

JNC TJ8400 2003-026

# 緩衝材侵入現象モデルの検討

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003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大字村松 4 49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

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)

2003

## 緩衝材侵入現象モデルの検討

(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った。第2次取りまとめの段階における検討で課題となっていた点の解決を目指し、次の項目を実施し、既存モデルの高度化を図った。

(1) 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した。(2) 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した。(3) 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した。(4) 安らのモデルとの比較：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、検討した。その結果、安らのモデルは本研究における固相拡散に基づくモデルと等価である可能性が示された。(5) 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した。BENTFLOW 試験の解析では、第2次取りまとめ時点の検討よりも試験結果と良い一致を得た。ただし、模型試験の解析では試験結果との差が大きく、今後の課題が残る。

---

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 原子力事業部 原燃プロジェクト部

Study on Model for Bentonite Buffer Intrusion Phenomenon

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

Takeshi Kanno\*, and Yumiko Iwata\*

Abstract

Modelling study on the extrusion phenomenon in a geological repository for the high-level radioactive is performed to enhance the reliability of existing model described in H12 report. Main conclusions of this study are as follows:

(1) The methods and physical interpretation of bentonite gel viscosity measurements are clarified and input data of the viscosity for the solid diffusivity are obtained.

(2) The input data of the swelling pressure and hydraulic conductivity of bentonite in the low-density region necessary for the solid diffusivity are determined.

(3) The consolidation-type model proposed by Ahn et al. is surveyed and compared with that used in this study. The consolidation-type model is thought to be equivalent to the solid diffusion model used in this study.

(4) The numerical analyses for BENTFLOW experiments and model experiments on extrusion in a pipe are performed. The analyses for the BENTFLOW reproduce the experimental results better than the past studies. The agreement between the calculated and experimental results of the model experiments is not good. Thus further study is required for the evaluation of density distribution in extruding bentonite gel.

---

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

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

\* Nuclear Fuel Cycle Project Dept., Energy System Division, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

## 目次

1	はじめに.....	1
1.1	研究開発の背景・動機.....	1
1.2	他機関や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
1.3	本研究開発の位置づけ・目的.....	5
1.4	研究開発方法の概要・特徴・特記事項.....	6
2	モデル入力データの調査および抽出.....	7
2.1	ベントナイトの粘性係数測定手法の検討.....	7
2.1.1	静的測定法.....	8
2.1.2	動的測定法.....	8
2.2	膨潤圧入力データの検討.....	13
2.2.1	小峯らの膨潤圧評価式の概要 <sup>13),14),15)</sup> .....	13
2.2.2	小峯らによる透水係数の実験式 <sup>13)</sup> .....	24
2.3	入力パラメータの設定.....	24
2.3.1	粘性係数.....	25
2.3.2	膨潤圧.....	27
2.3.3	透水係数.....	31
2.3.4	固相拡散係数.....	31
2.4	安らのモデルとの比較.....	37
3	数値解析.....	43
3.1	緩衝材流出挙動試験解析.....	43
3.1.1	緩衝材流出挙動試験の概要 <sup>19)</sup> .....	43
3.1.2	解析方法.....	43
3.1.3	解析結果.....	45
3.2	模型試験解析.....	46
3.2.1	模型試験の概要 <sup>20)</sup> .....	46
3.2.2	解析条件.....	48
3.2.3	解析結果.....	50

4	おわりに .....	53
5	参考文献 .....	53

## 図表目次

図 1.1-1	緩衝材の侵入・侵食シナリオ	1
図 1.2-1	BENTFLOW 試験の従来解析結果	5
図 2.1-1	粘弾性力学モデルの例	7
図 2.1-2	動的粘弾性測定のみずみと応力	8
図 2.1-3	粘度 $\eta$ とずり速度 $\dot{\gamma}$ の関係	11
図 2.1-4	ベントナイトの粘性係数測定結果	12
図 2.2-1	2つの粘土粒子間の静電ポテンシャル分布の模式図	14
図 2.2-2	砂・ベントナイト混合材料の質量組成および体積組成	16
図 2.2-3	結晶レベルから観たモンモリロナイトの膨潤体積ひずみ	19
図 2.2-4	砂・ベントナイト混合材料(ベントナイト配合率 60~90%)および締め めたベントナイトの膨潤圧実験結果に対する膨潤評価式の計算結果との比較	22
図 2.2-5	緩衝材・埋戻し材の透水係数とパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体 積ひずみ」との関係	24
図 2.3-1	粘度測定結果の外挿	25
図 2.3-2	侵入現象におけるベントナイトゲルの粘度推定値	26
図 2.3-3	ベントナイトゲルの粘度の設定値	27
図 2.3-4	緩衝材膨潤圧の設定値	28
図 2.3-5	緩衝材膨潤圧の近似式	28
図 2.3-6	緩衝材透水係数の設定値	31
図 2.3-7	平行平板き裂中のベントナイトの侵入現象のモデル化	33
図 2.3-8	コア部固相拡散係数の設定値	36
図 2.3-9	き裂部固相拡散係数の設定値	36
図 2.3-10	円管部固相拡散係数の設定値	37
図 3.1-1	緩衝材流出挙動試験解析メッシュ(き裂幅 1.5 mm)	44
図 3.1-2	緩衝材流出挙動試験の解析結果の一例	45
図 3.1-3	流出距離の解析結果	46
図 3.2-1	模型試験装置	47

図 3.2-2	模型試験解析メッシュ .....	49
図 3.2-3	模型試験解析結果.....	50
図 3.2-4	乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> 、孔径 4.2mm） ...	51
図 3.2-5	乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> 、孔径 5mm） .....	51
図 3.2-6	乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> 、孔径 6mm） .....	52
図 3.2-7	乾燥密度分布解析結果（初期乾燥密度 1.4Mg/m <sup>3</sup> 、孔径 6mm） .....	52
表 2.2-1	最大膨潤圧とベントナイト配合率の関係における膨潤評価式の計算結果例 .....	23
表 2.3-1	小峯らの評価式による膨潤圧（クニゲル V1-100%試料、 $\alpha=100\%$ ） .	29
表 2.3-2	小峯らの評価式による膨潤圧（クニゲル V1-100%試料、 $\alpha=70\%$ ） ...	30
表 3.1-1	緩衝材流出挙動試験の試験条件（静水試験） .....	43
表 3.2-1	模型試験の試験条件 .....	48



## 1 はじめに

### 1.1 研究開発の背景・動機

わが国の高レベル放射性廃棄物地層処分概念における緩衝材の候補材料は、ベントナイトとケイ砂の圧縮成型体である<sup>1)</sup>。ベントナイト・ケイ砂の圧縮成型体は、低透水性や放射性核種の収着性が高い等、種々の好ましい性質がある。しかし、処分場の閉鎖後に緩衝材が飽和、膨潤するにしたいが、緩衝材は周辺岩盤中のき裂へ侵入することが懸念される。この侵入現象とそれに引き続くと考えられる地下水流れによる緩衝材の侵食による緩衝材の流出量が多い場合は、処分坑道（または処分孔）内の緩衝材の密度低下により、(少なくとも局所的には)緩衝材自身の有する好ましい特性が低下する危険性がある。この緩衝材の侵入・侵食シナリオを図 1.1-1 に示す。したがって、高レベル放射性廃棄物地層処分における人工バリアの長期物理的安定性を評価するために、処分坑道（または処分孔）からの侵入・侵食による緩衝材の流出現象を定量的に把握する必要がある。

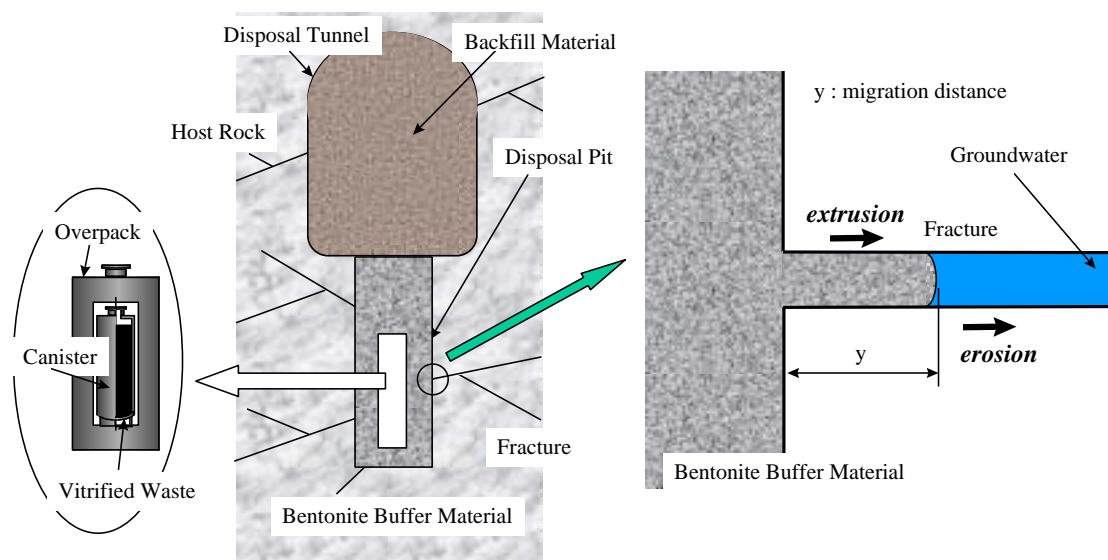


図 1.1-1 緩衝材の侵入・侵食シナリオ

## 1.2 他機関やこれまでの関連研究開発の状況

ベントナイト圧縮成型体のき裂への侵入現象に関するこれまでの試験研究においては、次の知見が得られている。

- ・ 侵食がない条件では、流出距離  $y$  (侵入するベントナイトのゲルの変位、図 1.1-1 参照) は、次式のように、ベントナイトと水が接触した後の時間  $t$  に比例し、侵入速度はき裂開口幅とベントナイト含有比  $B_c$  に依存する<sup>2)</sup>。

$$y = A(d, B_c)\sqrt{t} \quad (1.1)$$

- ・ 侵入するベントナイトゲルの先端では、2つの層(比較的硬い層と非常に軟らかい層)が形成される<sup>3)</sup>。
- ・ この非常に軟らかい層における含水比は約 550%であり<sup>4)</sup>、試験に用いたベントナイトの液性限界値に近い<sup>2)</sup>。

Pusch<sup>3),5)</sup>、Börgesson<sup>6)</sup>、Kanno ら<sup>2)</sup>、Verbeke ら<sup>7)</sup>により、ベントナイトの侵入現象に関するモデル化研究が行われているが、(1.1)式に示す侵入速度のき裂開口幅依存性は説明できていなかった。このため、Kanno ら<sup>8),9)</sup>は、中野らの固相拡散理論と粘性流体モデルを組み合わせることで緩衝材侵入現象のモデル化を行い、侵入速度のき裂幅依存性を説明している。このモデル化に基づく数値解析の結果は、サイクル機構の地層処分基盤研究施設 (ENTRY) における BENTFLOW 試験結果と良く一致している<sup>8),9)</sup>。第2次取りまとめにおいても、このモデル化に基づいて、処分場における緩衝材侵入現象の評価が行われている<sup>1),10)</sup>。このモデル化の概要を次に示す。

### 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

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<sup>11),12)</sup>

$$q_s = -k_s \frac{\partial \psi_s}{\partial z} \quad (1.2)$$

を提示した。ここで、 $q_s$  は粘土粒子の流束、 $k_s$  と  $\psi_s$  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、

$$D_s = k_s \frac{d\psi_s}{d\sigma} \quad (1.3)$$

と定義された。ここで、 $\sigma$  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。(1.2)式と(1.3)式より、

$$q_s = -D_s \frac{\partial \sigma}{\partial z} \quad (1.4)$$

が得られる。

第2次とりまとめでは、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<sup>1),10)</sup>。第2次とりまとめの内容及びこれを詳述した文献 (Kanno et al.,1999 及び 2001)<sup>8),9)</sup>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

$$\psi_s = \frac{P_s}{\rho_w g} \quad (1.5)$$

と考えると、固相拡散係数は次式で与えられる

$$D_s = \frac{\sigma k}{\rho_w g} \frac{dP_s}{d\sigma} \quad (1.6)$$

ここで、 $\rho_w$  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(1.6)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。(1.2)式と(1.5)式より、

$$q_s = -\frac{k_s}{\rho_w g} \frac{\partial P_s}{\partial z} \quad (1.7)$$

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速  $\bar{q}_s$  は、

$$\bar{q}_s = -\frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dPs}{dz} \quad (1.8)$$

で与えられる。ここで、 $\mu_f$  は流体の粘性係数、 $dPs/dz$  は圧力勾配である。(1.7)式と(1.8)式を比較すると、

$$k_s = \rho_w g \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \quad (1.9)$$

き裂中の固相拡散係数は、(1.3)式、(1.5)式、(1.9)式より、

$$D_s = \frac{d^2}{12\mu_s} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (1.10)$$

と得られる。(1.6)式を処分坑道(または処分孔)部に、(1.10)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、(1.4)式と(1.8)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、(1.1)式に示す係数  $A$  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<sup>2)</sup>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。

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

(1.4)式と(1.8)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<sup>4)</sup>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。

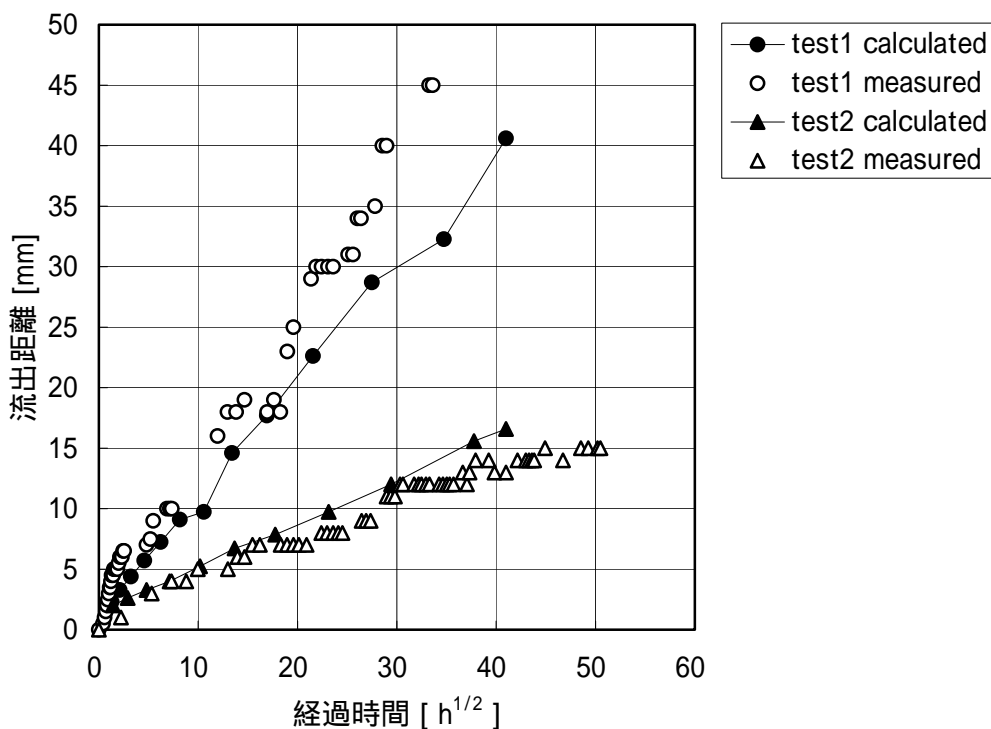


図 1.2-1 BENTFLOW 試験の従来の解析結果

### 1.3 本研究開発の位置づけ・目的

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、小峯ら<sup>13),14),15)</sup>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、本研究では、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、次節に示す項目を実施し、侵入現象モデルの高度化を図る。

#### 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高度化を行う。

- ・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。
- ・安らのモデル<sup>7),16)</sup>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。

## 2 モデル入力データの調査および抽出

### 2.1 ベントナイトの粘性係数測定手法の検討

緩衝材の流出現象では、乾燥密度  $1.6\text{g/cm}^3$  程度の圧縮成型体から液性限界程度の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、厳密には流出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ることが妥当である。粘弾性体では、フック弾性(弾性率  $G$ )をスプリングで、ニュートン粘性(粘性率  $\eta$ )をダッシュポットで表わし、これらの組み合わせで力学模型をつくる。粘弾性体の最も簡単な力学模型を図 2.1-1 に示す。直列に結合したものをマクスウェル要素、並列に結合したものをフォークト要素と呼ぶ。粘弾性体を扱うレオロジーの分野では、固体と液体は次のように定義される<sup>17)</sup>。

- (1) 一定のひずみを与えた状態に保つとき、長時間後に応力が一定値に近づく物体を固体、0 に限りなく近づく物体を液体という。
- (2) 一定の応力を与えた状態に保つとき、長時間後にひずみが一定値に近づく物体を固体、無限に大きくなる物体を液体という。

粘弾性体の物性測定では、時間変化の型によって、静的測定法と動的測定法がある。

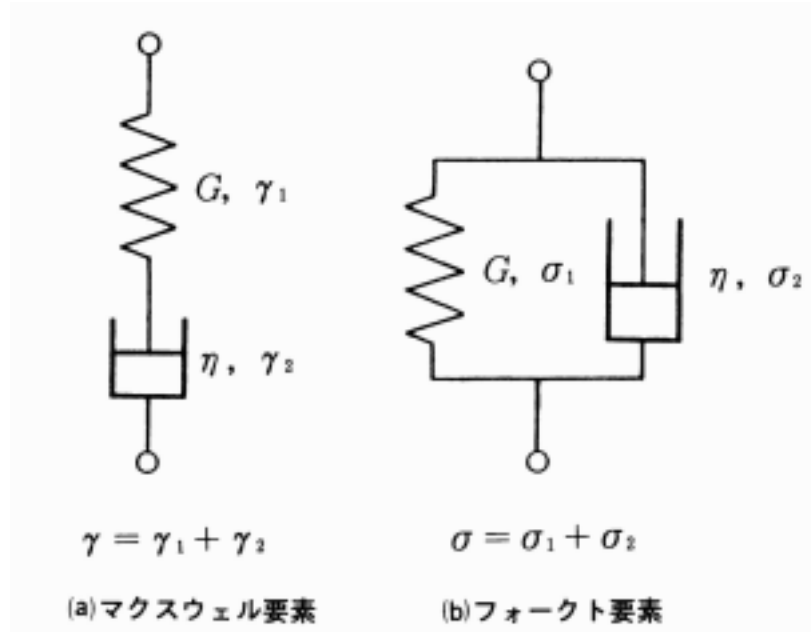


図 2.1-1 粘弾性力学モデルの例

### 2.1.1 静的測定法

静的測定法には、一定のひずみを与えて応力を測定する応力緩和法と、一定の応力を与えてひずみを測定するクリープ法がある。粘度の測定については、流動性の高い試料の場合、回転方法による回転型レオメーターで測定するのが一般的であるが、含水比の低いベントナイトでは流動性が低いため、回転方法による測定は困難であり、次に示す動的測定が必要となる。

### 2.1.2 動的測定法

動的測定法<sup>17)</sup>は、振動数 $\nu$ で振動するひずみ $\gamma$ を与える測定法で、ひずみ $\gamma$ は角振動数 $\omega$ を用いて次式で表わす。

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cos \omega t \quad (2.1)$$

これは、図 2.1-2 で時間の原点  $t=0$  を とすることに相当する。(図中の  $\sigma$ 、 $\gamma$  は異なる観点での測定の考え方を説明するための記号であり、ここでは説明を割愛する。)

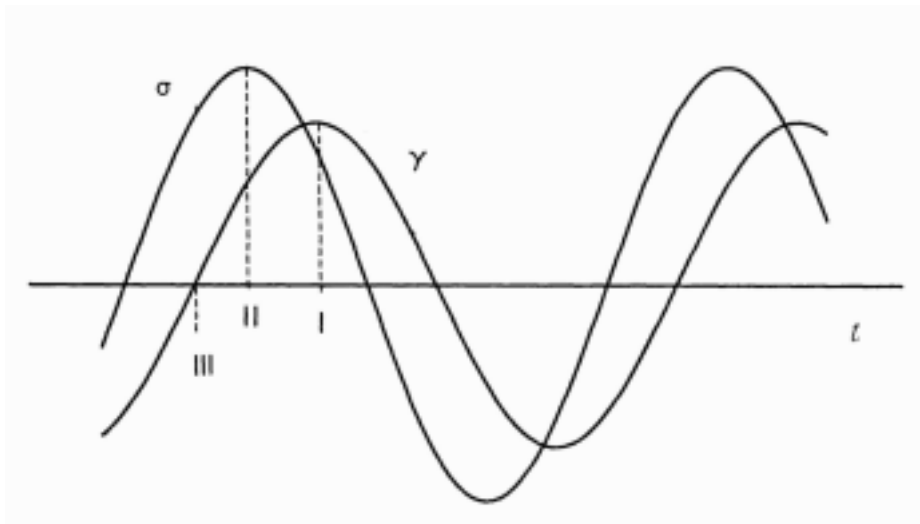


図 2.1-2 動的粘弾性測定 of ひずみと応力

応力 $\sigma$ も同じ周波数で振動するが、位相が $\delta$ だけ進んだものになり、以下の式で表される。



$$\begin{aligned}\sigma(t) &= \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) = \sigma_1 \cos \omega t - \sigma_2 \sin \omega t \\ \sigma_1 &= \sigma_0 \cos \delta, \sigma_2 = \sigma_0 \sin \delta\end{aligned}\quad (2.2)$$

これより、次の関数が定義される。

$$G'(\omega) = \frac{\sigma_1(\omega)}{\gamma_0} = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\gamma_0}, G''(\omega) = \frac{\sigma_2(\omega)}{\gamma_0} = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\gamma_0}\quad (2.3)$$

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'}\quad (2.4)$$

$G'$ は貯蔵弾性率、 $G''$ は損失弾性率、 $\tan \delta$ は損失正接と呼ばれ、いずれも角振動数の関数である。

これらの動的粘弾性関数は、複素数表示を用いると関係式が単純となる。正弦振動ひずみを複素数表示すると

$$\gamma(t) = \gamma_0 \exp i \omega t\quad (2.5)$$

応力は位相が $\delta$ だけ進んでおり

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp i(\omega t + \delta)\quad (2.6)$$

せん断速度は(2.5)式を微分して

$$\dot{\gamma}(t) = \gamma_0 i \omega \exp i \omega t\quad (2.7)$$

(2.6)式を(2.5)式で割って、弾性率の単位をもったレオロジー量  $G^*$

$$G^* = \frac{\sigma(t)}{\gamma(t)} = \frac{\sigma_0 \exp i(\omega t + \delta)}{\gamma_0 \exp i \omega t} = \left( \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right) \exp i \delta = \left( \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \right) (\cos \delta + i \sin \delta)\quad (2.8)$$

が定義できる。(2.3)式と比べると

$$G^* = G' + i G''\quad (2.9)$$

であることがわかる。したがって

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2}\quad (2.10)$$

また、(2.6)式を(2.7)式で割って、粘性率の単位をもったレオロジー量  $\eta^*$

$$\eta^* = \frac{\sigma(t)}{\dot{\gamma}(t)} = \frac{\sigma_0 \exp i(\omega t + \delta)}{\gamma_0 i \omega \exp i \omega t} = -i \left( \frac{\sigma_0}{\gamma_0 \omega} \right) \exp i \delta = \left( \frac{\sigma_0}{\gamma_0 \omega} \right) (\sin \delta - i \cos \delta)\quad (2.11)$$

が定義できる。 $\eta^*$ は複素粘性率と呼ばれる。ここで

$$\begin{aligned}\eta' &= \frac{\sigma_0}{\gamma_0 \omega} \sin \delta \\ \eta'' &= \frac{\sigma_0}{\gamma_0 \omega} \cos \delta\end{aligned}\tag{2.12}$$

とおくと

$$\eta^* = \eta' - i\eta''\tag{2.13}$$

ここで、 $\eta'$ は動的粘性率( dynamic viscosity )と呼ばれる。 $\eta''$ ( out-of-phase dynamic viscosity )には邦名が定まっていない<sup>17)</sup>。(2.3)式と比べて次の関係式が得られる。

$$G' = \eta'' \omega, \quad G'' = \eta' \omega\tag{2.14}$$

(2.14)式を(2.13)式に代入すると

$$\eta^* = \frac{G''}{\omega} - i \frac{G'}{\omega} = \frac{G' + iG''}{i\omega} = \frac{G^*}{i\omega}\tag{2.15}$$

と表わされる。

固体と液体の区別は $\omega \rightarrow 0$ における粘弾性関数の値に現われ、液体では $\eta'$ が一定値(粘度)であり、 $G'$ は $\omega^2$ 程度の微小量である<sup>17)</sup>。

コロイドや高分子のような複雑な物質の場合、粘度 $\eta$ はずり速度 $\dot{\gamma}$ の関数であり、次式で定義される<sup>17)</sup>。

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}\tag{2.16}$$

ここで $\sigma$ はせん断応力である。特に、ニュートン流体と非ニュートン流体を区別し、次のように呼ばれる。

$\eta(0)$  : ニュートン粘度 (ゼロずり粘度)

$\eta(\dot{\gamma})$  : 非ニュートン粘度

粘度をずり速度に対して両対数プロットしたグラフは、一般に図 2.1-3 のような形となる<sup>17)</sup>。ずり速度が低い領域で一定値 $\eta(0)$ になる (a 領域) こと、相当広い範囲にわたって、冪乗則が良い近似となる (b 領域) こと、ずり速度が極めて高い領域で再び一定値 $\eta(\infty)$ になる (c 領域) ことが特徴である。

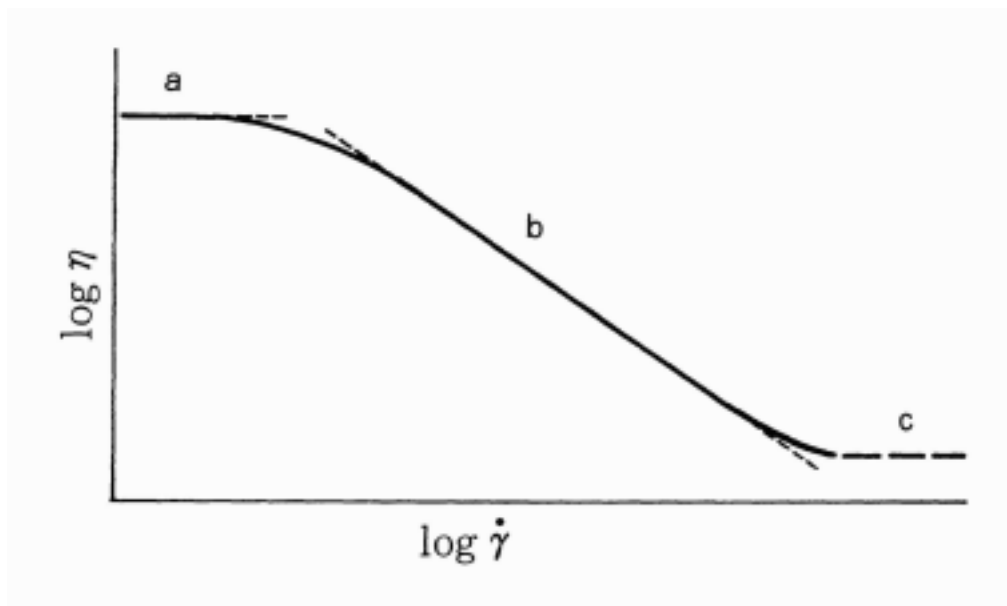


図 2.1-3 粘度 $\eta$ とずり速度 $\dot{\gamma}$ の関係

非ニュートン粘度 $\eta(\dot{\gamma})$ は、線形粘弾性の動的粘度 $\eta'(\omega)$ と極めて関係の深い関数である。 $\omega = \dot{\gamma}$ の点で比較すると、二つの関数の値はかなり近く、特に $\eta(0) = \eta'(0)$ の関係は厳密に成立する。また Cox-Merz 則と呼ばれる経験式

$$\eta(\dot{\gamma}) = \left\{ [\eta'(\omega)]^2 + [\eta''(\omega)]^2 \right\}^{1/2} \Big|_{\omega=\dot{\gamma}} \quad (2.17)$$

は多くの高分子液体に対して良く成立し、有用な関係式である。(2.13)式より、

$$|\eta^*| = \sqrt{\eta'^2 + \eta''^2} \quad (2.18)$$

であり、(2.17)式と(2.18)式より、

$$\eta(\dot{\gamma}) = |\eta^*|_{\omega=\dot{\gamma}} \quad (2.19)$$

が示される。すなわち、非ニュートン粘度は、 $\omega = \dot{\gamma}$ の点で複素粘性率の絶対値と等しい<sup>17)</sup>。

サイクル機構が動的測定法で実施したベントナイトの粘性係数の測定結果<sup>18)</sup>を図 2.1-4 に示す(図中のパラメータの数値は含水比)。縦軸の粘度は、複素粘性率の絶対

値で表わされている。含水比が最も高い 1200% 以外では、粘性係数は、角速度に依存する冪乗則領域にある。緩衝材侵入現象のモデル化では、侵入するベントナイトのゲルをニュートン粘性流体として扱っており、冪乗則領域よりも小さい角速度における粘性係数を用いることが適切と考えられる。したがって、サイクル機構の測定データからは、ベントナイトの粘性係数はこれ以上であるという情報は得られるが、侵入現象で対象とするひずみ速度での粘性係数の値を確定することはできない。ただし、ベントナイトのレオロジー特性をきちんと把握したという意味では、サイクル機構の測定データは貴重であり、今後、ベントナイトを粘弾性体としてモデル化するには、基礎的なデータとなると考えられる。

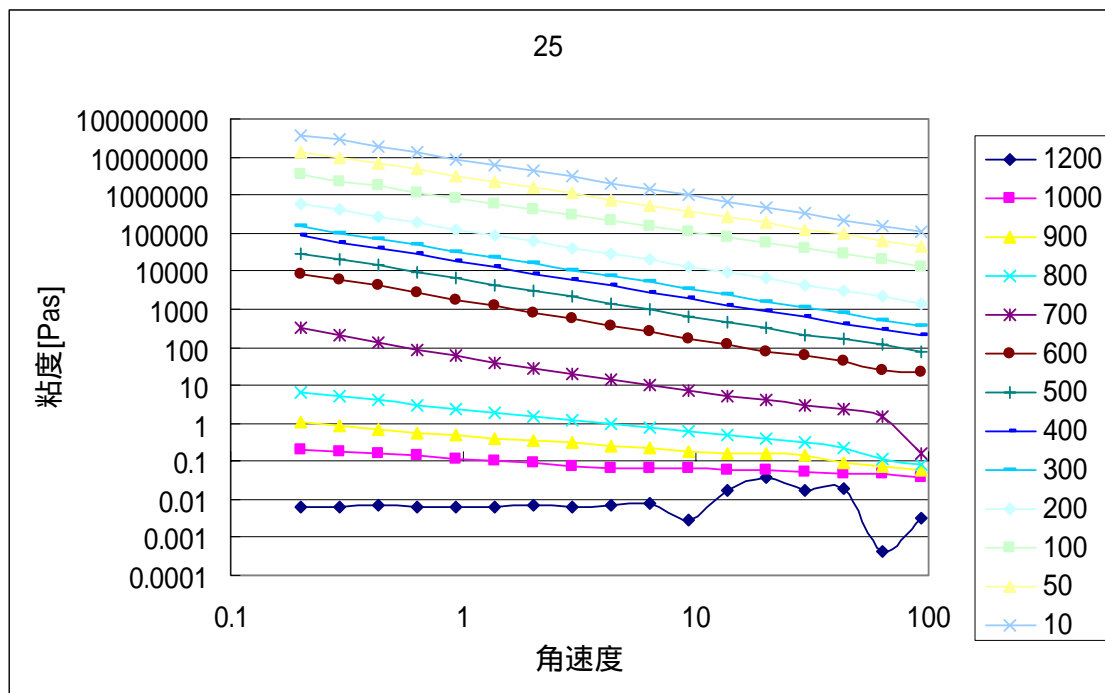


図 2.1-4 ベントナイトの粘性係数測定結果

最後に、坂井らの考え方<sup>18)</sup>に基づき、BENTFLOW 試験における緩衝材のせん断速度の評価の一例を示す。このような評価方法の妥当性については、今後さらに検討する必要があると考えられる。

ここでは、BENTFLOW 試験において、幅 1.5mm のき裂中をベントナイトゲルが

約(30時間)<sup>1/2</sup>で約45mm移動(30<sup>2</sup>h=3,240,000sで0.045m移動)したという測定データを用いる(図1.2-1参照)。平均移動速度は、0.045/3,240,000=1.4×10<sup>-8</sup>[m/s]となる。ベントナイトゲルと壁面との間に non-slip 条件を適用し、壁面において移動速度が0で、き裂中央において移動速度が上記の平均速度であると仮定する。したがって、せん断速度は、1.4×10<sup>-8</sup>[m/s]÷0.00075[m]=1.9×10<sup>-5</sup>[1/s]となる。図2.1-4に示す測定結果の最も低い角速度は0.1[1/s]よりも大きく、この測定では BENTFLOW 試験におけるせん断速度よりもはるかに大きなせん断速度条件となっていることが考えられる。

## 2.2 膨潤圧入力データの検討

固相拡散係数を用いた既存のモデル化<sup>1),2),8)</sup>では、緩衝材膨潤圧に関して、低密度領域(有効粘土密度1.36[g/cm<sup>3</sup>]以下)について実測データがないため、外挿した値を入力データとして用いている。一方、緩衝材等の膨潤圧については、拡散二重層理論に基づいた評価式が提案されている<sup>14),15)</sup>。本研究では、小峯ら<sup>14),15)</sup>の評価式に基づき膨潤圧の入力データを設定することとする。

上記の既存のモデル化では、透水係数についても、膨潤圧と同様に、低密度領域(乾燥密度1.0[g/cm<sup>3</sup>]以下)で既存データの外挿値を用いている。小峯ら<sup>13)</sup>は、透水係数についても、広範な密度領域で実測を行っており、実測結果を「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」の関数として実験式を報告している。本研究では、透水係数についても、小峯らの実験式に基づいて入力データを設定する。

### 2.2.1 小峯らの膨潤圧評価式の概要<sup>13),14),15)</sup>

Gouy-Chapman の拡散二重層理論では、モンモリロナイトの結晶層間における静電ポテンシャル分布を次式のように表示している。

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{2nve'}{\varepsilon} \sinh\left(\frac{ve'\varphi}{kT}\right) \quad (2.20)$$

ここに、

x : 粒子表面からの距離[m]

φ : x における静電ポテンシャル

$v$  : イオン価

$e'$  : 電子電荷 ( $=1.602 \times 10^{-19}[\text{C}]$ )

$k$  : Boltzmann 定数 ( $=1.38 \times 10^{-23}[\text{J/K}]$ )

$T$  : 絶対温度[K]

$n$  : 間隙水のイオン濃度[個数/ $\text{m}^3$ ]

$\epsilon$  : 間隙水の誘電率[ $\text{C}^2/(\text{Jm})$ ]

2つの粘土粒子間における静電ポテンシャル分布の模式図を図 2.2-1 に示す。

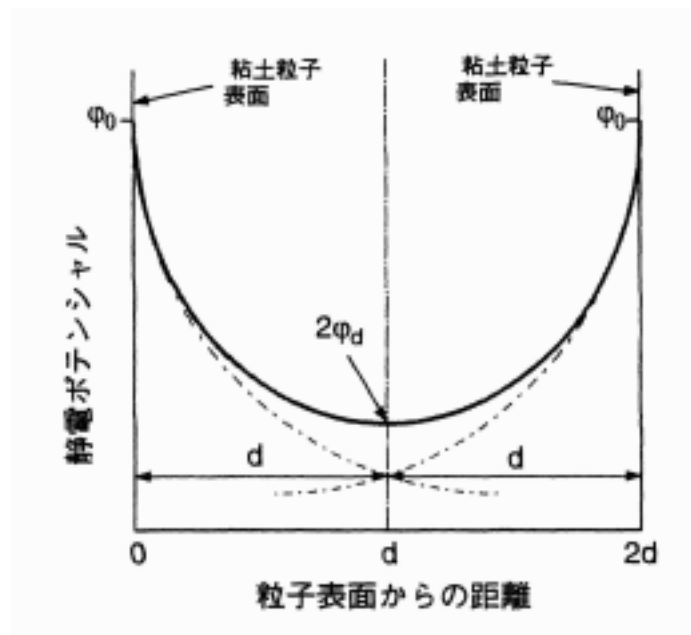


図 2.2-1 2つの粘土粒子間の静電ポテンシャル分布の模式図

静電ポテンシャル分布を周辺に形成している粒子が接近し、それぞれの静電ポテンシャル分布が重なり合うと二粒子間に反発力が生じる。Langmuir は、上式の静電ポテンシャル分布に基づき、二つの粘土粒子間に作用する反発力を次式で評価している。

$$f_r = 2nkT(\cosh u - 1) \times 10^{-3} [\text{kPa}] \quad (2.21)$$

ただし、

$$u = 8 \tanh^{-1} \left[ \exp(-\kappa d) \tanh \left( \frac{z}{4} \right) \right] \quad (2.22)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{2n\nu^2 e'^2}{\epsilon kT}} [m^{-1}] \quad (2.23)$$

$$z = 2 \sinh^{-1} \left( 96.5 \times \frac{CEC}{S} \sqrt{\frac{1}{8\epsilon n kT}} \right) \quad (2.24)$$

ここに、

$f_r$  : 平行に配列した二粘土粒子間に作用する反発力

$d$  : 平行に配列した二粘土粒子間距離の 1/2 [m]

CEC : 粘土粒子の陽イオン交換容量 [mequiv./g]

$S$  : 粘土粒子の比表面積 [m<sup>2</sup>/g]

距離  $2d$  離れて平行に配列した二粘土粒子間に作用する引力( van der Waals 力 )は、次式で与えられる。

$$f_a = \frac{A_h}{24\pi} \left[ \frac{1}{d^3} + \frac{1}{(d+t)^3} - \frac{2}{(d+t/2)^3} \right] \times 10^{-3} [kPa] \quad (2.25)$$

ここに、

$f_a$  : 平行に配列した二粘土粒子間に作用する引力

$A_h$  : Hamaker 定数 ( モンモリロナイトの場合、 $2.2 \times 10^{-20}$  [J] )

$t$  : 粘土結晶層厚 ( モンモリロナイトの場合、 $9.60 \times 10^{-10}$  [m] )

小峯らの評価式では、緩衝材の膨潤圧は、式(2.21)と式(2.25)の差として与えられる。また、結晶レベルでの膨潤挙動と緩衝材のマクロな膨潤挙動を結ぶパラメータとして、次の「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」を提案している ( 図 2.2-2 )。

$$\varepsilon_{sv}^* = \frac{V_v + V_{sv}}{V_m} \times 100 [\%] \quad (2.26)$$

ここに、

$\varepsilon_{sv}^*$  : モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ [%]

$V_m$  : 混合材料中のモンモリロナイトが占める体積

$V_v$  : 混合材料中の間隙体積

$V_{sw}$  : 一定鉛直圧下での混合材料の最大膨潤変形量 (ただし、 $V_{sw} = 0$ 、膨潤圧実験では  $V_{sw}=0$  である)

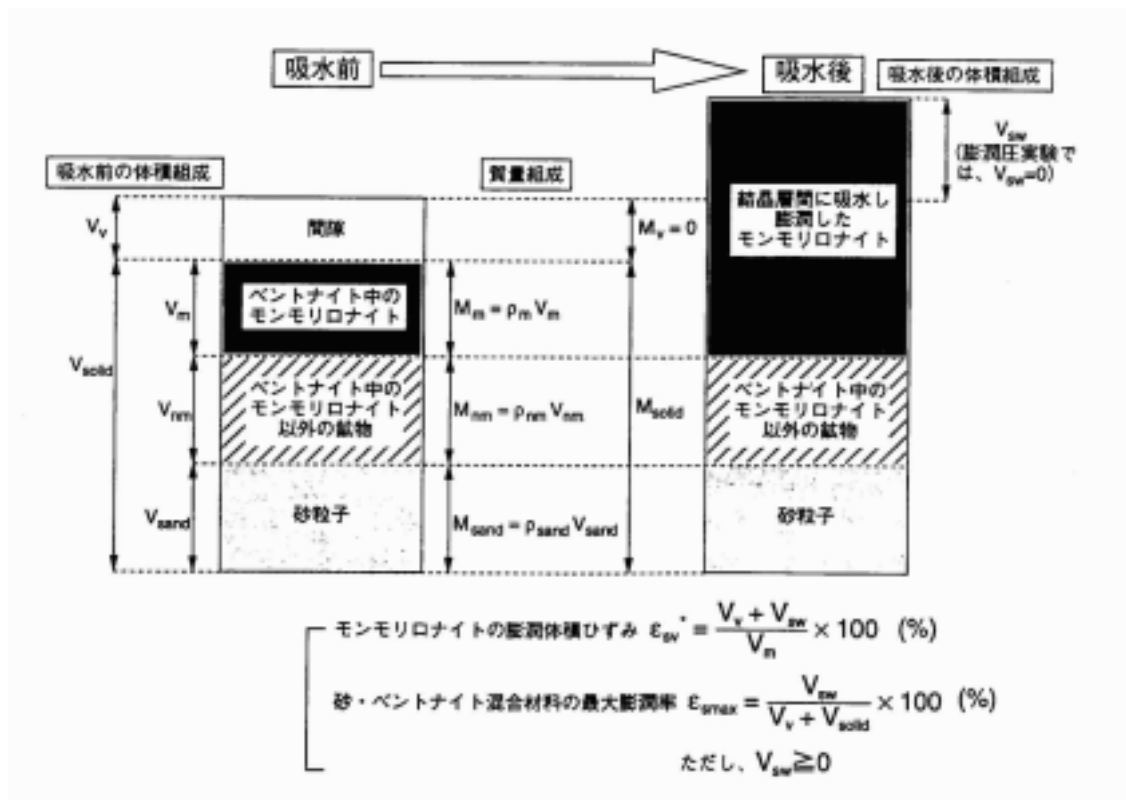


図 2.2-2 砂・ベントナイト混合材料の質量組成および体積組成

すなわち、 $\epsilon_{sv}^*$ はモンモリロナイトが全く水を含まない状態を仮定して、その状態のモンモリロナイトの体積に対する膨潤変形により増加したモンモリロナイトの体積増分の割合を表わすものである。また、物理的な条件により、

$$V_{solid} = V_m + V_{nm} + V_{sand} \quad (2.27)$$

$$e_0 = \frac{V_v}{V_{solid}} \quad (2.28)$$



$$C_m = \frac{\rho_m V_m}{\rho_m V_m + \rho_{nm} V_{nm}} \times 100[\%] \quad (2.29)$$

$$\alpha = \frac{\rho_m V_m + \rho_{nm} V_{nm}}{\rho_m V_m + \rho_{nm} V_{nm} + \rho_{sand} V_{sand}} \times 100[\%] \quad (2.30)$$

$$\varepsilon_{s \max} = \frac{V_{sw}}{V_v + V_{solid}} \times 100[\%] \quad (2.31)$$

ここに、

$V_{solid}$  : 混合材料中の砂とベントナイトが占める体積

$V_{nm}$  : ベントナイトに含まれるモンモリロナイト以外の鉱物が混合材料中に占める体積

$V_{sand}$  : 混合材料中の砂が占める体積

$e_0$  : 混合材料の初期間隙比

$C_m$  : ベントナイトのモンモリロナイト含有率[%]

$\rho_m$  : ベントナイトに含まれるモンモリロナイトの土粒子密度

$\rho_{nm}$  : ベントナイトに含まれるモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度

$\rho_{sand}$  : 砂の土粒子密度

$\alpha$  : 混合材料のベントナイト配合率[%]

$\varepsilon_{s \max}$  : 混合材料の最大膨潤率[%]

が成立する。式(2.26)～(2.31)より、次式が得られる。

$$\varepsilon_{sv}^* = \left\{ e_0 + \frac{\varepsilon_{s \max}}{100} (e_0 + 1) \right\} \left\{ 1 + \left( \frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left( \frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\} \times 100[\%] \quad (2.32)$$

混合材料の初期間隙比  $e_0$  は次式により、初期乾燥密度から計算できる。

$$e_0 = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1 \quad (2.33)$$

ここに、

$\rho_{solid}$  : 砂・ベントナイト混合材料の平均土粒子密度

$\rho_{d0}$  : 混合材料の初期乾燥密度

物理的な条件から次式が成り立つ (図 2.2-2)。

$$\rho_{solid} = \frac{M_{solid}}{V_{solid}} \quad (2.34)$$

$$M_{solid} = M_m + M_{nm} + M_{sand} \quad (2.35)$$

$$V_{solid} = V_m + V_{nm} + V_{sand} \quad (2.36)$$

$$C_m = \frac{M_m}{M_m + M_{nm}} \times 100 \quad (2.37)$$

$$\alpha = \frac{M_m + M_{nm}}{M_m + M_{nm} + M_{sand}} \times 100 \quad (2.38)$$

ここに、

$M_{solid}$  : 混合材料中の砂とベントナイトの乾燥質量

$M_m$  : ベントナイトに含まれるモンモリロナイトの乾燥質量

$M_{nm}$  : ベントナイトに含まれるモンモリロナイト以外の鉱物の乾燥質量

$M_{sand}$  : 混合材料中の砂の乾燥質量

式(2.34) ~ (2.38)より次式が得られる。

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left( \frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left( \frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}} \quad (2.39)$$

一方、結晶レベルでは、 $\varepsilon_{sv}^*$ は次式のように表現できる (図 2.2-3)。

$$\varepsilon_{sv}^* = \frac{d - R_{ion}}{t + R_{ion}} \times 100[\%] \quad (2.40)$$

ここに、

$R_{ion}$  : モンモリロナイト結晶層間中の陽イオンの非水和半径[m]

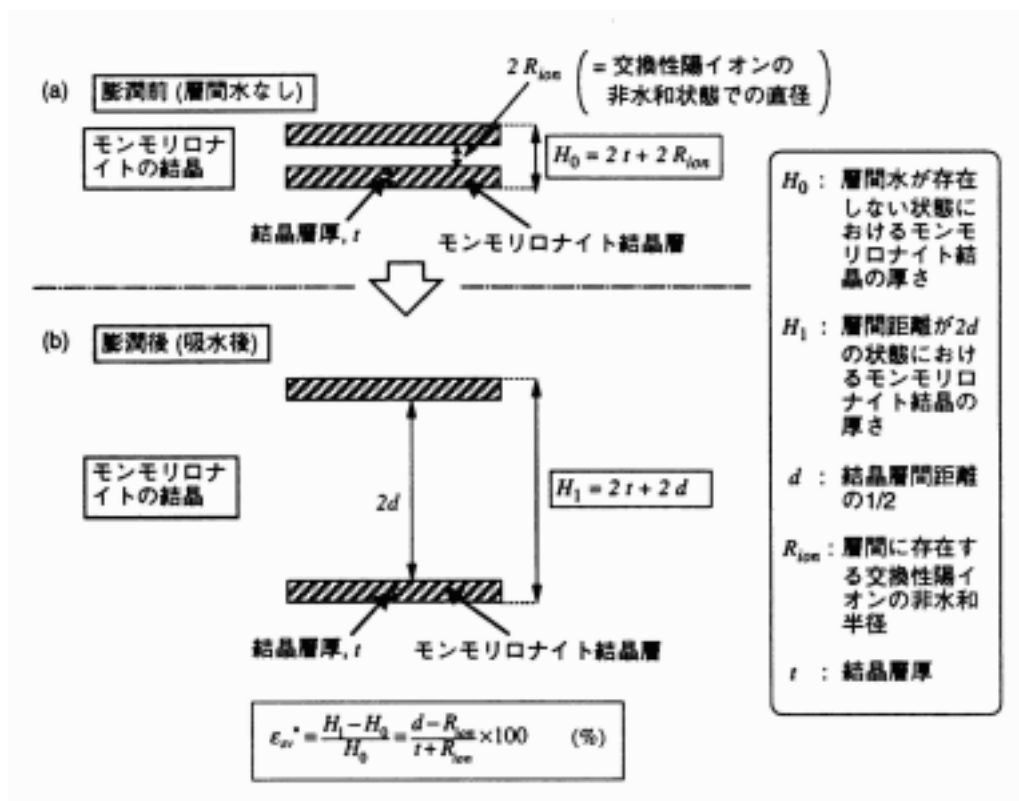


図 2.2-3 結晶レベルから見たモンモリロナイトの膨潤体積ひずみ

したがって、

$$d = \frac{\epsilon_{sv}^*}{100} (t + R_{ion}) + R_{ion} \quad (2.41)$$

吸水によりベントナイトが膨潤変形を生じた場合、間隙水のイオン濃度は膨潤変形前と比べて吸水により希釈され、小さくなると考えられる。したがって、

$$n = \frac{n_0 [\text{mol}/\text{m}^3] \times N_A}{1 + \frac{\epsilon_{sv}^*}{100}} [\text{個数}/\text{m}^3] \quad (2.42)$$

ここに、

$n_0$  : 緩衝材・埋戻し材中の間隙水のイオン濃度[mol/m<sup>3</sup>]

$N_A$  : アボガドロ数 (  $6.023 \times 10^{23}$  )

$n$  : 緩衝材・埋戻し材中の間隙水の補正イオン濃度

ベントナイト粘土粒子の比表面積  $S$  は、各構成要素の表面積、体積、質量の関係から次のように表わせる。

$$S = \frac{S_m \rho_m V_m + S_{nm} \rho_{nm} V_{nm}}{\rho_m V_m + \rho_{nm} V_{nm}} [m^2 / g] \quad (2.43)$$

ここに、

$S$  : ベントナイトの比表面積[m<sup>2</sup>/g]

$S_m$  : モンモリロナイトの比表面積[m<sup>2</sup>/g]

$S_{nm}$  : モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積[m<sup>2</sup>/g]

文献データや実測値より、モンモリロナイトの土粒子密度とベントナイト中のモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度はほぼ等しいと考えられるため、式(2.39)に  $\rho_m = \rho_{nm}$  を代入して、

$$S = \frac{V_m}{V_m + V_{nm}} S_m + \frac{V_{nm}}{V_m + V_{nm}} S_{nm} = \frac{C_m}{100} S_m + \left(1 - \frac{C_m}{100}\right) S_{nm} [m^2 / g] \quad (2.44)$$

以上の式(2.20)～(2.44)を用いて、ベントナイト混合材料の膨潤挙動を評価することができる。ただし、上述の評価手法は、ベントナイトに含有される陽イオンを一種類と仮定して定式化したものである。ベントナイトの主要な交換性陽イオンである、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>の4種類に起因する粘土結晶層間に作用する反発力と引力を算出し、各イオンの交換容量を用いて加重平均し評価する方法が提案<sup>\*)</sup>されている。

$$p = \frac{1}{CEC} \sum_{\substack{i=Na^+, Ca^{2+}, \\ K^+, Mg^{2+}}} [EXC_i \{(f_r)_i - (f_a)_i\}] [kPa] \quad (\text{なお、} p \text{ は反発を正とする}) \quad (2.45)$$

$$(f_r)_i = 2nkT(\cosh u_i - 1) \times 10^{-3} [\text{kPa}] \quad (2.45\text{-a})$$

$$u_i = 8 \tanh^{-1} \left[ \exp(-\kappa_i d_i) \tanh \left( \frac{z_i}{4} \right) \right] \quad (2.45\text{-b})$$

$$\kappa_i = \sqrt{\frac{2n v_i^2 e'^2}{\epsilon k T}} [m^{-1}] \quad (2.45\text{-c})$$

$$z_i = 2 \sinh^{-1} \left( 96.5 \times \frac{EXC_i}{S} \sqrt{\frac{1}{8\epsilon n k T}} \right) \quad (2.45\text{-d})$$

$$(f_a)_i = \frac{A_h}{24\pi} \left[ \frac{1}{d_i^3} + \frac{1}{(d_i + t)^3} - \frac{2}{(d_i + t/2)^3} \right] \times 10^{-3} [\text{kPa}] \quad (2.45\text{-e})$$

$$\epsilon_{sv}^* = \left\{ e_0 + \frac{\epsilon_{s\max}}{100} (e_0 + 1) \right\} \left\{ 1 + \left( \frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left( \frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\} \times 100 [\%] \quad (2.45\text{-f})$$

$$e_0 = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1 \quad (2.45\text{-g})$$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left( \frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left( \frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}} \quad (2.45\text{-h})$$

$$d = \frac{\epsilon_{sv}^*}{100} (t + (R_{ion})_i) + (R_{ion})_i \quad (2.45\text{-i})$$

$$n = \frac{n_0 [\text{mol}/\text{m}^3] \times N_A}{1 + \frac{\epsilon_{sv}^*}{100}} [\text{個数}/\text{m}^3] \quad (2.45\text{-j})$$

$$S = \frac{V_m}{V_m + V_{nm}} S_m + \frac{V_{nm}}{V_m + V_{nm}} S_{nm} = \frac{C_m}{100} S_m + \left( 1 - \frac{C_m}{100} \right) S_{nm} [\text{m}^2/\text{g}] \quad (2.45\text{-k})$$

ここで、

$p$  : ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の発生する圧力[kPa] (なお、 $p$  は反発を正とする)

$(f_r)_i$  : 交換性陽イオン  $i$  に起因する反発力[kPa] ( $i$  は  $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}$  のいずれかの交換性陽イオンを示す。以下に記述される  $i$  はこれと同様の意味である。)

$(f_a)_i$  : 交換性陽イオン  $i$  に起因する引力[kPa]

$EXC_i$  : 交換性陽イオン  $i$  の交換容量[mequiv./g]

$d_i$  : 交換性陽イオン  $i$  の時の結晶層間距離の 1/2[m]

$v_i$  : 交換性陽イオン  $i$  の価数

$(R_{ion})_i$  : モンモリロナイト結晶層間中の交換性陽イオン  $i$  の非水和半径[m]

クニゲル V1 と砂の混合試料を対象として、小峯らが式(2.45)に基づき実施した膨潤圧の評価結果の一例を表 2.2-1 に示す。

本研究では、式(2.45)を用いて、緩衝材侵入現象モデルの膨潤圧入力データを設定することとする。

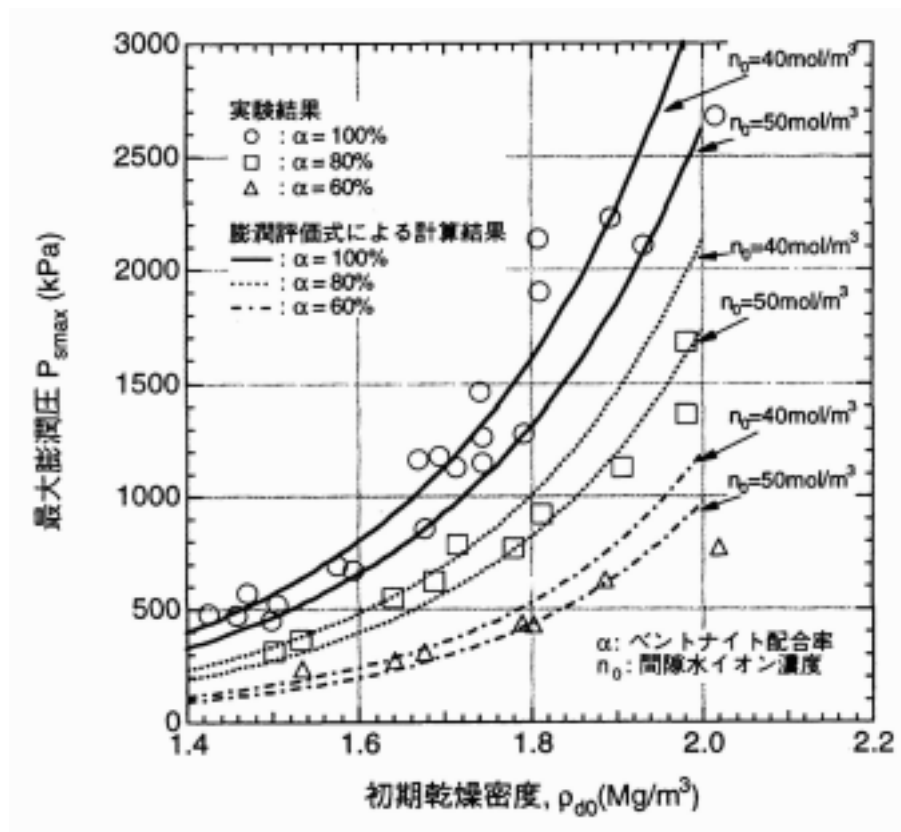


図 2.2-4 砂・ベントナイト混合材料(ベントナイト配合率 60~90%)および締め付けたベントナイトの膨潤圧実験結果に対する膨潤評価式の計算結果との比較

表 2.2-1 最大膨潤圧とベントナイト配合率の関係における膨潤評価式の計算結果例

$\alpha$ (%)	$e_{0\alpha}$ (%) 式(2.14-f) より計算	$n$ (個数/m <sup>2</sup> ) 式(2.14-j) より計算	$\epsilon_0$ 式(2.14-d) より計算	$\kappa_0$ (m <sup>-2</sup> ) 式(2.14-c) より計算	$d_0$ (m) 式(2.14-i) より計算	$\mu_0$ 式(2.14-b) より計算	$\langle \zeta \rangle_0$ (kPa) 式(2.14-a) より計算	$\langle \zeta \rangle_0$ (kPa) 式(2.14-e) より計算	$P$ (kPa) 式(2.14) より計算
1	7688.87	$3.1252 \times 10^{23}$	$\epsilon_{0a} = 8.633$ $\epsilon_{0c} = 7.943$ $\epsilon_{0e} = 1.571$ $\epsilon_{0g} = 3.505$	$\kappa_{0a} = 74584485$ $\kappa_{0c} = 149168870$ $\kappa_{0e} = 74584485$ $\kappa_{0g} = 149168870$	$d_{0a} = 8.960 \times 10^4$ $d_{0c} = 8.164 \times 10^4$ $d_{0e} = 8.330 \times 10^4$ $d_{0g} = 7.948 \times 10^4$	$\mu_{0a} = 0.0191$ $\mu_{0c} = 0.0090$ $\mu_{0e} = 0.0060$ $\mu_{0g} = 0.0090$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 0.00$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 0.00$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 0.00$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 0.00$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 0.00$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 0.00$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 0.00$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 0.00$	0.00
20	390.09	$4.9158 \times 10^{23}$	$\epsilon_{0a} = 5.883$ $\epsilon_{0c} = 5.198$ $\epsilon_{0e} = 0.635$ $\epsilon_{0g} = 1.314$	$\kappa_{0a} = 295804357$ $\kappa_{0c} = 591608713$ $\kappa_{0e} = 295804357$ $\kappa_{0g} = 591608713$	$d_{0a} = 4.225 \times 10^4$ $d_{0c} = 4.291 \times 10^4$ $d_{0e} = 4.397 \times 10^4$ $d_{0g} = 4.154 \times 10^4$	$\mu_{0a} = 2.1192$ $\mu_{0c} = 0.5451$ $\mu_{0e} = 0.2360$ $\mu_{0g} = 0.2174$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 127.49$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 6.89$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 1.12$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 0.95$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 0.36$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 0.34$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 0.30$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 0.39$	72.7
40	200.13	$8.0273 \times 10^{23}$	$\epsilon_{0a} = 5.396$ $\epsilon_{0c} = 4.714$ $\epsilon_{0e} = 0.341$ $\epsilon_{0g} = 1.054$	$\kappa_{0a} = 378000669$ $\kappa_{0c} = 756001338$ $\kappa_{0e} = 378000669$ $\kappa_{0g} = 756001338$	$d_{0a} = 2.215 \times 10^4$ $d_{0c} = 2.256 \times 10^4$ $d_{0e} = 2.320 \times 10^4$ $d_{0g} = 2.172 \times 10^4$	$\mu_{0a} = 3.1839$ $\mu_{0c} = 1.3113$ $\mu_{0e} = 0.2833$ $\mu_{0g} = 0.3994$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 734.88$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 54.10$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 2.64$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 5.28$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 6.15$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 5.69$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 5.05$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 6.09$	416.9
60	136.80	$1.0174 \times 10^{24}$	$\epsilon_{0a} = 5.162$ $\epsilon_{0c} = 4.482$ $\epsilon_{0e} = 0.303$ $\epsilon_{0g} = 0.945$	$\kappa_{0a} = 423549961$ $\kappa_{0c} = 847099923$ $\kappa_{0e} = 423549961$ $\kappa_{0g} = 847099923$	$d_{0a} = 1.545 \times 10^4$ $d_{0c} = 1.577 \times 10^4$ $d_{0e} = 1.628 \times 10^4$ $d_{0g} = 1.511 \times 10^4$	$\mu_{0a} = 3.8290$ $\mu_{0c} = 1.7136$ $\mu_{0e} = 0.3001$ $\mu_{0g} = 0.5136$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 1024.05$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 156.45$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 3.83$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 11.17$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 27.38$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 25.20$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 22.14$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 28.98$	1044.6
80	105.14	$1.1744 \times 10^{24}$	$\epsilon_{0a} = 5.020$ $\epsilon_{0c} = 4.342$ $\epsilon_{0e} = 0.283$ $\epsilon_{0g} = 0.884$	$\kappa_{0a} = 457211588$ $\kappa_{0c} = 914423176$ $\kappa_{0e} = 457211588$ $\kappa_{0g} = 914423176$	$d_{0a} = 1.210 \times 10^4$ $d_{0c} = 1.238 \times 10^4$ $d_{0e} = 1.282 \times 10^4$ $d_{0g} = 1.181 \times 10^4$	$\mu_{0a} = 4.2732$ $\mu_{0c} = 2.0975$ $\mu_{0e} = 0.3141$ $\mu_{0g} = 0.5819$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 3335.48$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 299.69$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 4.76$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 17.25$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 72.27$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 66.15$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 57.66$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 79.62$	1895.3
100	86.14	$1.2843 \times 10^{24}$	$\epsilon_{0a} = 4.924$ $\epsilon_{0c} = 4.247$ $\epsilon_{0e} = 0.269$ $\epsilon_{0g} = 0.844$	$\kappa_{0a} = 479975033$ $\kappa_{0c} = 959950065$ $\kappa_{0e} = 479975033$ $\kappa_{0g} = 959950065$	$d_{0a} = 1.009 \times 10^4$ $d_{0c} = 1.035 \times 10^4$ $d_{0e} = 1.075 \times 10^4$ $d_{0g} = 9.824 \times 10^{10}$	$\mu_{0a} = 4.6821$ $\mu_{0c} = 2.3998$ $\mu_{0e} = 0.3332$ $\mu_{0g} = 0.6493$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 5147.99$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 480.11$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 5.48$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 23.00$	$\langle \zeta \rangle_{0a} = 145.28$ $\langle \zeta \rangle_{0c} = 132.32$ $\langle \zeta \rangle_{0e} = 114.47$ $\langle \zeta \rangle_{0g} = 160.96$	2899.5

注) この表は初期乾燥密度 $\rho_{00} = 1.97 \text{ Mg/m}^3$ 、膨潤水のイオン濃度 $c_0 = 40 \text{ mol/m}^3$ の計算結果を列示している。なお、最大膨潤率 $e_{\max} = 0$ として計算している。表中の $\alpha$ は $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ のいずれかの交換性陽イオンを示す。

### 2.2.2 小峯らによる透水係数の実験式<sup>13)</sup>

小峯らは、緩衝材と埋戻し材の両方を対象として広範なベントナイト配合率、密度で透水係数を測定している。測定結果をまとめて次の実験式を得ている（図 2.2-5）。

$$k = 1.18 \times 10^{-17} (\varepsilon_{sv}^*)^{2.02} [m/s] \quad (2.46)$$

本研究では、式(2.46)を用いて、緩衝材侵入現象モデルの透水係数入力データを設定することとする。

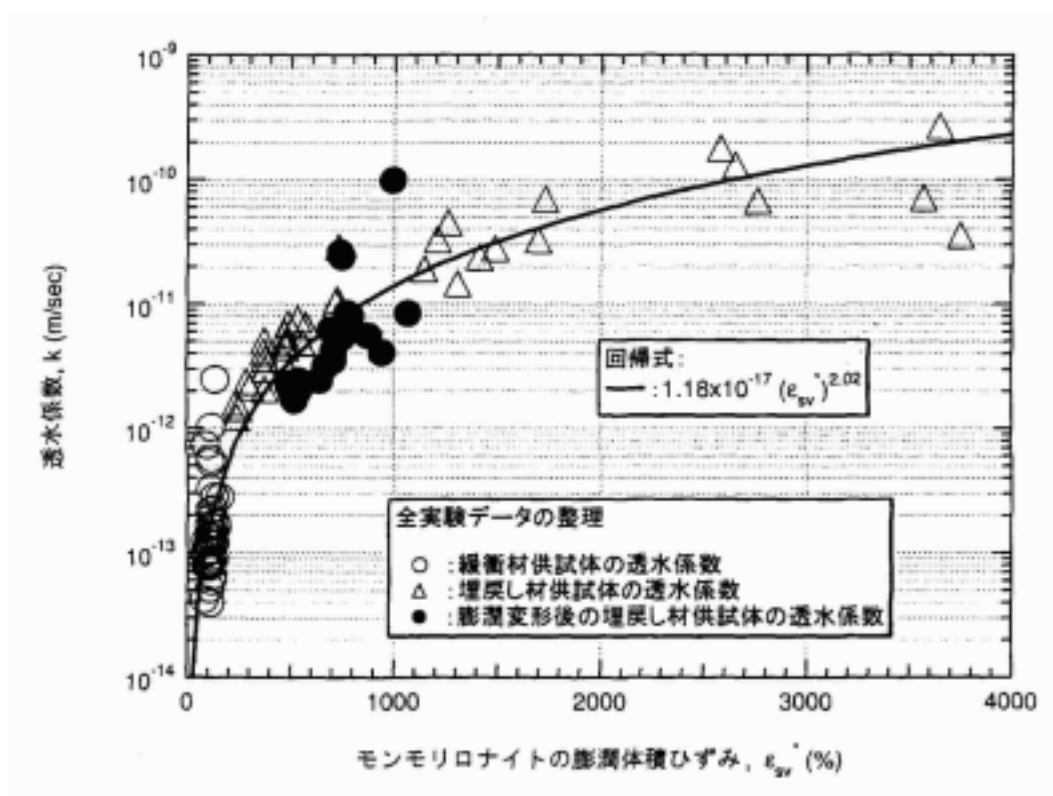


図 2.2-5 緩衝材・埋戻し材の透水係数とパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」との関係

### 2.3 入力パラメータの設定

ここでは、前節で述べた評価方法に基づいて、緩衝材侵入現象を対象とした数値解析用の入力パラメータの設定を行う。



### 2.3.1 粘性係数

前述のように、図 2.1-4 に示すベントナイトの粘度測定結果は、緩衝材侵入現象よりもかなり大きな角速度（角振動数）領域の値となっていると考えられる。そこで、ここでは、図 2.1-4 の実測結果に基づいて、侵入現象の領域における粘度を推定する。まず、(2.17) 式に示す、Cox-Merz の経験式より、粘度への影響に関して、角振動数とずり（せん断）速度が等価であるとする。また、(1) コロイド等において一般に、せん断速度と粘度の関係が広い領域において、図 2.1-3 に示す冪乗則で近似できる<sup>17)</sup> こと、(2) BENTFLOW 試験におけるせん断速度は、 $1.9 \times 10^{-5}$  [1/s] 程と推定できる (2.1.2 参照) ことから、緩衝材侵入現象を対象とした粘度評価として、図 2.1-4 の実測データを  $1.9 \times 10^{-5}$  [1/s] まで冪乗則で外挿した値を用いることとする。外挿した結果を図 2.3-1 に示す。各直線は、含水比毎の冪乗則近似式である。ここでは、これらの近似直線とせん断速度  $1.9 \times 10^{-5}$  [1/s] の交点が、緩衝材侵入現象の領域におけるベントナイトのゲルの粘度であると推定する。

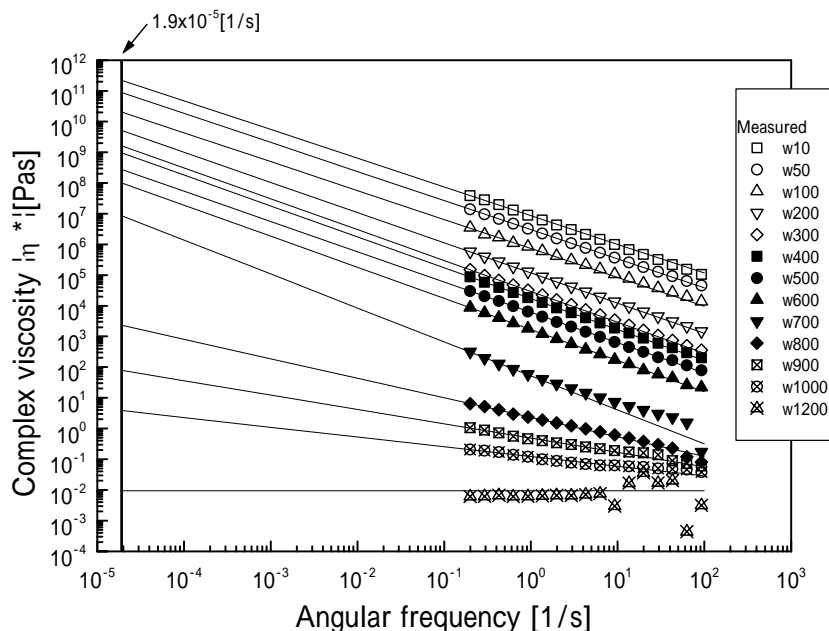


図 2.3-1 粘度測定結果の外挿

各交点の粘度を含水比についてプロットした結果を図 2.3-2 に示す。ここで、さら

に、図 2.3-2 のプロットを近似 (curve fit) して次の粘度評価式を得る。

$$\eta[\text{Pas}] = 2.86 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{w[\%]}{41.7}\right) \quad (2.47)$$

本研究では、高せん断速度領域の測定値に基づいた、式(2.47)を用いて緩衝材侵入現象におけるベントナイトのゲルの粘度を評価し、入力パラメータを設定する。

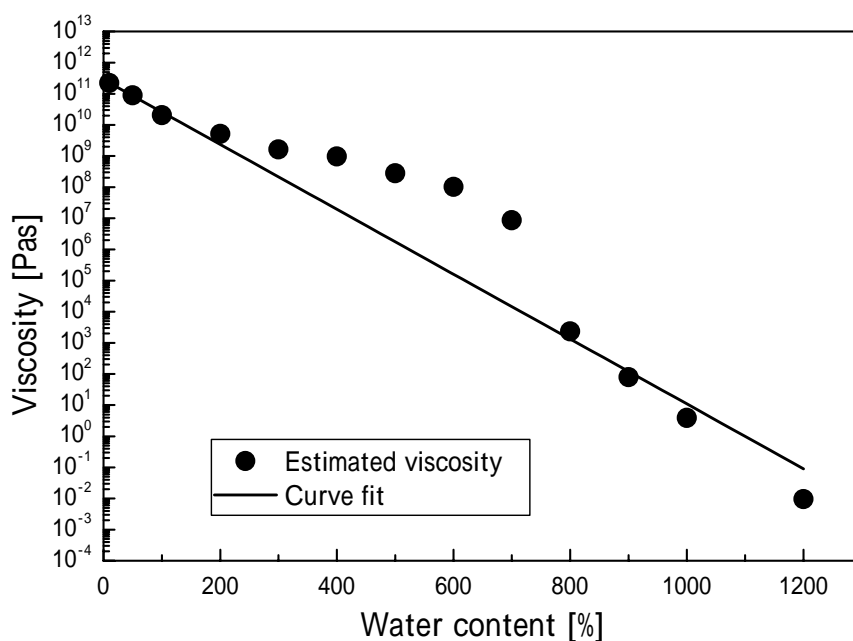


図 2.3-2 侵入現象におけるベントナイトゲルの粘度推定値

ベントナイトのゲルが飽和しているものと仮定し、式(2.47)から算出した、乾燥密度の関数としてのベントナイトゲル (ベントナイト 100%) の粘度の評価結果を図 2.3-3 に示す。図には、第 2 次取りまとめ時の基になっている評価<sup>9)</sup>を点線でも示す。本研究におけるベントナイトゲルの粘度の設定結果は、第 2 次取りまとめ時と比べ、粘度が低密度域で低く、高密度域で高い値となっている。

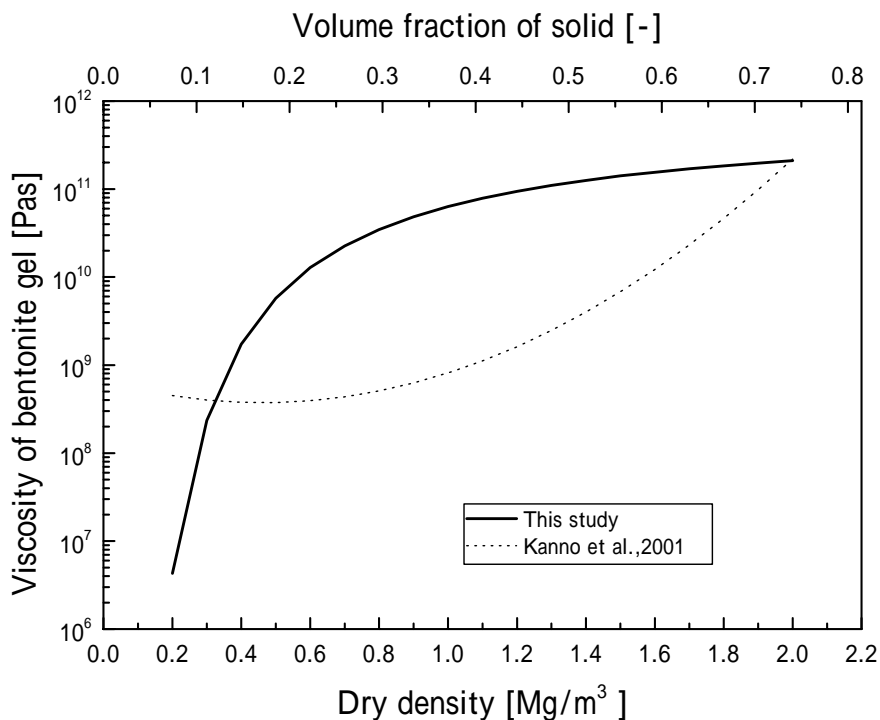


図 2.3-3 ベントナイトゲルの粘度の設定値

### 2.3.2 膨潤圧

式(2.41)に基づいて、クニゲル V1-100%試料とクニゲル V1(70wt%)-ケイ砂(30wt%)混合試料を対象とした膨潤圧の評価結果を表 2.3-1 と表 2.3-2 に示す。また、評価結果を乾燥密度の関数として図 2.3-4 に示す。この図でも、第 2 次取りまとめ時の基になっている膨潤圧入力設定データ<sup>9)</sup>を点線で合わせて示す。本研究における膨潤圧の設定結果は、第 2 次取りまとめ時と比べ、低密度域で高く、高密度域で低い値となっている。図 2.3-5 に固相率の関数としての膨潤圧の次式による近似曲線を示す。

$$P_s[Pa] = 154.9\sigma^5 - 370.7\sigma^4 + 347.3\sigma^3 - 161.3\sigma^2 + 42.24\sigma - 0.3583 \quad (2.48)$$

固相率で微分すると

$$\frac{dP_s[Pa]}{d\sigma} = 774.5\sigma^4 - 1483\sigma^3 + 1042\sigma^2 - 322.6\sigma + 42.24 \quad (2.49)$$

となる。

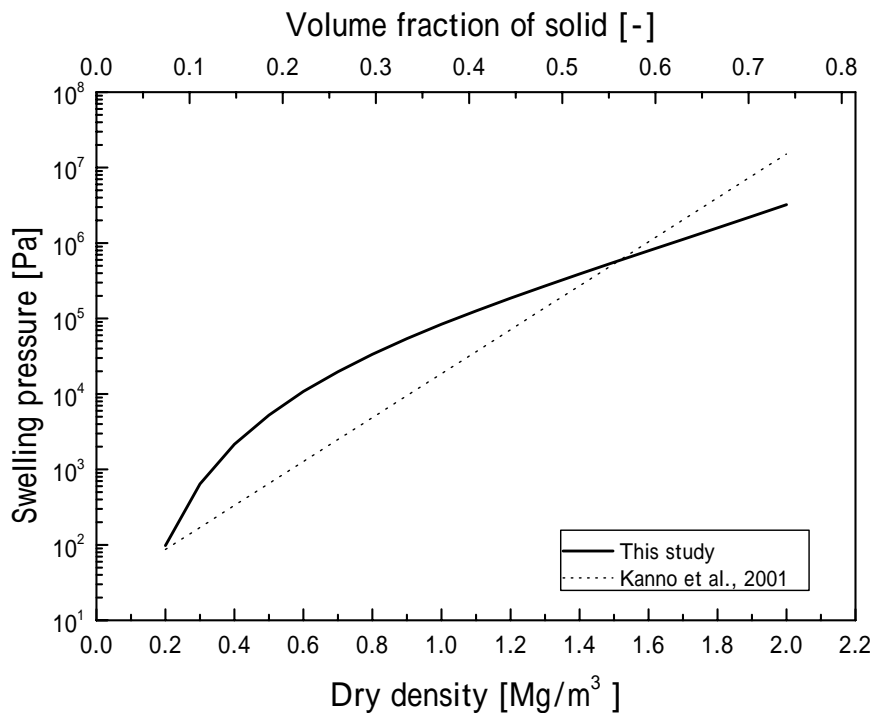


図 2.3-4 緩衝材膨潤圧の設定値

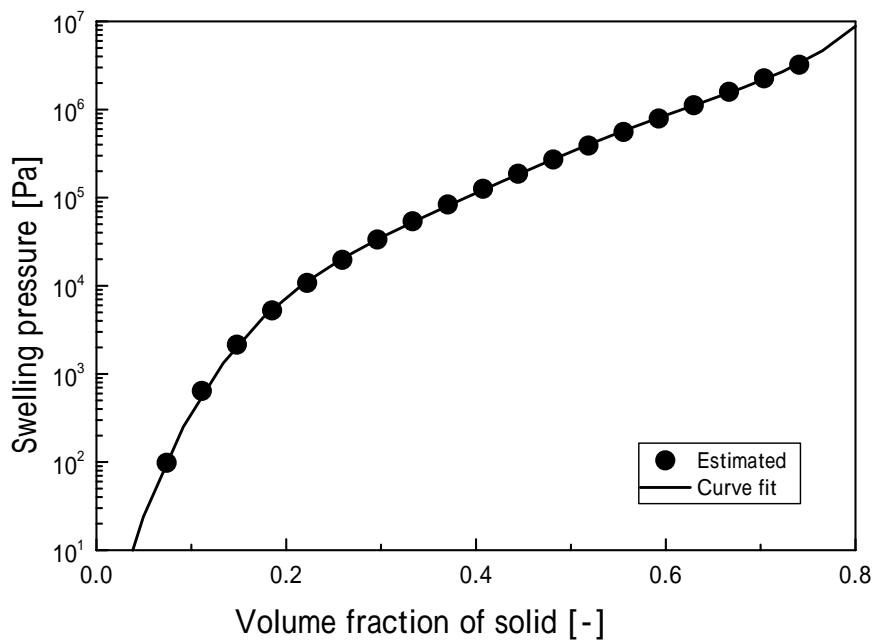


図 2.3-5 緩衝材膨潤圧の近似式

表 2.3-1 小峯らの評価式による膨潤圧 (クニゲル V1-100%試料、 $\alpha=100\%$ )

$\rho_{do}[\text{g}/\text{cm}^3]$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	
$\varepsilon_{sv}^*[\%]$	2679	1717	1236	947.4	755.0	617.6	514.6	434.4	370.3	317.8	274.1	237.1	205.4	177.9	153.9	132.7	113.8	96.94	81.75	
$n[\text{個数}/\text{m}^3]$	8.67e23	1.33e24	1.80e24	2.30e24	2.82e24	3.36e24	3.92e24	4.51e24	5.12e24	5.77e24	6.44e24	7.15e24	7.89e24	8.67e24	9.49e24	1.04e25	1.13e25	1.22e25	1.33e25	
$z_i$	$z_{\text{Na}^+}$	7.612	7.188	6.881	6.638	6.436	6.261	6.107	5.968	5.841	5.723	5.613	5.510	5.412	5.319	5.229	5.143	5.059	4.978	4.899
	$z_{\text{Ca}^{2+}}$	6.924	6.501	6.194	5.952	5.750	5.576	5.422	5.284	5.158	5.041	4.932	4.829	4.732	4.639	4.551	4.465	4.383	4.303	4.225
	$z_{\text{K}^+}$	0.961	0.787	0.679	0.604	0.547	0.502	0.466	0.435	0.408	0.385	0.365	0.346	0.330	0.315	0.301	0.288	0.276	0.265	0.255
	$z_{\text{Mg}^{2+}}$	2.566	2.213	1.973	1.794	1.653	1.537	1.439	1.354	1.281	1.215	1.156	1.103	1.054	1.010	0.968	0.930	0.894	0.860	0.828
$\kappa_i$ [ $\text{m}^{-1}$ ]	$\kappa_{\text{Na}^+}$	1.24e8	1.54e8	1.80e8	2.02e8	2.24e8	2.44e8	2.64e8	2.83e8	3.02e8	3.20e8	3.39e8	3.57e8	3.75e8	3.93e8	4.11e8	4.29e8	4.48e8	4.67e8	4.86e8
	$\kappa_{\text{Ca}^{2+}}$	2.48e8	3.07e8	3.58e8	4.05e8	4.48e8	4.89e8	5.28e8	5.67e8	6.04e8	6.40e8	6.77e8	7.13e8	7.49e8	7.86e8	8.22e8	8.59e8	8.96e8	9.33e8	9.71e8
	$\kappa_{\text{K}^+}$	1.24e8	1.54e8	1.80e8	2.02e8	2.24e8	2.44e8	2.64e8	2.83e8	3.02e8	3.20e8	3.39e8	3.57e8	3.75e8	3.93e8	4.11e8	4.29e8	4.48e8	4.67e8	4.86e8
	$\kappa_{\text{Mg}^{2+}}$	2.48e8	3.07e8	3.58e8	4.05e8	4.48e8	4.89e8	5.28e8	5.67e8	6.04e8	6.40e8	6.77e8	7.13e8	7.49e8	7.86e8	8.22e8	8.59e8	8.96e8	9.33e8	9.71e8
$d_i$ [m]	$d_{\text{Na}^+}$	2.84e-8	1.83e-8	1.32e-8	1.01e-8	8.09e-9	6.63e-9	5.54e-9	4.69e-9	4.02e-9	3.46e-9	3.00e-9	2.61e-9	2.27e-9	1.98e-9	1.73e-9	1.50e-9	1.30e-9	1.12e-9	9.63e-10
	$d_{\text{Ca}^{2+}}$	2.88e-8	1.85e-8	1.34e-8	1.03e-8	8.20e-9	6.73e-9	5.63e-9	4.77e-9	4.08e-9	3.52e-9	3.05e-9	2.65e-9	2.31e-9	2.02e-9	1.76e-9	1.53e-9	1.33e-9	1.15e-9	9.88e-10
	$d_{\text{K}^+}$	2.94e-8	1.89e-8	1.36e-8	1.05e-8	8.39e-9	6.88e-9	5.76e-9	4.88e-9	4.18e-9	3.61e-9	3.13e-9	2.73e-9	2.38e-9	2.08e-9	1.82e-9	1.58e-9	1.38e-9	1.19e-9	1.03e-9
	$d_{\text{Mg}^{2+}}$	2.80e-8	1.80e-8	1.30e-8	9.97e-9	7.96e-9	6.53e-9	5.45e-9	4.62e-9	3.95e-9	3.40e-9	2.94e-9	2.56e-9	2.23e-9	1.94e-9	1.69e-9	1.47e-9	1.27e-9	1.10e-9	9.37e-10
$u_i$	$u_{\text{Na}^+}$	0.2237	0.4584	0.7101	0.9645	1.217	1.465	1.709	1.950	2.189	2.426	2.663	2.900	3.140	3.382	3.629	3.881	4.140	4.408	4.686
	$u_{\text{Ca}^{2+}}$	0.0058	0.0251	0.0610	0.1135	0.1814	0.2636	0.3589	0.4665	0.5860	0.7171	0.8596	1.014	1.180	1.359	1.551	1.757	1.980	2.220	2.480
	$u_{\text{K}^+}$	0.0489	0.0853	0.1169	0.1436	0.1664	0.1858	0.2026	0.2173	0.2303	0.2418	0.2521	0.2615	0.2700	0.2778	0.2849	0.2916	0.2978	0.3037	0.3092
	$u_{\text{Mg}^{2+}}$	0.0043	0.0159	0.0349	0.0595	0.0884	0.1204	0.1548	0.1909	0.2284	0.2671	0.3067	0.3473	0.3887	0.4311	0.4744	0.5187	0.5640	0.6106	0.6586
$(f_r)_i$ [kPa]	$(f_r)_{\text{Na}^+}$	0.1773	1.154	3.860	9.408	19.18	34.96	59.14	94.94	146.8	220.7	325.3	472.4	678.9	969.2	1379	1959	2789	3989	5745
	$(f_r)_{\text{Ca}^{2+}}$	1.21e-4	3.40e-2	2.74e-2	0.1208	0.3787	0.9550	2.078	4.068	7.370	12.60	20.59	32.55	50.13	75.78	113.0	167.3	246.7	364.4	541.2
	$(f_r)_{\text{K}^+}$	8.43e-3	3.93e-2	0.1004	0.1935	0.3182	0.4732	0.6575	0.8701	1.111	1.379	1.675	2.000	2.355	2.740	3.158	3.610	4.099	4.629	5.202
	$(f_r)_{\text{Mg}^{2+}}$	6.44e-5	1.37e-3	8.94e-3	3.32e-2	8.98e-2	0.1985	0.3831	0.6708	1.093	1.684	2.486	3.544	4.914	6.660	8.857	11.60	14.98	19.15	24.27
$(f_a)_i$ [kPa]	$(f_a)_{\text{Na}^+}$	3.99e-5	3.49e-4	1.71e-3	6.06e-3	1.76e-2	4.48e-2	0.1035	0.2223	0.4521	0.8814	1.663	3.061	5.530	9.861	17.44	30.74	54.26	96.44	173.6
	$(f_a)_{\text{Ca}^{2+}}$	3.74e-5	3.27e-4	1.60e-3	5.67e-3	1.65e-2	4.19e-2	0.0966	0.2073	0.5211	0.8200	1.545	2.840	5.122	9.115	16.08	28.28	49.76	88.11	157.9
	$(f_a)_{\text{K}^+}$	3.38e-5	2.96e-4	1.44e-3	5.11e-3	1.48e-2	3.77e-2	8.67e-2	0.1859	0.3769	0.7326	1.378	2.526	4.544	8.063	14.18	24.83	43.49	76.58	136.3
	$(f_a)_{\text{Mg}^{2+}}$	4.28e-5	3.75e-4	1.83e-3	6.51e-3	1.90e-2	4.83e-2	0.1116	0.2399	0.4884	0.9535	1.802	3.322	6.013	10.75	19.05	33.68	59.66	106.5	192.7
$p$ [kPa]	0.0982	0.6401	2.146	5.251	10.75	19.69	33.46	53.95	83.72	126.3	186.6	271.3	390.2	556.7	790.5	1120	1588	2257	3224	

表 2.3-2 小峯らの評価式による膨潤圧 (クニゲル V1-100%試料、 $\alpha=70\%$ )

$\rho_{do}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	
$\varepsilon_{sv}$ *[%]	3822	2448	1761	1349	1074	878.0	730.7	616.2	524.6	449.7	387.2	334.4	289.1	249.8	215.5	185.2	158.2	134.1	112.4	
n[個数/m <sup>3</sup> ]	6.14e23	9.45e23	1.29e24	1.66e24	2.05e24	2.46e24	2.90e24	3.36e24	3.86e24	4.38e24	4.94e24	5.55e24	6.19e24	6.89e24	7.64e24	8.45e24	9.33e24	1.03e25	1.13e25	
z <sub>i</sub>	z <sub>Na<sup>+</sup></sub>	7.957	7.526	7.212	6.962	6.752	6.570	6.407	6.259	6.123	5.996	5.876	5.762	5.652	5.547	5.444	5.344	5.246	5.149	5.053
	z <sub>Ca<sup>2+</sup></sub>	7.268	6.838	6.525	6.275	6.066	5.884	5.722	5.574	5.439	5.312	5.193	5.079	4.970	4.866	4.764	4.665	4.567	4.472	4.377
	z <sub>K<sup>+</sup></sub>	1.126	0.923	0.796	0.707	0.638	0.584	0.540	0.502	0.469	0.441	0.415	0.392	0.372	0.353	0.335	0.319	0.303	0.289	0.275
	z <sub>Mg<sup>2+</sup></sub>	2.868	2.492	2.232	2.035	1.877	1.745	1.633	1.535	1.449	1.371	1.301	1.236	1.177	1.122	1.070	1.022	0.976	0.932	0.891
κ <sub>i</sub> [m <sup>-1</sup> ]	κ <sub>Na<sup>+</sup></sub>	1.05e8	1.30e8	1.52e8	1.72e8	1.91e8	2.09e8	2.27e8	2.45e8	2.62e8	2.79e8	2.97e8	3.14e8	3.32e8	3.50e8	3.69e8	3.88e8	4.08e8	4.28e8	4.49e8
	κ <sub>Ca<sup>2+</sup></sub>	2.09e8	2.59e8	3.04e8	3.44e8	3.82e8	4.19e8	4.54e8	4.89e8	5.24e8	5.59e8	5.93e8	6.28e8	6.64e8	7.00e8	7.37e8	7.76e8	8.15e8	8.56e8	8.99e8
	κ <sub>K<sup>+</sup></sub>	1.05e8	1.30e8	1.52e8	1.72e8	1.91e8	2.09e8	2.27e8	2.45e8	2.62e8	2.79e8	2.97e8	3.14e8	3.32e8	3.50e8	3.69e8	3.88e8	4.08e8	4.28e8	4.49e8
	κ <sub>Mg<sup>2+</sup></sub>	2.09e8	2.59e8	3.04e8	3.44e8	3.82e8	4.19e8	4.54e8	4.89e8	5.24e8	5.59e8	5.93e8	6.28e8	6.64e8	7.00e8	7.37e8	7.76e8	8.15e8	8.56e8	8.99e8
d <sub>i</sub> [m]	d <sub>Na<sup>+</sup></sub>	4.05e-8	2.60e-8	1.87e-8	1.44e-8	1.15e-9	9.39e-9	7.83e-9	6.62e-9	5.65e-9	4.86e-9	4.20e-9	3.64e-9	3.16e-9	2.74e-9	2.38e-9	2.06e-9	1.77e-9	1.52e-9	1.29e-9
	d <sub>Ca<sup>2+</sup></sub>	4.11e-8	2.63e-8	1.90e-8	1.46e-8	1.16e-8	9.52e-9	7.94e-9	6.71e-9	5.73e-9	4.93e-9	4.26e-9	3.69e-9	3.21e-9	2.79e-9	2.42e-9	2.10e-9	1.81e-9	1.55e-9	1.32e-9
	d <sub>K<sup>+</sup></sub>	4.19e-8	2.69e-8	1.94e-8	1.49e-8	1.19e-8	9.73e-9	8.12e-9	6.87e-9	5.87e-9	5.05e-9	4.37e-9	3.79e-9	3.29e-9	2.86e-9	2.49e-9	2.16e-9	1.86e-9	1.60e-9	1.36e-9
	d <sub>Mg<sup>2+</sup></sub>	3.99e-8	2.56e-8	1.85e-8	1.42e-9	1.13e-8	9.25e-9	7.71e-9	6.51e-9	5.56e-9	4.78e-9	4.12e-9	3.57e-9	3.10e-9	2.69e-9	2.33e-9	2.02e-9	1.74e-9	1.48e-9	1.26e-9
u <sub>i</sub>	u <sub>Na<sup>+</sup></sub>	0.1112	0.2620	0.4417	0.6362	0.8386	1.0456	1.2555	1.4678	1.6825	1.9001	2.1211	2.3464	2.5771	2.8143	3.0596	3.3145	3.5812	3.8621	4.1603
	u <sub>Ca<sup>2+</sup></sub>	0.0014	0.0081	0.0233	0.0488	0.0855	0.1336	0.1933	0.2646	0.3478	0.4430	0.5508	0.6717	0.8066	0.9565	1.1230	1.3077	1.5129	1.7417	1.9978
	u <sub>K<sup>+</sup></sub>	0.0274	0.0554	0.0829	0.1082	0.1309	0.1513	0.1696	0.1860	0.2009	0.2144	0.2267	0.2381	0.2485	0.2582	0.2672	0.2757	0.2836	0.2911	0.2983
	u <sub>Mg<sup>2+</sup></sub>	0.0012	0.0057	0.0149	0.0287	0.0467	0.0684	0.0932	0.1208	0.1509	0.1832	0.2176	0.2539	0.2922	0.3325	0.3748	0.4193	0.4660	0.5154	0.5676
(f <sub>r</sub> ) <sub>I</sub> [kPa]	(f <sub>r</sub> ) <sub>Na<sup>+</sup></sub>	3.09e-2	0.2656	1.045	2.833	6.227	12.00	21.19	35.19	55.98	86.29	130.0	192.9	283.2	413.3	602.0	878.6	1289	1910	2867
	(f <sub>r</sub> ) <sub>Ca<sup>2+</sup></sub>	5.00e-6	2.50e-4	2.86e-3	1.62e-2	6.11e-2	0.1794	0.4425	0.9645	1.918	3.559	6.262	10.58	17.31	27.67	43.50	67.68	104.8	162.6	254.3
	(f <sub>r</sub> ) <sub>K<sup>+</sup></sub>	1.88e-3	1.18e-2	3.63e-2	7.93e-2	0.1434	0.2300	0.3403	0.4752	0.6357	0.8232	1.039	1.286	1.565	1.879	2.233	2.630	3.075	3.576	4.139
	(f <sub>r</sub> ) <sub>Mg<sup>2+</sup></sub>	3.33e-6	1.26e-4	1.17e-3	5.59e-3	1.82e-2	4.69e-2	0.1027	0.2002	0.3582	0.6005	0.9567	1.464	2.168	3.128	4.419	6.135	8.400	11.38	15.28
(f <sub>a</sub> ) <sub>I</sub> [kPa]	(f <sub>a</sub> ) <sub>Na<sup>+</sup></sub>	6.95e-6	6.20e-5	3.09e-4	1.12e-4	3.33e-3	8.68e-3	2.05e-2	4.53e-2	9.48e-2	0.1904	0.3710	0.7069	1.325	2.461	4.547	8.409	15.65	29.50	56.73
	(f <sub>a</sub> ) <sub>Ca<sup>2+</sup></sub>	6.52e-6	5.81e-5	2.89e-4	1.05e-3	3.12e-3	8.12e-3	1.92e-2	4.23e-2	8.85e-2	0.1776	0.3457	0.6579	1.232	2.284	4.214	7.777	14.44	27.14	52.01
	(f <sub>a</sub> ) <sub>K<sup>+</sup></sub>	5.90e-6	5.25e-5	2.61e-4	9.46e-4	2.81e-3	7.31e-3	1.73e-2	3.81e-2	7.94e-2	0.1592	0.3096	0.5882	1.099	2.034	3.742	6.885	12.74	23.84	45.43
	(f <sub>a</sub> ) <sub>Mg<sup>2+</sup></sub>	7.45e-6	6.65e-5	3.31e-4	1.20e-3	3.58e-3	9.33e-3	2.21e-2	4.88e-2	0.1021	0.2054	0.4007	0.7643	1.435	2.669	4.941	9.157	17.09	32.31	62.39
p [kPa]	0.0171	0.1472	0.5794	1.574	3.468	6.706	11.88	19.82	31.65	48.99	74.10	110.3	162.3	237.3	345.9	504.8	739.6	1092	1632	

### 2.3.3 透水係数

式(2.46)に基づく、緩衝材の透水係数の評価結果を図 2.3-6 に示す。第 2 次取りまとめ時の基になっているデータ<sup>9)</sup>( 図中、点線で示す) と比べると、低密度域と高密度域で透水係数が高い結果となっている。

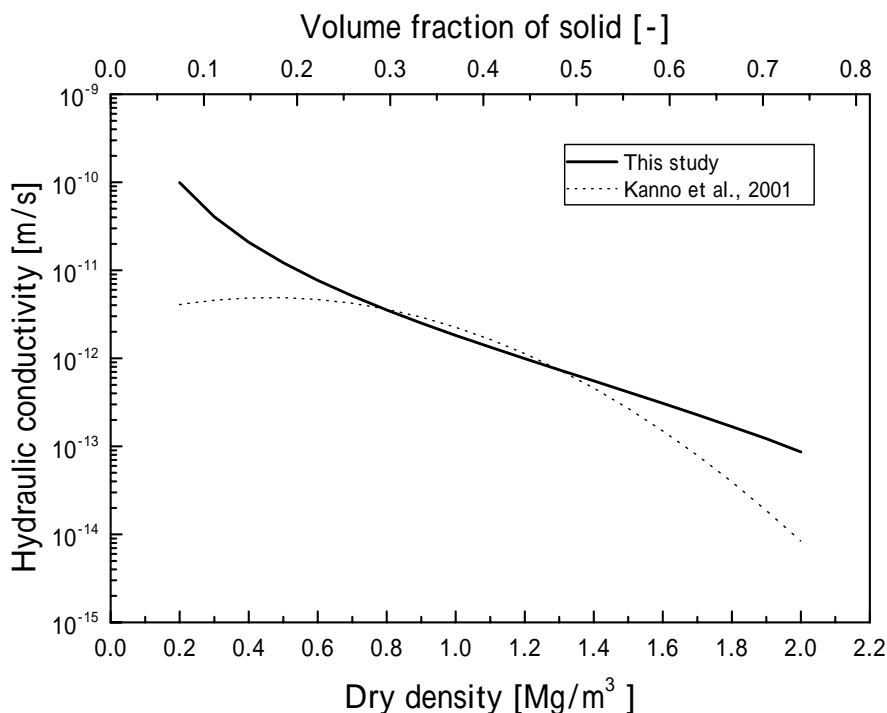


図 2.3-6 緩衝材透水係数の設定値

### 2.3.4 固相拡散係数

本研究では、緩衝材侵入現象に関する室内試験として、BENTFLOW 試験と後述するストロー型のサンプル器具を備えた模型試験(以下、模型試験と記す)の 2 種類の試験の解析を行う。BENTFLOW 試験では、緩衝材が侵入する領域は、岩盤き裂を模擬した平行平板間であるが、模型試験では、緩衝材は円管状のサンプル器具内へ侵入する。1.2.1 で述べたモデル化では、緩衝材の侵入現象の速度を規定する固相拡散係数を算出する際に、侵入する場の形状を考慮している。

したがって、本節では固相拡散係数を評価する前に、新たに、円管状の流路におけ

る固相拡散係数の形式を導出する必要がある。ここでは、平行平板間のき裂における固相拡散係数の導出過程<sup>9)</sup>を再度確認し、合わせて円管流路の場合を示し、両者の差異を明確にする。

また、導出された円管流路部の式及び、コア部、平行平板き裂部に用いる固相拡散係数式に対して、2.3.1～2.3.3 項で実測値を基に再検討した粘性係数、膨潤圧、透水係数を代入し、解析における入力パラメータとしての固相拡散係数を設定する。

#### (1) 平行平板き裂及び円管の固相拡散係数の導出

まず、平行平板き裂における固相拡散係数の導出過程を再確認する。ここでは、図 2.3-7 に示す幅  $d$  の平行平板き裂中における緩衝材の侵入現象を考える。侵入現象を粘性流体の定常クリープ流れとし、流れは  $z$  方向のみと考える。慣性項を無視し、2次元のナビエ - ストークスの運動方程式を適用すると、

$$\frac{dP_s}{dz} = \mu_s \frac{d^2 u_s}{dy^2} = \frac{\mu_s}{\sigma} \frac{d^2 q_s}{dy^2} \quad (2.50)$$

となる。ここで、 $\mu_s$  は固体粒子からなるゲルの粘性係数、 $u_s$ 、 $q_s$  は各々固体粒子の速度と流束で、 $q_s = \sigma u_s$  となる。この場合、圧力勾配  $dP_s/dz=P$  は  $y$  と  $z$  から独立であり、

$$\frac{d^2 q_s}{dy^2} = \frac{\sigma}{\mu_s} P \quad (2.51)$$

したがって、

$$q_s = \frac{\sigma}{2\mu_s} P y^2 + C_1 y + C_2 \quad (2.52)$$

き裂壁面ですべりなし条件を仮定すると、 $y=-d/2$  と  $y=d/2$  において  $q_s=0$  であり、

$$q_s = \frac{\sigma P}{2\mu_s} \left( y^2 - \frac{d^2}{4} \right) \quad (2.53)$$

$z$  に垂直な断面における  $q_s$  の平均値は、



$$\begin{aligned} \bar{q}_s &= \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} \frac{\sigma P}{2\mu_s} \left( y^2 - \frac{d^2}{4} \right) dy \\ &= -\frac{\sigma P}{12\mu_s} d^2 \\ &= -\frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dP_s}{dz} \end{aligned} \tag{2.54}$$

1.2.1 に述べたように、(1.7) 式と (2.54) 式を比較して、

$$k_s = \rho_w g \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \tag{2.55}$$

(1.3) 式、(1.5) 式、(2.55)式より、平行平板き裂における固相拡散係数を表す式として、

$$D_s = \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dP_s}{d\sigma} \tag{2.56}$$

が得られる。

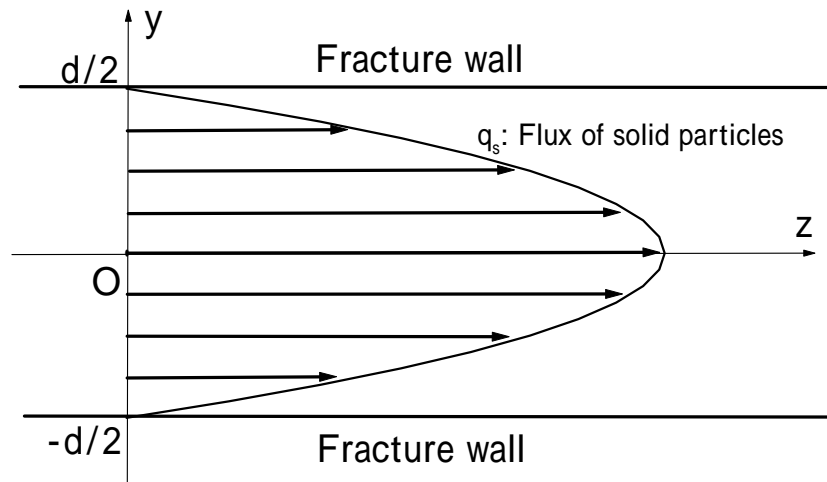


図 2.3-7 平行平板き裂中のベントナイトの侵入現象のモデル化

次に、円管における固相拡散係数の導出を試みる。直径  $d$  なる円管の場合も、断面形状は図 2.3-7 と同じである（半径  $r$  の方向を  $y$  にとる）、 $(r, z, \theta)$  なる円柱座標をとる

と、管内速度は、

$$u_z = u_z(r), u_r = u_\theta = 0$$

であるから、円柱座標におけるナビエ - ストークスの運動方程式は

$$\frac{d^2 u_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_z}{dr} = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{d^2 q_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dq_z}{dr} \right) = \frac{1}{\mu_s} \frac{dPs}{dz} = \frac{P}{\mu_s} \quad (2.57)$$

となる。管壁上ですべりなし条件

$$u_z(d/2) = \frac{1}{\sigma} q_z(d/2) = 0 \quad (2.58)$$

を仮定すると、これを満足する(2.57)式の解は

$$q_z(r) = \frac{\sigma P}{4\mu_s} \left( r^2 - \frac{d^2}{4} \right) \quad (2.59)$$

z に垂直な断面における  $q_s$  の平均値は、

$$\begin{aligned} \bar{q}_s &= \frac{1}{\pi d^2} \int_0^{d/2} 2\pi r \frac{\sigma P}{4\mu_s} \left( r^2 - \frac{d^2}{4} \right) dr \\ &= \frac{2}{d^2} \frac{\sigma P}{\mu_s} \left[ \frac{r^4}{4} - \frac{d^2}{4} \frac{r^2}{2} \right]_0^{d/2} = \frac{2}{d^2} \frac{\sigma P}{\mu_s} \left[ \frac{d^4}{64} - \frac{d^4}{32} \right] \\ &= -\frac{\sigma d^2}{32\mu_s} \frac{dPs}{dz} \end{aligned} \quad (2.60)$$

(1.7) 式と (2.60) 式を比較して、

$$k_s = \rho_w g \frac{\sigma d^2}{32\mu_s} \quad (2.61)$$

(1.3) 式、(1.5) 式、(2.61)式より、円管における固相拡散係数を表す式として、

$$D_s = \frac{\sigma d^2}{32\mu_s} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (2.62)$$

が得られる。

以上より、円管における固相拡散係数が導出された。平行平板き裂における固相拡散係数 (2.56) 式と円管における固相拡散係数 (2.62) 式より、円管の式においても形式に違いは見られず、係数が異なるのみであることが明らかとなった。

## (2) 物性値代入による固相拡散係数の設定

緩衝材の流出に関する試験の解析に必要なとなる固相拡散係数は、

コア部（緩衝材本体部分）

平行平板き裂部（緩衝材流出挙動試験の解析に必要な）

円管部（ストロー型サンプル器具を有する模型試験の解析に必要な）

の部位毎に設定する必要がある。これまでの検討により、それぞれの固相拡散係数は、以下のとおり導出されている。

コア部

$$D_s = \frac{\sigma k}{\rho_w g} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (1.6) \text{ (再出)}$$

平行平板き裂部

$$D_s = \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (2.56) \text{ (再出)}$$

円管部

$$D_s = \frac{\sigma d^2}{32\mu_s} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (2.62) \text{ (再出)}$$

上記の式に対して、前出の 2.3.1～2.3.3 項で実測値を基に再検討した粘性係数、膨潤圧、透水係数を代入し、解析における入力パラメータとしての固相拡散係数を設定した。コア部、平行平板き裂部、円管部に対する固相拡散係数の設定結果をそれぞれ図 2.3-8、図 2.3-9、図 2.3-10 に示す。さらに、コア部及び平行平板き裂部の固相拡散係数については、第 2 次とりまとめ時の基になっている設定データ<sup>9)</sup>を図 2.3-8、図 2.3-9 中に合わせて記載する（図中の Kanno et al., 2001 のデータ）。コア部の固相拡散係数は、低密度において本研究で設定した固相拡散係数の方がかなり大きくなっている。これは、2.3.3 項で検討した透水係数が低密度で大きくなっていることが主な原因と考えられる。また、き裂部の固相拡散係数は、傾向自体が異なっていると同時に、やはり低密度では本研究で設定した値が大きくなっている。この原因としては、本研究で設定した粘性係数の影響が最も大きな原因であると考えられる。

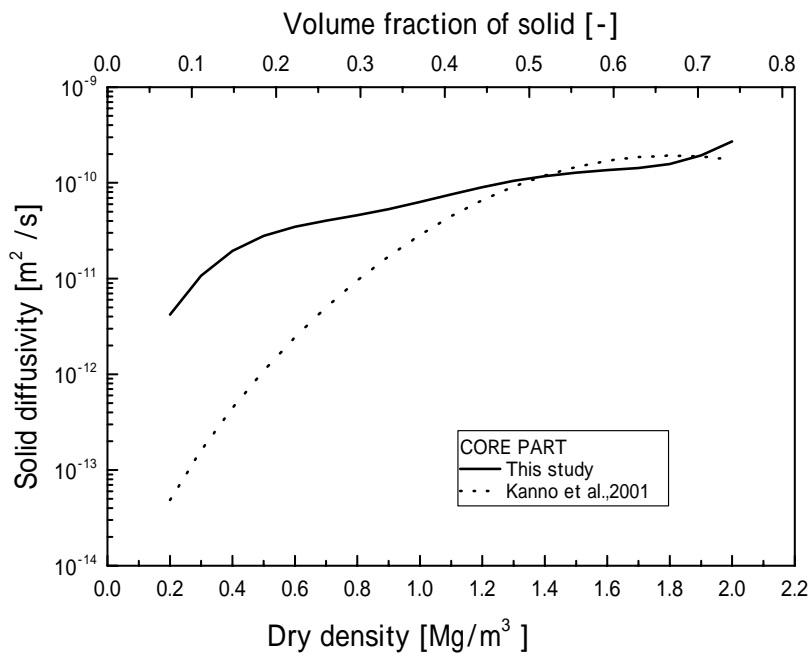


図 2.3-8 コア部固相拡散係数の設定値

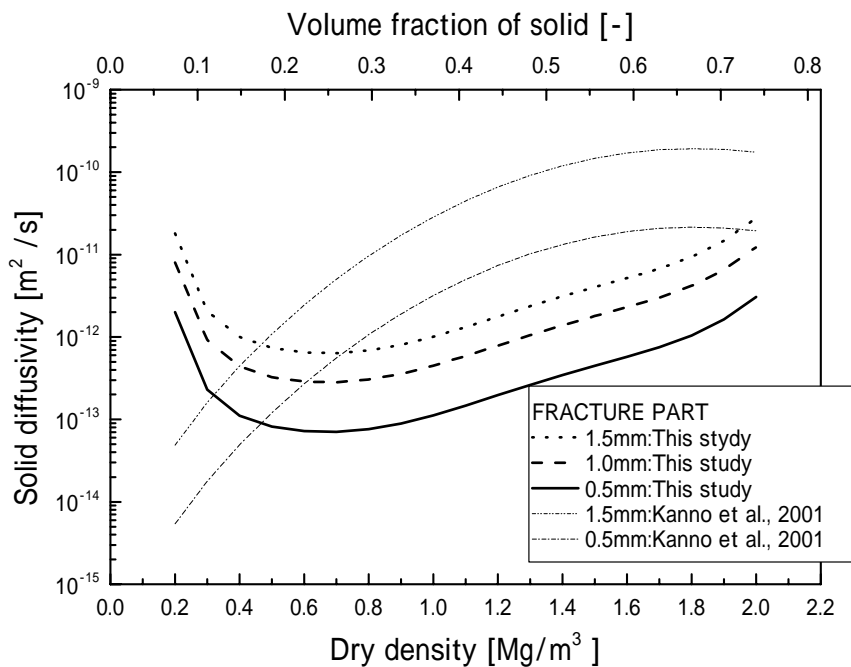


図 2.3-9 き裂部固相拡散係数の設定値

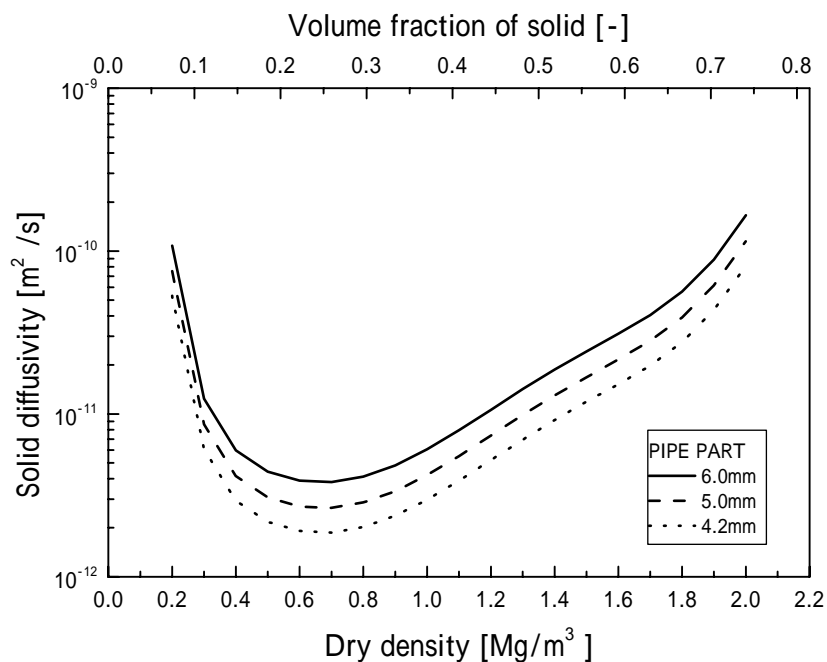


図 2.3-10 円管部固相拡散係数の設定値

## 2.4 安らのモデルとの比較

安ら<sup>7),16)</sup>は、緩衝材の侵入現象を圧密の逆過程と考え、圧密方程式を適用してモデル化している。モデル化の概要を以下に示す。

変形する領域における地下水流れの基礎式は

$$-\int_{\Gamma} \rho_w \bar{q} \cdot \bar{n} d\Gamma = \frac{D}{Dt} \int_V \rho_w \theta dV \quad (2.63)$$

ここで、

$\rho_w$  : 水の密度[kg/cm<sup>3</sup>]

$\theta$  : 体積含水率

$\bar{q}$  : 固体粒子への水の流束ベクトル

$D/Dt$  : 物質微分

$\Gamma$  : 計算領域境界[m<sup>2</sup>]

$V$  : 計算領域体積[m<sup>3</sup>]

である。体積要素が十分に小さい場合、 $\rho_w$  と  $\theta$  は  $V$  における平均値として取扱うこ

とができ、式(2.63)は

$$-\int_{\Gamma} \rho_w \vec{q} \cdot \vec{n} d\Gamma = \frac{D}{Dt} (\rho_w \theta V) \quad (2.64)$$

となる。ダルシー則を適用し

$$\vec{q} = -\frac{\kappa \rho_w g}{\mu} \vec{\nabla} h \quad (2.65)$$

ここで、

$\kappa$  : 固有透過度[m<sup>2</sup>]

$g$  : 重力定数[m/s<sup>2</sup>]

$\mu$  : 水の粘性係数[kg/(ms<sup>2</sup>)]

$h$  : 全水頭[m]

全水頭  $h$  は、2つの成分に分かれ

$$h = h_e + \frac{p_w}{\gamma_w} \quad (2.66)$$

ここで、

$h_e$  : 位置水頭[m]

$p_w$  : 間隙水圧[N/m<sup>2</sup>]

$\gamma_w = r_w g$  : 水の比重量[kg/(m<sup>2</sup>s<sup>2</sup>)]

である。位置水頭は一定で、 $\rho_w$ 、 $V$ 、 $\theta$ は  $p_w$  のみの関数と仮定し、式(2.65)を式(2.64)

に代入して、

$$\int_{\Gamma} \rho_w \frac{\kappa \rho_w g}{\mu} \vec{\nabla} h \cdot \vec{n} d\Gamma = M_c \frac{Dp_w}{Dt} \quad (2.67)$$

ここで

$$M_c = \frac{d}{dp_w} (\rho_w n S V) \quad (2.68)$$

$$\theta = n S \quad (2.69)$$

また、 $n$  は間隙率、 $S$  は飽和度である。水が非圧縮性であると仮定すると、式(2.68)

は

$$M_c = \rho_w S V_s \frac{de}{dp_w} + \rho_w e V_s \frac{dS}{dp_w} \quad (2.70)$$

と計算される。ここで、 $nV=V_v=eV_s$ 、 $V_s$  は固相の体積、 $V_v$  は間隙の体積、 $e$  は間隙比である。

不飽和媒体の有効応力 $\sigma'$ は

$$\sigma' = \sigma - p_w \chi \quad (2.71)$$

と表わされる。ここで、 $\sigma$ は全応力、 $\chi$ は Bishop のパラメータである。ベントナイトの場合は、全応力は間隙水圧と膨潤圧  $P_s$  からなり

$$\sigma = p_w \chi + P_s \quad (2.72)$$

と表わされる。式(2.71)と式(2.72)を比べて

$$\sigma' = P_s \quad (2.73)$$

ここで、任意の点における全応力は時間的に変化しないと仮定して

$$\Delta \sigma' = -(\chi \Delta p_w + p_w \Delta \chi) \quad (2.74)$$

または

$$\frac{d\sigma'}{dp_w} = -\chi', \text{ where } \chi' = \chi + p_w \frac{d\chi}{dp_w} \quad (2.75)$$

飽和媒体では $\chi=1$  または $\chi'=1$  である。式(2.75)より、

$$\frac{d(nV)}{dp_w} = -V_s \chi' \frac{de}{d\sigma'} \quad (2.76)$$

となる。

飽和指数  $C_s$  は

$$C_s = -\frac{de}{d \log_{10} \sigma'} = 2.303 \sigma' a_v \quad (2.77)$$

で定義される。ここで、

$$a_v = -\frac{de}{d\sigma'} \quad (2.78)$$

式(2.76)と式(2.78)より、式(2.70)の第1項は

$$\rho_w S \frac{d(nV)}{dp_w} = \rho_w S V_s a_v \chi' \quad (2.79)$$

式(2.79)を式(2.70)に代入して

$$M_c = \rho_w V_s \left( S a_v \chi' + e \frac{dS}{dp_w} \right) \quad (2.80)$$

式(2.80)を式(2.67)に代入して

$$\frac{1}{V} \int_{\Gamma} \frac{\kappa \rho_w g}{\mu} \nabla h \cdot \bar{n} d\Gamma = \frac{1}{1+e} \left( S a_v \chi' + e \frac{dS}{dp_w} \right) \frac{\partial p_w}{\partial t} \quad (2.81)$$

ここで、物質微分は偏微分で置き換えられることを仮定している。

さらに、要素体積が任意に小さいとして

$$\frac{\rho_w g}{\mu} \nabla(\kappa \nabla h) = \frac{1}{1+e} \left( S a_v \chi' + e \frac{dS}{dp_w} \right) \frac{\partial p_w}{\partial t} \quad (2.82)$$

ここで、ベントナイトが飽和していると仮定し

$$\frac{\rho_w g}{\mu} \nabla(\kappa \nabla h) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.83)$$

式(2.66)を式(2.83)に代入し、位置水頭  $h_e$  が一定と仮定し

$$\frac{1}{\mu} \nabla(\kappa(e) \nabla p_w) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.84)$$

式(2.75)と式(2.78)を用い

$$\frac{\partial p_w}{\partial x} = \frac{dp_w}{d\sigma'} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial x} = (-1) \left( -\frac{1}{a_v} \right) \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{1}{a_v(e)} \frac{\partial e}{\partial x} \quad (2.85)$$

これにより、式(2.84)は

$$\frac{1}{\mu} \nabla \left( \frac{\kappa(e)}{a_v(e)} \nabla e \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.86)$$

式(2.86)が飽和した変形する媒体中での水の流れの基礎式となる。安らは式(2.86)を数値的に解くことにより緩衝材侵入現象の解析を行っている。

次に、安らのモデルと本研究のモデルとの比較検討を行う。

間隙比  $e$  と固相率  $\sigma$  は

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{1}{\sigma} - 1 \quad (2.87)$$

の関係にある。また



$$\nabla e = \left( -\frac{1}{\sigma^2} \right) \nabla \sigma, \frac{\partial e}{\partial t} = \left( -\frac{1}{\sigma^2} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (2.88)$$

式(2.87)と式(2.88)を式(2.86)に代入すると

$$\sigma \left( -\frac{1}{\sigma^2} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \nabla \left( \frac{\kappa(\sigma)}{a_v(\sigma)} \cdot \left( -\frac{1}{\sigma^2} \right) \nabla \sigma \right) \quad (2.89)$$

すなわち

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial t} &= \frac{\sigma}{\mu} \nabla \left( \frac{\kappa(\sigma)}{a_v(\sigma) \sigma^2} \nabla \sigma \right) \\ &= \sigma \nabla \left( \frac{\kappa(\sigma)}{\mu a_v(\sigma) \sigma^2} \nabla \sigma \right) \\ &= \nabla \left( \sigma \frac{\kappa(\sigma)}{\mu a_v(\sigma) \sigma^2} \nabla \sigma \right) - \nabla \sigma \cdot \frac{\kappa(\sigma)}{\mu a_v(\sigma) \sigma^2} \nabla \sigma \\ &= \nabla \left( \frac{\kappa(\sigma)}{\mu a_v(\sigma) \sigma} \nabla \sigma \right) - \frac{\kappa(\sigma)}{\mu a_v(\sigma) \sigma^2} (\nabla \sigma)^2 \end{aligned} \quad (2.90)$$

ここで、 $(\nabla \sigma)^2$ が無視できる微小量であると仮定すると、

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \nabla \left( \frac{\kappa(\sigma)}{\mu a_v(\sigma) \sigma} \nabla \sigma \right) \quad (2.91)$$

となる。ここで、 $a_v(\sigma)$ を、式(2.73)と式(2.78)を用いて $\sigma$ と  $P_s$  の関数として表わすと

$$a_v = -\frac{de}{d\sigma'} = -\frac{de}{dP_s} = \frac{1}{\sigma^2} \frac{d\sigma}{dP_s} \quad (2.92)$$

となる。式(2.92)を式(2.91)に代入して

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \nabla \left( \frac{\kappa}{\mu} \sigma^2 \frac{dP_s}{d\sigma} \frac{1}{\sigma} \nabla \sigma \right) = \nabla \left( \frac{\kappa \sigma}{\mu} \frac{dP_s}{d\sigma} \nabla \sigma \right) \quad (2.93)$$

固有透過度と透水係数の関係

$$\kappa = \frac{\mu}{\rho_w g} k \quad (2.94)$$

より、式(2.93)は

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \nabla \left( \frac{\sigma k}{\rho_w g} \frac{dP_s}{d\sigma} \nabla \sigma \right) \quad (2.95)$$

すなわち

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \operatorname{div} \left( \frac{\sigma k}{\rho_w g} \frac{dP_s}{d\sigma} \operatorname{grad} \sigma \right) \quad (2.96)$$

となり、式(1.6)、式(1.12)に示す、自由膨潤状態の固相拡散係数と一致する。したがって、安らによるモデル化は、自由膨潤状態における固相拡散モデルと等価であると考えられる。

### 3 数値解析

#### 3.1 緩衝材流出挙動試験解析

第2章で設定した入力パラメータを用いて、緩衝材流出挙動試験<sup>19)</sup>の解析を実施した。

##### 3.1.1 緩衝材流出挙動試験の概要<sup>19)</sup>

緩衝材流出挙動試験装置は、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、供試体の下部にロードセルを設置しており、膨潤応力の経時変化を測定することができる。静水試験の試験条件を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 緩衝材流出挙動試験の試験条件（静水試験）

ベントナイト試料	クニゲル V1		
供試体寸法 [mm]	50 × H50		
乾燥密度 [ $\text{Mg m}^{-3}$ ]	1.6	1.8	
ケイ砂混合率 [%]	30	0	30
き裂幅 [mm]	0.3 ~ 1.5		
浸潤水	蒸留水		

##### 3.1.2 解析方法

図 3.1-1 に緩衝材流出挙動試験<sup>19)</sup>を対象とした解析メッシュを示す。緩衝材流出挙動試験の装置形状に従い、中心部の 50 × H50 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。

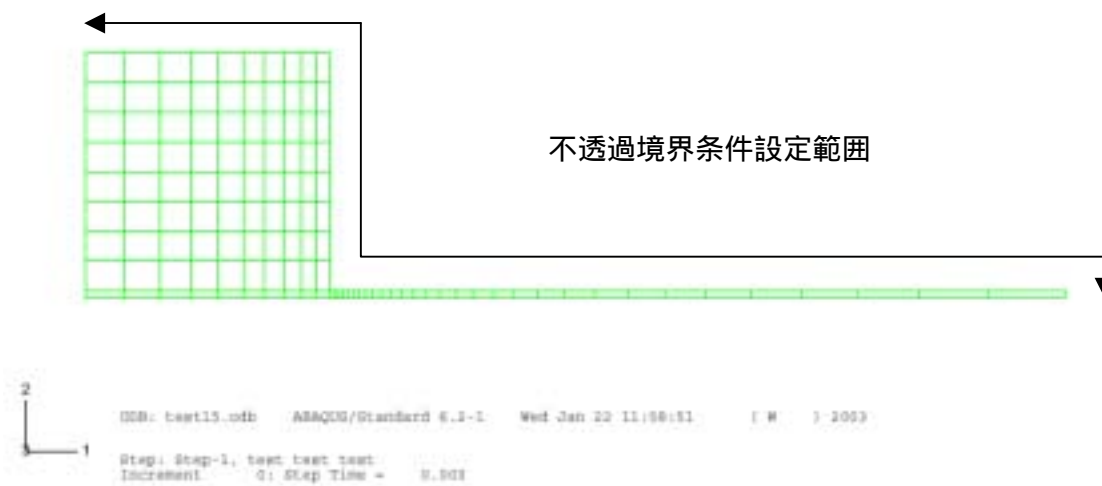


図 3.1-1 緩衝材流出挙動試験解析メッシュ（き裂幅 1.5 mm）

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（ $50 \times 50H$ [mm]）、き裂幅（0.5、1.0、1.5[mm]）、供試体表面からの最大き裂距離（75[mm]）
- ・緩衝材仕様：乾燥密度（ $1.8Mg \cdot m^{-3}$ ）、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  $1.8Mg \cdot m^{-3}$  より設定））  
き裂部（0.0817（含水比 416%（ベントナイトの液性限界）より設定））
- ・境界条件：
  - コア部表面及びき裂表面不透過（図 3.1-1 参照）
- ・入力パラメータ：
  - 固相拡散係数：コア部（式(1.6)に、2.3.2、2.3.3 項で検討した膨潤圧、透水係数を代入して設定）

き裂部（式(2.56)に、2.3.1、2.3.2 項で検討した粘性係数、膨潤圧を代入して設定）

### 3.1.3 解析結果

図 3.1-2 に固相率分布に関する解析結果（き裂幅 1.5mm、時間  $6.05 \times 10^6$  [s]）の一例を示す。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。また、流出距離の経時変化の解析結果を試験結果と合わせて図 3.1-3 示す。図 1.2-1 に示す従来の解析結果よりも試験結果と良く一致しており、本研究において、ベントナイト粘度の測定結果に基づいて設定した固相拡散係数は妥当であると考えられる。

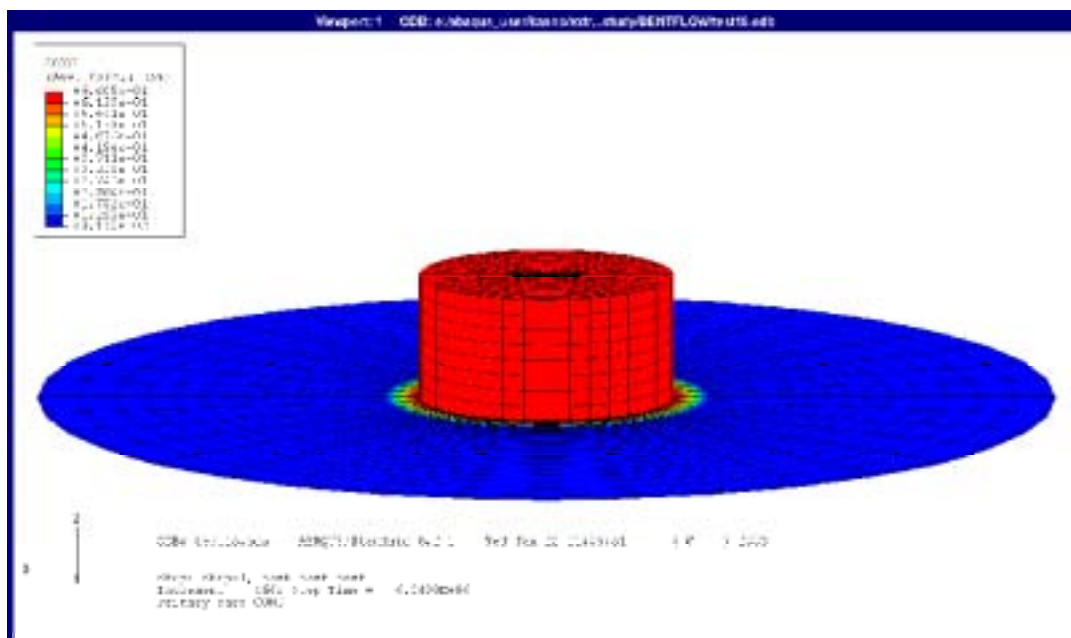


図 3.1-2 緩衝材流出挙動試験の解析結果の一例

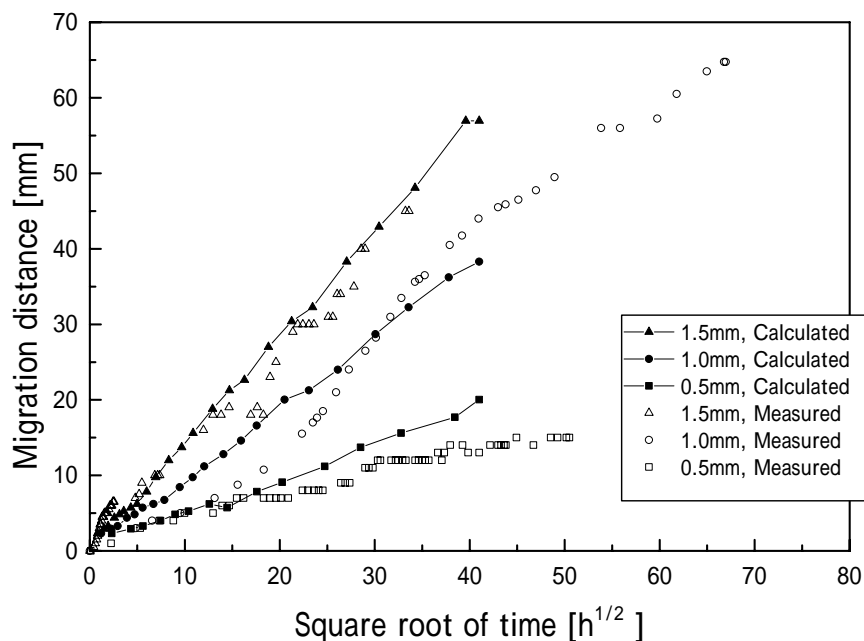


図 3.1-3 流出距離の解析結果

### 3.2 模型試験解析

第2章で設定した入力パラメータを用いて、ストロー状のサンプル管を有する緩衝材流出の模型試験<sup>20)</sup>の解析を実施した。

#### 3.2.1 模型試験の概要<sup>20)</sup>

図 3.2-1 に模型試験の装置の概念を示す。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 3.2-1 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 (純ベントナイト) 試料、乾燥密度 1.6 [Mg/m<sup>3</sup>] : 孔径 4.2, 5, 6 [mm]、乾燥密度 1.4 [Mg/m<sup>3</sup>] : 孔径 6 [mm] の 4 つの試験の解析を行った。

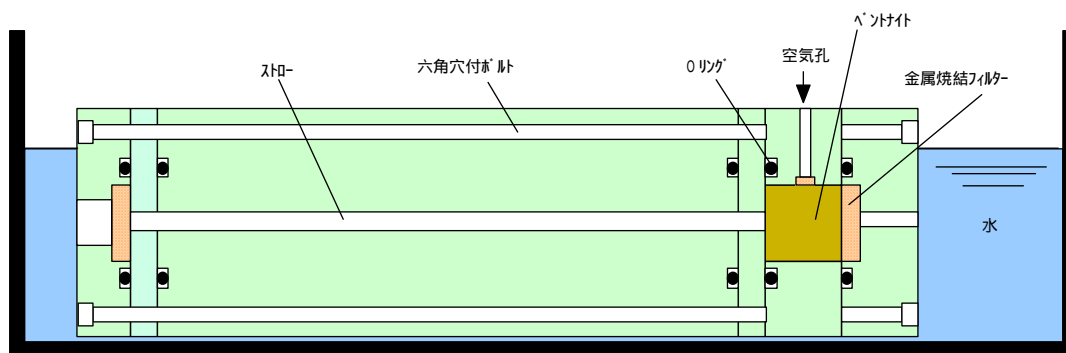


図 3.2-1 模型試験装置

表 3.2-1 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 [ $\text{Mg m}^{-3}$ ]	1.4	1.6	
ケイ砂混合率 [%]	0	0	30
初期含水比 [%]	9.5		
孔径 [mm]	4.2、4.5、6.0	4.2、5.0、6.0	
浸潤水	蒸留水		
試験期間 [day]	72	90	
試験温度 [ ]	室温 約 20		

### 3.2.2 解析条件

図 3.2-2 に模型試験<sup>20)</sup>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象のモデルとしている。



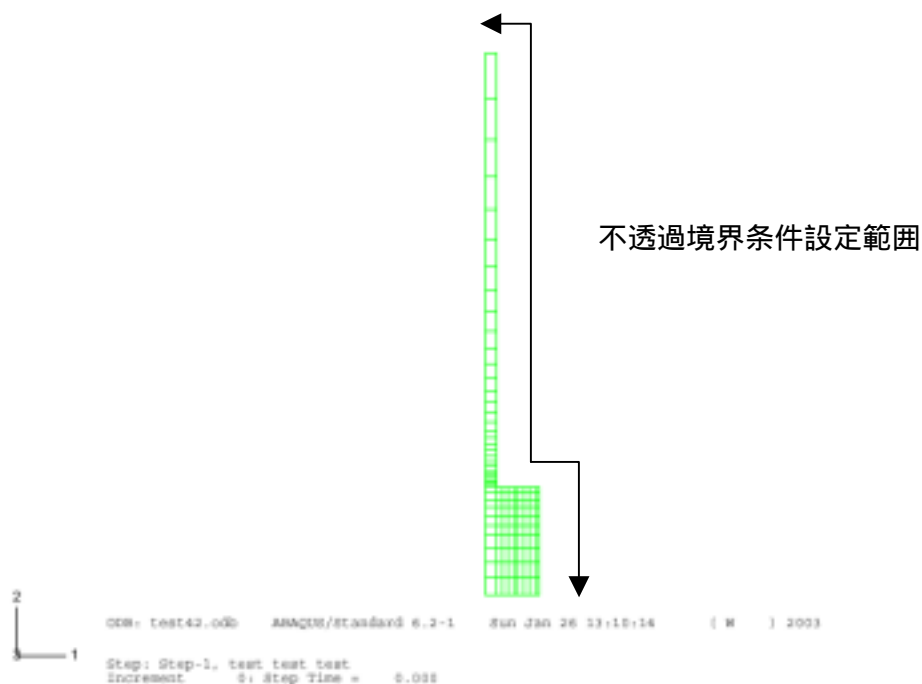


図 3.2-2 模型試験解析メッシュ

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（ $20 \times 20H$ [mm]）、ストロー部孔径（4.2、5、6[mm]）、ストロー部長さ（80[mm]）
- ・緩衝材仕様：乾燥密度（1.6、 $1.4\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ）、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、0.518519（それぞれ乾燥密度 1.6、 $1.4\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ））  
ストロー部（0.0（模型試験でベントナイト液性限界値より大きな含水比が、侵入部で測定されたため、0を設定した。））
- ・境界条件：
  - コア部表面及びストロー部表面不透過（図 3.2-2 参照）

・入力パラメータ：

- 固相拡散係数：コア部（式(1.6)に、2.3.2、2.3.3 項で検討した膨潤圧、透水係数を代入して設定）
- ストロー部（式(2.62)に、2.3.1、2.3.2 項で検討した粘性係数、膨潤圧を代入して設定）

### 3.2.3 解析結果

図 3.2-3 に模型試験<sup>20)</sup>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<sup>3</sup>]、孔径 4.2 [mm]、時間  $7.76 \times 10^6$  [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。侵入部の乾燥密度分布に関する解析結果を試験結果とともに、図 3.2-4～図 3.2-7 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、それ以外の所では乾燥密度が低く、侵入が遅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える。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。

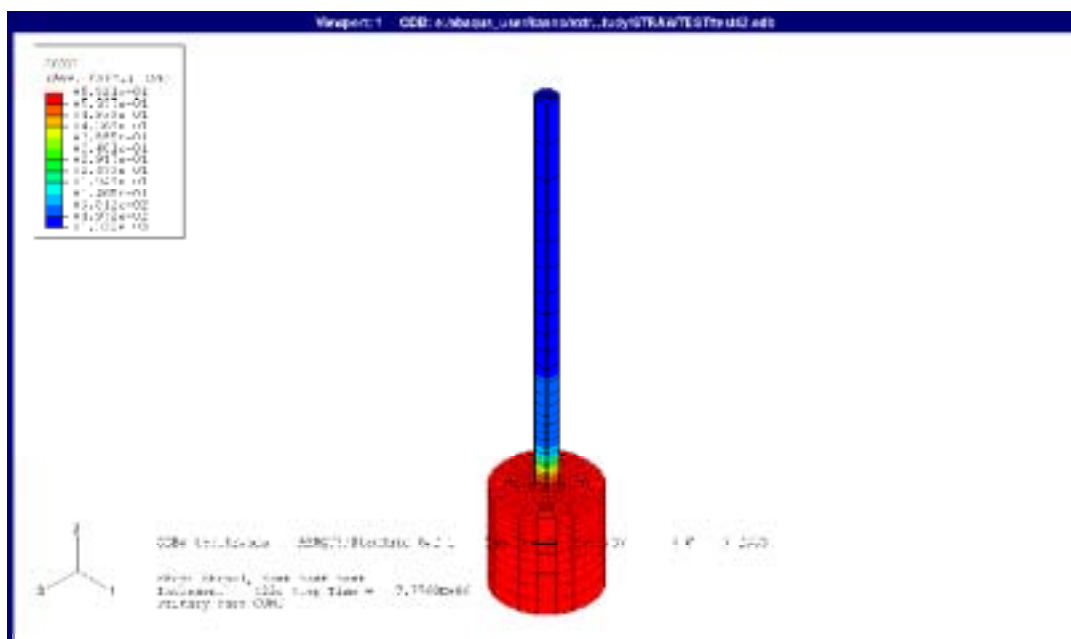


図 3.2-3 模型試験解析結果

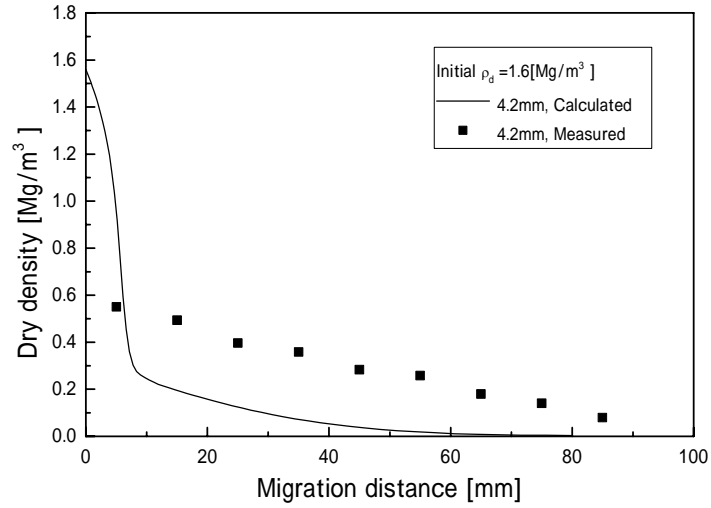


图 3.2-4 干燥密度分布解析结果 (初期干燥密度  $1.6Mg/m^3$ 、孔径 4.2mm)

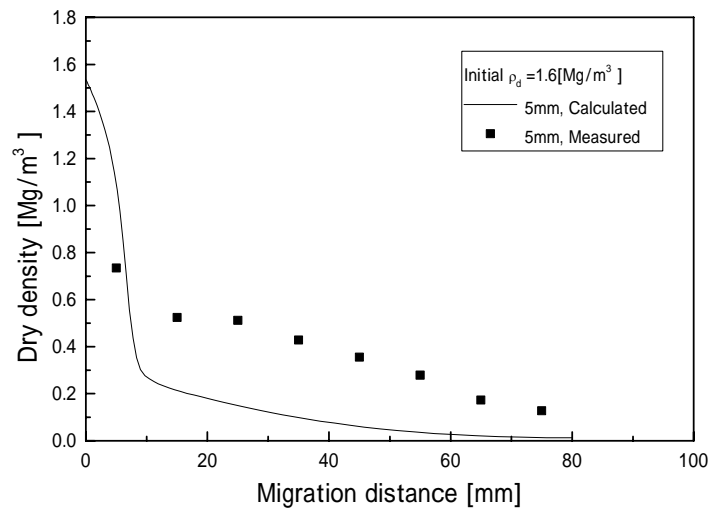


图 3.2-5 干燥密度分布解析结果 (初期干燥密度  $1.6Mg/m^3$ 、孔径 5mm)

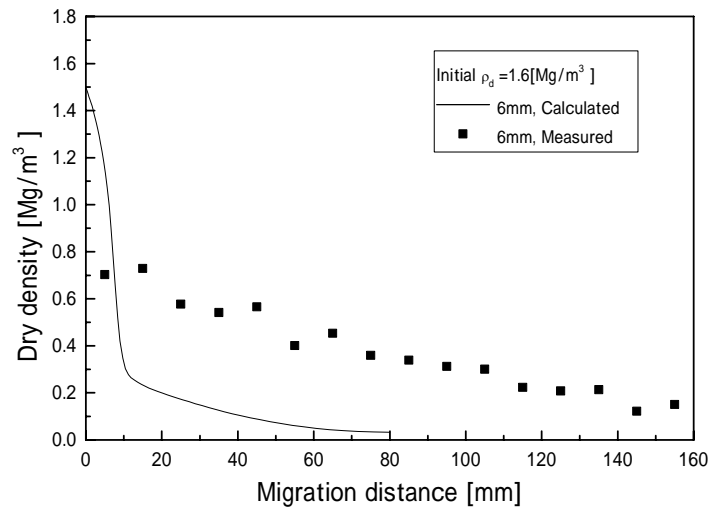


图 3.2-6 干燥密度分布解析结果（初期干燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>、孔径 6mm）

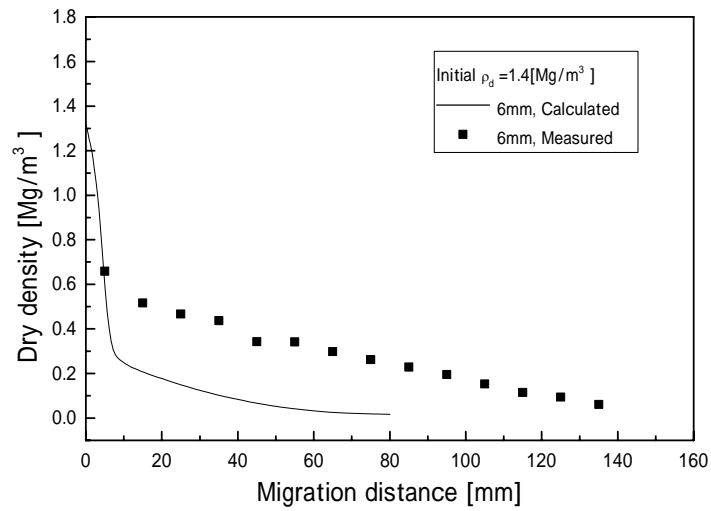


图 3.2-7 干燥密度分布解析结果（初期干燥密度 1.4Mg/m<sup>3</sup>、孔径 6mm）

#### 4 おわりに

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課題となっていた、  
緩衝材粘性係数の実測値に基づいた固相拡散係数の評価  
低密度領域の膨潤圧、透水係数の実測値を用いた固相拡散係数の評価  
侵入ゲルの密度分布の評価

について、最新の測定、試験結果に基づいて、モデル化の見直しを実施した。本研究で見直したモデル化に基づき、BENTFLOW 試験と模型試験の解析を実施した。BENTFLOW 試験の流出距離の経時変化の解析結果は、従来の解析結果よりも試験結果と良く一致しており、と の項目は解決されたものとする。ただし、 の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、今後さらに検討する必要がある。

#### 5 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 - 総論レポート”、JNC TN1400 99-020、(1999).
- [2] 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).
- [3] Pusch, R.: “Stability of bentonite gels in crystalline rock - Physical Aspects.”、SKBF/SKB Technical Report 83-04, (1983).
- [4] 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).
- [5] Pusch, R.: “Borehole sealing with highly compacted Na bentonite.”、SKBF/KBS Teknisk Rapport 81-09, (1981).
- [6] Börgesson, L.: “Interim report on the laboratory and theoretical work in modeling the drained and undrained behavior of buffer materials.” SKB Technical Report 90-45, (1990).

- [7] Verbeke, J., J. Ahn, P. L. Chambré : “ Long-term behaviour of buffer materials in geologic repositories for high-level wastes. ” UCB-NE-4220, (1997).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] Nakano, M. Y. Amemiya & K. Fujii: “ Saturated and Unsaturated Hydraulic Conductivity of Swelling Clays. ”、 Soil Science. Vol. 141. No. 1, (1986).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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 ) - 締固め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).
- [16] 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).

- [17] 日本レオロジー学会編：“講座・レオロジー”、1版、高分子刊行会、(2001).
- [18] 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開発 平成14年度報告”、JNC TN1400 2003-004、(2003).
- [19] 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).
- [20] 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).