

緩衝材の侵入現象モデルの適用性に関する検討

Study of the Applicability of the Diffusion Model of Bentonite Buffer Material

松本 一浩 棚井 憲治

Kazuhiro MATSUMOTO and Kenji TANAI

地層処分研究開発部門

地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

緩衝材の侵入現象モデルの適用性に関する検討

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

松本 一浩^{*}, 棚井 憲治

(2009年12月18日受理)

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

本報では、侵入現象のモデル化において用いられている緩衝材の粘度についてデータの取得を行い、それらに基づいた粘度評価値の見直しにより、実験結果のシミュレーション解析を実施して侵入現象モデルの適用性の確認を行った。

その結果、以下の知見が得られた。

1) ベントナイトの粘度の測定

含水比をパラメータとしてベントナイトの粘度を測定し、ベントナイトの粘度が含水比の増加とともに低下することを確認した。また、侵入試験結果に基づき逆解析から求めていた見かけの粘度の妥当性を検証するために、本測定で得られた実測の粘度と比較した。その結果、含水比800%以上から両者の粘度が乖離することを確認した。

2) 実験結果のシミュレーション解析

実測に基づいて設定した粘度を侵入現象モデルに適用し、固相拡散係数を再評価して侵入試験のシミュレーション解析を行った結果、実験結果と解析結果とで相違が認められた。この結果を踏まえ、粘度設定値の設定誤差を考慮した感度解析を実施した結果、粘度の設定値が一桁（10倍もしくは、1/10倍）変動することで高感度に解析結果に影響することが示された。

以上の結果から、実際の侵入現象においては、既存のモデルで用いられている物性パラメータ以外に評価上影響する要因が含まれているものと推測され、現状の物性パラメータによる侵入現象のモデル化には限界があるものと考えられる。したがって、要素試験とそれらの結果とのシミュレーションとを繰り返し行いつつ、侵入現象を表現し得るパラメータの検討を進め、モデルの最適化を図る必要がある。

Study of the Applicability of the Diffusion Model of Bentonite Buffer Material

Kazuhiro MATSUMOTO* and Kenji TANAI

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

(Received December 18, 2009)

Bentonite buffer material is envisaged as a component of the engineered barrier system for high-level radioactive waste disposal. As a result of its swelling property, the buffer may extrude into the surrounding host rock through open fractures. If this persists for extremely long periods of time, the buffer extrusion could lead to a reduction of buffer density, which may in turn degrade the expected performance. In this report, the viscosity of bentonite was measured as one of the parameters of a diffusion model. Additionally, a simulation analysis was carried out to confirm the applicability of the model.

Results obtained from the studies are summarized as follows:

1) Measurement of the viscosity of bentonite

The viscosity was measured as a function of water content ratio by a Rheometer. The measurement showed that the viscosity decreases with increasing water content. Apparent viscosities estimated by inverse analysis of the density profiles obtained by the extrusion experiment were verified by the measured viscosities. As a result, the divergence between the apparent and the measured viscosities was observed at a water content of more than 800%.

2) Simulation analysis of an experiment result

Bentonite extrusion profiles were obtained by a model simulation based on the measured viscosities and were shown to be different when compared with the observed profiles in the extrusion experiments. On the basis of this result, a sensitivity analysis of the setting error of the viscosity was conducted. The analysis showed that the extrusion profiles were very sensitive to changes in viscosity.

The above results suggest that there are other factors besides the physical-properties applied to the present diffusion model which determine extrusion profiles of bentonite and highlight the need to optimize the model through experiment based identification of other key parameters relevant to extrusion phenomenon.

Keywords : Bentonite, Buffer Material, Extrusion, Diffusion Model

* Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 粘度データの整備	2
2.1 専門家によるレビュー	2
2.2 粘度データの測定	4
2.2.1 長時間静的クリープ測定に関する予備検討	4
2.2.2 長時間静的クリープ測定	11
2.2.3 フローカーブ測定	21
2.3 考察	25
2.4 適切な測定・評価上の要求性能およびデータの信頼性評価	27
3. 侵入現象モデルの適用性の確認および検討	29
3.1 解析コードおよび改良項目の概要	29
3.2 解析コードの検証	30
3.3 侵入試験のシミュレーション解析	33
3.3.1 解析パラメータの設定	33
3.3.2 解析結果	37
3.3.3 感度解析	42
4. おわりに	46
参考文献	47

Contents

1. Introduction	1
2. Measurement and expansion of viscosity data	2
2.1 Export review	2
2.2 Measurement of viscosity data	4
2.2.1 Preliminary examination of static creep measurement	4
2.2.2 Static creep measurement	11
2.2.3 Flow curve measurement	21
2.3 Consideration	25
2.4 Reliability assessment in measurement	27
3. Applicability of a model	29
3.1 Outline of analysis code	29
3.2 Verification of an analysis code	30
3.3 Analysis	33
3.3.1 Analysis parameter	33
3.3.2 Analysis result	37
3.3.3 Sensitivity analysis	42
4. Conclusions	46
Reference	47

目 次

図 2.1	粘度測定装置（レオストレス RS600）	5
図 2.2	測定センサー（表面溝付きセンサー）	6
図 2.3	測定状況（ソルベントトラップ）	6
図 2.4	時間とせん断ひずみの関係（含水比：600%）	7
図 2.5	時間とせん断ひずみの関係（含水比：700%）	7
図 2.6	せん断速度と粘度の関係（クリープ測定）	8
図 2.7	せん断速度と粘度の関係（既存データと本測定データとの比較）	9
図 2.8	せん断速度と粘度の関係（測定時間を考慮した既存データと本測定データとの比較）	9
図 2.9	時間とせん断ひずみの関係（含水比：200%）	13
図 2.10	時間とせん断ひずみの関係（含水比：300%）	13
図 2.11	時間とせん断ひずみの関係（含水比：400%）	14
図 2.12	時間とせん断ひずみの関係（含水比：500%）	14
図 2.13	時間とせん断ひずみの関係（含水比：600%）	15
図 2.14	時間とせん断ひずみの関係（含水比：700%）	15
図 2.15	せん断速度と粘度の算出方法	17
図 2.16	せん断速度とせん断応力の関係	17
図 2.17	せん断速度と粘度の関係	18
図 2.18	せん断速度と粘度の関係（全データ）	18
図 2.19	せん断速度と粘度の関係（既存データと本測定データを同等な測定時間で再計算）	20
図 2.20	測定状況	22
図 2.21	せん断速度と粘度の関係（フローカーブ測定）	22
図 2.22	せん断速度と粘度の関係（既存データ含む）	23
図 2.23	せん断速度と粘度の関係	24
図 2.24	測定結果に基づく含水比と粘度の関係整理	25
図 3.1	侵入試験検証解析（1）	30
図 3.2	侵入試験検証解析（2）	31
図 3.3	侵入試験検証解析（3）	31
図 3.4	侵入試験検証解析（4）	32
図 3.5	侵入試験検証解析用メッシュ	32
図 3.6	濃度コンター（170 時間後，0.67 倍で固相率に相当）	32
図 3.7	外挿近似による粘度の設定	35
図 3.8	含水比と粘度の関係	36
図 3.9	固相率と粘度の関係近似	36
図 3.10	固相率と透水係数の関係	37
図 3.11	固相率と膨潤圧の関係	38

図 3.12	コア部における固相拡散係数	38
図 3.13	亀裂部における固相拡散係数	39
図 3.14	侵入試験の解析結果	39
図 3.15	濃度コンター (1056 時間後, 0.65 倍で固相率に相当)	40
図 3.16	亀裂部における固相拡散係数 (固相率 0.037 以下は 0)	40
図 3.17	侵入試験の解析結果 (コア部, 亀裂部)	41
図 3.18	濃度コンター (1056 時間後, 0.65 倍で固相率に相当)	41
図 3.19	侵入試験の解析結果 (亀裂部)	42
図 3.20	感度解析ケースにおける固相率と粘度の関係	43
図 3.21	感度解析ケースにおける固相率と固相拡散係数の関係	43
図 3.22	侵入試験の解析結果 (感度解析 Case1)	44
図 3.23	侵入試験の解析結果 (感度解析 Case2)	44
図 3.24	侵入試験の解析結果 (感度解析 Case3)	45
図 3.25	侵入試験の解析結果 (感度解析 Case4)	45

表 目 次

表 2.1	粘度測定装置仕様	5
表 2.2	測定条件（クリーブ測定）	5
表 2.3	測定結果より得られた知見（クリーブ測定）	10
表 2.4	測定条件（クリーブ測定）	11
表 2.5	試料の含水比変化	12
表 2.6	粘度測定結果	16
表 2.7	測定条件（フローカーブ測定）	21
表 2.8	測定結果より得られた知見の整理	24
表 2.9	含水比の状態に応じた適切な測定・評価上の要求性能	27
表 2.10	粘度測定データの信頼性評価	28
表 3.1	各含水比における粘度の設定値	35
表 3.2	感度解析ケースと近似式	43

This is a blank page.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、人工バリア材の一つである緩衝材の物理的な安定性に影響を及ぼす事象として、岩盤亀裂内への緩衝材の侵入現象が考えられている。本現象は、所定の密度で定置された緩衝材が岩盤亀裂内へ侵入することにより、超長期において緩衝材自体の密度が低下することで、緩衝材に期待される諸機能が損なわれることが懸念されるものである。このため、人工バリアの長期健全性を評価するうえで、本事象の理解ならびに長期的な予測評価手法を構築し、それらに基づく評価結果を性能評価研究に反映することで、より評価精度を向上させ、予測評価の不確実性を低減させることが重要である。

本現象に関しては、これまでに基本的な挙動の実験的な把握、また、予測評価手法（侵入現象モデル）の構築を進めてきた。実験では、緩衝材の模擬亀裂内への侵入速さのデータ取得、また近年、非破壊検査技術を適用した侵入密度プロファイルの測定を行うなどし、より詳細な現象理解を進めている。一方、モデル化については、実験的な現象の理解から、緩衝材の膨潤圧をドライビングフォースとした粘土粒子の拡散による移動と仮定し、本現象を粘土粒子の拡散現象としてモデル化を行っている。これまでに、モデルの妥当性を確認するために、モデルの入力データとなる緩衝材の物性データ（透水係数、膨潤圧、粘度）の整備や検討、それらに基づいた実験結果のシミュレーションなどを行うなどして、評価手法の適用性確認を進めてきた。しかしながら、物性データのうち、とくにベントナイトの粘度については未だ十分に整備できていないことなどから、モデルの適用性確認に関しても課題が残されている。

本研究では、モデルの入力データの一つである緩衝材の粘度データを整備するとともに、これらを踏まえた侵入現象の予測評価手法について、実験結果のシミュレーションを行い、その適用性を確認したので報告する。

2. 粘度データの整備

緩衝材の侵入現象のモデル化では、圧縮成型体からゲルまでの広範囲におけるベントナイトの粘度のデータが必要となる。これまでに、粘弾性測定装置（レオメータ）を用いて粘度データを取得し、ベントナイトの粘度の検討を行ってきた¹⁾。この検討では、ベントナイトの粘度の基礎的なデータは得られたものの、低せん断速度域における粘度データの更なる拡充が必要であること、また、実験結果に基づく逆解析により求めた見かけの粘度が含水比 1000 %以上の高含水比域において実験結果と相違が認められる点などから、より多くの粘度データを蓄積しての検証が課題として挙げられた。

2.1 専門家によるレビュー

本研究において検討を行ってきたベントナイト材料の粘度に関して、レオロジー分野の専門家（千葉大学工学部都市環境システム学科・大坪泰文教授）に対し、既存の粘度データの妥当性、ならびに本研究で対象とする粘度の適切な測定手法に関して、レビューを依頼した。

レビュー内容は、以下のとおりである。

- ・ 粘度の測定手法の妥当性
- ・ 精度の高い測定方法の知見等
- ・ 測定結果の解釈方法の妥当性
- ・ 材料条件に関する知見等
- ・ 侵入現象モデルの妥当性
- ・ その他留意事項等

専門家のコメントを以下に要約する。

【現象理解】

- ・ 低含水比状態ではベントナイトは流動せず、固体状態であると言える。初期状態が固体であるならば、亀裂内には侵入しないはずであるが、現実に侵入しているのは流体として流動しているわけではなく、膨潤により押出されているものと考えられる。したがって、これまでに取得した低含水比域の粘度は、短時間のせん断変形負荷から求めた弾性的変形を擬似的な粘度として扱っている可能性が高い。
- ・ 本研究で対象としている長期的な挙動を正確に評価するためには、長時間応力を一定载荷するクリープ測定によって「流動状態である」と判断できる程度に载荷を継続したデータを取得すべきである。具体的には幅広い含水比状態において、変形量 300 %以上、载荷時間 3×10^4 秒以上の長期クリープ測定を行い、変形挙動が収束するか、一定割合で継続するかを把握すべきである。
- ・ 膨潤によるベントナイト粒子の移動を擬似的に拡散モデルで評価する現在の研究アプローチに大きな問題はない。ただし先述のように、「固体としての変形挙動」もしくは「液体としての流動挙動」であるかを把握し、正しく現象を理解した上で、正確な粘度の設定、評価を行

うべきである。

- ・ 本当は流動していないにもかかわらず、固体状のものを短時間で計測した結果を「流動している」としている論文もあるので注意が必要である。

【測定時の留意事項】

- ・ 過去の粘度測定において用いた測定センサーはあまり適切ではない。正確な値を把握するためには二重円筒センサー等を用いるべきである（試料からの水の蒸発を抑制するため）。固体状のものを粘度計で計測する場合は試料と計器の間でスリップが起きていないことを確認する必要がある。測定にはミゾ付きセンサー等を用い、スリップを防止することが望ましい。
- ・ 高含水比領域の粘度の測定は回転粘度測定で問題ない。ただし、現状の技術では対象としているせん断速度（ 10^{-5} s^{-1} オーダー）の測定は不可能である。高含水比になるほどせん断速度の依存性は小さくなるので、高せん断速度域の粘度から推定すればよい。
- ・ ケイ砂が混入している場合、ケイ砂粒子径の 10 倍程度の亀裂幅であれば粘性挙動に大きな影響を及ぼさない。従って粘度の測定においてセンサーギャップサイズの 1/10 以下の粒径で測定を行うべきである。また、わざわざケイ砂混合試料を用いて測定しなくてもベントナイト単体の粘度が求めれば理論的にケイ砂混合体の粘度は求まる。
- ・ ただし、亀裂幅がケイ砂粒子径の 5 倍以下（本研究で用いたケイ砂 8 号の平均粒径約 $100 \mu\text{m}$ に対してなら亀裂幅 0.5 mm 以下）になるとベントナイト粒子の流動を阻害し、全く別の流体として振舞う事が考えられる。従ってこの場合、粘度も亀裂幅の関数とすべきである。
- ・ 気になる点として、レオメーターに用いるサンプルについては、調整時に静的であるが、実際の侵入挙動では、ベントナイトは流れが生じ動的である。これらの違いによって、粘度が変わってくる可能性がある。

【侵入現象モデル化】

- ・ 非ニュートン流体にもかかわらず、模型試験から平均的なせん断速度を求め、ニュートン流体としてモデル化しているため、正確な評価になっていないと考えられる。せん断速度に応じて粘度が変化するモデルにするか、あるいはべき乗則流体の関数形に落とし込んで評価するものひとつの有効な手段である。

【今後の進め方】

- ・ 以上のことから含水比条件と測定条件としては、固体と液体の境界の判断、正しい現象理解のため、低含水比域側（固体側）での長期クリープ測定を優先的に実施することを勧める。

以上の専門家によるご意見のうち、今後の検討において重要な見解およびそれを踏まえた対応策についてまとめる。

これまでの評価アプローチや粘度測定方法自体に大きな問題はないと考えられるものの、緩衝材が亀裂内に侵入する過程は、人工バリア近傍では流体としての流動ではなく膨張による変形であり、この時の「見かけの流動」を「見かけの粘度」で流体流動方程式として解いているのが現在のモデルであると考えられる。したがって、緩衝材の亀裂内への侵入の過程において「見かけの流動」（固体の変形）と「本来の流動」（流体の流動）の境界付近の特性を詳細に調査しておくことがモデルの妥当性を評価する上で重要である。

具体的には変形から流動へ遷移すると考えられる含水比前後のベントナイト試料を用いて長時間の静的クリープ測定を行い、これらの境界の含水比を把握すること、および「本来の流動」とみなせる領域においては信頼性の高い粘度を把握することである。なお、長時間測定を行う際には試料の蒸発防止やセンサーのスリップ防止等、計測中の初期条件、境界条件の変化に十分留意する。また、レビューにおいては具体的な言及はなかったが、モデルの精度向上の観点からは、高含水比領域での粘度データの整理も必要である。

次章ではこれらを踏まえ、ベントナイト粘度データの拡充を図った結果についてまとめる。

2.2 粘度データの測定

上記のレビュー結果を踏まえ、本検討では、以下の観点よりデータの拡充を図った。

- ① 変形と流動の境界近傍の特性把握、かつ信頼性の高い粘度を把握するための長時間静的クリープ測定に関する予備検討
- ② 含水比 1000 %以上の高含水比領域におけるベントナイトゲルの粘度データの取得

2.2.1 長時間静的クリープ測定に関する予備検討

2.2.1.1 測定概要

粘度の測定には、ドイツ・ハーケ社製のレオメータ（レオストレス RS600）を用いた。装置は図 2.1 のとおり、装置仕様は表 2.1 のとおりである。

また、今回実施した長期クリープ測定の測定条件を表 2.2 に示す。クリープ測定は、回転方向に一定応力 τ を与え、その時のひずみ量 γ からせん断速度 $d\gamma/dt$ 、粘度 μ を算出する静的測定法である。粘度 μ は、応力 τ とせん断速度 $d\gamma/dt$ より、次式 (2.1) によって算出される。

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{d\gamma}{dt}} \quad (2.1)$$

これまでベントナイトの粘度を長時間の静的測定で取得した例がないため、本検討では変形と流動の境界域に辺りをつけること、データの再現性や測定方法の妥当性を把握することなどを目的とした予備検討と位置付ける。

測定に用いた試料は、ベントナイトの含水比を 300~1000 %の範囲で 100 %毎に調製し、それぞれの試料容器を傾けることで試料の流動を目視により観察し、それらを目安として 600~700 %を測定条件として設定した。また、挙動の再現性を確認するために、同条件で 2 回測定を行った。測定時間についてはひずみの経時変化がほぼ定常状態となるまでとし、結果的に 450~1550 分となった。粘度データとして必要なせん断速度域は、侵入試験の実測値から求められる平均せん断速度は $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 付近であることから、载荷応力はせん断速度が結果的に $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ に近くなるよう、それぞれの含水比で表に示す 3 ケースの载荷応力を設定した。



図 2.1 粘度測定装置（レオストレステスト RS600）

表 2.1 粘度測定装置仕様

装置名	レオメータ レオストレステスト RS600（ドイツ・ハーケ社製）	
ひずみ分解能 [μ rad]	0.012	
回転速度 [min^{-1}]	回転数制御モード：0.001~1500(4500)* 応力制御モード： 1.0×10^{-7} ~1500	
トルク [Nm]	5.0×10^{-7} (1.0×10^{-7})~0.2	
周波数 [Hz]	1.0×10^{-4} ~100 1.0×10	
ノーマルフォース* [N]	0.01~30	
センサー	コーン&プレート(C&P), パラレルプレート(PP), 共軸二重円筒	
温度制御 [°C]	循環恒温槽	-80~350 (C&P,PP), -40~200 (二重円筒) 安定性: $\pm 0.01^\circ\text{C}$
	ペルチェ	-60~180 (C&P,PP), 安定性: $\pm 0.1^\circ\text{C}$
	電気ヒーター	-80~500 (C&P,PP), 30~200 (二重円筒) 安定性: $\pm 0.1^\circ\text{C}$
測定モード	フローカーブ, 降伏値, 低せん断粘度測定, クリープリカバリー測定, 動的粘弾性測定, 熱硬化測定等	

表 2.2 測定条件（クリープ測定）

試料（ベントナイト）	クニゲル V1
間隙水	蒸留水
含水比 [%]	600, 700 : 2 水準
測定温度[°C]	25（ペルチェ素子温度制御）
測定モード	クリープ測定
載荷応力[Pa]	含水比 600% : 30, 50, 100 含水比 700% : 10, 50, 100
使用センサー	PP20S : 表面溝付きセンサー 直径 20mm, ギャップ 1.5mm
測定時間[min]	450~1550

使用したセンサーはスリップを抑えるために溝付きセンサーを用いた。また、温度は 25 °C 一定とした。なお、温度制御方法のペルチェとは、2 種の半導体の接点に電流を流すと電導率の違いから熱の移動が起こるといふ現象を利用した温度制御システムである。

2.2.1.2 測定結果

測定中の写真を図 2.2, 図 2.3 に示す。図 2.2 に示す表面溝付きセンサー (PP20S) を使用し、実際の測定時は図 2.3 に示す乾燥防止用のソルベントトラップを設置して測定を行った。ソルベントトラップ内には水を染み込ませたガーゼを置き、過飽和状態とすることで試料の乾燥を抑制している。

装置の機構上、測定前後の重量変化が計測できないため、図 2.3 に示す実際の測定と同じ環境で応力は加えず、所定の時間経過前後の試料の重量変化を事前に測定した (ただし、温度制御は行っていない)。その結果、含水比 600 % のサンプル 1.42 g の 8 時間後の減少量は 0.09 g であった。これは、含水比として約 555 % に減少したことに相当する。実際の測定では最長で 26 時間測定していることから、さらに水分が蒸発し、含水比が減少している可能性があることが考えられる。今後、より長時間の水分蒸発の程度を把握するとともに、さらに水分変化を抑える測定環境や測定方法を検討する必要がある。本検討では、測定時間と含水比変化の関係までは把握できていないため、今回のデータに際して含水比の補正は行っていない。今後の検討において詳細なデータを取得次第、補正が必要である点を注記するものとする。

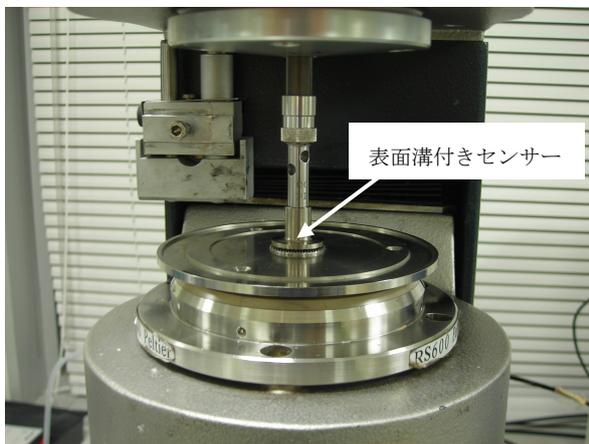


図 2.2 測定センサー (表面溝付きセンサー)

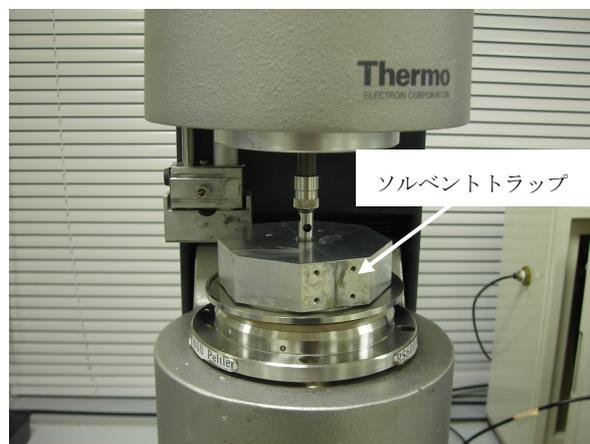


図 2.3 測定状況 (ソルベントトラップ)

図 2.4 に含水比 600 %, 図 2.5 に含水比 700 % 試料のせん断ひずみの経時変化を示す。含水比 600 % の試料は、低応力 (30 Pa) では長期的にはほぼ変形が停止したため固体状態と判断できるが、加える応力が増加すると変形は継続的に進行し流体的挙動を示す。これは、ベントナイト材料が単純に含水比のみで固体と流体に区分できないことを示し、固液境界がせん断速度域によって異なることを示している。さらに、流動状態であっても経過時間とともに傾きが変化し、同条件の 2 回の測定間でも応力 50 Pa, 100 Pa 共、1 ケースは経過時間とともに傾きが増加し、1 ケースはほぼ一定もしくは傾きが減少傾向にあり、再現性が低いものと思われる。これは、測定中に粘

度が変化していることを意味するが、水分蒸発の影響であれば、傾きが減少（粘度が上昇）する方向に作用するため、傾きの増加は計測中の含水比の変化では説明できない。この粘度の変化は含水比の影響に加え、試料とセンサープレート間のすべりやベントナイト材料の不均一性などの材料特性が要因として考えられるため、今後より詳細な検討が必要である。

一方、含水比 700% 試料では、今回設定した全ての応力において長期的にはほぼ一定の傾き（粘度が一定）であり、典型的な流体挙動を示している。ただし、低応力では 2 回の測定でやや傾きが異なった。いずれの測定ケースでも応力を加えた直後の変形の急激な増加が収束し、定常状態と判断できるまでは、おおよそ 300 分以上の測定時間が必要であることが分かる。

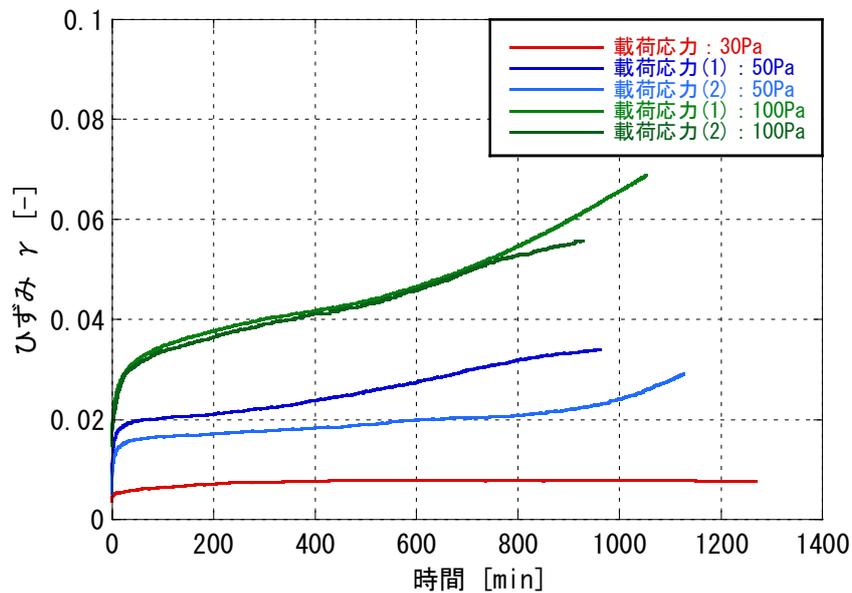


図 2.4 時間とせん断ひずみの関係（含水比 600%）

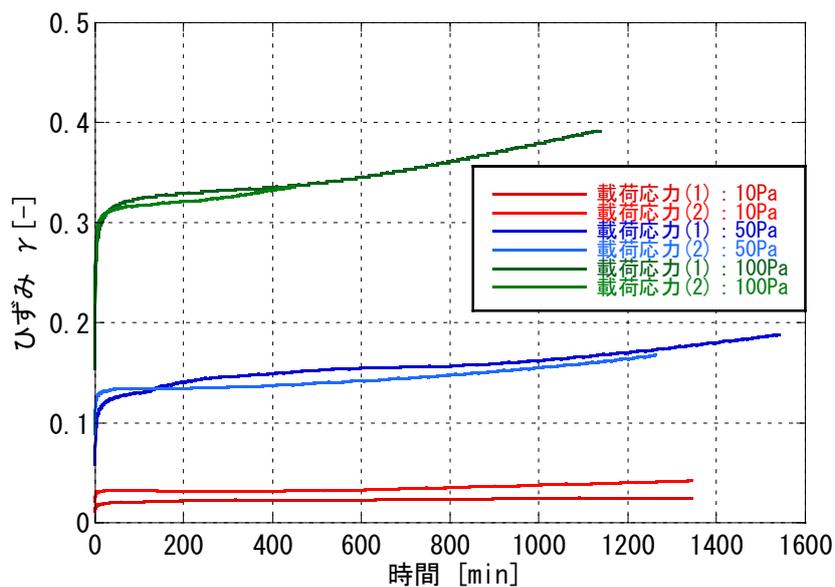


図 2.5 時間とせん断ひずみの関係（含水比 700%）

次に、測定時間 300 分～測定終了までの時間とひずみとの関係を最小二乗法により線形回帰し、その傾きからせん断速度 dy/dt を、(2.1) 式より粘度 μ をそれぞれ求め、両者の関係で整理したものを図 2.6 に示す。ここで、図中のプロット毎の数値は载荷応力を示している。なお、先述のように一部のケースで時間とひずみとの関係が線形関係から逸脱しているケースがあるが、本検討ではその挙動に対する補正は行わず、直線近似の範囲はそれぞれ 300 分～測定終了までとした。

含水比 600 %では、図 2.4 の結果から载荷応力 30 Pa ではひずみが生じていないのに対して、载荷応力 50 Pa でひずみが生じている。これはすなわち、図 2.6 において含水比 600 %では固液境界がせん断速度 $1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 付近であるということの意味する。一方、含水比 700 %では $4 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ 程度のせん断速度でも流動することが分かった。したがって目標とした $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 近傍での変形と流動との境界はより低い含水比にあると予想される。また、最大応力 (100 Pa) でもせん断速度は $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 近傍であることから、 $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 近傍の静的粘度を把握するためにはより高い応力を与える必要がある。ただし、 $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 近傍で「ニュートン流体とみなせるか」、「せん断速度依存性を有する非ニュートン流体であるか」も材料特性としては重要な情報であるが、今回得られたせん断速度領域では粘度のせん断速度依存性の有無が判断できないため、より幅広い応力条件下でデータを取得することが望ましいものと考えられる。

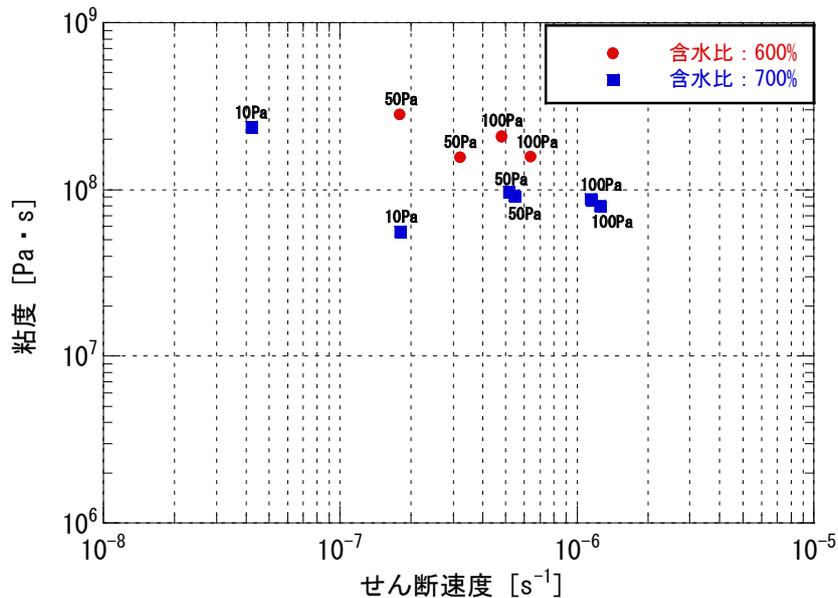


図 2.6 せん断速度と粘度の関係 (クリープ測定)

次に、既存データ¹⁾を加えたせん断速度と粘度の関係を図 2.7 に示す。既存のクリープデータとはせん断速度域が異なるため一概に比較できないが、粘度が 2 オーダー以上高いと判断できる。これは、既存のクリープ測定は測定時間が 5 分間程度であり、図 2.4、図 2.5 を見ても最初の 5 分程度は弾性的挙動が支配的であり、専門家の指摘どおり擬似的な粘度であったためである。

今回の測定データにおいて、最初の 5 分間のデータのみを最小二乗法により線形回帰し、せん断速度と粘度の関係を求めた結果を図 2.8 に示す。図ではクリープ測定データが得られたせん断速度、粘度の範囲を拡大している。また、プロット横の数字は载荷応力である。この図より、長

期的には固体と判断できる含水比 600%，応力 30 Pa のデータもこの測定時間では擬似的な粘度が求まることが分かる。このことから既存のクリープ測定データは長期的な静的粘度という観点からは精度が高いとは言い難い。

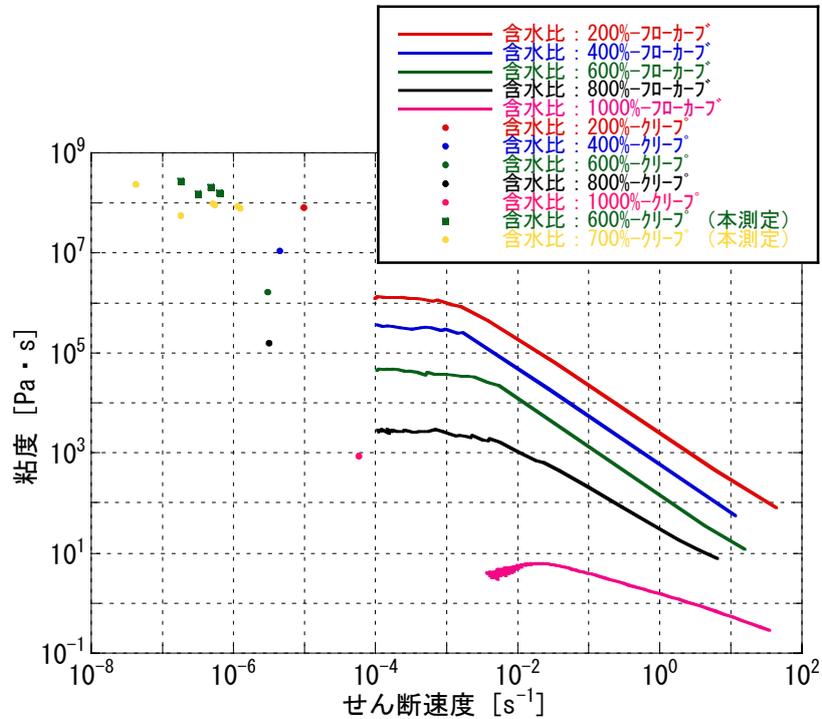


図 2.7 せん断速度と粘度の関係 (既存データと本測定データとの比較)

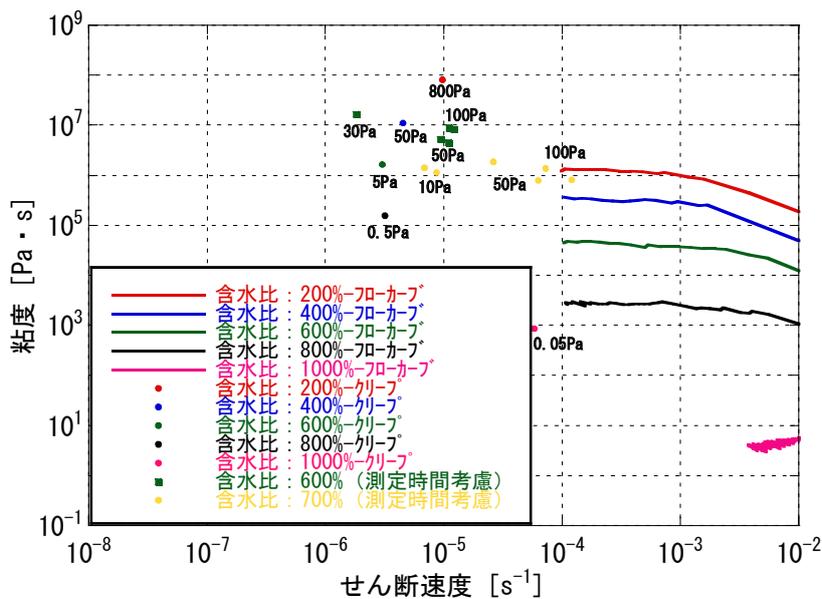


図 2.8 せん断速度と粘度の関係 (測定時間を考慮した既存データと本測定データとの比較)

2.2.1.3 知見の整理

今回のクリープ測定結果より、得られた知見を表 2.3 にまとめる。

表 2.3 測定結果より得られた知見 (クリープ測定)

	クリープ測定
測定手法	応力一定による静的測定法
出力データ	ひずみの経時変化
適用範囲	ひずみの経時変化の非線形性が強く現れる低せん断速度域
知見	<p>【測定方法について】</p> <ul style="list-style-type: none"> 乾燥防止措置を施し、スリップ防止用の溝付きセンサーを用いることで測定は可能。 せん断速度 10^{-5} s^{-1} 以下の条件では定常状態と判断できるまで 300 分以上の測定時間が必要。 ただし、測定時間 300 分以降でもひずみの経時変化の傾きが変化するケースもあることから、測定中の含水比変化量やスリップ発生の有無についてはより詳細に検討する必要がある。 <p>【結果について】</p> <ul style="list-style-type: none"> 変形と流動の境界は単純に含水比のみで区分できず、せん断速度域によってその境界は異なる。目標とした $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 近傍では 600 % 以下である可能性が高い。 $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 近傍のデータを取得するためには、600 % 以下の含水比で 100 Pa 以上の応力を与える必要がある。 既存のクリープ測定データは測定時間が 5 分間と極めて短く、専門家の指摘どおり擬似的な粘度であったことから、長期的な静的粘度という観点からは精度が高いとは言い難い。

2.2.2 長時間静的クリープ測定

長時間静的クリープ測定の予備検討の結果より、これまでに取得したクリープ測定における粘度は、測定時間が短いことによって粘度が低く見積もられている可能性が高いことが示唆されたことから、長期クリープ測定による粘度データの取得を再度実施した。

測定装置は、同様にレオストレス RS600 を用いた。測定条件は表 2.4 に示すとおりである。なお、表中における載荷応力のうち、()内の載荷ケースは、測定中における試料の流動によって測定不能となったケースを示している。測定時間については、ひずみの経過時間がほぼ定常状態となるまでとし、結果的には約 930～1430 分となった。

表 2.4 測定条件 (クリープ測定)

試料 (ベントナイト)	クニゲル V1
間隙水	蒸留水
含水比 [%]	200, 300, 400, 500, 600 : 5 水準
測定温度[°C]	25 (ペルチェ素子温度制御)
測定モード	クリープ測定
載荷応力[Pa]	含水比 200% : 500, 5000, (6000) 含水比 300% : 2000, 2500, (3000) 含水比 400% : 500, 1000, 1500, (2000) 含水比 500% : 100, 300, 1000, (1500) 含水比 600% : 100, 300
使用センサー	PP20S : 表面溝付きセンサー 直径 20mm, ギャップ 1.5mm
測定時間[min]	276～1428

2.2.2.1 測定結果

測定中における試料の含水比の変化を把握するために、重量変化を別途測定した。ただし、本測定では応力の負荷と温度制御は行っていない。試料の初期含水比が所定の含水比であるものとし、重量変化分が全て水分蒸発であるとして、経時的な含水比の変化を表 2.5 にまとめた。概ね実際の測定と同じ測定時間である 1400 分前後の時間では、200 %の試料では 4 %程度の含水比の減少であったが、300～600 %の試料では総じて 15 %前後の含水比が減少した。以後、本測定で得られた含水比で整理を行う。せん断ひずみの経時変化を図 2.9～図 2.14 に示す。なお、図 2.13 の含水比 600 %のデータは、図 2.4 の結果を含めて示している。また、図 2.14 は、図 2.5 の含水比 700 %の結果である。本結果より、総じて載荷直後のひずみは大きく変形し、その後の変形はほぼ一定もしくは時間経過に伴いひずみが漸増する挙動を示した。ひずみの割合は、測定の最終段階ではほぼ一定の割合で変化しているとし、ひずみ速度一定とみなせる区間を設定して図 2.15 に示す方法によりせん断速度と粘度を求めた。なお、この区間の設定においては、終点は測定の終了時とした。表 2.6 に粘度の測定結果を示し、これらの結果をせん断速度とせん断応力の関係、せん断速度と粘度の関係とし図 2.16 および図 2.17 に示す。また、本測定結果とこれまでに測定したクリープデータおよびフローカーブデータを、せん断速度と粘度の関係で図 2.18 にまとめる。

表 2.5 試料の含水比変化

	0min	270min	510min	1440min	含水比低下率[%]
サンプル重量[g]	0.678	0.673	0.668	0.661	96.2
土粒子重量[g]	0.226	0.226	0.226	0.226	
水分重量[g]	0.452	0.447	0.442	0.435	
重量変化量[g]	—	-0.005	-0.010	-0.017	
含水比[%]	200	198	196	192	

	0min	300min	520min	1260min	含水比低下率[%]
サンプル重量[g]	0.594	0.579	0.571	0.531	87.3
土粒子重量[g]	0.149	0.149	0.149	0.149	
水分重量[g]	0.446	0.437	0.429	0.389	
重量変化量[g]	—	-0.015	-0.023	-0.063	
含水比[%]	300	294	289	262	

	0min	300min	580min	1580min	含水比低下率[%]
サンプル重量[g]	0.581	0.578	0.568	0.533	84.1
土粒子重量[g]	0.116	0.116	0.116	0.116	
水分重量[g]	0.465	0.436	0.426	0.391	
重量変化量[g]	—	-0.016	-0.026	-0.061	
含水比[%]	400	375	367	336	

	0min	300min	580min	1580min	含水比低下率[%]
サンプル重量[g]	0.581	0.578	0.568	0.533	84.6
土粒子重量[g]	0.116	0.116	0.116	0.116	
水分重量[g]	0.465	0.436	0.426	0.391	
重量変化量[g]	—	-0.024	-0.032	-0.060	
含水比[%]	500	462	453	423	

	0min	300min	600min	1410min	含水比低下率[%]
サンプル重量[g]	0.516	0.566	0.554	0.528	87.3
土粒子重量[g]	0.074	0.074	0.074	0.116	
水分重量[g]	0.442	0.424	0.412	0.386	
重量変化量[g]	—	-0.028	-0.040	-0.066	
含水比[%]	600	575	559	524	

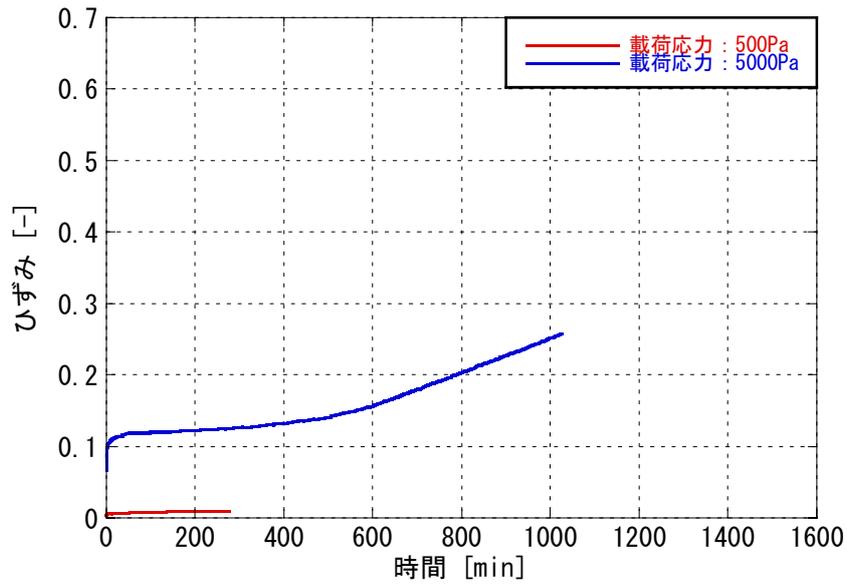


図 2.9 時間とせん断ひずみの関係 (含水比 : 200%)

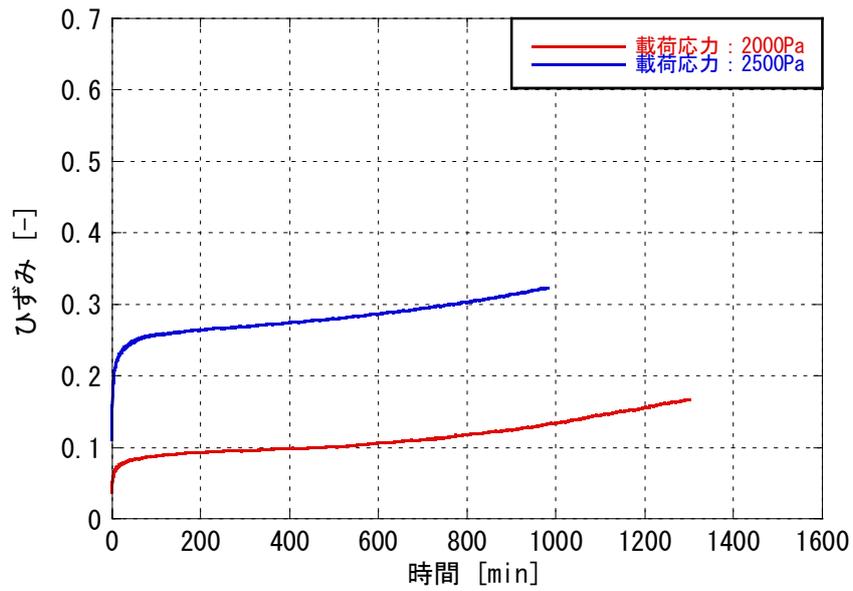


図 2.10 時間とせん断ひずみの関係 (含水比 : 300%)

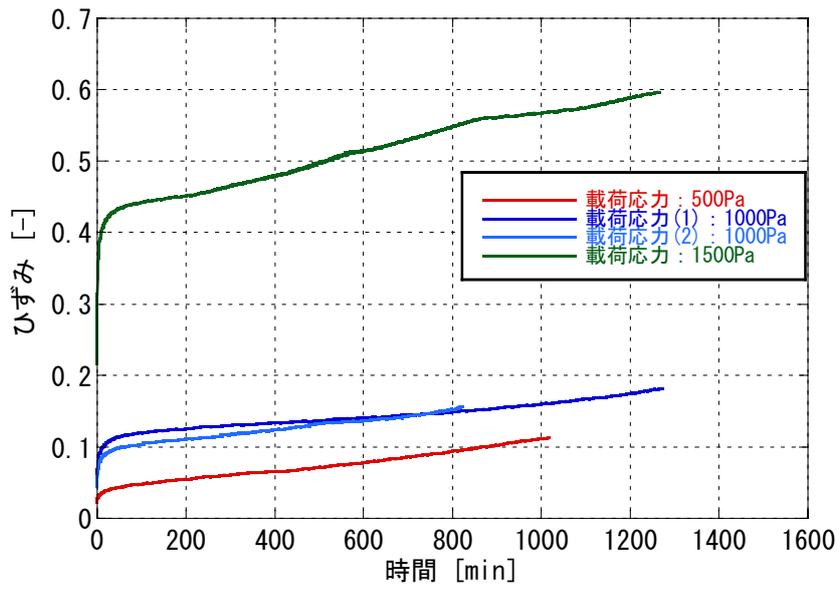


図 2.11 時間とせん断ひずみの関係 (含水比 : 400%)

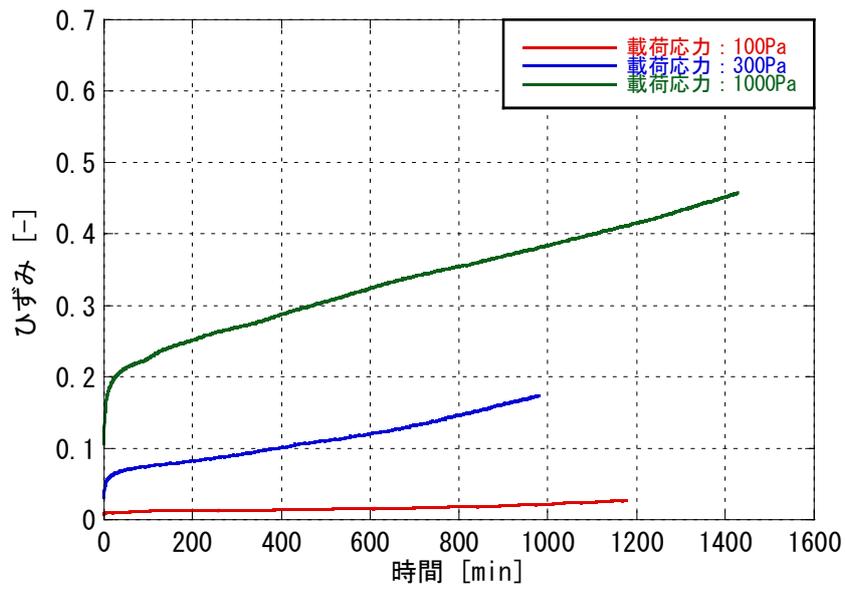


図 2.12 時間とせん断ひずみの関係 (含水比 : 500%)

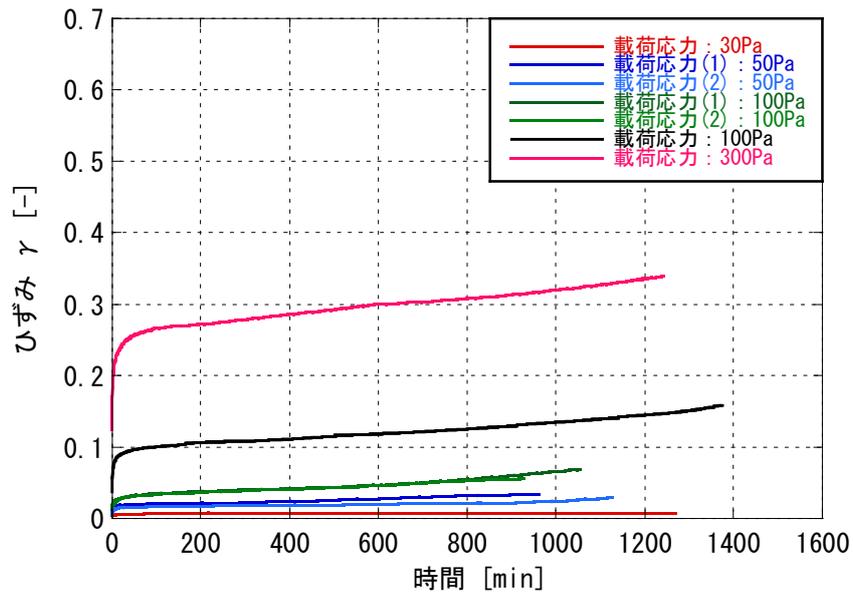


図 2.13 時間とせん断ひずみの関係 (含水比 : 600%)

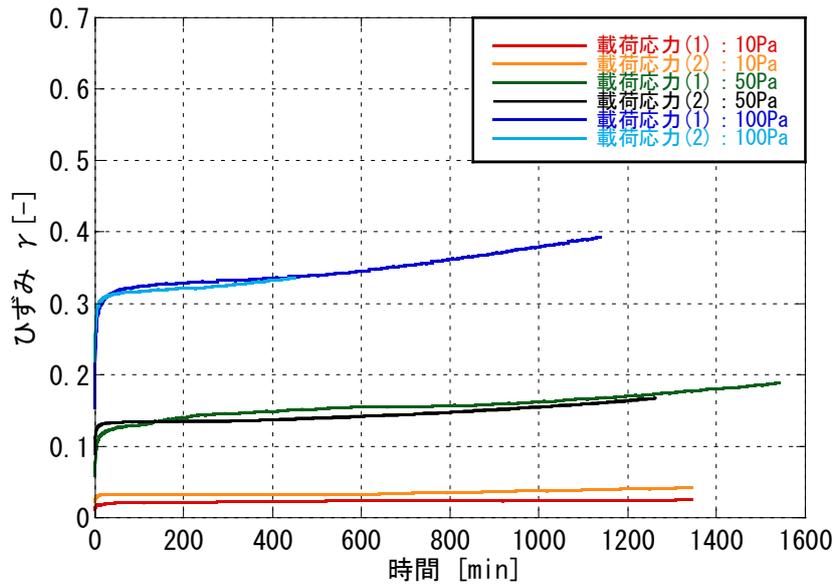


図 2.14 時間とせん断ひずみの関係 (含水比 : 700%)

表 2.6 粘度測定結果

含水比 [%]	せん断応力 [Pa]	測定時間 [min]	粘度測定対象区間		ひずみ速度 [s ⁻¹]	粘度 [Pa・s]	備考
			起点 [min]	終点 [min]			
200	500	276	200	276	5.89E-08	8.49E+09	
	5000	1025	700	1025	3.98E-06	1.26E+09	
	6000	短	—	—	—	—	サンプル破損
300	2000	1300	1000	1300	1.84E-06	1.08 E+09	
	2500	981	400	981	1.39E-06	1.80 E+09	
	3000	短	—	—	—	—	サンプル破損
400	500	1017	500	1017	1.35E-05	3.70 E+08	
	1000	1274	500	1274	9.36E-07	1.07 E+09	
	1000	821	500	821	1.15E-06	8.69 E+08	
	1500	1266	500	1266	2.04E-06	7.36 E+08	
	2000	短	—	—	—	—	サンプル破損
500	100	1178	1000	1178	4.74E-07	2.11 E+08	
	300	980	600	980	2.41E-06	1.25 E+08	
	1000	1428	500	1428	2.61E-06	3.84 E+08	
	1500	短	—	—	—	—	サンプル破損
600	30	1270	300	1270	—	—	固体挙動
	50	960	300	960	3.21 E-07	1.56 E+08	
	50	1127	300	1127	1.78 E-07	2.81 E+08	
	100	1053	300	1053	6.35 E-07	1.58 E+08	
	100	929	300	929	4.79 E-07	2.09 E+08	
	100	1375	800	1375	8.89 E-07	1.13 E+08	
	300	1242	500	1242	9.75 E-07	3.08 E+08	
700	10	1344	300	1344	4.22 E-08	2.37 E+08	
	10	1343	300	1343	1.79 E-07	5.58 E+07	
	50	1541	300	1541	5.15 E-07	9.70 E+07	
	50	1262	300	1262	5.44 E-07	9.19 E+07	
	100	1139	300	1139	1.25 E-06	8.02 E+07	
	100	450	300	450	1.14 E-06	8.75 E+07	

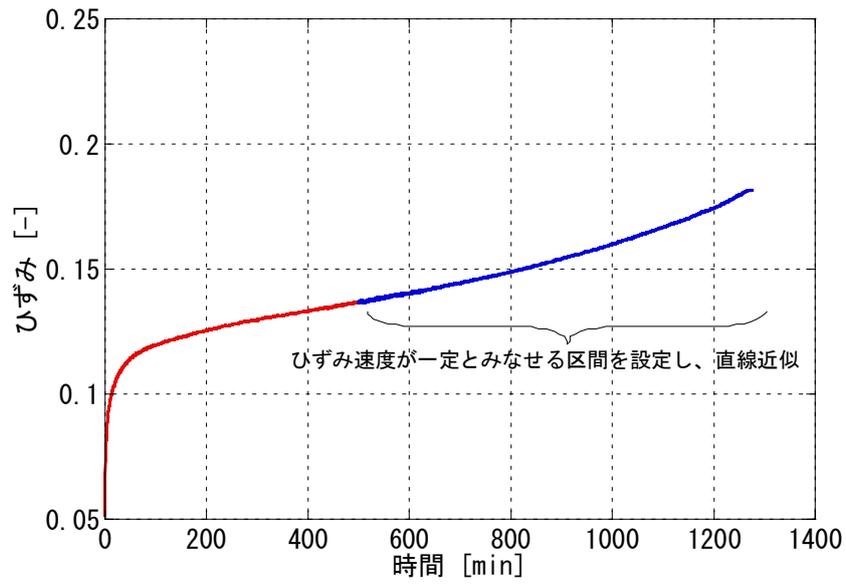


図 2.15 セン断速度と粘度の算出方法

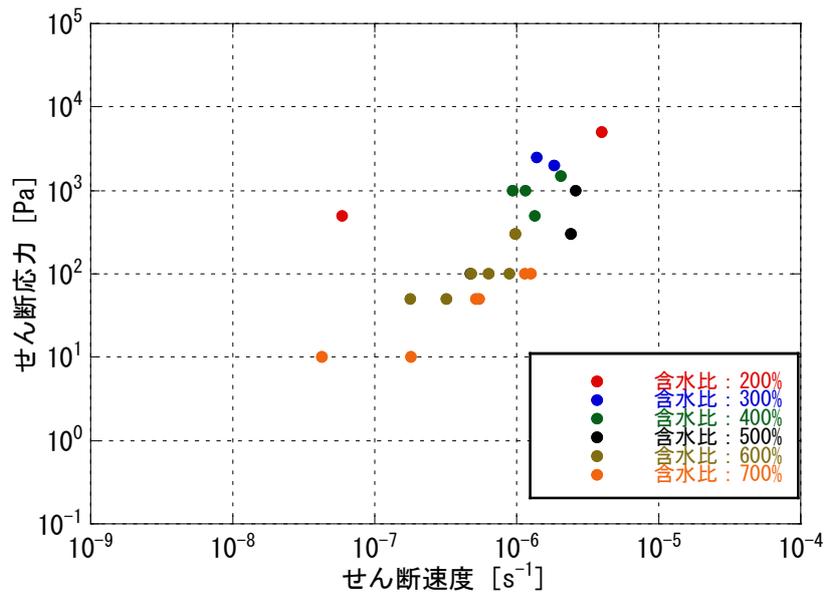


図 2.16 セン断速度とせん断応力の関係

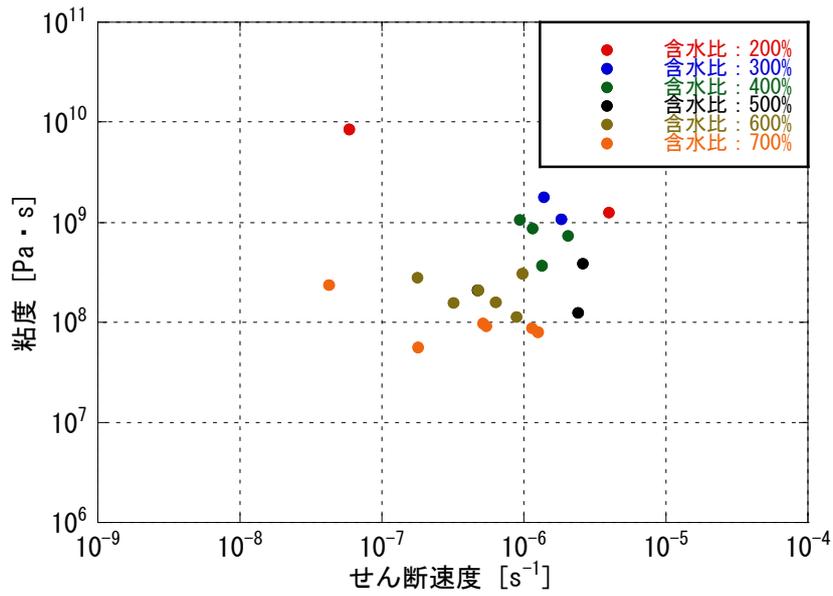


図 2.17 せん断速度と粘度の関係

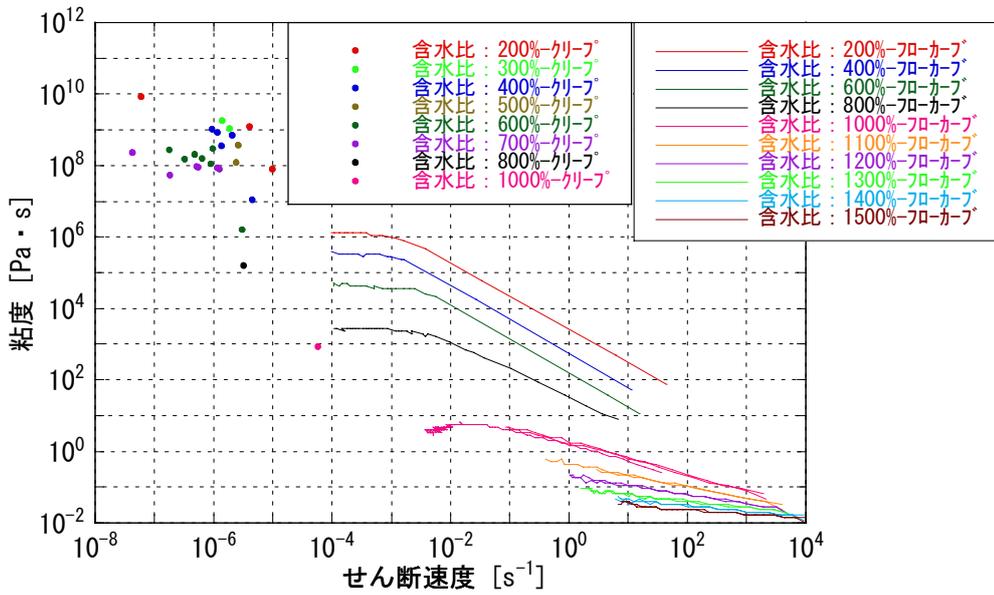


図 2.18 せん断速度と粘度の関係 (全データ)

これらの測定結果より、以下のようなことが分かった。

- ① 粘度算出上、測定の最終段階ではほぼ一定割合で変化しているとみなしたが、時間経過に伴いせん断速度が漸増（粘度が漸減）するケースも多く、実際にはベントナイトの粘度は複雑な時間依存性を有している。
- ② 既存のクリープデータ、フローカーブデータは新規に測定したクリープデータより 2～7 オーダー程度もせん断速度が速く、粘度も 3 オーダー以上低い。これは、既存のクリープ測定での測定時間は 5 分間、フローカーブ測定は载荷応力を連続的に変化させ、クリープ測定より極めて短時間の測定によりせん断速度と粘度との関係を求めていることから、長期の時間スケールの観点からはデータの信頼性は低い。
- ③ 測定時間の影響を把握するため、既存のクリープデータの最初の 2～5 分の区間に限定して時間とひずみとの関係を最小二乗法により線形回帰し、せん断速度と粘度との関係を求めた結果を図 2.19 に示す。既存のクリープデータの载荷応力は、含水比 200 %が 800 Pa, 400 %が 50 Pa, 600 %で 5 Pa であり、本測定データとは応力が異なること、また短時間測定によって求められた粘度であること等の条件の違いがある。両者の測定時間を同等にして粘度を求めることで本測定データと既存データは概ね近づく値を示す。このことから、既存のクリープデータは測定時間が十分でなかったものと推察される。
- ④ 含水比 500 %以下の試料でしか実測していないが、せん断応力を大きくすると極めて早い段階で試料が破損して測定不能となった。したがって、応力が高くなると変形に流動が追従せず、せん断破壊に至るものと考えられる。せん断破壊を起すということは、図 2.17 に示す各含水比における最大せん断速度 (10^{-6} s^{-1} オーダー) 以上で流動はしないということになるが、本当にこのせん断速度以上では流動しないのか、測定方法に問題があるのかは十分に把握できていない。測定方法の問題だとすれば、パラレルセンサーによる測定では側方応力によって拘束されていないため、実際の流動場より低いせん断速度で破損してしまっただことが考えられる。より速いせん断速度領域で長期的に定常的に流動するのか、またのその場合の粘度がどの程度なのかは、今後、測定方法の工夫等により詳細に検討する必要がある。
- ⑤ 今回のクリープデータの含水比 600 %、せん断応力 30 Pa のケースは弾性変形後のひずみはほとんど生じなかったことから粘度は無限大となるが、50 Pa では降伏し流動を開始している。他の含水比条件においては今回载荷した最小せん断応力でも流動したため、同様に降伏応力を有するかどうかは、さらに低せん断応力载荷時のデータを取得する必要があるが、含水比 600 %以下であれば試料ビンを横にしても流動しないことから、600 %程度以下は同様の降伏特性を有すると考えられる。また、図 2.16 より、流動するせん断応力範囲ではせん断速度の対数とせん断応力の対数の関係はほぼ 45° であり、図 2.17 から粘度に顕著なせん断速度依存性は認められない。含水比 600 %は、ビンガム流体的な特性を示し、小さいせん断応力では流動が発生せず、あるせん断応力に達すると流動する流体である。
- ⑥ 含水比が高くなるほど粘度の時間依存性は顕著でなくなることから、短時間測定（フローカーブ測定）による測定でもデータの信頼性は高くなると言える。これについては、今回測定した含水比 700 %を超える試料でも同様にせん断応力をパラメータとして長時間クリ

ープ測定を行うことで、フローカーブ測定によるデータの信頼性を検証する必要があるが、含水比が高くなるほど分散系の挙動に近づくと考えられ、擬塑性流体とみなしても問題ない可能性が高い。

- ⑦ ただし、含水比 800 %は乾燥密度に換算すると約 0.12 Mg m^{-3} といった低密度であり、これは侵入密度分布測定における侵入先端部の乾燥密度と同程度となる。この乾燥密度近傍においては、侵入のドライビングフォースとなる膨潤圧はほぼ 0 になることから、固相拡散係数も同様に 0 となることを意味する。すなわち、800 %を超える含水比状態は自由膨潤状態で粒子間力がバランスした状態のベントナイトゲルに、それ以上の水を加えた状態に相当し、粘度は固相拡散係数に寄与しない可能性が高い。このことから、今後は実現現象の把握、モデルの高度化と並行して、高含水比域の詳細な粘度データの取得の必要性を判断する必要がある。

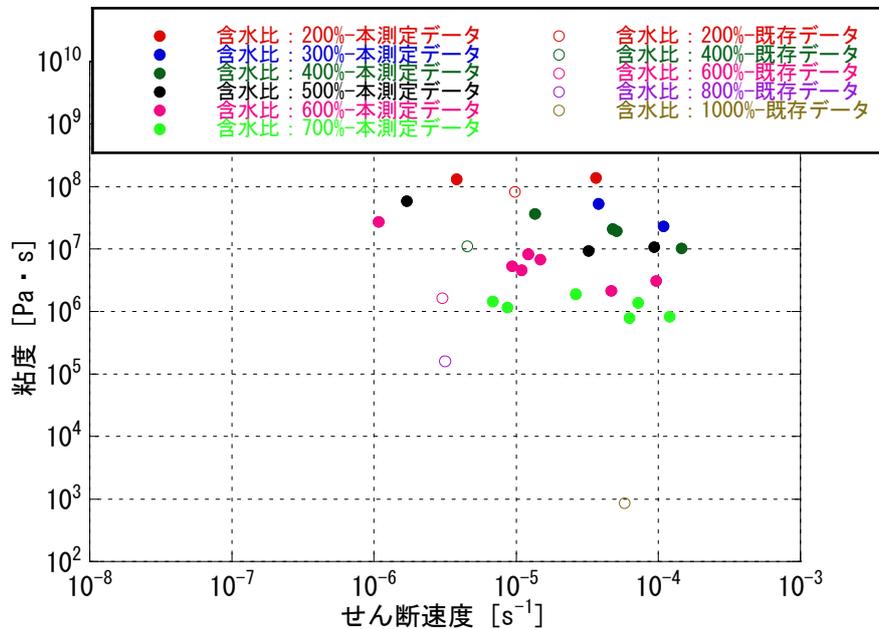


図 2.19 せん断速度と粘度の関係 (既存データと本測定データを同等な測定時間で再計算)

2.2.3 フローカーブ測定

侵入試験に基づく逆算値より求めた見かけの粘度 η は、実測に基づく粘度の推定値よりも高含水比領域において大きくなる傾向がある。また、この見かけの粘度は、含水比 1400 %まで計算上求められており、これは侵入試験において含水比 1400 %に相当するベントナイトゲルの密度が存在していることを意味している。したがい、高含水比領域における実測の粘度データを取得して整理しておくこと、また、それらのデータに基づき見かけの粘度に関する妥当性を確認しておく必要がある。以上のことを踏まえ、本検討では高含水比領域における粘度測定を行った。

フローカーブ測定には長期静的クリープ測定と同様にレオメータ（レオストレステス RS600）を用いた。測定条件を表 2.7 に示す。フローカーブ測定は、回転方向に与える応力 τ を連続的に増加させ、瞬間的なひずみの変化量からせん断速度域の粘度 μ を算出する動的測定法である。粘度 μ は、応力 τ とせん断速度 dy/dt より、(2.1) 式によって自動計算される。

表 2.7 測定条件（フローカーブ測定）

試料（ベントナイト）	ベントナイト単体（クニゲル V1）
間隙水	蒸留水
含水比 [%]	1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 : 6 水準
測定温度 [°C]	25（ペルチェ素子温度制御）
測定モード	フローカーブ測定（応力制御回転粘度測定）
応力 [Pa]	0.02～100
使用センサー	PP60：パラレルプレートセンサー 直径 60mm, ギャップ 0.5mm
測定時間 [min]	2

2.2.3.1 測定結果

測定中の写真を図 2.20 に示す。図に示すパラレルプレートセンサー（PP60）を使用し、実際の測定時はクリープ測定同様、図 2.3 に示す乾燥防止用の溶剤トラップを設置して測定を行った。測定結果を図 2.21 に示す。図中の凡例は含水比を表している。各含水比に対して 2 回ずつ測定を行っており、2 回の測定結果がほぼ一致していることから、データの再現性を確認している。図より、今回測定した全ての含水比および得られたせん断速度領域において、粘度のせん断速度依存性が認められ、非ニュートン流体の挙動を示した。また、含水比が高くなるほど粘度は低下する結果となったが、含水比 1500 %でも水の粘度（0.001 Pa・s at 20 °C）に比べ 1 オーダー以上高いものとなった。図 2.22 に含水比 200～1000 %で同様に粘度の測定を行ったフローカーブ測定の結果と今回の測定結果を併せて示す。なお既存データは本検討と同じベントナイト単体、蒸留水の結果である。両結果のうち、全く同条件で測定した結果は含水比 1000 %であり、両結果がほとんど同じであることから結果の再現性が確認でき、1000 %以上/以下の含水比データの連続性が担保されていると言える。

2.2.1 節では、クリープ測定によるひずみの経時変化の非線形により、最初の 5 分程度の測定では長期的な静的粘度という観点からは精度が低いと指摘したが、一般にはこの非線形性はせん断速度が遅いほど顕著に表れる。高含水比試料を対象とした場合はせん断速度が速くなるほど定常

状態になるのも早く、非線形性は無視し得ることから、短時間の測定でも信頼性を有していると予想される。非線形性の影響を受けるせん断速度域は含水比によっても異なると考えられるが、図 2.22 より含水比 200~1000 %の試料で遅いせん断速度で粘度が頭打ちになっている領域がある。これが、非線形性の影響を有意に受けている領域と考えられ、言い換えれば、粘度がせん断速度依存性を有している領域の結果はある程度信頼性が高いものと判断できる。ただし、理想的にはクリープ測定により非線形性の影響の程度を確認することが望ましい。

低いせん断速度域での実測値を得るためには载荷応力を小さくする必要があるが、非線形性の影響を無視できる信頼性の高いせん断速度範囲は、総じて目標としたせん断速度 $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ より速い。特に、1000 %以上の高含水比になると、最小応力でも 4~6 オーダー速いデータしか得られない。このことから、せん断速度依存性が $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 付近まで成立し、外挿することが妥当かどうかは、クリープ測定の結果と合わせ一般的な分散系材料の特性も踏まえた上で、判断する必要がある。ただし、少なくとも含水比が高くなればなるほど、水の粘度に近づくはずであり、その意味では収束値は既知である。

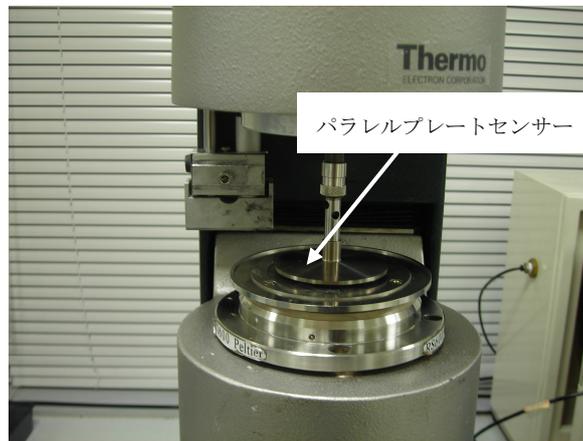


図 2.20 測定状況

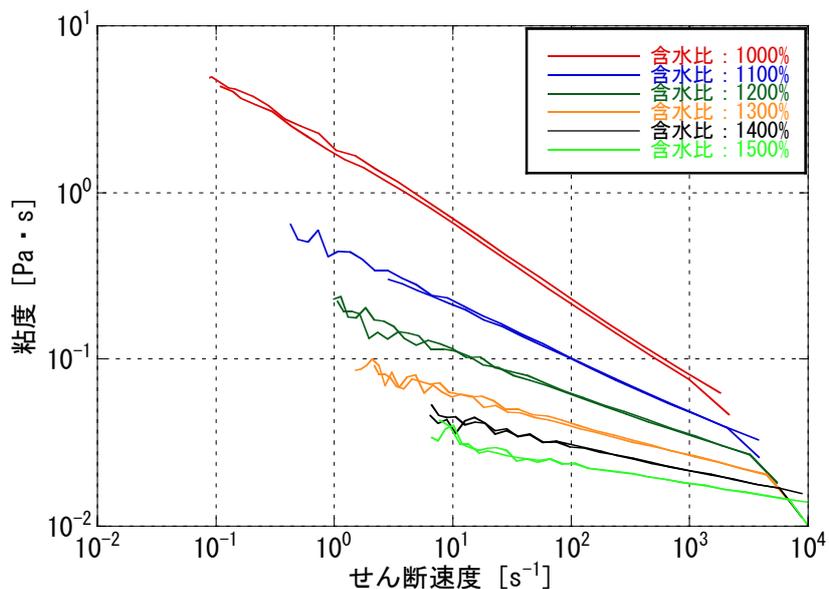


図 2.21 せん断速度と粘度の関係 (フローカーブ測定)

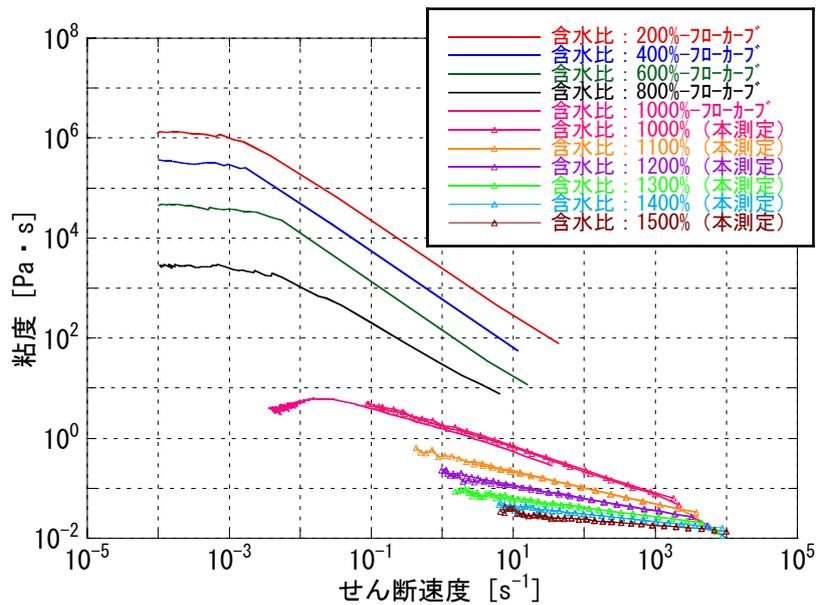


図 2.22 せん断速度と粘度の関係 (既存データ含む)

2.2.3.2 測定結果の整理

今回の測定結果から明らかとなった知見を表 2.8 にまとめる。

また、以上の知見から今回得られたクリープ測定結果および全てのフローカーブ測定結果のうち、粘度がせん断速度依存性を示す範囲のデータは信頼性が高いと判断できることから、これらのデータのみをまとめて図 2.23 に示す。図より結果的には最も必要なせん断速度 $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 付近のデータが抜けてしまっている。より詳細な知見を得るためには広範囲の含水比、応力条件における長期クリープ測定を行う必要があるが、含水比 600 %、700 % の結果より、フローカーブ測定による粘度の線形関係はせん断速度 10^{-7} s^{-1} オーダーまで直線近似できそうである。ただし、先述のとおり測定中に水分が蒸発し含水比が少なくとも 50 % 程度減少している可能性もあるが、含水比補正を行っていないことや、クリープ測定による結果の相関性については十分に把握できていないため、現状では幅を持った予測にとどめる。

表 2.8 測定結果より得られた知見の整理

	フローカーブ測定
測定手法	応力連続可変による動的測定法
出力データ	せん断速度-粘度関係の自動計測
適用範囲	ひずみの経時変化の非線形性の無視し得る高せん断速度域
得られた知見	<p>【測定方法について】</p> <ul style="list-style-type: none"> 理想的にはどの程度のせん断速度以上であれば非線形が無視し得るかはクリープ測定により確認することが望ましい。 <p>【結果について】</p> <ul style="list-style-type: none"> 既存データと合わせて 200~1500 %の含水比試料の測定を行ったが、含水比が高くなるほど粘度は低下し、また、強いせん断速度依存性が認められ、非ニュートン流体の挙動を示した。 粘度がせん断速度依存性を示す範囲はある程度信頼性が高いデータであると判断できる。 フローカーブ測定は、目標としたせん断速度 $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ より速いせん断速度域のデータがとれないことから、せん断速度依存性が $1.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 付近まで成立し、外挿するのが妥当であるかは、クリープ測定の結果と合わせ、一般的な分散系材料の特性も踏まえて判断する必要がある。ただし、少なくとも含水比が高くなれば、水の粘度に収束する。

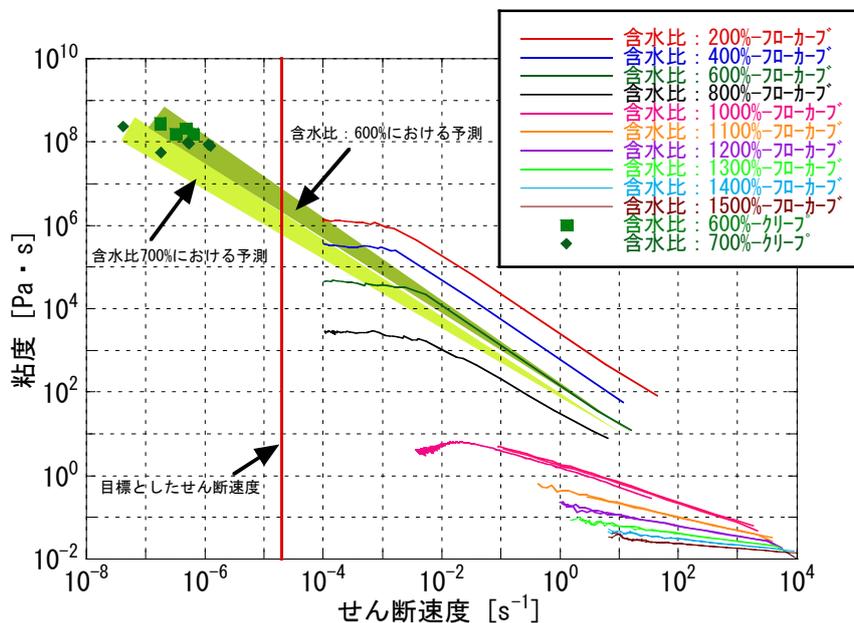


図 2.23 せん断速度と粘度の関係

2.3 考察

図 2.23 に基づき、含水比と粘度の関係において今回の検討で得られた知見を整理したものを図 2.24 に示す。今後はまずクリープ測定データを拡充し、図 2.24 の知見（含水比と粘度との関係に関する予測）の精度を向上させる必要がある。本来はその成果を受けてから行うべきであるが、現時点の知見に基づき考察する。

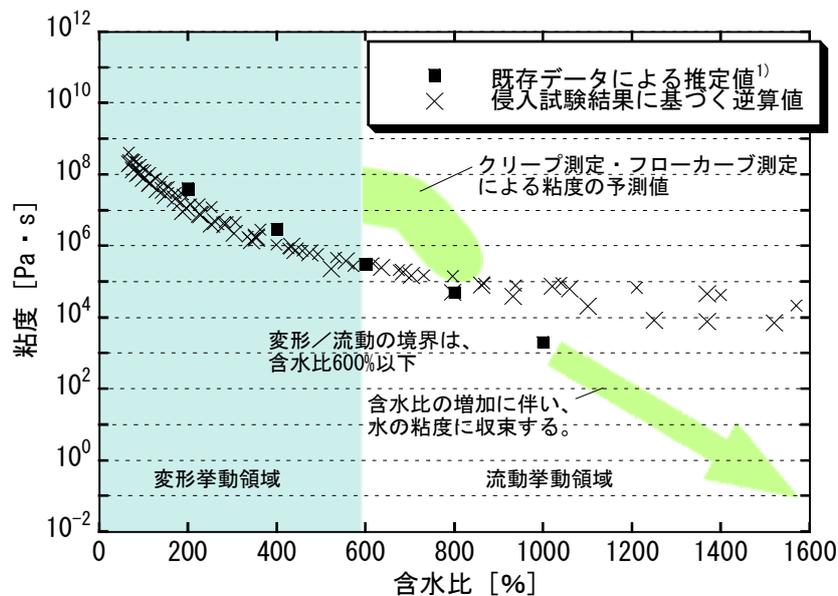


図 2.24 測定結果に基づく含水比と粘度の関係整理

図 2.24 の侵入試験に基づく粘度の逆算結果と粘度の実測から求められる推定結果との比較において特筆すべき点は以下のとおりである。

- ・ 侵入試験の逆算値は含水比 800 %以上で顕著な粘度の低下は認められないのに対し、粘度の実測に基づく推定結果では含水比 800 %以上において粘度が低下する傾向が見られ、基本的に傾向が異なる。
- ・ 含水比 600 %では、せん断応力が増加することでビンガム流体的な挙動を示して流動することから、変形と流動の境界は含水比 600 %以下に存在すると予想される。また、変形挙動領域は粘度が無量大となるが、実測の粘度データより求められる推定値ならびに侵入試験の逆算値においては見かけの粘度としての値が存在する。
- ・ 高含水比領域においては流動挙動が支配的となるため、理論上は水の粘度に近づくはずであるが、侵入試験の逆算値は 1×10^{-4} Pa·s 近辺で収束しており、著しく乖離している。

これらの傾向の違いは以下の要因によるものと考えられる。

- ・ 含水比が低い変形挙動領域での実際の移動現象は専門家の指摘のとおり、圧力勾配によって流動しているのではなくベントナイトが層間に水を取り込み粒子が膨潤することで亀裂内に粒子が押し出されることによって発生していること。
- ・ 変形と流動の境界付近とみなせる領域においては、単純に変形領域は変形のみ、流動領域は流

動のみで挙動している訳ではなく、両挙動が作用していると予想されること。

- ・ 侵入試験における高含水比域（低固相率域）では、ベントナイト粒子の亀裂壁面への吸着、目詰まり効果などの拡散遅延効果等によって見かけ上の粘度が大きくなっていると考えられること。
- ・ これまでの測定結果からベントナイトの粘度はせん断速度依存性を有しており、非ニュートン流体として扱う方が現実的であるが、現在のモデルではニュートン流体と仮定していること。
- ・ 侵入試験の逆算結果はX線CTによる密度測定結果や膨潤圧の近似式を用いて逆算しているが、含水比 1000 %は乾燥密度にして約 0.1 Mg m^{-3} （固相率：0.036），1600 %は約 0.06 Mg m^{-3} （固相率：0.023）に相当し、含水比が高くなるほど数値の精度が著しく下がると考えられるため、多分に不確実性を含んでいること。

などである。

現在のモデルは含水比全域においてある粘度を有する平行平板中の定常クリープ流れという移流モデルに相当するが、実際は上述のような種々の現象が複合的に作用している複雑な現象であると考えられる。また、実測より推定されるベントナイトの粘度と侵入実験より求めた逆算値とは合致しないことから、逆算値が持つ物理的な意味は小さく、種々のメカニズムや不確実性を含んだ「侵入試験環境で適用し得る見かけの粘度」と位置付けられる。

2.4 適切な測定・評価上の要求性能およびデータの信頼性評価

これまでの一連の検討から、幅広い含水比およびせん断速度域で異なった挙動を示すことが明らかとなり、精度の高い粘度データを取得するためには試料の状態に応じた適切な方法で測定する必要がある。ここでは、これまでの検討結果から得られた知見に基づき、試料の状態に応じた適切な測定・評価に関する要求性能を整理した。また、これまでに得られた粘度データの妥当性についてもあわせて評価を行った。表 2.9 に適切な測定・評価を行うための要求性能の整理結果を、表 2.10 に粘度データの信頼性評価の結果を示す。表 2.10 に示すとおり、既存のクリープデータ、フローカーブデータの測定時間は短く、本測定のクリープデータと比べてもせん断速度と粘度との関係に有意な差があることから、データを活用する場合には注意が必要である。本測定のクリープデータはほぼ要求性能を満たした測定方法であり、データの信頼性は高い。ただし、载荷応力を大きくすると試料が破損したため、より高いせん断速度域の粘度を測定するためには測定方法を別途検討する必要がある。また、含水比が高いほど粘度の時間依存性は顕著でなくなるため、高含水比域はフローカーブ測定でも長期挙動とは大きく乖離していないと思われるが、時間依存性の程度の定量的把握や、このせん断速度依存性の関係が低せん断速度域まで成立するか否かは、低载荷応力の長期測定等により確認する必要がある。

表 2.9 含水比の状態に応じた適切な測定・評価上の要求性能

含水比低 (200 [%])	含水比高 (1600 [%])
<p>共通事項</p> <ul style="list-style-type: none"> ・測定中は温度を一定に制御すること。 ・測定中は、試料の乾燥により含水比が変化するため、水分の蒸発を抑制する対策を講じるとともに、測定前後の重量測定により含水比の変化量を把握すること。 	
<ul style="list-style-type: none"> ・含水比が低いほど载荷応力が高くなるため、試料とセンサー間のすべりに対する対策を講じること。 ・せん断応力（せん断速度）が大きくなると試料が破損する可能性が高いことから、試料の破損を防止するよう測定方法の対策を講じること。 ・試料の粘度が時間依存性を示すため、応力制御载荷の場合はひずみ速度、ひずみ制御の場合は応力がほぼ一定と判断できるまで载荷を継続する長時間の測定を行うこと。 	<ul style="list-style-type: none"> ・含水比が高いほど粘度の時間依存性は、小さくなるため、载荷応力を連続的に変化させるフローカーブ測定により広範囲なせん断速度域の粘度を効率的に把握すること。 ・ただし、粘度の時間依存性の程度は含水比によって連続的に変化するため、数ケースの長時間の測定によりフローカーブ測定の適用範囲を把握する、もしくはデータの補正を行うこと。

表 2.10 粘度測定データの信頼性評価

データ区分	測定条件	信頼性評価結果
既存のデータ ¹⁾ (クリープ測定)	測定装置：レオストレ ス RS600 試料：ベントナイト単体 ケイ砂 30wt%混合体 浸潤水：蒸留水，人工海水， 幌延地下水 含水比：25～1000% 測定温度：25℃（温度一定制御） 測定時間：5分	本測定データより，ひずみ速度が安定するまでおよそ 300 分を要することが明らかとなり，測定時間が 5 分の既存データはひずみ速度を速く，かつ粘度を小さく見積もっており，静的な粘度としての精度は低いものと考えられる。
既存のデータ ¹⁾ (フローカーブ測定)	測定装置：レオストレ ス RS600 試料：ベントナイト単体 ケイ砂 30wt%混合体 浸潤水：蒸留水，人工海水， 幌延地下水 含水比：200～1000% 測定温度：25℃（温度一定制御） 測定時間：2分	既存データは，低含水比から高含水比までをフローカーブ測定により求めたが，固体域となる低含水比域ではひずみ速度が安定するまでおよそ 300 分を要する。したがって，測定時間が数秒の低含水比における既存データはひずみ速度が速く，かつ粘度を小さく見積もっており，静的な粘度としての精度は低いものと考えられる。
本測定データ (クリープ測定)	測定装置：レオストレ ス RS600 試料：ベントナイト単体 浸潤水：蒸留水 含水比：200～700% 測定温度：25℃（温度一定制御） 測定時間：276～1428分	長時間载荷によるデータであり，データの信頼性は高いものと考えられる。ただし，载荷応力を大きくすると試料が破損したため，より高いせん断速度域の粘度を測定するためには測定方法を別途検討する必要がある。
本測定データ (フローカーブ測定)	測定装置：レオストレ ス RS600 試料：ベントナイト単体 浸潤水：蒸留水 含水比：1000～1600% 測定温度：25℃（温度一定制御） 測定時間：5分	粘度の時間依存性はある程度低く，クリープ測定における長時間測定との乖離は含水比が高くなるほど少ないものと考えられる。ただし，必要なせん断速度域より数オーダー速く，この関係が低せん断速度域まで成立するか否かは，クリープ測定による低载荷応力の長期測定等により確認が必要である。

3. 侵入現象モデルの適用性の確認および検討

本章では、2章で報告した粘度データに基づき、それらをモデルの入力データに適用して、侵入試験結果のシミュレーション解析によりモデルの適用性について確認を行った。なお、本解析コードとして用いた **Dtransu-2D・EL** の概要について記すとともに、解析コード **ABAQUS** の解析から検証問題を設定し、結果の比較を行うことで解析コードの妥当性を検証した。

3.1 解析コードおよび改良項目の概要

解析コードには **Dtransu-2D・EL** (以下、**Dtransu** という) を使用した。**Dtransu** はオイリアン・ラグランジアン法による飽和・不飽和浸透流-移流・分散解析プログラムで、鉛直2次元、平面2次元、及び軸対称モデルにおける、密度勾配を考慮した飽和・不飽和浸透流及び移流・分散問題を対象とした解析コードである。特に、移流・分散解析においてオイリアン・ラグランジアン手法を用い、高ペクレ数から低ペクレ数の問題に対して安定した解析が可能である²⁾。本コードはソースが公開されており、自由な改変が認められている。ただし再配布は認められていない。

Dtransu のオリジナルの機能では拡散(分散)現象に関するパラメータとして、分子拡散係数、縦分散長、横分散長を設定することとなっている。これらの値は圧力等の変化によらず一定値として取り扱われる。本研究で取り扱う緩衝材の亀裂内挙動の既往の研究ではこの現象を固相拡散理論で表しているが、その際、拡散係数(分散係数)が固相率に応じて変化するモデルとなっている。このモデルを **Dtransu** で扱うために、拡散係数が固相率(**Dtransu** の機能では濃度に該当する)の関数として表すことができるよう、改変を加えた。具体的には以下の機能を付加した。

- ・ 固相率-相対分散係数のテーブルデータを入力、記憶する機能
- ・ 固相率に応じて上記データから相対分散係数を求め、それを分散係数に掛ける機能

この機能により分散係数を固相率に応じて変化させることができるようになった。なお、相対分散係数とは、基準となる固相率における分散係数と各固相率における分散係数の比である。

固相率-相対分散係数のテーブルデータは以下のように入力する。

CTABLE								
/ConcRatio (%) - D								
1	11							
	0.0	1.000	10.0	1.000	20.0	1.000	30.0	1.000
	40.0	1.000	50.0	1.000	60.0	1.000	70.0	1.000
	80.0	1.000	90.0	1.000	100.0	1.000		
2	11							
	0.0	0.000	10.0	1.000	20.0	1.000	30.0	1.000
	40.0	1.000	50.0	1.000	60.0	1.000	70.0	1.000
	80.0	1.000	90.0	1.000	100.0	1.000		

「CTABLE」は固相率-相対分散係数テーブルデータであることを示すためのラベルである。データの1行目、1~5文字のカラム内に材料番号、6~10文字のカラム内にテーブルデータのデータ数(固相率-相対分散係数で1組とし、それが何組あるか)を記述する。データの2行目以降は固相率と相対分散係数の値を1組ずつ記述する。固相率、相対分散係数ともそれぞれ10文字

分のカラム内に記述し、1行につき80文字（すなわち4組分）までの記述とし、続きがある場合は改行して複数行に渡って記述する。なお、行頭が「/」で始まる行はコメント行として Dtransu ではデータとして認識されない。

改良された Dtransu の中では分散係数は相対分散係数を用いて以下（3.1式）のように取り扱われる。

$$\begin{aligned} D_L &= (\alpha_L v_L + D_m) \times D_r \\ D_T &= (\alpha_T v_T + D_m) \times D_r \end{aligned} \tag{3.1}$$

$D_{L,T}$ は縦、横方向の分散係数、 $\alpha_{L,T}$ は縦、横分散長、 $v_{L,T}$ は縦、横方向の流速、 D_m は分子拡散係数、 D_r は相対分散係数である。

3.2 解析コードの検証

ここでは、改良した Dtransu による解析の妥当性を検証するために、ABAQUS を用いて行った解析から検証問題を設定し、結果の比較を行った。対象とした検証問題は侵入密度分布測定試験の解析である¹⁾。ABAQUS と同様の拡散解析とし、拡散係数の濃度関数テーブルを ABAQUS Input データに基づき設定した。ABAQUS における数値解析に相当する解析結果を図 3.1、図 3.2、図 3.3、図 3.4 に示す。また、図 3.3 の解析で用いたメッシュおよび濃度コンターを図 3.5、図 3.6 に示す。ただし、図 3.3 の解析は、本来はモデルに基づく固相拡散係数による解析であるはずであるが、実験に基づく固相拡散係数による解析の結果が記載されているため、Dtransu による解析もこれと同様とした。以上の結果から、ABAQUS と Dtransu の解析結果はほぼ一致し、解析コードの妥当性が検証された。

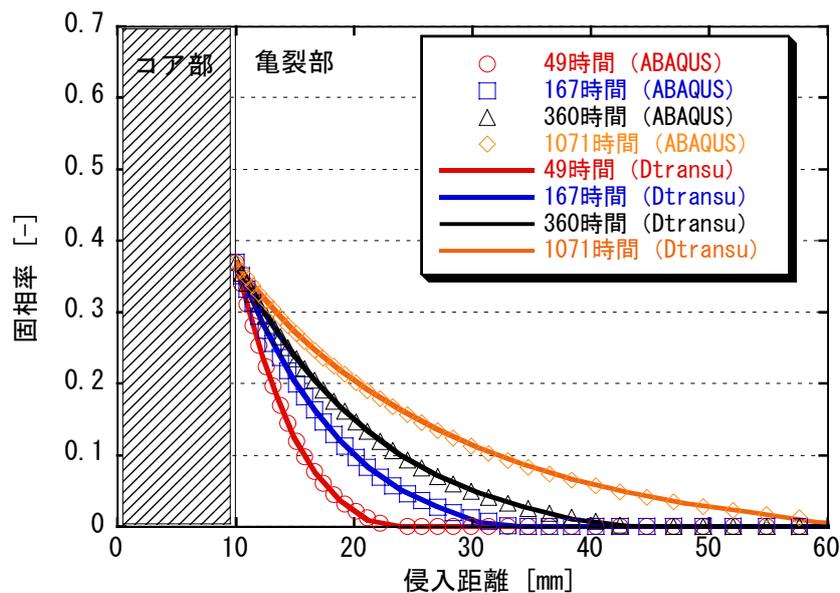


図 3.1 侵入試験検証解析(1)

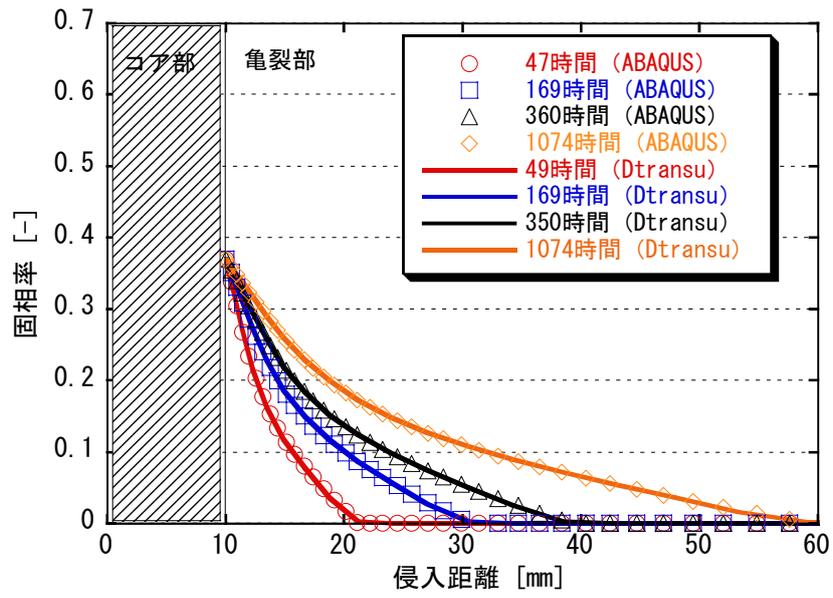


図 3.2 侵入試験検証解析(2)

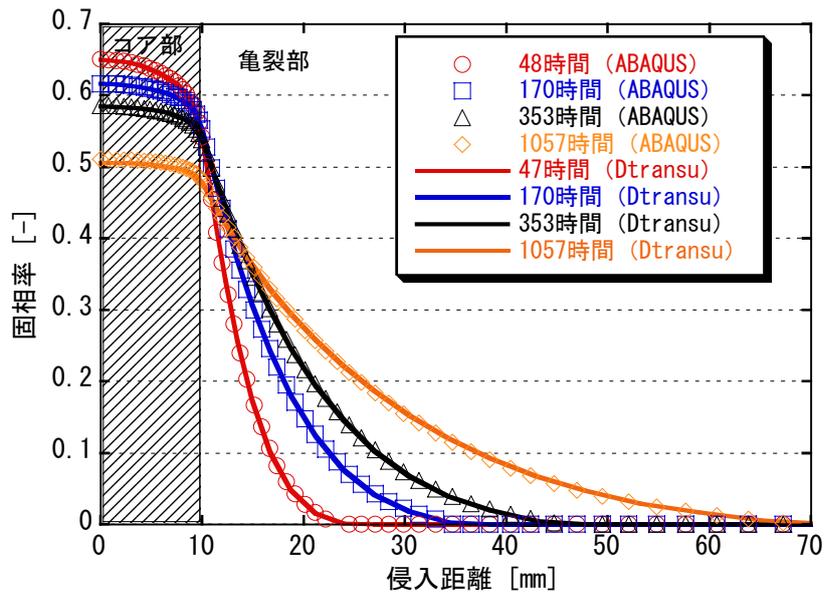


図 3.3 侵入試験検証解析(3)

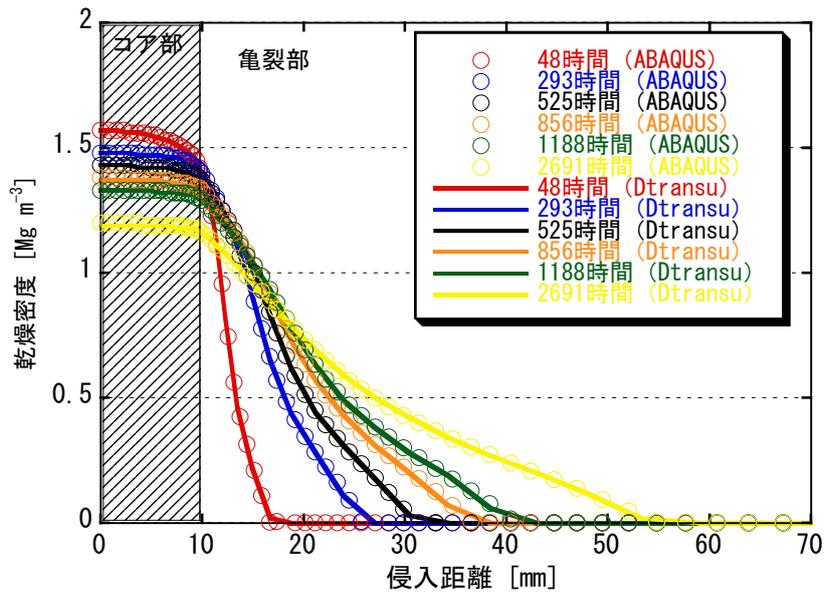


図 3.4 侵入試験検証解析(4)



図 3.5 侵入試験検証解析用メッシュ

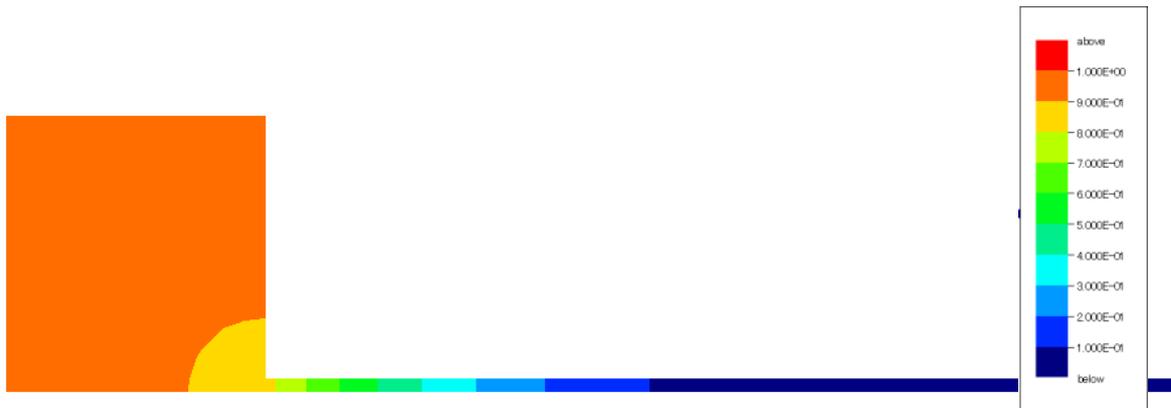


図 3.6 濃度コンター (170 時間後, 0.67 倍で固相率に相当)

3.3 侵入試験のシミュレーション解析

緩衝材の岩盤亀裂内への侵入現象のモデル化で提案されている、粘土粒子固相拡散モデル（以下、固相拡散モデルという）を用いて、2章で取得した粘度データを用いて、パラメータを設定し、模擬亀裂内への侵入密度分布のシミュレーション解析を行った。

3.3.1 解析パラメータの設定

亀裂内における固相拡散モデルは、ベントナイトの流動挙動をニュートン流体と仮定し、亀裂内を平面ポアズイユ流とした移流挙動を拡散挙動と置き換えたモデルである。この前提が成立するとした場合、粘度を固相率の関数として与えればよい。しかしながら、2章に示しているとおり、ベントナイトの粘度は時間依存性を有するとともに、含水比によってその程度は異なる。また、これらはせん断速度にも依存することから、粘度を固相率の関数として単純に設定することは難しい。そのため、ここでは以下に基づき、粘度と固相率の関係を設定した。

- ① 侵入密度測定試験において、模擬亀裂開口幅 0.85 mm の亀裂中をベントナイトゲルが約 1,056 時間で約 54 mm 移動したという測定データ¹⁾より、平均移動速度は $0.054 \text{ m} / 3,801,600 \text{ s} = 1.4 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ となる。ベントナイトゲルと壁面の間に non-slip 条件を適用し、壁面において移動速度が 0、亀裂中央において移動速度が上記平均速度と仮定し、 $1.4 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1} / 0.000425 \text{ m} = 3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ のせん断速度における粘度を設定した。
- ② 得られたせん断速度の範囲内では本測定のクリープデータによる粘度のせん断速度依存性は顕著ではない。せん断応力をより大きくした測定では試料が破損し、破損直前の載荷応力による測定でも①で設定しているせん断速度より 1 オーダー程度低い粘度の測定しか得られない。一般的に分散系材料は応力の値に依存して破壊が進み、流れやすくなる（粘度は低下する）ことから、せん断速度依存性を考慮してデータの補正を行う。補正の方法とし、各含水比で実施した最大載荷応力によるケースの時間とひずみとの関係より接線のせん断速度と粘度の関係を求め、この関係が長期挙動においても成立すると仮定し、 $3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ における粘度を求めた。この方法は外挿による設定であるため、課題として実測による長時間クリープデータを取得して確認する必要がある。
- ③ 表 2.5 より、ほぼ測定終了時点で相当する経過時間において最大で 15 %程度の含水比が低下していたことから、クリープデータの初期含水比より一律 15 %減じて含水比、固相率の補正を行った。
- ④ 初期含水比が高めである 1000~1600 %におけるフローカーブデータは、せん断速度依存性が認められる。データを外挿することにより、せん断速度 $3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ との交点を求めて設定を行った。
- ⑤ 固相率 0 は水の粘度とし、 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ に設定した。

以上の条件に基づき、クリープデータによる接線せん断速度と粘度との関係および高含水比域におけるフローカーブデータを外挿近似したものを図 3.7 に示す。図より、 $3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ との交点における粘度の設定結果を表 3.1 に示す。また、これにより設定された含水比と粘度の関係およ

び固相率と粘度の関係を図 3.8, 図 3.9 に示す。

図 3.8 には既存のクリープデータによる推定値（外挿値）および侵入密度分布測定試験による逆解析より求めた算出値も合わせて示す。含水比 600 %以下では既存の粘度評価値よりも本測定結果より得られた粘度の方が 1 オーダー近く高く、逆に 1000 %以上ではその関係が逆転し、本測定結果の粘度の方が著しく低いものとなった。高含水比域において、侵入密度分布測定試験の逆解析により求められた粘度よりも、徐々に水の粘度に近づいていく本測定結果の方が、傾向的には妥当であるものと考えられる。図 3.9 は、推定した粘度を固相率との関係で整理した図である。ここで、固相率 0（水の粘度）を起点として、長時間で測定したクリープ測定のプロットを通るように近似式を設定すると、(3.2) 式になる。ここで σ は固相率である。

$$\log \mu = 8.2 - 11.2 \cdot (10^{-14})^\sigma \quad (3.2)$$

近似式は含水比 1000~1600 %のフローカーブ測定値を通っていないが、フローカーブ測定は極めて短い測定時間に基づく設定値であること、また、設定しようとしているせん断速度域は $3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ であり、これらよりも 4 オーダー程度も速いせん断速度域で測定されたことなど、それらの間を外挿により設定していることから、本検討ではクリープ測定のプロットを通る近似とした。

補正含水比 170 %以下（固相率 0.18 以上、乾燥密度 0.5 Mg m^{-3} 以上に相当）はデータがなく、2 章で仮定した固相と液相の境界（どのようなせん断応力を与えても流動しない状態）が存在する可能性が考えられるが、そもそも初期状態が固相であれば全く流動しないこととなりモデルの前提が成立しないため、ここでは得られたデータから $1.0 \times 10^{8.2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ に収束することと仮定している。図 3.9 には侵入密度分布測定試験による逆解析より求めた粘度の近似式も合わせて示している。本評価では、侵入密度分布測定試験による推定値と比べ、固相率 0 での水の粘度を考慮している点、固相率 0 の範囲の長時間クリープ測定データの反映により、より現実的な近似となっていることが考えられる。

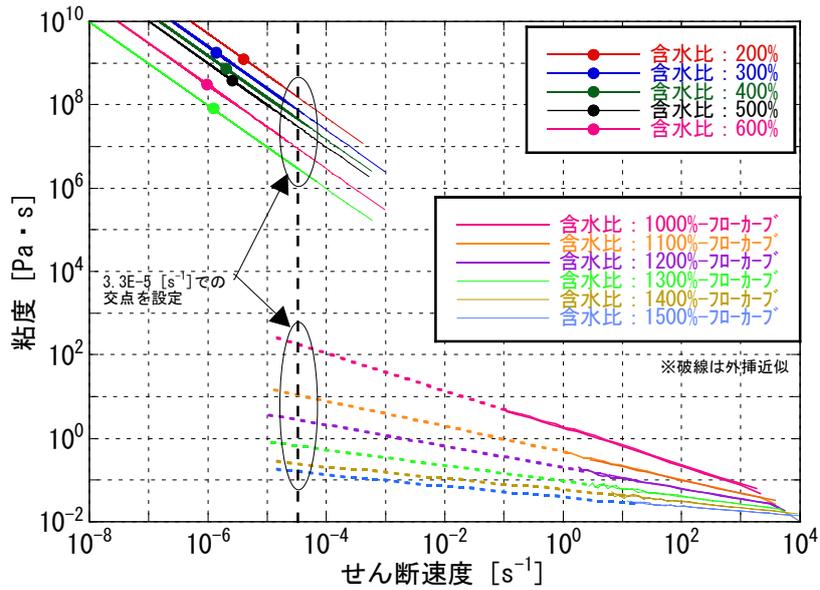


図 3.7 外挿近似による粘度の設定

表 3.1 各含水比における粘度の設定値

初期含水比[%]	補正含水比[%]	補正固相率[-]	粘度[Pa・s]	備考
200	170	0.179	1.50E+08	クリープ測定に基づいた推定結果
300	255	0.127	7.60E+07	
400	340	0.098	4.90E+07	
500	425	0.080	3.10E+07	
600	510	0.068	9.60E+06	
700	595	0.059	3.00E+06	
1000	1000	0.036	1.20E+02	フローカーブ測定に基づいた推定結果
1100	1100	0.033	1.70E+01	
1200	1200	0.030	2.50E+00	
1300	1300	0.028	7.00E-01	
1400	1400	0.026	3.00E-01	
1500	1500	0.024	1.50E-01	水の粘性
—	—	0	1.00E-03	

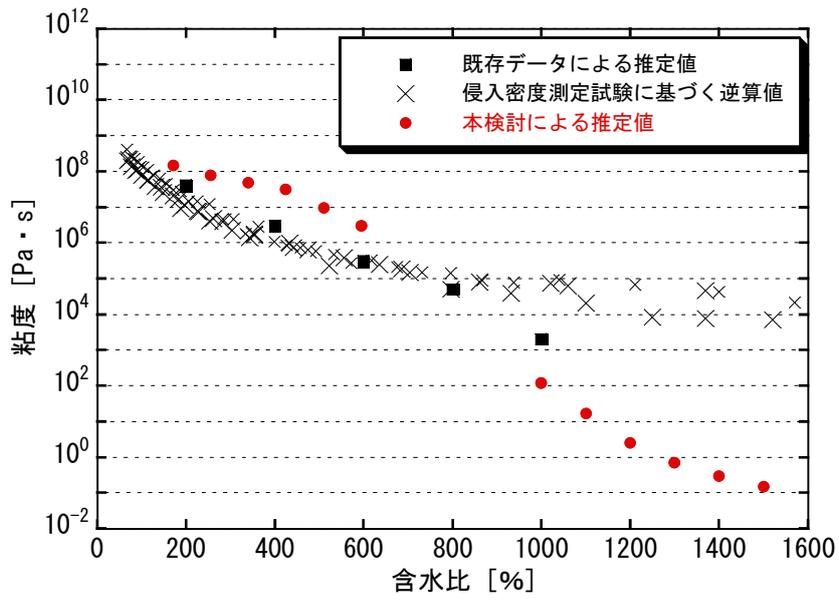


図 3.8 含水比と粘度の関係

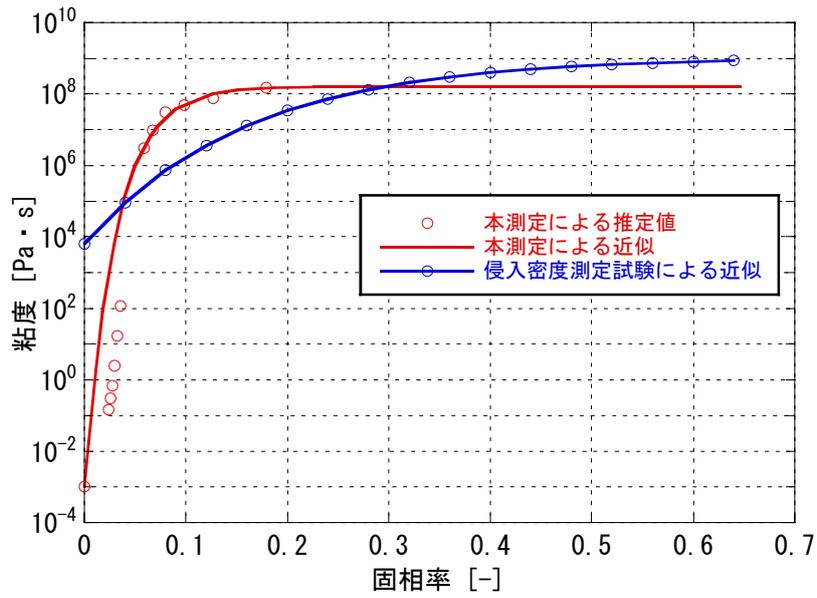


図 3.9 固相率と粘度の関係近似

3.3.2 解析結果

固相率と粘度の関係に (3.2) 式を反映し、それ以外の固相率と透水係数との関係、固相率と膨潤圧との関係は既存の評価¹⁾と同様とし、侵入密度測定試験のシミュレーションを行った。固相率と透水係数との関係、固相率と膨潤圧との関係をそれぞれ図 3.10 および図 3.11 に、コア部および亀裂部の固相拡散係数をそれぞれ図 3.12 および図 3.13 に示す。固相率と透水係数との関係、固相率と膨潤圧との関係は見直していないため、図 3.12 のコア部の固相拡散係数は、これまでの評価結果と同様である。図 3.13 には既存の解析における亀裂部の固相拡散係数も合わせて示しているが、固相拡散係数は粘度に反比例するため、両者の関係は図 3.9 を逆転させた形となる。

図 3.14 に固相率のプロファイルを示し、図 3.15 に最終段階の濃度コンターを示す。固相率が 0 で水の粘度に一致するとしたため、図 3.13 に示すように亀裂部の固相拡散係数が相対的に高くなっていることから、ベントナイトは非常に低い固相率の状態で急速に流出していく結果となり、実現象を全く表現できていない。これは粘度の設定の問題ではなく、膨潤圧が固相率 0 でも値を持つため、相対的に高い固相拡散係数が設定されたことによる。実際はゲルフロントの密度状態において膨潤圧が 0 となるものと考えられる。侵入密度分布測定試験からはゲルフロントにおける固相率が明瞭ではないが、貫入型模型試験の結果からは、侵入先端の密度は 0.1 Mg m^{-3} 以下（固相率に換算すると約 0.037 以下、含水比約 1000 %以上）となっており、およそこの状態で膨潤圧が 0 となっているものと仮定し、固相率 0.037 以下を膨潤圧 0 とした。この場合の亀裂部の固相拡散係数を図 3.16 に示す。図 3.17 に固相率のプロファイルを示し、図 3.18 に最終状態の濃度コンターを示す。図 3.17 より、ゲルフロントの状態を考慮することで連続的なプロファイルは現れるが、実験結果とは乖離している。また、実験結果では亀裂開口部における固相率が時間によらず 0.37 で一定であるため、この条件で模擬亀裂部のみを対象とした解析を行った結果を図 3.19 に示す。本結果でも、実験結果を表現できていない。このことから、本検討で設定した粘度では、実験結果を再現できなかった。

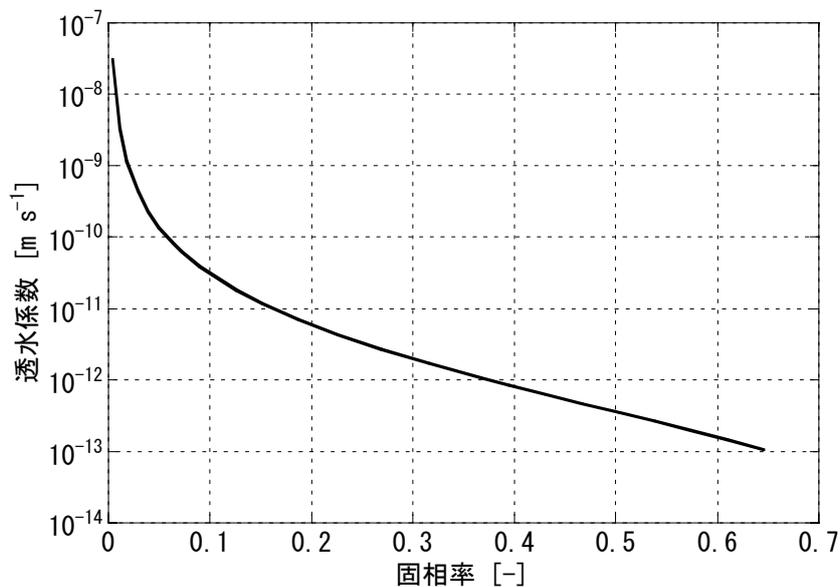


図 3.10 固相率と透水係数の関係

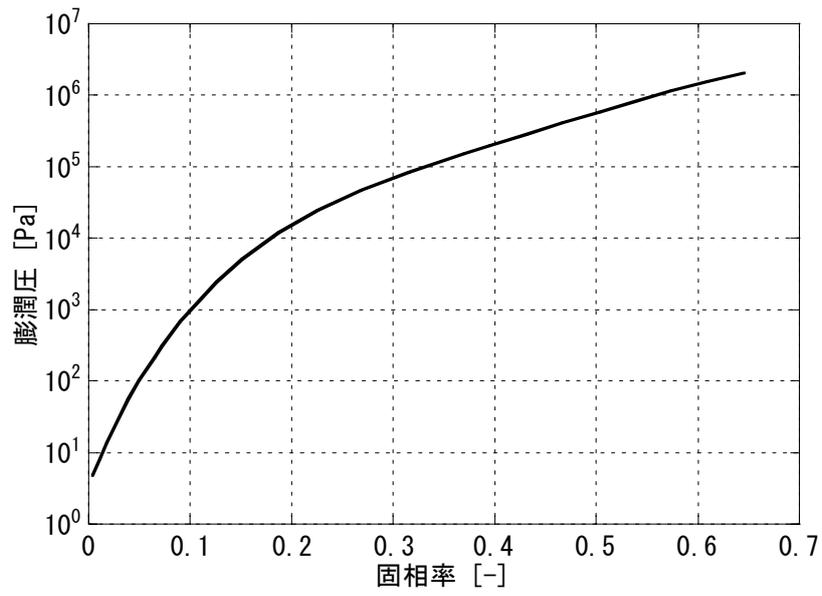


図 3.11 固相率と膨潤圧の関係

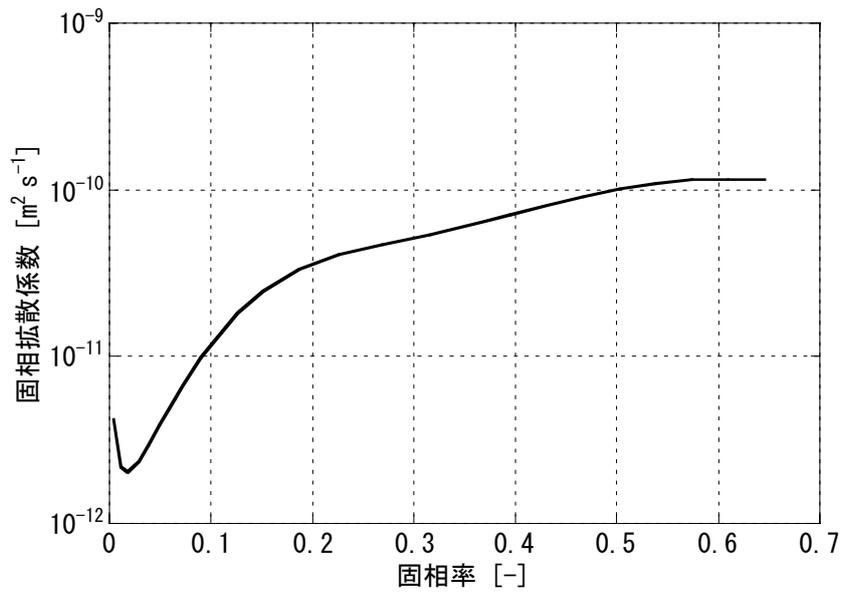


図 3.12 コア部における固相拡散係数

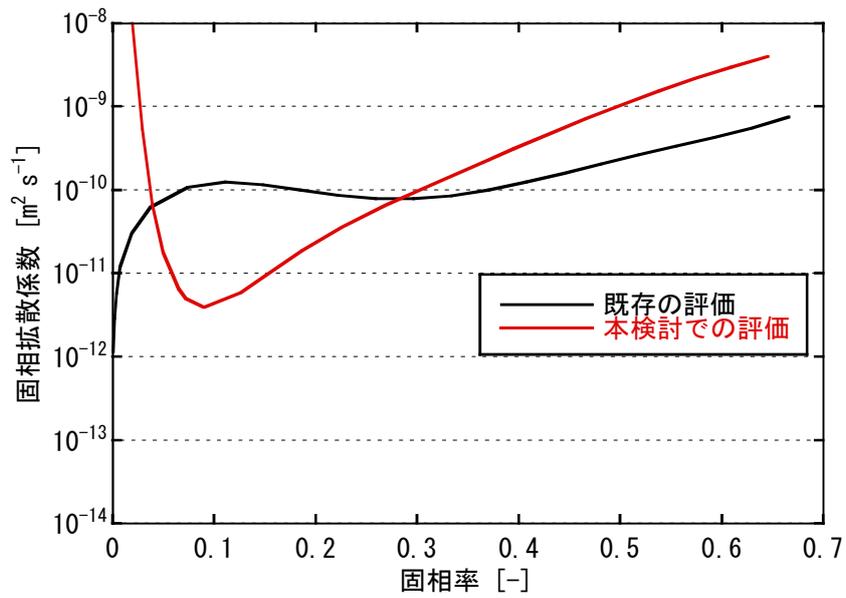


図 3.13 亀裂部における固相拡散係数

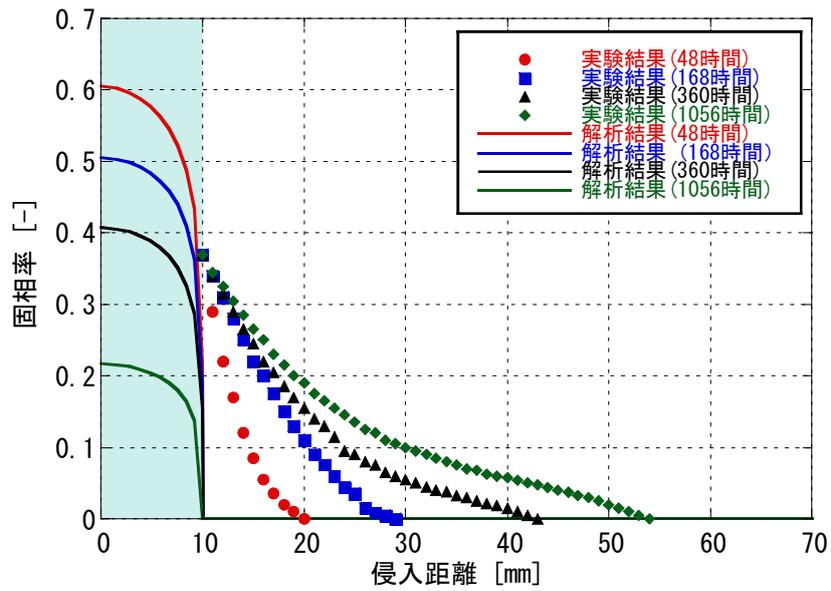


図 3.14 侵入試験の解析結果



図 3.15 濃度コンター (1056 時間後, 0.65 倍で固相率に相当)

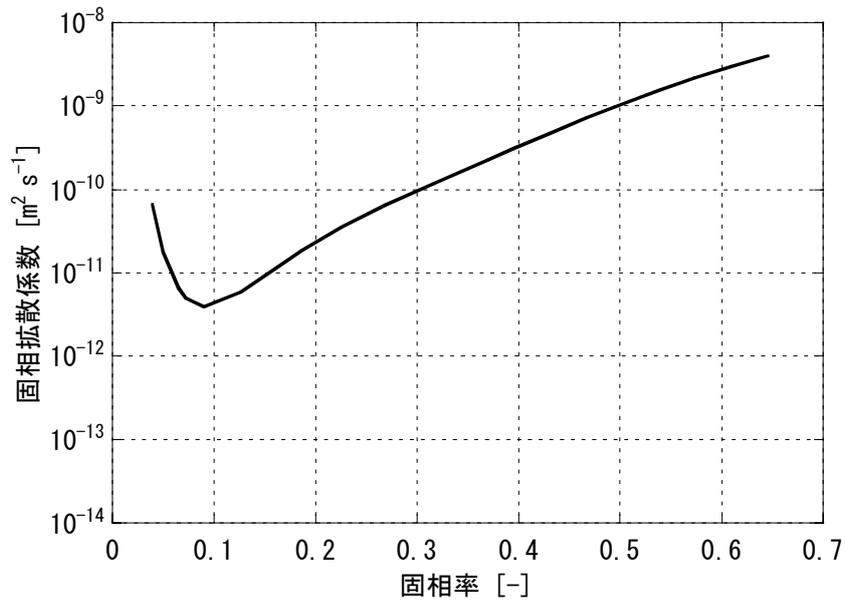


図 3.16 亀裂部における固相拡散係数 (固相率 0.037 以下は 0)

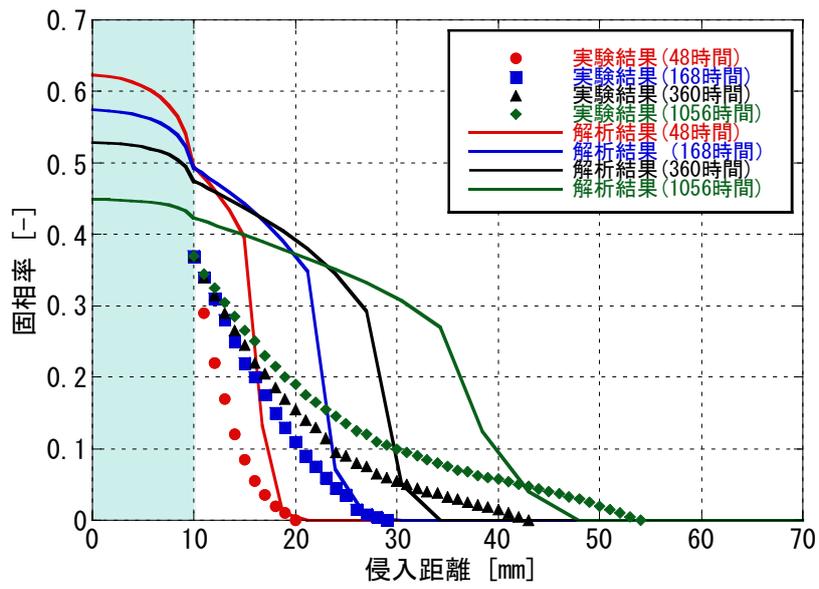


図 3.17 侵入試験の解析結果（コア部，亀裂部）

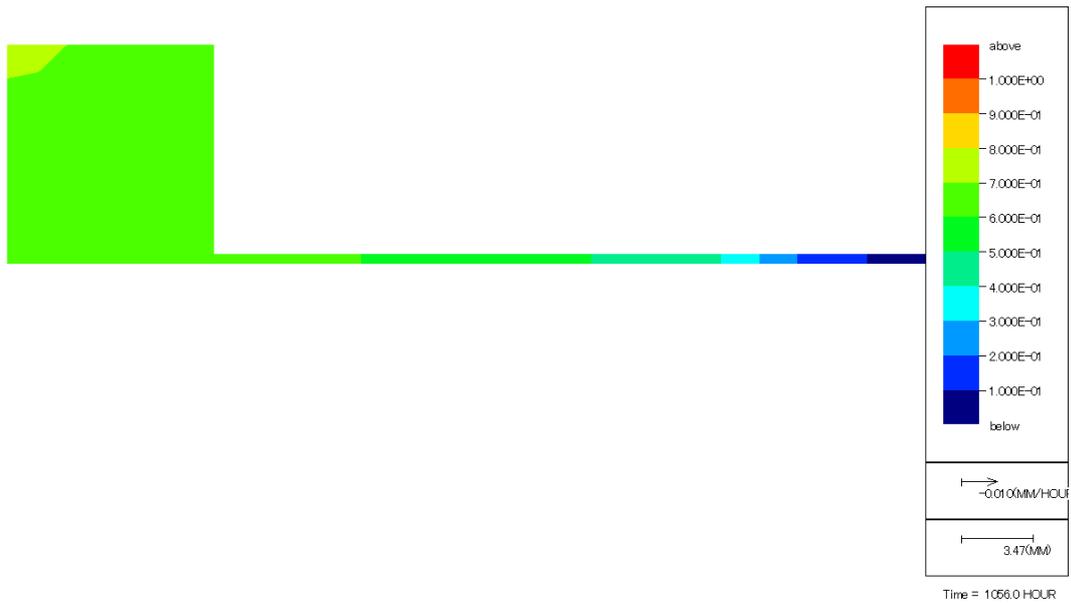


図 3.18 濃度コンター（1056 時間後，0.65 倍で固相率に相当）

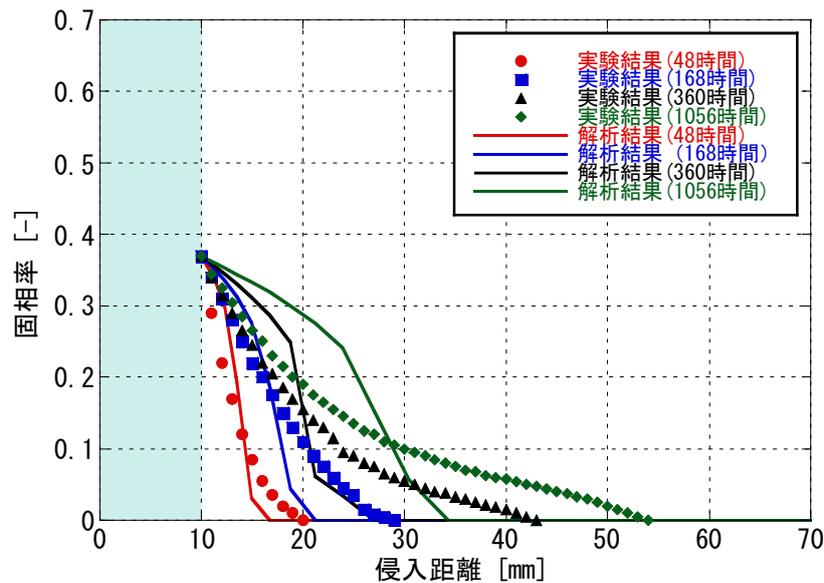


図 3.19 侵入試験の解析結果（亀裂部）

3.3.3 感度解析

本検討では粘度測定データを長期測定によって設定しており、既存のデータに比して信頼性は向上しているが、本来実データが必要な固相率領域（0～0.6 程度）に対して図 3.9 で明らかなように極めて限られた固相率領域（0.06～0.18）および種々の仮定条件に基づいた近似であり、その精度に関しては未だ十分とは言えず、図 3.17、図 3.19 の解析結果によって適用性が困難であると結論づけるのは早計である。そこで、固相率と粘度との関係をパラメータとした感度解析を行い、データの不確実性が解析結果に及ぼす影響について検討を行った。感度解析は図 3.9 の固相率と粘度との関係を表す近似式 (3.2) 式に対し、水の粘度を示す点は少なくとも必ず通り、高い固相率域において収束する粘度を 100 倍、10 倍、1/10 倍、1/100 倍に変化させた。表 3.2 に各ケースの近似式、図 3.20 にその近似式に基づく固相率と粘度の関係を示す。この固相率と粘度の関係および図 3.11 の固相率と膨潤圧との関係に基づき計算した固相率と亀裂部の固相拡散係数の関係を図 3.21 に示す。固相拡散係数は粘度と反比例関係であるため、本研究の評価値の設定値に対し総じて 1/100 倍～100 倍である。この亀裂部の固相拡散係数を用いて侵入試験の解析を行った結果を図 3.22～図 3.25 に示す。図 3.17 と比較すると、固相拡散係数が 10 倍もしくは 1/10 倍変わるだけで図 3.23、図 3.24 に示すようにプロファイルは大きく変わる。さらに、100 倍、1/100 倍では実験データとは完全に乖離している。長時間測定データのどの範囲で粘度を設定するか、必要なせん断速度域をどのように設定し、実測との乖離分をどのように外挿するか等によって 10 倍（1/10 倍）程度変動することは十分考えられる。本感度解析により、粘度が 1 桁（10 倍もしくは 1/10 倍）変動することでプロファイルにかなり高感度で影響することが分かった。これらのことから、実測値に基づき粘度を精度よく設定し、平面ポアズイユ流を前提としたシミュレーションにより実験結果を再現するのは、現状において困難であると言える。

以上、総括的に現在のモデル化における物性パラメータには限界があるものと考えられ、実際の侵入挙動においては、既存のパラメータ以外に影響する要因が含まれているものと推測する。

したがって、要素試験とそれらの結果とのシミュレーションとを繰り返し行いつつ、侵入現象を表現し得るパラメータの検討を進め、モデルの最適化を図る必要がある。

表 3.2 感度解析ケースと近似式

Case 番号	近似式
本研究の評価 (3.2 式)	$\log \mu = 8.2 - 11.2 \cdot (10^{-14})^\sigma$
Case1	$\log \mu = 6.2 - 9.2 \cdot (10^{-14})^\sigma$
Case2	$\log \mu = 7.2 - 10.2 \cdot (10^{-14})^\sigma$
Case3	$\log \mu = 9.2 - 12.2 \cdot (10^{-14})^\sigma$
Case4	$\log \mu = 10.2 - 13.2 \cdot (10^{-14})^\sigma$

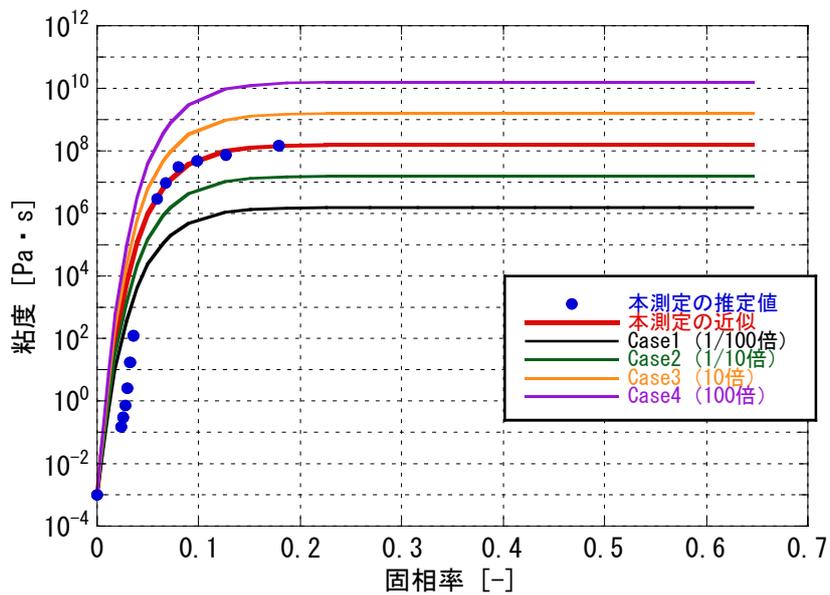


図 3.20 感度解析ケースにおける固相率と粘度の関係

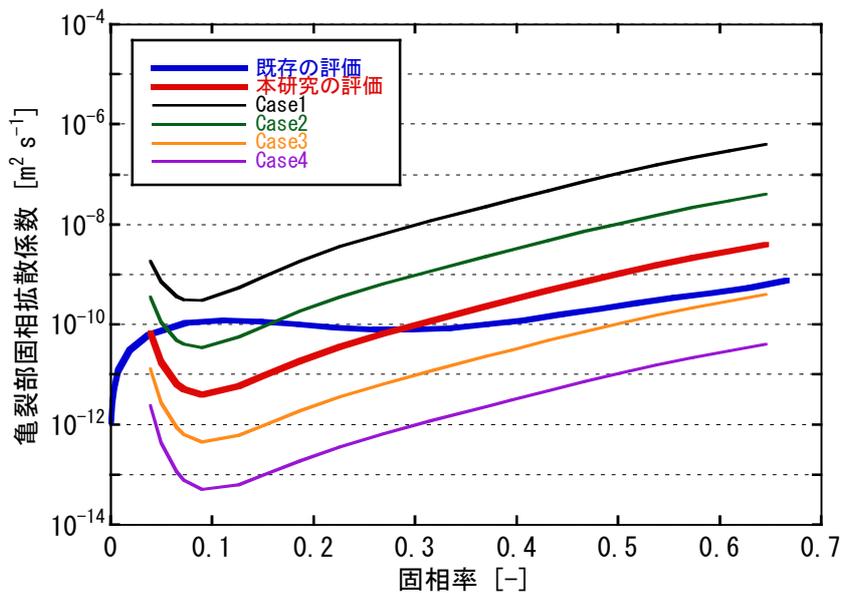


図 3.21 感度解析ケースにおける固相率と固相拡散係数の関係

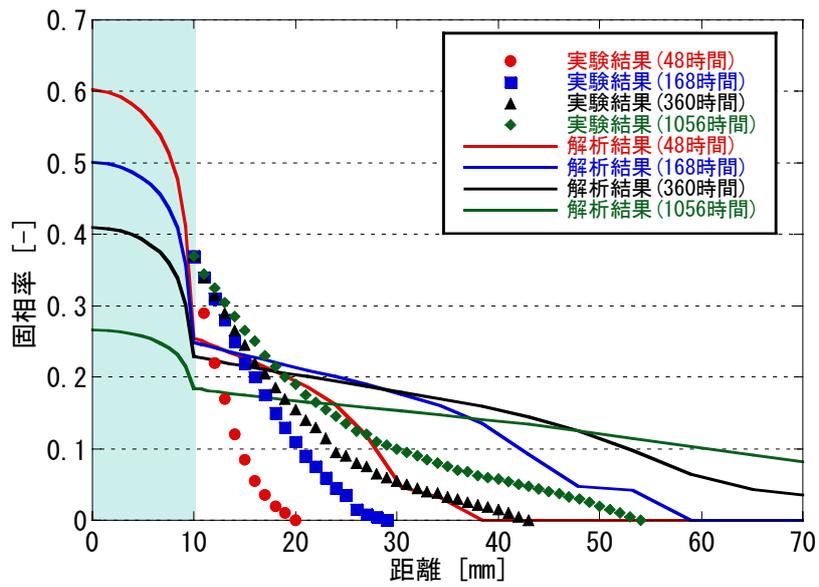


図 3.22 侵入試験の解析結果（感度解析 Case1）

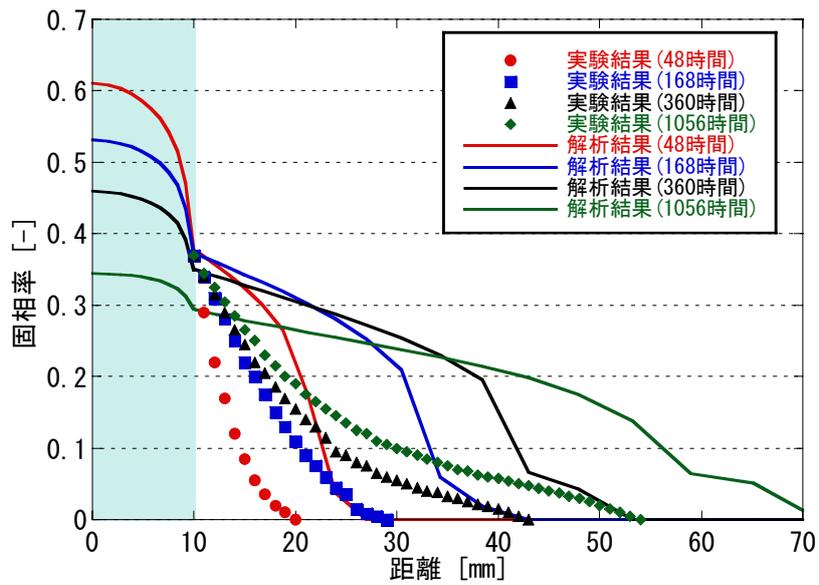


図 3.23 侵入試験の解析結果（感度解析 Case2）

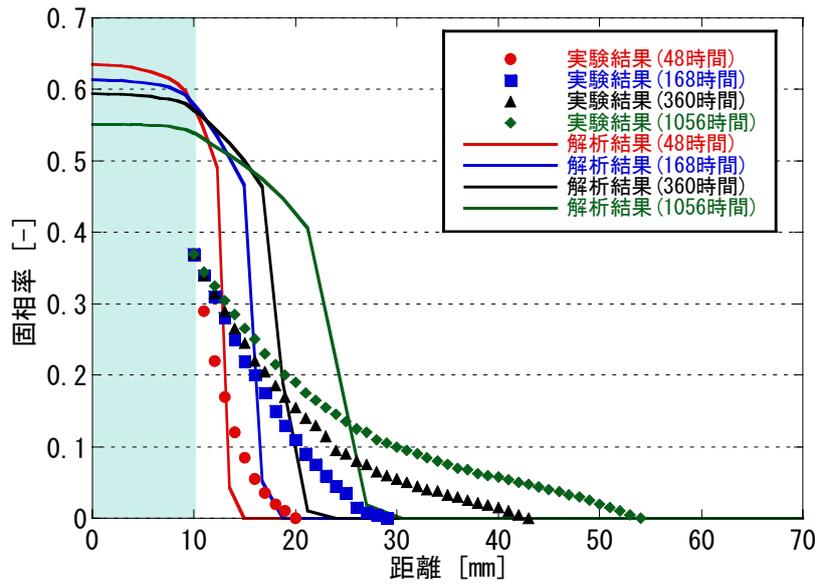


図 3.24 侵入試験の解析結果 (感度解析 Case3)

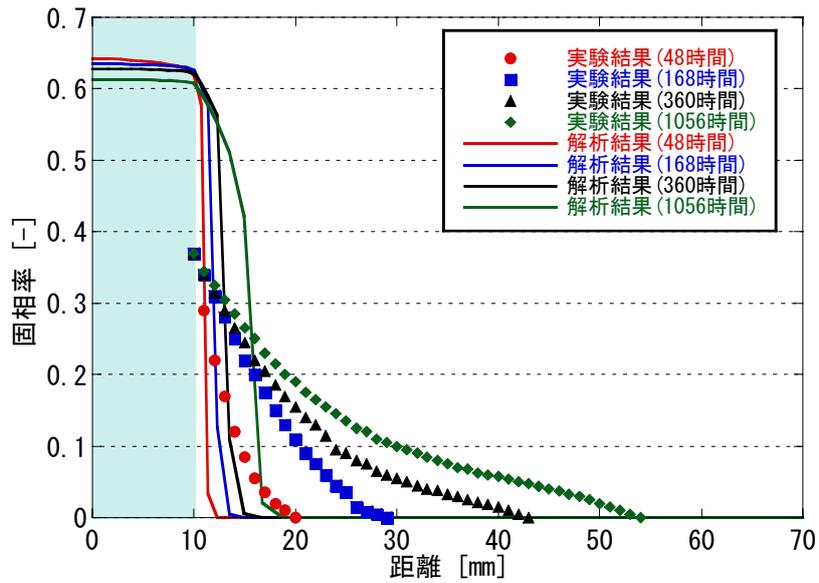


図 3.25 侵入試験の解析結果 (感度解析 Case4)

4. おわりに

本報告では、緩衝材の侵入現象モデルに関する適用性を確認するために、モデルの入力データの一つであるベントナイトの粘度について、専門家のレビューを踏まえたデータの取得を行った。これらのデータから、ベントナイトの固相率（密度）と粘度の関係を求め、侵入現象モデルにより固相拡散係数を設定し、実験結果のシミュレーション解析によってモデルの適用性確認を行った。

主な成果を以下にまとめる。

- 1) ベントナイトの粘度測定手法等について、専門家のレビューを参考にデータの取得を行い、測定手法のノウハウならびにデータの精度が向上した。
- 2) 含水比をパラメータとしてベントナイトの粘度を測定し、ベントナイトの粘度が含水比の増加とともに低下することを確認した。また、侵入試験結果に基づき逆解析から求めていた見かけの粘度の妥当性を検証するために、本測定で得られた実測の粘度と比較した。その結果、含水比 800 %以上から両者の粘度が乖離することを確認した。
- 3) 実測に基づいて設定した粘度を侵入現象モデルに適用し、固相拡散係数を再評価して侵入試験のシミュレーション解析を行った結果、実験結果と解析結果とで相違が認められた。この結果を踏まえ、粘度設定値の設定誤差を考慮した感度解析を実施した結果、粘度の設定値が一桁(10倍もしくは、1/10倍)変動することで高感度に解析結果に影響することが示された。

以上、本検討では、モデルの入力物性データの一つであるベントナイトの粘度データの整備を行い、それらを侵入現象モデルに適用して侵入試験結果のシミュレーション解析により、モデルの適用性について確認を行った。しかしながら、シミュレーション解析の結果からは、実験を再現できていない。本検討結果のうち、ベントナイトの粘度の設定値がシミュレーションの結果に大きく影響することは述べたとおりであるが、粘度の実測値に基づいて設定した粘度評価値では実験をシミュレートできないのに対し、侵入実験結果に基づいて逆解析より求めた係数（見かけの粘度）であれば、実験を再現できる事が確認されている¹⁾。これらのことから、総括的に現在のモデル化における物性パラメータには限界があるものと考えられ、実際の侵入挙動においては、既存のパラメータ以外に影響する要因が含まれているものと推測する。したがって、要素試験とそれらの結果とのシミュレーションとを繰り返し行いつつ、侵入現象を表現し得るパラメータの検討を進め、モデルの最適化を図る必要がある。

参考文献

- 1) 松本一浩, 棚井憲治, 菅野毅, 岩田裕美子: “拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化の事例解析”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2005-009 (2005) .
- 2) 西垣誠: “オイリアン・ラグランジアン飽和・不飽和浸透流・移流・分散解析プログラムデータ入力マニュアル(Ver.1.11) ” , (2002) .

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70.205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻¹² cm ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

