

拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化 の事例解析

(業務報告)

2005年6月

核燃料サイクル開発機構

東海事業所

本資料の全部または一部を複製・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122 (代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化の事例解析
(研究報告)

松本 一浩**, 棚井 憲治*, 菅野 毅***, 岩田 裕美子***

要旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、緩衝材の物理的安定性に影響を及ぼす事象として、緩衝材の流出／侵入挙動が考えられる。

本報では、侵入現象のモデル化で用いている緩衝材の物性データに関する検討ならびに見直しを行い、モデルの評価精度の向上を図った。また、緩衝材の侵入現象に伴う長期的な密度変化に関して事例解析を実施し、侵入現象モデルの今後の課題を明確化した。

1) ベントナイトの粘度の測定

ベントナイトの粘度は、非ニュートン流動の傾向を示し、既存の推定評価値と比較を行った結果、ベントナイトの含水比 400～1000[%]では既存の評価値よりもやや大きく評価された。これらの結果を踏まえ、本検討において粘度の評価値を見直した。

2) 実験結果のシミュレーション解析

拡散モデルに基づく実験結果のシミュレーション解析を行い、モデルの妥当性の確認を行った。その結果、モデルによる評価は、実験結果よりもやや拡散速度が大きく評価されたものの、実験結果を良く再現した。

3) 長期的な緩衝材密度変化に関する事例解析

長期的な緩衝材の密度変化に関して、拡散モデルに基づく事例解析を実施し、第2次取りまとめ時の評価との比較を行った。その結果、本解析では、第2次取りまとめ時での評価と比較し、早い時期に緩衝材の密度が低下する結果となった。また、侵入現象の実験式に基づき、海水系条件について長期的な緩衝材密度変化を試算した結果、海水系条件では本事象がさほど問題とならないことが示唆された。

* 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

** 検査開発株式会社

*** 石川島播磨重工業株式会社

An Analysis of Extrusion of Buffer Material into Fracture Behavior by Diffusion Model
(Research Document)

Kazuhiro Matsumoto^{**}, Kenji Tanai^{*}, Takeshi Kanno^{***}, Yumiko Iwata^{***}

Abstract

The buffer that will be used as a component of the engineered barriers system swells when saturated by groundwater. As a result of this swelling, buffer may penetrate into the surrounding rock zone through open fractures. It sustained for extremely long periods of time, the buffer extrusion could lead to reduction of buffer density, which may in turn degrade the assumed performance. In this report, the viscosity of bentonite was measured as one of the parameter of diffusion model. In addition, the simulation analysis was carried out to confirm the applicability of diffusion model. Moreover, an analytical evaluation on extrusion behavior of buffer into rock fractures was performed to estimate the long-term stability of buffer as reduction of density.

1) Measurement of the viscosity of bentonite

The viscosity of bentonite is measured by the Rheometer. The viscosity of bentonite indicated tendency to non-Newton flow. The viscosity of bentonite at water contents of 400-1000 % was estimated. The evaluated value of the viscosity was modified based on this measurement.

2) Simulation analysis of an experiment results

The simulation analysis of the experimental result using diffusion model was performed to confirm applicability of this model. The results of the simulation reasonably agreed with obtained experimental result.

3) Example analysis of a long-term stability of buffer

The analysis of a long-term stability of buffer as reduction of density was performed to compare with the results in H12 report. In this analysis, the density of the buffer material decreased earlier than the results in H12 report. In addition, a long-term change in the density of the buffer material under seawater condition was preliminarily calculated. As a result, it is indicated that extrusion behavior is not significant under seawater condition.

* Barrier performance group, West isolation research division, Waste management and fuel cycle research center

** Inspection Development Corporation

*** Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 侵入現象モデルの精度向上と適用性の検討	2
2.1 ベントナイトの粘度測定	2
2.2 固相拡散係数の評価	9
2.2.1 実験に基づく固相拡散係数の導出	9
2.2.2 モデルに基づく固相拡散係数の導出	12
2.2.3 固相拡散係数の評価	14
2.3 実験結果のシミュレーション解析	15
2.3.1 実験に基づく固相拡散係数による解析	15
2.3.2 モデルに基づく固相拡散係数による解析	16
3. 緩衝材の長期的な密度変化解析	18
3.1 第2次取りまとめにおける評価	18
3.2 降水系地下水条件における解析評価	20
3.2.1 本解析方法	20
3.2.2 解析結果および考察	21
3.3 海水系地下水条件における影響試算	26
4. 侵入現象モデル化研究における今後の課題	29
4.1 第2次取りまとめ時における課題と進捗	29
4.2 今後の課題の明確化	29
5. おわりに	31
参考文献	32

目 次

図 1.1	緩衝材の流出／侵入挙動概念図	1
図 2.1	粘弾性測定装置	2
図 2.2	ケイ砂の粒度分布	4
図 2.3	回転粘度測定／粘度測定結果（ベントナイト単体-蒸留水）	5
図 2.4	回転粘度測定／粘度測定結果（ベントナイト単体-人工海水）	6
図 2.5	回転粘度測定／粘度測定結果（ベントナイト単体-幌延地下水）	6
図 2.6	回転粘度測定／粘度測定結果（ケイ砂混合体-蒸留水）	6
図 2.7	ベントナイト単体の粘度測定結果 （回転粘度測定／クリープ測定）	7
図 2.8	ケイ砂混合体の粘度測定結果 （回転粘度測定／クリープ測定）	7
図 2.9	ベントナイト粘度の推定（ベントナイト単体試料）	8
図 2.10	ベントナイト粘度の推定（ケイ砂混合試料）	8
図 2.11	侵入密度分布の測定結果（ベントナイト単体）	9
図 2.12	試験結果から算出した固相拡散係数	10
図 2.13	固相拡散係数算出結果の近似	11
図 2.14	侵入密度分布の測定結果（ケイ砂混合体）	11
図 2.15	透水係数評価結果（モンモリロナイト含有率 60[%]）	12
図 2.16	膨潤圧評価結果（モンモリロナイト含有率 60[%]）	12
図 2.17	膨潤圧評価結果（モンモリロナイト含有率 48[%]）	13
図 2.18	ベントナイト粘度の評価	13
図 2.19	ベントナイト粘度の推定近似	14
図 2.20	コア部の固相拡散係数 （モンモリロナイト含有率 60[%]）	14
図 2.21	亀裂部の固相拡散係数 （モンモリロナイト含有率 60[%]）	14
図 2.22	コア部の固相拡散係数 （モンモリロナイト含有率 48[%]）	15
図 2.23	亀裂部の固相拡散係数／ケイ砂混合体 （モンモリロナイト含有率 48[%]）	15
図 2.24	亀裂部の固相拡散係数／ベントナイト単体 （モンモリロナイト含有率 48[%]）	15
図 2.25	侵入密度測定試験密度分布の逆解析結果	16

図 2.26	侵入密度測定試験密度分布の解析結果 (固相拡散モデル)	16
図 2.27	侵入密度測定試験解析メッシュ	17
図 2.28	侵入密度測定試験密度分布の解析結果 (ベントナイト単体)	17
図 2.29	侵入密度測定試験の解析結果 (固相率コンター, 170 時間後)	17
図 2.30	侵入密度測定試験密度分布の解析結果 (ケイ砂混合体)	18
図 3.1	第 2 次取りまとめの解析モデル	18
図 3.2	第 2 次取りまとめでの解析結果の一例 (密度)	19
図 3.3	第 2 次取りまとめでの埋設後の期間と緩衝材密度の関係	19
図 3.4	第 2 次取りまとめでの緩衝材密度の平均的な変化	19
図 3.5	解析メッシュ (亀裂長さ 3[m])	20
図 3.6	解析メッシュ (亀裂長さ 9[m])	20
図 3.7	処分場解析結果 / 1000 年後	21
図 3.8	処分場解析結果 / 10 万年後	21
図 3.9	処分場解析結果 / 1000 万年後	21
図 3.10	処分後年数と緩衝材密度の推移 (亀裂長さ 3[m], 亀裂幅別)	21
図 3.11	処分後年数と緩衝材密度の推移 (亀裂長さ 9[m], 亀裂幅別)	21
図 3.12	緩衝材密度の平均的な変化	22
図 3.13	第 2 次取りまとめと本解析との比較 (透水係数)	22
図 3.14	第 2 次取りまとめと本解析との比較 (膨潤圧)	23
図 3.15	第 2 次取りまとめと本解析との比較 (粘度)	23
図 3.16	第 2 次取りまとめと本解析との比較 (コア部固相拡散係数)	23
図 3.17	第 2 次取りまとめと本解析との比較 (亀裂部固相拡散係数)	24
図 3.18	緩衝材密度低下の試算 (侵入部密度 : 0.3[Mg/m ³])	28
図 3.19	緩衝材密度低下の試算 (侵入部密度 : 0.5[Mg/m ³])	28

表 目 次

表 2.1	粘弾性測定装置仕様	3
表 2.2	粘度測定センサー	3
表 2.3	ベントナイトの粘度測定条件	3
表 2.4	ケイ砂の粒径分布・化学分析結果 (8号ケイ砂)	4
表 2.5	粘度測定装置の校正結果	5
表 2.6	クリープ測定／粘度測定結果	7
表 2.7	ベントナイト粘度の推定結果	8
表 3.1	第2次取りまとめでの亀裂開口幅がある範囲である確率の設定	19
表 3.2	解析条件	20
表 3.3	試算に用いたパラメータ	27
表 3.4	緩衝材侵入距離	27
表 3.5	時間経過に伴う緩衝材の密度低下と低減率 (亀裂頻度：約 7.5 本/m)	28

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究では、人工バリア設置後において、緩衝材の物理的安定性に影響を及ぼす事象の一つとして、緩衝材の流出／侵入挙動が考えられている。緩衝材の流出現象は、岩盤亀裂内への侵入と、亀裂へ侵入したベントナイトゲルの浸食による二つの現象によるものと考えられ、人工バリア設置後における緩衝材の物理的安定性や核種移行評価を行う上で、これらの現象を定量的に把握する必要がある。緩衝材の流出／侵入挙動の概念図を図1.1に示す。

第2次取りまとめにおいて、緩衝材の岩盤亀裂内への侵入現象に関する長期的な予測評価では、粘土粒子の拡散モデルに基づく評価が行われた（核燃料サイクル機構，1999）。しかしながら、この時点における評価では、ベントナイトの低密度域の透水係数、膨潤圧の物性データおよび粘度等についての実測データが取得されておらず、高密度域からの外挿値や推定値を用いたデータをモデルに適用した。このため、これらベントナイトの物性データの精度の確認や見直しを行い、モデルの妥当性や適用性を検討すること、また、より現実的なモデルの高度化が課題であった。

第2次取りまとめ以降、これらベントナイトの物性データの見直しやデータ取得を行い、モデルの妥当性、適用性の確認を実施してきた（菅野・岩田，2003，2004）。

本報では、侵入現象モデルの精度向上へ向けた検討を継続し、現状レベルの数値解析による岩盤亀裂内への侵入現象による事例解析を実施し、侵入現象のモデル化研究における今後の課題の明確化を行った。

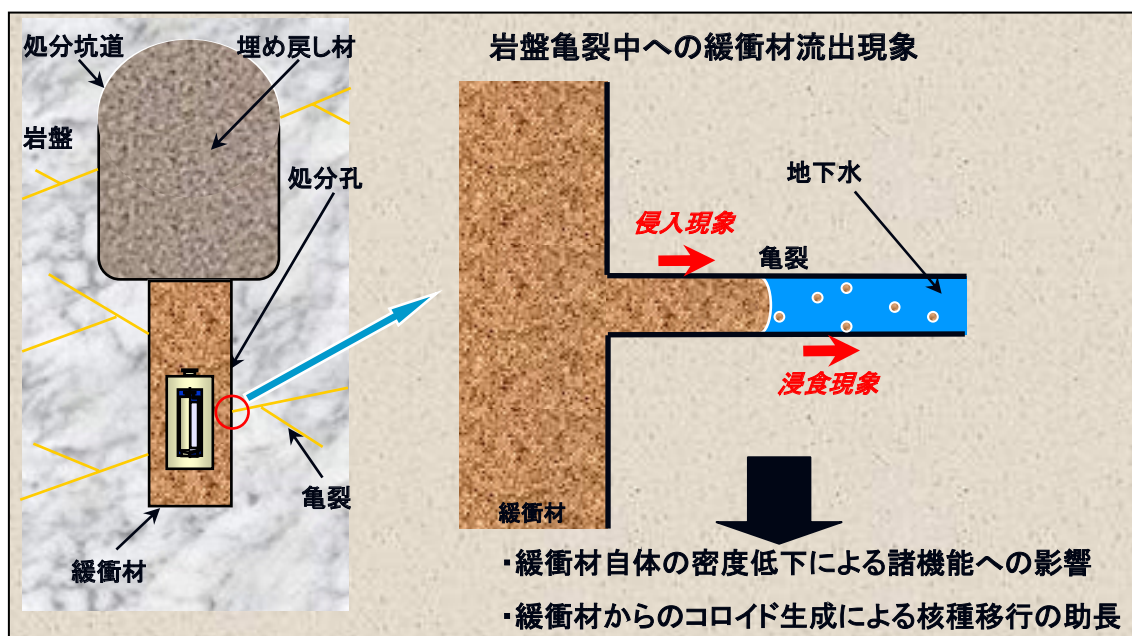


図 1.1 緩衝材の流出／侵入挙動概念図

2. 侵入現象モデルの精度向上と適用性の検討

2.1 ベントナイトの粘度測定

緩衝材の侵入現象のモデル化では、圧縮成型体からゲルまでの広い範囲のベントナイトの粘性係数（粘度）を評価する必要がある。一般に、圧縮成型体では固体（弾性体）的性質が、ゲルでは粘性流体的性質が卓越していると考えられるが、厳密には侵入現象で扱うベントナイトは、粘性と弾性の両方の性質を併せ持つ粘弾性体と考えられる。これまでに、ベントナイトの粘度測定に関しては、本研究で対象としているような広範囲における報告例はない。したがって、ベントナイトの流動特性を概略的に把握するための試みとして、ベントナイトの低含水比域から高含水比域における粘度の測定を行い、これまでに一部のデータを取得している（核燃料サイクル開発機構，2003）。これらの結果によれば、ベントナイトの流動は、せん断速度の増加によって粘度が減少する傾向であることから、擬塑性流動を示すものと考えられた。

緩衝材の侵入現象試験において、最も侵入が大きい一部の試験結果を用い、亀裂内への移動速度をせん断速度に置き換えた場合、 1.9×10^{-5} [1/s]程度と推定できる（菅野・岩田，2003）。ここで得られた粘度データは、実現象よりも4桁大きいせん断速度で得られた結果であり、実際の侵入現象とは対応していない。このため本検討では、緩衝材侵入現象の対象域となるさらに低せん断速度域における粘度を把握するために測定を実施した。測定は、粘弾性測定装置（レオストレス RS600）を用いて実施した（図 2.1）。装置の仕様を表 2.1 に示す。なお、センサーシステムは、ベントナイト試料の粘度に応じて、4種類（表 2.2）のものを用いた。



図 2.1 粘弾性測定装置

表 2.1 粘弾性測定装置仕様

トルク	0.0005 ~ 200 [mNm] 0.0001 ~ 200 [mNm] (オプション)
回転数	10 ⁻⁷ ~ 1500 [rpm] (CS) 0.001 ~ 1500 [rpm] (CR) (~4500[rpm]オプション)
周波数	0.0001 ~ 100 [Hz]
マルチウェーブ	0.01 ~ 20 [Hz]
ひずみ分解能	1.2×10 ⁻⁸ [rad]
センサー	コーン&プレート, パラレルプレート, 2重円筒
温度制御	-40 ~ 200 [°C] (循環恒温槽) -40 ~ 180 [°C] (ペルチェ) -RT ~ 500 [°C] (ヒーター)
応用測定	UV 硬化測定, 熱硬化 (使い捨てセンサー), 粉体塗料, ER (電気粘性流体), 測定高温・高圧測定

表 2.2 粘度測定センサー

センサーシステム	記号	仕様
パラレルプレート	PP35	Φ35[mm], ギャップ 0.5[mm]
	PP60	Φ60[mm], ギャップ 0.5[mm]
ダブルコーン 4°	DC60/4	Φ60[mm], ギャップ 0.14[mm]
ミゾ付パラレルプレート	PP20S	Φ20[mm], ギャップ 2[mm]

ベントナイトの粘度測定条件を表 2.3 に示す。表中に示している記号は、測定センサーを表わしている。なお、ベントナイト試料は、含水比 25[%]がプレート状の飽和供試体（乾燥密度：1.6[Mg/m³]）、その他の含水比（100~1000[%]）がゲル状サンプルとし、ケイ砂混合体は、測定センサーのギャップの制約により、8号ケイ砂を 106[μm]のメッシュで篩い分けしたものを使用した。表 2.4 にケイ砂の粒径分布・化学分析結果を、図 2.2 にケイ砂の粒度分布を示す。

表 2.3 ベントナイトの粘度測定条件

測定装置	レオメータ レオストレス RS600 (ドイツ・ハーケ社製)							
試料	<ul style="list-style-type: none"> ベントナイト単体 (クニゲル V1) ケイ砂混合体 (クニゲル V1 : 70[%], 8号ケイ砂 : 30[%]※) 							
測定温度[°C]	25							
	飽和溶液	含水比[%]						
		25	100	200	400	600	800	1000
ベントナイト単体	蒸留水	PP20S	—	PP35	PP35	PP60	PP60	PP60
	人工海水	—	PP35	PP60	DC60/4	—	—	—
	幌延地下水	—	PP35	PP35	PP60	PP60	PP60	—
ケイ砂混合体	蒸留水	PP20S	—	PP35	PP35	PP60	PP60	—

※8号ケイ砂は、106[μm]以下に篩い分けしたものを使用

表 2.4 ケイ砂の粒径分布・化学分析結果 (8号ケイ砂)

分析項目		結果							
		体積平均径 [μm]	10[%]粒径 [μm]	50[%]粒径 [μm]	90[%]粒径 [μm]				
粒径分布	8号ケイ砂	127.9	59.52	116.2	210				
	8号ケイ砂 (106[μm]以下)	91.43	49.64	85.93	139.6				
化学分析		分析成分[wt%]							
		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	I. L
		8.26	0.37	1.41	0.05	1.85	86.64	0.15	1.27

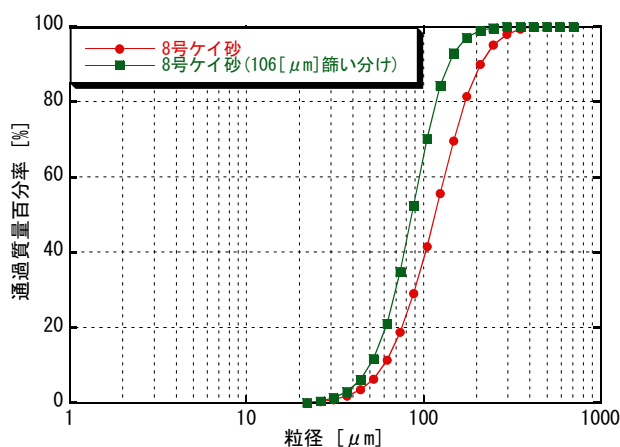


図 2.2 ケイ砂の粒度分布

測定は、粘度測定において一般的に用いられる回転粘度測定、また、クリープ測定の方法により実施した。クリープ測定は、侵入現象の対象域となるせん断速度域を包含するために用いた測定法であり、回転粘度測定限界よりもさらに低せん断速度域を対象とした測定が可能である。

1) 回転粘度測定

試料の回転方向に応力 τ を与え、その時のひずみ量 γ を測定し、ひずみ量とギャップサイズからせん断速度 $d\gamma/dt$ を算出する。粘度 μ は与えた応力とせん断速度から (2.1) 式により算出される。

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{d\gamma}{dt}} \tag{2.1}$$

2) クリープ測定

試料の回転方向に一定の応力を与えそのときの変形量を測定する。定常状態における単位時間当りの変形量とギャップサイズからせん断速度を算出する。粘度は (2.1) 式により算出する。与える応力によりせん断速度は変わることから、本測定では、応力をせん断速度が 10^{-5} ~

10^{-6} [1/s]の範囲となるように設定した。

本測定では、予めプレート（センサー）を 25[°C]とした後試料をセットし、30 秒間予熱後測定を行った。測定時間は、回転粘度測定で4 分間、クリープ測定で5 分間である。なお、測定に先立ち、標準粘度液を用い、粘度測定装置の校正を行った。表 2.5 に校正結果を示す。一般に、粘度測定装置では、測定誤差が 5[%]以内になるように校正される。

回転粘度測定による測定結果を図 2.3～図 2.6 に、クリープ測定による測定結果を表 2.6 に示す。図の横軸はせん断速度、縦軸は粘度である。また、グラフ中の数値はベントナイトの含水比 w [%]を表わしている。測定結果からはそれぞれベントナイトの含水比が小さい程、粘度が大きくなる傾向がある。また、せん断速度 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ [1/s]の領域では、粘度が頭打ちであり、せん断速度の増加に伴い、粘度が低下する傾向がみられた。これらの物性は、非ニュートン流動を示しており、隣接粒子間などに作用する2次結合力がせん断速度の増加に伴って減少するものである。つまり、せん断速度の増加に伴う粘度の低下は、液体、固体などの物理構造が破壊されつつある状態であり、これをチキントロピーという。

表 2.5 粘度測定装置の校正結果

標準粘度液の検定値 (20[°C])	1769 [mPas]
粘度測定装置 RS600 による測定値	1708 [mPas]
誤差	3.4 [%]

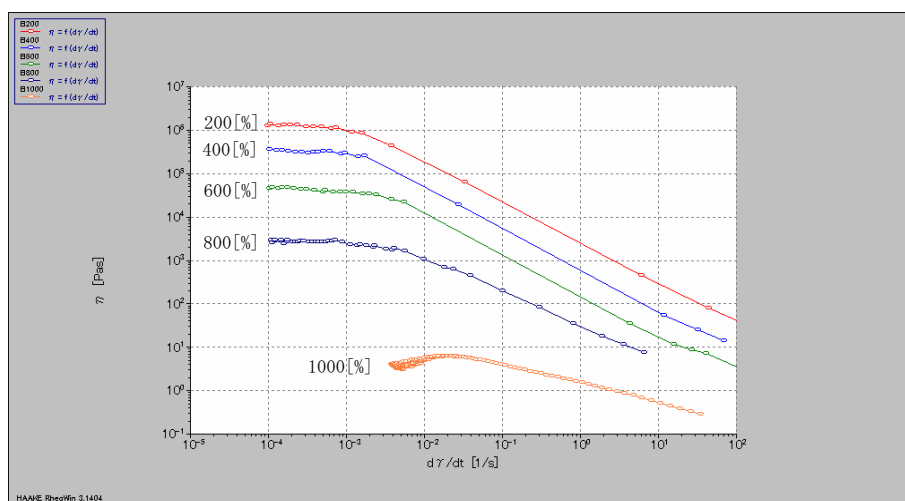


図 2.3 回転粘度測定／粘度測定結果（ベントナイト単体-蒸留水）

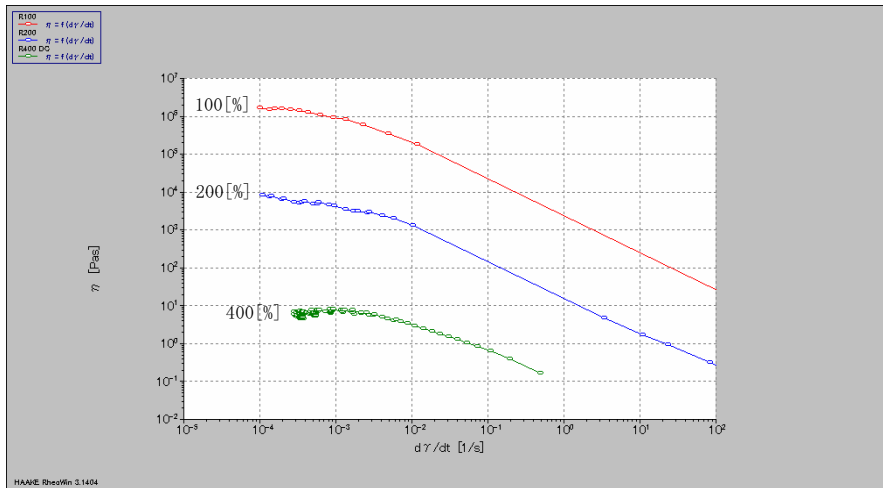


図 2.4 回転粘度測定／粘度測定結果（ベントナイト単体-人工海水）

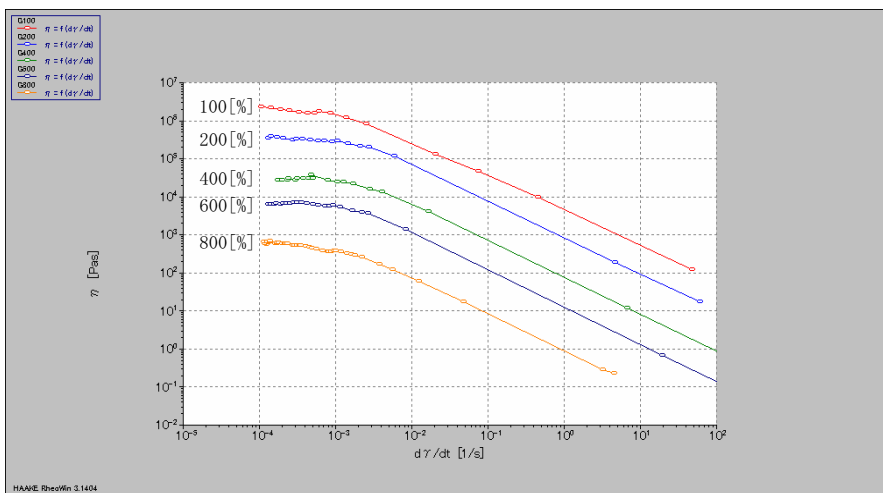


図 2.5 回転粘度測定／粘度測定結果（ベントナイト単体-幌延地下水）

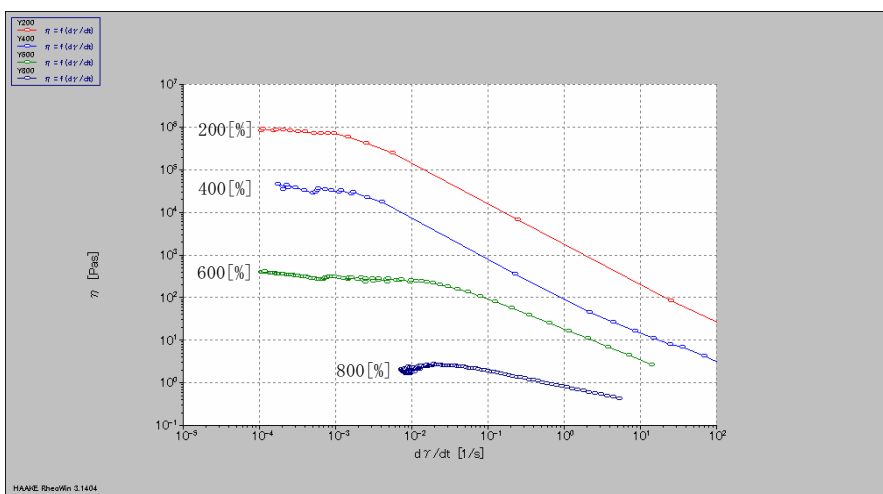


図 2.6 回転粘度測定／粘度測定結果（ケイ砂混合体-蒸留水）

表 2.6 クリープ測定／粘度測定結果

試料	含水比[%]	せん断速度[1/s]	粘度[Pa s]	応力[Pa]	センサー
ベントナイト単体 (蒸留水)	200	9.79×10^{-6}	8.17×10^7	800	PP35
	400	4.53×10^{-6}	1.10×10^7	50	PP35
	600	3.02×10^{-6}	1.65×10^6	5	PP60
	800	3.17×10^{-6}	1.58×10^5	0.5	PP60
	1000	5.81×10^{-5}	8.60×10^2	0.05	PP60
ベントナイト単体 (人工海水)	100	2.46×10^{-6}	3.25×10^8	800	PP35
	200	4.78×10^{-6}	2.09×10^7	100	PP35
	400	9.69×10^{-7}	5.16×10^6	5	PP60
	600	7.35×10^{-6}	1.36×10^5	1	PP60
	800	9.56×10^{-6}	5.23×10^4	0.5	PP60
ベントナイト単体 (幌延地下水)	100	1.09×10^{-5}	5.51×10^7	600	PP35
	200	1.19×10^{-5}	1.68×10^5	2	PP60
	400	2.61×10^{-5}	3.84×10^2	0.01	DC60/4
ケイ砂混合体 (蒸留水)	200	9.32×10^{-6}	8.58×10^7	800	PP35
	400	2.00×10^{-5}	4.00×10^6	80	PP35
	600	8.93×10^{-6}	5.60×10^4	0.5	PP60
	800	4.31×10^{-5}	1.16×10^3	0.05	PP60

ここでは、回転粘度測定とクリープ測定の結果から、緩衝材の侵入現象の対象となるせん断速度域における粘度を推定する。蒸留水における回転粘度測定結果とクリープ測定結果を合わせて、図 2.7 と図 2.8 に示す。これらの結果より、回転粘度測定では、ベントナイト単体とケイ砂混合体の両者が低せん断速度域で頭打ちとなる傾向である。一方、さらに低せん断速度域のクリープ測定では、回転粘度測定で頭打ちとなっている粘度よりもさらに大きい粘度を示した。

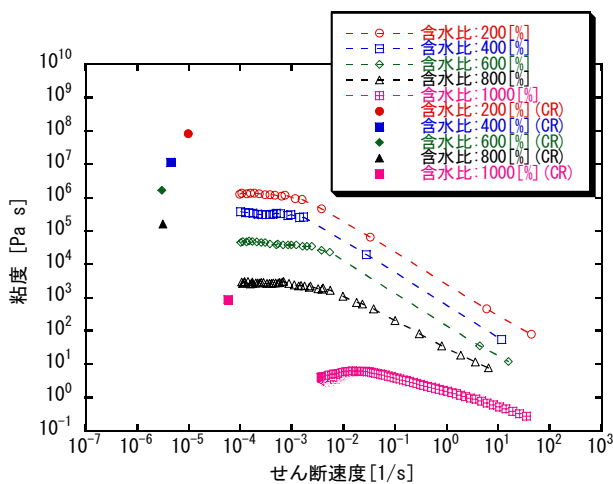


図 2.7 ベントナイト単体の粘度測定結果 (回転粘度測定／クリープ測定)

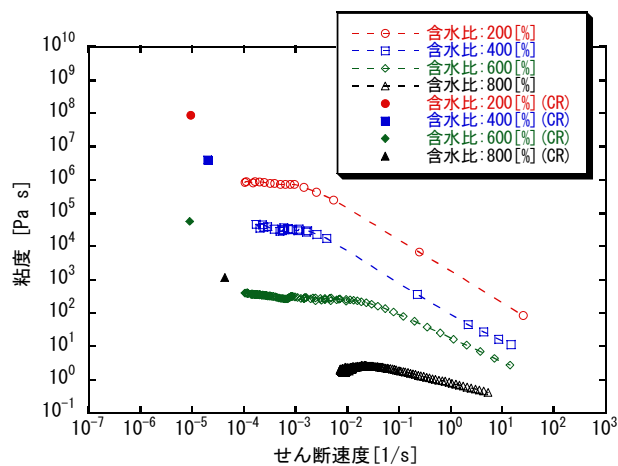


図 2.8 ケイ砂混合体の粘度測定結果 (回転粘度測定／クリープ測定)

本測定では、侵入現象の対象域となるせん断速度 1.9×10^{-5} [1/s] が、回転粘度測定とクリープ測定結果の間に位置している。本検討では、回転粘度測定データとクリープ測定データとを直線近似し、せん断速度 1.9×10^{-5} [1/s] の交点から、侵入現象対象域の粘度を推定した（図 2.9、図 2.10）。推定結果を表 2.7 に示す。

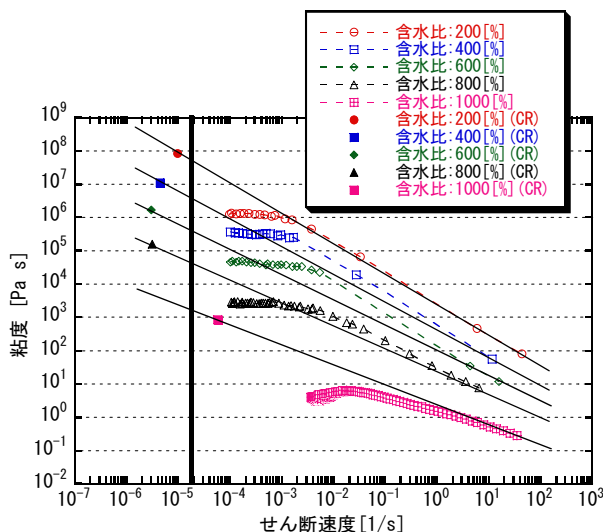


図 2.9 ベントナイト粘度の推定 (ベントナイト単体試料)

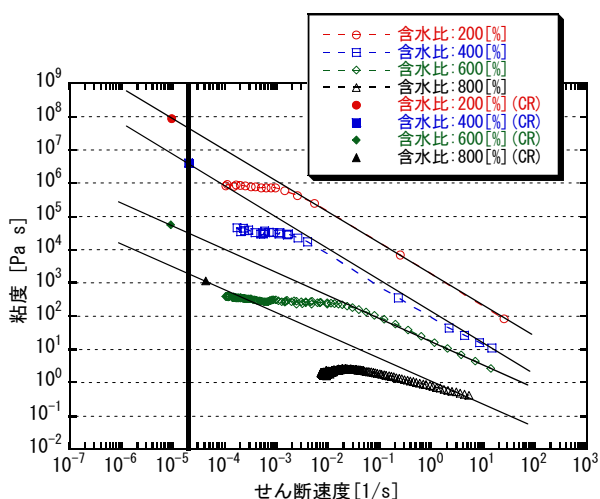


図 2.10 ベントナイト粘度の推定 (ケイ砂混合試料)

表 2.7 ベントナイト粘度の推定結果

含水比[%]	ベントナイト単体の粘度[Pa s]	ケイ砂混合体の粘度[Pa s]
200	4×10^7	4×10^7
400	3×10^6	4×10^6
600	3×10^5	3×10^4
800	5×10^4	2×10^3
1000	2×10^3	—

ここでは、第2次取りまとめ以降の課題の一つであったベントナイト粘度の実測データの取得を行い、その結果からベントナイトの粘度を推定評価した。これらは、実測に基づいていることから、第2次取りまとめ時に比べれば物性データの信頼性が向上されたものと考えられる。しかしながら、これらは含水比をパラメータとした概略的な傾向を把握した一部の基礎データに過ぎない。今後、測定を繰り返すなどして、データ自体の妥当性を確認するとともに、データ整備を継続する必要がある。特に、ケイ砂混合試料の場合には、混合するケイ砂の粒径によって粘度が変わることも考えられる。本測定では、測定上の制約によって、従来の実験で用いているケイ砂（3号,5号ケイ砂）よりも粒度の小さいものを使用していることに留意しておく必要がある。

2.2 固相拡散係数の評価

第2次取りまとめにおける拡散モデルの適用性評価は、主として緩衝材の侵入距離における時間変化のみで行われており、モデルの適用性に関する検討、評価が十分ではなかった。第2次取りまとめ以降、外挿や推定などにより求めたベントナイトの物性データの妥当性の検討を含め、モデルの適用性評価を実施してきた（菅野・岩田，2003，2004）。ここでは、検討ならびに見直しを行ったベントナイトの物性データを適用し、固相拡散係数を評価した。また、評価した固相拡散係数を用い、実験結果のシミュレーション解析を行い、モデルの適用性確認を実施した。

2.2.1 実験に基づく固相拡散係数の導出

第2次取りまとめ以降、X線CTを用いた非破壊検査によって、これまでに把握できていなかった亀裂侵入部におけるベントナイトの密度分布データが取得されている（松本・棚井，2004）。

ここでは、実験によって得られた侵入密度分布の時間変化より、固相拡散係数の導出を行った。

1) ベントナイト単体

侵入密度測定試験における模擬亀裂部の侵入密度分布（図では固相率で表示）の測定結果を図2.11に示す。この試験で使用したクニゲルV1は、MB（メチレンブルー）吸着量測定の結果より、モンモリロナイト含有率が第2次取りまとめに示されている値（46～49[%]）よりも高い（約60[%]）ことが確認されている（菊池・棚井，2004）。このため以降の検討では、第2次取りまとめにおけるモンモリロナイト含有率を48[%]、侵入密度測定試験で用いた試料のモンモリロナイト含有率を60[%]として検討を行う。

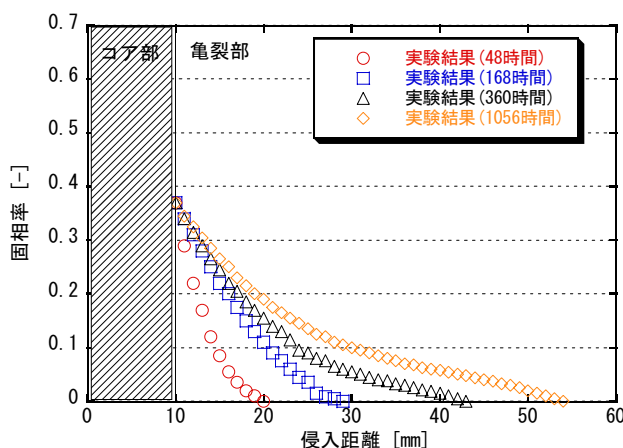


図 2.11 侵入密度分布の測定結果（ベントナイト単体）

図 2.11 に示す密度分布の時間変化より，固相拡散係数 D_s を算出する。試験の形状は軸対称であり，円柱座標 (r, θ, z) を用いて検討する。緩衝材の侵入を拡散現象と見なすと，半径 r 方向の拡散流束 q_s は，

$$q_s = -rD_s \frac{\partial \sigma}{\partial r} d\theta dz \tag{2.2}$$

であり，固相拡散係数は，(2.3) 式を用いて算出する。

$$D_s = -\frac{q_s}{rd\theta dz \frac{\partial \sigma}{\partial r}} = -\frac{\int_r^L (\sigma_{t=t_2} - \sigma_{t=t_1}) rd\theta dz dr}{rd\theta dz \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} \right)_{t=t_2} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} \right)_{t=t_1} \right\} t_2 - t_1} \frac{1}{2} \tag{2.3}$$

$$= -\frac{\int_r^L (\sigma_{t=t_2} - \sigma_{t=t_1}) r dr}{r \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} \right)_{t=t_2} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} \right)_{t=t_1} \right\} t_2 - t_1} \frac{1}{2}$$

ここで， σ は固相率， L は供試体長さ， t_1 ， t_2 は測定時間である。固相拡散係数の算出結果を図 2.12 に示す。

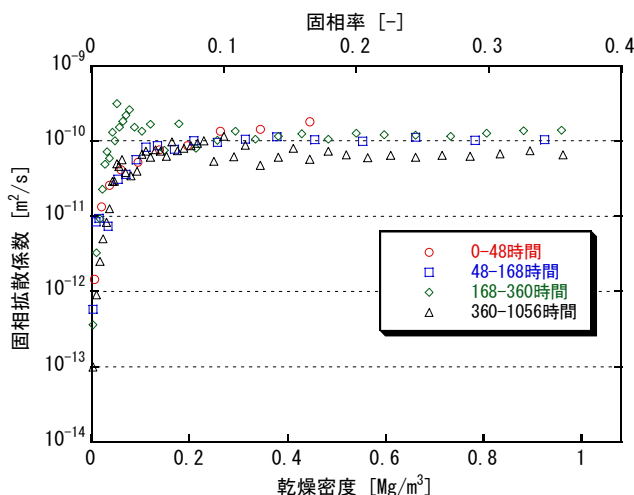


図 2.12 試験結果から算出した固相拡散係数

また，算出結果の近似曲線を求めると，図 2.13 に示すようになり，実験により求められる固相拡散係数は，(2.4) 式で表わされる。

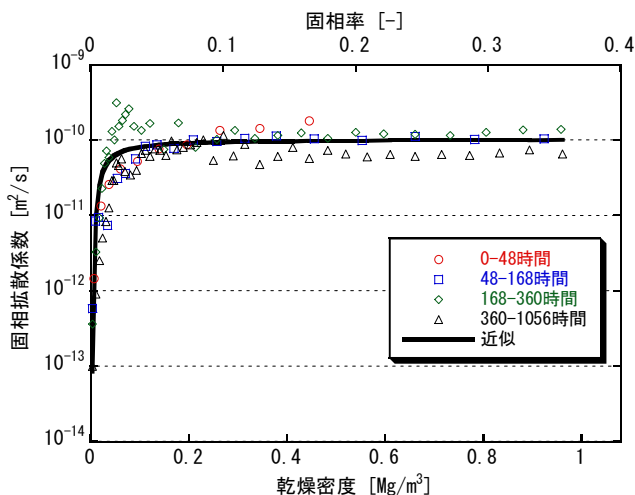


図 2.13 固相拡散係数算出結果の近似

$$D_s[m^2/s] = \exp(-23 - 0.00878/\sigma) \tag{2.4}$$

2) ケイ砂混合体

ベントナイト単体と同様に、ケイ砂混合体についても、X線CTによる侵入密度分布測定が試みられている（松本・棚井，2005）。しかしながら、図 2.14 に示すように、ケイ砂混合体の場合には、密度分布の時間変化が明瞭ではなく、固相拡散係数の導出は困難であった。そのため、ケイ砂混合体における固相拡散係数の導出は、今後のデータ取得の進捗を待って実施することとした。

ケイ砂混合材料における侵入密度分布の評価については、X線CTの適用性や測定手法について今後の測定を継続することにより検討していく必要がある。

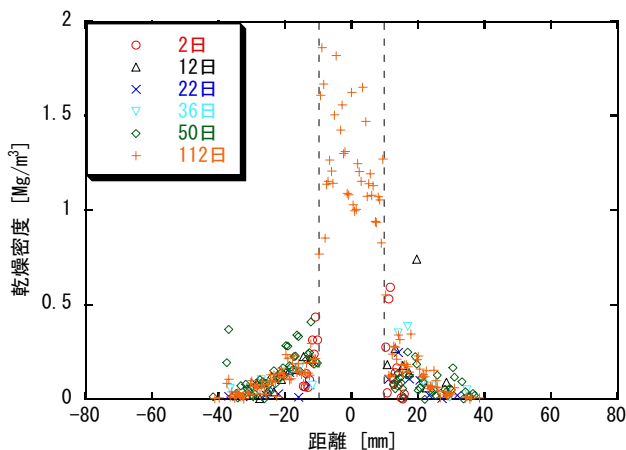


図 2.14 侵入密度分布の測定結果（ケイ砂混合体）

2.2.2 モデルに基づく固相拡散係数の導出

従来と同様に、緩衝材の侵入現象に粘土粒子拡散モデル (Kanno et al., 2001) を適用し、固相拡散係数を導出する。固相拡散係数は (2.5) 式および (2.6) 式で表現される。

・コア部
$$D_s = \frac{\sigma k}{\rho_w g} \frac{dP_s}{d\sigma} \tag{2.5}$$

・亀裂部
$$D_s = \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dP_s}{d\sigma} \tag{2.6}$$

ここで、 k は透水係数[m/s]、 P_s は膨潤圧[Pa]、 ρ_w は水の密度[Mg/m³]、 g は重力加速度[m/s²]、 d は亀裂開口幅[m]、 σ は固相率[-]、 μ_s はベントナイトの粘度[Pa s]である。

これまでの検討で、ベントナイト単体とケイ砂混合体の透水係数と膨潤圧の物性データの評価については、小峯・緒方 (1993, 1999, 2001) の評価式に基づいた見直しを実施しているが (菅野・岩田, 2003)、前述したように、侵入密度測定試験で用いたベントナイトのモンモリロナイト含有率は、第2次取りまとめ時のものよりも高い値となっている。したがって、モンモリロナイト含有率が60[%]の場合の透水係数と膨潤圧に関しても同様に、小峯・緒方の評価式に基づいて再評価を行った。また、緩衝材の長期的な密度変化の事例解析に用いる固相拡散係数を算出するために、これまで未検討であった緩衝材の第2次取りまとめ仕様 (レファレンスケース) の膨潤圧 (モンモリロナイト含有率48[%]) の固相率微分式を評価した。

モンモリロナイト含有率60[%]の透水係数の評価結果を図2.15に、同じく膨潤圧の評価結果を図2.16に示す。また、モンモリロナイト含有率48[%]の膨潤圧の評価結果を図2.17に示す。

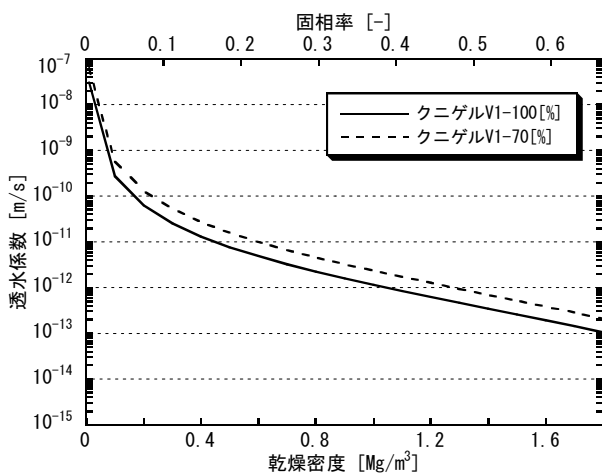


図 2.15 透水係数評価結果 (モンモリロナイト含有率60[%])

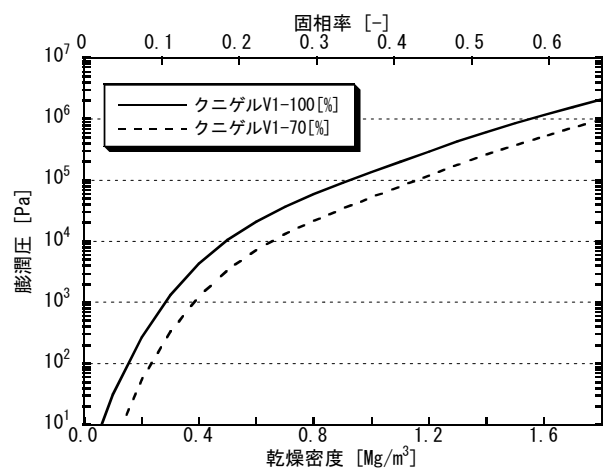


図 2.16 膨潤圧評価結果 (モンモリロナイト含有率60[%])

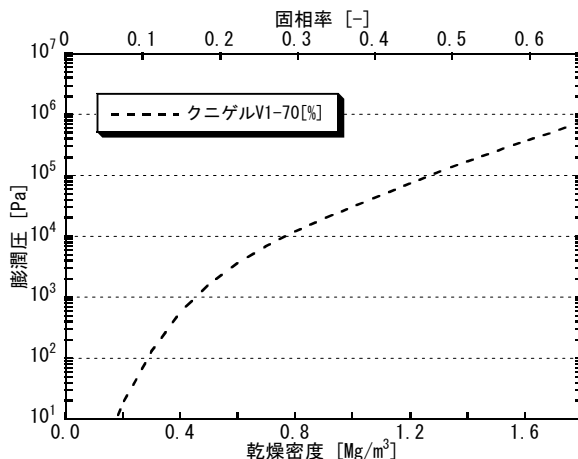


図 2.17 膨潤圧評価結果 (モンモリロナイト含有率 48[%])

次に、2.1 章に記したベントナイト粘度の測定、推定評価結果に基づき、これまでに検討を実施してきているベントナイトの粘度評価式を再検討した。表 2.7 に示しているベントナイト粘度の評価結果を図 2.18 に示す。図中では、これまでに検討したベントナイトの粘度(菅野・岩田, 2004 (図中●, ●, 実線))とともに、図 2.13 に示した固相拡散係数の測定値と図 2.15 および図 2.16 の透水係数、膨潤圧などの物性データを用いて、(2.6) 式により逆算して求めた粘度を示している (図中×)。今回の測定において推定された粘度 (図中■, ▲) は、以前に設定した評価に比べ (図中の実線)、高含水比域において粘度が高い傾向がある。また、この粘度推定値は、固相拡散係数から逆算して評価したプロット (図中×) と比べ、低含水比域でやや大きく、高含水比域でやや小さいが、おおよそ一致する傾向を示した。これまでに検討した粘度と比べ本評価のように高含水比域で粘度が高くなるかについては、更にデータを充足させ、確認していく必要がある。以降では、固相拡散係数から逆算した粘度を推定値として検討を進める。

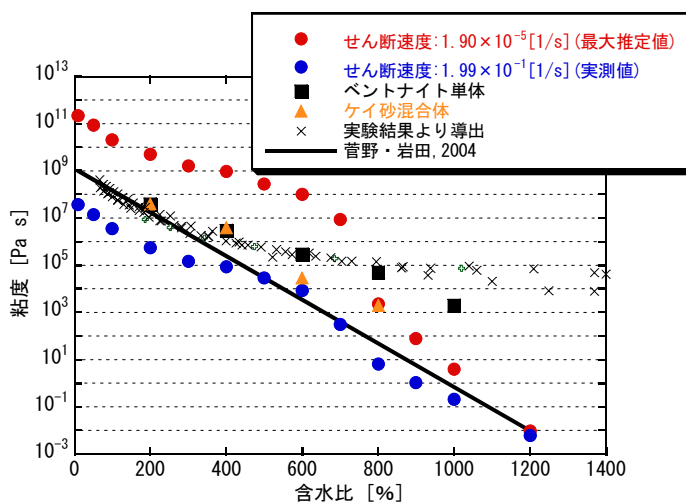


図 2.18 ベントナイト粘度の評価

固相拡散係数から逆算して求めた粘度は、ベントナイト単体試料を対象としたものである。今回測定を行ったベントナイト単体試料とケイ砂混合試料を比べると、高含水比域でケイ砂混合試料の粘度がやや小さい傾向が見えるが、低含水比域では同程度の値を示しており、ここでは、ベントナイト単体試料とケイ砂混合試料の粘度が同じであるものと仮定して検討を進める。

固相拡散係数の測定値から逆算した粘度 μ_s [Pa s] を固相率 σ [-] の関数として近似曲線を求めると、図 2.19 に示すように、(2.7) 式が得られる。

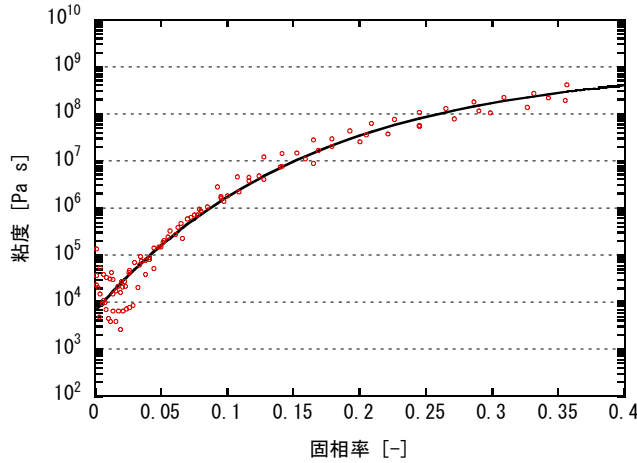


図 2.19 ベントナイト粘度の推定近似

$$\log \mu_s [Pas] = 9.033 - 5.235 \times 0.0019^\sigma \tag{2.7}$$

2.2.3 固相拡散係数の評価

上述の物性データの見直しに基づいて設定した固相拡散係数の評価結果を図 2.20～図 2.24 に示す。図 2.21 では、侵入密度測定試験の密度分布の時間変化から導出した固相拡散係数の測定値を合わせて示している。

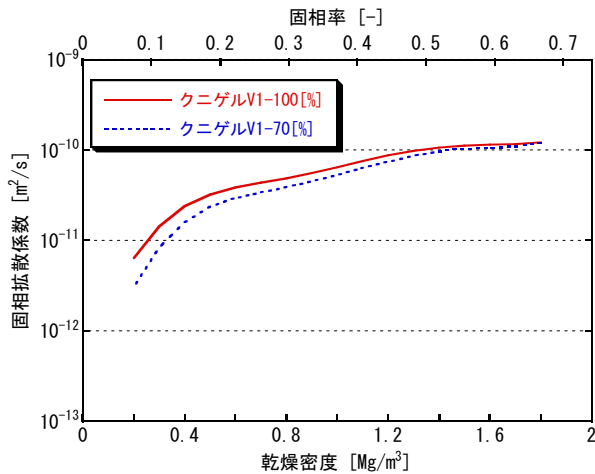


図 2.20 コア部の固相拡散係数
(モンモリロナイト含有率 60 [%])

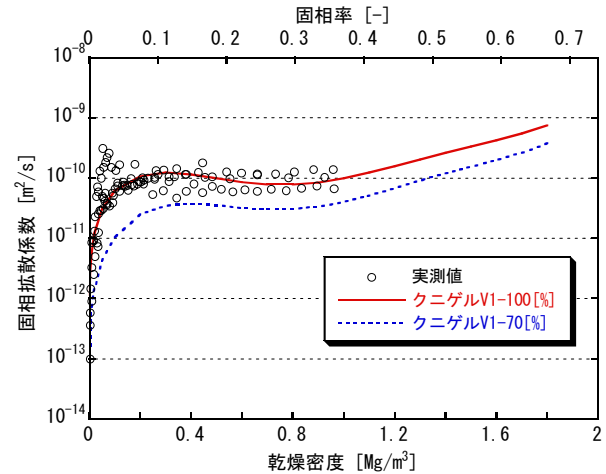


図 2.21 亀裂部の固相拡散係数
(モンモリロナイト含有率 60 [%])

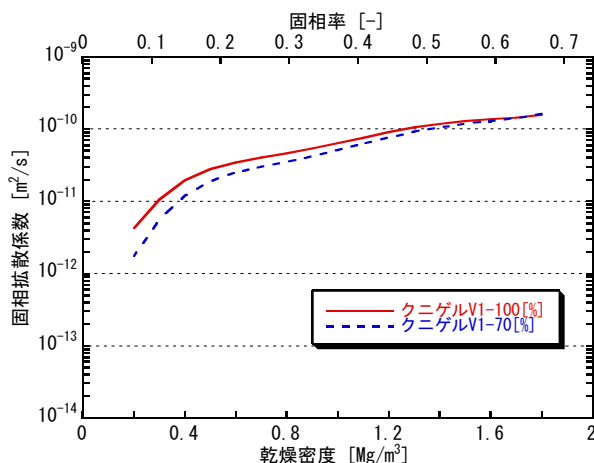


図 2.22 コア部の固相拡散係数 (モンモリロナイト含有率 48 [%])

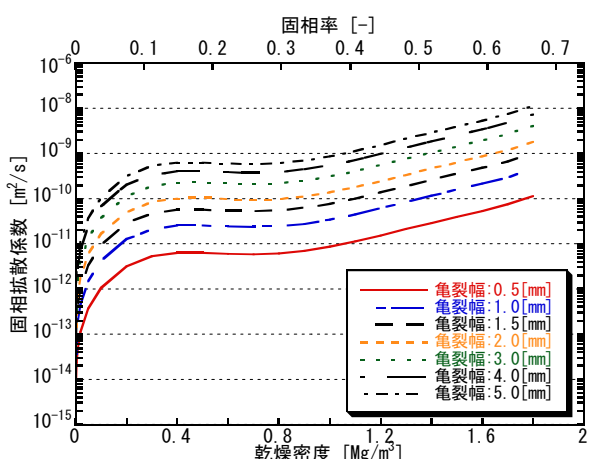


図 2.23 亀裂部の固相拡散係数/ケイ砂混合体 (モンモリロナイト含有率 48 [%])

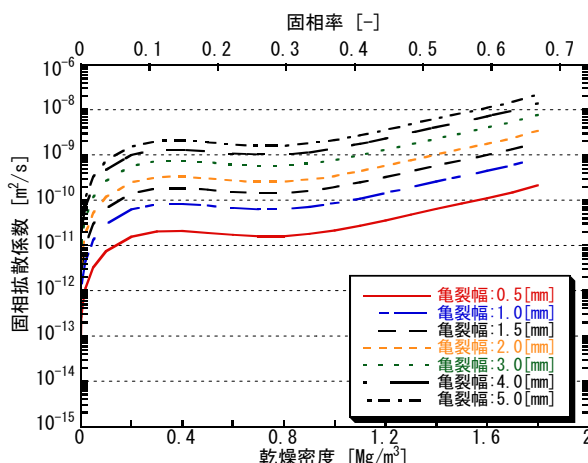


図 2.24 亀裂部の固相拡散係数/ベントナイト単体 (モンモリロナイト含有率 48 [%])

2.3 実験結果のシミュレーション解析

2.3.1 実験に基づく固相拡散係数による解析

図 2.13 に示す実験結果から算出した固相拡散係数近似式を用いて、汎用有限要素解析コード ABAQUS による侵入密度測定試験の密度分布 (固相率分布) の逆解析を行い、(2.6) 式による固相拡散係数算出の妥当性の確認を行った。図 2.11 に示す模擬亀裂中の固相率分布の測定結果では、亀裂の入口における固相率が時間によらず一定値 0.37 [-] となっている。ここでは、モデルによる固相拡散係数の算出方法の妥当性確認を目的とするため、模擬亀裂部のみを対象とした解析を行った。亀裂の入口部における境界条件を実験結果と同様に固相率一定とし、0.37 [-] とした。実験結果と解析結果を比較し、図 2.25 に示す。解析結果は実験結果と良く一致しており、固相拡散係数の算出方法の妥当性が確認された。

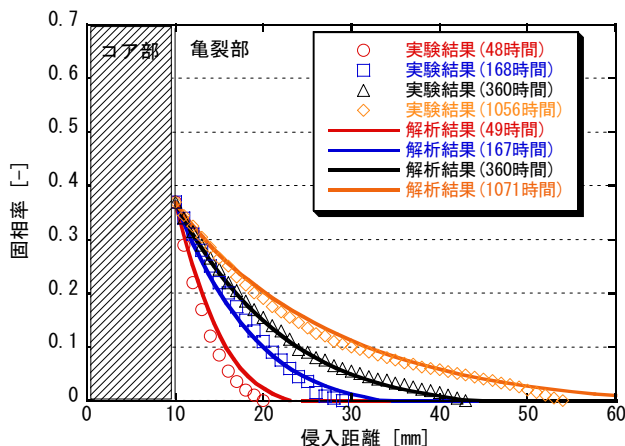


図 2.25 侵入密度測定試験密度分布の逆解析結果

2.3.2 モデルに基づく固相拡散係数による解析

2.3.1 章の逆解析と同様に、モデルに基づく固相拡散係数を用いて亀裂部を対象として解析を行い、実験から求めた固相拡散係数と同様に固相率分布の試験結果を再現できるかを確認した。実験結果と解析結果を比較し、図 2.26 に示す。解析結果は実験結果と良く一致しており、モデルに基づく固相拡散係数が実験による測定値を良く近似していることが確認された。

次に、モデルに基づく固相拡散係数により、コア部と亀裂部の全体を対象として、ベントナイト単体とケイ砂混合体の両方の解析を実施した。解析方法は、固相拡散係数の値を見直した以外はこれまでと同様である。図 2.27 に解析メッシュを、ベントナイト単体の密度分布の解析結果を図 2.28 に示す。また、固相率コンターの解析結果の一例を図 2.29 に示す。解析では、実験結果のように、亀裂の入口部の固相率（密度）が一定とはならず、拡散速度は実験結果より大きく評価されているものの、亀裂部における固相率分布の時間変化の傾向については概ね実験結果を再現していると考えられる。

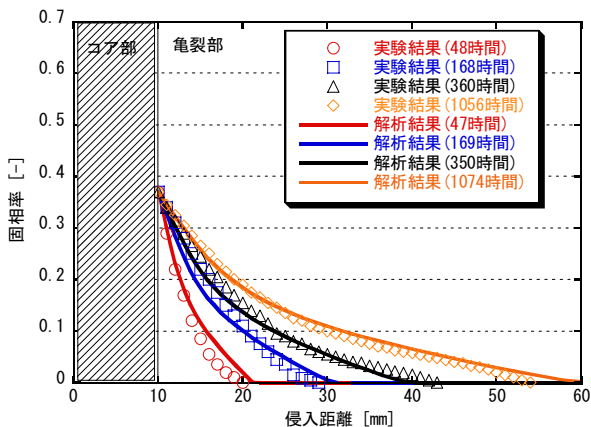


図 2.26 侵入密度測定試験密度分布の解析結果（固相拡散モデル）



図 2.27 侵入密度測定試験解析メッシュ

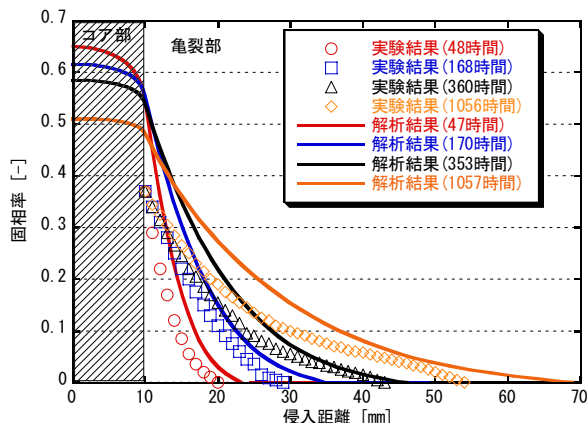


図 2.28 侵入密度測定試験密度分布の解析結果（ベントナイト単体）

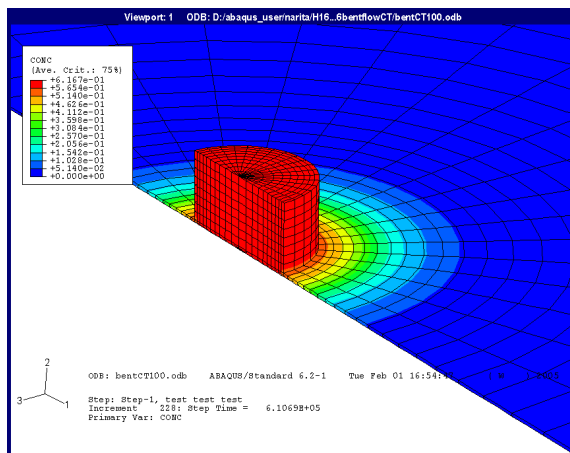


図 2.29 侵入密度測定試験の解析結果（固相率コンター，170 時間後）

次に、図 2.30 にケイ砂混合体の密度分布に関する解析結果を示す。図 2.14 に示す試験結果では、112 日後（2688 時間後）でも侵入部先端は 40[mm]程度であるが、解析では 2691 時間後には亀裂先端が 55[mm]程度まで達しており、ベントナイト単体の結果と同様、解析結果の方が実験結果に比べ拡散速度が大きくなる傾向であった。ただし、試験結果の 50 日後（1200 時間後）と解析結果の 1188 時間後の侵入距離はともに 40[mm]程度であり、解析結果は実験結果と良く一致している。本解析結果が実験結果よりも拡散速度が大きく評価される一要因とし、コア部では実際に不飽和の状態が比較的長く続いているものと推察されるが、モデルでは全領域で初期より飽和と仮定しており、コア部における拡散速度が実際よりも大きく評価されていることが考えられる。

これらの要因とともに、解析結果の妥当性を検証するためには、より明確な実験データが必要である。ベントナイトの侵入密度分布データは、現状において十分に得られておらず、今後さらにデータを充足しつつ、解析との比較検証を行っていく必要がある。

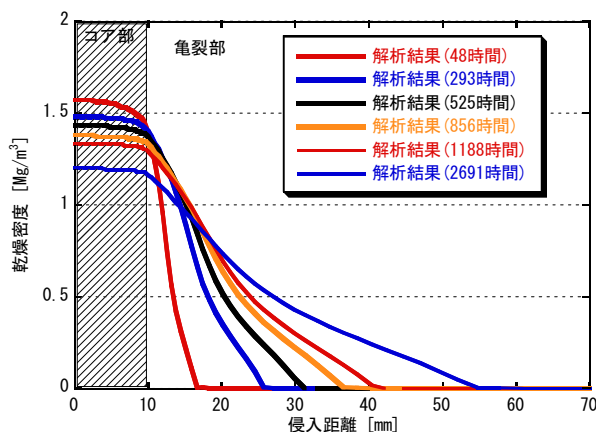


図 2.30 侵入密度測定試験密度分布の解析結果（ケイ砂混合体）

3. 緩衝材の長期的な密度変化解析

ここでは、前章で得られたモデルに基づく固相拡散係数を用い、第2次取りまとめの緩衝材仕様を対象に降水系地下水条件における事例解析を実施し、緩衝材の岩盤亀裂内への侵入による長期的な密度変化を評価した。また、第2次取りまとめにおける評価結果と比較検討を行う。さらに、海水系地下水条件においても、実験結果の知見を用いるなどして、緩衝材の長期的な密度変化の評価を行った。

3.1 第2次取りまとめにおける評価

第2次取りまとめにおける処分場の亀裂侵入解析に用いた解析モデルを図3.1に、また解析結果の一例を図3.2に示す。第2次取りまとめにおいては、亀裂幅をパラメータとして解析を実施し、処分後の緩衝材密度変化（図3.3）ならびに、これら各亀裂幅における密度変化に基づき、表3.1に示す亀裂幅の確率を考慮して、図3.4に示す緩衝材の平均的な密度変化の評価を行っている（杉野・菅野，1999；核燃料サイクル機構，1999）。

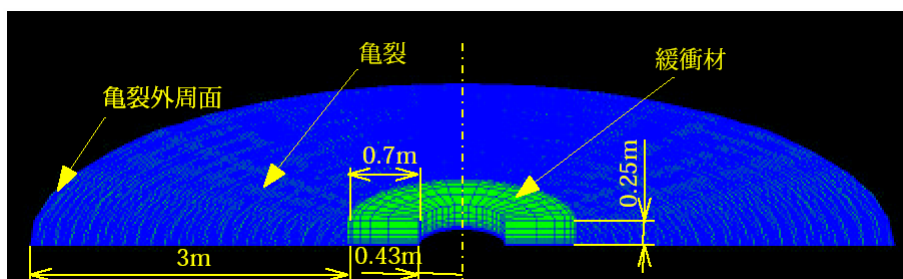


図 3.1 第2次取りまとめの解析モデル

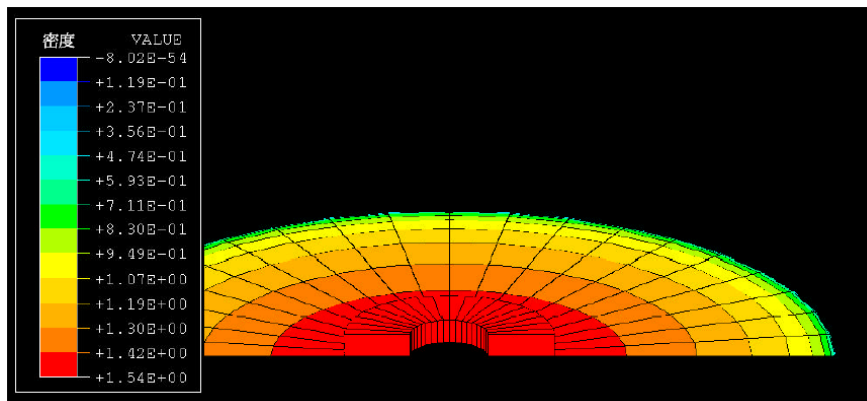


図 3.2 第 2 次取りまとめでの解析結果の一例（密度）

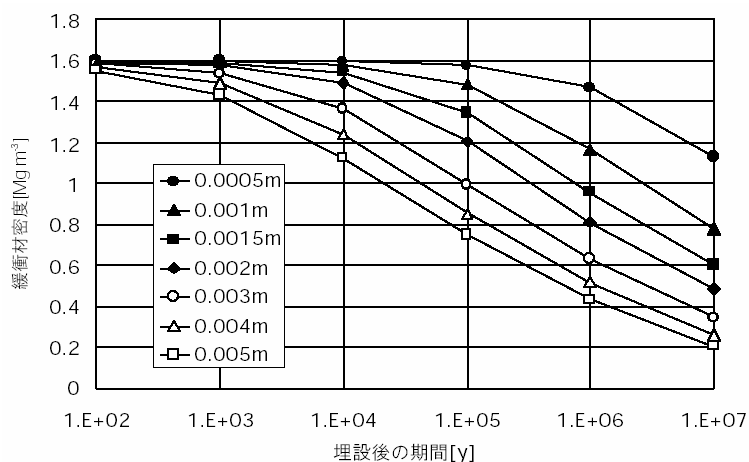


図 3.3 第 2 次取りまとめでの埋設後の期間と緩衝材密度の関係

表 3.1 第 2 次取りまとめでの亀裂開口幅がある範囲である確率の設定

亀裂開口幅の範囲	0.0005m 以下	0.0005m～0.001m	0.001m～0.0015m	0.0015m～0.002m	0.002m～0.003m	0.003m～0.004m	0.004m～0.005m
亀裂1本	0.913	0.059	0.016	0.006	0.004	0.001	0.0006
亀裂6本	0.595	0.256	0.082	0.031	0.021	0.007	0.003

注) 亀裂6本の場合はたとえば開口幅が0.0005m～0.001mの範囲であれば、その亀裂開口幅が6本とも0.001m以下で、かつそのうちの1本は0.0005mを越える確率を示す。

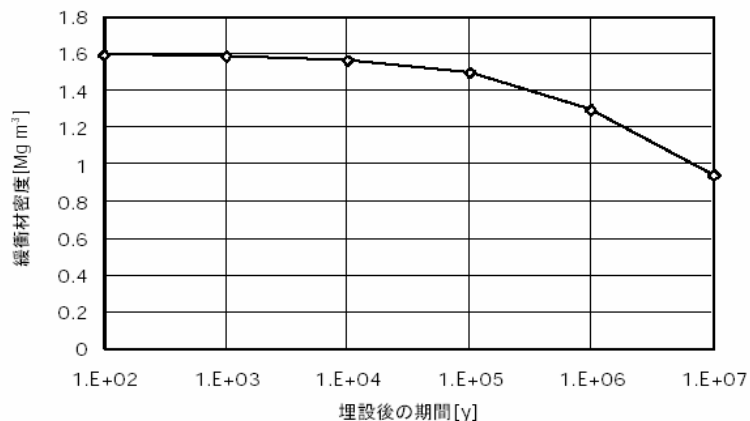


図 3.4 第 2 次取りまとめにおける緩衝材密度の平均的な変化

3.2 降水系地下水条件における解析評価

3.2.1 本解析方法

基本的な解析条件は第2次取りまとめに従った。解析条件を表3.2に示す。

第2次取りまとめ時と異なる点は、物性値である緩衝材の固相拡散係数について本検討で見直した値を用いたこと、また、亀裂長さについて第2次取りまとめで設定した3[m]に加え、9[m]のケースでも解析を行ったことである。本解析の境界条件は、亀裂外周面部分の緩衝材の固相率を0[-]と設定している。このため、亀裂へ侵入した緩衝材が亀裂外周面に到達するとゼロ濃度境界条件により強制的にモデル範囲外へ運び去られる。したがって、実際よりも侵入を速く評価してしまうことが考えられ、亀裂長さを大きくしたケースにより、解析評価上の影響を把握した。図3.5（亀裂長さ3[m]）と図3.6（亀裂長さ9[m]）に解析メッシュを示す。

表 3.2 解析条件

解析コード	汎用有限要素解析コード ABAQUS Ver. 6.2
緩衝材仕様	乾燥密度 1.6 [Mg/m ³], ケイ砂 30 [%]
モデル	軸対称モデル
緩衝材寸法	内径: ϕ 0.86[m], 外径: ϕ 2.26[m], 高さ: 0.25[m]
亀裂長さ	3[m], 9[m]
亀裂幅[m]	0.0005, 0.001, 0.0015, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005
初期条件	固相率: コア部(0.592593[-]), 亀裂部(0[-])
境界条件	コア部表面及び亀裂表面不透過, 亀裂外周面部分の緩衝材の固相率 0 亀裂外周面以外の部分では緩衝材のモデル外部への移動はない
入力パラメータ	固相拡散係数: コア部 [*] , 亀裂部 [*]

※: 図 2.22, 図 2.23 参照

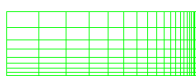


図 3.5 解析メッシュ（亀裂長さ 3[m]）



図 3.6 解析メッシュ（亀裂長さ 9[m]）

3.2.2 解析結果および考察

図 3.7～図 3.9 に解析結果の一例として固相率コンター図を 3 次元表示で示す(亀裂長さ 3[m], 亀裂幅 0.0005[m])。また, 図 3.10 と図 3.11 に亀裂長さ 3[m]および 9[m]の場合における緩衝材密度の時間的変化を, 図 3.12 に亀裂幅の確率を考慮した平均的な緩衝材密度の変化を示す。

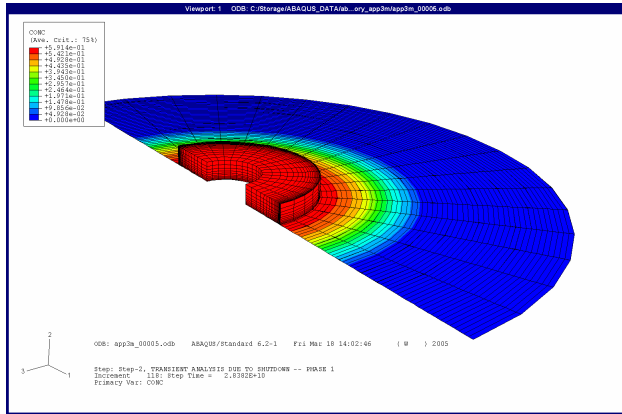


図 3.7 処分場解析結果/1000 年後

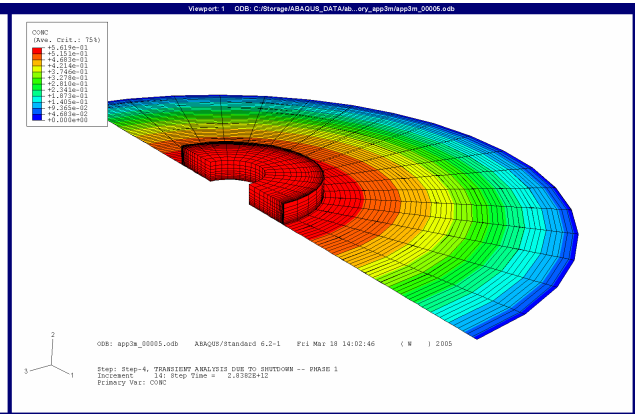


図 3.8 処分場解析結果/10 万年後

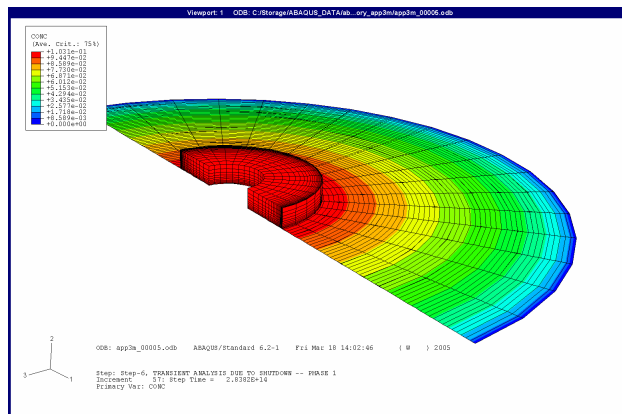


図 3.9 処分場解析結果/1000 万年後

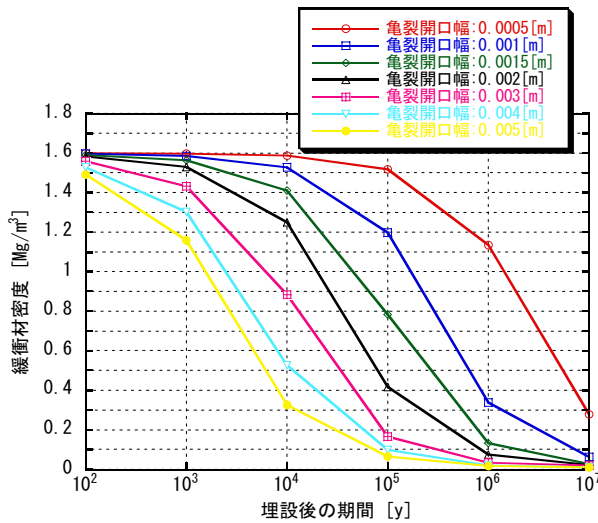


図 3.10 処分後年数と緩衝材密度の推移 (亀裂長さ 3[m], 亀裂幅別)

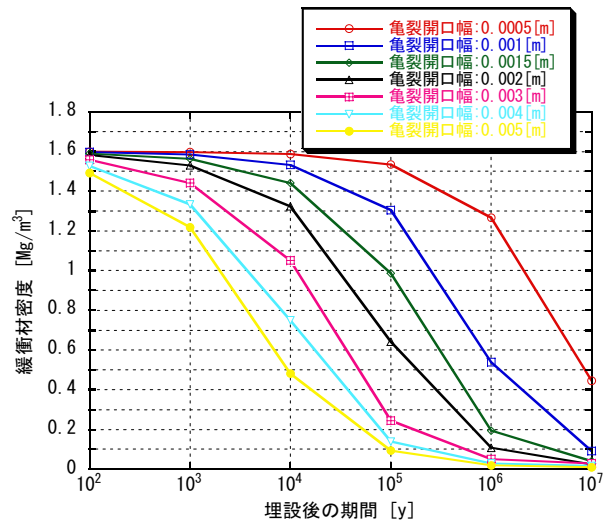


図 3.11 処分後年数と緩衝材密度の推移 (亀裂長さ 9[m], 亀裂幅別)

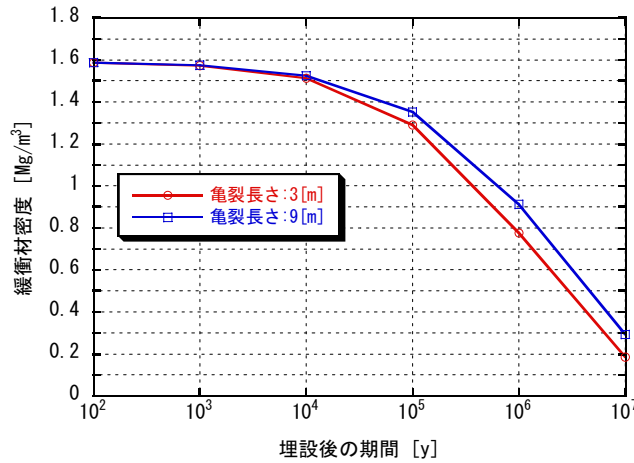


図 3.12 緩衝材密度の平均的な変化

亀裂長さが 9[m] の解析結果は、3[m] の結果よりも密度減少がやや遅くなっており、境界条件設定上の評価への影響がやや緩和されているものの、その密度差は 0.1 [Mg/m³] 程度であり、あまり顕著ではない。第 2 次取りまとめ時における解析評価結果 (図 3.4) と本解析評価を比較すると明らかなように、本解析では、第 2 次取りまとめ時の結果よりも早い時期に緩衝材密度が低下した。この差が生じた原因は、固相拡散係数を規定する、透水係数、膨潤圧、粘度のそれぞれの物性データの評価結果が第 2 次取りまとめの時点と異なるためである。

図 3.13～図 3.15 に第 2 次取りまとめと本解析における、緩衝材の透水係数、膨潤圧、粘度の物性データの比較図を、図 3.16 と図 3.17 にコア部の固相拡散係数、亀裂部の固相拡散係数の比較図を示す。

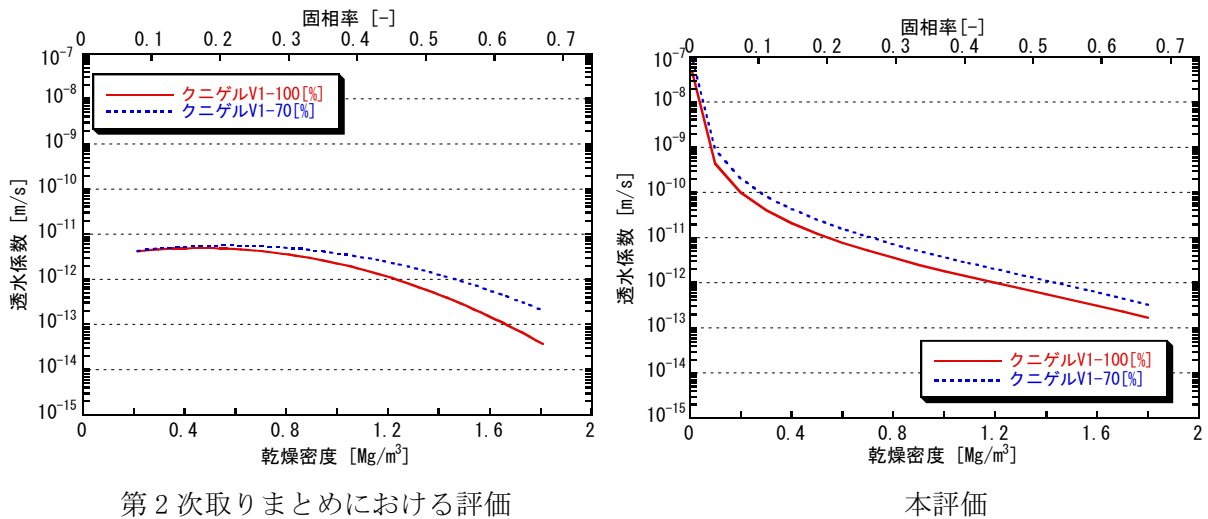
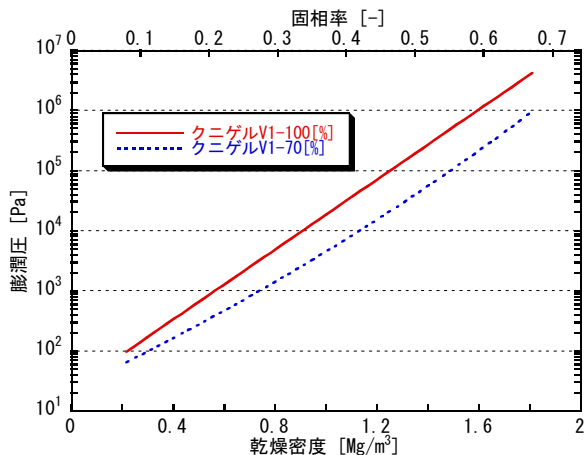
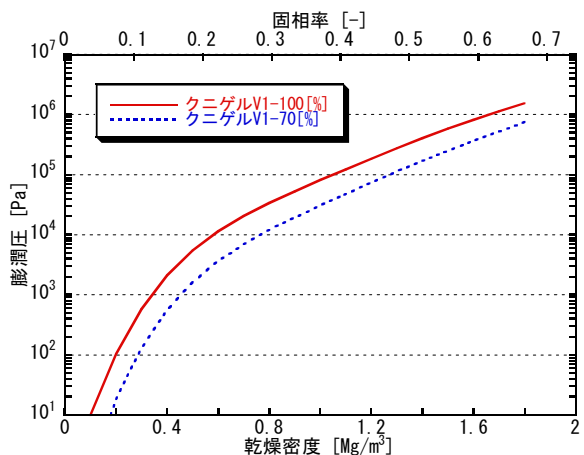


図 3.13 第 2 次取りまとめと本解析との比較 (透水係数)

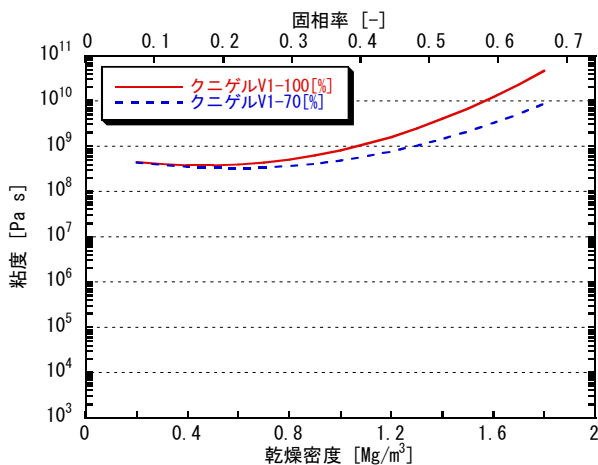


第2次取りまとめにおける評価

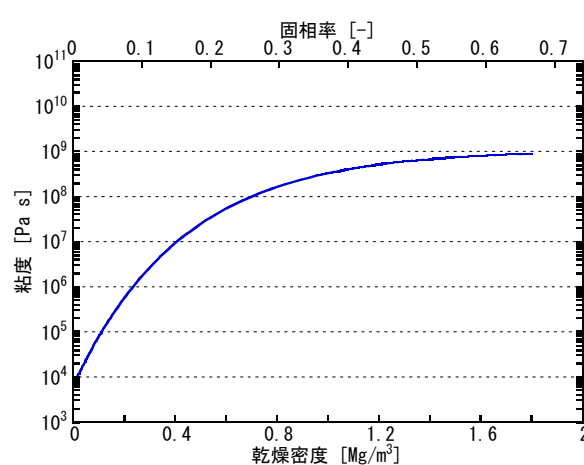


本評価

図 3.14 第2次取りまとめと本解析との比較 (膨潤圧)

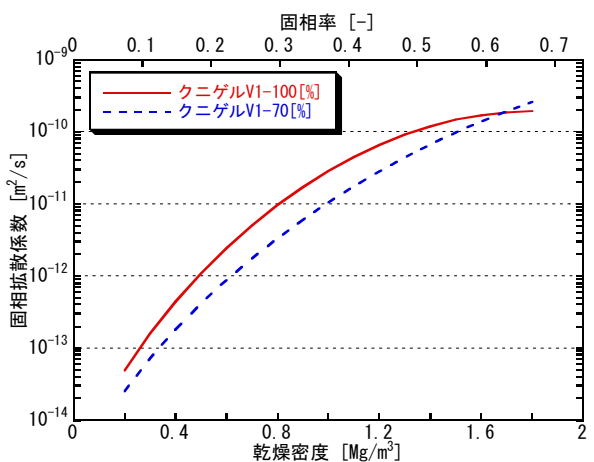


第2次取りまとめにおける評価

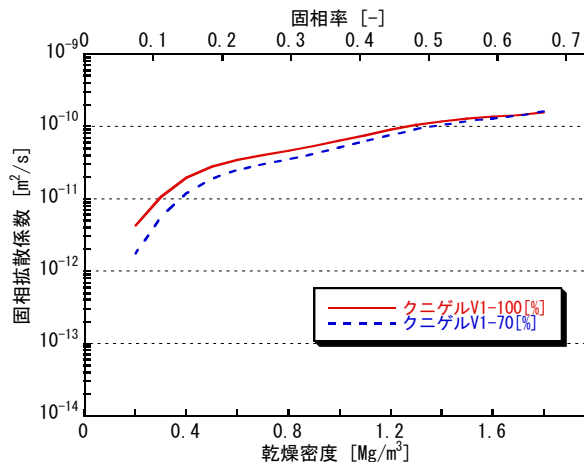


本評価

図 3.15 第2次取りまとめと本解析との比較 (粘度)

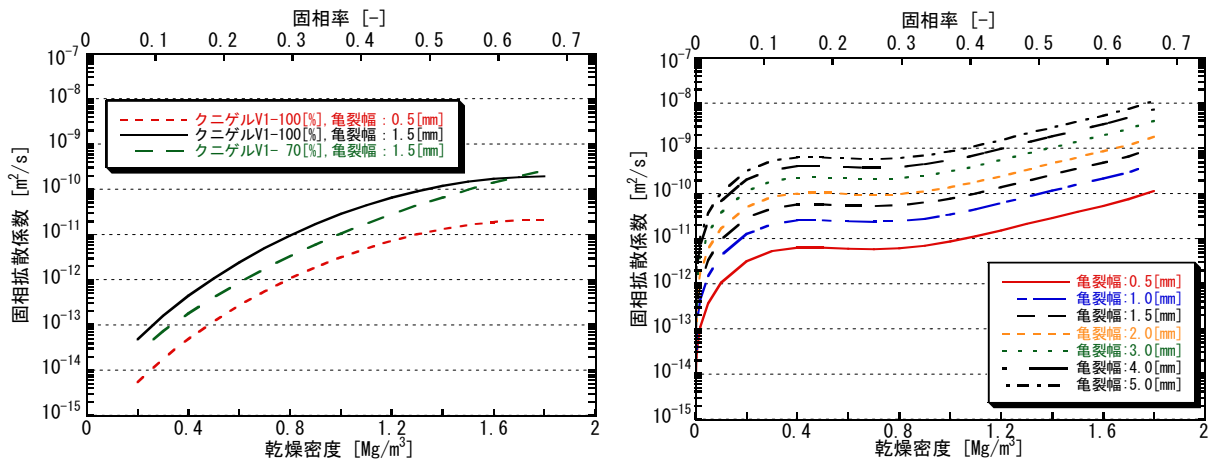


第2次取りまとめにおける評価



本評価

図 3.16 第2次取りまとめと本解析との比較 (コア部固相拡散係数)



第2次取りまとめにおける評価

本評価

図 3.17 第2次取りまとめと本解析との比較（亀裂部固相拡散係数）

図 3.16 と図 3.17 より、固相拡散係数は、コア部・亀裂部ともに、第2次取りまとめ時よりも2桁から3桁弱大きくなっていることが分かる。具体的には、コア部の固相拡散係数については透水係数の評価（図 3.1.3）、亀裂部の固相拡散係数については粘度の評価（図 3.1.5）における第2次取りまとめ時と本解析とでの差が、コア部と亀裂部の固相拡散係数が大きくなったことに起因する。

第2次取りまとめ時の評価では、ベントナイトの粘度のデータが取得されていなかったため、ある仮定により粘度を推定し、評価を行っている。本解析では、ベントナイトの粘度を実測値に基づいて評価しており、第2次取りまとめの時点より、その評価の信頼性が向上されているものと考えられる。しかし、その一方で、本解析で用いている粘度評価値は、実測値から推定したものであるため、今後さらに粘度のデータを蓄積し、評価の信頼性を検証していく必要がある。また、本解析が処分場で起こる現象をどの程度の精度で評価しているのかを確認するためには、今後、以下の事項について検討を行う必要がある。

固相拡散モデルの妥当性の確認

本検討では、ベントナイト単体については、X線CTによる密度分布の時間変化との比較解析が実施されているが、ケイ砂混合体については実施できていない。ケイ砂混合体に関しても、密度分布の時間変化について試験結果とモデルによる評価との比較を行い、固相拡散モデルが緩衝材の侵入現象を表現できるかについて十分な検証が必要である。また、ベントナイト単体についても、実験結果とモデルとの比較検討は、1データのみであり、さらに試験データを蓄積するなどして十分な比較検証を行い、モデルの妥当性を評価する必要がある。

粘度データの蓄積

低せん断速度域（侵入現象の対象域）における粘度データの蓄積が必要である。特に、本検討では、含水比 1000[%]以上の高含水比域においても、低せん断速度の場合に、粘度は以前評価した値よりも高くなることが示唆されており、この点について十分な数のデータを取得し、検証していく必要がある。

低密度域における透水係数・膨潤圧データの取得

本検討では、低密度域の透水係数と膨潤圧について、小峯・緒方らによる実験式と理論式を用いた評価を行っている。透水係数の実験式は、低密度の試料を用いた試験ではなく、ケイ砂混合率を増した試料での測定に基づいている。すなわち、透水係数・膨潤圧とも、実際に低密度の緩衝材の供試体を用いた測定ではないため、実測によって現状の評価の妥当性を検証する必要がある。

岩盤亀裂粗度の影響確認

侵入現象に関するこれまでの研究では、亀裂表面が平滑である条件における試験、モデル化による検討を行っている。しかしながら実際には、岩盤亀裂の表面は平滑ではなく粗度を有する面であり、この亀裂表面粗さが緩衝材の侵入を遅延させる効果があることが考えられる。または、緩衝材と岩盤亀裂表面の間の摩擦よりも、緩衝材の内部粒子間摩擦の方が卓越し、岩盤亀裂表面の粗さは侵入速度にあまり影響しないという考え方もできる。処分場における侵入現象の予測精度を向上させるためには、この亀裂表面粗さが及ぼす影響の程度について、試験を行うなどして確認する必要がある。

コア部の飽和・不飽和影響に関する検討

本検討で用いている固相拡散モデルでは、全領域で飽和を仮定しており、処分場で想定される処分初期の不飽和の影響は考慮できていない。不飽和時では、緩衝材の膨潤圧が飽和時のように高くないため、この分緩衝材の密度低下を速く見積もることになる。不飽和域をモデル化するためには、粘土粒子の亀裂への拡散と同時に地下水の緩衝材内部への拡散を連成して取り扱うか、もしくは、地下水の拡散を別途解析し、その結果を粘土粒子の拡散解析への入力条件とするかの二通りの手法が考えられる。ただし、処分場において、緩衝材が飽和するまでの時間は、50年程度と予測されていることから、 $10^6 \sim 10^7$ 年後における緩衝材の密度低下に及ぼす影響は小さいことが予想される。したがって、不飽和域を考慮したモデル化は、緩衝材侵入現象モデルの評価精度を技術的に向上させるという意義は大きいものの、処分性能を評価する観点からは重要性はあまり高くないものと考えられる。

3.3 海水系地下水条件における影響試算

ここでは、海水系地下水条件下を想定した際の長期的な時間変化に伴う緩衝材の密度低下について影響試算を行う。粘土粒子の拡散モデルでは、ベントナイトの透水係数、膨潤圧、粘度の物性データより、入力データとなる固相拡散係数を算出する必要がある。これまでに、降水系地下水条件については、各物性データの検討を行っているものの、海水系地下水条件下については、まだ検討できていない。したがって、本検討では、実験結果より得られた経験式を用い、海水系地下水条件による侵入現象の影響試算を行った。

緩衝材流出挙動試験設備 (BENTFLOW) における侵入現象に関する試験結果からは、蒸留水、人工海水、幌延地下水を用いた単一平行平板模擬亀裂中への時間と侵入速さに関するデータを取っている。これらの結果から、緩衝材が乾燥密度 $1.6[\text{Mg}/\text{m}^3]$ 、ケイ砂が 30[%] 混合された仕様では、蒸留水と幌延地下水における侵入速さの指標である比例係数を比較した場合に、幌延地下水は蒸留水よりも 1/4 程度小さくなる。また、蒸留水と人工海水では、人工海水の比例係数は蒸留水よりも 1/10 程度小さくなることが示されている。これはすなわち、時間スケールにおける緩衝材の密度低下量が、蒸留水 (降水系地下水) よりも幌延地下水・人工海水 (海水系地下水) の水質環境下で少ないことを示唆している。これらは、侵入挙動を単一平行平板の模擬亀裂によって地下水化学による影響をみたものであるが、実際の岩盤亀裂は、亀裂表面の粗さや、亀裂が複雑に交差していることが考えられることから、本実験結果は保守的なものとなっている。これらの実験的な結果より、緩衝材流出/侵入に関しては、海水系地下水条件下で、さほど問題とならないことが示唆されている (松本・棚井, 2004, 2005)。

したがい、ここでは、一例として幌延地下水における亀裂侵入速さのデータ (比例係数) と、X線 CT 測定より得られた亀裂侵入部における平均的な乾燥密度 (松本・棚井, 2004・2005) を用い、人工バリアの仕様例 (核燃料サイクル開発機構, 1999) を基に、岩盤亀裂中への侵入による緩衝材の密度低下を見積もり、緩衝材の物理的安定性を評価した。

ここでは、実験で得られた乾燥密度 $1.6[\text{Mg}/\text{m}^3]$ -ケイ砂 30[%] 混合体の比例係数と、X線 CT より得られた亀裂侵入部の平均乾燥密度の結果を用い、図 1.1 に示す概念図の岩盤亀裂中に、ある無限平板の単一亀裂が存在していると仮定し、亀裂傾度をパラメータとして緩衝材の密度低下量を見積った。試算に用いたパラメータを表 3.3 にまとめる。ここで、亀裂幅の設定は、実験で実施した幅とし、侵入域における乾燥密度は、侵入密度測定試験の結果をもとに、ケイ砂混合体で得られた平均乾燥密度 $0.3[\text{Mg}/\text{m}^3]$ と、保守的にベントナイト単体で得られた平均乾燥密度 $0.5[\text{Mg}/\text{m}^3]$ を用いた。また、緩衝材の周方向に設定した亀裂傾度は、10 本 (約 $2.5[\text{本}/\text{m}]$)、20 本 (約 $5[\text{本}/\text{m}]$)、30 本 (約 $7.5[\text{本}/\text{m}]$) とした。なお、本評価では、緩衝材の上部にある放射線遮へい上必要な埋め戻し材の仕様が、緩衝材と同じ材料仕様となっていることから、緩衝材上部の埋め戻し材を含んで評価を行った。

表 3.3 試算に用いたパラメータ

緩衝材仕様	乾燥密度 1.6[Mg/m ³] (ベントナイト 70[%], ケイ砂 30[%])
亀裂幅 [mm]	1.5
侵入域の平均密度 [Mg/m ³]	0.3 , 0.5
比例係数 [mm/hr ^{1/2}]	0.08
単一平板亀裂本数 [本]	10 , 20 , 30
経過時間 [year]	1年～100万年

侵入距離 y は、幌延の試錐調査により採取された実際の地下水を用いた実験によって得られた比例係数 A より、(3.1) 式によって見積られる。ここで、 t は時間である。

$$\text{亀裂幅} : 1.5\text{mm} \quad y[\text{mm}] = 0.08\sqrt{t} \quad (3.1)$$

岩盤亀裂中への緩衝材の侵入が、永久的にこの侵入形態で進展する場合には、100 万年後までの侵入距離は表 3.4 に示すとおりとなる。また、侵入域における形状に関しては、これまでの実験的な知見により、同心円状に侵入するものと仮定し、侵入距離と亀裂幅より侵入域の体積を求め、X 線 CT によって得られた亀裂侵入部の平均乾燥密度を用い、侵入部の乾燥質量から侵入現象による緩衝材の密度低下量を求めた。

表 3.4 緩衝材侵入距離

経過時間 [year]	経過時間 \sqrt{t} [hr ^{1/2}]	侵入距離 y [cm]
1年	94	0.8
10年	296	2.4
100年	936	7.5
1千年	2960	23.7
1万年	9359	74.9
10万年	29597	236.8
100万年	93595	748.8

侵入部における乾燥質量の計算結果より、緩衝材密度の時間的な低下は、図 3.18 および図 3.19 に示すとおりである。ここで、設定した亀裂頻度として最も厳しい条件である約 7.5[本/m]の結果を述べる。1 万年後までは、亀裂侵入部の乾燥密度が 0.3[Mg/m³]、0.5[Mg/m³]ともに、顕著な緩衝材の密度低下がないことが分かる。亀裂侵入部の乾燥密度が 0.3[Mg/m³]の場合、その後の緩衝材の密度低減率は、10 万年後で約 2[%] (約 1.57[Mg/m³]) 程度、100 万年後では約 13[%] (約 1.4[Mg/m³]) に留まる結果となった。一方、亀裂侵入部の乾燥密度が 0.5[Mg/m³]の場合、10 万年後の緩衝材の密度低減率は、約 3[%] (約 1.55[Mg/m³]) 程度、100 万年後では約 21[%] (約 1.26[Mg/m³]) となった。評価結果を表 3.5 にまとめる。

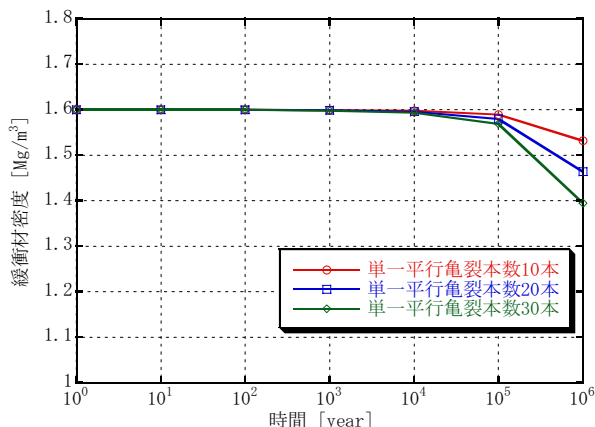


図 3.18 緩衝材密度低下の試算
(侵入部密度：0.3[Mg/m³])

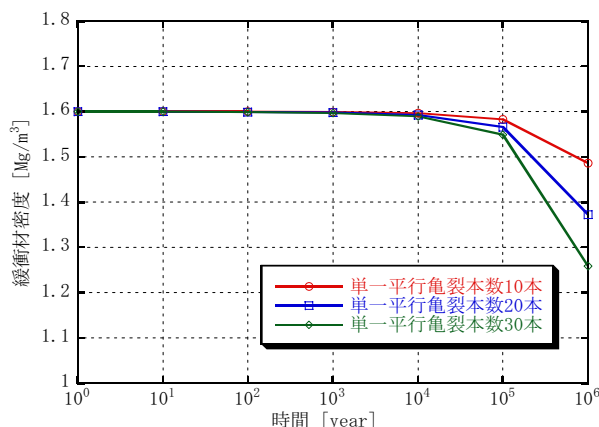


図 3.19 緩衝材密度低下の試算
(侵入部密度：0.5[Mg/m³])

表 3.5 時間経過に伴う緩衝材の密度低下と低減率（亀裂頻度：約 7.5 本/m）

経過時間 [year]	侵入部の平均乾燥密度を 0.3[Mg/m³]と仮定した場合		侵入部の平均乾燥密度を 0.5[Mg/m³]と仮定した場合	
	乾燥密度[Mg/m³]	密度の低減率[%]	乾燥密度[Mg/m³]	密度の低減率[%]
1年	1.600	0.00	1.600	0.00
10年	1.600	0.01	1.600	0.02
100年	1.600	0.03	1.599	0.05
1千年	1.598	0.10	1.597	0.17
1万年	1.594	0.39	1.590	0.65
10万年	1.569	1.91	1.549	3.18
100万年	1.395	12.78	1.259	21.30

緩衝材の岩盤亀裂内への侵入現象における人工バリア埋設後の健全性の観点より、100 万年後においても、緩衝材密度が 1.25[Mg/m³]（有効粘土密度：約 1.0[Mg/m³]）の密度を有していることから、緩衝材中の核種の移行形態を拡散場に担保していること。また、コロイドフィルトレーション機能が働く有効粘土密度 0.8[Mg/m³]以上の密度を担保していることから、幌延地下水を一例とした海水系地下水条件下において人工バリアは長期的に健全性を担保できるものと考えられる。

ここでは、本来複雑である岩盤内の亀裂を単一の平行平板と仮定し、さらに亀裂頻度も過大な設定によって侵入現象による緩衝材の密度低下を長期的に評価した。実際には、廃棄体の坑道離間距離および廃棄体ピッチより、廃棄体1本当りの緩衝材の岩盤亀裂への侵入距離は制限される。また、本来複雑である岩盤亀裂を平面的な空間として模擬したことで、実際の岩盤亀裂よりも、侵入が容易な条件を設定していることから、ここでの試算においては、かなり保守的な評価となっている。

以上のような評価においても、緩衝材の岩盤亀裂中への侵入による緩衝材の密度低下は顕著でなく、海水系地下水条件下において、本事象がさほど問題とならないことが示唆された。

4. 侵入現象モデル化研究における今後の課題

ここでは、侵入現象モデルの精度向上・高度化に向けた、第2次取りまとめ以降の進捗と今後の課題の整理を行った。

4.1 第2次取りまとめ時における課題と進捗

侵入現象のモデル化研究では、第2次取りまとめ時に、以下が課題として挙げられている。

- ①緩衝材の粘度データの取得
- ②緩衝材の低密度域における物性データの検討
- ③試験結果と解析結果との十分な比較検討

これらを踏まえ、第2次取りまとめ以降、モデルの精度向上や妥当性・適用性を含めた検討を実施してきた。上記①の課題については、ベントナイトの含水比をパラメータに粘度の実測を試み、実測データに基づいた粘度評価式を検討した。②については、実験・理論式に基づく再評価を実施し、透水係数・膨潤圧のデータを見直した。③については、X線CTを適用したベントナイト侵入密度分布データの取得を行い、解析との比較評価を実施した。これらモデル化に適用している物性データの見直しや適用性評価によって、モデルの精度向上が図られつつある。しかし、その一方で、上記課題解決は、十分ではない事も事実である。具体的に①③の課題に関しては、データ取得数が限られた一部であり、データそのものの妥当性の確認が行えていないことや、検証が十分でないことが挙げられる。また、②に関しては、侵入現象の対象となる低密度域への実験式・評価式の適用性確認が出来ていないことが挙げられる。

4.2 今後の課題の明確化

侵入現象モデル化研究に関する課題を、以下に記す。

- ・固相拡散モデルの妥当性の確認

実験結果とモデル評価との比較検証については、一部のデータのみでの実施しかできておらず、モデルによる侵入現象の表現性に関して十分な検証評価が必要である。

- ・物性データの取得および妥当性の確認

固相拡散係数を規定するベントナイトの物性データである低密度域における膨潤圧、透水係数の実測データの取得、ならびに、粘度データの蓄積を行い、モデルに適用しているデータ自体の十分な検証評価が必要である。

- ・岩盤亀裂粗度による侵入挙動への影響確認

侵入現象研究では、試験、モデル化ともに本来複雑である岩盤亀裂を、平行平板に模擬した亀裂系による検討しか実施されていない。岩盤亀裂粗度の侵入挙動への影響程度など、模擬試験を実施するなどした検討評価が必要である。

・固相拡散モデルの高度化

固相拡散モデルでは、緩衝材を埋設時より飽和と仮定している。モデル評価の精度向上を図るためには、現状のモデルに緩衝材への地下水の浸潤を連成させるなどの高度化を行うなどし、緩衝材の埋設初期時の飽和、不飽和による評価への影響確認が必要である。

さらに現状の評価は、非常に単純化した条件によるものであり、実際には、温度影響や、岩盤クリープ、オーバーパックの腐食膨張などによる緩衝材への外部応力の影響を考慮する他、今後、地質環境条件を考慮するなど、データを充足してモデルの高度化を進め、適宜評価を見直す必要がある。また、緩衝材の密度低下による人工バリアの構造力学的な検討に関しては、緩衝材の力学特性のデータ等の進捗を適宜参考にし、緩衝材の流出挙動に伴う複合的な事象評価、例えば、オーバーパックの支持力安定性などの評価、ならびに緩衝材自体の諸機能の限界範囲に関する評価を将来的に検討することが課題であろう。

4. おわりに

本報では、侵入現象モデルの精度向上へ向けた検討を行い、ベントナイトの粘度データの取得ならびに検討、実験結果に基づいた固相拡散係数の見直し、実験結果とのシミュレーション解析を実施し侵入現象モデルの適用性の確認を行った。また、本検討により見直された固相拡散係数により、長期的な時間変化による緩衝材密度変化の事例解析結果について報告を行った。

主な成果を以下にまとめる。

1) ベントナイトの物性データの精度向上

本検討により、侵入現象モデルに用いているベントナイトの粘度データの充足を行い、ベントナイト粘度の評価を再検討した。これにより評価した物性データを用い、実験結果とのシミュレーション解析を行った結果、解析結果は、実験結果を良く再現しており、解析の精度向上が図られた。

2) 長期的な緩衝材密度変化に関する事例解析

ベントナイトの物性データの見直しや検討結果より設定した固相拡散係数を用い、長期的な緩衝材の密度変化の事例解析を実施した。その結果、本解析結果は、第2次取りまとめ時での評価と比較し、早い時期に緩衝材の密度が低下する結果となった。また、実験結果に基づいた海水系地下水条件における侵入現象の影響試算を行った結果、海水系地下水条件下において本事象がさほど問題とならないことが示唆された。

さらに、上記の検討評価やモデルの精度に関して、妥当性を検討し、侵入現象のモデル化における今後の課題の明確化を行った。今後の主な検討課題は、以下のとおりである。

- ・固相拡散モデルの妥当性の確認
- ・物性データの取得および妥当性の確認
- ・岩盤亀裂粗度による侵入挙動への影響確認
- ・固相拡散モデルの高度化

以上、侵入現象のモデル化に関しては、第2次取りまとめ以降の検討により、固相拡散係数を規定するベントナイトの物性データの精度が向上され、モデルによる評価精度が向上されつつある。しかし、その評価の妥当性の確認などは現状において十分ではなく、本検討で挙げられた課題についてさらに検討を行っていく必要がある。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 — 地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022，(1999).
- 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研究報告 —平成14年度報告—”，JNC TN1400 2003-004，(2003).
- Kanno, T., Y. Iwata & H. Sugino：“Modelling of bentonite swelling as solid particle diffusion”，Clay Science for Engineering, Adachi & Fukui (eds), Balkema, Rotterdam, (2001).
- 菅野毅，岩田裕美子：“緩衝材侵入現象モデルの検討”，JNC TJ8400 2003-026，(2003).
- 菅野毅，岩田裕美子：“緩衝材侵入現象モデルの検討(II)”，JNC TJ8400 2003-083，(2004).
- 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”，JNC TN8430 2004-005，(2005).
- 小峯秀雄，緒方信英：“高レベル放射性廃棄物地層処分のための緩衝材の力学特性(その2) — 締め付けたベントナイトの吸水膨潤評価式の提案—”，電力中央研究所報告・研究報告 U92045，(1993).
- 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—”，電力中央研究所報告・研究報告 U99013，(1999).
- 小峯秀雄，緒方信英：“高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の透水特性”，電力中央研究所報告・研究報告 U00041，(2001).
- 松本一浩，棚井憲治：“緩衝材の流出／侵入特性”，JNC TN8400 2003-035，(2004).
- 松本一浩，棚井憲治：“緩衝材の流出／侵入特性(II) — 幌延地下水(HDB-6号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価—”，JNC TN8400 2004-026，(2005).
- 杉野弘幸，菅野毅：“拡散モデルを用いた緩衝材の流出挙動の解析的予測”，JNC TN8400 99-040，(1999).