

緩衝材侵入現象モデルの検討（Ⅱ）

（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）

2004年2月

石川島播磨重工業株式会社

本資料の全部または一部を複写,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 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)
2004

緩衝材侵入現象モデルの検討 (II)

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

菅野 毅* 岩田 裕美子*

要旨

高レベル放射性廃棄物地層処分における緩衝材の岩盤き裂への侵入現象のモデル化の検討を行なった。平成 14 年度の研究における緩衝材侵入現象のモデル化で課題となっていた、侵入ゲルの密度分布の評価について、X 線 CT によるき裂部乾燥密度分布の測定データを用い、モデルの妥当性および適用性に関する検討を行い、モデルの見直しを実施した。本研究で見直したモデルに基づき、模型試験 (ストロー貫入型・BENTFLOW 型) による侵入試験結果 6 ケースの密度分布測定結果との比較を行った。BENTFLOW 型模型試験では数値解析と実験結果との間に比較的整合性が見られたが、ストロー貫入型模型試験では実験結果との乖離が認められた。

本モデルにおいては、中野らの膨潤性粘土の移動論に基づき、粘土粒子の拡散としてモデル化を試みている。また、安らは、緩衝材の侵入現象について、圧密方程式を適用してモデル化を行っている。そこで、モデルの妥当性評価も含め、これら専門家間においてレビューを実施し、今後の課題を明確にした。

最後に、見直したモデルを用いて、緩衝材の密度低下を数値解析により評価し、第 2 次取りまとめとの比較を行なった。

本報告書は、石川島播磨重工業株式会社が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所 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

* 石川島播磨重工業株式会社

Study on Model for Bentonite Buffer Intrusion (II)

(Document Prepared by Other Organization, Based on the Trust Contract)

Takeshi Kanno* and Yumiko Iwata*

Abstract

Modelling study on the extrusion phenomenon of the bentonite in a geological repository for the high-level radioactive is performed to enhance the reliability of latest model studied on fiscal year 2003(H14), on the matter of density distribution of extruded bentonite gel. In this study, the model is reconsidered and revised based on the result of comparison between experimental and calculated results. The numerical analyses for BENTFLOW type experiments and model experiments on extrusion in a pipe are performed using the revised model. The analyses for the BENTFLOW about distribution of extrusion density reproduce the experimental results tolerably. The agreement between the calculated and experimental results of the model experiments are not good. Our model is originated in solid diffusion model of swelling clay proposed by Nakano et al. To enhance the reliability of our model, the latest model is reviewed by experts. At last, the numerical analyses for H12 type repository are performed by revised model to evaluate the long-term reduction of bentonite density for the extrusion phenomenon. The analytical results are compared with the results described in H12 report.

This work was performed by Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

目次

1	はじめに	1
1.1	研究開発の目的.....	1
1.2	これまでの関連研究開発の状況.....	2
1.2.1	第2次取りまとめ報告書における緩衝材侵入現象モデル化の取扱い	2
1.2.2	平成14年度の研究 - 粘性係数、低密度領域の膨潤圧、透水係数データを用いたモデル高度化 -	5
1.3	本研究開発の位置づけ・目的	15
1.4	研究開発方法の概要・特徴・特記事項.....	15
1.4.1	モデルの妥当性検討.....	15
1.4.2	専門家とのレビュー.....	16
1.4.3	数値解析.....	16
2	モデルの妥当性検討	17
2.1	平成14年度のモデルを用いた BENTFLOW 型模型試験の解析.....	17
2.1.1	BENTFLOW 型模型試験 (X線 CT 測定用) の概要	17
2.1.2	解析方法.....	17
2.1.3	解析結果.....	19
2.2	固相拡散係数の見直しによるモデルの再検討	19
2.3	見直した固相拡散係数による BENTFLOW 型模型試験の再解析	22
2.3.1	解析方法.....	22
2.3.2	解析結果.....	23
2.4	ストロー型模型試験の解析.....	30
2.4.1	ストロー型模型試験の概要	30
2.4.2	解析条件.....	31
2.4.3	解析結果.....	33
2.5	緩衝材流出挙動試験の解析 (侵入距離の評価)	40
3	専門家とのレビュー	43
4	処分場の数値解析.....	43
4.1	第2次取りまとめでの解析.....	43

4.2	本研究における固相拡散係数を用いた解析.....	45
4.2.1	解析方法.....	45
4.2.2	解析結果.....	46
5	おわりに.....	54
6	参考文献.....	55

図目次

図 1.1-1	緩衝材の侵入・侵食シナリオ.....	2
図 1.2-1	BENTFLOW 試験の従来解析結果.....	5
図 1.2-2	ベントナイトの粘性係数測定結果.....	7
図 1.2-3	粘度測定結果の外挿.....	8
図 1.2-4	侵入現象におけるベントナイトゲルの粘度推定値.....	8
図 1.2-5	ベントナイトゲルの粘度の設定値.....	9
図 1.2-6	緩衝材膨潤圧の設定値.....	10
図 1.2-7	緩衝材透水係数の設定値.....	11
図 1.2-8	コア部固相拡散係数の設定値.....	12
図 1.2-9	き裂部固相拡散係数の設定値.....	12
図 1.2-10	円管部固相拡散係数の設定値.....	13
図 1.2-11	流出距離の解析結果.....	14
図 1.2-12	乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m ³ 、孔径 4.2mm）.....	15
図 2.1-1	BENTFLOW 型模型試験解析メッシュ.....	18
図 2.1-2	平成 14 年度モデルによる BENTFLOW 型模型試験の解析結果の一例	19
図 2.2-1	粘性係数の設定.....	21
図 2.2-2	整合性の高い粘度を用いたときの解析結果.....	22
図 2.3-1	BENTFLOW 型模型試験解析メッシュ（再解析版）.....	22
図 2.3-2	解析結果（全体図 3 6 0 度）.....	23
図 2.3-3	解析結果（全体図 1 8 0 度）.....	24
図 2.3-4	解析結果初期状態.....	25
図 2.3-5	解析結果約 2 日後.....	25
図 2.3-6	解析結果約 7 日後.....	26
図 2.3-7	解析結果約 1 5 日後.....	26
図 2.3-8	解析結果約 4 4 日後.....	27
図 2.3-9	解析結果約 2 日後コア部拡大.....	28

図 2.3-10	乾燥密度分布解析結果（き裂幅 0.85 mm）	29
図 2.3-11	乾燥密度分布解析結果（き裂幅 1.0 mm）	29
図 2.3-12	乾燥密度分布解析結果（き裂幅 1.4 mm）	30
図 2.4-1	模型試験装置	31
図 2.4-2	模型試験解析メッシュ	32
図 2.4-3	ストロー型模型試験メッシュ（再解析版）	32
図 2.4-4	模型試験解析結果	34
図 2.4-5	解析結果初期状態	34
図 2.4-6	解析結果約 2 日後	35
図 2.4-7	解析結果約 7 日後	35
図 2.4-8	解析結果約 15 日後	36
図 2.4-9	解析結果約 26 日後	36
図 2.4-10	解析結果約 47 日後	37
図 2.4-11	解析結果約 77 日後	37
図 2.4-12	乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m ³ 、孔径 4.2mm）	38
図 2.4-13	乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m ³ 、孔径 5mm）	38
図 2.4-14	乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m ³ 、孔径 6mm）	39
図 2.4-15	本研究で見直された円管部の固相拡散係数	40
図 2.5-1	流出距離と時間の関係	42
図 2.5-2	BENTFLOW 型模型試験の侵入経過時間と距離の関係	42
図 4.1-1	第 2 次取りまとめの解析モデル	44
図 4.1-2	第 2 次取りまとめでの解析結果の一例（密度）	44
図 4.1-3	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	45
図 4.2-1	解析メッシュ	46
図 4.2-2	解析結果全体 360 度	48
図 4.2-3	解析結果全体 180 度	48
図 4.2-4	解析結果 初期状態	49
図 4.2-5	解析結果 100 年後	49
図 4.2-6	解析結果 1000 年後	50
図 4.2-7	解析結果 1 万年後	50

図 4.2-8	解析結果 10 万年後	51
図 4.2-9	解析結果 100 万年後	51
図 4.2-10	解析結果 1000 万年後	52
図 4.2-11	処分後年数と緩衝材密度の推移（き裂別）（ベントナイト 100%、模型試験に基づく固相拡散係数使用）	53
図 4.2-12	処分後年数と緩衝材密度の推移（き裂別）（ベントナイト 100%、BENTFLOW 試験に基づく固相拡散係数使用）	53

表目次

表 2.1-1	BENTFLOW 型模型試験の試験条件	17
表 2.4-1	解析対象とした模型試験の試験条件	31

1 はじめに

1.1 研究開発の目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、人工バリア材である緩衝材には、種々の機能が期待されている。このうち、緩衝材の岩盤き裂内への流出・侵入現象については、緩衝材の密度低下による人工バリアの諸機能の低下が懸念されている。緩衝材の侵入・侵食シナリオを図 1.1-1 に示す。

緩衝材の岩盤き裂への侵入現象に関する長期的な予測評価では、第2次取りまとめにおいて粘土粒子の拡散モデルに基づく評価が行われた。しかしながら、本来複雑である緩衝材の岩盤き裂内における挙動を単純化して得られた結果であり、ベントナイトの低密度領域の物性データおよび粘性係数等については、実測データが取得されておらず、推定値を用いた評価が行われた。このため、昨年度の委託研究において、ベントナイトの低密度領域の透水係数や膨潤応力の物性データの検討を行い、一部モデルの妥当性の確認を実施した。しかし、これまでの研究では、主として、緩衝材の侵入距離の時間変化のみで評価したものであるため、モデルの妥当性を十分に確認できていない。これは、緩衝材の侵入密度分布の実験データが取得されていないことに起因する。したがって、モデルの妥当性および適用性を評価するためには、緩衝材の侵入密度分布の実験データを取得し、実験結果と解析結果を比較する必要がある。

本研究では、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構という）において取得する緩衝材の侵入密度分布の実験データを用い、モデルの妥当性および適用性に関する検討を行うものである。

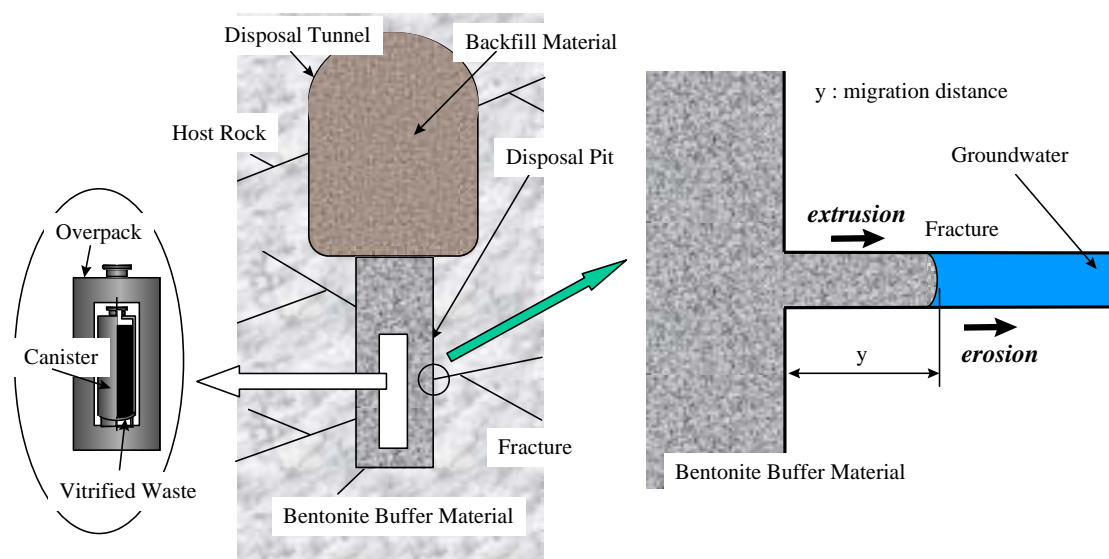


図 1.1-1 緩衝材の侵入・侵食シナリオ

1.2 これまでの関連研究開発の状況

ここでは、第2次取りまとめにおける緩衝材侵入現象のモデル化手法と昨年度実施したモデルの高度化に関する検討結果の概要を記述する。

1.2.1 第2次取りまとめ報告書¹⁾における緩衝材侵入現象モデル化の取扱い

侵入現象のメカニズムは、膨潤に伴うベントナイト粒子の移動と考えられる。中野らは膨潤性粘土の移動を表す式^{2),3)}

$$q_s = -k_s \frac{\partial \psi_s}{\partial z} \quad (1.1)$$

を提示した。ここで、 q_s は粘土粒子の流束、 k_s と ψ_s は各々、透水係数と水分ポテンシャルのアナロジーとして導入された固相伝導係数および粒子ポテンシャル、 z は座標である。さらに、固相拡散係数 D_s が、

$$D_s = k_s \frac{d\psi_s}{d\sigma} \quad (1.2)$$

と定義された。ここで、 σ は固相率 (V_s/V , ここで V_s は固相の体積 , V は全体積) である。(1.1)式と(1.2)式より、

$$q_s = -D_s \frac{\partial \sigma}{\partial z} \quad (1.3)$$

が得られる。

第2次取りまとめでは、この膨潤性粘土の移動論にもとづき、緩衝材の膨潤圧と粘性抵抗を用いて固相拡散係数を設定することにより緩衝材の侵入挙動をモデル化し、さらに緩衝材の侵入挙動試験と解析結果の比較を行っている^{1),4)}。第2次取りまとめの内容及びこれを詳述した Kanno ら (1999,2001) の文献^{5),6)}の内容を併せて、概要を以下に示すこととする。

飽和条件を仮定し、粘土粒子と水の質量保存則を考慮し、さらに粒子ポテンシャルが膨潤圧 P_s と等価である

$$\psi_s = \frac{P_s}{\rho_w g} \quad (1.4)$$

と考えると、固相拡散係数は次式で与えられる

$$D_s = \frac{\sigma k}{\rho_w g} \frac{dP_s}{d\sigma} \quad (1.5)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 k は透水係数である。緩衝材に外部応力等が作用しない、いわゆる自由膨潤状態では(1.5)式が適用できるが、岩盤の割れ目への緩衝材の侵入現象のように、狭い流路内における粘土粒子の移動では、流路壁面の摩擦の影響で、みかけの固相拡散係数が流路幅(割れ目幅)に依存することが考えられる。すなわち、固相拡散係数は、割れ目幅とともに増加し、割れ目幅がある程度大きくなると、自由膨潤状態の拡散係数に等しくなることが予想される。この現象をモデル化するために、割れ目中の粘性流体の式を侵入現象に適用する。(1.1)式と(1.4)式より、

$$q_s = -\frac{k_s}{\rho_w g} \frac{\partial P_s}{\partial z} \quad (1.6)$$

となる。ここで、き裂内の緩衝材侵入現象を粘性流体のクリープ流れでモデル化する。間隔 d の平行平板中ベントナイトのゲルの平均流束 \bar{q}_s は、

$$\bar{q}_s = -\frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dP_s}{dz} \quad (1.7)$$

で与えられる。ここで、 μ_s は流体の粘性係数、 dP_s/dz は圧力勾配である。(1.6)式と(1.7)

式を比較すると、

$$k_s = \rho_w g \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \quad (1.8)$$

き裂中の固相拡散係数は、(1.2)式、(1.4)式、(1.8)式より、

$$D_s = \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (1.9)$$

と得られる。(1.5)式を処分坑道(または処分孔)部に、(1.9)式を割れ目部に適用して侵入現象をモデル化する。ただし、緩衝材の粘性係数については、当時測定データがなかったために、ある一定のき裂幅において、(1.3)式と(1.7)式の固相拡散係数が等しいものと仮定して、粘性係数を評価した。具体的には、Kanno and Wakamatsu (1991)⁷⁾による実験から得られた侵入速度とき裂開口幅 d の関係式、

$$y = A(d, Bc)\sqrt{t} \quad (1.10)$$

(y は流出距離、 t はベントナイトが水と接触した後の時間、 Bc はベントナイト含水比)に示す係数 A のき裂幅にともなう増加傾向が、き裂幅 1 ~ 1.5mm 程度で頭打ちとなるという試験結果⁷⁾を参考にして、き裂幅が 1.5mm において、固相拡散係数が自由膨潤状態の値と等しくなると仮定した。一例として、ベントナイト 100%試料の粘性係数の評価結果を次式に示す。

$$\mu[Pa.s] = 1.67 \times 10^{-3} \cdot 10^{11.6 - 2.92\sigma + 8.53\sigma^2} \quad (1.11)$$

(1.3)式と(1.7)式を用い、BENTFLOW 試験の解析を実施した。解析は次式を基礎式とする軸対称拡散問題とし、汎用有限要素法解析コード ABAQUS (ver.5.7)を用いた。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \text{div}\{D_s(\sigma)\text{grad}\sigma\} \quad (1.12)$$

なお、流出先端部の境界条件については、Boisson (1989)⁸⁾の試験結果をもとに、先端部の含水比がその試料の液性限界値に等しいと仮定した。

図 1.2-1 に解析結果を示す(test1:ベントナイト 100%試料、き裂幅 1.5mm、test2:ベントナイト 100%試料、き裂幅 0.5mm)。解析結果は試験結果とほぼ一致しており、侵入速度の割れ目幅依存性が表現されている。

この解析では、粘性係数に推定値を用いており、緩衝材候補材料の粘性係数を実測

し、使用した推定値の妥当性を検証することが大きな課題である。また、固相拡散係数を算出する際に用いる、緩衝材の膨潤圧と透水係数については、乾燥密度の高い領域での測定データを低密度領域まで外挿した推定値を用いている。さらに、この時点では、緩衝材侵入現象の試験データとしては、流出距離 y のみであり、侵入ゲルの密度分布データが取得・整理されていなかった。このため、密度分布について、試験結果と解析結果を比較し、モデルの妥当性を十分に検討、評価することができていなかった。

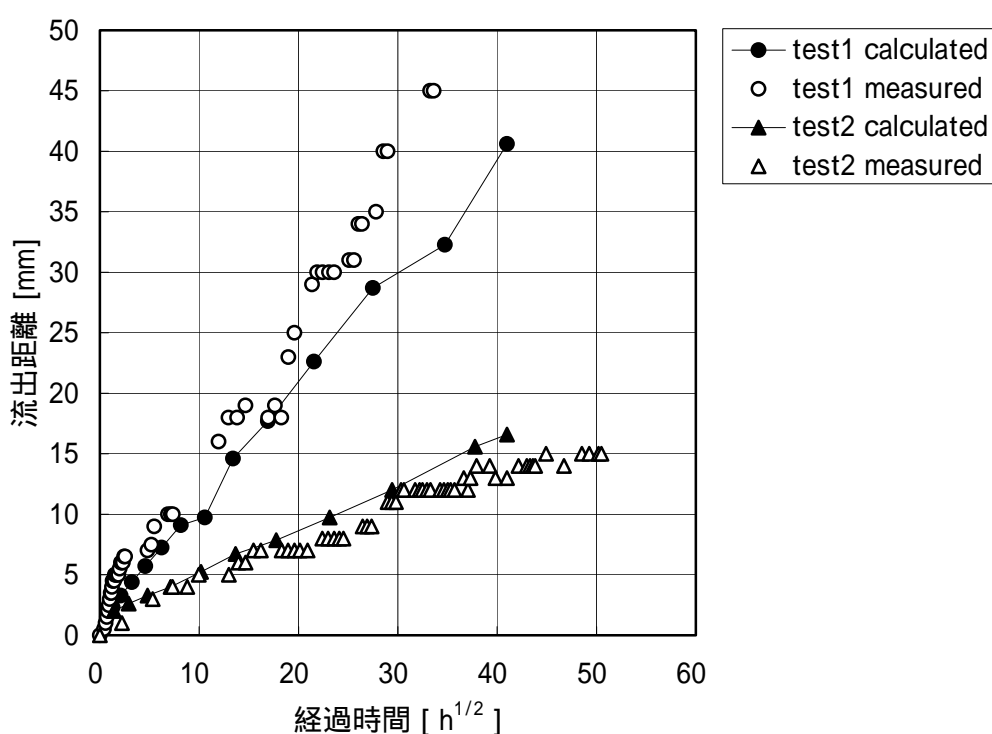


図 1.2-1 BENTFLOW 試験の従来の解析結果

1.2.2 平成 14 年度の研究 - 粘性係数、低密度領域の膨潤圧、透水係数データを用いたモデル高度化 -

前述の通り、第 2 次取りまとめにおける緩衝材侵入現象のモデル化では、次の 3 つの課題が残った。

- ・ 緩衝材の粘性係数に関する測定データがないため、推定値を用いていること
- ・ 低密度領域における緩衝材の膨潤圧と透水係数について、実測データを用いてい

ないこと

- ・試験データと解析結果の比較は、緩衝材流出距離の時間変化のみで行われており、侵入ゲルの密度分布について実施していないこと

第2次取りまとめ以降、ベントナイトのゲルの粘性係数および侵入ゲルの密度の測定がサイクル機構により試みられてきている。また、緩衝材の膨潤圧と透水係数については、小峯、緒方(1993,1999,2001)^{9), 10), 11)}の研究により、かなり低密度まで評価が行われてきている。このため、平成14年度の研究¹²⁾では、第2次取りまとめ時点での緩衝材侵入現象モデル化における上記3つの課題の解決を目指し、以下に示す項目を実施し、侵入現象モデルの高度化を試みた。

- ・ベントナイトの粘性係数測定手法の検討：緩衝材侵入現象のモデル化に必要な固相拡散係数算出に用いるベントナイトの粘性係数に関する測定方法を調査検討し、サイクル機構で取得されたデータの物理的解釈や妥当性を検討する。
- ・膨潤圧入力データの検討：小峯らが提案している緩衝材膨潤評価式に関する調査を行い、侵入現象のモデル化に必要な低密度領域を含めた膨潤圧（および透水係数）の入力データを検討する。
- ・入力パラメータの設定：上記の粘性係数、膨潤圧、透水係数に関する調査検討をまとめて、侵入現象の評価に必要な入力パラメータである固相拡散係数の値を見直す。
- ・Verbekeら(1997)¹³⁾およびAhnら(1998)¹⁴⁾との比較：緩衝材侵入現象を（逆の）圧密過程としてモデル化を実施している安らの手法について調査し、本研究で採用している固相拡散モデルとの類似性、相違点等を整理、検討する。
- ・数値解析：上記の入力パラメータの設定で得られた固相拡散係数の値を用い、BENTFLOW試験およびストロー状のサンプル器具を用いた侵入ゲルの密度分布に関するサイクル機構の模型試験の数値解析を実施する。

(1) ベントナイトゲルの粘性係数

図1.2-2にサイクル機構が測定したベントナイトゲルの粘性係数を示す。平成14年度の研究では、レオロジー分野におけるゲルの粘性係数の評価方法に関する調査結果に基づいて、

図 1.2-2 の測定値を外挿（図 1.2-3 参照）し、
 外挿値を含水比の関数として近似式を求め（図 1.2-4 参照）
 緩衝材侵入現象の評価で用いる粘性係数パラメータを図 1.2-5 に示す値として設
 定した。

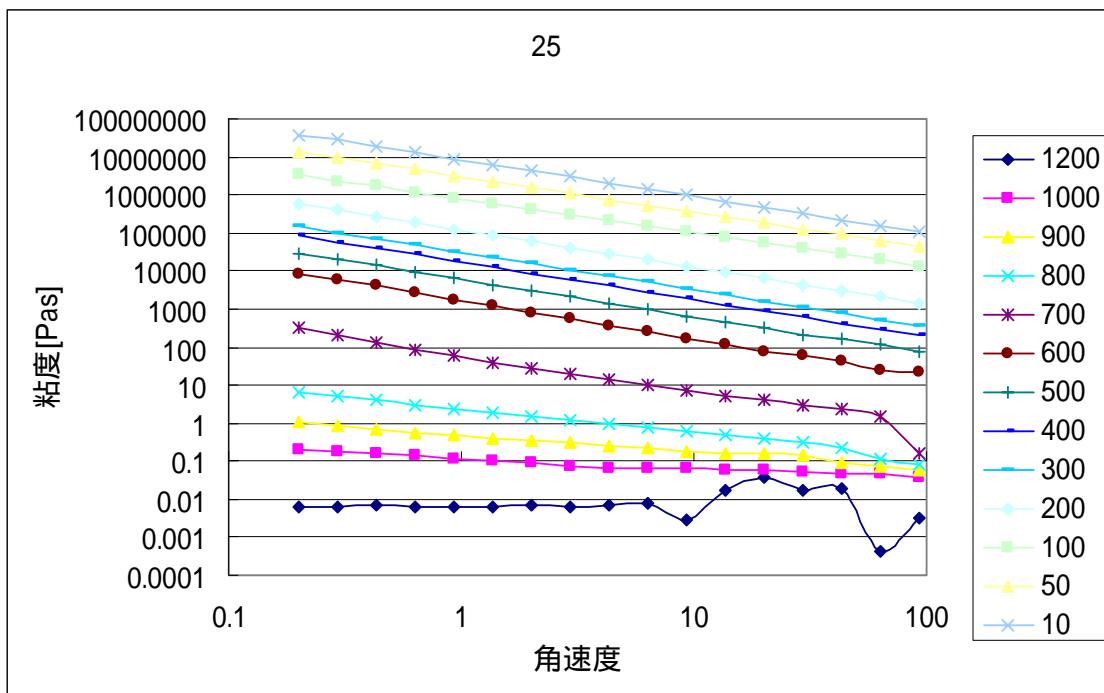


図 1.2-2 ベントナイトの粘性係数測定結果

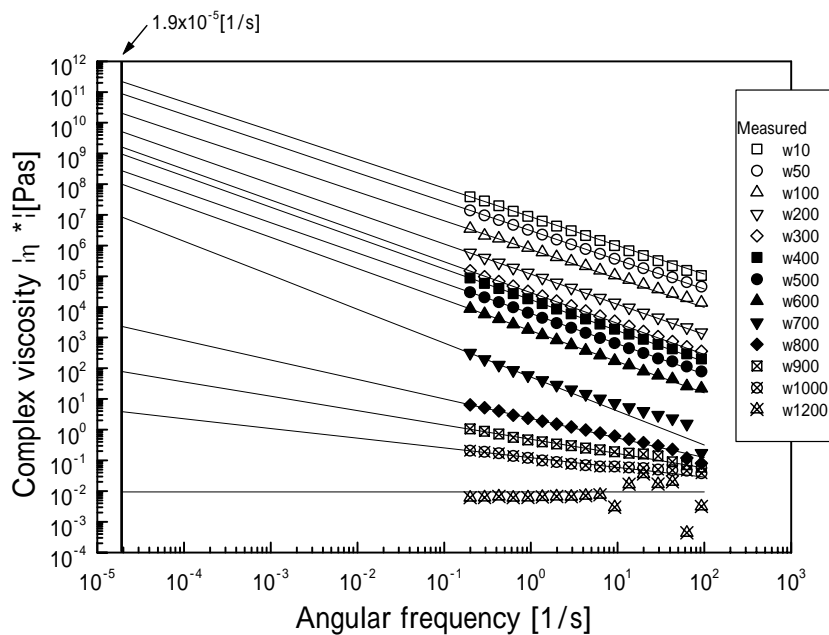


図 1.2-3 粘度測定結果の外挿

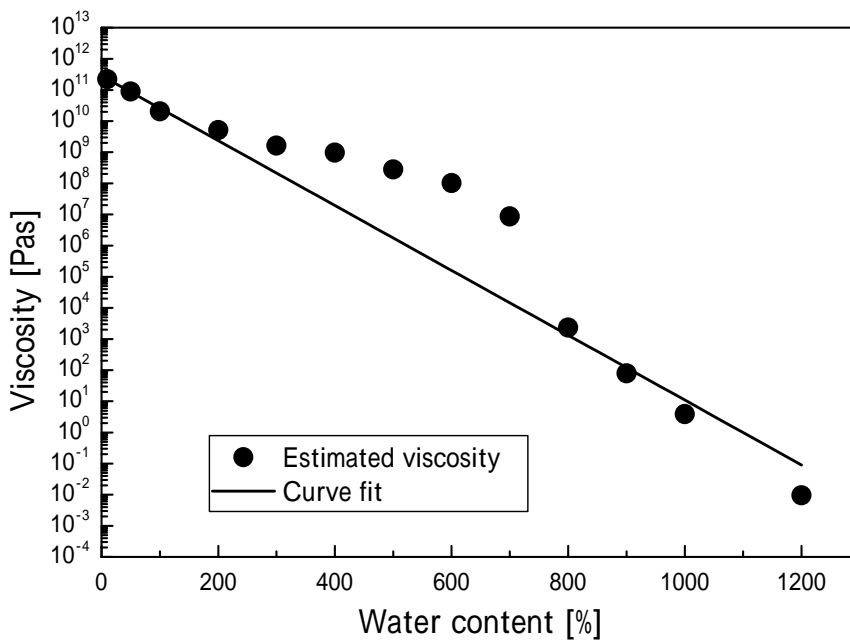


図 1.2-4 侵入現象におけるベントナイトゲルの粘度推定値

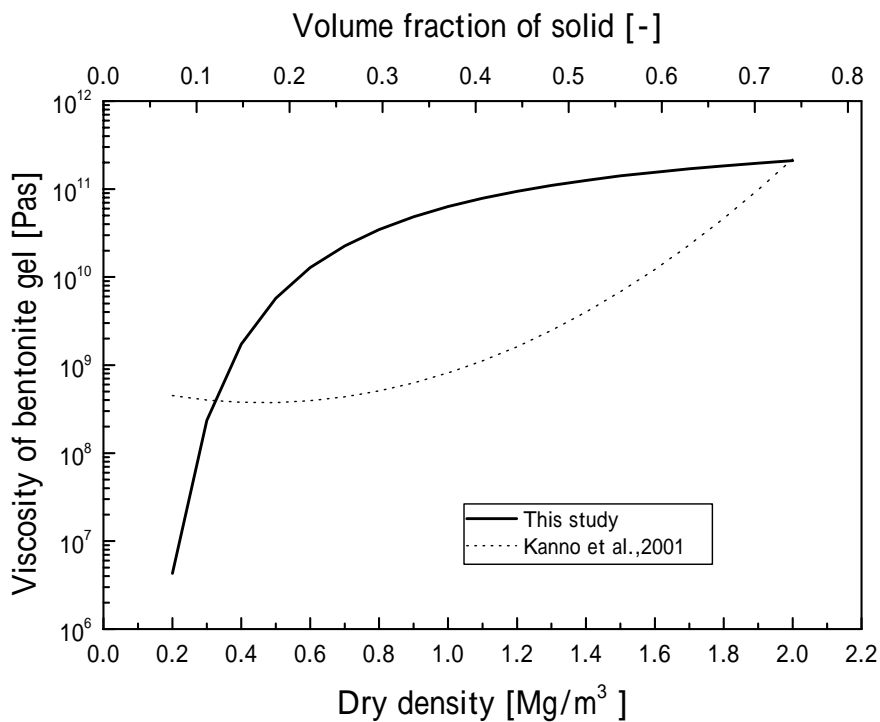


図 1.2-5 ベントナイトゲルの粘度の設定値

(2)膨潤圧

平成 14 年度の研究 (菅野ら (2003) ¹²⁾) では、小峯、緒方 (1993,1999) ^{10),11)} の研究結果に基づき膨潤圧の値を見直した。緩衝材侵入現象解析用に設定した結果を図 1.2-6 に示す。

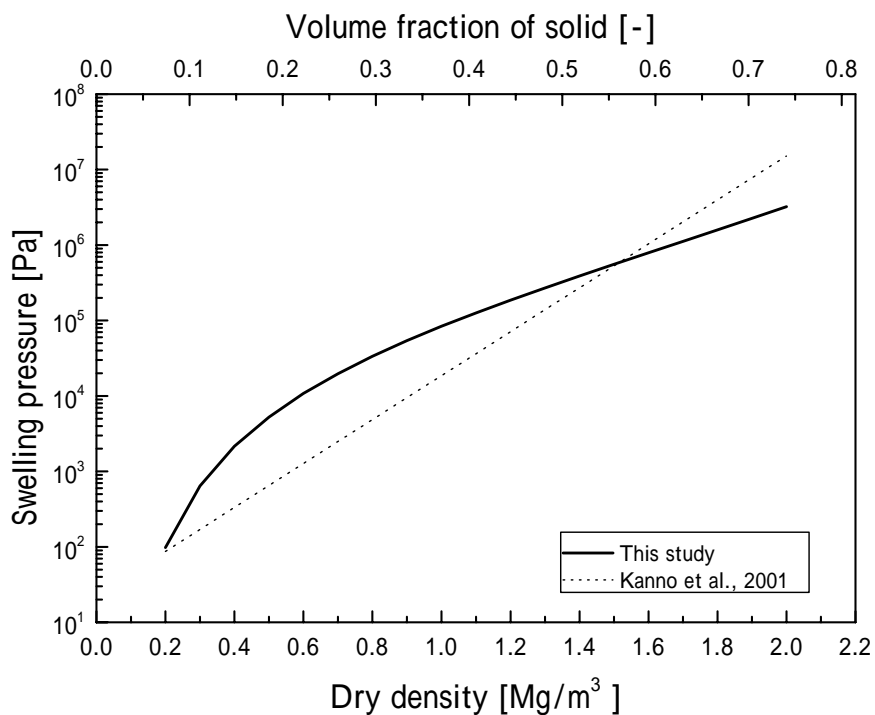


図 1.2-6 緩衝材膨潤圧の設定値

(3)透水係数

平成 14 年度の研究（菅野ら（2003）¹²⁾）では、小峯、緒方（2001）⁹⁾の研究結果に基づき透水係数の値を見直した。緩衝材侵入現象解析用に設定した結果を図 1.2-7 に示す。

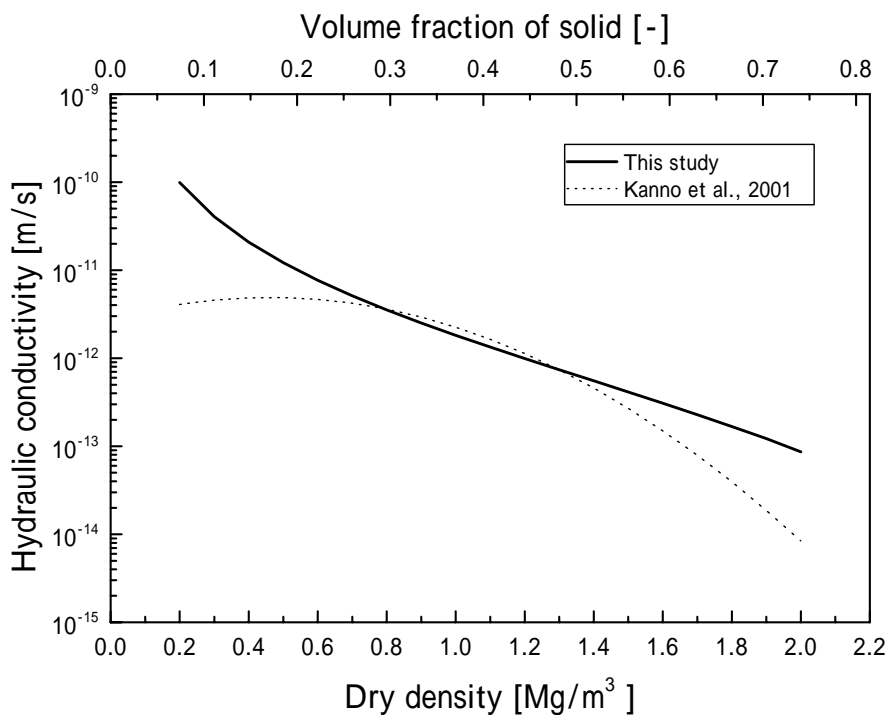


図 1.2-7 緩衝材透水係数の設定値

(4)固相拡散係数

上記の粘性係数、膨潤圧、透水係数の設定結果を用いて、(1.5)式、(1.9)式、及び円管部用の次式（導出過程は平成 14 年度研究¹²⁾を参照）

$$D_s = \frac{\sigma d^2}{36\mu_s} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (1.13)$$

を用いて算出したコア部、き裂部、円管部における固相拡散係数の評価・設定結果をそれぞれ図 1.2-8、図 1.2-9、図 1.2-10 に示す。

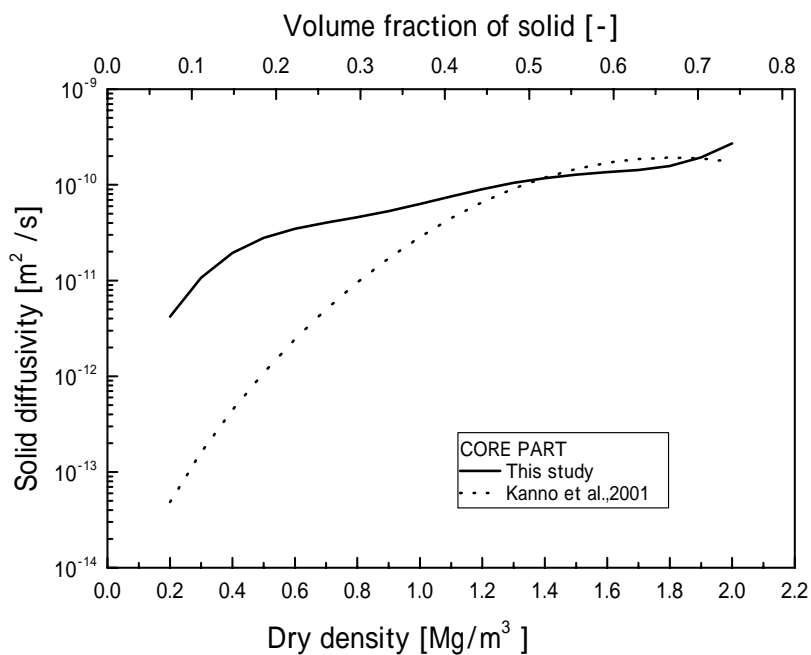


図 1.2-8 コア部固相拡散係数の設定値

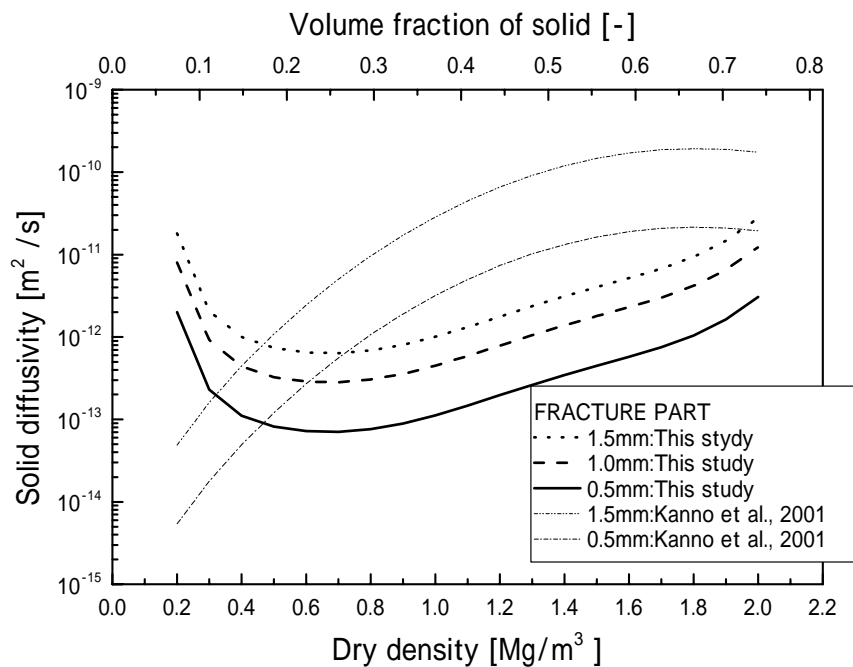


図 1.2-9 き裂部固相拡散係数の設定値

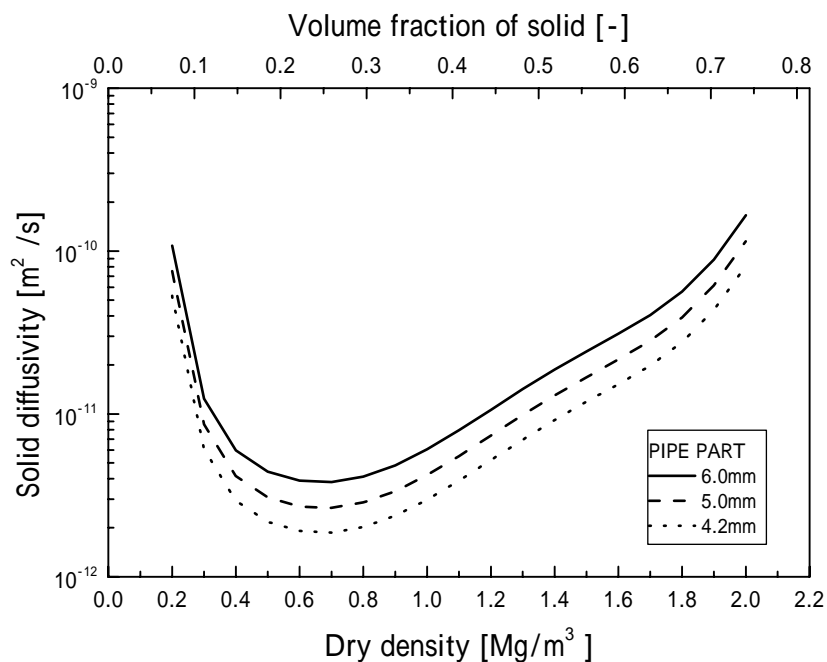


図 1.2-10 円管部固相拡散係数の設定値

(5) BENTFLOW 試験結果の解析

上記の固相拡散係数の設定値に基づいて実施した BENTFLOW 試験の流出距離に関する解析結果を図 1.2-11 に示す。第 2 次取りまとめにおける解析結果よりも試験結果と良く一致しており、平成 14 年度に実施した固相拡散係数の見直しの妥当性が確認されている。

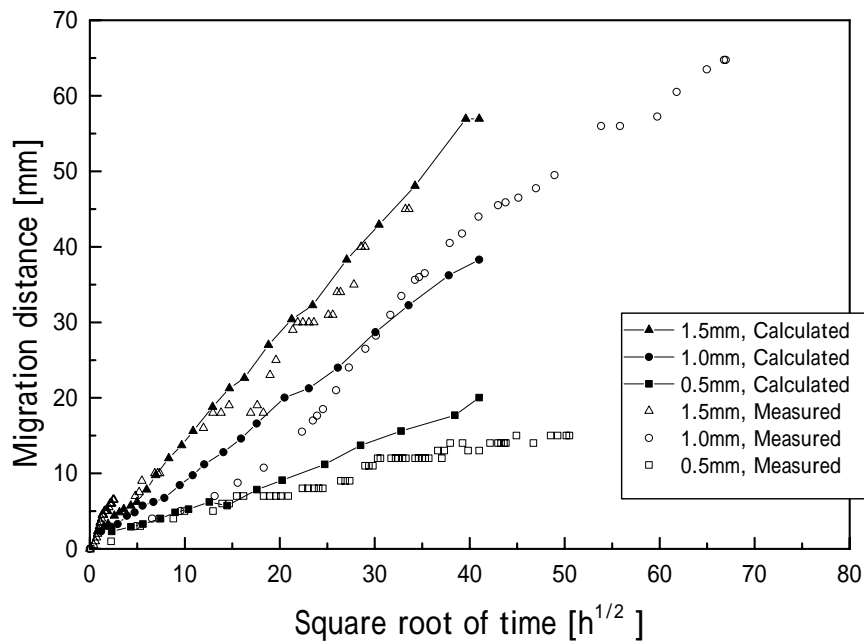


図 1.2-11 流出距離の解析結果

(6) ストロー型模型試験の解析

上記の固相拡散係数の設定値に基づいて実施したストロー型模型試験の密度分布に関する解析結果の一例を図 1.2-12 に示す。解析結果は試験結果を再現しておらず、モデル化やパラメータのさらなる見直しの必要性が必要であることが示唆される結果となった。

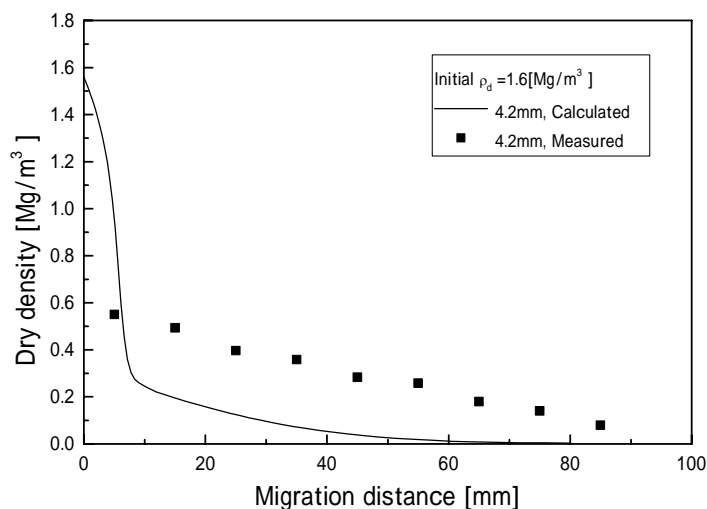


図 1.2-12 乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m^3 、孔径 4.2mm ）

1.3 本研究開発の位置づけ・目的

平成 14 年度の研究では、緩衝材の粘性係数、低密度領域の膨潤圧、透水係数の測定データを用いて緩衝材侵入現象モデルの高度化を試みた。モデルの見直しの結果、BENTFLOW 試験の流出距離の経時変化の解析結果は、従来のモデルのそれよりも試験結果とよく一致していた。しかし、密度分布の評価については、模型試験の結果と解析結果が十分一致しておらず、模型試験の精度も含め、モデルの妥当性確認について課題が残された。したがって、モデルの妥当性および適用性を評価するためには、緩衝材の侵入密度分布の実験データを取得し、実験結果と解析結果を比較する必要がある。

1.4 研究開発方法の概要・特徴・特記事項

本研究では、次の方法により、緩衝材の岩盤き裂への侵入現象に関するモデルの妥当性および適用性に関する検討を行う。

1.4.1 モデルの妥当性検討

サイクル機構において取得する緩衝材の侵入密度分布の実験データを用い、実験結

果と数値解析の比較を行う。実験結果による既存データは、ベントナイトゲルの粘性データの取得状況から、ベントナイト 100%の結果 3 ケースとの比較を行う。また、模型試験（ストロー貫入型・BENTFLOW 型）による侵入試験結果 6 ケースとの比較も合わせて実施し、モデルの妥当性を確認する。

1.4.2 専門家とのレビュー

緩衝材の侵入現象は、膨潤に伴うベントナイト粒子の移動として考えられる。本モデルにおいては、中野ら（1982）³⁾の膨潤性粘土の移動論に基づき、粘土粒子の拡散としてモデル化を試みている。また、Ahn ら（1998）¹⁴⁾は、緩衝材の侵入現象について、圧密方程式を適用してモデル化を行っている。したがって、モデルの妥当性評価も含め、これら専門家間においてレビューを実施し、今後の課題を明確にする。

1.4.3 数値解析

本モデルを用いて、緩衝材の密度低下を数値解析により評価し、第 2 次取りまとめとの比較を行う。

2 モデルの妥当性検討

2.1 平成 14 年度のモデルを用いた BENTFLOW 型模型試験の解析

前項までで説明した平成 14 年度に設定した入力パラメータを用いて、BENTFLOW 試験（X 線 CT 測定用）の解析を実施した。

2.1.1 BENTFLOW 型模型試験（X 線 CT 測定用）の概要

BENTFLOW 型模型試験（X 線 CT 測定用）装置は、緩衝材流出挙動試験¹⁵⁾装置と同様、中心部に処分孔を模擬した孔を形成できる窪みを有する上下 2 枚の厚いアクリル円板で構成される。中心部の孔には緩衝材の材料である圧縮ベントナイト供試体を設置し、上下の厚板の間にスペーサを挿入することにより、岩盤き裂を模擬する。このき裂を水で満たすと中心部の供試体が吸水、膨潤し、き裂中に侵入していく挙動を観察することが可能である。また、X 線 CT を用いてき裂中に侵入した緩衝材の密度が測定できるよう、アクリル円板の厚さを緩衝材流出挙動試験装置よりも薄くしている。BENTFLOW 型模型試験（X 線 CT 測定用）の試験条件を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 BENTFLOW 型模型試験の試験条件

ベントナイト試料	クニゲル V1		
乾燥密度 [Mg/m ³]	1.8		
ケイ砂混合率 [%]	0		
供試体寸法 [mm]	20 × 20h	30 × 30h	40 × 40h
き裂幅 [mm]	0.85	1.0	1.4
浸潤水	蒸留水		

2.1.2 解析方法

図 2.1-1 に BENTFLOW 型模型試験（CT 測定用）を対象とした解析メッシュを示す。装置形状に従い、中心部の供試体部分とその周囲にき裂部分を配置した軸対称のモデルとしている。なお、本解析では上半分のみを解析対象とした。

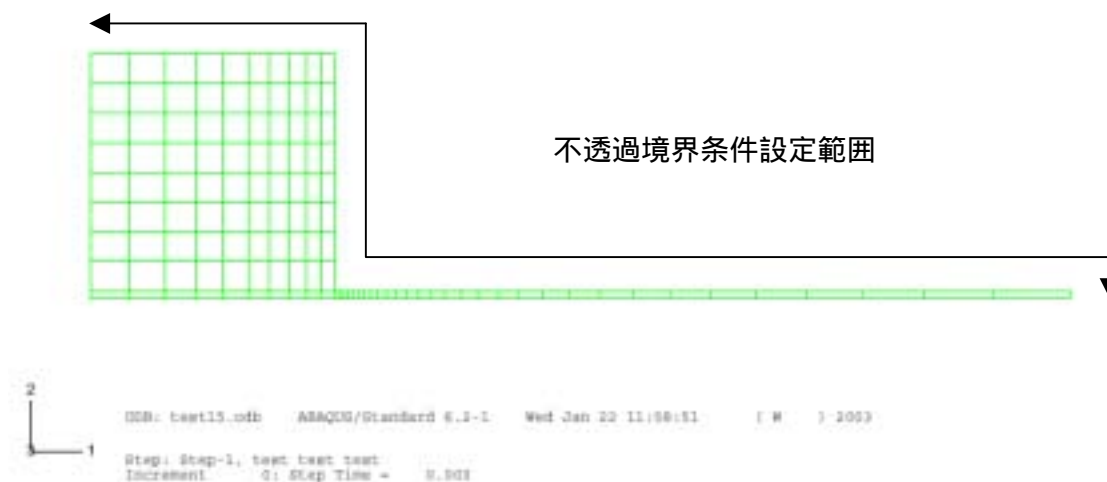


図 2.1-1 BENTFLOW 型模型試験解析メッシュ

解析方法は次の通りである。

- ・使用解析コード：汎用有限要素解析コード ABAQUS Ver.6.2
- ・軸対称解析
- ・寸法、緩衝材（（ ）内は供試体寸法 0.85 mm（ 20×20H mm）、1.0 mm（ 30×30H mm）、1.4 mm（ 40×40H mm））、供試体中心からき裂端部までの距離（75[mm]）
- ・緩衝材仕様：乾燥密度（1.8Mg/m³）、ベントナイト単体
- ・節点数：459、要素数：120
- ・初期条件：
 - 固相率：コア部（0.667（乾燥密度 1.8Mg/m³より設定））
 - き裂部（0.0）
- ・境界条件：
 - コア部表面及びき裂表面不透過（図 2.1-1 参照）
- ・入力パラメータ：
 - 固相拡散係数：コア部（式(1.5)に、1.2.2 項で検討した膨潤圧、透水係数を代入して設定）

き裂部（式(1.9)に、1.2.2 項で検討した粘性係数、膨潤圧を代入して設定）

2.1.3 解析結果

図 2.1-2 に固相率分布に関する解析結果（き裂幅 0.85mm、供試体寸法 20×20H mm）の一例を示す。この図には、X 線 CT 装置で測定したデータより求めたき裂中の密度（約 44 日後）のデータも同時にプロットしてある。この比較結果より、解析値の方が実験結果よりかなり侵入速度が小さいことが明らかとなった。そこで実験結果との整合性を高めるため、モデルの再検討を行なった。

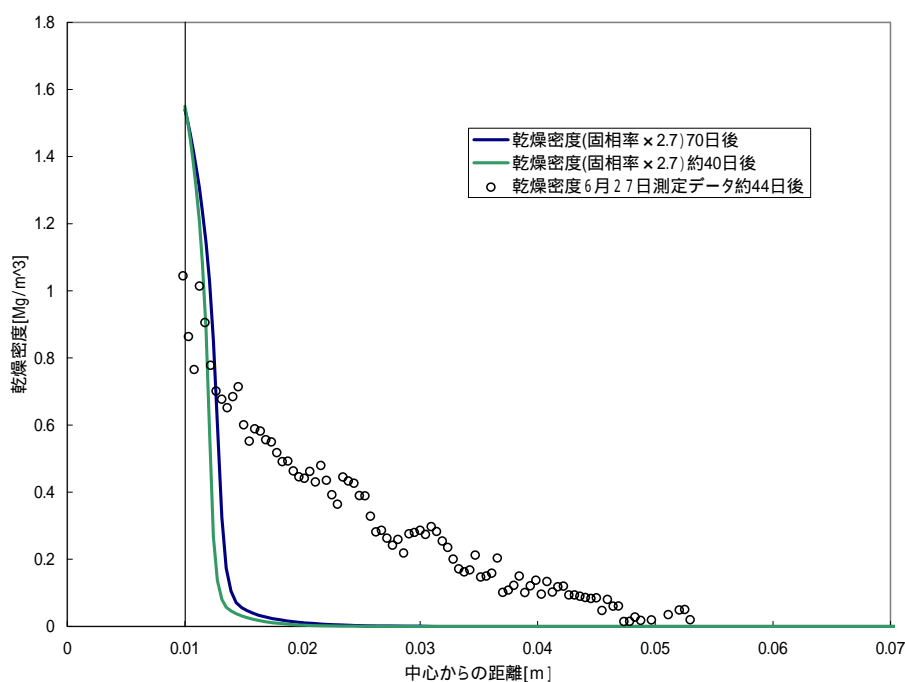


図 2.1-2 平成 14 年度モデルによる BENTFLOW 型模型試験の解析結果の一例

2.2 固相拡散係数の見直しによるモデルの再検討

前項で実施した、乾燥密度の解析結果と X 線 CT 測定値との比較により、解析値の方が実験値よりもかなり侵入が遅いことが明らかになった。そこで侵入の速度に影響を与える固相拡散係数を見直し、モデルの再検討を行なうこととした。

BENTFLOW 型の解析におけるき裂中の固相拡散係数 D_s は、

$$D_s = \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (1.9) \text{ (再出)}$$

で表される。侵入の速度を高めるためには、ある固相率における固相拡散係数を大きくしてやれば良いから、(1.9)式において膨潤圧 P_s を大きくするか、粘性係数 μ_s を小さくすれば良い。膨潤圧 P_s は、平成 14 年度の検討において実測値によって検証された膨潤評価式に基づいて設定されているため、ここでは設定値の変動要因の大きい粘性係数を再検討の対象とした。

平成 14 年度の検討では、本報告書 1.2.2(1)項で説明した通り、図 1.2-3 のように粘度測定結果を外挿し、BENTFLOW 試験におけるせん断速度が 1.9×10^{-5} [1/s] 程度との推定より外挿値を含水比の近似式として、粘度を推定している (図 1.2-4 参照)。せん断速度 1.9×10^{-5} [1/s] と含水比毎の粘度測定データの近似直線との交点のプロットおよび、そのプロットを近似した直線を図 2.2-1 に再掲する。図中での凡例はそれぞれ“粘度 / せん断速度 1.9×10^{-5} ”および“粘度 / 近似 1.9×10^{-5} ”で表されている。この近似した粘度評価式は、指数型の関数であると仮定して

$$\eta [Pas] = 2.86 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{w[\%]}{41.7}\right) \quad (2.1)$$

で示される。ここでは、より小さい粘度を用いることを考慮して、(2.1)式より小さい値を示す粘度評価式を設定する。一方、図 1.2-3 より、せん断速度 0.199 [1/s] までは粘度の実測データが取られているから、少なくともこのときの粘度 (図 2.2-1 中の凡例 “粘度 / せん断速度 0.199” のプロットとその近似直線 “粘度 / 近似 0.199”) 以上の値であると推測できる。そこで、この 2 本の粘度評価式の間で傾きを変えて粘度を設定し、(1.9)式に代入して固相拡散係数を求め、これをパラメータとした感度解析を行なった。

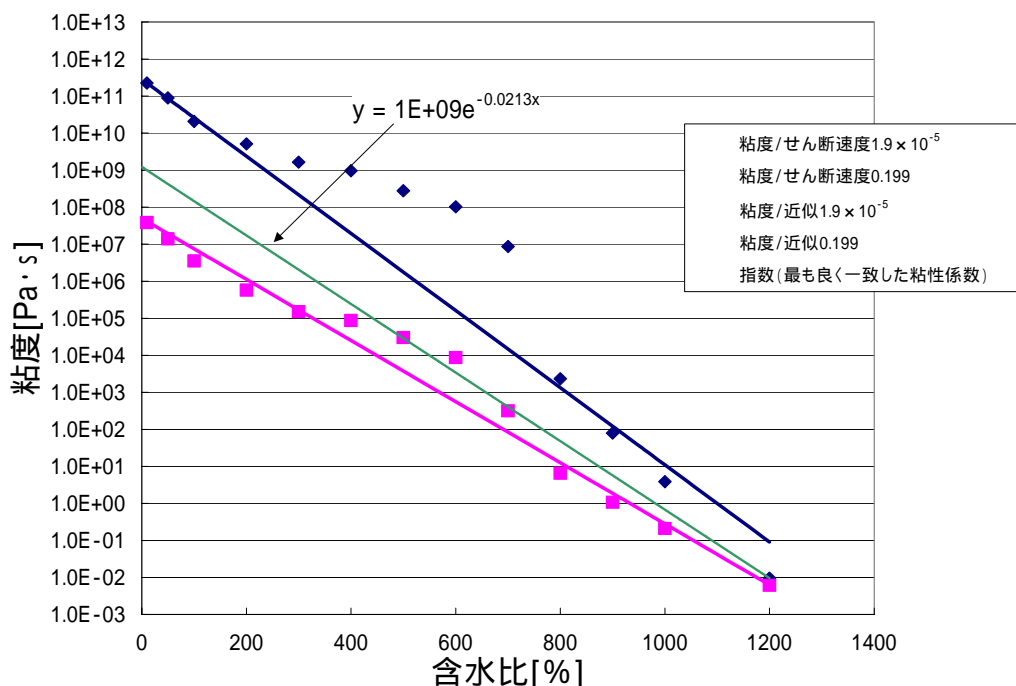


図 2.2-1 粘性係数の設定

その結果、次の粘度評価式で固相拡散係数を設定した場合に、比較的解析結果と X 線 CT による乾燥密度測定値との整合性があることがわかった。

$$[\text{Pas}] = 1\text{E}+09\text{e}^{-0.0213} \quad (2.2)$$

(2.2)式から固相拡散係数を設定して解析した結果の一例(き裂幅 0.85 mm、約 44 日後)を図 2.2-2 に示す。この図でわかるように、コア部分と流出の傾き加減は合っているが、き裂中における密度の低い部分は、解析の方がかなり侵入距離が大きい(侵入速度が大きい)結果となっている。従って、侵入距離で解析と実験結果を比較した場合は、解析の方が同じ時間における侵入距離は大きくなると予想される。しかしながら、本検討では、コア部分に残ったベントナイトの密度の整合性を重視することとし、以降の解析においては(2.2)式から設定した固相拡散係数を用いることとした。

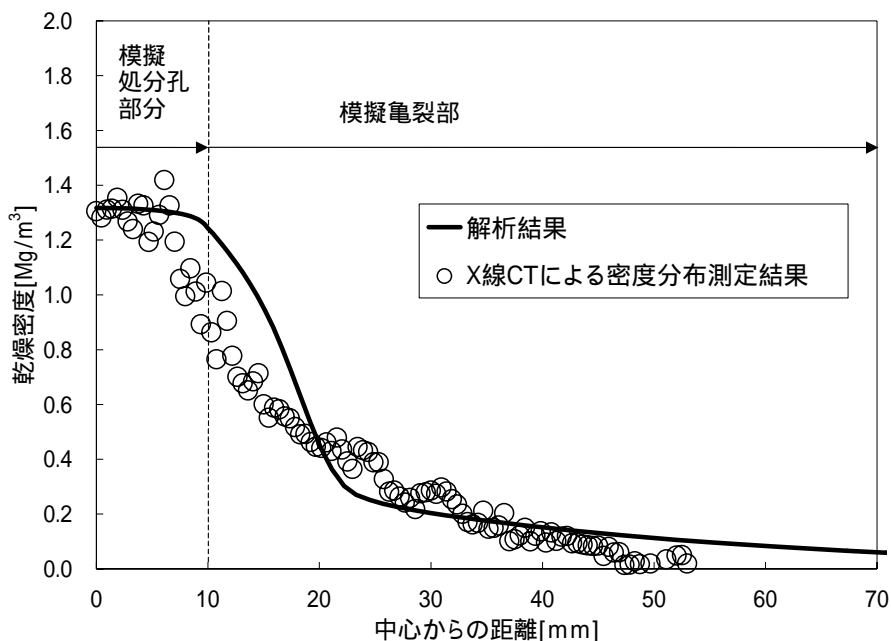


図 2.2-2 整合性の高い粘度を用いたときの解析結果

2.3 見直した固相拡散係数による BENTFLOW 型模型試験の再解析

2.3.1 解析方法

前項のように固相拡散係数を見直した結果、侵入速度がかなり大きくなったため、き裂距離が短いと、侵入したベントナイトがき裂内に溜まるという現象が解析中に見られた。そこで、中心からき裂端部までの距離を2倍にした。再解析のメッシュを図 2.3-1 に示す。

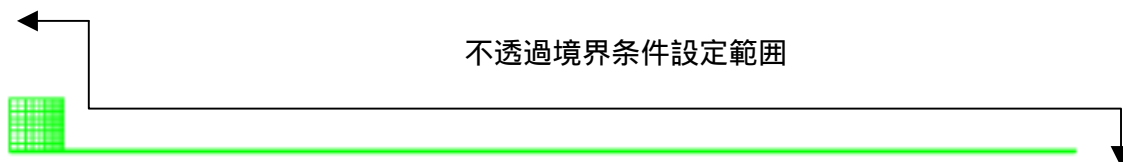


図 2.3-1 BENTFLOW 型模型試験解析メッシュ（再解析版）

その他の解析条件は、き裂部の固相拡散係数設定を見直しているほかは、2.1.2 項と同様である。

2.3.2 解析結果

図 2.3-2、図 2.3-3 に固相率分布に関する解析結果の一例（き裂幅 0.85 mm、時間 6.05×10^6 [s]（約 70 日後））を示す。本解析は軸対称問題として実施したものであるが、図では 3 次元表示として示している（360 度、180 度）。

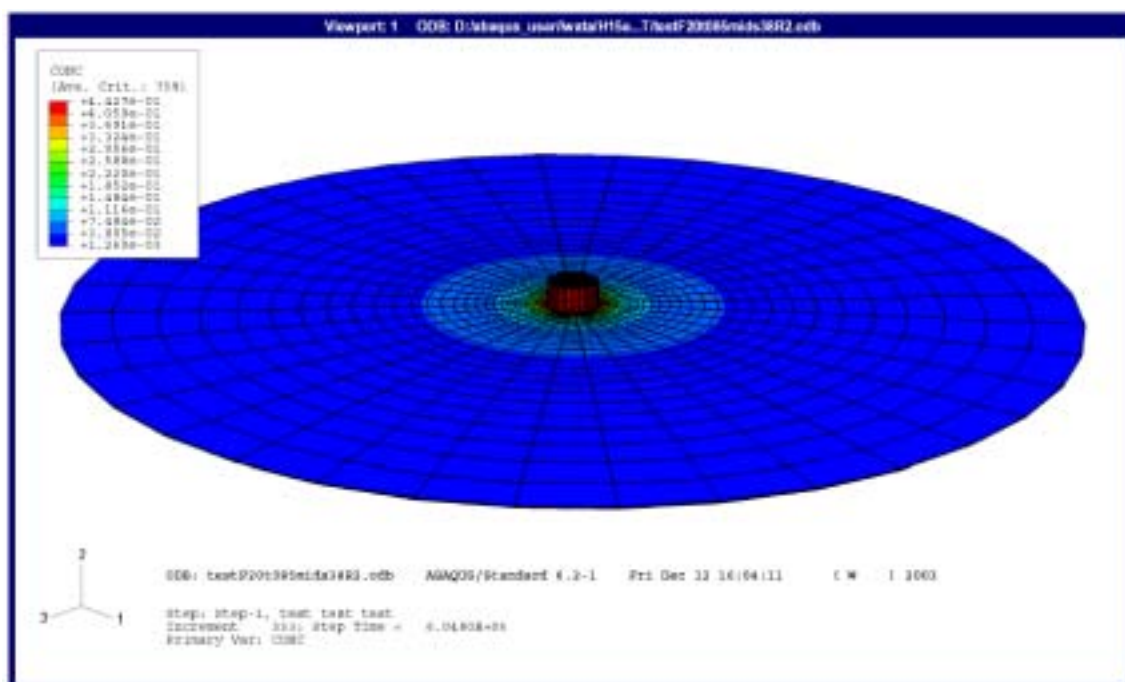


図 2.3-2 解析結果（全体図 360 度）

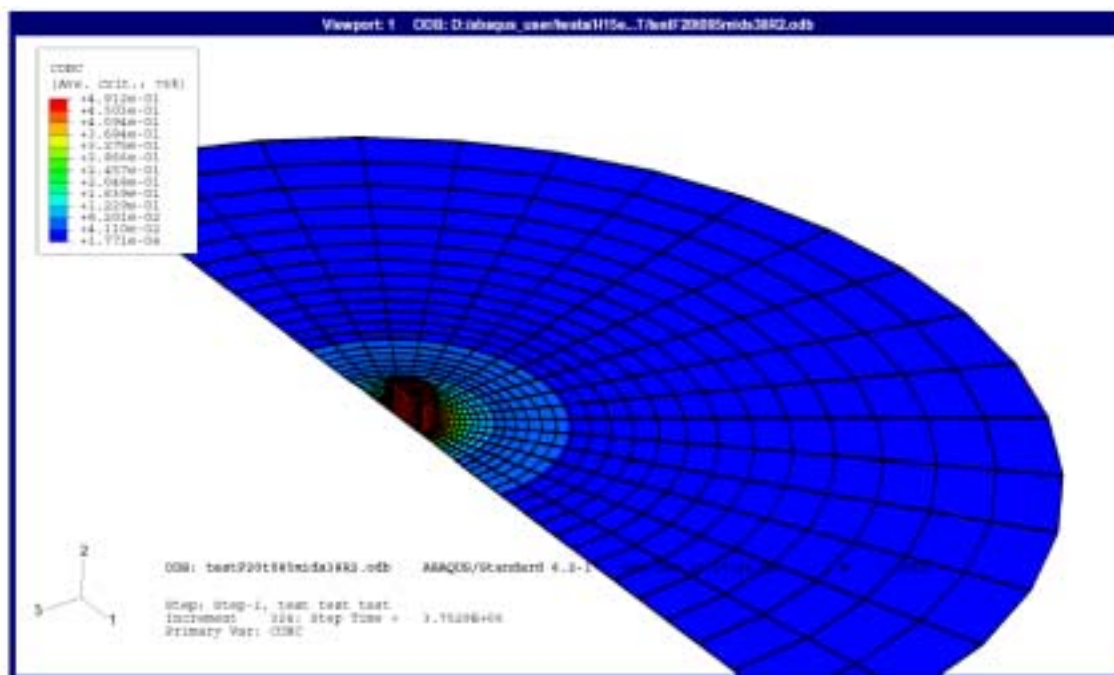


図 2.3-3 解析結果 (全体図 180度)

また、固相率分布の経時変化の例（き裂幅 0.85 mmのケース）を図 2.3-4~図 2.3-8 に示す。コア部のベントナイトが徐々にき裂中に侵入し、内側から外側に向かって固相率の分布が見られる。また、時間の経過に伴ってコア部の固相率が低下していく様子が確認できる。

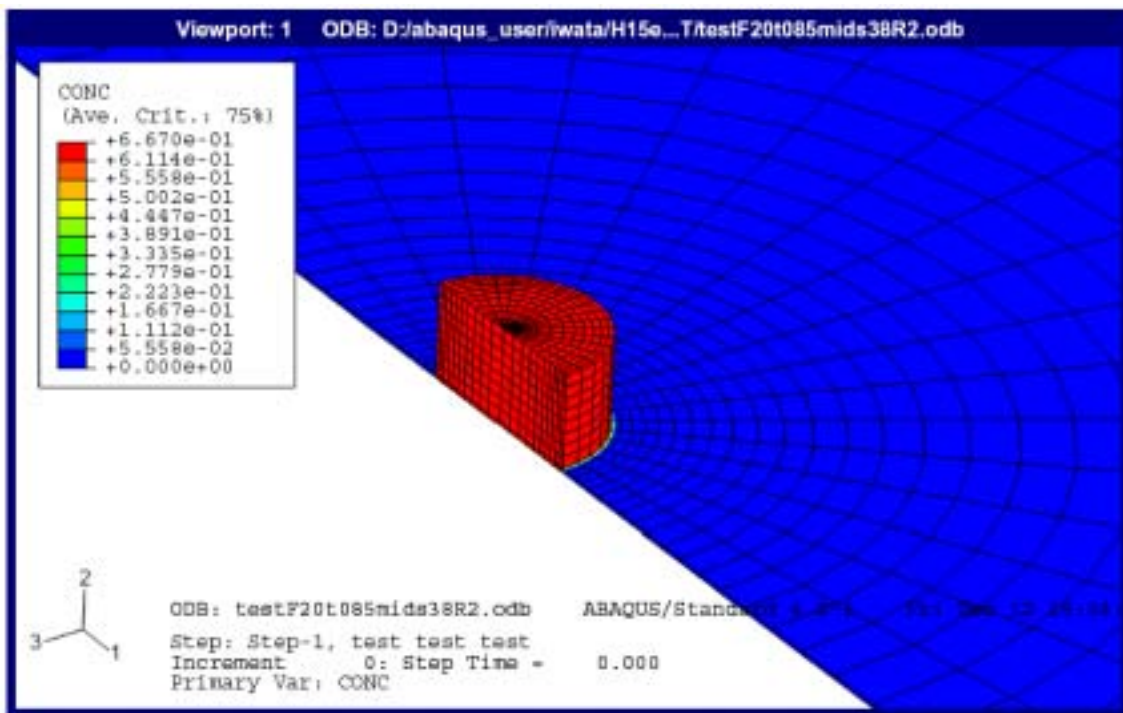


图 2.3-4 解析結果初期狀態

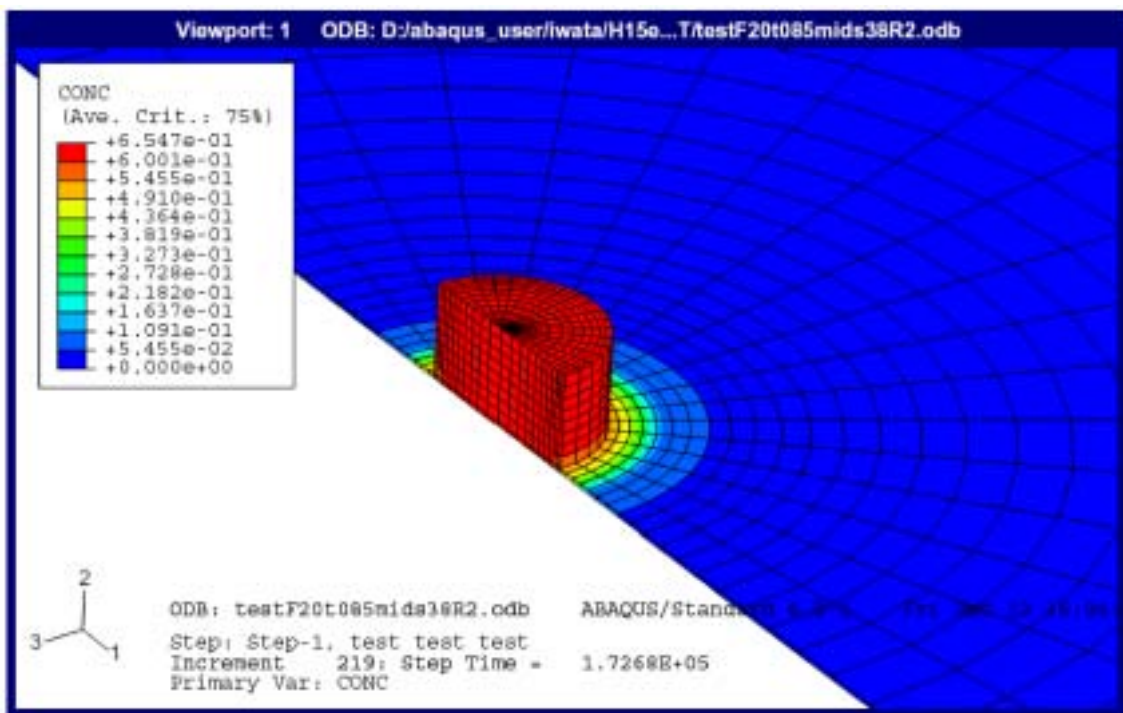


图 2.3-5 解析結果約 2 日後

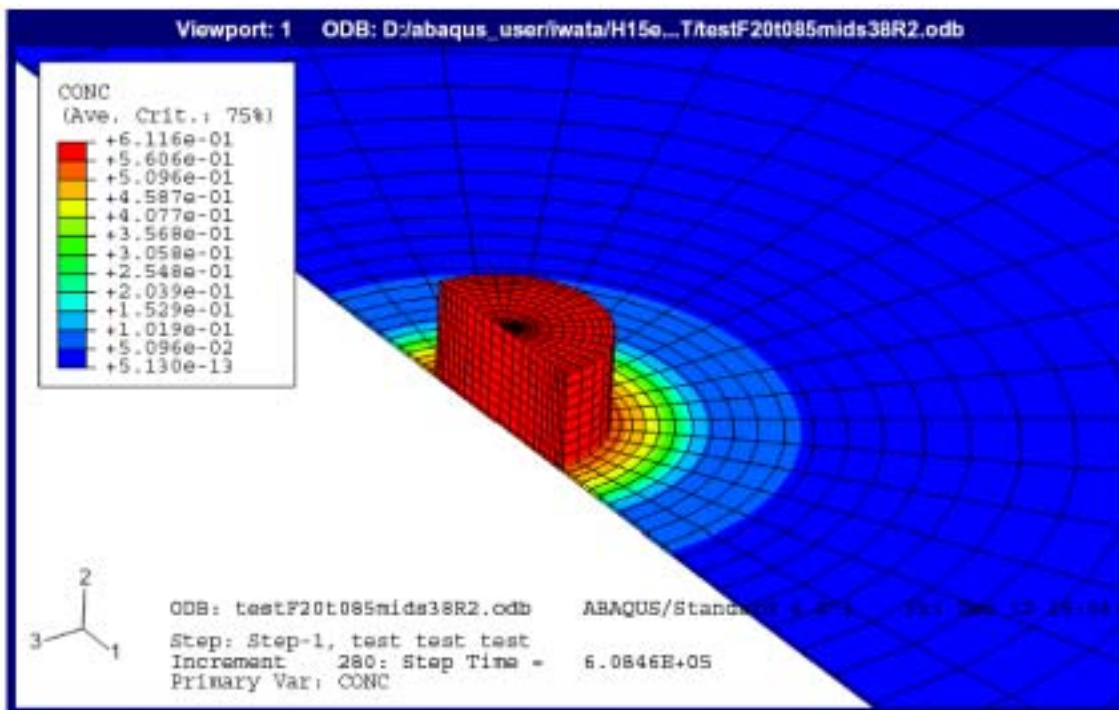


图 2.3-6 解析結果約 7 日後

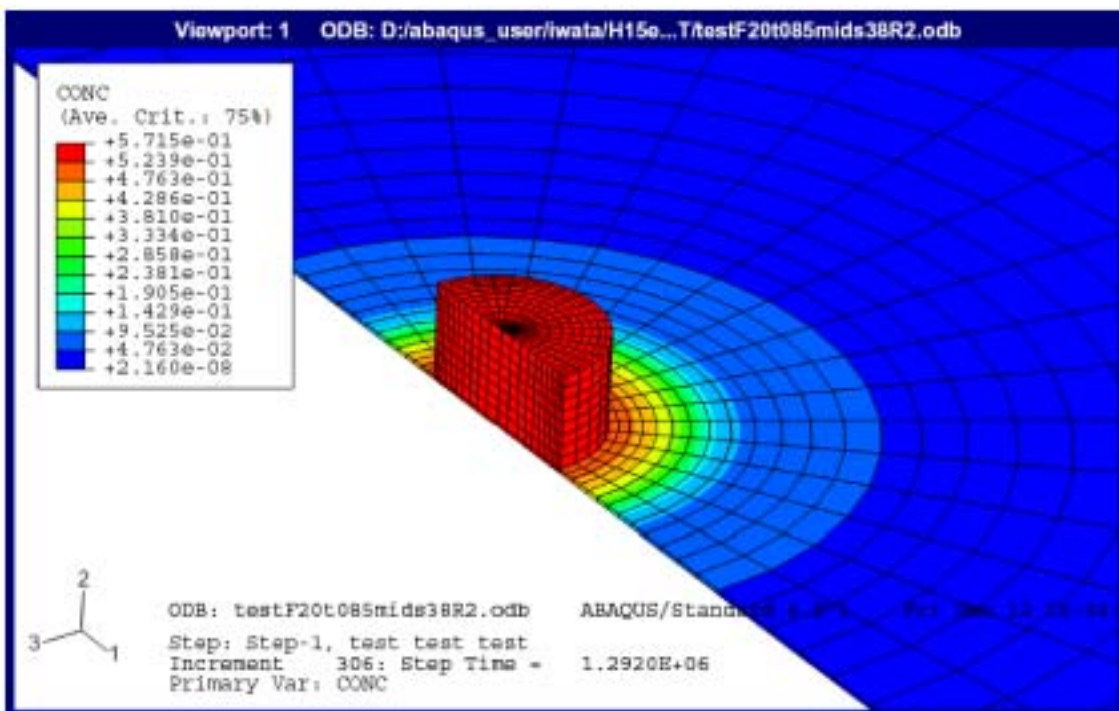


图 2.3-7 解析結果約 15 日後

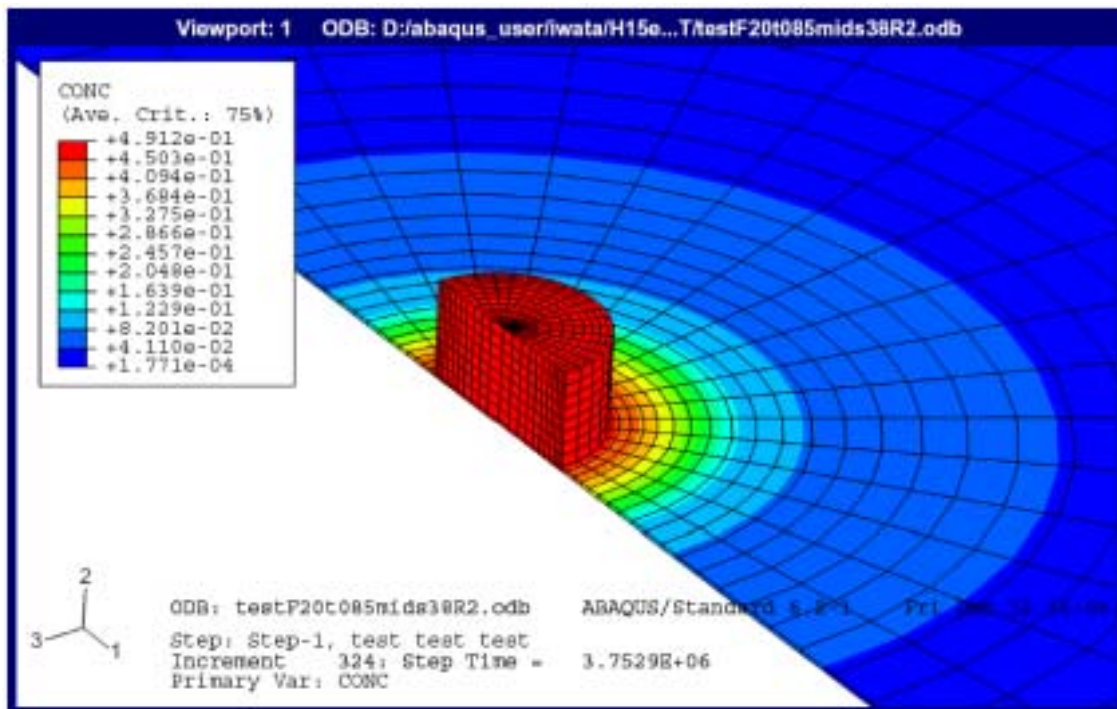


図 2.3-8 解析結果約 4 4 日後

図 2.3-9 にコア部断面の固相率分布を表した拡大図を示す(き裂幅 0.85 mm、約 2 日後)。図でわかるように、き裂への侵入口に近い部分のコア部では固相率の分布がみられ、き裂侵入口に近くなるに従い、固相率が若干低くなっている。

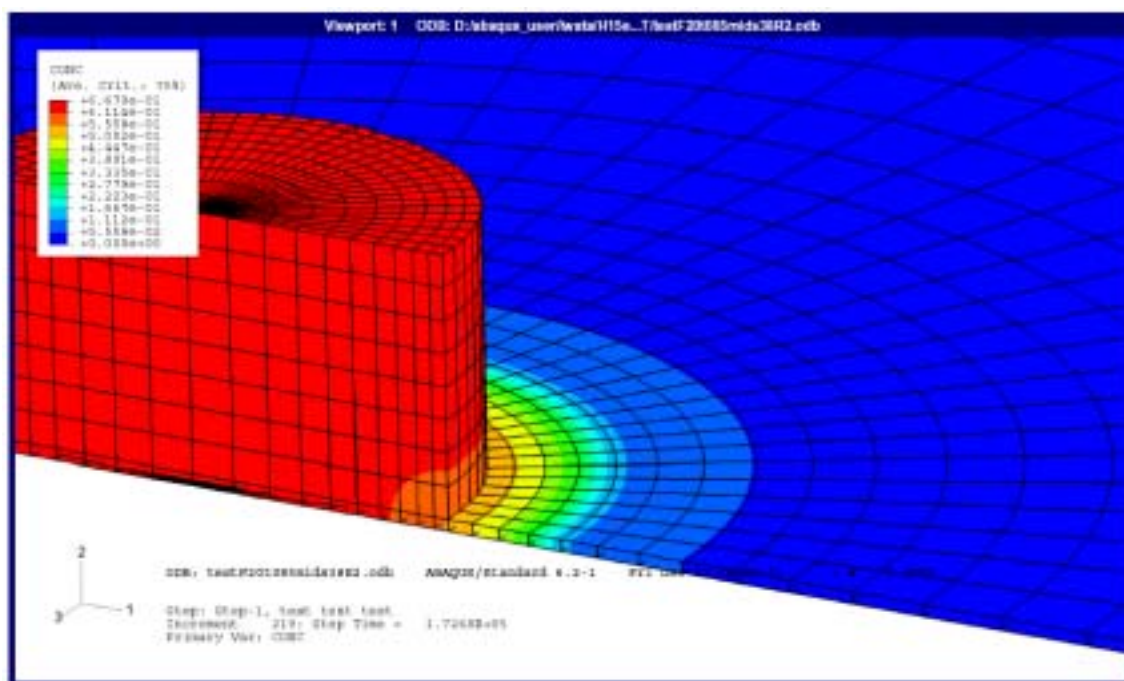


図 2.3-9 解析結果約 2 日後コア部拡大

次に、固相率の分布を乾燥密度の分布に直した解析結果を、実験で X 線 CT から求めた乾燥密度のデータとあわせて図 2.3-10~図 2.3-12 に示す。き裂幅、コア部寸法の小さいケースでは、コア部（模擬処分孔部分）やき裂部の乾燥密度の経時変化が比較的一致している。一方、き裂幅、コア部寸法が大きいケースでは、乾燥密度の測定結果のばらつきが大きくなっているため単純に比較はできないが、コア部の乾燥密度は、特に初期において解析との差が生じている。また、全てのケースにおいて、き裂の根元（コア部分に近い方）部分では解析結果の方が上に凸状に膨らんでおり、測定結果よりも高い乾燥密度になっている。

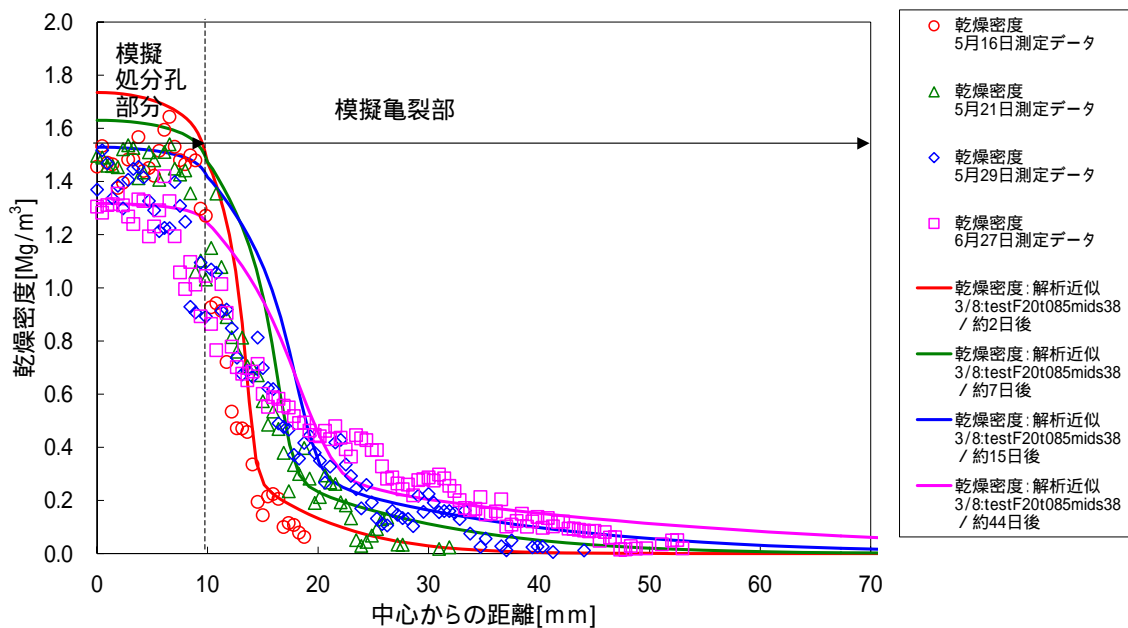


図 2.3-10 乾燥密度分布解析結果 (き裂幅 0.85 mm)

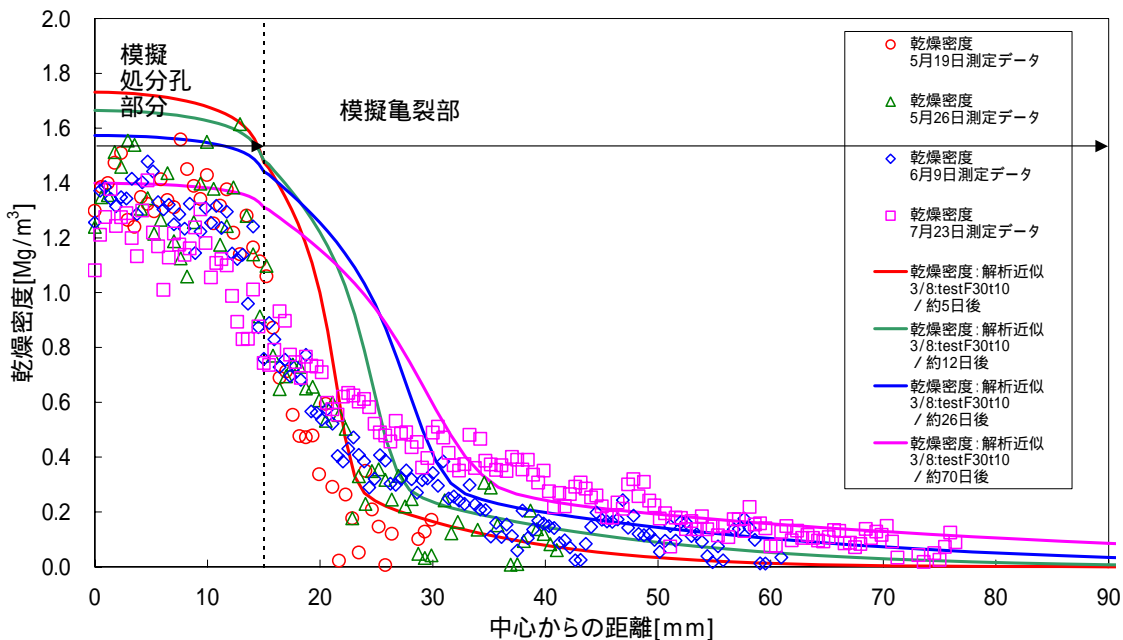


図 2.3-11 乾燥密度分布解析結果 (き裂幅 1.0 mm)

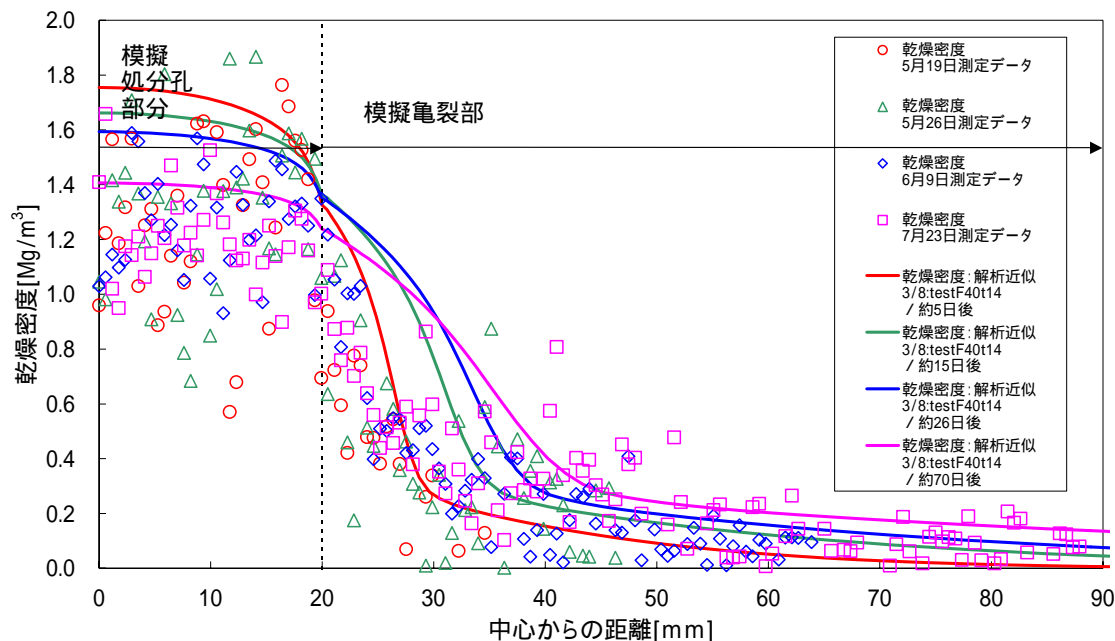


図 2.3-12 乾燥密度分布解析結果 (き裂幅 1.4 mm)

2.4 ストロー型模型試験の解析

2.4.1 ストロー型模型試験の概要

図 2.4-1 に模型試験の装置の概念¹⁶⁾を示す。この試験は、ストロー状のサンプル管を用いることにより、緩衝材流出部の密度分布を測定できるように設計されたものである。表 2.4-1 にこの模型試験の試験条件を示す。これらの条件のうち、本研究では、ケイ砂混合比 0 (純ペントナイト) 試料、乾燥密度 1.6 [Mg/m³] : 孔径 4.2, 5, 6 [mm] の 3 つの試験の解析を行った。

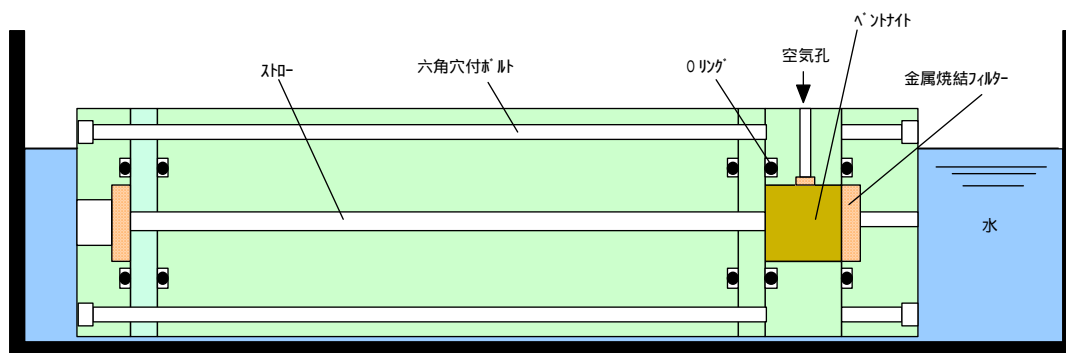


図 2.4-1 模型試験装置

表 2.4-1 解析対象とした模型試験の試験条件

ベントナイト試料	クニゲル V1
供試体寸法 [mm]	20 × H20
乾燥密度 [Mg/m ³]	1.6
ケイ砂混合率 [%]	0
初期含水比 [%]	9.5
孔径 [mm]	4.2、5.0、6.0
浸潤水	蒸留水
試験温度 []	室温 約 20

2.4.2 解析条件

図 2.4-2 に模型試験を対象とした解析メッシュを示す。模型試験の装置形状に従い、20 × H20 の供試体部分（コア部）とストロー部分からなる軸対称のモデルとしている。本年度は、2.2 節の検討で固相拡散係数を大きくしているため、ストローへの侵入速度が大きくなり、設定した解析期間の途中で侵入したベントナイトがストロー端部に達して溜まるという現象が起こることが、予備解析の結果わかった。そこで、図 2.4-3 に示すようにストロー部分の距離を 2 倍にして解析を実施することとした。

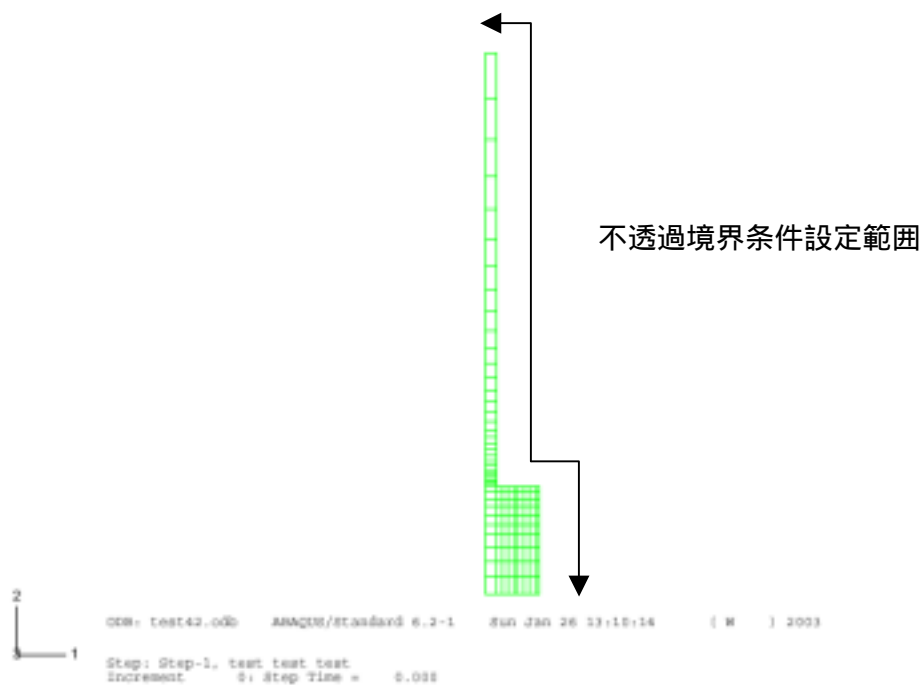


図 2.4-2 模型試験解析メッシュ



図 2.4-3 ストロー型模型試験メッシュ（再解析版）

解析方法は次の通りである。

- ・ 使用解析コード：汎用有限要素解析コード ABAQUS Ver.6.2
- ・ 軸対称解析
- ・ 寸法：緩衝材（ $20 \times 20H$ [mm]）、ストロー部孔径（4.2、5、6[mm]）、ストロー部長さ（180[mm]）
- ・ 緩衝材仕様：乾燥密度（ 1.6Mg/m^3 ）、ベントナイト単体
- ・ 節点数：120、要素数：459
- ・ 初期条件：
 - 固相率：コア部（0.592593（乾燥密度 1.6Mg/m^3 ））
ストロー部（0.0）
- ・ 境界条件：
 - コア部表面及びストロー部表面不透過（図 2.4-2 参照）
- ・ 入力パラメータ：
 - 固相拡散係数：コア部（式(1.5)に、検討した膨潤圧、透水係数を代入して設定）
ストロー部（式(1.13)に、2.2 節で検討した粘性係数、膨潤圧を代入して設定）

2.4.3 解析結果

図 2.4-4 に模型試験を対象とした固相率分布に関する解析結果（初期乾燥密度 1.6 [Mg/m^3]、孔径 6.0 [mm]、時間 7.776×10^6 [s (90 [day])]) の一例を示す。本解析も軸対称問題として実施したものであるが、図では 3 次元表示として示している。断面の固相率の経時変化を図 2.4-5 ~ 図 2.4-11（孔径 4.2 [mm]）に示す。時間の経過とともに、ストロー部分にベントナイトが侵入し、コア部分の固相率が下がっていく様子が認められる。侵入部の乾燥密度分布に関する解析結果を試験結果（X線CTによる測定結果）とともに、図 2.4-12 ~ 図 2.4-14 に示す。いずれの場合も、解析結果は試験結果に比べ、侵入部の根元（流出距離が 0 に近い所）で乾燥密度が高く、ストロー部分でも全体的に乾燥密度が高く、侵入がかなり早い結果となっている。この模型試験では、侵入部の含水比が液性限界値よりも大きな測定値が得られており、侵入現象のモデル化の前提と相反する現象が観測されている。この観測結果について、試験誤

差等を再度検討し直すことが必要であると考え。侵入部先端の含水比が液性限界値よりも大きくなることを確認された場合には、モデル化の前提を見直す必要があると考えられる。

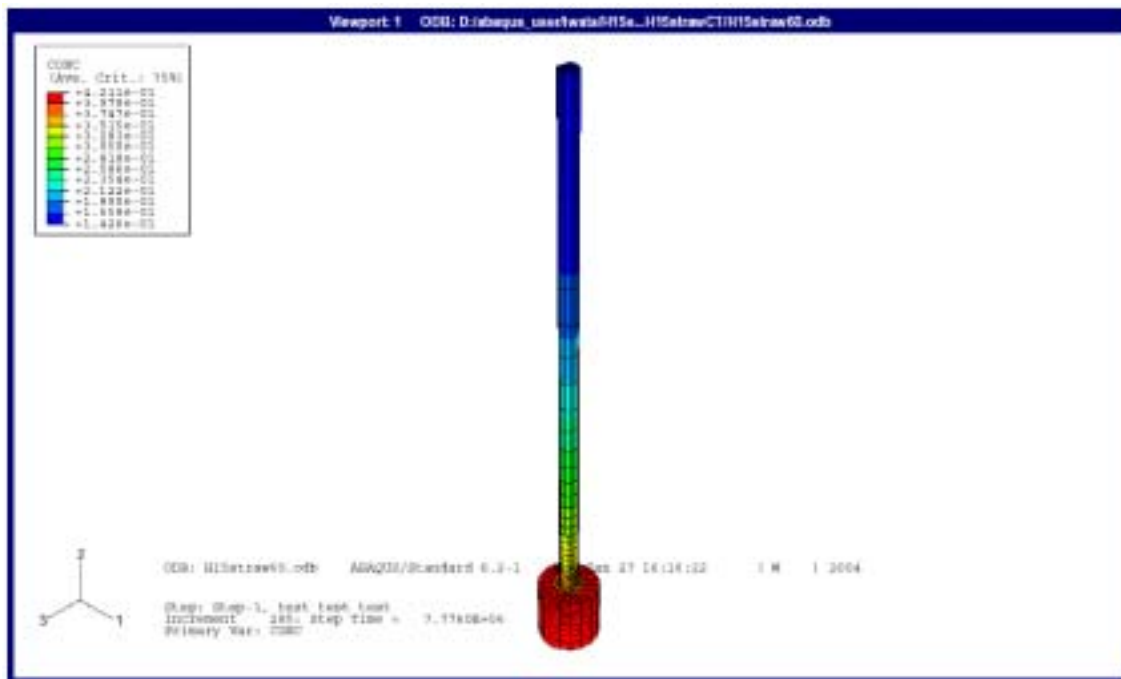


図 2.4-4 模型試験解析結果

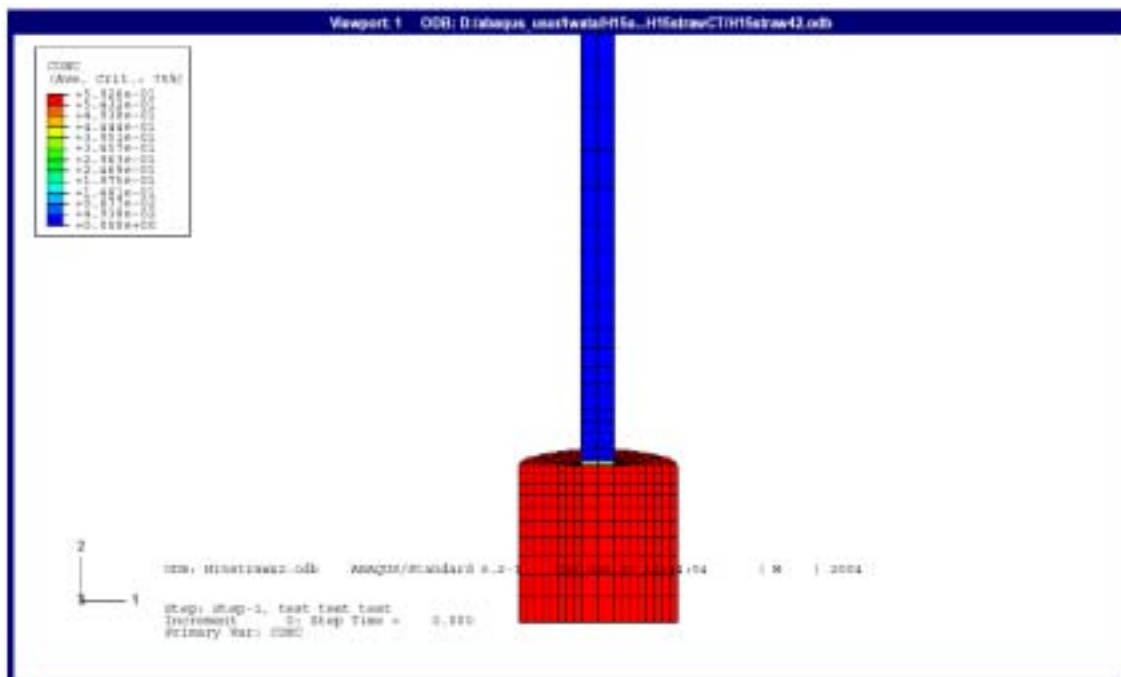


図 2.4-5 解析結果初期状態

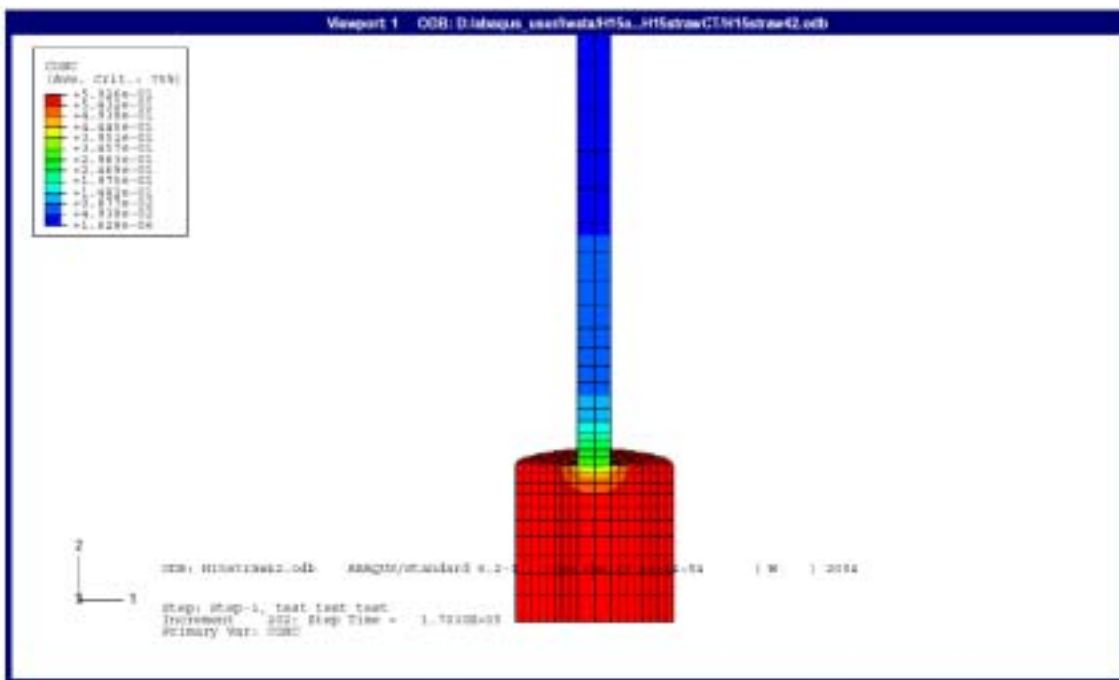


図 2.4-6 解析結果約 2 日後

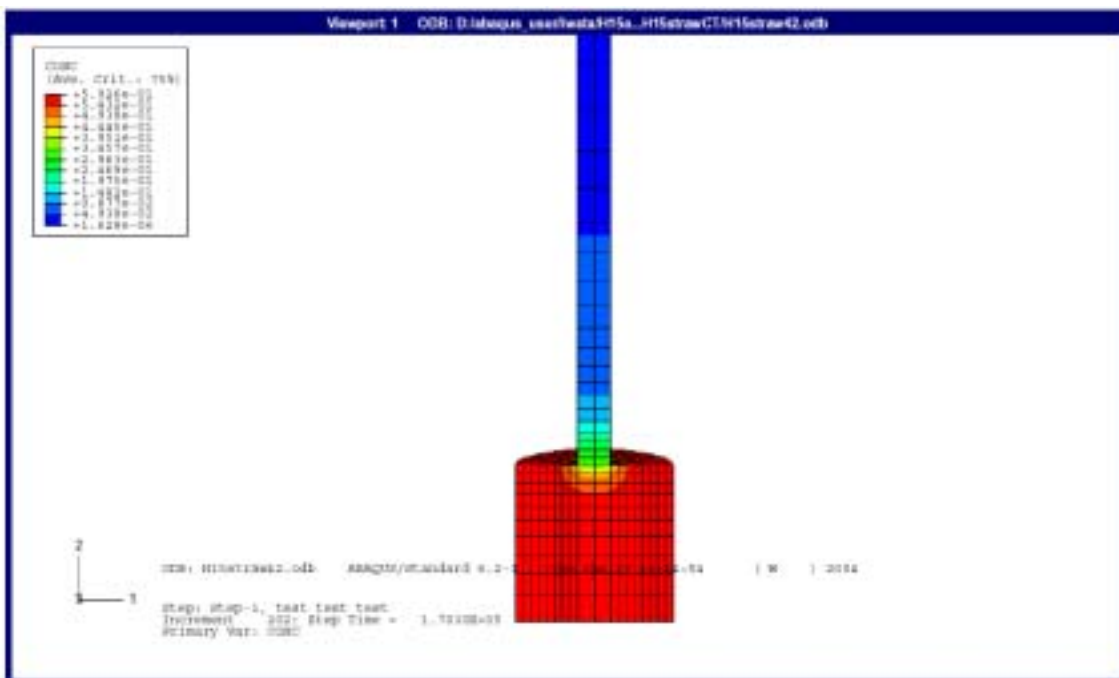


図 2.4-7 解析結果約 7 日後

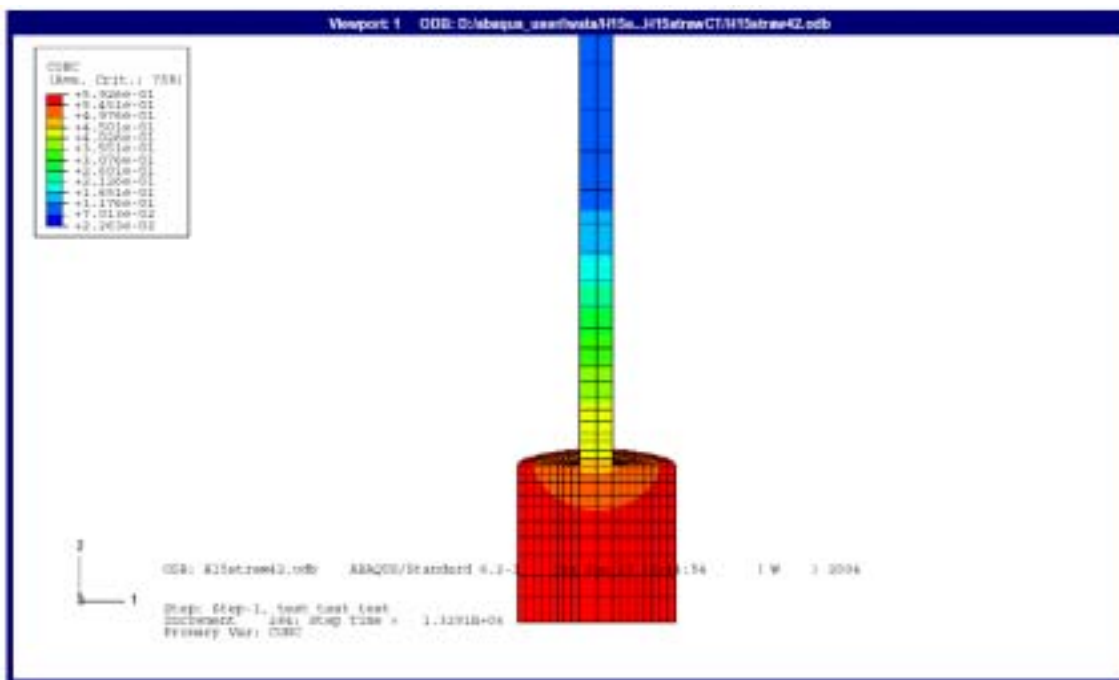


図 2.4-8 解析結果約 15 日後

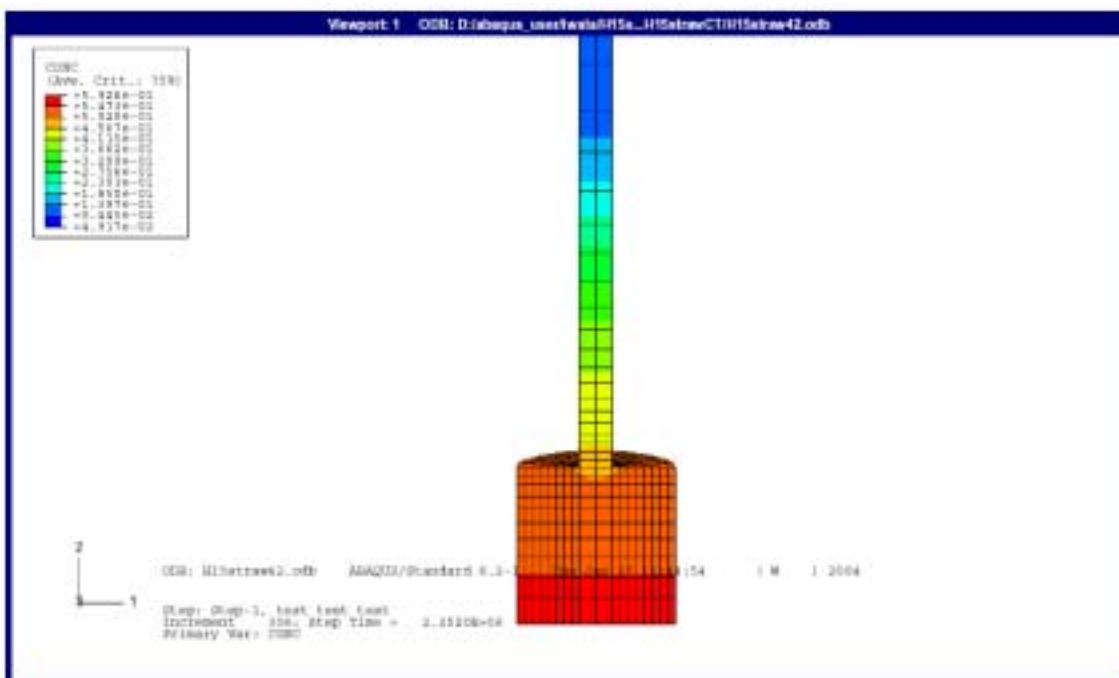


図 2.4-9 解析結果約 26 日後

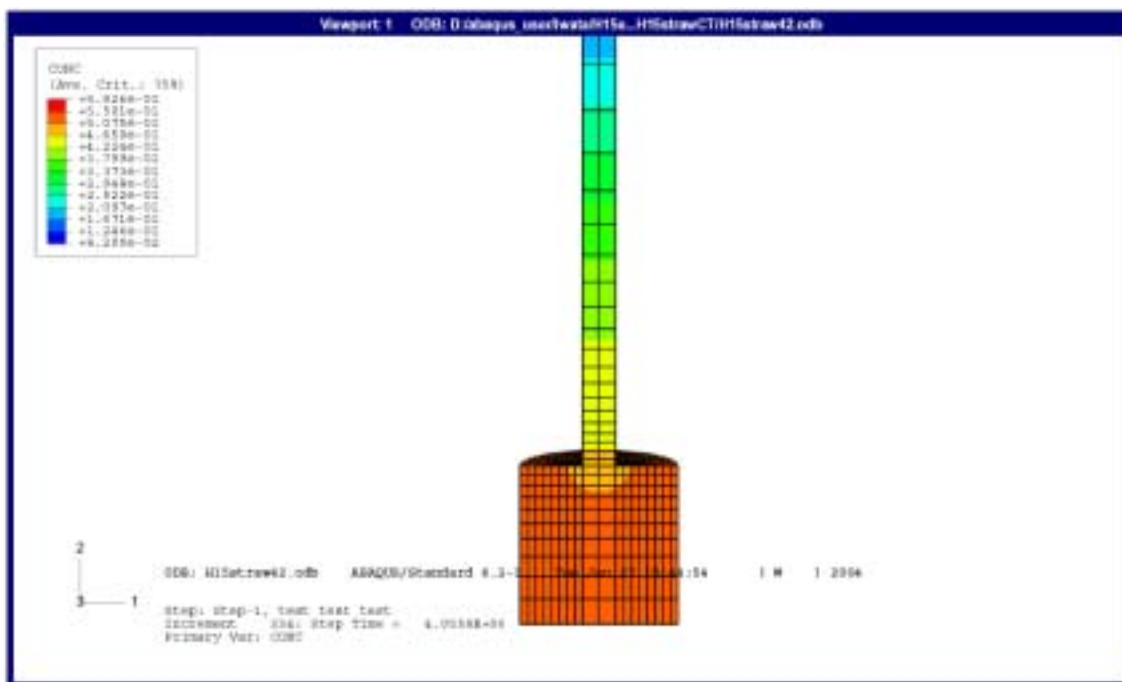


图 2.4-10 解析結果約 4 7 日後

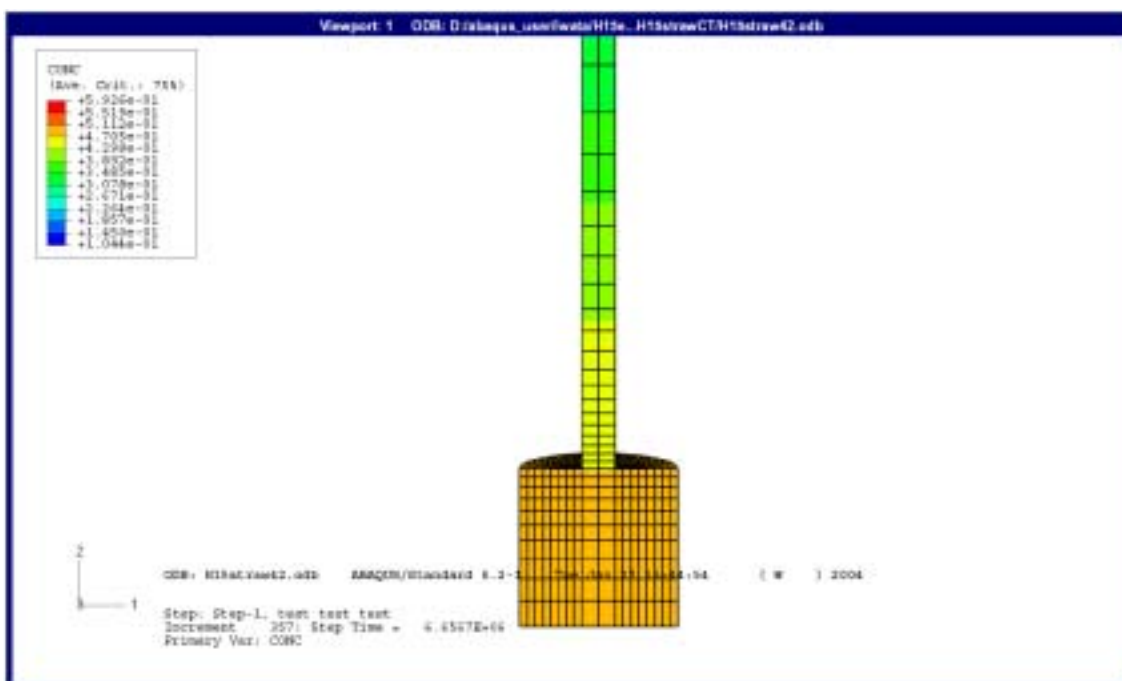


图 2.4-11 解析結果約 7 7 日後

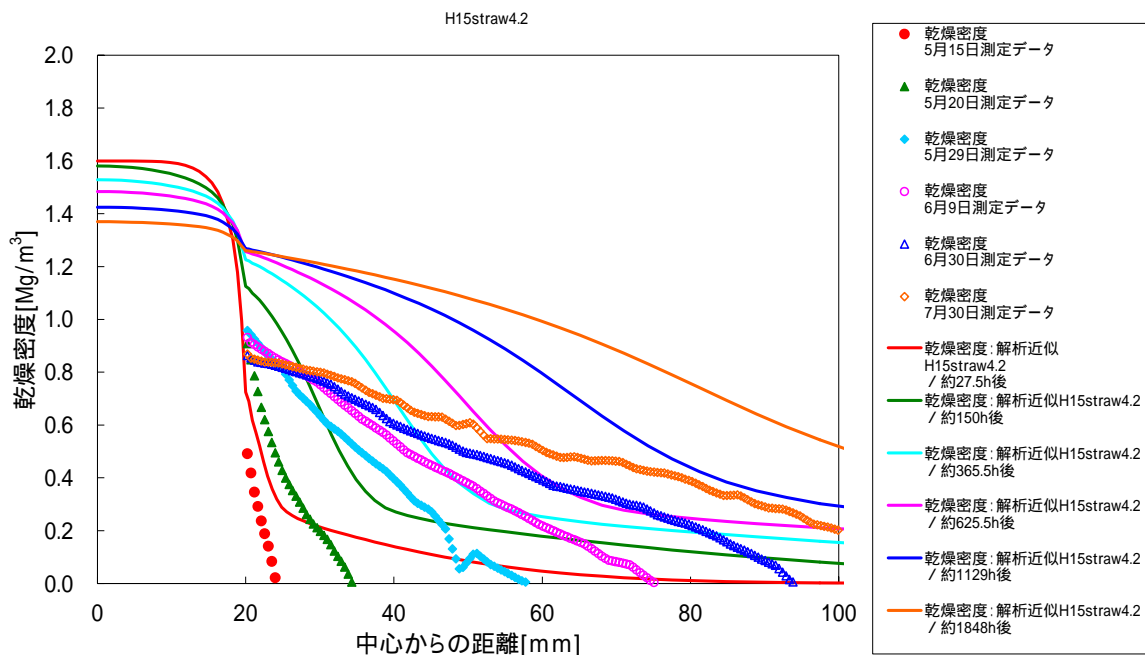


図 2.4-12 乾燥密度分布解析結果 (初期乾燥密度 1.6Mg/m³、孔径 4.2mm)

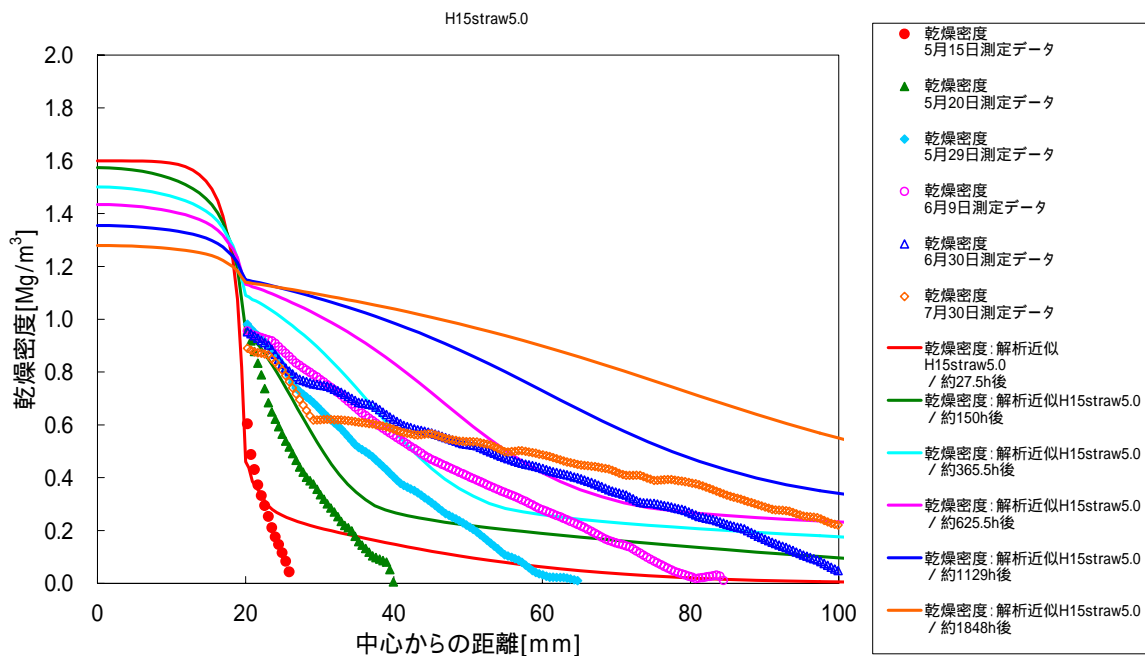


図 2.4-13 乾燥密度分布解析結果 (初期乾燥密度 1.6Mg/m³、孔径 5mm)

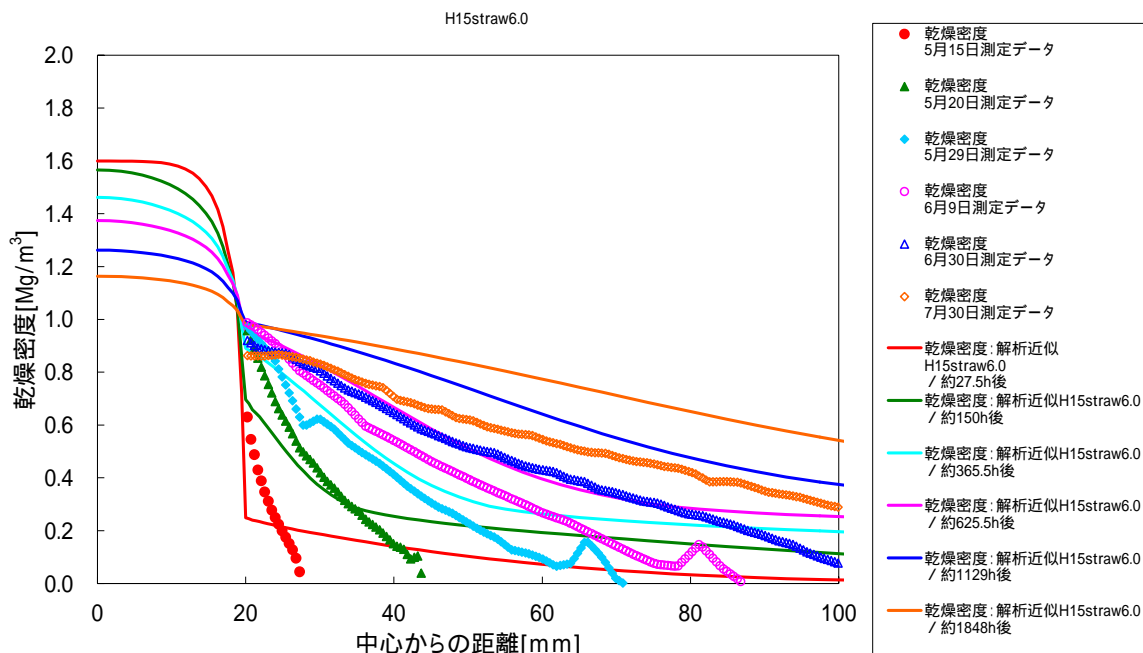


図 2.4-14 乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m³、孔径 6mm）

乾燥密度の分布に関する解析と実験データの違いは、BENTFLOW 型模型試験における違いよりも大きい。ストロー型の試験は侵入部の直径が最低 4.2[mm]で BENTFLOW 型に比べて大きく自由膨潤となっている可能性もあるため、円管部の固相拡散係数を考えるときには、自由膨潤を考慮したモデルの可能性について検討する必要があると考えられる。図 2.4-15 に、今年度の研究で見直された円管部の固相拡散係数を示す。この結果は、図 1.2-8 に示すコア部の固相拡散係数に比べても大きいことから、ストロー型の試験を解析するには、モデル化において何らかの見直しが必要と考えられる。

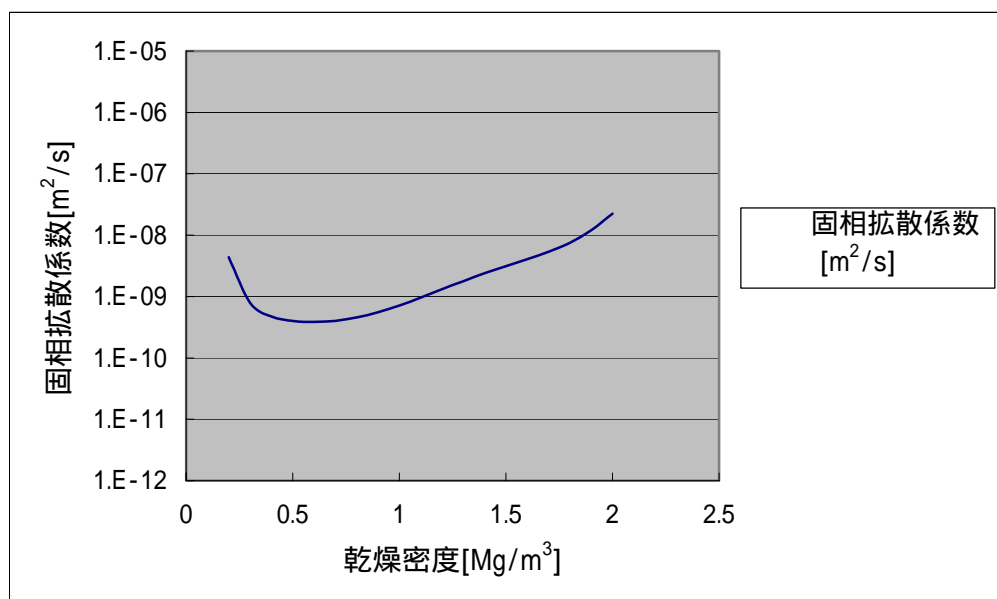


図 2.4-15 本研究で見直された円管部の固相拡散係数

2.5 緩衝材流出挙動試験の解析（侵入距離の評価）

2.2 節で固相拡散係数の見直しを行った際、平成 14 年度に設定した固相拡散係数に比べて大きな値となっており、解析結果でも密度の低い部分はかなり測定値よりも侵入速度が大きくなっていった。従って、侵入距離で比較した場合、今年度見直した固相拡散係数を用いると、時間に対する侵入距離は実験値よりも大きくなると予想される。図 2.5-1 は、平成 14 年度に実施した緩衝材流出挙動試験（以下、BENTFLOW 試験という）の解析メッシュにて今年度設定した固相拡散係数を用いた解析結果から、侵入距離と時間の関係を整理したものである。図 1.2-11 の結果と比較して、明らかに侵入距離が大きくなっていることがわかる。

一方、平成 14 年度に設定した固相拡散係数で評価した場合は、侵入距離は解析値と実験値が比較的一致していた。このときの侵入距離 y [mm] は、侵入経過時間 [hr] の平方根に比例し、その比例係数 A は、き裂幅 d [mm] とベントナイト含有比 Bc [-] に依存する（1.10 式参照）という考え方で整理すると、実験値と一致しているという前提であった。すなわち、BENTFLOW 試験では、侵入距離で整理すると、実験値、計算結果（1.10 式）解析結果（平成 14 年度固相拡散係数による）がほぼ一致していた。今年

度見直した固相拡散係数は、BENTFLOW 試験とは異なる、“BENTFLOW 型模型試験 (X 線 CT 測定用)” (2.1.1 項参照) の密度分布測定結果をもとに設定している。しかしながら、この試験における侵入距離が 1.10 式による計算結果と一致するかどうかを確認し、固相拡散係数設定の拠り所となる試験結果としての適用性を把握しておく必要がある。そこで、“BENTFLOW 型模型試験 (X 線 CT 測定用)” 結果を時間と侵入距離で整理し、1.10 式を基本とする評価式による計算結果との整合性を確認することとした。

1.10 式の比例係数 A は、これまでの BENTFLOW 試験結果より、次式で与えられる。

$$A=6.7587 \times 10^{-7} \cdot \exp(5.7261d) \cdot \exp((6.1598+(-0.5398d)+(-0.9272d^2)) \cdot b) \quad (2.3)$$

ここに、d はき裂幅[mm]、 b はベントナイト供試体の有効粘度密度[Mg/m³] (1.38 b 1.80) である¹⁶⁾。X 線 CT 測定用の BENTFLOW 型模型試験の結果を、き裂中への侵入開始からの経過時間の平方根と侵入距離の関係で表し、上記の計算結果を合わせて図 2.5-2 に示す。この図より、試験結果の方が計算結果よりも進入速度が速く、両者にはかなり開きが見られることがわかる。また、試験結果自体もあまりき裂幅の影響を受けていないように思われる。このことから、模型試験の結果を固相拡散係数の設定に直接適用するには慎重な検討を要することが示唆された。そこで、4 章で実施する処分場の解析では、侵入距離としては解析結果と試験結果が比較的一致していた平成 14 年度の固相拡散係数を用いた解析も、あわせて実施することとした。

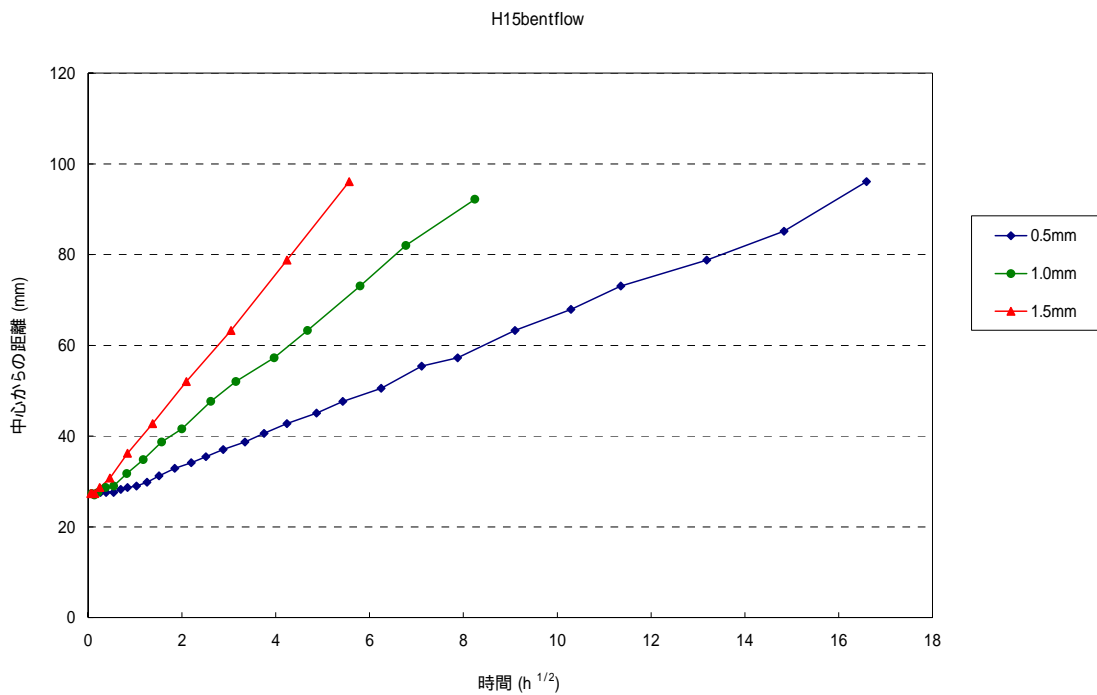


図 2.5-1 流出距離と時間の関係

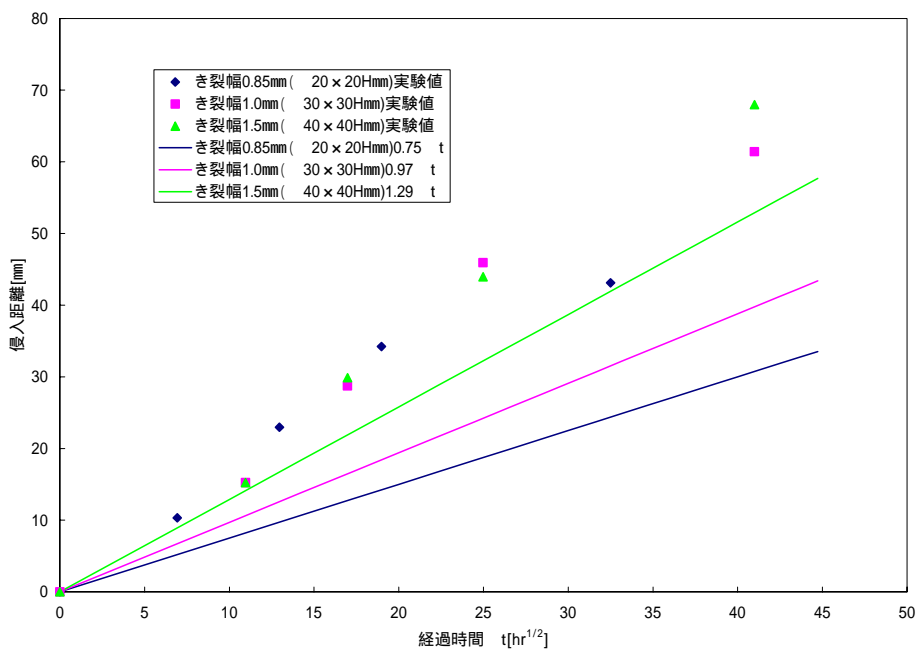


図 2.5-2 BENTFLOW 型模型試験の侵入経過時間と距離の関係

3 専門家とのレビュー

緩衝材侵入現象のモデル化手法開発に関して、専門家のレビューを受けた。開発方針に関する専門家の指摘は次の2項目である。

- ・ 平成14年のベントナイトゲルの粘性係数の設定は、測定値の外挿によるものであり、誤差が大きいと考えられる。ストロー型模型試験の解析が試験結果と一致しなかった理由の原因もこの点にある可能性が高い。このストロー型模型試験の解析では、定量的には試験結果と一致していないが、密度分布曲線の形という定性的な観点ではある程度試験結果を再現しているといえる。したがって、粘性係数の外挿方法を見直し、粘性係数をパラメータとした感度解析を実施することにより、試験結果を再現できる解析が可能となる可能性もあり、この感度解析の実施がまず必要である。
- ・ ベントナイトゲルの低ひずみ速度領域の実測はやはりかなり困難であると考えられる。上述の外挿方法の不確かさも考慮すると、現行の緩衝材の物性データから mechanistic にモデル化する手法には限界がある可能性が高い。したがって、開発中の mechanistic なモデルのみに頼るのではなく、固相拡散係数を実測値（侵入現象における密度分布）から算出し、この固相拡散係数を実測値として位置付けて、処分場における長期緩衝材侵入を評価する方法も試みるべきである。

4 処分場の数値解析

4.1 第2次取りまとめでの解析

第2次取りまとめでは、処分孔の壁面に開口した岩盤き裂中への緩衝材の侵入挙動について、緩衝材の膨潤圧と粘性抵抗をもとにした解析を実施している。このときの緩衝材の乾燥密度は 1.6Mg/m^3 、ケイ砂混合率は30%である。第2次取りまとめにおける処分場のき裂侵入解析に用いた解析モデルを図4.1-1に、また解析結果の一例として乾燥密度の解析結果を図4.1-2に示す。さらにき裂幅をパラメータとして解析した、処分後の経過時間ごとの緩衝材密度の推移を図4.1-3に示す。

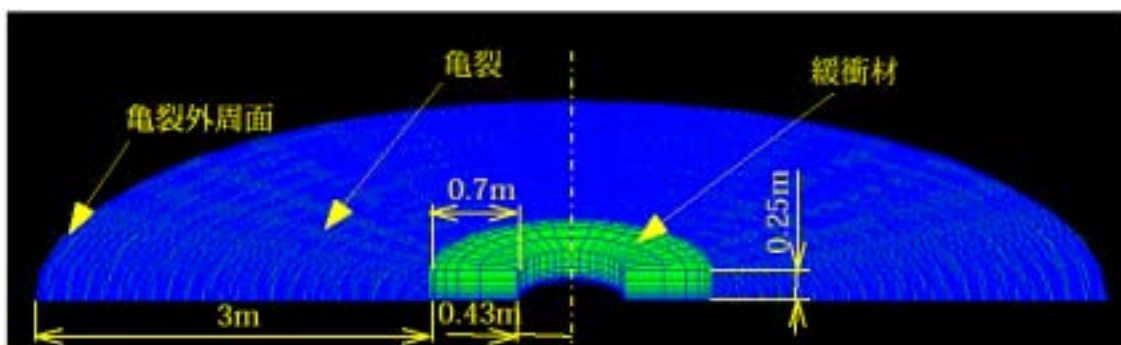


図 4.1-1 第 2 次取りまとめの解析モデル

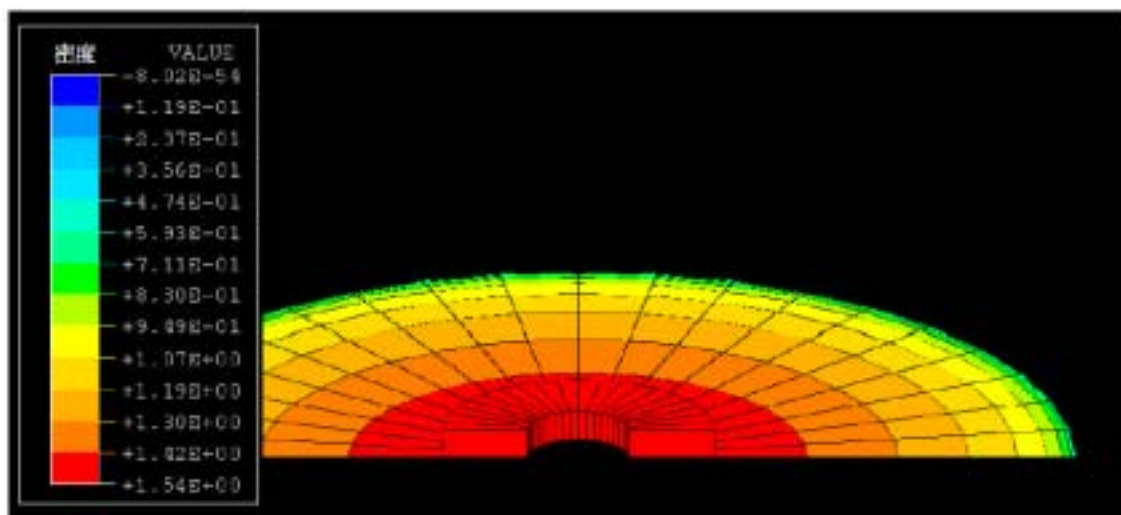


図 4.1-2 第 2 次取りまとめでの解析結果の一例（密度）

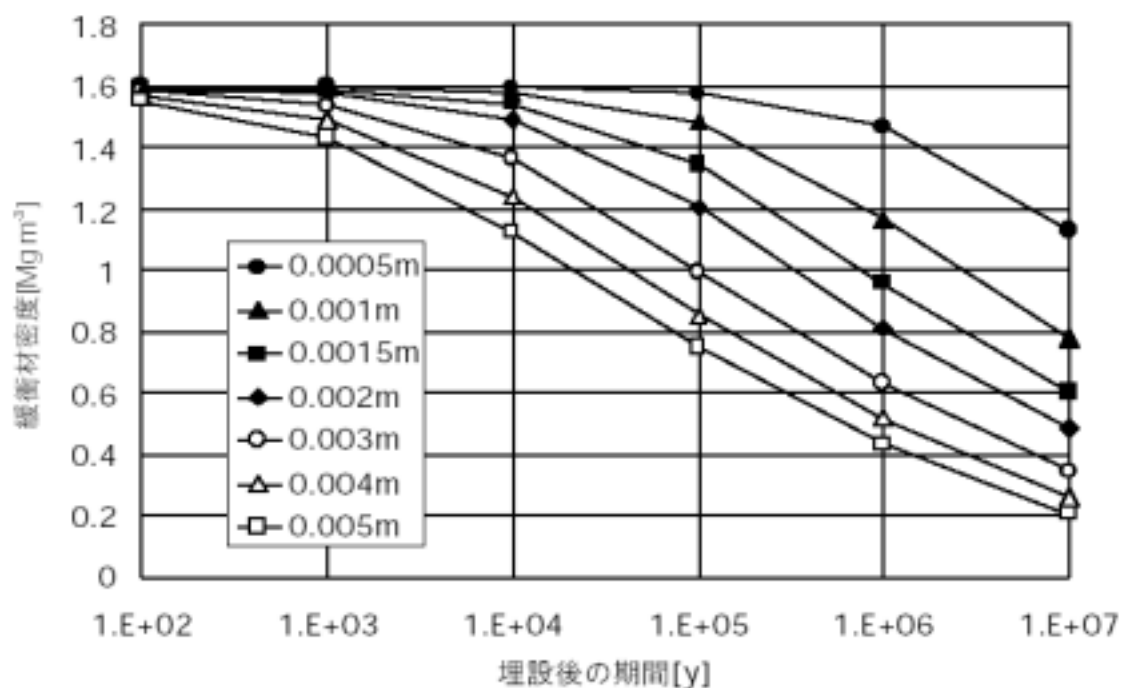


図 4.1-3 第 2 次取りまとめでの埋設後の期間と緩衝材密度の関係

4.2 本研究における固相拡散係数を用いた解析

4.2.1 解析方法

解析方法を以下に示す。基本的な解析条件は第 2 次取りまとめに従ったが、本検討で根拠としている粘性係数のデータは 100%ベントナイトである。なお、本解析では上半分のみを解析対象としている。

- ・使用解析コード：汎用有限要素解析コード ABAQUS Ver.6.2
- ・軸対称解析
- ・寸法、緩衝材（内径 0.86m/外径 2.26m×高さ 1.555m）
- ・寸法、き裂幅（0.0005m、0.001m、0.0015m、0.002m、0.003m、0.004m、0.005mの 7 種類）、中心部からき裂端部までの距離（4.0m）
- ・緩衝材仕様：乾燥密度（ 1.6Mg/m^3 ）、ベントナイト単体

- ・初期条件：
 - 固相率：コア部（0.592593（乾燥密度 1.6Mg/m³より設定））
 き裂部（0.0、及び 0.0817（下記のき裂部固相拡散係数において後者を用いた場合））
- ・境界条件：
 - コア部表面及びき裂表面不透過（図 4.2-1 参照）
- ・入力パラメータ：
 - 固相拡散係数：コア部（式(1.5)に、1.2.2 項で検討した膨潤圧、透水係数を代入して設定）
 き裂部（式(1.9)に、2.2 節で検討した粘性係数(本年度見直した係数)、膨潤圧を代入して設定したケース(ケース 1) 及び 1.2.2 項で検討した粘性係数(平成 14 年度検討した係数)、膨潤圧を代入して設定したケース（ケース 2））

その他の解析条件は、基本的に第 2 次取りまとめに従った。図 4.2-1 に解析メッシュを示す。

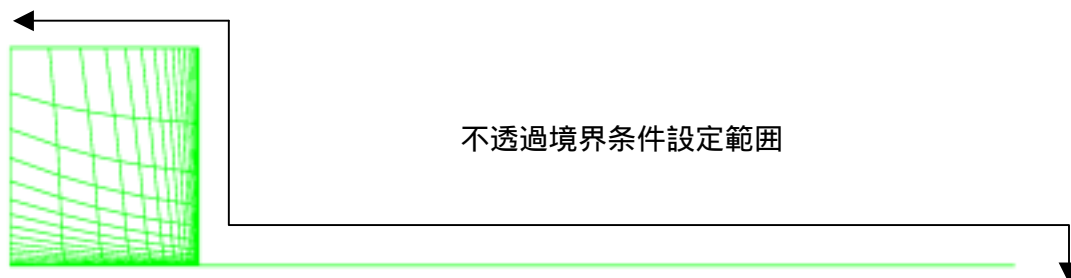


図 4.2-1 解析メッシュ

4.2.2 解析結果

図 4.2-2、図 4.2-3 に固相率分布に関する解析結果の一例(き裂幅 0.0005m、約 100 万年後)(ケース 1))を示す。本解析は軸対称問題として実施したものであるが、図では 3 次元表示として示している(360 度、180 度)。また、固相率分布の経時変化の例(き裂幅 0.0005m のケース)を図 4.2-4~図 4.2-10 に示す。コア部のベントナイトが徐々にき裂中に侵入し、内側から外側に向かって固相率の分布が見られる。また、

時間の経過に伴ってコア部の固相率が低下していく様子が確認できる。また、図 4.2-11 に処分孔（坑道）内の緩衝材の密度の時間的変化を示す。このときの固相拡散係数は、ケース 1 を用いたものである。明らかに図 4.1-3 に示す第 2 次取りまとめの結果よりも早い時期に密度が低くなっている。この差が生じた原因としては、第 2 次取りまとめではケイ砂混合緩衝材を対象としているのに対して、本研究ではベントナイト 100%緩衝材の固相拡散係数を用いて解析を行っていることがまず挙げられる。ベントナイト 100%では、緩衝材の膨潤圧がケイ砂混合物よりも大きいいため、侵入速度が大きくなる。今後、ケイ砂混合ベントナイトゲルの粘性係数データを取得し、ケイ砂混合緩衝材の固相拡散係数の見直しを実施して第 2 次取りまとめの結果との比較を行う必要がある。また、X 線 CT 測定による BENTFLOW 型模型試験の乾燥密度分布データをもとに本研究のモデルの妥当性を検討した結果、固相拡散係数を大きくしたことも、第 2 次取りまとめの解析結果との差につながったと考えられる。そこで、2.5 項でも検討したように、平成 14 年度に検討した固相拡散係数を用いて同様な解析を実施した（ケース 2）。この結果を処分孔内の緩衝材の密度の時間的変化として図 4.2-12 に示す。図 4.2-11 と比べると、緩衝材の密度低下がかなり緩やかになっている。

このように、固相拡散係数の設定の仕方によって解析結果は大きく異なるため、固相拡散係数の信頼性を上げるための詳細な検討が、今後の課題である。今年度は解析に用いる固相拡散係数を、X 線 CT 測定による BENTFLOW 型模型試験の乾燥密度分布データ、特にコア部分の密度データと比較することによって設定し、妥当性の確認を行なっている。しかしながら、比較対象としたコア部分の密度データは測定時点でのコア全体の密度を代表した値とはなっていない可能性、すなわちコアが不飽和状態にあるか、き裂中への侵入により部分的に極端に密度が低下している可能性がある。ある経過時間におけるコア全体の密度がこのような低密度だと仮定して固相拡散係数を設定すると、き裂中への侵入が非常に速く進む解析結果となってしまう、結果として処分場の解析においても緩衝材の密度が著しく低下することになる。従って、実験方法、測定データの解釈の方法を含めた再検討を行う必要があると考えられる。

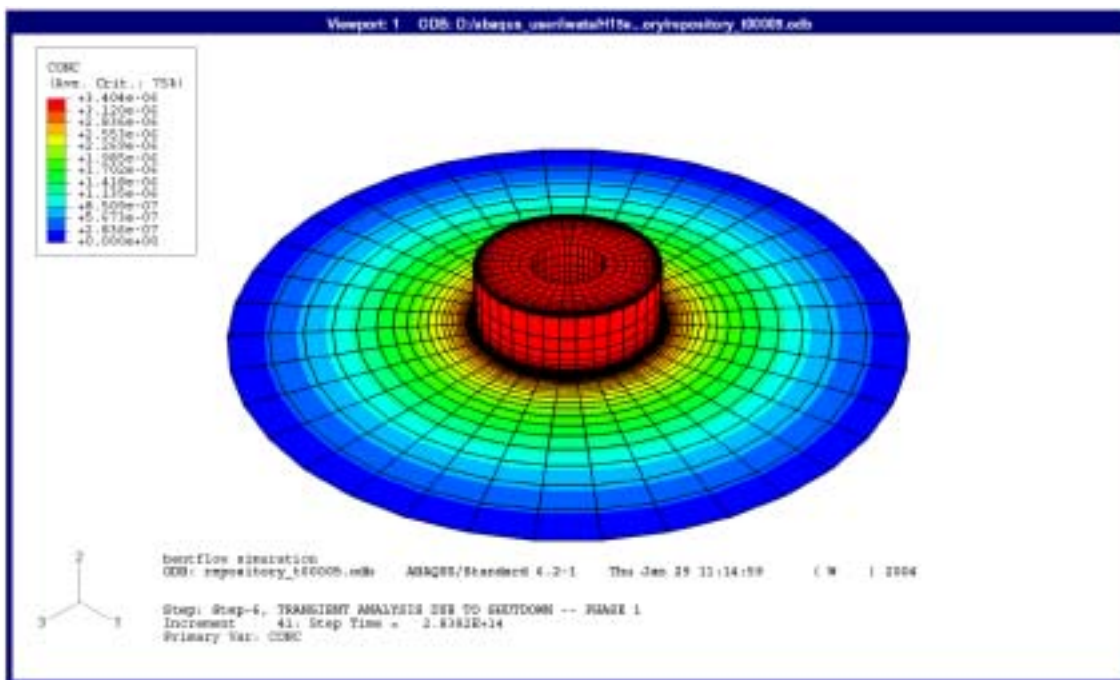


図 4.2-2 解析結果全体 360 度

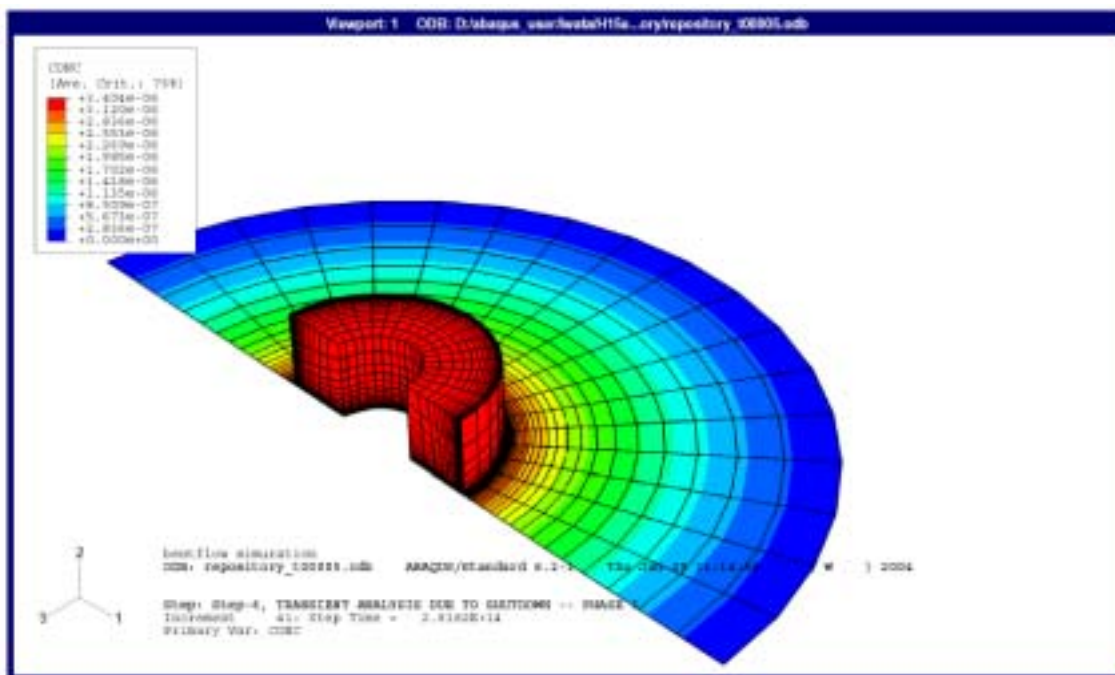


図 4.2-3 解析結果全体 180 度

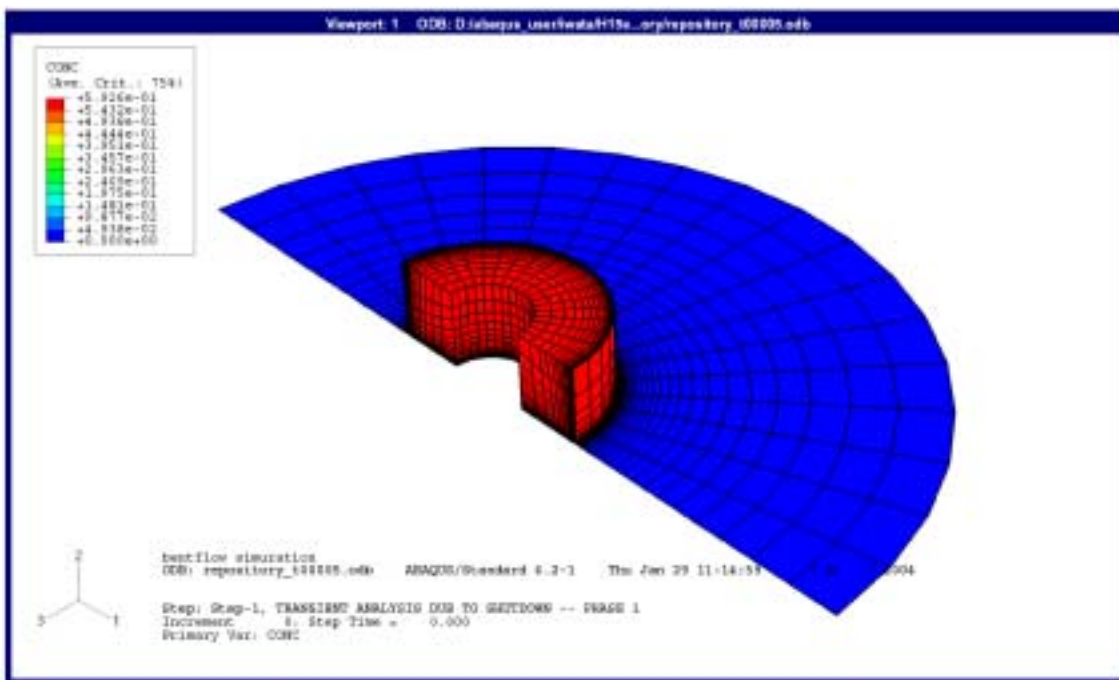


図 4.2-4 解析結果 初期状態

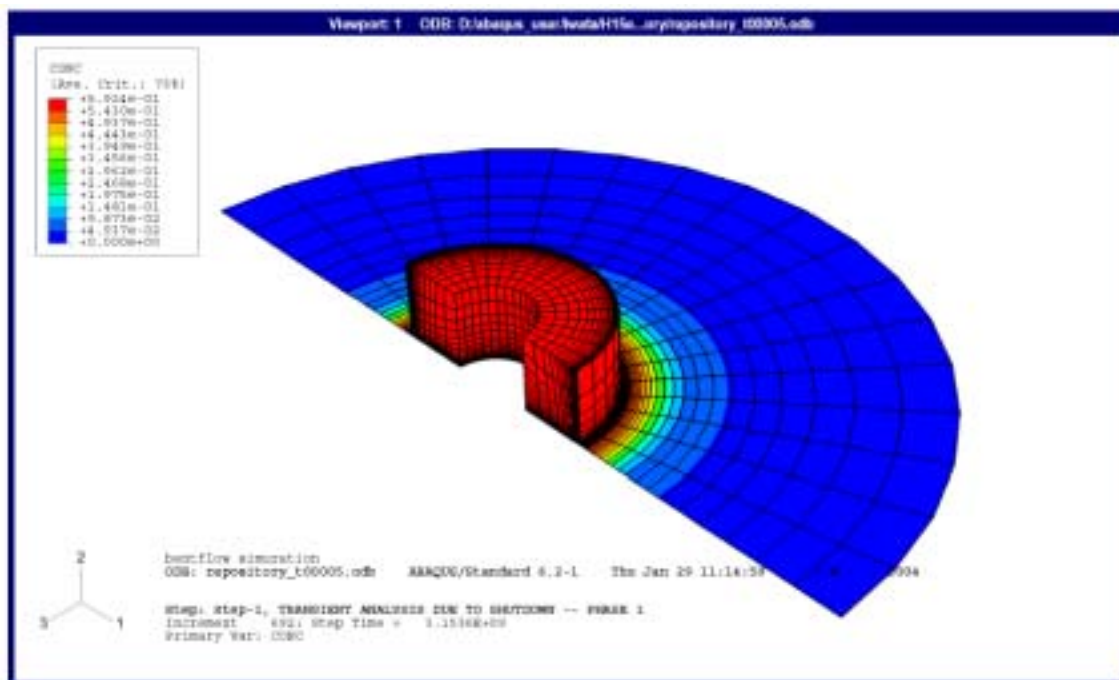


図 4.2-5 解析結果 100年後

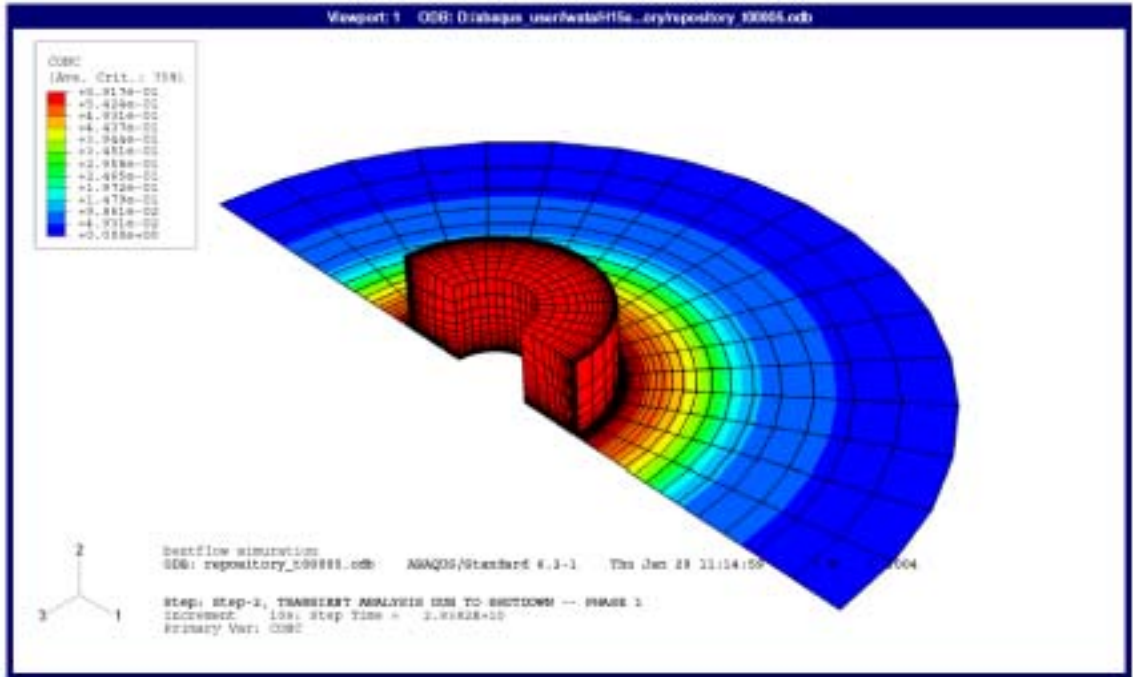


图 4.2-6 解析結果1000年後

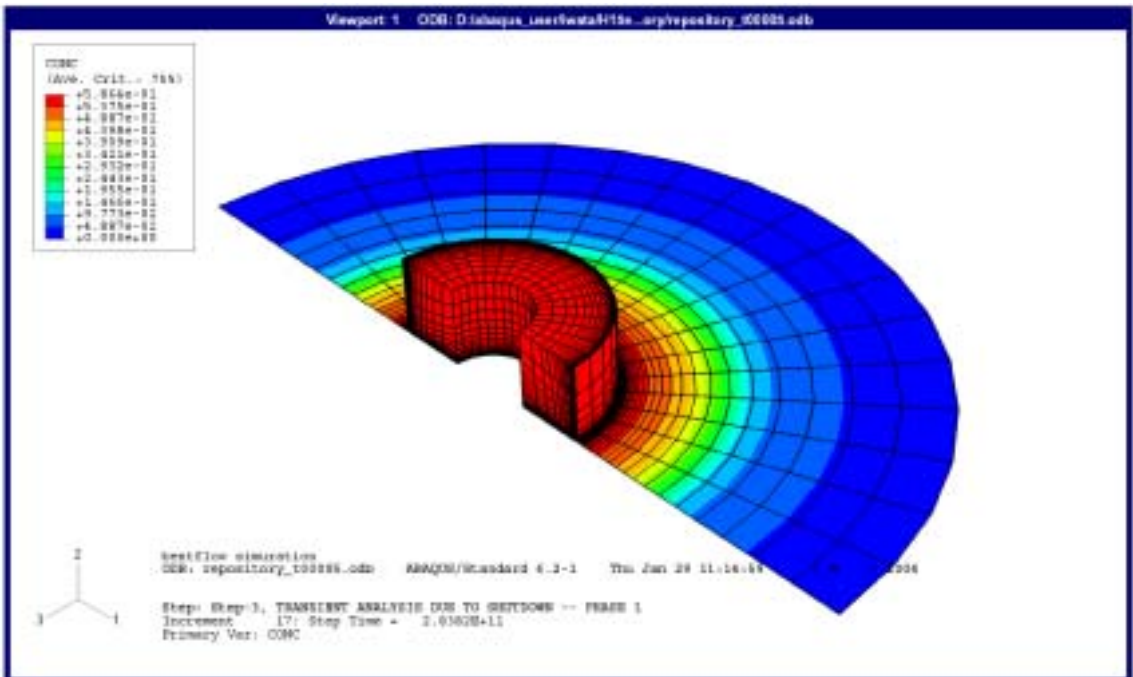


图 4.2-7 解析結果1万年後

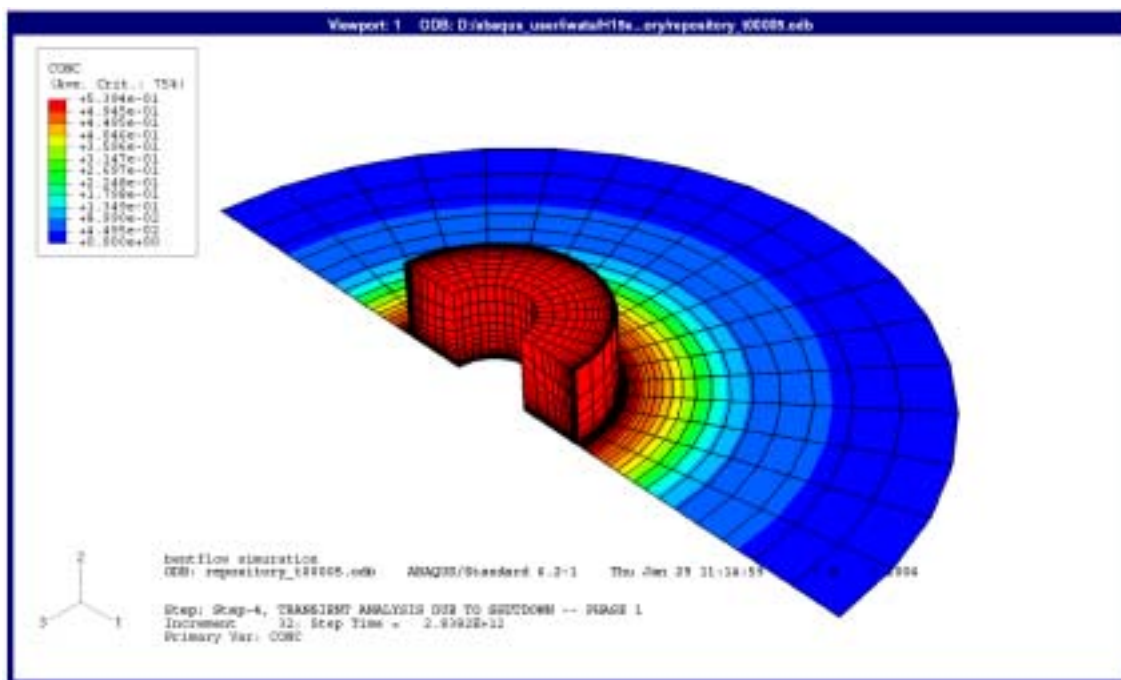
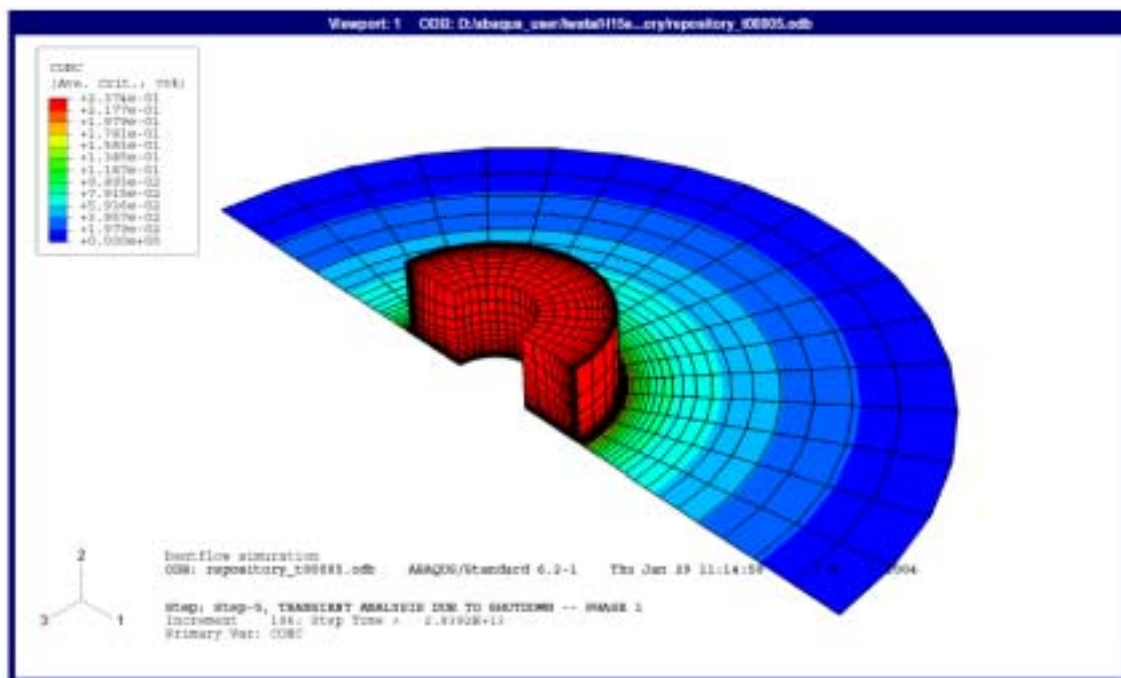


图 4.2-8 解析結果 1 0 万年後



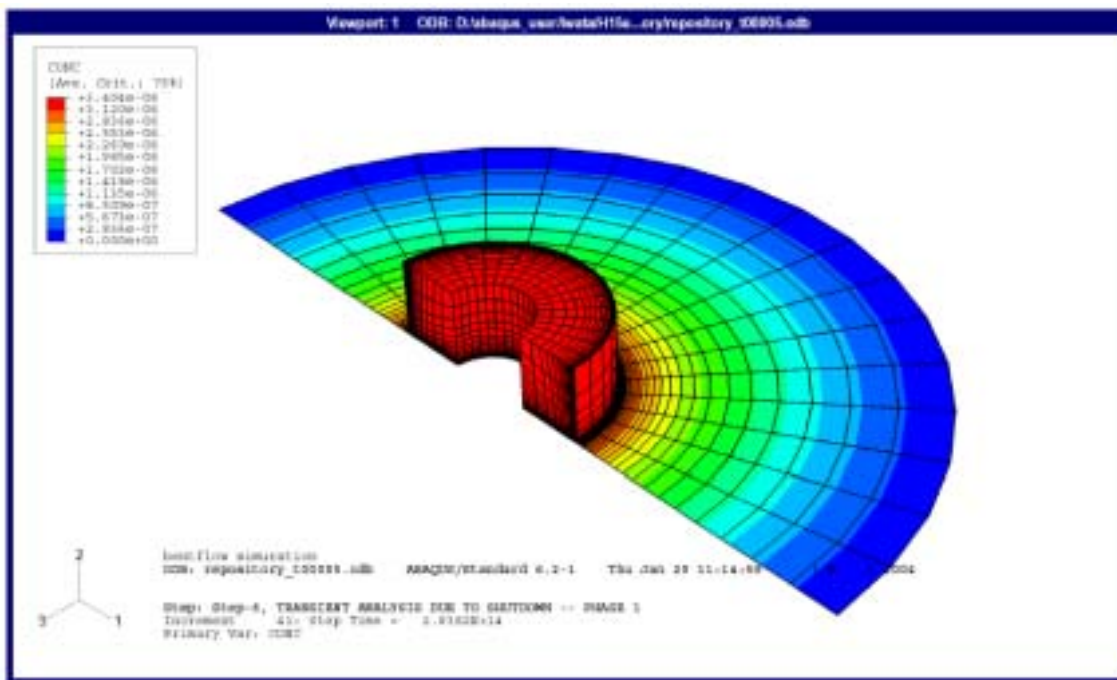


图 4.2-10 解析结果 1000 万年後

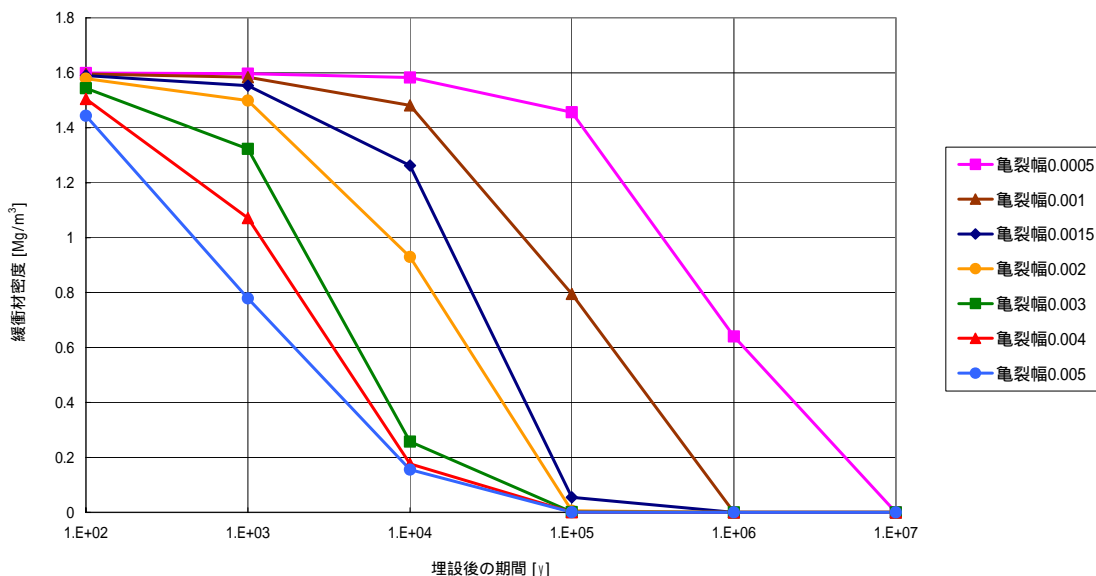


図 4.2-11 処分後年数と緩衝材密度の推移（き裂別）
 （ベントナイト 100%、模型試験に基づく固相拡散係数使用）

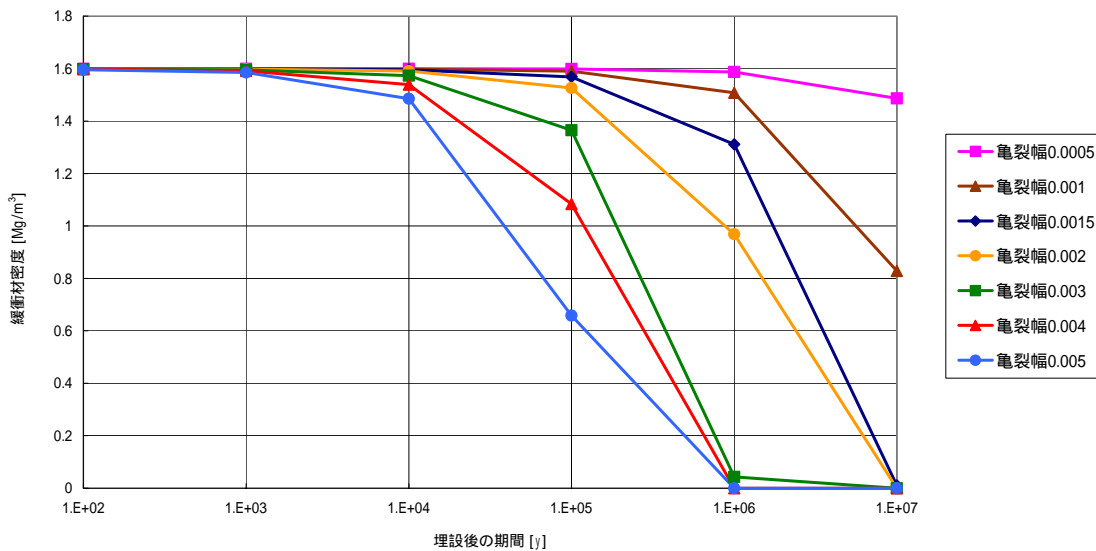


図 4.2-12 処分後年数と緩衝材密度の推移（き裂別）
 （ベントナイト 100%、BENTFLOW 試験に基づく固相拡散係数使用）

5 おわりに

平成 14 年度の研究における緩衝材侵入現象のモデル化で課題となっていた、侵入ゲルの密度分布の評価について、X 線 CT による乾燥密度分布の測定データを用い、モデルの妥当性および適用性に関する検討を行い、モデルの見直しを実施した。本研究で見直したモデルに基づき、実験結果と数値解析結果の比較を行なうことにより、モデルの適用性を検討した。実験結果による既存データは、模型試験（ストロー貫入型・BENTFLOW 型）による侵入試験結果 6 ケースとの比較を行った。BENTFLOW 型模型試験では数値解析と実験結果との間に比較的整合性が見られたが、ストロー貫入型模型試験では実験結果との乖離が認められた。

本モデルにおいては、中野らの膨潤性粘土の移動論に基づき、粘土粒子の拡散としてモデル化を試みている。また、安らは、緩衝材の侵入現象について、圧密方程式を適用してモデル化を行っている。そこで、モデルの妥当性評価も含め、これら専門家間においてレビューを実施し、今後の課題を明確にした。

最後に、見直したモデルを用いて、処分場における緩衝材の密度低下を数値解析により評価し、第 2 次取りまとめとの比較を行なった。X 線 CT による緩衝材密度分布のデータを元に固相拡散係数を設定して解析を実施したが、処分場のき裂中侵入挙動を極端に保守的に評価している可能性が示唆された。今後、実験データの適用方法と固相拡散係数の設定方法について詳細な検討が必要を行い、解析モデルの妥当性を確認する必要がある。

6 参考文献

- [1] 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).
- [2] Nakano, M. Y. Amemiya & K. Fujii: “Saturated and Unsaturated Hydraulic Conductivity of Swelling Clays.”、Soil Science. Vol. 141. No. 1, (1986).
- [3] 中野政詩、雨宮悠、藤井克己、石田朋靖、石井明俊：“不飽和粘土の浸潤と膨潤”、農業土木学会論文集、100、pp.8-16、(1982).
- [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 - 総論レポート”、JNC TN1400 99-020、(1999).
- [5] Kanno, T., K. Matsumoto & H. Sugino: “Evaluation of extrusion and erosion of bentonite buffer.” Proc. 7th Int. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM'99). Nagoya, (1999).
- [6] Kanno, T., Y. Iwata & H. Sugino: Modelling of bentonite swelling as solid particle diffusion.、Clay Science for Engineering, Adachi & Fukui (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 1579, (2001).
- [7] Kanno, T. & H. Wakamatsu: “Experimental study on bentonite gel migration from a deposition hole”、Proc. 3rd Int. Conf. Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management (RECOD '91). Sendai, (1991).
- [8] Boisson, J.Y.: “Study on the possibilities by flowing ground waters on bentonite plugs expanded from borehole into fractures.”、Proc. NEA/CEC Workshop - Sealing of Radioactive Waste Repositories, (1989).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).

- [12] 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).
- [13] Verbeke, J., J. Ahn, P. L. Chambré：“Long-term behaviour of buffer materials in geologic repositories for high-level wastes.” UCB-NE-4220, (1997).
- [14] Ahn, J., P. Chambré, E. Crandall, and J. Verbeke：“Long-Term Behavior of Bentonite Buffer in a Geologic Repository for High-Level Wastes”, UCB-NE-4222, (1998).
- [15] 菅野毅、松本一浩：“ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（Ⅰ）”、PNC TN8410 97-313、(1997).
- [16] 松本一浩、棚井憲治：“ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（Ⅱ）”、JNC TN8400 2003-006、(2003).