

ニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測評価手法の 信頼性向上に関する検討(II)

－緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧がニアフィールド岩盤の
長期安定性に与える影響に関する検討－

A Study for Improvement of the Credibility of Evaluation Method for
the Long-term Dynamical Behavior of Near-field Rock Mass (II)
- A Study for the Influence of Inner Pressures Caused
by Buffer Material and Overpack -

平本 正行 小林 保之 青柳 茂男* 宮野前 俊一*

Masayuki HIRAMOTO, Yasushi KOBAYASHI, Shigeo AOYAGI* and Shunichi MIYANOMAE*

地層処分研究開発部門
ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

ニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測評価手法の信頼性向上に関する検討（Ⅱ）
－緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧が
ニアフィールド岩盤の長期安定性に与える影響に関する検討－

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット
平本 正行[※]，小林 保之，青柳 茂男^{*}，宮野前 俊一^{*}

(2008年1月16日 受理)

本研究では，ニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測評価手法の信頼性向上に関する検討として，緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧がニアフィールド岩盤の長期安定性に与える影響について検討した。緩衝材の膨潤挙動を温度荷重で，オーバーパックの腐食膨張挙動を強制変位でモデル化し，ニアフィールド岩盤の長期力学挙動の予測解析を行った。

その結果，緩衝材の膨潤圧やオーバーパックの腐食膨張圧が内圧としてニアフィールド岩盤に作用することで，ニアフィールド岩盤の長期安定性が向上し，緩衝材の膨潤圧やオーバーパックの腐食膨張圧を考慮していない従来の評価手法が保守側の結果を与えることを示した。

ただし，例外として，緩衝材の剛性が高く，岩盤の初期応力が小さな場合においては，処分孔壁面近傍に引張破壊による緩み領域が発生する可能性が示された。そのような場合，緩衝材が岩盤中に発生した亀裂に侵入することから，人工バリアの性能をより詳しく評価することが求められる。

A Study for Improvement of the Credibility of Evaluation Method
for the Long-term Dynamical Behavior of Near-field Rock Mass (II)
—A Study for the Influence of Inner Pressures Caused by Buffer Material and Overpack—

Masayuki HIRAMOTO[※], Yasushi KOBAYASHI,
Shigeo AOYAGI* and Shunichi MIYANOMAE*

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 16, 2008)

The long-term stability of near-field rock mass influenced by swelling pressure of buffer material and expansion pressure caused by the corrosion of overpack was studied in this report to improve conventional credibility of evaluation methods for the long-term dynamical behavior of near-field rock mass which do not take account of these pressures. Swelling pressure of buffer material was modelled as temperature load and expansion pressure caused by the corrosion of overpack was modelled as forced displacement.

Because swelling pressure of buffer material and expansion pressure caused by the corrosion of overpack acted on near-field rock mass as inner pressure, it was estimated that long-term stability of near-field rock mass could be improved compared with conventional evaluation which gave safe-side results.

As an exception, when stiffness property of buffer material is large and initial stress of rock mass is small, tensile fractures in near field rock mass might be generated. In such a case, because buffer material may extrude into generated fractures, it is necessary to be evaluated the performance of the engineered barrier in detail.

Keywords : Inner Pressure, Swelling Pressure, Expansion Pressure, Tensile Fracture

※ Collaborating Engineer

* Maeda Corporation

目次

1. はじめに	1
2. 解析条件	2
2. 1 検討概要	2
2. 2 評価モデル	4
2. 2. 1 岩盤のクリープ変形のモデル化	4
2. 2. 2 緩衝材の膨潤圧のモデル化	9
2. 2. 3 オーバーパックの腐食膨張圧のモデル化	11
2. 3 解析条件	12
2. 3. 1 解析モデル	12
2. 3. 2 解析ステップ	12
2. 3. 3 入力物性値	14
2. 3. 4 解析ケース	15
3. 解析結果	16
3. 1 解析結果の着目点	16
3. 2 解析結果	18
3. 2. 1 緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧を考慮しない場合 (Case1)	18
3. 2. 2 緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧を考慮した場合 (Case2)	25
3. 2. 3 n_0 を変えた場合 (Case3)	33
3. 2. 4 m を変えた場合 (Case4)	41
3. 2. 5 岩盤の初期応力を変えた場合 (Case5)	48
4. まとめと考察	56
4. 1 まとめ	56
4. 2 考察	59
5. おわりに	61
参考文献	62

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Calculation conditions	2
2.1 Outline	2
2.2 Modeling methods	4
2.2.1 Modeling of time dependent behavior of rock mass	4
2.2.2 Modeling of swelling pressure caused by buffer material	9
2.2.3 Modeling of expansion pressure caused by overpack	11
2.3 Calculation conditions	12
2.3.1 Calculation model	12
2.3.2 Calculation procedure	12
2.3.3 Input parameters	14
2.3.4 Calculation cases	15
3. Calculated results	16
3.1 Viewpoint of calculated results	16
3.2 Calculated results	18
3.2.1 Without inner pressures caused by buffer material and overpack (Case1)	18
3.2.2 With inner pressures caused by buffer material and overpack (Case2)	25
3.2.3 difference in n_0 (Case3)	33
3.2.4 difference in m (Case4)	41
3.2.5 difference in initial stress of rock mass (Case5)	48
4. Conclusion and consideration	56
4.1 Conclusion	56
4.2 Consideration	59
5. Conclusions	61
Reference	62

表目次

表 2-1	第 2 次取りまとめにおけるニアフィールドの長期安定性検討	2
表 2-2	平成 17 年取りまとめにおけるニアフィールドの長期安定性検討	2
表 2-3	本研究における岩盤の長期安定性検討	3
表 2-4	本研究で想定した緩衝材の仕様 および 膨潤圧	10
表 2-5	オーバーパックの外縁半径増加量の計算条件	11
表 2-6	岩盤の物性値	14
表 2-7	緩衝材の物性値	14
表 2-8	オーバーパックの物性値	14
表 2-9	解析ケース一覧	15
表 4-1	解析結果一覧	56

図目次

図 2-1	時間依存性の程度を表すパラメータ n の概念図	6
図 2-2	破壊進行性の程度を表すパラメータ m の概念図	6
図 2-3	計算手順の模式図	8
図 2-4	緩衝材の膨潤圧の経時変化	9
図 2-5	緩衝材の平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係	10
図 2-6	解析モデル（軸対称モデル）	12
図 2-7	解析ステップの模式図	13
図 3-1	解析結果の着目点	16
図 3-2	岩盤の応力分布図（周方向応力）における変曲点	17
図 3-3	処分孔壁面変位の経時変化図	18
図 3-4	岩盤の応力分布図	19
図 3-5	岩盤着目要素の応力の経時変化図	20
図 3-6	処分孔壁面変位の経時変化図	22
図 3-7	岩盤の応力分布図	23
図 3-8	岩盤着目要素の応力の経時変化図	24
図 3-9	処分孔壁面変位の経時変化図	26
図 3-10	岩盤の応力分布図	27
図 3-11	岩盤着目要素の応力の経時変化図	28
図 3-12	処分孔壁面変位の経時変化図	30
図 3-13	岩盤の応力分布図	31
図 3-14	岩盤着目要素の応力の経時変化図	32
図 3-15	処分孔壁面変位の経時変化図	34
図 3-16	岩盤の応力分布図	35
図 3-17	岩盤着目要素の応力の経時変化図	36
図 3-18	処分孔壁面変位の経時変化図	38
図 3-19	岩盤の応力分布図	39
図 3-20	岩盤着目要素の応力の経時変化図	40
図 3-21	処分孔壁面変位の経時変化図	42
図 3-22	岩盤の応力分布図	43
図 3-23	岩盤着目要素の応力の経時変化図	44
図 3-24	処分孔壁面変位の経時変化図	45
図 3-25	岩盤の応力分布図	46
図 3-26	岩盤着目要素の応力の経時変化図	47
図 3-27	処分孔壁面変位の経時変化図	49
図 3-28	岩盤の応力分布図	50

図 3-29	岩盤着目要素の応力の経時変化図	51
図 3-30	処分孔壁面変位の経時変化図	53
図 3-31	岩盤の応力分布図	54
図 3-32	岩盤着目要素の応力の経時変化図	55
図 4-1	せん断破壊によるうろこ状の破壊形状	60
図 4-2	引張破壊による放射状の破壊形状	60

This is a blank page.

1. はじめに

「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ¹⁾」(以下、平成 17 年取りまとめ)では、主に軟岩系岩盤を対象にニアフィールド岩盤の長期安定性について解析的検討が行われており、評価モデルや評価手法の高度化が今後の課題として挙げられている。

軟岩系岩盤の長期安定性は、拘束圧(内圧)の影響を大きく受けることが室内試験結果より明らかとなっている²⁾。また、ニアフィールド岩盤に内圧として作用する人工バリアや支保工からの反作用力について解析的検討が行われており、これらがニアフィールド岩盤の長期安定性を向上させることが示されている³⁾。一方、平成 17 年取りまとめ¹⁾では、ニアフィールド岩盤に内圧として作用する緩衝材の膨潤圧やオーバーパックの腐食膨張圧については、評価がなされていない。

そこで、本研究では、評価モデルや評価手法の高度化の一環として、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧がニアフィールド岩盤の長期安定性に与える影響について検討し、平成 17 年取りまとめ¹⁾で示されている評価モデルや評価手法の保守性について考察することを目的とした。

2. 解析条件

2. 1 検討概要

ニアフィールドの長期安定性について、第2次取りまとめ⁴⁾においては表2-1のように、平成17年取りまとめ¹⁾においては表2-2のように検討が行われている。

表2-1 第2次取りまとめ⁴⁾におけるニアフィールドの長期安定性検討

解析現象		①岩盤クリープ	②オーバーバック 腐食膨張	③オーバーバック 沈下
示されている結果		岩盤のクリープ変形量と応力状態の経時変化	緩衝材の応力状態と過剰間隙水圧の経時変化	オーバーバック沈下量，緩衝材の応力状態と過剰間隙水圧の経時変化
モデル化	岩盤	○：粘弾性体 ^{※1}	×	×
	緩衝材	○：弾性体 ^{※4}	○：弾塑性体 ^{※2} (膨潤圧考慮)	○：弾粘塑性体 ^{※3}
	オーバーバック	×	○：弾性体 ^{※4} (腐食膨張圧考慮)	○：弾性体 ^{※4}
評価期間		10,000年		
備考		緩衝材の膨潤圧，オーバーバックの腐食膨張圧を考慮しない	岩盤クリープ変形を①の解析結果より設定	岩盤クリープ変形，オーバーバック腐食膨張圧を考慮しない

※1 コンプライアンス可変型構成方程式⁵⁾，※2 修正 Cam-Clay モデル^{6) 7)}，※3 関口・太田モデル⁸⁾，※4 線形弾性体

表2-2 平成17年取りまとめ¹⁾におけるニアフィールドの長期安定性検討

解析現象		①岩盤クリープ	②オーバーバック 腐食膨張	③オーバーバック 沈下
示されている結果		岩盤のクリープ変形量と応力状態，緩衝材の応力状態の経時変化	緩衝材の応力状態，岩盤とオーバーバックが受ける応力の経時変化	オーバーバック沈下量の経時変化
モデル化	岩盤	○：粘弾性体 ^{※1}	×	×
	緩衝材	○：弾性体 ^{※3}	○：弾粘塑性体 ^{※2}	○：弾粘塑性体 ^{※2}
	オーバーバック	○：弾性体 ^{※3}	○：弾性体 ^{※3} (腐食膨張圧考慮)	○：弾性体 ^{※3}
評価期間		10,000年	100,000年	
備考		緩衝材の膨潤圧，オーバーバックの腐食膨張圧を考慮しない	岩盤クリープ変形を考慮しない	岩盤クリープ変形，オーバーバック腐食膨張圧を考慮しない

※1 コンプライアンス可変型構成方程式⁵⁾，※2 関口・太田モデル⁸⁾ および 足立・岡モデル⁹⁾，※3 線形弾性体

表 2-1 および 表 2-2 より明らかなように、それぞれの現象に対して個別の評価が行われている。例えば、岩盤クリープの評価においては、外圧として作用する地圧のみを考慮し、内圧として作用する緩衝材の膨潤圧やオーバーパックの腐食膨張圧を考慮していないため、保守側の評価となっていることが推察される。しかしながら、平成 17 年取りまとめ¹⁾以降の課題とされている評価モデルや評価手法の高度化においては、粘弾性体、弾粘塑性体などのモデル自体の高度化に加え、各バリア材料における腐食膨張、膨潤、クリープなどの物理的な挙動が評価へ与える影響について検討し、従来の評価の保守性を定量的に示すことも重要であると考えられる。

そこで本研究では、岩盤の長期安定性評価に影響をおよぼすと考えられる事象のうち、表 2-3 に示すように、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧を取り上げ、これらが評価におよぼす影響について検討した。

表 2-3 本研究における岩盤の長期安定性検討

解析現象		岩盤クリープ
モデル化	岩盤	○：粘弾性体 ^{※1}
	緩衝材	○：弾性体 ^{※2} (膨潤圧考慮)
	オーバーパック	○：弾性体 ^{※2} (腐食膨張圧考慮)
評価期間		10,000 年
備考		緩衝材の膨潤圧は温度荷重で、オーバーパックの腐食膨張は強制変位でモデル化した

※1 コンプライアンス可変型構成方程式⁵⁾、※2 線形弾性体

2. 2 評価モデル

2. 2. 1 岩盤のクリープ変形のモデル化

(1) 岩盤のクリープ変形

本研究では、岩盤のクリープ変形のモデル化にコンプライアンス可変型構成方程式⁵⁾を採用した。これは、大久保らにより提案された粘弾性構成方程式であり、岩盤の非線形挙動や破壊挙動の表現に優れ、第2次取りまとめ⁴⁾ および平成17年取りまとめ¹⁾における岩盤の長期安定性評価にも適用されている。ヤング率やポアソン比といった岩盤構造物を対象とした解析で一般に用いられるパラメータに、時間依存性の程度を表すパラメータ n 、破壊進行性の程度を表すパラメータ m を加えることにより、比較的少ないパラメータ数で簡便に時間依存性挙動（載荷速度依存性、クリープ、応力緩和）を表現できる。

三次元応力下における基礎方程式は、式(2-1)のように表すことができる。岩盤に拘束圧 σ_3 が作用するに伴い、 σ^* は式(2-3)に、 n は式(2-4)に従い変化する。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\sigma^*)^n \cdot (\lambda^*)^m \quad \text{式(2-1)}$$

$$a = \frac{\{m/(n+1)\}^{m/(n-m+1)}}{t_0} \quad \text{式(2-2)}$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}} \quad \text{式(2-3)}$$

$$n = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}}{\sigma_c} n_0 \quad \text{式(2-4)}$$

ここに、

- λ^* : ひずみ ε と応力 σ の比であるコンプライアンス λ ($=\varepsilon/\sigma$) を初期値 λ_0 (初期ヤング率 E_0 の逆数) で基準化した値 [-]
- t : 時間 [sec]
- a : 強度を表すパラメータ [/sec] ; 式(2-2)
- t_0 : 定ひずみ速度載荷試験を行ったときピーク強度に達するまでの時間 [=120[sec]]
- σ^* : 破壊接近度 [-] ; 式(2-3)
- σ_1 : 圧縮応力を正とした場合の最大主応力 [MPa]
- σ_3 : 圧縮応力を正とした場合の最小主応力 [MPa]
- $(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}$: 破壊強度 [MPa]
- n : 時間依存性の程度を表すパラメータ [-] ; 式(2-4)

- m : 破壊進行性の程度を表すパラメータ [-]
 n_0 : 一軸応力下での n [-]
 σ_c : 一軸圧縮強度 [MPa]

本研究では、平成17年取りまとめ¹⁾と同様に、岩盤がMohr-Coulombの破壊規準(式(2-5))に従うものとした。この規準における破壊接近度を式(2-6)に示す。括弧内の前者はせん断破壊に対する破壊接近度を、後者は引張破壊に対する破壊接近度を表す。

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad \text{式(2-5)}$$

$$\sigma^* = \max \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c + \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3}, -\frac{\sigma_3}{\sigma_t} \right) \quad \text{式(2-6)}$$

ここに

- τ : せん断応力 [MPa]
 σ : せん断面に垂直な応力 [MPa]
 C : 粘着力 [MPa]
 ϕ : 内部摩擦角 [degs]
 σ_t : 引張強度 [MPa]

破壊の進行に伴うポアソン比の変化については、現在研究が進められている^{2) 10)}が、本研究ではポアソン比が破壊の進行につれ0.5に近づく(式(2-7))として解析を行った。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad \text{式(2-7)}$$

ここに

- ν_0 : 初期ポアソン比 [-]

以下に，時間依存性の程度を表すパラメータ n および 破壊進行性の程度を表すパラメータ m の概念図を示す。

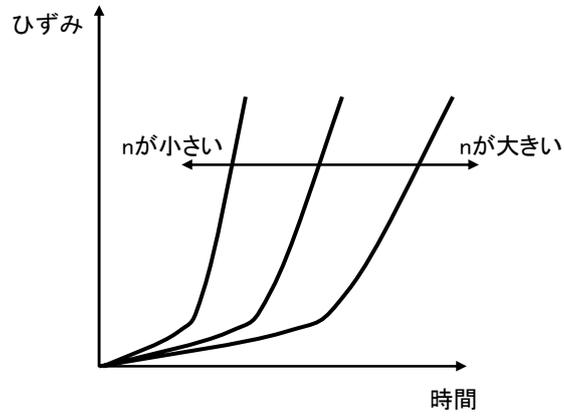


図 2-1 時間依存性の程度を表すパラメータ n の概念図
(値が小さいほど時間依存性が顕著)

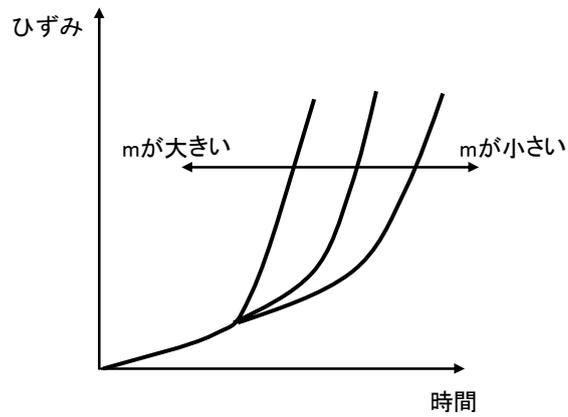


図 2-2 破壊進行性の程度を表すパラメータ m の概念図
(値が大きいほど破壊進行性が顕著)

(2) FEM への適用

施工過程を考慮した解析や他の非線形応力-ひずみ関係をもつ材料と組み合わせた解析を行うことができるよう、コンプライアンス可変型構成方程式に従う増分型の応力-ひずみ関係を組み込んだもの¹¹⁾を使用した。

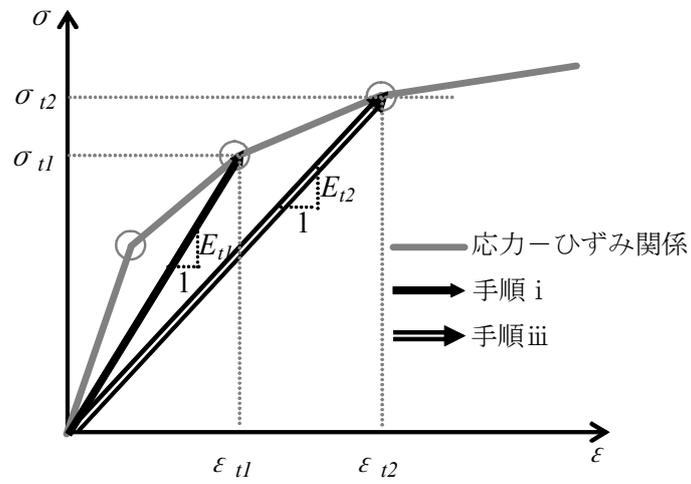
増分法を用いない場合の計算手順を i ~ iii に、増分法を用いる場合の計算手順（本研究で用いる計算手順）を I ~ III に示す。また、これらの計算手順の模式図を図 2-3 に示す。なお、ここで言う全ひずみ、全応力は、それぞれひずみ、応力の初期値からの総量を意味する。

◆ 増分法を用いない場合の計算手順

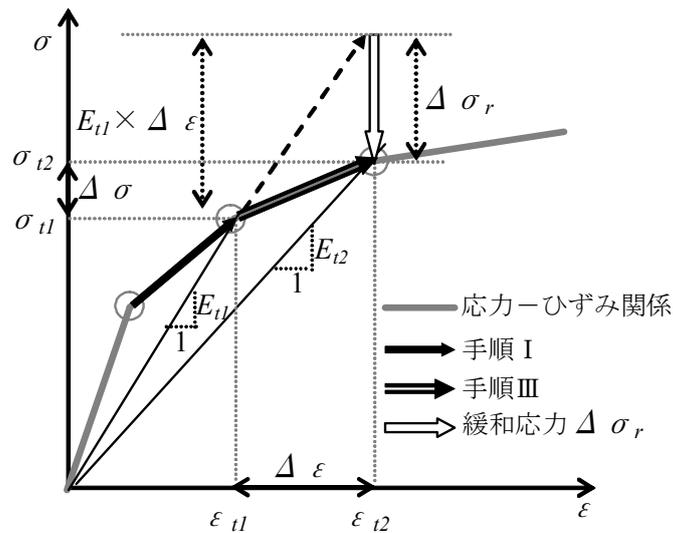
- i 時刻 t_1 における各要素の全ひずみ ε_{t1} 、全応力 σ_{t1} を、時刻 t_1 におけるコンプライアンス λ 、ポアソン比 ν から FEM により計算する。
- ii 時刻 t_1 における全応力 σ_{t1} より、時間増分 Δt におけるコンプライアンスの変化 $\Delta \lambda$ 、ポアソン比の変化 $\Delta \nu$ を式(2-1)～式(2-7)により求め、新たなコンプライアンス λ ($=\lambda + \Delta \lambda$)、新たなポアソン比 ν ($=\nu + \Delta \nu$) を各要素に割り当てる。
- iii 時刻 t_1 を t_2 にして以降繰り返す。

◆ 増分法を用いる場合の計算手順（本研究で用いる計算手順）

- I 前の時刻からのひずみ増分 $\Delta \varepsilon$ 、応力増分 $\Delta \sigma$ を、時刻 t_1 におけるコンプライアンス λ 、ポアソン比 ν 、前の時刻からのコンプライアンスの増分 $\Delta \lambda$ 、ポアソン比の増分 $\Delta \nu$ から増分型 FEM により計算する。前の時刻における全ひずみ ε 、全応力 σ に、それぞれ $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta \sigma$ を加え、時刻 t_1 における各要素の全ひずみ ε_{t1} 、全応力 σ_{t1} とする。
- II 時刻 t_1 における全応力 σ_{t1} より、次の時間増分 Δt におけるコンプライアンスの変化 $\Delta \lambda$ 、ポアソン比の変化 $\Delta \nu$ を求める。
- III 時刻 t_1 を t_2 にして以降繰り返す。



(a) 増分法を用いない場合の計算手順



(b) 増分法を用いる場合の計算手順（本研究で用いる計算手順）

図 2-3 計算手順の模式図¹¹⁾

計算手順より明らかなように、非増分法ではコンプライアンスとポアソン比の履歴が計算に考慮されるが、増分法ではこれらに加えてひずみや応力の履歴が考慮されることになる。

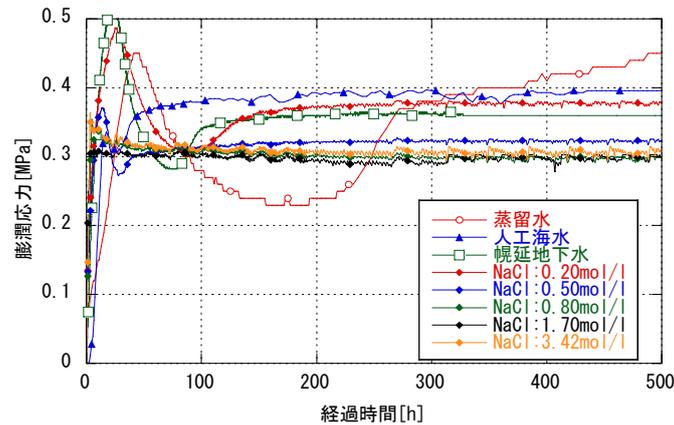
2. 2. 2 緩衝材の膨潤圧のモデル化

(1) 膨潤圧

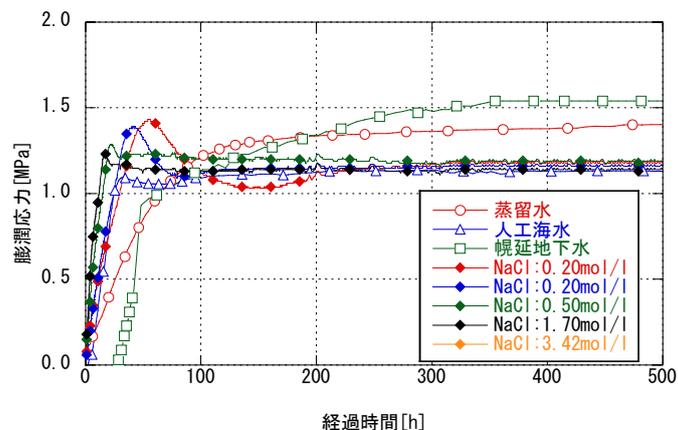
菊池・棚井¹²⁾は、緩衝材仕様や地下水条件を種々変化させ、緩衝材の膨潤圧を測定している。

本研究では、平成17年取りまとめ¹⁾と同様の地質環境条件を想定し、菊池・棚井¹²⁾が測定した結果のうち、海水系地下水（幌延地下水、人工海水、NaCl溶液）条件下のものをを用いた。また、緩衝材仕様としては、乾燥密度1.60Mg/m³、ケイ砂混合率30wt%（有効粘土密度1.37Mg/m³）および乾燥密度1.80Mg/m³、ケイ砂混合率30wt%（有効粘土密度1.58Mg/m³）の場合を想定した。

緩衝材の膨潤圧の経時変化を図2-4に、平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係を図2-5に示す。これらの図より、本研究では、表2-4に示す2ケースの膨潤圧を想定し、解析を行った。



(a) 乾燥密度 1.60Mg/m³、ケイ砂混合率 30wt%（有効粘土密度 1.37Mg/m³）



(b) 乾燥密度 1.80Mg/m³、ケイ砂混合率 30wt%（有効粘土密度 1.58Mg/m³）

図 2-4 緩衝材の膨潤圧の経時変化¹²⁾

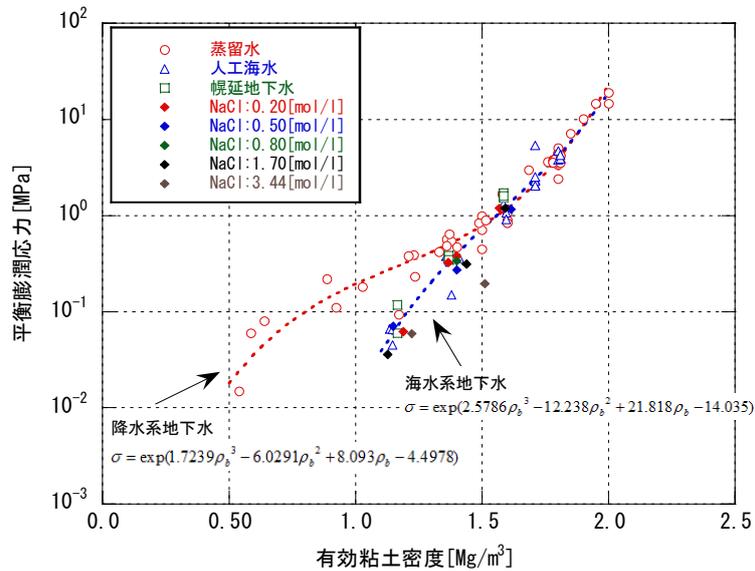


図 2-5 緩衝材の平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係¹²⁾

表 2-4 本研究で想定した緩衝材の仕様 および 膨潤圧

	CaseA	CaseB
乾燥密度 [Mg/m^3]	1.60	1.80
ケイ砂混合率 [wt%]	30	30
有効粘土密度 [Mg/m^3]	1.37	1.58
膨潤圧 [MPa]	0.3	1.4

(2) FEM への適用

本研究では、便宜的に人工バリア定置直後に緩衝材の膨潤圧が発生し、直ちに平衡状態に達する(時間ステップを考慮しない)ものとして解析を行った。膨張圧は、解析上 温度荷重で表現し、緩衝材の変形が完全に拘束された状態で、膨潤圧が 0.3MPa および 1.4MPa となる温度荷重(上昇)を与えた。

2. 2. 3 オーバーパットの腐食膨張圧のモデル化

(1) 腐食膨張圧

第2次取りまとめ⁴⁾ や平成17年取りまとめ¹⁾ におけるオーバーパットの腐食膨張解析(表2-1, 表2-2)では, オーバーパット寿命評価の観点から保守的に厚さ190mmのオーバーパットが0.04mm/年の速さで全面腐食(腐食生成物の体積は元の体積の3倍)し, 人工バリア定置から4,750年後にオーバーパットの全てが腐食するものとして評価が行われている。

本研究においても同様の腐食条件を想定し, 解析を行った。オーバーパットが高さ方向および半径方向に等しく腐食膨張すると仮定した場合には, 第2次取りまとめ⁴⁾ で想定されている条件(表2-5)で計算すると, オーバーパットの外縁半径の増加量は185mm/4,750年となる。

表2-5 オーバーパットの外縁半径増加量の計算条件

腐食速度 [mm/年]	0.04
腐食部の体積膨張 [倍]	3
肉厚 [m]	0.19
外縁半径 [m]	0.41
内縁半径 [m]	0.22
外縁長さ [m]	1.73
内縁長さ [m]	1.35

(2) FEM への適用

本研究では, オーバーパットの腐食膨張圧は, 緩衝材の膨潤圧, 岩盤のクリープ変形, 岩盤の初期応力の影響を考慮せず, 解析上は一義的な強制変位として与えた。人工バリアの定置後, 4,750年後までオーバーパットの外縁半径が線形的に増加することとし, 185mm/4,750年 (3.89×10^{-2} mm/年)の強制変位速度を与えた。

2. 3 解析条件

2. 3. 1 解析モデル

解析モデルは、処分孔の対称性を考慮し、軸対称モデルとした。解析モデルを図 2-6 に示す。岩盤の掘削面（掘削直径 $d=2.22\text{m}$ ）から側方境界までの距離は、 $5d (=11.1\text{m})$ とした。なお、支保工は考慮していない。

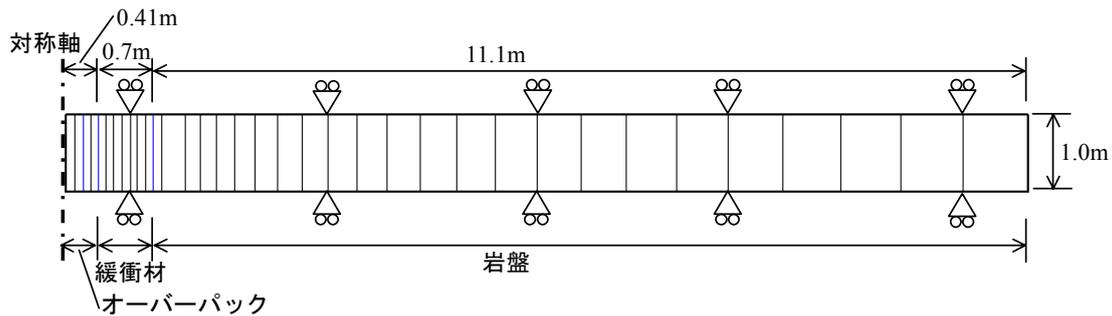


図 2-6 解析モデル（軸対称モデル）

2. 3. 2 解析ステップ

解析ステップの模式図を図 2-7 に示す。

◆ step1 初期応力状態

平成 17 年取りまとめ¹⁾ で例示されている地質環境条件（幌延における深度 450m の地質環境条件）と同様に、7.21MPa の初期応力（当該地域で想定される鉛直方向応力（土被り圧））を設定した。

◆ step2 処分孔掘削

処分孔に該当する部分の岩盤要素を削除し、弾性解析により応力の再配分を行うことで処分孔の掘削を表現した。

◆ step3 人工バリア定置

オーバーパック および 緩衝材要素を処分孔に該当する部分に追加した。

◆ step4 緩衝材の膨潤

2. 2. 2 の考えを基に、緩衝材の膨潤圧を表現した。

◆ step5 オーバーパックの腐食膨張、岩盤のクリープ変形

2. 2. 1 の考えを基に、岩盤のクリープ変形を表現した。また、2. 2. 3 の考えを基に、オーバーパックの腐食膨張圧を表現した。

◆ step6 岩盤のクリープ変形

2. 2. 1 の考えを基に、岩盤のクリープ変形を表現した。解析時間は、第 2 次取りまとめ⁴⁾ および 平成 17 年取りまとめ¹⁾ と同様に 10,000 年後までとした。

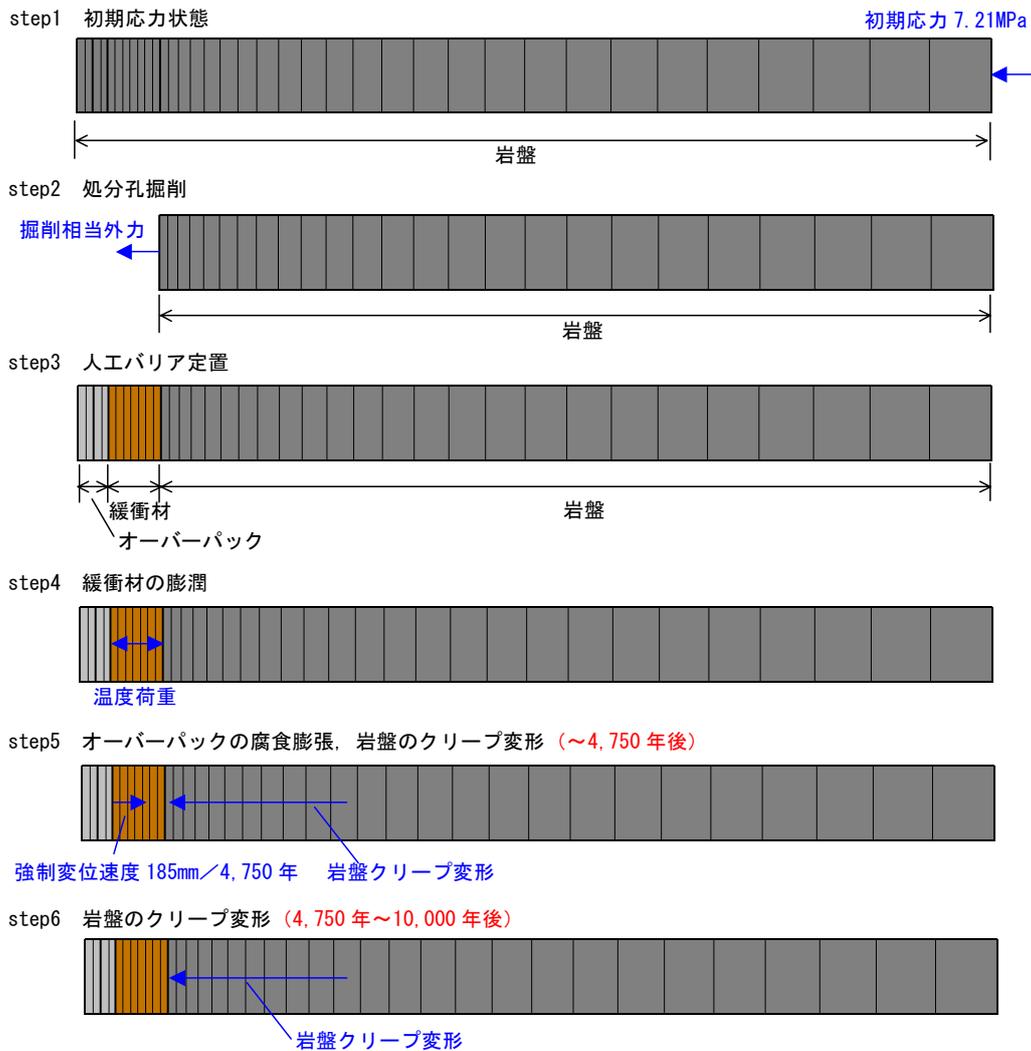


図 2-7 解析ステップの模式図

なお、step4 までは 1 万年という時間から考えれば極めて短い時間で終了するので、解析においては時間ステップを考慮せず（弾性解析）、step5 以降のみ時間ステップを考慮した。step5 以降の時間刻みの増分 Δt は、式(2-8)に示すように、最初の時間刻みを $\Delta t_0 = 120$ (sec) として、以降のステップは前ステップの時間刻みを 1.1 倍して次第に長くした。

$$\Delta t_n = 1.1 \times n \times \Delta t_0 \quad \text{式(2-8)}$$

2. 3. 3 入力物性値

(1) 岩盤

平成 17 年取りまとめ¹⁾ で例示されている地質環境条件（幌延における深度 450m の地質環境条件）と同様に、表 2-6 に示す物性値を用いた。なお、コンプライアンス可変型構成方程式に必要な定数 (n_0 , m) は、幌延のボーリング調査 (HDB-3 および HDB-6) で採取した岩石による室内試験結果より設定した²⁾¹³⁾。

表 2-6 岩盤の物性値

構成方程式	非線形粘弾性 ※1
初期ヤング率 E_0 [MPa]	2,500
初期ポアソン比 ν_0 [-]	0.186
粘着力 C [MPa]	5.2
内部摩擦角 ϕ [degs]	25
一軸圧縮強度 σ_c [MPa]	16.3
引張強度 σ_t [MPa]	1.63
時間依存性を表すパラメータ n_0 [-]	30
破壊進行性を表すパラメータ m [-]	20

※1 コンプライアンス可変型構成方程式⁵⁾

(2) 緩衝材

平成 17 年取りまとめ¹⁾ と同様に海水系地下水を想定し、菊池・棚井¹²⁾ が幌延地下水を用いた一軸圧縮試験で取得した値を基に、表 2-7 に示す物性値を用いた。ポアソン比については、試験で取得されていないため、第 2 次取りまとめ⁴⁾ と同様の値を用いた。

表 2-7 緩衝材の物性値

構成方程式	線形弾性	
	CaseA	CaseB
緩衝材の仕様		
ヤング率 [MPa]	17.77 ※1	47.03 ※2
ポアソン比 ν [-]	0.4	0.4

※1 目標有効粘土密度 1.40Mg/m³ の 3 本の試験片の算術平均値

※2 目標有効粘土密度 1.60Mg/m³ の 2 本の試験片の算術平均値

(3) オーバーパック

第 2 次取りまとめ⁴⁾ および 平成 17 年取りまとめ¹⁾ と同様に、炭素鋼の一般値である表 2-8 に示す物性値を用いた。

表 2-8 オーバーパックの物性値

構成方程式	線形弾性
ヤング率 [GPa]	210
ポアソン比 ν [-]	0.2

2. 3. 4 解析ケース

解析ケース一覧を表 2-9 に示す。

Case1, 2 では、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧の有無の影響について検討した。さらに、Case3~5 では、岩盤の時間依存性の程度を表すパラメータ n_0 、岩盤の破壊進行性の程度を表すパラメータ m および 岩盤の初期応力の大小の影響について検討するために条件を変更した。 n_0 , m については、岩盤のクリープ変形がより顕著な場合を想定し、初期応力については、浅い深度 (0.5 倍) を想定し、条件を変更した。

表 2-9 解析ケース一覧

解析 ケース	岩盤条件			緩衝材条件		オーバー パックの 腐食膨張 圧の有無	解析結果に 対する考察
	n_0 [-]	m [-]	初期応力 [MPa]	緩衝材の 仕様	膨潤圧の 有無		
Case1-1	30	20	7.21	CaseA	なし	なし	—
Case1-2	30	20	7.21	CaseB	なし	なし	Case1-1 と比較
Case2-1	30	20	7.21	CaseA	あり	あり	Case1-1 と比較
Case2-2	30	20	7.21	CaseB	あり	あり	Case1-2, Case2-1 と比較
Case3-1	20	20	7.21	CaseA	あり	あり	Case2-1 と比較
Case3-2	20	20	7.21	CaseB	あり	あり	Case2-2, Case3-1 と比較
Case4-1	30	30	7.21	CaseA	あり	あり	Case2-1 と比較
Case4-2	30	30	7.21	CaseB	あり	あり	Case2-2 と比較
Case5-1	30	20	3.605	CaseA	あり	あり	Case2-1 と比較
Case5-2	30	20	3.605	CaseB	あり	あり	Case2-2, Case5-1 と比較

3. 解析結果

3. 1 解析結果の着目点

図 3-1 に示す着目点において、以下の 3 種類の図を作成した。

- (a) 処分孔壁面変位の経時変化図
- (b) 岩盤の応力分布図
- (c) 岩盤着目要素の応力の経時変化図

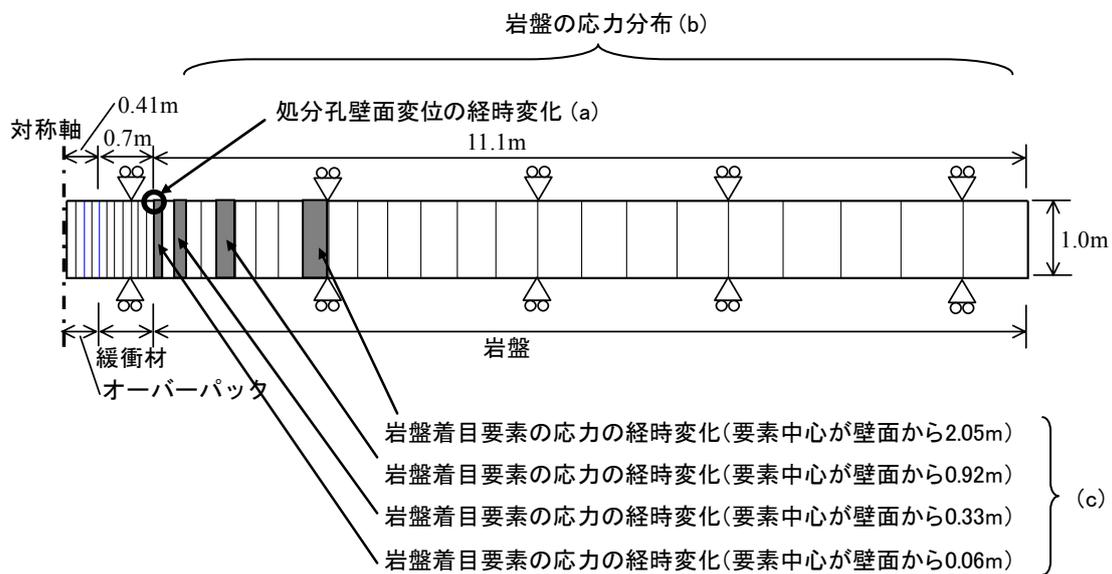


図 3-1 解析結果の着目点

また、それらの図を基に、以下の 2 点について考察した。

- ① 処分孔壁面の変位
- ② 緩み領域の発生時期と大きさ および 広がり

また、「(b) 岩盤の応力分布図」における変曲点（図 3-2 参照）は、緩み領域と弾性領域のほぼ境界を示す。変曲点がない場合には、緩み領域が発生していないことを意味する。なお、緩み領域とは、2. 2. 1 に述べたコンプライアンス可変型構成方程式によって岩盤のヤング率が初期値より低下し、応力が低下した領域を示す。

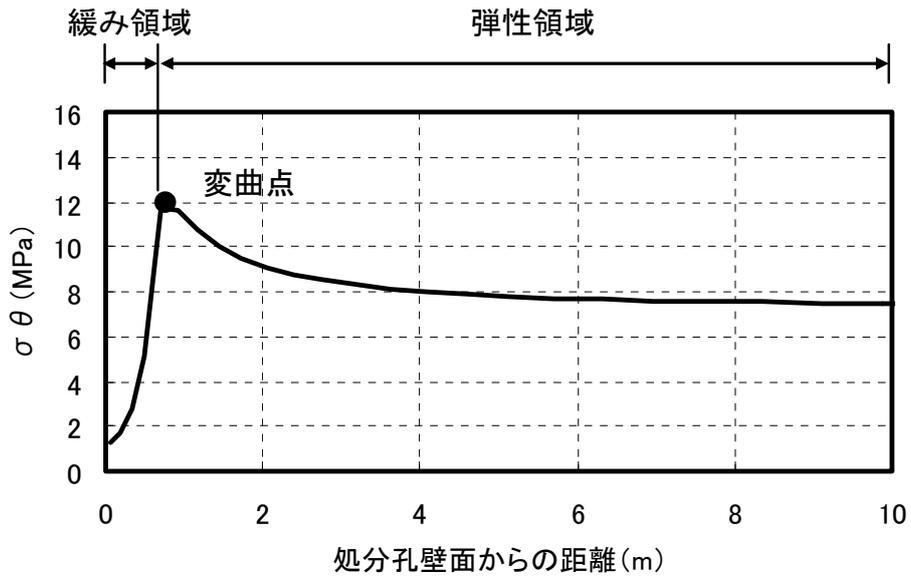


図 3-2 岩盤の応力分布図（周方向応力）における変曲点

3. 2 解析結果

3. 2. 1 緩衝材の膨潤圧とオーバーパックスの腐食膨張圧を考慮しない場合 (Case1)

(1) 緩衝材仕様：乾燥密度 1.60Mg/m^3 、ケイ砂混合率 30wt% (有効粘土密度 1.37Mg/m^3) の場合 (Case1-1)

処分孔壁面変位の経時変化図 (処分孔内空側への変位を負とする) を図 3-3 に、岩盤の応力分布図 (圧縮応力を正とする) を図 3-4 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図 (圧縮応力を正とする) を図 3-5 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置された時点 (図 2-7 における step4) での変位を 0 として結果を示した。

① 処分孔壁面の変位

- ・ 図 3-3 より、人工バリアの定置後、処分孔壁面は岩盤のクリープ変形の影響により、時間の経過とともに、徐々に内空側に変位していることが分かる。

② 緩み領域の発生時期と大きさ および 広がり

- ・ 図 3-4 (a) より、100 年後に変曲点が現れ、緩み領域 ($d=0.5\text{m}$) が発生していることが分かる。また、時間の経過とともに、変曲点が徐々に右側に移動し、緩み領域幅が広がっていることが分かる。

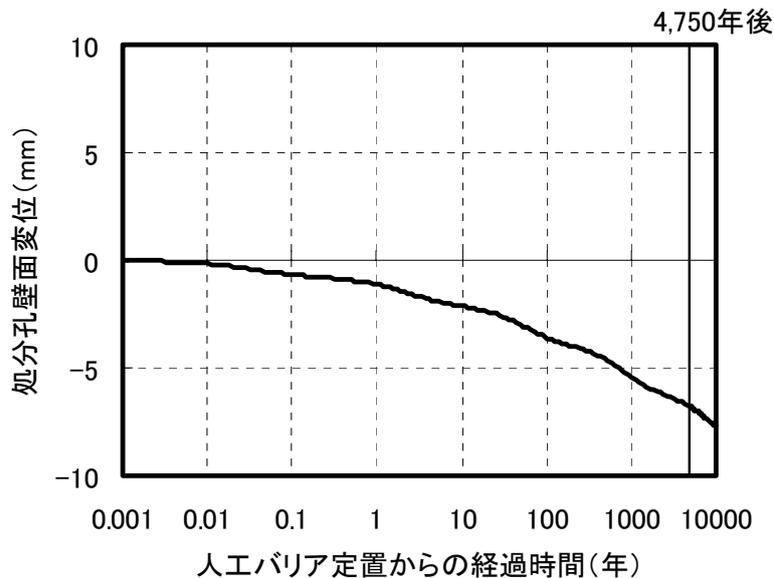
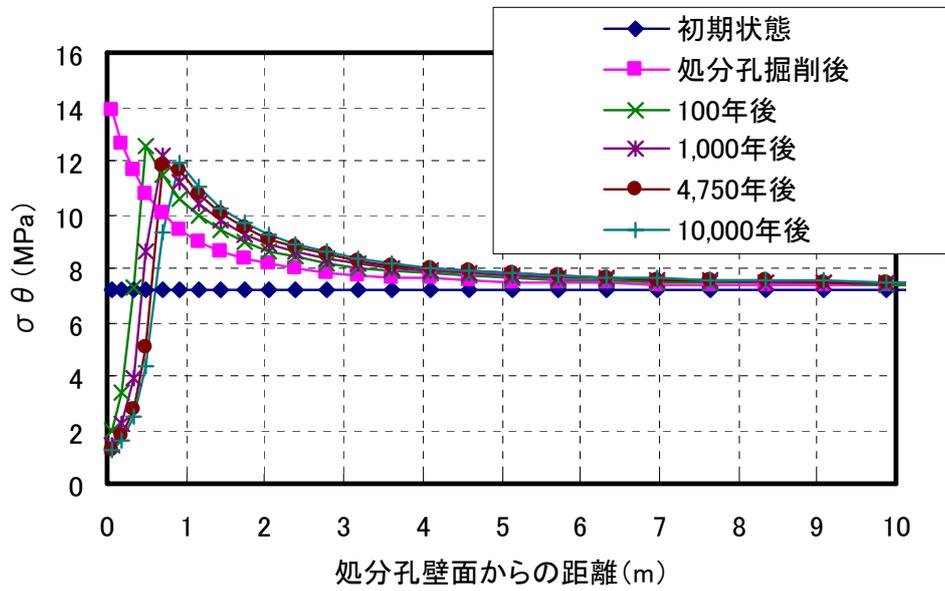
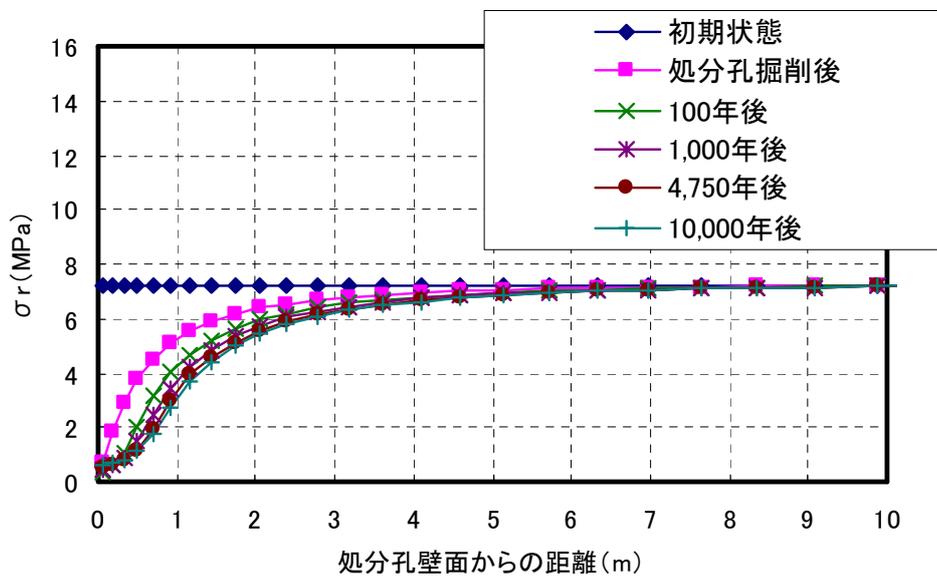


図 3-3 処分孔壁面変位の経時変化図

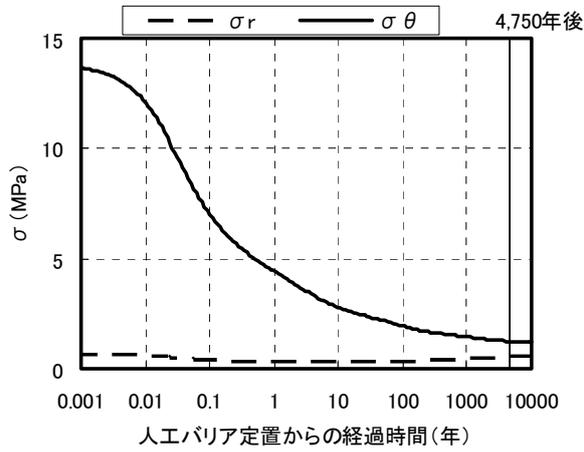


(a) 周方向応力

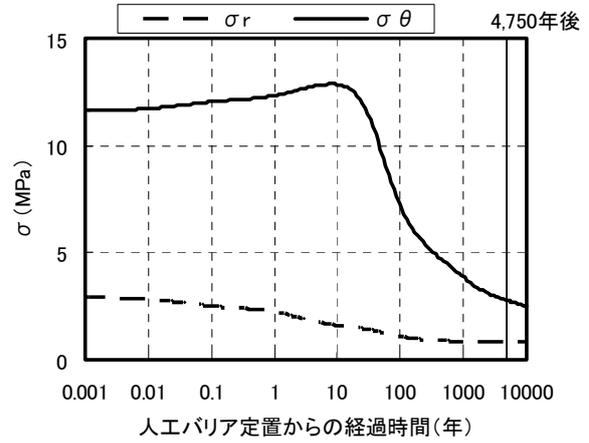


(b) 半径方向応力

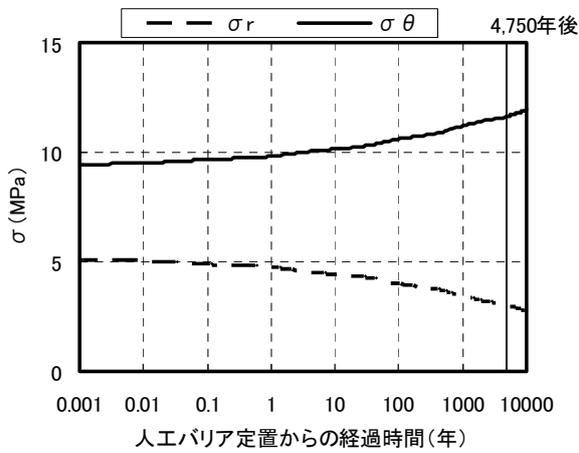
図 3-4 岩盤の応力分布図



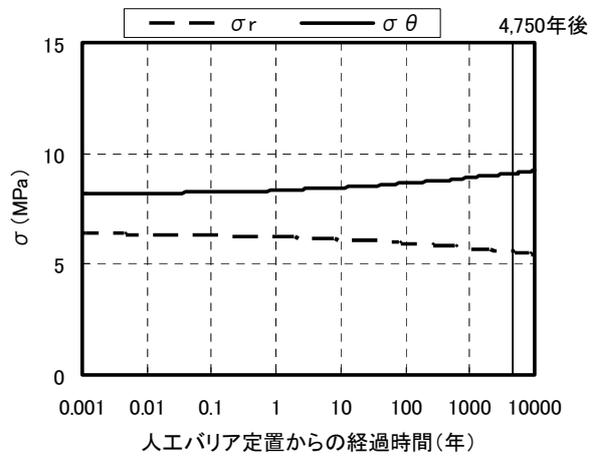
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-5 岩盤着目要素の応力の経時変化図

(2) 緩衝材仕様：乾燥密度 $1.80\text{Mg}/\text{m}^3$ 、ケイ砂混合率 30wt%（有効粘土密度 $1.58\text{Mg}/\text{m}^3$ ）の場合 (Case1-2)

処分孔壁面変位の経時変化図（処分孔内空側への変位を負とする）を図 3-6 に、岩盤の応力分布図（圧縮応力を正とする）を図 3-7 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図（圧縮応力を正とする）を図 3-8 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置された時点（図 2-7 における step4）での変位を 0 として結果を示した。

以下、Case1-1 と比較した考察を述べる。

① 処分孔壁面の変位

- ・ 図 3-6 より、人工バリアの定置後、処分孔壁面は岩盤のクリープ変形の影響により、時間の経過とともに、徐々に内空側に変位していることが分かる。これは、Case1-1（図 3-3）と同様の傾向である。ただし、変位量は、Case1-1（図 3-3）と比較して小さい。これは、緩衝材のヤング率が Case1-1（図 3-3）より大きいことで、Case1-1（図 3-3）より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくく、処分孔壁面が内空側に変位しにくいためと考えられる。

② 緩み領域の発生時期と大きさ および 広がり

- ・ 図 3-7 (a) より、100 年後に変曲点が現れ、緩み領域 ($d=0.3\text{m}$) が発生していることが分かる。また、時間の経過とともに、変曲点が徐々に右側に移動し、緩み領域幅が広がっていることが分かる。これは、Case1-1（図 3-4 (a)）と同様の傾向である。ただし、緩み領域幅の大きさと広がり、Case1-1（図 3-4 (a)）と比較して小さい。これは、緩衝材のヤング率が Case1-1（図 3-4 (a)）より大きいことで、Case1-1（図 3-4 (a)）より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくく、処分孔壁面近傍に緩み領域が発生しにくいためと考えられる。

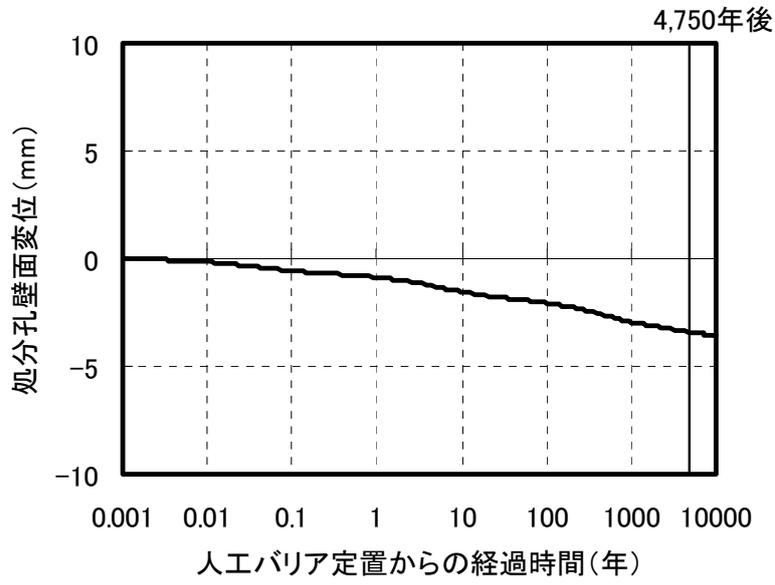
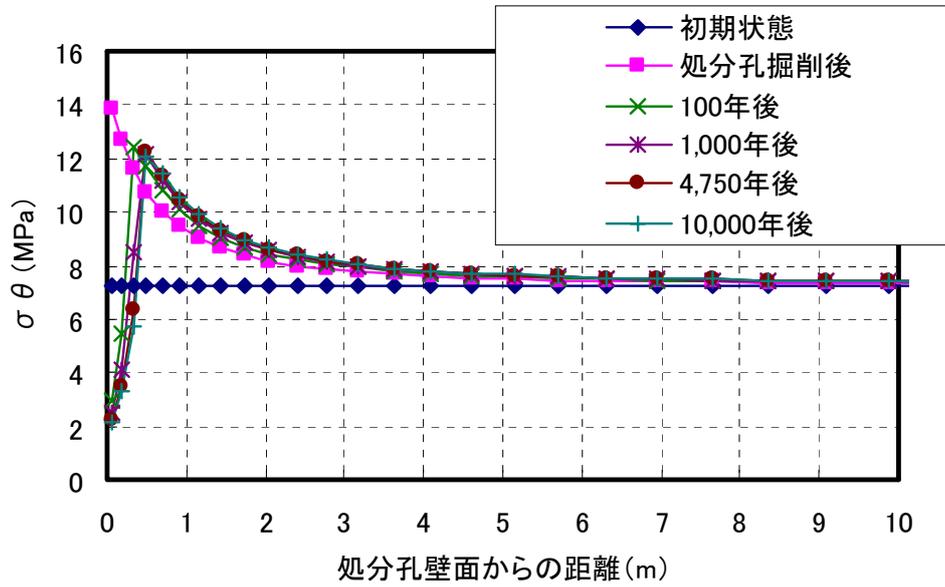
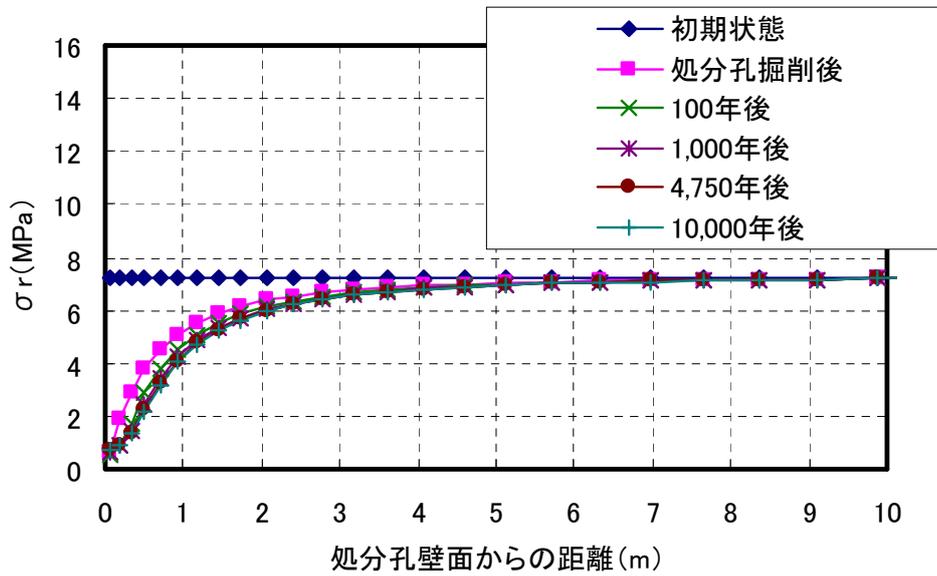


図 3-6 処分孔壁面変位の経時変化図

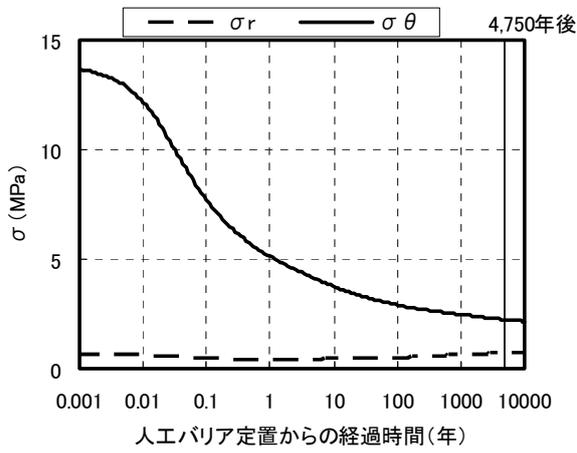


(a) 周方向応力

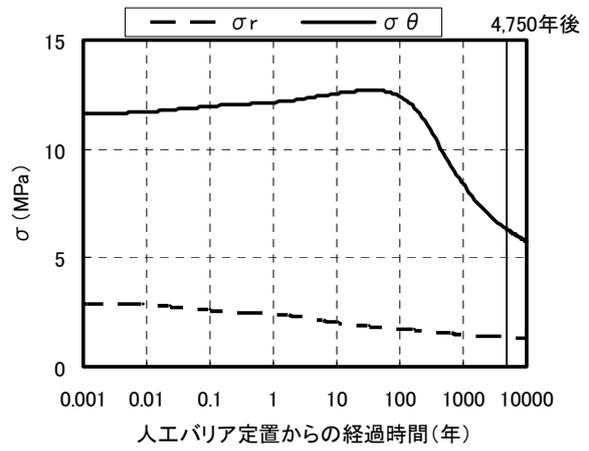


(b) 半径方向応力

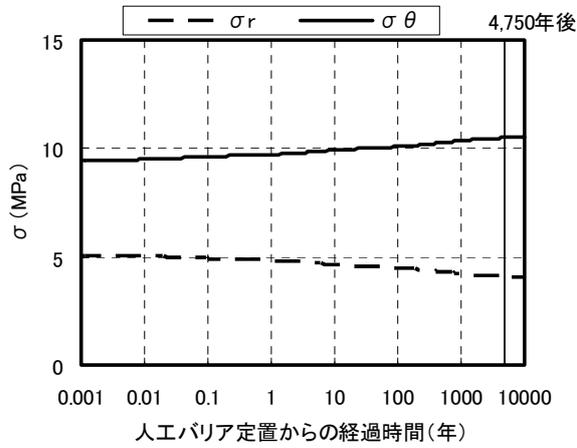
図 3-7 岩盤の応力分布図



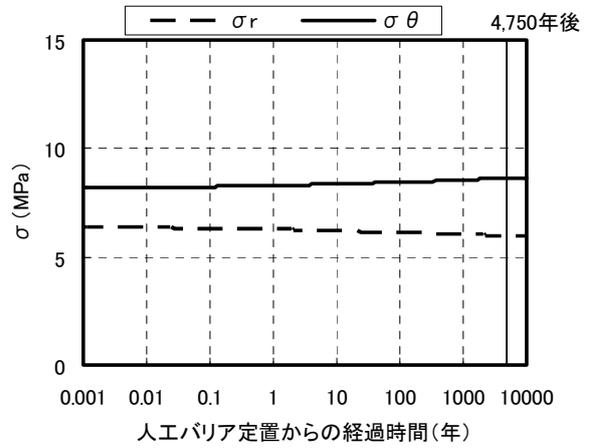
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-8 岩盤着目要素の応力の経時変化図

3. 2. 2 緩衝材の膨潤圧とオーバーパックスの腐食膨張圧を考慮した場合 (Case2)

(1) 緩衝材仕様：乾燥密度 1.60Mg/m^3 、ケイ砂混合率 30wt% (有効粘土密度 1.37Mg/m^3) の場合 (Case2-1)

処分孔壁面変位の経時変化図 (処分孔内空側への変位を負とする) を図 3-9 に、岩盤の応力分布図 (圧縮応力を正とする) を図 3-10 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図 (圧縮応力を正とする) を図 3-11 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置され、緩衝材の膨潤圧が発生した時点 (図 2-7 における step4) での変位を 0 として結果を示した。

以下、Case1-1 と比較した考察を述べる。

① 処分孔壁面の変位

- ・ 図 3-9 より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、オーバーパックスの腐食膨張の影響に比べて岩盤のクリープ変形の影響が大きく、処分孔壁面が徐々に内空側に変位していることが分かる。これは、Case1-1 (図 3-3) と同様の傾向である。ただし、変位量は、Case1-1 (図 3-3) と比較して小さい。これは、オーバーパックスの腐食膨張圧が作用していることで、Case1-1 (図 3-3) より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくく、処分孔壁面が内空側に変位しにくいためと考えられる。
- ・ 同じく図 3-9 より、100 年後程度～4,750 年後までは、岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパックスの腐食膨張の影響が大きく、内圧の影響により、処分孔壁面が広がる方向に変位していることが分かる。これは、Case1-1 (図 3-3) には見られない傾向である。なお、処分孔壁面が広がる方向に変位する場合、処分孔壁面近傍の引張破壊が懸念されるが、図 3-10 および 図 3-11 より、周方向応力は引張応力にはなっていないことが確認できる。
- ・ 同じく図 3-9 より、オーバーパックスの腐食膨張圧が一定になった 4,750 年後以降は、顕著な変化が生じていないことが分かる。これは、岩盤の応力が処分孔掘削後に比べて等方的な状態 (σ_θ と σ_r の差が小さい) であり (図 3-11 参照)、岩盤のクリープ変形の影響を受けにくいためと考えられる。これは、Case1-1 (図 3-3) には見られない傾向である。

② 緩み領域の発生時期と大きさ および 広がり

- ・ 図 3-10 (a) より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、オーバーパックスの腐食膨張の影響に比べて岩盤のクリープ変形の影響が大きく、100 年後に変曲点が現れ、緩み領域 ($d=0.3\text{m}$) が発生していることが分かる。これは、Case1-1 (図 3-4 (a)) と同様の傾向である。ただし、緩み領域幅の大きさは、Case1-1 (図 3-4 (a)) と比較して小さい。これは、オーバーパックスの腐食膨張圧が作用していることで、Case1-1 (図 3-4 (a)) より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくく、処分孔壁面近傍に緩み領域が発生しにくいためと考えられる。
- ・ 同じく図 3-10 (a) より、100 年後以降は、岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパックスの腐食膨張の影響が大きく、内圧の影響により、変曲点が右側に移動しておらず、緩み領

域幅が広がっていないことが分かる。これは、Case1-1 (図 3-4 (a)) には見られない傾向である。

以上より、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックスの腐食膨張圧を考慮せず、本解析と同様の岩盤条件で解析を行っている平成 17 年取りまとめりは、ニアフィールド岩盤の長期安定性について、保守側の評価を行っていることになる。

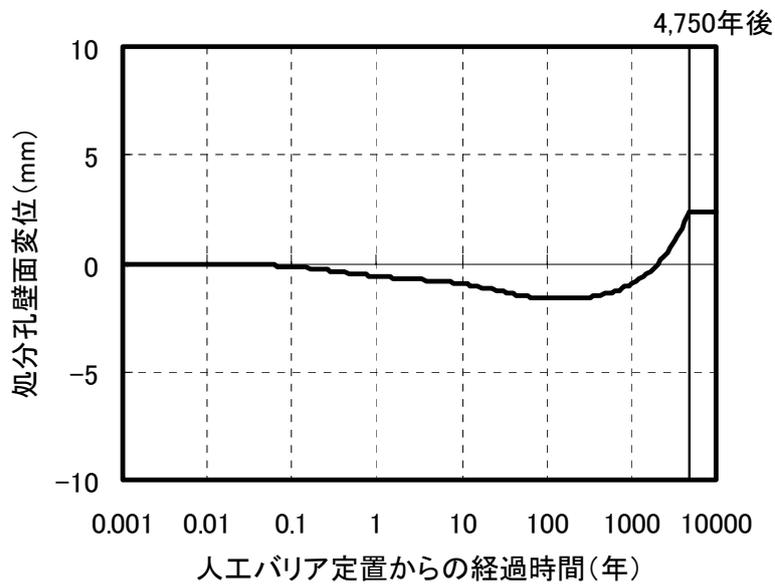
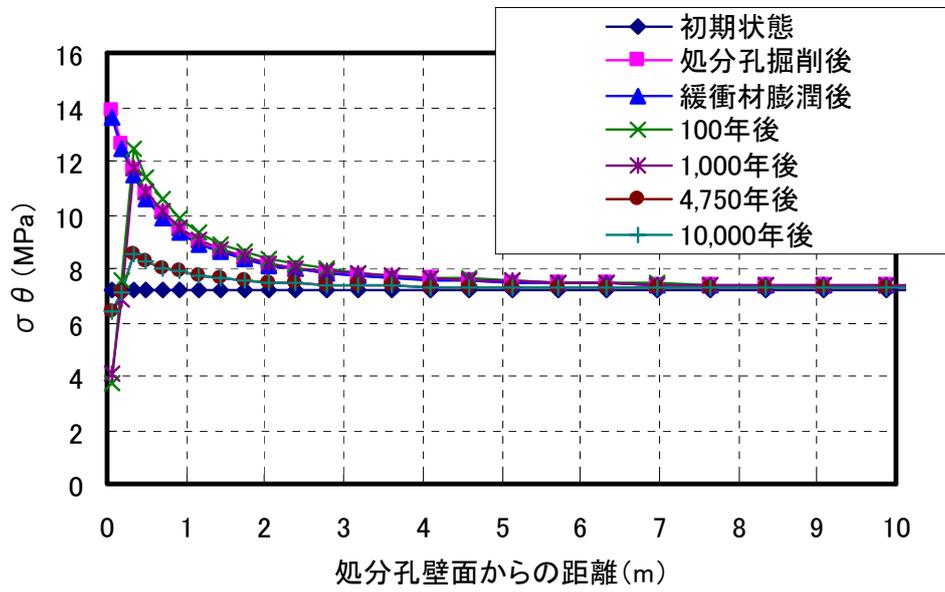
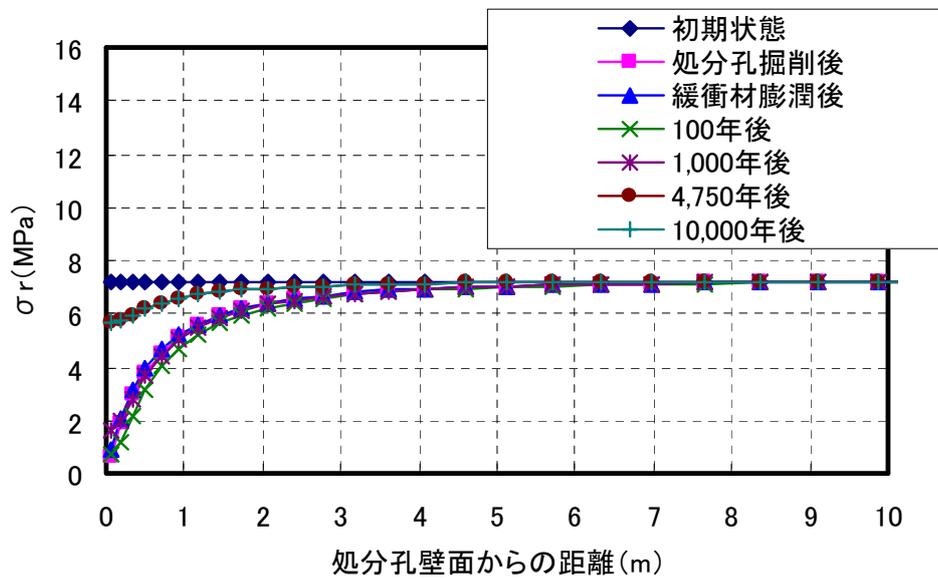


図 3-9 処分孔壁面変位の経時変化図

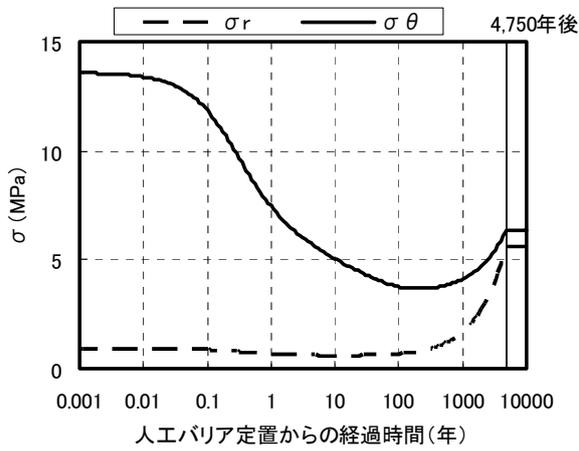


(a) 周方向応力

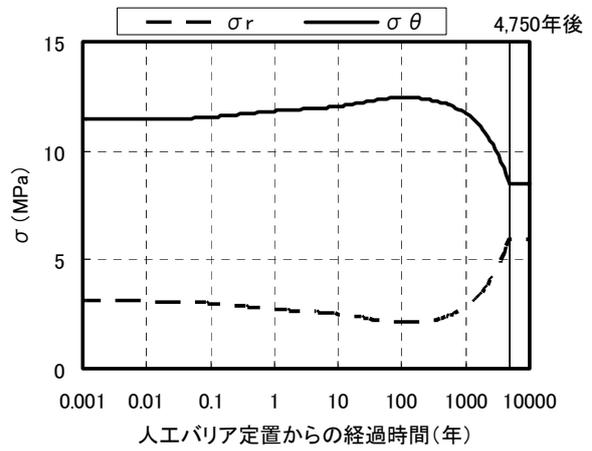


(b) 半径方向応力

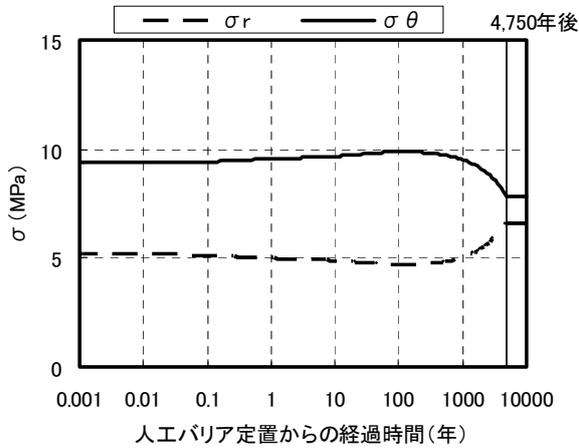
図 3-10 岩盤の応力分布図



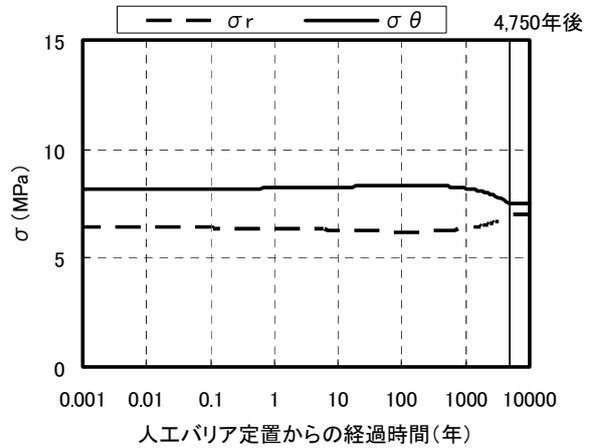
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-11 岩盤着目要素の応力の経時変化図

(2) 緩衝材仕様：乾燥密度 1.80Mg/m³、ケイ砂混合率 30wt% (有効粘土密度 1.58Mg/m³) の場合 (Case2-2)

処分孔壁面変位の経時変化図 (処分孔内空側への変位を負とする) を図 3-12 に、岩盤の応力分布図 (圧縮応力を正とする) を図 3-13 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図 (圧縮応力を正とする) を図 3-14 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置され、緩衝材の膨潤圧が発生した時点 (図 2-7 における step4) での変位を 0 として結果を示した。

以下、Case1-2 および Case2-1 と比較した考察を述べる。

① 処分孔壁面の変位

- ・ 図 3-12 より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、処分孔壁面が変位していないことが分かる。これは、Case1-2 (図 3-6) や Case2-1 (図 3-9) と異なる傾向である。これは、a) オーバーパックの腐食膨張圧が作用していることで、Case1-2 (図 3-6) より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくいため および b) 緩衝材のヤング率が Case2-1 (図 3-9) より大きいことで、Case2-1 (図 3-9) より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくいため の二つの理由から、処分孔壁面が変位しにくいためと考えられる。
- ・ 同じく図 3-12 より、100 年後程度～4,750 年後までは、岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパックの腐食膨張の影響が大きく、内圧の影響により、処分孔壁面が広がる方向に変位していることが分かる。これは、Case1-2 (図 3-6) には見られない傾向である。また、Case2-1 (図 3-9) と同様の傾向である。ただし、変位量は、Case2-1 (図 3-9) と比較して大きい。これは、緩衝材のヤング率の大小にかかわらず、オーバーパックの腐食膨張量を一定としていることで、緩衝材のヤング率の大きい本ケースの方が内圧の影響が大きいためと考えられる。なお、処分孔壁面が広がる方向に変位する場合、処分孔壁面近傍の引張破壊が懸念されるが、図 3-13 および 図 3-14 より、周方向応力は引張応力にはなっていないことが確認できる。

② 緩み領域の発生時期と大きさ および 広がり

- ・ 図 3-13 (a) より、人工バリアの定置から 100 年後に変曲点が現れず、緩み領域が発生していないことが分かる。これは、Case1-2 (図 3-7 (a)) や Case2-1 (図 3-10 (a)) と異なる傾向である。これは、a) オーバーパックの腐食膨張圧が作用していることで、Case1-2 (図 3-7 (a)) より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくいため および b) 緩衝材のヤング率が Case2-1 (図 3-10 (a)) より大きいことで、Case2-1 (図 3-10 (a)) より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくいため の二つの理由から、処分孔壁面近傍に緩み領域が発生しにくいためと考えられる。

以上より、Case2-1と同様に、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧を考慮せず、本解析と同様の岩盤条件で解析を行っている平成17年取りまとめりは、ニアフィールド岩盤の長期安定性について、保守側の評価を行っていることになる。

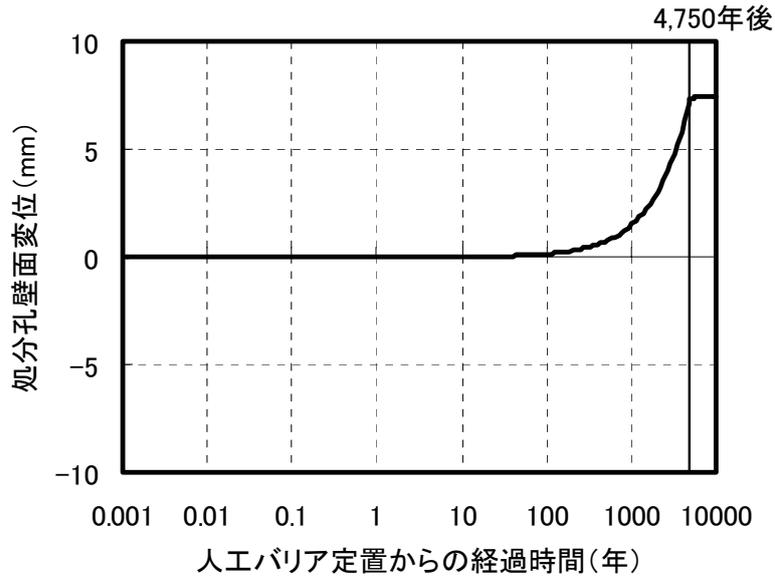
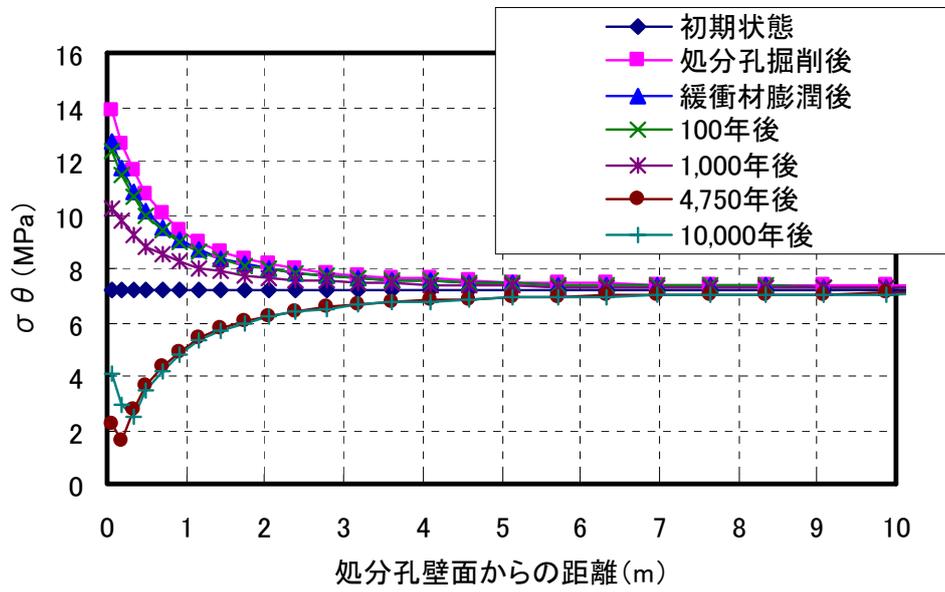
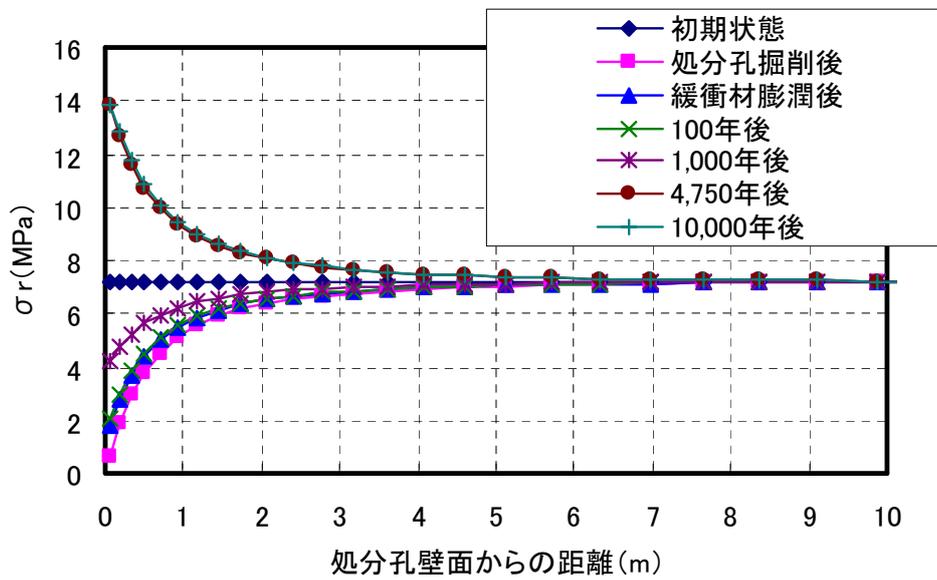


図 3-12 処分孔壁面変位の経時変化図

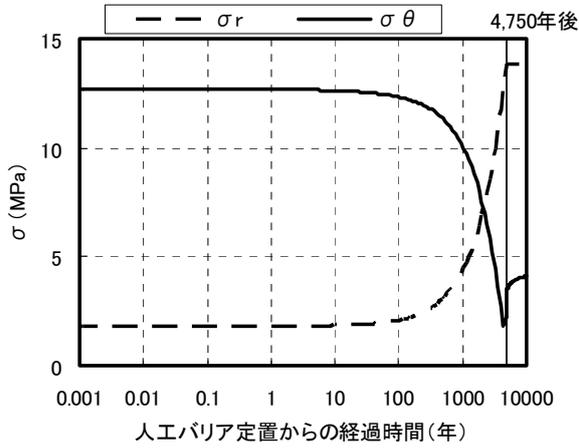


(a) 周方向応力

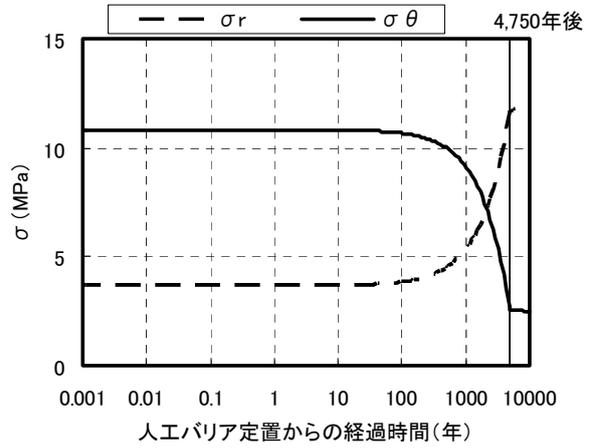


(b) 半径方向応力

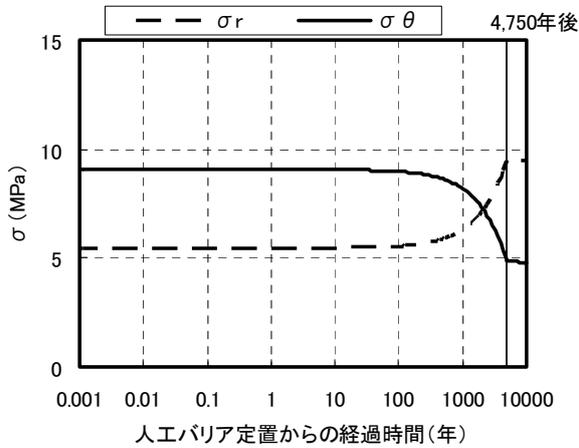
図 3-13 岩盤の応力分布図



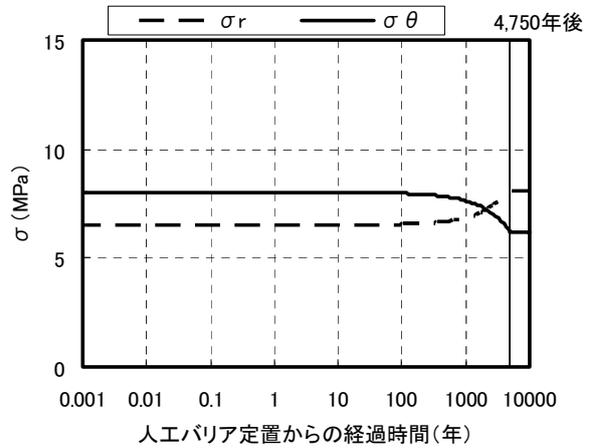
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-14 岩盤着目要素の応力の経時変化図

3. 2. 3 n_0 を変えた場合 (Case3)

(1) 緩衝材仕様：乾燥密度 1.60Mg/m^3 、ケイ砂混合率 30wt% (有効粘土密度 1.37Mg/m^3) の場合 (Case3-1)

処分孔壁面変位の経時変化図 (処分孔内空側への変位を負とする) を図 3-15 に、岩盤の応力分布図 (圧縮応力を正とする) を図 3-16 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図 (圧縮応力を正とする) を図 3-17 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置され、緩衝材の膨潤圧が発生した時点 (図 2-7 における step4) での変位を 0 として結果を示した。

以下、Case2-1 と比較した考察を述べる。

① 処分孔壁面の変位

- 図 3-15 より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、オーバーパックの腐食膨張の影響に比べて岩盤のクリープ変形の影響が大きく、処分孔壁面が徐々に内空側に変位していることが分かる。これは、Case2-1 (図 3-9) と同様の傾向である。ただし、変位量は、Case2-1 (図 3-9) と比較して大きい。これは、 n を小さくしたことにより、Case2-1 (図 3-9) より時間依存性が顕著な場合を想定していることで、処分孔壁面が内空側に変位しやすいためと考えられる。
- 同じく図 3-15 より、100 年後程度～4,750 年後までは、岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパックの腐食膨張の影響が大きく、内圧の影響により、処分孔壁面が広がる方向に変位していることが分かる。これは、Case2-1 (図 3-9) と同様の傾向である。ただし、変位量は、Case2-1 (図 3-9) と比較して大きい。これは、 n を小さくしたことにより、Case2-1 (図 3-9) より時間依存性が顕著な場合を想定していることで、緩み領域が広範囲に発生し (図 3-10 (a), 図 3-16 (a) 参照)、処分孔壁面が広がる方向に押し戻されやすいためと考えられる。なお、処分孔壁面が広がる方向に変位する場合、処分孔壁面近傍の引張破壊が懸念されるが、図 3-16 および 図 3-17 より、周方向応力は引張応力にはなっていないことが確認できる。
- 同じく図 3-15 より、オーバーパックの腐食膨張圧が一定になった 4,750 年後以降は、顕著な変化が生じていないことが分かる。これは、岩盤の応力が処分孔掘削後に比べて等方的な状態 (σ_θ と σ_r の差が小さい) であり (図 3-17 参照)、岩盤のクリープ変形の影響を受けにくいと考えられる。これは、Case2-1 (図 3-9) と同様の傾向である。

② 緩み領域の発生時期と大きさ および 広がり

- 図 3-16 (a) より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、オーバーパックの腐食膨張の影響に比べて岩盤のクリープ変形の影響が大きく、100 年後に変曲点が現れ、緩み領域 ($d=1.4\text{m}$) が発生していることが分かる。これは、Case2-1 (図 3-10 (a)) と同様の傾向である。ただし、緩み領域幅は、Case2-1 (図 3-10 (a)) と比較して大きい。これは、 n を小

さくしたことにより、Case2-1 (図 3-10 (a)) より時間依存性が顕著な場合を想定していることで、処分孔壁面近傍に緩み領域が発生しやすいと考えられる。

- 同じく図 3-16 (a) より、100 年後以降は、岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパックの腐食膨張の影響が大きく、内圧の影響により、変曲点が右側に移動しておらず、緩み領域幅が広がっていないことが分かる。これは、Case2-1 (図 3-10 (a)) と同様の傾向である。

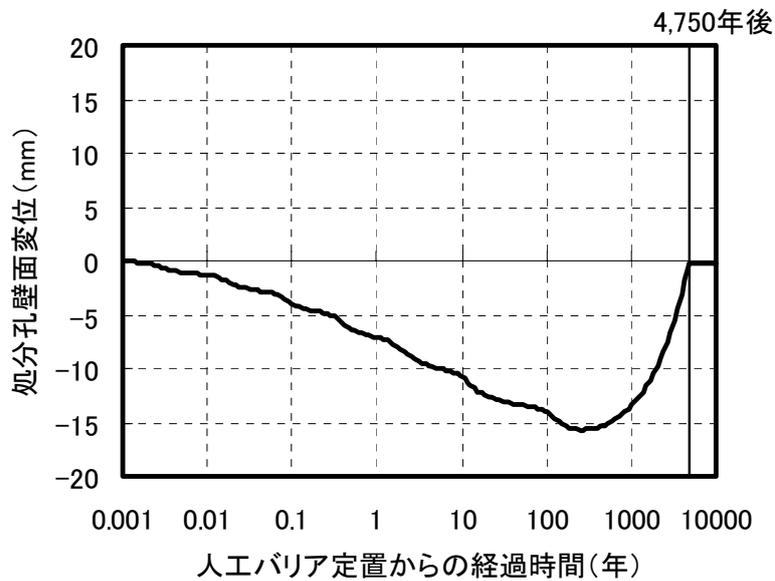
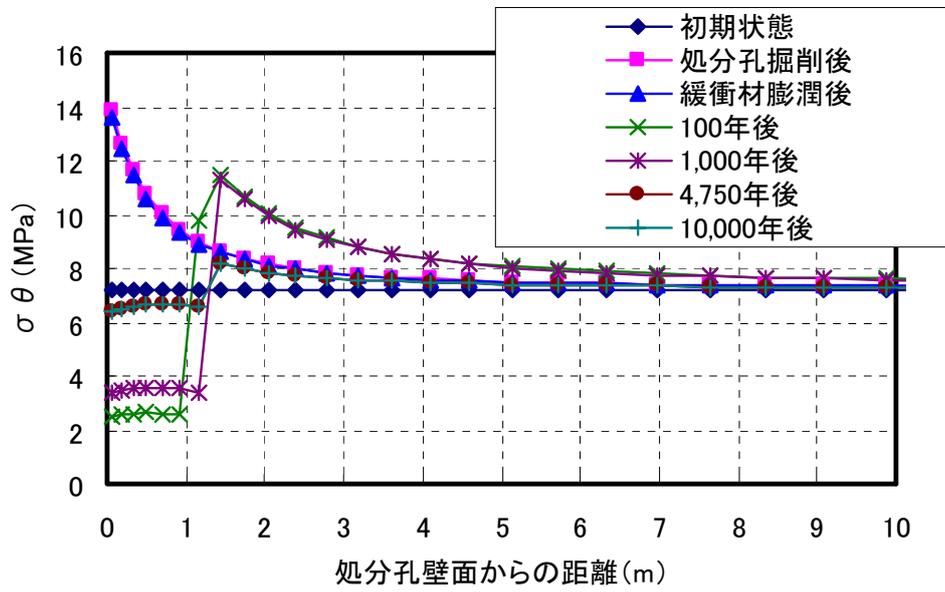
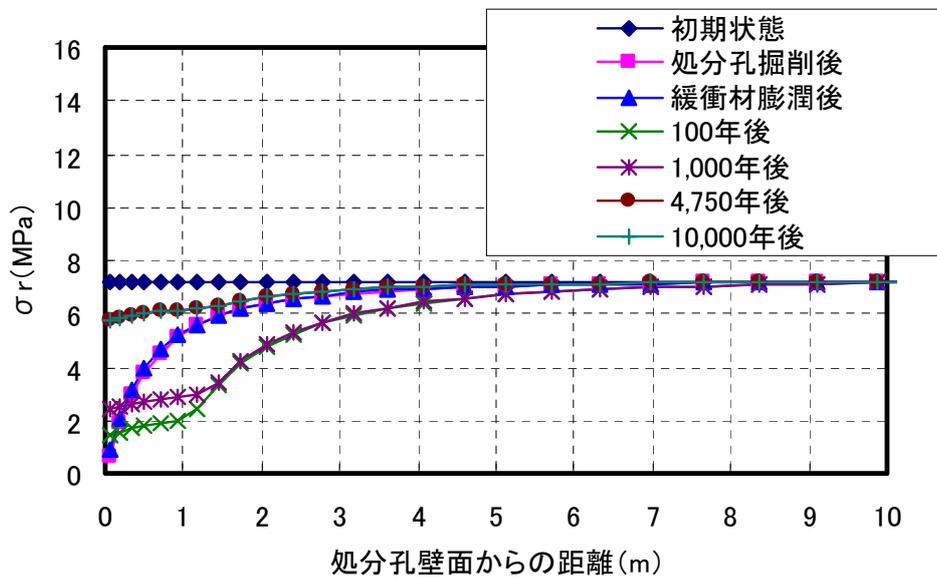


図 3-15 処分孔壁面変位の経時変化図

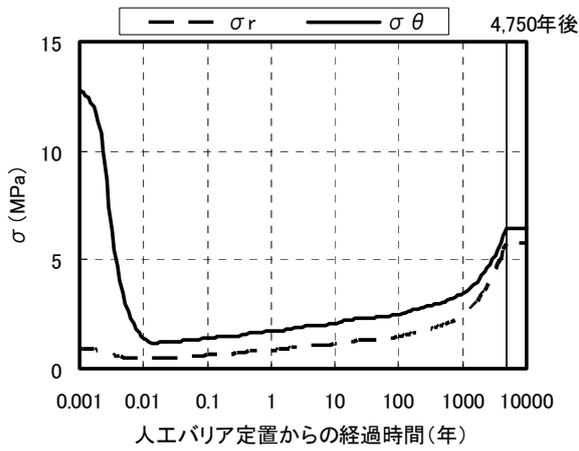


(a) 周方向応力

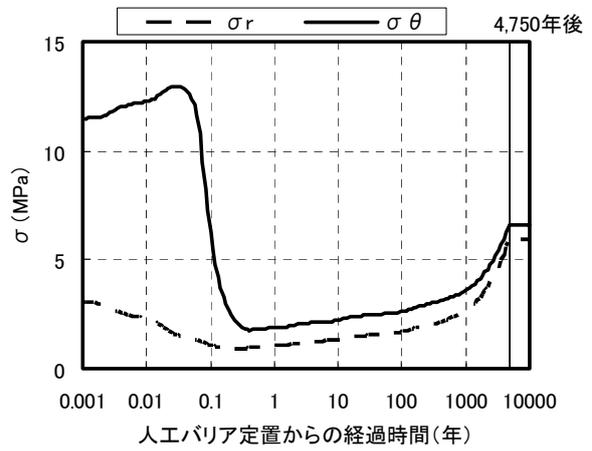


(b) 半径方向応力

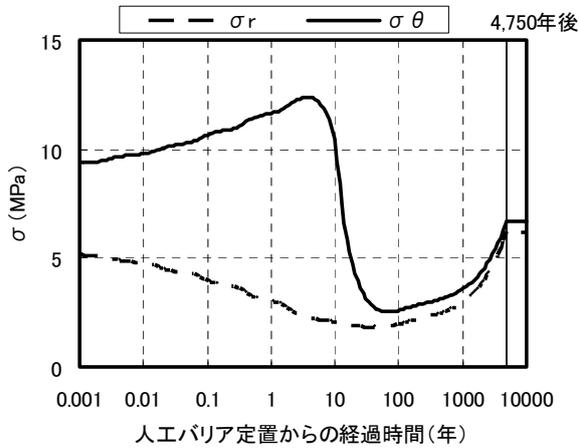
図 3-16 岩盤の応力分布図



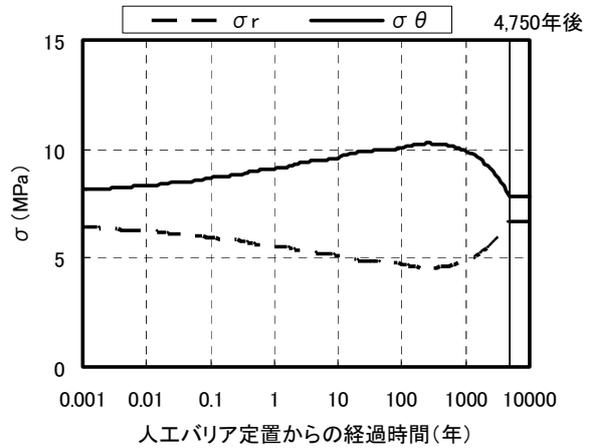
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-17 岩盤着目要素の応力の経時変化図

(2) 緩衝材仕様：乾燥密度 1.80Mg/m³、ケイ砂混合率 30wt% (有効粘土密度 1.58Mg/m³) の場合 (Case3-2)

処分孔壁面変位の経時変化図 (処分孔内空側への変位を負とする) を図 3-18 に、岩盤の応力分布図 (圧縮応力を正とする) を図 3-19 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図 (圧縮応力を正とする) を図 3-20 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置され、緩衝材の膨潤圧が発生した時点 (図 2-7 における step4) での変位を 0 として結果を示した。

以下、Case2-2 および Case3-1 と比較した考察を述べる。

① 処分孔壁面の変位

- ・ 図 3-18 より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、オーバーパックの腐食膨張の影響に比べて岩盤のクリープ変形の影響が大きく、処分孔壁面が徐々に内空側に変位していることが分かる。これは、Case2-2 (図 3-12) と異なる傾向である。これは、 n を小さくしたことにより、Case2-2 (図 3-12) より時間依存性が顕著な場合を想定していることで、処分孔壁面が内空側に変位しやすいためと考えられる。また、Case3-1 (図 3-15) と同様の傾向である。ただし、変位量は、Case3-1 (図 3-15) と比較して小さい。これは、緩衝材のヤング率が Case3-1 (図 3-15) より大きいことで、Case3-1 (図 3-15) より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくく、処分孔壁面が内空側に変位しにくいいためと考えられる。
- ・ 同じく図 3-18 より、100 年後程度～4,750 年後までは、岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパックの腐食膨張の影響が大きく、内圧の影響により、処分孔壁面が広がる方向に変位していることが分かる。これは、Case2-2 (図 3-12) と同様の傾向である。ただし、変位量は、Case2-2 (図 3-12) と比較して大きい。これは、 n を小さくしたことにより、Case2-2 (図 3-12) より時間依存性が顕著な場合を想定していることで、緩み領域が広範囲に発生し (図 3-13 (a), 図 3-19 (a) 参照)、処分孔壁面が広がる方向に押し戻されやすいためと考えられる。また、Case3-1 (図 3-15) と同様の傾向である。ただし、緩衝材のヤング率が異なるにもかかわらず、変位量は、Case3-1 (図 3-15) と比較してほぼ等しいことが分かる。これは、a) 緩衝材のヤング率が小さく、緩み領域が広範囲に発生した (図 3-16 (a), 図 3-19 (a) 参照) Case3-1 (図 3-15) の方が、処分孔壁面が広がる方向に押し戻されやすい影響 および b) 緩衝材のヤング率の大きい本ケースの方が内圧の影響が大きく、処分孔壁面が広がる方向に押し戻されやすい影響 の二つの影響が相殺したためと考えられる。なお、処分孔壁面が広がる方向に変位する場合、処分孔壁面近傍の引張破壊が懸念されるが、図 3-19 および 図 3-20 より、周方向応力は引張応力にはなっていないことが確認できる。

② 緩み領域の発生時期と大きさ および 広がり

- ・ 図 3-19 (a) より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、オーバーパックの腐食膨張の影響に比べて岩盤のクリープ変形の影響が大きく、100 年後に変曲点が現れ、緩み領域 ($d=0.3\text{m}$) が発生していることが分かる。これは、Case2-2 (図 3-13 (a)) と異なる傾向で

ある。これは、 n を小さくしたことにより、Case2-2 (図 3-13 (a)) より時間依存性が顕著な場合を想定していることで、処分孔壁面近傍に緩み領域が発生しやすいためと考えられる。また、Case3-1 (図 3-16 (a)) と同様の傾向である。ただし、緩み領域幅の大きさは、Case3-1 (図 3-16 (a)) と比較して小さい。これは、緩衝材のヤング率がCase3-1 (図 3-16 (a)) より大きいことで、Case3-1 (図 3-16 (a)) より岩盤のクリープ変形の影響を受けにくく、処分孔壁面近傍に緩み領域が発生しにくいと考えられる。

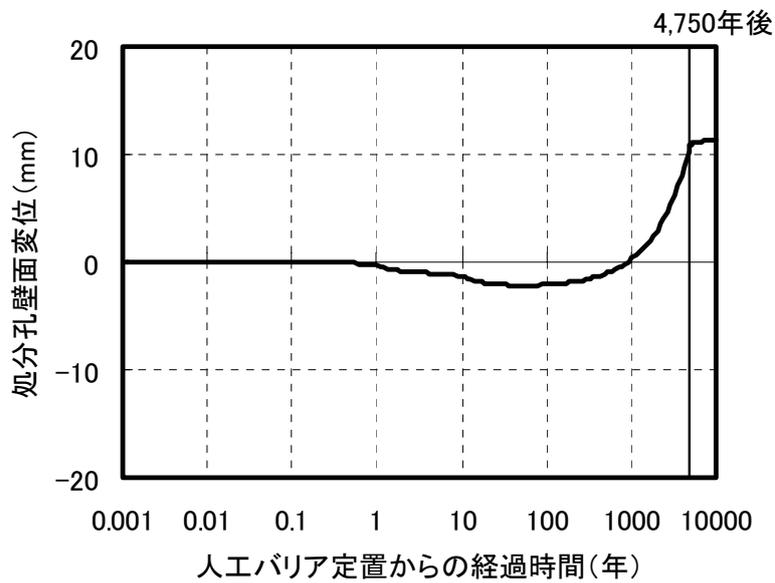
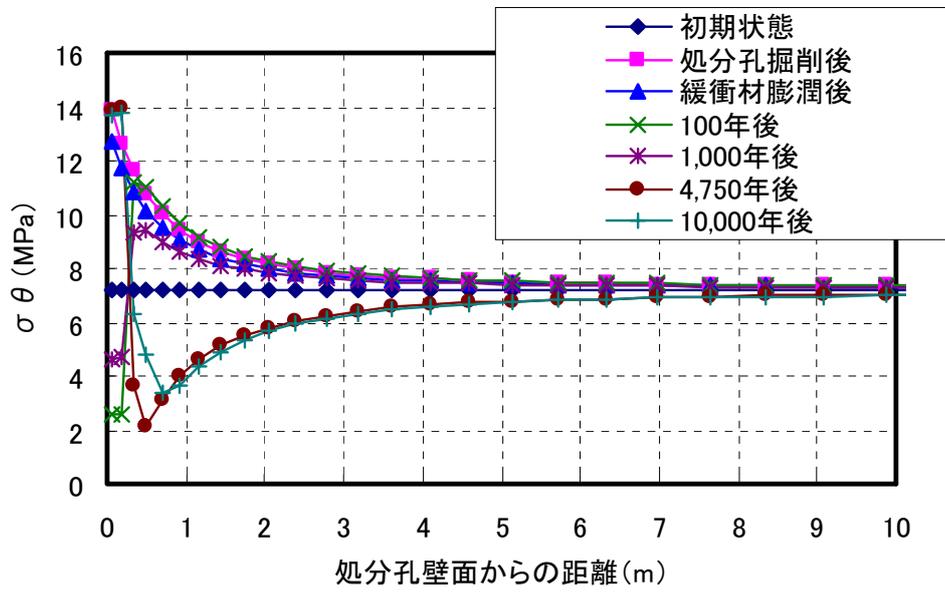
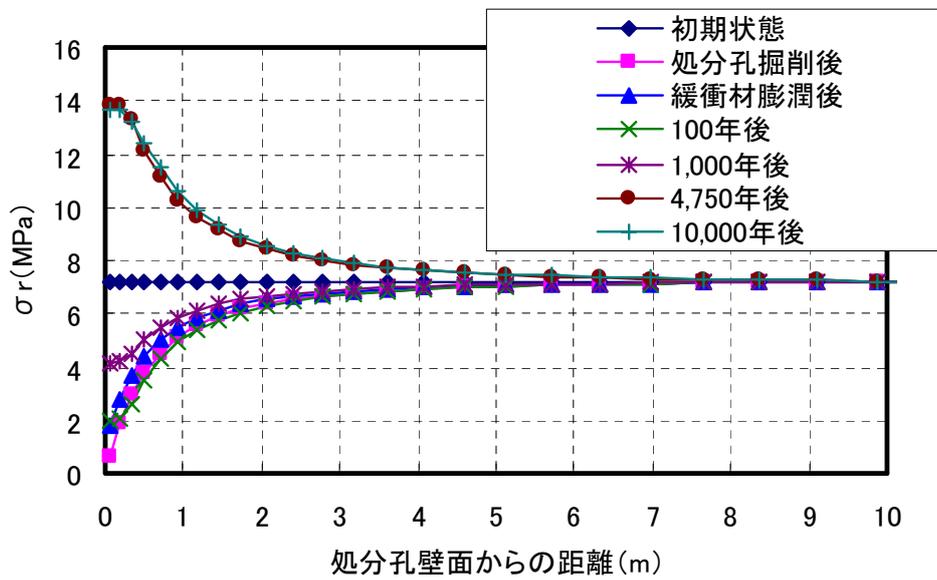


図 3-18 処分孔壁面変位の経時変化図

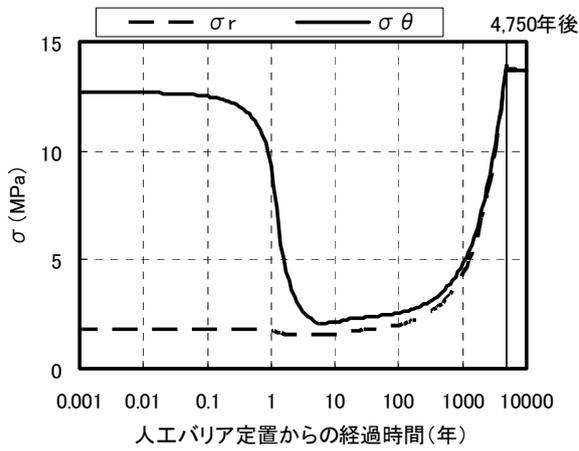


(a) 周方向応力

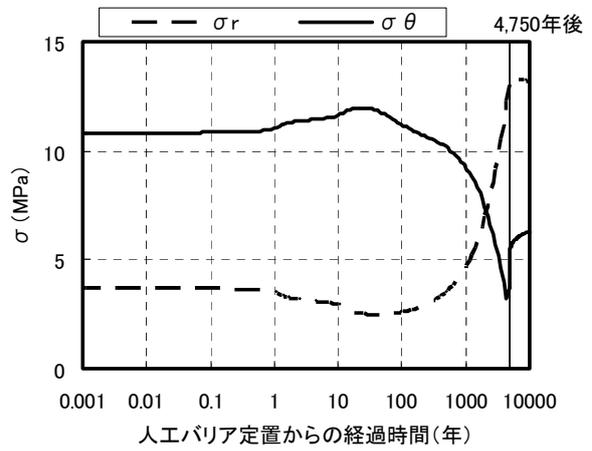


(b) 半径方向応力

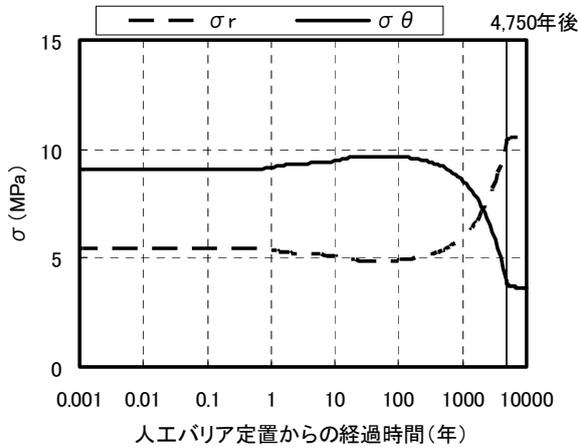
図 3-19 岩盤の応力分布図



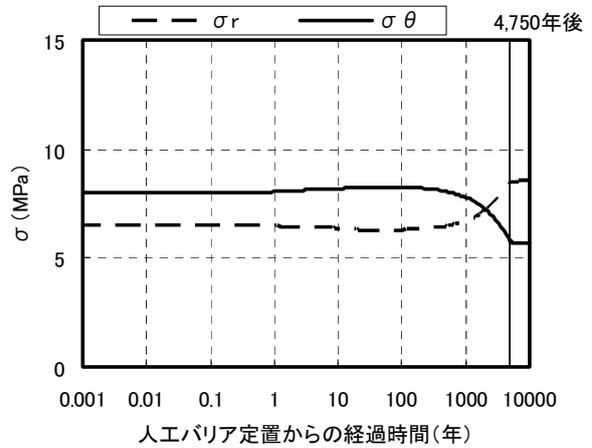
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-20 岩盤着目要素の応力の経時変化図

3. 2. 4 mを変えた場合 (Case4)

(1) 緩衝材仕様：乾燥密度 $1.60\text{Mg}/\text{m}^3$ 、ケイ砂混合率 30wt% (有効粘土密度 $1.37\text{Mg}/\text{m}^3$) の場合 (Case4-1)

処分孔壁面変位の経時変化図 (処分孔内空側への変位を負とする) を図 3-21 に、岩盤の応力分布図 (圧縮応力を正とする) を図 3-22 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図 (圧縮応力を正とする) を図 3-23 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置され、緩衝材の膨潤圧が発生した時点 (図 2-7 における step4) での変位を 0 として結果を示した。

以下、Case2-1 と比較した考察を述べる。

① 処分孔壁面の変位

- ・ 図 3-21 より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、オーバーパックの腐食膨張の影響に比べて岩盤のクリープ変形の影響が大きく、処分孔壁面が内空側に変位していることが分かる。これは、Case2-1 (図 3-9) と同様の傾向である。ただし、変位量は、Case2-1 (図 3-9) と比較して大きい。これは、m を大きくしたことにより、Case2-1 (図 3-9) より破壊進行性が顕著な場合を想定していることで、処分孔壁面が内空側に変位しやすいためと考えられる。
- ・ 同じく図 2-28 より、100 年後程度～4,750 年後までは、岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパックの腐食膨張の影響が大きく、内圧の影響により、処分孔が広がる方向に変位していることが分かる。これは、Case2-1 (図 3-9) と同様の傾向である。ただし、変位量は、Case2-1 (図 3-9) と比較して大きい。これは、m を大きくしたことにより、Case2-1 (3-9) より破壊進行性が顕著な場合を想定していることで、緩み領域が広範囲に発生し (図 3-10(a)、図 3-22 (a) 参照)、処分孔壁面が広がる方向に押し戻されやすいためと考えられる。なお、処分孔壁面が広がる方向に変位する場合、処分孔壁面近傍の引張破壊が懸念されるが、図 3-22 および 図 3-23 より、周方向応力は引張応力にはなっていないことが確認できる。
- ・ 同じく図 3-21 より、オーバーパックの腐食膨張圧が一定になった 4,750 年後以降は、顕著な変化が生じていないことが分かる。これは、岩盤の応力が処分孔掘削後に比べて等方的な状態 (σ_{θ} と σ_r の差が小さい) であり (図 3-23 参照)、岩盤のクリープ変形の影響を受けにくいと考えられる。これは、Case2-1 (図 3-9) と同様の傾向である。

② 緩み領域の発生時期と大きさ および 広がり

- ・ 図 3-22 (a) より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、オーバーパックの腐食膨張の影響に比べて岩盤のクリープ変形の影響が大きく、100 年後に変曲点が現れ、緩み領域 ($d=0.7\text{m}$) が発生していることが分かる。これは、Case2-1 (図 3-10 (a)) と同様の傾向である。ただし、緩み領域幅は、Case2-1 (図 3-10 (a)) と比較して大きい。これは、m を大きくしたことにより、Case2-1 (図 3-10 (a)) より破壊進行性が顕著な場合を想定していることで、処分孔壁面近傍に緩み領域が発生しやすいためと考えられる。

- 同じく図 3-22 (a) より, 100 年後以降は, 岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパッキングの腐食膨張の影響が大きく, 内圧の影響により, 変曲点が右側に移動しておらず, 緩み領域幅が広がっていないことが分かる。これは, Case2-1 (図 3-10 (a)) と同様の傾向である。

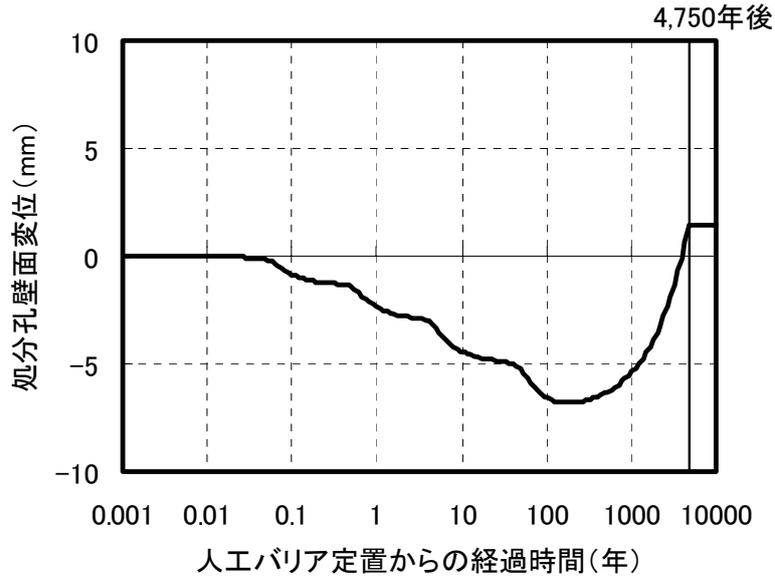
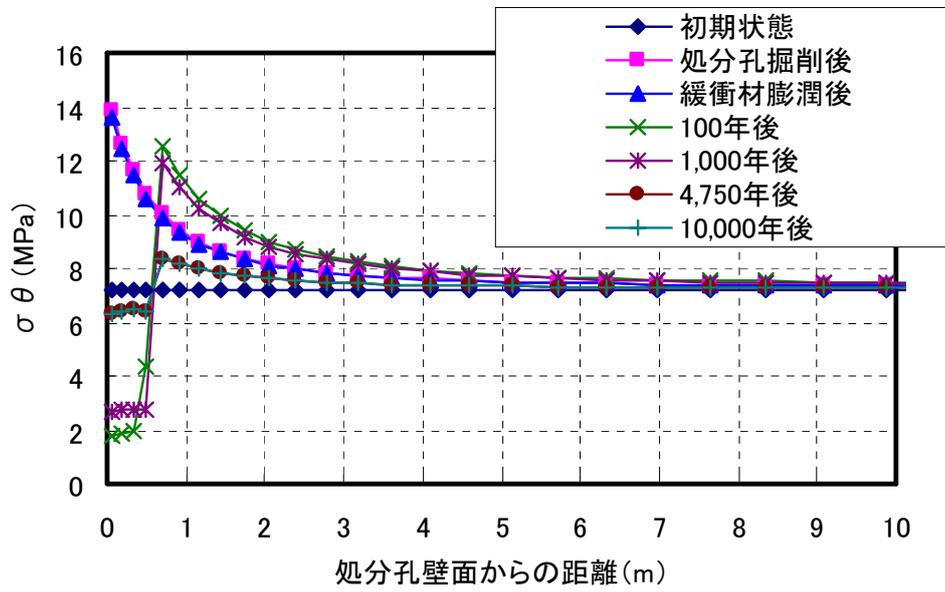
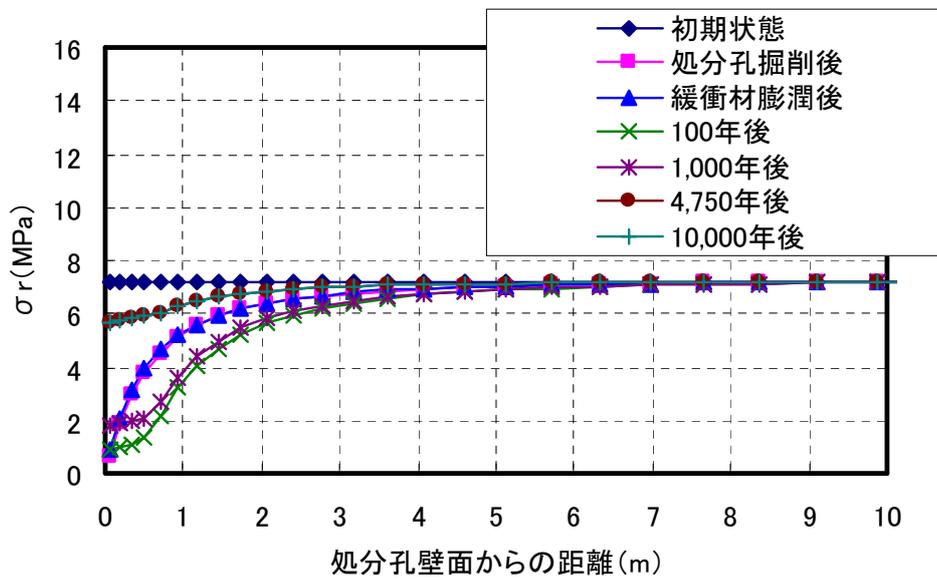


図 3-21 処分孔壁面変位の経時変化図

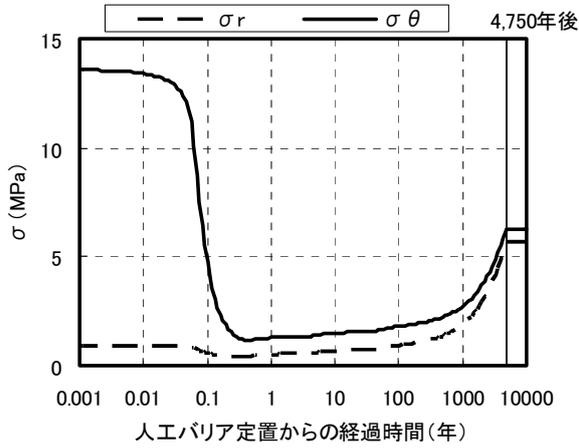


(a) 周方向応力

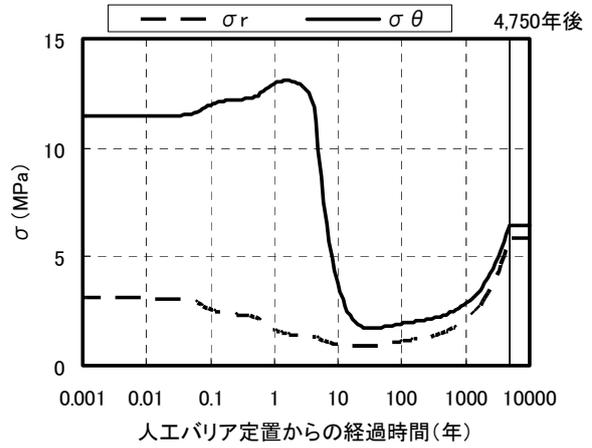


(b) 半径方向応力

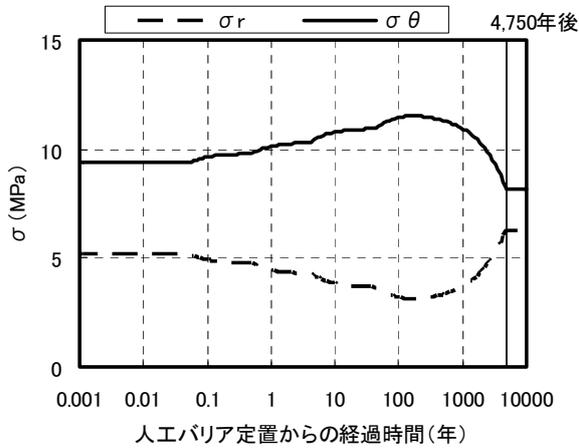
図 3-22 岩盤の応力分布図



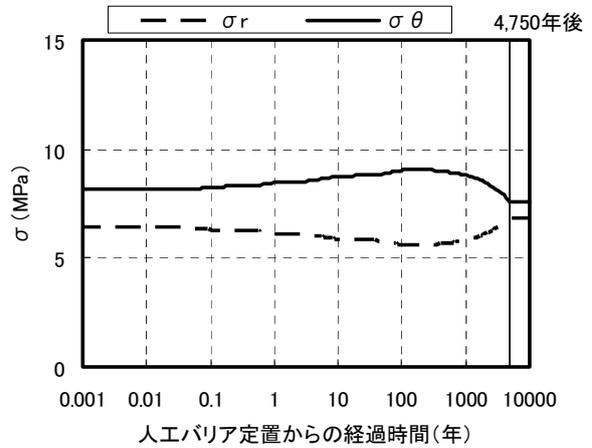
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-23 岩盤着目要素の応力の経時変化図

(2) 緩衝材仕様：乾燥密度 1.80Mg/m³，ケイ砂混合率 30wt%（有効粘土密度 1.58Mg/m³）の場合（Case4-2）

処分孔壁面変位の経時変化図（処分孔内空側への変位を負とする）を図 3-24 に、岩盤の応力分布図（圧縮応力を正とする）を図 3-25 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図（圧縮応力を正とする）を図 3-26 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置され、緩衝材の膨潤圧が発生した時点（図 2-7 における step4）での変位を 0 として結果を示した。

以下、Case2-2 と比較した考察を述べる。

図 3-24～図 3-26 より、Case2-2（図 3-12～図 3-14）と解析結果に大きな差異が見られないことが分かる。これは、両者とも人工バリアの定置後、オーバーパックの腐食膨張の影響が大きくなり始める 100 年後程度までの間に、岩盤のクリープ変形が生じないためと考えられる。m は破壊後の挙動を表すパラメータであることから、岩盤のクリープ変形による破壊が生じないこれらのケースでは、m の大小は解析結果に影響をおよぼさないとと言える。

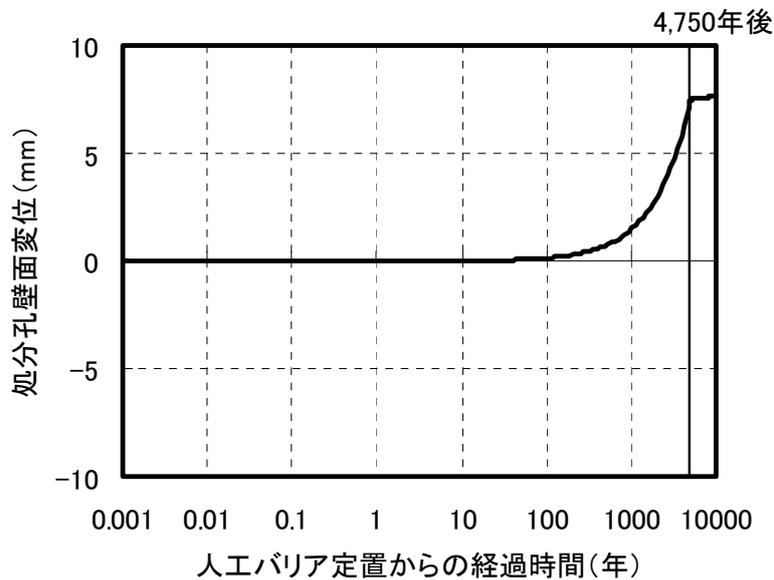
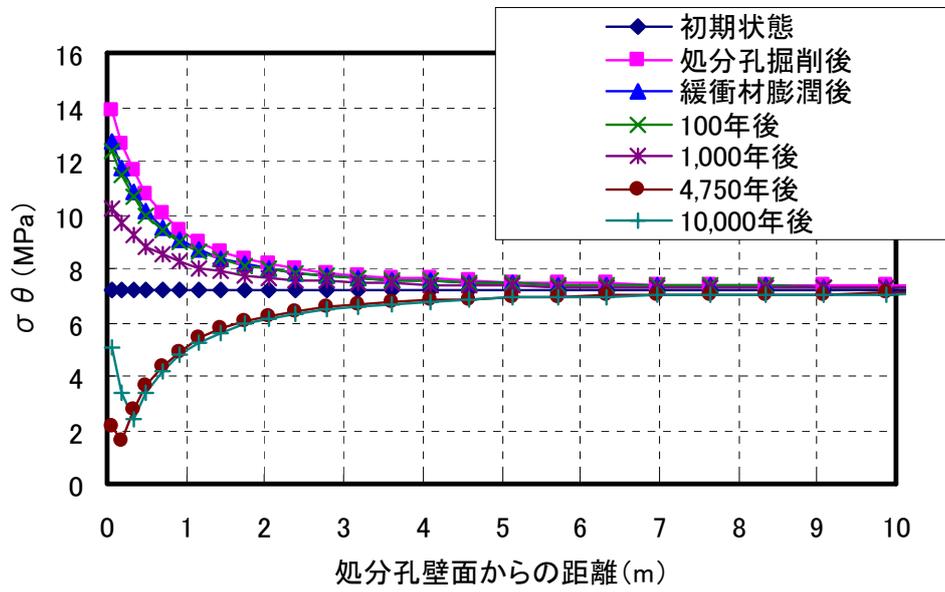
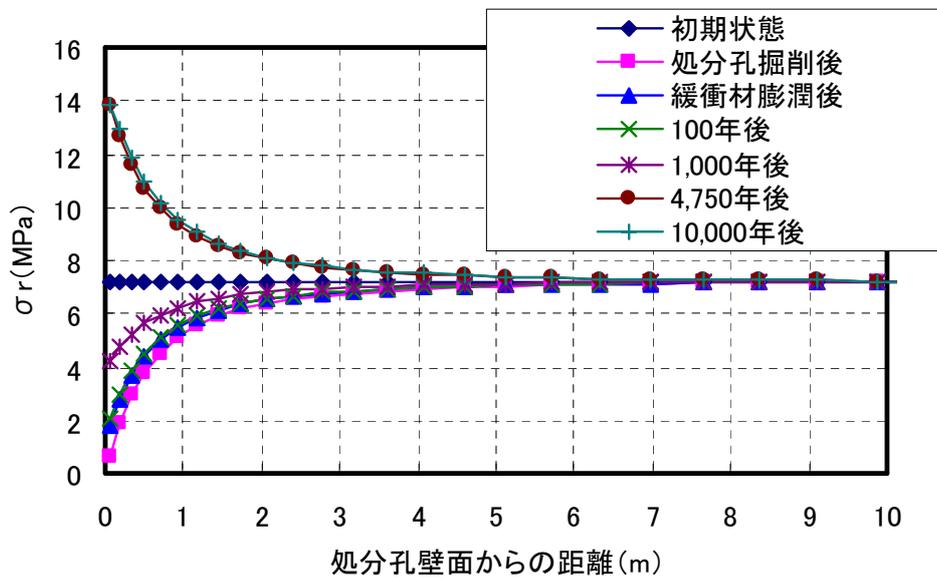


図 3-24 処分孔壁面変位の経時変化図

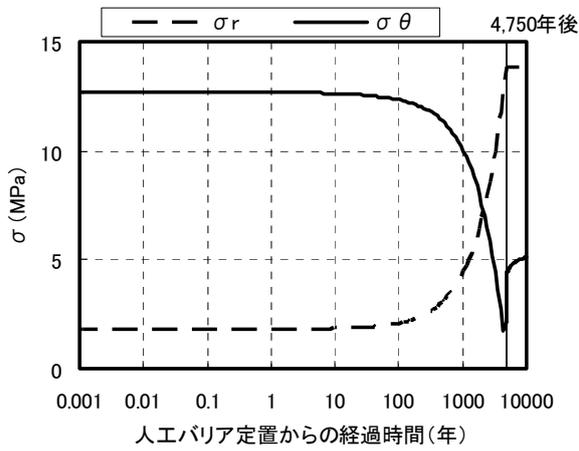


(a) 周方向応力

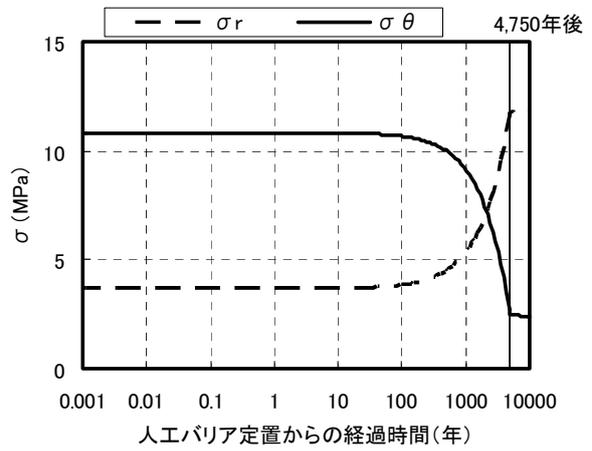


(b) 半径方向応力

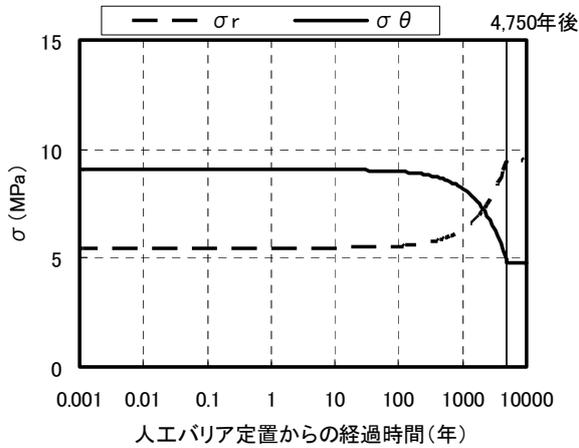
図 3-25 岩盤の応力分布図



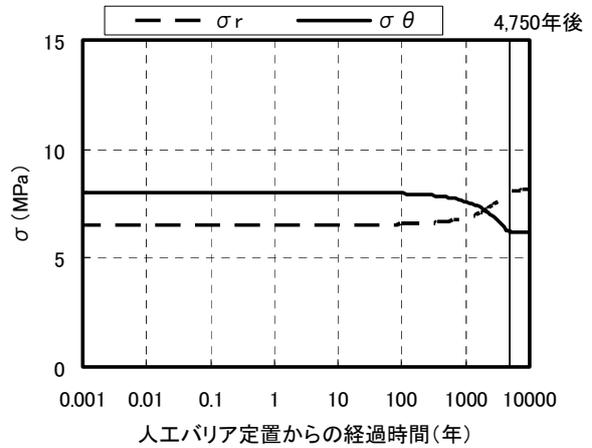
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-26 岩盤着目要素の応力の経時変化図

3. 2. 5 岩盤の初期応力を変えた場合 (Case5)

(1) 緩衝材仕様：乾燥密度 1.60Mg/m^3 、ケイ砂混合率 30wt% (有効粘土密度 1.37Mg/m^3) の場合 (Case5-1)

処分孔壁面変位の経時変化図 (処分孔内空側への変位を負とする) を図 3-27 に、岩盤の応力分布図 (圧縮応力を正とする) を図 3-28 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図 (圧縮応力を正とする) を図 3-29 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置され、緩衝材の膨潤圧が発生した時点 (図 2-7 における step4) での変位を 0 として結果を示した。

以下、Case2-1 と比較した考察を述べる。

① 処分孔壁面の変位

- 図 3-27 より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、処分孔壁面が変位していないことが分かる。これは、Case2-1 (図 3-9) と異なる傾向である。これは、岩盤の初期応力を 0.5 倍にしたにもかかわらず、岩盤の強度を同じとしていることで、地山強度比 (=一軸圧縮強度/初期応力) が 2 倍になり、処分孔壁面が変位しにくいためと考えられる。
- 同じく図 3-27 より、100 年後程度～4,750 年後までは、岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパックの腐食膨張の影響が大きく、内圧の影響により、処分孔壁面が広がる方向に変位していることが分かる。これは、Case2-1 (図 3-9) と同様の傾向である。ただし、岩盤の初期応力が異なるにもかかわらず、変位量は、Case2-1 (図 3-9) と比較してほぼ等しいことが分かる。これは、a) 岩盤の初期応力を 0.5 倍にしたにもかかわらず、岩盤の強度を同じとしていることで、地山強度比 (=一軸圧縮強度/初期応力) が 2 倍になり、処分孔壁面が変位しにくい影響 および b) 岩盤の初期応力が小さい本ケースの方が内圧の影響が顕著で、処分孔壁面が広がる方向に押し戻されやすい影響 の二つの影響が相殺したためと考えられる。なお、処分孔壁面が広がる方向に変位する場合、処分孔壁面近傍の引張破壊が懸念されるが、図 3-28 および 図 3-29 より、周方向応力は引張応力にはなっていないことが確認できる。
- 同じく図 3-27 より、オーバーパックの腐食膨張圧が一定になった 4,750 年後以降は、顕著な変化が生じていないことが分かる。これは、岩盤の応力が処分孔掘削後に比べて等方的な状態 (σ_θ と σ_r の差が小さい) であり (図 3-29 参照)、岩盤のクリープ変形の影響を受けにくいためと考えられる。これは、Case2-1 (図 3-9) と同様の傾向である。

② 緩み領域の発生時期と大きさ および 広がり

- 図 3-28 (a) より、人工バリアの定置から 100 年後に変曲点が現れず、緩み領域が発生していないことが分かる。これは、Case2-1 (図 3-10 (a)) と異なる傾向である。これは、岩盤の初期応力を 0.5 倍にしたにもかかわらず、岩盤の強度を同じとしていることで、地山強度比 (=一軸圧縮強度/初期応力) が 2 倍になり、処分孔壁面近傍に緩み領域が発生しにくい

ためと考えられる。

以上より、岩盤の初期応力を小さくする（=外圧を小さくする）ことにより、ニアフィールド岩盤の長期安定性が増したと言える。本ケースは、全ケースを通じて最も安定性の高いケースである。

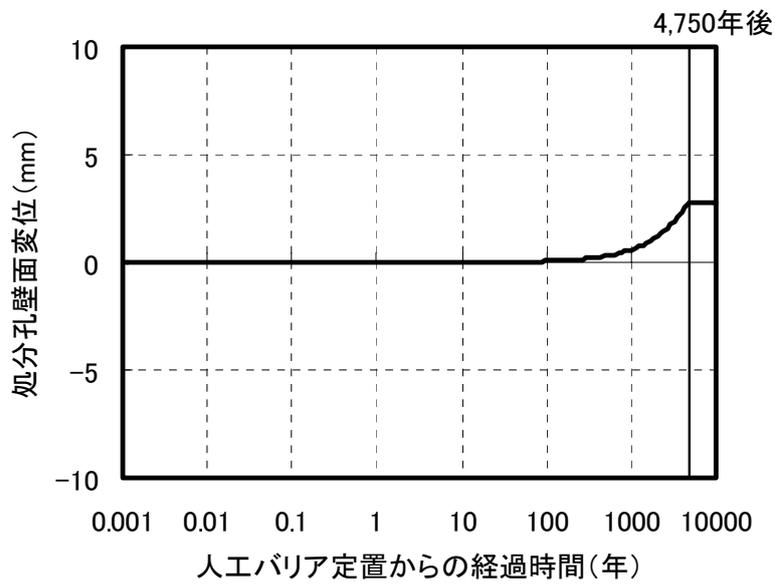
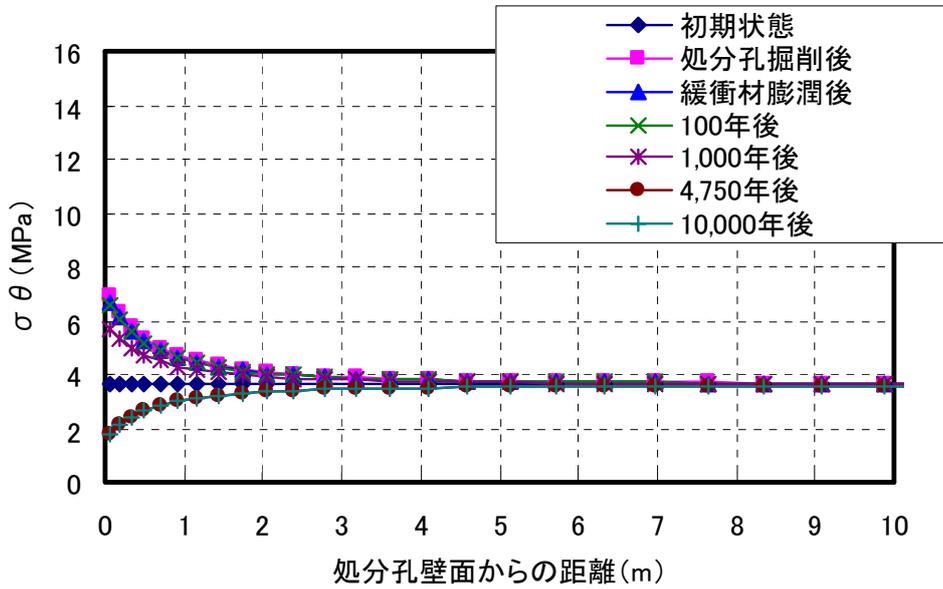
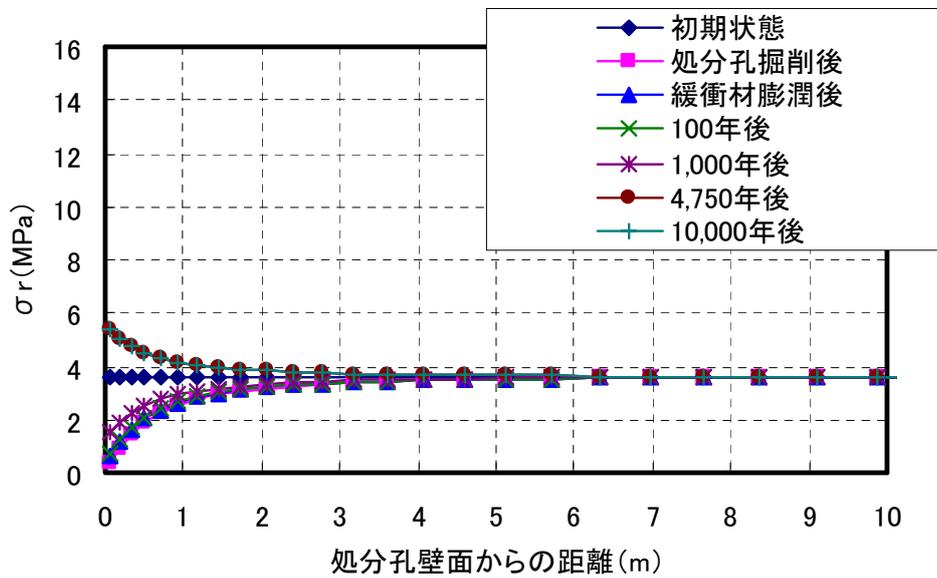


図 3-27 処分孔壁面変位の経時変化図

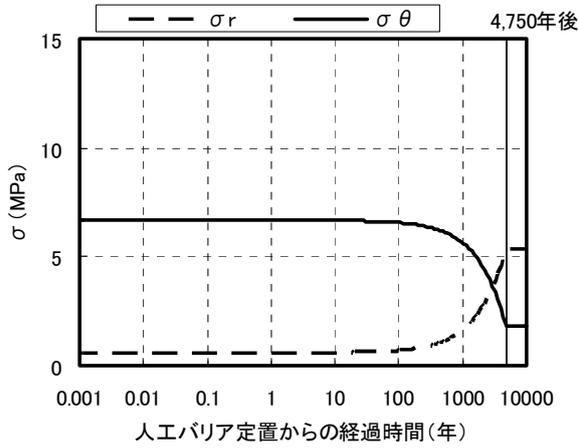


(a) 周方向応力

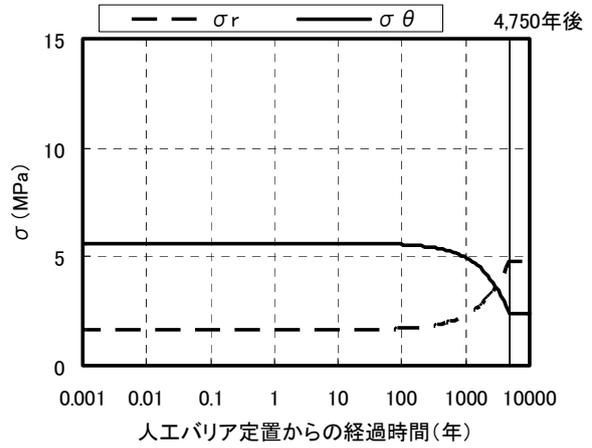


(b) 半径方向応力

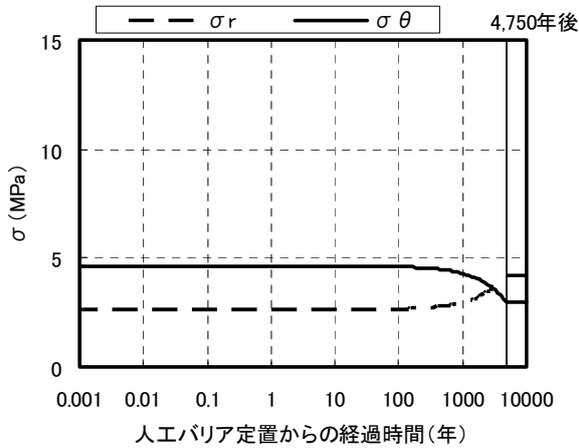
図 3-28 岩盤の応力分布図



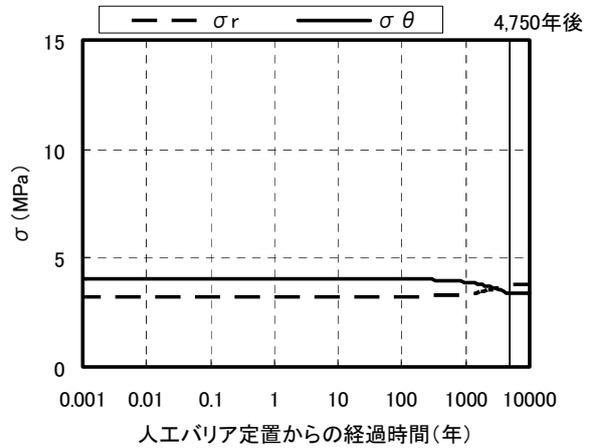
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-29 岩盤着目要素の応力の経時変化図

(2) 緩衝材仕様：乾燥密度 $1.80\text{Mg}/\text{m}^3$ 、ケイ砂混合率 30wt% (有効粘土密度 $1.58\text{Mg}/\text{m}^3$) の場合 (Case5-2)

処分孔壁面変位の経時変化図 (処分孔内空側への変位を負とする) を図 3-30 に、岩盤の応力分布図 (圧縮応力を正とする) を図 3-31 に、岩盤着目要素の応力の経時変化図 (圧縮応力を正とする) を図 3-32 に示す。ここで、処分孔壁面変位については、人工バリアが定置され、緩衝材の膨潤圧が発生した時点 (図 2-7 における step4) での変位を 0 として結果を示した。

以下、Case2-2 および Case5-1 と比較した考察を述べる。

① 処分孔壁面の変位

- ・ 図 3-30 より、人工バリアの定置から 100 年後程度までは、処分孔壁面が変位していないことが分かる。これは、Case2-2 (図 3-12) や Case5-1 (図 3-27) と同様の傾向である。
- ・ 同じく図 3-30 より、100 年後程度～4,750 年後までは、岩盤のクリープ変形の影響に比べてオーバーパックの腐食膨張の影響が大きく、内圧の影響により、処分孔壁面が広がる方向に変位していることが分かる。これは、Case2-2 (図 3-12) や Case5-1 (図 3-27) と同様の傾向である。ただし、ここで注意が必要であるが、処分孔壁面が広がる方向に変位する場合、処分孔壁面近傍の引張破壊が懸念されるが、図 3-31 および 図 3-32 より、周方向応力は引張応力が発生している。

以上より、緩衝材の膨潤圧やオーバーパックの腐食膨張による内圧が大きく、対して岩盤の初期応力が小さい (=外圧が小さい) 場合には、処分孔壁面近傍に引張破壊による緩み領域が発生する可能性が示された。Case5-1 では、岩盤の初期応力を小さくする (=外圧を小さくする) ことによって、最も長期安定性の高いケースとなったが、内圧の大きさによっては、岩盤の初期応力を小さくする (=外圧を小さくする) ことが必ずしも安定性の高いケースになるとは限らないことが示された。

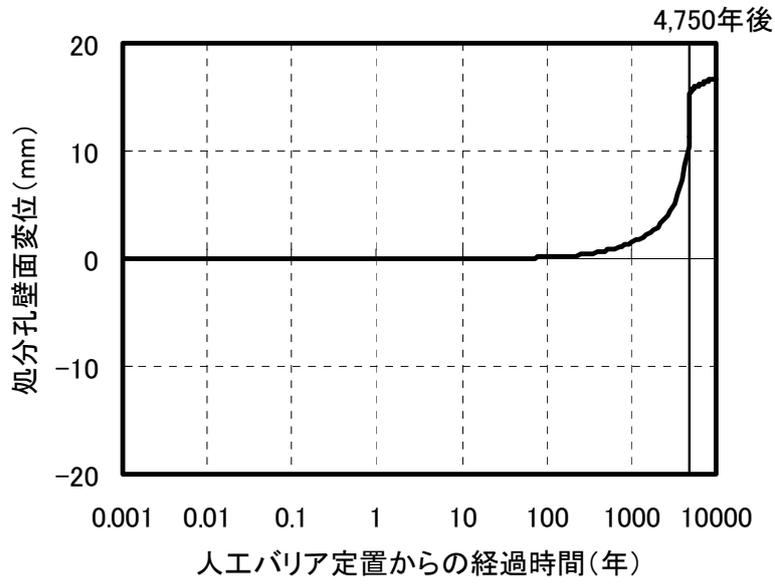
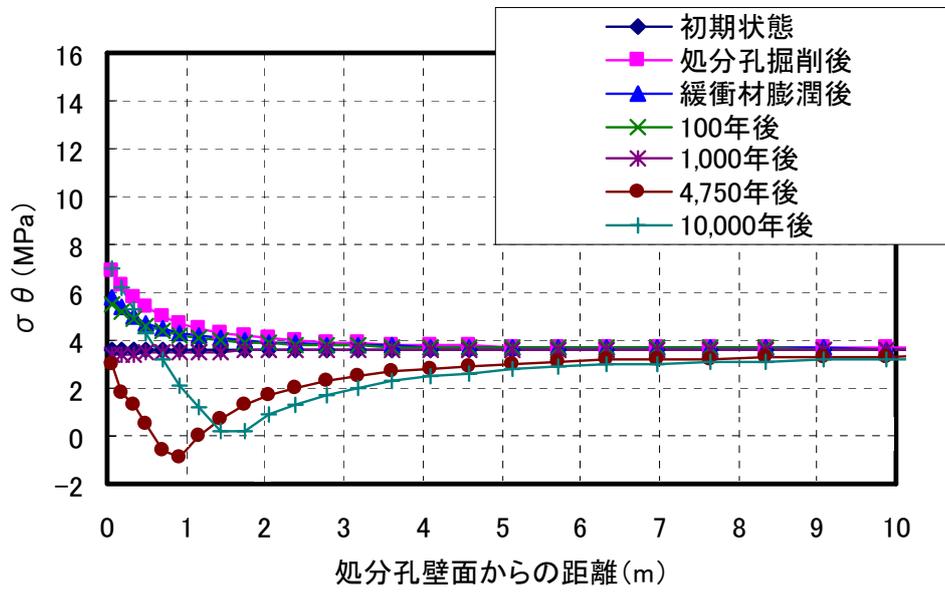
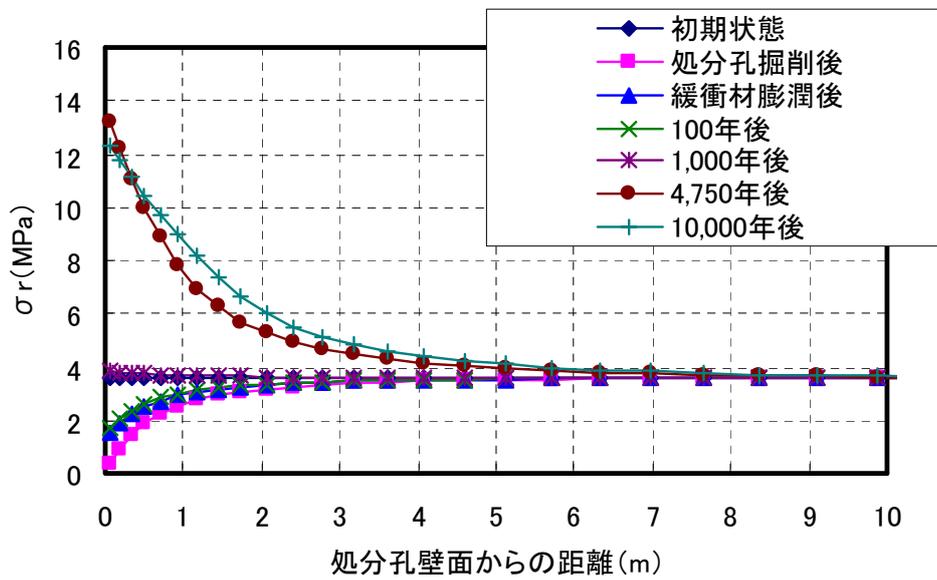


図 3-30 処分孔壁面変位の経時変化図

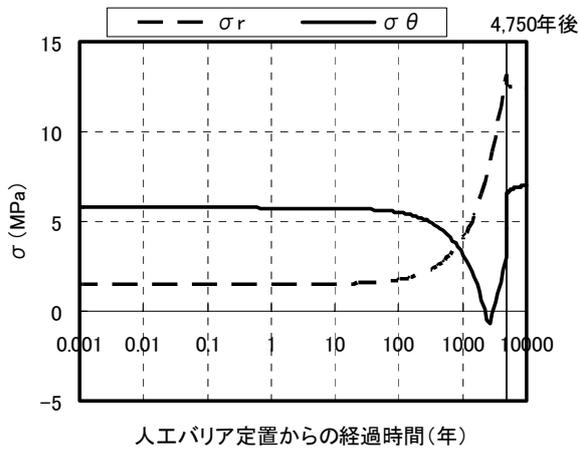


(a) 周方向応力

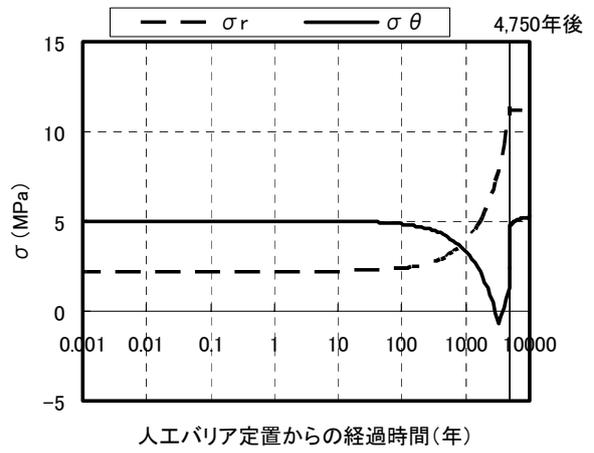


(b) 半径方向応力

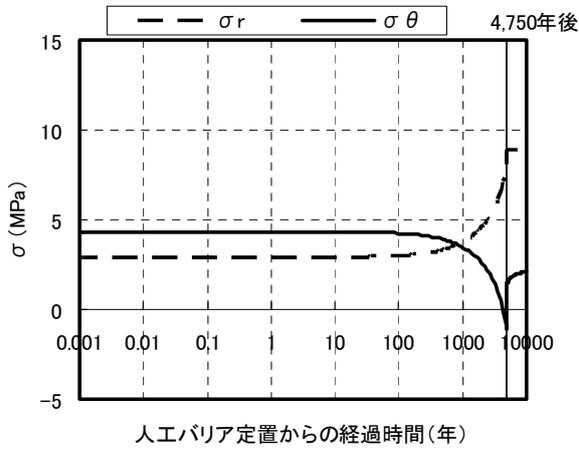
図 3-31 岩盤の応力分布図



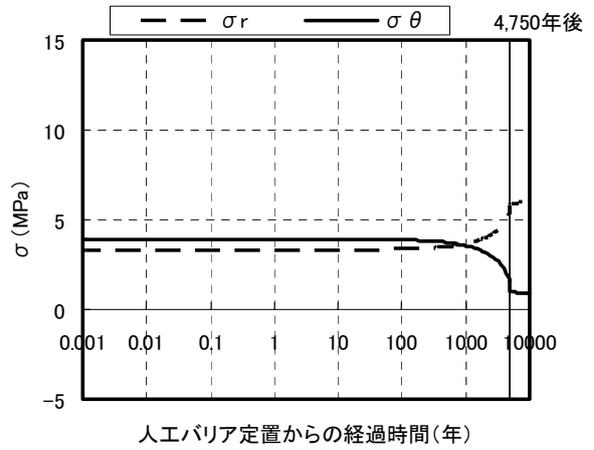
(a) 壁面から 0.06m



(b) 壁面から 0.33m



(c) 壁面から 0.92m



(d) 壁面から 2.05m

図 3-32 岩盤着目要素の応力の経時変化図

4. まとめと考察

4. 1 まとめ

解析結果一覧（10,000年後の結果）を表4-1に示す。

表 4-1 解析結果一覧

解析 ケース	岩盤条件			緩衝材条件		オーバー パックの 腐食膨張 圧の有無	10,000年後の結果	
	n0 [-]	m [-]	初期応力 [MPa]	緩衝材の 仕様	膨潤圧の 有無		処分孔壁面 変位*1 [mm]	緩み領域*2 [m]
Case1-1	30	20	7.21	CaseA	なし	なし	-7.7	0.9 (せん断)
Case1-2	30	20	7.21	CaseB	なし	なし	-3.6	0.7 (せん断)
Case2-1	30	20	7.21	CaseA	あり	あり	2.4	0.3 (せん断)
Case2-2	30	20	7.21	CaseB	あり	あり	7.5	0.3 (せん断)
Case3-1	20	20	7.21	CaseA	あり	あり	-0.2	1.7 (せん断)
Case3-2	20	20	7.21	CaseB	あり	あり	11.4	0.9 (せん断)
Case4-1	30	30	7.21	CaseA	あり	あり	1.4	0.7 (せん断)
Case4-2	30	30	7.21	CaseB	あり	あり	7.6	0.3 (せん断)
Case5-1	30	20	3.605	CaseA	あり	あり	2.8	0.0 (発生しない)
Case5-2	30	20	3.605	CaseB	あり	あり	16.8	1.7 (引張)

※1 緩衝材の膨潤圧発生後の変位を 0 とし、内空側への変位をマイナスとした。

※2 緩み領域とは、ヤング率が初期値より低下した領域を示す。括弧内は、緩み領域の発生モードを表す。

以下、本研究で得られた知見を示す。

① 緩衝材の仕様の影響

緩衝材の乾燥密度は、緩衝材のヤング率、膨潤圧の双方に影響を与え、乾燥密度が大きいほど両者の値は大きくなる。この影響により、解析では以下のような結果が得られた。

- ・ 緩衝材の膨潤圧とオーバーパックスの腐食膨張圧を考慮しない場合には、緩衝材の乾燥密度が大きいほど、処分孔壁面の変位量や緩み領域が小さくなる。
- ・ 緩衝材の膨潤圧とオーバーパックスの腐食膨張圧を考慮した場合には、緩衝材の乾燥密度が大きいほど、処分孔壁面の内空側への変位量は小さく、処分孔壁面が広がる方向への変位量は大きい。

② 緩衝材の膨潤圧とオーバーパックスの腐食膨張圧の影響

オーバーパックスの腐食膨張圧は、緩衝材の膨潤圧、岩盤のクリープ、地圧の影響を考慮せず、解析上は一義的な強制変位として与えた。その結果、解析では以下のような結果が得られた。

- ・ 岩盤のパラメータや緩衝材の有効粘土密度が同じ条件で比較すると、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックスの腐食膨張圧を考慮しない場合には、処分孔は内空側へ変位する。一方、これらを考慮した場合には、処分孔壁面は一旦内空側へ変位するが、オーバーパックスの腐食膨張に伴い、処分孔壁面が広がる方向に変位する。
- ・ 岩盤のパラメータや緩衝材の仕様が同じ条件で比較すると、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックスの腐食膨張を考慮しない場合には、緩み領域が大きくなる。

③ 岩盤の時間依存性の程度を表すパラメータ n_0 の影響

n_0 は、コンプライアンス可変型構成方程式における岩盤の時間依存性の程度を表すパラメータであり、この値が小さいほど、時間依存性が顕著になる。その結果、解析では以下のような結果が得られた。

- ・ n_0 が小さいほど、処分孔壁面の変位量や緩み領域が大きくなる。
- ・ 緩衝材の乾燥密度が小さいほど、 n_0 の影響が顕著になる。

④ 岩盤の破壊進行性の程度を表すパラメータ m の影響

m は、コンプライアンス可変型構成方程式における岩盤の破壊進行性の程度を表すパラメータであり、この値が大きいほど、破壊進行性が顕著になる。その結果、解析では以下のような結果が得られた。

- ・ 緩衝材の乾燥密度が小さな場合には、 m の影響が顕著になり、 m が大きいほど、処分孔壁面の変位量や緩み領域が大きくなる。
- ・ 緩衝材の乾燥密度が大きな場合には、 m の影響はほとんどない。

⑤ 岩盤の初期応力の影響

- ・ 緩衝材の乾燥密度が小さな場合には、岩盤の初期応力が小さいほど、処分孔壁面の変位量や緩み領域が小さく、ニアフィールド岩盤の長期安定性が高い。
- ・ 緩衝材の乾燥密度が大きな場合には、岩盤の初期応力が小さいほど、処分孔壁面近傍に引張破壊による緩み領域が発生する。

本研究で得られた知見のうち、特に強調すべき点は、以下の2点である。

- ・ 第2次取りまとめ⁴⁾や平成17年取りまとめ¹⁾におけるニアフィールド岩盤の長期安定性解析においては、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧が考慮されていなかった。本研究では、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧を考慮し解析を行った結果、従来の評価手法に比べ、処分孔壁面の変位量や緩み領域が小さくなり、ニアフィールド岩盤の長期安定性が向上する結果が得られた。よって、従来の評価手法が保守側の結果を与えることが示された。
- ・ ただし、例外として、緩衝材の剛性が高く、岩盤の初期応力が小さなケース（Case5-2）では、処分孔壁面近傍に引張破壊による緩み領域が発生する可能性が示された。緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧を考慮しない従来の評価手法においては、緩衝材の剛性が高く、岩盤の初期応力が小さいほど、ニアフィールド岩盤の長期安定性が高くなる傾向にあったが、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧を考慮した場合には、従来の評価手法が必ずしも保守側の結果を与えるとは限らないことが示された。

4. 2 考察

Case5-2 では、処分孔の壁面近傍で引張破壊による緩み領域が発生する結果であったが、それ以外のケースでは、せん断破壊による緩み領域が発生する結果であった。ここでは、これらの破壊形状に関する実験結果を紹介する。

井上・南¹⁴⁾ は、人工試験体（粘土、シルト、セメントの混合体で寸法は 1.0m×1.0m×0.5m、材令 30 日における一軸圧縮強度が約 0.5MPa）を用いて、地山強度比が 0.5（初期地圧 1.0MPa）の条件下にて掘削実験を行った。その結果、せん断破壊によって、孔壁面にうろこ状の破壊面が観察された（図 4-1）。

また、同様の人工供試体（材令 60 日における一軸圧縮強度が約 0.8MPa）を用いて、地山強度比が 1.0（初期地圧 0.8MPa）の条件下にて掘削実験を行った。その際、井上・南¹⁴⁾ の実験とは異なり、孔の掘削後に乾燥密度 1.6Mg/m³ の圧縮ベントナイトを挿入し、孔近傍に設置した注水孔から水を供給しながら、5 ヶ月間外圧を保持して実験を行った。その結果、孔壁面近傍には、ベントナイトの膨潤圧に起因すると考えられる放射状の引張破壊面が観察された（図 4-2）。その際、孔近傍のベントナイトが侵入し、人工供試体の亀裂内で再び固化していた。

限られた実験結果ではあるものの、解析結果と同様に、岩盤に作用する内圧が初期応力に比べて相対的に大きく、壁面近傍に引張破壊が発生するような場合には、緩衝材が亀裂へ侵入することが考えられる。侵入の程度が大きな場合には、人工バリアの機能低下につながることも考えられる。一方、適度な内圧が岩盤に作用する場合には、掘削に伴い一旦緩み領域となった岩盤の強度が回復し、長期安定性が増していく可能性があることが室内実験結果より明らかとなっている²⁾。

このように、どの程度の内圧が作用すれば、引張破壊による緩み領域が発生し、ニアフィールド岩盤の長期安定性が低下するか、また、どの程度の内圧が作用すれば、ニアフィールド岩盤に発生した緩み領域の強度回復が起り、ニアフィールド岩盤の長期安定性が増すかについては、基礎データが必ずしも十分とは言えない現状では正確に予測することは困難であり、室内試験や原位置試験を通じ 今後も検討を継続し、最終的には、評価モデル および 評価手法の高度化に反映する必要があると考える。



図 4-1 せん断破壊によるうろこ状の破壊形状¹⁴⁾



図 4-2 引張破壊による放射状の破壊形状

5. おわりに

本研究では、ニアフィールド岩盤の長期力学挙動予測評価手法の信頼性向上に関する検討として、緩衝材の膨潤圧とオーバーパックの腐食膨張圧がニアフィールド岩盤の長期安定性に与える影響について検討した。緩衝材の膨潤挙動を温度荷重で、オーバーパックの腐食膨張挙動を強制変位でモデル化し、ニアフィールド岩盤の長期力学挙動の予測解析を行った。

その結果、緩衝材の膨張圧やオーバーパックの腐食膨張圧が内圧としてニアフィールド岩盤に作用することで、ニアフィールド岩盤の長期安定性が向上し、緩衝材の膨潤圧やオーバーパックの腐食膨張圧を考慮していない従来の評価手法が保守側の結果を与えることを示した。

ただし、例外として、緩衝材の剛性が高く、岩盤の初期応力が小さな場合においては、処分孔壁面近傍に引張破壊による緩み領域が発生する可能性が示された。そのような場合、緩衝材が岩盤中に発生した亀裂に侵入することから、人工バリアの性能をより詳しく評価することが求められる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築，—平成17年取りまとめ—，分冊2，工学技術の開発”，JNC TN1400 2005-015，(2005)
- 2) 大久保誠介：“ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法に関する研究(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”，JNC TJ8400 2004-018，(2005)
- 3) 吉野尚人，宮野前俊一，井上博之，梨本裕：“軟岩の長期安定性に関する検討(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)”，JNC TJ8400 2005-004，(2005)
- 4) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022，(1999)
- 5) 大久保誠介，西松裕一，緒方義弘：“非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション”，日本鉱業会誌，Vol.103，pp.293-296，(1987)
- 6) Schofield,A.N. and Wroth,C.P. : Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, London, (1968)
- 7) Roscoe,K.H. and Burland,J.B. : On the Generalized Stress-Strain behavior of ‘Wet’ Clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp.535-609, (1968)
- 8) Sekiguchi,H. and Ohta,H. : Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays, Constitutive Equations of Soils, Proc. Specialty Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo, pp.306-315, (1977)
- 9) Adachi,T. and Oka,F. : Constitutive Equations for Normally Consolidated Clay Based on Elasto-viscoplasticity, Soil and Foundation, Vol.22, No.4, pp.55-70, (1982)
- 10) 大久保誠介：“ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”，JNC TJ8400 2003-081，(2004)
- 11) 宮野前俊一，野本康介，森田篤，松井幹雄，梨本裕，大久保誠介：“岩盤の時間依存性挙動と施工過程を考慮した掘削解析手法の提案”，土木学会論文集，No.791/VI-67，pp.97-109，(2005)
- 12) 菊池広人，棚井憲治：“幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2004-005，(2005)
- 13) 大久保誠介：“ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”，JNC TJ8400 2003-081，(2004)
- 14) 井上博之，南浩輔：“軟岩の長期力学的変形挙動研究(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”，JNC TJ8400 2002-061，(2003)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	1m/m ²	m ² ・m ⁻³ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	''	1''=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

