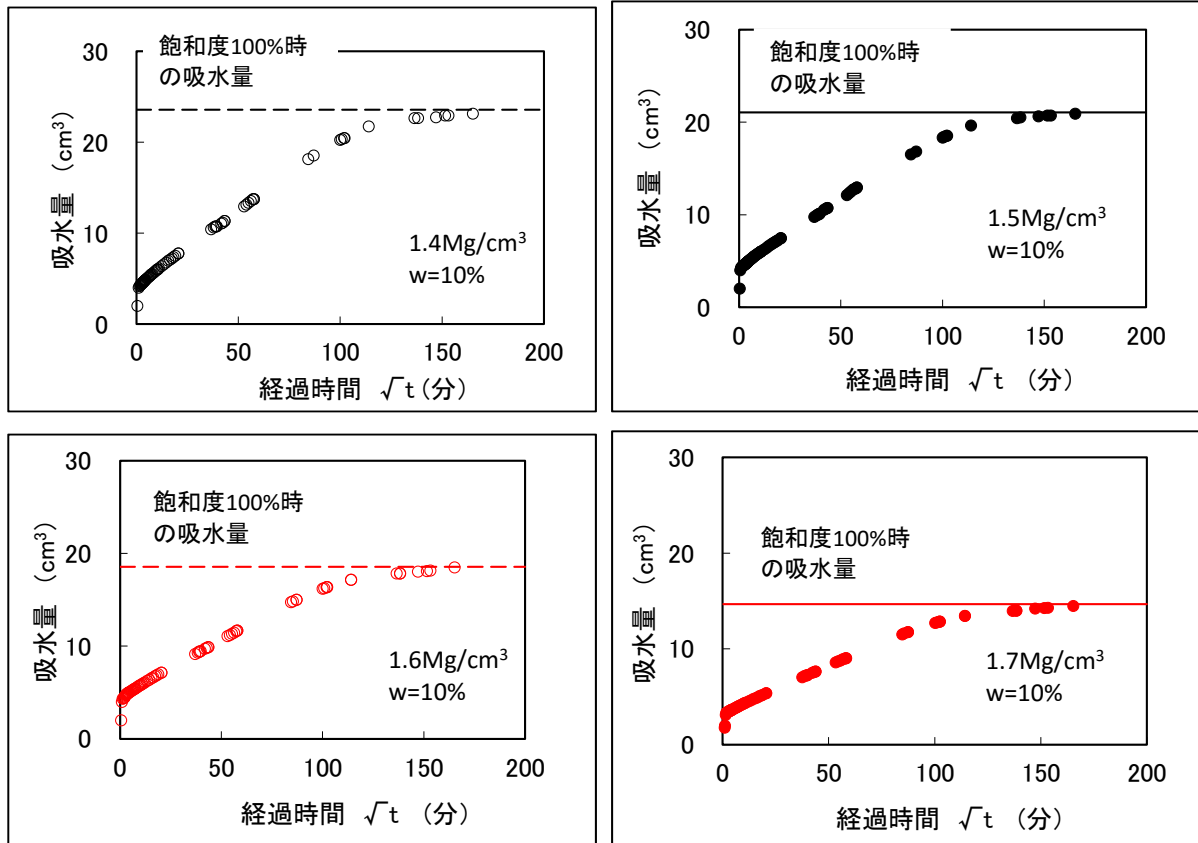


図 3.2.2-21 吸水量と経過時間の関係

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出した。また、吸水の速度を見かけの透水係数として飽和度変化との関係を求めた。図 3.2.2-22～図 3.2.2-25 には、給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係を示す。

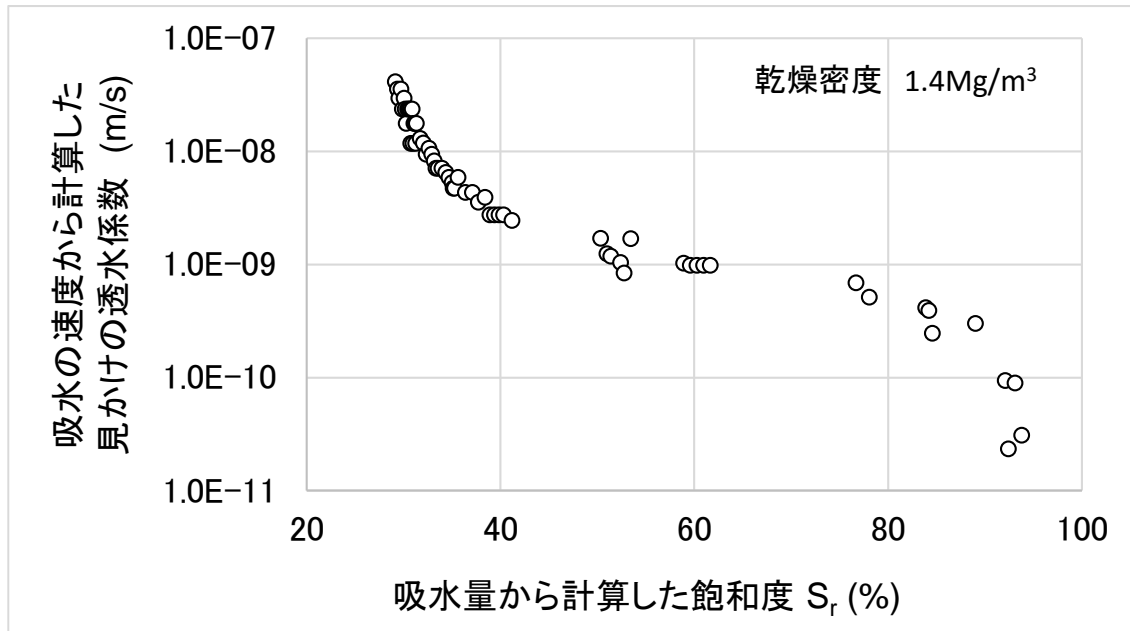


図 3.2.2-22 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係

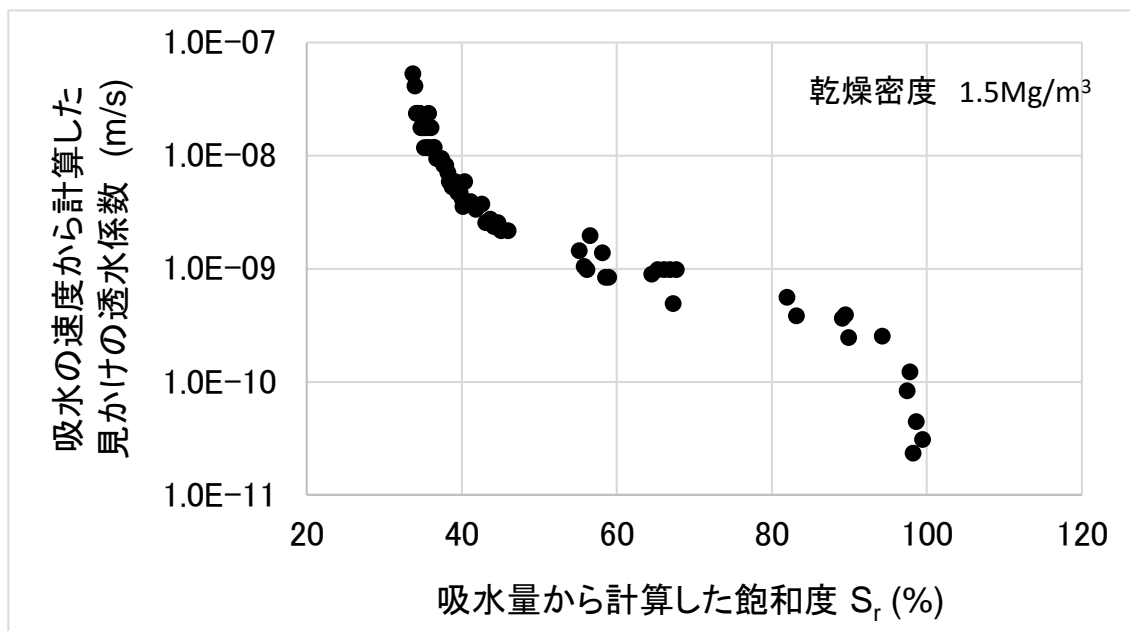


図 3.2.2-23 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係

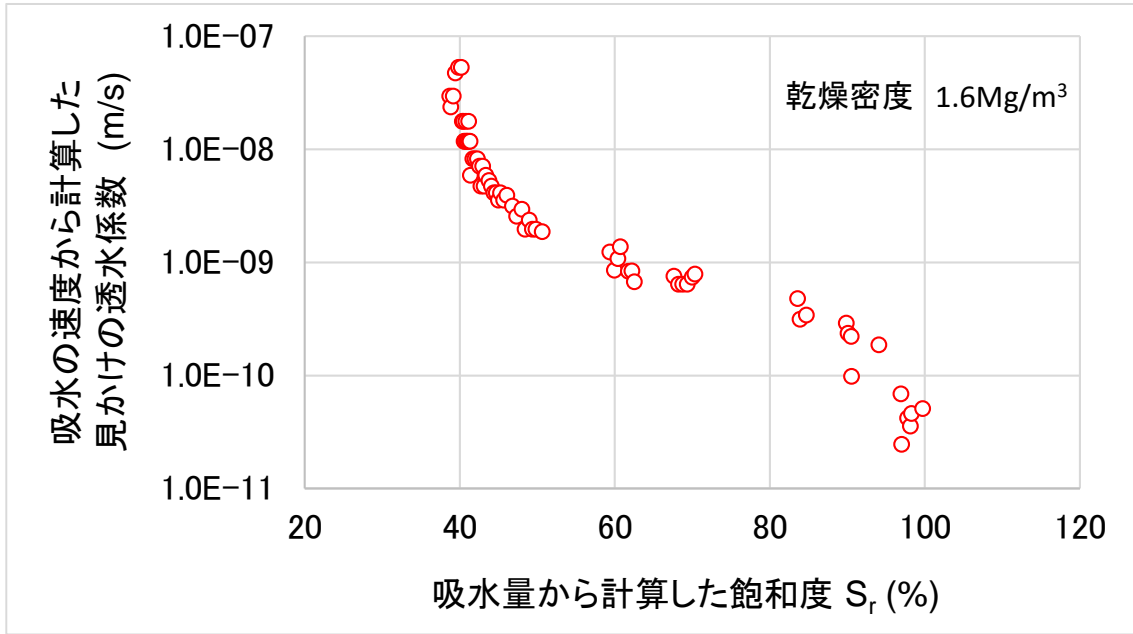


図 3.2.2-24 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係

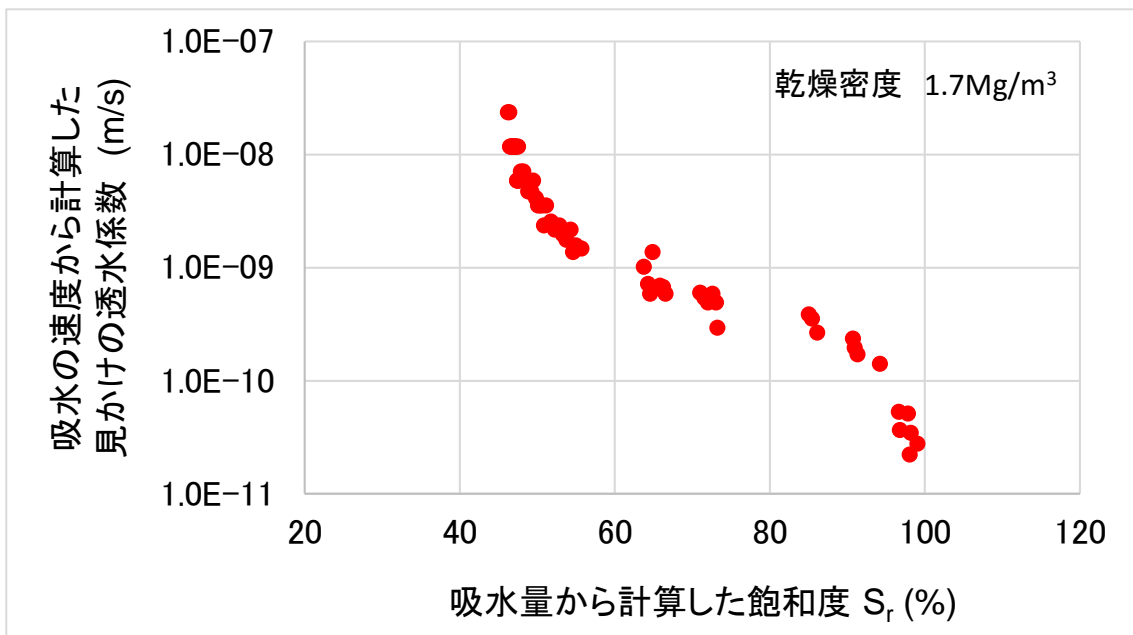


図 3.2.2-25 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係

3) 透水係数の測定方法（周辺岩盤）

周辺岩盤の透水試験は、JIS A 1218:2009 を参考に、図 3.2.2-26 に示す三軸試験装置を用い、図 3.2.2-27 に示す方法による変水位透水試験を実施した。透水係数は、供試体下部及び供試体上部に二重管ビュレットを配備していることから、緩衝材と同じく、式 3.2.3-4 に示す変水位透水試験の式を用いて算出した。

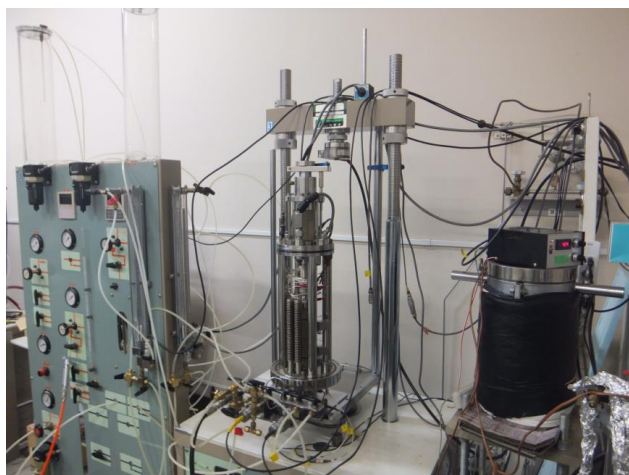


図 3.2.2-26 三軸試験装置を用いた変水位透水試験装置

透水試験供試体

直径 50mm 高さ 100mm

漏水防止

供試体側面からの漏水を防ぐ目的でメンブレンと供試体を弾性接着剤で接着した後、三軸セル内に設置した。

有効拘束圧（圧密応力）

有効拘束圧を 4 段階に変化させて透水試験を実施した。

有効拘束圧

1.5Mpa、3Mpa、5Mpa、7 Mpa

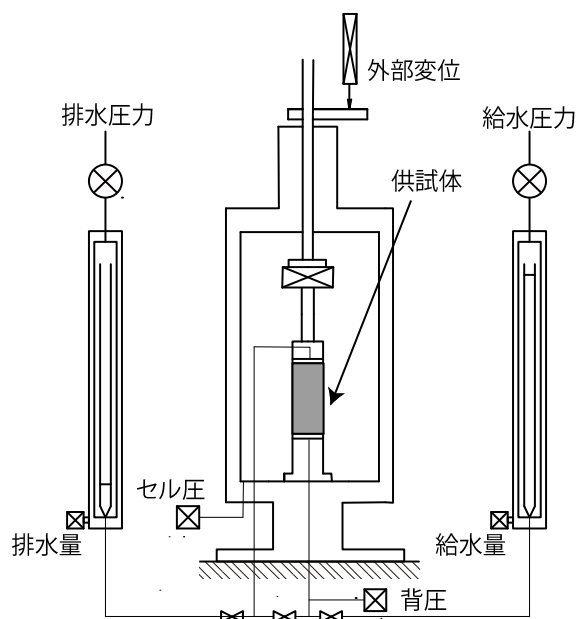


図 3.2.2-27 変水位透水試験の方法

透水試験方法

透水試験は、流入側、流出側に差圧を与えた二重管ビュレットを用い、供試体下部より給水し、上部より排水させる手法とした。

圧力条件

給水圧力 0.4Mpa 排水圧力 0.2Mpa

加圧力 0.2Mpa

4) 透水試験結果（緩衝材）

緩衝材の給水過程が終了した後、供試体下部より段階的に加圧力を付加し、変水位透水試験を実施した。供試体下部に与える加圧力は、給水過程時に計測された膨潤圧より小さい圧力設定(20、50、100kPa の3段階)とし、供試体上部は大気解放としている。表 3.2.2-14～表 3.2.2-15 及び図 3.2.2-28～図 3.2.2-29 に透水試験結果を示す。

表 3.2.2-14 加圧力 50kPa 時の透水試験結果

供試体名	加圧力 (MPa)	背圧 (MPa)	動水勾配 i	乾燥密度 (Mg/m ³)	透水係数 (m/s)
$\rho_d=1.4\text{Mg/m}^3$ $w=10\%$	0.05	0	255	1.4	1.76E-12
$\rho_d=1.5\text{Mg/m}^3$ $w=10\%$	0.05	0	255	1.5	1.24E-12
$\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ $w=10\%$	0.05	0	255	1.6	1.00E-12
$\rho_d=1.7\text{Mg/m}^3$ $w=10\%$	0.05	0	255	1.7	8.74E-13

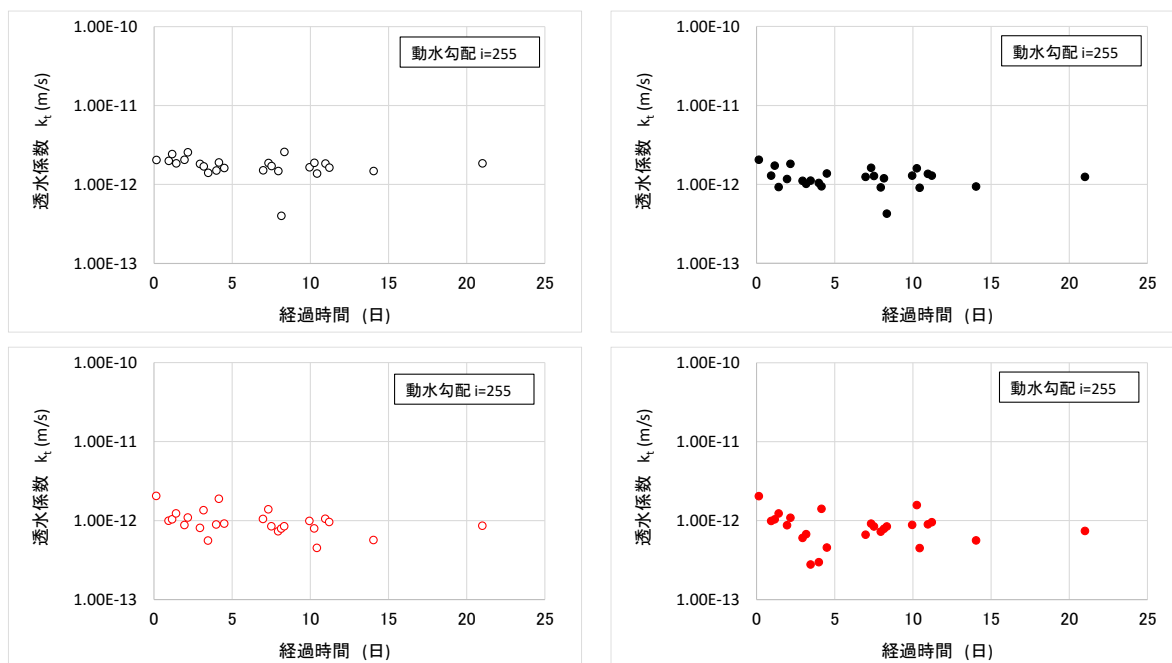


図 3.2.2-28 加圧力 50kPa 時の透水試験結果

表 3.2.2-15 加圧力 100kPa 時の透水試験結果

供試体名	加圧力 (MPa)	背圧 (MPa)	動水勾配 i	乾燥密度 (Mg/m ³)	透水係数 (m/s)	固有透過度 (m ²)
$\rho_d=1.4\text{Mg/m}^3$ w=10%	0.1	0	510	1.4	1.39E-12	1.33E-19
$\rho_d=1.5\text{Mg/m}^3$ w=10%	0.1	0	510	1.5	1.07E-12	1.02E-19
$\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ w=10%	0.1	0	510	1.6	7.54E-13	7.22E-20
$\rho_d=1.7\text{Mg/m}^3$ w=10%	0.1	0	510	1.7	5.22E-13	5.00E-20

固有透過度は、水温 23°C時の水の粘性係数 η と密度 ρ_w を用い、重力加速度は 9.80665m/s^2 として式 3.2.3-5 より算出した。

$$K = \frac{k_t \eta}{\rho_w g} \quad \text{式 3.2.2-5}$$

ここに、

- K : 固有透過度 (m²)
- K_t : T(°C)における透水係数 (m/s)
- η : 水の粘性係数 (Pa · s)
- ρ_w : 水の密度 (Mg/m³)
- t₂-t₁ : 測定時間 (s)
- g : 重力加速度(m/s²)

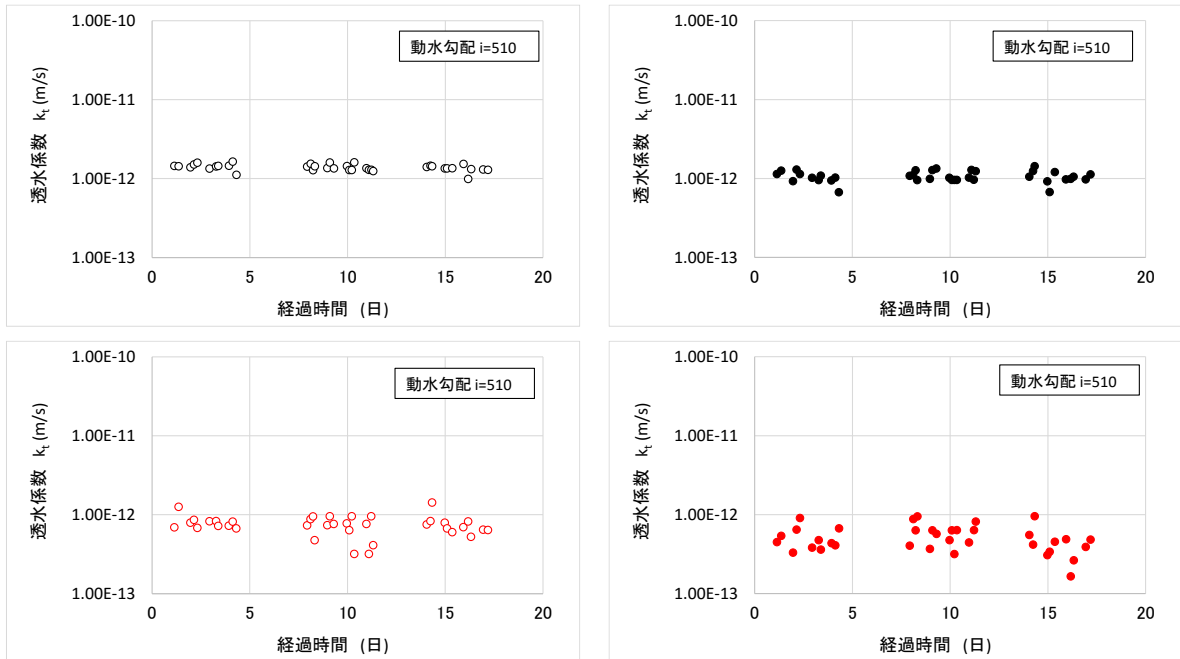


図 3.2.2-29 加圧力 100kPa 時の透水試験結果

図 3.2.2-30 に、加圧力 100kPa 時の透水係数と供試体作成時の乾燥密度の関係を示す。同図より、供試体作成時の乾燥密度の上昇とともに透水係数は低下する傾向が認められた。

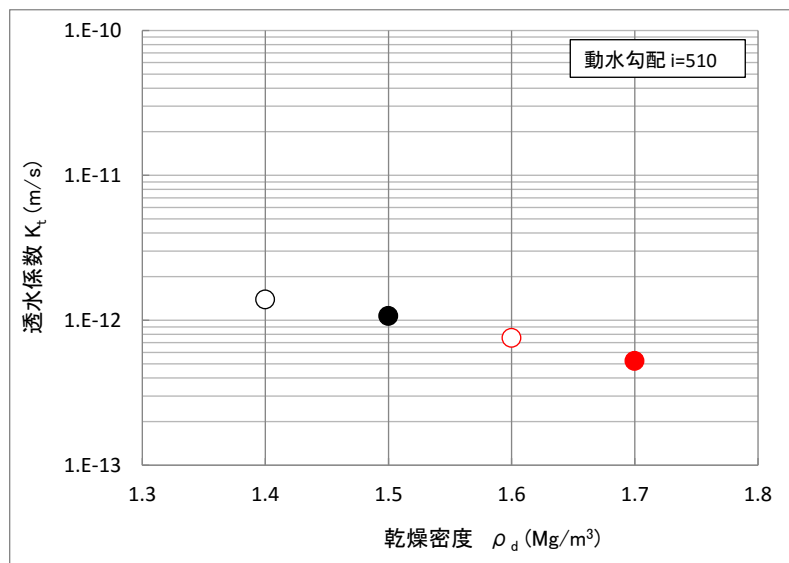


図 3.2.2-30 加圧力 100kPa 時の透水係数と供試体作成時の乾燥密度の関係

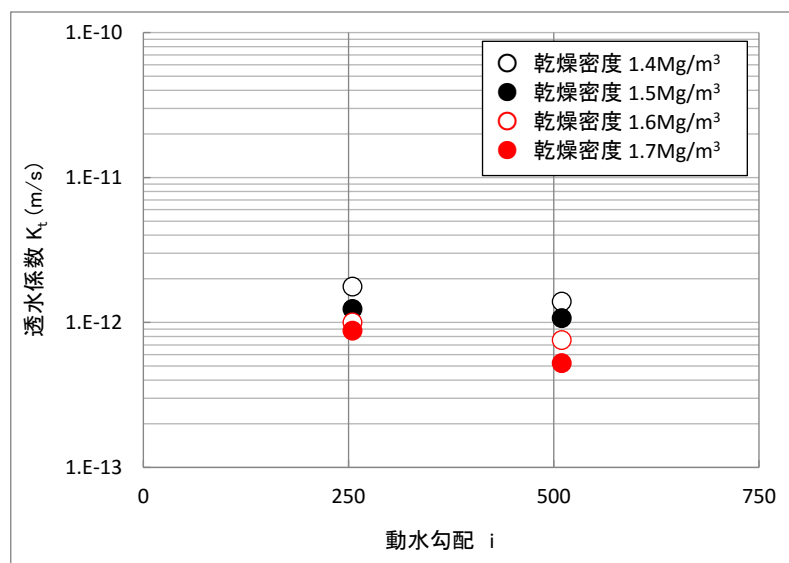


図 3.2.2-31 透水係数と動水勾配の関係

透水係数と動水勾配の関係を図 3.2.2-31 に示す。動水勾配の増加に伴い透水係数が低下する傾向が認められている。これは、供試体に付加する加圧力の増加に伴い、供試体内の飽和度に変化が生じたためと考える。このことから、動水勾配 $i=510$ で得られた透水係数を飽和透水係数とみなすことはできないと判断する。今後、供試体の上下に背圧を付加することにより、さらに供試体内の飽和度を向上させた後、動水勾配の変化による透水係数の変化が認められないことを確認して飽和透水係数とする計画である。

5) 透水試験結果（周辺岩盤）

周辺岩盤の変水位透水試験結果を表 3.2.2-16 及び図 3.2.2-32 に示す。図 3.2.2-32 より、凝灰質砂岩の透水係数は、圧密圧力の増加とともに低下する傾向が認められた。

表 3.2.2-16 凝灰質砂岩の変水位透水試験結果

供試体番号	YTS3-2-1			
圧密圧力 σ_c' (Mpa)	1.5	3.0	5.0	
間隙比 e	0.620	0.617	0.600	
測定時の温度 (°C)	22	21	20	
透水係数 K_t (m/s)	9.25E-11	7.05E-11	6.43E-11	
温度補正係数	0.839	0.859	0.880	
15°Cに対する透水係数 K_{15} (m/s)	7.76E-11	6.06E-11	5.65E-11	
固有透過度 K (m ²)	7.60E-18	6.07E-18	5.80E-18	

供試体番号	YTS3-3-4			
圧密圧力 σ_c' (Mpa)	1.5	3.0	5.0	7.0
間隙比 e	0.652	0.647	0.643	0.636
測定時の温度 (°C)	23	23	23	23
透水係数 K_t (m/s)	4.83E-11	4.10E-11	3.63E-11	3.62E-11
温度補正係数	0.819	0.819	0.819	0.819
15°Cに対する透水係数 K_{15} (m/s)	3.96E-11	3.36E-11	2.97E-11	2.97E-11
固有透過度 K (m ²)	3.79E-18	3.21E-18	2.85E-18	2.84E-18

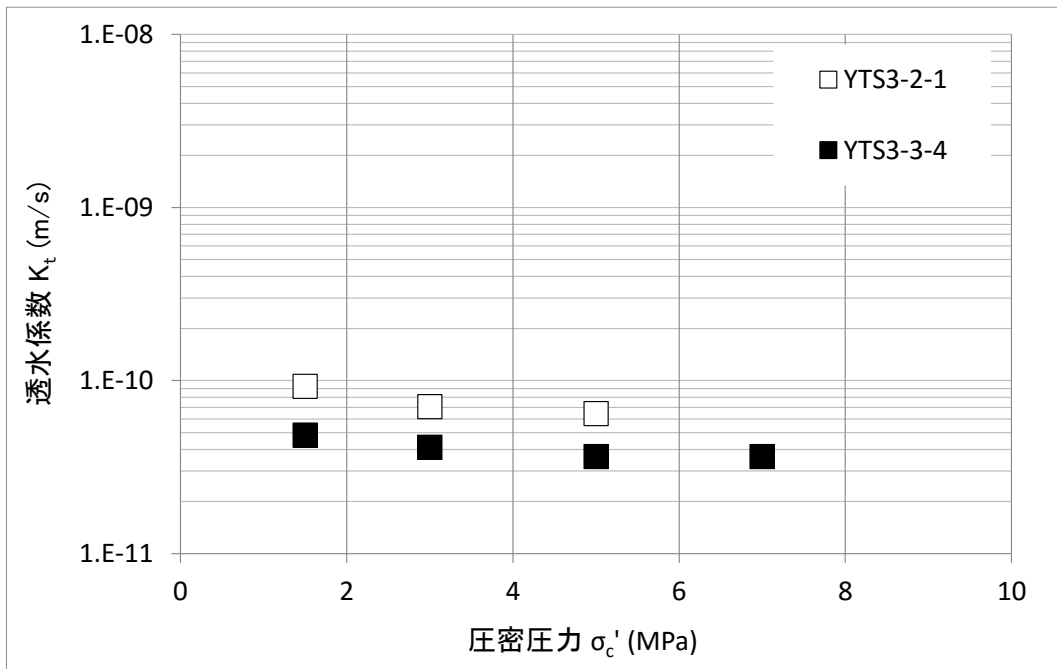


図 3.2.2-32 周辺岩盤の変水位透水試験結果

(6) 圧密特性

1) 圧密試験方法

周辺岩盤の圧密特性を把握する目的において、段階载荷による圧密試験を実施した。圧密試験装置図を図 3.2.2-33 に示す。圧密試験では、初期の圧密圧力を 0.313Mpa に設定し、荷重増分比を 1 として、1 段階 24 時間の段階载荷を 9 段階（最大圧密圧力 80Mpa）、除荷を 1 段階行った。除荷過程は、最終圧密圧力の载荷終了後、初期圧密圧力まで除荷を行い、その状態を 24 時間維持した。



図 3.2.2-33 圧密試験装置

2) 圧密試験結果

周辺岩盤の圧密試験結果を表 3.2.2-17 及び図 3.2.2-34 に示す。周辺岩盤の圧密降伏応力は、20Mpa 以上有する結果となった。

表 3.2.2-17 周辺岩盤で実施した圧密試験結果

供試体番号		YTS3-1-1	YTS3-3-5
土粒子の密度	ρ_s (Mg/m ³)	2.788	2.753
初期間隙比	e_0	0.657	0.72
圧密降伏応力	P_c (MPa)	31.0	21.7
圧縮指数	C_c	0.401	0.457

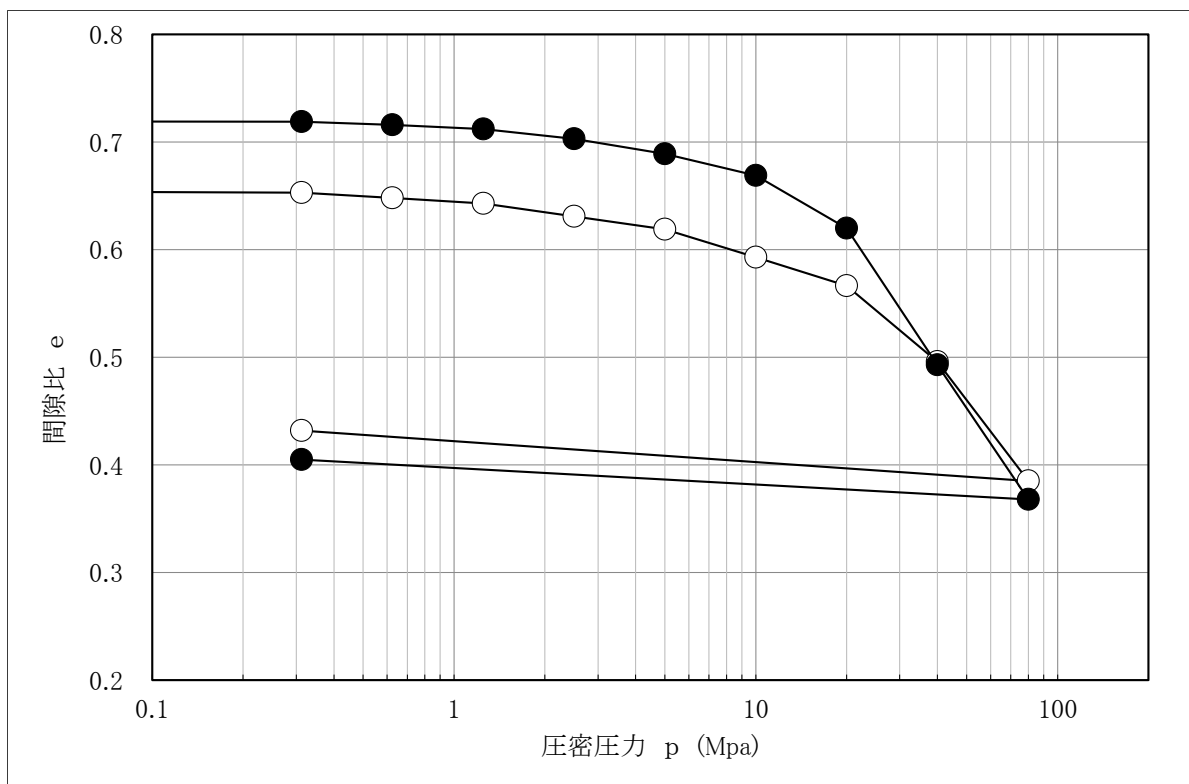


図 3.2.2-34 周辺岩盤で実施した圧密試験結果

(7) 力学特性

1) 緩衝材の一軸圧縮試験

緩衝材の一軸圧縮試験は、1.5、1.6、1.7Mg/m³の3種類の乾燥密度条件で作成した供試体を用いて実施した。供試体は、所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト7：珪砂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、静的締固めにより作成した。図 3.2.2-35 には、含水比条件を変化させて作成した緩衝材の一軸圧縮試験供試体を示し、図 3.2.2-36 には、緩衝材の一軸圧縮試験状況を示す。表 3.2.2-18～表 3.2.2-20 及び図 3.2.2-37～図 3.2.2-39 には、含水比条件を変化させた緩衝材の一軸圧縮試験結果を示し、図 3.2.2-40 には、飽和度で整理した一軸圧縮強さ、変形係数の関係を示す。

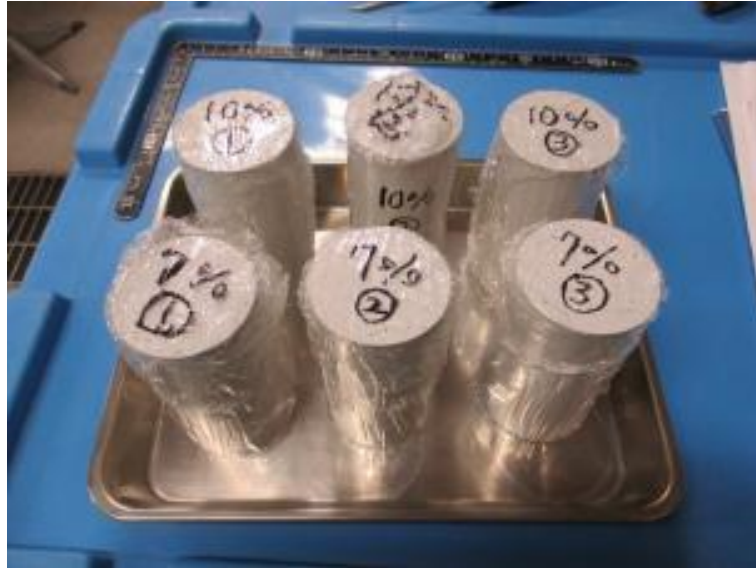


図 3.2.2-35 含水比条件を変化させた緩衝材の一軸圧縮試験供試体



一軸圧縮試験前

一軸圧縮試験後

図 3.2.2-36 緩衝材の一軸圧縮試験状況（含水比 10%の供試体の例）

表 3.2.2-18 含水比条件を変化させた緩衝材（乾燥密度 1.6Mg/m³）の一軸圧縮試験結果

試料名	乾燥密度 (Mg/m ³)	飽和度 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	破壊ひずみ (%)	変形係数 (MPa)				
w=7%	①	1.568	26.1	0.93	0.93	0.86	0.88	124	118
	②	1.564	25.9	0.93		0.90		108	
	③	1.562	25.9	0.95		0.89		122	
w=10%	①	1.571	37.1	0.91	0.97	0.96	1.09	98.4	107
	②	1.571	37.1	1.00		0.99		138	
	③	1.575	36.9	0.95		0.95		124	
	④	1.576	38.4	0.95		1.36		68.7	
	⑤	1.577	38.2	1.05		1.24		97.1	
	⑥	1.581	37.9	0.95		1.04		113	
w=12%	①	1.590	43.7	0.68	0.81	1.04	1.25	73.7	90
	②	1.579	45.8	0.82		1.12		134	
	③	1.585	44.8	0.56		1.18		51.2	
	④	1.584	45.5	0.84		1.47		64.9	
	⑤	1.596	46.6	0.96		1.34		102	
	⑥	1.628	48.2	1.02		1.34		115	
w=15%	①	1.587	57.6	0.54	0.60	1.56	1.67	64.9	69
	②	1.591	56.8	0.57		1.63		72.5	
	③	1.591	57.3	0.67		1.81		69.9	
w=18%	①	1.588	69.0	0.55	0.58	3.22	3.09	35.2	45
	②	1.589	68.8	0.54		3.08		39.1	
	③	1.629	73.3	0.65		3.31		47.4	
	④	1.592	68.3	0.56		2.88		48.7	
	⑤	1.613	70.9	0.63		3.18		49.8	
	⑥	1.593	68.5	0.57		2.89		50.1	

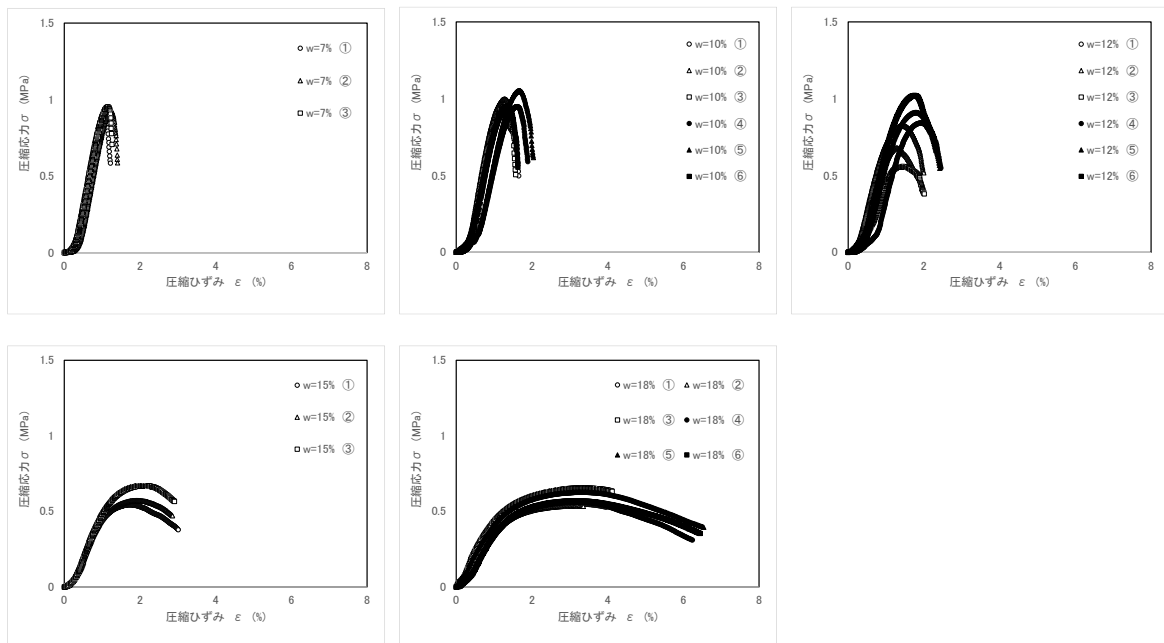


図 3.2.2-37 含水比条件を変化させた緩衝材（乾燥密度 1.6Mg/m³）の一軸圧縮試験結果

表 3.2.2-19 含水比条件を変化させた緩衝材（乾燥密度 1.7Mg/m³）の一軸圧縮試験結果

試料名	乾燥密度 (Mg/m ³)	飽和度 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	破壊ひずみ (%)	変形係数 (MPa)						
w=7%	①	1.701	27.4	1.98	1.90	1.21	1.19	163	159		
	②	1.700	27.3	1.96						1.22	161
	③	1.697	27.3	1.75						1.14	154
w=10%	①	1.686	44.8	1.54	1.61	1.33	1.31	110	127		
	②	1.683	44.1	1.62						1.28	139
	③	1.682	44.6	1.67						1.32	132
w=12%	①	1.679	52.7	1.32	1.36	1.59	1.55	102	120		
	②	1.679	53.0	1.29						1.85	70.6
	③	1.695	54.0	1.38						1.94	72.8
	④	1.687	51.3	1.39						1.29	158
	⑤	1.686	51.6	1.40						1.35	158
	⑥	1.689	50.9	1.39						1.27	157
w=15%	①	1.710	69.7	1.12	1.15	2.65	2.55	61.0	64		
	②	1.748	73.3	1.29						2.72	70.2
	③	1.732	71.4	1.25						2.58	69.9
	④	1.693	66.2	1.04						2.39	58.9
	⑤	1.703	67.6	1.12						2.64	54.0
	⑥	1.704	66.2	1.07						2.33	69.4
w=18%	①	1.695	79.1	0.87	0.89	3.31	3.47	68.7	71		
	②	1.695	79.1	0.89						3.65	68.4
	③	1.696	78.9	0.90						3.46	74.6

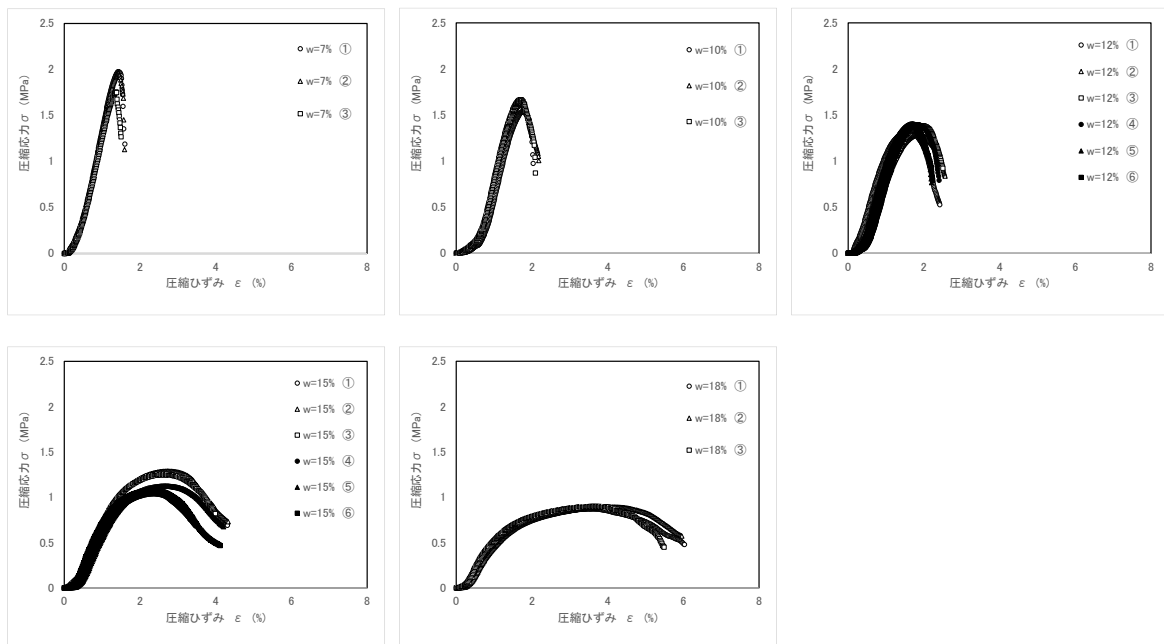


図 3.2.2-38 含水比条件を変化させた緩衝材（乾燥密度 1.7Mg/m³）の一軸圧縮試験結果

表 3.2.2-20 含水比条件を変化させた緩衝材（乾燥密度 1.5Mg/m³）の一軸圧縮試験結果

試料名	乾燥密度 (Mg/m ³)	飽和度 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	破壊ひずみ (%)	変形係数 (MPa)
w=7%	①	1.488	0.39	0.53	0.81
	②	1.486	0.59		0.97
	③	1.489	0.60		1.11
w=10%	①	1.491	0.58	0.59	0.96
	②	1.489	0.58		0.96
	③	1.484	0.62		0.98
w=12%	①	1.496	0.66	0.57	1.67
	②	1.492	0.46		1.55
	③	1.498	0.59		1.61
w=15%	①	1.498	0.37	0.46	1.81
	②	1.499	0.45		2.04
	③	1.499	0.56		2.15
w=18%	①	1.503	0.44	0.45	3.31
	②	1.496	0.47		3.33
	③	1.509	0.43		3.33

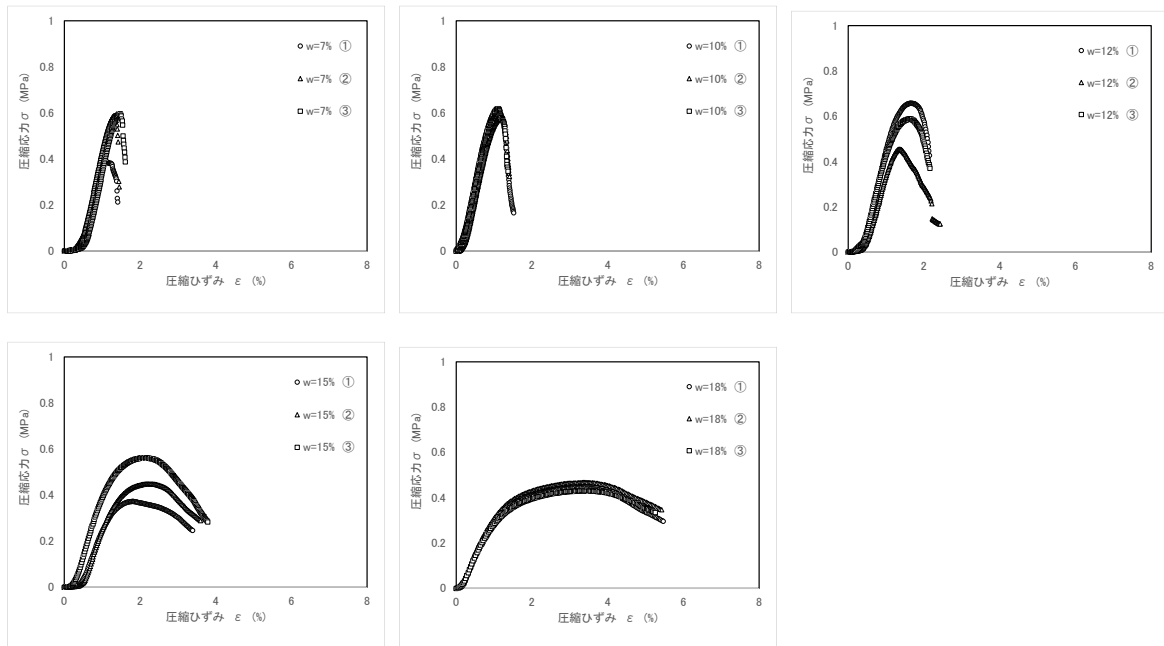


図 3.2.2-39 含水比条件を変化させた緩衝材（乾燥密度 1.5Mg/m³）の一軸圧縮試験結果

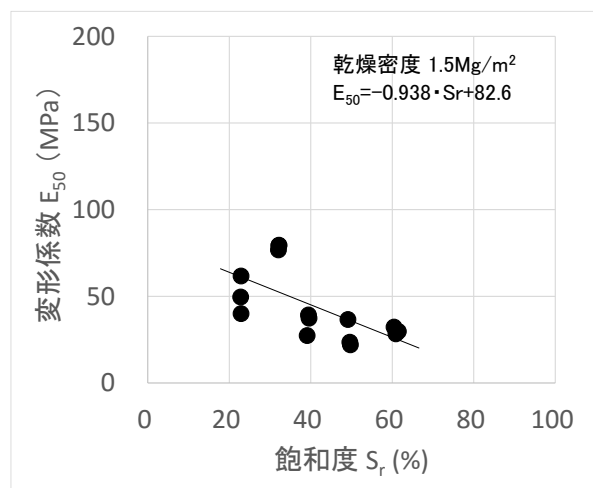
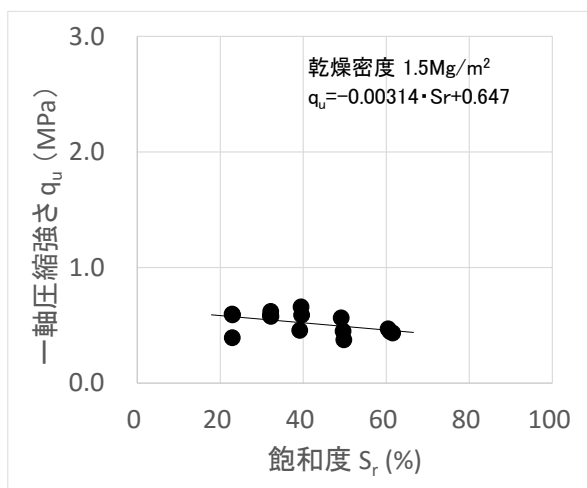
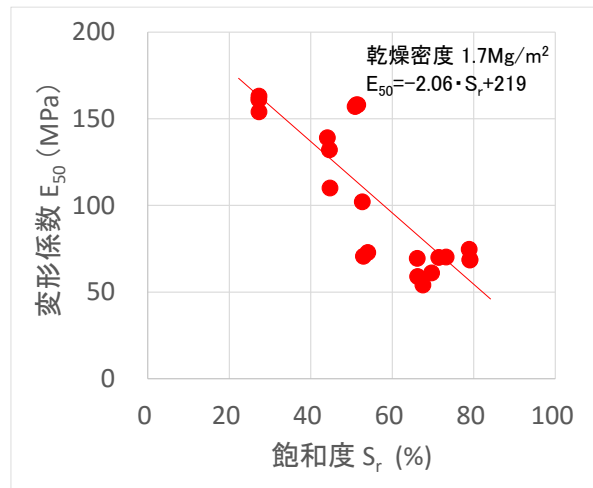
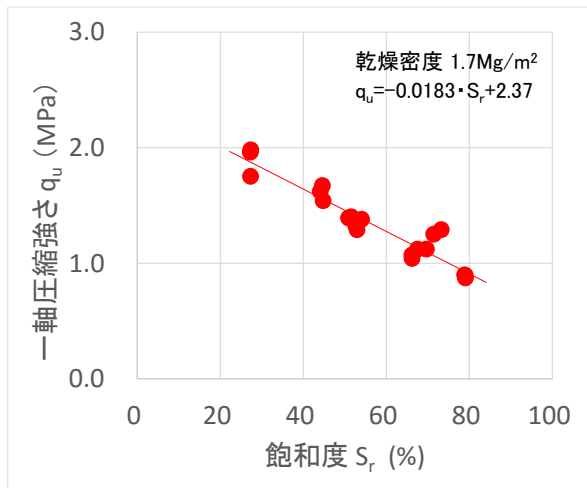
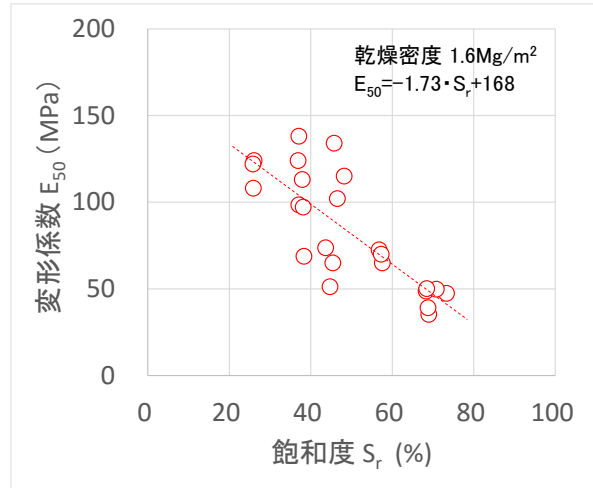
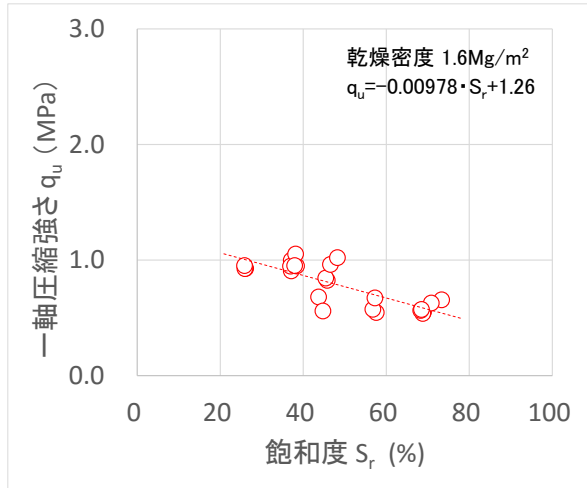


図 3.2.2-40 飽和度で整理した一軸圧縮強さ、変形係数の関係

図 3.2.2-41 には、作成時の初期含水比に着目した一軸圧縮強さ、変形係数の関係を示す。同じ乾燥密度条件においても、供試体作成時の初期含水比が高いほど一軸圧縮強さ及び変形係数が低下する傾向が認められた。

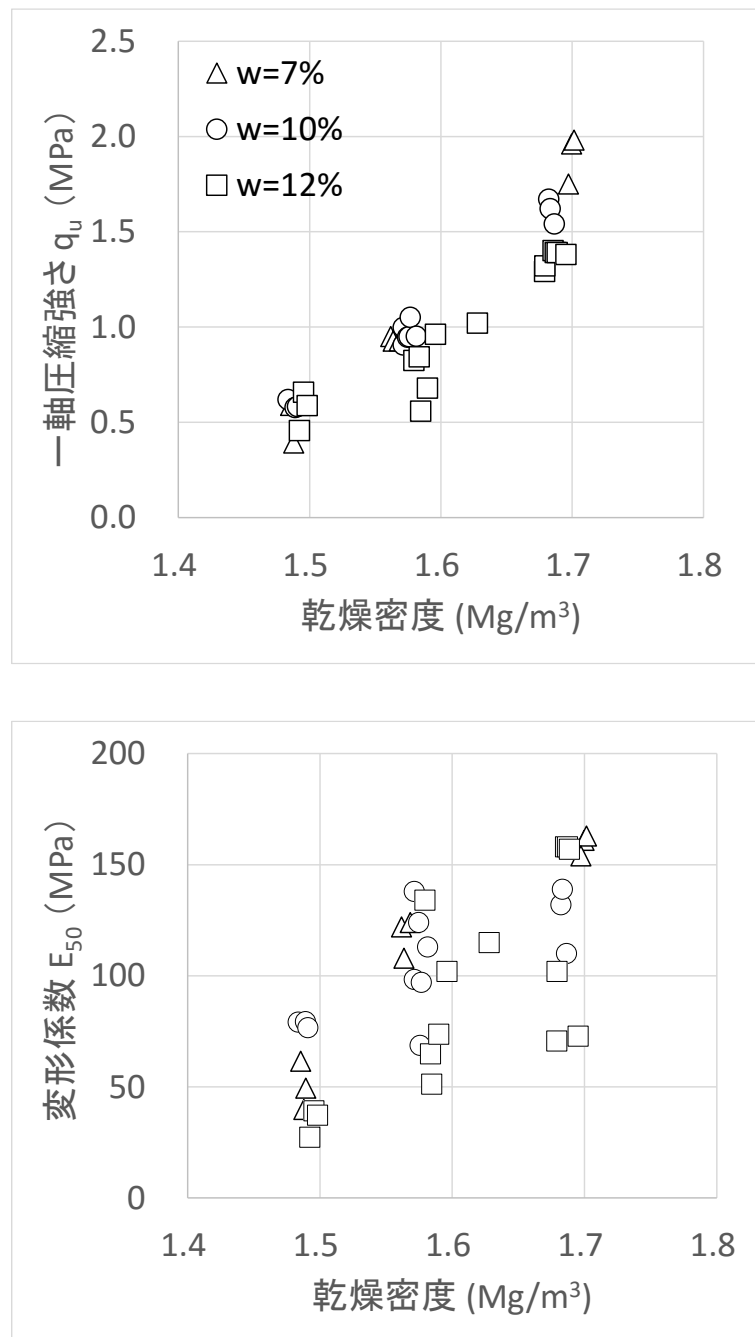


図 3.2.2-41 作成時の初期含水比に着目した一軸圧縮強さ、変形係数の関係

2) 周辺岩盤の一軸圧縮強さ

周辺岩盤の一軸圧縮試験は、遠心力模型実験の周辺岩盤における初期状態（強制乾燥状態）の強度特性を把握する目的で、図 3.2.2-42 に示す試験装置を用いて実施した。



一軸圧縮試験供試体

直径 50mm 高さ 100mm

載荷速度

0.1%/min

ひずみ計測

供試体側面にひずみゲージを貼付し、軸方向圧縮に伴う、変形係数及びポアソン比を算出した

図 3.2.2-42 一軸圧縮試験装置

周辺岩盤の一軸圧縮試験結果を表 3.2.2-21 及び図 3.2.2-43～図 3.2.2-45 に示す。図 3.2.2-46 には、周辺岩盤の一軸圧縮試験供試体の状況を示す。

表 3.2.2-21 周辺岩盤の一軸圧縮試験結果（強制乾燥状態）

供試体番号	YTS3-1-1	YTS3-1-3	YTS3-2-4	平均
湿潤密度 ρ_t Mg/m ³	2.072	2.050	2.079	2.067
乾燥密度 ρ_d Mg/m ³	1.711	1.679	1.737	1.709
一軸圧縮強さ q_u MPa	15.6	17.3	17.4	16.8
破壊ひずみ ε_f %	0.88	0.79	0.46	0.71
変形係数 E_{L50} MPa	2116	2720	4651	3162
ポアソン比 ν	0.23	0.18	0.18	0.20

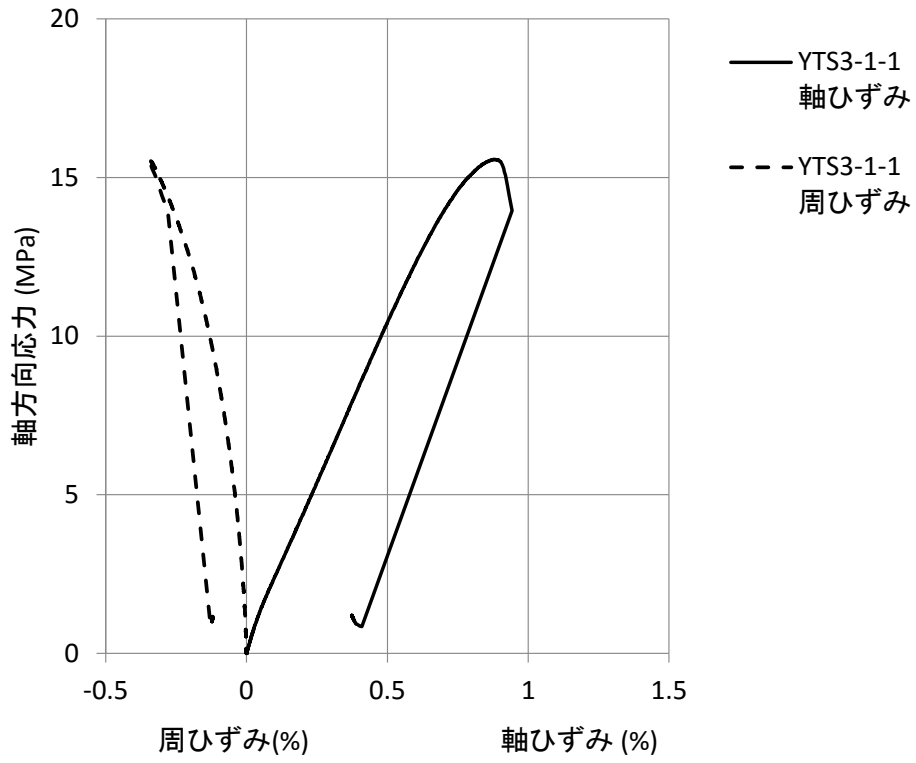


図 3.2.2-43 一軸圧縮試験結果 (強制乾燥状態)

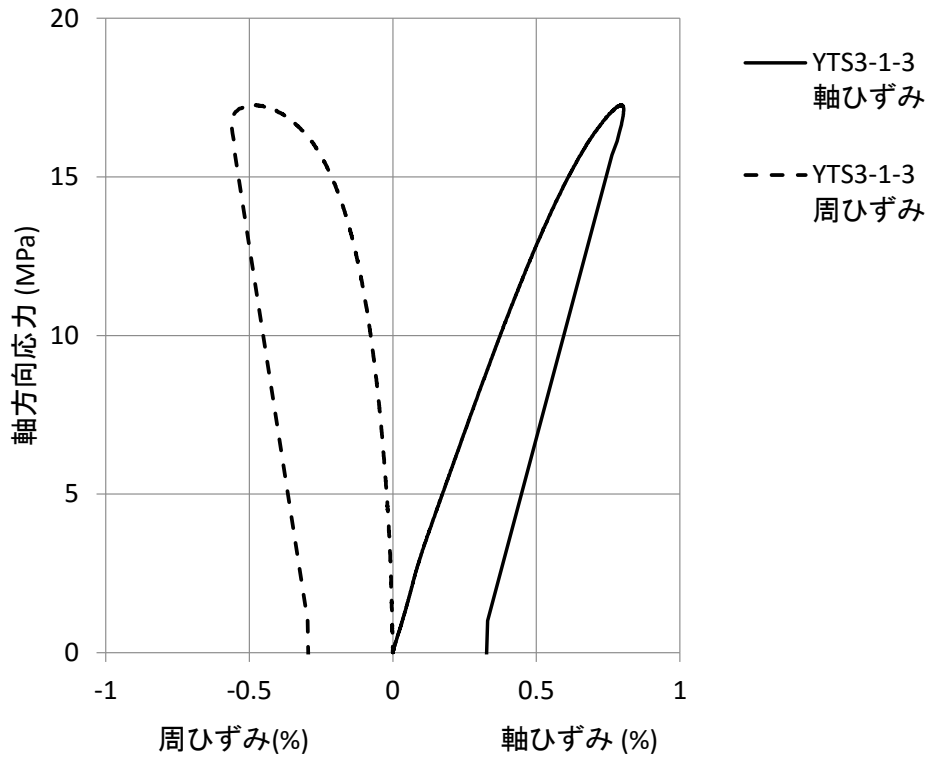


図 3.2.2-44 一軸圧縮試験結果 (強制乾燥状態)

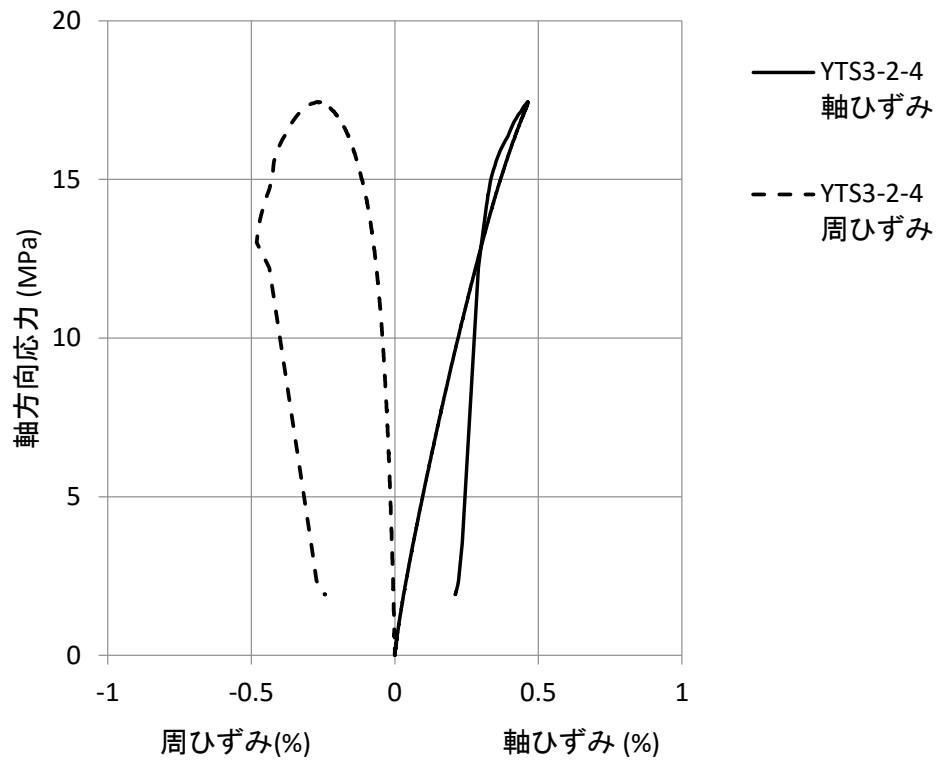
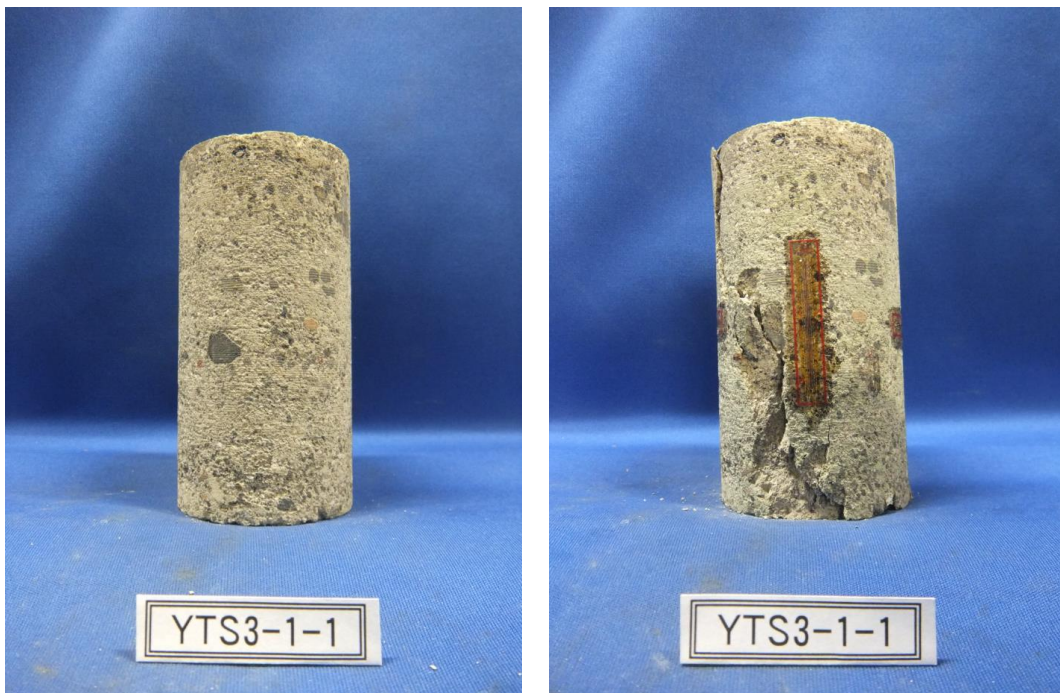


図 3.2.2-45 一軸圧縮試験結果 (強制乾燥状態)



一軸圧縮試験前供試体

一軸圧縮試験後供試体

図 3.2.2-46 一軸圧縮試験供試体の状況

3) 周辺岩盤の一軸引張試験

周辺岩盤の一軸引張試験は、周辺岩盤の引張強度を把握する目的で、図 3.2.2-47 に示す試験装置を用いて実施した。一軸引張試験状況を図 3.2.2-48 に示し、一軸引張試験結果を表 3.2.2-22 及び図 3.2.2-49 に示す。



図 3.2.2-47 一軸引張試験装置



図 3.2.2-48 一軸引張試験後の供試体状況

表 3.2.2-22 一軸引張試験結果

供試体番号		YTS3-4-4	YTS4-1-1	YTS4-1-4	平均
一軸引張強さ	(Mpa)	0.309	0.439	0.638	0.462
変形係数	Ets,50 (Mpa)	2030	3170	5630	3610
	Ett,50 (Mpa)	1750	2220	5020	3000

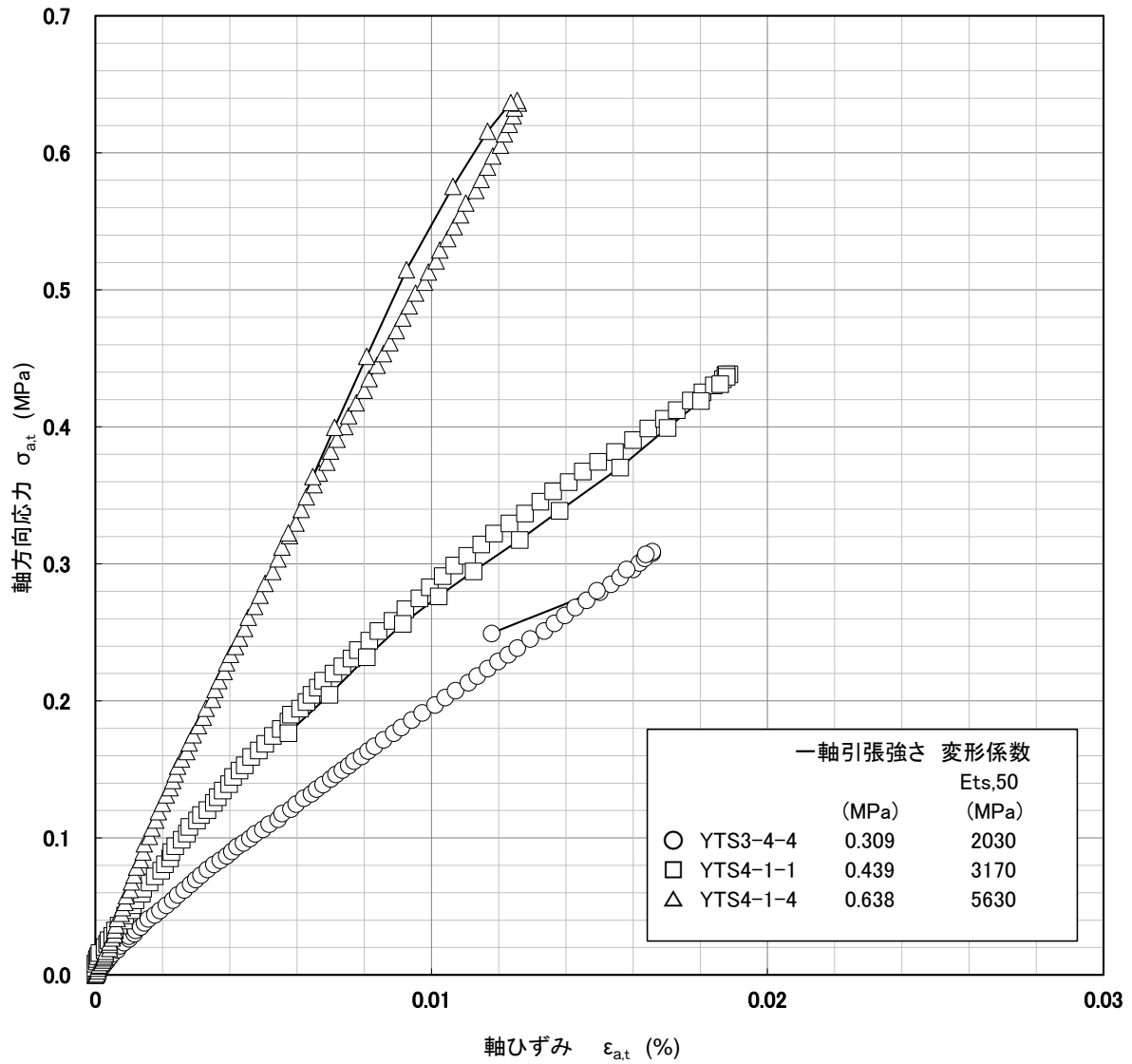


図 3.2.2-49 一軸引張試験結果

4) 緩衝材の三軸圧縮試験

緩衝材の三軸圧縮試験は、緩衝材の非排水せん断強度を把握する目的で、図 3.2.2-50 に示す試験装置を用いて実施した。緩衝材の三軸圧縮（圧密非排気）試験の試験条件を表 3.2.2-23 に示す。緩衝材の三軸圧縮試験は、 1.6Mg/m^3 の乾燥密度条件で作成した供試体を用いて実施した。供試体は、所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト 7：珪砂 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、静的締固めにより作成した。作成した供試体を不飽和状態のまま三軸試験装置にセットし、所定の圧密圧力を付加（圧密圧力付加時は排気条件）した後、非排気状態を保持したまま軸方向載荷を行った。

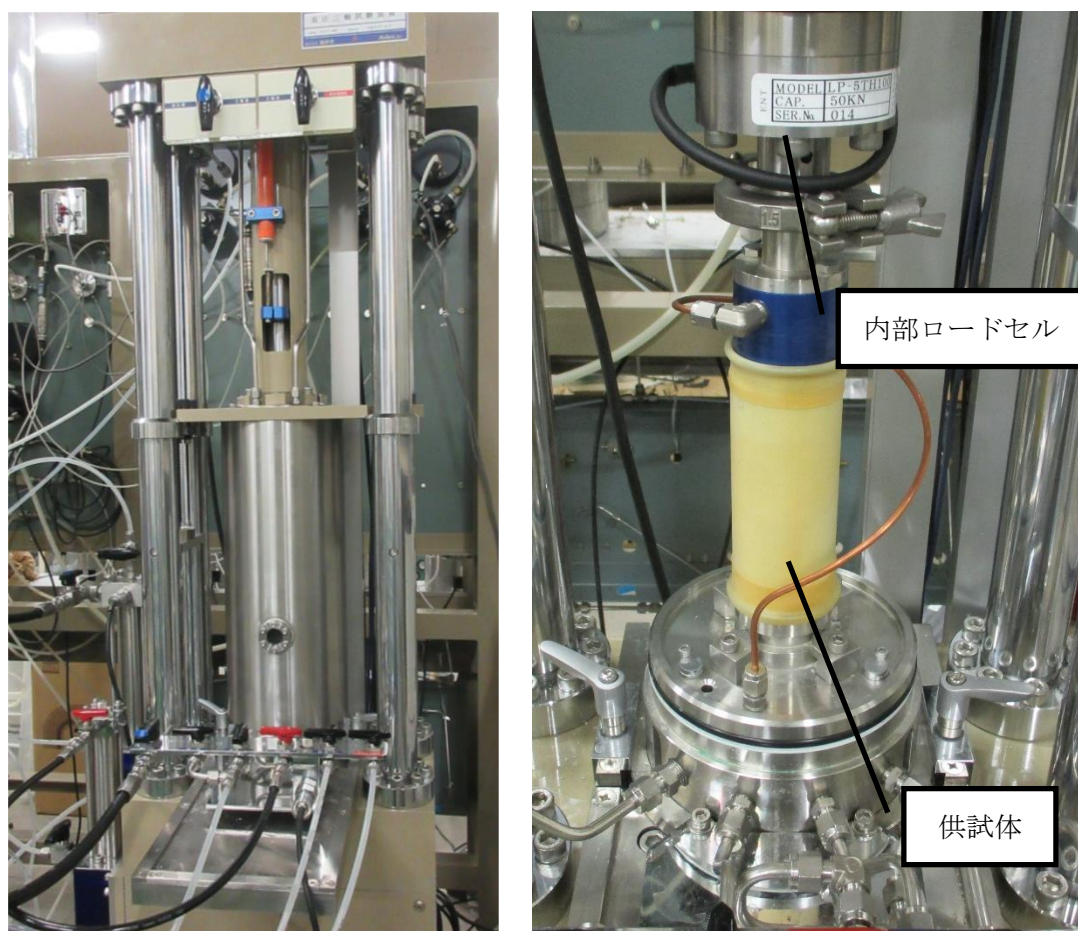


図 3.2.2-50 三軸圧縮試験装置

表 3.2.2-23 緩衝材の三軸圧縮（圧密非排気）試験条件

供試体寸法	直径 50(mm)×高さ 100 (mm)
載荷速度	0.1 (%/min)
含水状態	供試体作成時の含水比
有効拘束圧 σ'_c	1.5、3、5、7 (MPa)
背圧	なし

緩衝材の三軸圧縮試験結果を表 3.2.2-24 及び図 3.2.2-51 に示す。

表 3.2.2-24 緩衝材の三軸圧縮（圧密非排気）試験結果

目標密度	1.6Mg/m ³			
目標含水比	10%			
供試体番号	1	2	3	4
圧密圧力 (MPa)	1.5	5.0	3.0	7.0
最大軸差強度 (MPa)	3.2	7.5	5.6	9.0
破壊ひずみ (%)	15.0	15.0	15.0	15.0

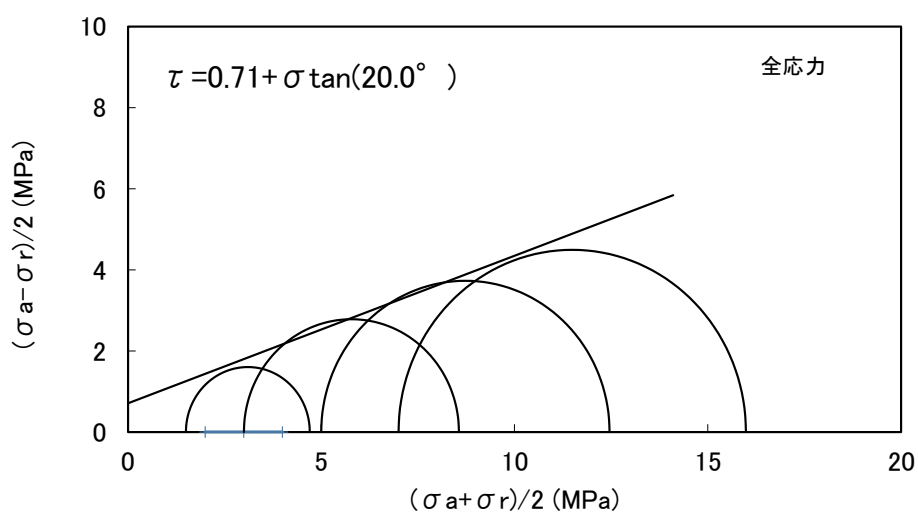
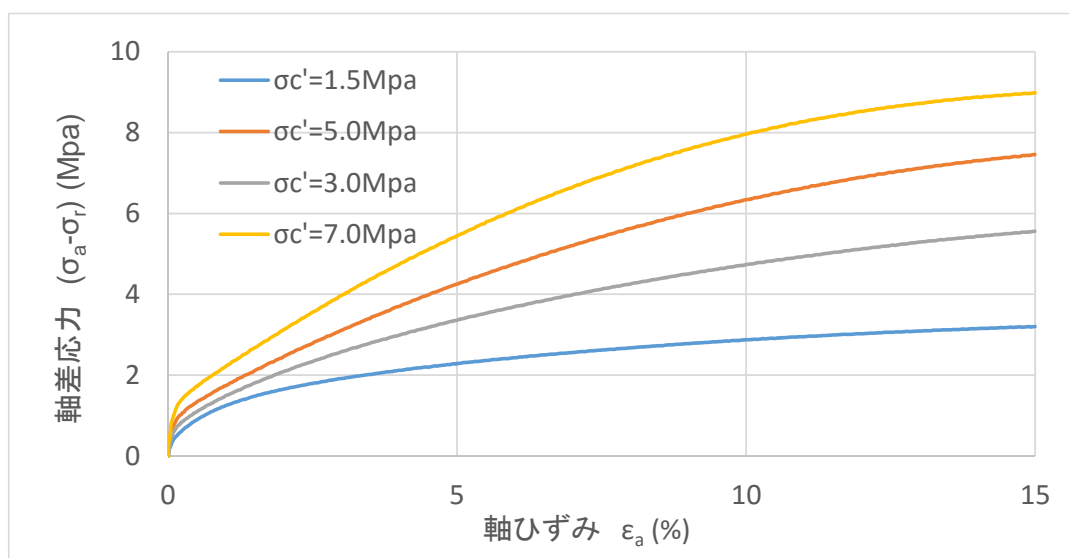


図 3.2.2-51 緩衝材の三軸圧縮（圧密非排気）試験結果

5) 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験

周辺岩盤の三軸圧縮試験は、周辺岩盤の排水強度、変形特性を把握する目的で、図 3.2.2-52 に示す試験装置を用いて実施した。供試体側面には、ひずみゲージを貼付し、軸方向圧縮に伴う、変形係数及びポアソン比を算出した。周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験の試験条件を表 3.2.2-25 に示す。

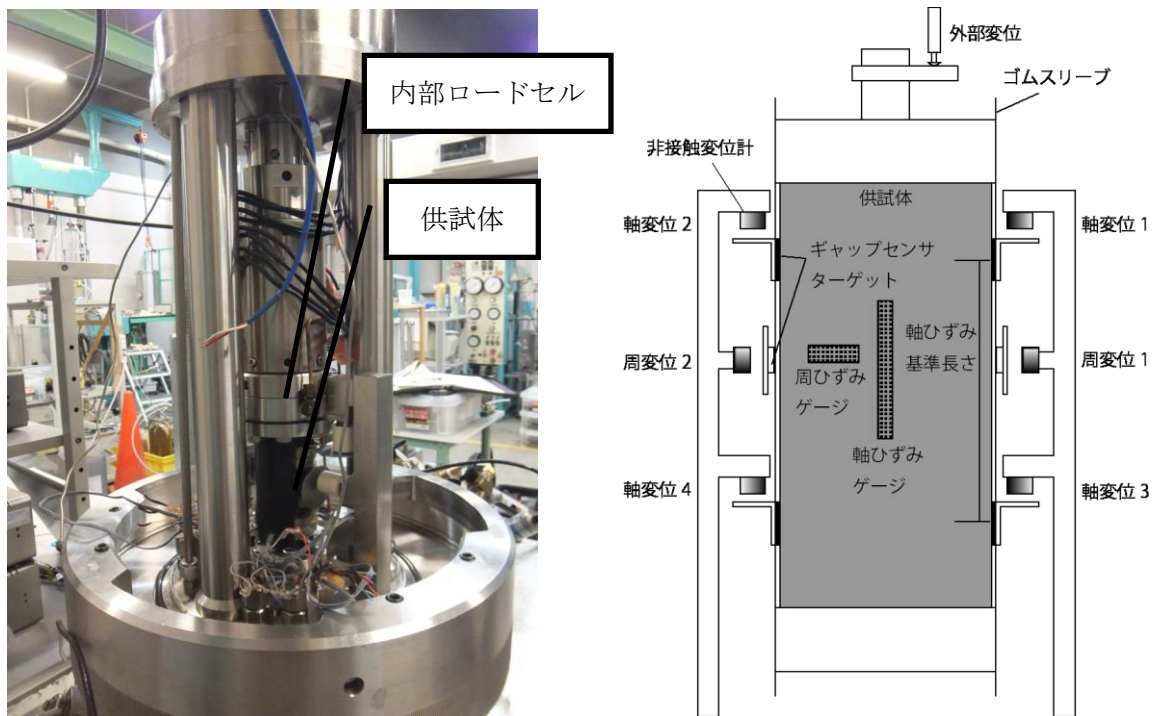


図 3.2.2-52 三軸圧縮試験装置

表 3.2.2-25 三軸圧縮（圧密排水）試験条件

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

周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果を、表 3.2.2-26 及び図 3.2.2-53～図 3.2.2-55 に示す。図 3.2.2-56～図 3.2.2-63 には、供試体別に整理した軸差応力～ひずみの関係及び割線変形係数～軸差応力比の関係を示す。

表 3.2.2-26 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果

試験体番号		YTS3-3-1	YTS3-4-1	YTS3-4-5	YTS3-4-6
圧密圧力	(MPa)	1.5	3.0	5.0	7.0
最大軸差強度	(MPa)	9.31	11.84	14.44	18.10
破壊ひずみ	(%)	1.562	1.594	8.828	14.037
体積ひずみ	(%)	0.368	0.596	3.053	5.879
ポアソン比	-	0.16	0.22	0.19	0.13

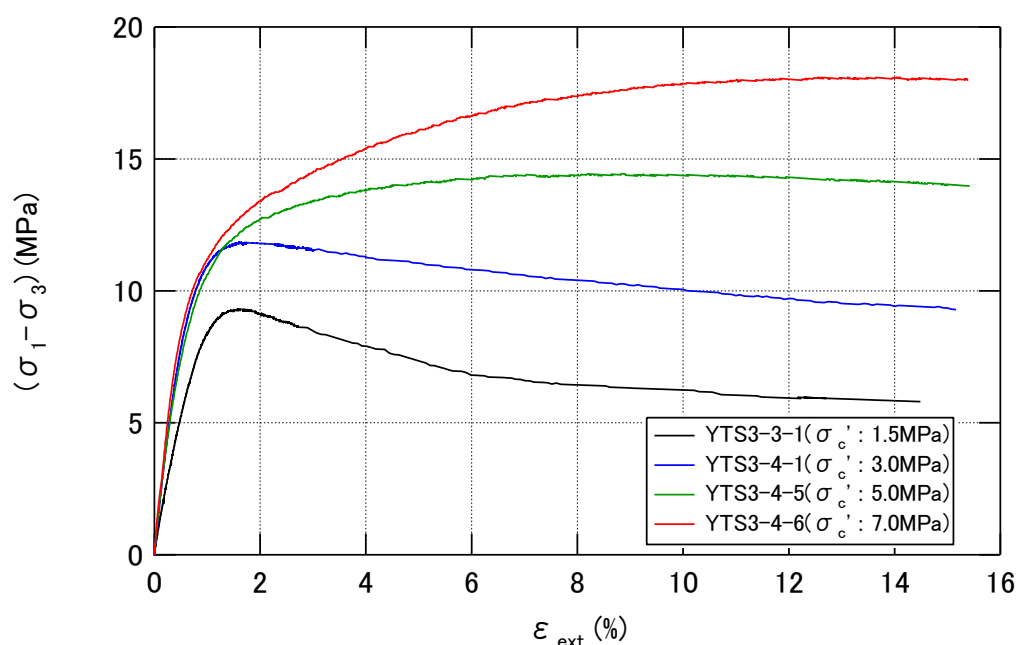


図 3.2.2-53 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果（軸差応力～軸ひずみ関係）

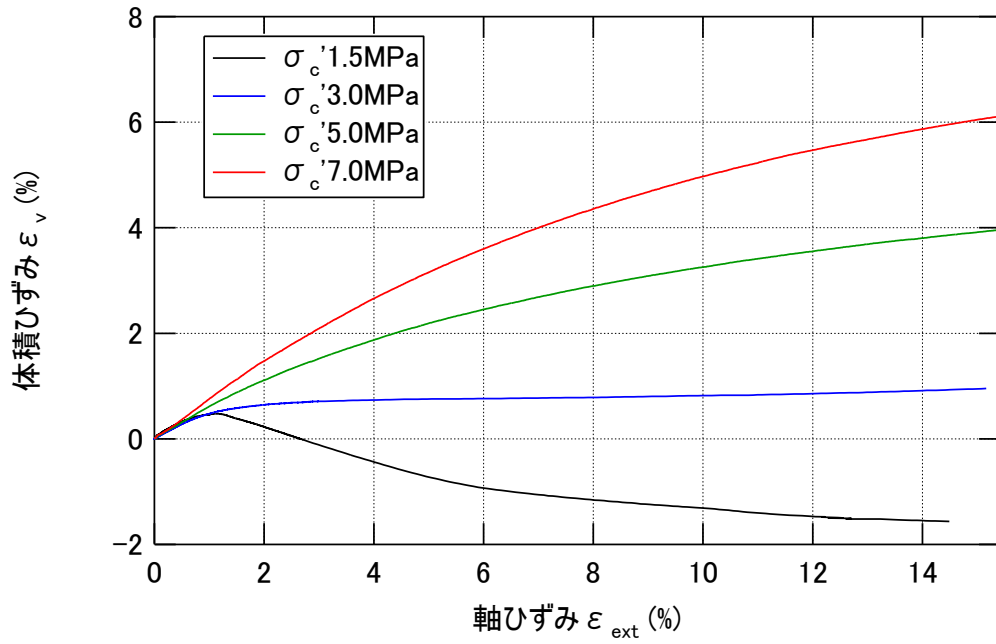


図 3.2.2-54 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果（体積ひずみ～軸ひずみ関係）

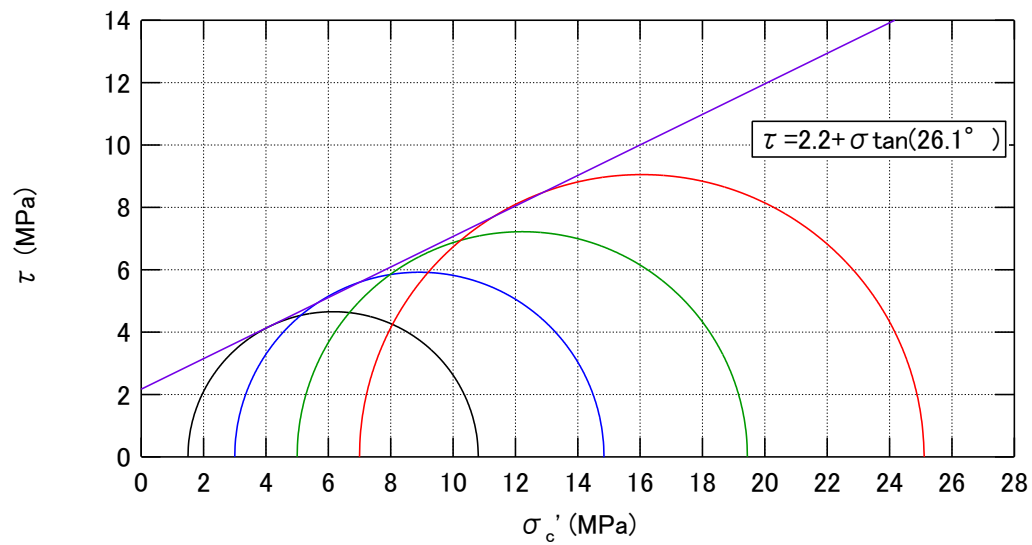


図 3.2.2-55 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果（強度特性）

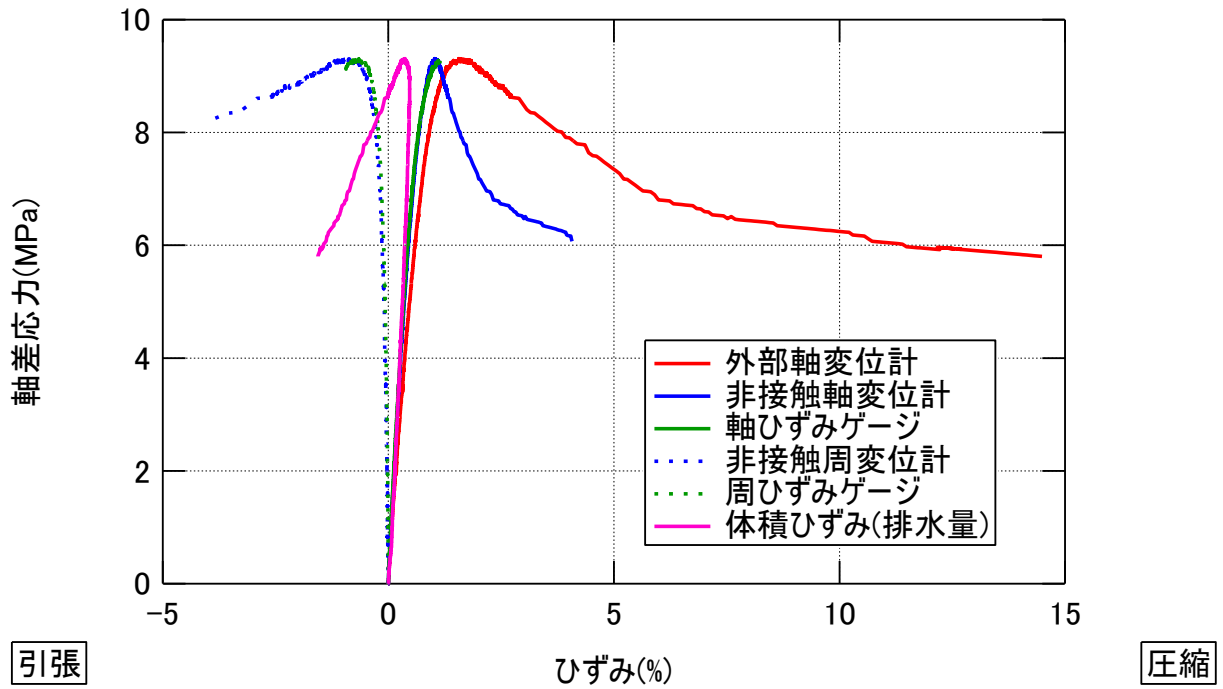


図 3.2.2-56 軸差応力～ひずみの関係 (YTS3-3-1, σ_c' : 1.5MPa)

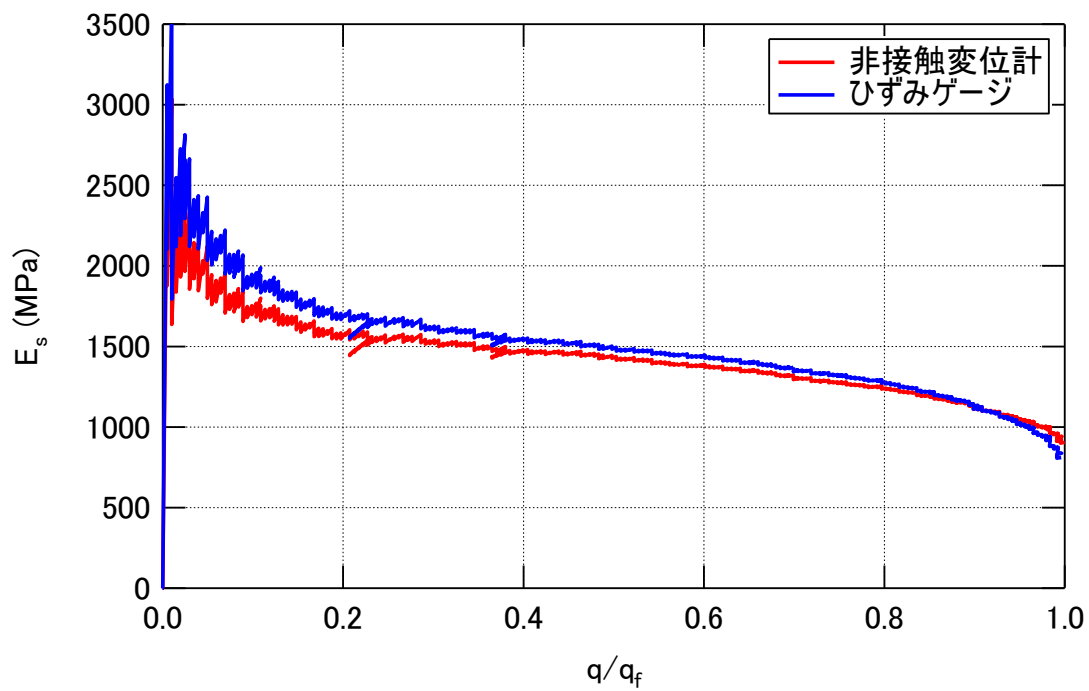


図 3.2.2-57 割線変形係数～軸差応力比の関係 (YTS3-3-1, σ_c' : 1.5MPa)

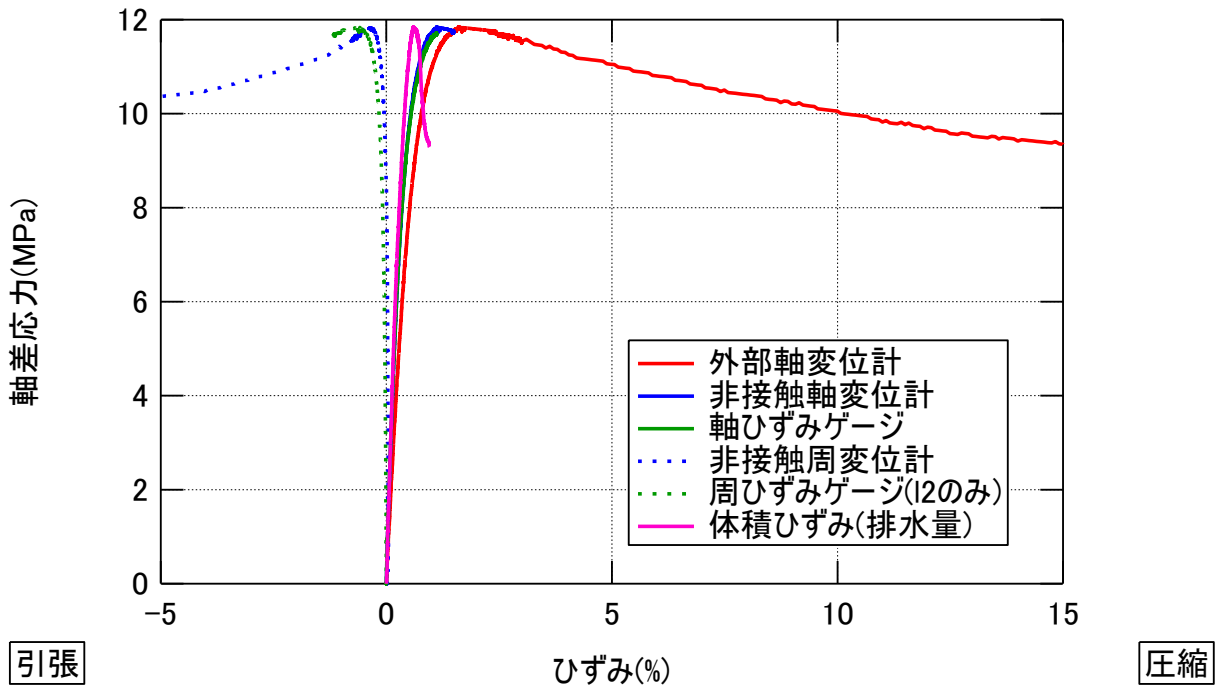


図 3.2.2-58 軸差応力～ひずみの関係 (YTS3-4-1,oc' : 3.0MPa)

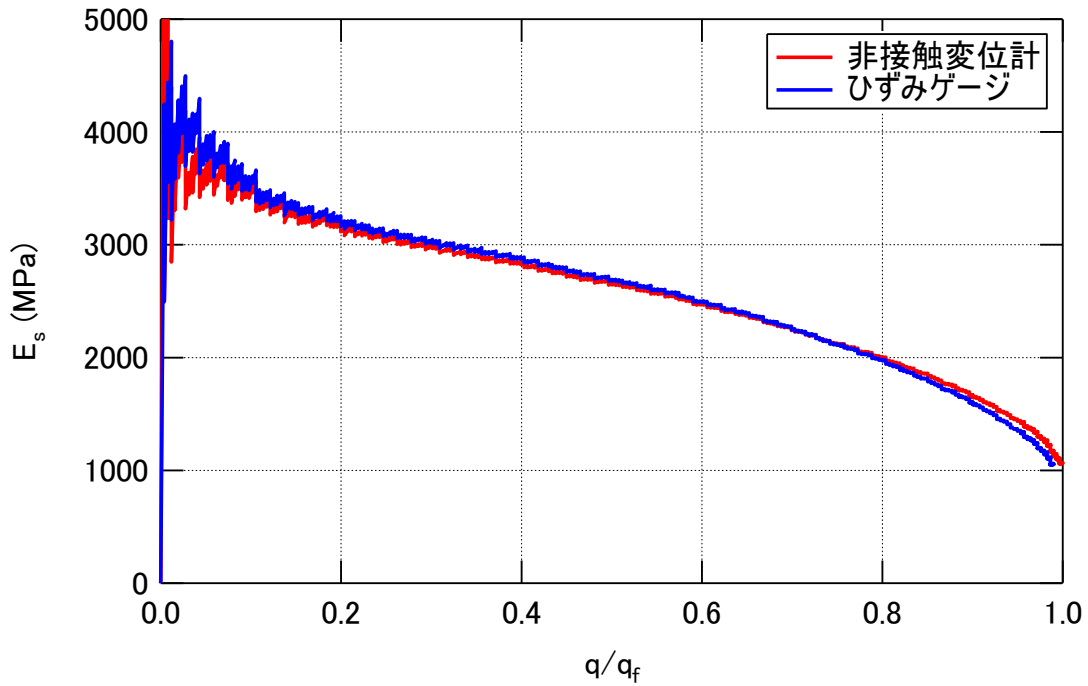


図 3.2.2-59 割線変形係数～軸差応力比の関係 (YTS3-4-1,oc' : 3.0MPa)

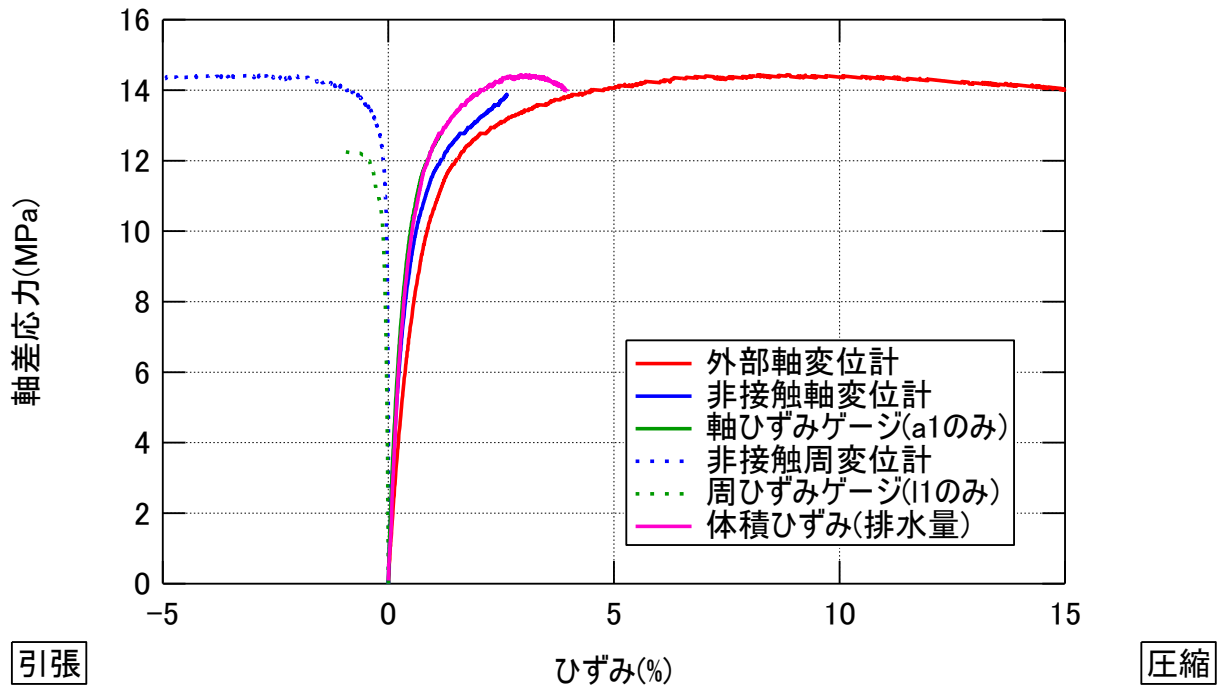


図 3.2.2-60 軸差応力～ひずみの関係 (YTS3-4-5,oc' : 5.0MPa)

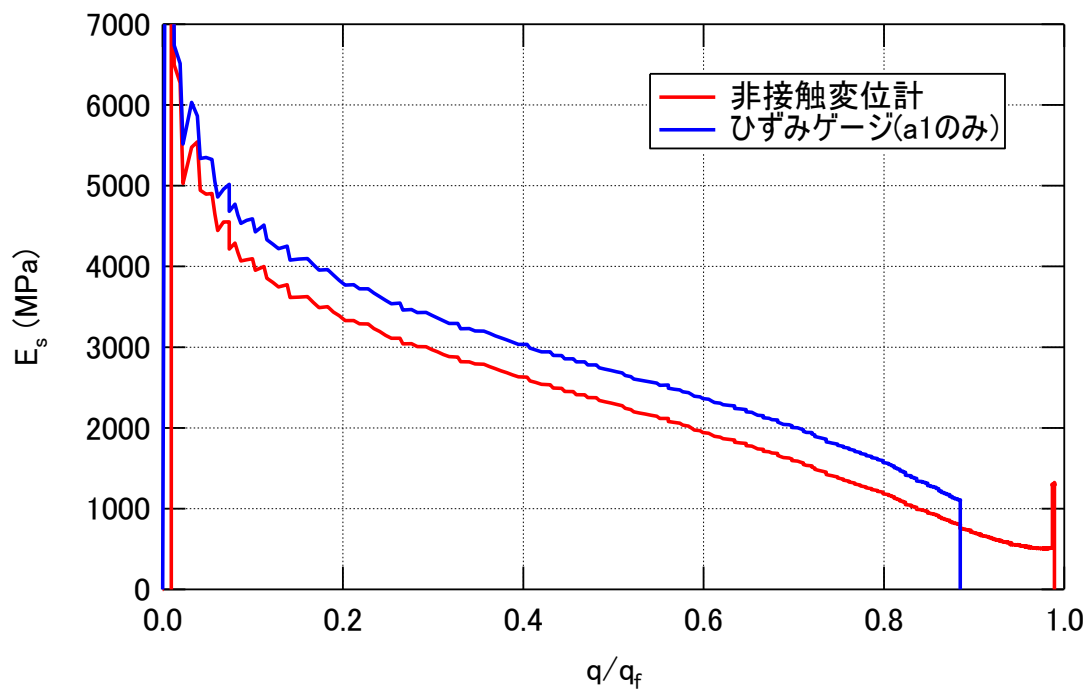


図 3.2.2-61 割線変形係数～軸差応力比の関係 (YTS3-4-5,oc' : 5.0MPa)

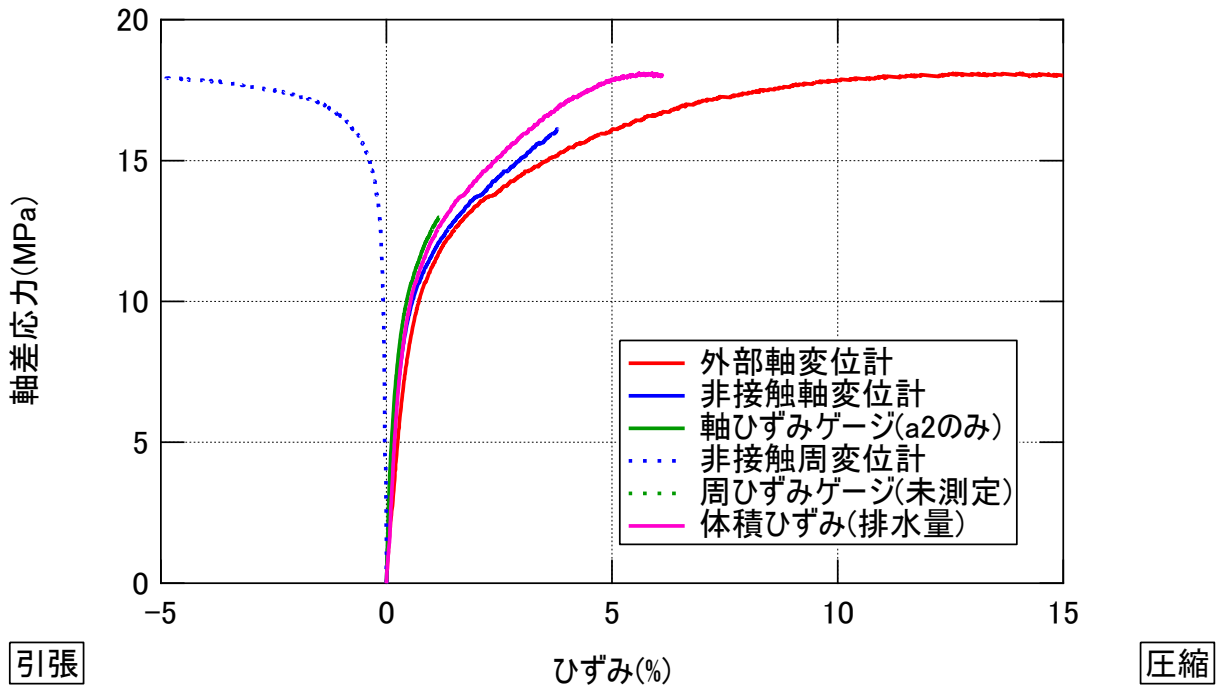


図 3.2.2-62 軸差応力～ひずみの関係 (YTS3-4-6,oc' : 7.0MPa)

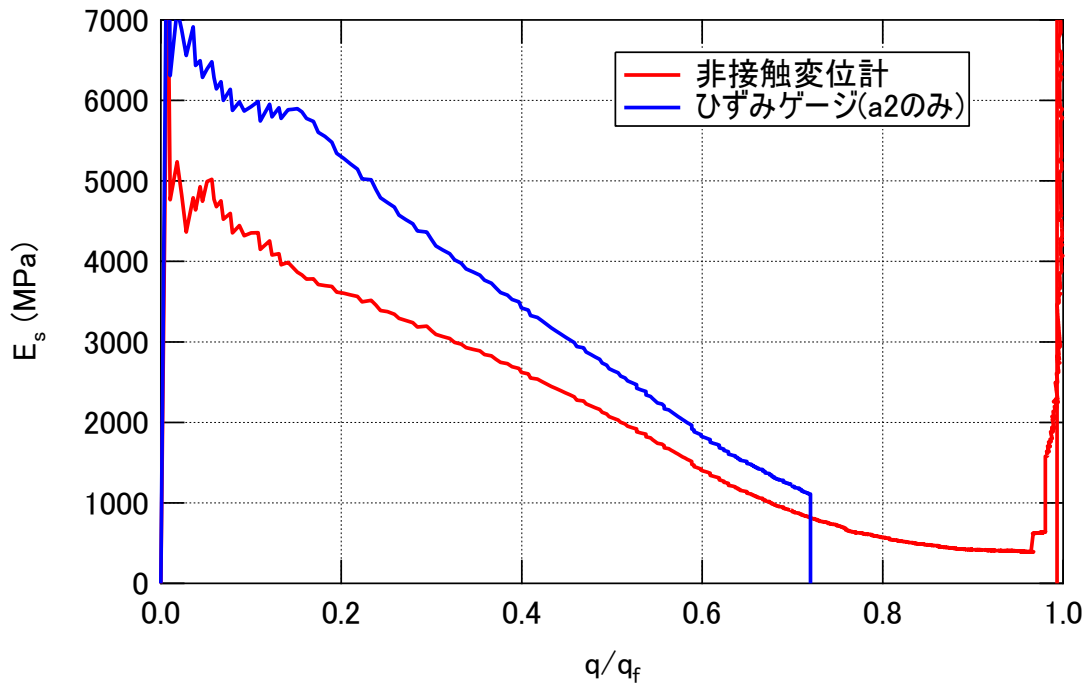


図 3.2.2-63 割線変形係数～軸差応力比の関係 (YTS3-4-6,oc' : 7.0MPa)

3.2.3 まとめ

要素実験では、数値解析で入力するパラメータに資するデータの取得を目的として実験を実施した。実験は、緩衝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、超音波伝播速度測定）、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) 物理特性

要素実験で得られた物理特性は、データのばらつきを統計処理できる数量の実験結果を得た。

(2) 緩衝材の膨潤特性

緩衝材の乾燥密度の増加とともに、膨潤圧も上昇する傾向が認められた。また、次項に示す模型実験で得られたベントナイト土圧と、要素実験から得られた緩衝材の膨潤圧は整合した。

(3) 熱特性

要素実験において、広範囲な飽和度の変化に伴う熱伝導率の関係が得られた。固相（緩衝材及び周辺岩盤）の熱特性として、比熱測定、熱膨張率測定などが今後の対象である。

(4) 保水特性

要素実験において、広範囲な飽和度の変化に伴う保水特性の関係が得られた。化学ポテンシャルの大きい領域（飽和度の低い領域）においては、緩衝材及び周辺岩盤ともに、蒸気圧法による測定を併用し、保水特性の精度を向上させることが必要である。

(5) 透水特性

緩衝材においては、飽和透水係数の定義（飽和の判定方法及び測定結果の妥当性の評価）を明確にする。周辺岩盤においては、透水試験の実施数量を増やし要素実験で得られる透水特性の精度を向上させること必要である。

(6) 力学特性

緩衝材及び周辺岩盤において、三軸試験の実施数量を増やし要素実験で得られる力学特性の精度を向上させることが必要である。

第3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 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] 高下達也, 谷和夫, 中山栄樹, 三上武子: 低い導水勾配域におけるフローポンプ試験と低水位透水試験の比較, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.81-87, 2012.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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 研究報告, N10018, 2011.

第4章 遠心力模型実験

4.1 背景・目的

4.1.1 背景

遠心力場の相似則を利用した遠心力模型実験は、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[2]。また遠心力場の相似則における時間加速の効果により、長時間の遠心力模型実験を行うことでニアフィールドの長期力学的挙動の推定に対して有利である。ただし、実物と同じ材料で遠心力模型実験を行った場合、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、一般的にいわれる H^2 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考えられる現象に対しては、実物の長期力学的挙動をある程度推定できる可能性がある。

これまでに実施された遠心力模型試験による長期挙動の取得は、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載荷装置を用いて実施されている[3]。この試験では、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 年相当の模型実験が実施された[4][5]。その結果、拘束圧（地圧）をパラメータとした応力拘束条件下では、周辺岩盤の変形を考慮しない既往のひずみ拘束条件下での遠心力模型実験結果と異なり、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、かつ実験期間内において収束しないことが示された。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が実験的に明らかにされている。一方で上記実験は、処分孔上端面の背圧が 0.5MPa、オーバーパックの温度が 95°C 一定[5]と実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実験が必要不可欠である。

4.1.2 目的

これまでに実施された遠心力模型試験で考慮されていない、廃棄体の発熱および近深部環境（温度、地圧）といった実環境を考慮した境界条件による実験を行い、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動のより正確な挙動を取得することを目的とした。

4.1.3 3カ年の実施計画および本年度の実施内容

本業務で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 4.1.3-1 に遠心力模型実験の3カ年計画を示す。最終年度に処分坑道を含めた大型のニアフィールド模型を用いた遠心力載荷実験の実施を念頭に、今年度は基礎的なデータ取得を目的に、オーバーパック1体、処分孔1孔の処分坑道を含まない廃棄体周辺を抽出し、1/30の模型を用いて遠心力30G

場において実験を実施する。模型サイズは、センサの貼付け、計測点数、孔内に存在する隙間・継目等が作製可能かどうかを考慮し決定した。また、遠心力模型実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おいて力学的挙動が最も大きく生じると考えられるため、飽和後の挙動もある程度示せるよう、100年程度相当とした。詳細な境界条件は4.3.5節で述べる。

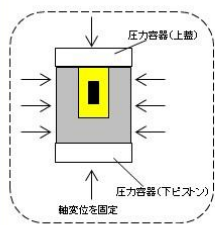
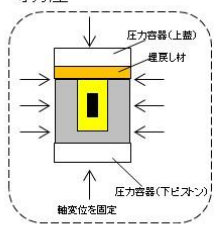
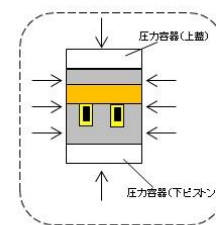


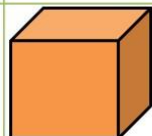
	H27	H28	H29	H30以降
条件	<ul style="list-style-type: none"> •1/30模型 •処分孔1孔 •熱-水-応力 •等方圧 	<ul style="list-style-type: none"> •1/30模型 •処分孔1孔 •岩盤供試体上端面に埋戻し材やプラグを想定した条件 •熱-水-応力 •等方圧 	<ul style="list-style-type: none"> •1/50模型 •処分坑道1本、処分孔2孔 •熱-水-応力 •等方圧 	<ul style="list-style-type: none"> •その他の環境因子を条件にした研究(水質、材料の力学的異方性、動的問題など) •稠密計測可能な大型模型実験の検討、など
模型形状	 φ18cm (処分孔1孔)	 φ18cm (処分孔1孔)	 30cm角 (複数孔、坑道)	

図 4.1.3-1 今フェーズにおける遠心力模型実験の実験計画

4.2 遠心模型実験における静的場の相似則

4.2.1 相似則

遠心力模型実験とは、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[2][6][7]。

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、 Buckingham 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模型と原型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[8]。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 4.2.1-1 に示す。なお相似則については、Garner ら[9]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。

表 4.2.1-1 静的場における遠心力場の相似則

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

4.2.2 遠心力模型実験の優位点

遠心力模型実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こと。
(実時間換算すると時間短縮の効果)

が挙げられる。

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力模型試験が有効である。遠心力模型試験は、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、重力場模型でも現象の観測は可能であるが、2つの現象(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。

4.2.3 遠心力模型実験の適用限界

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。遠心力模型実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実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実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[8]。

遠心力模型実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. [10]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[11]は帯基礎を含む既往の基礎に関する遠心力模型実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[8][10][11]。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。

また、中村・田中[12]では、電気事業連合会・電力中央研究所が提案した処分施設[13]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。

本研究では、岩盤の破壊や亀裂進展は評価の対象外、用いる模型に対して外側境界から等方応力を負荷し、対象とする現象が連続体としての緩衝材の挙動であり、粒子径以上の現象を対象としているため、メカニズムは同様、寸法効果の影響は限定的と考え、中村・田中[12]と同様の相似則が成立すると類推した。

4.2.4 長期挙動評価における遠心力模型実験の意義

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力模型実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 4.2.1-1 で示した物理量に関連して、表 4.2.4-1 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 1/30 の模型を遠心力 30G 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 1/900 に短縮されて、40 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、 $\epsilon_c = A \cdot \exp[-(E/\eta)t]$ で表され (A : 定数、 E : ヤング率、 η : クリープ粘性係数、 t : 時間) [14]、実物と模型のヤング率が $E=E_m$ として $t=n^2t_m$ (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 $\eta_c=n^2\eta_{cm}$ 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 [15]。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、遠心力模型実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大きくないと仮定し、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 4.2.4-1 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	$l, e, \rho_l, \sigma_r, h_c, \eta, T, k, \sigma, t_f$	○	有
緩衝材の圧密、膨潤	$l, \rho, d, e, Sr, \rho_l, \sigma_r, h_c, T, \eta, k, \sigma, t_f$	○	有
廃棄体から周辺地盤への熱	T, t_f	○	—
物質移動 (移流・拡散)	$l, e, \rho_l, \sigma_r, h_c, T, \eta, k, \sigma, t_f$	○	—
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	—

4.3 実験概要

4.3.1 実験設備

(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、電中研が所有する超長期遠心载荷岩盤実験装置で、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されている (図 4.3.1-1) [3]。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ホームの面積は、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。プラットホームには最大で 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)が設置されており、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実験データは無線 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。

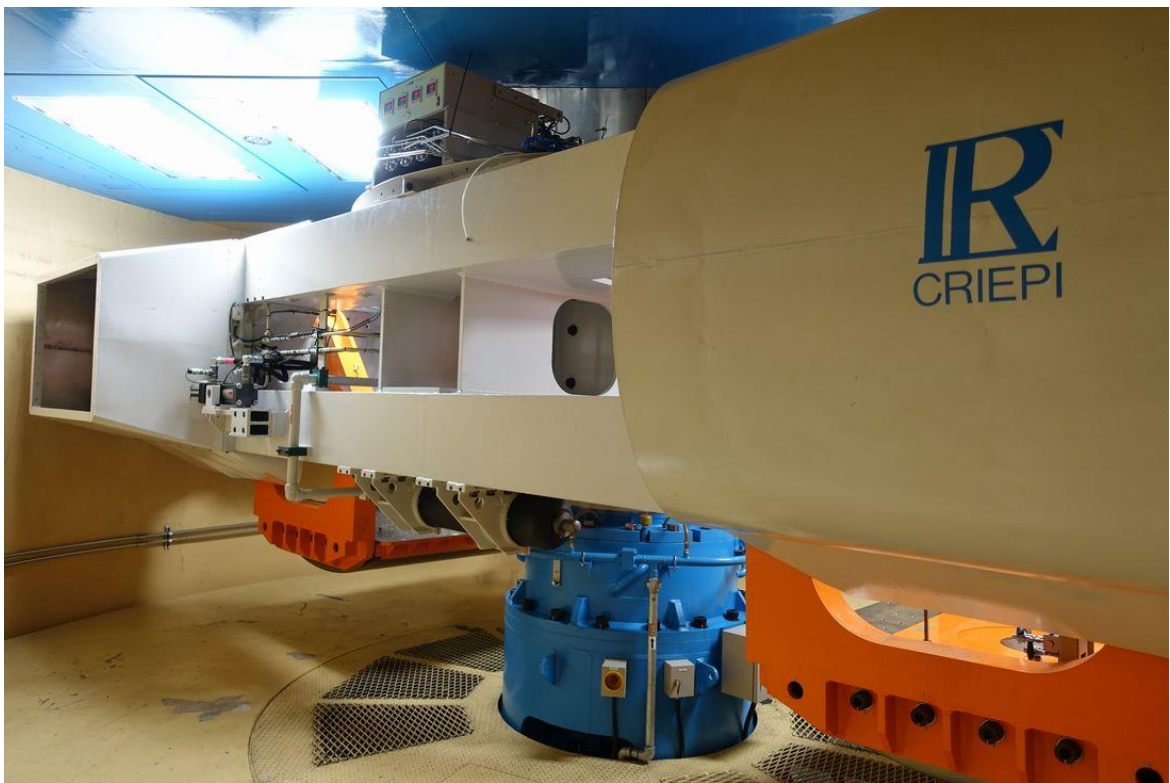
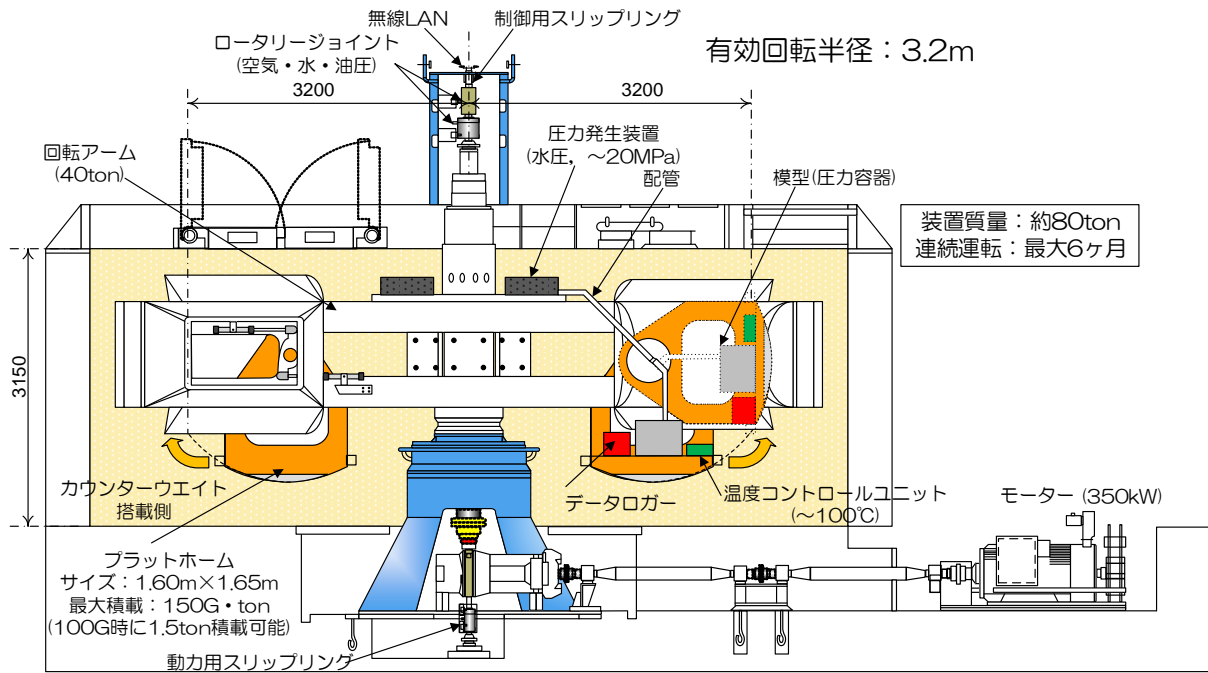


図 4.3.1-1 超長期遠心载荷岩盤実験装置の概略図（上）と装置全景（下）

(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実験は、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（被り圧）は圧力容器[3]による応力負荷で担保する。自重応力の相似則は廃棄体周辺のみを考慮した。図 4.3.1-2 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 54.15kg、周圧は水圧、軸圧はピストン構造（下部架台を水圧により作動させる）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・排水口が設けられており、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。上蓋に設置された土圧計の先端には厚さ約 3mm のシリコンシーラント層が設置されており、軸圧をかけた状態においても、土圧計にかかる圧力は 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端子台が設置され、これを通じて模型に貼付されたひずみゲージ、土圧計付き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され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される。容器上蓋内部には模擬オーバーパックの鉛直変位量を計測する渦電流式非接触変位計と緩衝材の膨潤圧を計測するひずみゲージ式土圧計が組み込まれており、スイッチボックスに接続する。

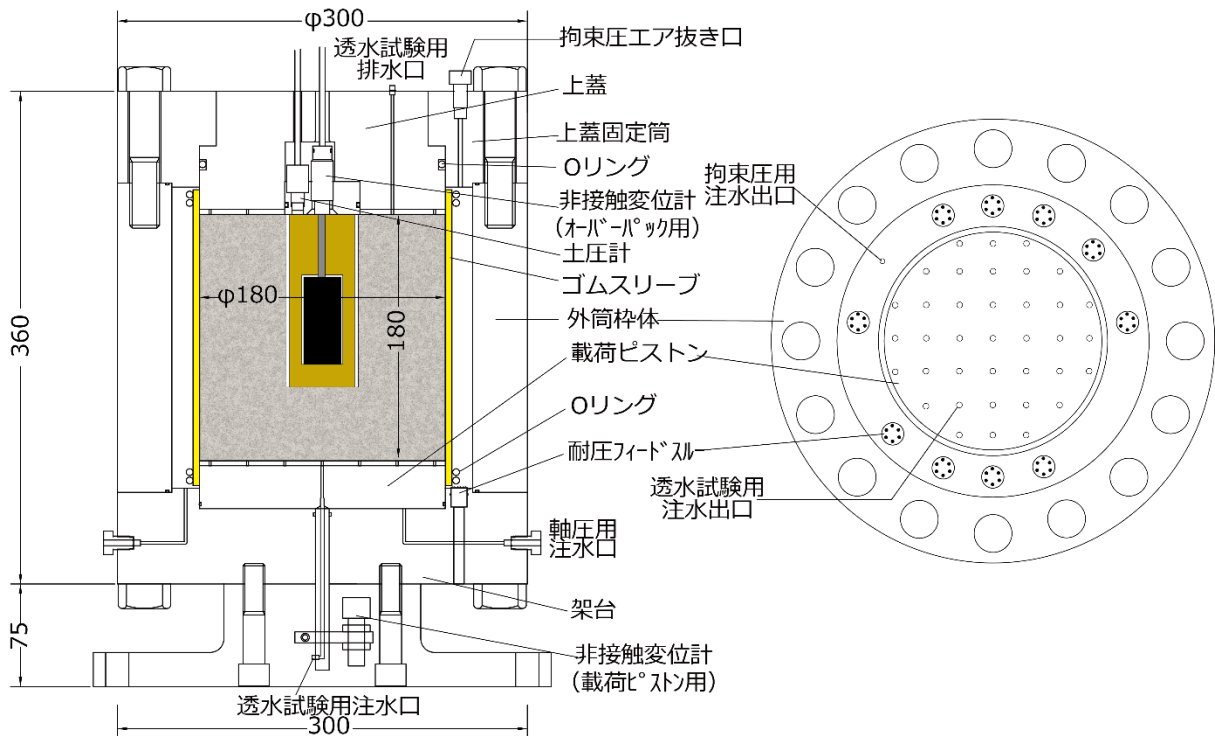


図 4.3.1-2 18cm 円柱用圧力容器の見取図、(左) 立断面、(右)、平断面

(3) X線 CT 装置

X線 CT 撮影は、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 4.3.1-3）。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 4.3.1-3 医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ

4.3.2 想定した施設および模型

本研究で用いるニアフィールド縮尺模型は、第2次取りまとめ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 4.3.2-1) [16]。オーバーパック、緩衝材、処分孔サイズの 1/30 の大きさで、廃棄体 1 体、処分孔 1 孔および緩衝材、周辺岩盤から構成される縮尺模型である。なお、「供試体」とは整形された緩衝材、岩盤試料そのものを指し、「模型」とは模擬オーバーパックと緩衝材供試体を岩盤供試体に削孔された孔に封入した状態の実験試料全体を指す。

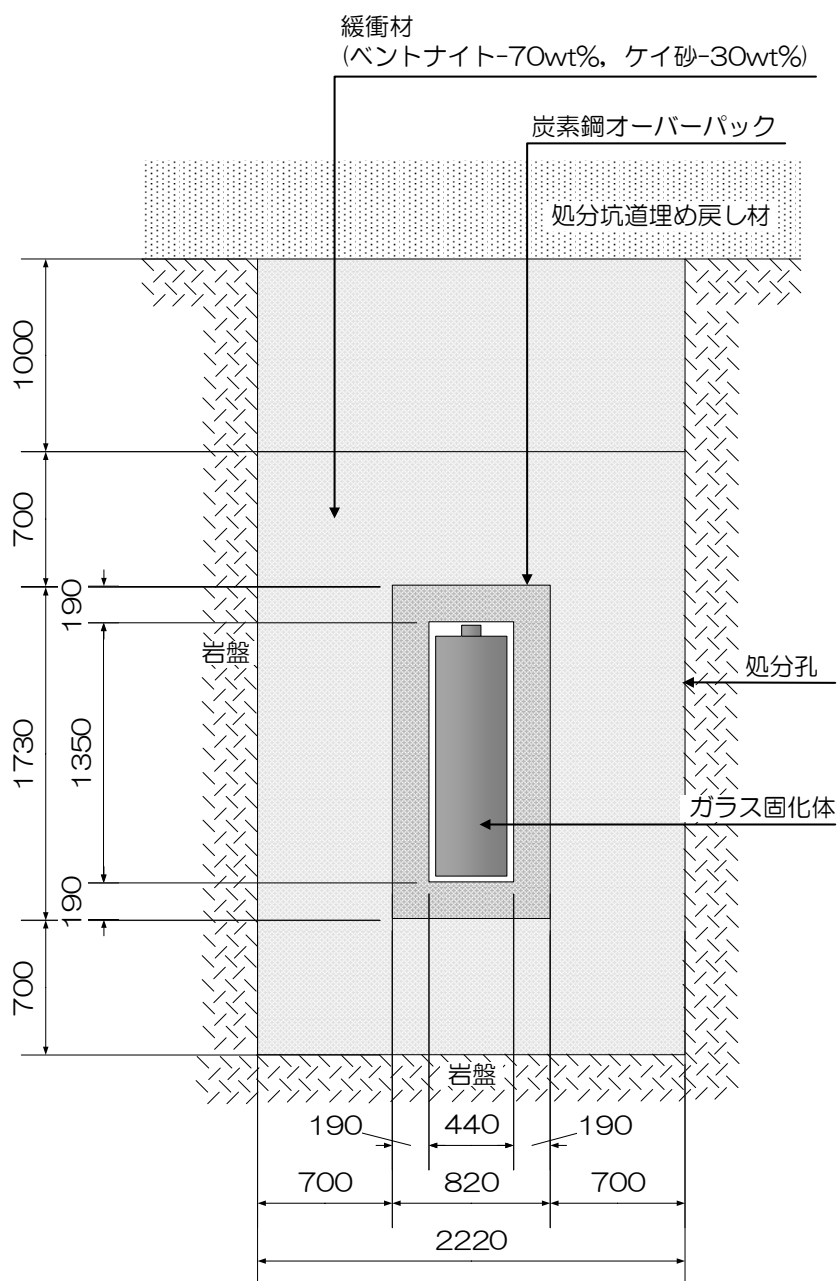


図 4.3.2-1 対象とした処分施設の概要[16]

4.3.3 模型の作製

(1) 模擬オーバーパック

模擬オーバーパックは直径 27.33mm、高さ 57.67mm である (図 4.3.3-1)。密度は炭素鋼の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 [16]。本実験で開発した土圧計付発熱型オーバーパックは、2 個の小型カートリッジヒーターと土圧計 3 個 (図 4.3.3-1)、熱電対と隙間充填剤 (エポキシ樹脂)、ステンレス鋼材から成る。これらを併せて上記密度となるようにステンレス鋼材を質量調整し、模擬オーバーパックを作製した。下記に各材料の詳細を示す。

- ・カートリッジヒーター

ミスミ社製、MHK6.25-25.4-V120-W80、120V、80W の出力のもので図 4.3.3-1 のとおりに 2 個配置している。本実験では、電圧 100V で使用するため、出力は $80\text{W} \times 100\text{V} / 120\text{V} \times 2 = 133.4\text{W}$ となっている。

- ・土圧計

東京測器研究所製、PDB-5MPHS001、定格容量は 5MPa で、受圧面の 6.0mm で、O リングを設置することで止水を行っている。オーバーパック下面中央に 1 個、下端部から 22mm の側面に 90°となるように 2 個配置している (図 4.3.3-1)。

- ・熱電対

株式会社チノー製、フッ素樹脂被膜熱電対 JK3 (K 型熱電対、3.2mm、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ている。

- ・隙間充填剤

共和電業製、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°C ~ 200°C である。

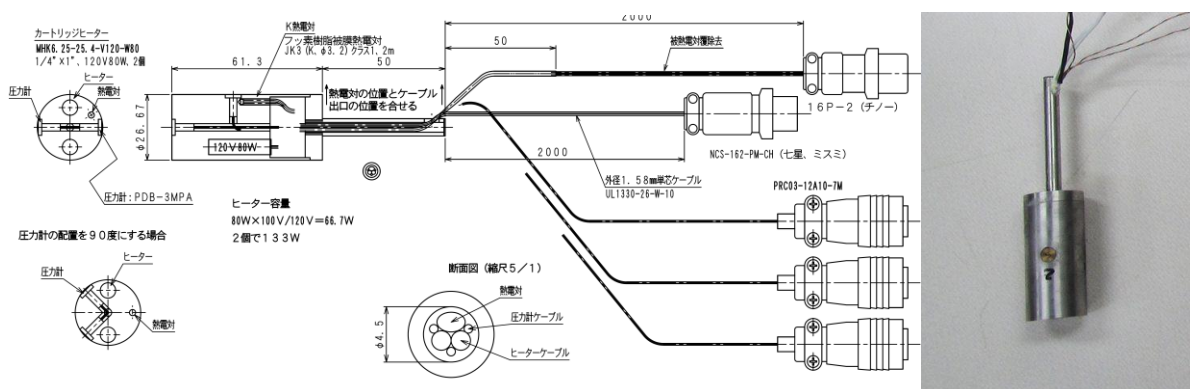


図 4.3.3-1 土圧計付発熱型オーバーパックの概要図 (左) と実際の模型 (右)

(2) 緩衝材

緩衝材は、直径 74mm、高さ 137.7mm である。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 で混合した物を、治具を用いて圧縮ベントナイトを作製した[16][17]。下記に緩衝材の作製方法を示す。

緩衝材は、岩盤供試体の孔壁と緩衝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 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。緩衝材ブロックは 7 個に分割されている（図 4.3.3-2）。図中の断面図内の①～③の位置に模擬オーバーパックのギャップセンサーターゲットの柱が④～⑥の位置には模擬オーバーパックが静置される。クニゲル V1 は、含水比が 10.84% であり、ケイ砂はほぼ乾燥状態（含水比 0.2%）である。また、ケイ砂のうち 3 号 S は 2mm ふるいを通過したもののみを抽出し、使用している。各緩衝材試料に必要なクニゲル V1 とケイ砂の質量を表 4.3.3-1 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が貼付されており、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 4.3.3-3）、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、ベントナイト締固め機（株式会社誠研舎製、DAM-149）に設置する（図 4.3.3-4、左）。緩衝材の作製には 37kN の荷重で載荷する必要があるため、締固めは 7.4kN、14.8kN、22.2kN、29.6kN、37kN の段階にわけて圧縮を実施し、各載荷段階で荷重が落ち着くのを待ち次の段階の荷重での圧縮に移った。圧縮荷重は東京測器研究所製、TC-31M を用いて計測した。緩衝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を取り出すため、下部加圧板とモールドを固定している板を取り外し、載荷時と天地を逆転させて圧縮ベントナイト取出し機に設置する（図 4.3.3-4、右）。モールド上部にスペーサーを設置し、ジャッキにて緩衝材試料を押し出し、緩衝材試料の高さと質量を計測する。以上の作業を緩衝材試料 7 個に対して実施した。作製した緩衝材ブロックの諸元を表 4.3.3-2 に、作製された緩衝材を図 4.3.3-5 に示す。

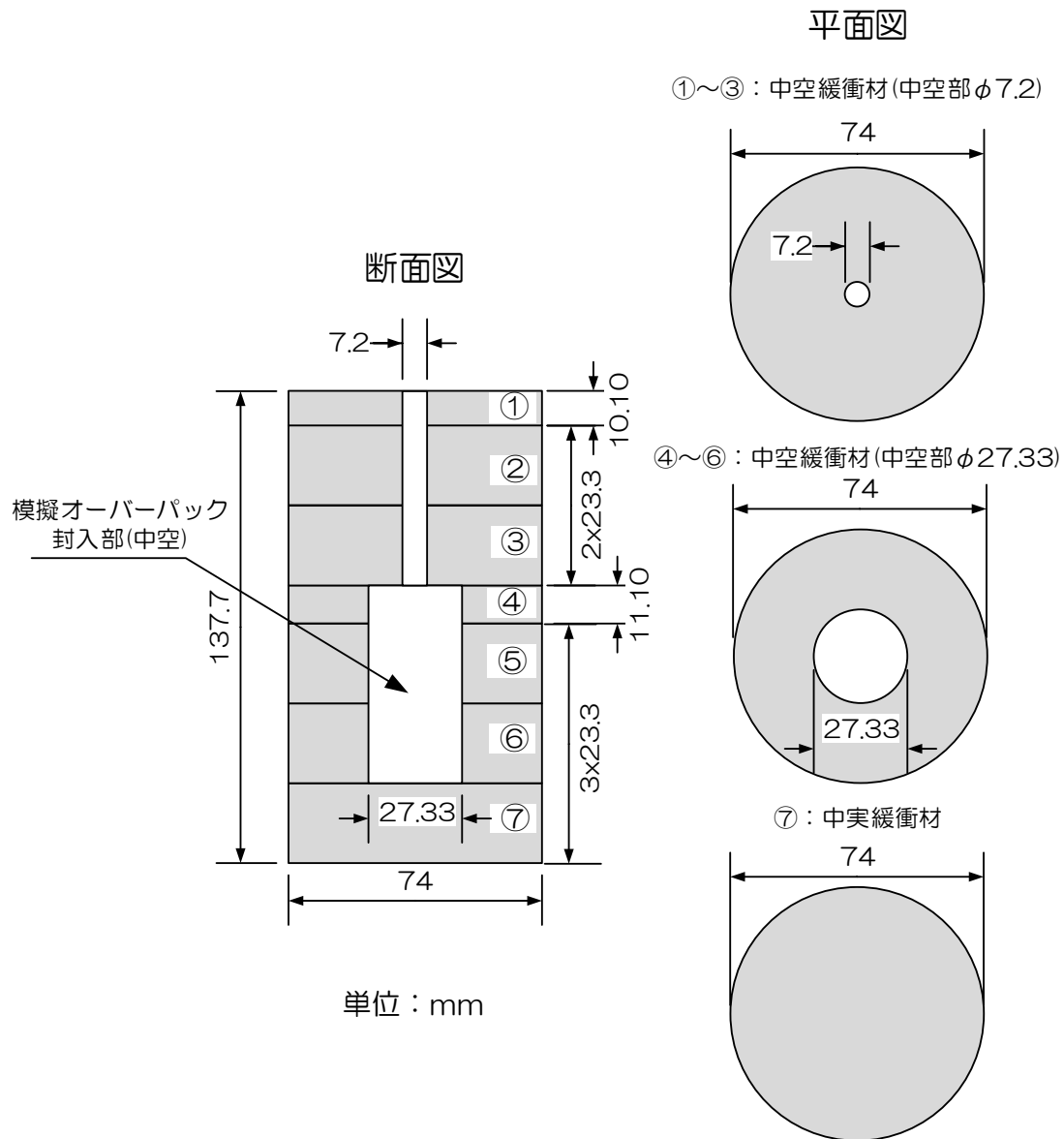


図 4.3.3-2 緩衝材ブロックの断面図、平面図および分割状況

表 4.3.3-1 緩衝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	56.37	21.84	78.21	10.1
②	130.04	50.38	180.42	23.3
③	130.04	50.38	180.42	23.3
④	54.43	21.09	75.51	11.1
⑤	114.25	44.26	158.51	23.3
⑥	114.25	44.26	158.51	23.3
⑦	131.22	50.84	182.05	23.3



図 4.3.3-3 緩衝材試料（クニゲル V1、70wt%、混合ケイ砂 30wt%）



図 4.3.3-4 ベントナイト締め機（左）、圧縮ベントナイト取出し機（右）

表 4.3.3-2 作製した緩衝材ブロックの諸元

	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	78.2	9.93	7.65	1.85	1.72	1.63
②	180.34	23.24	7.65	1.82	1.69	1.61
③	180.41	23.08	7.65	1.84	1.70	1.62
④	75.45	10.94	7.65	1.86	1.73	1.63
⑤	158.24	23.05	7.65	1.85	1.72	1.62
⑥	158.34	23.16	7.65	1.84	1.71	1.61
⑦	181.98	23.12	7.65	1.83	1.70	1.62



①中空緩衝材(中空部φ7.2)



②中空緩衝材(中空部φ7.2)



③中空緩衝材(中空部φ7.2)



④中空緩衝材(中空部φ27.33)



⑤中空緩衝材(中空部φ27.33)



⑥中空緩衝材(中空部φ27.33)



⑦中実緩衝材

図 4.3.3-5 作製した緩衝材ブロック一覧

(3) 岩盤供試体

本研究では初声凝灰岩を使用し、180mm×高さ 180mm の円柱状に整形した岩盤試料に模擬処分孔を削孔した。岩盤供試体の概略図を図 4.3.3-6 に示す。

岩盤供試体の作製方法を以下に示す。サンプリングしたコアブロックをコア抜き機に静置し、内径 180mm のコアドリルを取り付ける。岩盤試料を動かさないように固定し、湿式でコアを抜く（図 4.3.3-7 上段中）。コア抜きが終了した後に、切断機に試料を設置し、岩盤試料の上下面を湿式で切断する（図 4.3.3-7 中上段左）。この際、岩盤試料の高さが 185mm 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（図 4.3.3-7 中下段左）。岩盤試料の高さは $180\pm 0.3\text{mm}$ 以下となっている。その後供試体を再度コア抜き機に設置し、固定する。外径 75mm のコアドリルを取り付け、岩盤試料中央にコアドリルがくるように位置を調整し、岩盤試料上端部から 13.4cm のところまで掘削する（図 4.3.3-7 下段左）。次にコアドリルを外径 54mm の物に交換し、再度岩盤試料上端部から 134mm のところまで掘削する。

模擬処分孔はコアドリルで掘削した部分までのコアを折り除去する。除去後に水で破片を洗い出し、ノミを使用して粗削りを行う。この粗削りは、深さ 133.5mm を目標に実施する。粗削り終了後、エアリユーターを使用して処分孔底部の研削を行う。リユーターの径は処分孔の径より小さいため、前後左右に小刻みに移動させることで処分孔底部全体を平滑にした。ノギスで 4 点深さを計測し、 $133.7\text{mm}\pm 0.3\text{mm}$ であることを確認して模擬処分孔の作製を完了した。

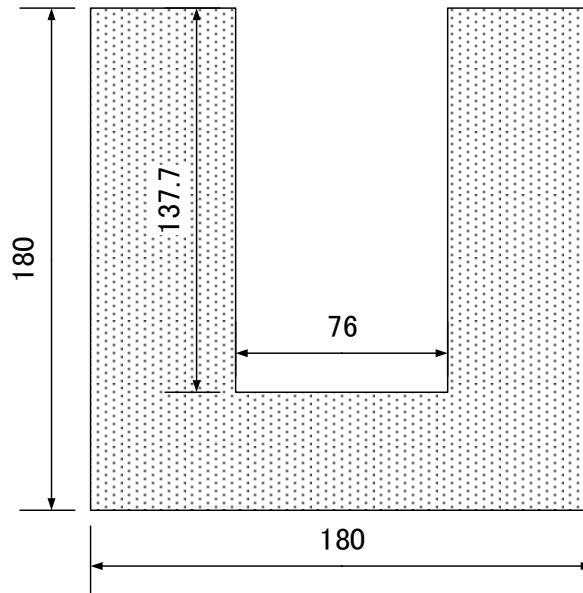


図 4.3.3-6 岩盤供試体の概略断面図



図 4.3.3-7 岩盤試料の整形状況

(4) 遠心力载荷実験用模型の準備

岩盤供試体を 50℃に設定した株式会社東洋製作所製、ADVANTEC DRK632DB 送風定温乾燥機 (図 4.3.3-8) にて 2 週間乾燥させた。乾燥状態になった岩盤供試体にひずみゲージを貼付するマーキングを行った (図 4.3.3-9)。使用するひずみゲージは、共和電業製、KFG-10-120-C1-11N50C3 (図 4.3.3-10 上) を 5 枚、測温機能付きひずみゲージである東京測器研究所製、QFLA-5T-11-6FB-3LT (図 4.3.3-10 下) が 11 枚である。後に実施する被覆のため、各ひずみゲージのリード線の撚りを解き、ナンバリングした。

マーキングした部分で岩盤供試体上端面のものと処分孔内のもの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土圧計付発熱型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も合わせて切削した (図 4.3.3-11)。ひずみゲージを貼付する箇所に NICHIBAN 製アラルダイトラピッドを使用して厚さ 1mm の下地を作製した (図 4.3.3-12)。下地剤が乾燥するのを待ち、ひずみゲージを東京測器研究所製、CN 瞬間接着剤を使用して貼付した (図 4.3.3-13)。ひずみゲージを貼付した後、1 次コーティングとして信越化学工業株式会社製、KE-45-TS 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、岩盤供試体上端面と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) に株式会社潤工社製、テトラエッチ B を塗布し、20 秒放置後、呉工業株式会社製、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 を使用して溝に埋没させた。1 次コーティングの乾燥後、2 次コーティングとして信越化学工業株式会社製、シーラント 40 を塗布した (図 4.3.3-14)。

コーティング剤が乾燥した後、150mm、長さ 220mm、厚さ 2mm のメンブレンゴムスリーブ (天然ラテックスゴム) を被せた。この際、メンブレンゴムスリーブが岩盤供試体下部に 20 mm 余分に出るように調整した。ひずみゲージのリード線、土圧計付発熱型オーバーパックのヒーターケーブル、熱電対、土圧計リード線をメンブレンゴムスリーブから取り出すための 5mm 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 2 か所、上部に 4 か所の計 6 か所に開けた (図 4.3.3-15)。岩盤供試体側面に貼付した測温機能付きひずみゲージは下部の 2 か所からリード線を取り出し、岩盤供試体上面および処分孔内に貼付したひずみゲージおよび測温機能付きひずみゲージは上部の 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、測温機能付き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。本実験は側圧を水圧で 8MPa 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 4.3.3-16)。また、緩衝材ブロックに貼付するひずみゲージのゲージ箔のはんだ部分も KE-45-TS を塗布し、防水処理を施した (図 4.3.3-17)。

緩衝材と土圧計付発熱型オーバーパックを模擬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 3 個に加工を行った。ワイヤーソーにて緩衝材を半分に切断し (図 4.3.3-18)、一番上に設置される緩衝材の切断面にオーバーパックから出ているヒーターケーブル

ル、熱電対、土圧計リード線を逃すための溝を切削した。その後上から 2 番目の緩衝材の側面にひずみゲージを貼付するため、必要分側面を紙やすり (#400) で削った。削った部分に軸方向、周方向にひずみゲージを貼付した。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、緩衝材ブロックの底板部と、27.33mm の穴が開いている円筒部の 3 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 3 個をオーバーパックの配線柱部に設置した状態で岩盤供試体溝部分と配線部が合うように処分孔内に静置した(図 4.3.3-19)。静置後、緩衝材の乾燥を防ぐため、緩衝材部をラップで覆いテープで塞いだ後、ヒーターケーブル、熱電対、土圧計リード線をメンブレンゴムスリーブ上部に開けた 2 か所の穴から取出し、岩盤供試体上面部については、ケーブルをテトラエッチ B で下処理を実施し、KE-45-TS を使用して溝部分に埋設した(図 4.3.3-20)。溝部分の処理が終わった後、メンブレンゴムスリーブ部の防水処理を行う。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 4.3.3-8 ADVANTEC DRK632DB 送風定温乾燥機



図 4.3.3-9 岩盤供試体へのマーキング状況

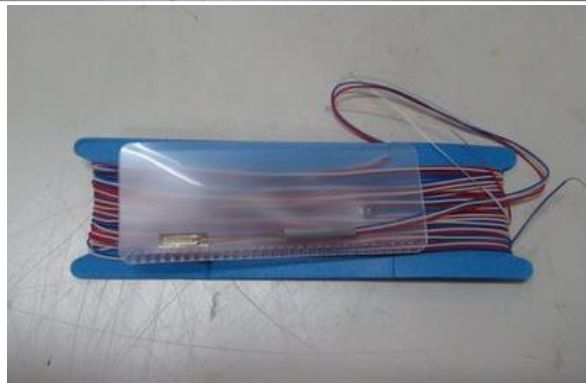
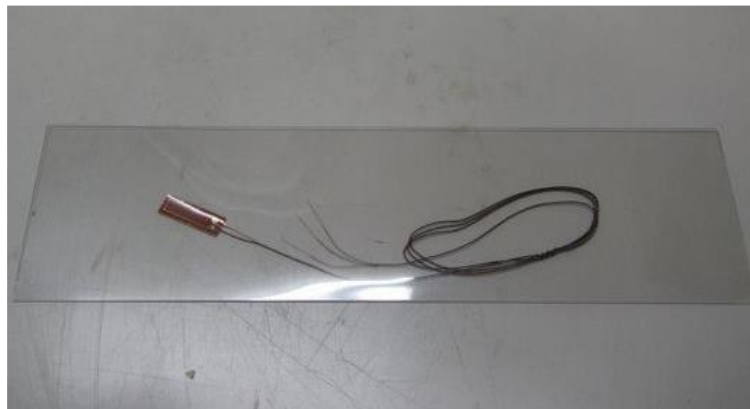


図 4.3.3-10 使用したひずみゲージ、KFG-10-120-C1-11N50C3 (上)、QFLA-5T-11-6FB-3LT (下)

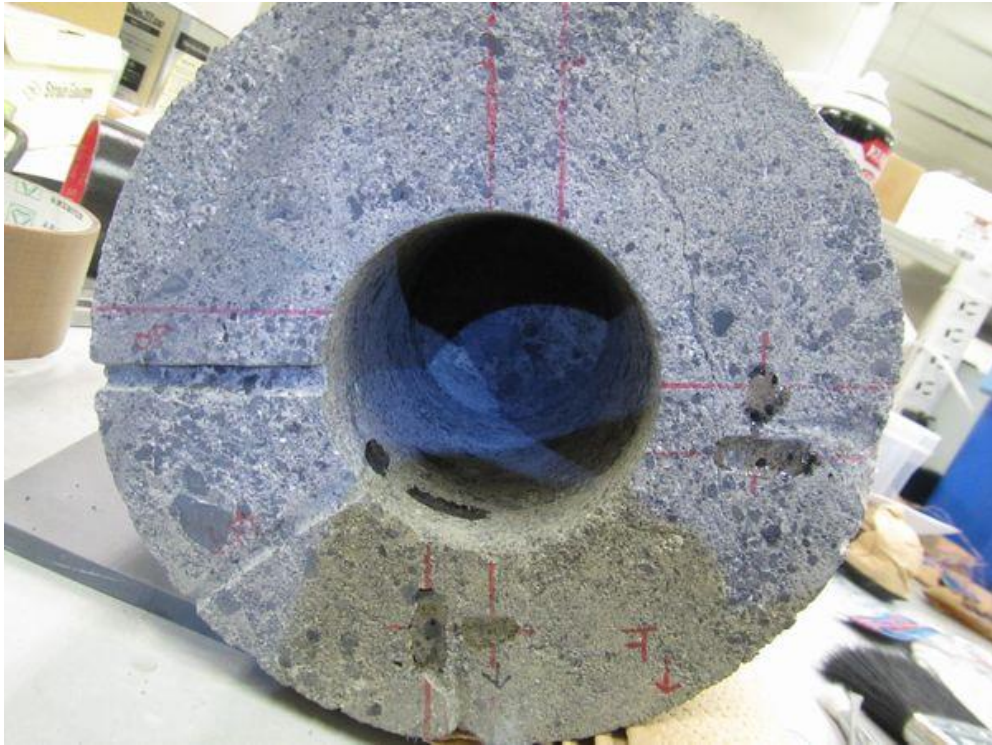


図 4.3.3-11 岩盤試料上端面の加工状況



図 4.3.3-12 下地剤塗布状況



図 4.3.3-13 ひずみゲージの貼付状況



図 4.3.3-14 ひずみゲージ貼付部分へのコーティング状況

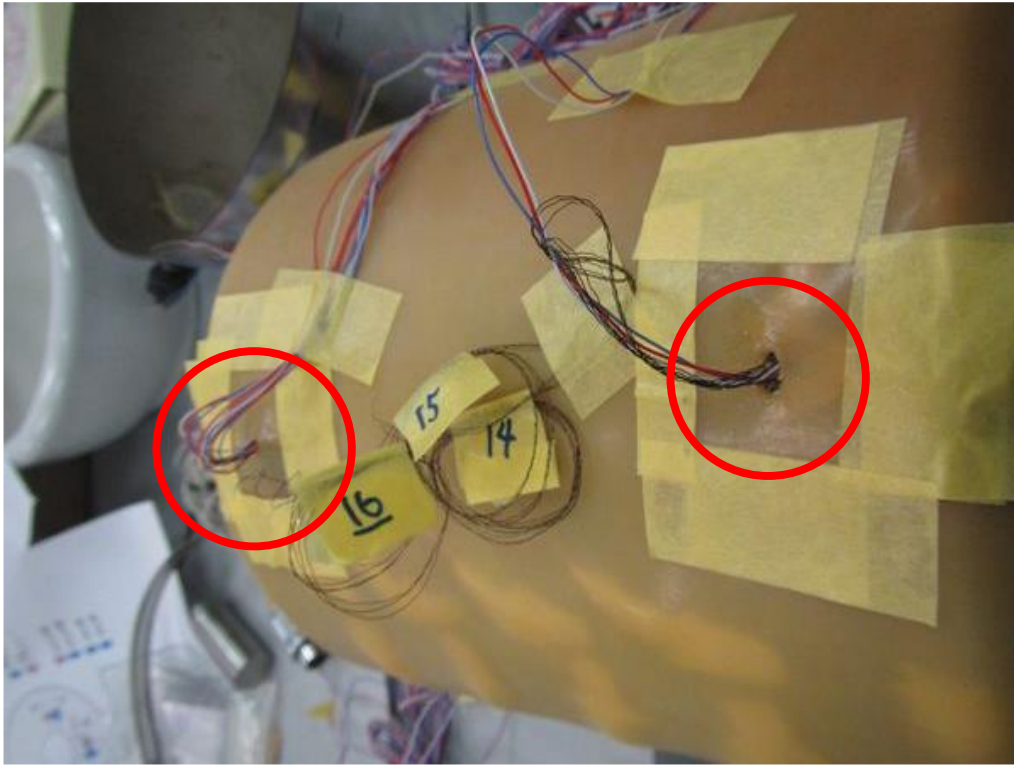


図 4.3.3-15 メンブレンゴムスリーブへの穴開け状況（赤丸部分）

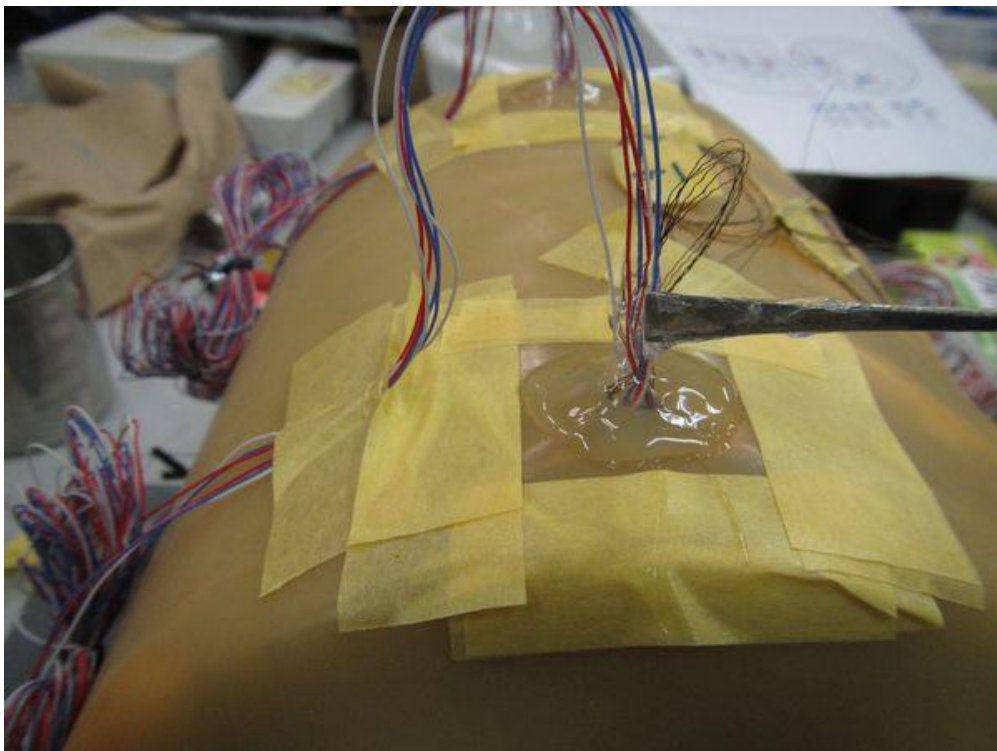


図 4.3.3-16 KE-45-TS を使用しての止水処理状況

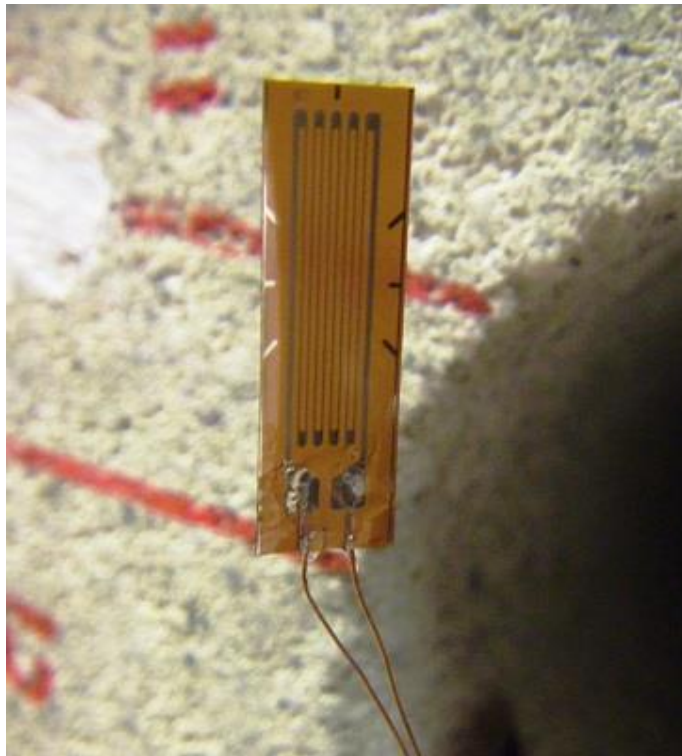


図 4.3.3-17 ベントナイト貼付用ひずみゲージへのコーティング状況



図 4.3.3-18 緩衝材ブロックの切断状況

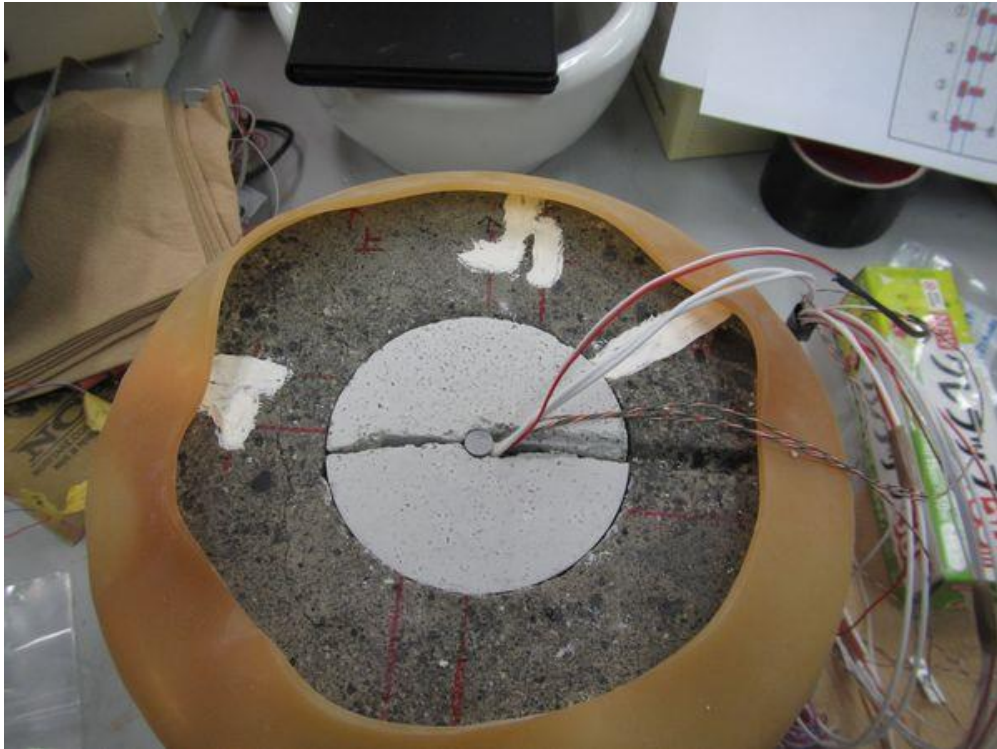


図 4.3.3-19 緩衝材・模擬オーバーパックの処分孔への設置状況



図 4.3.3-20 オーバーパックケーブル類埋設状況

4.3.4 模型の設置

(1) 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載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、遠心力載荷実験用模型を設置、模型上部に載荷ピストン上面と同様の導水用ステンレスメッシュを接着した上蓋を設置する（図4.3.4-1）。この際、メンブレンゴムスリーブと下部架台、上蓋と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2個設置する（図4.3.4-2）。共和電業製、KFG-10-120-C1-11N50C3のリード線を下部架台に設置されている耐圧フィードスルーにはんだ付けし、東京測器研究所製、ホットメルト型コーティング剤W-1を使用して芯線露出部の防水処理を行った（図4.3.4-3）。同様に土圧計付発熱型オーバーパックの土圧計のリード線も耐圧フィードスルーにはんだ付けし、W-1を使用して芯線露出部の防水処理を行った（図4.3.4-4）。測温機能付きひずみゲージのリード線については、貫通孔式端子台、MHM2-020-A12-T（CONAX社製、シーリンググランド）、熱電対についてはMHC2-040-2-T（CONAX社製、シーリンググランド）、ヒーターケーブルについてはMHM2-062-A2-T（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を通した（図4.3.4-5）。

配線の処理が完了した後、外筒枠体を設置し、架台下部とボルトで密着させ、模型と外筒枠体との間に蒸留水を流入する。その後上蓋固定筒を外筒枠体と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する。カウンターウェイト計算のため、模型設置後の圧力容器の重量計測を実施する。計測はsartorius社製、MW2P1-150FE-Lを用いた（図4.3.4-6）。計測した重量と圧力容器の重心から、遠心力載荷装置に搭載するカウンターウェイトを計算することができる。

(2) 遠心力模型実験装置への設置

圧力容器は、天井クレーンを用いて遠心力載荷装置の容器設置側のプラットホームに静置する。圧力容器とプラットホームをボルトで固定し、土圧計、ひずみゲージ、測温機能付きひずみゲージを東京測器研究所製、高速スイッチボックスIHW-50G-05(S)に結線する（図4.3.4-7）。土圧計付発熱型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（電子応用製、PU09-236-102：模擬オーバーパックの鉛直変位量、PU-20：載荷ピストン鉛直変位量）は、プラットホーム上に設置された専用アンプへ接続する。遠心加速度30G場においては、計測器のケーブルであっても、そのものが持つ重量の30倍の重さになってしまうため、その自重によってケーブルが損傷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、側圧を載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、圧力容器側圧載荷部の空気を抜くため、圧力発生装置（送水ポンプ）から通水を行う。その後、カウンターウェイト側プラットホームに計算から求めたカウンターウェイトを搭載し、圧力容器の遠心力載荷装置への設置が完了する。

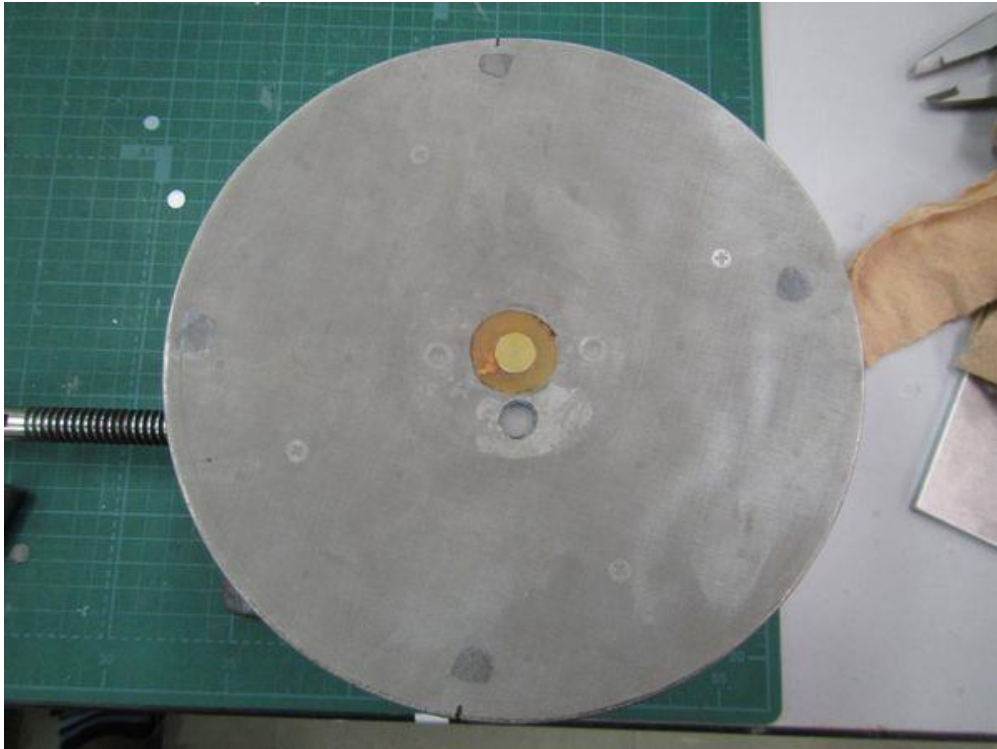


図 4.3.4-1 ステンレスメッシュ貼付状況

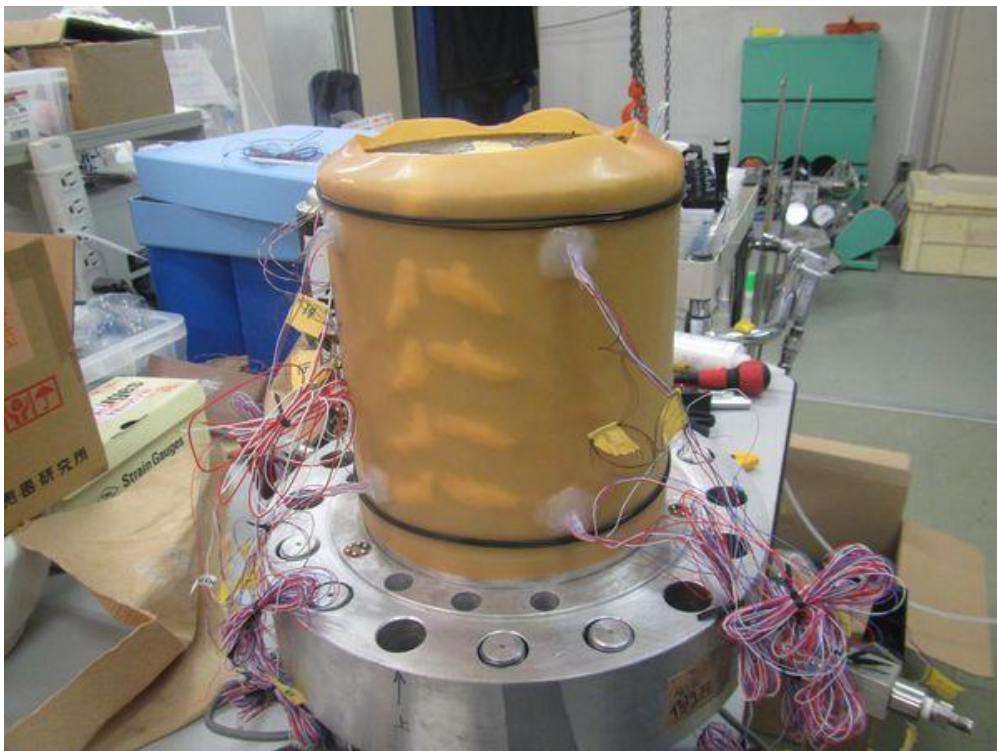


図 4.3.4-2 下部架台への設置状況 (Oリング設置済)



図 4.3.4-3 ひずみゲージのリード線の防水処理状況

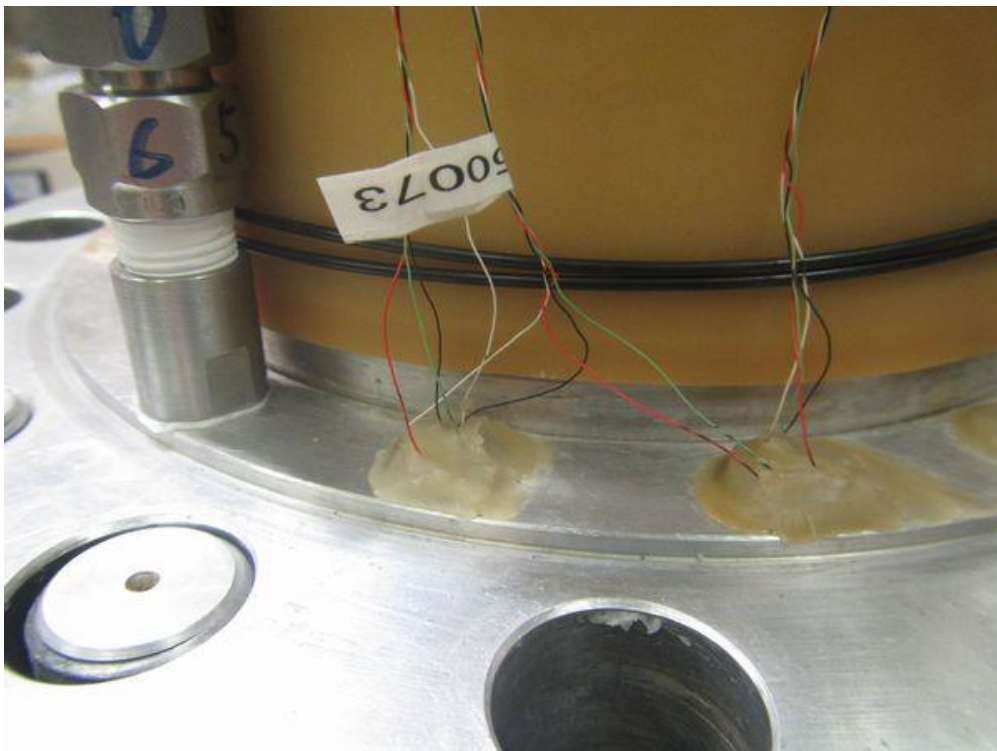


図 4.3.4-4 土圧計リード線の防水処理状況

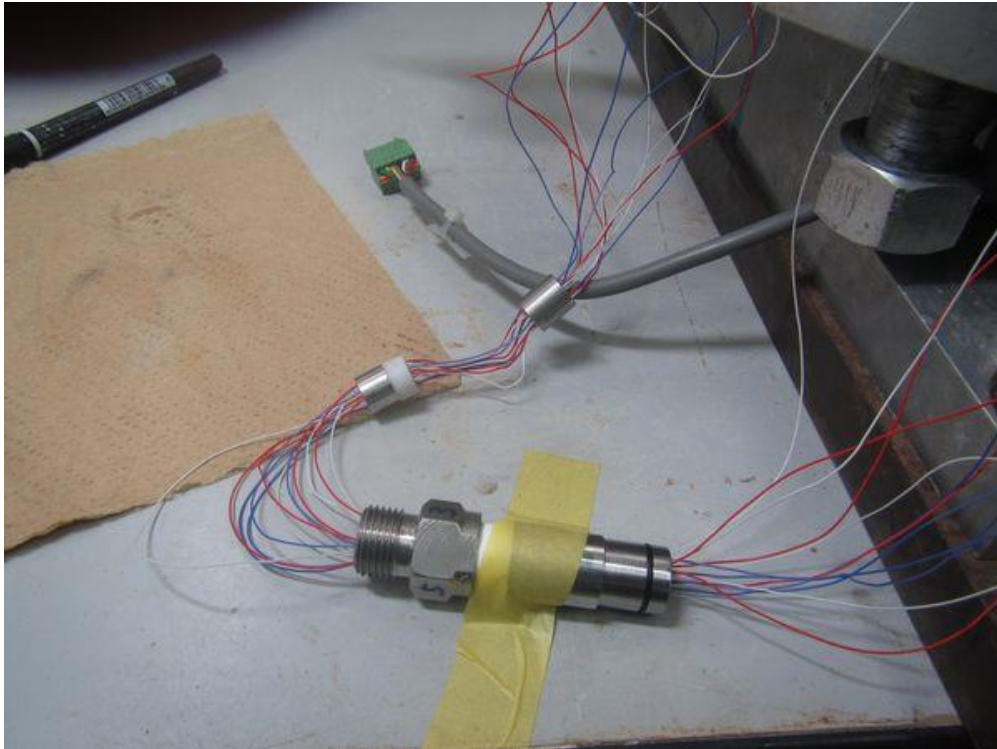


図 4.3.4-5 Conax 社製、シーリンググランドへのリード線設置状況



図 4.3.4-6 sartorius 社製、MW2P1-150FE-L



図 4.3.4-7 高速スイッチボックスへの結線状況

4.3.5 実験方法

(1) 条件

本実験は、遠心力载荷実験によるオーバーパックの変位量（浮上・沈下挙動）やベントナイトの膨潤挙動、岩盤・ベントナイトのひずみの計測と、X線CT撮影による遠心力载荷実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、実験手順は、(1) 遠心力载荷実験前の模型のCT撮影、(2) 遠心力载荷実験、(3) 遠心力载荷実験後の模型のX線CT撮影、として実施した[4]。

遠心力载荷実験の実験条件は、遠心加速度30G、8MPaの等方圧の応力拘束条件で、深度400mに対応する。オーバーパックの温度はHLW第2次取りまとめの処分孔堅置き方式・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4.3.5-1内の青線で示す温度変化のように設定した[16]。本実験では、急激な温度の変化が与える影響を検討するために、図中赤線のような制御を実施した。岩盤の境界温度は平均的な地温勾配（ $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ）[18]から 34°C 一定に設定した。

岩盤供試体は整形後 50°C の乾燥炉で2週間静置した。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（4.3.3項(4)を参照）、岩盤供試体の初期条件を飽和状態とするとベントナイトが作業中に吸水してしまい、正確なベントナイトの膨潤挙動を計測できない。このため実験は岩盤供試体を乾燥状

態として実験を開始している。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。本実験における想定している状況を図 4.3.5-2 に示した。

間隙水圧の条件は、岩盤の密度を 2.0Mg/m^3 、水の密度を 1.0Mg/m^3 とした場合の所定の深度におけるそれぞれの被り圧に対応するよう、模型上端面を 4.0MPa とした。模型の高さの実規模換算である 9m 分の水圧 0.09MPa を制御の関係から 0.1MPa とし、間隙水圧を 4.1MPa と設定し、透水試験用注水口（図 4.3.1-2）より蒸留水を模型下面へ注入した（図 4.3.5-2）。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 $75\mu\text{m}$ ）を被覆しており、注入された水は模型下面より間隙に流入し、上端面より排水されることになる。

背圧は透水試験用排水口（図 4.3.1-2）より模型上端面に負荷され、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。実験開始時点ではポンプ圧が 0.10MPa となるピストン位置でポンプを停止させた。模型をほぼ乾燥状態にして実験を開始していることから模型上端面には 0.10MPa の空気圧が負荷される。その後、注入された間隙水が模型を浸潤し上端面まで達すると圧力水頭が生じ、背圧が徐々に水圧となる。模型を浸潤した水が配管を徐々に満たし排水ポンプまで達する過程において、水の自重応力により背圧が漸増する。この水圧が上昇して背圧が 4.0MPa になったところで排水ポンプの定圧制御を開始した。

(2) 手順

実験手順は以下の通りである。

- Step1：拘束圧を $0.05\text{MPa}/\text{min}$ で 8MPa まで負荷する。拘束圧の負荷の後、遠心力载荷装置ピット内および土圧計付加熱型オーバーパックを所定の深度相当の温度（境界温度）である 34°C に設定する。ひずみゲージの計測値が一定値に収束するまで、設定を保持する。
- Step2：ひずみゲージの計測値が一定値に収束したのち、遠心力载荷装置の運転を開始する。 0.08rad/s^2 の角加速度で回転を加速させ、 30G に到達させる。 30G に到達後、各センサの値が安定するまで、状態を保持する。
- Step3：各センサの値が安定するのを確認した後、間隙水圧を $0.05\text{MPa}/\text{min}$ で 4.1MPa まで上昇させ、土圧計付発熱型オーバーパックの温度制御を図 4.3.5-1 に従い開始した。間隙水圧が 4.1MPa に達した後は定圧制御を行った。
- Step4：背圧はポンプ圧力が 0.10MPa となるピストン位置で停止させた。注入された間隙水が模型を浸潤し背圧が上昇し、 4.0MPa となったところで排水ポンプを定圧制御とした。

本実験では、オーバーパックの変位量およびオーバーパックにかかる土圧、ベントナイトの土圧、ベントナイトおよび岩盤のひずみおよび温度を計測した。なお、図 4.3.5-3 に示した G1T～8T、10T、12T、13T 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が計測できる（温度について述べる場合は、例えば T_G1T と記して、ゲージ No の前に T を付けることとする）。また、土圧計付発熱型オーバーパック内部には熱電対が埋め込まれており、これによって温度の制御・計測を行う。

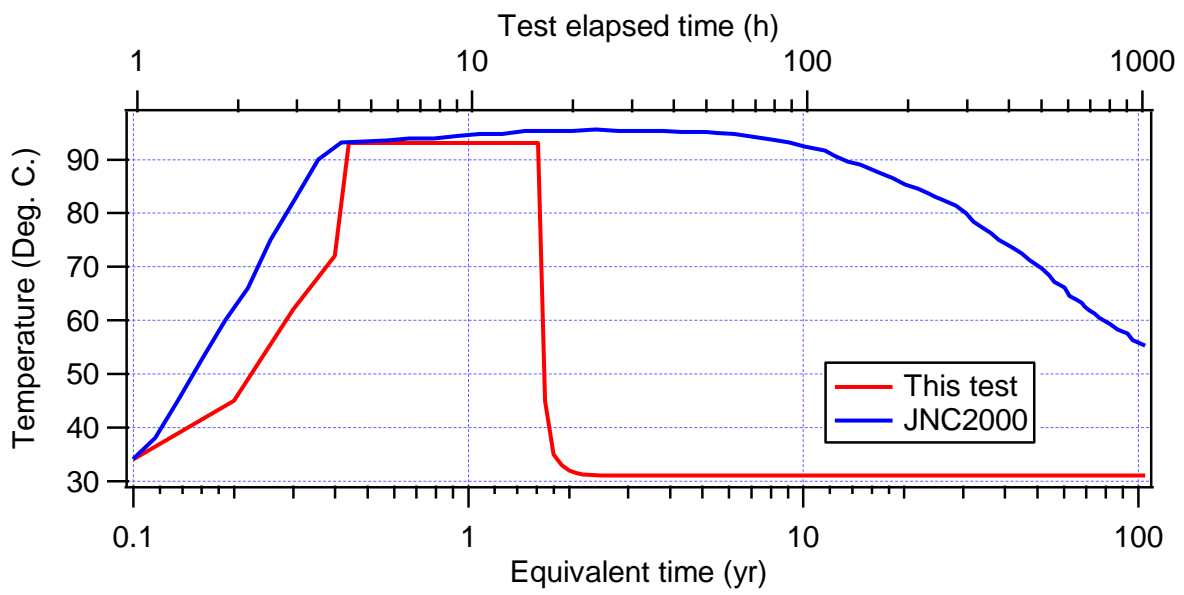


図 4.3.5-1 オーバーパックの温度制御

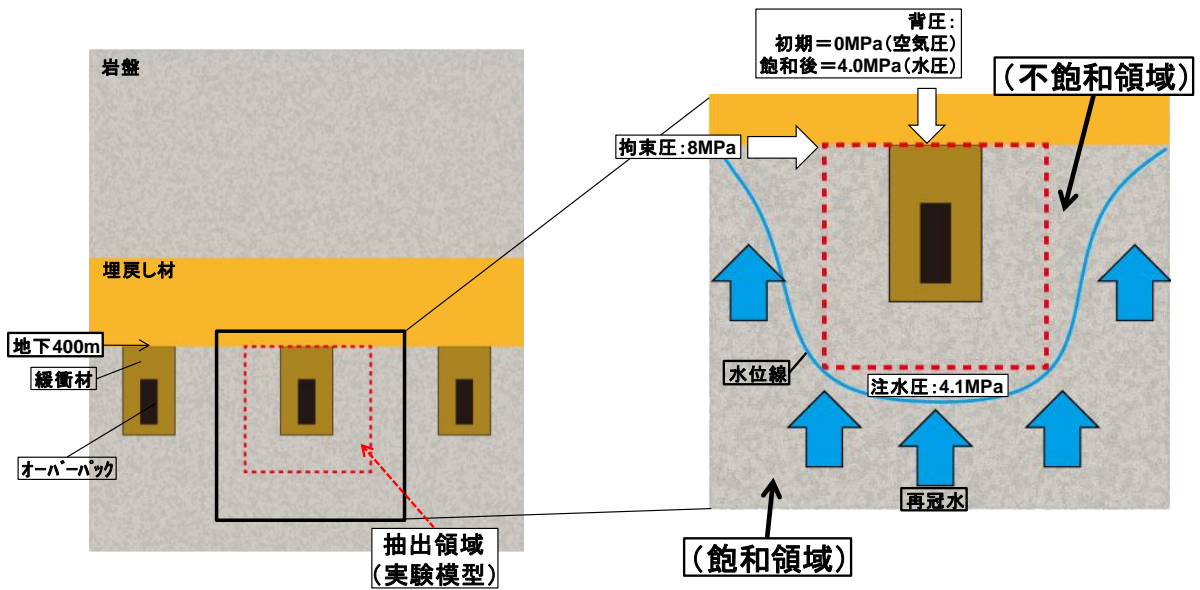
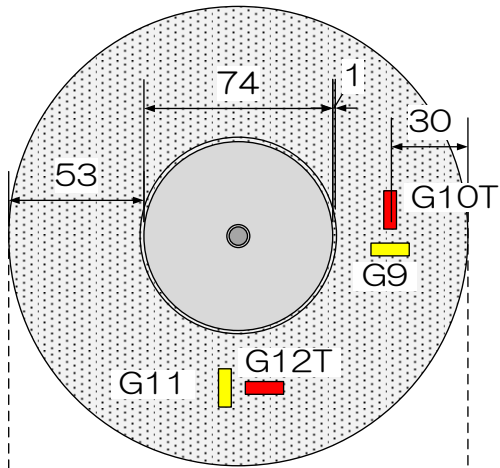


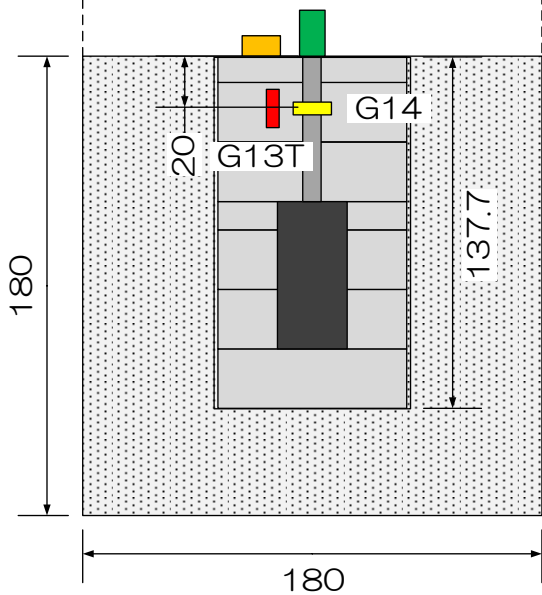
図 4.3.5-2 実験条件のイメージ図

(平面図：岩盤上端面)

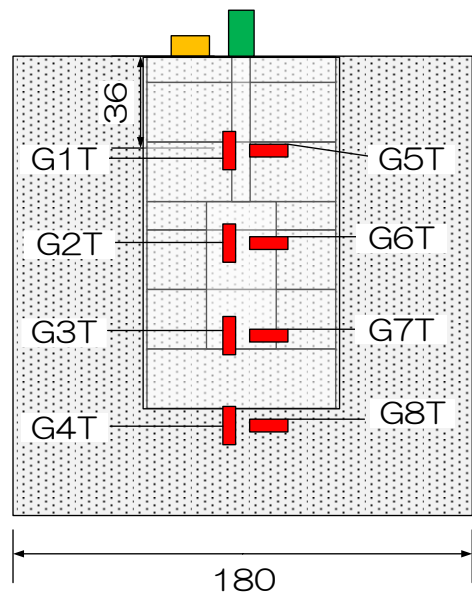


- 非接触変位計
- 土圧計
- ひずみゲージ
- 測温機能付ひずみゲージ
- オーバーパック
- 緩衝材

(立位断面図)



(立位側面図)



G13T, G14 : 孔壁に貼付
G15, G16 : ベントナイトに貼付

図 4.3.5-3 本実験のセンサレイアウト

4.4 結果

4.4.1 遠心力载荷実験

以下、図中において、既定の遠心加速度 30G に到達し、注水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、実物換算経過時間で記載してある。また、オーバーパックの変位についても実物換算した値を記載してある。

(1) 温度

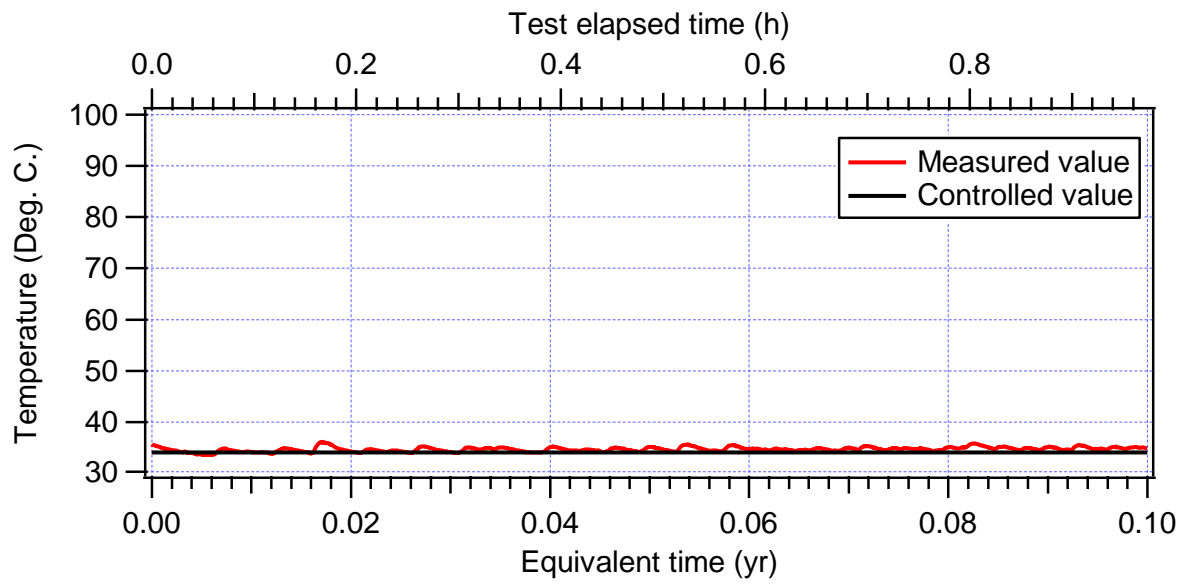
図 4.4.1-1 にオーバーパックの温度の経時変化（温度制御値）を示す。縦軸は温度、横軸に経過時間をとっている。オーバーパックが加熱され 92℃ になり約 1.6 年相当経過した時点でオーバーパックの温度調整を終了させ、その後は温度によるひずみ値の影響を見るため 31℃ の温度で推移させた。

図 4.4.1-2 に模型側面軸方向に貼付した測温機能付きひずみゲージの温度の経時変化を示す。実験開始直後は周辺温度である 34℃ 付近であるが、0.1 年相当経過時で約 1℃ の温度上昇が見られる。0.1 年相当経過時あたりより、オーバーパックの発熱に伴い全てのゲージで温度上昇が見られる。オーバーパックが最高温度となった際に、T_G01T は 37.9℃、T_G02T は 36.1℃、T_G03T が 35.2℃、T_G04T が 37.1℃ となった。

図 4.4.1-3 に模型側面周方向に貼付した測温機能付きひずみゲージの温度の経時変化を示す。オーバーパックが最高温度となった際に、T_G07T と T_G06T は 39℃、T_G05T は 37.9℃、T_G08T が 37.1℃、となった。ゲージ間の温度の差は 3.8℃ であった。その後は T_05T を除くゲージで 33.7℃ 付近で 10 年相当程度保持され 15 年相当付近から漸減する傾向となった。T_05T のみ他と傾向が違い、最高温度になった後に温度が他と同様に 33℃ 付近になり、そこからさらに温度が下降している。5 年相当～8 年相当の間は 32℃ で保持されていたが、8 年相当を超えたあたりからさらに温度が下降し、17 年相当で 26.1℃ となりその後 0.6℃ 上昇するが漸減し、26.1℃ に落ち着いている。このゲージのみが他のゲージとトレンドが違っており、2 年相当経過時付近から下地材の剥離等の原因で精度が低下してしまったものと考えられる。

図 4.4.1-4 に模型上面と模擬処分孔内に貼付した測温機能付きひずみゲージの温度経時変化を示す。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、処分孔内の T_G13T では 39.4℃、T_G10T と T_G12T では 35.7℃ まで昇温した。オーバーパックの発熱がなくなると、34℃ まで温度が下降し、T_G-10T と T_G-13T に関してはその温度で保持された。T_G-12T は 10 年相当から温度の下降がさらに続き 30.5℃ となった。

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

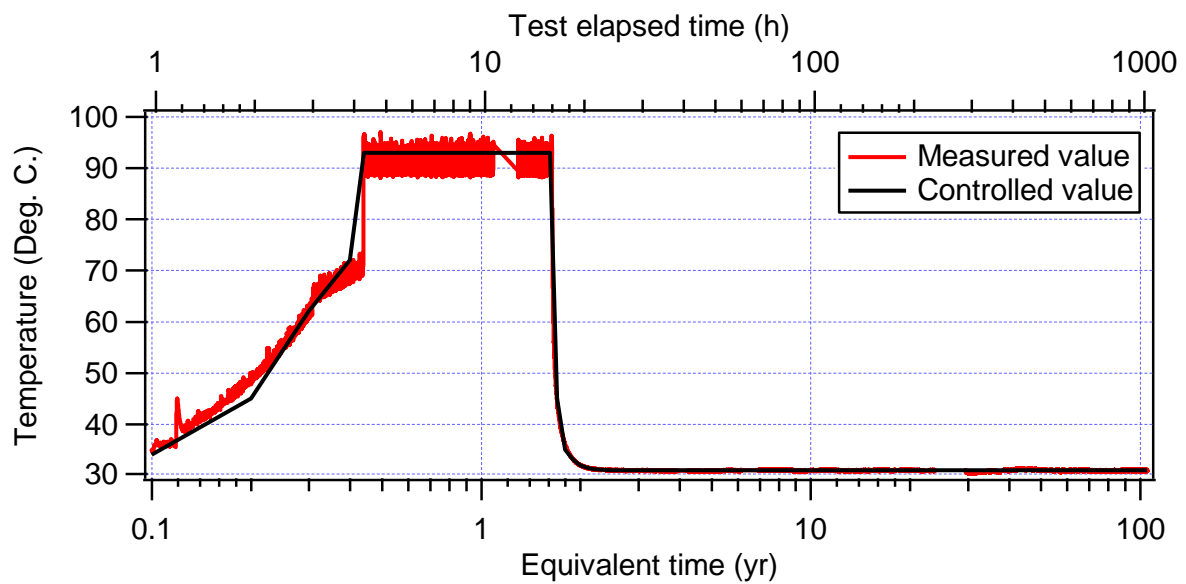
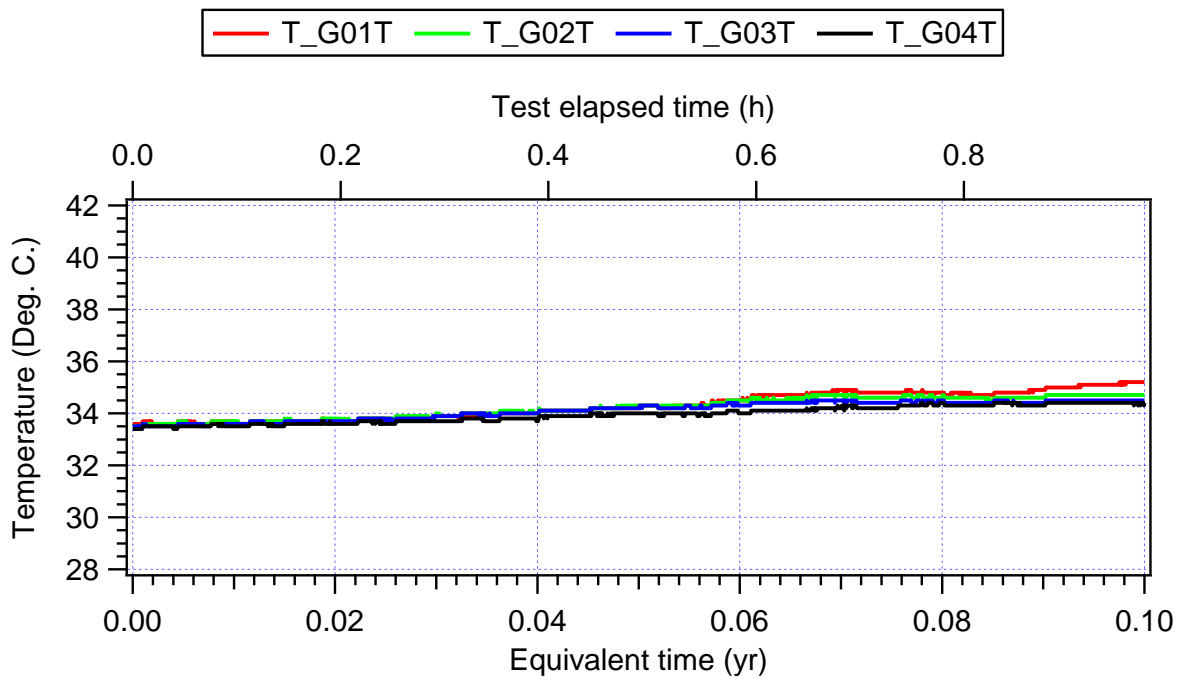


図 4.4.1-1 オーバーパックの温度経時変化 (温度制御値)

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

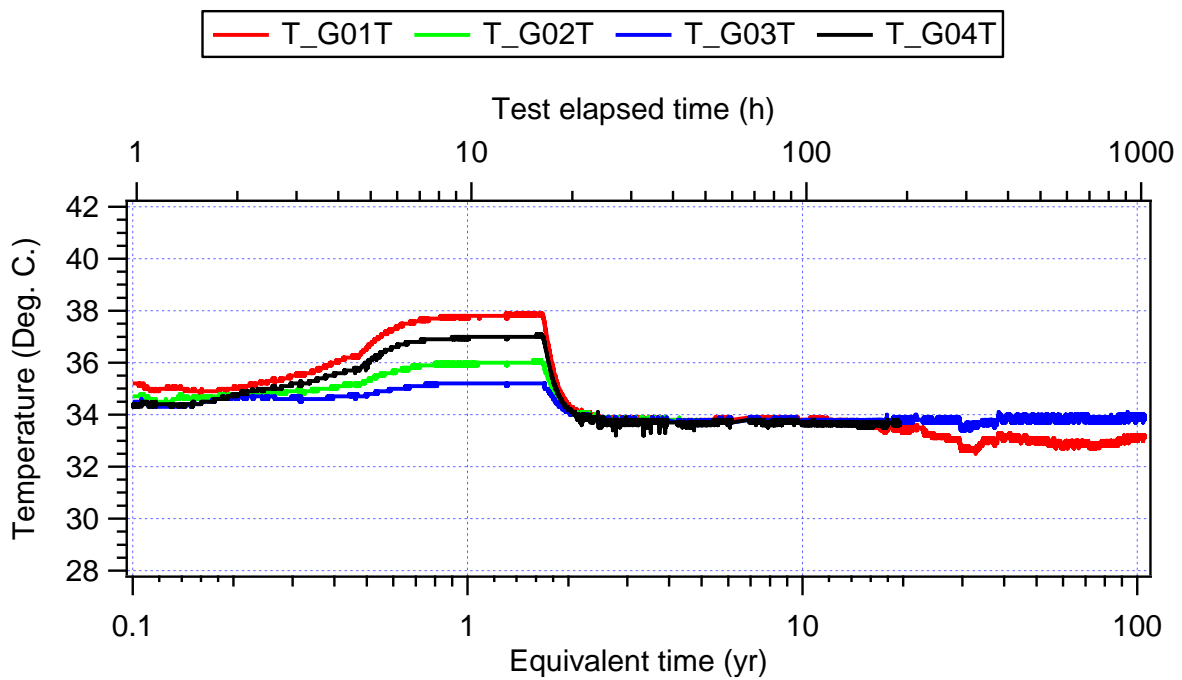
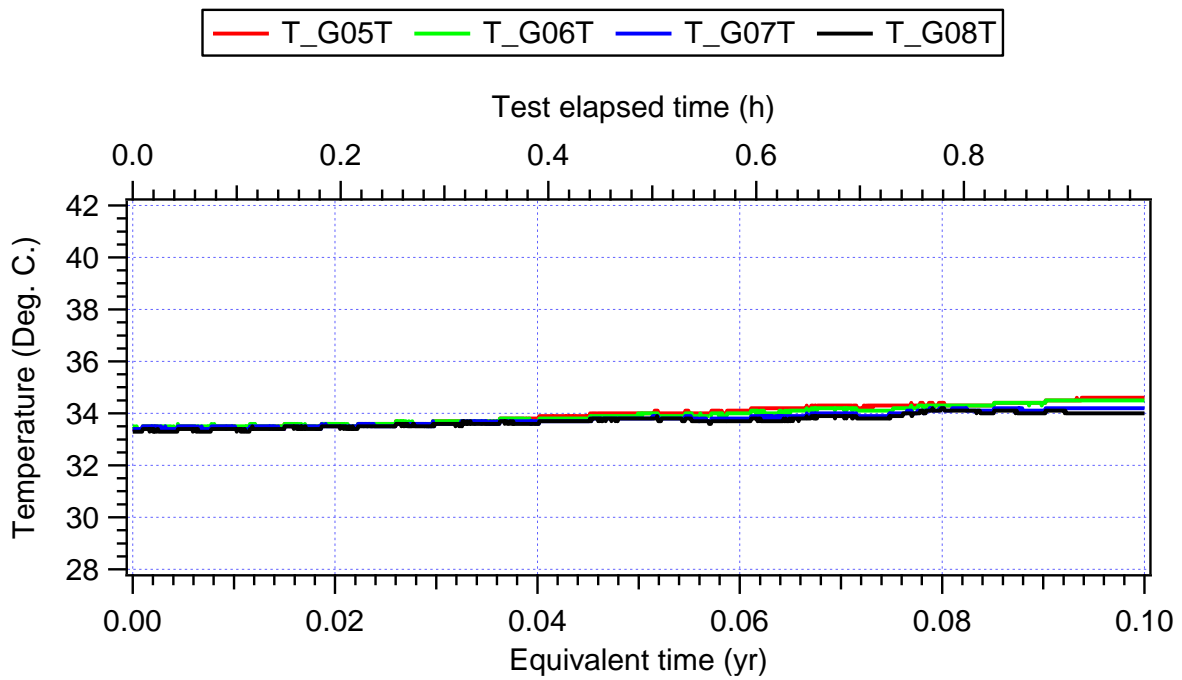


図 4.4.1-2 模型側面部軸方向ゲージによって計測された温度経時変化

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

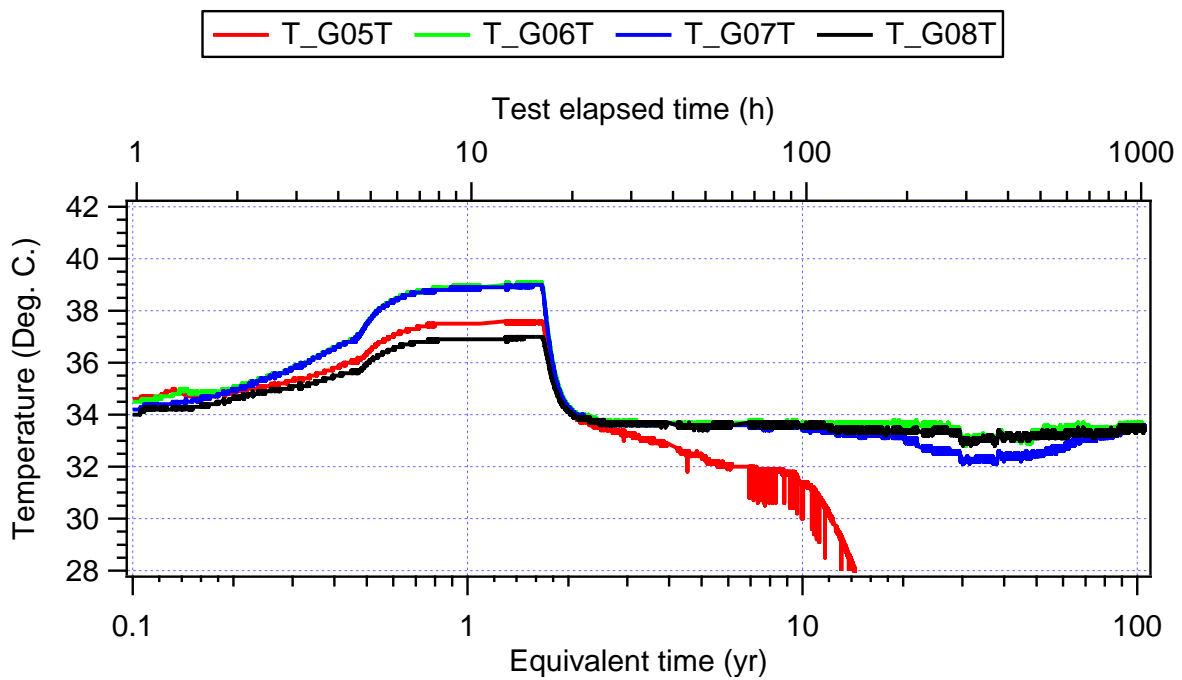
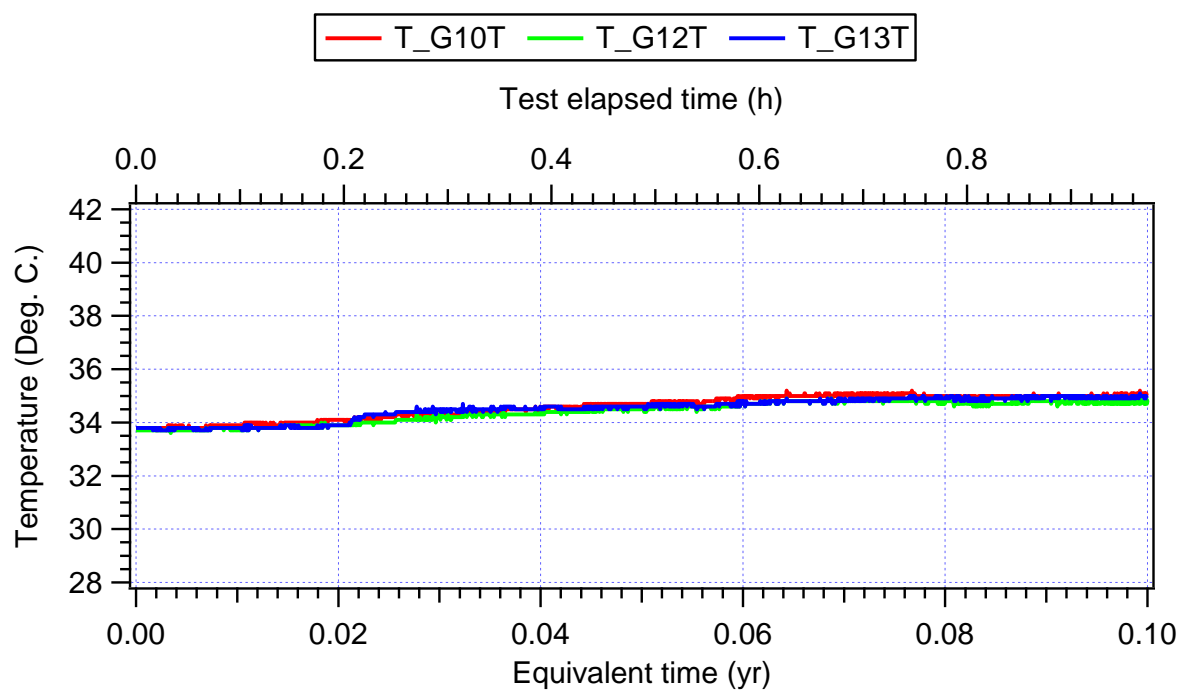


図 4.4.1-3 模型側面部周方向ゲージによって計測された温度経時変化

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

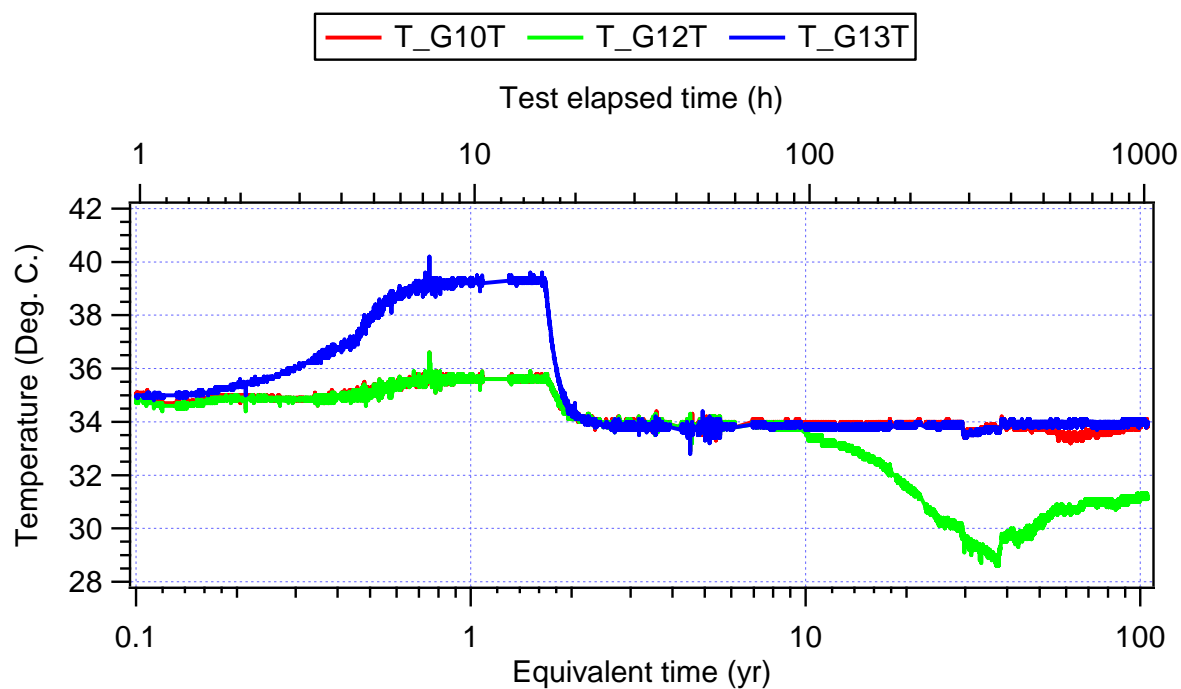


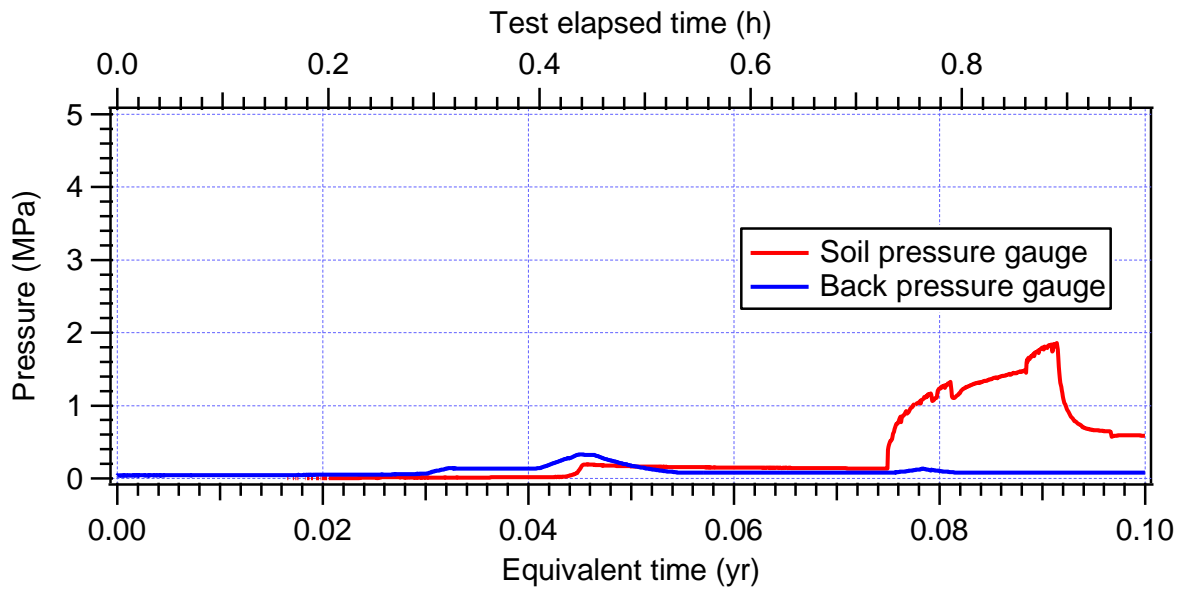
図 4.4.1-4 模型上端部と処分孔壁のゲージで計測した温度経時変化

(2) ベントナイトの土圧

緩衝材の膨潤挙動は模型上端面（圧力容器上蓋）に設置されている土圧計（Soil pressure gauge）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ベントナイトに負荷される応力」のいずれか大きい値と背圧値（Back pressure gauge）の和である。このため、土圧計で計測されている値から背圧を差し引いたものが「見かけの膨潤圧」となり、本実験ではこれを「ベントナイトの土圧」と定義し、ベントナイトの膨潤挙動を評価した。図 4.4.1-5 に示してある「Soil pressure gauge」から「Back pressure gauge」を引いた値が「ベントナイトの土圧（Bentonite pressure）」となる。また、圧力容器上蓋に設置されている土圧計の受圧面は、約 3mm のシリコン層を挟み上蓋加圧面より 1mm 以下程度内側にあるため、下部ピストンによって載荷された圧力が計測されない構造となっている。

図 4.4.1-6 にベントナイトの土圧の経時変化を示す。上図は実験開始直後から 0.1 時間までの経時変化を示しており、下図はそれ以降の経時変化を示している。ベントナイトの土圧は実験開始後、0.15 年相当までは理由は不明であるが、値の急増減が発生している。注水開始直後は給水作業を頻繁に実施したため注入圧の正確な制御ができていないことが影響した可能性がある。1.72 年相当が経過したあたりから値が増加しはじめ、ベントナイトが膨潤し始めたと考えられる。20 年相当経過時でのベントナイトの土圧は 0.56MPa となっており、それ以降は実験終了時の値 0.6MPa 程度に収束傾向を示した。

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

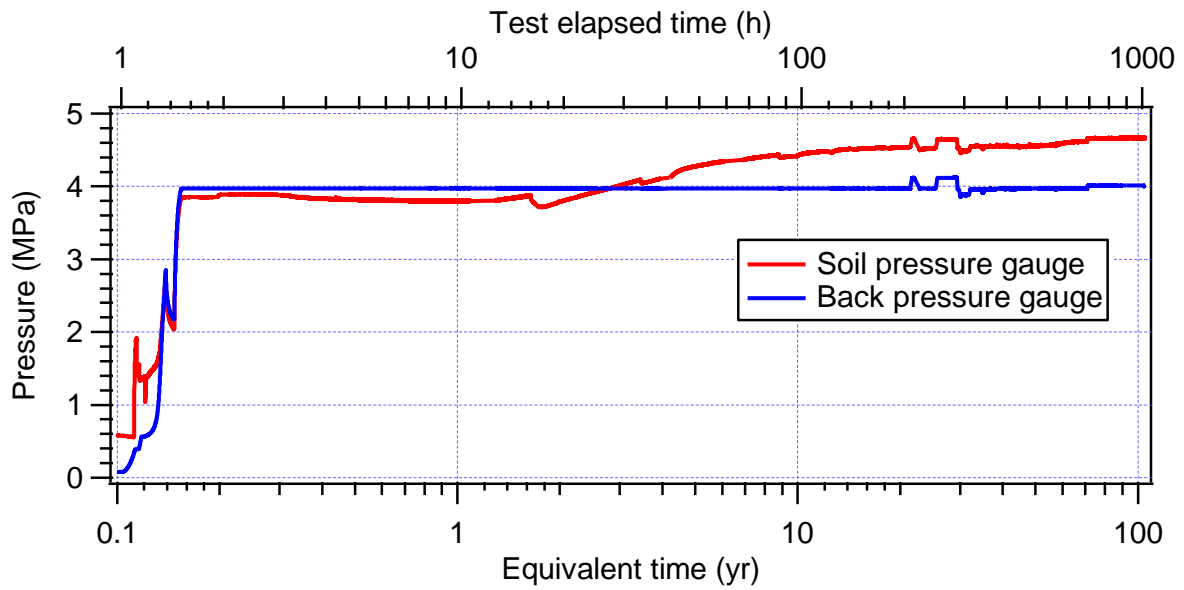
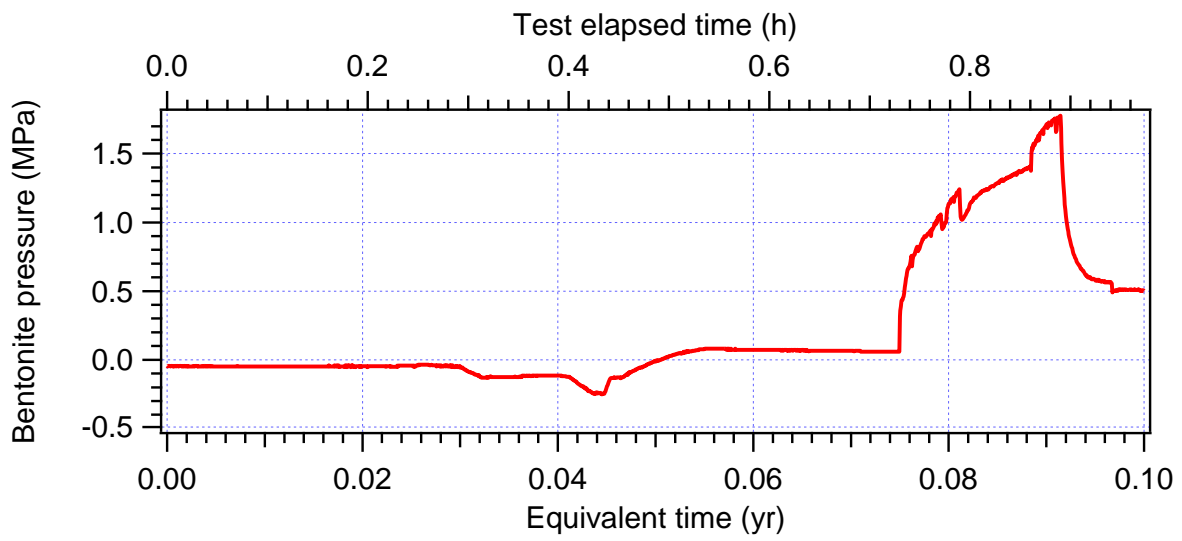


図 4.4.1-5 土圧計で計測された圧力と背圧の経時変化

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

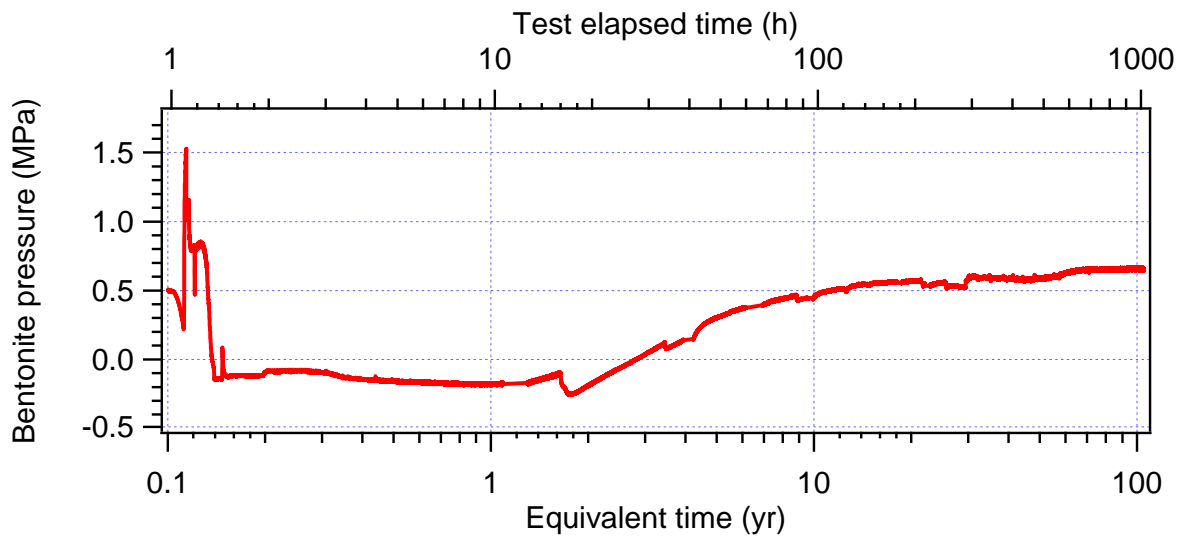


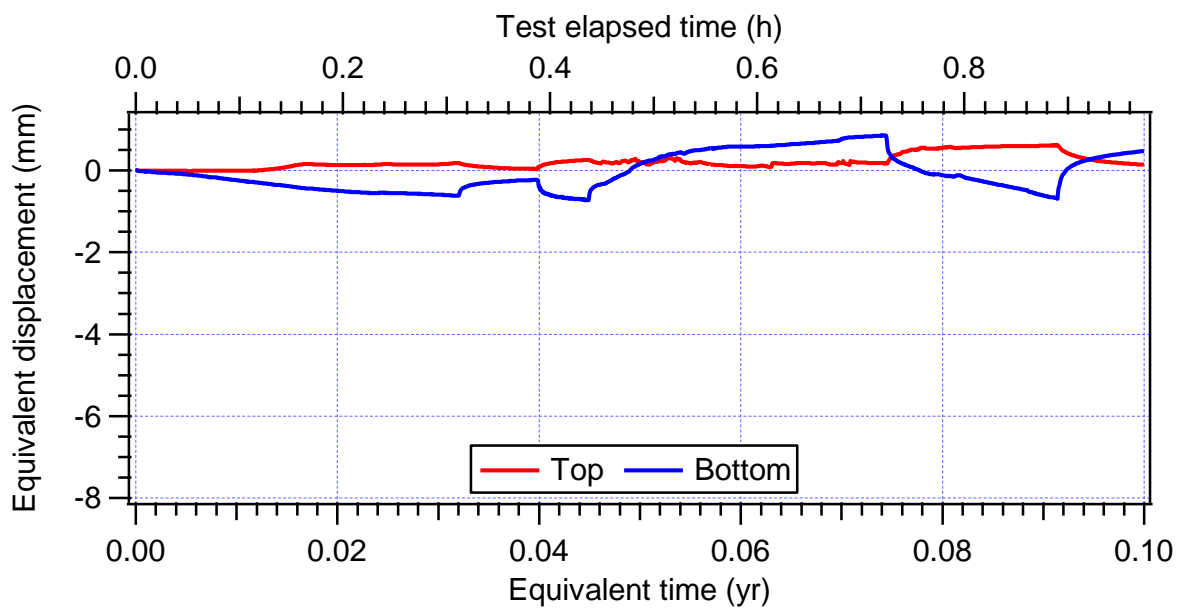
図 4.4.1-6 ベントナイトの土圧経時変化

(3) オーバーパックの鉛直変位

図 4.4.1-7 に非接触変位計によって計測された変位の経時変化を示す。非接触変位計は図中の凡例の **Top** が容器上蓋に設置されたセンサ（図 4.3.1-2 内、非接触変位計（オーバーパック用）に対応）で、**Bottom** が軸方向応力を载荷ピストン部に設置されたセンサ（図 4.3.1-2 内、非接触変位計（载荷ピストン用）に対応）である。本実験では軸方向応力が 8MPa 载荷され、上蓋が動くことはない。従って、**Bottom** によって計測された载荷ピストンの変位は模型の軸方向の変位を計測していることになる。**Bottom** におけるプラスはピストンが上昇（载荷）方向であり、マイナスはピストンが下降（除荷）方向である。**Bottom** の変位は 0.1 年相当経過時の **Soil pressure gauge** の値の発生状況と良く対応しており、上蓋加压面に圧力が作用したことによって载荷ピストンが下降している。0.2 年相当経過時以降では、ピストンは漸減傾向を示している。また、18 年相当経過時の値の急増（ピストンの上昇）は遠心停止後の再開時に遠心加速度が上昇することによって、载荷圧力が増加したためと考えられる。ただし、その値は実測値で 0.055mm と非常に小さいものであった。**Top** の変位は、0.16 年相当経過時に沈下の挙動を示している。これは、岩盤内部に存在した亀裂（4.4.3 項参照）を通して間隙水が上部まで浸潤したため、その圧力で沈下したと考えられる。その後、前述した「**Soil pressure gauge**」の値が一定値になると下部緩衝材の膨潤によって浮上し、約 3 年相当経過時より上部の緩衝材が膨潤してきたため、沈下傾向を示した。約 18 年および 30 年相当経過時の遠心装置停止で急激に浮上するものの、緩衝材の膨潤により緩衝材の弾性率が下がり、全体としてはオーバーパックの自重によって沈下する傾向となった。オーバーパックの変位は、見かけ上は **Top** の値となるが、上述したとおり圧力容器下部の载荷ピストンの変位、すなわち模型の軸方向の変位を差し引く必要がある。このため本研究では、**Top** で計測したオーバーパックに設置されたターゲットの変位から **Bottom** で計測した模型の軸方向の変位を差し引くことでオーバーパックの変位を定義した。

図 4.4.1-8 にオーバーパックの鉛直変位経時変化を示す。図の縦軸は実物換算したオーバーパックの鉛直変位となっている。変位量のプラスは浮上、マイナスは沈下としている。上図は開始直後から 0.1 年までの経時変化、下図はそれ以降の経時変化となっている。約 0.18 年相当経過時まで沈下、浮上を繰り返した。それ以降は約 0.3 年相当まで下部緩衝材の膨潤によって、急激な浮上をしている。約 0.3 年相当経過時以降も値は漸増し、オーバーパックは浮上する傾向を示した。約 3 年相当経過時から値が漸減しており、オーバーパックは沈下する傾向を示した。これは、上部緩衝材に間隙水が浸潤することで膨潤し、オーバーパックを押し戻したためと考えられる。約 30 年相当経過時から遠心装置停止によるオーバーパックの急浮上があったものの値は漸増～ほぼ一定に収束する傾向にある。前述したベントナイトの土圧も約 20 年相当経過時から値が収束していることが影響していると考えられる。

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

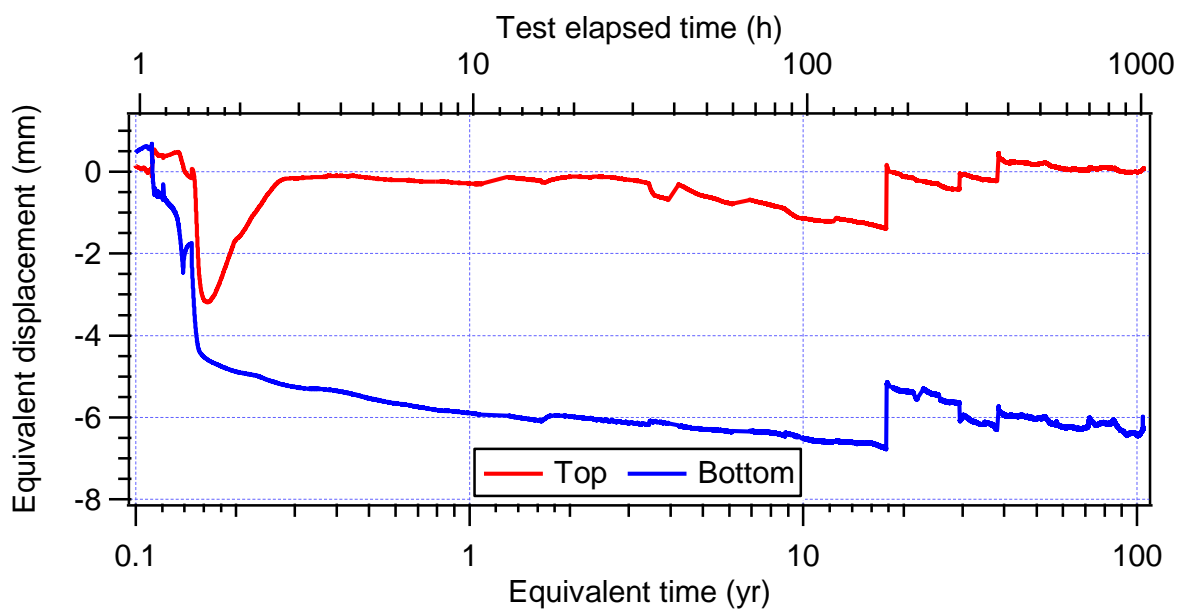
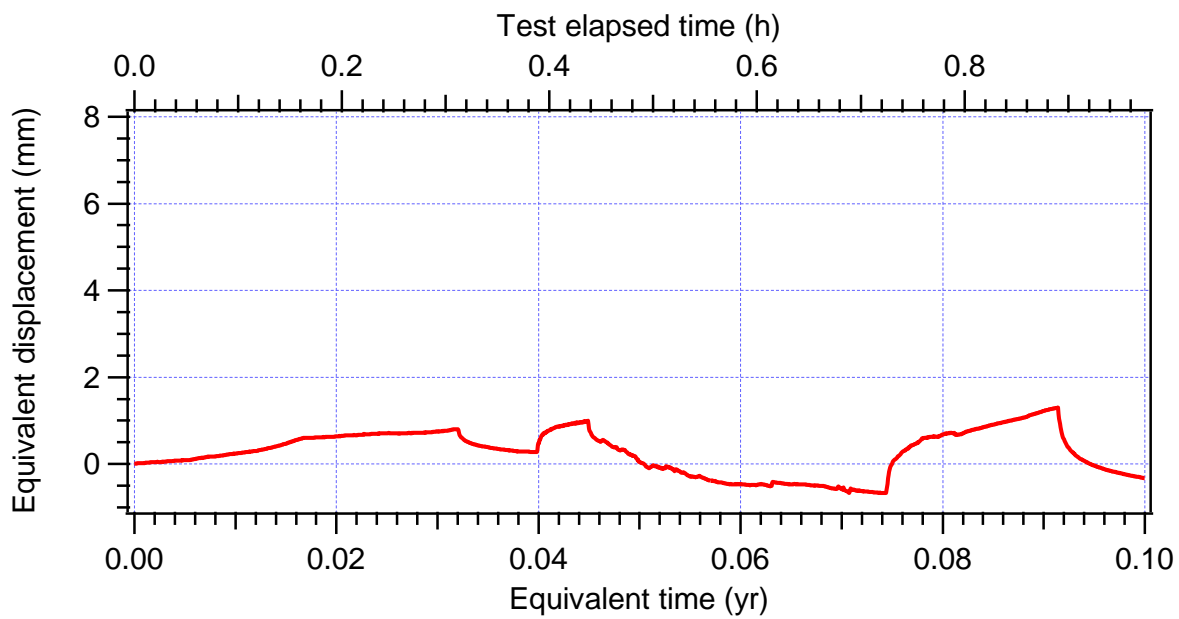


図 4.4.1-7 ギャップセンサで計測された変位経時変化

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

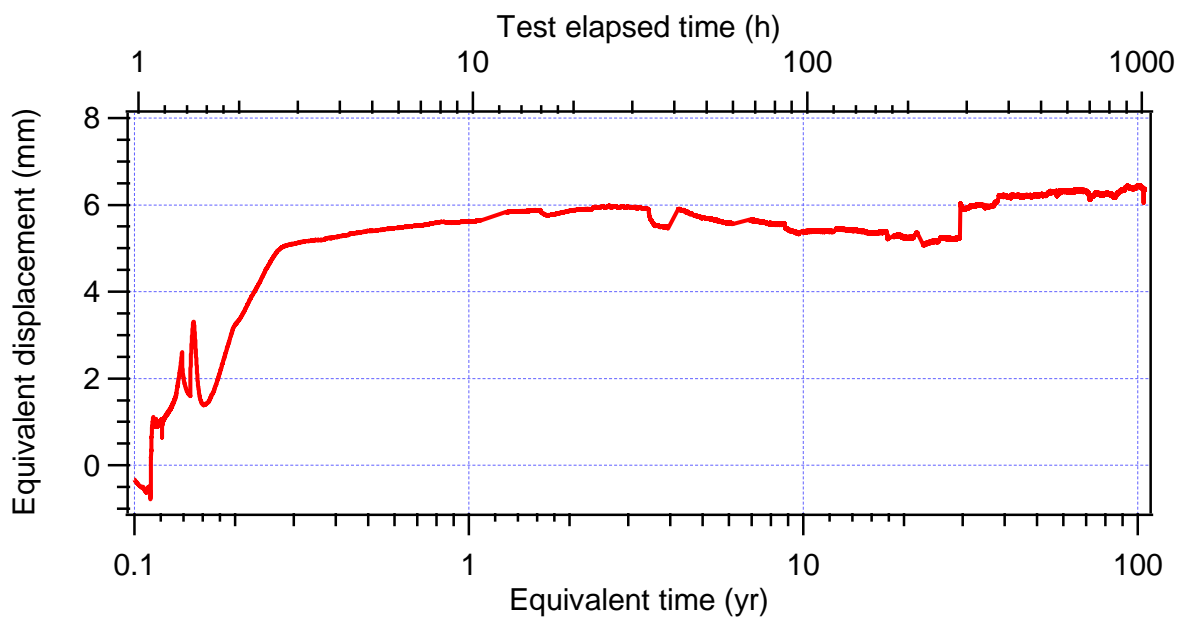


図 4.4.1-8 オーバーパックの変位経時変化

(4) 岩盤のひずみ

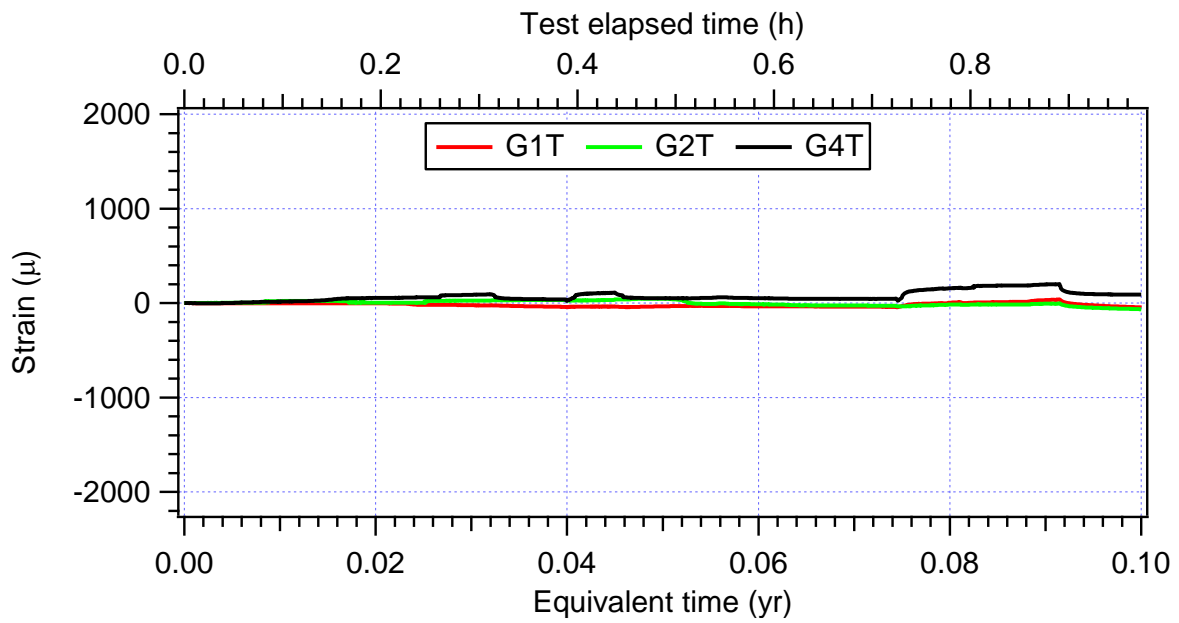
以降、ひずみゲージの計測値を示した図では、プラスは引張、マイナスは圧縮である。図 4.4.1-9 と図 4.4.1-10 に岩盤側面に貼付したひずみゲージの計測値を示す。図 4.4.1-9 では実験開始直後から注水側に近いゲージから順に、値の大小はあるが、値が急増している。G1T は 10 年相当経過時まで引張傾向が続き 1268 μ を計測し、圧縮側に値が漸減している。G2T は値の急増後も増加傾向が続き 5 年相当経過時 1126 μ を計測した後に計測不能となった。G4T は 2.1 年相当経過した時点で 308 μ を計測してから値が減少し、19.4 年相当経過時に -1368 μ を計測し、その後計測不能となった。

図 4.4.1-10 では実験開始直後ほぼ同時に値の大小はあるが、値が急増している。G5T では 2.1 年相当経過後に極大値である 729 μ を計測し、その後は圧縮傾向にあり 20 年相当経過時点で -146 μ を計測し、値は収束傾向となっている。他のひずみゲージの値の変化から考慮すると、G5T は下地剤の剥がれによってひずみ値の精度が低下しているものと考えられる (4.4.1(6)参照)。G6T は急増後も 12.7 年相当経過後に 1441 μ を計測してから漸減し、20 年相当経過時点で 1368 μ を計測、漸減傾向にある。G7T も G6T と同様な傾向を示し、11.3 年相当経過後に 707 μ を示し、その後漸減し、20 年相当経過時点で 390 μ を計測、漸減傾向にある。G8T は 1.59 年相当経過時で最大値 503 μ を計測してから漸減傾向が続き 20 年相当経過時点で 66 μ を計測している。

図 4.4.1-11 では G10T は実験開始直後に引張側に値が推移し、多少の増減はあるものの 1030 μ 付近で安定して推移している。対して G12T は実験開始直後に圧縮側に推移し、その後引張傾向を示して 9.6 年相当経過時に -81 μ を計測している。その後再度圧縮傾向を示している。処分孔内のひずみゲージ値の経時変化を図 4.4.1-12 に示す。実験開始直後は圧縮方向に推移するが、0.15 年相当経過時から引張方向に値が推移し 715 μ まで増加した。その後も引張側に推移する傾向が見られ、4 年相当経過時には 1162 μ となった。その後は再度圧縮方向に推移している。

図 4.4.1-10 において模型側面に貼付したゲージは、初期に急激な値の増加が発生した。後述の図 4.4.3-4 に示す三次元 CT 図によって模型の岩盤供試体内部には、0.6mm 程度の亀裂が入っていることが確認されており、その亀裂によって急激な有効応力の変化が発生したためと考えられる。その後の値の漸増期間は、岩盤試料が飽和に向かうため、有効応力が低下することでひずみが増大することに加え、緩衝材が膨潤することでさらに値が増大するためであると考えられる。また、緩衝材が飽和・膨潤し、上下の緩衝材部分に密度差が生じることで、上部に貼られたひずみゲージほど値が大きくなったと考えられる。その後は、岩盤供試体、緩衝材ともに湿潤化（軟化）によって弾性率が低下することで圧密過程に入ると考えられるため値が漸減したと推測される。

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

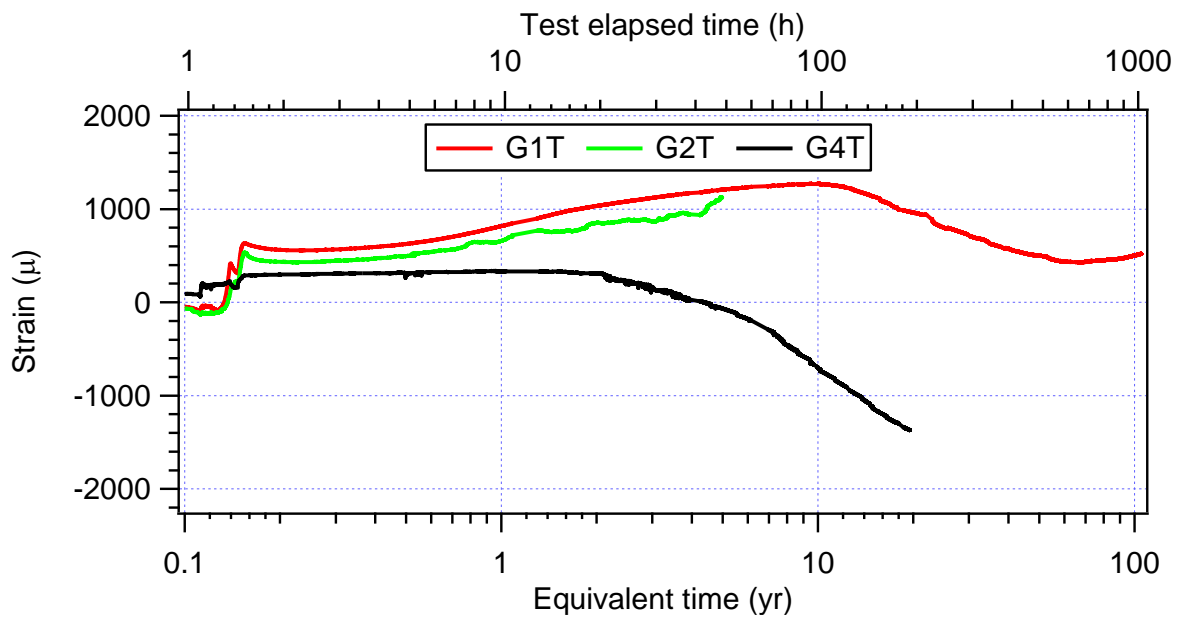
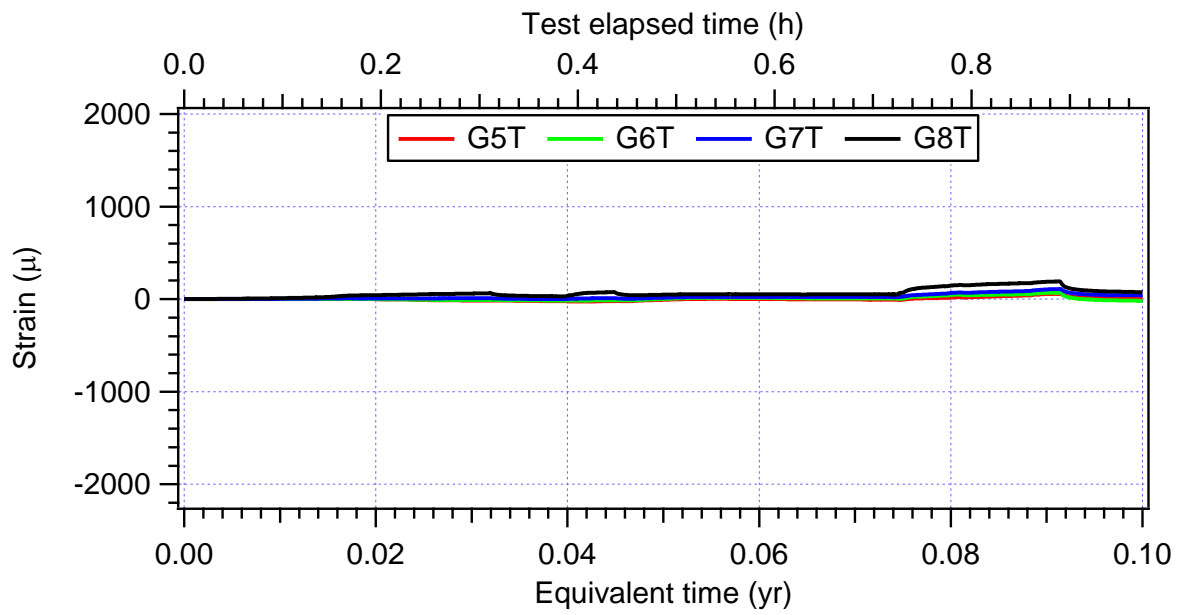


図 4.4.1-9 模型側面軸方向のひずみ経時変化

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

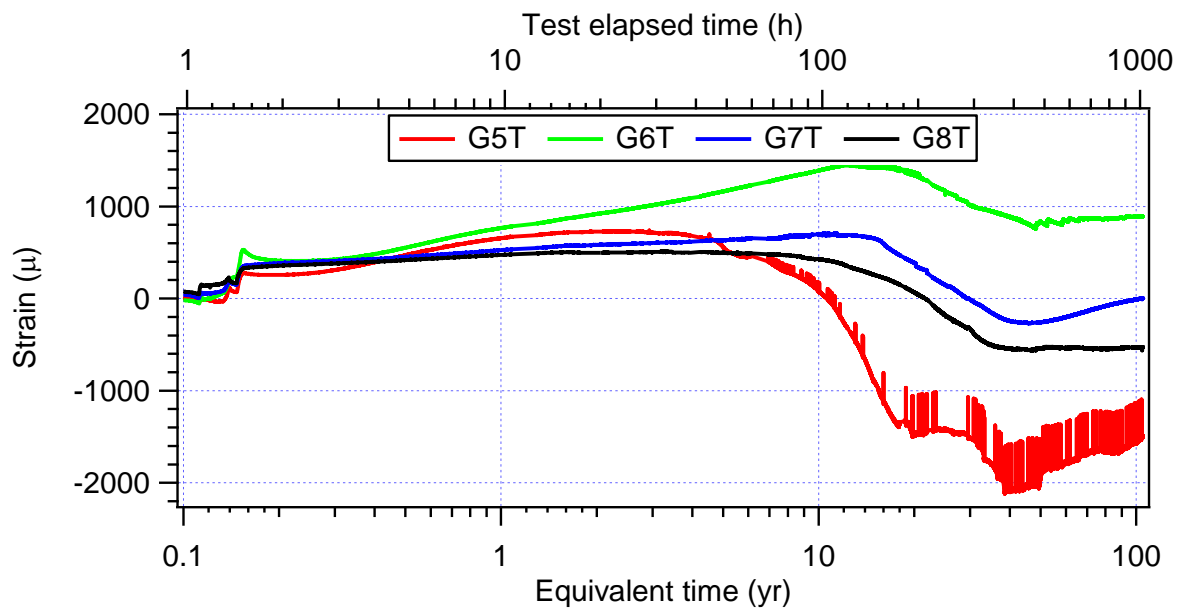
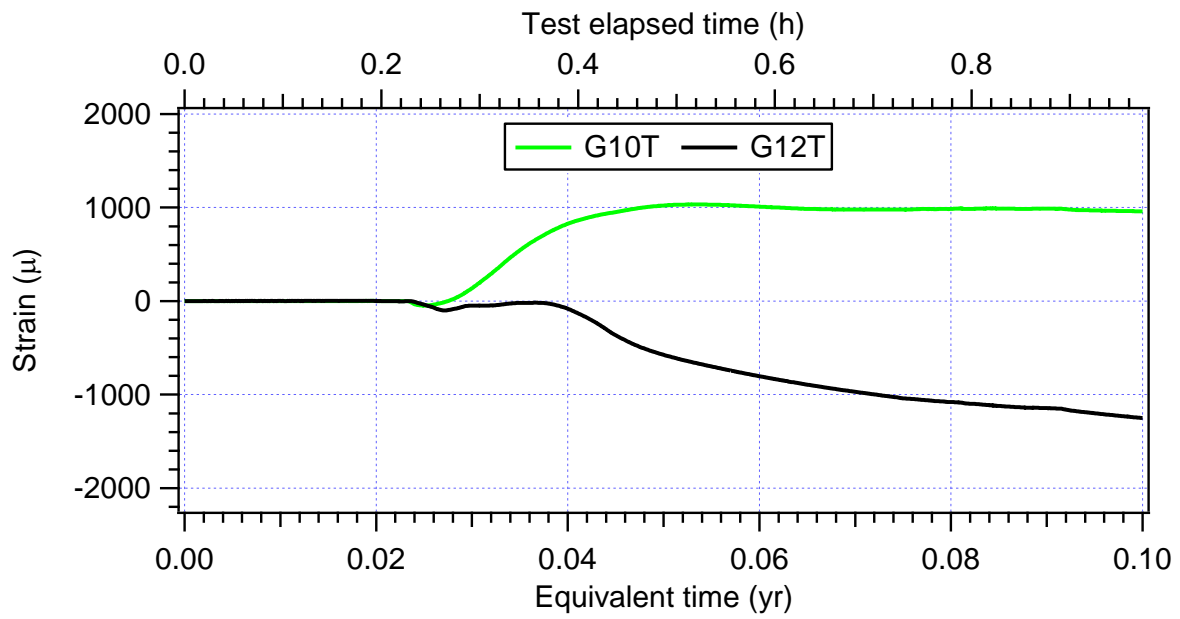


図 4.4.1-10 模型側面周方向のひずみ経時変化

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

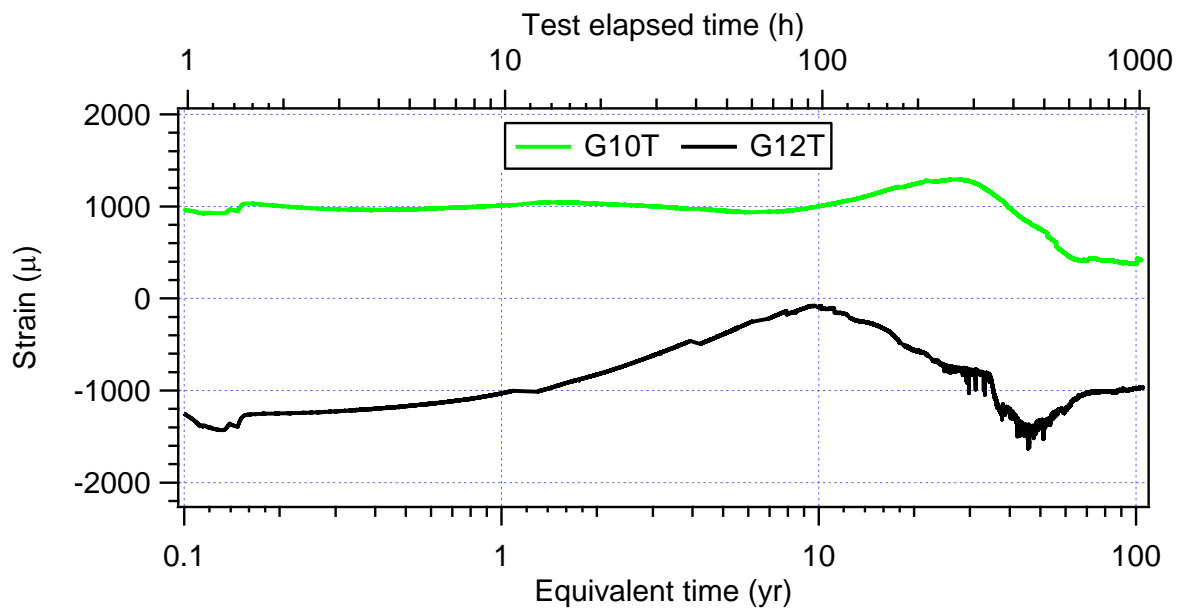
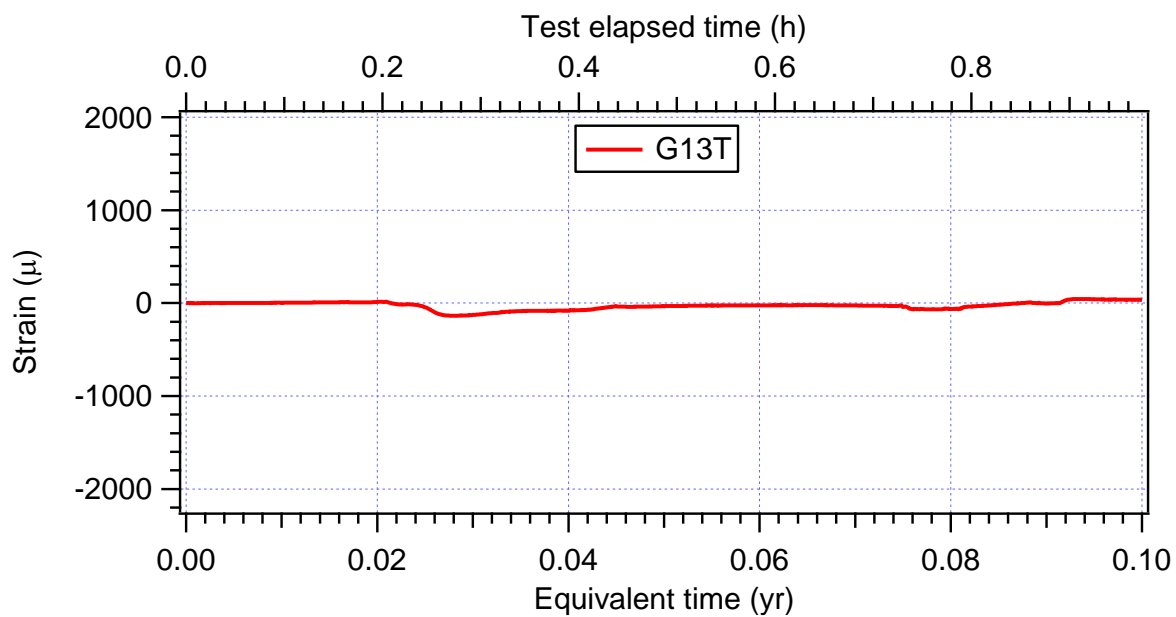


図 4.4.1-11 G10T および G12T のひずみ経時変化

a) 開始から 0.1 年相当経過時



b) 0.1 年相当経過時以降

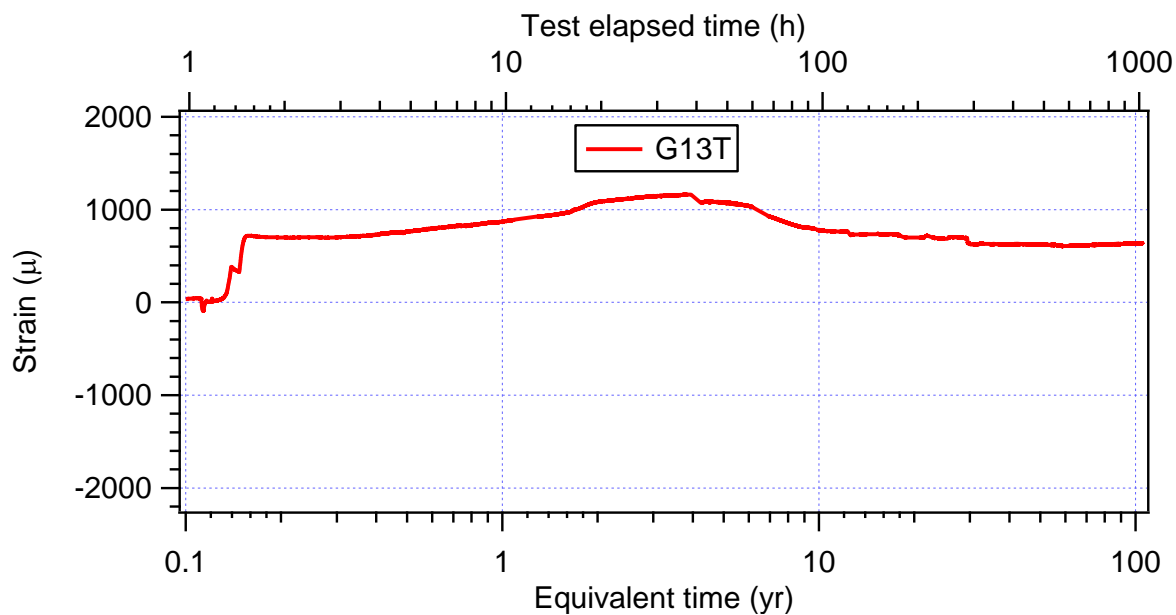


図 4.4.1-12 処分孔内のひずみ経時変化

(5) 岩盤のひずみと温度の関係

オーバーパックの発熱によるひずみへの影響を検討するため、模型側面、上端面および処分孔内のひずみの経時変化に併せてオーバーパックの温度の経時変化を示したものを図 4.4.1-13 に示す。オーバーパックが発熱している間は、各ゲージともひずみ値が増大している。加熱による熱ひずみは田下凝灰岩で $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である[19]。本研究で使用した初声凝灰岩の熱ひずみ(熱膨張係数)は今後取得予定であるが、類似の凝灰岩であることから同程度であると想定し考察した。本研究における熱ひずみは、最大 5°C 程度の上昇であったため、 40μ 程度と推定され、一方、有効応力の変化によるひずみは数百 μ と推定される。また、その後のオーバーパックの温度制御を終了させ、温度が境界温度である 34°C になった 1.86 年相当経過時においては顕著な変化は見られず、以降の各ゲージのひずみ値を見ると、引張側に推移するもの、圧縮側に推移するもの、一旦圧縮側に推移しその後引張側に推移するものと一定の傾向は見られなかった。

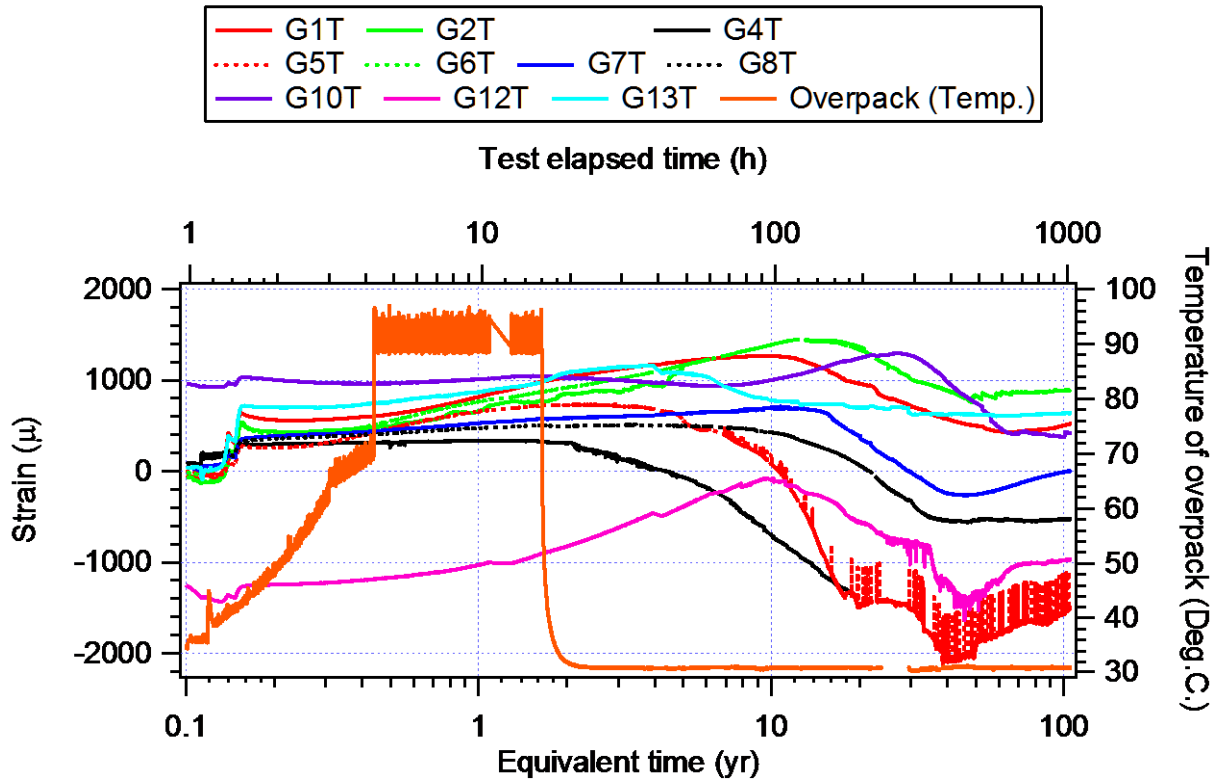


図 4.4.1-13 ひずみの経時変化と温度変化

(6) ひずみゲージの応力応答確認

実験終了直前にひずみゲージの応答性の確認を実施した。実施方法は、拘束圧を 0.37MPa 上昇させ、約 70 分間値を保持する。ひずみゲージの値が安定したのを確認後、拘束圧を元に戻した。エラー! 参照元が見つかりません。に模型(岩盤)側面のひずみをエラー! 参照元が見つかりません。に上端面のひずみを示す。それぞれの図中には変化させた拘束圧の差圧も併せて示してある。エラー! 参照元が見つかりません。では、拘束圧を上昇させると、ひずみが圧縮側に変化していることがわかる。ただし、G1T、G5T は変化に対する応答が不安定であるため、

下地剤の剥離等が生じ正確に計測できていない可能性がある。エラー! 参照元が見つかりません。では、G10T、G12Tともに拘束圧の変化に対して応答はしているが、拘束圧上昇後の保持期間もG10Tに関しては引張側に推移し、G12Tに関しては値が一定値を取らないため、G1T、G5Tと同様に下地剤の剥離等が生じ正確に計測できていない可能性がある。

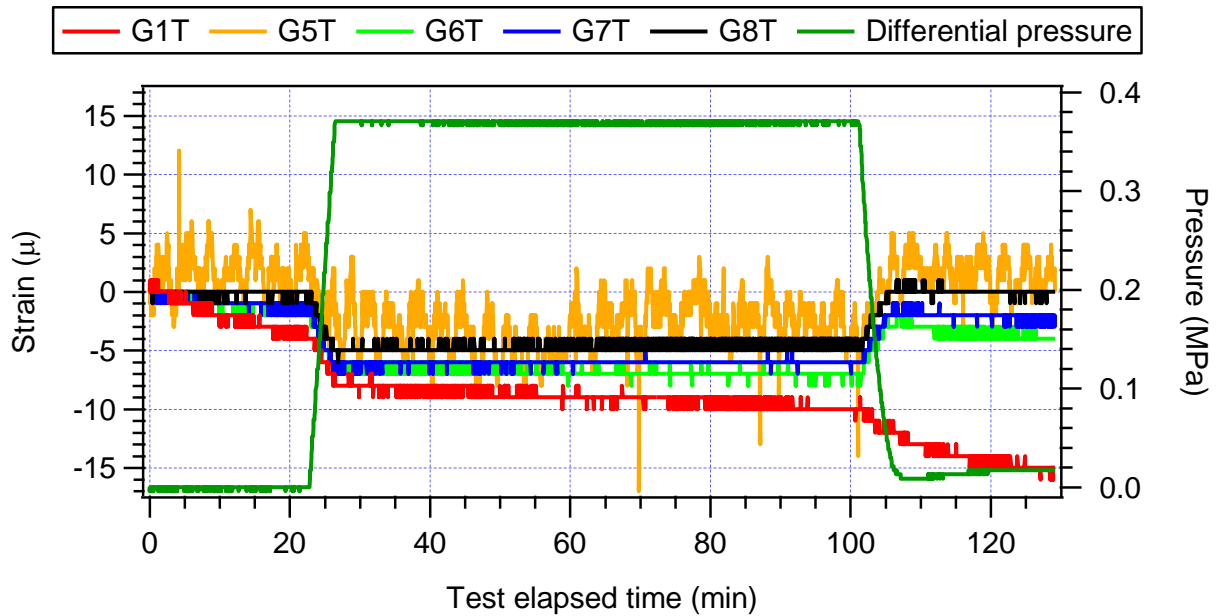


図 4.4.1-14 岩盤側面のゲージの応力応答確認

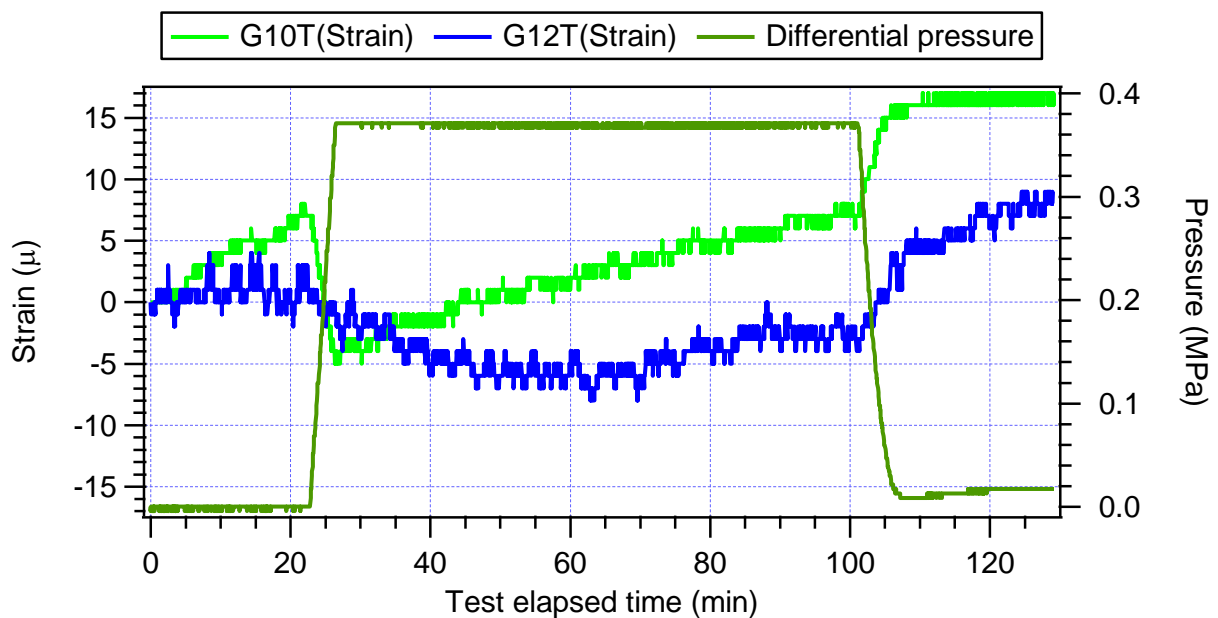


図 4.4.1-15 岩盤上端面のゲージの応力応答確認

4.4.2 実験後の密度、含水比測定

実験終了後に、緩衝材を採取し、密度および含水比を測定した。採取は図 4.4.2-1 に示す、高さ 15mm、内径 9.8mm の試料採取ロッドを使用した。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。図 4.4.2-2 に採取位置を示す。以下に示す図中の(a)~(g)は、図 4.4.2-2 の深さの(a)~(g)に対応している。図 4.4.2-3 に密度の深度分布を示す。乾燥密度においては、125mm 地点を除き、上方ほど密度が高い傾向がわかる。一方、湿潤密度では、10mm~65mm 地点まではほぼ同等の値であるが、90mm で値が減少し、120mm は 90mm とほぼ同じ値となっている。オーバーパック直下の地点では試料採取の際に試料が完全に充填できなかったため、乾燥、湿潤密度ともに値が小さくなっている。緩衝材には砂を混合してあるため、試料採取の際の摺り切りを実施すると砂粒子が欠ける可能性がある。そのため、90mm、120mm 地点の乾燥、湿潤密度が小さく求められてしまったと考えられる。

図 4.4.2-4 に含水比の深度分布を示す。処分孔底部での含水比が 28.9%と一番大きく、深度が小さくなるにつれ含水比も小さくなり、10mm の部分では 22.6%となった。図 4.4.2-5 に飽和度の深度分布を示す。飽和度は以下の式を用いて求めた。

$$S_r = \frac{w\rho_s}{\rho_w e} \quad (4.4-1)$$

ここで、 S_r : 飽和度、 w : 含水比、 ρ_s : 固相の密度、 ρ_w : 水の密度、 e : 間隙比
また、間隙比は以下の式から求まる。

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (4.4-2)$$

ここで、 ρ_d : 乾燥密度

1 点を除いて飽和度は 1 以上となり、飽和状態であることがわかる。上端面より 90mm の箇所では、飽和度が上下の点と比べ小さく、含水比との対応も悪くなっている。これは、含水比試料のロッドが小さいため、また、緩衝材には砂を混入しているため摺り切りの際に砂粒子が削り取られてしまった。そのため、湿潤密度が小さく測定され、間隙比が大きくなり、飽和度が小さくなってしまったためである。廃棄体直下の飽和度は 0.93 程度となっているが、これは、試料採取の際に試料が完全に充填できていなかったためと考えられる。



図 4.4.2-1 実験後の含水比計測に使用した試料採取ロッド

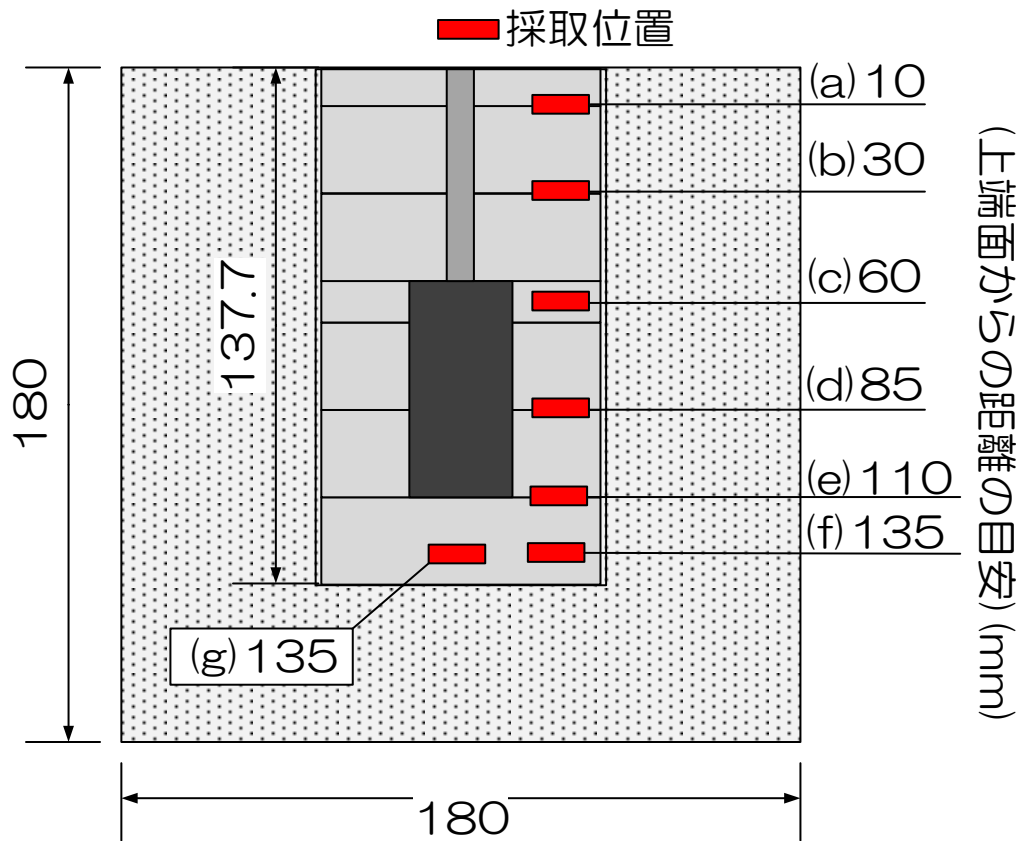


図 4.4.2-2 実験後の採取地点

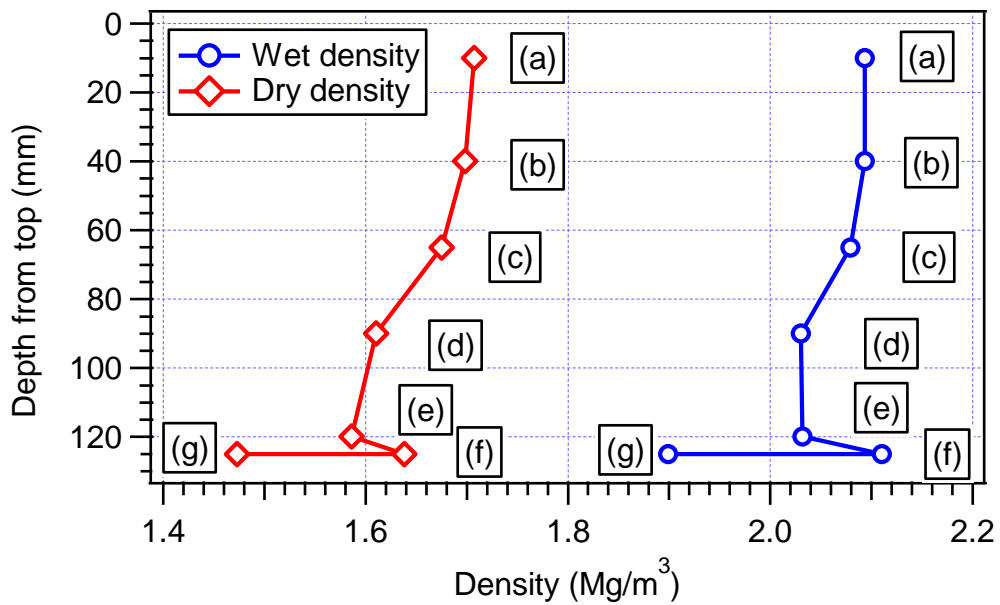


図 4.4.2-3 緩衝材密度の深度分布

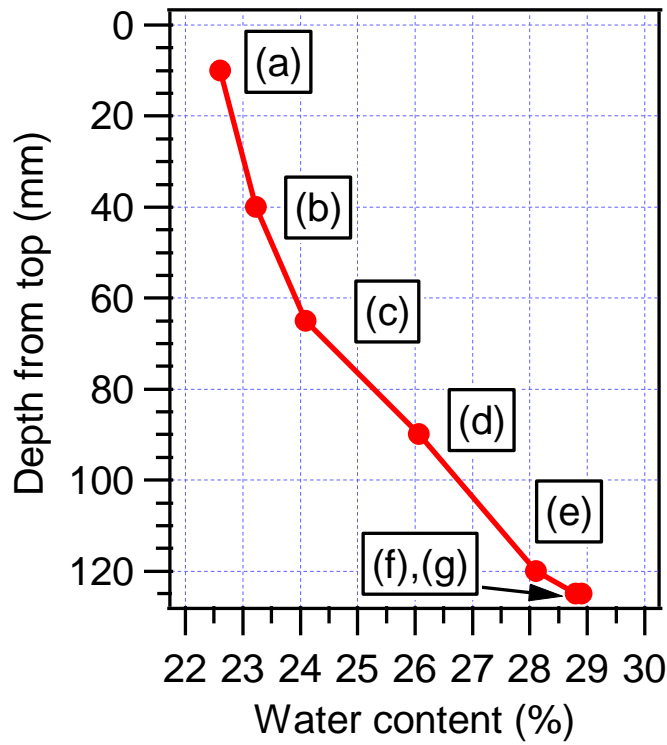


図 4.4.2-4 緩衝材含水比の深度分布

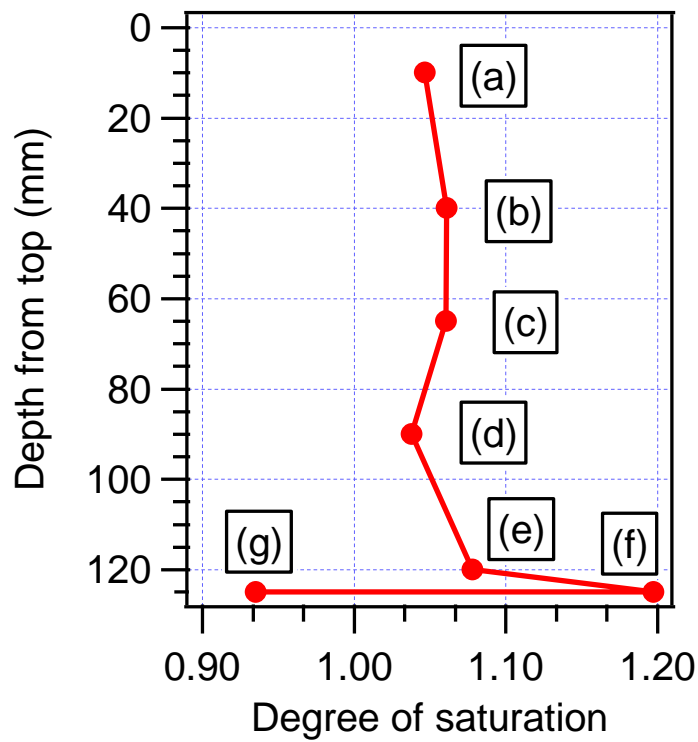


図 4.4.2-5 緩衝材飽和度の深度分布

4.4.3 X線 CT 撮影

X線 CT 撮影は、遠心力载荷実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 4.4.3-1 に撮影箇所概要図を示す。図中の A-A'、B-B'断面は図 4.4.3-2 や図 4.4.3-5 に示す画像の A-A'や B-B'断面、図 4.4.3-3 や図 4.4.3-6 に示す CT 値の分布に対応している。

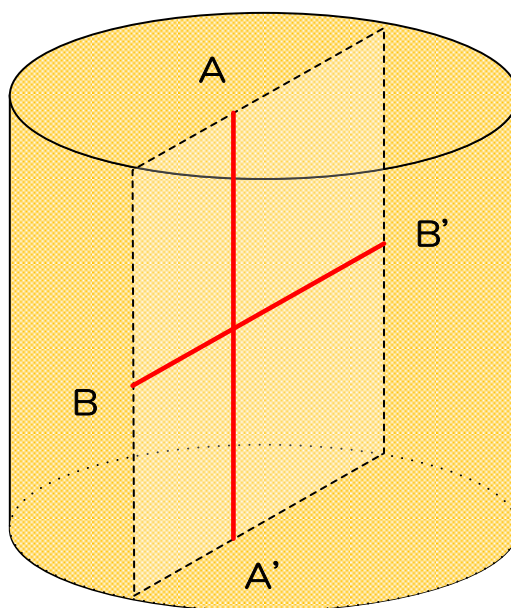


図 4.4.3-1 撮影箇所概要図

(1) 実験前撮影

図 4.4.3-2 にオーバーパックの撮影画像を示す。図中の A-A'や B-B'断面は図 4.4.3-3 に示す CT 値の分布に対応している。A-A'断面においては岩盤と緩衝材が明瞭に区別され、B-B'断面を見ると岩盤、緩衝材、オーバーパック、隙間、継目が明瞭に区別されていることが分かる、図 4.4.3-4 に CT 画像より構築した模型の三次元図を示す。矢印で示すとおり、岩盤部の縦方向に幅 0.6mm 程度の亀裂が存在している。4.4.1(4)で述べたとおり、この亀裂を間隙水が優先的に通り、岩盤のひずみ値に影響した可能性がある。

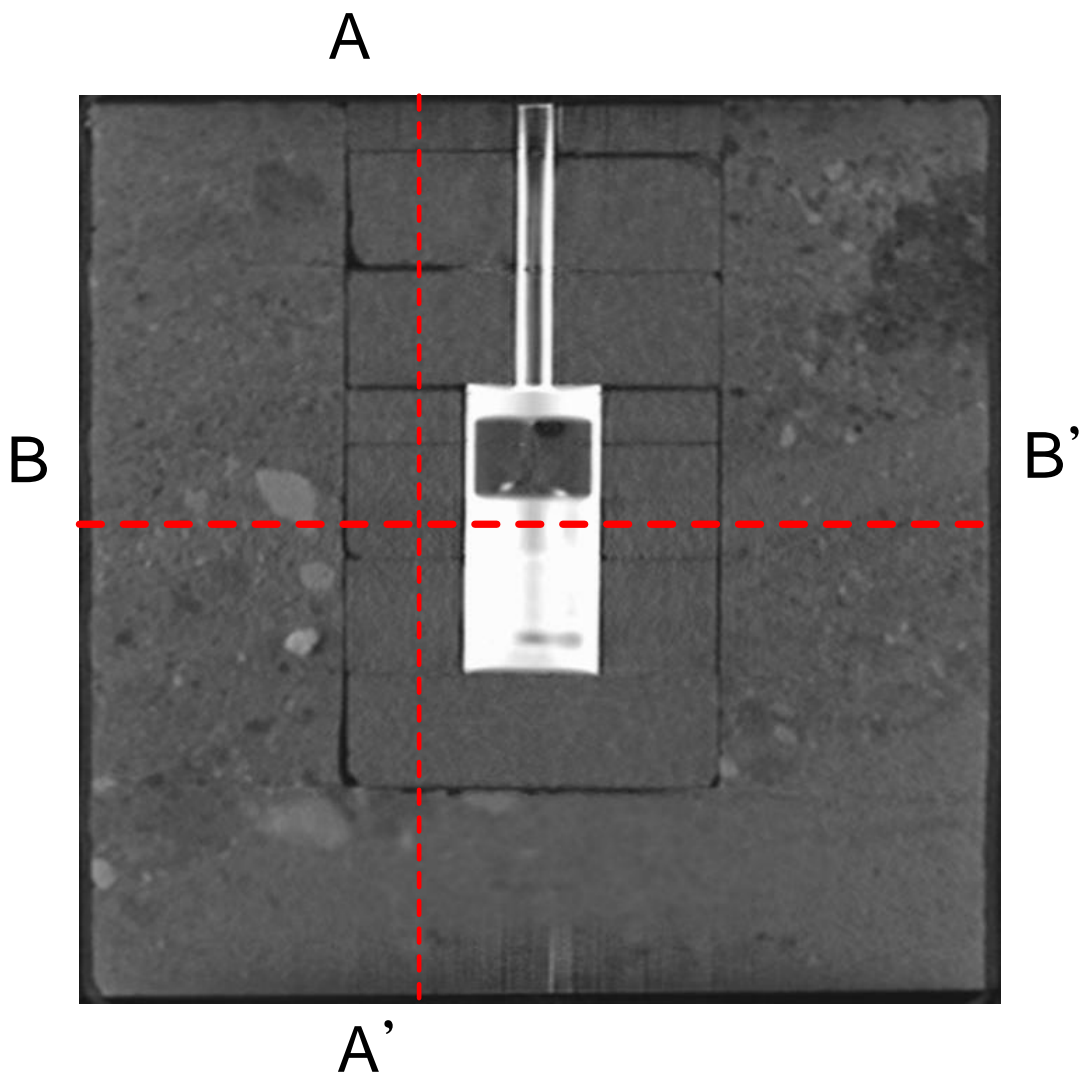
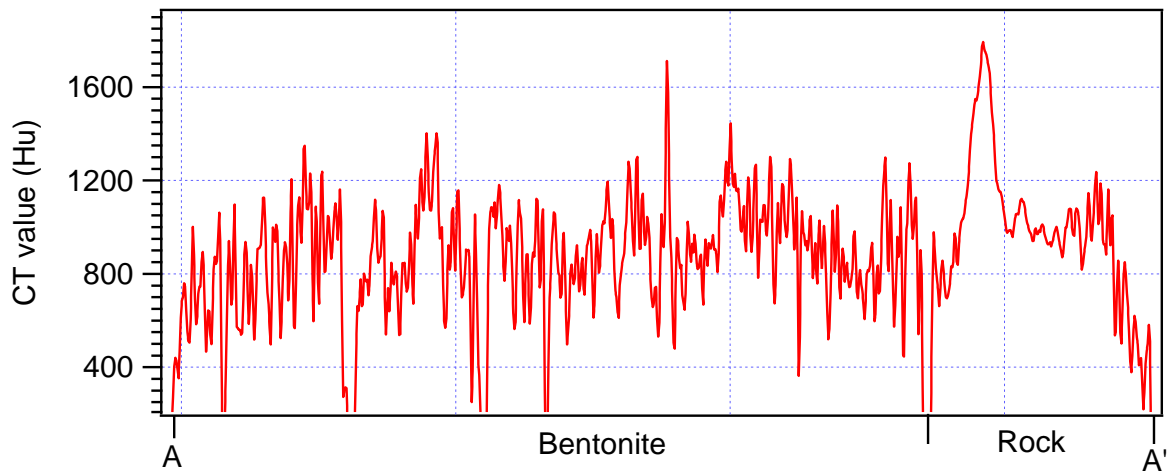


図 4.4.3-2 実験前の CT 撮影結果

a) A-A'断面



b) B-B'断面

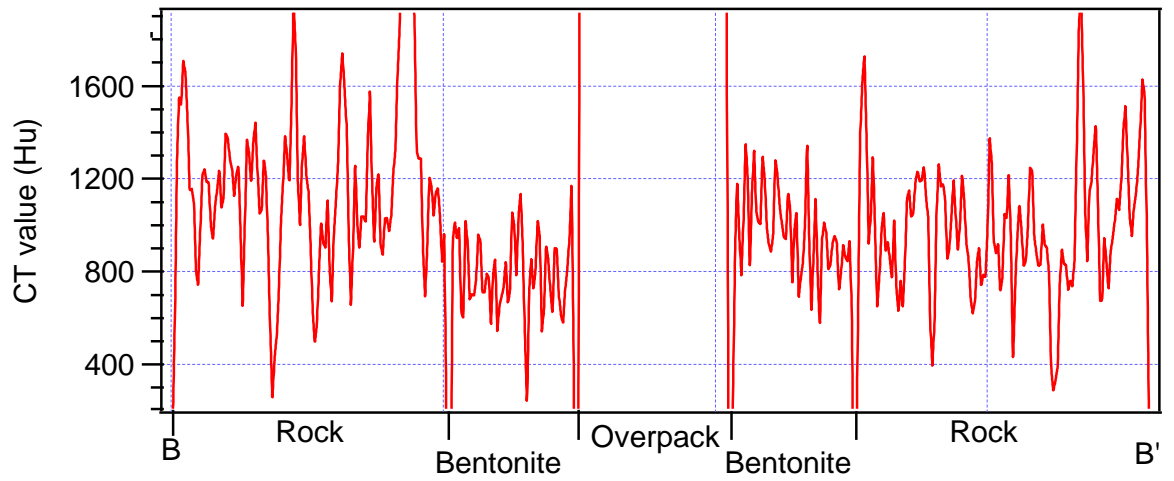


図 4.4.3-3 実験前の各地点における CT 値

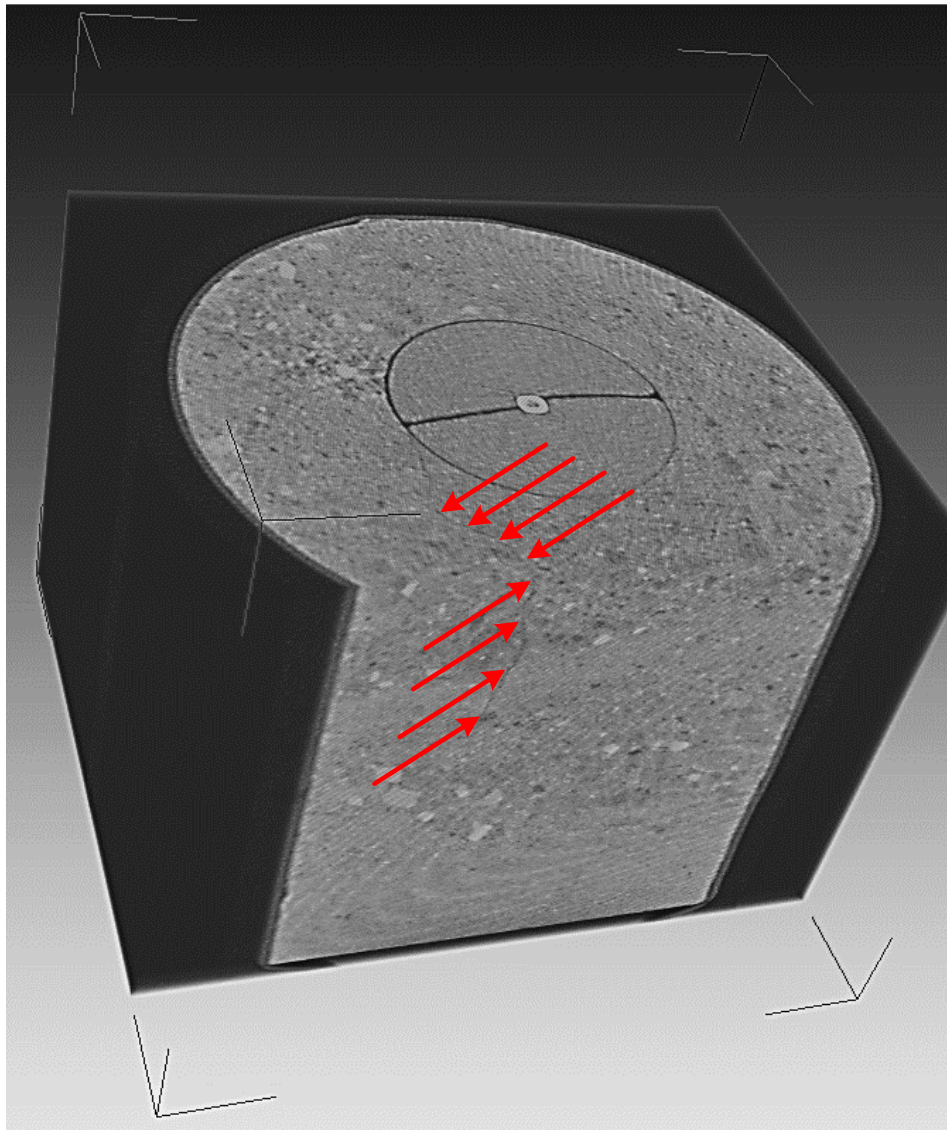


図 4.4.3-4 CT 画像より構築した実験前の模型の三次元図

(2) 実験後撮影

実験後に実施した X線 CT 撮影の結果を図 4.4.3-5 に示す。図中の A-A' や B-B' 断面は図 4.4.3-6 に示す CT 値および密度の分布に対応している。実験前に撮影した CT 画像では、緩衝材と緩衝材の継ぎ目やオーバーパックとの間に隙間が見られたが、実験後の CT 画像では、継目や隙間が緩衝材によって充填されていることがわかる。A-A' 断面は、実験前は隙間や継ぎ目の影響で CT 値が小さくなっているが、実験後にはその低下はなくなり、ほぼ均一な値となっていることがわかる。B-B' 断面は、岩盤と緩衝材、緩衝材とオーバーパックとの間に隙間と考えられる明確な CT 値の低下が認められる。この隙間は撮影の際、圧力容器から取り出しており、応力開放によって生じたものと考えられる[4]。

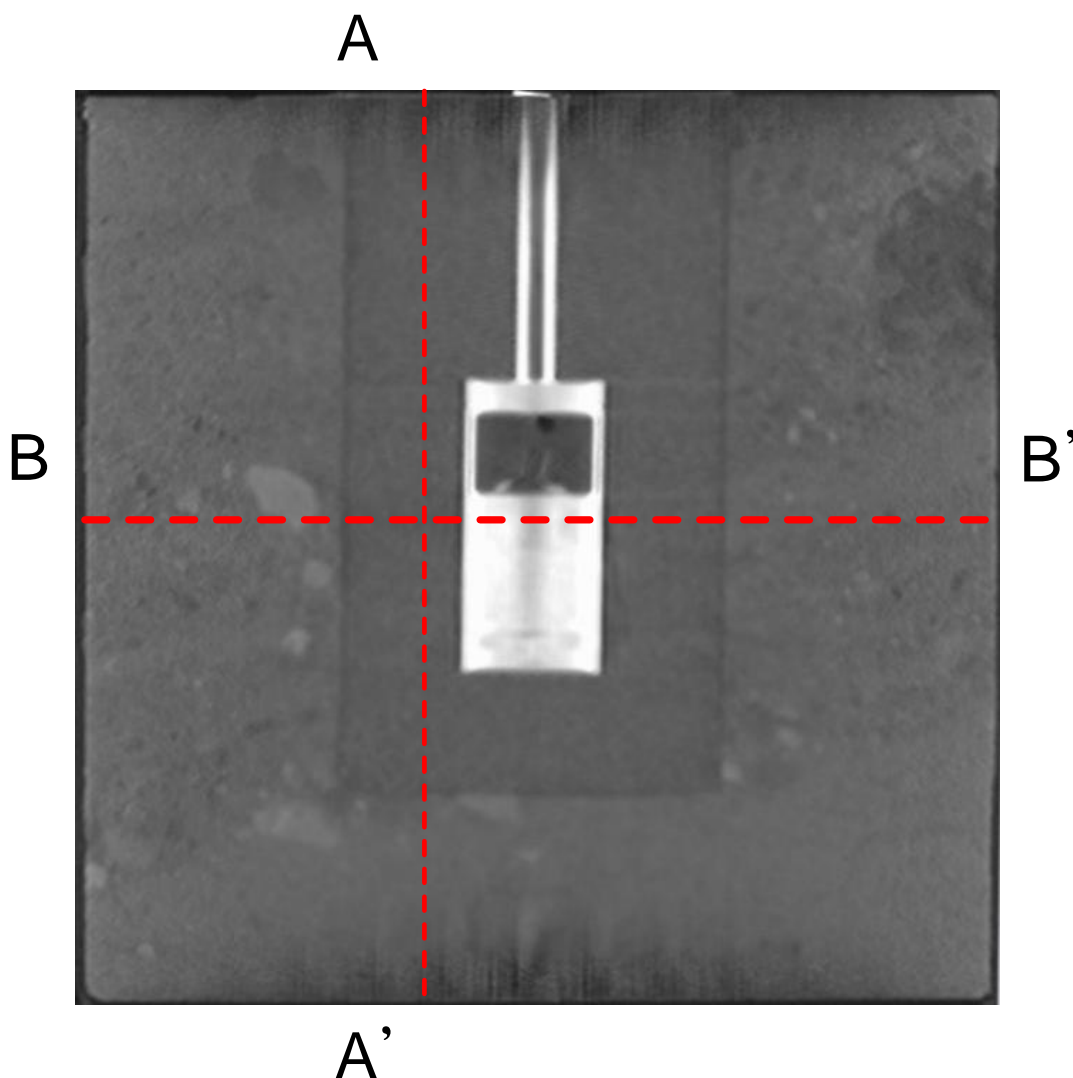
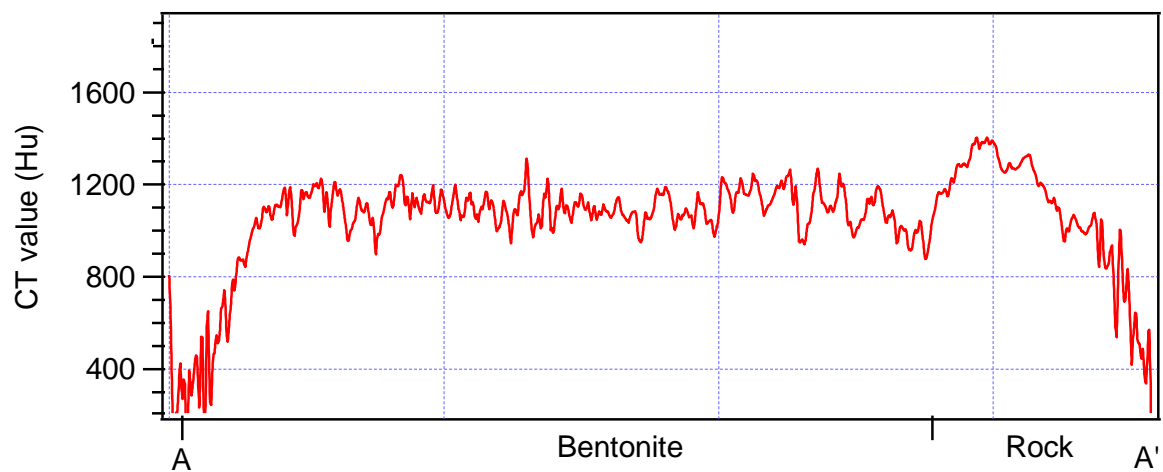


図 4.4.3-5 実験後の CT 撮影結果

a) A-A'断面



b) B-B'断面

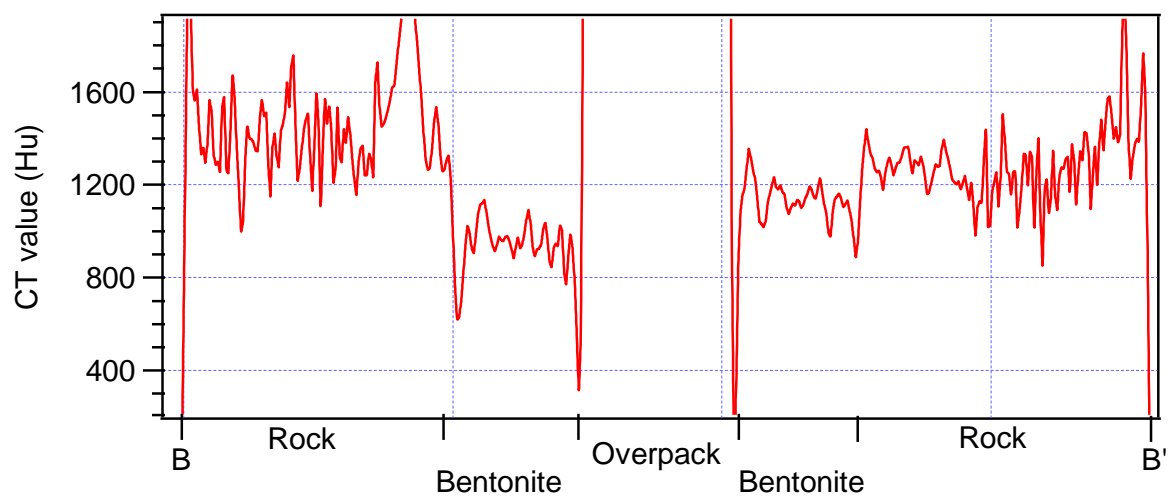


図 4.4.3-6 実験後の各地点における CT 値

4.5 まとめおよび今後の課題

4.5.1 まとめ

ニアフィールドの長期挙動を検討するため、時間短縮の相似則を適用できる遠心力場での廃棄体周辺を抽出した模型実験を実施し、温度、ベントナイトの土圧、オーバーパックスの鉛直変位および岩盤のひずみを計測した。

その結果以下の事項が分かった。

- 温度：オーバーパックスが加熱され 92℃になると、岩盤の温度は最大で 39℃程度まで上昇し、加熱が終了すると周囲の温度である 34℃に収束した。
- 加熱の影響：オーバーパックスの加熱による岩盤の熱ひずみは最大で 40 μ 程度と推測され、オーバーパックスの加熱停止後の各計測値には顕著な影響は認められなかった。
- ベントナイトの土圧：実験開始直後は背水圧および注水圧上昇の過渡的な時期であることから、土圧が増減した。注水圧および背圧が一定となると緩衝材の膨潤が始まるまでは多少の増減はあるもののほぼ一定値で推移し、緩衝材上部の膨潤が始まると徐々に値が増加している。飽和と考えられる時点以降はほぼ一定値（室内要素実験の値とほぼ同値）が計測された。
- オーバーパックスの変位：注水開始してから間隙水の下方から上方への浸潤の影響により 0.2 年相当経過後から緩衝材下部が膨潤することで急激に浮上した後、緩衝材上部の膨潤によって沈下する傾向を示している。その後は漸増～ほぼ一定に収束する傾向が見られた。
- 岩盤のひずみ：岩盤側面のひずみは実験開始直後から間隙水浸潤による有効応力の変化から引張ひずみがみられるが、岩盤と緩衝材の飽和による剛性低下の影響で圧縮方向に推移した。また、ゲージ貼付位置が模型上面になるほど引張ひずみが大きくなり、緩衝材の膨潤の順序による緩衝材の密度の変化とも良く対応していた。岩盤上面のひずみには一定の傾向は見られなかった。処分孔内のひずみは岩盤側面のひずみと同様の傾向を示した。
- 実験後に緩衝材を専用のロッドを使用してサンプリングし、密度、含水比を計測した。その結果、乾燥密度・含水比が上方から下方に向かって、それぞれ低下・増加する傾向が見られた。
- CT 撮影：実験前後ともに、模型の岩盤、緩衝材、オーバーパックス、隙間・継目が明瞭に区別された。また、実験終了後の撮影結果では、緩衝材の膨潤により、隙間・継目が充填されていることが確認できた。

4.5.2 今後の課題

- ・本実験は等方応力条件の実験であったが、既往研究[4][5]とは岩種、緩衝材の砂混合率、背圧が違うため単純に比較はできないが、類似の既往研究と異なる結果が得られた。本実験のみから何らかの判断を行うのは困難であるため、次年度以降に必要な応じて追加実験が必要と考える。
- ・急激な温度の変化による影響を把握するためにオーバーパックの加熱を停止したが、第2次とりまとめ[16]で提示されている温度履歴どおりに実験を通じて加熱を制御した実験を実施することで、より実環境に近いデータが得られると考える。
- ・本実験は全応力として模型に 8MPa の拘束圧を負荷した条件であるが、上部が岩盤相当の剛な条件でも実験初期ではオーバーパックは浮上傾向を示している。このため、処分孔上部の埋戻し材やプラグなどを想定し、その剛性を考慮した実験によりオーバーパックの変位に与える影響が大きく変わる可能性があり、これらの境界条件を設定した実験を実施する必要があると考える。

第4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 p.529, 2013.
- [2] Taylor, R. N.: Geotechnical Centrifuge Technology, London, Blackie Academic & Professional, 1995.
- [3] 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-, 電力中央研究所研究報告書, N10018, 2011.
- [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書, N11040, 2012.
- [5] 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-応力連成模型実験-, 電力中央研究所研究報告書, N14003, 2014.
- [6] 木村孟, 日下部治: 講座 遠心模型実験 2.序論, 土と基礎, 35, 11, p.68-74, 1987.
- [7] Craig, W. H., James, R. G., Schofield, A. N.: Centrifuges in soil mechanics, Balkema Rotterdam, 1988.
- [8] 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, p.37-44, 2004.
- [9] Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S. M., Culligan, P. J., Goodings, D., Koning, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M. F., Thorel, L.: Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling, International Journal of Physical Modelling in geotechnics, 7, 3, p.1-23, 2007.
- [10] Tatsuoka, F., Goto, S., Tanaka, T., Tani, K., Kimura, Y.: Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material, in: Asaoka, A., Adachi, T., Oka, F. (Eds.), Deformation and progressive failure in geomechanics, Pergamon, 1997.
- [11] Kusakabe, O.: 6. Foundations, in: Taylor, R. N. (Ed.), Geotechnical Centrifuge Technology, Blackie Academic & Professional, 1995.
- [12] 中村邦彦, 田中幸久: 高レベル放射性廃棄物処分場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, U03074, 2004.
- [13] 緒方信英, 小崎明郎, 植田浩義: その4 人工バリアの設計と製作(特集「高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術」), 原子力バックエンド研究, 5, 2, p.103-121, 1999.
- [14] 地盤工学会: 堆積軟岩の工学的性質とその応用, in: 堆積軟岩の工学的性質とその応力編集委員会 (Ed.), 土質基礎工学ライブラリー30, (社)地盤工学会, 1998.
- [15] 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- 電力中央研究所研究報告, N05057 2006.
- [16] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第2次取りまとめ- 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400

99-22, 1999.

- [17] 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.
- [18] 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, 数値地質図 DGM P- 5, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2004.
- [19] 下岡謙司, 宇都宮透, 川澄脩, 海蔵寺忍, 村岡進, 田代晋吾, 荒木邦夫: 地層処分による岩盤への熱的および力学的影響ー調査および試算ー, JAERI-M レポート, JAERI-M83-040, 1983.

第5章 まとめ

5.1 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力模型実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。

本検討の最終的な目標は、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築である。この長期的な目標を念頭におき、まず3カ年の研究計画を策定した。

策定した計画に従い、本年度は長期挙動評価の検証手法の骨子を検討し、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、ほぼ均一な系における遠心力模型実験結果を取得した。また、数値解析手法による人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価に先立ち、数値解析コードのパラメータスティーによる感度解析を行い、あわせて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、要素実験で取得するための手法の整理を行い、実験を実施した。

5.2 本年度の成果

本年度の成果は、以下の通りである。

5.2.1 研究計画

(1) 全体計画

今フェーズ（H27～29）の3カ年の研究計画を策定し、検討の対象、人工バリアの長期挙動に影響をおよぼす周辺環境因子の整理し提示した。

本検討の対象は、閉鎖後初期の数百年程度の期間に生じる緩衝材の膨潤変形、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とする。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、いわば安全評価が対象とする期間の初期値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必要がある、という観点によるものである。

人工バリアの長期挙動に影響をおよぼす周辺環境因子として、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という観点から、①応力（埋戻し圧・上載圧）、②水質、③岩盤の不均質、を選定し、今フェーズにおいては①の応力の影響について検討する研究計画を策定した。

(2) 長期挙動評価手法の構築

最終的な目標である長期挙動評価手法の構築のために、今フェーズにおいて長期挙動評価手法の骨子（素案）を提示した。本年度は、検証の考え方、検証手順の素案、評価項目について検討した。

(3) 共通の条件

本検討において実施する数値解析および遠心力模型実験について、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、本検討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、遠心力模型実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。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。

境界条件について、深度 400m（地圧：8MPa 相当）の施設を想定し、間隙水圧を 4.0MPa、地度を 34°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—」に従い処分孔堅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（最高上昇温度 94.5°C ）。

5.2.2 数値解析

(1) 感度解析

本研究では人工バリア定置後のニアフィールドの長期挙動評価を行う上で、THM 連成による数値解析を適用する際に、考慮すべき計算条件の優先度を確認するために感度解析を実施した。基本ケースと各ケースの結果を整理し、比較することで以下に述べる事項が明らかとなった。

1) 温度変化を考慮することによる影響

岩盤やベントナイトの水蒸気拡散に関係し浸潤速度に影響がある。特にオーバーパックの付近で乾燥し飽和時刻を遅らせる影響が大きい。しかしながら、最終的なベントナイトの冠水時刻は加熱を考慮したケースで一様に早くなった。これは温度上昇により間隙水の粘土が低下するためと考えられる。また、岩盤を含めたモデル全体に対する影響はあまり大きくないが、熱応力の発生による拘束圧の変化などの影響が見られ、オーバーパックの最終的な鉛直変位量などベントナイト部の挙動に多少の影響が見られた。

2) ベントナイトの膨潤が岩盤に与える影響

浸潤が進行すると人工バリア定置前に生じている拘束圧が解消する方向に膨潤圧が発生するため、初期せん断が解消する傾向が認められる。このため、岩盤にクリープモデルを設定したケースにおいてもその影響は殆ど見られなかった。しかし、極端に膨潤圧が大きくなる条件下などでは岩盤自体を破壊することも考えられる。また、本研究における感度解析では、隙間を考慮したケースでベントナイト土圧が大きくなり、岩盤の間隙水圧分布などにもその影響が見られた。

3) 透水性の影響

浸潤速度が変わることで膨潤の進行過程に影響する他、定常に至る前の岩盤の温度分布な

どに多少の影響が見られる。また、ベントナイトの土圧やオーバーパック変位に与える影響は、岩盤物性を修正したケースよりベントナイト物性自体を修正した方がその影響は大きい。しかしながら、浸潤速度はベントナイト土圧の発生履歴には影響を与えるが、最終的な発生土圧やその分布、オーバーパックの変位量などに与える影響は小さい。

4) ベントナイトの力学特性の影響

ベントナイトの剛性が高いと膨潤変形しにくい条件となり、オーバーパックの変位などは殆ど見られなくなる。これはポアソン比を大きく設定した際も同様であった。ベントナイトの剛性が膨潤挙動に与える影響は大きく、浸潤の過程で変化するベントナイトの物性を評価することは重要である。なお、浸潤に伴いポアソン比が大きくなる効果は応力と間隙水圧との連成により達成されるが、本検討では膨潤相当外力に生じる軸差を解消する意図で設定しており、この目的は達成されている。

5) 膨潤挙動のモデル化の影響

ベントナイトの膨潤がニアフィールドに与える影響は大きく、解析においてこの部分のモデル化は重要である。膨潤の進行に伴う膨潤の発生についてはサクション圧や飽和度などの変化から制御を行っているがその影響は大きく、水分特性曲線の形に大きく影響を受ける。また、最終的な膨潤圧が既知である場合にはより簡易なモデルを導入することができるが、実際の膨潤挙動は周囲の拘束圧やベントナイトの密度変化の影響を受けるため、あくまで簡便な評価といえる。

6) 隙間をモデル化することによる影響

処分孔およびオーバーパックと緩衝材間にある隙間をモデル化することで、浸潤過程におけるベントナイト密度のむらを考慮することが可能になり、その影響を確認することができる。本研究では基本として飽和時のベントナイト剛性を設定していることから均質化しにくく、ベントナイト上部で乾燥密度が大きくなり、均質化ケースと比べて大きなベントナイト土圧を発生した。しかし、岩盤の拘束圧が大きい場合にベントナイト土圧が大きくなる傾向や、オーバーパックより上部のベントナイト土圧が大きくなる傾向は実験と整合している。

7) 感度解析より得られた重要パラメータ

以上の結果より、ニアフィールドにおける長期挙動評価、特に発生する応力と変形に着目した検討において最も重要なパラメータは剛性やポアソン比などの力学特性であり、次に膨潤評価のモデルや隙間のモデル化などによる影響が大きいことが確認された。また、岩盤の拘束圧や境界水圧なども重要と考えられる。一方で、水理特性や伝熱特性が岩盤等の変形に与える影響は相対的に小さく、パラメータに多少のばらつきが生じていたとしてもニアフィールドの定常的な応力状態に与える影響は小さい。

(2) 数値解析に連動した要素実験

要素実験では、数値解析で入力するパラメータに資するデータの取得を目的として実験を実施した。なお実験で得られるデータは、データのばらつきを統計処理できる数量の実験を今フェーズにおいて実施する予定である。

実験は、緩衝材および岩盤について、物理特性（固相の密度、湿潤密度、含水比測定、超音

波伝播速度測定、膨潤圧測定)と力学特性(透水係数測定、一軸強さ測定、排水強度測定)を、日本工業規格および地盤工学会基準・規格に基づき実施した。

- 1) 物理特性
- 2) 要素実験で得られた物理特性は、データのばらつきを統計処理できる数量の実験結果を得た。
- 3) 膨潤特性
- 4) 緩衝材の作成時の乾燥密度の増加とともに、膨潤圧も増加する傾向が認められた。また、模型実験で得られたベントナイト土圧と要素実験から得られた緩衝材の膨潤圧は整合した。
- 5) 熱特性
- 6) 要素実験において、広範囲な飽和度の変化に伴う熱伝導率の関係が得られた。次フェーズにおいては、固相(緩衝材及び周辺岩盤)の熱特性として、比熱測定、熱膨張率測定を実施する。
- 7) 保水特性
- 8) 要素実験において、広範囲な飽和度の変化に伴う保水特性の関係が得られた。次フェーズにおいては、化学ポテンシャルの大きい領域(飽和度の低い領域)においては、緩衝材及び周辺岩盤とともに、蒸気圧法による測定を併用し、保水特性の精度向上を目指す。
- 9) 透水特性
- 10) 緩衝材においては、飽和透水係数の定義(飽和の判定方法及び測定結果の妥当性の評価)を明確にする。周辺岩盤においては、透水試験の実施数量を増やし要素実験で得られる透水特性の精度向上を目指す。
- 11) 力学特性
- 12) 緩衝材及び周辺岩盤において、三軸試験の実施数量を増やし要素実験で得られる力学特性の精度向上を目指す。

5.2.3 遠心力模型実験

ニアフィールドのオーバーパックスの長期挙動を検討するため、時間短縮の相似則を適用できる遠心力場での廃棄体周辺を抽出した模型実験を実施し、岩盤のひずみと温度、オーバーパックスの鉛直変位、ベントナイト土圧を計測した。その結果、以下の事項が明らかになった。

(1) 遠心力模型実験

1) 温度

オーバーパックスが加熱され 92℃になると、岩盤の温度は最大で 39℃程度まで上昇し、加熱が終了すると周囲の温度である 34℃に収束した。

2) 加熱の影響

オーバーパックスの加熱による岩盤の熱ひずみは最大で 40 μ 程度と推測され、オーバーパックスの加熱停止後の各計測値には顕著な影響は認められなかった。

3) ベントナイトの土圧

実験開始直後は背水圧および注水圧上昇の過渡的な時期であることから、土圧が増減した。注水圧および背圧が一定となると緩衝材の膨潤が始まるまでは多少の増減はあるもののほぼ一定値で推移し、緩衝材上部の膨潤が始まると徐々に値が増加している。飽和と考えられる時点以降はほぼ一定値（室内要素実験の値とほぼ同値）が計測された。

4) オーバーパックの変位

注水開始してから間隙水の下方から上方への浸潤の影響により 0.2 年相当経過後から緩衝材下部が膨潤することで急激に浮上した後、緩衝材上部の膨潤によって沈下する傾向を示している。その後は漸増〜ほぼ一定に収束する傾向が見られた。

5) 岩盤のひずみ

岩盤側面のひずみは実験開始直後から間隙水浸潤による有効応力の変化から引張ひずみが見られるが、岩盤と緩衝材の飽和による剛性低下の影響で圧縮方向に推移した。また、ゲージ貼付位置が模型上面になるほど引張ひずみが大きくなり、緩衝材の膨潤の順序による緩衝材の密度の変化とも良く対応していた。岩盤上面のひずみには一定の傾向は見られなかった。処分孔内のひずみは岩盤側面のひずみと同様の傾向を示した。

6) 緩衝材の密度、含水比

実験後に緩衝材を専用のロッドを使用してサンプリングし、密度、含水比を計測した。その結果、乾燥密度・含水比が上方から下方に向かって、それぞれ低下・増加する傾向が見られた。

7) CT 撮影

実験前後ともに、模型の岩盤、緩衝材、オーバーパック、隙間・継目が明瞭に区別された。また、実験終了後の撮影結果では、緩衝材の膨潤により、隙間・継目が充填されていることが確認できた。

第6章 参考資料

6.1 数値解析（パラメータの感度解析結果）

6.1.1 解析モデル

図 6.1.1-1 に解析モデルの寸法と境界条件を示す。解析では、埋戻し材と緩衝材および初期隙間を区別し、直径と高さが 5.4m の範囲をモデル化した。力学拘束は対称軸とモデル上面をローラー支持とし、上面と底面および側面境界の温度を 35°C で一定とした。また、水理境界としてモデルの下半分に相当する外側境界面を圧力 3MPa で一定とし、上面は間隙水が自由に抜ける浸出面境界に設定した。オーバーパックの発熱は温度を 95°C で一定とする条件を設定した。なお、人工バリアの定置前の岩盤外側に 6MPa の拘束圧を考慮し、これに相当する初期応力を設定した。

感度解析に用いた FEM メッシュを図 6.1.1-2 に示す。解析モデルは 1887 節点の小規模なものであるが、人工バリアの定置から 1000 年経過時までの長期挙動を THM 連成解析で評価するため、計算規模としては小さいものではない。

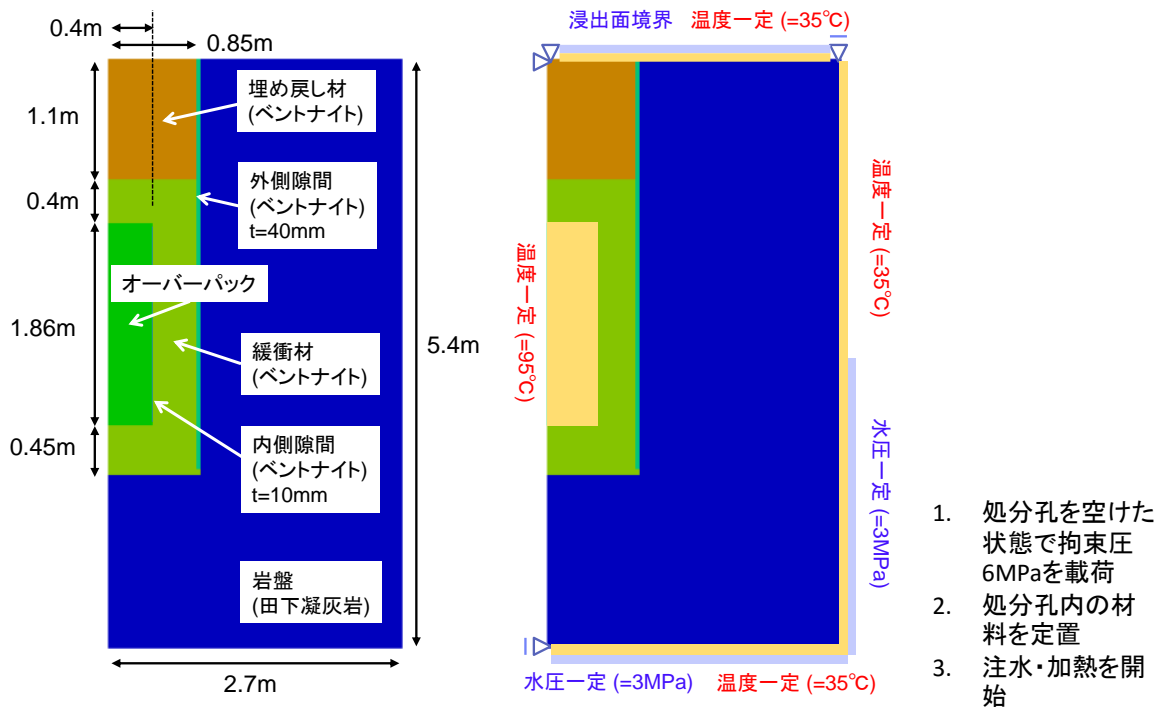


図 6.1.1-1 解析モデルの諸元と境界条件

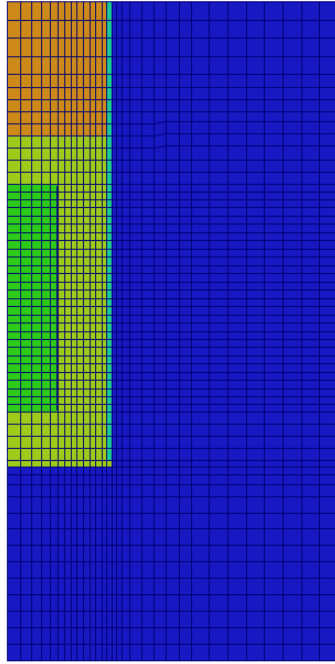


図 6.1.1-2 感度解析モデルの FEM メッシュ図 (1798 要素・1887 節点)

6.1.2 感度解析のケース一覧

基本条件を基本ケース THM-0 とし、透水性や剛性などの基本的なパラメータの他、膨潤モデルや岩盤のクリープ挙動の影響などを比較する感度解析ケースを表 6.1.2-1 に示すように設定した。また、オーバーパックの発熱の影響を確認するため、加熱を考慮しない基本ケース HM-0 を別に加え、これと比較する加熱を考慮しない検討ケースを設定した。THM-0～3 と HM-0～3 はそれぞれ加熱の有無以外に条件に相違がなく、加熱の影響を比較することができる。この他、処分孔と緩衝材の間にある隙間の影響を考慮したケースを設定し、境界の拘束圧を変えることでその影響を確認した。隙間を考慮していないケースでは前述のとおり、隙間が緩衝材の膨潤により潰れた後を想定しており、均質化した後の乾燥密度を初期条件として設定している。

表 6.1.2-1 解析ケース一覧

ケース	内容
THM-0 (基本ケース)	加熱あり、隙間なし・ベントナイト均一
THM-1	ベントナイトの固有透過度 1/2
THM-2	岩盤の固有透過度 1/10
THM-3	水分特性曲線 JNC2000
THM-4	ベントナイトの固有透過度を 2 倍とする
THM-5	岩盤の固有透過度を 10 倍とする
THM-6	膨潤の進行に関するパラメータ※1 を 1.0→3.0
THM-7	後述するより簡易な膨潤モデルの採用
THM-8	ベントナイトのポアソン比を飽和時のもの※2 とする
THM-9	ベントナイトのヤング率を乾燥時のもの※3 とする
THM-10	岩盤のクリープを考慮
HM-0 (基本ケース)	加熱なし、隙間なし・ベントナイト均一
HM-1	ベントナイトの固有透過度 1/2
HM-2	岩盤の固有透過度 1/10
HM-3	水分特性曲線 JNC2000
HM-4	ベントナイトの吸水挙動を水分拡散とする
HM-5	処分孔の隙間を考慮、拘束圧 6 MPa、水圧 3 MPa
HM-6	処分孔の隙間を考慮、拘束圧 10 MPa、水圧 5 MPa

6.1.3 実施結果

感度解析を実施して得られた各ケースの結果を以下に示す。各ケースの解析結果からは、モデル全体の間隙水圧分布、温度分布、岩盤の応力とひずみの分布、およびベントナイト部の飽和度と乾燥密度の変動分布についてその経過時変化の履歴を出力して図示した。なお、加熱を考慮していないケースの温度分布には意味がないが、等温条件であることを確認するためにそのまま一定温度の図を示している。また、緩衝材の膨潤挙動に各設定条件が与える影響を見るため、モデル上面拘束位置付近のベントナイトの鉛直土圧とオーバーパック鉛直変位履歴、および岩盤上部の各位置において発生するひずみの履歴を確認した。具体的な出力部位と位置を図 6.1.3-1 に示す。なお、ベントナイト土圧は上部の要素応力の平均で評価しており、オーバーパックの鉛直変位についても上面節点の平均から評価している。経時変化を比較する上での基本ケースは、加熱を考慮するケースに THM-0、考慮しないケースについては HM-0 を設定している。

以降に検討した各ケースの結果をまとめて示す。

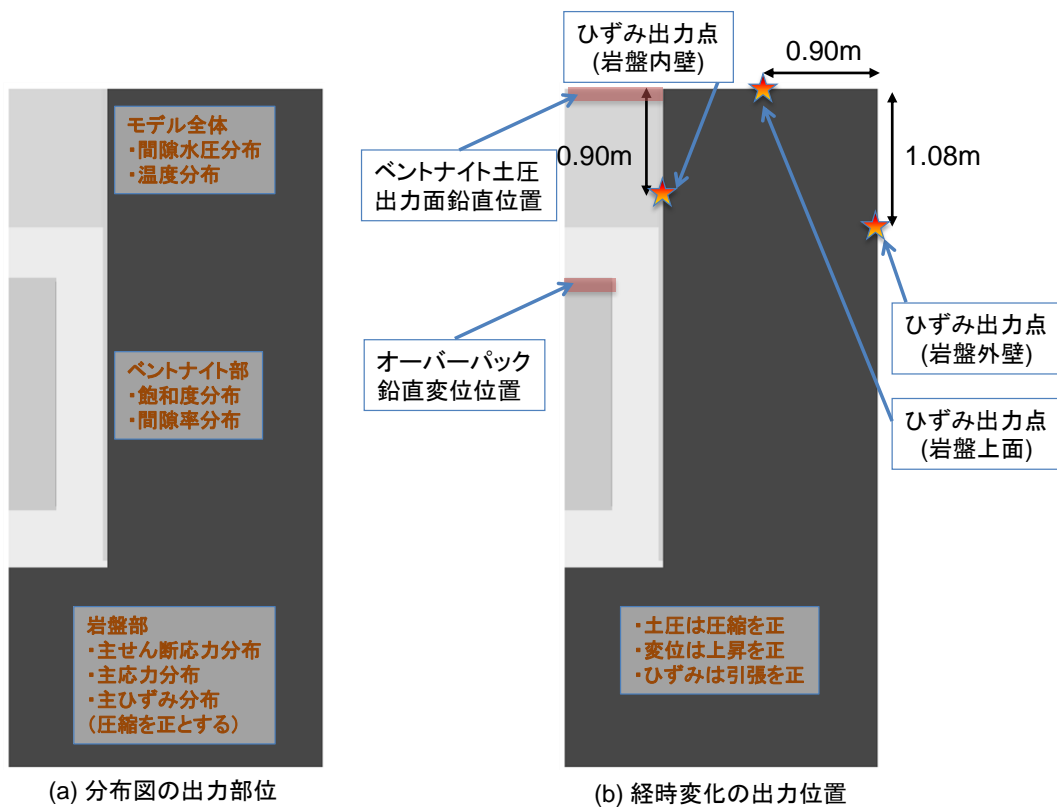


図 6.1.3-1 解析結果の出力部位と出力位置

6.1.4 THM-0

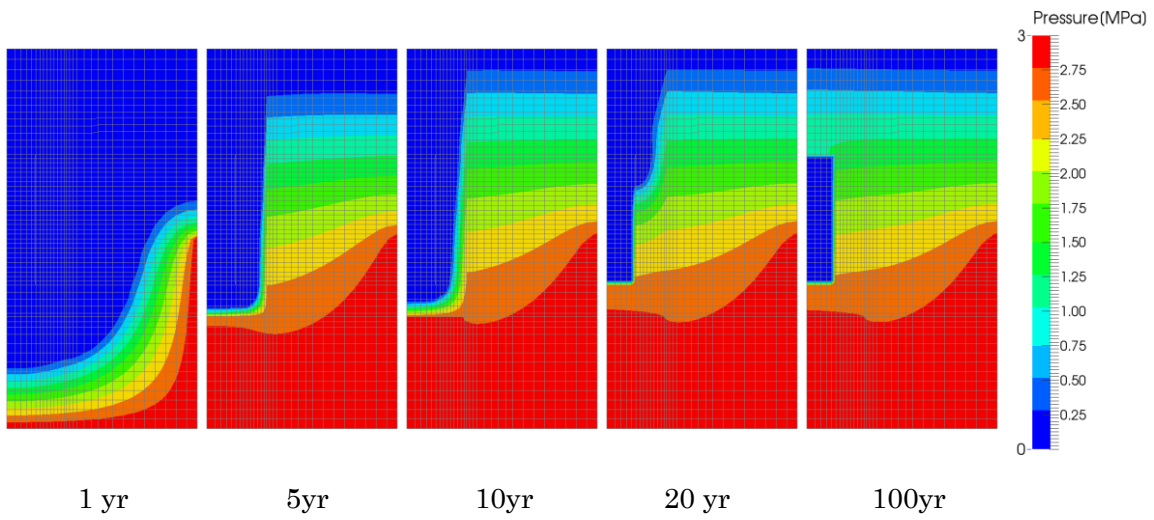


図 6.1.4-1 THM-0 岩盤部分・間隙水压分布

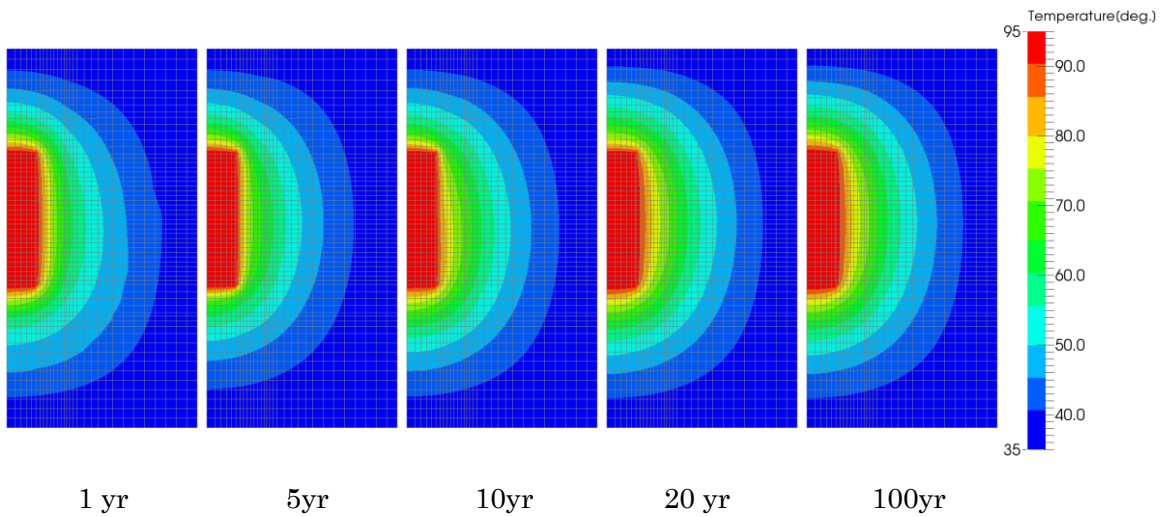


図 6.1.4-2 THM-0 岩盤部分・温度分布

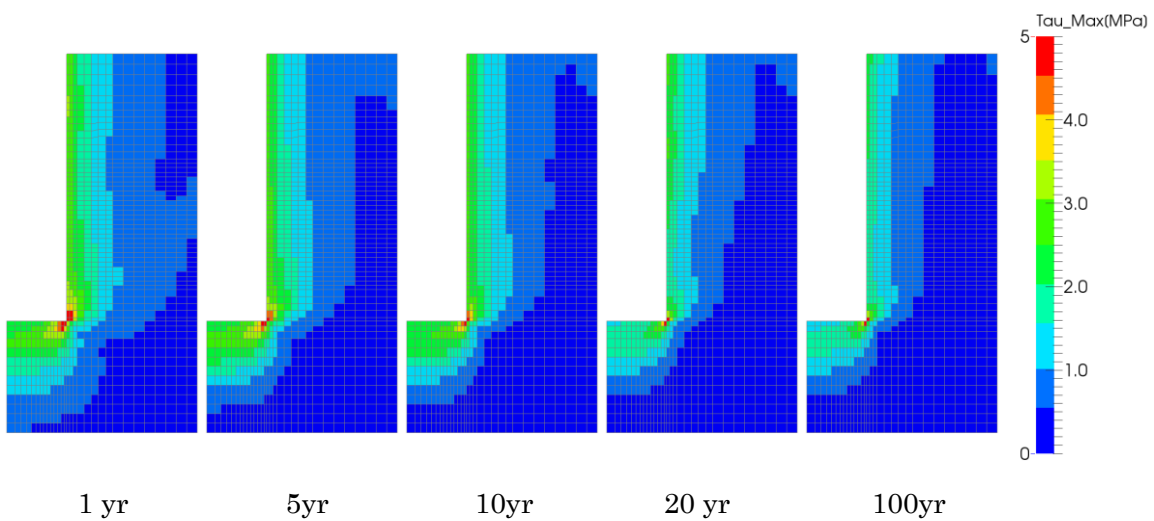


図 6.1.4-3 THM-0 岩盤部分・主せん断応力分布

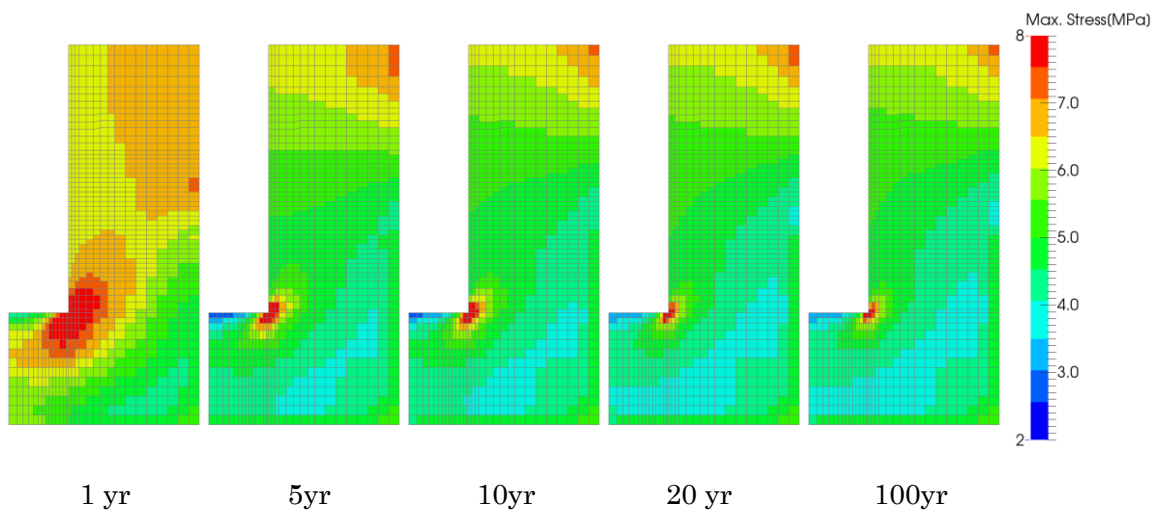


図 6.1.4-4 THM-0 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

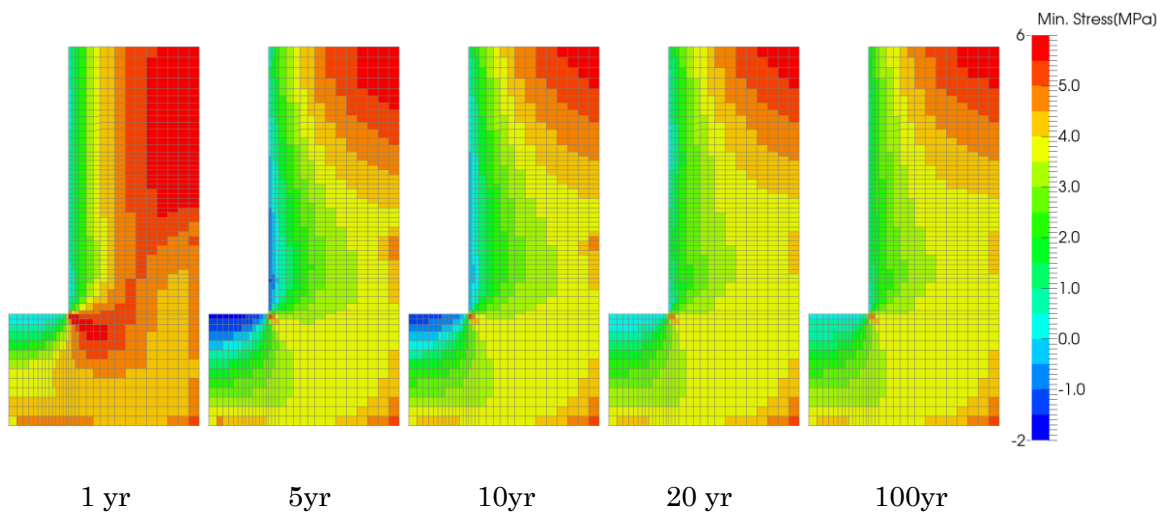


図 6.1.4-5 THM-0 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

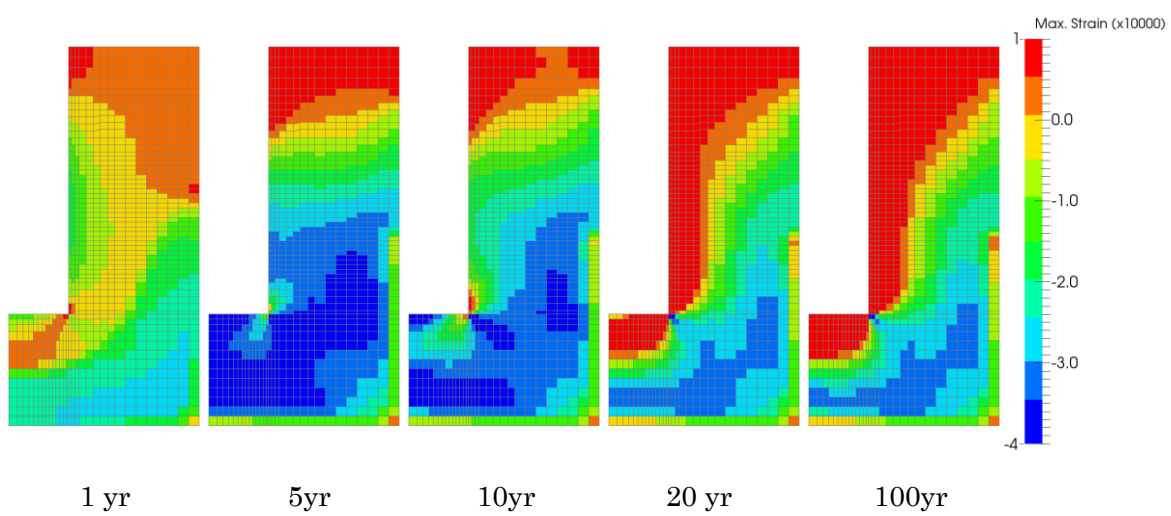


図 6.1.4-6 THM-0 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

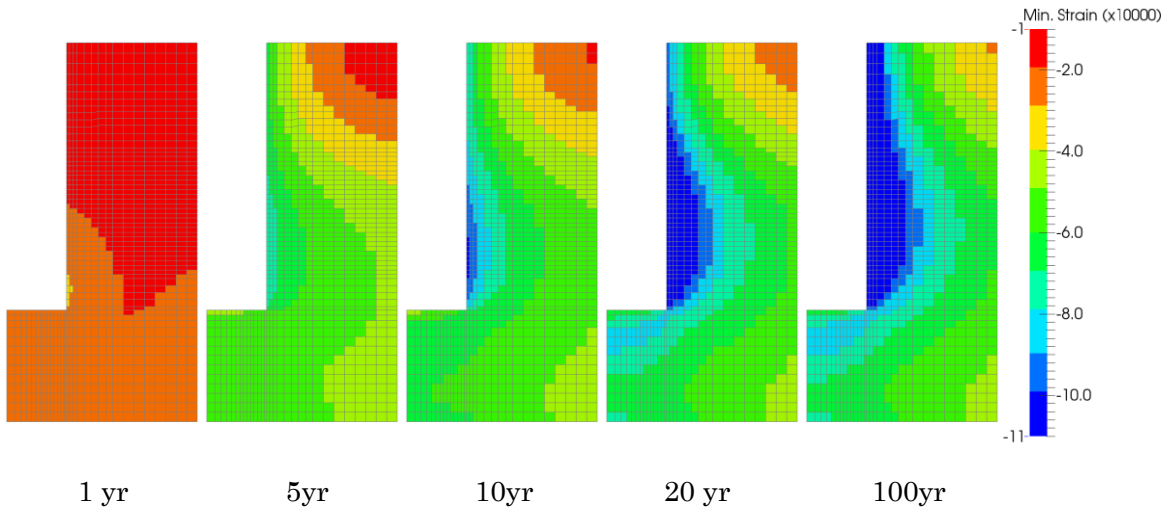


図 6.1.4-7 THM-0 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

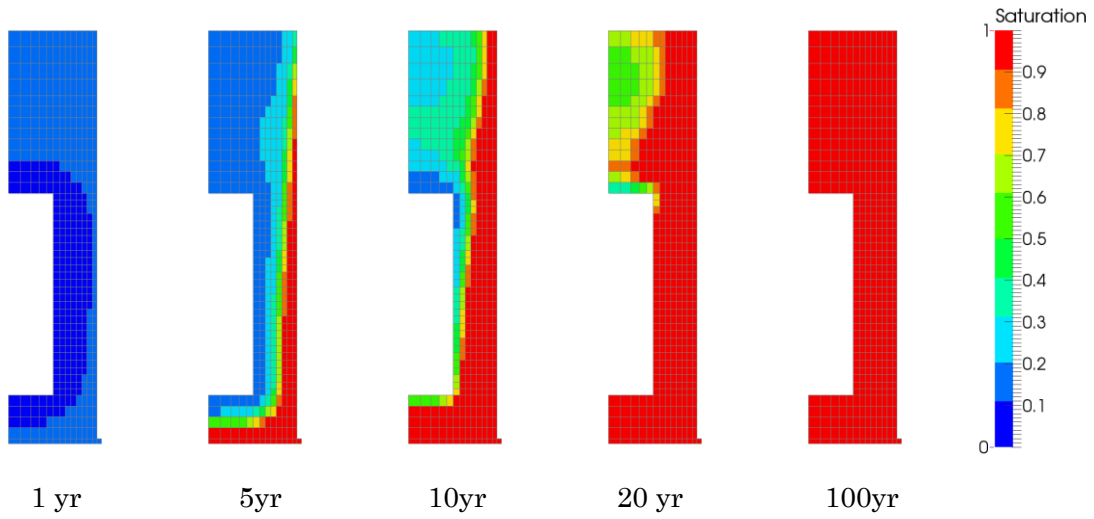


図 6.1.4-8 THM-0 ベントナイト部分・飽和度分布

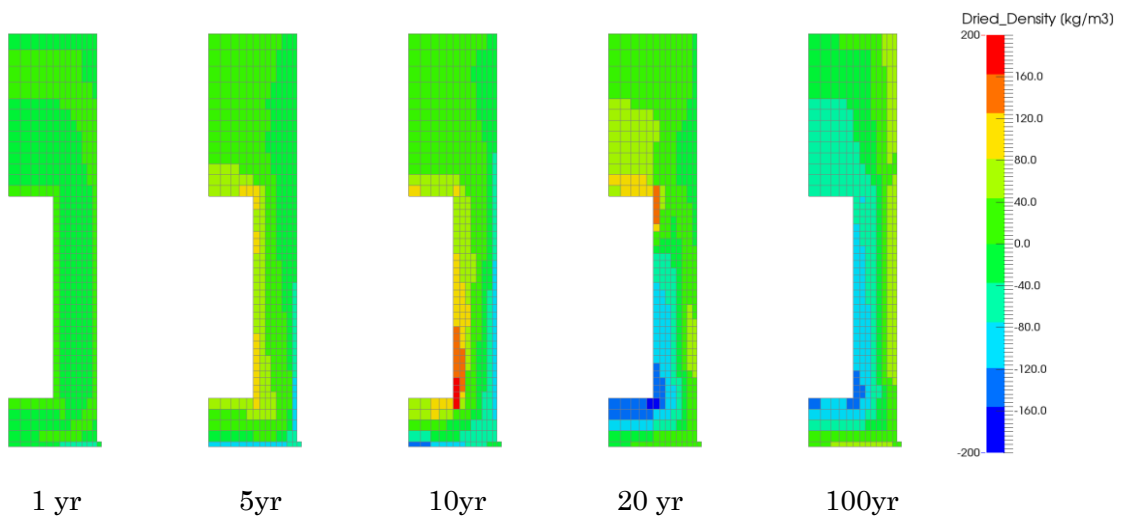


図 6.1.4-9 THM-0 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

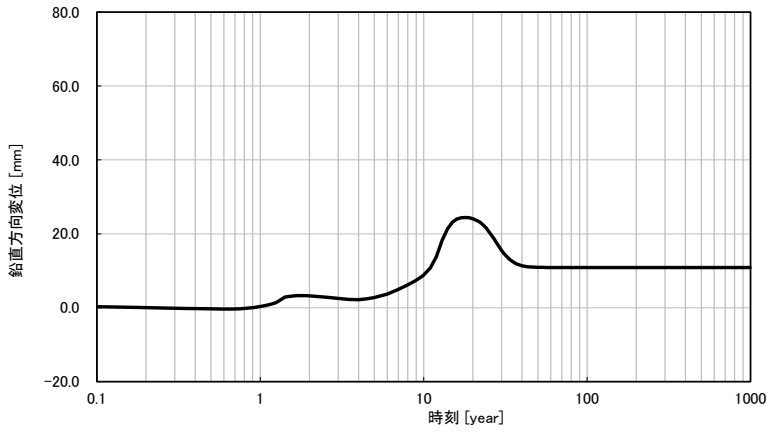


図 6.1.4-10 THM-0 鉛直方向の変位時刻歴

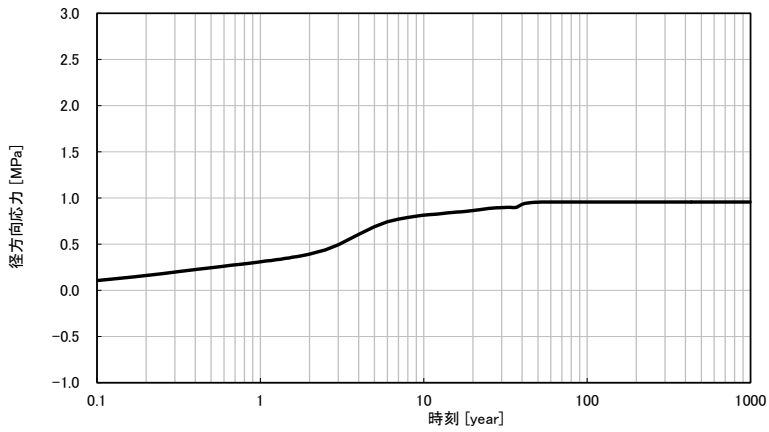


図 6.1.4-11 THM-0 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

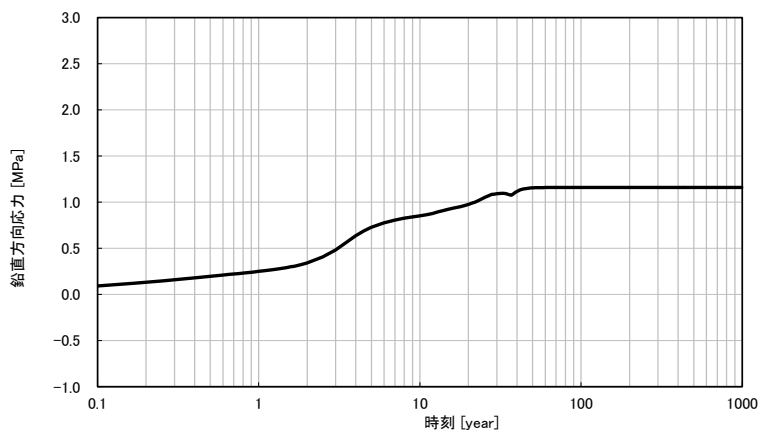
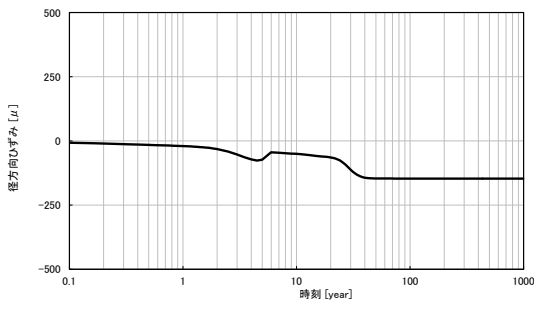
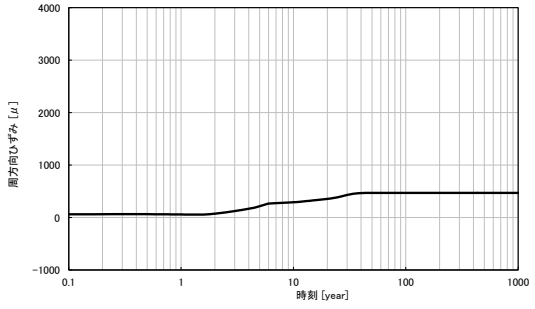


図 6.1.4-12 THM-0 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

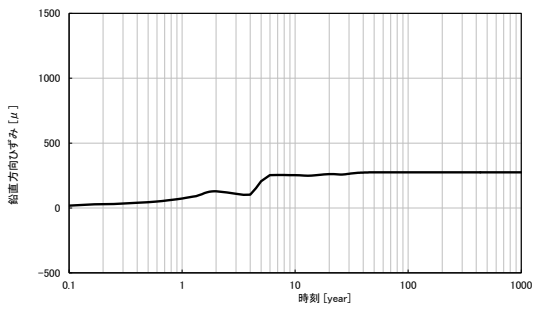


(a)径方向

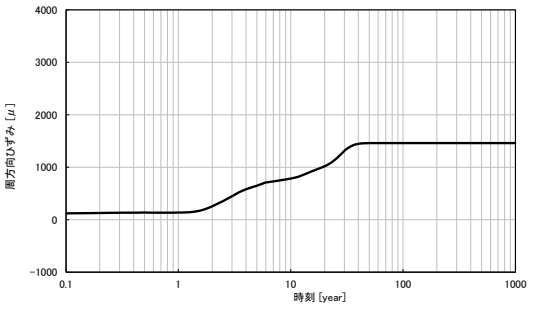


(b)周方向

図 6.1.4-13 THM-0 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

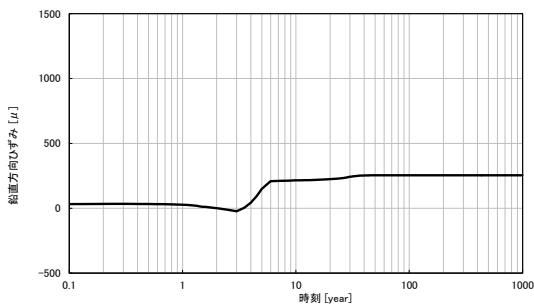


(a)鉛直方向

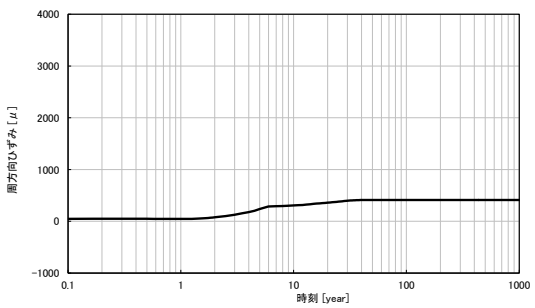


(b)周方向

図 6.1.4-14 THM-0 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.4-15 THM-0 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.5 THM-1

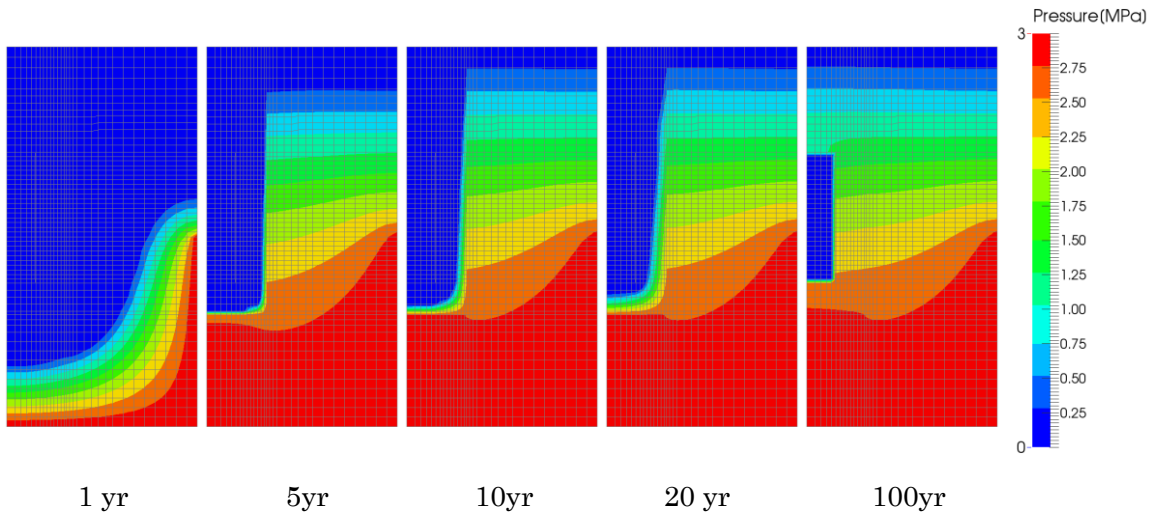


図 6.1.5-1 THM-1 岩盤部分・間隙水压分布

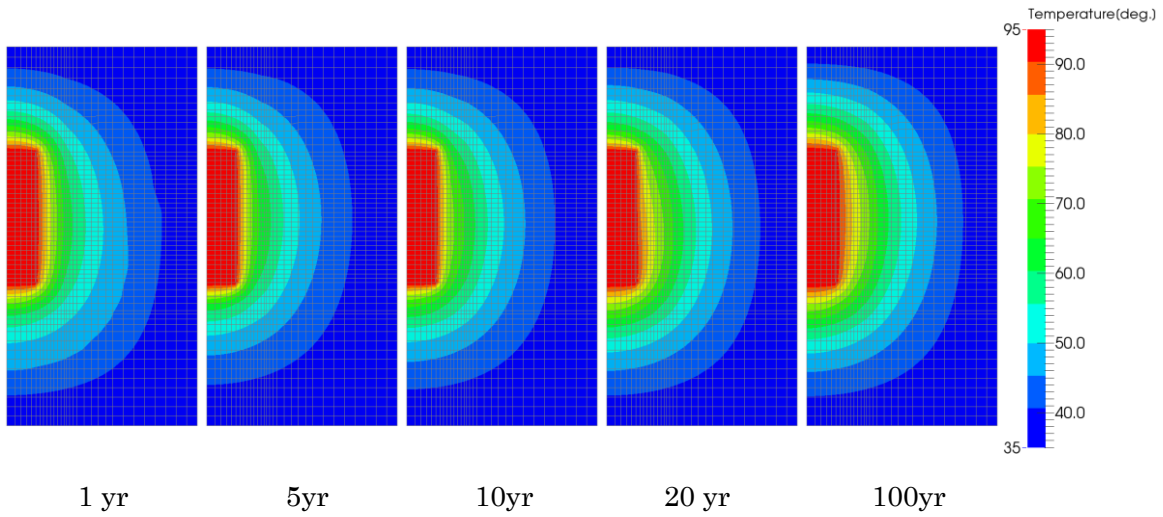


図 6.1.5-2 THM-1 岩盤部分・温度分布

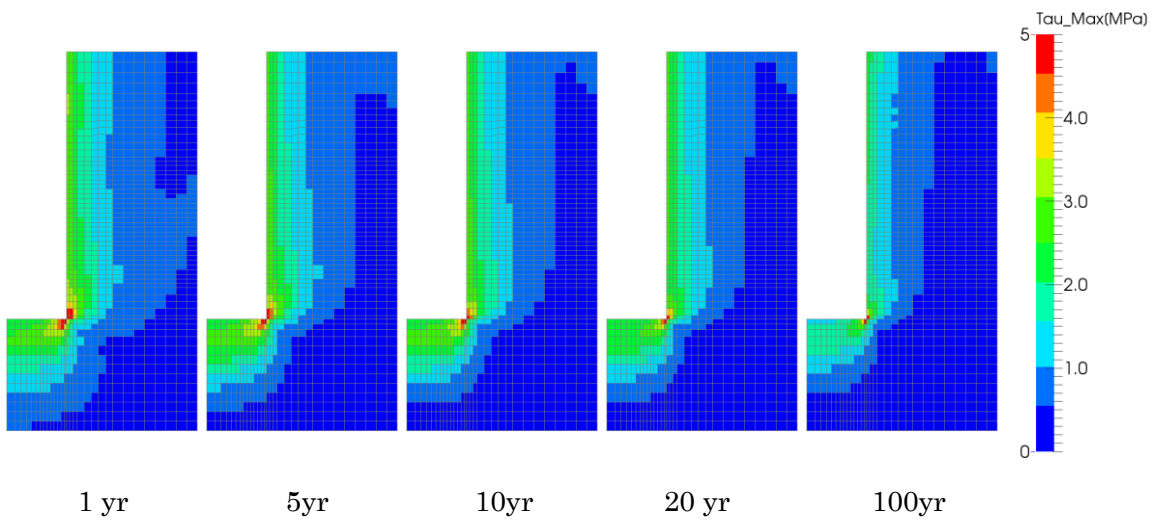


図 6.1.5-3 THM-1 岩盤部分・主せん断応力分布

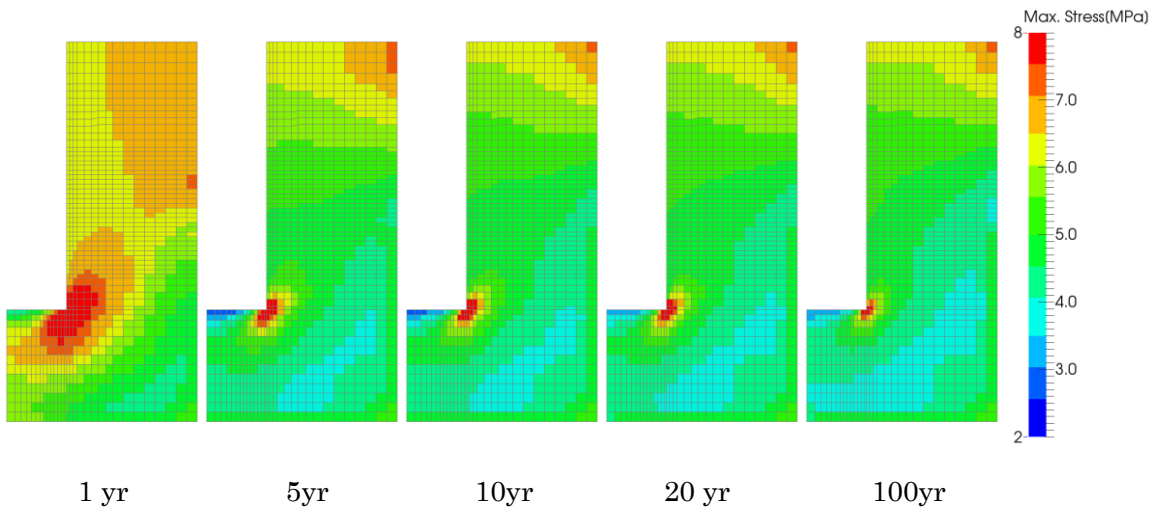


図 6.1.5-4 THM-1 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

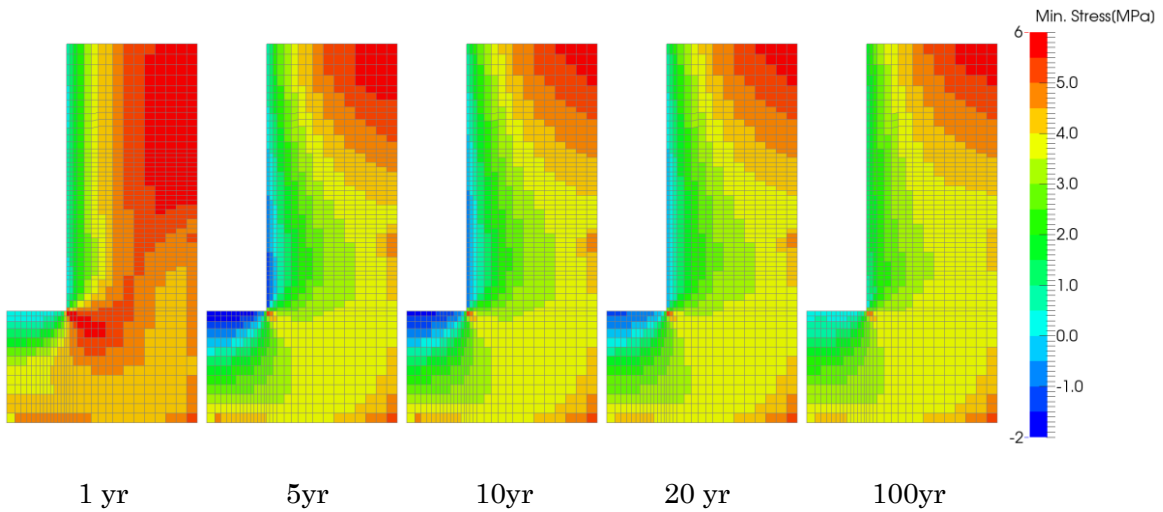


図 6.1.5-5 THM-1 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

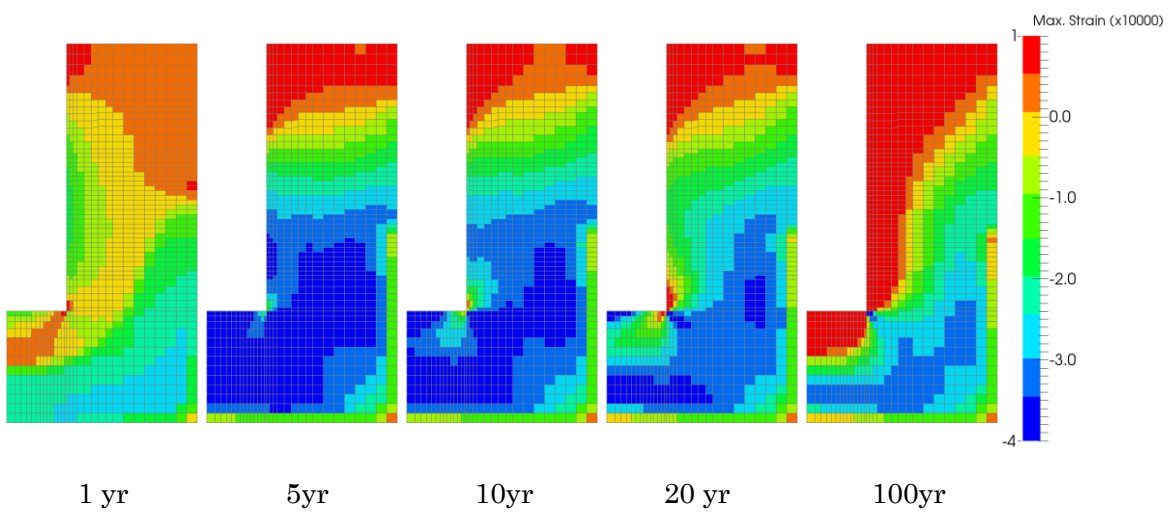


図 6.1.5-6 THM-1 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

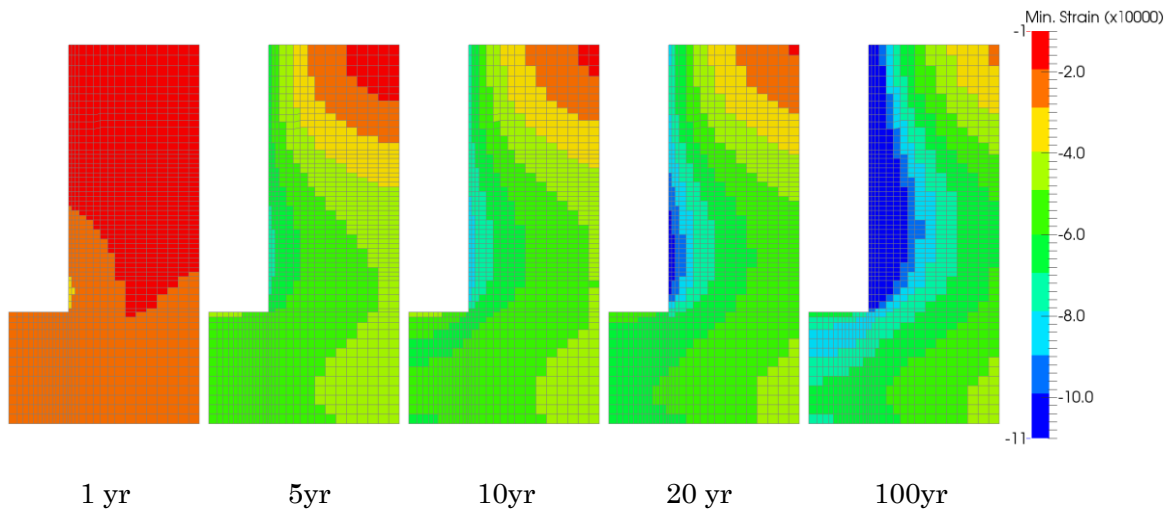


図 6.1.5-7 THM-1 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

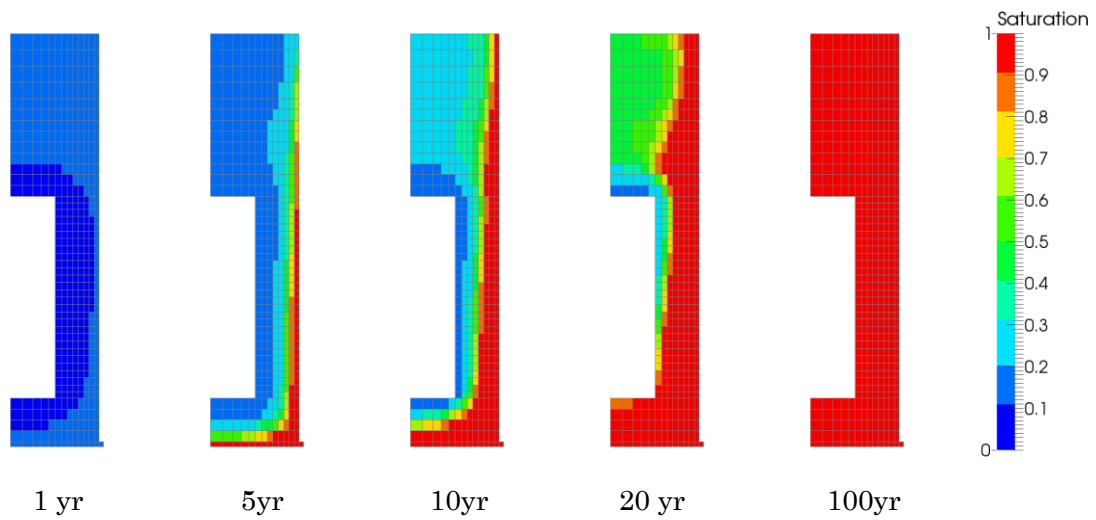


図 6.1.5-8 THM-1 ベントナイト部分・飽和度分布

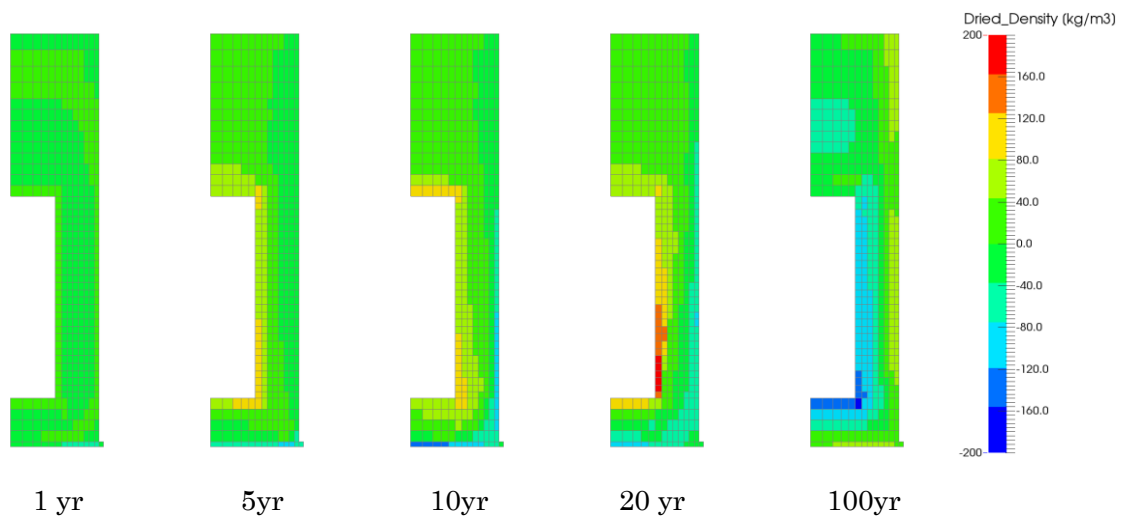


図 6.1.5-9 THM-1 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

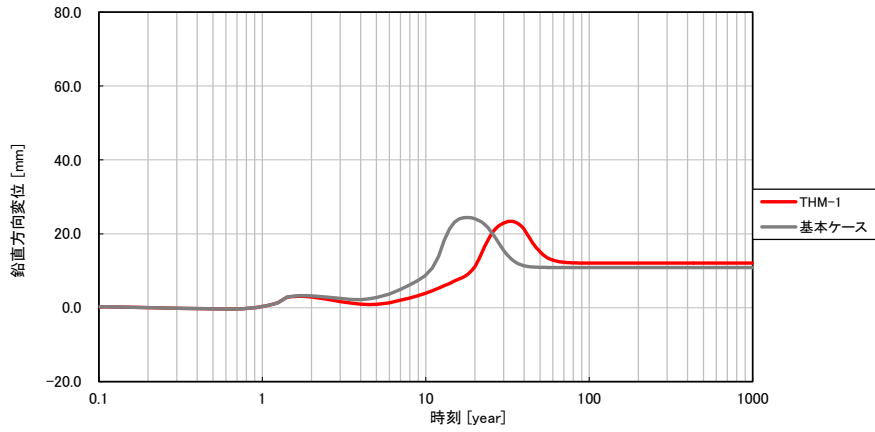


図 6.1.5-10 THM-1 鉛直方向の変位時刻歴

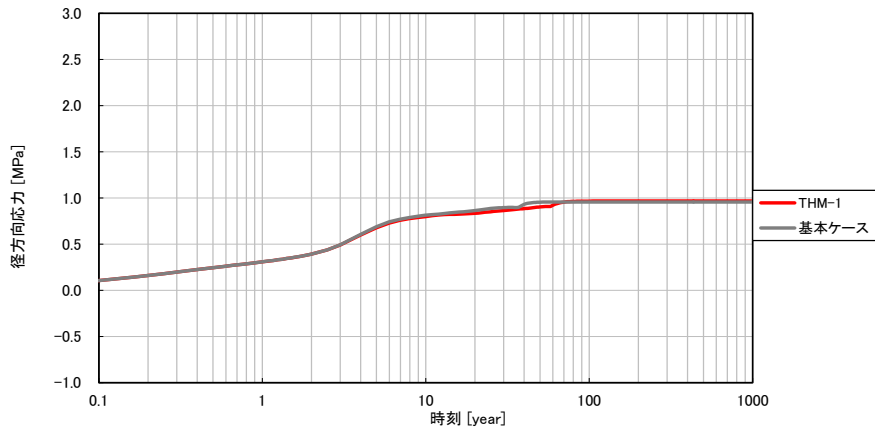


図 6.1.5-11 THM-1 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

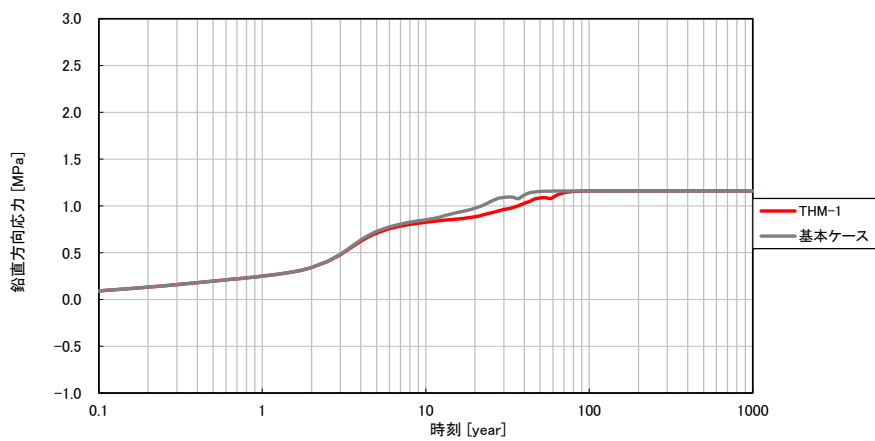
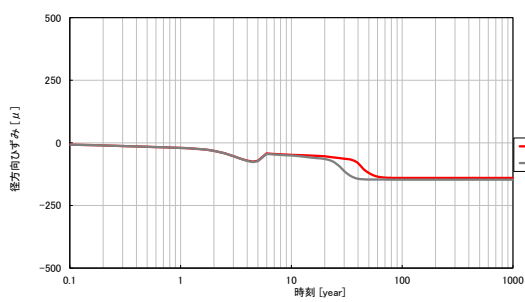
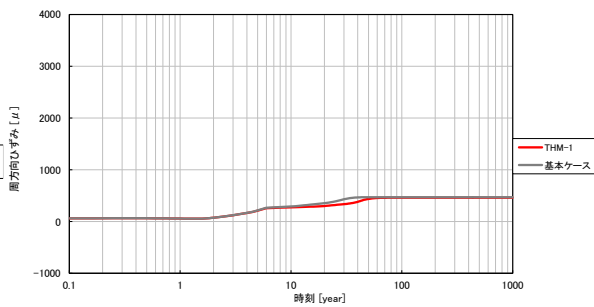


図 6.1.5-12 THM-1 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

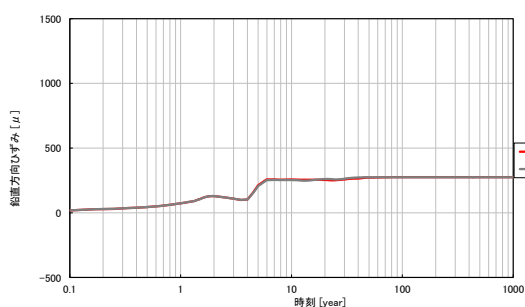


(a)径方向

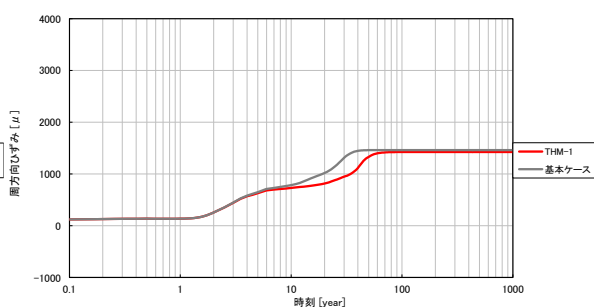


(b)周方向

図 6.1.5-13 THM-1 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

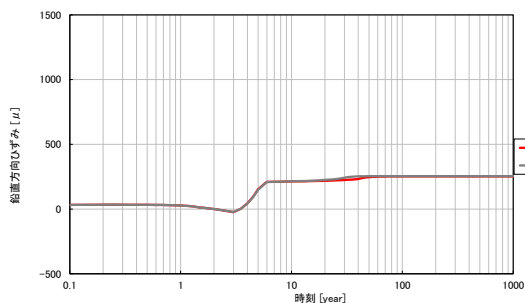


(a)鉛直方向

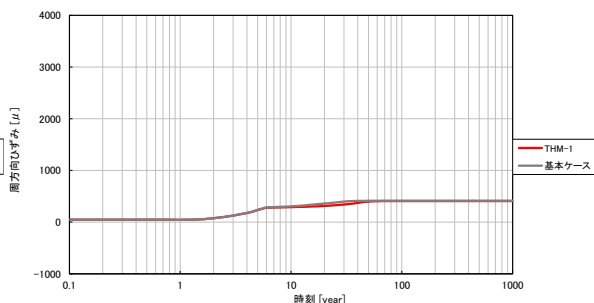


(b)周方向

図 6.1.5-14 THM-1 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.5-15 THM-1 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.6 THM-2

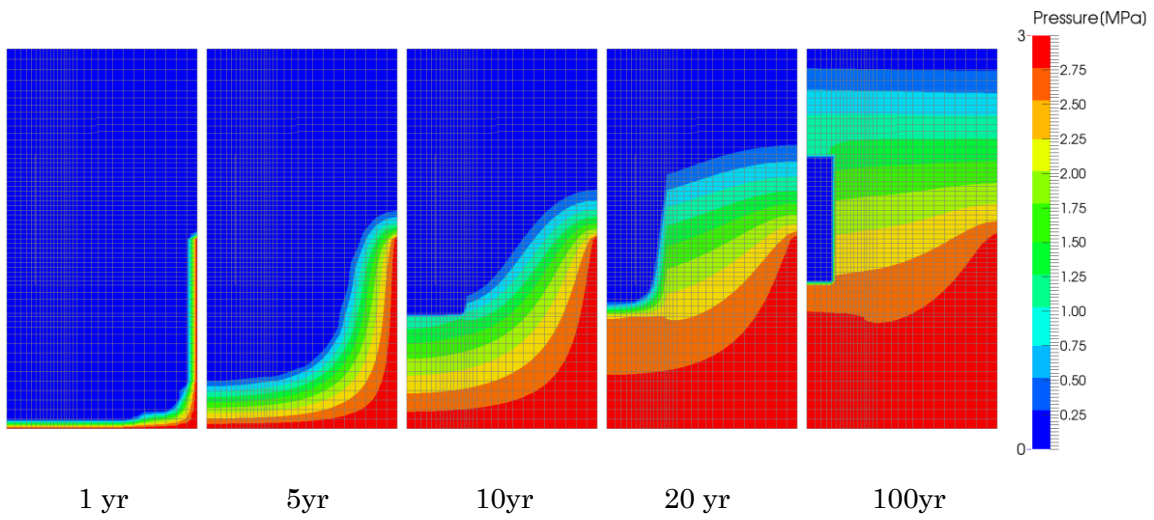


図 6.1.6-1 THM-2 岩盤部分・間隙水圧分布

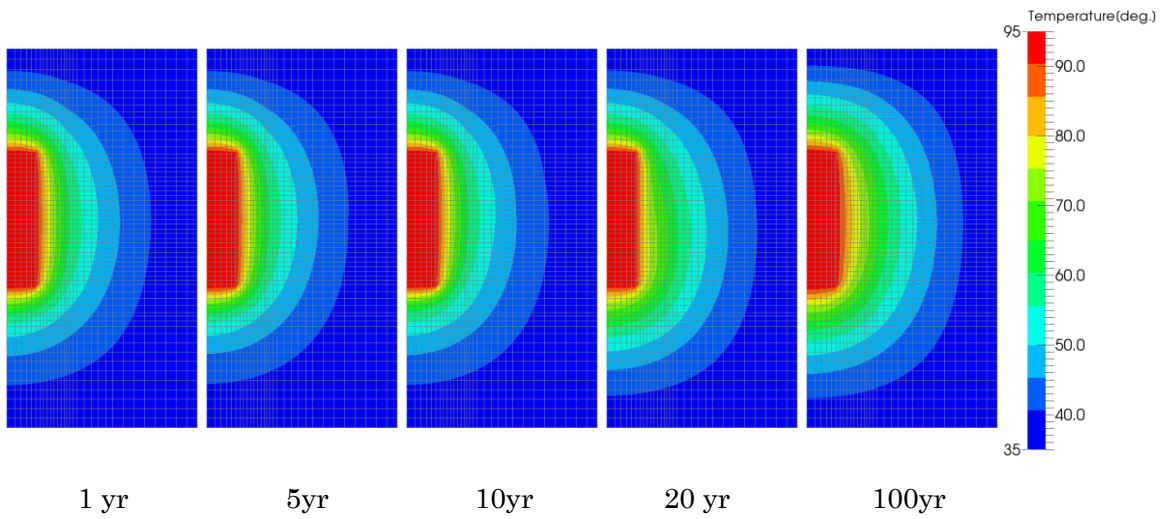


図 6.1.6-2 THM-2 岩盤部分・温度分布

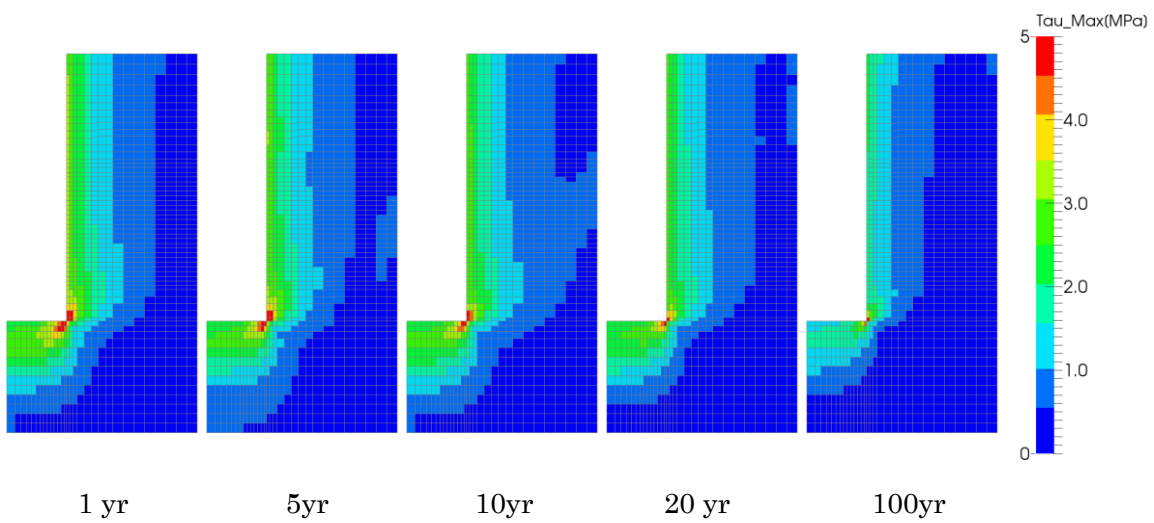


図 6.1.6-3 THM-2 岩盤部分・主せん断応力分布

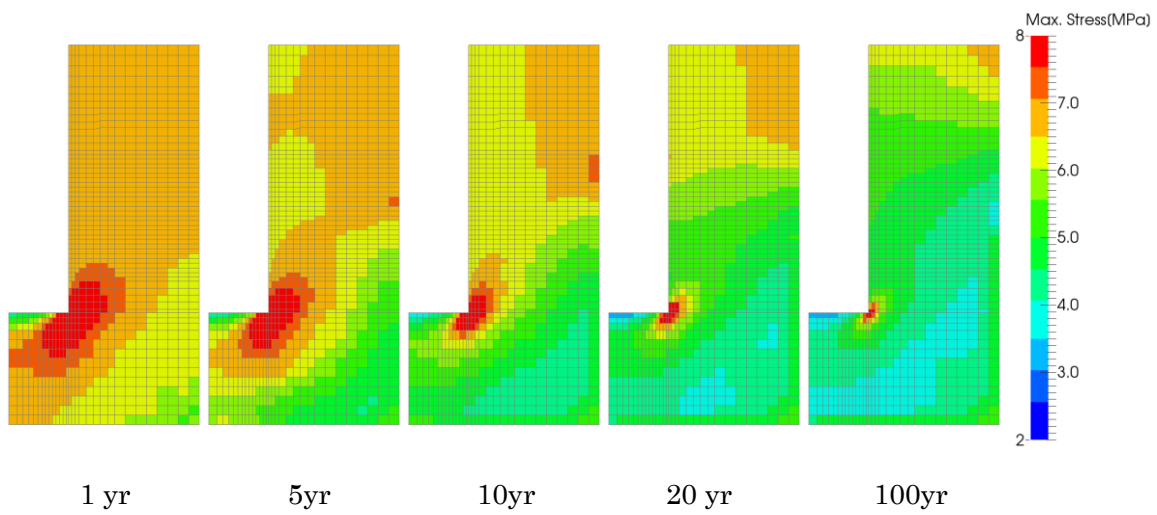


図 6.1.6-4 THM-2 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

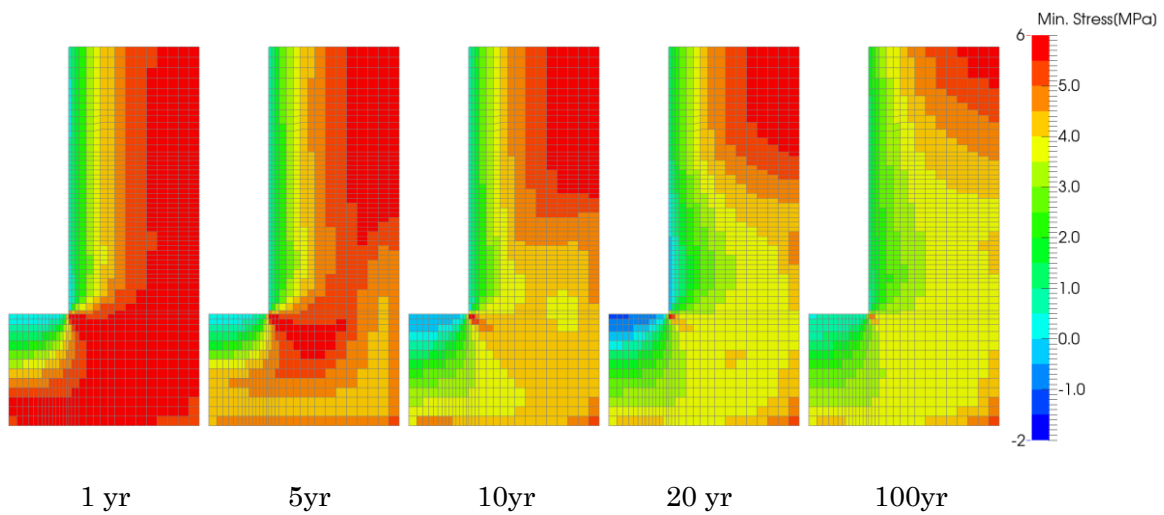


図 6.1.6-5 THM-2 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

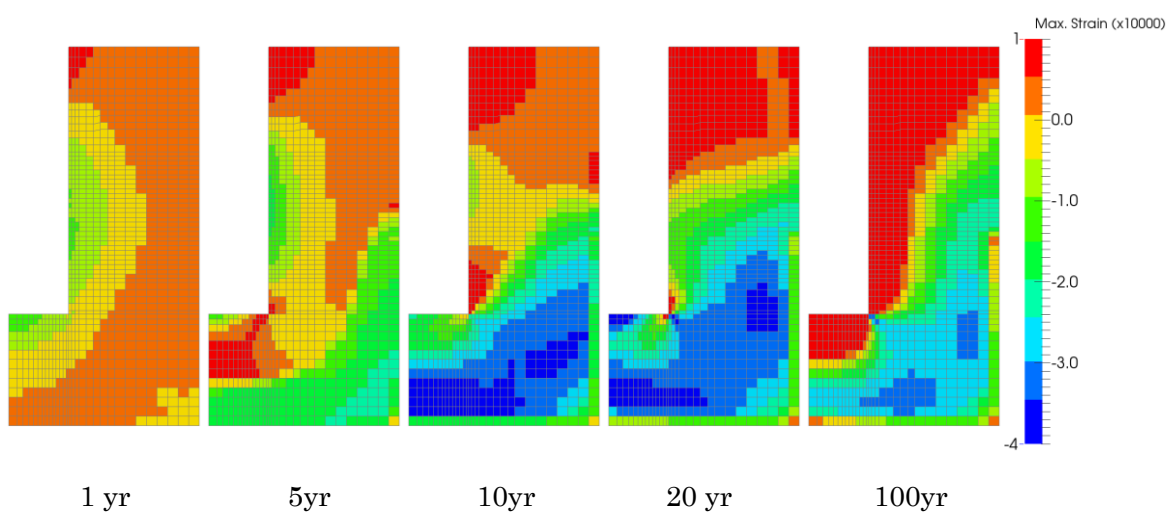


図 6.1.6-6 THM-2 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

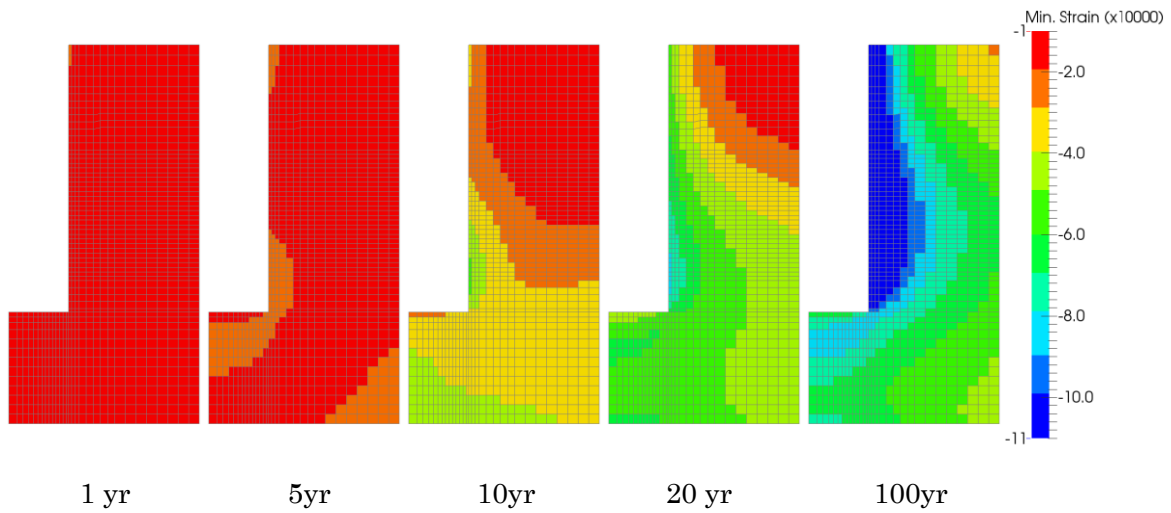


図 6.1.6-7 THM-2 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

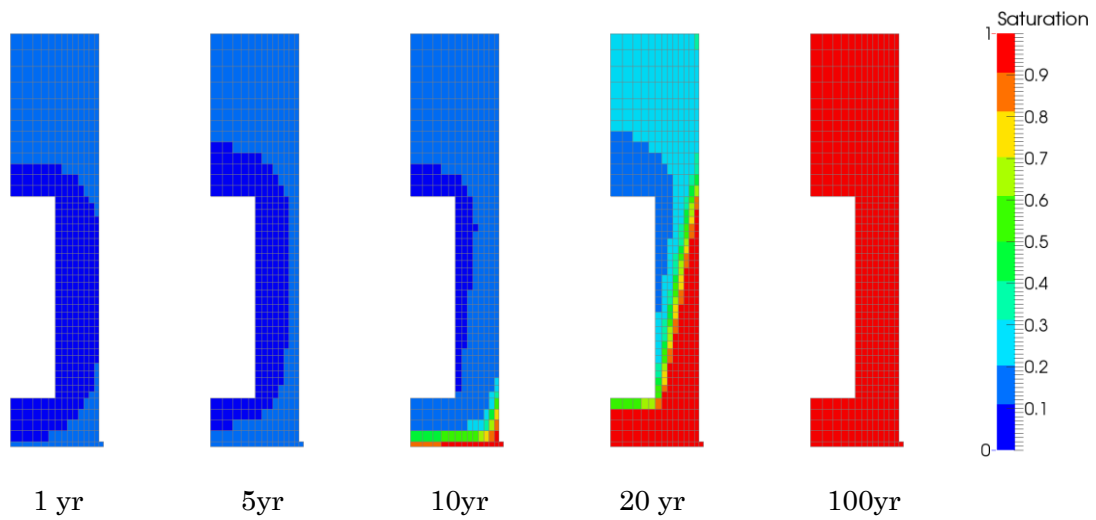


図 6.1.6-8 THM-2 ベントナイト部分・飽和度分布

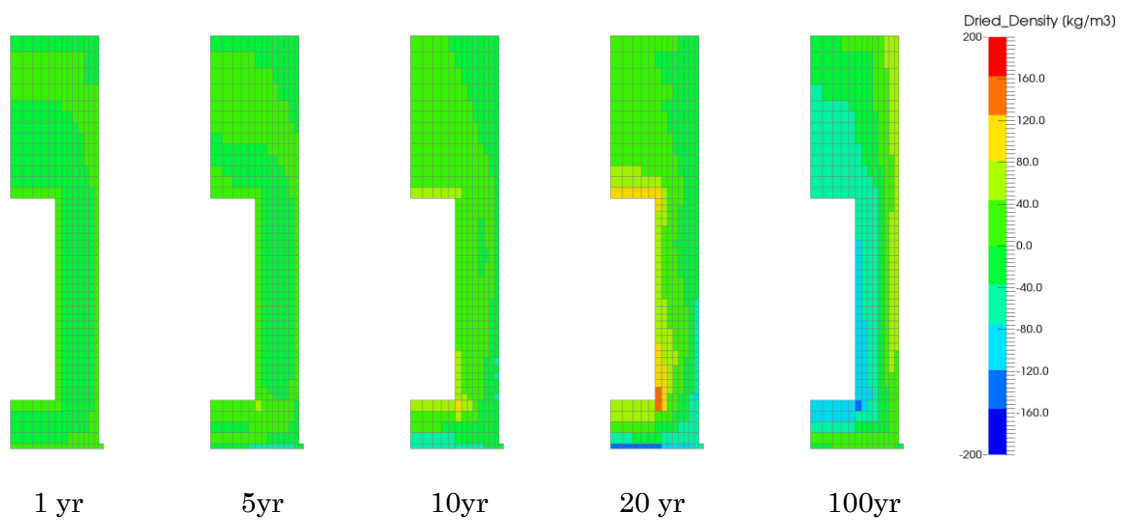


図 6.1.6-9 THM-2 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

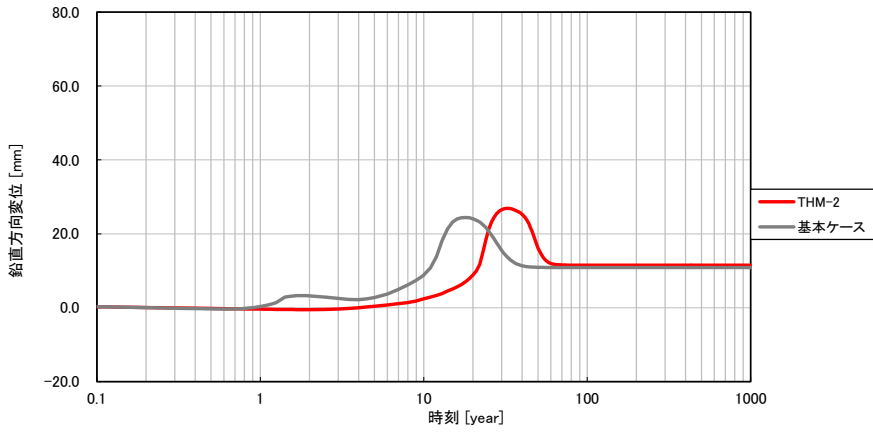


図 6.1.6-10 THM-2 鉛直方向の変位時刻歴

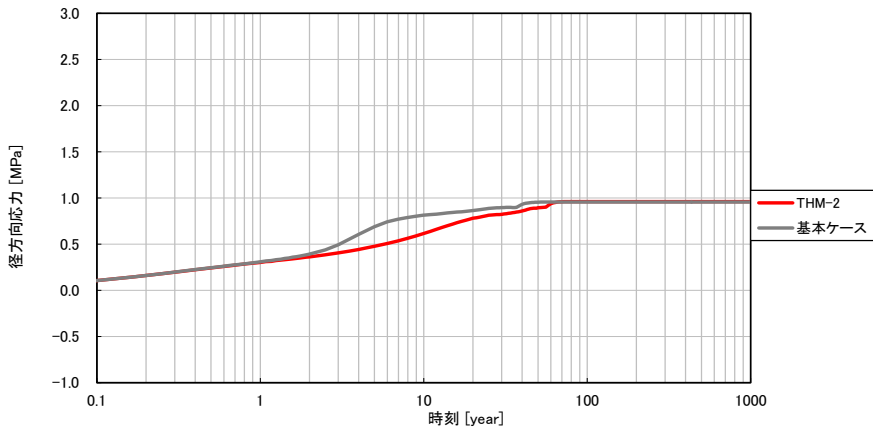


図 6.1.6-11 THM-2 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

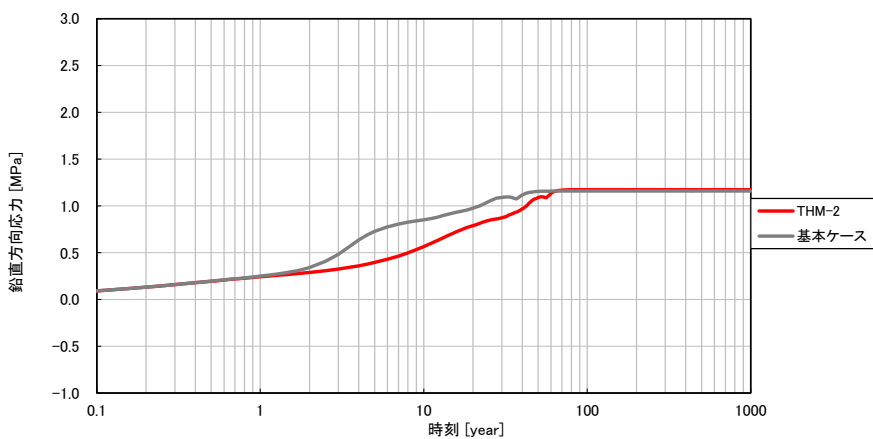
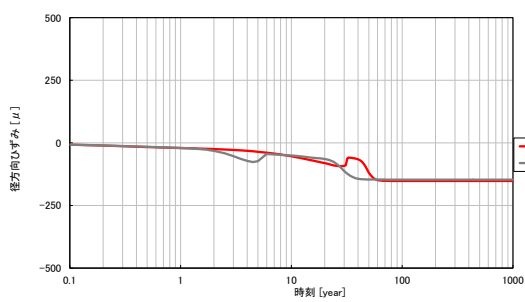
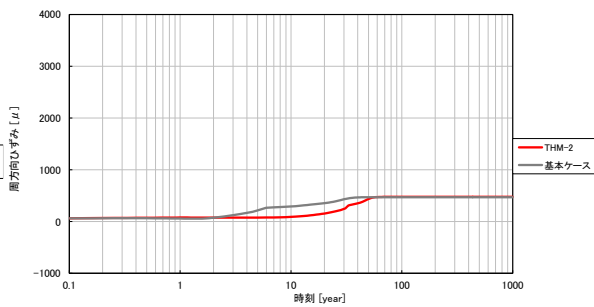


図 6.1.6-12 THM-2 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

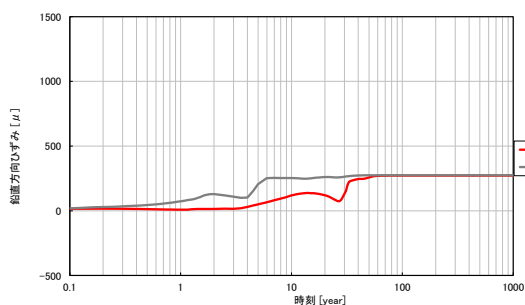


(a)径方向

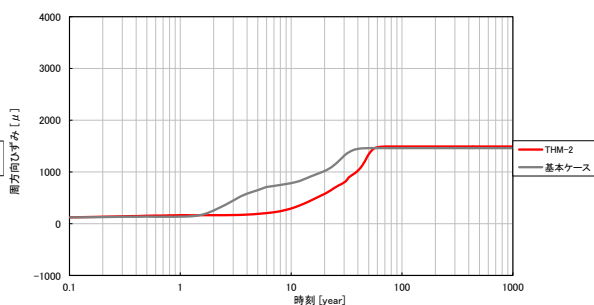


(b)周方向

図 6.1.6-13 THM-2 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

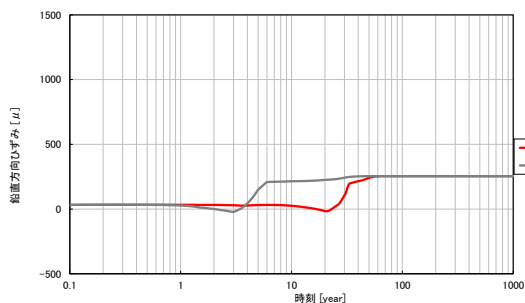


(a)鉛直方向

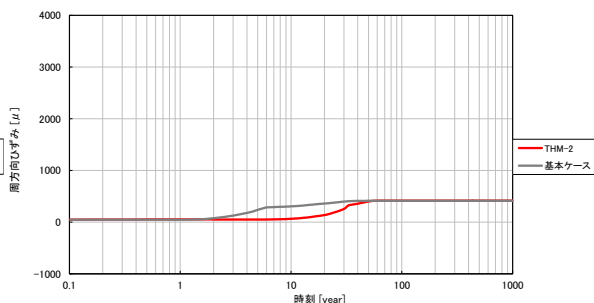


(b)周方向

図 6.1.6-14 THM-2 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.6-15 THM-2 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.7 THM-3

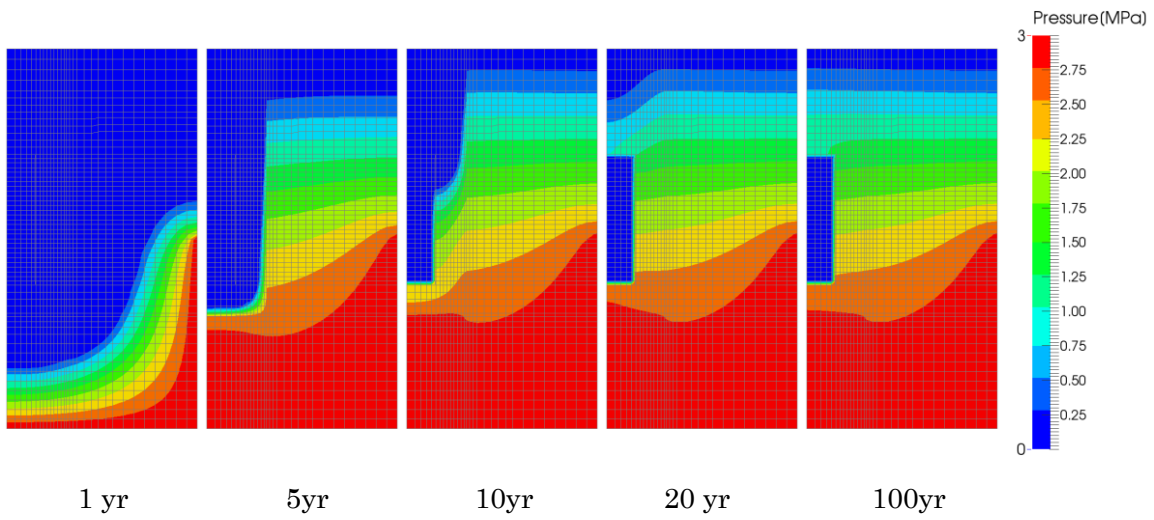


図 6.1.7-1 THM-3 岩盤部分・間隙水圧分布

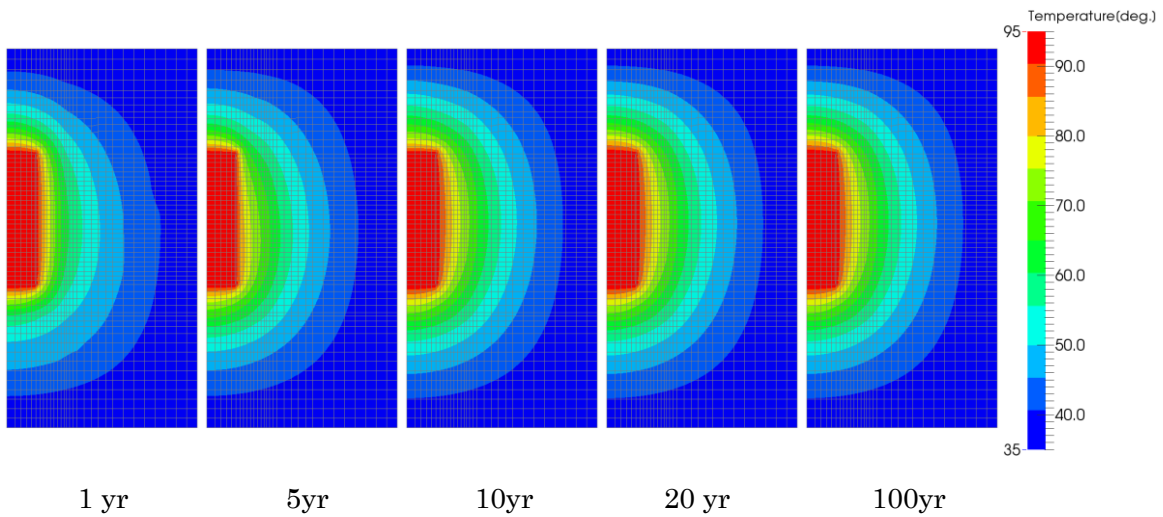


図 6.1.7-2 THM-3 岩盤部分・温度分布

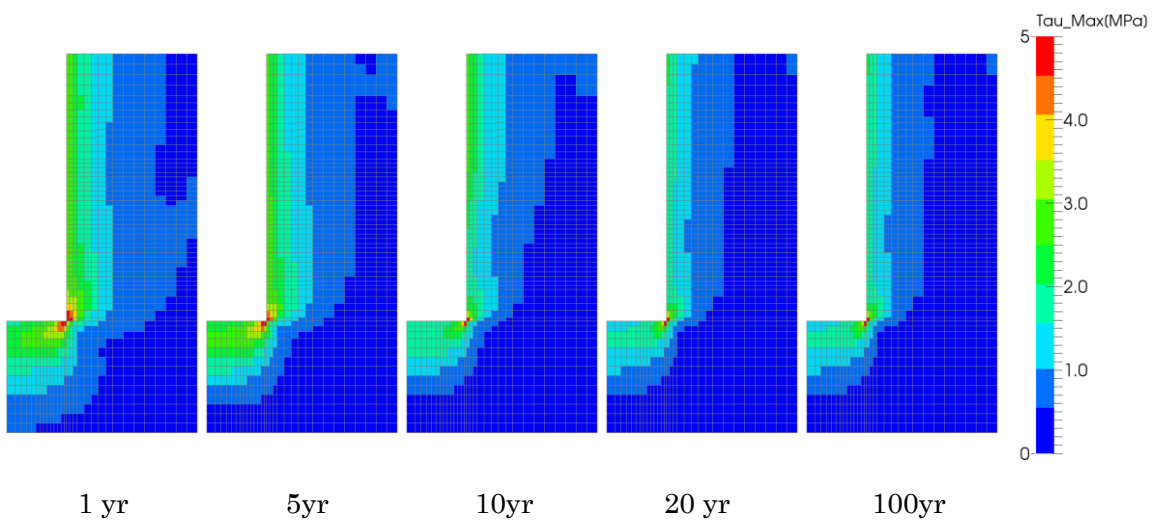


図 6.1.7-3 THM-3 岩盤部分・主せん断応力分布

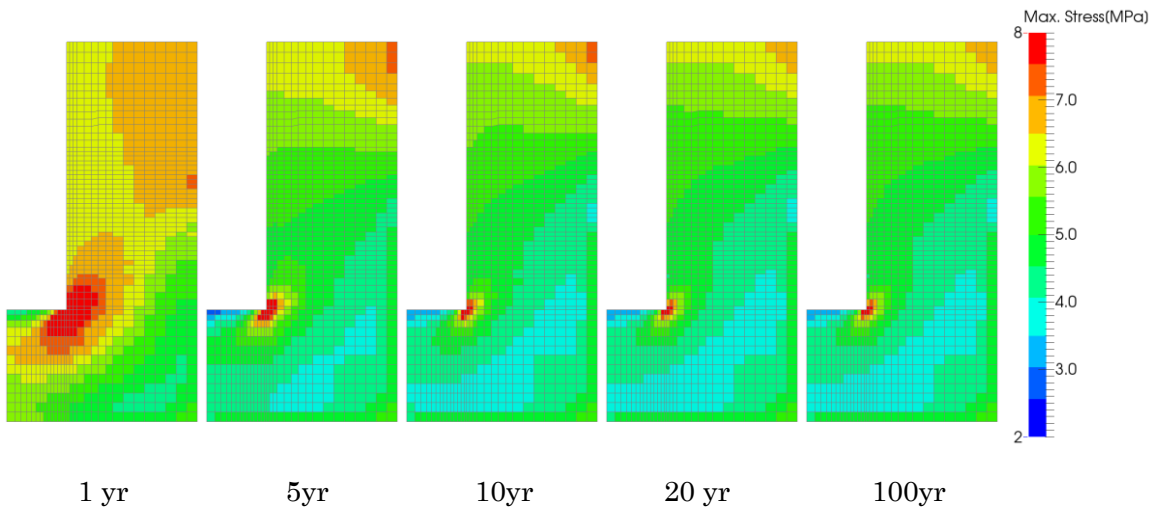


図 6.1.7-4 THM-3 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

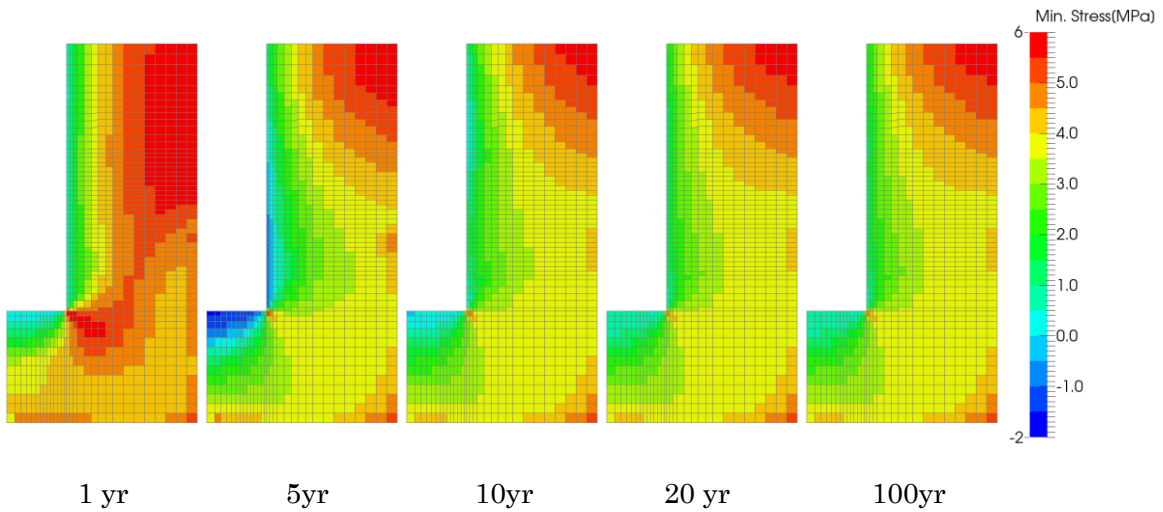


図 6.1.7-5 THM-3 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

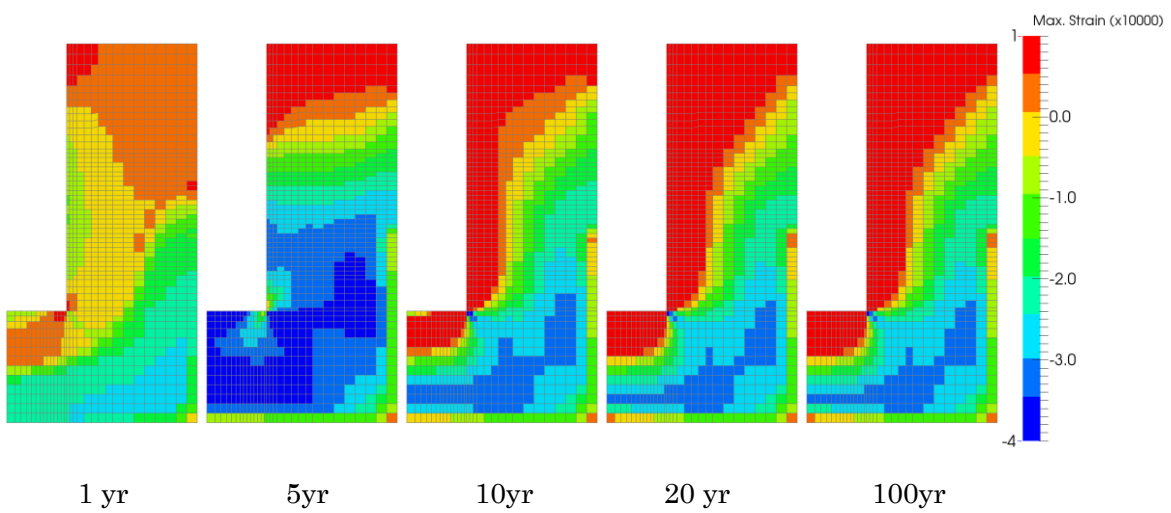


図 6.1.7-6 THM-3 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

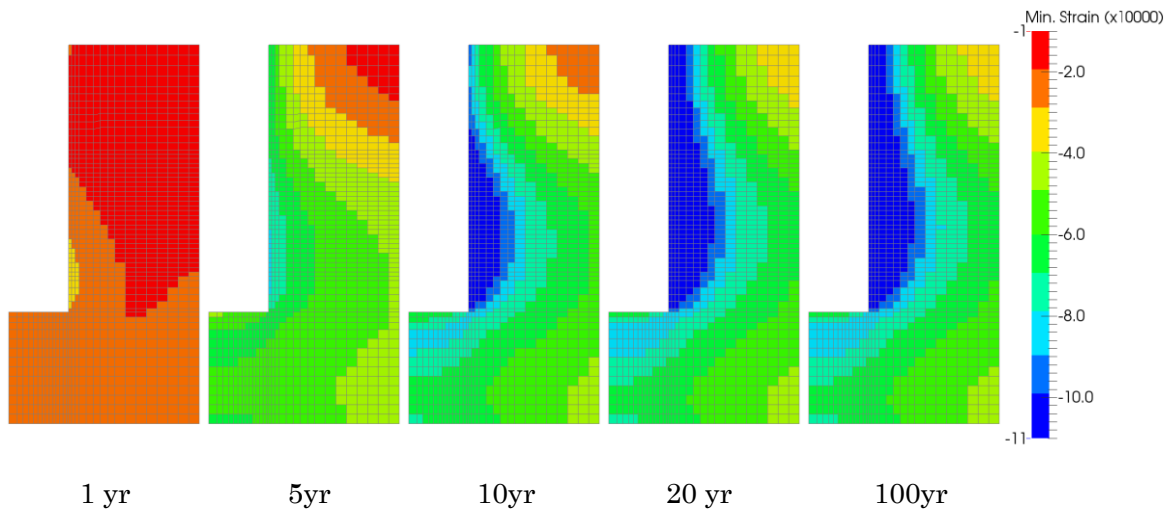


図 6.1.7-7 THM-3 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

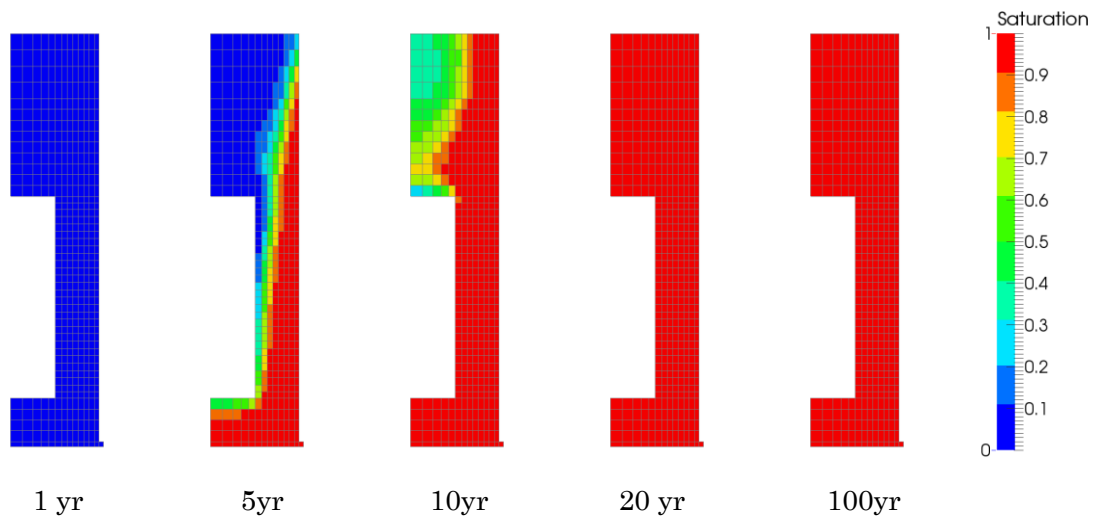


図 6.1.7-8 THM-3 ベントナイト部分・飽和度分布

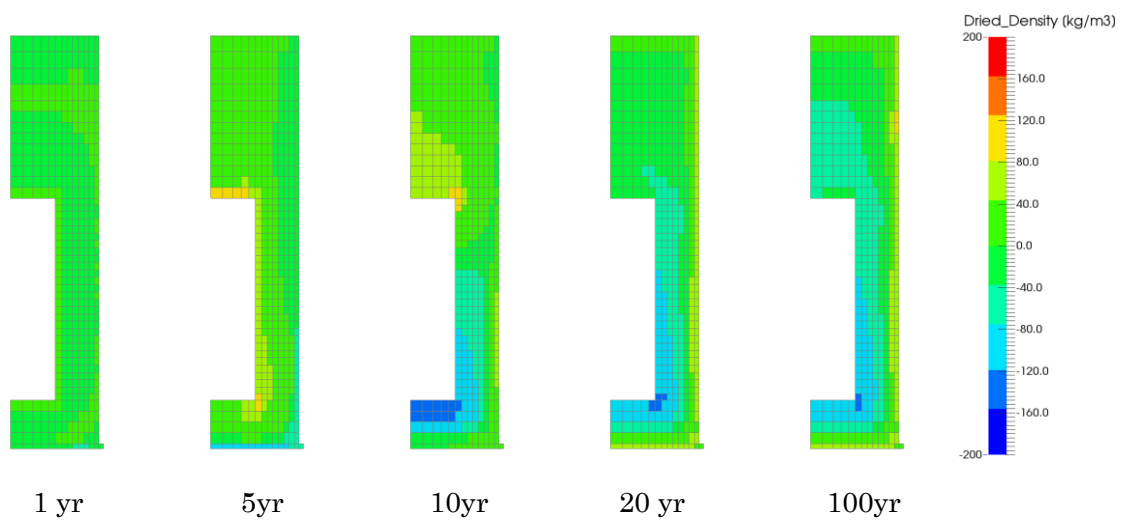


図 6.1.7-9 THM-3 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

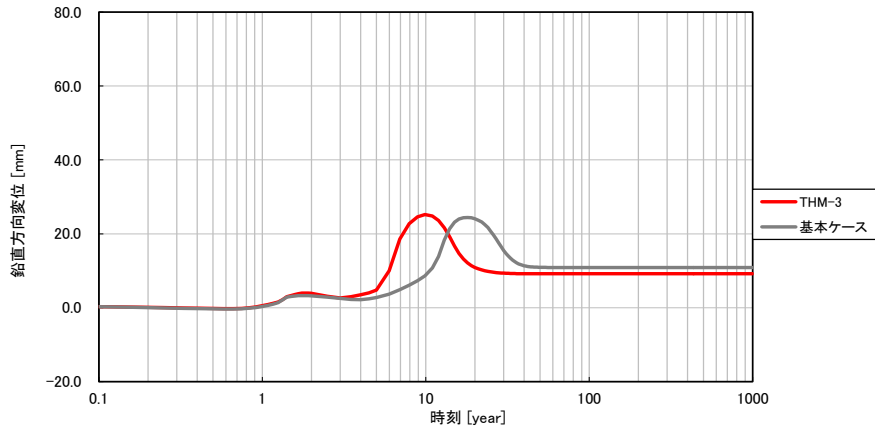


図 6.1.7-10 THM-3 鉛直方向の変位時刻歴

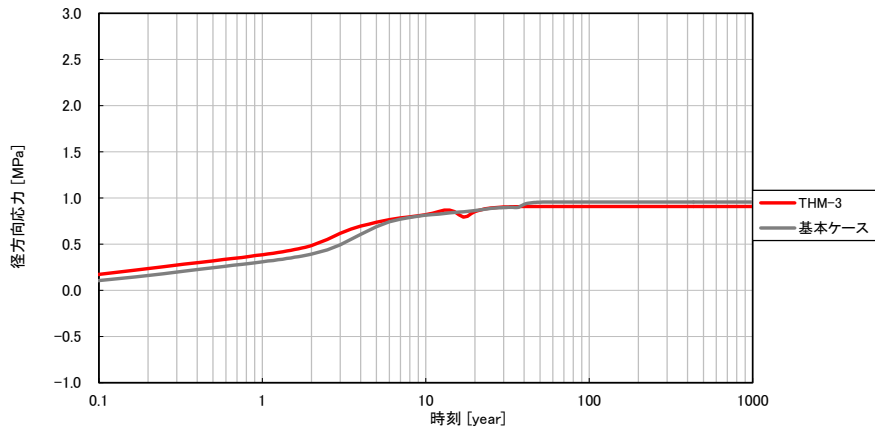


図 6.1.7-11 THM-3 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

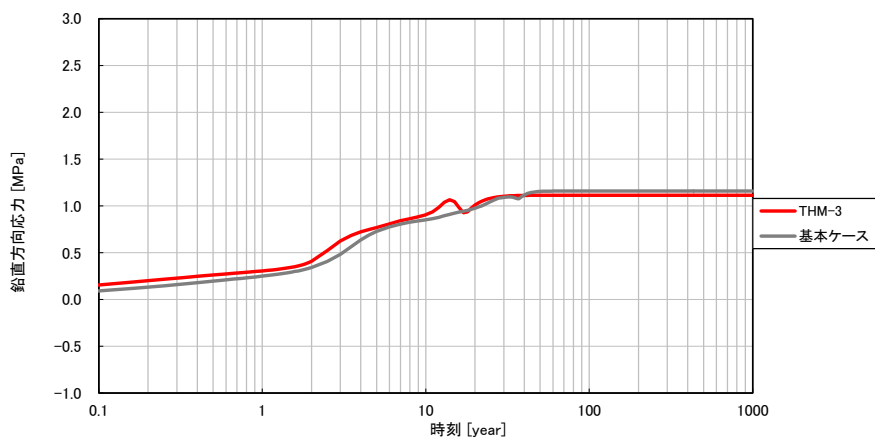
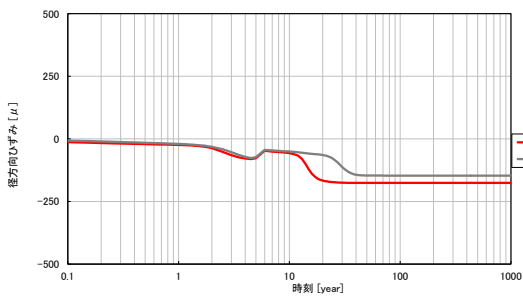
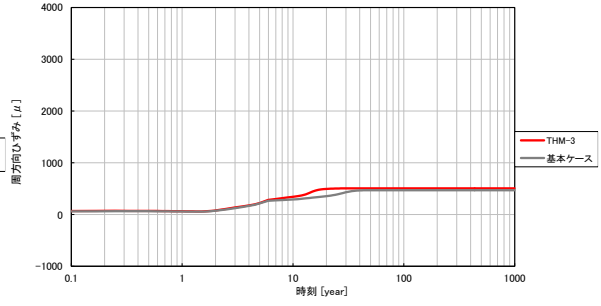


図 6.1.7-12 THM-3 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

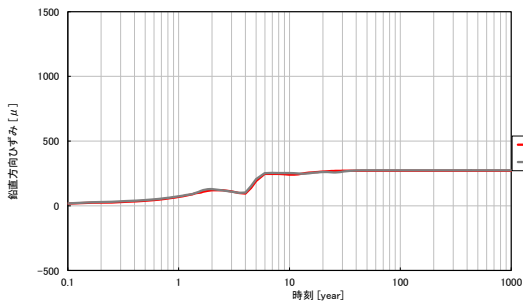


(a)径方向

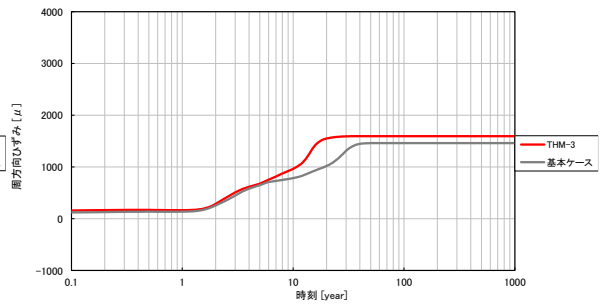


(b)周方向

図 6.1.7-13 THM-3 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

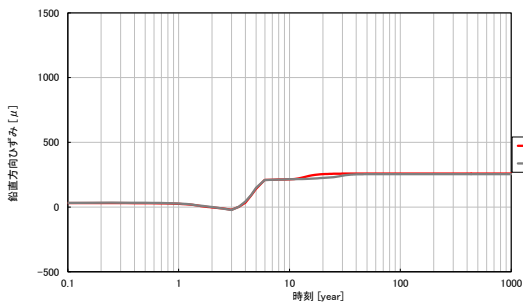


(a)鉛直方向

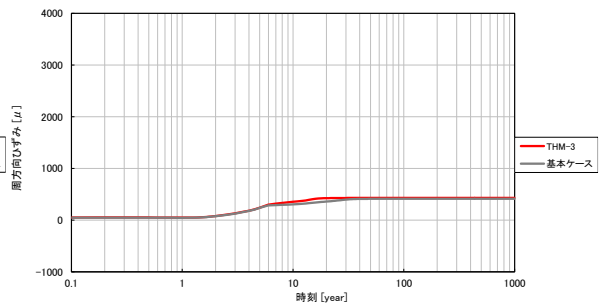


(b)周方向

図 6.1.7-14 THM-3 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.7-15 THM-3 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.8 THM-4

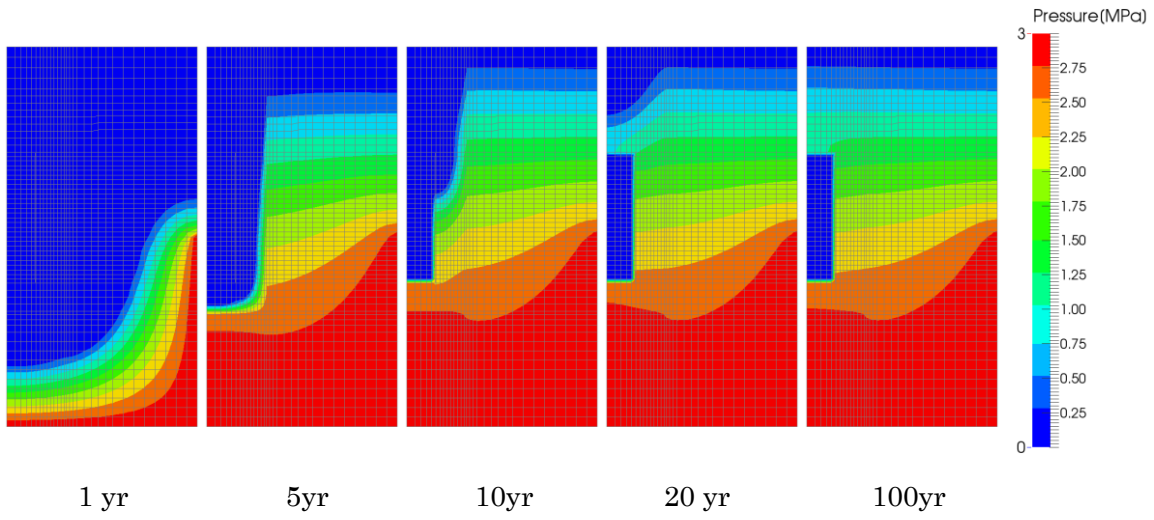


図 6.1.8-1 THM-4 岩盤部分・間隙水压分布

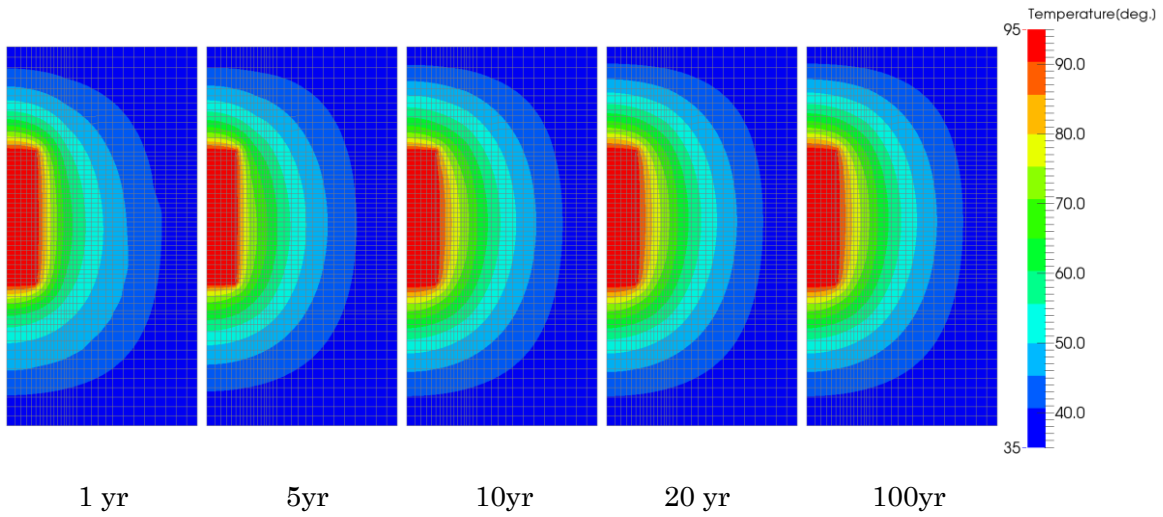


図 6.1.8-2 THM-4 岩盤部分・温度分布

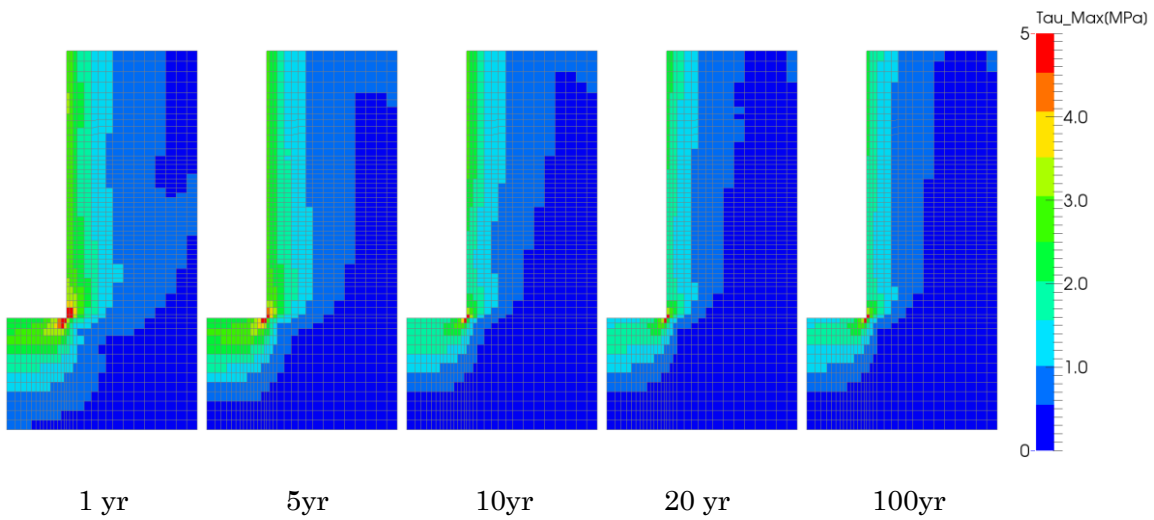


図 6.1.8-3 THM-4 岩盤部分・主せん断応力分布

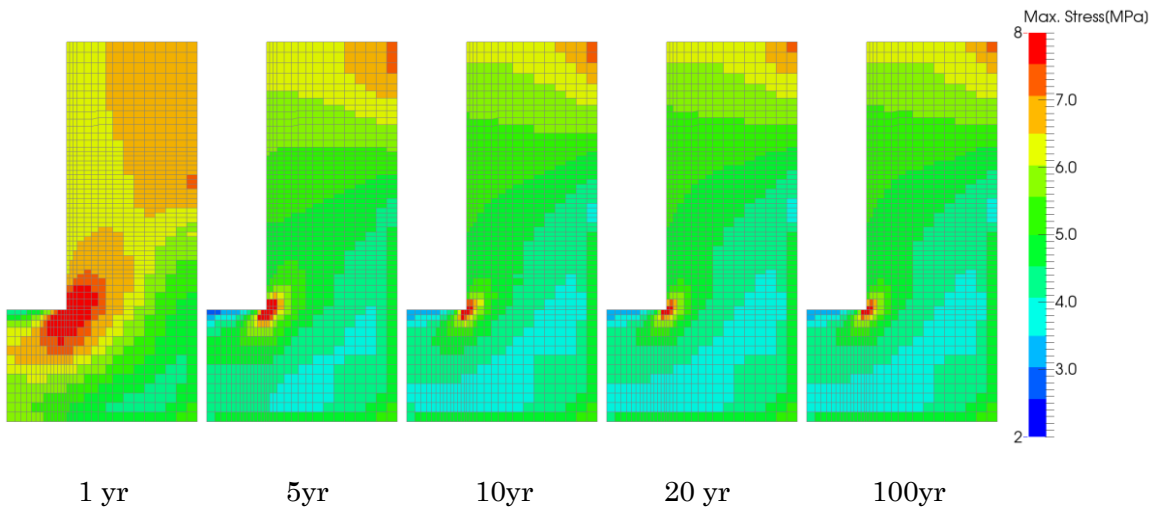


図 6.1.8-4 THM-4 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

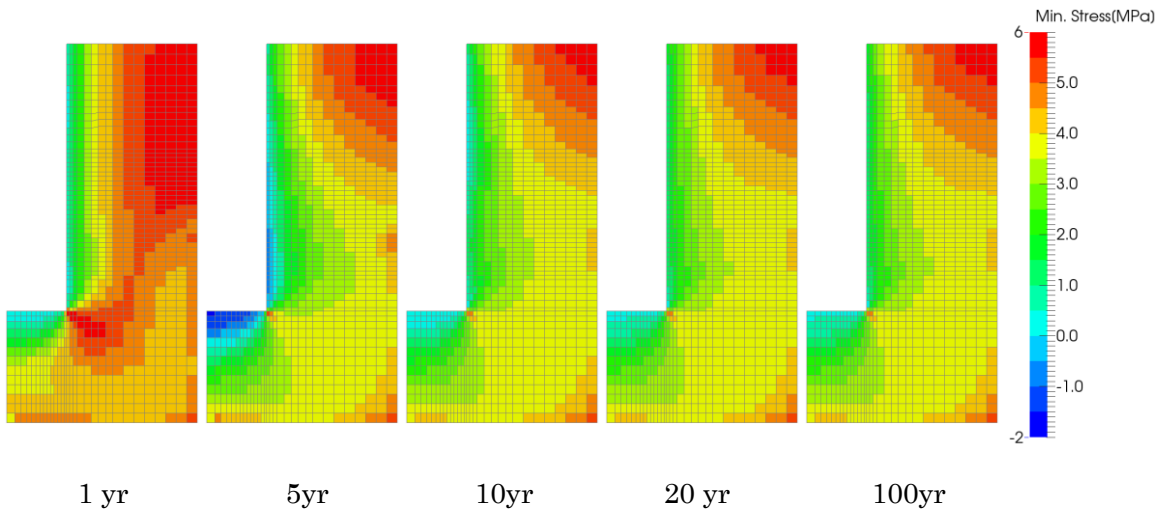


図 6.1.8-5 THM-4 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

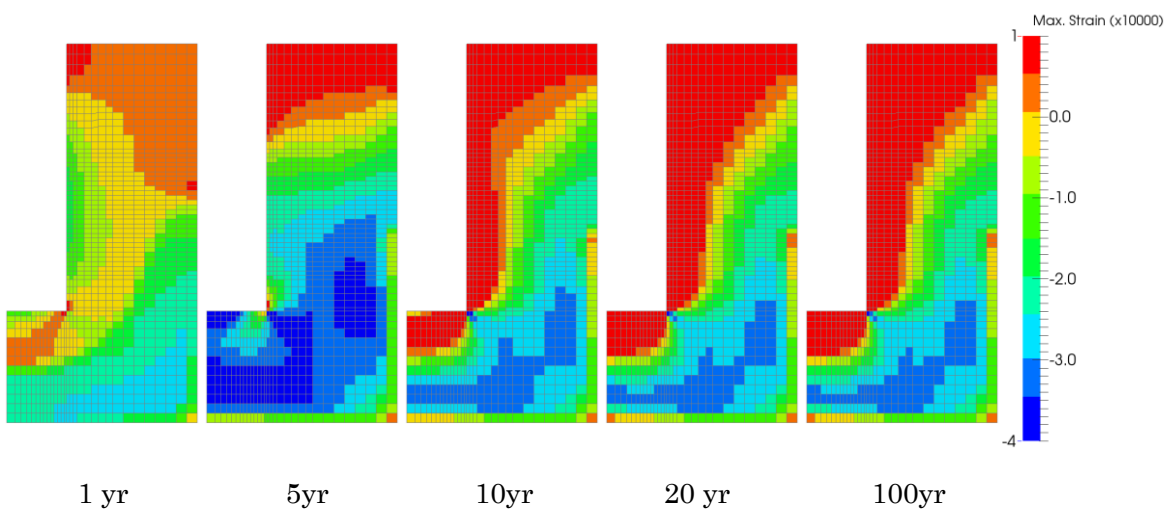


図 6.1.8-6 THM-4 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

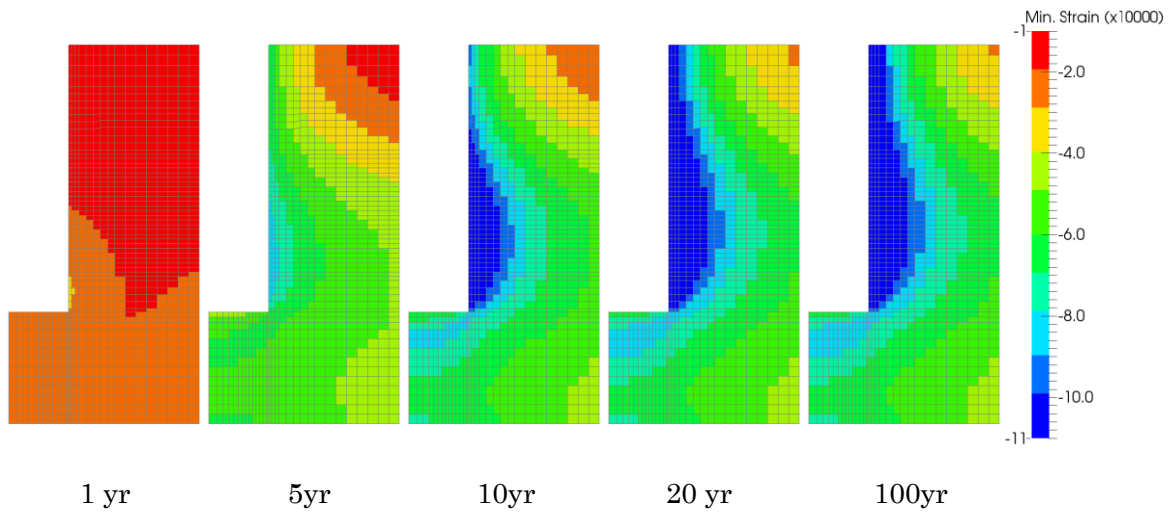


図 6.1.8-7 THM-4 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

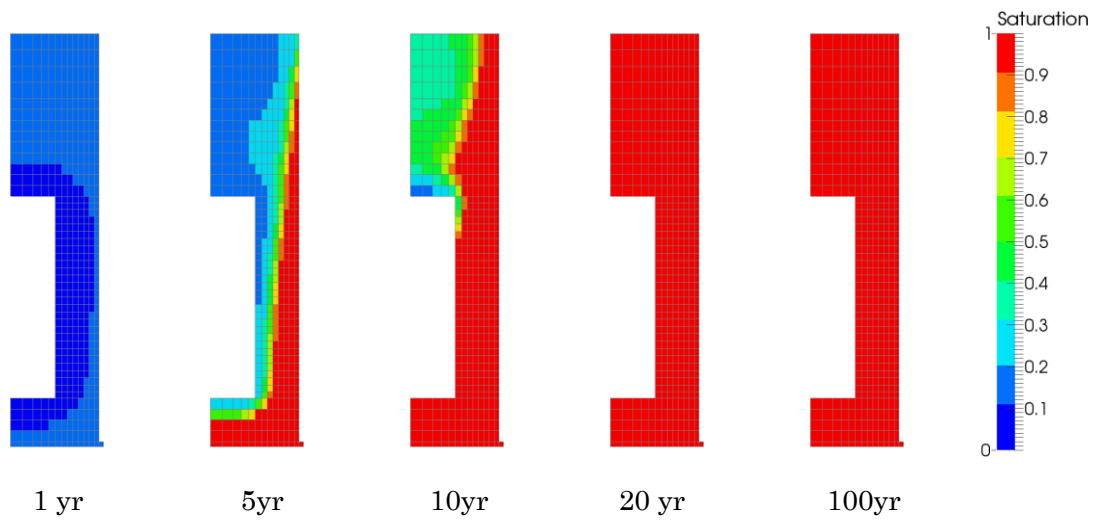


図 6.1.8-8 THM-4 ベントナイト部分・飽和度分布

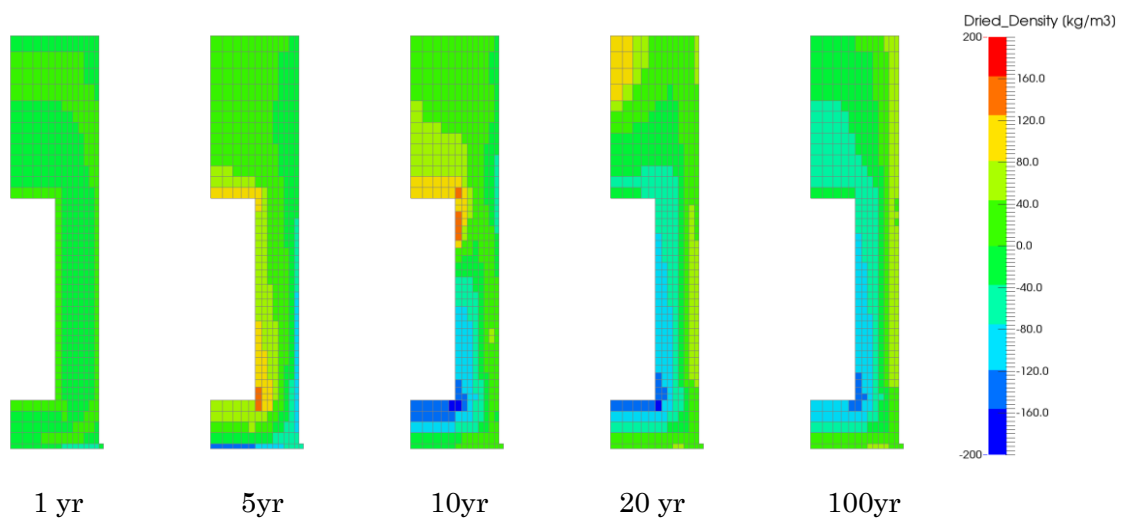


図 6.1.8-9 THM-4 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

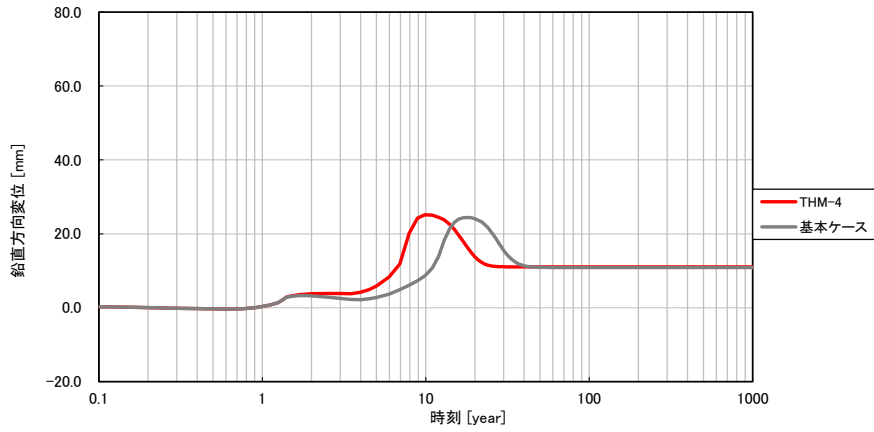


図 6.1.8-10 THM-4 鉛直方向の変位時刻歴

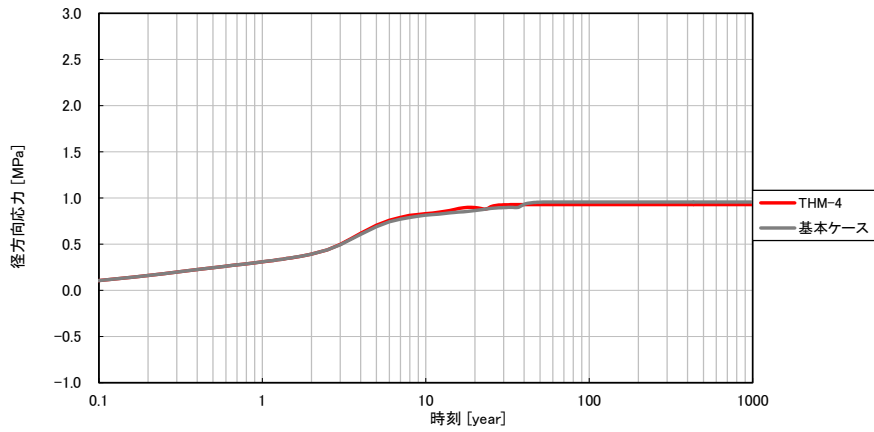


図 6.1.8-11 THM-4 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

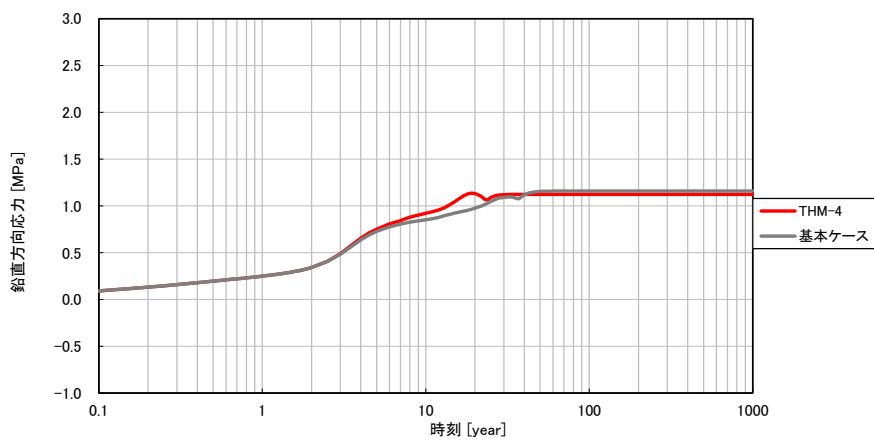
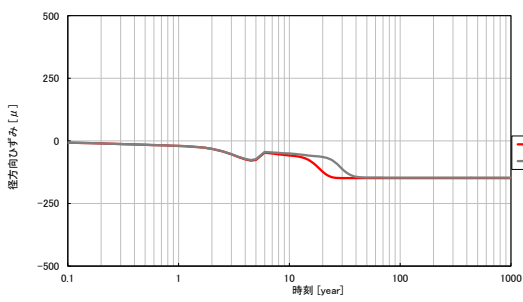
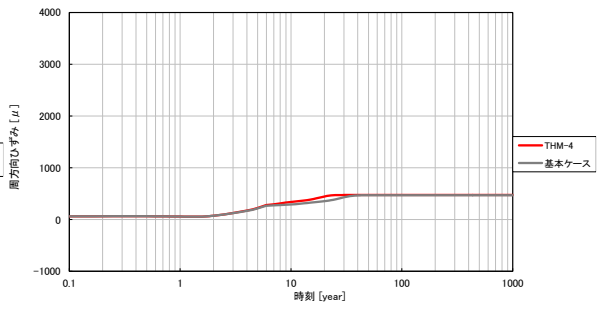


図 6.1.8-12 THM-4 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

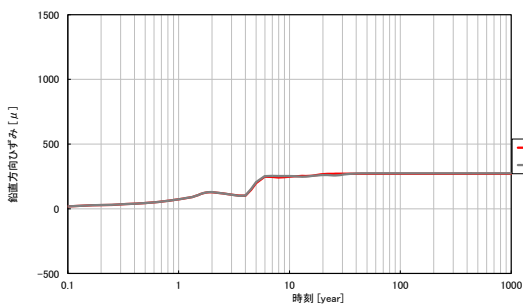


(a)径方向

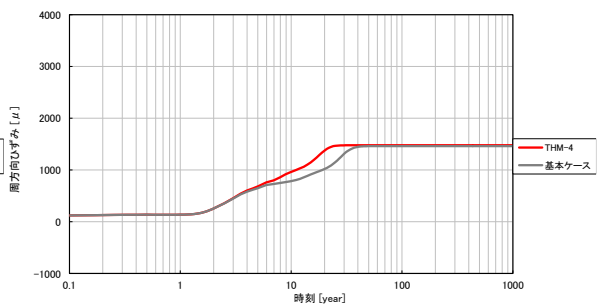


(b)周方向

図 6.1.8-13 THM-4 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

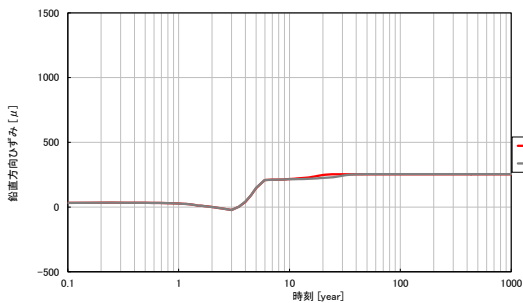


(a)鉛直方向

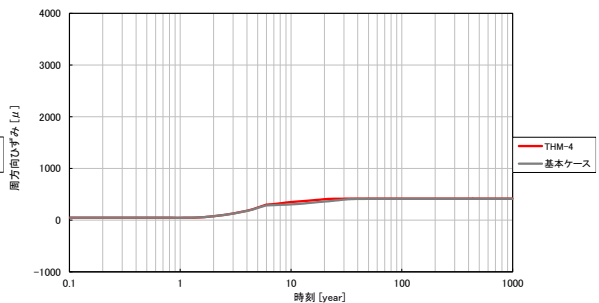


(b)周方向

図 6.1.8-14 THM-4 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.8-15 THM-4 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.9 THM-5

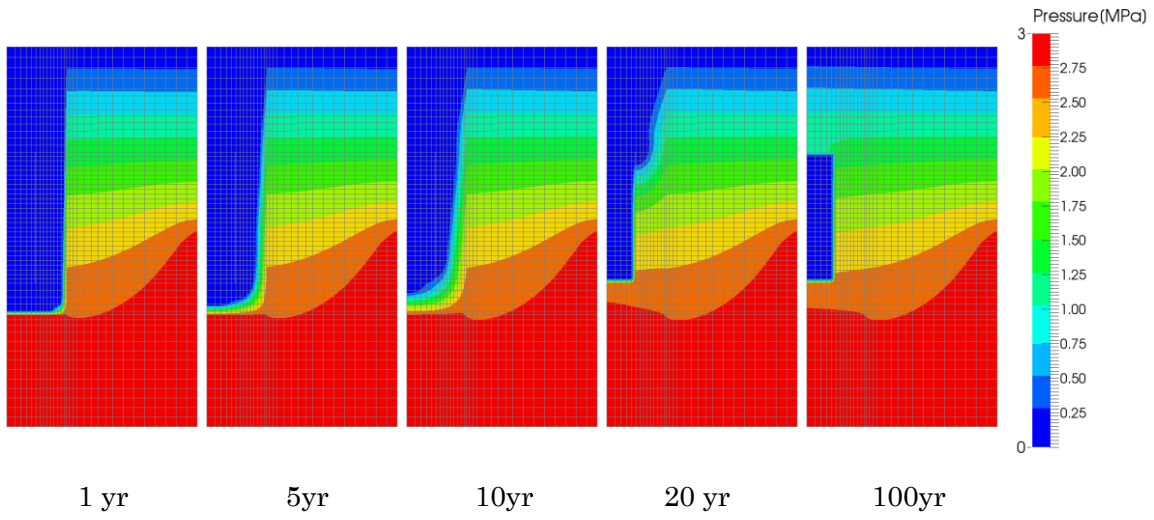


図 6.1.9-1 THM-5 岩盤部分・間隙水圧分布

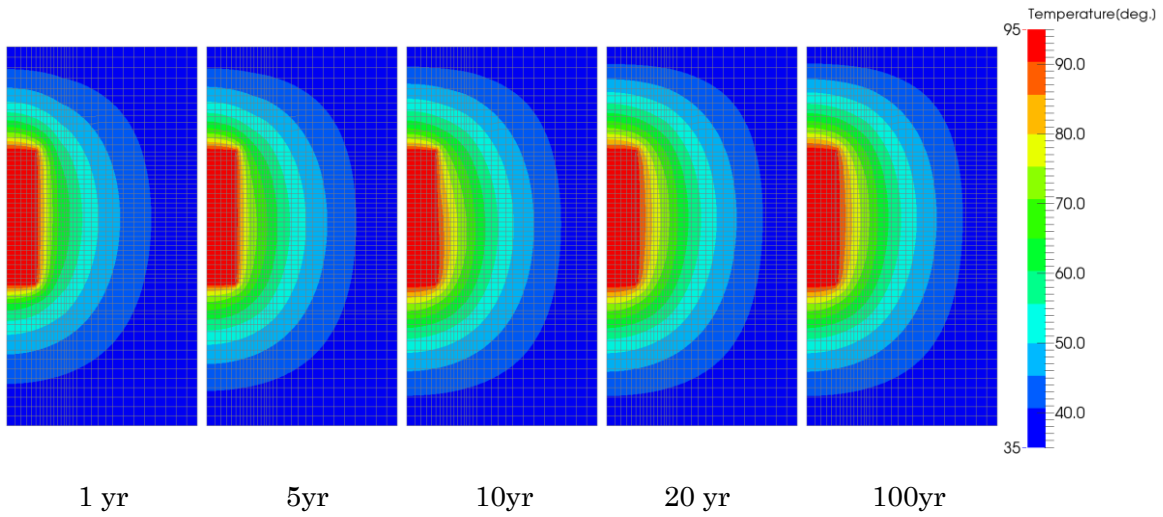


図 6.1.9-2 THM-5 岩盤部分・温度分布

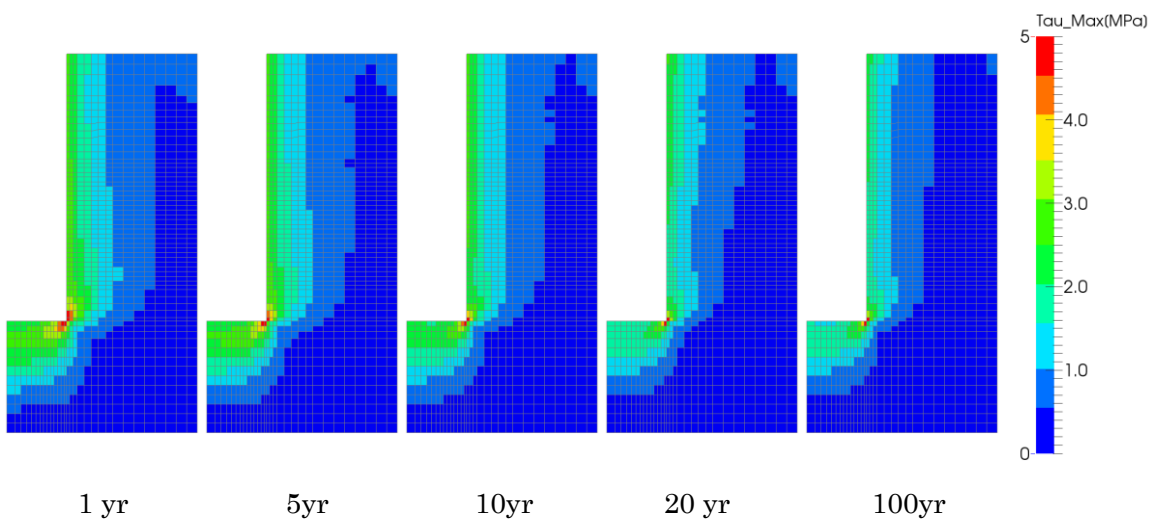


図 6.1.9-3 THM-5 岩盤部分・主せん断応力分布

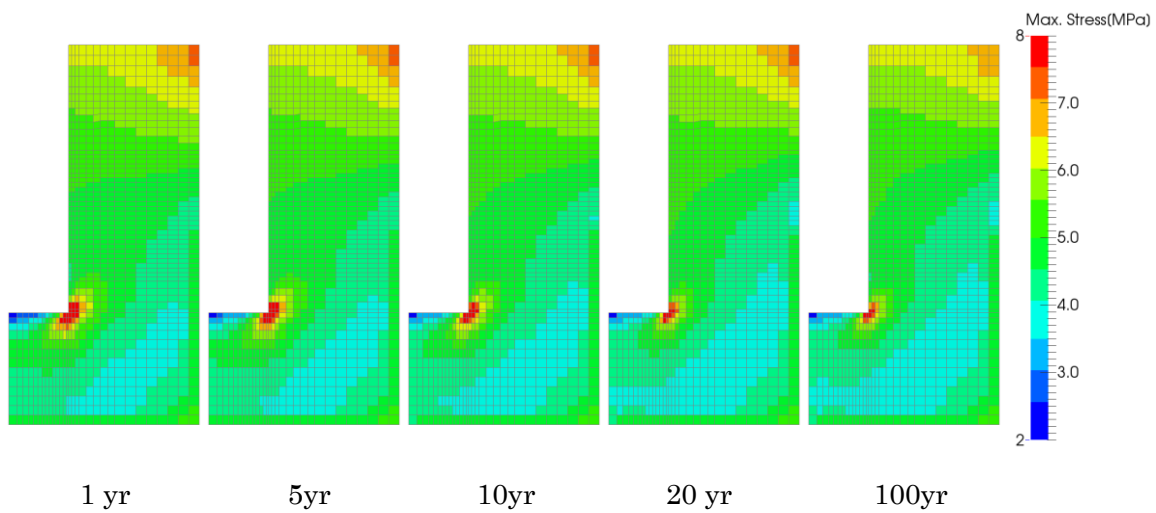


図 6.1.9-4 THM-5 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

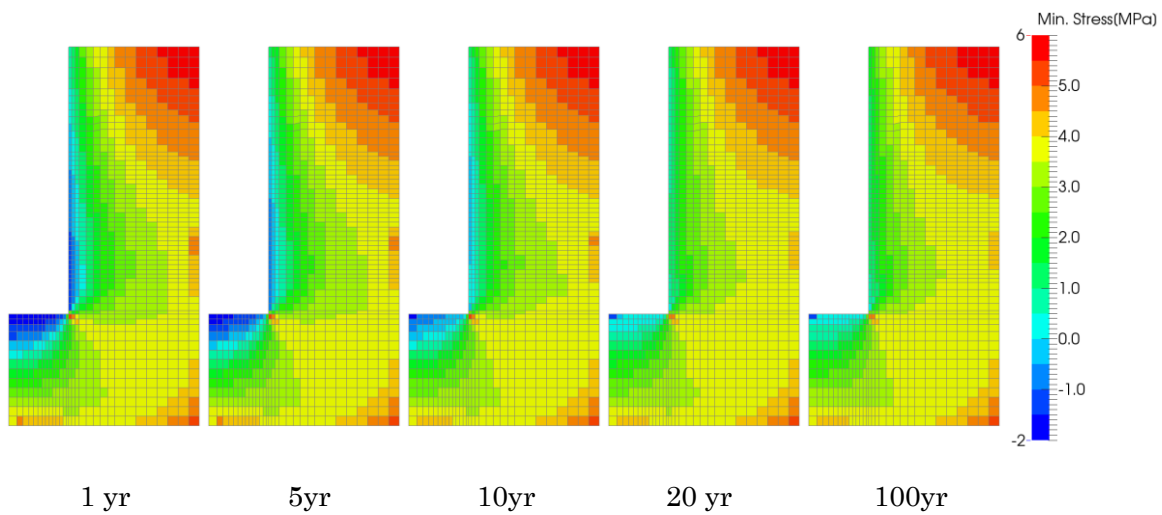


図 6.1.9-5 THM-5 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

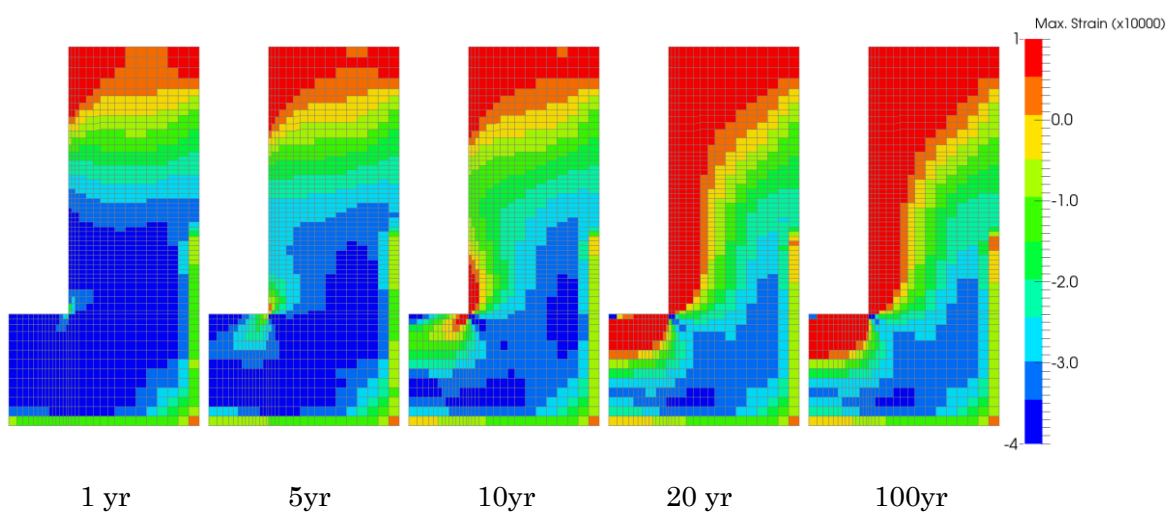


図 6.1.9-6 THM-5 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

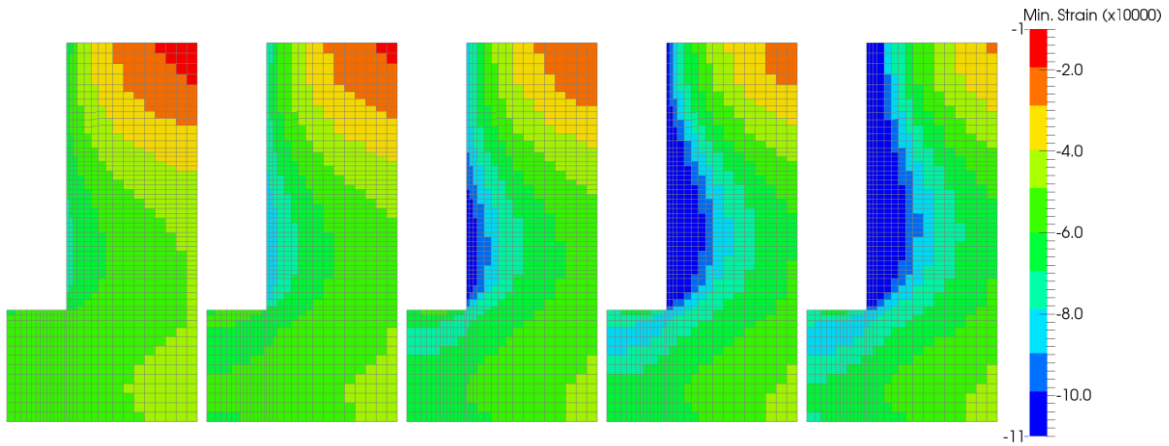


図 6.1.9-7 THM-5 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

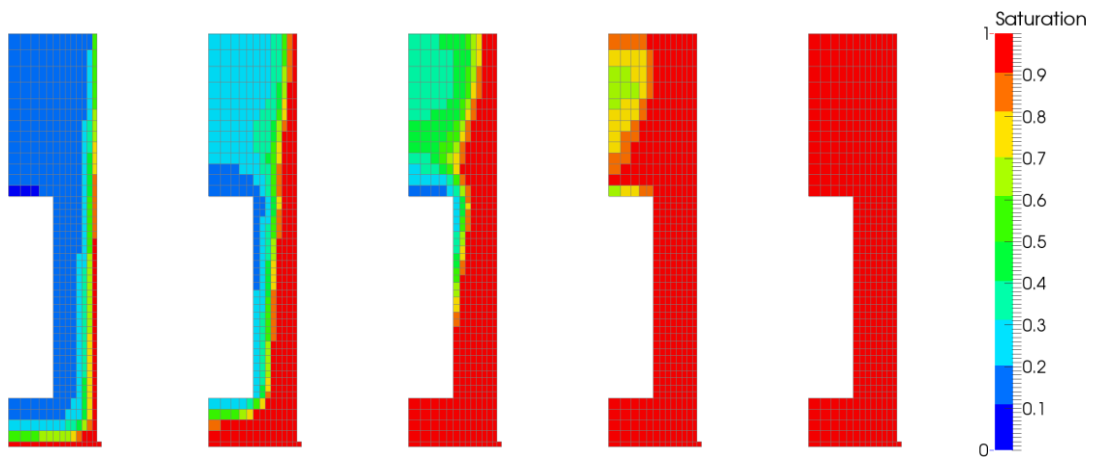


図 6.1.9-8 THM-5 ベントナイト部分・飽和度分布

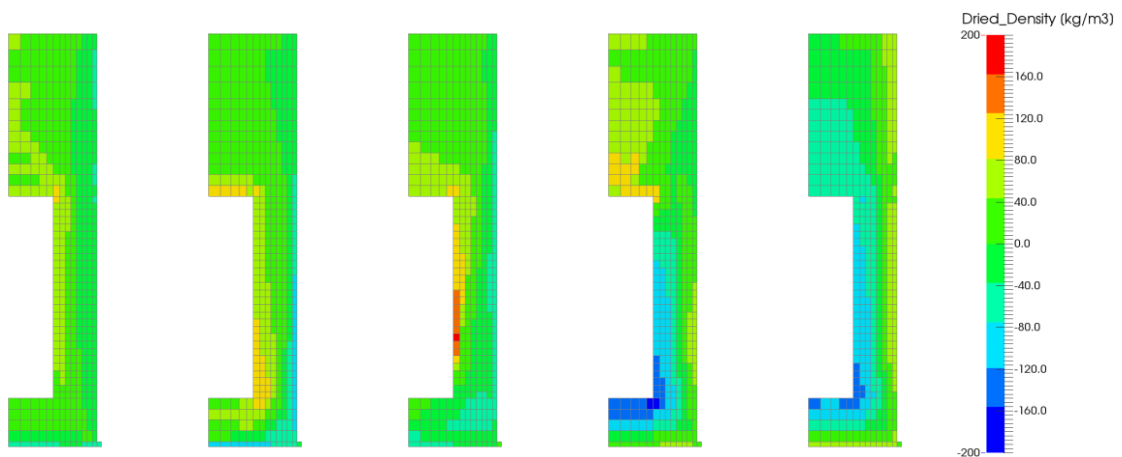


図 6.1.9-9 THM-5 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

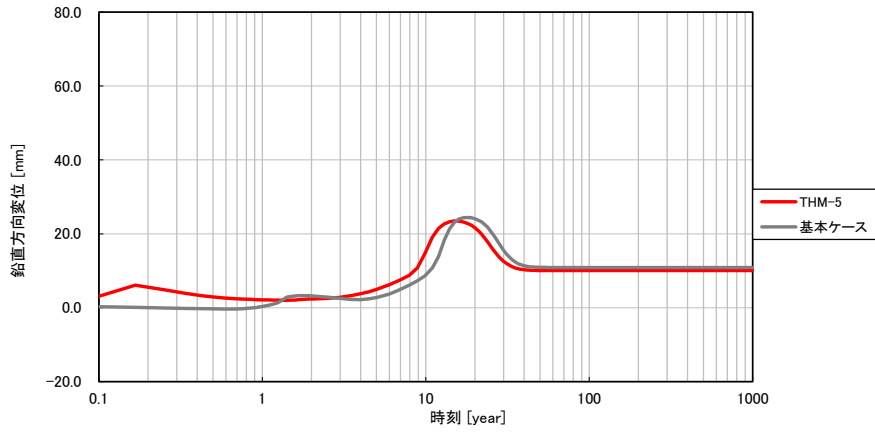


図 6.1.9-10 THM-5 鉛直方向の変位時刻歴

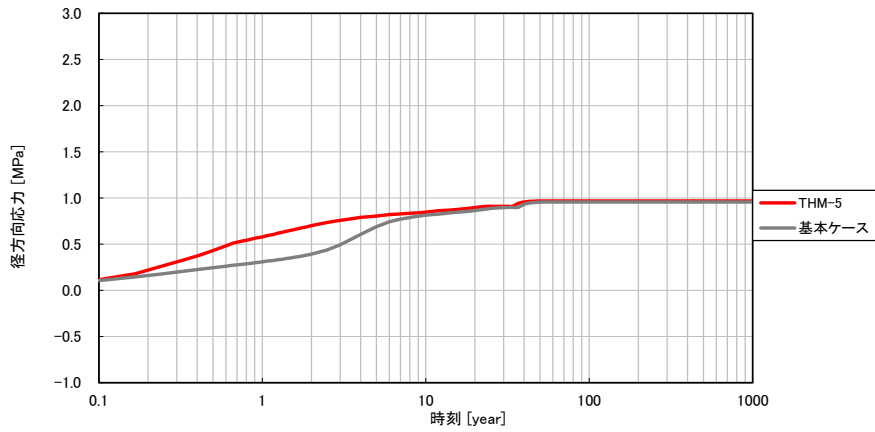


図 6.1.9-11 THM-5 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

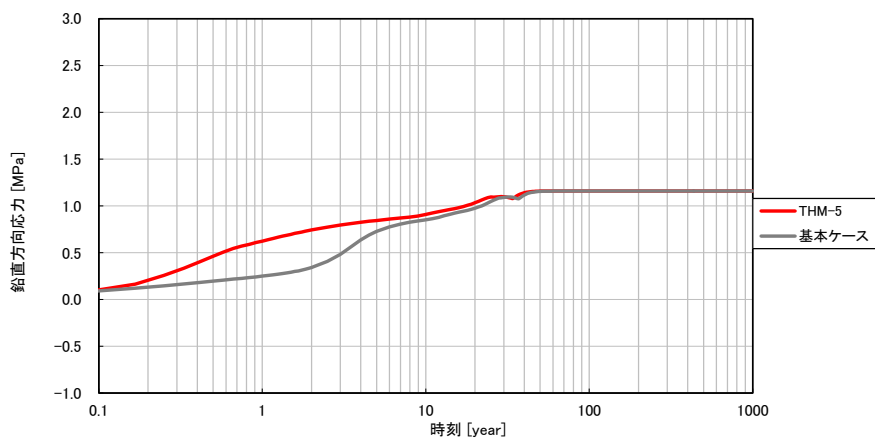
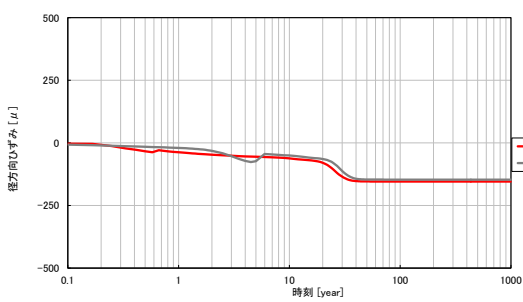
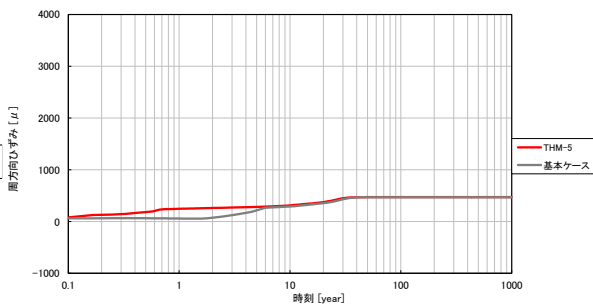


図 6.1.9-12 THM-5 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

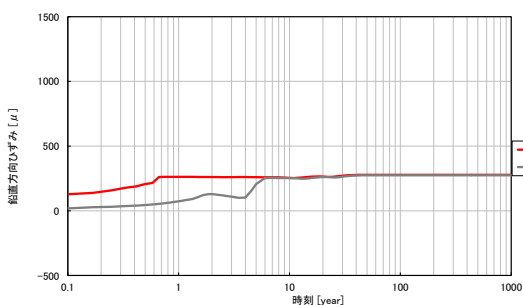


(a)径方向

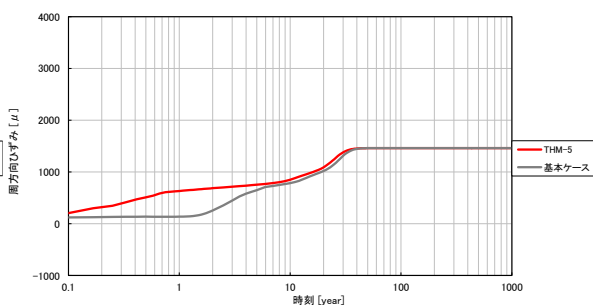


(b)周方向

図 6.1.9-13 THM-5 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

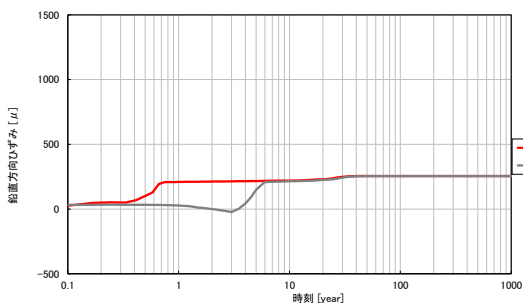


(a)鉛直方向

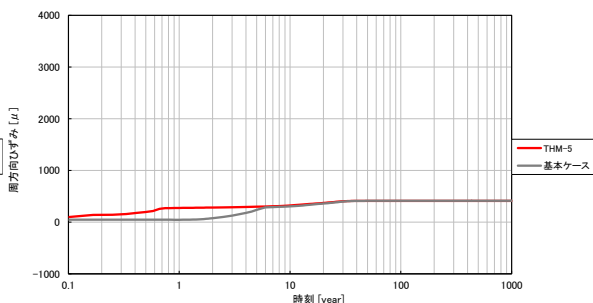


(b)周方向

図 6.1.9-14 THM-5 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.9-15 THM-5 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.10 THM-6

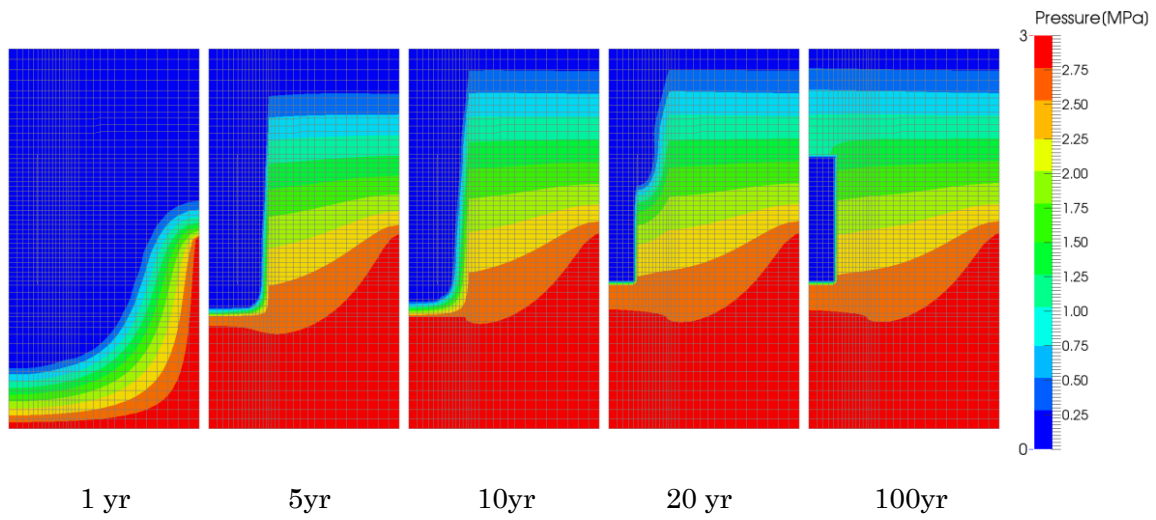


図 6.1.10-1 THM-6 岩盤部分・間隙水压分布

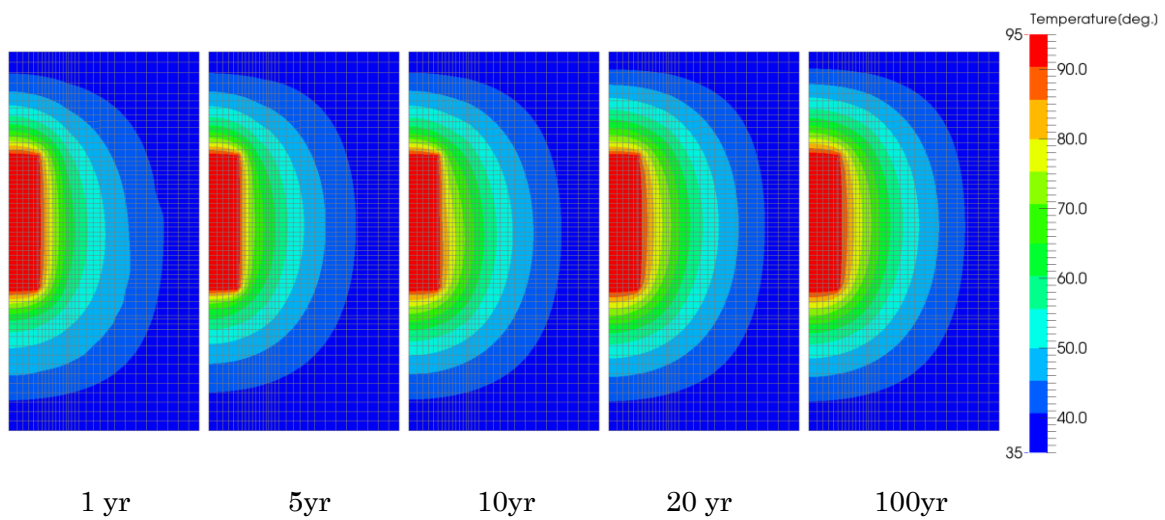


図 6.1.10-2 THM-6 岩盤部分・温度分布

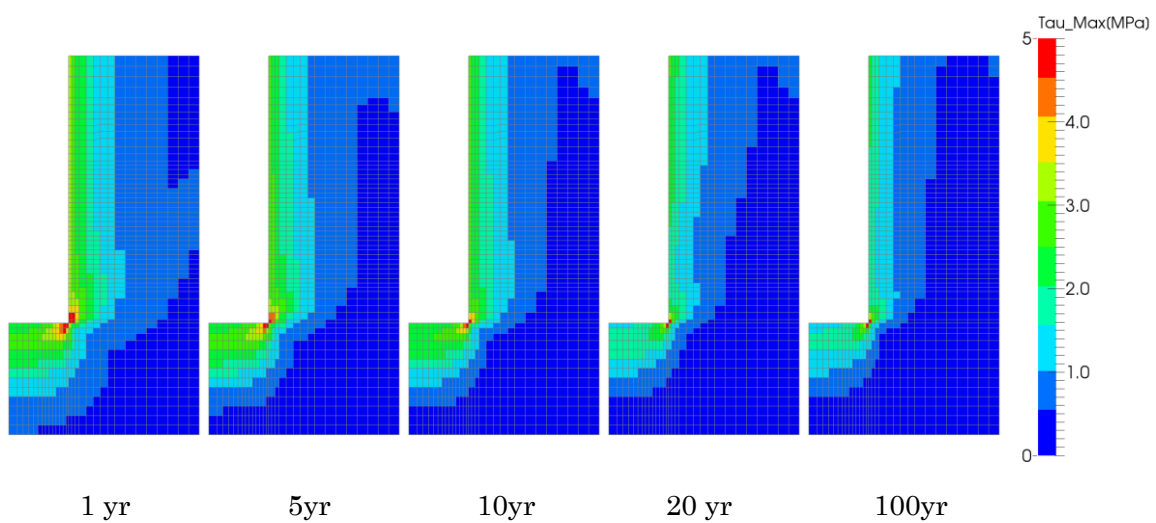


図 6.1.10-3 THM-6 岩盤部分・主せん断応力分布

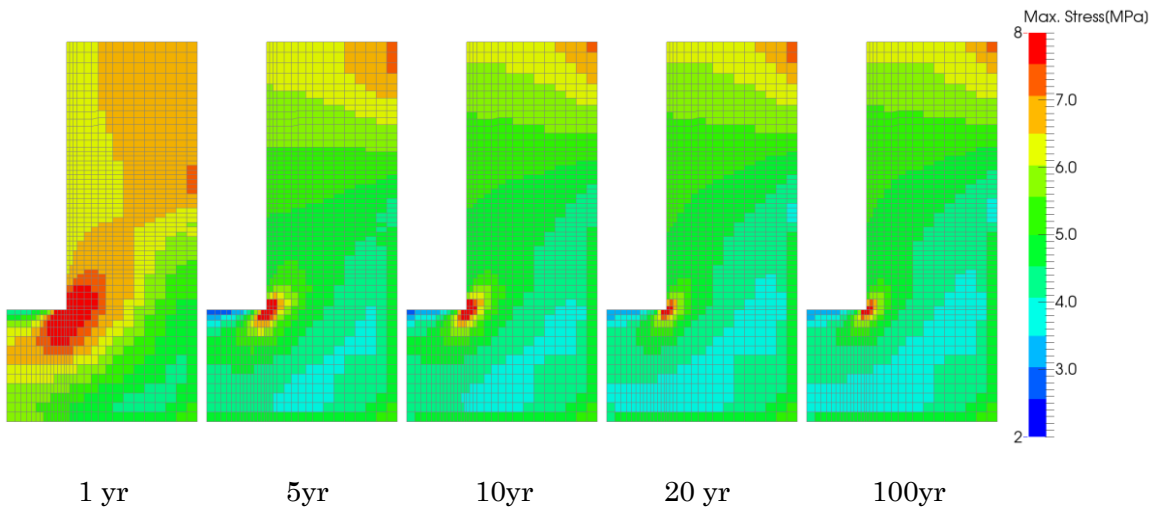


図 6.1.10-4 THM-6 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

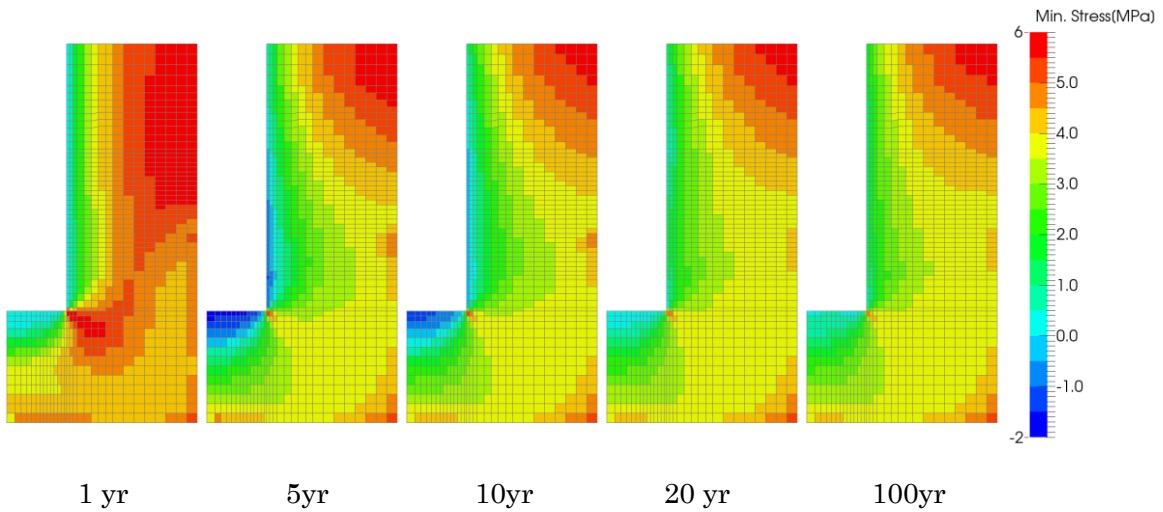


図 6.1.10-5 THM-6 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

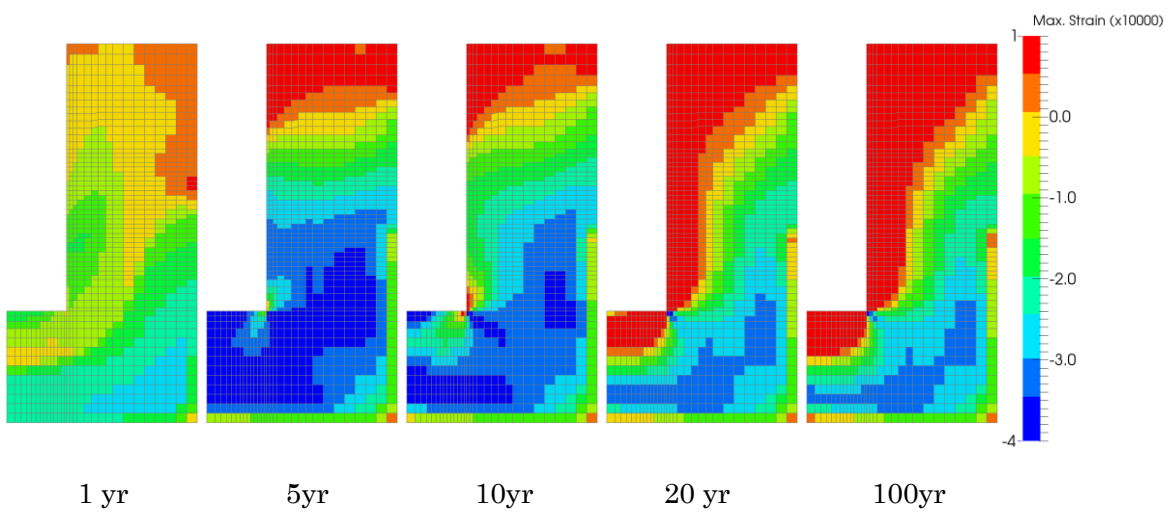


図 6.1.10-6 THM-6 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

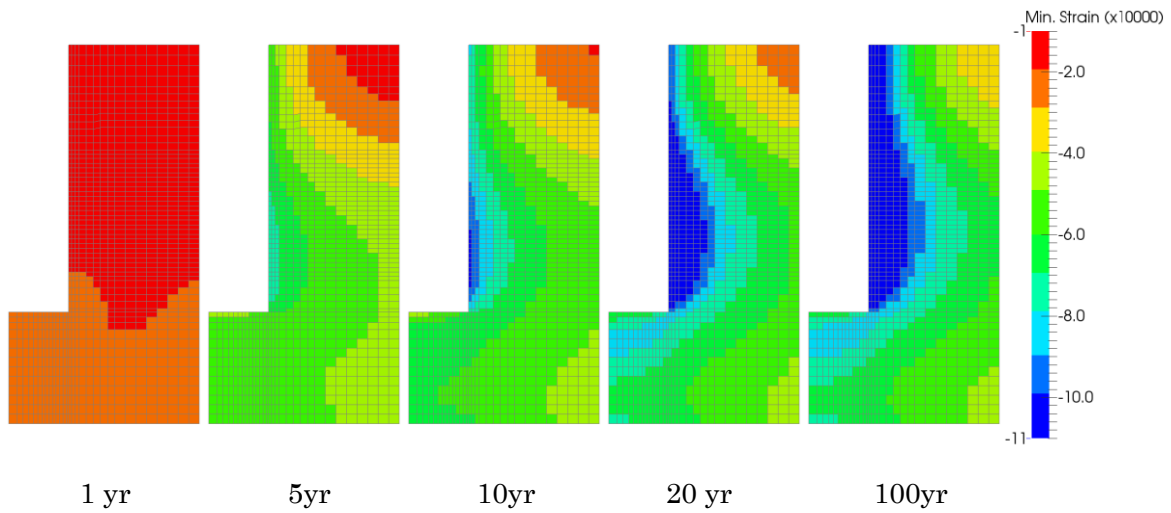


図 6.1.10-7 THM-6 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

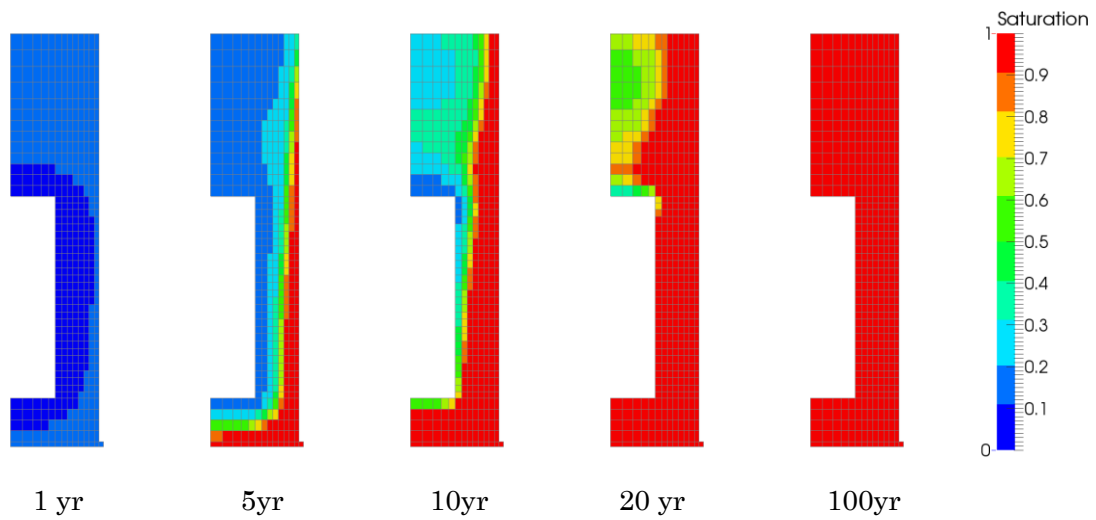


図 6.1.10-8 THM-6 ベントナイト部分・飽和度分布

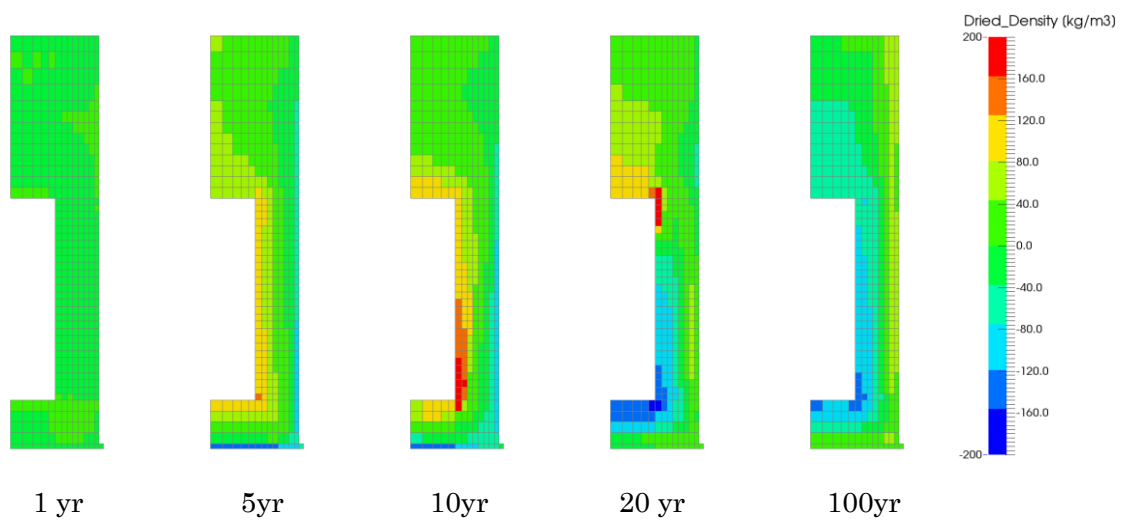


図 6.1.10-9 THM-6 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

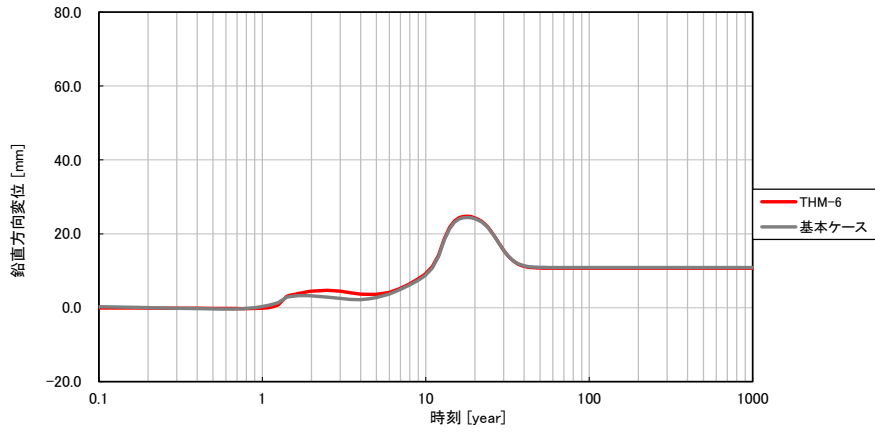


図 6.1.10-10 THM-6 鉛直方向の変位時刻歴

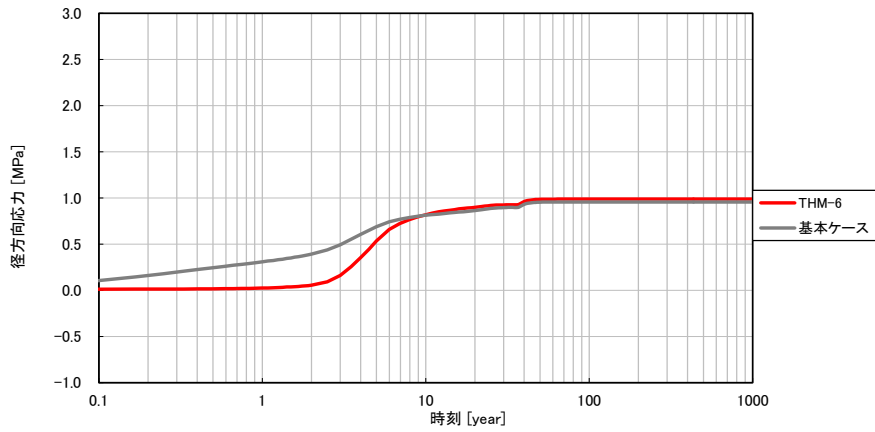


図 6.1.10-11 THM-6 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

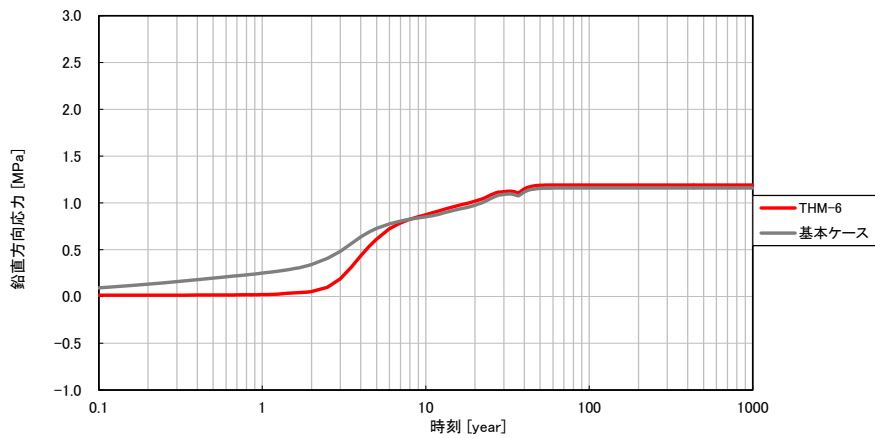
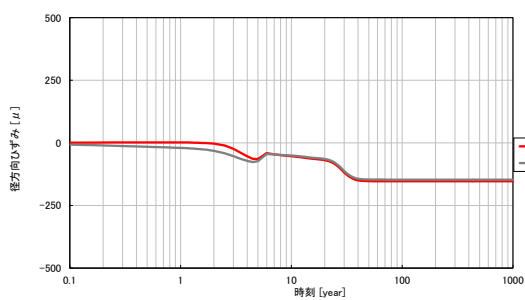
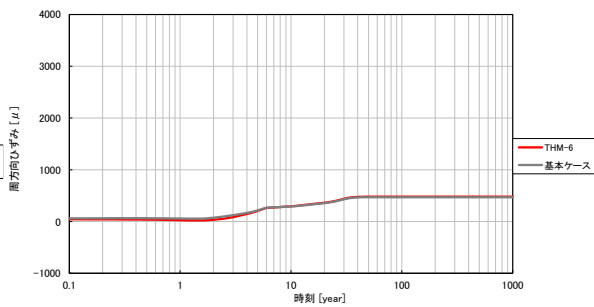


図 6.1.10-12 THM-6 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

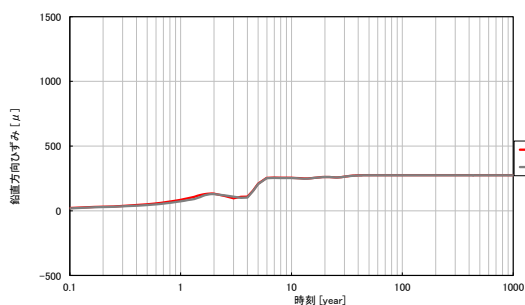


(a)径方向

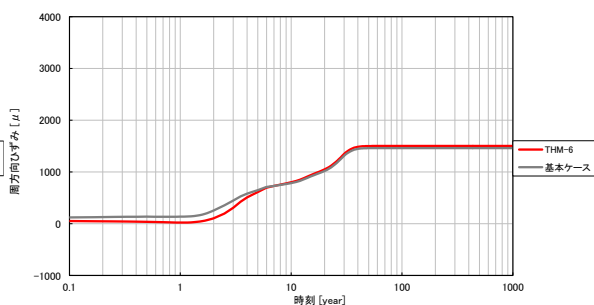


(b)周方向

図 6.1.10-13 THM-6 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

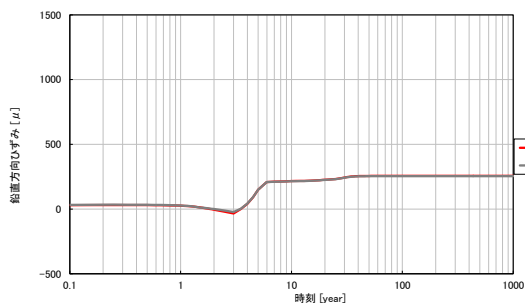


(a)鉛直方向

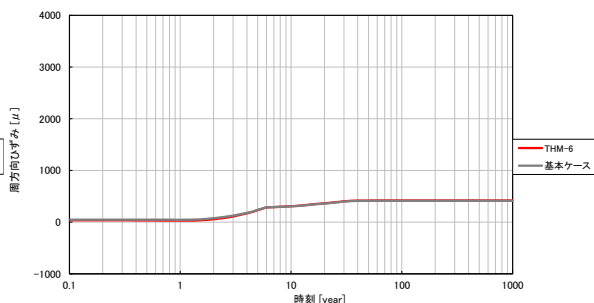


(b)周方向

図 6.1.10-14 THM-6 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.10-15 THM-6 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.11 THM-7

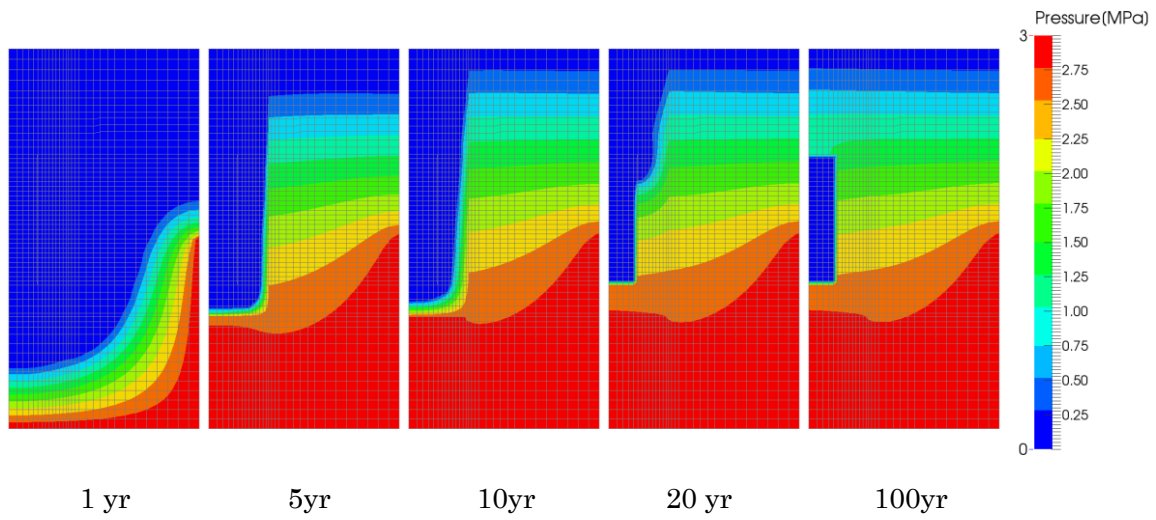


図 6.1.11-1 THM-7 岩盤部分・間隙水压分布

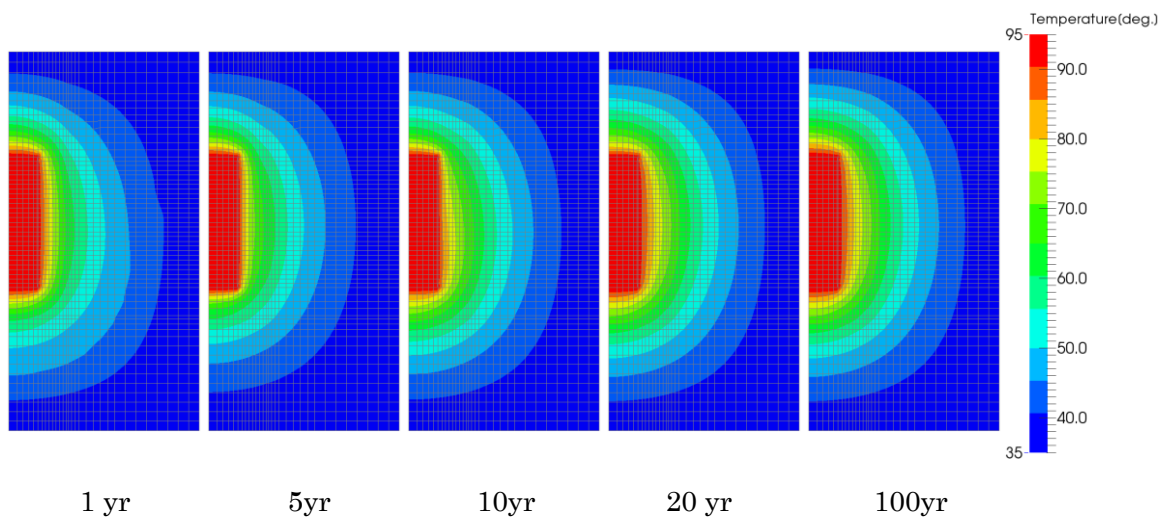


図 6.1.11-2 THM-7 岩盤部分・温度分布

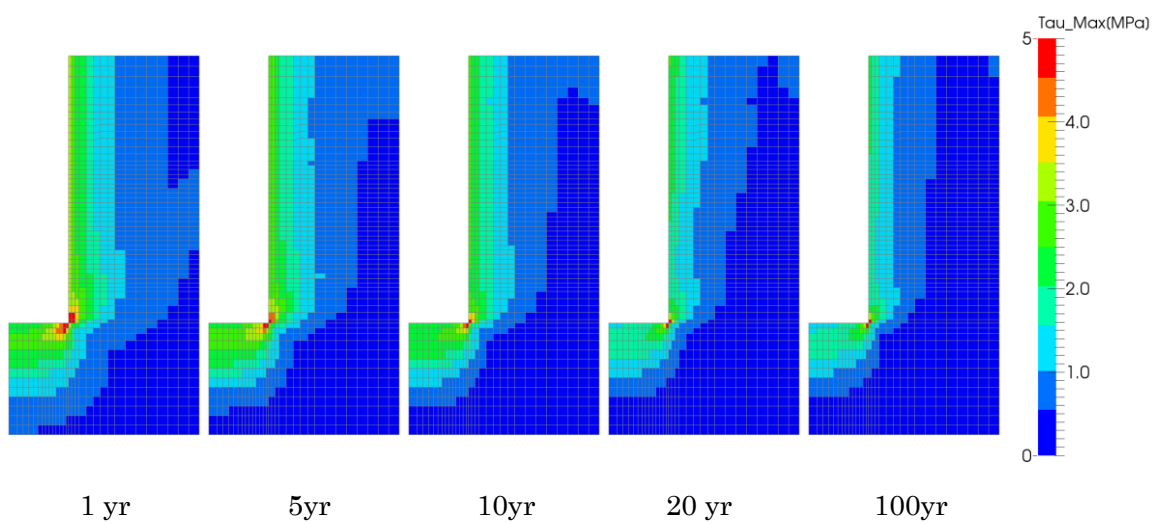


図 6.1.11-3 THM-7 岩盤部分・主せん断応力分布

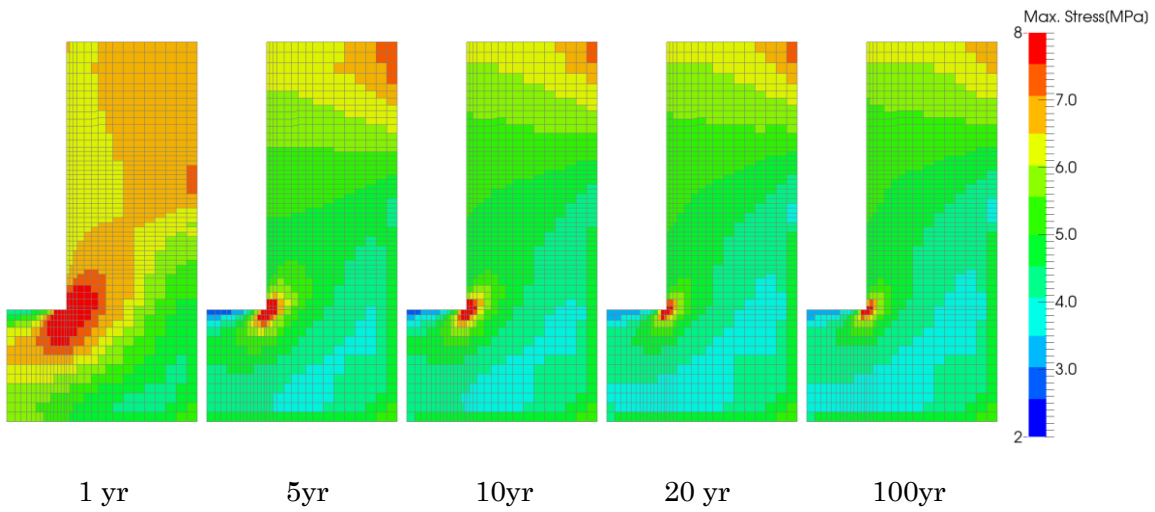


図 6.1.11-4 THM-7 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

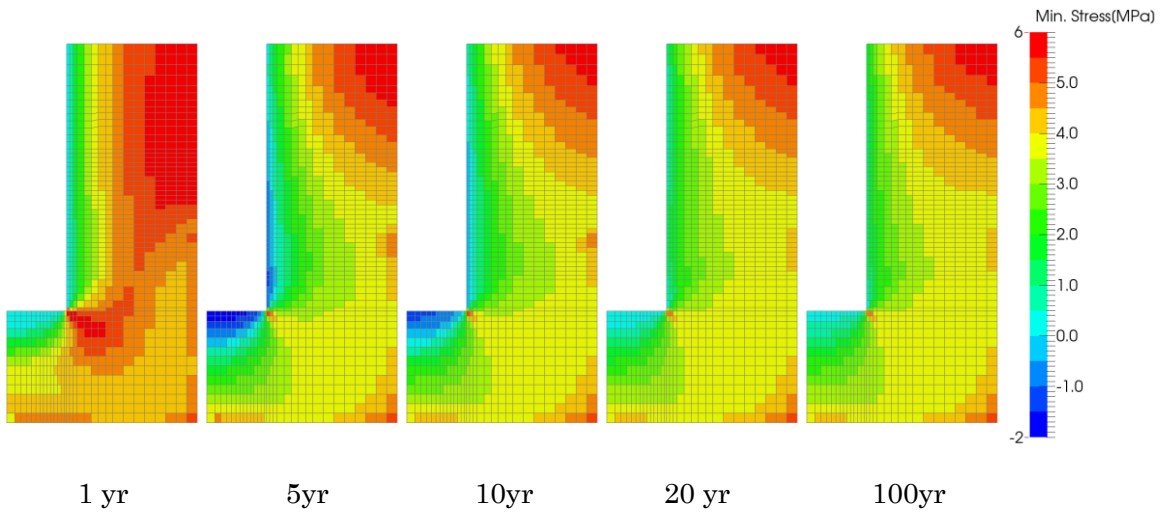


図 6.1.11-5 THM-7 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

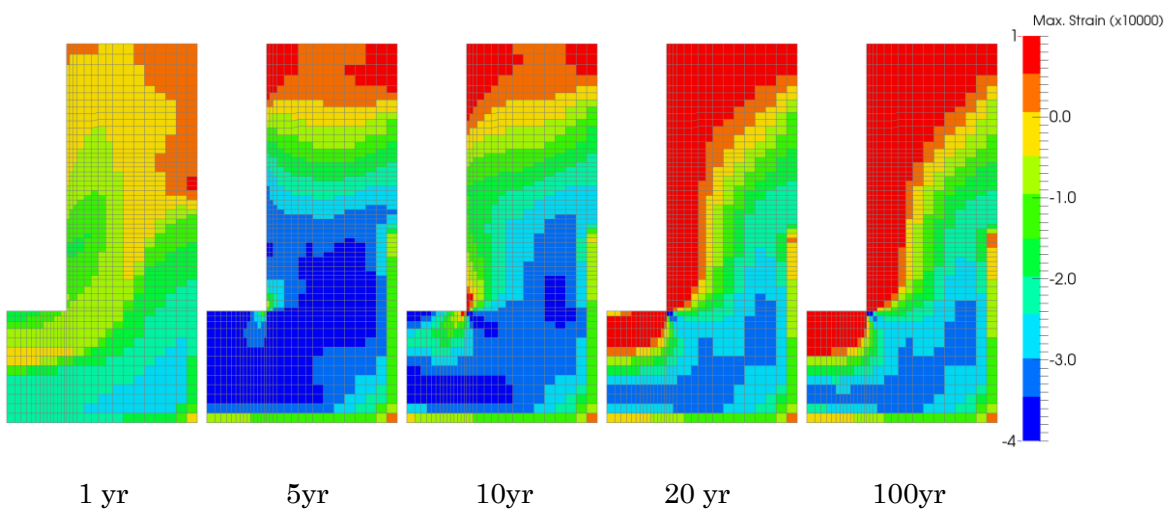


図 6.1.11-6 THM-7 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

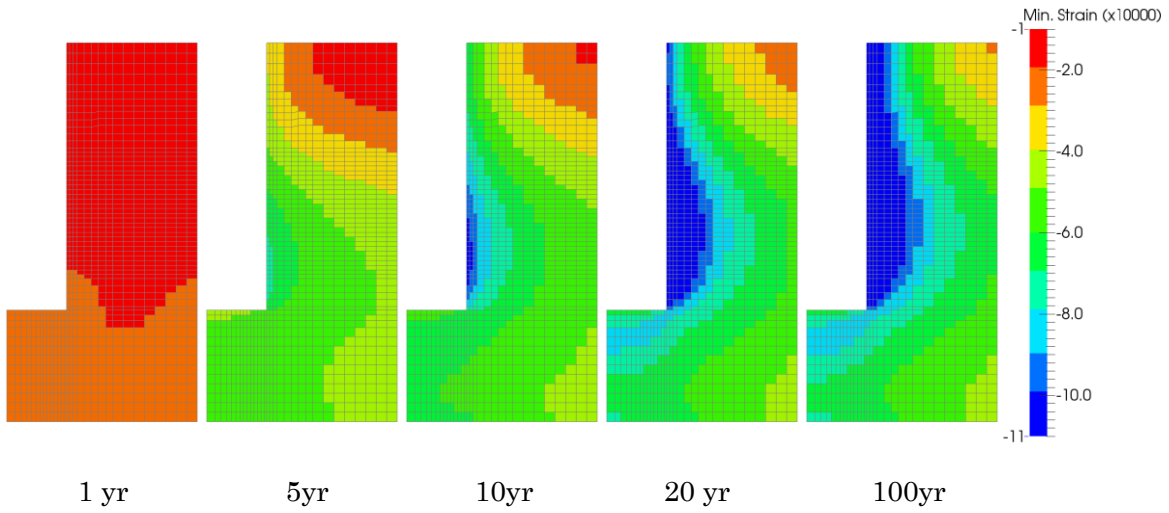


図 6.1.11-7 THM-7 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

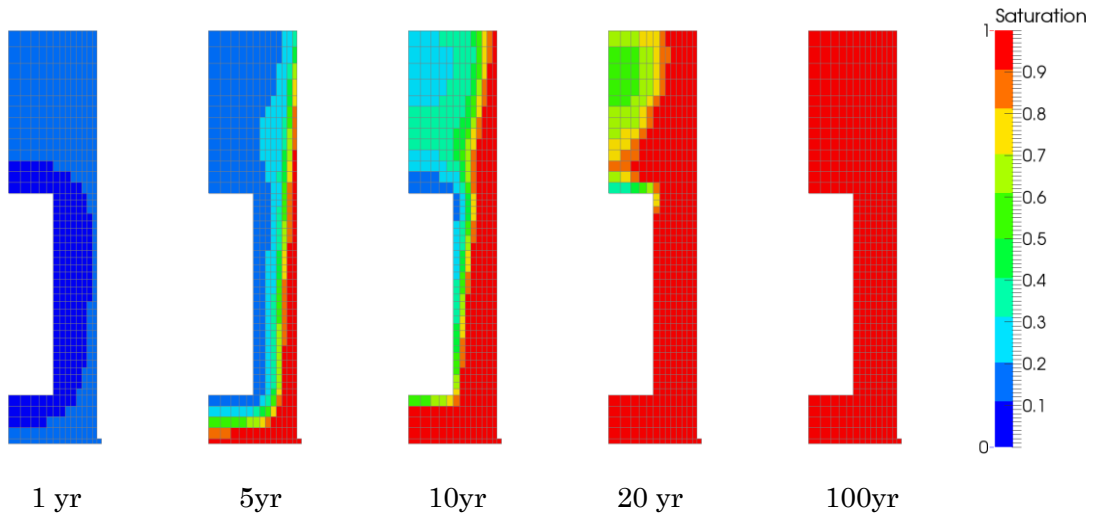


図 6.1.11-8 THM-7 ベントナイト部分・飽和度分布

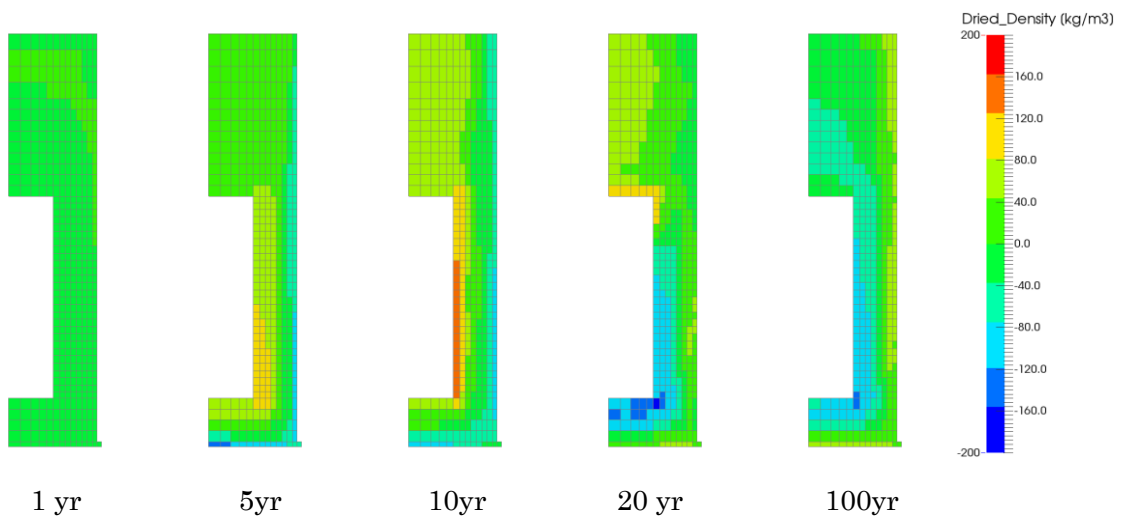


図 6.1.11-9 THM-7 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

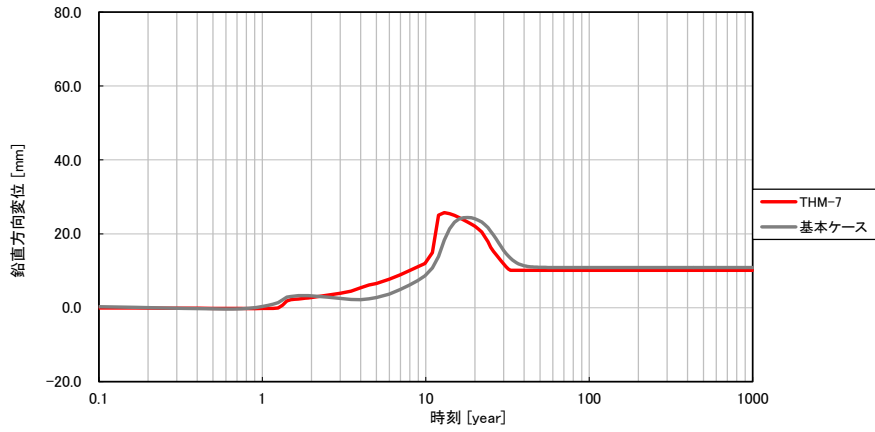


図 6.1.11-10 THM-7 鉛直方向の変位時刻歴

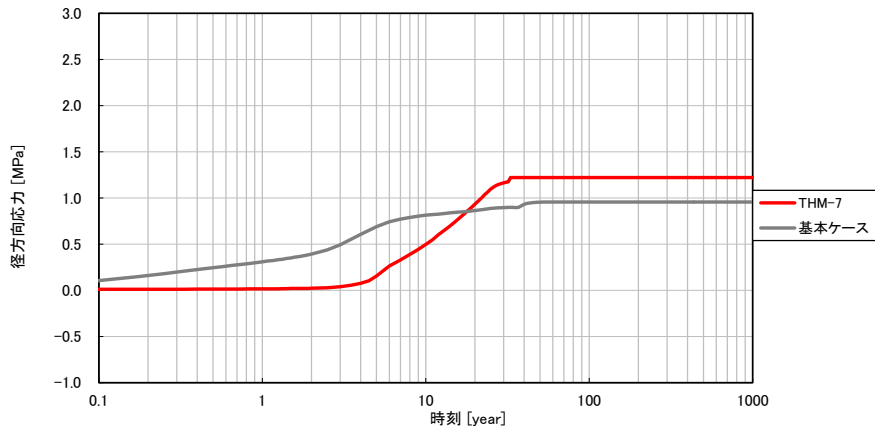


図 6.1.11-11 THM-7 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

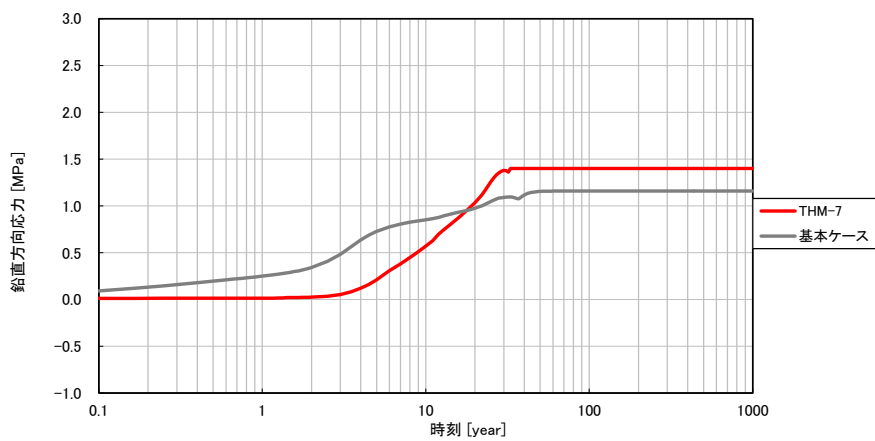
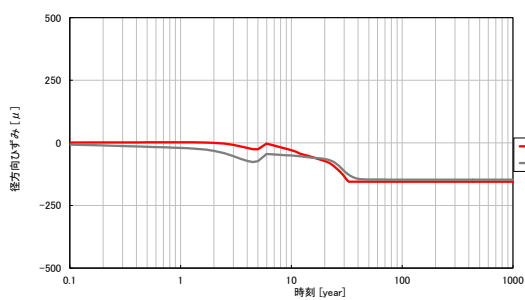
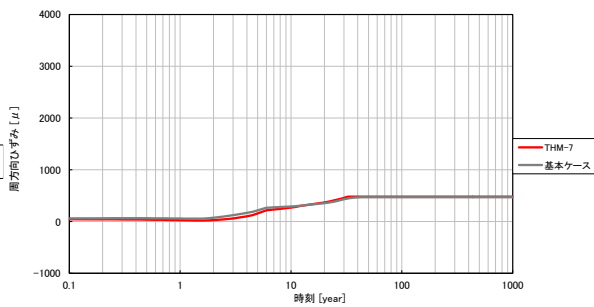


図 6.1.11-12 THM-7 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

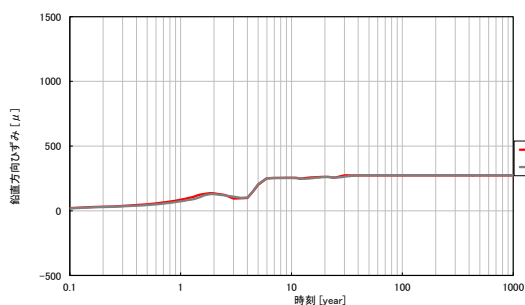


(a)径方向

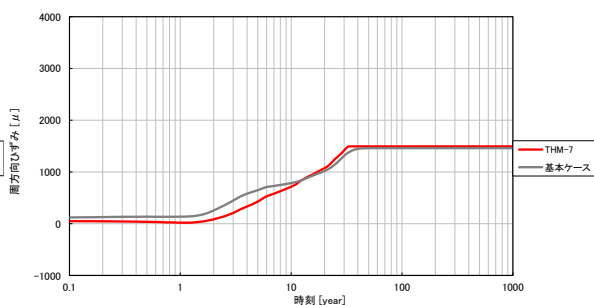


(b)周方向

図 6.1.11-13 THM-7 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

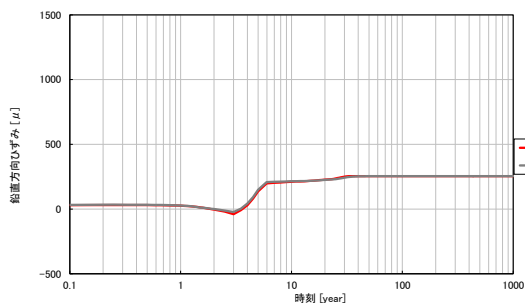


(a)鉛直方向

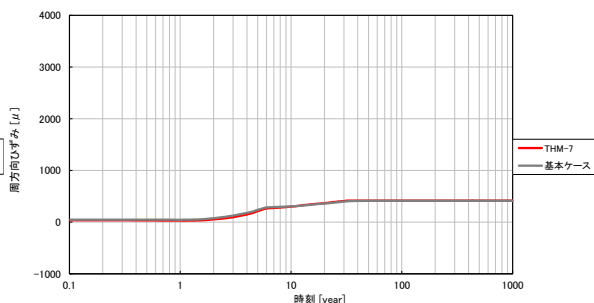


(b)周方向

図 6.1.11-14 THM-7 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.11-15 THM-7 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.12 THM-8

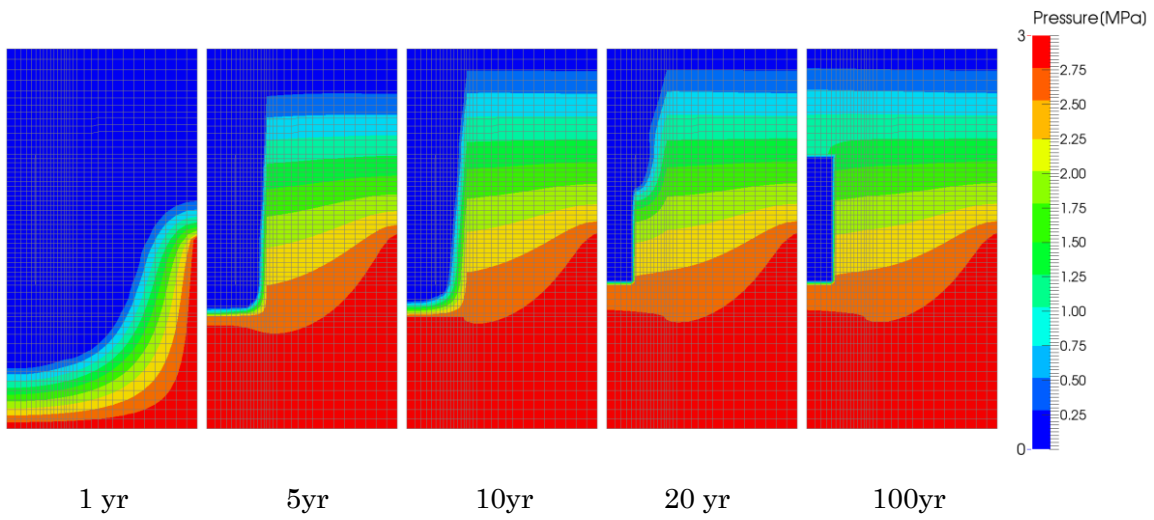


図 6.1.12-1 THM-8 岩盤部分・間隙水压分布

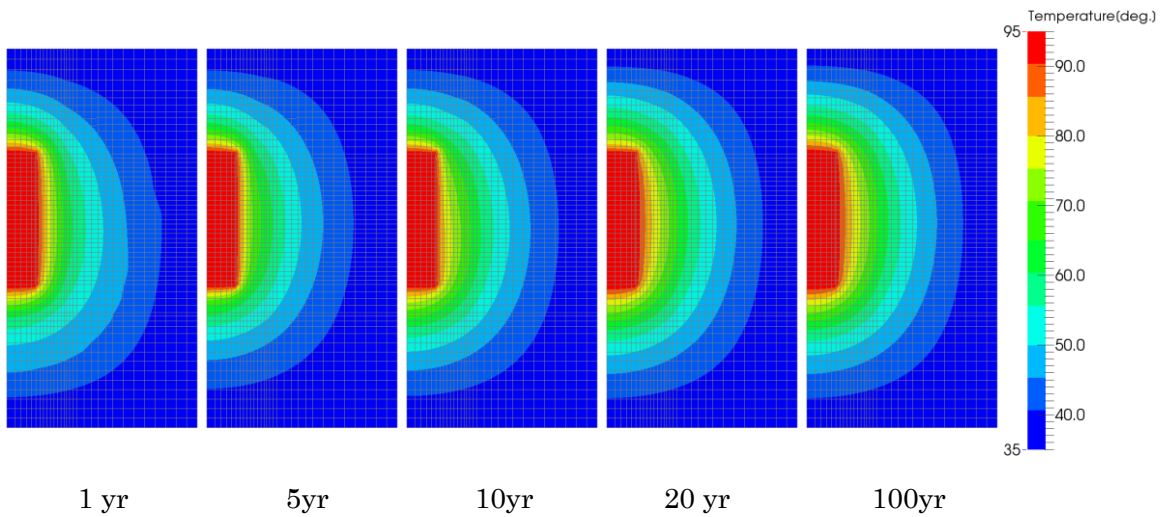


図 6.1.12-2 THM-8 岩盤部分・温度分布

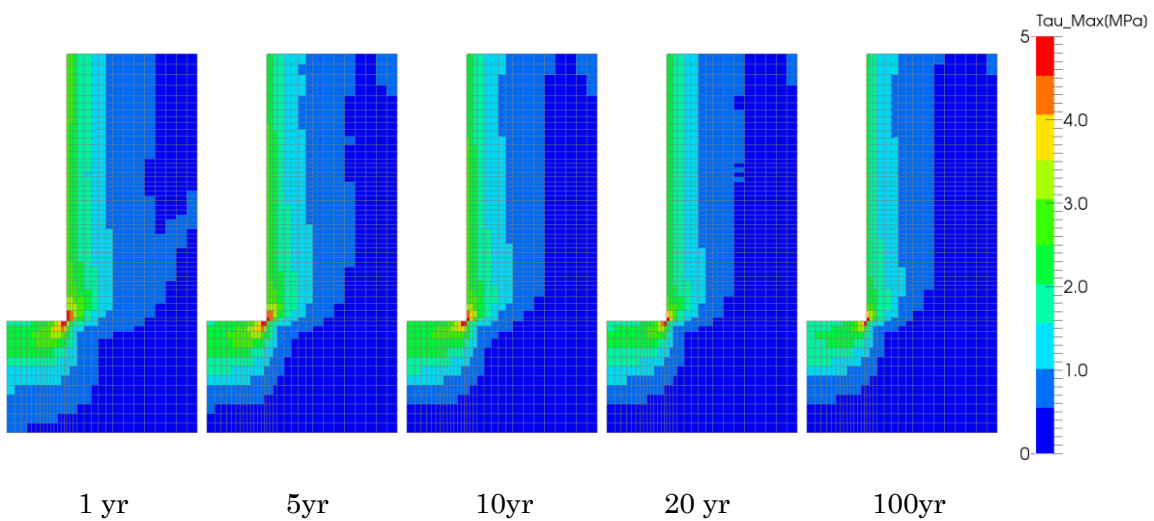


図 6.1.12-3 THM-8 岩盤部分・主せん断応力分布

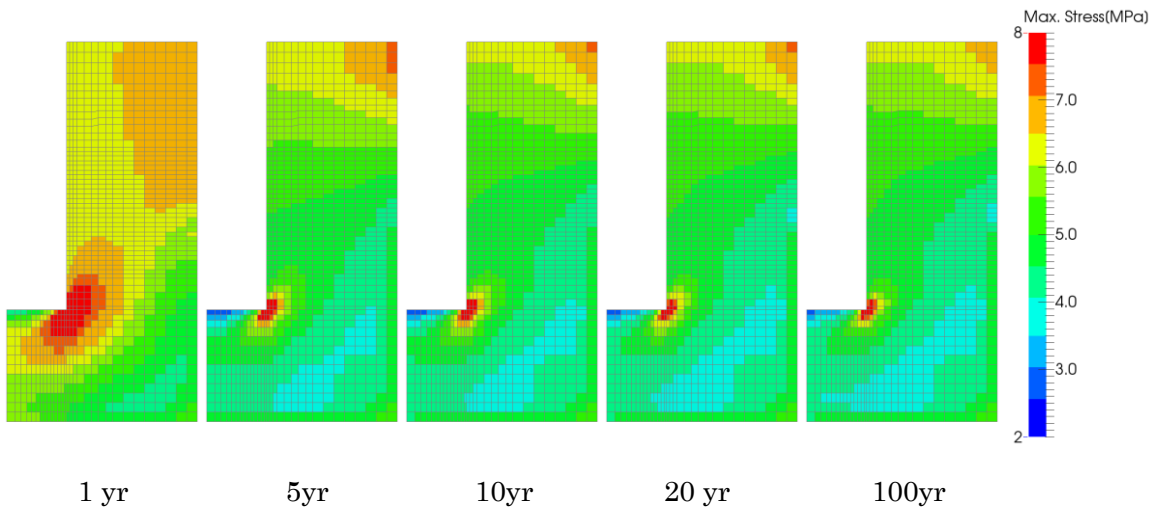


図 6.1.12-4 THM-8 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

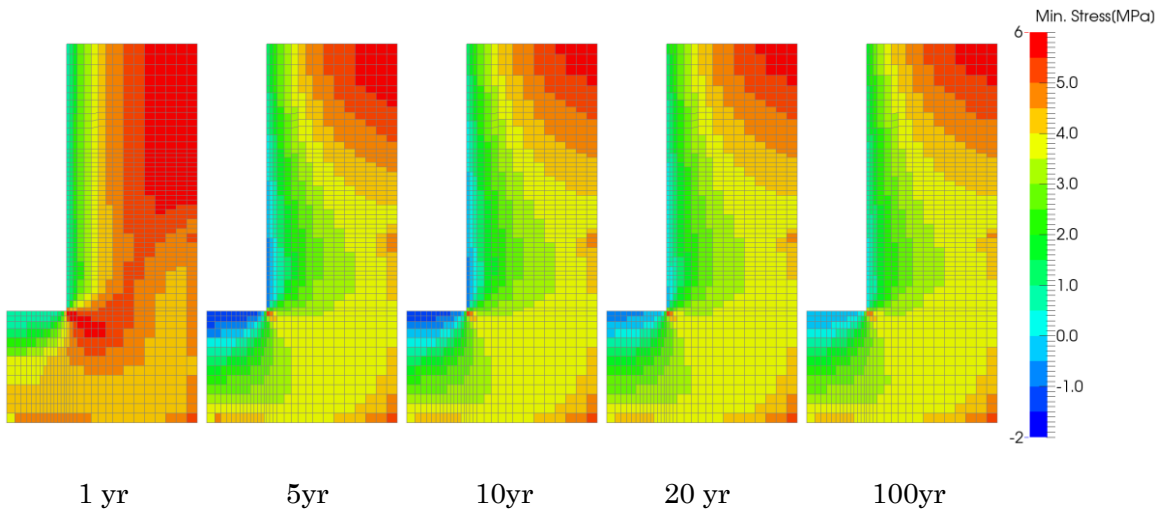


図 6.1.12-5 THM-8 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

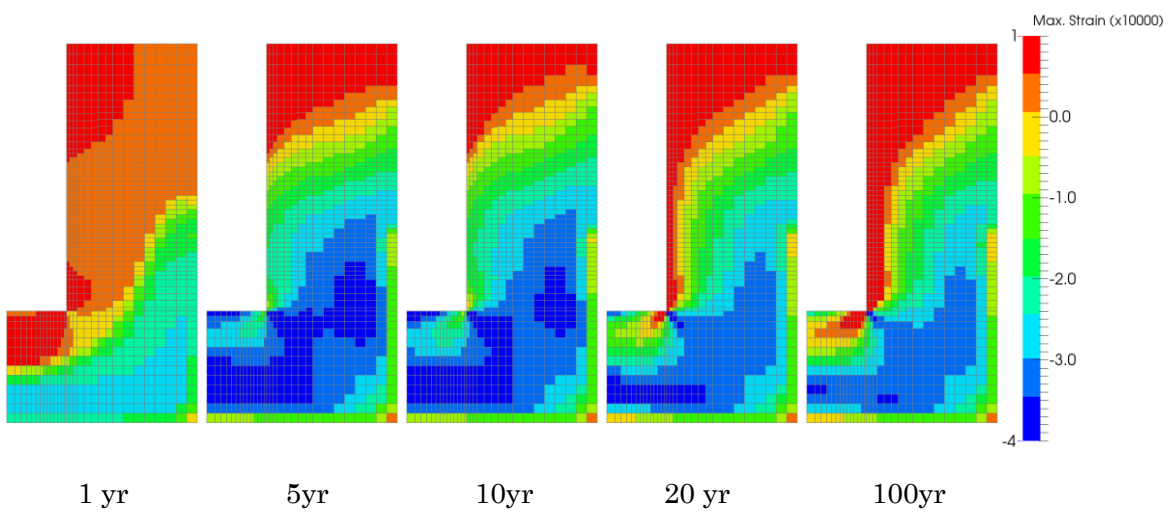


図 6.1.12-6 THM-8 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

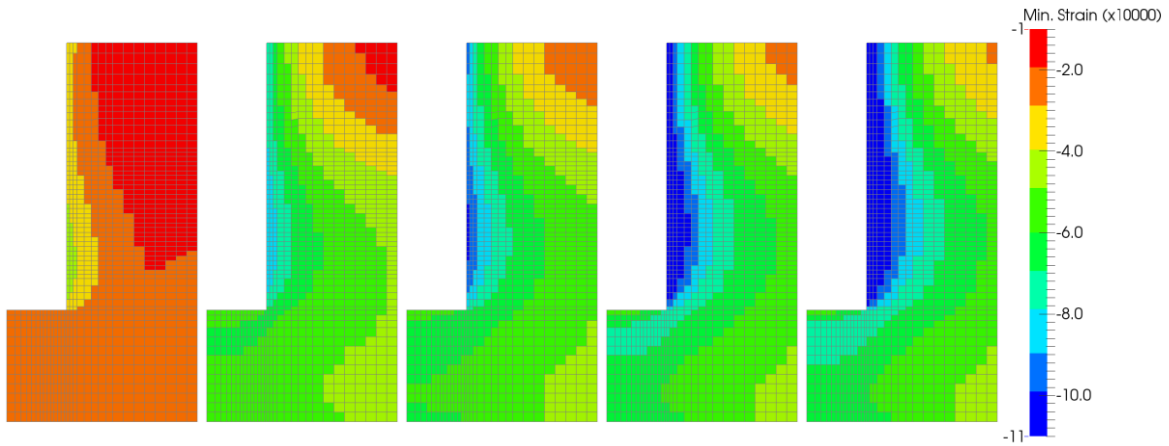


図 6.1.12-7 THM-8 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

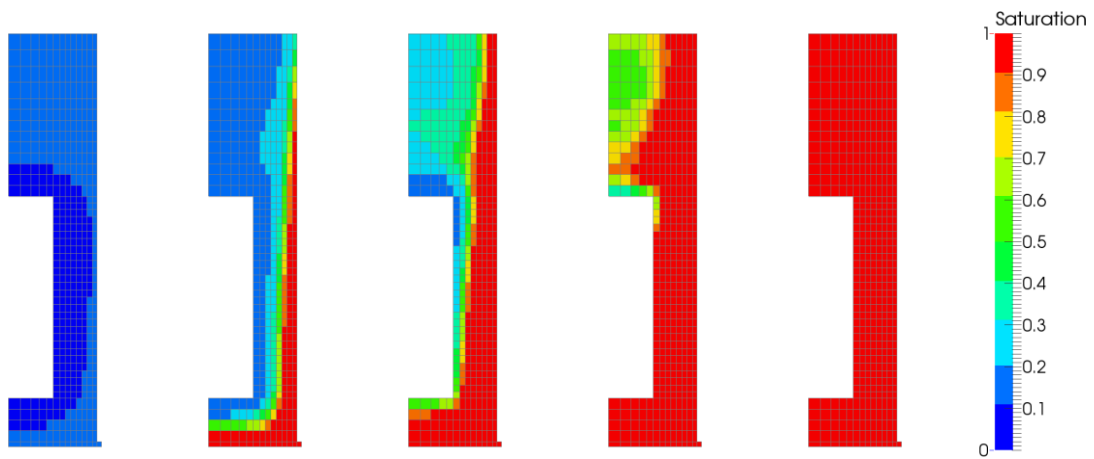


図 6.1.12-8 THM-8 ベントナイト部分・飽和度分布

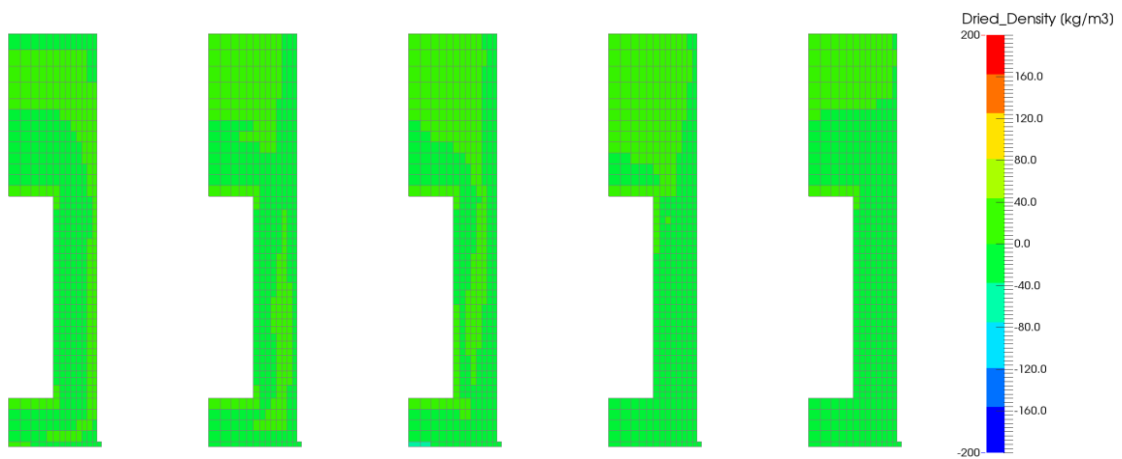


図 6.1.12-9 THM-8 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

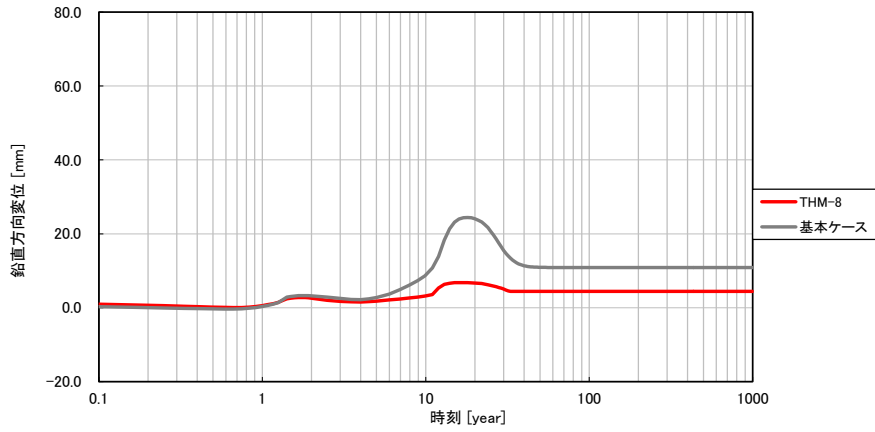


図 6.1.12-10 THM-8 鉛直方向の変位時刻歴

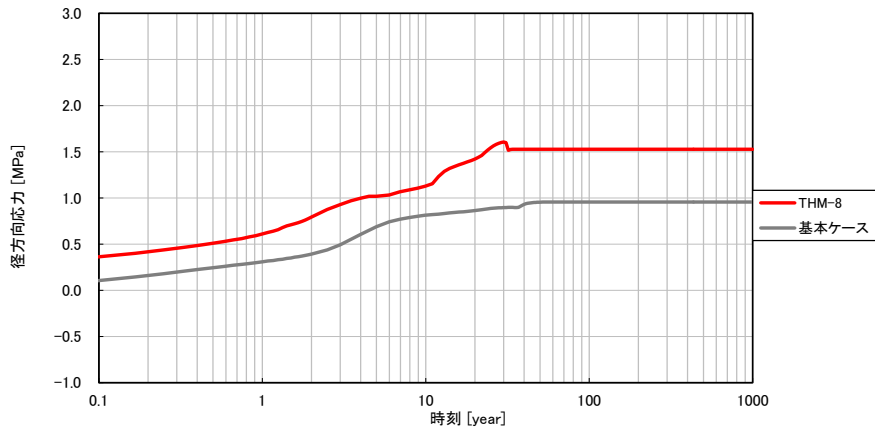


図 6.1.12-11 THM-8 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

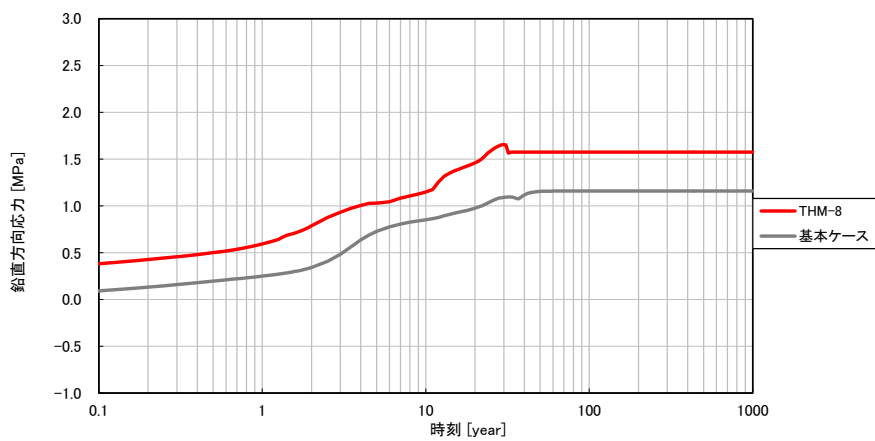
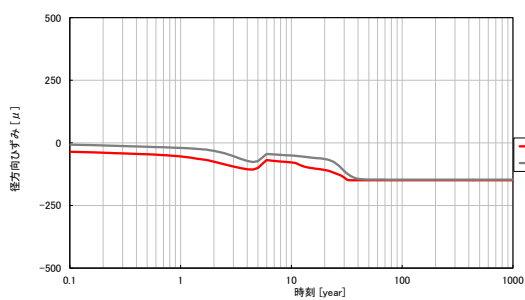
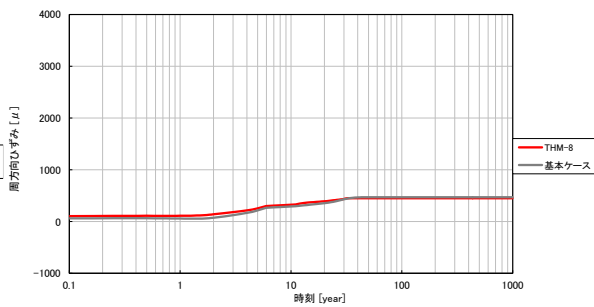


図 6.1.12-12 THM-8 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

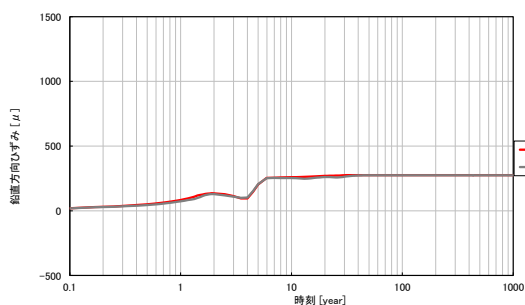


(a)径方向

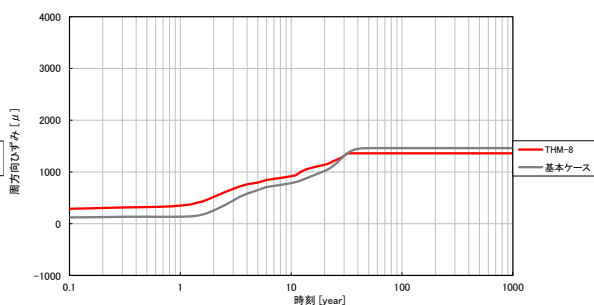


(b)周方向

図 6.1.12-13 THM-8 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

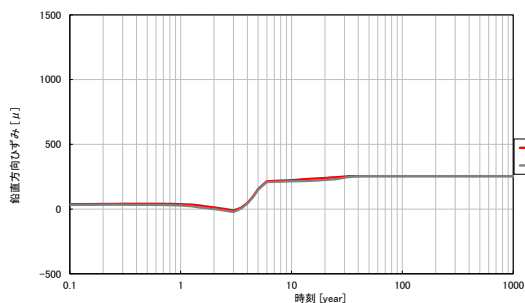


(a)鉛直方向

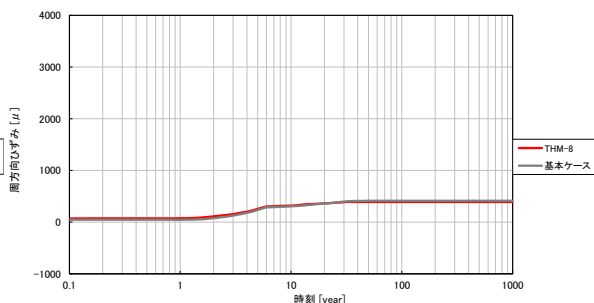


(b)周方向

図 6.1.12-14 THM-8 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.12-15 THM-8 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.13 THM-9

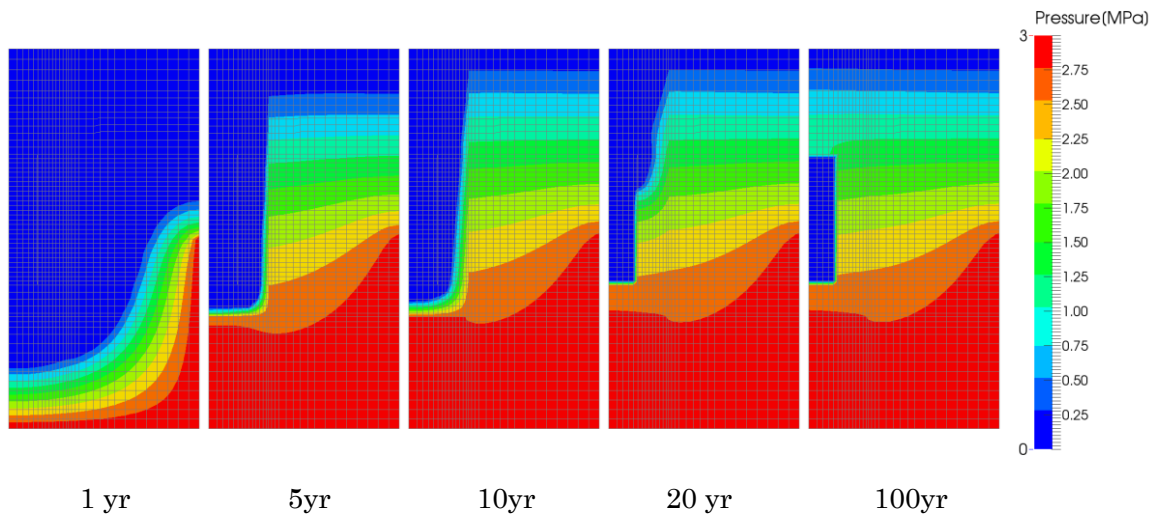


図 6.1.13-1 THM-9 岩盤部分・間隙水圧分布

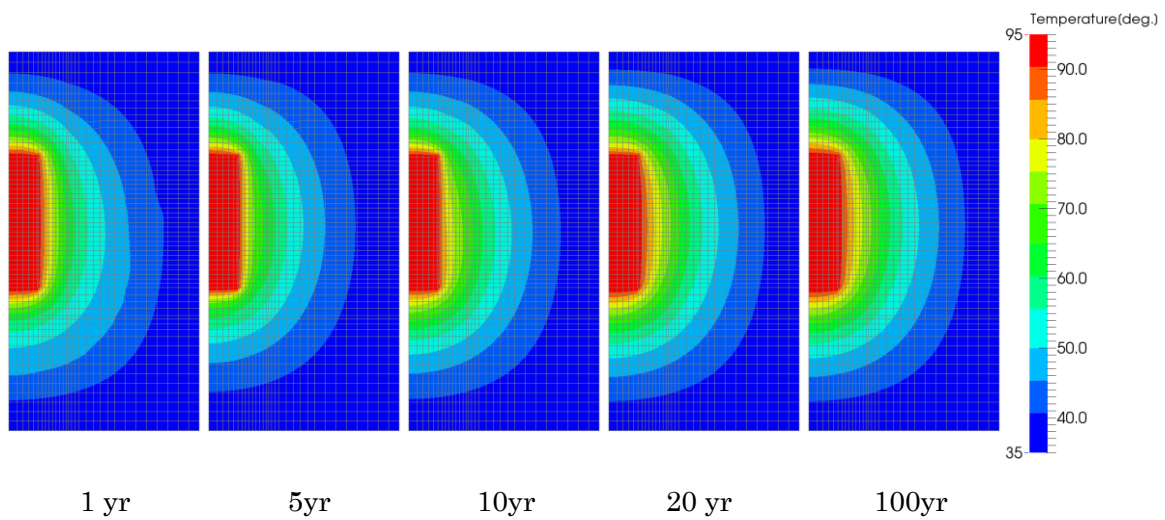


図 6.1.13-2 THM-9 岩盤部分・温度分布

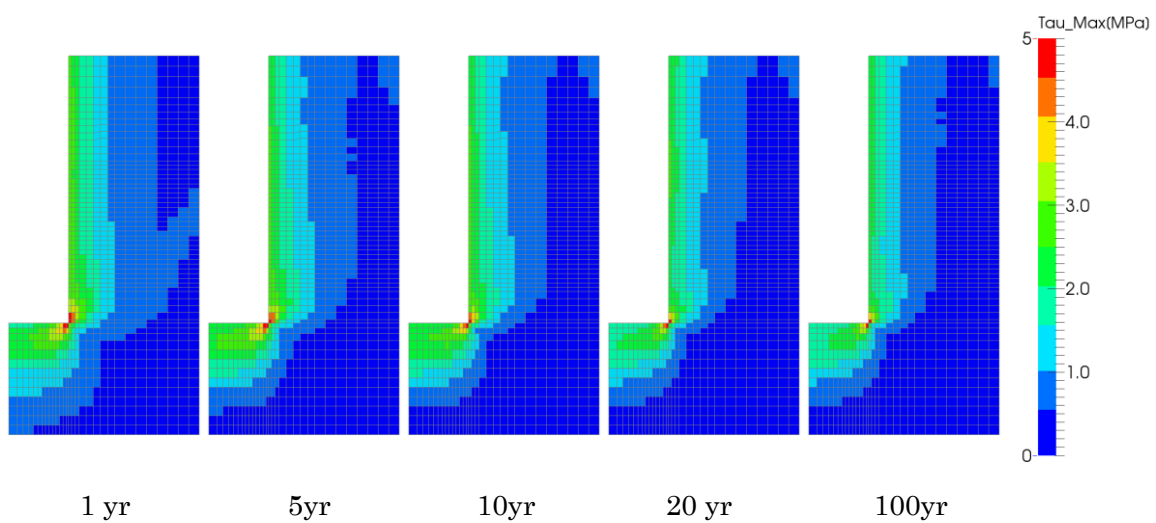


図 6.1.13-3 THM-9 岩盤部分・主せん断応力分布

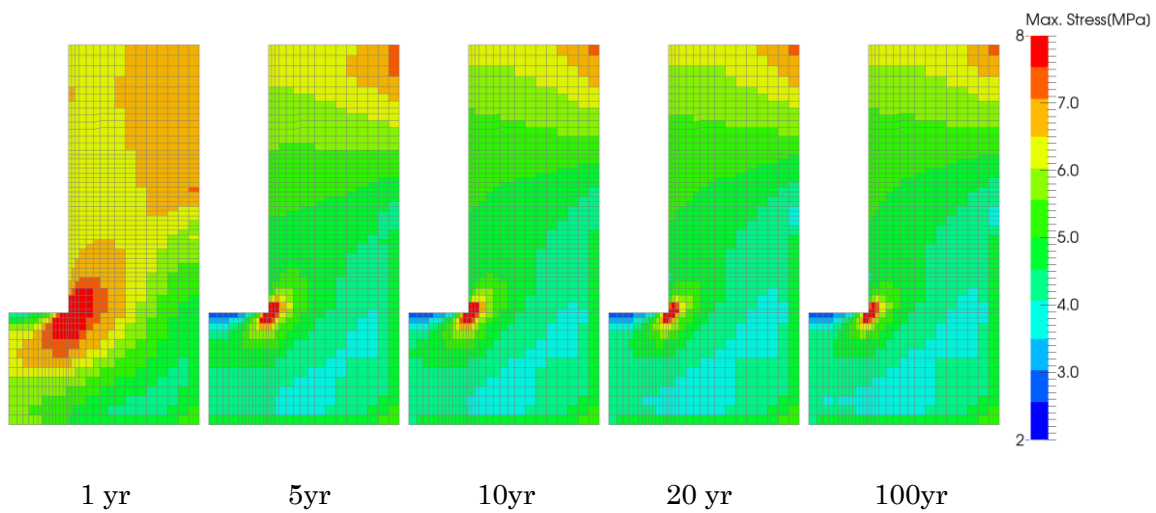


図 6.1.13-4 THM-9 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

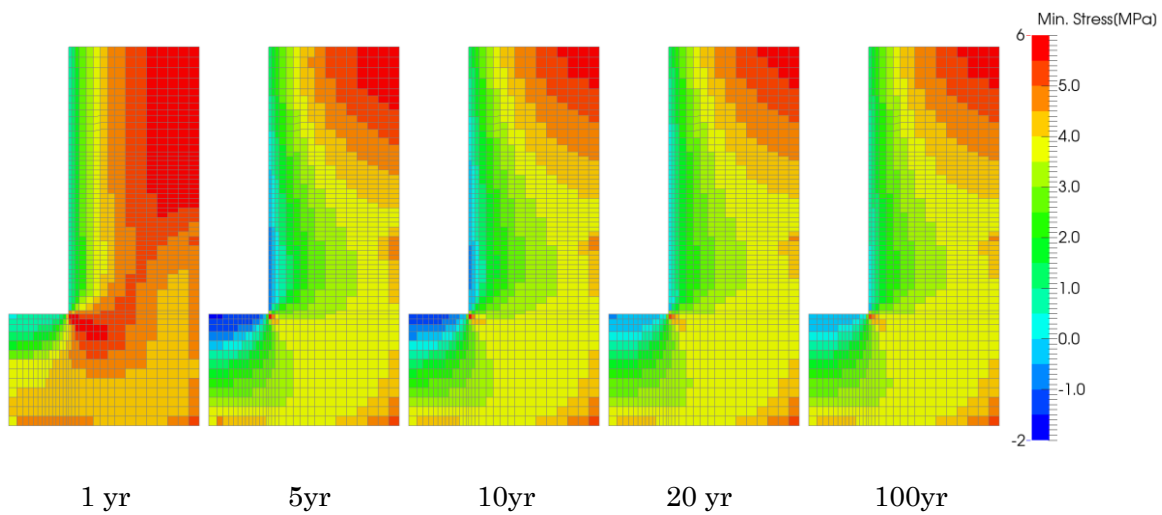


図 6.1.13-5 THM-9 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

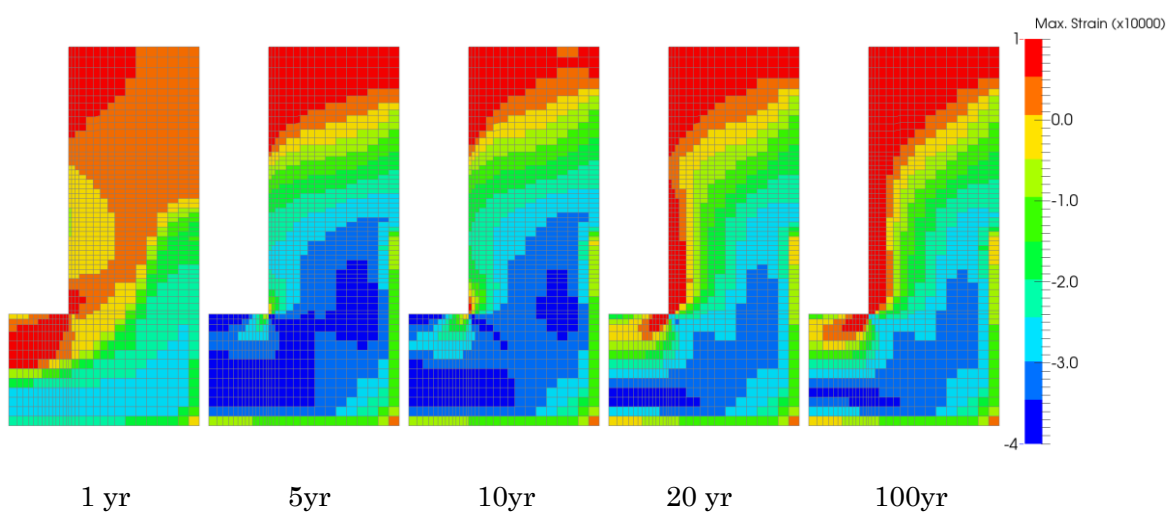


図 6.1.13-6 THM-9 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

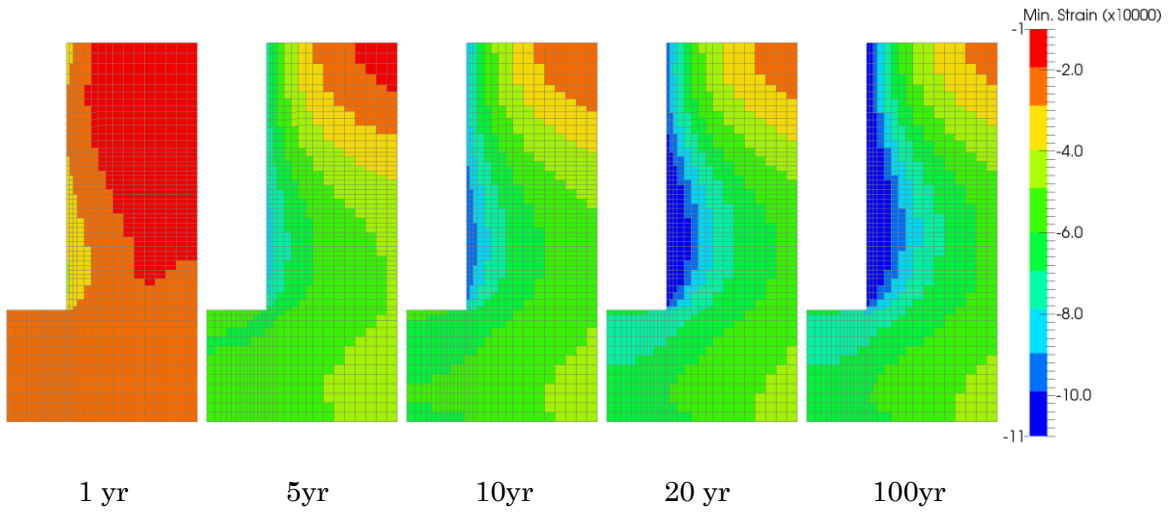


図 6.1.13-7 THM-9 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

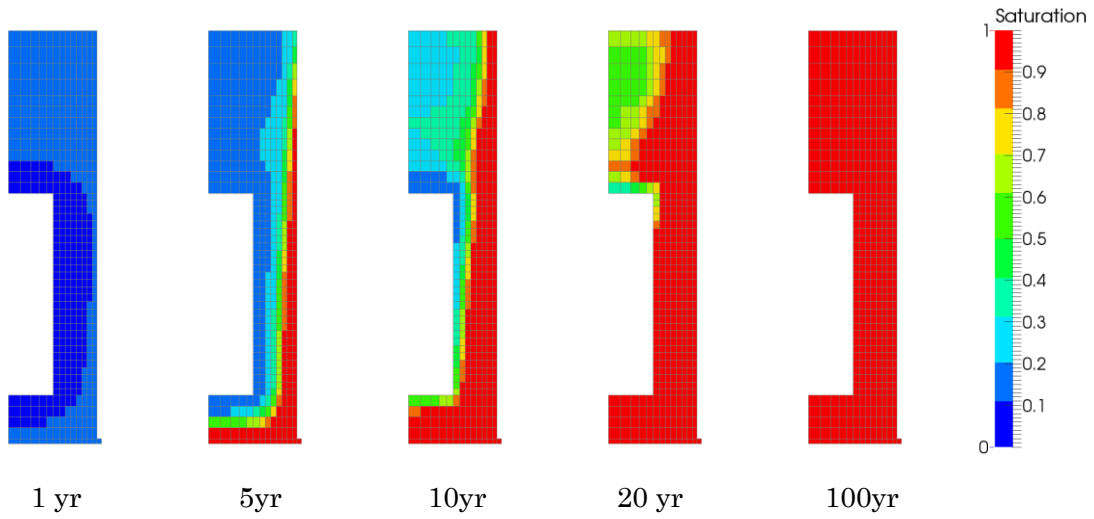


図 6.1.13-8 THM-9 ベントナイト部分・飽和度分布

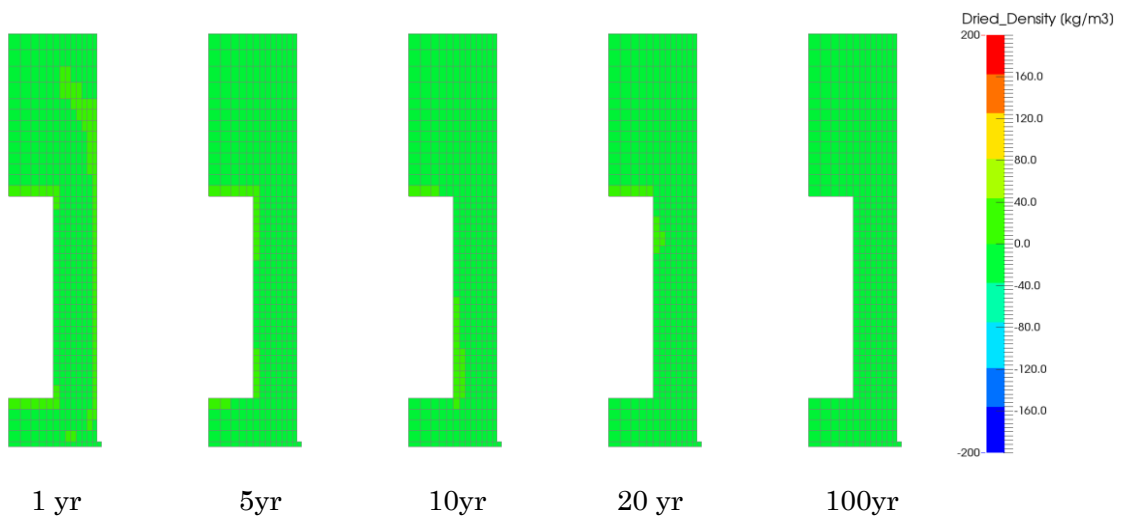


図 6.1.13-9 THM-9 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

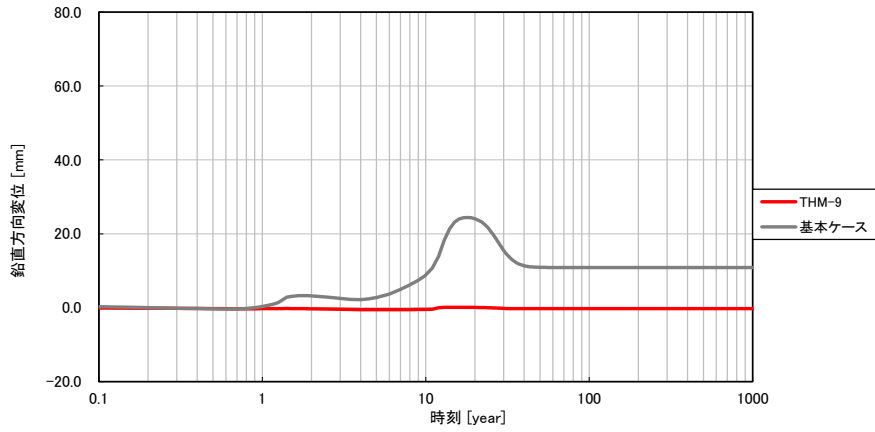


図 6.1.13-10 THM-9 鉛直方向の変位時刻歴

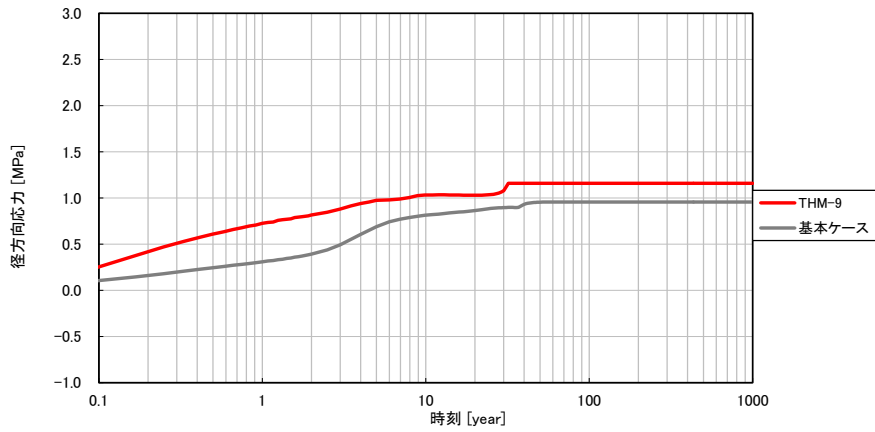


図 6.1.13-11 THM-9 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

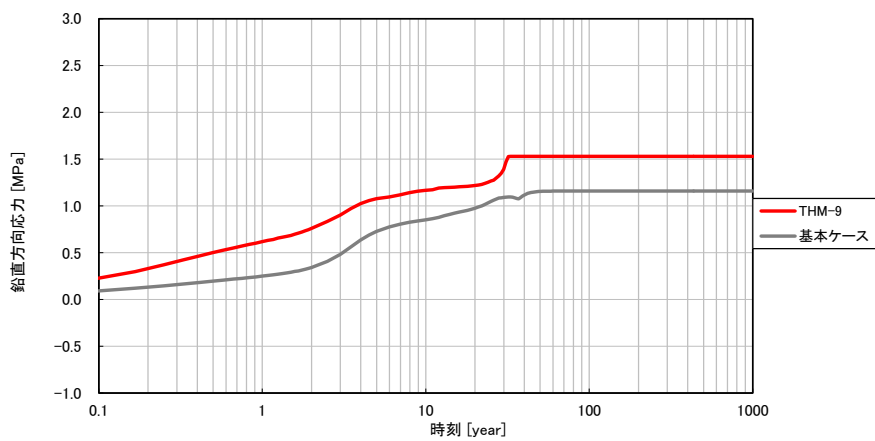
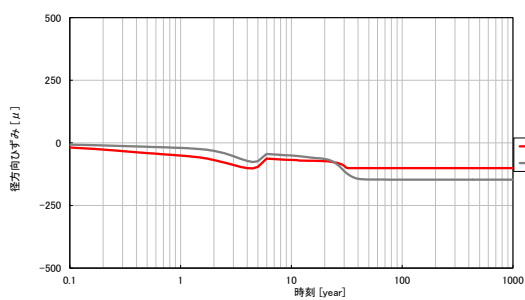
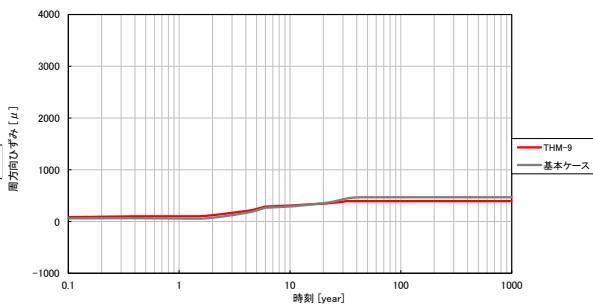


図 6.1.13-12 THM-9 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

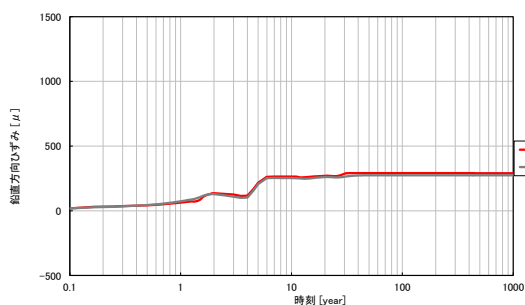


(a)径方向

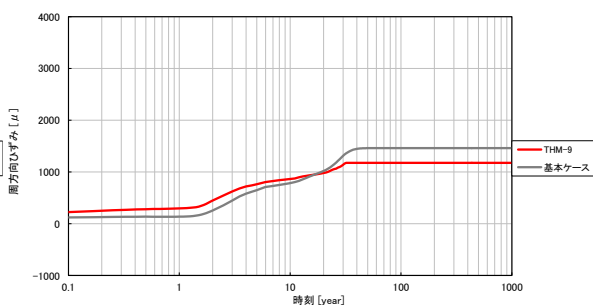


(b)周方向

図 6.1.13-13 THM-9 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

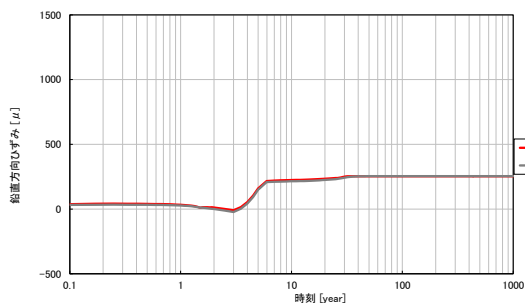


(a)鉛直方向

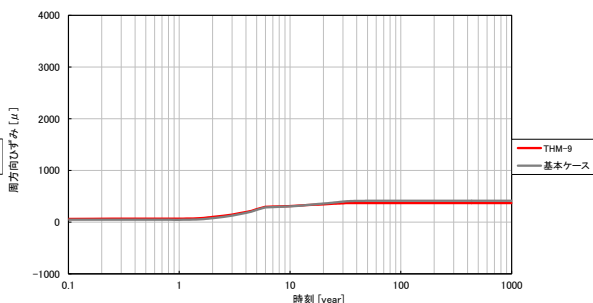


(b)周方向

図 6.1.13-14 THM-9 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.13-15 THM-9 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.14 THM-10

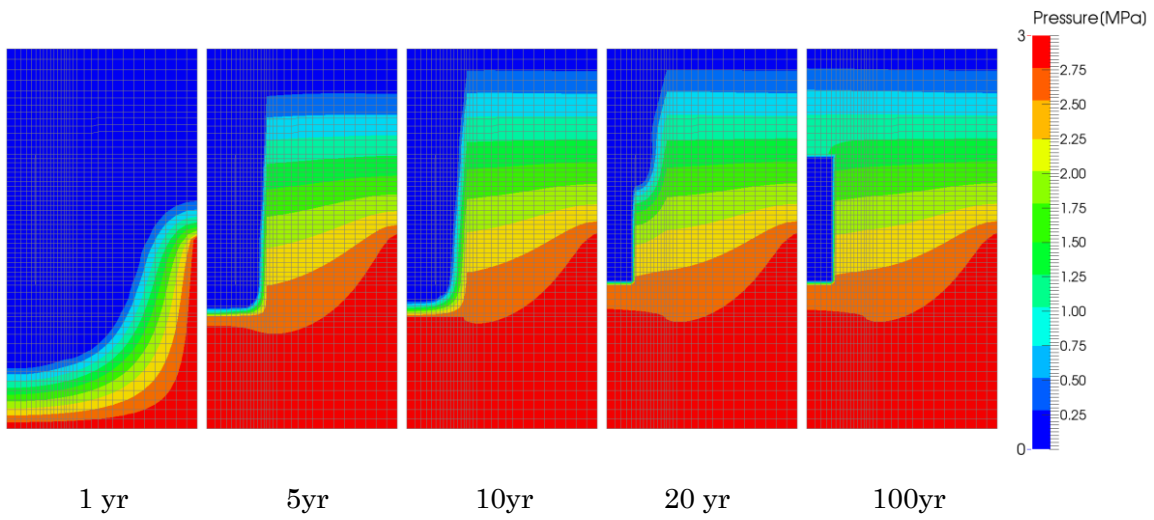


図 6.1.14-1 THM-10 岩盤部分・間隙水压分布

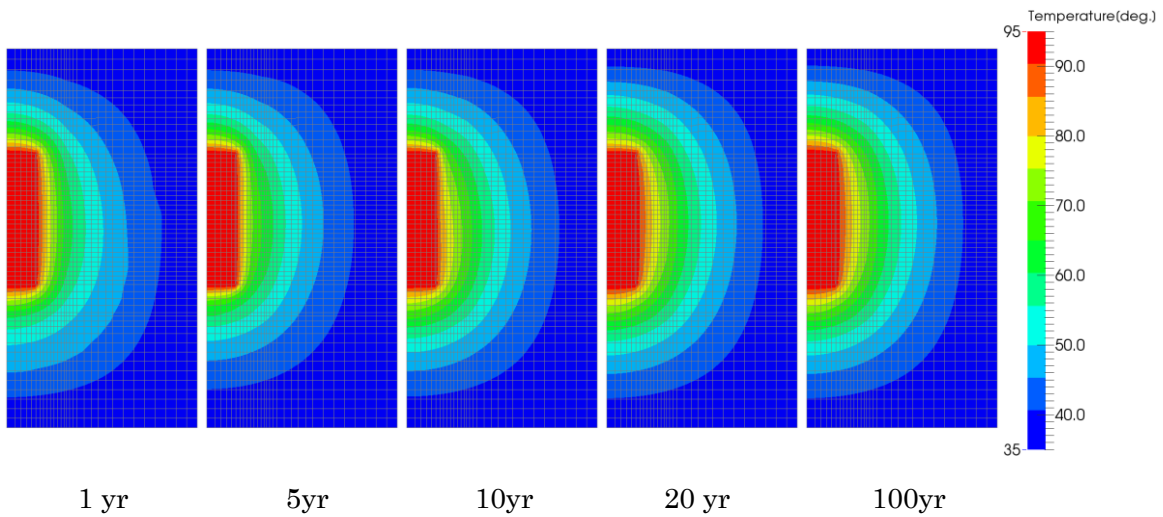


図 6.1.14-2 THM-10 岩盤部分・温度分布

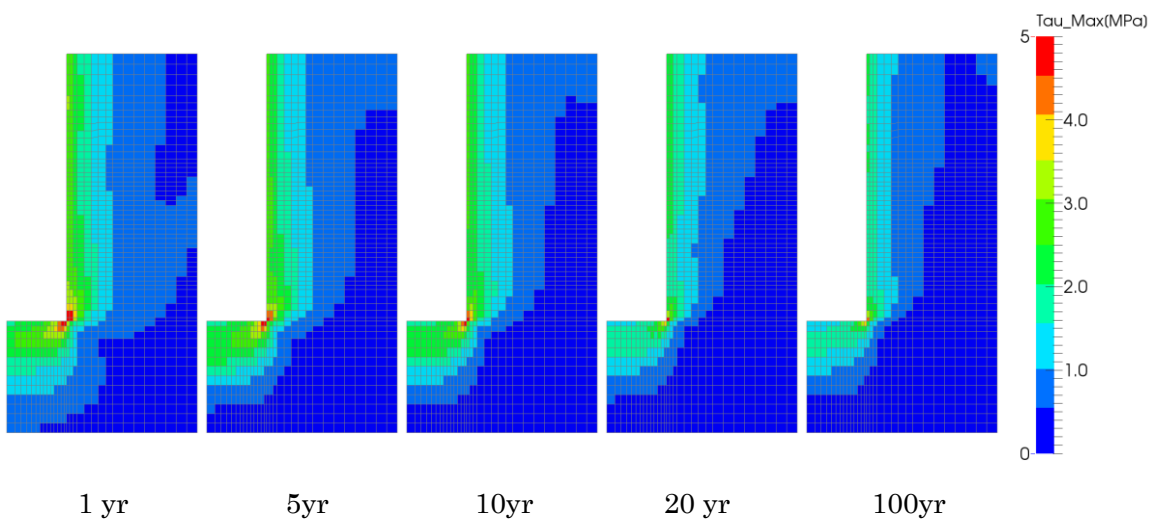


図 6.1.14-3 THM-10 岩盤部分・主せん断応力分布

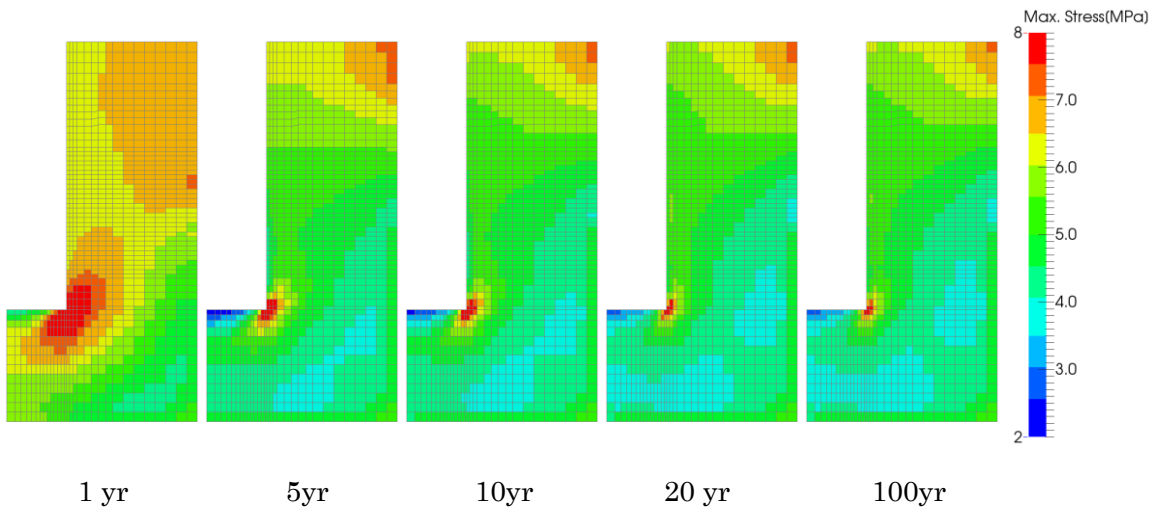


図 6.1.14-4 THM-10 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

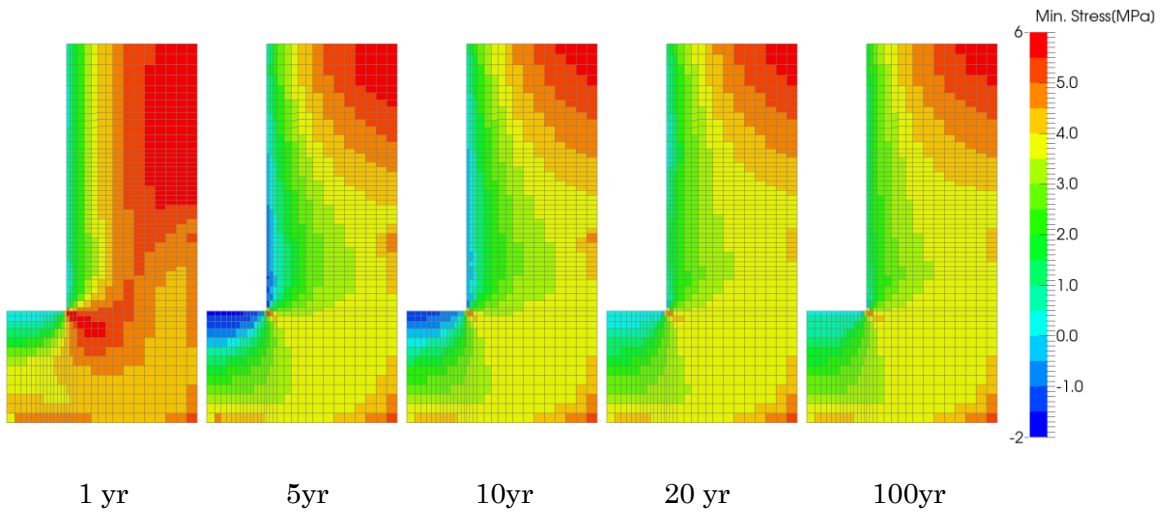


図 6.1.14-5 THM-10 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

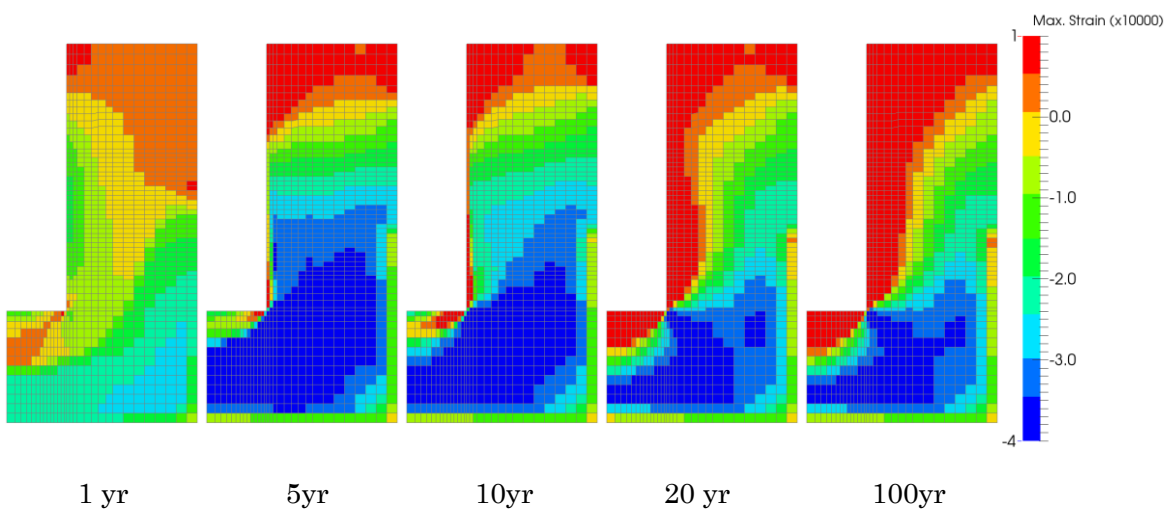


図 6.1.14-6 THM-10 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

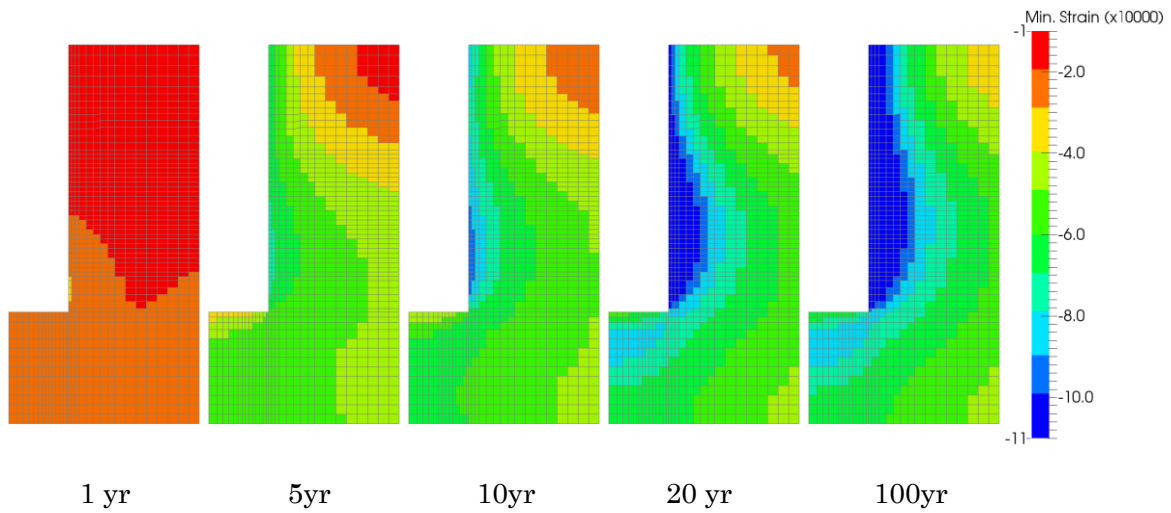


図 6.1.14-7 THM-10 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

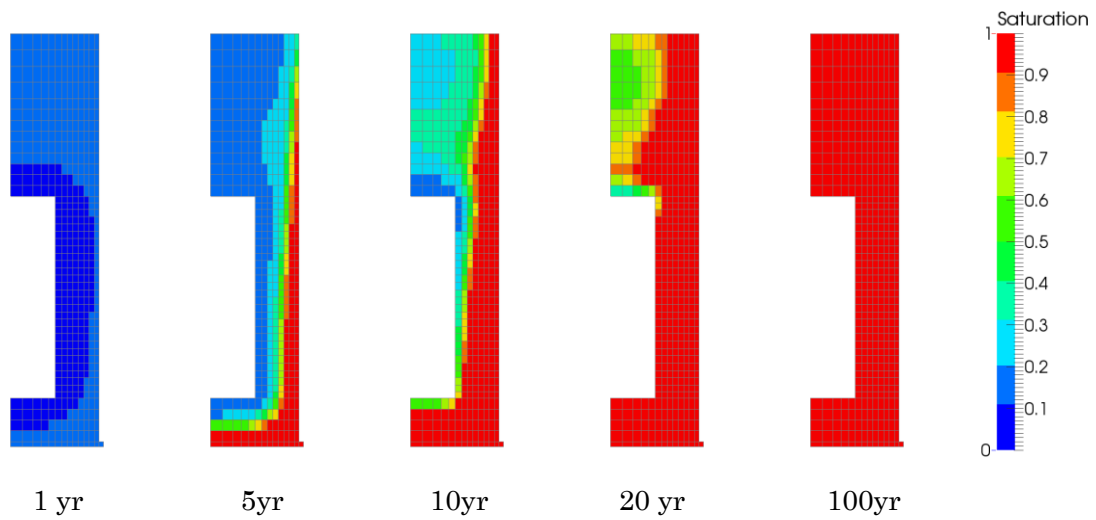


図 6.1.14-8 THM-10 ベントナイト部分・飽和度分布

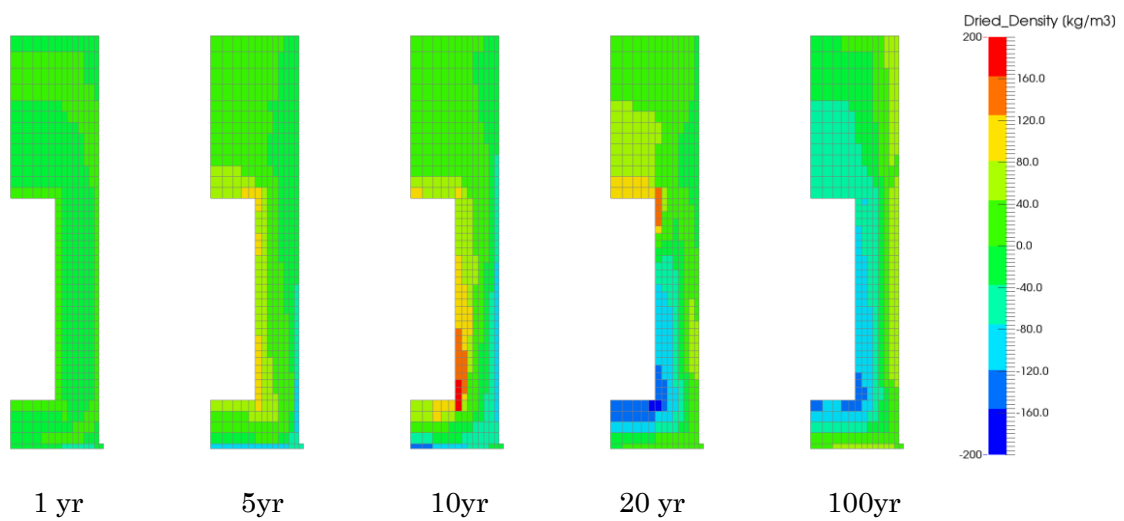


図 6.1.14-9 THM-10 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

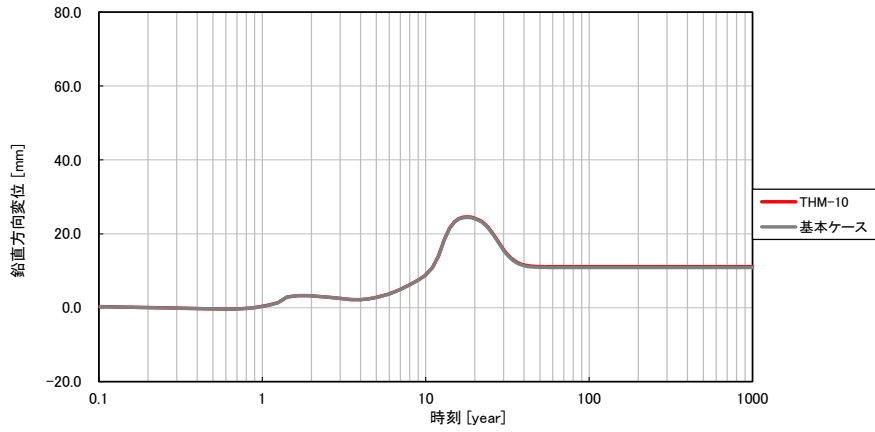


図 6.1.14-10 THM-10 鉛直方向の変位時刻歴

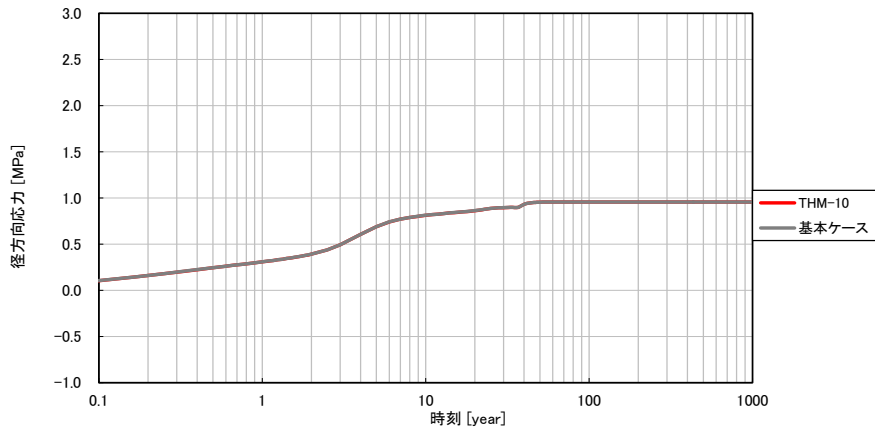


図 6.1.14-11 THM-10 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

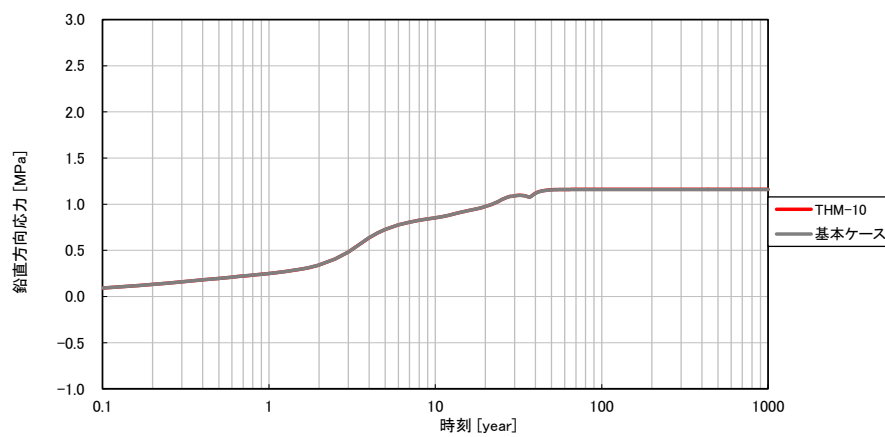
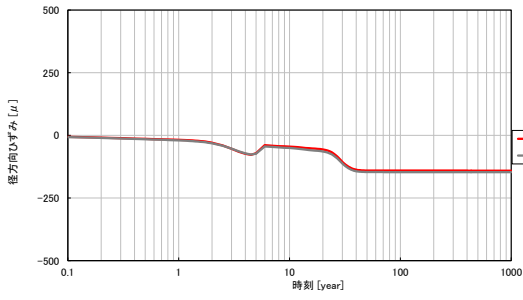
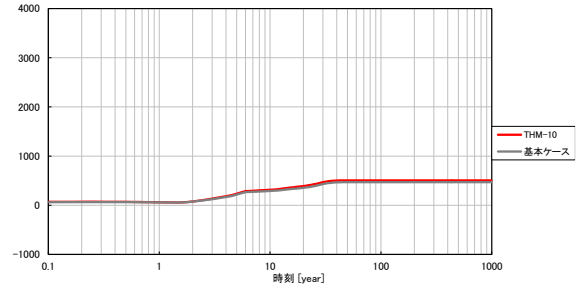


図 6.1.14-12 THM-10 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

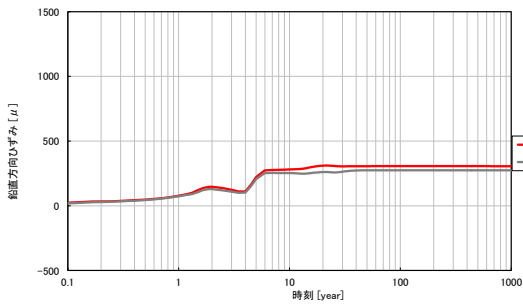


(a)径方向

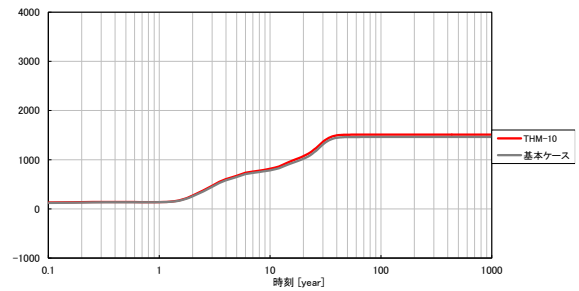


(b)周方向

図 6.1.14-13 THM-10 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

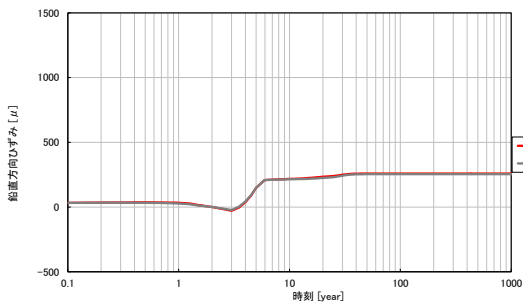


(a)鉛直方向

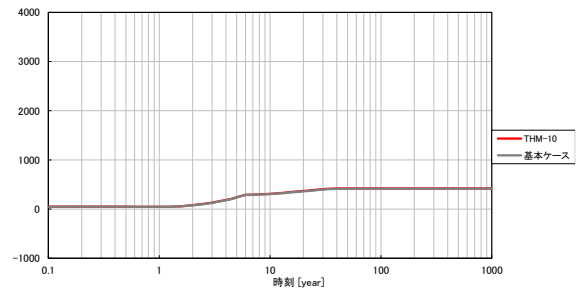


(b)周方向

図 6.1.14-14 THM-10 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.14-15 THM-10 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.15 HM-0

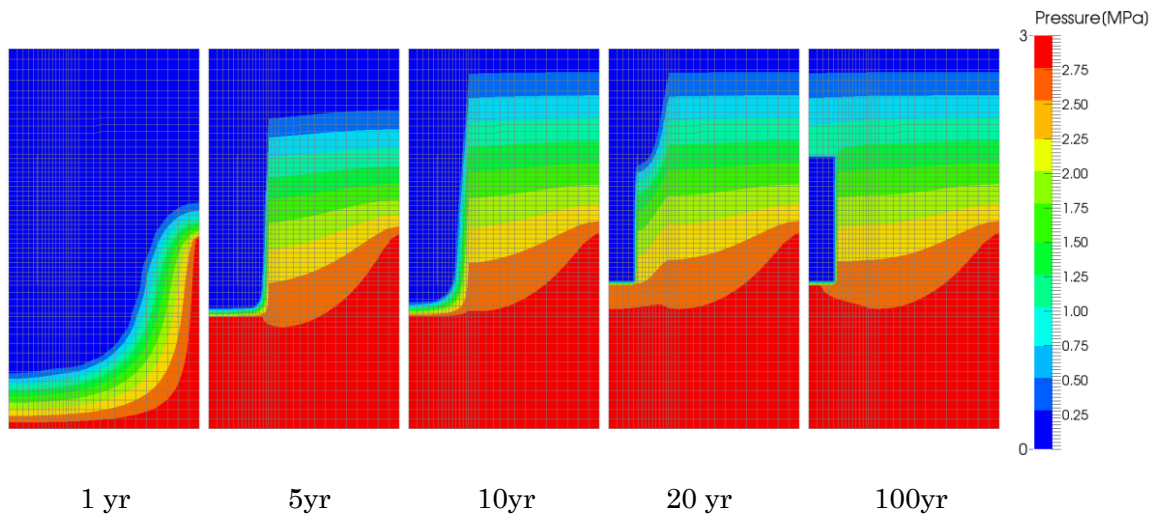


図 6.1.15-1 HM-0 岩盤部分・間隙水压分布

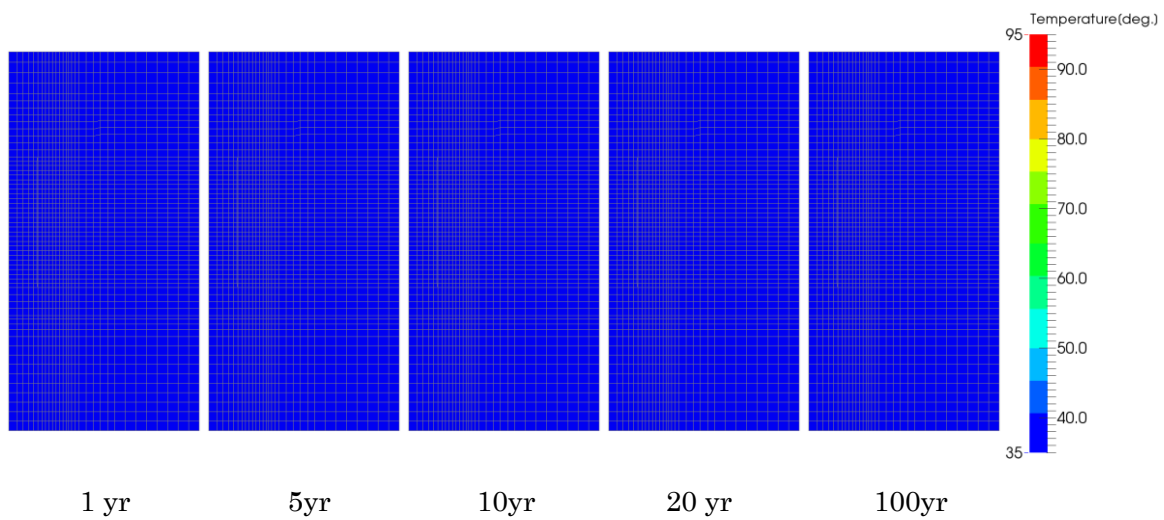


図 6.1.15-2 HM-0 岩盤部分・温度分布

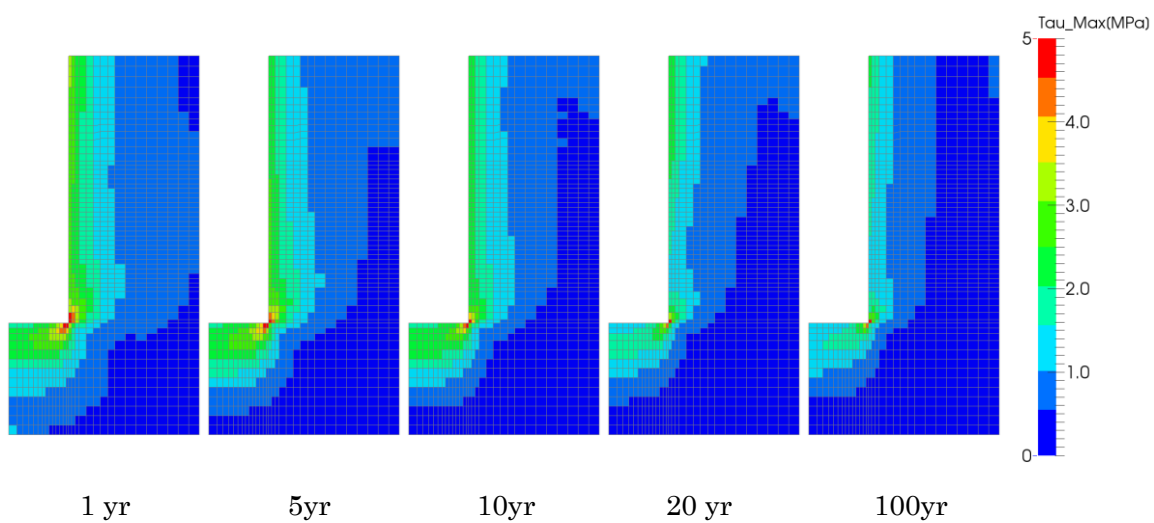


図 6.1.15-3 HM-0 岩盤部分・主せん断応力分布

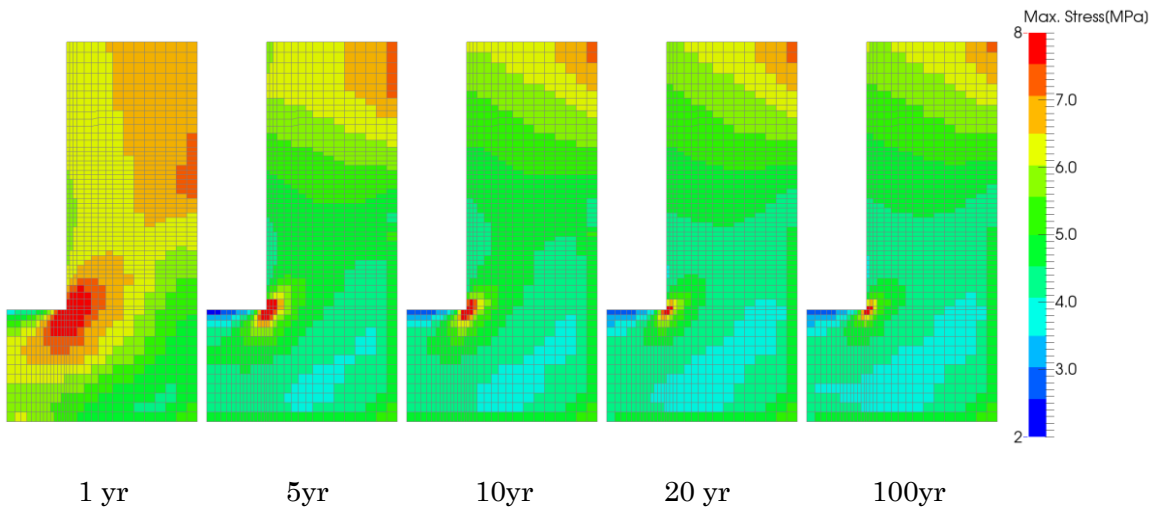


図 6.1.15-4 HM-0 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

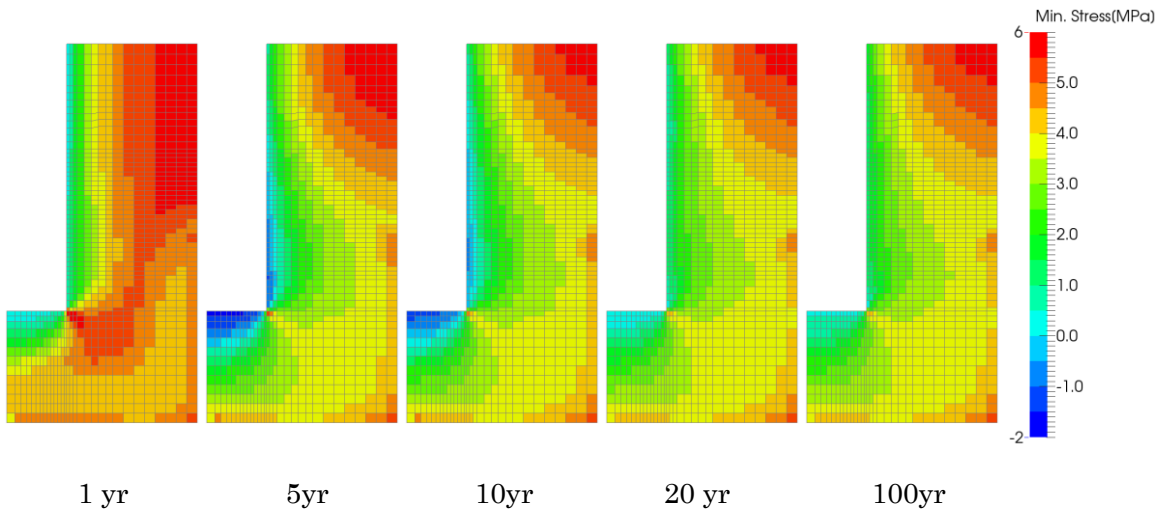


図 6.1.15-5 HM-0 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

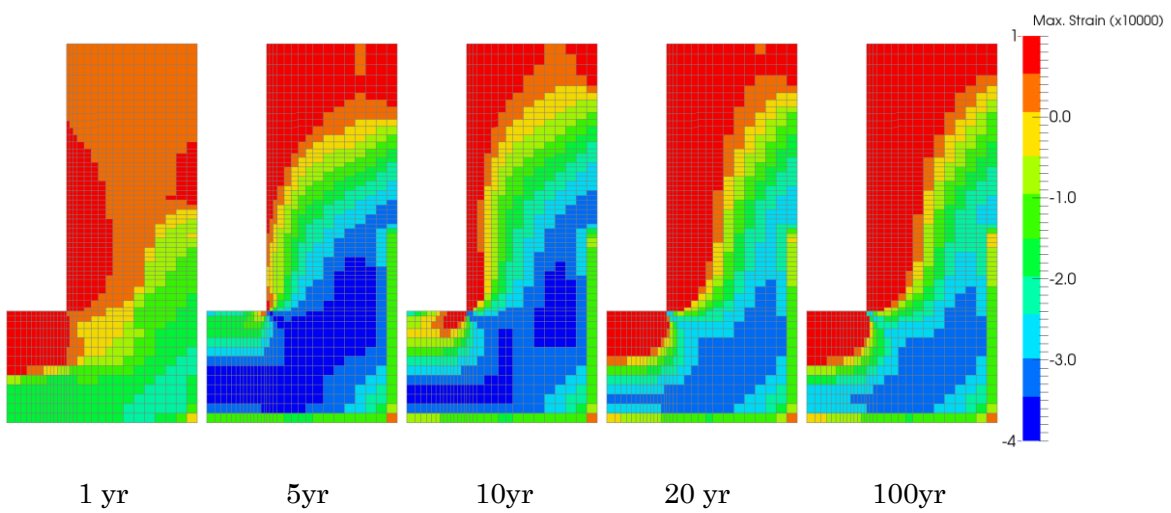


図 6.1.15-6 HM-0 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

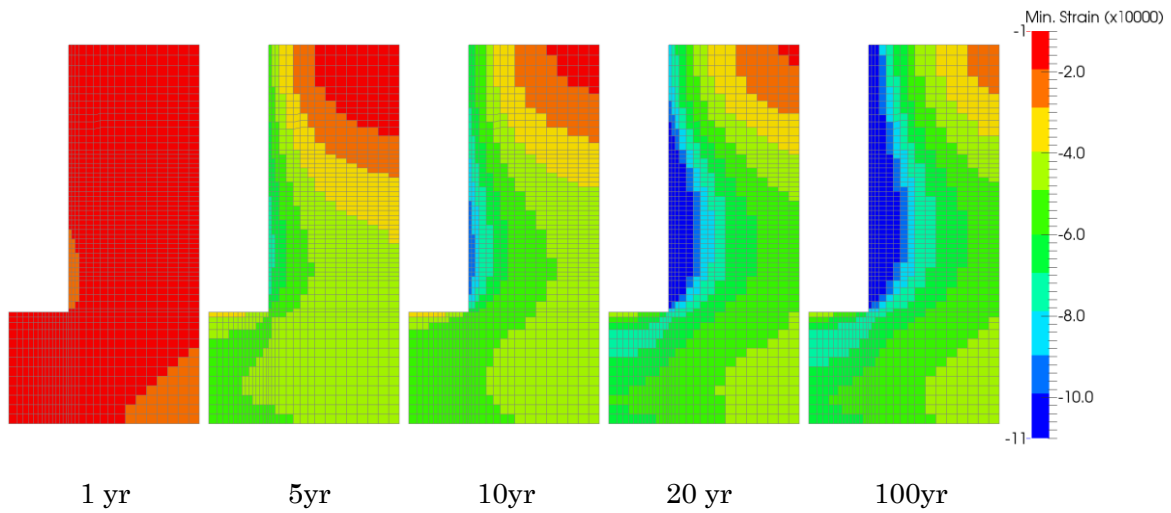


図 6.1.15-7 HM-0 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

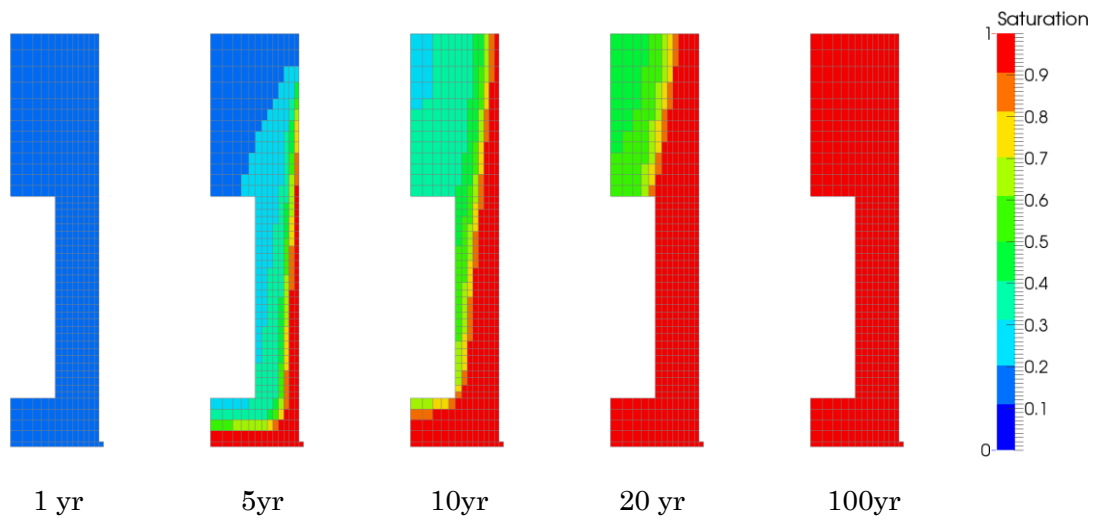


図 6.1.15-8 HM-0 ベントナイト部分・飽和度分布

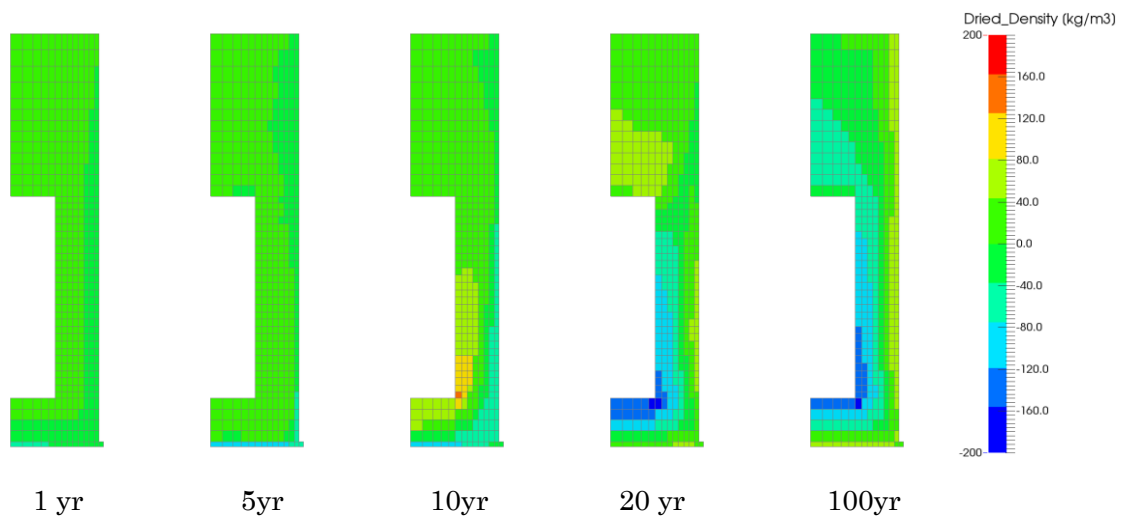


図 6.1.15-9 HM-0 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

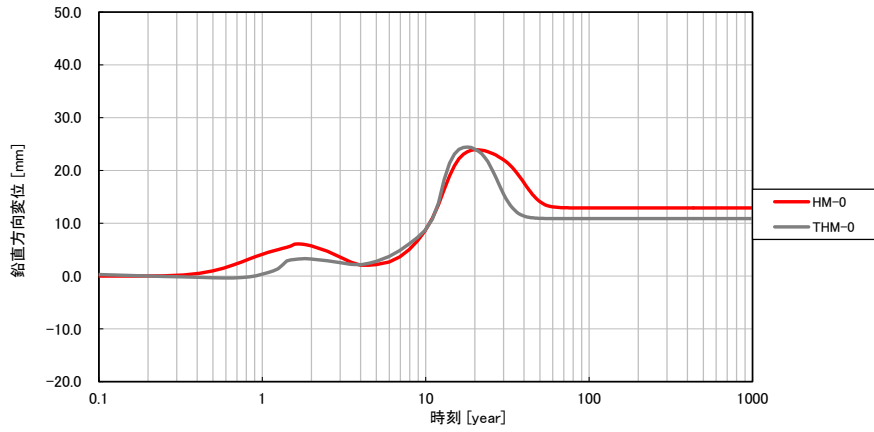


図 6.1.15-10 HM-0 鉛直方向の変位時刻歴

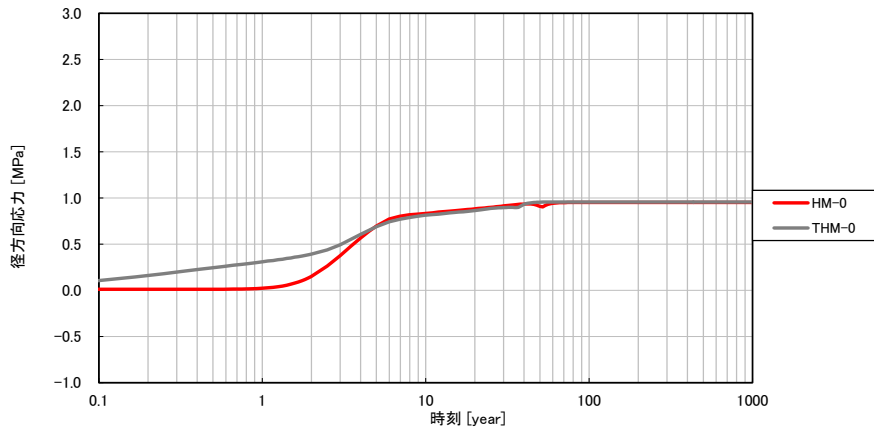


図 6.1.15-11 HM-0 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

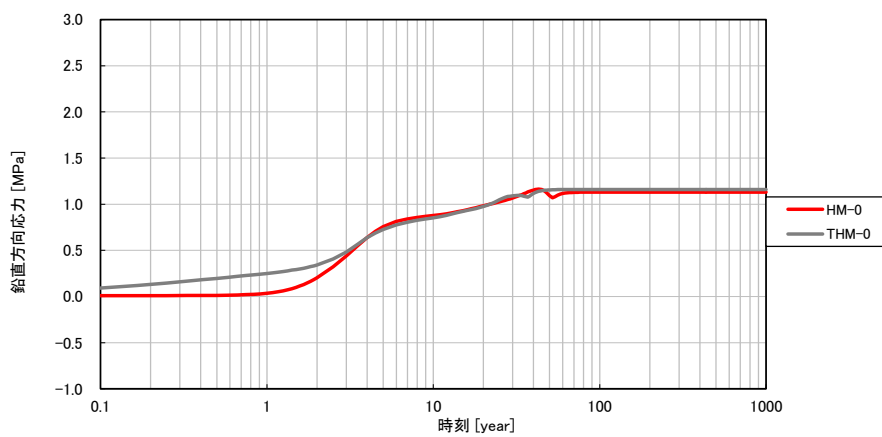
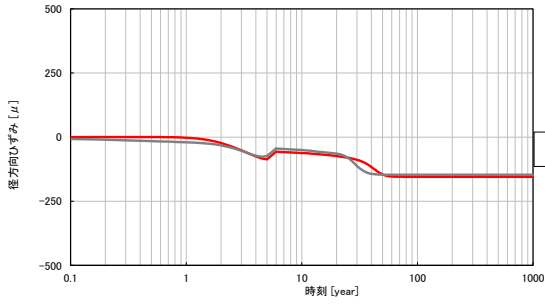
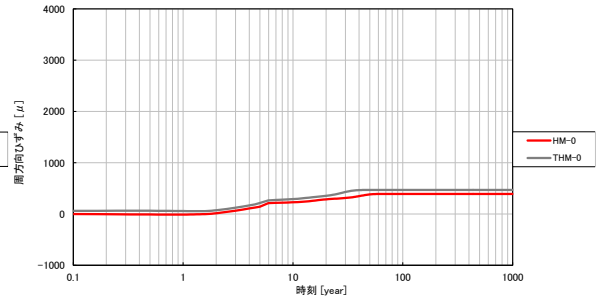


図 6.1.15-12 HM-0 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

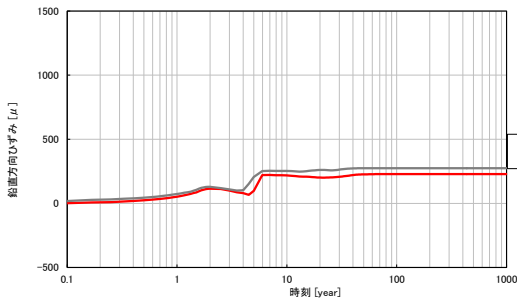


(a)径方向

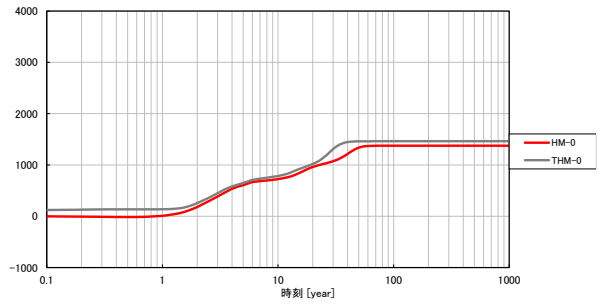


(b)周方向

図 6.1.15-13 HM-0 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

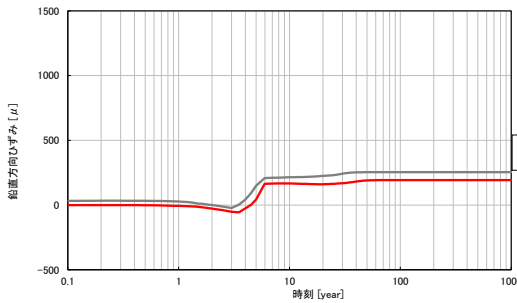


(a)鉛直方向

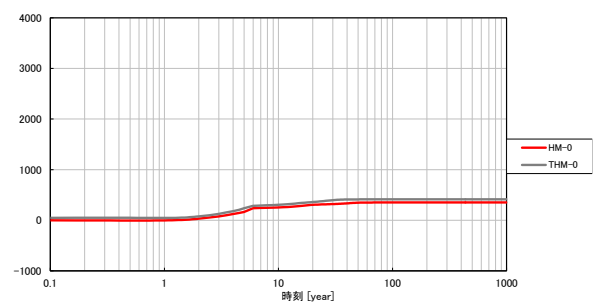


(b)周方向

図 6.1.15-14 HM-0 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.15-15 HM-0 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.16 HM-1

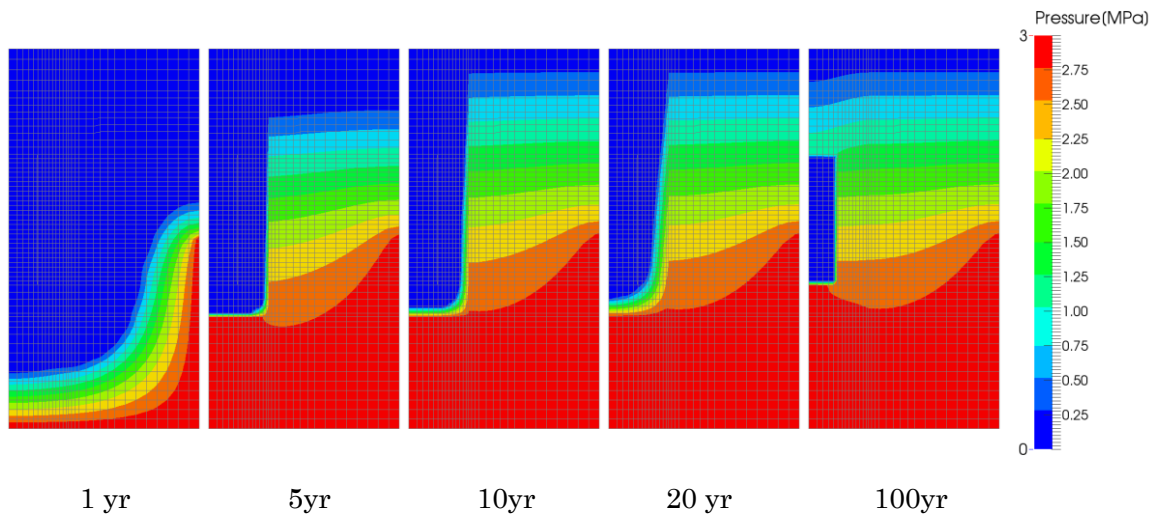


図 6.1.16-1 HM-1 岩盤部分・間隙水圧分布

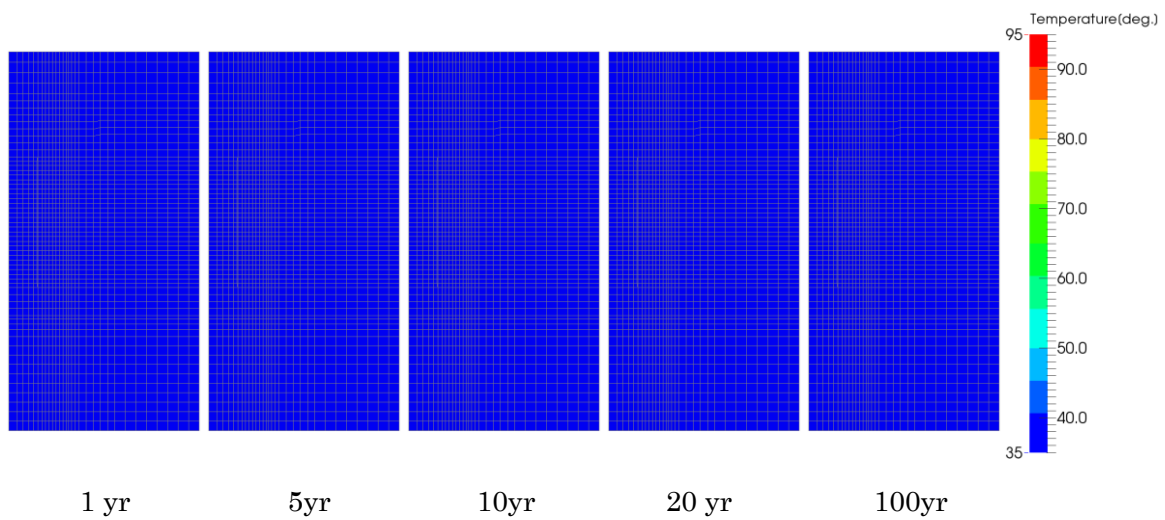


図 6.1.16-2 HM-1 岩盤部分・温度分布

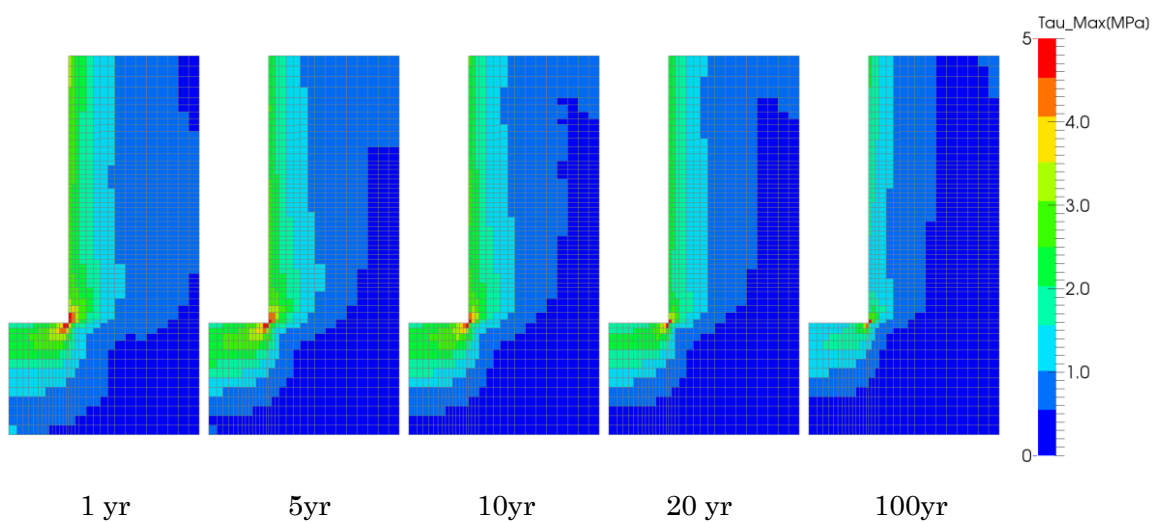


図 6.1.16-3 HM-1 岩盤部分・主せん断応力分布

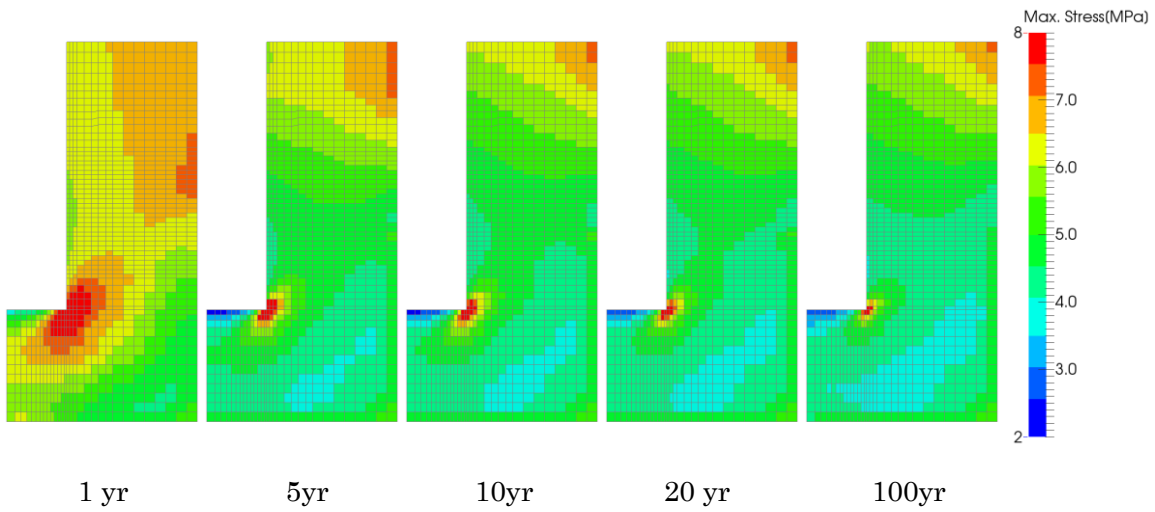


図 6.1.16-4 HM-1 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

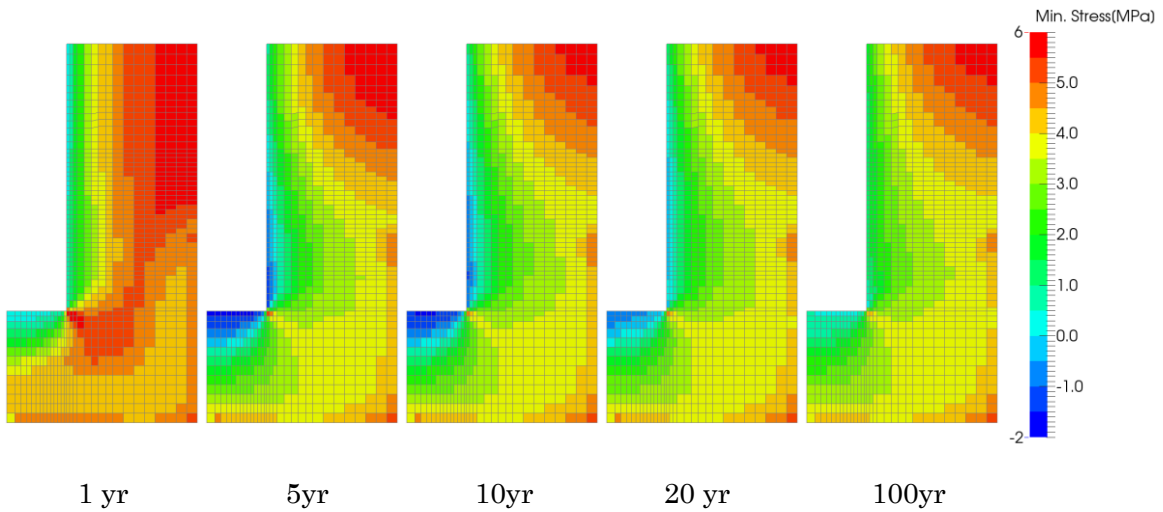


図 6.1.16-5 HM-1 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

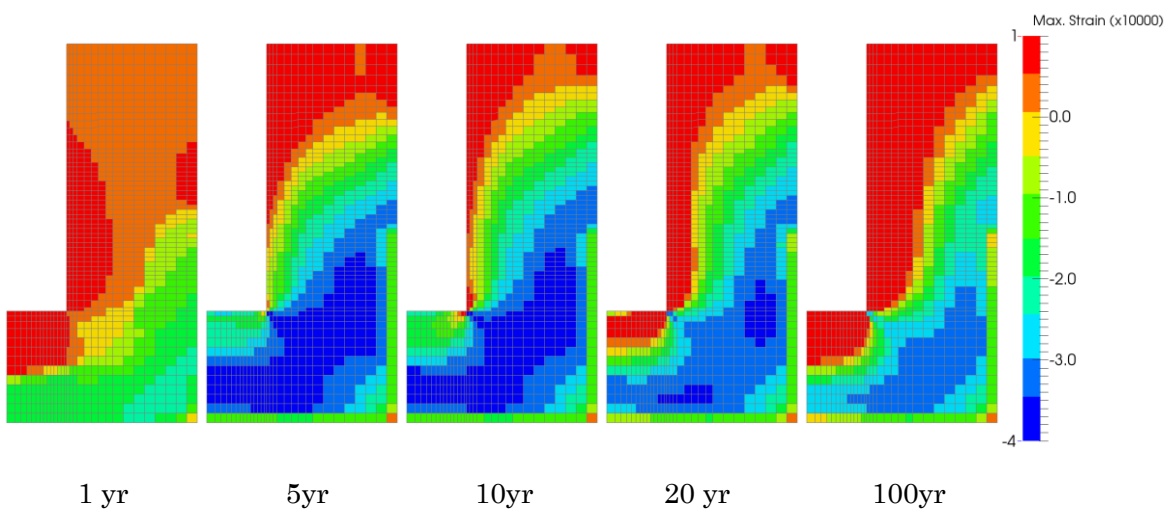


図 6.1.16-6 HM-1 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

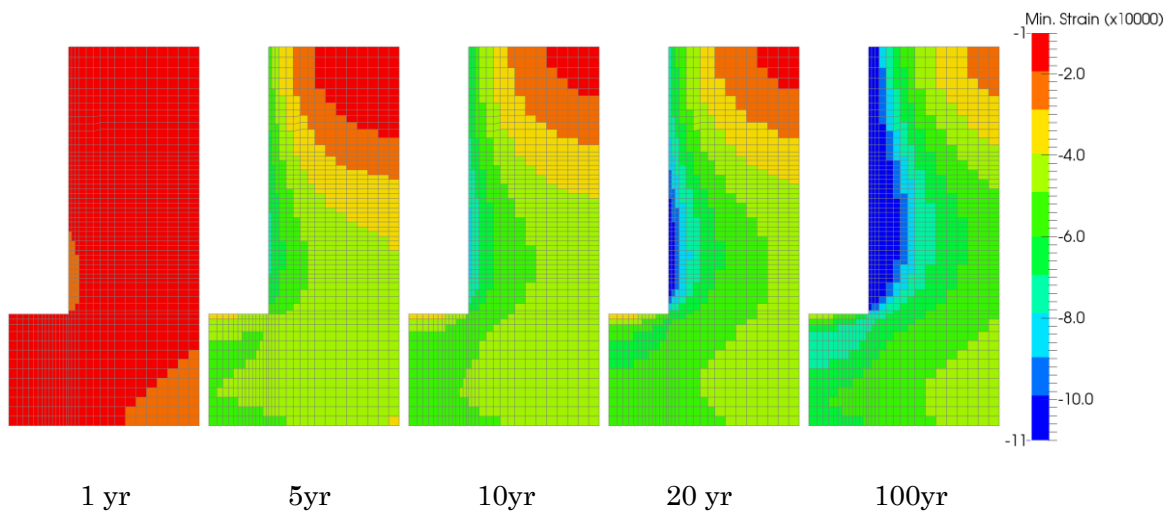


図 6.1.16-7 HM-1 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

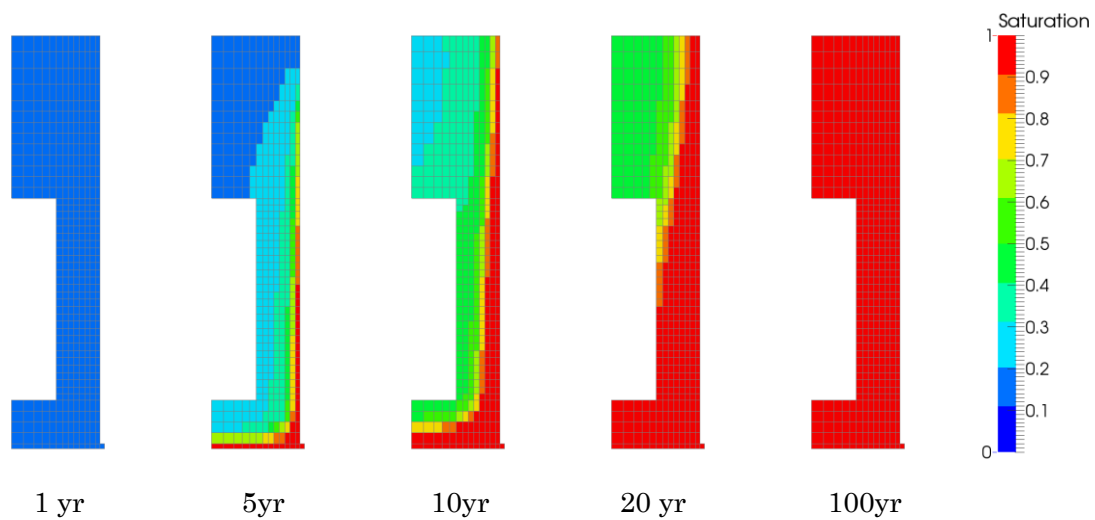


図 6.1.16-8 HM-1 ベントナイト部分・飽和度分布

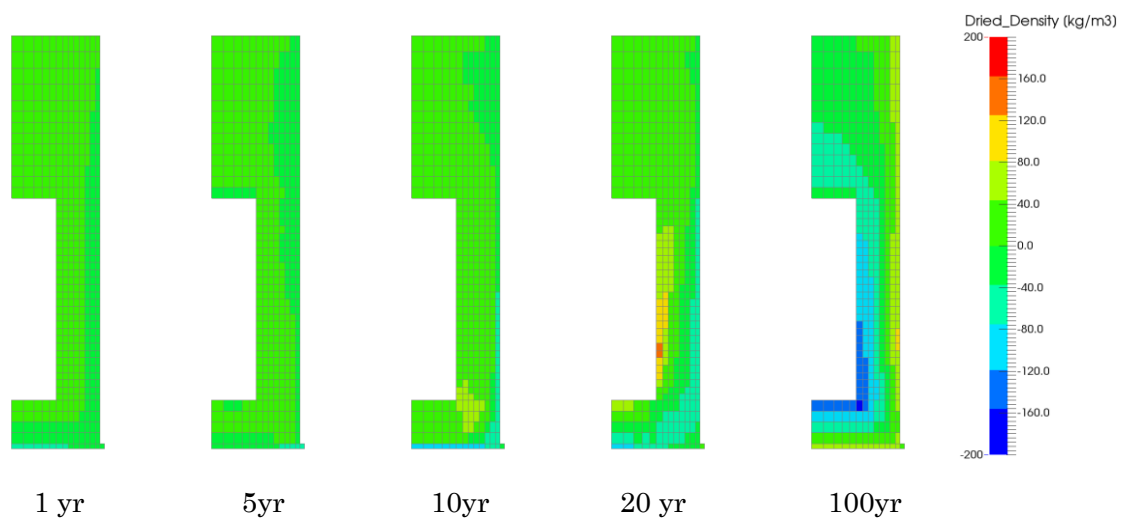


図 6.1.16-9 HM-1 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

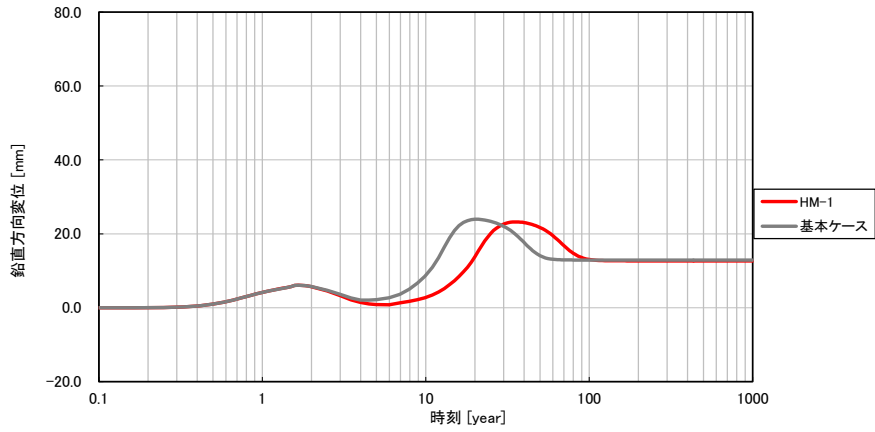


図 6.1.16-10 HM-1 鉛直方向の変位時刻歴

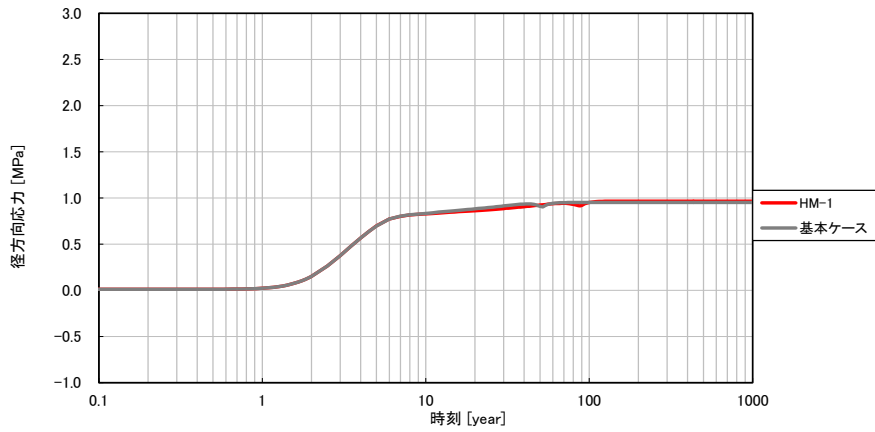


図 6.1.16-11 HM-1 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

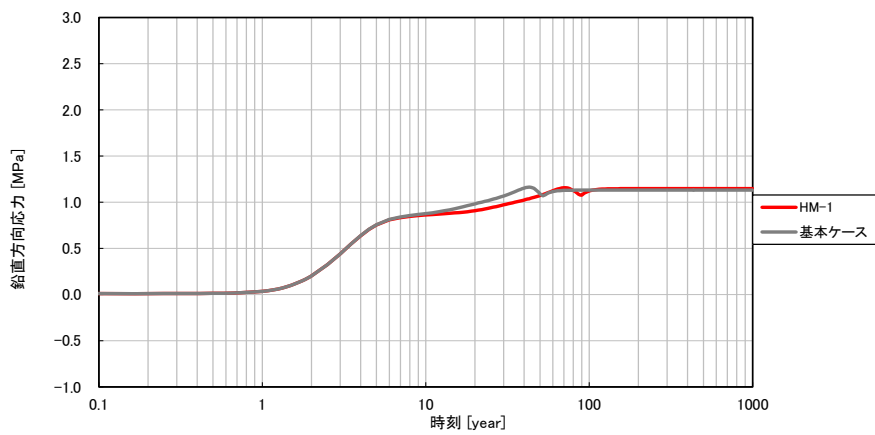
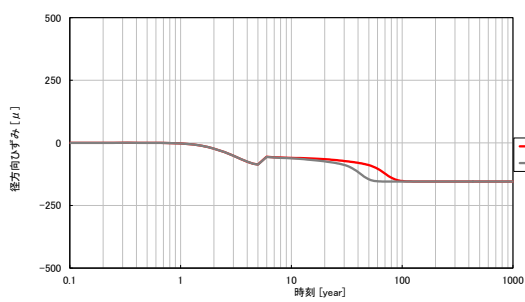
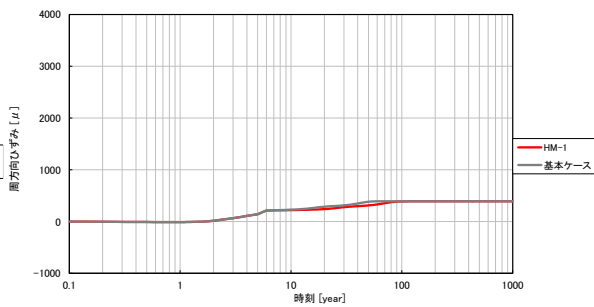


図 6.1.16-12 HM-1 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

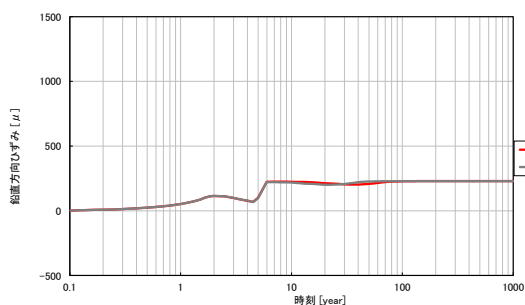


(a)径方向

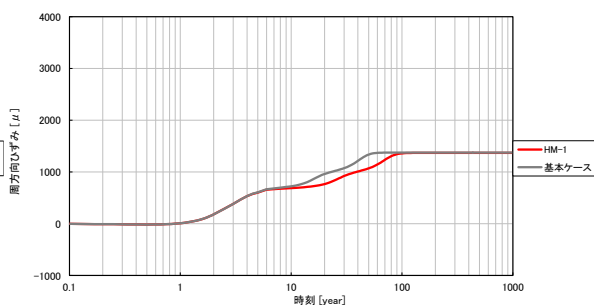


(b)周方向

図 6.1.16-13 HM-1 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

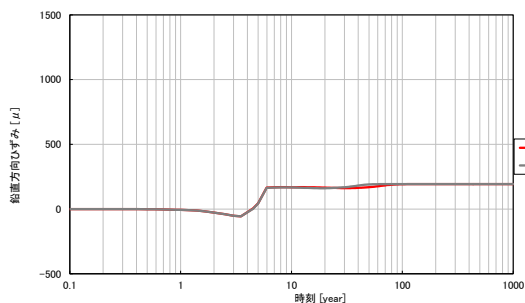


(a)鉛直方向

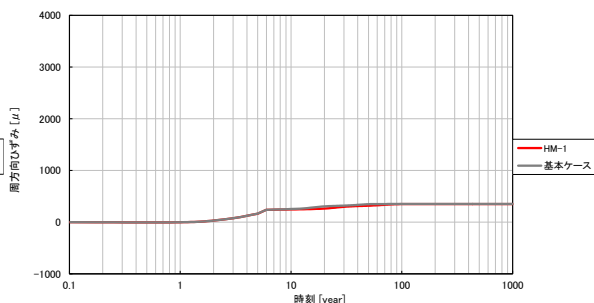


(b)周方向

図 6.1.16-14 HM-1 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.16-15 HM-1 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.17 HM-2

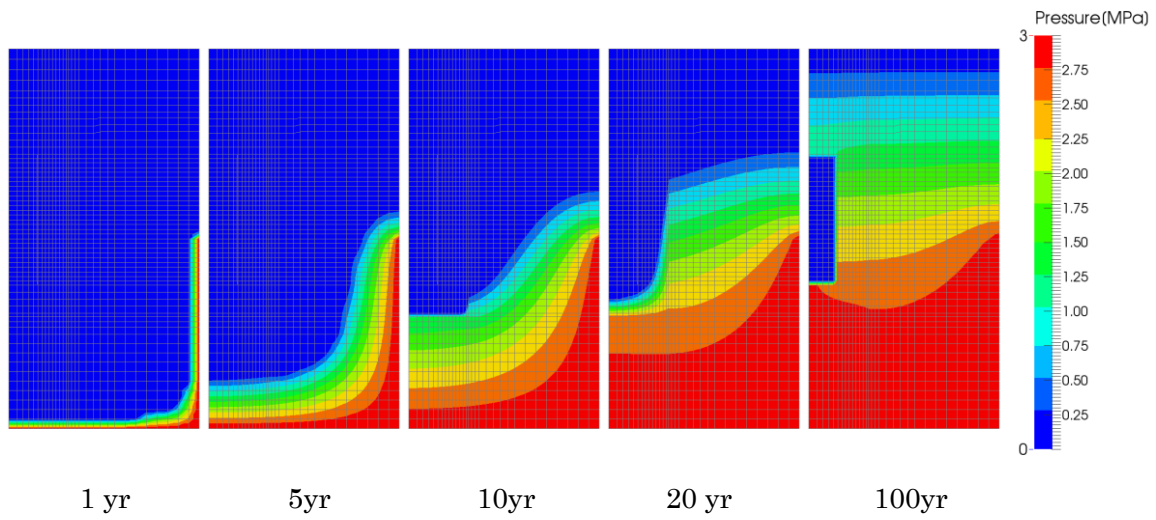


図 6.1.17-1 HM-2 岩盤部分・間隙水圧分布

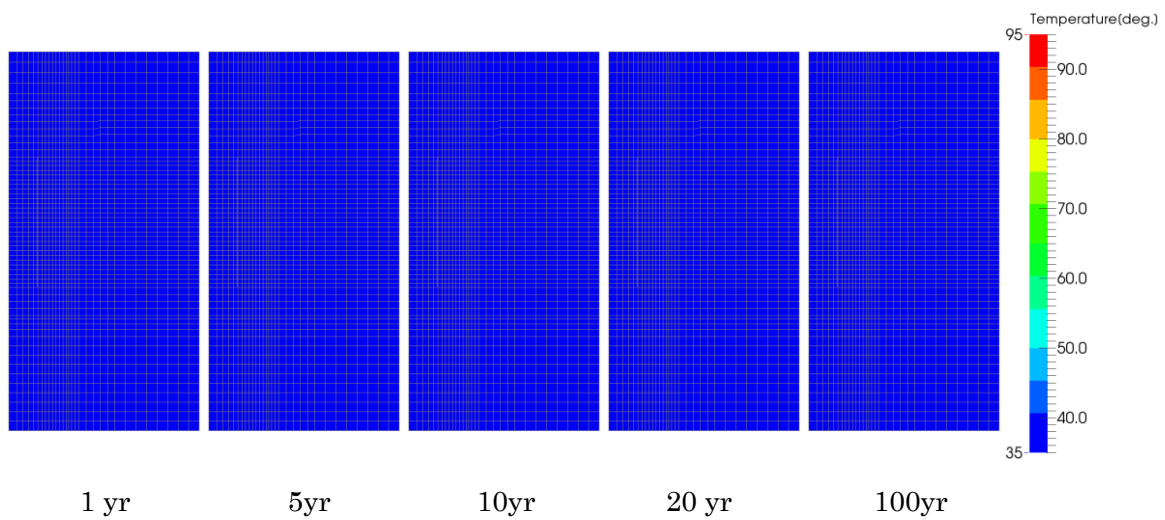


図 6.1.17-2 HM-2 岩盤部分・温度分布

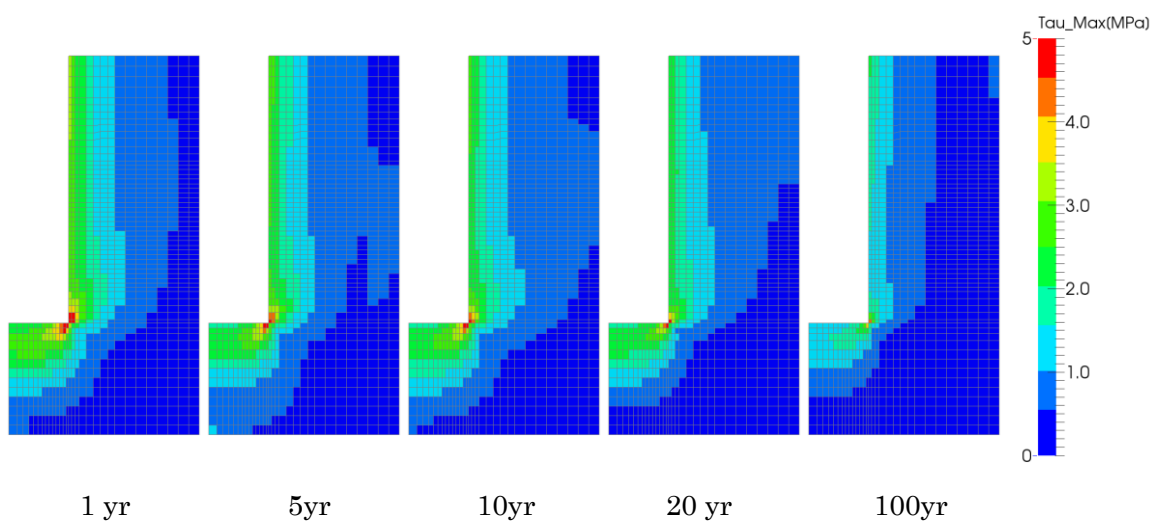


図 6.1.17-3 HM-2 岩盤部分・主せん断応力分布

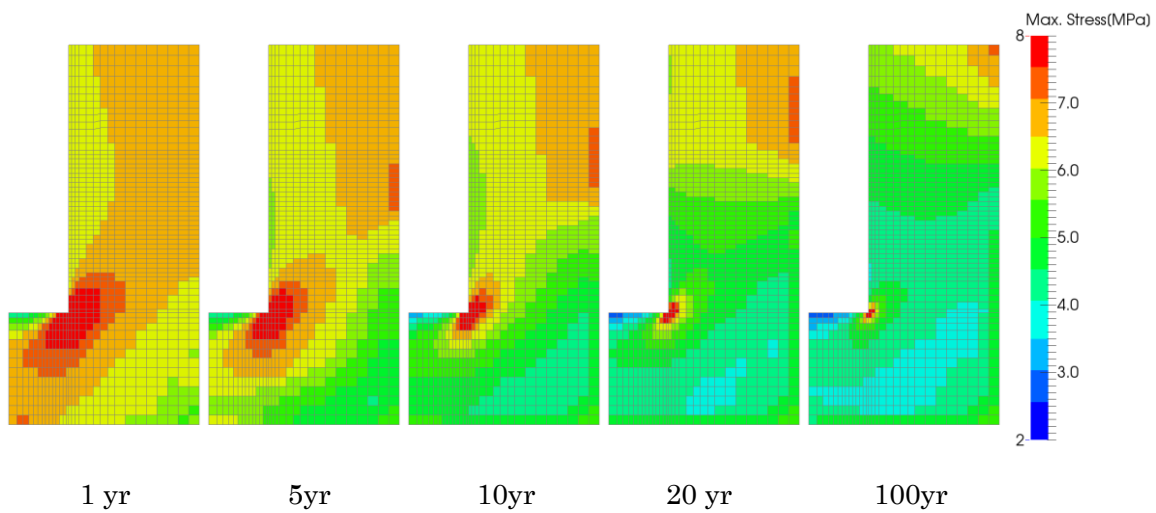


図 6.1.17-4 HM-2 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

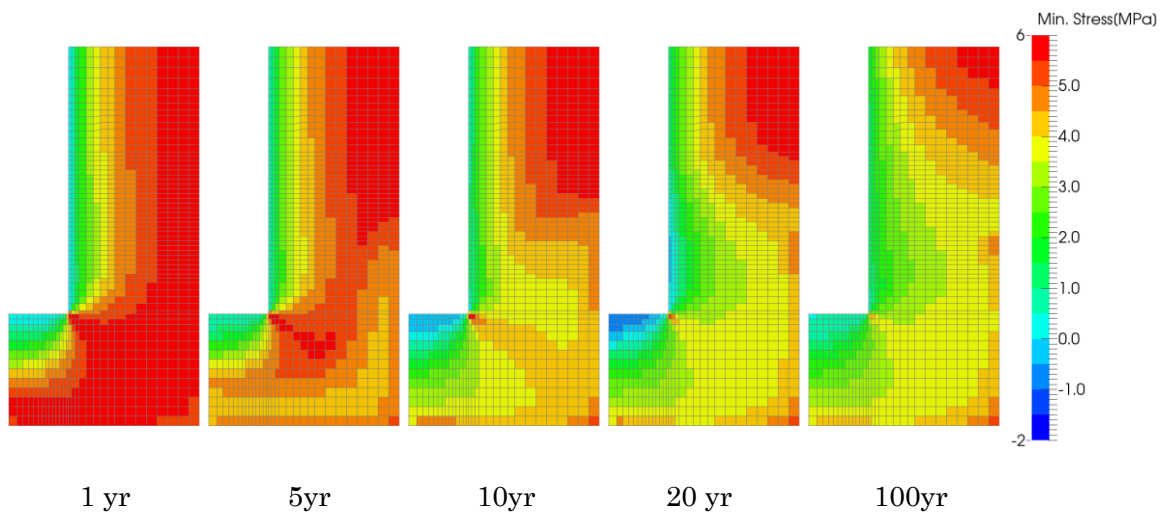


図 6.1.17-5 HM-2 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

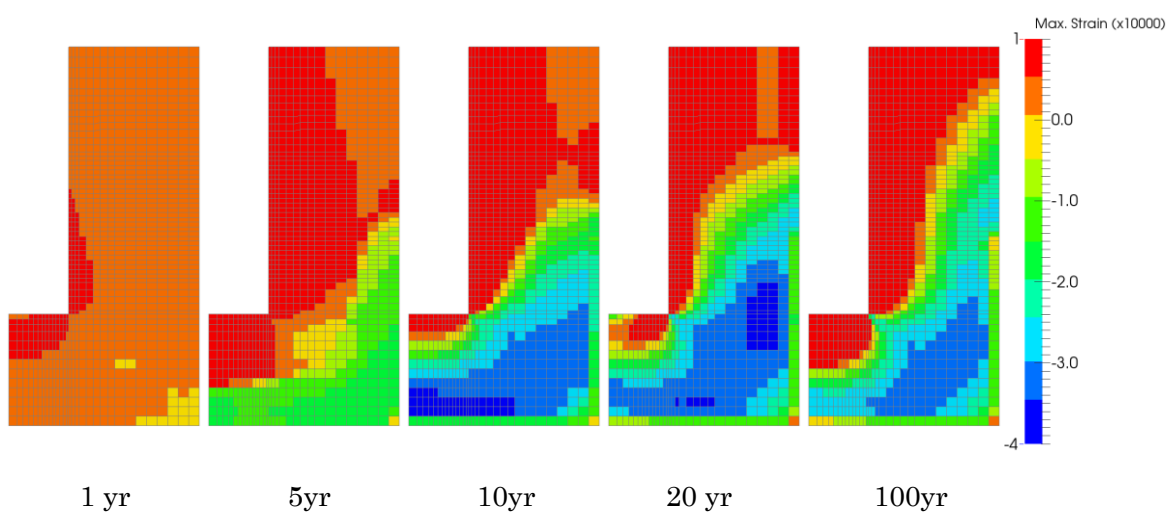


図 6.1.17-6 HM-2 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

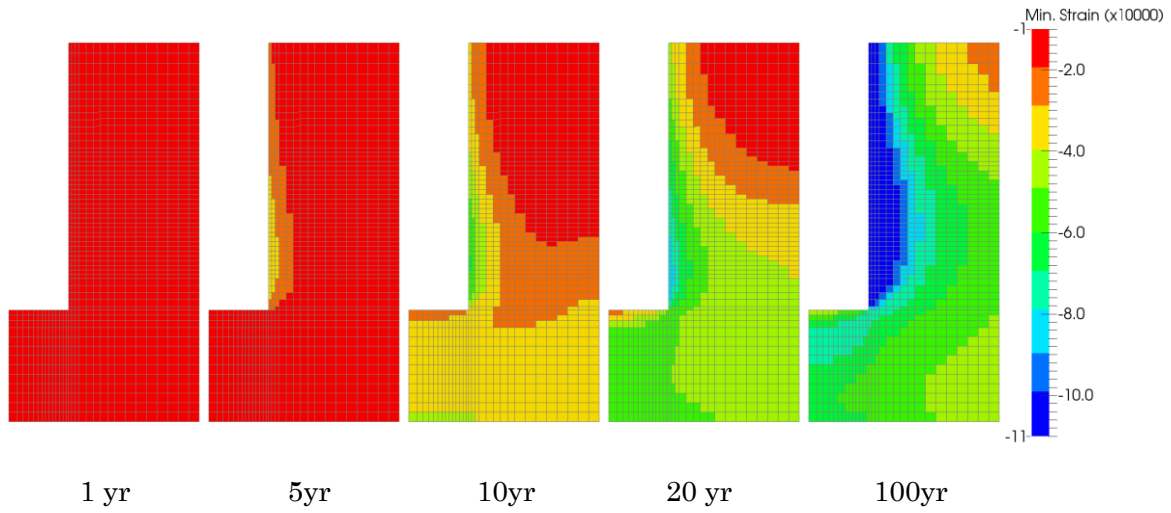


図 6.1.17-7 HM-2 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

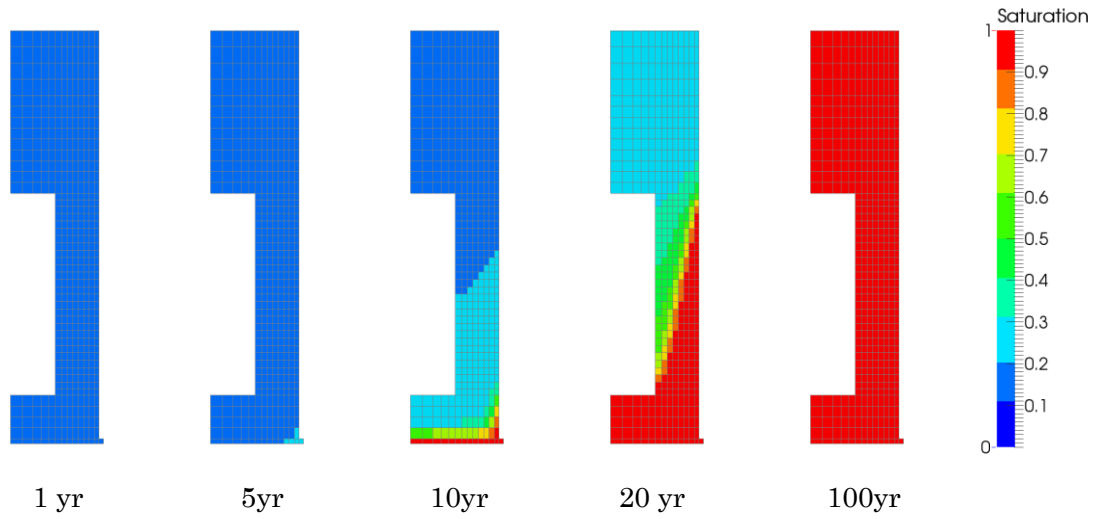


図 6.1.17-8 HM-2 ベントナイト部分・飽和度分布

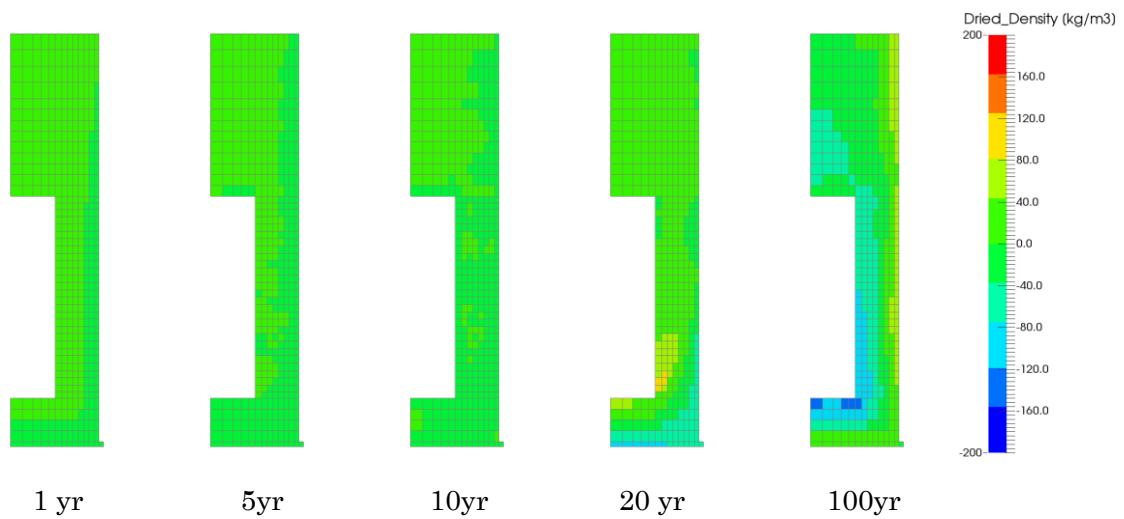


図 6.1.17-9 HM-2 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

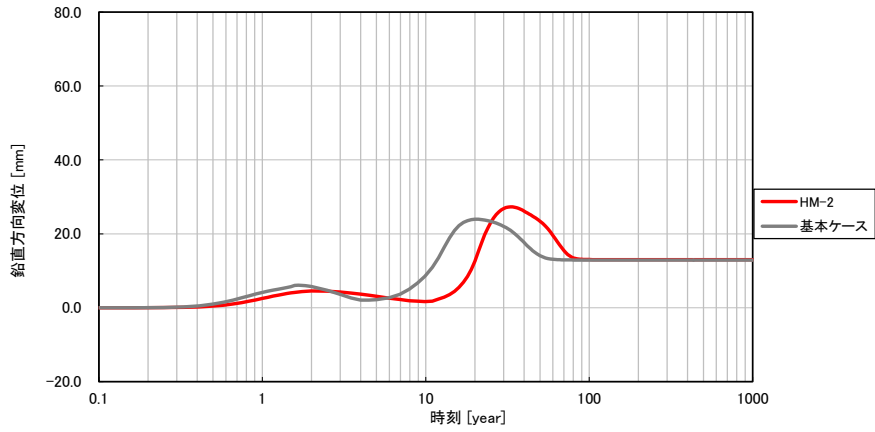


図 6.1.17-10 HM-2 鉛直方向の変位時刻歴

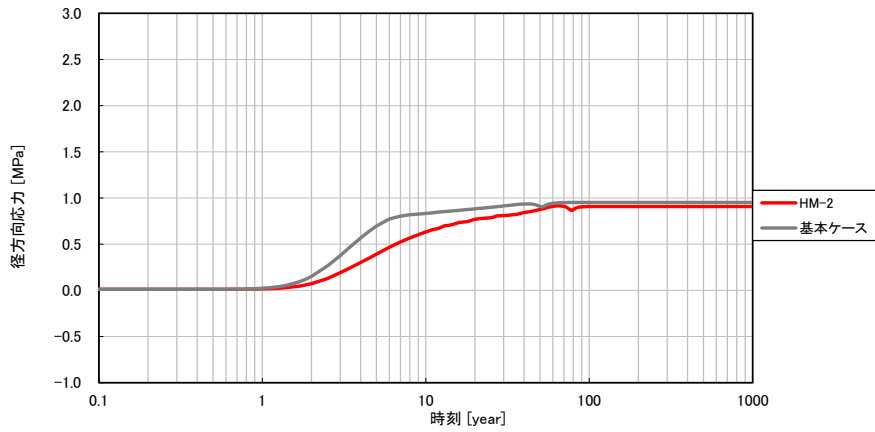


図 6.1.17-11 HM-2 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

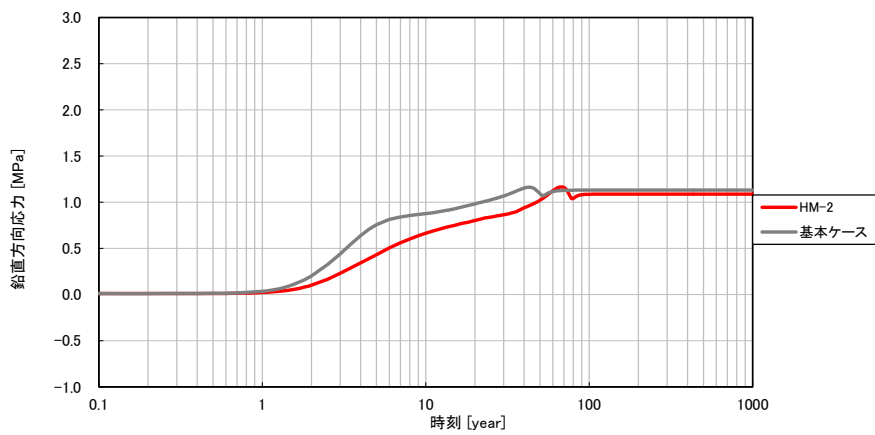
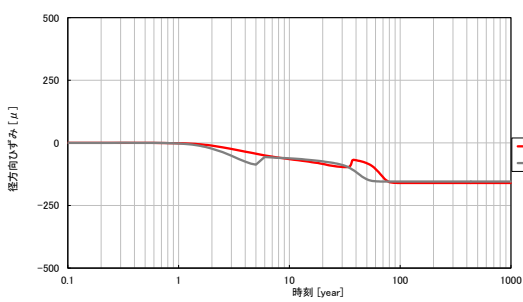
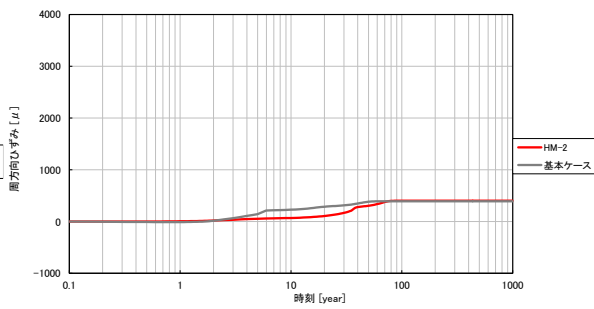


図 6.1.17-12 HM-2 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

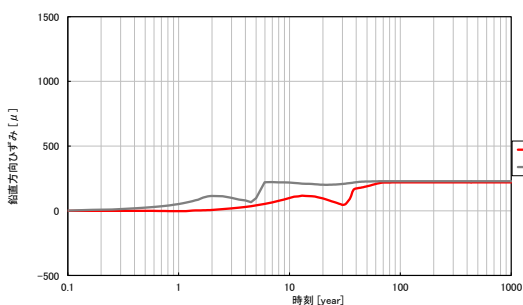


(a)径方向

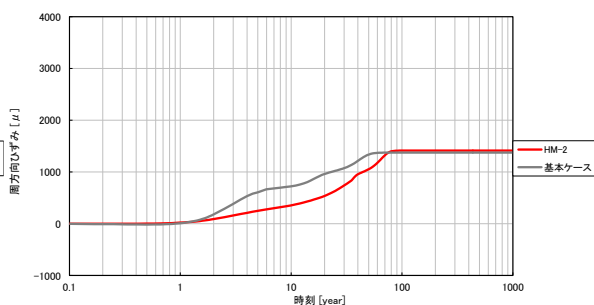


(b)周方向

図 6.1.17-13 HM-2 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

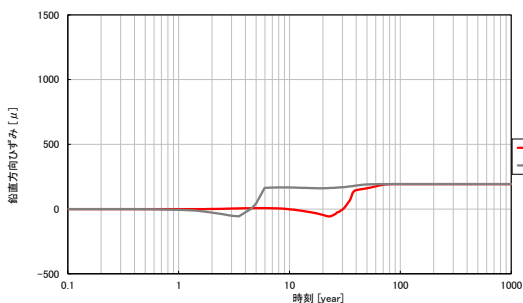


(a)鉛直方向

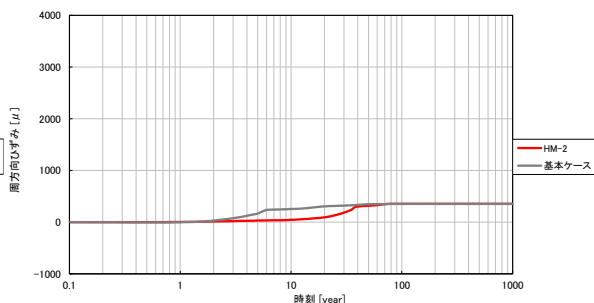


(b)周方向

図 6.1.17-14 HM-2 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.17-15 HM-2 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.18 HM-3

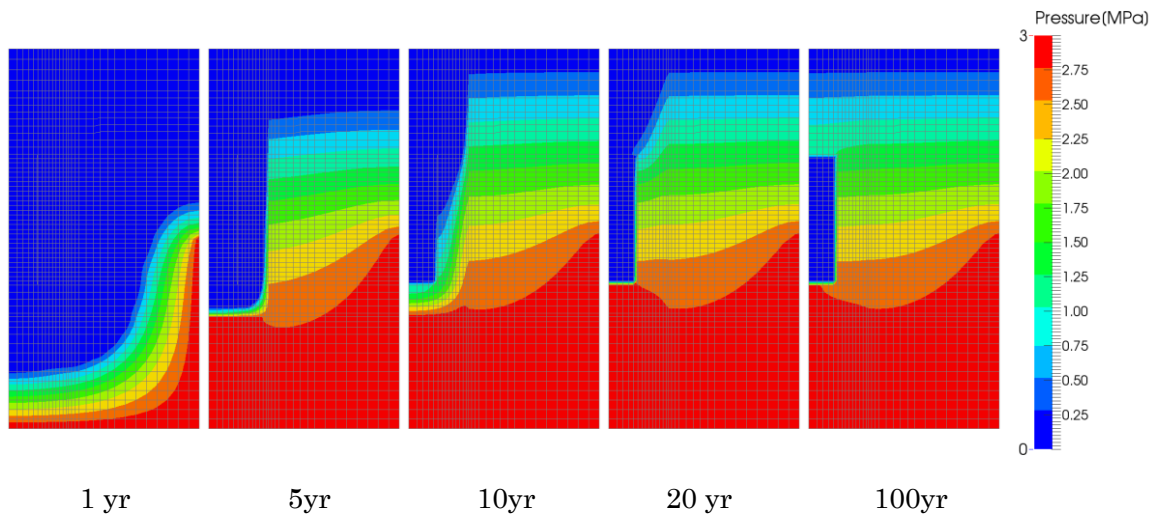


図 6.1.18-1 HM-3 岩盤部分・間隙水压分布

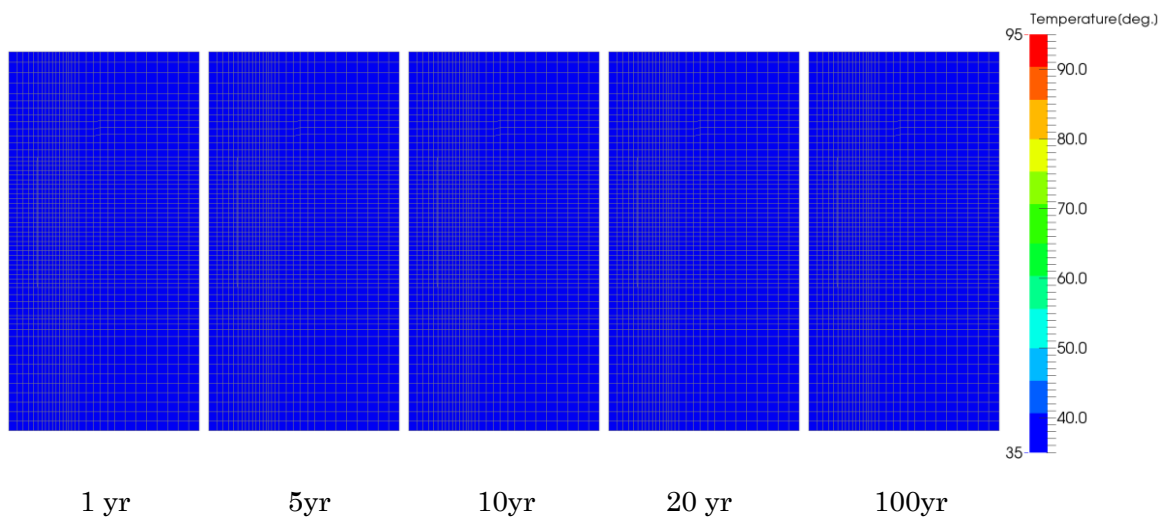


図 6.1.18-2 HM-3 岩盤部分・温度分布

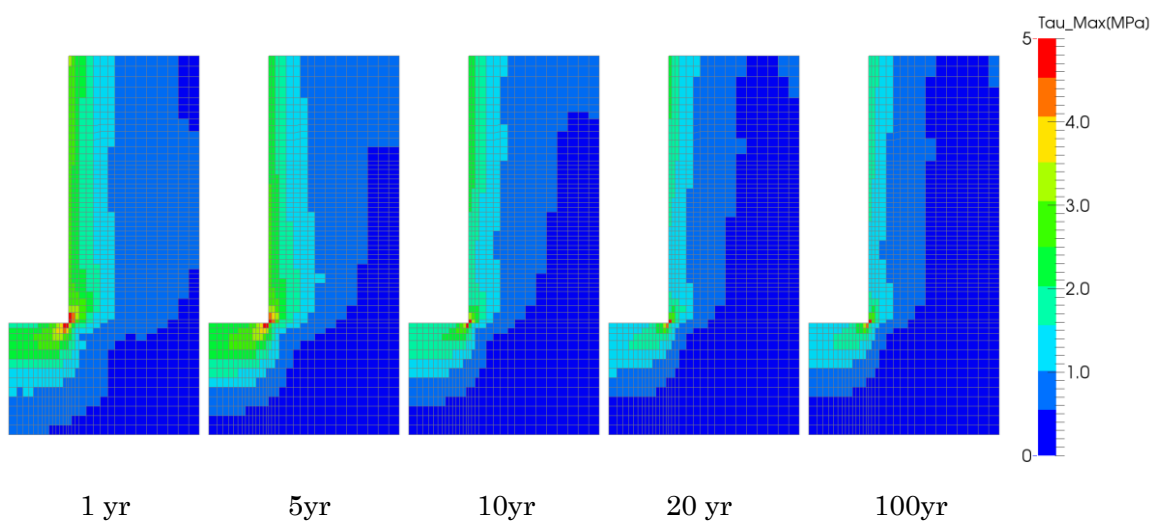


図 6.1.18-3 HM-3 岩盤部分・主せん断応力分布

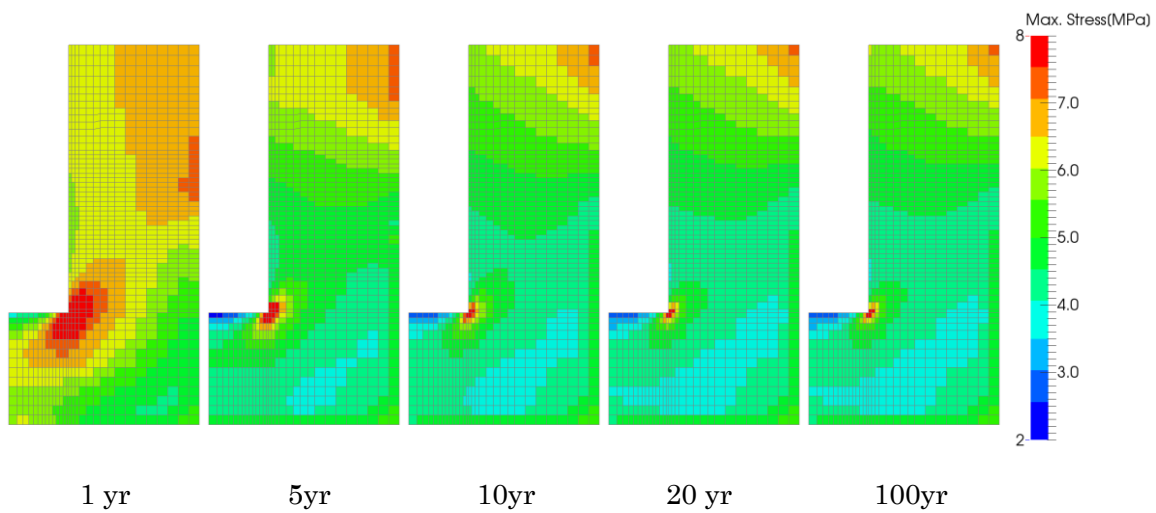


図 6.1.18-4 HM-3 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

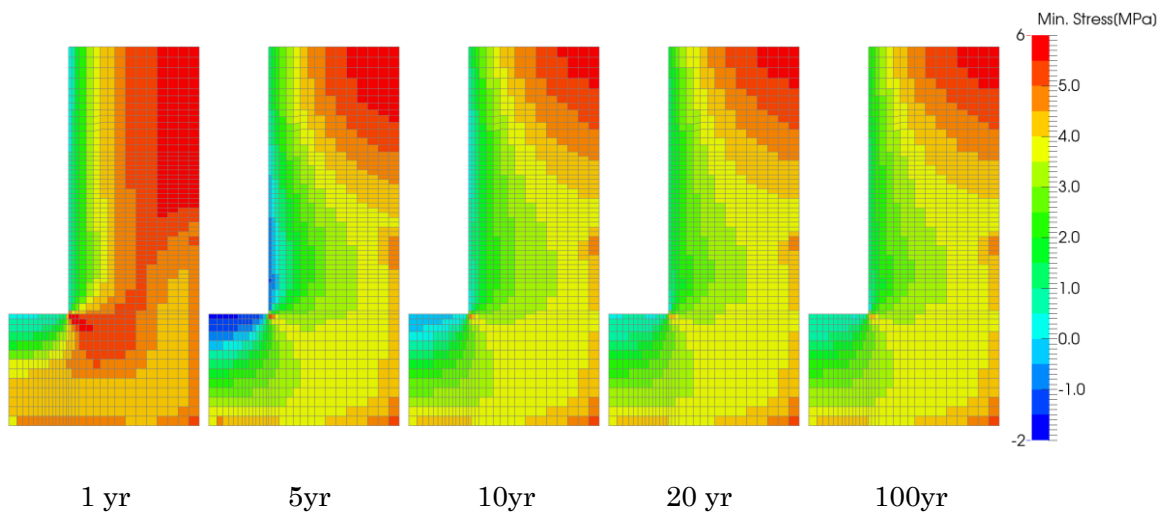


図 6.1.18-5 HM-3 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

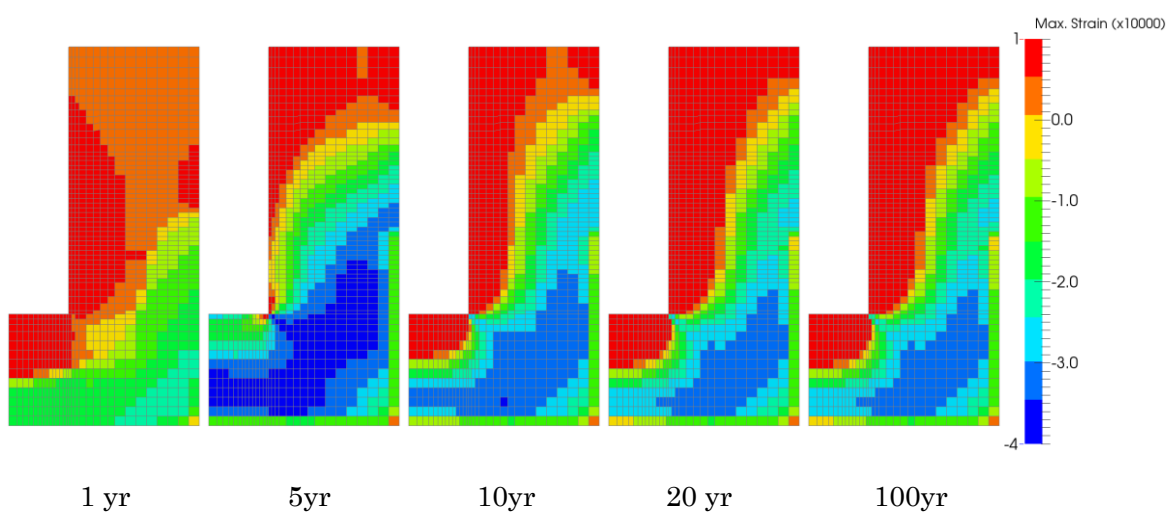


図 6.1.18-6 HM-3 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

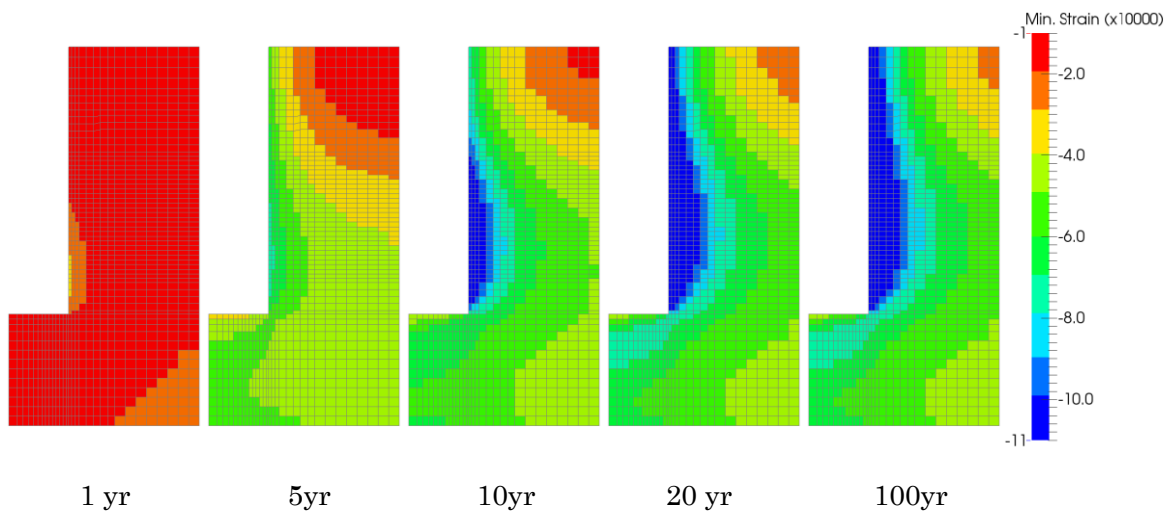


図 6.1.18-7 HM-3 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

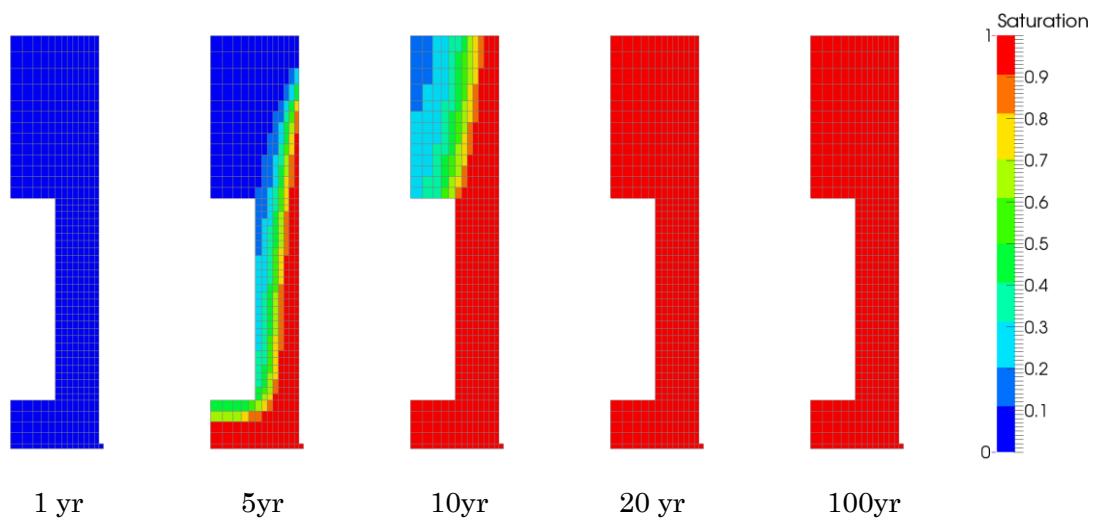


図 6.1.18-8 HM-3 ベントナイト部分・飽和度分布

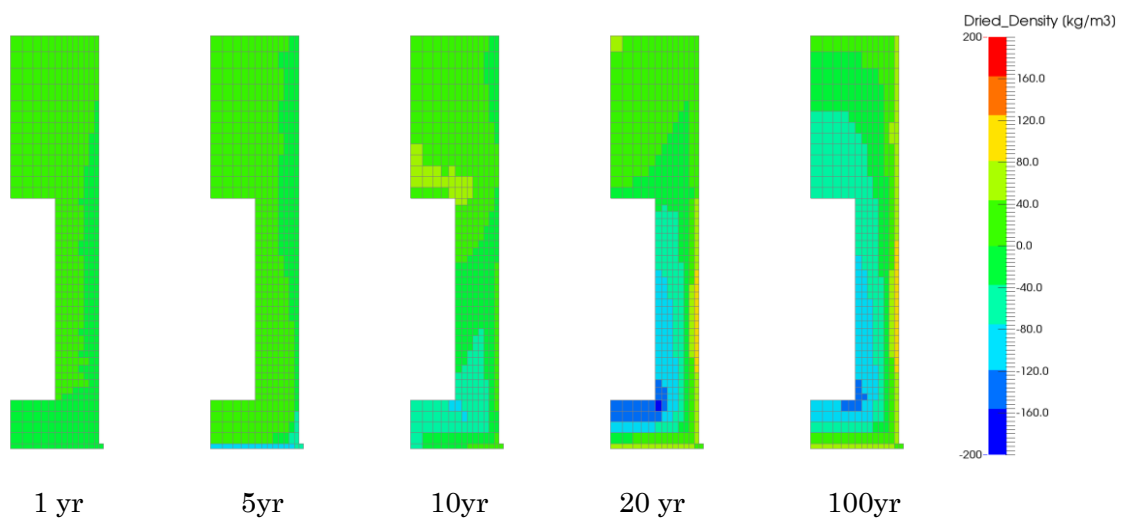


図 6.1.18-9 HM-3 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

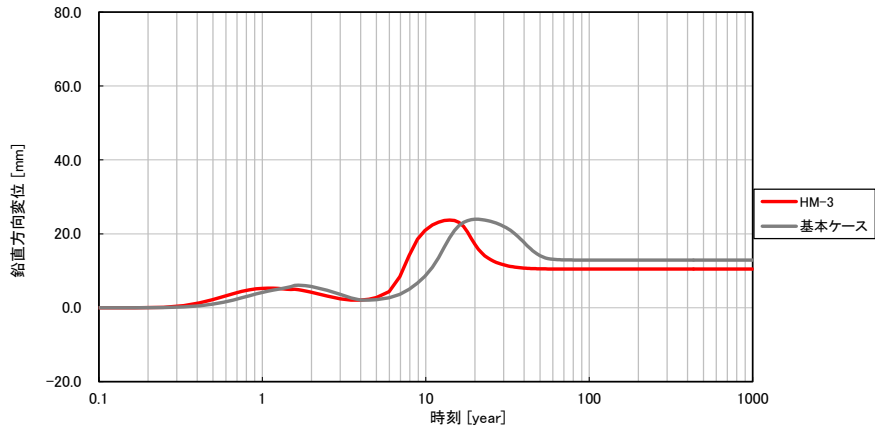


図 6.1.18-10 HM-3 鉛直方向の変位時刻歴

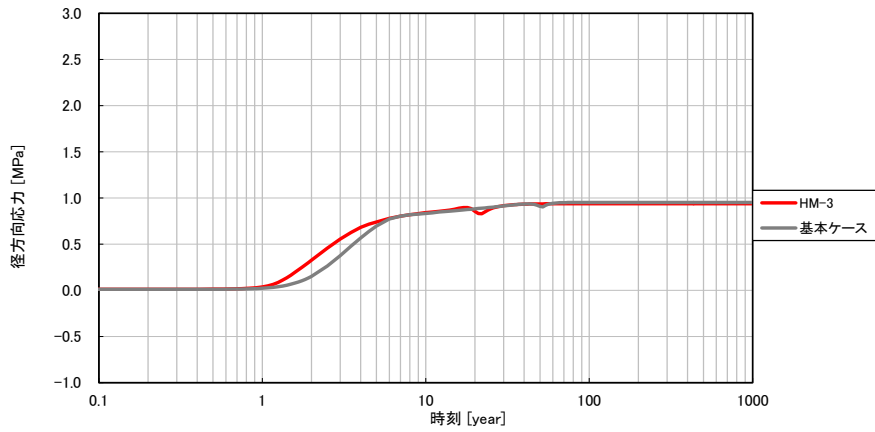


図 6.1.18-11 HM-3 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

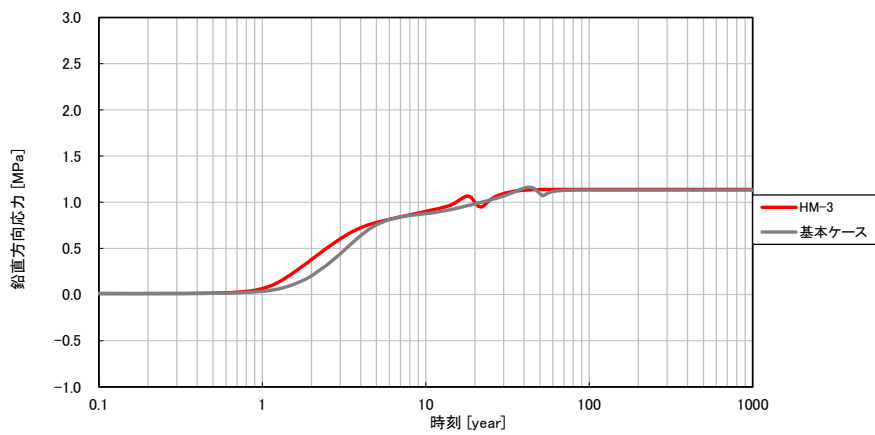
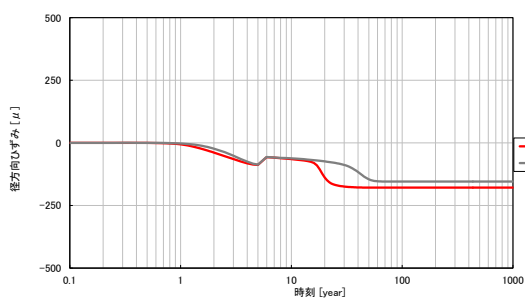
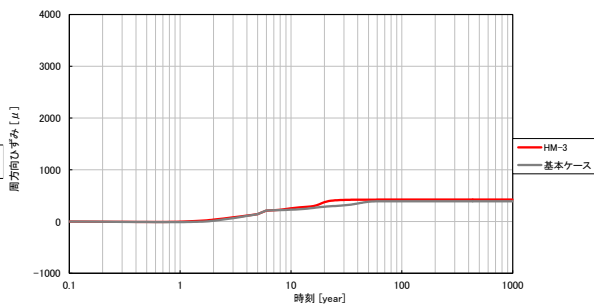


図 6.1.18-12 HM-3 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

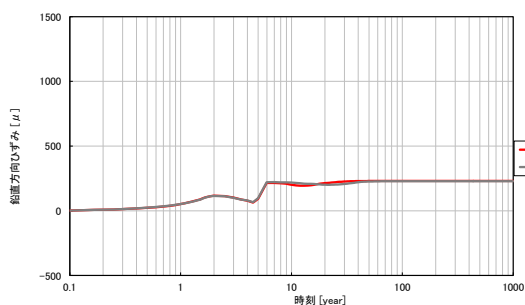


(a)径方向

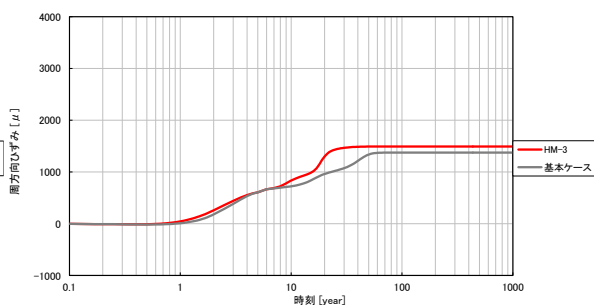


(b)周方向

図 6.1.18-13 HM-3 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

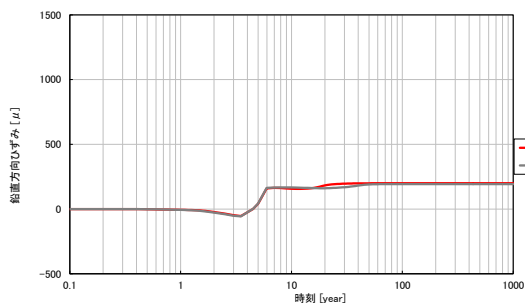


(a)鉛直方向

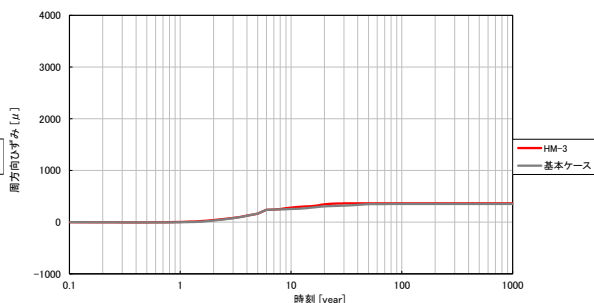


(b)周方向

図 6.1.18-14 HM-3 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.18-15 HM-3 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.19 HM-4

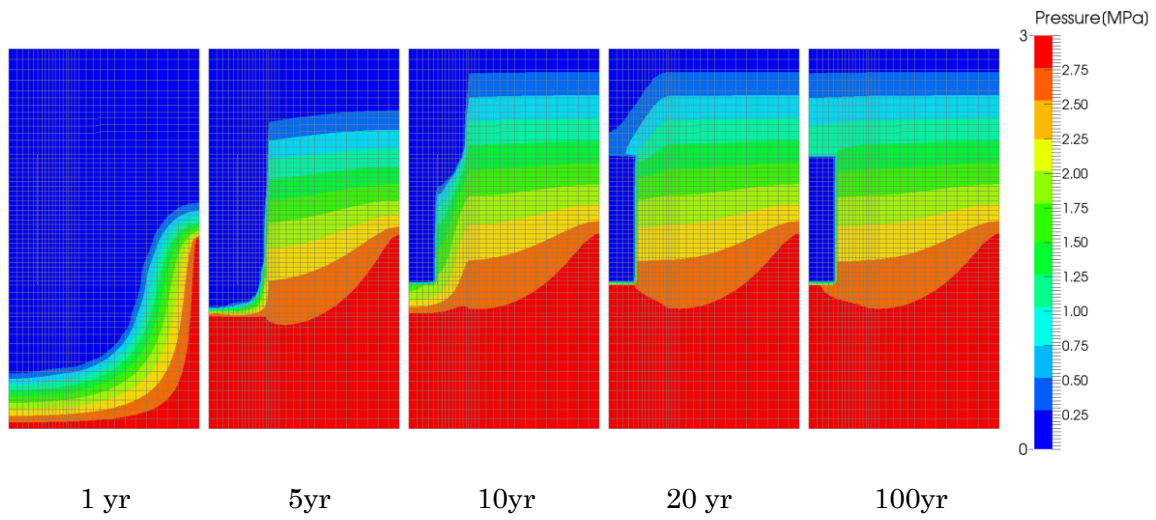


図 6.1.19-1 HM-4 岩盤部分・間隙水压分布

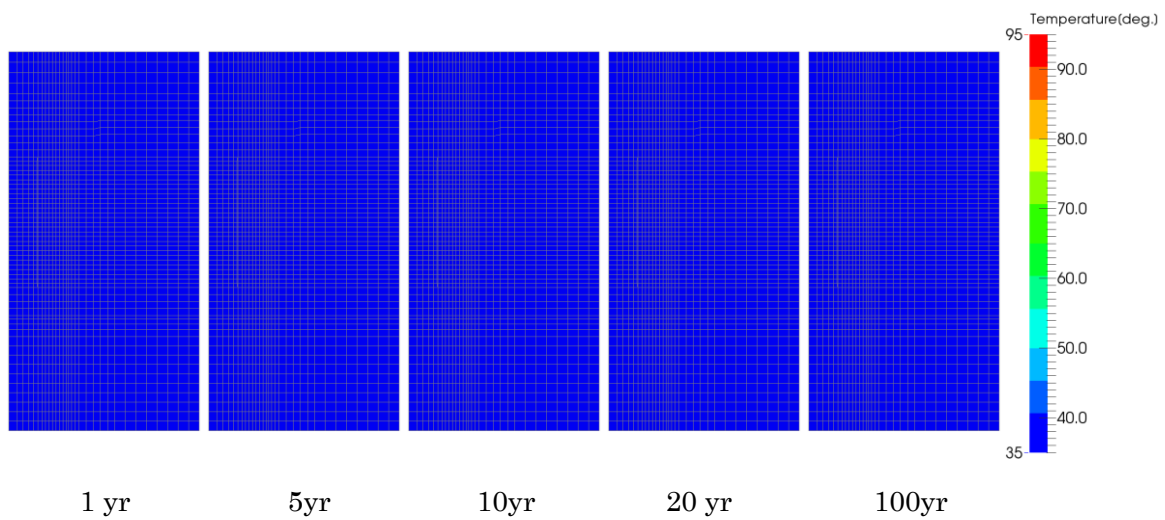


図 6.1.19-2 HM-4 岩盤部分・温度分布

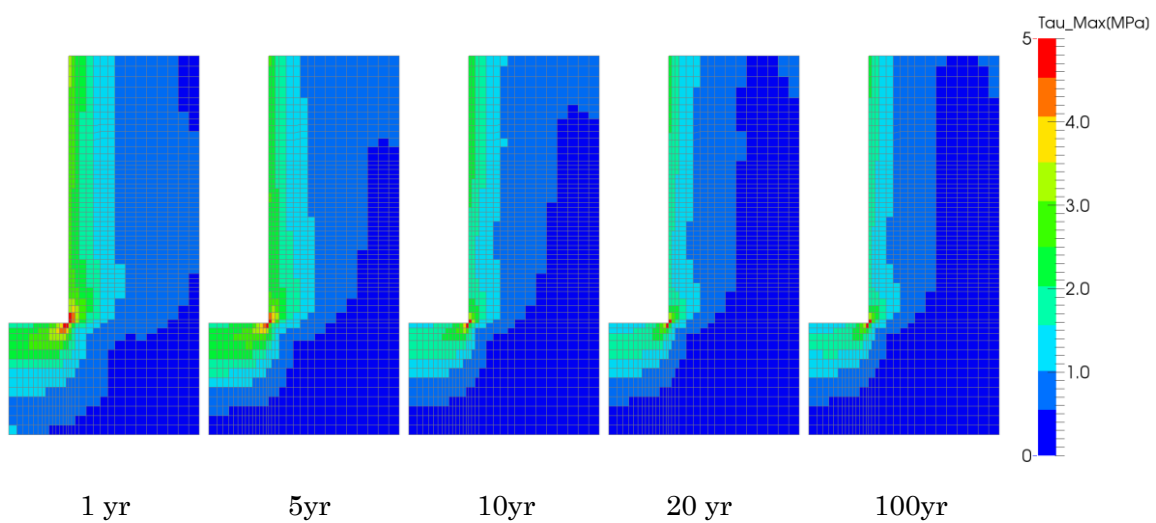


図 6.1.19-3 HM-4 岩盤部分・主せん断応力分布

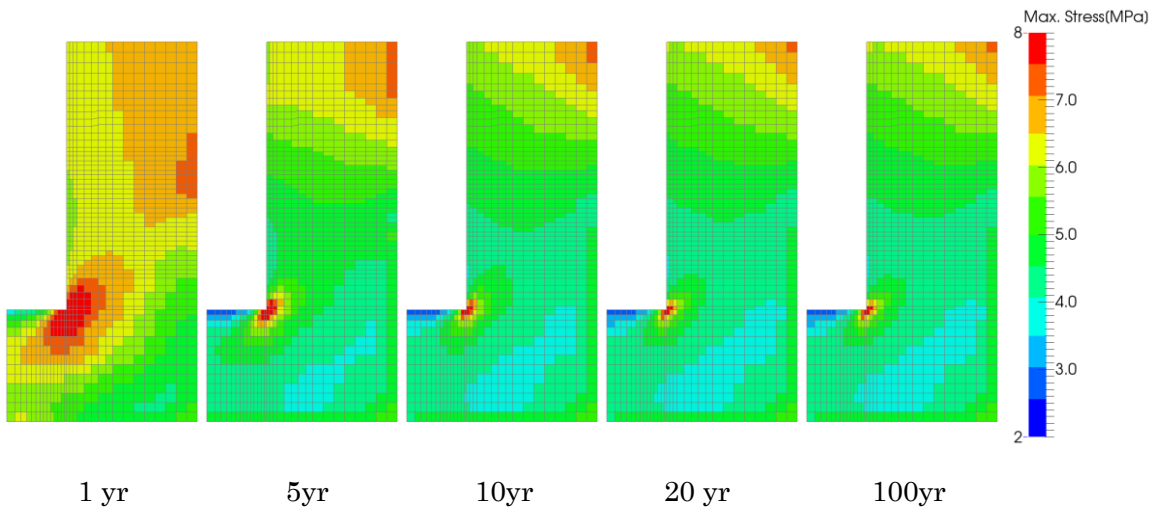


図 6.1.19-4 HM-4 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

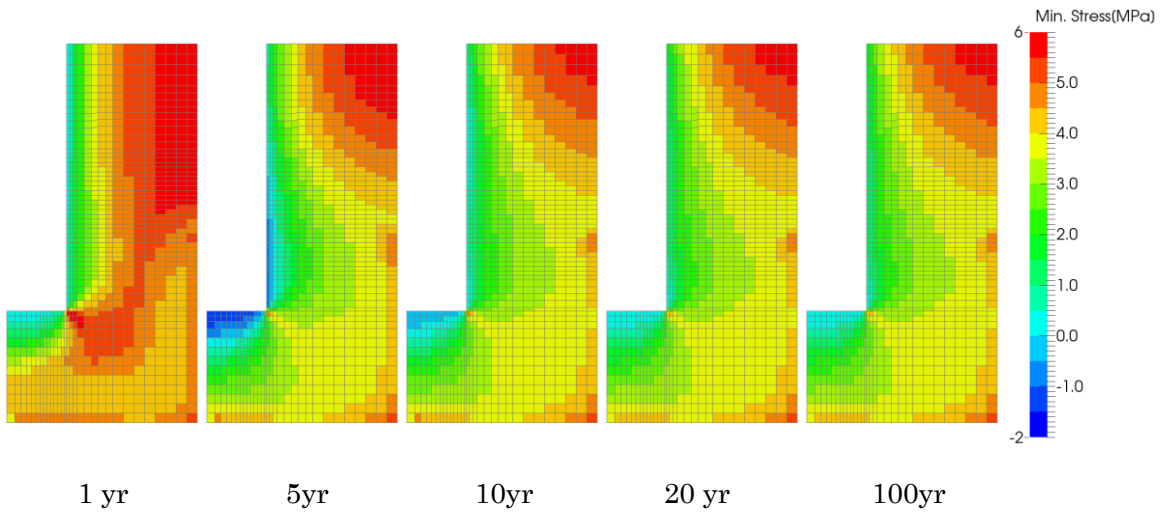


図 6.1.19-5 HM-4 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

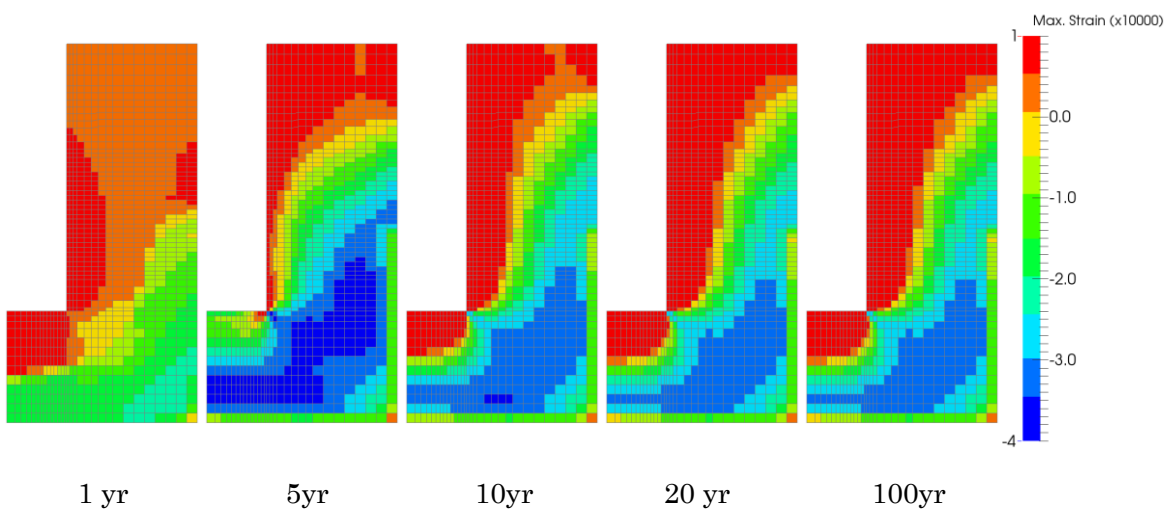


図 6.1.19-6 HM-4 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

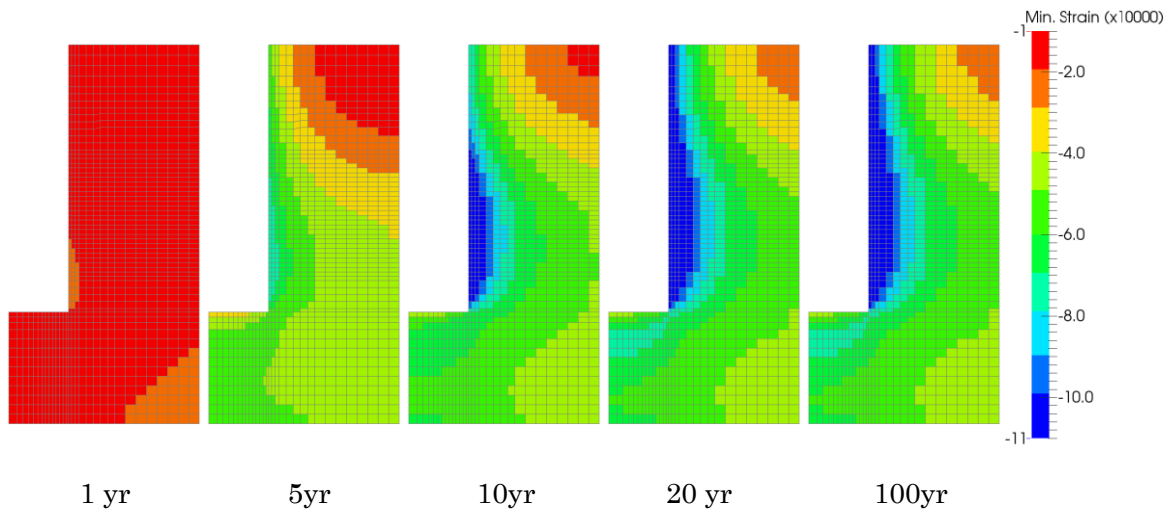


図 6.1.19-7 HM-4 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

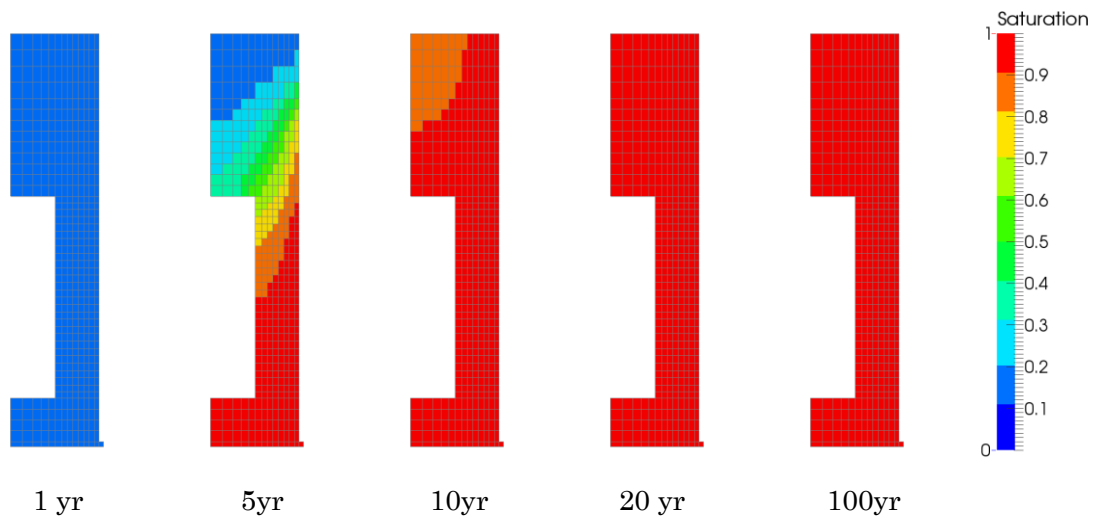


図 6.1.19-8 HM-4 ベントナイト部分・飽和度分布

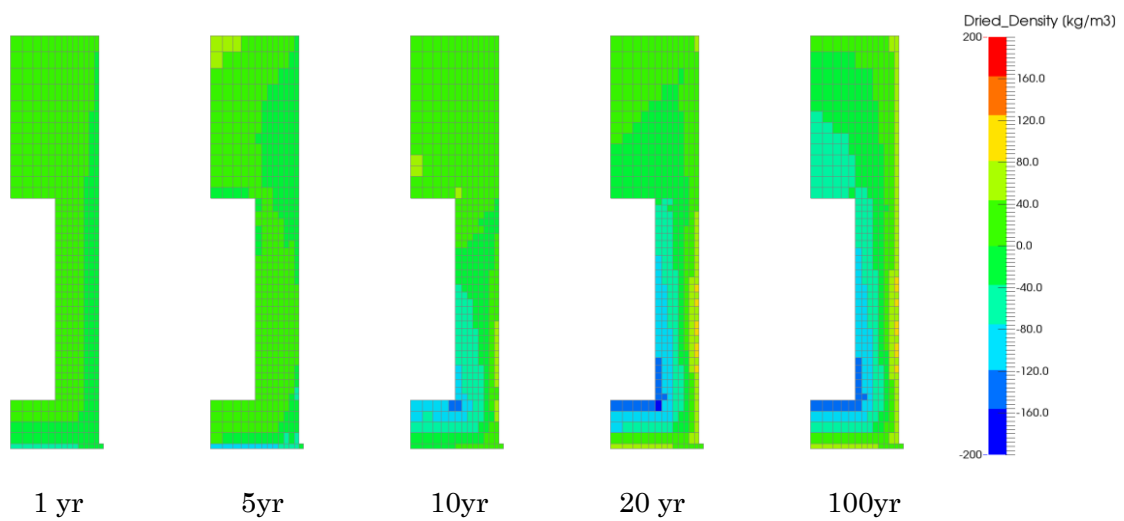


図 6.1.19-9 HM-4 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

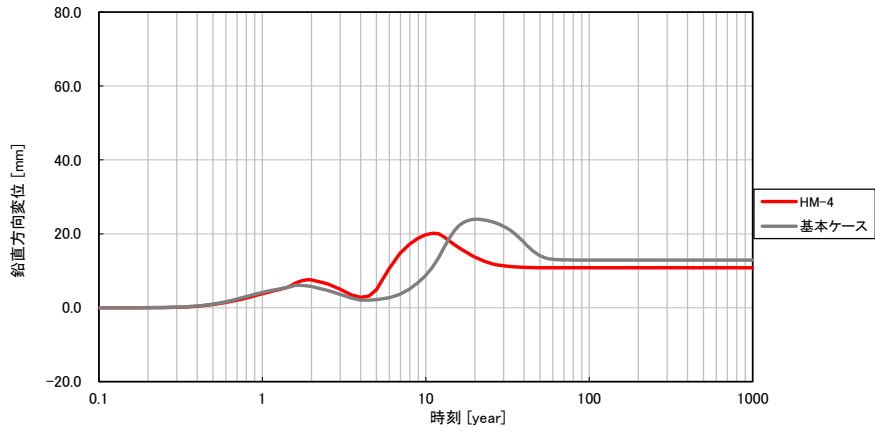


図 6.1.19-10 HM-4 鉛直方向の変位時刻歴

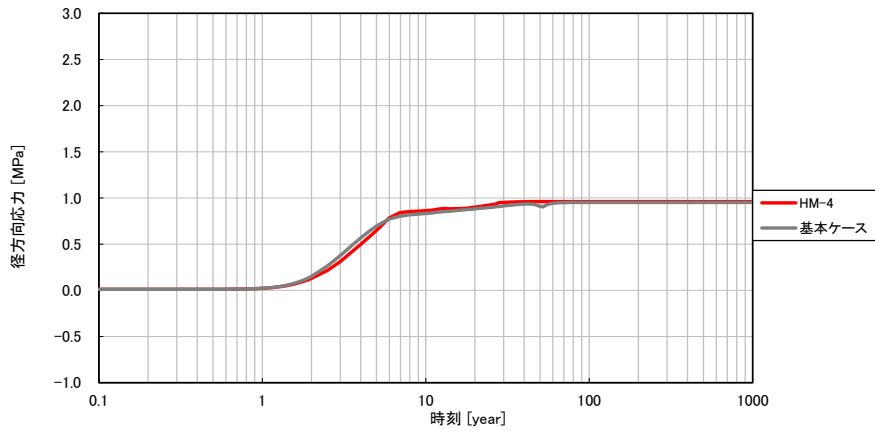


図 6.1.19-11 HM-4 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、圧縮：正)

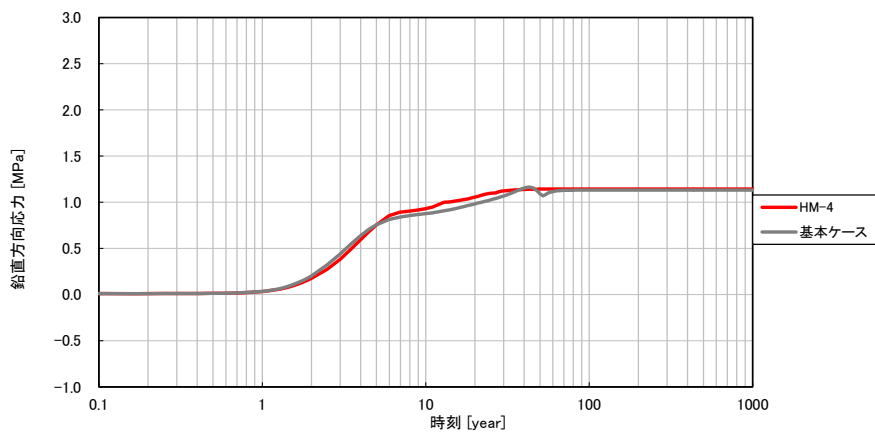
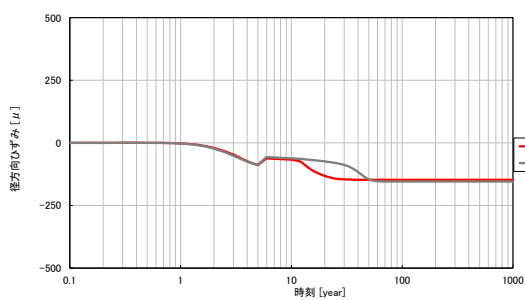
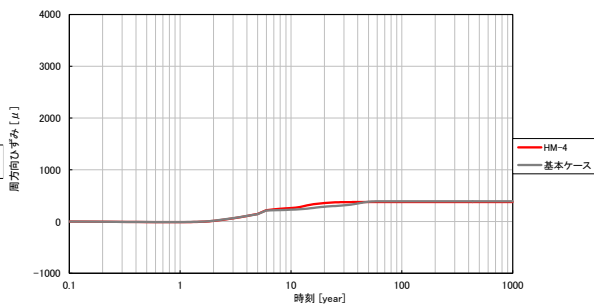


図 6.1.19-12 HM-4 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

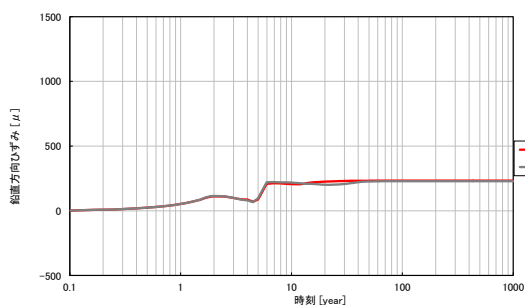


(a)径方向

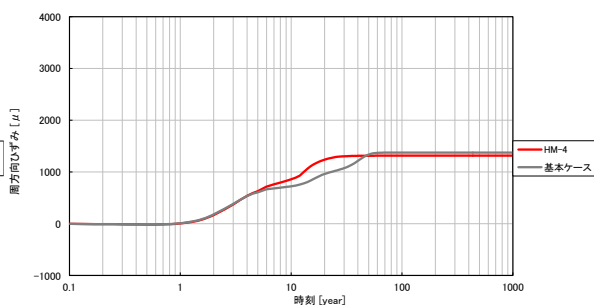


(b)周方向

図 6.1.19-13 HM-4 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

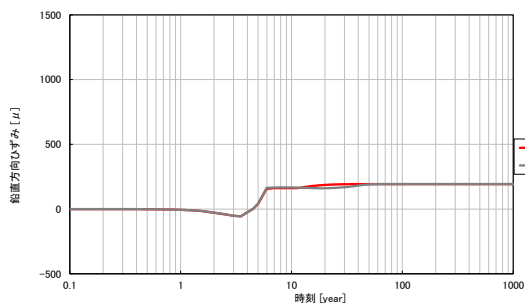


(a)鉛直方向

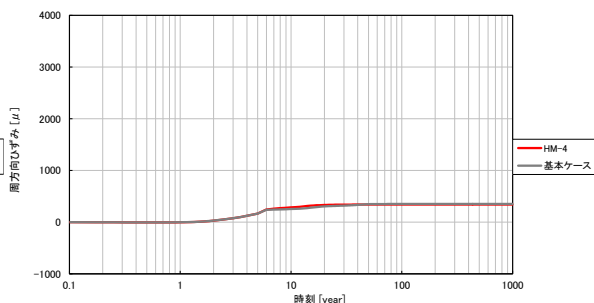


(b)周方向

図 6.1.19-14 HM-4 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.19-15 HM-4 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.20 HM-5

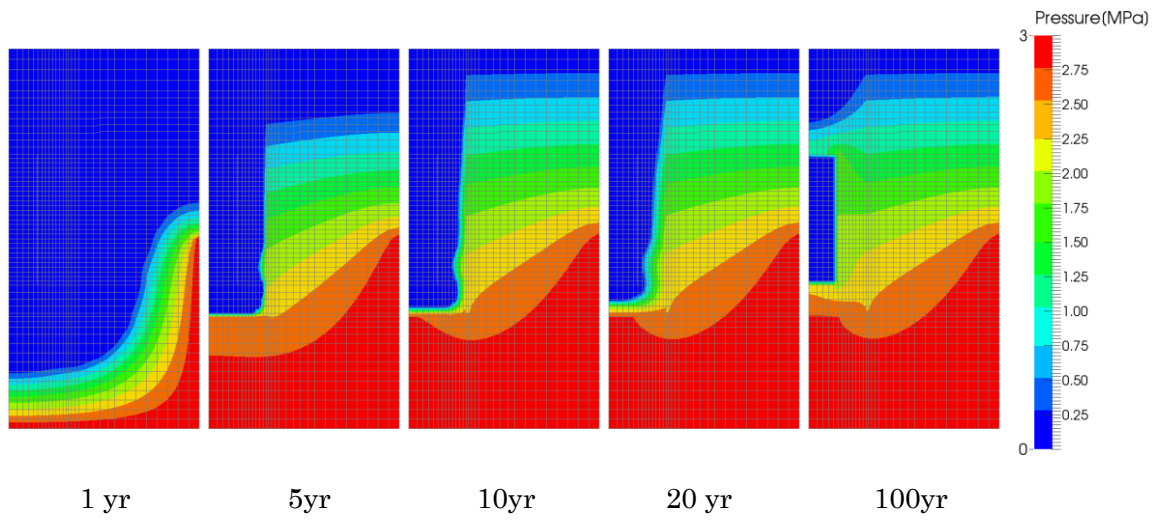


図 6.1.20-1 HM-5 岩盤部分・間隙水压分布

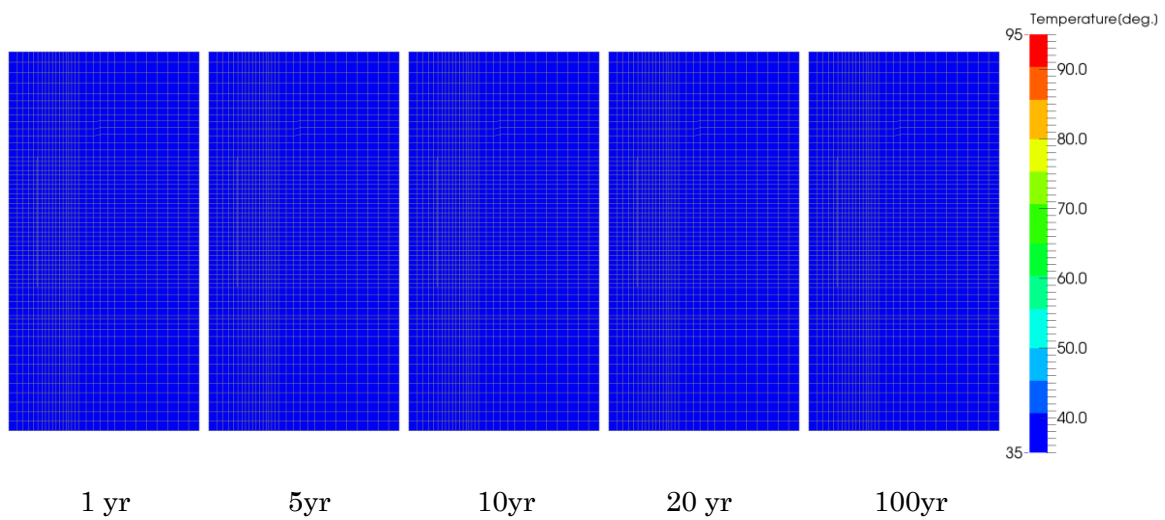


図 6.1.20-2 HM-5 岩盤部分・温度分布

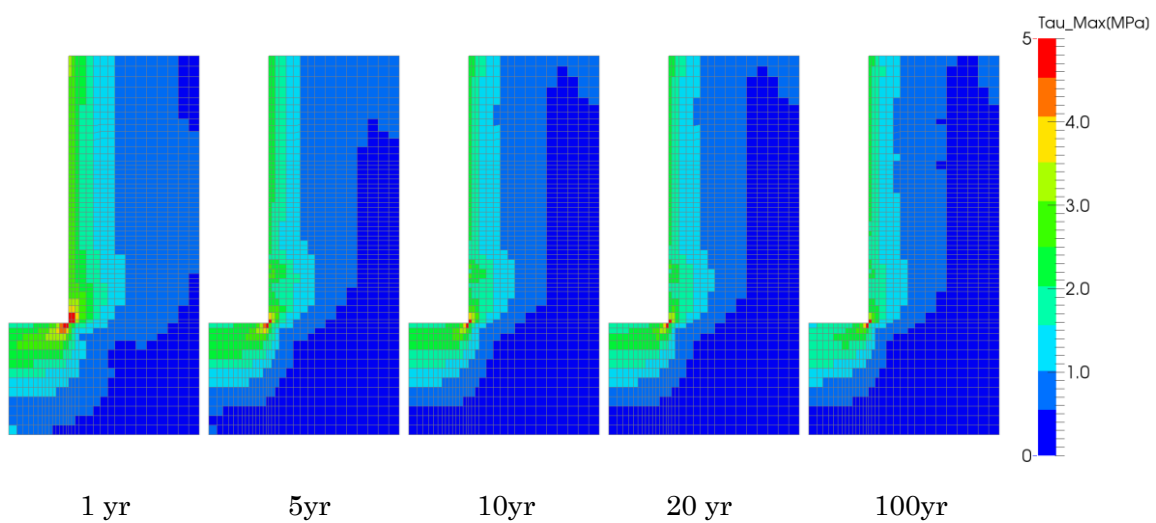


図 6.1.20-3 HM-5 岩盤部分・主せん断応力分布

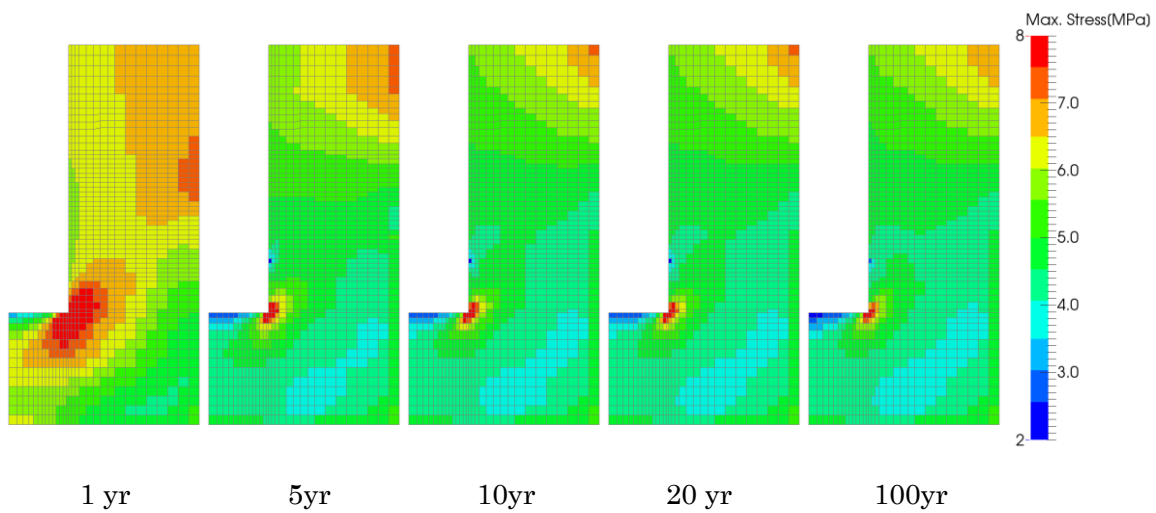


図 6.1.20-4 HM-5 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

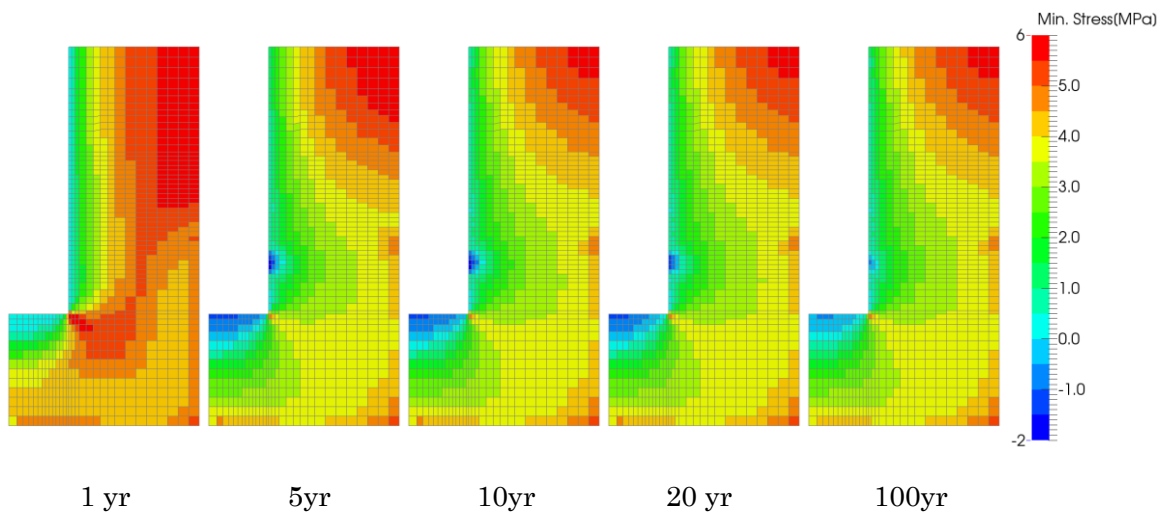


図 6.1.20-5 HM-5 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

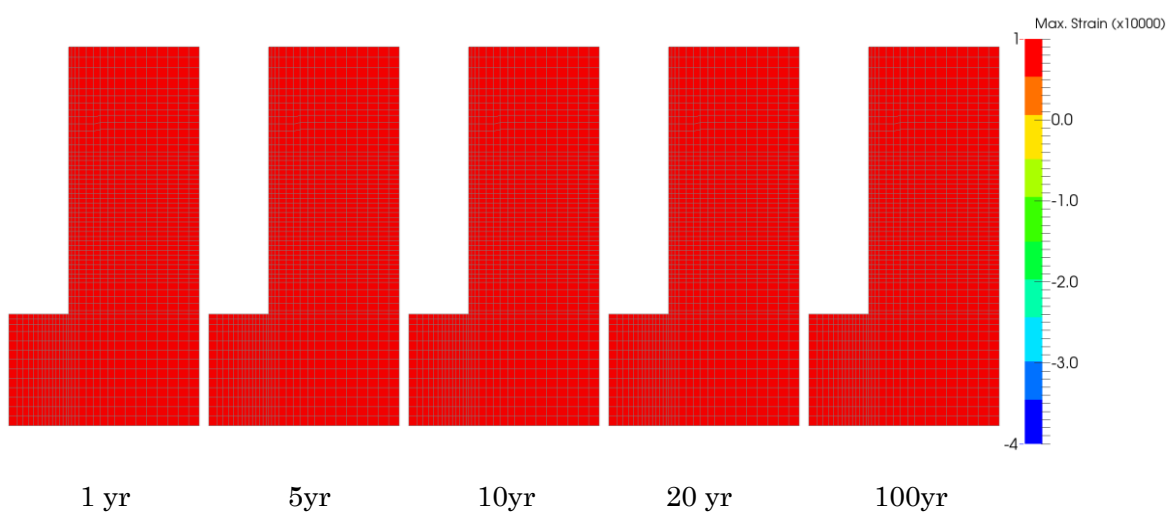


図 6.1.20-6 HM-5 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

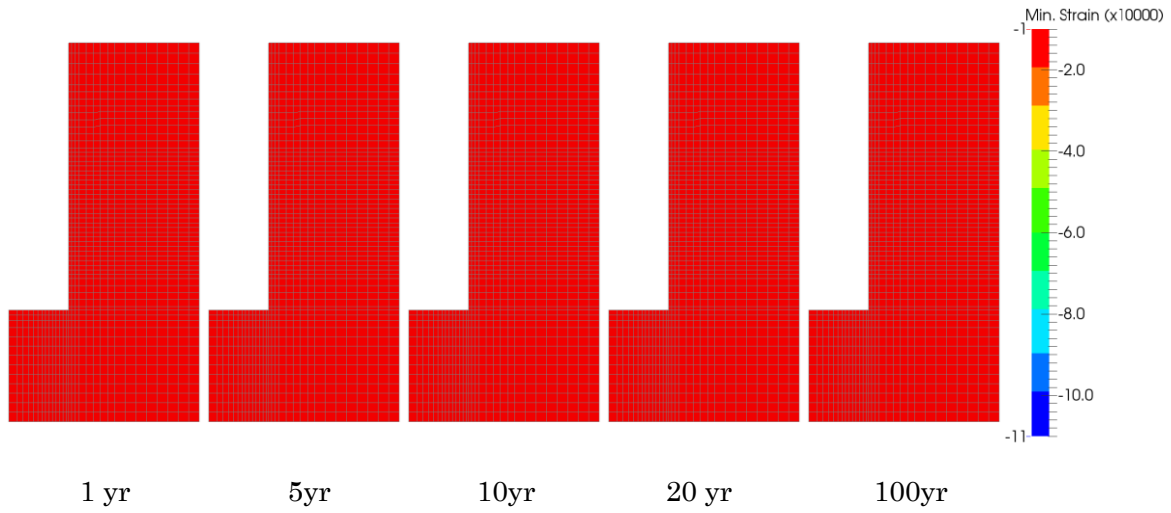


図 6.1.20-7 HM-5 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

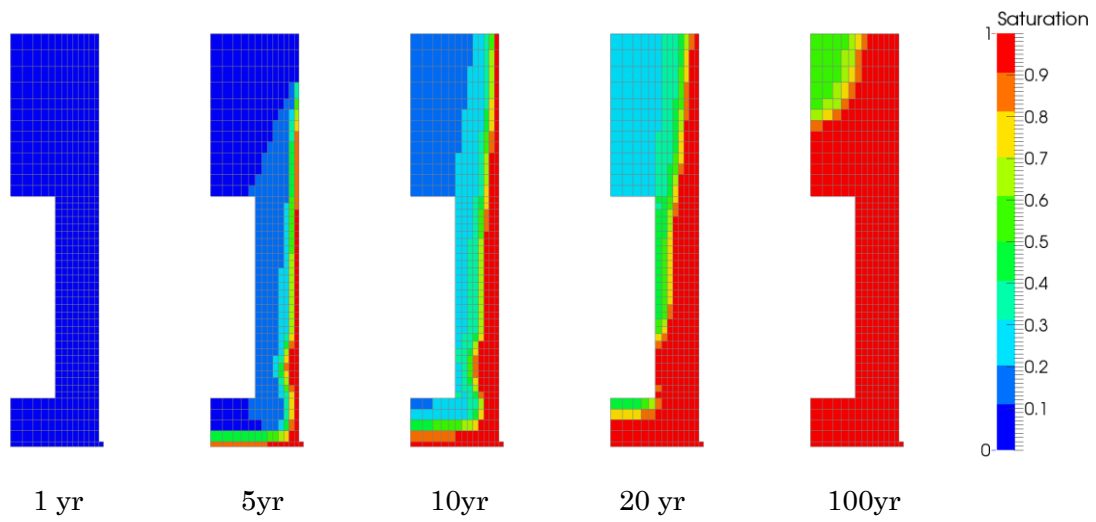


図 6.1.20-8 HM-5 ベントナイト部分・飽和度分布

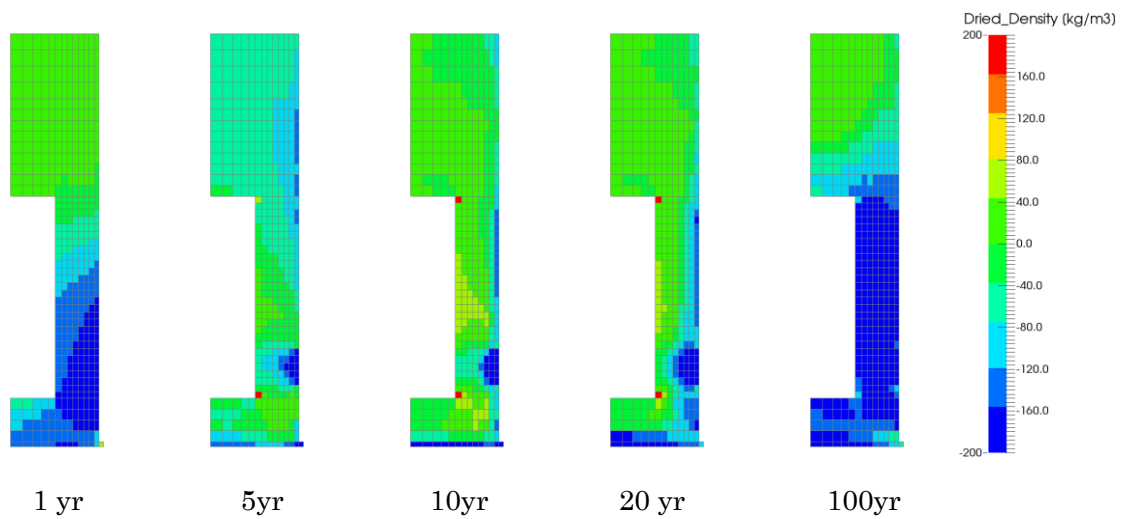


図 6.1.20-9 HM-5 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

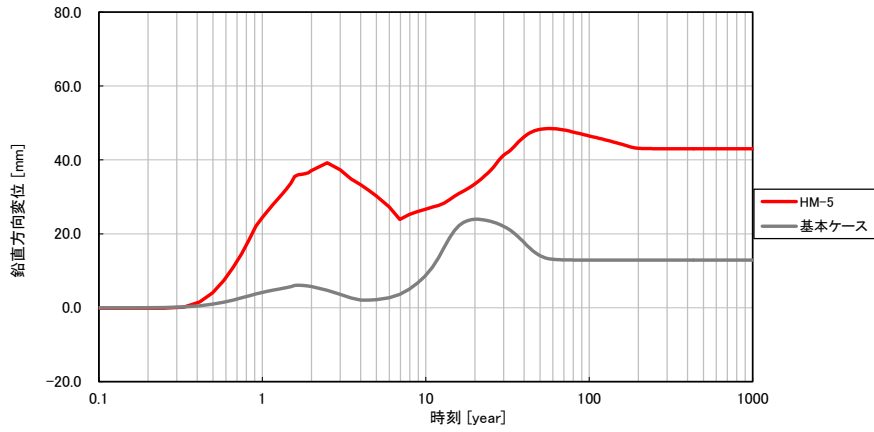


図 6.1.20-10 HM-5 鉛直方向の変位時刻歴

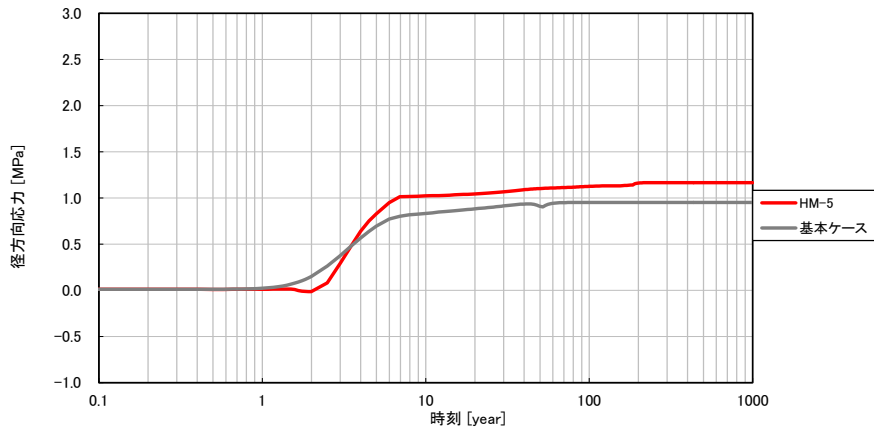


図 6.1.20-11 HM-5 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、引張：正)

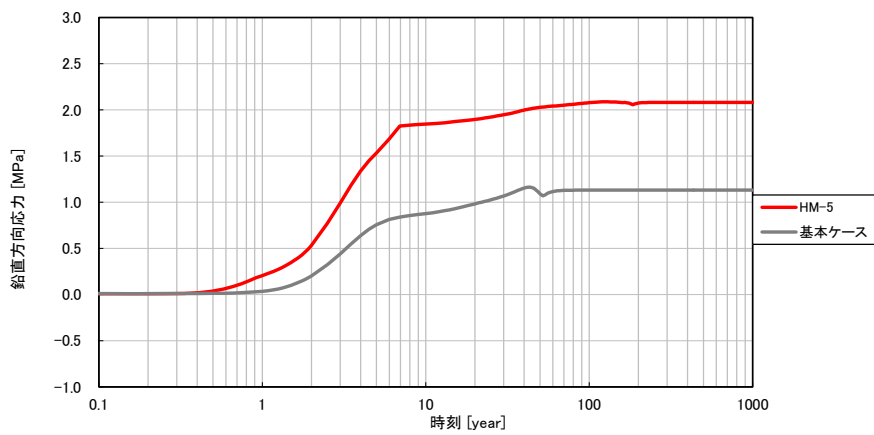
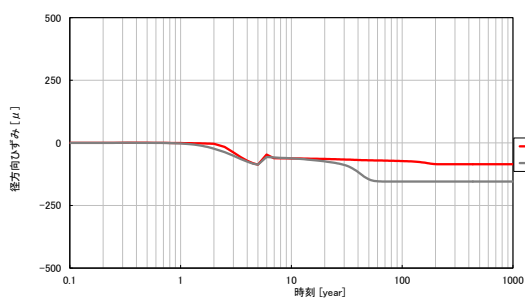
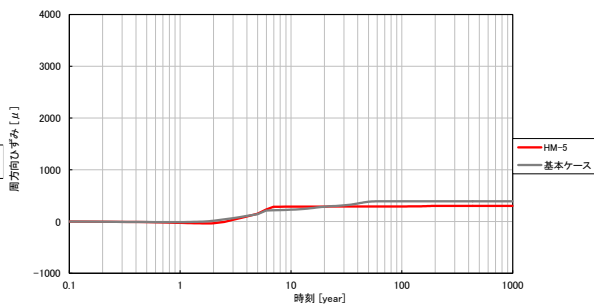


図 6.1.20-12 HM-5 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、引張：正)

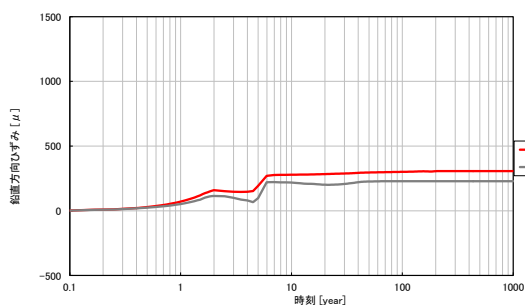


(a)径方向

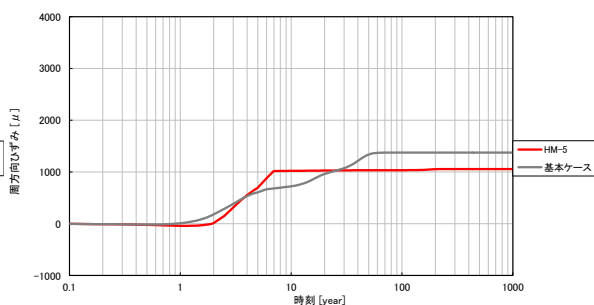


(b)周方向

図 6.1.20-13 HM-5 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

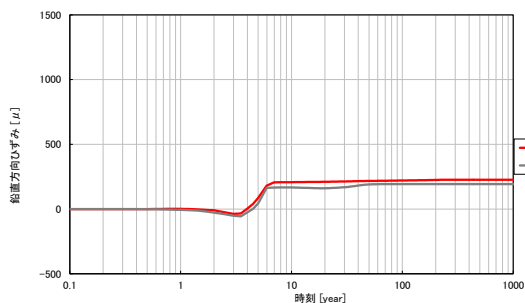


(a)鉛直方向

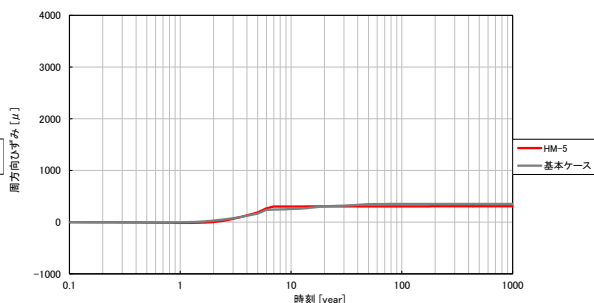


(b)周方向

図 6.1.20-14 HM-5 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向



(b)周方向

図 6.1.20-15 HM-5 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.1.21 HM-6

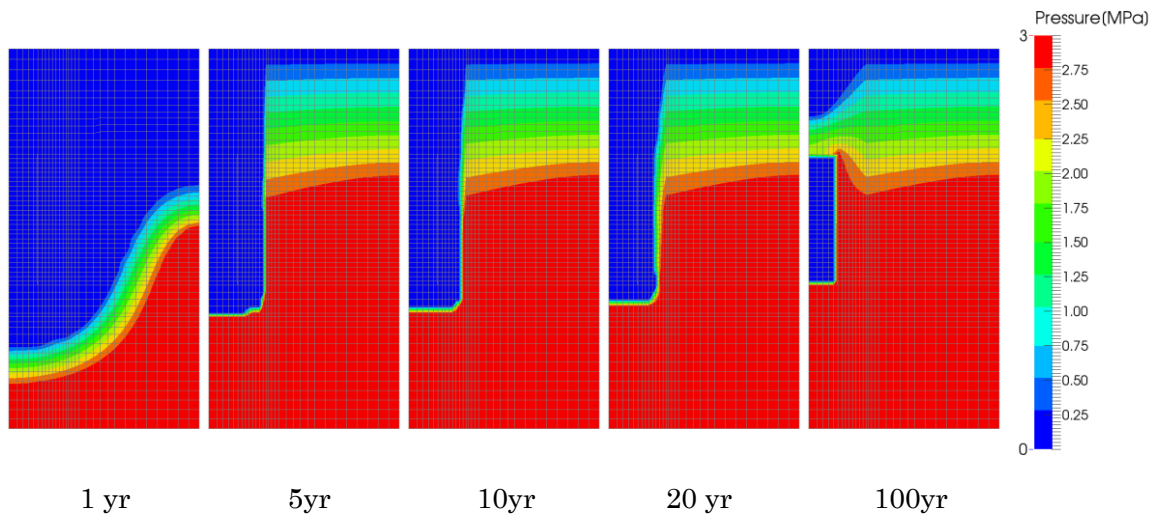


図 6.1.21-1 HM-6 岩盤部分・間隙水圧分布

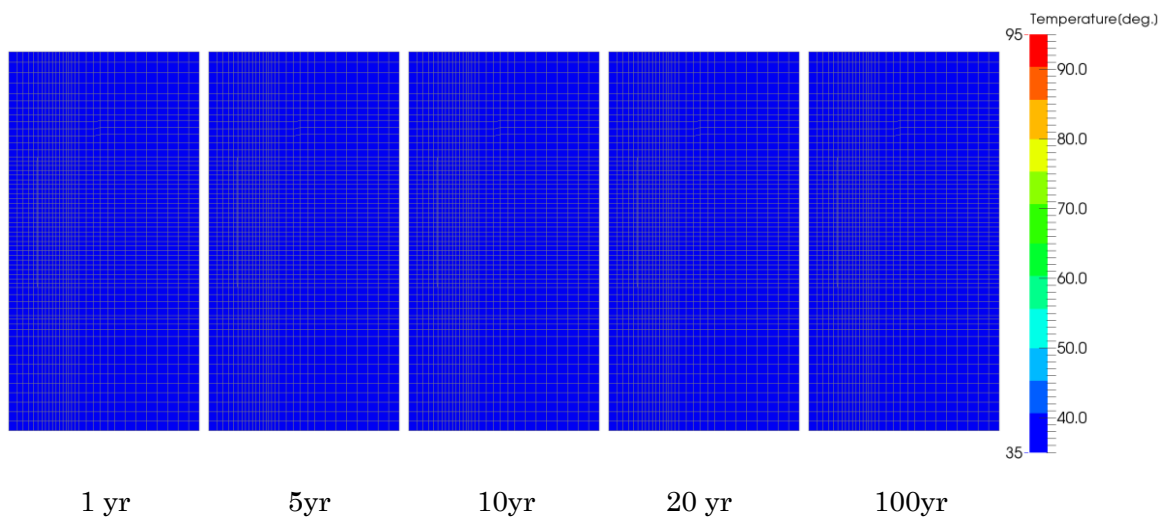


図 6.1.21-2 HM-6 岩盤部分・温度分布

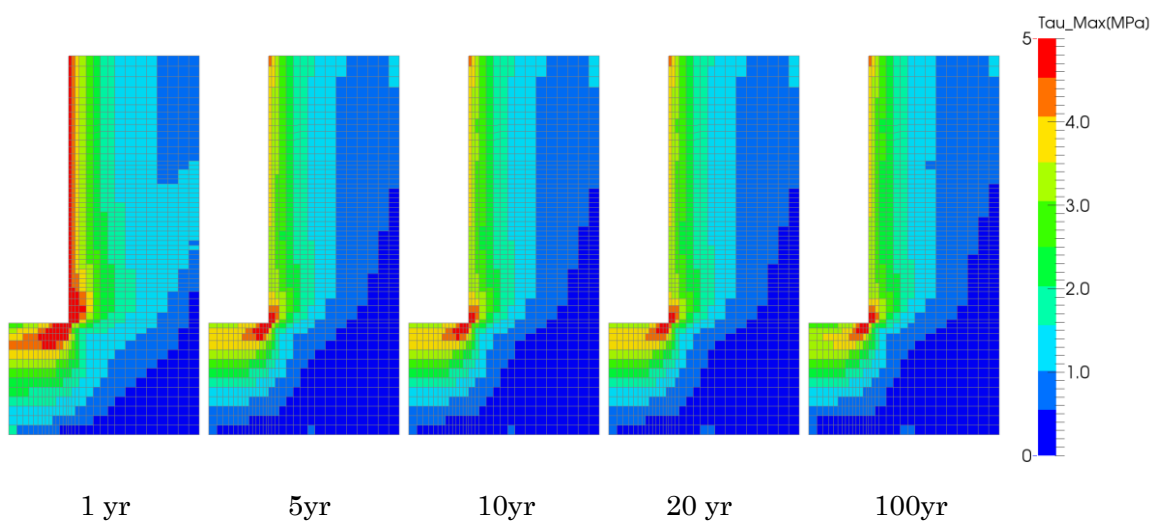


図 6.1.21-3 HM-6 岩盤部分・主せん断応力分布

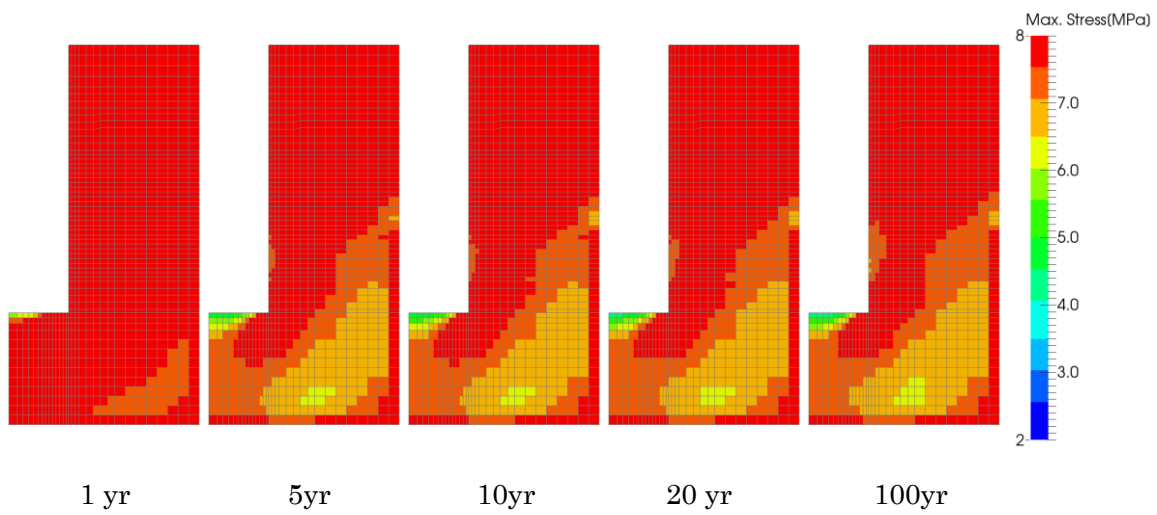


図 6.1.21-4 HM-6 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

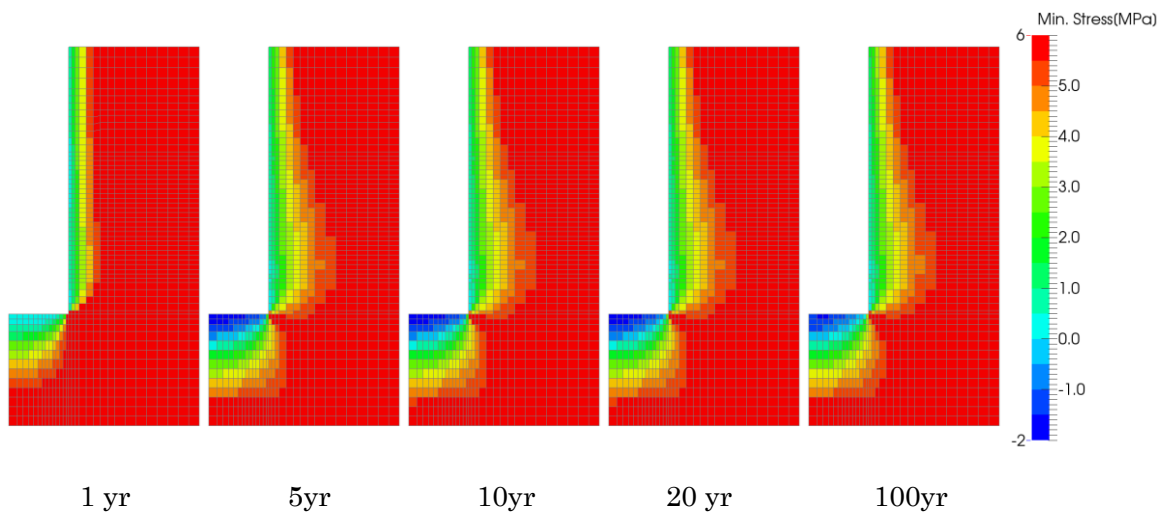


図 6.1.21-5 HM-6 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

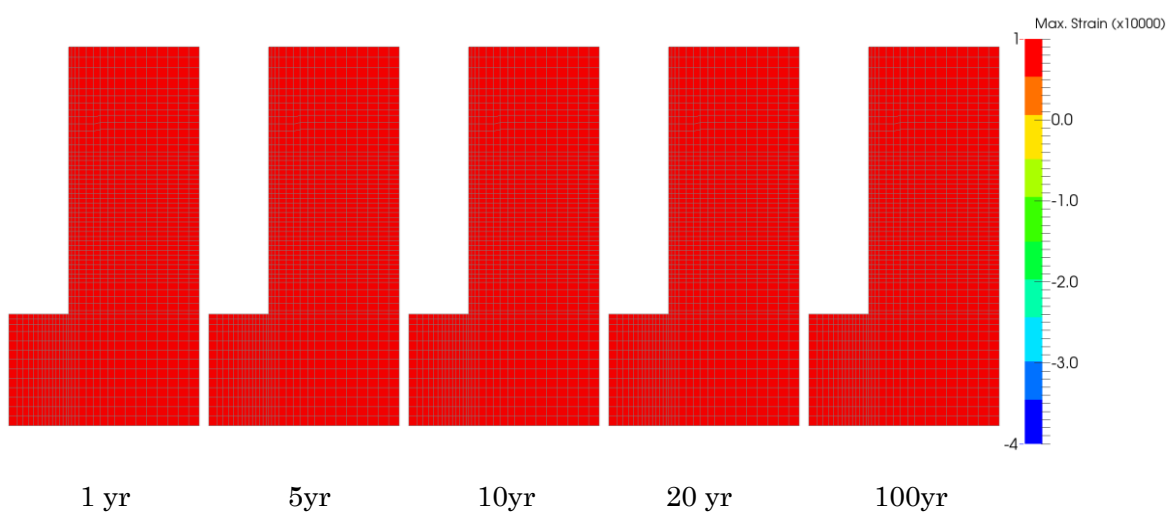


図 6.1.21-6 HM-6 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

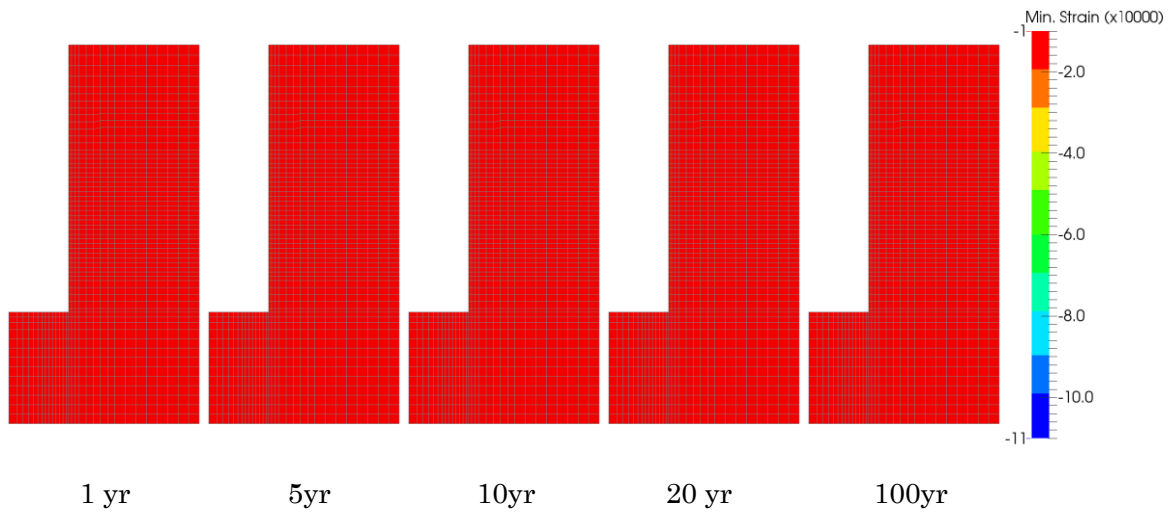


図 6.1.21-7 HM-6 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

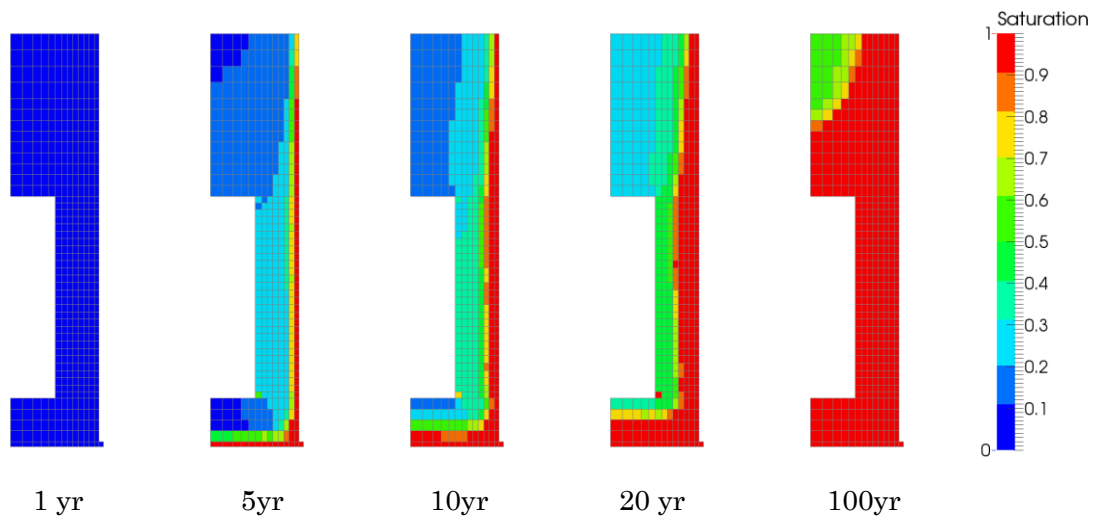


図 6.1.21-8 HM-6 ベントナイト部分・飽和度分布

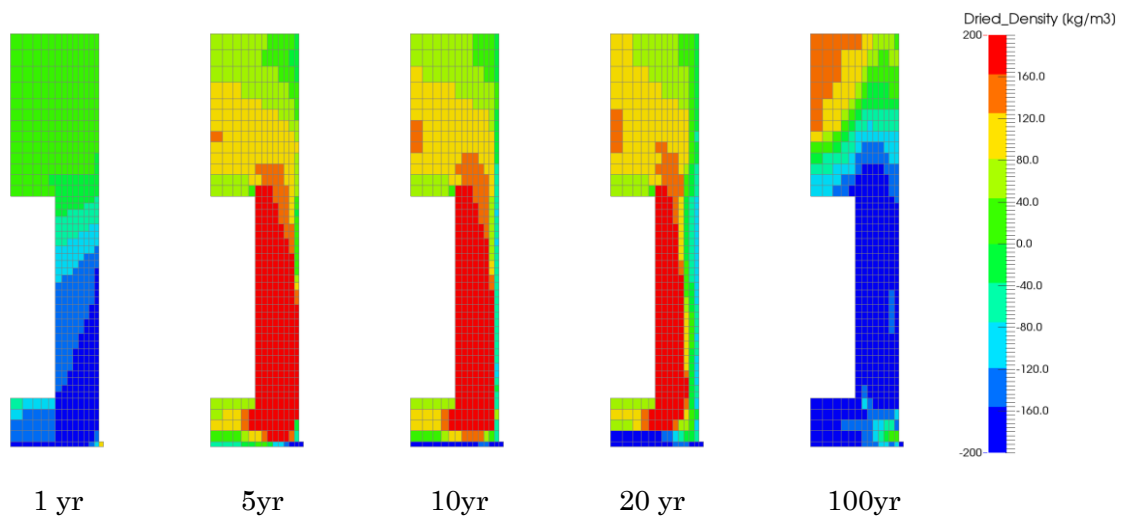


図 6.1.21-9 HM-6 ベントナイト部分・乾燥密度の変動分布

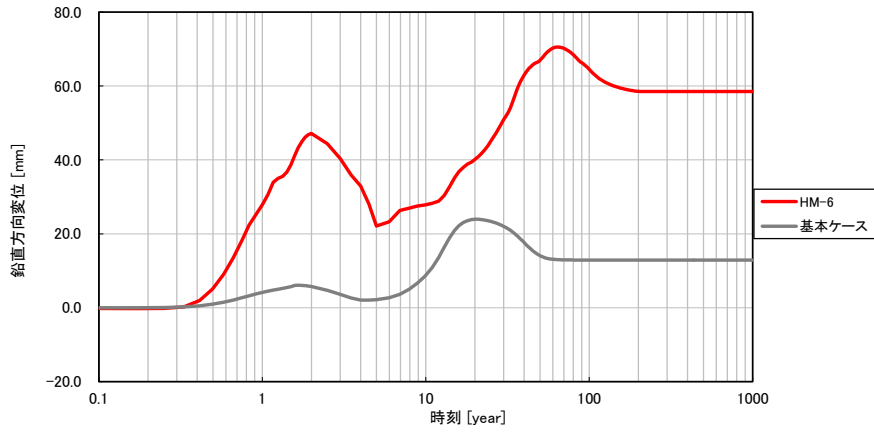


図 6.1.21-10 HM-6 鉛直方向の変位時刻歴

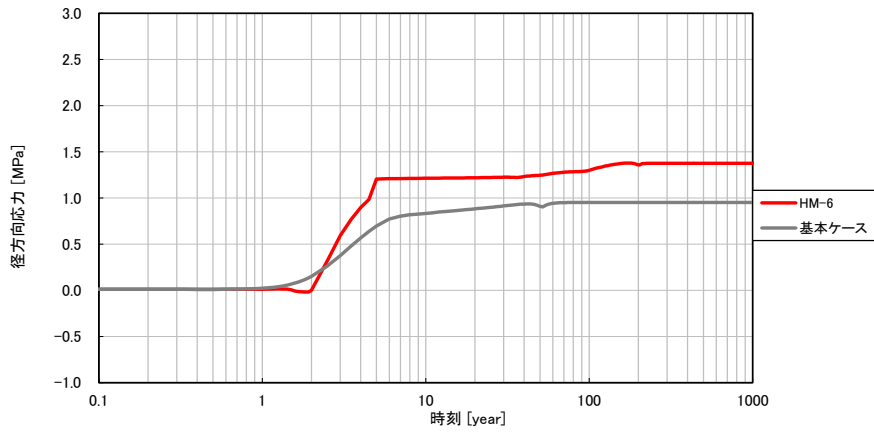


図 6.1.21-11 HM-6 ベントナイト土圧時刻歴 (径方向、引張：正)

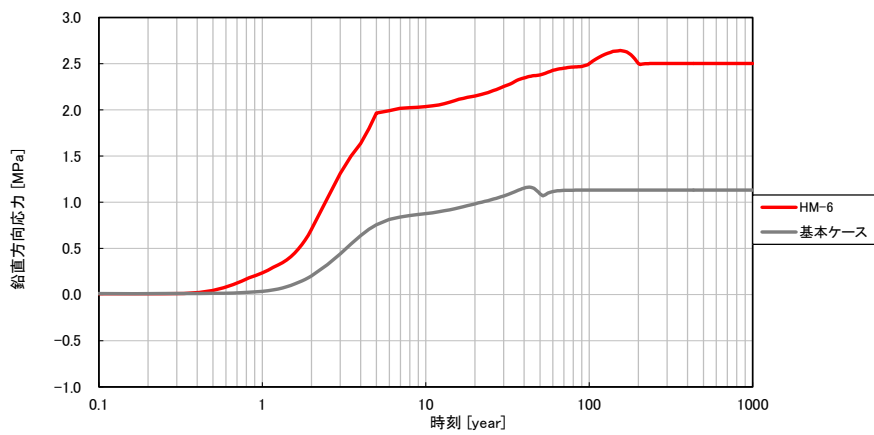
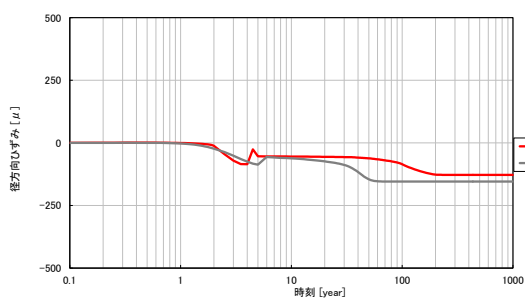
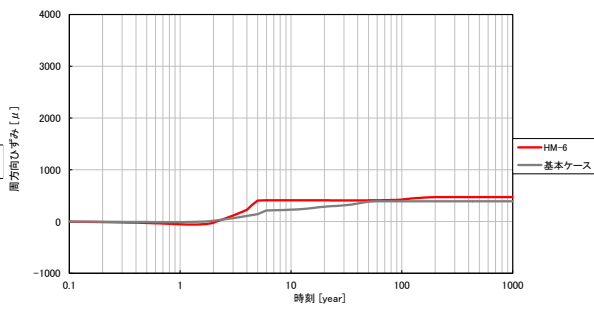


図 6.1.21-12 HM-6 ベントナイト土圧時刻歴 (鉛直方向、引張：正)

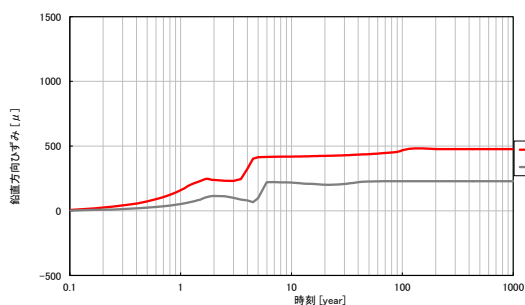


(a)径方向

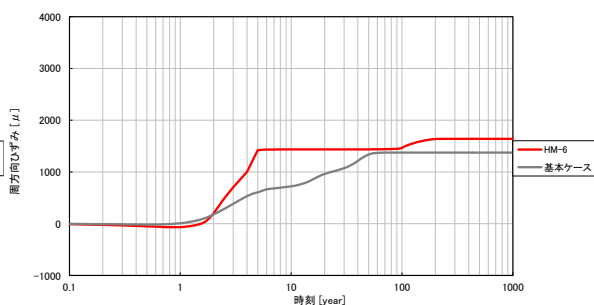


(b)周方向

図 6.1.21-13 HM-6 ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

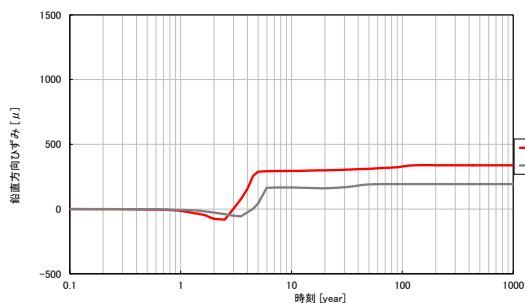


(a)鉛直方向

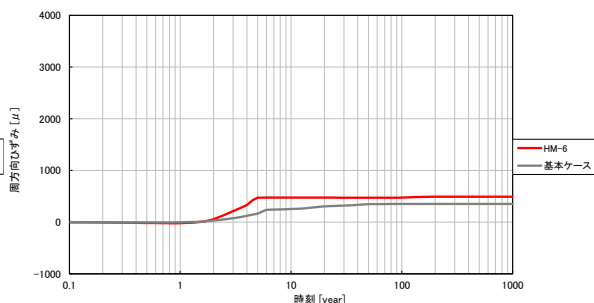


(b)周方向

図 6.1.21-14 HM-6 ひずみ時刻歴 (岩盤内壁、引張：正)



(a)鉛直方向

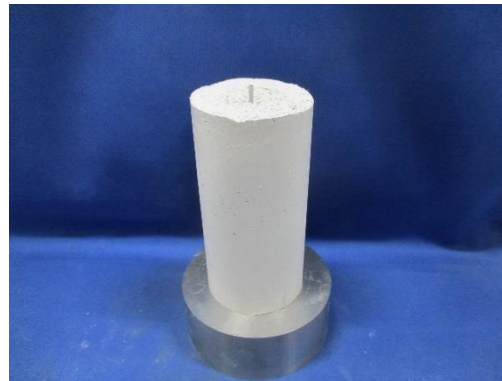
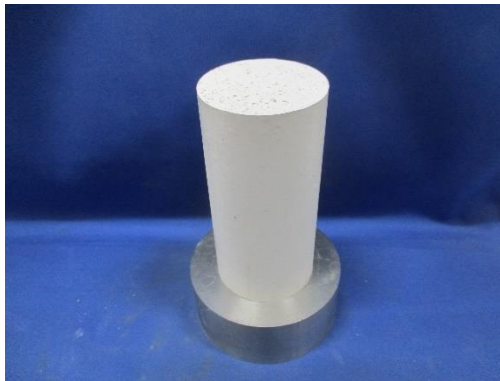


(b)周方向

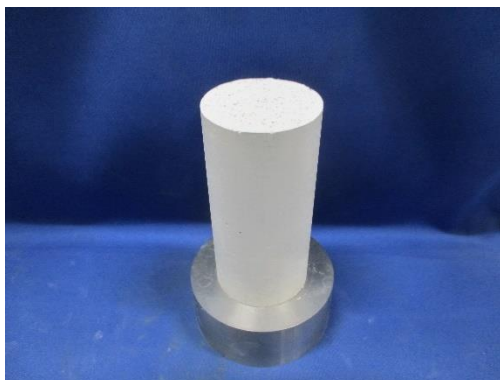
図 6.1.21-15 HM-6 ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

6.2 要素試験 供試体

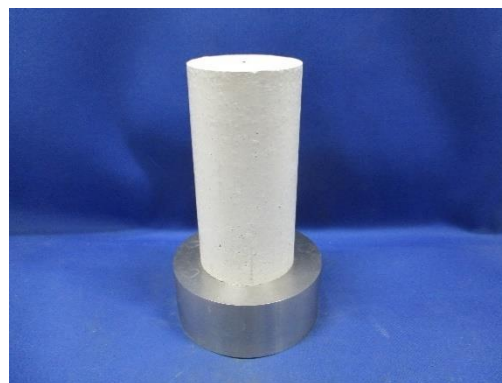
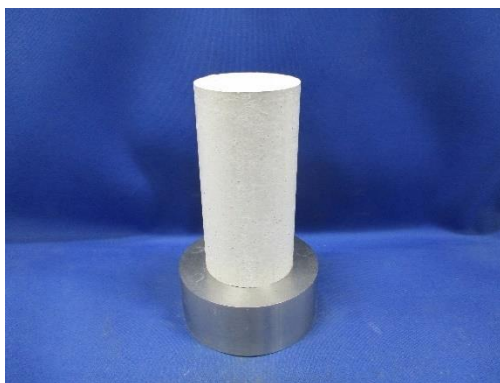
6.2.1 熱伝導率測定供試体（緩衝材）



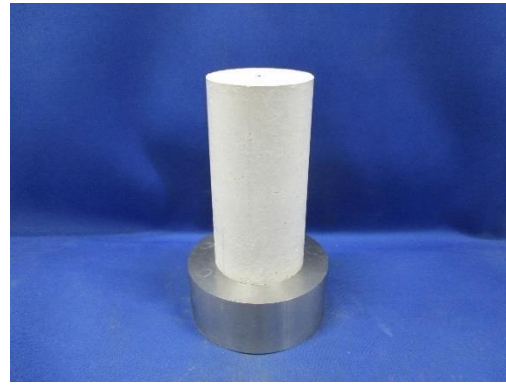
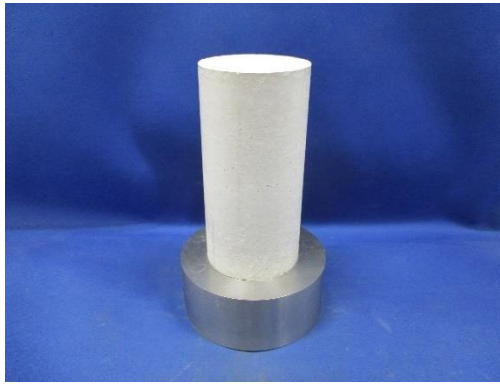
熱伝導率測定供試体①（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 5%）



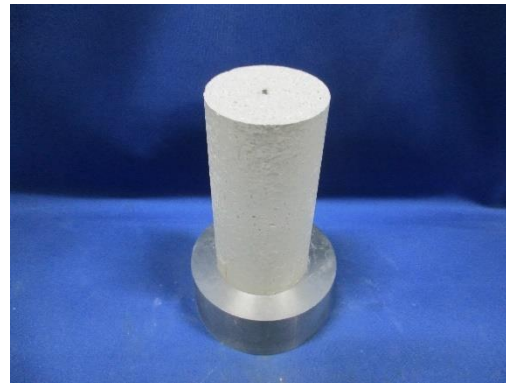
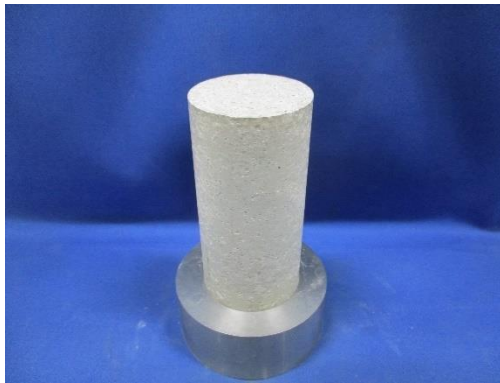
熱伝導率測定供試体①（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 5%）



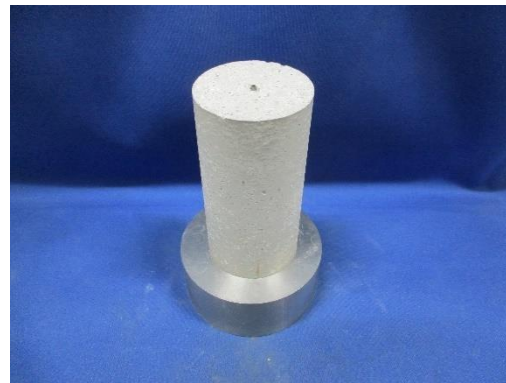
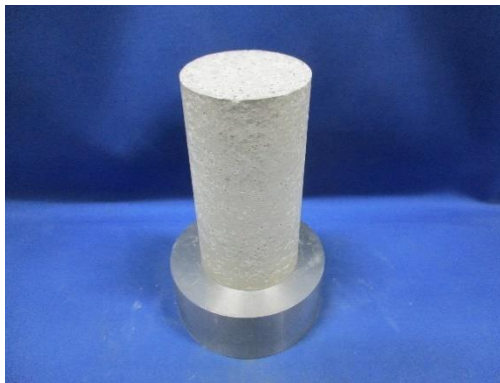
熱伝導率測定供試体①（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 10%）



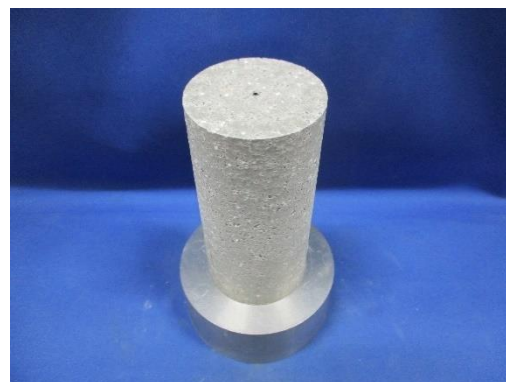
熱伝導率測定供試体② (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 10%)



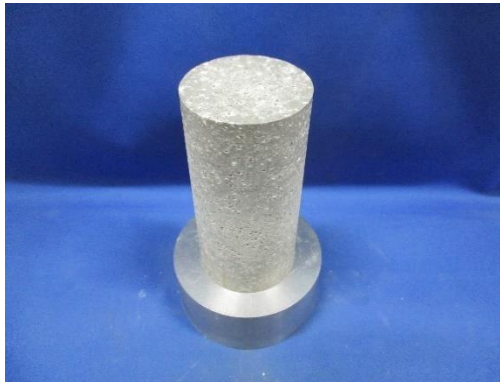
熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 15%)



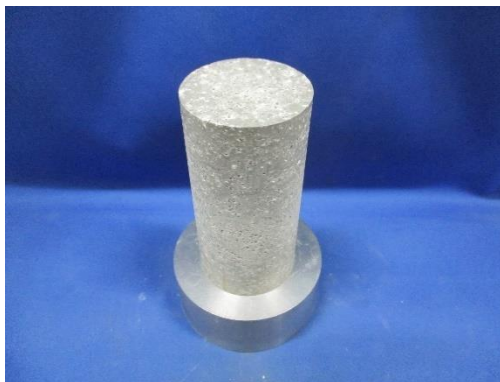
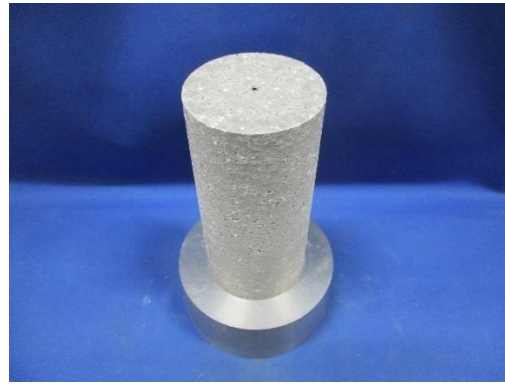
熱伝導率測定供試体② (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 15%)



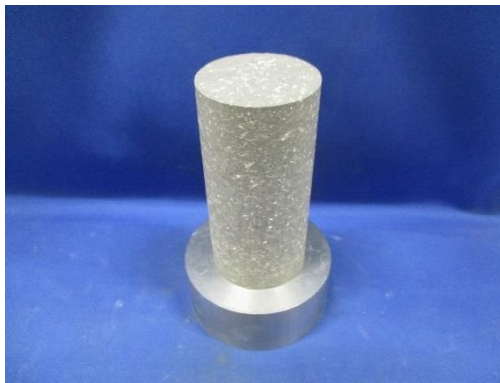
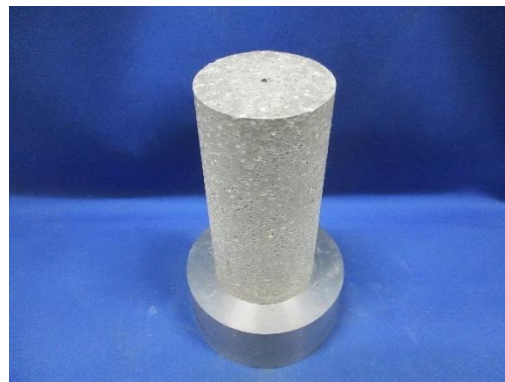
熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 20%)



熱伝導率測定供試体② (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 20%)



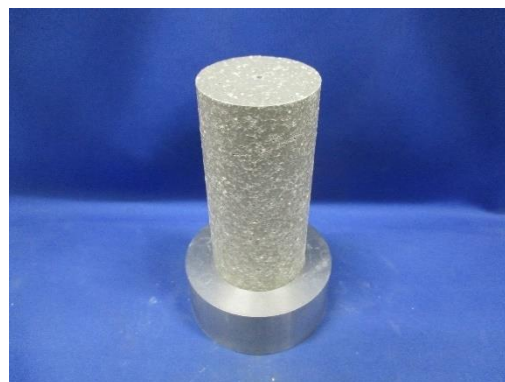
熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 23%)

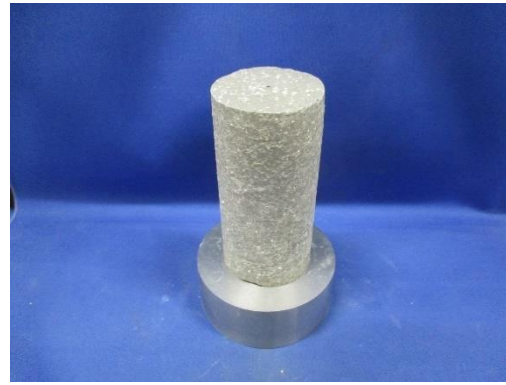


熱伝導率測定供試体② (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 23%)

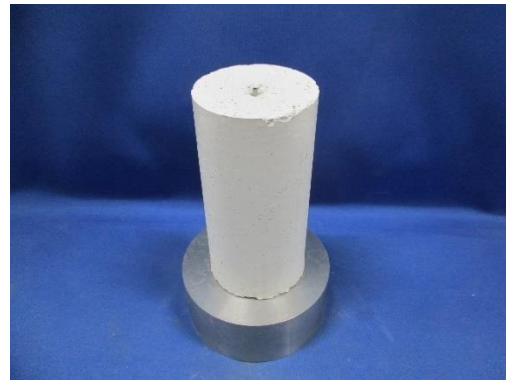
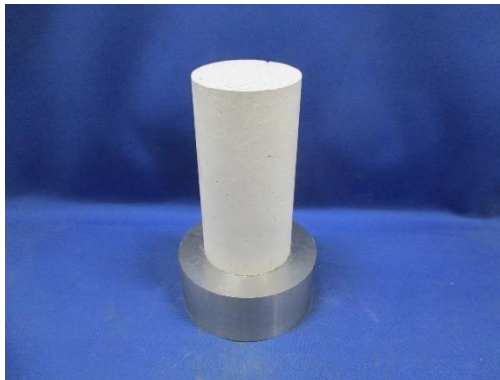


熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 24%)

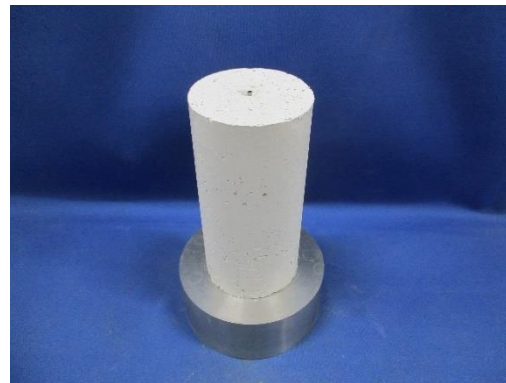
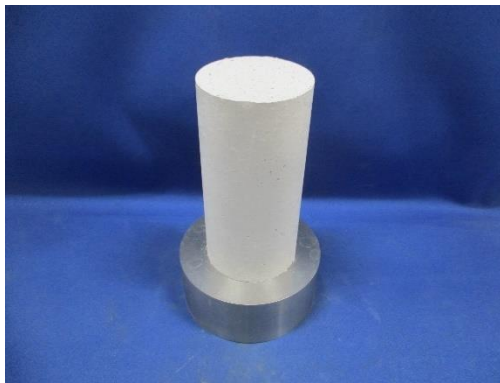




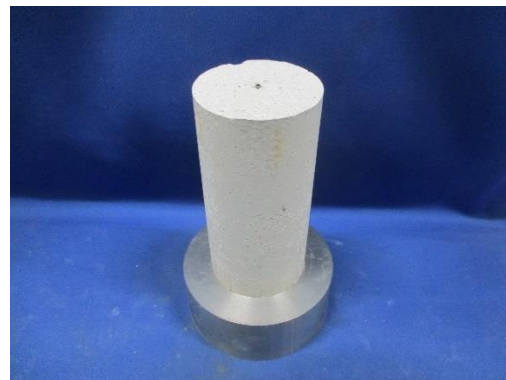
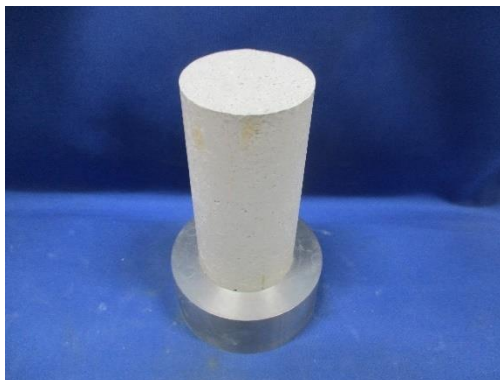
熱伝導率測定供試体② (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 24%)



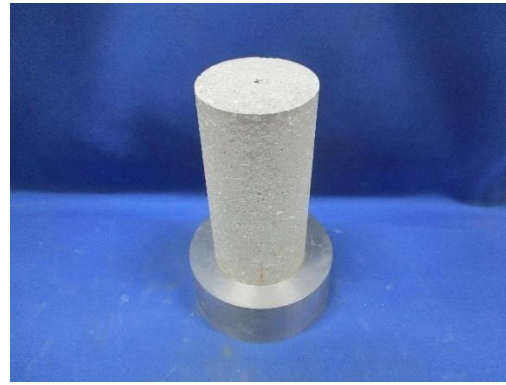
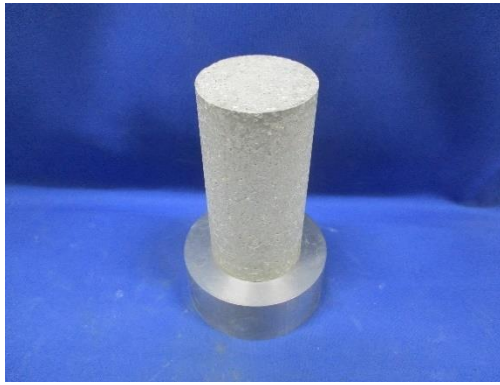
熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.5Mg/m^3 初期含水比 10%)



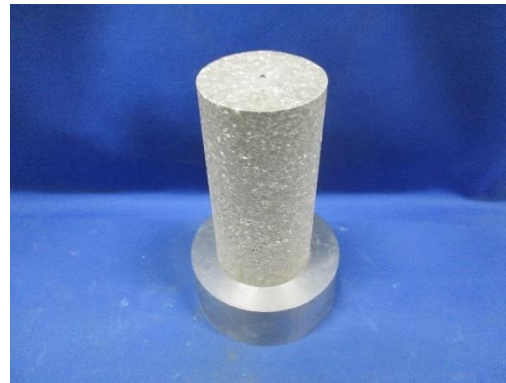
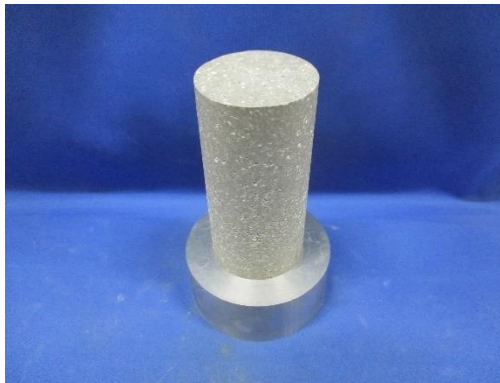
熱伝導率測定供試体② (乾燥密度 1.5Mg/m^3 初期含水比 10%)



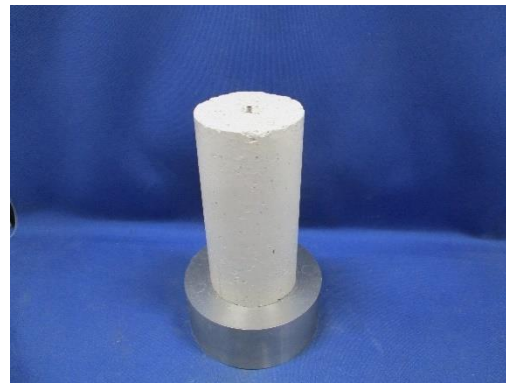
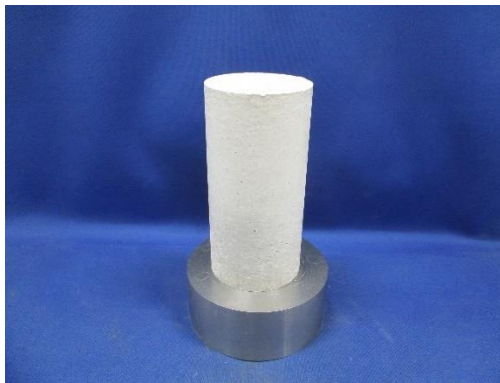
熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.5Mg/m^3 初期含水比 15%)



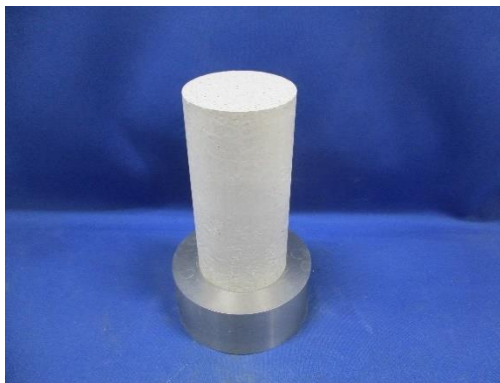
熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.5Mg/m^3 初期含水比 20%)



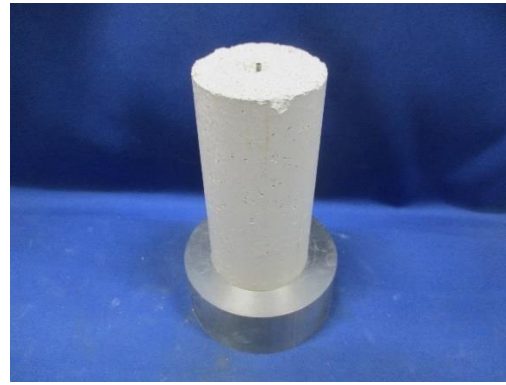
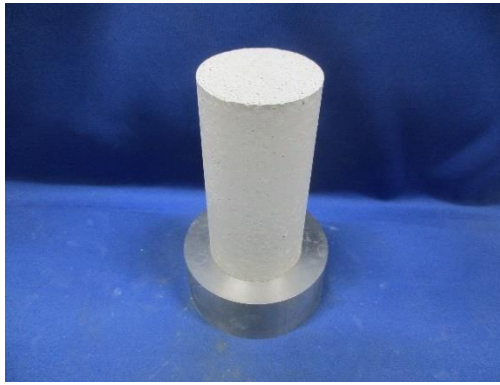
熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.5Mg/m^3 初期含水比 25%)



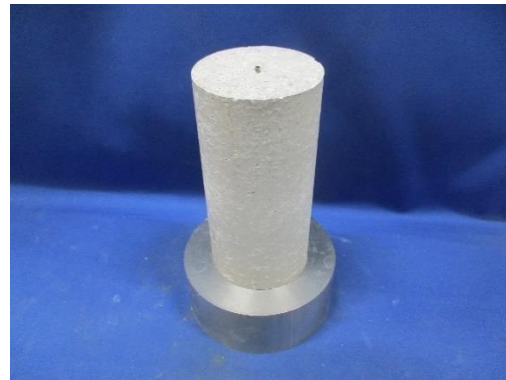
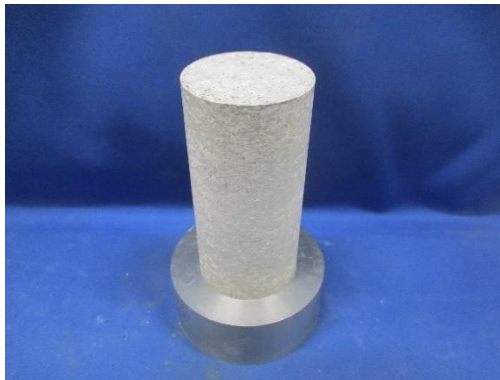
熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 10%)



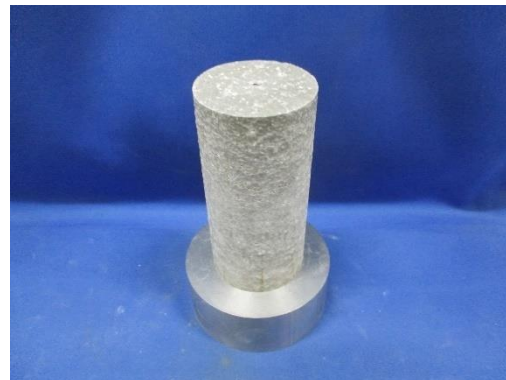
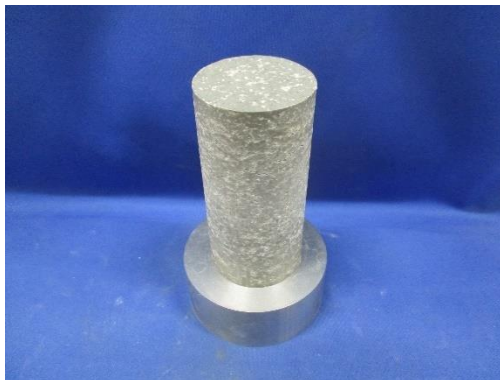
熱伝導率測定供試体② (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 10%)



熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 12%)

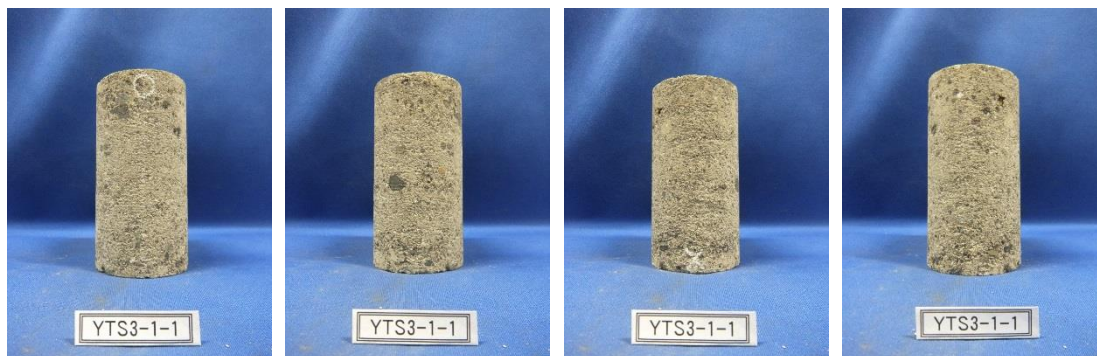


熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 15%)



熱伝導率測定供試体① (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 20%)

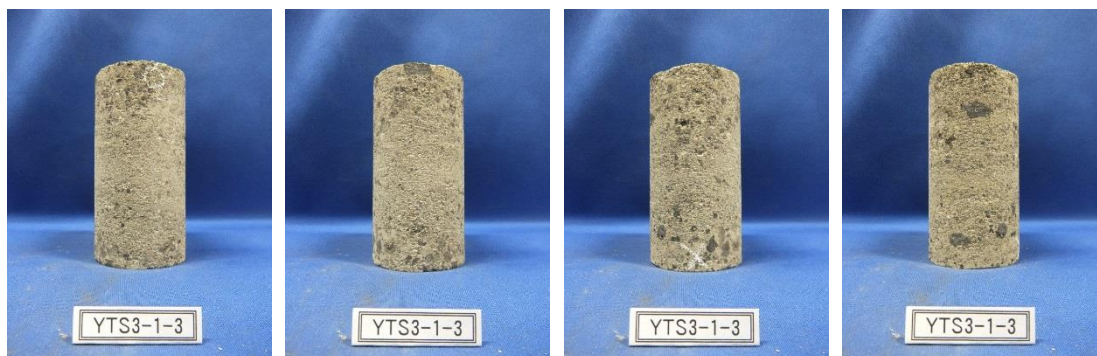
6.2.2 一軸圧縮試験供試体 (周辺岩盤)



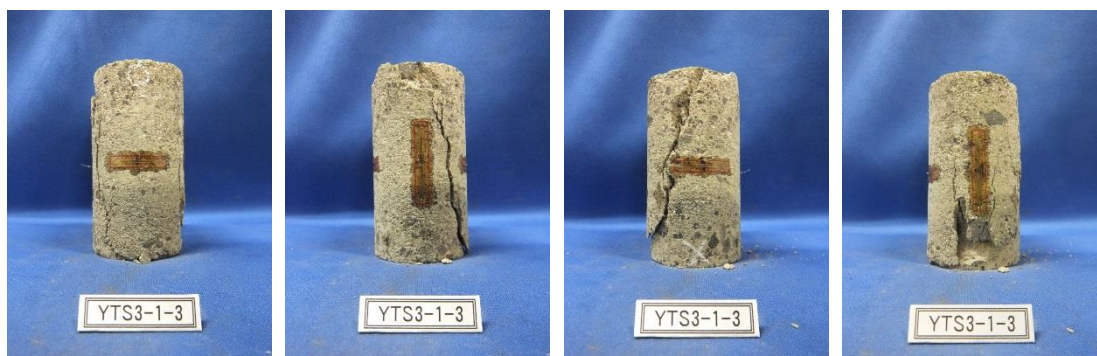
一軸圧縮試験① 前供試体 (乾燥状態)



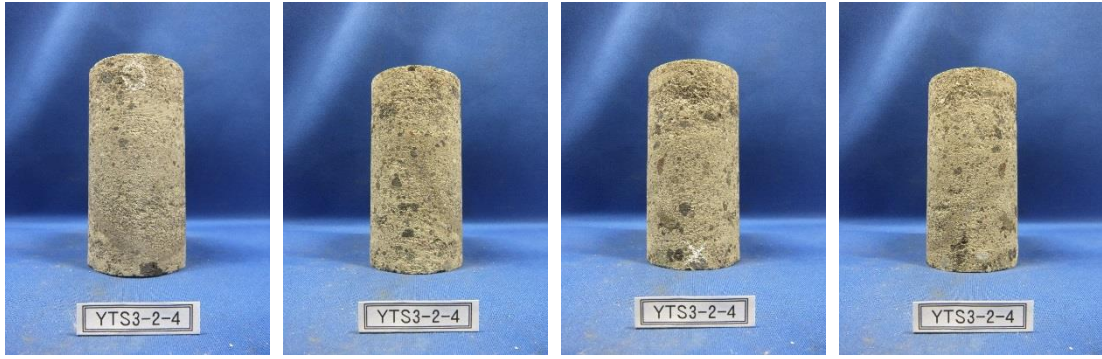
一軸圧縮試験① 後供試体 (乾燥状態)



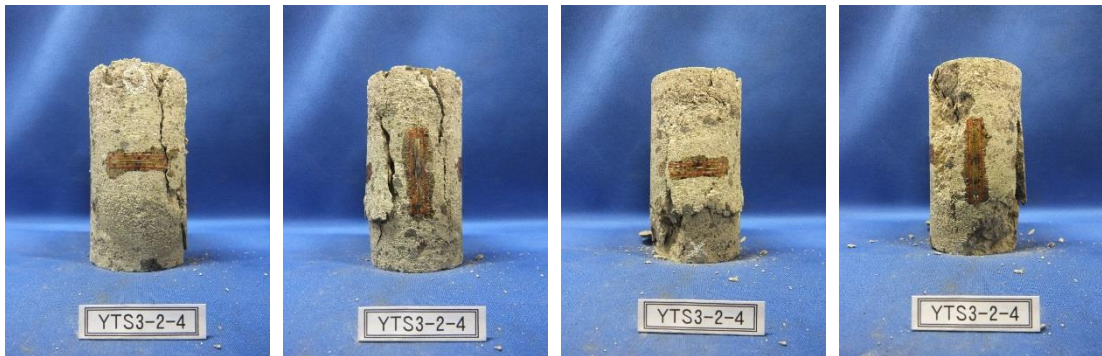
一軸圧縮試験② 前供試体 (乾燥状態)



一軸圧縮試験② 後供試体 (乾燥状態)



一軸圧縮試験③ 前供試体 (乾燥状態)



一軸圧縮試験③ 後供試体 (乾燥状態)

6.2.3 熱伝導率測定供試体（周辺岩盤）



熱伝導率測定供試体①（湿潤状態）



熱伝導率測定供試体①（110°C炉乾燥状態）



熱伝導率測定供試体②（湿潤状態）



熱伝導率測定供試体②（110°C炉乾燥状態）



熱伝導率測定供試体③ (湿潤状態)



熱伝導率測定供試体③ (110°C炉乾燥状態)



熱伝導率測定供試体④ (湿潤状態)



熱伝導率測定供試体④ (110°C炉乾燥状態)



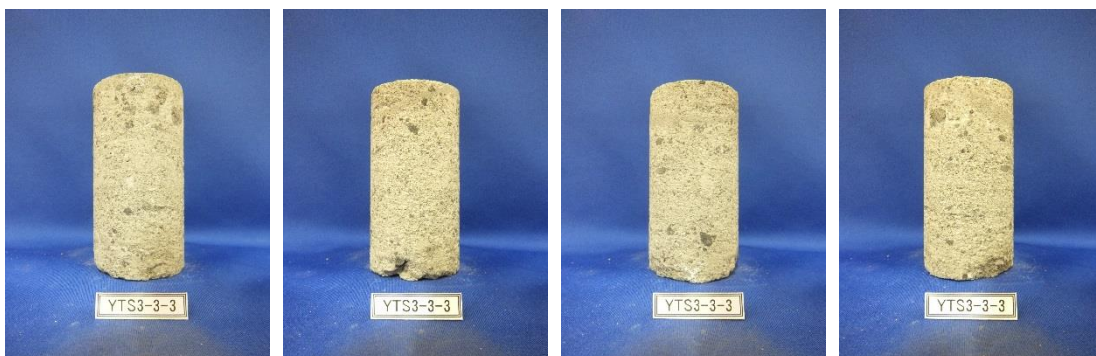
熱伝導率測定供試体⑤ (湿潤状態)



熱伝導率測定供試体⑤ (110°C 炉乾燥状態)

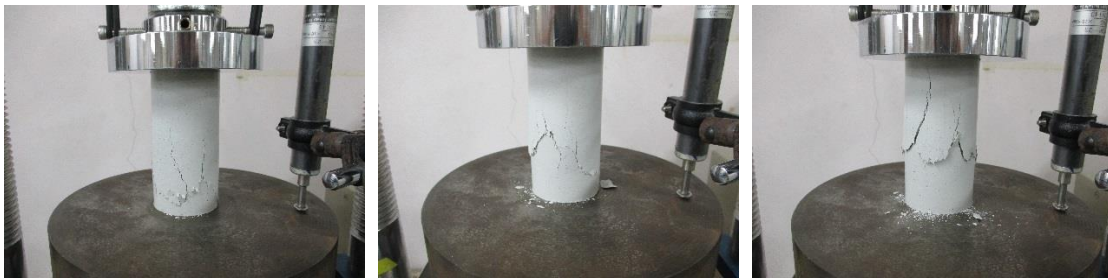


熱伝導率測定供試体⑥ (湿潤状態)



熱伝導率測定供試体⑥ (110°C 炉乾燥状態)

6.2.4 一軸壓縮試驗供試體（緩衝材）



一軸壓縮試驗 後供試體①~③（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 7%）



一軸壓縮試驗 後供試體④~⑥（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 10%）



一軸壓縮試驗 後供試體①~③（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 10%）



一軸壓縮試驗 後供試體①~③（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 12%）



一軸壓縮試驗 後供試體④~⑥（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 12%）



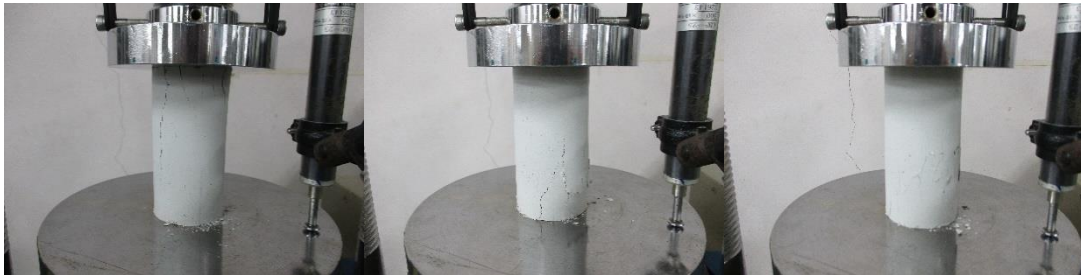
一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 15%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 18%)



一軸圧縮試験 後供試体④~⑥ (乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 18%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 7%)



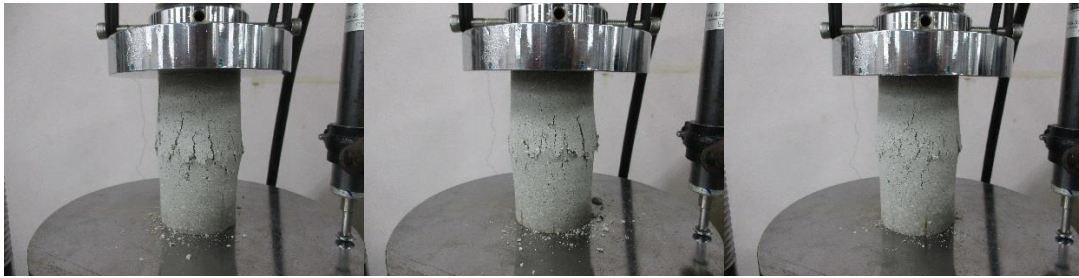
一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 10%)



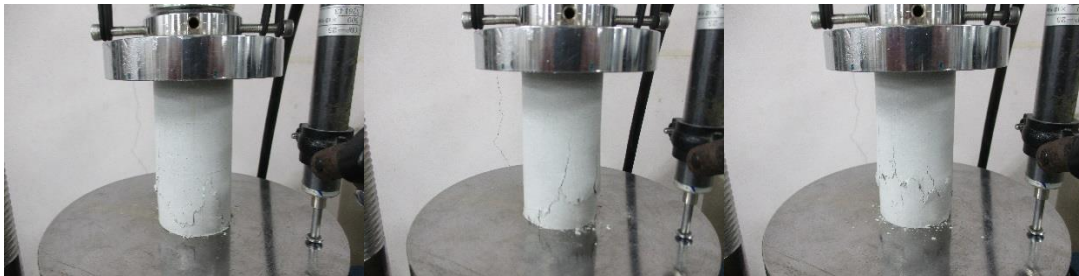
一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 12%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 15%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 18%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 6%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$ 初期含水比 10%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 12%)



一軸圧縮試験 後供試体④~⑥ (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 12%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 15%)



一軸圧縮試験 後供試体④~⑥ (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 15%)

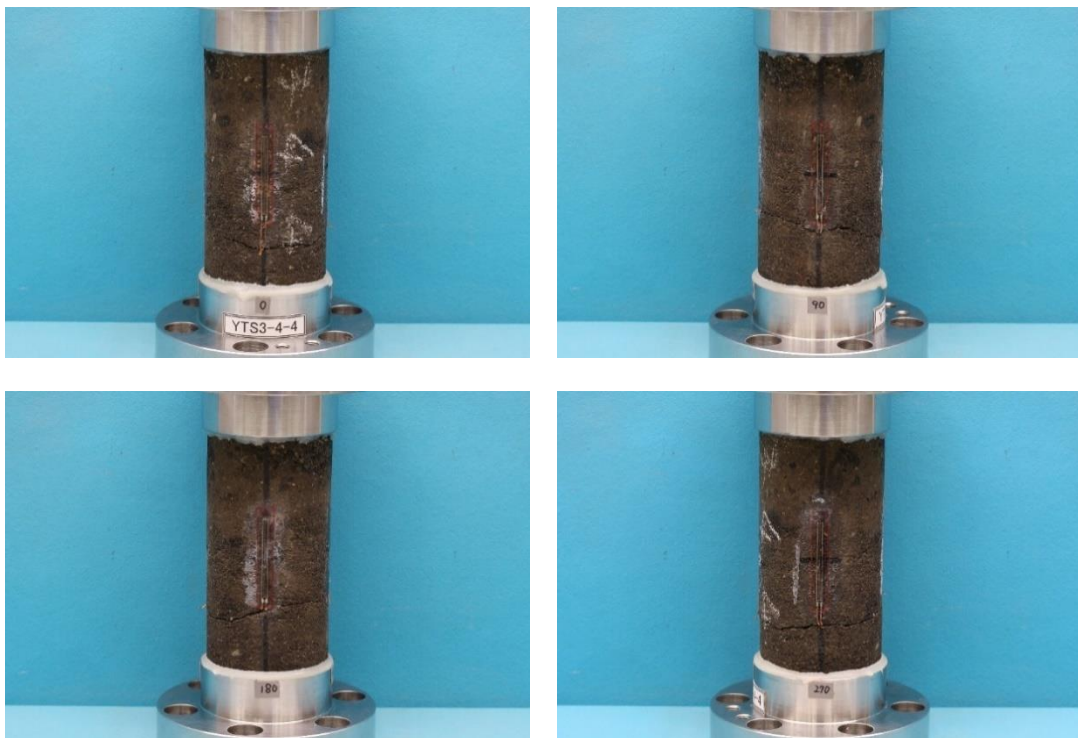


一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 18%)

6.2.5 一軸引張試験供試体（周辺岩盤）



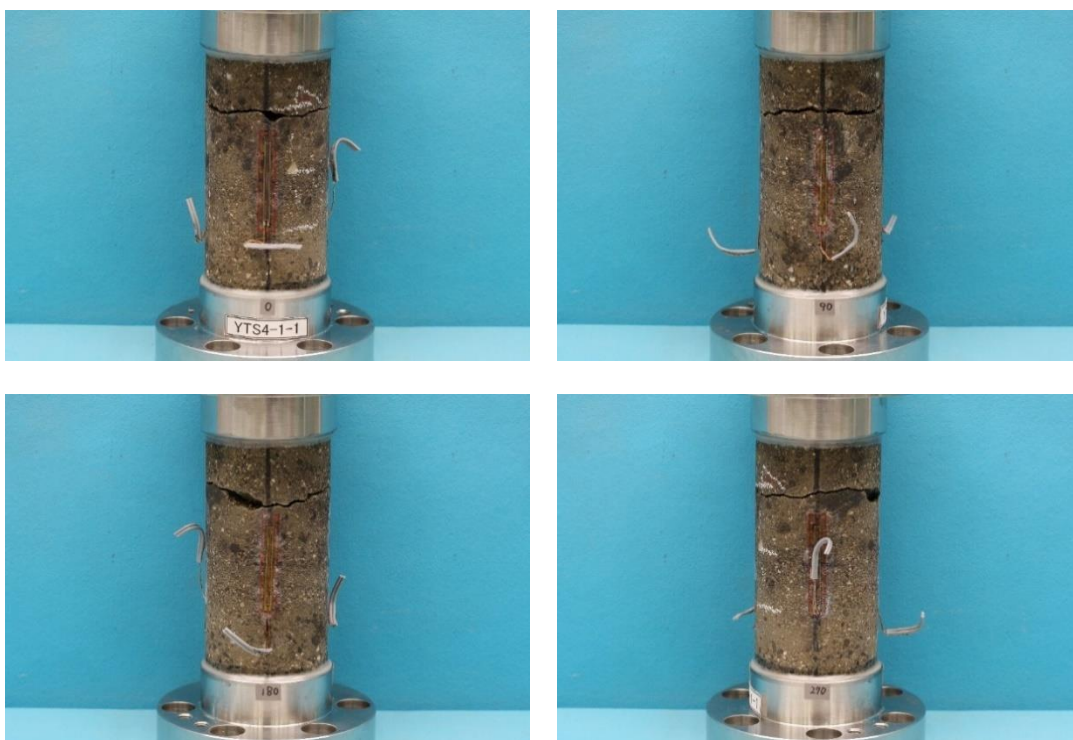
一軸引張試験① 前供試体



一軸引張試験① 後供試体



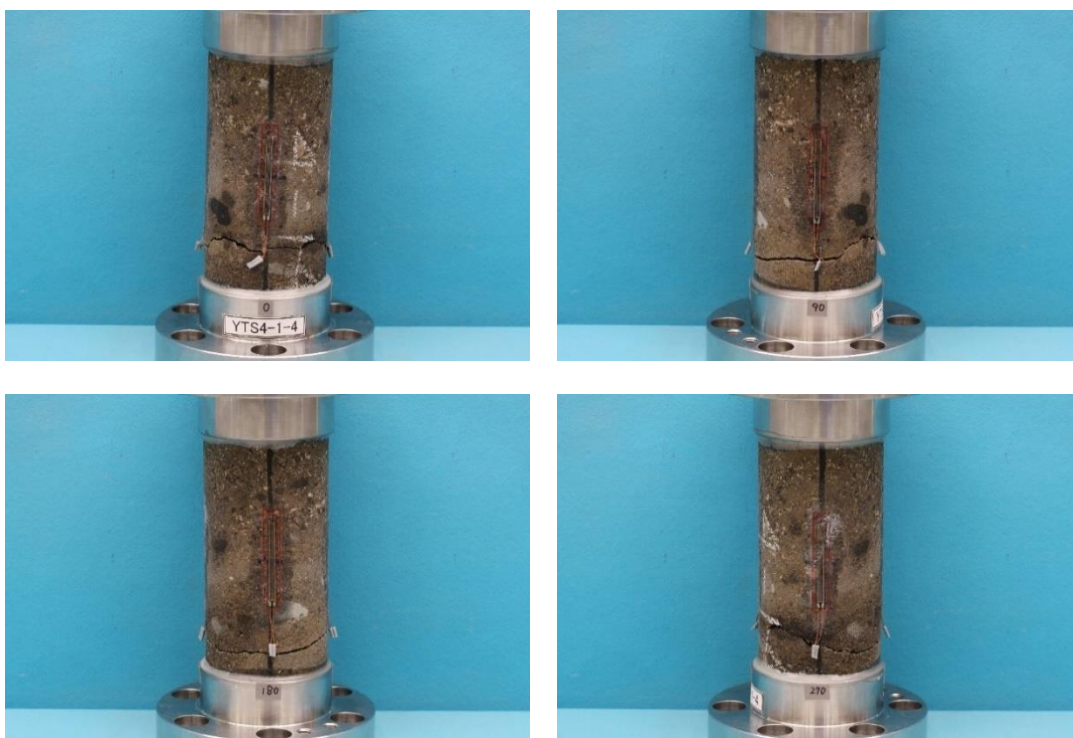
一軸引張試験② 前供試体



一軸引張試験② 後供試体



一軸引張試験③ 前供試体

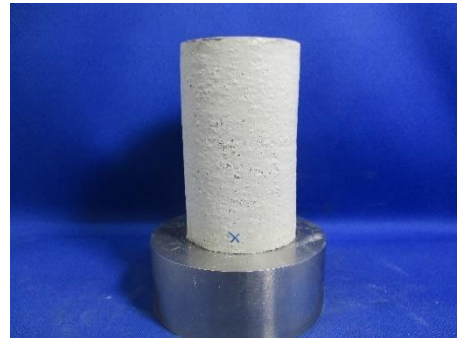
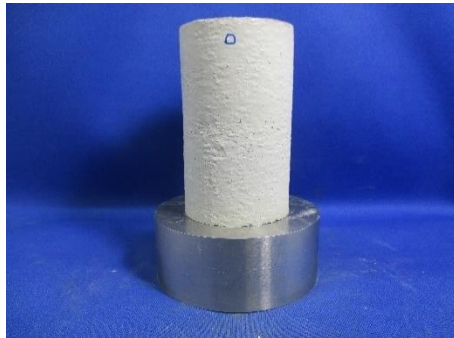


一軸引張試験③ 後供試体

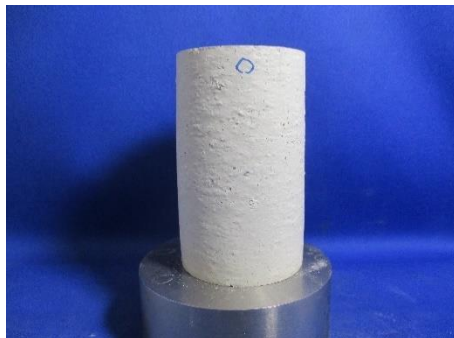
6.2.6 三軸圧縮試験供試体（緩衝材）



三軸圧縮試験① 後供試体 ($\sigma_c'=1.5\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験② 後供試体 ($\sigma_c'=3.0\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験③ 後供試体 ($\sigma_c'=5.0\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験④ 後供試体 ($\sigma_c'=7.0\text{Mpa}$)

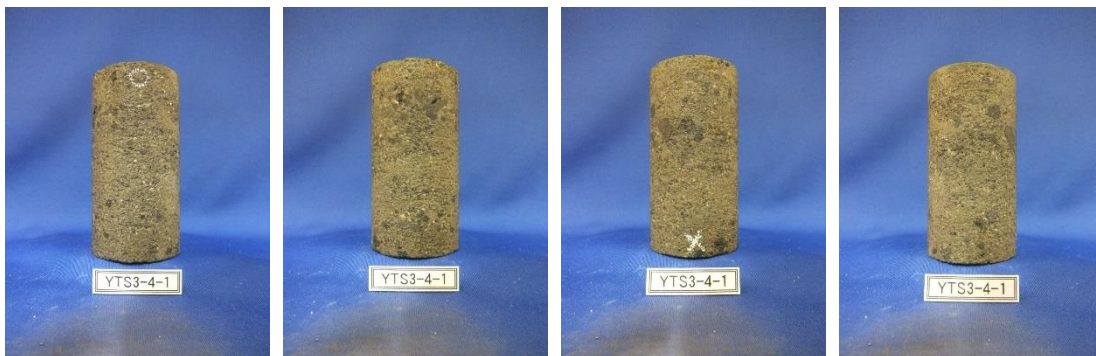
6.2.7 三軸圧縮試験供試体 (周辺岩盤)



三軸圧縮試験① 前供試体 ($\sigma_c' = 1.5\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験① 後供試体 ($\sigma_c' = 1.5\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験② 前供試体 ($\sigma_c' = 3.0\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験② 後供試体 ($\sigma_c' = 3.0\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験③ 前供試体 ($\sigma'_c=5.0\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験③ 後供試体 ($\sigma'_c=5.0\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験④ 前供試体 ($\sigma'_c=7.0\text{Mpa}$)



三軸圧縮試験④ 後供試体 ($\sigma'_c=7.0\text{Mpa}$)