

平成28年度
地層処分技術調査等事業
処分システム工学確証技術開発

報告書
(第3分冊)

人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築

平成29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28年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発のうち、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28年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

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

目次

第 1 章	実施概要及び計画.....	1-1
1.1	全体計画.....	1-1
1.1.1	概要.....	1-1
1.1.2	評価対象の選定.....	1-2
1.1.3	人工バリアの長期挙動に影響をおよぼす周辺環境因子.....	1-5
1.1.4	着眼点.....	1-7
1.1.5	3カ年の全体実施計画.....	1-8
1.2	平成 28 年度の実施内容.....	1-9
1.3	長期挙動評価手法の構築.....	1-10
1.3.1	処分システムの実現に向けた研究の意義.....	1-10
1.3.2	長期挙動の評価手法.....	1-11
第 2 章	本事業の諸条件.....	2-1
2.1	数値解析コード.....	2-1
2.2	遠心力载荷試験装置.....	2-1
2.3	材料.....	2-2
2.3.1	オーバーパック.....	2-2
2.3.2	緩衝材.....	2-2
2.3.3	埋戻し材.....	2-2
2.3.4	岩盤.....	2-2
2.4	試験対象.....	2-4
2.4.1	試験対象の定置概念.....	2-4
2.4.2	境界条件(図 2.4.2-2).....	2-4
第 3 章	数値解析及び要素試験.....	3-1
3.1	遠心模型試験の再現解析.....	3-1
3.1.1	背景及び目的.....	3-1
3.1.2	解析コードの概要.....	3-1
3.1.3	解析モデルの諸元・境界条件.....	3-8
3.1.4	パラメータ.....	3-11
3.1.5	設定した解析ケース一覧.....	3-17
3.1.6	解析結果及び考察.....	3-19
3.1.7	遠心模型試験の再現解析結果のまとめ.....	3-29
3.2	数値解析に用いる要素特性取得のための要素試験.....	3-30

3.2.1	取得する各材料の物性値.....	3-30
3.2.2	要素試験の結果.....	3-33
3.2.3	解析用物性値.....	3-111
3.2.4	要素試験のまとめ.....	3-125
第4章	遠心模型試験.....	4-1
4.1	背景・目的.....	4-1
4.1.1	背景.....	4-1
4.1.2	目的.....	4-2
4.1.3	3カ年の実施計画および本年度の実施内容.....	4-2
4.2	遠心模型試験における相似則.....	4-3
4.2.1	相似則.....	4-3
4.2.2	遠心模型試験の優位点.....	4-5
4.2.3	遠心模型試験の適用限界.....	4-5
4.2.4	長期挙動評価における遠心模型試験の意義.....	4-6
4.3	試験設備.....	4-7
4.3.1	遠心力载荷装置.....	4-8
4.3.2	遠心模型の封入容器.....	4-10
4.3.3	X線CT装置.....	4-11
4.4	境界条件.....	4-12
4.4.1	想定した施設.....	4-12
4.4.2	境界条件.....	4-15
4.5	事前検討.....	4-17
4.5.1	膨出センサーの開発.....	4-17
4.6	遠心模型試験の実施.....	4-22
4.6.1	遠心模型の作製.....	4-22
4.6.2	試験概要.....	4-55
4.6.3	結果.....	4-58
4.7	まとめおよび今後の課題.....	4-91
4.7.1	まとめ.....	4-91
4.7.2	今後の課題.....	4-92
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	実施計画.....	5-1
5.2.2	数値解析及び要素試験.....	5-2
5.2.3	遠心模型試験.....	5-4

第6章	参考資料	6-1
6.1	数値解析の結果	6-1
6.1.1	解析結果	6-2
6.2	要素試験	6-119
6.2.1	要素試験における供試体の観察写真	6-119

図目次

図 1.1.2-1	本研究における評価期間および支配現象の概念図	1-2
図 1.1.2-2	ニアフィールドで生じる諸現象の概略図	1-3
図 1.1.3-1	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	1-6
図 1.1.4-1	長期挙動評価における不確実性低減のための概念図	1-7
図 1.3.1-1	将来変遷の概念と本研究の対象期間	1-11
図 1.3.2-1	長期挙動の評価手法の概念	1-12
図 2.2-1	超長期遠心载荷岩盤実験装置のイメージ	2-1
図 2.3.4-1	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、	2-3
図 2.3.4-2	防空壕内で実施した地質観察図	2-4
図 2.4.2-1	本事業における対象施設(竖置き方式)	2-5
図 2.4.2-2	本事業で想定する境界条件の概念図	2-6
図 2.4.2-3	遠心模型試験で想定するオーバーパックの温度条件(経時変化)[6]	2-6
図 3.1.2-1	LOSTUFにおける緩衝材膨潤モデル	3-6
図 3.1.2-2	弾性ひずみの再配分の計算方法	3-7
図 3.1.3-1	平成27年度遠心模型試験のレイアウト	3-9
図 3.1.3-2	解析モデルのFEMメッシュ図(2388要素・2498節点)	3-10
図 3.1.3-3	解析モデルの諸元と境界条件	3-11
図 3.1.4-1	緩衝材と岩盤の水分特性曲線	3-12
図 3.1.4-2	緩衝材の固有透過度	3-13
図 3.1.4-3	緩衝材のヤング率と飽和度の関係(一次回帰に下限値を設定)	3-14
図 3.1.4-4	緩衝材のヤング率と飽和度の関係(平均飽和度と下限値から設定)	3-15
図 3.1.4-5	緩衝材の熱伝導率	3-15
図 3.1.6-1	代表的なケースにおけるオーバーパック鉛直変位の履歴	3-25
図 3.1.6-2	代表的なケースにおける緩衝材の土圧の履歴	3-25
図 3.1.6-3	代表的なケースにおける岩盤ひずみの履歴	3-27
図 3.1.6-4	接触面強度を検討したケースのO/P鉛直変位の履歴	3-28
図 3.1.6-5	岩盤および隙間の透水性を検討したケースのO/P鉛直変位の履歴	3-28
図 3.2.2-1	ベントナイト(クニゲルV1)の粒径加積曲線	3-33
図 3.2.2-2	ケイ砂3号(2mmアンダー)の粒径加積曲線	3-34
図 3.2.2-3	ケイ砂5号の粒径加積曲線	3-34
図 3.2.2-4	浸出陽イオン量のまとめ	3-35
図 3.2.2-5	モンモリロナイト含有率のまとめ	3-36
図 3.2.2-6	周辺岩盤の粒径加積曲線	3-37

図 3.2.2-7	膨潤圧測定に用いた透水試験装置の概要	3-38
図 3.2.2-8	膨潤圧測定状況(供試体下部より給水)	3-38
図 3.2.2-9	供試体作製時の乾燥密度と吸水膨張圧力の経時変化	3-39
図 3.2.2-10	供試体作製時の乾燥密度と平衡膨潤圧	3-39
図 3.2.2-11	埋戻し材の吸水膨張圧力の経時変化	3-40
図 3.2.2-12	測定供試体の穿孔状況	3-41
図 3.2.2-13	測定プローブの概要	3-41
図 3.2.2-14	緩衝材の熱伝導率測定結果(H27年度)	3-42
図 3.2.2-15	埋戻し材の熱伝導率測定結果(H28年度)	3-43
図 3.2.2-16	周辺岩盤の熱伝導率測定結果(H27年度、H28年度)	3-43
図 3.2.2-17	断熱走査型比熱測定装置	3-44
図 3.2.2-18	比熱測定に用いた供試体	3-45
図 3.2.2-19	比熱と温度との関係(緩衝材 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$)	3-46
図 3.2.2-20	比熱と温度との関係(埋戻し材 $\rho_d=1.8\text{Mg/m}^3$)	3-47
図 3.2.2-21	比熱と温度との関係(周辺岩盤)	3-47
図 3.2.2-22	ひずみゲージを貼付した供試体	3-48
図 3.2.2-23	平均熱膨張係数と温度との関係(緩衝材 $\rho_d=1.5\text{Mg/m}^3$)	3-49
図 3.2.2-24	平均熱膨張係数と温度との関係(緩衝材 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$)	3-50
図 3.2.2-25	平均熱膨張係数と温度との関係(緩衝材 $\rho_d=1.7\text{Mg/m}^3$)	3-50
図 3.2.2-26	平均熱膨張係数と温度との関係(埋戻し材 $\rho_d=1.8\text{Mg/m}^3$)	3-51
図 3.2.2-27	平均熱膨張係数と温度との関係(周辺岩盤)	3-51
図 3.2.2-28	サイクロメータ及び恒温槽	3-52
図 3.2.2-29	作製した緩衝材供試体(直径 35mm×高さ 4mm程度)	3-53
図 3.2.2-30	周辺岩盤供試体(直径 35mm×高さ 4mm程度)	3-54
図 3.2.2-31	緩衝材の保水特性(静的締固めによる供試体作製)	3-56
図 3.2.2-32	緩衝材の保水特性(排水過程)	3-56
図 3.2.2-33	埋戻し材の保水特性(静的締固めによる供試体作製)	3-57
図 3.2.2-34	埋戻し材の保水特性(排水過程)	3-57
図 3.2.2-35	周辺岩盤の保水特性(排水過程)	3-58
図 3.2.2-36	周辺岩盤の保水特性(吸水過程)透水特性	3-58
図 3.2.2-37	透水試験装置の概要	3-59
図 3.2.2-38	変水位透水試験装置	3-59
図 3.2.2-39	吸水量と経過時間の関係(緩衝材:H27年度)	3-60
図 3.2.2-40	吸水量と経過時間の関係(緩衝材:H28年度)	3-61
図 3.2.2-41	給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係(緩衝材)	3-62
図 3.2.2-42	給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係(緩衝材)	3-62

図 3.2.2-43	給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係(緩衝材)	3-63
図 3.2.2-44	給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係(緩衝材)	3-63
図 3.2.2-45	吸水量と経過時間の関係(埋戻し材)	3-64
図 3.2.2-46	給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係(埋戻し材)	3-64
図 3.2.2-47	三軸試験装置を用いた変水位透水試験装置	3-65
図 3.2.2-48	変水位透水試験の方法	3-65
図 3.2.2-49	透水係数の経時変化($\rho_d=1.4\text{Mg/m}^3$)	3-69
図 3.2.2-50	透水係数の経時変化($\rho_d=1.5\text{Mg/m}^3$)	3-69
図 3.2.2-51	透水係数の経時変化($\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$)	3-70
図 3.2.2-52	透水係数の経時変化($\rho_d=1.7\text{Mg/m}^3$)	3-70
図 3.2.2-53	飽和透水係数と作製時の乾燥密度との関係	3-71
図 3.2.2-54	透水係数の経時変化($\rho_d=1.8\text{Mg/m}^3$)	3-73
図 3.2.2-55	周辺岩盤の変水位透水試験結果(透水係数と圧密応力)	3-75
図 3.2.2-56	周辺岩盤の変水位透水試験結果(透水係数と間隙比)	3-75
図 3.2.2-57	圧密試験装置	3-76
図 3.2.2-58	周辺岩盤で実施した圧密試験結果	3-77
図 3.2.2-59	緩衝材の一軸圧縮試験結果(一軸圧縮強さと飽和度)	3-78
図 3.2.2-60	緩衝材の一軸圧縮試験結果(ヤング率と飽和度)	3-79
図 3.2.2-61	緩衝材の一軸圧縮試験結果(一軸圧縮強さと飽和度)	3-79
図 3.2.2-62	緩衝材の一軸圧縮試験結果(ヤング率と飽和度)	3-80
図 3.2.2-63	緩衝材の一軸圧縮試験結果(一軸圧縮強さと飽和度)	3-80
図 3.2.2-64	緩衝材の一軸圧縮試験結果(ヤング率と飽和度)	3-81
図 3.2.2-65	埋戻し材の一軸圧縮試験結果(一軸圧縮強さと飽和度)	3-81
図 3.2.2-66	埋戻し材の一軸圧縮試験結果(ヤング率と飽和度)	3-82
図 3.2.2-67	一軸圧縮試験時の計器設置状況	3-82
図 3.2.2-68	緩衝材の一軸圧縮試験結果(ポアソン比と飽和度)	3-83
図 3.2.2-69	緩衝材の一軸圧縮試験結果(ポアソン比と飽和度)	3-83
図 3.2.2-70	埋戻し材の一軸圧縮試験結果(飽和度とポアソン比)	3-84
図 3.2.2-71	局所変位計及び外部変位計から得られるヤング率	3-85
図 3.2.2-72	緩衝材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m^3)	3-85
図 3.2.2-73	緩衝材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m^3)	3-86
図 3.2.2-74	緩衝材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m^3)	3-86
図 3.2.2-75	緩衝材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.7Mg/m^3)	3-87
図 3.2.2-76	緩衝材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.7Mg/m^3)	3-87
図 3.2.2-77	緩衝材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.7Mg/m^3)	3-88
図 3.2.2-78	埋戻し材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m^3)	3-88

図 3.2.2-79	埋戻し材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m ³)	3-89
図 3.2.2-80	埋戻し材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m ³)	3-89
図 3.2.2-81	一軸圧縮試験装置	3-90
図 3.2.2-82	一軸圧縮試験結果(強制乾燥状態)	3-91
図 3.2.2-83	一軸圧縮試験結果(強制乾燥状態)	3-91
図 3.2.2-84	一軸圧縮試験結果(強制乾燥状態)	3-92
図 3.2.2-85	一軸引張試験装置	3-93
図 3.2.2-86	一軸引張試験後の供試体状況	3-93
図 3.2.2-87	一軸引張試験結果	3-94
図 3.2.2-88	三軸圧縮試験装置	3-95
図 3.2.2-89	緩衝材の三軸圧縮(圧密非排気)試験結果	3-96
図 3.2.2-90	緩衝材の三軸圧縮(圧密非排気)試験結果	3-97
図 3.2.2-91	緩衝材のヤング率の比較(供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m ³)	3-98
図 3.2.2-92	埋戻し材の三軸圧縮(圧密非排気)試験結果	3-98
図 3.2.2-93	埋戻し材のヤング率の比較	3-99
図 3.2.2-94	三軸圧縮試験装置	3-100
図 3.2.2-95	周辺岩盤の三軸圧縮(圧密排水)試験結果(強度定数)	3-102
図 3.2.2-96	周辺岩盤の三軸圧縮(圧密排水)試験結果(ヤング率と間隙比)	3-103
図 3.2.2-97	周辺岩盤の三軸圧縮(圧密排水)試験結果(ϵ_{50} と間隙比)	3-103
図 3.2.2-98	周辺岩盤の三軸圧縮(圧密排気)試験結果(強度定数)	3-105
図 3.2.2-99	周辺岩盤の三軸圧縮(圧密排気)試験結果(ヤング率と間隙比)	3-106
図 3.2.2-100	周辺岩盤の三軸圧縮(圧密排気)試験結果(ϵ_{50} と間隙比)	3-106
図 3.2.2-101	クリープ試験装置	3-107
図 3.2.2-102	軸差応力で正規化した偏差ひずみ速度と経過時間(第1近似線)	3-108
図 3.2.2-103	軸差応力で正規化した偏差ひずみ速度と経過時間(第2近似線)	3-109
図 3.2.2-104	偏差ひずみ速度と経過時間	3-110
図 3.2.3-1	緩衝材の膨潤圧(解析用物性値)	3-112
図 3.2.3-2	埋戻し材の膨潤圧(解析用物性値)	3-112
図 3.2.3-3	緩衝材の保水特性(解析用物性値)	3-113
図 3.2.3-4	埋戻し材の保水特性(解析用物性値)	3-114
図 3.2.3-5	周辺岩盤の保水特性(解析用物性値)	3-114
図 3.2.3-6	緩衝材のヤング率(解析用物性値)	3-116
図 3.2.3-7	緩衝材のポアソン比(解析用物性値)	3-116
図 3.2.3-8	埋戻し材のヤング率(解析用物性値)	3-117
図 3.2.3-9	埋戻し材のポアソン比(解析用物性値)	3-117
図 3.2.3-10	周辺岩盤のヤング率(解析用物性値)	3-118

図 3.2.3-11	周辺岩盤のポアソン比(解析用物性値)	3-118
図 3.2.3-12	緩衝材の熱伝導率(解析用物性値)	3-119
図 3.2.3-13	埋戻し材の熱伝導率(解析用物性値)	3-120
図 3.2.3-14	周辺岩盤の熱伝導率(解析用物性値)	3-120
図 3.2.3-15	緩衝材の比熱(解析用物性値)	3-121
図 3.2.3-16	埋戻し材の比熱(解析用物性値)	3-122
図 3.2.3-17	周辺岩盤の比熱(解析用物性値)	3-122
図 3.2.3-18	緩衝材の平均熱膨張係数(解析用物性値)	3-123
図 3.2.3-19	埋戻し材の平均熱膨張係数(解析用物性値)	3-124
図 3.2.3-20	周辺岩盤の平均熱膨張係数(解析用物性値)	3-124
図 4.1.3-1	本研究における遠心模型試験の試験計画	4-2
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)	4-9
図 4.3.2-1	18cm 円柱用圧力容器の見取図、(左)立断面、(右)、平断面	4-10
図 4.3.3-1	医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ	4-11
図 4.4.1-1	対象とした処分施設の概要	4-12
図 4.4.1-2	試験条件のイメージ図	4-13
図 4.4.1-3	遠心模型(1/30 縮尺)	4-14
図 4.4.2-1	岩盤供試体の三軸試験結果と包絡線	4-16
図 4.4.2-2	载荷圧力の経時変化	4-16
図 4.4.2-3	オーバーパックの温度制御	4-17
図 4.5.1-1	片端固定条件の際のゲージレイアウト	4-18
図 4.5.1-2	片端固定条件のテスト実施状況	4-18
図 4.5.1-3	中心挿入の際のイメージ	4-19
図 4.5.1-4	中心挿入時のテスト結果	4-19
図 4.5.1-5	中心挿入時のディスク厚さから見積もられた変位の理論値	4-20
図 4.5.1-6	左端挿入の際のイメージ	4-20
図 4.5.1-7	左端挿入時のテスト結果	4-20
図 4.5.1-8	左端挿入時のディスク厚さから見積もられた変位の理論値	4-21
図 4.5.1-9	右端挿入の際のイメージ	4-21
図 4.5.1-10	右端挿入時のテスト結果	4-21
図 4.5.1-11	右端挿入時のディスク厚さから見積もられた変位の理論値	4-22
図 4.6.1-1	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)	4-23
図 4.6.1-2	緩衝材ブロックの断面図、平面図および分割状況	4-24
図 4.6.1-3	緩衝材試料(クニゲル V1、70wt%、混合ケイ砂 30wt%)	4-25
図 4.6.1-4	ベントナイト締固め機(左)、圧縮ベントナイト取出し機(右)	4-25
図 4.6.1-5	作製した緩衝材ブロック一覧	4-27

図 4.6.1-6 岩盤供試体の概略断面図	4-28
図 4.6.1-7 岩盤試料の整形状況.....	4-29
図 4.6.1-8 表面計測機	4-30
図 4.6.1-9 岩盤供試体の表面計測機への設置状況.....	4-31
図 4.6.1-10 表面計測の測線のイメージ	4-31
図 4.6.1-11 測線 1 と 2 の計測結果.....	4-32
図 4.6.1-12 測線 3-1 と 3-2 の計測結果	4-33
図 4.6.1-13 測線 4-1 と 4-2 の計測結果	4-34
図 4.6.1-14 測線 5 と 6 の計測結果.....	4-35
図 4.6.1-15 埋戻し材用圧縮容器	4-36
図 4.6.1-16 高剛性リング	4-37
図 4.6.1-17 上部加圧板静置状況	4-37
図 4.6.1-18 埋戻し材加工状況.....	4-38
図 4.6.1-19 ADVANTEC DRK632DB 送風定温乾燥機	4-41
図 4.6.1-20 岩盤供試体へのマーキング状況	4-41
図 4.6.1-21 使用したひずみゲージ.....	4-42
図 4.6.1-22 岩盤試料上端面の加工状況.....	4-42
図 4.6.1-23 下地剤塗布状況.....	4-43
図 4.6.1-24 ひずみゲージの貼付状況.....	4-43
図 4.6.1-25 ひずみゲージ貼付部分へのコーティング状況	4-44
図 4.6.1-26 メンブレンゴムスリーブへの穴開け状況(赤丸部分)	4-44
図 4.6.1-27 KE-45-TS を使用しての止水処理状況.....	4-45
図 4.6.1-28 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.....	4-45
図 4.6.1-29 緩衝材ブロックの中心部加工状況.....	4-46
図 4.6.1-30 緩衝材ブロックの土圧計設置の加工状況.....	4-46
図 4.6.1-31 緩衝材・模擬オーバーパックの処分孔への設置状況	4-47
図 4.6.1-32 圧力計(東京測器製 PDA-3MPB)	4-47
図 4.6.1-33 膨出センサー設置状況.....	4-48
図 4.6.1-34 膨出センサースライド治具.....	4-48
図 4.6.1-35 土圧計および膨出センサー設置状況.....	4-49
図 4.6.1-36 埋戻し材の設置状況	4-49
図 4.6.1-37 メンブレンの装着状況.....	4-50
図 4.6.1-38 メンブレン部の被覆状況	4-50
図 4.6.1-39 ステンレスメッシュ貼付状況.....	4-52
図 4.6.1-40 下部架台への設置状況(Oリング設置済)	4-52
図 4.6.1-41 ひずみゲージのリード線の防水処理状況	4-53

図 4.6.1-42	土圧計リード線の防水処理状況.....	4-53
図 4.6.1-43	Conax 社製、シーリンググランドへのリード線設置状況.....	4-54
図 4.6.1-44	sartorius 社製、MW2P1-150FE-L.....	4-54
図 4.6.1-45	高速スイッチボックスへの結線状況.....	4-55
図 4.6.2-1	遠心模型試験のセンサーレイアウト.....	4-57
図 4.6.3-1	オーバーパックの温度の入力値および計測値の経時変化.....	4-59
図 4.6.3-2	模型側面部軸方向の測温ゲージによって計測された温度の経時変化.....	4-60
図 4.6.3-3	模型側面部周方向の測温ゲージによって計測された温度の経時変化.....	4-61
図 4.6.3-4	模型上端部と処分孔壁の測温ゲージで計測した温度の経時変化.....	4-62
図 4.6.3-5	模型処分孔内部の測温ゲージで計測した温度の経時変化.....	4-63
図 4.6.3-6	T_G13T と排水圧の経時変化.....	4-64
図 4.6.3-7	緩衝材内の土圧計で計測された圧力と軸圧、排水圧の経時変化.....	4-65
図 4.6.3-8	試験後期の土圧計で計測された圧力と軸圧、排水圧の経時変化.....	4-66
図 4.6.3-9	容器上蓋内の土圧計で計測された圧力と排水圧の経時変化.....	4-67
図 4.6.3-10	圧力容器に設置された非接触変位計で計測された変位の経時変化.....	4-69
図 4.6.3-11	オーバーパックの鉛直変位の経時変化.....	4-70
図 4.6.3-12	模型側面部軸方向のひずみ経時の変化.....	4-72
図 4.6.3-13	模型側面部周方向のひずみの経時変化.....	4-73
図 4.6.3-14	岩盤上端面のひずみの経時変化.....	4-74
図 4.6.3-15	処分孔壁のひずみの経時変化.....	4-75
図 4.6.3-16	膨出センサーのひずみの経時変化.....	4-77
図 4.6.3-17	時間毎の膨出センサーのひずみ分布状況.....	4-78
図 4.6.3-18	試験後の含水比計測に使用した試料採取ロッド.....	4-79
図 4.6.3-19	試験後の採取地点.....	4-80
図 4.6.3-20	緩衝材密度の深さ分布.....	4-80
図 4.6.3-21	緩衝材含水比の深さ分布.....	4-81
図 4.6.3-22	緩衝材飽和度の深さ分布.....	4-81
図 4.6.3-23	緩衝材飽和度の深さ分布.....	4-82
図 4.6.3-24	埋戻し材の含水比計測位置.....	4-82
図 4.6.3-25	埋戻し材の含水比分布.....	4-83
図 4.6.3-26	撮影箇所の概要図.....	4-83
図 4.6.3-27	実験前の CT 撮影結果.....	4-84
図 4.6.3-28	実験前の各地点における CT 値.....	4-85
図 4.6.3-29	試験後の CT 撮影結果.....	4-86
図 4.6.3-30	試験後の各地点における CT 値.....	4-87
図 4.6.3-31	試験後の CT 値(10mm 平均値)の算出箇所.....	4-88

図 4.6.3-32	試験後の 10mm 範囲の CT 値	4-89
図 4.6.3-33	試験後の CT 画像(リン青銅板の位置検討)	4-90
図 4.6.3-34	リン青銅板の最終変位	4-91
図 4.7.2-1	センサー変位の計算方法のイメージ	4-92
図 6.1-1	解析結果の出力部位と出力位置	6-1
図 6.1.1-1	Case 0 岩盤部分・間隙水圧分布	6-2
図 6.1.1-2	Case 0 岩盤部分・温度分布	6-2
図 6.1.1-3	Case 0 岩盤部分・主せん断応力分布	6-2
図 6.1.1-4	Case 0 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-3
図 6.1.1-5	Case 0 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-3
図 6.1.1-6	Case 0 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-3
図 6.1.1-7	Case 0 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-4
図 6.1.1-8	Case 0 緩衝材部分・飽和度分布	6-4
図 6.1.1-9	Case 0 緩衝材部分・乾燥密度分布	6-4
図 6.1.1-10	Case 0 鉛直方向の変位時刻歴	6-5
図 6.1.1-11	Case 0 緩衝材土圧時刻歴(鉛直方向、圧縮:正)	6-5
図 6.1.1-12	Case 0 径方向ひずみ時刻歴(岩盤上面、引張:正)	6-5
図 6.1.1-13	Case 0 鉛直方向ひずみ時刻歴(岩盤外壁、引張:正)	6-6
図 6.1.1-14	Case 0 周方向ひずみ時刻歴(岩盤外壁、引張:正)	6-6
図 6.1.1-15	Case 1 岩盤部分・間隙水圧分布	6-6
図 6.1.1-16	Case 1 岩盤部分・温度分布	6-7
図 6.1.1-17	Case 1 岩盤部分・主せん断応力分布	6-7
図 6.1.1-18	Case 1 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-7
図 6.1.1-19	Case 1 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-8
図 6.1.1-20	Case 1 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-8
図 6.1.1-21	Case 1 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-8
図 6.1.1-22	Case 1 緩衝材部分・飽和度分布	6-9
図 6.1.1-23	Case 1 緩衝材部分・乾燥密度分布	6-9
図 6.1.1-24	Case 1 鉛直方向の変位時刻歴	6-9
図 6.1.1-25	Case 1 緩衝材土圧時刻歴(鉛直方向、圧縮:正)	6-10
図 6.1.1-26	Case 1 径方向ひずみ時刻歴(岩盤上面、引張:正)	6-10
図 6.1.1-27	Case 1 鉛直方向ひずみ時刻歴(岩盤外壁、引張:正)	6-10
図 6.1.1-28	Case 1 周方向ひずみ時刻歴(岩盤外壁、引張:正)	6-11
図 6.1.1-29	Case 2 岩盤部分・間隙水圧分布	6-11
図 6.1.1-30	Case 2 岩盤部分・温度分布	6-11
図 6.1.1-31	Case 2 岩盤部分・主せん断応力分布	6-12

図 6.1.1-32	Case 2	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-12
図 6.1.1-33	Case 2	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-12
図 6.1.1-34	Case 2	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-13
図 6.1.1-35	Case 2	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-13
図 6.1.1-36	Case 2	緩衝材部分・飽和度分布	6-13
図 6.1.1-37	Case 2	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-14
図 6.1.1-38	Case 2	鉛直方向の変位時刻歴	6-14
図 6.1.1-39	Case 2	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-14
図 6.1.1-40	Case 2	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-15
図 6.1.1-41	Case 2	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-15
図 6.1.1-42	Case 2	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-15
図 6.1.1-43	Case 3	岩盤部分・間隙水圧分布	6-16
図 6.1.1-44	Case 3	岩盤部分・温度分布	6-16
図 6.1.1-45	Case 3	岩盤部分・主せん断応力分布	6-16
図 6.1.1-46	Case 3	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-17
図 6.1.1-47	Case 3	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-17
図 6.1.1-48	Case 3	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-17
図 6.1.1-49	Case 3	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-18
図 6.1.1-50	Case 3	緩衝材部分・飽和度分布	6-18
図 6.1.1-51	Case 3	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-18
図 6.1.1-52	Case 3	鉛直方向の変位時刻歴	6-19
図 6.1.1-53	Case 3	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-19
図 6.1.1-54	Case 3	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-19
図 6.1.1-55	Case 3	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-20
図 6.1.1-56	Case 3	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-20
図 6.1.1-57	Case 4	岩盤部分・間隙水圧分布	6-20
図 6.1.1-58	Case 4	岩盤部分・温度分布	6-21
図 6.1.1-59	Case 4	岩盤部分・主せん断応力分布	6-21
図 6.1.1-60	Case 4	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-21
図 6.1.1-61	Case 4	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-22
図 6.1.1-62	Case 4	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-22
図 6.1.1-63	Case 4	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-22
図 6.1.1-64	Case 4	緩衝材部分・飽和度分布	6-23
図 6.1.1-65	Case 4	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-23
図 6.1.1-66	Case 4	鉛直方向の変位時刻歴	6-23
図 6.1.1-67	Case 4	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-24

図 6.1.1-68	Case 4	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-24
図 6.1.1-69	Case 4	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-24
図 6.1.1-70	Case 4	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-25
図 6.1.1-71	Case 5	岩盤部分・間隙水圧分布	6-25
図 6.1.1-72	Case 5	岩盤部分・温度分布	6-25
図 6.1.1-73	Case 5	岩盤部分・主せん断応力分布	6-26
図 6.1.1-74	Case 5	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-26
図 6.1.1-75	Case 5	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-26
図 6.1.1-76	Case 5	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-27
図 6.1.1-77	Case 5	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-27
図 6.1.1-78	Case 5	緩衝材部分・飽和度分布	6-27
図 6.1.1-79	Case 5	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-28
図 6.1.1-80	Case 5	鉛直方向の変位時刻歴	6-28
図 6.1.1-81	Case 5	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-28
図 6.1.1-82	Case 5	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-29
図 6.1.1-83	Case 5	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-29
図 6.1.1-84	Case 5	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-29
図 6.1.1-85	Case 6	岩盤部分・間隙水圧分布	6-30
図 6.1.1-86	Case 6	岩盤部分・温度分布	6-30
図 6.1.1-87	Case 6	岩盤部分・主せん断応力分布	6-30
図 6.1.1-88	Case 6	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-31
図 6.1.1-89	Case 6	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-31
図 6.1.1-90	Case 6	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-31
図 6.1.1-91	Case 6	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-32
図 6.1.1-92	Case 6	緩衝材部分・飽和度分布	6-32
図 6.1.1-93	Case 6	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-32
図 6.1.1-94	Case 6	鉛直方向の変位時刻歴	6-33
図 6.1.1-95	Case 6	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-33
図 6.1.1-96	Case 6	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-33
図 6.1.1-97	Case 6	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-34
図 6.1.1-98	Case 6	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-34
図 6.1.1-99	Case 7	岩盤部分・間隙水圧分布	6-34
図 6.1.1-100	Case 7	岩盤部分・温度分布	6-35
図 6.1.1-101	Case 7	岩盤部分・主せん断応力分布	6-35
図 6.1.1-102	Case 7	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-35
図 6.1.1-103	Case 7	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-36

図 6.1.1-104	Case 7	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-36
図 6.1.1-105	Case 7	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-36
図 6.1.1-106	Case 7	緩衝材部分・飽和度分布	6-37
図 6.1.1-107	Case 7	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-37
図 6.1.1-108	Case 7	鉛直方向の変位時刻歴	6-37
図 6.1.1-109	Case 7	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-38
図 6.1.1-110	Case 7	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-38
図 6.1.1-111	Case 7	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-38
図 6.1.1-112	Case 7	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-39
図 6.1.1-113	Case 8	岩盤部分・間隙水圧分布	6-39
図 6.1.1-114	Case 8	岩盤部分・温度分布	6-39
図 6.1.1-115	Case 8	岩盤部分・主せん断応力分布	6-40
図 6.1.1-116	Case 8	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-40
図 6.1.1-117	Case 8	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-40
図 6.1.1-118	Case 8	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-41
図 6.1.1-119	Case 8	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-41
図 6.1.1-120	Case 8	緩衝材部分・飽和度分布	6-41
図 6.1.1-121	Case 8	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-42
図 6.1.1-122	Case 8	鉛直方向の変位時刻歴	6-42
図 6.1.1-123	Case 8	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-42
図 6.1.1-124	Case 8	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-43
図 6.1.1-125	Case 8	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-43
図 6.1.1-126	Case 8	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-43
図 6.1.1-127	Case 9	岩盤部分・間隙水圧分布	6-44
図 6.1.1-128	Case 9	岩盤部分・温度分布	6-44
図 6.1.1-129	Case 9	岩盤部分・主せん断応力分布	6-44
図 6.1.1-130	Case 9	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-45
図 6.1.1-131	Case 9	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-45
図 6.1.1-132	Case 9	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-45
図 6.1.1-133	Case 9	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-46
図 6.1.1-134	Case 9	緩衝材部分・飽和度分布	6-46
図 6.1.1-135	Case 9	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-46
図 6.1.1-136	Case 9	鉛直方向の変位時刻歴	6-47
図 6.1.1-137	Case 9	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-47
図 6.1.1-138	Case 9	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-47
図 6.1.1-139	Case 9	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-48

図 6.1.1-140	Case 9	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-48
図 6.1.1-141	Case 10	岩盤部分・間隙水圧分布	6-48
図 6.1.1-142	Case 10	岩盤部分・温度分布	6-49
図 6.1.1-143	Case 10	岩盤部分・主せん断応力分布	6-49
図 6.1.1-144	Case 10	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-49
図 6.1.1-145	Case 10	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-50
図 6.1.1-146	Case 10	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-50
図 6.1.1-147	Case 10	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-50
図 6.1.1-148	Case 10	緩衝材部分・飽和度分布	6-51
図 6.1.1-149	Case 10	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-51
図 6.1.1-150	Case 10	鉛直方向の変位時刻歴	6-51
図 6.1.1-151	Case 10	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-52
図 6.1.1-152	Case 10	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-52
図 6.1.1-153	Case 10	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-52
図 6.1.1-154	Case 10	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-53
図 6.1.1-155	Case 11	岩盤部分・間隙水圧分布	6-53
図 6.1.1-156	Case 11	岩盤部分・温度分布	6-53
図 6.1.1-157	Case 11	岩盤部分・主せん断応力分布	6-54
図 6.1.1-158	Case 11	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-54
図 6.1.1-159	Case 11	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-54
図 6.1.1-160	Case 11	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-55
図 6.1.1-161	Case 11	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-55
図 6.1.1-162	Case 11	緩衝材部分・飽和度分布	6-55
図 6.1.1-163	Case 11	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-56
図 6.1.1-164	Case 11	鉛直方向の変位時刻歴	6-56
図 6.1.1-165	Case 11	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-56
図 6.1.1-166	Case 11	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-57
図 6.1.1-167	Case 11	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-57
図 6.1.1-168	Case 11	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-57
図 6.1.1-169	Case 12	岩盤部分・間隙水圧分布	6-58
図 6.1.1-170	Case 12	岩盤部分・温度分布	6-58
図 6.1.1-171	Case 12	岩盤部分・主せん断応力分布	6-58
図 6.1.1-172	Case 12	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-59
図 6.1.1-173	Case 12	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-59
図 6.1.1-174	Case 12	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-59
図 6.1.1-175	Case 12	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-60

図 6.1.1-176	Case 12	緩衝材部分・飽和度分布	6-60
図 6.1.1-177	Case 12	緩衝材部分・乾燥密度分布.....	6-60
図 6.1.1-178	Case 12	鉛直方向の変位時刻歴	6-61
図 6.1.1-179	Case 12	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-61
図 6.1.1-180	Case 12	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正).....	6-61
図 6.1.1-181	Case 12	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-62
図 6.1.1-182	Case 12	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-62
図 6.1.1-183	Case 13	岩盤部分・間隙水圧分布	6-62
図 6.1.1-184	Case 13	岩盤部分・温度分布.....	6-63
図 6.1.1-185	Case 13	岩盤部分・主せん断応力分布	6-63
図 6.1.1-186	Case 13	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正).....	6-63
図 6.1.1-187	Case 13	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正).....	6-64
図 6.1.1-188	Case 13	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-64
図 6.1.1-189	Case 13	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-64
図 6.1.1-190	Case 13	緩衝材部分・飽和度分布	6-65
図 6.1.1-191	Case 13	緩衝材部分・乾燥密度分布.....	6-65
図 6.1.1-192	Case 13	鉛直方向の変位時刻歴	6-65
図 6.1.1-193	Case 13	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-66
図 6.1.1-194	Case 13	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正).....	6-66
図 6.1.1-195	Case 13	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-66
図 6.1.1-196	Case 13	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-67
図 6.1.1-197	Case 14	岩盤部分・間隙水圧分布	6-67
図 6.1.1-198	Case 14	岩盤部分・温度分布.....	6-67
図 6.1.1-199	Case 14	岩盤部分・主せん断応力分布	6-68
図 6.1.1-200	Case 14	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正).....	6-68
図 6.1.1-201	Case 14	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正).....	6-68
図 6.1.1-202	Case 14	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-69
図 6.1.1-203	Case 14	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-69
図 6.1.1-204	Case 14	緩衝材部分・飽和度分布	6-69
図 6.1.1-205	Case 14	緩衝材部分・乾燥密度分布.....	6-70
図 6.1.1-206	Case 14	鉛直方向の変位時刻歴	6-70
図 6.1.1-207	Case 14	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-70
図 6.1.1-208	Case 14	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正).....	6-71
図 6.1.1-209	Case 14	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-71
図 6.1.1-210	Case 14	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-71
図 6.1.1-211	Case 15	岩盤部分・間隙水圧分布.....	6-72

図 6.1.1-212	Case 15	岩盤部分・温度分布	6-72
図 6.1.1-213	Case 15	岩盤部分・主せん断応力分布	6-72
図 6.1.1-214	Case 15	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-73
図 6.1.1-215	Case 15	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-73
図 6.1.1-216	Case 15	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-73
図 6.1.1-217	Case 15	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-74
図 6.1.1-218	Case 15	緩衝材部分・飽和度分布	6-74
図 6.1.1-219	Case 15	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-74
図 6.1.1-220	Case 15	鉛直方向の変位時刻歴	6-75
図 6.1.1-221	Case 15	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-75
図 6.1.1-222	Case 15	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-75
図 6.1.1-223	Case 15	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-76
図 6.1.1-224	Case 15	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-76
図 6.1.1-225	Case 16	岩盤部分・間隙水圧分布	6-76
図 6.1.1-226	Case 16	岩盤部分・温度分布	6-77
図 6.1.1-227	Case 16	岩盤部分・主せん断応力分布	6-77
図 6.1.1-228	Case 16	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-77
図 6.1.1-229	Case 16	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-78
図 6.1.1-230	Case 16	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-78
図 6.1.1-231	Case 16	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-78
図 6.1.1-232	Case 16	緩衝材部分・飽和度分布	6-79
図 6.1.1-233	Case 16	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-79
図 6.1.1-234	Case 16	鉛直方向の変位時刻歴	6-79
図 6.1.1-235	Case 16	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-80
図 6.1.1-236	Case 16	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-80
図 6.1.1-237	Case 16	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-80
図 6.1.1-238	Case 16	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-81
図 6.1.1-239	Case 17	岩盤部分・間隙水圧分布	6-81
図 6.1.1-240	Case 17	岩盤部分・温度分布	6-81
図 6.1.1-241	Case 17	岩盤部分・主せん断応力分布	6-82
図 6.1.1-242	Case 17	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-82
図 6.1.1-243	Case 17	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-82
図 6.1.1-244	Case 17	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-83
図 6.1.1-245	Case 17	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-83
図 6.1.1-246	Case 17	緩衝材部分・飽和度分布	6-83
図 6.1.1-247	Case 17	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-84

図 6.1.1-248	Case 17	鉛直方向の変位時刻歴	6-84
図 6.1.1-249	Case 17	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-84
図 6.1.1-250	Case 17	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-85
図 6.1.1-251	Case 17	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-85
図 6.1.1-252	Case 17	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-85
図 6.1.1-253	Case 18	岩盤部分・間隙水圧分布	6-86
図 6.1.1-254	Case 18	岩盤部分・温度分布	6-86
図 6.1.1-255	Case 18	岩盤部分・主せん断応力分布	6-86
図 6.1.1-256	Case 18	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-87
図 6.1.1-257	Case 18	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-87
図 6.1.1-258	Case 18	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-87
図 6.1.1-259	Case 18	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-88
図 6.1.1-260	Case 18	緩衝材部分・飽和度分布	6-88
図 6.1.1-261	Case 18	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-88
図 6.1.1-262	Case 18	鉛直方向の変位時刻歴	6-89
図 6.1.1-263	Case 18	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-89
図 6.1.1-264	Case 18	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-89
図 6.1.1-265	Case 18	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-90
図 6.1.1-266	Case 18	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-90
図 6.1.1-267	Case 19	岩盤部分・間隙水圧分布	6-90
図 6.1.1-268	Case 19	岩盤部分・温度分布	6-91
図 6.1.1-269	Case 19	岩盤部分・主せん断応力分布	6-91
図 6.1.1-270	Case 19	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-91
図 6.1.1-271	Case 19	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-92
図 6.1.1-272	Case 19	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-92
図 6.1.1-273	Case 19	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-92
図 6.1.1-274	Case 19	緩衝材部分・飽和度分布	6-93
図 6.1.1-275	Case 19	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-93
図 6.1.1-276	Case 19	鉛直方向の変位時刻歴	6-93
図 6.1.1-277	Case 19	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-94
図 6.1.1-278	Case 19	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-94
図 6.1.1-279	Case 19	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-94
図 6.1.1-280	Case 19	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-95
図 6.1.1-281	Case 20	岩盤部分・間隙水圧分布	6-95
図 6.1.1-282	Case 20	岩盤部分・温度分布	6-95
図 6.1.1-283	Case 20	岩盤部分・主せん断応力分布	6-96

図 6.1.1-284	Case 20	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-96
図 6.1.1-285	Case 20	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-96
図 6.1.1-286	Case 20	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-97
図 6.1.1-287	Case 20	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-97
図 6.1.1-288	Case 20	緩衝材部分・飽和度分布	6-97
図 6.1.1-289	Case 20	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-98
図 6.1.1-290	Case 20	鉛直方向の変位時刻歴	6-98
図 6.1.1-291	Case 20	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-98
図 6.1.1-292	Case 20	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-99
図 6.1.1-293	Case 20	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-99
図 6.1.1-294	Case 20	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-99
図 6.1.1-295	Case 21	岩盤部分・間隙水圧分布	6-100
図 6.1.1-296	Case 21	岩盤部分・温度分布	6-100
図 6.1.1-297	Case 21	岩盤部分・主せん断応力分布	6-100
図 6.1.1-298	Case 21	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-101
図 6.1.1-299	Case 21	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-101
図 6.1.1-300	Case 21	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-101
図 6.1.1-301	Case 21	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-102
図 6.1.1-302	Case 21	緩衝材部分・飽和度分布	6-102
図 6.1.1-303	Case 21	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-102
図 6.1.1-304	Case 21	鉛直方向の変位時刻歴	6-103
図 6.1.1-305	Case 21	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-103
図 6.1.1-306	Case 21	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正)	6-103
図 6.1.1-307	Case 21	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-104
図 6.1.1-308	Case 21	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正)	6-104
図 6.1.1-309	Case 22	岩盤部分・間隙水圧分布	6-104
図 6.1.1-310	Case 22	岩盤部分・温度分布	6-105
図 6.1.1-311	Case 22	岩盤部分・主せん断応力分布	6-105
図 6.1.1-312	Case 22	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正)	6-105
図 6.1.1-313	Case 22	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正)	6-106
図 6.1.1-314	Case 22	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-106
図 6.1.1-315	Case 22	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-106
図 6.1.1-316	Case 22	緩衝材部分・飽和度分布	6-107
図 6.1.1-317	Case 22	緩衝材部分・乾燥密度分布	6-107
図 6.1.1-318	Case 22	鉛直方向の変位時刻歴	6-107
図 6.1.1-319	Case 22	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-108

図 6.1.1-320	Case 22	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正).....	6-108
図 6.1.1-321	Case 22	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-108
図 6.1.1-322	Case 22	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-109
図 6.1.1-323	Case 23	岩盤部分・間隙水圧分布	6-109
図 6.1.1-324	Case 23	岩盤部分・温度分布.....	6-109
図 6.1.1-325	Case 23	岩盤部分・主せん断応力分布	6-110
図 6.1.1-326	Case 23	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正).....	6-110
図 6.1.1-327	Case 23	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正).....	6-110
図 6.1.1-328	Case 23	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-111
図 6.1.1-329	Case 23	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-111
図 6.1.1-330	Case 23	緩衝材部分・飽和度分布	6-111
図 6.1.1-331	Case 23	緩衝材部分・乾燥密度分布.....	6-112
図 6.1.1-332	Case 23	鉛直方向の変位時刻歴	6-112
図 6.1.1-333	Case 23	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-112
図 6.1.1-334	Case 23	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正).....	6-113
図 6.1.1-335	Case 23	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-113
図 6.1.1-336	Case 23	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-113
図 6.1.1-337	Case 24	岩盤部分・間隙水圧分布	6-114
図 6.1.1-338	Case 24	岩盤部分・温度分布.....	6-114
図 6.1.1-339	Case 24	岩盤部分・主せん断応力分布	6-114
図 6.1.1-340	Case 24	岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮:正).....	6-115
図 6.1.1-341	Case 24	岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮:正).....	6-115
図 6.1.1-342	Case 24	岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-115
図 6.1.1-343	Case 24	岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮:正)	6-116
図 6.1.1-344	Case 24	緩衝材部分・飽和度分布	6-116
図 6.1.1-345	Case 24	緩衝材部分・乾燥密度分布.....	6-116
図 6.1.1-346	Case 24	鉛直方向の変位時刻歴	6-117
図 6.1.1-347	Case 24	緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮:正)	6-117
図 6.1.1-348	Case 24	径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張:正).....	6-117
図 6.1.1-349	Case 24	鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-118
図 6.1.1-350	Case 24	周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張:正).....	6-118

表目次

表 1.1.5-1	本事業における3カ年計画の概要	1-8
表 1.1.5-1	平成 28 年度実施内容の概要	1-9
表 1.3.2-1	評価項目と影響要因の関係、評価(検証)試験の評価項目と期間	1-14
表 2.3.4-1	第2次取りまとめの解析で使用された軟岩の物性値	2-3
表 3.1.2-1	解析パラメーター一覧(熱・水)	3-8
表 3.1.2-2	解析パラメーター一覧(力学)	3-8
表 3.1.4-1	解析パラメータ(隙間と接触面以外)	3-12
表 3.1.4-2	膨潤計算パラメータ	3-14
表 3.1.4-3	ジョイント要素のパラメータ	3-17
表 3.1.5-1	解析ケース一覧	3-18
表 3.2.1-1	要素特性の一覧表(1)	3-30
表 3.2.1-2	要素特性の一覧表(2)	3-31
表 3.2.1-3	要素特性の一覧表(3)	3-31
表 3.2.1-4	要素特性の一覧表(4)	3-32
表 3.2.2-1	混合材料の固相の密度	3-33
表 3.2.2-2	ベントナイト(クニゲル V1)のコンシステンシー特性	3-34
表 3.2.2-3	ベントナイトの陽イオン交換容量の測定結果	3-35
表 3.2.2-4	ベントナイトのメチレンブルー吸着量の測定結果	3-36
表 3.2.2-5	緩衝材及び埋戻し材の物理特性	3-37
表 3.2.2-6	周辺岩盤の物理特性	3-37
表 3.2.2-7	平衡膨潤圧のまとめ(緩衝材及び埋戻し材)	3-40
表 3.2.2-8	土壌熱伝導率測定器の諸元	3-41
表 3.2.2-9	断熱走査型比熱測定装置の諸元	3-44
表 3.2.2-10	比熱測定のまとめ	3-46
表 3.2.2-11	熱膨張率測定 of 諸元	3-48
表 3.2.2-12	熱膨張率測定のまとめ	3-49
表 3.2.2-13	サイクロメータの諸元	3-52
表 3.2.2-14	変水位透水試験における圧力の付加条件と透水試験結果	3-67
表 3.2.2-15	変水位透水試験における圧力の付加条件と透水試験結果	3-68
表 3.2.2-16	変水位透水試験における圧力の付加条件と透水試験結果	3-72
表 3.2.2-17	凝灰質砂岩の変水位透水試験結果	3-74
表 3.2.2-18	周辺岩盤で実施した圧密試験結果	3-77
表 3.2.2-19	埋戻し材のポアソン比のまとめ	3-84

表 3.2.2-20	周辺岩盤の一軸圧縮試験結果(強制乾燥状態)	3-90
表 3.2.2-21	一軸引張試験結果	3-94
表 3.2.2-22	緩衝材の三軸圧縮(圧密非排気)試験条件	3-95
表 3.2.2-23	緩衝材の三軸圧縮(圧密非排気)試験結果	3-96
表 3.2.2-24	三軸圧縮(圧密排水)試験条件	3-100
表 3.2.2-25	周辺岩盤の三軸圧縮(圧密排水)試験結果	3-101
表 3.2.2-26	周辺岩盤の三軸圧縮試験結果のまとめ(飽和条件)	3-102
表 3.2.2-27	三軸圧縮(圧密排気)試験条件	3-104
表 3.2.2-28	周辺岩盤の三軸圧縮(圧密排気)試験結果	3-104
表 3.2.2-29	周辺岩盤の試験結果のまとめ(強制乾燥条件)	3-105
表 3.2.2-30	クリープ試験の試験条件	3-107
表 3.2.2-31	クリープ試験のまとめ	3-109
表 3.2.2-32	クリープ試験のまとめ	3-110
表 3.2.3-1	解析用物性値の対比表(膨潤に関するパラメータ)	3-111
表 3.2.3-2	解析用物性値の対比表(間隙以外のパラメータ)	3-111
表 3.2.3-3	保水特性の解析用物性値	3-113
表 3.2.3-4	透水係数の解析用物性値	3-115
表 3.2.3-5	変形特性の解析用物性値	3-115
表 3.2.3-6	熱伝導率の解析用物性値	3-119
表 3.2.3-7	比熱の解析用物性値	3-121
表 3.2.3-8	平均熱膨張係数の解析用物性値	3-123
表 4.2.1-1	遠心力場の相似測	4-4
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	4-7
表 4.5.1-1	挿入したディスクの厚さと直径一覧	4-19
表 4.6.1-1	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	4-24
表 4.6.1-2	作製した緩衝材ブロックの諸元	4-26
表 4.6.1-3	作製した埋戻し材の諸元	4-38

第1章 実施概要及び計画

1.1 全体計画

1.1.1 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が実施されている[1]。この中で人工バリア材料であるオーバーパックや緩衝材の品質に係る実験、調査、検討が実施されている。特に緩衝材の検討では主に再冠水過程における膨潤挙動、湧水による流出、浸潤過程における変質（例えば、Ca 型化など）といった緩衝材の機能を低下させる要因について検討されている。緩衝材の機能を低下させるもう一つの要因として、オーバーパックの浮上や沈降による厚さの変化、孔外への膨出による密度低下など、緩衝材の変形に因るものがある。さらに実処分環境での変形を考慮するためには人工バリア周辺の岩盤も対象に含めていく必要がある。

処分システムの将来状態について、建設・操業・埋戻し・閉鎖の期間から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。この数百年の期間は熱－水理－力学（THM）が連成する複雑な、力学現象が卓越し、その挙動が不安定な期間となる。この後、オーバーパック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。処分施設に対する安全評価の直接的な対象の主たる部分は、力学的に安定した後の緩慢な化学現象と浸透・拡散現象のもとで進行する核種の漏出と移行の評価であり、この安全評価の信頼性を向上するためには、操業～閉鎖後数百年の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初期の数百年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重要となる。

上記数百年の期間における人工バリアと周辺岩盤の挙動を評価する手法として、実験による現象理解、適切にモデル化された数値解析による将来予測などが挙げられる。実験的手法では、実際に生じた現象を評価することが可能である一方で、例えば数百年の長期間にわたる現象を直接評価することが困難である。そのため最終的な長期挙動の評価には数値解析による将来予測が必要であるが、解析による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。

このような背景を受け、最終的な目標として処分システムを構成する人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価手法の構築を目指し、人工バリアの定置後から再冠水過程における環境条件を考慮した数値解析、数値解析のパラメータ取得のための要素試験、相似則の適用によって時間加速実験が可能な遠心模型試験を通じ、解析手法の妥当性や検証する実験データの取得方法を検討する。

1.1.2 評価対象の選定

(1) 時間スケール

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

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

図 1.1.2-1 に、ニアフィールドで生じる種々の現象について、オーバーパック、緩衝材、岩盤それぞれに生じる現象と、熱、水、応力の作用を時間軸に対して整理したものを示す。長期側になると系は定常状態になり、化学や拡散浸透が支配的になる。一方、初期の再冠水過程では力学的現象が支配的である。

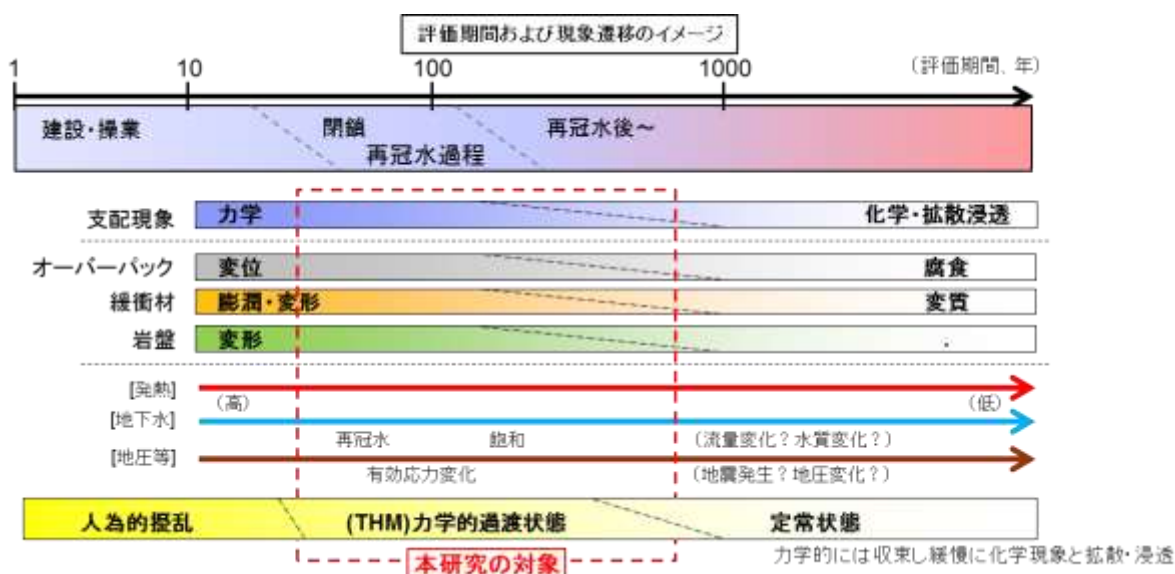


図 1.1.2-1 本研究における評価期間および支配現象の概念図

(2) 現象

人工バリアと周辺岩盤を含むニアフィールドで生じる現象について、検討対象事項を抽出した（図 1.1.2-2）[2]。熱の作用としてオーバーパックに封入されたガラス固化体からの発熱、応力の作用として地圧による岩盤の変形、緩衝材の膨潤圧、オーバーパックスの自重、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、水理的作用として周辺岩盤からの地下水の

浸潤が挙げられる。

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

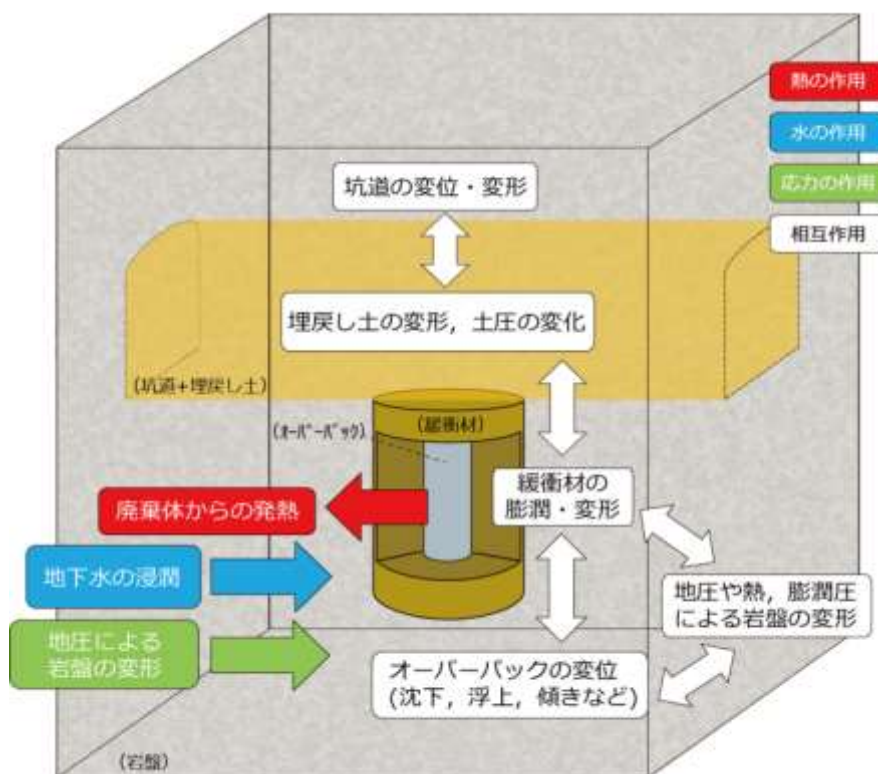


図 1.1.2-2 ニアフィールドで生じる諸現象の概略図

(3) 評価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」[4]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[3]。この他の要件も含めリファレンスケースの緩衝材の仕様[1]は、配合（ベントナイト：ケイ砂＝7：3）、密度（ 1.6Mg/m^3 ）、厚さ（70cm）とされており、この状態が緩衝材の安全機能が期待される時期（1000年後）まで維持されているのが重要である。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でき、この状態を損なう働きをする現象が緩衝材の劣化現象となる。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」[5]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できる。また、図 1.1.2-1 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。

以上より、本研究の対象を以下のように設定した。

現象： 周辺岩盤を含めた人工バリアの力学的な作用による変形挙動

期間： 定置後数十年～数百年

1.1.3 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挙動に影響をおよぼす周辺環境因子は、オーバーパックの移動量（変位や傾きなど）、緩衝材の品質（密度、透水係数など）に影響する可能性のあるものである。緩衝材の膨潤変形や周辺岩盤の変形による応力によりオーバーパックに変位が生じ、逆にその変位により緩衝材の厚みが増減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の変位、緩衝材の膨潤変形、周辺岩盤の変形が生じるか等、人工バリアの長期挙動に影響する環境因子を明らかにする必要がある。

ニアフィールドを構成するオーバーパック、緩衝材、周辺岩盤において、オーバーパックの変位、緩衝材の膨潤変形、周辺岩盤の変形の観点から前述した力学的現象に大きな影響を与える可能性があるものとして主として以下の3つが考えられる。図 1.1.3-1 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、遠心模型試験では相似則上、十分に扱えない化学的な影響は除くものとする。その上で、本研究（平成 27～29 年度）では、特に①応力（埋戻し圧・上載圧、地圧）の影響に着目し、研究を実施する。

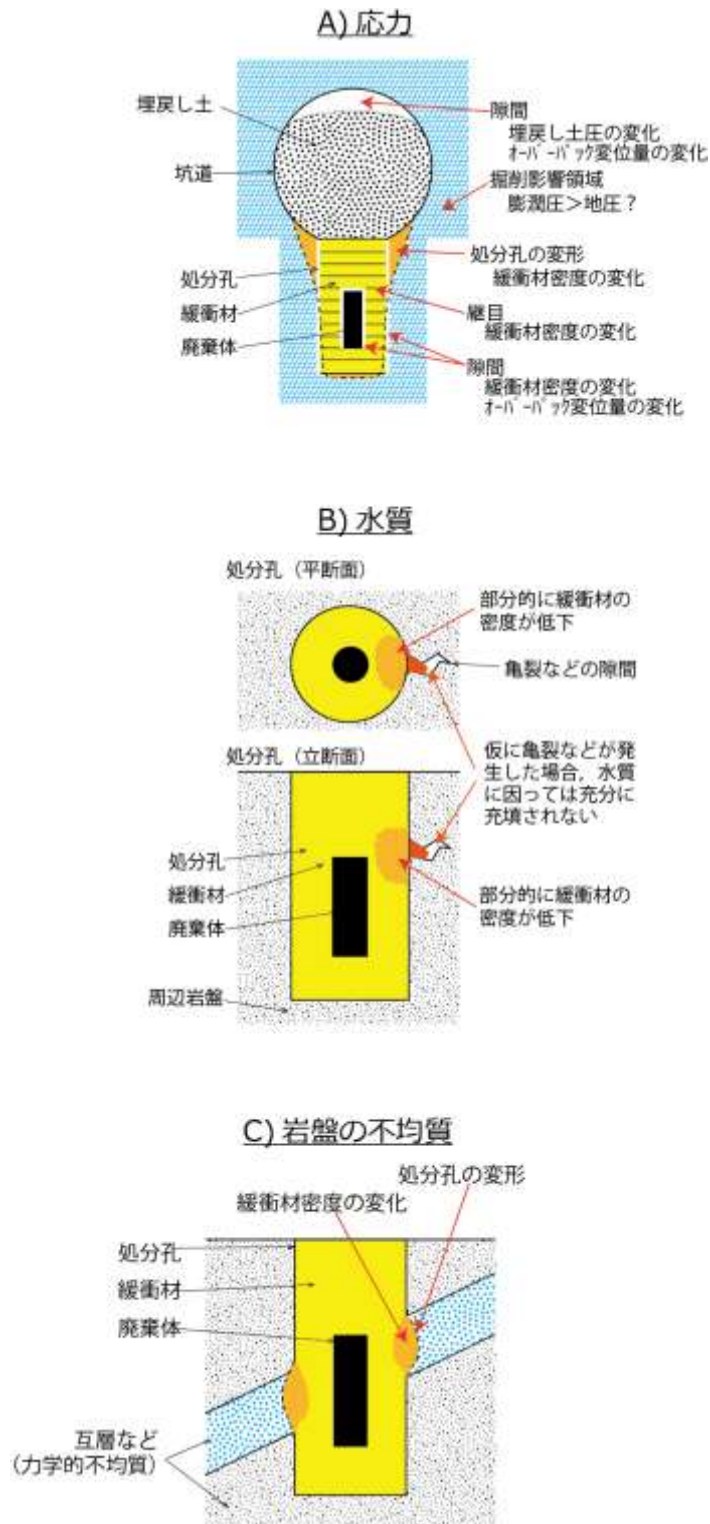


図 1.1.3-1 人工バリアの長期挙動に影響を与える主要な環境因子の概念図

1.1.4 着眼点

本業務成果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り、その成果の適用先は実際の処分事業の安全評価におけるニアフィールドの THM 連成挙動を数値解析で評価し、安全評価の初期値を設定することである。このため平成 29 年度までの今フェーズの実施内容として前述の観点から、閉鎖後の長期評価手法（骨子）の構築、およびほぼ均一な系を対象とした、遠心模型試験の結果（検証データ）を提示するものとする

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

- ① 人工バリアの長期挙動に影響をおよぼす環境因子（熱、力学、水理等）を整理する。
- ② 数値解析コードは熱－水理－力学（THM）現象が連成可能なものを使用する。
- ③ 長期挙動相当のデータは、人工バリアの定置後に曝される多様な環境条件を考慮し、遠心力場の相似則に基づき時間加速実験が可能な遠心模型試験を実施して得る。
- ④ 閉鎖後の再冠水により廃棄体周辺が飽和に向かう数十年程度の期間において力学的挙動が最も大きく生じると考えられる。このため遠心模型試験における評価期間は、飽和後の挙動もある程度示せるよう、100 年程度とする。
- ⑤ 遠心模型試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、数値解析では捉えにくい、あるいは現れていない現象把握の観点でも実施する。
- ⑥ 数値解析の入力値のばらつきの低減のため、遠心模型試験に使用する材料のデータを要素実験で取得、数値解析に入力し再現解析を実施する（図 1.1.4-1）。
- ⑦ 本研究における数値解析の高精度化は、パラメータの感度や入力値のばらつきに着目する（構成則等の修正・改良などは別途、本研究以外において検討する）。
- ⑧ 数値解析と遠心模型試験の結果を比較し、長期挙動評価手法（骨子）の構築に資する。

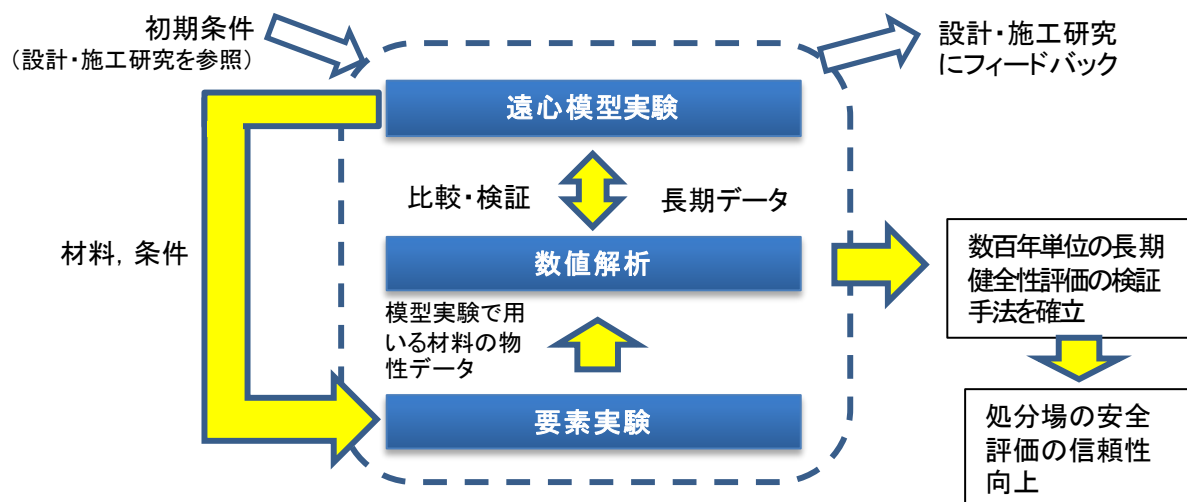


図 1.1.4-1 長期挙動評価における不確実性低減のための概念図

1.1.5 3カ年の全体実施計画

本事業における3カ年計画について、表 1.1.5-1 に示す。計画について、実施内容をより具体化し、追記した（表中下線部）。具体的な内容について、第3章以降に示す。なお、策定した計画は随時見直しを行い、変更があるものとして進めていくものとする。

表 1.1.5-1 本事業における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) 実施計画			
長期挙動評価手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> 長期挙動、評価手法の構築に向けた課題の整理 環境因子、評価期間の設定 	<ul style="list-style-type: none"> 評価手法における課題の反映方法の検討 検証に資する技術等の情報収集 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型試験と数値解析の比較検討からの考察 評価手法の骨子の作成
計画	<ul style="list-style-type: none"> 実施計画の立案 遠心模型試験における加速対象の設定 遠心模型試験で目指す加速時間の設定 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型試験による結果と数値解析結果の比較 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型試験による結果と数値解析結果の比較 取りまとめ
(2) 数値解析			
遠心模型試験の数値解析	<ul style="list-style-type: none"> 本解析に先立つ感度解析（2次元）実施 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型試験（<u>H27 結果</u>）の解析 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型試験（<u>H28、29 結果</u>）の解析
要素試験	<ul style="list-style-type: none"> パラメータ取得のための要素試験 	<ul style="list-style-type: none"> パラメータ取得のための要素試験 	<ul style="list-style-type: none"> <u>H27、28 の数値解析結果を踏まえ、重要パラメータ追加取得のための要素試験</u>
(3) 遠心模型試験			
遠心模型試験	<ul style="list-style-type: none"> 縮尺模型の材料選定、設計 遠心模型試験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型試験の実施 <u>緩衝材の変形（膨出）に着目</u> 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型試験の実施 <u>（緩衝材の変形（膨出）に着目）</u>
各年度の成果目標	<ul style="list-style-type: none"> 評価手法骨子の提示に向けた大の抽出整理 感度解析結果の取得 要素試験による解析パラメータの取得 遠心模型試験による加速データ取得 	<ul style="list-style-type: none"> 遠心模型試験結果と数値解析手法との比較によるデータの検証と課題の整理 評価手法適用における課題の提示 	<ul style="list-style-type: none"> 評価手法（骨子）の提示

1.2 平成 28 年度の実施内容

表 1.1.5-1 に平成 28 年度の実施内容の概要を示す。本年度は平成 27 年度策定した実施計画をより具体化し、更新された試験計画に基づいて解析、試験を実施した。

数値解析では、平成 27 年度に実施した感度解析の結果に基づいて、解析条件、解析モデルを設定した上で、平成 27 年度に実施した遠心模型試験の計測結果と比較を行い、その結果を示した。また、数値解析に必要なパラメータについて、パラメータの整理、必要なパラメータ取得のための要素試験を実施し、その結果を示した。

遠心模型試験では、平成 27 年度に引き続き、数値解析の長期挙動評価の検証に資する試験を実施した。本年度は埋戻し材を処分孔上部に設置することによる緩衝材の変形（膨出）に着目し、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データを取得した。

表 1.1.5-1 平成 28 年度実施内容の概要

H28年度計画(実施内容)			第1四半期			第2四半期			第3四半期			第4四半期		
実施項目			4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(1) 試験計画の更新														
研究計画	3か年計画の更新													
	当年度計画の策定													
既往成果調査・検討、評価手法検討	既往文献調査													
	評価骨子の課題等整理													
(2) 数値解析														
① 解析に用いるパラメータの取得	文献調査・前年データ整理 パラメータ取得要素実験 (解析の整理結果応じて)	物理特性試験												
		緩衝材の特性取得試験												
		熱特性試験												
		水分特性試験												
		力学特性試験												
		周辺岩盤材料の採取												
② 数値解析の実施	パラメータの整理 解析モデルの検討 模型実験との比較 感度解析(必要に応じて)	着目パラメータの決定												
		構成モデルなどの検討												
		解析モデルの作製												
		平均パラメータによる解析												
		ばらつきを考慮した解析												
		着目パラメータの検討												
③ 遠心力模型試験	既往文献の調査等 模型作製 遠心力模型試験の実施	模型形状の検討												
		境界条件の検討												
		模型作製												

1.3 長期挙動評価手法の構築

1.1 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。人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価には、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結果を検証する実験データの裏付けが必要である。そのような背景のもと、本事業では人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築するため、遠心模型試験と数値解析を通じ、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した。

本事業（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。

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に対する概念を述べる。

1.3.1 処分システムの実現に向けた研究の意義

図 1.3.1-1 に将来変遷の概念と本研究の対象期間には、堅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直接的な対象の主たる部分は、力学的に安定した後の緩慢な化学現象と浸透・拡散現象のもとで進行する核種の漏出と移行を評価する。この安全評価の信頼性を向上するためには、人為的な攪乱と再冠水の過渡的期間に発生する力学的現象がどのようなものであるか、過渡期間に生じる力学変化により緩衝材や岩盤が健全であるか、いわば安全評価が対象とする期間の初期値（本検討では、安全評価の初期状態、と言う）としての人工バリアと周辺岩盤の状態を的確に評価することが肝要である。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、本検討では図 1.1.2-2、図 1.3.1-1 にも示すように、人工バリア設置後数百年程度以内の人為的な攪乱・再冠水に伴う過渡的な期間の THM 連成現象を評価するが、この意義は、安全評価の初期状態としての人工バリアと周辺岩盤の状態を的確に評価することにより、処分システムに対する安全評価の信頼性を向上するということである。安全評価の初期状態としての人工バリアと周辺岩盤の状態を的確に評価することにより、処分システムに対する安全評価の信頼性の向上を図る。

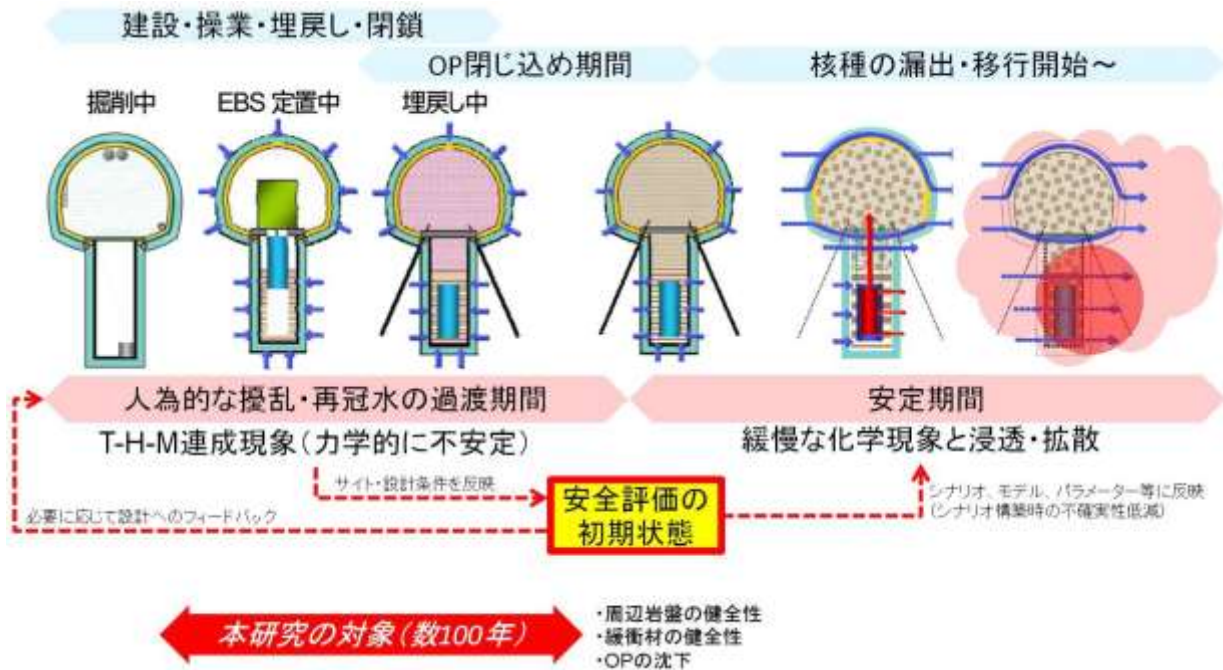


図 1.3.1-1 将来変遷の概念と本研究の対象期間

1.3.2 長期挙動の評価手法

(1) 概念

人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動の評価手法とは、解析手法を用いた数値シミュレーションによる評価と実験的手法による現象把握を踏まえて、これらを比較検討することで総合的に評価することと捉え、本事業ではその手法の構築に向けての検討を行う。この概念を図 1.3.2-1 に示す。THM 連成数値解析コードを人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価に適用する際、数値解析では評価対象とする処分施設の将来にわたる挙動を物理モデル化し、対象施設に対応したパラメータの設定や境界条件を仮定して将来予測（評価）する。その解析結果には多くの要因が影響しているため、解析結果に対してはその妥当性確認が必要不可欠である。緩衝材のような土質材料と周辺岩盤の間で生じる複雑な THM 連成現象に対して影響要因を絞った実験を行うことで現象を把握し、一方で同じ材料の物性値を用い類似の境界条件でその数値解析を行うことで検証を行うことが考えられる。すなわち、数値解析の妥当性の確認を通じて初めて、数値解析による人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価結果をその適用限界も踏まえて総合的に評価することができると考えられる。

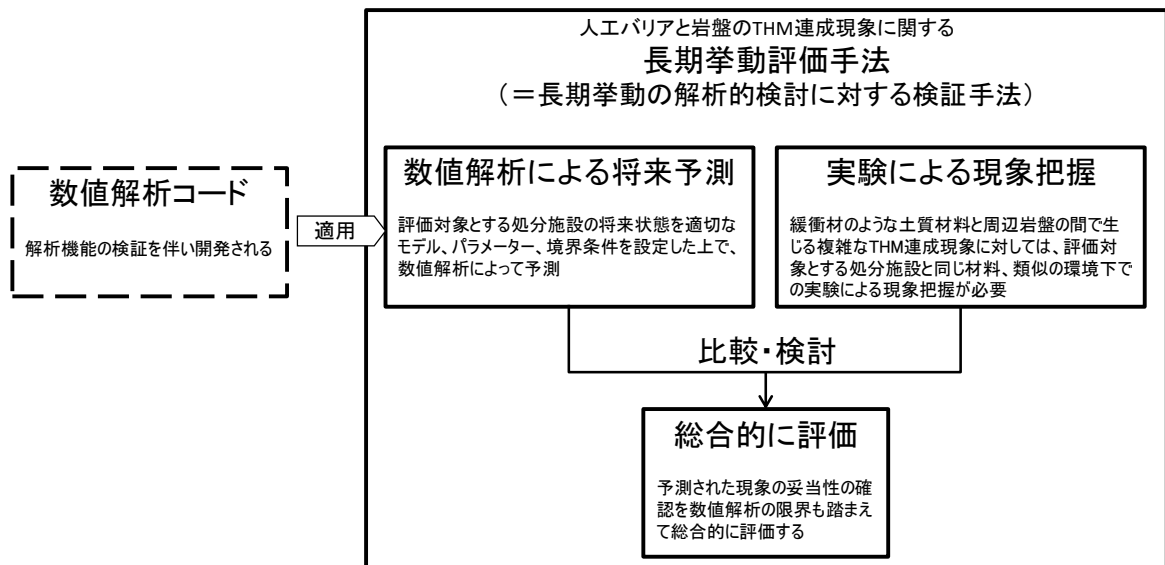


図 1.3.2-1 長期挙動の評価手法の概念

(2) 評価項目、影響要因の抽出

長期挙動評価手法の構築に向けて、人工バリアと周辺岩盤の将来状態に関する重要な評価項目と、それに影響を及ぼす環境要因を抽出する必要がある。

長期挙動評価手法における評価項目は、以下のものが挙げられる[3]－[8]。

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

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

廃棄体容器の移動・沈下は、緩衝材の安全機能の確保のために一定の厚さが必要になることから評価するものである。これは重要な評価事項であり SKB 処分プロジェクトの安全検討でもキャニスタの沈下として検討されている[9]。緩衝材の健全性では、岩盤亀裂を通じた緩衝材流出や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。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や既存の弱面が開くなど周辺岩盤の透水性が増加することから、そのような現象の有無を確認することが重要である。

次に、影響要因については以下のものが挙げられる[3]－[8]。

- バリアの設計・施工条件
 - ・ 緩衝材・埋戻し材の仕様の影響
 - ・ 処分孔と緩衝材の隙間、緩衝材の継目、水みちなどの影響
 - ・ 初期の緩衝材・埋戻し材密度の不均質性（ばらつき）の影響
 - ・ 処分孔の塞ぎ方の影響
- 処分サイトの環境条件
 - ・ 岩盤の特性（物性、亀裂、不均質性等）

- ・ 地圧（深度、異方応力）、水圧
- ・ 水質
- ・ 地温
- ・ 動的な現象（湧水、地震等）

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

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

以上の評価項目と影響要因から、その影響の大きさをまとめた一覧を表 2.3.2-1 に示す。注釈は特定の条件下においては影響が小さくなることを示している。また表の右列には、評価（検証）試験における評価可能な項目と期間もあわせて示す。本表で示す評価は、各評価項目に対し、個別の各要因の影響の大きさを示すものである。このため、評価項目間、あるいは複数の要因によって生じる相互作用の影響には別途考慮が必要である。

表 1.3.2-1 において、特に重要と思われる影響（イエロー）と本研究の本研究（H27～29 年度）における着眼点（オレンジ）をハッチで示した。緩衝材・埋戻し材の仕様、隙間・継目、プラグの有無、岩種、地圧による条件に対し、オーバーパックの移動、緩衝材の変形、岩盤の影響を評価する。このため本研究では対象外としている影響が大きい事項（評価項目の緩衝材の経時変化により生じる密度不均質や流出、岩盤の亀裂開口など、影響要因の施工時の不均質や岩盤の亀裂、動的問題など）については、別途実施する必要がある。

評価項目によっては遠心模型試験以外の手法も併用するなどのことが考えられる。一方で、遠心模型試験では他の試験には無い時間縮尺による百年単位に相当する挙動を得られるという大きな特長を生かした検討を行うことができる。人工バリアの設計・施工条件の影響に関する検討についても、実物相当の詳細なモデル作成は困難な場合も考えられるが、評価の着眼点をしぼり単純化したモデルで設計・施工の参考になるようなデータ、数値解析の検証対象をしぼったデータを提示していくことにより、長期挙動評価の信頼性を向上することを目指す。

表 1.3.2-1 評価項目と影響要因の関係、評価（検証）試験の評価項目と期間

評価項目	本研究の着眼点 ○ 影響が大きい項目 △ 影響がある項目 × 影響が小さい項目	影響要因(設計施工)						影響要因(環境)						動的		評価(検証)試験の 評価可能項目と期間 遠心力模 型試験 原位置等 大型模型試験
		影響要因(設計施工)		影響要因(設計施工)		影響要因(設計施工)		影響要因(設計施工)		影響要因(設計施工)		影響要因(設計施工)		湧水	地震動	
		縫合材の 仕様	埋戻し材の 仕様	縫合材の 間隔	縫合材の 埋戻し材の 不均質	ブラグの有 無	地圧	亀裂	互層異方 性・不均質	水圧	水質	地温				
オーバーバウク	移動量(沈下、浮上、傾き等)に影響を与えるか? また、移動量が縫合材の設計仕様の厚さの範囲内にあるか?	○	○	△*1	○	○*2	○*3	△*3	△*3	○*4	△*4	△*4	△	○	~数百年	
縫合材	抗通へ・膨出があるか? ある場合、膨出によって要求性能への範囲内にあるか?	○	○	△*1	○	○*2	△*3	△*3	○*4	△*4	△*4	○	○	△	~数百年	
	密度不均質が生じるか? 生じた場合、密度不均質が要求性能への範囲内にあるか?	○	○	△	○	○*2	△*3	△*3	○*4	○*4	△*4	△	△	×	(~数百年)	
ニアフィールド	水みちが生じるか? 生じた場合、流出によって要求性能への範囲内にあるか?	○	○	○	○	△	○	△	○	○	×	○	○	△	-	
	岩盤亀裂などの流出生じるか? 生じた場合、要求性能への範囲内にあるか?	○	○	○	○	○	○	△	○	△	○	○	○	○	-	
周辺岩盤 (縫合材の外側)	変形が生じるか? 生じた場合、縫合材が要求性能への範囲内にあるか?	△	×	×	×	△*5	○	○	○*6	×	×	×	×	○	~数百年	
	亀裂開口が生じるか? 生じた場合、縫合材が要求性能への範囲内にあるか?	△	×	×	×	△*5	○	○	○	×	×	×	△	○	-	
ニアフィールド	破壊が生じるか? 生じた場合、縫合材が要求性能への範囲内にあるか?	△	×	×	×	△*5	○	○	○*6	×	×	×	×	○	~数百年	
	凍水係数の変化が生じるか? 生じた場合、縫合材が要求性能への範囲内にあるか?	×	×	○	×	△*5	○	○	○*6	×	×	×	○	○	~数百年	
ニアフィールド	温度分布に影響を与えるか?	×	×	△*7	×	×	△	×	×	×	×	×	△	×	~数百年	
	地下水圧分布に影響を与えるか?	×	×	△*7	×	×	×	×	○	×	×	×	△	△	~数百年	

評価項目間の相互作用は別途考慮が必要
 *1 2次元的な変位(沈下、浮上、傾き)にのみ影響する
 *2 3次元の変位(沈下、浮上、傾き)にのみ影響する
 *3 掘削時の掘削特性の変化を通じて影響
 *4 掘削時の掘削圧、地圧を通じて影響
 *5 掘削時の掘削圧、地圧を通じて影響
 *6 掘削時の掘削圧、地圧を通じて影響
 *7 掘削時の掘削圧、地圧を通じて影響
 *8 マイクロクラックの開裂等に依存

第1章 参考文献

- [1] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 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, 2016
- [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) —ニアフィールド模型試験法の確立と等方応力拘束条件下における長期挙動—, 電力中央研究所報告, N11040, 41, 2012.
- [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, 2013.
- [4] (公財) 原環センター, 平成 27 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 28 年 3 月
- [5] (公財) 原環センター、平成 27 年度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、平成 28 年 3 月
- [6] 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-, 1999.
- [7] 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業のための安全評価技術の開発 (I) -シナリオ構築技術の高度化-, 原子力発電環境整備機構 技術報告書, NUMO-TR-10, 2011.
- [8] 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業「処分システム評価確証技術開発」報告書, 2016.
- [9] SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, *Main Rep. SR-Site Proj.*, Volume II, Technical Report TR-11-01, 2011.

第2章 本事業の諸条件

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

2.1 数値解析コード

解析手法として電力中央研究所（以下、電中研という。）で開発している熱－水理－力学連成コードである LOSTUF（放射性廃棄物地層処分における地下空洞長期安定性解析プログラム）[2]を用いた。解析コードの詳細は第3章に示す。

2.2 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[3][4]。図 2.2-1 に装置のイメージを示す。詳細については第4章に示す。

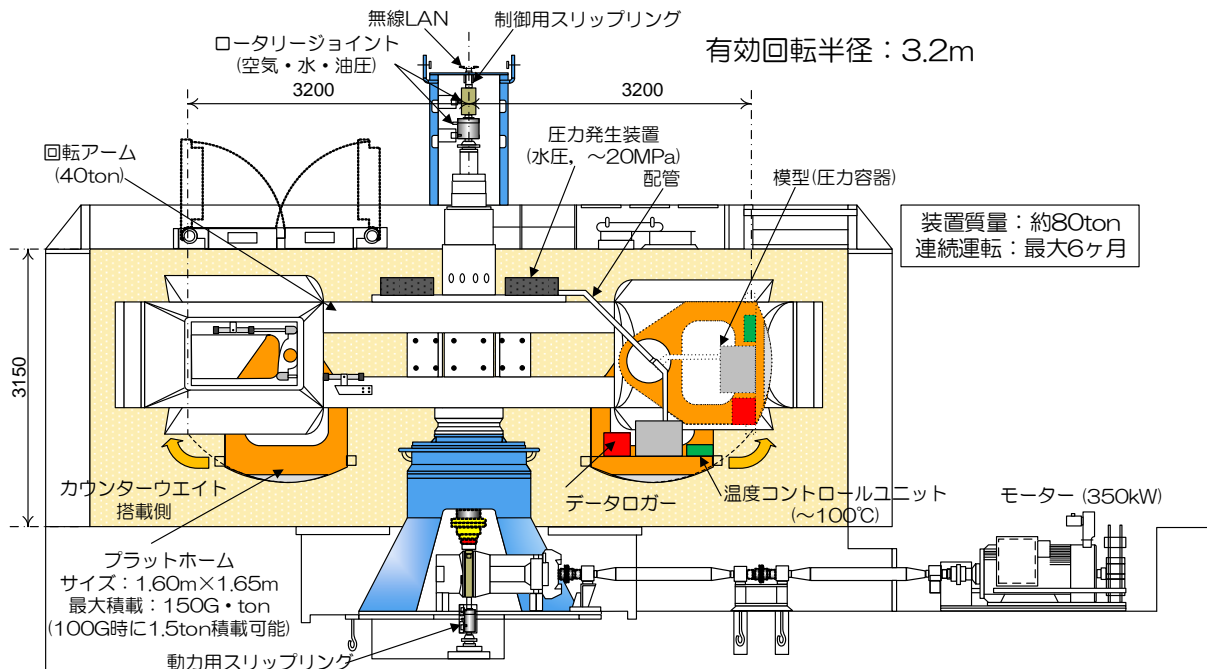


図 2.2-1 超長期遠心载荷岩盤実験装置のイメージ

2.3 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）を参照し、以下の通り選定した。

2.3.1 オーバーパック

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

2.3.2 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/m^3 とする。

2.3.3 埋戻し材

配合は重量比でベントナイト：ケイ砂＝15：85、ケイ砂は3号および5号を重量比で1：1とする。ケイ砂の粒径は2mm以下とした。初期含水比は7～8%程度、初期平均乾燥密度を 1.80Mg/m^3 以上とする。

2.3.4 岩盤

第1章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 2.3.4-1 に示すような5種類のデータセットが解析に用いられている。このうち、SR-C～E は比較的一軸圧縮強度が小さく、変形が期待できる。

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

岩盤のサンプリングを行った場所は、電中研・横須賀地区内にある防空壕跡内に産出する新第三紀（前期鮮新世）の三浦層群初声層の含礫凝灰質砂岩（ts、以下、初声凝灰岩と呼ぶ）である（図 2.3.4-1）。図 2.3.4-2 に、防空壕内で実施した地質観察図を示す。同図に示す凝灰質砂岩（ts）は、褐灰色を呈し、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。

表 2.3.4-1 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

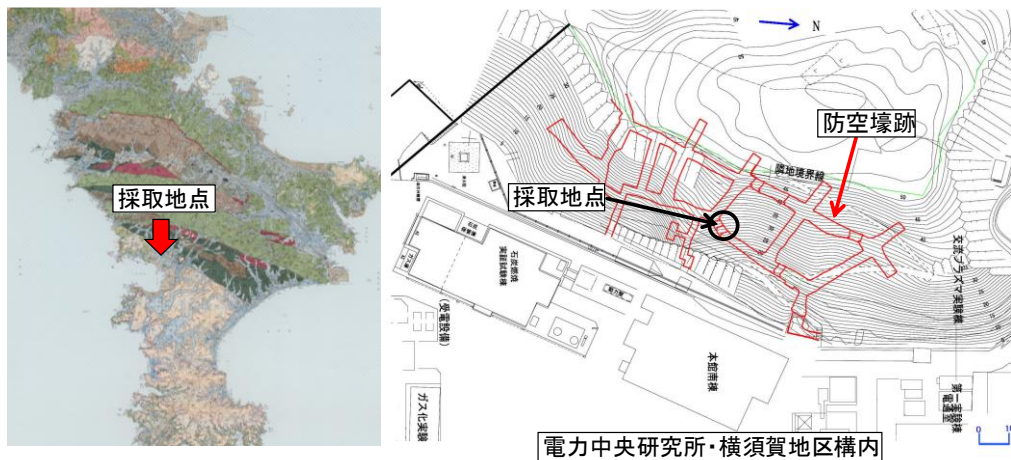


図 2.3.4-1 岩盤サンプリング箇所。（左）三浦半島の 5 万分の 1 表層地質図、（右）サンプリングを行った電力中央研究所・横須賀地区構内図

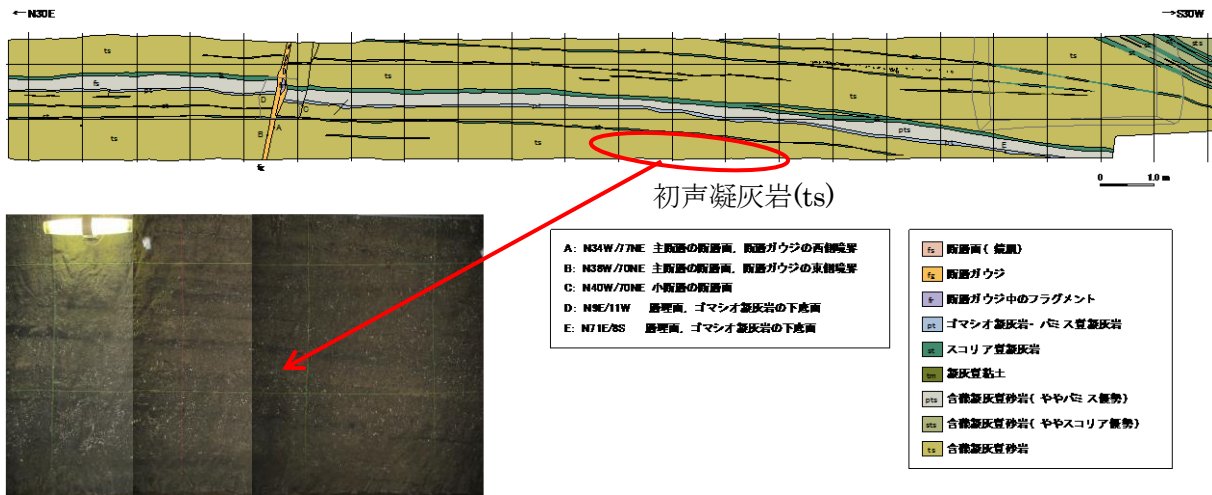


図 2.3.4-2 防空壕内で実施した地質観察図

2.4 試験対象

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

2.4.1 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できる。

以上の理由より、本検討では「処分孔縦置き定置方式」を対象とした (図 2.4.2-1)。

2.4.2 境界条件 (図 2.4.2-2)

(1) 試験対象の範囲

H27年度は、深度400mにおける鉛直地圧(土被り圧)が全て緩衝材に作用したことを想定し遠心模型試験を行った(岩盤の密度を 2.0Mg/m^3 とした場合、初期拘束圧 8MPa 、再冠水後の有効拘束圧 4.0MPa)。

H28年度は、緩衝材の変形(膨出)に着目するため、坑道内の埋戻し材を含む模型(境界)を設定した。埋戻し材を処分孔上部に設置した際の、緩衝材の変形(膨出)を許容した条件における試験を行った。

(2) 応力（周圧、軸圧、間隙水圧）

対象施設は軟岩系サイトとして深度を 400m とし、飽和後の周方向の有効応力が 4.0MPa、軸方向の応力が埋戻し材の鉛直自重応力相当 (0.1MPa) を考慮し決定した。異方応力条件であるため、岩盤が破壊しない条件である必要がある。このため、実験における具体的な载荷応力は H27 年度に実施した岩盤の力学試験の結果から[5]、以下の通り設定した。

初期応力として、周圧を 5.0MPa、軸圧を 0.1MPa とした。

次に、模型下面からの間隙水の注入と同時に、軸方向の有効応力が変化しないように、軸圧、注水圧、排水圧を同じ割合で昇圧させた。

最終的に、軸圧は 0.1MPa から 1.1MPa、注水圧は 0MPa から 1.05MPa、排水圧は 0MPa から 1.0MPa となるように制御し、飽和後において模型全体で有効周圧がおおよそ 4.0MPa、埋戻し材付近の有効軸圧が 0.1MPa の条件を成立させた（詳細は 4 章を参照されたい）。

(3) 水質

2.1 で述べたように本事業では実験における間隙水は蒸留水を使用する。

(4) 温度

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[1]。遠心模型試験で発熱させるオーバーパックスの温度変化について、同解析結果のうち、処分孔縦置き方式・隙間モデルの CASE.A（ガラス固化体－オーバーパック間、オーバーパック－緩衝材間、緩衝材－岩盤間の隙間の充填物が空気）の C_{xin} の経時変化を採用した（オーバーパック表面、最高上昇温度 94.5℃）。

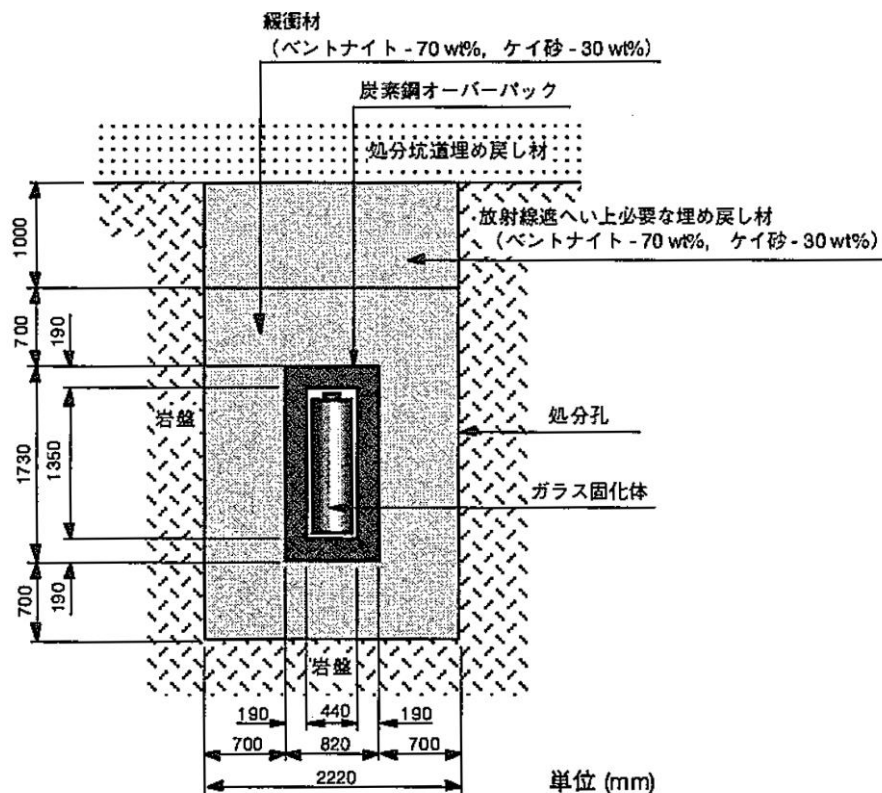


図 2.4.2-1 本事業における対象施設（縦置き方式）

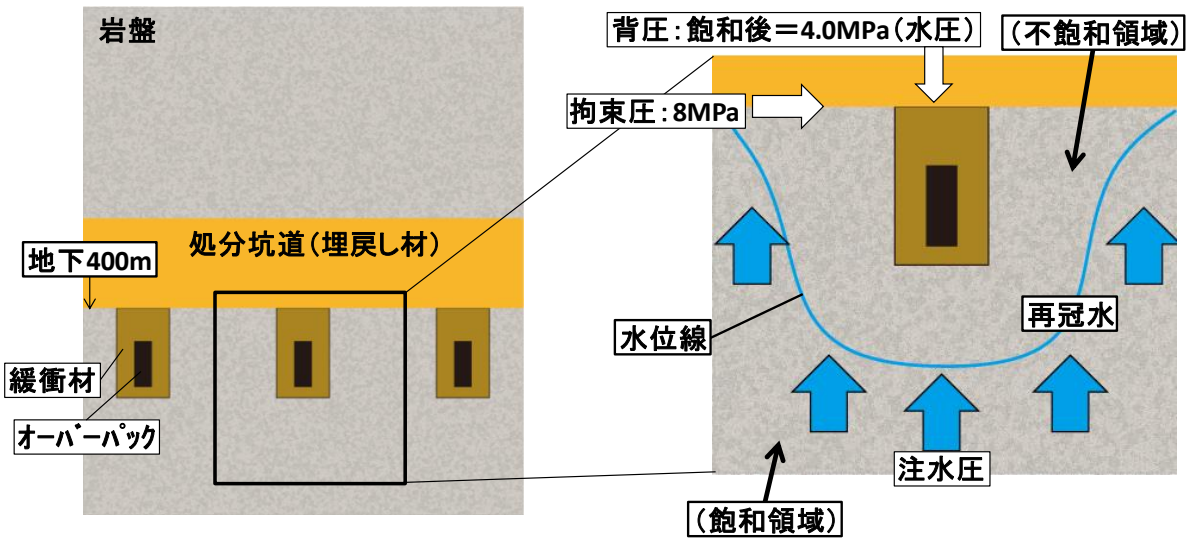


図 2.4.2-2 本事業で想定する境界条件の概念図

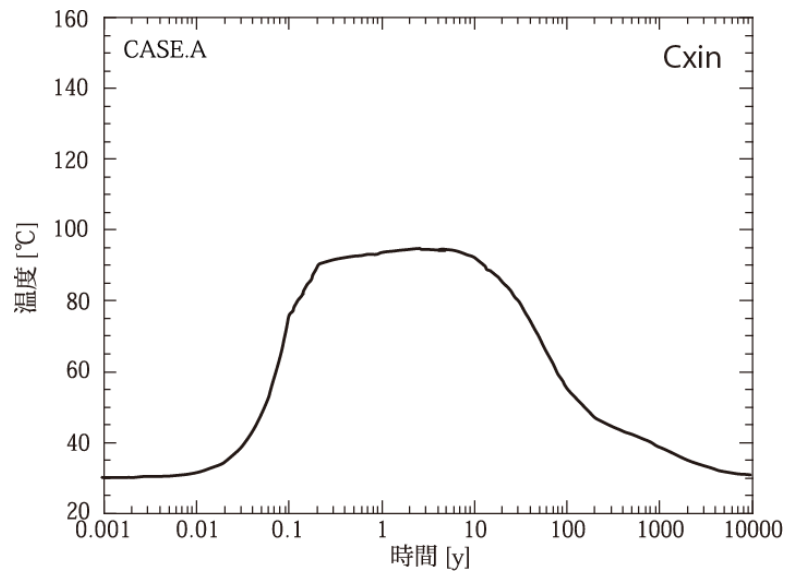
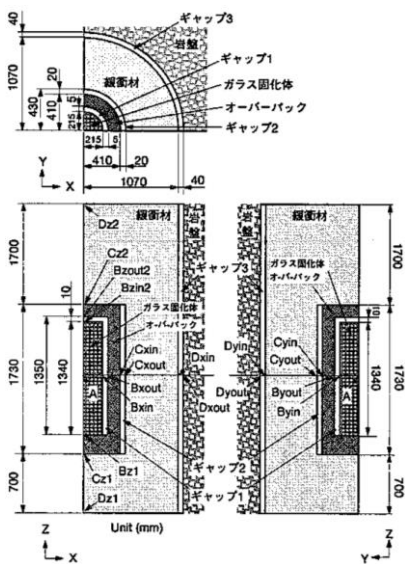


図 2.4.2-3 遠心模型試験で想定するオーバーパックの温度条件 (経時変化) [6]

第2章 参考文献

- [1] (公財) 原環センター, 平成27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28年3月
- [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—, 電力中央研究所報告, N10018, 2011.
- [4] S. Nishimoto, M. Sawada, T. Okada, New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 1: Test of Physical Modeling in Near Field Under Isotropic Stress-Constraint Conditions, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2016.
- [5] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成27年度地層処分技術調査等事業「処分システム工学確証技術開発」報告書(第3分冊) —人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築—, 2016.
- [6] 日本原子力研究開発機構, 平成27年度地層処分技術調査等事業「処分システム評価確証技術開発」報告書, 2016.

第3章 数値解析及び要素試験

3.1 遠心模型試験の再現解析

3.1.1 背景及び目的

(1) 背景

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

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

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

(2) 実施内容

本年度実施する数値解析は、平成 27 年度に実施した遠心模型試験の再現解析を行い、ニアフィールドの THM 連成現象のモデル化方法の妥当性や、長期挙動評価において重要となるパラメータについて確認を行うこととした。

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]を参考に導出した。以下にその支配方程式について簡単に記す。以下の解説で「地盤」は固相、液相、気相を含めた多孔質媒体の系全体を表している。

地下水の連続式から以下の式が導かれる。

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

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ため、 $s = -P_l$ 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。

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

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。

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

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 Bish オーバーパック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。遠心模型試験に用いるベントナイト、岩石は非常に大きなサクシオンを持つ材料であるため、サクシオンを独立な応力成分とした。不飽和段階においてサクシオンの減少に伴って進行するベントナイトの膨潤については、後述するように応力ひずみ関係とは別に等価な節点力を作用させることでモデル化する。この仮定により、不飽和時の間隙圧は大気圧に等しくなる。この有効応力を用いた力学構成式は以下のようなになる。

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

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。

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

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

式 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。

(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なになる。

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

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。

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

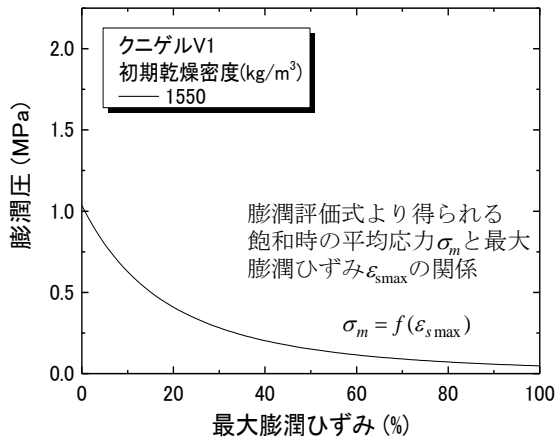
ここで、 P_l は間隙水圧、 P_{l0} は基準となる間隙水圧（負値）、 l は不飽和時の膨潤の進行に関するパラメータである。これまでは $l = 1$ を仮定し、間隙水圧の上昇量と線形に ω_{smax} の値が決まるようにされている。算出された最大膨潤ひずみ ω_{smax} を発生させるための等価な節点力 \mathbf{F}_p を、膨潤要素を構成する節点に作用させ、変形、応力が計算される。計算された体積ひずみを累積膨潤ひずみ ε_{aw} とする。

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

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}

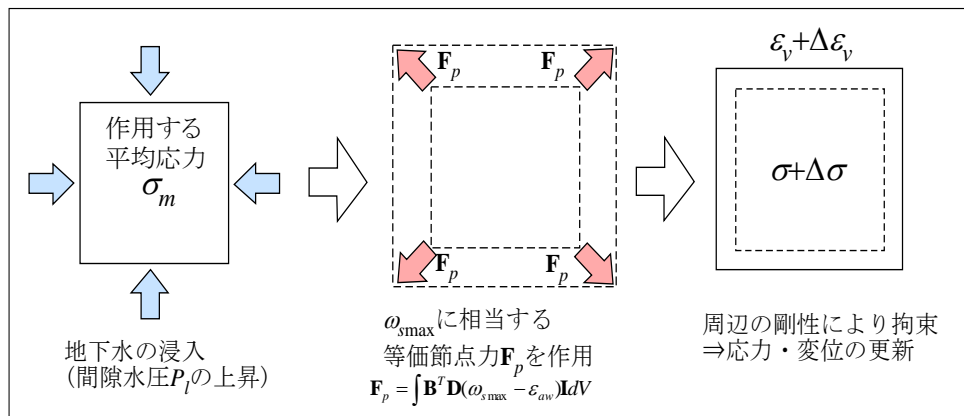
$$\omega_{smax}(P_l) = \varepsilon_{smax} \left(\frac{|P_l - P_{l0}|}{|P_{l0}|} \right)^l$$

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_{aw} 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) THM 連成ジョイント要素

緩衝材とオーバーパックや岩盤との間は接触面であり、ジョイント要素など不連続接触を取り扱える要素を用いてこれを表現する必要がある。地盤や岩盤と構造物の隙間や、断層面など弱層のモデル化に用いられる一般のジョイント要素では、THM 連成の現象は取り扱わないが、本研究におけるニアフィールドの長期挙動評価ではこれを考慮する必要がある。そこで、LOSTUF では熱・水と力学の相互作用を考慮した THM 連成ジョイント要素を導入している。この要素は、Zienkiewicz ら[6]によって導入されたジョイント要素と同様の定式化となっており、極薄いアイソパラメトリック要素に対して、前述の THM 連成系の支配方程式に基づく構成式を適用している。なお、ジョイント要素は本来、接触面をモデル化するものであることから、弾性体のポアソン効果がないことや、間隙率や熱膨張などの取り扱いについて、ソリッド要素とは幾つかの違いがある。しかし、基本的には剛性だけでなく水や熱の流れに対し、異方性の特性を設定可能なソリッド要素として導入されている。

(4) 剛性変化による弾性ひずみの再配分

緩衝材などの土質材料は土骨格の変形や水分作用により、剛性に関する材料非線形性を持っている。このような特性は、塑性ひずみを生じる不可逆なものであるが、一方で THM 連成問題においては弾性域内においても剛性が変化するような現象が考えられる。これは骨格構造が破壊されない範囲における温度上昇や含水率の増加に伴う剛性低下に相当するものであり、本研究では緩衝材や岩盤の含水による軟化を簡易的に検討するため、飽和度に依存して剛性が変化する等方線形弾性体を用いた検討も実施した。具体的には、図 3.1.2-2 に示されるように他に外力がない条件で剛性のみ変化する場合、発生した不平衡力により要素変形が生じ、拘束がない条件下では応力が変化せず弾性ひずみが再配分される。

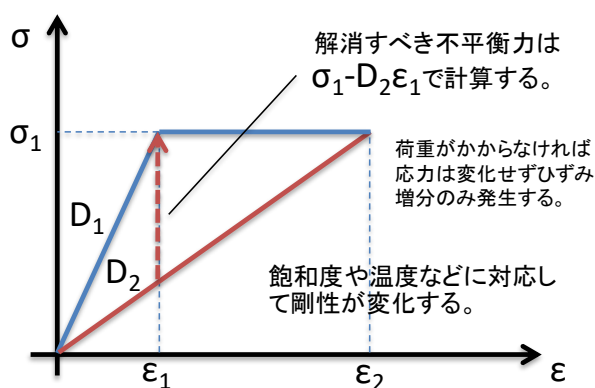


図 3.1.2-2 弾性ひずみの再配分の計算方法

(5) 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カー・プラガー降伏基準バイリニアモデル、カ

ムクレイモデル、関ロー太田モデル、軟岩クリープモデル[7]が LOSTUF に導入されている。

表 3.1.2-1 解析パラメーター一覧 (熱・水)

記号	パラメータ	単位	試験による取得方法
μ_l	水の粘性係数	Pa s	物理量
ρ_l	水の密度	kg/m ³	物理量
ρ_v	水蒸気の密度	kg/m ³	物理量
ρ_{vS}	飽和水蒸気密度	kg/m ³	物理量
c_l	水の比熱	J/kg K	物理量
β_{lP}	水の圧縮係数	Pa ⁻¹	物理量
β_{lT}	水の熱膨張係数	K ⁻¹	物理量
L	水蒸気の潜熱	J/kg	物理量
R_v	比気体定数	J/kg K	物理量
D_m	水蒸気分子拡散係数	m ² /s	物理量
ρ_s	固相の密度	kg/m ³	重量分析など
ϕ	間隙率	-	水銀圧入法, 重量分析など
k	固有透過度	m ²	透水試験
k_{rl}	相対透水係数	-	三乗則, van Genuchten式(サイクロメータ法などの保水力試験)
$C_{IP}(=\rho_l g d S_l / d P_l)$	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

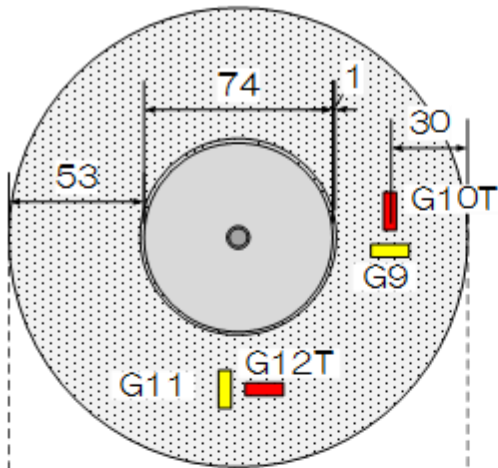
表 3.1.2-2 解析パラメーター一覧 (力学)

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			
$\epsilon_s \max(\sigma_m)$	膨潤特性	-	膨潤圧試験, 膨潤変形試験, 膨潤評価式
l	膨潤進行パラメータ	-	膨潤圧試験, 膨潤変形試験の進行過程

3.1.3 解析モデルの諸元・境界条件

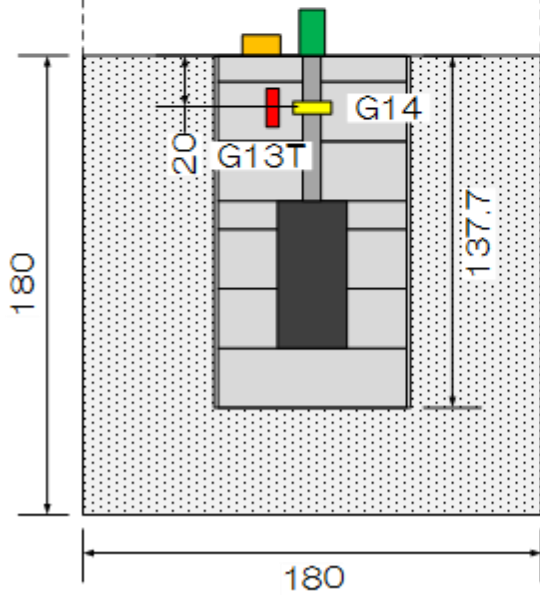
本研究で実施した再現解析の解析モデルについて、諸元や計算条件の詳細を以下に示す。解析モデルは平成 27 年度に実施し、処分システム工学確証技術開発報告書[8]に詳細の記される遠心模型試験 (図 3.1.3-1 を参照) を対象とする。これは、電中研・電事連の報告書[9]において提案されているものを対象として、廃棄体周辺のみを抽出したものである。この実験の再現解析のため、図 3.1.3-3 に示される軸対称モデルの FEM メッシュを作成した。解析では遠心模型試験における相似則の成立を確認するため、実物寸法のケースも一部設定しており、図には供試体の模型寸法のもの、その 30 倍の実物寸法について両方を示した。なお、図の左端の中立軸付近でオーバーパックから細かい心棒部分が伸びており、これはケーブルなどを通すために設けた。

(平面図：岩盤上端面)

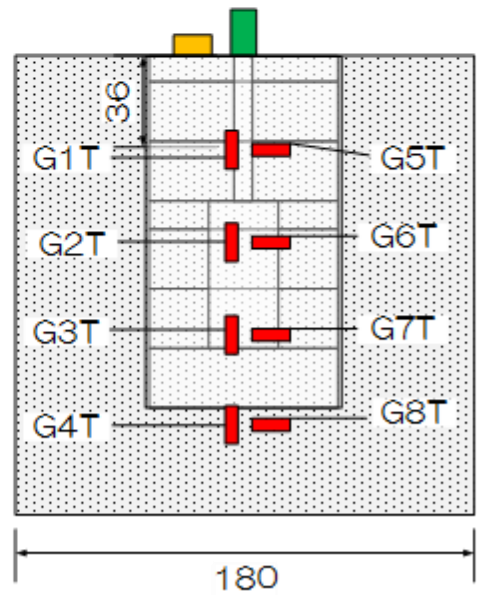


- 非接触変位計
- 土圧計
- ひずみゲージ
- 測温機能付ひずみゲージ
- オーバーパック
- 緩衝材

(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 3.1.3-1 平成 27 年度遠心模型試験のレイアウト

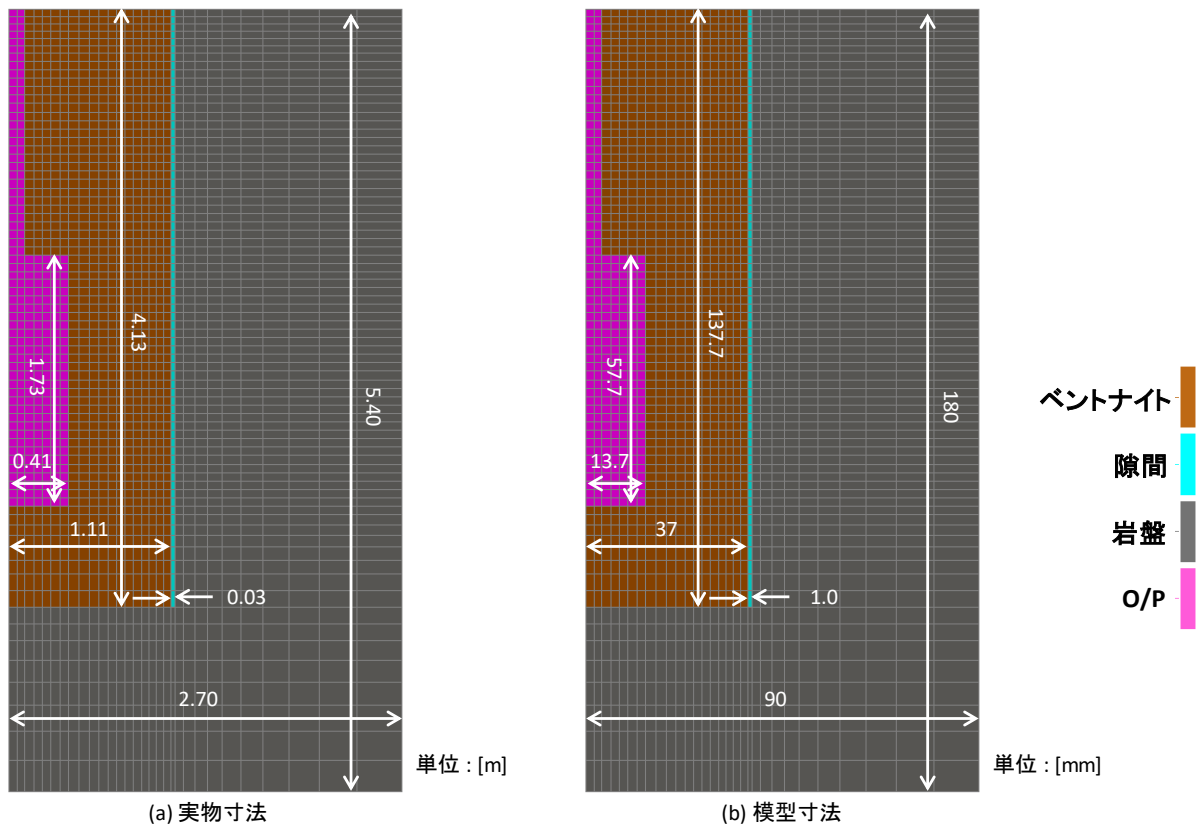


図 3.1.3-2 解析モデルの FEM メッシュ図 (2388 要素・2498 節点)

対象とする試験は 30G の遠心力場におけるニアフィールドを模擬した 1/30 模型に、底面からの注水と模擬オーバーパックの発熱を与え、約 40 日間に渡る経時変化を追うものであり、実寸換算で約 100 年間の現象に相当する。その詳細については平成 27 年度の報告書を参照されたい。本項では解析モデルに設定した境界条件について図 3.1.3-3 に示す。解析では、埋戻し材と緩衝材を区別せず、岩盤との間にある初期隙間は区別し、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、ただし上面のうち緩衝材の上部の土圧計との接触面についてはジョイント要素を配置することで摩擦や剥がれを考慮できるモデルとした。なお、人工バリアの定置前の岩盤外側に 8MPa の拘束圧を考慮し、これに相当する初期応力を設定した。また、水理境界としてモデルの底面に位置する境界面を圧力 4.1MPa で一定とし、上面は間隙水圧が 4.0MPa を超えた段階で間隙水が自由に抜ける浸出面境界に設定しており、これも試験条件に対応する。なお、初期の乾燥した状態におけるサクシオンはモデル全体で 55MPa とし、これは緩衝材および岩盤の保水試験で観測された乾燥時のサクシオンを参考に決定した。温度境界条件については、上面と底面および側面境界の温度を 33°C で一定とした。オーバーパックの発熱は遠心模型試験でヒーターに設定した発熱履歴をそのまま設定することが好ましいが、試験装置の仕様により温度制御が行われていたことから試験結果より直接温度履歴を設定した。なお、温度履歴を設定したのは心棒を除いたオーバーパック本体の部分のみであり、またヒーターの出力が 0 となって以降は温度拘束を解除した。

本解析モデルでは、緩衝材の表面全体を覆うように前述の THM 連成ジョイント要素を配置しており、膨潤による変形がオーバーパックや岩盤など周囲の剛性によって拘束されないようにモデル化を行った。解析モデルは 2498 節点で構成され、これはジョイント要素の配置により分離された節点を含むものである。

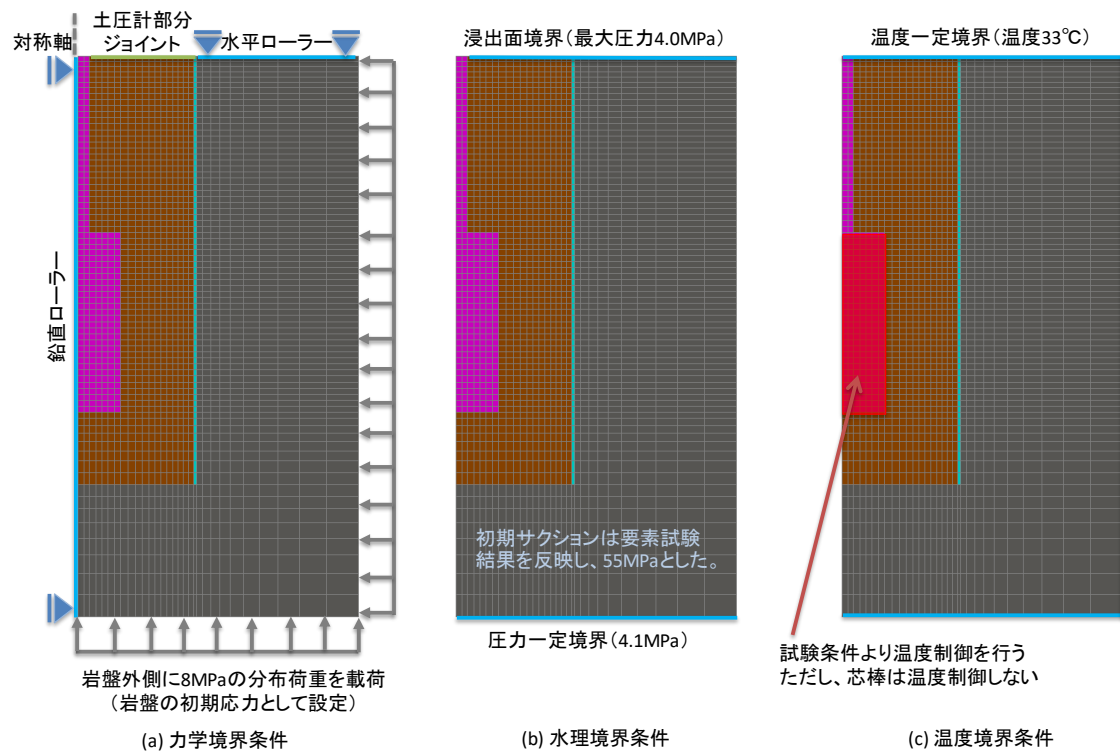


図 3.1.3-3 解析モデルの諸元と境界条件

3.1.4 パラメータ

(1) 基本ケースの設定パラメータ

再現解析を進める上で、最初に要素試験結果などを参照し、基本的な条件としてのケースを設定した。緩衝材は配合条件と要素試験結果より初期条件を設定し、弾性係数については飽和後の値を設定している。ポアソン比については飽和に至る過程で間隙水の作用により 0.5 に近づくと考えられる。不飽和時における間隙水の影響は前述の膨潤モデルに含まれるため、連成を考慮しておらず、ポアソン比としては 0.5 に近い値を設定するべきであるが、体積変形を拘束する問題を避ける必要があり、基本ケースでは乾燥時の値を設定した。

各ケースにて設定した基本的な物性値を表 3.1.4-1 に示す。隙間や接触面のモデル化にはジョイント要素を用いるため、表中からは除いている。なお、表中の式については後述する。

表 3.1.4-1 解析パラメータ (隙間と接触面以外)

条件・パラメータ	ベントナイト	模擬廃棄体	岩盤
初期条件			
間隙率	0.414	0.001	0.392
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.585	6.35	1.678
飽和度 (%)	25.6	0	20.5
透水関係のパラメータ			
水分特性曲線 a (MPa ⁻¹)	0.244	0.001	13.6
水分特性曲線 n	1.53	1.43	1.24
固有透過度 (m ²)	式	1.0 x 10 ⁻³⁰	3.58x 10 ⁻¹⁸
力学関係のパラメータ			
ヤング率 (GPa)	0.01	193	2.7
ポアソン比	0.3	0.3	0.21
膨潤圧(等体積、飽和時) (MPa)	0.67	—	—
熱関係のパラメータ			
乾燥時の熱伝導率 (W/mK)	0.465	16.7	0.45
飽和時の熱伝導率 (W/mK)	2.188	16.7	1.311
比熱 (J/kg/K)	323.0	590.0	887.0
熱膨張率 (K ⁻¹)	1.0 x 10 ⁻⁵	1.73 x 10 ⁻⁵	2.9 x 10 ⁻⁶

1) 透水関係のパラメータ

緩衝材や岩盤の水分特性曲線はサイクロメータ法による保水試験結果から表中のパラメータを決定しており、図 3.1.4-1 に示す水分特性曲線を van Genuchten モデルから設定した。また、解析モデル全体に設定した初期サクションも同じデータから 55MPa に設定している。

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

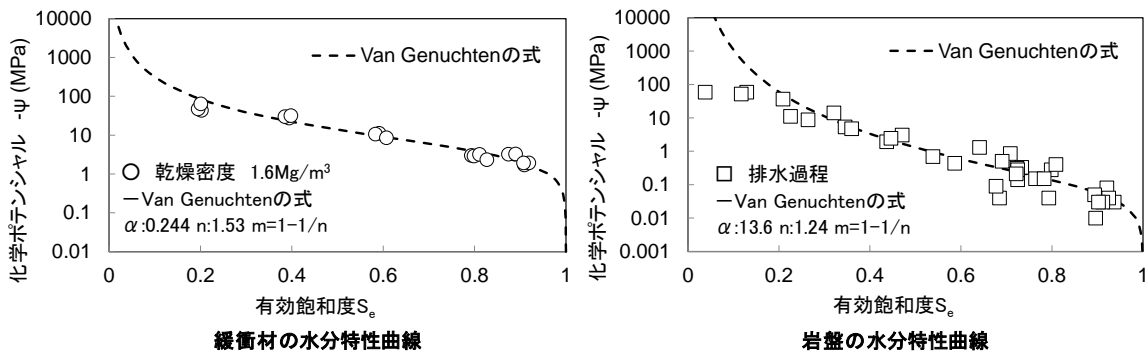


図 3.1.4-1 緩衝材と岩盤の水分特性曲線

緩衝材の固有透過度は、HLW 第2次取りまとめ[10]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

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 に示される固有透過度の計算式は式 3.22 に示す。また、岩盤の固有透過度は要素試験結果に基づき、間隙率と透水係数の関係にばらつきが小さいため一定値を設定した。

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

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

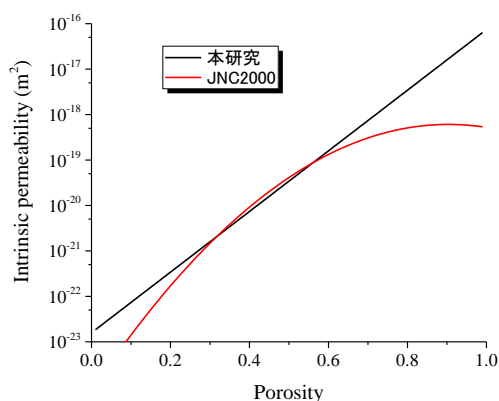


図 3.1.4-2 緩衝材の固有透過度

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[10]より乾燥密度 1.6Mg/m^3 のベントナイト単体の飽和時弾性係数を設定した。ポアソン比は一般的な値を設定し、膨潤計算に用いるパラメータは要素試験結果と小峯 (2005) [12]を参考に

表 3.1.4-2 に示す条件を設定した。なお、岩盤のヤング率とポアソン比は要素試験結果をそのまま利用している。

緩衝材と岩盤については前述の弾性ひずみの再配分を考慮することによる剛性の飽和度依存性を考慮した検討も行った。

緩衝材については、要素試験結果より飽和度とヤング率のばらつきがある程度分かっており、この標準偏差を用いて 2 パターンの飽和度依存性を設定しており、対応する検討ケースでこれを用いた。図 3.1.4-3 のグラフに示される実線はヤング率に関する要素試験結果の一次回帰直線を基本とし、勾配を同じとした $\pm 1\sigma$ のばらつきを設定し、それぞれ下限値として飽和時の剛性を与えたものである。また、図 3.1.4-4 は平均飽和度におけるヤング率に対し、 $\pm 1\sigma$ のばらつきを設定し、これと下限値を直線補間するものである。また、ポアソン比については、飽和時に 0.49 となるように初期値と直線補間する飽和度依存性を採用した。なお、ポアソン比を 0.5 相当に設定する目的は発生する膨潤圧を等方にするためであるが、飽和時以降に間隙水圧が発生すると体積変形を過剰に拘束する可能性があり、膨潤の生じない飽和時においてはポアソン比を乾燥時相当に戻すことが好ましいと考えられる。しかしながら、不連続に力学特性を変化させることは不連続な変形を生じるため、本研究では飽和して以降もポアソン比は 0.49 に設定している。

岩盤については要素試験結果のばらつきに基づく剛性変化は考慮せず、要素試験結果で得られた乾燥時と飽和時のヤング率を直線補間する検討を実施した。基本ケースで設定している岩盤のヤング率は昨年度実施した要素試験で得られている飽和時の平均値であり、岩盤剛性の飽和度依存性を考慮した検討では、追加実施した要素試験結果を反映した検討を行った。なお、岩盤についてはポアソン比に関する飽和度依存性は考慮していない。

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	$1.62 \times 10^{-19} \text{ C}$	
	Boltzman定数	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	
	Hamaker定数	$2.2 \times 10^{-22} \text{ J}$	
	Avogadro's数	6.023×10^{23}	
	ベントナイトの組成 クニゲルVI相当	陽イオン交換容量	<u>1.118 mequiv./g</u>
下線は要素試験結果 または配合条件に基づく	交換性Naイオン量	<u>0.673 mequiv./g</u>	
	交換性Caイオン量	<u>0.478 mequiv./g</u>	
	交換性Kイオン量	<u>0.015 mequiv./g</u>	
	交換性Mgイオン量	<u>0.022 mequiv./g</u>	
	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	0.0980 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	0.1330 nm	
	Mgイオンの非水和イオン半径	0.0835 nm	
	モンモリロナイト粒子の厚さ	$9.60 \times 10^{-10} \text{ m}$	
	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	<u>2.81 Mg/m^3</u>	
	砂の土粒子密度	<u>2.64 Mg/m^3</u>	
	モンモリロナイトの比表面積	$810 \text{ m}^2/\text{g}$	
	モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積	$0 \text{ m}^2/\text{g}$	
	ベントナイトのモンモリロナイト含有率	<u>54 %</u>	
	ベントナイトの乾燥密度	<u>1.585 Mg/m^3</u>	
	ベントナイトの配合率	<u>72.1 %</u>	
	その他	間隙水の誘電率	$80 \times 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{J/m}$
		間隙水のイオン濃度	35.2 mol/m^3
		絶対温度(基準温度)	298.15 K

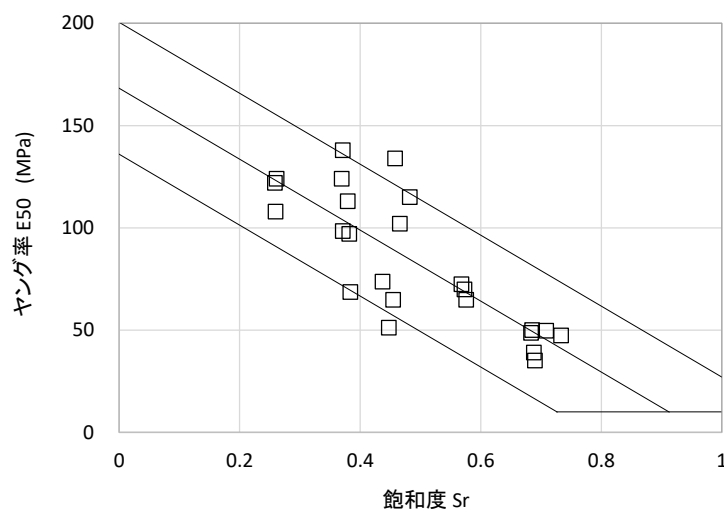


図 3.1.4-3 緩衝材のヤング率と飽和度の関係（一次回帰に下限値を設定）

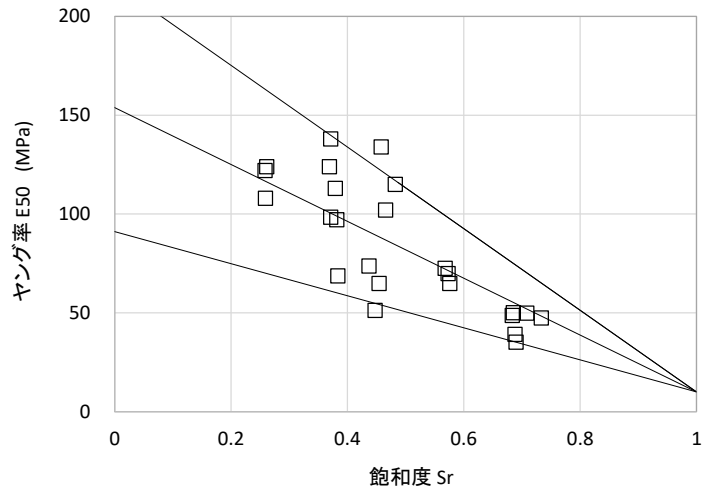


図 3.1.4-4 緩衝材のヤング率と飽和度の関係（平均飽和度と下限値から設定）

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[10]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 3.1.4-5 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、要素試験結果に基づき、同様に条件を設定した。なお、オーバーパックモデル部分に直接繋がっている心棒部分については、上端部の境界を常温で一定とする影響を考慮して、その影響が小さくなるように緩衝材相当の値を設定している。ただし、熱膨張率については力学挙動に直接影響することからオーバーパック部分と同じ値に設定した。

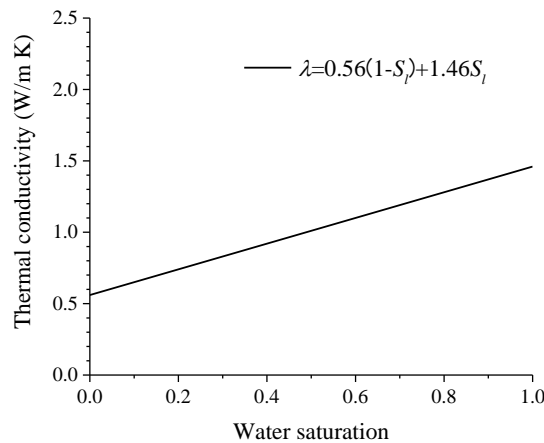


図 3.1.4-5 緩衝材の熱伝導率

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

3-23

4) ジョイント要素のパラメータ

緩衝材とオーバーパックおよび岩盤の間には THM 連成ジョイント要素を配置しており、ソリッド要素とはパラメータが少し異なる設定となっている。基本的に、接触面ではより硬い方のソリッドの物性値を参照し、熱と水の流れについても簡単のため等方的なソリッドと同じ設定としている。前述のとおり、THM 連成ジョイント要素は極薄いソリッド要素として導入されているため、垂直剛性についてはオーバーパックおよび岩盤の値をそのまま用いている。せん断剛性については、ジョイント要素が摩擦抵抗と滑動を考慮する非線形要素であることから、増分解析に対応して徐々にせん断応力を蓄積できるよう、垂直剛性に比べて小さな値を設定し、本研究では一律で垂直剛性の 1/100 倍とした。透水や熱伝導に関する物性値も参照するソリッド要素と同じ値を設定しているが、厚さが極薄く全体積が間隙であることから基本的に飽和条件となり、接触面の両側で同じ物理量を持つようなモデル化を行っている。

なお、緩衝材と岩盤の間にある隙間部分についても、同様にして THM 連成ジョイントでモデル化を行っているが、実物寸法で 30mm あるこの隙間については閉塞を考慮する必要がある。LOSTUF では、このような隙間の閉塞を考慮する場合、ジョイントの垂直変位に関する非線形剛性を定義し、閉塞時に高剛性を発揮するモデル化が可能となっている。この隙間の閉塞モデルではジョイント面の非線形剛性は式 3-24 で評価される。

$$k = k_0 \left(\frac{T_L}{T_L - \delta_n} \right)^\alpha \quad 3-24$$

ここで、 k はジョイント要素の剛性、 k_0 は初期剛性、 T_L はジョイント要素に設定される厚さ、 δ_n は垂直変位である。また、 α は非線形性を調整するパラメータであり、本研究では隙間の閉塞の様子を事前検討して一律 2.0 に設定した。なお、このようなある程度厚みのあるジョイント要素の取り扱い、通常のソリッドと厚みのないジョイント要素の中間的な取り扱いとなり、水や熱の流れを考慮する上で参照したソリッドの物性と同一間隙率を設定した。

表 3.1.4-3 に設定したジョイント要素のパラメータを示す。接触面については基本的により硬い方の物性に基づくが、隙間のモデル化については初期剛性として非常に小さい値を設定し、透水関係のパラメータは緩衝材相当とした。ただし、固有透過度については緩衝材と同じ設定が使用できないため岩盤相当としている。また、熱伝導率は緩衝材の飽和時の値、比熱は間隙水の値を設定した。なお、接触面の強度パラメータとしては摩擦係数と粘着力を設定するが、基本ケースでは飽和地盤を想定して摩擦係数を 0.3 に設定し、粘着力は 0 とした。なお、要素試験結果から緩衝材の内部摩擦角が 20 度程度、粘着力が 0.71 MPa であることが分かっており、摩擦係数の調整や粘着力の考慮についても検討する。

表 3.1.4-3 ジョイント要素のパラメータ

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

※隙間の閉塞を考慮した非線形剛性モデルの初期剛性

3.1.5 設定した解析ケース一覧

前述の基本条件を設定したものを基本ケースとし、遠心力模型試験結果と比較する上での検討のため、条件の違いを考慮した多くのケースを設定した。また、遠心模型試験における相似則が解析で成立することを確認するため、基本ケースと同じ条件でモデル寸法を実規模相当の30倍に設定したCase 0をこれらとは別に設定した。設定する検討ケースは、物性のばらつきなどを考慮することを基本としたが、緩衝材については要素試験結果が得られていない、あるいは解析実施時点で未実施のものがあり、また乾燥した岩盤の剛性などについてはばらつき自体が小さいことから、解析における物性値以外に関する検討ケースも加えた。具体的に剛性などの飽和度依存性を考慮した際に弾性ひずみを再配分するなど、解析におけるモデル化方法自体も検討項目に加えている。なお、温度物性については緩衝材の膨出に着目するとその影響が小さいと考えられ、検討ケースでは特にばらつきの考慮などは実施していない。試験結果との比較と考察は表3.1.5-1に示される検討ケースに対して行った。なお、各ケースの詳細についてはケース毎の考察で補足する。

表 3.1.5-1 解析ケース一覧

ケース	内容
Case 0 (実寸ケース)	基本ケースである Case 1 と同じ条件であるが、模型寸法でなく実物寸法のケース
Case 1 (基本ケース)	基本ケース、緩衝材の剛性は飽和時のもの、平均物性、接触面の摩擦係数を 0.3 とする
Case 2	岩盤の固有透過度を平均値から+1 σ に設定
Case 3	岩盤の固有透過度を平均値から-1 σ に設定
Case 4	岩盤の固有透過度を平均値とし、隙間の固有透過度を 1000 倍とし水みちを考慮
Case 5	緩衝材のポアソン比を 0.4 に設定
Case 6	緩衝材と岩盤やオーバーパック間の摩擦係数を半分の 0.15 に設定
Case 7	緩衝材と岩盤やオーバーパック間の摩擦係数を 2 倍の 0.60 に設定
Case 8	緩衝材と岩盤やオーバーパック間の摩擦係数を 0.15、粘着力として 500kPa を考慮
Case 9	緩衝材と岩盤やオーバーパック間の摩擦係数を 0.30、粘着力として 500kPa を考慮
Case 10	緩衝材と岩盤やオーバーパック間の摩擦係数を 0.60、粘着力として 500kPa を考慮
Case 11	基本ケースと同じ物性であるが、膨潤の進行をサクシオンでなく飽和度の関数で制御
Case 12	緩衝材剛性の飽和度依存(下限値 10MPa フラットの平均値ケース)考慮 $\nu=0.3\sim 0.49$ 隙間の透水性 1000 倍
Case 13	緩衝材剛性の飽和度依存(下限値 10MPa フラットの+1 σ ケース) $\nu=0.3\sim 0.49$ 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 14	緩衝材剛性の飽和度依存(下限値 10MPa フラットの-1 σ ケース) $\nu=0.3\sim 0.49$ 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 15	緩衝材剛性の飽和度依存(飽和時 10MPa の平均値ケース) $\nu=0.3\sim 0.49$ 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 16	緩衝材剛性の飽和度依存(飽和時 10MPa の+1 σ ケース) $\nu=0.3\sim 0.49$ 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 17	緩衝材剛性の飽和度依存(飽和時 10MPa の-1 σ ケース) $\nu=0.3\sim 0.49$ 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 18	緩衝材(下限値 10MPa フラットの平均値)+岩盤剛性の飽和度依存(3.29 \Rightarrow 1.89GPa) 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 19	緩衝材(下限値 10MPa フラットの平均値)+岩盤剛性の飽和度依存(3.29 \Rightarrow 1.00GPa) 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 20	緩衝材(下限値 10MPa フラットの-1 σ)+岩盤剛性の飽和度依存(3.29 \Rightarrow 1.89GPa) 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 21	緩衝材(下限値 10MPa フラットの-1 σ)+岩盤剛性の飽和度依存(3.29 \Rightarrow 1.00GPa) 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 22	緩衝材は飽和時剛性+岩盤剛性の飽和度依存(3.29 \Rightarrow 1.89GPa) 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 23	緩衝材は飽和時剛性+岩盤剛性の飽和度依存(3.29 \Rightarrow 1.00GPa) 隙間の固有透過度 1000 倍
Case 24	緩衝材は飽和時剛性+岩盤剛性の飽和度依存(3.29 \Rightarrow 1.00GPa) 隙間の固有透過度 1000 倍 膨潤の進行は飽和度制御

3.1.6 解析結果及び考察

平成 27 年度に実施した遠心模型試験の再現解析において、設定した各検討ケースの解析結果は参考資料として 6.1.1 に一覧を掲載する。本項では、各ケースの比較結果に対する考察と、数値解析による検討を実施して得られた成果についてまとめる。なお、解析結果はすべて実寸換算を行った上で整理している。

(1) 各ケースの解析結果

1) Case 1 (基本ケース)

遠心模型試験との比較検討を行う上で、各ケースの基本条件として設定したケースである。解析結果より、岩盤底面から浸潤が徐々に進行し、1 年経過時頃に緩衝材の下端に水位が達する。この初期の浸潤過程では岩盤と接するベントナイト要素のみが膨潤し、水位が緩衝材下端に達して以降、他の要素の膨潤により緩衝材の土圧が大きくなり、20 年経過時頃にオーバーパックスの鉛直変位がピークを迎えることがわかる。なお、1 年経過時以前に見られるオーバーパックス鉛直変位や緩衝材の土圧の変化については、膨潤の発生も含まれているものの、飽和した岩盤の膨張や高温部分の熱応力の影響も大きいと考えられる。また、0.5 年目以降に見られるオーバーパックスの下降は膨潤により隙間が閉塞する過程でポアソン効果により生じている。なお、オーバーパックスを模擬するヒーターの発熱は 2 年目以降では作用しないため、温度分布は試験結果と解析結果の両方で常温に戻る。この最初の 2 年間についておおまかな温度履歴は解析と実験で合っているが、設定している常温に多少の差が確認できる。また、オーバーパックス周囲の温度が常温に戻る過程で緩衝材や岩盤が収縮している影響が解析と実験の両方で認められる。

平成 27 年度に実施した遠心模型試験結果（以下、単に試験結果と呼ぶ）と比較すると、オーバーパックスの鉛直変位や発生する緩衝材の土圧では、特に 10 年経過時以降の膨潤の影響が大きくなる時期に差異が大きくなる。解析結果では下部の緩衝材の膨潤によりオーバーパックスが大きく押し上げられ、20 年以降に上部の緩衝材の膨潤と岩盤の膨張により押し下げられる傾向があるのに対し、試験結果では初期の上昇以降にほとんどオーバーパックス鉛直変位が認められない。試験結果では緩衝材の膨出もないことから、最大の緩衝材の土圧の発生(約 20 年目)以降は、計測した土圧から背圧を差し引いた緩衝材の有効応力には有意な変化が認められない。一方で、解析結果では大きな鉛直変位があり、突き抜けた心棒部分の体積が膨出に相当するため、最大土圧の発生以降に有効応力が大きく低下していることがわかる。試験でこのような傾向が見られない原因はわからないが、ベントナイトの膨潤が緩衝材の上部と下部でほぼ同時に進行しているものと考えられる。なお、発生する緩衝材の土圧のピーク値は解析結果の方が大きくなっているが、これは解析では緩衝材のポアソン比を 0.3 に設定し、等方的に仮定した膨潤ひずみ増分と要素剛性から膨潤相当外力を計算しているためであり、土圧の鉛直方向成分が大きくなるためと考えられる。

岩盤の垂直ひずみは、遠心模型試験では初期段階で引張が生じており、解析では認められない。遠心場での試験条件が安定するまでの間に生じていると考えられるが、解析では拘束

圧を初期応力として設定しているため、試験結果のような引張は発生していない。一方で、冠水して以降は試験結果では収縮が生じており、解析結果とは逆の変形を生じている。

また、このケースと全く同じ条件で、モデル寸法のみ実寸換算した Case 0 を相似則の確認のために設定した。Case 0(実寸換算)との結果を比較すると、Case 1 と Case 0 の解析結果に有意な差は見られず、数値解析で相似則が成立していることを確認した。

2) Case 2

基本ケースから岩盤の透水係数のばらつきを考慮して、要素試験結果の平均値より 1σ ほど大きく設定した。そのため、岩盤部分の地下水位の上昇や間隙水圧の発生は他のケースに比べて早く、一方で緩衝材内部の飽和度変化については浸潤速度が変わらないため大きな差異はない。多くの結果項目について基本ケースと大きな違いは見られないが、オーバーパックの最大鉛直変位の発生時刻はやや早くなっていることがわかる。これは岩盤部分の飽和時刻が早くなること、飽和時の流量が増えたことに対応していると考えられる。

3) Case 3

Case 2 とは反対に岩盤の透水係数を要素試験結果から 1σ ほど小さくしたケースであり、岩盤と緩衝材の部分の両方で浸潤速度が遅くなっていることが確認できる。このケースでは Case 2 とは反対に最大鉛直変位の発生時刻がやや遅くなっている。

4) Case 4

基本ケースをはじめ他のケースでは、THM 連成ジョイントでモデル化した隙間の透水物性（固有透過度と不飽和特性（水分特性曲線・相対透水係数））については、周囲のソリッド要素と同様になるように設定した。本ケースは、隙間が地下水位到達後に直ちに飽和し、その後は水みちとなることを考慮するために固有透過度を基本ケースの 1000 倍に設定した。そのため、他のケースに比べてモデル全体の浸潤速度が大きく、間隙水圧分布や飽和度分布に有意な差異が確認できる。なお、最も影響が大きいのはオーバーパック変位と緩衝材の土圧であり、緩衝材の外側隙間から上部と下部のベントナイトがほぼ同時に膨潤を開始するため、オーバーパック周辺の土圧の作用が釣り合い、オーバーパック鉛直変位と緩衝材の土圧のピーク値および変動が小さくなっている。また、浸潤過程の初期における岩盤などの膨張も小さくなっていることが確認できる。

5) Case 5

基本ケースをはじめ、他のケースでは緩衝材のポアソン比を 0.3 に設定している。LOSTUF の膨潤評価式に基づく等価節点力の計算では、ポアソン比が小さい場合に発生土圧に軸差が生じるため、その影響を緩和する目的で乾燥時と飽和時の平均的な値として 0.4 を設定したケースである。このケースでは、軸差が緩和することで最大土圧のピークが小さくなることを期待したものであるが、解析結果からはその効果はほとんど認められない。

6) Case 6

基本ケースでは、接触面の摩擦係数として湿った条件下の地盤と岩盤間などで一般的な値 0.30 を設定した。本ケースは、摩擦強度に関するパラメータは不確実性が大きいと考え、接触面摩擦の影響を確認するため、摩擦係数を基本ケースの 1/2 に設定した。解析結果より、本ケースと基本ケースの解析結果に有意な差は確認できなかった。

7) Case 7

Case 6 とは反対に基本ケースから接触面の摩擦係数を 2 倍に設定したケースである。摩擦角としては 30 度を超える大きさであり、乾燥した地盤や岩同士の接触摩擦に相当する。本ケースと基本ケースの解析結果に有意な差は見られず、接触面摩擦係数を大きくしても解析結果に大きな影響はないことが確認できる。また、Case 6 と本ケースの解析結果から、接触面の摩擦係数は解析結果に大きな影響を及ぼさないことを確認した。

8) Case 8

基本ケースでは考慮していなかった接触面の強度に緩衝材の粘着力を考慮したケースである。粘着力は緩衝材の一軸試験結果より最大値として 0.5MPa を設定しており、この粘着力が考慮できる場合においても、実際には浸潤過程で徐々に失われていくものと考えられる。オーバーパックの鉛直変位に着目すると、基本ケースと比較して全体的に変位は小さくなる傾向にあるものの、時間変化の傾向には有意な差はない。

9) Case 9

Case 6 の条件で接触面強度に粘着力を考慮したケースである。解析結果については基本的に Case 8 と有意な違いはない。

10) Case 10

Case 7 の条件で接触面強度に粘着力を考慮したケースである。解析結果については基本的に Case 8 と有意な差はない。Case 8~Case 10 の解析結果より、接触面の粘着力が解析結果に大きく影響することはないことを確認した。

11) Case 11

基本ケースをはじめとした各ケースでは、膨潤の進行度合いをサクシオン圧の変化で評価している。本ケースでは膨潤の進行度合いを飽和度に基づき評価した。サクシオン圧と飽和度は水分特性曲線の縦と横軸に対応するため、どちらで評価するかの違いは膨潤の発生過程に違いを生じる。つまり、サクシオンで評価する場合に膨潤の進行速度が大きい含水域では、飽和度で評価した場合には逆に膨潤の進行速度が小さくなり、その過程は水分特性曲線によって決まる。解析結果より、膨潤圧が飽和度に依存して発生するモデルは、膨潤圧をサクシオンに基づき評価する基本ケースと比較して膨潤圧の発生が遅くなり、不飽和時(10 年以前)の緩衝材の土圧は全体的に小さい傾向にある。その他は、基本ケースとの大きな差異は見られない。

12) Case12

本ケースでは、隙間を水みちとして考慮する Case 4 の条件に加え、緩衝材の剛性およびポアソン比が飽和度に依存して変化する設定とした。緩衝材の剛性は、飽和度に対して要素試験結果の平均の一次回帰直線で変化するが、10MPa 未満にはならないように設定した(図 3.1.4-3 参照)。ポアソン比は、乾燥時の 0.3 から飽和時の 0.49 まで飽和度に対して線形に変化する。Case 4 と比較すると、不飽和時の緩衝材は剛性が大きいいため、初期膨潤の発生時に生じるひずみが小さく、オーバーパックの鉛直変位が非常に小さくなっている。また、浸潤により剛性が低下するため、緩衝材の自重相当の初期応力が再配分され、オーバーパックを巻き込んで沈下する影響が多少見られるが、膨潤圧に比べて小さいため 10 年目までに見られ

る沈下傾向については Case 4 との差は小さい。飽和して以降（10 年以降）はオーバーパックスの沈下が Case 4 よりも小さく、緩衝材の岩盤側への膨張が Case 4 よりも小さいことから、岩盤外壁のひずみも Case 4 より小さくなっている。この傾向は、飽和して以降に緩衝材のポアソン比が 0.5 に近くなり、体積変形を拘束することに起因しており、解析上の問題であると考えられる。緩衝材の土圧（有効応力）が飽和して以降、緩やかに低下し負圧となっていることも同様の現象である。

13) Case13

Case 12 の条件で、緩衝材の剛性が要素試験結果の平均値より 1σ ほど大きい値で変化するケースである（飽和時の剛性が設定した下限値に達さない）。解析結果については基本的に Case 12 と大きな違いはないが、オーバーパックス鉛直変位が小さく、特に 10 年目以降に生じる沈下量が小さくなった。

14) Case14

Case 12 の条件で、緩衝材の剛性が要素試験結果の平均値より 1σ ほど小さい値で変化するケースである。解析結果については基本的に Case 12 と大きな違いはないが、10 年目以降のオーバーパックス鉛直変位が大きくなっている。Case 12~|Case 13 の結果から、要素試験結果における $\pm 1\sigma$ 程度の剛性のばらつきでは、オーバーパックス鉛直変位に多少の違いが見られるが、その他の結果には大きな差異は見られないことがわかる。

15) Case 15

本ケースにおいても、緩衝材の剛性およびポアソン比が飽和度に依存するが、Case 12 と異なり飽和時に 10MPa になるよう設定した（図 3.1.4-4 参照）。緩衝材の剛性は、飽和度に対して要素試験結果の平均程度の値で変化する。また、ポアソン比は Case 12~|Case 13 と同様に、乾燥時の 0.3 から飽和時の 0.49 まで飽和度に対して線形に変化する。なお、Case 12 と本ケースの解析結果には大きな差異は見られない。

16) Case 16

Case 15 の条件で、緩衝材の剛性が要素試験結果の平均値より 1σ ほど大きい値で変化するケースである。解析結果については基本的に Case 15 と大きな違いはない。ヤング率を $+1\sigma$ としたケースとしては Case 13 と対応し、解析結果に大きな違いはないが、10 年目以降のオーバーパックス鉛直変位は本ケースの方が大きい。これは Case 13 のベントナイトの飽和時剛性が、設定した下限値より大きいためである。

17) Case 17

Case 15 の条件で、緩衝材の剛性が要素試験結果の平均値より 1σ ほど小さい値で変化するケースである。解析結果については基本的に Case 15 と有意な差はない。また、Case 14 とも大きな違いはないが、オーバーパックス変位は本ケースの方が大きい。これは Case 14 で設定したベントナイトのヤング率が多くの飽和度域で下限値となっているためである。

Case 12~|Case 17 の結果から、剛性の飽和度依存性の形式や、要素試験結果における $\pm 1\sigma$ 程度の剛性のばらつきでは、解析結果に大きな差異は見られないことがわかった。

18) Case 18

本ケースでは、Case 12 の条件に加え、岩盤の剛性が飽和度に対して、乾燥時の 3.29GPa

から飽和時の 1.89GPa まで変化するように設定した。これは飽和して以降に遠心模型試験結果で見られる岩盤の圧縮を再現する目的があり、乾燥時と飽和時の値は要素試験のデータに基づく平均値である。軟岩は含水により軟化する特性があり、岩盤の初期拘束圧が大きいと浸潤によって収縮が見られる。

解析結果より、岩盤の周方向ひずみに着目すると、浸潤に伴って岩盤の剛性が低下するため、Case 12 と同じ初期応力に対して、約 4 年目までは収縮側にひずみが生じている。5 年目以降は膨張に転じているが、これは間隙水圧の作用と岩盤が緩衝材により外側に押されているためである。

岩盤の鉛直方向ひずみについては、約 0.8 年で圧縮から引っ張りに転じているが、これは飽和により地下水が岩盤の応力の一部を負担するためである。

緩衝材の土圧は Case 12 と大きな違いはないが、オーバーパック変位は Case 12 と比べて全体的に沈下傾向にある。これは、Case 12 では岩盤下部が膨張するのに対し、Case 18 では収縮が生じるためである。なお、岩盤ひずみで見られる解析と実験結果の差異は小さくないが、剛性低下の大きさによっては現象を再現できる可能性がある。なお、本ケースの結果は、Case 12 や基本ケースと比較して岩盤の飽和時刻に大きな差が見られるが、これは収縮ひずみが大きいため間隙率に差異があるためである。

19) Case 19

本ケースでは、Case 12 の条件に加え、岩盤の剛性が飽和度に対して 3.29GPa から 1.00GPa まで変化するように設定した。実施した要素試験データに基づき、ばらつきを考慮した場合、飽和時の岩盤の剛性の最小値は 1.00GPa 程度である。

初期 0.1~0.5 年の岩盤下部の剛性低下に伴う収縮の影響から、初期の上昇変位がみられない。Case 18 と比較すると、全体的な傾向は同じであるが、飽和時の剛性が約半分であるため、0.5 年以降の岩盤下部の収縮量も Case 18 より顕著になり、オーバーパック変位は全体的に沈下する傾向にある。

20) Case 20

本ケースでは、Case 14 の条件に加え、岩盤の剛性が飽和度に対して Case 18 と同様に 3.29GPa から 1.89GPa まで変化するように設定した。

Case 14 と比較すると、オーバーパック変位の傾向は同様であるが、飽和時の剛性低下による圧縮により岩盤下部が上昇し、オーバーパック鉛直変位は全体的に低くなる傾向にある。また、周方向・鉛直方向のひずみの傾向は、Case 18 の場合と同様である。

21) Case 21

本ケースでは、Case 14 の条件に加え、岩盤の剛性が飽和度に対して Case 19 と同様に 3.29GPa から 1.00GPa まで変化するように設定した。

全体的な傾向は Case 20 と同様であるが、飽和時の剛性が約半分であるため、0.5 年以降の岩盤下部の圧縮量も Case 20 より顕著になり、オーバーパック変位は全体的に低い傾向にある。また、Case 19 とほぼ同じ解析結果となっている。

22) Case 22

本ケースでは、岩盤剛性の飽和度依存性を検討した Case 18、Case 20 とほぼ同様の条件

であるが、緩衝材のヤング率を飽和時の値(10MPa)で一定とした。解析結果より、岩盤のひずみの傾向は、岩盤の飽和度依存性を考慮した Case 18~Case 21 の傾向に近いことがわかる。緩衝材の土圧の時間変化は Case 4 の傾向に近く、3 年目以降の土圧が全体的に大きい。これは、飽和時の剛性低下により岩盤に収縮が生じ、緩衝材が圧縮されるため鉛直方向に変形が生じるためである。これに関連して飽和時にポアソン比が 0.5 相当になることによる、有効応力の低下の影響は殆ど見られない。また、オーバーパック変位の時間変化の傾向も Case 4 に近いが、30 年目以降のオーバーパック変位の降下が発生していない。

23) Case 23

本ケースでは、Case 22 の条件で岩盤の飽和時の剛性を 1.0GPa としたケースである。Case 20 に対する Case 21 の考察同様、Case 22 に比較して飽和時の岩盤の剛性が小さいため、岩盤の圧縮の影響が顕著に現れ、オーバーパック変位は小さく、緩衝材の土圧はより大きくなっている。

24) Case 24

本ケースでは、Case 23 とほぼ同じ条件であるが、ベントナイト膨潤の進行を Case 11 と同様にサクシオン圧でなく飽和度で評価している。解析結果より、Case 23 と同様の解析結果となっているが、緩衝材の土圧については差異が認められる。他の緩衝材剛性の飽和度依存性を考慮したケースと同様に、有効応力に低下傾向が見られる。

(2) 遠心模型試験の再現解析結果の考察

本研究では平成 27 年度に実施した遠心模型試験を対象として、その再現解析を実施した。以下に項目別に比較を行った解析結果と考察を示す。

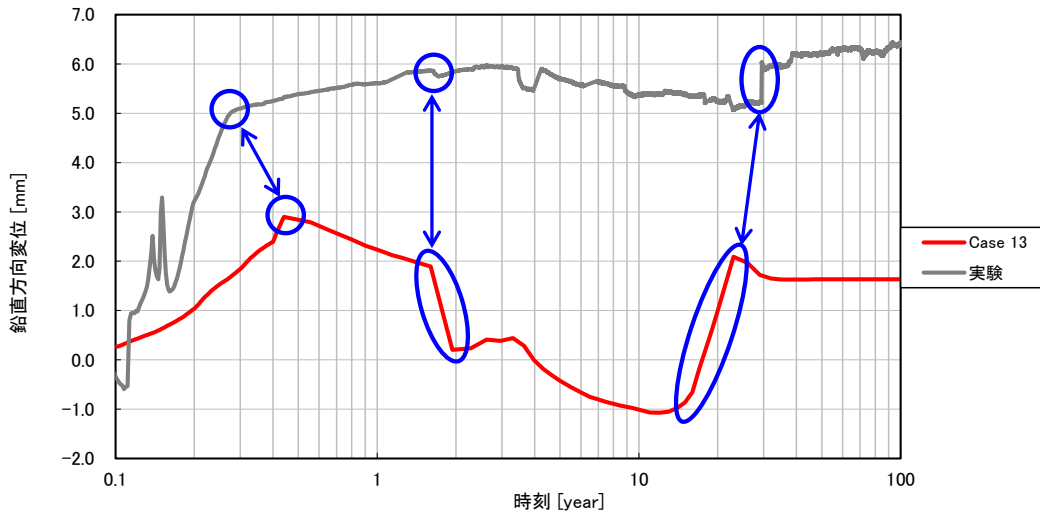
1) 緩衝材物性の飽和度依存性を考慮した場合のオーバーパック変位

基本ケースなど緩衝材物性の飽和度依存性を考慮していないケースでは、オーバーパックの鉛直変位が実験と大きく異なるため、ここでは飽和度依存性を考慮した Case 13 を代表ケースとしてオーバーパック変位について考察する。なお、基本ケースをはじめとする他のケースについても基本的な挙動は共通である。

Case 13 の解析では、初期 0.1 年目から約 0.4 年目までオーバーパックは上昇している。これは、下部の岩盤と接している緩衝材が膨張をしたため、試験ではこの傾向は 0.3 年目まで続いている。解析で 0.4 年目以降は、オーバーパックが沈下している。これは緩衝材が岩盤との隙間を埋めるように膨張し、ポアソン効果により鉛直方向に収縮したためと考えられる。

Case 13 では剛性低下による初期応力の再配分による自重沈下の影響もあるが、膨潤変形に比べるとこの影響は十分小さい。また、0.4 年目以降、試験では鉛直変位が上昇する傾向となっており、緩衝材の膨潤が解析より大きく生じて鉛直方向に膨張した可能性が考えられる。1.6~2 年目付近で、試験・解析ともにオーバーパックの降下がみられるが、これはヒーターの加熱が停止したことによる熱応力の消失によるものと考えられる。解析ではこの影響によるオーバーパックの沈下量が大きい、オーバーパック模型の芯棒や境界条件などの影響と考えられる。

2~10年目までは実験・解析ともに降下する傾向にある。このとき、緩衝材は隙間を埋めていくような変形となる。約10~20年目の期間になると、解析ではオーバーパックが上昇している。この期間では、下部~中部のオーバーパックに近い緩衝材が膨潤し、岩盤の膨張も合わさってオーバーパックを持ち上げている。20~30年目で解析ではオーバーパックは下降しており、これは上部の緩衝材が膨潤したためであるが、緩衝材の剛性が高いため拘束されその下降量は小さい。



(青枠部分が実験と解析で対応すると考えられる箇所)

図 3.1.6-1 代表的なケースにおけるオーバーパック鉛直変位の履歴

2) 緩衝材の飽和度依存性を考慮した場合の緩衝材の土圧

オーバーパック変位と同様に Case 13 と比較のために飽和度依存性を考慮していない Case 4 を対象として、緩衝材の土圧に関する比較を行った。

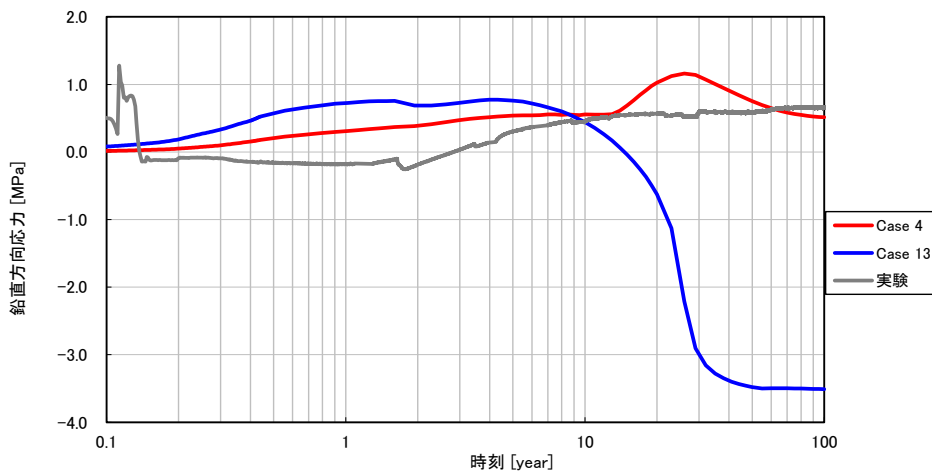


図 3.1.6-2 代表的なケースにおける緩衝材の土圧の履歴

Case 4 の解析結果では、約 12 年目以降に緩衝材の土圧が 1.0MPa を超えている。これは、緩衝材のポアソン比が 0.3 であるため、仮定する等方なひずみに対応し、膨潤圧が等方的に発生しなかったことが原因と考えられる。

Case 4 の結果に対して、緩衝材の物性の飽和度依存性を考慮し、ポアソン比が飽和度に応じて 0.3 から 0.49 まで変化させた Case 13 の解析では、0.1 年目から約 7 年目まで土圧が徐々に発生する結果となっているが、試験では、約 2 年目から土圧が発生している。これは、浸潤過程の違いも考えられるが、実際の緩衝材は等方弾性体ではないため、下部から締固められていき、上部の土圧変化に時間遅れが発生した可能性が考えられる。また、Case 13 と Case 4 の間に見られる土圧の立ち上がりの違いは剛性の違いに対応するものである。なお、試験、Case 4、Case 13 の解析いずれも、約 1.6 年目に応力の低下がみられるが、これはヒーターの加熱が停止したことによるものと考えられる。

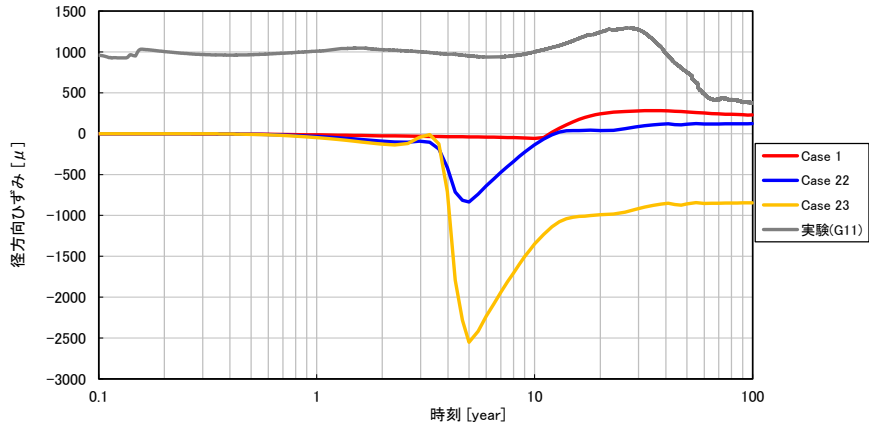
Case 13 の解析では、約 7~8 年目から緩衝材上部が飽和に至り、水圧が大きくなるため、有効応力として示している土圧は徐々に低下している。これは、飽和時のポアソン比を 0.49 としているため、体積変形が拘束されたことによる影響と考えられる。なお、実験ではこの期間、土圧がほぼ一定値となっていることから、水圧の上昇分が土骨格の変形にそのまま対応していると考えられる。

3) 岩盤の軟化と岩盤ひずみ (Case 22、Case 23)

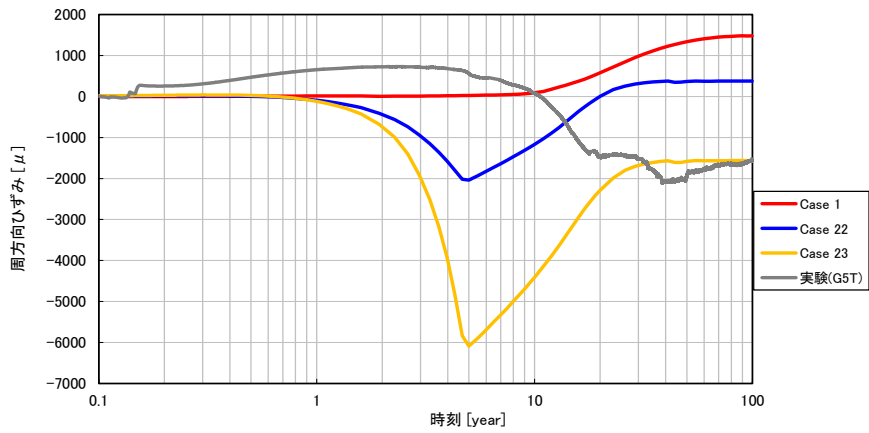
岩盤の剛性を一定に設定したケースの場合、約 10 年目以降のひずみの傾向が試験結果と真逆の傾向となった。試験では圧縮ひずみが生じており、間隙水圧により膨張を生じている解析結果とは大きく異なっている。

試験において、間隙中の水分量が増加しているにも関わらず圧縮ひずみが発生する要因として、岩盤の剛性が飽和度の上昇に対応して低下し、初期拘束圧の作用により収縮していることが考えられる。この要因を考慮して、要素試験結果を基に岩盤物性が乾燥時の 3.29GPa から飽和時の 1.89GPa および 1.0GPa まで変化するように設定した Case 22 と Case 23 について基本ケースと比較した。

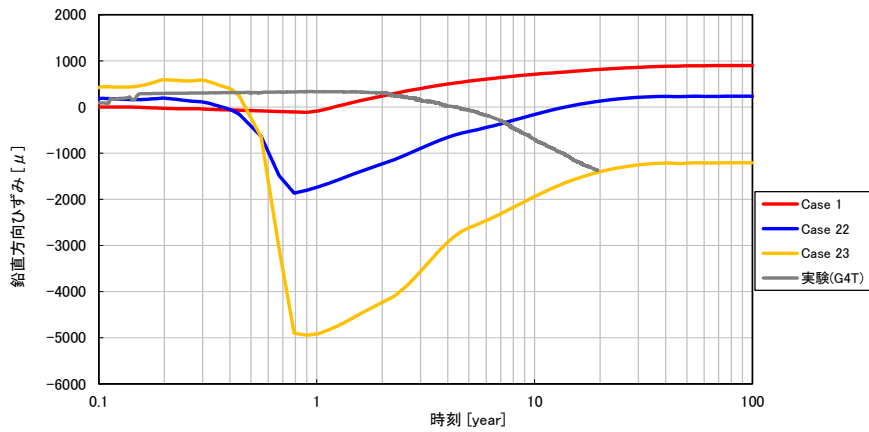
図 3.1.6-3 に、Case 1 および Case 22 と Case 23 の結果を示す。Case 22 と Case 23 ではどちらのケースでも飽和後に圧縮ひずみが発生しており、剛性低下の効果が現れている。しかし、試験と比較すると、圧縮ひずみは大きく、実際の剛性低下量は要素試験の平均値に基づくものより小さい可能性が考えられる。なお、飽和したと考えられる時刻が基本ケースや試験に比べて早いのが、これは岩盤収縮が大きいために間隙率変化が浸潤速度に影響を与えたことが原因である。



径方向ひずみ



周方向ひずみ



鉛直方向ひずみ

図 3.1.6-3 代表的なケースにおける岩盤ひずみの履歴

4) 接触面強度の検討 (Case 1、Case 6～10)

基本ケースをはじめとして、解析と実験の結果にはオーバーパック変位について大きな差があり、これを説明するために接触面強度に関する検討を行っている。図 3.1.6-4 に、基本ケースと摩擦係数及び粘着力を変更させた各ケースの結果を示すが、接触面強度がオーバーパック変位に与える影響は小さいことがわかる。

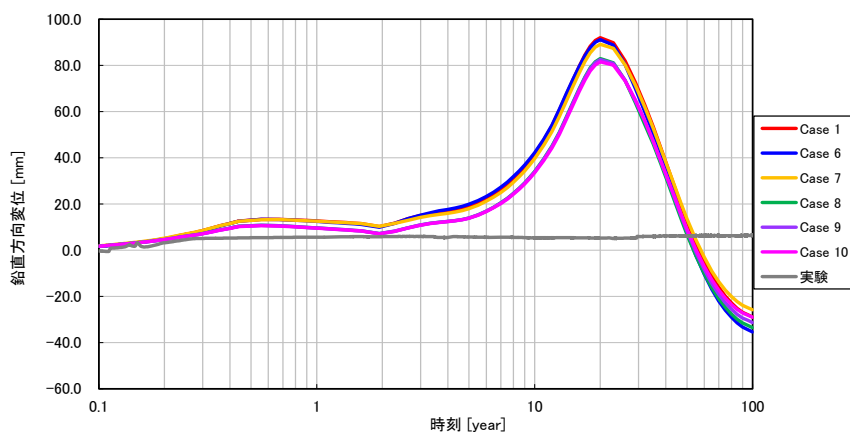


図 3.1.6-4 接触面強度を検討したケースの O/P 鉛直変位の履歴

5) 透水性が力学挙動に与える影響 (Case 1～4)

要素試験における岩盤の固有透過度のばらつきを考慮して、岩盤の固有透過度の平均値の $\pm 1\sigma$ に設定した (Case 2、Case 3)。また、緩衝材と岩盤の隙間では浸透速度が極めて大きいと考えられることから、隙間の透水性を基本ケースの 1000 倍とした (Case 4)。図 3.1.6-5 に示されるように、オーバーパックの変位に関して、Case 1～Case 3 間には大きな変化はないが、隙間を水みちとして考慮した Case 4 では側方から緩衝材が一様に膨潤することでオーバーパックの鉛直方向の最大変位が小さくなっている。なお、Case 1～Case 3 の最大変位に有意な差が見られるのは透水性の違いにより緩衝材および岩盤内の流量のバランスが変化したためである。

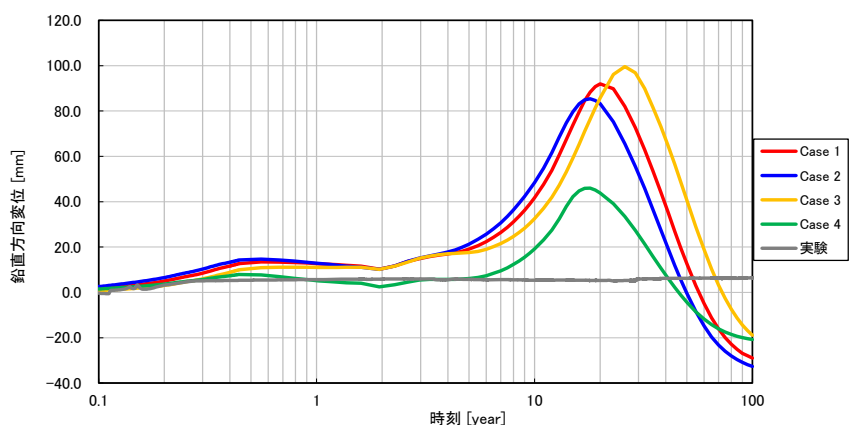


図 3.1.6-5 岩盤および隙間の透水性を検討したケースの O/P 鉛直変位の履歴

3.1.7 遠心模型試験の再現解析結果のまとめ

本研究では平成 27 年度に実施した遠心模型試験を対象として、24 ケースの検討ケースを設定し、その再現解析を実施した。基本ケースと実寸モデルケースを含む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) 遠心模型試験の相似則の確認

重力加速度の N 倍の遠心場における模型試験では、 $1/N$ 模型の応力ひずみが等倍となり、また模型を用いる効果により水や熱の拡散時間が $1/N^2$ 倍になる。本研究では、模型寸法の基本ケースと同じ条件の実寸法ケースの解析結果を比較し、想定されている模型試験の相似則を満たすことを確認した。これは、不飽和流れや緩衝材の膨潤挙動、接触面の滑りなどを含む非線形問題においても成立している。

(2) 透水性の評価が与える影響

平成 27 年度に実施した感度解析結果より、浸潤速度は緩衝材の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との結論を得た。一方、本研究で対象とした試験条件の解析では、透水係数の大きさによって最終変位や応力に多少の影響が認められた。これは、平成 27 年度に実施した感度解析モデルと比較して、冠水後の間隙水圧が大きいため、浸透流による地盤骨格に対する作用が相対的に大きいためと考えられる。

試験との比較では、オーバーパック変位などの差異は大きく、透水性を要素試験結果から得られるばらつき程度変化させても傾向は殆ど変わらなかった。試験結果では、オーバーパックの鉛直変位は小さく、これは緩衝材の上部と下部のベントナイトが殆ど時間差を生じることなく膨潤しているためと考えられる。なお、緩衝材と岩盤間にある隙間は、浸潤過程で水みちになると考えられ、これを考慮することによる影響は大きい。

(3) 接触面の摩擦強度の影響

試験結果では、緩衝材の膨潤がほとんど発生していない初期段階で、オーバーパックの上昇が生じる一方、膨潤により大きな圧力が発生する時期にはオーバーパックの鉛直変位は殆ど生じていない。この原因について、緩衝材とオーバーパックや岩盤との接触面強度が関係している可能性を考慮し、摩擦係数と粘着力の検討を行ったが、大きな影響は認められなかった。

(4) 剛性の飽和度依存性の影響

緩衝材と岩盤について剛性の飽和度依存性を考慮した検討を行った。緩衝材について、膨潤の等方性や均質化を考慮する上で重要であるが、本研究で用いた飽和時にポアソン比を 0.5 相当とするモデルについては体積変形を拘束する問題がある。しかしながら、膨潤挙動を試験と比較する上では重要である。また、軟岩の含水に伴う軟化についてもモデル化を検討し、岩盤変形を評価する上で重要であることを確認した。

(5) 物性のばらつきによる影響

岩盤の透水性は膨潤の発生時刻や冠水後の岩盤変形に、接触面の摩擦強度についてはオーバーパックの鉛直変位に影響するが、物性のばらつきに関する影響はあまり大きくない。また、

岩盤や緩衝材の剛性のばらつきについては、剛性と初期拘束圧の大きい岩盤でより大きく、緩衝材についてはオーバーパックの変位量などに強く影響した。ニアフィールドの長期評価において、これらの特性の評価は特に重要である。

3.2 数値解析に用いる要素特性取得のための要素試験

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を目指し、遠心模型試験、数値解析実施した。数値解析実施のため、人工バリアと周辺岩盤（遠心模型試験に用いた岩盤供試体）の要素特性（入力パラメータ）のデータ取得するため、要素試験を実施した。要素試験では、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。以下、要素試験の詳細を述べる。なお、要素試験における供試体の観察写真は別途 6.1.2 に記載する。

3.2.1 取得する各材料の物性値

緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤（初声凝灰岩）に関して、表 3.2.1-1~表 3.2.1-4 に示す規格・基準で要素試験を行い、要素特性を取得した。

表 3.2.1-1 要素特性の一覧表(1)

パラメータ	試験工種	要素試験方法 規格・基準		対象材料		H27年度 実施数量	H28年度 実施数量	H27~H28年度 実施数量
初期条件	土粒子の密度試験	土粒子の密度試験方法	JIS A1202:2009	ベントナイト	クニゲルV1	2	3	5
				ケイ砂	3号 (2mmアンダー)	1	4	5
					5号	1	4	5
				緩衝材	ベントナイト:珪砂 70:30	2	3	5
				埋戻し材	ベントナイト:珪砂 15:85	0	5	5
	周辺岩盤		50	0	50			
	土の粒度試験	土の粒度試験方法	JIS A1203:2009	ベントナイト	クニゲルV1	0	5	5
				ケイ砂	3号 (2mmアンダー)	0	5	5
					5号	0	5	5
	周辺岩盤		30	0	30			
	液性限界・塑性限界	土の液性限界・塑性限界 試験方法	JIS A1205:2009	ベントナイト	クニゲルV1	0	3	3
	湿潤密度試験	土の湿潤密度試験方法	JIS A1225:2009	緩衝材 密度1.5Mg/m ³	ベントナイト:ケイ砂 70:30	15	0	15
				緩衝材 密度1.6Mg/m ³		24	12	36
				緩衝材 密度1.7Mg/m ³		21	15	36
				埋戻し材 密度1.8Mg/m ³	ベントナイト:ケイ砂 15:85	0	25	25
岩石の密度試験方法		JGS 2132-2009	周辺岩盤		43	7	50	

表 3.2.1-2 要素特性の一覧表(2)

パラメータ	試験工種	要素試験方法 規格・基準		対象材料		H27年度 実施数量	H28年度 実施数量	H27～H28年度 実施数量
膨潤評価式	膨潤圧測定	参考文献による Ca型ベントナイト混合土の透水試験方法(その1) 「室内締固め供試体に対する剛性容器を用いた方法」による測定		緩衝材 (1.4～1.7Mg/m ³)	ベントナイト:珪砂 70:30	4	4	8
	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	埋戻材 密度1.8Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 15:85	0	2	2
	陽イオン交換容量	陽イオン交換容量(CEC)の試験方法	粘土ハンドブック 速心沈殿法(Schofield法)	ベントナイト	クニゲルVI	5	5	10
水分特性	保水特性試験	サイクロメータ法	JGS 0151-2009	緩衝材 密度1.6Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 70:30	18	0	18
					排水過程で実施	0	3	3
				埋戻材 密度1.8Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 15:85	0	28	28
					排水過程で実施	0	5	5
		周辺岩盤	吸水過程で実施	38	0	38		
			排水過程で実施	36	0	36		
変水位透水試験	参考文献による 低透水性材料に対する透水試験方法 Ca型ベントナイト混合土の透水試験方法(その1)	参考文献による 堆積岩の圧密現象に着目した透水係数推定の試み		緩衝材 (1.4～1.7Mg/m ³)	膨潤圧測定後に実施	0	4	4
				埋戻材 密度1.8Mg/m ³		0	2	2
				周辺岩盤	2	6	8	

表 3.2.1-3 要素特性の一覧表(3)

パラメータ	試験工種	要素試験方法 規格・基準		対象材料		H27年度 実施数量	H28年度 実施数量	H27～H28年度 実施数量
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 密度1.5Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 70:30	7	1	8
				緩衝材 密度1.6Mg/m ³		14	0	14
				緩衝材 密度1.7Mg/m ³		7	1	8
				埋戻材 密度1.8Mg/m ³	0	14	14	
					周辺岩盤	24	24	48
	比熱測定	断熱走査型比熱測定	(規格なし)	緩衝材 密度1.6Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 70:30	0	5	5
				埋戻材 密度1.8Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 15:85	0	5	5
					周辺岩盤	0	10	10
	熱膨張率測定	熱膨張率測定	ひずみゲージ貼付 による測定	緩衝材 密度1.5Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 70:30	0	1	1
				緩衝材 密度1.6Mg/m ³		0	3	3
緩衝材 密度1.7Mg/m ³				0		3	3	
埋戻材 密度1.8Mg/m ³				0	5	5		
				周辺岩盤	---	5	5	

表 3.2.1-4 要素特性の一覧表(4)

パラメータ	試験工種	要素試験方法 規格・基準		対象材料		H27年度 実施数量	H28年度 実施数量	H27～H28年度 実施数量
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 密度1.5Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 70:30	15	0	15
				緩衝材 密度1.6Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 70:30	24	15	39
				緩衝材 密度1.7Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 70:30	21	18	39
				埋戻材 密度1.8Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 15:85	---	25	25
		岩石の一軸圧縮試験方法	JGS 2521-2009	周辺岩盤		3	0	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 局所変位計(LDT) を用いた変位計測	緩衝材 密度1.6Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 70:30	4	0	4
				緩衝材 密度1.6Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 70:30	---	1	1
				埋戻材 密度1.8Mg/m ³	ベントナイト:珪砂 15:85	---	1	1
三軸CD試験	岩石のCD三軸圧縮試験	JGS 2534-2009	周辺岩盤		飽和状態 4	4	8	
					乾燥状態 ---	4	4	
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	3	5
クリープ特性	排水クリープ試験	参考文献による 体積軟岩における大規模空洞の 掘削時挙動・長期挙動の解析的検討		周辺岩盤		---	3	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	2	5

3.2.2 要素試験の結果

(1) 物理特性

1) 混合材料の物理特性

緩衝材（ベントナイト：ケイ砂 7：3）及び埋戻し材（ベントナイト：ケイ砂 85：15）の作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、図 3.2.2-1～図 3.2.2-3 に粒径加積曲線を示す。

表 3.2.2-1 混合材料の固相の密度

固相の密度 ρ_s (Mg/m^3)	クニゲル V1	ケイ砂 3号 (2mmアンダー)	ケイ砂 5号
個数	5	5	5
平均	2.772	2.635	2.632
中央値	2.779	2.633	2.633
標準偏差	0.028	0.005	0.002

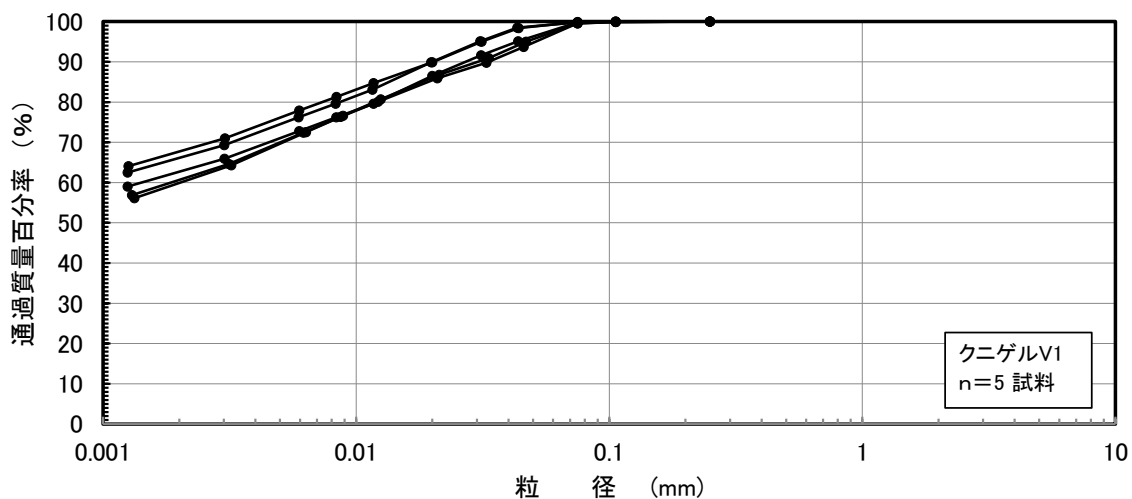


図 3.2.2-1 ベントナイト（クニゲルV1）の粒径加積曲線

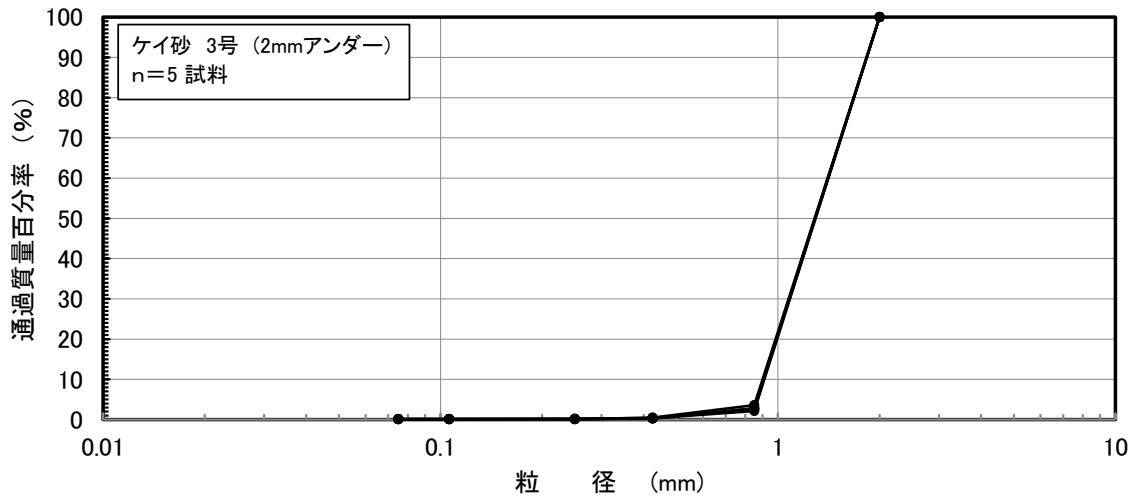


図 3.2.2-2 ケイ砂 3号 (2mm アンダー) の粒径加積曲線

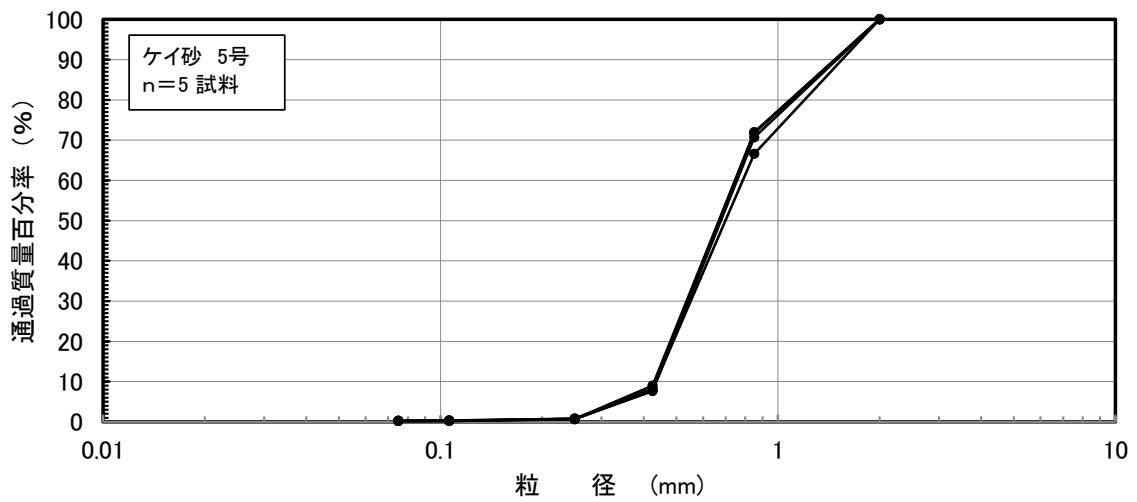


図 3.2.2-3 ケイ砂 5号の粒径加積曲線

表 3.2.2-2 ベントナイト (クニゲル V1) のコンシステンシー特性

クニゲル V1	液性限界 W_L (%)	塑性限界 W_P (%)	塑性指数 I_P
個数	3	3	3
平均	512.3	25.0	487.3

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陽イオン交換容量及びメチレンブルー吸着量の測定結果を表 3.2.2-3～表 3.2.2-4 及び図 3.2.2-4～図 3.2.2-5 に示す。各測定は 10 回ずつ行い、平均値を表中に示した。

表 3.2.2-3 ベントナイトの陽イオン交換容量の測定結果

試料名	定容量(ml)	試料100g当りの溶出イオン量 (meq/100g)					総陽イオン
		Na	Ca	K	Mg		
クニゲルV1-RW	1	100	67.0	47.0	1.5	2.2	117.7
	2	100	68.0	48.9	1.5	2.2	120.7
	3	100	66.5	47.5	1.5	2.2	117.8
	4	100	67.7	47.8	1.5	2.2	119.2
	5	100	67.3	47.6	1.5	2.2	118.6
	6	100	66.6	43.8	1.5	2.0	114.0
	7	100	67.0	42.7	1.5	2.0	113.3
	8	100	67.8	44.1	1.5	2.1	115.4
	9	100	67.9	44.4	1.5	2.1	115.9
	10	100	67.8	43.8	1.5	2.0	115.2
	平均		67.4	45.8	1.5	2.1	116.8

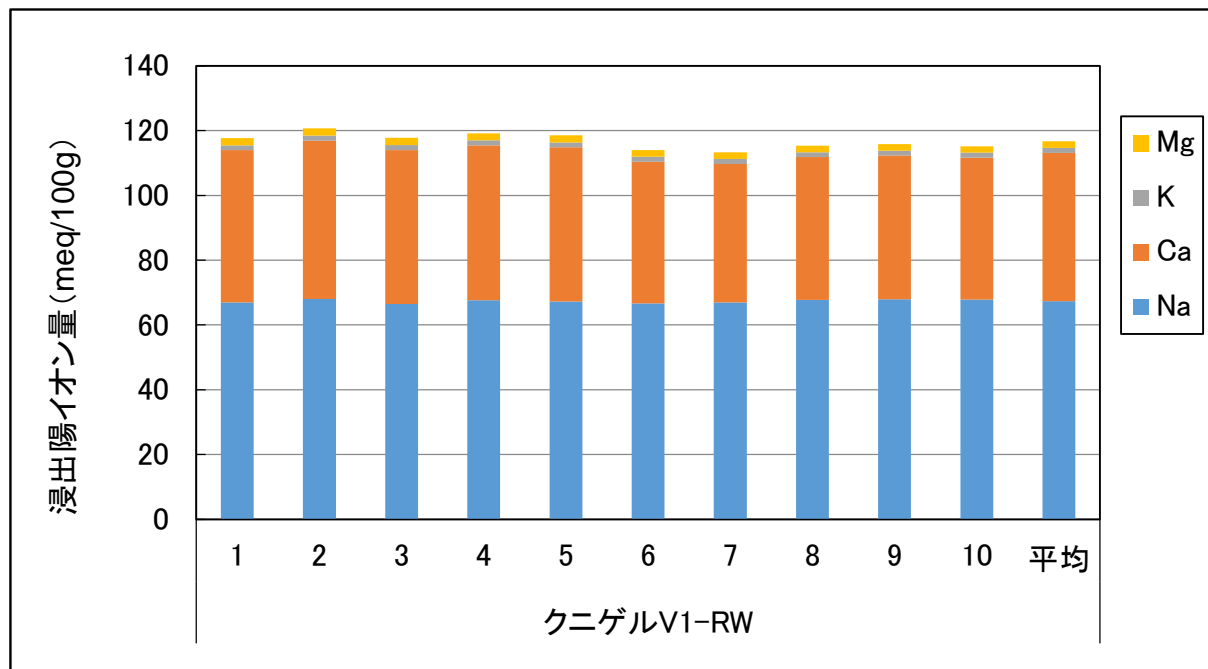


図 3.2.2-4 浸出陽イオン量のまとめ

表 3.2.2-4 ベントナイトのメチレンブルー吸着量の測定結果

試料名		試料重量 (g-dry)	0.01M-MB消費量 (ml)	MB吸着量(mmol/100g)	モンモリロナイト 含有率※ (%)
クニゲルV1-RW	1	0.5000	38.0	76.0	54.3
	2	0.5003	37.0	74.0	52.8
	3	0.5002	38.0	76.0	54.3
	4	0.5000	38.0	76.0	54.3
	5	0.5002	38.0	76.0	54.3
	6	0.5000	39.0	78.0	55.7
	7	0.5003	39.0	78.0	55.7
	8	0.5002	40.0	80.0	57.1
	9	0.5000	39.0	78.0	55.7
	10	0.5002	40.0	80.0	57.1
		平均		-	77.2

※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

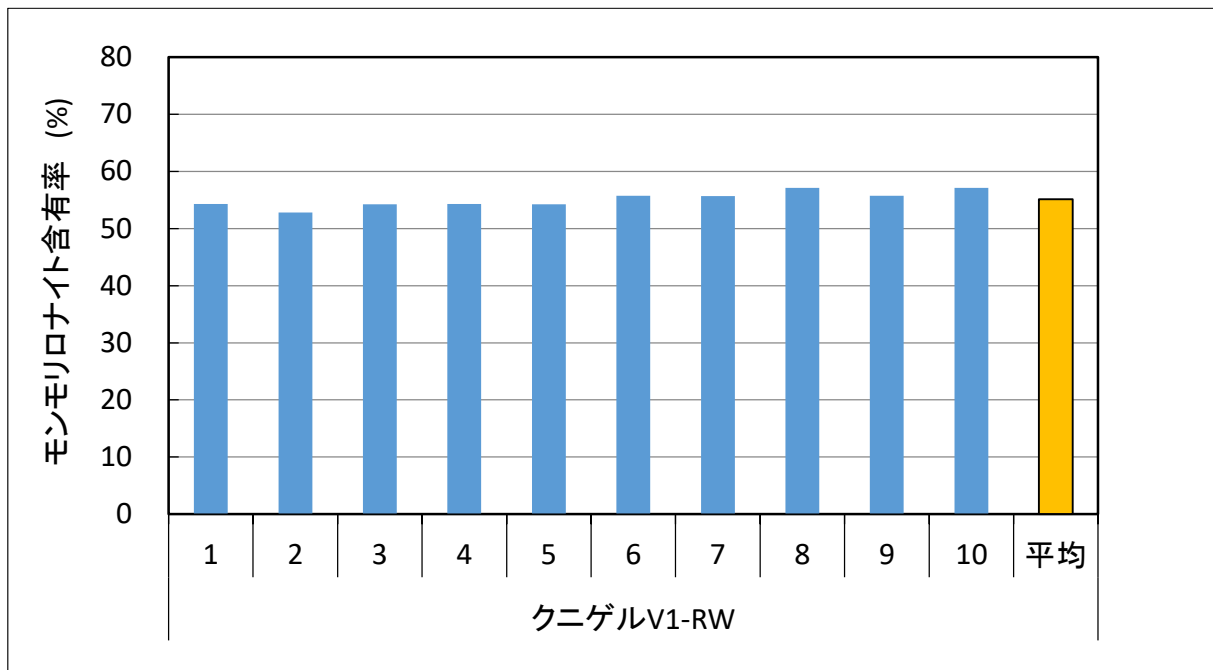


図 3.2.2-5 モンモリロナイト含有率のまとめ

3) 緩衝材及び埋戻し材の物理特性

緩衝材及び埋戻し材の物理特性を表 3.2.2-5 に示す。

表 3.2.2-5 緩衝材及び埋戻し材の物理特性

混合材	緩衝材 クニゲル:ケイ砂 7:3				埋戻し材 クニゲル:ケイ砂 15:85	
	固相の密度 ρ_s (Mg/m ³)	作成時 目標乾燥密度 1.5Mg/m ³	作成時 目標乾燥密度 1.6Mg/m ³	作成時 目標乾燥密度 1.7Mg/m ³	固相の密度 ρ_s (Mg/m ³)	作成時 目標乾燥密度 1.8Mg/m ³
供試体作成個数	5	15	39	39	5	25
平均	2.713	1.494	1.591	1.698	2.646	1.797
中央値	2.708	1.496	1.589	1.695	2.645	1.797
標準偏差	0.011	0.007	0.017	0.017	0.002	0.006

4) 周辺岩盤の物理特性

周辺岩盤の物理特性を表 3.2.2-6 及び図 3.2.2-6 に示す。

表 3.2.2-6 周辺岩盤の物理特性

周辺岩盤	周辺岩盤	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	50	50	50	50	50
平均	2.762	2.057	1.675	0.648	0.393
中央値	2.766	2.057	1.671	0.645	0.392
標準偏差	0.031	0.030	0.038	0.034	0.013

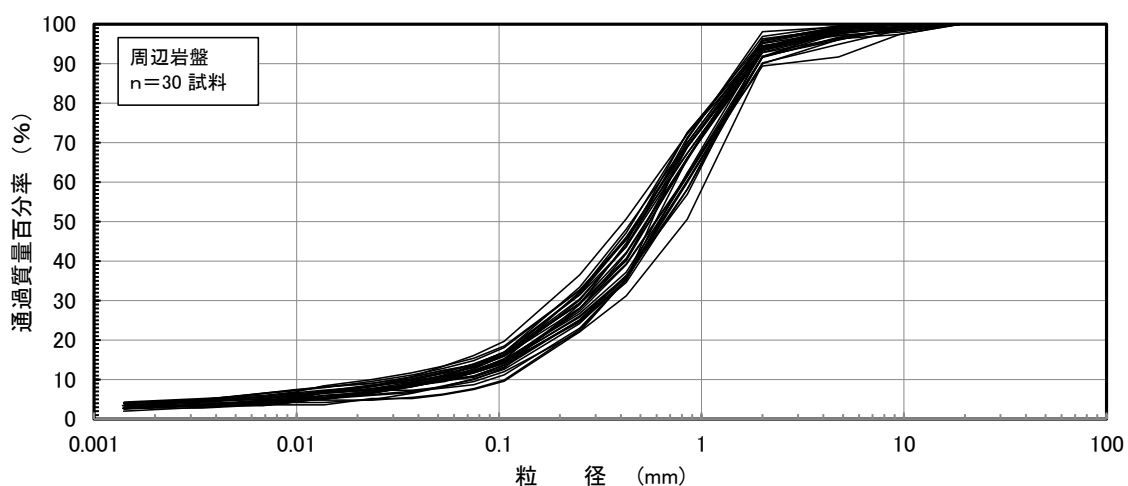


図 3.2.2-6 周辺岩盤の粒径加積曲線

(2) 緩衝材及び埋戻し材の膨潤特性

1) 緩衝材及び埋戻し材の膨潤圧測定

緩衝材及び埋戻し材の膨潤圧測定は、図 3.2.2-7 に示す透水試験装置を用いて測定した。緩衝材は、供試体作成時の乾燥密度条件を 4 種類 (1.4~1.7Mg/m³) に変化させ、埋戻し材は供試体作成時の乾燥密度条件を 1.8Mg/m³ として供試体を作製した。

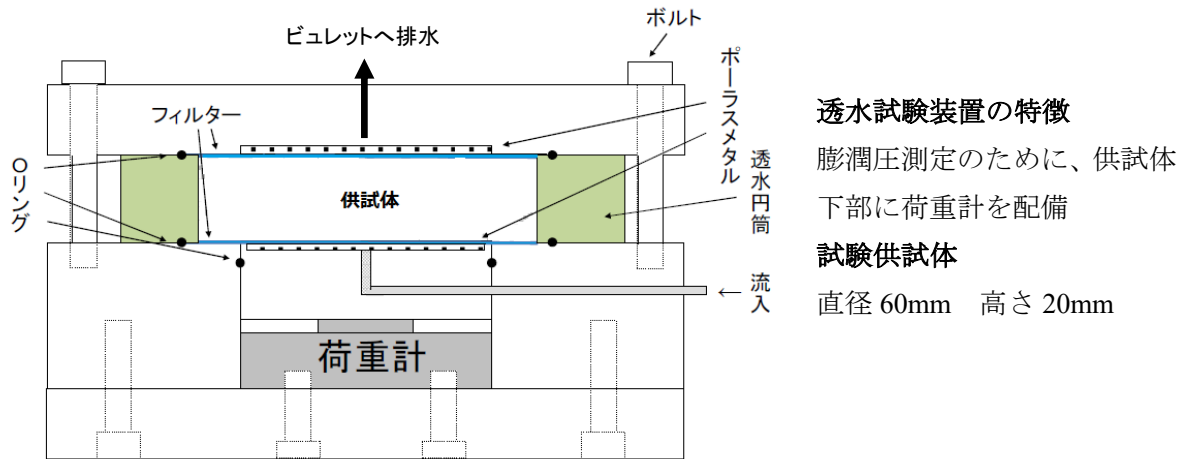


図 3.2.2-7 膨潤圧測定に用いた透水試験装置の概要



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) で計測した

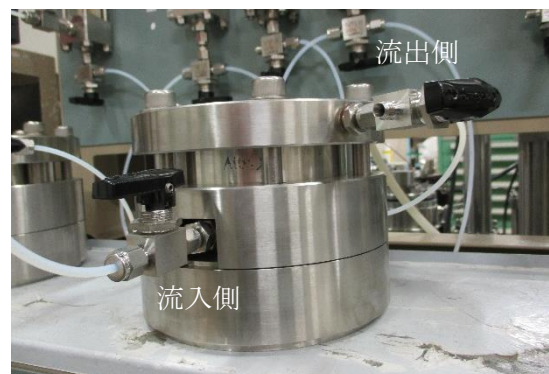


図 3.2.2-8 膨潤圧測定状況 (供試体下部より給水)

所定の乾燥密度条件で作製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 3.2.2-8 参照）を行い、吸水膨張圧力を測定した。なお、給水圧力は、最大でもビュレットの水頭 20(cm)程度とした。吸水膨張圧力が一定値を示した時点において吸水膨張圧力の測定を終了し、緩衝材及び埋戻し材の平衡膨潤圧とした。

図 3.2.2-9 には、供試体作製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し、図 3.2.2-10 には、供試体作製時の乾燥密度と平衡膨潤圧との関係を示す。

図 3.2.2-10 より、供試体作製時の乾燥密度の増加とともに、平衡膨潤圧も増加する傾向が認められた。

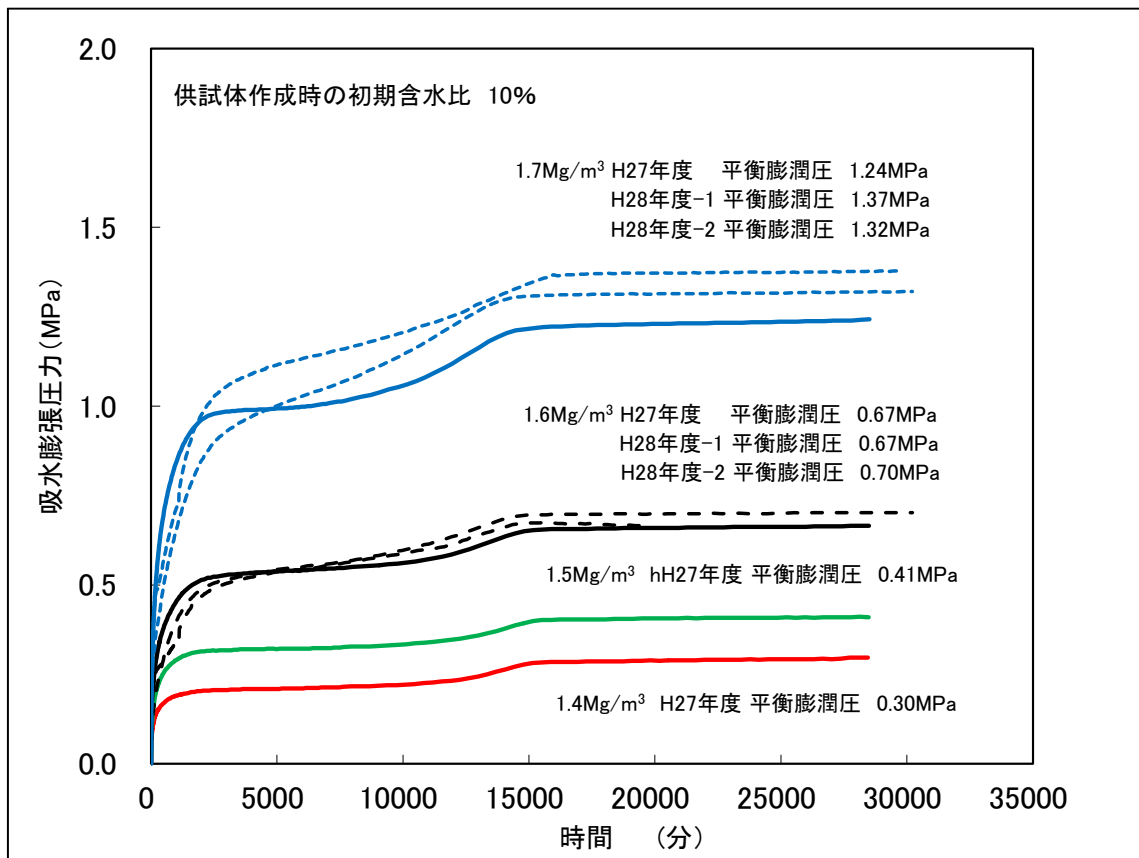


図 3.2.2-9 供試体作製時の乾燥密度と吸水膨張圧力の経時変化

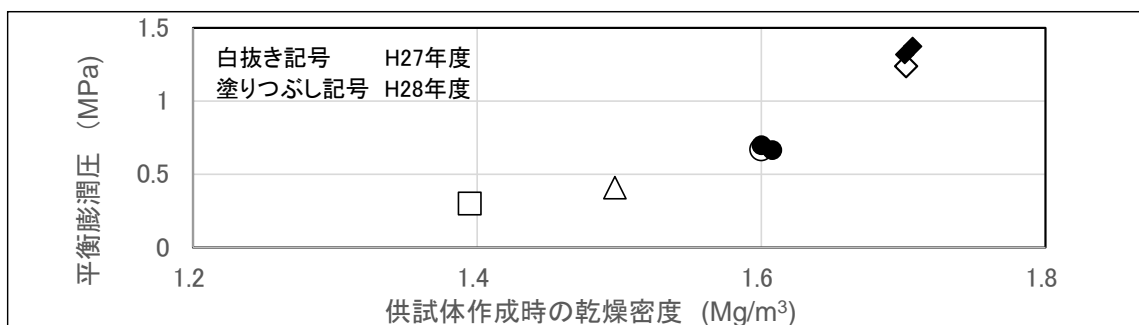


図 3.2.2-10 供試体作製時の乾燥密度と平衡膨潤圧
(供試体作製時の含水比：10%)

図 3.2.2-11 には、埋戻し材の吸水膨張圧力の経時変化を示す。埋戻し材の平衡膨潤圧は、0.14~0.18(MPa) (平均値 0.16MPa) となった。

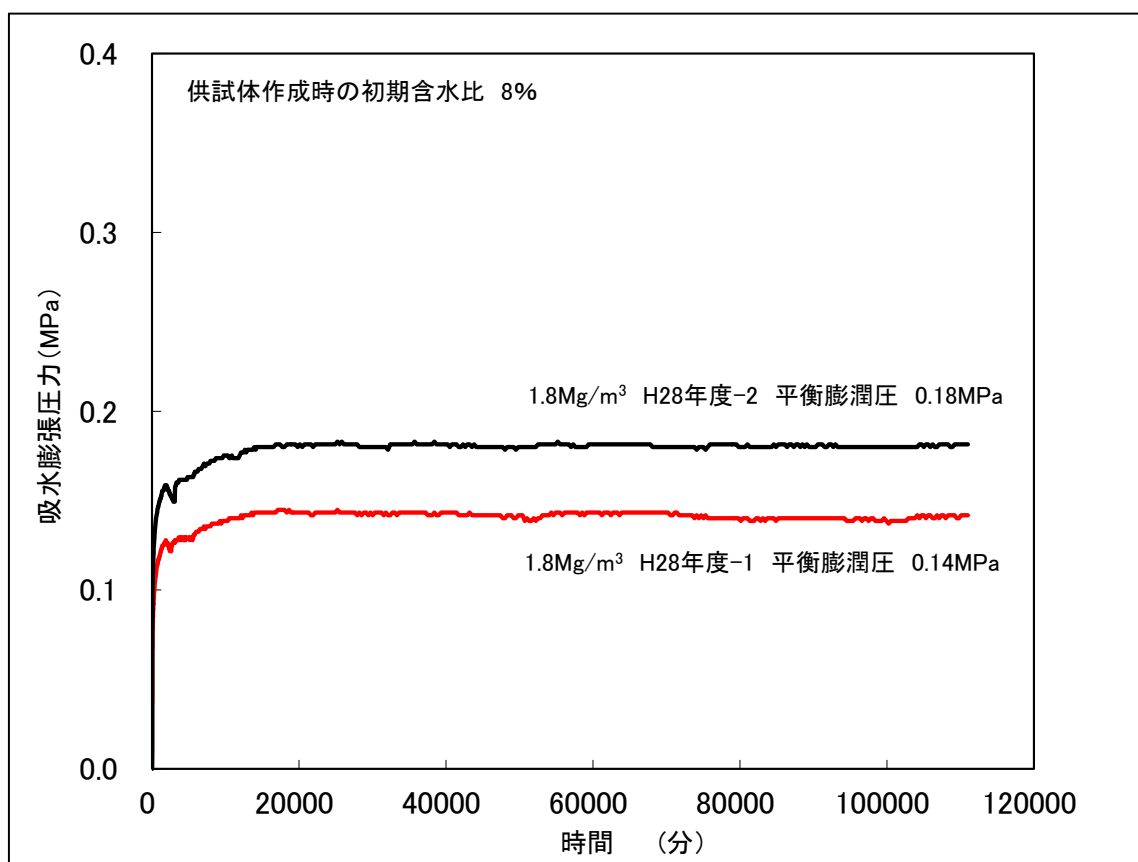


図 3.2.2-11 埋戻し材の吸水膨張圧力の経時変化

表 3.2.2-7 平衡膨潤圧のまとめ (緩衝材及び埋戻し材)

実施年度	試料名	作製時 乾燥密度 (g/cm ³)	初期含水比 (%)	間隙比	平衡膨潤圧 (MPa)	
H27	緩衝材	H27-1	1.40	10.4	0.939	0.30
		H27-1	1.50	10.2	0.807	0.41
		H27-1	1.60	10.0	0.691	0.67
		H27-1	1.70	9.9	0.589	1.24
H28	緩衝材	H28-1	1.61	9.6	0.688	0.67
		H28-1	1.71	9.7	0.590	1.37
		H28-2	1.60	10.0	0.696	0.70
		H28-2	1.70	10.0	0.595	1.32
H28	埋戻し材	H28-1	1.81	7.5	0.462	0.18
		H28-2	1.81	7.5	0.463	0.14

(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 3.2.2-8 に測定プローブの概要を図 3.2.2-13 に示し、熱伝導率測定のための供試体の穿孔状況を図 3.2.2-12 に示す。

表 3.2.2-8 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 φ1×90(mm)を穿孔して、プローブを挿入する。
準拠する規格	ASTM D 5334-92、D 5930-97、IEEE 442-1981 の測定規格に準拠した製品
センサの較正方法	グリセリンの熱伝導率 0.286(W/mK)を測定し較正係数を求める $C = \frac{\lambda_{material}}{\lambda_{measured}}$ $\lambda_{matelal} = \text{較正材料の既知の熱伝導率}$ $\lambda_{measured} = \text{熱針プローブ装置で測定された材料の熱伝導率}$

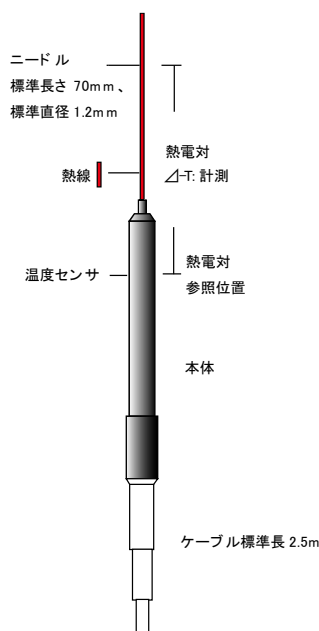
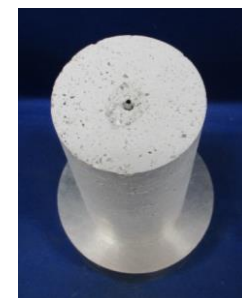


図 3.2.2-13 測定プローブの概要



周辺岩盤



緩衝材

図 3.2.2-12 測定供試体の穿孔状況

熱伝導率の測定時には、グリセリン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：ケイ砂3で混合）を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより作成した。

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) 熱伝導率の測定結果

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、埋戻し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 3.2.2-14 に示す。緩衝材の熱伝導率は、供試体作製時の乾燥密度に関わらず、飽和度の上昇とともに増加する傾向が認められた。また、供試体の乾燥密度による差異は認められなかった。

熱伝導率と飽和度との関係においては、飽和度 20(%)以下では、ほぼ一定値を示すのに対し、飽和度 30(%)を境に、飽和度の上昇とともに熱伝導率が大きくなる傾向が認められることから、低含水比状態と高含水比状態では熱特性に変化が生じるものと考えられる。

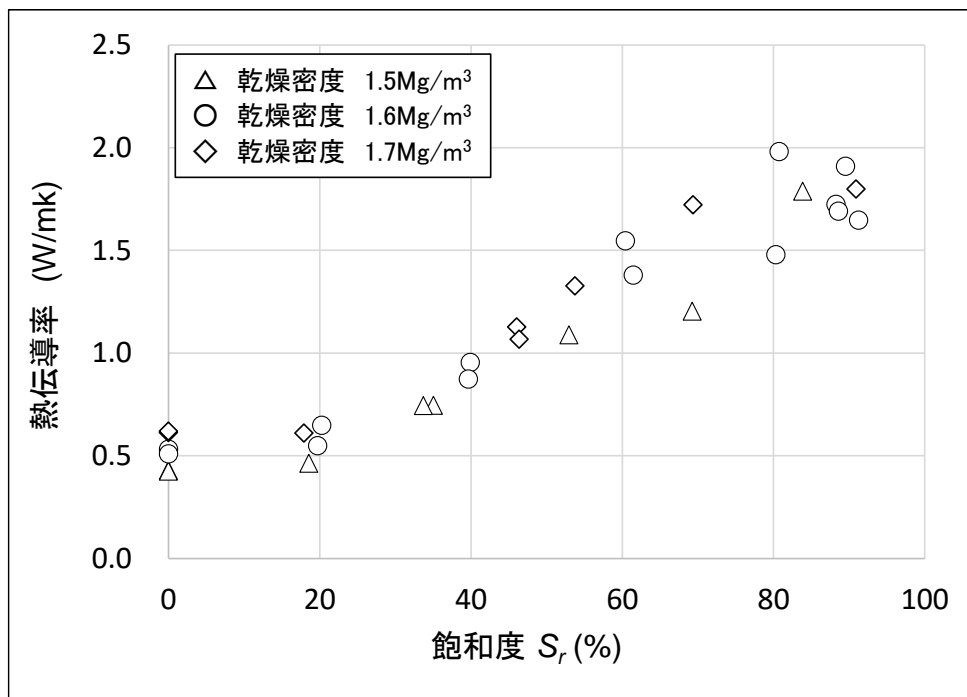


図 3.2.2-14 緩衝材の熱伝導率測定結果 (H27 年度)

埋戻し材の熱伝導率測定結果を図3.2.2-15に示す。熱伝導率と飽和度との関係においては、飽和度20(%)を境に、飽和度の上昇とともに熱伝導率が大きくなる傾向が認められた。

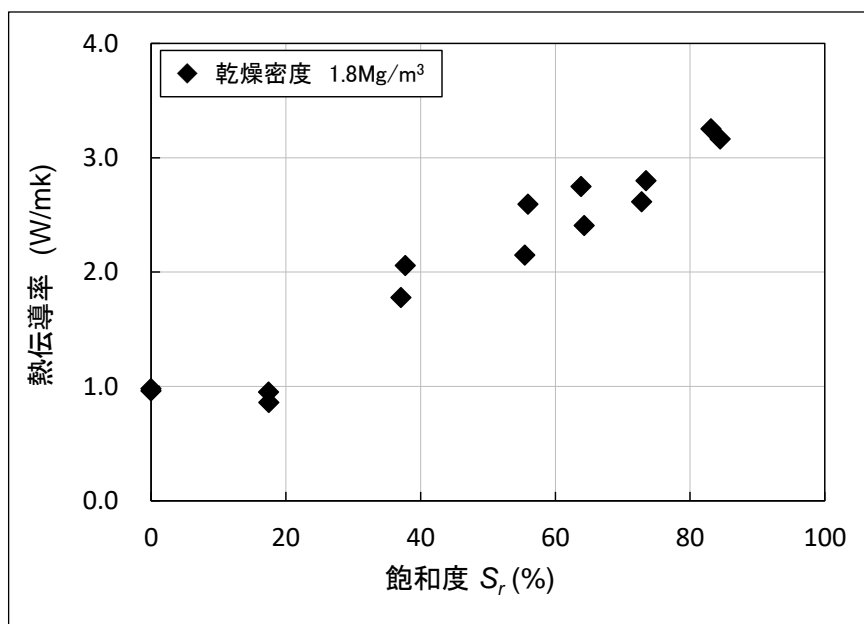


図 3.2.2-15 埋戻し材の熱伝導率測定結果 (H28 年度)

周辺岩盤の熱伝導率測定結果を図 3.2.2-16 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考えられる。

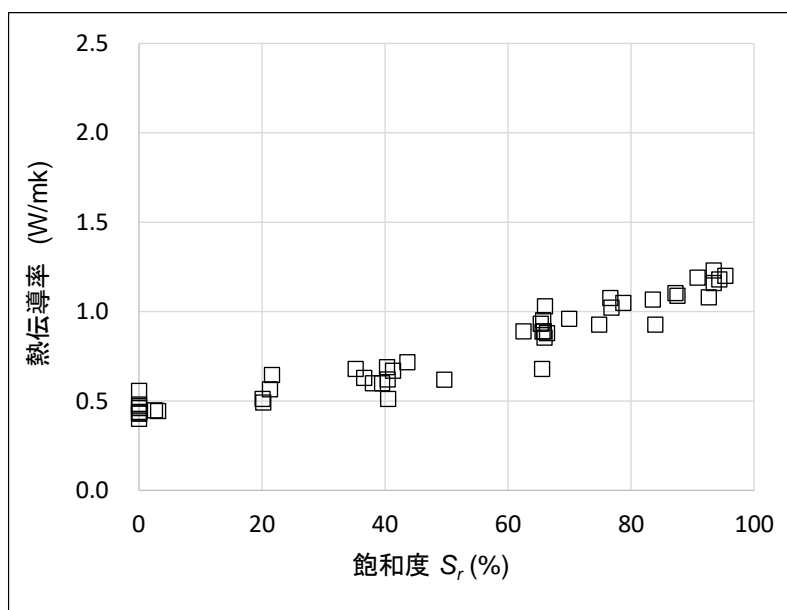


図 3.2.2-16 周辺岩盤の熱伝導率測定結果 (H27 年度、H28 年度)

3) 比熱の測定方法

比熱の測定は、断熱走査型比熱測定装置 SH-3000L(真空理工株式会社製)を用いて実施した。断熱走査型比熱測定装置の諸元を表 3.2.2-9 に、断熱走査型比熱測定装置を図 3.2.2-17 に示す。

表 3.2.2-9 断熱走査型比熱測定装置の諸元

型番	SH-3000L(真空理工株式会社製)
測定温度範囲	-150~250(°C)
熱電対	K
計測方法	供試体を断熱容器に入れて、一定の熱量を与えた際の供試体温度上昇を計測する。
供試体寸法	φ16×H31(mm)、または、紛体試料
特徴	昇温速度が遅く、熱平衡状態に近い速度で精密に測定できる。
測定手法	断熱法(長崎-高木法)を参考とした
装置の検定方法	ニッケルの比熱を測定して過去のデータと比較する

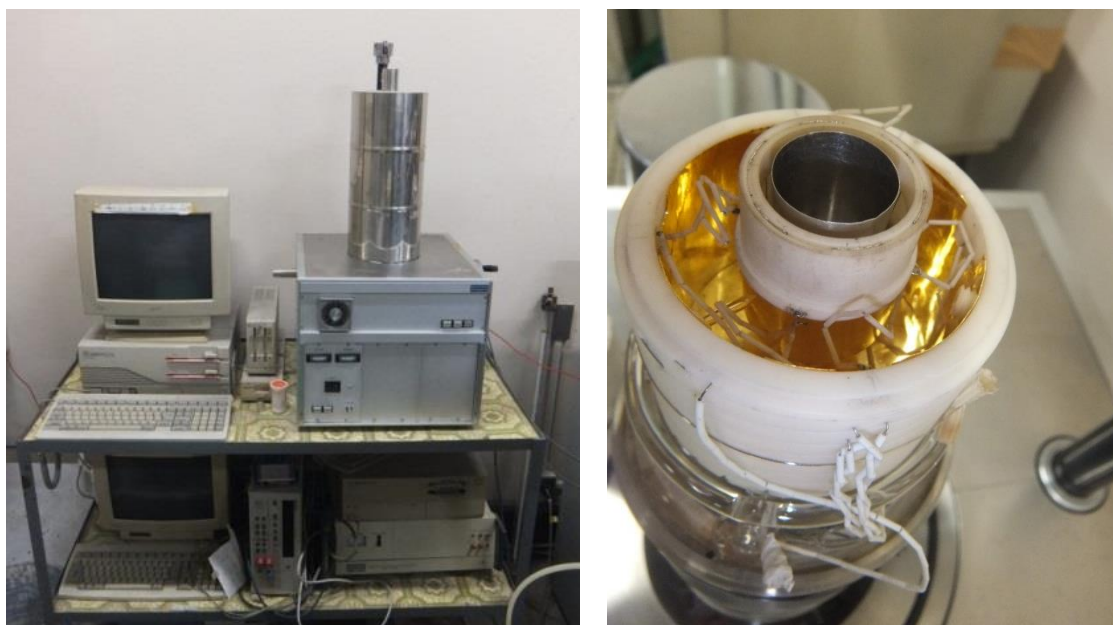


図 3.2.2-17 断熱走査型比熱測定装置

断熱走査型比熱測定装置 SH-3000L は、断熱法(長崎-高木法)による比熱測定が可能であり、昇温速度は遅く熱平衡に近い状態で測定可能である。

比熱の測定は、重さを測定した試料を、試料加熱用の内部ヒーターによって一定電力で加熱し、加熱された試料の温度が消散しないように断熱容器内の試料の温度と断熱容器外の温度を等温に維持する手法で測定した。

試料の温度が $(\theta - 1/2 \cdot \Delta\theta)^\circ\text{C}$ から、 $(\theta + 1/2 \cdot \Delta\theta)^\circ\text{C}$ まで、 $\Delta\theta^\circ\text{C}$ だけ温度上昇するのに

△t 秒の時間を要したとすると、試料の θ℃における定圧比熱 C_pは、次式で表される。

$$C_p = M \frac{w\Delta t}{M\Delta\theta} [J/(g \cdot K)] \quad 3-25$$

ここに、

w : 加熱用の内部ヒータの一定電力 (W)

M : 試料の重さ (g)

θ : 試料の温度(℃)

t : 時間 (s)

緩衝材の供試体は、含水比 10(%)に調整した混合土 (ベントナイト 7 : ケイ砂 3 で混合) を 1.6(Mg/m³) (直径 15mm×高さ 30mm) となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。

埋戻し材の供試体は、含水比 8(%)に調整した混合土 (ベントナイト 15 : ケイ砂 85 で混合) を 1.8(Mg/m³) (直径 15mm×高さ 30mm) の乾燥密度条件となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。

周辺岩盤の供試体は、直径 16(mm)×高さ 31(mm)に成形した。比熱測定に用いた供試体を 図 3.2.2-18 に示す。

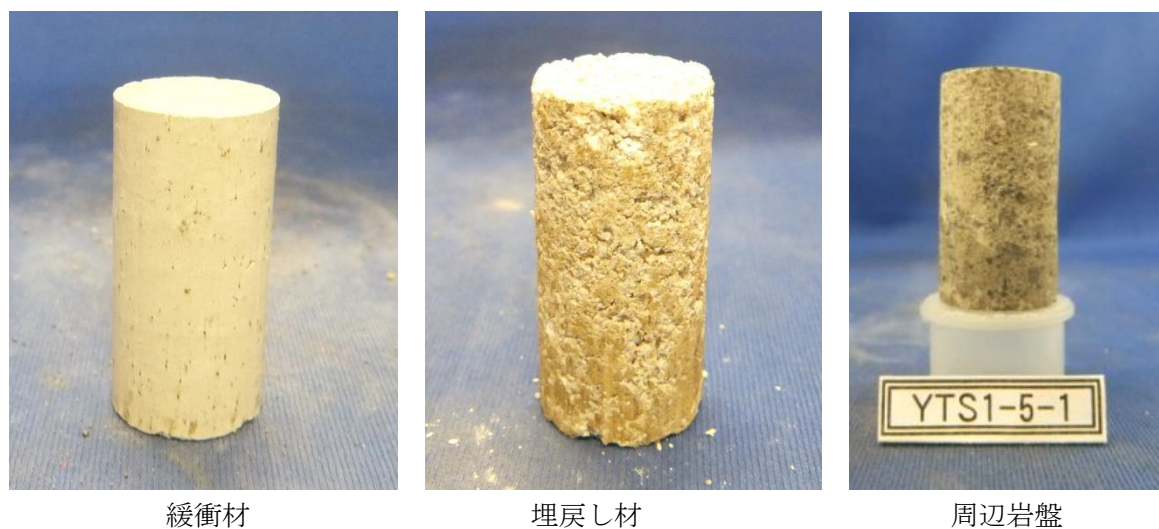


図 3.2.2-18 比熱測定に用いた供試体

比熱測定は、作製した供試体を 110(℃)で炉乾燥した後、常温まで冷まし、断熱走査型比熱測定装置にセットして 25(℃)～100(℃)まで連続的に実施した。

4) 比熱の測定結果

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

緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤の比熱測定のまとめを表 3.2.2-10 に、比熱の測定結果を図 3.2.2-19～図 3.2.2-21 に示す。緩衝材及び埋戻し材の比熱は、 $\Delta\theta=0.5(^{\circ}\text{C})$ で算出したことから、比熱と温度との関係にばらつきが認められるものの、温度の上昇とともにわずかに増加する傾向が認められた。周辺岩盤の比熱においても、比熱と温度との関係にばらつきが認められるものの、温度の上昇とともに増加する傾向が認められた。さらに、測定温度 $50(^{\circ}\text{C})$ までと $50(^{\circ}\text{C})$ 以上では温度の上昇に対する比熱の増加傾向が異なる結果となった。

表 3.2.2-10 比熱測定のまとめ

固相の比熱 (J/gK)	緩衝材 1.6(Mg/m ³)	埋戻し材 1.8(Mg/m ³)	周辺岩盤
個数	5	5	10
平均	0.858	0.820	0.875
標準偏差	0.154	0.151	0.166

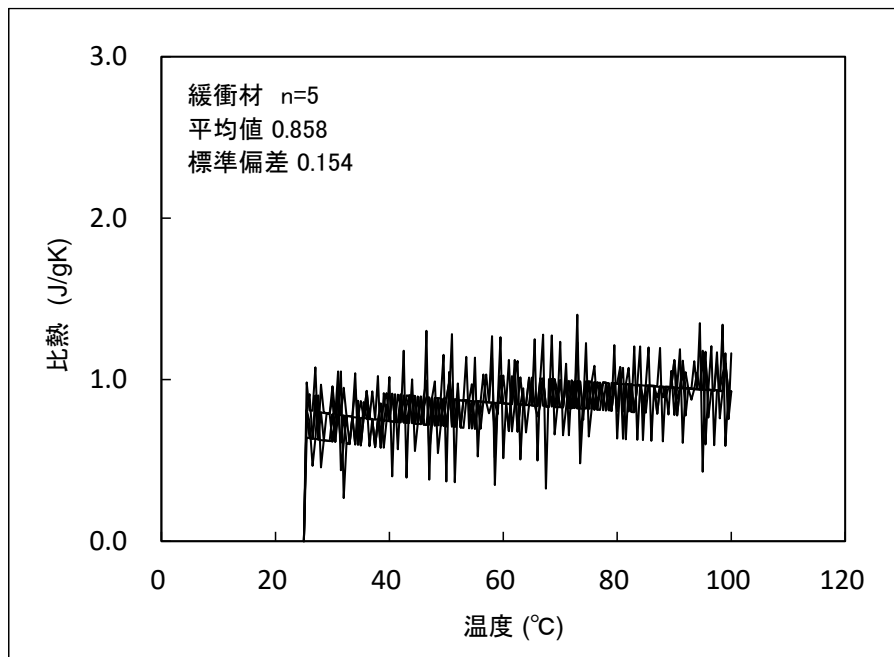


図 3.2.2-19 比熱と温度との関係 (緩衝材 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$)

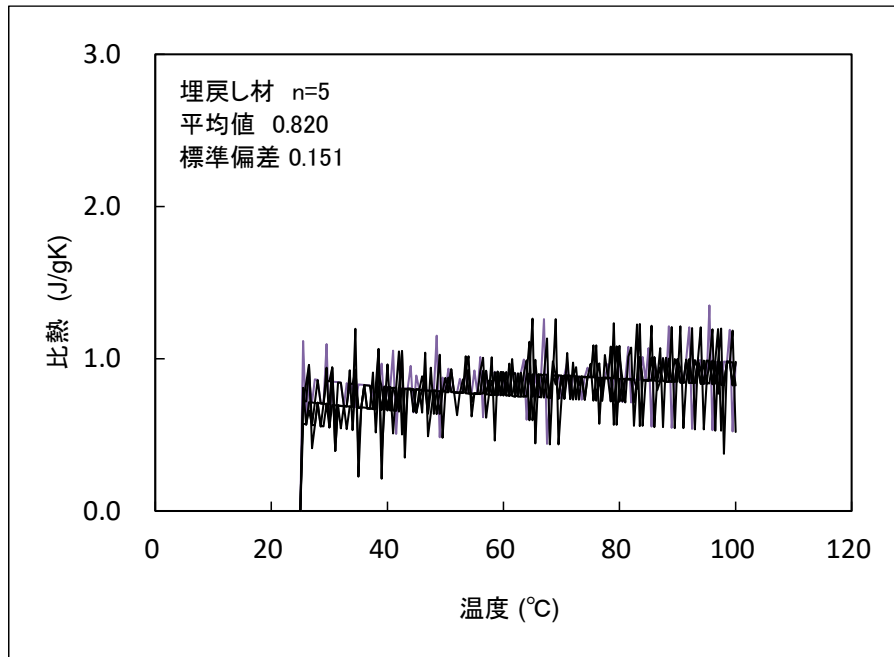


図 3.2.2-20 比熱と温度との関係 (埋戻し材 $\rho_d=1.8\text{Mg/m}^3$)

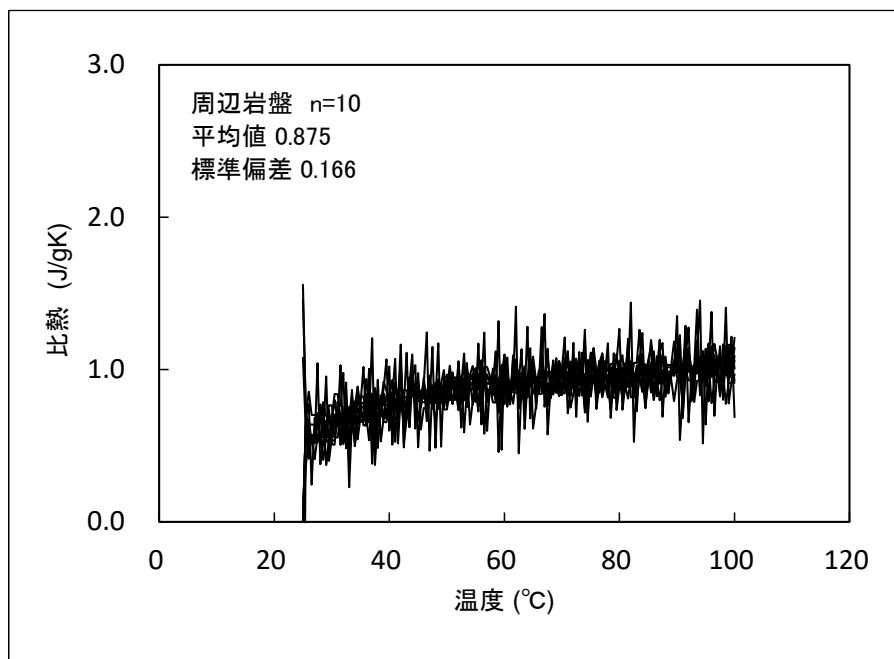


図 3.2.2-21 比熱と温度との関係 (周辺岩盤)

5) 熱膨張率の測定方法

熱膨張率の測定は、炉乾燥した供試体にひずみゲージを貼付し、供試体を恒温槽内で加熱して測定する手法とした。

表 3.2.2-11 熱膨張率測定 of 諸元

ひずみゲージ	高温用(QFLA-30)(東京測器研究所製)
測定温度範囲	室温～90(°C)
計測方法	供試体を恒温槽内で加熱し、加熱中の供試体のひずみと温度を測定する
供試体寸法	φ50(mm)×H100(mm)
ゲージの温度補正方法	「温度が変化する条件下における岩盤内部のひずみ計測結果の補正」[15]を参考とした
有効性の確認	SS400 にひずみゲージを貼付し、ゲージ補正の有効性を確認した

緩衝材の熱膨張率測定は、1.5、1.6、1.7(Mg/m³)の3種類の乾燥密度条件で作製した供試体を用いて測定した。供試体は、含水比10(%)に調整した混合土(ベントナイト7:ケイ砂3で混合)を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。

埋戻し材の熱膨張率測定は、1.8(Mg/m³)の乾燥密度条件で作製した供試体を用いて測定した。供試体は、含水比8%に調整した混合土(ベントナイト15:ケイ砂85で混合)を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。周辺岩盤は、直径50(mm)×高さ100(mm)に成形した。作製した供試体を110(°C)で炉乾燥し、常温まで冷ました後、対向する2ヶ所にひずみゲージを貼付して測定供試体(図3.2.2-22参照)とした。

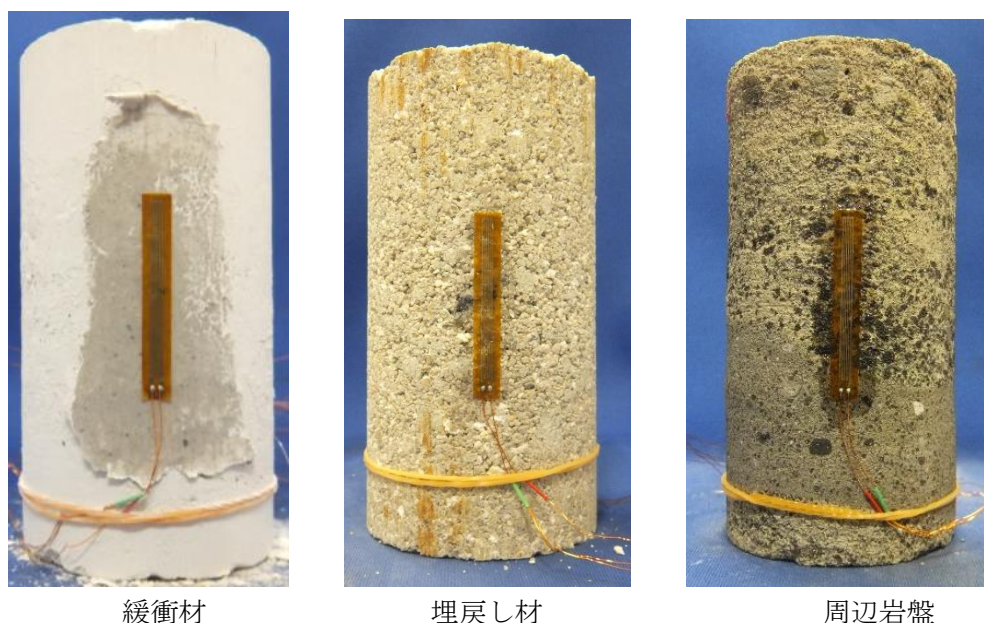


図 3.2.2-22 ひずみゲージを貼付した供試体

6) 熱膨張率の測定結果

ひずみゲージ法により測定した平均熱膨張係数と測定温度の関係をとりまとめ、緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤の熱膨張率特性とした。緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤の熱膨張率のまとめを表 3.2.2-12 に、熱膨張率の測定結果を図 3.2.2-23~図 3.2.2-27 に示す。緩衝材及び埋戻し材の平均熱膨張係数は、40(°C)程度まで増加する傾向が認められ、その後温度の上昇とともに小さくなり、収束する傾向が認められた。周辺岩盤の平均熱膨張係数は、温度の上昇とともに小さくなる傾向が認められた。

表 3.2.2-12 熱膨張率測定のみまとめ

	緩衝材			埋戻し材	周辺岩盤
	1.5(Mg/m ³)	1.6(Mg/m ³)	1.7(Mg/m ³)	1.8(Mg/m ³)	
個数	1	3	3	5	5
平均熱膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)	23.3	20.7	15.8	12.4	7.61

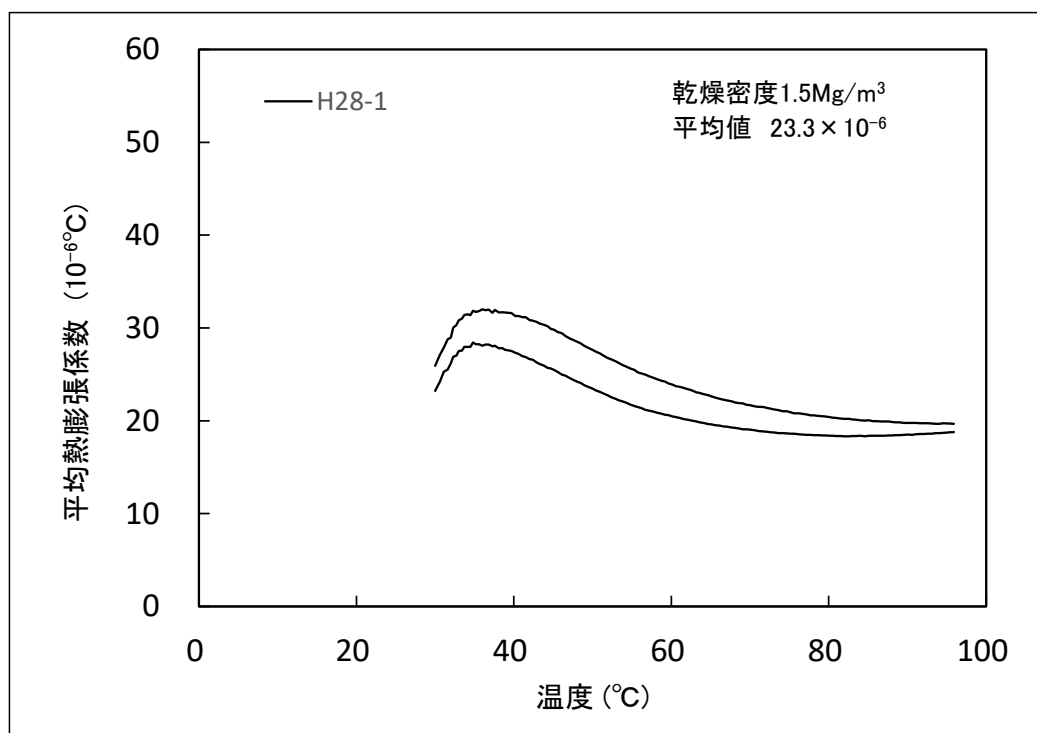


図 3.2.2-23 平均熱膨張係数と温度との関係 (緩衝材 $\rho_d=1.5\text{Mg/m}^3$)

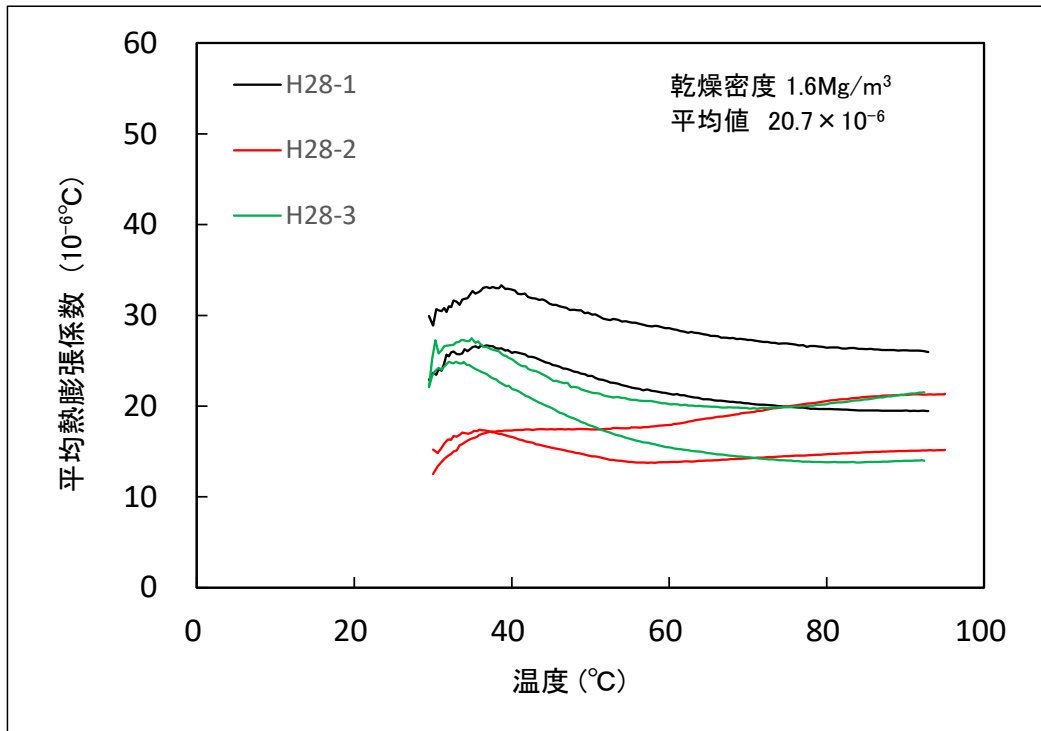


図 3.2.2-24 平均熱膨張係数と温度との関係 (緩衝材 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$)

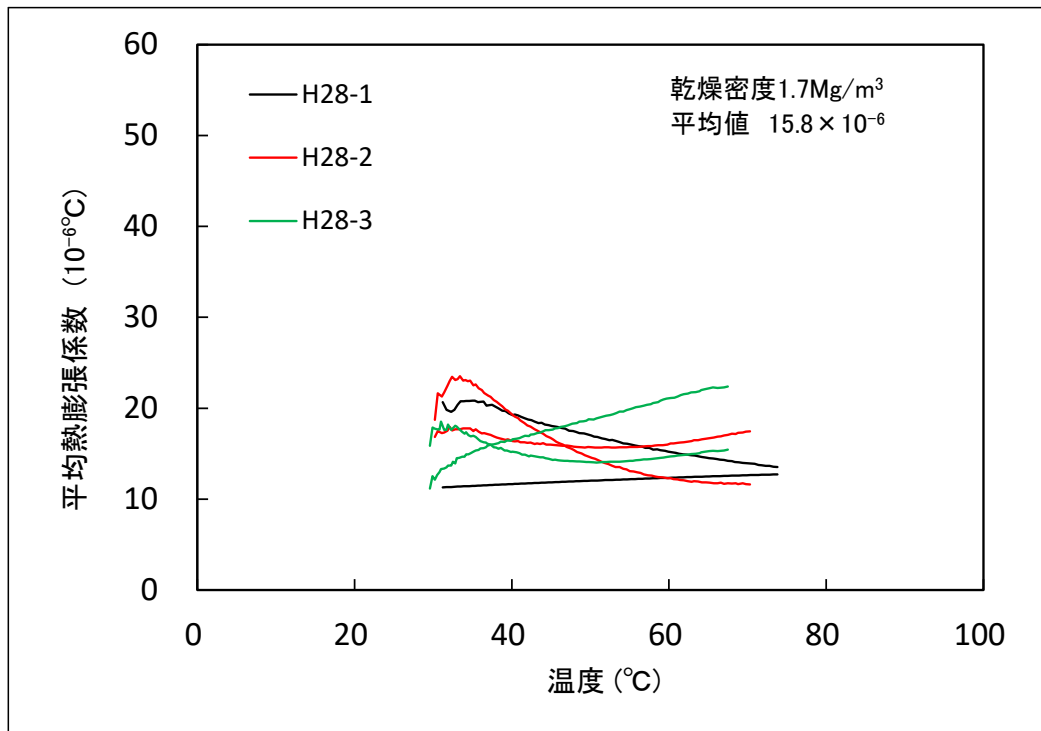


図 3.2.2-25 平均熱膨張係数と温度との関係 (緩衝材 $\rho_d=1.7\text{Mg/m}^3$)

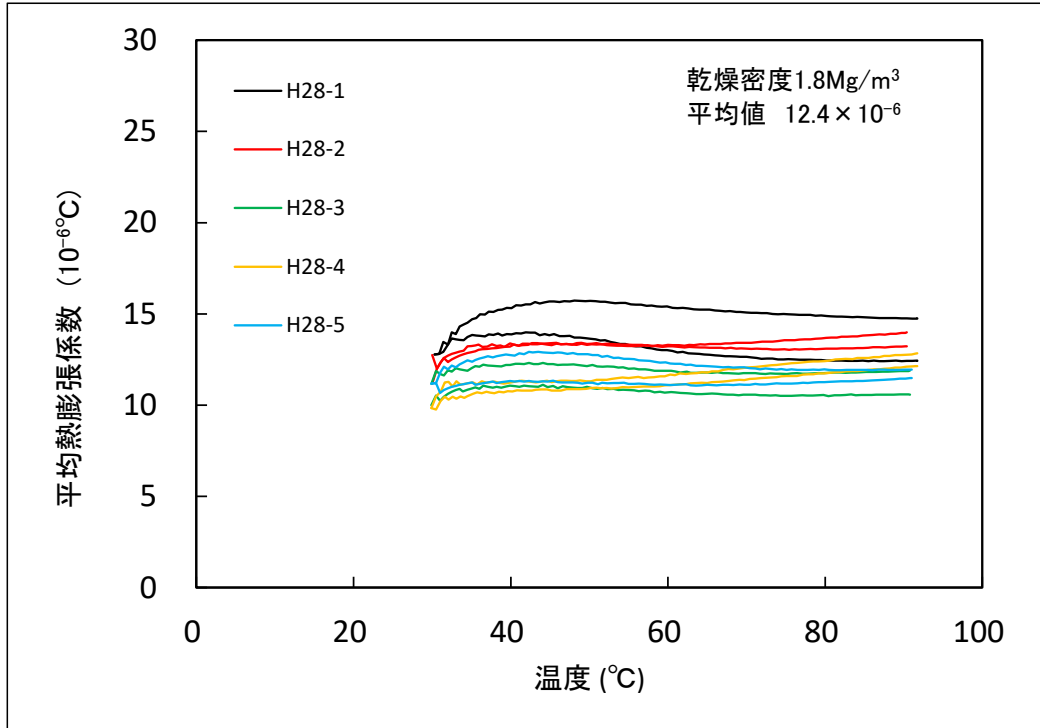


図 3.2.2-26 平均熱膨張係数と温度との関係 (埋戻し材 $\rho_d=1.8 \text{ Mg/m}^3$)

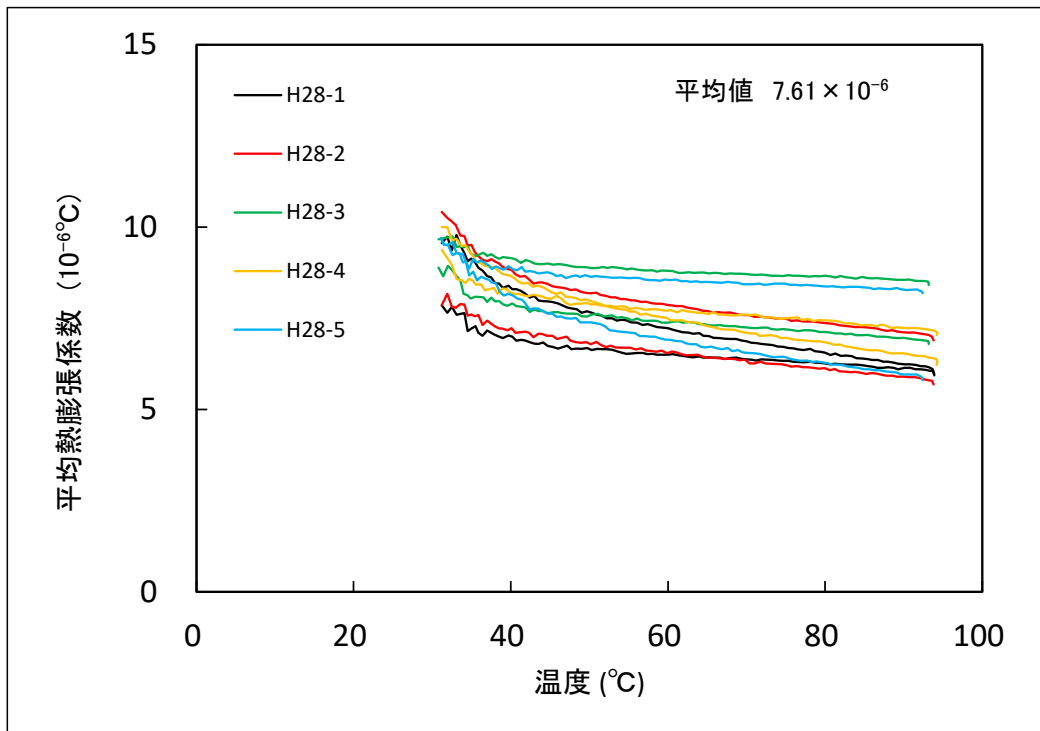


図 3.2.2-27 平均熱膨張係数と温度との関係 (周辺岩盤)

(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 社製 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 3.2.2-13 に恒温槽及びサイクロメータを図 3.2.2-28 に示す。

表 3.2.2-13 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°C 0.1°C単位設定
測定センサ	チルドミラー露点センサ 赤外線サンプル温度センサ



図 3.2.2-28 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、 $1.6(\text{Mg}/\text{m}^3)$ の乾燥密度条件で作製した供試体を用いて測定した。供試体（図 3.2.2-29 参照）は、所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト 7：ケイ砂 3 で混合）を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。



図 3.2.2-29 作製した緩衝材供試体(直径 35mm×高さ 4mm程度)

また、排水過程の水分特性を取得する目的から、 $1.6(\text{Mg}/\text{m}^3)$ の乾燥密度条件で作製した供試体を強制飽和させた後、1 辺 15(mm)×高さ 5(mm)程度に成形した飽和供試体を作製した。排水過程の水分特性は、供試体を気中で乾燥（乾燥時間調整）させ、任意の水分量に調整した後に測定した。



作製した緩衝材供試体(1 辺 15mm×高さ 5mm程度)

緩衝材の保水特性は、 $1.8(\text{Mg}/\text{m}^3)$ の乾燥密度条件で作製した供試体を用いて測定した。供試体（参照）は、所定の含水比に調整した混合土（ベントナイト 15：ケイ砂 85 で混合）を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。緩衝材と同じく、排水過程の水分特性は、 $1.8(\text{Mg}/\text{m}^3)$ の乾燥密度条件で作製した飽和度の十分高い試料を気中で乾燥（乾燥時間を調整）させ、任意の水分量に調整した後に測定した。



作製した埋戻し材供試体(直径 32mm×高さ 4mm程度)

周辺岩盤の保水特性は、図 3.2.2-30 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 $4(\text{mm})$ 程度にカットして作製した。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 $110(^{\circ}\text{C})$ 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量に調整を実施した。吸水過程による飽和度調整では、 $110(^{\circ}\text{C})$ 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。



図 3.2.2-30 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 3-26～3-28 により回帰を行った。

$$S_e = \left\{ 1 + (\alpha h)^n \right\}^{-m} \quad 3-26$$

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad 3-27$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad 3-28$$

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)

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

緩衝材の保水特性を図 3.2.2-31～図 3.2.2-32 に、埋戻し材の保水特性を図 3.2.2-33～図 3.2.2-34 に、周辺岩盤の保水特性を図 3.2.2-35～図 3.2.2-36 に示す。緩衝材、埋戻し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、飽和度 S_r が低い領域で回帰式と測定結果にかい離が認められた。これは、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。

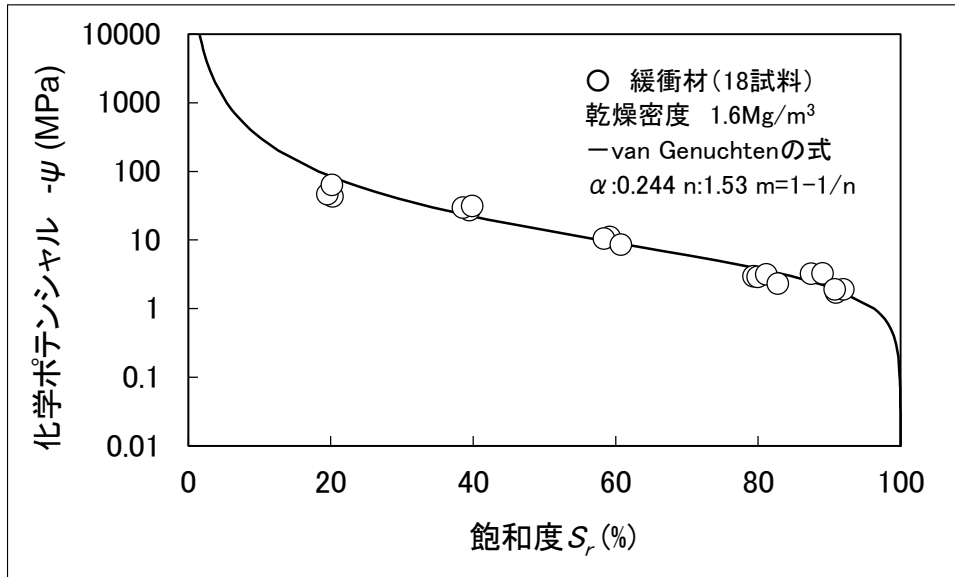


図 3.2.2-31 緩衝材の保水特性（静的締固めによる供試体作製）

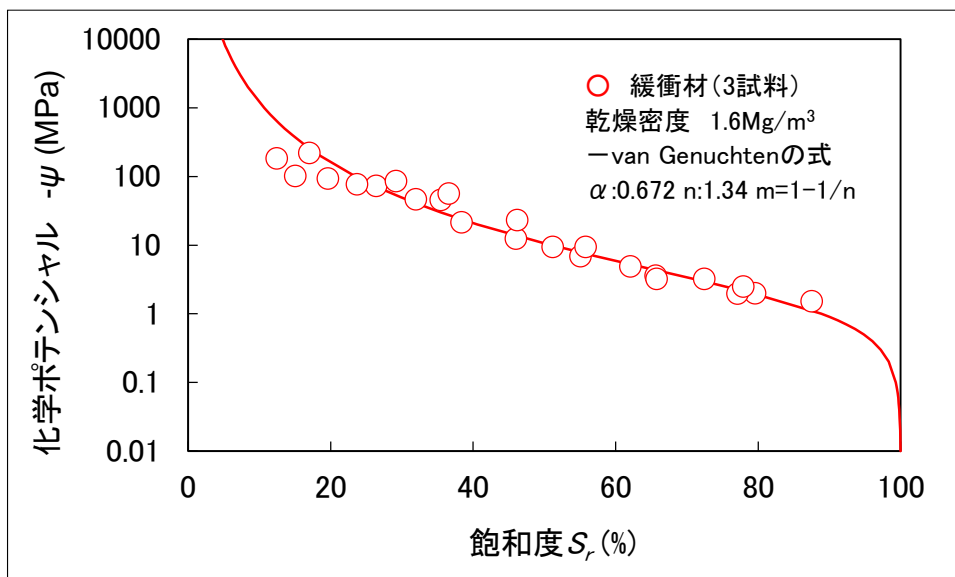


図 3.2.2-32 緩衝材の保水特性（排水過程）

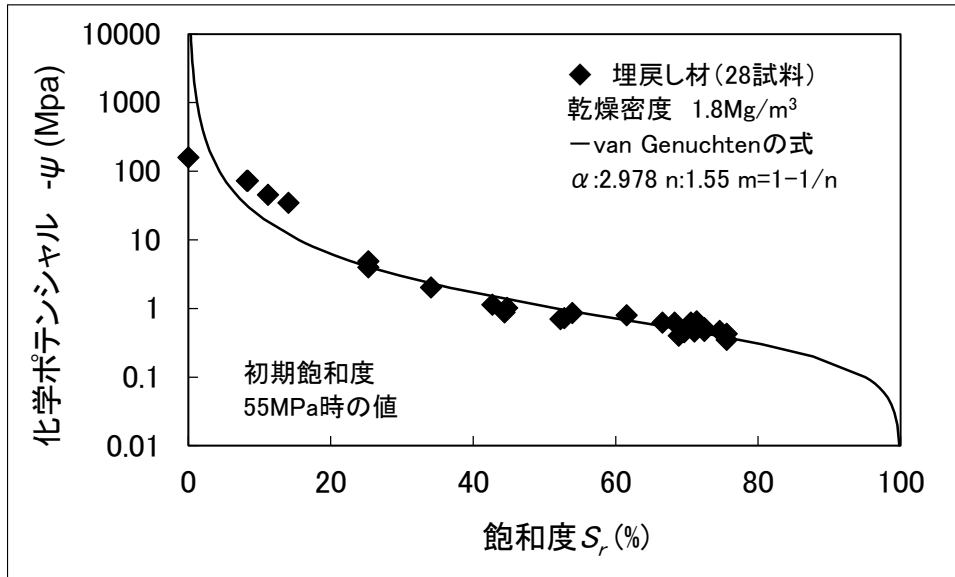


図 3.2.2-33 埋戻し材の保水特性（静的締固めによる供試体作製）

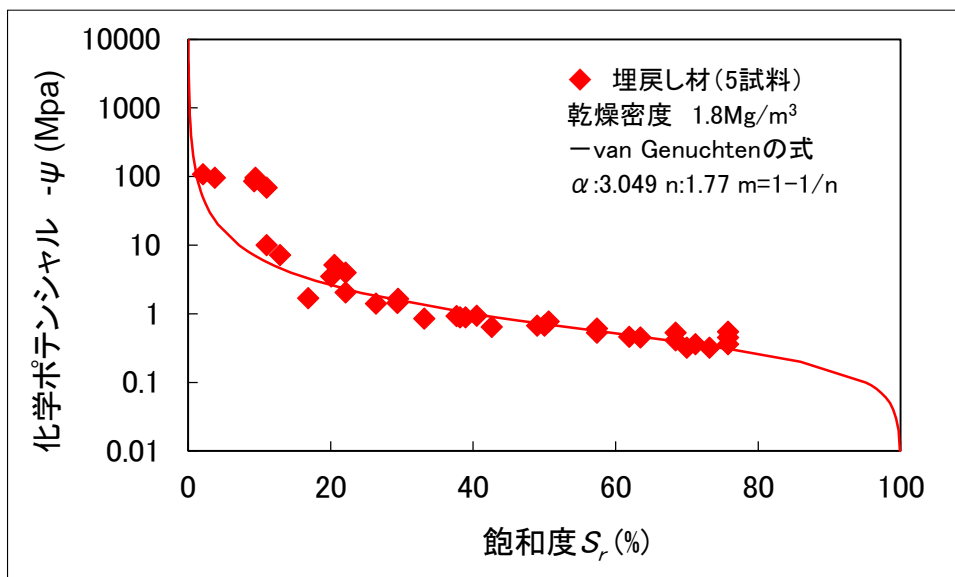


図 3.2.2-34 埋戻し材の保水特性（排水過程）

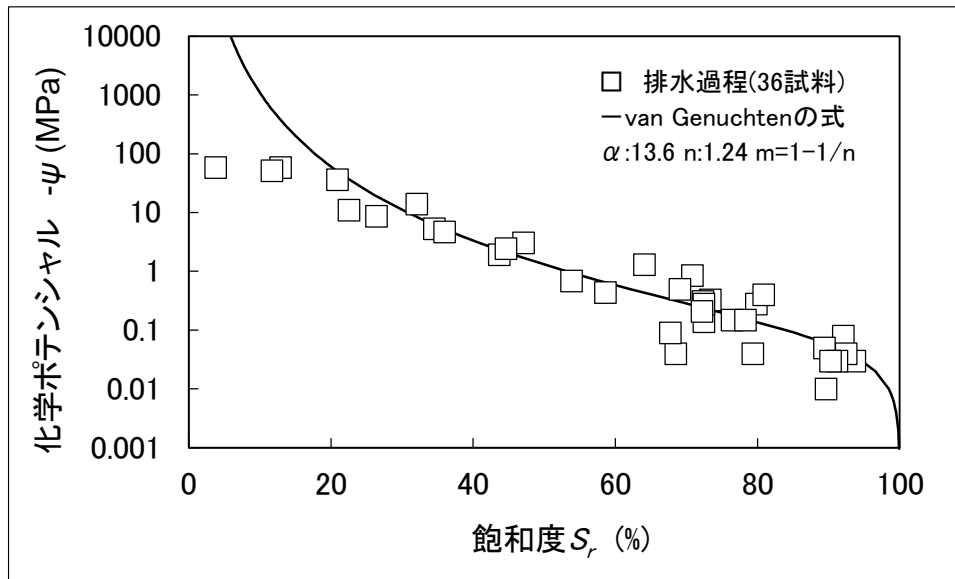


図 3.2.2-35 周辺岩盤の保水特性（排水過程）

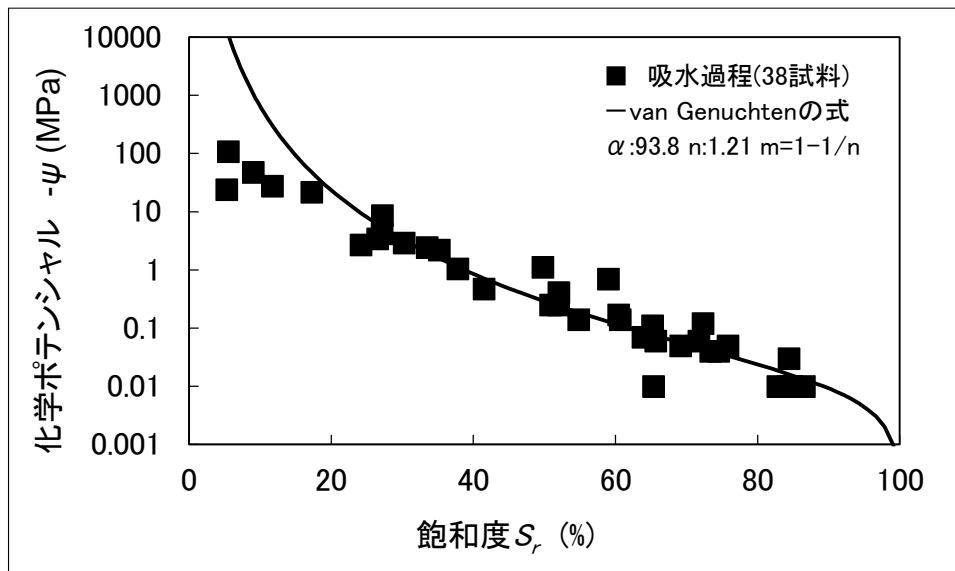


図 3.2.2-36 周辺岩盤の保水特性（吸水過程）透水特性

(5) 透水特性

1) 透水係数の測定方法

緩衝材及び埋戻し材の透水試験は、電力中央研究所報告 Ca 型ベントナイト混合土の透水試験方法（その1）「室内締め供試体に対する剛性容器を用いた方法」による測定手法を参考に、図 3.2.2-37～図 3.2.2-38 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、以下の式に示す変水位透水試験の式（低透水性材料に対する透水試験方法 JGS 基準案）を用いて算出した。

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

ここに、

K_t : T(°C)における透水係数 (m/s)

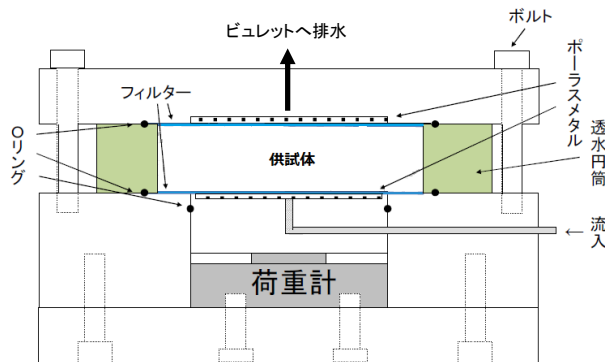
a_{in} : 流入側のビュレットの断面積 (cm²)

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 3.2.2-37 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 3.2.2-38 変水位透水試験装置

2) 緩衝材及び埋戻し材の給水過程

緩衝材の給水過程においては、所定の乾燥密度条件で作製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。供試体作製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を目安として、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 3.2.2-39～図 3.2.2-40 には、吸水量と経過時間 (\sqrt{t}) の関係を示す。

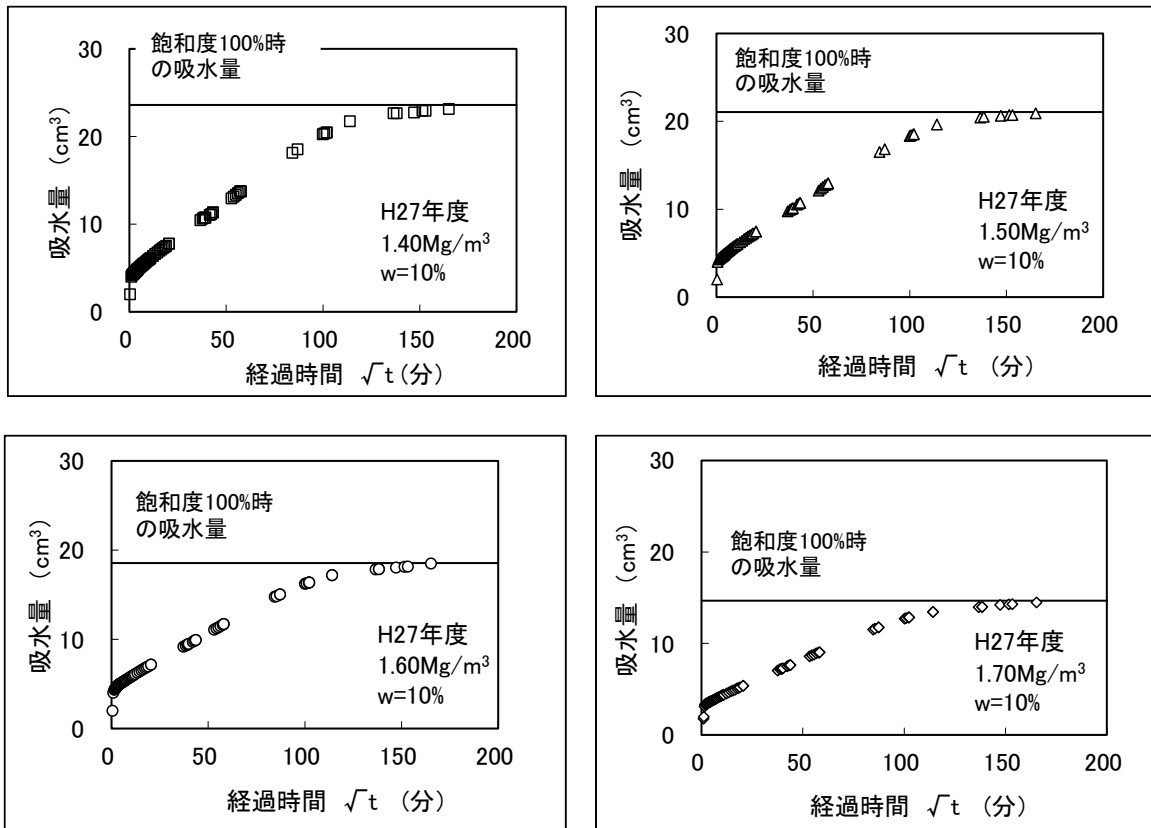


図 3.2.2-39 吸水量と経過時間の関係 (緩衝材 : H27 年度)

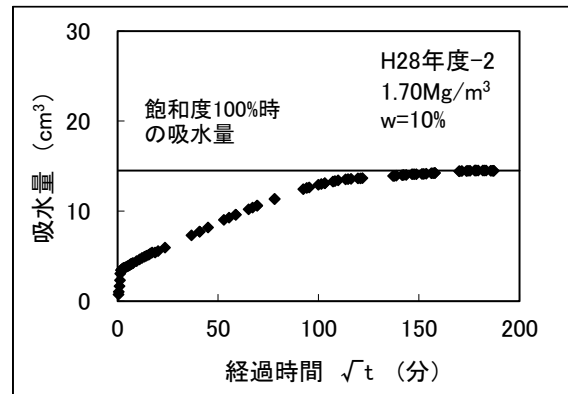
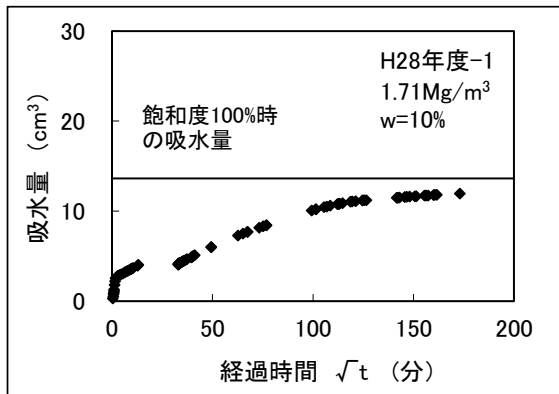
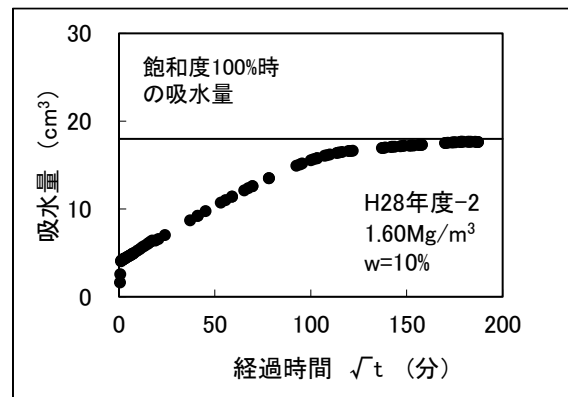
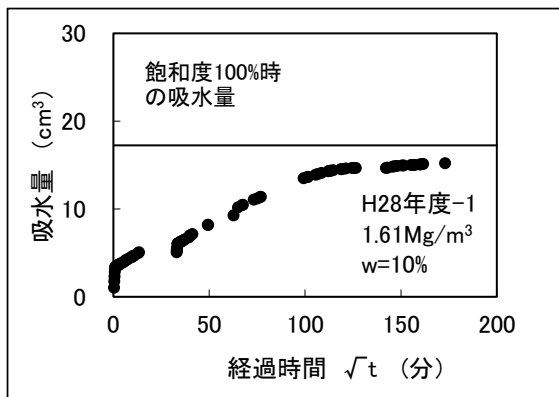


図 3.2.2-40 吸水量と経過時間の関係 (緩衝材 : H28 年度)

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との関係を求めた。図 3.2.2-41～図 3.2.2-44 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。

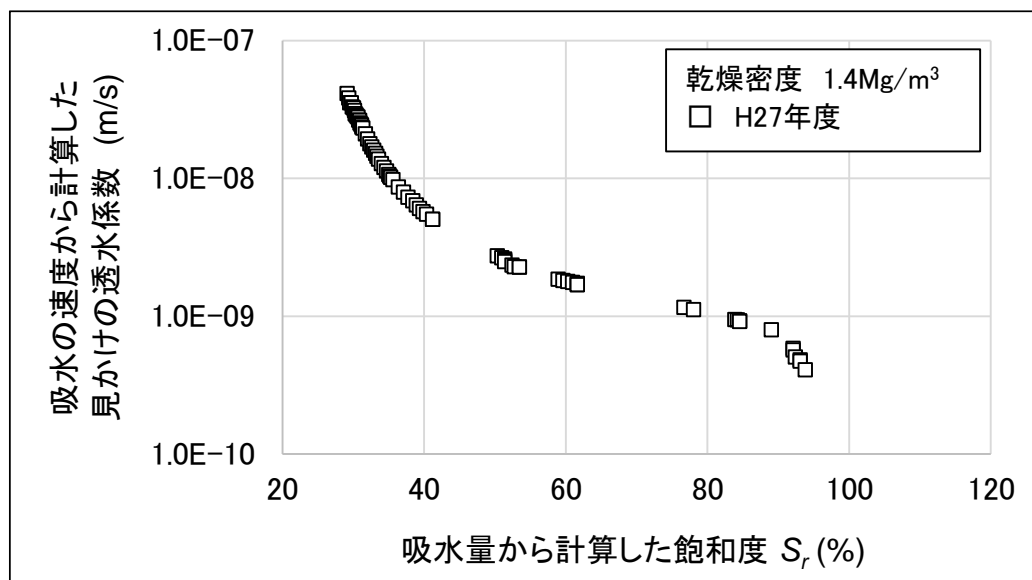


図 3.2.2-41 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係（緩衝材）

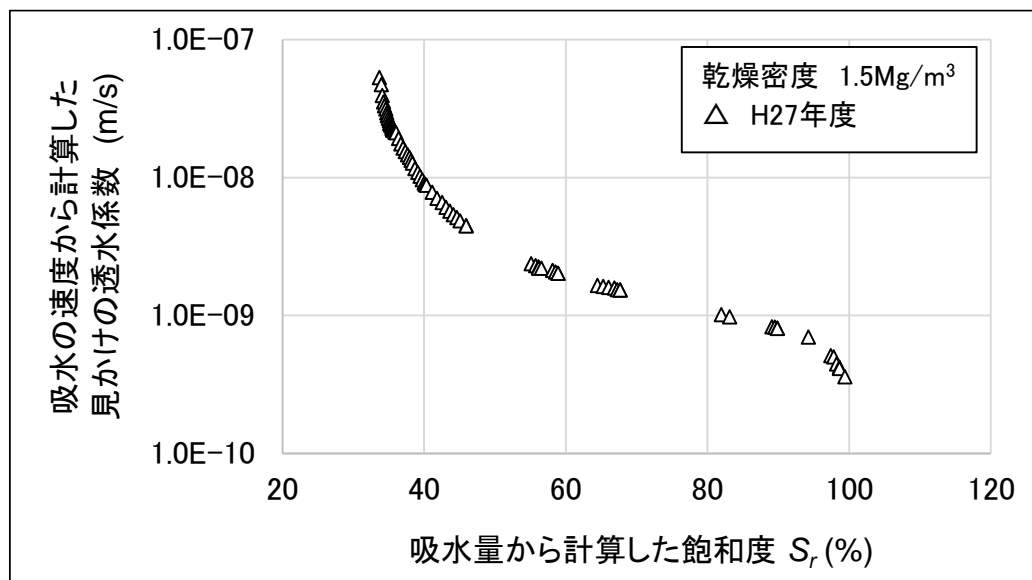


図 3.2.2-42 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係（緩衝材）

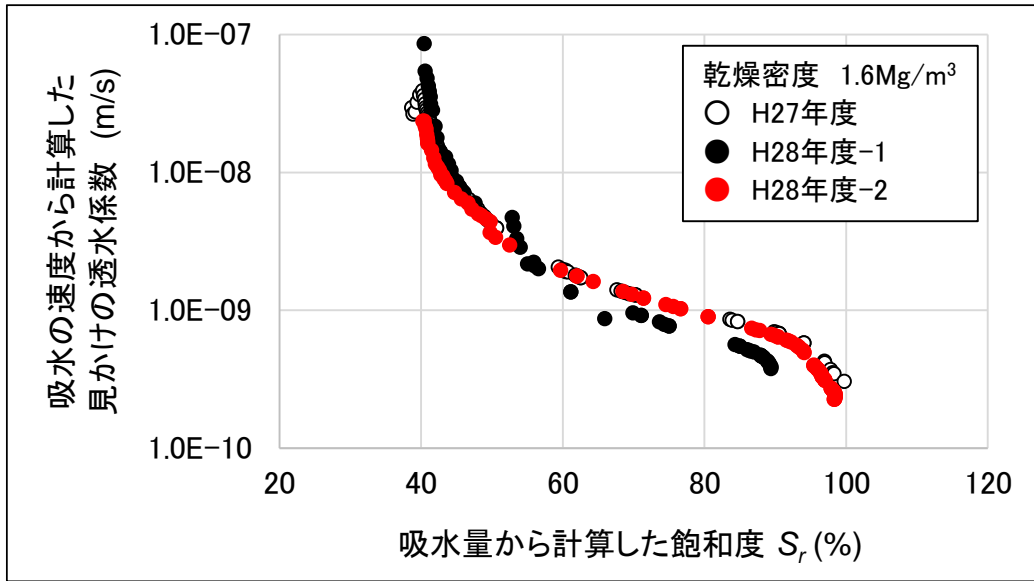


図 3.2.2-43 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係（緩衝材）

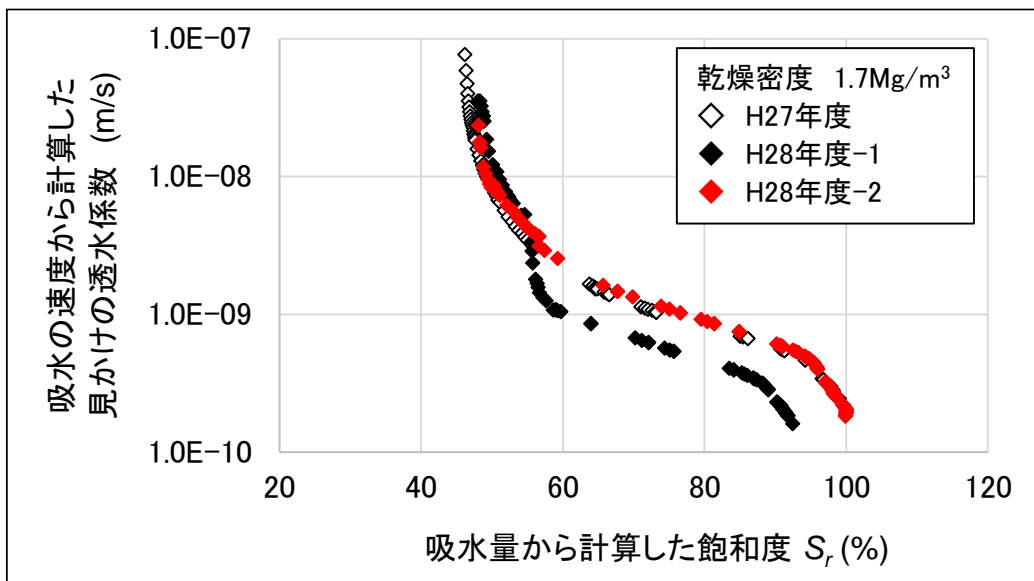


図 3.2.2-44 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係（緩衝材）

埋戻し材の給水過程においては、所定の乾燥密度条件で作製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。供試体作製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を目安として、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 3.2.2-45 には、吸水量と経過時間 (\sqrt{t}) の関係を示す。

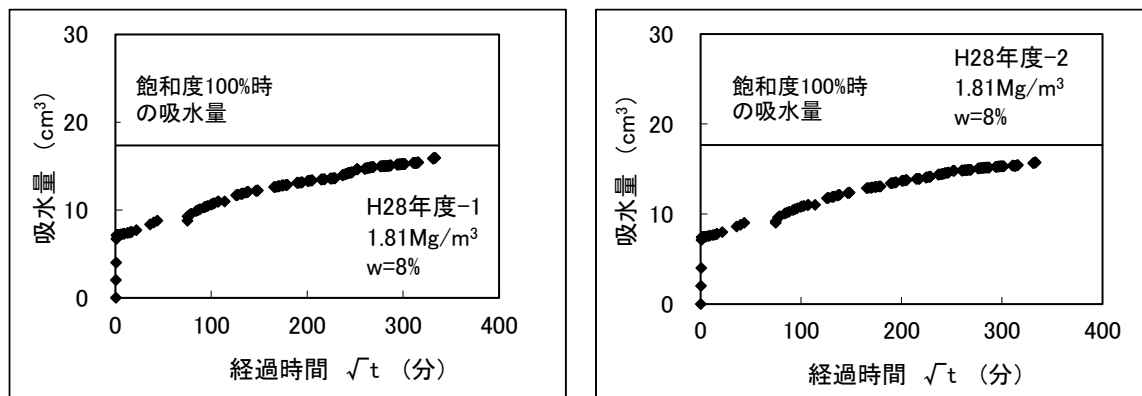


図 3.2.2-45 吸水量と経過時間の関係 (埋戻し材)

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との関係を求めた。図 3.2.2-46 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。

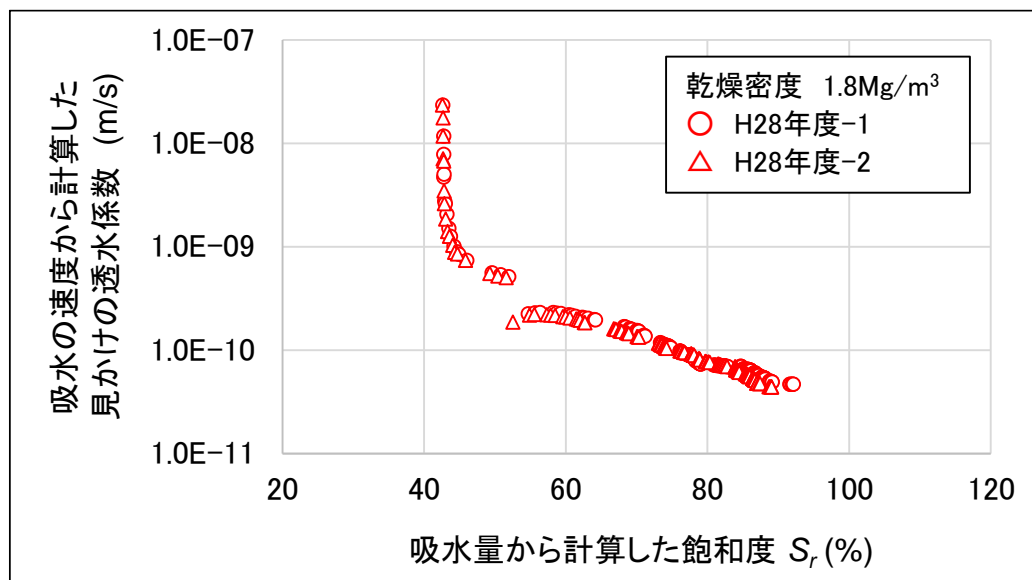


図 3.2.2-46 給水過程における見かけの透水係数と飽和度の関係 (埋戻し材)

3) 透水係数の測定方法（周辺岩盤）

周辺岩盤の透水試験は、「堆積岩の圧密現象に着目した透水係数推定の試み」[18]による測定手法を参考に、図 3.2.2-47 に示す三軸試験装置を用い、図 3.2.2-48 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、3-29)に示す変水位透水試験の式を用いて算出した。

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スーパー X 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

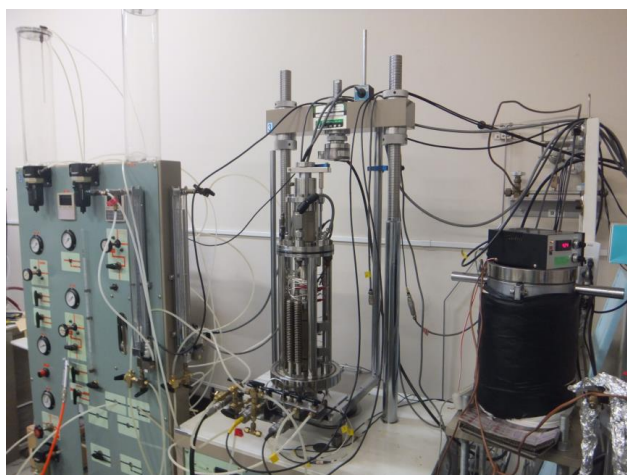


図 3.2.2-47 三軸試験装置を用いた変水位透水試験装置

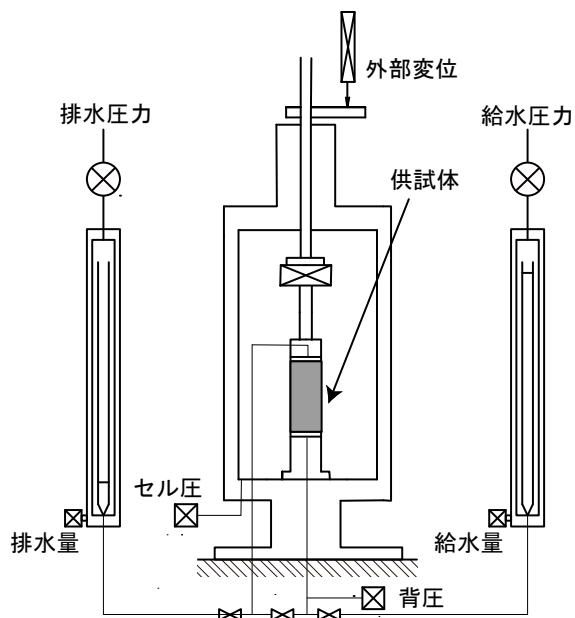


図 3.2.2-48 変水位透水試験の方法

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

- ① 給水圧力 0.4MPa 排水圧力 0.2MPa
- ② 給水圧力 0.4MPa 排水圧力 0.35MPa

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（流入側）より段階的に加圧力を付加した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(0.02、0.05、0.1MPa の 3 段階)とし、供試体上部（流出側）は大気解放(0MPa)とした。供試体下部に与える加圧力を段階的に変化（動水勾配 i を変化）させる目的は、供試体内の飽和度に変化が生じた場合、動水勾配 i の増加とともに透水係数が低下する傾向が認められるためである。

次に、供試体下部及び供試体上部に加圧力（背圧）を付加し、供試体内の飽和度をさらに向上させた変水位透水試験を実施した。まず、供試体下部に 0.15(MPa)、供試体上部に 0.05(MPa)の圧力設定（動水勾配 $i=510$ ）における変水位透水試験を実施した。その後、動水勾配（ $i=255$ ）を保ったまま、供試体下部及び供試体上部に付加する圧力を変化させた変水位透水試験を実施した。動水勾配及び背圧を変化させた変水位透水試験における透水性に変化が認められないことから、供試体の飽和度が十分高いと判断し、飽和透水係数を算出した。

表 3.2.2-14 及び図 3.2.2-49～図 3.2.2-52 に透水試験結果を示す

表 3.2.2-14 変水位透水試験における圧力の付加条件と透水試験結果

供試体作製時 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	実験 段階数	供試体下部 (流入)の圧力 (MPa)	供試体上部 (流出)の圧力 (MPa)	動水勾配 i	透水係数 k_w (m/s)	
1.40	1	0.02	0.00	102	2.08E-12	平均値
	2	0.05	0.00	255	1.61E-12	
	3	0.10	0.00	510	1.38E-12	
	4	0.15	0.05	510	1.22E-12	
	5	0.10	0.05	255	1.12E-12	1.12E-12
	6	0.15	0.10	255	1.12E-12	
	7	0.20	0.15	255	1.13E-12	
供試体作製時 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	実験 段階数	供試体下部 (流入)の圧力 (MPa)	供試体上部 (流出)の圧力 (MPa)	動水勾配 i	透水係数 k_w (m/s)	
1.50	1	0.02	0.00	102	2.24E-12	平均値
	2	0.05	0.00	255	1.21E-12	
	3	0.10	0.00	510	1.04E-12	
	4	0.15	0.05	510	9.02E-13	
	5	0.10	0.05	255	7.77E-13	8.00E-13
	6	0.15	0.10	255	7.89E-13	
	7	0.20	0.15	255	8.33E-13	

表 3.2.2-15 変水位透水試験における圧力の付加条件と透水試験結果

供試体作製時 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	実験 段階数	供試体下部 (流入)の圧力 (MPa)	供試体上部 (流出)の圧力 (MPa)	動水勾配 i	透水係数 k_w (m/s)	
1.60	1	0.02	0.00	102	2.00E-12	平均値
	2	0.05	0.00	255	9.41E-13	
	3	0.10	0.00	510	7.44E-13	
	4	0.15	0.05	510	6.53E-13	
	5	0.10	0.05	255	5.10E-13	5.18E-13
	6	0.15	0.10	255	5.15E-13	
	7	0.20	0.15	255	5.27E-13	
供試体作製時 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	実験 段階数	供試体下部 (流入)の圧力 (MPa)	供試体上部 (流出)の圧力 (MPa)	動水勾配 i	透水係数 k_w (m/s)	
1.70	1	0.02	0.00	102	1.59E-12	平均値
	2	0.05	0.00	255	7.72E-13	
	3	0.10	0.00	510	4.72E-13	
	4	0.15	0.05	510	3.54E-13	
	5	0.10	0.05	255	3.73E-13	3.42E-13
	6	0.15	0.10	255	3.44E-13	
	7	0.20	0.15	255	3.09E-13	

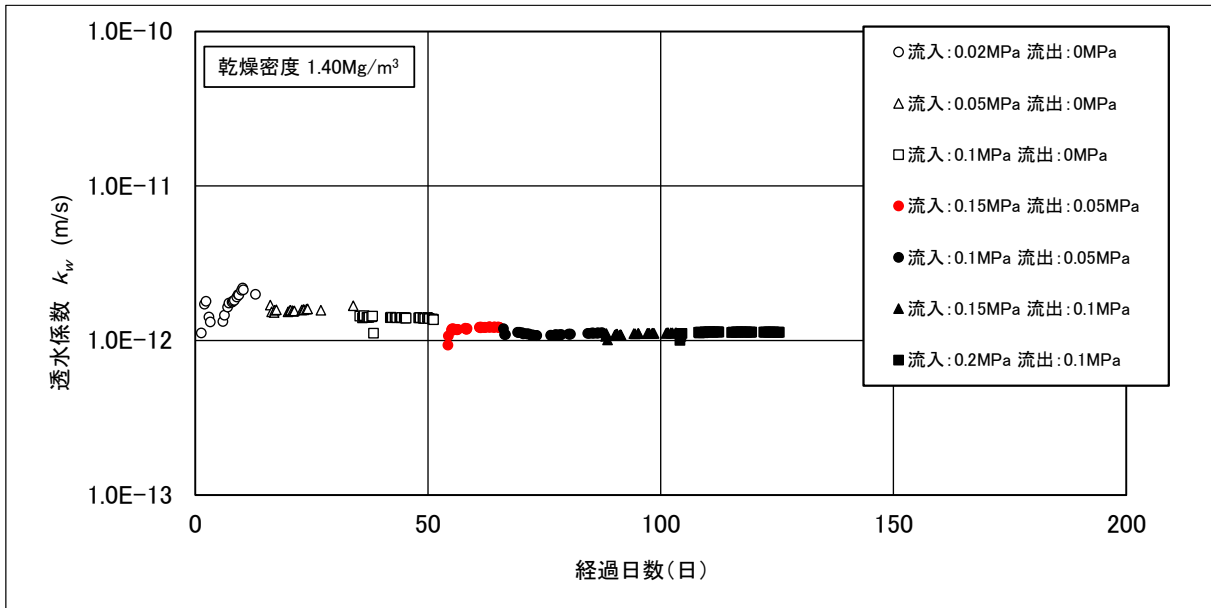


図 3.2.2-49 透水係数の経時変化 ($\rho_d=1.4\text{Mg/m}^3$)

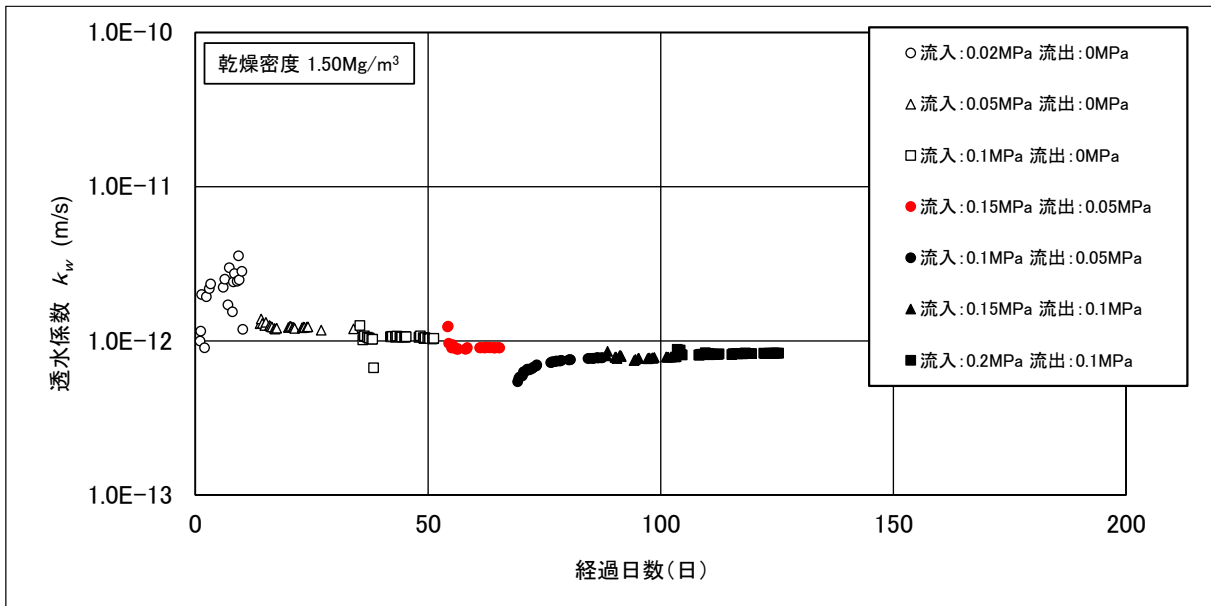


図 3.2.2-50 透水係数の経時変化 ($\rho_d=1.5\text{Mg/m}^3$)

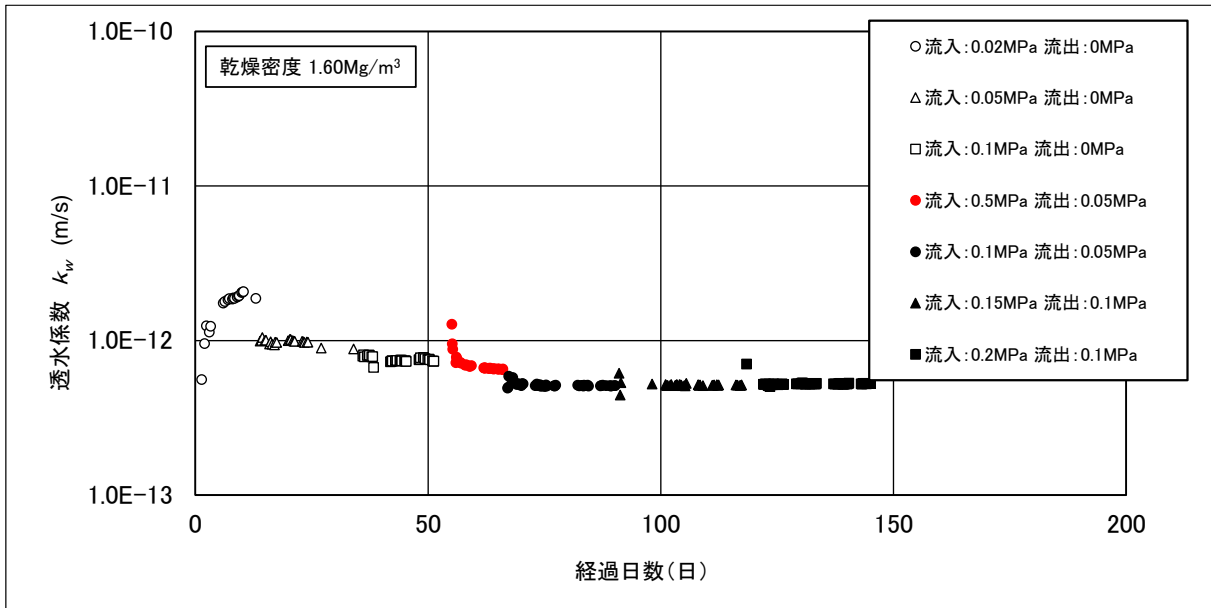


図 3.2.2-51 透水係数の経時変化 ($\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$)

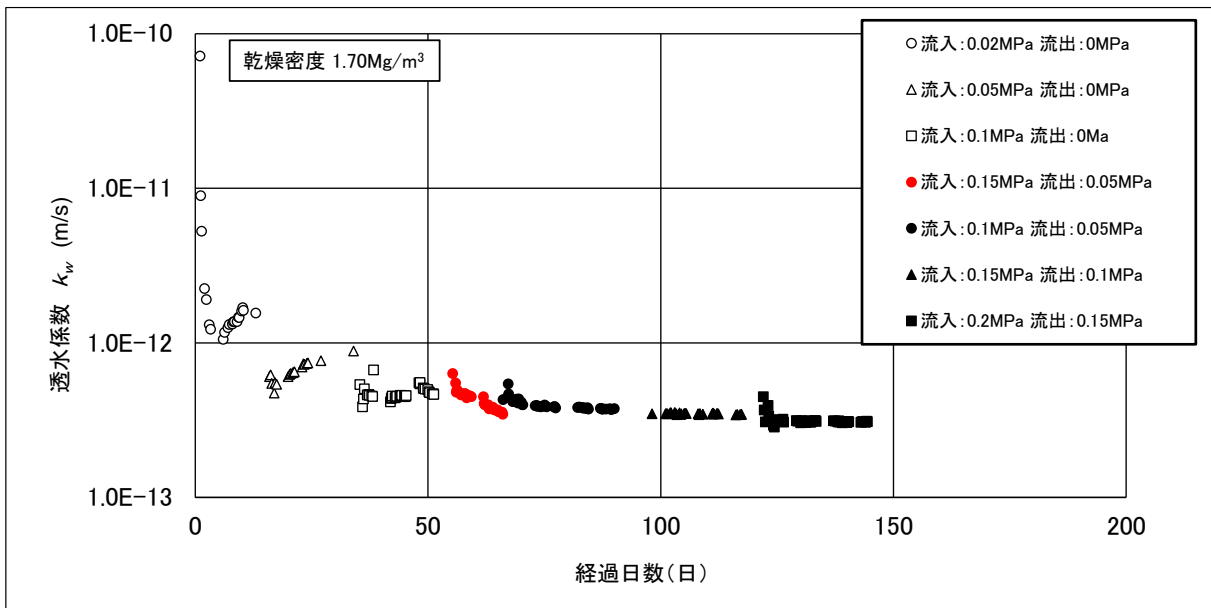


図 3.2.2-52 透水係数の経時変化 ($\rho_d=1.7\text{Mg/m}^3$)

図 3.2.2-53 には、透水係数と作製時の乾燥密度との関係を示す。図 3.2.2-53 より、供試体作製時の乾燥密度の増加とともに、透水係数が小さくなる傾向が認められた。

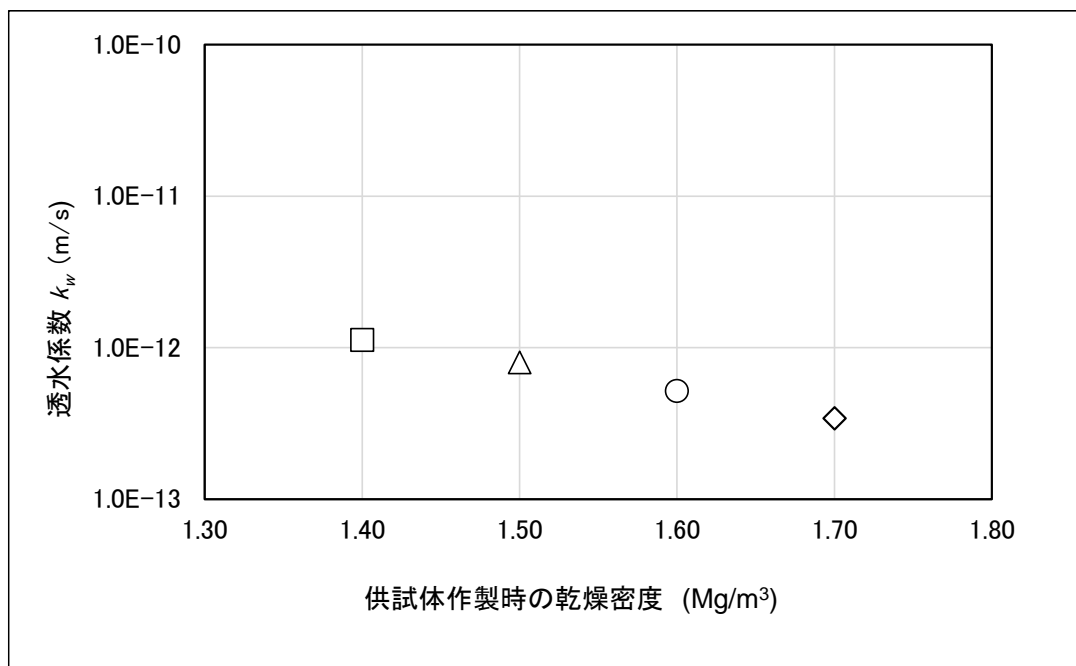


図 3.2.2-53 飽和透水係数と作製時の乾燥密度との関係

5) 透水試験結果（埋戻し材）

埋戻し材の給水過程が終了した後、供試体下部（流入側）より段階的に加圧力を付加した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(0.02MPa)とし、供試体上部（流出側）は大気解放（0MPa）とした。次に、供試体下部及び供試体上部に加圧力（背圧）を付加し、供試体内の飽和度をさらに向上させた変水位透水試験を実施した。

まず、供試体下部に 0.04(MPa)、供試体上部に 0.02(MPa)の圧力設定（動水勾配 $i=102$ ）における変水位透水試験を実施した。その後、動水勾配（ $i=102$ ）を保ったまま、供試体下部及び供試体上部に付加する圧力を変化させた変水位透水試験を実施した。動水勾配及び背圧を変化させた変水位透水試験における透水性に変化が認められないことから、供試体の飽和度が十分高いと判断し、飽和透水係数を算出した。表 3.2.2-16 及び図 3.2.2-54～に透水試験結果を示す。埋戻し材の飽和透水係数は、概ね $1 \times 10^{-11}(\text{m/s})$ 程度となった。

表 3.2.2-16 変水位透水試験における圧力の付加条件と透水試験結果

供試体作製時 乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3)	実験 段階数	供試体下部 (流入)の圧力 (MPa)	供試体上部 (流出)の圧力 (MPa)	動水勾配 i	透水係数 k_w (m/s)	
						平均値
1.81	1	0.02	0.00	102	1.37E-11	1.05E-11
	2	0.04	0.02	102	1.09E-11	
	3	0.06	0.04	102	1.04E-11	
	4	0.08	0.06	102	1.01E-11	
1.81	1	0.02	0.00	102	1.19E-11	1.08E-11
	2	0.04	0.02	102	1.15E-11	
	3	0.06	0.04	102	1.04E-11	
	4	0.08	0.06	102	1.05E-11	

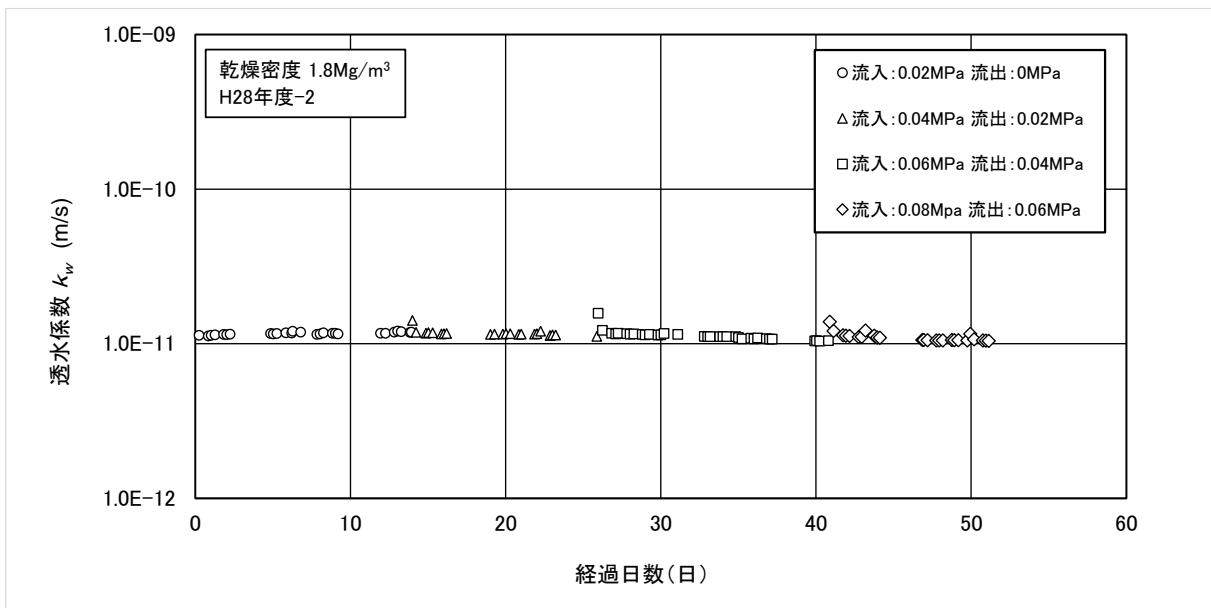
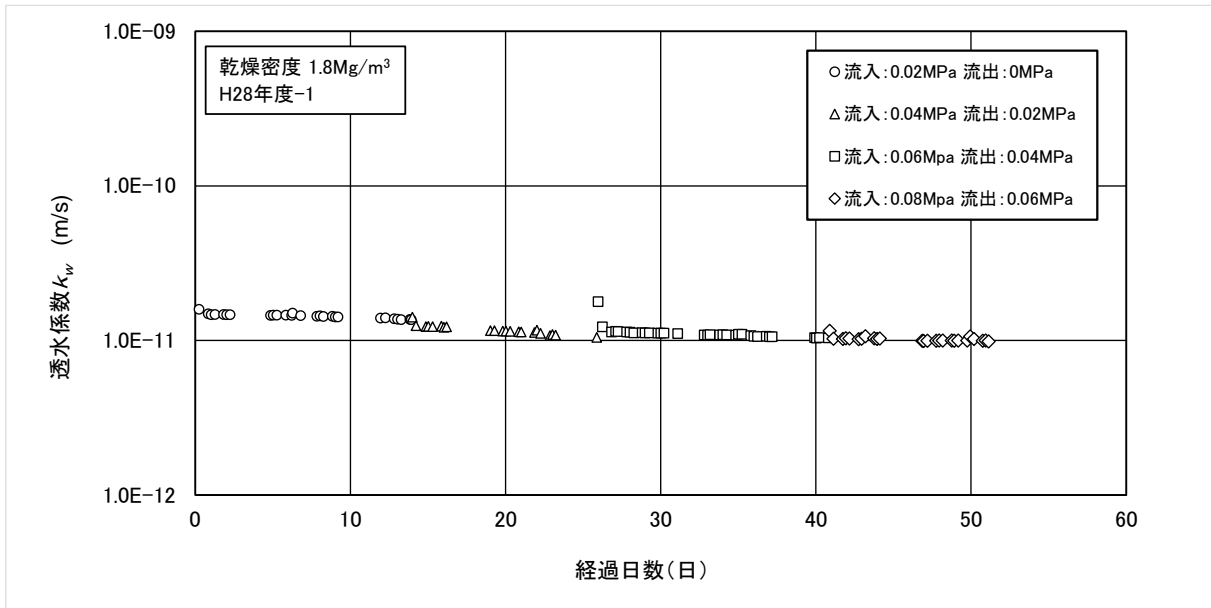


図 3.2.2-54 透水係数の経時変化 ($\rho_d=1.8\text{Mg/m}^3$)

6) 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 3.2.2-17 及び図 3.2.2-55～図 3.2.2-56 に示す。

図 3.2.2-55 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。また、図 3.2.2-56 より、凝灰質砂岩の透水係数は、概ね $10^{-10} \sim 10^{-11}(\text{m/s})$ オーダに分布し、平均値で $6 \times 10^{-11}(\text{m/s})$ となった。

表 3.2.2-17 凝灰質砂岩の変水位透水試験結果

供試体番号	H27-1			H27-2					
圧密圧力 σ_c' (MPa)	1.5	3.0	5.0	1.5	3.0	5.0	7.0		
間隙比 e	0.620	0.617	0.600	0.652	0.647	0.643	0.636		
間隙率 n	0.383	0.382	0.375	0.395	0.393	0.391	0.389		
透水係数 K_t (m/s)	9.25E-11	7.05E-11	6.43E-11	4.83E-11	4.10E-11	3.63E-11	3.62E-11		
温度補正係数	0.839	0.859	0.880	0.819	0.819	0.819	0.819		
15°Cに対する透水係数 K_w (m/s)	7.76E-11	6.06E-11	5.65E-11	3.96E-11	3.36E-11	2.97E-11	2.97E-11		
供試体番号	H28-1			H28-2		H28-3			
圧密圧力 σ_c' (MPa)	1.5	3.0	5.0	3.0	5.0	1.5	3.0	5.0	
間隙比 e	0.643	0.639	0.635	0.549	0.545	0.632	0.630	0.625	
間隙率 n	0.391	0.390	0.388	0.354	0.353	0.387	0.387	0.385	
透水係数 K_t (m/s)	9.52E-11	8.88E-11	8.69E-11	9.51E-12	9.62E-12	1.58E-10	1.32E-10	8.94E-11	
温度補正係数	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	
15°Cに対する透水係数 K_w (m/s)	7.62E-11	7.10E-11	6.95E-11	7.61E-12	7.70E-12	1.26E-10	1.06E-10	7.15E-11	
供試体番号	H28-4			H28-5			H28-6		
圧密圧力 σ_c' (MPa)	1.5	3.0	5.0	1.5	3.0	5.0	1.5	3.0	5.0
間隙比 e	0.605	0.601	0.596	0.671	0.668	0.664	0.586	0.582	0.577
間隙率 n	0.377	0.375	0.373	0.402	0.400	0.399	0.369	0.368	0.366
透水係数 K_t (m/s)	1.58E-10	1.26E-10	1.05E-10	8.47E-11	6.22E-11	4.82E-11	6.79E-11	5.43E-11	4.39E-11
温度補正係数	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
15°Cに対する透水係数 K_w (m/s)	1.26E-10	1.01E-10	8.40E-11	6.78E-11	4.98E-11	3.86E-11	5.43E-11	4.34E-11	3.51E-11

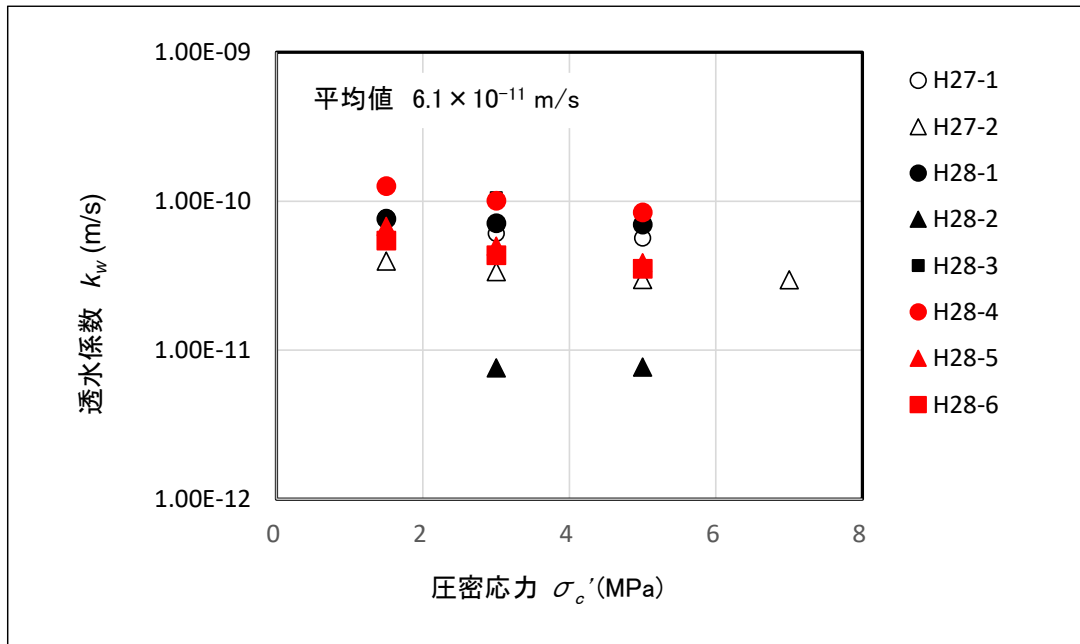


図 3.2.2-55 周辺岩盤の変水位透水試験結果（透水係数と圧密応力）

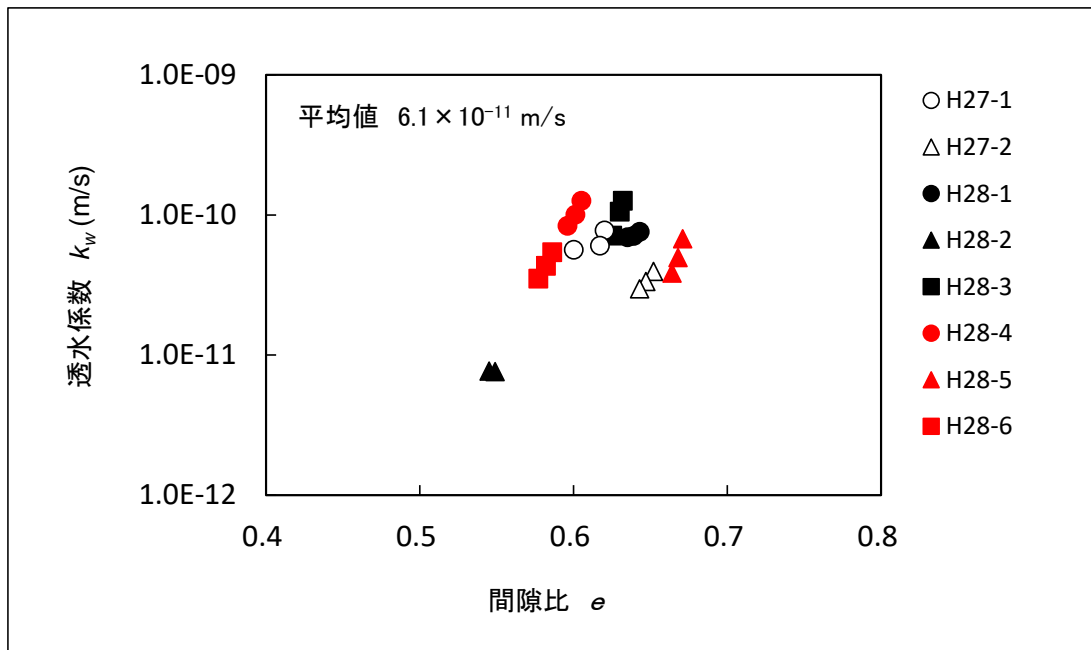


図 3.2.2-56 周辺岩盤の変水位透水試験結果（透水係数と間隙比）

(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 3.2.2-57 に示す。圧密試験では、初期の圧密圧力を 0.313(MPa)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 3.2.2-57 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 3.2.2-18 及び図 3.2.2-58 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 3.2.2-18 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	YTS1-4-3	YTS1-4-4	YTS2-2-1
土粒子の密度	ρ_s (Mg/m ³)	2.788	2.753	2.749	2.793	2.727
初期間隙比	e_0	0.657	0.720	0.647	0.633	0.743
圧密降伏応力	P_c (MPa)	31.0	21.7	26.6	29.7	21.5
圧縮指数	C_c	0.401	0.457	0.356	0.381	0.406

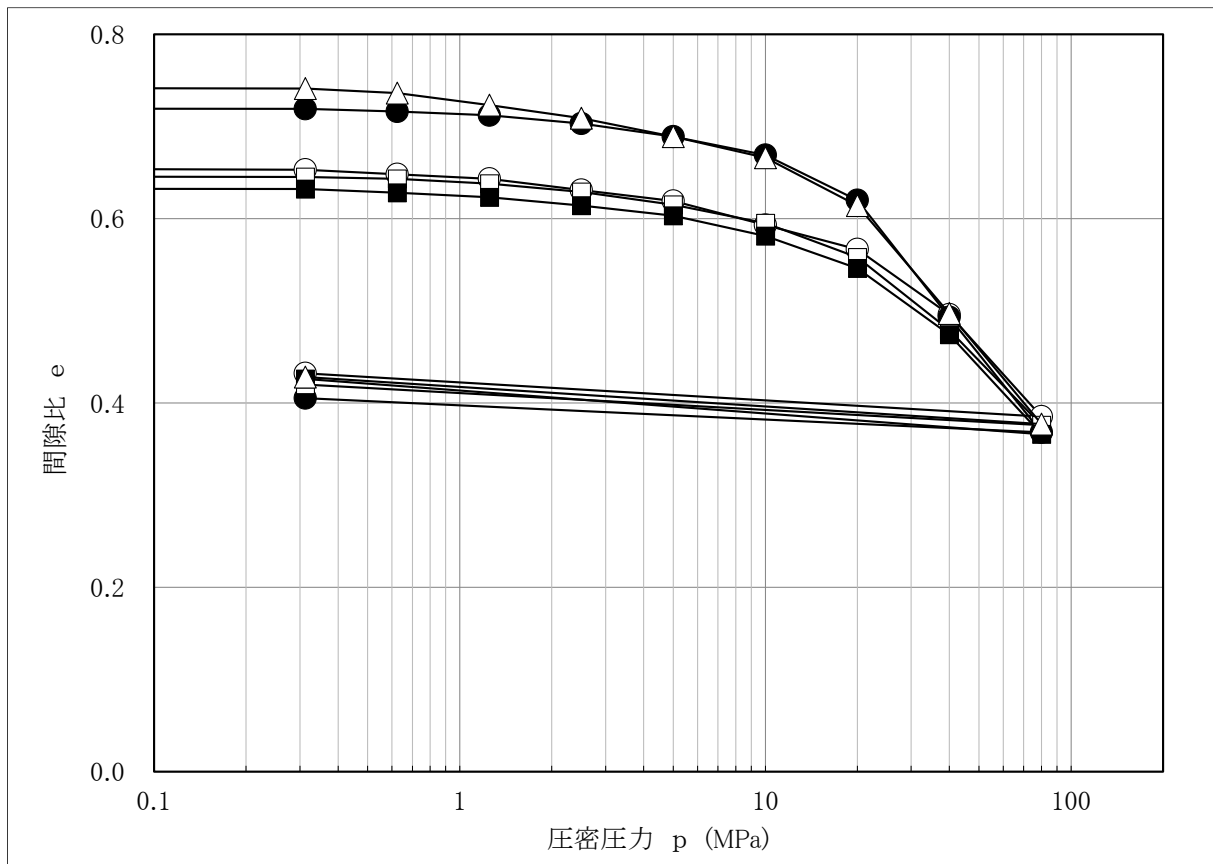


図 3.2.2-58 周辺岩盤で実施した圧密試験結果

(7) 力学特性

1) 緩衝材及び埋戻し材の一軸圧縮試験

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

緩衝材及び埋戻し材のヤング率は、圧縮応力と外部変位計による軸変位から算出している。緩衝材の一軸圧縮試験は、1.5、1.6、1.7(Mg/m³)の3種類の乾燥密度条件で作製した供試体を用いて実施した。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：ケイ砂3で混合）を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。

埋戻し材の一軸圧縮試験は、1.8(Mg/m³)の乾燥密度条件で作製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15：ケイ砂85で混合）を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。

図 3.2.2-59～図 3.2.2-66 には、緩衝材及び埋戻し材の一軸圧縮試験結果を示す。図 3.2.2-59～図 3.2.2-64 より、緩衝材では、供試体作製時の乾燥密度が同じ条件で比較した場合、飽和度が高いほど一軸圧縮強さ及び変形係数が低下する傾向が認められた。図 3.2.2-65～図 3.2.2-66 より、埋戻し材では、飽和度変化によらず一軸圧縮強さ及び変形係数に大きな差異は認められない結果となった。

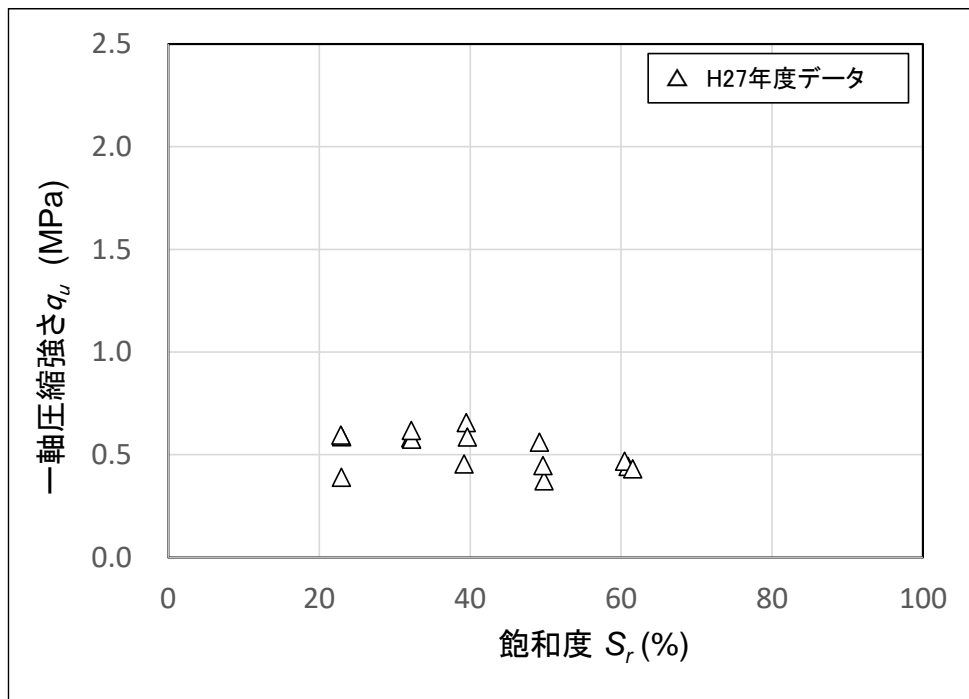


図 3.2.2-59 緩衝材の一軸圧縮試験結果（一軸圧縮強さと飽和度）
（供試体作製時の乾燥密度 1.5Mg/m³）

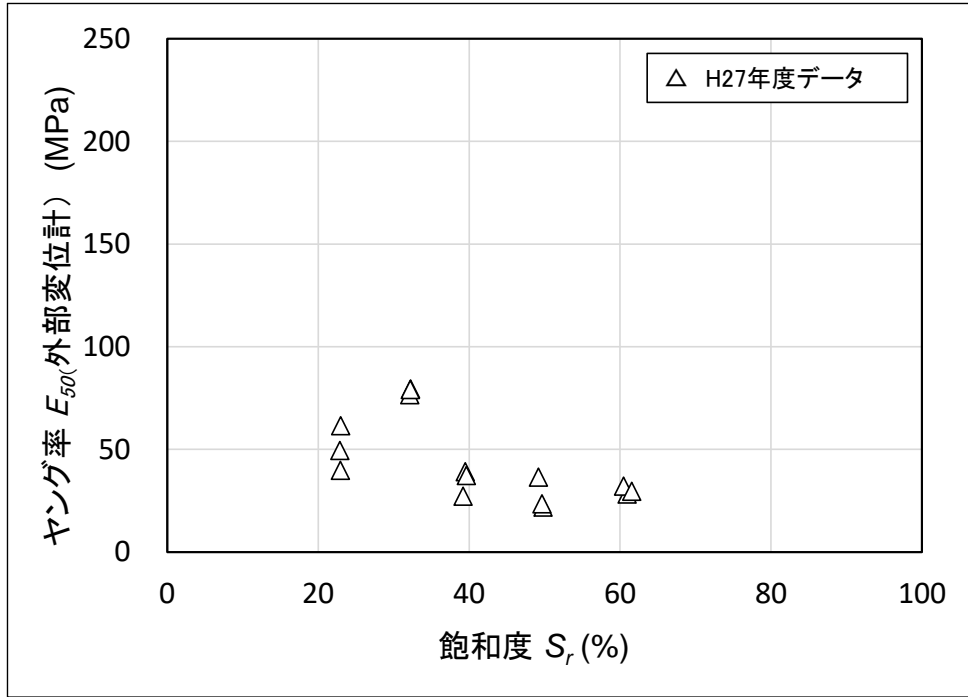


図 3.2.2-60 緩衝材の一軸圧縮試験結果 (ヤング率と飽和度)
(供試体作製時の乾燥密度 1.5Mg/m^3)

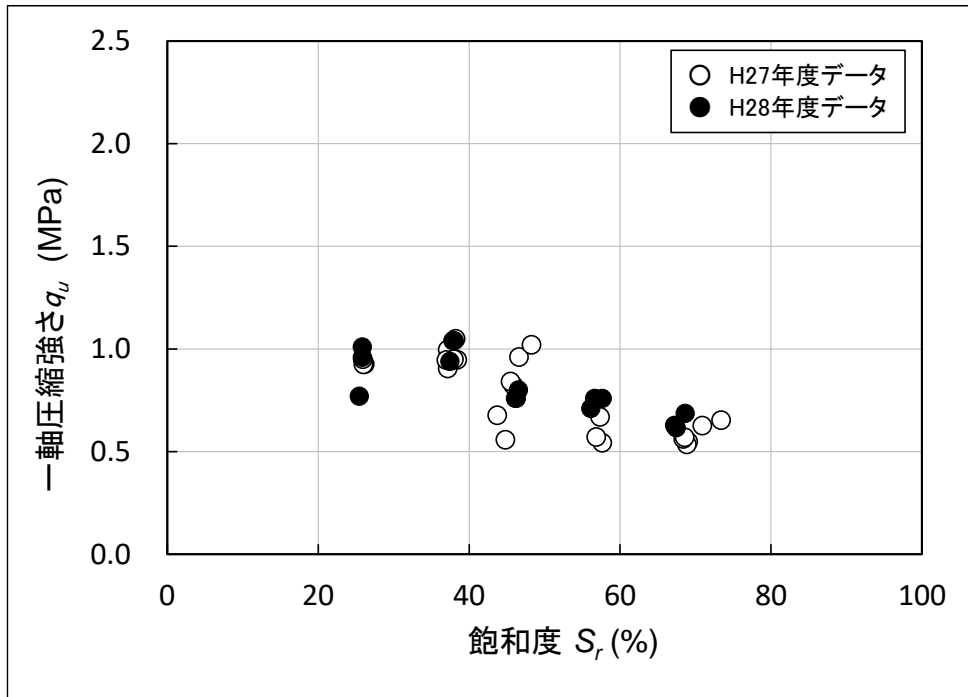


図 3.2.2-61 緩衝材の一軸圧縮試験結果 (一軸圧縮強さと飽和度)
(供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m^3)

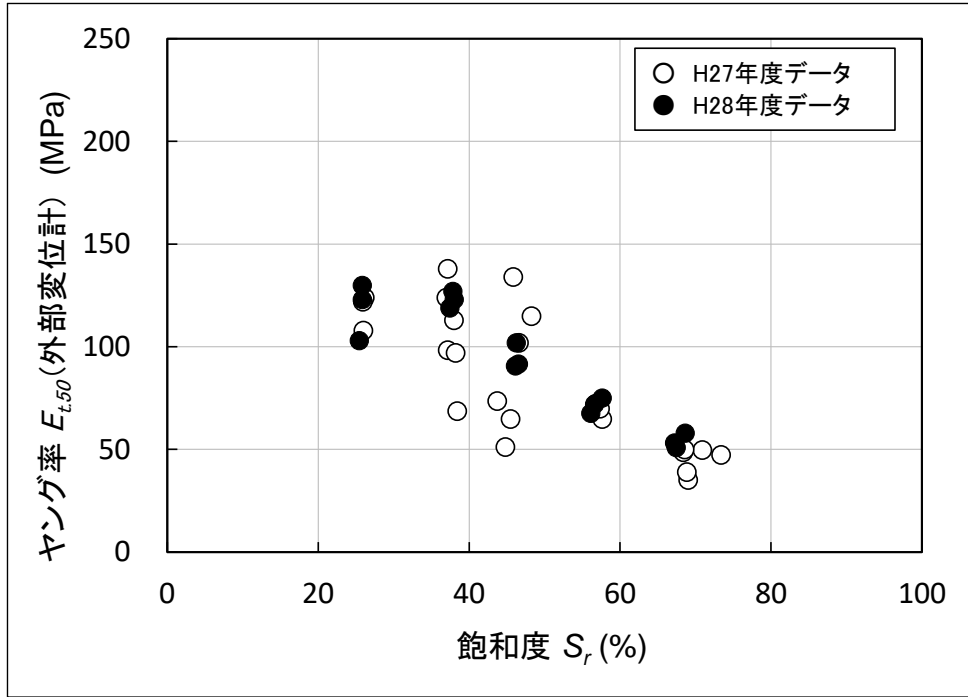


図 3.2.2-62 緩衝材の一軸圧縮試験結果 (ヤング率と飽和度)
 (供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m^3)

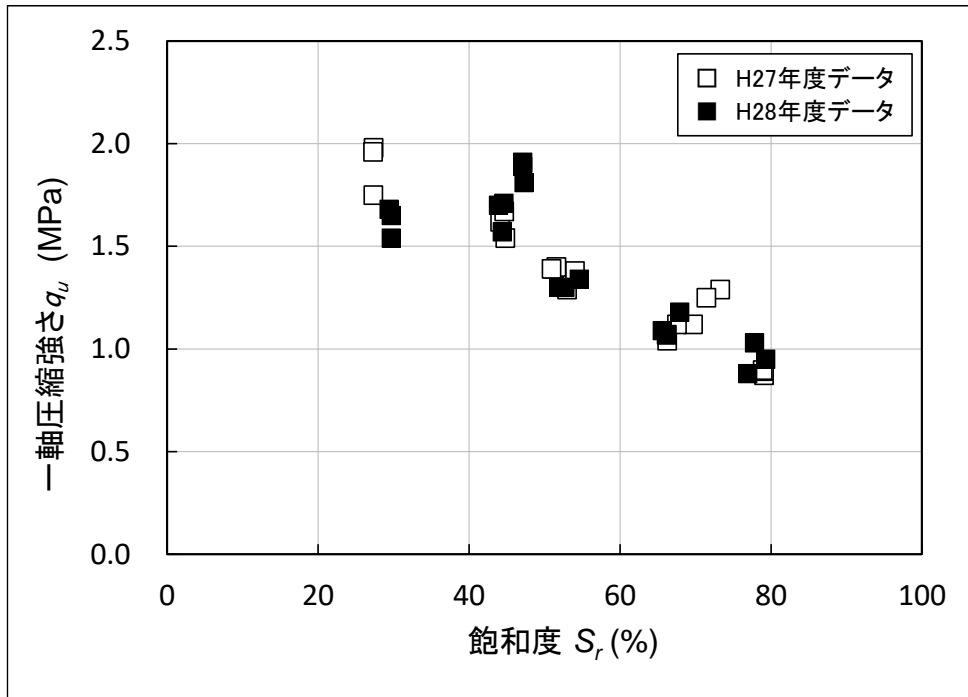


図 3.2.2-63 緩衝材の一軸圧縮試験結果 (一軸圧縮強さと飽和度)
 (供試体作製時の乾燥密度 1.7Mg/m^3)

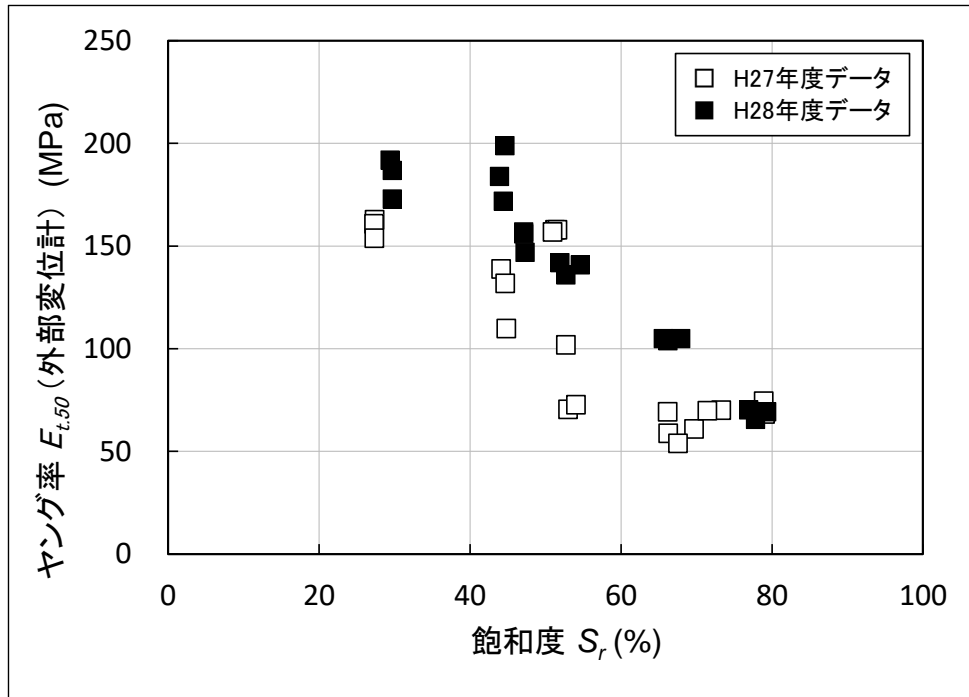


図 3.2.2-64 緩衝材の一軸圧縮試験結果 (ヤング率と飽和度)
 (供試体作製時の乾燥密度 1.7Mg/m³)

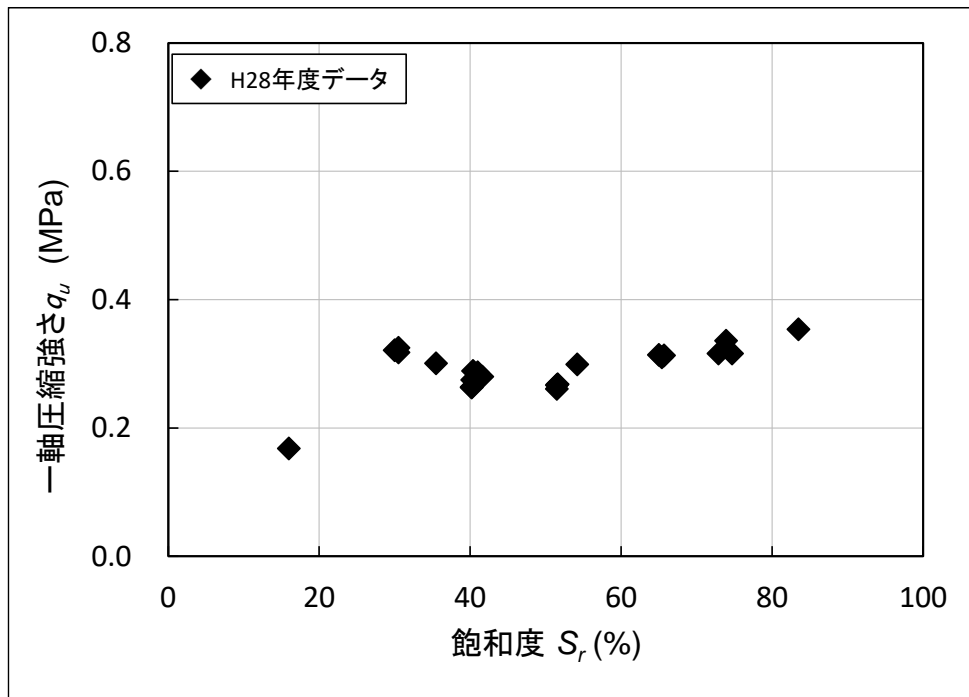


図 3.2.2-65 埋戻し材の一軸圧縮試験結果 (一軸圧縮強さと飽和度)
 (供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m³)

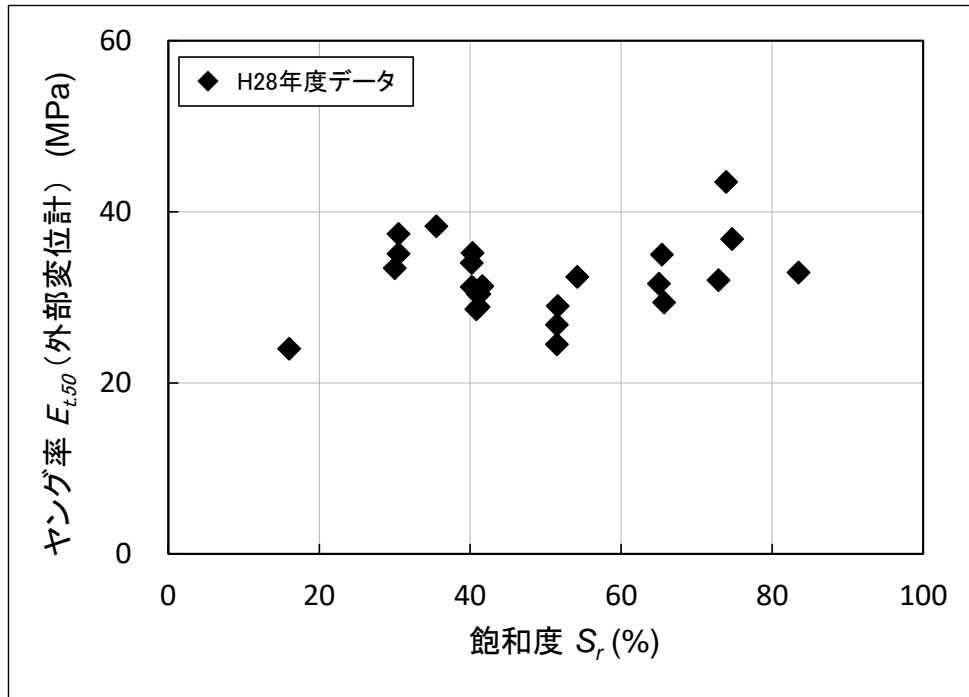


図 3.2.2-66 埋戻し材の一軸圧縮試験結果（ヤング率と飽和度）
（供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m^3 ）

緩衝材及び埋戻し材の供試体作製時の飽和度（同一乾燥密度条件）がポアソン比に与える影響を把握する目的で、供試体側面にひずみゲージを貼付した一軸圧縮試験を実施した。なお、飽和度が高い供試体の場合、ひずみゲージの貼付が困難と予想されたことから、局所変位計（LDT）及び横型 LDT も併用して計測を行った（図 3.2.3-70）。

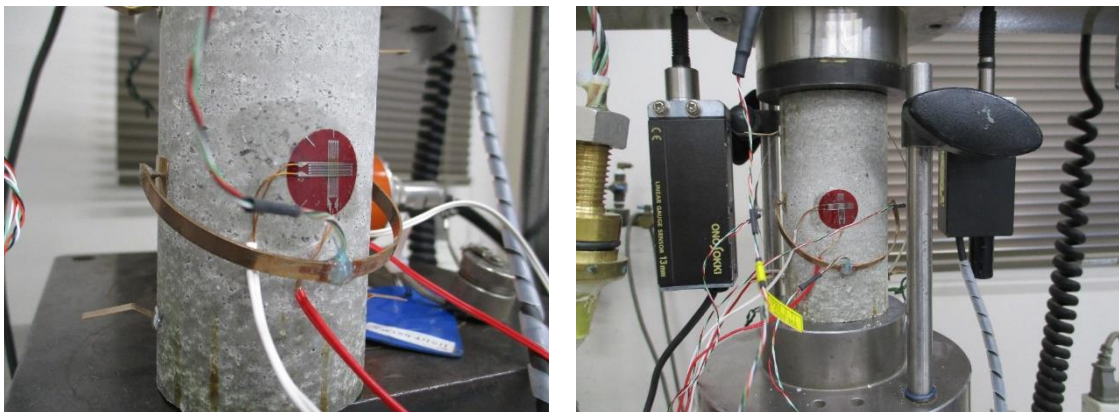


図 3.2.2-67 一軸圧縮試験時の計器設置状況

図 3.2.2-68～図 3.2.2-70 には、緩衝材及び埋戻し材のポアソン比と飽和度との関係を示す。図 3.2.2-68～図 3.2.2-69 より、緩衝材のポアソン比は、飽和度が高くなるほど大きくなる傾向が認められた。図 3.2.2-70 より、埋戻し材では、ばらつきは認められるものの、飽和度変化によらずポアソン比は一定値となっている。また、表 3.2.2-19 に示す埋戻し材のポアソン比の

まとめから、ひずみゲージによるポアソン比計測結果に比べ、横型 LDT によるポアソン比計測結果のほうが、ポアソン比の値が大きく、かつ、ばらつきが小さい結果となった。

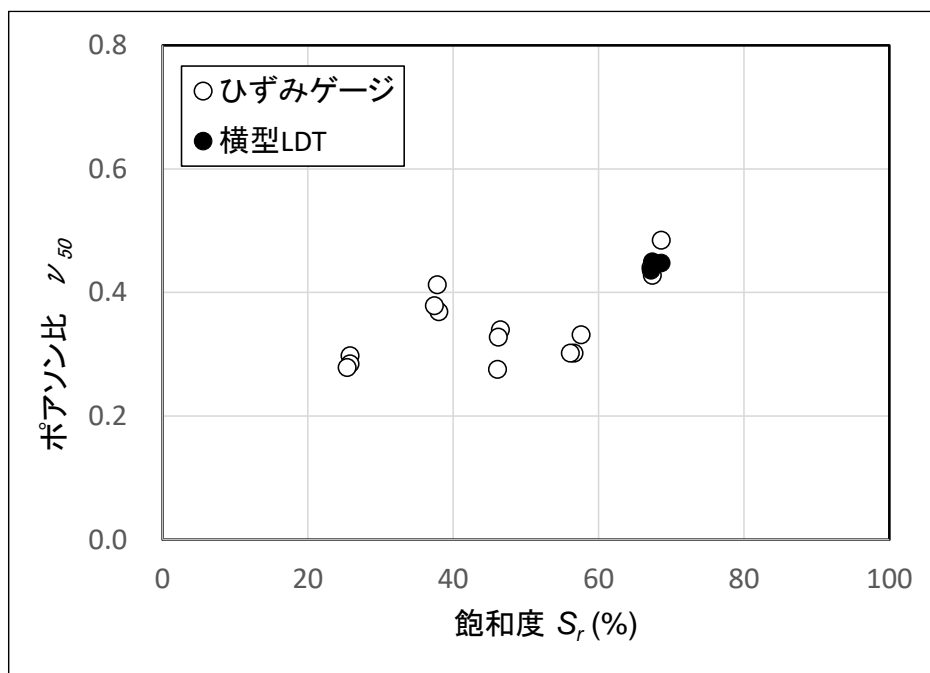


図 3.2.2-68 緩衝材の一軸圧縮試験結果 (ポアソン比と飽和度)
(供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m^3)

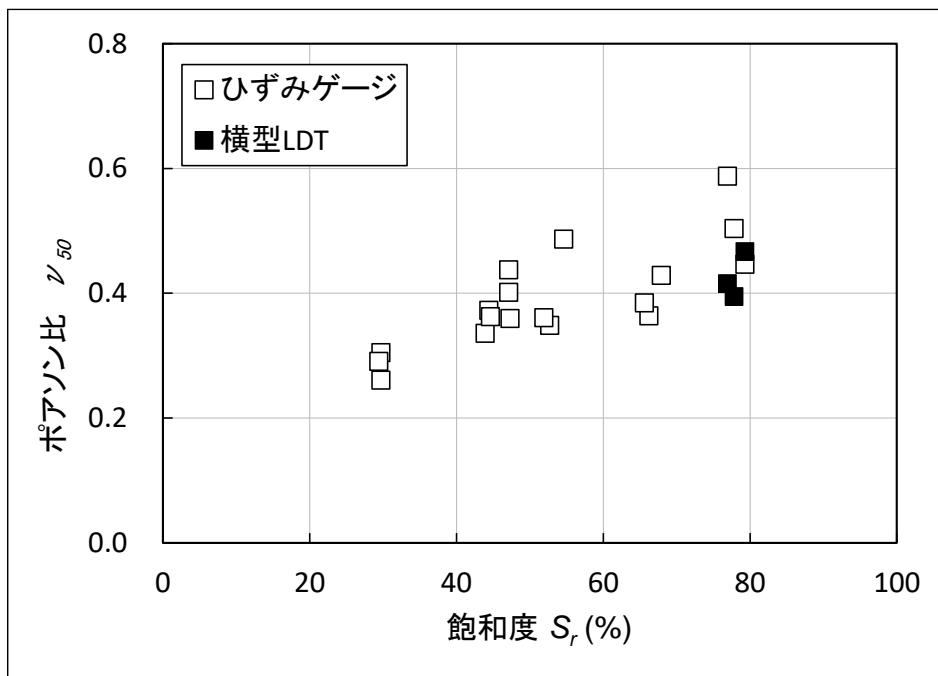


図 3.2.2-69 緩衝材の一軸圧縮試験結果 (ポアソン比と飽和度)
(供試体作製時の乾燥密度 1.7Mg/m^3)

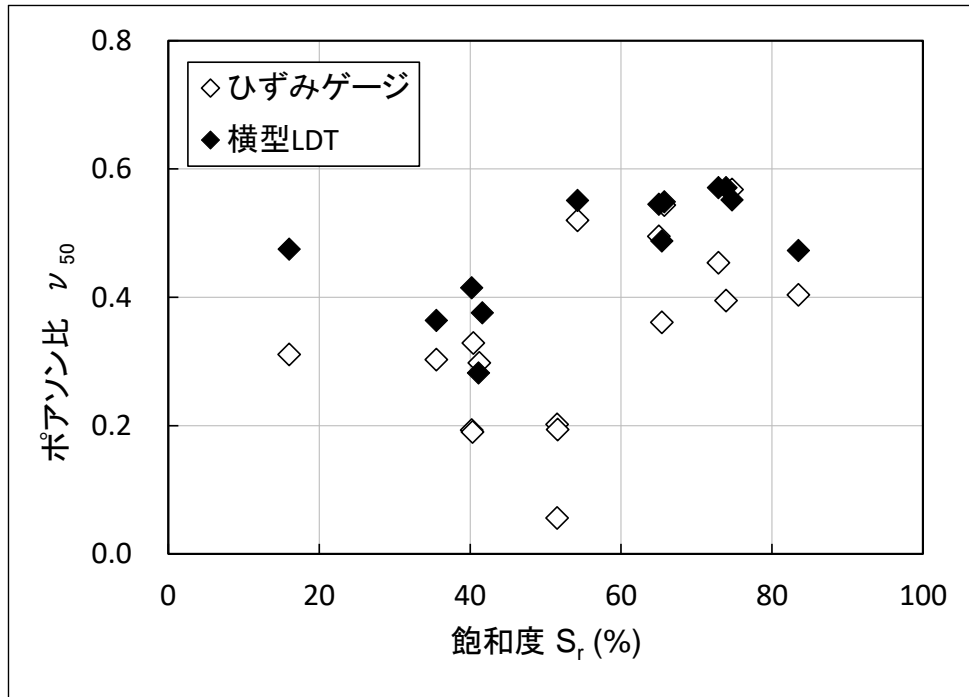


図 3.2.2-70 埋戻し材の一軸圧縮試験結果（飽和度とポアソン比）
 （供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m^3 ）

表 3.2.2-19 埋戻し材のポアソン比のまとめ

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

図 3.2.2-71～図 3.2.2-80 には、緩衝材及び埋戻し材の局所変位計で計測したヤング率と外部変位計から得られるヤング率の比較を示す。図 3.2.2-71 より、局所変位計で計測したヤング率のほうが外部変位計で計測したヤング率に比べ、やや大きい値を示す結果となった。図 3.2.2-72～図 3.2.2-80 から、緩衝材及び埋戻し材のヤング率は、応力比 (q/q_u) の小さい領域 ($q/q_u < 0.4$) において、かい離が認められるものの、変形係数 E_{50} の算定においては、大きな差異が認められない。よって、変形特性を E_{50} で評価する場合には、外部変位計で算定した変形特性が局所変位計で算定した変形特性と差異は少ないと判断できる。今後、変形特性にひずみ依存性を考慮した解析を実施する場合、局所変位計による変形特性（微小ひずみ領域）の取得が必要である。

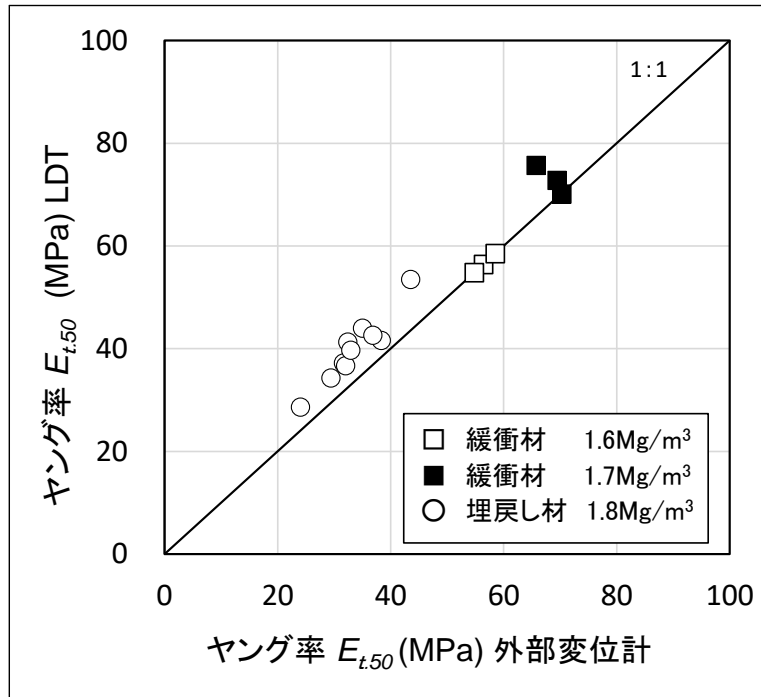


図 3.2.2-71 局所変位計及び外部変位計から得られるヤング率

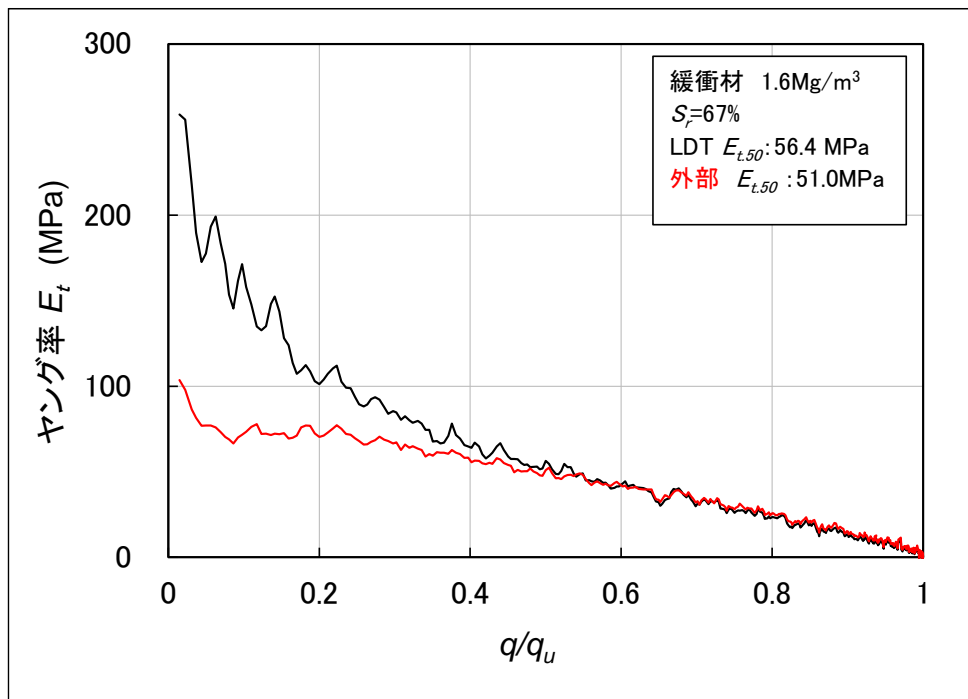


図 3.2.2-72 緩衝材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m³)

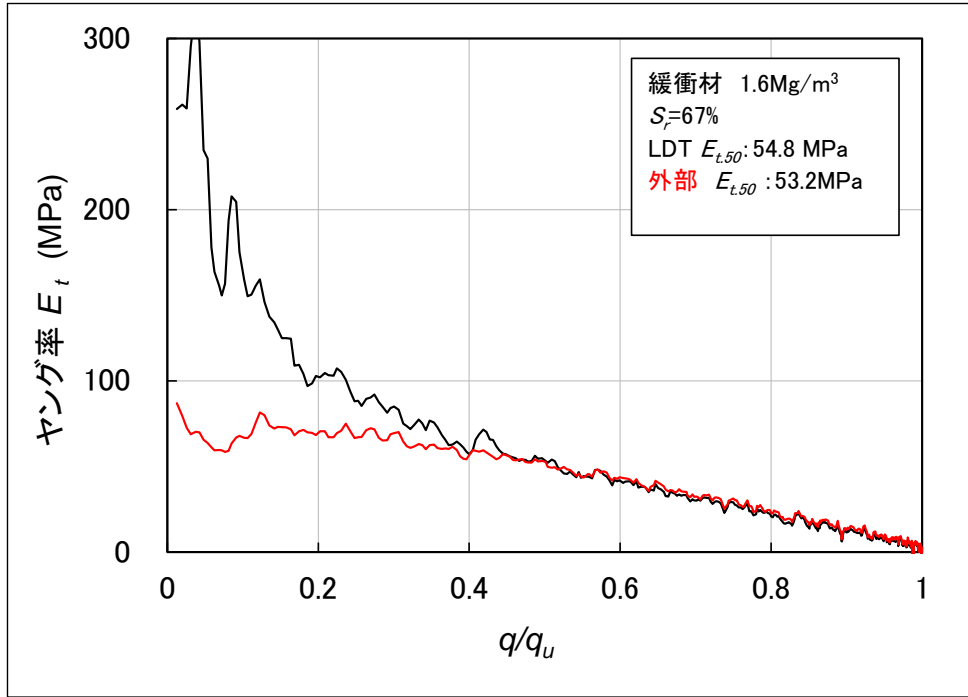


図 3.2.2-73 緩衝材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m³)

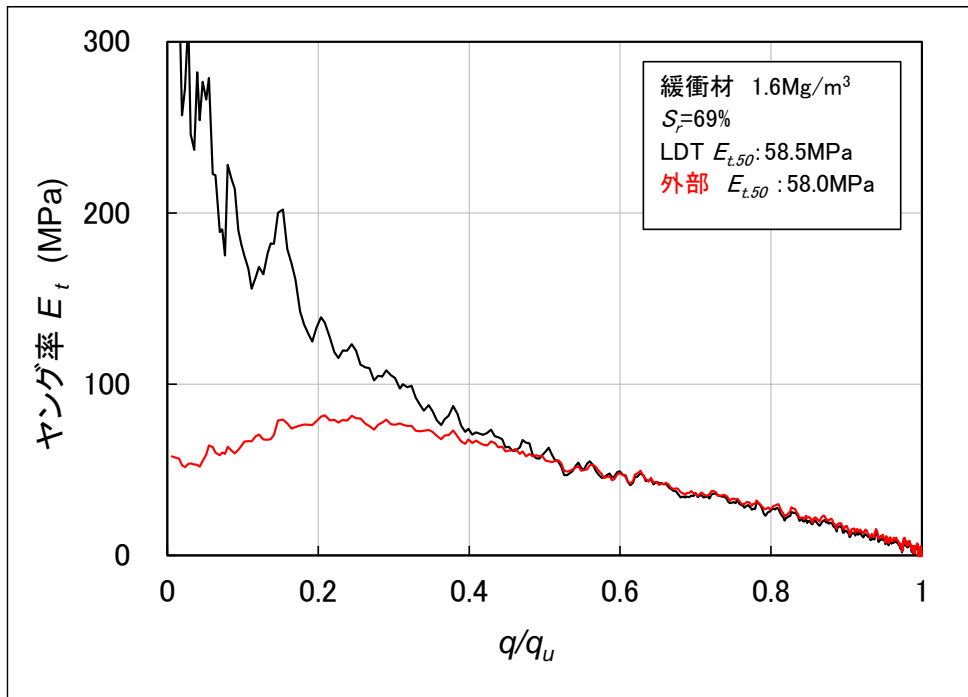


図 3.2.2-74 緩衝材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m³)

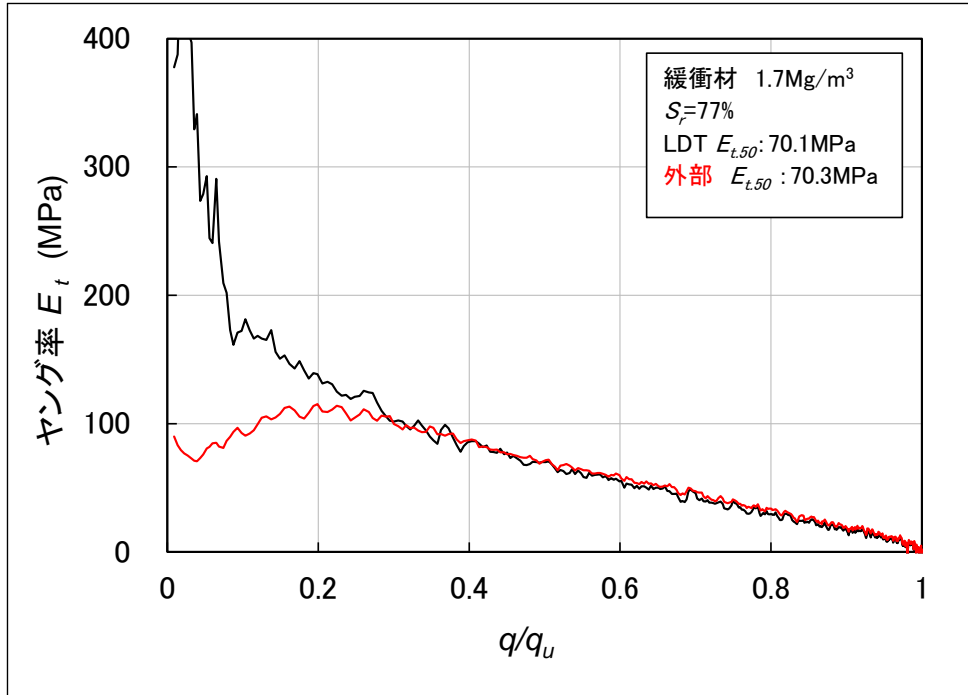


図 3.2.2-75 緩衝材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.7Mg/m³)

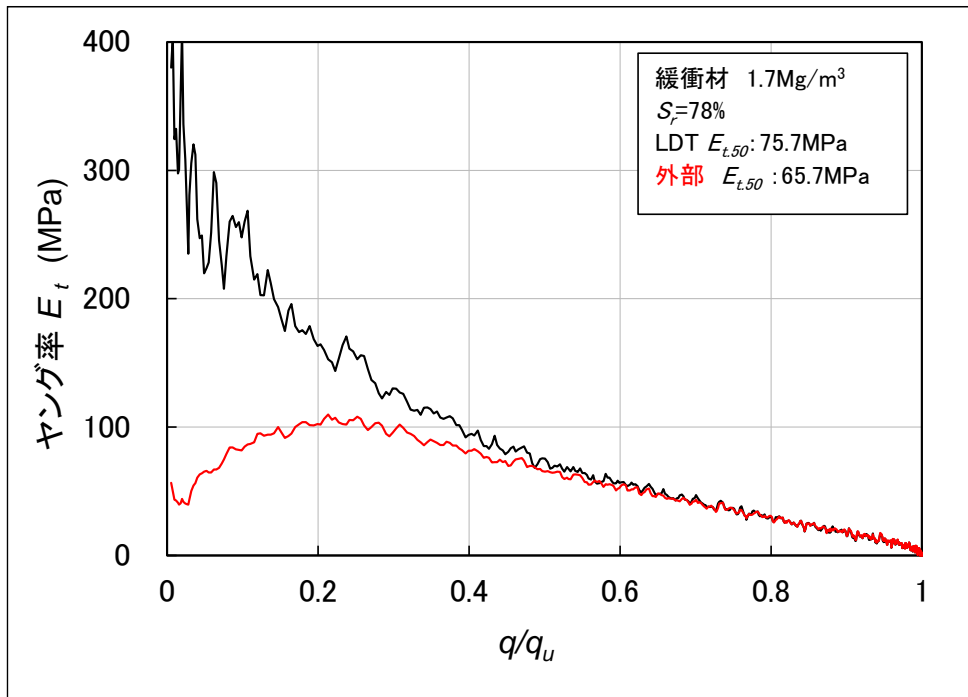


図 3.2.2-76 緩衝材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.7Mg/m³)

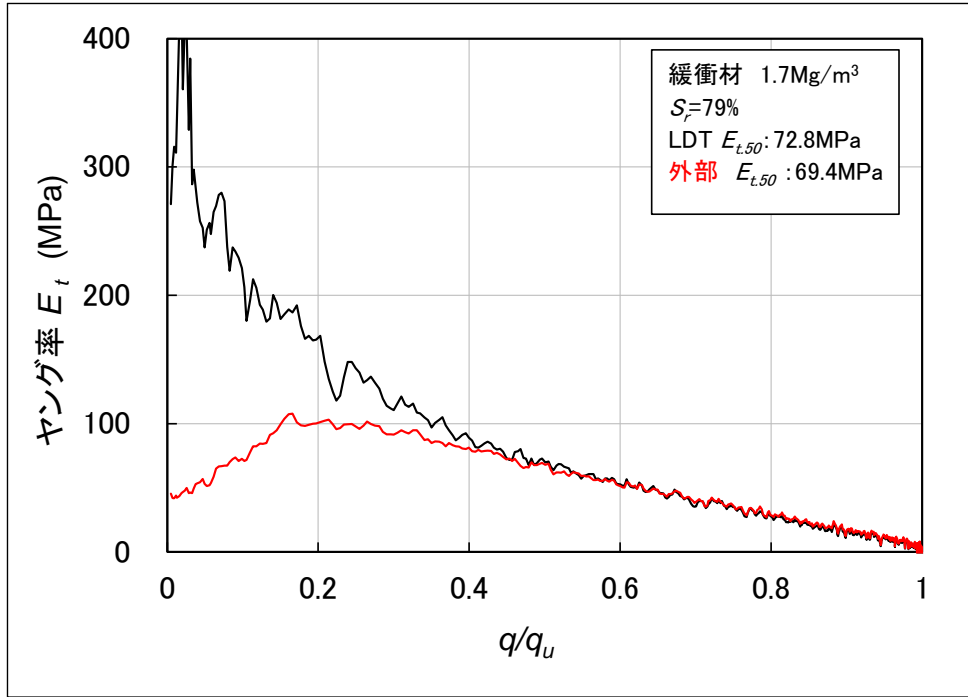


図 3.2.2-77 緩衝材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.7Mg/m³)

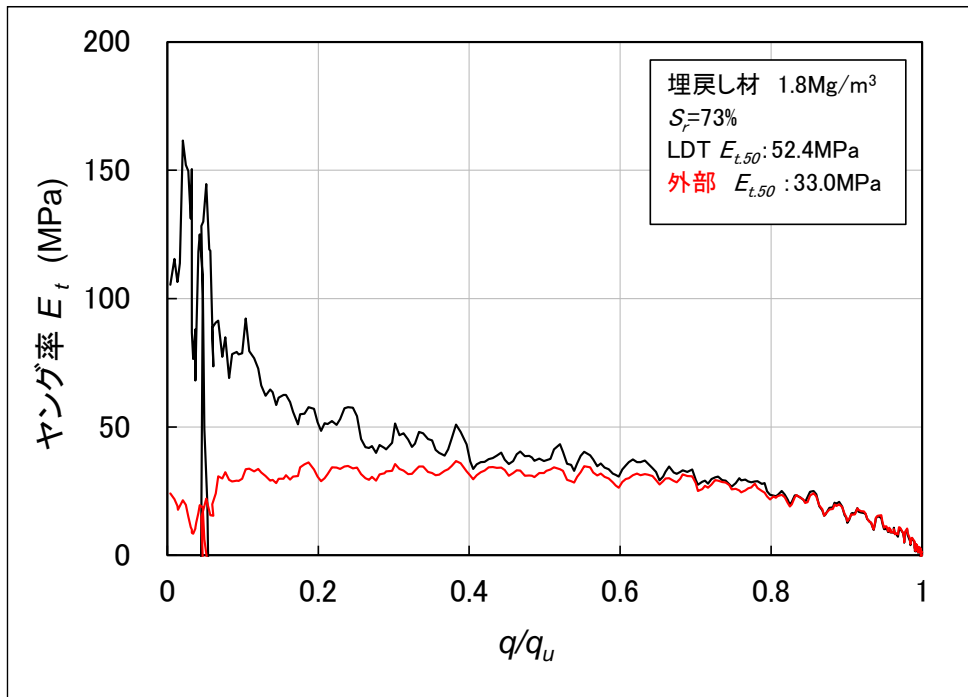


図 3.2.2-78 埋戻し材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m³)

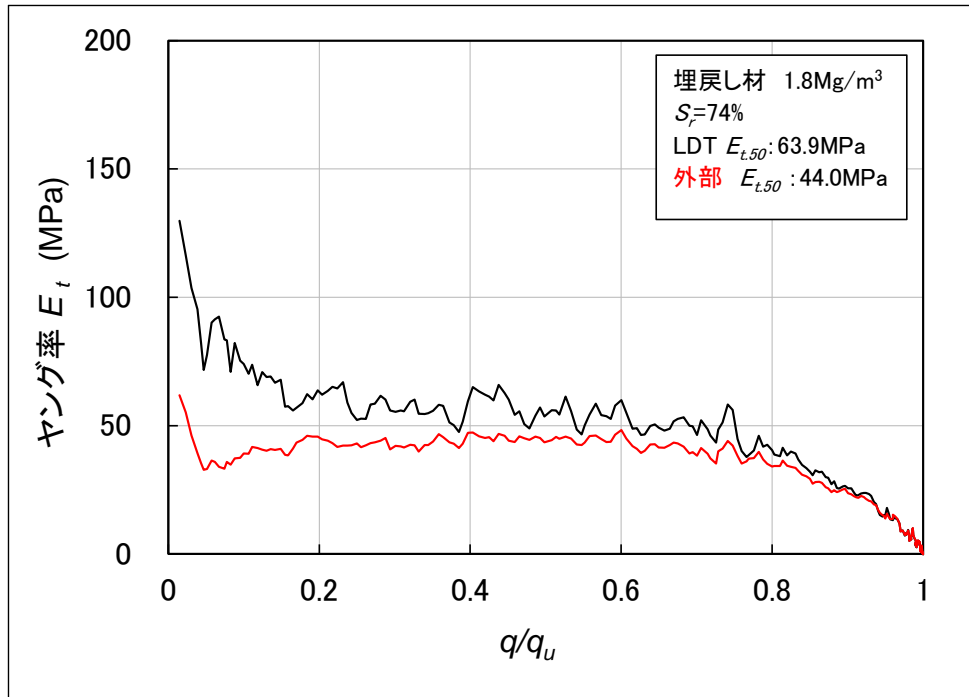


図 3.2.2-79 埋戻し材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m³)

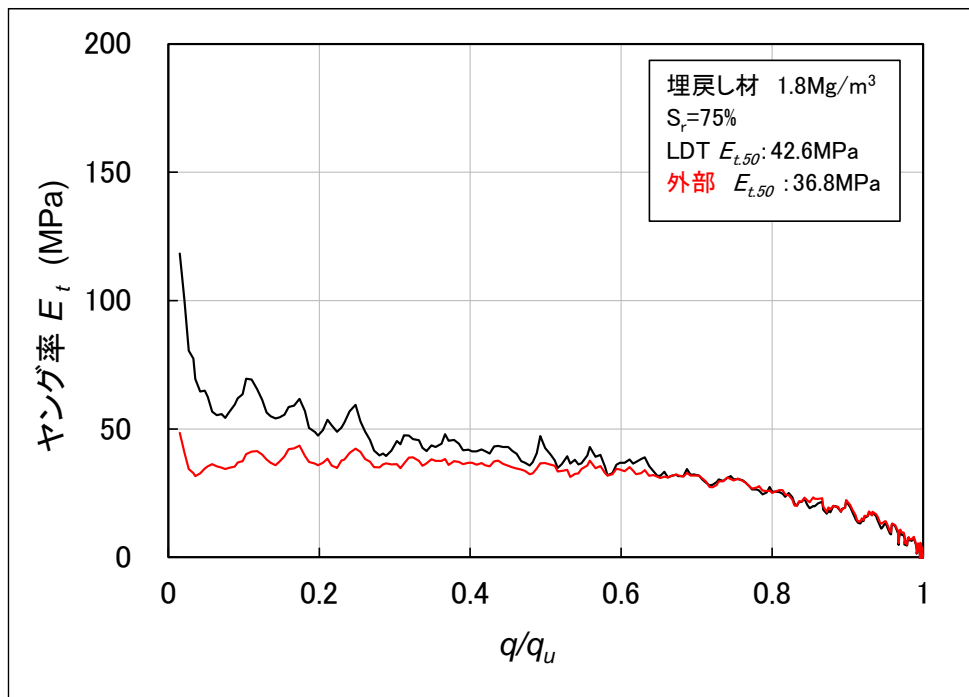


図 3.2.2-80 埋戻し材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m³)

2) 周辺岩盤の一軸圧縮強さ

周辺岩盤の一軸圧縮試験は、遠心模型試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 3.2.2-81 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 3.2.2-81 一軸圧縮試験装置

周辺岩盤の一軸圧縮試験結果を表 3.2.2-20 及び図 3.2.2-82～図 3.2.2-84 に示す。

表 3.2.2-20 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_{t50} MPa	2116	2720	4651	3162
ポアソン比 ν	0.23	0.18	0.18	0.20

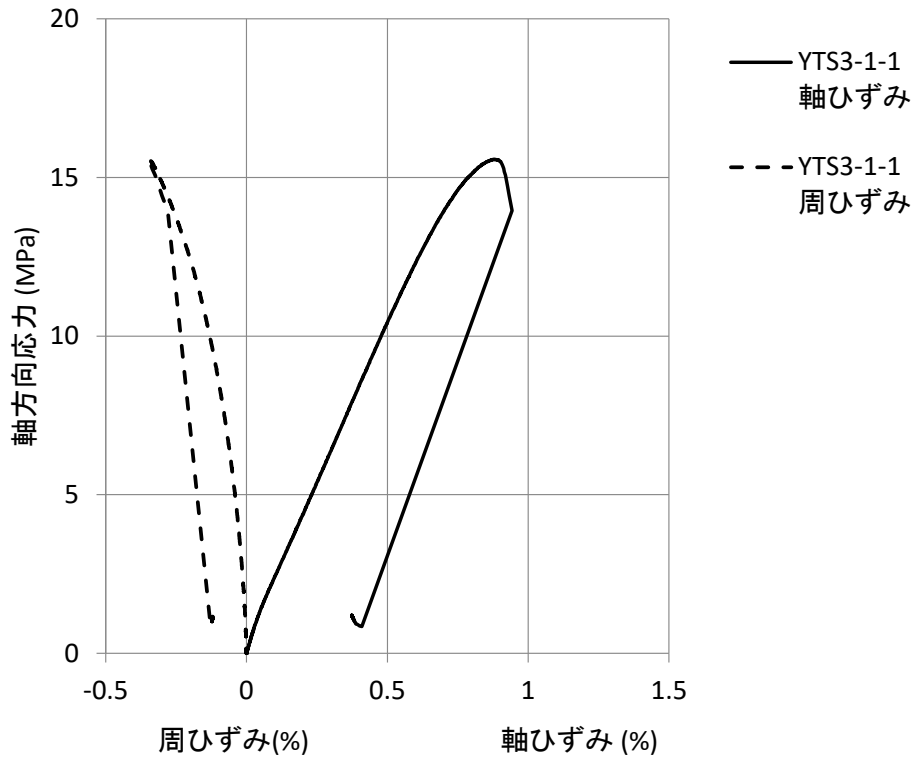


図 3.2.2-82 一軸圧縮試験結果 (強制乾燥状態)

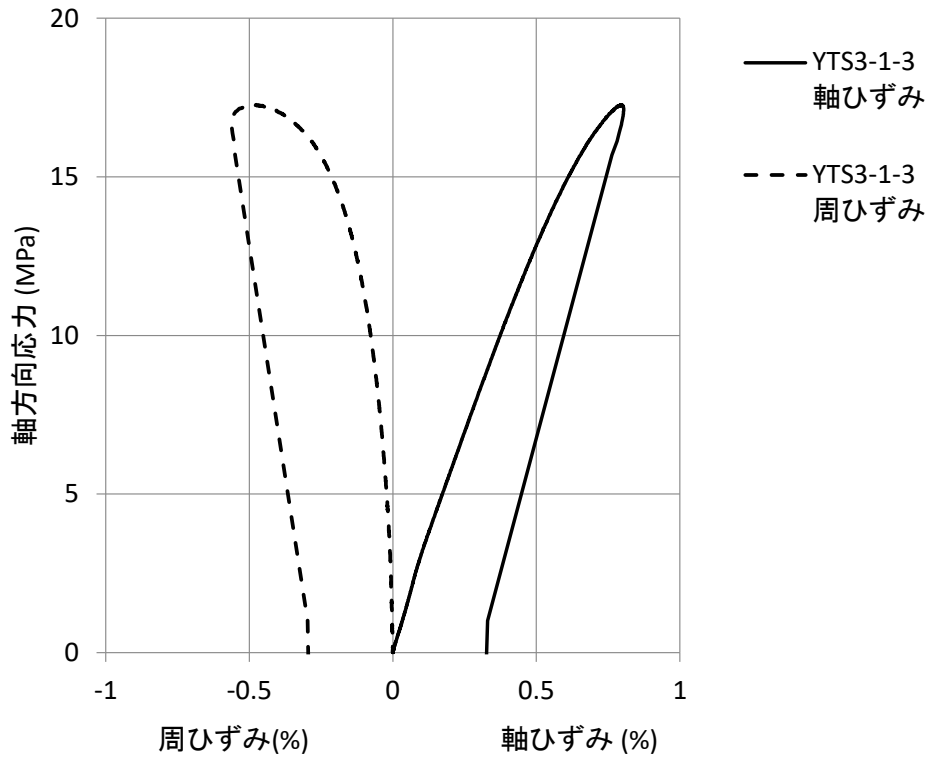


図 3.2.2-83 一軸圧縮試験結果 (強制乾燥状態)

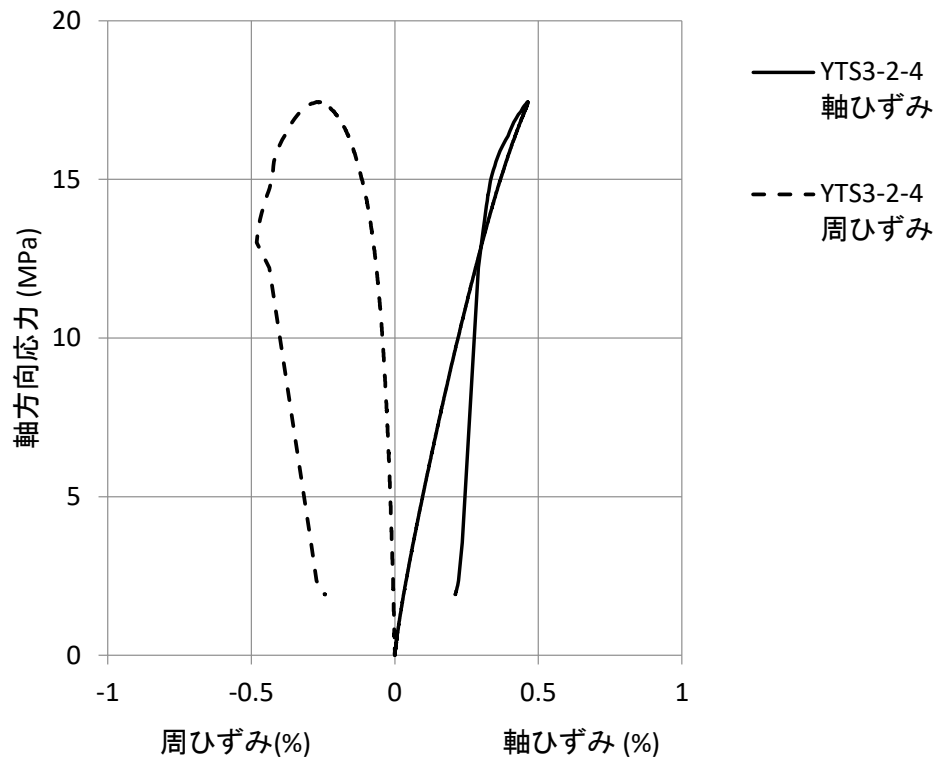


図 3.2.2-84 一軸圧縮試験結果 (強制乾燥状態)

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 3.2.2-85 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 3.2.2-86 に示し、一軸引張試験結果を表 3.2.2-21 及び図 3.2.2-87 に示す。



図 3.2.2-85 一軸引張試験装置

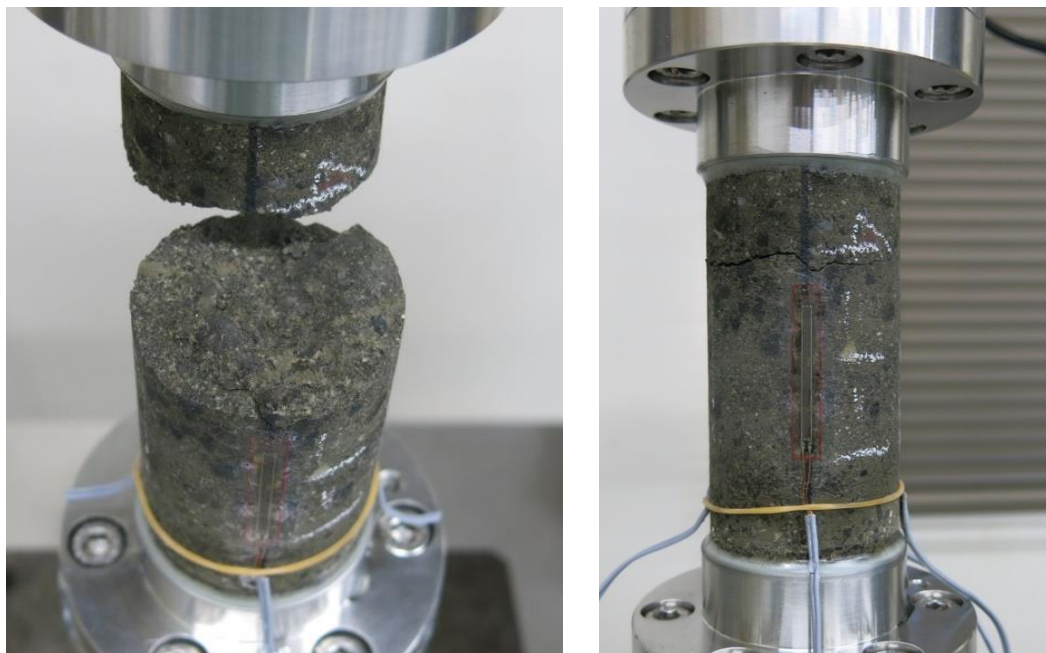


図 3.2.2-86 一軸引張試験後の供試体状況

表 3.2.2-21 一軸引張試験結果

供試体番号		YTS3-4-4	YTS4-1-1	YTS4-1-4	YTS2-1-1	YTS2-4-2	平均
一軸引張強さ	(MPa)	0.309	0.439	0.638	0.819	0.275	0.496
変形係数	Ets,50 (MPa)	2030	3170	5630	2980	654	2893
	Ett,50 (MPa)	1750	2220	5020	2600	571	2432

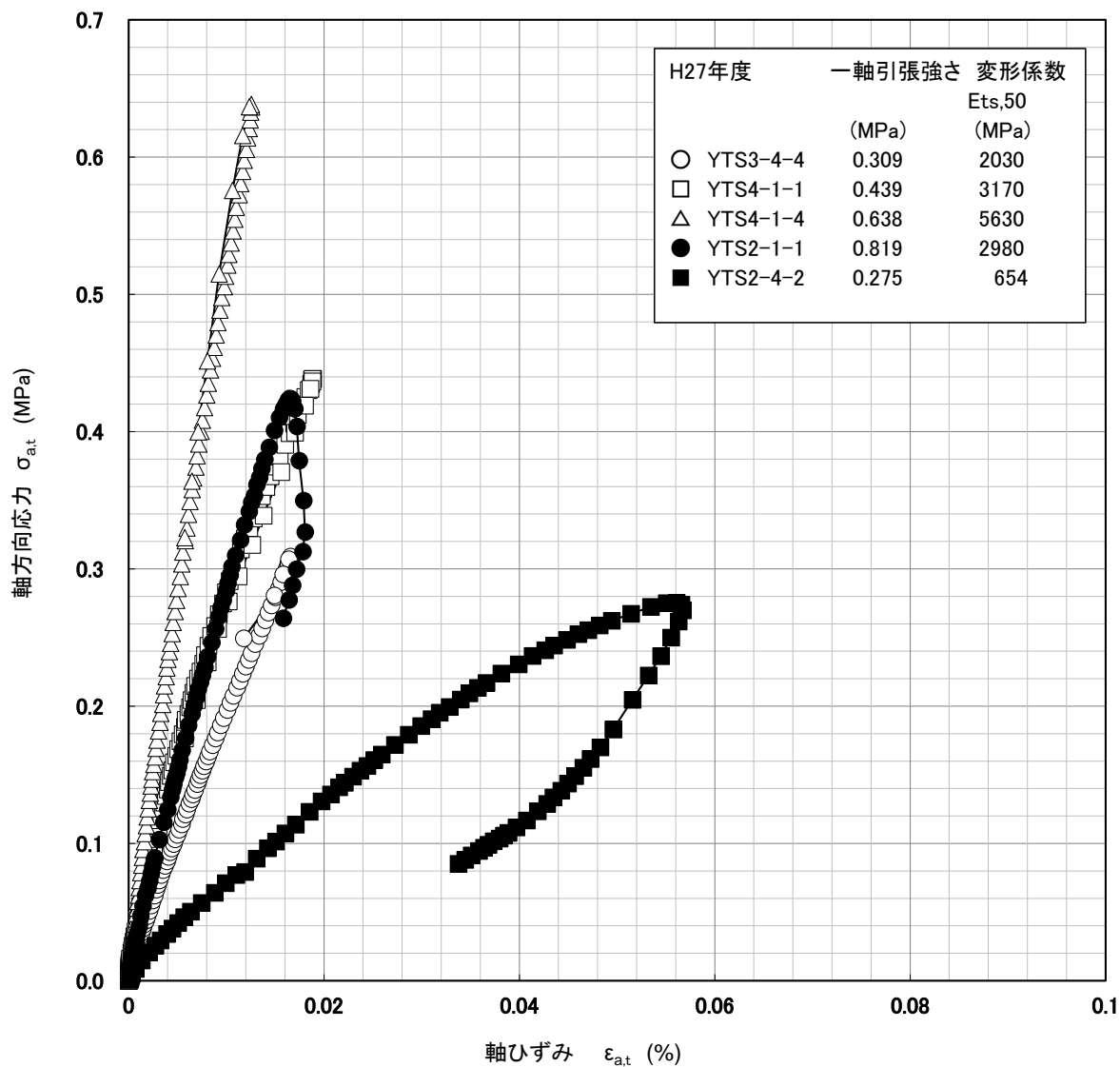


図 3.2.2-87 一軸引張試験結果

4) 緩衝材の三軸圧縮試験

緩衝材の三軸圧縮試験は、不飽和状態にある緩衝材の非排水せん断強度を把握する目的で、図 3.2.2-88 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 3.2.2-22 に示す。緩衝材の三軸圧縮試験は、 $1.6(\text{Mg}/\text{m}^3)$ の乾燥密度条件で作製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：ケイ砂 3 で混合）を設定した乾燥密度となるように重量測定を行い、静的締固めにより作製した。作製した供試体を不飽和状態のまま三軸試験装置にセットし、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载荷を行った。

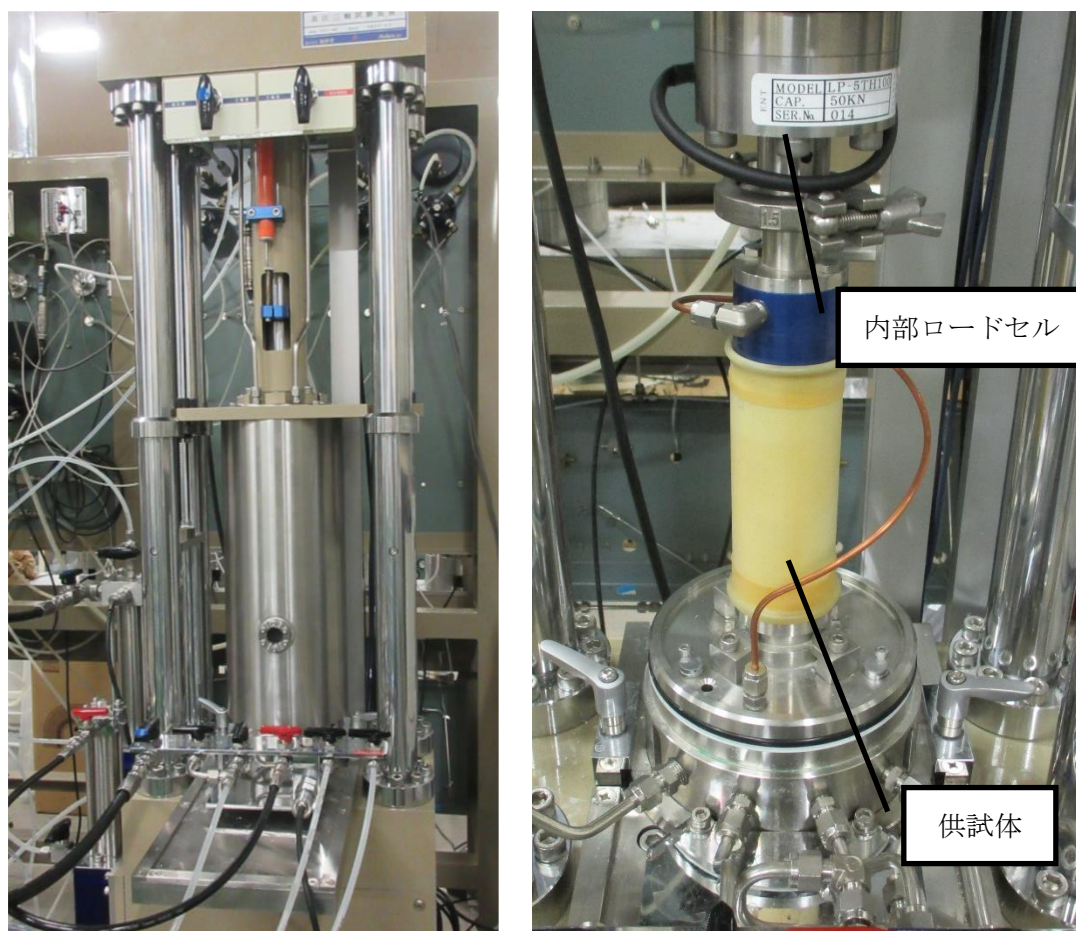


図 3.2.2-88 三軸圧縮試験装置

表 3.2.2-22 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)
载荷速度	0.1 (%/min)
含水状態	供試体作製時の含水比
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 3.2.2-23 及び図 3.2.2-89 に示す。

表 3.2.2-23 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	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

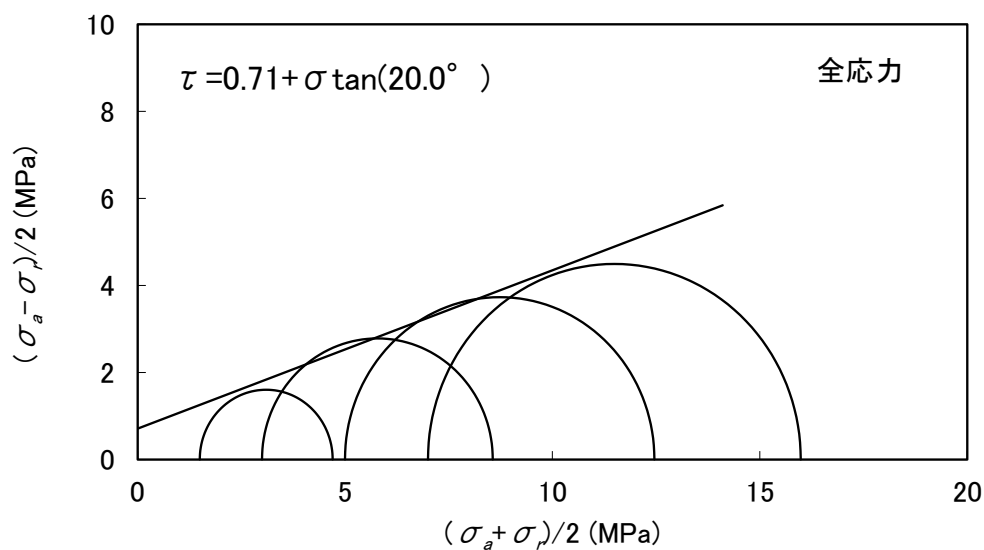
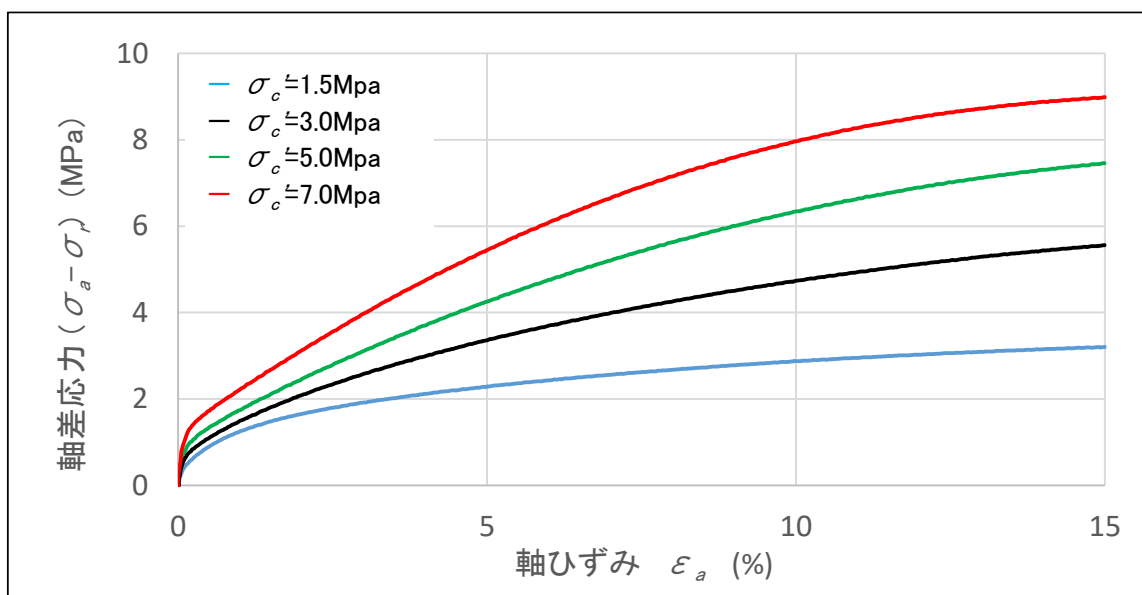


図 3.2.2-89 緩衝材の三軸圧縮（圧密非排気）試験結果

図 3.2.2-90～図 3.2.2-93 には、緩衝材及び埋戻し材の局所変位計で計測した三軸圧縮（圧密非排気）試験結果の比較を示す。図 3.2.2-90～図 3.2.2-93 より、局所変位計で計測したヤング率のほうが外部変位計で計測したヤング率に比べ、わずかに大きい値を示す結果となった。緩衝材及び埋戻し材の三軸圧縮試験では、拘束圧を付加することにより、供試体端部に発生するベディングエラーの影響が小さくなり、局所変位計と外部変位計で計測したヤング率に大きな差異が認められなかったと考える。今後、変形特性にひずみ依存性を考慮した解析を実施する場合、一軸圧縮試験と同様に、局所変位計による変形特性（微小ひずみ領域）の取得が必要と考える。

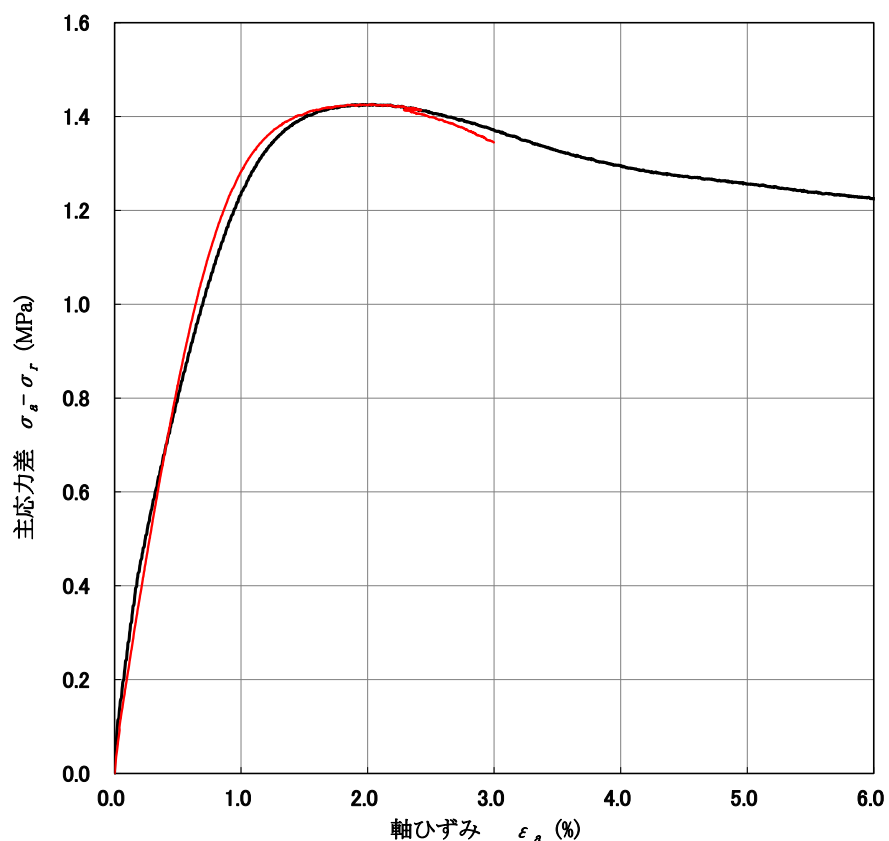


図 3.2.2-90 緩衝材の三軸圧縮（圧密非排気）試験結果
 （供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m³）

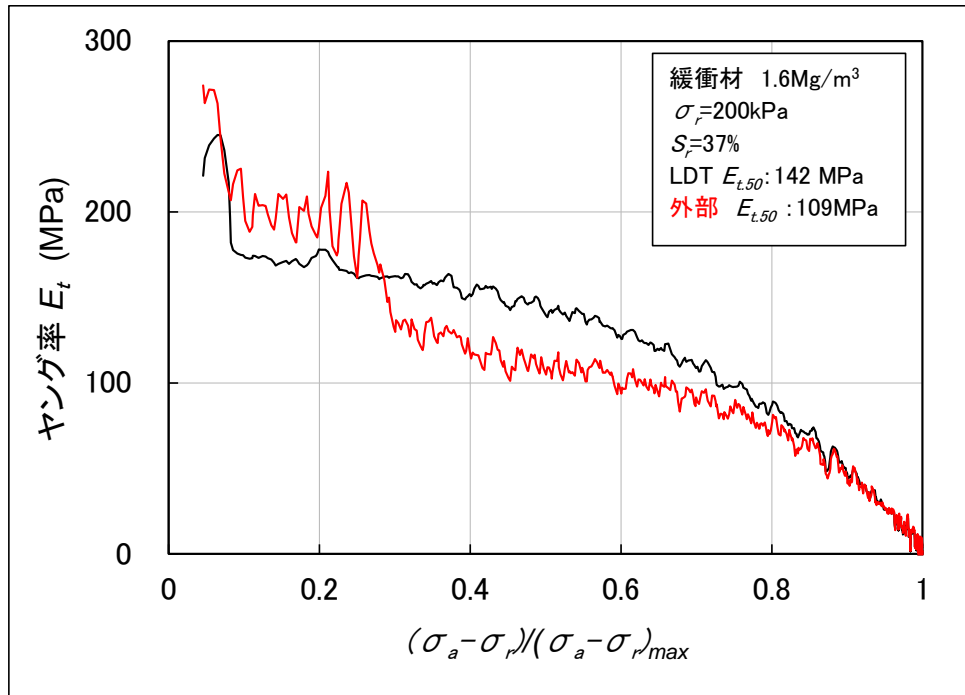


図 3.2.2-91 緩衝材のヤング率の比較 (供試体作製時の乾燥密度 1.6Mg/m³)

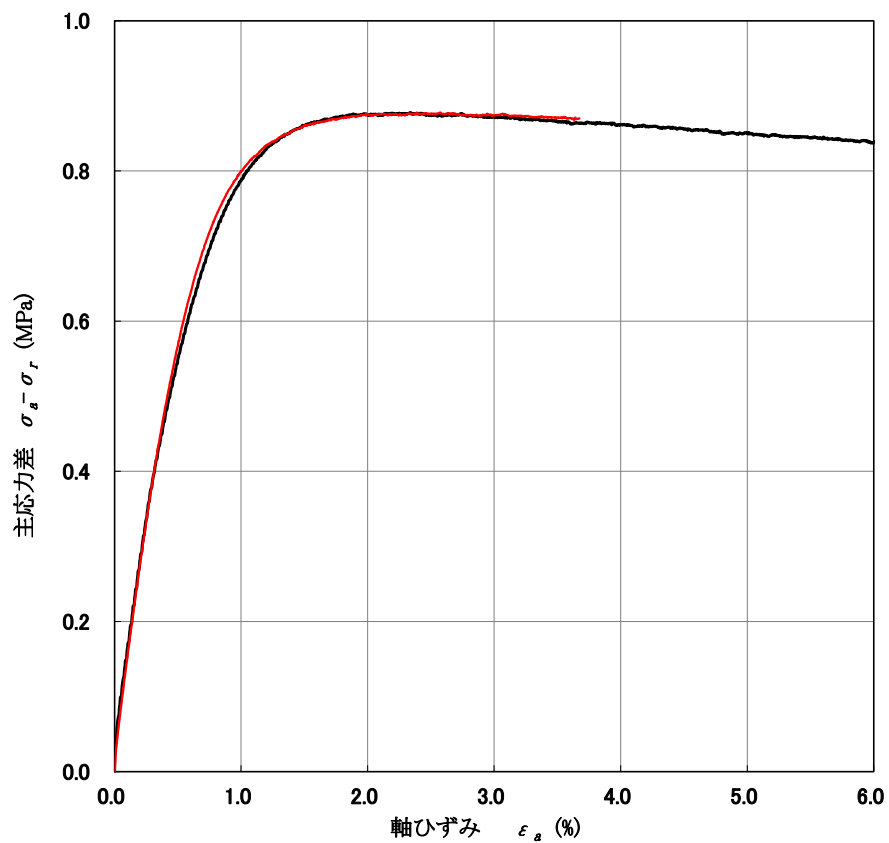


図 3.2.2-92 埋戻し材の三軸圧縮 (圧密非排気) 試験結果
(供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m³)

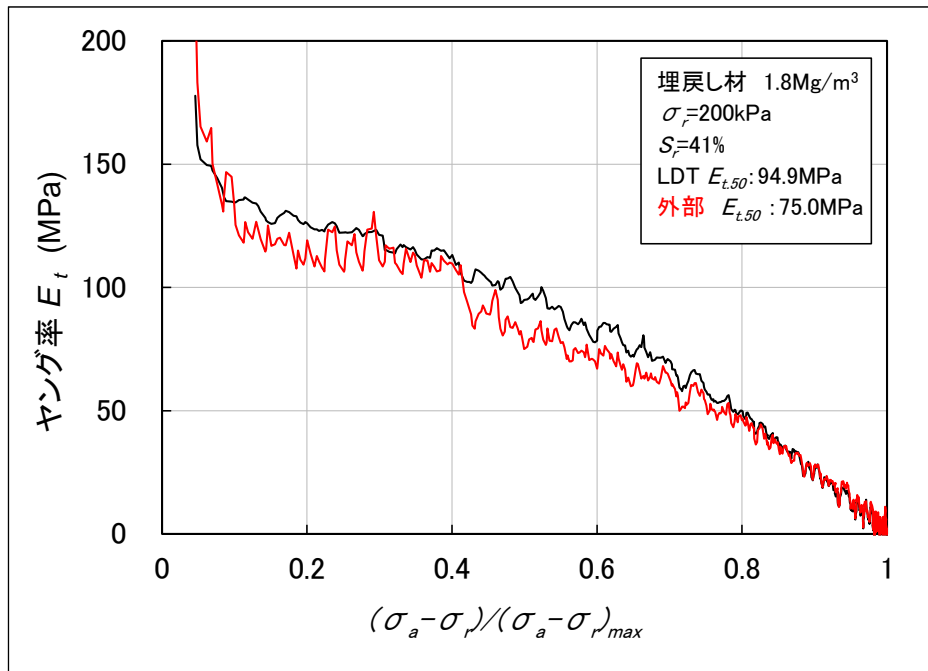


図 3.2.2-93 埋戻し材のヤング率の比較
 (供試体作製時の乾燥密度 1.8Mg/m³)

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 3.2.2-94 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 3.2.2-24 に示す。

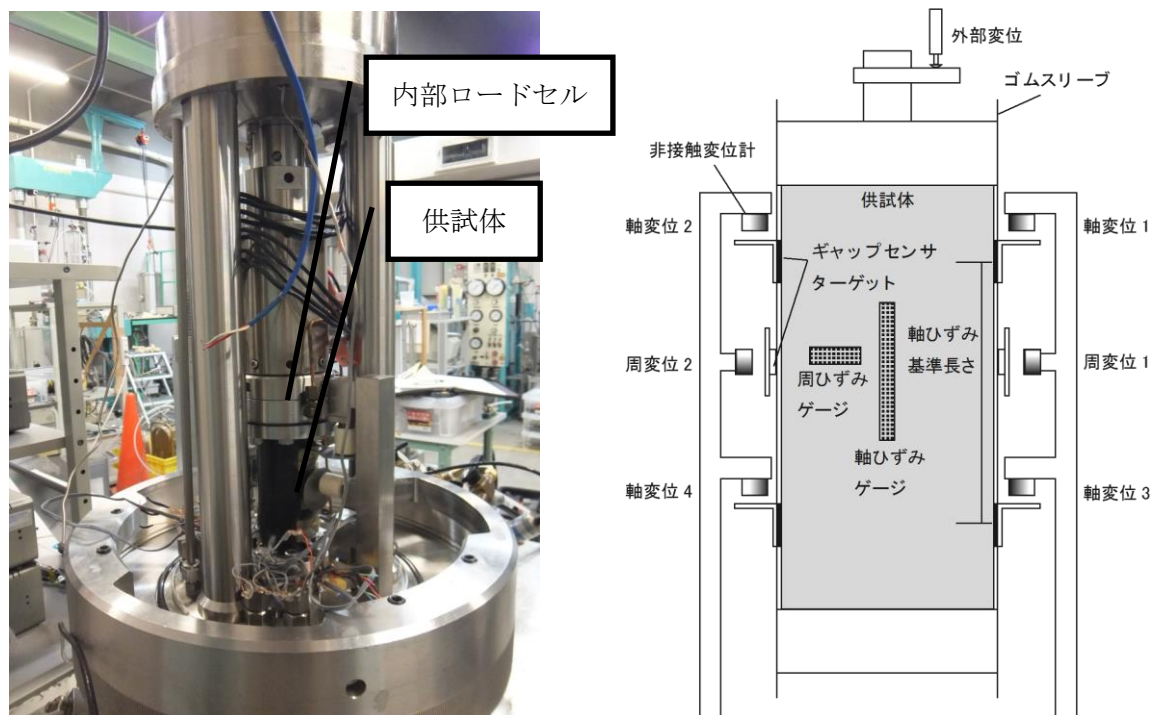


図 3.2.2-94 三軸圧縮試験装置

表 3.2.2-24 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)
载荷速度	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 3.2.2-25～表 3.2.2-26 及び図 3.2.2-95～図 3.2.2-97 に示す。

表 3.2.2-25 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
圧密後間隙比	0.637	0.645	0.620	0.591
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
変形係数 E_{50} (MPa)	1503	2721	2712	2669
ポアソン比 ν -	0.21	0.21	0.21	0.06
試験体番号	YTS1-1-4	YTS3-3-5	YTS2-4-4	YTS-4-3-6
圧密圧力 (MPa)	1.5	7.0	3.0	5.0
圧密後間隙比	0.635	0.554	0.581	0.586
最大軸差強度 (MPa)	11.87	18.27	13.10	14.02
破壊ひずみ (%)	1.23	15.65	3.19	7.06
体積ひずみ (%)	0.11	5.86	0.89	2.31
変形係数 E_{50} (MPa)	2062	890	1786	1494
ポアソン比 ν -	0.40	0.23	0.54	0.08

表 3.2.2-26 周辺岩盤の三軸圧縮試験結果のまとめ（飽和条件）

粘着力 c	(MPa)	2.64
内部摩擦角 ϕ	($^{\circ}$)	24.2
変形係数 E_{50}	(MPa)	1850
ポアソン比 ν	-	0.25

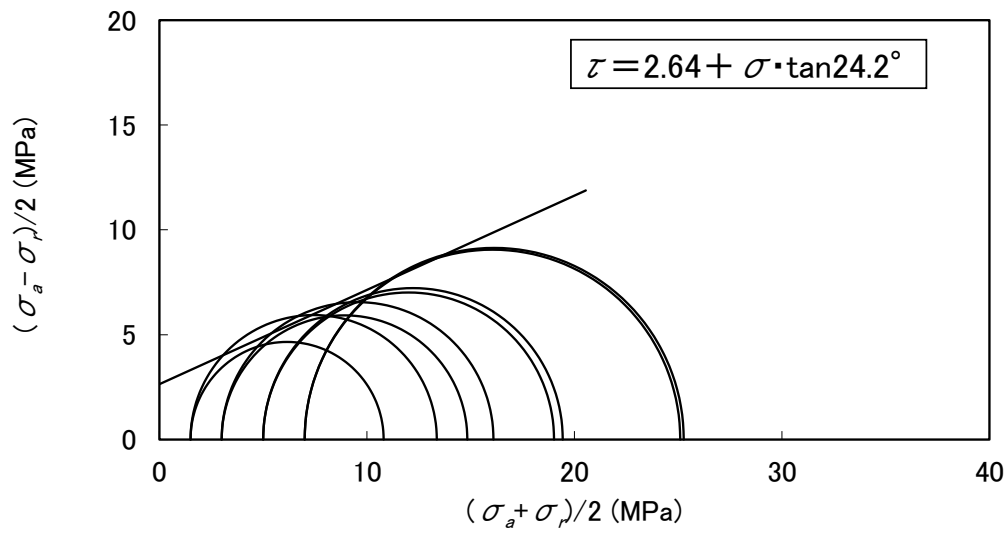


図 3.2.2-95 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果（強度定数）

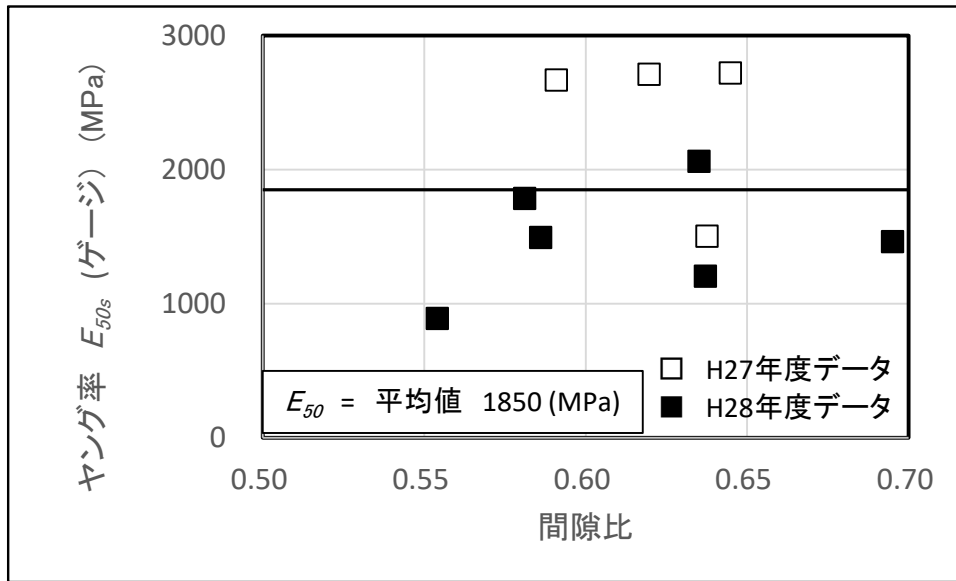


図 3.2.2-96 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果（ヤング率と間隙比）

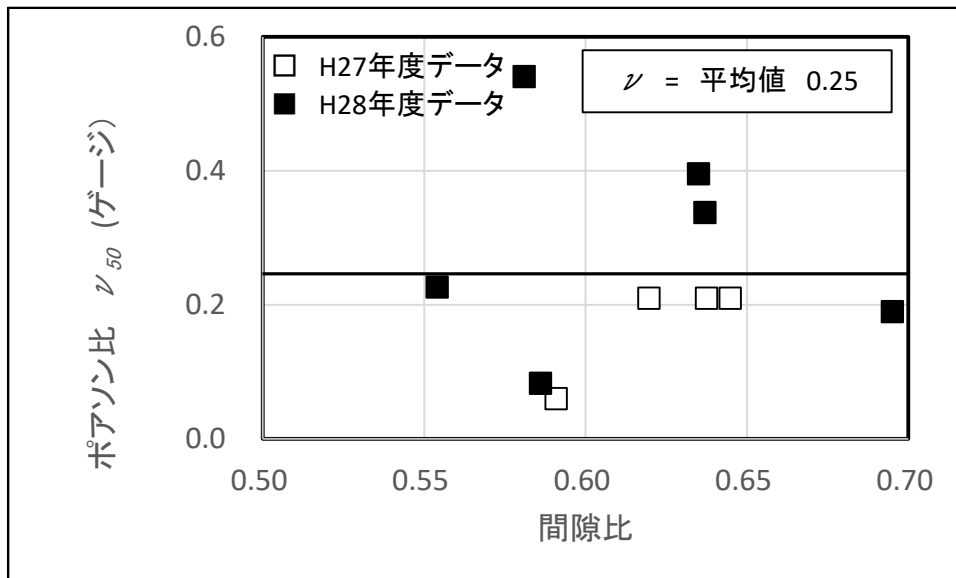


図 3.2.2-97 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排水）試験結果（ ν_{50} と間隙比）

強制乾燥状態の周辺岩盤の強度特性を把握する目的で、三軸圧縮（圧密排気）試験を実施した。三軸圧縮（圧密排気）の試験条件を表 3.2.2-24 に示す。

表 3.2.2-27 三軸圧縮（圧密排気）試験条件

供試体寸法	直径 50(mm)×高さ 100 (mm)
载荷速度	0.005 (%/min)
含水状態	強制乾燥状態（110°C 炉乾燥）
有効拘束圧 σ_c'	1.5、3、5、7(MPa)

周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排気）試験結果を、表 3.2.2-28～表 3.2.2-29 及び図 3.2.2-98～図 3.2.2-100 に示す。

表 3.2.2-28 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排気）試験結果

試験体番号	YTS5-1-3	YTS5-1-6	YTS2-6-1	YTS6-4-7
圧密圧力 (MPa)	1.5	3.0	5.0	7.0
初期間隙比	0.633	0.661	0.599	0.673
最大軸差強度 (MPa)	20.71	21.19	23.73	25.01
破壊ひずみ (%)	2.50	3.37	3.48	6.61
変形係数 E_{50} (MPa)	3507	3054	3309	4000
ポアソン比 ν	0.10	0.14	0.15	0.07

表 3.2.2-29 周辺岩盤の試験結果のまとめ (強制乾燥条件)

粘着力 c	(MPa)	7.04
内部摩擦角 ϕ	(°)	17.4
変形係数 E_{50}	(MPa)	3290
ポアソン比 ν	-	0.11

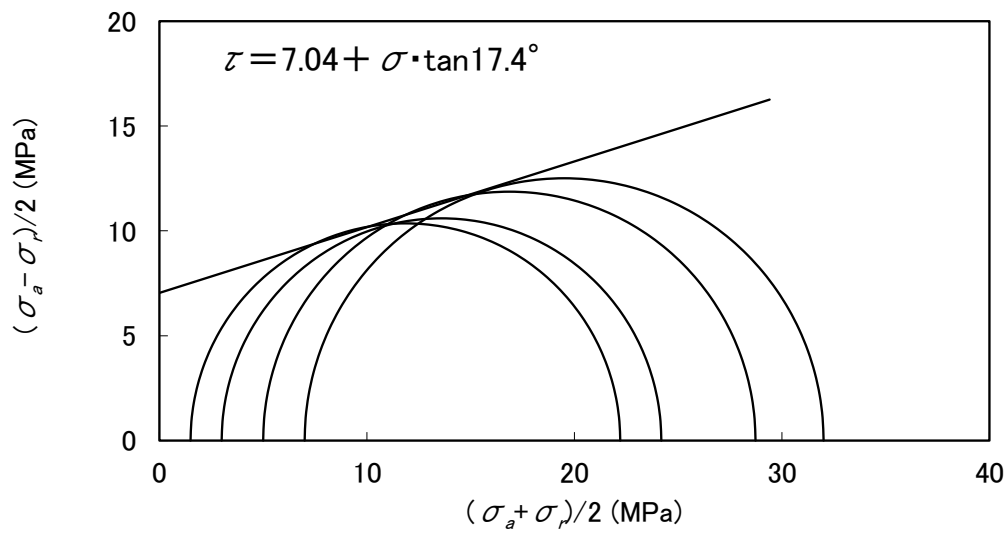


図 3.2.2-98 周辺岩盤の三軸圧縮 (圧密排気) 試験結果 (強度定数)

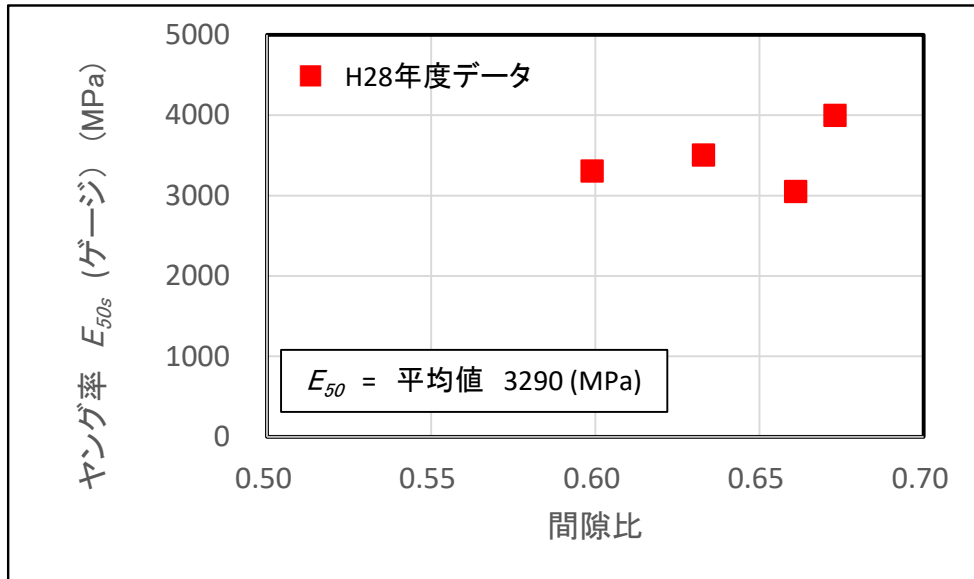


図 3.2.2-99 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排気）試験結果（ヤング率と間隙比）

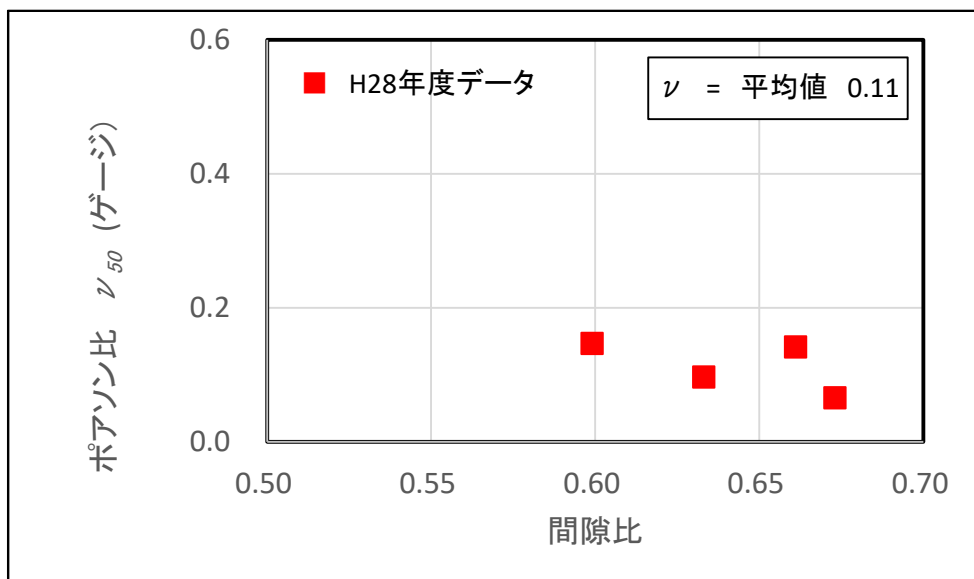


図 3.2.2-100 周辺岩盤の三軸圧縮（圧密排気）試験結果（ ν_{50} と間隙比）

6) 周辺岩盤のクリープ（圧密排水）試験

周辺岩盤のクリープ試験は、周辺岩盤の長期的な強度、変形特性を把握する目的で、図 3.2.2-101 に示す試験装置を用いて実施した。クリープ（圧密排気）試験の試験条件表 3.2.2-30 に示す。



図 3.2.2-101 クリープ試験装置

表 3.2.2-30 クリープ試験の試験条件

クリープ試験で求める物性	試験条件
残留強度以下のせん断弾性係数 及び粘性係数	有効拘束圧 0.1(MPa) 応力比（三軸圧縮試験のピーク強度に対する比） 0.35
拘束圧依存性	有効拘束圧 0.1、0.4、1.6(MPa)
最小ひずみ速度と加速クリープ の関係	有効拘束圧 0.1(MPa) 応力比 0.9、0.85、0.8

7) クリープ定数の算出

LOSTUF に必要なクリープ定数は、「堆積軟岩における大規模空洞の掘削時挙動・長期挙動の解析的検討」[19]を参考に算出した。

クリープ定数のうち、粘性係数を求める 5 要素モデルは、以下の式で表される。

$$\frac{\dot{\epsilon}}{(\sigma_a - \sigma_r)} = \frac{1}{3} \left[\frac{e^{-\left(\frac{G_2}{\eta_{G2}}\right)t}}{\eta_{G2}} + \frac{e^{-\left(\frac{G_3}{\eta_{G3}}\right)t}}{\eta_{G3}} \right] \quad 3-30$$

ここに、

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

有効拘束圧 0.1MPa、応力比 0.35 で実施したクリープ試験から得られた、軸差応力で正規化した偏差ひずみ速度と経過時間との関係を図 3.2.2-102～図 3.2.2-103 に示す。

図 3.2.2-102 に示す第 1 近似線及び図 3.2.2-103 に示す第 2 近似線の切片から粘性係数 η_{G2} 、 η_{G3} を算出し、第 1 近似線、第 2 近似線の傾きと粘性係数 η_{G2} 、 η_{G3} から、せん断弾性係数 G_2 、 G_3 を算出した。

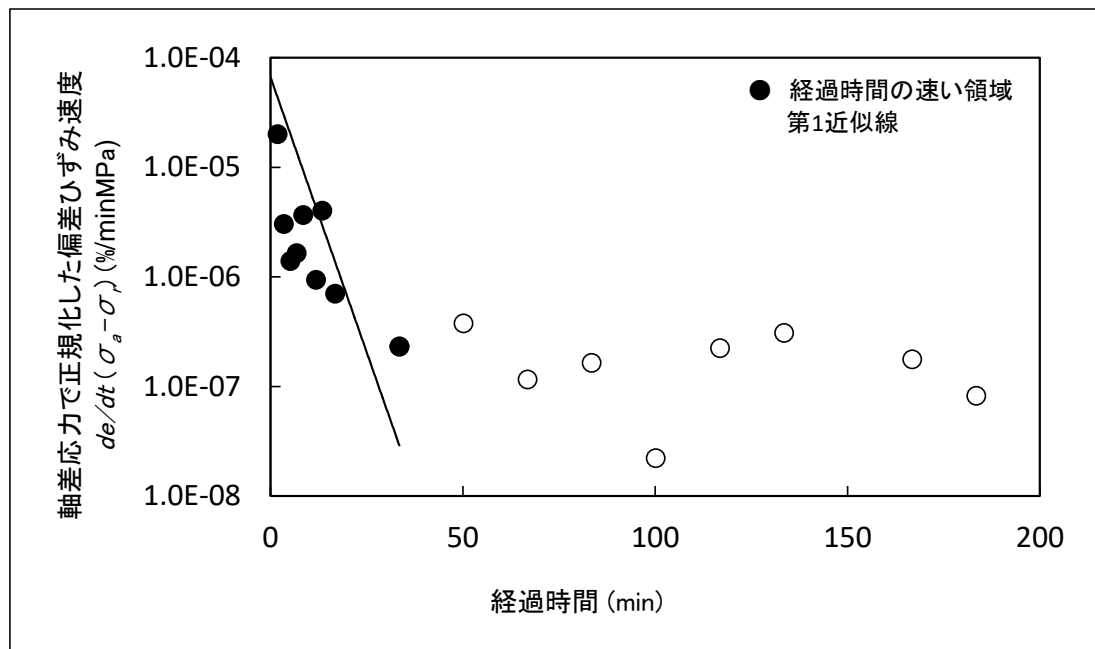


図 3.2.2-102 軸差応力で正規化した偏差ひずみ速度と経過時間 (第 1 近似線)

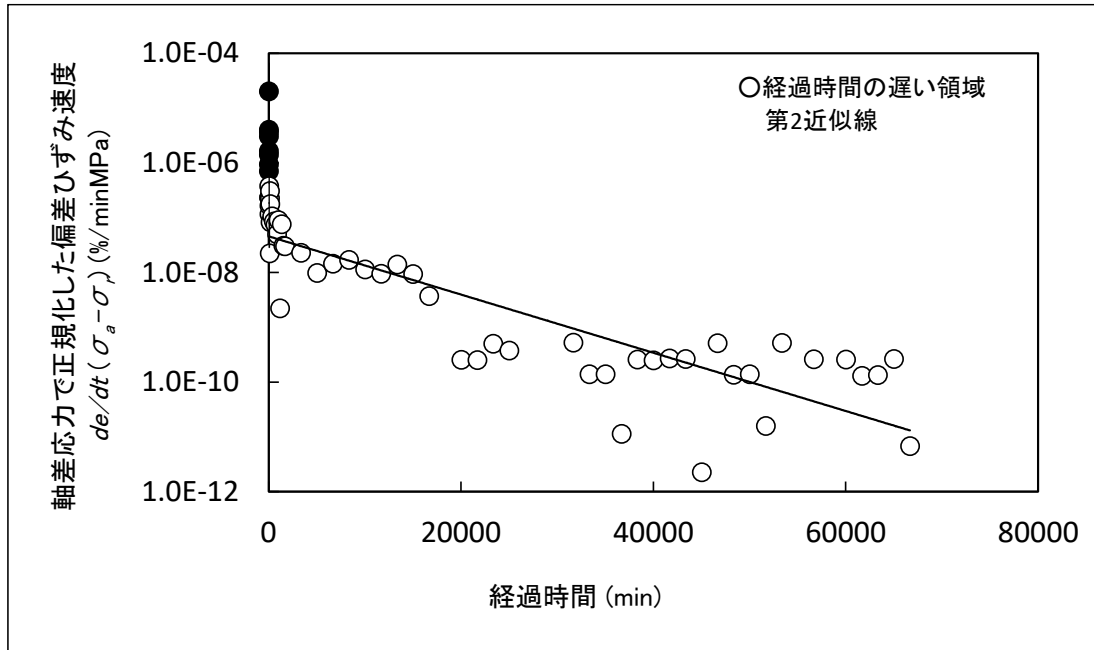


図 3.2.2-103 軸差応力で正規化した偏差ひずみ速度と経過時間（第 2 近似線）

表 3.2.2-31 には、せん断弾性係数と粘性係数のまとめを示す。

表 3.2.2-31 クリープ試験のまとめ

	第1近似線	第2近似線
せん断弾性係数 (MPa)	G_2 2679	G_3 2057
粘性係数 (MPa・min)	η_{G2} 5.04E+03	η_{G3} 7.30E+06

有効拘束圧 0.1MPa、応力比 0.9 及び 0.8 で実施したクリープ試験から得られた偏差ひずみ速度と経過時間との関係を図 3.2.2-104 に示す。

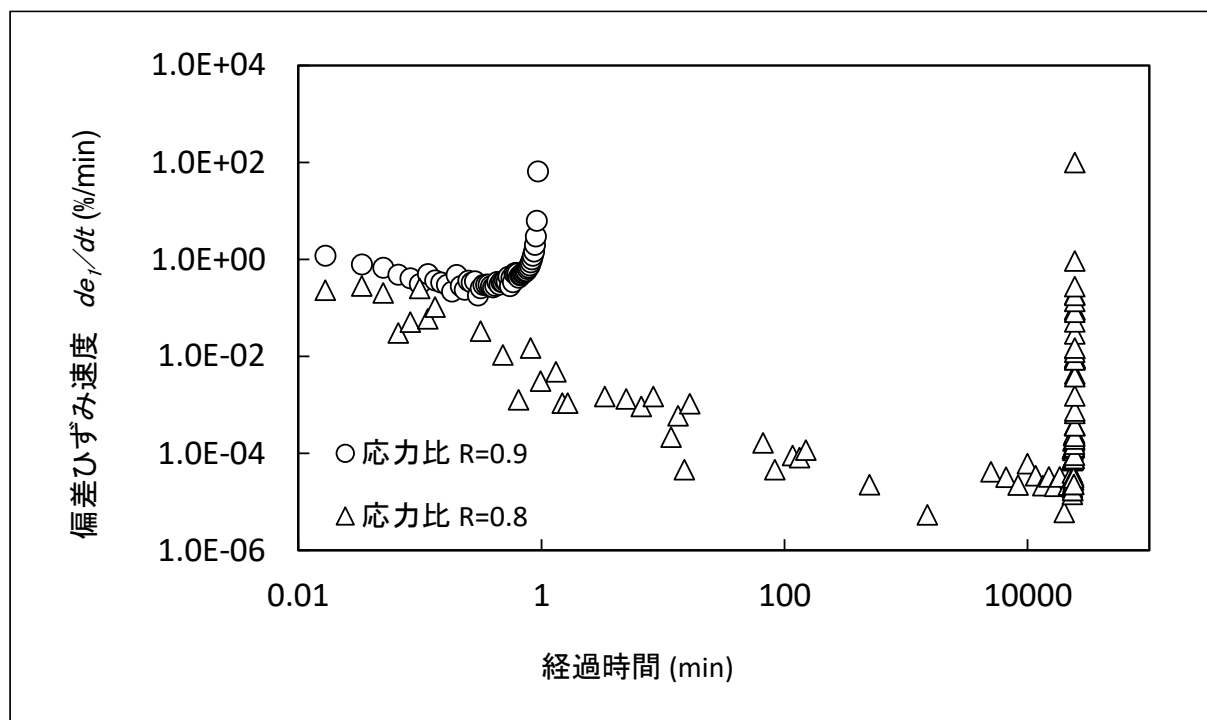


図 3.2.2-104 偏差ひずみ速度と経過時間

表 3.2.2-32 には、クリープ試験のまとめを示す。

表 3.2.2-32 クリープ試験のまとめ

応力比	σ_r' (MPa)	$\sigma_a - \sigma_r$ (MPa)	加速クリープ時間 t_a (min)	最小ひずみ速度 de_{1s}/dt (%/min)
0.9	0.1	6.11	0.55	1.81E-01
0.8	0.1	5.75	21667	5.43E-06

3.2.3 解析用物性値

平成 28 年度に実施した緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤の実験結果をとりまとめ、解析用物性値を更新した。表 3.2.3-1～表 3.2.3-2 に、平成 28 年度解析用物性値と対比を示す。解析用パラメータのうち、着色部分の物性値について、取りまとめの結果を示す。

表 3.2.3-1 解析用物性値の対比表（膨潤に関するパラメータ）

膨潤に関するパラメータ		解析用物性値	H28年度 実験結果	膨潤に関するパラメータ		解析用物性値	H28年度 実験結果
電子素量	(C)	1.62×10^{-19}	<--	モンモリロナイト粒子の厚さ	(m)	9.60×10^{-10}	<--
Boltzman定数	(J/K)	1.38×10^{-23}	<--	モンモリロナイト粒子の密度	(Mg/m ³)	2.77	<--
Hamaker定数	(J)	2.2×10^{-22}	<--	ベントナイトの密度	(Mg/m ³)	2.79	2.77
Avogadro's定数		6.023×10^{23}	<--	モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子の密度	(Mg/m ³)	2.81	2.77
陽イオン交換容量	(mequiv./g)	1.188	1.168	砂の土粒子密度	(Mg/m ³)	2.64	2.63
交換性Naイオン量	(mequiv./g)	0.673	0.674	緩衝材の乾燥密度	(Mg/m ³)	1.585	1.591
交換性Caイオン量	(mequiv./g)	0.478	0.458	モンモリロナイトの比表面積	(m ² /g)	810	<--
交換性Kイオン量	(mequiv./g)	0.015	0.015	モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積	(m ² /g)	0	<--
交換性Mgイオン量	(mequiv./g)	0.022	0.021	ベントナイトの モンモリロナイト含有率	(%)	54.0	55.1
NaイオンおよびKイオンのイオン価		1	<--	ベントナイト配合率	(%)	72.1	70.0
CaイオンおよびMgイオンのイオン価		2	<--	間隙水の誘電率	(C ² /J/m)	$80 \times 8.8542 \times 10^{-12}$	<--
Naイオンの非水和イオン半径	(nm)	0.098	<--	間隙水のイオン濃度	(mol/m ³)	35.2	<--
Caイオンの非水和イオン半径	(nm)	0.115	<--	絶対温度	(K)	298.15	<--
Kイオンの非水和イオン半径	(nm)	0.133	<--	膨潤圧	(MPa)	0.67	0.68
Mgイオンの非水和イオン半径	(nm)	0.085	<--				

表 3.2.3-2 解析用物性値の対比表（間隙以外のパラメータ）

解析用パラメータ		緩衝材		埋戻し材		周辺岩盤	
		解析用物性値	H28年度 実験結果	解析用物性値	H28年度 実験結果	解析用物性値	H28年度 実験結果
初期条件	間隙率	0.414	0.414	---	0.321	0.392	0.393
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.585	1.591	---	1.797	1.678	1.675
	固相密度 (Mg/m ³)	2.705	2.713	---	2.646	2.760	2.762
	飽和度 初期サクション50MPa時の値 (%)	25.6	25.0	---	6.1	20.5	20.5
透水特性	水分特性曲線 a (MPa ⁻¹)	0.244	0.244	---	2.978	13.6	13.6
	水分特性曲線 n	1.53	1.53	---	1.55	1.24	1.24
	透水係数 (m/s)	---	5.18×10^{-13}	---	1.06×10^{-11}	4.68×10^{-11}	6.10×10^{-11}
変形特性	ヤング率 (GPa)	飽和度依存性を考慮	飽和度依存性を考慮	---	平均値 0.03	2.7	平均値 1.85
	ポアソン比	乾燥時 0.3 飽和時 0.49	乾燥時 0.24 飽和時 0.49	---	平均値 0.48	0.21	平均値 0.25
膨潤特性	膨潤圧 (MPa)	0.67	0.68	---	0.16	---	---
熱特性	乾燥時の熱伝導率 (W/mK)	0.465	0.414	---	0.758	0.450	0.404
	飽和時の熱伝導率 (W/mK)	2.188	1.945	---	3.579	1.311	1.166
	比熱 (J/kg/K)	323	858	---	820	887	875
	熱膨張率(線膨張率) (K ⁻¹)	1.0×10^{-5}	2.07×10^{-5}	---	1.24×10^{-5}	2.9×10^{-6}	7.6×10^{-6}

1) 緩衝材及び埋戻し材の膨潤圧

緩衝材及び埋戻し材の膨潤圧を図 3.2.3-1～図 3.2.3-2 に示す。膨潤圧の解析用物性値は、平衡膨潤圧の測定結果の平均値とした。

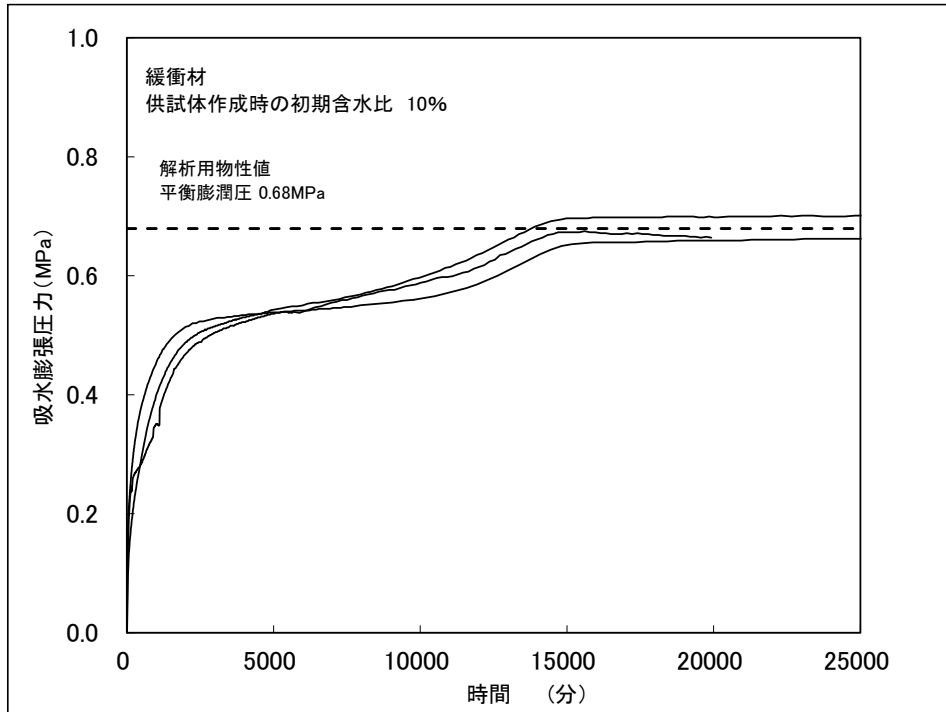


図 3.2.3-1 緩衝材の膨潤圧 (解析用物性値)

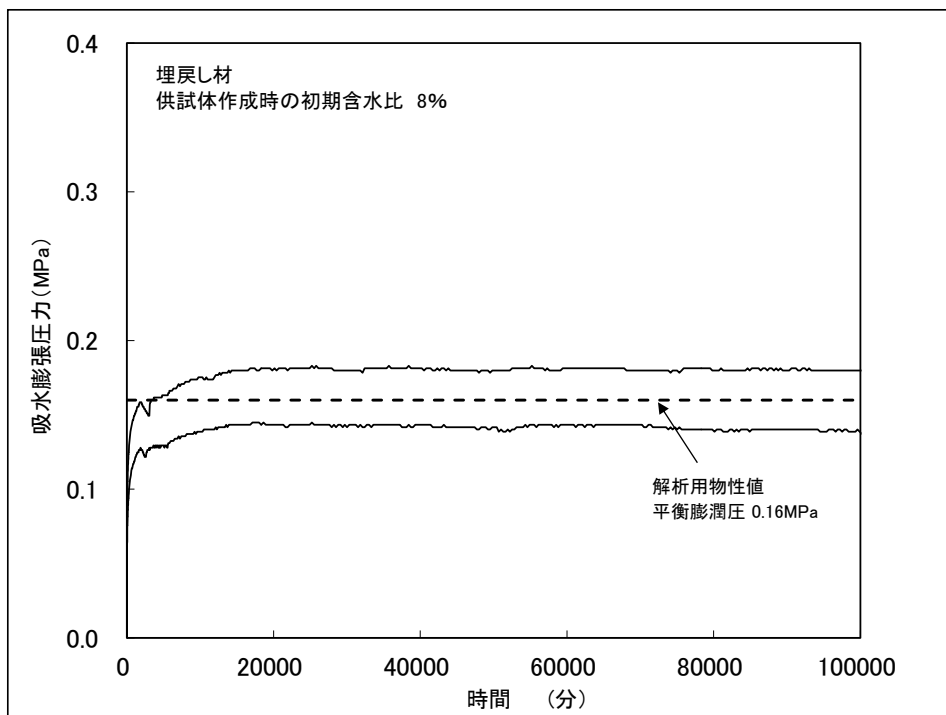


図 3.2.3-2 埋戻し材の膨潤圧 (解析用物性値)

2) 保水特性

保水特性の解析用物性値を表 3.2.3-3 及び図 3.2.3-3～図 3.2.3-5 に示す。保水特性の解析用物性値は、van Genuchten の回帰式によるパラメータとし、初期飽和度は、同回帰式に初期サクションとして 55MPa を代入した値とした。

表 3.2.3-3 保水特性の解析用物性値

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

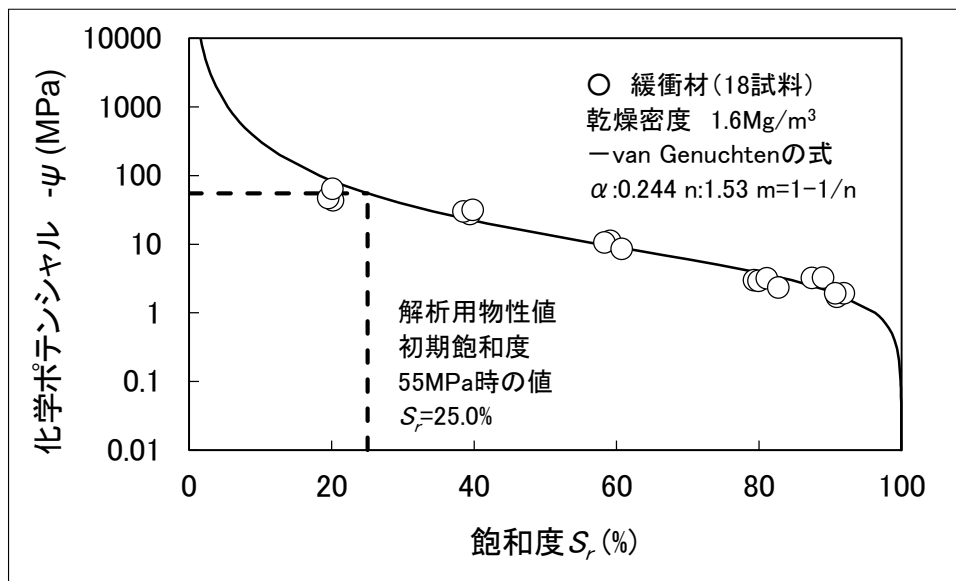


図 3.2.3-3 緩衝材の保水特性 (解析用物性値)

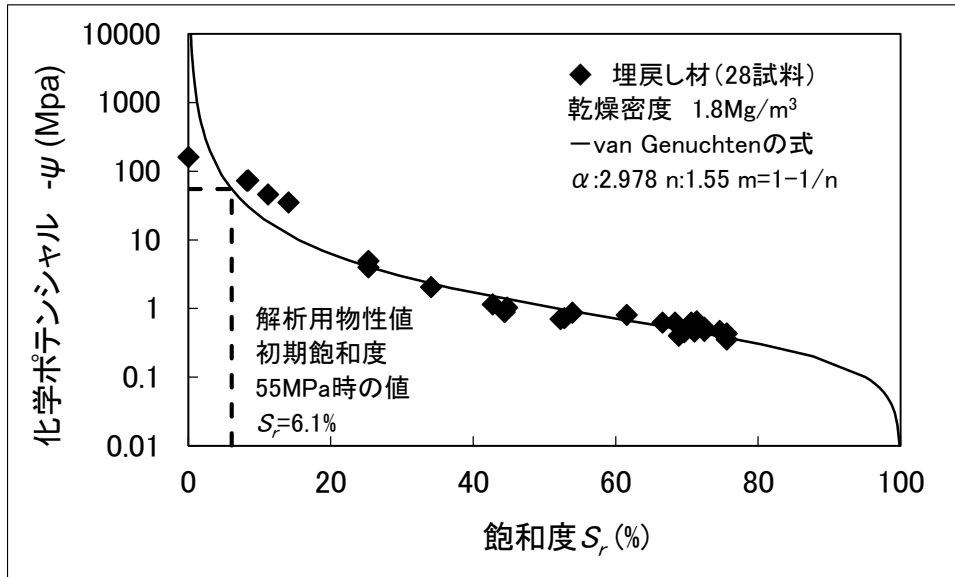


図 3.2.3-4 埋戻し材の保水特性（解析用物性値）

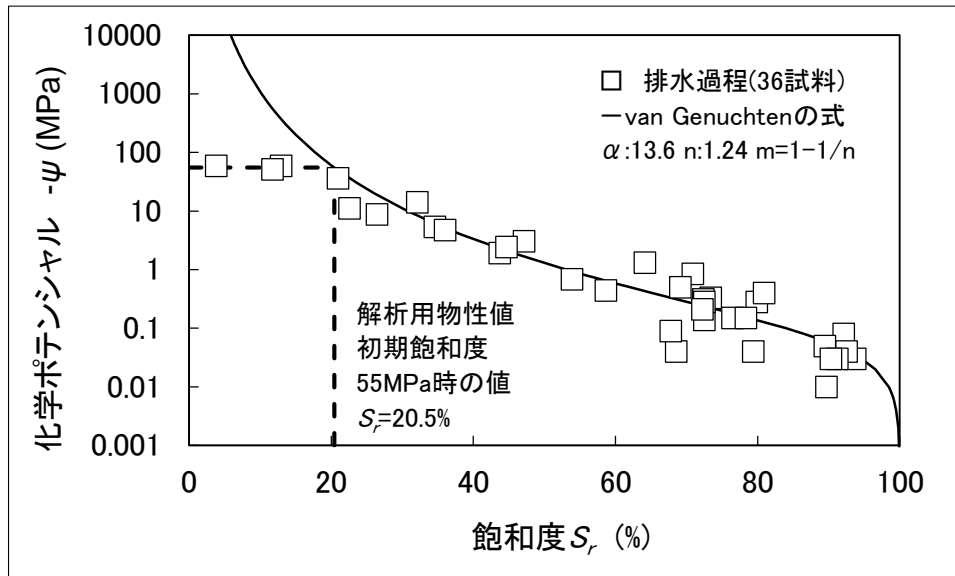


図 3.2.3-5 周辺岩盤の保水特性（解析用物性値）

3) 透水係数

透水係数の解析用物性値を表 3.2.3-3 に示す。透水係数の解析用物性値は、測定結果の平均値とした。

表 3.2.3-4 透水係数の解析用物性値

	緩衝材 1.6(Mg/m ³)	埋戻し材 1.8(Mg/m ³)	周辺岩盤
透水係数 k_w (m/s)	5.18E-13	1.06E-11	6.10E-11

4) 変形特性 (ヤング率及びポアソン比)

変形特性の解析用物性値を表 3.2.3-5 及び図 3.2.3-6～図 3.2.3-11 に示す。緩衝材の解析用物性値については、飽和度依存性を考慮した一次回帰式とし、埋戻し材及び周辺岩盤においては、飽和度依存性が明瞭に確認できないことから測定結果の平均値とした。

表 3.2.3-5 変形特性の解析用物性値

	緩衝材 1.6(Mg/m ³)	埋戻し材 1.8(Mg/m ³)	周辺岩盤
ヤング率 (MPa)	$E = 171 - 1.74 S_r$ $S_r \leq 92(\%)$ $E = 10(\text{MPa})$ $S_r > 92(\%)$	32.1	1850
ポアソン比	$\nu = 0.24 + 0.25 S_r$ 乾燥時 0.24 飽和時 0.49	0.48	0.25

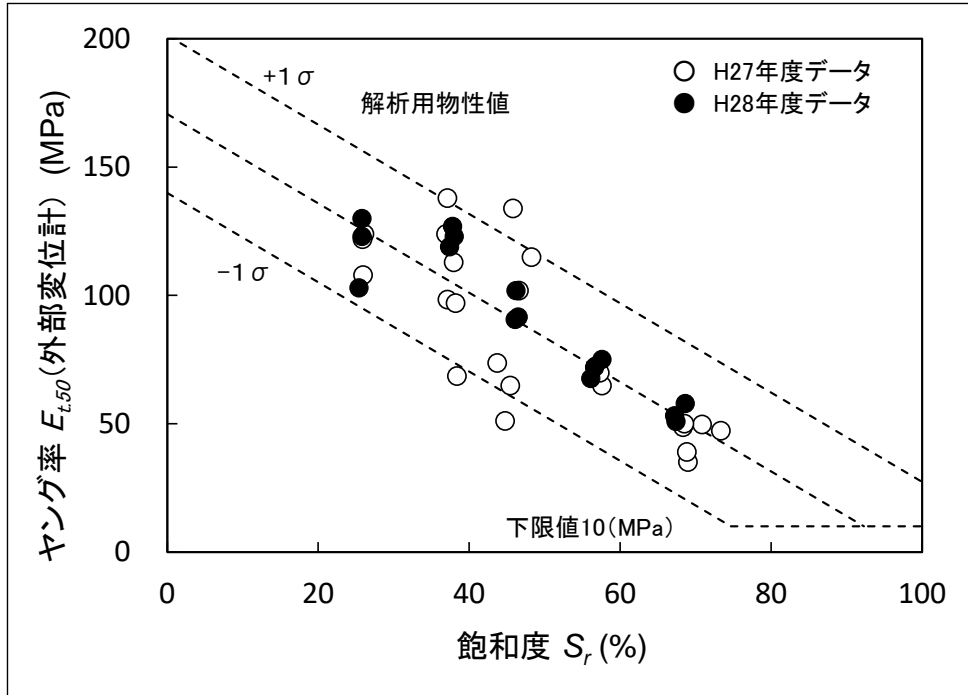


図 3.2.3-6 緩衝材のヤング率 (解析用物性値)

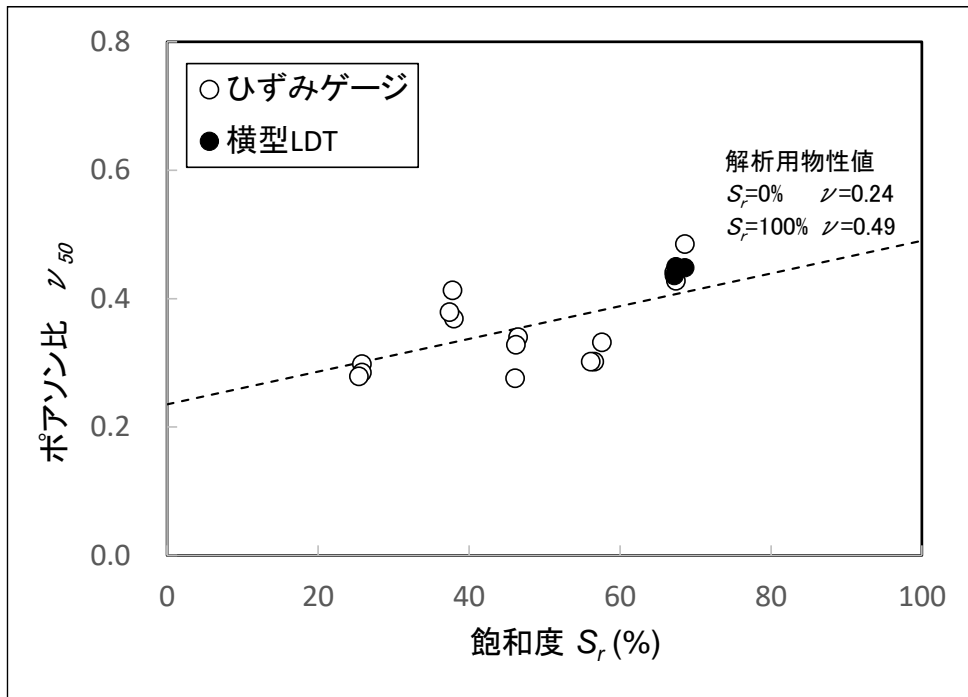


図 3.2.3-7 緩衝材のポアソン比 (解析用物性値)

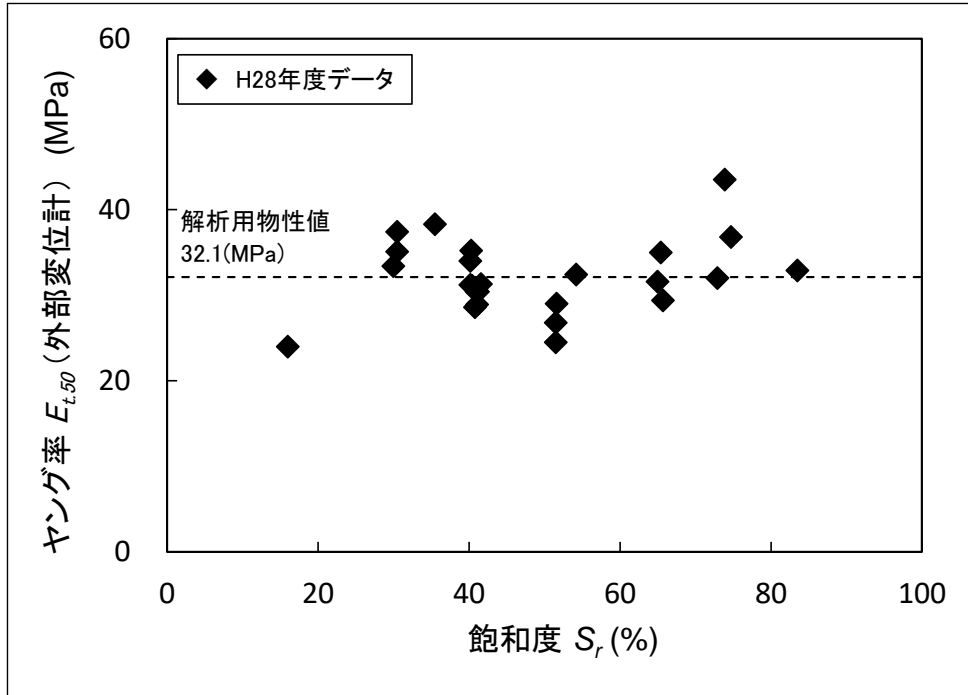


図 3.2.3-8 埋戻し材のヤング率 (解析用物性値)

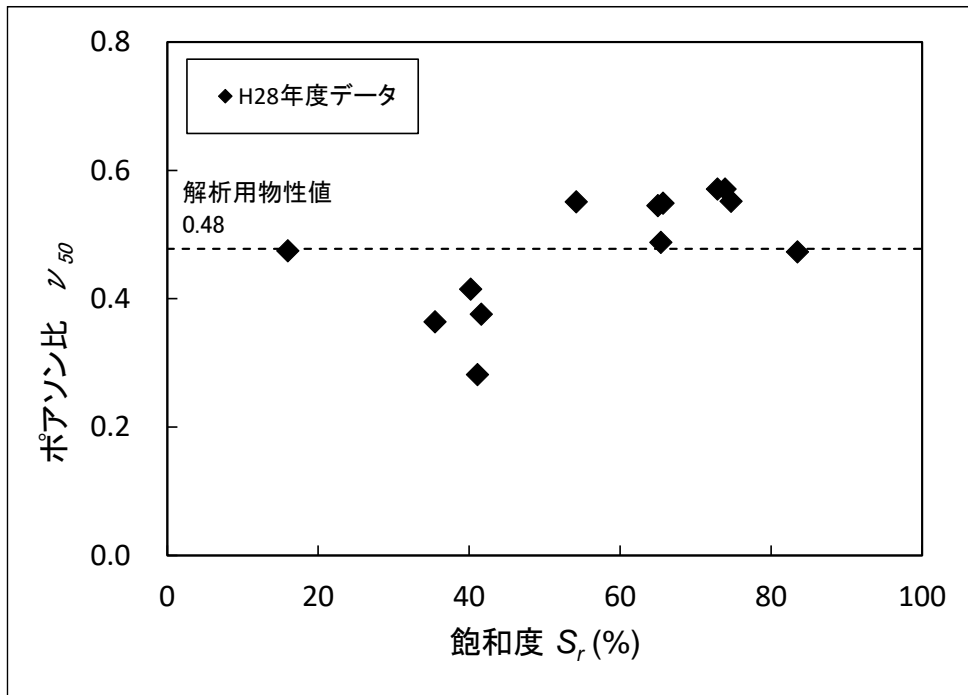


図 3.2.3-9 埋戻し材のポアソン比 (解析用物性値)

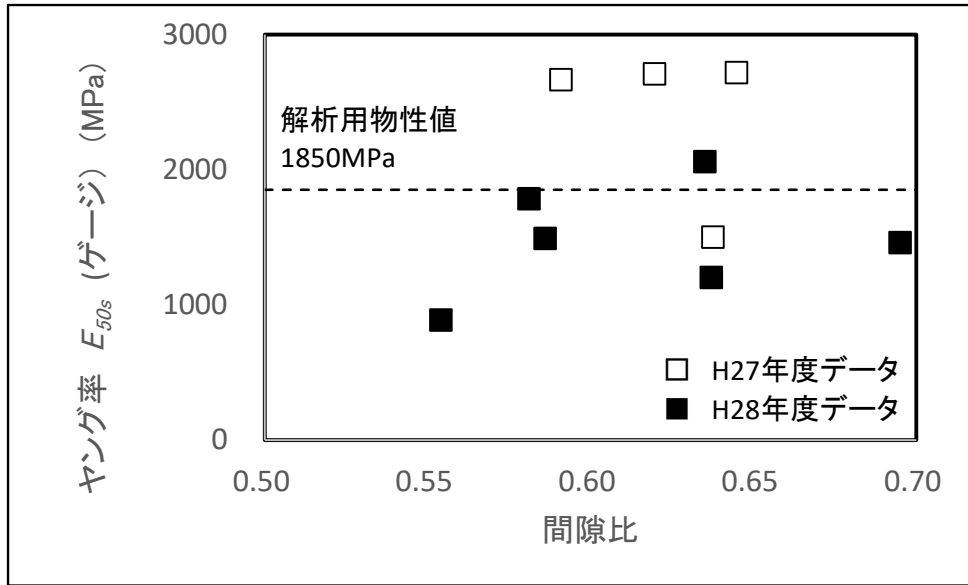


図 3.2.3-10 周辺岩盤のヤング率 (解析用物性値)

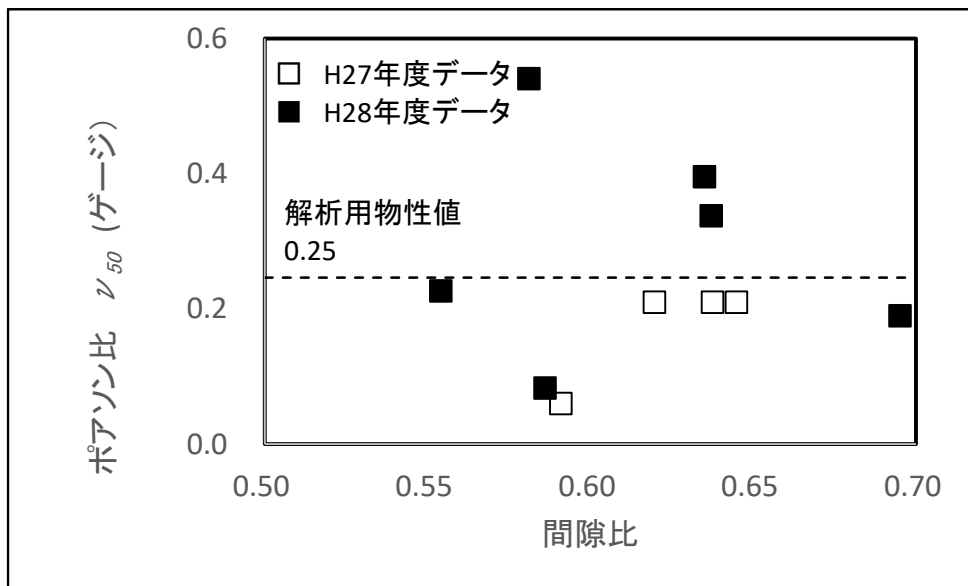


図 3.2.3-11 周辺岩盤のポアソン比 (解析用物性値)

5) 熱特性（熱伝導率）

熱伝導率の解析用物性値を表 3.2.3-6 及び図 3.2.3-12～図 3.2.3-14 に示す。熱伝導率の解析用物性値については、飽和度依存性を考慮した一次回帰式とした。

表 3.2.3-6 熱伝導率の解析用物性値

熱伝導率 (W/mK)	緩衝材 1.6(Mg/m ³)	埋戻し材 1.8(Mg/m ³)	周辺岩盤
個数	14	14	48
λ_{dry}	0.414	0.758	0.404
λ_{sat}	1.945	3.579	1.166

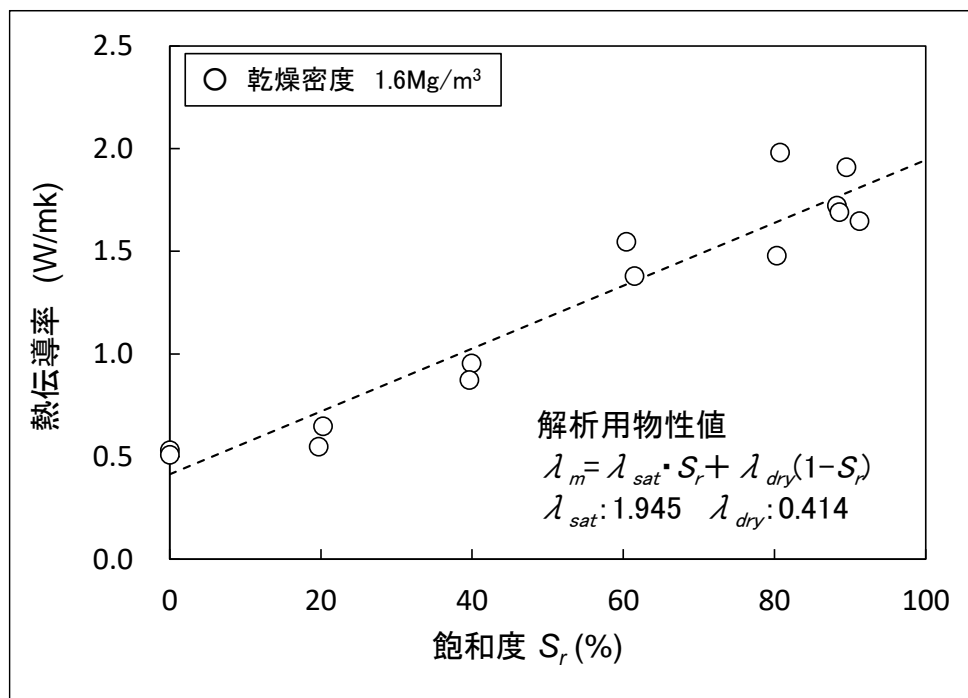


図 3.2.3-12 緩衝材の熱伝導率（解析用物性値）

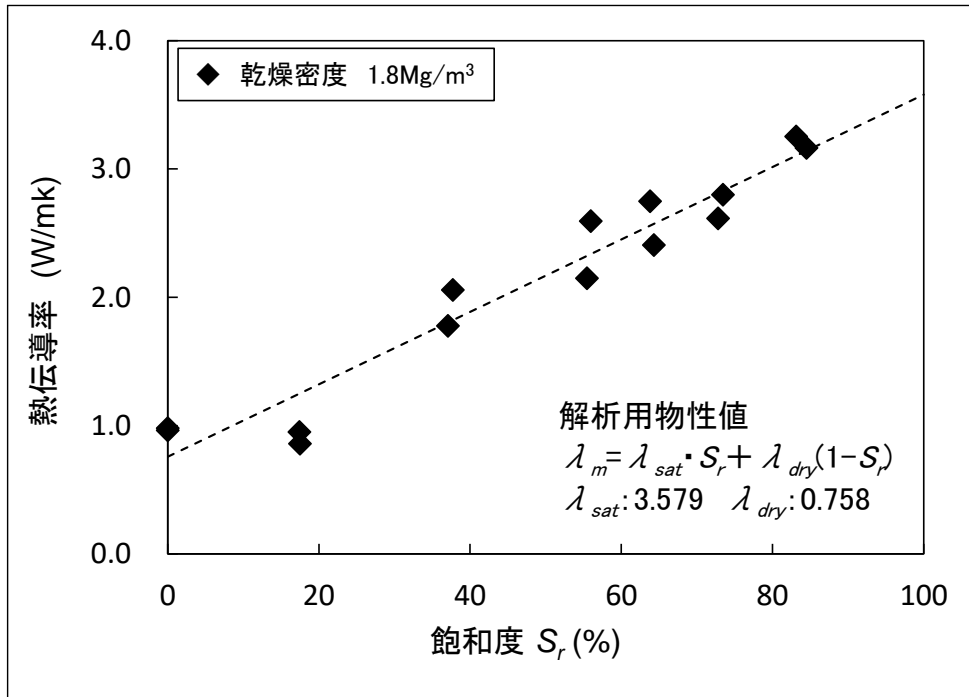


図 3.2.3-13 埋戻し材の熱伝導率（解析用物性値）

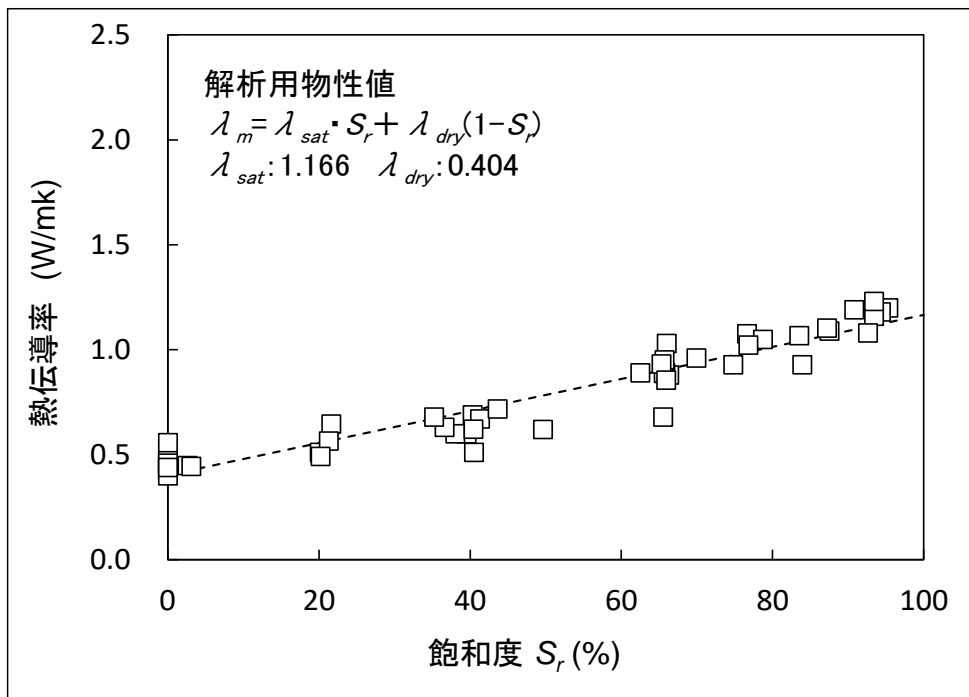


図 3.2.3-14 周辺岩盤の熱伝導率（解析用物性値）

6) 熱特性 (比熱)

比熱の解析用物性値を表 3.2.3-7 及び図 3.2.3-15～図 3.2.3-17 に示す。比熱の解析用物性値については、測定結果の平均値とした。

表 3.2.3-7 比熱の解析用物性値

固相の比熱 (J/gK)	緩衝材 1.6(Mg/m ³)	埋戻し材 1.8(Mg/m ³)	周辺岩盤
個数	5	5	10
平均	0.858	0.820	0.875

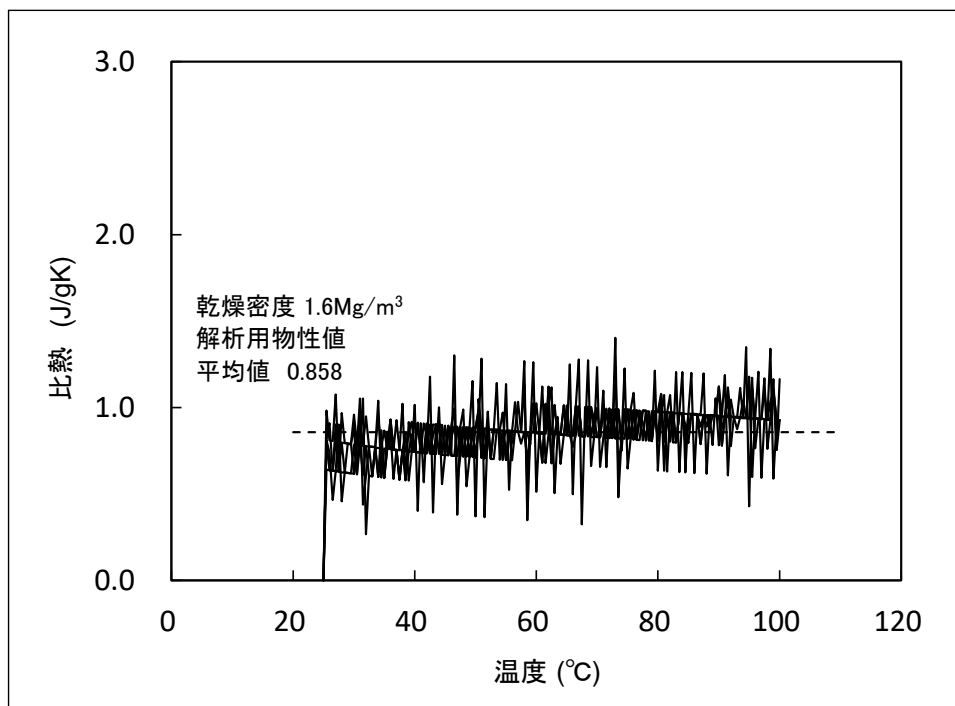


図 3.2.3-15 緩衝材の比熱 (解析用物性値)

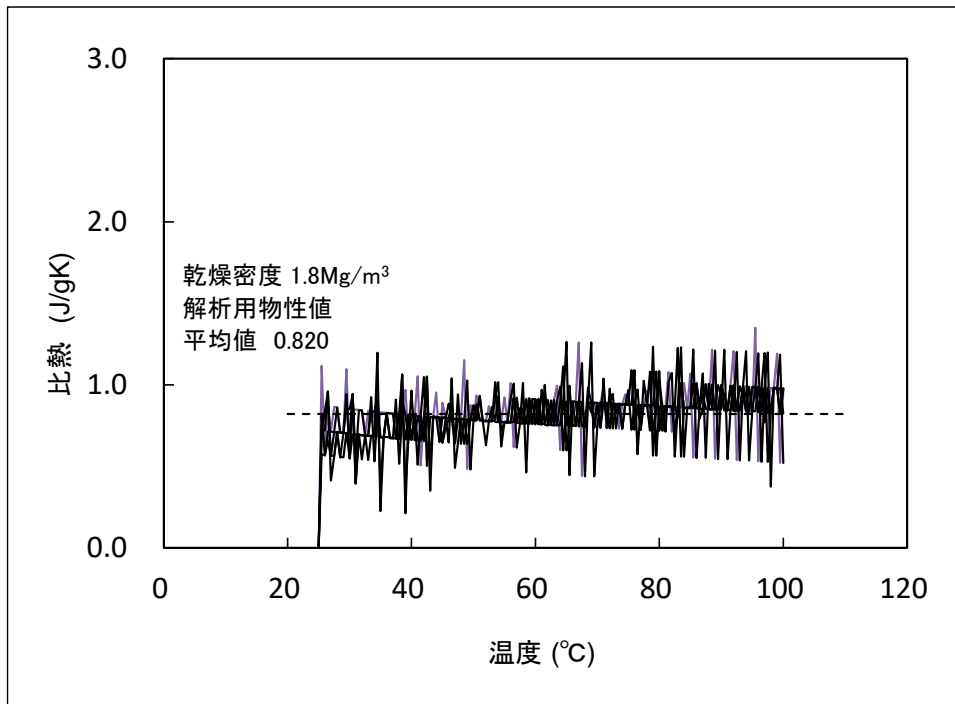


図 3.2.3-16 埋戻し材の比熱（解析用物性値）

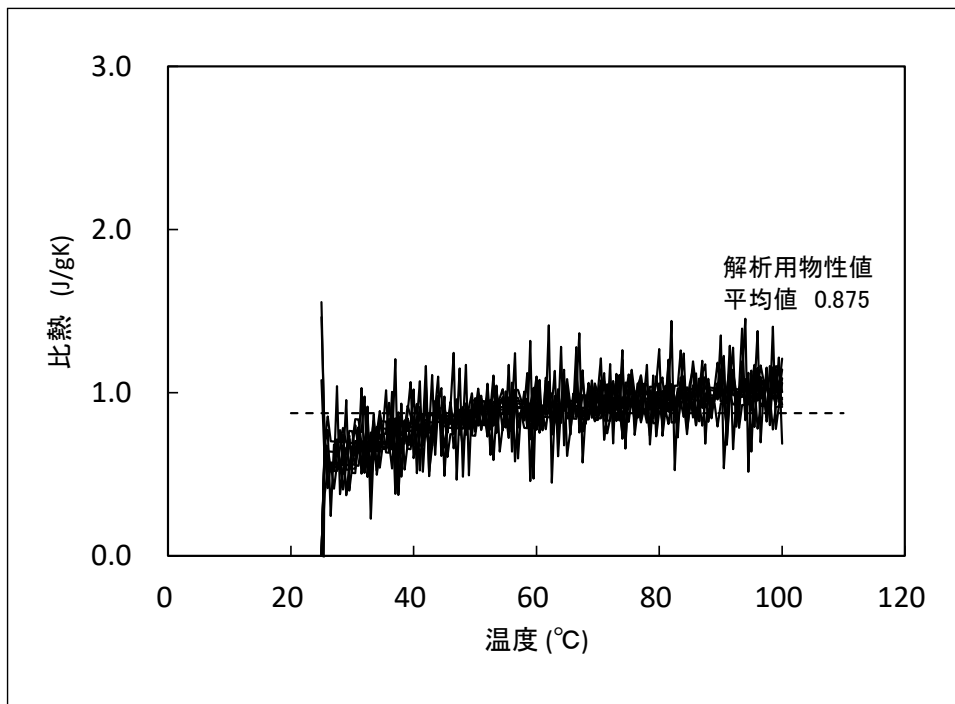


図 3.2.3-17 周辺岩盤の比熱（解析用物性値）

7) 熱特性（熱膨張係数）

熱膨張係数の解析用物性値を表 3.2.3-8 及び図 3.2.3-18～図 3.2.3-20 に示す。熱膨張係数の解析用物性値については、測定結果の平均値とした。

表 3.2.3-8 平均熱膨張係数の解析用物性値

	緩衝材 1.6(Mg/m ³)	埋戻し材 1.8(Mg/m ³)	周辺岩盤
個数	3	5	5
平均熱膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)	20.7	12.4	7.61

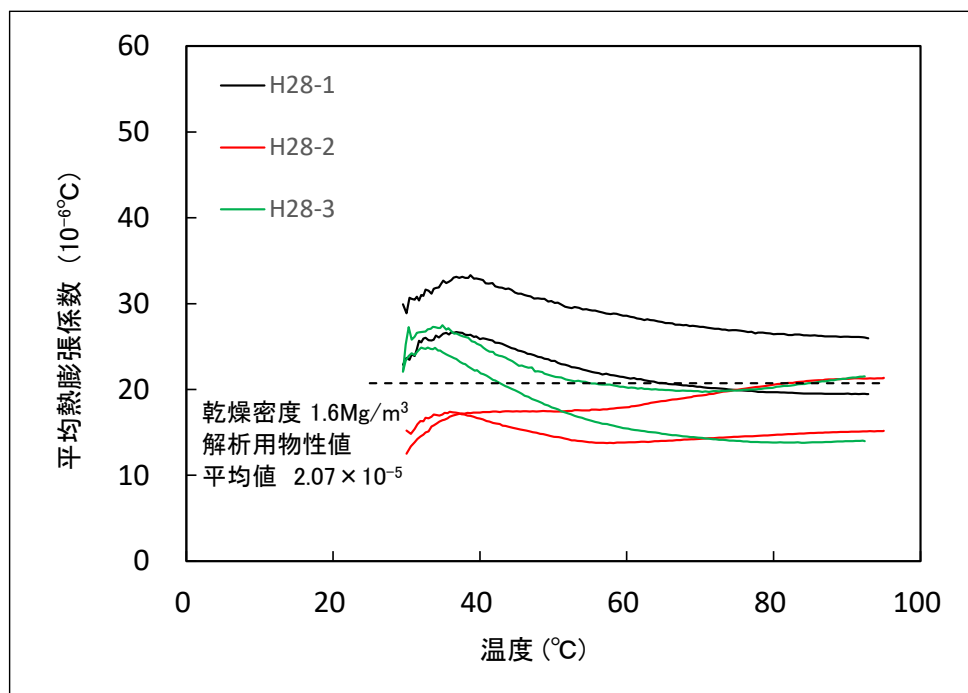


図 3.2.3-18 緩衝材の平均熱膨張係数（解析用物性値）

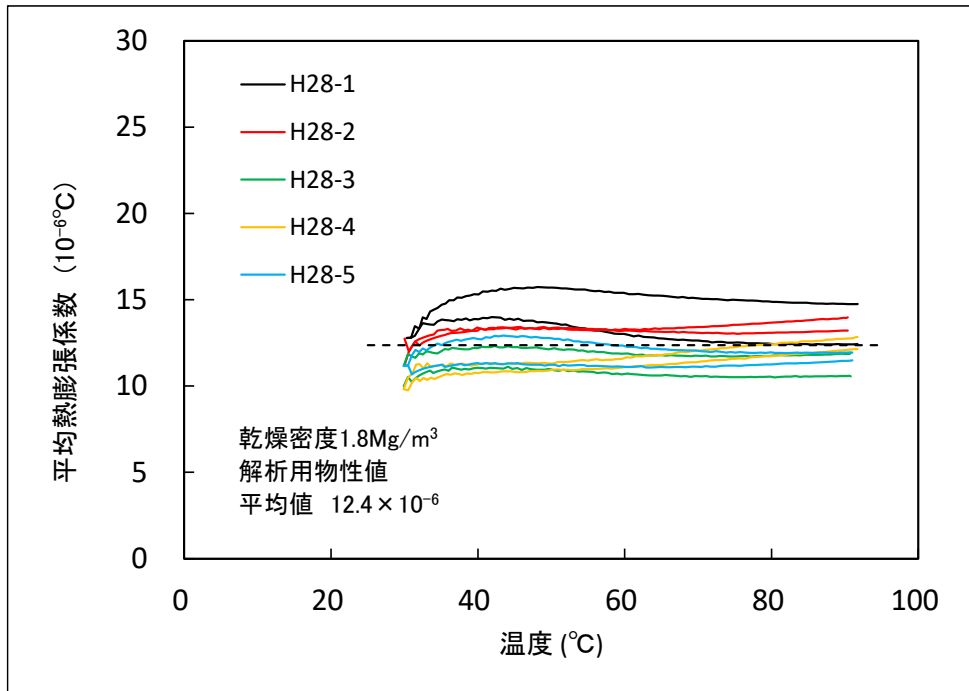


図 3.2.3-19 埋戻し材の平均熱膨張係数 (解析用物性値)

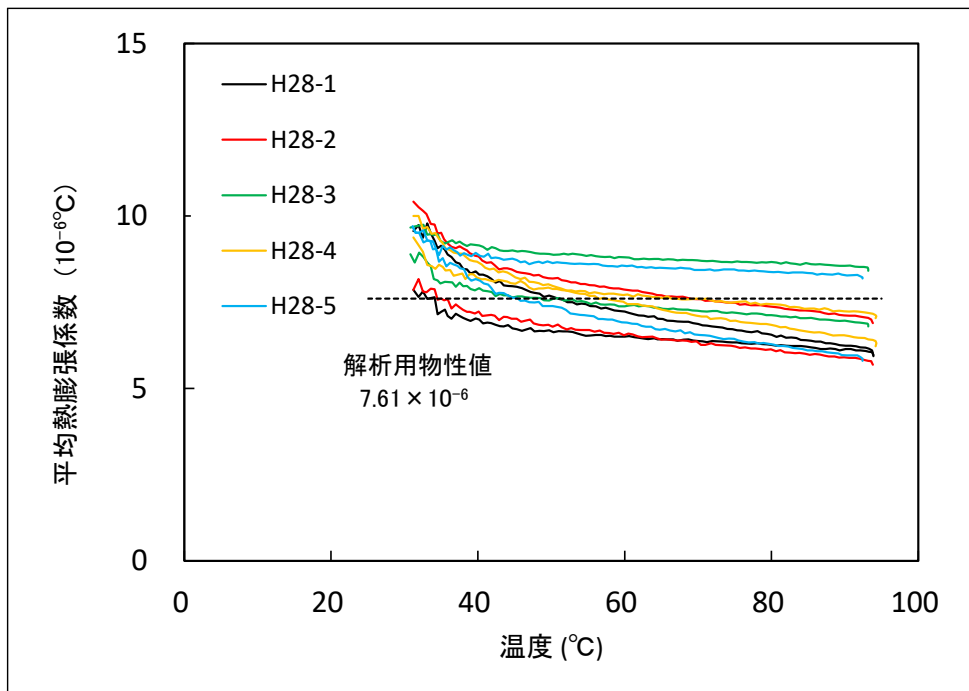


図 3.2.3-20 周辺岩盤の平均熱膨張係数 (解析用物性値)

3.2.4 要素試験のまとめ

要素試験では、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各種実験を実施した。

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

(1) 物理特性

要素試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) 膨潤特性

緩衝材の作製時の乾燥密度の増加とともに、平衡膨潤圧も増加する傾向が認められた。

埋戻し材の膨潤圧は、0.14~0.18MPa となった。来年度以降は、緩衝材及び埋戻し材の膨潤圧測定の実施数量を増やし要素試験で得られる膨潤特性の精度向上を目指す。

(3) 熱特性

要素試験において、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、埋戻し材及び周辺岩盤）の熱特性として、比熱、熱膨張係数が得られた。

(4) 保水特性

要素試験において、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。

(5) 透水特性

緩衝材及び埋戻し材において、吸水に伴う透水性の変化を示した。緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤において、飽和度が十分に高まった状態の透水係数が得られた。緩衝材においては、供試体作製時の乾燥密度の増加とともに、透水係数が小さくなる傾向が認められた。

来年度においては、緩衝材及び埋戻し材の実施数量を増やし要素試験で得られる透水特性の精度向上を目指す。

(6) 力学特性

緩衝材及び埋戻し材において、飽和度の変化に伴う強度・変形特性の関係が得られた。

周辺岩盤において、強度特性、変形特性、ポアソン比が得られた。

来年度以降は、緩衝材及び埋戻し材において、三軸圧縮試験を実施し、強度・変形特性の拘束圧依存性を確認する。

(7) 解析用物性値

模型実験の数値解析に必要な要素特性を取得し、膨潤に関するパラメータ（緩衝材、埋戻し材）及び間隙以外のパラメータ（緩衝材、埋戻し材、周辺岩盤）の設定を行った。

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: 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その1)—超長期遠心載荷岩盤実験装置と遠心模型試験法の開発—, 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] O. C. Zienkiewicz, and B. Best, Some non-linear problems in soil and rock mechanics – finite element solution, *Conf. on Rock Mechanics, University of Queensland, Townsville, June, 1969.*
- [7] 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.
- [8] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 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, 2015.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その2)—ニアフィールド模型試験法の確立と等方応力拘束条件下における長期挙動—, 電力中央研究所 研究報告, N11040, 2012.
- [14] 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する委員会, 低透水性材料に対する透水試験方法(基準案), 第60回地盤工学シンポジウム, 2016
- [15] 長崎誠三, 高木豊: 高温に於ける比熱の測定法について, *応用物理*, Vol.17, No.5, pp.104-

- 108, 1948.
- [16] 平野公平, 岡田哲実, 澤田昌孝, 高倉望, 池野谷尚史, 谷和夫, 田中悠一: 温度が変化する条件下における岩盤内部のひずみ計測結果の補正, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.
 - [17] 渡邊保貴, 田中幸久, 中村邦彦, 廣永道彦: Ca型ベントナイト混合土の透水試験方法(その1), 電力中央研究所 研究報告, N13005, 2013.
 - [18] 川崎了, 中川加明一郎, 小泉和広: 堆積岩の圧密現象に着目した透水係数推定の試み, 応用地質, Vol.39, No.3, pp.273-281, 1998.
 - [19] 赤井浩一, 足立紀尚, 西好一: 堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の時間依存性と構成式, 土木学会論文報告集, No.282, pp.75-87, 1979.
 - [20] 澤田昌孝, 岡田哲実: 堆積軟岩における大規模空洞の掘削時挙動・長期挙動の解析的検討, 電力中央研究所 研究報告, N10002, 2010.

第4章 遠心模型試験

4.1 背景・目的

4.1.1 背景

人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価に関する研究において、実規模実証試験や予測数値解析シミュレーションが実施されており、日本原子力研究開発機構・幌延深地層研究センターでは実規模実証試験「人工バリア性能確認試験」が地下 350m で実施されている[1]-[3]。数値解析結果の妥当性検証のために実規模試験結果との比較・検討を行うことは数値解析モデルの高精度化のために有効な手段の一つである。しかし、実規模実証試験を実施できる期間は長くても十数年程度であり、その試験結果を用いて百年単位の挙動を予測するための数値解析モデルを高精度化するには限りがある。

遠心力場の相似則を利用した遠心模型試験は、実物と縮尺模型の応力の対応が良く、力学的・水理的挙動も実物に近い[4]。また遠心力場の相似則における時間加速の効果により、長時間の遠心模型試験を行うことで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模型試験を行った場合、岩盤等の骨格の粘弾性的な特性に基づく経時的な変形に関しては、一般的にいわゆる平成 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仮定、あるいは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。

既往研究では、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载荷装置を用いて[5]、模擬廃棄体（オーバーパック）1 体、処分孔 1 孔、ベントナイト緩衝材、岩盤（堆積軟岩）から成るニアフィールド模型を用いて、30G の遠心力場において最長約 200 年相当の模型試験を実施している[6]-[8]。その結果、周辺岩盤の変形を考慮しない既往のひずみ拘束条件下の遠心模型試験結果と異なり、オーバーパックの変位量、ベントナイト緩衝材の土圧が拘束圧により変化し、かつ試験期間内に収束しないことがわかった。地圧と時間経過に応じた岩盤の変形挙動とベントナイト緩衝材の膨潤変形挙動の力学的相互作用によって、オーバーパックの変位量、ベントナイト緩衝材の土圧に地圧依存性・時間依存性が生じることを試験的に明らかにした。

一方、上記試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[7]と試験手法の開発の要素が強く、想定される施設の実環境とは異なる点がある。このため、より正確な長期挙動データを得るためには、実環境を考慮した境界条件による試験が必要不可欠である。

4.1.2 目的

これまでに実施された遠心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試験を行い、人工バリア及び周辺岩盤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

本事業（平成 27～平成 29）において対象とする環境因子は応力である。本年度は、人工バリア及び周辺岩盤の応力状態及び処分孔上端面に作用する上載圧について着目した。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 に遠心模型試験の 3 カ年計画を示す。最終年度（平成 29 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模型試験の実施を念頭に、平成 28 年度は緩衝材の膨出に着目し、オーバーパック 1 体、処分孔 1 孔、および処分坑道の一部を含んだ廃棄体周辺を抽出し、1/30 の模型を用いて遠心力 30G 場の試験を実施した。模型サイズは、センサーの貼付け、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、遠心模型試験における評価期間は、閉鎖後の再冠水により廃棄体周辺が飽和に向かう数十年程度の期間において力学的挙動が最も大きく生じると考えられる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。詳細な境界条件は後述の 4.4 を参照されたい。

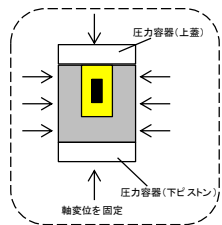
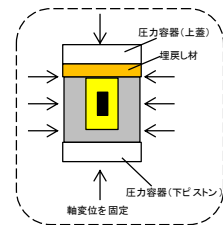
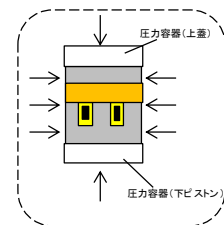


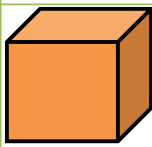
	H27	H28	H29	H30以降
条件	<ul style="list-style-type: none"> •1/30模型 •処分孔1孔 •熱-水-応力 •等方圧 	<ul style="list-style-type: none"> •1/30模型 •処分孔1孔 •岩盤供試体上端面に埋戻し材を想定した条件 •熱-水-応力 •異方圧 	<ul style="list-style-type: none"> •1/50模型 •処分坑道1本、処分孔2孔 •熱-水-応力 •等方圧 	<ul style="list-style-type: none"> •その他の環境因子を条件にした研究（水質、材料の力学的異方性、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 本研究における遠心模型試験の試験計画

4.2 遠心模型試験における相似則

4.2.1 相似則

遠心模型試験とは、遠心力を付与できる遠心力载荷装置に幾何学的に縮小 ($1/n$) された小型模型を設置し、 nG の遠心加速度が作用する場で小型模型の挙動を調べる「物理模型試験」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、ほかの物理模型試験と同様、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。

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

基本的に要約すると、

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

である[11]。すなわち、単なる幾何学的相似則のみならず、力学的相似則を満足することが求められる。本研究における関連のある物理量について抽出を行い、その静的条件における遠心力場の相似則を表 4.2.1-1 に示す。なお相似則については、Garnier et al.[12]が 15 のカテゴリに分けて現状までの知見および未解決の課題について詳細な整理をしている。

表 4.2.1-1 遠心力場の相似測

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

4.2.2 遠心模型試験の優位点

遠心模型試験の大きな優位点として、

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

である。

1 つめの自重応力が構造物や地盤におよぼす影響の問題に関しては、自重応力が実物と大きく違う模型試験では、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試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試験や現場実験は、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試験で再現できる遠心模型試験が有効である。遠心模型試験は、縮尺 $1/n$ の模型に遠心加速度 nG を作用させることにより、実物と 1 : 1 対応の応力レベルを模型に発生させることができる。これにより、模型岩盤やオーバーパックの自重応力や水圧のヘッド差の違いなど粒子レベルでの挙動、模型全体での挙動が実現象と模型とで相似性が成立する。

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

4.2.3 遠心模型試験の適用限界

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

相似則が満足されないことが遠心模型試験結果に及ぼす影響を調べるには、**Modeling of prototype** や **Modeling of models** といった手法がとられる。**Modeling of prototype** は遠心模型と対応

する実物を比較するものであり、Modeling of models は同一寸法の実物に対応する遠心模型試験を異なる縮尺比で行って比較するものである。前者は遠心模型の妥当性を検討する直接的な手法であり、最も信頼がおけるものといえるが、スケールが大きく異なるものを比較するため地盤条件や実験装置等の実験条件を両者で同一とすることが難しいという問題がある。一方、後者は異なる縮尺の遠心模型試験で整合した結果が得られれば、それを外挿して縮尺比=1 の実物も整合した結果となることを期待するものである。Modeling of models では縮尺比をできるだけ広い範囲に変化させることが重要である[11]。

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

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

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

4.2.4 長期挙動評価における遠心模型試験の意義

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

実物と同じ材料の縮尺模型に遠心加速度を付与することで、縮尺模型上で表 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、 $\epsilon_c = A \cdot \exp[-(E/\eta_c)t]$ で表され (A : 定数、 E : ヤング率、 η_c : クリープ粘性係数、 t : 時間) [17]、実物と模型のヤング率が $E = E_m$ として $t = n^2 t_m$ (添え字のmは模型を表す) が成立し、実物と模型の幾何学的相似点において発生する応力が同じであれば $\eta_c = n^2 \eta_{cm}$ 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試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 [18]。

本研究では、実物と模型が同じ材料であるとして試験を行うことから、遠心模型試験で得られる結果は「ある小寸法の実物」における挙動として扱う、すなわち、相似則が成立しない現象についての定量的な評価は数値解析など他の手法に頼らざるを得ない。しかし、小寸法の実物ではそうした要因による影響が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 試験設備

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

4.3.1 遠心力载荷装置

本研究で使用した遠心力载荷装置は、(一財)電力中央研究所所有の超長期遠心载荷岩盤実験装置で、回転アームが4柱ビーム式(模型搭載側、カウンターウェイト側固定)、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)[5]。本装置で付与できる最大遠心加速度は、静的条件で100G(167.2rpm)である。模型を搭載するプラットフォームの面積は、2.64m²(1.60m×1.65m)と同規模の遠心力载荷装置と比較して非常に広く、大型模型が搭載可能である。プラットフォームには最大で150G・ton(100G時に最大1.5ton)積載でき、任意の遠心加速度で着座できる油圧着座方式を採用している。バランス機構は、長期間の運転を考慮し複雑な制御を行わない手動カウンターバランス方式を採用している。中心回転軸には動力用スリップリング(4極、AC200V/60Aおよび2極、AC100V/60A)、制御用スリップリング(17極)、通信用無線LAN機器(2セット)、油圧・水圧・空圧を付与できるロータリージョイント(各2ポート)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载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。

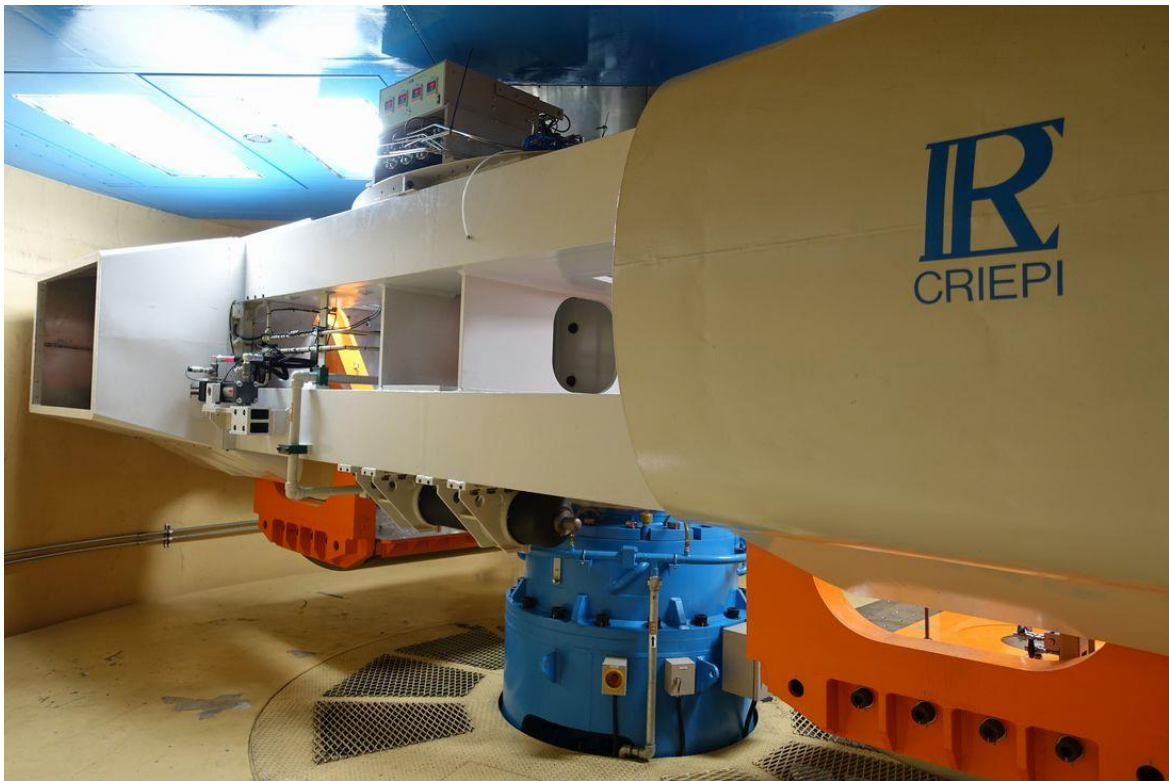
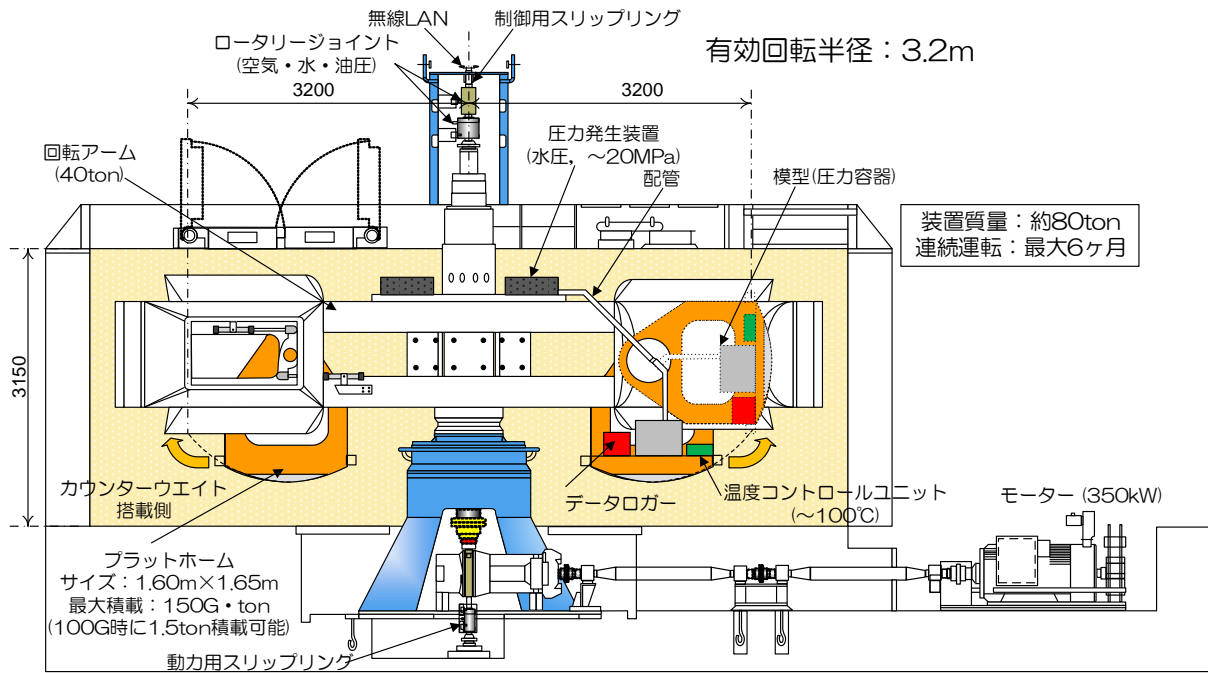


図 4.3.1-1 超長期遠心载荷岩盤実験装置の概略図 (上) と装置全景 (下)

4.3.2 遠心模型の封入容器

遠心模型試験は、地表から地下深部の処分施設までの全体を模型とするのではなく、廃棄体周辺を抽出した模型を使用した。そのため、地圧相当の応力（被り圧）を遠心模型に負荷するために、遠心模型を封入する圧力容器[5]を使用した。自重応力の相似則は廃棄体周辺のみを考慮した。図 4.3.2-1 に本研究で用いた圧力容器の概略図を示す。圧力容器はジュラルミン製で質量 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する。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を組み込み、スイッチボックスに接続する。

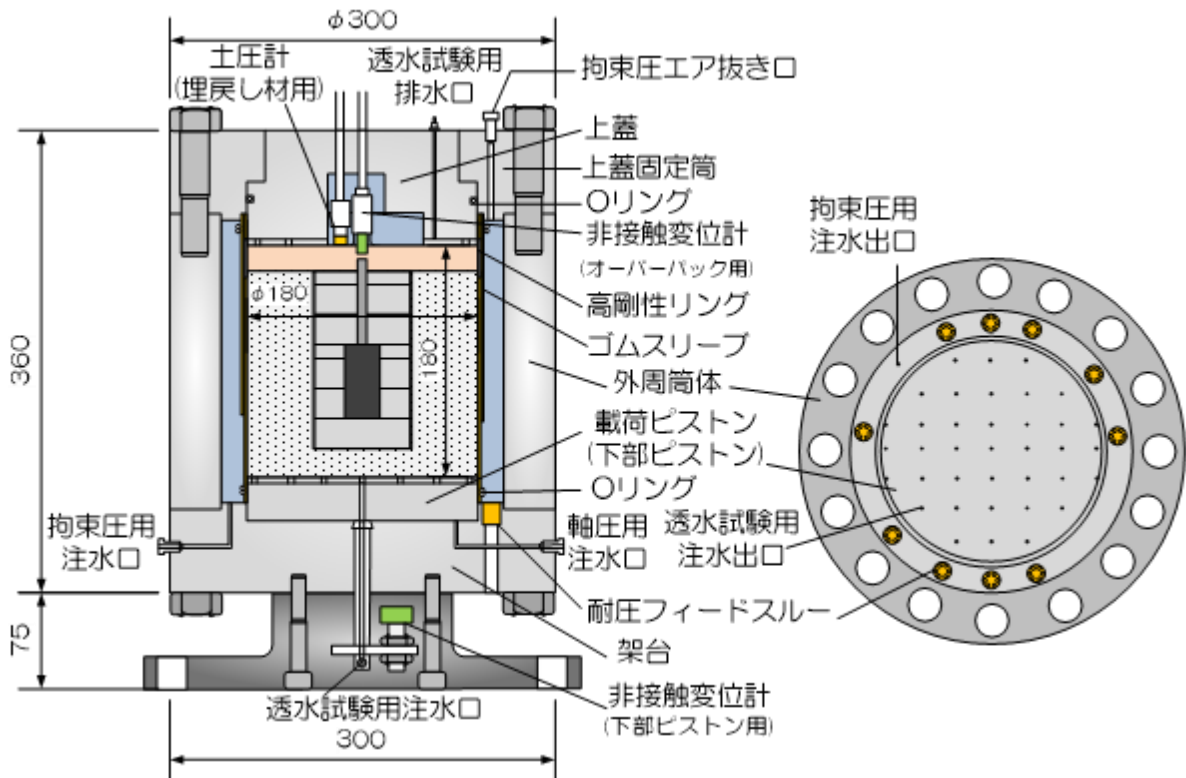


図 4.3.2-1 18cm 円柱用圧力容器の見取図、(左) 立断面、(右)、平断面

4.3.3 X線CT装置

X線CT撮影は、(一財)電力中央研究所 地球工学研究所所有の寝台が移動しX線照射源と検出器が対象物の周囲を螺旋状に回転しデータを取得する医療用マルチスライスヘリカルCTスキャナ(東芝メディカルシステムズ社製、Aquilion64 TSX-10 1A)を使用しCT画像を取得した(図4.3.3-1)。Aquilion64は同時に64列の断面データを収集でき、空間分解能は最小で0.35mmである。ガントリー開口径は72cmで最大撮影領域径は50cm、最大積載可能質量は200kgである。撮影時の管電圧は135keV、撮影時間は試料の大きさにもよるが数秒程度である。



図 4.3.3-1 医療用マルチスライスヘリカルCTスキャナ

4.4 境界条件

4.4.1 想定した施設

本研究で用いる遠心模型は、HLW 第 2 次取りまとめ[19]の豎置き方式の廃棄体周辺領域を抽出したものである (図 4.4.1-1)。

平成 28 年度は、平成 29 年度に実施予定の処分坑道を含む模型での試験実施を想定して、平成 27 年度の模型上に埋戻し材を設置することで、埋戻し材の存在によって生じる緩衝材の変形特性(膨出)がオーバーパックの変位に与える影響や、その時の緩衝材、埋戻し材の土圧の発現状況に加えて、緩衝材の膨出状態の定性的な把握を目的とした。実験条件のイメージを図 4.4.1-2 に示す。

模型は、オーバーパック、緩衝材、処分孔サイズの 1/30 の大きさで、廃棄体 1 体、処分孔 1 孔および緩衝材、埋戻し材、周辺岩盤から構成される縮尺模型である (図 4.4.1-3)。なお、本研究で述べる「供試体」とは整形された緩衝材および埋戻し材、岩盤試料そのものを指し、「遠心模型」とはオーバーパック、緩衝材供試体を岩盤供試体に削孔された孔に封入し、その上部に埋戻し材を設置した状態の試験試料全体を指す。

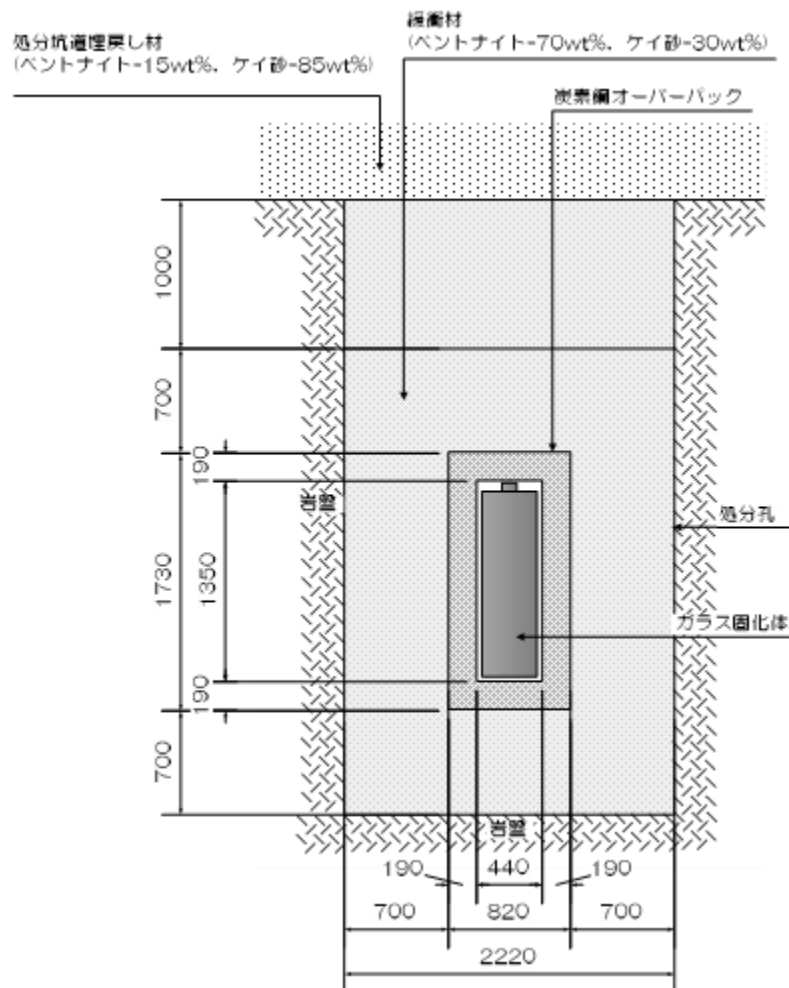


図 4.4.1-1 対象とした処分施設の概要

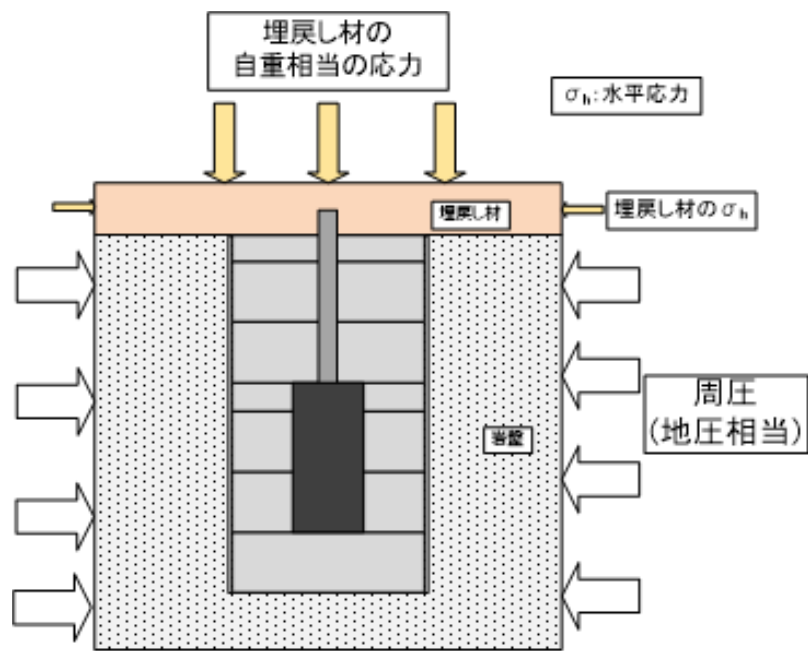
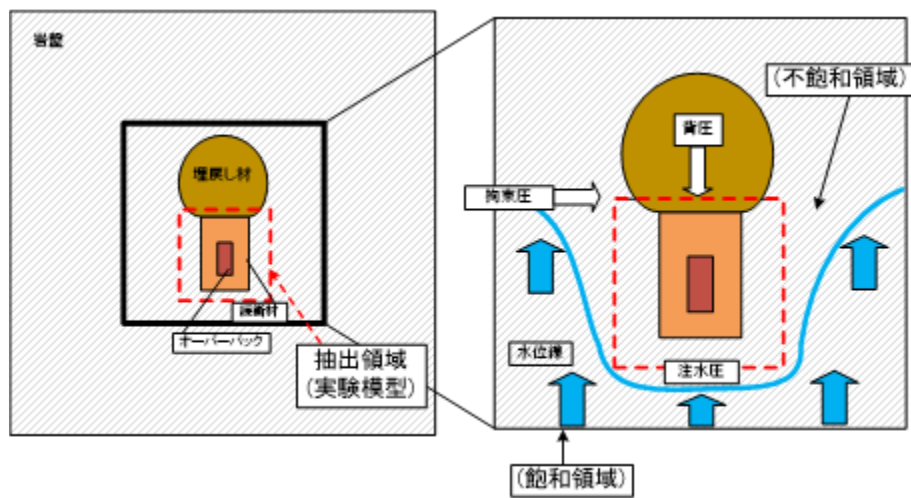
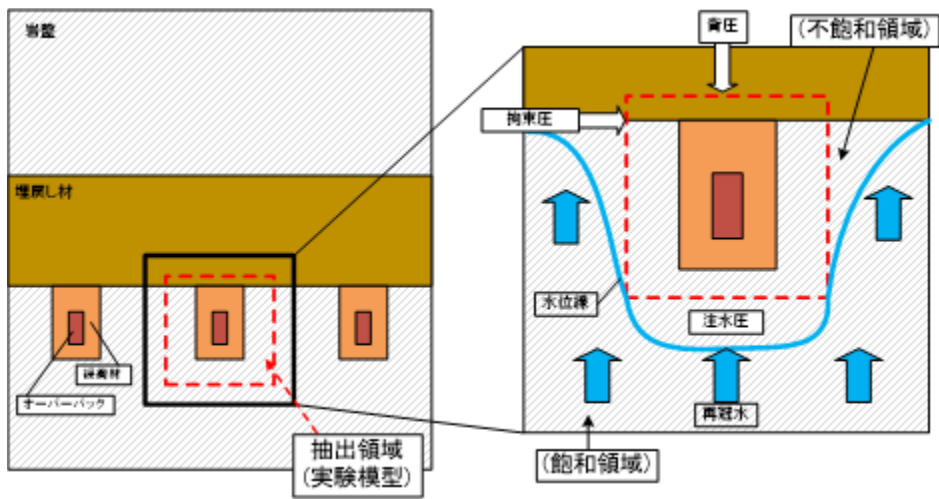


図 4.4.1-2 試験条件のイメージ図

(平面図：岩盤上端面)

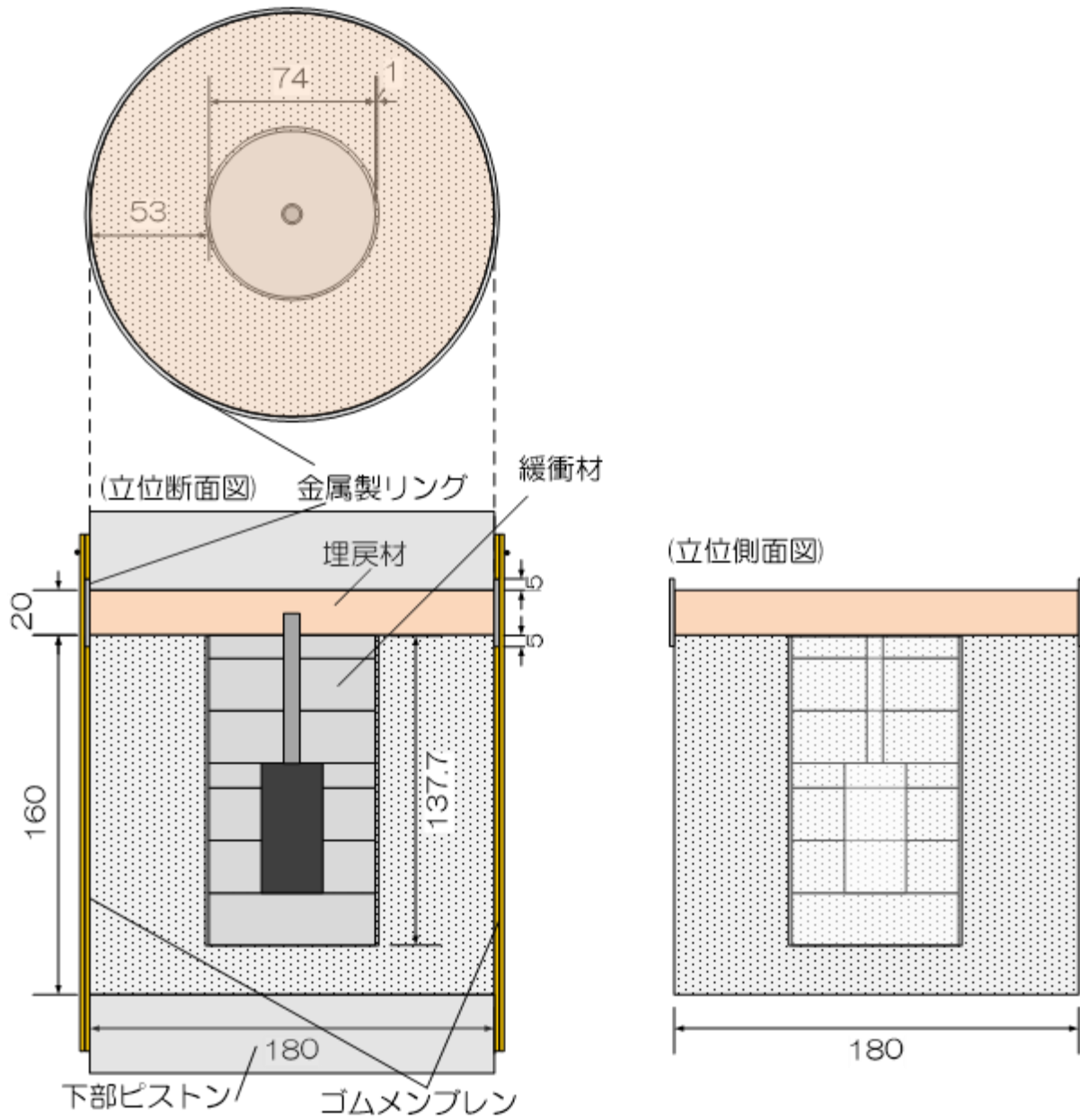


図 4.4.1-3 遠心模型 (1/30 縮尺)

4.4.2 境界条件

試験条件は平成 27 年度と同様、遠心加速度 30G 場において、遠心模型の上端面を深度 400m 相当とするが、平成 27 年度に採用した周圧 8MPa (岩盤の密度を 2.0Mg/m^3 とし、かつ不飽和時の全被り圧) の条件に対して、埋戻し材自重応力である 0.1MPa (注1)を軸圧の条件とすると、図 4.4.2-1 に示す平成 27 年度に実施した岩盤の三軸試験の結果[20]から、飽和後に破壊する可能性がある。また、埋戻し材の周方向の応力については閉鎖後初期においてはほぼ作用しないと考えられる。このため、岩盤部では飽和後の有効応力である深度 400m 相当の 4.0MPa を満たすように拘束圧条件を決定し、埋戻し材の周囲には周応力が作用しないように金属のリングを設置した(図 4.4.1-3) (詳細は、4.6.1(4))。

試験に使用する岩盤供試体は、模型作製時の制約から乾燥状態で試験を開始する。そのため、試験開始時は周圧 5.0MPa 、軸圧 0.1MPa とした。模型下面からの注水圧(間隙圧)を 0MPa から 1.05MPa まで徐々に圧力を上げ 1.05MPa になると同時に一定圧力制御とした。注水圧の昇圧とともに軸圧を 0.1MPa から 1.1MPa に圧力を上げ、その後は一定圧力制御とした。また模型上面の排水圧(背圧)は試験開始時では 0MPa としており、下面からの間隙水の浸潤に伴い 0MPa から徐々に上昇する。排水圧が 1.0MPa に達した後は 1.0MPa の一定圧力制御とした。これにより、岩盤の周方向の有効応力が 4.0MPa 、埋戻し材の有効応力が 0.1MPa となる。実際の圧力制御の経時変化を図 4.4.2-2 に示す。模型下面の注水圧は試験開始時に 0MPa であるが、遠心力载荷によってポンプから模型を設置しているプラットフォームまでの水頭差によって 0.37MPa となった。

オーバーパックの温度は HLW 第 2 次取りまとめの処分孔縦置き方式・隙間モデルの CASE.A (ガラス固化体-オーバーパック間、オーバーパック-緩衝材間、緩衝材-岩盤間の隙間の充填物が空気)の C_{xin} の経時変化を参照し、図 4.4.2-3 内の青線で示す温度変化のように設定した。長期試験では、青線の温度変化になるべく合わせるように昇温過程を設定し、温度の下降過程では制御上の理由から段階的に温度を下げる図中赤線のような制御を実施した。岩盤の境界温度は、実験室の常温 (25°C) を地上の平均気温と仮定し、平均的な地温勾配 ($2^\circ\text{C}/100\text{m}$) [21]から 33°C 一定に設定した。

注 1) 埋戻し材の密度を 1.80Mg/m^3 、処分坑道の高さを 5m とした場合の単位面積あたりの応力

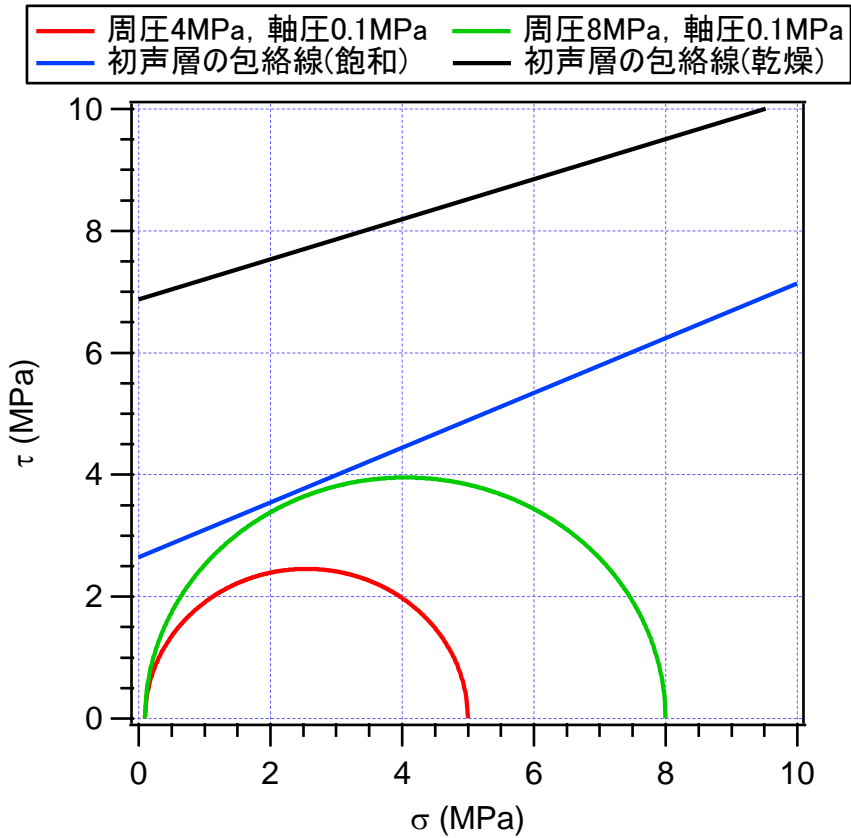


図 4.4.2-1 岩盤供試体の三軸試験結果と包絡線

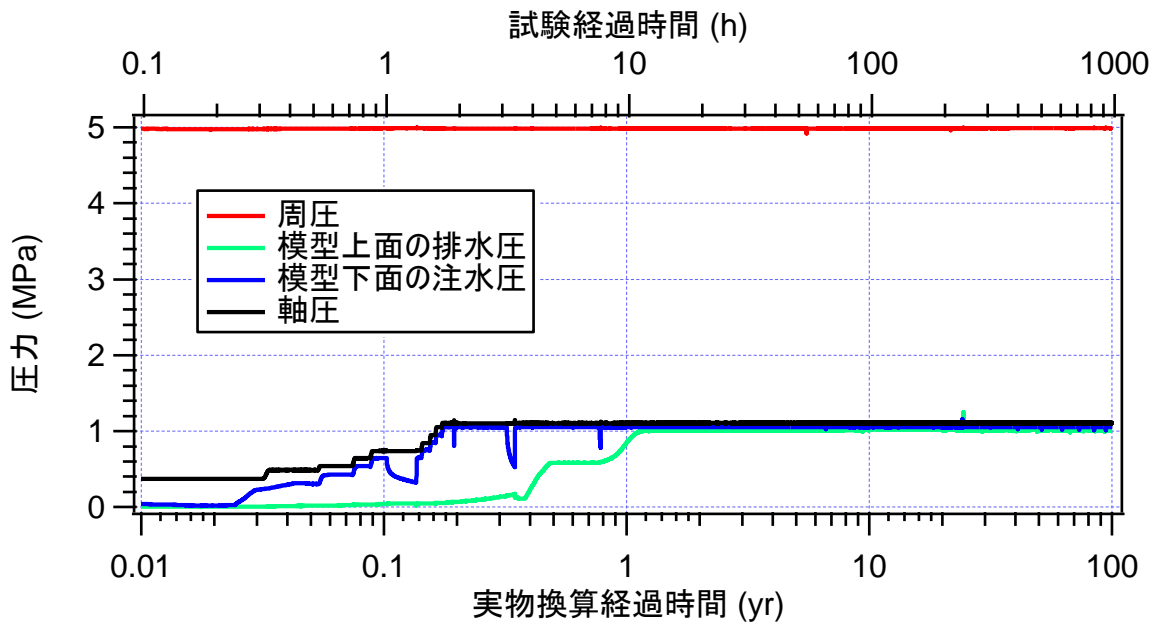


図 4.4.2-2 载荷圧力の経時変化

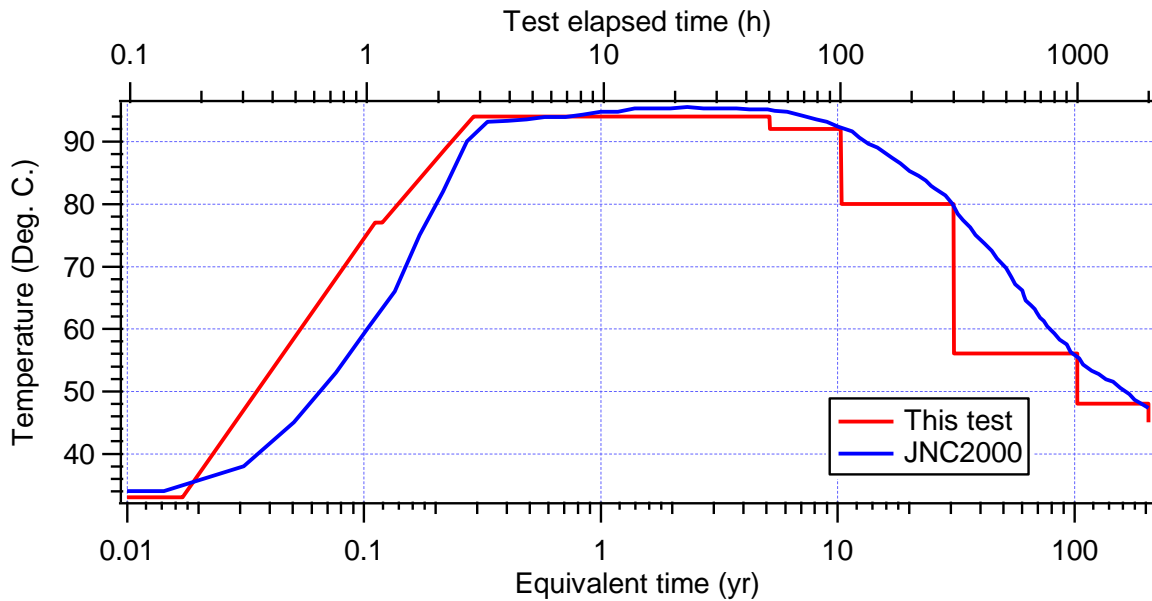


図 4.4.2-3 オーバーパックの温度制御

4.5 事前検討

遠心模型試験で使用する模型において緩衝材の膨出を何らかの形で検出するために、本研究では遠心模型試験に適用した「膨出センサー」を新たに開発した。

4.5.1 膨出センサーの開発

本年度の遠心模型試験は、岩盤および緩衝材の上に埋戻し材が存在するため、緩衝材の膨出現象が発生すると考えられる。その膨出の状況を把握するために膨出センサーの開発を実施した。幌延 URL における人工バリア性能確認試験では、薄板状の基盤に光ファイバーひずみゲージと光ファイバー温度計を設置し、緩衝材の膨出状況の確認を実施している[2]、[3]。この試験で使用されている「緩衝材膨出センサー」を参考として開発を行った。

(1) 材料の選定

膨出センサーは、緩衝材の膨出を妨げることなく、緩衝材の変形に追随して変形する必要がある。このため、剛性の低いプラスチック製の基盤を考えたが、大変形に追随できるひずみゲージがないことなどから不採用とした。一方、リン青銅板は市販の変位計もあり信頼性も高いこと、薄さを極力抑えることで緩衝材の変位の拘束が少なくなることから、薄さ 0.3mm のリン青銅板を採用した。

(2) センサーの形状

図 4.5.1-1 に示すような膨出センサーを想定してセンサーを作製した。片端は固定状態とし、もう一方の端部は上下の移動のみ固定するスライドできるような機構とした。実施する長期試

験を想定し、変位の発生方法も厚さが同じで直径の異なるプラスチック板を挿入することとした。また、挿入位置を変化させることで出力状態が変化することを確認するため中心挿入、左端挿入、右端挿入の3種でテストを実施した。テストの実施状況を図 4.5.1-2 に示し、挿入したディスクの一覧を表 4.5.1-1 に示す。中心挿入のイメージを図 4.5.1-3、テスト結果を図 4.5.1-4、ディスク厚さから見積もられた理論値を図 4.5.1-5 に、左端挿入のイメージを図 4.5.1-6、テスト結果を図 4.5.1-7、ディスク厚さから見積もられた理論値を図 4.5.1-8 に、右端挿入のイメージを図 4.5.1-9、テスト結果を図 4.5.1-10、ディスク厚さから見積もられた理論値を図 4.5.1-11 に示す。テスト結果よりどのケースにおいても挿入枚数が増えるとともにひずみ値も増大しており、ディスク厚さから見積もられた理論値の形状とも似た形状となったことがわかる。

以上のことから、厚さ 0.3mm のリン青銅板、片端固定の膨出センサーを採用することとした。ただし、課題として、リン青銅板の線膨張係数が $18\mu/K$ であることから温度の影響を何等かの方法で補正する必要がある。また、キャリブレーションの方法も予備実験から何等かの形状を計測できる可能性があることがわかったがより詳細に検討する必要がある。

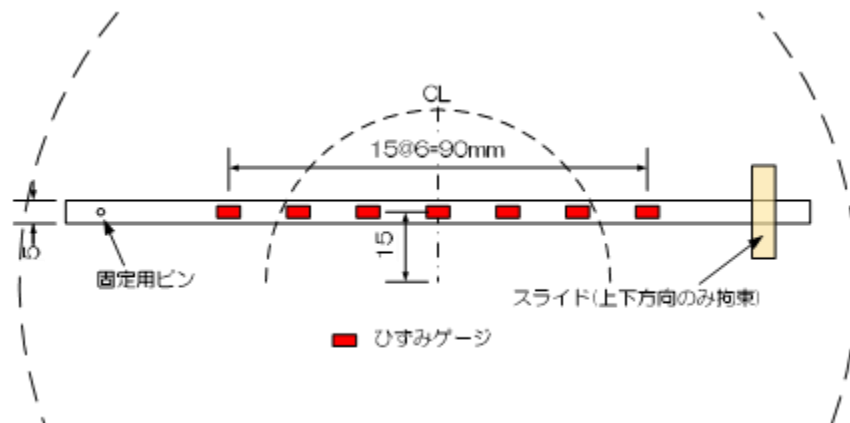


図 4.5.1-1 片端固定条件の際のゲージレイアウト

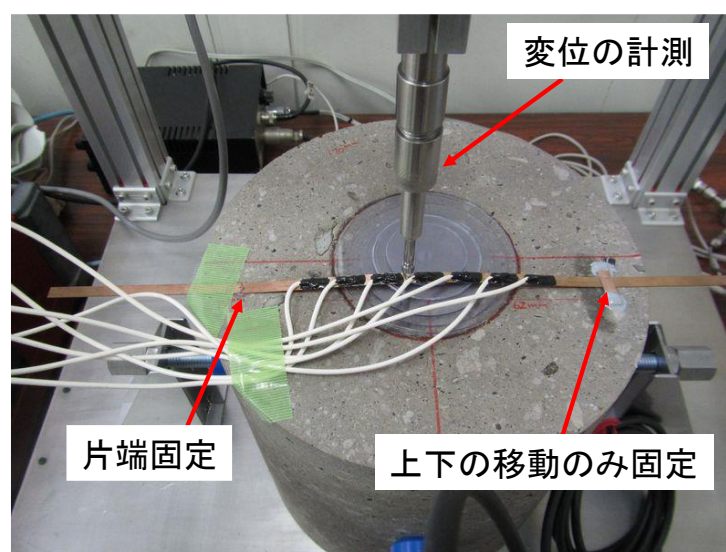


図 4.5.1-2 片端固定条件のテスト実施状況

表 4.5.1-1 挿入したディスクの厚さと直径一覧

No.	直径 (mm)	厚さ (mm)
1	74	1
2	64	1
3	54	1
4	44	1
5	34	1
6	24	1

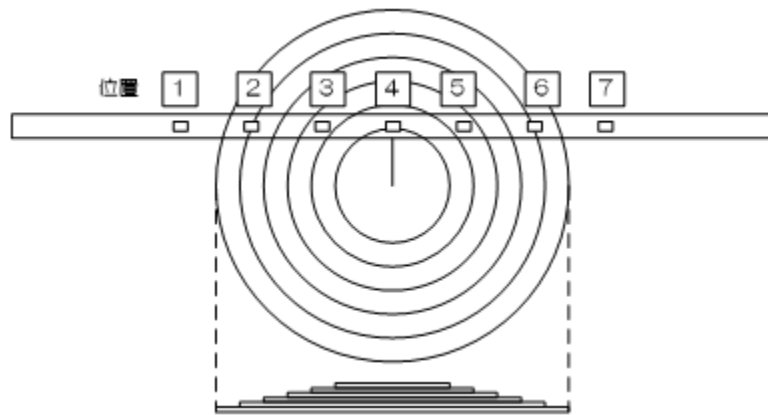


図 4.5.1-3 中心挿入の際のイメージ

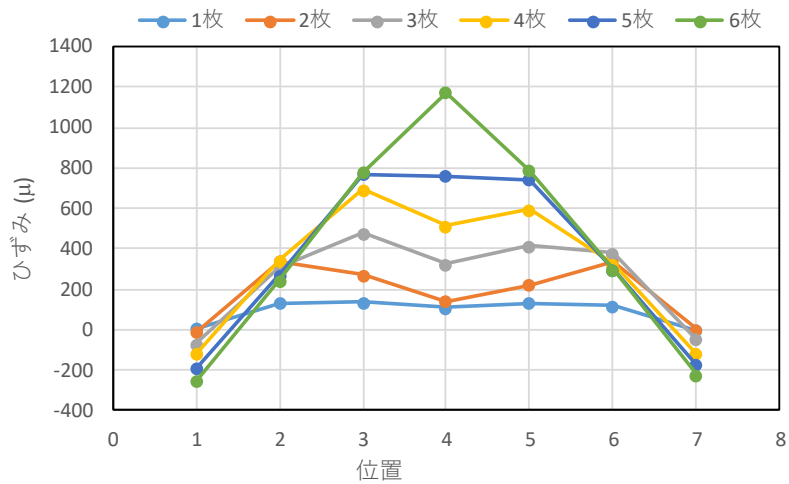


図 4.5.1-4 中心挿入時のテスト結果

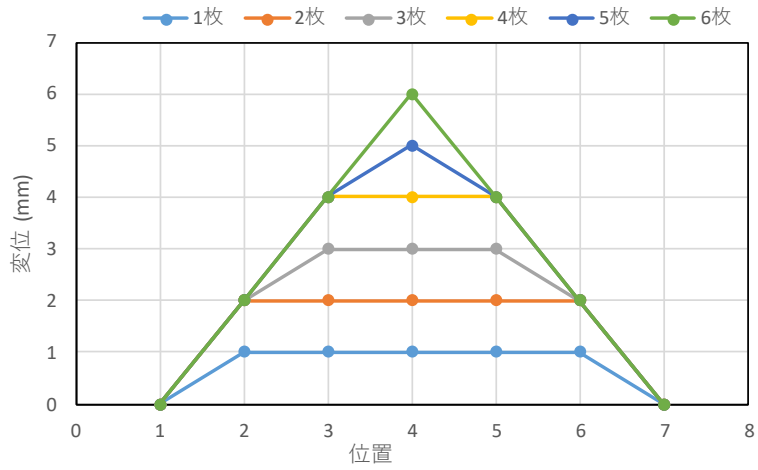


図 4.5.1-5 中心挿入時のディスク厚さから見積もられた変位の理論値

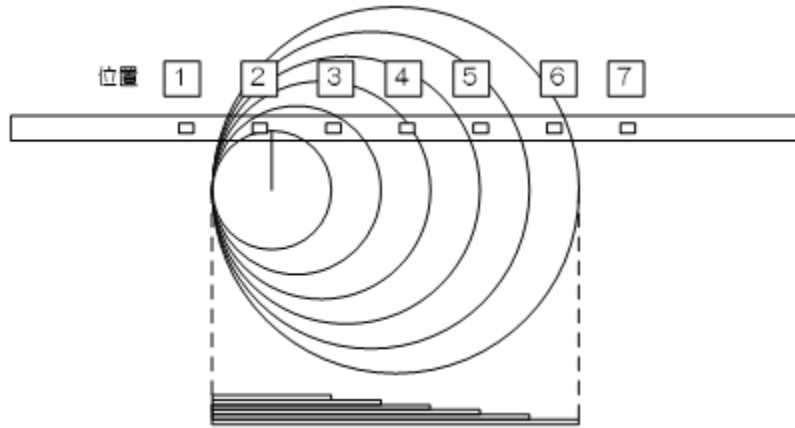


図 4.5.1-6 左端挿入の際のイメージ

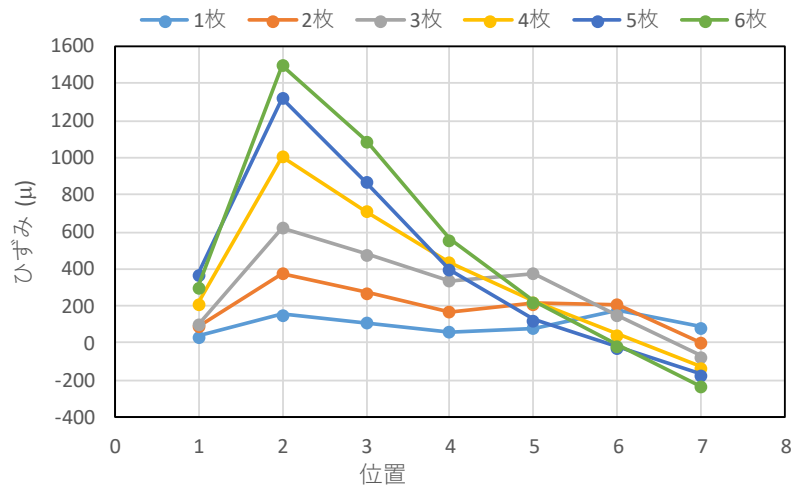


図 4.5.1-7 左端挿入時のテスト結果

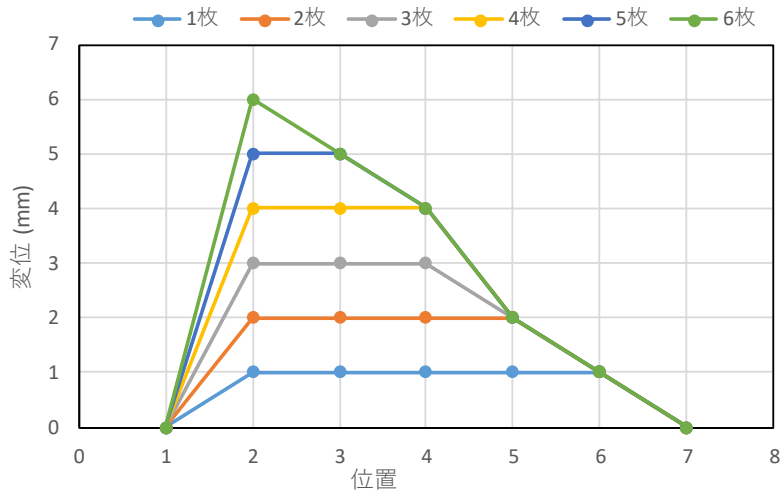


図 4.5.1-8 左端挿入時のディスク厚さから見積もられた変位の理論値

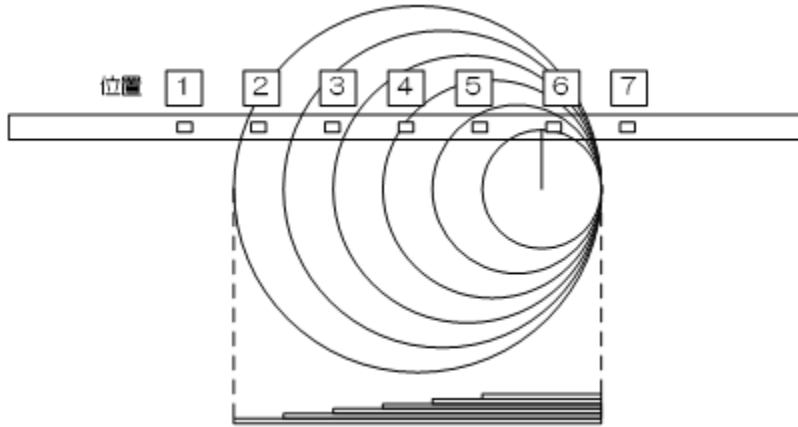


図 4.5.1-9 右端挿入の際のイメージ

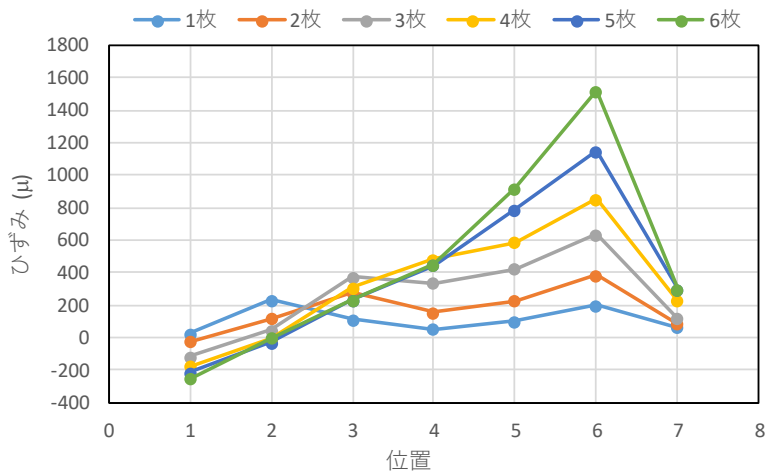


図 4.5.1-10 右端挿入時のテスト結果

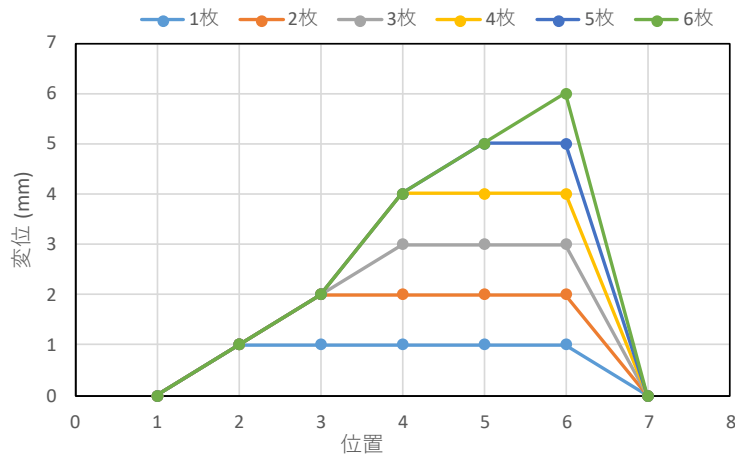


図 4.5.1-11 右端挿入時のディスク厚さから見積もられた変位の理論値

4.6 遠心模型試験の実施

4.5 の事前検討において、膨出センサーの計測性、信頼性等を確認した。本研究では、この事前検討の知見を反映させた上で、遠心模型を用いた遠心模型試験を実施した。

4.6.1 遠心模型の作製

平成 28 年度の遠心模型は、オーバーパック、緩衝材、岩盤、および埋戻し材から構成される。以下にその寸法、仕様、作製状況などの詳細を述べる。

(1) 模擬オーバーパック

模擬オーバーパックは直径 27.33mm、高さ 57.67mm である (図 4.6.1-1)。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]。発熱型オーバーパックは、1 個の小型カートリッジヒーター (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

WATLOW 社製、FIREROD、GIA83 3/8 インチ×1 インチ 240V200W の出力のもので図 4.6.1-1 のとおりに中心部に 1 個配置している。長期試験では、電圧 100V で使用するため、出力は $200\text{W} \times 100\text{V} / 240\text{V} = 83.3\text{W}$ となっている。

- 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℃～200℃である。

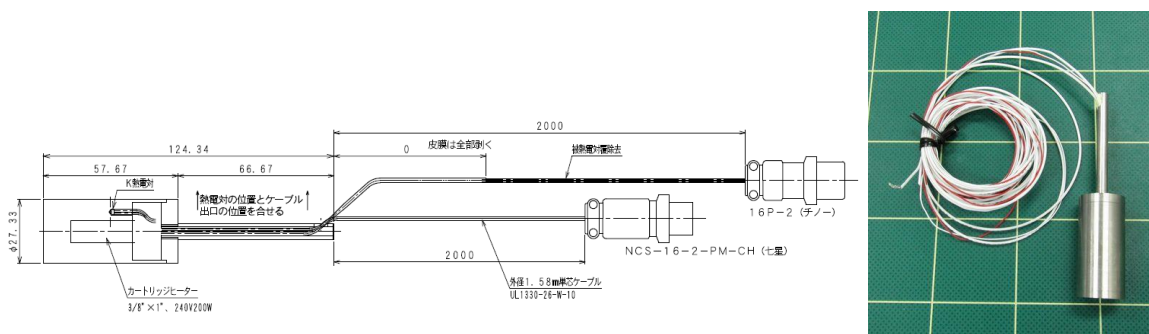


図 4.6.1-1 土圧計付発熱型オーバーパックの概要図 (左) と実際の模型 (右)

(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[16][17]した物を、治具を用いて緩衝材を作製した。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 [19][23]となるように初期乾燥密度を設定しクニゲル V1 とケイ砂の量を調整した。緩衝材ブロックは 7 個に分割されている（図 4.6.1-2）。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 15.59%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を使用している。各緩衝材試料に必要なクニゲル V1 とケイ砂の質量を表 4.6.1-1 に示す。必要なクニゲル V1 とケイ砂の質量を計量し、金属製のボウルにクニゲル V1 とケイ砂を投入し、薬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 4.6.1-3）、表面が平坦になるように調整する。クニゲル V1 とケイ砂を投入したモールドに上部加圧板を静置し、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 4.6.1-4、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 4.6.1-4、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 4.6.1-2 に作製された緩衝材を図 4.6.1-5 に示す。

作製した緩衝材ブロックのうち直径 7.2mm の孔が開いているものに関しては、発熱型オーバーパック模型のヒーターおよび熱電対のケーブルを通すため、3mm 程度孔を大きくする加工をした。

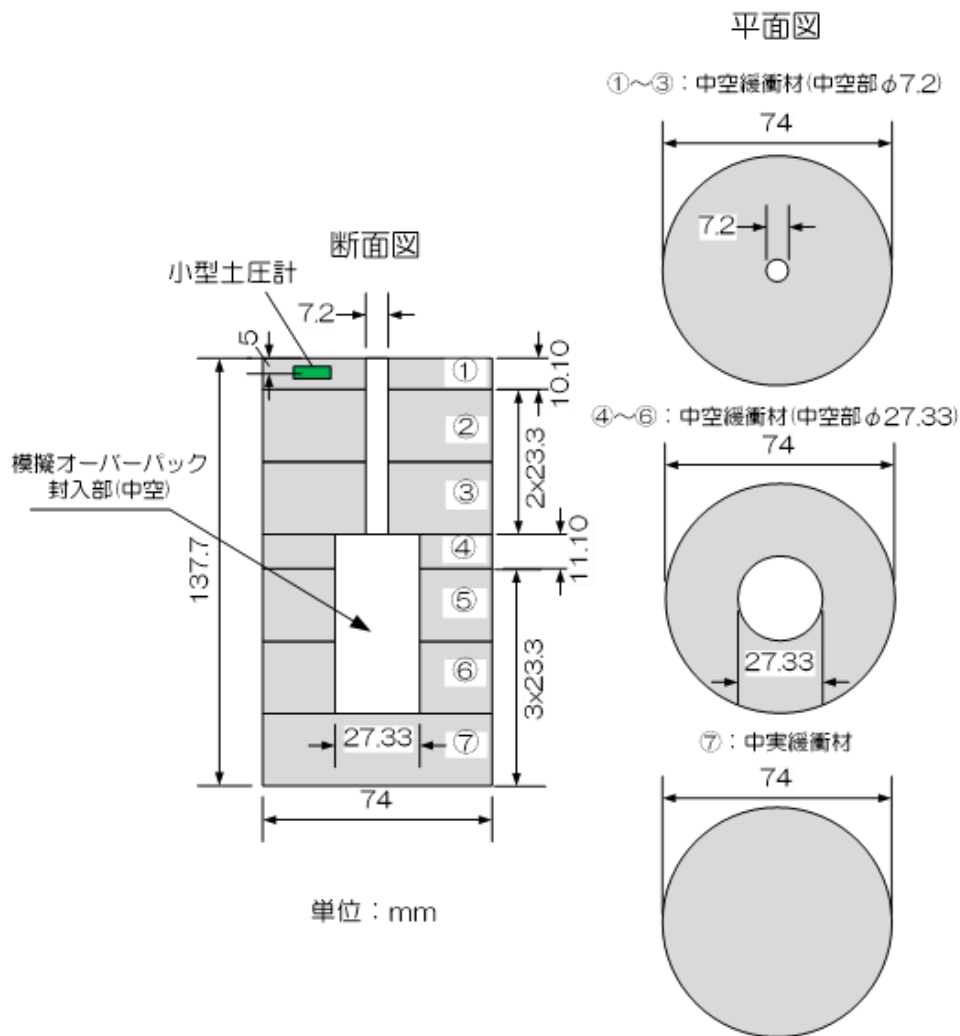


図 4.6.1-2 緩衝材ブロックの断面図、平面図および分割状況

表 4.6.1-1 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 4.6.1-3 緩衝材試料 (クニゲル V1、70wt%、混合ケイ砂 30wt%)



図 4.6.1-4 ベントナイト締固め機 (左)、圧縮ベントナイト取出し機 (右)

表 4.6.1-2 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	80.42	10.21	10.91	1.85	1.67	1.60
②	185.31	23.32	10.91	1.87	1.68	1.61
③	185.14	23.30	10.91	1.86	1.68	1.61
④	77.57	11.16	10.91	1.87	1.69	1.61
⑤	162.50	23.28	10.91	1.88	1.69	1.61
⑥	165.04	23.30	10.91	1.91	1.72	1.64
⑦	186.66	23.37	10.91	1.86	1.67	1.61



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 4.6.1-5 作製した緩衝材ブロック一覧

(3) 岩盤供試体

1) 整形

本研究では初声凝灰岩を使用し、直径 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 4.6.1-6 に示す。

岩盤供試体の作製方法を以下に示す。

- ① 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。
- ② 岩盤試料を動かないように固定し、湿式でコアを抜く (図 4.6.1-7 上段中)。
- ③ 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 4.6.1-7 中上段左)。この際、岩盤試料の高さが 165mm 程度になるように切断面を設定する。
- ④ 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 4.6.1-7 中下段左)。岩盤試料の高さは $160\pm 0.3\text{mm}$ 以下となっている。
- ⑤ 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 4.6.1-7 下段左)。
- ⑥ 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。
- ⑦ 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。
- ⑧ 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。
- ⑨ 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する。

以上の工程を実施し、製作誤差 $133.7\text{mm}\pm 0.3\text{mm}$ (ノギスによる 4 点計測) であることを確認して模擬処分孔の作製を完了した。

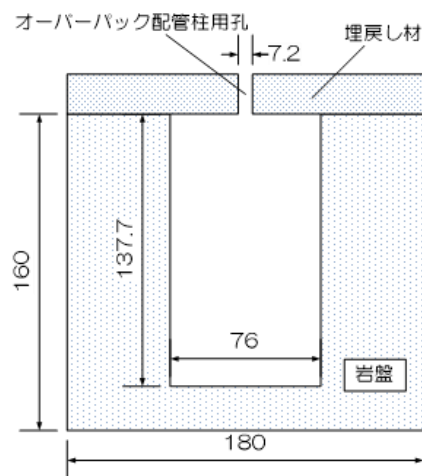


図 4.6.1-6 岩盤供試体の概略断面図



図 4.6.1-7 岩盤試料の整形状況

2) 岩盤供試体の表面の凹凸計測

岩盤供試体を整形後、約 2 週間乾燥炉にて乾燥した後に表面の凹凸計測を実施した。図 4.6.1-8 に示す表面計測機に供試体をセットし、供試体表面の凹凸を計測する。岩盤供試体の設置状況を図 4.6.1-9 に、計測した測線のイメージ図を図 4.6.1-10 に示す。

b) 測線 2～図 4.6.1-14 は各側線における表面計測の結果である。装置および計測機の都合上、左右の変位を計測できないため、横軸は距離とはならず、計測点数となる。縦軸は、各側線の開始位置を 0 として表面の高さをプロットしてある。岩盤供試体上端面の計測結果を見ると、どの測線も $\pm 0.06\text{mm}$ 以下の凹凸となっている。処分孔内の測線である測線 5 を見ると、1 か所 0.2mm 程度の凹凸があることがわかる。これは、供試体を整形している際に 0.4mm 程度の小片が取れた部位があったためと考える。測線 6 ではプラスマイナス 0.07mm 以下の凹凸となっている。

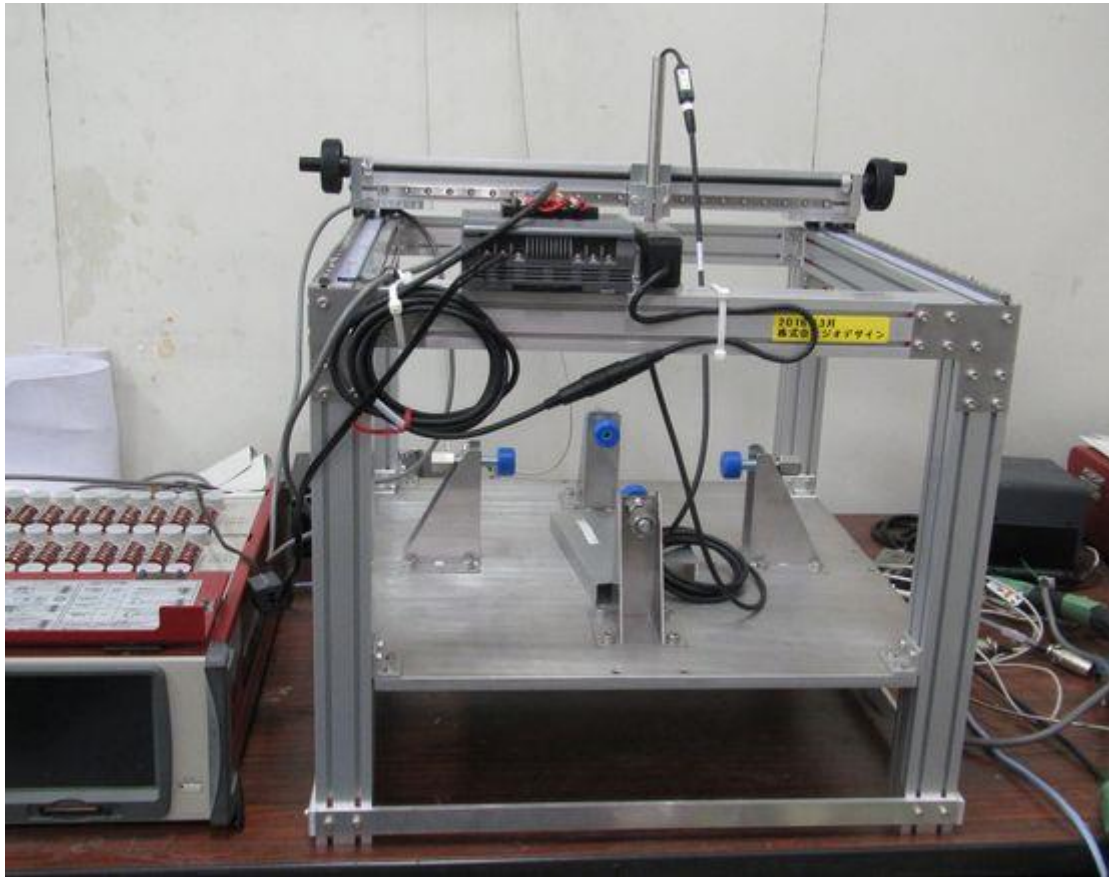


図 4.6.1-8 表面計測機

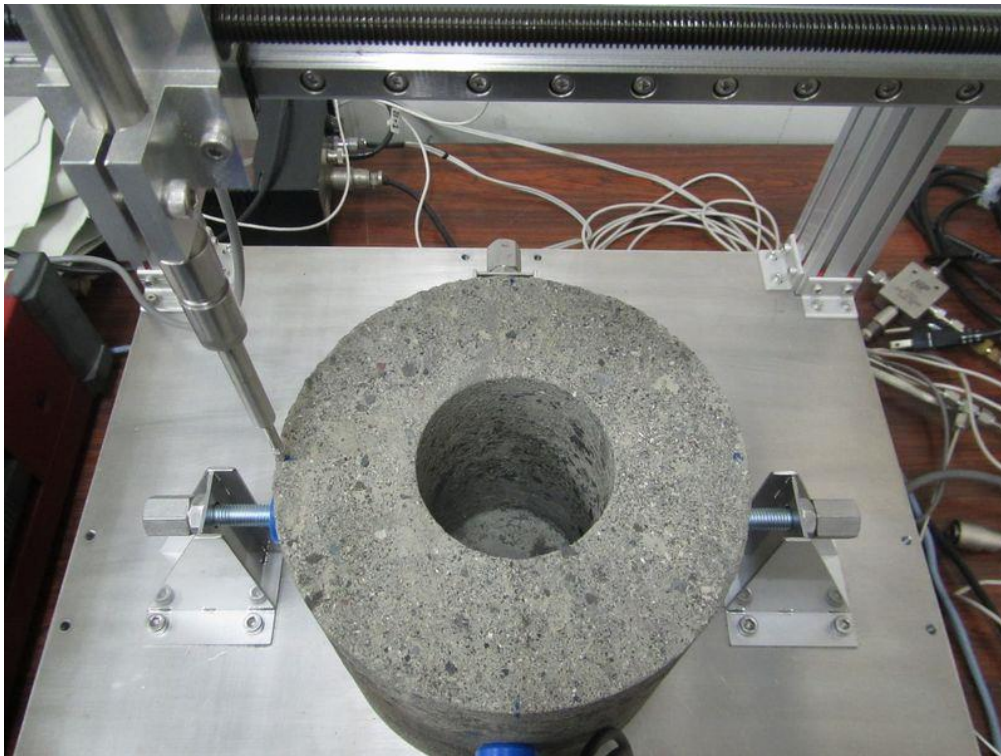


図 4.6.1-9 岩盤供試体の表面計測機への設置状況

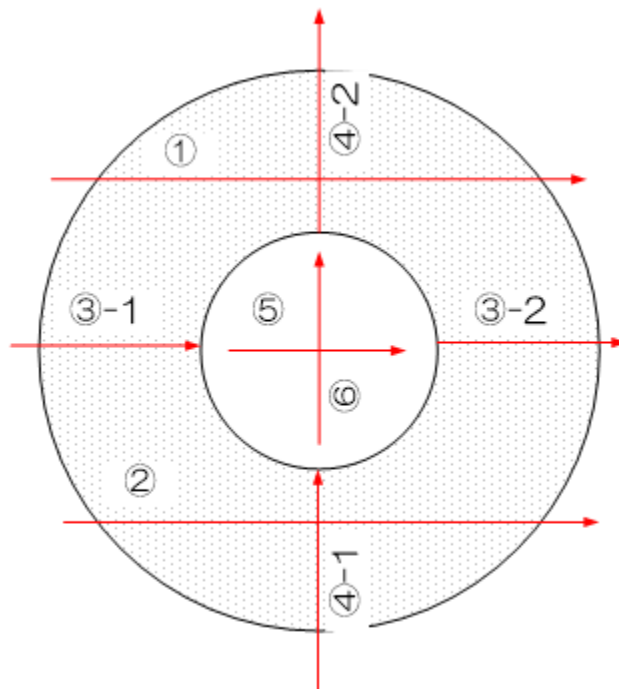
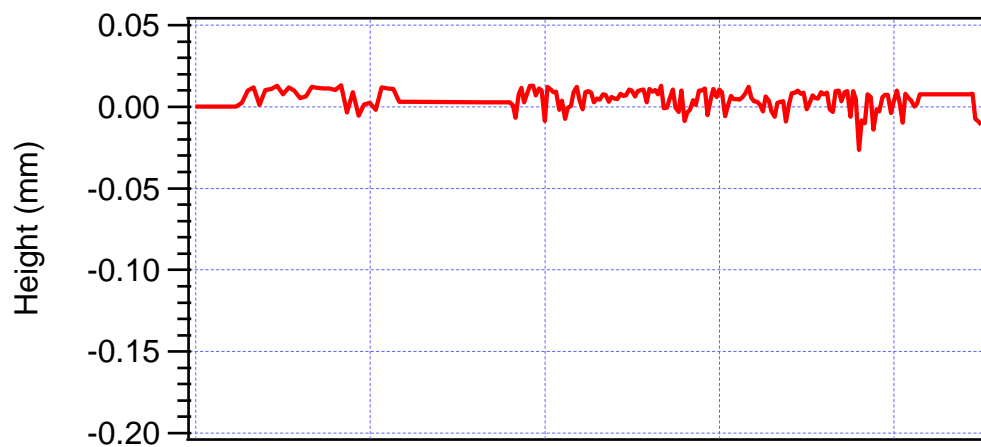
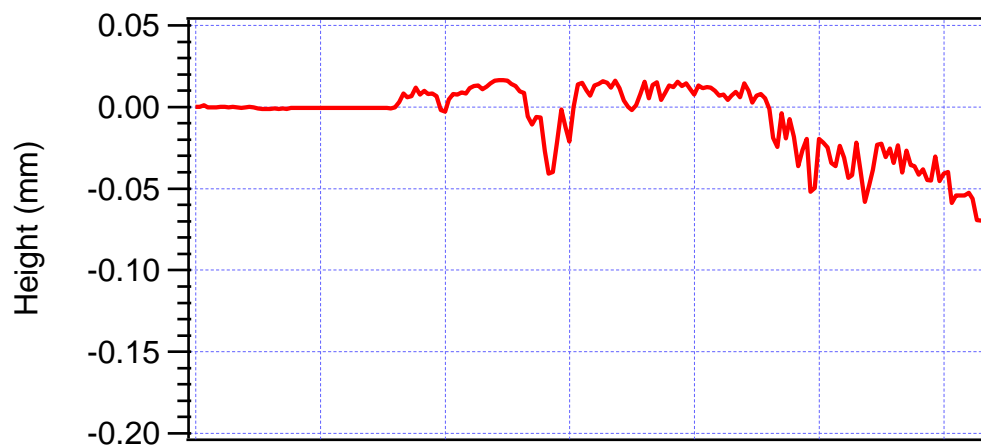


図 4.6.1-10 表面計測の測線のイメージ

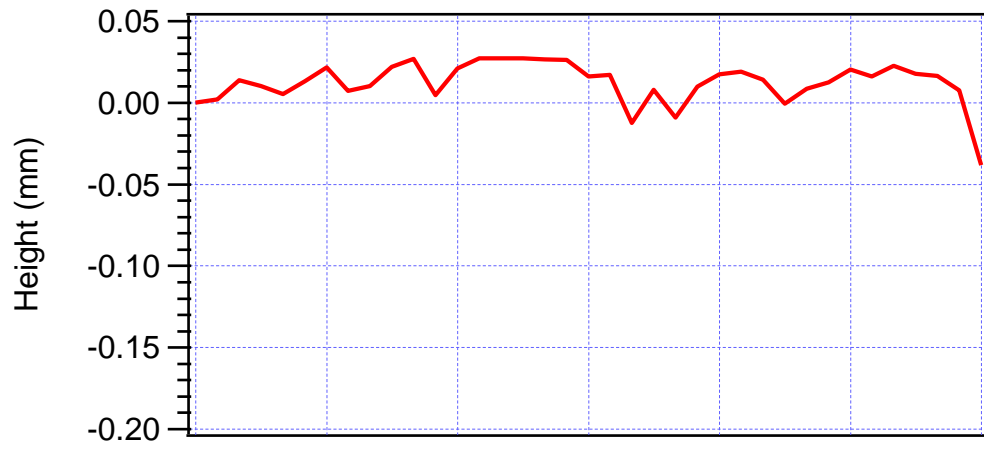


a) 測線 1

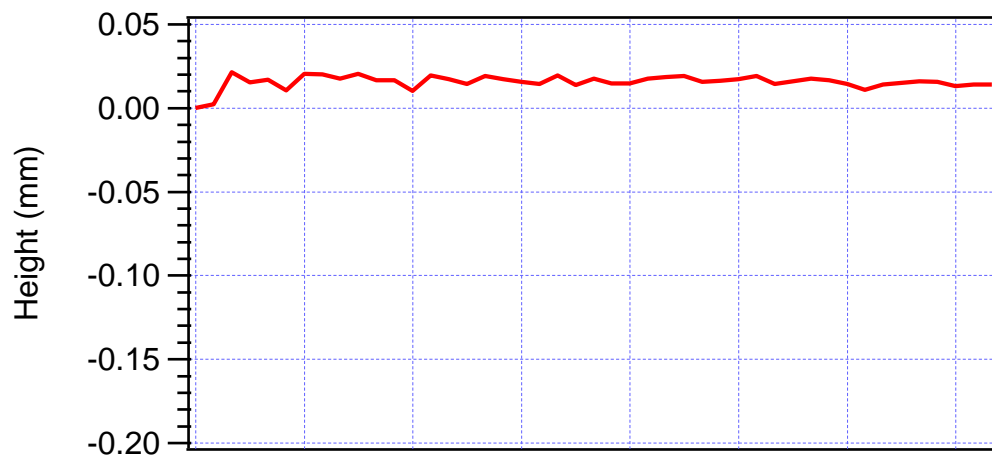


b) 測線 2

図 4.6.1-11 測線 1 と 2 の計測結果

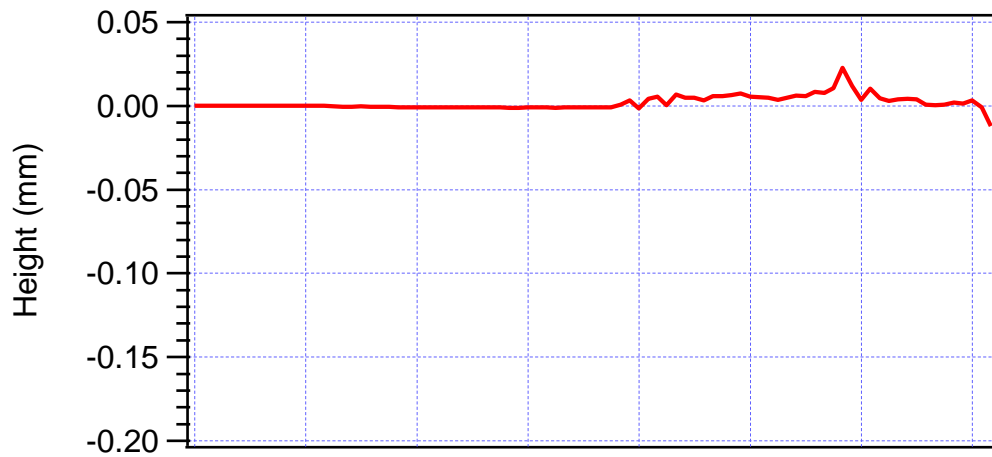


c) 測線 3-1

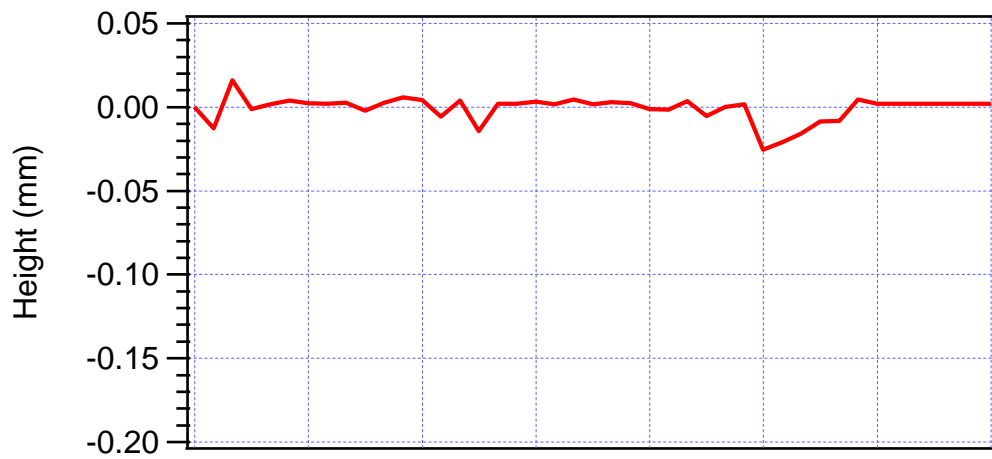


d) 測線 3-2

図 4.6.1-12 測線 3-1 と 3-2 の計測結果

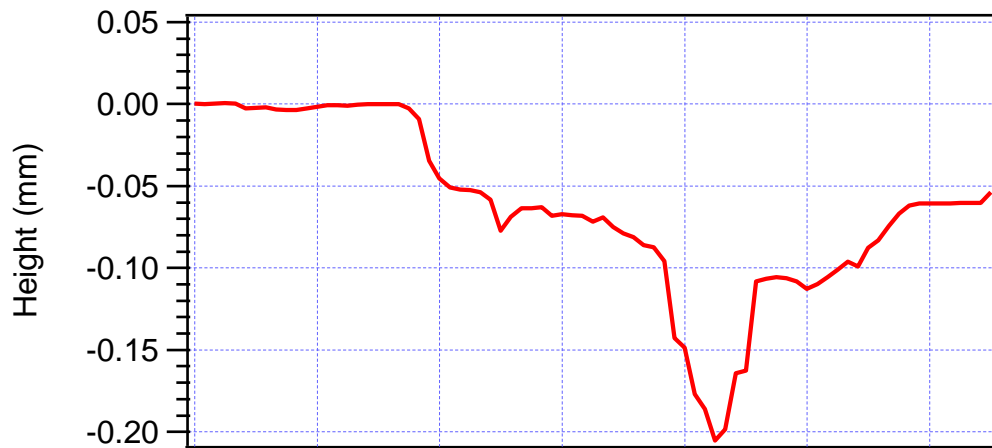


e) 測線 4-1

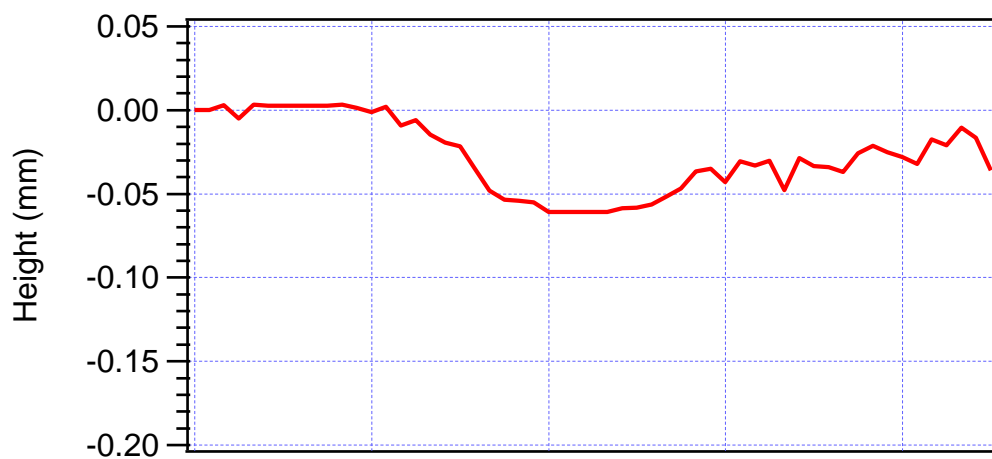


f) 測線 4-2

図 4.6.1-13 測線 4-1 と 4-2 の計測結果



g) 測線 5



h) 測線 6

図 4.6.1-14 測線 5 と 6 の計測結果

(4) 埋戻し材

埋戻し材は直径 180mm、高さ 20mm 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 15 対 85 で混合した物を、治具を用いて埋戻し材を作製した。埋戻し材の中央部にはオーバーパックの変位を計測するための金属棒を通すため直径 7.2mm の穴が開いている。埋戻し材の作製方法を以下に示す。

- ① 埋戻し材は初期乾燥密度が $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ 以上になるように設定し、クニゲル V1 とケイ砂の量を計量する。クニゲル V1 は、含水比が 13.40% 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、使用する。
- ② 所定量のクニゲル V1 とケイ砂を計量し、含水比調整のため、ケイ砂に所定量を加水する。
- ③ 含水比調整を実施したケイ砂にクニゲル V1 を投入し、スコップを使用して攪拌を行う。攪拌時間は 5 分とする。
- ④ 埋戻し材用圧縮容器（図 4.6.1-15）の下部加圧版にはテフロンシートを設置した。下部加圧版に高剛性リング（図 4.6.1-16）を設置し、分割モールドを組み立てる。モールド側壁にはシリコンスプレーを塗布し試料を投入し、表面を均等になるように調整する。試料を投入したモールドにテフロンシートを設置した上部加圧版を静置し（図 4.6.1-17）、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。その後、所定の高さになるように 120kN 程度の荷重を加え締固めを実施する。
- ⑤ 圧縮が終了した埋戻し材をモールドより取り外し、高さおよび重量を計測する。計測結果を表 4.6.1-3 作製した埋戻し材の諸元に示す。
- ⑥ 埋戻し材に発熱型オーバーパック模型のヒーターおよび熱電対のケーブルを通すために中心部の孔を 3mm 程度大きくし、上面も溝の掘削を実施し、壁面近くに孔を削孔する（図 4.6.1-18）。

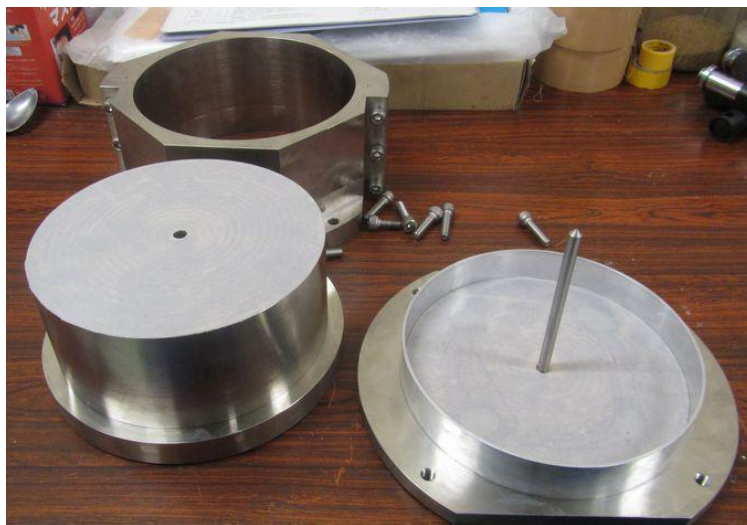


図 4.6.1-15 埋戻し材用圧縮容器



図 4.6.1-16 高剛性リング

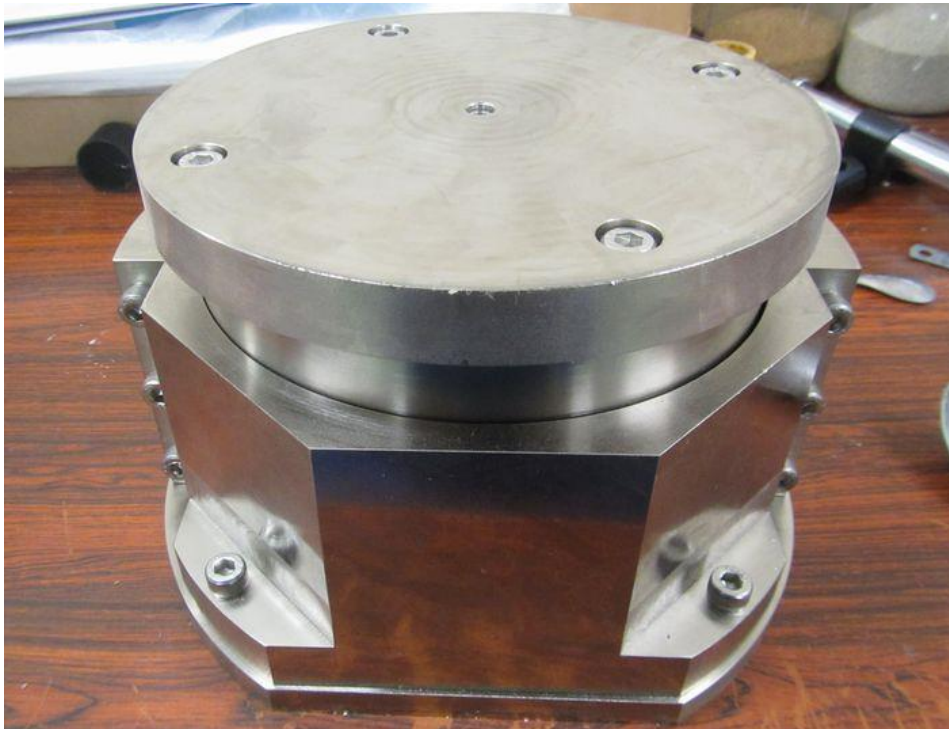


図 4.6.1-17 上部加圧板静置状況

表 4.6.1-3 作製した埋戻し材の諸元

高さ (mm)	平均高さ (mm)	重量 (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (Mg/m ³)	乾燥密度 (Mg/m ³)
20.01	20.01	989.63	8.05	1.95	1.80
20.02					
20.01					



図 4.6.1-18 埋戻し材加工状況

(5) 遠心模型の準備

遠心模型試験に使用する模型試験の製作を以下の手順で実施した。

- ① 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 4.6.1-19) にて 2 週間乾燥させる。乾燥状態になった岩盤供試体にひずみゲージ貼付部のマーキングを行う (図 4.6.1-20)。使用するひずみゲージは、共和電業製、KFG-10-120-C1-11N50C3 (図 4.6.1-21 上) を 2 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 4.6.1-21 下) が 14 枚である。後に実施する被覆のため、各ひずみゲージのリード線の撚りを解き、ナンバリングを行う。
- ② 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 になるように研削する。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、圧力計のリード線取出し用の溝を掘削する (図 4.6.1-22)。ひずみゲージを貼付する箇所に NICHIBAN 製アララルダイトラピッドを使用して厚さ 1mm の下地を作製する (図 4.6.1-23)。
- ③ 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する (図 4.6.1-24)。
- ④ ひずみゲージを貼付後、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する。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る。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 を塗布する (図 4.6.1-25)。
- ⑤ 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) を被覆させる。この際、メンブレンゴムスリーブが岩盤供試体下部に 20mm 余分に出るように調整する。ひずみゲージのリード線、発熱型オーバーパックのヒーターケーブル、熱電対、圧力計の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 5 か所の計 7 か所を開ける (図 4.6.1-26)。
- ⑥ 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す。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ぐ。
- ⑦ 遠心模型試験は周圧を水圧で 5MPa かけるため、リード線とメンブレンゴムスリーブとの間に僅かな弱部があるだけで止水することができなくなる。そのため、KS-45-TS を穴とリード線部分に 6 回以上重ね塗りを行う (図 4.6.1-27)。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、防水処理をする（図 4.6.1-28）。緩衝材と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 個に加工を行う。ペンリユーターにて緩衝材の中心部にヒーターおよび熱電対のケーブルが通るように孔を 3mm 程度大きくする（図 4.6.1-29）。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) で削る。

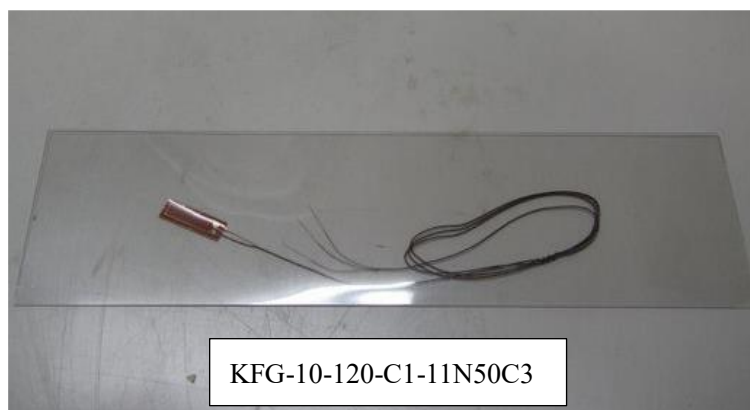
- ⑧ 削った部分に軸方向、周方向にひずみゲージを貼付する。一番上に設置される緩衝材は、土圧計を 2 個設置するため、土圧計の大きさに合わせて溝を掘削する（図 4.6.1-30）。
- ⑨ メンブレンゴムスリーブを被覆した岩盤供試体を横に倒し、緩衝材ブロックの底板部と、27.33mm の穴が開いている円筒部の 3 個を模擬処分孔内に設置する。
- ⑩ 中心部に 7.2mm の穴が開いている緩衝材 3 個をオーバーパックの配線柱部に設置した状態で処分孔内に静置する（図 4.6.1-31）。
- ⑪ 静置後、2 個の東京測器製、超小型圧力計 PDA-3MPB（図 4.6.1-32）を設置し、岩盤部の溝にケーブルを固定する。
- ⑫ ケーブルをテトラエッチ B で下処理を実施し、溝は KS-45-TS を用いて埋め、シーラント 40 を塗布する。
- ⑬ 膨出センサー設置のため、緩衝材の所定部分を削り、膨出センサーを設置し、固定のためのビス (M1.4) をアラルダイトラピッドにて設置する（図 4.6.1-33）。もう一方の端部は、スライドできるよう同じ厚さのリン青銅板を用いて図 4.6.1-34 の機構を作製し、設置する。
- ⑭ ケーブルを変位しても断線することの無いように養生し、メンブレンに開けた孔からケーブルを取り出す。圧力計および膨出センサーの設置状況を図 4.6.1-35 に示す。
- ⑮ 岩盤および緩衝材上部に高剛性リングに設置された埋戻し材を設置する。設置する際にヒーターおよび熱電対のケーブルを通す必要があるため、注意を必要とする。また両ケーブルを埋戻し材端部にある孔に通し、下にある岩盤部まで戻し設置を完了する（図 4.6.1-36）。
- ⑯ ゴムメンブレンの孔から外に出す。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）を接着した上蓋を設置し、岩盤と高剛性リングおよび岩盤と上蓋の接点が鋭角となっているため、アラルダイトラピッドを使用して角を失くす処理をする。メンブレンが破損する可能性を低減するため、模型の下部 5cm を除いた部分のメンブレンを二重にする（図 4.6.1-37）。下にあるメンブレンと同じ位置に孔を開け、ケーブルを外に取り出す。また、メンブレン同士の密着度を上げるため、上下端部をゴム糊で接着した。
- ⑰ 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 回以上重ね塗りする（図 4.6.1-38）。



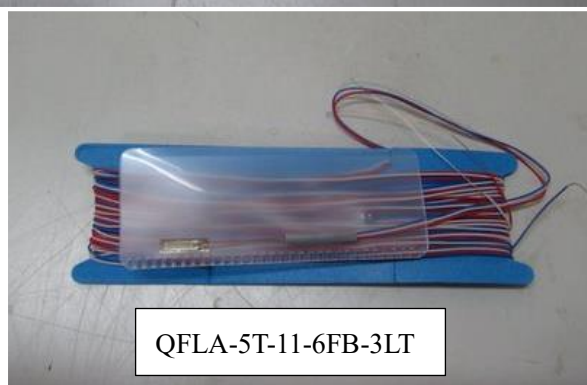
図 4.6.1-19 ADVANTEC DRK632DB 送風定温乾燥機



図 4.6.1-20 岩盤供試体へのマーキング状況



KFG-10-120-C1-11N50C3



QFLA-5T-11-6FB-3LT

図 4.6.1-21 使用したひずみゲージ

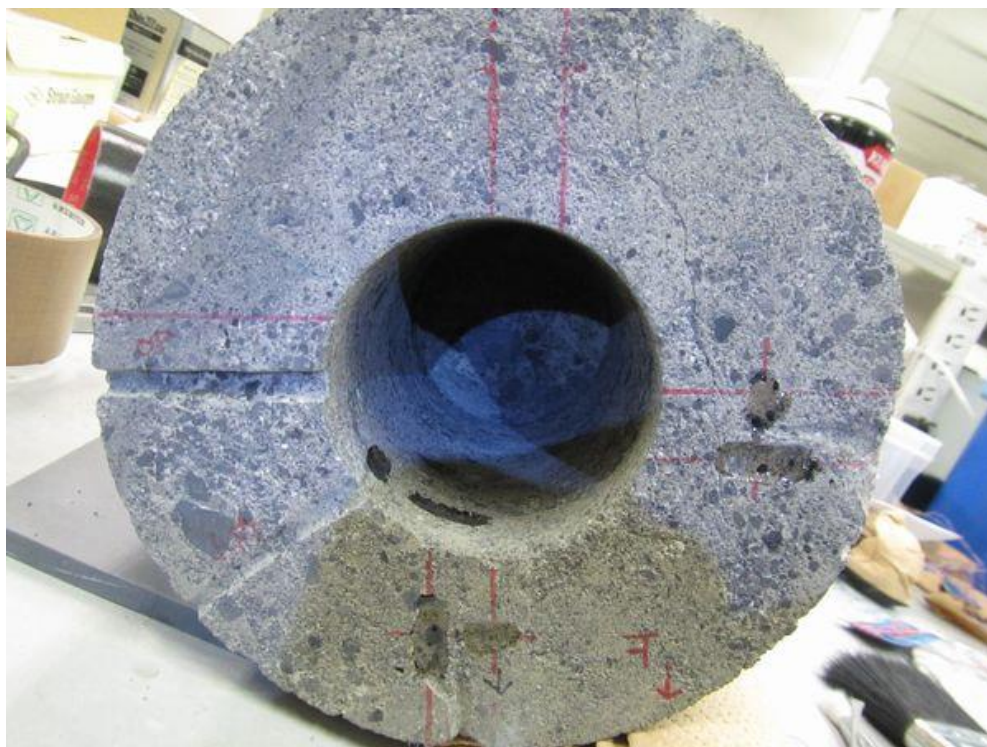


図 4.6.1-22 岩盤試料上端面の加工状況



図 4.6.1-23 下地剤塗布状況

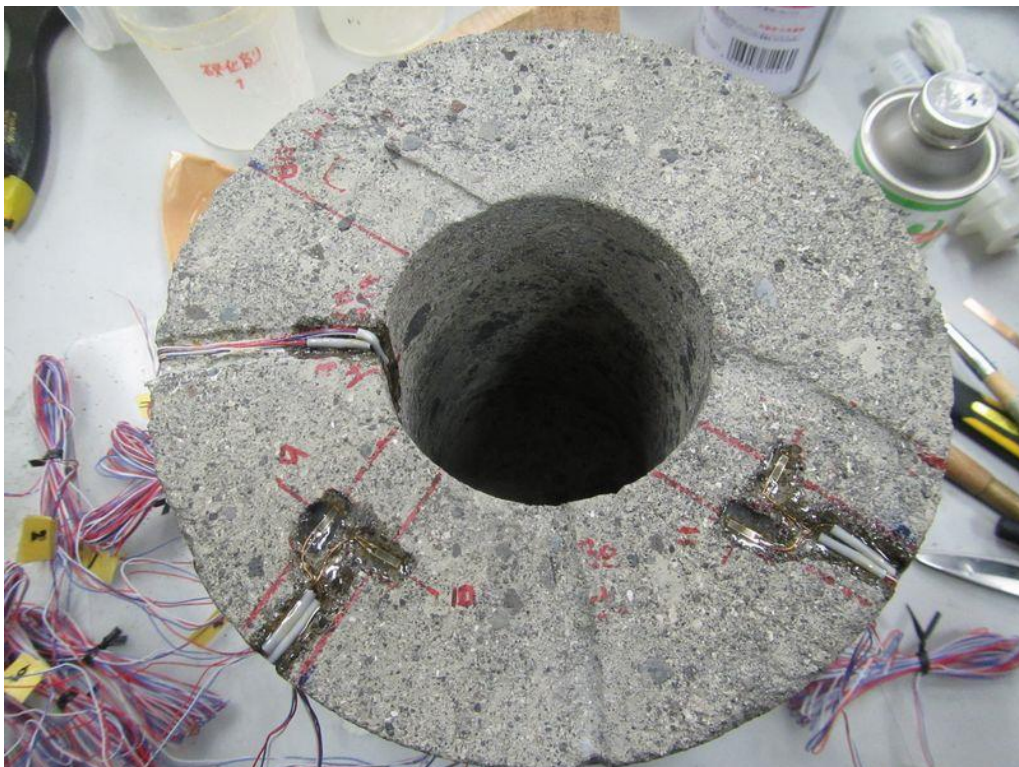


図 4.6.1-24 ひずみゲージの貼付状況



図 4.6.1-25 ひずみゲージ貼付部分へのコーティング状況

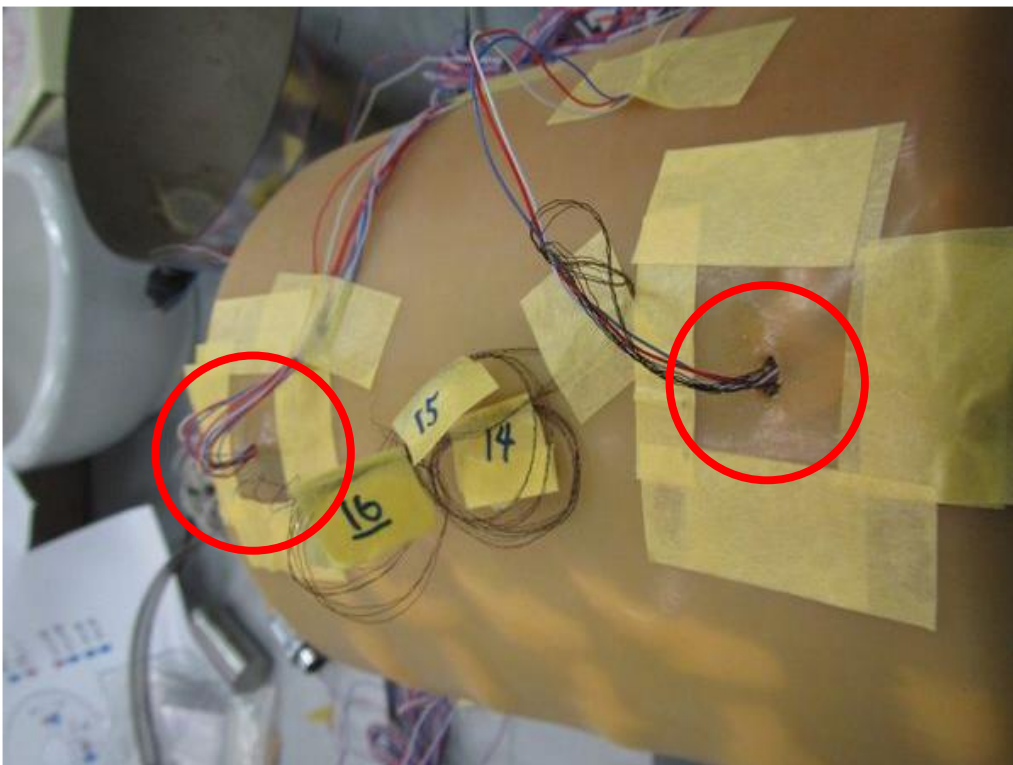


図 4.6.1-26 メンブレンゴムスリーブへの穴開け状況 (赤丸部分)

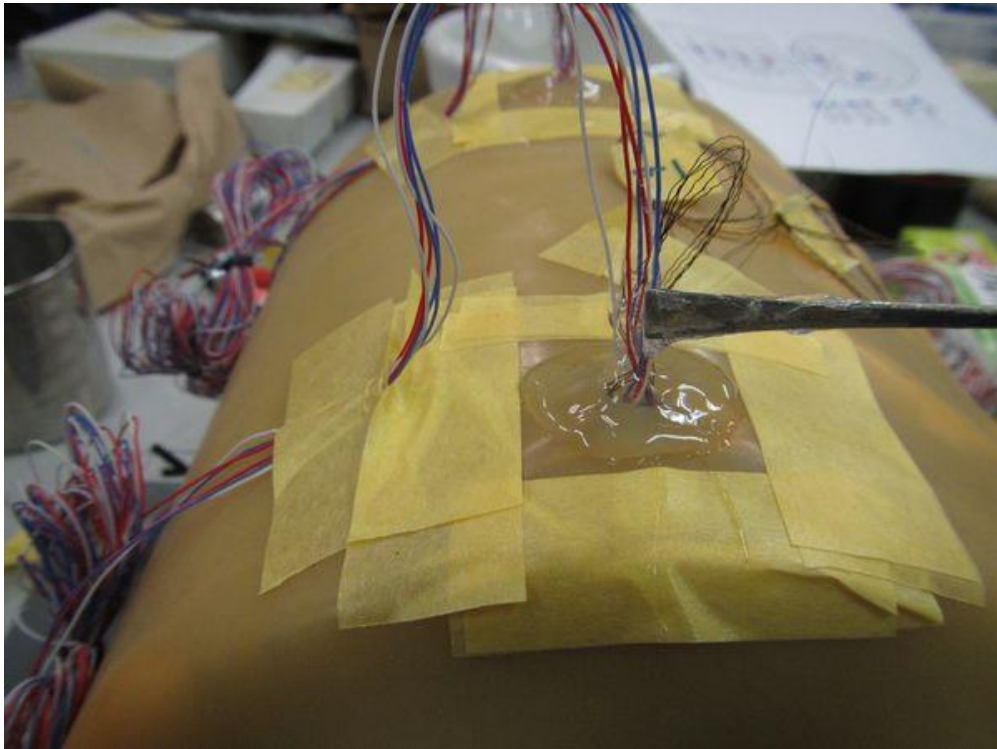


図 4.6.1-27 KE-45-TS を使用しての止水処理状況

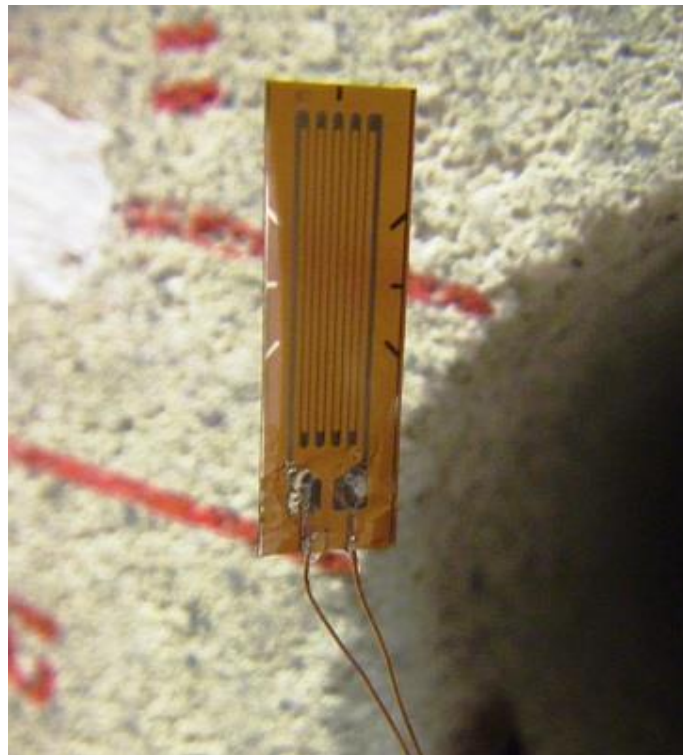


図 4.6.1-28 ベントナイト貼付用ひずみゲージへのコーティング状況



図 4.6.1-29 緩衝材ブロックの中心部加工状況

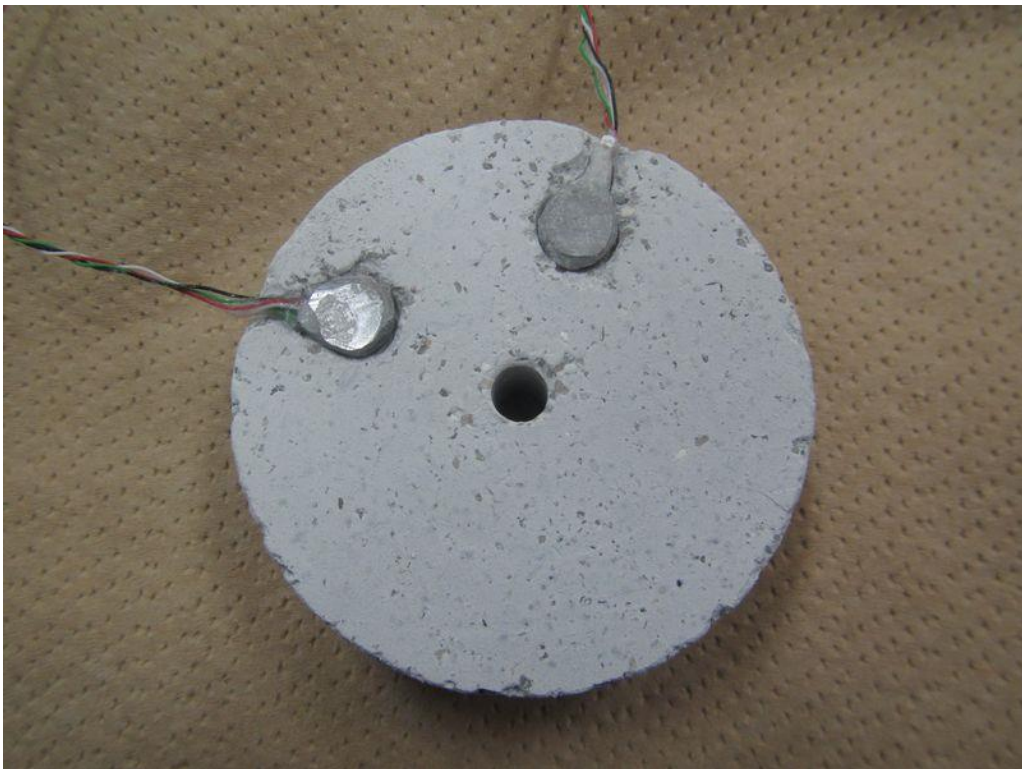


図 4.6.1-30 緩衝材ブロックの土圧計設置の加工状況



図 4.6.1-31 緩衝材・模擬オーバーパックの処分孔への設置状況



図 4.6.1-32 圧力計（東京測器製 PDA-3MPB）

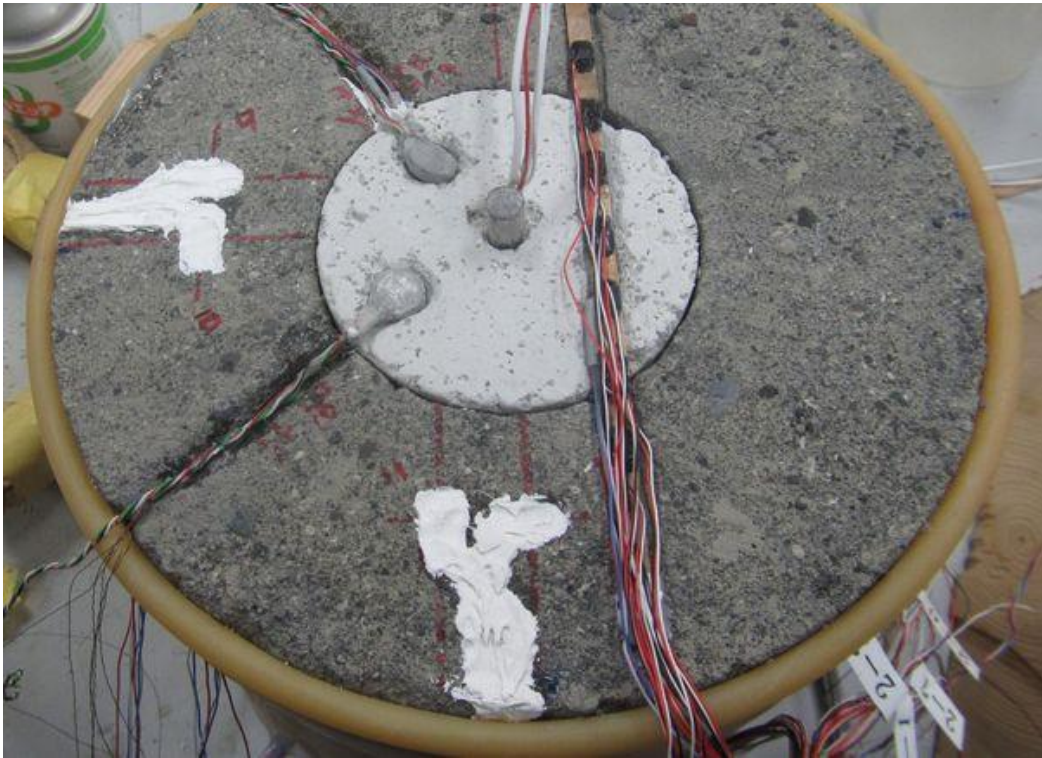


図 4.6.1-33 膨出センサー設置状況

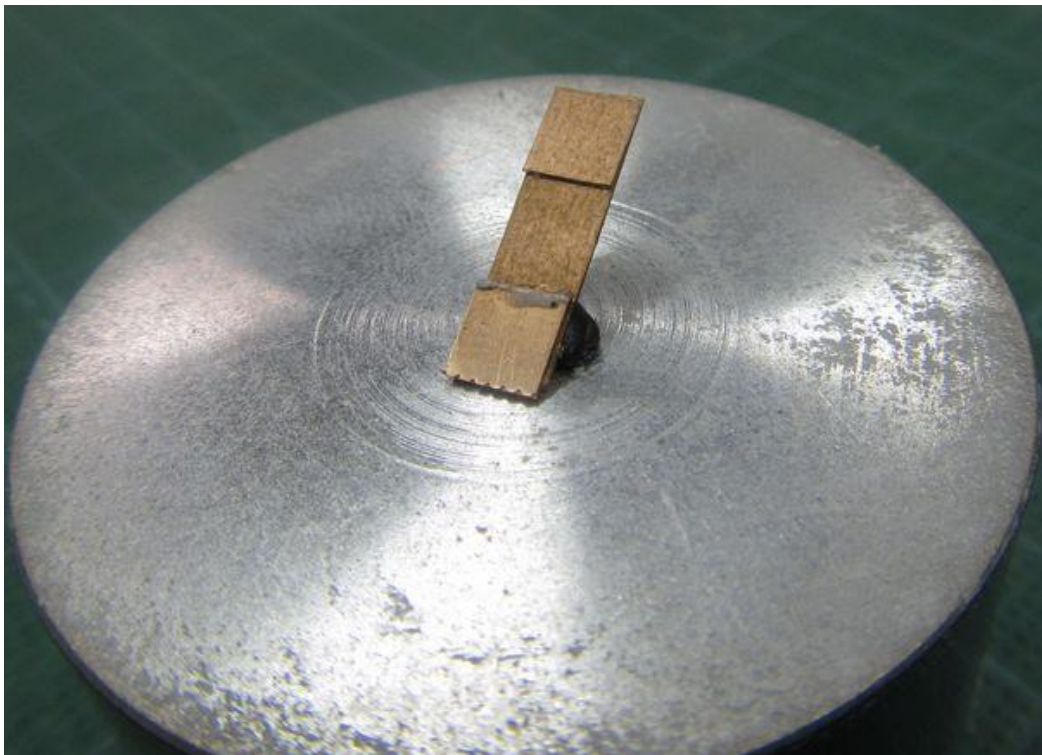


図 4.6.1-34 膨出センサースライド治具



図 4.6.1-35 土圧計および膨出センサー設置状況



図 4.6.1-36 埋戻し材の設置状況



図 4.6.1-37 メンブレンの装着状況

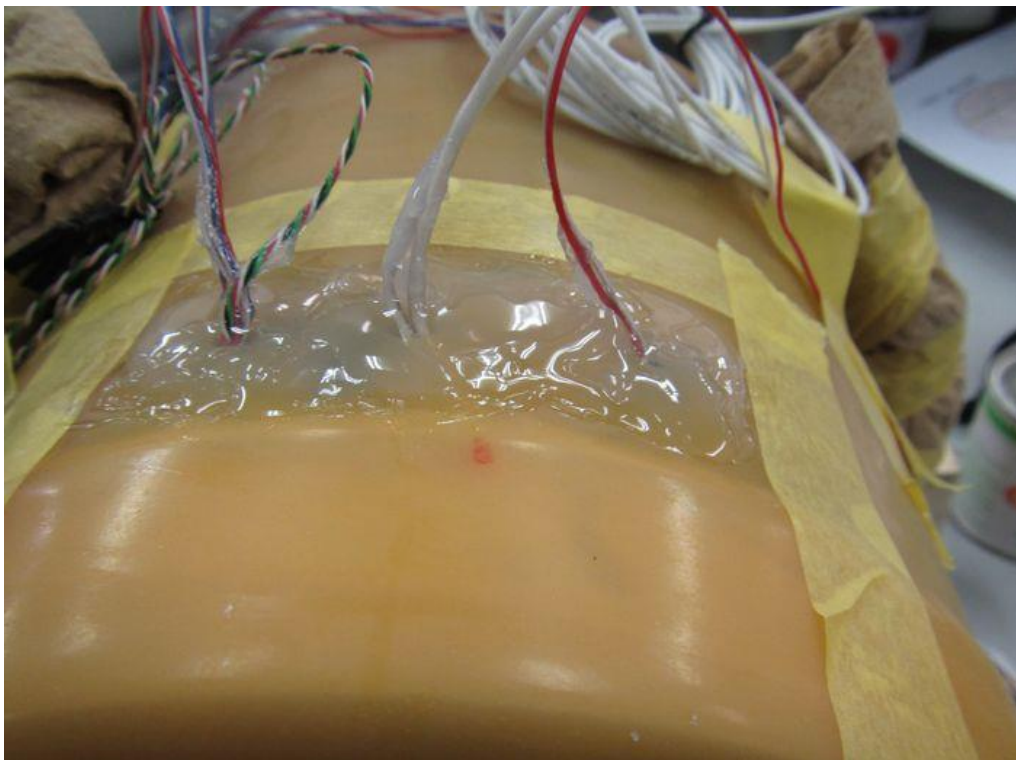


図 4.6.1-38 メンブレン部の被覆状況

(6) 圧力容器への設置

- ① 模型の設置において、まず圧力容器下部架台上にある载荷ピストン上面に導水用ステンレスメッシュ (200 メッシュ/インチ、目開き 75 μ m) を接着し、遠心模型試験用模型を設置する (図 4.6.1-39)。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およびメンブレンゴムスリーブが二重になっている箇所に止水用の O リングをそれぞれ設置する (図 4.6.1-40)。
- 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う (図 4.6.1-41)。同様に緩衝材部に設置した東京測器製 PDA-3MPB 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う (図 4.6.1-42)。
- ③ 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す (図 4.6.1-43)。
- ④ 配線の処理が完了後、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。
- ⑤ 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。
- ⑥ 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 4.6.1-44)。計測した重量と圧力容器の重心から、遠心力载荷装置に搭載するカウンターウェイトを計算する。

(7) 遠心模型試験装置への設置

- ① 圧力容器は、天井クレーンを用いて遠心力载荷装置の容器設置側のプラットフォームに静置する。
- ② 圧力容器とプラットフォ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 4.6.1-45)。
- ③ 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 : 载荷ピストン鉛直変位量) は、プラットフォーム上に設置された専用アンプへ接続する。
- ④ 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。
- ⑤ ケーブルの養生終了後、軸圧、周圧を载荷するためプラットフォーム上の圧力供給口への配管を行い、配管内の空気、圧力容器周圧载荷部の空気を抜くため、圧力発生装置 (送水ポ

ンプ) から通水を行う。

- ⑥ カウンターウェイト側プラットフォームに計算から求めたカウンターウェイトを搭載する。
以上の手順により、圧力容器の遠心力载荷装置への設置が完了した。

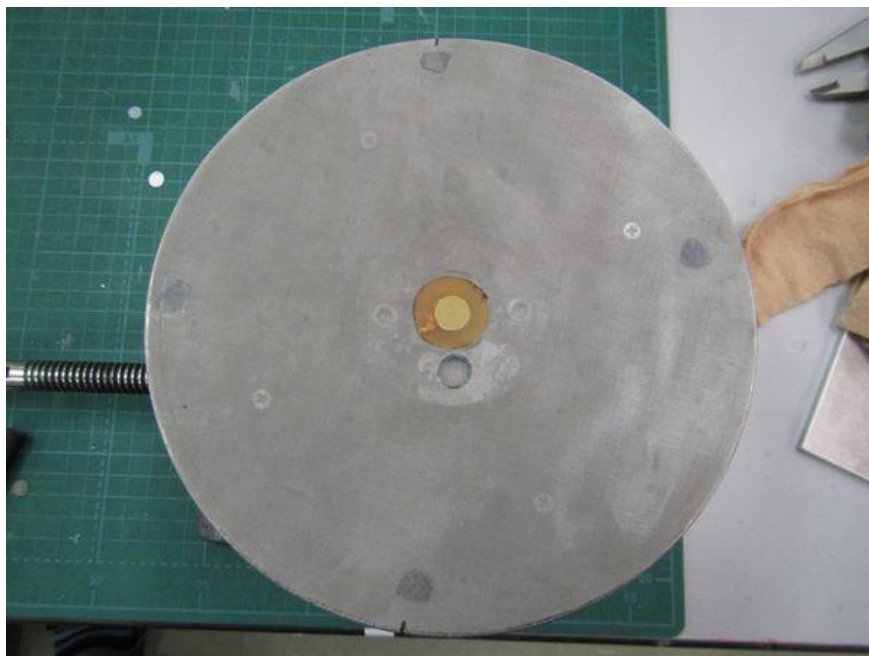


図 4.6.1-39 ステンレスメッシュ貼付状況

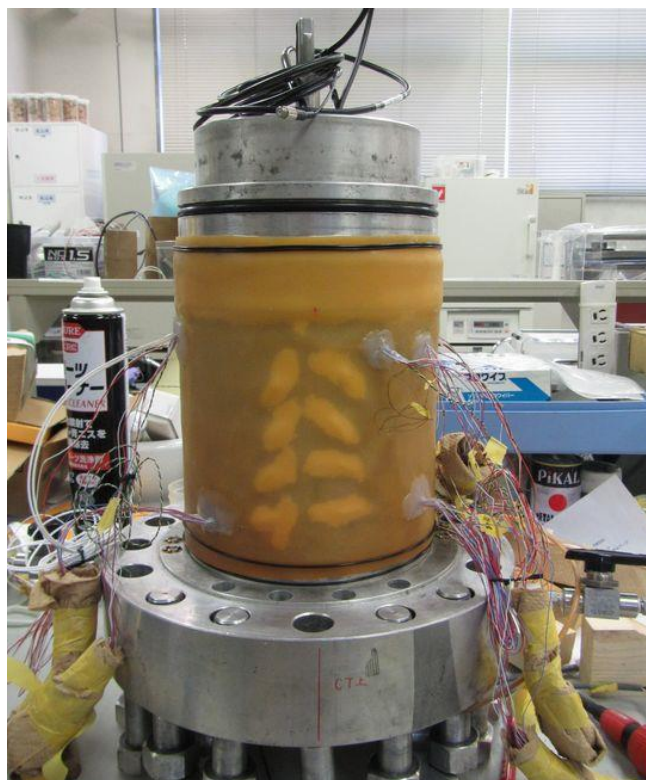


図 4.6.1-40 下部架台への設置状況 (Oリング設置済)



図 4.6.1-41 ひずみゲージのリード線の防水処理状況

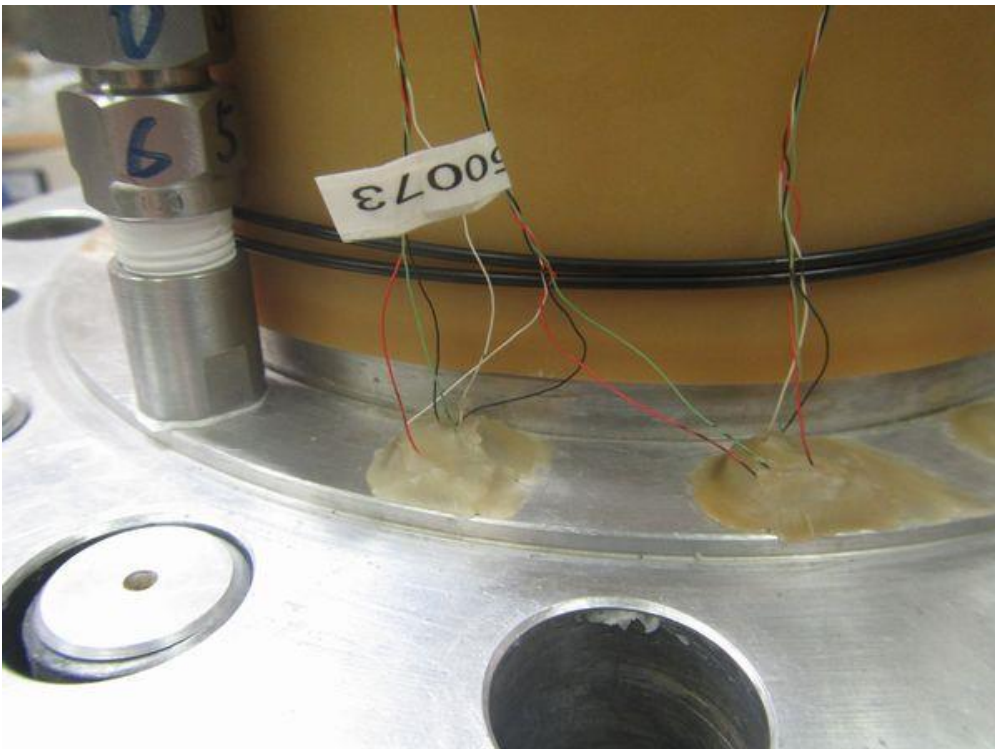


図 4.6.1-42 土圧計リード線の防水処理状況

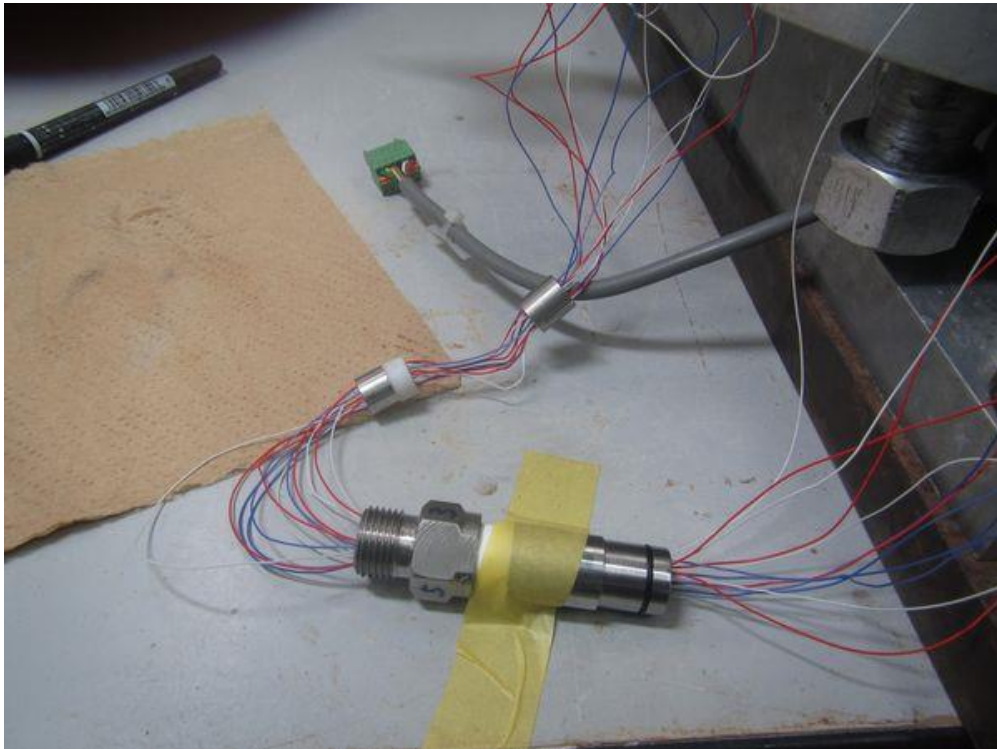


図 4.6.1-43 Conax 社製、シーリンググランドへのリード線設置状況



図 4.6.1-44 sartorius 社製、MW2P1-150FE-L



図 4.6.1-45 高速スイッチボックスへの結線状況

4.6.2 試験概要

(1) 条件

本研究では、岩盤供試体は整形後 50℃の乾燥炉で 2 週間静置した。遠心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 (4.3.2 を参照)、岩盤供試体の初期条件を飽和状態とすると緩衝材が作業中に吸水してしまい、正確な緩衝材の膨潤挙動を計測できない。このため、試験では岩盤供試体を乾燥状態として試験を開始した。実際の処分環境では、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、周辺岩盤は不飽和状態と考えられる。

拘束圧は 4.4.2 に述べたとおり、周圧は 5.0MPa、軸圧は注水圧 (間隙水圧) の昇圧とともに 0MPa から 1.1MPa に昇圧させる設定とした。注水圧は、試験開始時点は 0MPa として、徐々に 1.05MPa に昇圧させる設定とし、透水試験用注水口 (図 4.3.2-1) より蒸留水を模型下面へ注入した。模型上下端面には導水用ステンレスメッシュ (200 メッシュ/インチ、目開き 75 μ m) を被覆しており、注入された水は模型下面より間隙に流入し、上面より排水される。

背圧は透水試験用排水口 (図 4.3.2-1) より模型上面に負荷され、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 0MPa 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 0MPa の空気圧が負荷される。その後、注入された間隙水の模型内部への浸潤にともない下面 - 上面の間に圧力勾配が発生する。間隙水が模型上面に達すると圧力水頭が生じ、背圧が徐々に水圧となり、水の自重応力により背圧 (模型上面の圧力) が漸増する。この水圧が上昇して

背圧が 1.0MPa になったところで、背圧を 1.0MPa とする排水ポンプの一定圧制御を開始した。

(2) 手順

具体的な手順は以下の通りである。

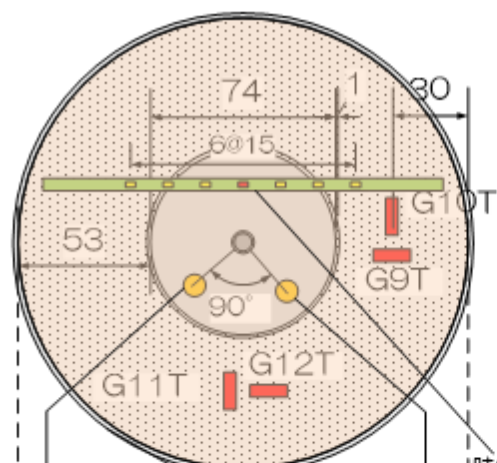
- Step1** : 周圧および軸圧を 0.1MPa/min でそれぞれ 5MPa、0.1MPa まで昇圧する。拘束圧の負荷の後、遠心力载荷装置ピット内およびオーバーパックを所定の深度相当の温度（境界温度）である 33℃に設定する。ひずみゲージの計測値が一定値に収束するまで、設定を保持する。
- Step2** : ひずみゲージの計測値が一定値に収束したのち、遠心力载荷装置の運転を開始する。0.08rad/s²の角加速度で回転を加速させ、30G に到達させる。30G に到達後、着座を行い、各センサーの値が安定するまで、状態を保持する。
- Step3** : 各センサーの値が安定するのを確認した後、注水ポンプにより間隙水圧を 0.1MPa/min で 1.05MPa まで上昇させ、オーバーパックの温度制御を図 4.4.2-3 に従い開始した。間隙水圧が 1.05MPa に達した後は注水ポンプを一定圧制御する。
- Step4** : 背圧は、実験開始時点では排水ポンプの圧力が 0MPa となるピストン位置で停止させている。注入された間隙水が模型を浸潤し背圧が上昇し、背圧が 1.0MPa に達した後は排水ポンプを一定圧制御する。

(3) 計測項目

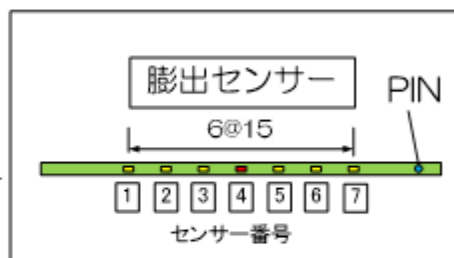
試験では、オーバーパックの鉛直変位量および緩衝材、埋戻し材の土圧、緩衝材・岩盤のひずみおよび温度を計測した。

オーバーパックの鉛直変位は圧力容器上蓋に埋め込まれた非接触変位計、緩衝材の土圧は緩衝材中に埋め込んだ小型土圧計、埋戻し材の土圧は圧力容器上蓋に埋め込まれた土圧計、岩盤および緩衝材のひずみはひずみゲージ、緩衝材の膨出挙動は膨出センサーで計測した（図 4.6.2-1）。なお、図 4.6.2-1 に示した G1T~14T は測温機能付きひずみゲージ（以下、測温ゲージ）であり、同じ場所のひずみと温度が計測できる（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、オーバーパック内部に埋め込まれた熱電対により、オーバーパックの温度の制御・計測を行った。

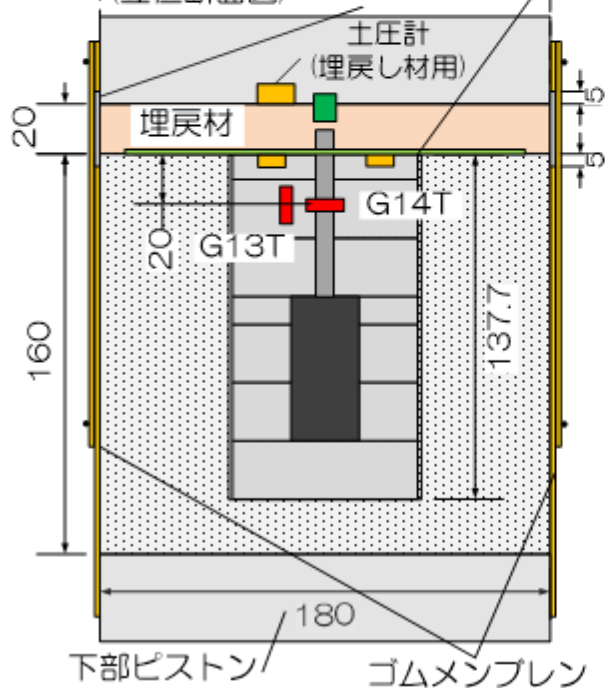
(平面図：岩盤上端面)



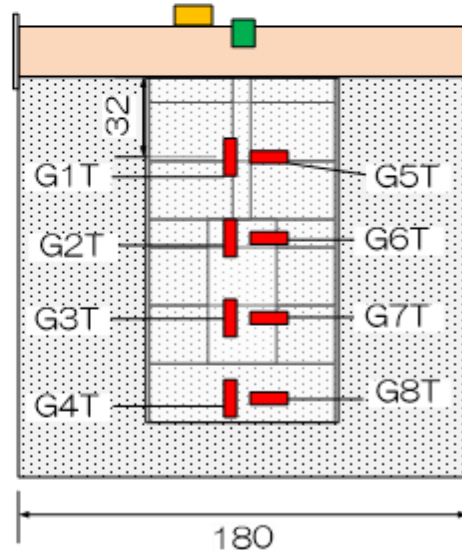
- 非接触変位計
- 土圧計
- ひずみゲージ
- 測温機能付ひずみゲージ
- オーバーパック
- 緩衝材
- 膨出センサー



土圧計02 土圧計01 膨出センサー
 (立位断面図) 金属製リング



(立位側面図)



G13T, G14T : 孔壁に貼付
 G15, G16 : 緩衝材に貼付

図 4.6.2-1 遠心模型試験のセンサーレイアウト

4.6.3 結果

(1) 試験時の計測結果

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）を原点（0 時間）とし、縦軸は計測値、下横軸は実物換算経過時間、上横軸は試験経過時間で示してある。文中で述べる際は、実物換算経過時間で記載してある。なお、オーバーパックの変位についてのみ、実物換算した値を記載してある（計測値の 30 倍）。また、各図の上図は 0 時間から 0.01 時間相当経過時までの経時変化（通常時間スケール）とし、下図は 0.01 時間相当経過時以降の経時変化（Log スケール）を示した。

1) 温度

図 4.6.3-1 にオーバーパックの温度の入力値および計測値の経時変化を示す。入力に対して、最大 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ で制御している。計測箇所は図 4.6.2-1 を参照されたい。

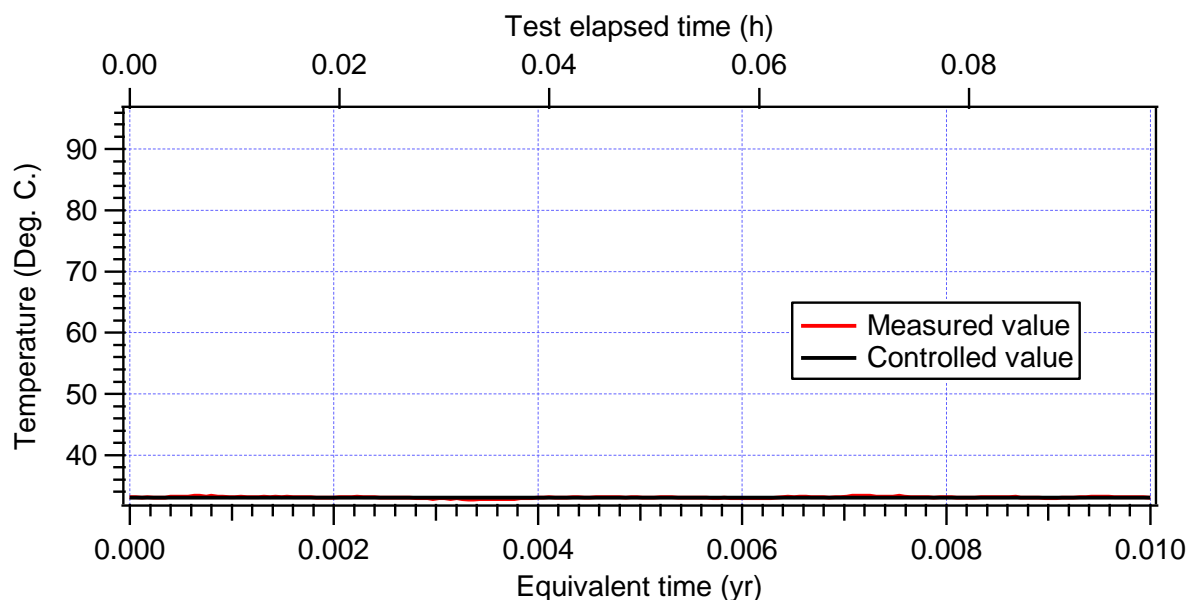
図 4.6.3-2 に模型側面軸方向に貼付したゲージの温度の経時変化を示す。試験開始直後は周辺温度である 33°C 付近であるが、0.1 年相当経過時で約 1°C の温度上昇が見られた。0.1 年相当経過時あたりより、オーバーパックの発熱に伴い全てのゲージで温度上昇が見られた。オーバーパックが最高温度となった際に、 T_G01T は 37.7°C 、 T_G02T は 39.1°C 、 T_G03T が 37.9°C 、 T_G04T が 36.0°C となった。その後 10 年相当経過後にオーバーパックの温度が下降するとゲージで計測している温度も下降した。オーバーパックと同じ高さにある T_G02T と T_G03T が高い温度を示し、 T_G01T と T_G04T はそれより低い値であったが、 T_G04T は下方から注水されているため最も低い値を計測した。

図 4.6.3-3 に模型側面周方向に貼付した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_G05T は 37.6°C 、 T_G06T は 39.0°C 、 T_G07T は 37.8°C 、 T_G08T が 36.1°C 、となった。最高温度になった後に T_G07T が接触不良のためか、値の増減を繰り返して、 34.9°C まで温度が低下した。全てのゲージで、オーバーパックの温度の下降にともなってゲージで計測している温度が下降している。周方向のゲージでも軸方向のゲージと同様な傾向を示しており、 T_G07T を除いて $T_G06T > T_G05T > T_G08T$ の関係となった。

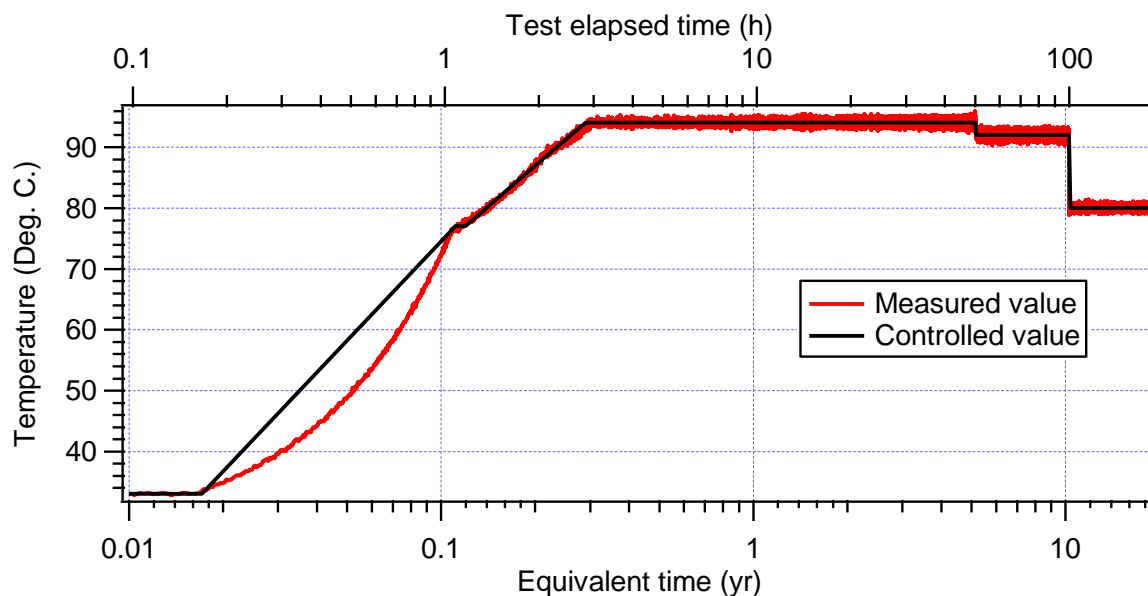
図 4.6.3-4 に模型上面に貼付したゲージの温度の経時変化を示す。側面の温度と同様にオーバーパックの昇温が始まると温度が上昇し、 T_G10T と T_G11T 、 T_G12T では 35.7°C まで昇温した。 T_G09T は 35.0°C と他より多少小さい値となった。その後はオーバーパックの温度低下に伴い温度も低下している。模型上面のゲージは、模型側面のゲージと比べオーバーパックまでの距離があるため、模型側面で計測された温度より低い値を計測した。

図 4.6.3-5 に模擬処分孔内に貼付したゲージの温度の経時変化を示す。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 40.3°C と発熱体であるオーバーパックに一番近いことにより最高温度となり、 T_G14T では 36.4°C となった。その後、 T_G14T は接触不良からか温度が下降し、2 年相当経過時より再度温度が上昇する傾向を示し、50 年相当経過時に計測不能となった。図 4.6.3-6 に T_G13T と模型上面の排水圧の経時変化を示す。模型上面の排水圧が上昇を始める 0.5 年相当経過時に T_G13T

の温度が下降し、排水圧が 1.0MPa となった 1.2 年相当経過時から 1.68 年相当経過後（試験経過時間で約 16 時間）に再び昇温が始まり、3 年相当経過時に温度の下降が始まる前と同じ温度に回復した。その後は、オーバーパックの温度の下降に伴い、温度が下降した。このことから、注入された間隙水が岩盤と緩衝材との隙間を浸潤した可能性がある。

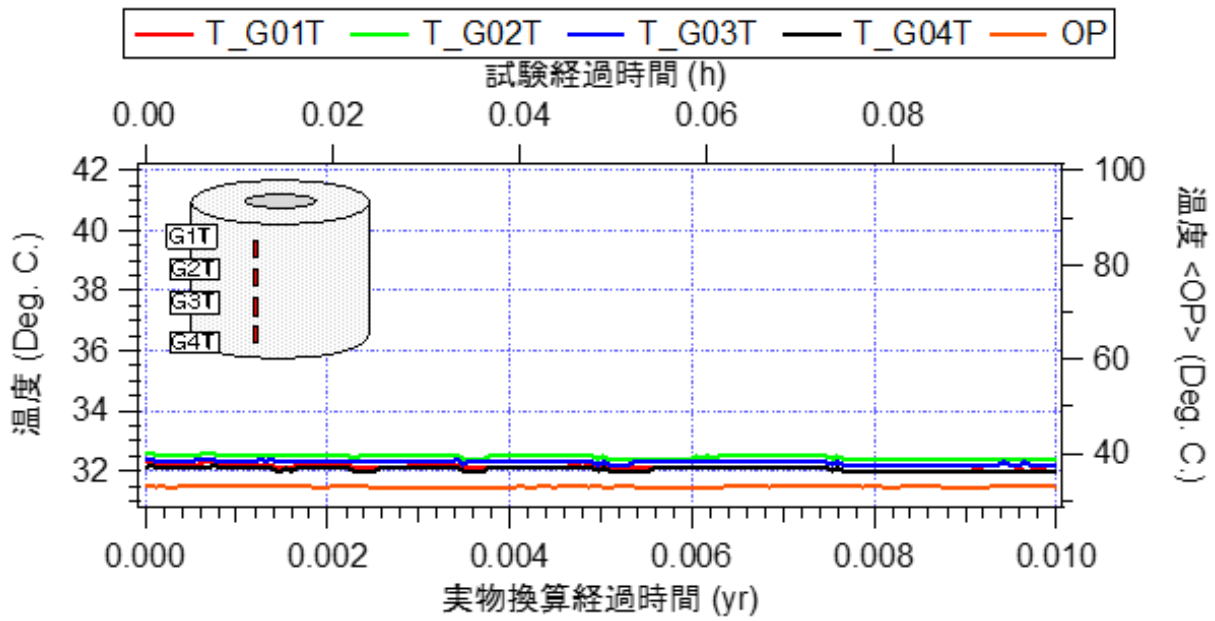


a) 開始から 0.01 年相当経過時

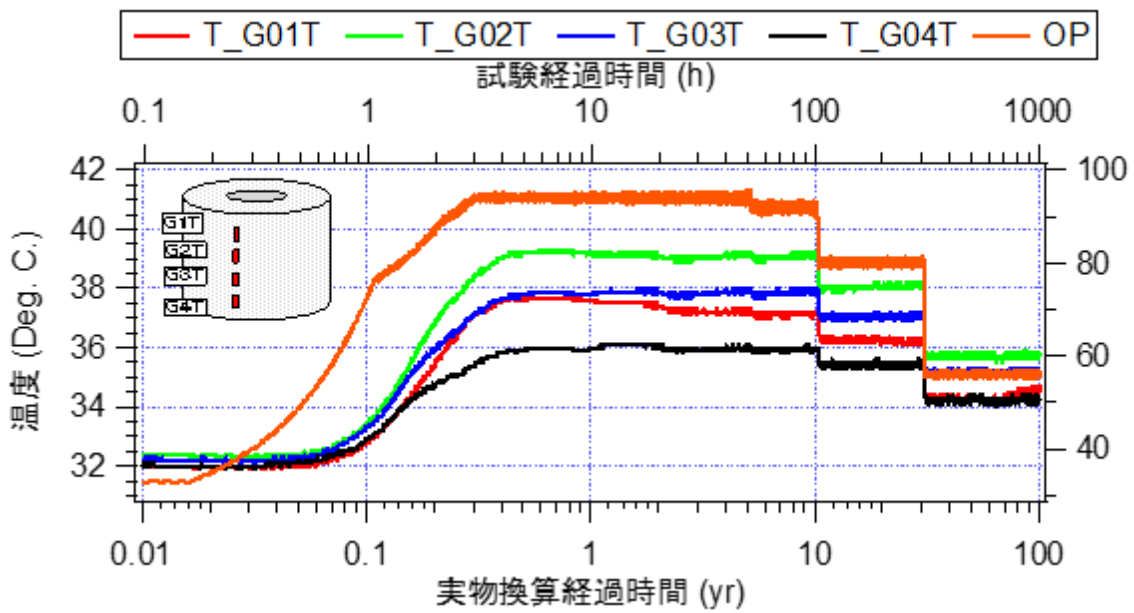


b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-1 オーバーパックの温度の入力値および計測値の経時変化

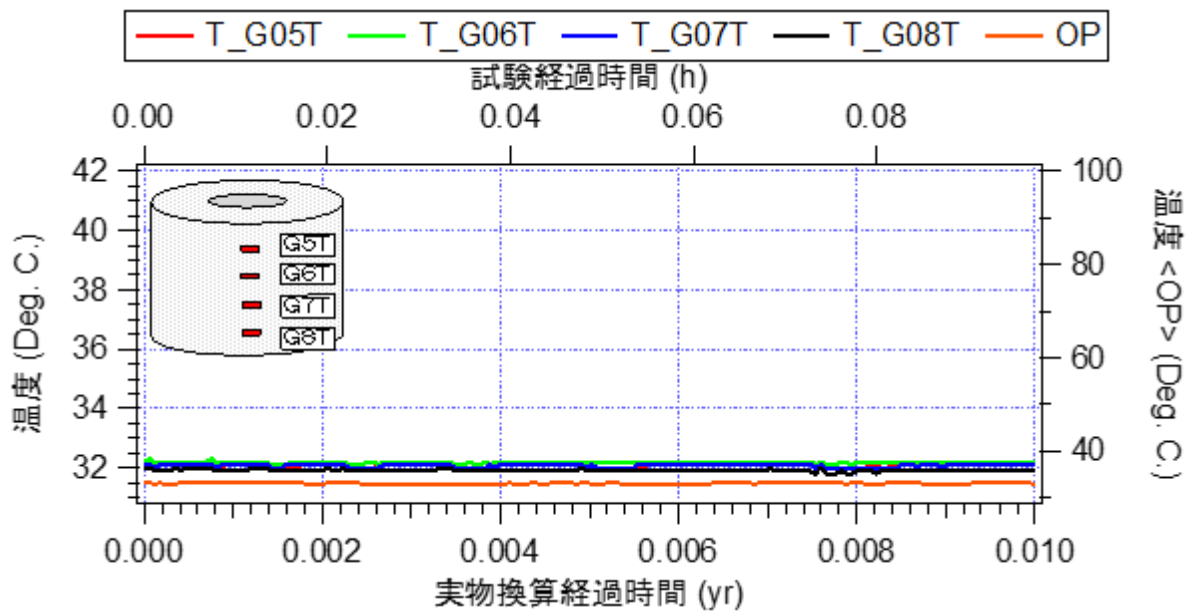


a) 開始から 0.01 年相当経過時

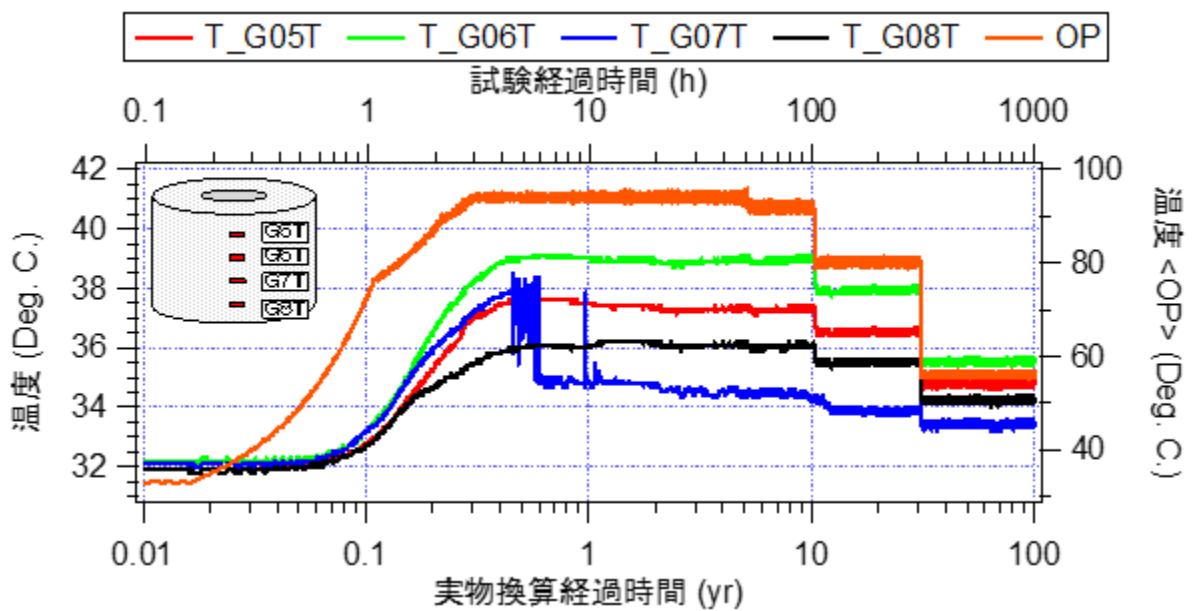


b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-2 模型側面部軸方向の測温ゲージによって計測された温度の経時変化

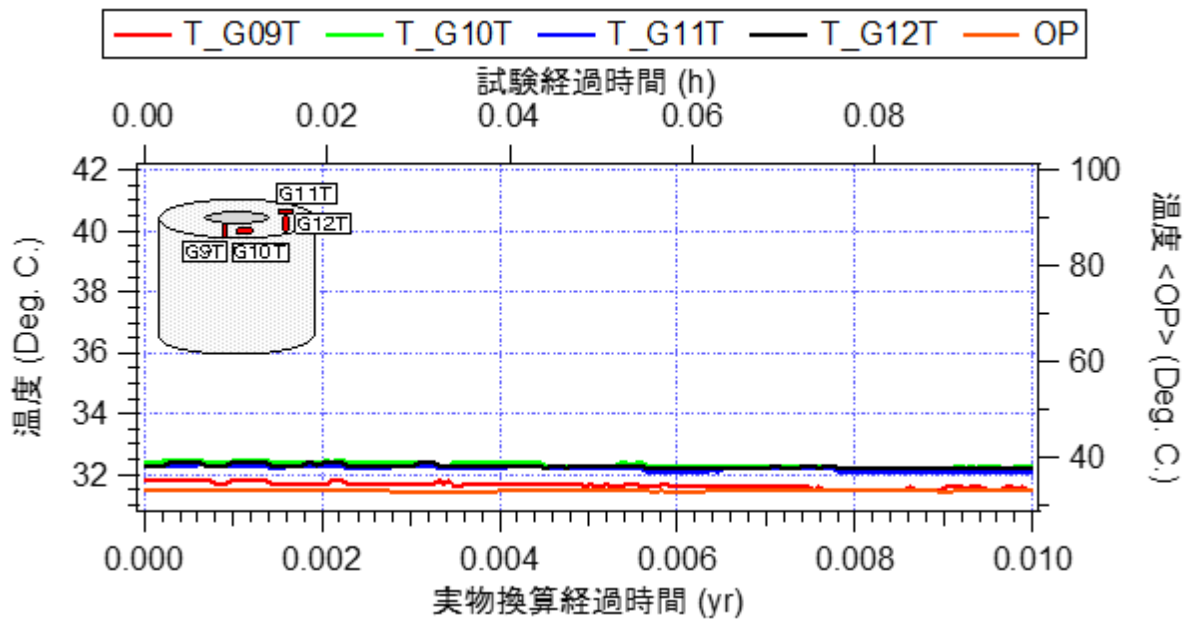


a) 開始から 0.01 年相当経過時

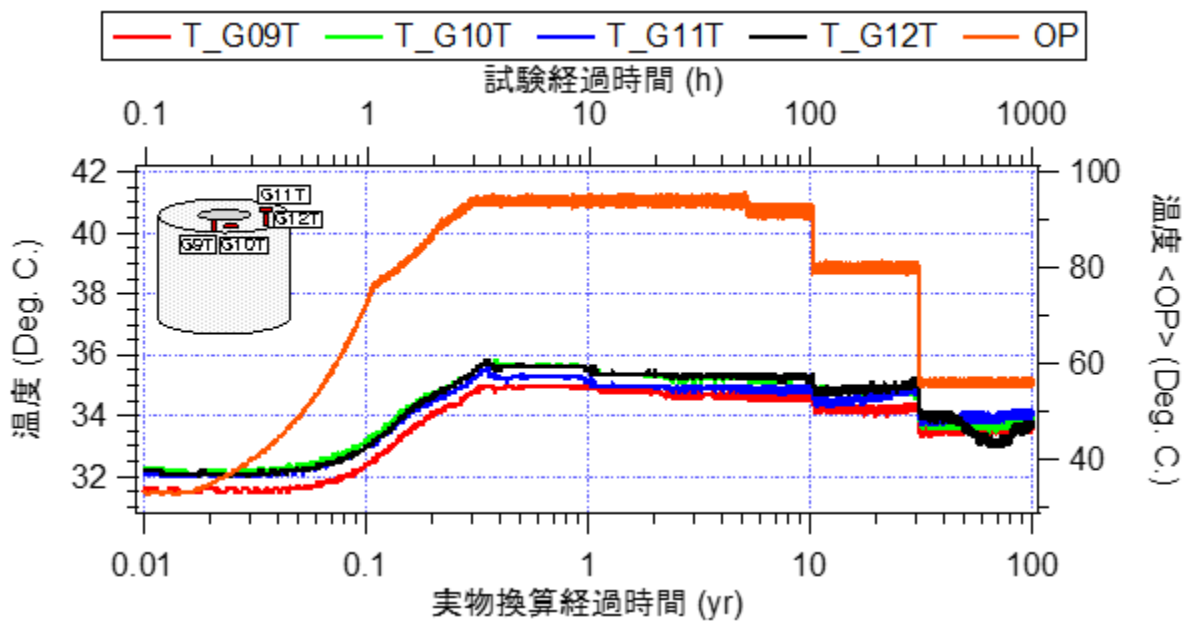


b) 0.1 年相当経過時以降

図 4.6.3-3 模型側面部周方向の測温ゲージによって計測された温度の経時変化

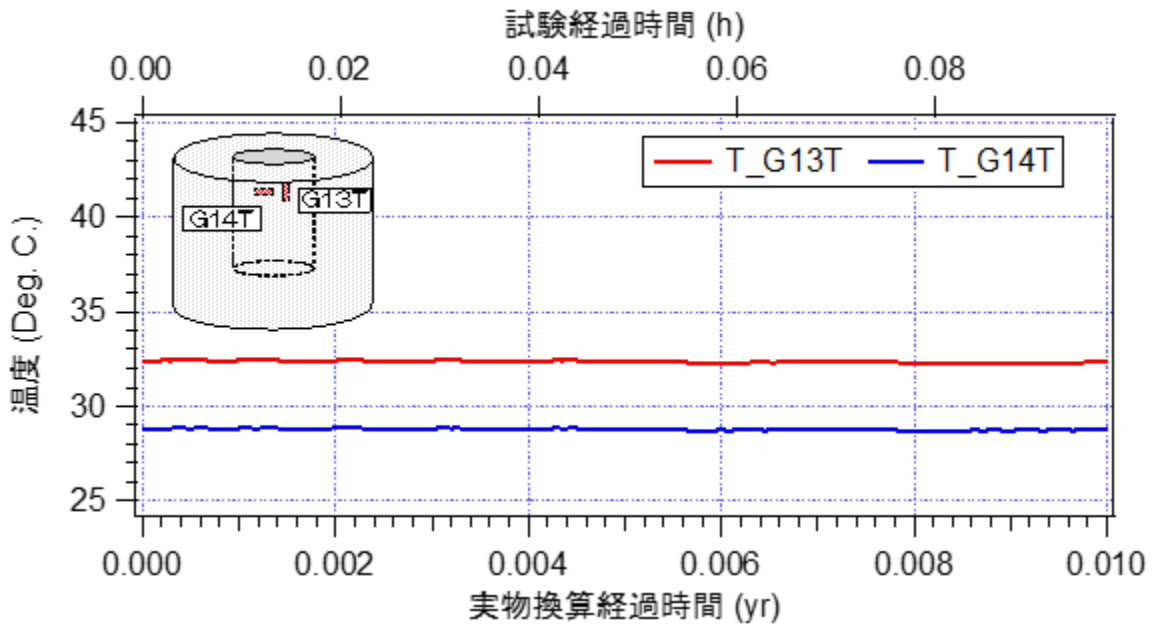


a) 開始から 0.01 年相当経過時

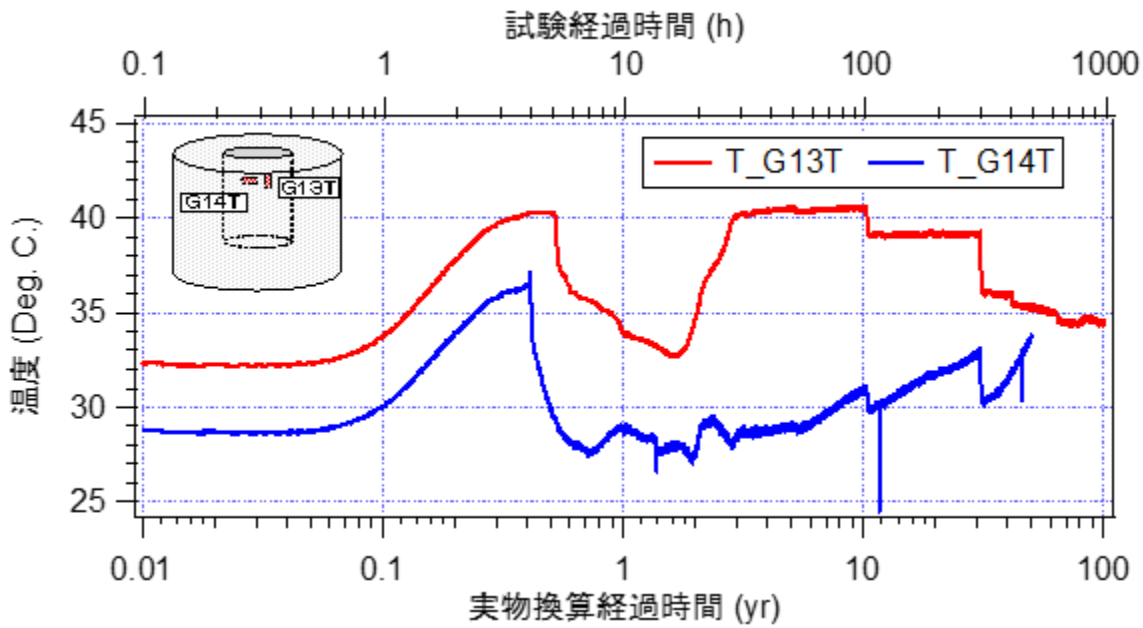


b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-4 模型上端部と処分孔壁の測温ゲージで計測した温度の経時変化



a) 開始から 0.01 年相当経過時



b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-5 模型処分孔内部の测温ゲージで計測した温度の経時変化

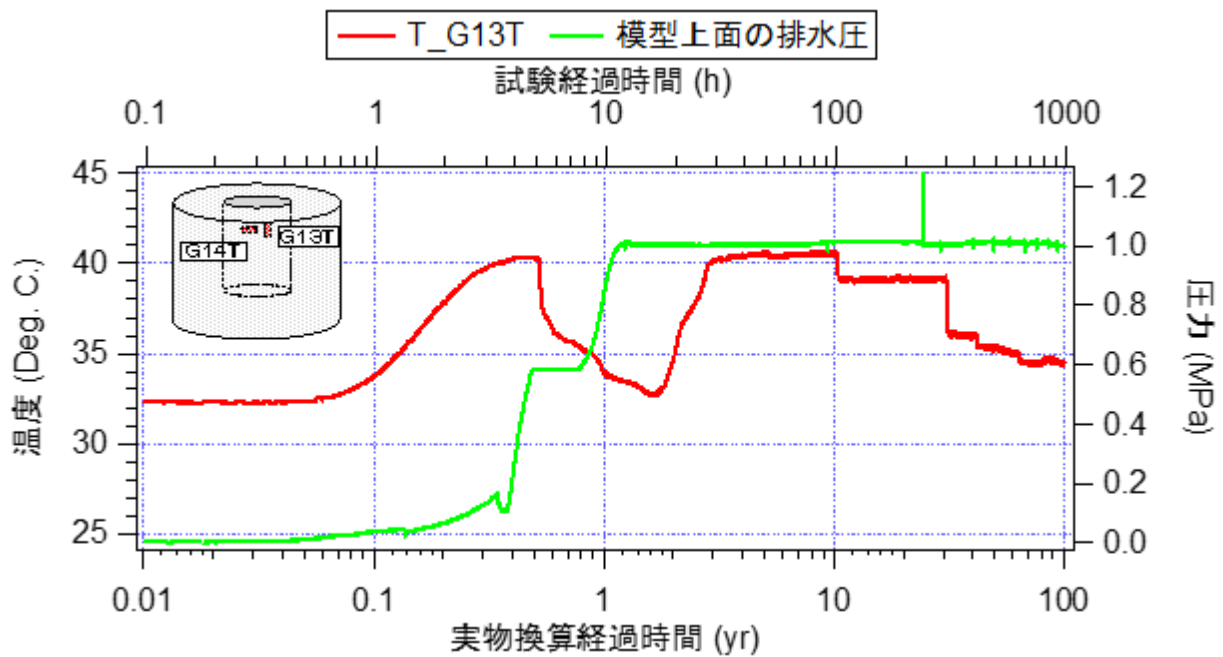
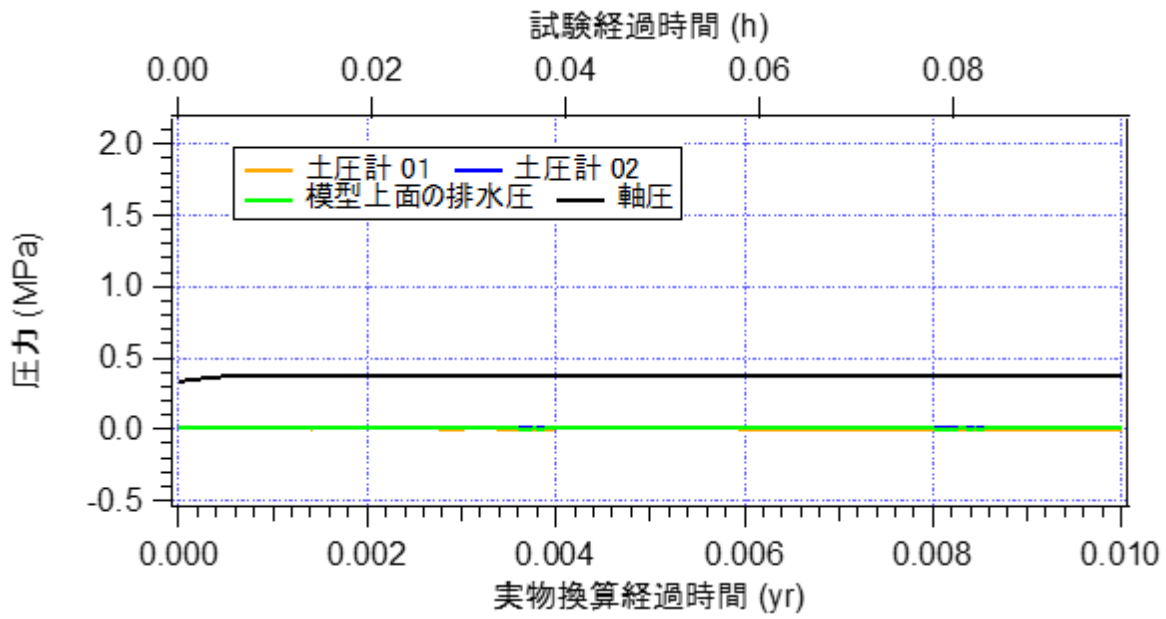


図 4.6.3-6 T_G13T と排水圧の経時変化

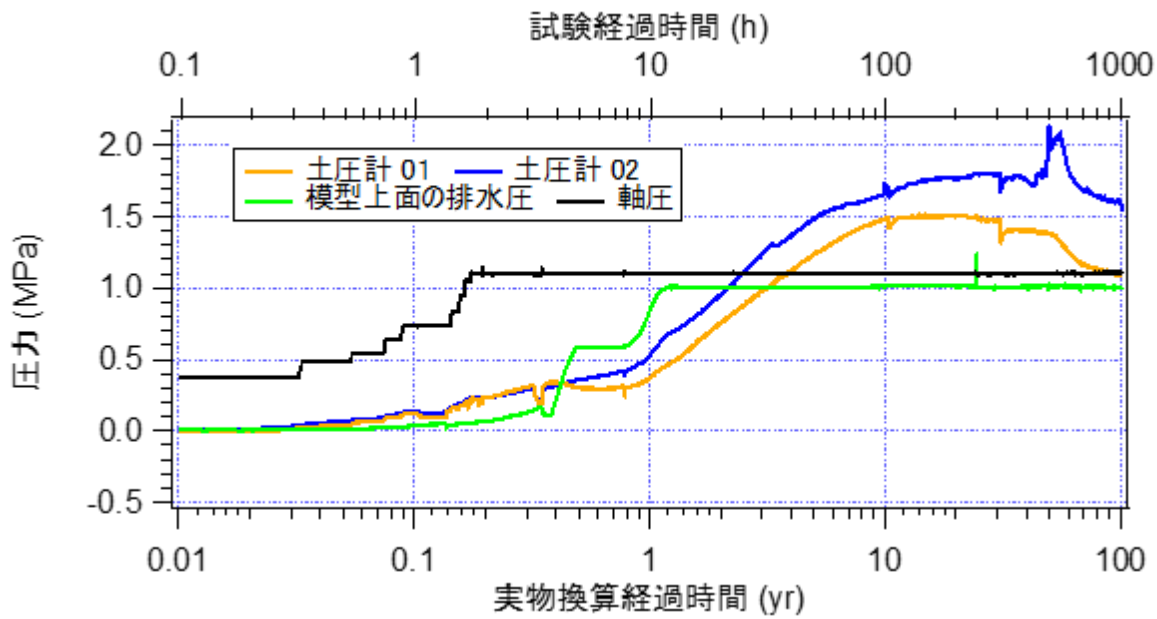
2) 緩衝材の土圧

緩衝材の膨潤圧は緩衝材中に埋め込まれた土圧計（土圧計 01、土圧計 02、図 4.6.2-1 を参照）で計測しているが、この計測値自体は「緩衝材の膨潤圧」あるいは「拘束圧の負荷による岩盤の変形で緩衝材に負荷される応力」、「埋戻し材の膨潤により緩衝材に負荷される応力」のいずれか大きい値と「軸圧」もしくは「排水圧」のいずれか大きい値との和である。すなわち計測される土圧計の値は、模型の飽和度などにより値に影響を及ぼしている要因が異なる。このため、本研究の遠心模型試験ではこれを「緩衝材の土圧」と定義し、緩衝材の膨潤挙動を評価した。

図 4.6.3-7 に土圧計 01、土圧計 02 で計測した土圧の経時変化を示す。緩衝材に設置した土圧計は、緩衝材を削って設置したことから、隙間があり試験開始初期の緩衝材が間隙水の浸潤によって膨潤するまでは値はほとんど上昇しない。土圧計の値は試験開始後、0.4 年相当までは、下方の緩衝材の膨潤による値の増加がみられた。その後、模型上面の排水圧の増加が開始すると緩衝材全体の膨潤が始まり、値の増加傾向が大きくなった。20 年相当経過あたりから値が収束を始めていることから、模型が飽和したと考えられる。緩衝材に設置した土圧計は 90°になるように 2 個設置されており、模型上面の排水圧が上昇しはじめる頃から値の増加傾向に差が出た。このことから、緩衝材の膨潤に偏りがあることがわかる。土圧計 01 の最大値は約 1.5MPa、土圧計 02 の最大値は 45 年相当経過時から 50 年相当経過時までの値の増減を除けば約 1.8MPa となった。各圧力計の値は 50 年相当経過時以降に値が減少し、収束傾向を示し土圧計 01 は 1.09MPa、土圧計 02 は 1.59MPa となった。図 4.6.3-8 に試験後期の土圧計の計測値を示す。なお、図の上横軸、下横軸は通常スケールである。



a) 開始から 0.01 年相当経過時



b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-7 緩衝材内の土圧計で計測された圧力と軸圧、排水圧の経時変化

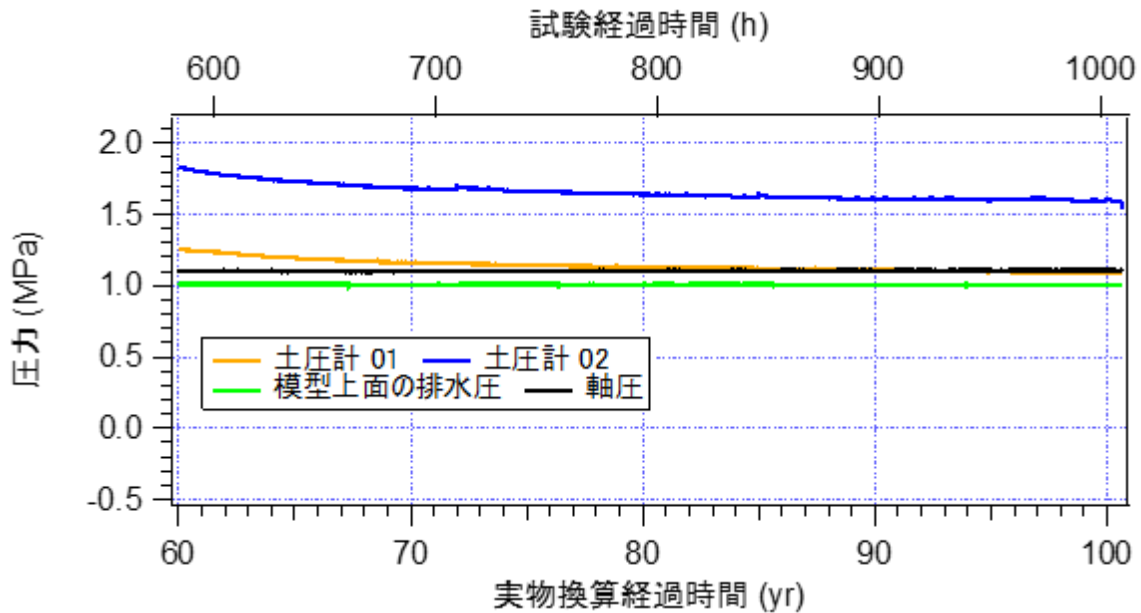
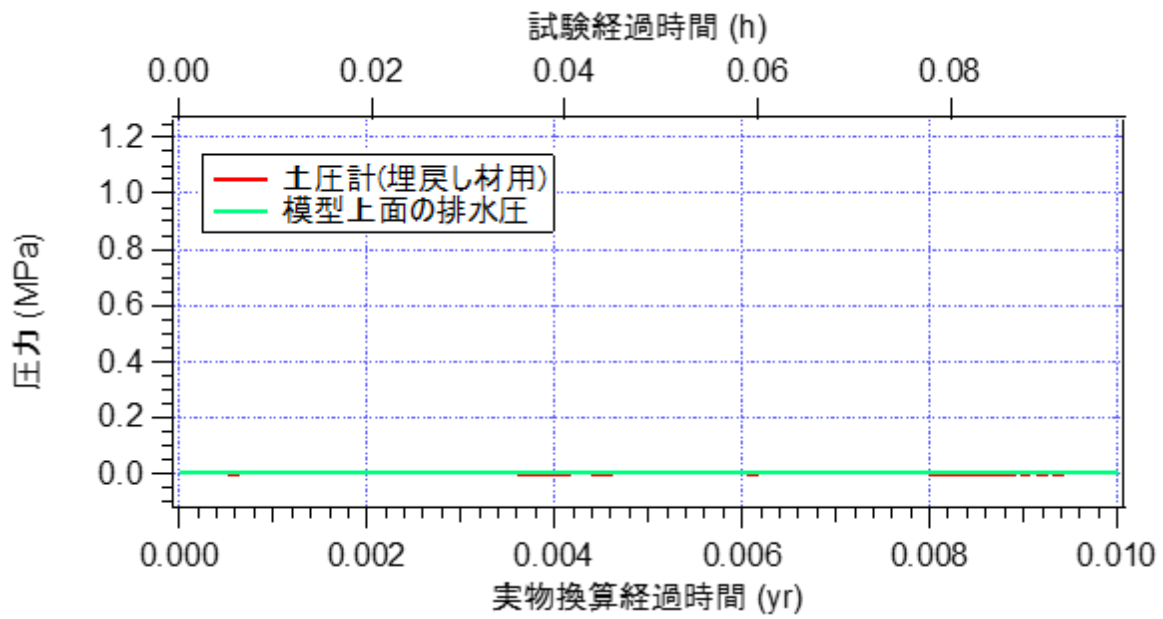


図 4.6.3-8 試験後期の土圧計で計測された圧力と軸圧、排水圧の経時変化

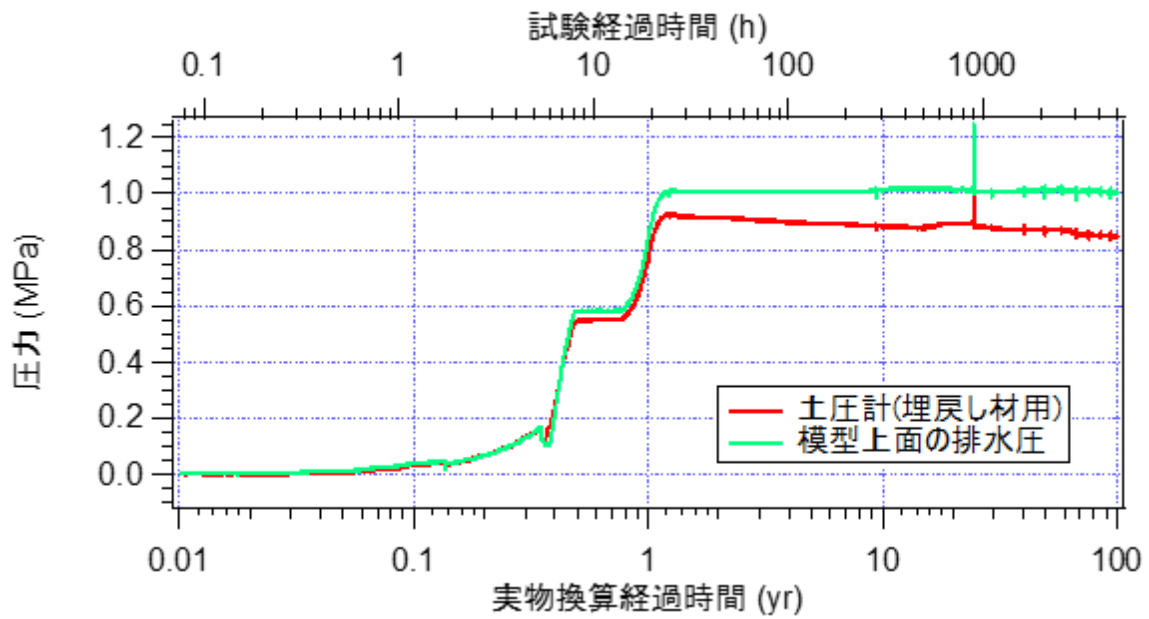
3) 埋戻し材の土圧

埋戻し材の膨潤圧は模型上面（圧力容器上蓋）に設置されている土圧計（埋戻し材用）で計測しているが、この計測値自体は「埋戻し材の膨潤圧」あるいは「拘束圧の負荷による岩盤の変形で緩衝材に負荷される応力」、「緩衝材の膨潤圧により負荷される応力」のいずれか大きい値と模型上面の排水圧の和である。このため、長期試験ではこれを「埋戻し材の土圧」と定義し、埋戻し材の膨潤挙動を評価した。

図 4.6.3-9 に土圧計（埋戻し材用）で計測した土圧の経時変化を示す。土圧計の計測値は、模型上面の排水圧とともに上昇したが、0.4 年相当経過時では模型上面の排水圧は 0.6MPa、埋戻し材の土圧は 0.55MPa と排水圧の値が埋戻し材の土圧より大きくなった。これは、埋戻し材全体に間隙水が十分に浸潤していなかったことが影響したと考えられる。この傾向は、試験終了時まで続いた。埋戻し材の土圧は、最大値である 0.92MPa を 1.2 年相当経過時に計測した後、膨潤によって岩盤供試体上端面の隙間や凹凸を徐々に充填したため漸減し、試験終了時は 0.85MPa となった。



a) 開始から 0.01 年相当経過時



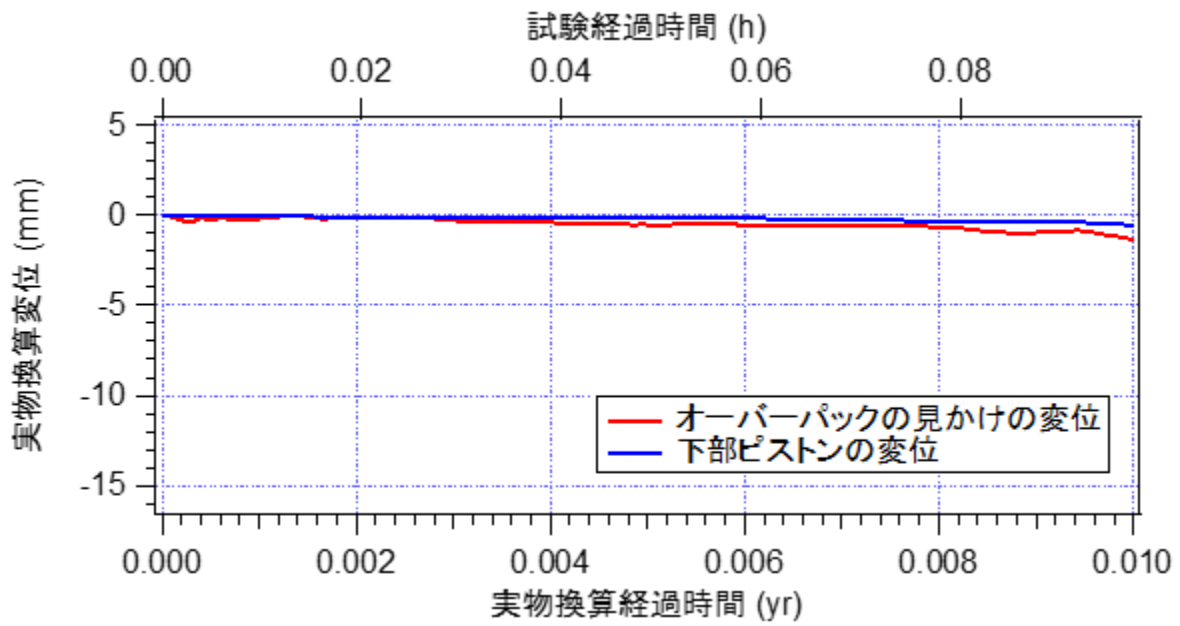
b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-9 容器上蓋内の土圧計で計測された圧力と排水圧の経時変化

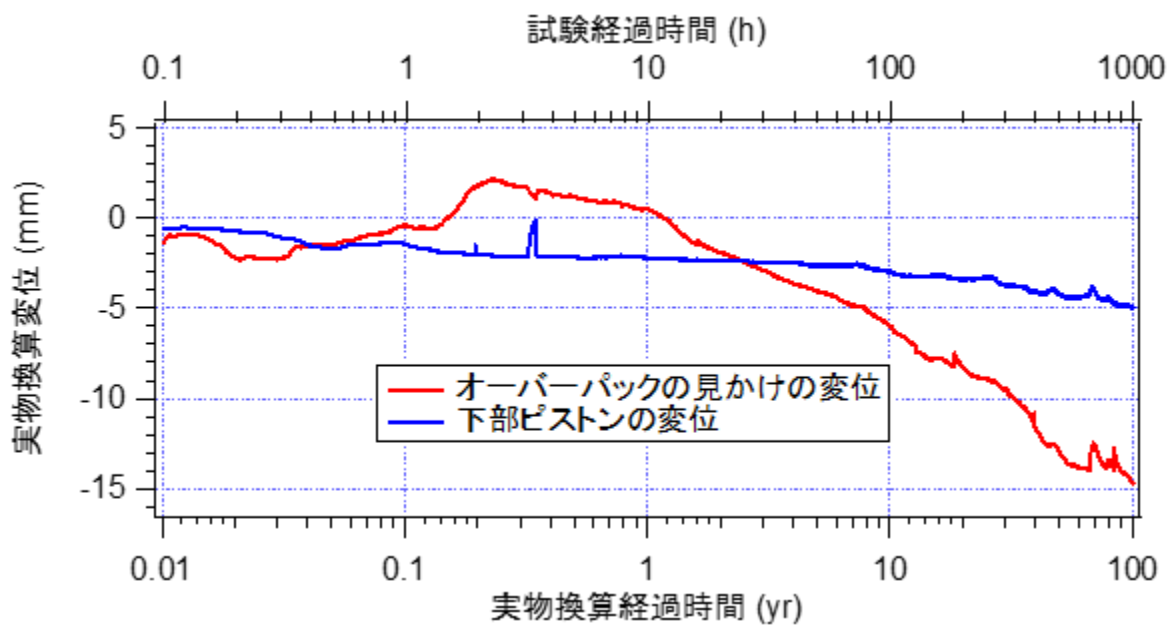
4) オーバーパックの鉛直変位

図 4.6.3-10 に非接触変位計によって実物換算された鉛直変位の経時変化を示す。非接触変位計は図中の凡例のオーバーパックの見かけの変位が容器上蓋に設置されたセンサー（図 4.3.2-1 内、非接触変位計（オーバーパック用）に対応）で計測した値で、下部ピストンの変位が軸方向応力を载荷ピストン部に設置されたセンサー（図 4.3.2-1 内、非接触変位計（载荷ピストン用）に対応）で計測した値である。圧力容器の構造上、上蓋は動くことはない。従って、下部ピストンに設置された非接触変位計によって計測された変位は模型の軸方向の変形を計測していることになる。下部ピストンの変位におけるプラスはピストンが上昇（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。下部ピストンの変位は試験開始後から下降傾向にあり、周圧による圧密や、緩衝材が膨潤・膨出することで岩盤自体（模型）が軸方向に伸びているものと考えられる。オーバーパックの見かけの変位は、試験開始直後は緩衝材の膨潤により上昇したが、0.22 年相当経過時から沈下の挙動を示した。これは、上部緩衝材の膨潤が開始し、オーバーパックを押し下げたためと考えられる。オーバーパックの変位は、見かけ上はオーバーパックの見かけの変位となるが、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。このため長期試験では、非接触変位計（オーバーパック用）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下部ピストンに設置された非接触変位計で計測した模型の軸方向の圧縮分を差し引くことでオーバーパックの変位を定義した。

図 4.6.3-11 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 0.01 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 0.23 年相当経過時まで浮上し、それ以降は値が漸減しており、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ことや、緩衝材の膨出が原因と考えられる。（実験終了値は 9.4mm）。

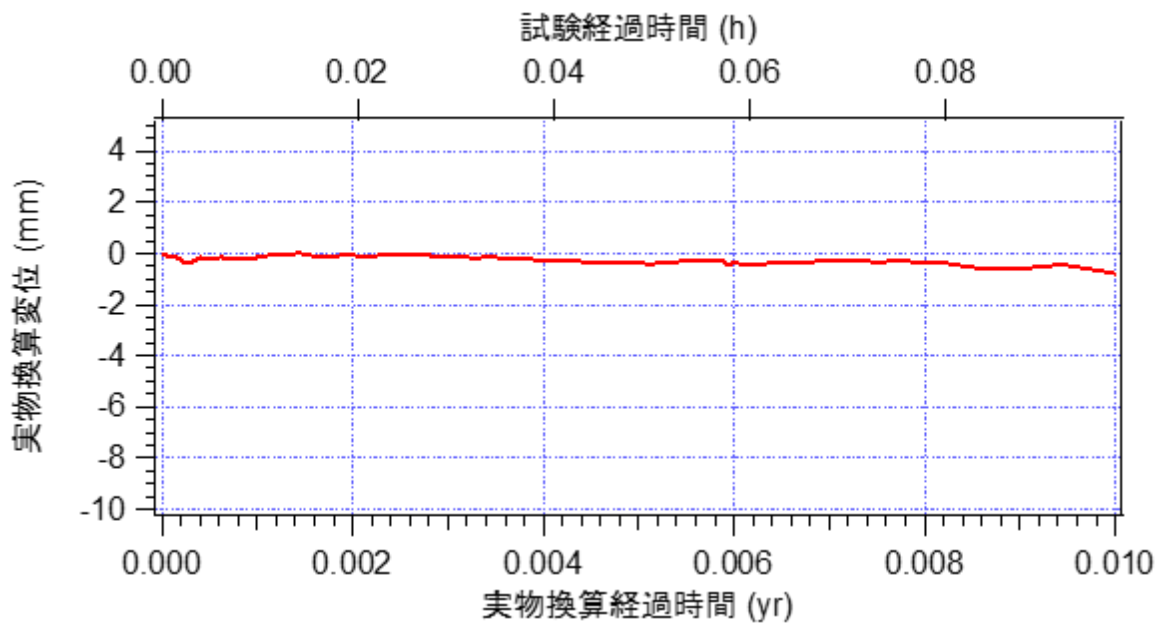


a) 開始から 0.01 年相当経過時

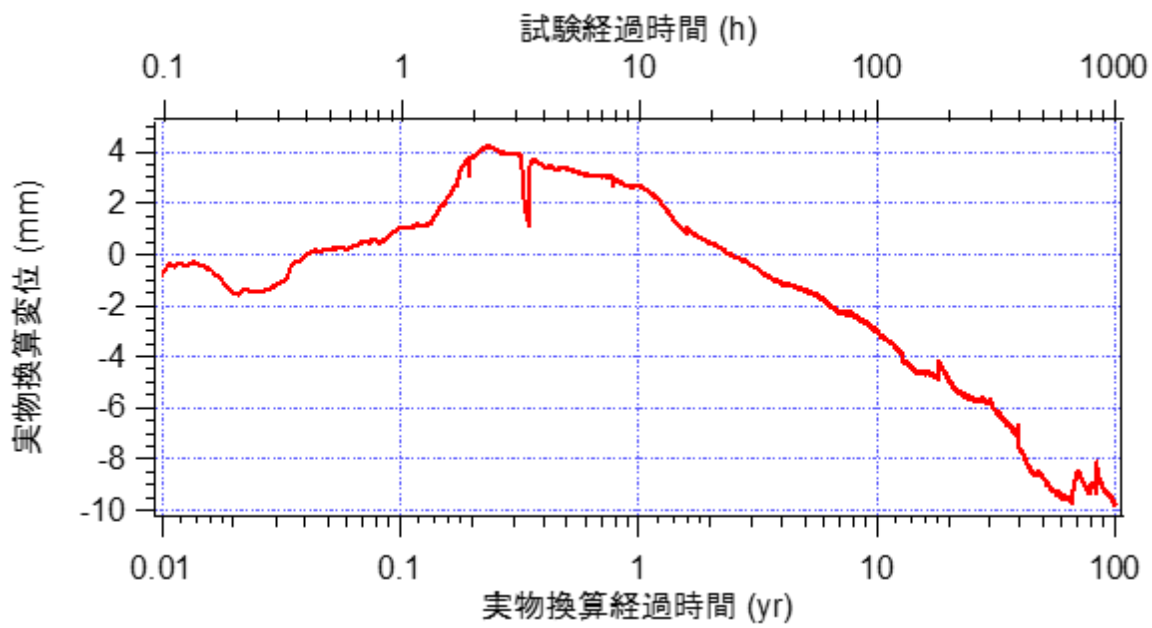


b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-10 圧力容器に設置された非接触変位計で計測された変位の経時変化



a) 開始から 0.01 年相当経過時



b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-11 オーバーパックの鉛直変位の経時変化

5) 岩盤のひずみ

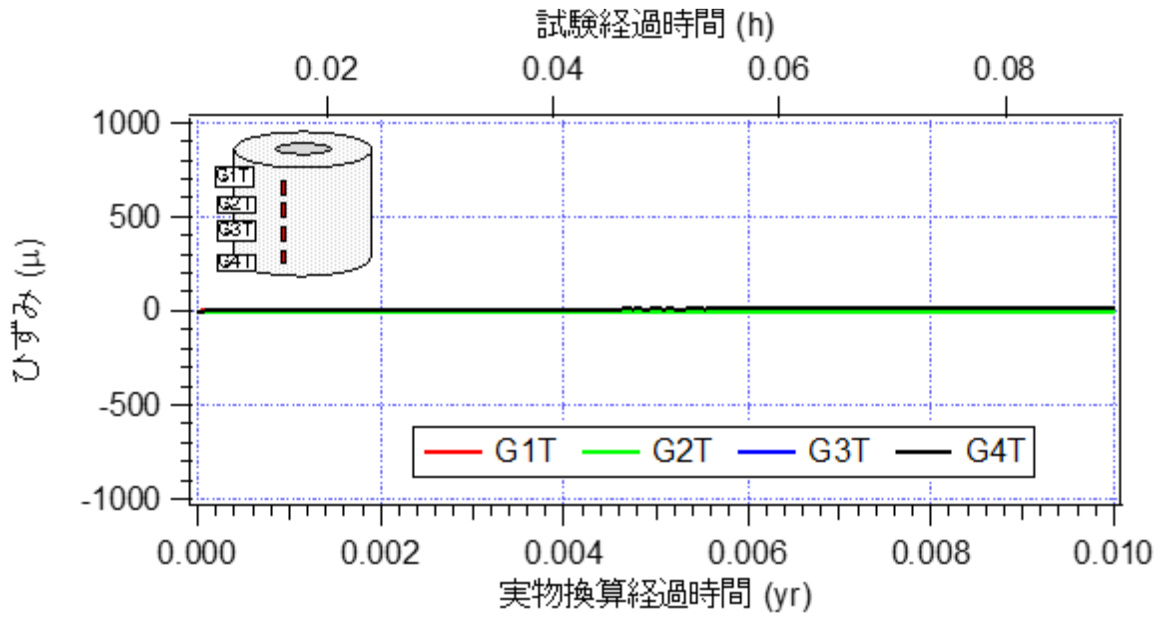
ひずみゲージの計測値を示した図において、プラスは引張(膨張)、マイナスは圧縮で示す。

図 4.6.3-12 と図 4.6.3-13 に岩盤側面に貼付したひずみゲージの計測値を示す。図 4.6.3-12 は岩盤軸方向のひずみの経時変化であり、試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、値が増加している。G1T は注水開始直後に圧縮側に値が低下するが、間隙水の浸潤に伴って有効応力が低下することで値が増加し引張ひずみが発生した。1.9 年相当経過時には 61 μ を計測し、その後圧縮側に値が漸減している。その後、23 年相当経過時から再び引張ひずみを計測した。G2T は 1.9 年相当経過時に 748 μ を計測し、その後は圧縮側に値が減少している。G4T は G1T と似た傾向を示した。0.4 年相当経過した時点で 638 μ を計測してから値が減少し、40 年相当経過時から再び引張ひずみを計測した。

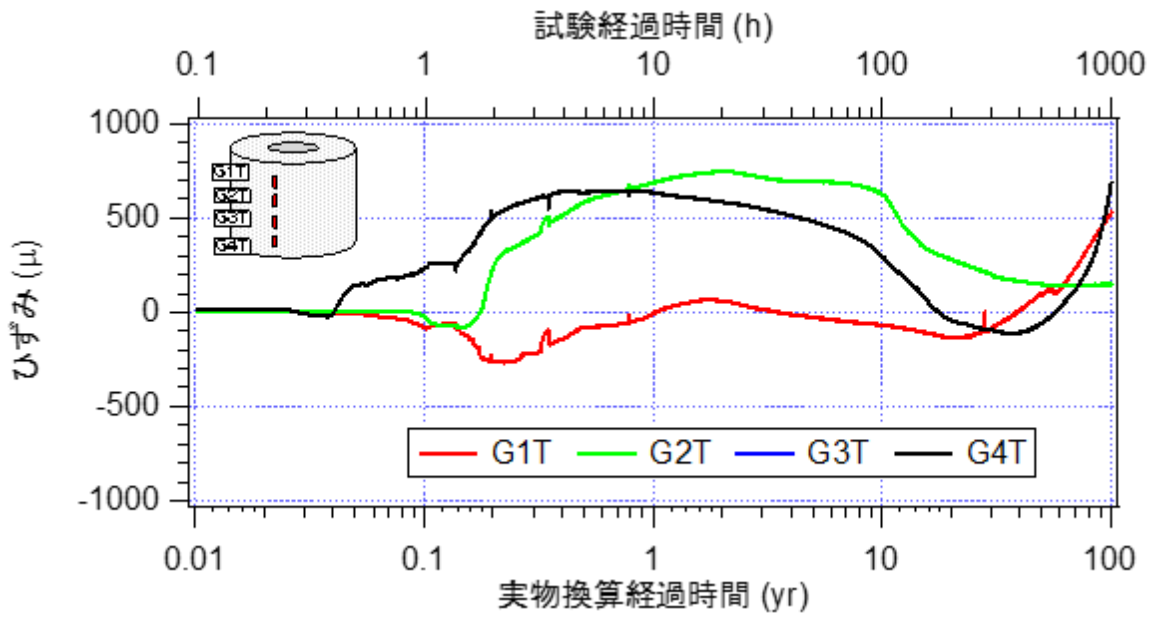
図 4.6.3-13 は岩盤周方向のひずみの経時変化である。G5T では 2.19 年相当経過後に極大値である 432 μ を計測し、その後は引張傾向にあり 18.8 年相当経過時点で 457 μ を計測し、その後は圧縮ひずみを計測した。その後 43.8 年相当経過時より再び引張ひずみを計測した。G6T は値の増加後 7.7 年相当経過後に 453 μ を計測してから圧縮傾向を示し、30 年相当経過時点で -54 μ を計測、その後は再び引張傾向を示した。G8T は開始直後に引張傾向にあったが、0.1 年相当経過時から圧縮傾向となり、0.32 年相当経過時から再度引張傾向となった。4.86 年相当経過時で 178 μ を計測してから圧縮ひずみが発生し、18 年相当経過時点で -94 μ を計測し、その後は引張ひずみを計測した。

図 4.6.3-14 では G9T が間隙への注水が開始されると圧縮側ひずみが発生し、その後 0.4 年経過時点で -409 μ を計測し、その後は引張ひずみが発生し、引張側に値が推移した。G12T は 0.4 年相当経過後に引張ひずみが発生し、8 年相当経過時点で 506 μ を計測し、その後は、圧縮ひずみが発生し 30 年相当経過時点で -358 μ を計測し、その後は引張ひずみが発生、60 年相当経過時より再び圧縮ひずみが発生しており値の安定性に欠けた。一方、G10T と G11T は試験開始後に引張傾向を示し、その後値が漸減する傾向を示している。G10T は 0.36 年相当経過時に 223 μ を計測、その後は圧縮ひずみが発生した。35 年相当経過時に -84 μ を計測した後、引張ひずみが発生した。G11T は 0.35 年相当経過時に 449 μ を計測した後 10 年相当経過時から値が急減し計測不能となった。

処分孔壁のひずみの経時変化を図 4.6.3-15 に示す。G13T は、試験開始直後から緩衝材の膨潤によって引張傾向を示し 15 年相当経過時に 2209 μ を計測、その後も引張側に推移する傾向となった。G14T では試験開始直後から圧縮方向に推移し、0.39 年相当経過時に -1158 μ を計測した後、値が急減し約 -4000 μ を計測した。

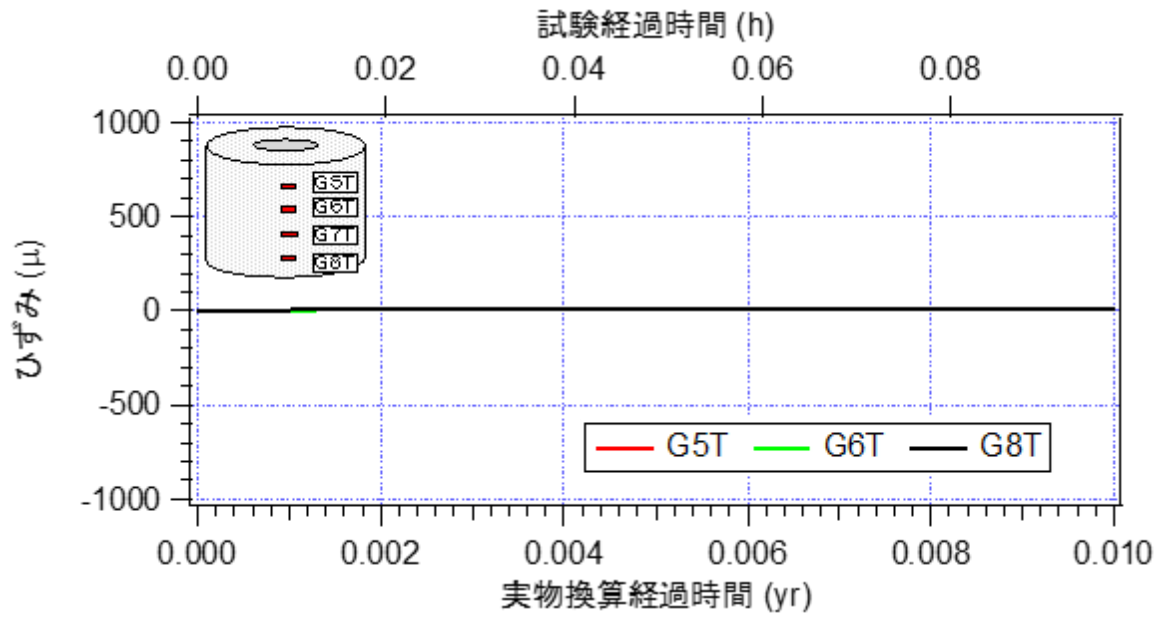


a) 開始から 0.01 年相当経過時

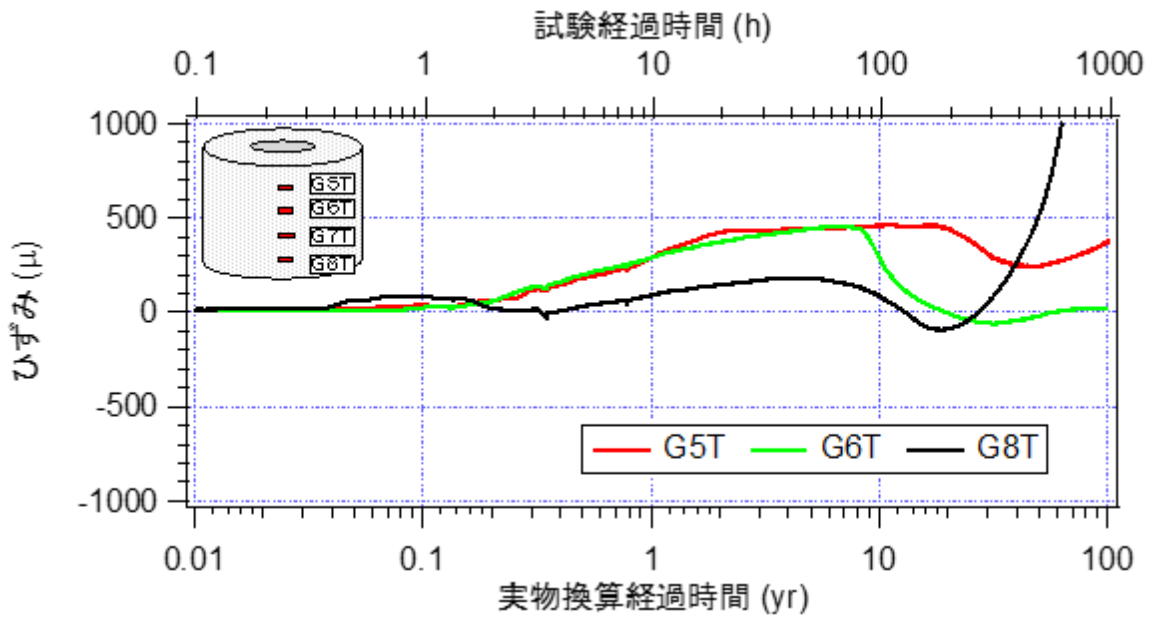


b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-12 模型側面軸方向のひずみ経時の変化

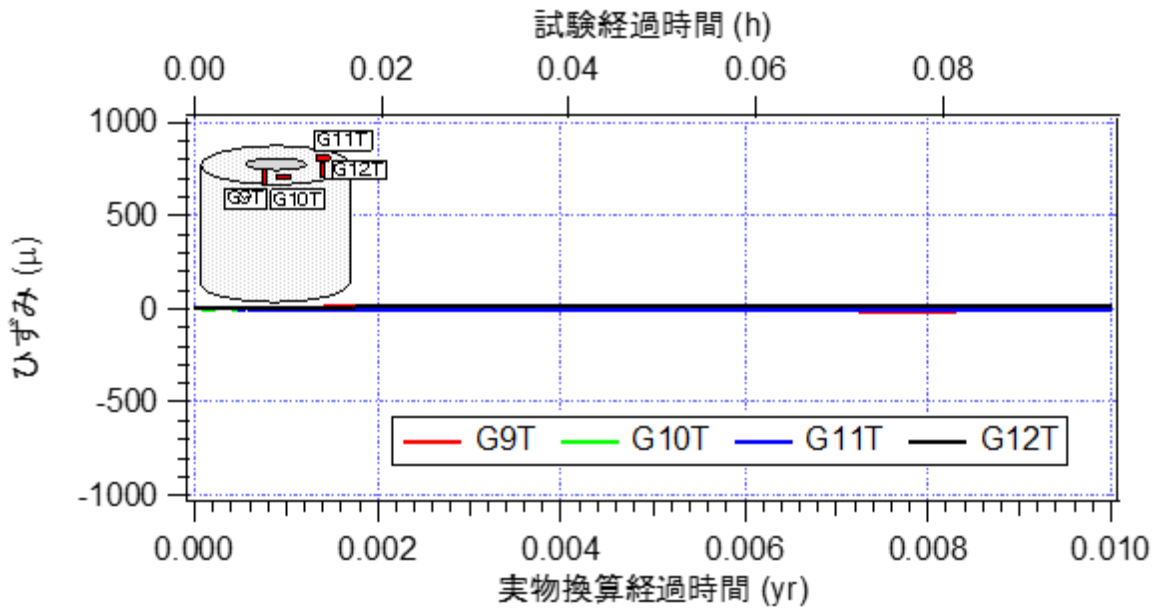


a) 開始から 0.01 年相当経過時

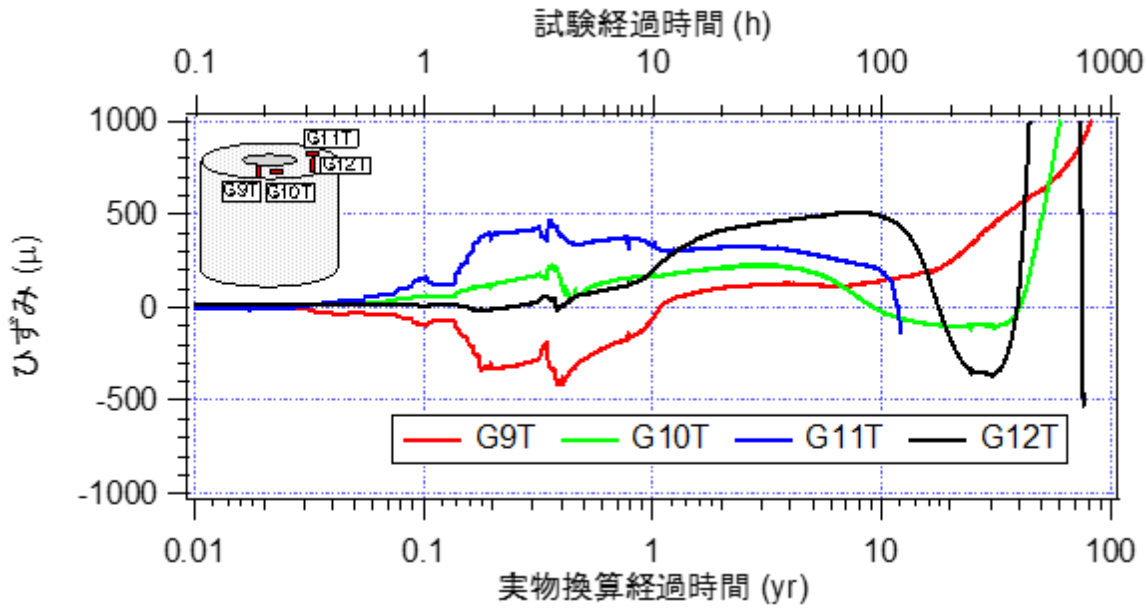


b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-13 模型側面周方向のひずみの経時変化

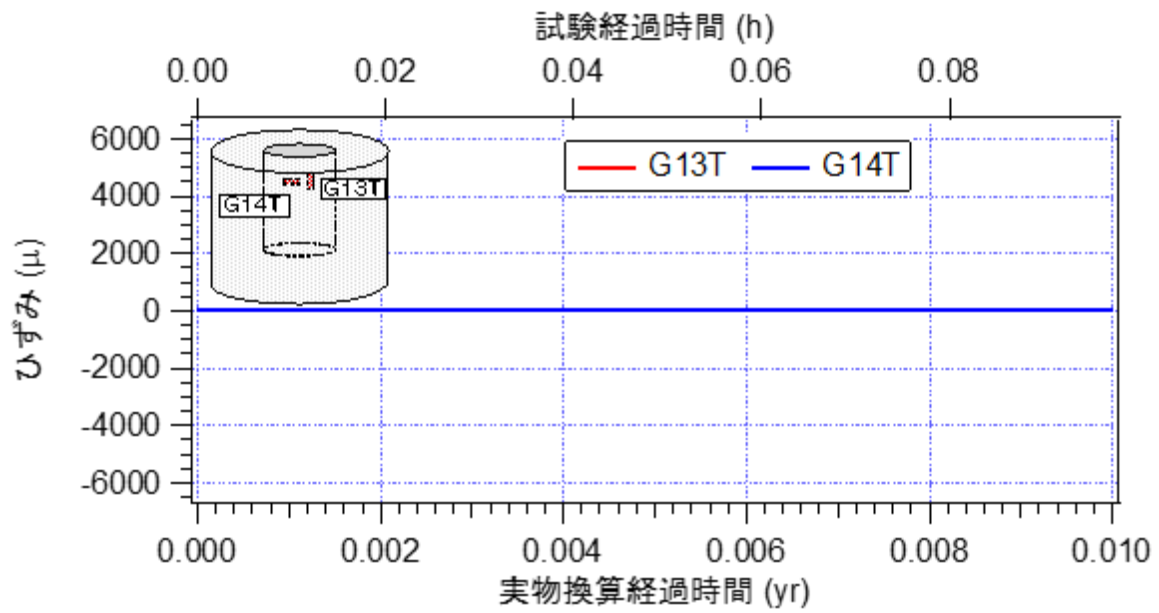


a) 開始から 0.01 年相当経過時

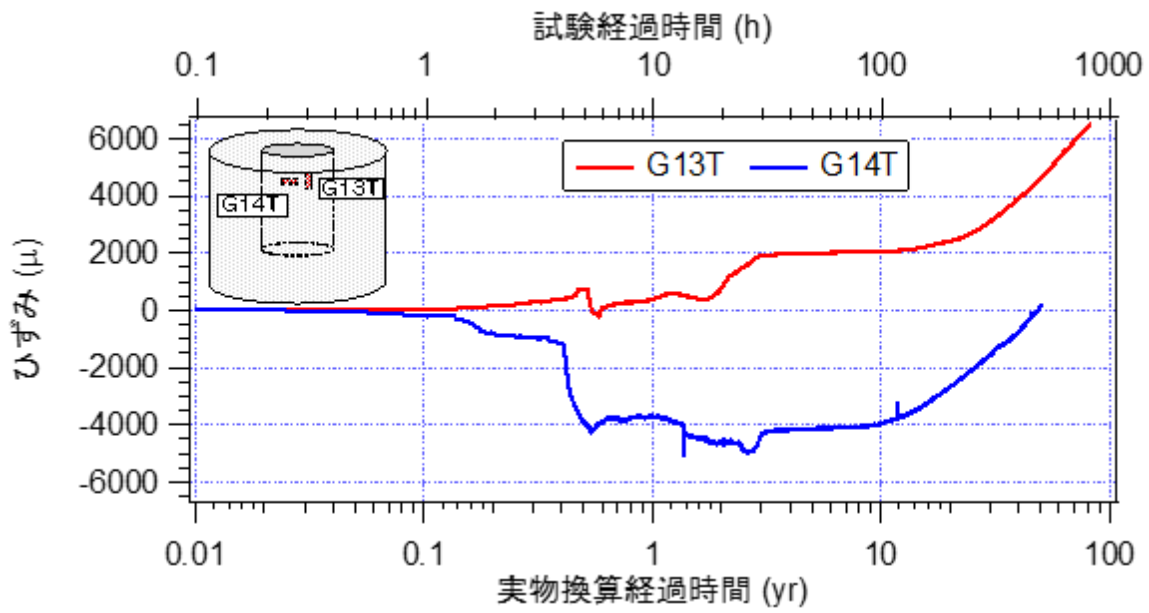


b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-14 岩盤上端面のひずみの経時変化



a) 開始から 0.01 年相当経過時



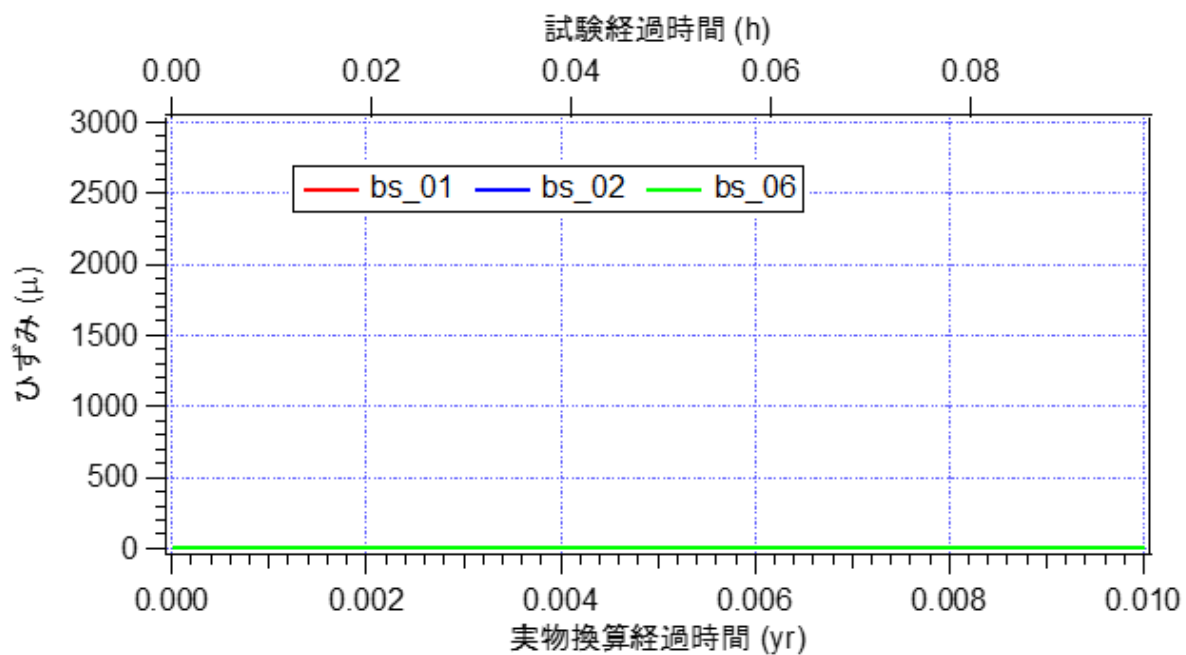
b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-15 処分孔壁のひずみの経時変化

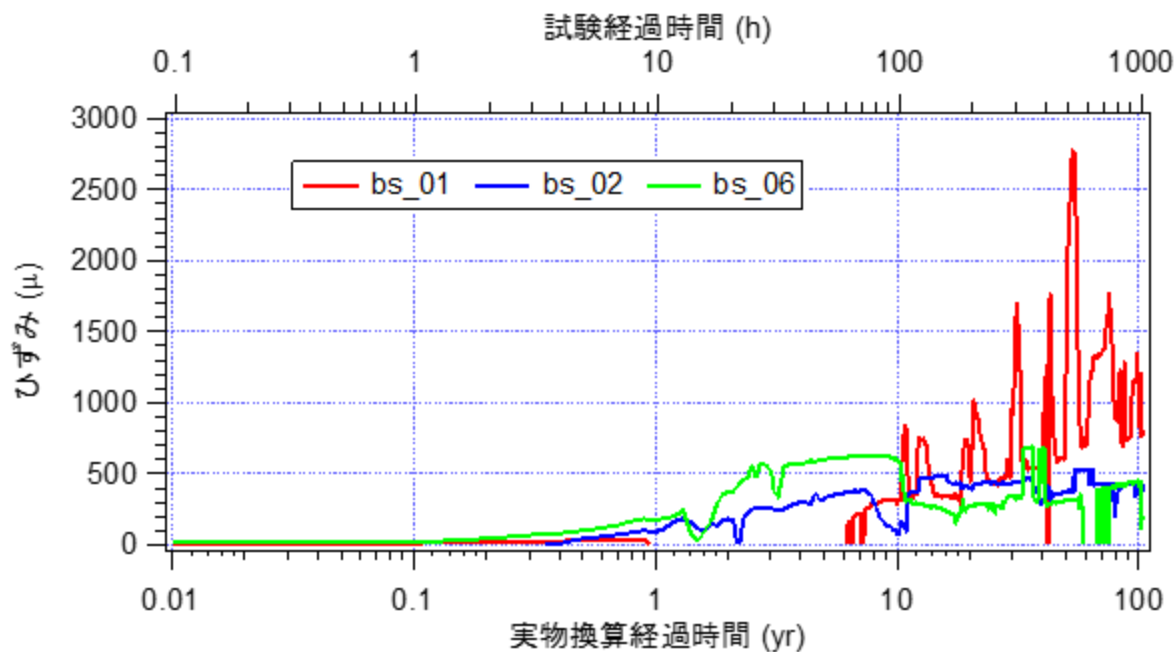
6) 膨出センサー

図 4.6.3-16 に膨出センサーに貼付してあるひずみゲージから計測されたひずみの経時変化を示す。ここで、bs_01 は、図 4.6.2-1 におけるセンサー1 に対応、bs_02 はセンサー2、bs_06 がセンサー6 に対応する。初期位置は、bs_01 では岩盤、bs_02、06 では緩衝材の上に位置する。bs_03、bs_04、bs_05、bs_07 は値が安定せず、特に bs_05 に関しては初期の段階から計測不能となっているため、グラフからは除外している。膨出センサーがひずみを検出し始めた時刻は、注水開始後約 0.13 年程度経過後となっている。これは、注水が開始され、緩衝材の膨潤によってオーバーパックが 0.13 年程度から浮上を始めていることにも整合している。bs_02、bs_06 は多少の値の増減はあるものの、注水が進むにつれプラス方向に推移した。bs_01 では、値が大きく増加した後に増加前の値程度まで戻る現象が続き、例えば 50～60 年相当経過時において、約 800 μ から約 2800 μ まで増加した後、約 850 μ に値が低下している。事前のセンサーの動作確認において、リン青銅板の弾性領域内の曲げによるひずみは最大で約 1000 μ 程度を確認している。設置した膨出センサーは、リン青銅板の片端がスライドする機構である。このひずみの急増減の現象は、リン青銅板と岩盤、緩衝材、埋戻し材との間に生じる摩擦を十分に切ることができなかつたため生じた引張ひずみによるものと考えられる。摩擦のためスムーズに緩衝材の膨出変形に追従できず、引張（センサーの引っかかり）が生じ、ひずみが増加し、その引っかかりが取れると値が急減した可能性が考えられる。

図 4.6.3-17 に bs_01、bs_02、bs06 の値の引張ひずみの影響と思われる急増減値を除いたひずみの経時変化を示す。計測値のうち、値が急増減している部分は点線で示した。実線の部分のみを見ると岩盤上にある bs_01 は時間の経過とともに値が大きくなった。一方緩衝材の上に位置し、かつ対称な位置にある bs_02 と bs_06 は値の変化が小さく計測値もほぼ同等となっている。このことから、膨出センサーを設置した位置での緩衝材の膨出は比較的一様に発生していると考えられる。



a) 開始から 0.01 年相当経過時



b) 0.01 年相当経過時以降

図 4.6.3-16 膨出センサーのひずみの経時変化

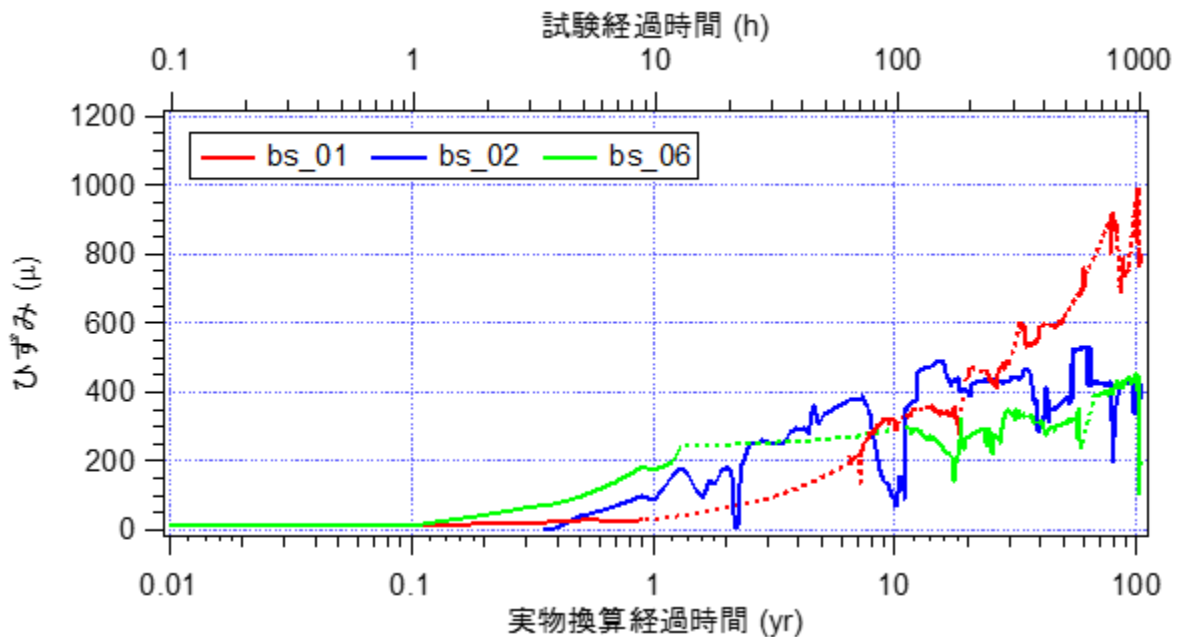


図 4.6.3-17 時間毎の膨出センサーのひずみ分布状況

(2) 試験後の緩衝材密度、含水比測定

試験終了後に、緩衝材を採取し、密度および含水比を測定した。採取は図 4.6.3-18 に示す、高さ 15mm、内径 9.8mm の試料採取ロッドを使用した。試料採取には細心の注意を払ったが、試料採取ロッドを打撃して試料の採取を実施するため、ロッド内に採取できる試料は少なからず圧縮した状態となっている可能性がある。図 4.6.3-19 に採取位置を示す。以下に示す図中の (a) ~ (g) は、図 4.6.3-19 の深さの (a) ~ (g) に対応している。

図 4.6.3-20 に密度の分布を示す。乾燥密度、湿潤密度ともに同様な傾向を示した。オーバーパックより上の (a)、(b) では膨出の影響で、上方ほど密度が小さくなり、オーバーパックの位置 (c)、(d)、(e) では膨潤が下部緩衝材より発生することで上方の緩衝材が圧縮されるため、上方ほど密度が大きくなった。オーバーパック直下の (g) は (f) に比べて密度が大きくオーバーパックの沈下の影響と考えられる。

図 4.6.3-20 の乾燥密度は湿潤密度と含水比から算出されているが、乾燥重量計測時に合わせて採取試料の寸法も計測している。乾燥後の試料であるので形状が一定ではないため各試料直径と高さを 3 箇所計測した。実測値から算出した乾燥密度の分布形状を図 4.6.3-21 に示す。比較のために湿潤密度と含水比から算出した乾燥密度の分布形状も併せて表示してある。赤丸は中央値でエラーバーは直径と高さの最大値より求めた乾燥密度の最小値と同最小値より求めた乾燥密度の最大値の幅を示している。実測値より算出した乾燥密度の中央値を比較すると値に差があるが、誤差範囲まで含めて見るとほぼ同様な形状を示していることがわかる。

図 4.6.3-22 に含水比の深さ分布を示す。オーバーパックより上方の (a)、(b) は上方ほど含水比が高くなったが、それ以下の点では下方ほど含水比が高くなる傾向を示した。オーバーパックより下方の 2 点では、オーバーパック直下の含水比が低くなった。緩衝材と岩盤との間の隙

間にはベントナイトの粉末を入れるなどの処理をしていないため、間隙水がその隙間を伝って上方まで浸透した可能性がある。試験前の CT 撮影では見つけることができなかったが、岩盤の下方から上方につながるマイクロクラックがあり間隙水が浸透し緩衝材上部の含水比が大きくなった可能性がある。いずれかもしくは両者があったと仮定すれば、模型上面の排水圧が定圧になるまでの時間が実時間換算で 1 年程度と早かったこととも調和的である。

図 4.6.3-23 に飽和度の深さ分布を示す。飽和度は以下の式 (4.1) を用いて求めた。

$$S_r = \frac{w\rho_s}{\rho_w e} \quad (4.1)$$

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 (4.2) から求まる。

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (4.2)$$

ここで、 ρ_d : 乾燥密度

飽和度はオーバーパックのある高さでは下方ほど飽和度が低下している。また、飽和度が 1 に達していない点もあるが、ほぼ飽和状態であると考えられる。

図 4.6.3-24 に埋戻し材の含水比試料の採取位置を示す。採取は模型外縁部から 10mm、40mm、70mm の位置とした。埋戻し材は高さ 20mm かつ砂分が 85% と多いため、既存の高さ 15mm、内径 9.8mm の試料採取ロッドでは試料の採取が困難であったため、飽和度・密度については計測しなかった。図 4.6.3-25 に埋戻し材の含水比分布を示す。外縁部ほど含水比が高い結果となった。中心に近い部分は 18.5%、外縁部では 21.1% と 2.6% の差があった。

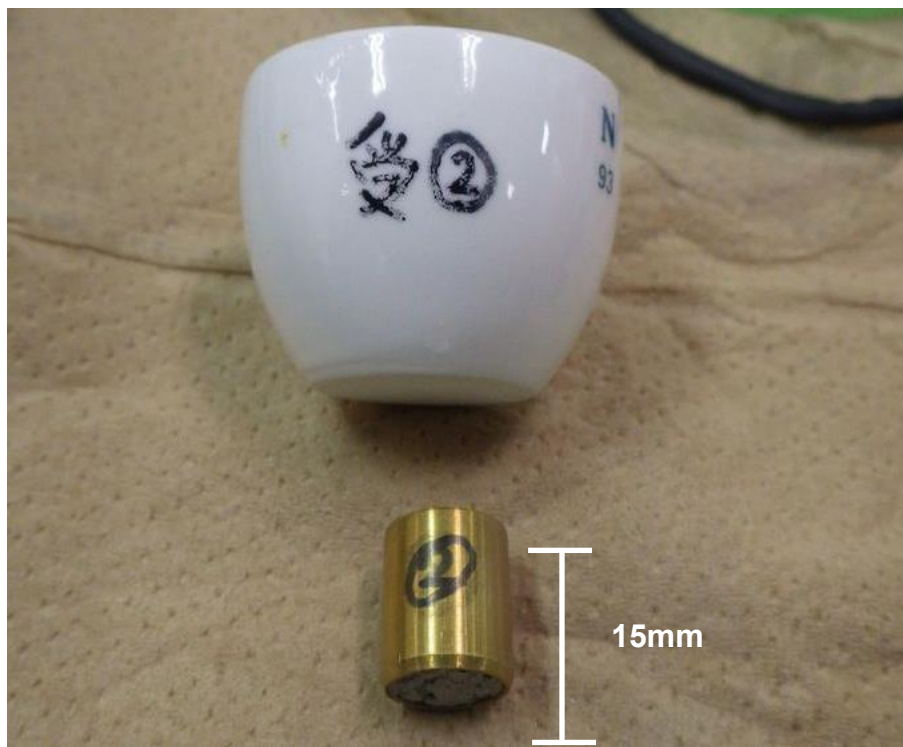


図 4.6.3-18 試験後の含水比計測に使用した試料採取ロッド

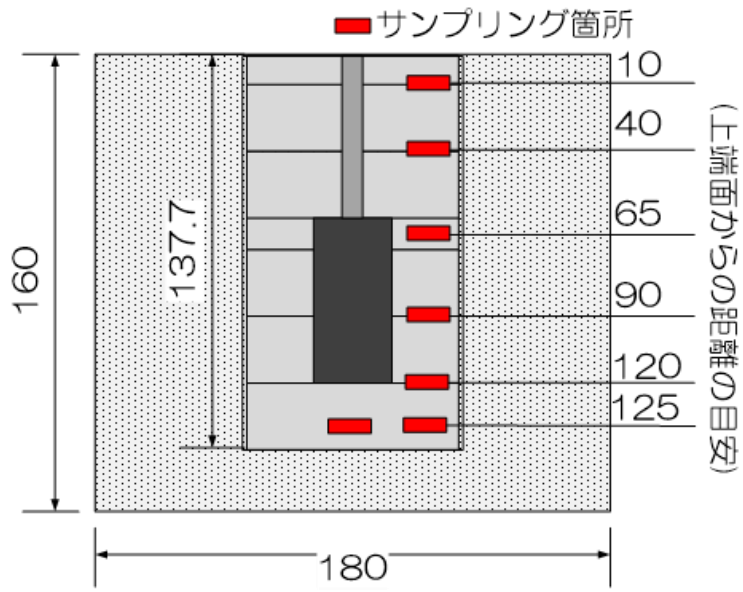


図 4.6.3-19 試験後の採取地点

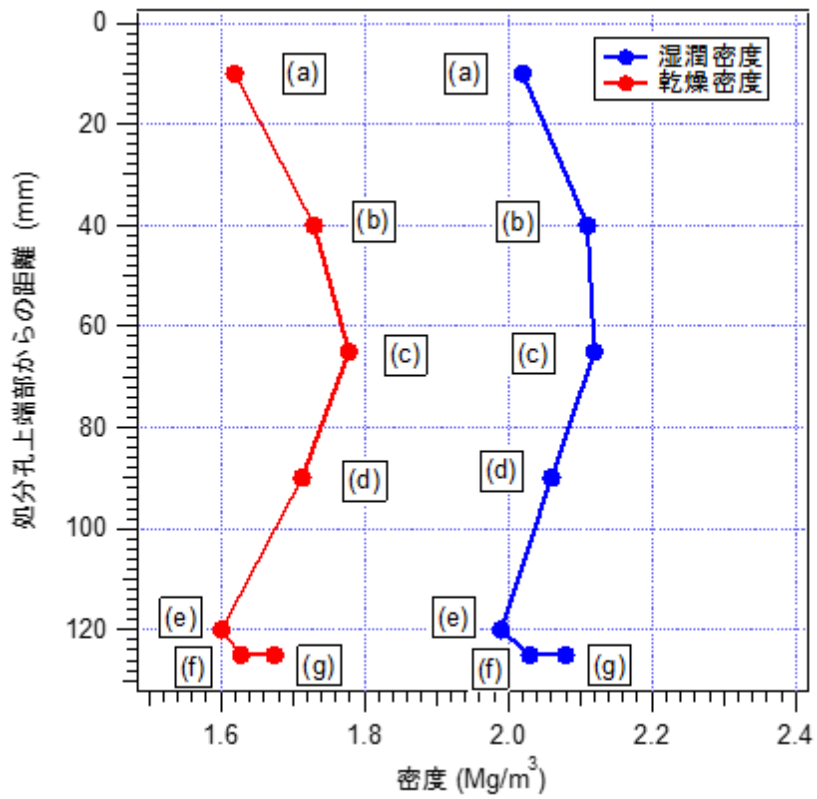


図 4.6.3-20 緩衝材密度の深さ分布

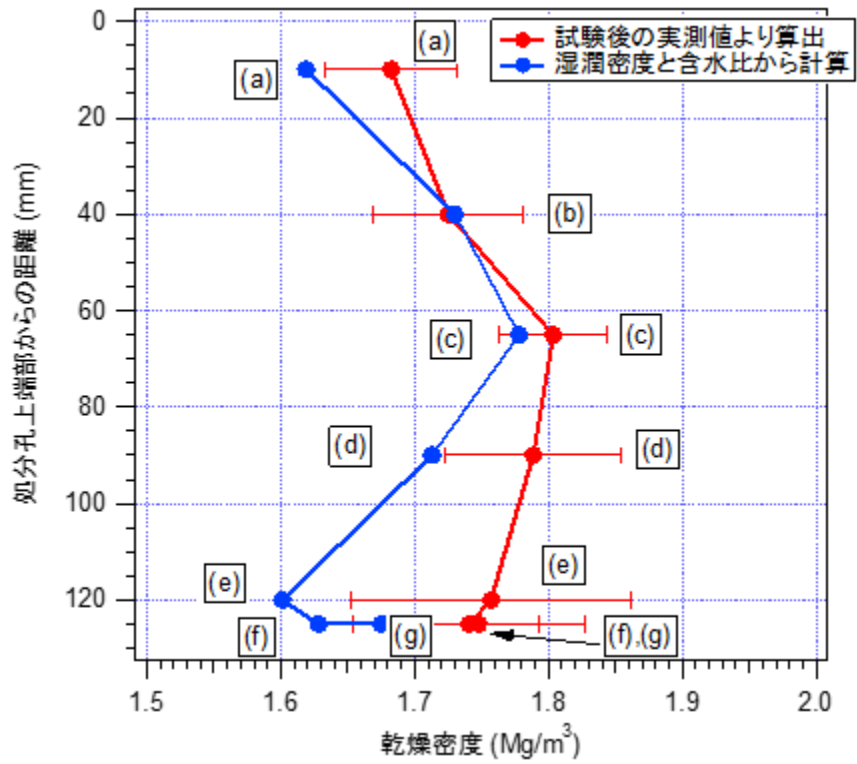


図 4.6.3-21 緩衝材含水比の深さ分布

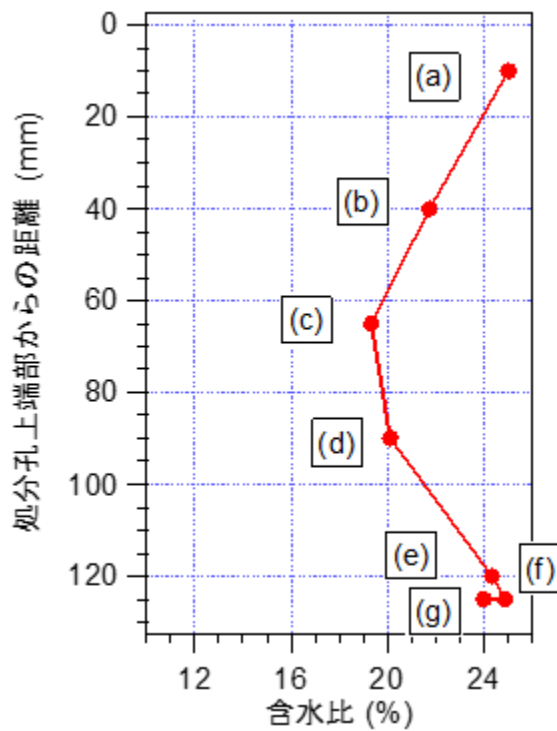


図 4.6.3-22 緩衝材飽和度の深さ分布

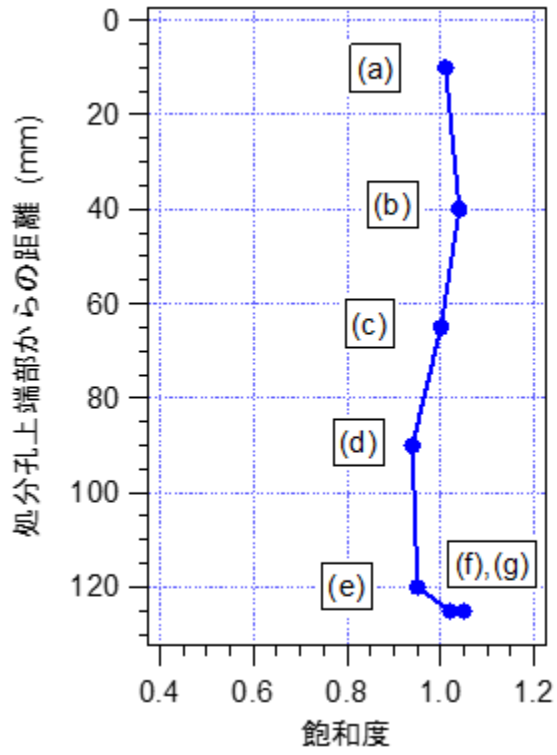


図 4.6.3-23 緩衝材飽和度の深さ分布

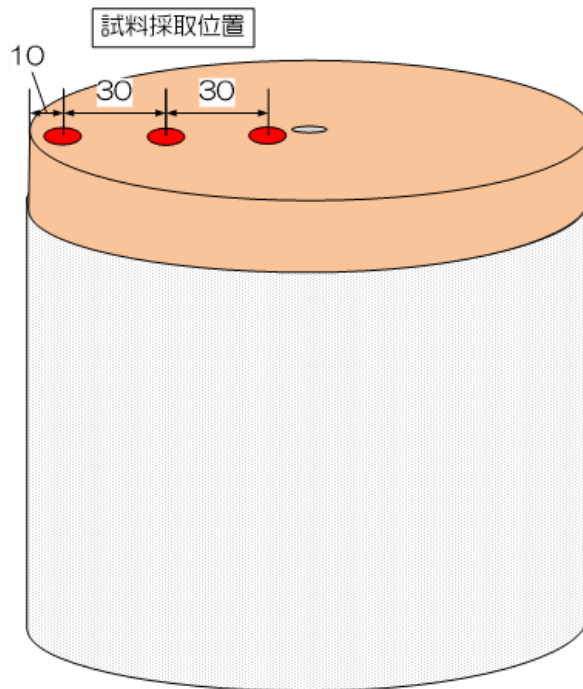


図 4.6.3-24 埋戻し材の含水比計測位置

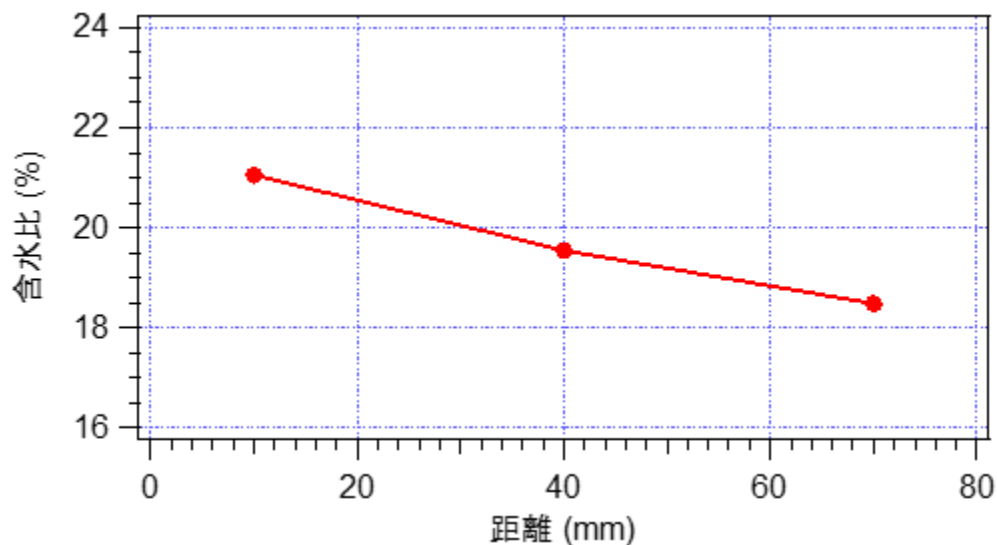


図 4.6.3-25 埋戻し材の含水比分布

(3) X線 CT 撮影

X線 CT 撮影は、遠心力载荷試験前後の模型を撮影することで、模型の内部構造を把握することが目的である。図 4.6.3-26 に撮影箇所概要図を示す。図中の点線で示した断面は、図 4.6.3-27 に示す画像、図 4.6.3-27 に示す画像の A-A'や B-B'は、図 4.6.3-28 に示す CT 値の分布に対応している。

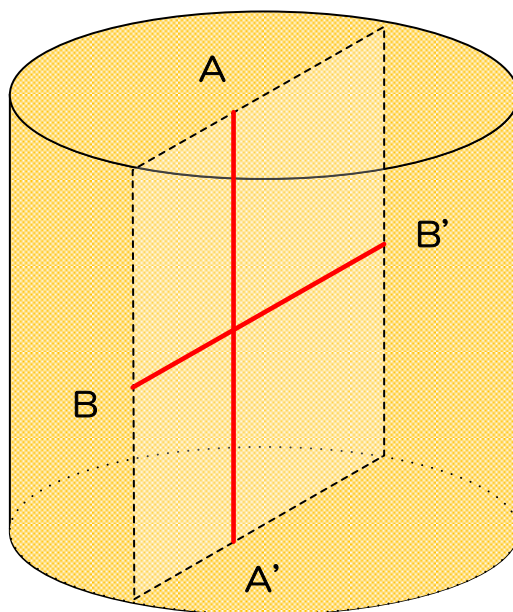


図 4.6.3-26 撮影箇所概要図

1) 試験前撮影

図 4.6.3-27 に図 4.6.3-26 に示した断面における撮影画像を示す。図中の A-A'や B-B'は図 4.6.3-28 に示す CT 値の分布に対応している。A-A'においては埋戻し材、緩衝材、岩盤が明瞭

に区別され、B-B'を見ると岩盤、緩衝材、オーバーパックが明瞭に区別されていることがわかる。図 4.6.3-28 において、A-A'では CT 値が約埋戻し材および緩衝材で約 1000Hu、岩盤部で約 800~1000Hu を示している。これは、緩衝材の密度が 1.87Mg/m³、埋戻し材の密度が 1.95Mg/m³ であり、密度値が近いためである。B-B'では、密度が 7.93Mg/m³ のオーバーパック（金属）については大きな CT 値（約 8000Hu）であり、図 4.6.3-27 で確認される岩盤部のノジュール部分に一部高い CT 値を示す箇所や、それ以外の部分では 600~1400Hu を示し、岩盤内の鉱物やノジュールの分布（密度の違い）によりかなり幅のある値を示している。

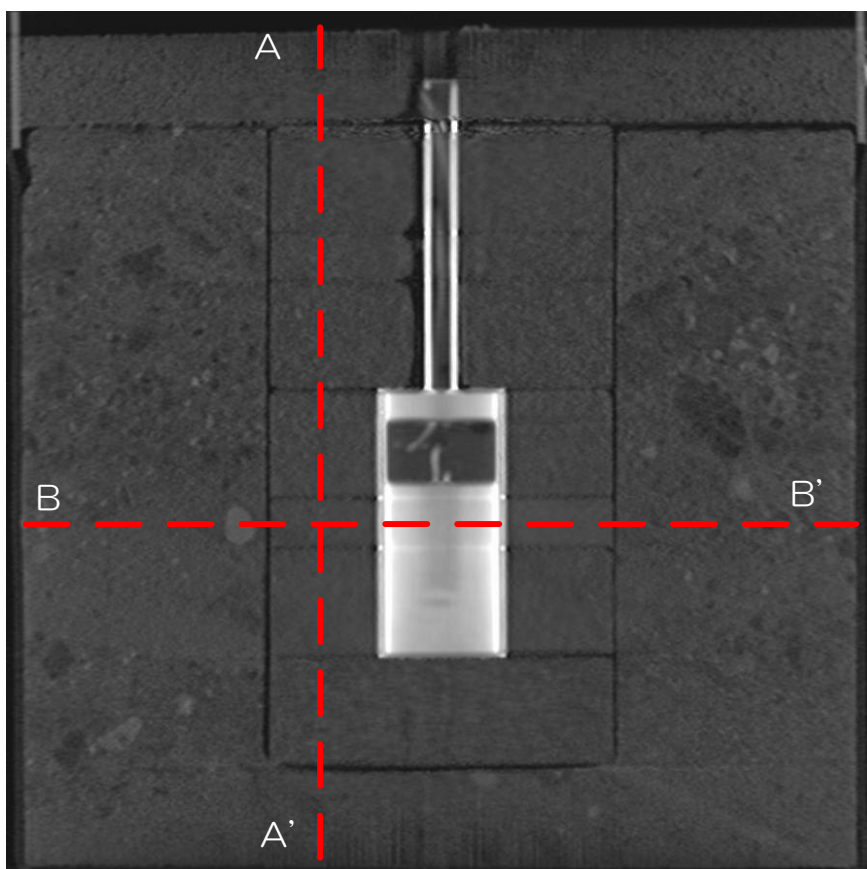
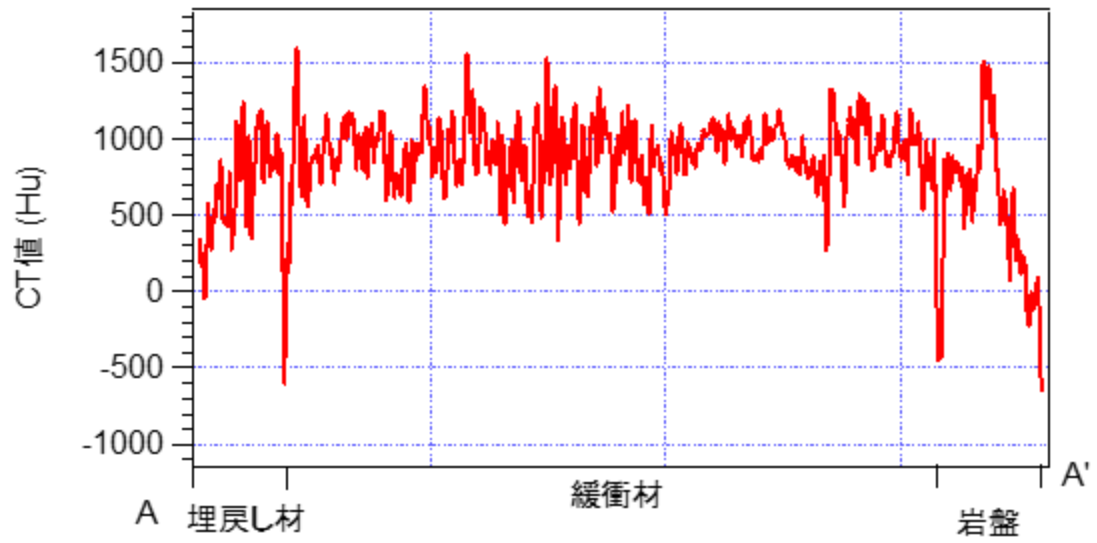
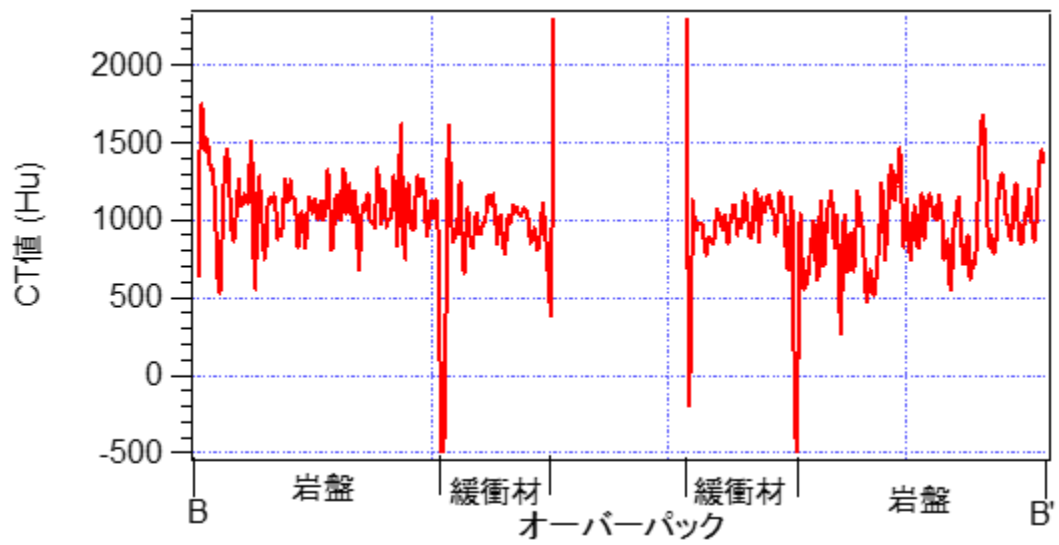


図 4.6.3-27 実験前の CT 撮影結果



a) A-A'断面



b) B-B'断面

図 4.6.3-28 実験前の各地点における CT 値

2) 試験後撮影

試験後に実施した X 線 CT 撮影の結果を図 4.6.3-29 に示す。図中の A-A'や B-B'は図 4.6.3-30 に示す CT 値の分布に対応している。試験前に撮影した 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、試験後の CT 画像では、継ぎ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。なお、緩衝材部のオーバーパック下方部と上方部にある黒い平行線は、オーバーパックの影響で虚像が出たものと考えられる。CT 画像の下側にある岩盤の亀裂は、圧力容器解放前の撮影では確認できなかったことから、圧力容器開封後模型単体での CT 撮影準備中の衝撃によって発生したものと考えられる。A-A'断面では、試験前の CT と比べて値の変動が小さく、値が若干大きくなった。B-B'断面でも同様な傾向が見られ、CT 値のばらつきが小さく値も大きくなった。これは、隙間に水が入ったことが一因としてある。B-B'断面では、左側の岩盤と緩衝材の間と右側のオーバーパックと緩衝材の間に隙間と考えられる CT 値の低下が見られた。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。

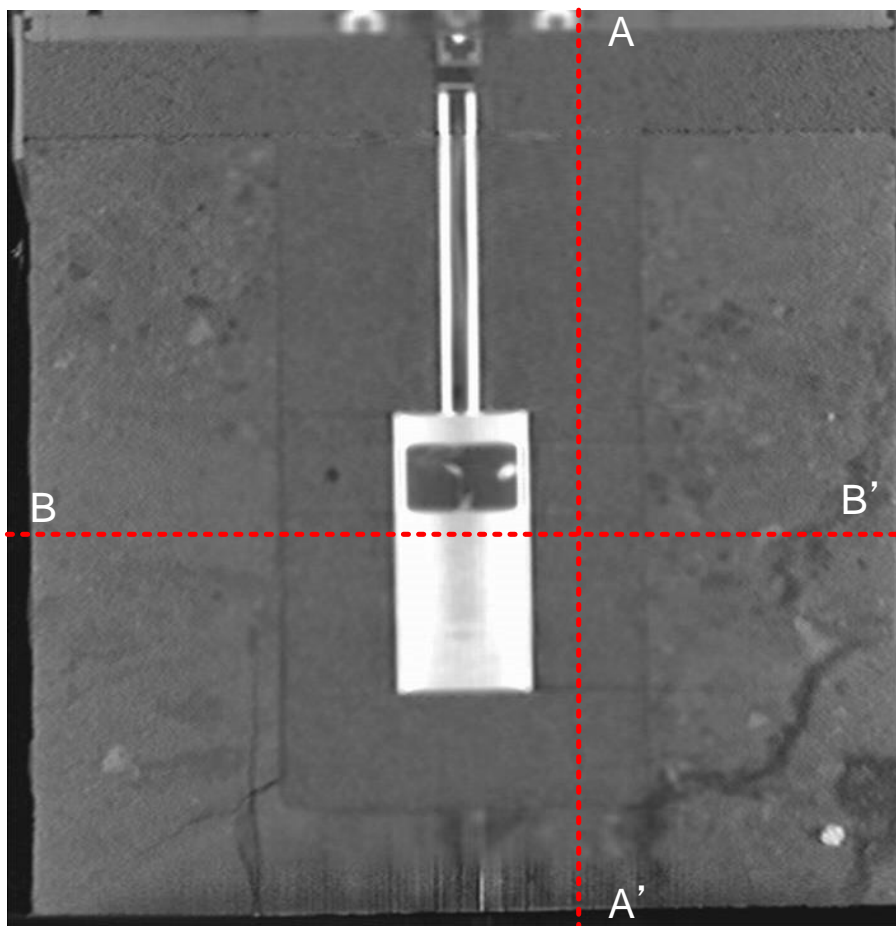
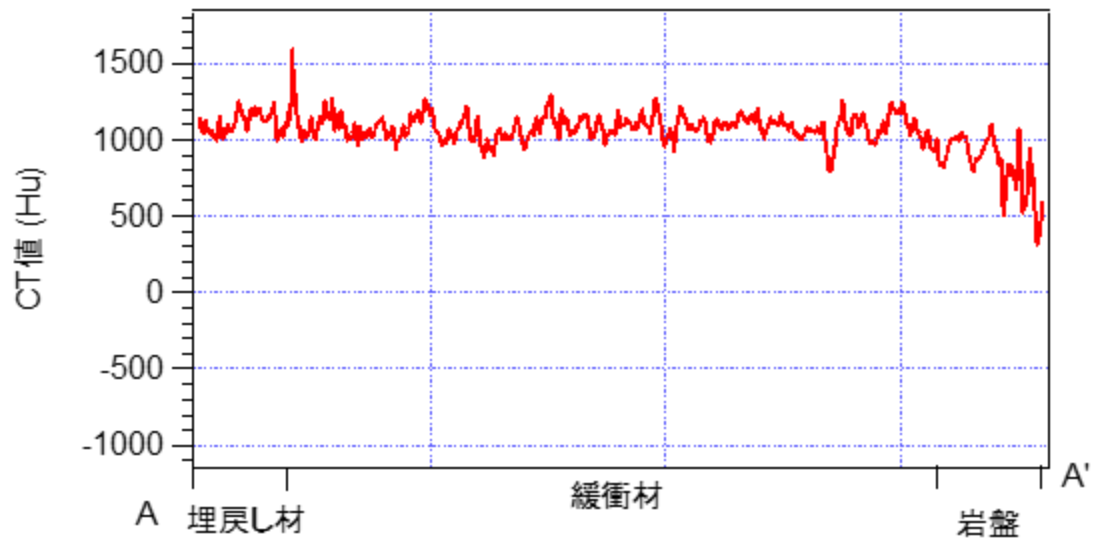
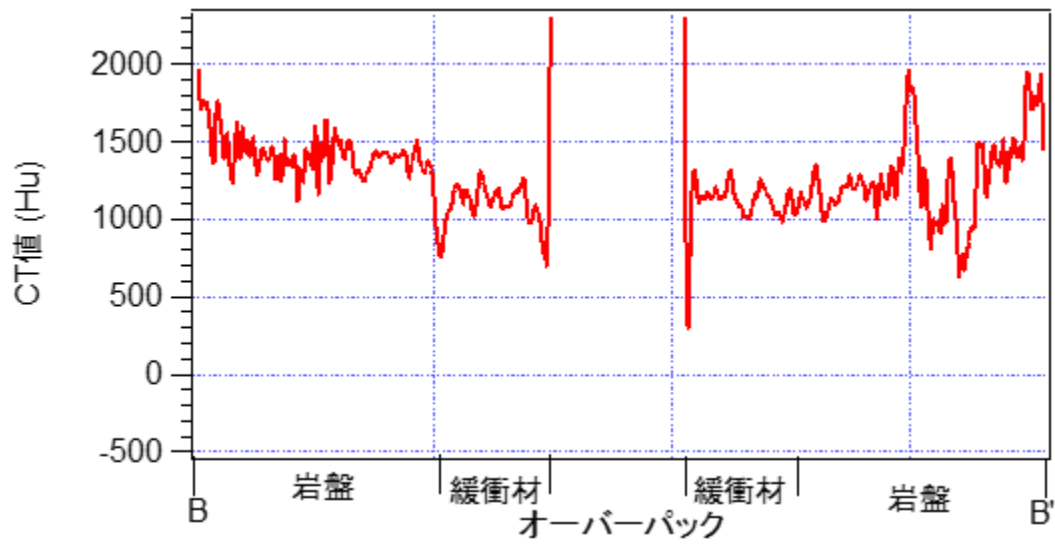


図 4.6.3-29 試験後の CT 撮影結果



a) A-A'断面



b) B-B'断面

図 4.6.3-30 試験後の各地点における CT 値

3) 密度の推定 (CT 画像から)

試験後の緩衝材の密度分布を推定するため、図 4.6.3-31 に示す位置の範囲(10mm)の CT 値の平均を算出した。図 4.6.3-32 は CT 値の深さ分布である。比較のため試験後の湿潤密度分布の結果も併せて表示してある。CT 値では、CT 画像に見られるオーバーパック端部に見られる虚像の影響が見られる (例えば、深さ 115mm の CT 値の低下)。

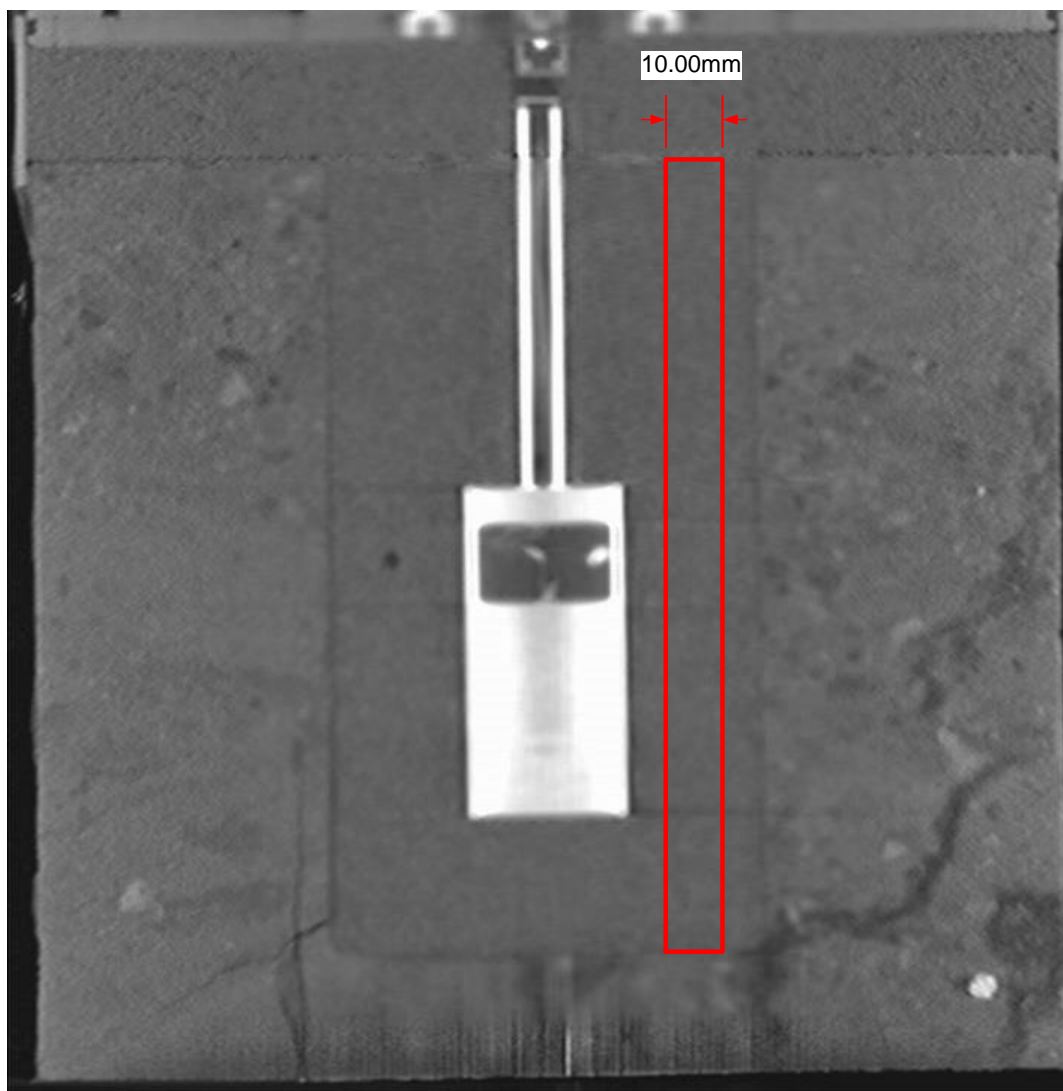


図 4.6.3-31 試験後の CT 値 (10mm 平均値) の算出箇所

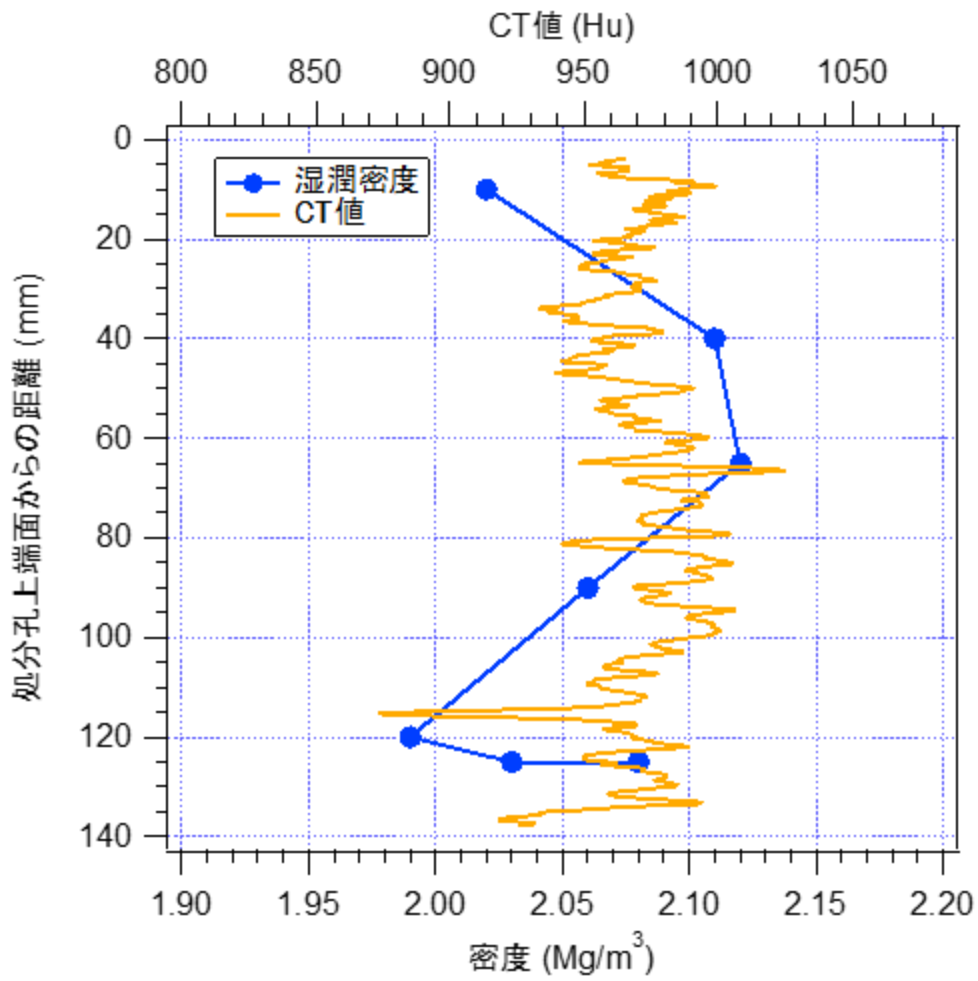
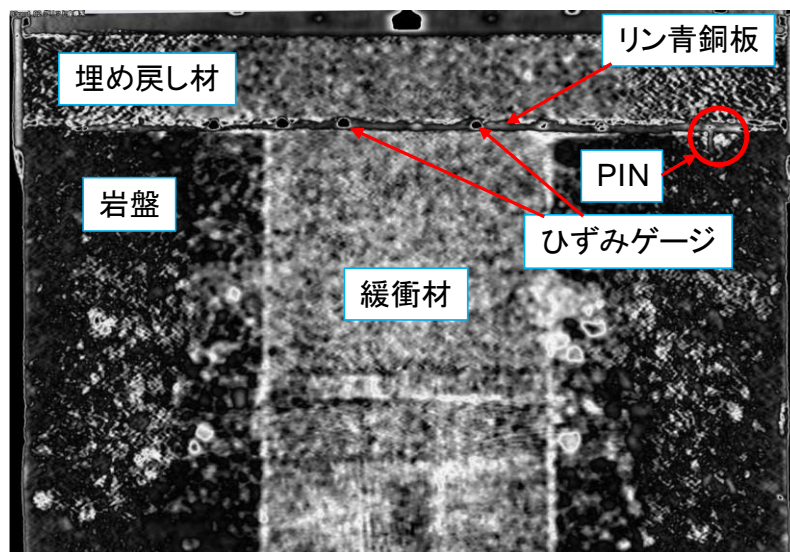


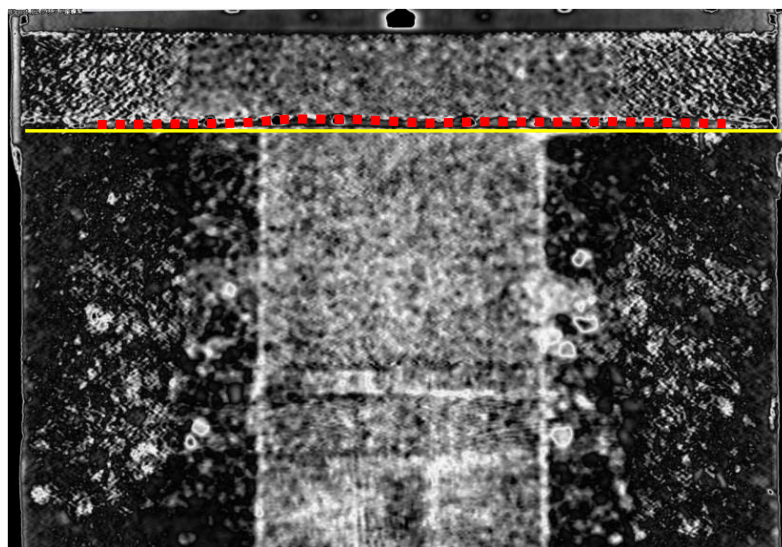
図 4.6.3-32 試験後の 10mm 範囲の CT 値
(平均値 (上軸)と湿潤密度 (下軸) 分布形状)

4) リン青銅板の最終的な位置の推定 (CT 画像から)

応力解放後ではあるが、CT 画像におけるリン青銅板の位置を試験終了後の最終的な位置と仮定し、膨出の形状を検討した。図 4.6.1-33 に示す CT 画像のコントラストは、リン青銅板の形状を検討するために画像の色調を補正したものである。図の (b) の黄線は試験前のリン青銅板の位置であり、赤点は試験後のリン青銅板の位置である。画像から、リン青銅板が変位していることがわかる。図 4.6.3-34 は試験後のリン青銅板の位置から試験前のリン青銅板の位置を差し引いた「リン青銅板の鉛直変位」である。下軸の数字は膨出センサーにおける各ゲージの番号である。CT 画像の解像度は 0.35mm であるため、それ以下の値については誤差大きくなるが、最大で 0.38mm、換算値で 11.5mm の変形があった。リン青銅板の形状についても緩衝材の上にあるひずみゲージの箇所ではほぼ均等な形状となった。



(a) 画像の説明



(b) 試験前後のリン青銅板の位置

図 4.6.3-33 試験後の CT 画像 (リン青銅板の位置検討)

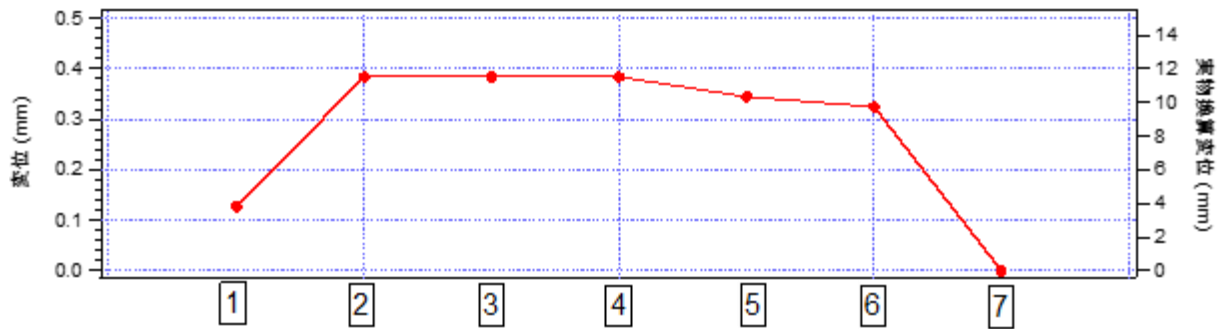


図 4.6.3-34 リン青銅板の最終変位

4.7 まとめおよび今後の課題

4.7.1 まとめ

本年度は、平成 27 度の模型上に埋戻し材を設置することで、埋戻し材の存在によって生じる緩衝材の変形特性（膨出）がオーバーパックの変位に与える影響や、その時の緩衝材、埋戻し材の土圧の発現状況、緩衝材の膨出状態の定性的に把握した。以下、試験から得られた知見を示す。

- ・温度：オーバーパックの加熱により岩盤の温度は最大で 38℃程度まで上昇し、オーバーパックの温度が下がるとそれに伴って岩盤の温度も下降した。
- ・オーバーパックの変位：緩衝材への間隙水の下方からの浸潤で初期に下部緩衝材が膨潤することで浮上し、その後の上部緩衝材の膨潤によって沈下する傾向が続いた。
- ・緩衝材の土圧：オーバーパックの変位よりやや遅れて発生、漸増し、それ以降はほぼ一定の値を示したが、50 年相当経過時から値が減少し、収束する傾向を示した。
- ・埋戻し材の土圧：模型上面の排水圧と比べて小さい値が計測された。土圧は最大値計測時以降では漸減する傾向を示した。
- ・岩盤のひずみ：間隙水浸潤によって生じる有効応力の低下によって引張ひずみが発生し、軸方向のひずみは圧縮後、引張ひずみが発生した。
- ・膨出センサー：膨出センサーを設置し、緩衝材の膨出の発生をリン青銅板に生じるひずみにより計測した。
- ・緩衝材及び埋戻し材のサンプリング：緩衝材の飽和度、密度を算出した。含水比は緩衝材上方と下方が高くなり、密度についてはその逆となった。埋戻し材の含水比は中心部より外縁部の方が高い傾向を示した。
- ・CT 撮影：試験終了後に緩衝材が膨潤し、隙間を埋めていることが確認できた。また、試験終了後の画像より緩衝材の湿潤密度の推定とリン青銅板の試験終了時の位置の検討を実施し、リン青銅板の形状（緩衝材の膨出形状）を把握した。

4.7.2 今後の課題

遠心模型試験の今後の課題を以下に示す。

- 膨出センサーの計測値に安定性がなかったため、防水性を高め計測の確実性を向上させ、ひずみの分布形状を詳細に把握し、膨出の形状を計測する方法をより詳細に検討する必要がある。例えば、ひずみの発生は曲げのみと仮定し、計測されたひずみ値から算出した曲率 θ が図4.7.2-1に示すゲージ間距離 L での曲率と仮定しひずみを算出する。両端の固定条件は上下方向に関して固定である。 n 番目のゲージの変位を g_n 、 n 番目のゲージ間距離でのたわみを d_n 、 $g_1=d_1/2$ とすると $g_n=d_{n-1}+d_n/2$ と表すことができる。もう一方の端部では、 $g_n=d_n/2$ 、 $g_{n-1}=d_n+d_{n-1}/2$ となる。両端の上下方向は固定であるので、両端から変位を積算することで全体の形状を把握することができる。

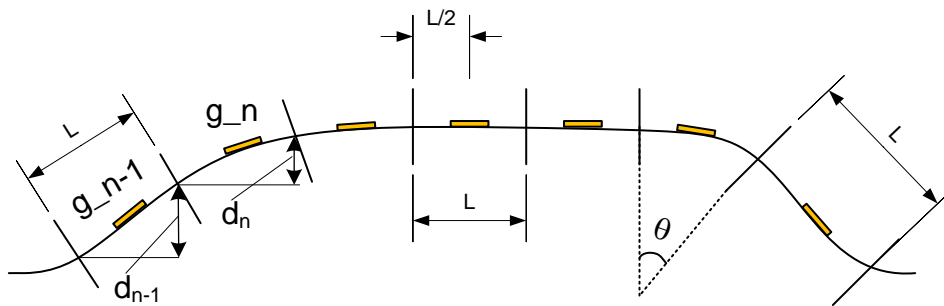


図 4.7.2-1 センサー変位の計算方法のイメージ

- 膨出センサーによる緩衝材の膨出形状の把握と実験後 CT 画像から緩衝材の膨出形状を推定した。CT 画像による緩衝材の膨出形状の把握をより精度良く実施するために、緩衝材上部に CT で判別できるターゲットを設置するなどの検討の実施が必要である。
- 埋戻し材の自重応力を载荷した状態でのデータを得ることができたが、次年度は埋戻し材全体（高さ方向）を模擬し、その剛性や坑道内に生じると考えられる岩盤と埋戻し材間の隙間を考慮した条件でのデータの取得が必要である。

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, 529, 2013.
- [2] 中山雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人, 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験; 計測データ集(平成 27 年度), *JAEA-Data/Code*, 2016-5, 2016.
- [3] 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業「処分システム評価確証技術開発」報告書, 2016.
- [4] R. N. Taylor, *Geotechnical Centrifuge Technology*. London: Blackie Academic & Professional, 1995.
- [5] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その1) -超長期遠心載荷岩盤実験装置と遠心模型試験法の開発-, 電力中央研究所報告, N10018, 2011.
- [6] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物 処分場周辺の長期挙動評価(その2) -ニアフィールド模型試験法の確立と等方応力拘束条件下における長期挙動-, 電力中央研究所報告, N11040, 41, 2012.
- [7] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物 処分場周辺の長期挙動評価(その4) -加熱型廃棄体を用いた等方応力拘束条件下における 熱-水-応力連成模型試験-, 電力中央研究所報告, N14003, 30, 2014.
- [8] S. Nishimoto, M. Sawada, T. Okada, New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 1: Test of Physical Modeling in Near Field Under Isotropic Stress-Constraint Conditions, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2016.
- [9] 木村孟, 日下部治, 講座 遠心模型試験 2.序論, 土と基礎, 35, 11, 68-74, 1987.
- [10] W. H. Craig, R. G. James, A. N. Schofield, *Centrifuges in soil mechanics*. Balkema Rotterdam, 1988.
- [11] 岡村未対, 竹村次朗, 上野勝利, 遠心模型試験-実験技術と実務への適用- 2.遠心模型の相似則、実験技術-利点と限界, 土と基礎, 52, 10, 37-44, 2004.
- [12] J. Garnier, C. Gaudin, S. M. Springman, P. J. Culligan, D. Goodings, D. Koning, B. Kutter, R. Phillips, M. F. Randolph, L. Thorel, Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling, *Int. J. Phys. Model. geotechnics*, 7, 3, 1-23, 2007.
- [13] F. Tatsuoka, S. Goto, T. Tanaka, K. Tani, Y. Kimura, Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material, *Deformation and progressive failure in geomechanics: IS-NAGOYA '97* . Pergamon, Nagoya, Japan, 133-138, 1997.
- [14] O. Kusakabe, 6. Foundations, in *Geotechnical Centrifuge Technology*, R. N. Taylor, Ed. Blackie Academic & Professional, 1995.
- [15] 中村邦彦, 田中幸久, 高レベル放射性廃棄物処分孔での廃棄体の沈下挙動-遠心模型試験と簡易沈下予測法の提案-, 電力中央研究所研究報告書, U03074, 2004.
- [16] 緒方信英, 小崎明郎, 植田浩義, 朝野英一, 高尾肇, 高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術-その4 人工バリアの設計と製作-, 原子力バックエンド研究, 5, 2, 103-121, 1999.
- [17] 地盤工学会, 堆積軟岩の工学的性質とその応用, in *土質基礎工学ライブラリー30*, 堆積軟岩の工学的性質とその応用編集委員会, Ed. (社)地盤工学会, 1998.

- [18] 岡田哲実, 高温環境下における堆積軟岩の力学特性 (その2) —軸圧縮試験によるクリープ特性の温度依存性の評価, 電力中央研究所報告, N05057, 2006.
- [19] 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-, 1999.
- [20] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成27年度地層処分技術調査等事業「処分システム工学確証技術開発」報告書(第3分冊) —人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築—, 2016.
- [21] 田中明子, 山野誠, 矢野雄策, 笹田政克, 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2004.
- [22] 中村大, 後藤隆司, 伊藤陽司, 山下聡, 鈴木輝之, 岩石と土の凍上特性の差異に関する実験的検証, 土木学会論文集C, 66, 3, 472-486, 2010.
- [23] 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成26年度地層処分技術調査等事業「処分システム工学確証技術開発」報告書(第2分冊) —人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材, 2015.

第5章 まとめ

5.1 実施内容

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

本年度は、評価手法（骨子）の提示のために、ニアフィールドの将来状態に関する重要な評価項目、環境要因の抽出を行った。数値解析では、熱－水理－力学連成コードを用いた解析を行い、平成 27 年度に実施した遠心模型試験の計測結果と比較した。また、入力するパラメータ取得のための要素試験を行った。遠心模型試験では、処分孔上部の埋戻し材を含む模型を作製し、透水、拡散、熱伝導などの現象に関して時間縮尺効果のある遠心力場の相似則に基づいて 100 年程度に相当する THM 連成挙動データを提示した。

5.2 本年度の成果

5.2.1 実施計画

(1) 全体計画

昨年度策定した平成 27～29 年度の 3 カ年の研究計画を更新した。実施内容について、本年度および来年度の内容を具体化した。これにより、本年度の実施内容を以下の通りとした。

- ・ 長期挙動評価手法の構築：評価手法（骨子）の提示に向けた、ニアフィールドの将来状態に関する重要な評価項目、環境要因の抽出を行う。
- ・ 数値解析および要素試験：THM 学連成コードを用いた解析を行い、平成 27 年度に実施した遠心模型試験の計測結果と比較した。また、入力するパラメータ取得のための要素試験を行った。
- ・ 遠心模型試験：処分孔上部の埋戻し材を含む模型を作製し、透水、拡散、熱伝導などの現象に関して時間縮尺効果のある遠心力場の相似則に基づいて数百年程度に相当する THM 連成挙動データを提示し、緩衝材の変形（膨出）挙動に着目したデータを取得した。

(2) 長期挙動評価手法（骨子）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、本事業（平成 27～平成 29 年度）においてその骨子を提示する。本年度は、人工バリアと周辺岩盤の将来状態に関する重要な評価項目と、それに影響を及ぼす環境要因を抽出し、平成 27 年度に示した評価手法の概念を具体的にどのように行うのか例示した。

5.2.2 数値解析及び要素試験

(1) 数値解析

平成 27 年度に実施した遠心模型試験の再現解析を行い、人工バリア及び周辺岩盤（ニアフィールド）の THM 連成現象のモデル化の妥当性や長期挙動評価において重要となるパラメータについて確認した。基本ケースと各ケースの比較から以下のような事項が明らかとなった。

1) 遠心模型試験の相似則の確認

重力加速度の N 倍の遠心場における模型試験では、 $1/N$ 模型の応力ひずみが等倍となり、また模型を用いる効果により水や熱の拡散時間が $1/N^2$ 倍になる。本研究では、模型寸法の基本ケースと同じ条件の実寸法ケースの解析結果を比較し、想定されている模型試験の相似則を満たすことを確認した。これは、不飽和流れや緩衝材の膨潤挙動、接触面の滑りなどを含む非線形問題においても成立している。

2) 透水性の評価が与える影響

平成 27 年度に実施した感度解析結果より、浸潤速度は緩衝材の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との結論を得た。一方、本研究で対象とした試験条件の解析では、透水係数の大きさによって最終変位や応力に多少の影響が認められた。これは、平成 27 年度に実施した感度解析モデルと比較して、冠水後の間隙水圧が大きいいため、浸透流による地盤骨格に対する作用が相対的に大きいためと考えられる。

試験との比較では、オーバーパック変位などの差異は大きく、透水性を要素試験結果から得られるばらつき程度変化させても傾向は殆ど変わらなかった。試験結果では、オーバーパックの鉛直変位は小さく、これは緩衝材の上部と下部が殆ど時間差を生じることなく膨潤しているためと考えられる。なお、緩衝材と岩盤間にある隙間は、浸潤過程で水みちになると考えられ、これを考慮することによる影響は大きい。

3) 接触面の摩擦強度の影響

試験では、緩衝材の膨潤がほとんど発生していない初期段階で、オーバーパックの上昇が生じる一方、膨潤により大きな圧力が発生する時期にはオーバーパックの鉛直変位は殆ど生じていない。この原因について、緩衝材とオーバーパックや岩盤との接触面強度が関係している可能性を考慮し、摩擦係数と粘着力の検討を行ったが、大きな影響は認められなかった。

4) 剛性の飽和度依存性の影響

緩衝材と岩盤について剛性の飽和度依存性を考慮した検討を行った。緩衝材について、膨潤の等方性や均質化を考慮する上で重要であるが、本研究で用いた飽和時にポアソン比を 0.5 相当とするモデルについては体積変形を拘束する問題がある。しかしながら、膨潤挙動を試験と比較する上では重要である。また、軟岩の含水に伴う軟化についてもモデル化を検討し、岩盤変形を評価する上で重要であることを確認した。

5) 物性のばらつきによる影響

岩盤の透水性は膨潤の発生時刻や冠水後の岩盤変形に、接触面の摩擦強度についてはオー

バーパックの鉛直変位に影響するが、物性のばらつきに関する影響はあまり大きくない。また、岩盤や緩衝材の剛性のばらつきについては、剛性と初期拘束圧の大きい岩盤でより大きく、緩衝材についてはオーバーパックの変位量などに強く影響した。

(2) 要素試験

要素試験では、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各種試験を実施した。

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

1) 膨潤特性

緩衝材の作製時の乾燥密度の増加とともに、平衡膨潤圧も増加する傾向が認められた。

埋戻し材の膨潤圧は、 $0.14\sim 0.18\text{MPa}$ となった。

来年度は、緩衝材及び埋戻し材の膨潤圧測定の実施数量を増やし要素試験で得られる膨潤特性の精度向上を目指す。

2) 熱特性

広範囲な飽和度の変化に伴う熱伝導率の関係を取得した。固相（緩衝材、埋戻し材及び周辺岩盤）の熱特性として、比熱、熱膨張率を取得した。

3) 保水特性

要素試験において、広範囲な飽和度の変化に伴う保水特性の関係を取得した。

4) 透水特性

緩衝材及び埋戻し材において、吸水に伴う透水性の変化を示した。緩衝材及び周辺岩盤においては、飽和度が十分に高まった状態の透水係数が得られた。緩衝材においては、供試体作製時の乾燥密度の増加とともに、透水係数が小さくなる傾向を確認した。

来年度においては、緩衝材及び埋戻し材の実施数量を増やし要素試験で得られる透水特性の精度向上を目指す。

5) 力学特性

緩衝材及び埋戻し材において、飽和度の変化に伴う強度・変形特性の関係を取得した。周辺岩盤において、強度特性、変形特性、ポアソン比を取得した。緩衝材及び埋戻し材において、三軸試験の実施数量を増やし、要素試験で得られる力学特性の分析精度向上を目指す。

6) 解析用物性値

模型実験の数値解析に必要な要素特性を取得し、膨潤に関するパラメータ（緩衝材、埋戻し材）及び間隙以外のパラメータ（緩衝材、埋戻し材、周辺岩盤）の設定を行った。

5.2.3 遠心模型試験

本年度は、平成 27 度の模型上に埋戻し材を設置し、その自重応力を緩衝材に負荷することで、埋戻し材の存在によって生じる緩衝材の変形特性（膨出）がオーバーパックの変位に与える影響や、その時の緩衝材、埋戻し材の土圧の発現状況、加えて、緩衝材の膨出状態の定性的な把握した。試験では、周辺岩盤の温度、オーバーパックの鉛直変位、緩衝材の土圧、埋戻し材の土圧、周辺岩盤のひずみ、膨出状況を計測した。その結果、以下の事項がわかった。

1) 温度

オーバーパックの加熱により周辺岩盤の温度は最大で 38℃程度まで上昇し、オーバーパックの温度が下がるとそれに伴って周辺岩盤の温度も下降した。

2) オーバーパックの変位

緩衝材への間隙水の下方からの浸潤で初期に下部緩衝材が膨潤することで浮上し、その後の上部緩衝材の膨潤によって沈下する傾向が続いた。

3) 緩衝材の土圧

オーバーパックの変位よりやや遅れて発生、漸増し、それ以降はほぼ一定の値を示したが、50 年相当経過時から値が減少し、収束する傾向を示した。

4) 埋め戻し材の土圧

模型上面の排水圧と比べて小さい値が計測された。土圧は最大値計測時以降では漸減する傾向を示した。

5) 周辺岩盤のひずみ

間隙水浸潤によって生じる有効応力の低下によって引張ひずみが計測された。軸方向のひずみについてはその後圧縮～引張ひずみを計測した。

6) 膨出センサー

膨出センサーを設置することで、緩衝材の膨出をリン青銅板に生じるひずみにより計測した。

7) 試験終了後の緩衝材の定体積採取および埋戻し材の定量採取

緩衝材の飽和度、密度を算出した。含水比は緩衝材上方と下方が高くなり、密度についてはその逆となった。埋め戻し材の含水比は中心部より外縁部の方が高い傾向を示した。

8) CT 撮影

試験終了後に緩衝材が膨潤し、隙間を埋めていることが確認できた。また、試験終了後の画像より緩衝材の湿潤密度の推定とリン青銅板の試験終了時の位置の検討を実施し、リン青銅板の変形を把握した。

第6章 参考資料

6.1 数値解析の結果

数値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、および緩衝材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、換算時間で2年経過時以降は温度分布にはあまり意味がないが、そのままほぼ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、モデル上面の緩衝材の鉛直土圧とオーバーパック鉛直変位履歴、および岩盤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 6.1-1 に示す。なお、緩衝材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は岩盤下端に対する相対変位となっており、遠心模型試験の計測条件と同一にしている。また、各ケースの経時変化グラフの比較対象は遠心模型試験結果となっている。以降に検討した各ケースの結果をまとめて示す。

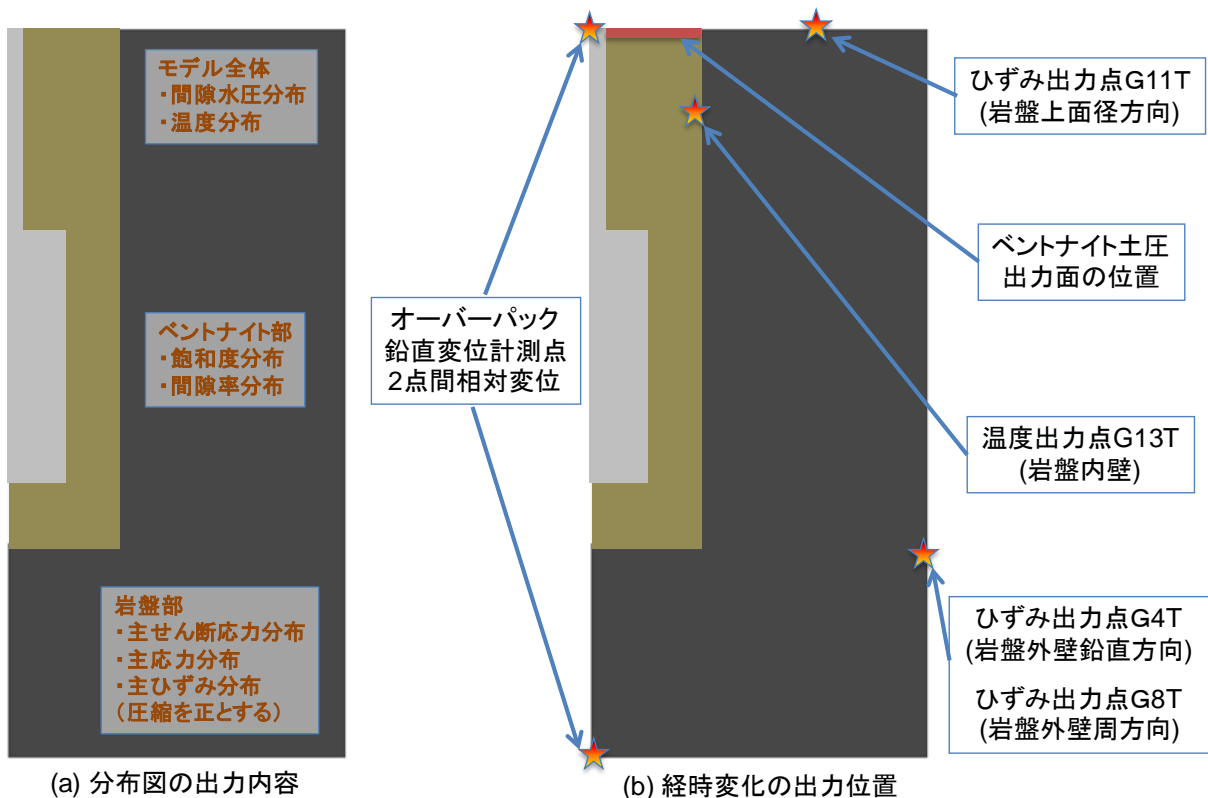


図 6.1-1 解析結果の出力部位と出力位置

6.1.1 解析結果

(1) Case 0

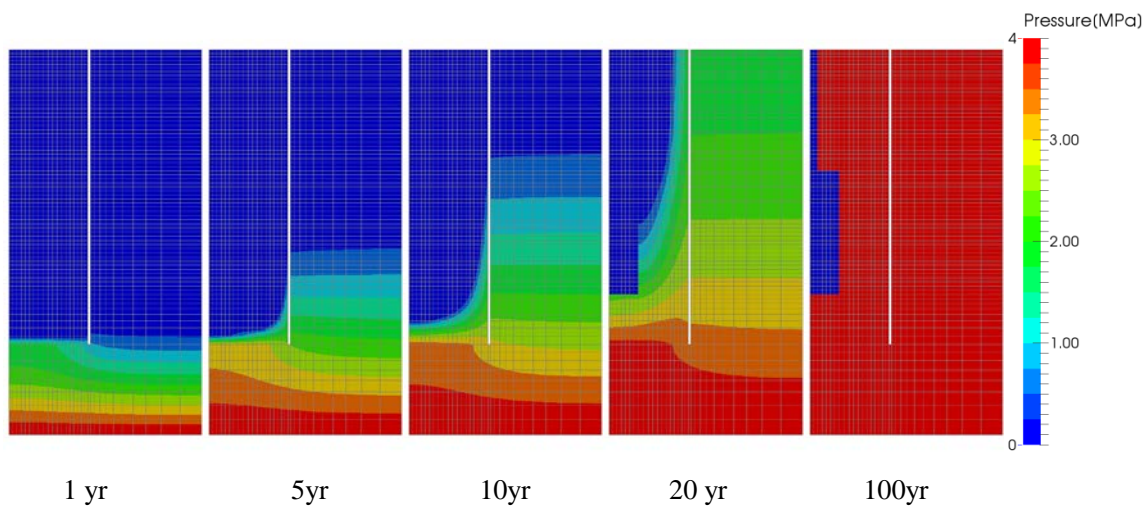


図 6.1.1-1 Case 0 岩盤部分・間隙水圧分布

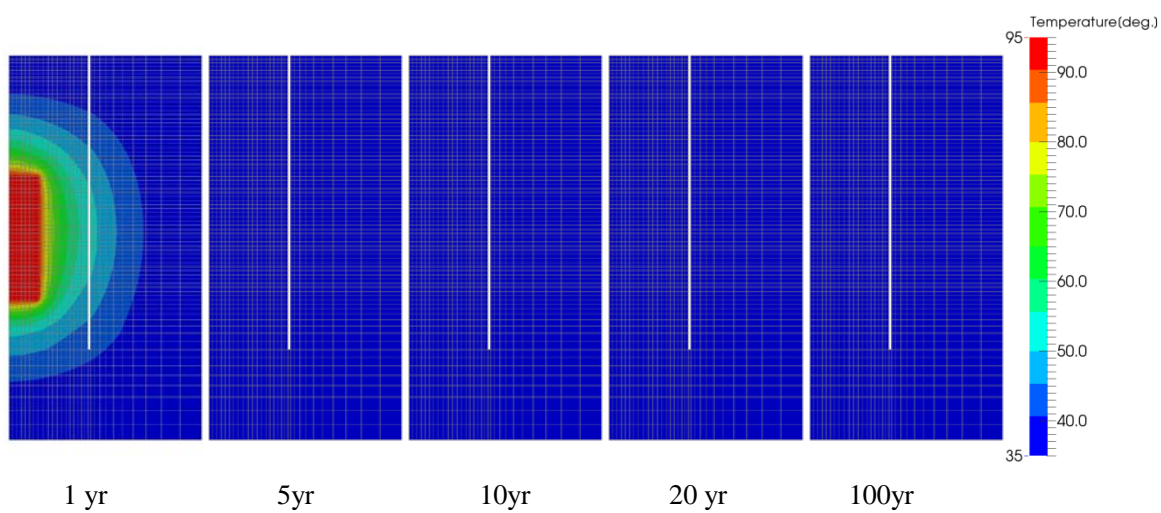


図 6.1.1-2 Case 0 岩盤部分・温度分布

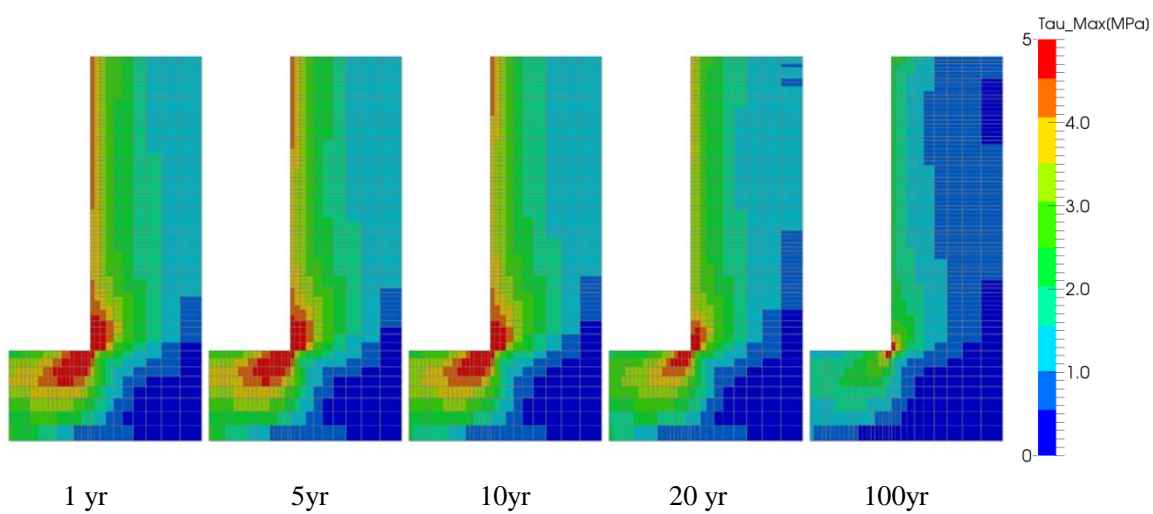


図 6.1.1-3 Case 0 岩盤部分・主せん断応力分布

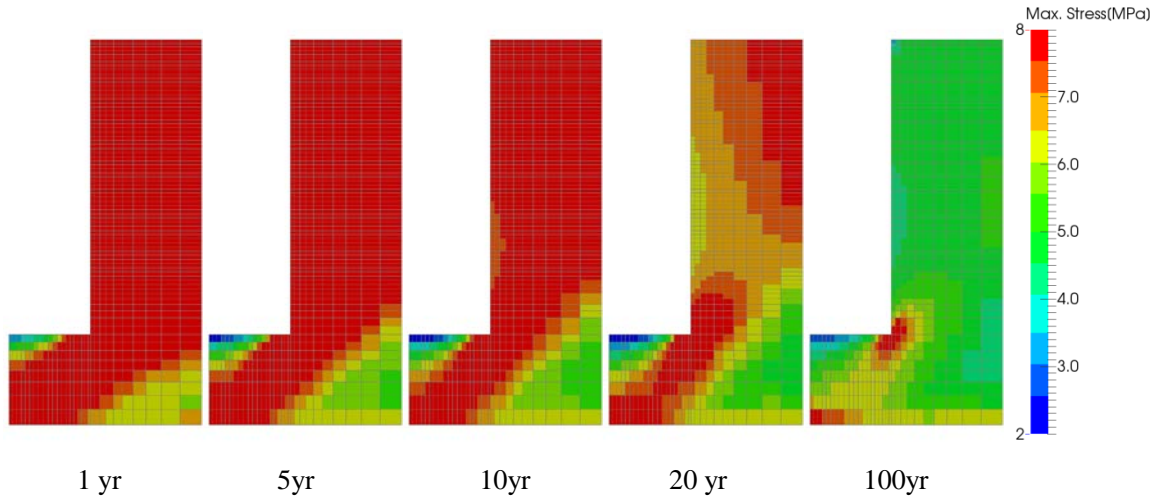


図 6.1.1-4 Case 0 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

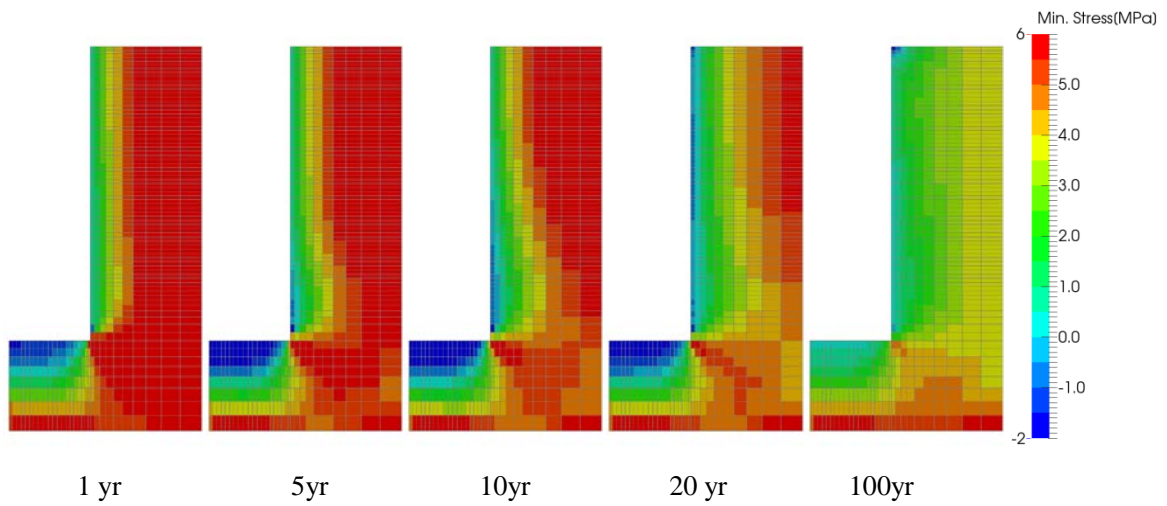


図 6.1.1-5 Case 0 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

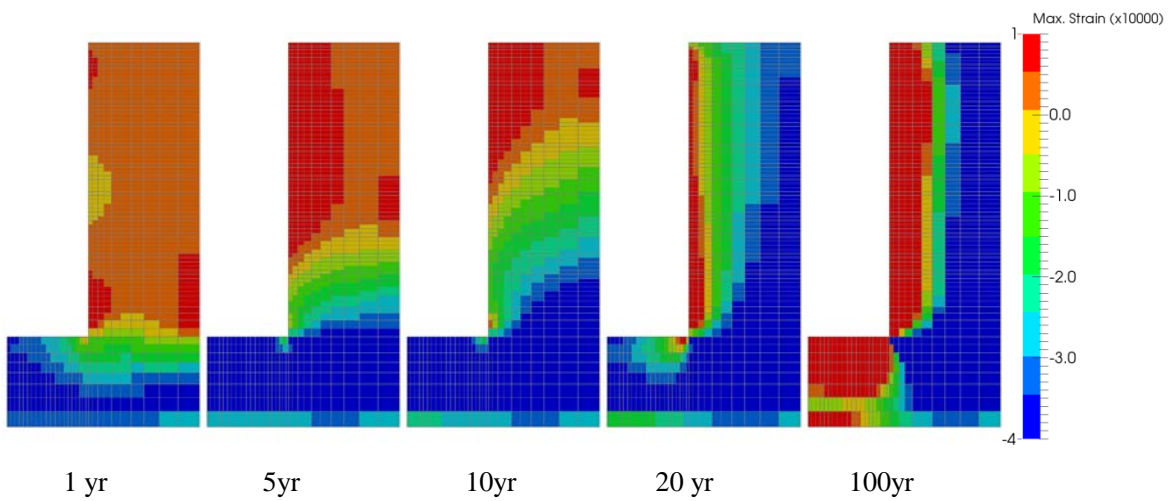


図 6.1.1-6 Case 0 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

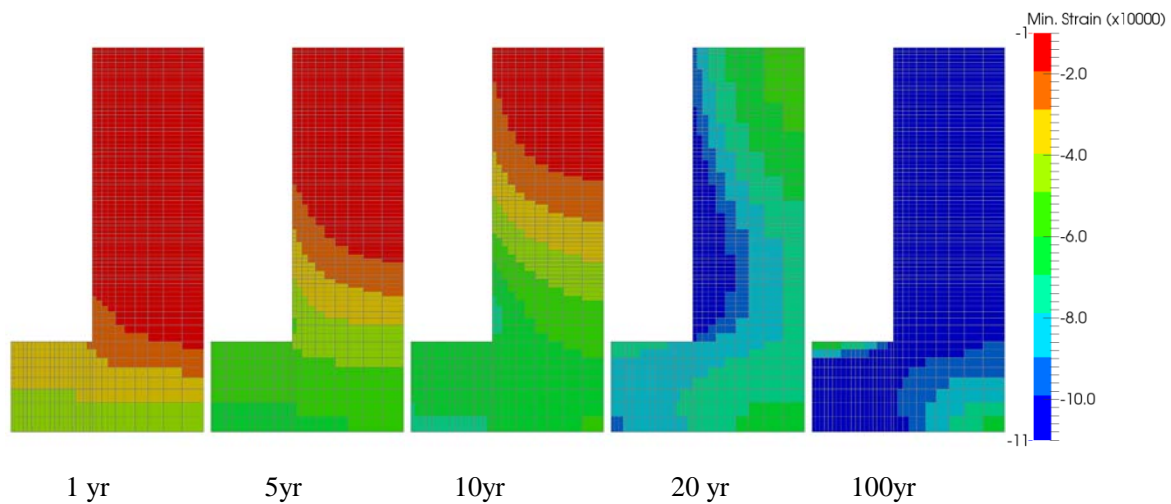


図 6.1.1-7 Case 0 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

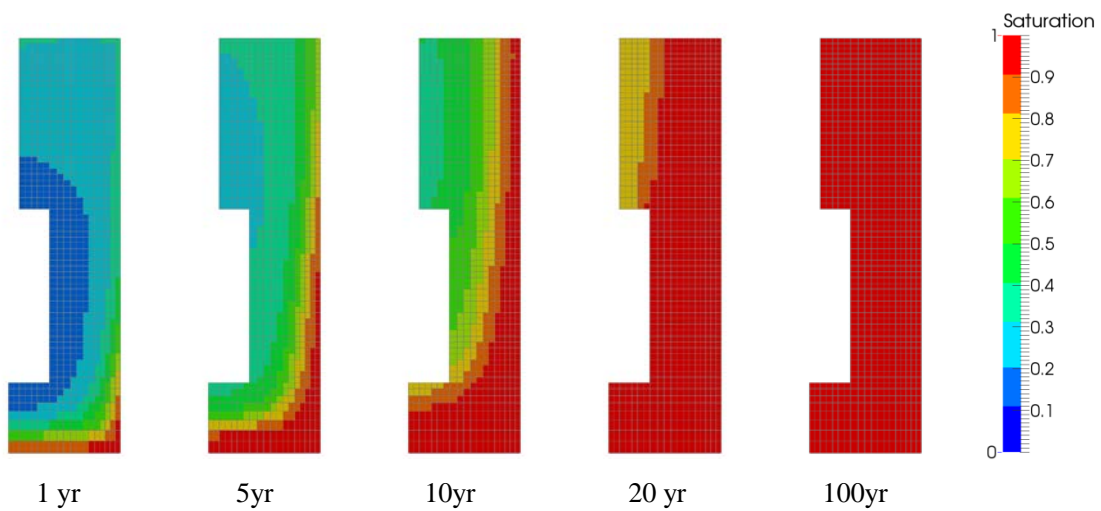


図 6.1.1-8 Case 0 緩衝材部分・飽和度分布

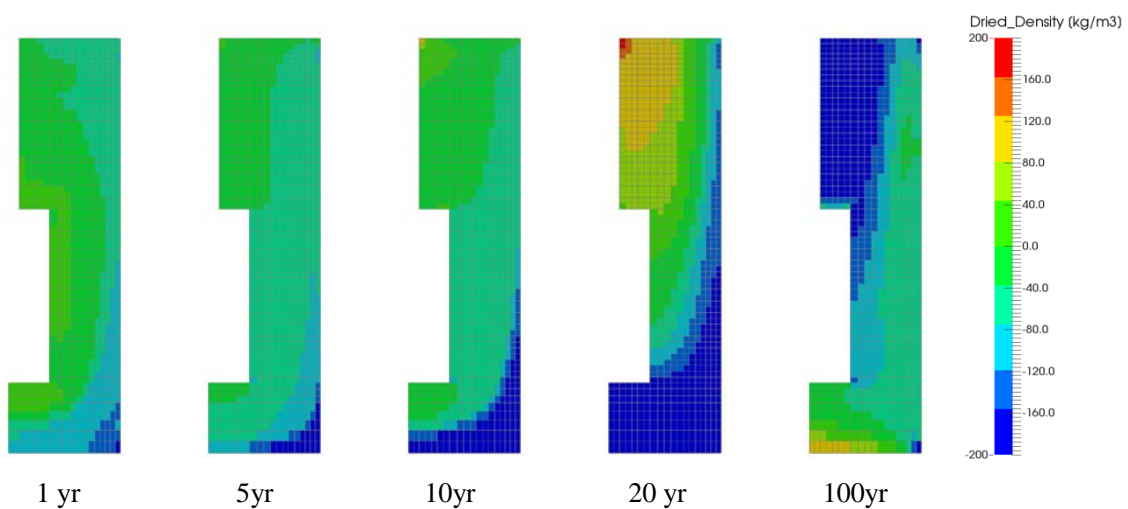


図 6.1.1-9 Case 0 緩衝材部分・乾燥密度分布

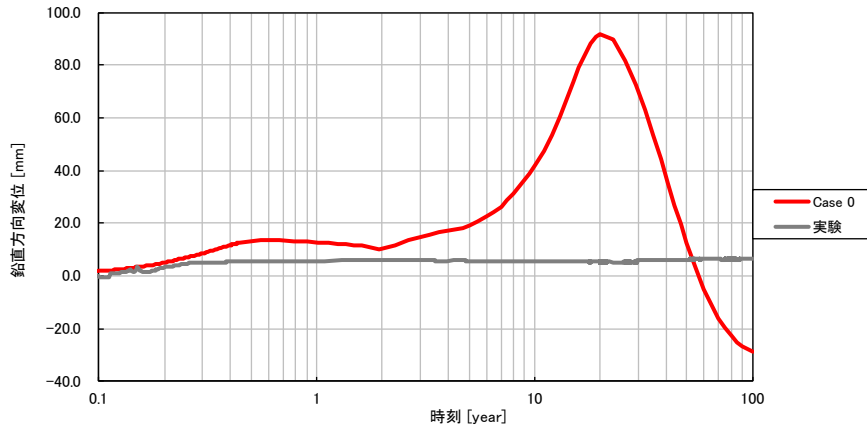


図 6.1.1-10 Case 0 鉛直方向の変位時刻歴

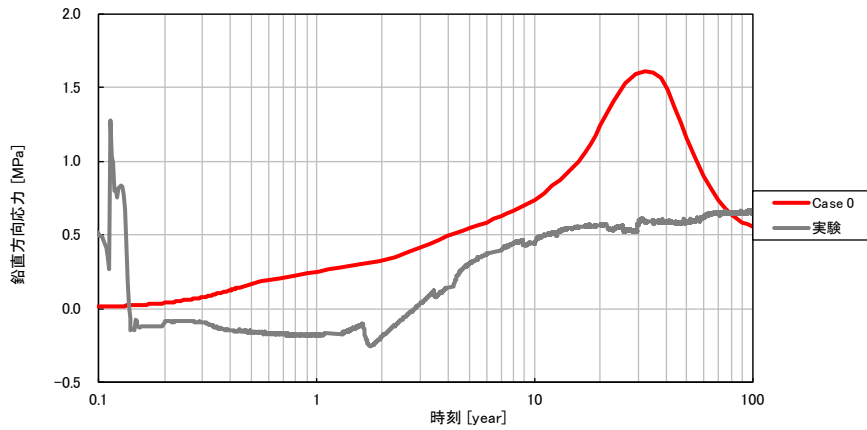


図 6.1.1-11 Case 0 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

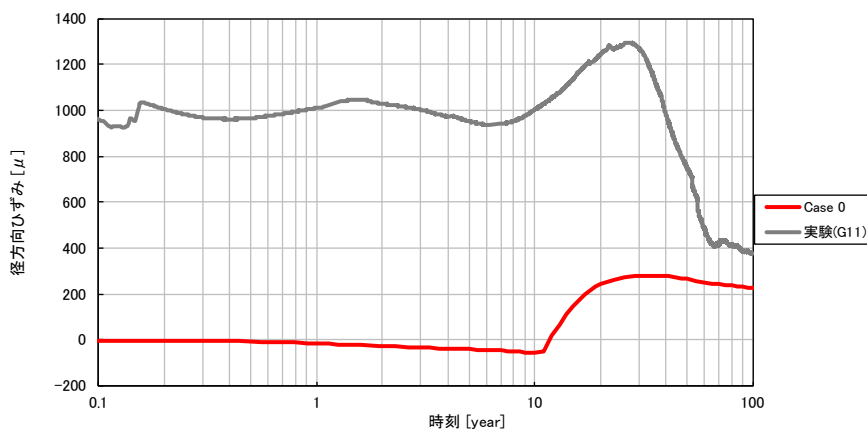


図 6.1.1-12 Case 0 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

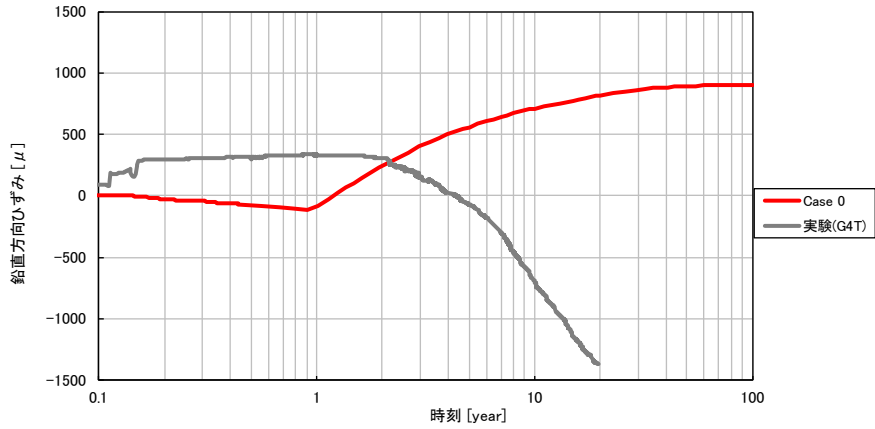


図 6.1.1-13 Case 0 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

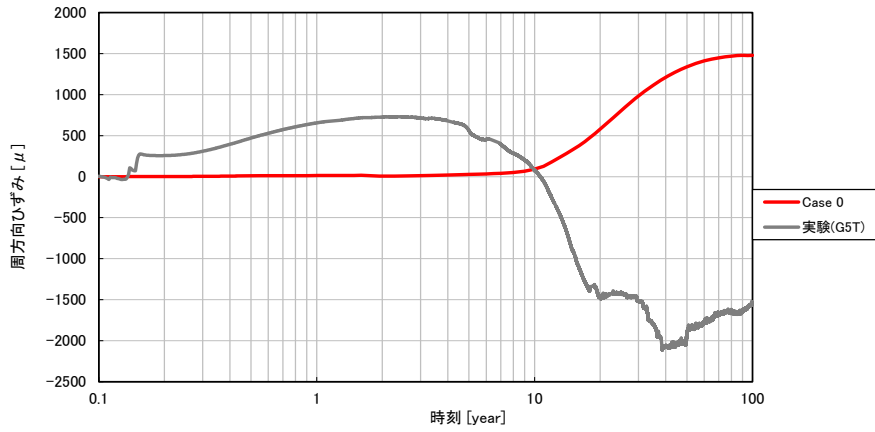


図 6.1.1-14 Case 0 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(2) Case 1

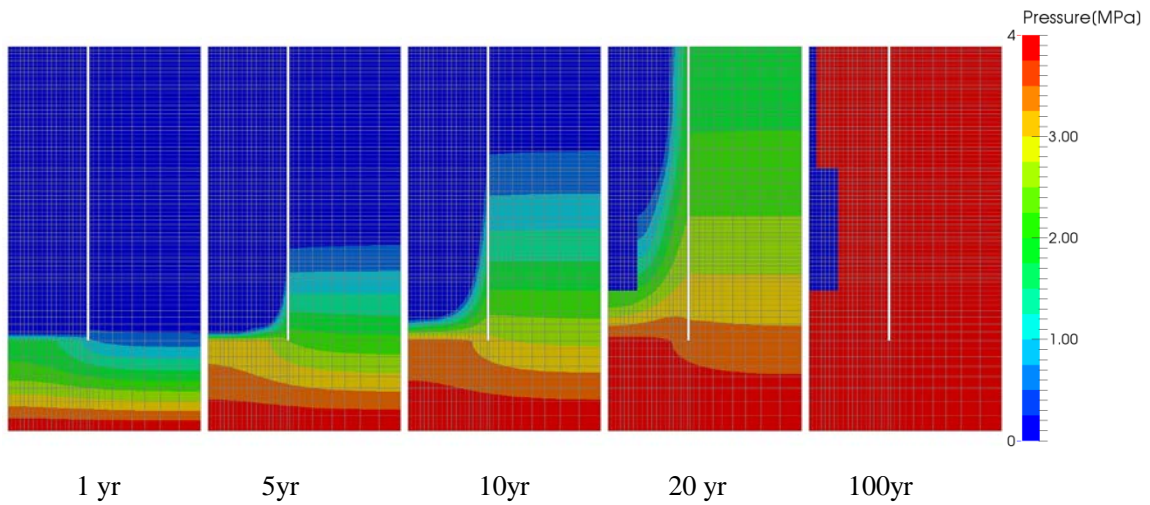


図 6.1.1-15 Case 1 岩盤部分・間隙水圧分布

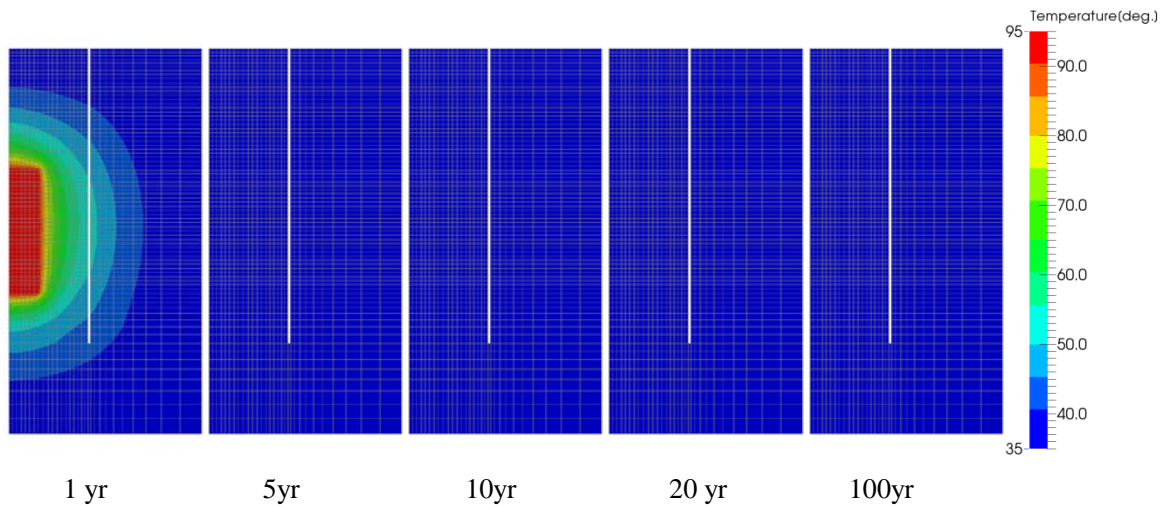


図 6.1.1-16 Case 1 岩盤部分・温度分布

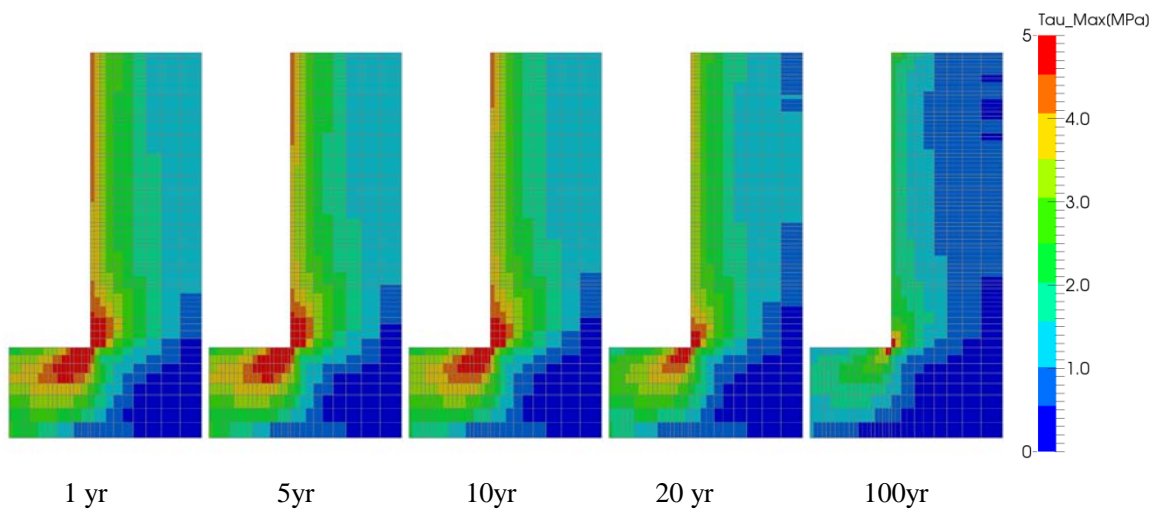


図 6.1.1-17 Case 1 岩盤部分・主せん断応力分布

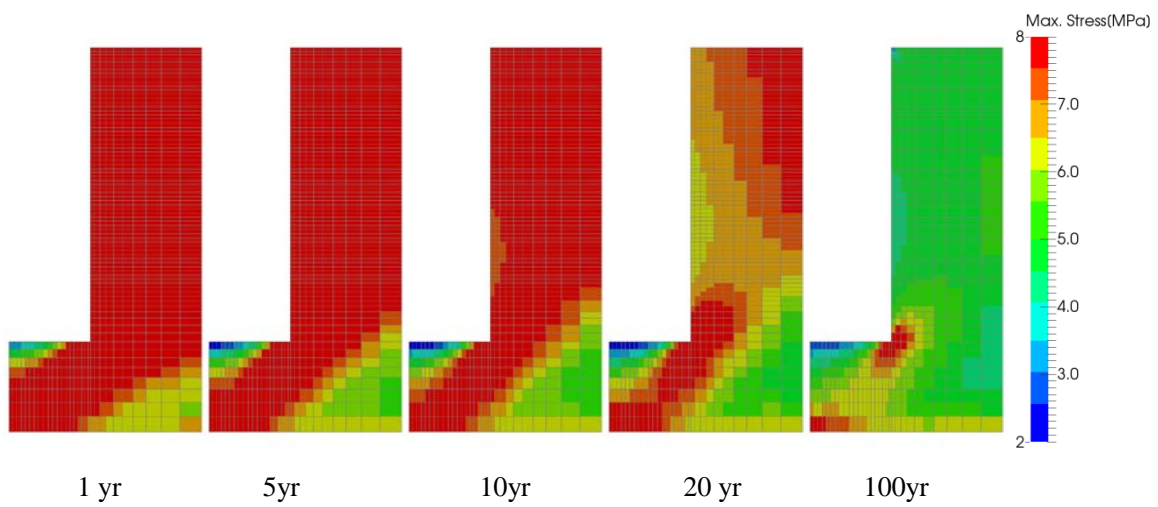


図 6.1.1-18 Case 1 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

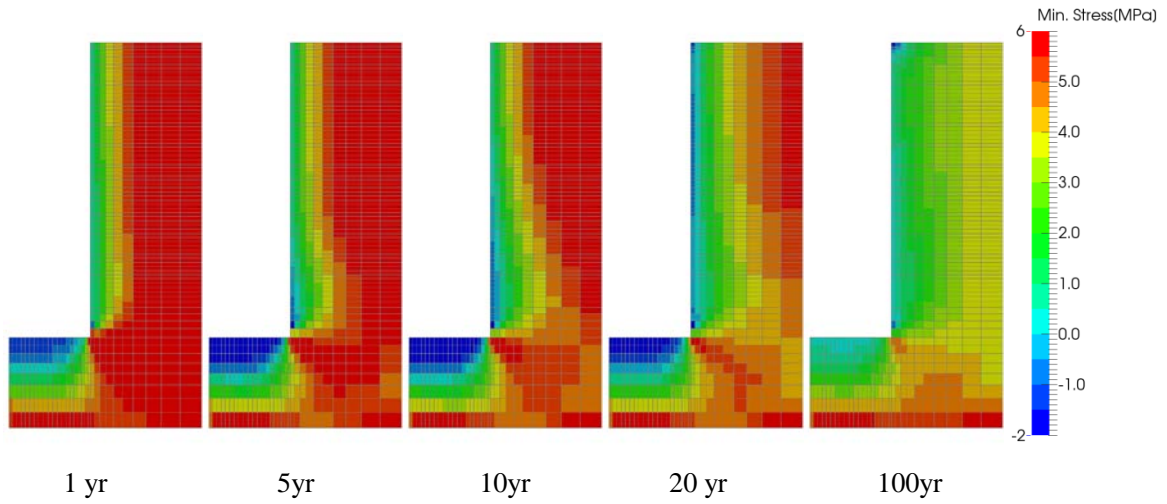


図 6.1.1-19 Case 1 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

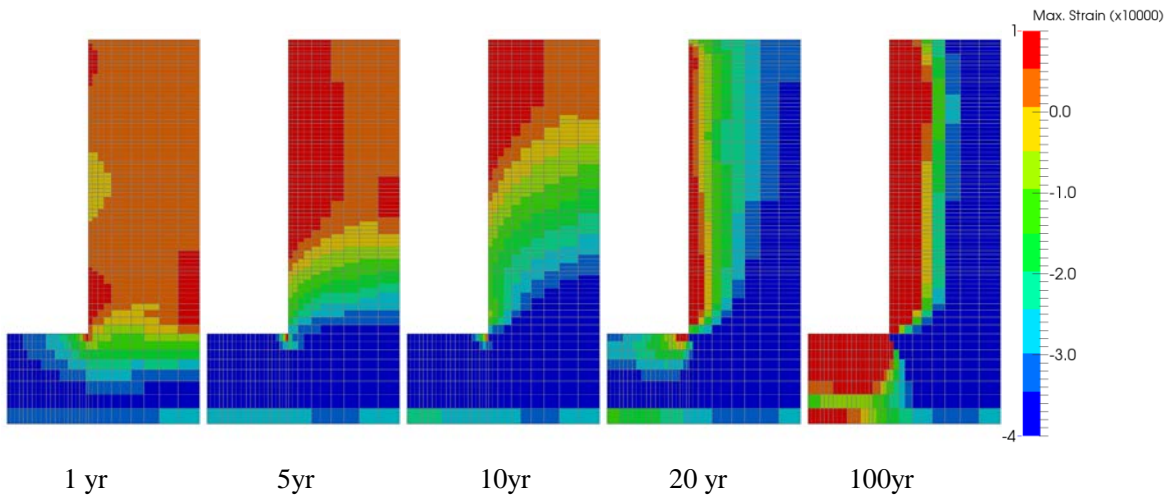


図 6.1.1-20 Case 1 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

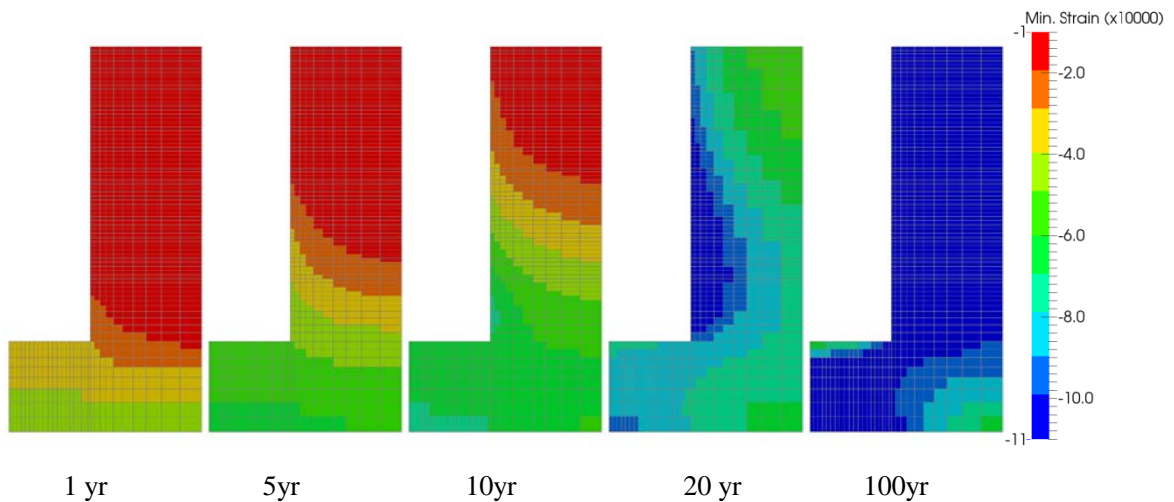


図 6.1.1-21 Case 1 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

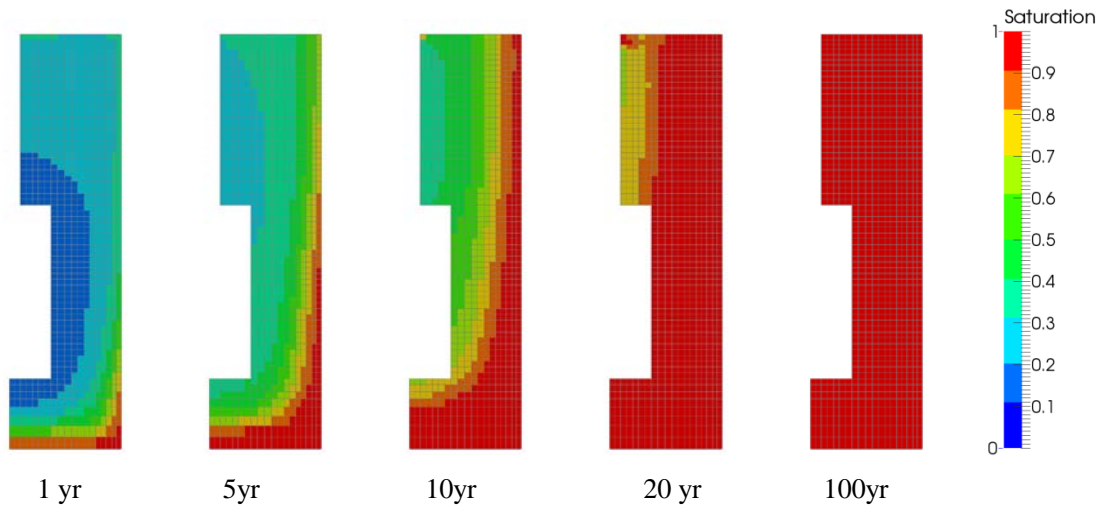


図 6.1.1-22 Case 1 緩衝材部分・飽和度分布

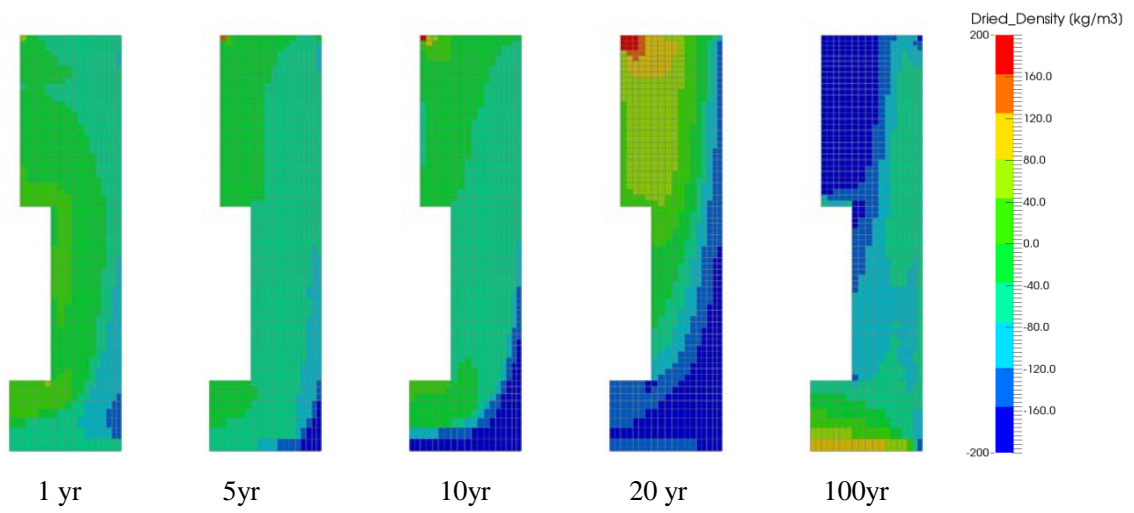


図 6.1.1-23 Case 1 緩衝材部分・乾燥密度分布

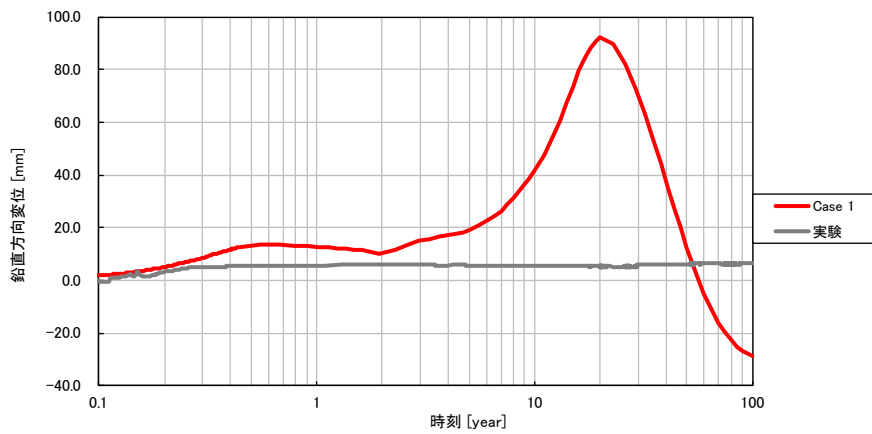


図 6.1.1-24 Case 1 鉛直方向の変位時刻歴

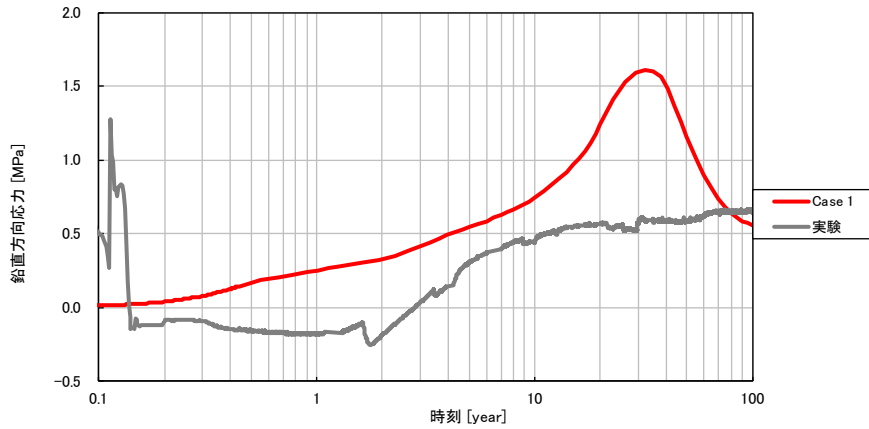


図 6.1.1-25 Case 1 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

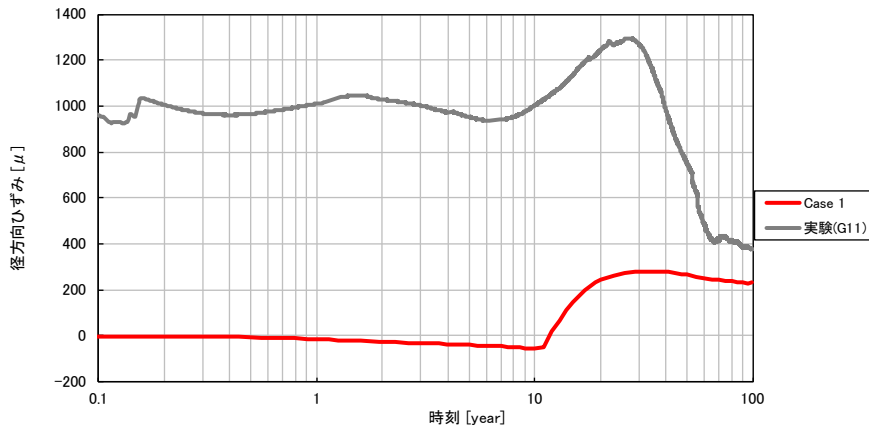


図 6.1.1-26 Case 1 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

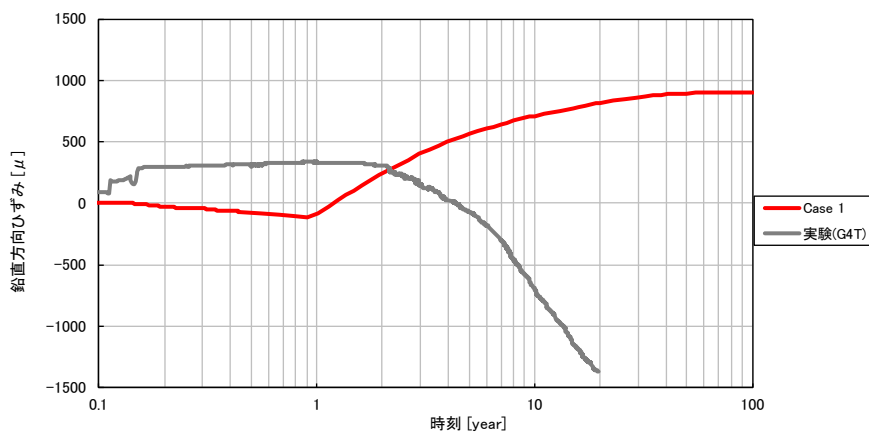


図 6.1.1-27 Case 1 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

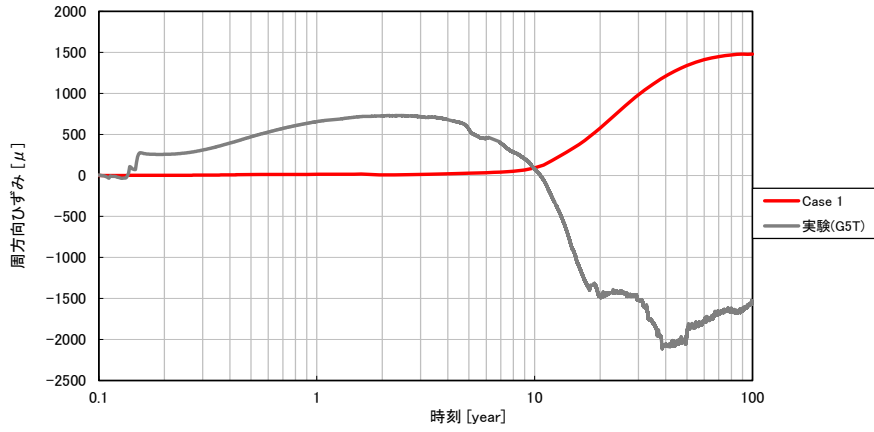


図 6.1.1-28 Case 1 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(3) Case 2

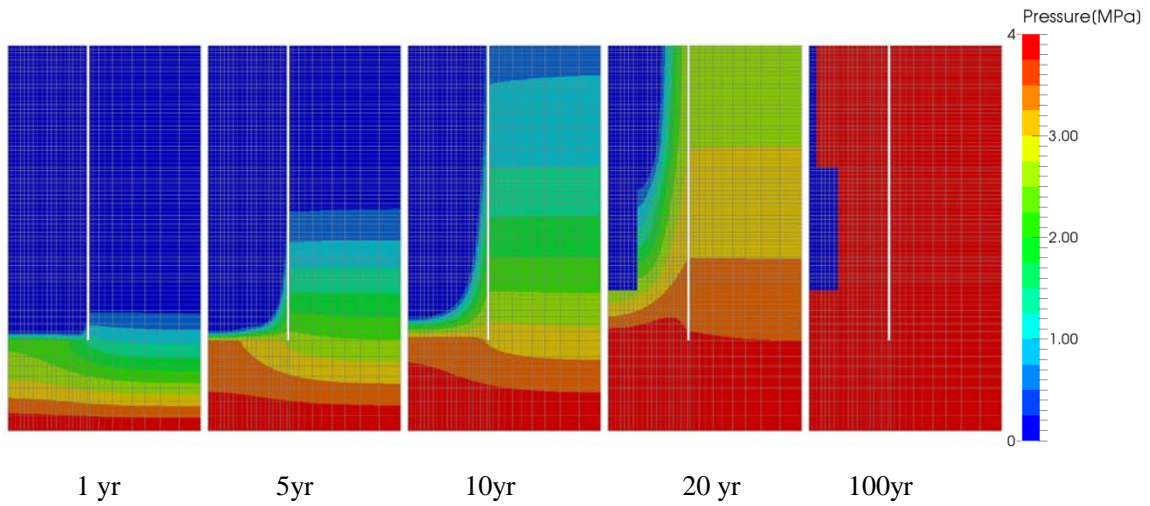


図 6.1.1-29 Case 2 岩盤部分・間隙水圧分布

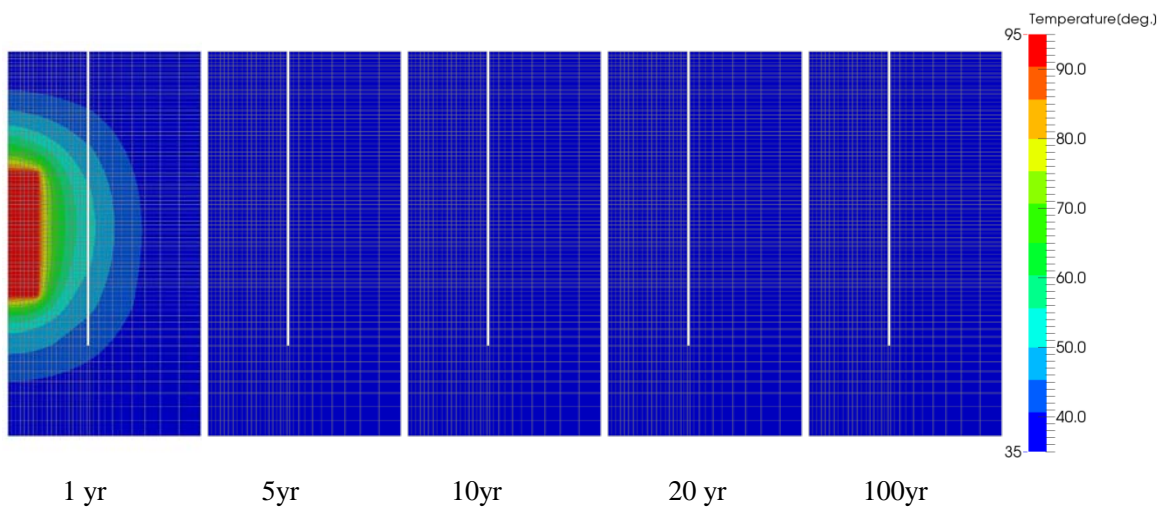


図 6.1.1-30 Case 2 岩盤部分・温度分布

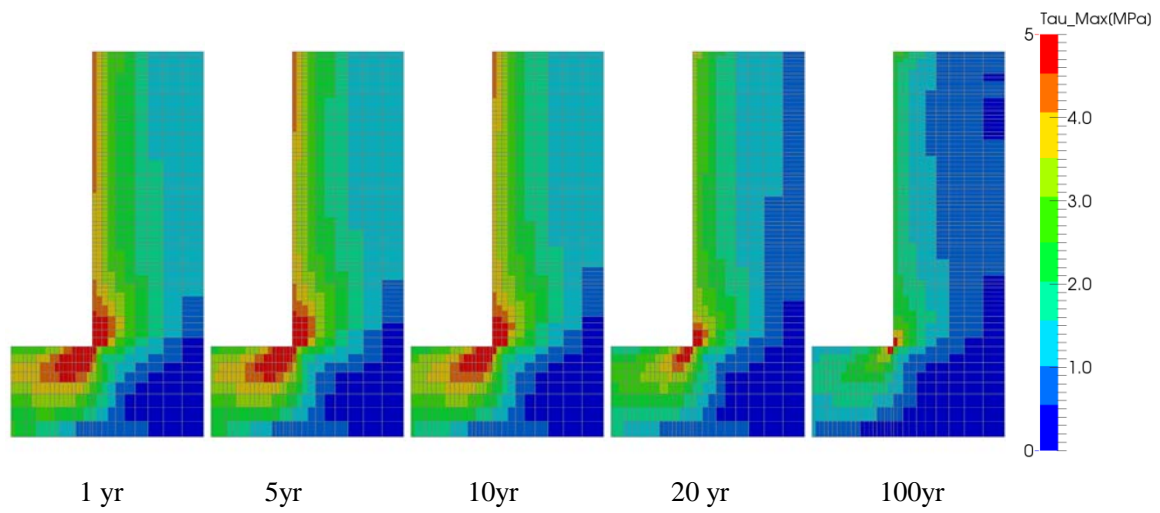


図 6.1.1-31 Case 2 岩盤部分・主せん断応力分布

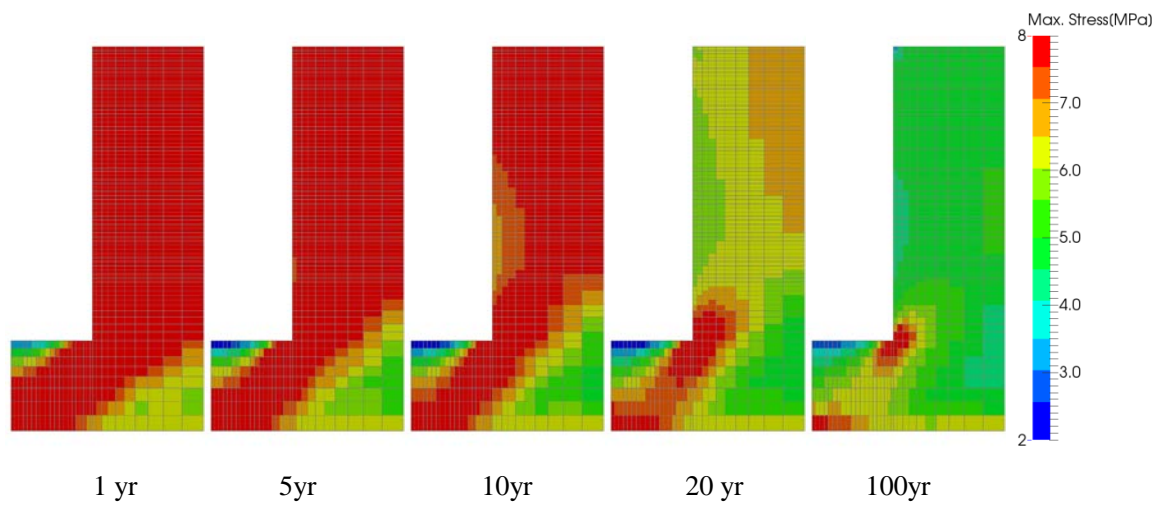


図 6.1.1-32 Case 2 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

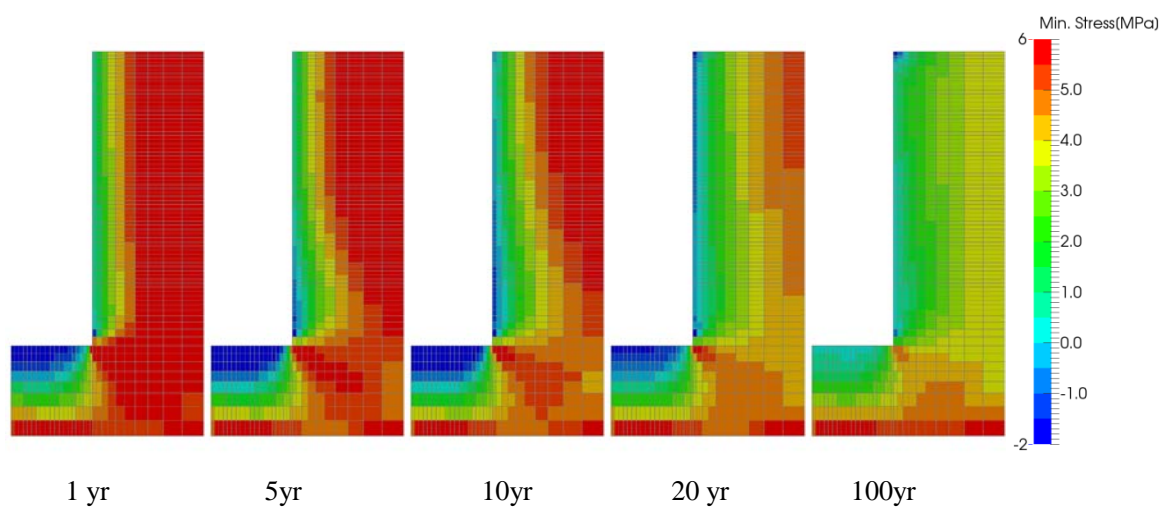


図 6.1.1-33 Case 2 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

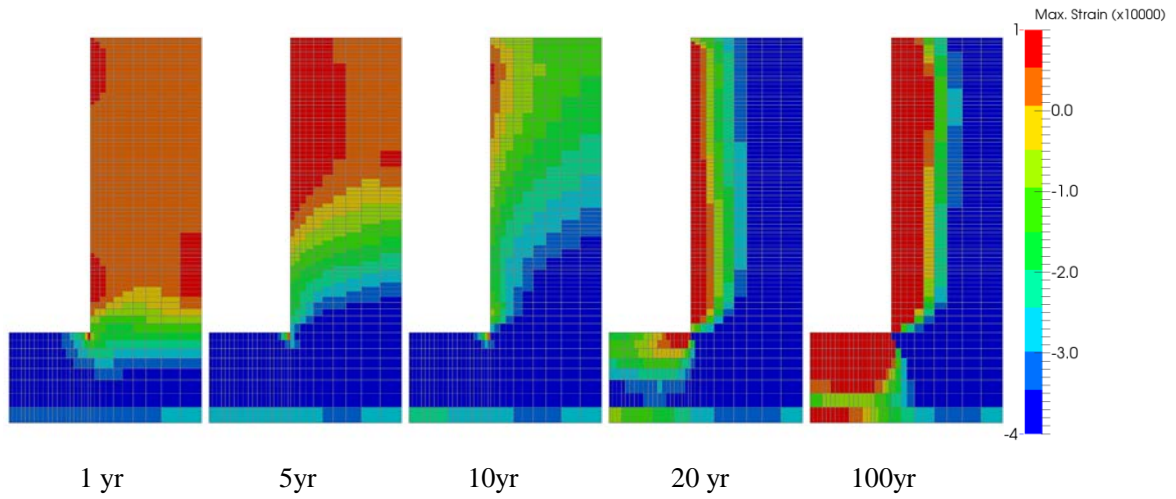


図 6.1.1-34 Case 2 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

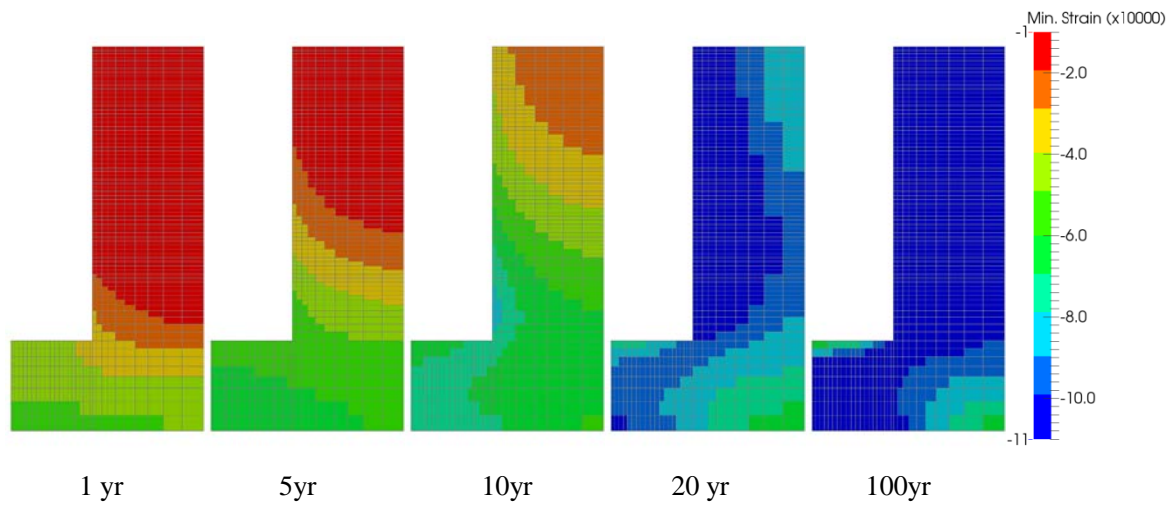


図 6.1.1-35 Case 2 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

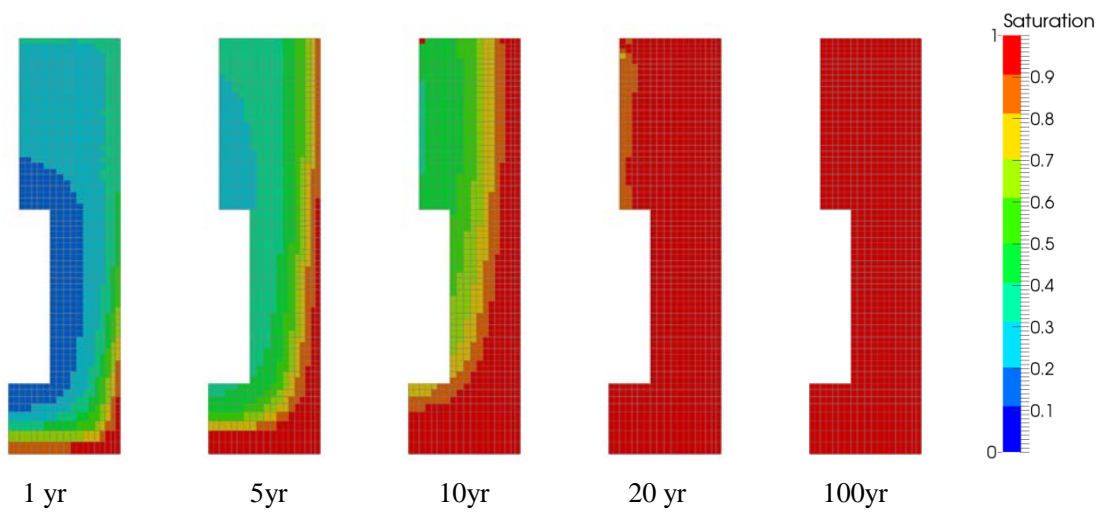


図 6.1.1-36 Case 2 緩衝材部分・飽和度分布

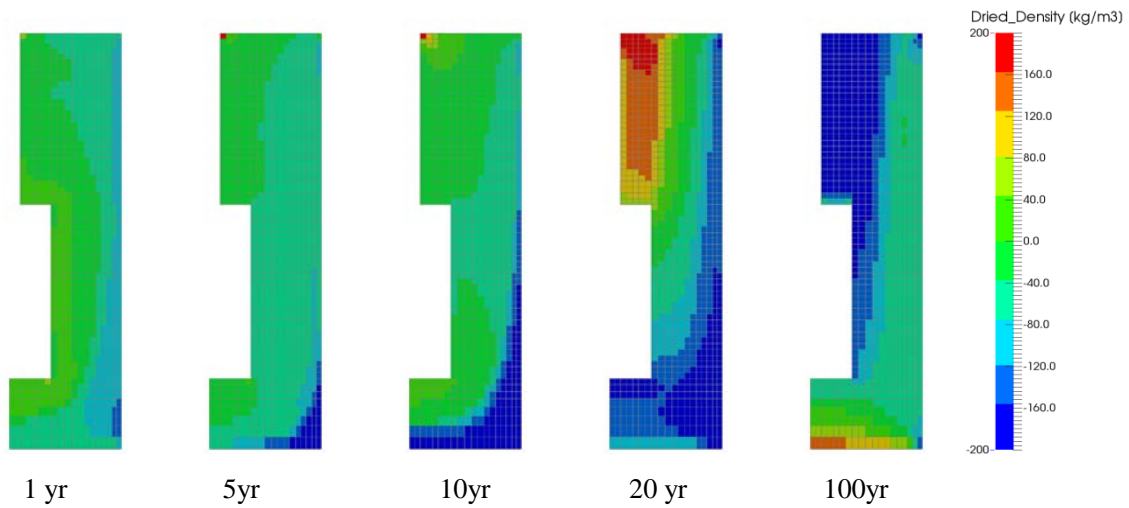


図 6.1.1-37 Case 2 緩衝材部分・乾燥密度分布

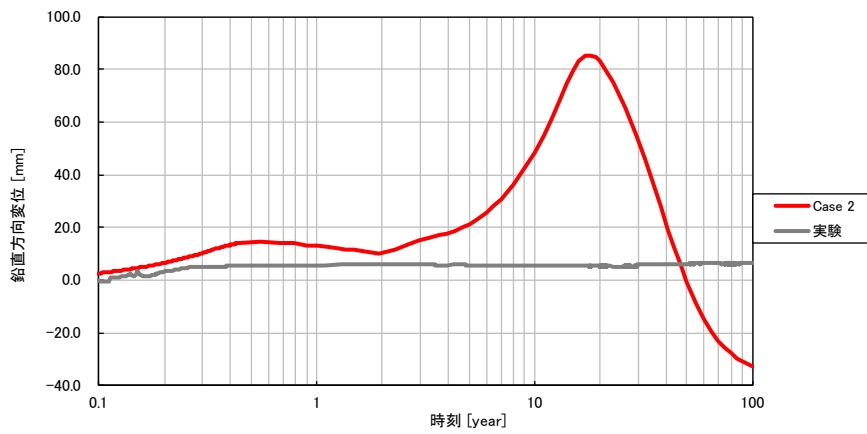


図 6.1.1-38 Case 2 鉛直方向の変位時刻歴

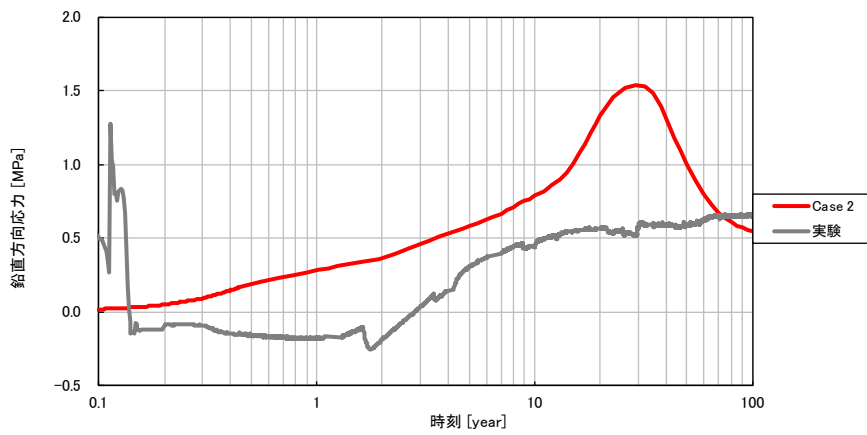


図 6.1.1-39 Case 2 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

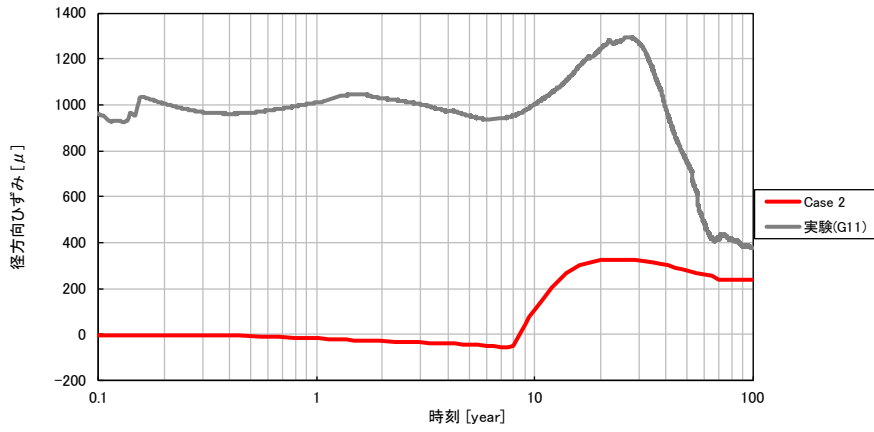


図 6.1.1-40 Case 2 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

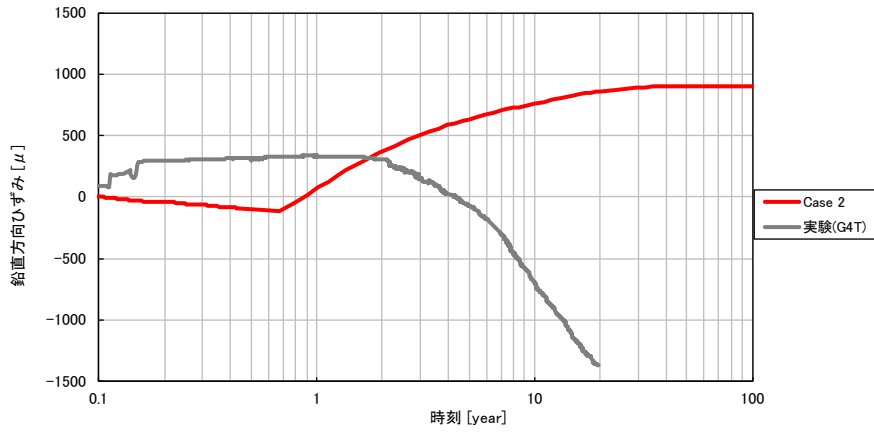


図 6.1.1-41 Case 2 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

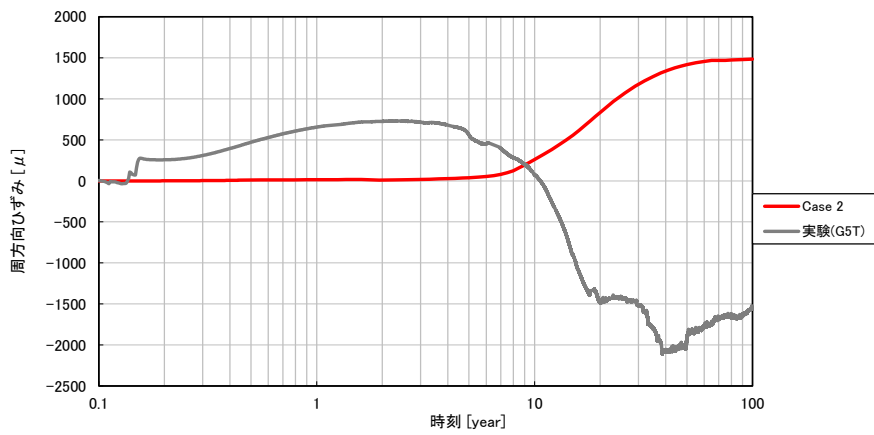


図 6.1.1-42 Case 2 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(4) Case 3

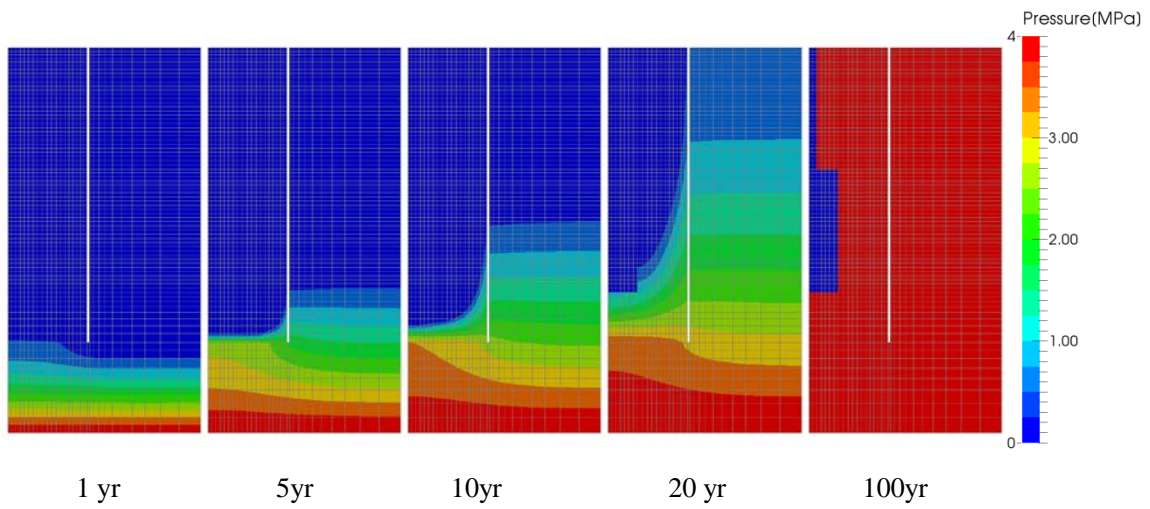


図 6.1.1-43 Case 3 岩盤部分・間隙水圧分布

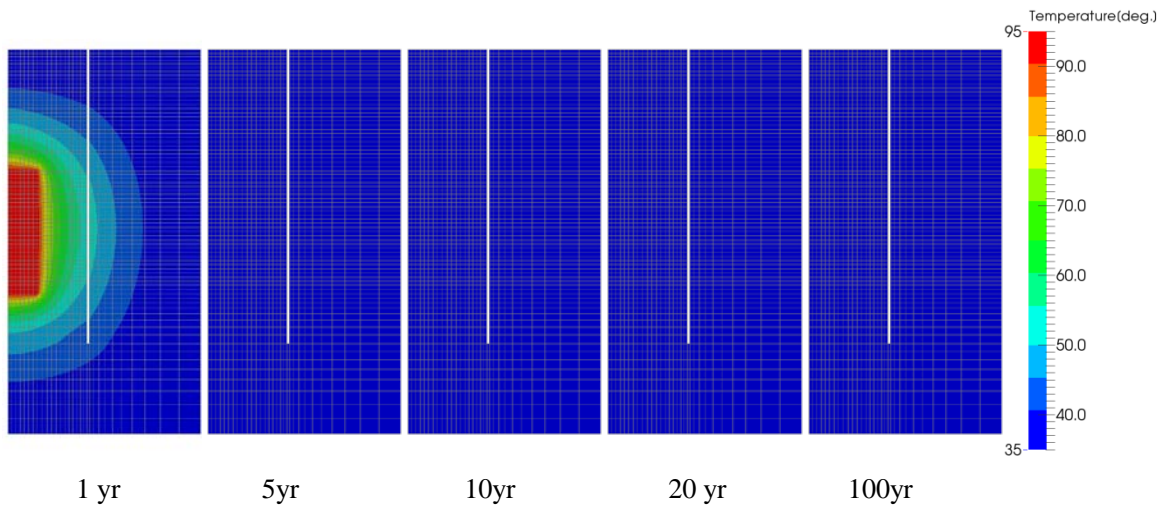


図 6.1.1-44 Case 3 岩盤部分・温度分布

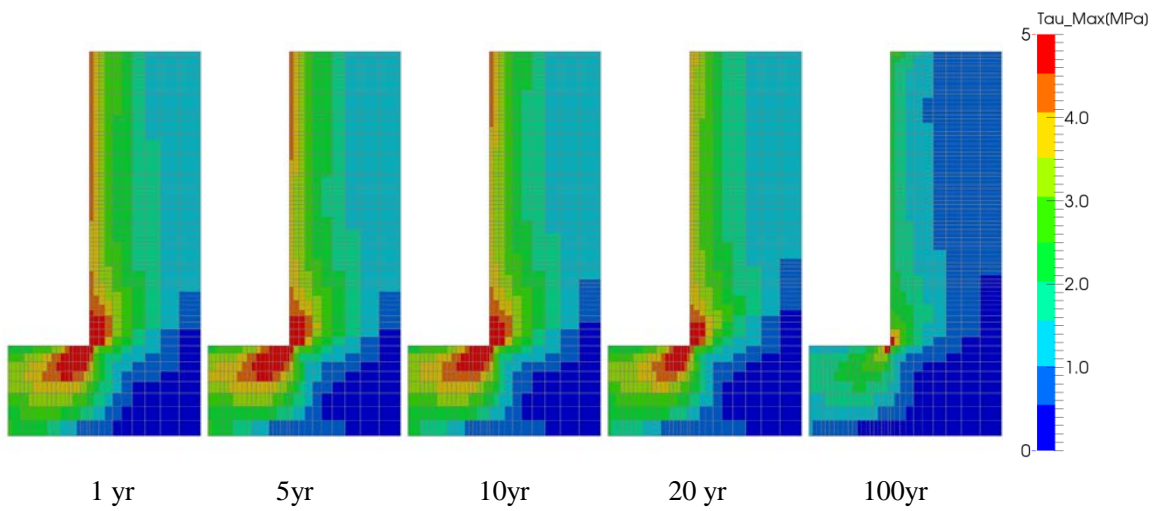


図 6.1.1-45 Case 3 岩盤部分・主せん断応力分布

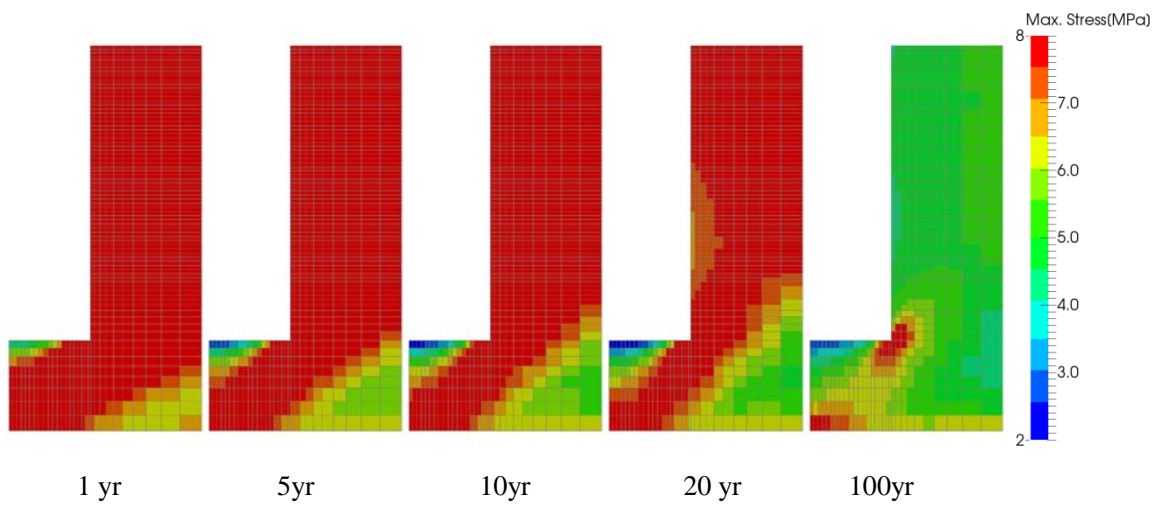


図 6.1.1-46 Case 3 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

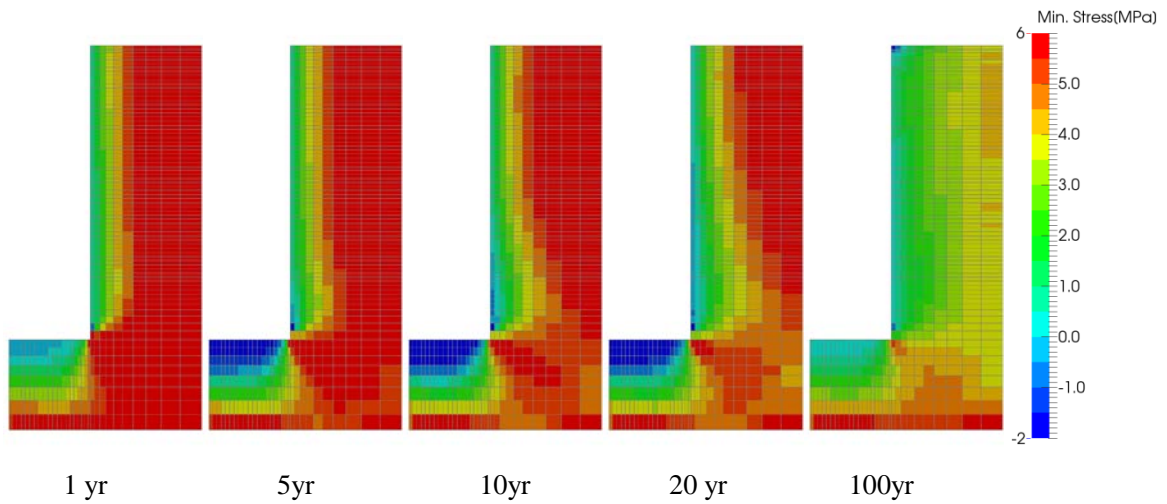


図 6.1.1-47 Case 3 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

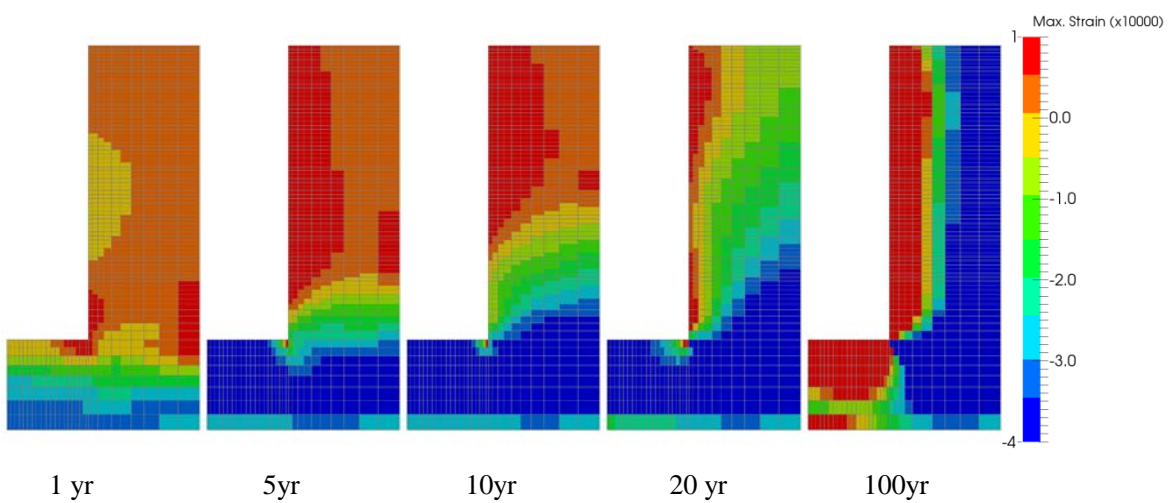


図 6.1.1-48 Case 3 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

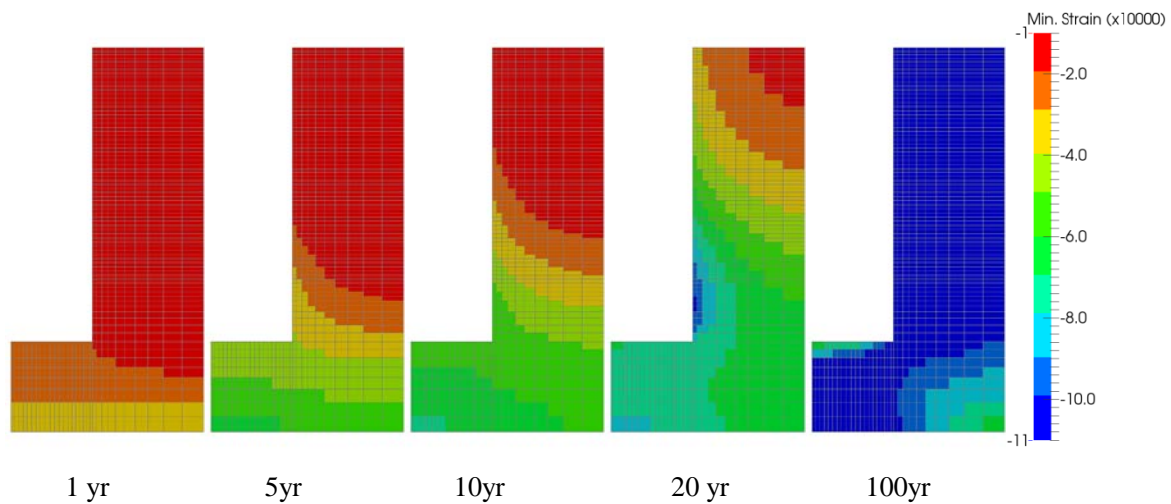


図 6.1.1-49 Case 3 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

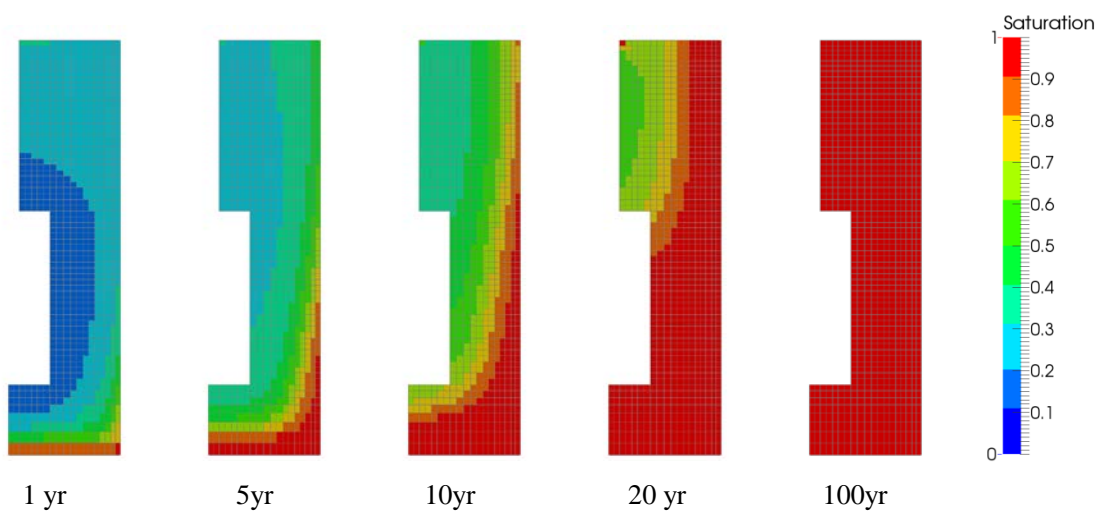


図 6.1.1-50 Case 3 緩衝材部分・飽和度分布

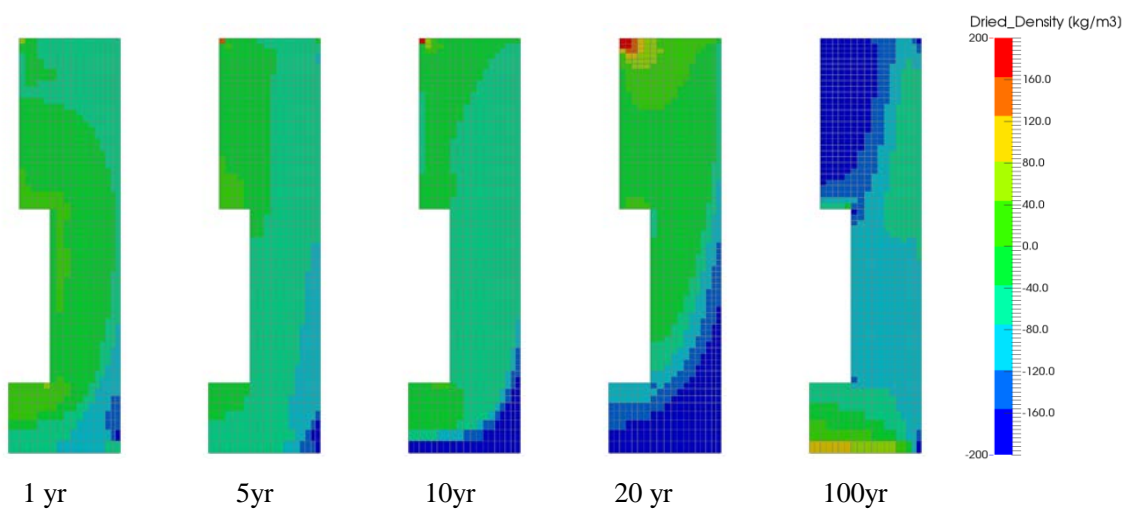


図 6.1.1-51 Case 3 緩衝材部分・乾燥密度分布

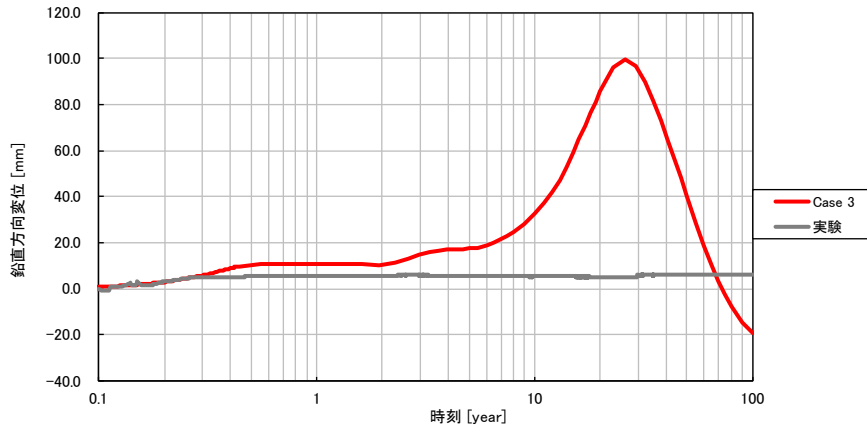


図 6.1.1-52 Case 3 鉛直方向の変位時刻歴

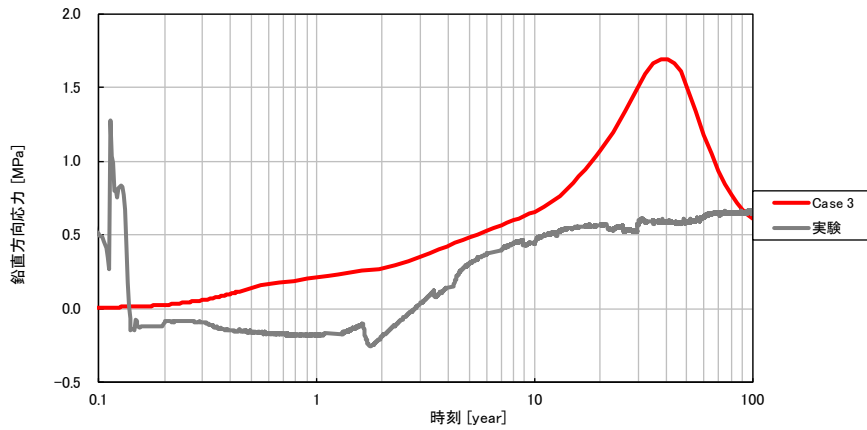


図 6.1.1-53 Case 3 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

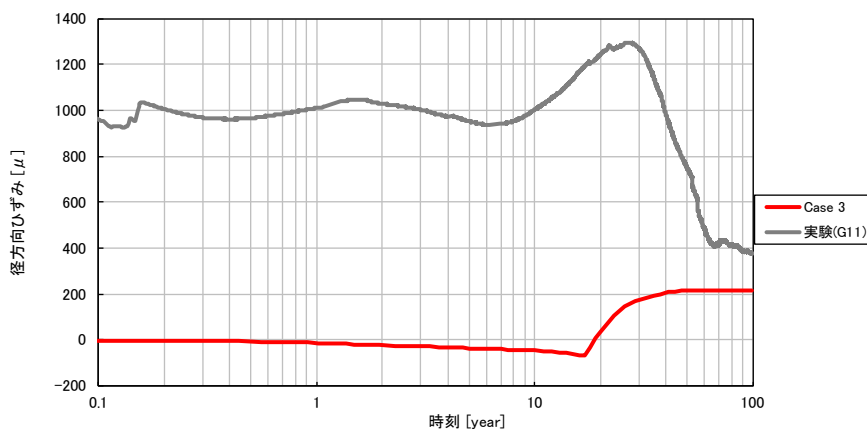


図 6.1.1-54 Case 3 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

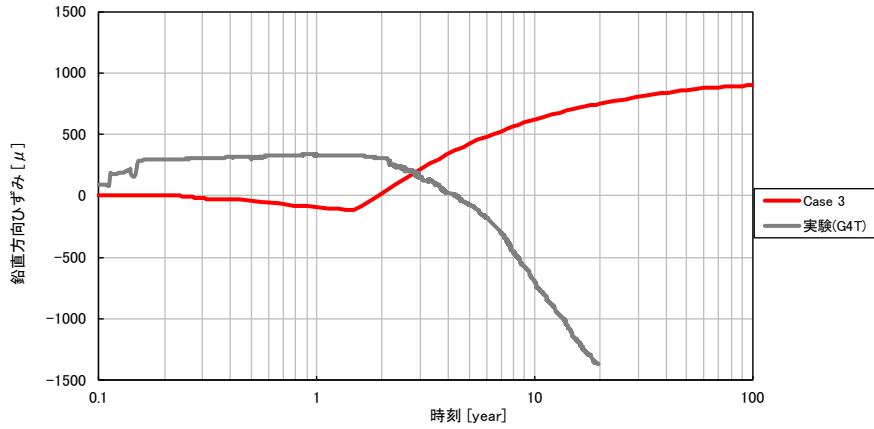


図 6.1.1-55 Case 3 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

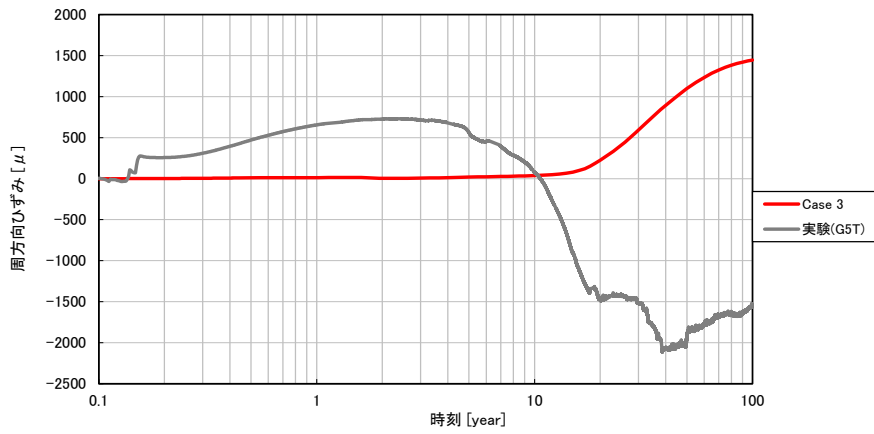


図 6.1.1-56 Case 3 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(5) Case 4

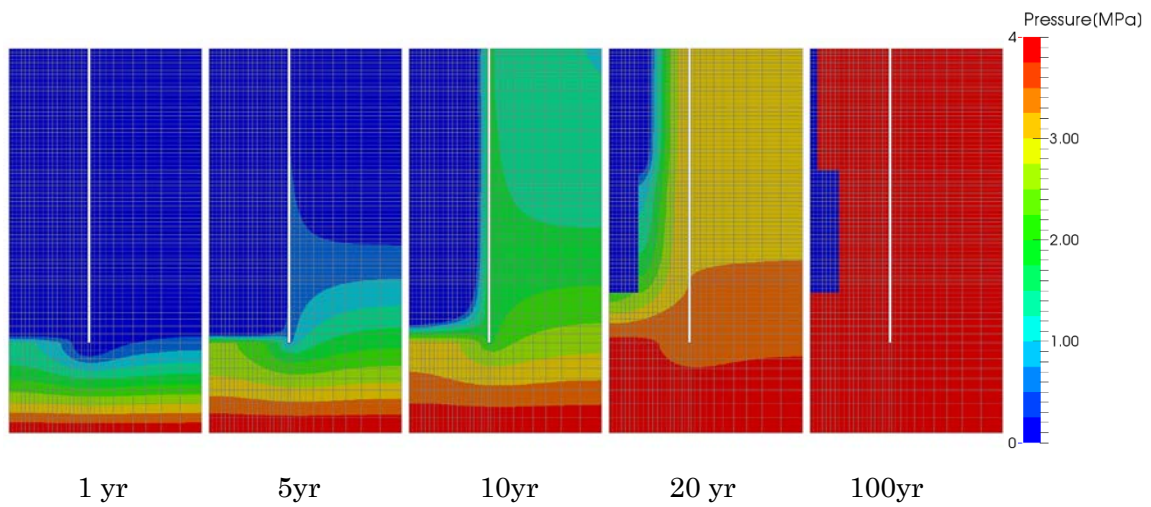


図 6.1.1-57 Case 4 岩盤部分・間隙水圧分布

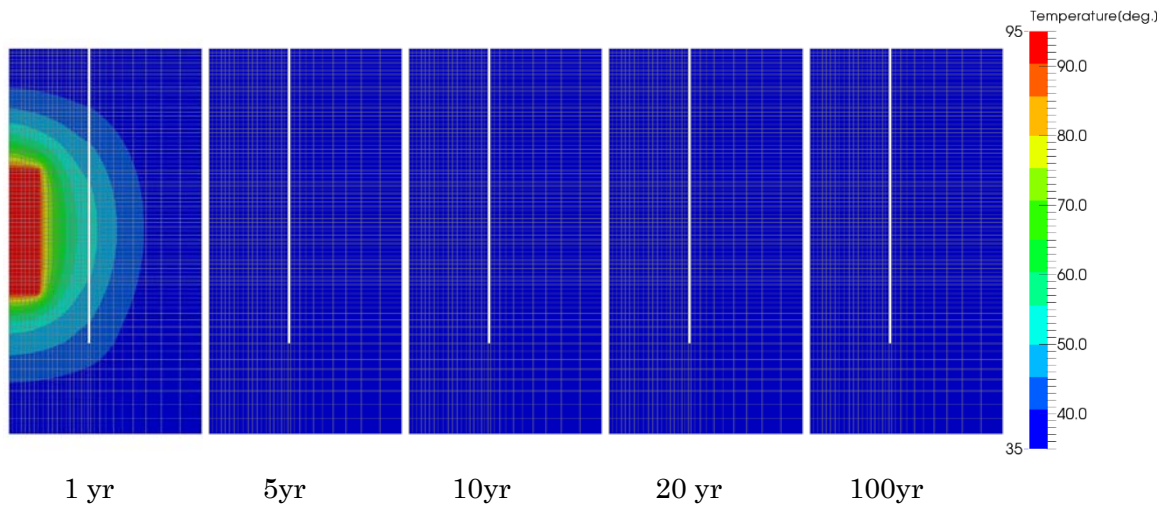


図 6.1.1-58 Case 4 岩盤部分・温度分布

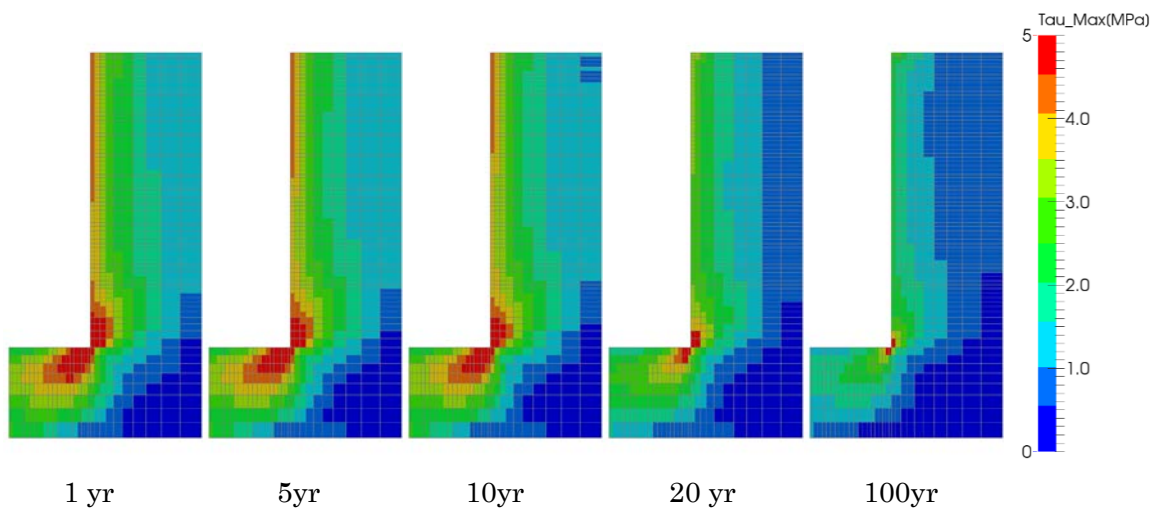


図 6.1.1-59 Case 4 岩盤部分・主せん断応力分布

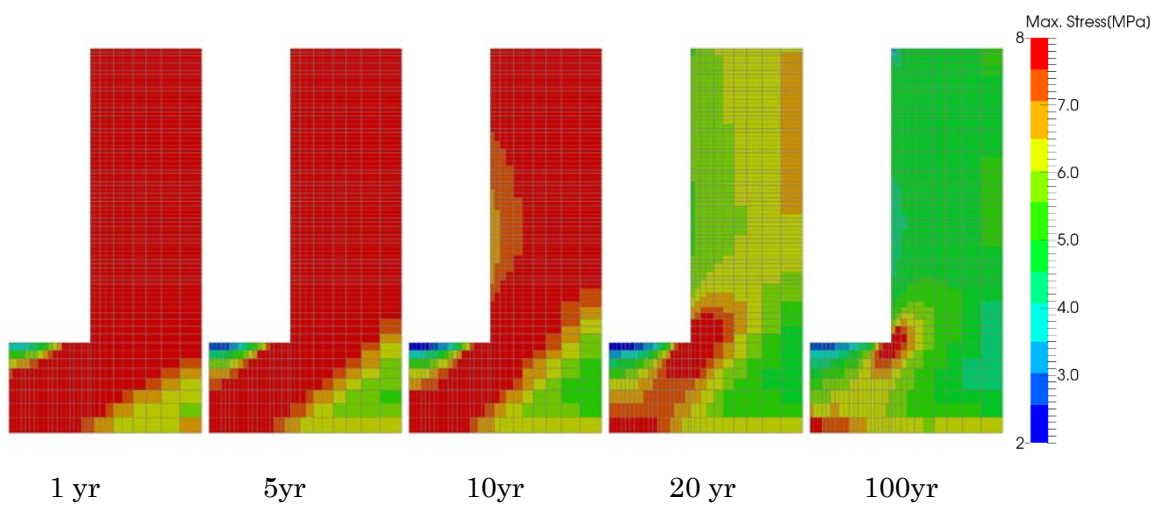


図 6.1.1-60 Case 4 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

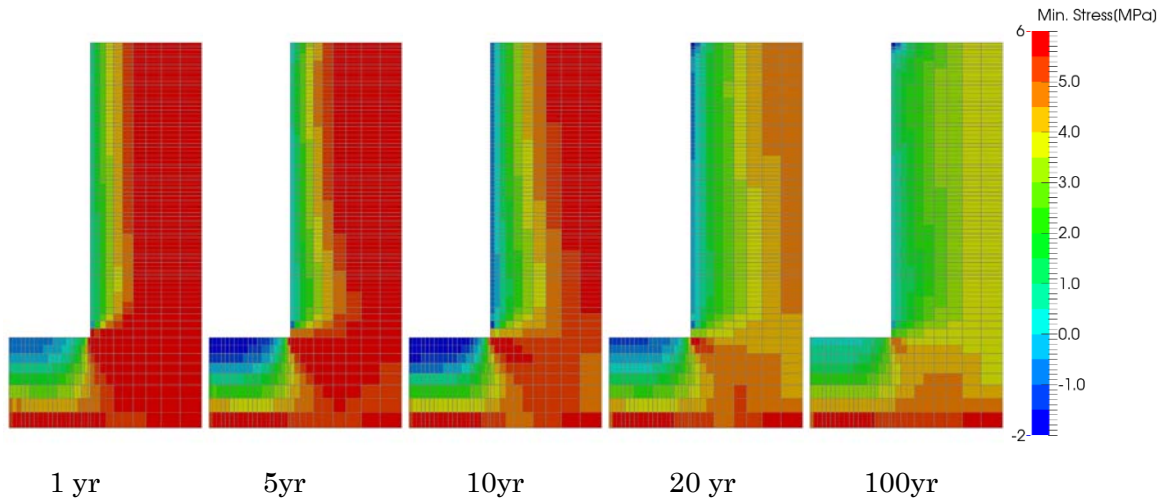


図 6.1.1-61 Case 4 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

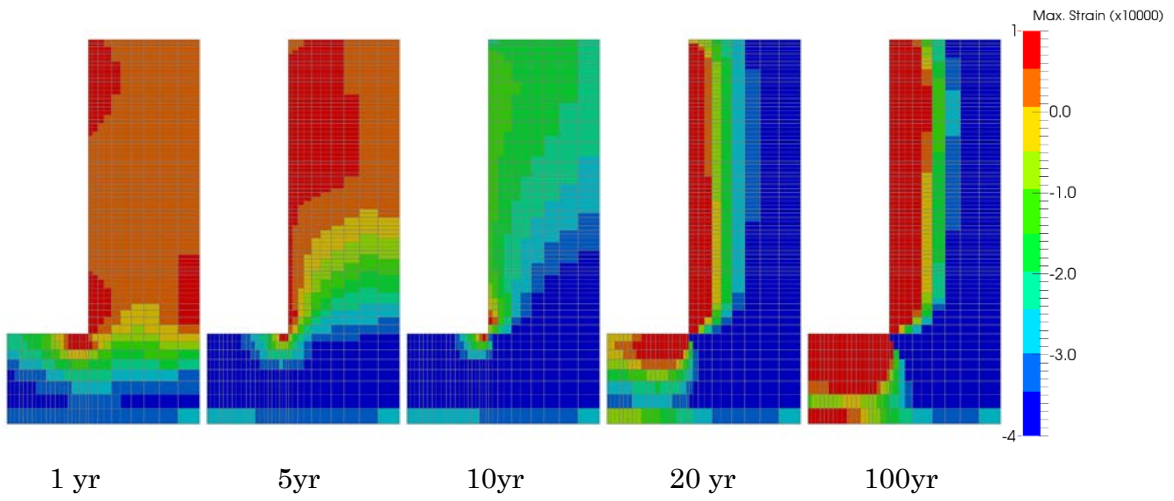


図 6.1.1-62 Case 4 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

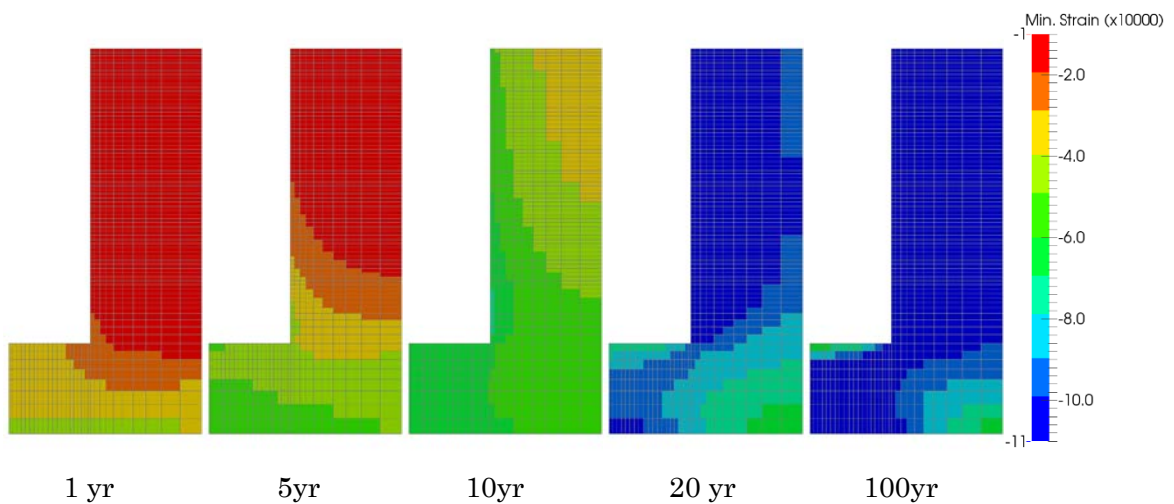


図 6.1.1-63 Case 4 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

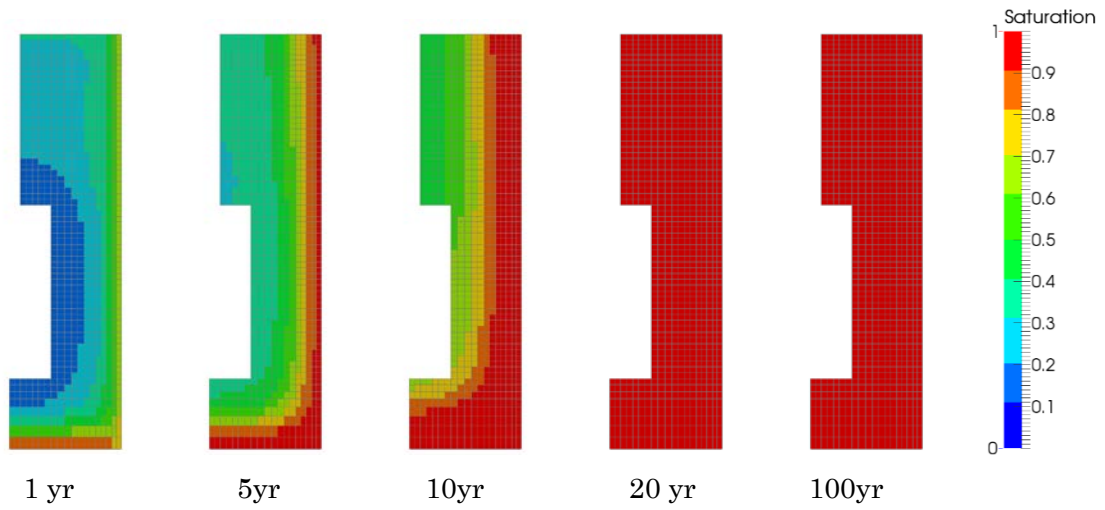


図 6.1.1-64 Case 4 緩衝材部分・飽和度分布

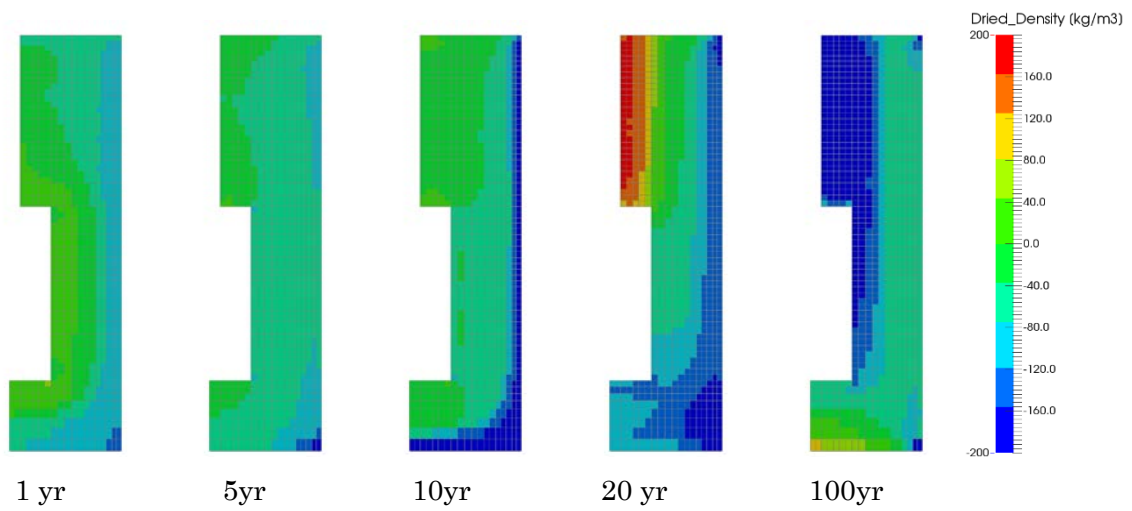


図 6.1.1-65 Case 4 緩衝材部分・乾燥密度分布

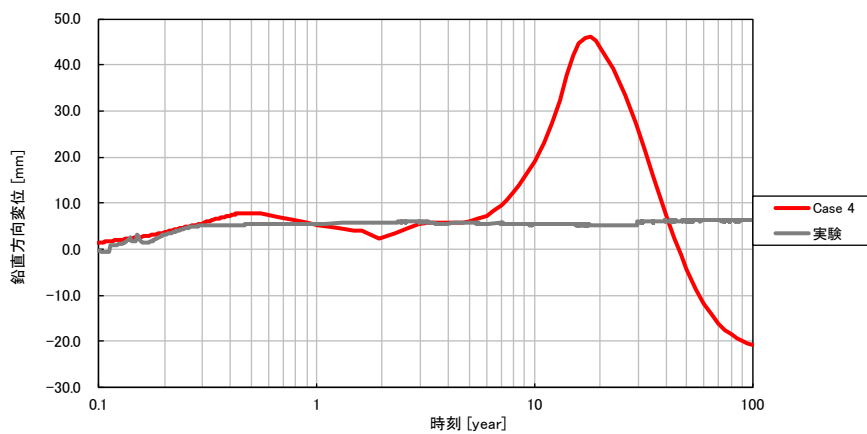


図 6.1.1-66 Case 4 鉛直方向の変位時刻歴

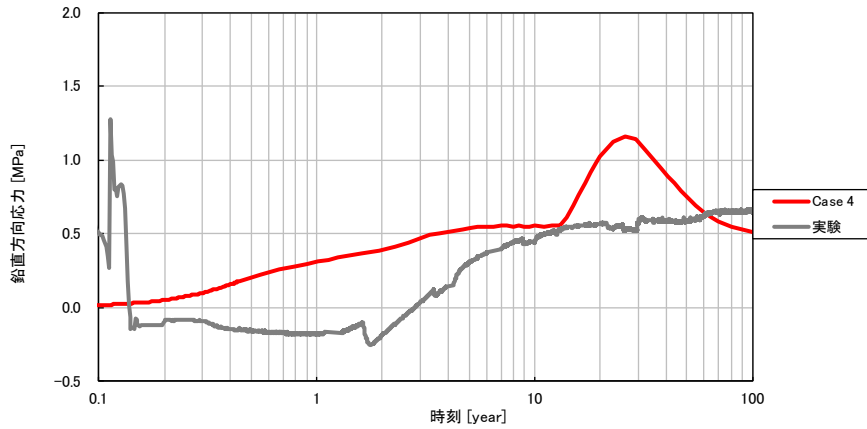


図 6.1.1-67 Case 4 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

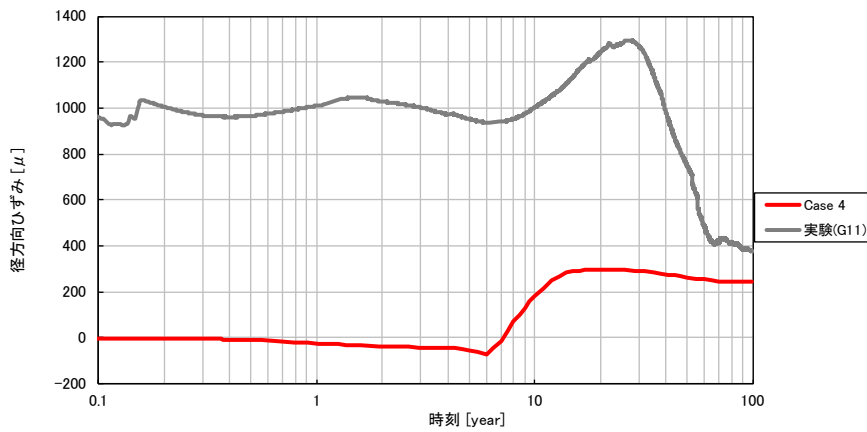


図 6.1.1-68 Case 4 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

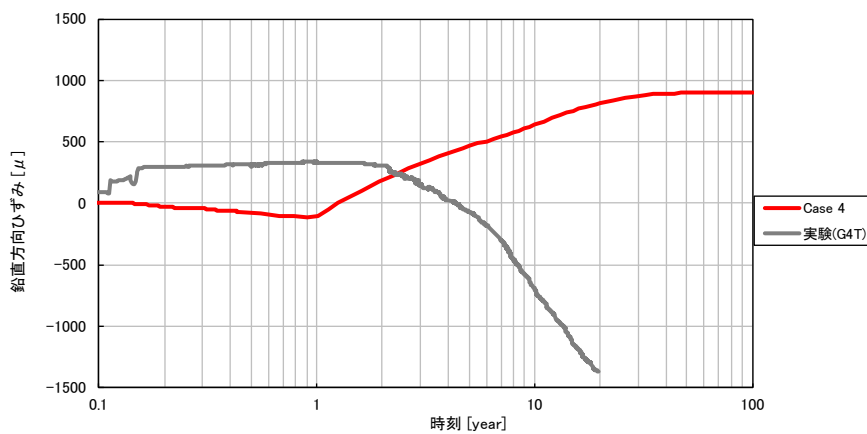


図 6.1.1-69 Case 4 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

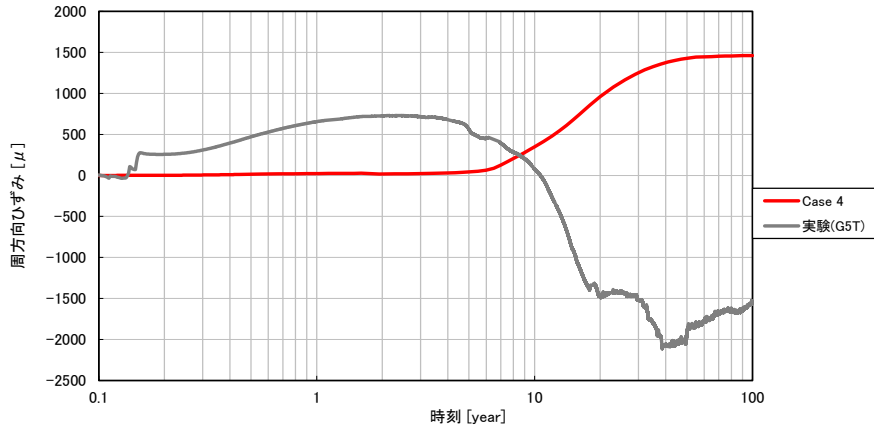


図 6.1.1-70 Case 4 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(6) Case 5

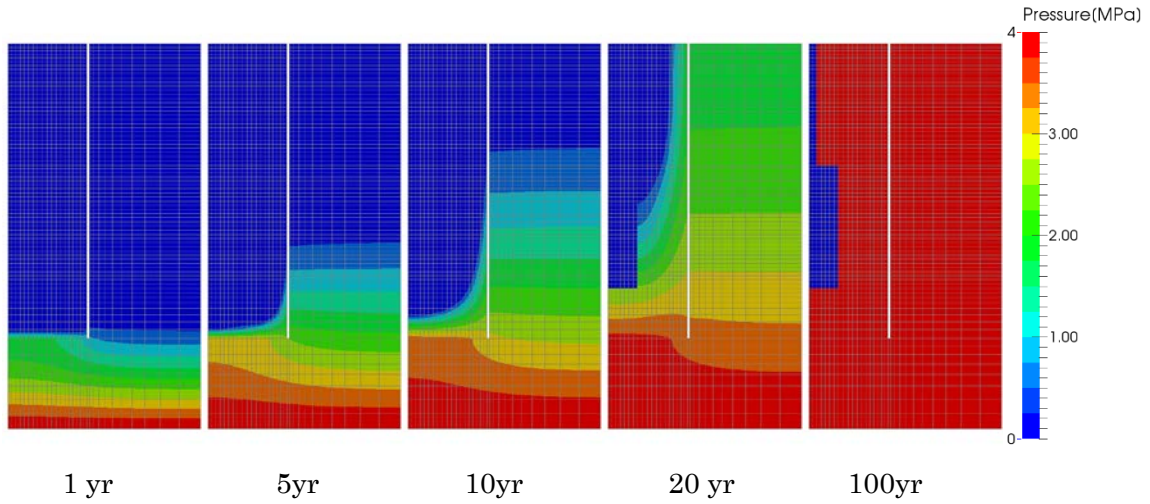


図 6.1.1-71 Case 5 岩盤部分・間隙水圧分布

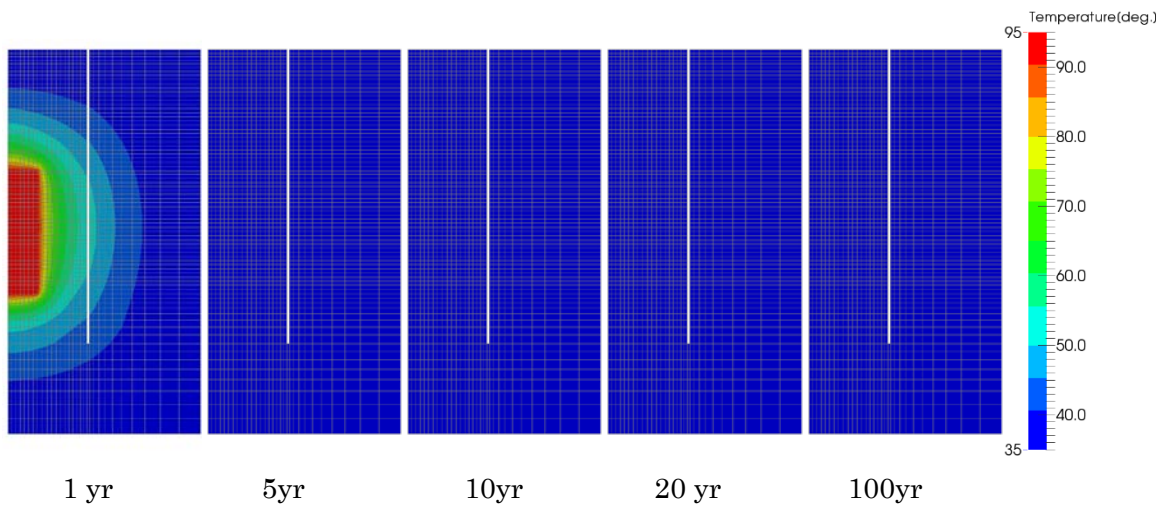


図 6.1.1-72 Case 5 岩盤部分・温度分布

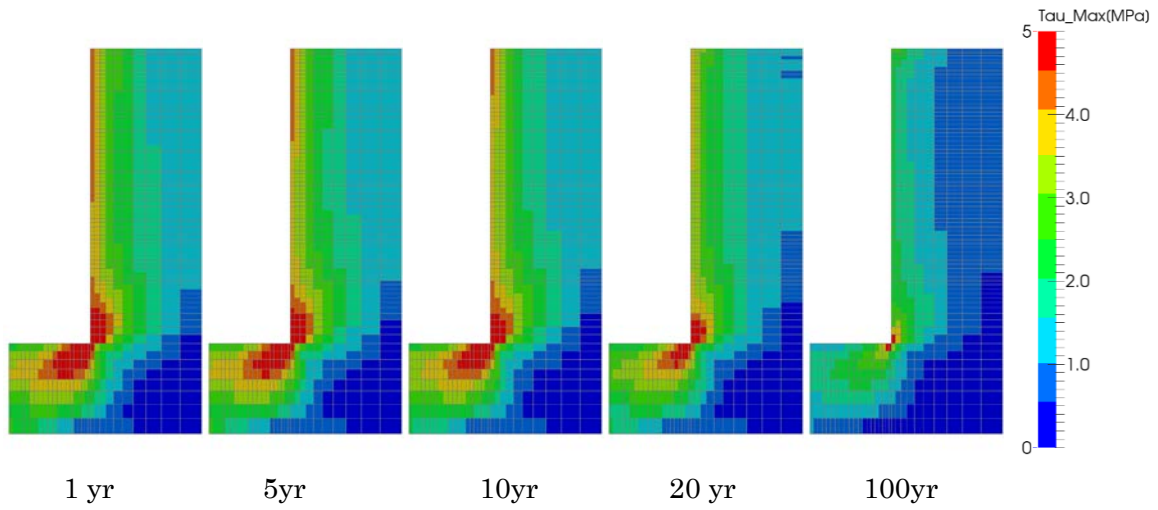


図 6.1.1-73 Case 5 岩盤部分・主せん断応力分布

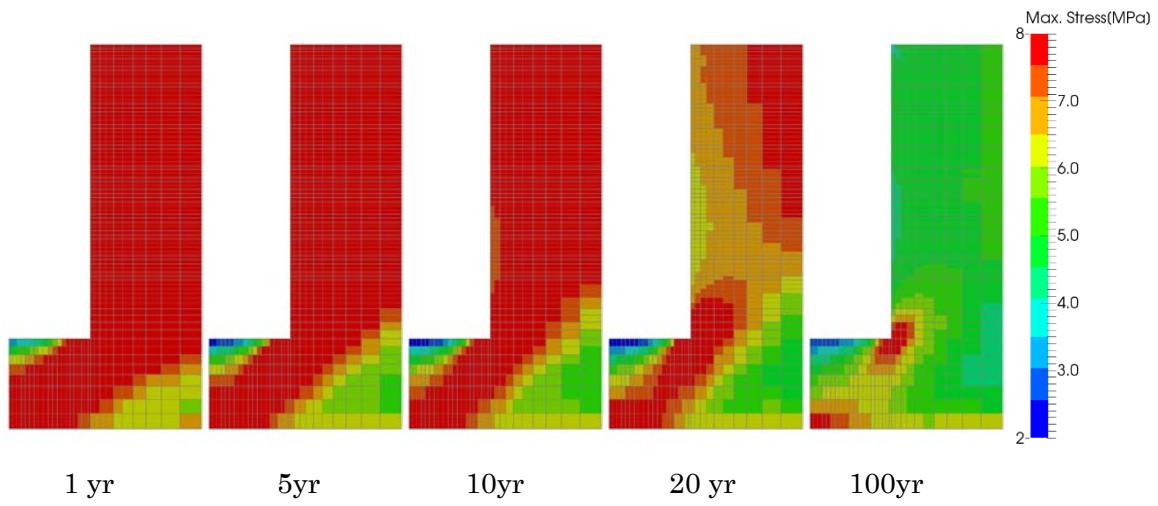


図 6.1.1-74 Case 5 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

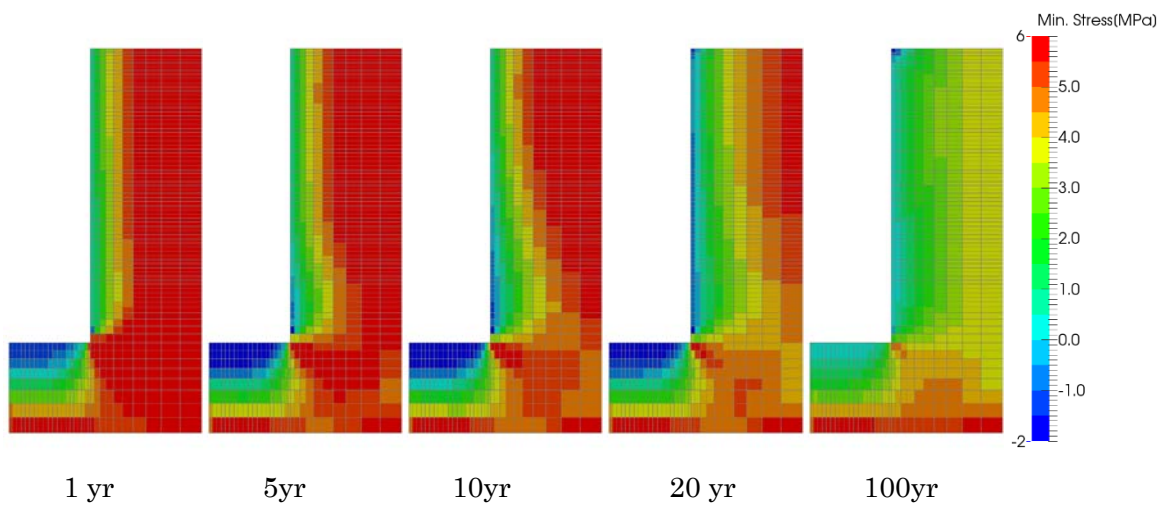


図 6.1.1-75 Case 5 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

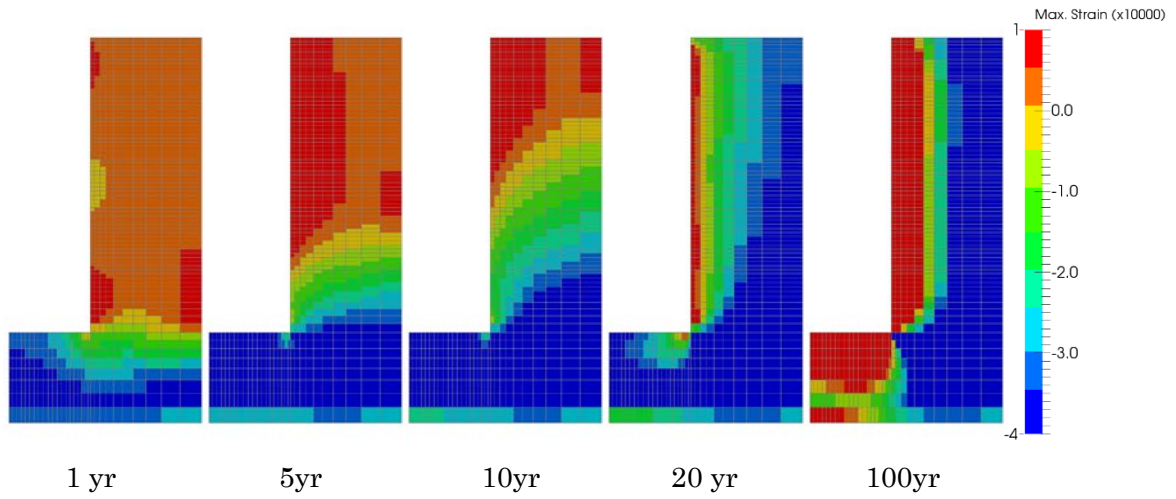


図 6.1.1-76 Case 5 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

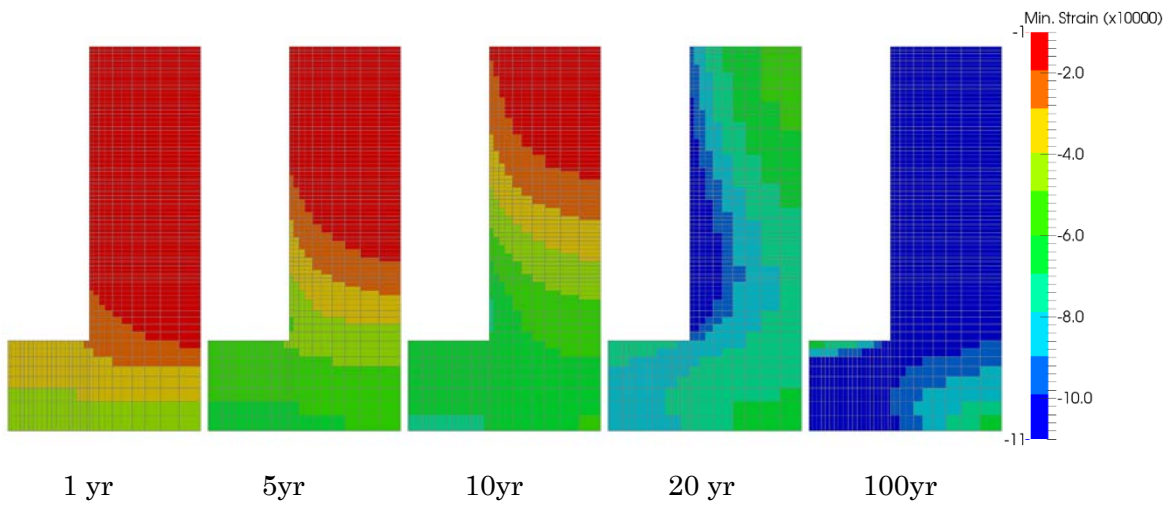


図 6.1.1-77 Case 5 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

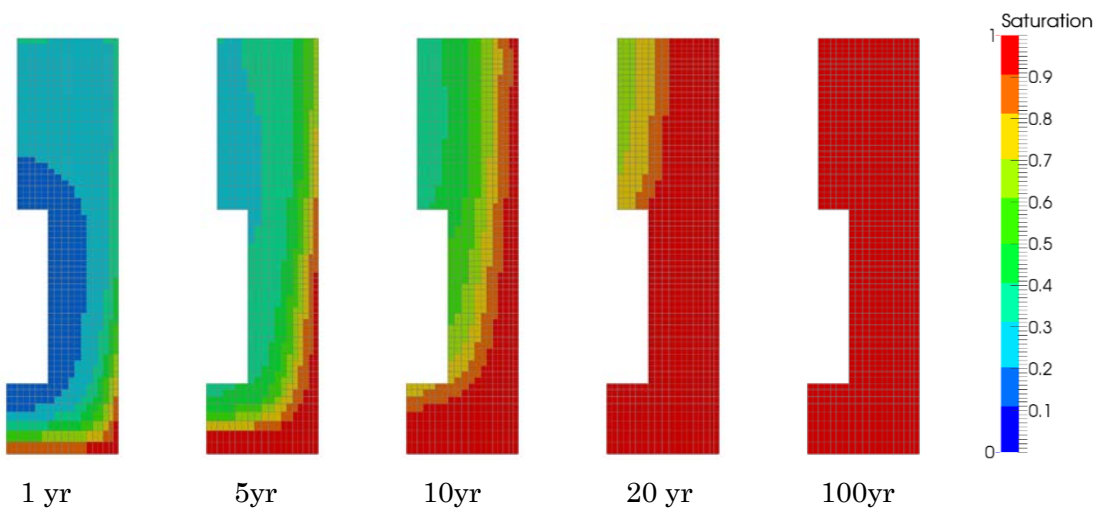


図 6.1.1-78 Case 5 緩衝材部分・飽和度分布

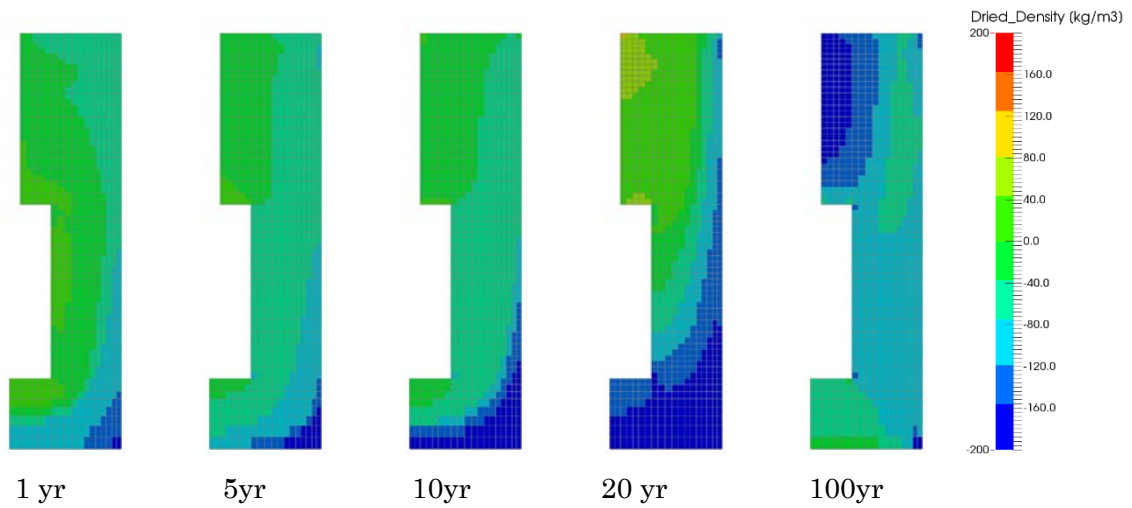


図 6.1.1-79 Case 5 緩衝材部分・乾燥密度分布

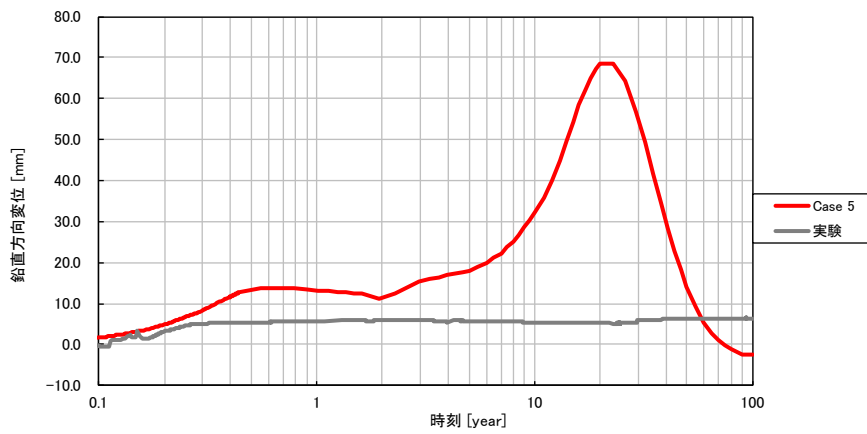


図 6.1.1-80 Case 5 鉛直方向の変位時刻歴

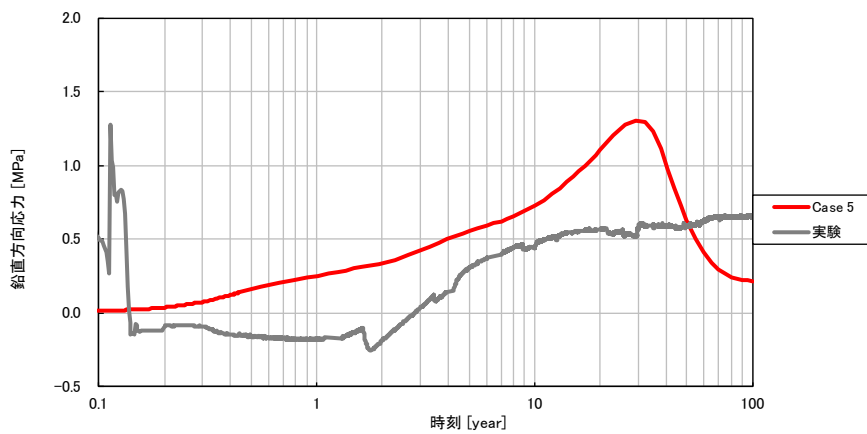


図 6.1.1-81 Case 5 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

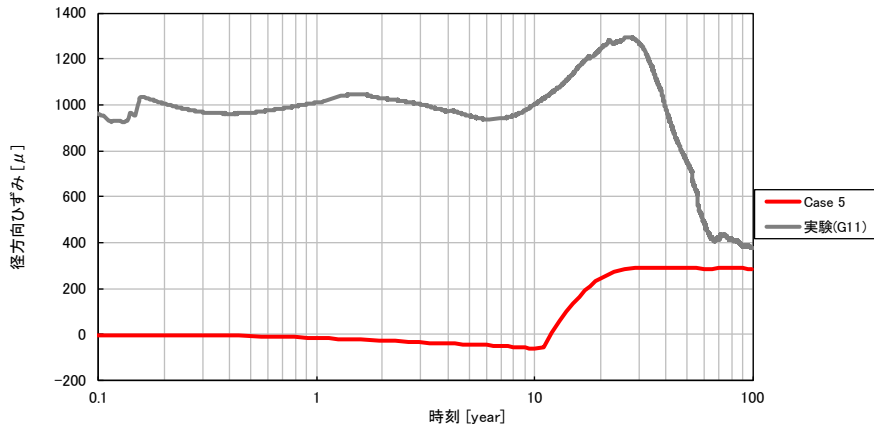


図 6.1.1-82 Case 5 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

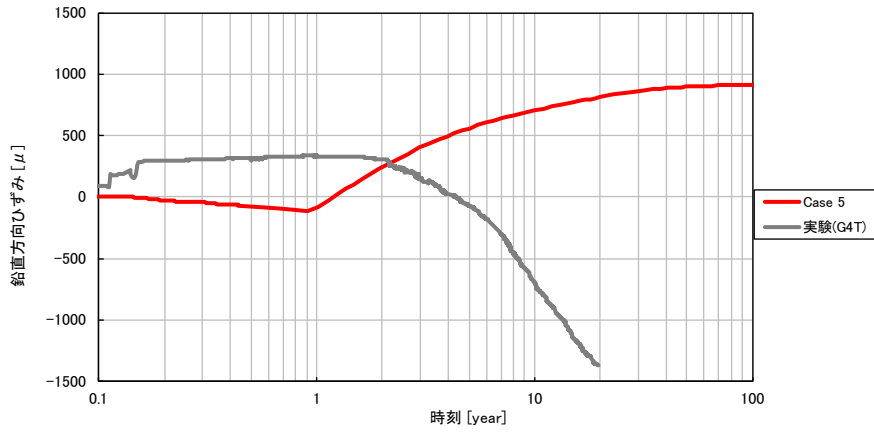


図 6.1.1-83 Case 5 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

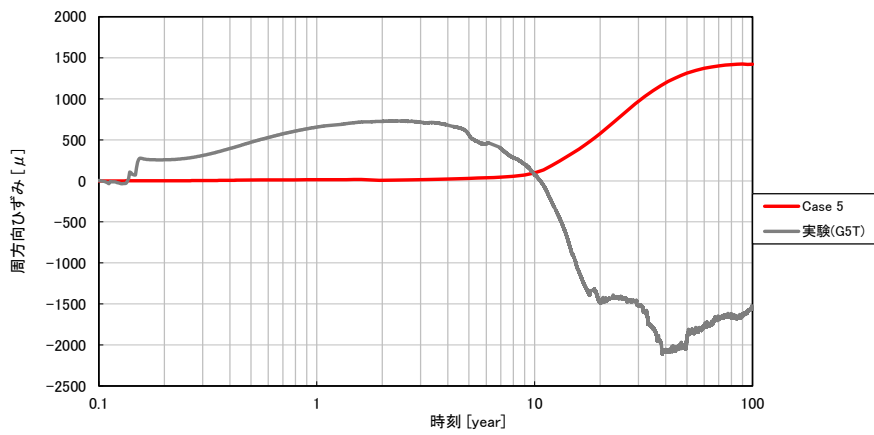


図 6.1.1-84 Case 5 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(7) Case 6

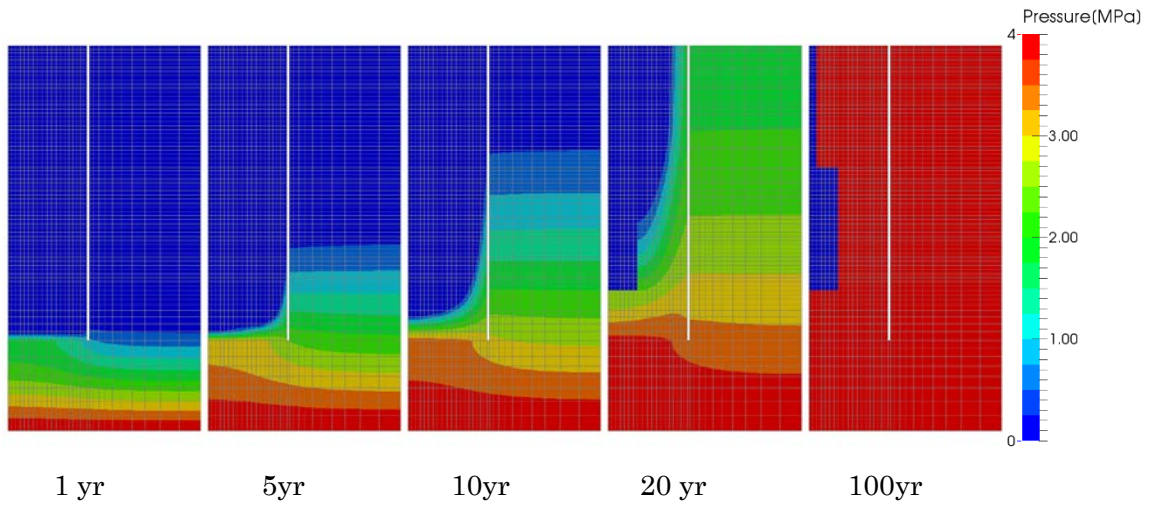


図 6.1.1-85 Case 6 岩盤部分・間隙水压分布

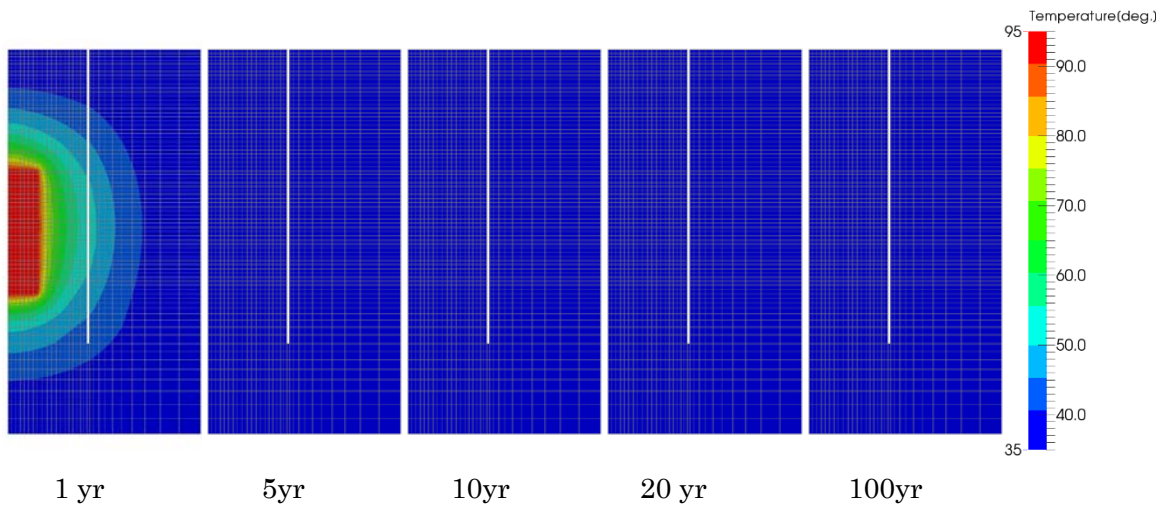


図 6.1.1-86 Case 6 岩盤部分・温度分布

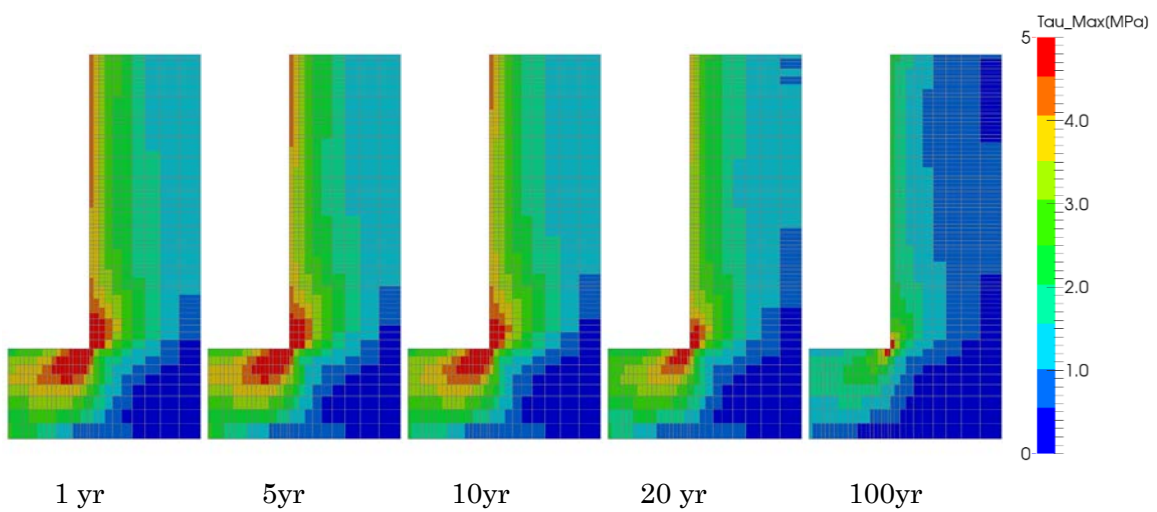


図 6.1.1-87 Case 6 岩盤部分・主せん断応力分布

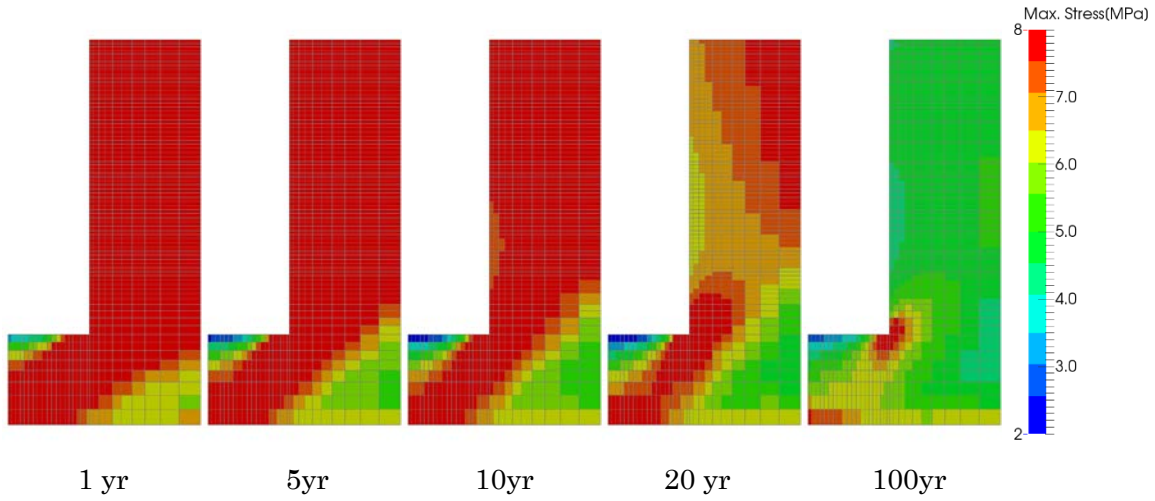


図 6.1.1-88 Case 6 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

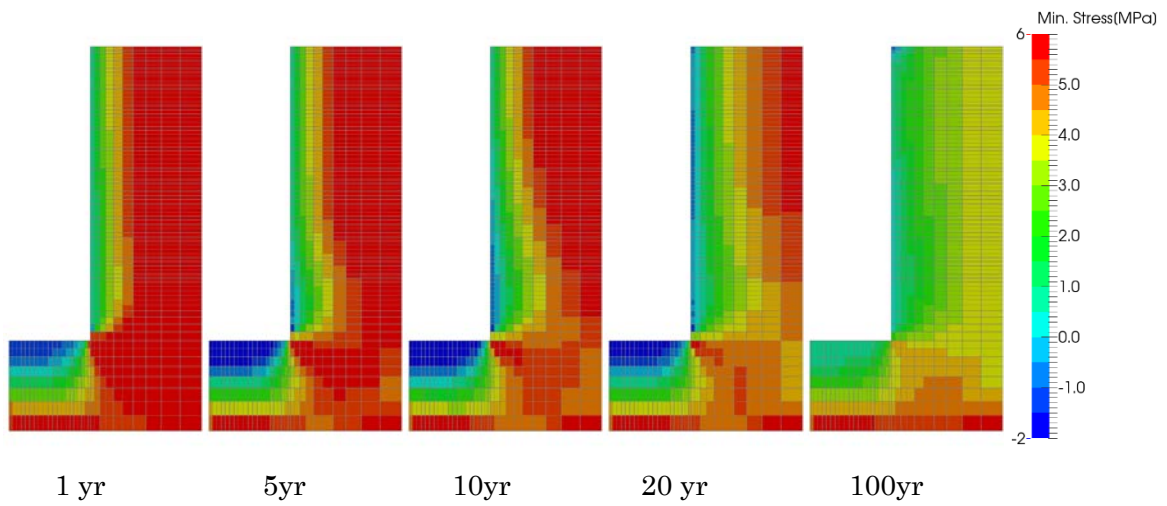


図 6.1.1-89 Case 6 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

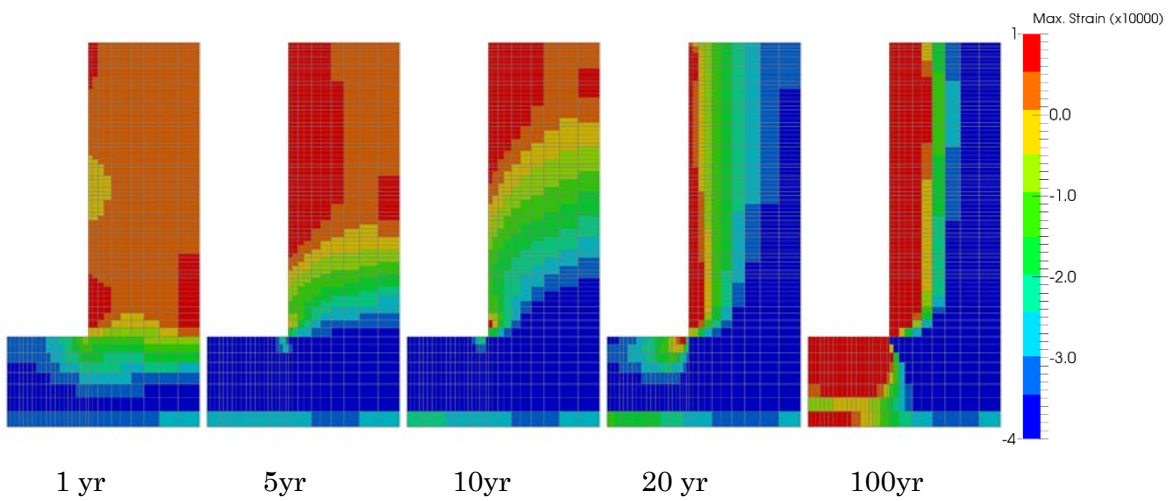


図 6.1.1-90 Case 6 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

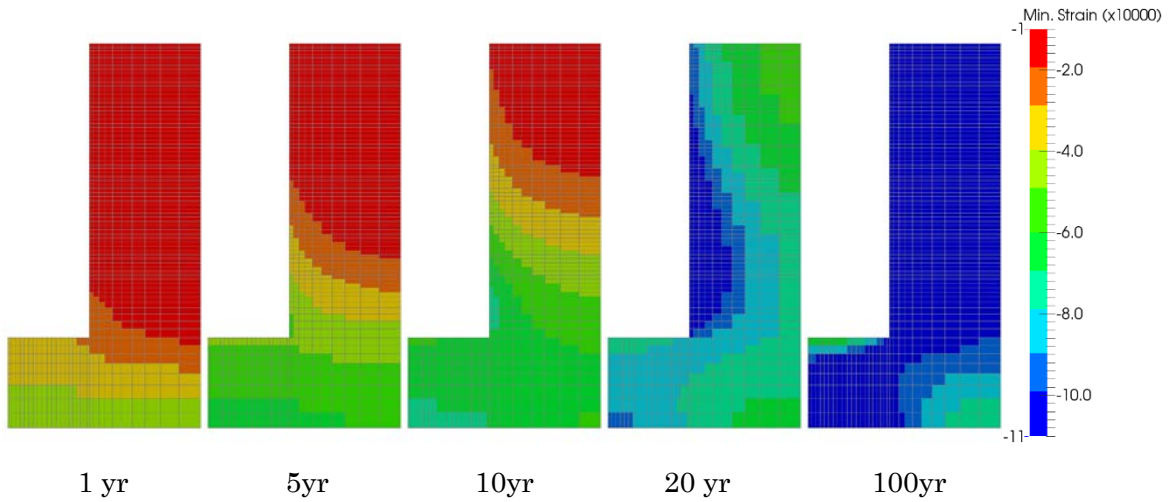


図 6.1.1-91 Case 6 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

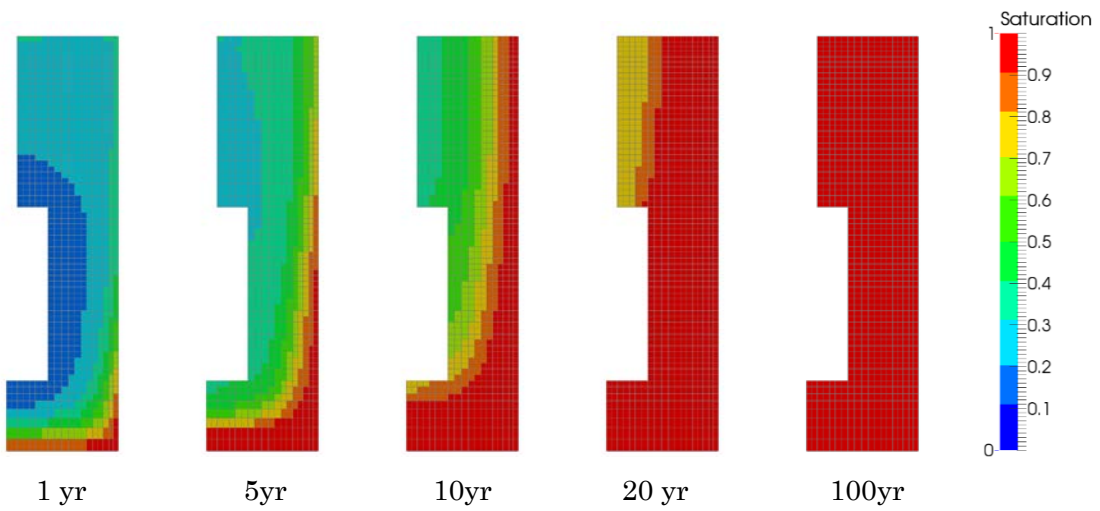


図 6.1.1-92 Case 6 緩衝材部分・飽和度分布

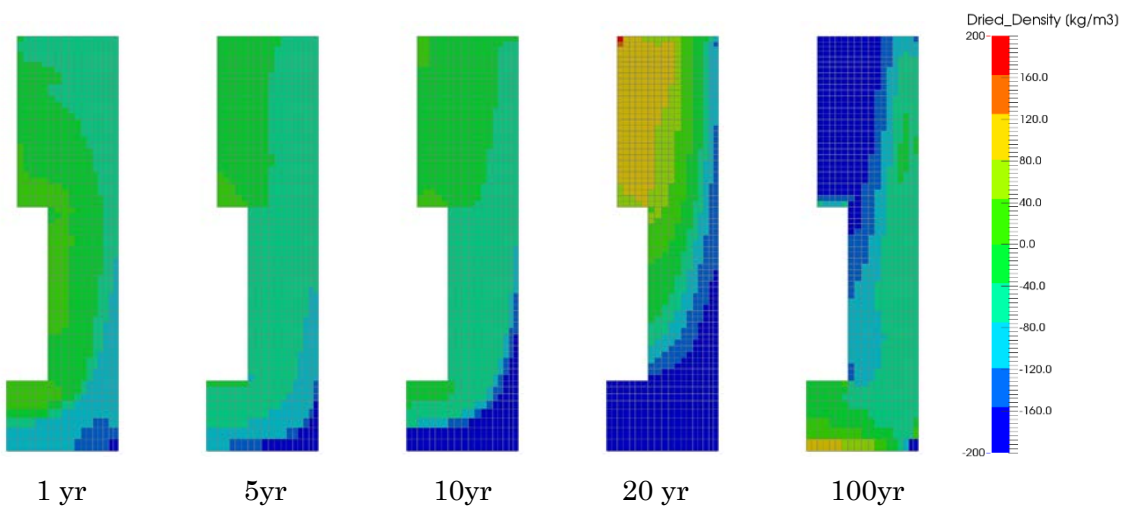


図 6.1.1-93 Case 6 緩衝材部分・乾燥密度分布

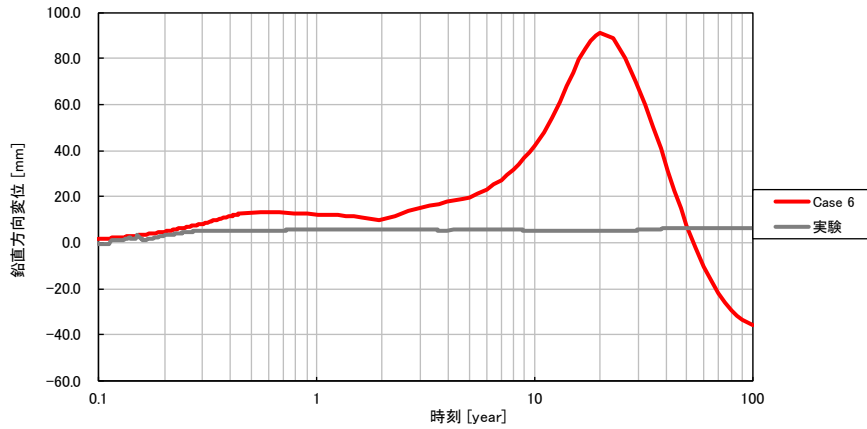


図 6.1.1-94 Case 6 鉛直方向の変位時刻歴

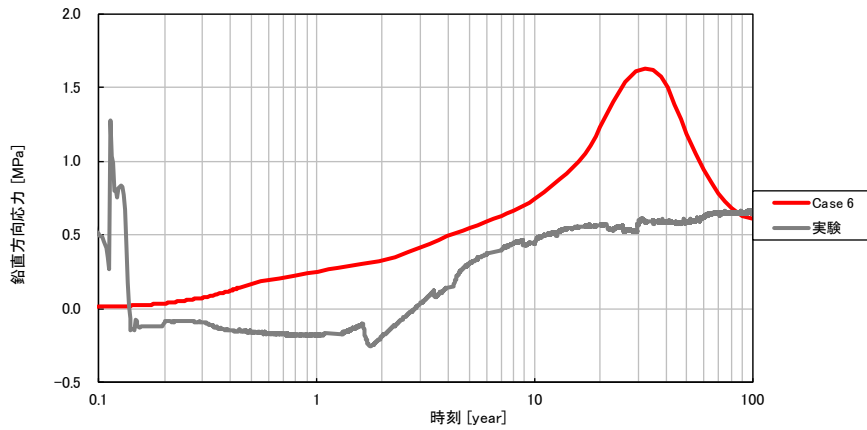


図 6.1.1-95 Case 6 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

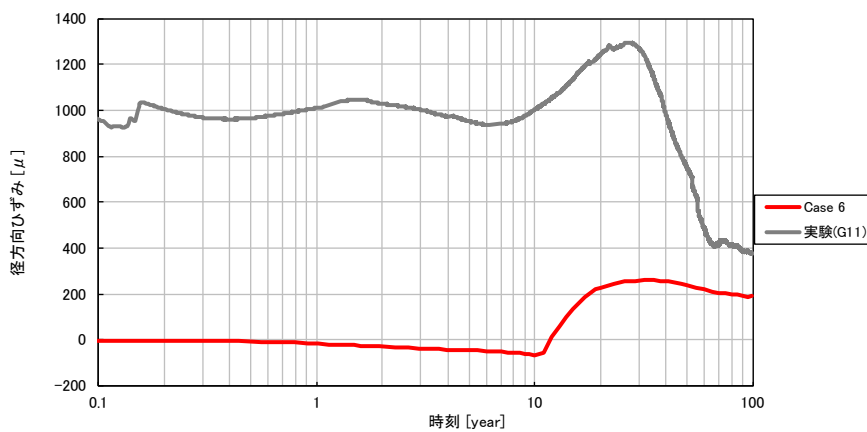


図 6.1.1-96 Case 6 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

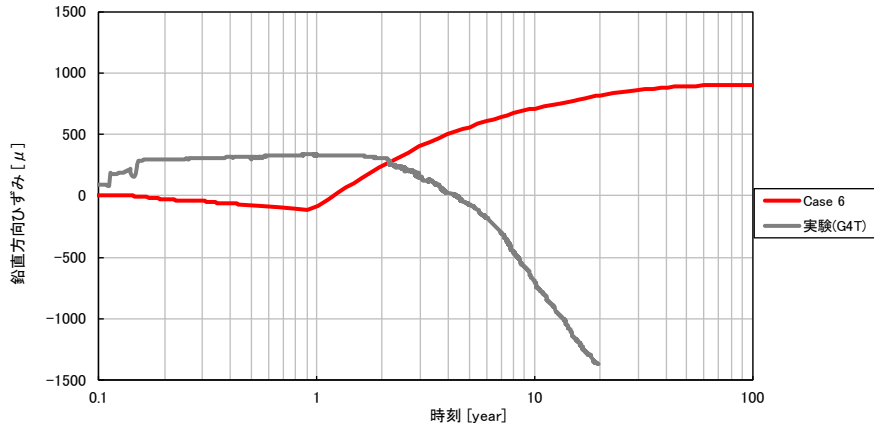


図 6.1.1-97 Case 6 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

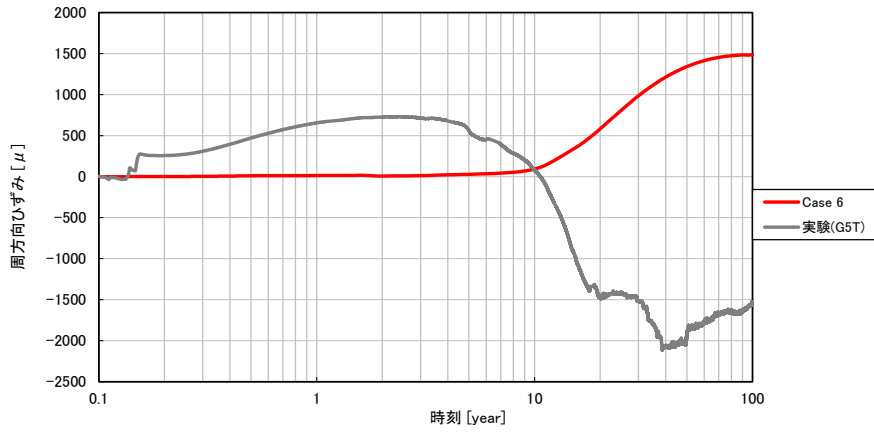


図 6.1.1-98 Case 6 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(8) Case 7

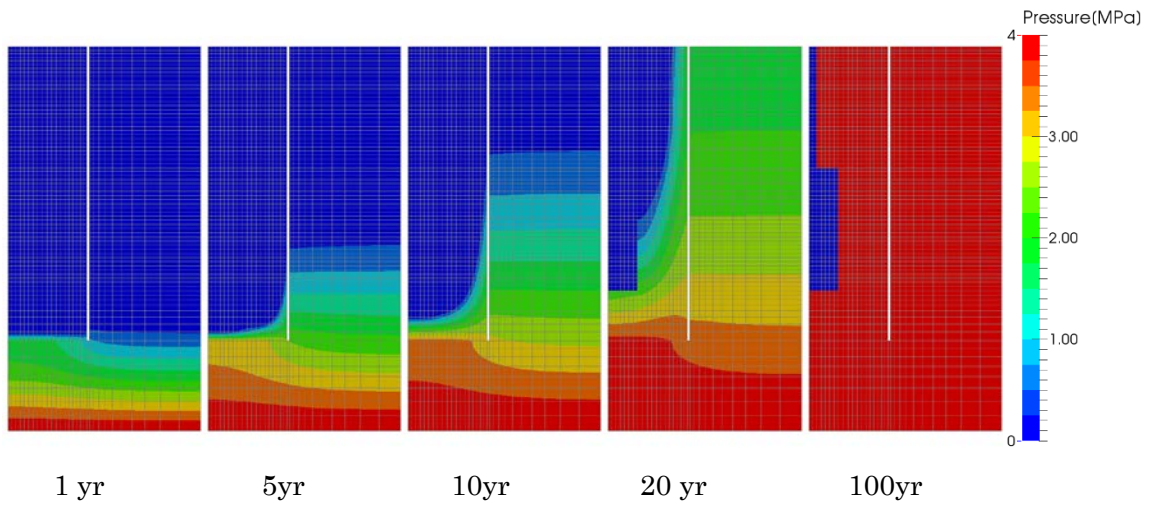


図 6.1.1-99 Case 7 岩盤部分・間隙水圧分布

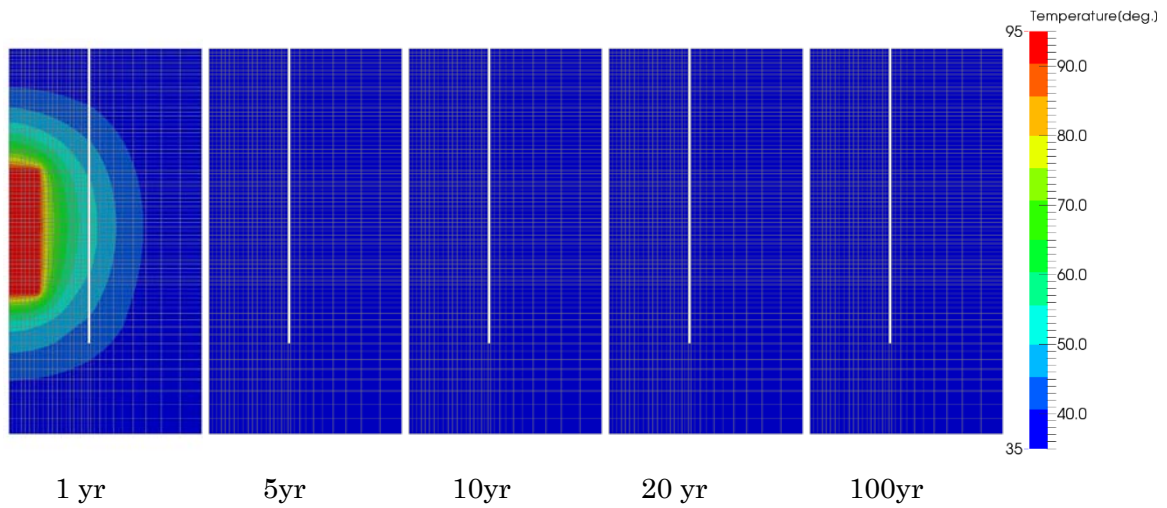


図 6.1.1-100 Case 7 岩盤部分・温度分布

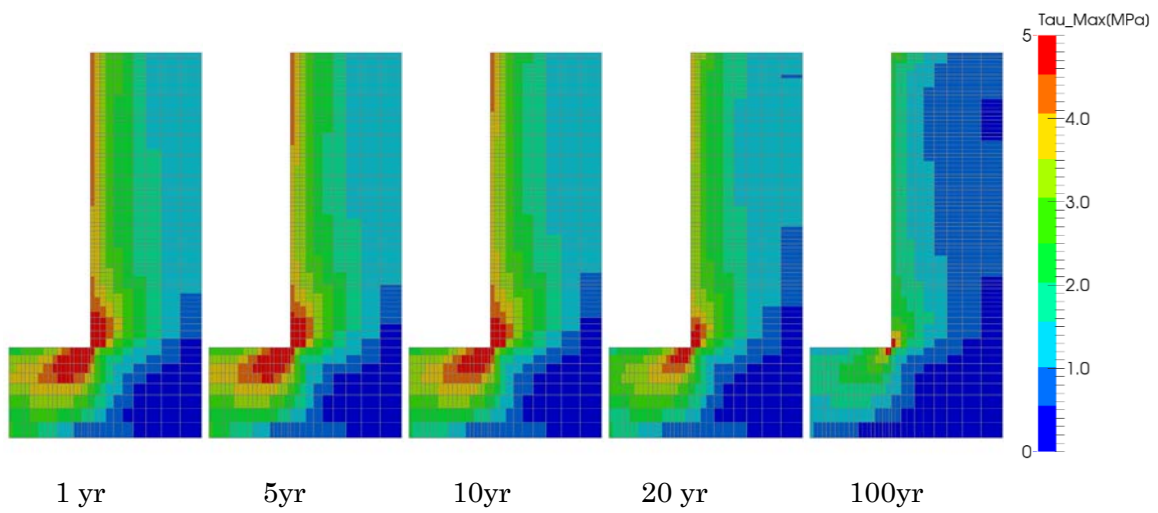


図 6.1.1-101 Case 7 岩盤部分・主せん断応力分布

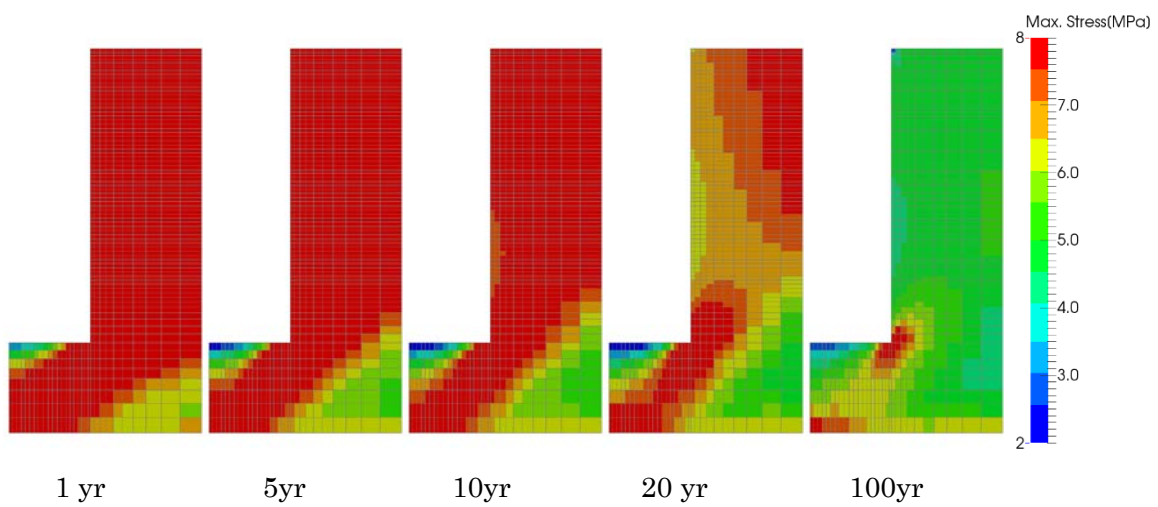


図 6.1.1-102 Case 7 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

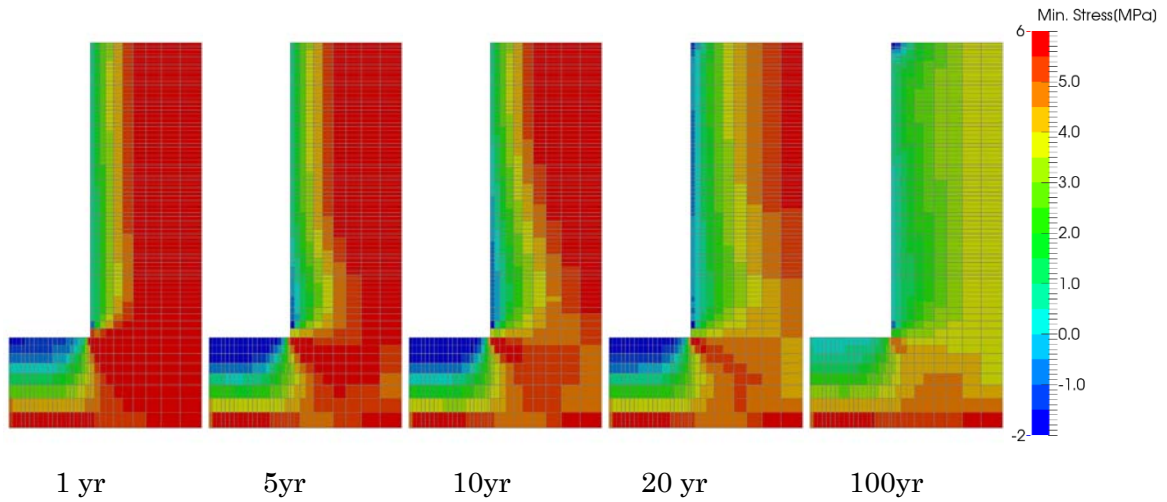


図 6.1.1-103 Case 7 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

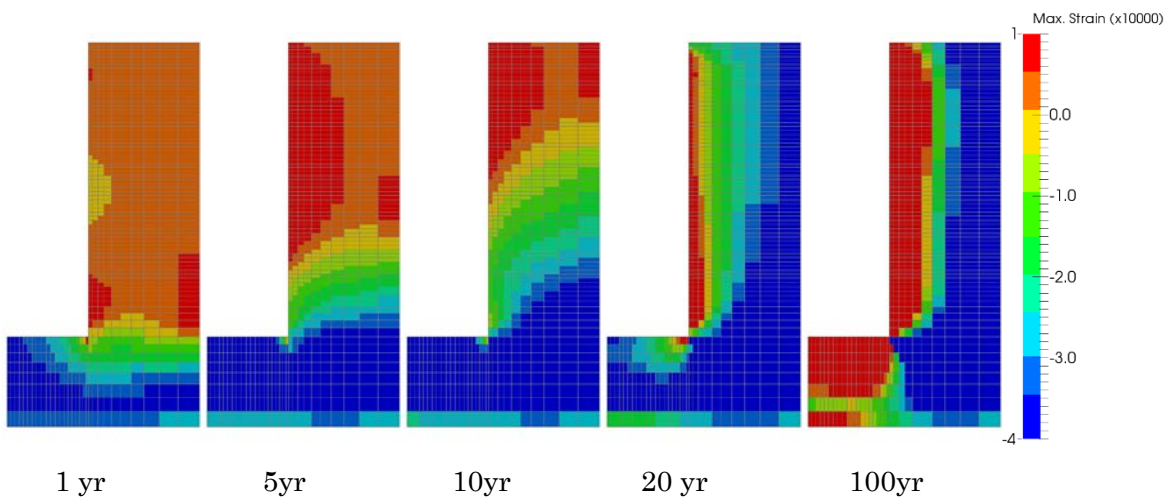


図 6.1.1-104 Case 7 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

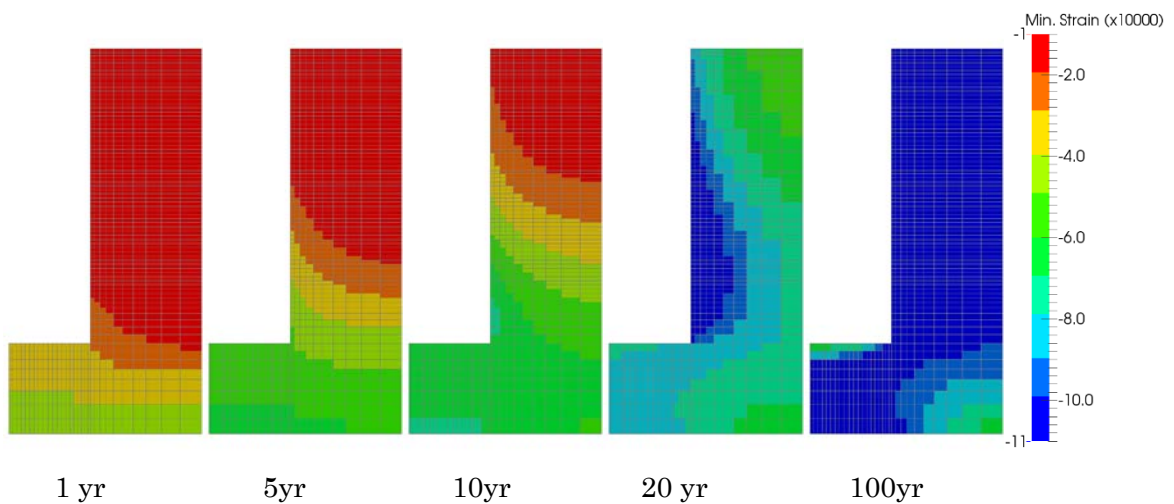


図 6.1.1-105 Case 7 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

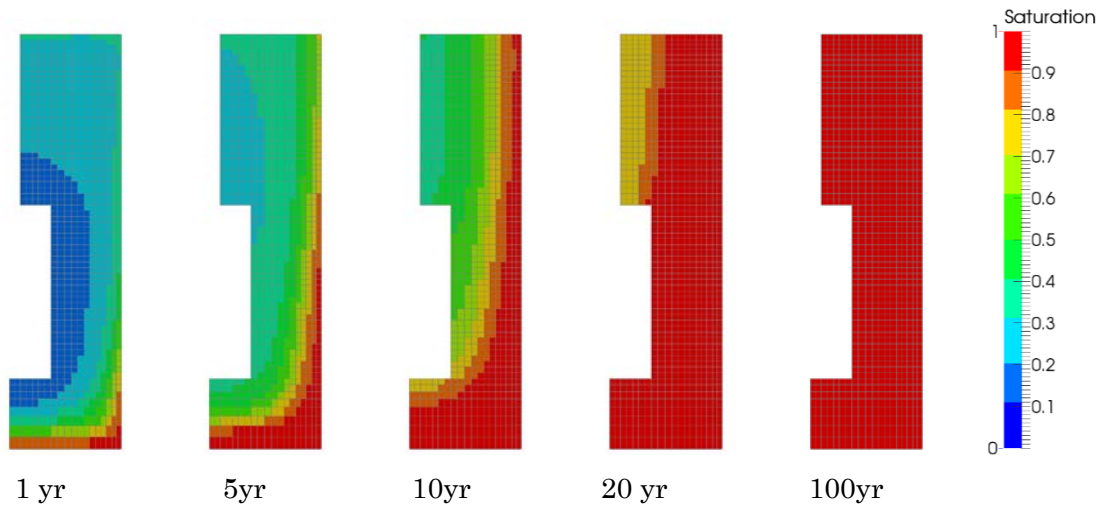


図 6.1.1-106 Case 7 緩衝材部分・飽和度分布

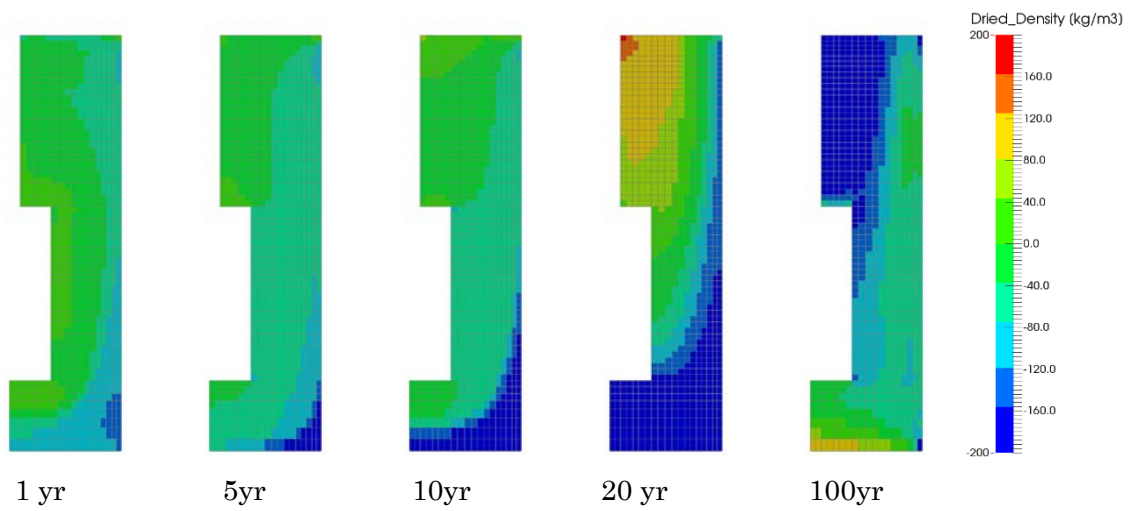


図 6.1.1-107 Case 7 緩衝材部分・乾燥密度分布

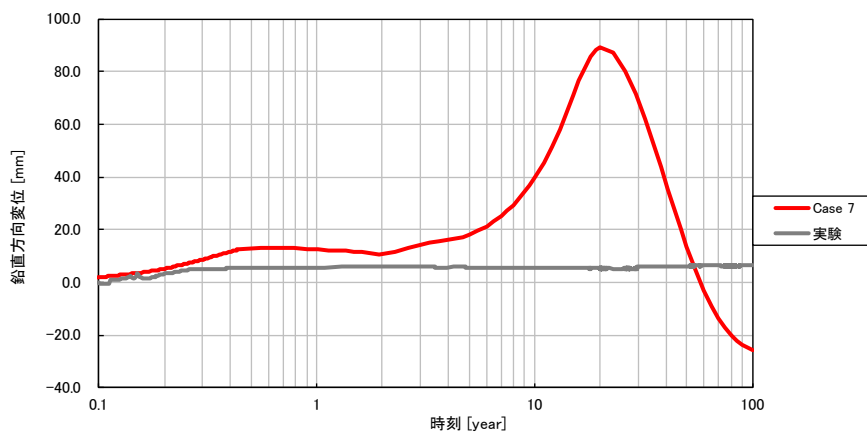


図 6.1.1-108 Case 7 鉛直方向の変位時刻歴

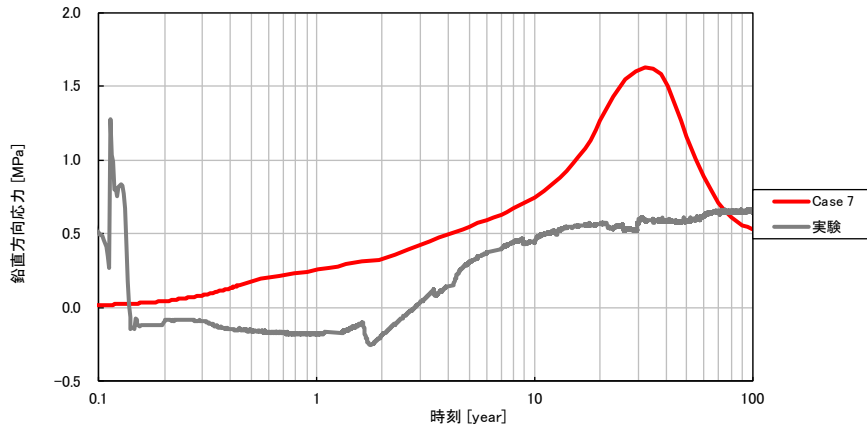


図 6.1.1-109 Case 7 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

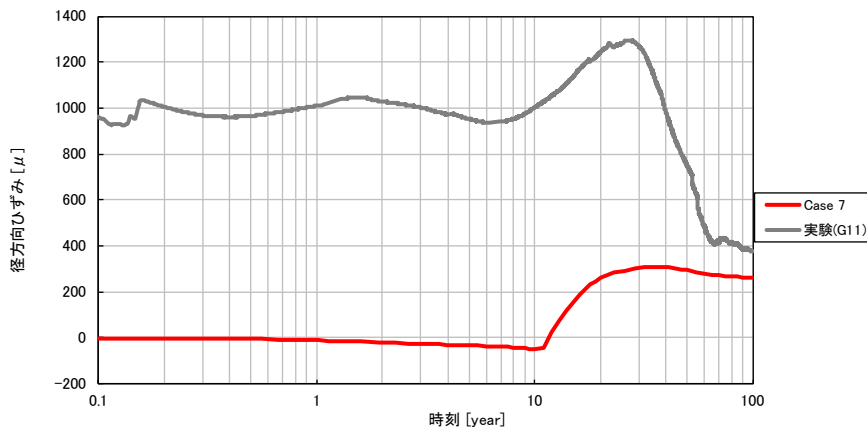


図 6.1.1-110 Case 7 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

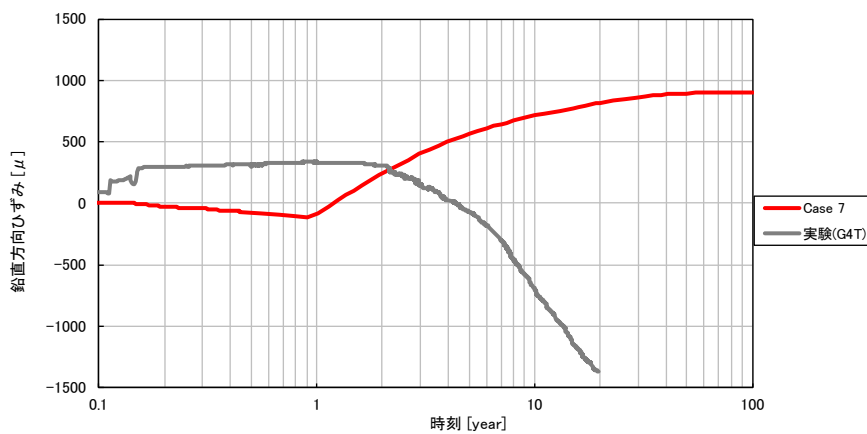


図 6.1.1-111 Case 7 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

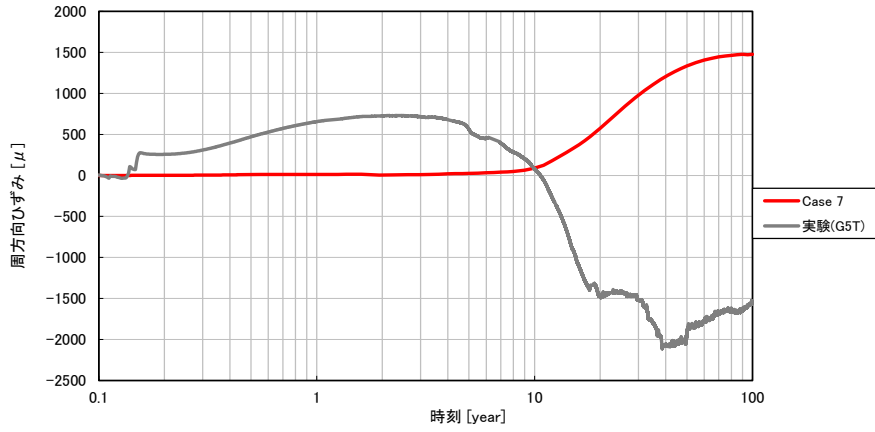


図 6.1.1-112 Case 7 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(9) Case 8

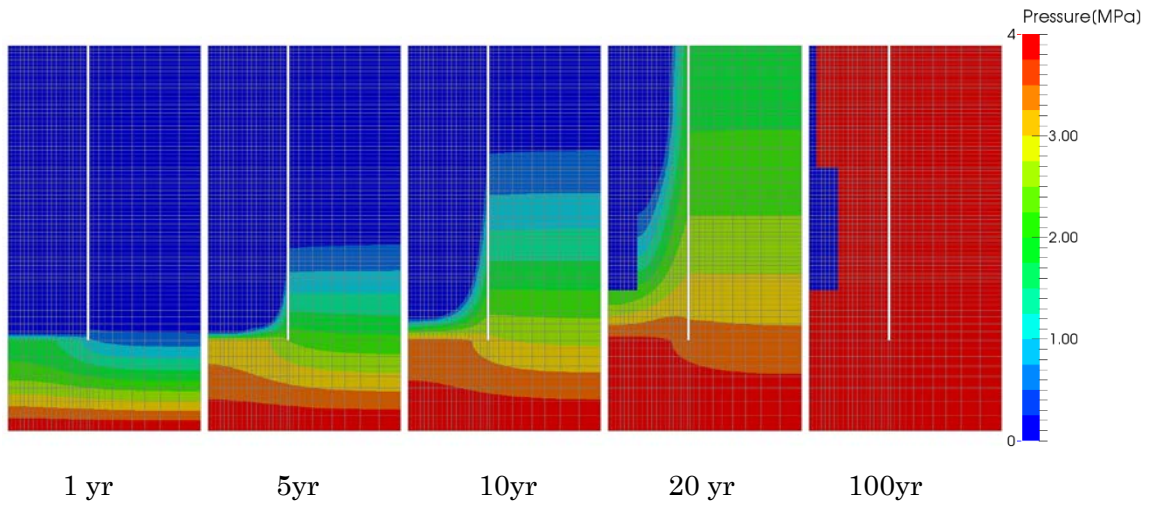


図 6.1.1-113 Case 8 岩盤部分・間隙水圧分布

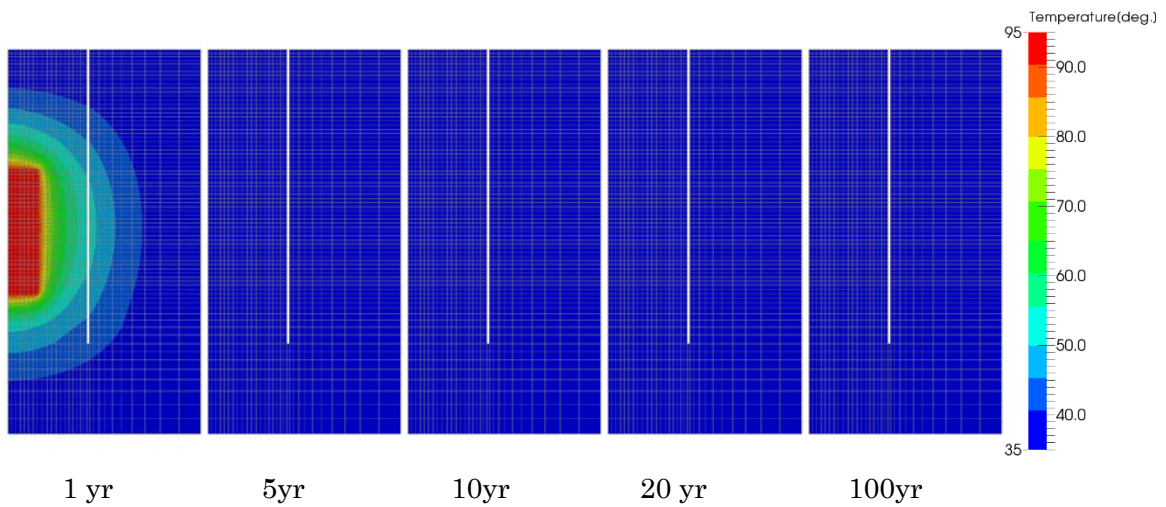


図 6.1.1-114 Case 8 岩盤部分・温度分布

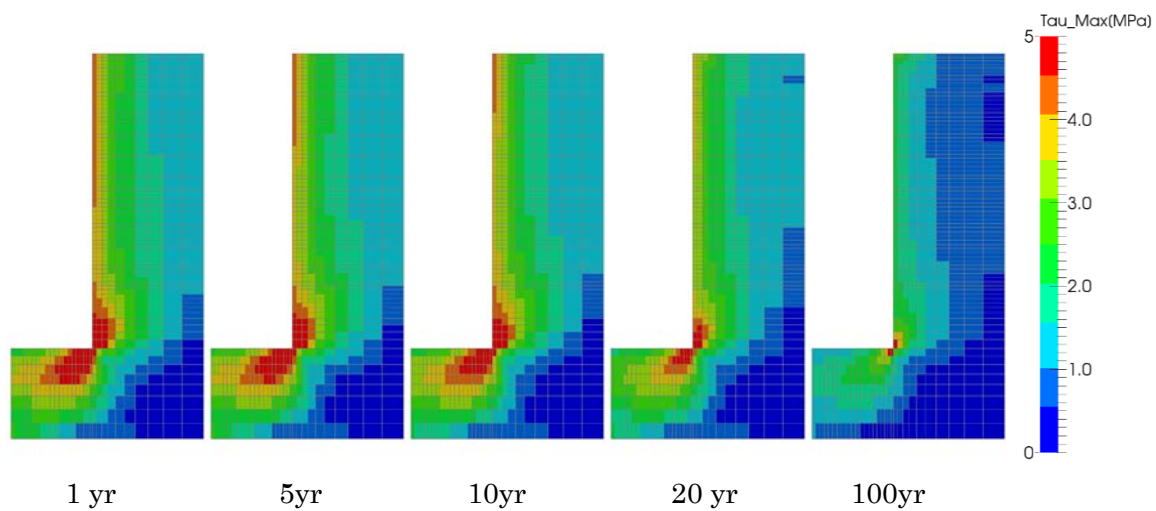


図 6.1.1-115 Case 8 岩盤部分・主せん断応力分布

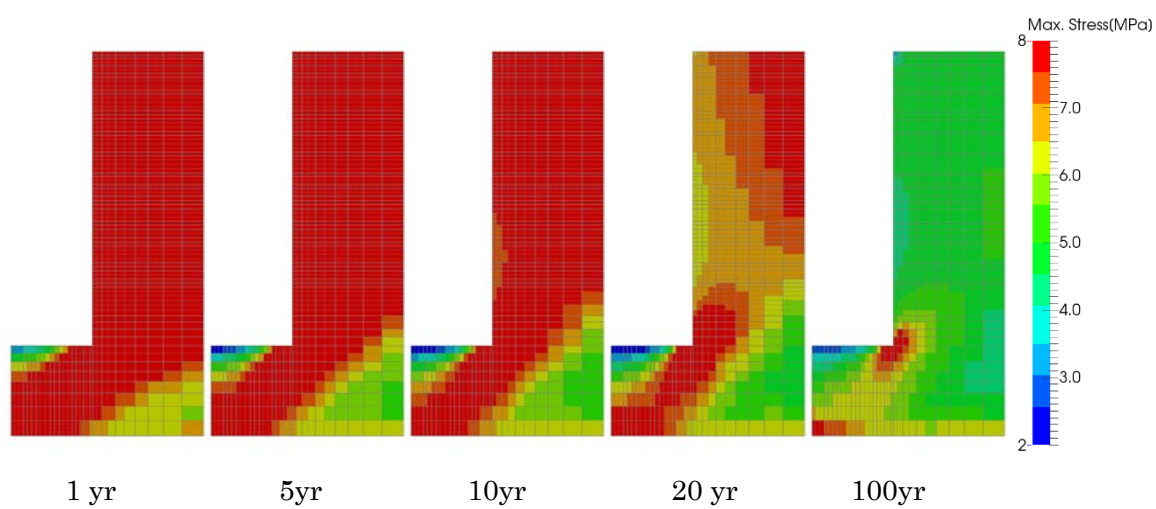


図 6.1.1-116 Case 8 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

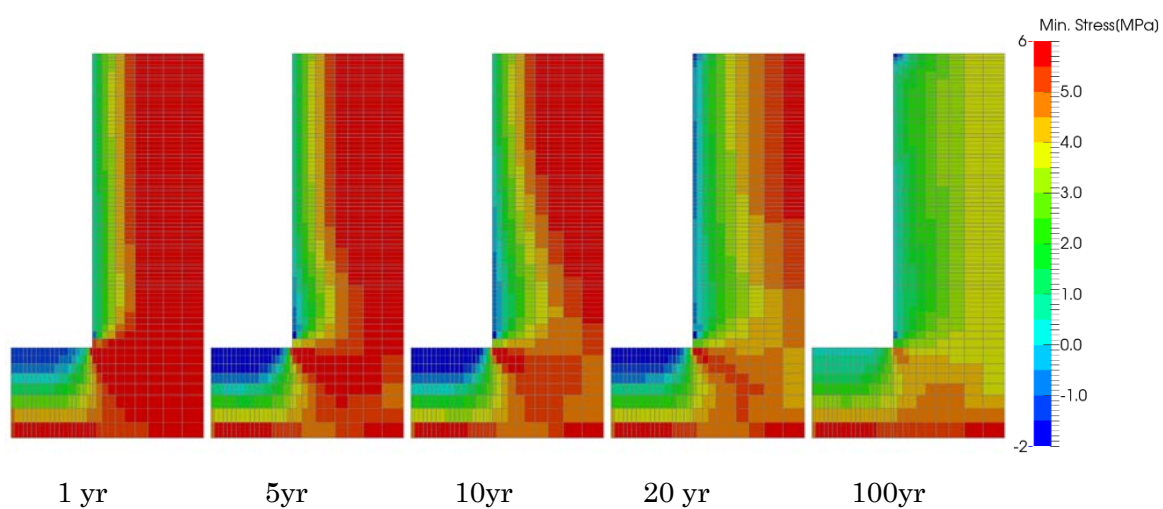


図 6.1.1-117 Case 8 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

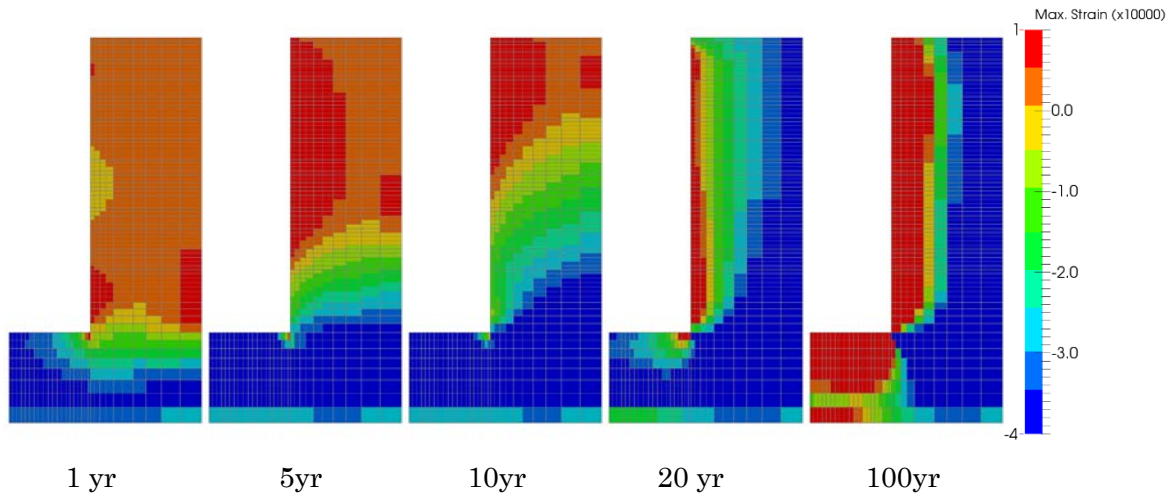


図 6.1.1-118 Case 8 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

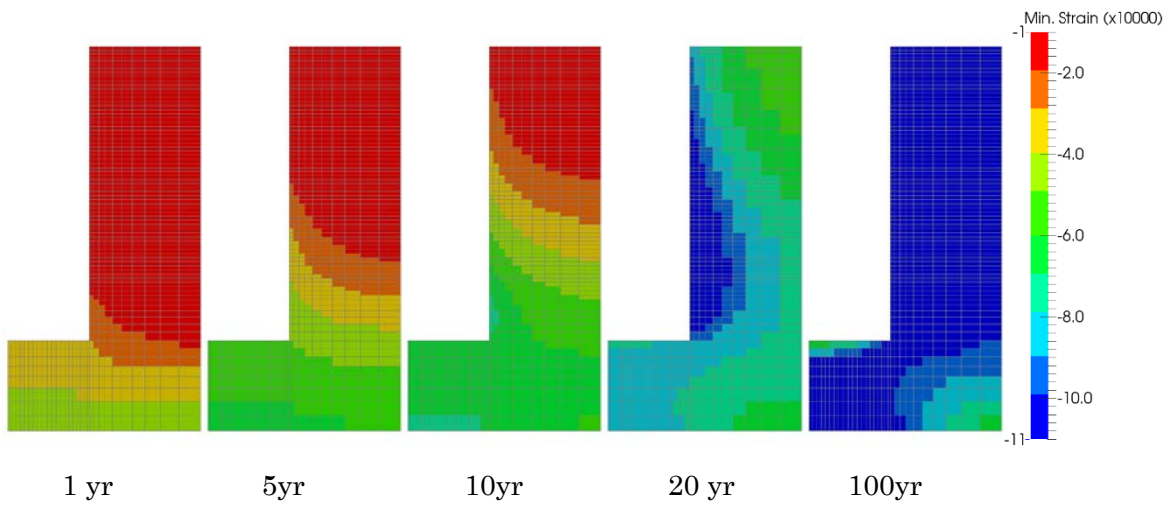


図 6.1.1-119 Case 8 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

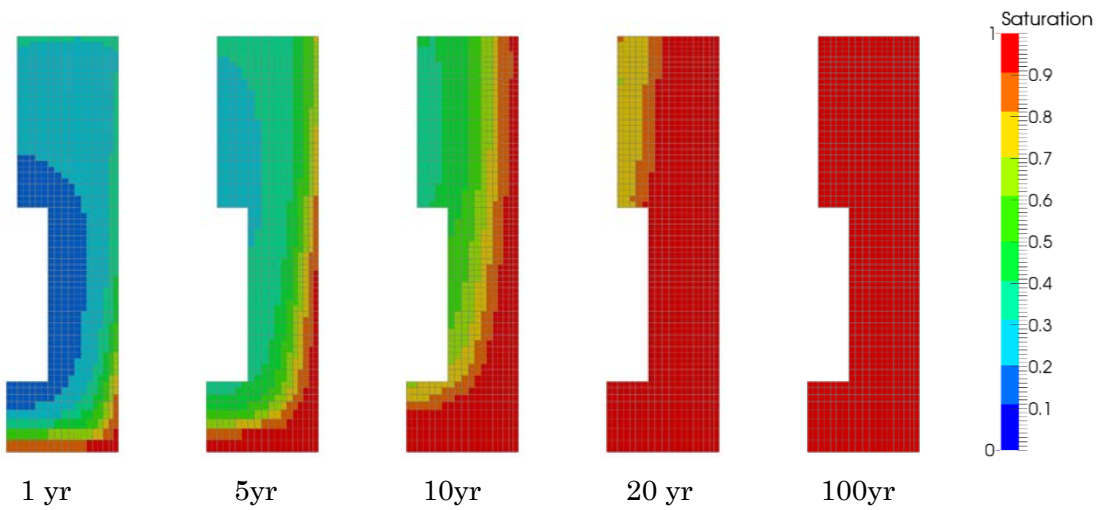


図 6.1.1-120 Case 8 緩衝材部分・飽和度分布

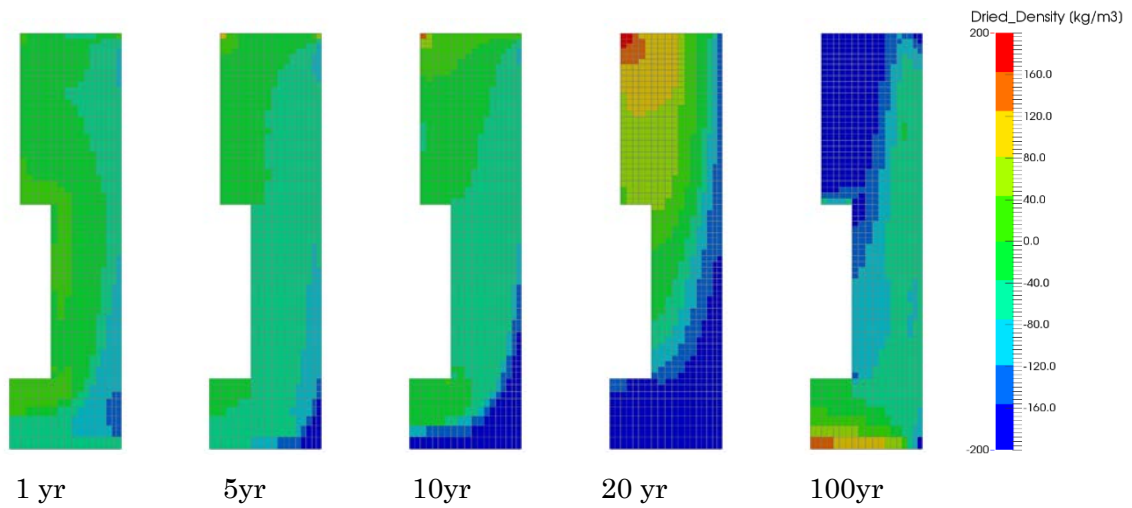


図 6.1.1-121 Case 8 緩衝材部分・乾燥密度分布

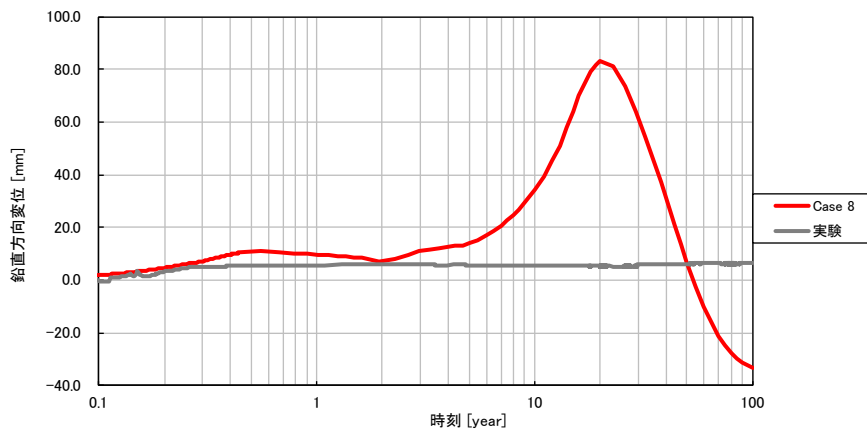


図 6.1.1-122 Case 8 鉛直方向の変位時刻歴

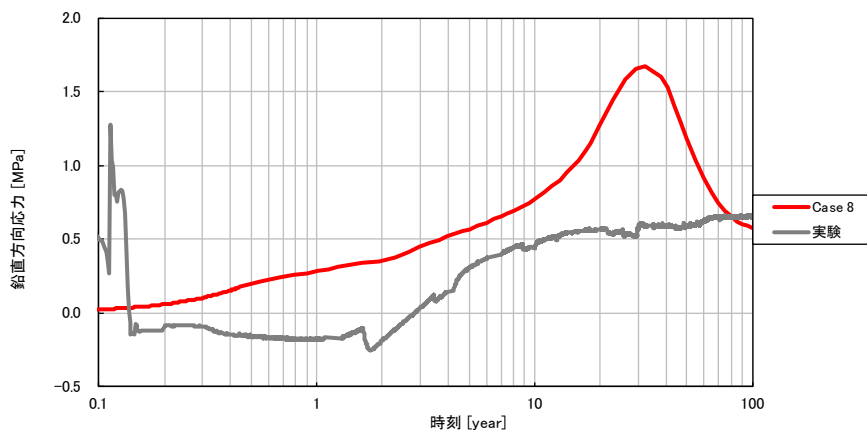


図 6.1.1-123 Case 8 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

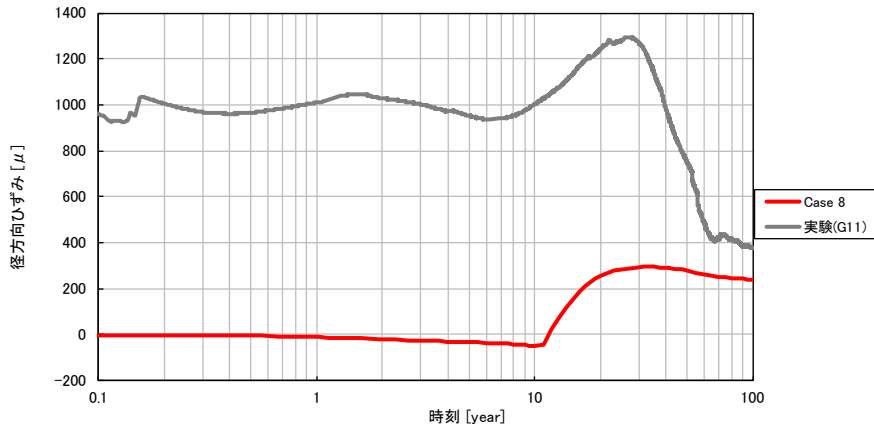


図 6.1.1-124 Case 8 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

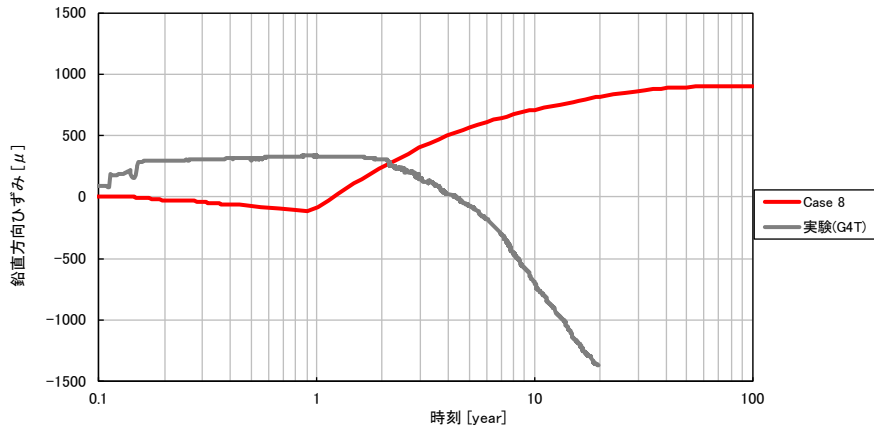


図 6.1.1-125 Case 8 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

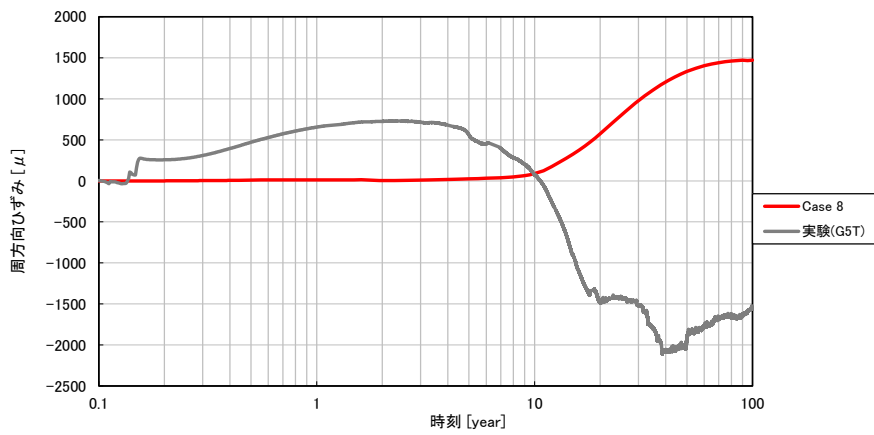


図 6.1.1-126 Case 8 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(10) Case 9

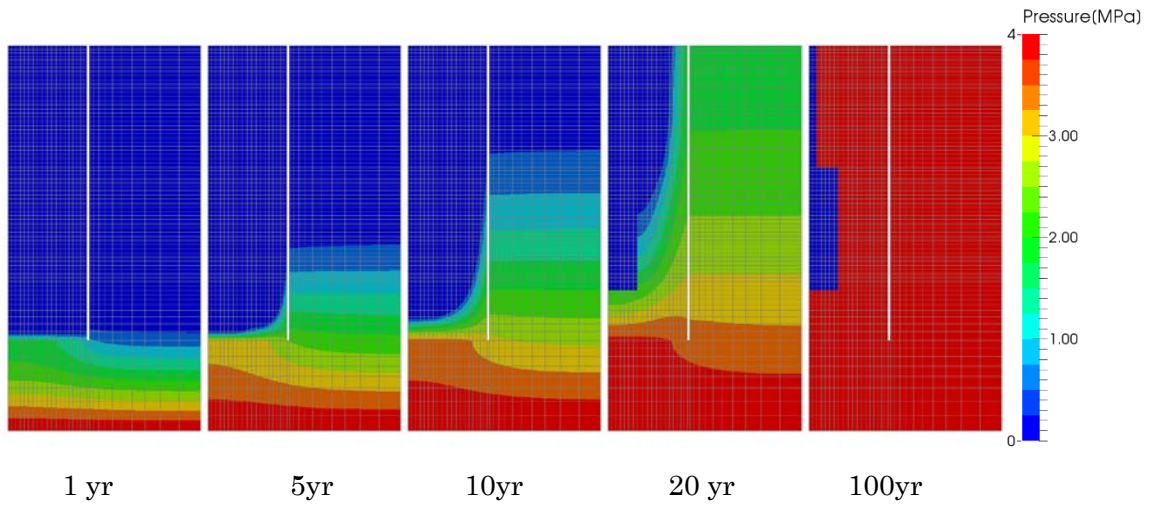


図 6.1.1-127 Case 9 岩盤部分・間隙水压分布

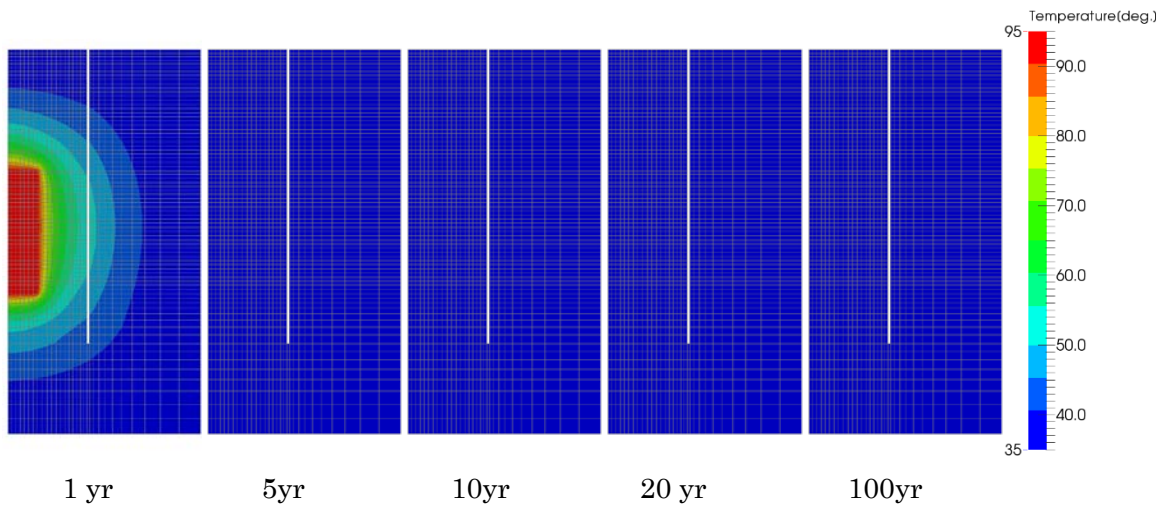


図 6.1.1-128 Case 9 岩盤部分・温度分布

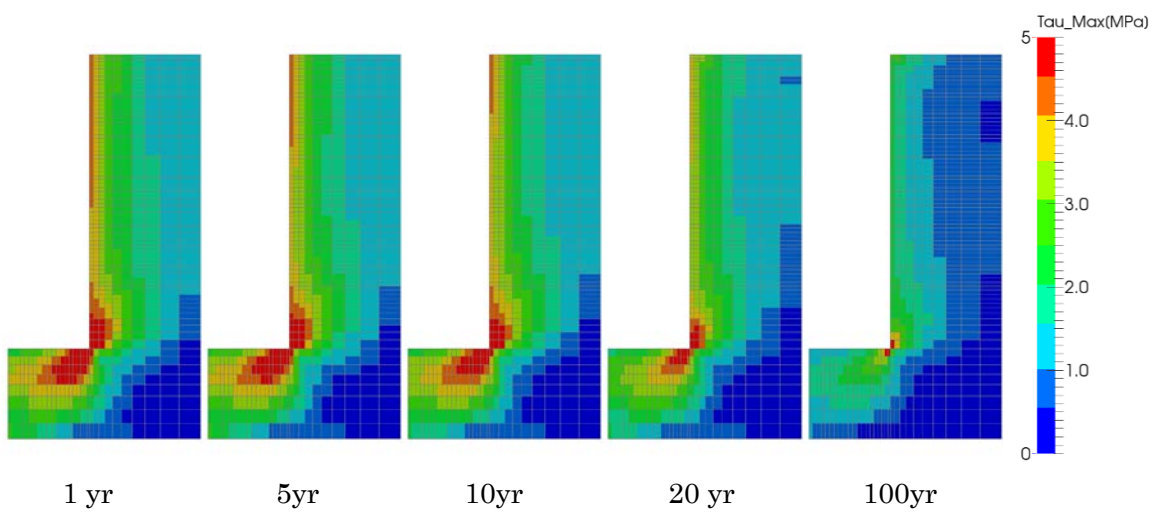


図 6.1.1-129 Case 9 岩盤部分・主せん断応力分布

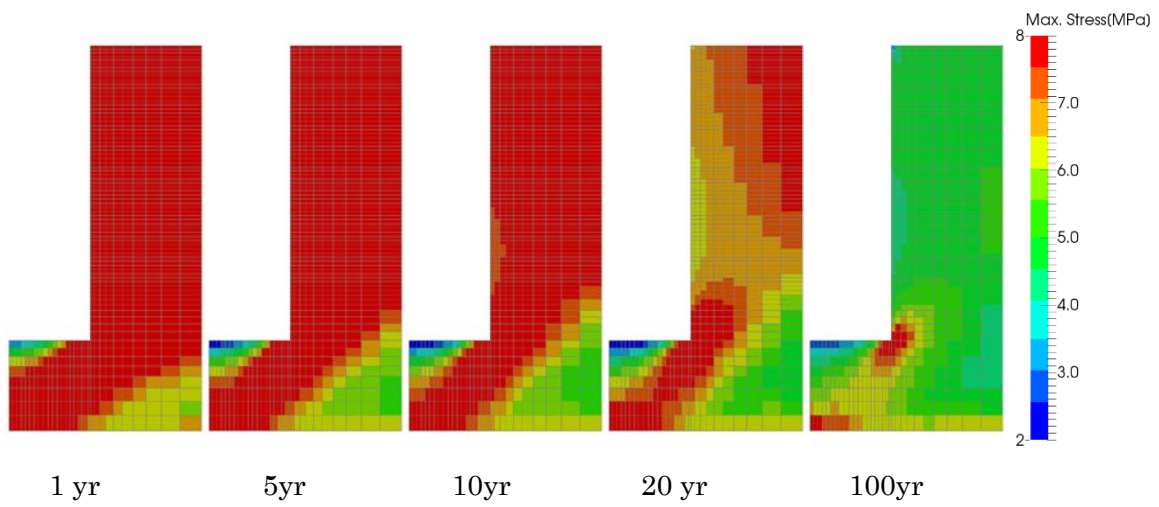


図 6.1.1-130 Case 9 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

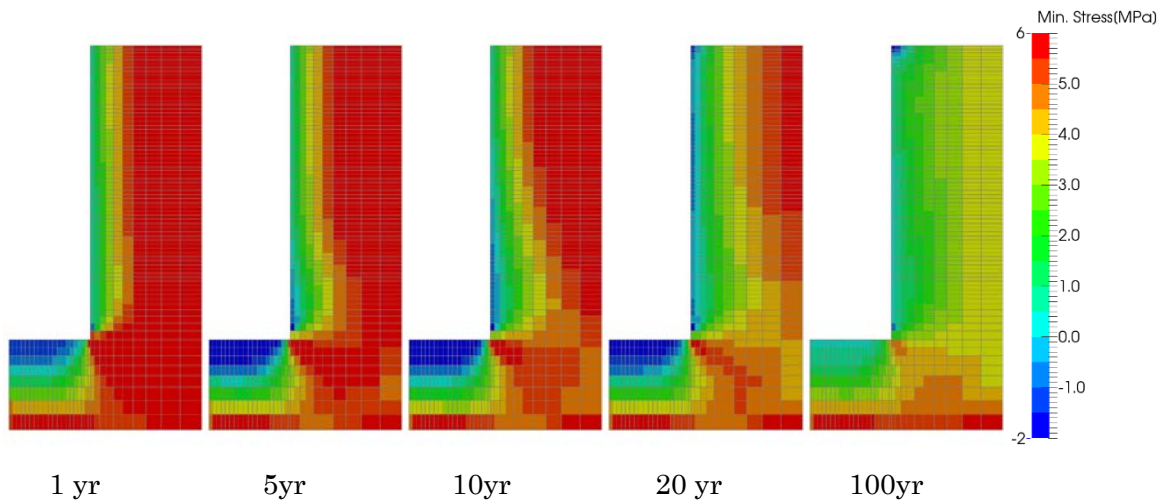


図 6.1.1-131 Case 9 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

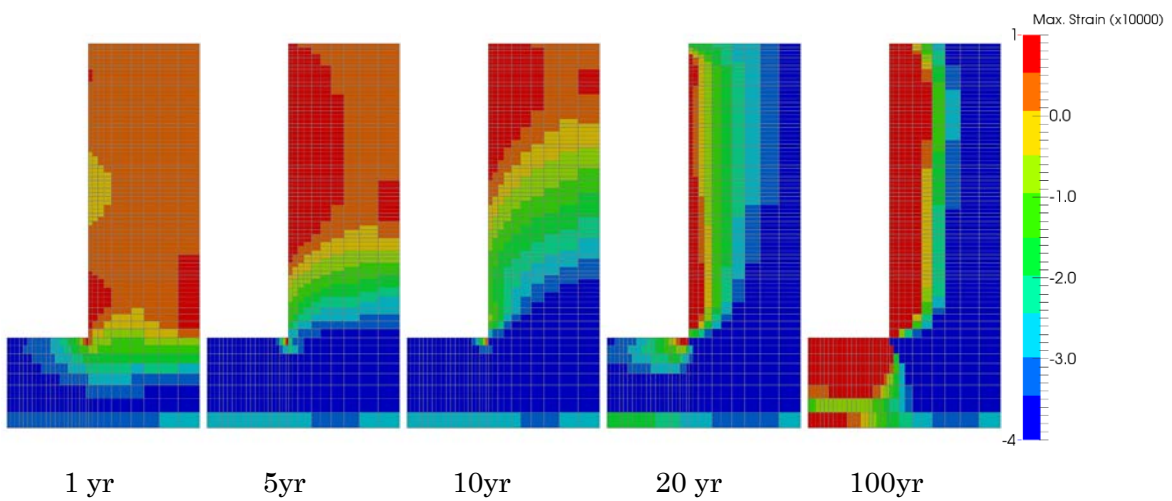


図 6.1.1-132 Case 9 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

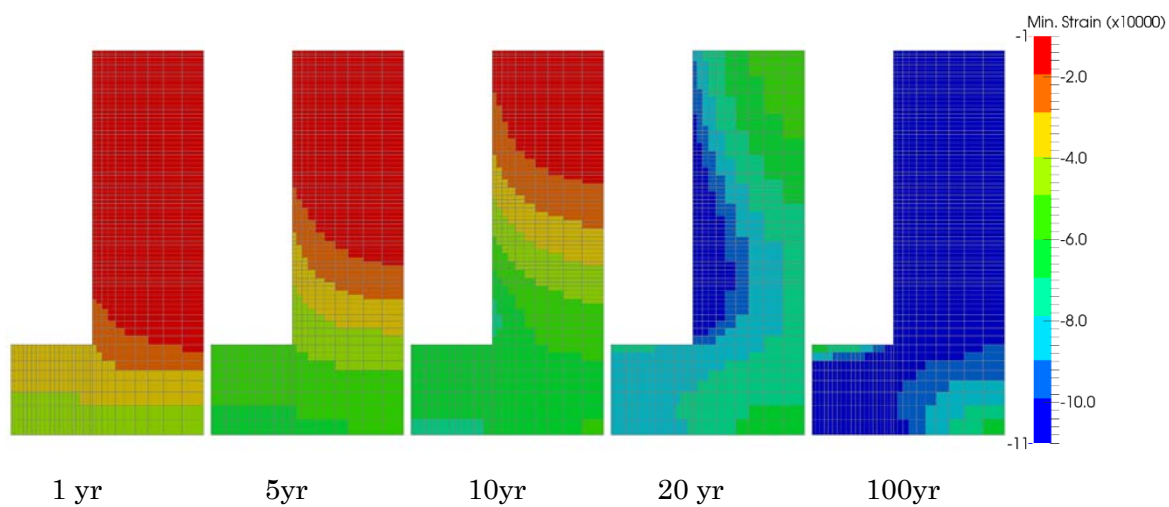


図 6.1.1-133 Case 9 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

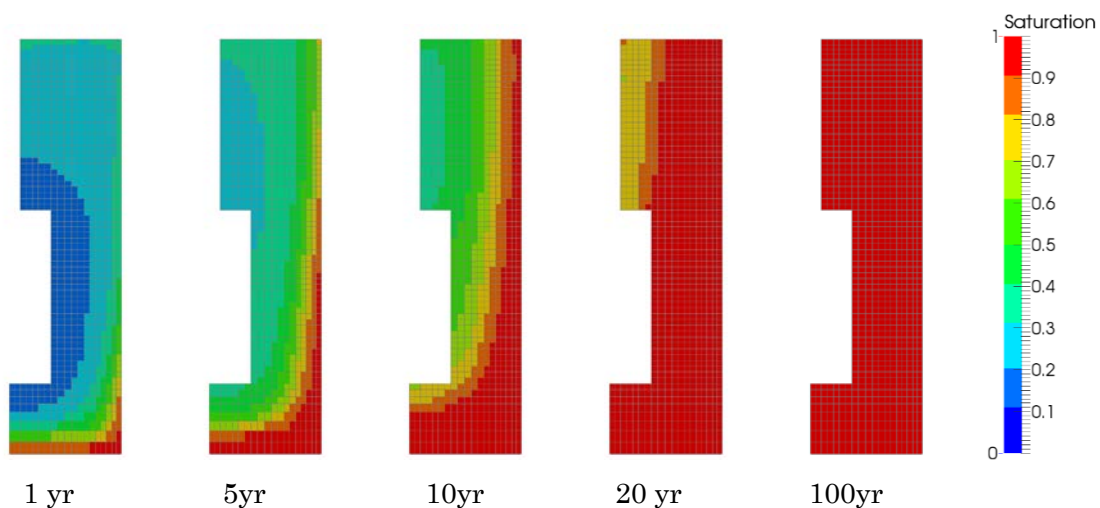


図 6.1.1-134 Case 9 緩衝材部分・飽和度分布

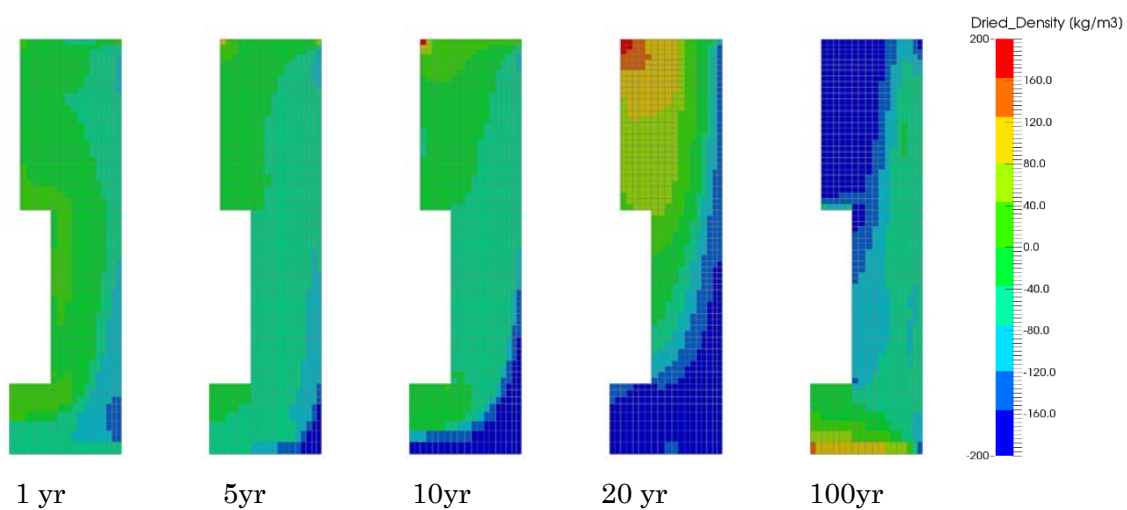


図 6.1.1-135 Case 9 緩衝材部分・乾燥密度分布

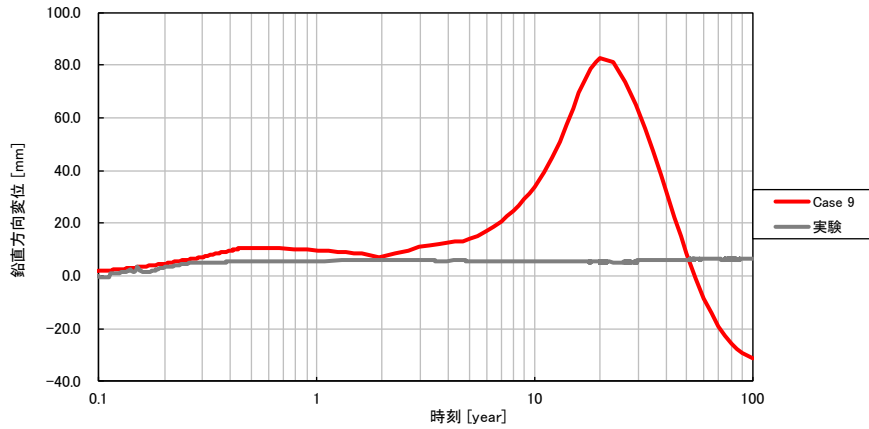


図 6.1.1-136 Case 9 鉛直方向の変位時刻歴

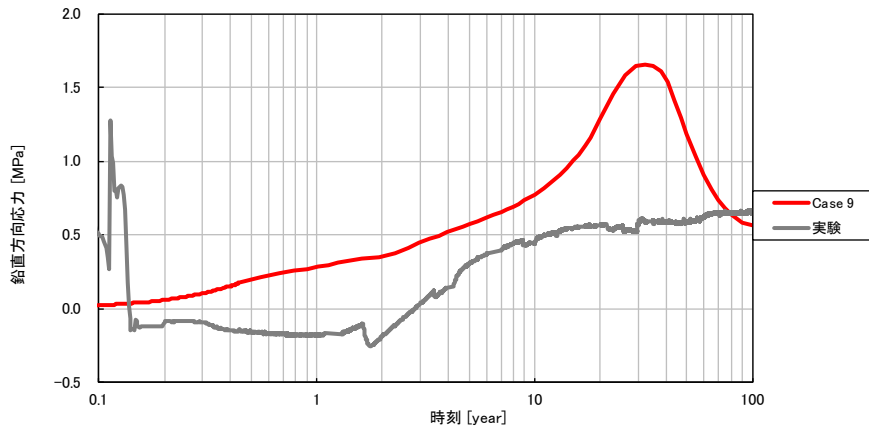


図 6.1.1-137 Case 9 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

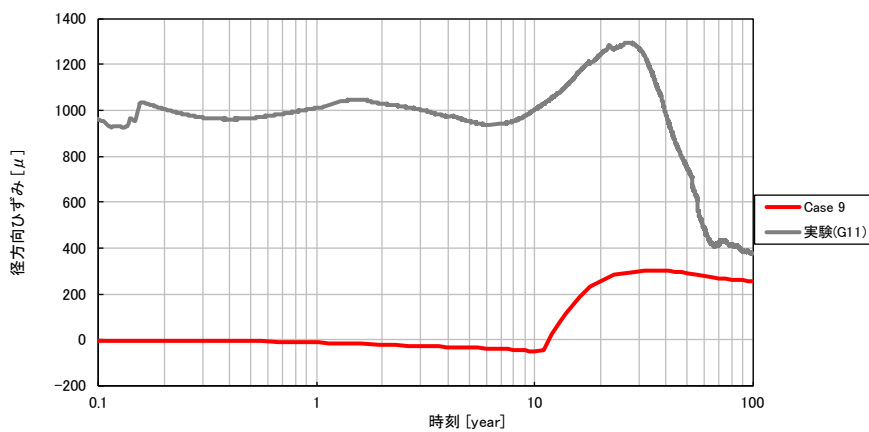


図 6.1.1-138 Case 9 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

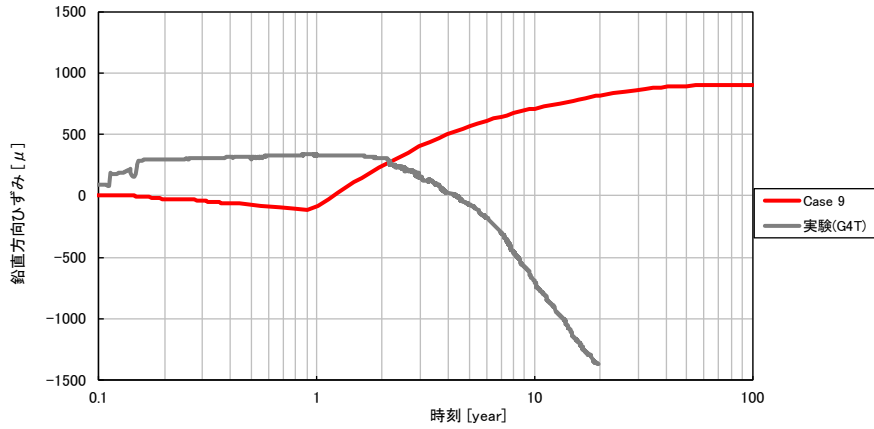


図 6.1.1-139 Case 9 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

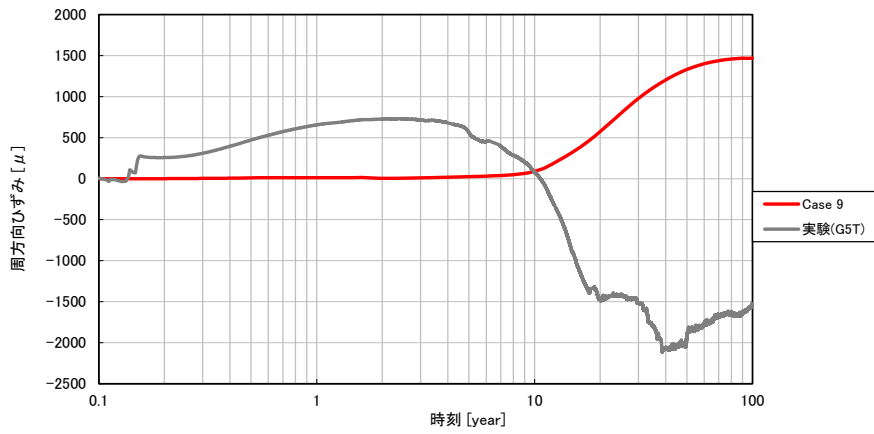


図 6.1.1-140 Case 9 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(11) Case 10

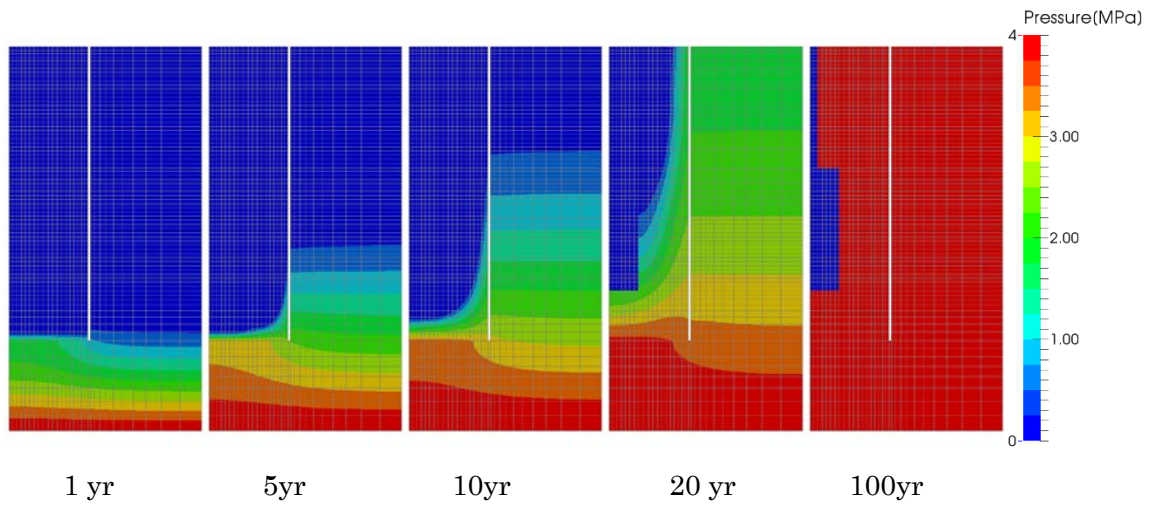


図 6.1.1-141 Case 10 岩盤部分・間隙水圧分布

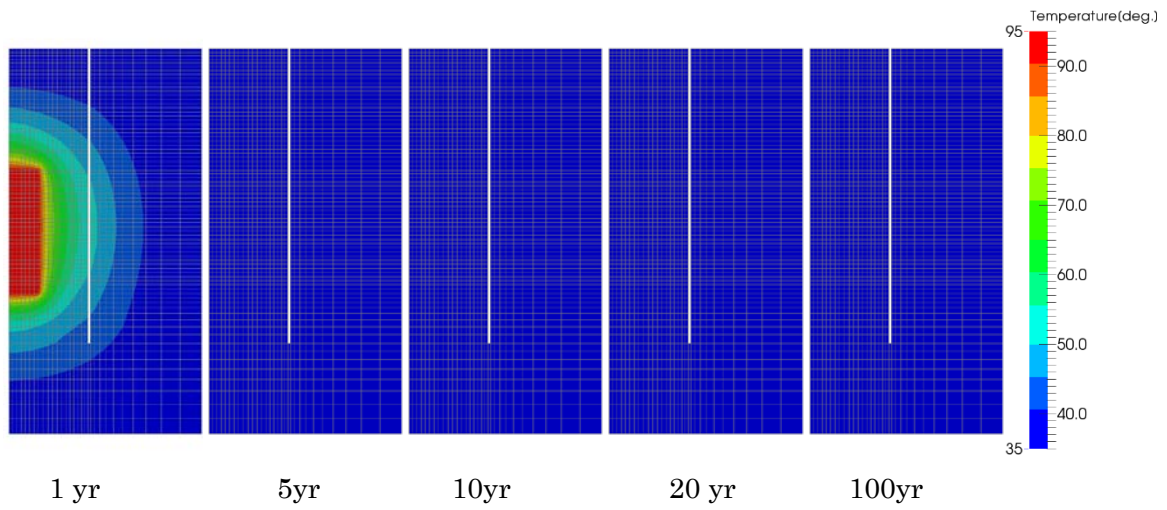


図 6.1.1-142 Case 10 岩盤部分・温度分布

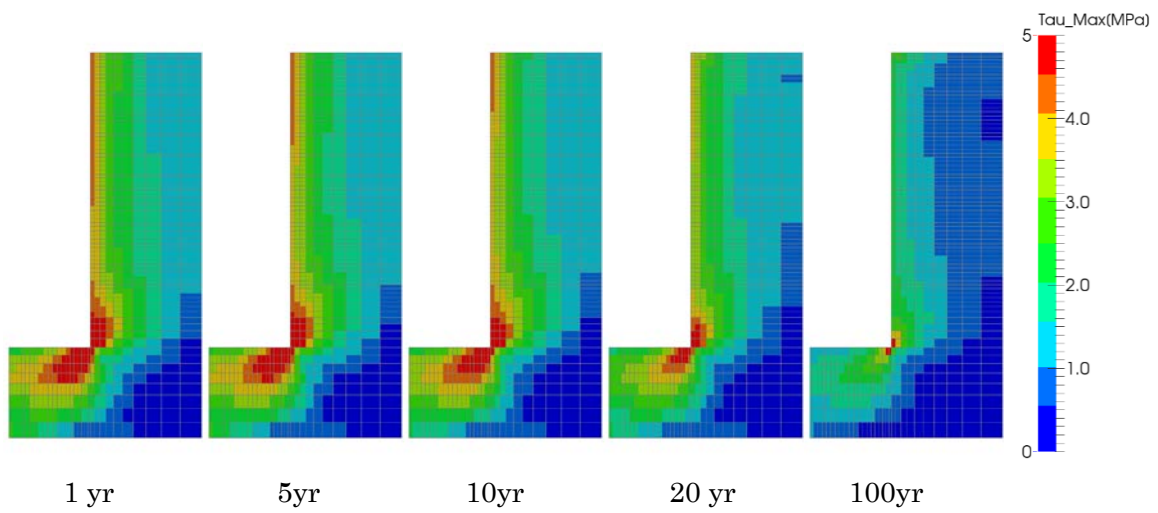


図 6.1.1-143 Case 10 岩盤部分・主せん断応力分布

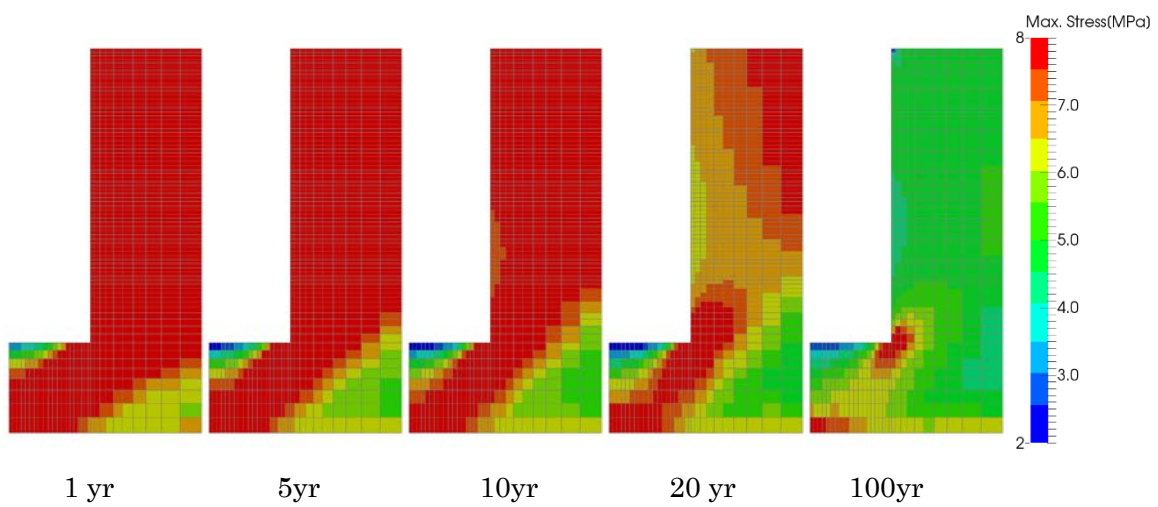


図 6.1.1-144 Case 10 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

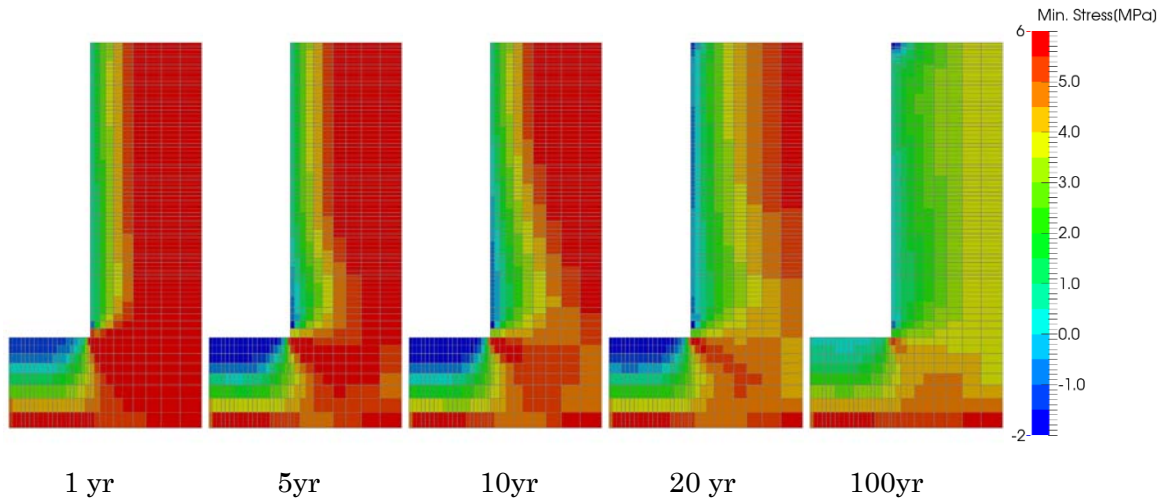


図 6.1.1-145 Case 10 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

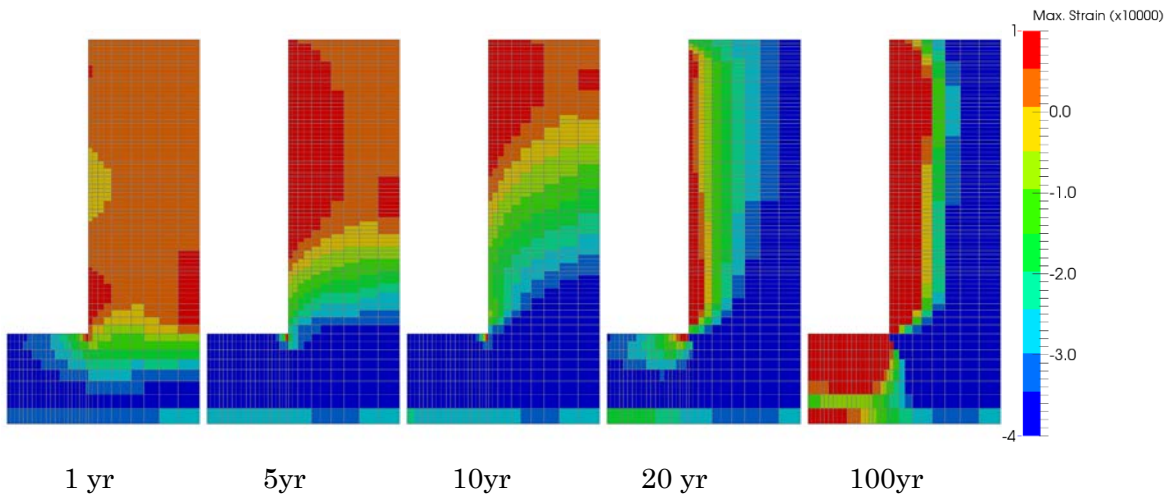


図 6.1.1-146 Case 10 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

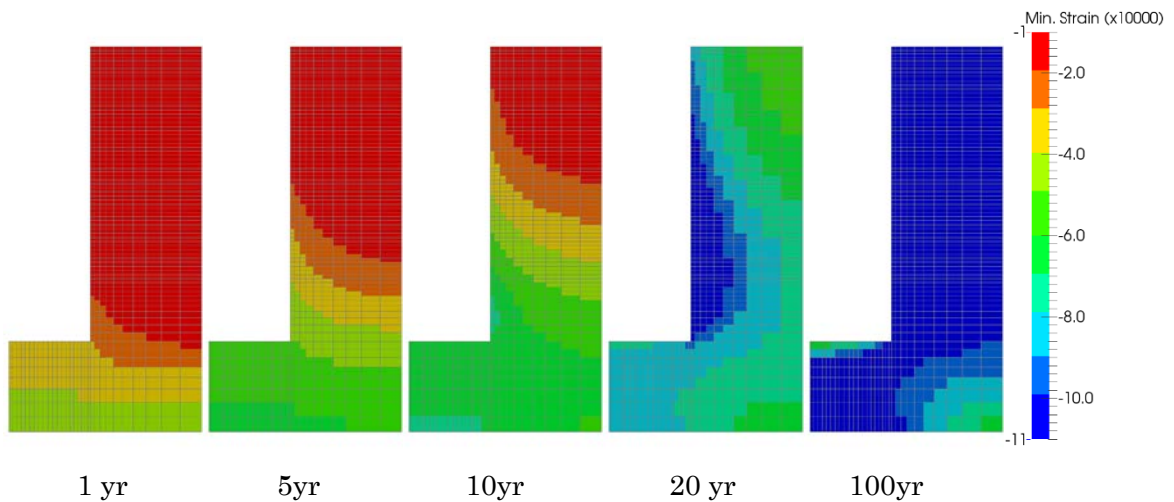


図 6.1.1-147 Case 10 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

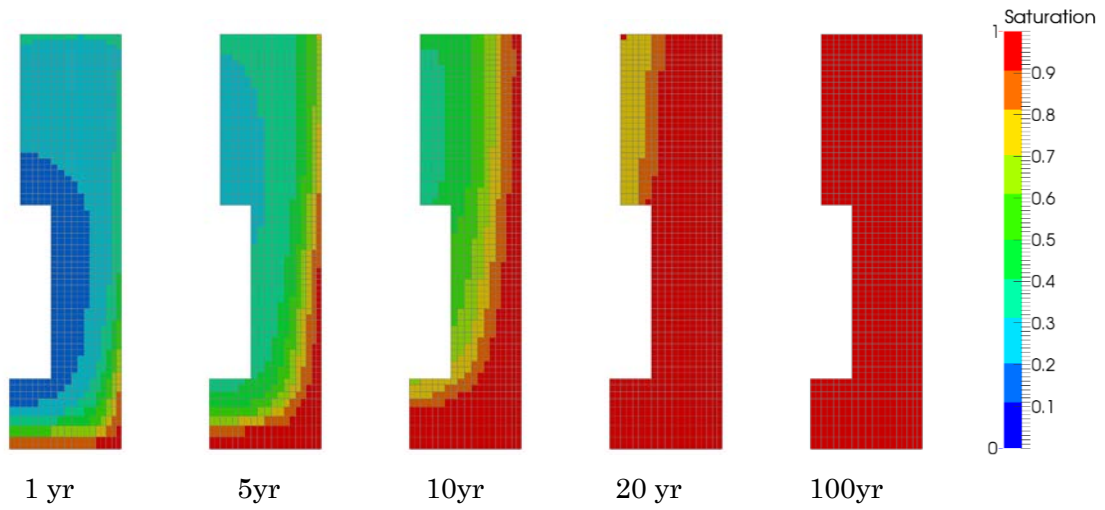


図 6.1.1-148 Case 10 緩衝材部分・飽和度分布

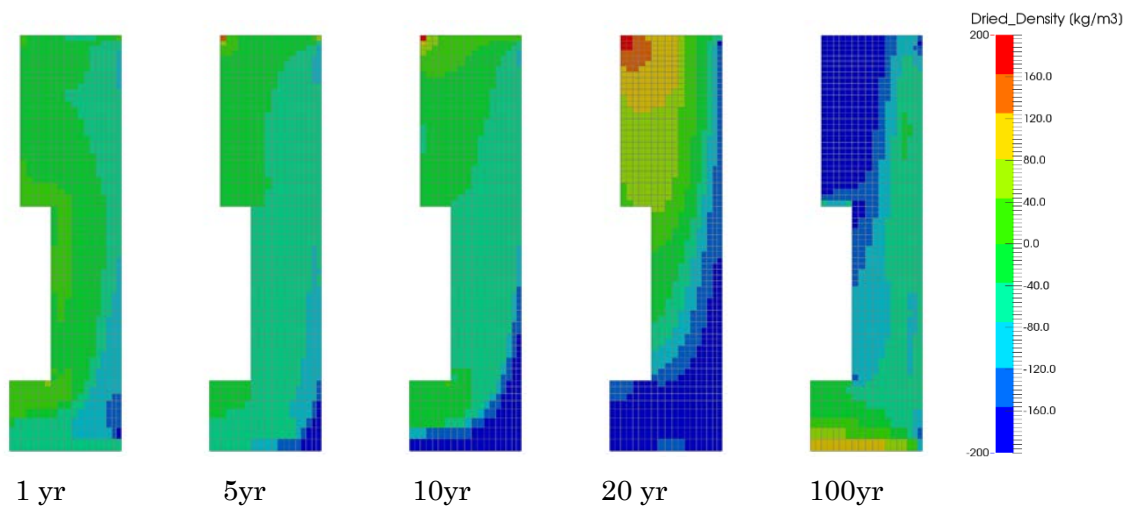


図 6.1.1-149 Case 10 緩衝材部分・乾燥密度分布

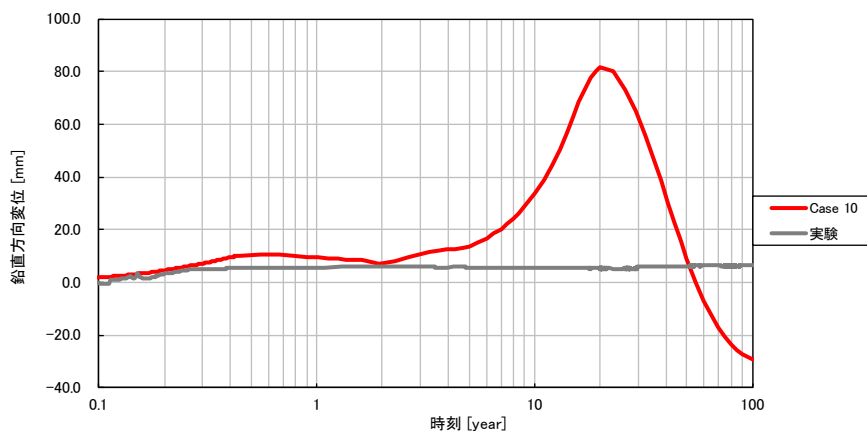


図 6.1.1-150 Case 10 鉛直方向の変位時刻歴

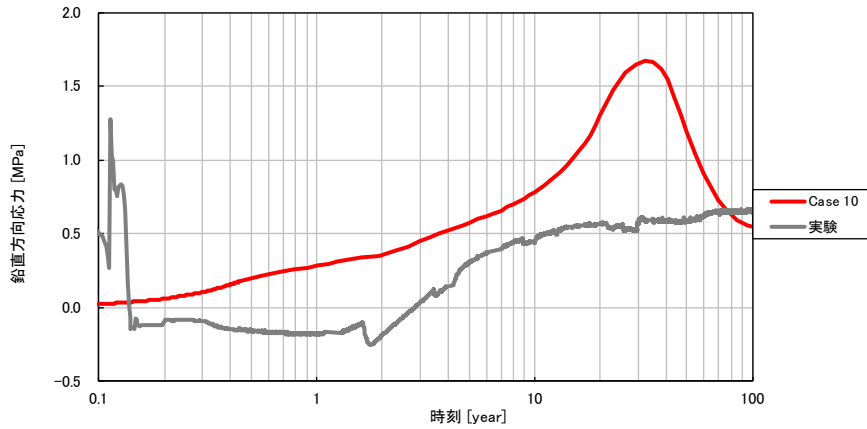


図 6.1.1-151 Case 10 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

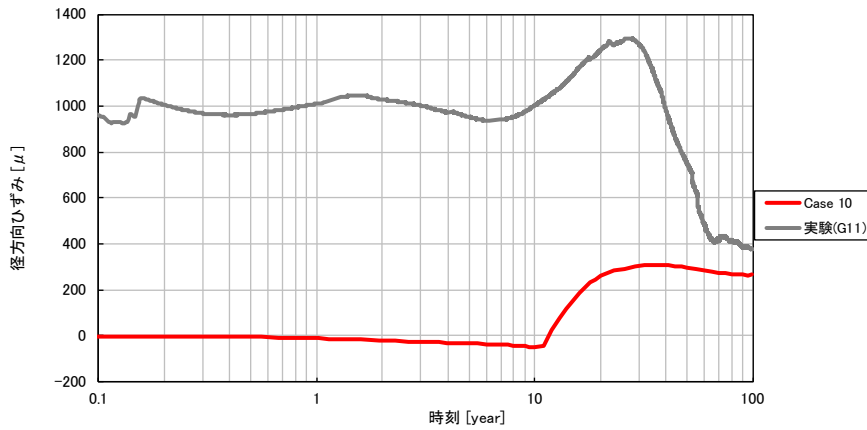


図 6.1.1-152 Case 10 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

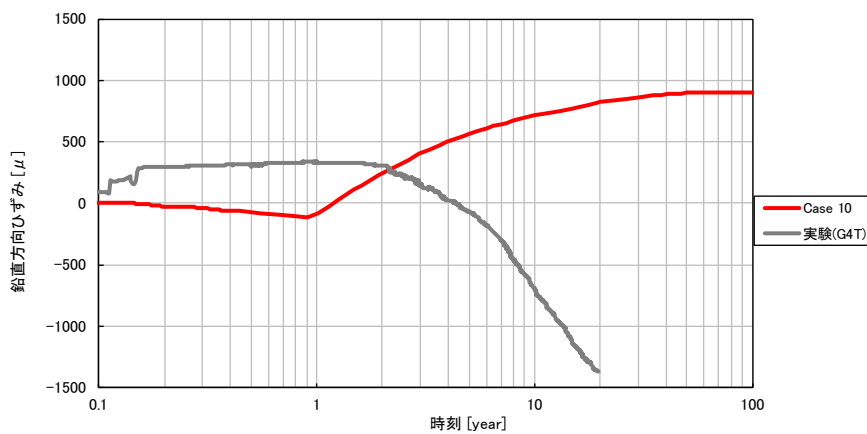


図 6.1.1-153 Case 10 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

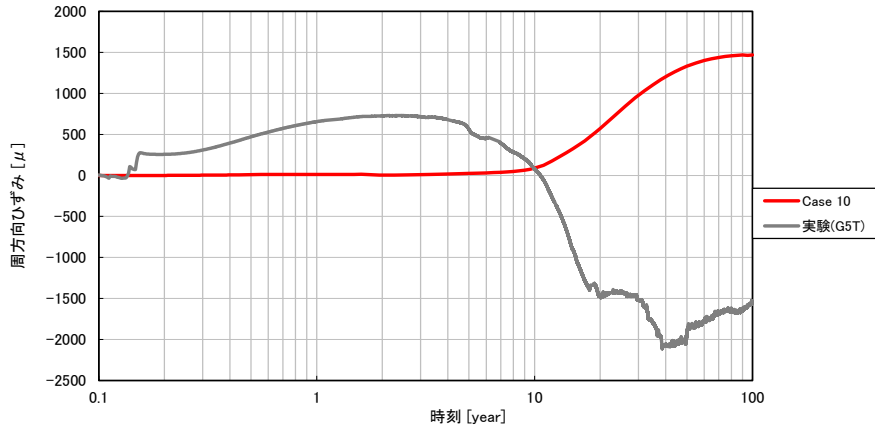


図 6.1.1-154 Case 10 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(12) Case 11

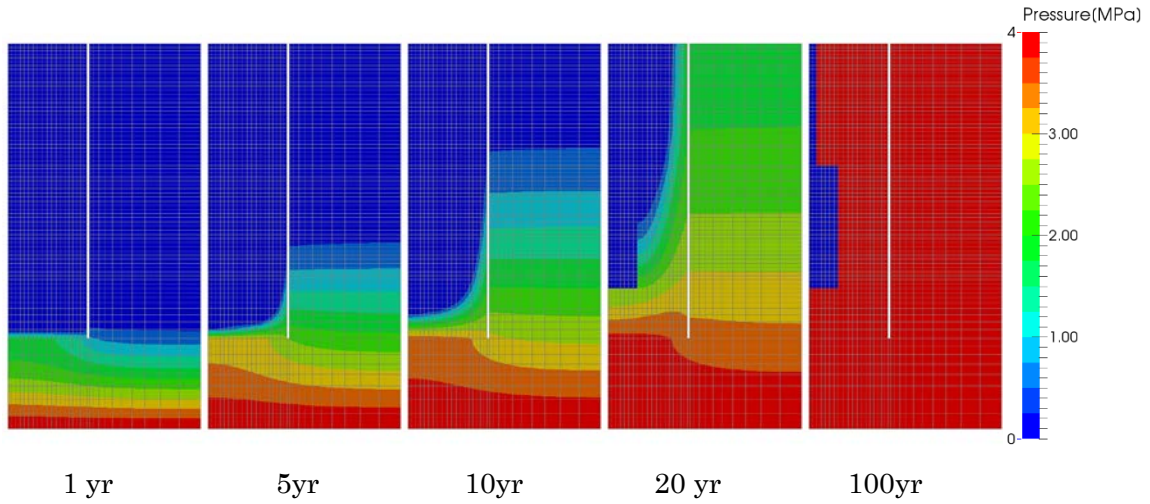


図 6.1.1-155 Case 11 岩盤部分・間隙水圧分布

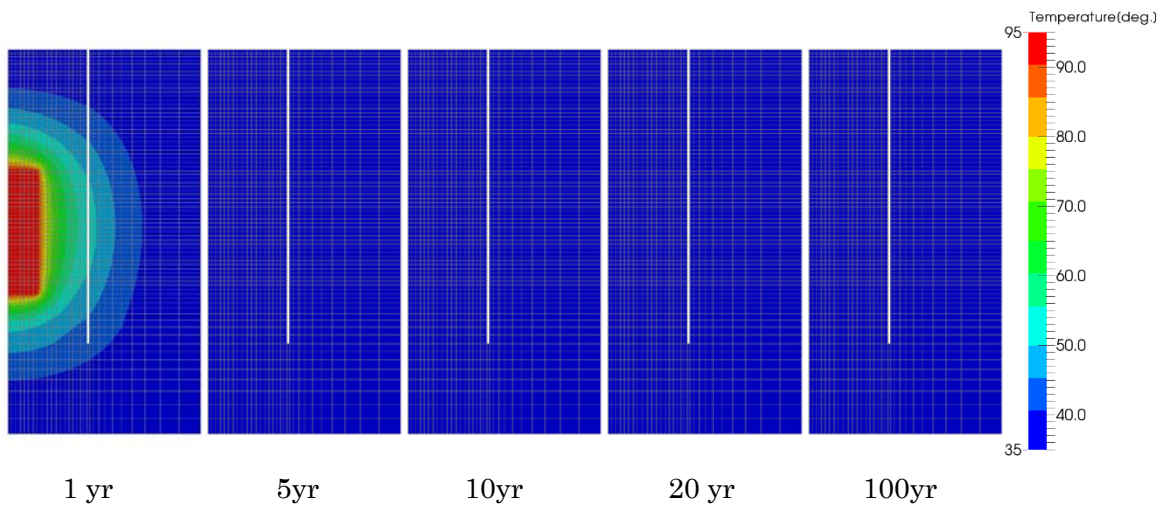


図 6.1.1-156 Case 11 岩盤部分・温度分布

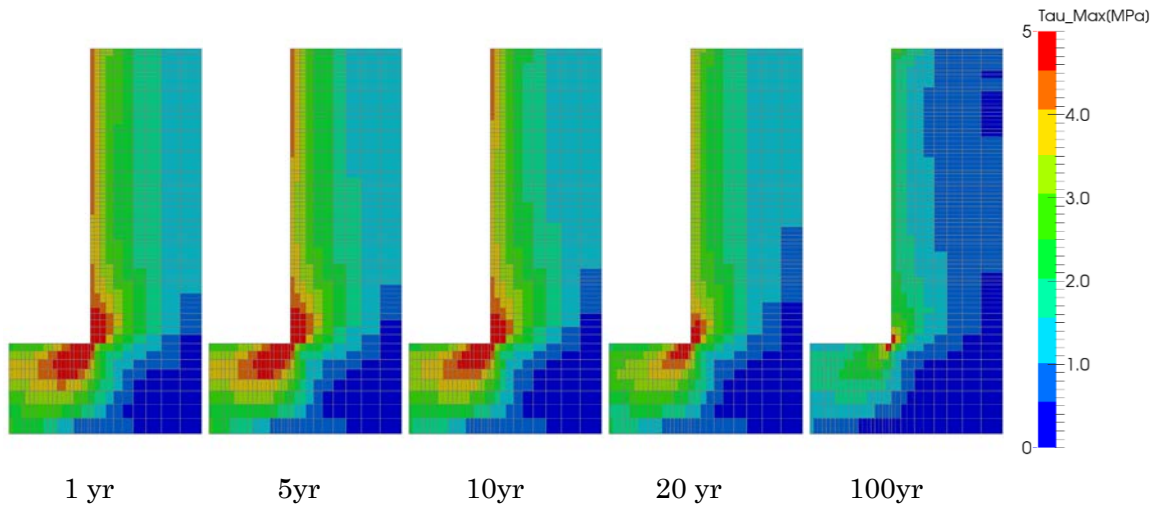


図 6.1.1-157 Case 11 岩盤部分・主せん断応力分布

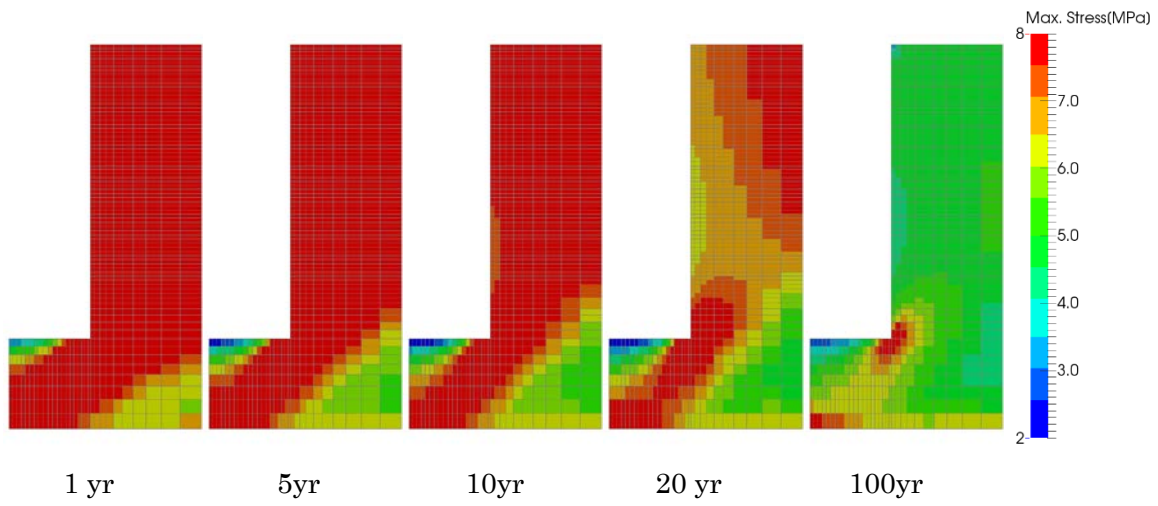


図 6.1.1-158 Case 11 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

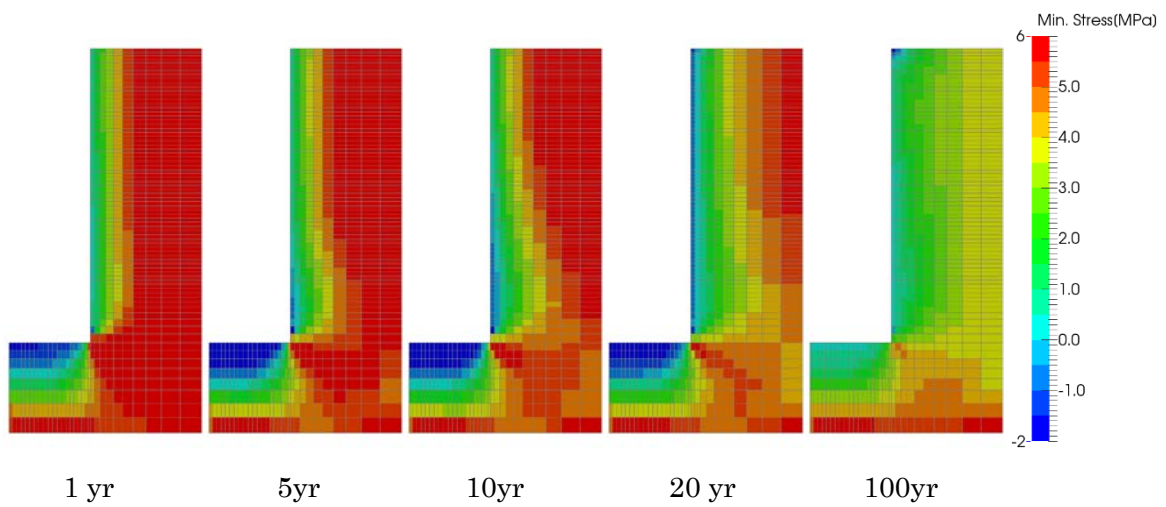


図 6.1.1-159 Case 11 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

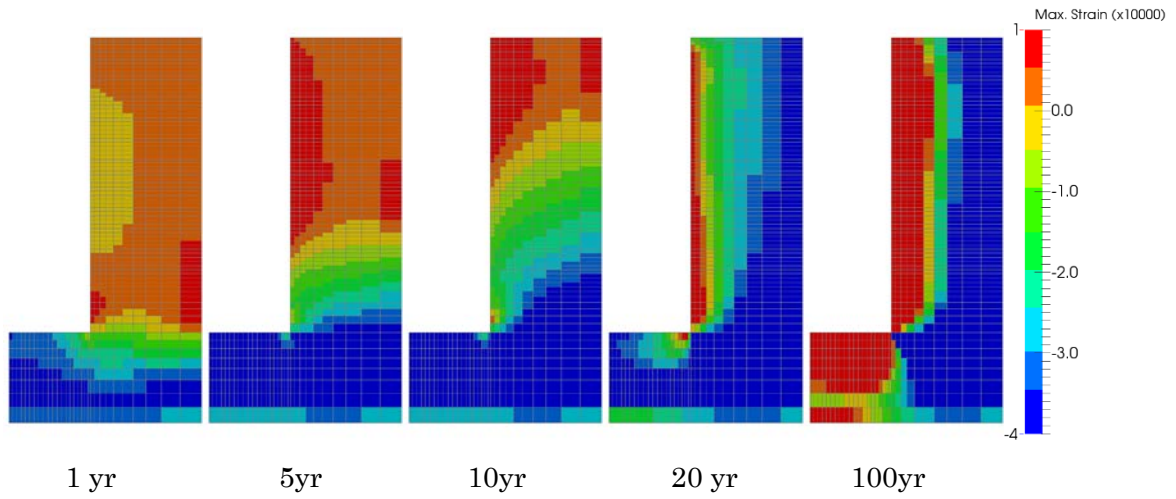


図 6.1.1-160 Case 11 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

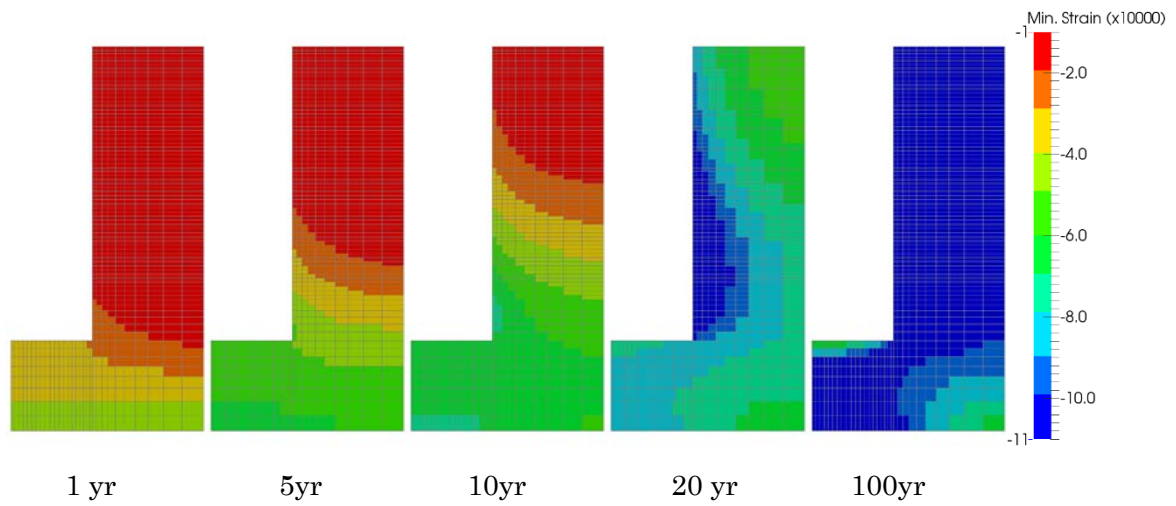


図 6.1.1-161 Case 11 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

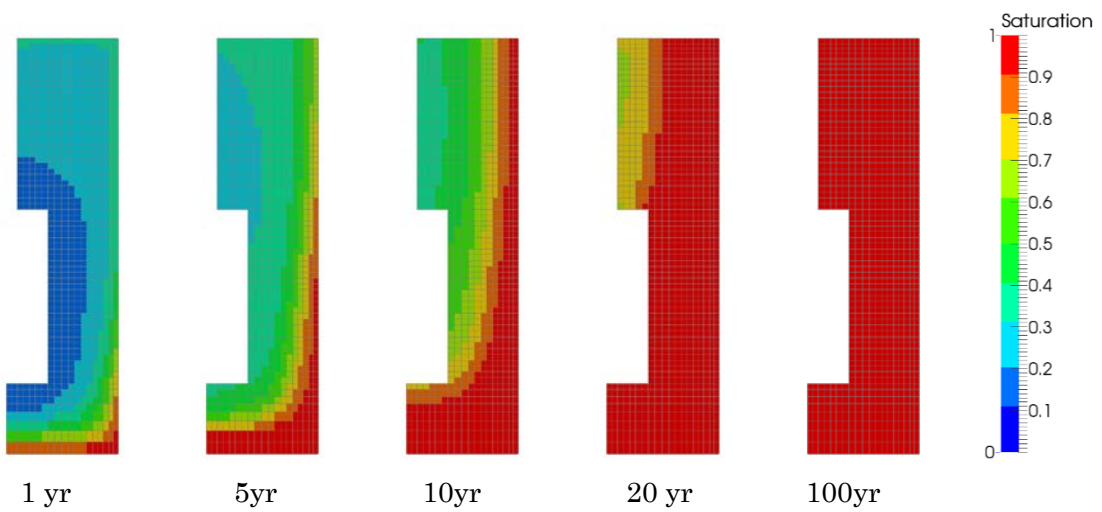


図 6.1.1-162 Case 11 緩衝材部分・飽和度分布

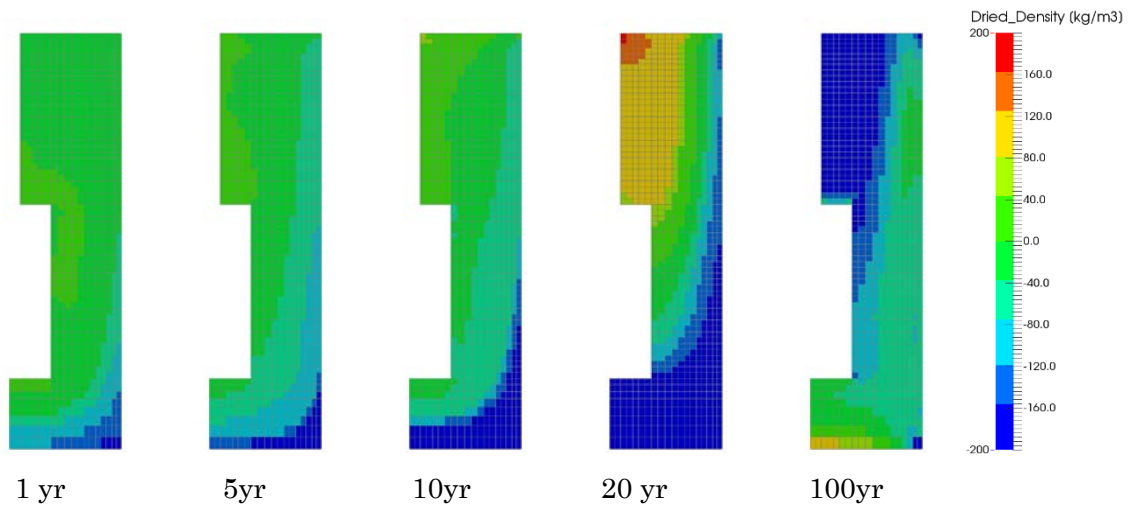


図 6.1.1-163 Case 11 緩衝材部分・乾燥密度分布

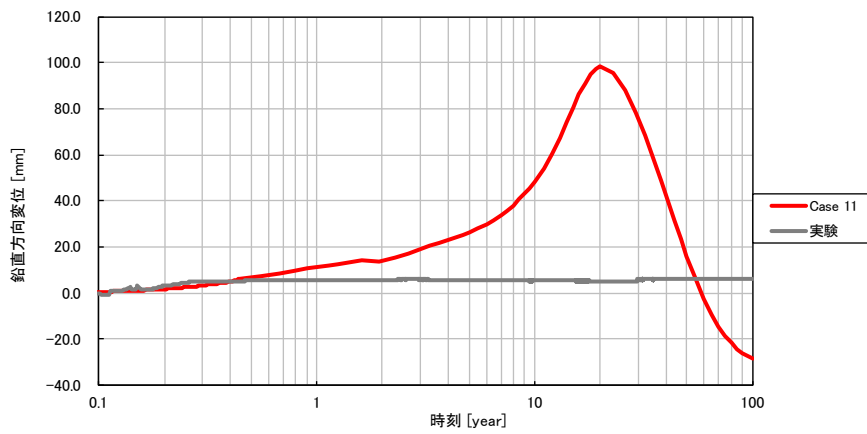


図 6.1.1-164 Case 11 鉛直方向の変位時刻歴

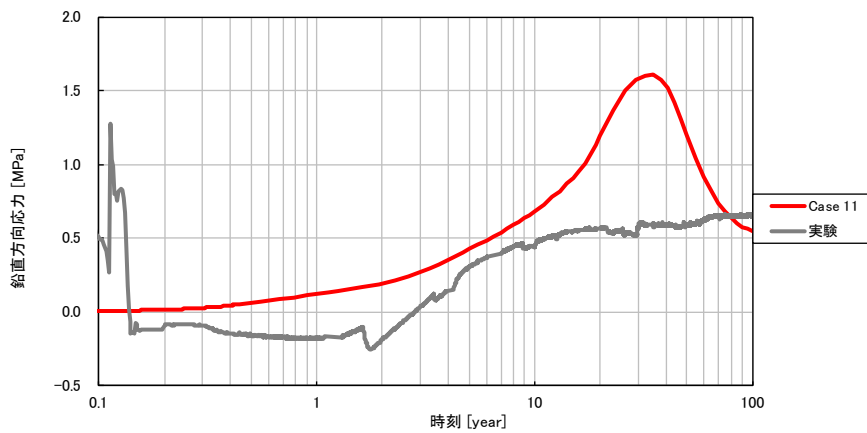


図 6.1.1-165 Case 11 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

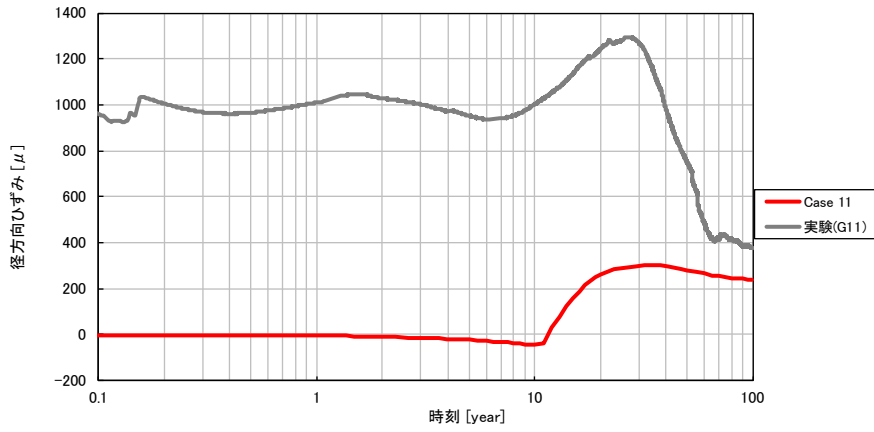


図 6.1.1-166 Case 11 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

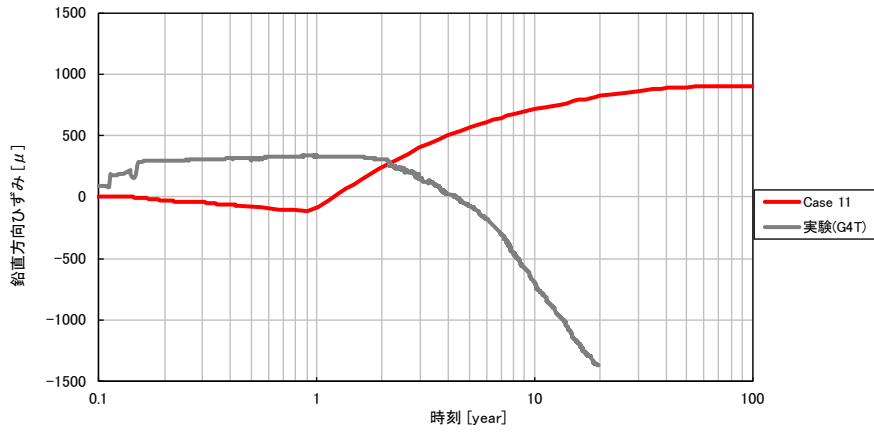


図 6.1.1-167 Case 11 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

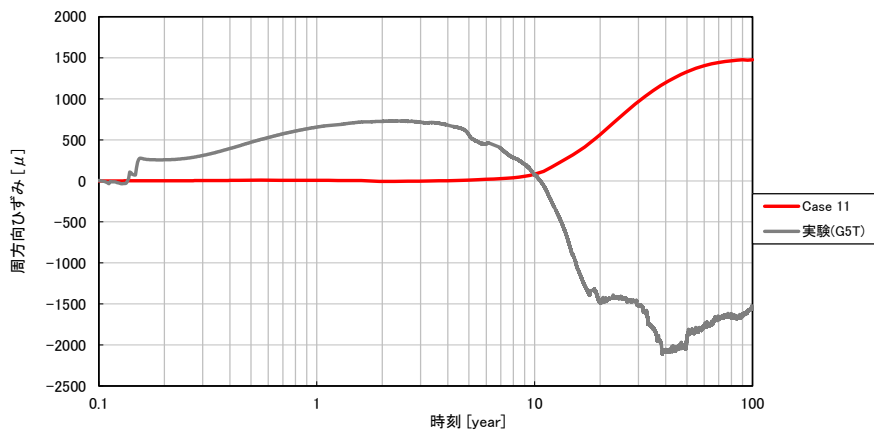


図 6.1.1-168 Case 11 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(13) Case 12

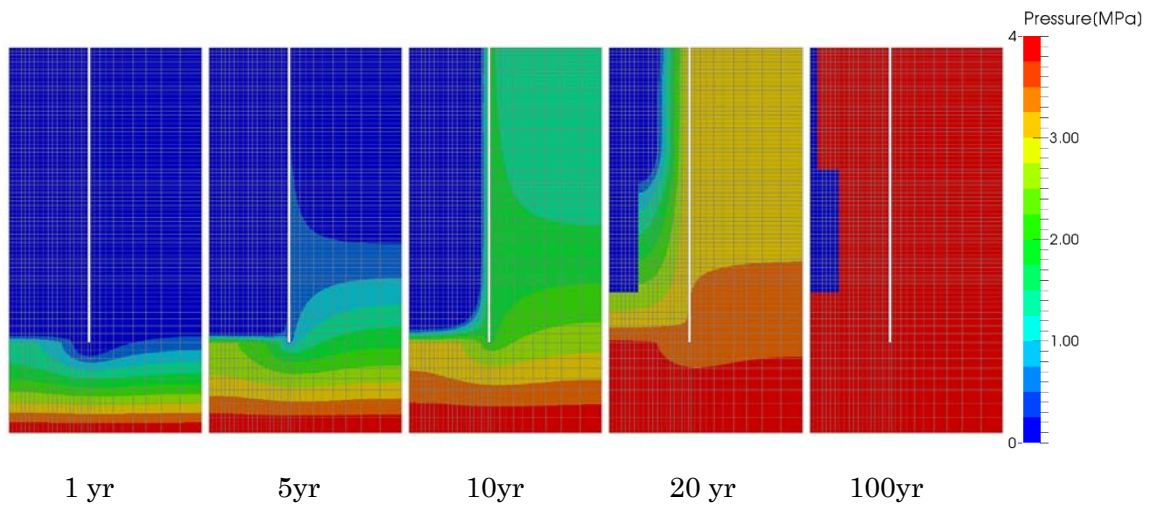


図 6.1.1-169 Case 12 岩盤部分・間隙水压分布

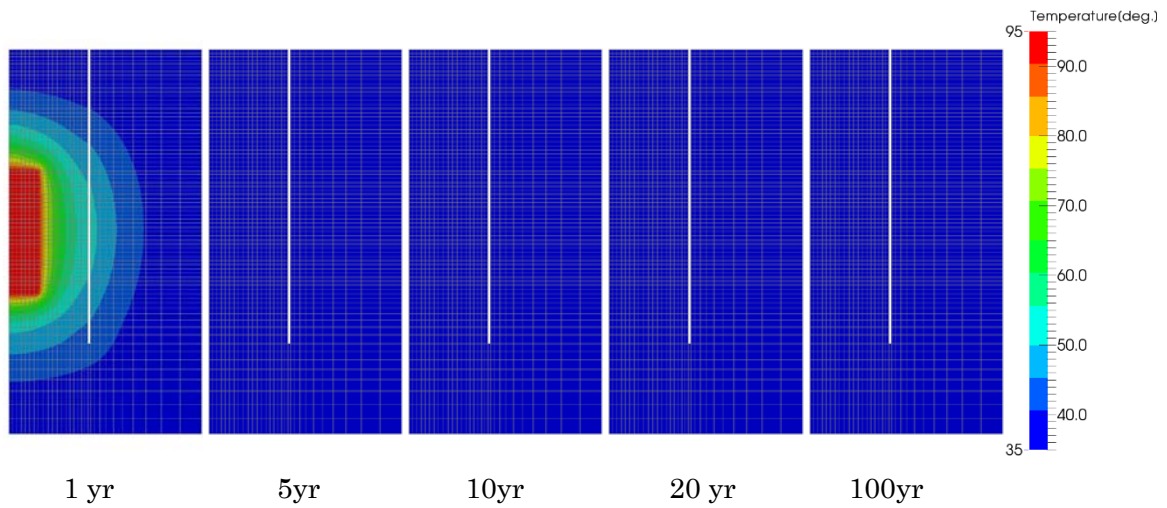


図 6.1.1-170 Case 12 岩盤部分・温度分布

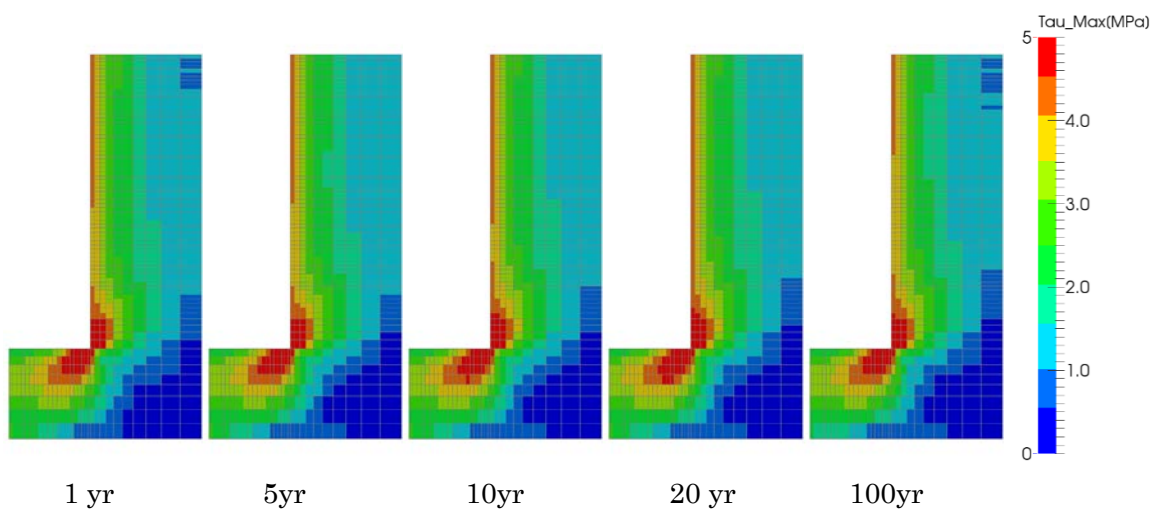


図 6.1.1-171 Case 12 岩盤部分・主せん断応力分布

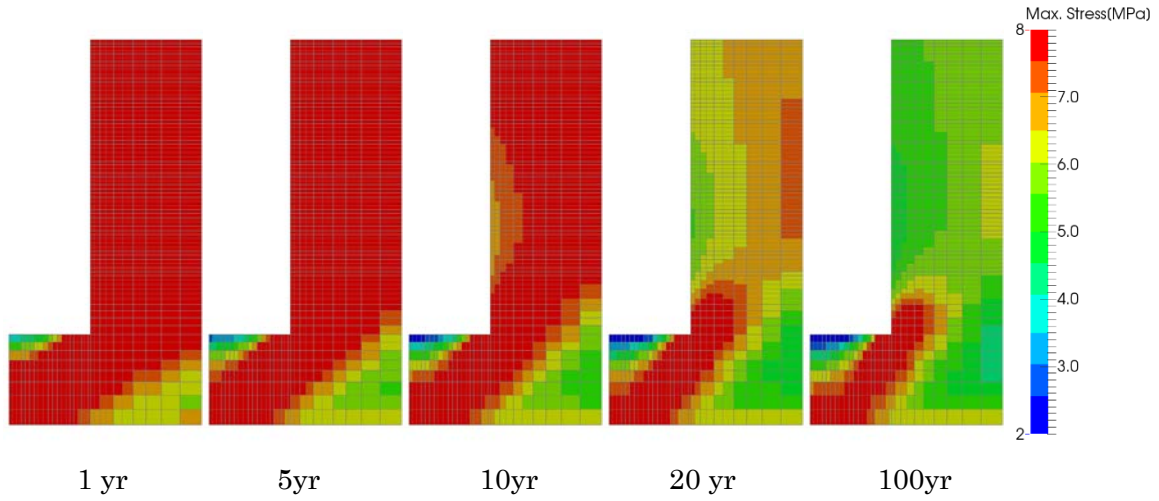


図 6.1.1-172 Case 12 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

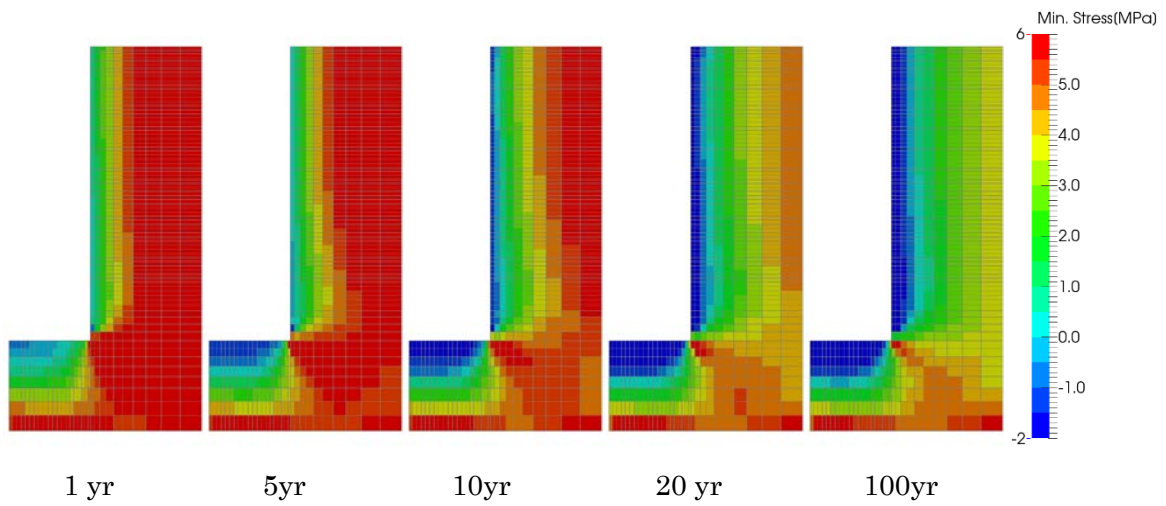


図 6.1.1-173 Case 12 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

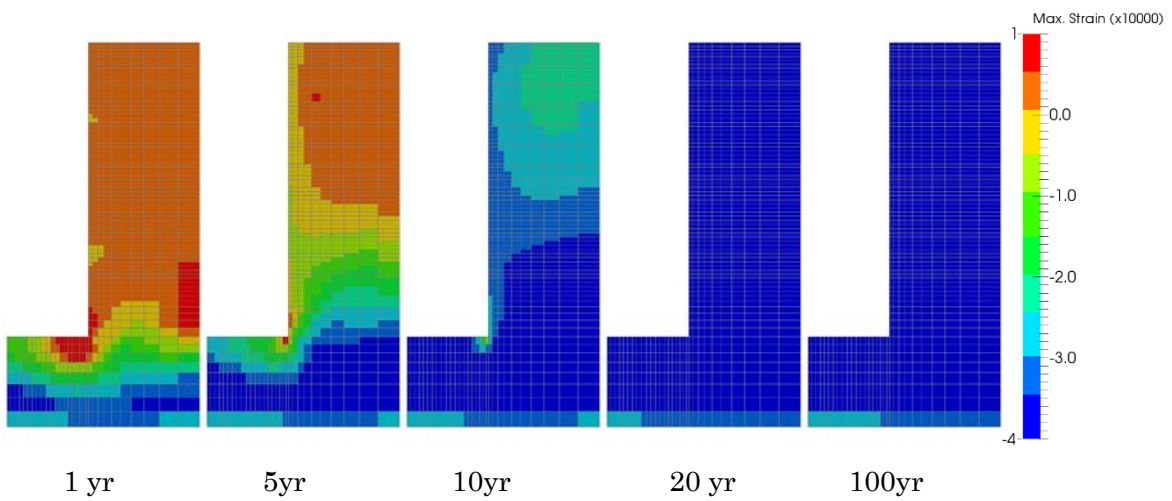


図 6.1.1-174 Case 12 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

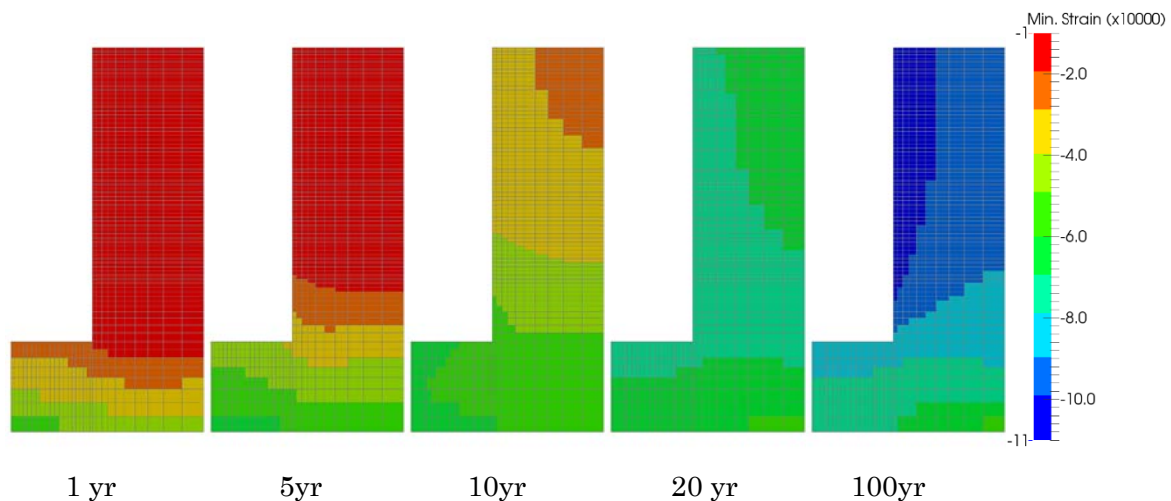


図 6.1.1-175 Case 12 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

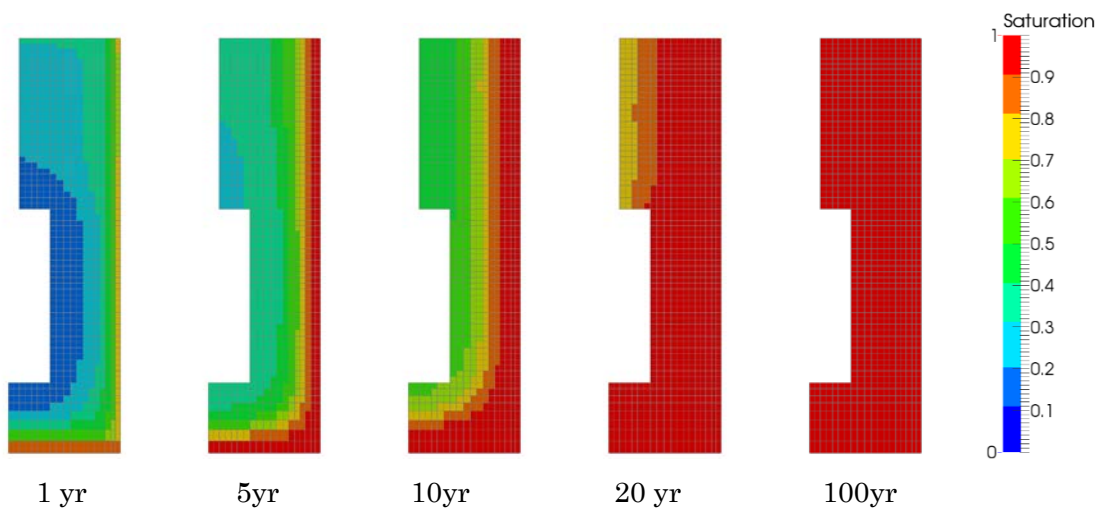


図 6.1.1-176 Case 12 緩衝材部分・飽和度分布

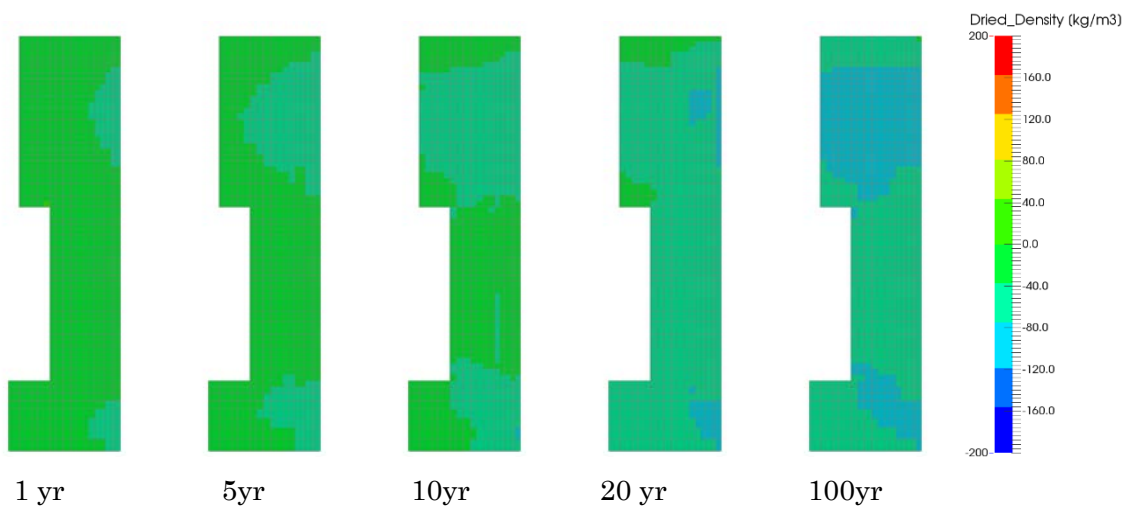


図 6.1.1-177 Case 12 緩衝材部分・乾燥密度分布

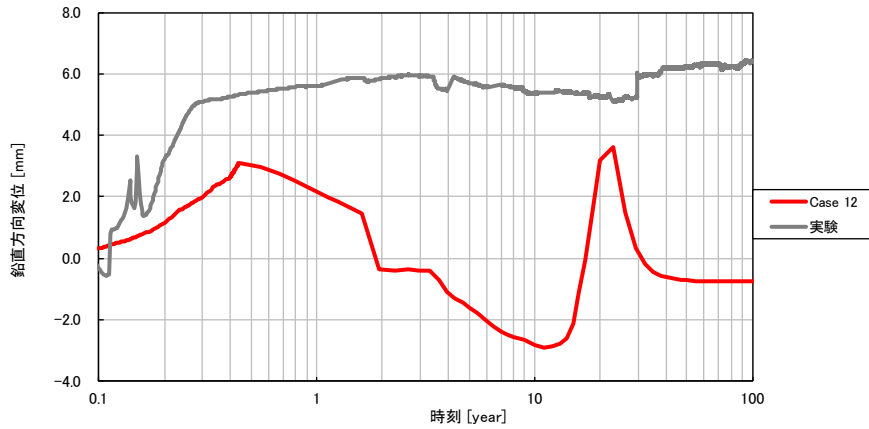


図 6.1.1-178 Case 12 鉛直方向の変位時刻歴

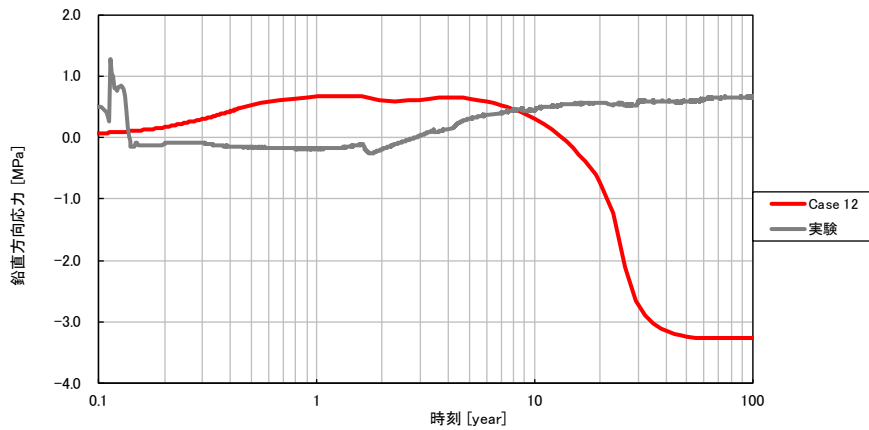


図 6.1.1-179 Case 12 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

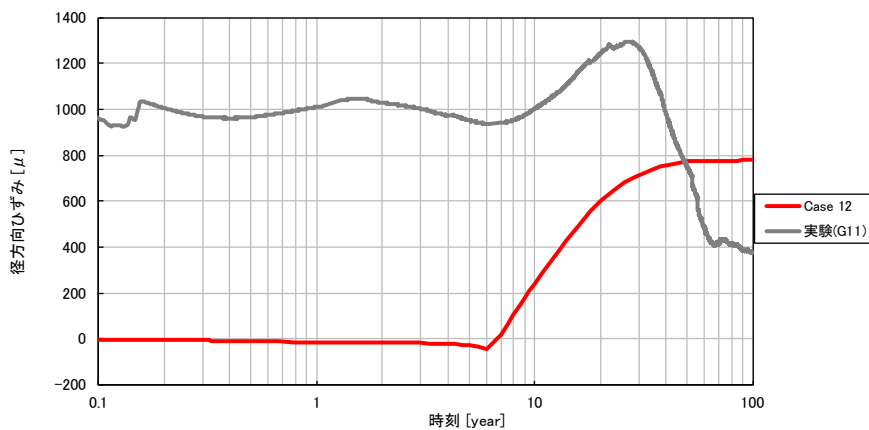


図 6.1.1-180 Case 12 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

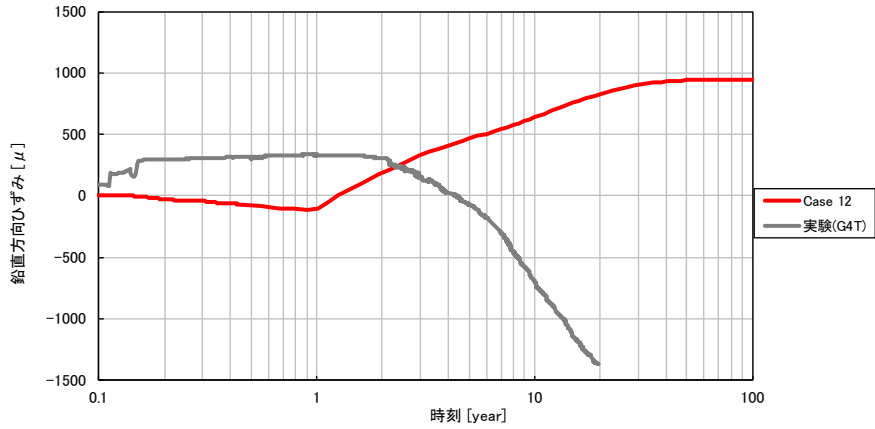


図 6.1.1-181 Case 12 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

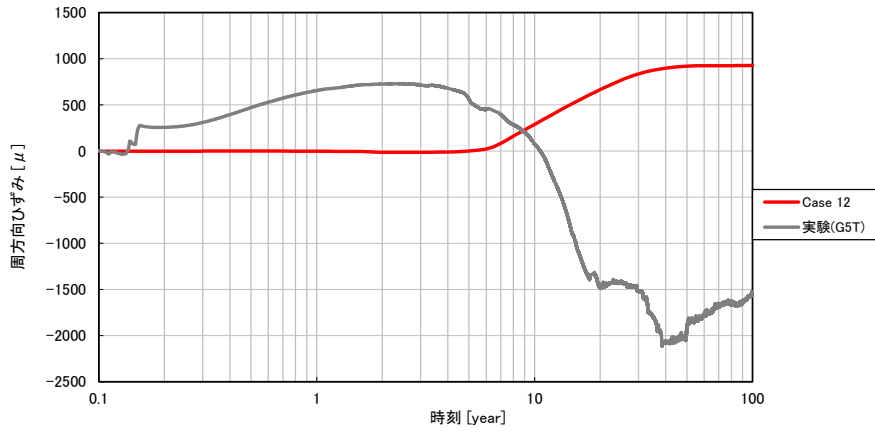


図 6.1.1-182 Case 12 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(14) Case 13

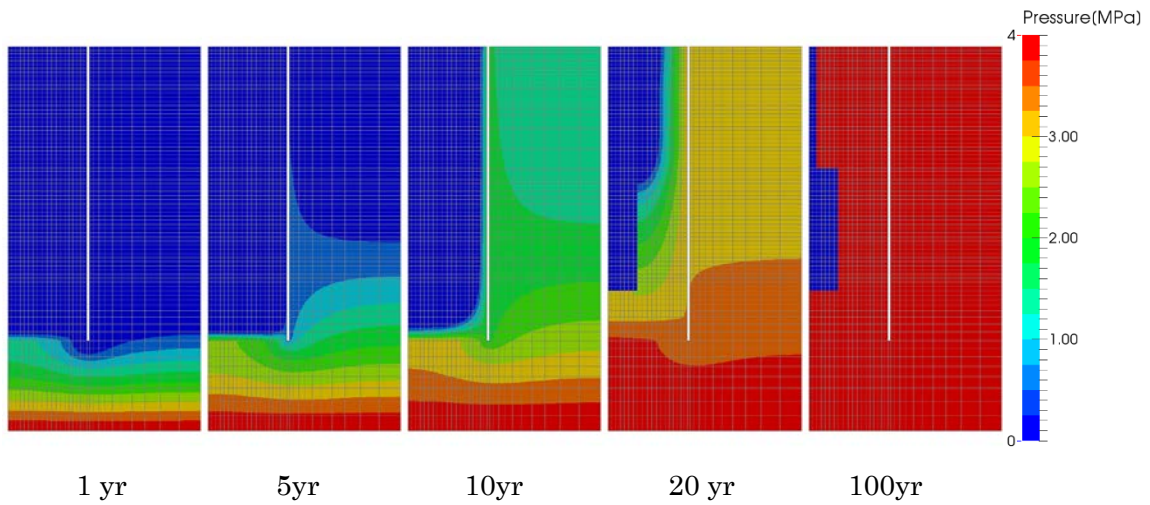


図 6.1.1-183 Case 13 岩盤部分・間隙水圧分布

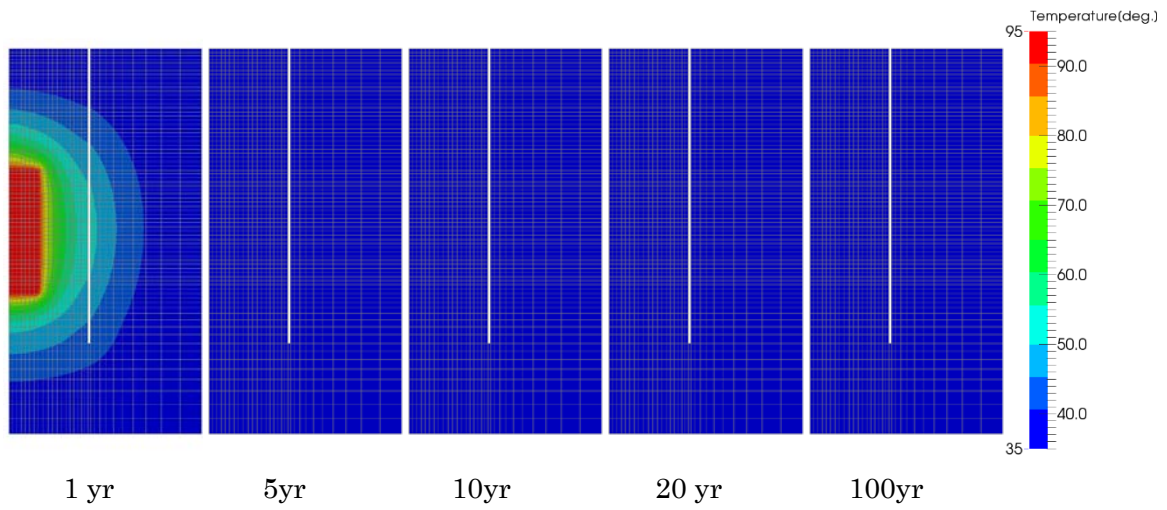


図 6.1.1-184 Case 13 岩盤部分・温度分布

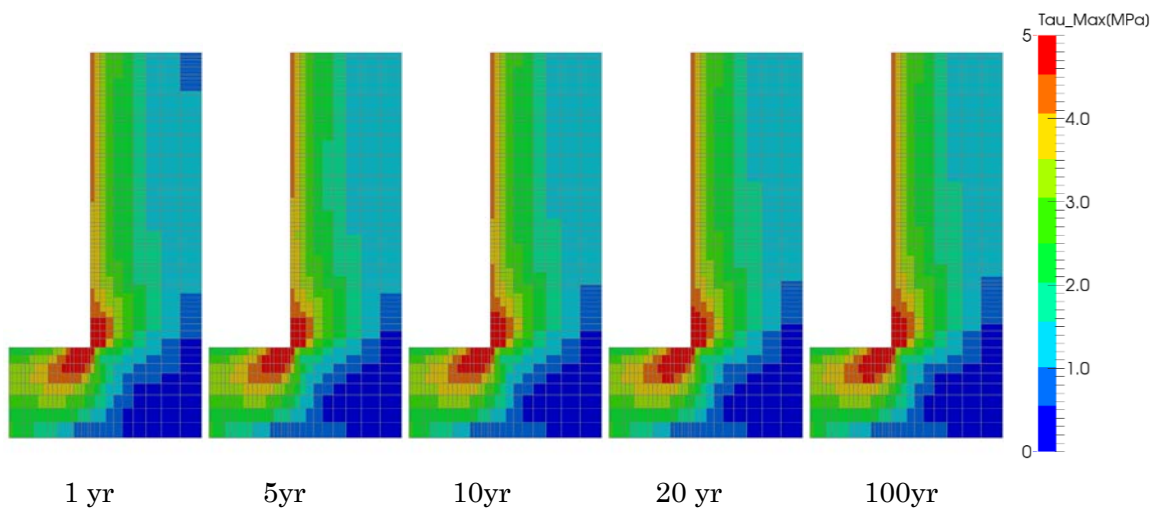


図 6.1.1-185 Case 13 岩盤部分・主せん断応力分布

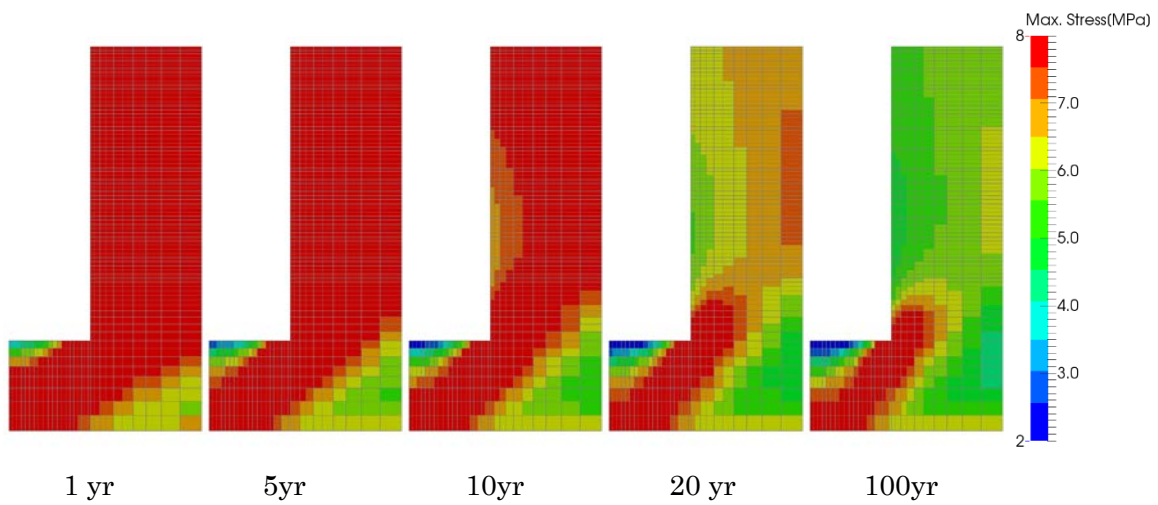


図 6.1.1-186 Case 13 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

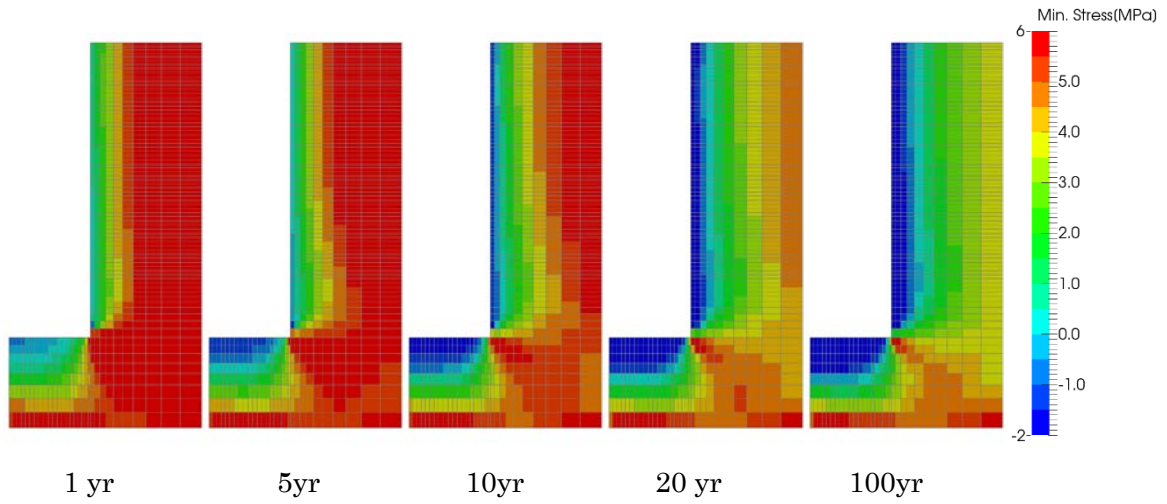


図 6.1.1-187 Case 13 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

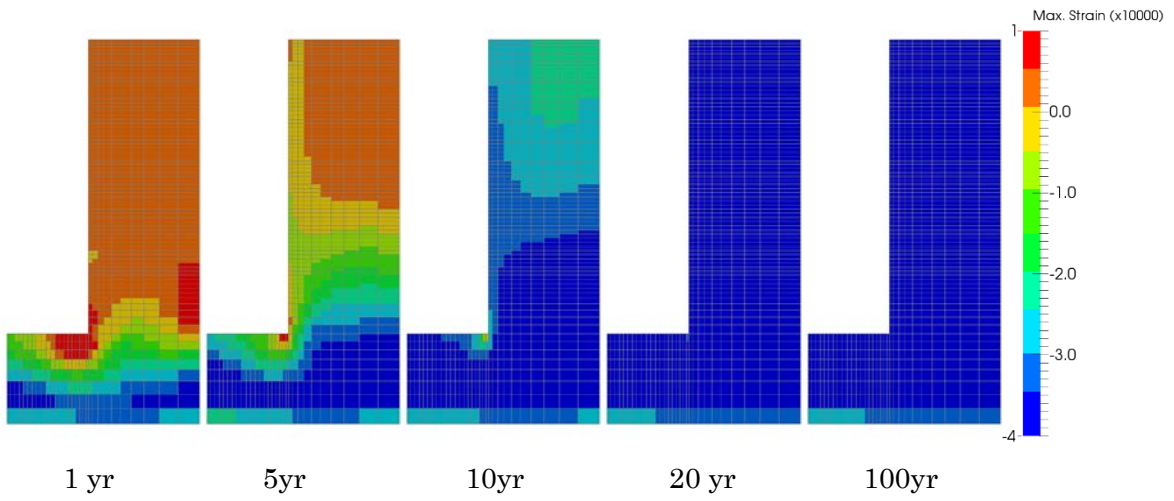


図 6.1.1-188 Case 13 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

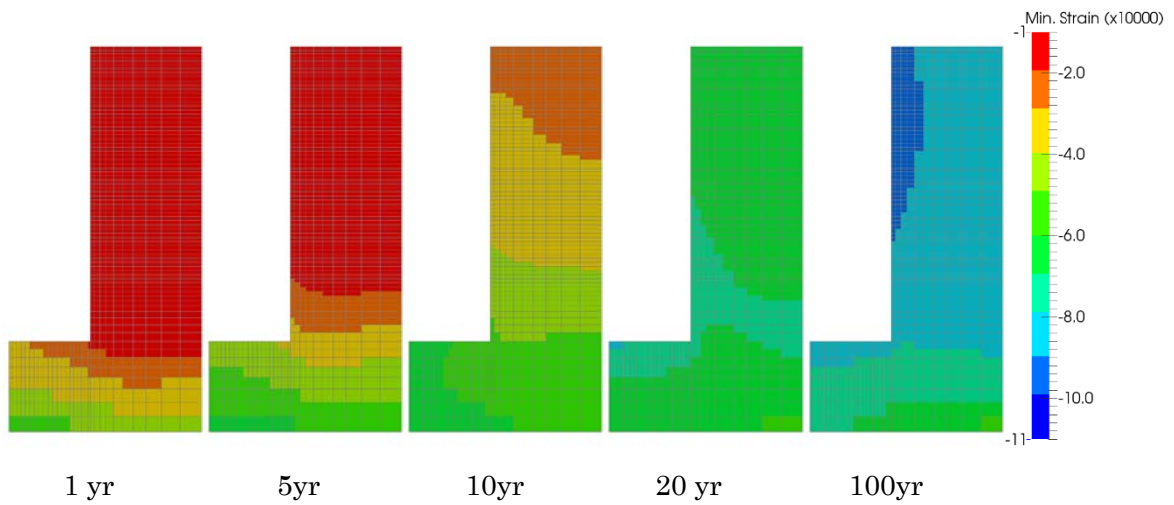


図 6.1.1-189 Case 13 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

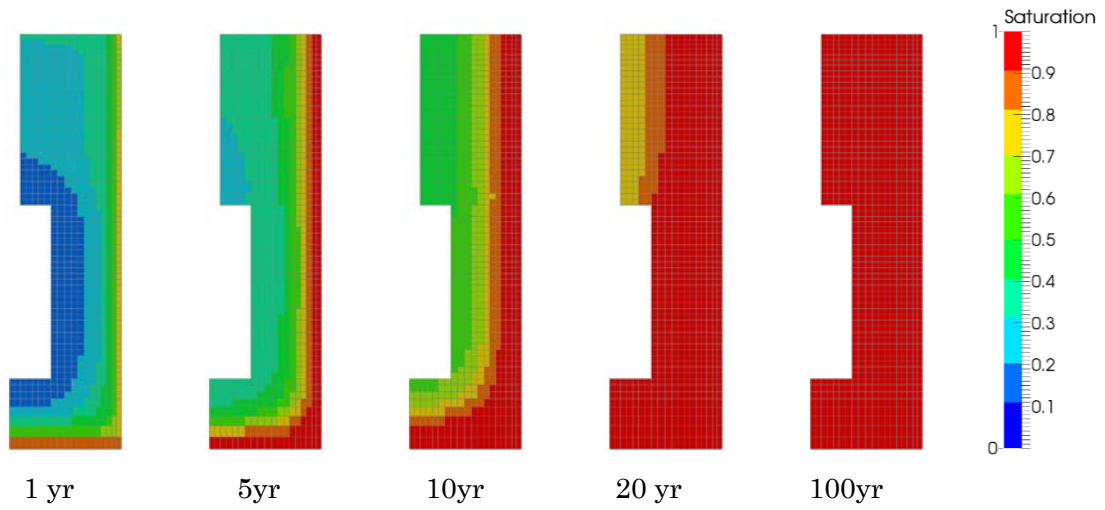


図 6.1.1-190 Case 13 緩衝材部分・飽和度分布

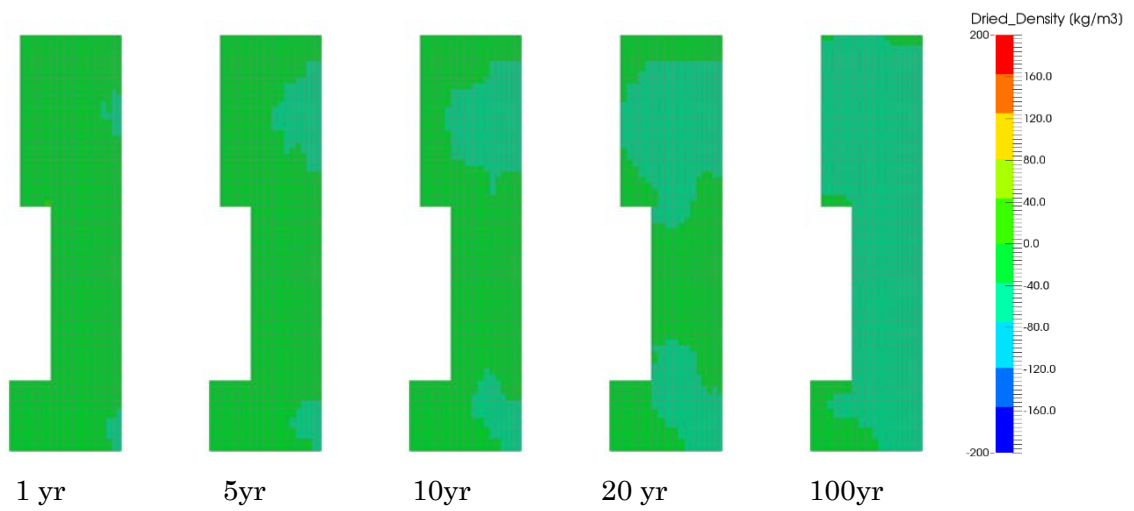


図 6.1.1-191 Case 13 緩衝材部分・乾燥密度分布

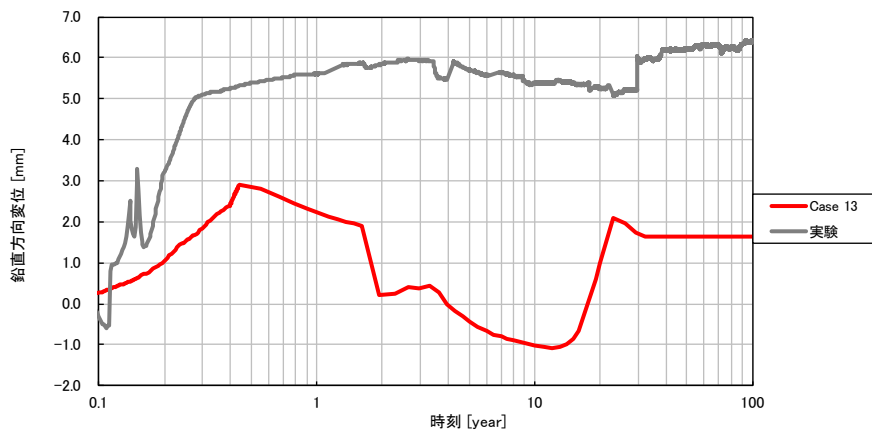


図 6.1.1-192 Case 13 鉛直方向の変位時刻歴

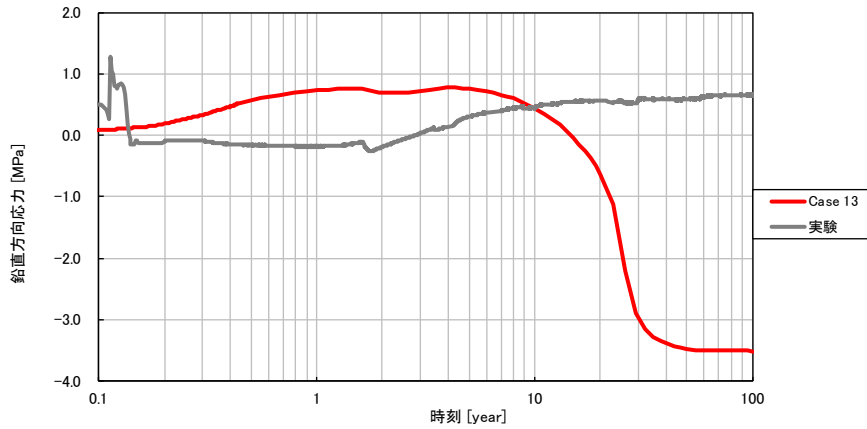


図 6.1.1-193 Case 13 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

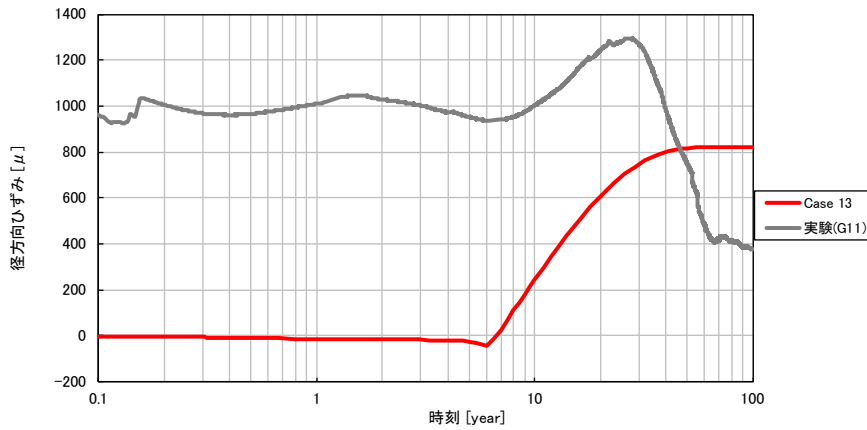


図 6.1.1-194 Case 13 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

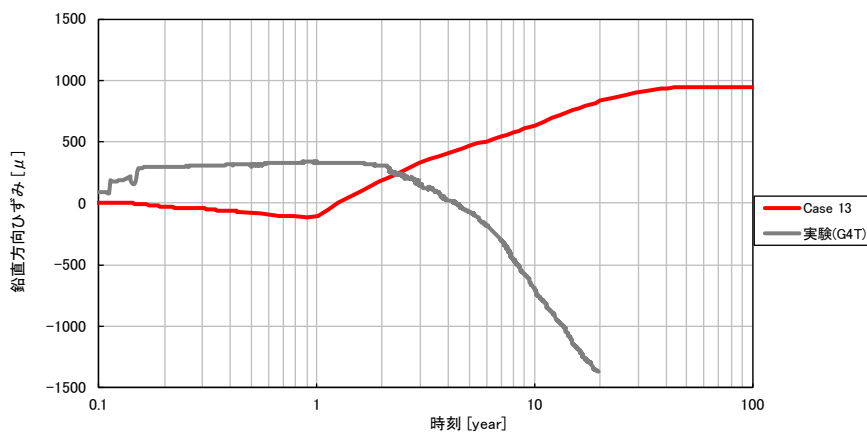


図 6.1.1-195 Case 13 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

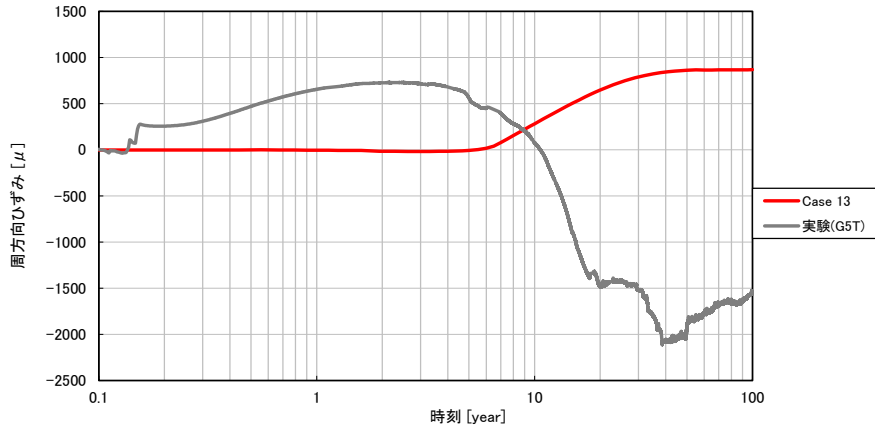


図 6.1.1-196 Case 13 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(15) Case 14

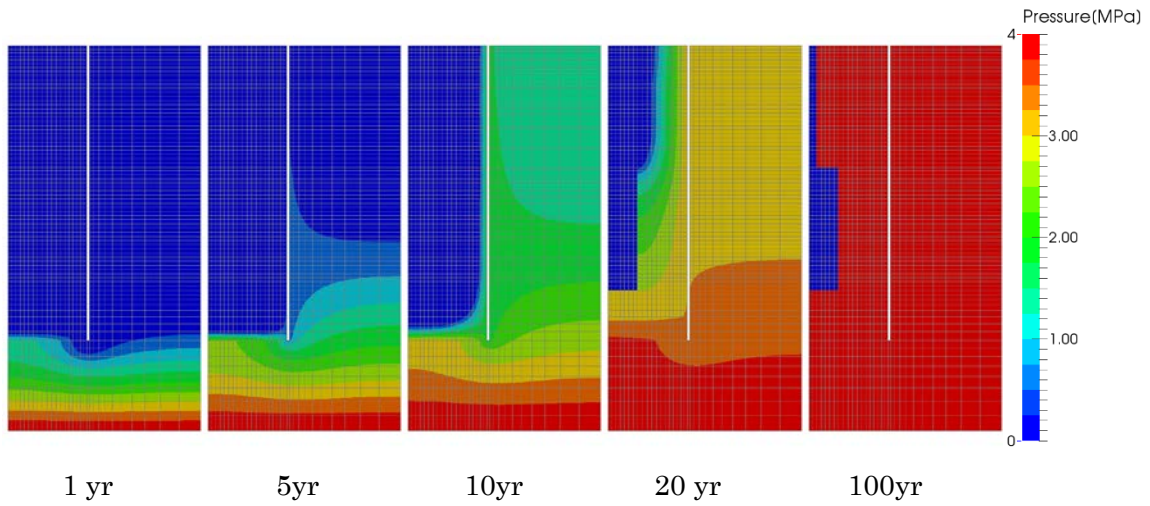


図 6.1.1-197 Case 14 岩盤部分・間隙水圧分布

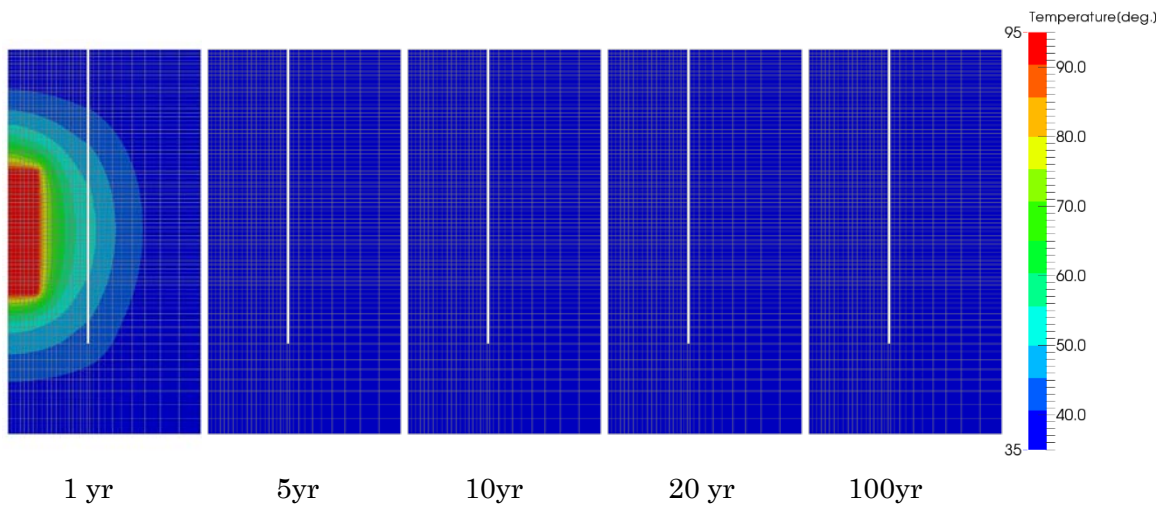


図 6.1.1-198 Case 14 岩盤部分・温度分布

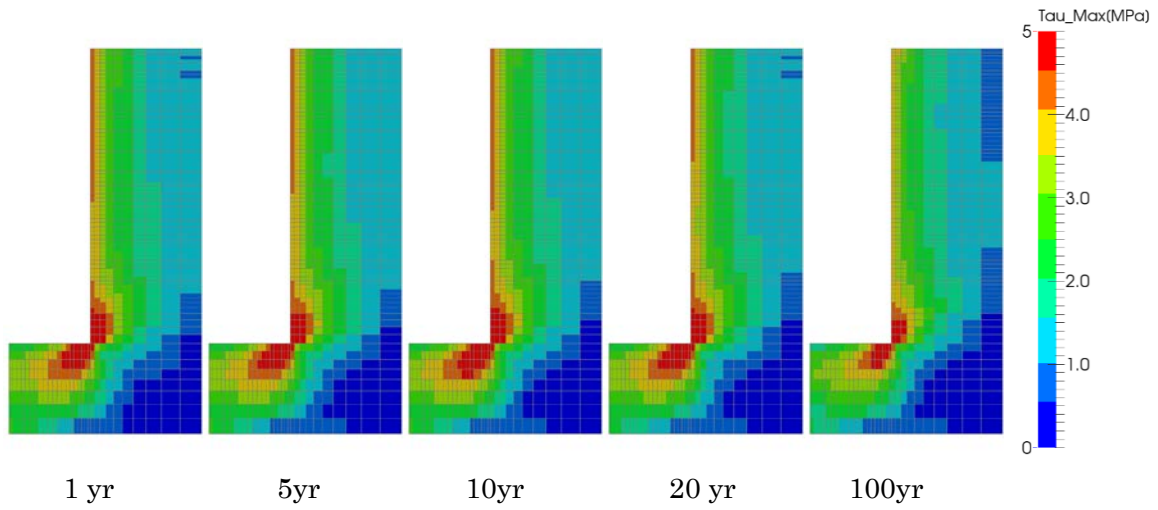


図 6.1.1-199 Case 14 岩盤部分・主せん断応力分布

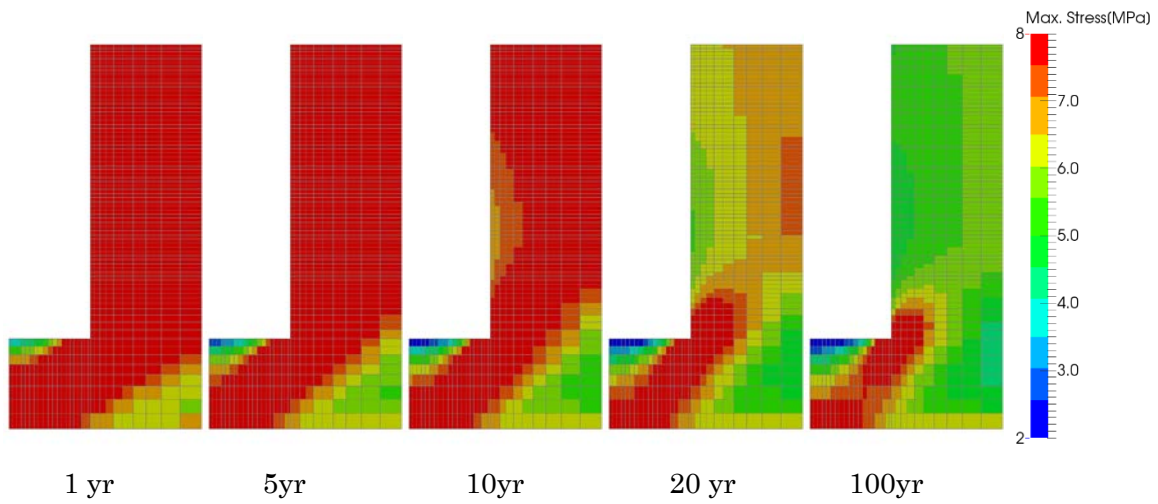


図 6.1.1-200 Case 14 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

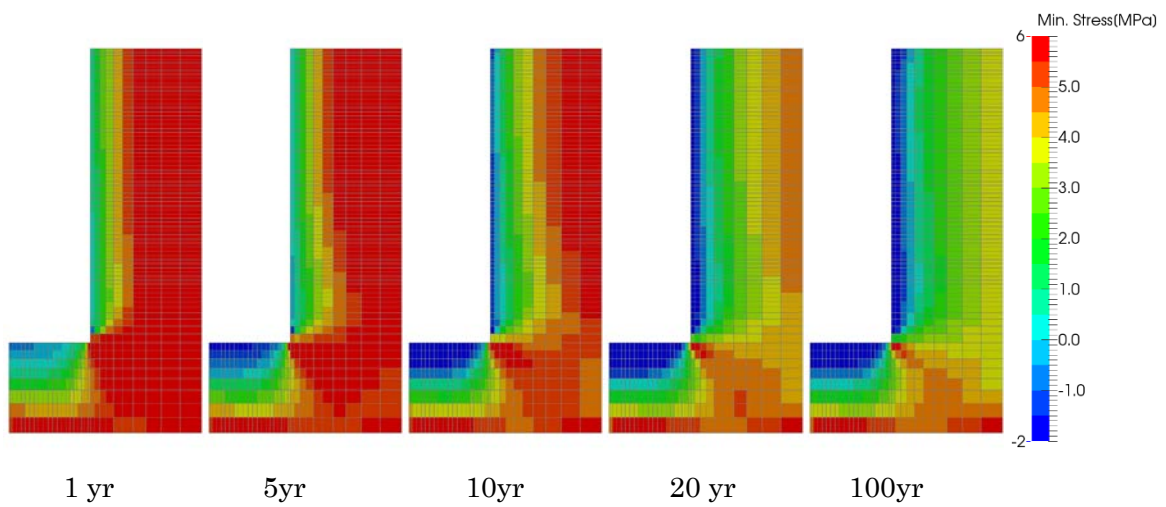


図 6.1.1-201 Case 14 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

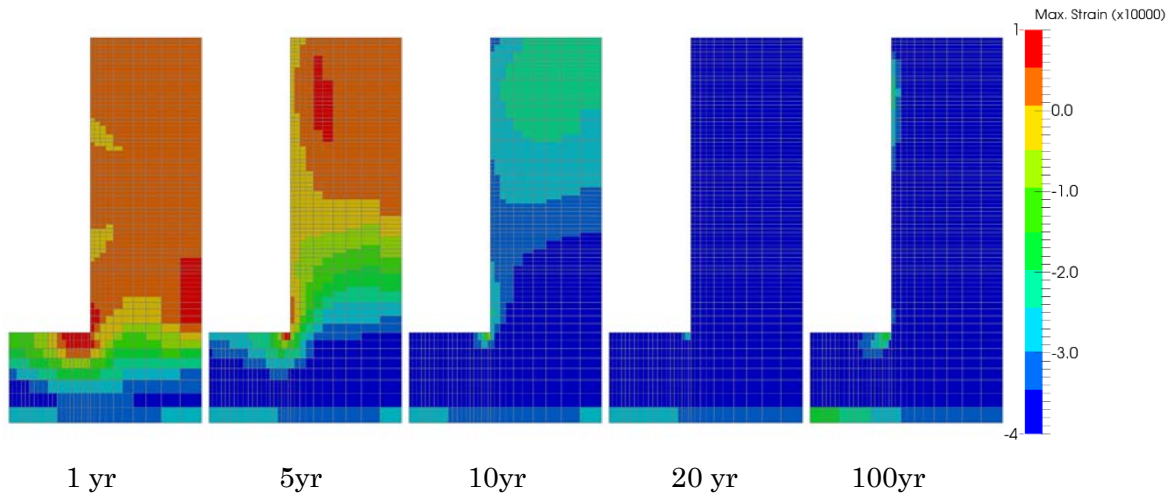


図 6.1.1-202 Case 14 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

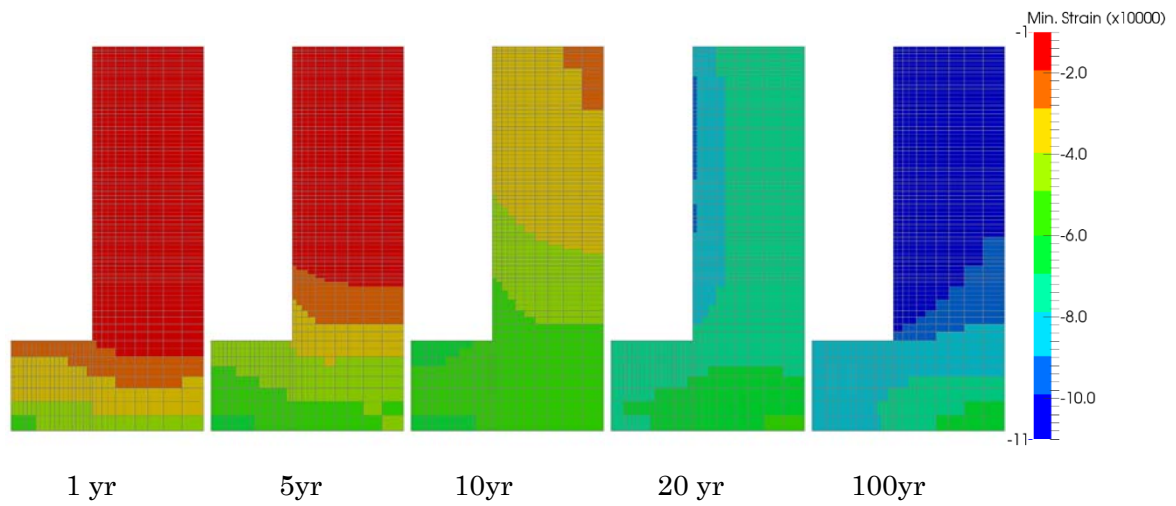


図 6.1.1-203 Case 14 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

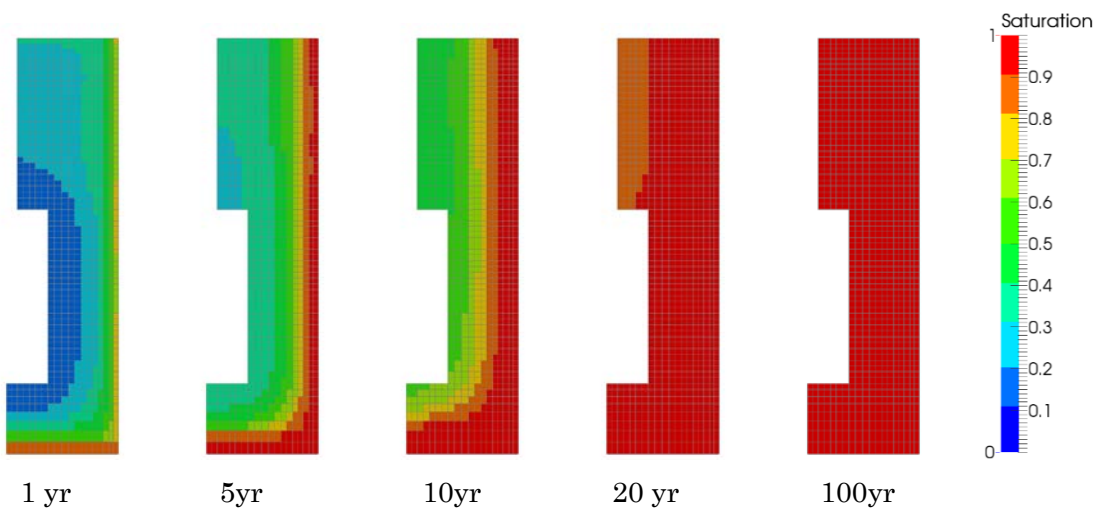


図 6.1.1-204 Case 14 緩衝材部分・飽和度分布

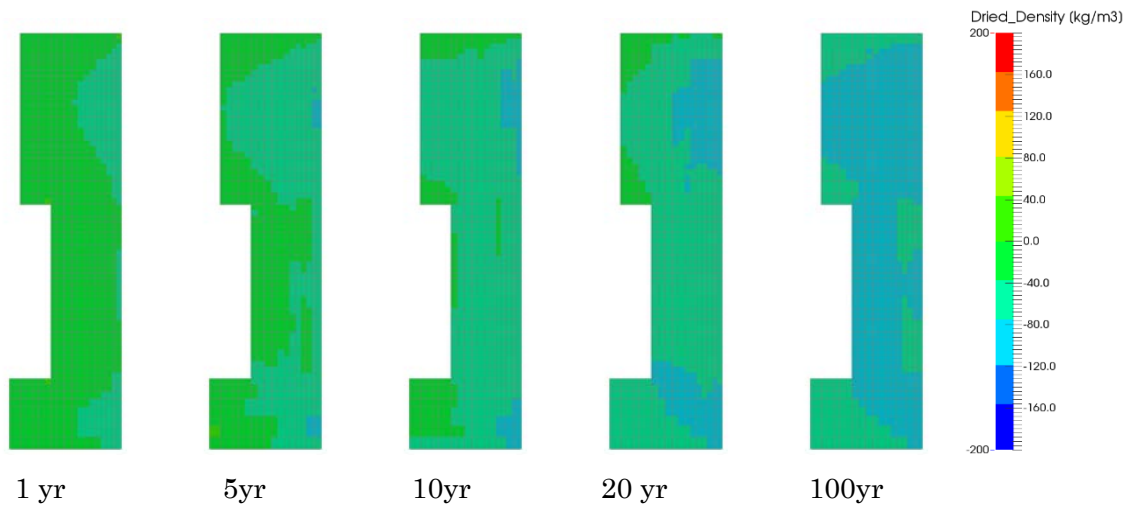


図 6.1.1-205 Case 14 緩衝材部分・乾燥密度分布

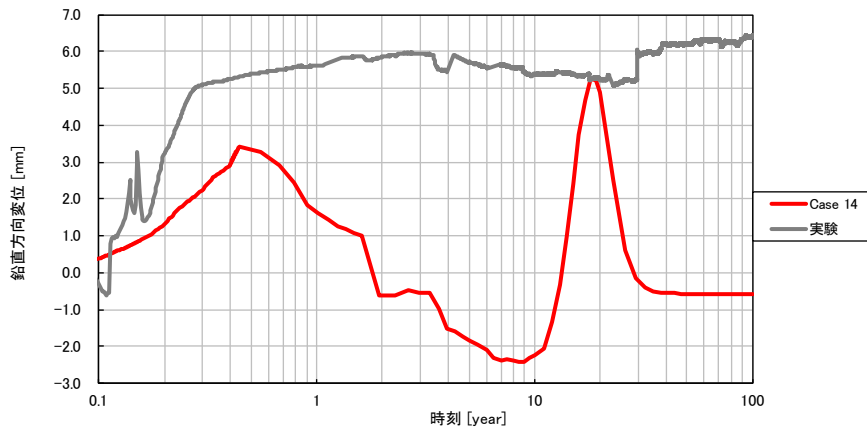


図 6.1.1-206 Case 14 鉛直方向の変位時刻歴

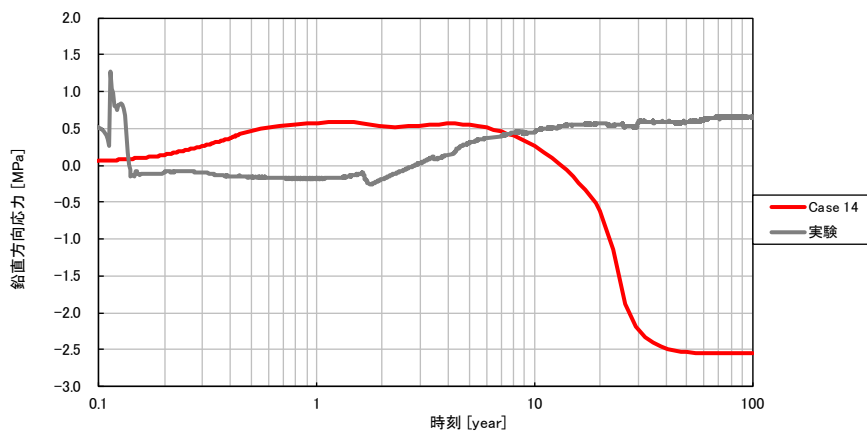


図 6.1.1-207 Case 14 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

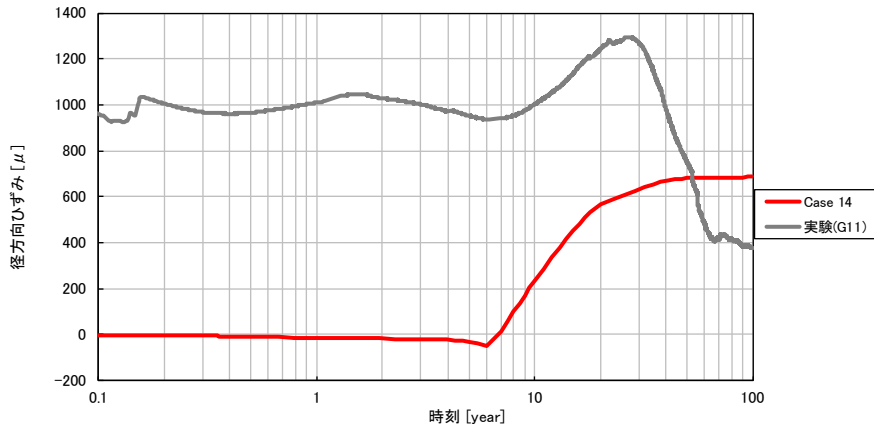


図 6.1.1-208 Case 14 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

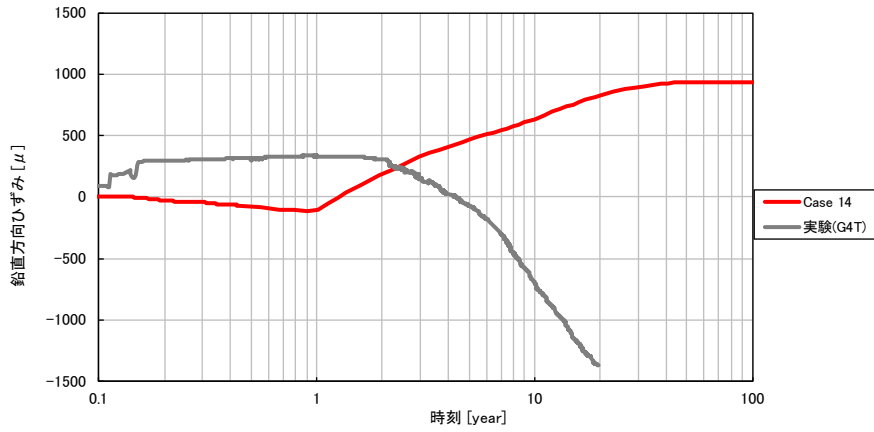


図 6.1.1-209 Case 14 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

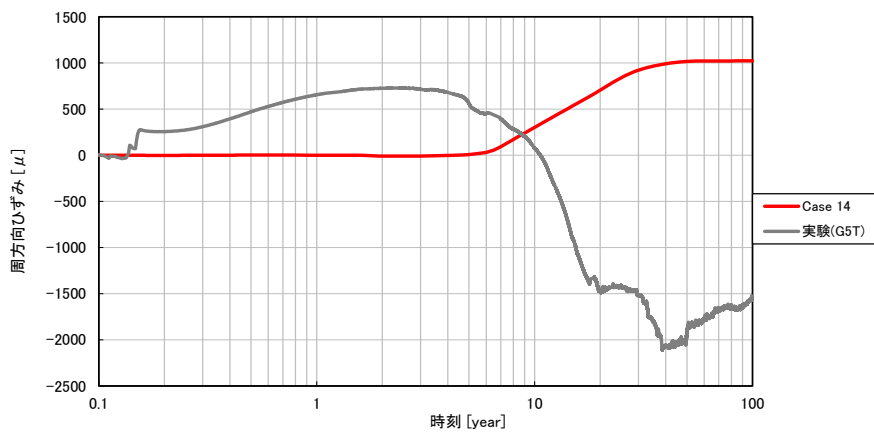


図 6.1.1-210 Case 14 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(16) Case 15

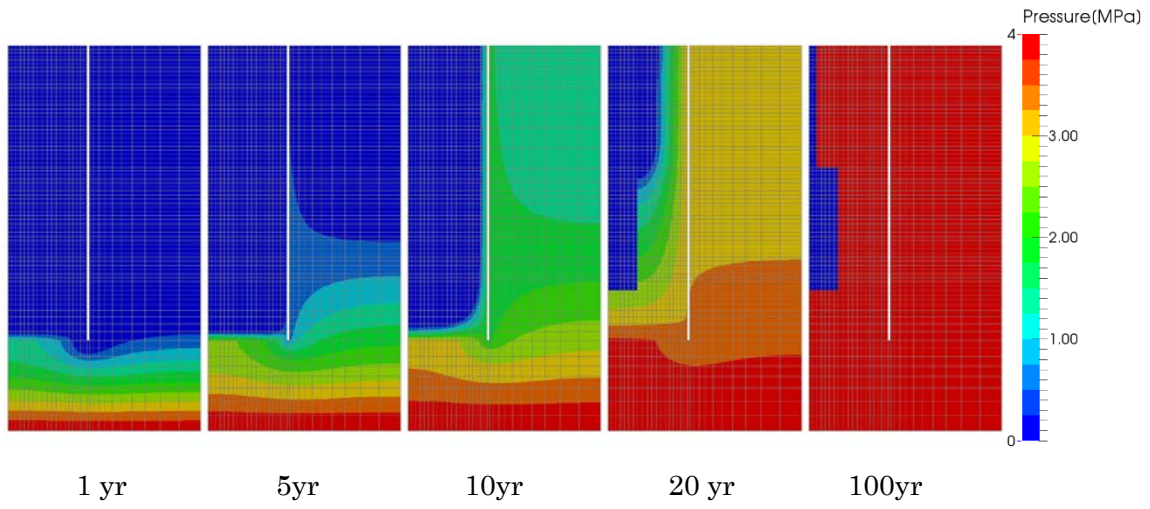


図 6.1.1-211 Case 15 岩盤部分・間隙水压分布

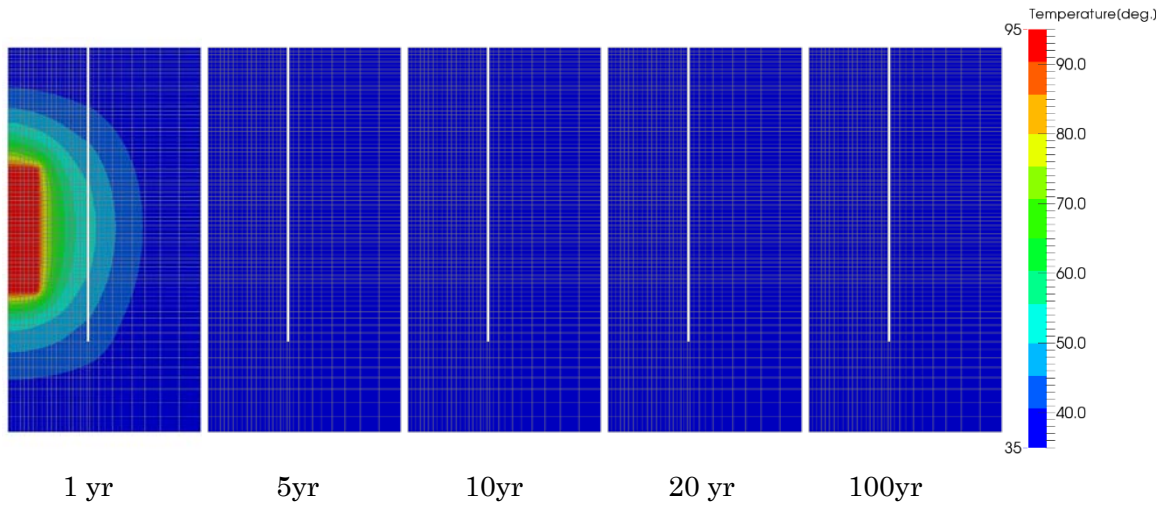


図 6.1.1-212 Case 15 岩盤部分・温度分布

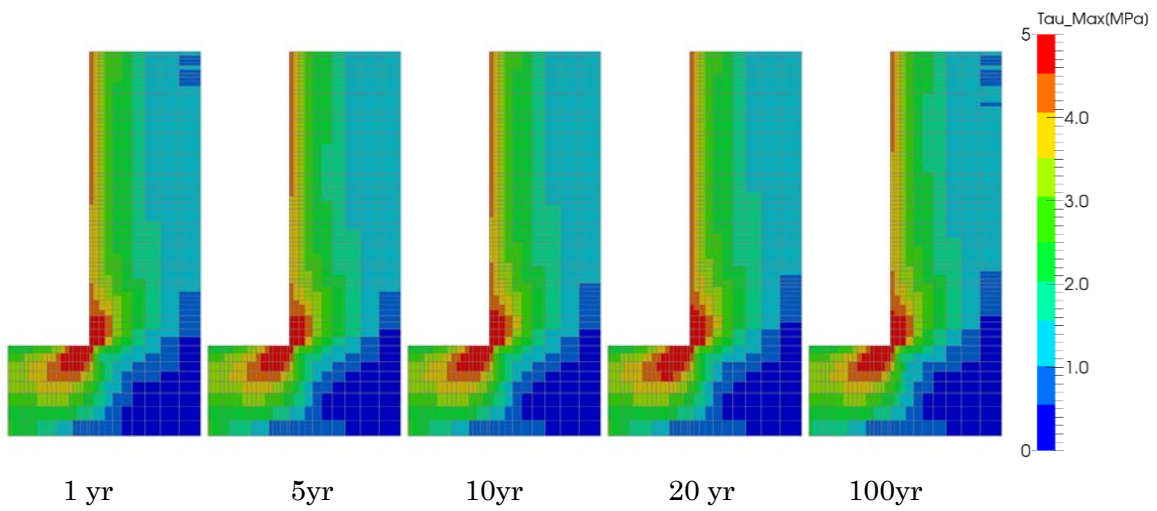


図 6.1.1-213 Case 15 岩盤部分・主せん断応力分布

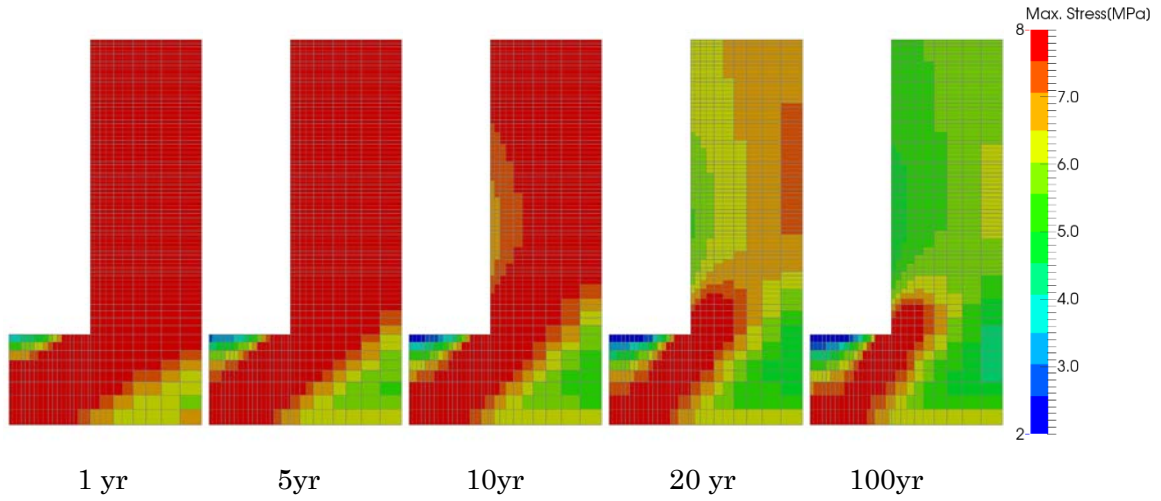


図 6.1.1-214 Case 15 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

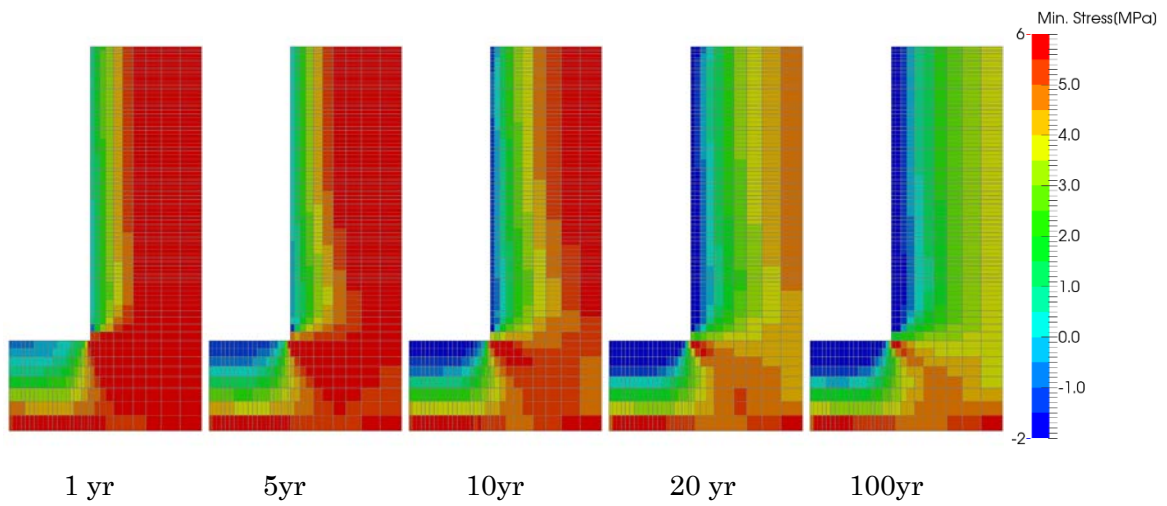


図 6.1.1-215 Case 15 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

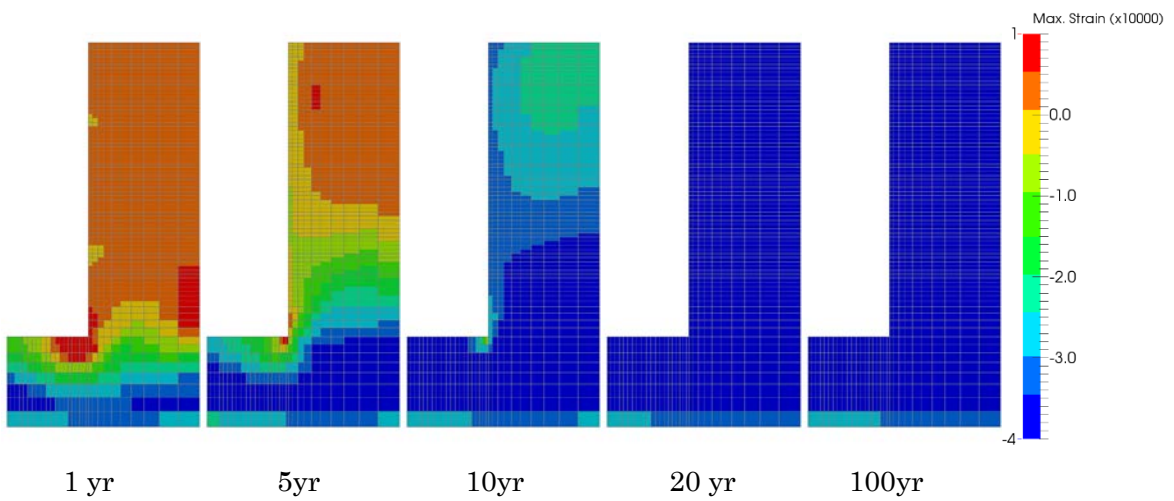


図 6.1.1-216 Case 15 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

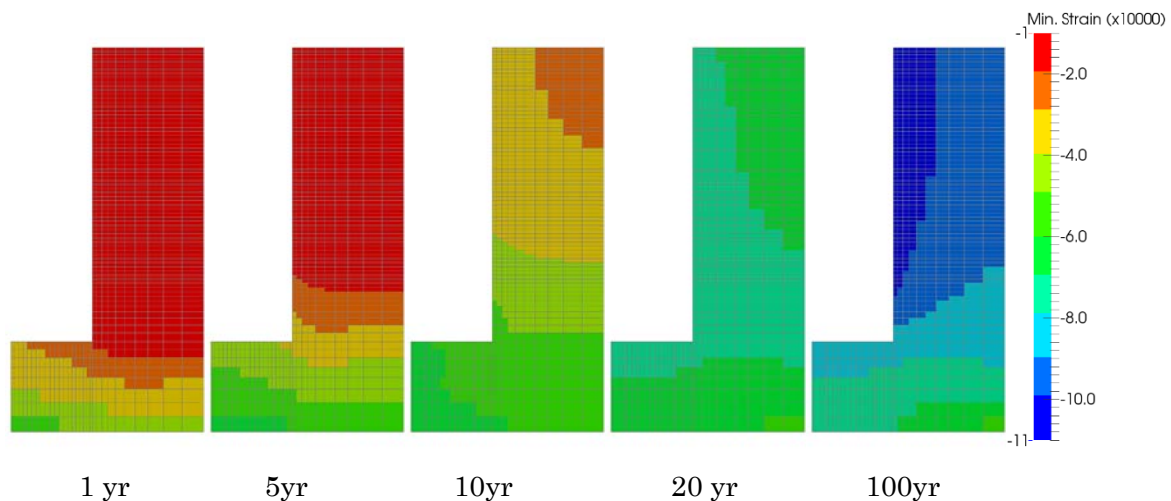


図 6.1.1-217 Case 15 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

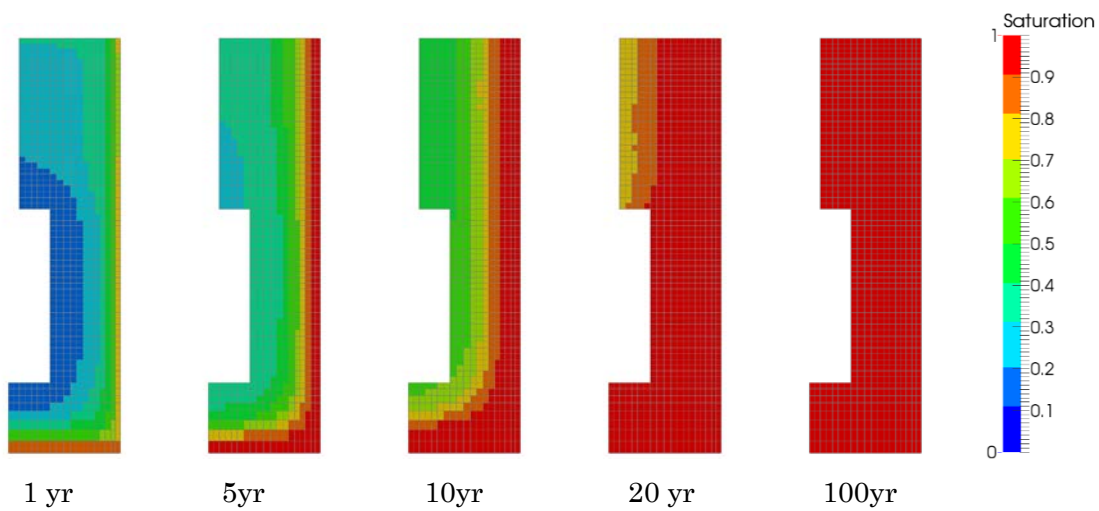


図 6.1.1-218 Case 15 緩衝材部分・飽和度分布

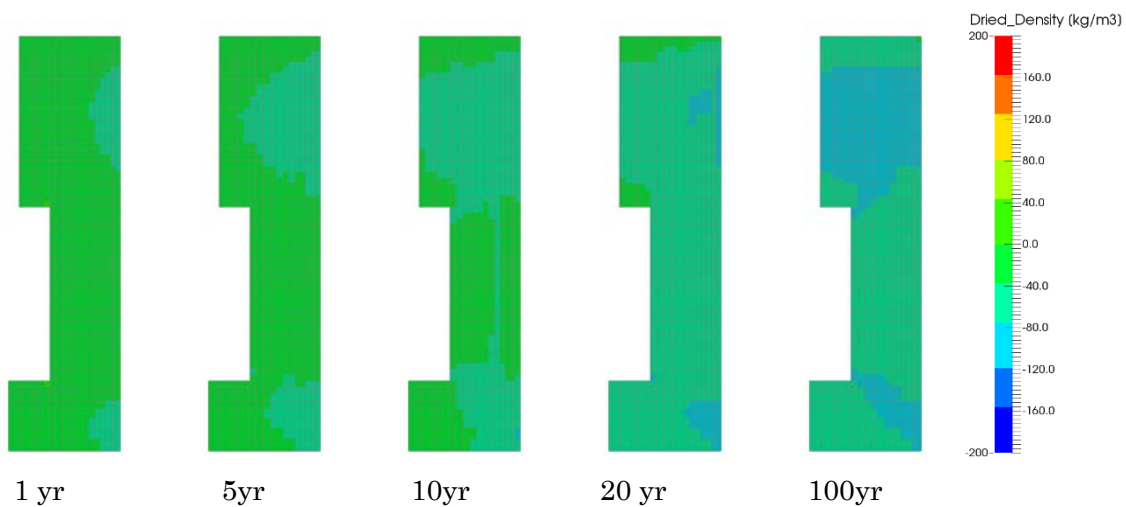


図 6.1.1-219 Case 15 緩衝材部分・乾燥密度分布

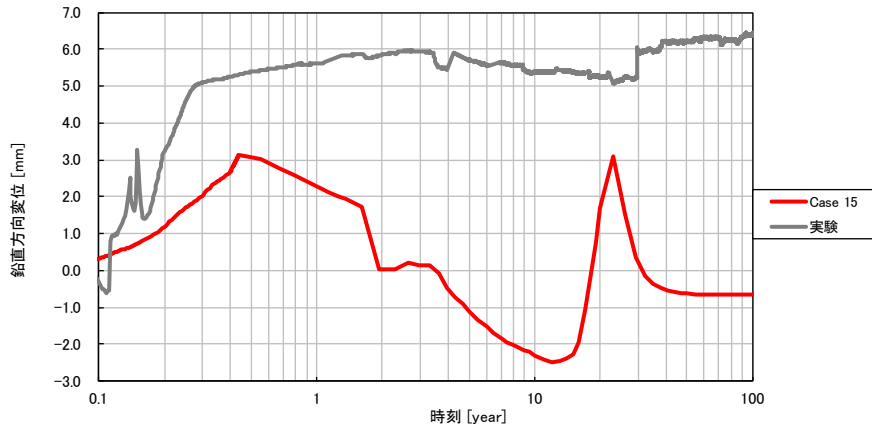


図 6.1.1-220 Case 15 鉛直方向の変位時刻歴

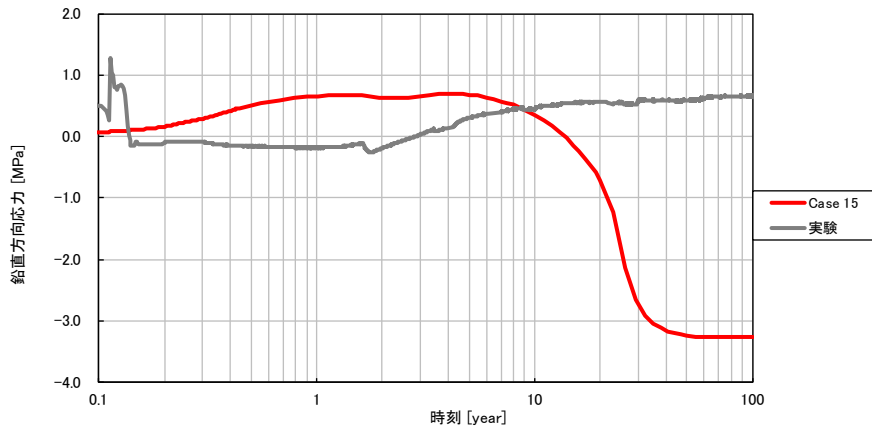


図 6.1.1-221 Case 15 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

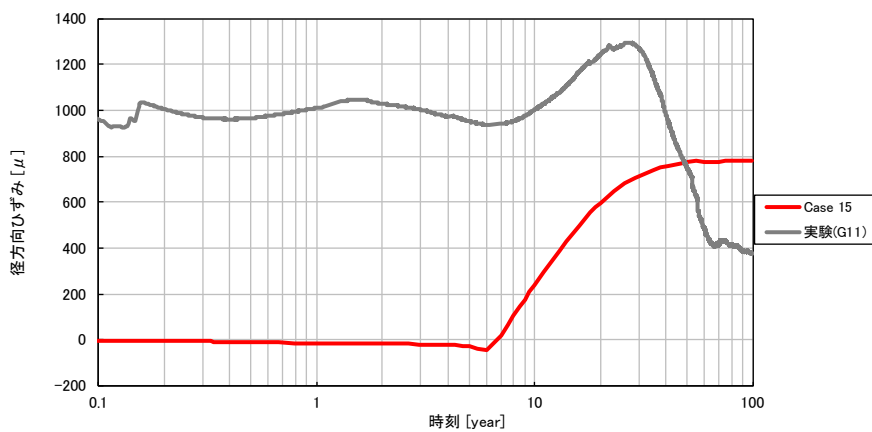


図 6.1.1-222 Case 15 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

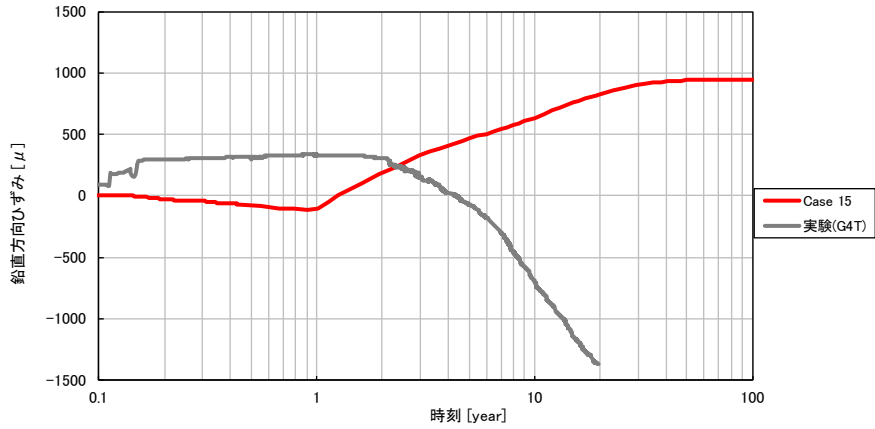


図 6.1.1-223 Case 15 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

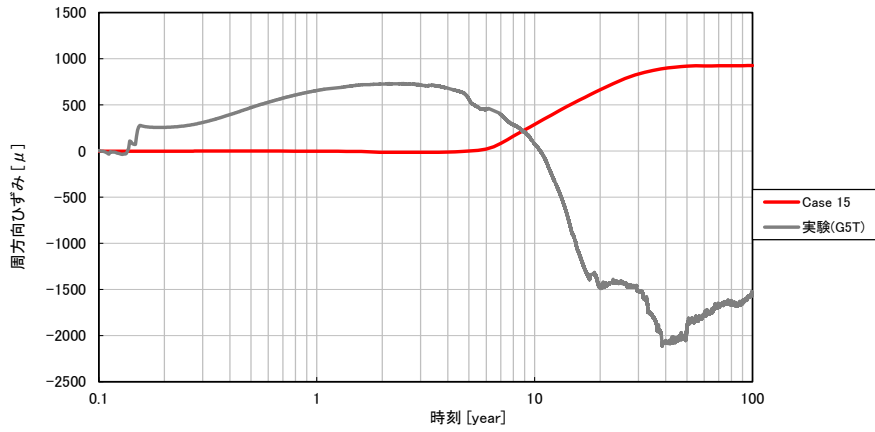


図 6.1.1-224 Case 15 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(17) Case 16

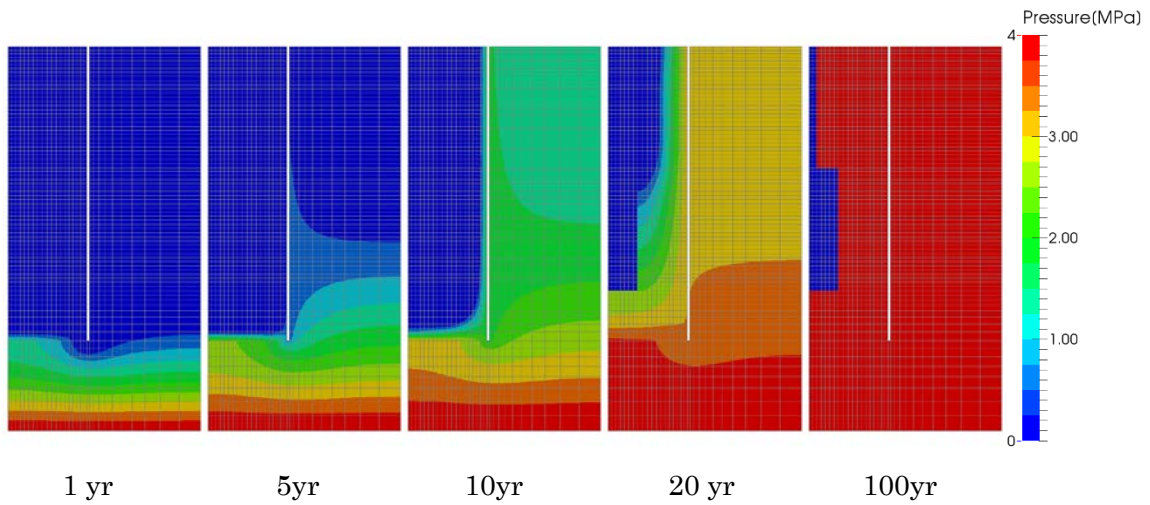


図 6.1.1-225 Case 16 岩盤部分・間隙水圧分布

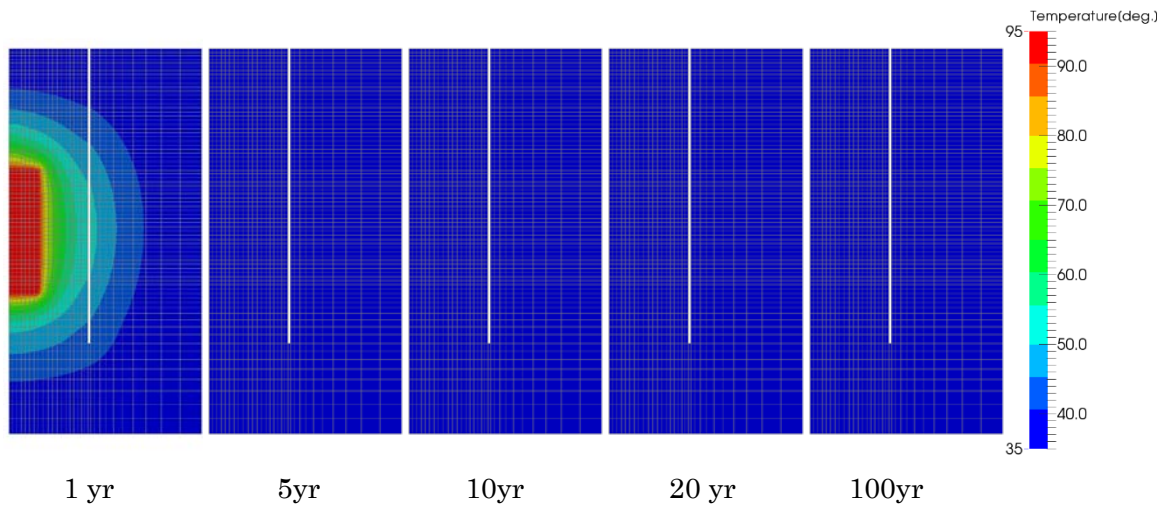


図 6.1.1-226 Case 16 岩盤部分・温度分布

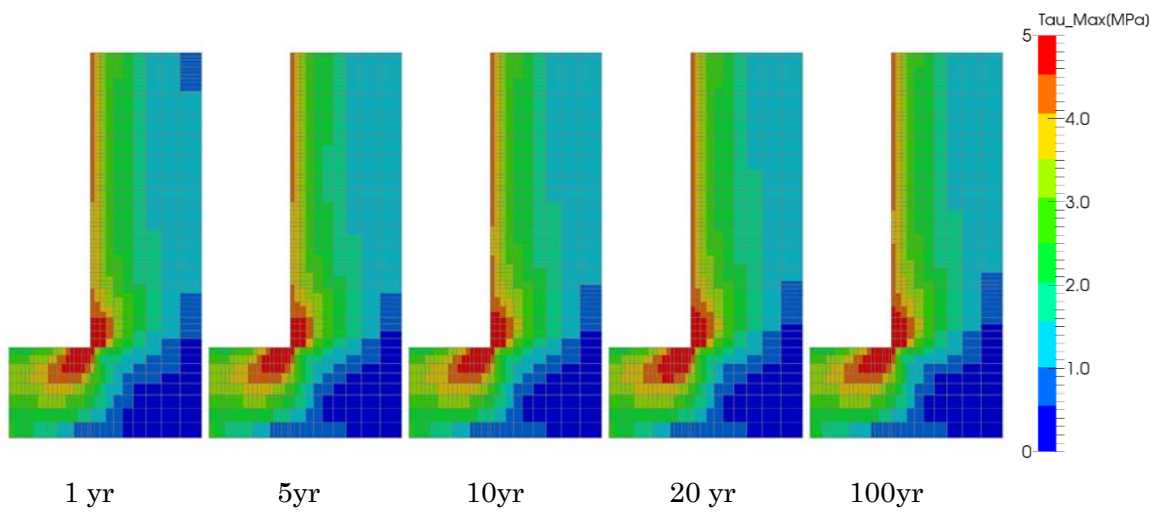


図 6.1.1-227 Case 16 岩盤部分・主せん断応力分布

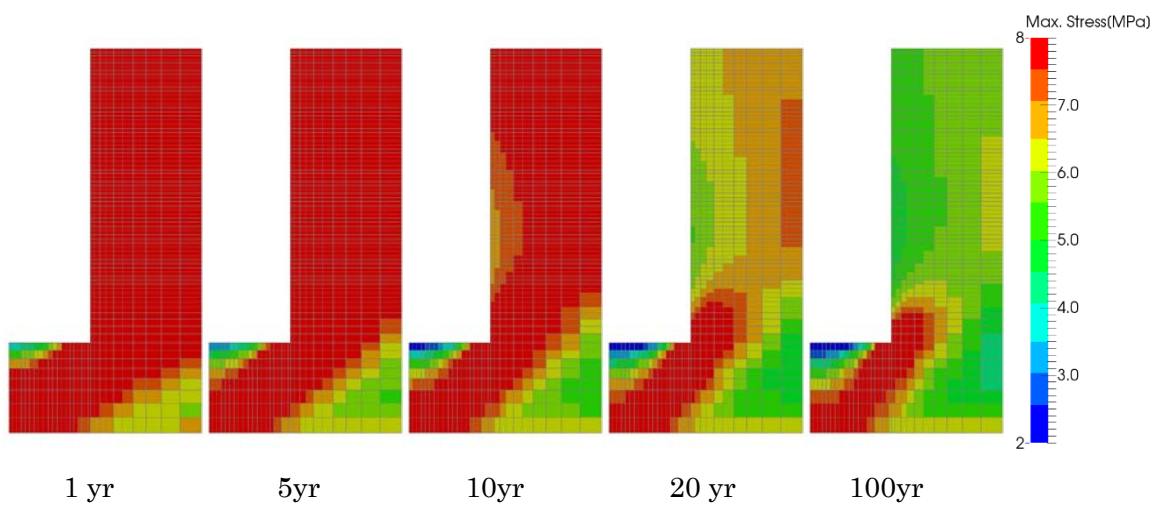


図 6.1.1-228 Case 16 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

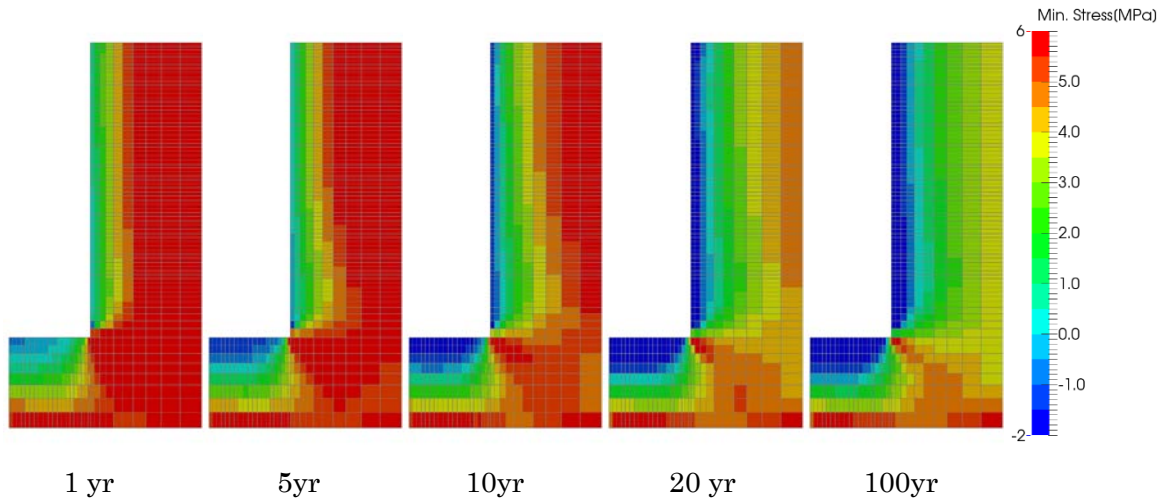


図 6.1.1-229 Case 16 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

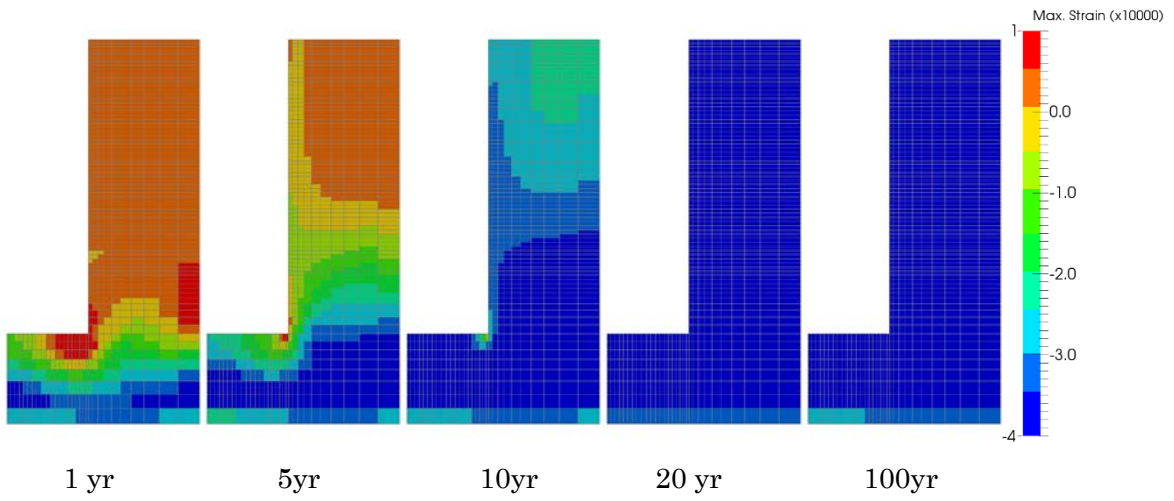


図 6.1.1-230 Case 16 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

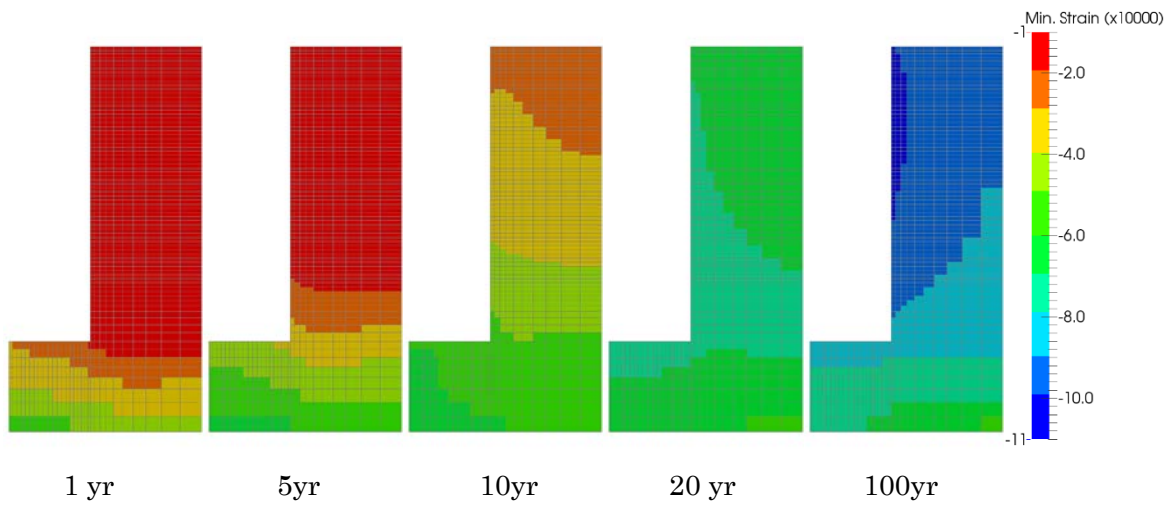


図 6.1.1-231 Case 16 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

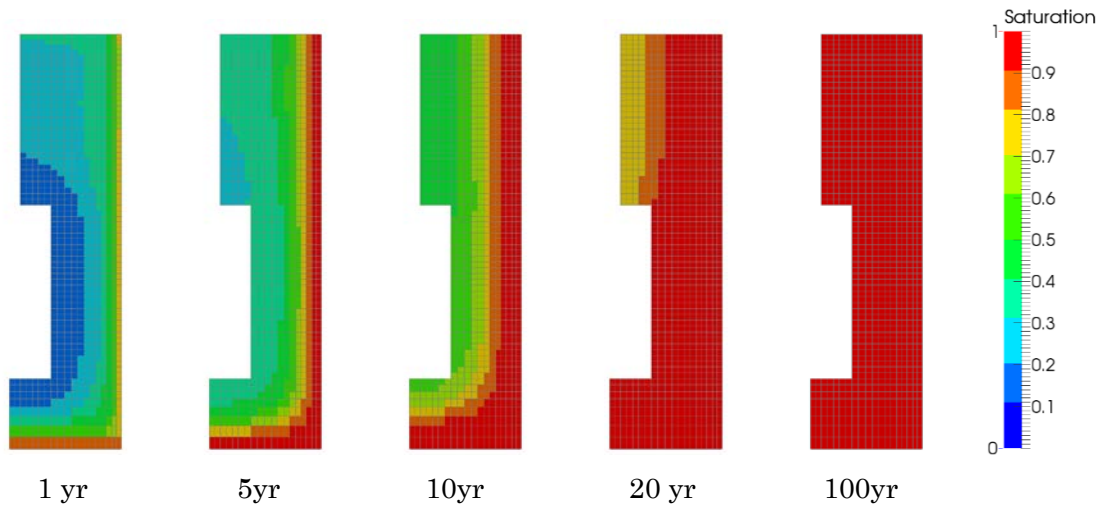


図 6.1.1-232 Case 16 緩衝材部分・飽和度分布

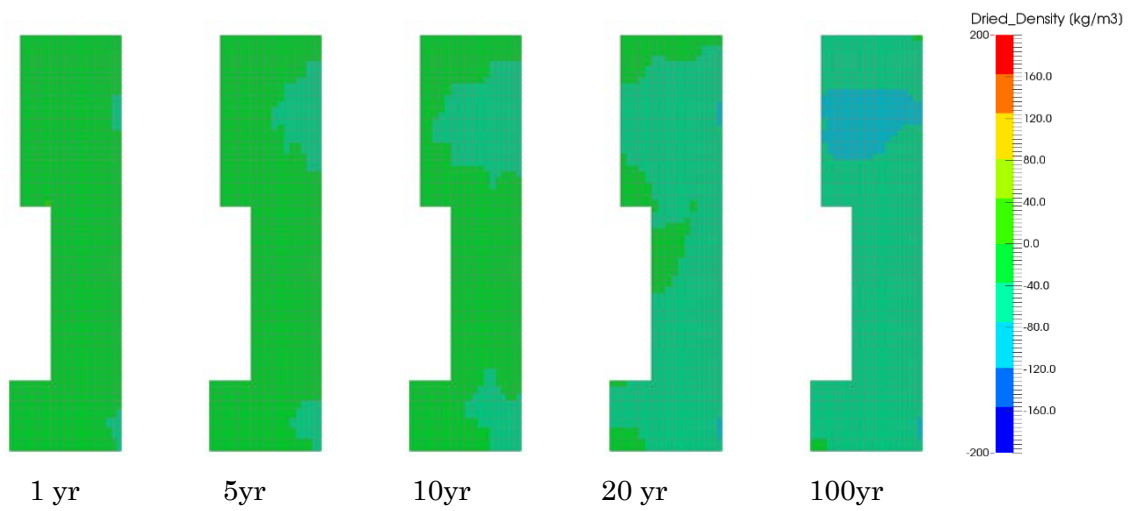


図 6.1.1-233 Case 16 緩衝材部分・乾燥密度分布

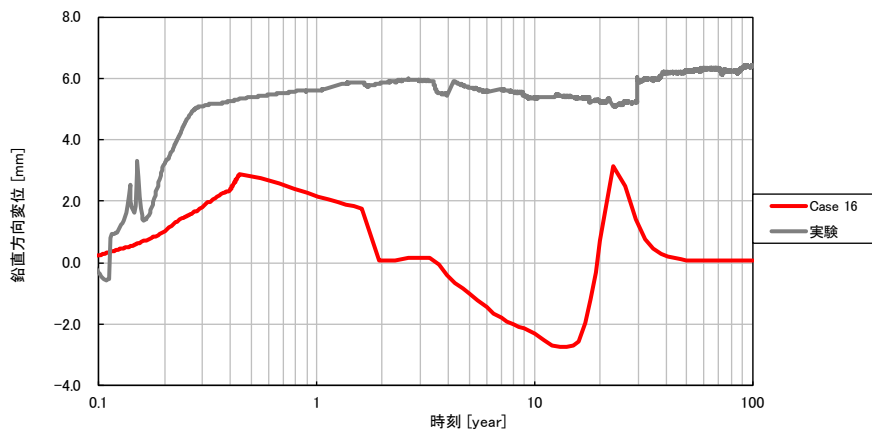


図 6.1.1-234 Case 16 鉛直方向の変位時刻歴

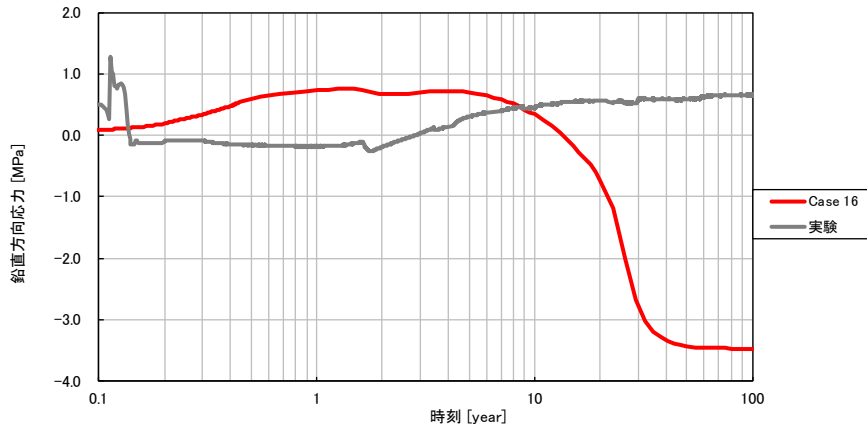


図 6.1.1-235 Case 16 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

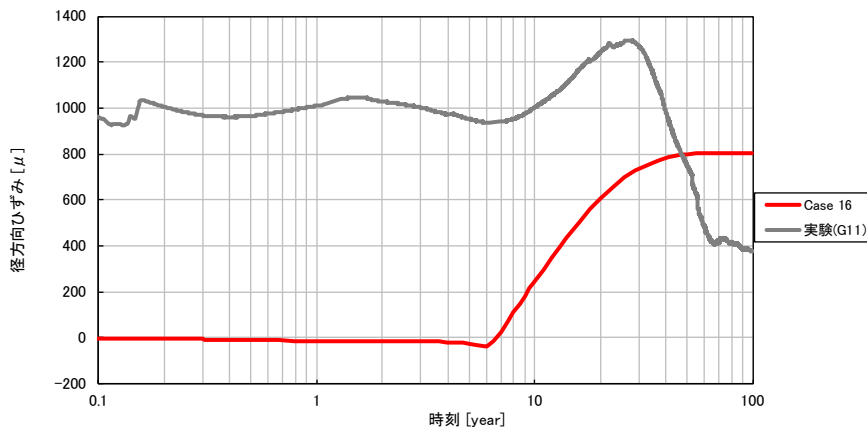


図 6.1.1-236 Case 16 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

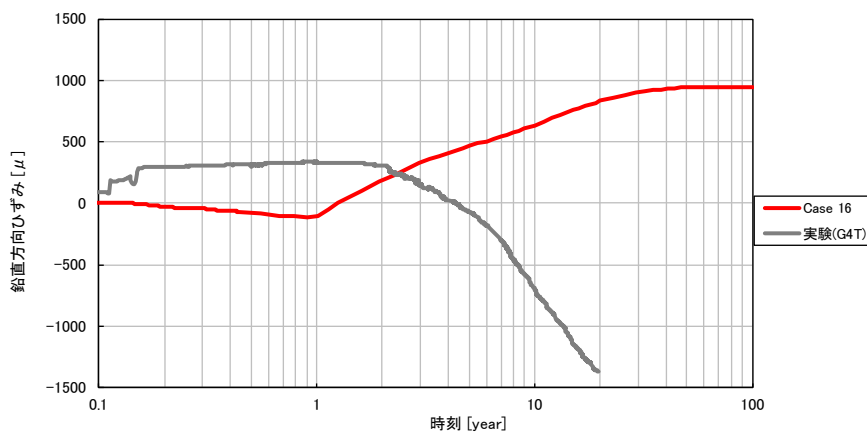


図 6.1.1-237 Case 16 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

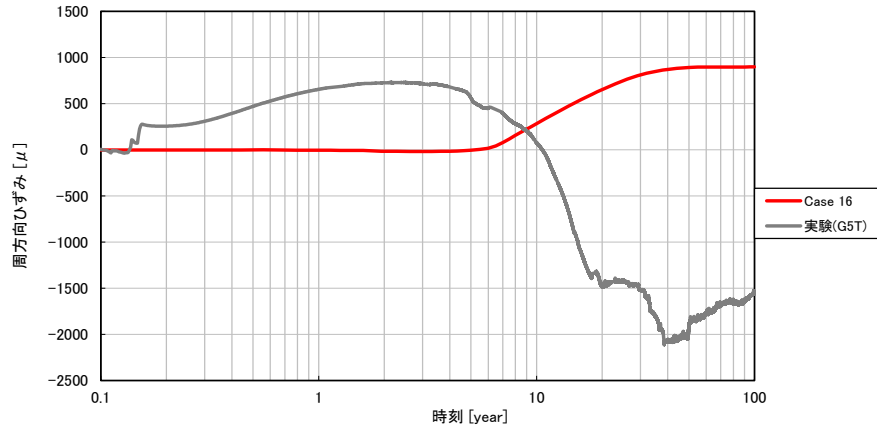


図 6.1.1-238 Case 16 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(18) Case 17

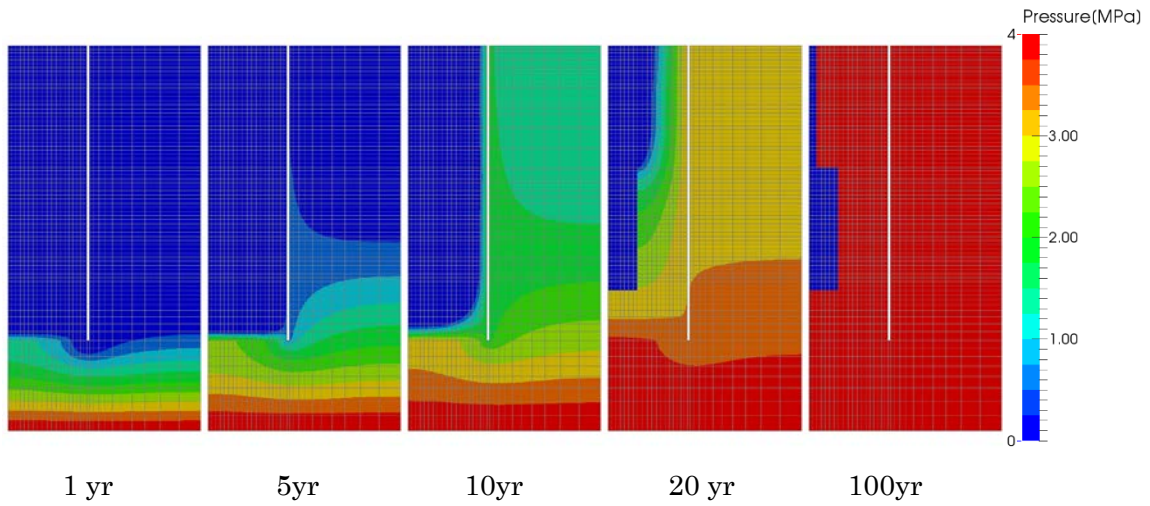


図 6.1.1-239 Case 17 岩盤部分・間隙水圧分布

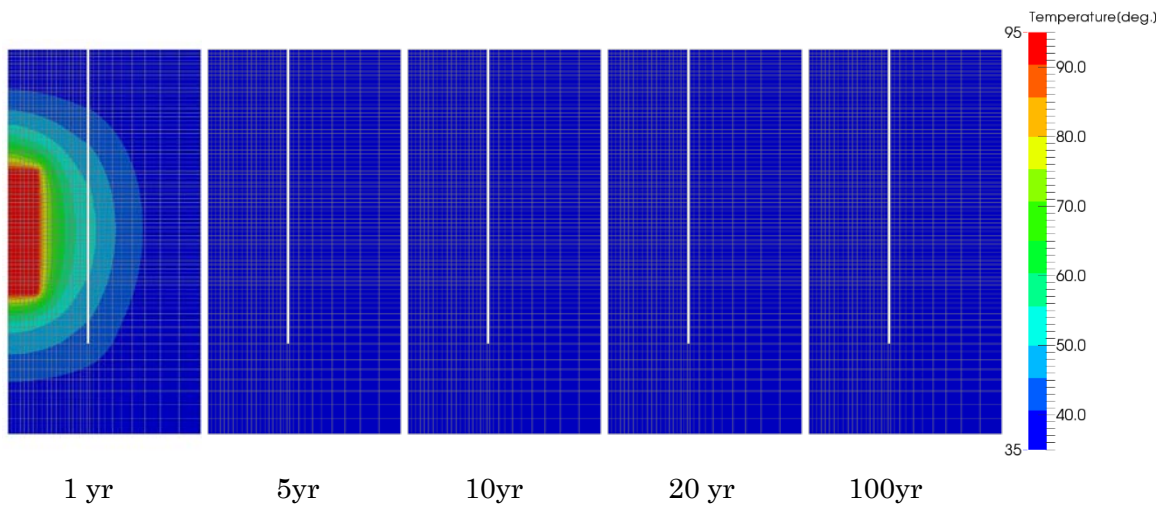


図 6.1.1-240 Case 17 岩盤部分・温度分布

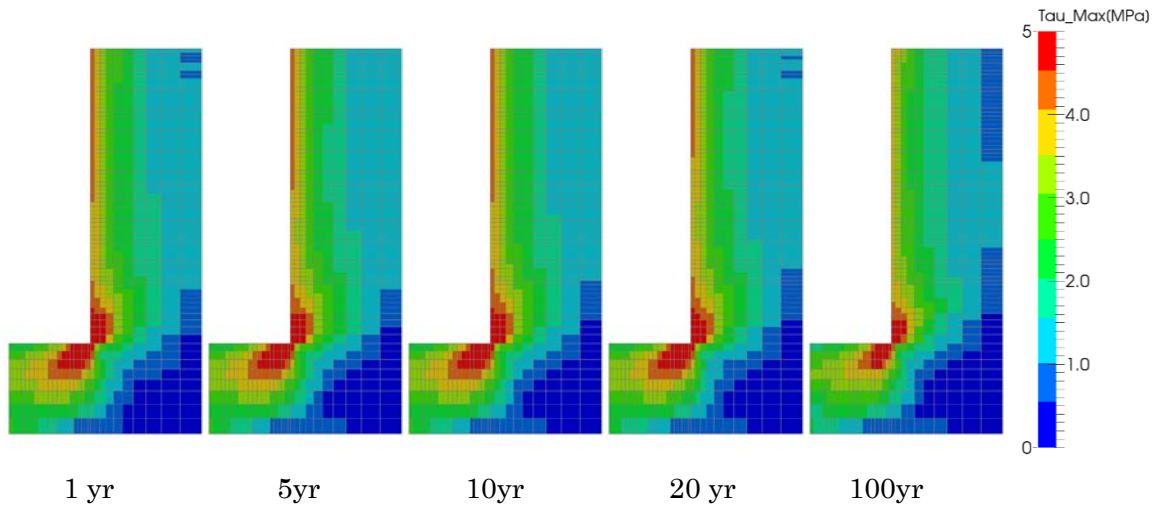


図 6.1.1-241 Case 17 岩盤部分・主せん断応力分布

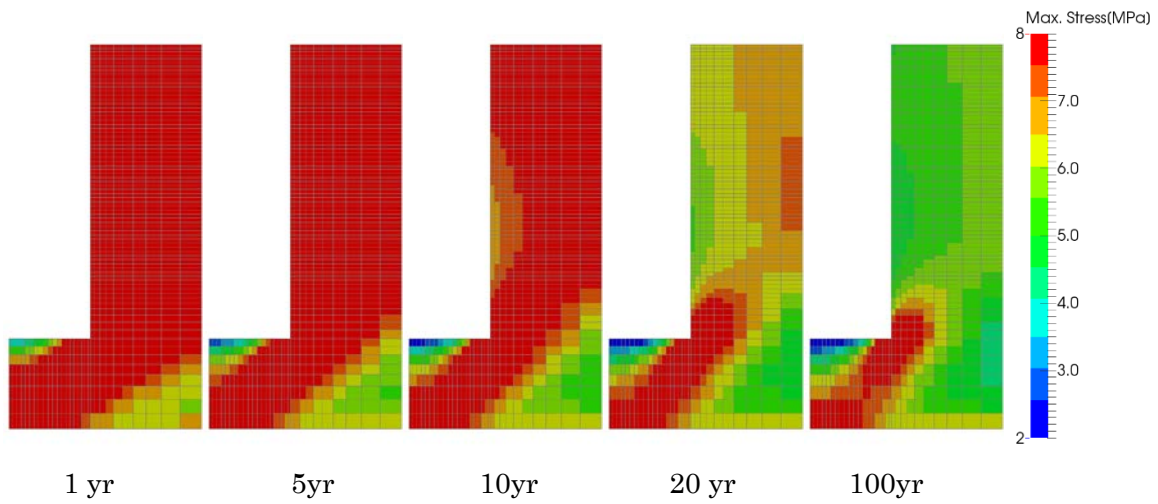


図 6.1.1-242 Case 17 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

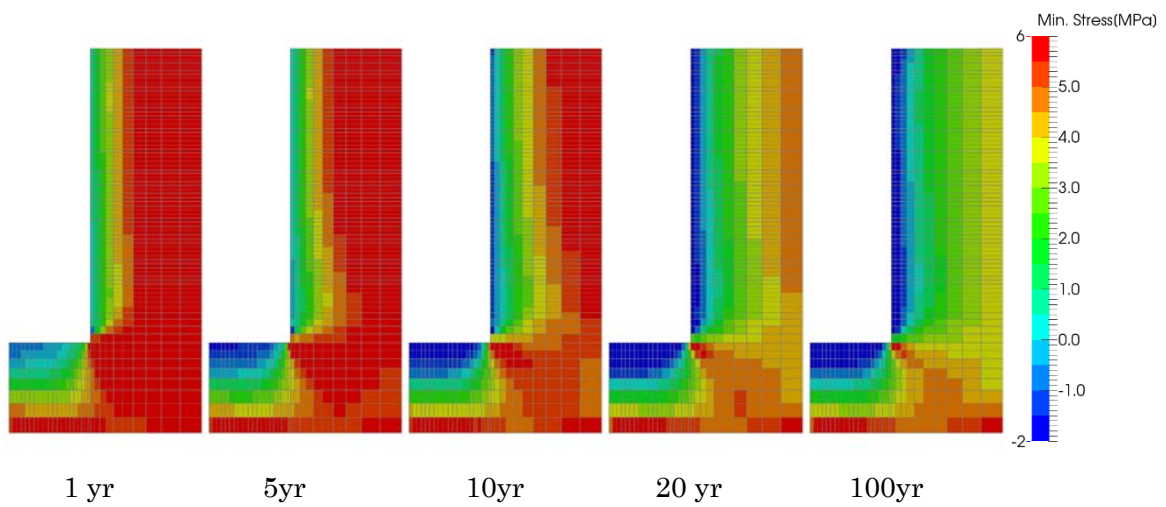


図 6.1.1-243 Case 17 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

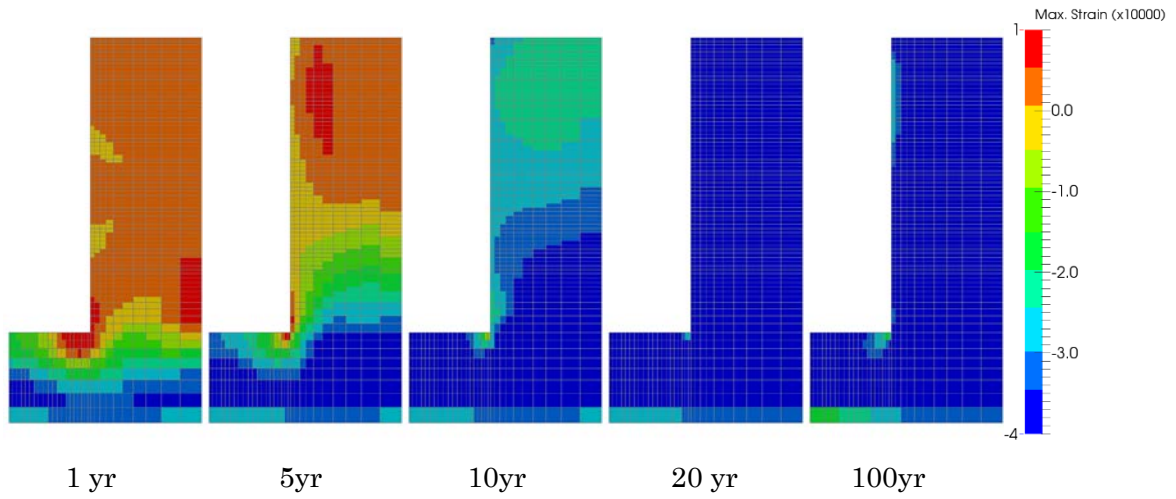


図 6.1.1-244 Case 17 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

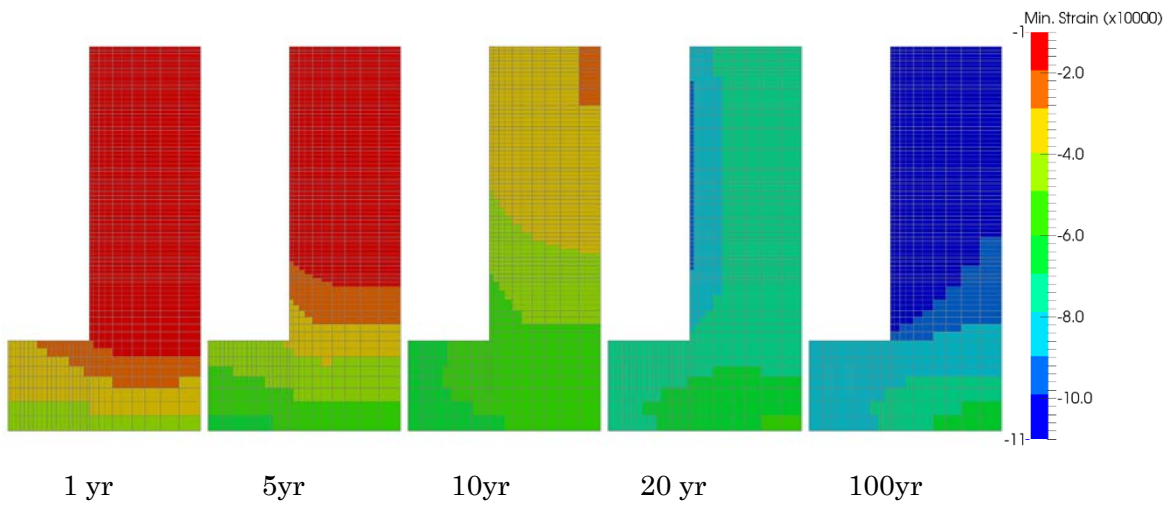


図 6.1.1-245 Case 17 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

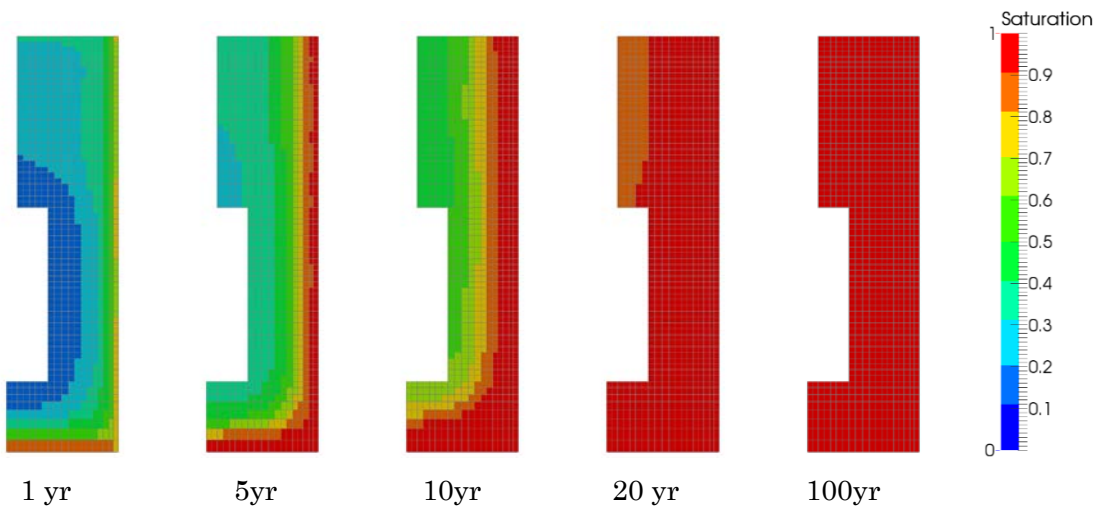


図 6.1.1-246 Case 17 緩衝材部分・飽和度分布

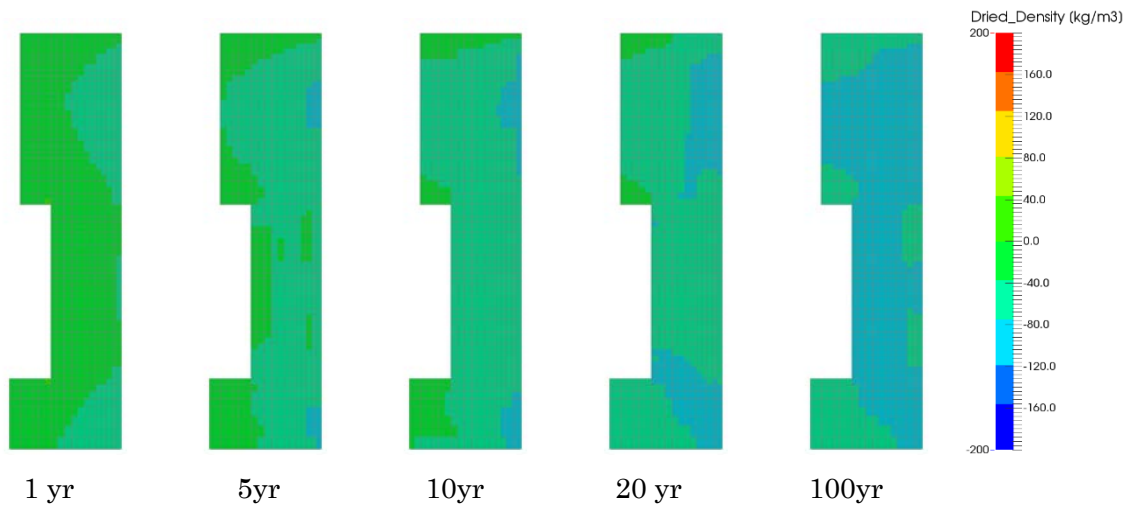


図 6.1.1-247 Case 17 緩衝材部分・乾燥密度分布

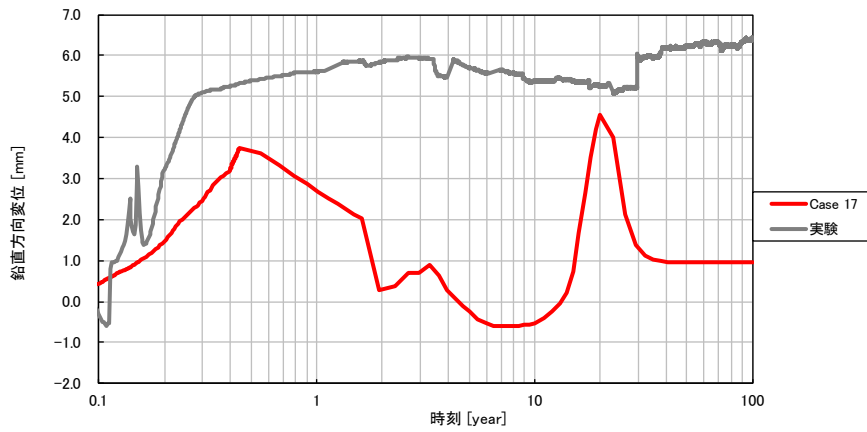


図 6.1.1-248 Case 17 鉛直方向の変位時刻歴

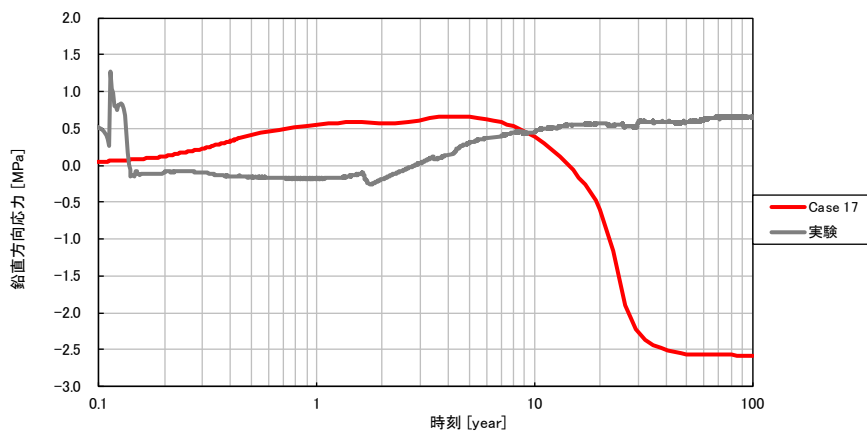


図 6.1.1-249 Case 17 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

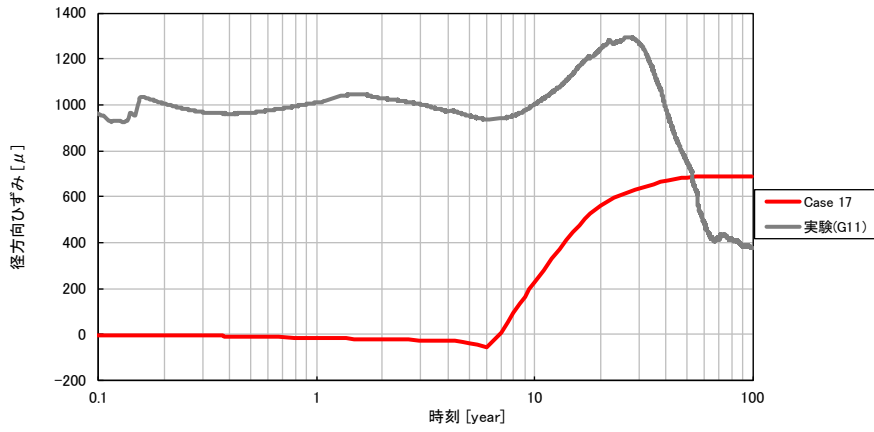


図 6.1.1-250 Case 17 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

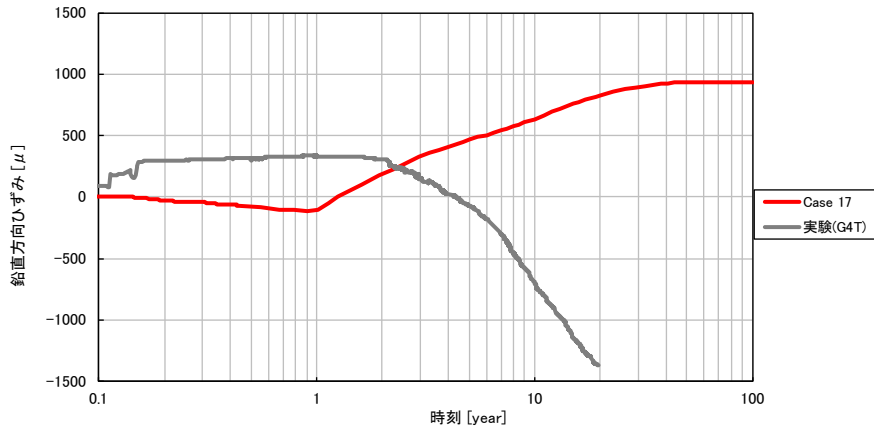


図 6.1.1-251 Case 17 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

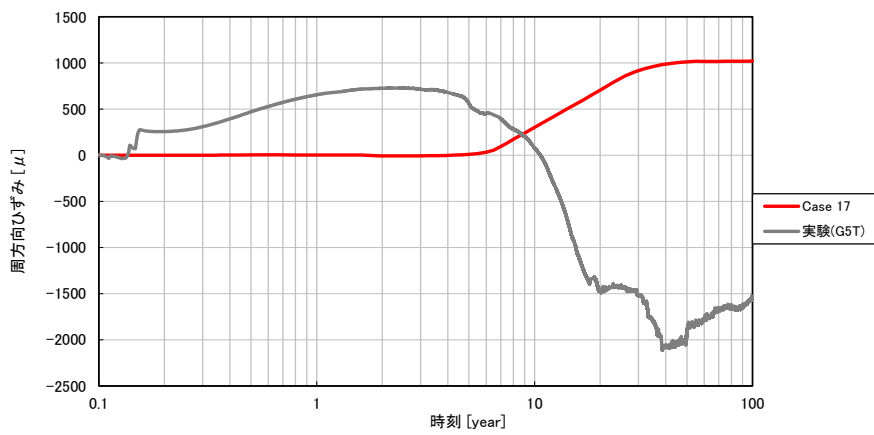


図 6.1.1-252 Case 17 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(19) Case 18

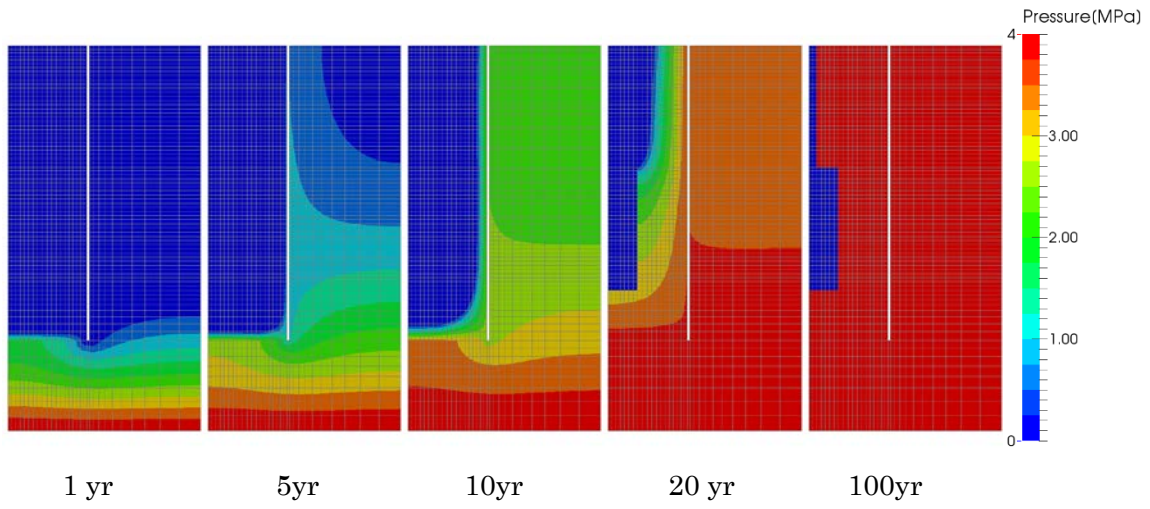


図 6.1.1-253 Case 18 岩盤部分・間隙水压分布

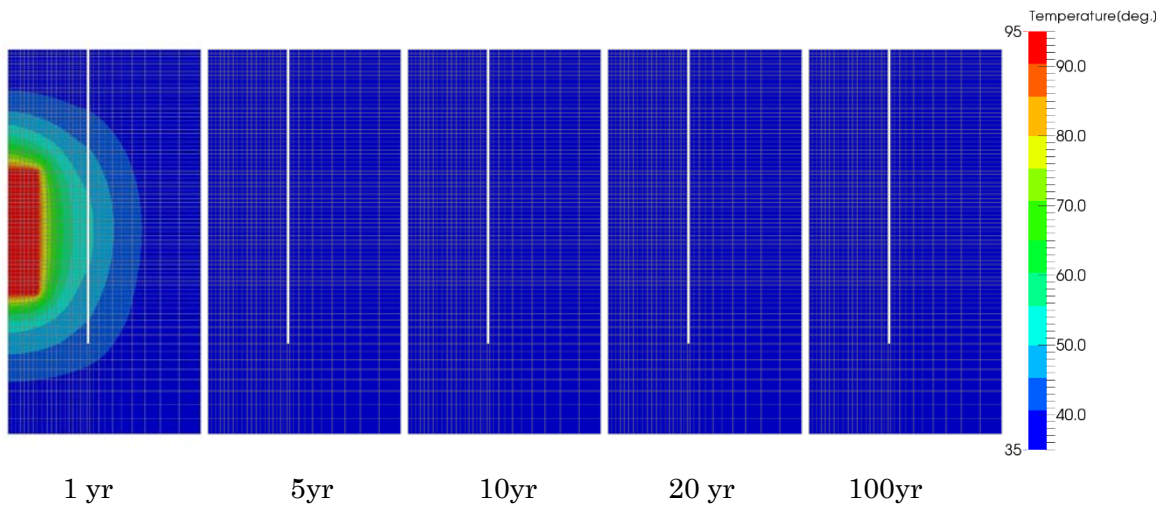


図 6.1.1-254 Case 18 岩盤部分・温度分布

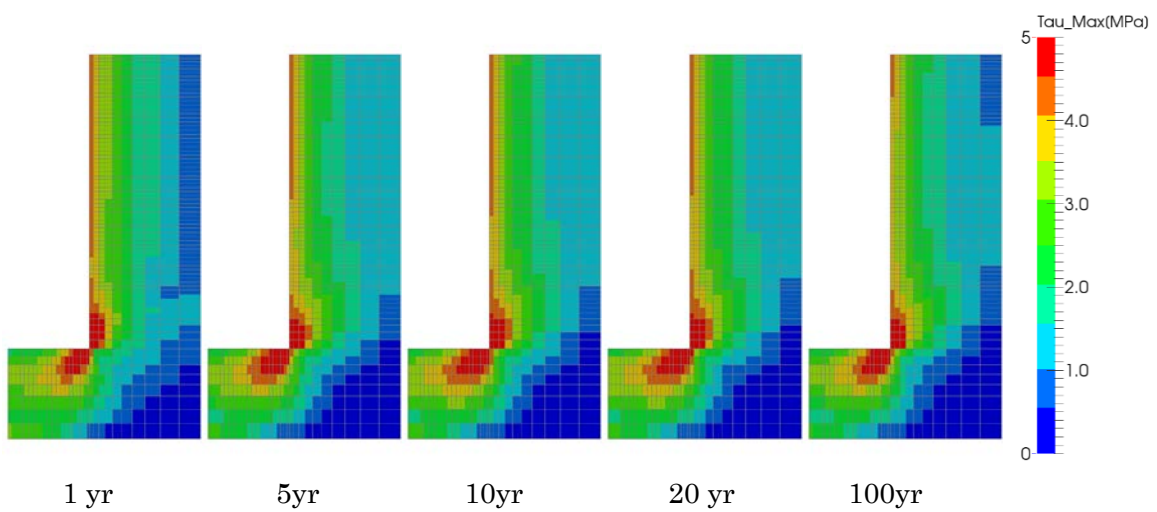


図 6.1.1-255 Case 18 岩盤部分・主せん断応力分布

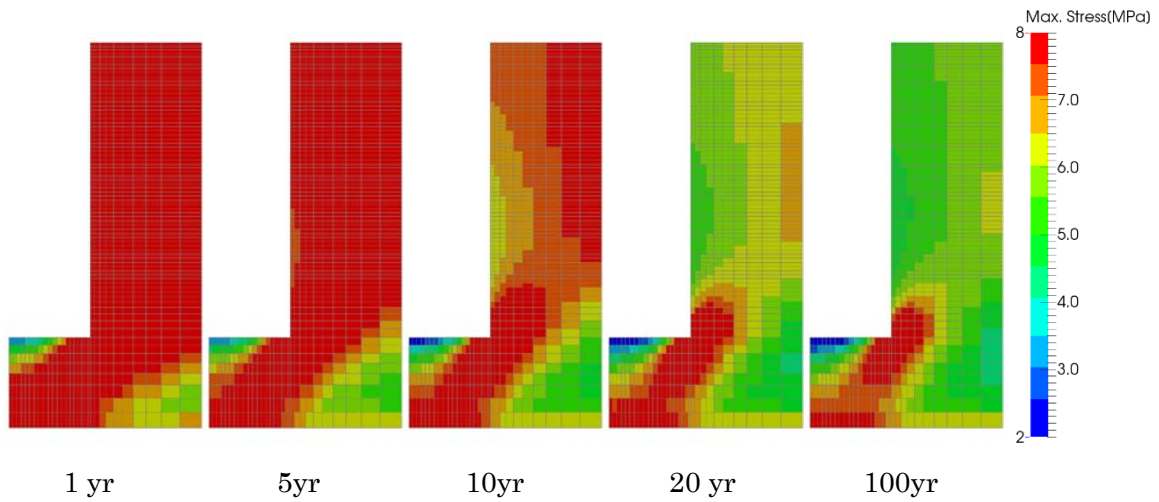


図 6.1.1-256 Case 18 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

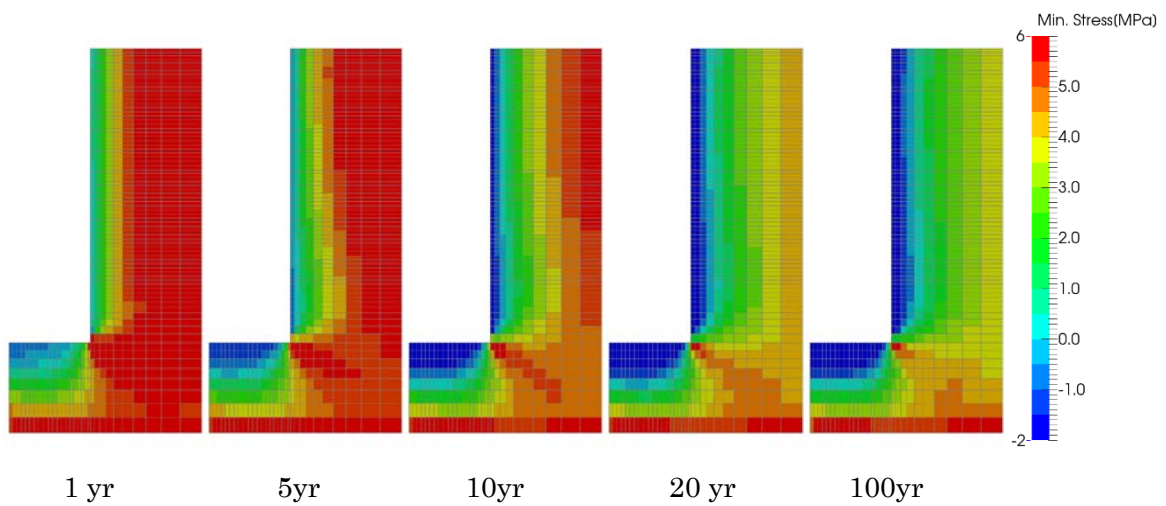


図 6.1.1-257 Case 18 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

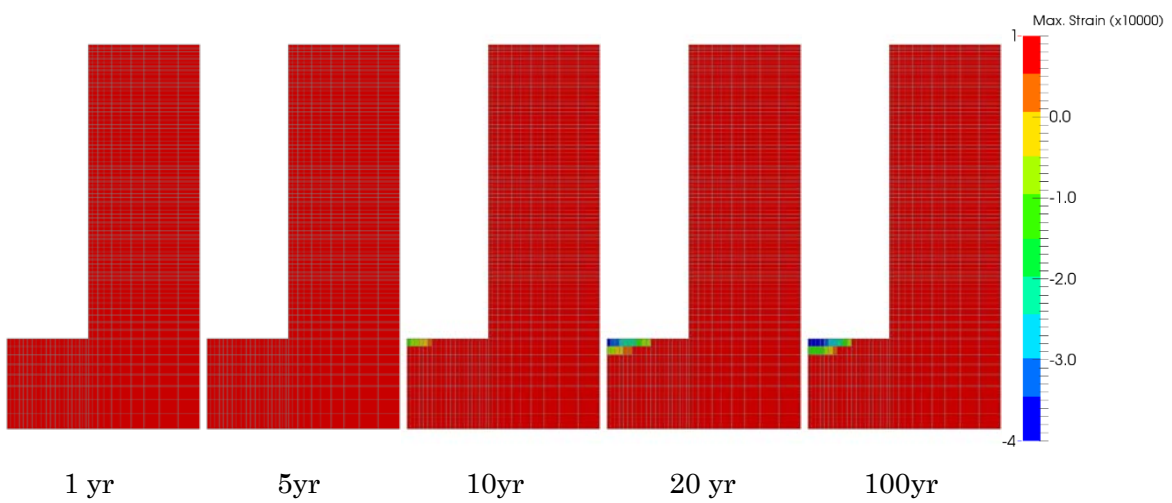


図 6.1.1-258 Case 18 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

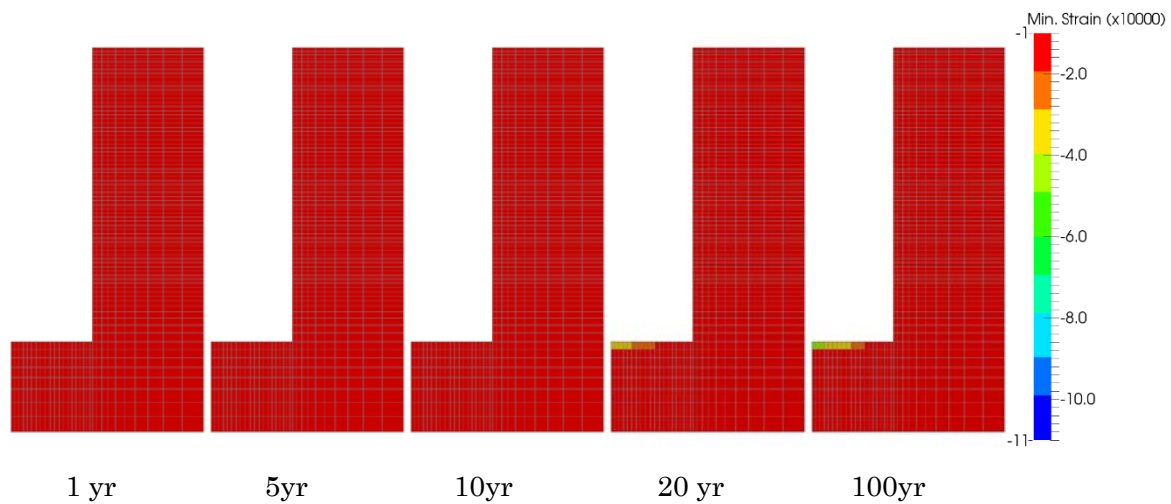


図 6.1.1-259 Case 18 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

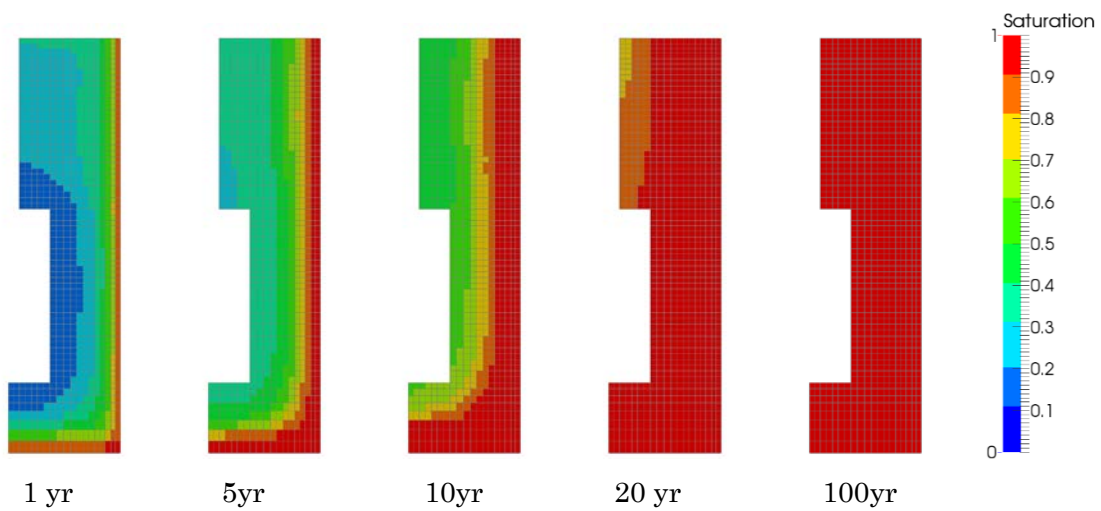


図 6.1.1-260 Case 18 緩衝材部分・飽和度分布

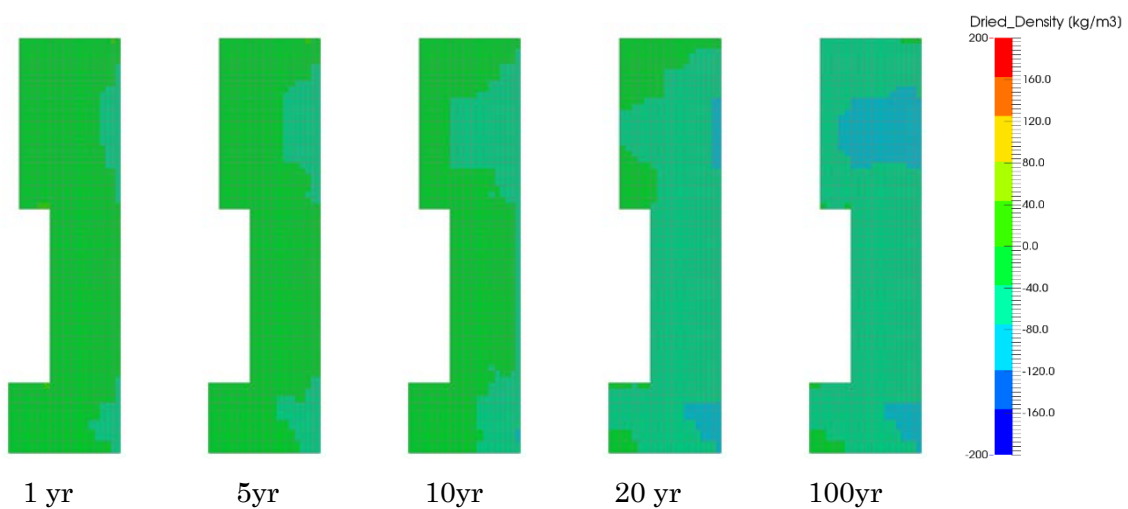


図 6.1.1-261 Case 18 緩衝材部分・乾燥密度分布

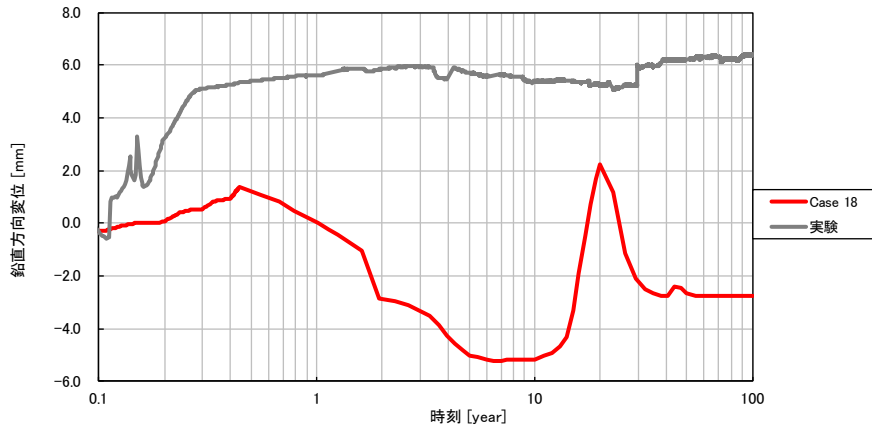


図 6.1.1-262 Case 18 鉛直方向の変位時刻歴

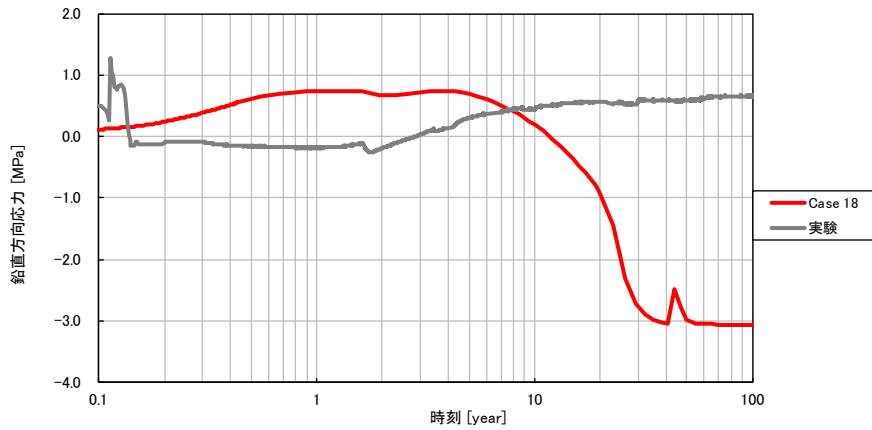


図 6.1.1-263 Case 18 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

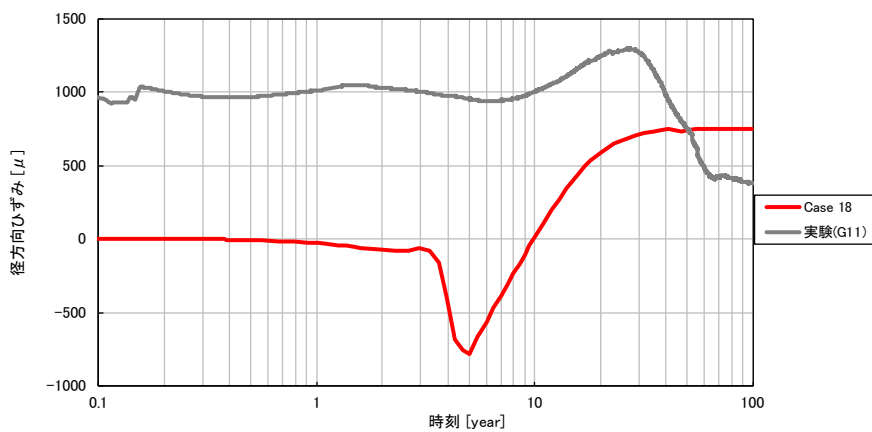


図 6.1.1-264 Case 18 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

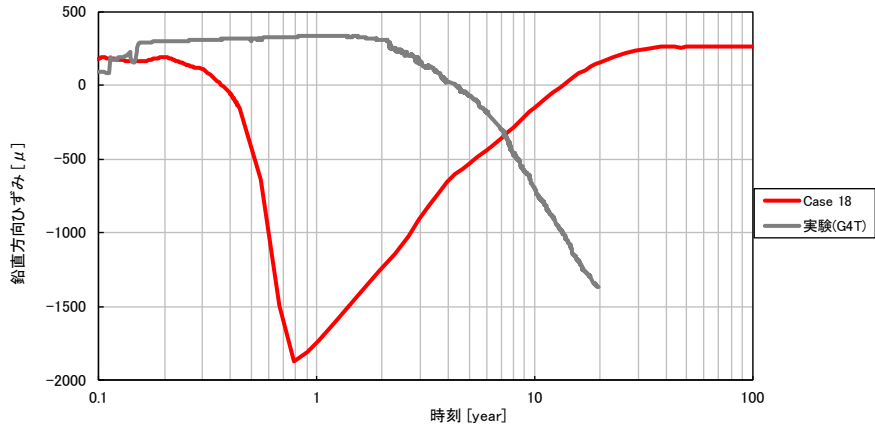


図 6.1.1-265 Case 18 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

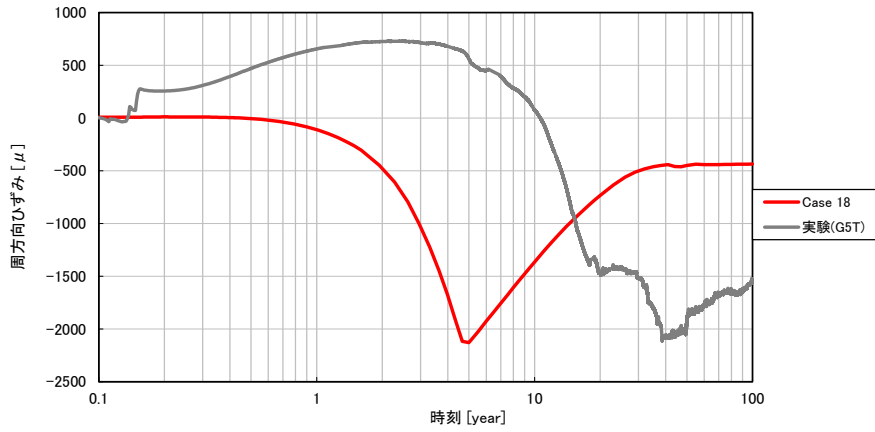


図 6.1.1-266 Case 18 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(20) Case 19

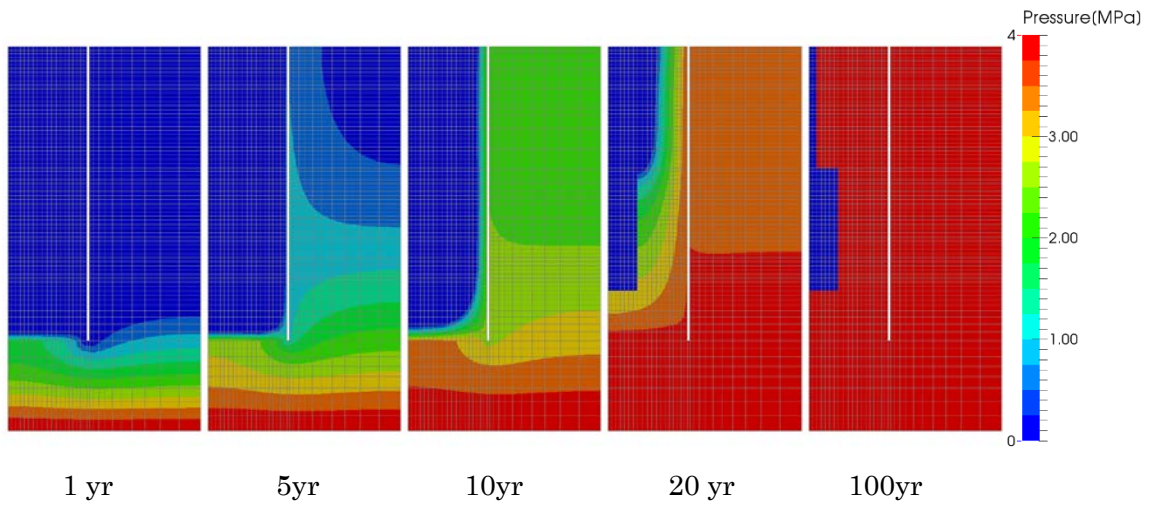


図 6.1.1-267 Case 19 岩盤部分・間隙水圧分布

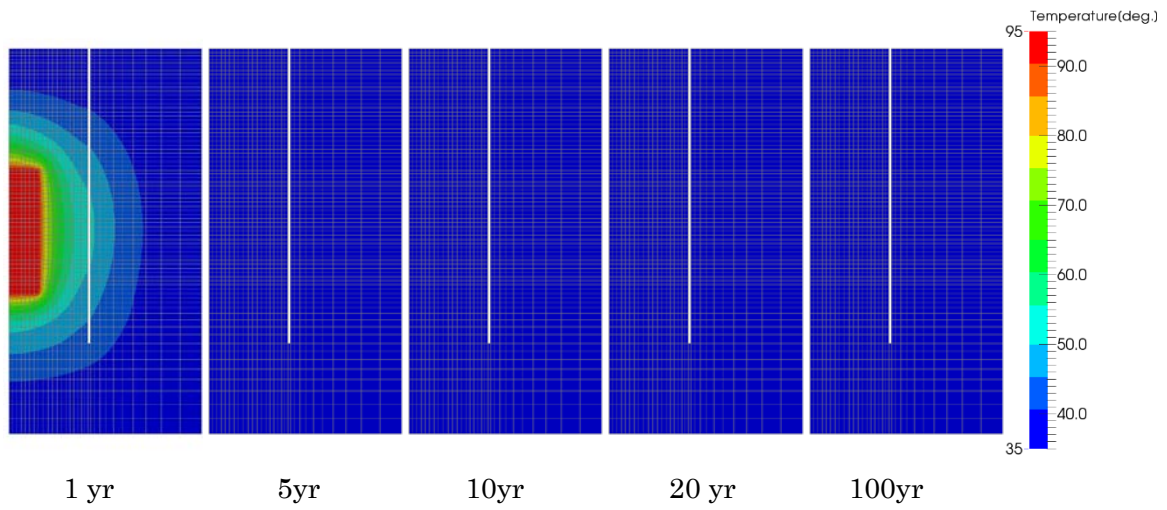


図 6.1.1-268 Case 19 岩盤部分・温度分布

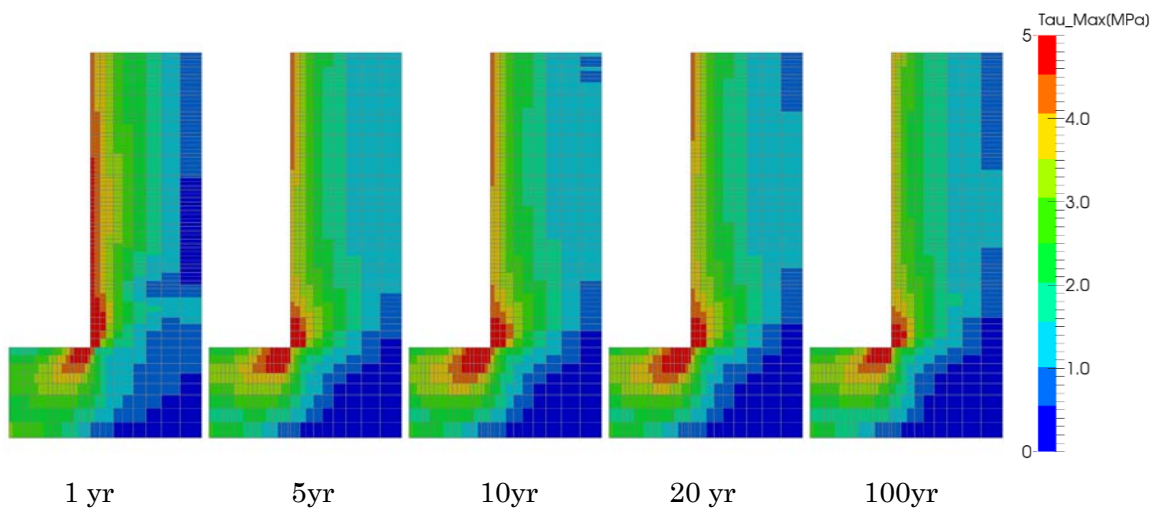


図 6.1.1-269 Case 19 岩盤部分・主せん断応力分布

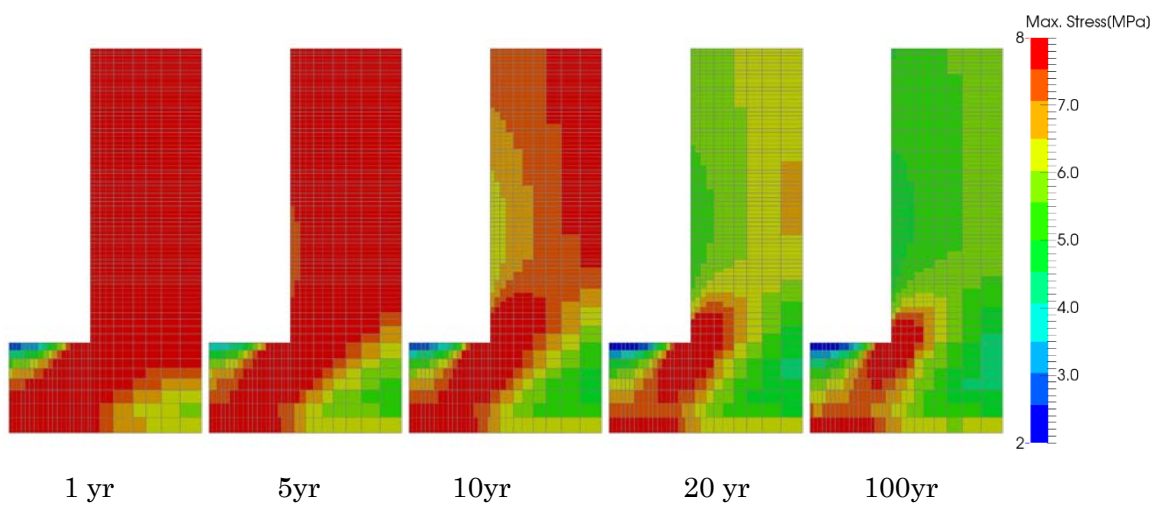


図 6.1.1-270 Case 19 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

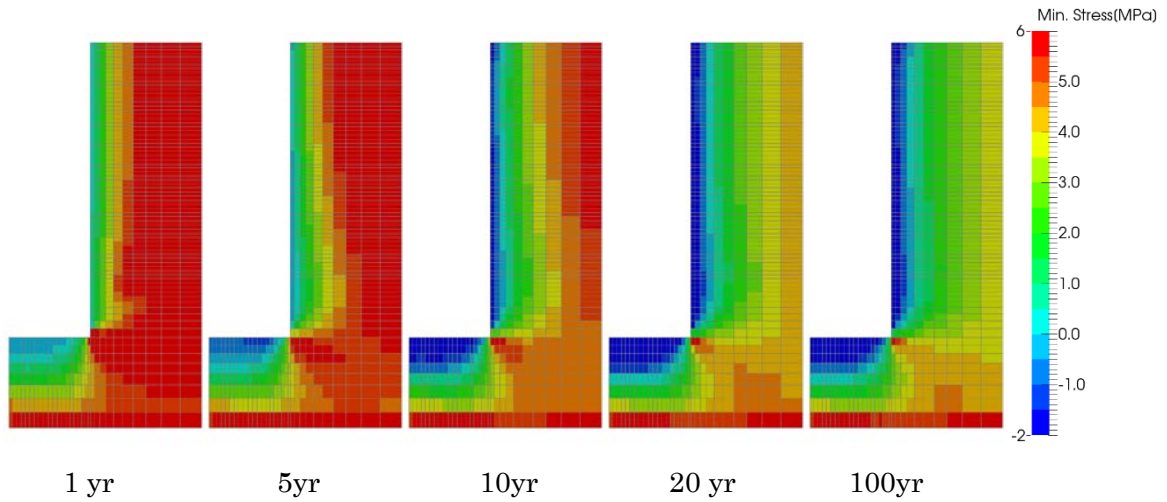


図 6.1.1-271 Case 19 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

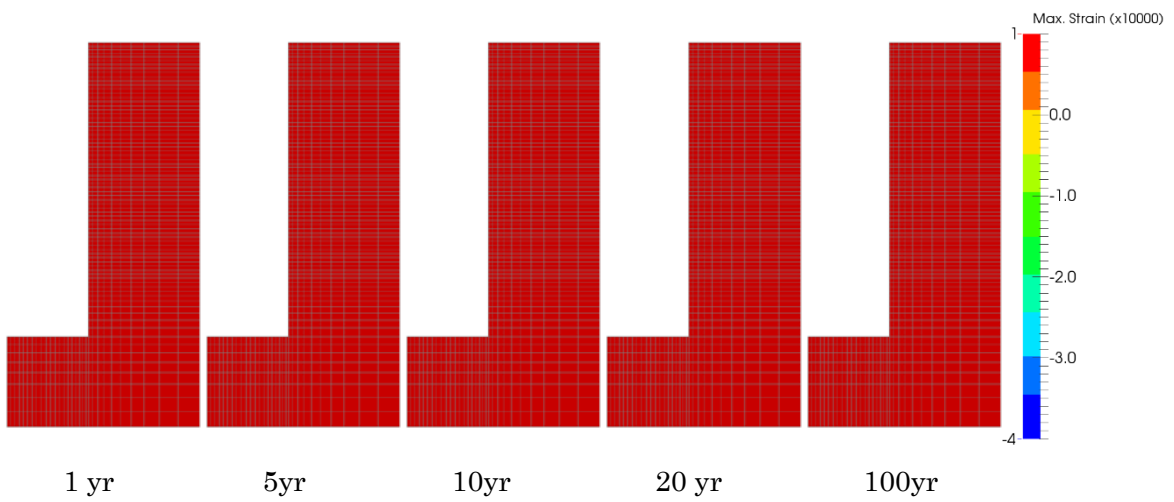


図 6.1.1-272 Case 19 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

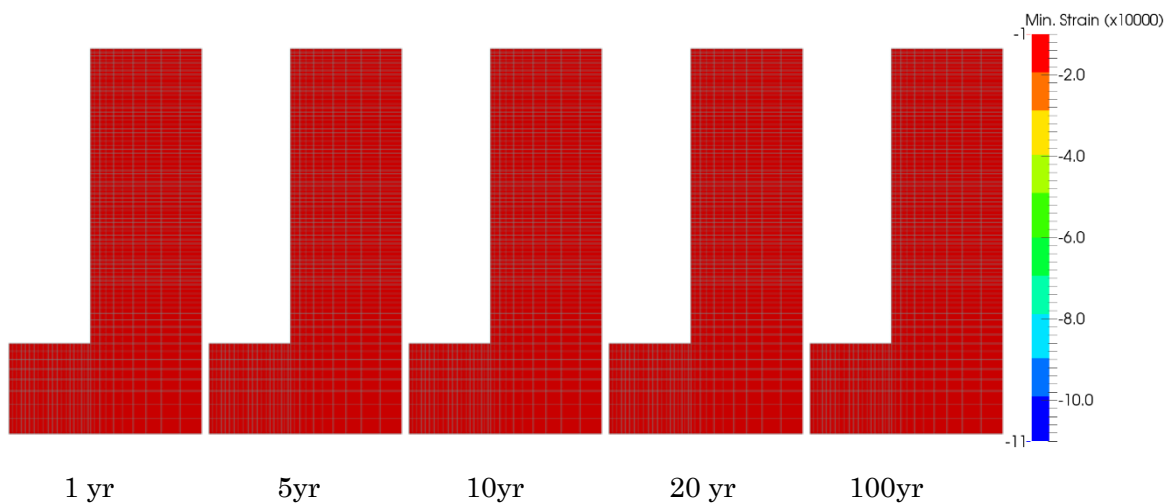


図 6.1.1-273 Case 19 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

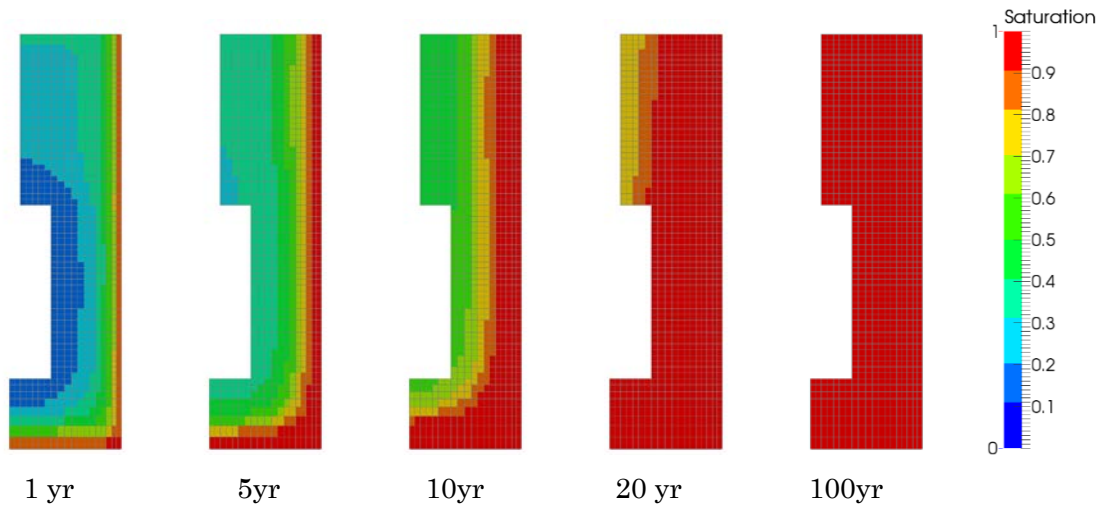


図 6.1.1-274 Case 19 緩衝材部分・飽和度分布

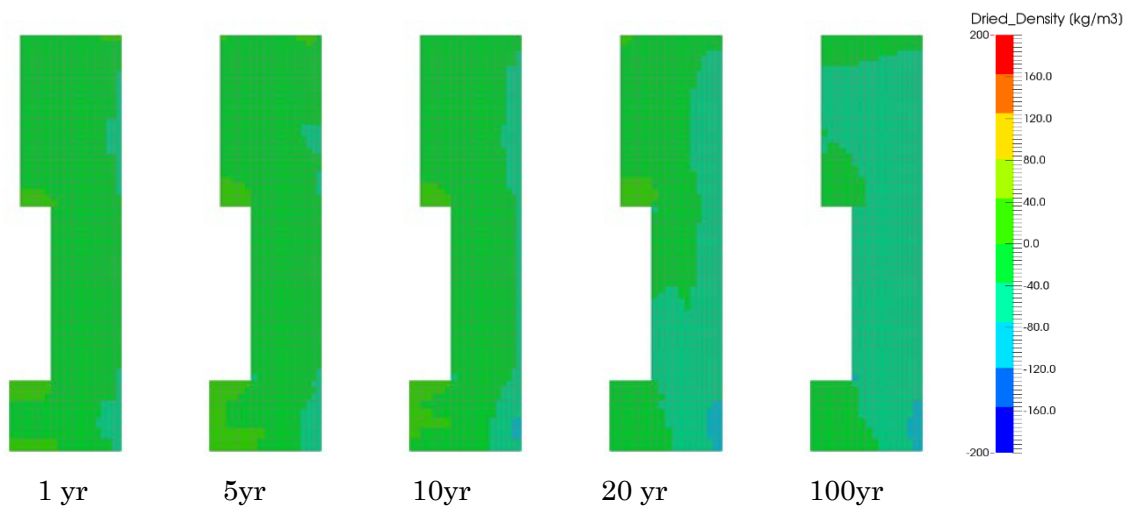


図 6.1.1-275 Case 19 緩衝材部分・乾燥密度分布

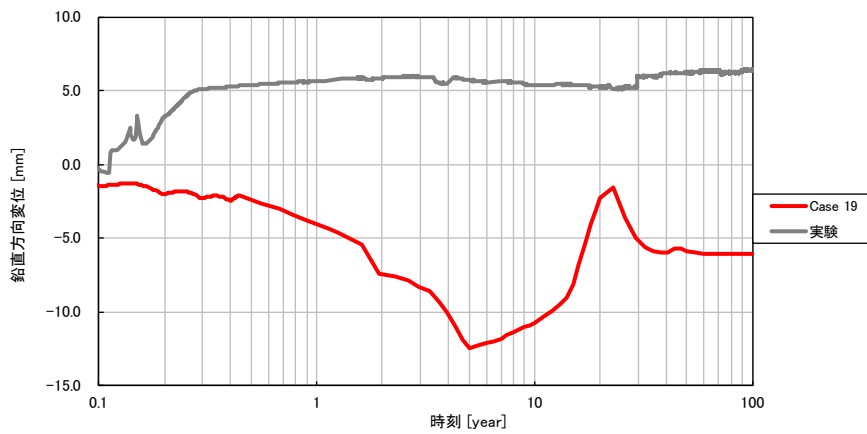


図 6.1.1-276 Case 19 鉛直方向の変位時刻歴

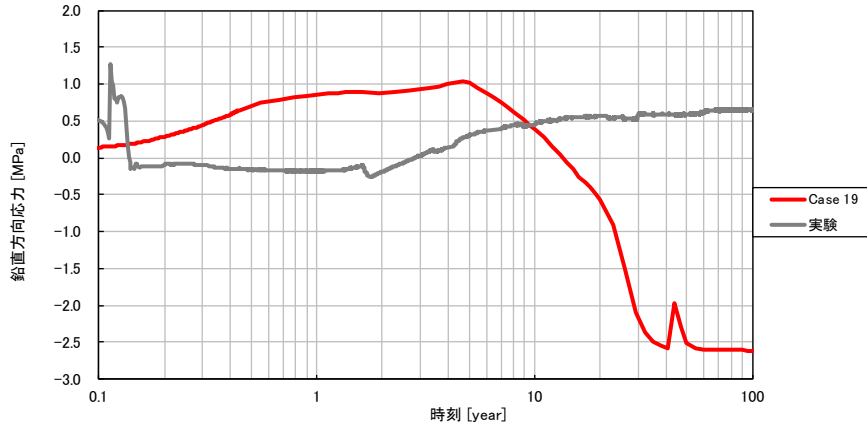


図 6.1.1-277 Case 19 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

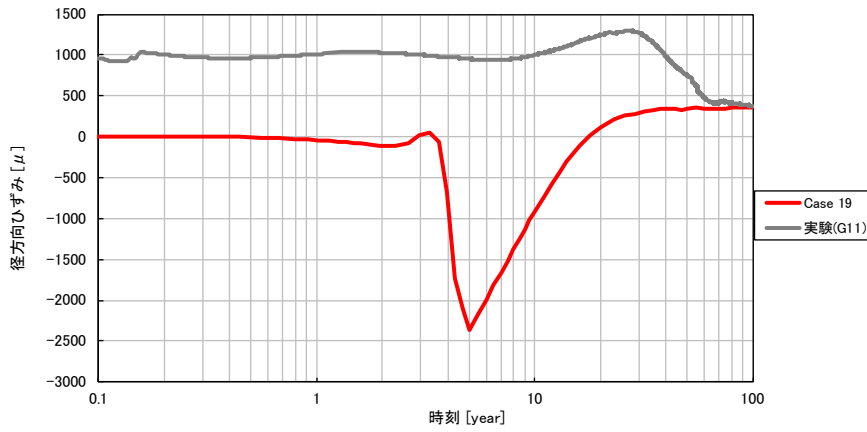


図 6.1.1-278 Case 19 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

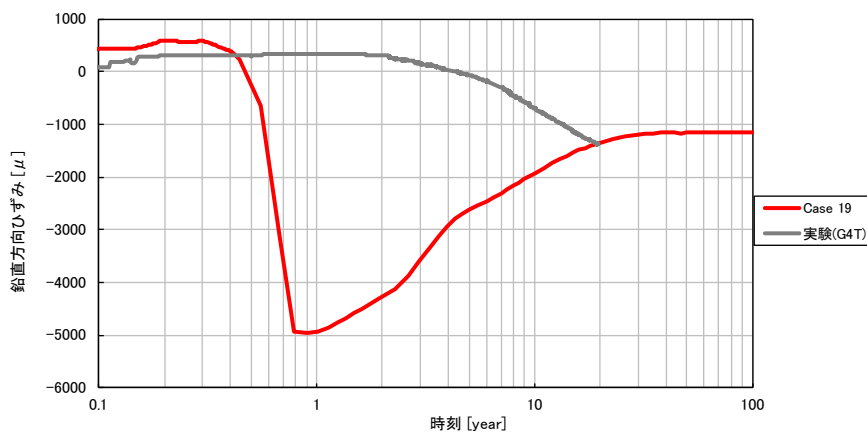


図 6.1.1-279 Case 19 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

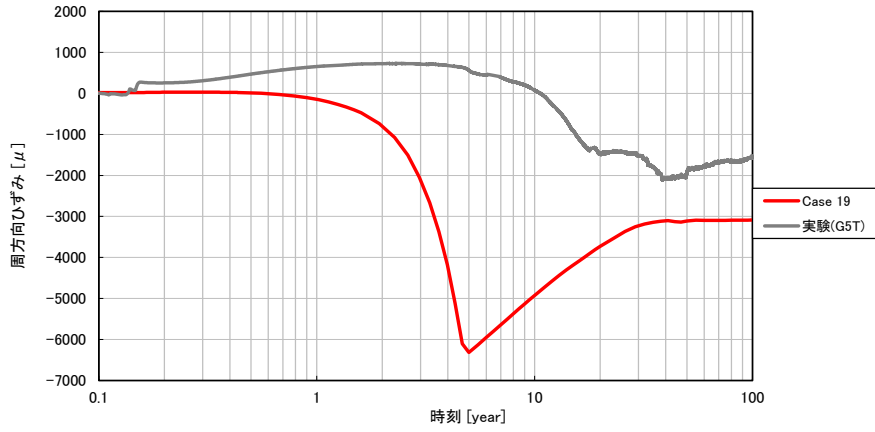


図 6.1.1-280 Case 19 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(21) Case 20

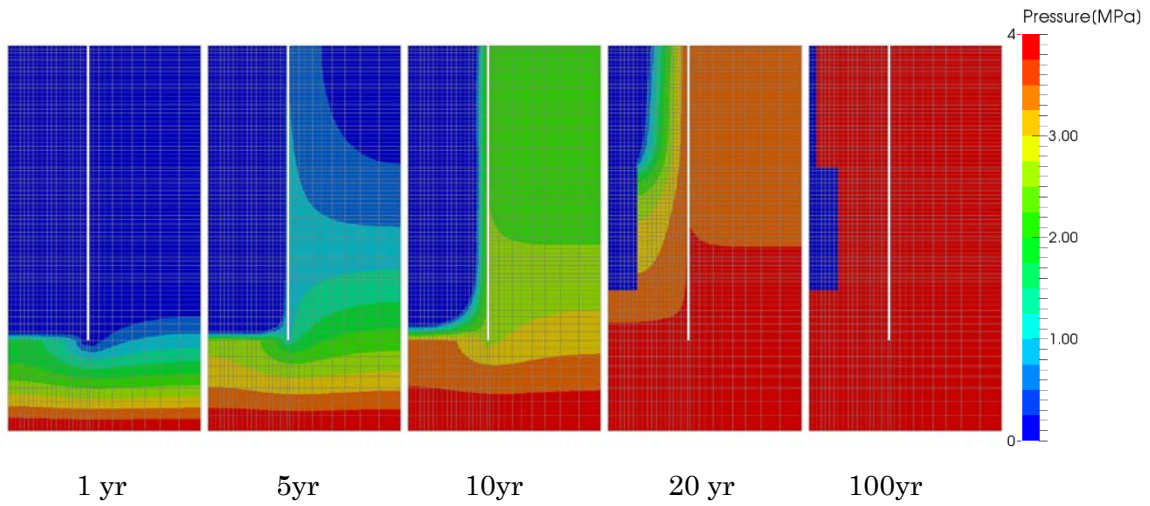


図 6.1.1-281 Case 20 岩盤部分・間隙水圧分布

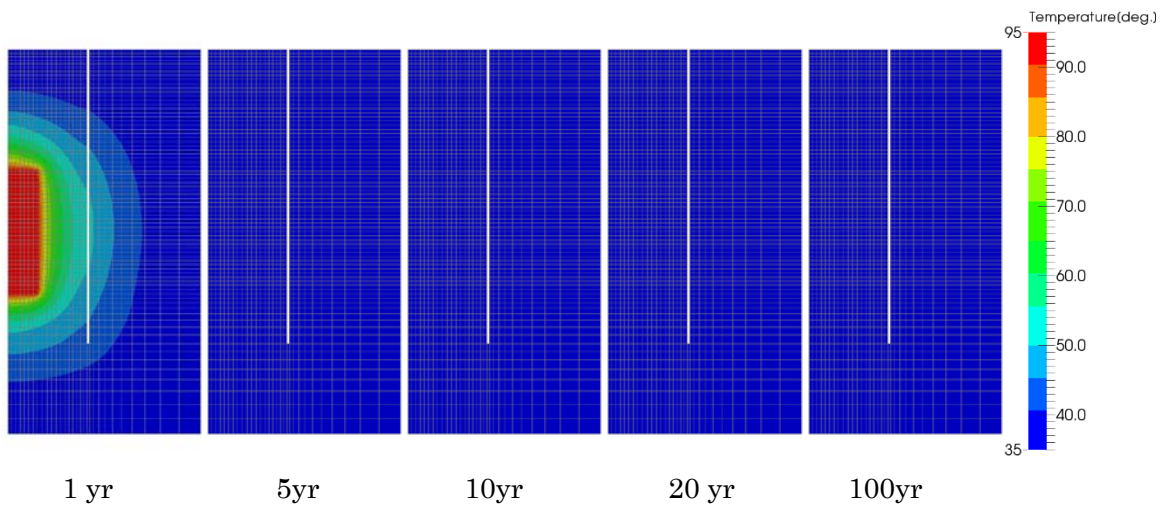


図 6.1.1-282 Case 20 岩盤部分・温度分布

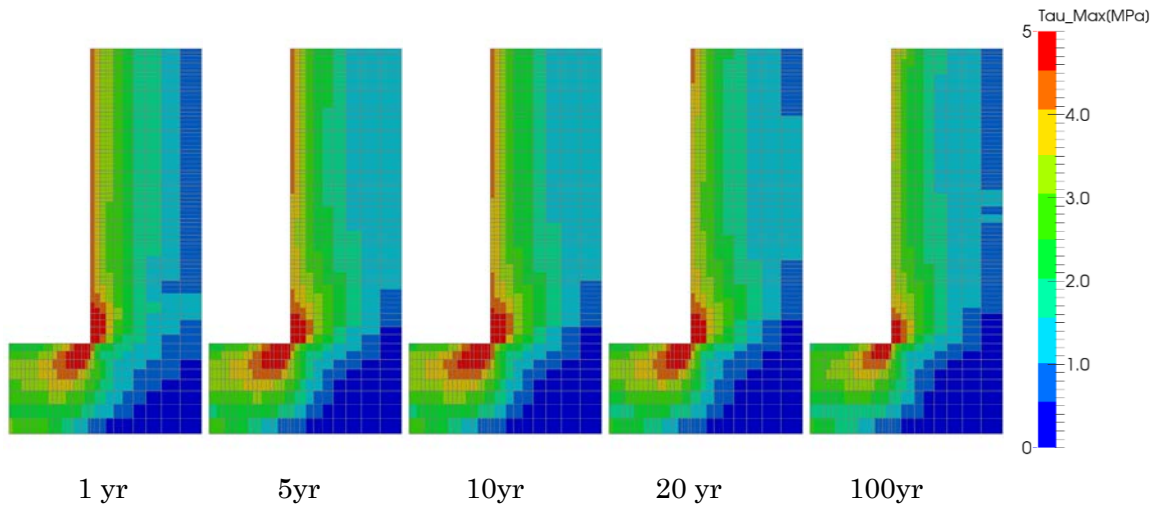


図 6.1.1-283 Case 20 岩盤部分・主せん断応力分布

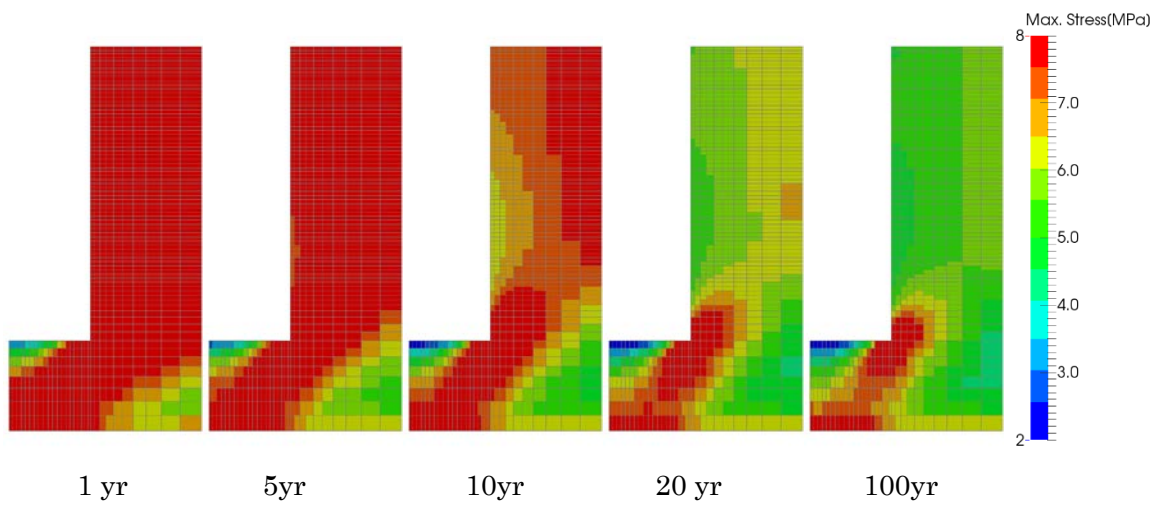


図 6.1.1-284 Case 20 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

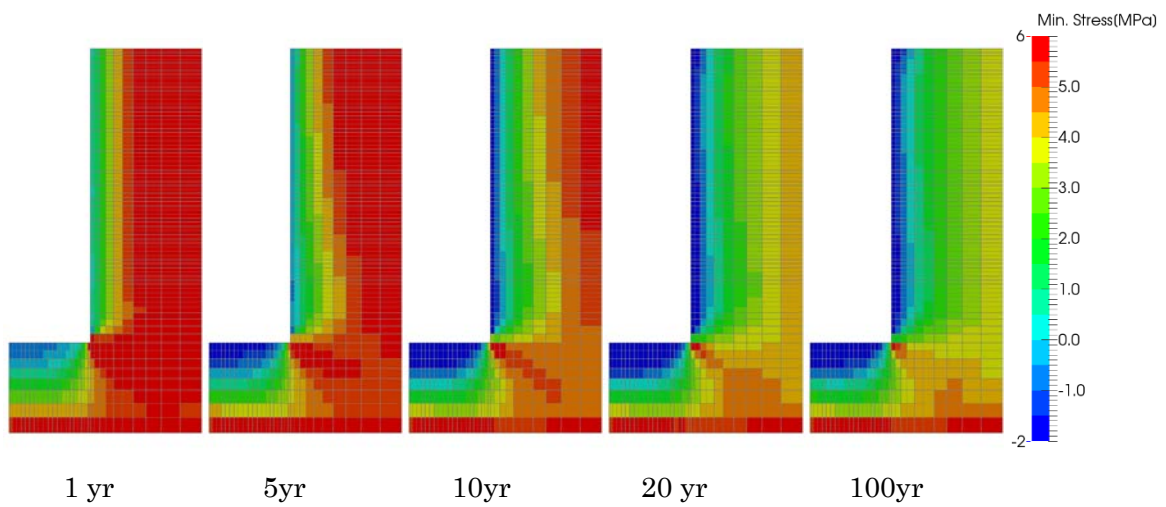


図 6.1.1-285 Case 20 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

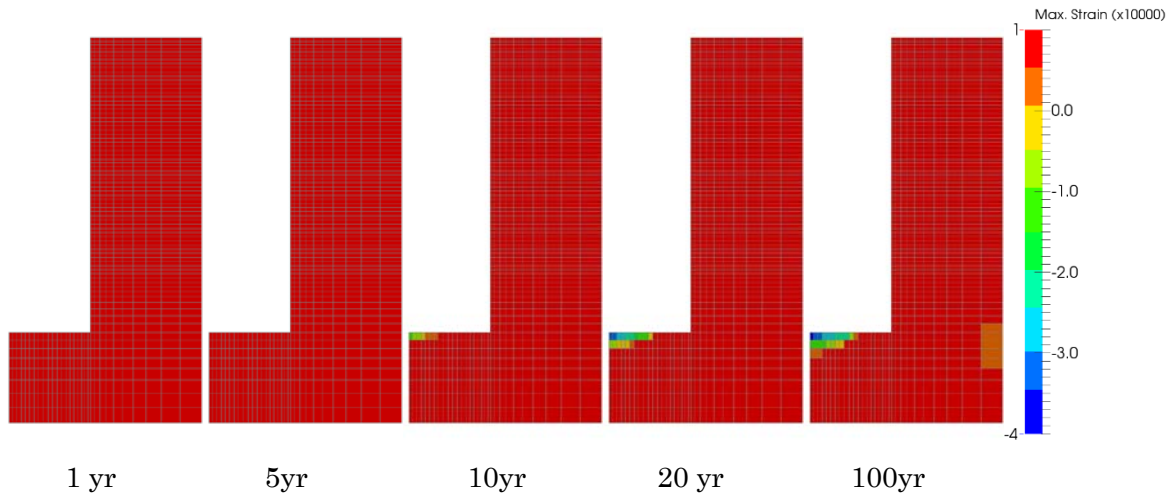


図 6.1.1-286 Case 20 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

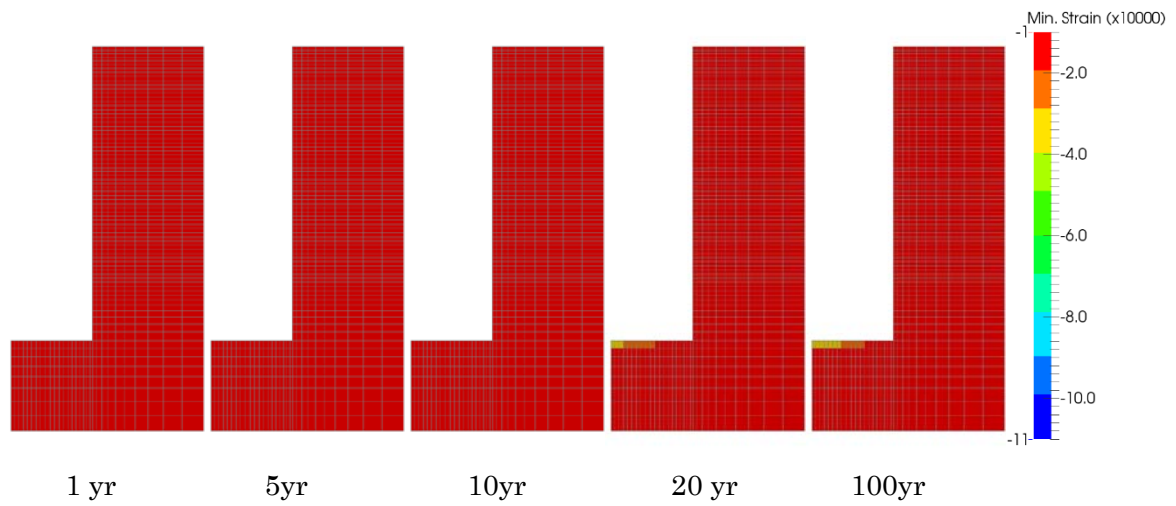


図 6.1.1-287 Case 20 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

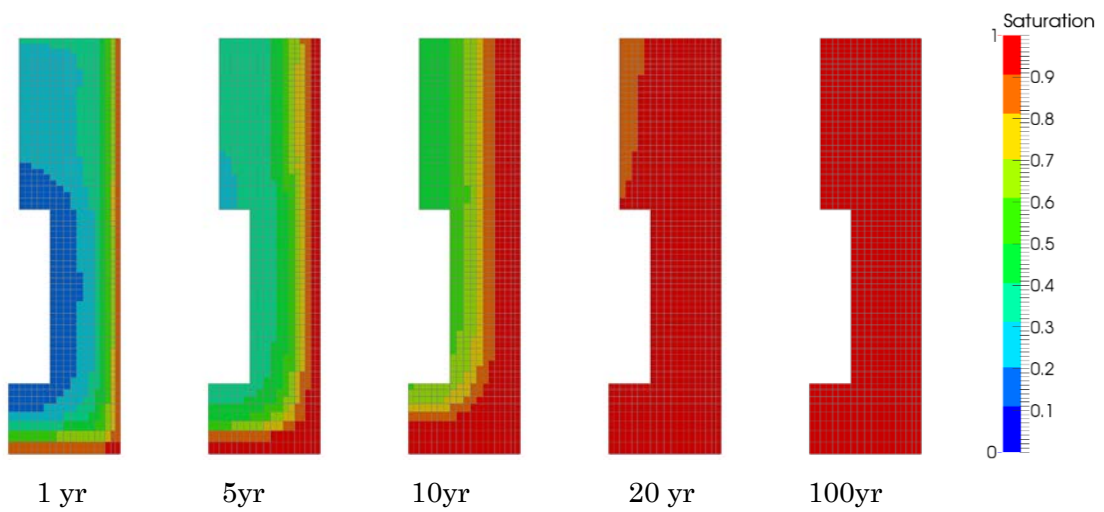


図 6.1.1-288 Case 20 緩衝材部分・飽和度分布

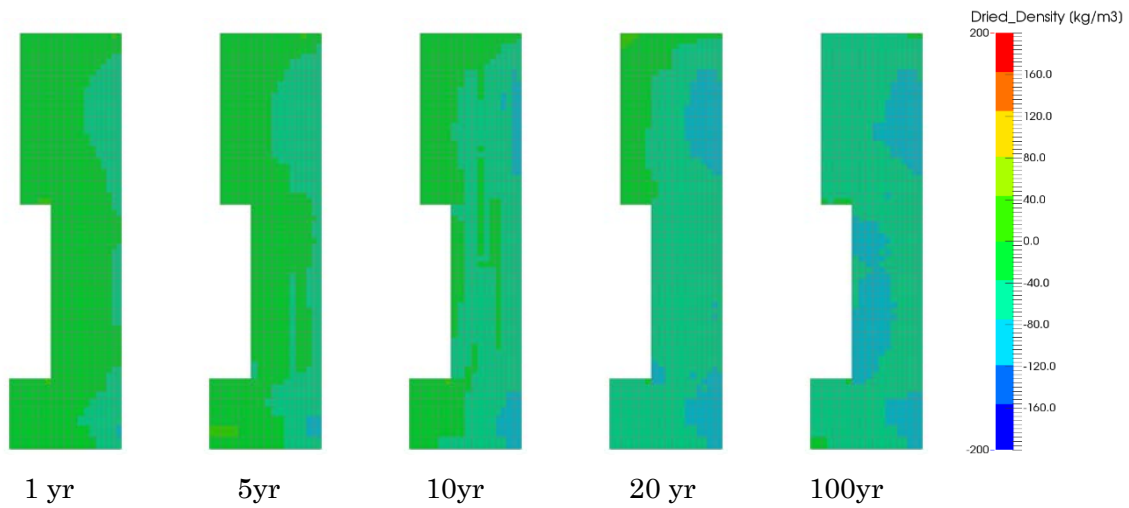


図 6.1.1-289 Case 20 緩衝材部分・乾燥密度分布

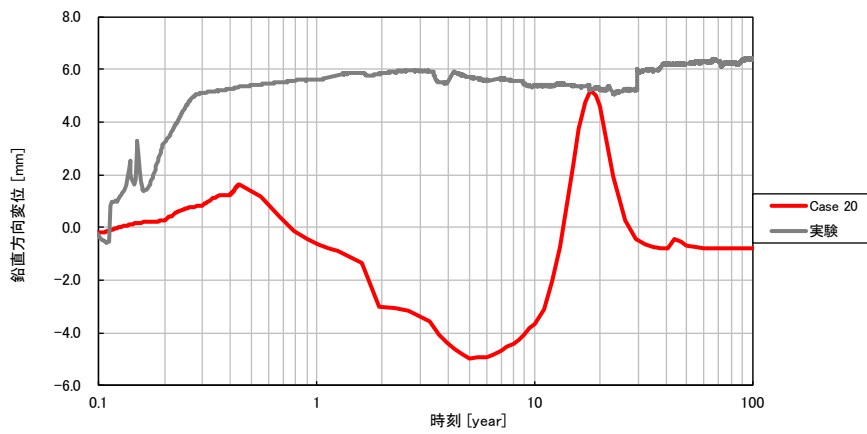


図 6.1.1-290 Case 20 鉛直方向の変位時刻歴

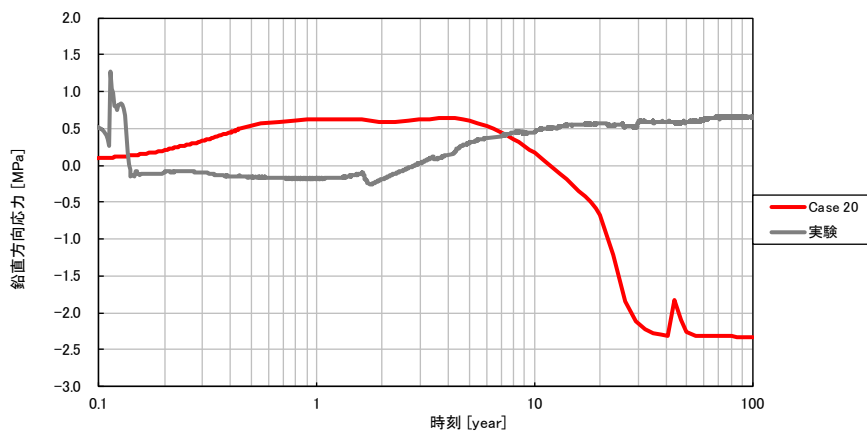


図 6.1.1-291 Case 20 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

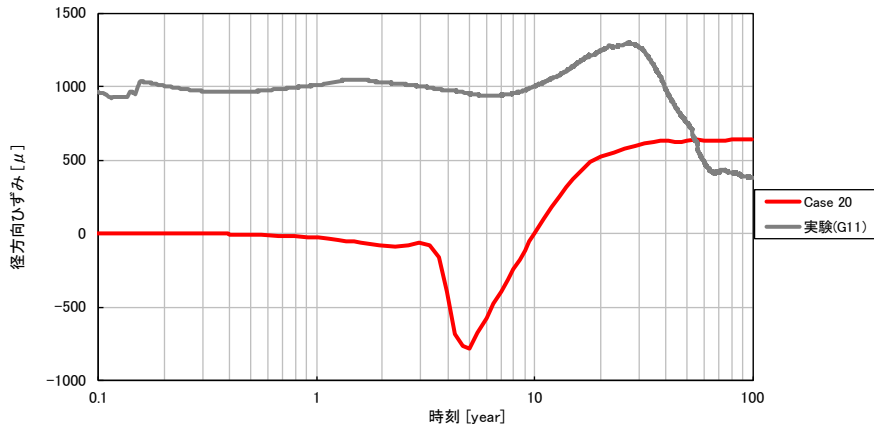


図 6.1.1-292 Case 20 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

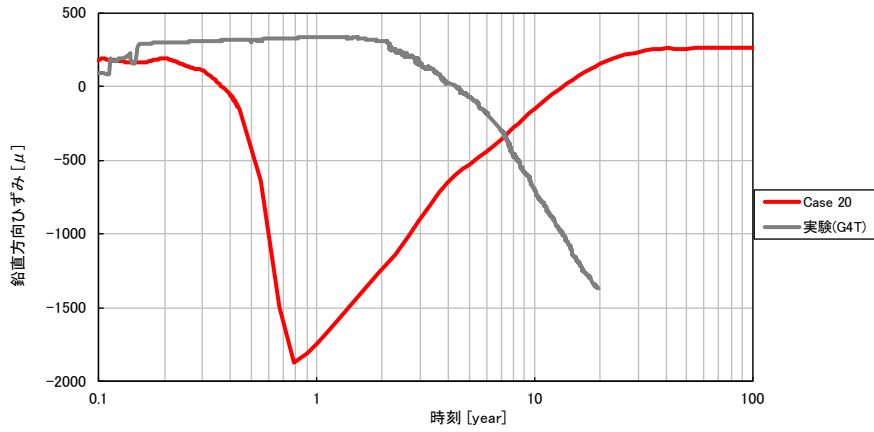


図 6.1.1-293 Case 20 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

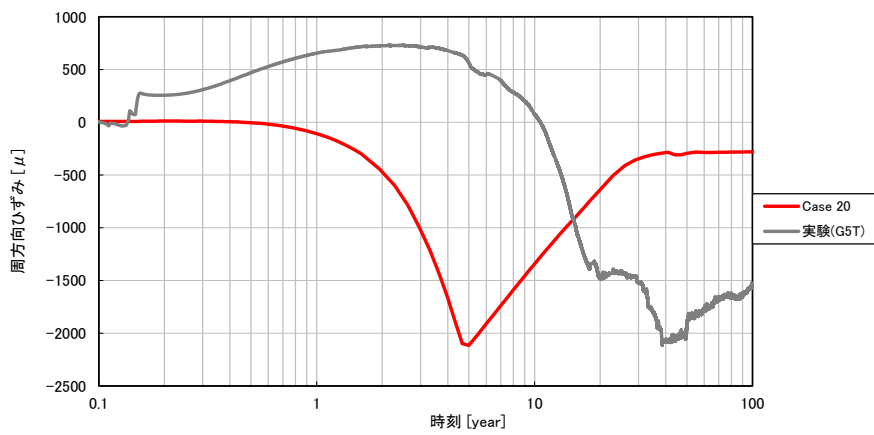


図 6.1.1-294 Case 20 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(22) Case 21

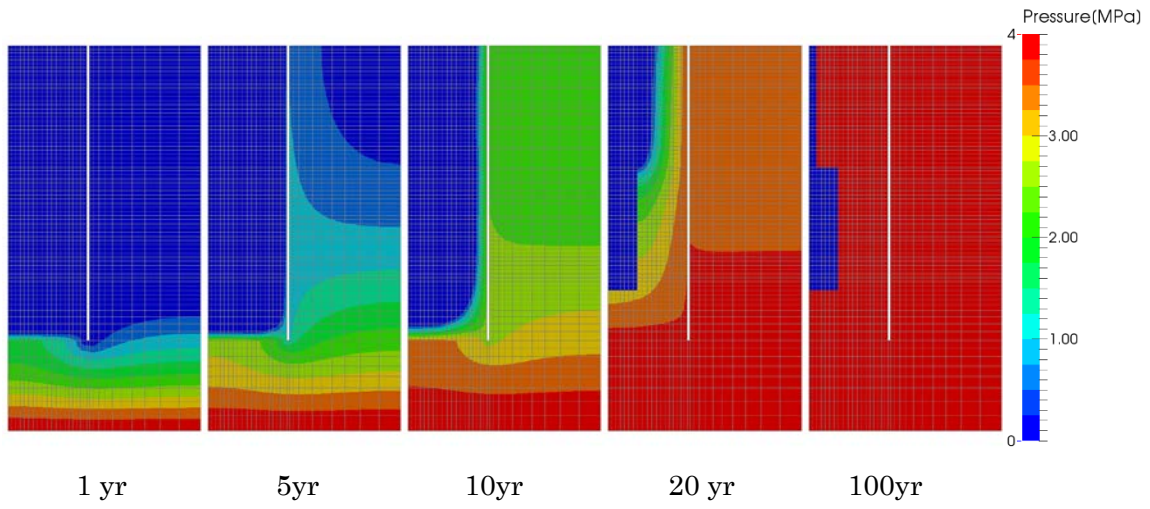


図 6.1.1-295 Case 21 岩盤部分・間隙水压分布

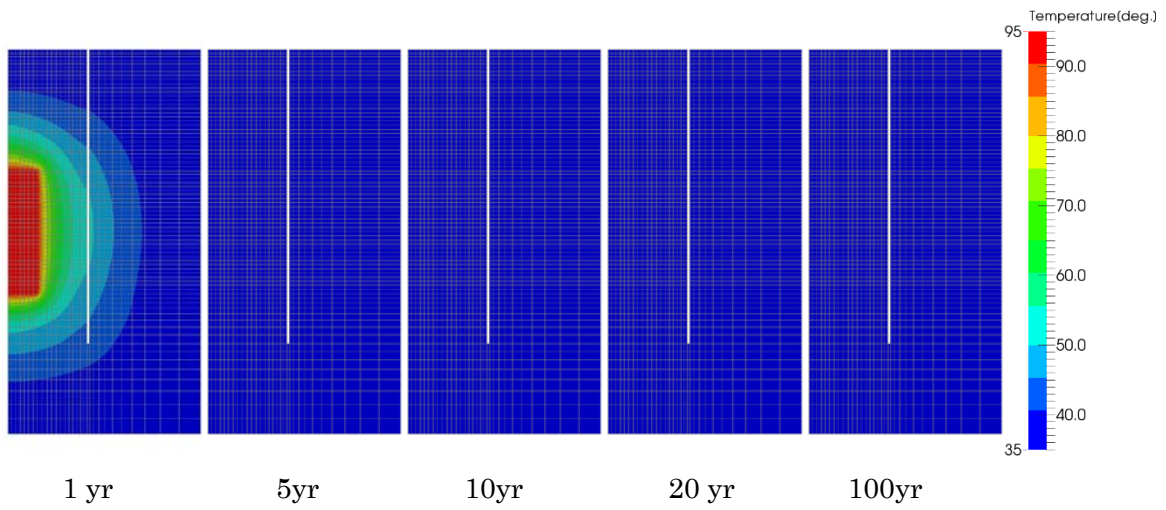


図 6.1.1-296 Case 21 岩盤部分・温度分布

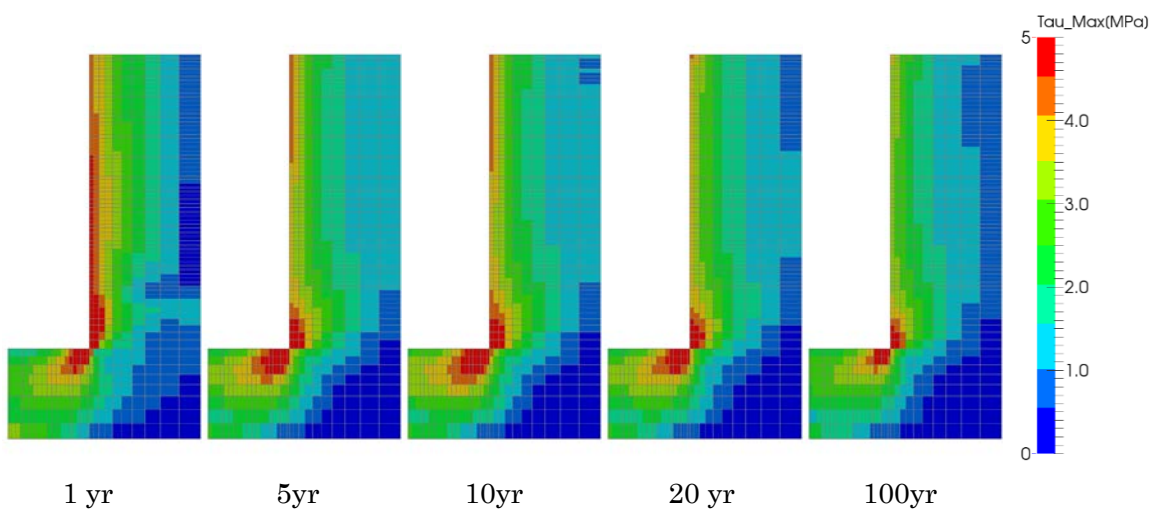


図 6.1.1-297 Case 21 岩盤部分・主せん断応力分布

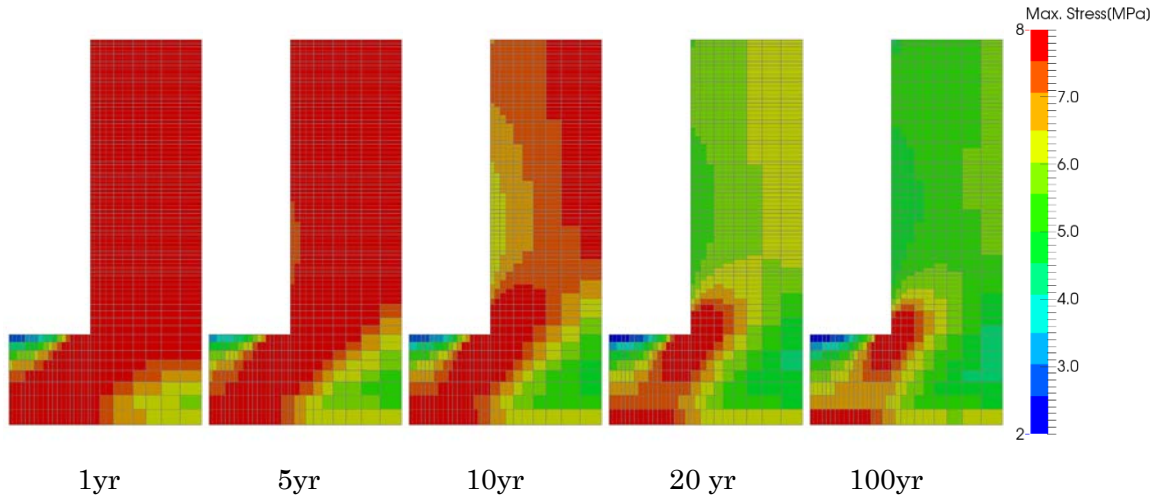


図 6.1.1-298 Case 21 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

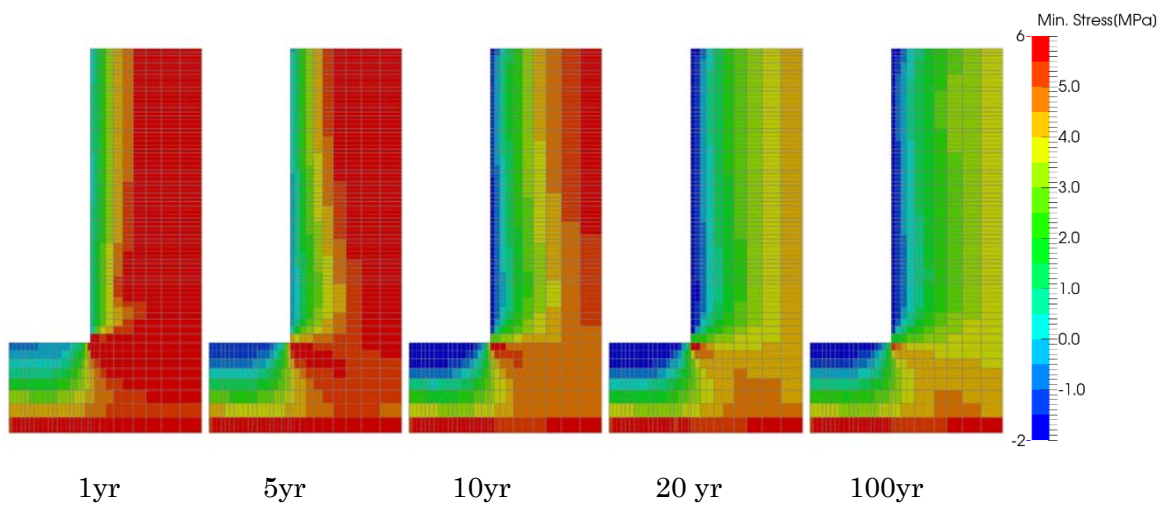


図 6.1.1-299 Case 21 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

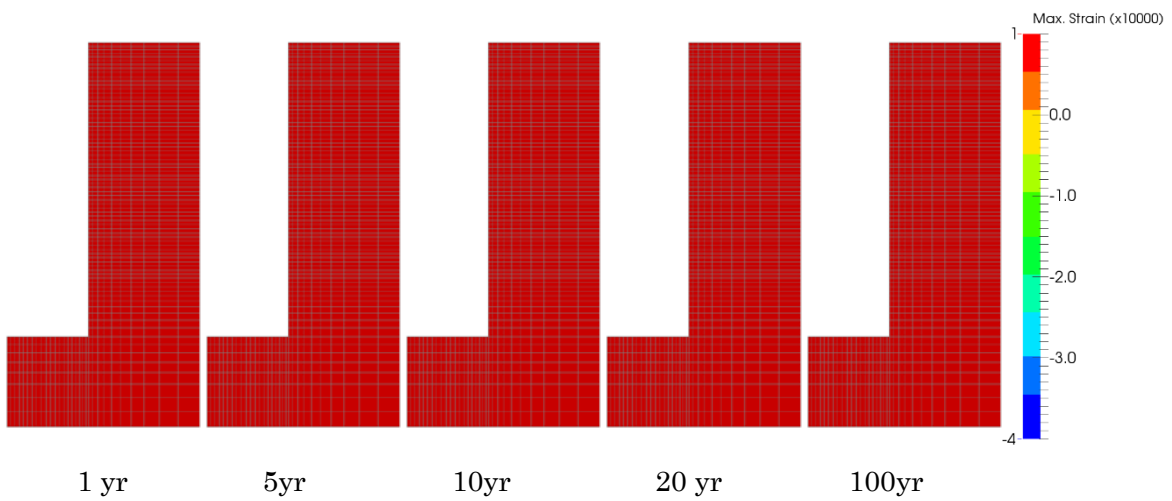


図 6.1.1-300 Case 21 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

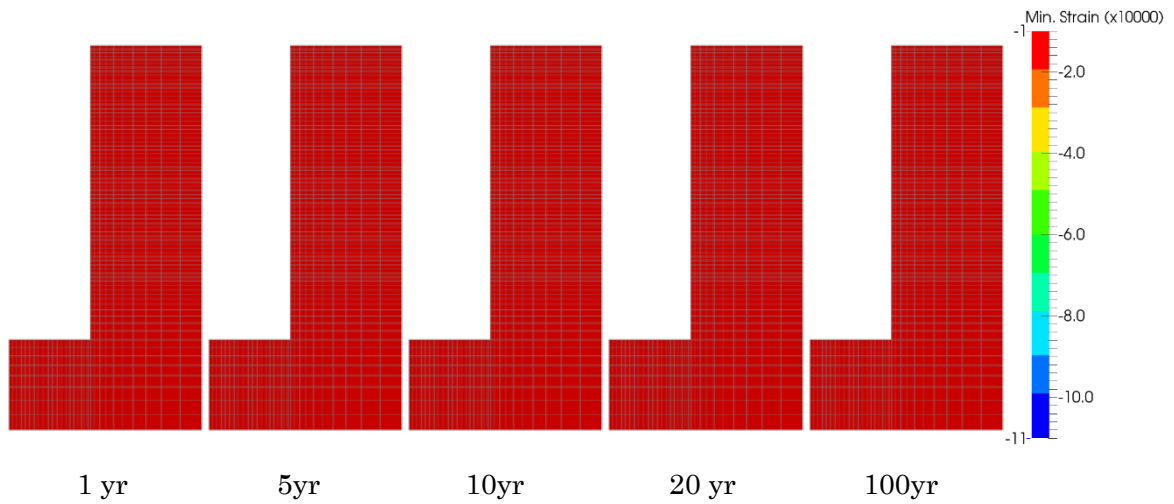


図 6.1.1-301 Case 21 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

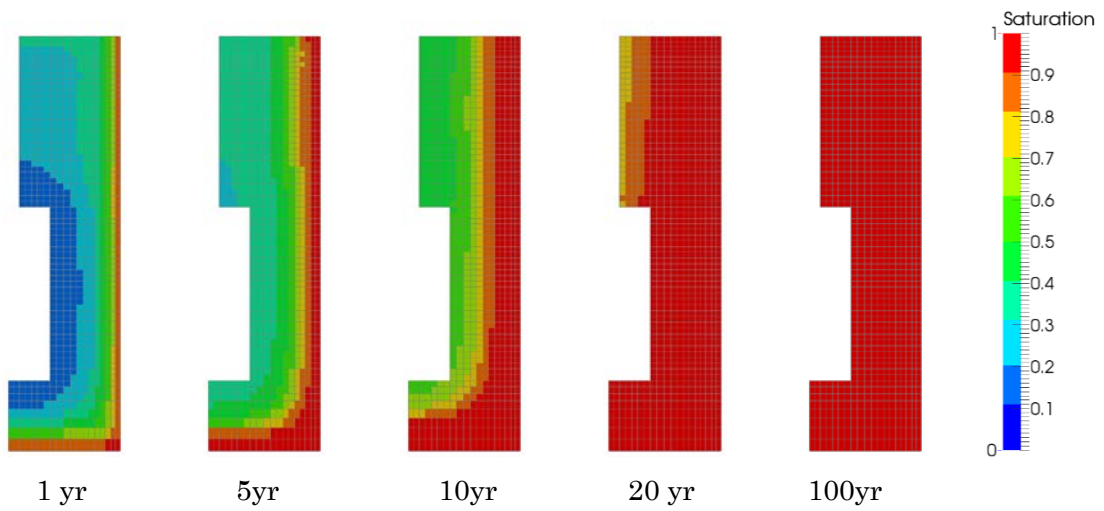


図 6.1.1-302 Case 21 緩衝材部分・飽和度分布

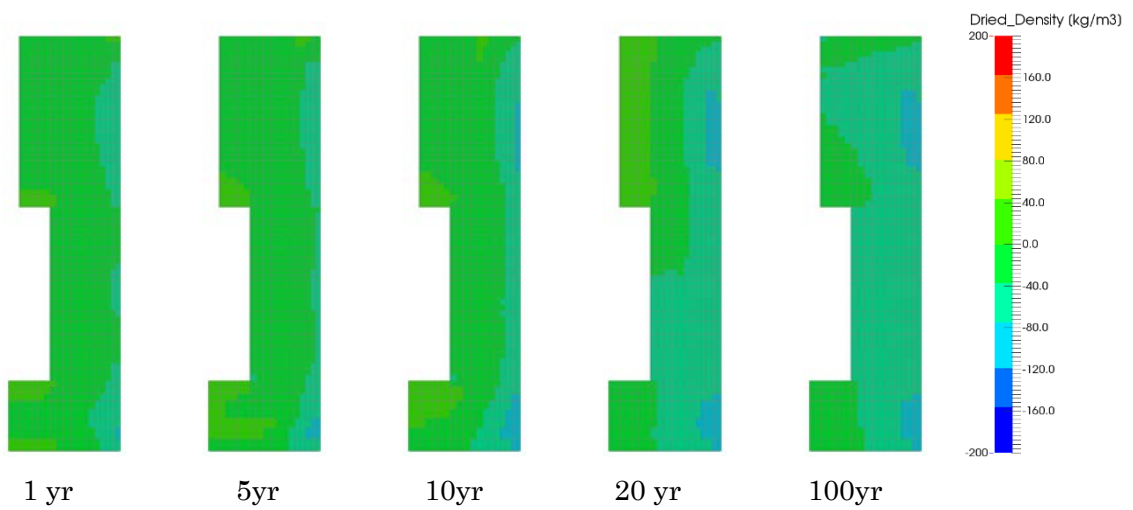


図 6.1.1-303 Case 21 緩衝材部分・乾燥密度分布

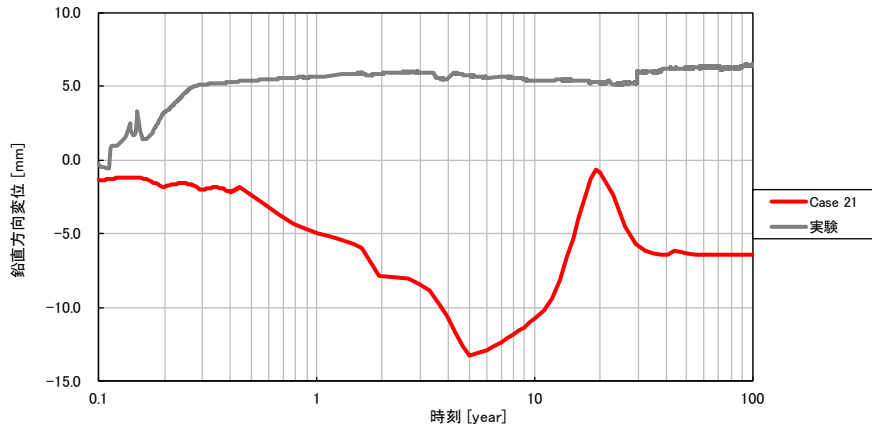


図 6.1.1-304 Case 21 鉛直方向の変位時刻歴

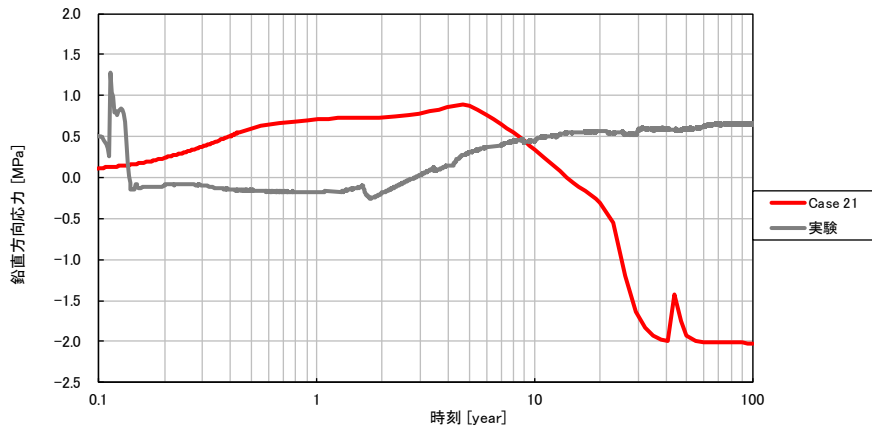


図 6.1.1-305 Case 21 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

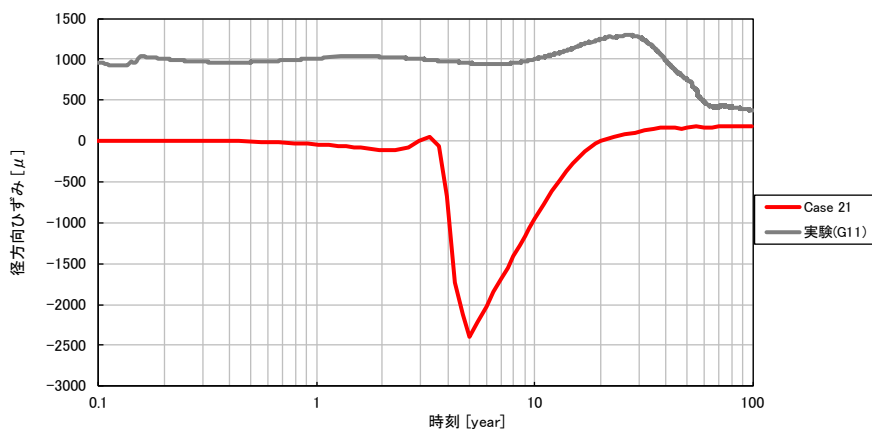


図 6.1.1-306 Case 21 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

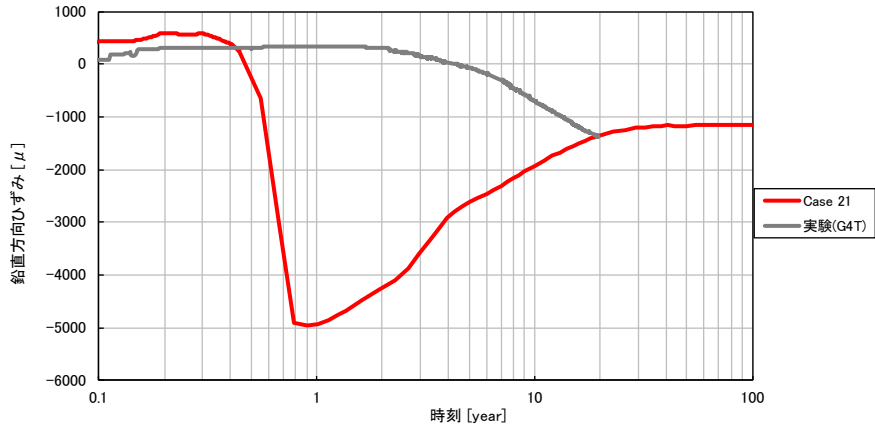


図 6.1.1-307 Case 21 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

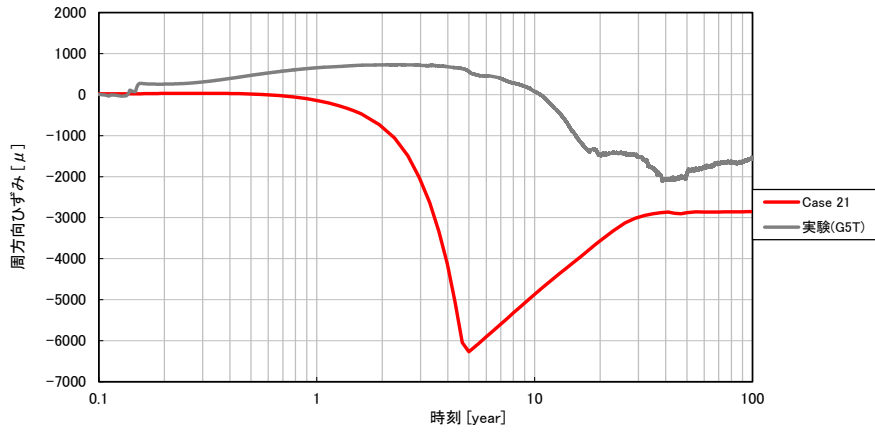


図 6.1.1-308 Case 21 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(23) Case 22

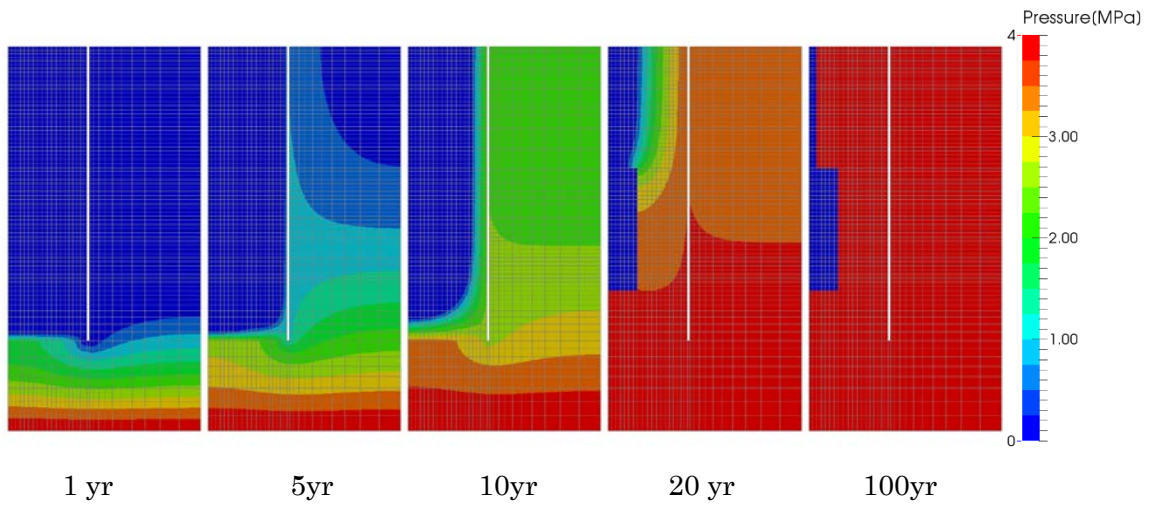


図 6.1.1-309 Case 22 岩盤部分・間隙水圧分布

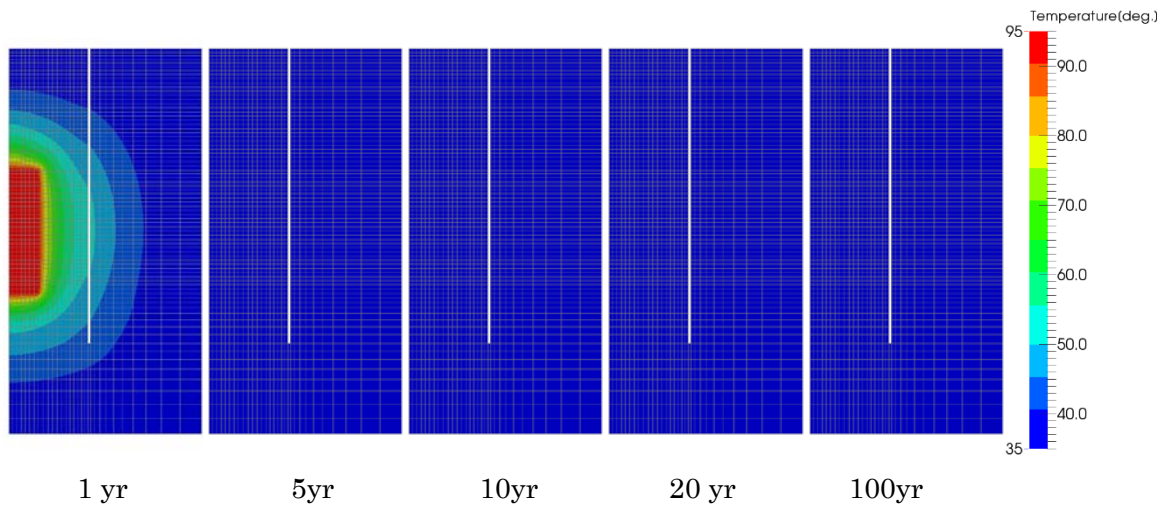


図 6.1.1-310 Case 22 岩盤部分・温度分布

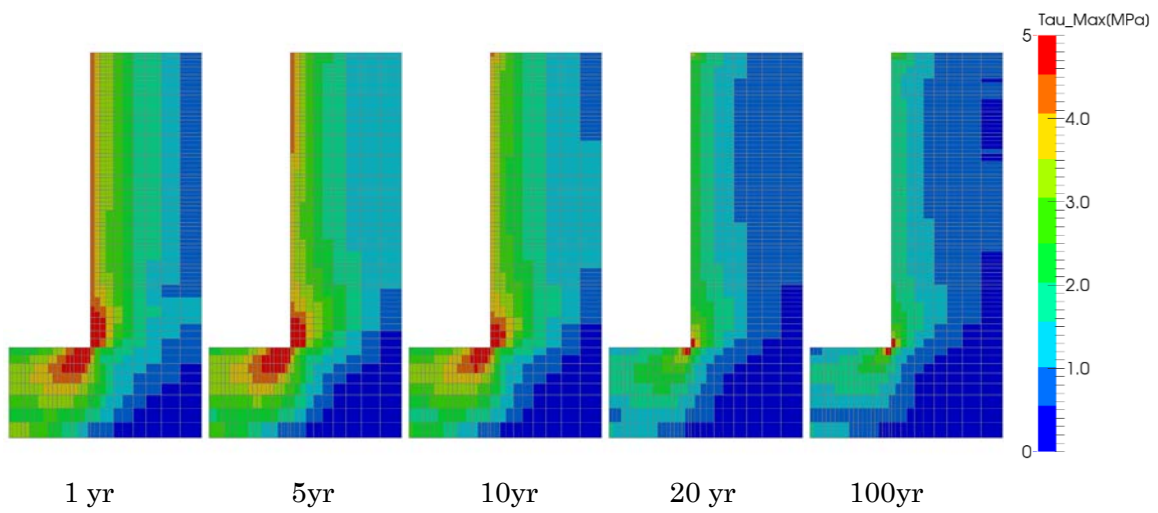


図 6.1.1-311 Case 22 岩盤部分・主せん断応力分布

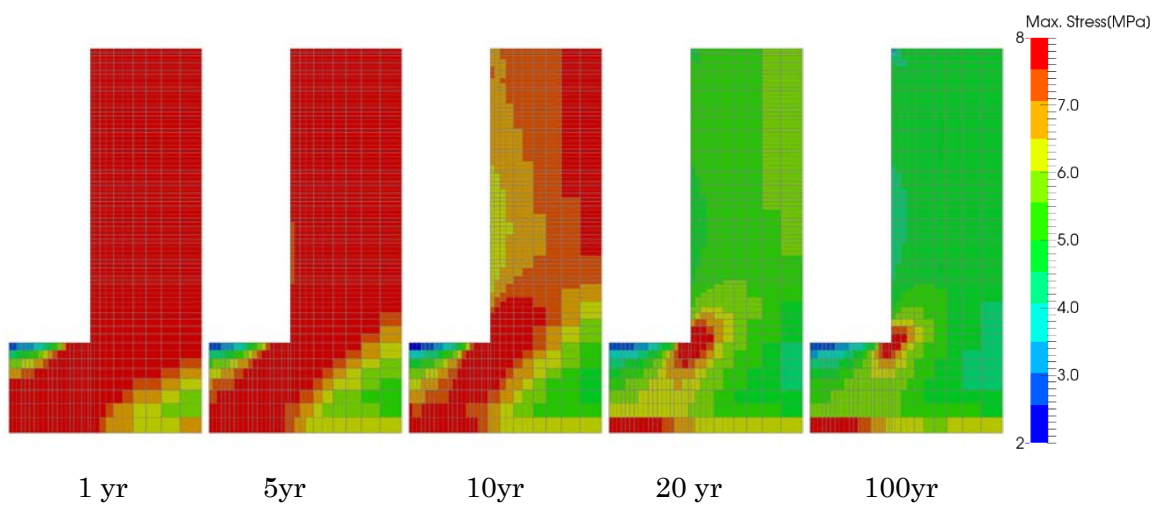


図 6.1.1-312 Case 22 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

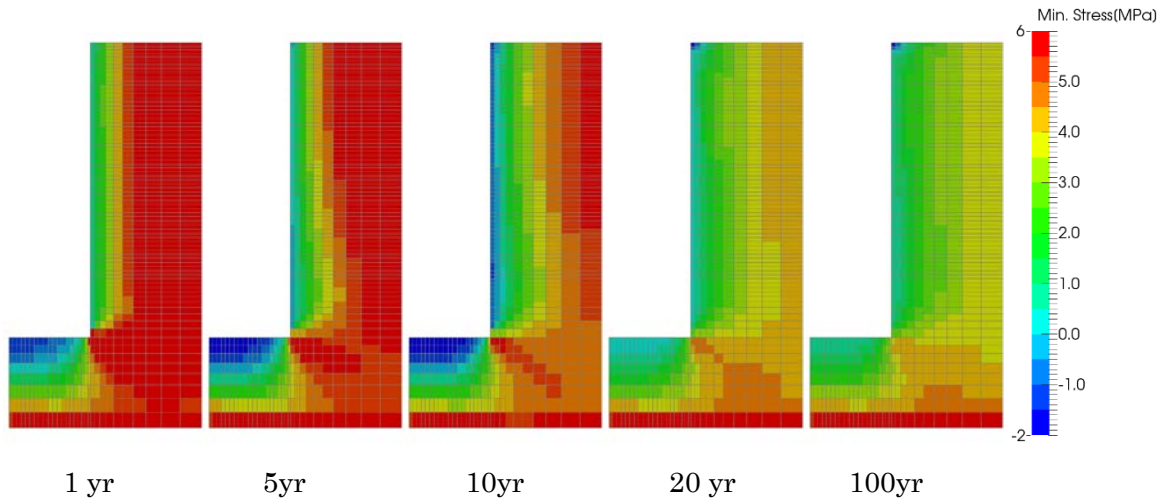


図 6.1.1-313 Case 22 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

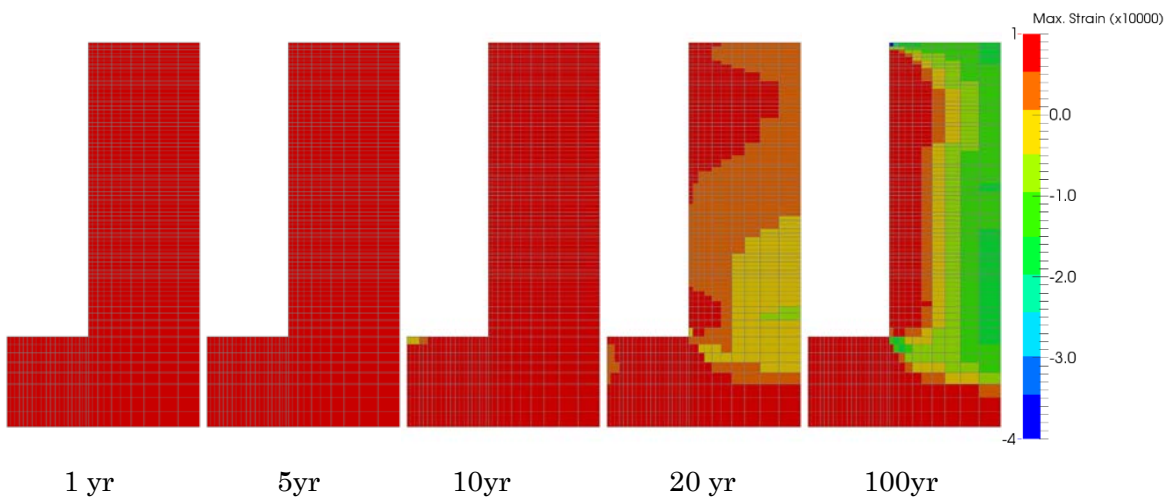


図 6.1.1-314 Case 22 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

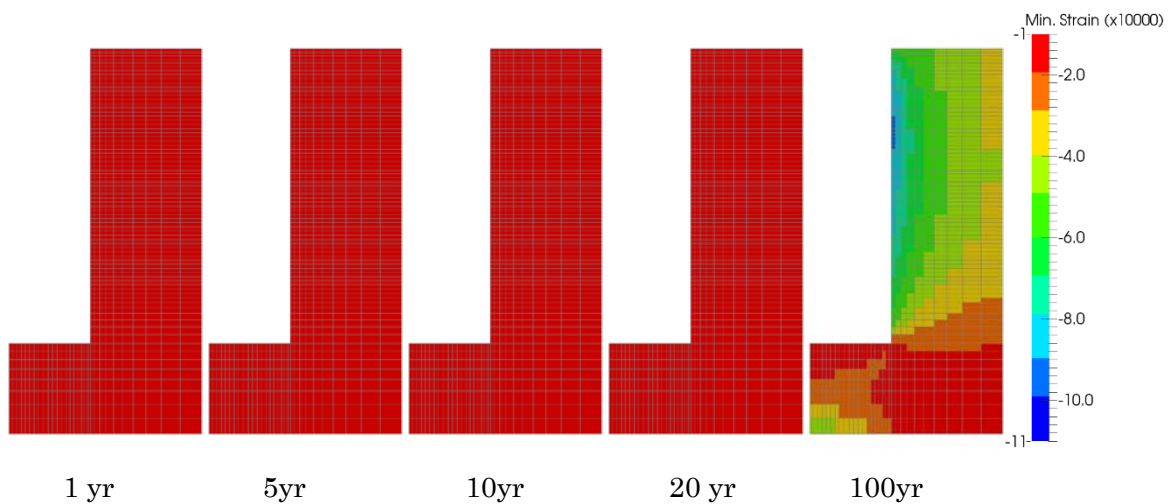


図 6.1.1-315 Case 22 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

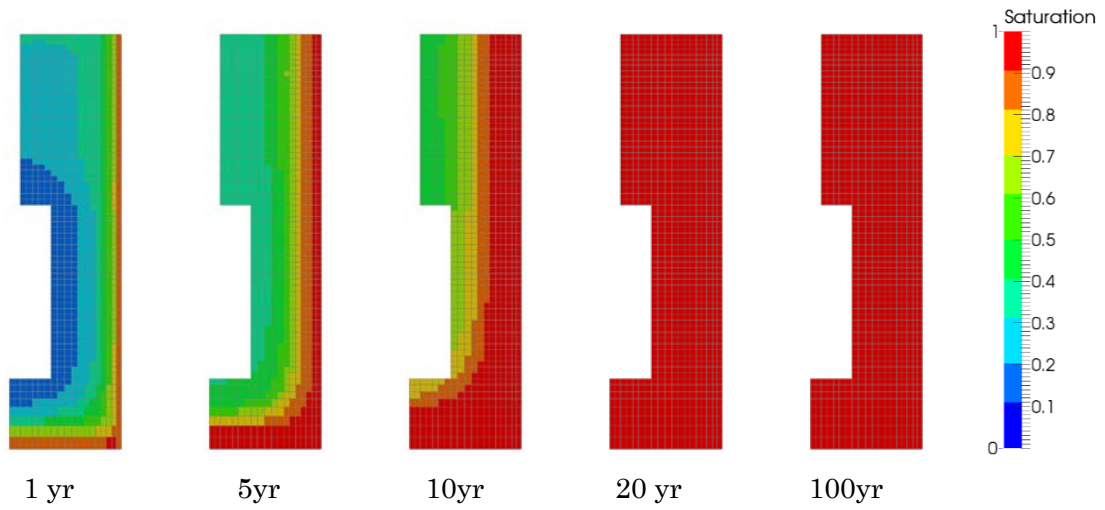


図 6.1.1-316 Case 22 緩衝材部分・飽和度分布

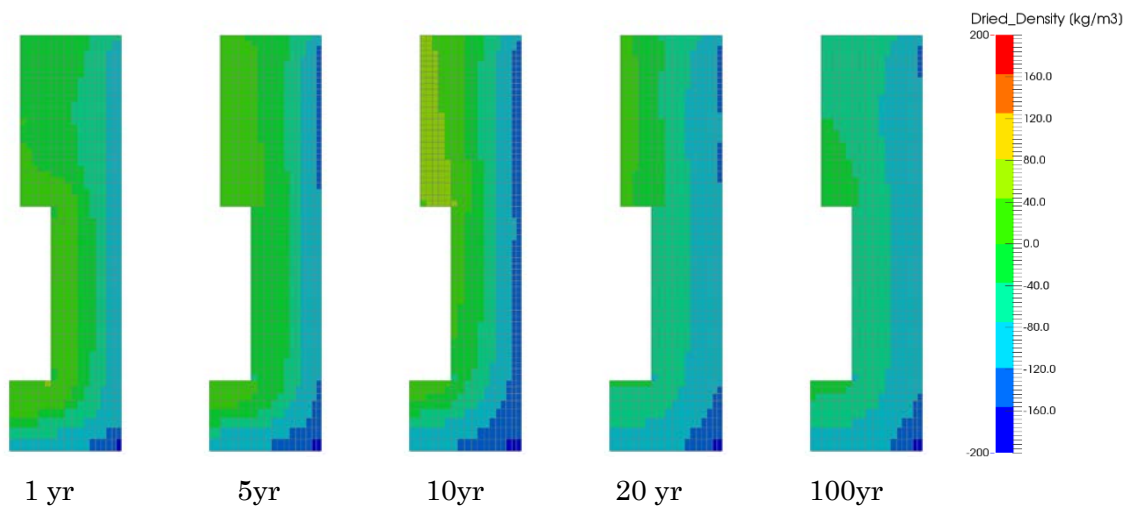


図 6.1.1-317 Case 22 緩衝材部分・乾燥密度分布

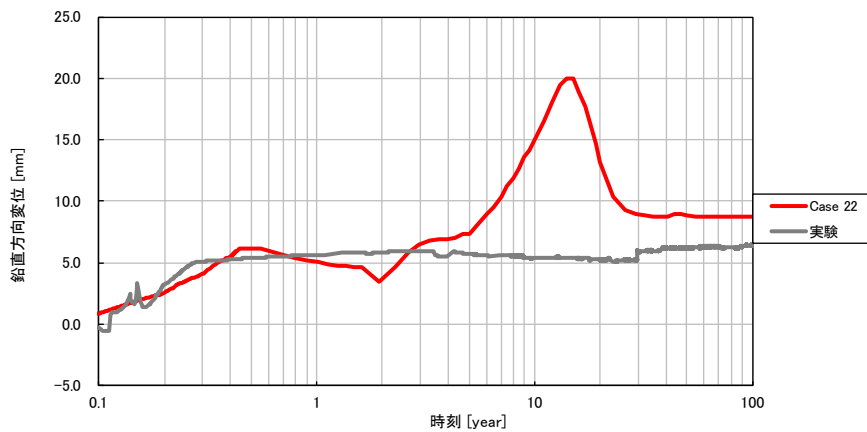


図 6.1.1-318 Case 22 鉛直方向の変位時刻歴

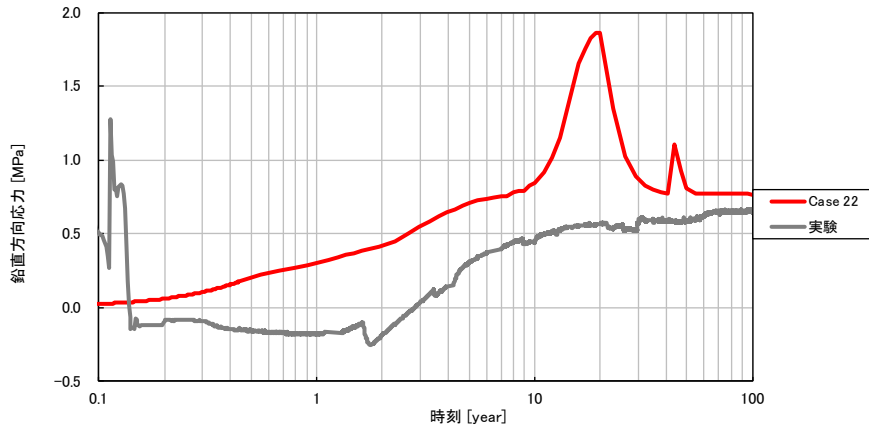


図 6.1.1-319 Case 22 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

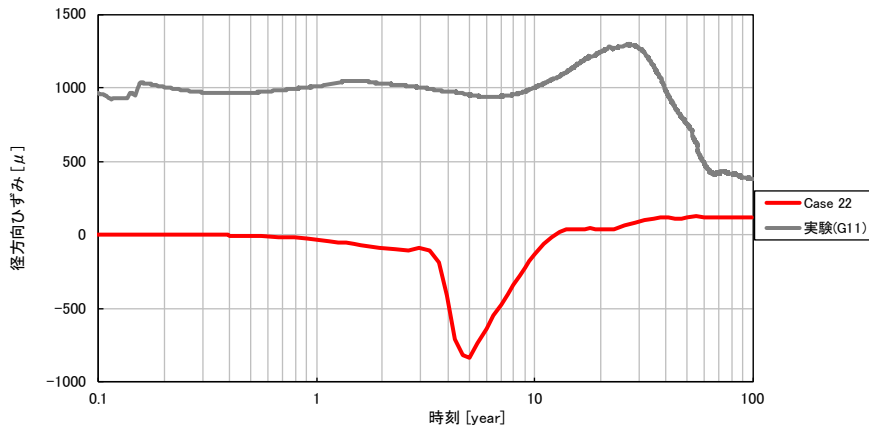


図 6.1.1-320 Case 22 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

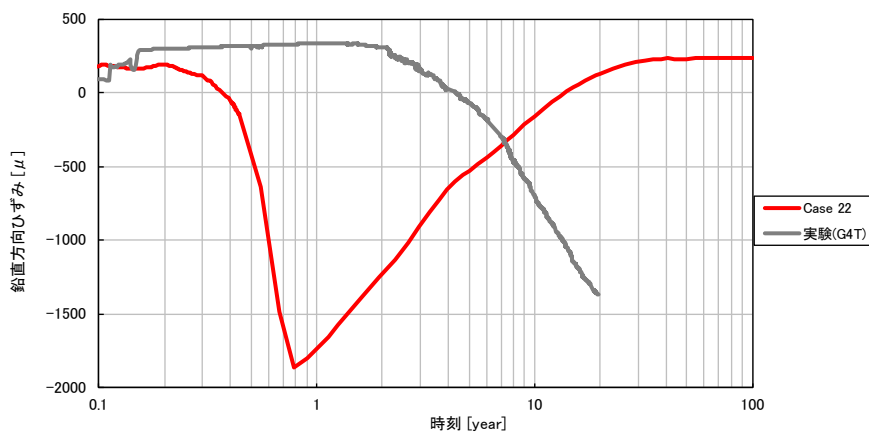


図 6.1.1-321 Case 22 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

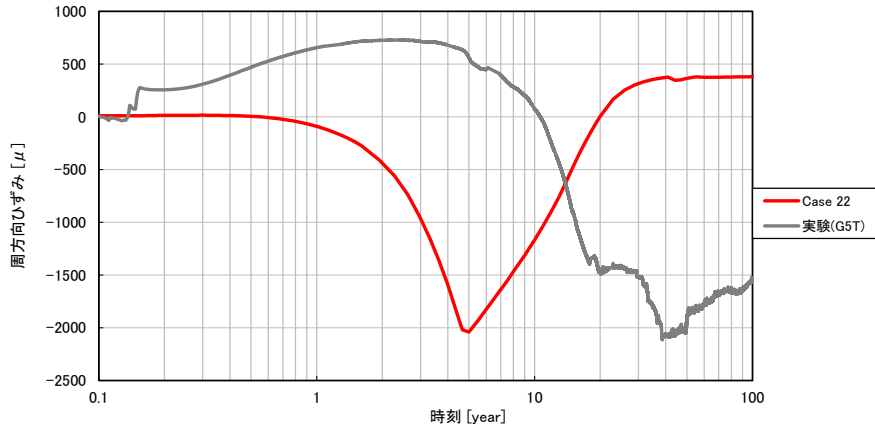


図 6.1.1-322 Case 22 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(24) Case 23

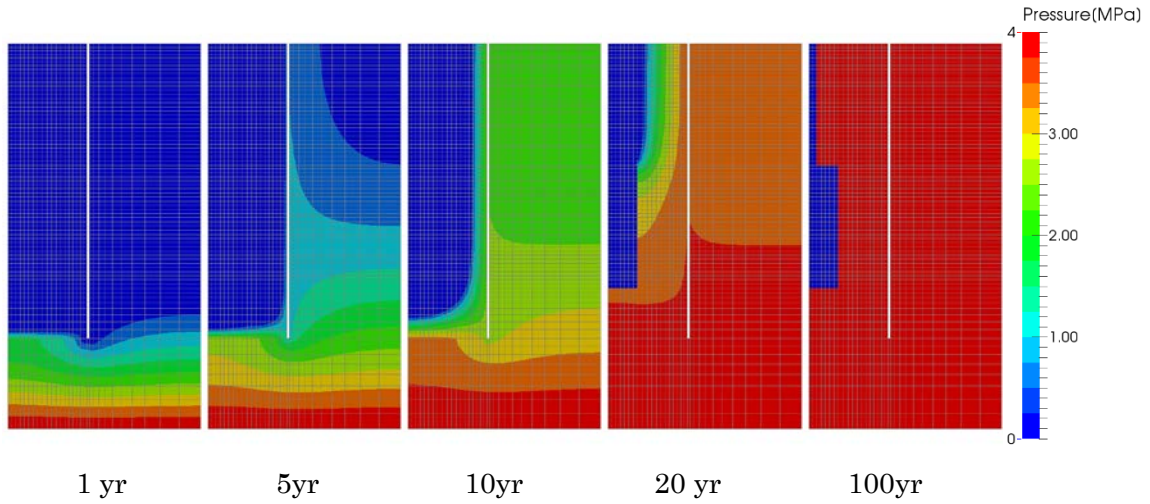


図 6.1.1-323 Case 23 岩盤部分・間隙水圧分布

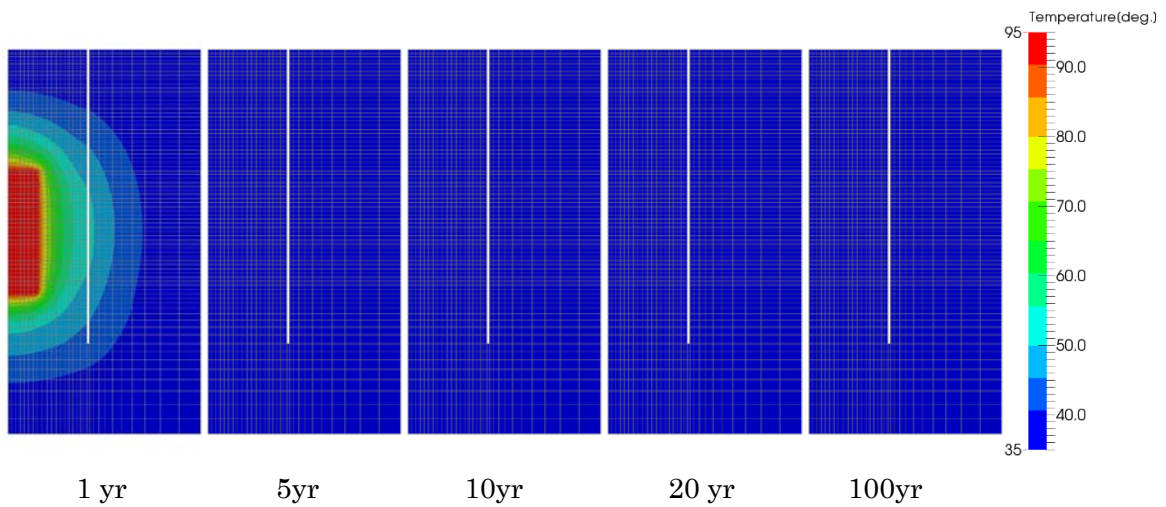


図 6.1.1-324 Case 23 岩盤部分・温度分布

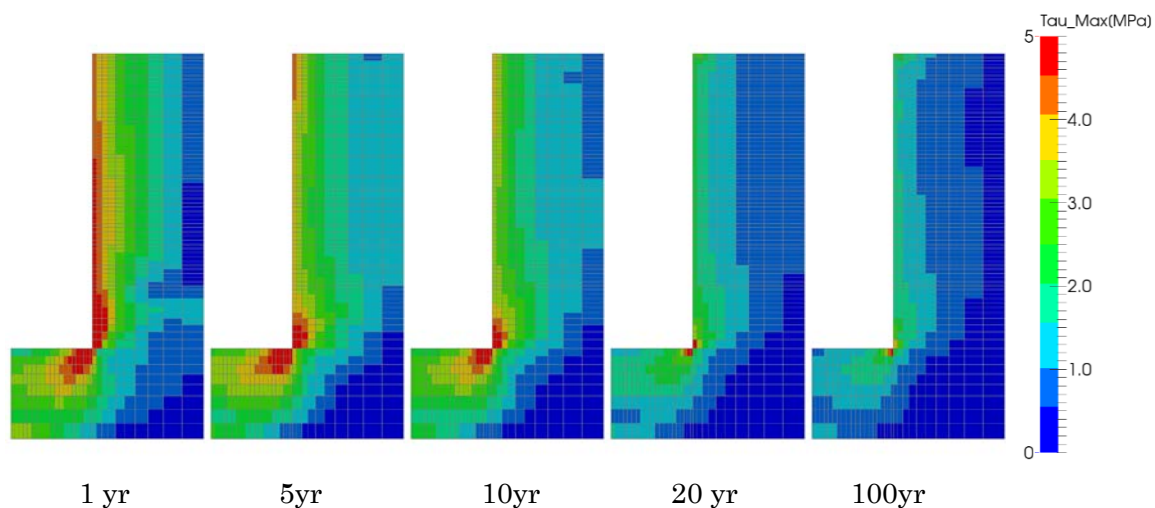


図 6.1.1-325 Case 23 岩盤部分・主せん断応力分布

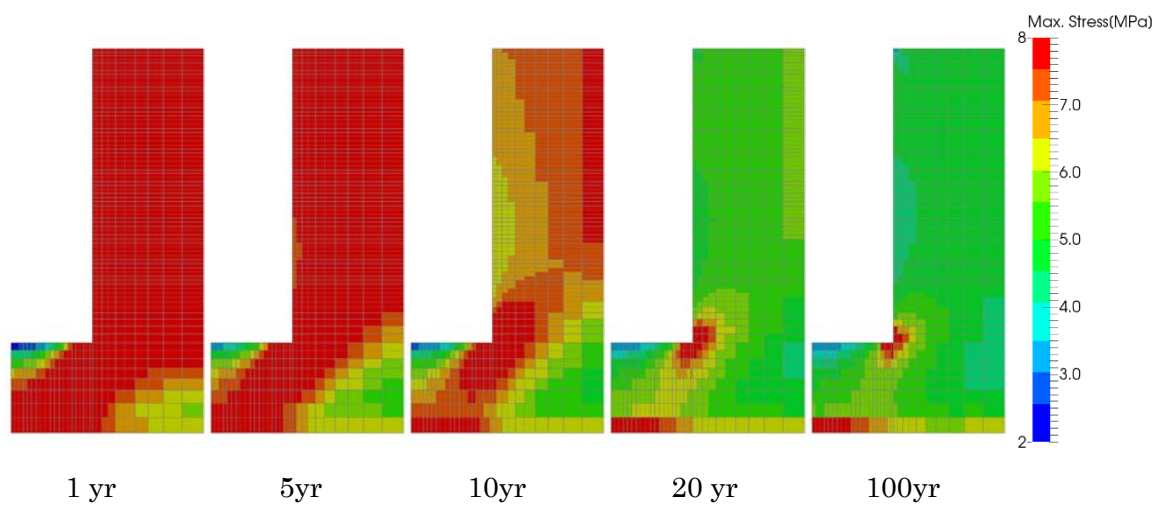


図 6.1.1-326 Case 23 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

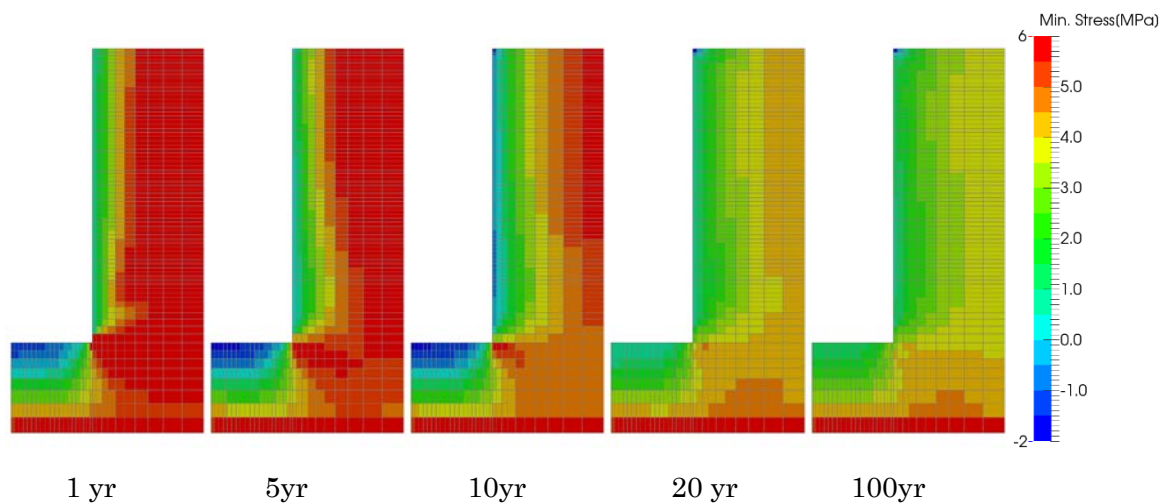


図 6.1.1-327 Case 23 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

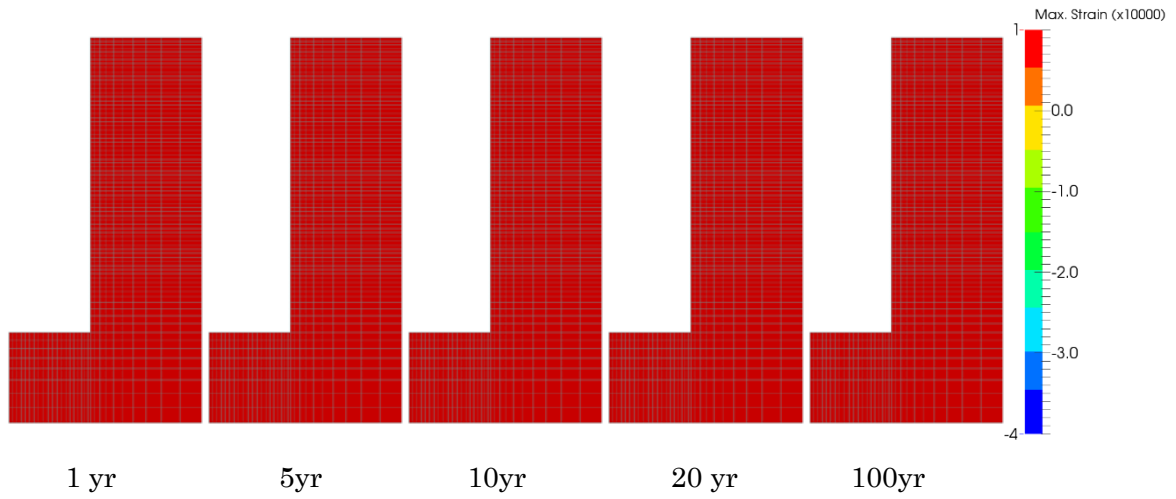


図 6.1.1-328 Case 23 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

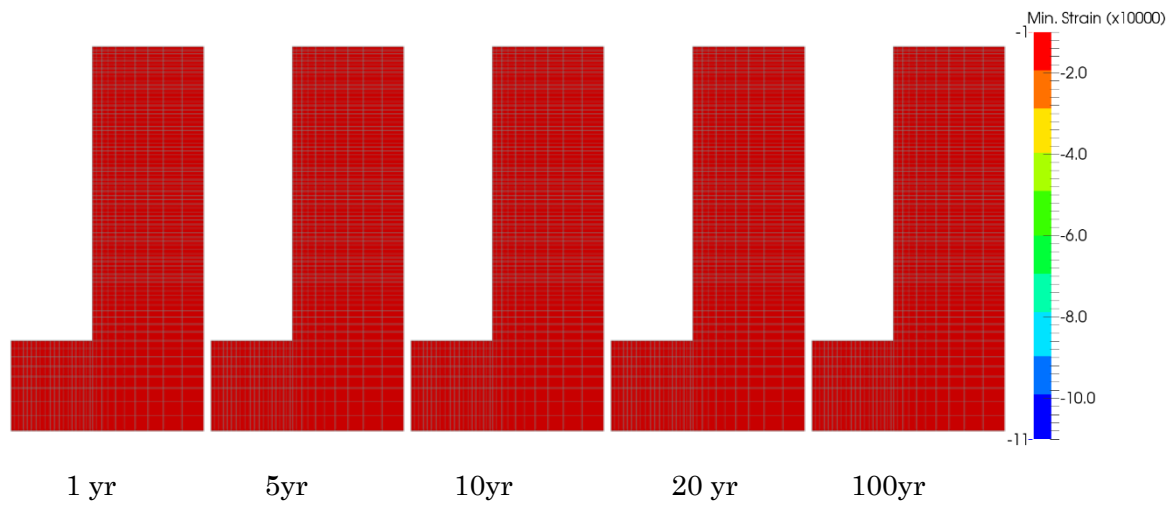


図 6.1.1-329 Case 23 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

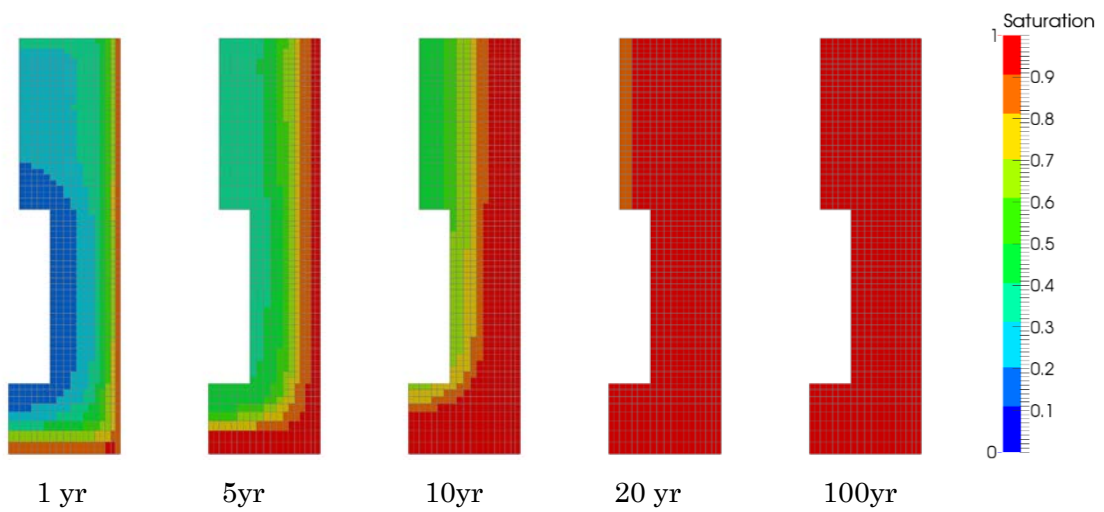


図 6.1.1-330 Case 23 緩衝材部分・飽和度分布

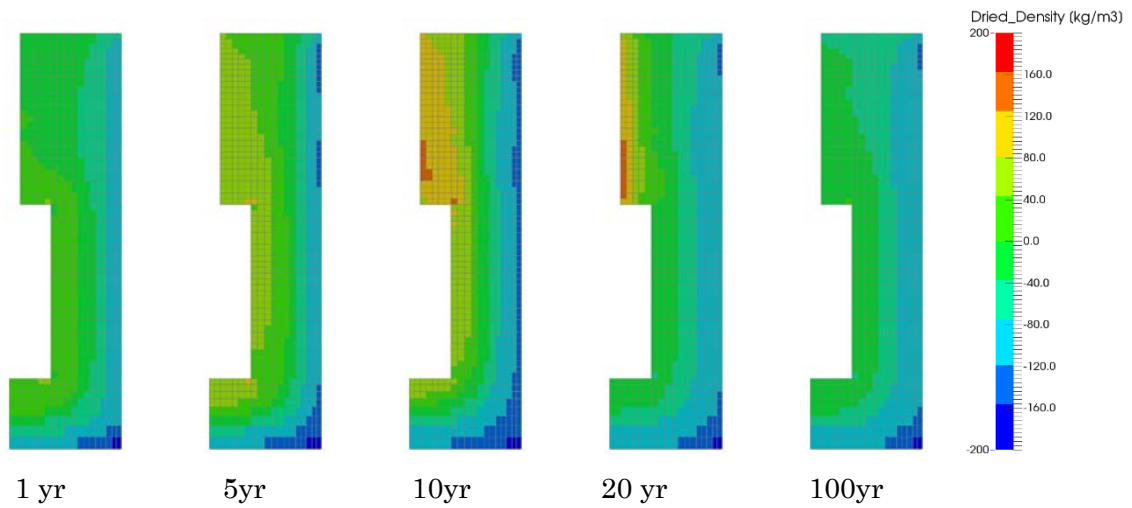


図 6.1.1-331 Case 23 緩衝材部分・乾燥密度分布

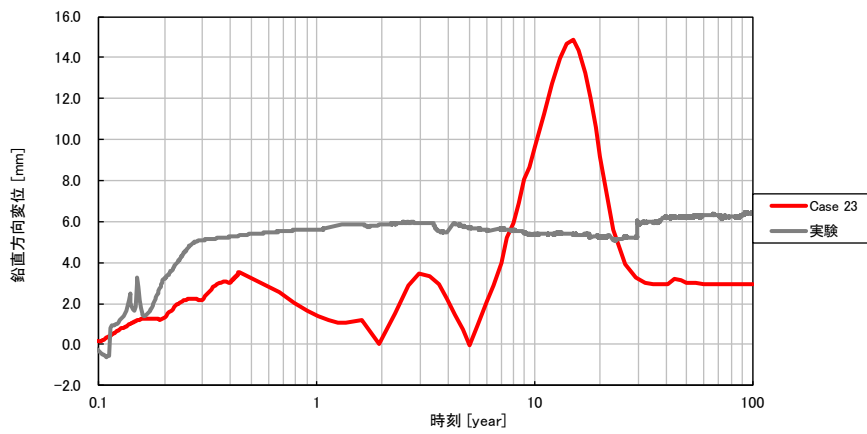


図 6.1.1-332 Case 23 鉛直方向の変位時刻歴

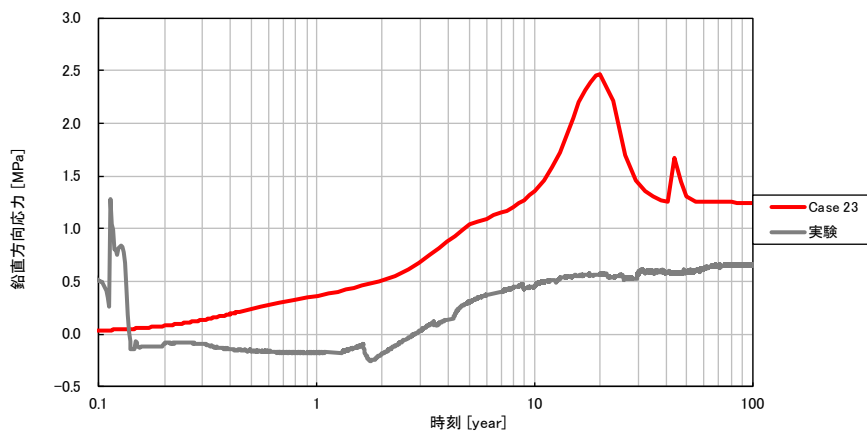


図 6.1.1-333 Case 23 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

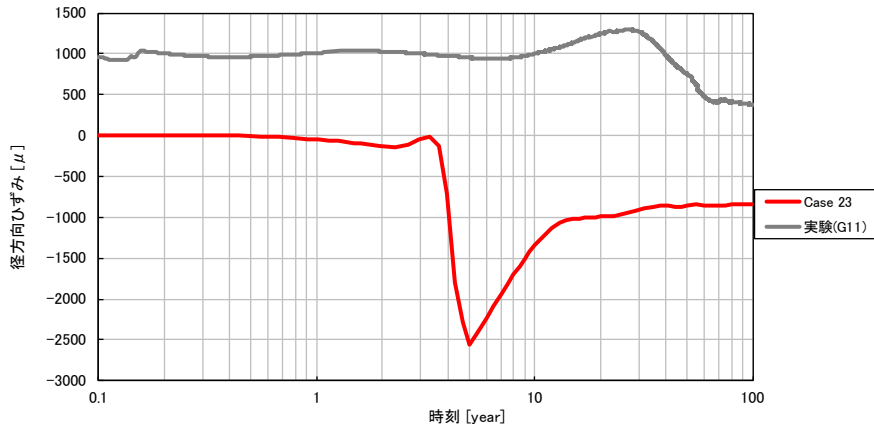


図 6.1.1-334 Case 23 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

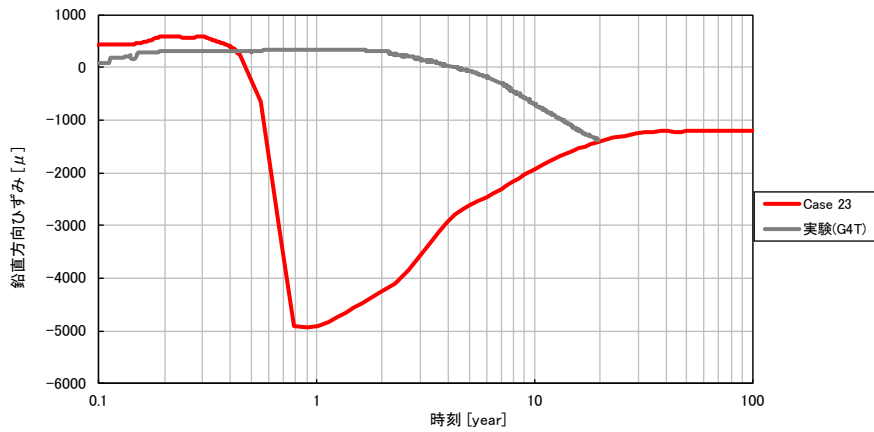


図 6.1.1-335 Case 23 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

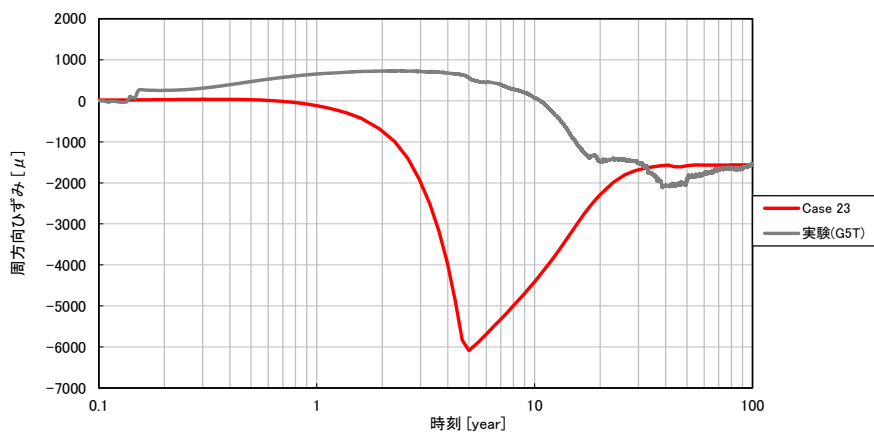


図 6.1.1-336 Case 23 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

(25) Case 24

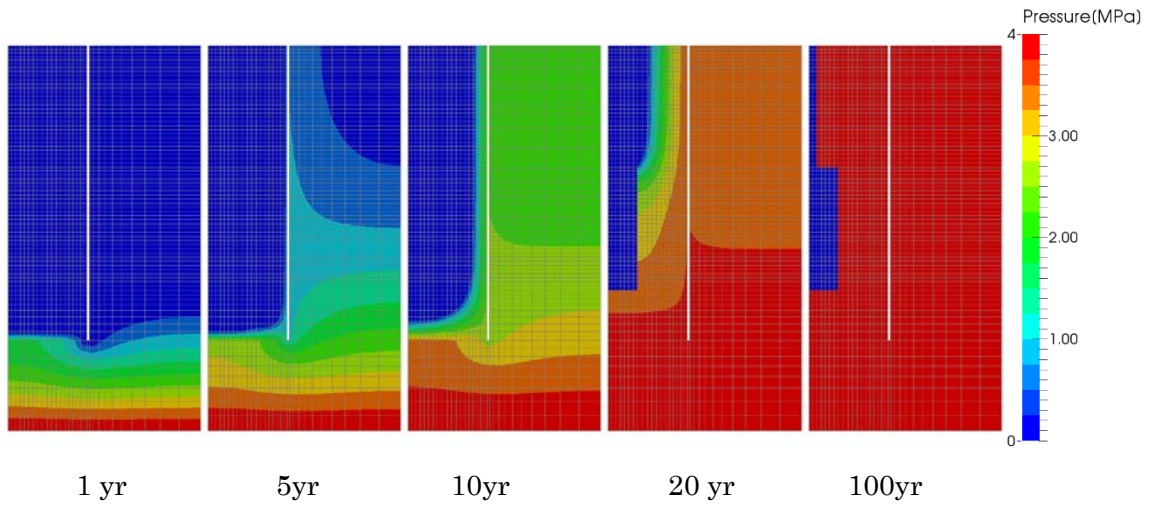


図 6.1.1-337 Case 24 岩盤部分・間隙水压分布

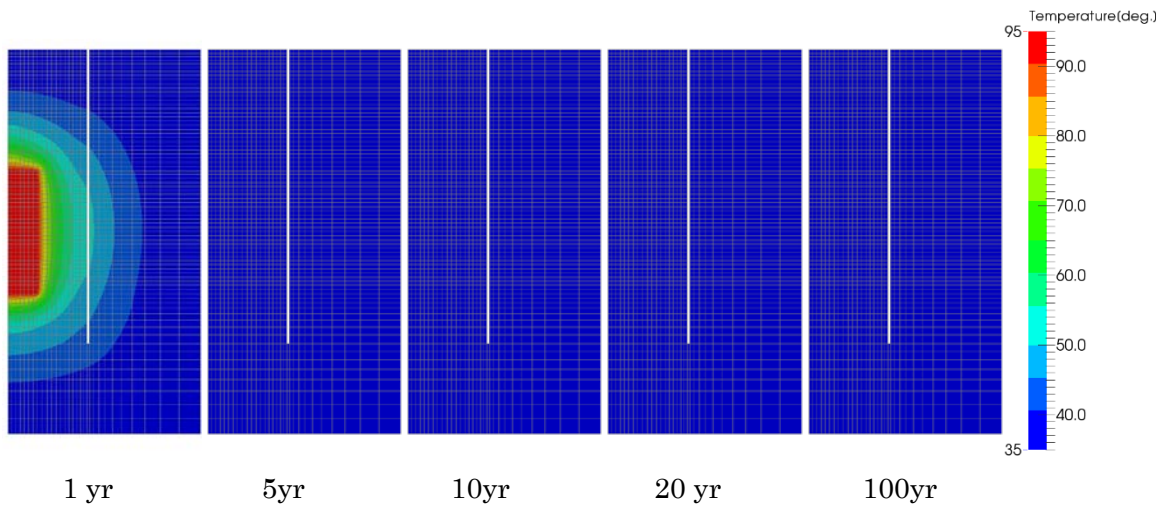


図 6.1.1-338 Case 24 岩盤部分・温度分布

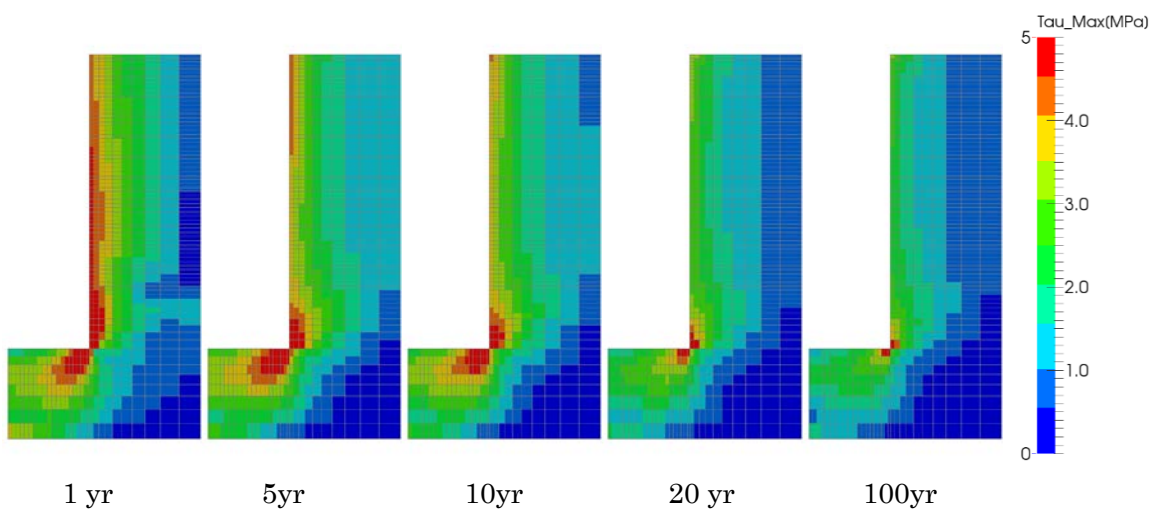


図 6.1.1-339 Case 24 岩盤部分・主せん断応力分布

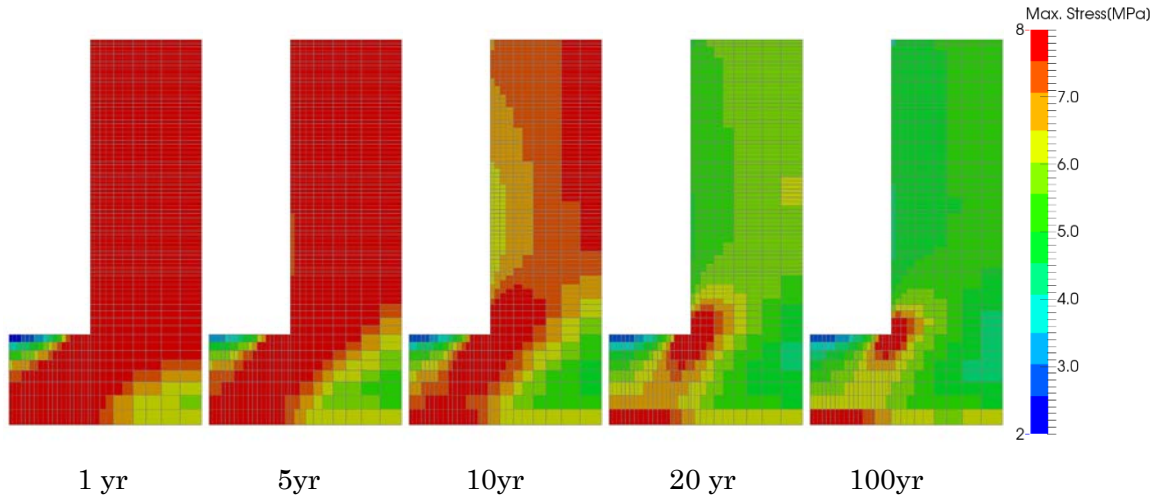


図 6.1.1-340 Case 24 岩盤部分・圧縮側主応力分布(圧縮：正)

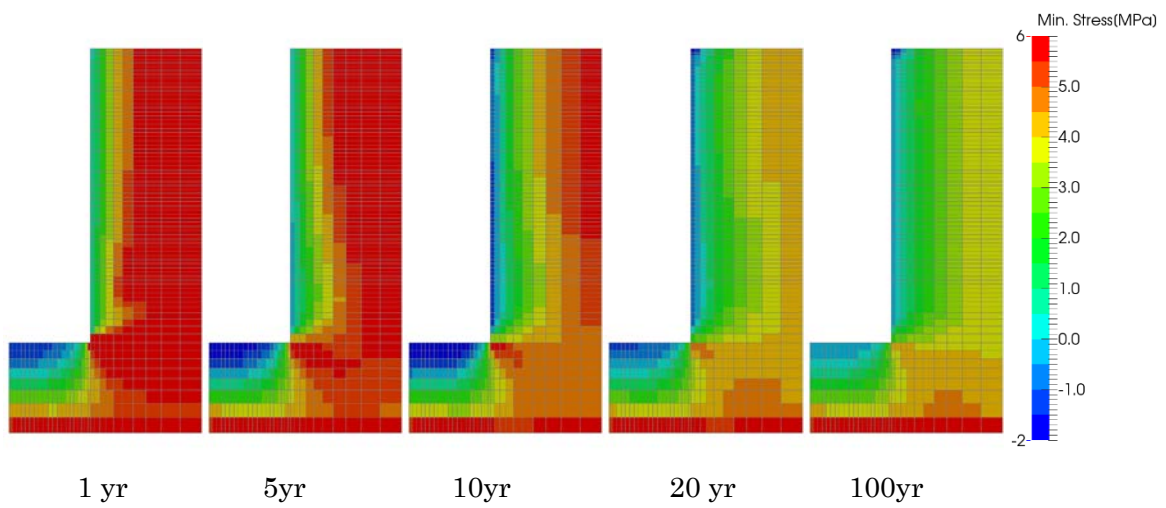


図 6.1.1-341 Case 24 岩盤部分・引張側主応力分布(圧縮：正)

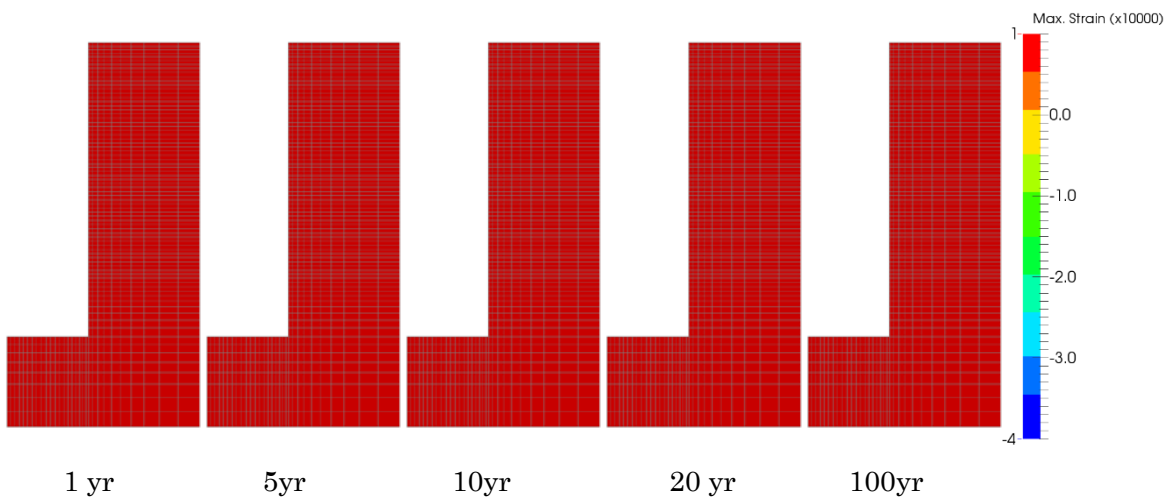


図 6.1.1-342 Case 24 岩盤部分・圧縮側主ひずみ分布(圧縮：正)

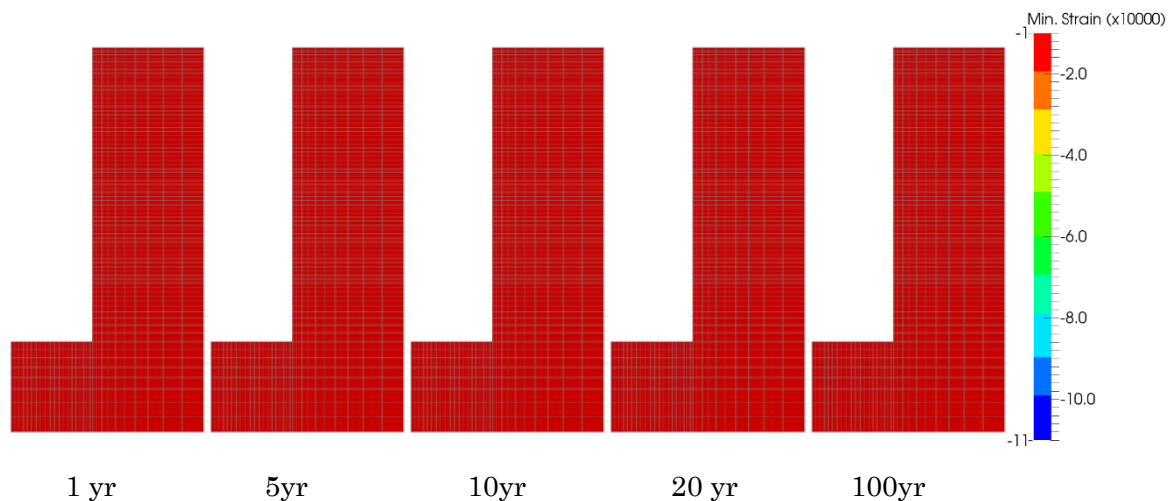


図 6.1.1-343 Case 24 岩盤部分・引張側主ひずみ分布(圧縮：正)

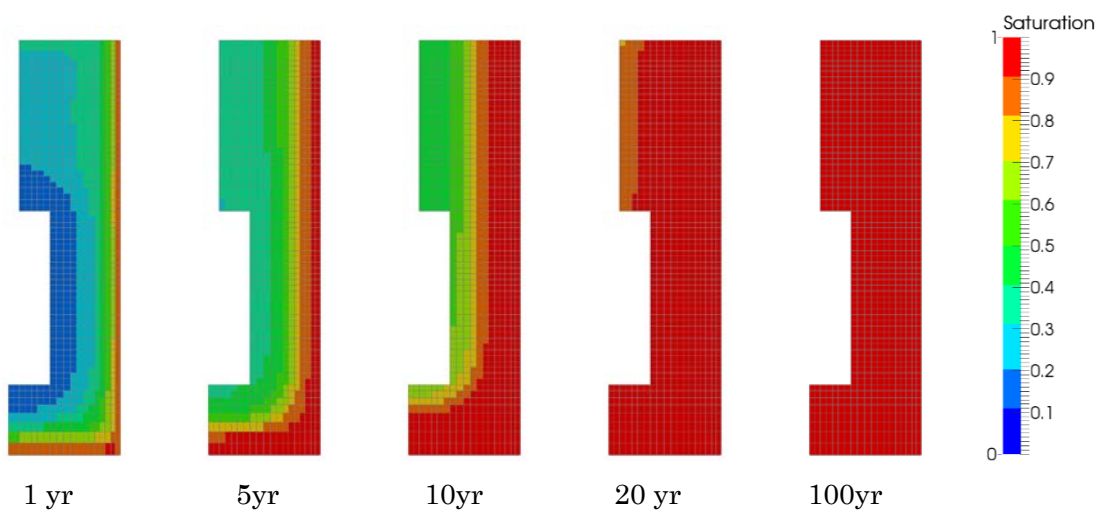


図 6.1.1-344 Case 24 緩衝材部分・飽和度分布

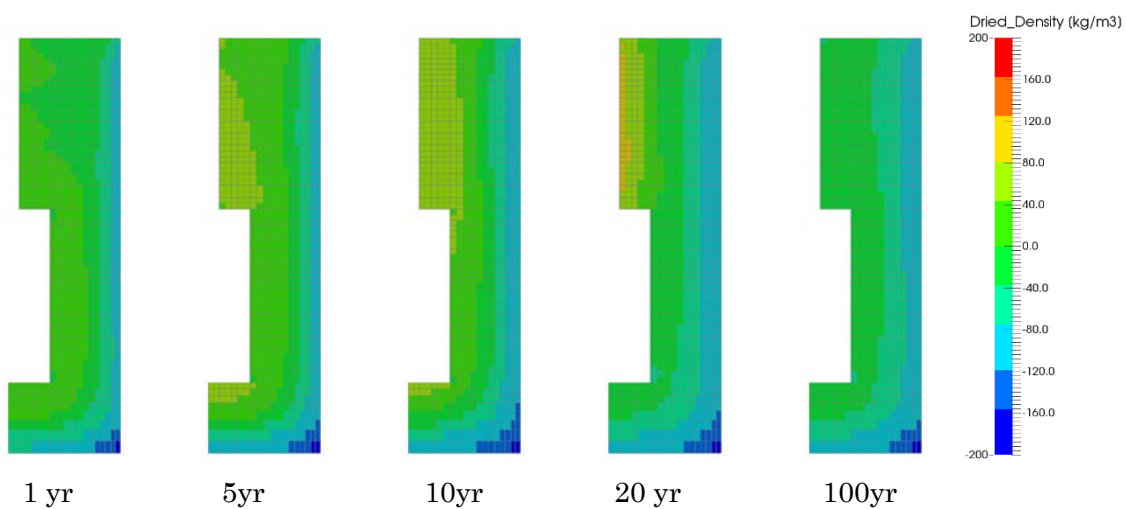


図 6.1.1-345 Case 24 緩衝材部分・乾燥密度分布

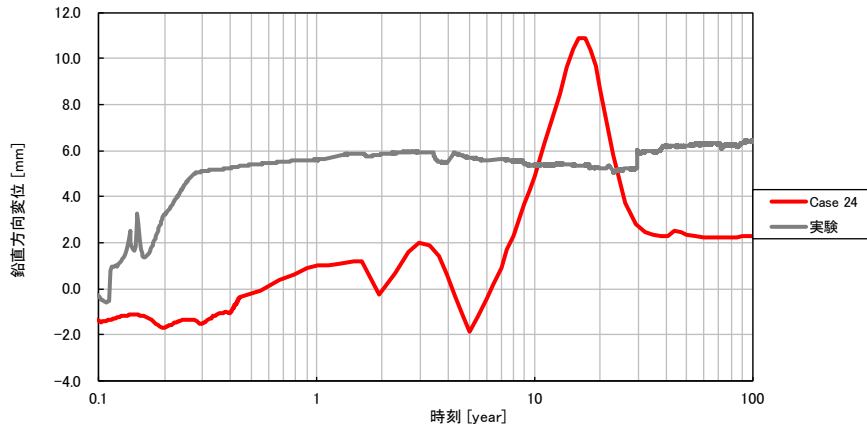


図 6.1.1-346 Case 24 鉛直方向の変位時刻歴

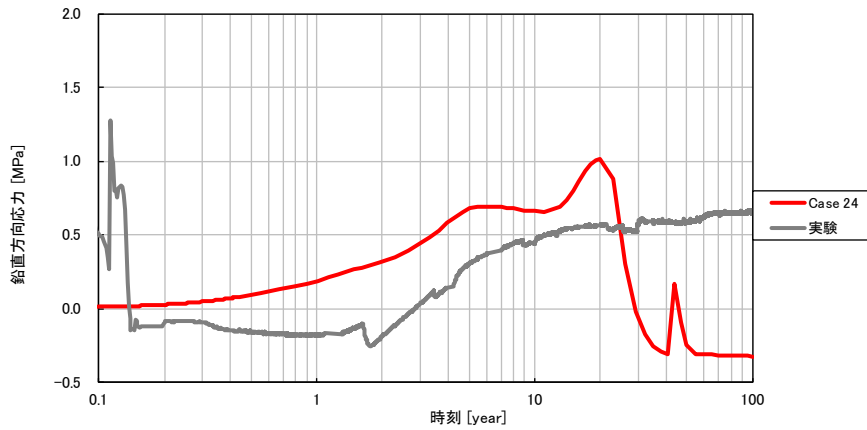


図 6.1.1-347 Case 24 緩衝材土圧時刻歴 (鉛直方向、圧縮：正)

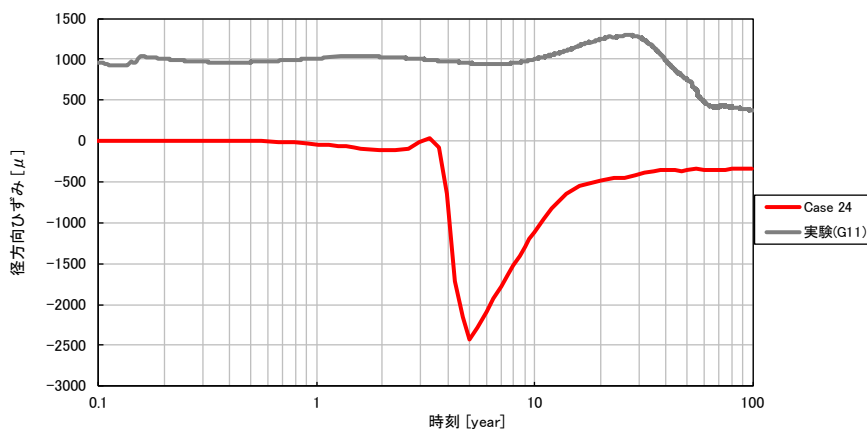


図 6.1.1-348 Case 24 径方向ひずみ時刻歴 (岩盤上面、引張：正)

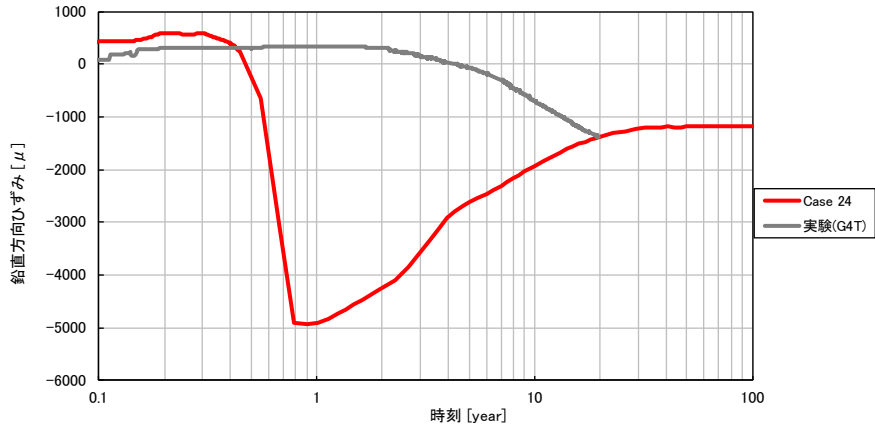


図 6.1.1-349 Case 24 鉛直方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

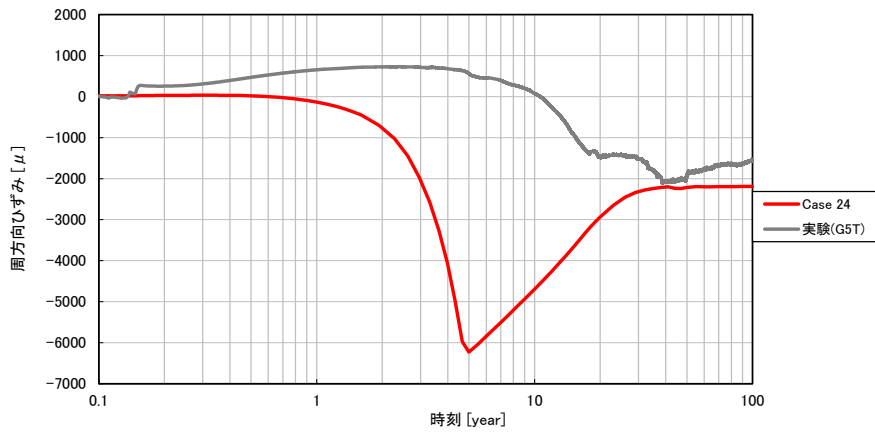


図 6.1.1-350 Case 24 周方向ひずみ時刻歴 (岩盤外壁、引張：正)

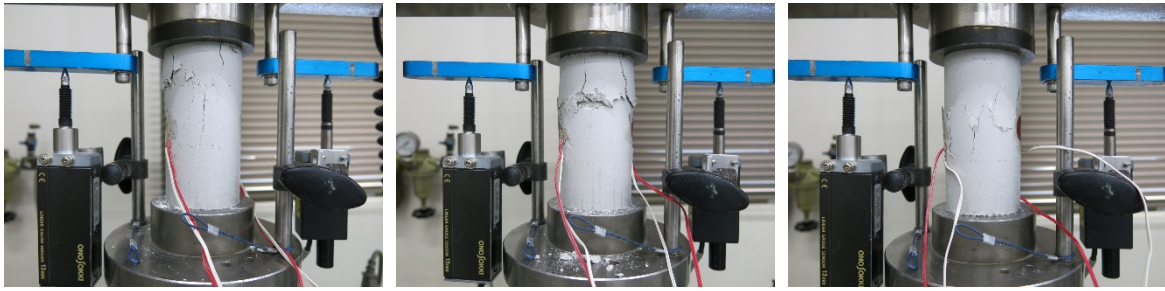
6.2 要素試験

6.2.1 要素試験における供試体の観察写真

下記に示す供試体の観察写真を記載する。

- (1) 一軸圧縮試験供試体（緩衝材）
- (2) 一軸圧縮試験供試体（埋戻し材）
- (3) 一軸引張り試験供試体（周辺岩盤）
- (4) 三軸圧縮試験供試体（緩衝材）
- (5) 三軸圧縮試験供試体（埋戻し材）
- (6) 三軸圧縮試験供試体（周辺岩盤）
- (7) 変水位透水試験供試体（周辺岩盤）
- (8) 圧密試験供試体（周辺岩盤）

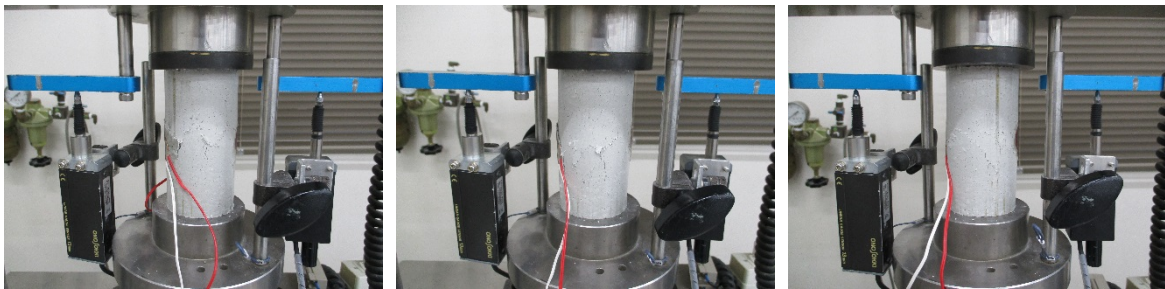
(1) 一軸壓縮試験供試体（緩衝材）



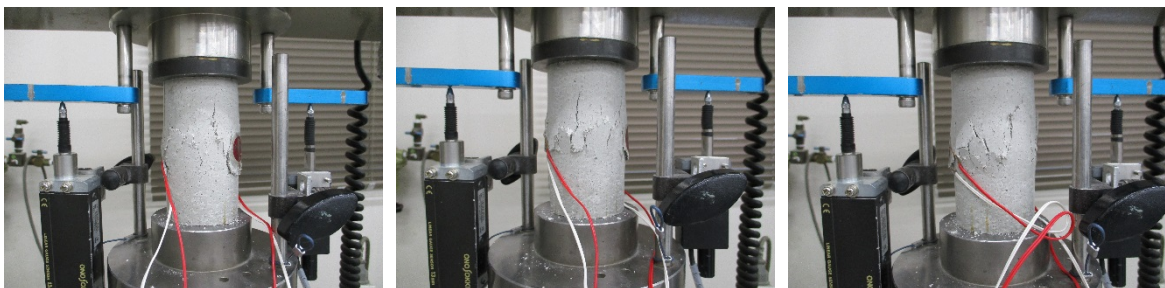
一軸壓縮試験 後供試体①~③（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 10%）



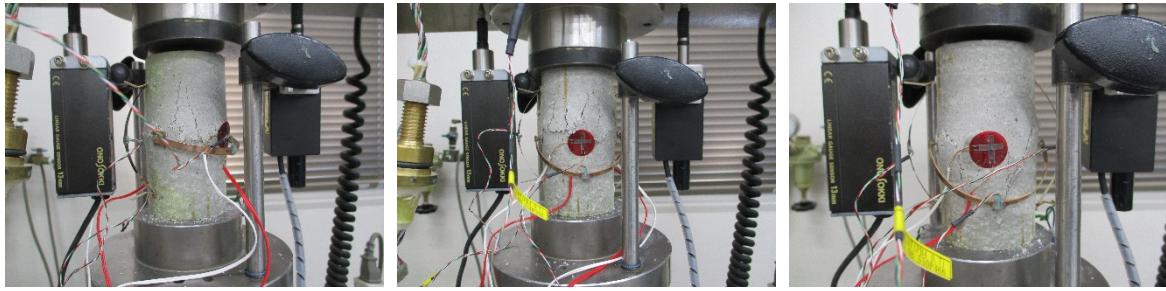
一軸壓縮試験 後供試体①~③（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 10%）



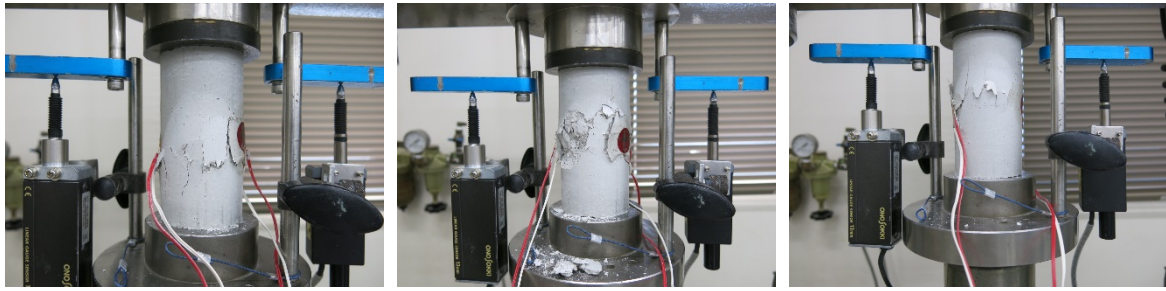
一軸壓縮試験 後供試体①~③（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 12%）



一軸壓縮試験 後供試体①~③（乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 15%）



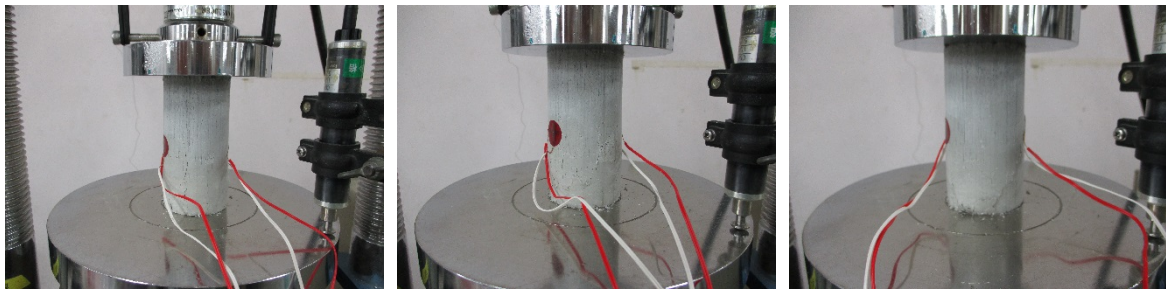
一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 18%)



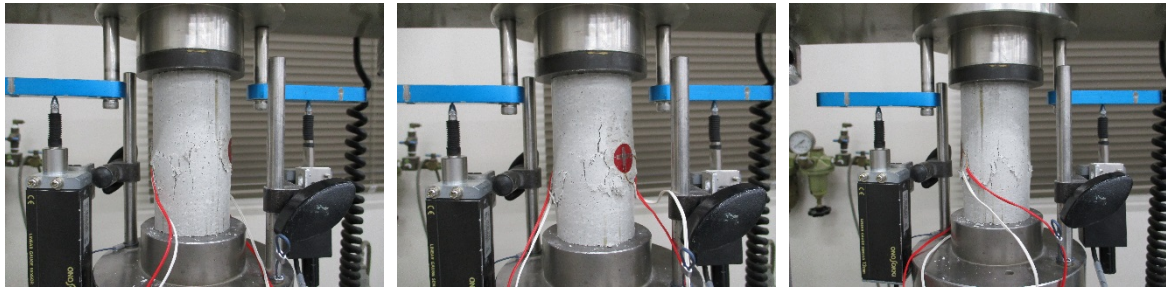
一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 7%)



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



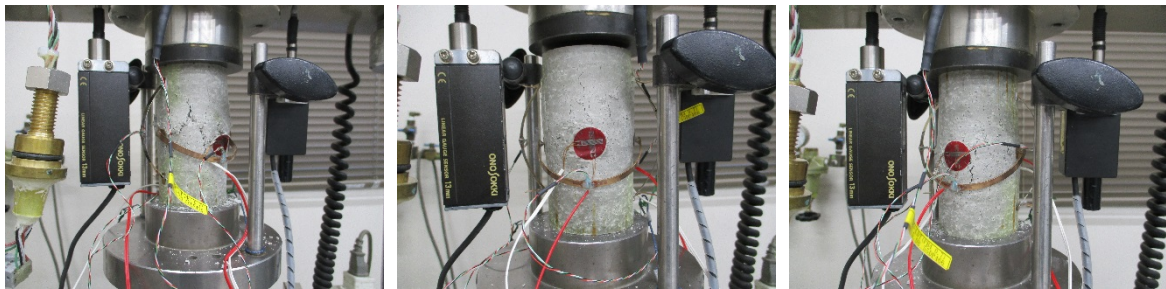
一軸圧縮試験 後供試体④~⑥ (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 10%)



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①~③ (乾燥密度 1.7Mg/m^3 初期含水比 18%)

(2) 一軸圧縮試験供試体（埋戻し材）



一軸圧縮試験 後供試体①~③（乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 6%）



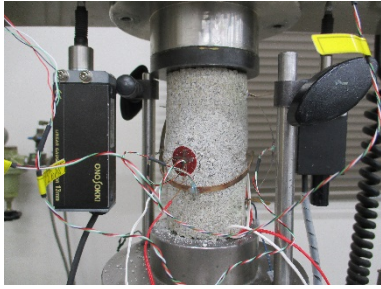
一軸圧縮試験 後供試体①~③（乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 8%）



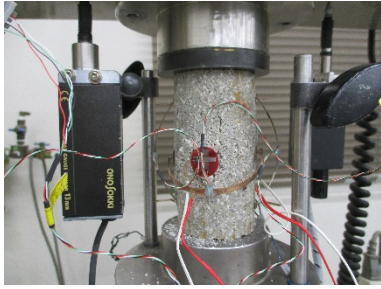
一軸圧縮試験 後供試体④~⑥（乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 8%）



一軸圧縮試験 後供試体①~③（乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 10%）



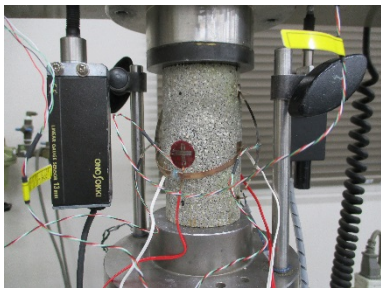
一軸圧縮試験 後供試体① (乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 3%)



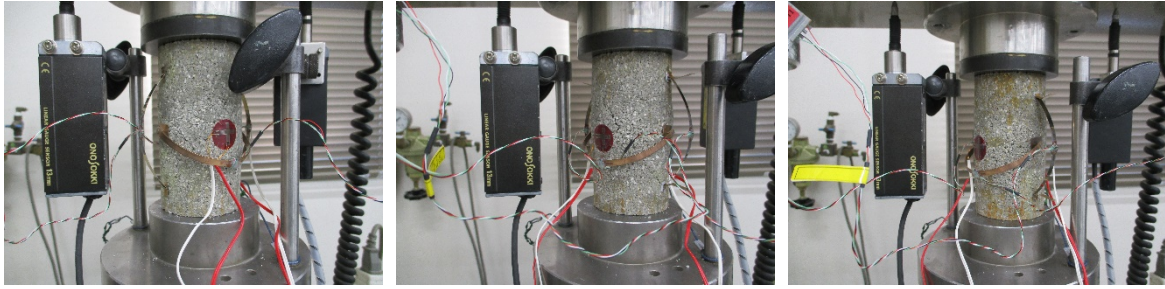
一軸圧縮試験 後供試体① (乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 6.5%)



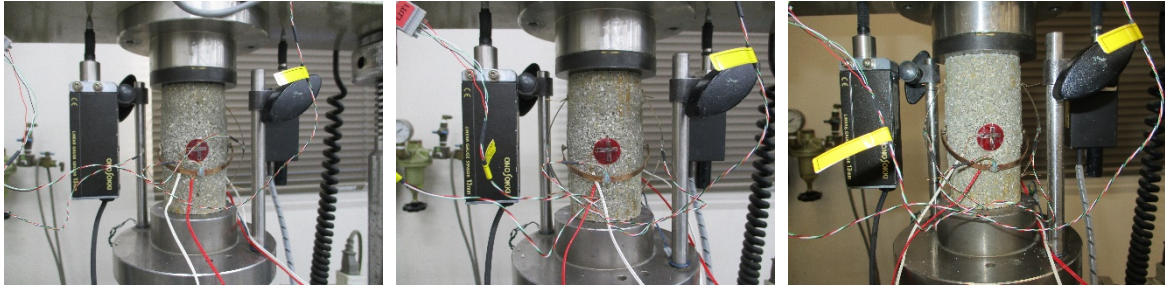
一軸圧縮試験 後供試体⑦~⑨ (乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 8%)



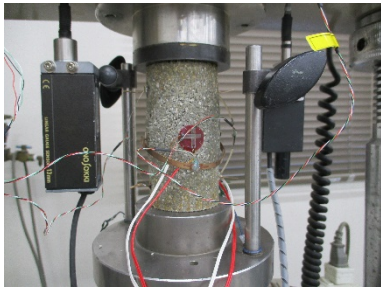
一軸圧縮試験 後供試体④ (乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 10%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 12%)



一軸圧縮試験 後供試体①~③ (乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 13%)



一軸圧縮試験 後供試体① (乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 15%)

(3) 一軸引張り試験供試体 (周辺岩盤)



一軸引張り試験 後供試体① (周辺岩盤)



一軸引張り試験 後供試体② (周辺岩盤)

(4) 三軸圧縮試験供試体（緩衝材）



三軸圧縮試験 ($\sigma_c' = 200\text{kPa}$) 後供試体① (乾燥密度 1.6Mg/m^3 初期含水比 10%)

(5) 三軸圧縮試験供試体（埋戻し材）



三軸圧縮試験（ $\sigma_c' = 200 \text{kPa}$ ） 後供試体①（乾燥密度 1.8Mg/m^3 初期含水比 8%）

(6) 三軸圧縮試験供試体（周辺岩盤）



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



三軸圧縮試験 ($\sigma_c'=3\text{MPa}$) 後供試体②



三軸圧縮試験 ($\sigma_c'=5\text{MPa}$) 後供試体③



三軸圧縮試験 ($\sigma_c'=7\text{MPa}$) 後供試体④



三軸圧縮試験 ($\sigma_c'=1.5\text{MPa}$) 後供試体⑤



三軸圧縮試験 ($\sigma_c'=3\text{MPa}$) 後供試体⑥



三軸圧縮試験 ($\sigma_c'=5\text{MPa}$) 後供試体⑦



三軸圧縮試験 ($\sigma_c'=7\text{MPa}$) 後供試体⑧

(7) 透水試験供試体 (周辺岩盤)



透水試験供試体①



透水試験供試体②



透水試験供試体③



透水試験供試体④



透水試験供試体⑤



透水試験供試体⑥

(8) 圧密試験供試体 (周辺岩盤)



圧密試験供試体①



圧密試験供試体②



圧密試験供試体③

(8) クリープ試験供試体 (周辺岩盤)



クリープ試験 ($\sigma_c'=0.1\text{MPa}$ 応力比=0.9) 供試体①



クリープ試験 ($\sigma_c'=0.1\text{MPa}$ 応力比=0.8) 供試体②



クリープ試験 ($\sigma_c'=0.1\text{MPa}$ 応力比=0.35) 供試体③