

緩衝材の侵入現象モデルの適用性に関する検討(Ⅱ)

Study of the Applicability of the Diffusion Model of Bentonite Buffer Material(Ⅱ)

松本 一浩 藤田 朝雄

Kazuhiro MATSUMOTO and Tomoo FUJITA

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 2011

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

緩衝材の侵入現象モデルの適用性に関する検討(Ⅱ)

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※, 藤田 朝雄

(2010 年 12 月 15 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、岩盤亀裂内への緩衝材の流出／侵入現象が考えられている。

本報告では、既往の固相拡散理論に基づく侵入現象モデルの適用性を評価するために、飽和条件の自由膨潤挙動（一次元拡散挙動）の実験を行い、実験と侵入現象モデルの前提となる固相拡散理論との整合性について検証を行った。また、それらの結果に基づいて模擬亀裂内の侵入挙動についても評価を行った。さらに、本検討結果に関して専門家のレビューを踏まえ、今後の課題を明確にした。

その結果、以下の知見が得られた。

1) 固相拡散係数理論値の検証

固相拡散理論で用いられる固相拡散係数について、実験に基づいて設定した値（実験値）と理論的に求めた値（理論値）との比較を行った結果、固相拡散係数は特に低固相率域で大きく乖離した。また、理論値は拡散速度が実験よりも遅く、シミュレーションによる検証では実験を適切に表現できない結果となった。

2) 侵入試験のシミュレーション

侵入現象のソースとなるベントナイト供試体部（コア部）には実験に基づいて設定した固相拡散係数、ベントナイトの侵入部（亀裂部）にはコア部の係数倍の固相拡散係数を用いて侵入試験のシミュレーション解析を行った結果、コア部と亀裂部ともに固相率分布を総じて表現することができた。

3) 専門家によるレビュー

専門家のレビューにおいて、特に膨潤による変形効果（物理的移動）を移流項とした移流・拡散方程式への展開に関する提案があった。

以上、本検討ならびにレビューの結果を踏まえ、モデル・パラメータの見直しおよび種々の条件における実験シミュレーションを繰り返し行いつつ、侵入現象モデルの精度向上を図る必要がある。

Study of the Applicability of the Diffusion Model of Bentonite Buffer Material(II)

Kazuhiro MATSUMOTO[※] and Tomoo FUJITA

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

(Received December 15, 2010)

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, verification of the solid phase diffusion theory of the past was performed and future problems were extracted based on expertise.

Results obtained from the studies are summarized as follows;

1) Verification of solid phase diffusion theory

Comparison with the solid phase diffusion coefficient based on an swelling experiment and the theoretical value was performed. As a result of simulation, the theoretical diffusion velocity had slower than the experimental one.

2) Simulation of an extrusion experiment

As a result of performing the simulation of an extrusion experiment using the fitting line based on an experiment, it was well in agreement in comparison.

3) Expert review

The expert propel an application of advection-diffusion equation to the extrusion model.

It is necessary to attain optimization of a model, repeating the simulation of element experiment and those results and performing it based on the result of this experiment and a review.

Keywords : Bentonite, Buffer Material, Extrusion, Diffusion Model

※ Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 既往研究に対する本研究の位置付け	2
2.1 粘土の 2 相系物質移動論	2
2.2 固相拡散理論	4
2.3 本検討の位置付けおよび検討アプローチ	5
3. 固相拡散理論の検証	7
3.1 自由膨潤試験	7
3.1.1 試験概要	7
3.1.2 試験結果	8
3.2 固相拡散係数の設定	11
3.2.1 自由膨潤試験に基づく固相拡散係数の設定	11
3.2.2 理論に基づく固相拡散係数の設定	14
3.2.3 固相拡散係数の理論値と実験の比較	15
3.3 自由膨潤試験のシミュレーション	16
3.3.1 解析コードおよび改良項目の概要	16
3.3.2 解析結果	17
3.4 乖離要因の検討	23
3.4.1 自由膨潤試験の前提条件の成立性	24
3.4.2 固相拡散理論の仮定条件の成立性	24
3.4.3 透水係数, 膨潤圧試験精度	29
3.4.4 2 相系物質移動論自体の成立性	34
3.4.5 乖離要因検討結果のまとめ	36
3.5 固相拡散係数の見直し	36
4. 亀裂内固相拡散挙動の把握	41
4.1 侵入試験	41
4.1.1 試験概要	41
4.1.2 試験結果	42
4.2 亀裂内固相拡散係数の設定	44
4.3 侵入試験のシミュレーション	47
4.4 亀裂内固相拡散理論の検証	50
5. 本検討内容のレビュー結果	52
6. おわりに	55
参考文献	56

Contents

1. Introduction	1
2. The outline of previous research and this research	2
2.1 A clayey mass transfer theory	2
2.2 Solid phase diffusion theory	4
2.3 Examination approach of this research	5
3. Verification of a solid phase diffusion theory(Core part)	7
3.1 Free swelling experiment	7
3.1.1 Experimental condition	7
3.1.2 Experimental result	8
3.2 A setting of a diffusion coefficient	11
3.2.1 A setting of a diffusion coefficient based on an experiment	11
3.2.2 A setting of a diffusion coefficient based on theory	14
3.2.3 Comparison of theory and an experiment	15
3.3 The simulation of a free swelling experiment	16
3.3.1 Outline of analysis code	16
3.3.2 Analysis result	17
3.4 Examination of a factor	23
3.4.1 Verification of the precondition of an experiment	24
3.4.2 Verification of the assumption conditions of theory	24
3.4.3 Accuracy of an experiment	29
3.4.4 Verification of a mass transfer theory	34
3.4.5 The conclusion of examination of a factor	36
3.5 A re-setting of a diffusion coefficient	36
4. Solid phase diffusion behavior(Crack part)	41
4.1 Extrusion test	41
4.1.1 Experimental condition	41
4.1.2 Experimental result	42
4.2 A setting of a solid phase diffusion coefficient(Crack part)	44
4.3 The simulation of an extrusion experiment	47
4.4 Verification of a solid phase diffusion theory(Crack part)	50
5. Expert review	52
6. Conclusions	55
Reference	56

目 次

図 3.1	自由膨潤試験状況	7
図 3.2	自由膨潤試験による固相率プロファイル ($\rho_0=1.2\text{Mg m}^{-3}$)	8
図 3.3	自由膨潤試験による固相率プロファイル ($\rho_0=1.4\text{Mg m}^{-3}$)	8
図 3.4	自由膨潤試験による固相率プロファイル ($\rho_0=1.6\text{Mg m}^{-3}$)	9
図 3.5	自由膨潤試験による固相率プロファイル ($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$)	9
図 3.6	実際の試料の乾燥重量とプロファイルより求めた重量率の経時変化	10
図 3.7	自由膨潤試験により求められた固相拡散係数 ($\rho_0=1.2\text{Mg m}^{-3}$)	12
図 3.8	自由膨潤試験により求められた固相拡散係数 ($\rho_0=1.4\text{Mg m}^{-3}$)	12
図 3.9	自由膨潤試験により求められた固相拡散係数 ($\rho_0=1.6\text{Mg m}^{-3}$)	13
図 3.10	自由膨潤試験により求められた固相拡散係数 ($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$)	13
図 3.11	固相率と透水係数の関係 (小峯・緒方評価式)	14
図 3.12	固相率と膨潤圧の関係 (小峯・緒方評価式)	14
図 3.13	固相率と固相拡散係数の関係 (理論値)	15
図 3.14	理論値とコア部フィッティングラインの比較	15
図 3.15	自由膨潤試験解析モデル	17
図 3.16	自由膨潤試験のシミュレーション結果 ($\rho_0=1.2\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)	18
図 3.17	自由膨潤試験のシミュレーション結果 ($\rho_0=1.2\text{Mg m}^{-3}$, フィッティングライン)	18
図 3.18	自由膨潤試験のシミュレーション結果 ($\rho_0=1.4\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)	19
図 3.19	自由膨潤試験のシミュレーション結果 ($\rho_0=1.4\text{Mg m}^{-3}$, フィッティングライン)	19
図 3.20	自由膨潤試験のシミュレーション結果 ($\rho_0=1.6\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)	20
図 3.21	自由膨潤試験のシミュレーション結果 ($\rho_0=1.6\text{Mg m}^{-3}$, フィッティングライン)	20
図 3.22	自由膨潤試験のシミュレーション結果 ($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)	21
図 3.23	自由膨潤試験のシミュレーション結果 ($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$, フィッティングライン)	21
図 3.24	自由膨潤試験解析コンター図 ($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)	22
図 3.25	自由膨潤試験解析コンター図 ($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$, フィッティングライン)	22
図 3.26	ベントナイト単体材料の水分特性曲線	28
図 3.27	土壌水のポテンシャルとその状態	28
図 3.28	固相率とサクション／膨潤圧の関係	28
図 3.29	モンモリロナイト膨潤体積ひずみと透水係数の関係	30
図 3.30	小峯・緒方および JAEA による透水試験データ	31
図 3.31	見直し後の固相率と透水係数の関係	31
図 3.32	小峯・緒方による膨潤圧試験結果と膨潤評価式の計算結果との比較	32
図 3.33	膨潤圧試験結果と膨潤評価式との計算結果の比較 (乾燥密度)	33
図 3.34	膨潤圧試験結果と膨潤評価式との計算結果の比較 (有効粘土密度)	33
図 3.35	膨潤評価式と JAEA データによる固相率と膨潤圧の関係近似式	34
図 3.36	固相・液相の組成見直しに関する模式図	35

図 3.37	固相率と固相拡散係数の関係（膨潤評価式による近似式：ケース 1）	38
図 3.38	固相率と固相拡散係数の関係（JAEA 近似式：ケース 2）	38
図 3.39	膨潤圧を固定した場合のコア部フィッティングラインからの透水係数逆算値	39
図 3.40	透水係数を固定した場合のコア部フィッティングラインからの膨潤圧逆算値	40
図 4.1	飽和セル	41
図 4.2	飽和試料のセット状況	41
図 4.3	侵入試験実施状況	42
図 4.4	侵入試験による固相率プロファイル（亀裂幅 0.5mm）	42
図 4.5	侵入試験による固相率プロファイル（亀裂幅 1.0mm）	43
図 4.6	侵入試験による固相率プロファイル（亀裂幅 1.5mm）	43
図 4.7	侵入試験により求められた固相拡散係数（亀裂幅 0.5mm）	45
図 4.8	侵入試験により求められた固相拡散係数（亀裂幅 1.0mm）	45
図 4.9	侵入試験により求められた固相拡散係数（亀裂幅 1.5mm）	46
図 4.10	既往の侵入試験により求められた固相拡散係数（亀裂幅 0.85mm）	46
図 4.11	侵入試験のシミュレーション結果（亀裂幅 0.5mm）	47
図 4.12	侵入試験のシミュレーション結果（亀裂幅 1.0mm）	48
図 4.13	侵入試験のシミュレーション結果（亀裂幅 1.5mm）	48
図 4.14	侵入試験の解析コンター図（亀裂幅 0.5mm）	49
図 4.15	侵入試験の解析コンター図（亀裂幅 1.0mm）	49
図 4.16	侵入試験の解析コンター図（亀裂幅 1.5mm）	49
図 4.17	コア部の実験値と解析値の比較	50
図 4.18	亀裂部フィッティングラインからの膨潤圧逆算値	51
図 5.1	専門家のレビューにおける議論のポイント	52
図 5.2	土粒子の配置に関わるパラメータ ν の概念	53
図 5.3	層間水と外部間隙水の連続性に関する概念図	53

表 目 次

表 3.1	自由膨潤試験条件	7
表 3.2	コア部フィッティングラインテーブル	13
表 3.3	乖離要因一覧	23
表 3.4	乖離要因の検討結果	36
表 3.5	竹内らに基づく外部間隙パラメータ α の計算	37
表 4.1	侵入試験条件	41

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可能性がある。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。

既往の検討では緩衝材の侵入挙動を粘土粒子の拡散現象とみなし、処分孔部（コア部）のモデル化として 2 相系物質移動論に基づく固相拡散理論、亀裂部には平面ポアズイユ流れとした粒子移動モデルを仮定した検討を進めた。コア部のモデルには緩衝材の透水係数と膨潤圧データが、亀裂部のモデルには粘度及び膨潤圧データが必要である。このうち、データが整備されていなかった粘度について、幅広い含水比、せん断速度域でのデータ取得および整理を行い、亀裂部のモデルへの適用性検討を実施した。しかしながら、実験結果（時間経過に伴う固相率（乾燥密度／ベントナイトの土粒子密度）分布のプロファイル）と解析結果では、乖離が認められ、実験を表現できない結果となった。このため、本現象モデルの理論の妥当性ならびにモデルに用いられる緩衝材の物性データの妥当性に関して検証を行い、それらの検討結果に基づき評価手法の改良についても視野に入れ、本現象を表現可能な評価手法を構築する必要がある。

本研究では粘土粒子移動挙動の現象理解、ならびにパラメータやモデルの妥当性評価および高度化へのステップとして、飽和条件の一次元拡散挙動といった単純系の境界条件の挙動と理論の整合性について重点的に検討を行い、その結果を受けて亀裂内侵入挙動についても評価を行った。

2 章では粘土の 2 相系物質移動論に基づいた固相拡散理論の構築にあたっての前提条件を整理し、既往検討の位置づけの明確化、ならびに侵入現象モデルの精度向上について検討を行った。

3 章では飽和条件の自由膨潤試験結果に基づく固相拡散係数と、理論的に求まる固相拡散係数の比較ならびに実験シミュレーションを行い、両者を比較することによりその妥当性について評価した。

4 章では侵入試験結果に基づく固相拡散係数と、理論的に求まる固相拡散係数による侵入試験のシミュレーションを行い、両者を比較することによりその妥当性について評価した。

5 章では本検討内容に関する専門家のレビュー結果を整理するとともに、それらを踏まえた研究の方向性について考察した。

2. 既往研究に対する本研究の位置付け

緩衝材の侵入現象の検討^{1) 2) 3) 4)}（以下、既往検討）では、固相拡散理論を前提に検討を進めてきた。本理論は、中野らによって提示された粘土中に水が浸潤、膨潤する挙動を固相と液相の 2 相の連立した系における物質移動論^{5) 6)}（ここでは、2 相系物質移動論）に基づくものである。

以下に理論の概要および飽和条件下での固相拡散理論を整理し、既往研究における問題点ならびに、本研究の位置付けを明確にした上で侵入現象モデルの構築に関する検討を行う。

2.1 粘土の 2 相系物質移動論

水と土粒子が同時に移動する場合、水の土粒子に対する流速 u は次式で与えられる。

$$u = u_w - u_s \quad (2.1)$$

ここで u_w 、 u_s は水および土粒子の平均流速である。 u_w 、 u_s および u に対応する流束は、

$$q_w = \theta u_w \quad (2.2)$$

$$q_s = \sigma u_s \quad (2.3)$$

$$q = \theta u \quad (2.4)$$

と書ける。ここで、 θ は体積含水率、 σ は固相率である。(2.2)式、(2.3)式、(2.4)式を(2.1)式に代入すると、

$$q_w = q + \frac{\theta}{\sigma} q_s \quad (2.5)$$

粘土中の水分移動はダルシー則で与えられると仮定すると、鉛直一次元では水の土粒子に対する流束 q は次式で与えられる。

$$q = -k \frac{\partial \phi_{wT}}{\partial z} \quad (2.6)$$

k は透水係数である。 ϕ_{wT} は水の全ポテンシャルである。

また、水の流束 q_w にもダルシー則を適用すると、

$$q_w = -k_w \frac{\partial \phi_{wT}}{\partial z} \quad (2.7)$$

ここで、 k_w はみかけの透水係数である。

また、水分拡散係数 D_w を次式で定義する。

$$D_w = k_w \frac{d\phi_{wT}}{d\theta} \quad (2.8)$$

水の全ポテンシャルが体積含水率のみの関数と仮定すると(2.7)式、(2.8)式より、

$$q_w = -D_w \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2.9)$$

と書き表すことができる。

一方、水の浸潤に伴う粘土の膨潤すなわち体積膨張は、移動論の立場からみれば系内の土粒子の移動に伴う固相率の変化とみることができる。この土粒子の移動は、固相の全ポテンシャルの勾配によって誘起されるものと考え、試料中のある位置の土粒子の流束 q_s は、

$$q_s = -k_s \frac{\partial \phi_{sT}}{\partial z} \quad (2.10)$$

で与えられる。

ここで、 k_s は固相率の関数であり、透水係数のアナロジーとして導入された固相伝導係数と呼ぶ。 ϕ_{sT} は土粒子移動の要因となる土粒子の全ポテンシャルである。

また、固相拡散係数 D_s を次式で定義する。

$$D_s = k_s \frac{d\phi_{sT}}{d\sigma} \quad (2.11)$$

(2.10)式、(2.11)式より、

$$q_s = -D_s \frac{\partial \sigma}{\partial z} \quad (2.12)$$

と書き表すことができる。

ここで、ベントナイトのような膨潤性粘土では、土粒子の全ポテンシャルのうち膨潤圧に起因するポテンシャルが支配的であり、これを粒子ポテンシャル ψ_{sm} とし、水に関してはマトリックポテンシャル ψ_{wm} が支配的であると仮定し、次式の関係性を定義する。

$$\frac{\partial \psi_{sm}}{\partial z} = -\nu \frac{\partial \psi_{wm}}{\partial z} \quad (2.13)$$

上式において $\nu=1$ とし、(2.6)式、(2.7)式、(2.10)式、(2.13)式を(2.5)式に代入すると、透水係数、固相伝導係数は以下の関係で表される。

$$k_w = k - k_s \frac{\theta}{\sigma} \quad (2.14)$$

また、(2.8)式、(2.11)式より、 D_s と D_w の関係は次式で表される。

$$\frac{D_s}{D_w} = - \frac{k_s \frac{d\sigma}{d\theta}}{k - k_s \frac{\theta}{\sigma}} \quad (2.15)$$

連続条件より、水の移動は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q_w}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

と組合せて

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (2.17)$$

固相の移動は、連続条件

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial z} = 0 \quad (2.18)$$

と組合せて

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_s \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right) \quad (2.19)$$

と表すことができる。

体積含水率 θ と固相率 σ との間には

$$\theta + \sigma \leq 1.0 \quad (2.20)$$

が成立する。すなわち、不飽和領域では不等号、飽和領域では等号が成立する。したがって、不飽和領域では水および土粒子の移動は(2.17)式および(2.19)式によって振舞うことになる。飽和領域では $(\partial \theta / \partial z) + (\partial \sigma / \partial z) = 0$ すなわち、 $q_w / q_s = D_w / D_s$ となるように水と土粒子の流束が相互に制約される。また、そのもとで水分分布、固相率分布が決められる。

2.2 固相拡散理論

既往研究において提案された固相拡散理論は、前述の 2 相系物質移動論において、完全飽和状態 ($\theta + \sigma = 1.0$) を前提として理論を簡略化したものである。

(2.16)式、(2.18)式より、

$$\frac{\partial(\theta + \sigma)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} (q_w + q_s) \quad (2.21)$$

完全飽和でかつ本検討対象のように、 $z = 0$ において流束が発生しない場合、任意の点において

$$q_w + q_s = 0 \quad (2.22)$$

が成立する。

(2.7)式, (2.10)式, (2.13)式を(2.2)式に代入し,

$$k_w = k_s \quad (2.23)$$

また, (2.14)式より,

$$k_s = \sigma k \quad (2.24)$$

が求まる。

また, ψ_{sm} は膨潤圧 Ps と密接に関係していると考えられることから, 飽和条件では次式で表されると仮定し, ψ_{sm} を次のように表している。

$$\psi_{sm} = \frac{Ps}{\rho_w g} \quad (2.25)$$

したがって, (2.11)式は次式で表されとしている。

$$D_s = \frac{\sigma k}{\rho_w g} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (2.26)$$

ここで, ρ_w は水の密度, g は重力加速度である。

すなわち, 固相拡散係数は透水係数と膨潤圧の関数となる。また, 透水係数, 膨潤圧は固相率 (乾燥密度) の関数となるため, 理論的に固相拡散係数は固相率の関数で表される。

2.3 本検討の位置付けおよび検討アプローチ

2.2 節の固相拡散理論は, 2.1 節の 2 相系物質移動論に対し, 評価対象が,

- ・完全飽和であること ($\theta + \sigma = 1.0$)
- ・閉じた系であること ($q_w + q_s = 0$)
- ・土粒子の全ポテンシャルのうち膨潤圧に起因するポテンシャルが支配的, 水に関してはマトリックポテンシャルが支配的であり, かつマトリックポテンシャルの絶対値 (サクション) と粒子ポテンシャルが等しいこと ($\frac{\partial \psi_{sm}}{\partial z} = -\frac{\partial \psi_{wm}}{\partial z}$)
- ・粒子ポテンシャルは膨潤圧と等価であること ($\psi_{sm} = \frac{Ps}{\rho_w g}$)

という制約および仮定条件を満たして初めて(2.26)式が成立する。

これに対し, 既往検討では比較的複雑な境界条件の侵入試験 (初期不飽和条件, 二次元軸対称, コア部／亀裂部の連係等) をシミュレーションの対象としており, コア部の固相拡散係数には

(2.26)式を用い、亀裂部にはニュートン流体の平面ポアズイユ流れを仮定した次式(2.27)を定義した上で、ベントナイトの粘度データの拡充を重点的に行ってきた。

$$D_s = \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (2.27)$$

ここで、 μ_s は粘度、 d は亀裂幅である。

しかしながらコア部における拡散挙動（自由膨潤挙動）の検討、いわゆる単純系での試験の挙動と理論の整合性についての検討が十分ではないこと、また、ニュートン流体の平面ポアズイユ流れは移流方程式であり、基本的に固相拡散理論とは前提が異なることなどから、モデルの適用性の検討はこれらの仮定の妥当性を確認した後に行われるべき項目と考えられる。

以上の観点から、本検討では緩衝材の侵入現象に関して、論理的に拡散理論の検証を行い、理論の適用性評価および最適パラメータの設定を試みる。なお、本検討では 2 相系物質移動論の制約条件下での、(2.26)式に基づく拡散理論を「固相拡散理論」と呼び、これを亀裂内挙動に展開した(2.27)式に基づく拡散理論を「亀裂部固相拡散理論」と呼び、明確に区分する。

3. 固相拡散理論の検証

固相拡散理論の成立性を検証するため、自由膨潤挙動に対するシミュレーションおよび考察を行い、モデルの見直し、ならびに固相拡散係数の設定を試みた。

3.1 自由膨潤試験

3.1.1 試験概要

試験条件を表 3.1 に示す。本試験では試料をあらかじめ飽和セルで飽和させた初期飽和条件の試験である。試験手順は以下の通りである。

- ① 目標寸法で所定の初期乾燥密度となる重量の試料を $\phi 19.0 \times h19.0\text{mm}$ の圧縮成型治具にて圧縮成型する。
 - ② $\phi 19.5 \times h19.5\text{mm}$ の飽和セルにて飽和する。
 - ③ アクリル製のメスシリンダに試料設置後水を供給し、膨潤試験を開始する。
 - ④ 所定の時間経過ごとに垂直変位および X 線 CT スキャナにより乾燥密度分布を測定する。
- 試験状況を図 3.1 に示す。

表 3.1 自由膨潤試験条件

試料	ベントナイト（クニゲル V1）100%		
試験水	蒸留水		
初期乾燥密度 $\rho_0 [\text{Mg m}^{-3}]$	1.2, 1.4, 1.6, 1.8		
初期含水比[%]	10.46		
目標寸法[mm]	$\phi 20 \times h20$ （メスシリンダは $\phi 20$ ）		
湿潤重量[g]	1.2 Mg m^{-3} : 8.33	1.4 Mg m^{-3} : 9.72	
	1.6 Mg m^{-3} : 11.11	1.8 Mg m^{-3} : 12.49	
試験温度	室温		

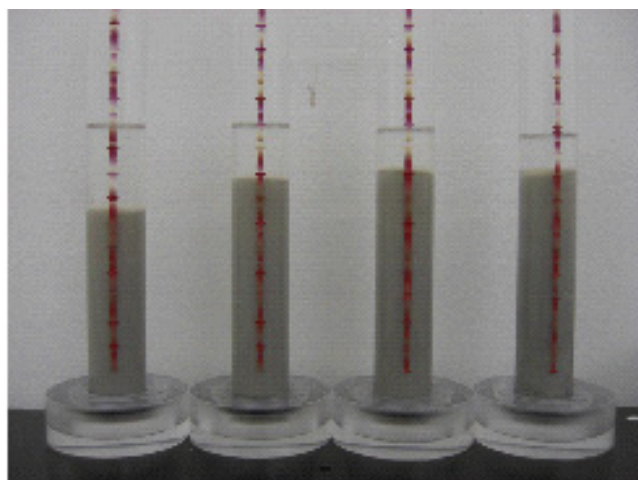


図 3.1 自由膨潤試験状況

3.1.2 試験結果

各乾燥密度ケースの固相率プロファイルを図 3.2～図 3.5 に示す。固相率は乾燥密度／ベントナイトの土粒子密度で求められる。ここで、ベントナイトの土粒子密度は 2.7Mg m^{-3} とした。また、固相率のプロファイルは、連続的な曲線となるようスムージング補正を行った。

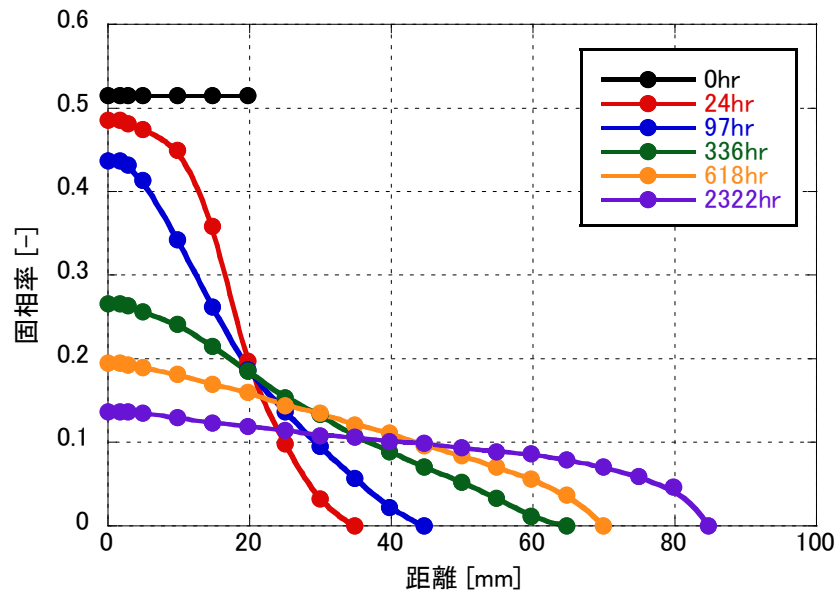


図 3.2 自由膨潤試験による固相率プロファイル($\rho_0=1.2\text{Mg m}^{-3}$)

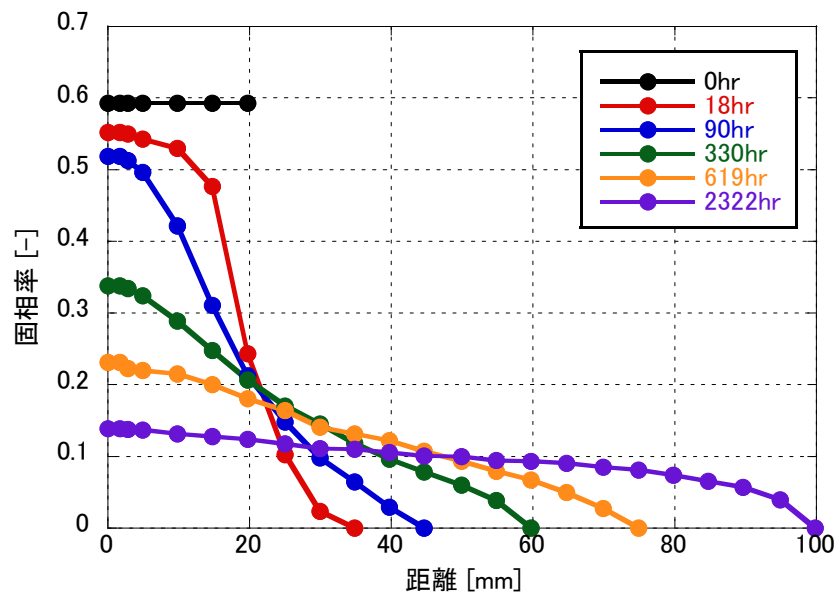


図 3.3 自由膨潤試験による固相率プロファイル($\rho_0=1.4\text{Mg m}^{-3}$)

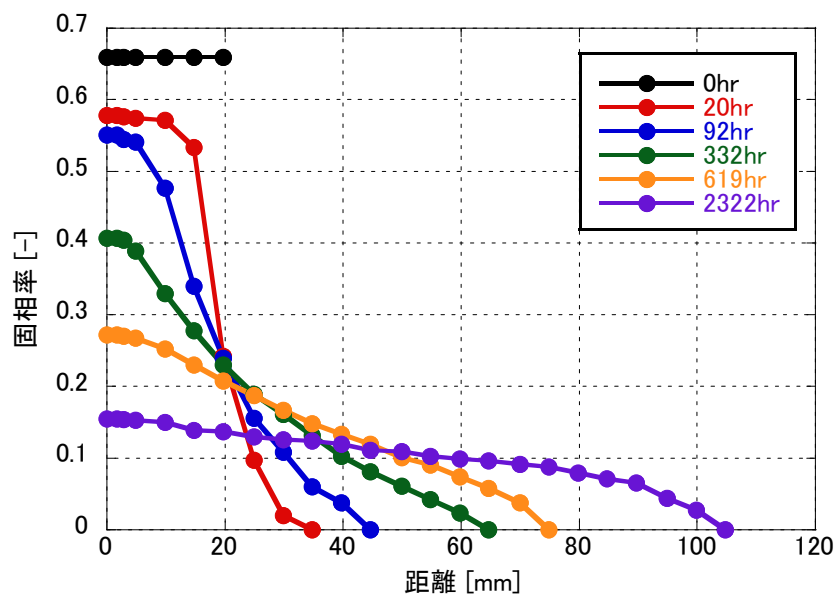


図 3.4 自由膨潤試験による固相率プロファイル($\rho_0=1.6\text{Mg m}^{-3}$)

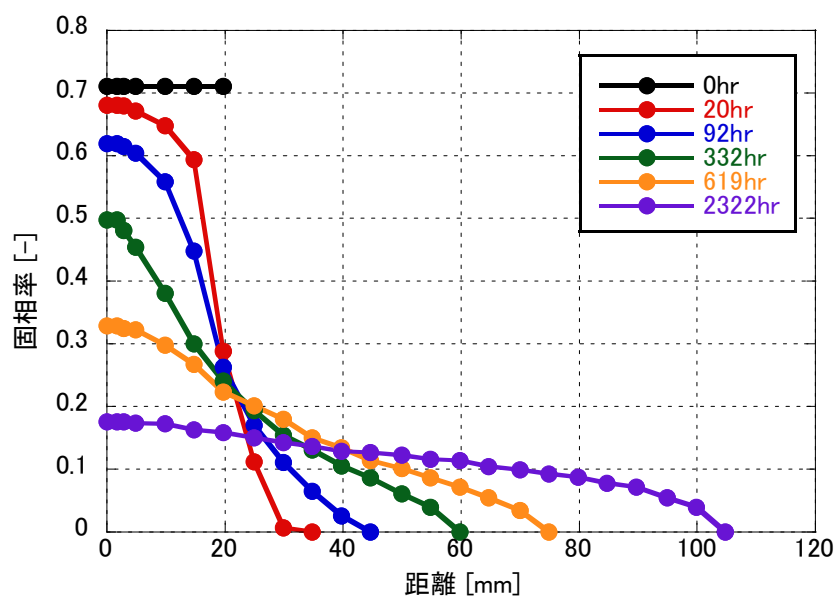


図 3.5 自由膨潤試験による固相率プロファイル($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$)

自由膨潤試験は閉じた系であるため、各時間における固相率プロファイルが成す面積より求められる重量は一定となるはずである。これを確認するため、実際の試料の乾燥重量（以下、「実重量」；湿潤重量と初期含水比から算出。目標寸法 $\phi 20 \times h20 \times$ 初期乾燥密度から求まる「理論重量」と同じとなる。）とプロファイルが成す面積より求めた重量率（プロファイル重量）を求めた。図 3.6 に重量率の経時変化を示す。飽和セルの寸法は $\phi 19.5 \times h19.5$ であるため、試験開始時 (0hr) は半径方向に隙間があり所定の乾燥密度より高くなっているが、プロファイル上の寸法は目標寸法 $\phi 20 \times h20$ で計算するためプロファイル重量は実重量より計算上大きくなる。そこで、0hr における計算上のプロファイル重量の妥当性を確認するため、飽和セル取出し時の実際の乾燥密度で目標寸法 $\phi 20 \times h20$ を満たしていると想定して重量率を求め、参考として図示した。

図より“飽和セル取出し時密度 $\times (\phi 20 \times h20)$ ”と想定した重量と実際の乾燥重量は 108%であるのに対し、0hr におけるプロファイル重量率は 105~114%で大きな差はないことから、0hr におけるプロファイル重量はほぼ妥当である。その後、全ケースで時間経過とともに重量比は低下を続け、20~90hr あたりで理論重量を下回り、最終的には 90%前後でほぼ収束した。20hr あたりまでの急激な低下は、半径方向の隙間を埋める膨潤による密度低下が大きく影響し、20~90hr あたりで半径方向の隙間を完全に充填、均一化したため、対理論重量が 100%に至ったものと推測できる。論理的には 100%で収束するはずであるが、90hr 超で理論重量を下回る挙動は全ケースでほぼ同一の傾向であるため、測定誤差や測定値のドリフト等とは考えにくい。

試験の観察状況からは、ベントナイトゲル頂部において二層分離が観察でき、分離上部では白濁していることが確認されている。このことから、実際にはゲルフロントにおいてベントナイト粒子の粒子拡散が生じているが、X 線 CT スキャナではこの拡散分を測定しきれなかった可能性が考えられる。試料全重量の 10%前後もの重量が粒子拡散したのかどうかは確認できていないものの、固相拡散係数の算出にあたってはこの重量ロス分の取り扱いが大きく影響する。したがって、本検討では水中にベントナイト粒子が粒子拡散したという前提で補正を行った。

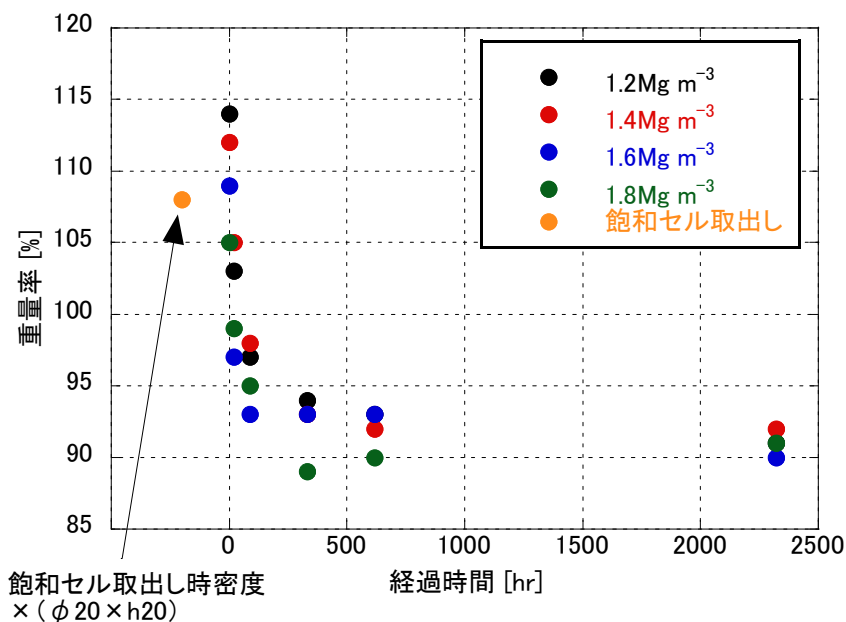


図 3.6 実際の試料の乾燥重量とプロファイルより求めた重量率の経時変化

3.2 固相拡散係数の設定

3.2.1 自由膨潤試験に基づく固相拡散係数の設定

固相拡散係数は、(2.12)式より次式で表される。

$$D_s = - \frac{q_s}{\frac{\partial \sigma}{\partial z}} \quad (3.1)$$

したがって、時刻 t_1 , t_2 における固相率プロファイルより、任意の点 z において平均的には、次式(3.2)で求めることができる。

$$D_s = - \frac{\int_z^L (\sigma_{t=t_2} - \sigma_{t=t_1}) dz}{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \sigma}{\partial z} \right)_{t=t_2} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial z} \right)_{t=t_1} \right\}} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \quad (3.2)$$

ここで、 L は試料長さである。上式にしたがい、図 3.2～図 3.5 より固相率と固相拡散係数の関係を求めるが、3.1.2 項に述べたように、概ね 20hr までは半径方向の隙間を膨潤により充填する影響を含んでいるものと推察されることから 20hr 程度までのデータは計算上除外した。また、時間経過にともなう重量ロス分は粒子拡散分として補正した。

図 3.7～図 3.10 に自由膨潤試験より求められた任意の時間区間における固相率と固相拡散係数の関係を示す。図より、いずれのケースでも固相率が大きくなるほど固相拡散係数は減少する傾向で、時間経過にしたがって全体的に小さくなっている。図 3.2～図 3.5 より約 2300 時間後では各試験でほぼ同じ固相率分布となっていることから、長期的には上載荷重によるポテンシャル分布で平衡状態になるものと考えられる。また、試料内のポテンシャルが重力ポテンシャルを無視し得ると考えられる約 600hr までは各初期乾燥密度、各時間範囲でほぼ同じ関係となっている。このことから本検討では共通の固相拡散係数のフィッティングライン（以下、コア部フィッティングライン）を設定して図中に示した。解析用設定値については、 $\sigma=0.2$ 以下は $D_s=3.00 \times 10^{-10} [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$ で一定、 $\sigma=0.4$ 以上は $D_s=1.00 \times 10^{-10} [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$ で一定、 $0.2 < \sigma < 0.4$ の間は直線で結ぶように設定した。コア部フィッティングラインのテーブルを表 3.2 に示す。

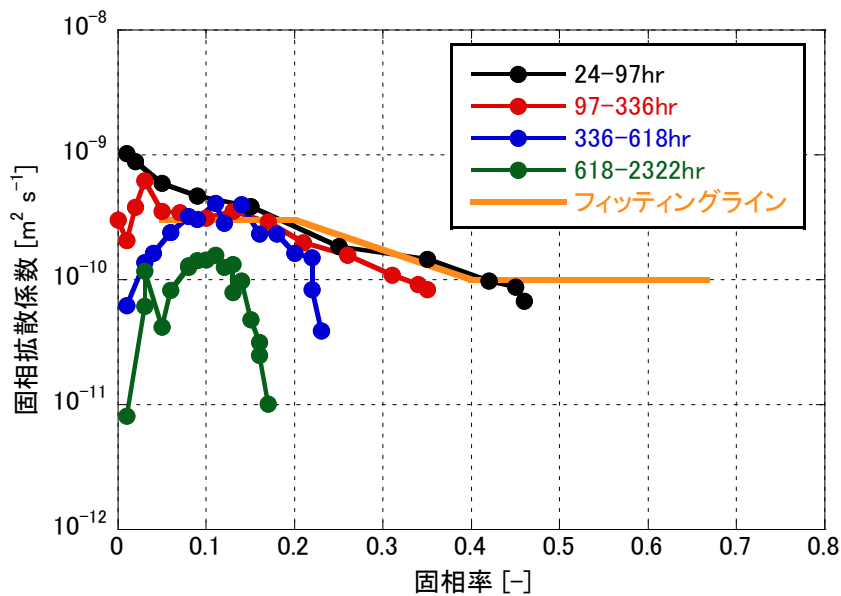


図 3.7 自由膨潤試験により求められた固相拡散係数($\rho_0=1.2\text{Mg m}^{-3}$)

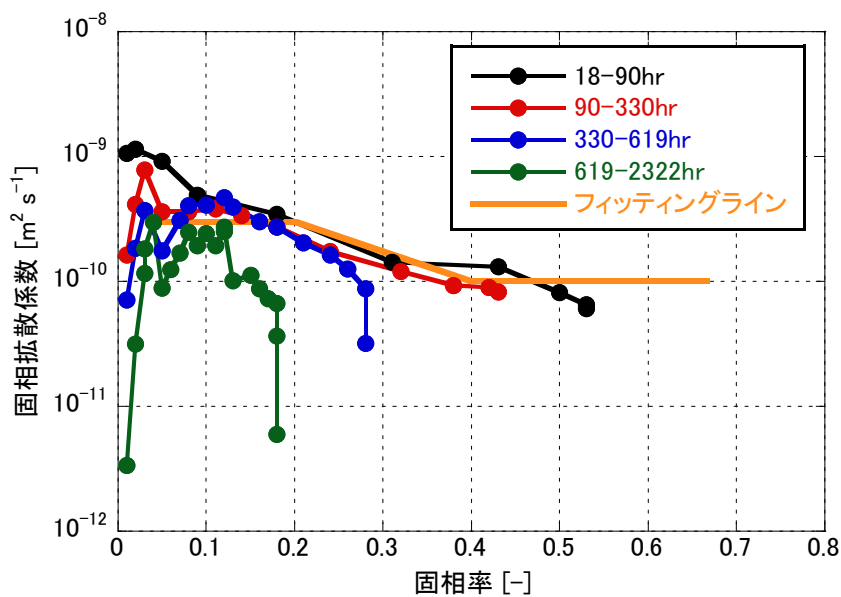


図 3.8 自由膨潤試験により求められた固相拡散係数($\rho_0=1.4\text{Mg m}^{-3}$)

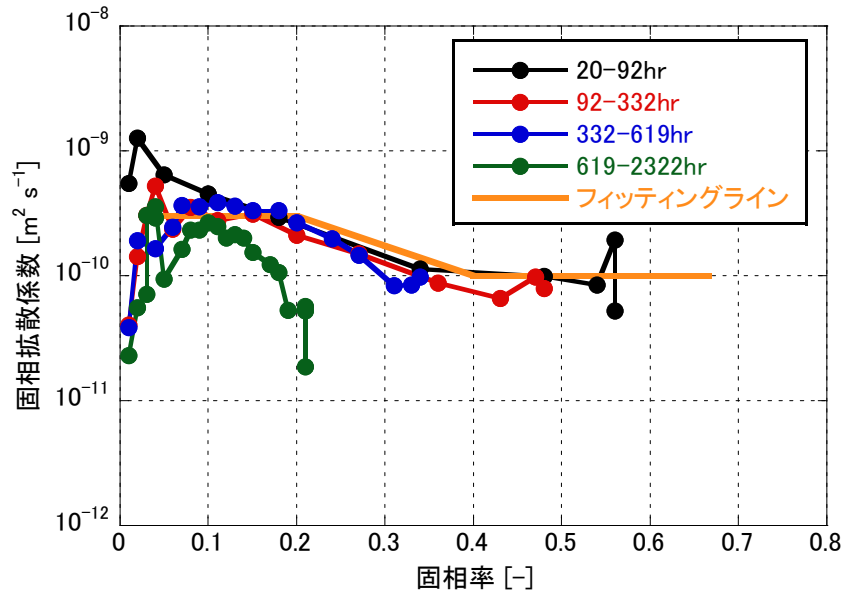
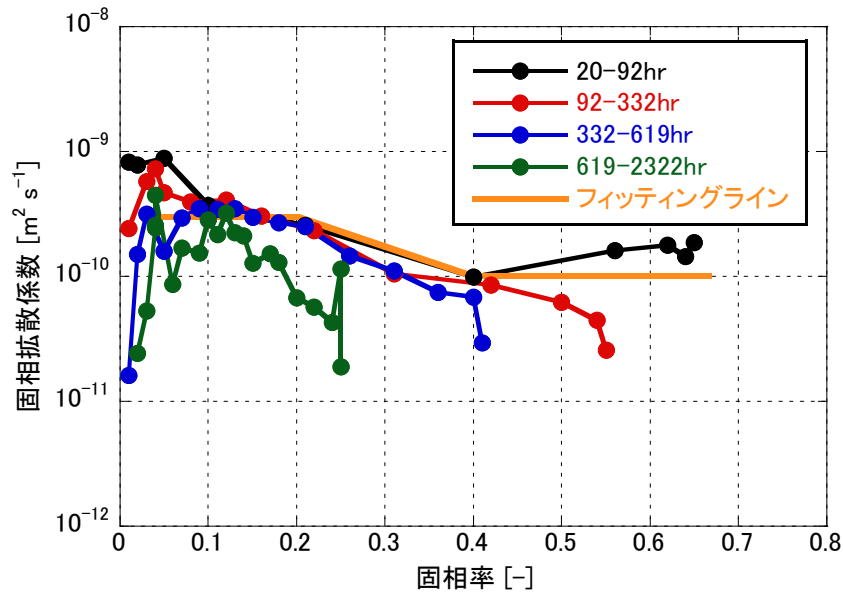
図 3.9 自由膨潤試験により求められた固相拡散係数($\rho_0=1.6\text{Mg m}^{-3}$)図 3.10 自由膨潤試験により求められた固相拡散係数($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$)

表 3.2 コア部フィッティングラインテーブル

固相率 σ [-]	固相拡散係数 D_s [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
0	0
0.05	3.00×10^{-10}
0.2	3.00×10^{-10}
0.3	1.73×10^{-10}
0.4	1.00×10^{-10}
0.5	1.00×10^{-10}
0.6	1.00×10^{-10}
0.67	1.00×10^{-10}

3.2.2 理論に基づく固相拡散係数の設定

固相拡散係数は、固相率と透水係数の関係および固相率と膨潤圧の関係によって(2.26)式より理論的に求める事ができる。

既往検討で設定した固相率と透水係数の関係、固相率と膨潤圧の関係およびこれから求めた固相率と固相拡散係数の理論値（ベントナイト配合率 100%，モンモリロナイト含有率 60%）を図 3.11, 図 3.12, 図 3.13 に示す。（それぞれ松本ほか⁴⁾の図 2.15, 図 2.16, 図 2.20 に相当する。）

既往検討では、この D_s を用いた自由膨潤挙動（コア部の挙動）の検証は行っていない。

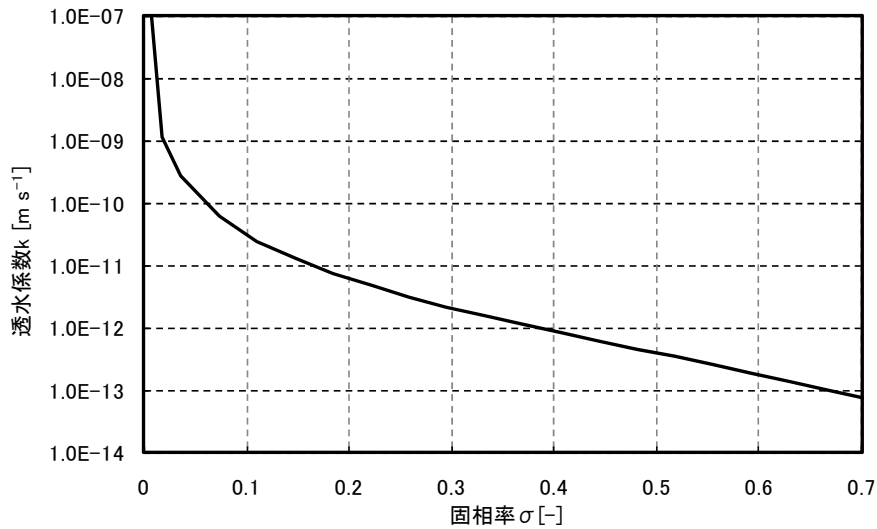


図 3.11 固相率と透水係数の関係（小峯・緒方評価式）

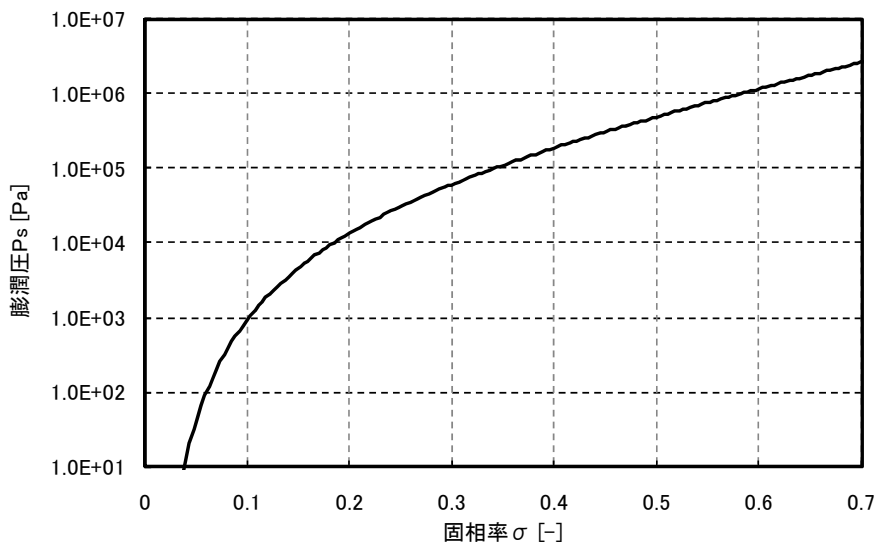


図 3.12 固相率と膨潤圧の関係（小峯・緒方評価式）

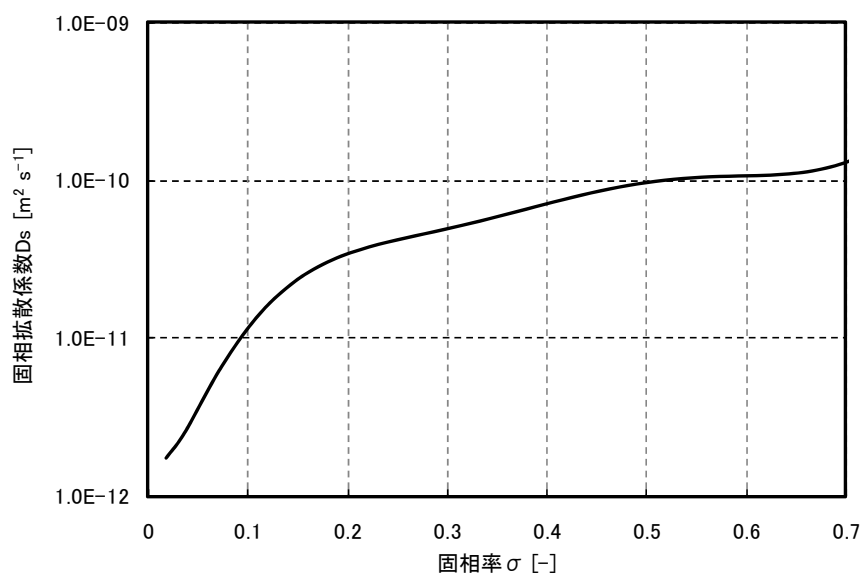


図 3.13 固相率と固相拡散係数の関係（理論値）

3.2.3 固相拡散係数の理論値と実験の比較

図 3.7～図 3.10 に示したコア部フィッティングラインと図 3.13 のモデルによる理論値を併せて図 3.14 に示す。理論値は基本的に固相率 σ が大きくなると D_s は上昇傾向、コア部フィッティングラインは基本的に固相率 σ が大きくなると D_s は減少しており逆の傾向である。 $\sigma=0.4$ 以上で両者は概ね $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ で一致しているが、固相率が低いほど両者の乖離は大きくなり、 $\sigma=0.1$ で 1 オーダー以上乖離した。

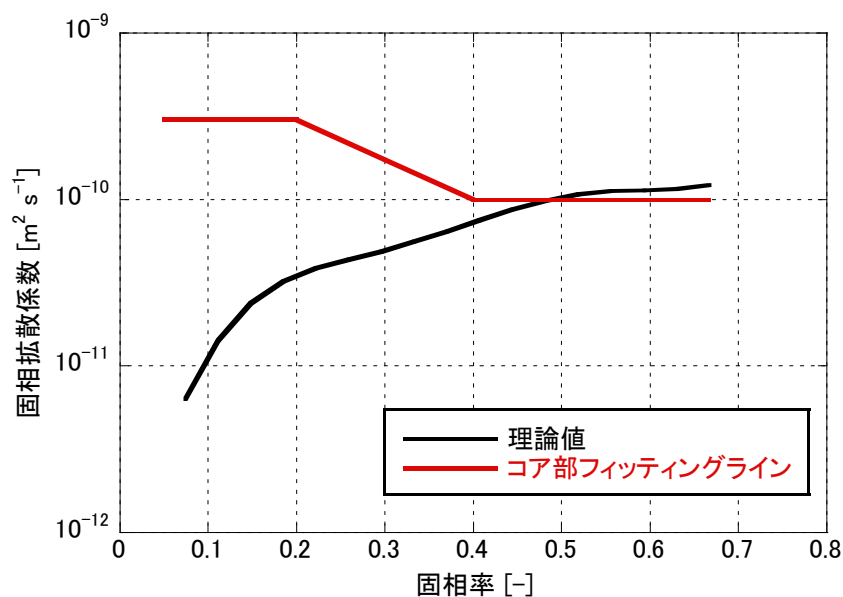


図 3.14 理論値とコア部フィッティングラインの比較

3.3 自由膨潤試験のシミュレーション

図 3.14 の固相拡散係数理論値とコア部フィッティングラインの乖離による解析結果への影響の程度を確認するために、両者の固相拡散係数を用いて、自由膨潤試験のシミュレーション解析を行った。

3.3.1 解析コードおよび改良項目の概要

シミュレーションコードには Dtransu-2D・EL（以下、Dtransu）を使用した⁷⁾。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。

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。本研究で設定した拡散係数（分散係数）は固相率に応じて変化するため、この挙動を Dtransu で扱うために、拡散係数（分散係数）が固相率（Dtransu の機能で言う「濃度」に当たる）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 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（読み飛ばす）行である。

改良された D_{transu} の中では分散係数は相対分散係数を用いて以下のように扱われる。

$$\begin{aligned} D_L &= (\alpha_L v_L + D_m) \times D_r \\ D_T &= (\alpha_T v_T + D_m) \times D_r \end{aligned} \quad (3.3)$$

$D_{L,T}$ 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。

なお、本研究⁸⁾において ABAQUS で行った解析⁴⁾と同一条件での解析との結果比較を行い、ほぼ一致したことを確認しており、解析コードの妥当性は検証済みである。

3.3.2 解析結果

図 3.15 に解析モデルを示す。実際の試験は円柱形であるが一次元拡散であるため、二次元平面モデルとして取り扱った。

各乾燥密度における理論値およびコア部フィッティングラインによるシミュレーション結果を図 3.16～図 3.23 に、コンター図の例（乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} ）を図 3.24、図 3.25 に示す。図より、コア部フィッティングラインによって、それぞれの乾燥密度ケース、時間区切りにおけるプロファイルをはほぼ表現できている。一方、理論値によるシミュレーションは、低固相率域での D_s が実測より大幅に小さいため、試験結果に比べて拡散速度（膨潤）が遅く、プロファイルを表現できていない。したがって、両者の固相拡散係数の乖離は解析結果においても顕著に現れている。これらの結果より、理論値は適切なパラメータとは言い難い。

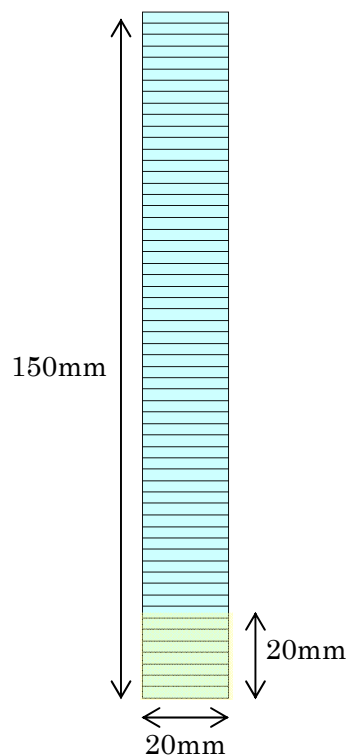


図 3.15 自由膨潤試験解析モデル

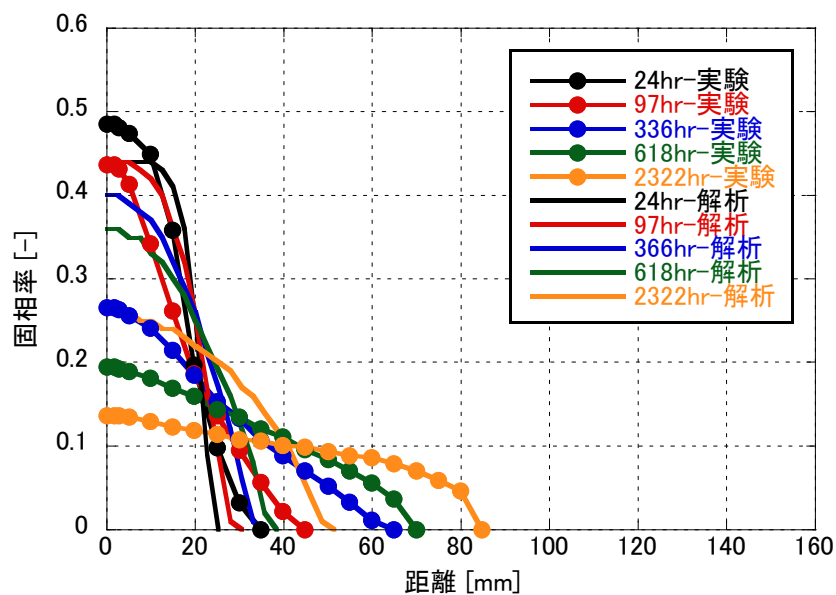


図 3.16 自由膨潤試験のシミュレーション結果($\rho_0=1.2\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)

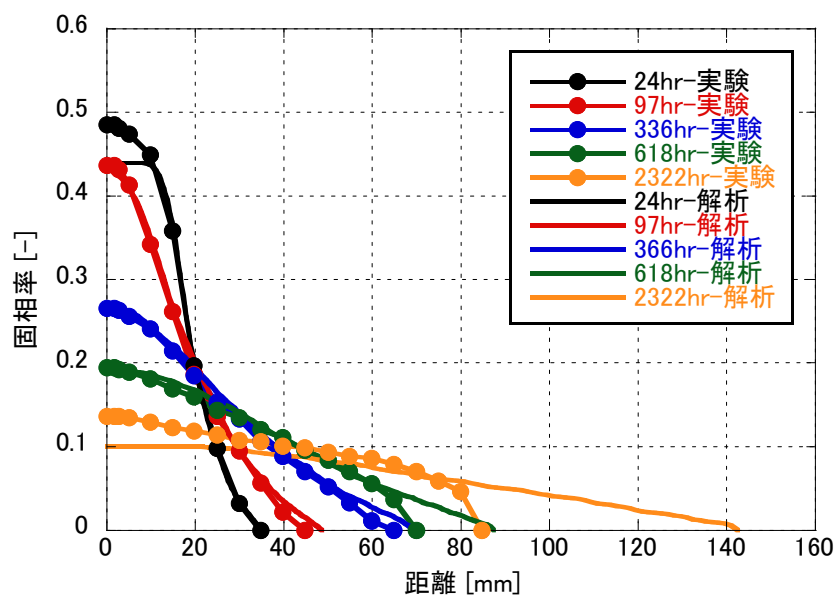


図 3.17 自由膨潤試験のシミュレーション結果($\rho_0=1.2\text{Mg m}^{-3}$, フィッティングライン)

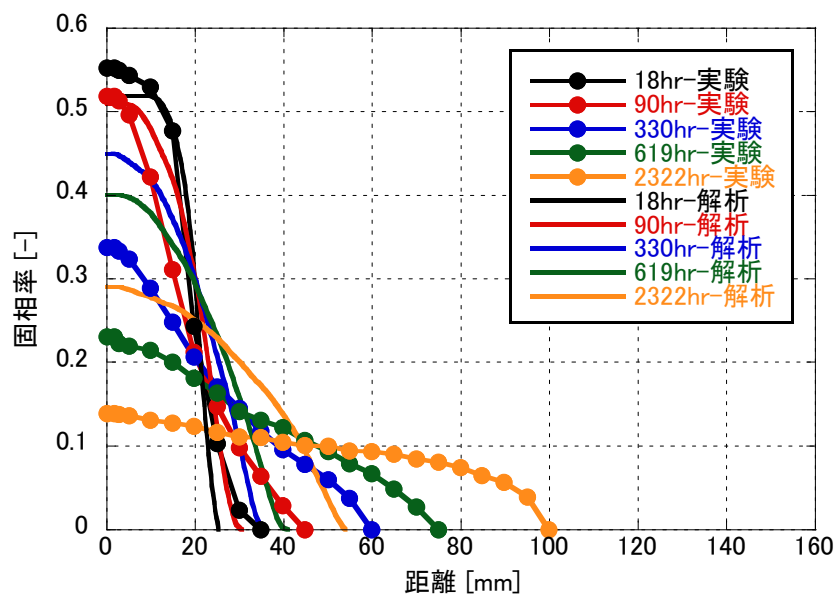


図 3.18 自由膨潤試験のシミュレーション結果($\rho_0=1.4\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)

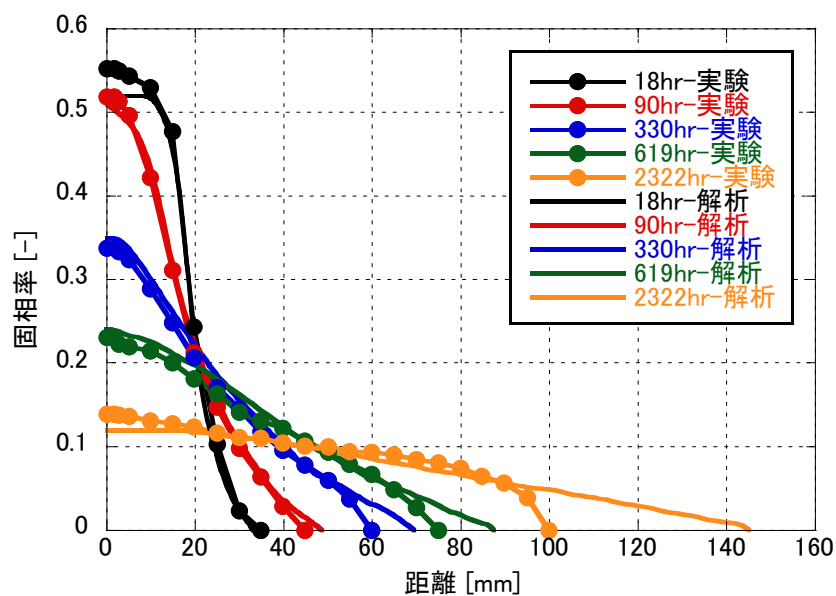


図 3.19 自由膨潤試験のシミュレーション結果($\rho_0=1.4\text{Mg m}^{-3}$, フィッティングライン)

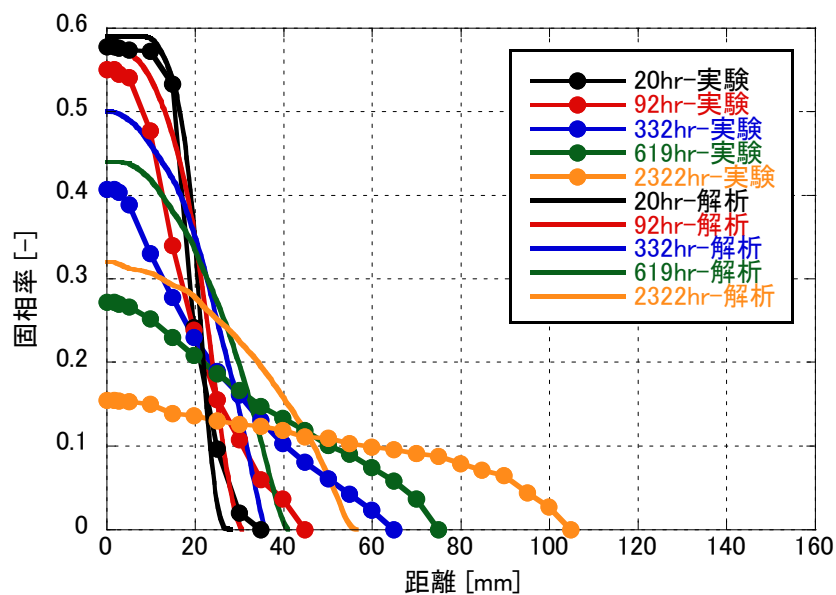


図 3.20 自由膨潤試験のシミュレーション結果($\rho_0=1.6\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)

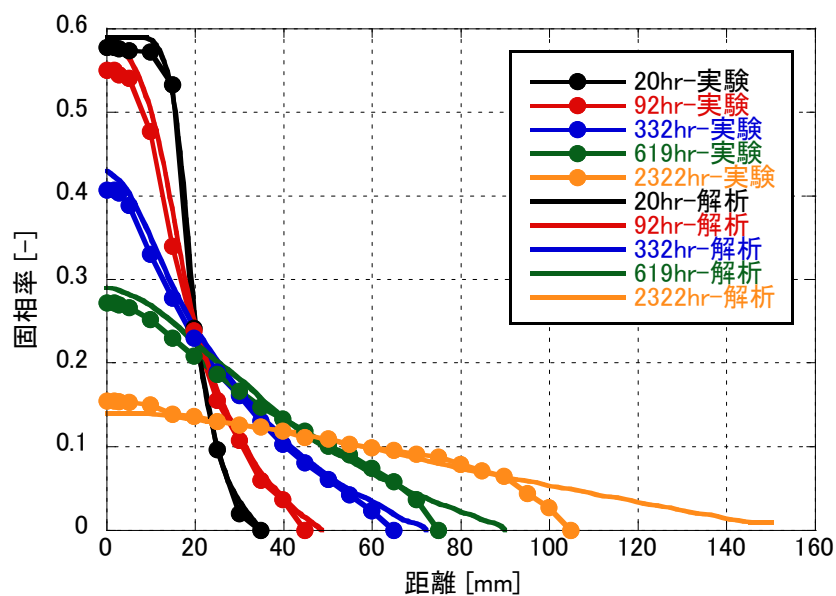


図 3.21 自由膨潤試験のシミュレーション結果($\rho_0=1.6\text{Mg m}^{-3}$, フィットティングライン)

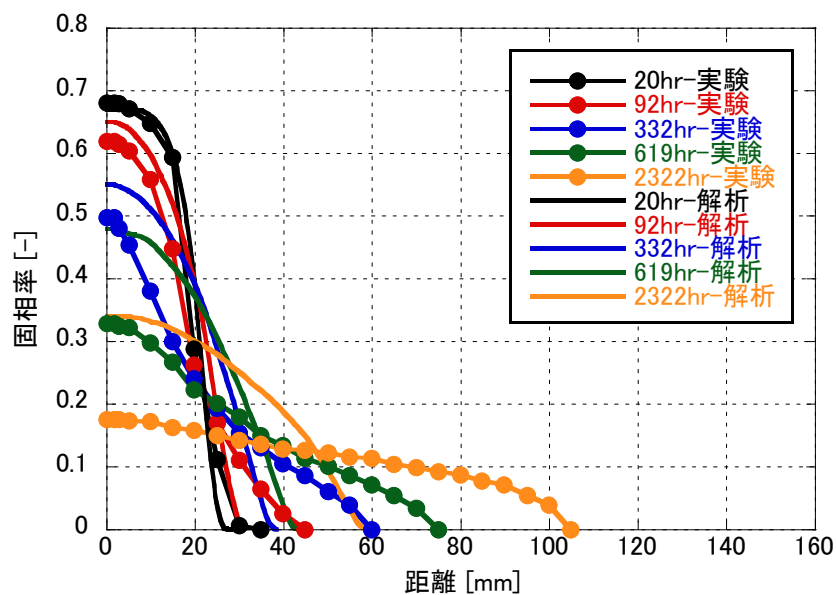


図 3.22 自由膨潤試験のシミュレーション結果($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)

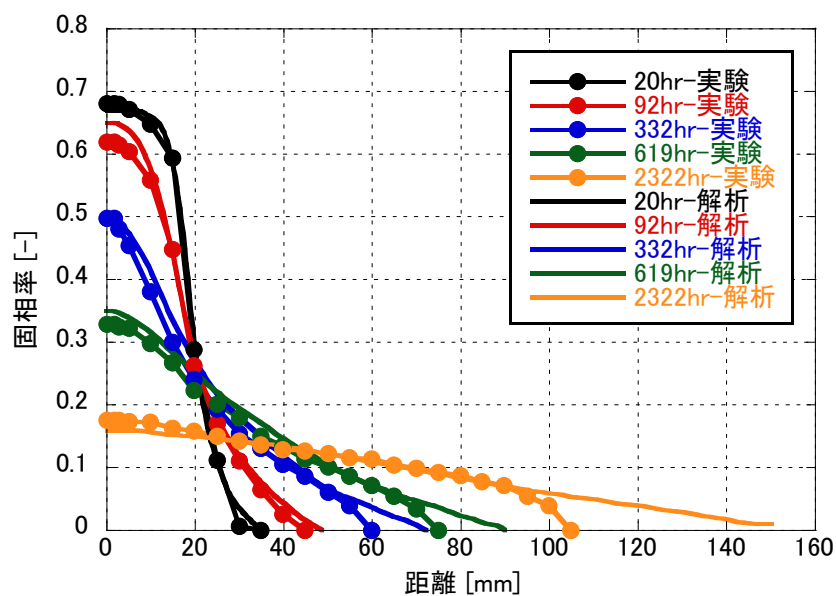


図 3.23 自由膨潤試験のシミュレーション結果($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$, フィッティングライン)

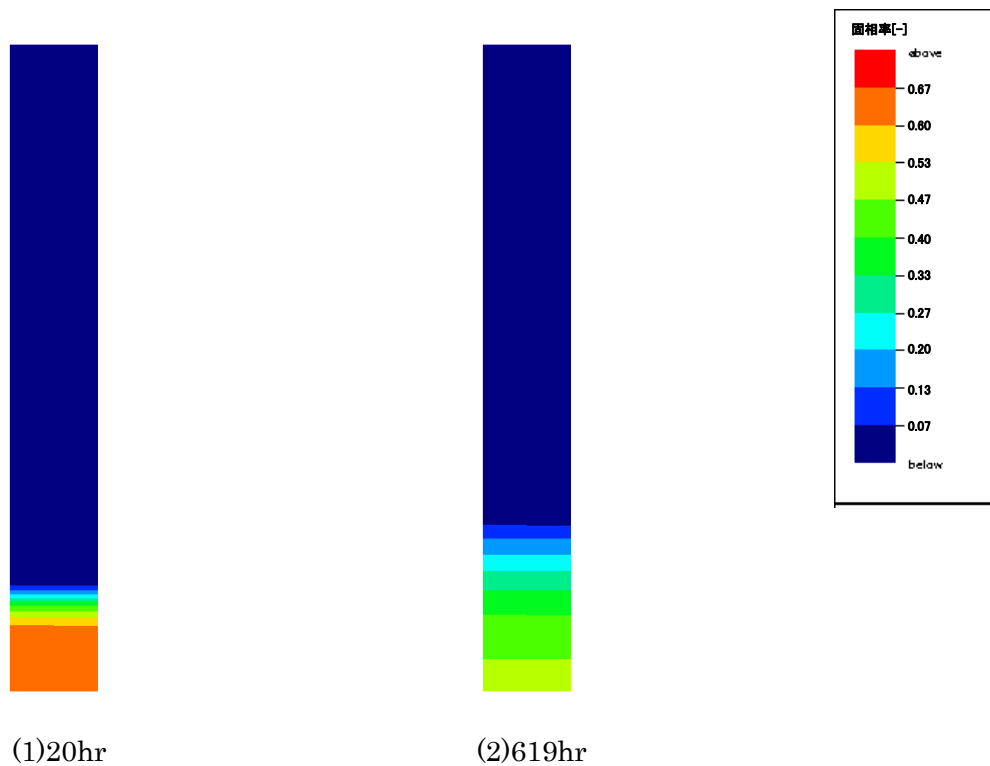


図 3.24 自由膨潤試験解析コンター図($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$, 理論値)

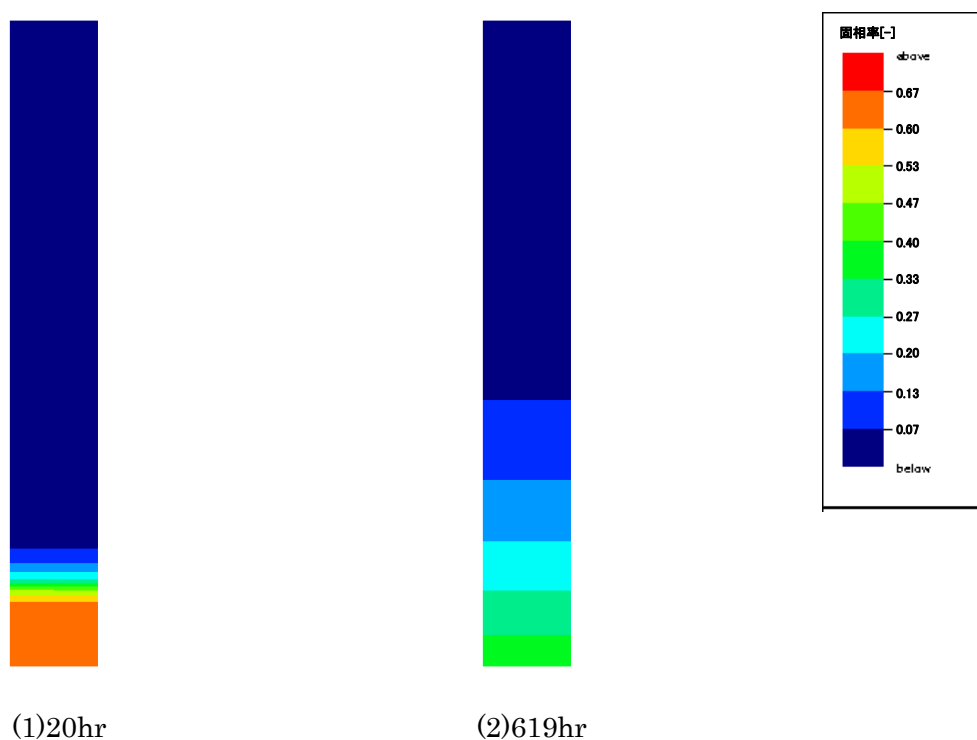


図 3.25 自由膨潤試験解析コンター図($\rho_0=1.8\text{Mg m}^{-3}$, フィッティングライン)

3.4 乖離要因の検討

固相拡散理論値が一次元の自由膨潤挙動を適切に表現できていないということは、理論の成立性の根幹に係わる問題である。そこで、コア部フィッティングラインとの乖離要因について多角的に検討し、成立性についてより詳細に検討した。表 3.3 に考えられる乖離要因を整理する。

検討した乖離要因は次の 4 つである。以下ではこれらの要因の影響について検討・考察を行った。

- ①試験が完全飽和であること、閉じた系であることという前提条件を満たしていない可能性
- ②土粒子および水のポテンシャルに関する固相拡散理論の仮定条件が成立していない可能性
- ③理論値に用いた要素試験の精度
- ④固相拡散理論の元となる 2 相系物質移動論において、ベントナイト材料固有の特徴を反映していない可能性

表 3.3 乖離要因一覧

項目	概要
①自由膨潤試験の前提条件の成立性 (3.4.1 項)	自由膨潤試験が、2.2 章に示す固相拡散理論が成立するための下記的前提条件を満たしていない可能性 ・ 完全飽和であること ・ 閉じた系であること
②固相拡散理論の仮定条件の成立性 (3.4.2 項)	2 相系物質移動論を固相拡散理論に展開するにあたって、ベントナイト材料が 2.2 章に示す下記の仮定条件を満たしていない可能性 ・ 土粒子の全ポテンシャルのうち膨潤圧に起因するポテンシャルが支配的, 水に関してはマトリックポテンシャルが支配的であり, かつマトリックポテンシャルの絶対値と粒子ポテンシャルが等しいこと ・ 粒子ポテンシャルは膨潤圧と等価であること
③透水試験, 膨潤圧試験精度 (3.4.3 項)	理論値の設定に用いた透水試験データ, 膨潤圧データの精度, 広範囲な密度領域における近似方法に問題がある可能性
④2 相系物質移動論自体の成立性 (3.4.4 項)	2 相系物質移動論においてベントナイト材料固有の特徴（モンモリロナイト層間に固定された水の流れへの寄与に関する考え方）を反映していない可能性

3.4.1 自由膨潤試験の前提条件の成立性

自由膨潤試験が、2.2 節に示す固相拡散理論が成立するための下記的前提条件を満たしていない可能性が考えられる。

- ・完全飽和であること ($\theta + \sigma = 1.0$)
- ・閉じた系であること ($q_w + q_s = 0$)

しかし、今回取得した自由膨潤試験は初期飽和試験であり、かつ、初期の供試体寸法がメスシリンドラ径より一回り小さく、隙間を埋める時間と予想される初期のデータは除外していることから、評価期間において $\theta + \sigma = 1.0$ の前提条件は成立していると考えられる。また、試験機構上、閉じた系であることは自明であるが、CT 値から求まる重量についてもこれを粒子拡散分として補正することにより、 $q_w + q_s = 0$ の前提条件を確保している。

3.4.2 固相拡散理論の仮定条件の成立性

2 相系物質移動論を固相拡散理論に展開するにあたっては、ベントナイト材料が 2.2 節に示す下記の条件を満たしていると仮定している

- ・土粒子の全ポテンシャルのうち膨潤圧に起因するポテンシャルが支配的、水に関してはマトリックポテンシャルが支配的であり、かつマトリックポテンシャルの絶対値と粒子ポテンシャルが等しいこと ($\frac{\partial \psi_{sm}}{\partial z} = -\frac{\partial \psi_{wm}}{\partial z}$)

- ・粒子ポテンシャルは膨潤圧と等価であること ($\psi_s = \frac{Ps}{\rho_w g}$)

これらの成立性を検討するにあたり、まず土壌水のポテンシャルについて一般論を整理した上で、本概念のベントナイトへの展開について考察する。

(1)一般的な土壌における水の全ポテンシャル

土壌水には、土粒子との間の付着力や重力、さらにはイオンが溶け込むことで発生する浸透圧などが作用している。これらによって、土壌水のポテンシャルは「ある高さにある基準面の自由水」のポテンシャルとは異なってくる。したがって、土壌水の全ポテンシャル (ϕ_{wT}) は、これらの力に起因する各々のポテンシャルの総和となり、次式で表される。

$$\phi_{wT} = \psi_{wg} + \psi_{wm} + \psi_{wp} + \psi_{wa} + \psi_{ws} \quad (3.4)$$

ここで、 ψ_{wg} は、重力ポテンシャル (位置ポテンシャルとも呼ぶ)、 ψ_{wm} はマトリックポテンシャル、 ψ_{wp} は静水圧ポテンシャル、 ψ_{wa} は空気圧ポテンシャル、 ψ_{ws} は浸透ポテンシャルである。上式に示した 5 つ以外にもポテンシャル成分は存在するが、一般にはこの 5 つを考慮すれば良い。

(i)重力ポテンシャル (ψ_{wg})

重力場における基準面との高さの差によるポテンシャルである。重力ポテンシャルは、他のポテンシャル成分とは異なり、土壌水の化学的な状態や圧力条件には関係なく、相対的な高さだけ

で決まる。したがって、基準面をどこに設定するかによってその値の正負が決定される。例えば、基準面を地下水面とすると $\psi_{wg} > 0$ となり、基準面を地表面とすると $\psi_{wg} < 0$ となる。重力ポテンシャル（水頭）はある地点の高さと基準高さとの差（相対的な高さ）に等しい。

(ii) マトリックポテンシャル (ψ_{wm})

土壌の固相のことを土壌マトリックスと呼ぶ。マトリックポテンシャルとは、一般的には水と土壌マトリックスとの間に働く毛管力（付着力）に由来するポテンシャルのことをいう。このポテンシャルは飽和状態にあるときは作用しない。なぜならば、間隙が水で満たされた状態では表面張力が作用しないからである。したがって、不飽和土壌においてのみ表われるポテンシャル成分となる。付着力の作用によって水のポテンシャルエネルギーは間隙空気のそれよりも低下するため、大気圧を 0 とするゲージ圧で表すと、マトリックポテンシャルは常に負となる。

ψ_{wm} のもう一つの重要な性質として、土壌湿潤度（体積含水率あるいは含水比）と関数関係を有する点が挙げられる。この関数関係を土壌水分特性曲線（あるいは土壌水分保持曲線）といい、土壌の保水性を表現する重要な指標である。

(iii) 静水圧ポテンシャル (ψ_{wp})

土壌が飽和状態にあるとき、土壌には静水圧がかかる。この静水圧に起因するポテンシャルを静水圧ポテンシャルという。

(iv) 空気圧ポテンシャル (ψ_{wa})

土壌中の空気圧に起因するポテンシャルであり、土壌空気の圧力と基準圧力との差に等しい。土壌空気の圧力は周辺空気の圧力に等しい。したがって、大気圧下にある土壌では $\psi_{wa} = 0$ となる。ただし、加圧（あるいは減圧）された空気中に土壌を静置した場合には加圧（あるいは減圧）した圧力と基準圧力との差が ψ_{wa} となる。

(v) 浸透ポテンシャル (ψ_{ws})

土壌水が溶質を含むことにより生じるポテンシャルであり、土壌溶液の浸透圧を π [J m^{-3}] あるいは [Pa] とすると、浸透ポテンシャル $\psi_{ws} = -\frac{\pi}{\rho_w g}$ となる。

なお、マトリックポテンシャル ψ_{wm} と浸透ポテンシャル ψ_{ws} の和を水ポテンシャル (ϕ_w) という。一方、粒子ポテンシャルも同様に

$$\phi_{sT} = \psi_{sg} + \psi_{sm} + \psi_{sp} + \psi_{sa} + \psi_{ss} \quad (3.5)$$

と表すことができる。

自然界ではすべての物体はポテンシャルエネルギーの高い方から低い方へ移動し、最終的には周りと平衡する。平衡状態にある系のポテンシャルエネルギーは場所に関係なく等しい。したがって、土壌水および土粒子の移動にこのことを当てはめると、「土壌水および土粒子は全ポテンシ

ルの大きい方から小さい方に移動し、平衡状態となる。平衡状態となった全ポテンシャルは場所に関係なく等しい」と定義することができる。

(2) 膨潤性粘土における水および粒子ポテンシャルに関する考察

完全飽和条件である自由膨潤試験環境においては、空気圧ポテンシャル ψ_{wa} は発生せず、また、重力ポテンシャル ψ_{wg} と静水圧ポテンシャル ψ_{wp} の和は任意の点において等しい。また、間隙水は蒸留水であるため、浸透ポテンシャルも任意の点で0である。すなわち、水のポテンシャルはマトリックポテンシャル ψ_{wm} が支配的である。したがって、

$$\phi_{wT} = \psi_{wm} + const. \quad (3.6)$$

膨潤性を有しない一般粘土では、先述のように飽和状態では毛管力に由来するマトリックポテンシャルは作用しないが、マトリックポテンシャルを土と水の相互作用によるポテンシャルの低下量と考えれば、膨潤性粘土では飽和状態でもマトリックポテンシャルが作用しているものと考えることができる。すなわち、ベントナイトの場合、主成分鉱物であるモンモリロナイトは層間陽イオンが水溶液中では層表面から電気二重層を形成すると同時に、モンモリロナイト粒子間に生ずる陽イオンの濃度勾配により浸透圧が発生し、濃度勾配を減少させようとしてさらなる水分が層間に侵入することにより膨潤すると考えられており、土粒子（層間水を含む）にはこれに起因する粒子ポテンシャル ψ_{sm} が作用すると同時に、土壤水（外部間隙水）にはこれと反対にマトリックポテンシャル（ ψ_{wm} ）が作用することとなる（外力が作用しない場合）。ちなみに、溶液濃度や溶質の種類によりモンモリロナイト粒子間に生ずる陽イオンの濃度勾配が変わり浸透圧も変わることから、溶液濃度によって土壤水の浸透ポテンシャルに直接影響するだけでなく、マトリックポテンシャルも変化すると考えられる。

(3.5)式において土粒子にはこの粒子ポテンシャルの他に重力ポテンシャル ψ_{sg} と載圧荷重によるポテンシャル ψ_{sp} が作用すると考えられるが、膨潤圧は上載圧ポテンシャルの一部と見なすことができるので、土粒子の全ポテンシャルは、試料底を0、試料位置を z とすると、

$$\phi_{sT} = z + \psi_{sm} \quad (3.7)$$

となる。この意味は、ポテンシャル勾配が、

$$\frac{\partial \phi_{sT}}{\partial z} = 1 + \frac{\partial \psi_{sm}}{\partial z} \quad (3.8)$$

となることから、試料長さを L とおくと、平衡状態（ $\frac{\partial \phi_{sT}}{\partial z} = 0$ ）は $\psi_{sm} = L - z$ の上載荷重によるポテンシャルを受けた状態であることを意味している。厳密には超長期評価を行う場合には、この重力による影響を考慮しないと平衡状態の密度分布が異なるが、実際の評価対象は水平亀裂であり重力の影響は無視でき、粒子ポテンシャルが支配的であるとみなすことができる。

次に、粒子ポテンシャルと不飽和状態のサクシヨンの比較を行った。なお、サクシオンは、マ

トリックポテンシャルの絶対値である。

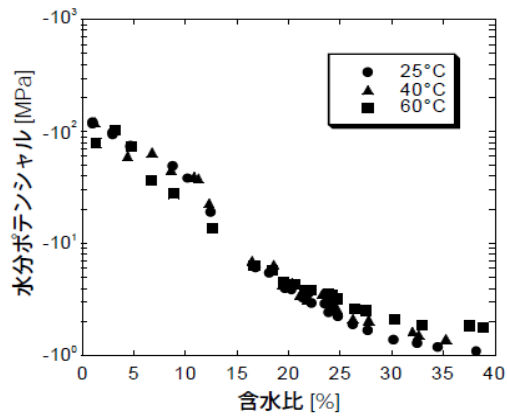
鈴木ら⁹⁾は、熱伝対サイクロメータを用いて水分ポテンシャル（本報告書ではマトリックポテンシャルと定義）の測定を行っている。図 3.26 にベントナイト単体による試験結果を示す。また、この結果より、水分ポテンシャルを含水比の関数として次式の関係を導入している。

$$\psi_{wm} = \rho_w g (1.37 \times 10^3 T - 1.23 \times 10^5) \times \exp(-9.5 \times 10^{-3} \omega^2) - 3.5 \times 10^4 \omega^{-0.95} \quad (3.9)$$

ここで、 ψ_{wm} は水分ポテンシャル（応力標記） [Pa]、 ω は含水比[%]、 T は温度[°C]、 ρ は水の密度[Mg m⁻³]、 g は重力加速度[cm s⁻²]である。

ベントナイトの不飽和状態における水分ポテンシャルは、主に膨潤に起因するポテンシャル低下と毛管力に由来するポテンシャル低下の和と考えられる。図 3.27 に示すように一般的に土壌水の水分ポテンシャルは絶乾状態で -10^3 MPa、最適含水比で -10^{-1} MPa 程度である、図 3.26 より、絶乾状態に近い状態ではサクシオンは一般土と近いと考えられるが、最適含水比（ $\omega=15\sim 20\%$ 程度）ではベントナイトの方が 40～100 倍程度水分ポテンシャルが低く、これは自然状態では水分ポテンシャルは膨潤に起因するポテンシャル低下が支配的であることを示唆している。

図 3.26 においてベントナイトが完全飽和であると仮定すると、含水比と固相率は 1 対 1 の関係となるため、上式をサクシオンと固相率の関係（ $T=25^\circ\text{C}$ ）として整理し、併せて膨潤圧と固相率の関係について整理したものを図 3.28 に示す。なお、膨潤圧と固相率の関係は緩衝材データベース¹¹⁾より、クニゲル V1、蒸留水、室温のデータのみを抜粋したものである。ここで、膨潤圧は有効粘土密度で統一的に整理される知見に基づき、ケイ砂混合体についてはベントナイト分のみの固相率（有効粘土密度／ベントナイト土粒子密度）とした。図より、不飽和状態のサクシオンと飽和状態の膨潤圧は固相と水の体積比率で整理すると、サクシオンを測定した含水比 40%（固相率 0.48 相当）以上ではサクシオンは膨潤圧のほぼ上限を通ることが分かった。以上のことから、粒子ポテンシャルを膨潤圧とすれば、サクシオンとほぼ一致することから、マトリックポテンシャルの絶対値（サクシオン）と粒子ポテンシャルが等しく、粒子ポテンシャルは膨潤圧と等価であるという仮定は飽和条件でも成立しているといえる。

図 3.26 ベントナイト単体材料の水分特性曲線⁹⁾

保水性の 試験方法	土中水の ポテンシャル値		土 の 状 態	
	$\log(-\psi)$ $\psi: \text{kPa}$	$\log(-\psi)$ $\psi: \text{kPa}$	農学上の用語	工学上の用語
メータイク ロ法	5.5	6.0		炉 乾 燥
	5.2			
	3.5	4.5	5.5	気 乾 燥
	3.2	3.2	4.2 永久しおれ点	収縮限界
	2.5	3.0	3.5 初期しおれ点	
加速 圧心 法	2.0	2.0	3.0 成長阻害水分	最適含水比
	1.5			
	1.0			
吸引 法	0.5	0.5	1.8 圃場含水量	液性限界
			1.5	
			0 最大含水量	
土柱 法				

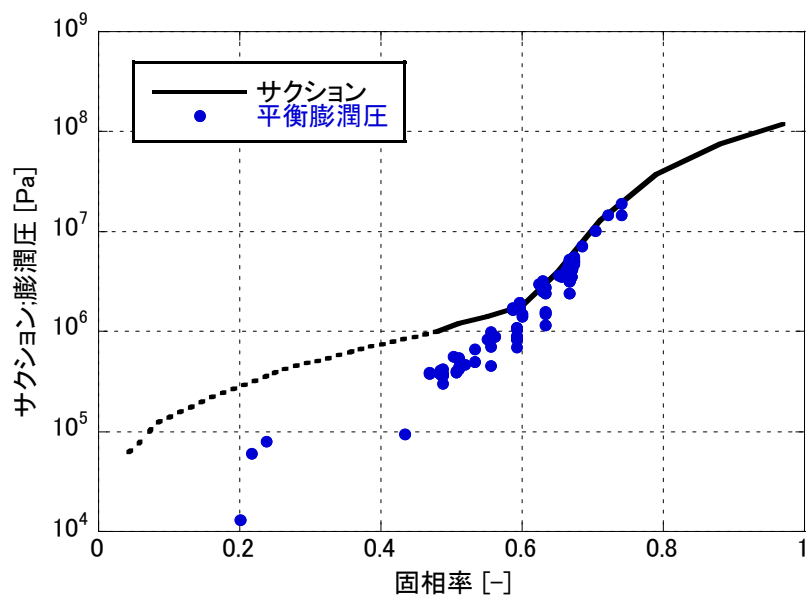
図 3.27 土壌水のポテンシャルとその状態¹⁰⁾

図 3.28 固相率とサクシオン／膨潤圧の関係

3.4.3 透水係数, 膨潤圧試験精度

理論式中の透水係数, 膨潤圧パラメータは, 図 3.11, 図 3.12 の固相率との関係を適用している。これらの妥当性について検討した。

(1) 透水試験データ

固相率と透水係数の関係は, 次に示す小峯・緒方式¹²⁾を用いている。

$$k = 1.10 \times 10^{-17} (\varepsilon_{sv}^*)^{2.02} \quad [m/s] \quad (3.10)$$

ここで ε_{sv}^* は, モンモリロナイト膨潤体積ひずみで, 次式で表される。

$$\varepsilon_{sv}^* = \left\{ e_0 + \frac{\varepsilon_{s\max}}{100} (e_0 + 1) \right\} \left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\} \times 100 \quad (3.11)$$

$$e_0 = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1 \quad (3.12)$$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}} \quad (3.13)$$

ここで,

- $\varepsilon_{s\max}$: 緩衝材・埋戻し材の最大膨潤率[%]
- e_0 : 緩衝材・埋戻し材の初期間隙比[-]
- C_m : ベントナイトのモンモリロナイト含有率[%]
- ρ_{d0} : 緩衝材・埋戻し材の初期乾燥密度[Mg m⁻³]
- α : ベントナイト配合率[%]
- ρ_m : モンモリロナイトの土粒子密度[Mg m⁻³]
- ρ_{nm} : モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度[Mg m⁻³]
- ρ_{sand} : 砂粒子密度[Mg m⁻³]
- ρ_{solid} : 土粒子平均密度[Mg m⁻³]

図 3.29 は, 小峯・緒方による透水試験データ (モンモリロナイト膨潤体積ひずみと透水係数の関係) と, それに基づく (3.10) 式の回帰式である。なお, 小峯・緒方は, (3.11)~(3.13) 式において, $C_m=48\%$, $\rho_m=2.77 \text{ Mg m}^{-3}$, $\rho_{nm}=2.81 \text{ Mg m}^{-3}$, $\rho_{sand}=2.66 \text{ Mg m}^{-3}$ としている。

既存の透水試験データをモンモリロナイト膨潤体積ひずみとの関係で整理し, 小峯・緒方のデ

ータに重ね合わせたものを図 3.30 に示す。なお、透水試験データは緩衝材データベースより、クニゲル V1, 蒸留水, 室温相当のデータのみを抜粋したものである。モンモリロナイト含有率 C_m は 48% とし、土粒子密度は $\rho_m = \rho_{nm} = 2.7 \text{ Mg m}^{-3}$, $\rho_{sand} = 2.64 \text{ Mg m}^{-3}$ とした。図より、両者のデータは良い一致を見せている。

また、データのモンモリロナイト膨潤体積ひずみは約 100%～4000%であり、これをベントナイト配合率 100%とにおいて固相率に換算すると 0.04～0.64 に相当する。これは、図 3.7～図 3.10 に示す自由膨潤試験の固相率範囲を網羅している。ただし、小峯・緒方による透水試験におけるモンモリロナイト膨潤体積ひずみ 2000%以上のデータは、実際はベントナイト配合比 5%, 乾燥密度 $1.43 \sim 1.67 [\text{Mg m}^{-3}]$ 条件のものである。この仕様とベントナイト配合率 100%の低密度（低固相率）仕様での透水係数が同等かどうかについては確認しておく必要がある。

以上のことから、(3.10)式は評価対象の固相率範囲において比較的信頼性の高いデータであると言える。ただし、クニゲル V1 の C_m は透水試験データ取得時の 48% に対し、近年用いられているものは 60% と高くなっていることから、図 3.11 は $C_m = 60\%$, $\alpha = 100\%$, $\rho_m = 2.77 \text{ Mg m}^{-3}$, $\rho_{nm} = 2.81 \text{ Mg m}^{-3}$, ($\rho_{sand} = 2.66 \text{ Mg m}^{-3}$) とした場合の ε_{sv}^* に基づいている。本検討は C_m は 60% とするが、土粒子密度に関しては先述の設定値である $\rho_m = \rho_{nm} = 2.7 \text{ Mg m}^{-3}$, ($\rho_{sand} = 2.64 \text{ Mg m}^{-3}$) に見直すこととする。見直し後の固相率と透水係数の関係を図 3.31 に示す。ただし、数%程度の密度の修正であるため、図 3.11 とは大きく変わらない。

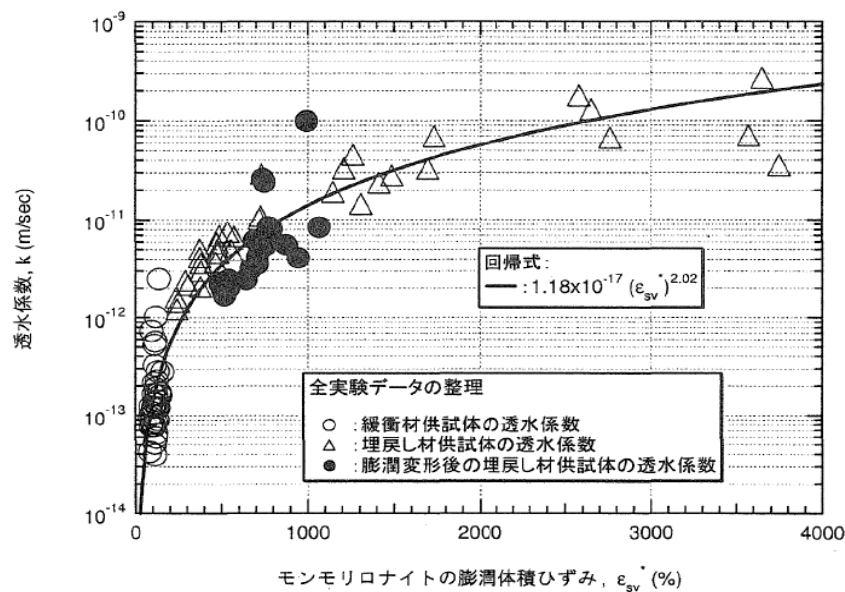


図 3.29 モンモリロナイト膨潤体積ひずみと透水係数の関係

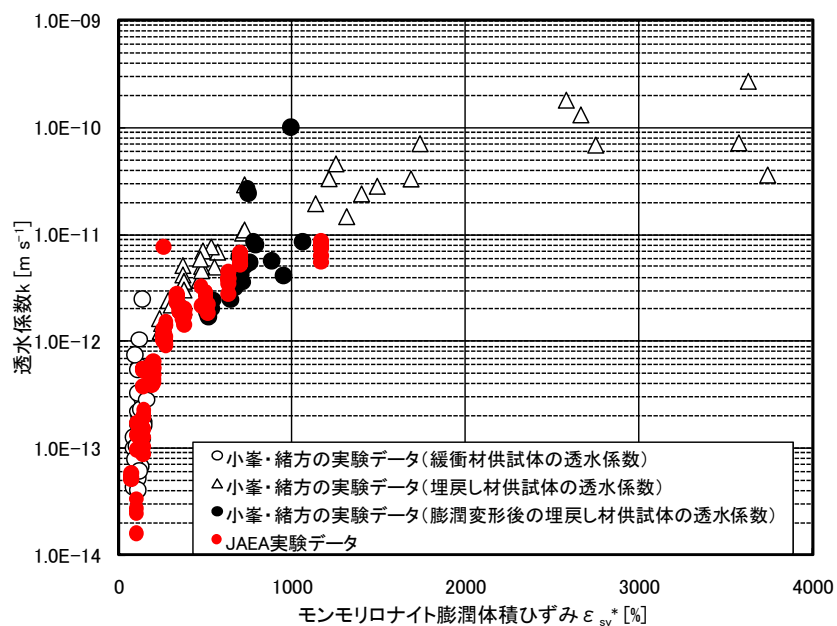


図 3.30 小峯・緒方および JAEA による透水試験データ

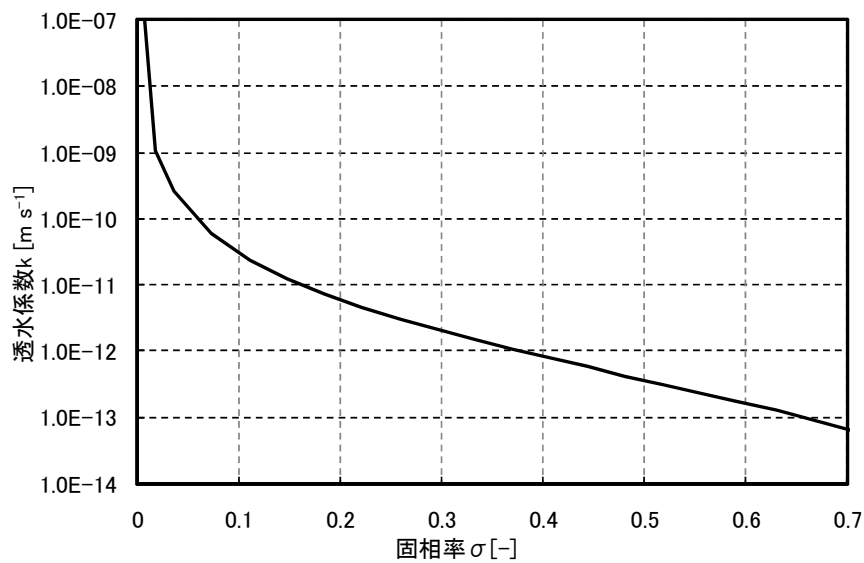


図 3.31 見直し後の固相率と透水係数の関係

(2) 膨潤圧試験データ

固相率と膨潤圧の関係は、小峯・緒方による膨潤評価式¹³⁾を用いている。小峯・緒方による膨潤圧試験結果と膨潤評価式の計算結果との比較を図 3.32 に示す。図より、膨潤評価式の計算結果は、膨潤圧試験結果とほぼ整合している。

一方、JAEA における膨潤圧試験結果と膨潤評価式の計算結果を比較するため、初期乾燥密度と膨潤圧の関係で整理したものを図 3.33 に、有効粘土密度との関係で統一的に整理したものを図 3.34 に示す。ここで、試験データは緩衝材データベースより、クニゲル V1、蒸留水、室温のデータのみを抜粋したものであり、図 3.28 で整理したデータと同じである。また、膨潤圧評価式において土粒子密度は設定値である $\rho_m = \rho_{nm} = 2.7 \text{ Mg m}^{-3}$ 、 $\rho_{sand} = 2.64 \text{ Mg m}^{-3}$ とした。図より、膨潤圧試験結果は総じて膨潤評価式より高く、乾燥密度が高くなるほど乖離が大きい傾向にある。膨潤圧については圧縮成型方法や試料寸法、装置機構（給水方法など）、測定時間、載荷履歴などによってばらつくことが考えられ、いずれの膨潤圧が実際の物性値に近いかは今のところ判断できない。したがって、膨潤評価式に加え膨潤圧試験結果による近似式（以下、JAEA 近似式という）の両ケースを設定することにより、膨潤圧データの不確実性を考慮する必要がある。

図 3.35 に設定した膨潤評価式と JAEA 近似式による固相率と膨潤圧の関係の近似式を示す。なお、膨潤評価式においてはモンモリロナイト含有率、土粒子密度は、透水係数データの検討の条件と同様 $C_m = 60\%$ 、 $\rho_m = \rho_{nm} = 2.7 \text{ Mg m}^{-3}$ 、 $\rho_{sand} = 2.64 \text{ Mg m}^{-3}$ である。膨潤評価式の近似式、JAEA 近似式をそれぞれ次式とする。

(膨潤評価式による近似式：ケース 1)

$$P_s = 10^{274.4\sigma^5 - 618.73\sigma^4 + 536.98\sigma^3 - 226.25\sigma^2 + 51.441\sigma - 0.4087} \quad (3.14)$$

(JAEA 近似式：ケース 2)

$$P_s = 10^{4.7042\sigma^2 + 0.5691\sigma + 4.1395} \quad (3.15)$$

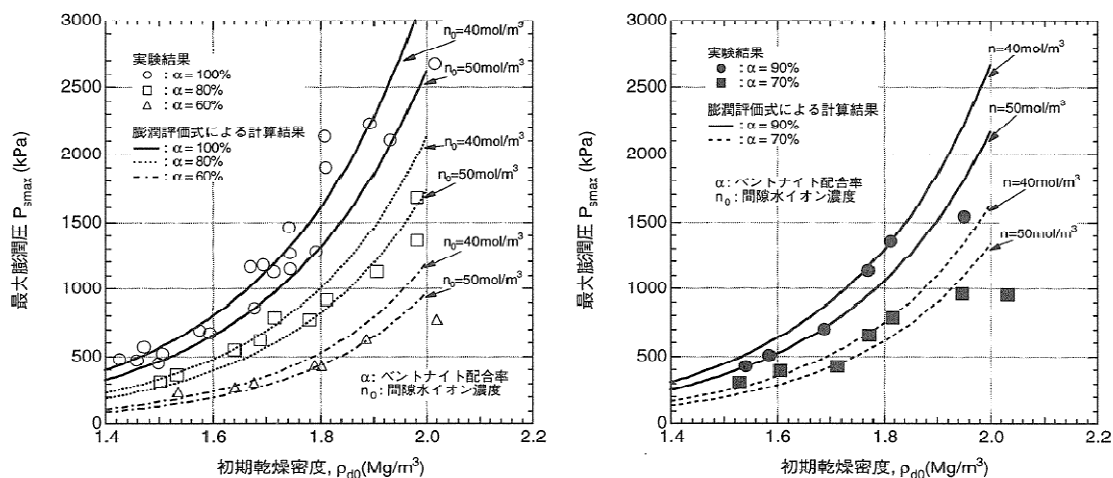


図 3.32 小峯・緒方による膨潤圧試験結果と膨潤評価式の計算結果との比較

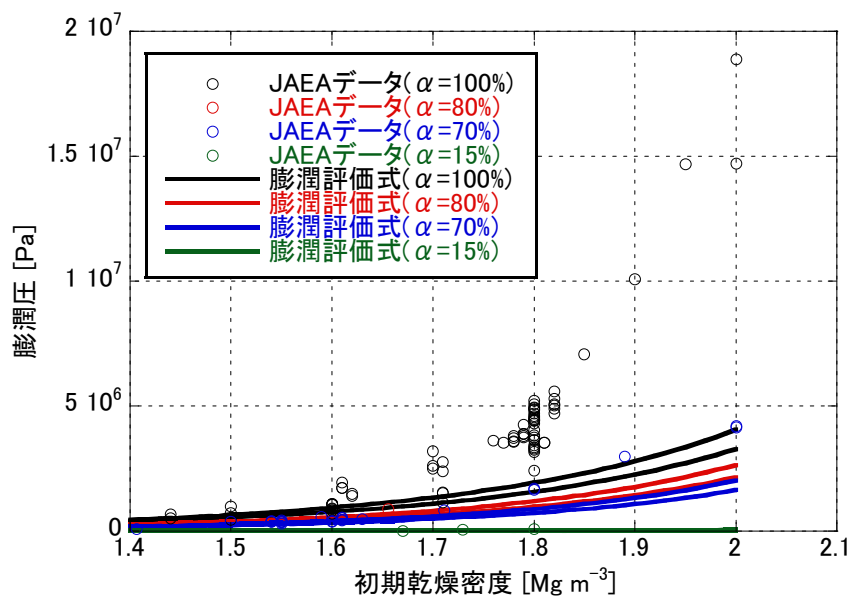


図 3.33 膨潤圧試験結果と膨潤評価式との計算結果の比較（乾燥密度）

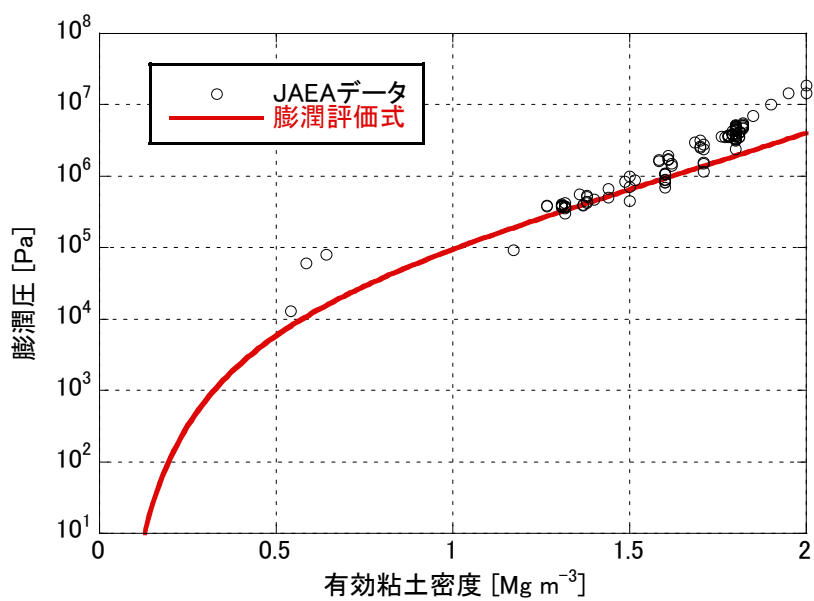


図 3.34 膨潤圧試験結果と膨潤評価式との計算結果の比較（有効粘土密度）

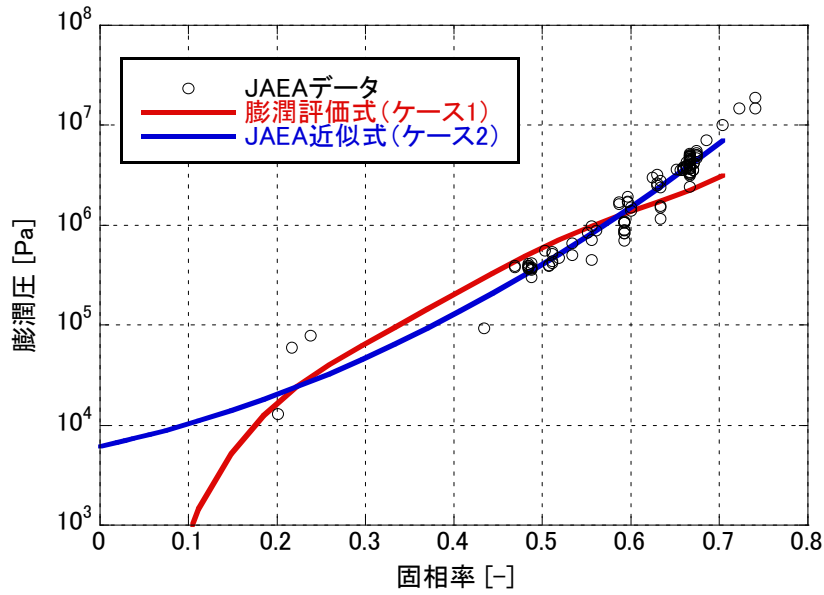


図 3.35 膨潤評価式と JAEA データによる固相率と膨潤圧の関係近似式

3.4.4 2 相系物質移動論自体の成立性

3.41～3.43 項は、2 相系物質移動論を固相拡散理論へ展開するにあたっての妥当性の検討と位置付けられるが、2 相系物質移動論自体の概念がベントナイト材料固有の特徴を考慮していない可能性について検討した。

2 相系物質移動論では(2.2)～(2.4)式に示すように、水の流束は体積含水率で規定され、固相の流束は固相率で規定されている。しかし、ベントナイトはモンモリロナイト層間に水分子が侵入することにより膨潤し、層間に侵入した水は電氣的に固定されていることから、水の流れに寄与していない可能性が考えられる。すなわち、液相を流れに寄与する外部間隙水と流れに寄与しない層間水に分けて考える。図 3.36 に模式図を示す。流れに寄与する外部間隙の体積含水率を θ' ，層間水も含んだ固相率を σ' とすると、(2.19)式は、次のように書き直される。ここで、 D'_s は修正拡散係数である。

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D'_s \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right) \quad (3.16)$$

ここで、 $\sigma' = f(\sigma)$ とし、飽和条件 ($\theta' + \sigma' = 1$) での固相拡散理論は次式で示される。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D'_s \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right) \quad (3.17)$$

$$D'_s = \frac{\sigma' k}{\rho_w g} \frac{dPs}{d\sigma'} = D_s \frac{\sigma'}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\sigma'} \quad (3.18)$$

層間水と外部間隙水の比については正確なデータがないため、ここでは θ に対する θ' の割合が一定であるとし、外部間隙パラメータ α ($0 \leq \alpha \leq 1$) を用いて下式のようにおく。

$$\theta' = \alpha\theta \quad (3.19)$$

飽和条件より(3.18)式を解くと,

$$D'_s = \left(1 + \frac{1-\alpha}{\sigma\alpha}\right) D_s \quad (3.20)$$

となる。ここでは α をパラメータとした固相拡散係数への影響を検討した。

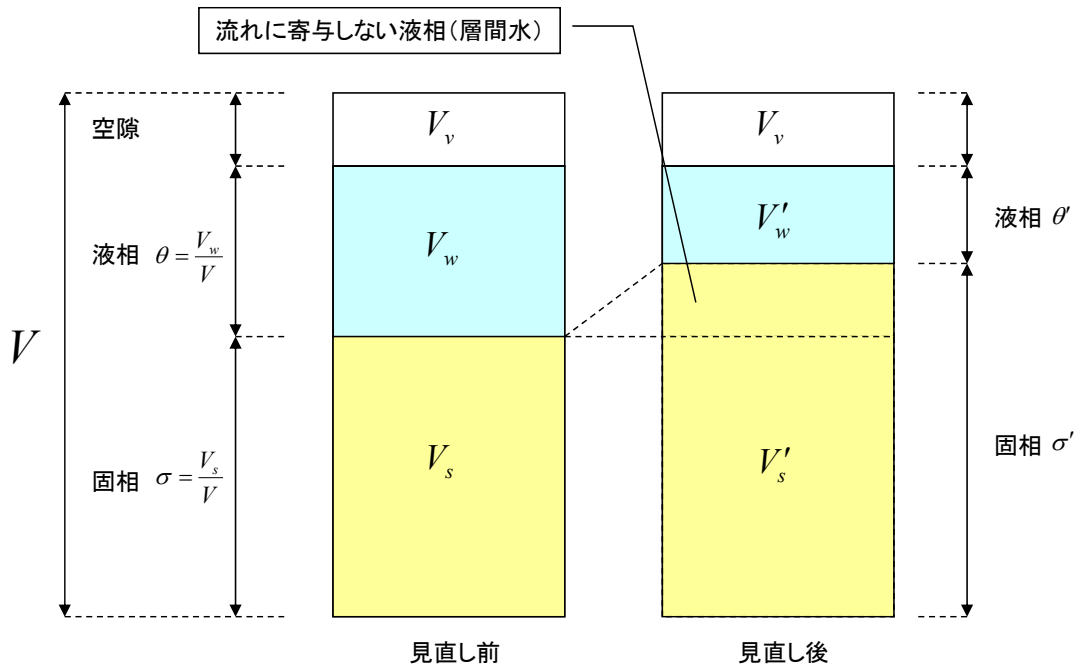


図 3.36 固相・液相の組成見直しに関する模式図

3.4.5 乖離要因検討結果のまとめ

乖離要因の影響について検討・考察を行った結果を表 3.4 に整理した。

表 3.4 乖離要因の検討結果

項目	検討結果と評価方法
①自由膨潤試験の前提条件の成立性 (3.4.1 項)	初期のデータを除外することにより，評価期間において $\theta + \sigma = 1.0$ の前提条件は成立している。 また，データの補正により $q_w + q_s = 0$ の前提条件を確保している。
②固相拡散理論の仮定条件の成立性 (3.4.2 項)	マトリックスポテンシャルの絶対値と粒子ポテンシャルが等しい前提 ($\frac{\partial \psi_{sm}}{\partial z} = -\frac{\partial \psi_{wm}}{\partial z}$) および粒子ポテンシャルは膨潤圧と等価である前提 ($\psi_{sm} = \frac{P_s}{\rho_w g}$) は飽和条件でも成立していると考えられる。
③透水試験，膨潤圧試験精度 (3.4.3 項)	理論値の設定に用いた透水試験データおよび近似方法（小峯・緒方式）は，本検討で想定しうる固相率範囲で比較的信頼性が高い。 また，膨潤圧データは，小峯・緒方によるデータと JAEA データで大きく異なるため，それぞれのデータに基づき近似式を 2 ケース設定することで不確実性を考慮する。また，土粒子密度は JAEA 設定値に統一する。
④2 相系物質移動論自体の成立性 (3.4.4 項)	2 相系物質移動論は，水の流束は体積含水率，固相の流束は固相率で規定されているが，ベントナイトは層間に侵入した水は電氣的に固定されており，流れに寄与していない可能性が考えられるため，液相を外部間隙水と層間水に分けて考え，パラメトリックに影響を把握する。

3.5 固相拡散係数の見直し

竹内ら¹⁴⁾はモンモリロナイトに吸着される水分子層数の変化とそれに伴うモンモリロナイトの層間の体積及びモンモリロナイト以外の外部間隙の体積の計算方法を提案しており，この計算により外部間隙パラメータ α （全空隙に対する外部間隙の比率）の推測が可能である。この計算によると， $\sigma = 0.67$ （乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} ）で， $\alpha = 0.19$ と求められる（表 3.5）。なお，文献ではモンモリロナイト含有率が 50%であるが，本検討では含有率を 60%として計算を行った。これを前節までの検討結果を反映して見直しを行った固相率と固相拡散係数の関係（図 3.37，図 3.38）

と併せて図中に青プロットで示す。本プロットは、「層間の水分子層数 n 」が求まらないと計算できないが、少なくともコア部フィッティングラインとは1オーダー以上乖離している。上記の計算は化学的根拠が希薄ではあるものの、層間水の概念を取り入れ、膨潤圧を膨潤評価式、JAEA近似式のいずれとしても、コア部フィッティングラインを表現できる関係を説明し得ない。

以上のように、理論と実測の乖離要因を多角的に検討した上で、データの不確実性を考慮し、実現象に即した修正理論を用いても、実測を表現する結果が得られなかった。したがって、今回の検討で想定した以外の乖離要因があると考えらるべきであろう。さらに考えられる要因を以下に示す。

- ・膨潤圧試験，透水試験の不確実性。
- ・本検討では妥当であると判断したが，実際は自由膨潤時の粒子ポテンシャルが，膨潤圧と等価ではない。
- ・層間水と外部間隙水の比が想定と異なる。また，層間水も流れに寄与している。
- ・体積ロス分の補正方法が適切ではない。
- ・膨潤による後方からの物理的な押し出し（移流）挙動が作用しているが，理論値ではそれを考慮していない。

上記のいずれも，現時点ではより詳細な検証は困難である。一例の検討とし，膨潤圧試験，透水試験の不確実性についてはその乖離の程度を把握するため，コア部フィッティングラインから膨潤圧，透水係数の一方に実測データに基づく解析用設定値（図 3.31，図 3.35）を用い，他方を逆算した場合の関係を求めた。 $\alpha=1.0$ ， 0.2 とした場合の逆算値を図 3.39，図 3.40 に示す。図 3.39 の逆算値ケース 1 は膨潤圧を膨潤評価式とした場合の透水係数逆算値，逆算値ケース 2 は膨潤圧を JAEA 近似式とした場合の逆算値である。一方，図 3.40 は，透水係数を図 3.31 とした場合の膨潤圧の逆算値である。 D_s の乖離幅がそのままほぼ各物性値の乖離幅となり， $\alpha=1.0$ の場合は低固相率になるほど逆算値の方が1オーダー以上大きくなる。 $\alpha=0.2$ の場合は高固相率になるほど逆算値の方が1オーダー以上小さくなる。このように物性値の1オーダーの変動が解析結

表 3.5 竹内ら¹³⁾に基づく外部間隙パラメータ α の計算

項目	記号	数値	単位	備考
試料1g中のモンモリロナイト重量	r_m	0.6	g	モンモリロナイト含有率60%
モンモリロナイト表面積	S	8.10E+06	cm ² /g	文献値
板状層状体の面積	a	1.00E-10	cm ²	文献値(雲母の結晶構造から推定)
板状層状体の数	m	8	枚	パラメーター
クラスターの数	N	3.04E+15	個/g	$N=r_m*S/2ma$
試料の乾燥密度	r_d	1.8	g/cm ³	設定値
クラスター最外面積	S_0	3.38E+05	cm ²	$S_0=2aN/r_d$
層間の水分子層数	n	2	層	パラメーター
水分子の直径	r	2.76E-08	cm	文献値
クラスターが持つ水量	V_w	0.151	g/cm ³	$V_w=(m+1)nraN$
試料の真密度	ρ	2.7	g/cm ³	文献値
試料の全空隙(体積含水率)	θ	0.333	cm ³ /cm ³	$\theta=(\rho-r_d)/\rho$
固相率	σ	0.667	cm ³ /cm ³	$\sigma=1-\theta$
層間水の体積含水率	V_{ti}	0.272	cm ³ /cm ³	$V_{ti}=V_w*rd$
外部間隙水の体積含水率	θ'	0.062	cm ³ /cm ³	$\theta'=\theta-V_{ti}$
外部間隙パラメータ	α	0.19	cm ³ /cm ³	$\nu=\theta'/\theta$

果に大きな影響を及ぼすことから、膨潤圧、透水係数データを層間水と外部間隙水と比（底面間隔）と併せて取得することが重要な検討項目の一つである。特に図 3.35 に示すように、固相率 0.4 以下の膨潤圧は少ないデータに基づく外挿であるため、重点的にデータ取得を行い、精度を高める必要がある。

理論値との整合性の検討は、モデルを高度化する上で重要であるため、今後も詳細な検討が必要であるが、本検討の範囲では実際の一次元拡散挙動（自由膨潤試験）から得られたコア部フィッティングライン（表 3.2）を現時点において適用する D_s として設定し、検討を進める。

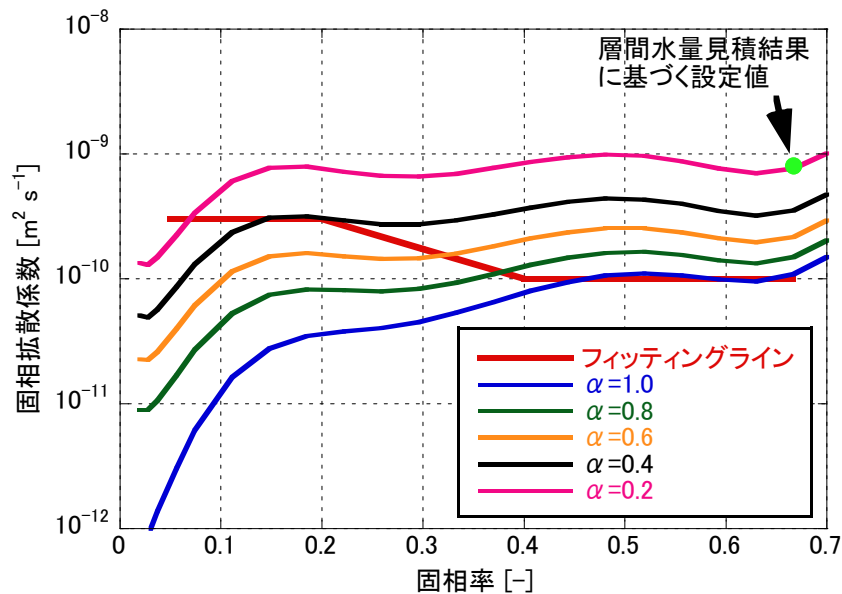


図 3.37 固相率と固相拡散係数の関係（膨潤評価式による近似式：ケース 1）

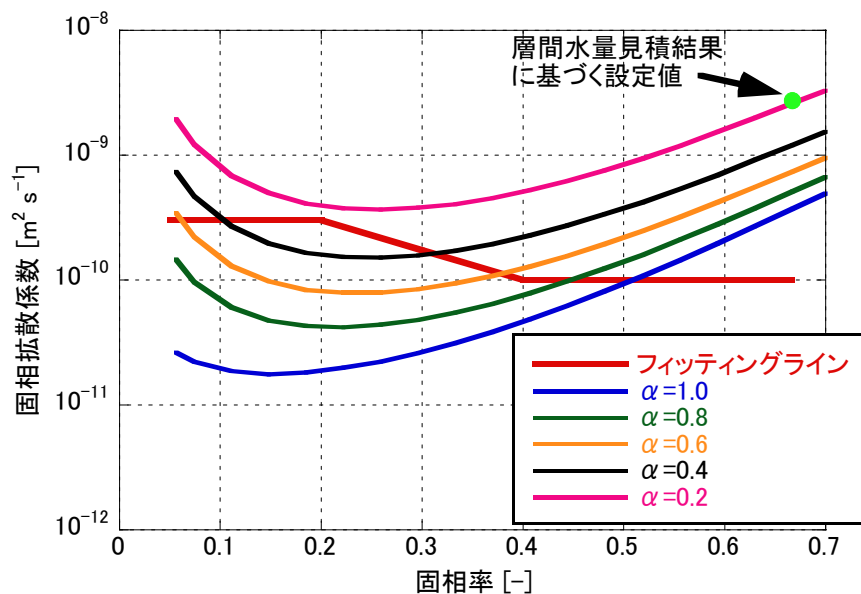


図 3.38 固相率と固相拡散係数の関係（JAEA 近似式：ケース 2）

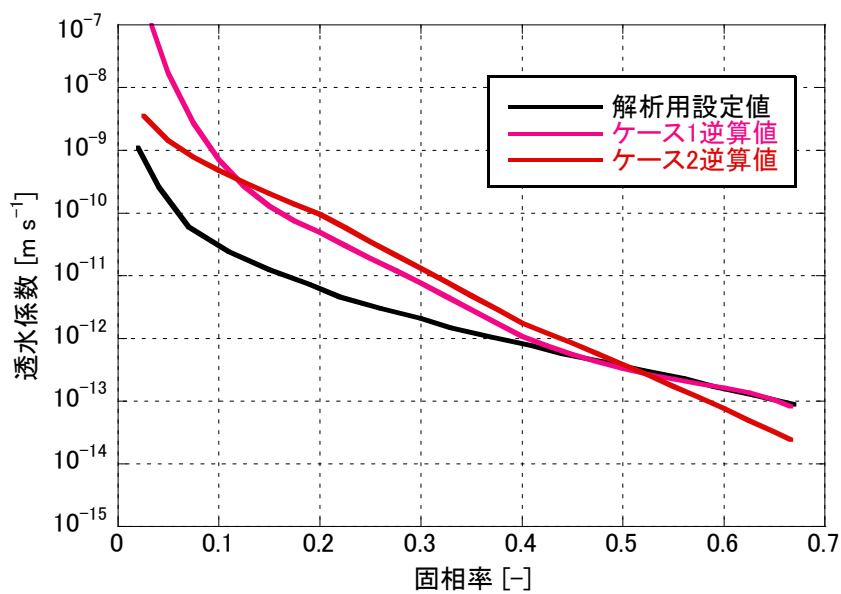
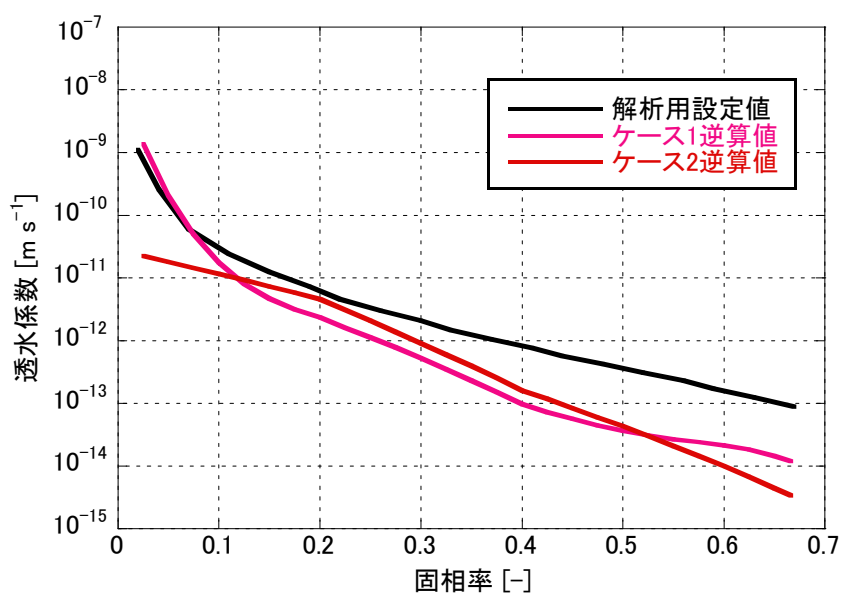
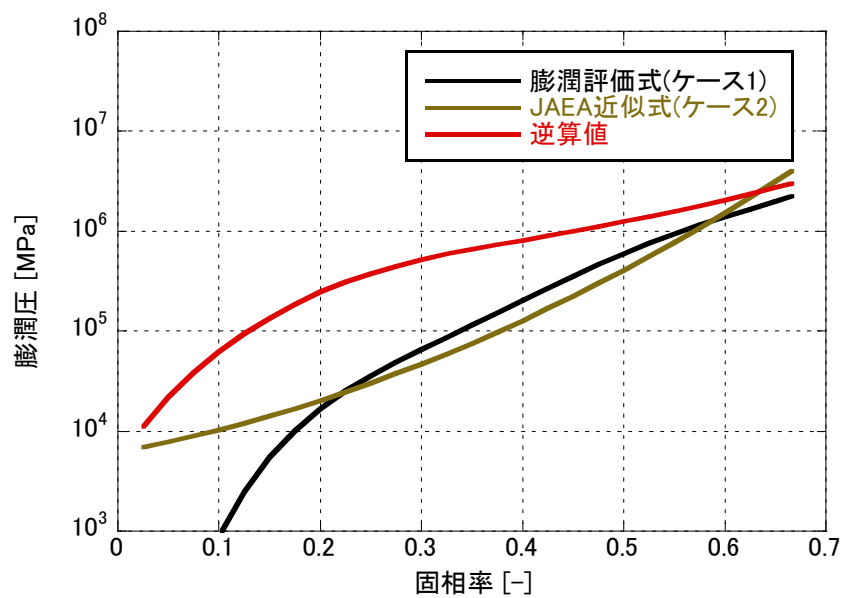
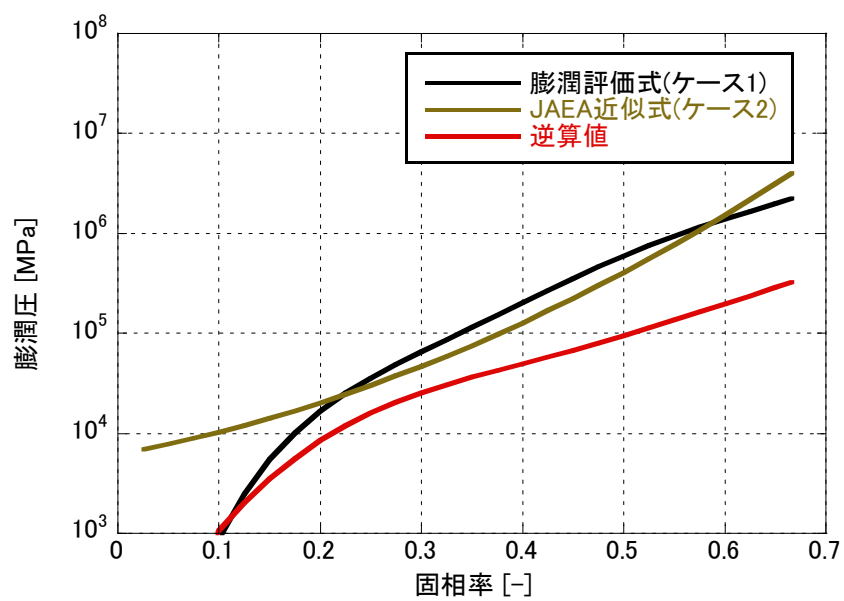
(a) $\alpha = 1.0$ (b) $\alpha = 0.2$

図 3.39 膨潤圧を固定した場合のコア部フィッティングラインからの透水係数逆算値



(a) $\alpha = 1.0$



(b) $\alpha = 0.2$

図 3.40 透水係数を固定した場合のコア部フィッティングラインからの膨潤圧逆算値

4. 亀裂内固相拡散挙動の把握

3 章の固相拡散理論の検証に続き、亀裂内固相拡散挙動を把握するため、亀裂内侵入挙動に対するシミュレーションおよび考察を行い、モデルの見直し、ならびに固相拡散係数の設定を試みた。

4.1 侵入試験

4.1.1 試験概要

試験条件を表 4.1 に示す。本試験では試料をあらかじめ飽和セルで飽和させた初期飽和条件の試験である。試験手順は以下の通りである。

- ①目標寸法で所定の初期乾燥密度となる重量の試料を $\phi 19.0 \times h19.0\text{mm}$ の圧縮成型治具にて圧縮成型する。
- ② $\phi 19.5 \times h19.5\text{mm}$ の飽和セルにて飽和する。
- ③試験装置コア部に試料設置後水を供給し、試験を開始する。
- ④所定の時間経過ごとに侵入距離、X 線 CT スキャナにより亀裂部の乾燥密度を測定する。
- ⑤試験終了後、コア部の実測密度を測定する。

飽和セル、試料のセット状況を図 4.1～図 4.3 に示す。

表 4.1 侵入試験条件

試料	ベントナイト（クニゲル V1）100%
試験水	蒸留水
初期乾燥密度 $\rho_0 [\text{Mg m}^{-3}]$	1.6
目標寸法[mm]	$\phi 20 \times h20$
亀裂幅[mm]	0.5 ,1.0 ,1.5
試験温度	室温

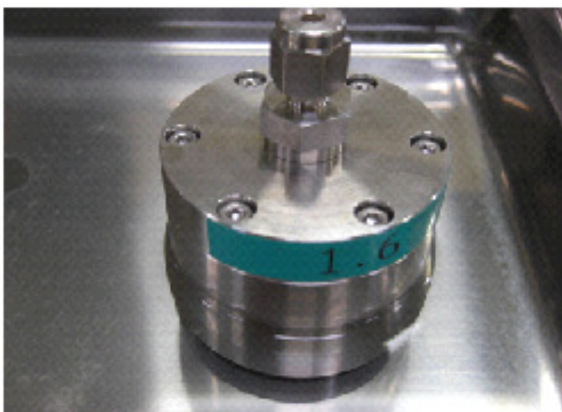


図 4.1 飽和セル

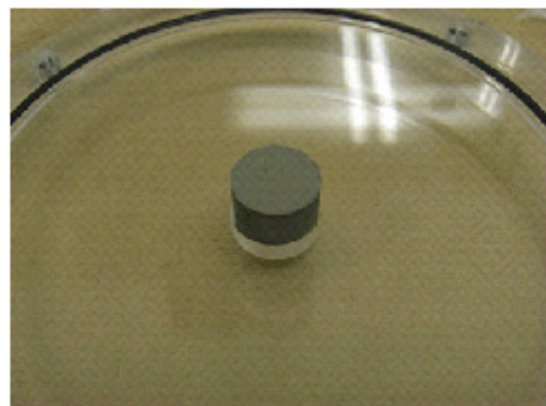


図 4.2 飽和試料のセット状況

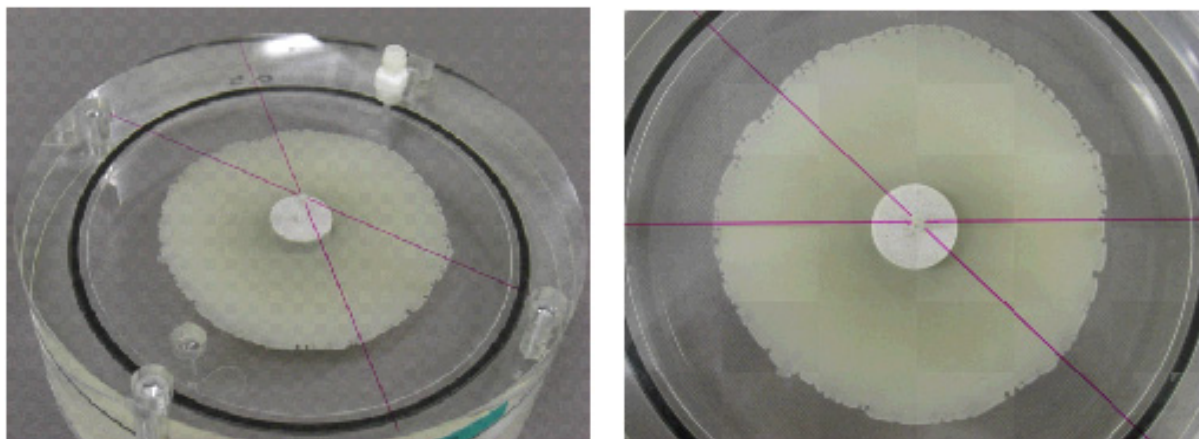


図 4.3 侵入試験実施状況

4.1.2 試験結果

各乾燥密度ケースのコア部中心からの距離と固相率の関係（固相率プロファイル）を図 4.4～図 4.6 に示す。プロファイル固相率は乾燥密度／ベントナイトの土粒子密度であり、ここで、ベントナイトの土粒子密度は 2.7Mg m^{-3} とした。また、固相率のプロファイルは、連続的な曲線となるようスムージング補正を行った。

なお、亀裂幅 1.0mm, 1.5mm の試験は 1146 時間程度で侵入域がほぼ装置の端部に到達したため、測定を終了した。

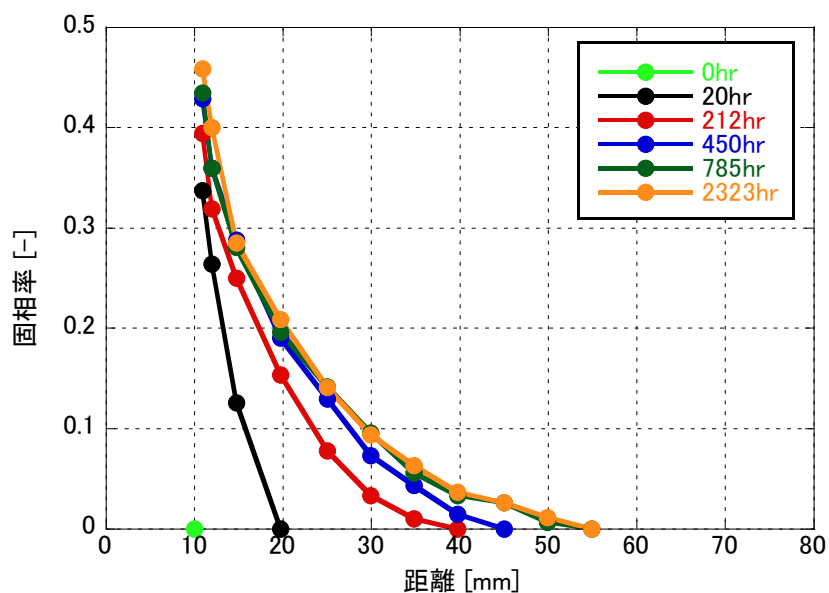


図 4.4 侵入試験による固相率プロファイル（亀裂幅 0.5mm）

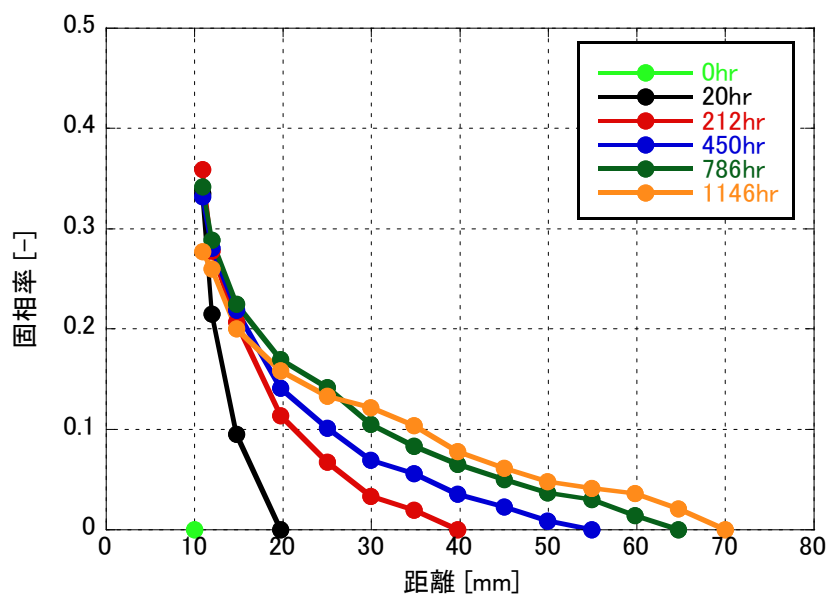


図 4.5 侵入試験による固相率プロファイル（亀裂幅 1.0mm）

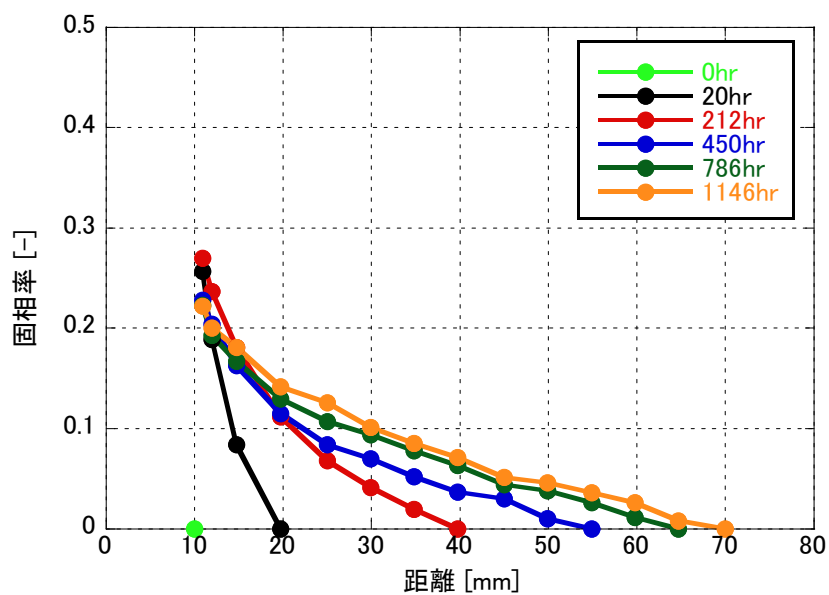


図 4.6 侵入試験による固相率プロファイル（亀裂幅 1.5mm）

4.2 亀裂内固相拡散係数の設定

固相拡散係数は、(2.12)式より次式で表される。

$$D_s = - \frac{q_s}{\frac{\partial \sigma}{\partial z}} \quad (4.1)$$

したがって、時刻 t_1 , t_2 における固相率プロファイルより、任意の点 z において平均的には、次式で求めることができる。

$$D_s = - \frac{\int_0^L (\sigma_{t=t_2} - \sigma_{t=t_1}) r dr}{\frac{1}{2} r \left\{ \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} \right)_{t=t_2} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} \right)_{t=t_1} \right\}} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \quad (4.2)$$

ここで、 L は試料長さである。上式にしたがい、図 4.4～図 4.6 より固相率と固相拡散係数の関係を求める。なお、X 線 CT スキャナの結果から求まるコアと亀裂の総土粒子体積と理論的に求まる初期土粒子体積の差を自由膨潤試験と同様に粒子拡散分として補正した。

図 4.7～図 4.9 に侵入試験より求められた任意の時間区間における固相率と固相拡散係数の関係を示す。図より、亀裂幅 0.5mm のケースは時間依存性を示し、2300 時間経過時にはほぼ侵入が止まっているが、1.0mm, 1.5mm のケースはほぼ同じ関係である。また、いずれのケースも各時間区間で概ね固相率が大きくなるほど固相拡散係数は減少する傾向である。なお、過去に実施した侵入試験（亀裂幅 0.85mm）によって求められた固相拡散係数を図 4.10 に示す。このデータは体積補正等を行っておらず、 $1 \times 10^{-10} [\text{m}^2 \text{ s}^{-1}]$ 程度の一定値であるが、今回の試験とは概ね近い傾向である。この結果より、1.0mm, 1.5mm のケースに対し、両実験結果に近くなるような解析用設定値として、自由膨潤による解析用設定値を 0.5 倍した関係（以下、亀裂部フィッティングライン）を設定した。

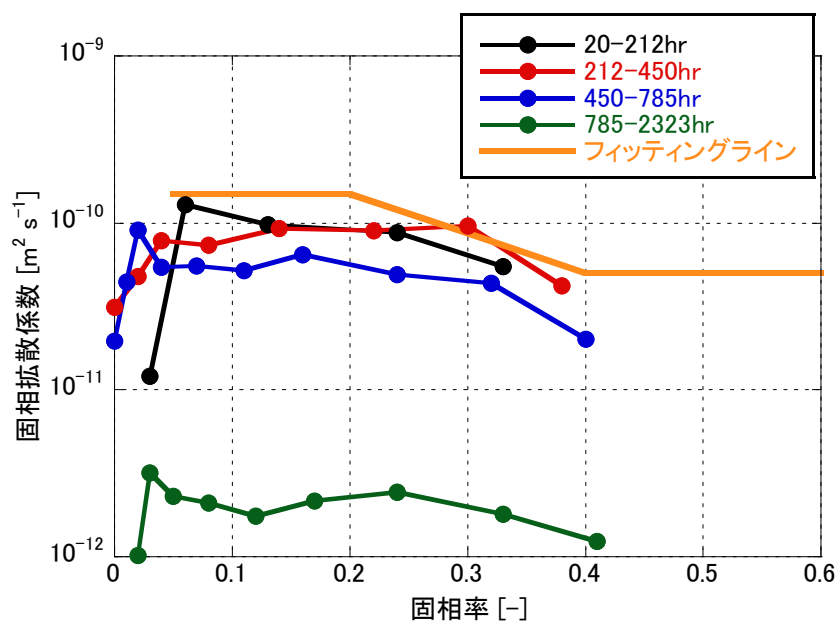


図 4.7 侵入試験により求められた固相拡散係数（亀裂幅 0.5mm）

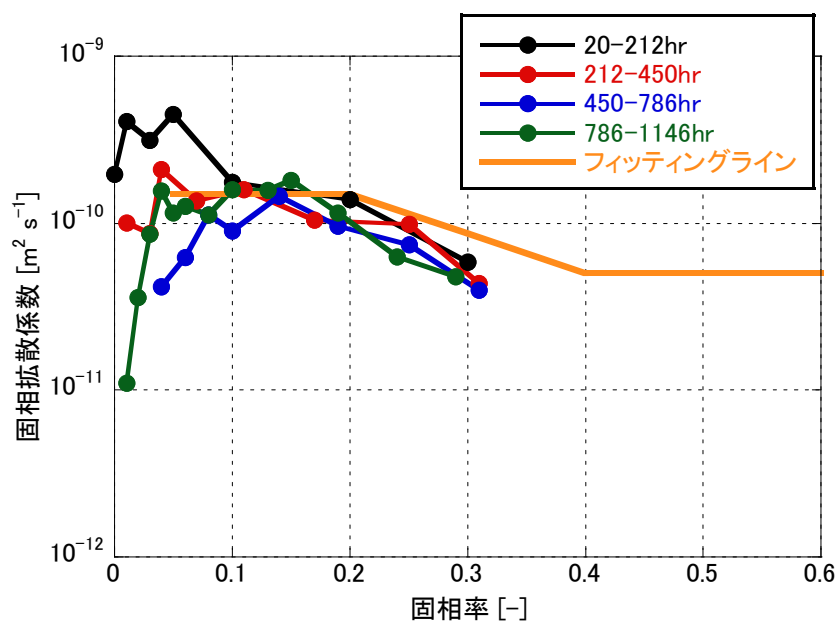


図 4.8 侵入試験により求められた固相拡散係数（亀裂幅 1.0mm）

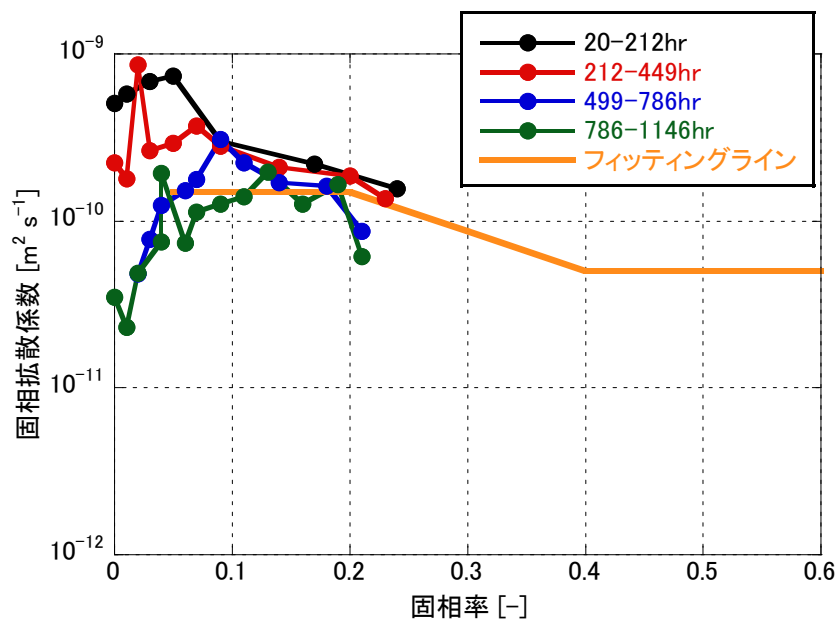


図 4.9 侵入試験により求められた固相拡散係数（亀裂幅 1.5mm）

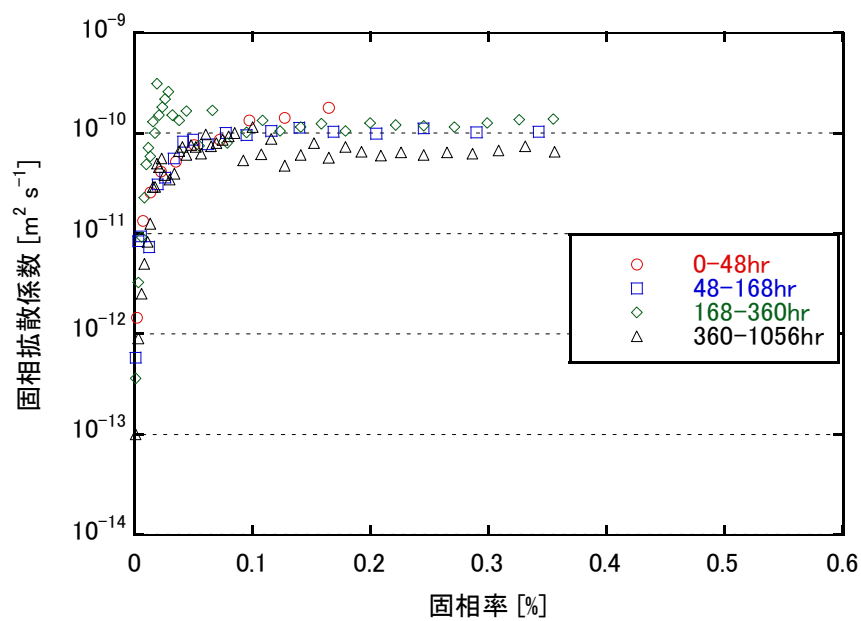


図 4.10 既往の侵入試験により求められた固相拡散係数（亀裂幅 0.85mm）⁴⁾

4.3 侵入試験のシミュレーション

コア部フィッティングラインおよび亀裂部フィッティングラインを用いてシミュレーション解析を行った。解析結果を図 4.11～図 4.13 に、コンター図の例（20hr および最終ステップ）を図 4.14～図 4.16 に示す。亀裂部のプロファイルは、亀裂幅 0.5mm のケースは固相拡散係数に時間依存性があるため、時間経過とともに大きく乖離するが、亀裂幅 1.0mm, 1.5mm のケースでは亀裂先端ほど概ねうまく表現できている。このことから、亀裂内の拡散挙動は一次元拡散よりも遅く、亀裂幅依存性を有することが示唆された。

次に、コア部の実験および解析による密度低下の経時変化を図 4.17 に示す。亀裂幅 0.5mm のケースは約 500hr 経過でほぼ侵入が停止しているのに対し、解析は低下を続けている。亀裂幅 1.0 mm, 1.5mm のケースでは実験による初期の密度低下が大きいとその間隔はほぼ一定で推移している。したがって、亀裂幅 1.0mm, 1.5mm のケースのみで判断すれば、コア部の密度の長期予測をする上で大きな乖離は生じないと考えられ、今回設定したコア部および亀裂部の固相拡散係数は概ね妥当であるものと考えられる。ただし、さらに長期的に実験を測定すれば亀裂幅 1.0 mm, 1.5mm のケースにおいても侵入がほぼ止まる可能性があることに留意しておく必要がある。既往の評価は拡散モデルであり、かつ亀裂先端の固相率の境界条件が 0 である以上、解析では侵入は止まらない。したがって、長期的な侵入実験によって亀裂開口幅に因らず侵入が止まることが確認された場合には、その要因を把握するとともに、モデル化に反映していく必要がある。

いずれにせよ、定量的に亀裂内のプロファイルおよびコア部の密度経時変化に対する評価の精度を上げるためには、自由膨潤挙動（一次元拡散挙動）における理論値と実験値の乖離要因の把握、亀裂内挙動と自由拡散挙動の違いの要因把握等を行い、モデル、解析パラメータを見直すことが必要である。

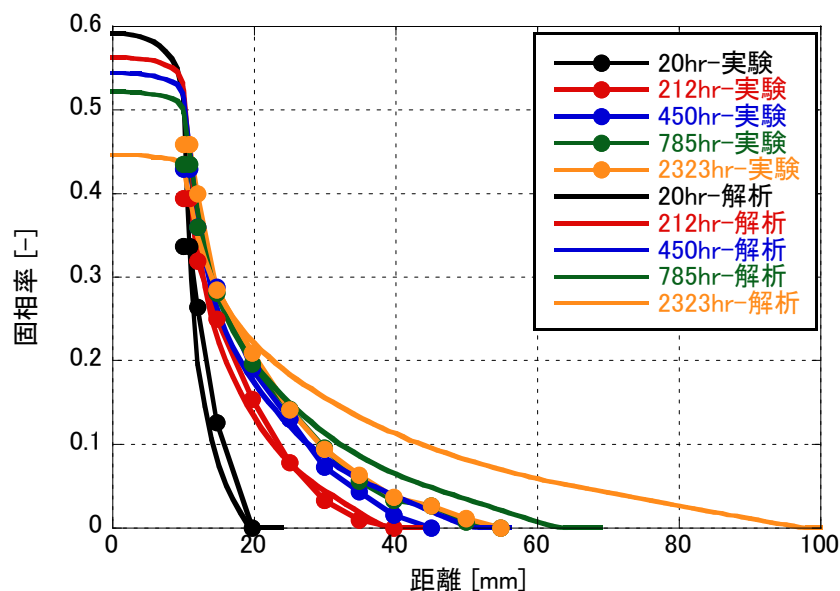


図 4.11 侵入試験のシミュレーション結果（亀裂幅 0.5mm）

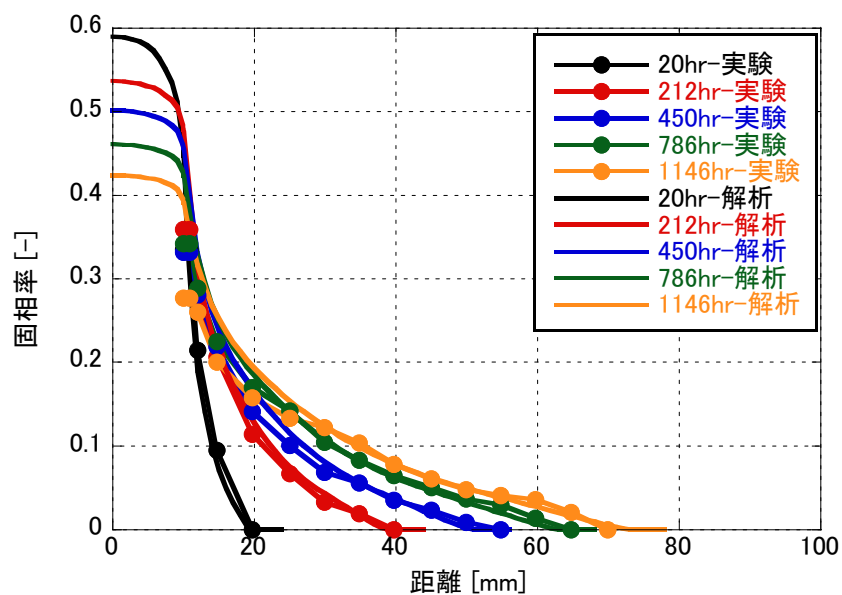


図 4.12 侵入試験のシミュレーション結果（亀裂幅 1.0mm）

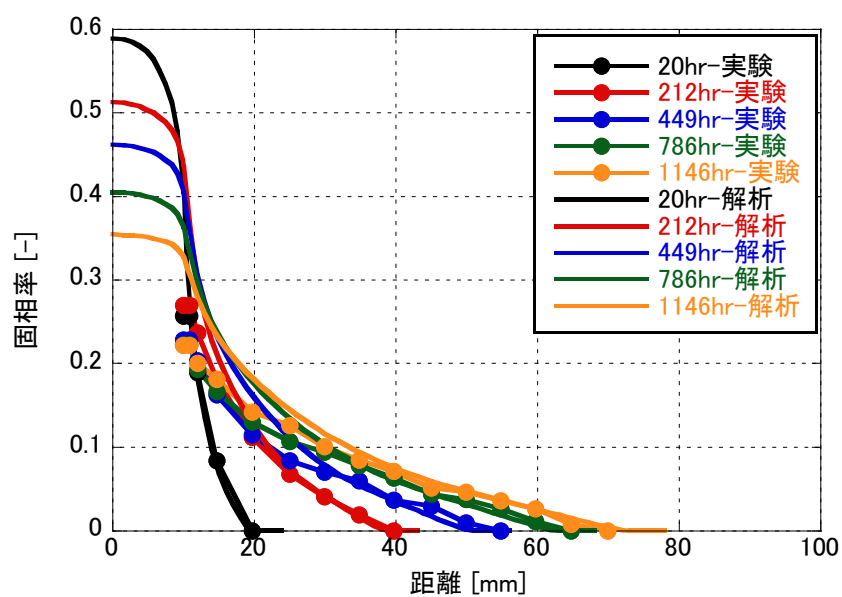
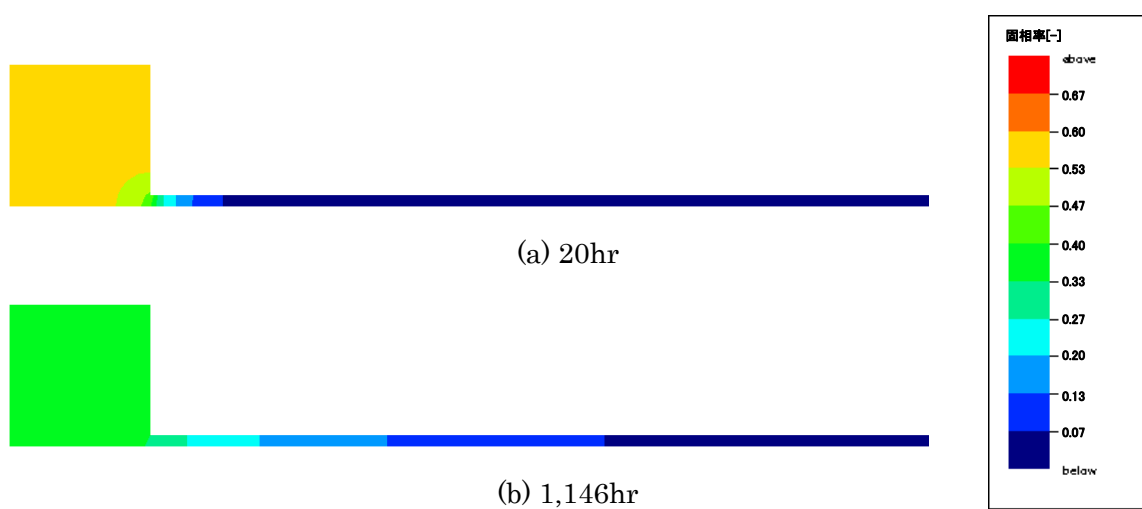
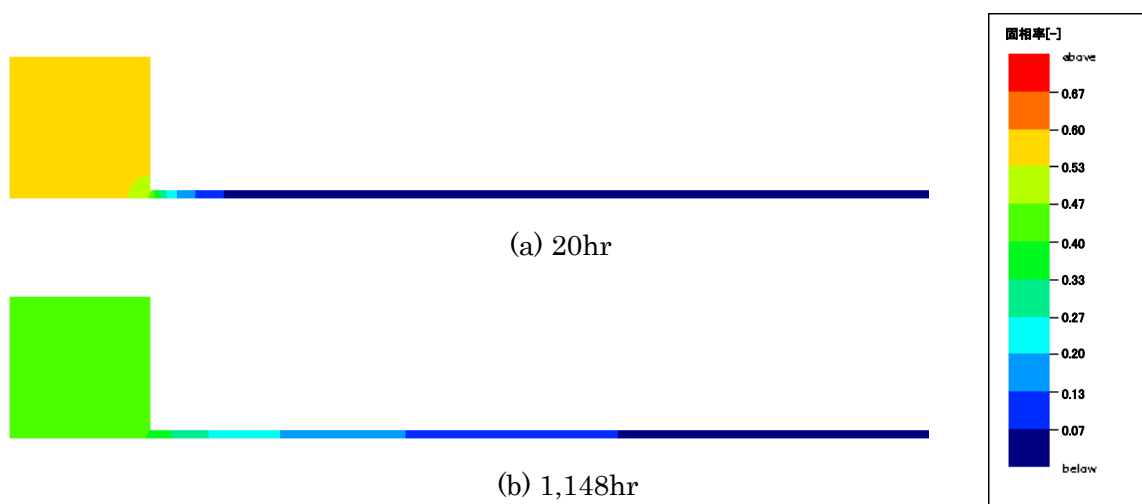
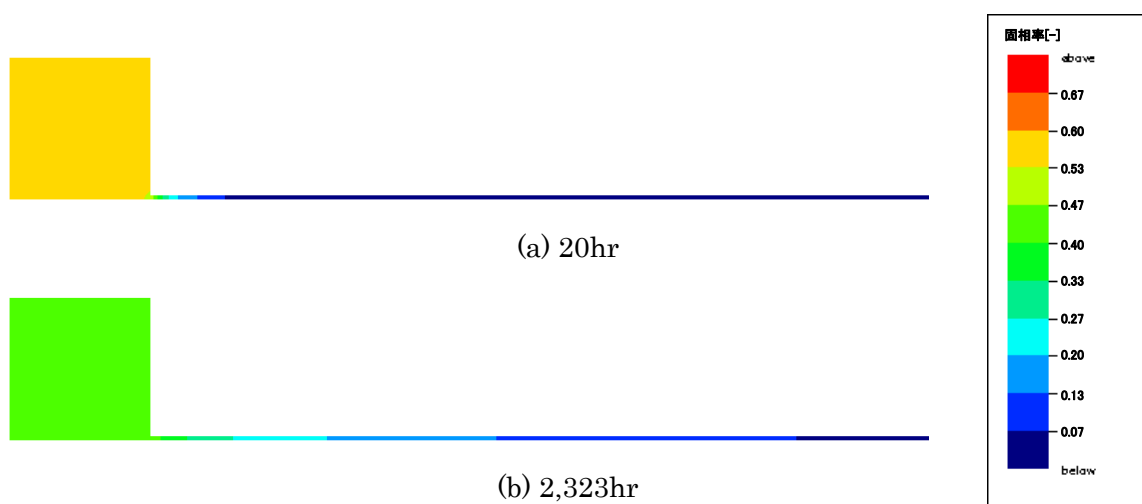


図 4.13 侵入試験のシミュレーション結果（亀裂幅 1.5mm）



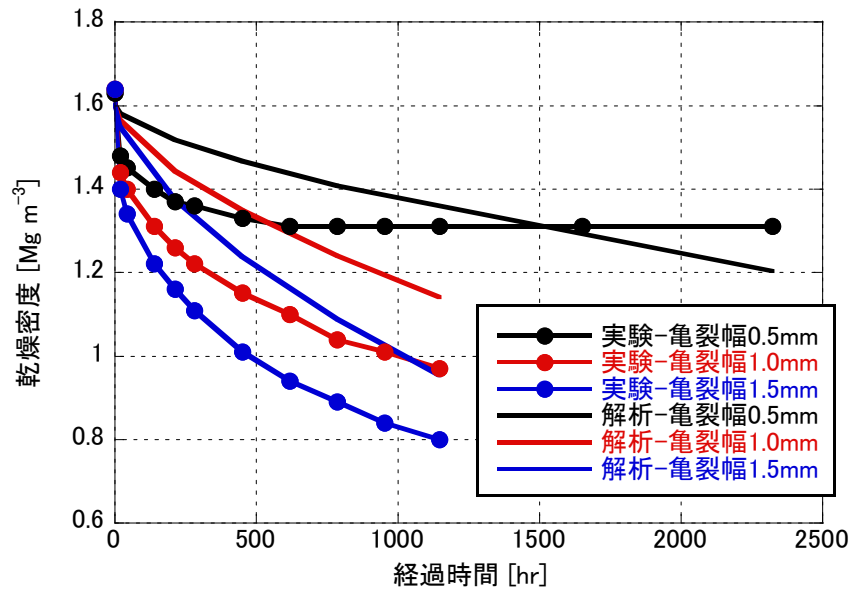


図 4.17 コア部の実験値と解析値の比較

4.4 亀裂内固相拡散理論の検証

亀裂内の侵入挙動をニュートン流体の平面ポアズイユ流れと仮定した「亀裂部の固相拡散理論；(2.27)式」は、水と粘土粒子混合物の流れの平均流速によって運ばれる粘土粒子の単位時間当たりの移動量を流速として表現したもの（混合物の移流方程式）であり、粘土粒子の拡散流速を前提とした固相拡散理論とは前提が異なる。したがって、亀裂部の固相拡散理論の直接的な適用には注意を要するが、ここでは亀裂内は亀裂部の固相拡散理論にしたがって粘土粒子が移動していると仮定し、亀裂部フィッティングラインを逆算して求めた粘度と、既存の粘度データとの比較により、その適合性を評価した。逆算値を図 4.18 に示す。亀裂部の固相拡散理論は亀裂の関数でもあるため、固定とした亀裂部フィッティングラインに対してそれぞれの固相率と粘度の関係が求まる。また、逆算値ケース 1 は膨潤圧を膨潤評価式とした場合、逆算値ケース 2 は膨潤圧を JAEA 近似式とした場合の逆算値である。いずれのケースでも粘度の実測値と亀裂部フィッティングライン逆算値とは大きく乖離しており、直接亀裂部の固相拡散理論を適用することは困難であるものと考えられる。

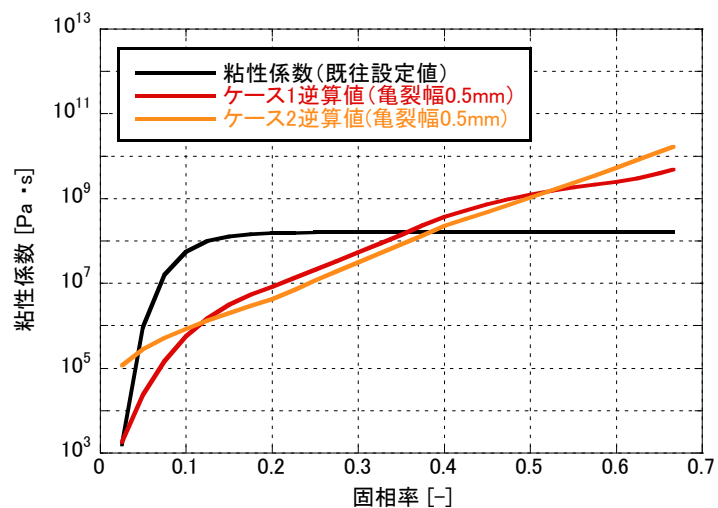
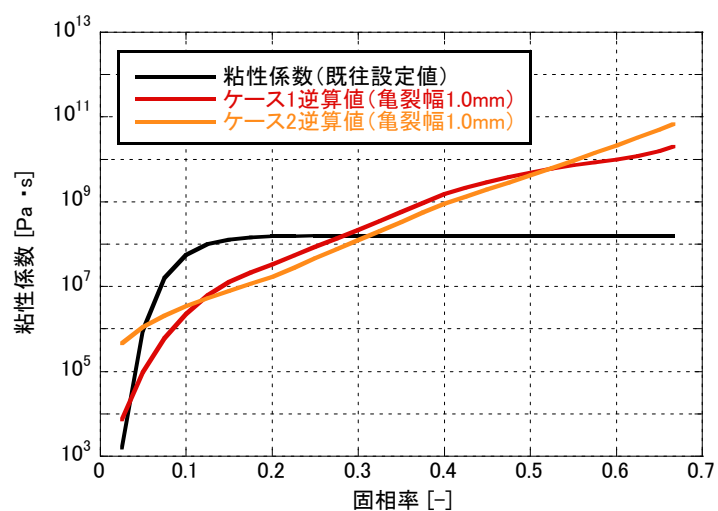
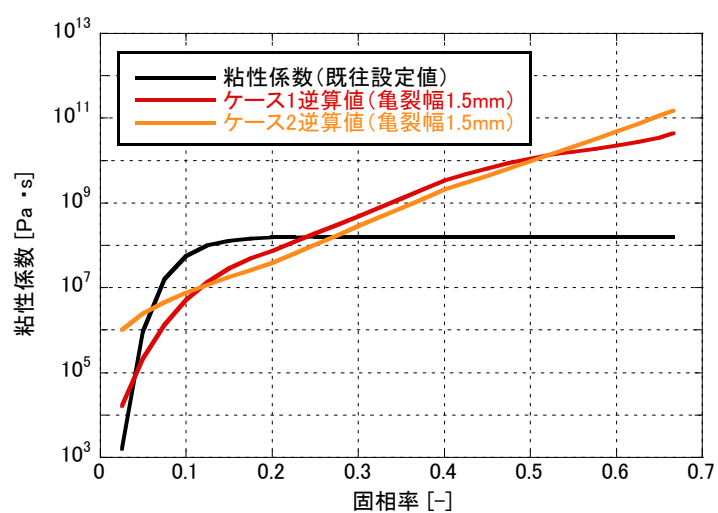
(a) $d=0.5\text{mm}$ (b) $d=1.0\text{mm}$ (c) $d=1.5\text{mm}$

図 4.18 亀裂部フィッティングラインからの膨潤圧逆算値

5. 本検討内容のレビュー結果

本検討内容について、専門家（東京大学名誉教授・中野政詩殿）にレビューを依頼した。ここでは、その内容についてまとめる。

これまでの実験・シミュレーションの結果と乖離要因の検討結果などについて報告を行い、ご意見を伺った。図 5.1 に本レビューにおける議論のポイントを示す。

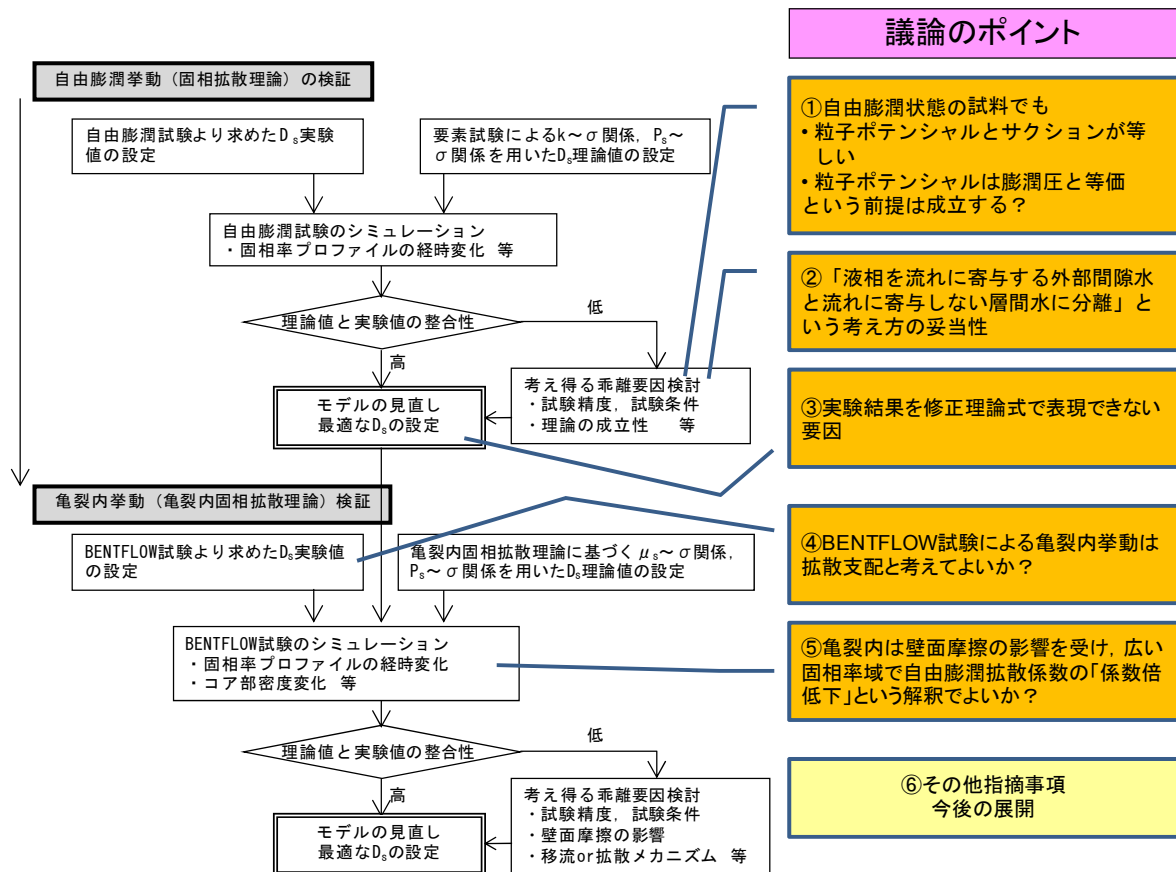


図 5.1 専門家のレビューにおける議論のポイント

専門家によるコメントを以下に示す。

【議論のポイント①，②について】

- ・膨潤圧と固相の粒子ポテンシャルが等しいという仮定は実は昔から争点になっている。過去の論文⁶⁾では膨潤圧と固相のポテンシャルの関係を

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial z} = -\nu \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (5.1)$$

で表し、 $1 \geq \nu \geq 0$ であろうと記述してあるが、 ν をつきつめては議論しておらず、その後の式の展開では $\nu=1$ と仮定している。（ $\nu=1$ とした場合、(2.13)式と等価）

ν は土の粒子の配置に関わるパラメータとして捉える。板状の土粒子が不規則に重なりあって

いる場合、水を取り込んで膨らもうとする際に土粒子同士の摩擦が生じて理論的な膨潤圧より膨潤圧が低くなる。これを ν で表している。図 5.2 に ν の概念図を示す。

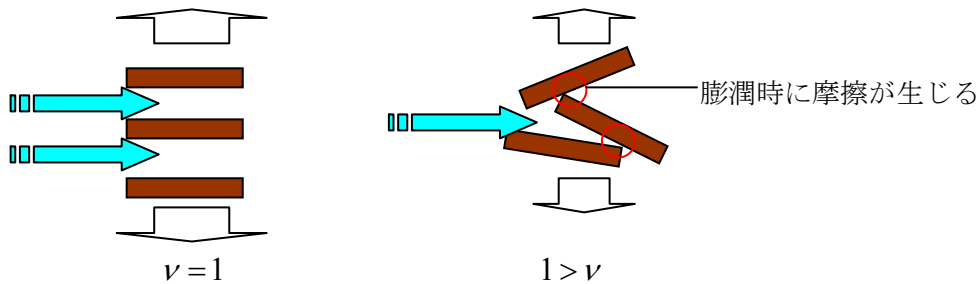


図 5.2 土粒子の配置に関わるパラメータ ν の概念

- ・本研究の実験とシミュレーションが合わないのはこの $\nu=1$ が原因の一つとして考えられる。
- ・固相拡散係数 D_s を係数倍することと、膨潤圧 Ps を係数倍することは同義であることから、亀裂部の固相拡散係数をコア部の 0.5 倍にすると合うというのも、亀裂内では土粒子の配置が自由膨潤状態と異なっているため、 ν の値も異なっている可能性が考えられる。
- ・層間水は層間外の水との連続性が保たれている限り水の流れに寄与すると考える。層間に取り込まれた水は確かに固相粒子と接触する部分では不動水となりうるかもしれないが、種々の実験などによれば粒子から 1~2nm 程度の範囲だけ不動になるのであって層間水全体からみれば無視できる量である。図 5.3 にこれらを表す概念図を示す。

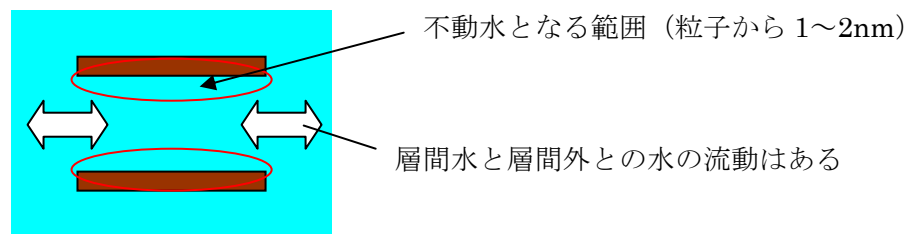


図 5.3 層間水と外部間隙水の連続性に関する概念図

- ・層間水のポテンシャル P と層間外の水のポテンシャル P' の差($P'-P$)がすなわち膨潤圧であり、言わば浸透ポテンシャルである。
- ・(5.1)式における ν を固相率 σ の関数にしたらどうか。摩擦の考え方に従えば σ 低で ν は 1 に近づき、 σ 高で ν は小さくなると思われる。

【議論のポイント③, ④について】

- ・固相率 σ が低いときの拡散係数 D_s が理論では低くなる傾向になるのは自然に考えれば非常に受け入れやすい形である。しかし、実験から求めた D_s は σ が低いほど高くなる。これは膨潤による変形の効果を考えていないからではないか。
- ・変形による効果を粒子(Mass)の移動(移行)挙動に見立てて、項を一つ増やしたらどうか。

Mass の移行はおそらく粒子のポテンシャル勾配に比例する形で表され则认为られる。

$$-K \frac{\partial \psi_{sm}}{\partial z} \quad (5.2)$$

- ・移行項の透水係数に当たる部分 K は恐らく密度の関数となるであろう。

$$K = f(\rho_s) \quad (5.3)$$

- ・ ν と移行項を加えた式の展開についてはまた別途間違えないように検討してみる必要がある。

【議論のポイント⑤について】

- ・亀裂内壁面摩擦についてはその影響範囲は小さいのではないか。(層間水の不動水の議論と同様)
- ・砂との混合比と亀裂幅によっては影響があるかも知れない。
- ・壁面摩擦ではなく、移行項における流速分布発生の影響ではないかと思われる。
- ・その流速分布の発生する流れにおいて影響する粘性が、粘性係数で表現できるかも知れない。

【議論のポイント⑥について】

- ・マトリックポテンシャルあるいはサクションという用語は不飽和領域での挙動を連想させる。マトリックとは組織のことであり、間隙形状に依存しない飽和条件の挙動を説明する際の手語としては誤解を招く恐れがある。ここでいうポテンシャルは言わば浸透ポテンシャルである。そうした概念を含む一般的な用語として水分ポテンシャルという語を使った方が適切である。

本検討成果および専門家のレビューを踏まえ、モデルの最適化に向けた今後の課題について以下に示す。

- ・膨潤圧データ（固相率 0.4 以下）の拡充による膨潤評価式、JAEA 近似式の妥当性の確認
- ・土粒子の配置に関わるパラメータ ν を組み込んだ固相拡散係数の見直し
- ・ベントナイト粒子の変形（物理的移動）を移流項とした、移流・拡散方程式への展開

特に、移流項の追加は物理的現象としての妥当性検討、パラメータの設定方法を含め、詳細に検討する必要がある。

6. おわりに

本報告では、飽和条件の自由膨潤挙動（一次元拡散挙動）といった単純系の境界条件の挙動と理論との整合性について重点的に検討を行い、それらの結果を受けて亀裂内の侵入挙動に関しても評価を行った。また、本検討結果に関して、専門家のレビュー結果を受け、今後の課題を明確にした。

主な成果を以下にまとめる。

1) 固相拡散係数理論値の検証

初期飽和条件における自由膨潤試験を行い、実験から得られた固相率プロファイルより固相率と固相拡散係数の関係を求めた。また、それらの関係から実験に基づく解析用のフィッティングラインを設定し、既往検討における固相拡散係数の理論値との比較を行った。その結果、両者の固相拡散係数は、特に低固相率域で大きく 1 オーダー程度の乖離が認められた。また、両者の固相拡散係数を用いた実験のシミュレーションの結果、実験に基づくフィッティングラインにおいては密度プロファイルをほぼ表現することができたが、理論値においては実験に比べて拡散速度が遅く、密度プロファイルを適切に表現できない結果となった。

2) 理論と実測における固相拡散係数の乖離要因の検討

上記 1) の乖離要因の検討として、「自由膨潤試験の前提条件の成立性」、「固相拡散理論の仮定条件の成立性」、「透水試験、膨潤圧試験データの精度」、「2 相系物質移動論自体の成立性」を挙げ、それぞれについて検討を行った。その結果、理論と実測の乖離要因を多角的に検討した結果によってみなした固相拡散係数を用いても実験を表現する結果を得られなかったことから、さらに別の要因があることが示唆された。

3) 侵入試験のシミュレーション

初期飽和条件における侵入試験を行い、上記 1) で設定したフィッティングラインによる侵入試験のシミュレーションを実施した。その結果、フィッティングラインを一律 0.5 倍とすることで比較的实验結果と近い関係となることから、亀裂内の拡散挙動は開口幅依存性を有し、一次元拡散よりも遅いことを確認した。また、設定したコア部と亀裂部のフィッティングラインを用いて、侵入試験のシミュレーション解析を行った結果、コア部と亀裂部ともに総じて現象を表現することができた。

4) 専門家によるレビュー

本検討内容について、専門家のレビューにより、実験と理論の乖離要因やモデルの見直しについてアドバイスを頂いた。その結果、特に膨潤による変形効果（物理的移動）を移流項とした移流・拡散方程式への展開に関する提案があった。

以上、本検討ならびにレビューの結果を踏まえ、モデル・パラメータの見直しおよび種々の条件における実験シミュレーションを繰り返し行いつつ、侵入現象モデルの精度向上を図る必要がある。

参考文献

- 1) 菅野毅, 岩田裕美子: “緩衝材侵入現象モデルの検討”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ8400 2003-026 (2003)
- 2) 菅野毅, 岩田裕美子: “緩衝材侵入現象モデルの検討 (II)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ8400 2003-083 (2004)
- 3) 松本一浩, 棚井憲治: “緩衝材の流出／侵入特性”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2003-035 (2004)
- 4) 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)
- 5) 中野政詩, 雨宮悠, 藤井克己, 石田朋靖, 石井祐二: “不飽和粘土の浸潤と膨潤”, 農業土木学会論文集, 100, pp8-16 (1982)
- 6) M. Nakano, Y. Amemiya, and K. Fujii: “Saturated and Unsaturated Hydraulic Conductivity of Swelling Clays.”, Soil Science, Vol.141, No.1 (1986)
- 7) 西垣誠: “オイラリアン・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)
- 8) 松本一浩, 棚井憲治: “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, JAEA-Research 2009-070 (2010)
- 9) 鈴木英明, 藤田朝雄, 菅野毅: “緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数”, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN8410 96-117 (1996)
- 10) 地盤工学会: “土質試験の方法と解説”, (2000)
- 11) 菊池広人, 棚井憲治: “緩衝材の基本特性データベース (データ集・記録集)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8450 2003-010 (2004)
- 12) 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 U00041 (2001)
- 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・埋戻し材の膨潤評価式の提案ー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・組成の影響ー”, 電力中央研究所報告 U99013 (1999)
- 14) 竹内真司, 原啓二, 中野政詩: “圧縮ベントナイトの水分特性曲線および水分拡散係数と水の移動形態”, 地盤工学会論文報告集, Vol.35, No.3, pp.129-137 (1995)

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
物質モル	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
速さ, 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) ともよばれる。

(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 ^(c)	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
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエネルギー当分, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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付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 sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
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 sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m 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	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 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=60 s
時	h	1 h=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	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm 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
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元系の 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=1 cGy=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	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ) 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

