



ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての 試験法の現状調査と試験による検討

- 日本原子力研究開発機構／電力中央研究所共同研究成果報告-
(共同研究)

Survey on Current Status of Laboratory Test Method and Experimental
Consideration for Establishing Standardized Procedure of Material Containing Bentonite

- Report of Collaboration Research between JAEA and CRIEPI -
(Joint Research)

棚井 憲治 菊池 広人 中村 邦彦 田中 幸久 廣永 道彦

Kenji TANAI, Hirohito KIKUCHI, Kunihiko NAKAMURA
Yukihisa TANAKA and Michihiko HIRONAGA

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

August 2010

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

ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討
- 日本原子力研究開発機構／電力中央研究所共同研究成果報告 -
(共同研究)

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

棚井 憲治、菊池 広人*
中村 邦彦*、田中 幸久*、廣永 道彦*

(2010年6月4日 受理)

放射性廃棄物処分では、施設の構成要素の一つとして、ベントナイト系材料を用いることが検討されている。ベントナイト系材料に求められている低透水性などは、ほとんどの場合、室内試験結果により評価されている。ところが、有効粘土密度などの指標が同一でも、試験法が標準化されていないことなどにより室内試験結果にはばらつきがあるため、このことが評価結果の不確かさの一因となっている。そのため、ベントナイト系材料の標準的室内試験法の確立が望まれている。そこで、ベントナイト系材料の標準的試験法の構築に向け、文献調査及び試験を実施し、試験結果に影響を及ぼす要因の抽出と影響程度の把握を行い、また、それらへの対応策の提案や課題の抽出を行った。

本検討では、ベントナイト系材料に対する標準的試験法がないことに加え、測定法による影響程度が十分把握されていない透水試験、膨潤圧試験及び熱物性値測定（熱伝導率、熱拡散率）を対象とし、試験法の現状調査ならびに追加試験を行い、試験法（試験装置、試験手順）に関して以下の成果を得た。

(1) 透水試験

文献調査の結果、定圧透水法と圧密試験法の使用例が多かった。一般的な土に対する試験結果への影響要因として、定圧透水試験法では①動水勾配、②供試体側面のみずみち、③透水圧、④飽和度ならびに⑤供試体寸法、また圧密試験法では④、⑤に加えて⑥供試体の変形に伴う摩擦、⑦圧密荷重が考えられる。ベントナイト系材料に対する定圧透水試験法では、実用上の範囲で①、②ならびに⑤は試験結果に影響しないことが分かった。③は供試体の収縮を避けるために膨潤圧以下に設定すること、④は内部に空気が残存しにくいよう供試体下部から一次元的な通水を行うことや背圧の負荷等により容易に影響を排除することができる。一方、圧密試験法では、④につ

本報告書は、日本原子力研究開発機構と(財)電力中央研究所との共同研究により実施した研究成果に関するものである。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

* 技術開発協力員

* (財)電力中央研究所

いては、圧密試験装置の構造上、飽和度を高めるための一次元的な通水と背圧の負荷は困難である。また、⑥を完全に排除出来ないため、摩擦の影響を補正する等の考慮が必要である。⑤の影響、⑦の影響を検討した事例は、調査した範囲で見当たらなかった。

以上より、試験結果に及ぼす影響を容易に排除可能であり不明な影響要因が少ないことから、定圧透水試験法を用いるのが現状望ましいと思われる。

(2) 膨潤圧試験

文献調査の結果、拘束型の装置と圧密試験装置に類似した装置が用いられていた。両装置とも試験結果に影響を及ぼす要因としては、飽和度、供試体寸法が考えられる。飽和度は、拘束型の装置では一次元的な通水と背圧の負荷により影響を排除できる。供試体寸法は、有効粘土密度 1.6Mg/m^3 程度以上では、影響が大きいことが明らかとなった。文献調査のみならず、同一試料を用いた追加試験結果でも、拘束型の装置による膨潤圧は、圧密試験装置に類似した装置による膨潤圧よりも大きくなる傾向が得られたが、その理由の解明は今後の課題である。

(3) 熱物性値測定（熱伝導率、熱拡散率）

今回調査した針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法、ホットディスク法であれば、どの測定法を用いても特に問題がない。ただし、ケイ砂などの混合材を混ぜる場合のばらつきや測定中における供試体中の水分移動などが、測定結果に影響を及ぼす。したがって、供試体作製時の混合材のばらつきを抑制するため、材料の投入を数回に分けるなどして均一に混合したり、測定中の供試体の水分移動を防ぐために供試体を包装フィルムなどで覆うなどの対策が必要である。

Survey on Current Status of Laboratory Test Method and Experimental Consideration for
Establishing Standardized Procedure of Material Containing Bentonite
- Report of Collaboration Research between JAEA and CRIEPI –
(Joint Research)

Kenji TANAI, Hirohito KIKUCHI*
Kunihiko NAKAMURA*, Yukihisa TANAKA* and Michihiko HIRONAGA*

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

(Received June 4, 2010)

In the current concept of repository for radioactive waste disposal, compacted bentonite as well as bentonite based material will be used as an engineered barrier mainly for inhibiting migration of radioactive nuclides. In most cases, properties of bentonite, such as low permeability etc., are obtained by laboratory tests. However, results of laboratory tests of bentonite often vary considerably even if index parameter, such as effective clay density, is constant. One of the causes of the variability is considered to be lack of standardized method of laboratory test for bentonite. Thus standardization of laboratory test methods for bentonite is needed. So, investigation for establishing standardized laboratory test method of bentonite is conducted based on the results of survey on current status of laboratory test method for bentonite. In particular, the literature survey as well as laboratory tests were conducted to find factors affecting the results of laboratory tests for bentonite and to estimate their degree of influence. The following conclusions are obtained through this study.

(1) Hydraulic conductivity test

According to the results of literature survey, it is revealed that constant pressure permeability test and consolidation test are currently used for measuring hydraulic conductivity of bentonite and that (a)hydraulic gradient, (b)local seepage flow between lateral surface of the specimen and lateral wall of the container, (c)water pressure which is applied to the specimen, (d)degree of saturation and (e)size of the specimen possibly affect the results of the constant pressure permeability test, while (f)friction between lateral surface of the specimen and lateral wall of the container accompanied by deformation of the specimen, (g)consolidation pressure together with factors (d), (e) affect the results of the consolidation test. Literature which describes that factors (a), (b) and (e) affect the results of the constant pressure permeability test is not found. In the constant pressure permeability test, the effect of factor (c) can be avoided by setting applied water pressure difference for seepage flow smaller than the swelling pressure. In the constant pressure permeability test, the effect of factor (d) is also avoided by infiltrating water into the specimen one-dimensionally so that air does not remain in the specimen and by applying back pressure during seepage flow test.

In the consolidation test, a correction method for the effect of friction is needed because the effect of the factor (f) is inevitable. It is revealed that one-dimensionally infiltration of water into the specimen is difficult because of the structure of the consolidation test apparatus.

This work has been performed in JAEA as a joint research with Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI).

* Collaborating Engineer

* CRIEPI

There is no literature which describes the effects of factors (e) and (g) on the results of the consolidation test conducted for bentonite specimen. According to the reasons mentioned above, it is currently desirable to use the constant pressure permeability test for compacted bentonite.

(2) Swelling pressure test

According to the literature survey, confined type testing apparatuses and apparatuses which are similar to the consolidation test apparatuses are used for measuring swelling pressure. Factors affecting results of swelling pressure tests are saturation of the specimen, size of the specimen and difference of apparatus. Saturation of the specimen set in confined type testing apparatus can be raised easily by one-dimensional infiltration of water through the specimen and by applying backpressure. It is revealed that size of the specimen affects the test results if effective clay density is larger than 1.6Mg/m^3 . Though swelling pressure measured by the confined type test apparatus is larger than that by apparatuses which are similar to the consolidation test apparatuses, further study is needed to clarify the cause of the difference.

(3) Thermophysical properties measurement

There seems no problem in measuring thermal conductivity and thermal diffusivity by the current four methods for uniformly mixed specimens of sand-bentonite mixture. However, heterogeneity of sand content and moisture content in the specimen affects the results of measurement. Therefore, procedure for mixing bentonite and admixture uniform and procedure for prohibiting migration of water content by covering the specimen by wrapping are necessary.

Keywords: Bentonite, Laboratory Test Method

目 次

1. はじめに	1
参考文献	3
2. 共同研究の概要	4
2.1 検討する試験項目について	4
2.2 役割分担	7
2.3 検討手順	8
2.4 適用範囲	8
参考文献	9
3. 放射性廃棄物処分でベントナイト系材料の諸特性を評価する場合の試験法における現状調査と課題の抽出	11
3.1 透水特性	11
3.1.1 放射性廃棄物処分でベントナイト系材料に求められる透水特性について	11
3.1.2 透水試験法の調査	11
3.1.3 影響要因の検討	21
3.1.4 透水試験法の現状と課題のまとめ	47
参考文献	50
3.2 膨潤特性	55
3.2.1 放射性廃棄物処分でベントナイト系材料に求められる膨潤特性について	55
3.2.2 膨潤圧試験法の調査	55
3.2.3 影響要因の検討	62
3.2.4 膨潤圧試験法の現状と課題のまとめ	130
参考文献	133
3.3 熱特性	136
3.3.1 放射性廃棄物処分でベントナイト系材料に求められる熱特性について	136
3.3.2 熱物性値測定方法の調査	136
3.3.3 影響要因の検討	142
3.3.4 熱物性値に関する測定方法の現状と課題のまとめ	160
参考文献	165
4. おわりに	167
謝辞	168
付録 文献調査リスト	177

Contents

1. Introduction	1
References	3
2. Outline of collaborative study	4
2.1 Examination item	4
2.2 Segregation of duties	7
2.3 Examination procedure	8
2.4 Scope of application	8
References	9
3. Current status and issue of experimental method in the case of evaluation of various characteristic of bentonite material on radioactive waste disposal	11
3.1 Hydraulic properties	11
3.1.1 Hydraulic property expected bentonite materials on radioactive waste disposal	11
3.1.2 Hydraulic conductivity test method	11
3.1.3 Study of influence factor	21
3.1.4 Summary and further issues	47
References	50
3.2 Swelling properties	55
3.2.1 Swelling property expected bentonite materials on radioactive waste disposal	55
3.2.2 Swelling pressure test method	55
3.2.3 Study of influence factor	62
3.2.4 Summary and further issues	130
References	133
3.3 Thermophysical properties	136
3.3.1 Thermophysical property expected bentonite materials on radioactive waste disposal	136
3.3.2 Thermophysical properties measurement method	136
3.3.3 Study of influence factor	142
3.3.4 Summary and further issues	160
References	165
4. Summary	167
Acknowledgement	168
Appendix List of bibliographic survey	177

1. はじめに

核燃料サイクルで発生する放射性廃棄物のうち、低レベル放射性廃棄物（以下、LLW という）及び TRU 廃棄物ならびに高レベル放射性廃棄物（以下、HLW という）を処分する施設では、システムの構成要素の一つとしてベントナイト系材料が用いられることが検討されている^{例え¹}。

近年、放射性廃棄物処分施設に係わる国の安全審査指針や民間規格が策定されつつある。LLW 処分施設の長期安全評価に関する基本的な考え方は、「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方（中間報告）」²、「余裕深度処分の安全評価手法」³、「余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方」⁴等により検討されている。また、処分施設の建設・品質管理・検査の考え方が、「低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について」⁵、「低レベル放射性廃棄物の施設検査標準」⁶、「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方」⁷等により検討されている。今後、TRU 廃棄物や HLW を対象とした地層処分についても、LLW 処分と同様の議論が行われる可能性が高いと考えられる。

これらの議論で、重要なものの一つに、放射性廃棄物処分における人工バリア状態設定の不確かさの考え方⁸がある。ここでいう状態とは、人工バリアの将来の状態及びその状態より推定される性能の状態をいう。

原子力安全委員会⁸では、放射性廃棄物処分における人工バリア状態設定の不確かさが、安全評価パラメータの設定に与える影響のイメージを、図 1-1 のように整理している。ここで、Step0 の施設等の設計・建設（品質管理・検査を含む）における不確かさは、品質管理方法及び検査方法ならびに建設方法に関わるものであり、人為的な対応により低減可能な不確かさである。一方、Step1 からの不確かさは、地下施設埋め戻し完了後に発生するものであるため、予測技術の精度より変化する不確かさである。また、Step0 の不確かさは、Step1 以降の長期的な人工バリアの特性評価の不確かさを増大させる可能性があることから、第一に重要なことは、長期的な予測の初期条件となる Step0 の人工バリア状態設定の不確かさを低減するために、人工バリアの基本的特性の把握を精度良く行うことである。

基本的特性の把握は、ほとんどの場合、室内試験結果により、それらの特性が評価されている。例えば、ベントナイト系材料の透水性や膨潤性等は、有効粘土密度（単位体積あたりに含まれるベントナイト分の乾燥重量を、ベントナイト以外の混合材の体積を除いた体積で割ることにより得られる密度、算出方法は p43 の式 3.1-1 に示す。）などの指標が同一でも、室内試験結果にはばらつきがあるため、室内試験結果に基づく Step0 の人工バリア状態設定には不確かさが存在する。ベントナイト系材料の室内試験結果のばらつきは、幾つかの試験法で統一化がなされていないことや、試験に関する留意事項などの整理が不十分であることが原因の一つである可能性がある。このため、室内試験結果のばらつきを低減するためには、標準的なベントナイト系材料の室内試験法の設定が重要である。

そこで、本研究では、標準的なベントナイト系材料の室内試験法の構築に向けて、試験法に関する基盤情報をとりまとめ、ベントナイト系材料に対する試験について得られる特性値のばらつきの要因分析を文献調査及び一部追加試験により実施し、推奨方法や留意事項等を取りまとめた。

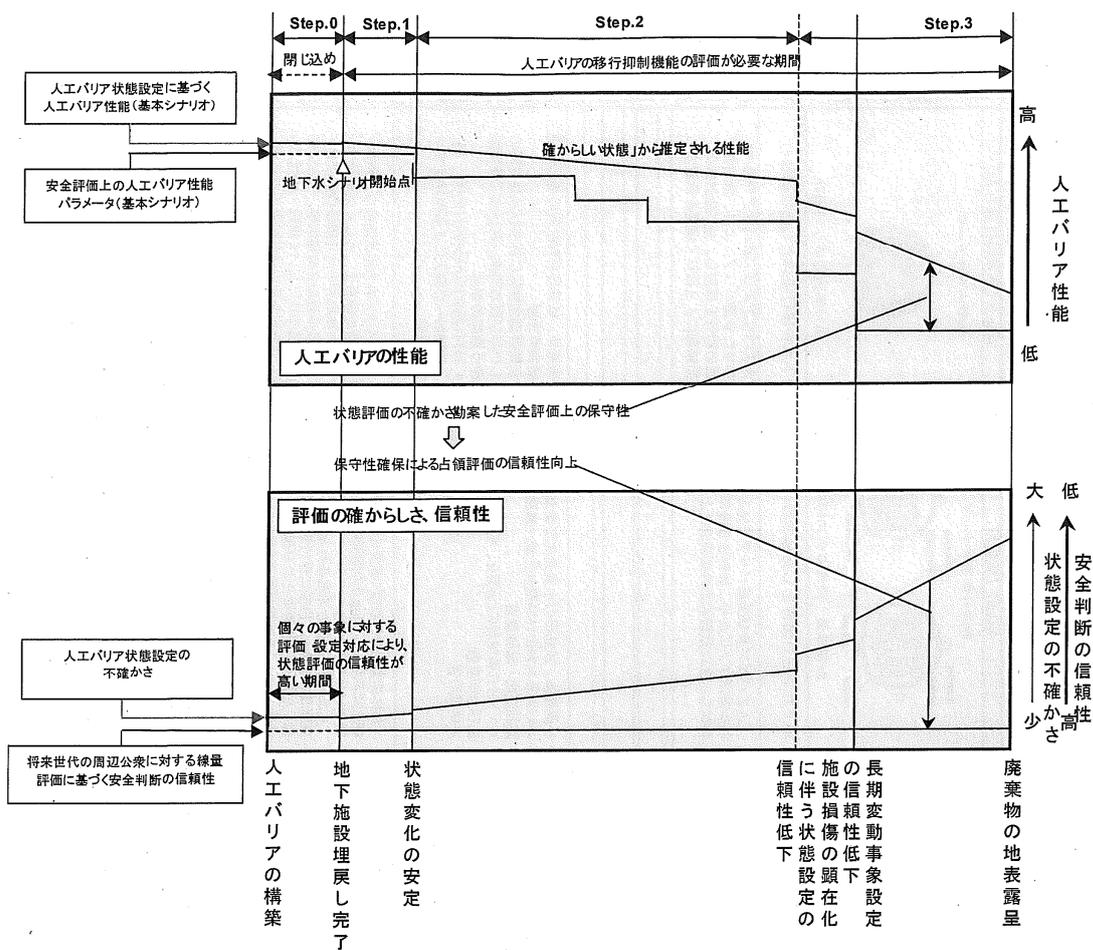


図 1-1 人工バリア状態設定の不確かさとそれを踏まえた安全評価パラメータ設定のイメージ⁸⁾

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022 (1999).
- 2) 原子力安全委員会：“低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方（中間報告）”（2007）.
- 3) 日本原子力学会：“日本原子力学会標準 余裕深度処分の安全評価手法”，AESJ-SC-F012-2008 (2009).
- 4) 土木学会：“余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方”，エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関わる研究小委員会 (2008).
- 5) 経済産業省資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会：“低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係わる安全規制について”，廃棄物安全小委員会(第32回) 資料 5-2 (2008).
- 6) 日本原子力学会：“低レベル放射性廃棄物の施設検査標準”，余裕深度処分施設の施設検査方法(案) 簡条1～4，第11回 LLW 埋設施設検査分科会資料 F15SC11-3-1
- 7) 土木学会：“余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方”，エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関わる研究小委員会 (2009).
- 8) 原子力安全委員会：“人工バリアの長期状態設定の考え方(案)”，原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 第二種廃棄物埋設分科会（第15回） 配布資料二分第15-2号 (2009).

2. 共同研究の概要

(財)電力中央研究所（以下、電中研という）及び(独)日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）では、それぞれ長年にわたって放射性廃棄物の処分に反映するため、ベントナイト系材料の特性に関する研究開発を実施してきた。文献調査及び試験法の精度や試験結果に及ぼす影響の要因分析について検討する場合、単一の機関で行うよりも、両機関で行った方が試験に関するノウハウやデータを共有化することが出来、効率的に検討が行えるため、共同研究を平成 21 年度に実施した。

2.1 検討する試験項目について

余裕深度処分では、「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方」¹⁾（表 2.1-1）にあるように、施設の長期安全確保のための、設計、品質管理及び検査を行う上で考慮するベントナイト系材料の特性として透水係数、強度・変形係数、膨潤圧、鉱物組成、厚さ、密度（かさ密度）が挙げられている。また、HLW 処分では、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」²⁾にあるように、緩衝材の設計を行う上で考慮するベントナイト系材料の特性として、低透水性（透水係数）、コロイドろ過性、自己シール性（膨潤特性）、製作・施工性（強度特性）、廃棄体支持性（強度特性）、熱伝導性（熱特性）が挙げられている。

これらの特性とその測定・試験法を表 2.1-2 のように整理した。これらのうち、強度・変形係数については、地盤工学会における「地盤材料試験の方法と解説」³⁾の一軸圧縮試験法（JIS A 1216）や三軸試験法（JGS0520）等が適用可能と考え、検討する試験項目より除外した。また、部材の寸法測定（厚さ）については、レベル測量や 3 次元レーザー測量が、ベントナイトの膨潤性が発揮される前の段階で実施されるため、ベントナイト以外の膨潤性を有しない一般的な土と同様に、レベル測量や 3 次元レーザー測量が適用可能であり、ベントナイト対して特別に留意することがないと考え、検討する試験項目より除外した。密度（かさ密度）については、地盤工学会における「地盤材料試験の方法と解説」（例えば JIS A 1225 等）³⁾等が適用可能と考え、検討する試験項目より除外した。鉱物組成については、日本ベントナイト工業会による試験方法（例えば、JBS-107-91）等が適用可能と考え、検討する試験項目より除外した。コロイドろ過性については、国内外とも類似した実験により実施されており、実験結果に大きな違いは認められないため、現状の試験方法を適用することが可能と考え、検討する試験項目より除外した。

以上の試験項目を検討する試験項目から除外した結果、透水試験、膨潤試験（膨潤圧試験）、熱物性値測定試験が検討する項目として考えられた。更に、これら 3 つの試験について、以下の理由により検討が必要と考えた。

一般の土を対象とした透水試験については、「地盤材料試験の方法と解説」³⁾において「土の透水試験方法」が示されている。しかし、ベントナイトを用いた透水試験法については、これまでに動水勾配の影響や容器側面における選択的な移行に関する影響など、測定結果にばらつきを与える要因についての研究報告例^{4),5)}があり、これらの知見を整理しておく必要があると考えた。また、透水性は余裕深度処分施設で重要度の高いパラメータとして挙げられている¹⁾ことも考慮した。

表 2.1-1 長期安全確保のための設計、品質管理および考慮すべき項目について (例) 1)

人工バリア機能	主な対応部位	重要度の高いパラメータ (施工時性能・状態)	性能を支配する主要な物理・化学特性	長期状態評価において考慮すべき主要な現象・反応	左記現象・反応に影響する当該部位の主要な特性 (長期状態設定)	考慮すべき特性
低透水性	低透水層	○透水係数	モンロライト層間付組成	・ 交換性陽イオンの変化	* 鈳物組成 (層間付組成)	○透水係数
			モンロライト含有率	・ モンロライトの溶解	* 密度 (かさ密度)	○厚さ
			乾燥密度	・ 力学的変形に伴う密度・形状の変化 ・ 近接部材隙間等へのバント付流出	* 鈳物組成 (モンロライト含有率)	* 鈳物組成 * 密度 (かさ密度) * 強度・変形係数 * 膨潤圧
			間隙水の水質	・ 塩水の影響 ・ 硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	—	
低拡散性	空洞内充てん材	○厚さ	厚さ	・ 力学的変形に伴う密度・形状の変化 ・ 近接部材隙間等へのバント付流出	* 強度・変形係数 * 膨潤圧	
			短絡経路の有無	・ 力学的影響による物理的損傷 ・ 膨潤による自己シール	* 膨潤圧	
			密度	・ 鈳物変質	* 鈳物組成	○強度・変形係数 * 鈳物組成
			基質部の空隙構造	・ セメント水和物の溶脱、二次鈳物の生成 ・ 硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	* 鈳物組成 * 実効拡散係数	○ * 実効拡散係数 ○ ひび割れ開口面積
核種収着性	区内充てん材、コンクリートピット、低拡散層	○ひび割れ開口面積	ひび割れ幅長さ本数	・ 二次鈳物の生成によるひび割れ形成 ・ 硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響 ・ 微生物活動 ・ 力学的変形に伴うひび割れの生成、進展 ・ 低透水層の不等沈下に伴う応力発生によるひび割れ形成	* 鈳物組成 * 圧縮強度	○厚さ * 鈳物組成 * 圧縮強度
			厚さ (健全部)	・ セメント水和物の溶脱、二次鈳物の生成 ・ 硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	* 鈳物組成	○厚さ
			鈳物組成	・ セメント水和物の溶脱、二次鈳物の生成 ・ 熱変質による鈳物変質	* 鈳物組成	○ * 実効分配係数 ○ 収着体積
			間隙水の水質	・ セメント水和物の溶脱、二次鈳物の生成 ・ 硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	—	○ * 実効分配係数 ○ 収着体積 * 鈳物組成
核種収着性	区内充てん材、コンクリートピット、低拡散層	○収着体積	当該部位の体積	・ セメント水和物の溶脱、二次鈳物の生成	* 鈳物組成	○ * 実効分配係数 ○ 収着体積 * 鈳物組成

表 2.1-2 設計仕様項目と現状用いられている試験方法

(考慮すべき特性は、LLW 処分については余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方

¹⁾、HLW 処分についてはわが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性²⁾を参考に設定した。)

右に示す考慮すべき特性を必要とする処分	考慮すべき特性	現状用いられている試験方法	備 考
LLW 処分, HLW 処分	透水係数 (低透水性)	規格はあるが、ベントナイトへの適用は議論が必要	JIS、JGS規格は一般の土を対象としているため、そのままのベントナイトへの適用は困難
LLW 処分	ベントナイト層の厚さ	レベル測量、3次元レーザー測量等	土木構造物の建設で使用されており実績がある方法である。
LLW 処分, HLW 処分	膨潤圧(自己シール性)	圧密試験に類似した方法	規格が無い 各機関で工夫を加えながら行っている。
LLW 処分	鉱物組成(モンモリロナイト含有率、層間陽イオン組成等)	メチレンブルー吸着試験 (JBAS-107-91)	JBAS 規格有
LLW 処分, HLW 処分	密度(かさ密度)	土の湿潤密度試験方法(JIS A 1225)等	JIS 規格有
LLW 処分, HLW 処分	強度・変形係数(廃棄体支持性、製作施工性)	一軸圧縮試験法(JIS A 1216) 三軸圧縮試験法(JGS 0524) 等	JIS、JGS 規格有
LLW 処分	熱伝導性(熱特性)	点熱源法、線熱源法、面熱源法等	ベントナイトとケイ砂混合材料の熱伝導率の測定値のばらつきや、各測定法に基づく信頼性の確認などが必要である。
LLW 処分, HLW 処分	コロイドろ過性	透過試験や拡散試験等	国内外とも類似した試験方法により実施。 実験結果に大きな違いはない。

また、膨潤試験には、膨潤圧試験と膨潤変形試験があり、いずれも具体的な試験法について規格化されていない。また、図 2.1-1 に示すように、膨潤圧の試験結果には、設計上の指標となる可能性のある有効粘土密度との間に大きなばらつきがあることが確認されており、原因を検討するための知見を整理しておく必要があると考えた。ただし、本報告では膨潤変形試験の既往の知見が少なく、試験結果のばらつきの把握や試験結果に及ぼす影響要因の検討が困難であると考えたため、膨潤圧試験のみを対象として検討することとした。

さらに、熱特性については、HLW 処分で、坑道間の離隔距離等は、施設のレイアウト、コストに大きく影響を与えるため、設計上重要な項目と考えた。熱特性の熱物性値測定は、点熱源法、線熱源法、面熱源法といった測定方法が現状用いられているが、測定法の違いによるデータのばらつきについてはこれまで検討されていないことから、試験法に関して検討しておく必要があると考えた。

以上の観点から、本報告では、透水試験法、膨潤圧試験法及び熱物性値測定法について検討することとした。

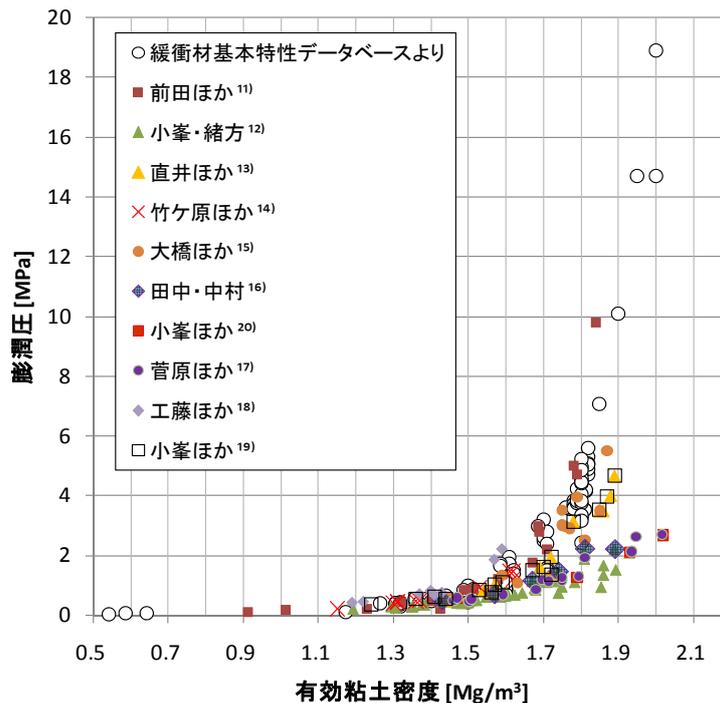


図 2.1-1 有効粘土密度と膨潤圧との関係 (クニゲル V1、蒸留水、室温～25℃)

2.2 役割分担

電中研及び原子力機構がこれまで進めてきた LLW、TRU 廃棄物、HLW の放射性廃棄物処分に
 関する検討の実績を考慮し、共同研究として最終的な取りまとめを効率的に行えるよう表 2.2-1
 のように役割分担を行った。

表 2.2-1 共同研究の役割分担 (◎は主体となりまとめた機関を示す)

	原子力 機構	電中研
(1)透水特性		
①国内の文献調査	○	◎
②海外の文献調査	◎	○
③実験結果に及ぼす影響要因の整理	○	◎
④試験方法の現状と課題のまとめ	◎	◎
(2)膨潤特性		
①国内の文献調査	○	◎
②海外の文献調査	◎	○
③実験結果に及ぼす影響要因の整理	◎	○
④試験方法の現状と課題のまとめ	◎	◎
(3)熱特性		
①国内の文献調査	◎	○
②海外の文献調査	◎	○
③実験結果に及ぼす影響要因の整理	◎	○
④試験方法の現状と課題のまとめ	◎	◎

2.3 検討手順

2.1 章において示した透水試験、膨潤圧試験の標準化に向けた基盤情報の整理については、図 2.3-1 に示すように行った。熱物性値測定法については、ベントナイトとケイ砂混合供試体の熱伝導率の測定値のばらつきの把握や、点熱源法、線熱源法、面熱源法といった測定方法に基づくデータの信頼性の検討を行った。

なお、文献調査においては、土木学会、原子力学会、地盤工学会等の学会発表や論文、海外に関しては、代表例として R. Pusch and Geodevelopment AB による SKB のテクニカルレポート^{6),7)}を対象に行った。

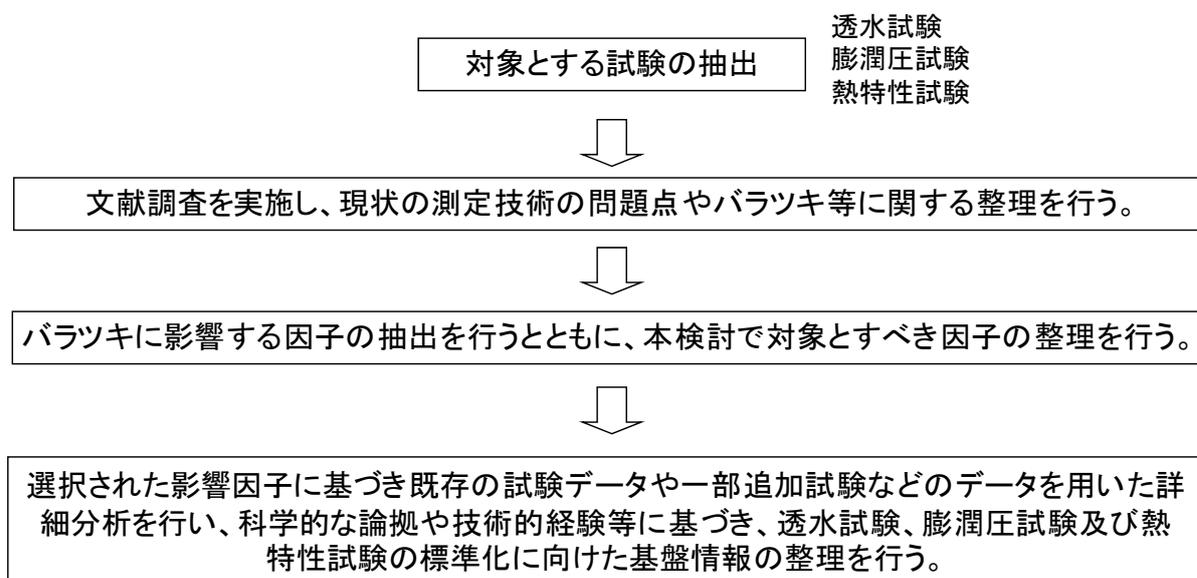


図 2.3-1 本研究の検討フロー

2.4 適用範囲

本報告における検討では、試験結果に及ぼす影響要因を検討するために、一部、サンプリング供試体に対する試験結果を用いた以外は、主に室内で要素試験用に作製された圧縮成型体を用いた試験結果を対象として検討を行っている。しかしながら、本報告で留意事項として挙げたものは、室内で要素試験用に作製された圧縮成型体のみならず、サンプリング供試体に対しても適用出来るものと考えられるが、サンプリング供試体固有の要因（供試体の成型方法、装置への供試体の設置の仕方等）が試験結果に及ぼす影響については、検討していないため、サンプリング供試体に対しては、これらの要因に留意した検討を今後行う必要がある。

また、文献調査の結果、特性値に関するデータの多くは有効粘土密度 $1.0\text{Mg/m}^3 \sim 2.0\text{Mg/m}^3$ のデータであり、低い有効粘土密度の供試体に対するデータが不足していたため、本報告書で、試験法に対する推奨方法の適用範囲は有効粘度密度 $1.0\text{Mg/m}^3 \sim 2.0\text{Mg/m}^3$ とした。

なお、本報告の検討は、電中研と原子力機構の 2 機関で検討して得られた結果であり、更に標準的な試験法を確立するためには、学会や有識者など多くの方々の議論を経なければならないと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：“余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方”，エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関わる研究小委員会，(2009).
- 2) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022 (1999).
- 3) 地盤工学会：“地盤材料試験の方法と解説” (2009).
- 4) 石井卓、中島均、白石知成、後藤高志：“ $1E-13$ m/s の透水係数を短時間で測定する高速透水試験”，土木学会第58回年次学術講演会，pp.319-320 (2003).
- 5) 田中幸久、中村邦彦：“長期透水中のベントナイトの膨潤圧と透水係数の測定”，第44回地盤工学研究発表会，pp.247-248 (2009).
- 6) R. Pusch and Geodevelopment AB：“The buffer and backfill handbook -Part 2: Materials and techniques-”，SKB TR-02-12 (2001).
- 7) R. Pusch and Geodevelopment AB：“The buffer and backfill handbook – Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods –”，SKB TR-02-20 (2002).
- 8) 伊藤 弘志：“原鉱石から調整した粒状ベントナイトの特性試験(2)～透水特性について～”，土木学会第59回年次学術講演会，pp.85-86 (2004).
- 9) 田中幸久、中村邦彦：“長期透水中のベントナイトの膨潤圧と透水係数の測定”，第44回地盤工学研究発表会，pp.247-248 (2009).
- 10) 日本原子力開発機構、緩衝材基本特性データベース、<http://bufferdb.jaea.go.jp/bumdb/>
- 11) 前田宗宏、棚井憲治、伊藤勝、三原守弘、田中益弘：“カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性 - 膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数 -”，PNC TN8410 98-021 (1998).
- 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・埋め戻し材の膨潤評価式の提案—砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響—”，電力中央研究所報告、研究報告 U99013 (1999).
- 13) 直井優、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴：“異なる寸法の供試体を用いたベントナイト系緩衝材の膨潤圧特性調査”，第39回地盤工学研究発表会，pp.2205-2206 (2004).
- 14) 竹ヶ原竜大、九石正美、川口光夫、高尾肇：“緩衝材の膨潤・透水特性 - 隙間の影響 -”，土木学会第60回年次学術講演会，pp.101-102 (2005).
- 15) 大橋良哉、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：“短期間の温度履歴を受けたベントナイトの膨潤圧特性に関する実験的調査”，土木学会第59回年次学術講演会，pp.509-510 (2004).
- 16) 田中幸久、中村邦彦：“海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響”，電力中央研究所報告，研究報告 N04007 (2004).
- 17) 菅原宏、小峯秀雄、緒方信英、田代勝浩：“締固めたベントナイトの膨潤圧に関する基礎的研究”，第27回土質工学研究発表会，pp. 277-278 (1992).
- 18) 工藤康二、田中幸久、横倉俊幸、北村至：“締固めたベントナイト試料の膨潤圧測定方法に関する検討”，第40回地盤工学研究発表会，pp. 2573-2574 (2005).
- 19) 小峯秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴：“人工海水条件下における各種ベントナイト

- の自己シール挙動に関する実験的研究”，第41回地盤工学研究発表会，pp.299-300 (2006).
- 20) 小峯秀雄，緒方信英，西好一：“高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材の力学特性（その1） - 締固めたベントナイトの給水膨潤メカニズムの実験的検討 - ”，電力中央研究所報告，研究報告 U92039 (1992).

3. 放射性廃棄物処分でベントナイト系材料の諸特性を評価する場合の 試験法における現状調査と課題の抽出

まず、透水試験、膨潤試験、熱物性値測定でこれまでに取得されている物性値のばらつきの要因分析を行うため、文献調査を行った。また、調査結果をもとに、ばらつきの要因分析を実施し、ばらつきを低減するための試験での推奨方法を整理した。なお、膨潤試験、熱物性値測定については、調査結果のみで判断がつきにくい要因があったため追加試験を実施した。以下に試験・測定毎に行った検討内容を示す。

3.1 透水特性

3.1.1 放射性廃棄物処分でベントナイト系材料に求められる透水特性について

LLW処分におけるベントナイト系材料の人工バリアには主として核種移行抑制機能¹⁾、HLW処分における緩衝材には、主として拡散場担保機能²⁾が要求されている。これらの要求を満足するために、ベントナイト系材料にはLLW処分、HLW処分共に低透水性が求められる。

3.1.2 透水試験法の調査

土の透水係数を求める試験法として、現状ではJIS規格などがある¹²⁾が、ベントナイト系材料は非常に透水性が低いため現実的な時間で試験結果を得ようとする場合、供試体サイズや動水勾配の設定などをそのまま適用することが困難な場合がある。そのため、各機関で実際に実施されている試験法には装置や試験手順、試験条件に差が生じている。そこで本節では、各機関で実際に実施されている試験法の現状を把握するとともに、ベントナイト系材料を対象とした場合の適切な試験法を検討した。

透水試験の現状や問題点等の整理を行うため、地盤工学会、土木学会及び原子力学会などの学会発表や論文、R. Pusch and Geodevelopment AB によるSKBのテクニカルレポート^{3), 4)}を対象に文献調査を行った。これらの文献調査から試験データを収集するとともに、電中研や原子力機構で取得されたデータと合わせて全体的な試験結果のばらつきについて検討を行い、3.1.3節における透水試験結果に及ぼす影響要因の抽出を行った。

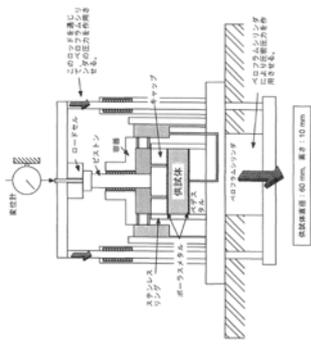
文献調査に際しては、モンモリロナイト含有率、ベントナイト土粒子密度、混合材の種類と混合率(%)、混合材の土粒子密度、通水溶液の種類、通水溶液のイオン強度、供試体の圧縮成型方法と成型圧、透水試験法(試験に用いた試験装置)、給水方法、供試体の寸法、乾燥密度、有効粘土密度、試験温度、供試体作製時の含水比(以後、初期含水比とする)に関する情報を整理した。これらの調査から抽出された透水関係の文献及び論文は、88件であった(付録参照)。文献からの透水係数データの収集は、具体的な数値が記載されていない場合には、Biosoft社のUnGraph5を使用し、グラフから数値データを読み取った。表3.1-1に文献内に記載されている透水係数とグラフからUnGraph5で読み取った透水係数を比較検討した結果を示す。読み取った透水係数は、記載された透水係数に対して、±6%の誤差であり、グラフ上から全体的な試験結果のばらつきをみるためには問題がないと判断した。

試験に用いられているベントナイト材料としては、クニゲルV1が最も多く、それ以外は、ボル

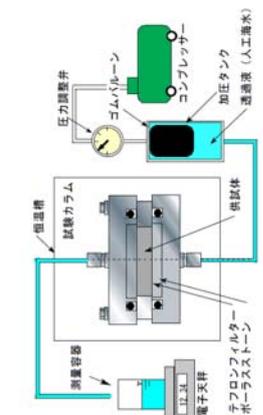
クレイ、クニボンド、MX-80、ネオクニボンド、ベントナイト原鉱、ベントナイトペレット、ベントボールが用いられていた。透水試験法としては、定圧透水試験法と圧密試験法、変水位試験法が多く用いられており、それ以外には、フローポンプ試験法が2件行われていた。調査した文献に記載されていた透水試験装置を図3.1-1に示した。透水試験に用いられている供試体の寸法については、直径が40mm～100mm、高さについては5mm～50mmまでの円柱供試体を用いたものが多く、直径300mm、高さ200mmの円柱供試体⁶⁵⁾、50mm×50mm、高さ20mmの角型供試体⁶²⁾を用いたものもあった。試験に用いられている通水溶液は、蒸留水またはイオン交換水が最も多く、次いで人工海水^{例えば²⁴⁾}が多かった。人工海水を用いた試験では人工海水の濃度をパラメータとした試験^{例えば²⁴⁾}もあった。また、ベントナイト系材料の透水性への地下水の影響を把握するために通水溶液に地下水を用いている試験²⁸⁾も存在した。有効粘土密度が記載されている文献は多かったが、有効モンモリロナイト密度を算出するのに必要となるモンモリロナイト含有率、土粒子密度などについては、記載されている文献は少なかった。

表 3.1-1 UnGraph5 を用いたデータスキニングの精度確認結果

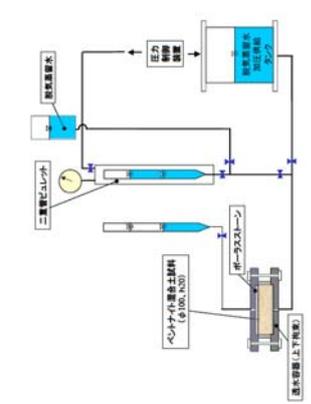
ベントナイト配合率 (%)	乾燥密度 [Mg/m ³]	記載された透水係数 [m/s]	グラフから読み取った透水係数 [m/s]	グラフから読み取った透水係数/記載された透水係数 (%)
100	1.79	5.71E-13	5.66E-13	99
100	1.78	1.32E-13	1.33E-13	101
100	1.84	8.22E-14	8.26E-14	100
100	1.82	1.91E-13	1.89E-13	99
100	1.82	1.20E-13	1.18E-13	98
100	1.86	1.19E-13	1.18E-13	99
100	1.71	2.82E-13	2.83E-13	100
100	1.76	1.63E-13	1.63E-13	100
100	1.80	7.81E-14	7.73E-14	99
80	1.94	5.30E-13	5.07E-13	96
80	1.96	1.65E-13	1.58E-13	96
80	1.98	7.72E-14	7.39E-14	96
80	1.87	1.21E-13	1.18E-13	98
80	1.90	8.53E-14	8.30E-14	97
80	1.94	5.13E-14	4.95E-14	96
80	1.80	1.73E-13	1.66E-13	96
80	1.84	9.00E-14	8.71E-14	97
80	1.88	6.53E-14	6.30E-14	96
70	2.09	7.35E-13	7.34E-13	100
70	2.11	1.24E-13	1.24E-13	100
70	2.13	9.75E-14	9.72E-14	100
70	2.07	1.02E-13	1.01E-13	99
70	2.11	7.71E-14	7.65E-14	99
70	2.14	4.24E-14	4.22E-14	100
70	1.92	1.41E-13	1.41E-13	100
70	1.97	5.93E-14	5.92E-14	100
70	2.00	3.94E-14	3.96E-14	101
50	2.13	1.02E-12	9.72E-13	95
50	2.15	3.25E-13	3.09E-13	95
50	2.10	2.16E-13	2.07E-13	96
50	2.06	2.47E-12	2.35E-12	95
50	2.17	2.26E-13	2.16E-13	96
50	2.13	1.33E-13	1.27E-13	95
50	1.98	2.78E-13	2.67E-13	96
50	2.03	1.60E-13	1.54E-13	96
50	2.06	1.20E-13	1.15E-13	96



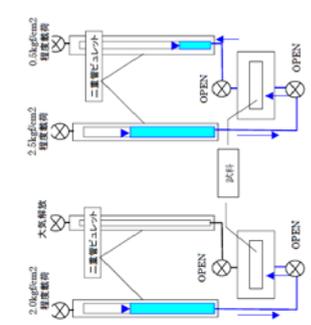
透水試験装置 (D) (21), (34)



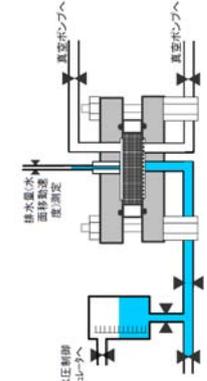
透水試験装置 (C) (23), (28), (27), (37), (49)



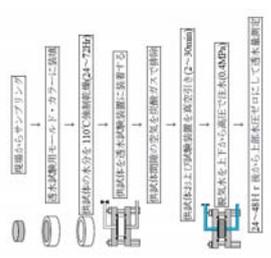
透水試験装置 (B) (33)



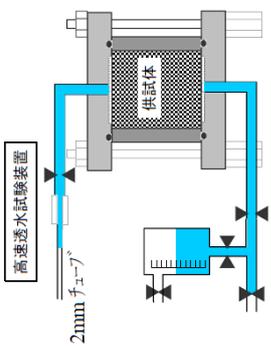
透水試験装置 (A) (15)



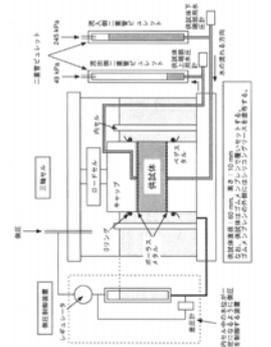
透水試験装置 (H) (35), (36)



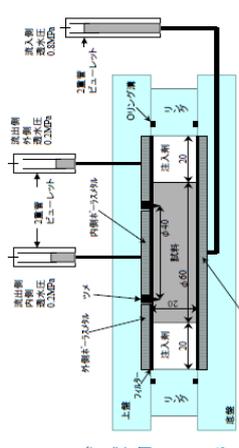
透水試験装置 (G) (42)



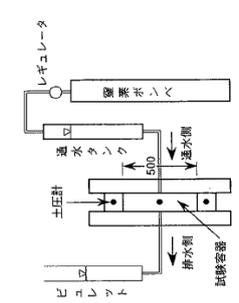
透水試験装置 (F) (17)



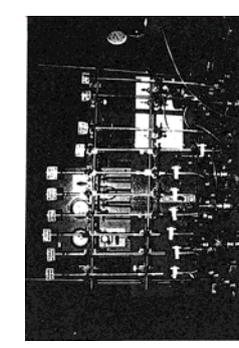
透水試験装置 (E) (21)



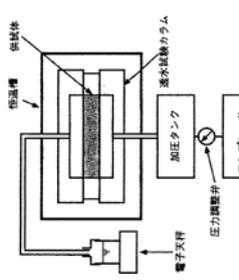
透水試験装置 (L) (32)



透水試験装置 (K) (66)



透水試験装置 (J) (30)



透水試験装置 (I) (38)

図 3.1-1(1) 透水試験に用いられている試験装置

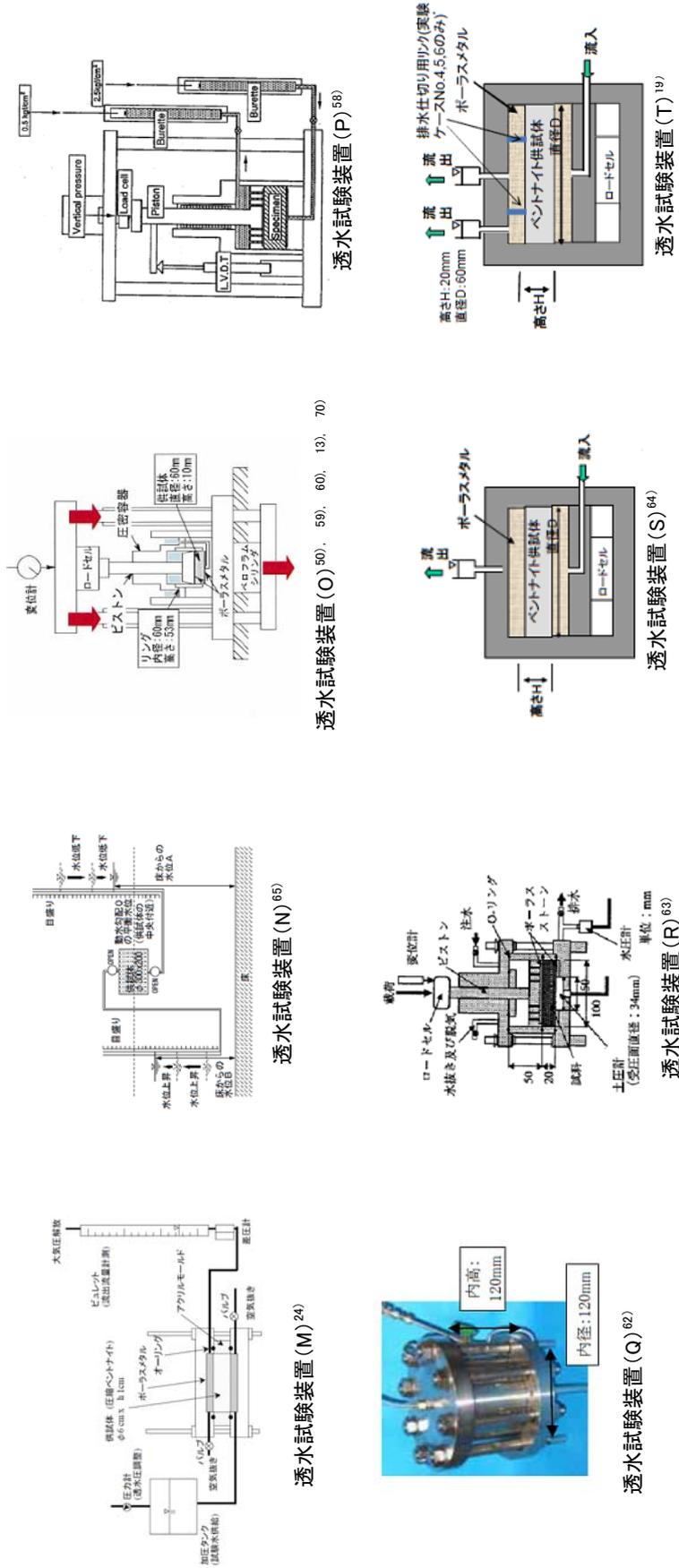


図 3.1-1(2) 透水試験に用いられている試験装置

有効粘土密度に対する試験結果のばらつきを把握するため以下に整理した。クニゲル V1、MX80、ボルクレイ、ネオクニボンド、クニボンドを対象に蒸留水またはイオン交換水、海水を用いて行われた試験結果を、それぞれの材料及び通水溶液の条件毎に、有効粘土密度と透水係数の関係で整理したものを図 3.1-2～図 3.1-12 に示す。なお、図 3.1-2～図 3.1-12 は以下の点を考慮して作成した。

- ・ 海水条件の結果には、人工海水（アクアマリンを含む）を通水している結果のみを抽出し、塩濃度（イオン強度）をパラメータとした結果は含めない。
- ・ 混合材を用いている場合、混合材の土粒子密度が記載されていないものについては、有効粘土密度を算出することができないため含めない。
- ・ ベントナイト系材料の種類が記載されていないものについては、ベントナイト種類が判断出来ないため含めない。
- ・ 既往の知見^{4),27)}で述べられているように、試験結果に対する温度の影響が予想されたが、温度の記載された文献が少なかったため、温度の記載されていないものについては室温として整理する。なお、図 3.1-2～図 3.1-12 の凡例に温度の記載条件の有無を示した。ただし、クニゲル V1 で蒸留水またはイオン交換水を用いた試験については、最も試験が実施されていることを踏まえて、温度条件に関しては室温または 25°C 以下の温度が記載されたものだけで整理した結果も示した（図 3.1-2）。電中研で実施された試験については、温度の記載が無い場合でも、室温環境条件で行ったことを確認した試験結果については、併せて図 3.1-2 にプロットした。

また、蒸留水で行われた試験により得られているクニゲル V1 の有効粘土密度に対する透水係数の関係（図 3.1-3）をみると、有効粘土密度によらず、透水係数は 1 オーダー～2 オーダー程度のばらつきを有していることが分かる。クニゲル V1 に対して、海水で行われた試験結果でも（図 3.1-4）、蒸留水の場合と同様に、有効粘土密度によらず、透水係数は 1 オーダー～2 オーダー程度のばらつきを有している。

今回の文献調査の範囲において、クニゲル V1 以外の粘土の試験結果（図 3.1-5～図 3.1-12）を見るとクニゲル V1 に対する試験結果（図 3.1-2～図 3.1-4）に対して、試験結果が少ないことが分かる。クニゲル V1 以外のベントナイトについては、試験結果が少なく、有効粘土密度に対する透水係数のばらつきを把握することは出来ないと判断したため、クニゲル V1 に対する試験結果のみをばらつきの原因の検討の対象とした。

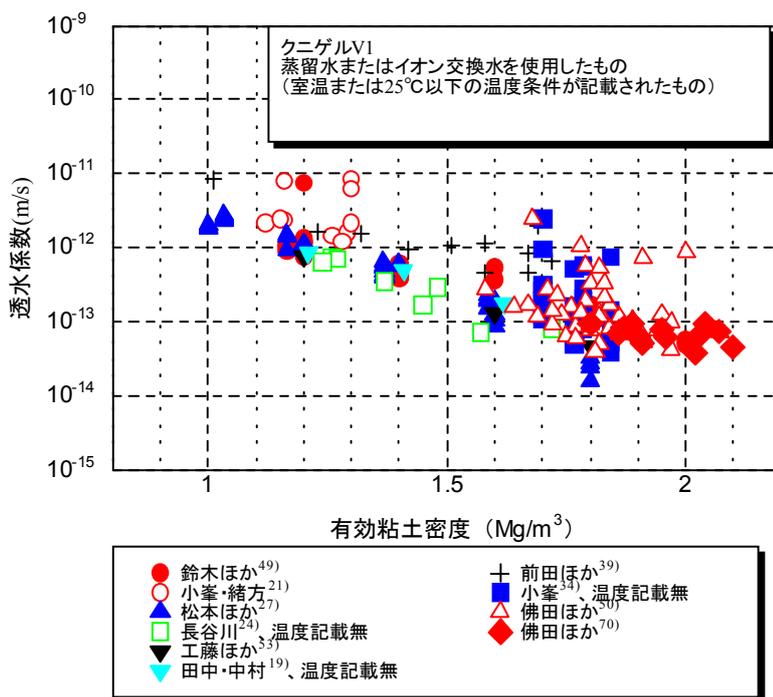


図 3.1-2 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、蒸留水またはイオン交換水を使用したもの、室温または 25°C 以下の温度条件が記載されたもの)

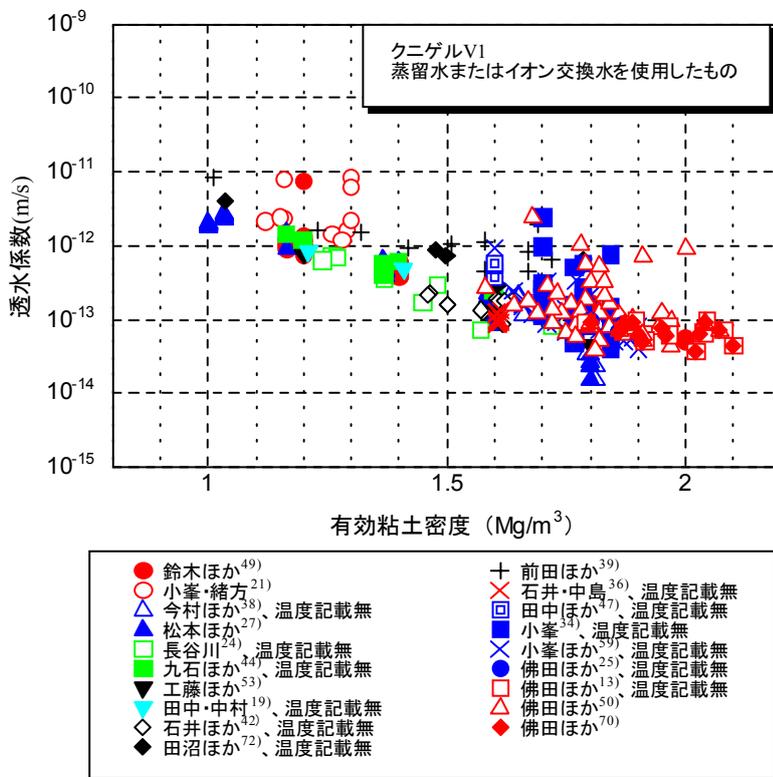


図 3.1-3 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、蒸留水またはイオン交換水を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

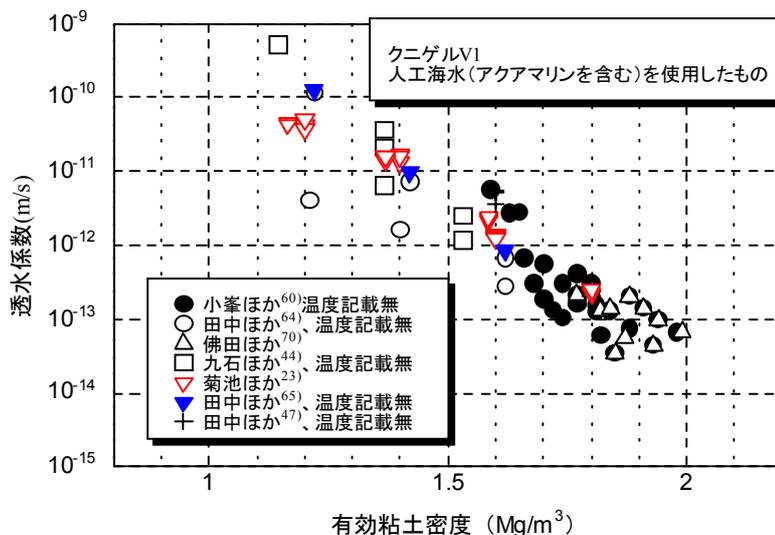


図 3.1-4 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、人工海水 (アクアマリンを含む) を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

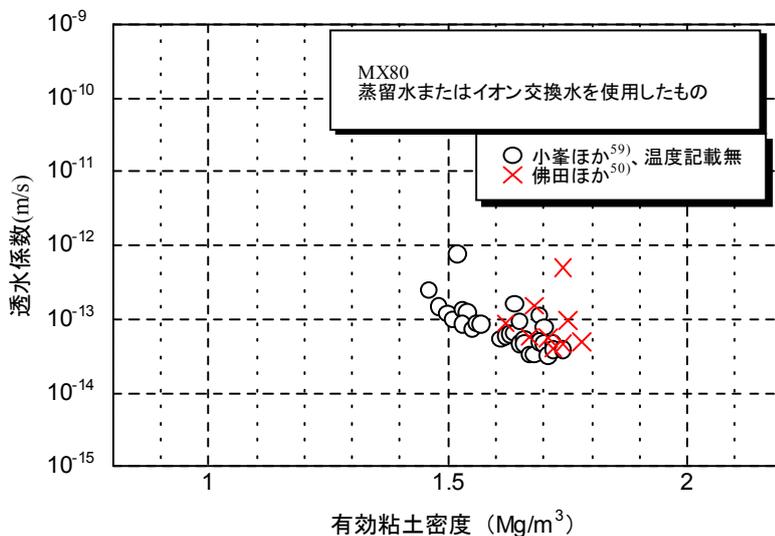


図 3.1-5 有効粘土密度と透水係数の関係 (MX-80、蒸留水またはイオン交換水を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

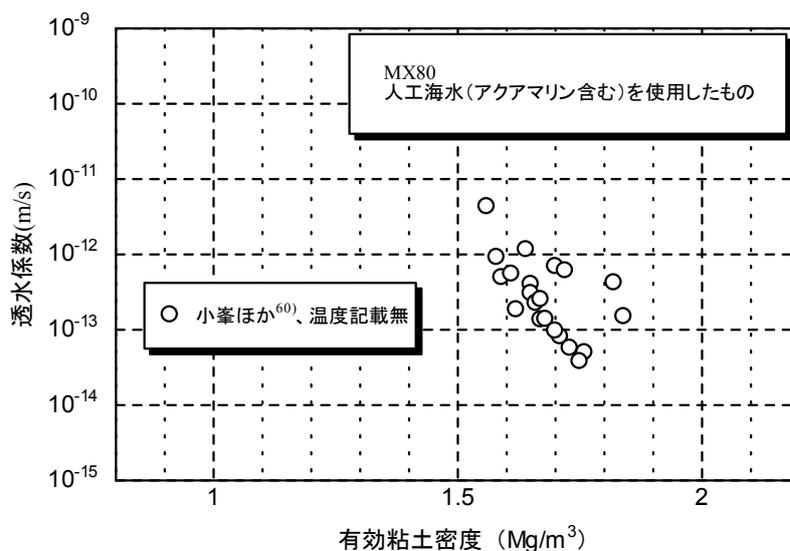


図 3.1-6 有効粘土密度と透水係数の関係 (MX-80、人工海水 (アクアマリンを含む) を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

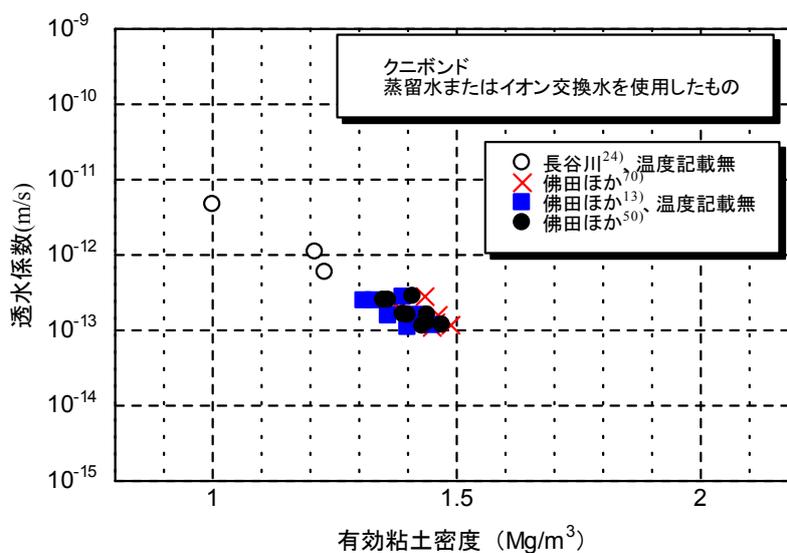


図 3.1-7 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニボンド、蒸留水またはイオン交換水を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

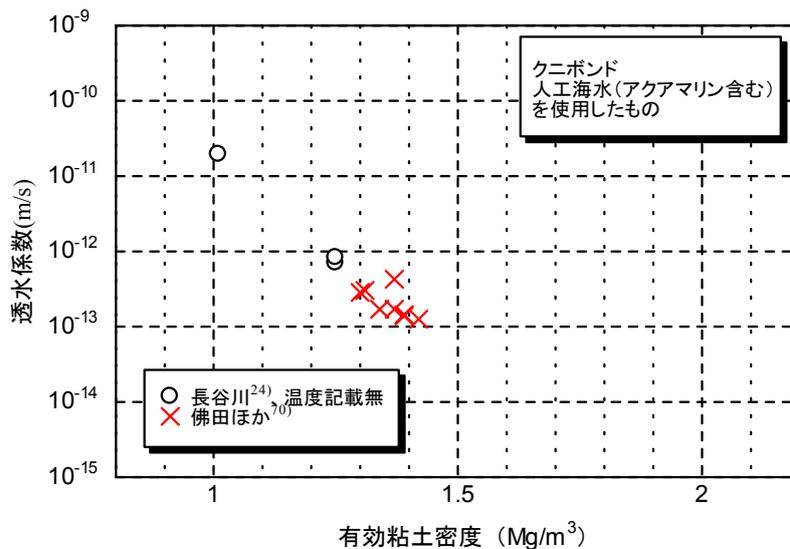


図 3.1-8 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニボンド、人工海水 (アクアマリンを含む) を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

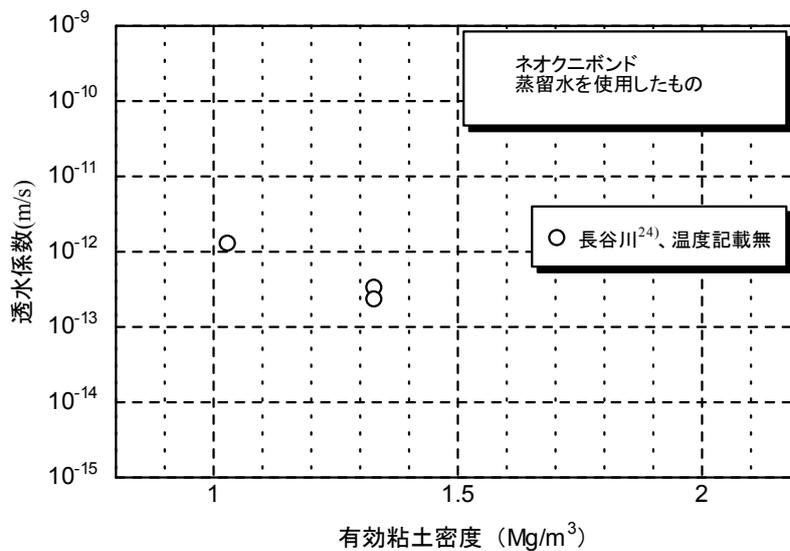


図 3.1-9 有効粘土密度と透水係数の関係 (ネオクニボンド、蒸留水またはイオン交換水を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

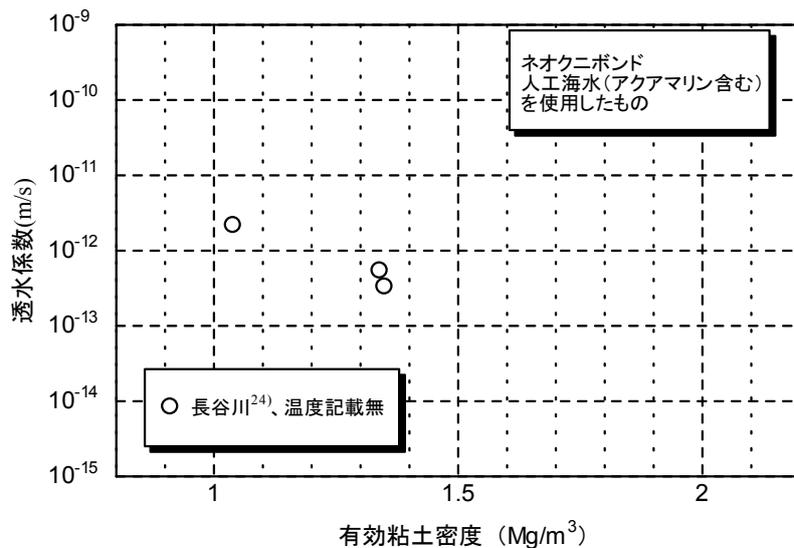


図 3.1-10 有効粘土密度と透水係数の関係 (ネオクニボンド、人工海水 (アクアマリンを含む) を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

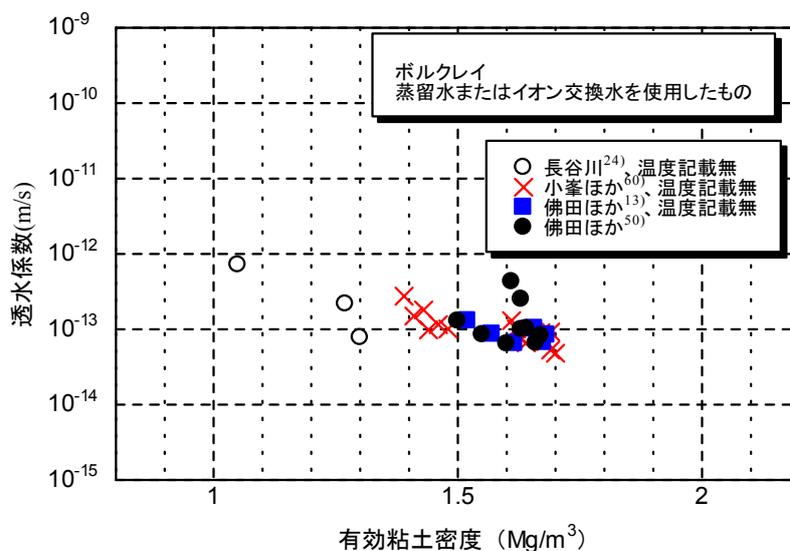


図 3.1-11 有効粘土密度と透水係数の関係 (ボルクレイ、蒸留水またはイオン交換水を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

表 3.1-2 試験結果に及ぼす影響要因の分類

①試験法自体による影響要因		・試験法（試験装置）の影響
②試験手順による影響要因		・飽和化の影響
③試験条件による影響要因		・動水勾配、透水圧の影響
		・供試体寸法の影響
		・初期含水比の影響
		・通水溶液の種類や組成による影響
		・温度の影響
④供試体の特性による影響要因	a. 定量的評価が可能な要因	・モンモリロナイト含有率による影響
		・土粒子密度の影響
		・交換性陽イオン組成の影響
	b. 定量的評価が困難な要因	・土の微視的構造の影響
		・密度不均一性の影響

(1) 試験法自体による影響要因

1) 試験法（試験装置）の影響

国内の文献調査の結果、既往の研究で行われている試験法の多くは、定圧透水試験法、変水位透水試験法、圧密試験法であった。一方、フローポンプ試験法は 2 件のみ実施されていた^{7),8)}。

R. Pusch and Geodevelopment AB によるSKBのテクニカルレポートTR-02-20⁴⁾では、試験法（試験装置）に対して、一般的な供試体径 20～50mmの透水試験装置と、粒径の大きな供試体に対して、それぞれ剛性のセルの装置を用いた定圧透水試験法が示されている。また、ゴムメンブレンを装着した試料での三軸セルを用いた透水試験についても示されている。その他の試験法（試験装置）に対しては記述されていなかった。また、ベントナイトの膨潤により、有効粘土密度が変化しないように、剛性の高い試験装置を用い、試験装置のひずみを可能な限り小さくすること、三軸セルを用いた透水試験装置を用いる場合には、圧縮しやすい供試体では、セル圧により圧密が生じる可能性があることが述べられている。

ここで、各試験法の長所、短所等をまとめたものを表 3.1-3 に示す。詳細な試験法の検討については以下に示す。ここでは、最も実績があり、流量のみを単純に測定することで透水係数が求められるため試験結果のばらつきが小さいと考えられる定圧透水試験法を基準としてその他の試験法についてまとめる。

(a) 定圧透水試験法

定圧透水試験法は、供試体に一定の透水圧を与えた状態で、供試体を通過した通水溶液の流量を直接測定する試験法である。定圧透水試験法は、比較的低い有効粘土密度から高い有効粘土密度まで、幅広く実施されていた。定圧透水試験法では剛性セルが多く用いられており、一部、三

軸セルを用いたものもあった²¹⁾。

(b) 変水位透水試験法

変水位透水試験法は、定圧透水試験法と同様に、供試体を通過した通水溶液の流量とビューレット内の変化した水位を直接測定する試験法である。定圧透水試験法に対して、一般的に比較的大きい透水性を示す供試体に対して用いられることが多い。そのため、比較的低い有効粘土密度における透水係数評価に用いられているが、有効粘土密度の比較的高い供試体に対しては用いられていなかった。これは、透水係数が小さい場合には、変水位透水試験法で与える動水勾配では、供試体の飽和化を含む試験期間が長期に至るためと考えられる。本報告書では、有効粘土密度 1.0Mg/m^3 以上の供試体に対する試験を対象としたため、変水位試験法は検討対象としなかった。

(c) フローポンプ試験法

フローポンプ試験法については実績が 2 件あった^{7),8)}。フローポンプ試験法とは、供試体の透水係数に応じた速度でフローポンプと呼ばれるシリンジによって供試体内に水を通水させ、その際の反力（水圧）を測定する方法である。この反力から算出される流入側の全水頭とスタンドパイプで計測される流出側の全水頭から動水勾配を算出し、透水係数を求める。一般には定常状態になった際の透水係数を求めるが、Morin et.al.⁹⁾やEsaki et.al.¹⁰⁾による非定常解を適用することにより、非定常状態においても、定常状態での透水係数を求められる¹¹⁾。畔柳ほか⁸⁾は、直径 40mm、高さ 20mmのNa型ベントナイト及びCa型化ベントナイトの供試体に対して（表 3.1-4）、定圧透水試験法とフローポンプ試験法の両方で透水係数を測定し、両試験で得られた透水係数の結果は、ほぼ一致していることを確認している（図 3.1-13）。フローポンプ試験法により、透水係数を得るために必要な時間は、500～300min(約 2 日)であり、定圧透水試験法の約 30 日程度から大幅に試験時間を短縮できると述べられている。しかし、フローポンプ試験法についても、水の流れは非定常状態で透水係数を測定可能であるが、透水圧を与えるまでに供試体を飽和させておく必要があるため、試験期間の短縮については、飽和に要した時間も考慮し判断する必要がある。畔柳ほか^{7),8)}では、飽和に要した期間については記載がなかったため、本検討では、試験期間が飽和期間を考慮しても短縮できるかについては判断することが出来なかった。また、フローポンプ試験法については、データ数も少なく試験結果のばらつきの程度を検討することも出来なかった。これらより、本報告書ではフローポンプ試験法については推奨する試験方法とはしなかった。

(d) 圧密試験法

圧密試験法による透水性の評価は、土の一次元圧密理論をもとに、土の骨格の圧縮速さと変形量から間接的に透水係数を求める方法である。「地盤材料試験の方法と解説」¹²⁾の「土の段階載荷による圧密試験法」の規格（JIS A 1217）では、透水係数は報告事項としてあげられていないが、報告事項としてあげられている圧密係数と体積圧縮係数を用いて $k = \rho_w g C_v m_v$ (k :透水係数, C_v :圧密係数, m_v :体積圧縮係数) によって直ちに求めることができる。

定圧透水試験で得られた透水係数と、圧密試験法で得られた透水係数を比較するため、図 3.1-14、図 3.1-15 にそれぞれ定圧透水試験法、圧密試験法で求めた有効粘土密度と透水係数の関係を示し

た。図 3.1-14 によれば、定圧透水試験法で得られた透水係数は、異なる試験者により得られたデータについては、ばらつきが大きいものの、同じ試験者により得られたデータのばらつきは小さい。一方、図 3.1.3-3 に示す圧密試験法では同じ試験者により得られたデータでもばらつきが大きい傾向がある。ちなみに佛田らは試験に用いる変位計の分解能を向上させることにより、ベントナイトの圧密試験結果のばらつきが抑えられると述べている⁵⁰⁾。

圧密試験には、上述したように試験結果にばらつきをもたらす要因のほかに、試験結果に影響をもたらすが、影響程度が不明であったり、排除することが困難な要因がいくつかある。そのひとつには供試体側面と圧密リングの間の摩擦があげられる¹²⁾。特に、一般の土と異なりベントナイトは膨潤性を有し、供試体側面と圧密リングの間に膨潤圧が作用するため、供試体と圧密リング間の摩擦の影響は一般の土よりも大きくなる可能性がある。したがって、この摩擦力が圧密試験から透水係数を評価する上での不確実要因となる。

飽和度は透水係数に影響するため、飽和透水係数を求めるためには、供試体の飽和度を高める必要がある（詳細は「(2) 1) 飽和化の影響」に示す。）。定圧透水試験は構造上、一次元で溶液を通水したり背圧をかける等して飽和化が容易に出来るのに対して、圧密試験は、水の供給が上・下端面の 2 方向からなので、空気が供試体内部に閉じ込められやすく、背圧を加えることが構造的に難しいため飽和化が容易でない。

圧密試験結果には、上述した摩擦や飽和度の影響のほかに圧密荷重の大きさならびに供試体寸法も影響すると思われるが、ベントナイトの圧密試験結果を対象とした圧密荷重の大きさならびに供試体寸法の影響の検討例は見当たらなかった。したがって、これらの要因もベントナイトの圧密試験結果を評価する上での不確実要因となる。このように、圧密試験結果から透水係数を求める際には、影響程度が不明であったり、排除することが困難な要因がいくつか含まれている。

(e) まとめ

試験結果に及ぼす影響を容易に排除可能であり、不明な影響要因が少ないことから、定圧透水試験法を用いるのが現状望ましいと思われる。

表 3.1-3 透水試験法の調査結果

	剛性セルを用いた 定圧透水試験法	三軸セルを用いた 定圧透水試験法	剛性セルを用いた 変水位透水試験法	圧密試験法	フローポンプ試験法
実績	◎	△	○	○	△
試験時間	供試体サイズ、初期飽和度が同一であれば、透水係数を測定する前に飽和させる時間は、どの試験法も同じ時間を要するはず。 ベントナイト系材料の透水試験が、測定よりも飽和化に時間を要することを勘案すれば、差は小さい。				
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・定密度で試験が出来る。 ・側面摩擦等による透水係数のばらつきを考慮しなくてよい。 ・動水勾配を一定で設定できる。 ・真空にする、背圧を上げるなど飽和化の工夫が容易。 ・河野・西垣法による透水係数測定前の飽和度の確認が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・側面のみずみちの影響がないと言われている。 ・変形させることで、一つの試験で密度を変化させて透水係数を測定することが出来る。 ・動水勾配を一定で設定できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・定密度で試験が出来る。 ・側面摩擦等による透水係数のばらつきを考慮しなくてよい。 ・真空にするなど飽和化の工夫が容易。 	<ul style="list-style-type: none"> ・変形させることで、一つの試験で密度を変化させて透水係数を測定することが出来る。 	
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・変形が生じるため所定の密度での測定が困難。 ・透水圧の上昇に伴い、側圧も制御する必要がある。 ・装置が大掛かりでコストが高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・変形が生じるため所定の密度での測定が困難。 ・透水圧の上昇に伴い、側圧も制御する必要がある。 ・装置が大掛かりでコストが高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・みずみちが発生する可能性がある。 ・高密度の場合、長期試験になる。 ・動水勾配一定の実験が不可。 	<ul style="list-style-type: none"> ・飽和化が容易にできない。 ・供試体側面と容器内側壁との摩擦がばらつきやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・透水係数を算出する過程に変形係数などのパラメータが必要となり、ばらつき要因が増加。 ・主に岩石材料で適用されており、ベントナイト系材料のような変形性の高い材料には適用が困難な可能性がある。

表 3.1-4 供試体の諸元⁸⁾ ※表内の加圧法は定圧透水試験法に相当する。

適用	種類	供試体 No.	湿潤密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m ³)	直径 (cm)	高さ (cm)	質量 (g)	
透水試験	加圧法・フローポンプ法 (同一供試体で実施)	Na 型	1	1.715	7.00	1.603	4.0	2.0	43.1
		2	1.431	7.00	1.337	36.0			
		3	1.220	7.00	1.140	30.7			
	Ca 型化	4	1.639	7.98	1.518	41.1			
	5	1.566	7.98	1.450	39.4				

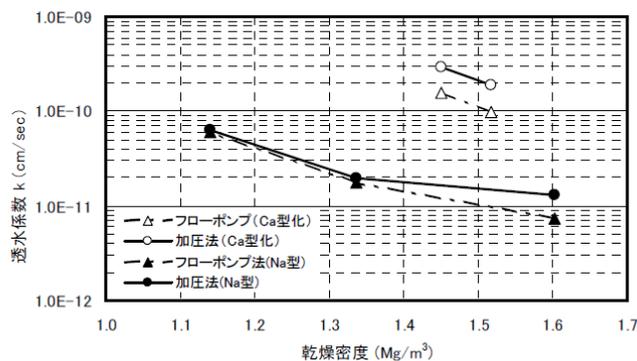


図 3.1-13 フローポンプ試験法と定圧透水試験法で得られた透水係数の比較⁸⁾
 ※グラフ内の凡例の加圧法は定圧透水試験法に相当する。

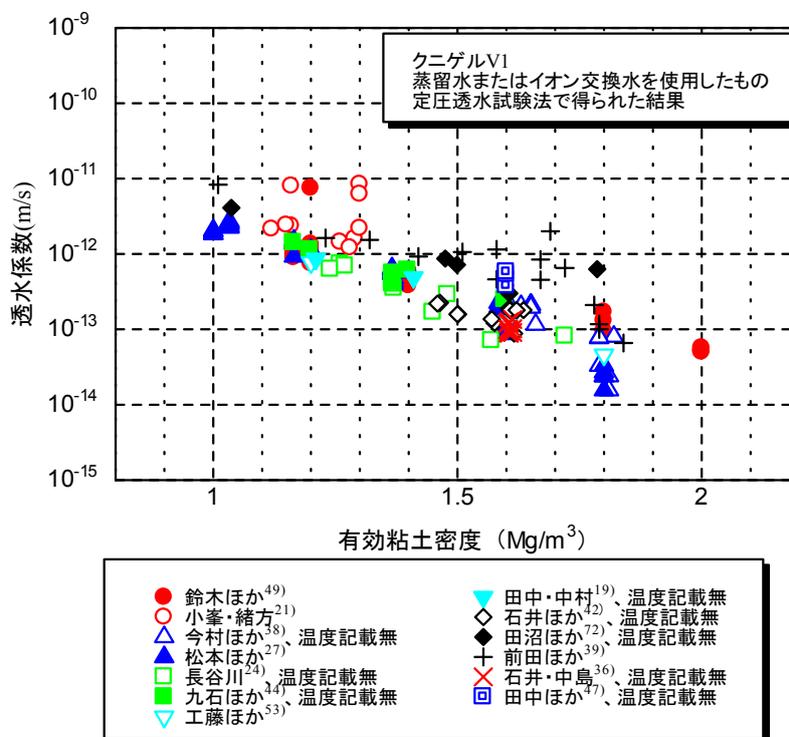


図 3.1-14 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、蒸留水またはイオン交換水を使用したもの、(温度条件の記載の有無は凡例に示す。)) (定圧透水試験法)

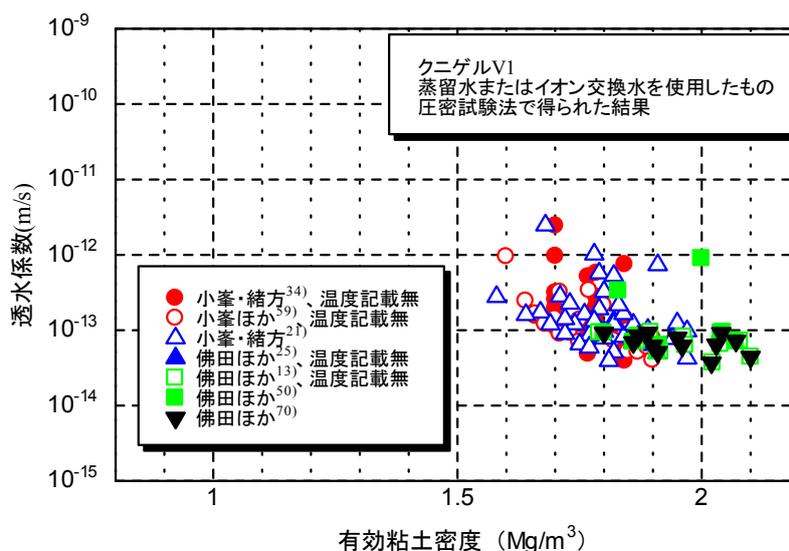


図 3.1-15 有効粘土密度と透水係数の関係（クニゲル V1、蒸留水またはイオン交換水を使用したもの、（温度条件の記載の有無は凡例に示す。）（圧密試験法）

(2) 試験手順による影響要因

「(1)試験法自体による影響要因、1)試験法（試験装置）の影響」で述べたように定圧透水試験法を用いるのが現状望ましいと思われるので、以下に述べる影響要因の検討は、定圧透水試験法のみを対象とした。

1) 飽和化の影響

ベントナイト混合供試体の透水係数に対する飽和度の影響を調べたものに、出口ほか¹⁵⁾の研究がある。出口ほか¹⁵⁾は、20wt%のケイ砂を混合した乾燥密度 1.7Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の供試体に対して、透水試験を実施している。それによれば、背圧を加え飽和度をあげた方が若干ではあるが、透水係数が大きくなる傾向があることが示されている（図 3.1-16）。

出口ほか¹⁵⁾で示されたように、飽和度が透水係数に影響するため、調査した文献の中でも供試体の飽和化のため、様々な工夫が行われていた。以下に例を示す。

田中ほか¹⁶⁾は、定圧透水試験法において、供試体の飽和度を高めるために、真空ポンプによって、供試体の空気を除去し、その後に飽和度の低下を防止するために、炭酸ガスで置き換え、最後に通水によって炭酸ガスを水に置き換えている。炭酸ガスを用いる方法は、飽和砂の液状化試験で、供試体の飽和度を高めるために用いられている方法である¹²⁾。また、田中ほか¹⁶⁾は、透水試験時に背圧を加えることにより、飽和度を高める工夫も行っている。

石井ほか¹⁷⁾は、図 3.1-17 に示す定圧透水試験装置を用い、供試体をあらかじめ飽和状態で作製し、有効粘土密度 $1.616\text{Mg/m}^3 \sim 1.635\text{Mg/m}^3$ のベントナイト単体の透水試験を実施している。飽和供試体の作製方法は、以下に示すように述べられている¹⁷⁾。

- イ) ねらった密度の飽和含水比で材料を調整しておく
- ロ) 材料調整段階からプレス成型に至るまで炭酸ガス雰囲気にし、溶解度の低い空気を排除しておく。

- ハ) プレス成型直前に真空状態にし、気相領域がゼロに近くなる雰囲気です定の密度にプレス成型する。
- ニ) 成型した供試体はシリンダー部のカラーと一体にしたまま透水試験モールドにセットする。

以上により飽和供試体を透水試験装置に装填することを可能としている。石井ほか¹⁷⁾は、この方法により、試験開始から 8 日間程度で透水係数を把握しており、有効粘土密度 1.621Mg/m^3 の供試体に対して、 $1.9 \times 10^{-13}\text{m/s}$ の透水係数データを取得している(図 3.1-18)。なお、試験終了時の飽和度は、99.6%であったとしている¹⁷⁾。

R. Pusch and Geodevelopment AB⁴⁾は、飽和化させるために、背圧をかけることを推奨している。その場合には、背圧は膨潤圧の 10~20%に設定することが適切と述べられている。

その他、多くの試験においては、供試体中に空気が残存しないように、試験体下部から一次的に通水を行う手法を取っていた^{例えば 22)}。

また、透水試験で得られている透水係数が飽和状態で得られている透水係数であるか確認している例としては、以下に示すような方法がとられていた。

- ①流入側と流出側の透水係数が一致していることを確認する方法^{例えば 53)}、
- ②試験終了時に、飽和化していたかを確認するために、試験終了後の供試体の飽和度を含水比から求める方法^{例えば 21)}や
- ③河野・西垣法¹⁴⁾ (透水試験装置を二重管ビューレットを介して加圧した時のビューレット内の水位変化量から、供試体内の空気の体積変化量を計算し、飽和度を算出する) で確認する方法¹⁶⁾

これらのように、試験後の供試体の飽和度は、透水係数が飽和状態で得られたものであることを示したり、試験結果を解釈するために記録しておくことが重要である。

以上をまとめると、透水試験を行う際には、飽和度が透水係数に影響を及ぼすため、飽和状態での透水係数を求めるには、供試体下部から 1 次元で通水したり、背圧を与える等の方法により、供試体の飽和度を高めるとともに、試験終了後の飽和度を記録することが必要である。

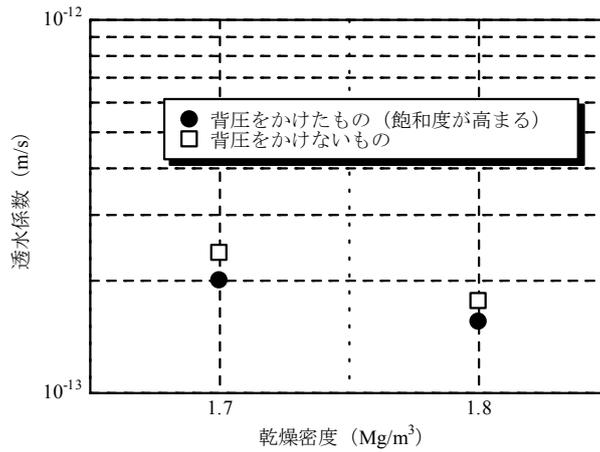


図 3.1-16 飽和度がベントナイト混合土試料の透水係数に及ぼす影響 (出口ほか¹⁵⁾ の試験結果より作図) (供試体は、20wt%のケイ砂混合)

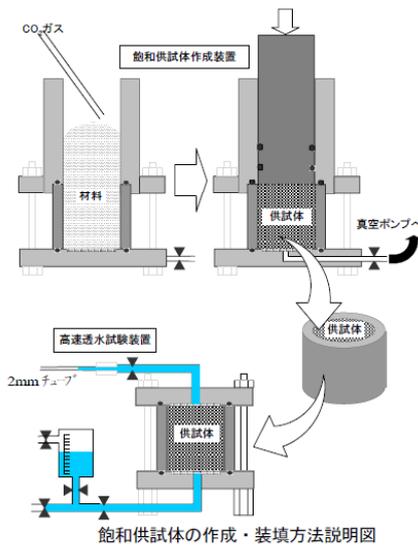
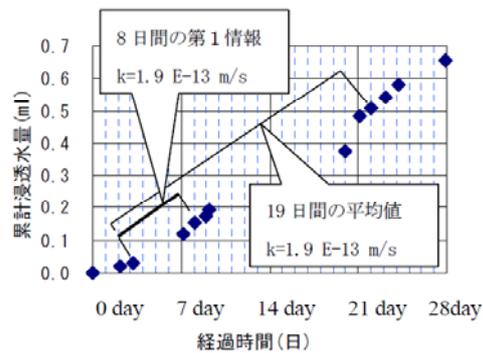


図 3.1-17 飽和供試体の作製方法例¹⁷⁾



P=0.4MPaにおける乾燥密度 1621kg/m³ 供試体の浸透水量測定値 (50mmφ × 50mmH 供試体)

図 3.1-18 飽和供試体の作製方法で作製した供試体で得られた透水係数¹⁷⁾

(3) 試験条件による影響要因

1) 動水勾配、透水圧の影響

動水勾配については、ASTM D5084 (米国材料試験協会の設定する試験法規格) によれば、透水係数が 10^{-9} m/s 未満の材料に対して動水勾配を 30 未満とすべきことが規定されている。ベントナイト系材料の透水係数は、有効粘土密度によっては $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-14}$ m/s と非常に小さく、難透水性であるため、定圧透水試験において動水勾配を 30 未満とすると、測定可能な流量を得るために非常に長期間を要する。そのため、ほとんどの場合、動水勾配を 30 以上として定圧透水試験が行われている。

例えば、石井ほか¹⁷⁾は、有効粘土密度 1.621Mg/m^3 のベントナイト単体の直径 50mm 、高さ 50mm の供試体に対し、透水圧 $0.1\text{MPa}\sim 0.4\text{MPa}$ (動水勾配にして約 $196\sim 744$) で透水試験を実施し、この動水勾配の範囲内においては透水係数が一定であることを示している (図 3.1-19)。

また、伊藤¹⁸⁾は、ベントナイト原鉱を調整した粒状ベントナイト (粒径は 10mm 以下) を動的に締固めた供試体 (有効粘土密度 1.62Mg/m^3 程度 (グラフから判断)) に対して、室温条件下で動水勾配を変化させ透水係数を測定している。図 3.1-20 に示すように、動水勾配 500 程度から 2000 程度まで変化させているが、透水係数はほぼ一定の結果が得られている。

一方、動水勾配 30 未満で透水試験が実施された例もある。白石ほか⁶⁵⁾は、ベントナイト混合率 20% で乾燥密度 1.74Mg/m^3 の混合供試体に対して、 20°C の一定温度条件下で、動水勾配を $0\sim 6$ 程度まで変化させ透水係数に及ぼす動水勾配の影響を検討している (図3.1-21)。図3.1-21に示すように、動水勾配が $1.2\sim 6$ までの範囲では、動水勾配によらずほぼ一定の透水係数を得られることが示されている⁶⁵⁾ (動水勾配 1.2 未満の結果については、測定精度の問題から扱われていない)。また、別途実施された動水勾配 60 以上の透水試験により得られた透水係数とも、同じであったと述べられている⁶⁵⁾。

これらによれば、ベントナイトの透水係数は、動水勾配の依存性が小さいものと考えられる。

次に、透水圧の設定について、供試体と試験装置間におけるみずみちの影響の観点から整理する。田中・中村¹⁹⁾は、透水圧を膨潤圧より小さい値に設定し、有効粘土密度が約 1.2 、 1.4 、 1.6Mg/m^3 のクニゲルV1 に対してイオン交換水や人工海水を通水し、排水仕切り板を設置した排水側ポラスメタルを用いて、供試体中心部を通る排水量と、供試体の外周部 (壁面近傍) を通る排水量を別々に測定している (図 3.1-22)。さらに、供試体中心部を通る排水量から計算した透水係数と全排水量から計算した透水係数が等しいことを確認することにより、透水圧を膨潤圧以下に設定した場合、壁面付近の局所的な流れ (みずみち) が透水係数に及ぼす影響はほとんどないとしている (図 3.1-23)。

また、図 3.1-24 に、ゴムメンブレンで供試体の周囲の漏水を防ぐ三軸セルを用いた透水試験と剛性セルを用いた透水試験の結果を比較した結果を示す^{19),21),24),27),36),38),39),42),44),47),49),53),72)}。小峯・緒方²¹⁾の実施した三軸セルを用いた透水試験結果とその他の剛性セルを用いて得られた結果は同程度の有効粘土密度であれば、同程度の透水係数を示している。したがって、剛性セルでも壁面近傍の卓越した水の流れ (みずみち) は発生していないと考えられる。このことは、みずみちの影響に関しては、既往の研究で設定されているような膨潤圧以下の透水圧の範囲であれば、透水係数に及ぼす透水圧の影響は剛性セルを用いた試験でもないことを示している。

以上のような結果から、ベントナイト系材料に対する透水試験では膨潤圧以下の透水圧を設定すれば、壁面近傍からの漏水は剛性セルであっても生じないものと考えられる。これは、ベントナイト系材料は、膨潤性を有するため、通常の粘土の透水試験で問題となる壁面と供試体間の卓越した水のながれ (みずみち) が膨潤圧以下の透水圧では生じにくいと考えられる。

次に、透水圧の設定について、供試体の変形の観点から考える。膨潤圧以上の透水圧を定常圧として加えた場合、供試体の流出側端面の有効土圧は膨潤圧を超えるため、供試体は収縮すると思われる。供試体が収縮した場合、供試体の有効粘土密度は変化し、透水係数も変化する。したがって、供試体の収縮を起ささないという観点からも透水圧は、膨潤圧を超えないように設定し

なければならない。また、R. Pusch and Geodevelopment AB⁴⁾も透水圧の設定については、注意する項目として述べており、供試体の変形のないように、透水圧は膨潤圧の50%以下とすることを推奨している。

以上より、動水勾配については、透水係数に影響を及ぼさないため、留意する必要はないが、透水圧については、供試体の変形し、透水係数に影響を及ぼす可能性があるため、透水圧は膨潤圧を超えない値に設定する必要がある。ただし、土圧計などが装着されておらず厳密に膨潤圧を把握出来ない場合には、予想される膨潤圧に基づいて透水圧を設定することとなる。

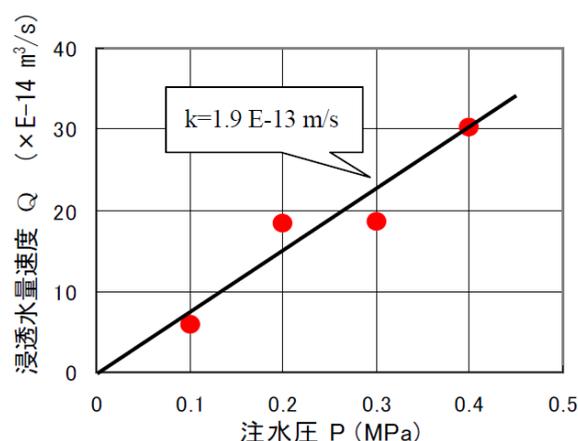


図 3.1-19 乾燥密度 1621kg/m³ 供試体の圧力-流量特性と平均的透水係数 (50mm φ × 50mmH 供試体)¹⁷⁾

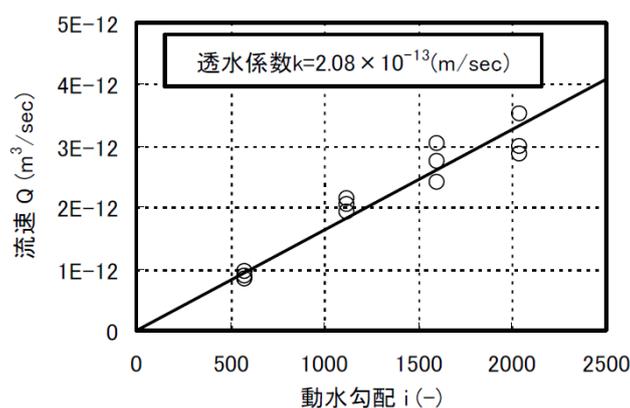


図3.1-20 流速-動水勾配の関係と透水係数 (供試体は、原鉱より調整した10mm以下粒状ベントナイトを最適含水比、最大乾燥密度で締固めたもの。) ¹⁸⁾

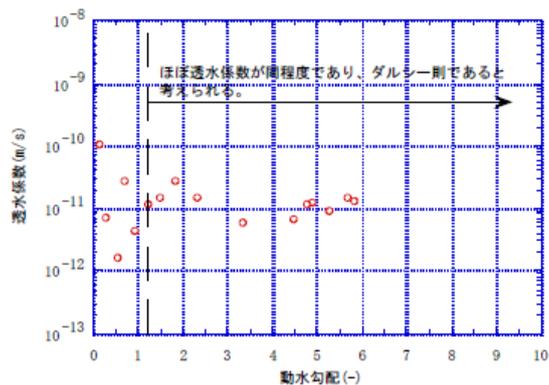


図-4 動水勾配と透水係数の関係

図 3.1-21 動水勾配と透水係数の関係⁶⁵⁾

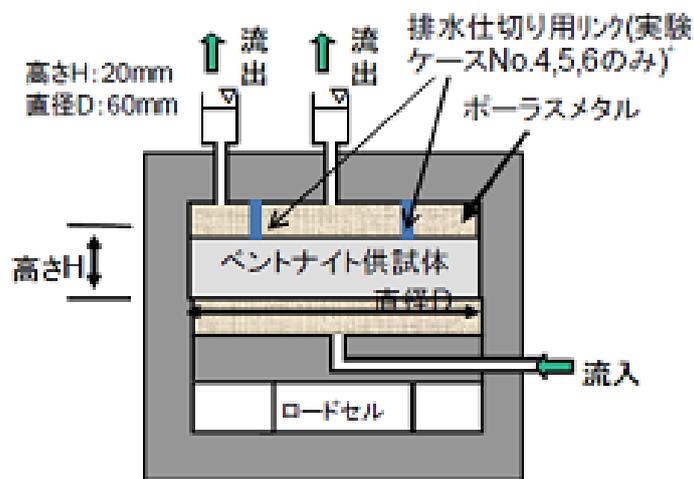


図3.1-22 透水試験装置概要¹⁹⁾

(本装置は、流出量を供試体の中心部と外周部で測定しているため、壁面のみずみちの影響を把握することが可能な装置である。)

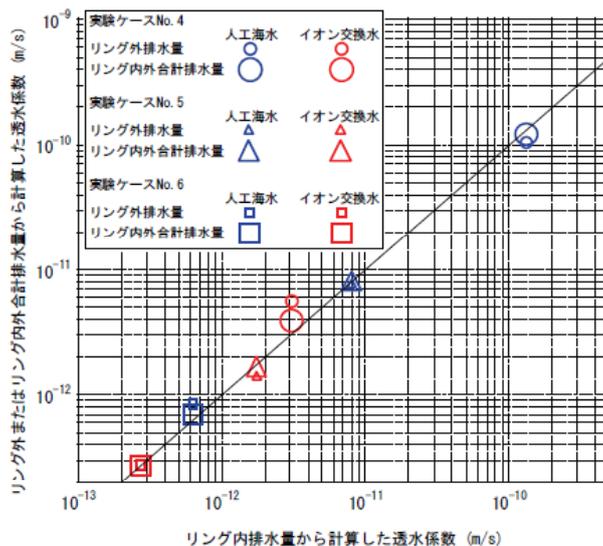


図3.1-23 リング内外透水係数の比較¹⁹⁾

(供試体は、クニゲルV1を自然含水比で密度を1.2、1.4、1.6Mg/m³に締固めて作製したもの)

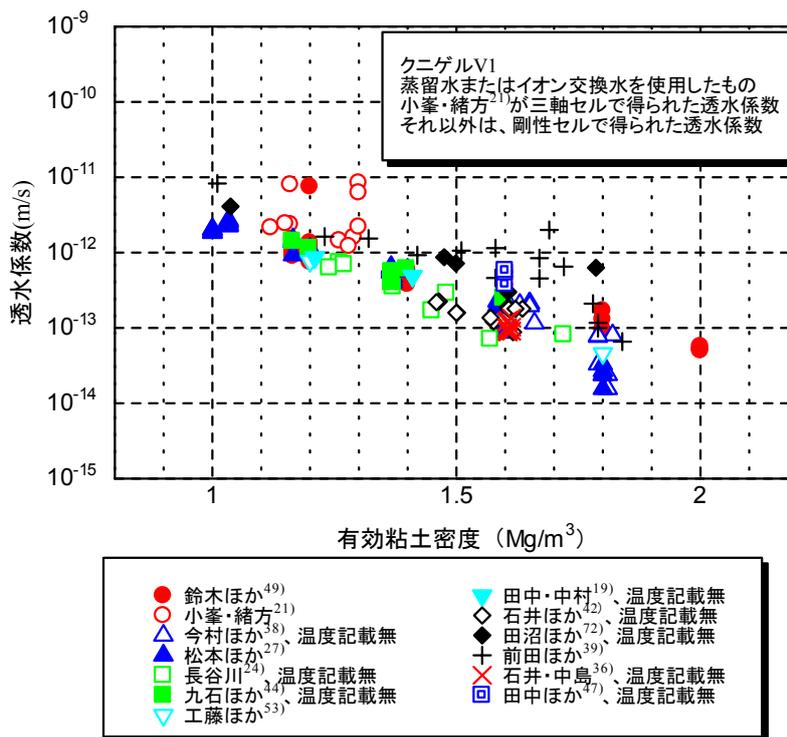


図 3.1-24 三軸セルと剛性セルで得られた透水係数の比較

2) 初期含水比の影響

透水係数に及ぼす初期含水比の影響を検討したものは、文献調査では見当たらず、また、初期含水比について記載されているデータが少なかったため、検討出来なかった。

一方、膨潤圧試験の場合には、初期含水比の影響を検討した例が幾つかあり、本共同研究での追加試験による結果も踏まえると、高有効粘土密度領域（1.8Mg/m³程度）では、初期含水比の影

響を受けるとの結果が得られている（詳細は 3.2.3 節を参照されたい）。以上より、透水係数に及ぼす初期含水比の影響については、現状知見がないため判断出来ないが、透水係数が膨潤圧と密接に関係していると考えた場合、高有効粘土密度領域では、初期含水比が透水係数にも影響を及ぼす可能性もあるため、記録しておくことが望ましい。

3) 供試体寸法の影響

透水試験における供試体の寸法は、例えば「地盤材料試験の方法と解説」¹²⁾では、透水円筒の内径と高さは、試料の最大粒径の 10 倍以上とするという規定がなされている。R. Pusch and Geodevelopment AB⁴⁾も同様に、供試体寸法の径は最大粒径の 10 倍以上を推奨している。また、ASTM D 2434-68（米国材料試験協会の設定する試験法規格）では許容される試料の最大粒径を透水円筒内径の 1/12～1/8 としている。

図 3.1-25、3.1-26 は、菊池ほか²³⁾の報告で示されているベントナイト（クニゲルV1）と 3 号ケイ砂、5 号ケイ砂の粒径加積曲線である。これを見ると、クニゲルV1 の最大粒径は、0.1mm 程度であり、「地盤材料試験の方法と解説」¹²⁾の規定に当てはめると内径と高さは 1mm 程度以上必要となる。また、ASTM D2434-68 の規定に当てはめると、透水円筒内径は、0.8mm～1.2mm 以上必要となる。文献調査の結果では、供試体サイズが記載されているものについては全て 5mm 程度以上であり、どちらの基準も満足している。

ベントナイト混合供試体を用いた場合には、例えば 3 号ケイ砂を用いた場合には、最大粒径が約 2.5mm であるため、「地盤材料試験の方法と解説」¹²⁾の規定に当てはめると内径と高さは約 25mm 以上必要となる。また、ASTM D2434-68 の規定に当てはめると、透水円筒内径は、約 20mm～30mm 以上必要となる。

図 3.1-27 に透水係数と有効粘土密度との関係のデータを供試体の直径で色分けして示す。赤でプロットしたものが直径 60mm のもの、黒でプロットしたものが直径 50mm の供試体に対するデータ、青でプロットしたものが直径 40mm の供試体に対するデータである。データには、ベントナイト単体のみならず、混合供試体も対象としたデータを含んでいる。図 3.1-27 を見ると、直径 40mm の供試体に対するデータが少なく、その他の直径の供試体に対するデータとの比較を行わなかった。直径 50mm と 60mm の供試体に対するデータについては、透水係数に明確な差は認められなかった。一方、田中ら⁷⁴⁾は、同一の試料や試験条件のもと、クニゲルV1 を有効粘土密度 1.4Mg/m³ 程度で作製した 2 種類の直径（60mm と 200mm）で高さの等しい（20mm）供試体に対して透水係数を求めている。田中ら⁷⁴⁾の結果によれば、直径 60mm の供試体で得られた透水係数は、 $3.7 \times 10^{-13} \sim 3.8 \times 10^{-13} \text{m/s}$ であり、直径 200mm の供試体では、 $3.7 \times 10^{-13} \sim 4.3 \times 10^{-13} \text{m/s}$ である。このように直径の違いによらず、同程度の透水係数が得られている。これらより、直径 50mm～200mm の供試体を用いれば、供試体の直径の違いが、透水係数に及ぼす影響は小さいといえる。また、このことはクニゲルV1 原鉱を対象とした透水試験結果でも示されている⁷⁷⁾。

さらに、田中ら⁷⁴⁾は、クニゲルV1 を直径 60mm で有効粘土密度 1.4 程度で作製した異なる 3 種類の高さ（20mm と 40mm と 80mm）の供試体に対して、透水試験を実施している。その結果、高さ 20mm、40mm、80mm の供試体の透水係数は、各々 3.24×10^{-13} 、 2.73×10^{-13} 、 $2.45 \times 10^{-13} \text{m/s}$ と同程度となっており、透水係数に及ぼす高さの影響は、20～80mm では小さいことが明らかと

なっている。また、このことはクニゲルV1 原鉱を対象とした透水試験結果でも示されている⁷⁷⁾。

図 3.1-29 に透水係数と有効粘土密度との関係のデータを高さで色分けしたものを示した。赤でプロットしたものが高さ 20mmの供試体で得られたデータ、青でプロットしたものが高さ 10mmの供試体で得られたデータ、黒でプロットしたものが高さ 5mmの供試体で得られたデータである。高さ 5mmの供試体で得られたデータは、その他の高さの供試体で得られたデータに比べて大きくなる傾向が見受けられる。一方、供試体の高さ 10mmと 20mmで得られたデータは、差が小さいことが明らかである。前述した田中ら⁷⁴⁾のデータと併せて考えた場合、供試体の高さが 10mm～80mmであれば、供試体の高さの違いが透水係数に及ぼす影響は小さいと考えられる。

以上より、直径については 50mm～200mm 程度、高さについては、10mm～80mm 程度であれば、供試体の寸法が透水係数に及ぼす影響は小さいため、供試体寸法を影響要因として考慮する必要はない。なお、この範囲外の寸法の供試体を用いる場合は、透水係数に及ぼす寸法効果の影響がないことを異なる寸法の試験データとの比較から確認することが望ましい。

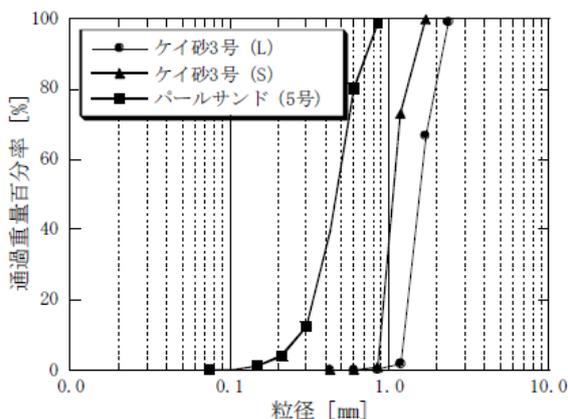


図 3.1-25 クニゲル V1 の粒度分布²³⁾

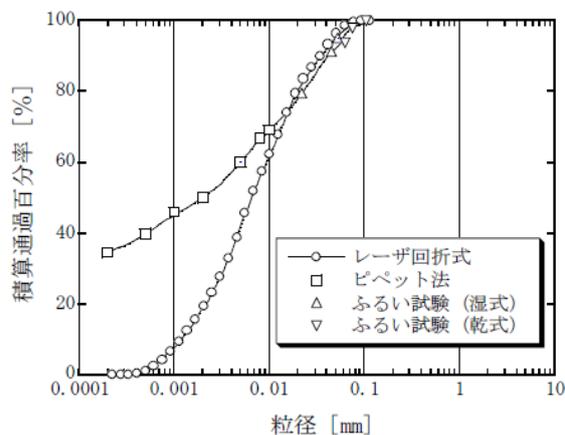


図 3.1-26 ケイ砂の粒度分布²³⁾

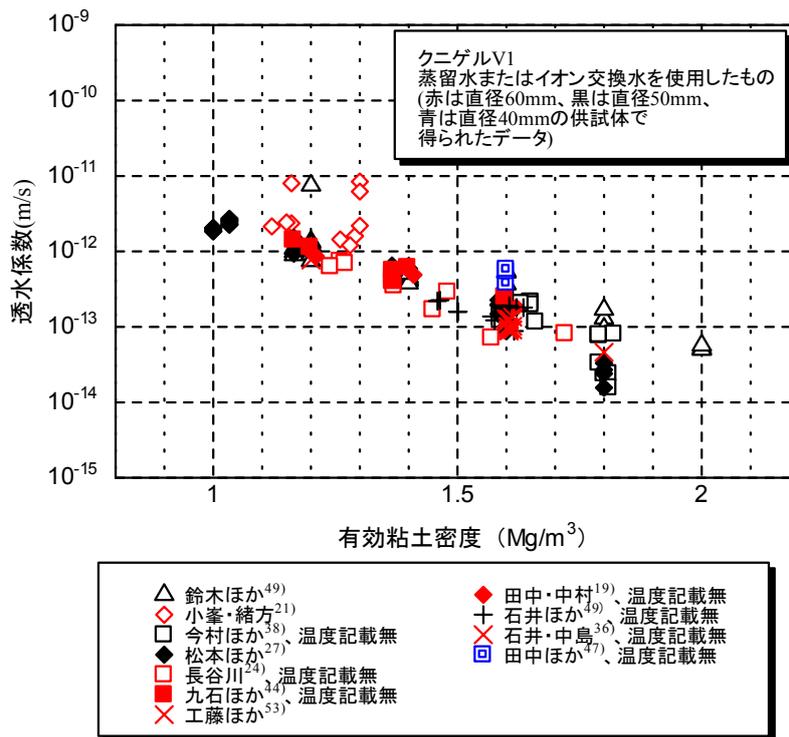


図 3.1-27 供試体の直径が透水係数に与える影響
(赤は直径 60mm、黒は直径 50mm、青は直径 40mm で得られたデータ)

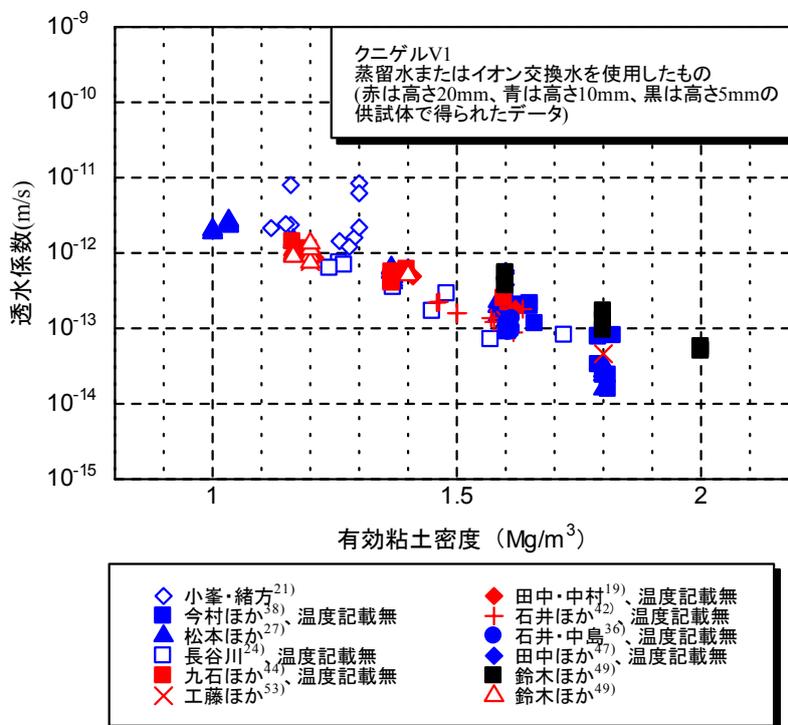


図 3.1-28 供試体の高さが透水係数に与える影響
(赤は高さ 20mm、青は高さ 10mm、黒は高さ 5mm で得られたデータ)

4) 通水溶液の種類や組成の影響

菊池ほか²³⁾は、通水溶液に人工海水（ASTM D-1141-98 基準）を用いて、ベントナイト単体とベントナイトとケイ砂の混合供試体の透水係数を測定している。使用したベントナイトはクニゲルV1であり、混合試料には、クニゲルV1と3号ケイ砂と5号ケイ砂を混合したものをを用いている。有効粘土密度と透水係数との関係が整理されたものを図3.1-29に示した。人工海水を通水溶液とした場合、蒸留水に比べて、透水係数は1桁程度大きくなること、有効粘土密度が低密度から高密度になるにしたがって、人工海水を通水した時の透水係数は蒸留水を通水した時の透水係数に近づく傾向がある結果が得られている。同様の傾向は、長谷川²⁴⁾でも確認されている。

菊池・棚井²⁸⁾は、有効粘土密度 1.40Mg/m^3 のクニゲルV1 単体を用いた供試体に対して、透水係数に及ぼす通水溶液の影響について検討を行っている。試験では、直径 50mm、高さ 10mm の供試体に対して、図 3.1-1(1)の透水試験装置 (C) に示す定圧透水試験装置により透水試験を実施している。通水溶液には、幌延の地下水 (表 3.1-5) 及びNaCl溶液 (0.34、0.72、0.86、1.50、2.00、3.42mol/l) が用いられている。図 3.1-30 は、イオン強度と固有透過度の関係が示されたものである。ここでは、通水溶液の粘性や通水溶液の密度の影響を排除して供試体の透過性を見るために、透水係数ではなく固有透過度を用いて整理されている。通水溶液のイオン強度が大きくなるに従い、ベントナイトの固有透過度 (透水係数) が大きくなる傾向があることが明らかとされている。また、図 3.1-30 に示すように、 2mol/kg 程度 of イオン強度を超えることにより固有透過度が変化しないことも示されている。

R. Pusch and Geodevelopment AB⁴⁾もNaClと蒸留水をベントナイトに通水した場合の透水係数を求めており、菊池ほか²³⁾、長谷川²⁴⁾、菊池・棚井²⁸⁾と同様に、蒸留水に比べてNaClを通水した方が透水係数が増大することを示している。

以上より、ベントナイト系材料の透水係数は、通水溶液の影響を大きく受けるため、通水溶液については、イオン交換水、蒸留水、海水、地下水等の溶液の種類や、溶液中のイオン組成等を記録しておくことが必要である。

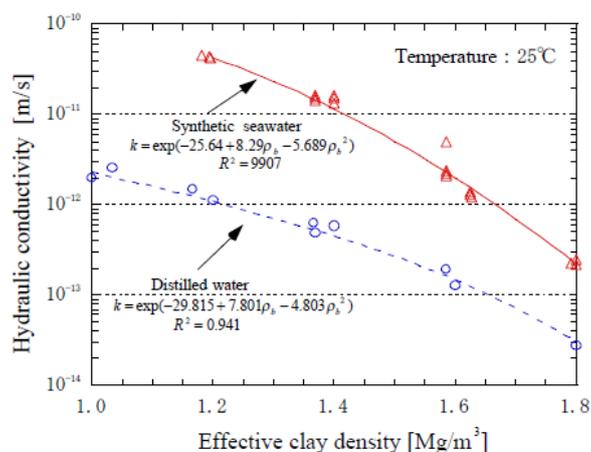


図 3.1-29 透水係数に及ぼす溶液の種類の影響²³⁾

表 3.1-5 幌延地下水の組成分析結果²⁸⁾

試験項目	単 位	幌延地下水 (HDB-6)
pH	—	7.70 (22.7°C)
EC	mS/m	2010
Na ⁺	mg/l	4300
K ⁺	mg/l	92
NH ₄ ⁺	mg/l	124
Ca ²⁺	mg/l	136
Mg ²⁺	mg/l	89
Total P	mg/l	0.45
I	mg/l	19
Fe ²⁺	mg/l	<0.2
Fe ³⁺	mg/l	0.6
Total Fe	mg/l	0.6
Si	mg/l	24
Al	mg/l	<1
Cl ⁻	mg/l	6400
NO ₃ ⁻	mg/l	<0.1
SO ₄ ²⁻	mg/l	<0.2
H ₂ S	mg/l	—
S ²⁻	mg/l	<0.5
P アルカリ度	mmol/l	<0.5
M アルカリ度	mmol/l	22.8
HCO ₃ ⁻	mg/l	1600
CO ₃ ²⁻	mg/l	<0.5
TOC	mg/l	23
イオン強度	mol/l	0.2075

※イオン強度においては、PHREEQC を用いて求めた。

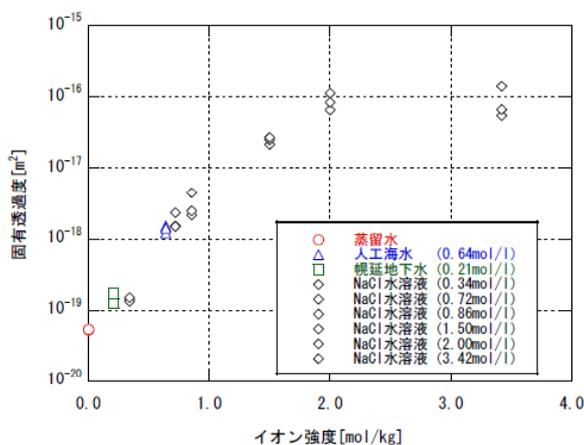


図 3.1-30 透水係数に及ぼすイオン強度の影響²⁸⁾

(有効粘土密度 1.40Mg/m³、クニゲル V1)

5) 温度の影響

松本ほか²⁷⁾は、図 3.1-1(1)の透水試験装置 (C) に示す定圧透水試験装置を用いて、ベントナイト系材料の透水係数に及ぼす温度の影響について試験を行っている。クニゲルV1 単体 (モンモリロナイト含有率 46~49%) を対象として、試験温度 25、40、60、80、90°C の環境下で蒸留水を用いて試験を実施している。円柱供試体の寸法は、直径 50mm、高さ 10mm (低有効粘土密度の

ケース) または高さ 5mm (高有効粘土密度のケース) である。図 3.1-31 は、温度と透水係数との関係が示されたものの一例である。温度が高くなるに従い、透水係数が大きくなることが明らかとなっている。

R. Pusch and Geodevelopment AB⁴⁾も 22°C~75°Cの温度条件でMX-80 に対して透水試験を実施し、ベントナイトの透水係数に温度が影響し、温度の高い方が透水係数が大きくなることを示している。また、透水係数の温度依存性を計測する場合、粘土も容器も熱膨張するため間隙水圧の変化が重要であり、事前に確認する必要があると述べられている。

既往の試験法での温度の取り扱い方法としては、例えば、一般の土を対象に規格化されている JISA1218 土の透水試験法¹²⁾があり、試験結果の報告の整理方法として、温度 15°C に対する透水係数 k_{15} を報告することとなっている。 k_{15} を求めるための温度補正係数を決定するために、測定時の水温を記録することが必要となっている。また、R. Pusch and Geodevelopment AB⁴⁾は、透水係数に試験時の温度が影響を及ぼすため、一定温度状態の下で試験を実施することを推奨している。

以上より、透水係数には温度が影響するため、試験を実施する際には、なるべく温度が一定の環境条件下で透水試験を実施することが必要である。なお、温度の制御が困難な場合には、測定期間中の温度を記録することが必要である。

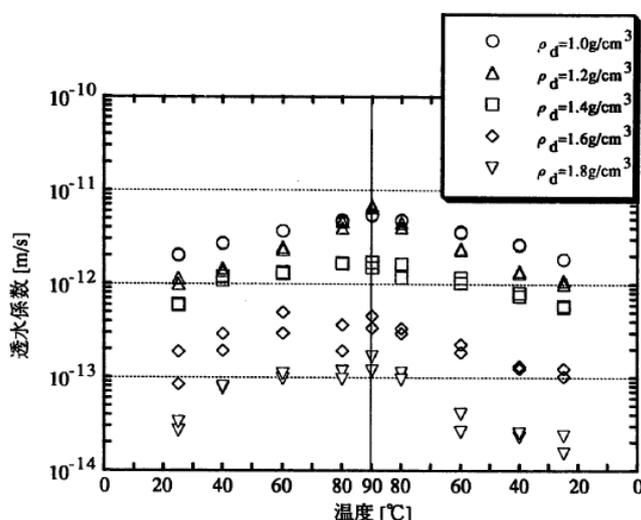


図 3.1-31 透水係数の温度依存性²⁷⁾
(クニゲル V1 単体)

(4) 供試体の特性による影響要因

1) 定量的評価が可能な要因

(a) モンモリロナイト含有率の影響

長谷川²⁴⁾は、モンモリロナイト含有率が透水係数に及ぼす影響を調べるため、クニゲル V1、クニボンド、ネオクニボンド、ボルクレイに対して、蒸留水、人工海水、人工海水の濃度の 1/2 の

溶液を通水溶液として試験を実施している。装置は図 3.1-1(2)の透水試験装置 (M) に示す定圧透水試験装置を用いている。用いられたベントナイトの基本的な特性は表 3.1-5 に示すとおりである。表 3.1-5 に示したモンモリロナイト含有率が異なるベントナイトに対して、有効モンモリロナイト密度 (単位体積あたりに含まれるモンモリロナイトの乾燥重量を、モンモリロナイト以外の土粒子の体積を除いた体積で割ることにより得られる密度、算出方法は p43 の式 3.1-2 に示す。) と透水係数の関係が整理されているものが図 3.1-32 である。図 3.1-32 では、モンモリロナイト含有率が異なるベントナイトでも主な交換性陽イオンが Na 型のベントナイトであれば、有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係には、蒸留水、人工海水ごとに相関性があることが示されている。

定圧透水試験結果以外の結果であるが、佛田ほか²⁵⁾は、表 3.1-7 に示すクニゲルV1、ボルクレイ、クニボンド、MX-80 に対して高压での圧密試験を実施している。供試体は直径 60mm 高さ 10mm となっている。透水係数と有効粘土密度の関係、透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係、透水係数とモンモリロナイトの膨潤体積ひずみの関係が図 3.1-33 のように示されている。佛田ほかは、有効粘土密度よりも、有効モンモリロナイト密度や膨潤体積ひずみで整理した方が透水係数のばらつきが抑えられることから、ベントナイトの透水係数を評価するには、有効モンモリロナイト密度や膨潤体積ひずみを指標として用いることが有効であると述べている。

これらの文献^{24),25)}を参考に、今回の文献調査で得られたデータについて有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係で整理した結果を、図 3.1-34 に示した。有効粘土密度と透水係数の関係で整理した図 3.1-2 と比較すると、透水試験結果のばらつきが若干小さくなっているようであるが、データ数に違いがあるため、これらの (図 3.1-2 と図 3.1-34) 比較からは、有効モンモリロナイト密度で整理した方が、試験結果のばらつきが小さくなるという結論を得ることは出来なかった。

ちなみに、クニゲル V1 を用いて試験が実施された研究事例から、モンモリロナイト含有率が記載されているものを調べた結果、モンモリロナイト含有率は 46~59.3%と広く分布していた。

そこで、クニゲルV1 の有効粘土密度 1.6Mg/m^3 の供試体の場合に、モンモリロナイト含有率が 46~59.3%の幅で、どの程度有効モンモリロナイト密度が異なるか以下に検討した。クニゲルV1 のモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度を、小峯・緒方²⁶⁾を参考に 2.81 とした場合、有効モンモリロナイト密度は、 $1.07\sim 1.24\text{Mg/m}^3$ となった。この範囲 ($1.07\sim 1.24\text{Mg/m}^3$) の有効モンモリロナイト密度に対する透水係数を、図 3.1-32 の有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を基に推定した場合、透水係数は 1 桁近く変動する。言い換えれば、同じ有効粘土密度のクニゲルV1 を供したとしても、モンモリロナイト含有率が 46%~59%まで異なっていた場合、透水係数は 1 桁近く変動する。したがって、クニゲルV1 中のモンモリロナイト含有率の違いも有効粘土密度で透水係数を整理した場合の結果のばらつきの大きな要因になっていると考えられる。

以上のように、有効粘土密度と透水係数の関係には、ベントナイトのモンモリロナイト含有率の違いが影響するため、有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係で整理することが重要である。そのためには、供試体中のベントナイトのモンモリロナイト含有率については、必要に応じて記録しなければならない。

表 3.1-6 試験に用いたベントナイトの基本的性質²⁴⁾

	クニゲルV1	ボルクレイ	クニボンド	
主な交換性陽イオン	Na型	Na型	Ca型	
土粒子の密度 (Mg/m ³)	2.79	2.84	2.71	
液性限界 (%)	473.9	628.2	144.5	
塑性限界 (%)	26.61	44.80	63.87	
塑性指数	447.3	583.4	80.6	
活性度	6.93	6.35	4.36	
塑性比	16.81	13.02	1.26	
粘土分(<2μm)含有率 (%)	64.5	91.9	18.5	
モンモリロナイト含有量 (%)	試験開始時	48	69	80
	試験終了時	53	69	71

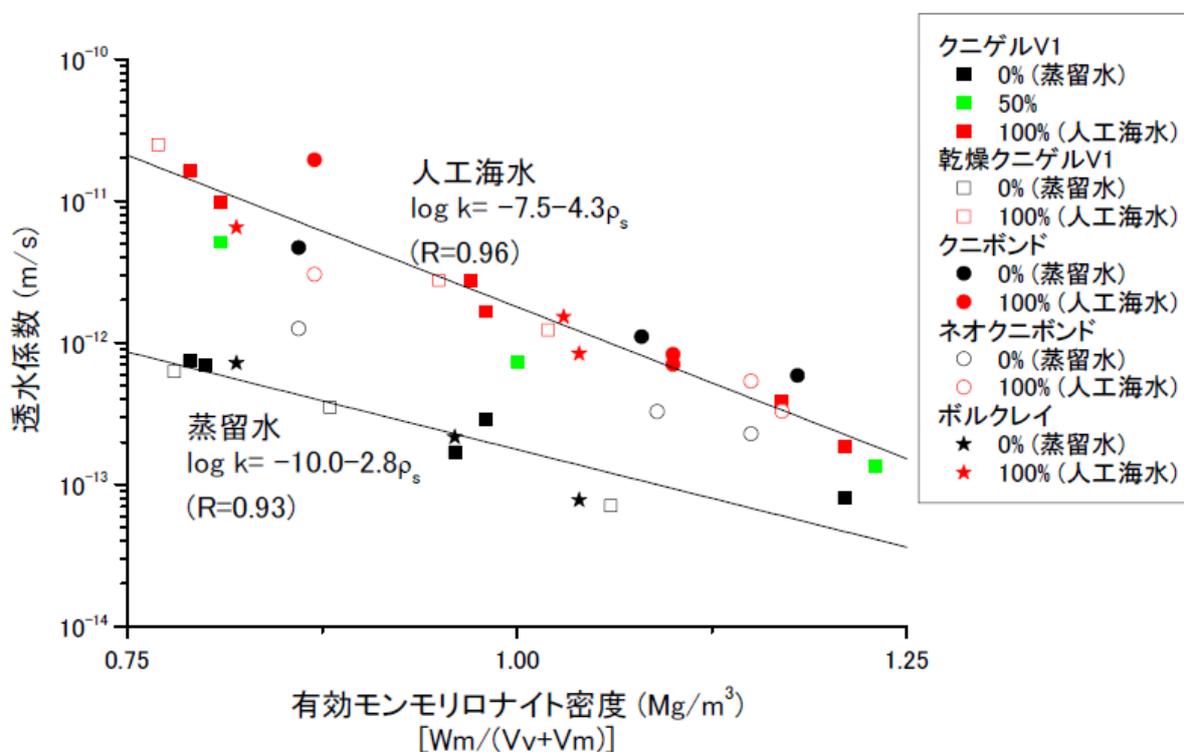


図 3.1-32 各種ベントナイトの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係²⁴⁾

表 3.1-7 各種ベントナイトの基本的性質 (佛田ほか²⁵⁾)
ただし、直井ほか⁷¹⁾を引用

ベントナイト	A	B	C	E
名称	クニゲルV1	ボルクレイ	クニボンド	MX-80
タイプ	Na型	Na型	Ca型	Na型
土粒子密度 (Mg/m ³)	2.79	2.84	2.71	2.88
液性限界(%)	458.1	565.0	128.7	437.3
塑性限界(%)	23.7	47.2	38.4	38.0
塑性指数	434.4	517.8	90.3	399.3
モンモリロナイト含有率(%)	57	71	84	80
陽イオン交換容量 (meq/g)	0.732	1.007	0.796	1.104
交換性Naイオン量 (meq/g)	0.405	0.556	0.119	0.624
交換性Caイオン量 (meq/g)	0.287	0.293	0.585	0.429
交換性Kイオン量 (meq/g)	0.009	0.016	0.019	0.024
交換性Mgイオン量 (meq/g)	0.030	0.132	0.072	0.027

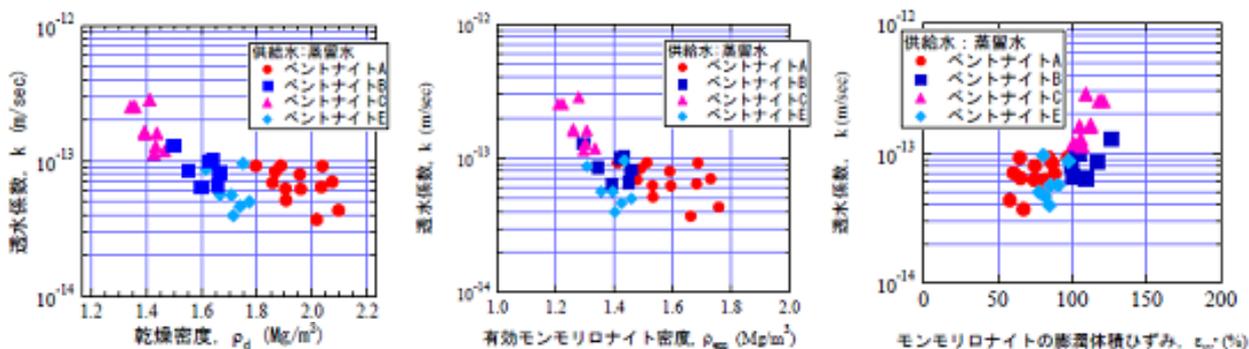


図 3.1-33 ベントナイトの種類ごとの透水係数と各種指標の比較²⁵⁾
ベントナイト A,B,C,E に対応するベントナイトの名称は表 3.1-7 に示す。

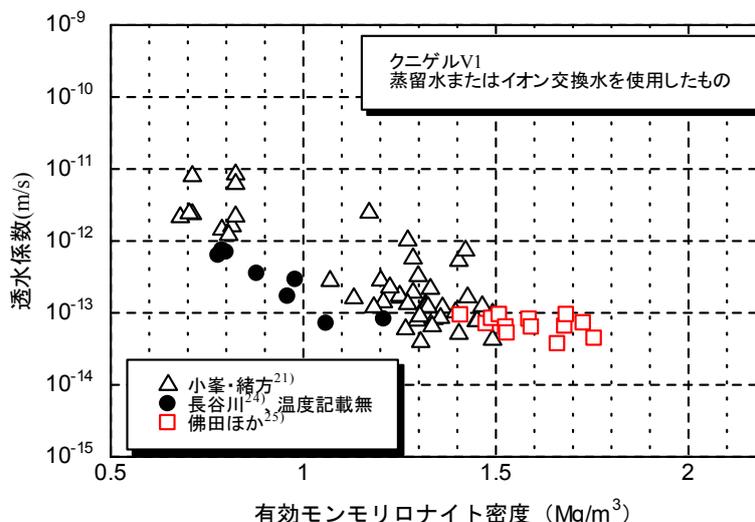


図 3.1-34 有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、蒸留水またはイオン交換水を使用したもの (温度条件の記載の有無は凡例に示す。))

(b) 土粒子密度の影響

透水試験結果を解釈または表示する際に、混合供試体の有効粘土密度、有効モンモリロナイト密度、試験終了後の供試体の飽和度を用いる場合がある。有効粘土密度、有効モンモリロナイト密度、飽和度の計算式は、それぞれ式(3.1-1)、式(3.1-2)、(式 3.1-3) で表される。

有効粘土密度

$$\begin{aligned} \rho_b &= M_b / (V_b + V_a) \\ &= \rho_d(100 - R_s) / (100 - \rho_d R_s / \rho_s) \quad (\text{式 3.1-1}) \end{aligned}$$

ここで、 ρ_b :有効粘土密度[Mg/m³]、 M_b :ベントナイトの乾燥重量[Mg]、 V_b :ベントナイトの容積[m³]、 V_a :空隙の容積[m³]、 ρ_d :乾燥密度[Mg/m³]、 R_s :混合材の混合率[wt%]、 ρ_s :混合材の土粒子密度[Mg/m³]である。

有効モンモリロナイト密度

$$\begin{aligned} \rho_{em} &= M_m / (V_m + V_a) \\ &= \rho_b C_m / (100 - \rho_b(100 - C_m) / \rho_{nm}) = \rho_d(100 - R_s) / (100 - \rho_d R_s / \rho_s) \\ &\quad * C_m / (100 - \rho_b(100 - C_m) / \rho_{nm}) \\ &= \rho_d(100 - R_s) / (100 - \rho_d R_s / \rho_s) \\ &\quad * MBC / MBC_{100} / (100 - \rho_b(100 - C_m) / \rho_{nm}) \\ &= \rho_d(100 - R_s) / (100 - \rho_d R_s / \rho_s) * MBC \\ &\quad / MBC_{100} / (100 - \rho_b(100 - 100(MBC / MBC_{100})) / \rho_{nm}) \\ & \quad (\text{式 3.1-2}) \end{aligned}$$

ここで ρ_{em} :有効モンモリロナイト密度[Mg/m³]、 M_m :モンモリロナイトの重量[Mg]、 V_m :モンモリロナイトの容積[m³]、 C_m :モンモリロナイト含有率[%]、 ρ_{nm} :ベントナイト中に含まれるモンモリロナイト以外の随伴鉱物の土粒子密度[Mg/m³]、 MBC :ベントナイトのメチレンブルー吸着量[mmol/100g]、 MBC_{100} :純モンモリロナイトのメチレンブルー吸着量[mmol/100g]

飽和度

$$S_r = G_s \omega / e = ((100 - R_s) / 100)(\rho_b / \rho_w) + (R_s / 100)(\rho_s / \rho_w)$$

(式 3.1-3)

ここで S_r :飽和度[%]、 G_s :試験に用いた供試体の土粒子密度、 ω :含水比[%]、 e :空隙比、 ρ_w :水の密度[Mg/m³]

(式 3.1-1) によれば、有効粘土密度を計算する場合は、混合材の土粒子密度[Mg/m³]ならびに試験に用いた供試体の土粒子密度が必要となる。

(式 3.1-2) によれば、有効モンモリロナイト密度を計算する場合は、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイト以外の随伴鉱物の土粒子密度が必要となる。ベントナイト中に含まれるモン

モンモリロナイト以外の随伴鉱物の土粒子密度の測定は容易には行えないため、モンモリロナイト含有量やモンモリロナイトの土粒子密度から推定すること等が別の方法として考えられる。

(式 3.1-3) によれば、供試体の飽和度を計算する場合は、試験に用いた供試体の土粒子密度が必要となる。

以上より、透水試験結果を指標となるパラメータとともに表示する際には、パラメータに応じて混合材の土粒子密度、ベントナイトの土粒子密度、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイト以外の随伴鉱物の土粒子密度、供試体の土粒子密度を記録する必要がある。

(c) 交換性陽イオン組成の影響

小峯²⁹⁾は、ベントナイト系材料の透水係数の評価式を提案している。この透水係数の評価式は、モンモリロナイトの結晶レベルの膨潤挙動を考え、モンモリロナイトの結晶層間の距離を計算し、モンモリロナイトの結晶層間の水の流れを、二次元的な平行平板間を流れる定常で非圧縮性流体の層流と仮定して、透水係数を求めるものである²⁹⁾。ここで、モンモリロナイトの結晶レベルでの膨潤挙動を考える際に、交換性陽イオンがパラメータの1つとなっている。小峯らの理論評価式によれば、交換性陽イオンやベントナイトのモンモリロナイト含有率が異なっても、モンモリロナイトの結晶層間の距離が計算できれば、通水溶液が蒸留水の場合の透水係数は評価可能であることを示している。

田中ほか³⁰⁾は、交換性陽イオン組成や通水溶液の変化に伴う膨潤圧ならびにモンモリロナイト結晶間の反発力の変化により、モンモリロナイト結晶の凝集の程度が変化し、このことがベントナイトの透水性に影響を及ぼすとして、**Na**型及び**Ca**型ベントナイトの蒸留水及び人工海水の通水溶液に対して適用し得るモデルを提案している。

以上、どちらのモデルでも、交換性陽イオン組成は透水係数に影響を及ぼすため、試験結果を解釈しやすいように、供試体の交換性陽イオン組成を必要に応じて記録しておくことが望ましい。

2) 定量的評価が困難な要因

(a) 土の微視的構造の影響

土（ベントナイトのみならず一般的な土も含む）の透水係数には、有効粘土密度のほかに土粒子の配列など土の微視的構造が影響している可能性がある^{例えば 12)}が、土の微視的構造を詳細に把握することは困難であるため、もっぱら透水係数に及ぼす異方性の影響が検討されてきた^{例えば 75)}。締固めた土の透水係数は、一般的には締固め方向と締固めに対して直角な方向で異なることが知られている⁷⁵⁾。

締固めたベントナイトの透水係数に及ぼす異方性の影響については田中ほか³²⁾が検討している。粒径が20mm以下のクニゲルV1原鉱を、コンクリートピット内で含水比約21%、層厚約10cmで締固めた地盤からサンプリングした直径約60mm、高さ約20mmの供試体に対して、定圧透水試験を実施し、鉛直方向供試体（締固め方向と透水の方向が一致）と水平方向供試体（透水の方向が締固め方向に垂直）の透水係数に及ぼす異方性の影響を検討している。用いられた透水試験装置は図3.1-1(1)の透水試験装置(L)に示したものである。図3.1-35に示されたように、両方向で得られた透水係数はほぼ一致しており、ベントナイト系材料の透水性に及ぼす異方性の影響が小

さいことを示している。

工藤ほか⁷⁶⁾は、締固めたクニゲルV1 供試体の自然含水比から飽和までの過程で発生する膨潤圧を測定し、締固め方向と締固め方向に垂直な方向の膨潤圧がほぼ一致していることを報告している。このことと田中ほか³²⁾が実施した透水試験結果を考え合わせると飽和したベントナイトの微視的構造は等方的であり、モンモリロナイト結晶はランダムな方向に配列していることが推定できる。

以上より、透水係数に及ぼす微視的構造の異方性の影響は小さいと思われる。一方、透水係数に及ぼす異方性以外の微視的構造の影響については、その有無や程度を調べた研究がなく、今後の研究によらねばならない。現時点では、供試体の作製方法を必要に応じて記録しておくこととした。

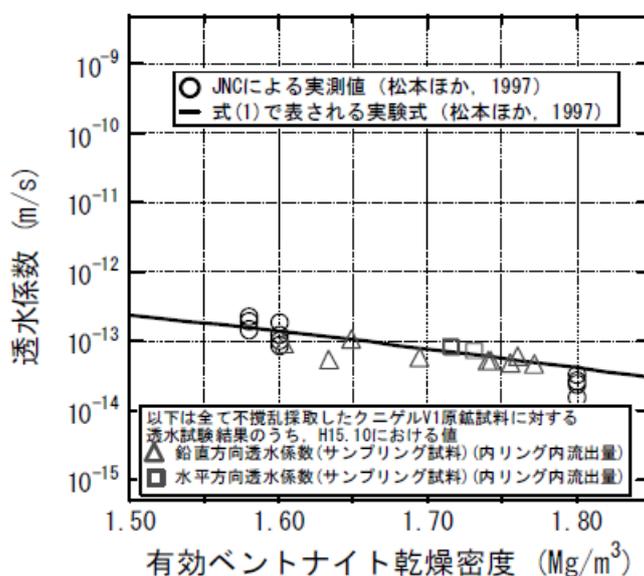


図 3.1-35 透水係数に及ぼす異方性の影響³²⁾

(b) 密度不均一性の影響

供試体の密度不均一性を考えた場合、室内で締固めや静的圧縮により作製される供試体中の密度分布は成層構造に近い状態となると考えられる。透水係数 k_1 、 k_2 、 \dots 、 k_n の土が、 H_1 、 H_2 、 \dots 、 H_n の層厚で水平に体積していると考えた場合、層全体での層に対する鉛直方向の透水係数は、式 3.1-4 により求められる⁷³⁾。

$$k = H / \sum_{j=1}^n \frac{H_j}{k_j} \quad (\text{式 3.1-4})$$

ここで、 H ;供試体の高さ

ここで一例として、平均有効粘土密度は 1.6Mg/m^3 で等しいが、密度分布が成層構造となっている供試体を以下の 3 通り設定し、層全体での鉛直方向での透水係数を計算した。なお、有効粘土

密度から透水係数を算出するに際してはクニゲル V1 に対して提案されている、式 3.1-5 を用いた
23)。

$$k = \exp(-29.815 + 7.801\rho_b - 4.8032\rho_b^2) \quad (\text{式 3.1-5})$$

ここで、 ρ_b :有効粘土密度

- イ) 有効粘土密度 1.4～有効粘土密度 1.8Mg/m³まで、10 層で 0.04Mg/m³ずつばらついているとした場合（層毎の透水係数 3.0×10^{-14} m/s～ 4.5×10^{-13} m/s）（平均有効粘土密度 1.6Mg/m³）
- ロ) 有効粘土密度 1.5～有効粘土密度 1.7Mg/m³まで、10 層 0.02Mg/m³ずつばらついているとした場合（透水係数 6.6×10^{-14} m/s～ 2.6×10^{-13} m/s）（平均有効粘土密度 1.6Mg/m³）
- ハ) 有効粘土密度 1.6Mg/m³で、10 層とも均一な場合（透水係数 1.4×10^{-13} m/s）（平均有効粘土密度 1.6Mg/m³）

計算した透水係数の結果を、図 3.1-36 に示す。図 3.1-36 に示すように、層毎の透水係数の分布に対して、層全体での透水係数は平均有効粘土密度（1.6Mg/m³）の透水係数の値に近くなること
が分かる。イ)のように、有効粘土密度が 1.4～1.8Mg/m³までの層が供試体に分布していたとしても、層全体での透水係数は、 8.8×10^{-14} m/s であり、有効粘土密度 1.6Mg/m³に対する透水係数 1.4×10^{-13} m/s に対して 0.65 倍程度であった。ロ)の場合の層全体での透水係数は、 1.2×10^{-13} m/s であり、有効粘土密度 1.6Mg/m³に対する透水係数 1.4×10^{-13} m/s に対して 0.89 倍程度であった。本検討では、供試体作製時の密度の不均一性が 1.4～1.8Mg/m³程度までとしたが、実際の透水試験では、供試体の不均一性がここまで生じないものと考えられること、ベントナイト系材料は膨潤性を有するため時間に伴い均質化する方向へと向かうことを考えると透水係数に及ぼす密度不均一性の影響は更に小さくなるものと予想される。

以上より、透水係数に及ぼす密度不均一性の影響は、大きくないものと考えられる。しかしながら、供試体の密度不均一性が透水係数に及ぼす影響が、全く無い訳ではないことを考えると、透水係数と有効粘土密度等の関係を求める場合、可能な限り均一な供試体を用いることが望ましい。そのためには、次節の「3.2 膨潤特性」で示すように、供試体作製時に圧縮成型治具や容器に焼結金属フィルターなどを設置し空気を抜けやすくするか、上下面圧縮により供試体を作製するといった方法が有効である。

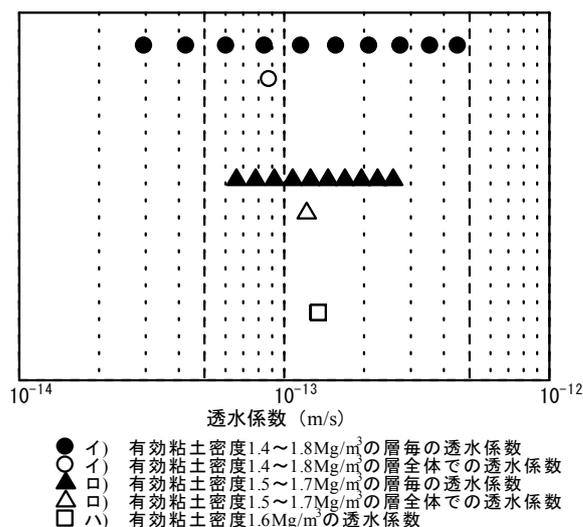


図 3.1-36 透水係数に及ぼす不均一性の影響検討結果

3.1.4 透水試験法の現状と課題のまとめ

3.1.3 節で文献調査をもとに透水係数に及ぼす影響要因について整理した。以下の推奨方法を取ることにより、定圧透水試験により飽和透水係数を正しく評価することが可能である。

(1) 試験法自体によるもの

1) 試験法（試験装置）の影響

試験結果に及ぼす影響を容易に排除でき、不明な影響が少ないという観点からは、定圧透水試験法を用いるのが現状望ましいと考えられる。

(2) 試験手順によるもの

1) 飽和化の影響

飽和状態での透水係数を求めるためには、供試体下部から一次元で通水したり、背圧を与える等の方法により飽和度を高めるとともに、試験終了後の飽和度を記録することが必要である。

(3) 試験条件によるもの

1) 動水勾配、透水圧の影響

動水勾配については、透水係数に影響を及ぼさないため、留意する必要はないが、透水圧については、供試体が変形し、透水係数に影響を及ぼす可能性があるため、透水圧は膨潤圧を超えない値に設定する必要がある。ただし、土圧計などが装着されておらず厳密に膨潤圧を把握出来ない場合には、予想される膨潤圧に基づいて透水圧を設定することとなる。

2) 供試体寸法の影響

直径は 50mm~200mm 程度、高さは、10mm~80mm 程度であれば、供試体の寸法が透水係数に及ぼす影響は小さいため、寸法に対して留意する必要はない。なお、この範囲外の寸法の供試

体を用いる場合は、透水係数に及ぼす寸法効果の影響がないことを、異なる寸法の試験データとの比較から確認することが望ましい。

3) 初期含水比の影響

初期含水比の影響については、現状知見がないため判断出来ないが、透水係数が膨潤圧と密接に関係していると考えた場合、高有効粘土密度領域では、初期含水比が透水係数にも影響を及ぼす可能性もあるため、記録しておくことが望ましい。

4) 通水溶液の種類や組成の影響

透水係数は通水溶液の種類や組成の影響を大きく受けるため、通水溶液については、イオン交換水、蒸留水、海水、地下水等の溶液の種類や、溶液中のイオン組成などを記録することが必要である。

5) 温度の影響

透水係数には温度が影響するため、試験を実施する際には、なるべく温度が一定の環境条件下で透水試験を実施する。なお、温度の制御が困難な場合には、測定期間中の温度を記録する必要がある。

(4) 供試体の特性による影響要因

1) 定量的評価が可能な要因

(a) モンモリロナイト含有率の影響

有効粘土密度と透水係数の関係には、ベントナイトのモンモリロナイト含有率の違いが影響するため、有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係で整理することが重要である。そのためには、供試体中のベントナイトのモンモリロナイト含有率については、必要に応じて記録する。

(b) 土粒子密度の影響

透水試験結果の指標となるパラメータとともに表示する際には、パラメータに応じて混合材の土粒子密度、ベントナイトの土粒子密度、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイト以外の随伴鉱物の土粒子密度、試料の土粒子密度を記録する必要がある。

(c) 交換性陽イオン組成の影響

交換性陽イオン組成は透水係数に影響を及ぼすため、試験結果を解釈しやすいように、供試体の交換性陽イオン組成を必要に応じて記録しておくことが望ましい。

2) 定量的評価が困難な要因

(a) 土の微視的構造の影響

透水係数に及ぼす微視的構造の異方性の影響は小さいと思われる。一方、透水係数に及ぼす異

方性以外の微視的構造の影響については、その有無や程度を調べた研究がなく、今後の研究によらねばならない。現時点では、供試体の作製方法を必要に応じて記録する。

(b) 密度不均一性の影響

密度の不均一性が透水係数に及ぼす影響について検討した計算結果によれば、透水係数に及ぼす密度不均一性の影響は、大きくないものと考えられが、供試体の密度不均一性が透水係数に及ぼす影響が全く無い訳ではないことを考えると、透水係数と有効粘土密度等の関係を求める場合、可能な限り均一な供試体を用いることが望ましい。そのためには、次節の「3.2 膨潤特性」で示すように、供試体作製時に圧縮成型治具や容器に焼結金属フィルターなどを設置し空気を抜けやすくするか、上下面圧縮により供試体を作製するといった方法が有効である。

参考文献

- 1) 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関わる研究小委員会：“余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方” (2009).
- 2) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次とりまとめ-分冊2 地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022 (1999).
- 3) R. Pusch and Geodevelopment AB：“The buffer and backfill handbook -Part 2: Materials and techniques-”，SKB TR-02-12 (2001).
- 4) R. Pusch and Geodevelopment AB：“The buffer and backfill handbook – Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods –”，SKB TR-02-20 (2002).
- 5) 横山信吾、黒田真人、筒井政則、佐藤勉、鈴木啓三、榎戸洋之：“月布ベントナイト鉱床における川向坑産ベントナイトと梅ノ木田坑産ベントナイトの鉱物学的比較”，粘土科学第44巻，第2 (2004).
- 6) 小峯秀雄：“同一名称ベントナイトの算出年度による違いと膨潤特性評価式の適用性”，土木学会第60回年次学術講演会，pp.251-252 (2005).
- 7) 畔柳幹雄、岡本道孝、笹倉剛：“ベントナイト系難透水性材料に対する透水・圧密試験時間短縮の試み”，土木学会第57回年次学術講演会，pp.451-452 (2002).
- 8) 畔柳幹雄、岡本道孝、小林一三、笹倉剛：“ベントナイト系難透水性材料の透水・圧密試験時間短縮の試み”，土木学会第58回年次学術講演会，pp.321-322 (2003).
- 9) Morin,R,H and Olsen,H,W：“Theoretical analysis of the transient response from a constant flow rate hydraulic conductivity test”，Water Resource Research, Vol.23, No.8, pp.1461-1470 (1987).
- 10) T. Esaki, M. Zhang, A. Takeshita, and Y. Mitani：“Rigorous theoretical analysis of a flow pump permeability test”，Geotechnical Testing Journal, Vol.19, No.3, pp.241-246 (1996).
- 11) 笹倉剛、小林一三：“放射性廃棄物地層処分におけるバリア材料の性能評価技術の開発”，鹿島技術研究所年報第52号 (2004).
- 12) 地盤工学会：“地盤材料試験の方法と解説” (2009).
- 13) 佛田理恵、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：“高圧圧密試験装置を用いたベントナイト系緩衝材の透水係数算出における試験方法の高度化”，第39回地盤工学研究発表会，pp.1203-1204 (2004).
- 14) 河野伊一郎、西垣誠：“室内透水試験法に関する2,3の考察”，土質工学論文報告集 Vol.22, No.4, pp.181-190 (1982).
- 15) 出口朗、小野文彦、雨宮清、今井久、トランデュク フィ オアン：“緩衝材原位置締固め工法の検討-透水試験-”，土木学会第56回年次学術講演会，pp.14-15 (2001).
- 16) 田中幸久、広永道彦：“人工バリア・天然バリアのガス透気特性”，電力中央研究所報告，研究報告 申請中 (2010).
- 17) 石井卓、中島均、白石知成、後藤高志：“ $1E-13$ m/s の透水係数を短時間で測定する高速透水試験”，土木学会第58回年次学術講演会，pp.319-320 (2003).
- 18) 伊藤 弘志：“原鉱石から調整した粒状ベントナイトの特性試験(2)～透水特性について～”，土

- 木学会第 59 回年次学術講演会, pp.85-86 (2004).
- 19) 田中幸久、中村邦彦：“長期透水中のベントナイトの膨潤圧と透水係数の測定”，第 44 回地盤工学研究発表会, pp.247-248 (2009).
- 20) 谷澤房郎、今村聡、安部聡、古賀善雄、後藤聡：“ベントナイト・砂混合土の透水特性”，土木学会第 48 回年次学術講演会, III-514 (1993).
- 21) 小峯秀雄、緒方信英：“高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の透水特性”，電力中央研究所報告, 研究報告 U00041 (2001).
- 22) 中村邦彦、田中幸久：“X 線 CT スキャンによるベントナイト原鉱の透水特性検討”，第 40 回地盤工学研究発表会, pp.1305-1306 (2005).
- 23) 菊池広人、棚井憲治、松本一浩、佐藤治夫、上野健一、鐵剛志：“緩衝材の飽和透水特性-II —海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響—”，JNC TN8430 2003-002 (2003).
- 24) 長谷川琢磨：“ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響”，電力中央研究所 受託報告 N04005 (2004).
- 25) 佛田理恵、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴：“ベントナイトの透水係数に対する各種評価指標値の有効性比較”，土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.631-632 (2004).
- 26) 小峯秀雄、緒方信英：“放射性廃棄物処分のための砂・ベントナイト混合材料の膨潤特性とその評価法”，電力中央研究所報告, 研究報告 U96029 (1997).
- 27) 松本一浩、菅野毅、藤田朝雄、鈴木英明：“緩衝材の飽和透水特性”，PNC TN8410 97-296, (1997).
- 28) 菊池広人、棚井憲治：“幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験”，JNC TN8430 2004-005 (2005).
- 29) 小峯秀雄：“各種ベントナイトの透水係数に対するモンモリロナイト結晶層間流モデルに基づく透水係数理論評価式の適用性”，土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.87-88 (2004).
- 30) 田中幸久、長谷川琢磨、中村邦彦：“海水の濃度が各種ベントナイトの透水係数ならびに膨潤圧に及ぼす影響のモデル化”，土木学会論文集 C, Vol.65, N01, pp.66-84 (2009).
- 31) 小峯秀雄、緒方信英：“高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の提案—砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響—”，電力中央研究所報告, 研究報告 U99013 (1999).
- 32) 田中幸久、中村邦彦、工藤康二、広永道彦、仲神元順、小松進一：“地盤統計学手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価”，土木学会論文集 C Vol.63 No.1, pp.207-223 (2007).
- 33) 関根一郎、田中徹、中村隆浩、高木努、小峯秀雄：“Na 型、Ca 型ベントナイトを使用した放射性廃棄物処分施設用埋め戻し材料への塩分の影響”，土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.341-342 (2006).
- 34) 小峯秀雄：“「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」によるベントナイト系緩衝材・遮水材の透水特性評価”，第 36 回地盤工学研究発表会, pp.2521-2522 (2001).
- 35) 石井卓、中島均：“ $1E-13$ m/s の透水係数を短時間で測定する高速透水試験（その 2）—浸潤方式飽和法透水試験との比較—”，土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.91-92 (2004).

- 36) 石井卓、中島均：“放射性廃棄物処分施設における小型ベントナイトブロック定置工法（その2）—ブロックの継ぎ目の透水性変化—”，土木学会第60回年次学術講演会，pp.631-632 (2005).
- 37) M.Chijimatsu、T.Fujita、Y.Sugita and W.Taniguchi：“Evaluation of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Phenomena in the Near Field for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste”，JNC TN8400 2000-008 (2000).
- 38) 今村雅弘、千々松正和、杉田裕、菊池広人、村田澄彦、雨宮清、斎藤敏明：“高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト緩衝材継目部の力学および浸潤特性”，土木学会論文集 No.673/III-54,pp.61-70 (2001).
- 39) 前田宗宏、棚井憲治、伊藤勝、三原守弘、田中益弘：“カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性—膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数—”，PNC TN8410 98-021 (1998).
- 40) 古市光昭、奥津一夫、田中益弘：“高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しの検討（その2）”，原子力バックエンド研究 Vol.5 No.2，pp.51-57 (1999).
- 41) 小野文彦、庭瀬一仁、谷智之、中越章雄、千々松正和：“現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果”，土木学会第61回年次学術講演会，pp.323-324 (2006).
- 42) 石井卓、中島均、後藤高志：“強制乾燥真空注水飽和法によるベントナイト系難透水性材の短時間透水試験—現場サンプリング供試体の透水試験—”，土木学会第59回年次学術講演会，pp.93-94 (2004).
- 43) 竹ヶ原竜大、増田良一、千々松正和、高尾肇、上坂文哉：“ベントナイトペレットの特性試験（その3）—ベントナイトペレットの熱物性及び透水特性—”，土木学会第58回年次学術講演会，pp.309-310 (2003).
- 44) 九石正美、川口光夫、竹ヶ原竜大、高尾肇：“緩衝材の膨潤・透水特性—隙間の影響—”，土木学会第60回年次学術講演会，pp.101-102 (2005).
- 45) 中越章雄、千々松正和：“粒状ベントナイトの最大粒径がバリア性能に与える影響に関する検討”，日本原子力学会「2009年秋の大会」，p.596 (2009).
- 46) 庭瀬一仁、池田秀康、鳴海恵一郎、大西利満、佐藤泰、岸野敏彦：“ベントナイト原鉱石を用いた遮水土の特性調査(その2)”，土木学会第61回年次学術講演会，pp.321-322 (2006).
- 47) 田中益弘、笹倉剛、藤澤理、岡本道孝：“Na型ベントナイトの塩水化による透水及び膨潤特性の変化”，土木学会第55回年次学術講演会 (2000).
- 48) 田中幸久、中村邦彦：“海水の濃度と高温履歴がベントナイト膨潤特性に及ぼす影響”，電力中央研究所，研究報告 N04007 (2004).
- 49) 鈴木英明、柴田雅博、山形順二、広瀬郁郎、寺門一馬：“緩衝材の特性試験 (I)”，PNC-TN8410 92-057 (1992).
- 50) 佛田理恵、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：“高圧圧密試験装置を用いたベントナイトの透水係数算出における試験方法の高度化”，土木学会論文集 C Vol.62 No.3，pp.573-578 (2006).
- 51) 角脇三師 山口徹治 向井雅之 飯田芳久 田中忠夫：“Ca型化率とイオン強度をパラメータとしたベントナイトの透水係数の実験的取得”，日本原子力学会「2008年秋の大会」，p.669 (2008).
- 52) 五十嵐孝文、水品知之、今村聡、末岡徹：“ベントナイト・砂混合土の透水特性”，第31回地

盤工学研究発表会, pp.329-330 (1996).

- 53) 工藤康二、田中幸久、川西光弘、北村至：“締固めたベントナイト試料の真空脱気方法による飽和時間短縮に関する検討”，第 39 回地盤工学研究発表会, pp.2207-2208 (2004).
- 54) 佐川修、兵動正幸、中田幸男、吉本憲正、村田秀一：“Na 型ベントナイト混合砂の Ca 置換に伴う透水係数の経時変化”，第 39 回地盤工学研究発表会, pp.1209-1210 (2004).
- 55) 佐藤 泰、大西利満、横田茂幸、佐藤努、米田哲郎、河原木千恵：“ベントナイト鉱床から採取した試料の長期透水試験”，日本原子力学会「2007 年春の年会」, p.427 (2007).
- 56) 三好悟、田島孝敏、久保博、山本修一：“圧縮ベントナイト再冠水時のカルシウムイオン侵入の影響について”，日本原子力学会「2009 年春の大会」, p.595 (2009).
- 57) 緒方信英、小峯秀雄、堀江義博、石井卓、三谷泰浩：“ベントナイト混合土の透水性と骨材との関係について”，土木学会第 48 回年次学術講演会, pp.1080-1081 (1993).
- 58) 小峯秀雄、緒方信英、菅原宏：“砂とベントナイト混合材料の膨潤変形前後の透水係数”，土木学会第 47 回年次学術講演会, pp.666-667 (1992).
- 59) 小峯秀雄、安原一哉、村上哲、佛田理恵、山口憲治、竹内靖典：“広範囲な乾燥密度における各種ベントナイトの透水係数測定”，第 42 回地盤工学研究発表会, pp.1027-1028 (2007).
- 60) 小峯秀雄、安原一哉、村上哲、佛田理恵、山口憲治、竹内靖典：“人工海水環境下における各種ベントナイトの透水係数に関する実験的研究”，土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.193-194 (2007).
- 61) 杉田裕、千々松正和、雨宮清：“ベントナイトペレットを用いた緩衝材の隙間充填性に関する検討（その 1）ベントナイトペレット膨潤後の止水性に関する検討”，土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.2-3 (2001).
- 62) 和田隆太郎、山口憲治、竹内靖典、本郷 隆夫：“高品質・高施工性ベントナイト系成型品の開発-4 ベントボール 粒径配合充填施工状態の透水係数測定”，日本原子力学会「2005 年秋の大会」, p.587 (2005).
- 63) 嘉門雅史、勝見武、中島晃：“難透水性粘土材料の透水性評価に関する研究”，第 31 回地盤工学研究発表会, pp.337-338 (1996).
- 64) 田中幸久：“蒸留水・人工海水長期通水中のベントナイトの膨潤圧・透水係数測定”，日本原子力学会「2008 年秋の大会」, p.727 (2008).
- 65) 白石知成、中島均、石井卓：“ベントナイト系材料の透水係数に与える動水勾配の影響”，土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.21-23 (2001).
- 66) 菅野毅、棚井憲治、平和男、近藤嘉広、末吉隆信：“圧縮ベントナイトブロック集合体の高水圧透水試験”，第 32 回地盤工学研究発表会, pp.2009-2010 (1997).
- 67) 片岡哲之、田中幸久、工藤康二、中村邦彦、山崎 直、庭瀬一仁、小松進一：“高密度な不攪乱ベントナイト試料を対象とした透水係数の測定方法に関する検討”，第 38 回地盤工学研究発表会, pp.1177-1178 (2003).
- 68) 末岡徹、小林淳志、今村聡、小川輝繁：“高圧縮ベントナイトの土質力学的性質について”，第 25 回土質工学研究発表会, pp.301-302 (1990).
- 69) 伊藤裕紀、庭瀬 一仁、鈴木康正、千々松正和：“ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験

- (その1) 膨潤挙動に関する検討”，土木学会第 63 回年次学術講演会，pp.195-196 (2008).
- 70) 佛田理恵、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：“高圧圧密試験装置を用いて算出した Na 型および Ca 型ベントナイトの透水係数に及ぼす人工海水の影響”，第 40 回地盤工学研究発表会，pp.1303-1304 (2005).
- 71) 直井優、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴：“各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響”，土木学会論文集 No.785/III-70，pp.51-60 (2005).
- 72) 田沼進、子安徹人、樋口奈津子、田辺博三、本島禎二、中島均、石井卓：“ベントナイト系人工バリアのカルシウム水通水時の膨潤挙動”，土木学会第 56 回年次学術講演会，pp.8-9 (2001).
- 73) 山口柏樹:土質力学(全改訂)、技報堂出版 (1969).
- 74) 田中幸久、広永道彦、工藤康二：“飽和したベントナイトのガス移行メカニズムとそのモデル化”，電力中央研究所，研究報告 N07005 (2007).
- 75) 近藤武：“締固め土の透水係数の異方性”，土と基礎 Vol.32, No.11, pp.55-58 (1984).
- 76) 工藤康二、田中幸久、横倉俊幸、北村至：“締固めたベントナイト試料の膨潤圧測定方法に関する検討”，第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.2573-2574 (2005).
- 77) 田中幸久、廣永道彦：“飽和した高密度ベントナイト原鉱のガス移行特性”，電力中央研究所研究報告 N09014 (2010).

3.2 膨潤特性

3.2.1 放射性廃棄物処分でベントナイト系材料に求められる膨潤特性について

ベントナイトが膨潤する性質は、施工上生じた隙間の閉塞や何らかの外力による損傷で形成された水みちや地下水移行経路となる岩盤亀裂の閉塞、さらには劣化によって生じた施設内部の空隙の閉塞などといった自己シール性という要求機能上重要な役割を担うものである。また、膨潤圧は、長期的な人工バリアの力学的な状態を評価する上で重要な物性値である。ただし、過大な膨潤圧の発生は、周辺部位（セメント系材料やオーバーパック、岩盤、埋め戻し材など）に対して力学的影響を及ぼすことが考えられるため、それらへの力学的影響を考慮した材料設計を行う必要がある。

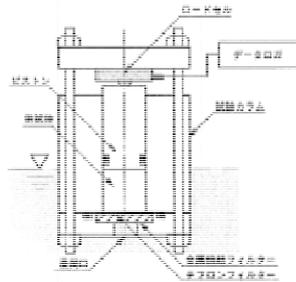
現状は、ベントナイト系材料の膨潤特性（膨潤圧、膨潤変形特性）を求める試験法は規格化されていない。測定される試験結果の不確かさを低減するためには、試験法について調査し、問題点や留意点を整理しておく必要がある。本報告では、膨潤変形特性を把握するための膨潤変形試験の事例が少なく、試験結果のばらつきの把握や試験結果に及ぼす影響要因の検討が困難であると考えたため、膨潤圧試験のみを対象に検討を行った。なお、既往の試験例では、平衡膨潤圧、平衡膨潤応力、膨潤応力、膨潤圧、膨潤圧力などの用語が用いられているが、ここでは報告書の取りまとめ上、これらを便宜的に総称して「膨潤圧」ということとする。したがって、文献等から引用した図表と文章中の用語が整合していない箇所もある。

3.2.2 膨潤圧試験法の調査

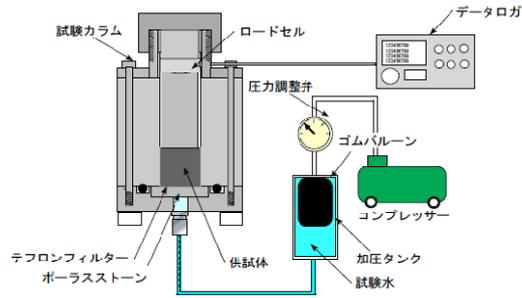
ここでは、膨潤圧試験を対象として、地盤工学会、土木学会及び原子力学会などの学会発表や論文発表、R. Pusch and Geodevelopment AB による SKB のテクニカルレポート^{1),2)}をもとに、試験法の現状や問題点などの整理を行う。また、これらの文献調査から試験データを収集するとともに、原子力機構や電中研で取得されたデータと合わせて全体的な試験結果のばらつきについて検討を行い、3.2.3 節における影響要因の検討に資する。

文献調査に際しては、クニゲル V1 に限らず、クニピア F、ボルクレイ、クニボンド、MX-80、ネオクニボンド、ベントナイト原鉱など、ベントナイト系材料全般を対象に、モンモリロナイト含有率、ベントナイト土粒子密度、混合材とその有無、混合材土粒子密度、水質、イオン強度、供試体の圧縮成型方法と成型圧力、給水方法、供試体の寸法、乾燥密度/有効粘土密度、試験温度、含水比及び試験に用いた試験装置に関する情報を整理した。また、これらの文献から測定データを収集した。測定データの収集に関しては、3.1 章でも示したように文献内に具体的な数値が明記されていない場合には、Biosoft 社の UnGraph5 を使用し、論文や予稿に掲載されたグラフから結果をスキニングした。これらの調査から抽出された膨潤関係の文献及び論文は、70 件であった（付録参照）。試験に用いられているベントナイト系材料としては、クニゲル V1 が最も多く、それ以外のベントナイト系材料に関しては、種々の環境条件下における膨潤圧の比較という観点などから試験が行われている例が多い。膨潤圧試験に用いられている供試体の寸法については、直径が 20mm～150mm、高さについては 5mm～60mm まで多様であった。試験装置には図 3.2-1 に示すような装置が用いられていた。供試体の圧縮成型方法としては、自然充てんといった方法を除いては、主に供試体の上端面から荷重を載荷する方法（以下、「上面加圧」という。）と供試

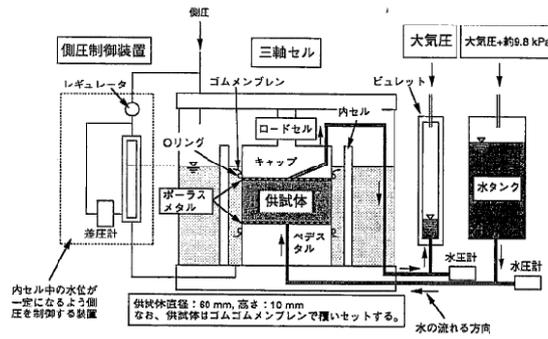
体上下両端面から荷重を载荷する方法（以下、「上下面加圧」という。）に区分される。また、圧縮成型した後、成型治具から一旦供試体を抜き出して試験に供する方法などもあった。供試体への給水方法に関しては、供試体下面から給水する方法、上下両端面から給水する方法に区分され、初期含水比としては、具体的な数値は不明であるが“自然含水比”で行っているものから最大 20% 程度のものまでを対象とした試験が行われていた。



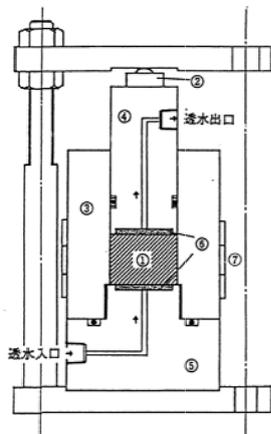
膨潤圧試験装置 (A) ³⁾



膨潤圧試験装置 (B) ⁴⁾

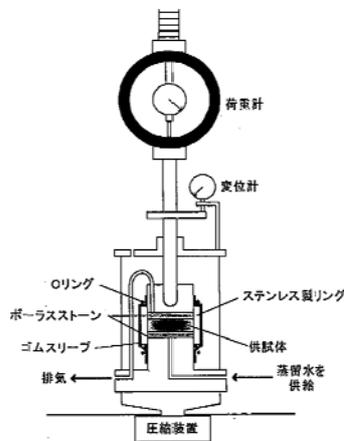


膨潤圧試験装置 (C) ⁷⁾



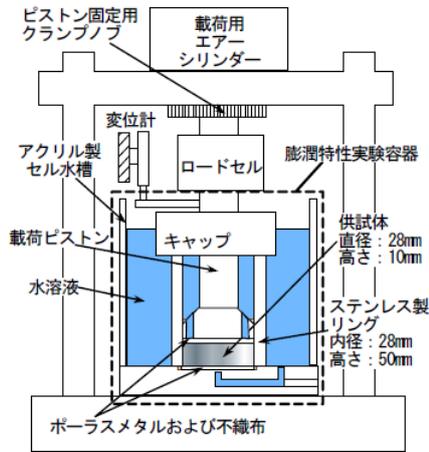
膨潤圧試験装置 (D) ⁵⁾

- ①供試体
- ②超小型ロードセル
- ③円筒セル
- ④上部ピストン
- ⑤下部底板
- ⑥ポーラスメタル
- ⑦バンドヒーター

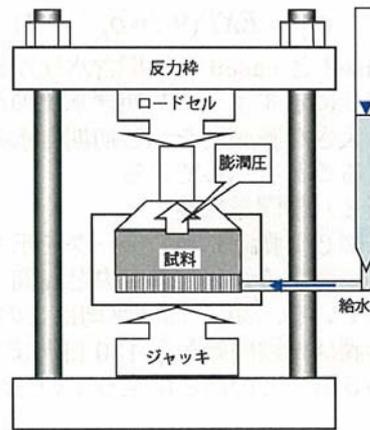


膨潤圧試験装置 (E) ⁶⁾

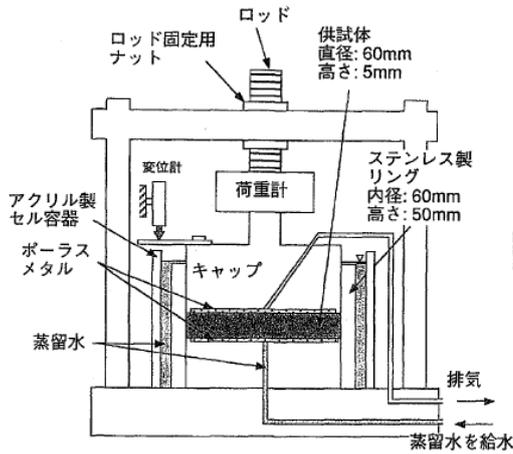
図 3.2-1(1) 膨潤圧試験に用いられている試験装置の例



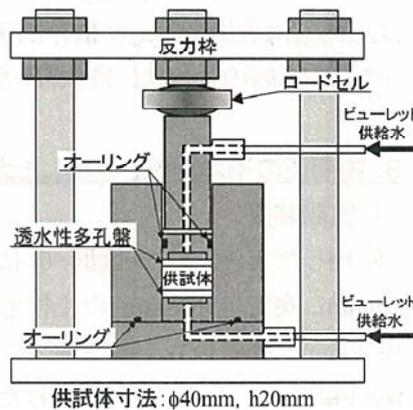
膨潤圧試験装置 (F) ⁸⁾



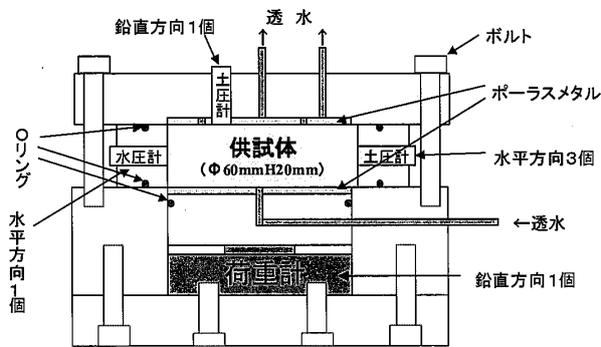
膨潤圧試験装置 (G) ⁹⁾



膨潤圧試験装置 (H) ¹⁰⁾

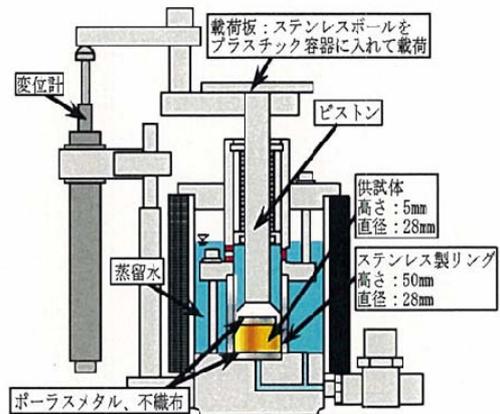


膨潤圧試験装置 (I) ¹¹⁾



(1) 小型ステンレス試験装置 (φ60mmH20mm)

膨潤圧試験装置 (J) ¹²⁾



膨潤圧試験装置 (K) ¹³⁾

図 3.2-1(2) 膨潤圧試験に用いられている試験装置の例

文献調査から得られたデータをもとに、データのばらつきの傾向を把握可能な結果として、クニゲル V1^{5),10),12),14),15),16),17),18),19),20),21),22)}、MX-80^{8),17),23),24)}及びクニボンド^{5),8),10),17)}を対象に整理した。具体的には、蒸留水や海水を用いて、かつ室温（～25℃）で行われた試験例が多く存在したことから、それぞれの材料及び水質条件毎に、有効粘土密度と膨潤圧の関係で整理した（図 3.2-2～図 3.2-7）。なお、海水条件の結果には人工海水（アクアマリンを含む）を使用した結果のみを抽出しており、塩濃度をパラメータとした結果は含めていない。これらの結果から総じて言えることは、有効粘土密度 1.5Mg/m³程度以下の密度領域での膨潤圧はそれほどばらついていないが、有効粘土密度 1.6Mg/m³程度以上の密度領域になると膨潤圧のばらつきが顕著になっている。有効粘土密度が高い領域では、膨潤圧そのものが大きくなり、試験装置の違いや供試体の寸法など種々の要因が結果に大きく影響を与えているものと推測される。

膨潤圧はモンモリロナイト含有率にも大きく依存することが知られている。また、市販されているクニゲル V1 のモンモリロナイト含有率も常に一定ではなく採取場所等によってその量は変動している。今回の文献調査で抽出された論文の中にはモンモリロナイト含有率まで記載されているものが数少なかったことから、ここでは基本的には有効粘土密度で整理した。なお、モンモリロナイト含有率が記載された文献のデータをもとに有効モンモリロナイト密度で再整理した結果を図 3.2-8 に示す。図 3.2-2 と図 3.2-8 の結果を比較すると膨潤圧のばらつきに違いは見られなかった。

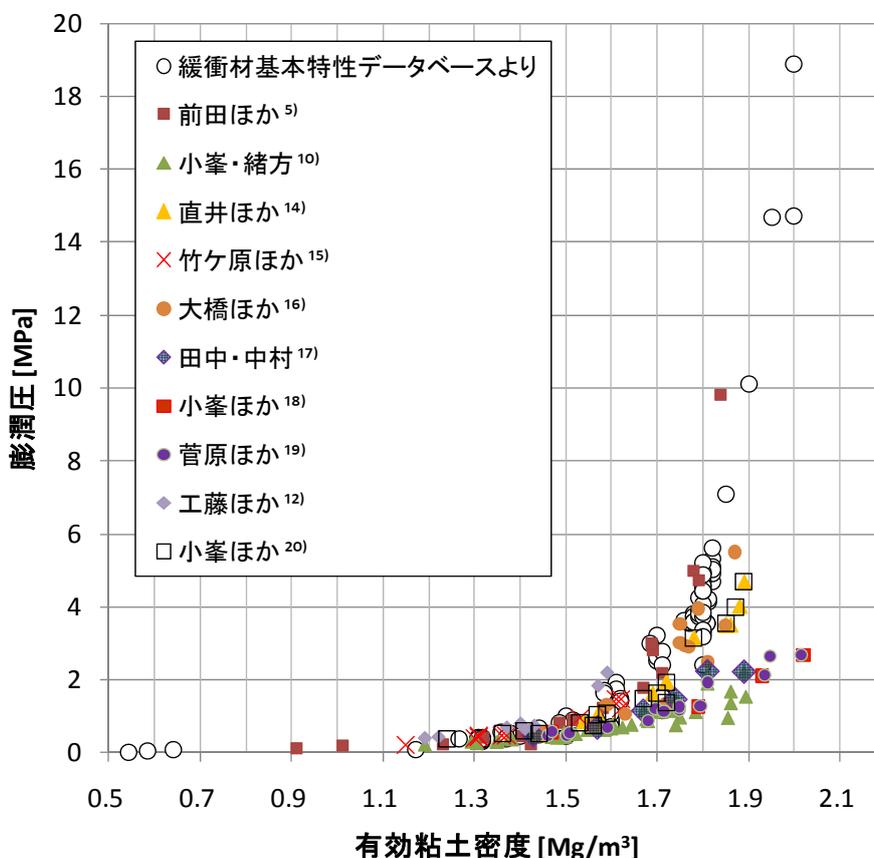


図 3.2-2 有効粘土密度と膨潤圧の関係（クニゲル V1、蒸留水条件）

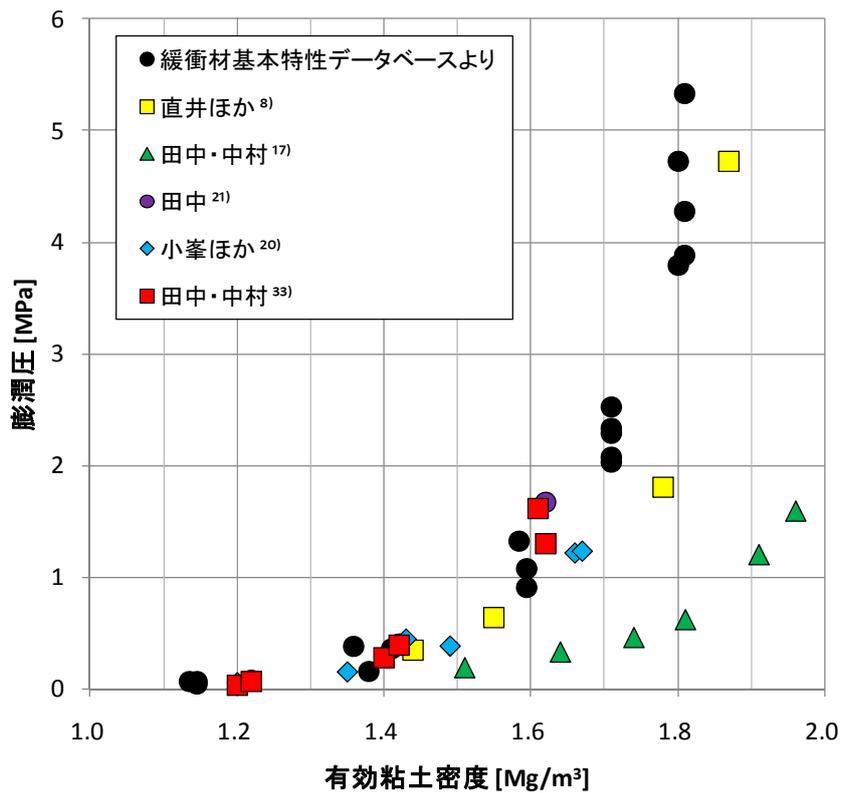


図 3.2-3 有効粘土密度と膨潤圧の関係 (クニゲル V1、海水条件)

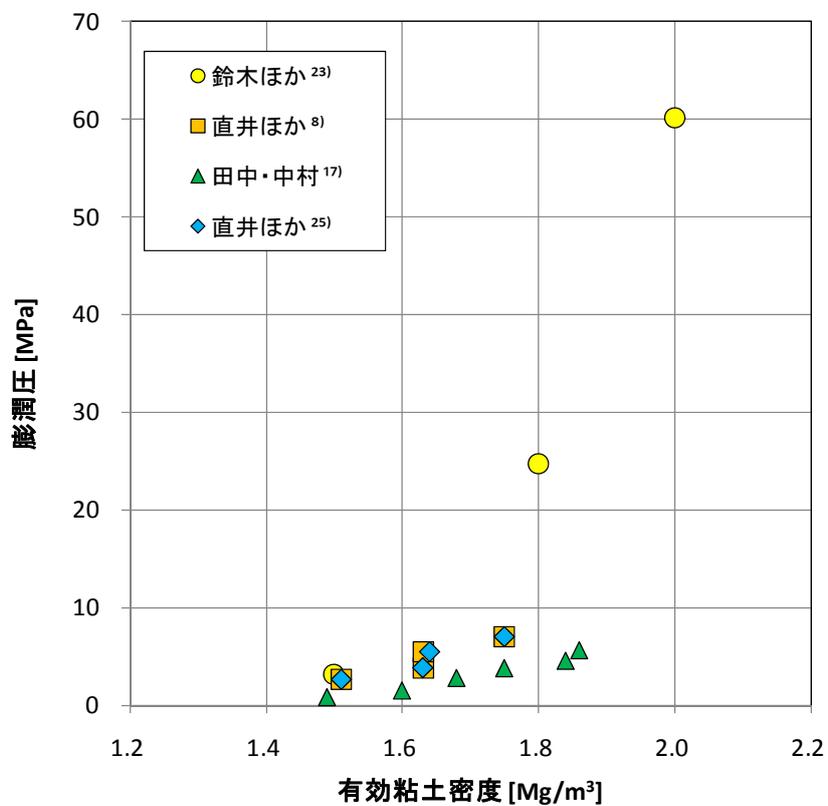


図 3.2-4 有効粘土密度と膨潤圧の関係 (MX-80、蒸留水条件)

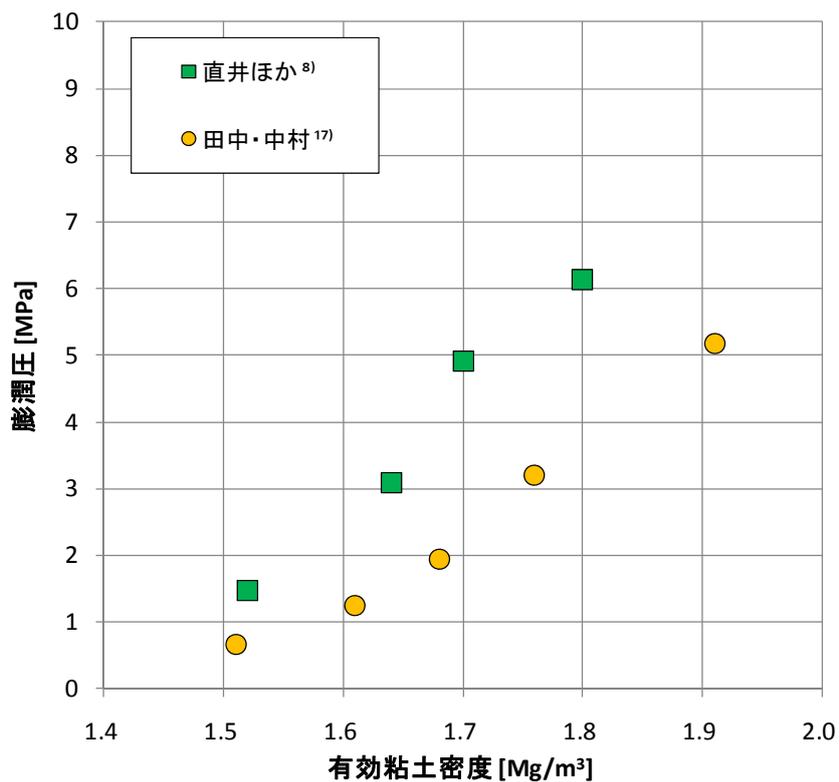


図 3.2-5 有効粘土密度と膨潤圧の関係 (MX-80、海水条件)

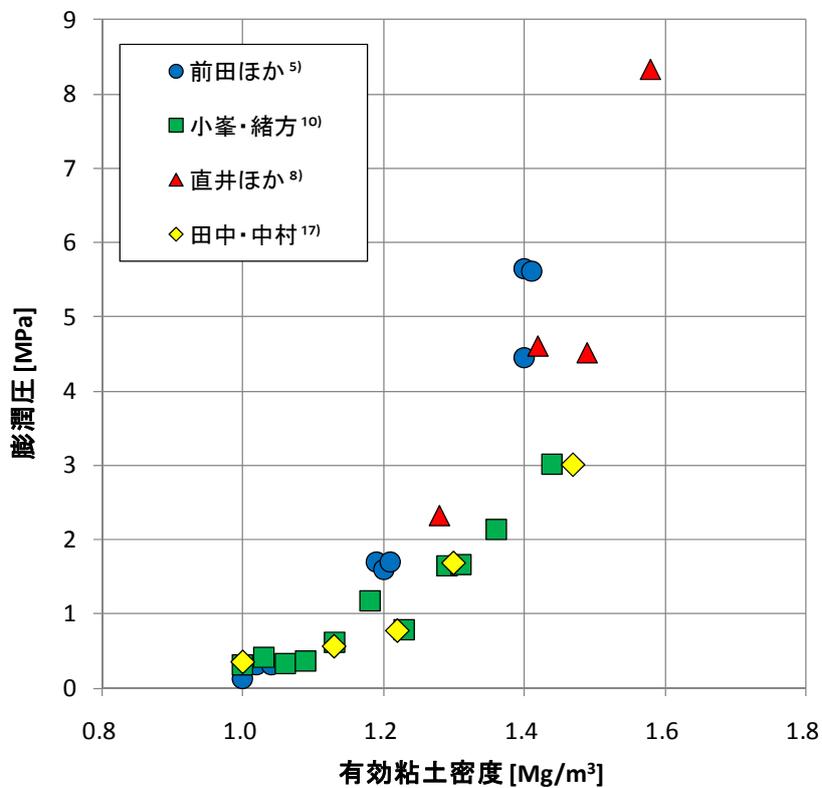


図 3.2-6 有効粘土密度と膨潤圧の関係 (クニボンド、蒸留水条件)

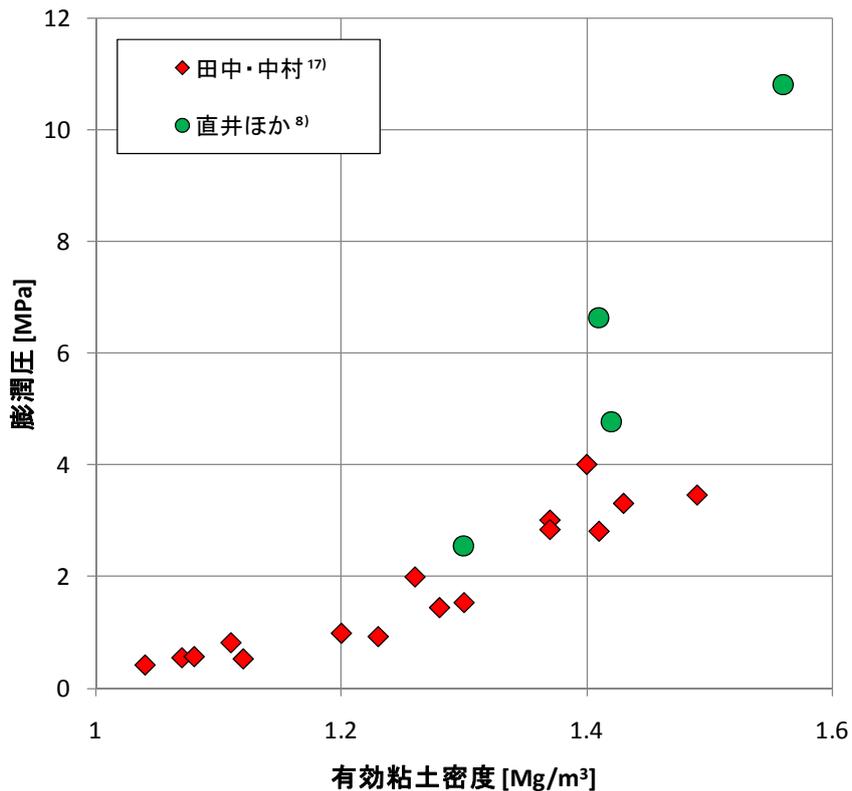


図 3.2-7 有効粘土密度と膨潤圧の関係 (クニボンド、海水条件)

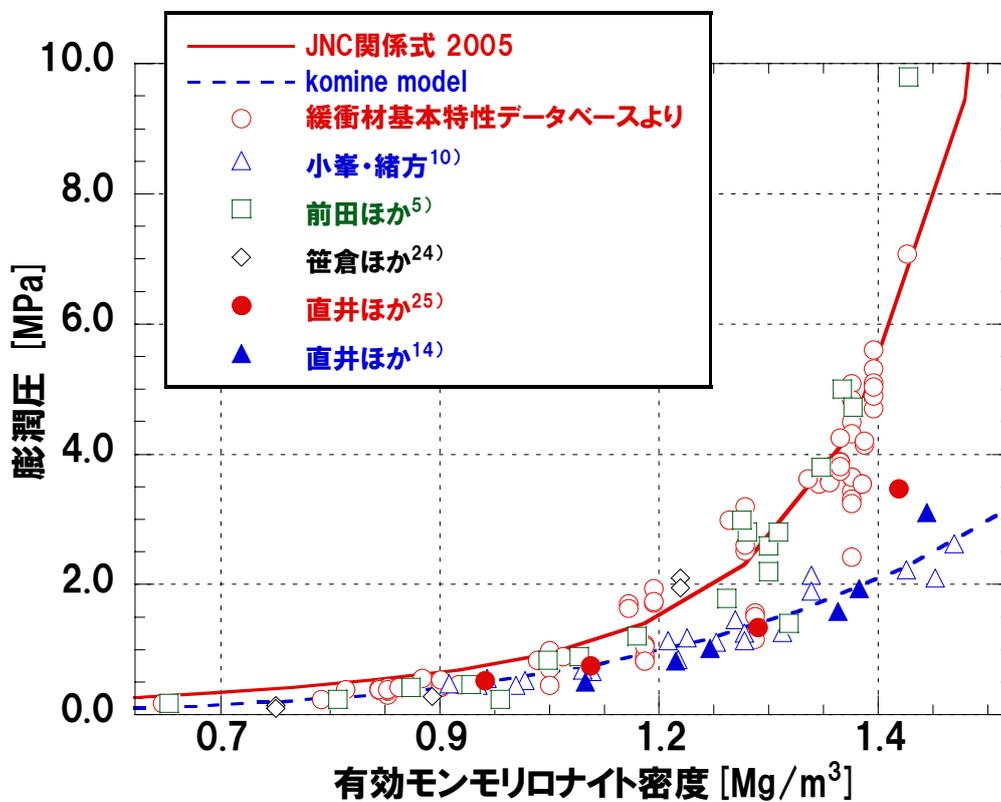


図 3.2-8 有効モンモリロナイト密度と膨潤圧の関係

3.2.3 影響要因の検討

ここでは、3.1章の透水特性と同様に、①試験法自体による影響要因、②試験手順による影響要因、③試験条件による影響要因、④供試体の特性による影響要因に区分し、既往の試験データや追加で実施した試験データをもとに、膨潤圧試験の結果のばらつきに与える影響要因について検討を行う。

(1) 試験法自体による影響要因

1) 試験法（試験装置）の影響

試験装置の影響としては、装置自体の剛性の問題や装置自体の構造の違いなどが考えられる。装置自体の剛性の問題については、膨潤圧により試験装置がひずみ、結果的に供試体の密度に影響を与えることであり、装置のひずみ量を測定し実測データを補正する必要がある。例えば、児玉ほか³⁰⁾は、ベントナイト・ケイ砂混合供試体の高温環境下での膨潤特性（膨潤圧、膨潤変形特性）を把握するための試験において、装置の熱膨張を補正するための較正試験のほかに、供試体の膨潤圧を受けて収縮すると考えられるステンレス製シャフト、キャップ、ポーラスストーン、ろ紙やペダスタルのひずみ量を測定するシステム較正試験も実施している。また、小峯・緒方⁷⁾は、砂・ベントナイト混合供試体の膨潤特性（膨潤圧、膨潤変形特性）試験で使用する装置の鋼製フレームについて、その変形量が膨潤圧の測定値にどの程度影響するかを計算し、鋼製フレームが十分剛性を有していることを確認して試験を行っている。さらに、R. Pusch and Geodevelopment AB²⁾は、膨潤圧試験装置としては、非常に剛性の高い装置が必要であり、軸荷重とひずみを測定するためにロードセルとひずみ計測用のセンサーの設置を推奨している。

装置自体の構造の違いに関しては、これまでの研究例から、拘束型の試験装置（以下、ここでは便宜的に「拘束型試験装置」という）か、または圧密試験装置に類似した装置（以下、ここでは便宜的に「圧密類似型試験装置」という）を用いたものに大きく区分できる。ここで、拘束型試験装置とは、図 3.2-1 に示す装置のうち、例えば、膨潤圧試験装置 (A) や (B) などであり、背圧を加えることも可能なものである。また、圧密類似型試験装置は、図 3.2-1 に示す装置のうち、膨潤圧試験装置 (F) や (H) であり、上部載荷板と容器内側面の間が止水されておらず、背圧を加えることができないものである。3.2.2 節の高密度部の膨潤圧データのばらつきから、膨潤圧が高い傾向を示しているデータは、拘束型試験装置を用いて得られたものであり、膨潤圧が低い傾向を示しているデータは、圧密類似型試験装置で取得されたものである。しかしながらこれらは、別々の機関で取得されたデータであるため、試験装置の違いだけではなく、用いたベントナイトの違いや温度条件など、様々な要因が関係していることが考えられる。そこで、モンモリロナイト含有率や陽イオン交換容量等が等しい同一のベントナイトを用いて、水質、温度条件等を一致させ、装置の違いのみの影響を把握する目的で、圧密類似型試験装置を用い膨潤圧試験を実施した。また、本試験では供試体の飽和化の影響に関する観点も考慮して実施した。

(a) 装置の違いによる影響に関する再確認試験

① 試験条件及び方法

本試験で使用したクニゲル V1 の物理化学特性を表 3.2-1 に、また、膨潤圧試験結果に及ぼす試験条件（装置の違いなど）の影響を調べるために電中研が実施した追加試験の試験条件一覧を表

3.2-2 に示す。表 3.2-2 に示す全ての試験は、クニゲル V1 単体で実施しており、ケイ砂等は混合していない。通水溶液には、イオン交換水を使用し、試験は 23～25℃で制御した温度条件下で実施した。表 3.2-2 には拘束型試験装置による試験ケースと圧密類似型試験装置による試験ケースを示した。ここでは、圧密類似型試験装置による試験ケースについて述べ、拘束型試験装置の結果に関しては、「(2) 試験手順による影響」以降で後述する。

試験は、圧密類似型試験装置を用い膨潤圧試験を実施した。試験装置の概略を図 3.2-9 に示す。供試体は、アムスラーを用い、上下面加圧により圧縮成型した。成型後、アムスラーより、試験リング内にスライドして設置する。供試体サイズは、直径 60mm、高さ 5mm である。膨潤圧は、上部载荷ロードとフレームの間に設置されたロードセルにより測定した（写真 3.2-1）。また、試験ケース B-0-1～B-0-4 については、試験時の鉛直方向への変位を変位計で計測し密度の補正を行った。試験ケース B-1-1～B-1-4 については、三軸セルを設置したため鉛直変位を計測することができなかった。しかしながら、鉛直変位を計測した B-0-1～B-0-4 の変位量は、0.009～0.118mm 程度であり、この結果から鉛直変位による乾燥密度の変化の影響は小さいと考えられる。試験手順については、飽和化の影響を調べるため、試験ケース B-0-1～B-0-4 と B-1-1～B-1-4 では、真空引きの有無及び給水方法が異なる。これらの試験手順は以下のとおりである。

【試験ケース B-0-1～B-0-4】

- ・ 締固めた供試体を作製し、リング内にスライドさせ、装置にセットした後、供試体の上下端面からイオン交換水を給水させ、膨潤圧を測定した。なお、給水は大気圧条件下で実施した。試験終了後は、含水比から飽和度を推定した。

【試験ケース B-1-1～B-1-4】

- ・ 締固めた供試体を作製し、リング内にスライドさせ、装置にセットした後、真空ポンプに接続し、真空近くまで減圧した状態で 1 日間放置した。その後、炭酸ガスを供試体内部に充填し 3 日間放置した後、供試体の下部よりイオン交換水を通水し、膨潤圧を測定した。なお、通水は大気圧条件下で実施した。試験終了後は、含水比から飽和度を推定した。

表 3.2-1 試験に使用したクニゲル V1 の物理化学特性

試料名	クニミネ工業製 クニゲル V1	
ロット No.	303292	
自然含水比 [%]	10.4～11.1	
土粒子密度 [Mg/m ³]	2.744	
メチレンブルー吸着量 [mmol/100g]	72	
モンモリロナイト含有率 [wt%]	51.4	
浸出陽イオン [meq/100g]	Na ⁺	58.4
	K ⁺	2.0
	Mg ⁺⁺	2.8
	Ca ⁺⁺	42.4
	Total	105.7

表 3.2-2 試験条件一覧

試験装置	着目した試験条件	試験ケース名	有効粘土密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)	初期飽和度 (%)	試験後の飽和度 (%)	供試体寸法 (mm)	飽和のための給水条件	膨潤圧 (MPa)		
拘束型試験装置	基本ケース	A-0-1	1.217	11.2 (自然含水比)	24.4	106.0	高さ 10 直径 60	供試体内真空後、 下端から一方向給水・透水	0.347		
		A-0-2	1.417		32.7	103.6			0.755		
		A-0-3	1.612		43.7	103.6			2.687		
	給水条件	A-1-1	1.210	7.9 (自然含水比)	17.0	107.2 ^{※1}		高さ 10 直径 60	供試体内大気圧のまま上下両方向の給水のみ	0.252	
		A-1-2	1.408		22.7	106.6 ^{※1}				0.541	
		A-1-3	1.600		30.1	108.1 ^{※1}				1.836	
	初期含水比	A-2-1	1.220	22.9	50.2	102.3			高さ 10 直径 60	供試体内真空後、 下端から一方向給水・透水	0.442
		A-2-2	1.401	19.2	54.9	108.2					0.769
		A-2-3	1.592	16.3	61.7	104.9					2.137
		A-2-4	1.216	35.0	76.4	103.0	0.462				
		A-2-5	1.389	27.0	75.8	101.1	0.925				
		A-2-6	1.617	21.2	83.2	103.5	2.464				
	初期乾燥密度の不均一性	A-3-1	平均 1.399 (1.593, 1.404, 1.200)	11.1 (自然含水比)	平均 3.26 (42.2, 32.0, 23.7)	102.9 ^{※2}	高さ 30 直径 60	供試体内真空後、 下端から一方向給水のみ	0.605		
		A-3-2	平均 1.593 (1.683, 1.594, 1.501)		平均 42.5 (48.4, 42.3, 36.9)	93.5 ^{※2}			2.191		
		A-3-3	平均 1.598 (1.788, 1.600, 1.406)		平均 43.9 (57.1, 42.7, 32.0)	90.8 ^{※2}			2.128		
	圧密類似型試験装置	基本ケース	B-0-1	1.214	11.2 (自然含水比)	24.3	130.3	高さ 5 直径 60	供試体内大気圧のまま上下両方向の給水のみ	0.342	
			B-0-2	1.420		32.9	124.9			0.752	
			B-0-3	1.609		43.5	131.2			1.379	
			B-0-4	1.808		59.3	167.9			2.410	
		給水条件	B-1-1	1.206		23.8	126.3		高さ 5 直径 60	供試体内真空後、 下端から一方向給水のみ	0.196
			B-1-2	1.399		31.5	132.2				0.389
B-1-3			1.590	42.3		147.9	0.914				
B-1-4			1.796	58.2		162.5	2.164				

※1：上表中の膨潤圧測定後、背圧を変化させて、その後試験を終了し、供試体を取り出して飽和度を測定したため、上記膨潤圧測定時の飽和度は測定されていない。

※2：試験後、供試体内の含水比分布を測定するため、供試体を 2mm 程度の厚さにスライスした。この含水比は、測定した個々のスライスの含水比の平均値から算出した。

注) 上記表中の試験ケースで用いた試料はいずれもクニゲル V1 単体である。したがって、各供試体の有効粘土密度は、各供試体の乾燥密度に等しい。

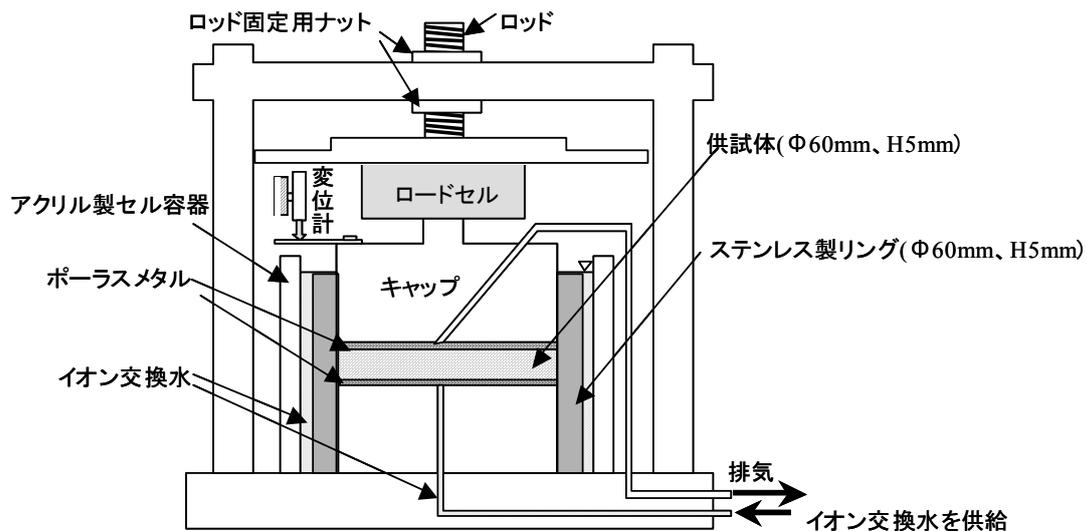


図 3.2-9 圧密類似型試験装置の概略



モーラー式 (上下面加圧 (ピストン、モーラー)) リングへスライドさせた供試体 試験装置へのリングの設置



内セルの設置状況 試験開始前の様子

写真 3.2-1 試験状況

② 試験結果

経過時間と膨潤圧及び軸変位量の関係を図 3.2-10～図 3.2-12 に、また、有効粘土密度と膨潤圧の関係に及ぼす試験装置と給水方法の影響を図 3.2-13 にそれぞれ示す。図 3.2-13 によれば、いずれの試験装置も給水方法によって膨潤圧の値が変化するが、有効粘土密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ の場合、圧密類似型試験装置による膨潤圧は拘束型試験装置で得られた膨潤圧よりも小さい。このことから、モンモリロナイト含有率などが等しく、同一の材料を使用して試験を実施した場合でも試験装置

の違いにより膨潤圧が異なる傾向があることが示された。この原因については、以下に考察する。

表 3.2-2 によれば、図 3.2-13 に示した試験ケースの供試体の試験後に測定した飽和度は、拘束型試験装置で 103%~107%、圧密類似型試験装置で 125%~167%であり、いずれも 100%を超えている。これは、試験後の除荷により供試体が吸水膨張したことによると思われる。除荷による吸水膨張は供試体高さが小さいほど迅速に生じるため、供試体高さが 5mm の圧密類似型試験装置では、供試体高さが 10mm の拘束型試験装置の場合より、試験後の供試体の飽和度の測定値が大きくなりやすいものと思われる。このことは、寸法の小さなベントナイト供試体の試験後の飽和度測定には注意が必要であることを示すとともに、試験後の飽和度測定結果に基づく試験中の供試体の飽和度の評価にも注意すべきこと、図 3.2-13 に示した膨潤圧の測定結果への供試体飽和度の影響を定量的に議論することは困難であることを示している。

「(3) 試験条件による影響要因」の「(1) 供試体寸法の影響」で後述するように供試体寸法は膨潤圧の測定結果に影響を及ぼし、その影響程度は図 3.2-21 に示すように供試体の有効粘土密度が高いほど大きくなる傾向がある。図 3.2-13 に示した膨潤圧の測定結果に影響を及ぼす試験装置の影響も有効粘土密度が比較的高い場合に生じているため、供試体寸法が影響している可能性がある。均質で寸法のみ異なる土質供試体に対する要素試験結果に差を生じさせる原因としては、粒径と供試体寸法の比の影響と自重の影響があることが知られているが、ベントナイトの粒径は通常の土質材料に比べると小さいため、膨潤圧に関する寸法効果の原因になるとは考えられない。一方、図 3.2-21 によれば供試体が扁平であるほど、膨潤圧は小さくなる傾向があり、図 3.2-13 においても、圧密類似型試験装置の供試体（高さ 5mm、直径 60mm）は、拘束型試験装置の供試体（高さ 10mm、直径 60mm）と比べると直径は同一で高さは小さく扁平であるため、図 3.2-21 と同様な傾向が表れていると解釈することができる。しかし、供試体が扁平であるほど供試体の高さ方向の有効粘土密度の変化は小さいと思われるが、図 3.2-86 に示す結果では供試体内密度が均一である方が膨潤圧は大きく、図 3.2-21 から予想される結果とは逆の結果になっている。したがって、供試体内の有効粘土密度の不均一性が図 3.2-13 に示した膨潤圧の測定結果に影響を及ぼす試験装置の影響の原因であるとは考えにくい。ところで、一般に粘土の力学特性は、密度が同一であっても正規圧密か過圧密かなどの応力履歴の違いによって異なることが知られている。これは、応力履歴による粘土の微視的構造の変化が力学特性に影響を及ぼすことを意味している。供試体寸法が異なると供試体作製時に供試体に加える応力が異なり、作製された供試体の微視的構造が異なり、そのことが膨潤圧の違いとして表れている可能性がある。したがって、図 3.2-13 や図 3.2-21 に示される試験結果の原因には、供試体作製方法の違いに伴う供試体の微視的構造の違いが考えられる。ただし、現状では微視的構造の違いが試験結果に及ぼす影響を定量的に説明することは困難である。微視的構造の違いの影響を定量的に調べるためには、一定の方法で作製した地盤から大きな寸法の供試体を切り出して膨潤圧試験を行い、膨潤圧を比較することなどが有効であると思われる。

以上に記述した理由により、図 3.2-13 に示した試験装置による膨潤圧の差の原因を特定することはできなかった。なお、給水方法等の異なる試験ケース B-0-1~B-0-4 及び B-1-1~B-1-4 のデータを比較した飽和化の影響に関する考察については、「(2) 試験手順による影響」の「(1) 飽和化の影響」にて後述する。

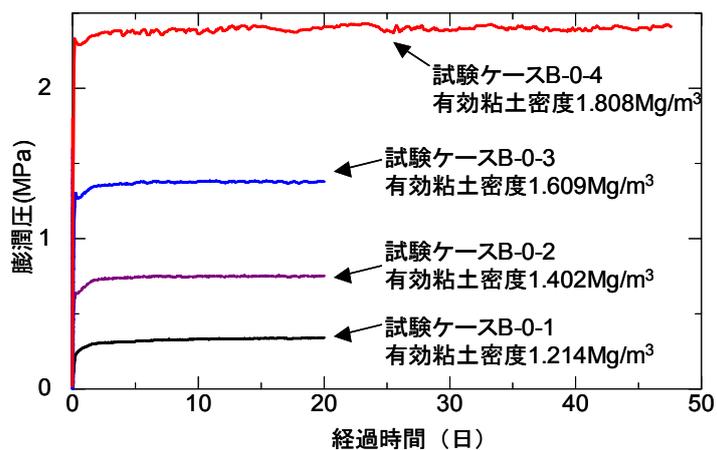


図 3.2-10 膨潤圧の経時変化 (試験ケース B-0-1～B-0-4、真空引き無し、上下両端面給水)

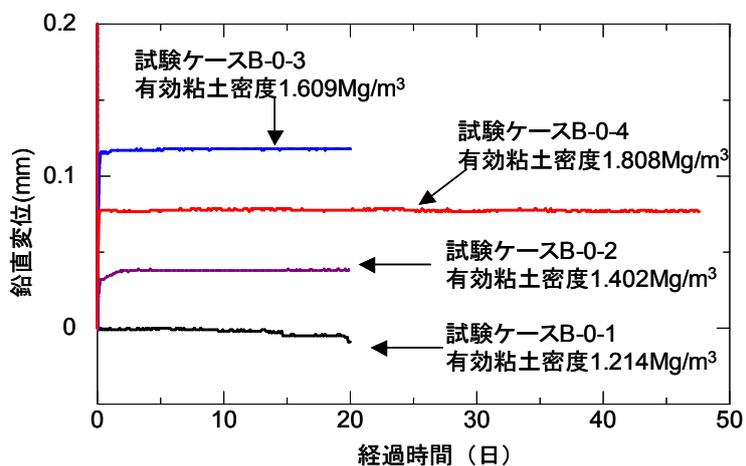


図 3.2-11 鉛直変位の経時変化 (試験ケース B-0-1～B-0-4、真空引き無し、上下両端面給水)

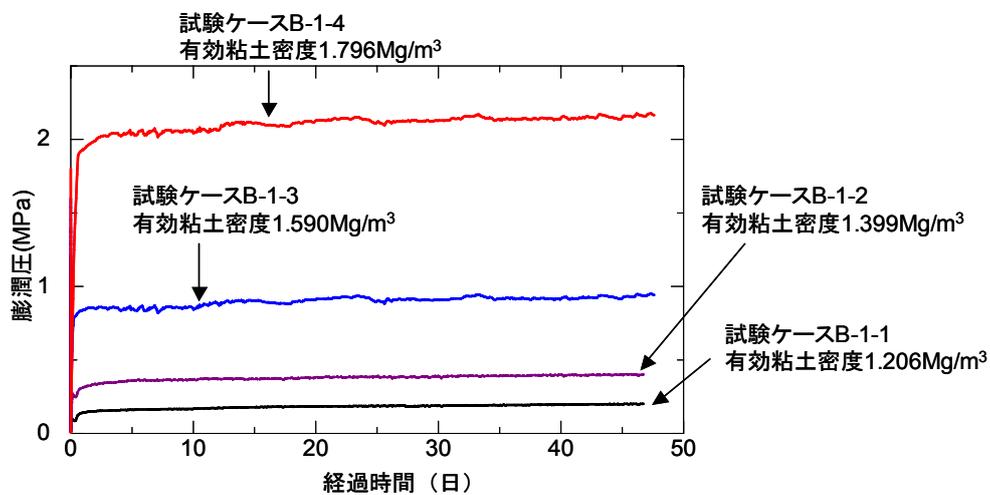


図 3.2-12 膨潤圧の経時変化 (試験ケース B-1-1～B-1-4、真空引き有り、下端給水)

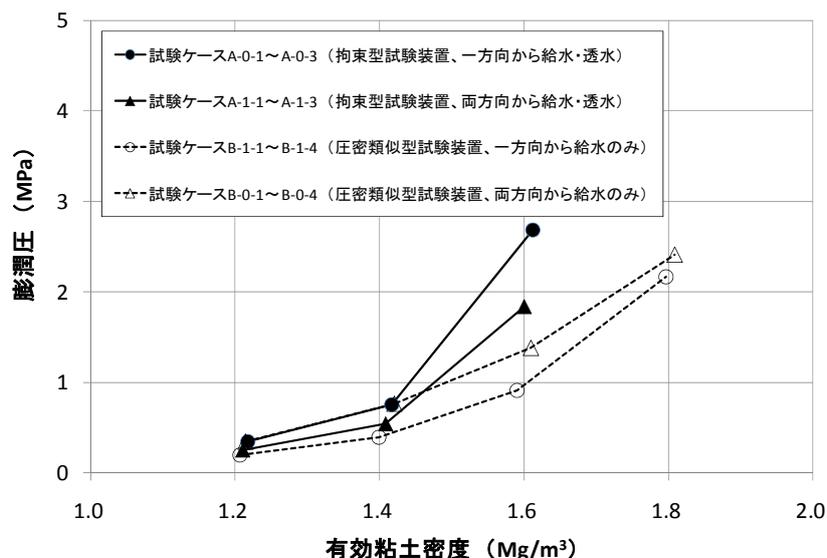


図 3.2-13 有効粘土密度と膨潤圧の関係に及ぼす試験装置と給水方法の影響

以上の結果から、装置の違いによる影響については、供試体の作製方法、初期含水比、給水方法、供試体寸法など、全ての条件を統一した実験によりデータを拡充することが必要であり、今後の課題となる。なお、試験装置は試験体の膨潤圧に見合った剛性を有するとともに、必要に応じて装置のひずみを把握するためのひずみ計を設置しなければならない。

(2) 試験手順による影響

1) 飽和化の影響

田中・中村³³⁾は、吸水後の膨潤圧に及ぼす初期の不飽和の影響について、試験結果に基づいて理論的な検討を行っている。試験に使用されたクニゲル V1 の基本的性質は表 3.2-3 であり、モンモリロナイト含有率については大きな差はなく、陽イオン交換容量については、荷重計付き箱型（本報告書で称する“拘束型試験装置”である）に用いられた材料の方が大きい。田中・中村は、拘束型試験装置と圧密類似型試験装置によって測定した膨潤圧の大きさの差は、給水方法の違いによる膨潤圧測定時の供試体の飽和度の違いであるとして、完全に飽和した時の膨潤圧と供試体内部に空気が残留した場合の膨潤圧をモデル計算している。つまり、拘束型試験装置では通水溶液を一次的に供給するため、供試体内に空気が残留せず完全に飽和するのに対して、圧密類似型試験装置では、供試体の上下両端面より給水するため、初期に供試体内に存在する空気は排出先を失い、サクシオンと空気圧がバランスするまで体積収縮するため膨潤圧測定時にも供試体は不飽和であると考えられている。図 3.2-14 は、自然含水比で締め固められたベントナイトの乾燥密度と吸水後の膨潤圧の関係が示されたものである。また、有効粘土密度 1.7Mg/m^3 、 1.8Mg/m^3 の初期飽和度(S_{w0})、さらにボイル則とサクシオン - 水飽和度関係を用いて吸水後の飽和度(S_{w1}) が計算され、式 3.2-1 による計算結果に飽和度 100% の実測膨潤圧を加えることによって得られた計算結果が同図の▲で示されている。さらに、 S_{w0} が同一で S_{w1} とした式 3.2-1 による計算結果に浸透圧による膨潤圧を加えた結果が同図の△で示されている。いずれの計算結果も実測結果と整合的である。このことから、図 3.2-14 中の○と●の差は、試験法の違いが原因である可能性を

示唆している。

$$P_s(S_{w0}, S_{w1}) = - \int_{S_{w0}}^{S_{w1}} K_d(U_c(S_w)) \frac{S_w \left[\frac{dU_c}{dS_w} \right] dS_w}{K_{dro} \left[\frac{\text{Max}[\sigma'_m, U_c]}{P_a} \right]} \quad \text{式 3.2-1}$$

ここで、 S_w は吸水過程における供試体の飽和度、 S_{w0}, S_{w1} はそれぞれ供試体作製時、吸水後の水飽和度、 $P_s(S_{w0}, S_{w1})$ は飽和度 S_{w0} で作製した供試体が吸水後に飽和度 S_{w1} に達した時の膨潤圧、 U_c はサクション、 K_d は供試体の体積弾性係数、 σ'_m は平均有効応力、 K_{dro} は定数、 P_a は規準圧力(=0.1MPa)である。

表 3.2-3 試験に使用したクニゲル V1 の基本的性質³³⁾

文献	改良標準圧密装置型 (小峯・緒方,1999)	荷重計付箱型 (田中ほか,2009.2)
土粒子の密度 (Mg/m ³)	2.79	2.79
液性限界(%)	473.9	394.3
塑性限界(%)	26.61	26.3
塑性指数	447.3	368.0
活性度	6.93	12.0
塑性比	16.81	13.98
モンモリロナイト含有率 ^{注1)} (%)	48	50
陽イオン交換容量 ^{注2)} (meq/g)	0.732	1.169
交換性 Na イオン量 ^{注3)} (meq/g)	0.405	0.642
交換性 Ca イオン量 ^{注3)} (meq/g)	0.287	0.480
交換性 K イオン量 ^{注3)} (meq/g)	0.009	0.023
交換性 Mg イオン量 ^{注3)} (meq/g)	0.03	0.024

注 1) メチレンブルー吸着量試験により測定

注 2) 交換性 Na, Ca, K, Mg イオン量の総和

注 3) 1N 酢酸アンモニウム(CH₃COONH₄)抽出法により測定



図 3.2-14 ベントナイト乾燥密度と膨潤圧の関係³³⁾

図 3.2-13 から圧密類似型試験装置ならびに拘束型試験装置における給水方法が膨潤圧に及ぼす影響を読み取ることができる。拘束型試験装置の場合、一方向から給水・透水した方が有効粘土密度 1.6Mg/m^3 における膨潤圧は大きく、有効粘土密度 1.2Mg/m^3 ならびに 1.4Mg/m^3 における膨潤圧は、一方向から給水・透水した場合と両方向から給水・透水した場合とではほぼ同一である。有効粘土密度 1.6Mg/m^3 の場合は、一次元的な給水・透水により飽和度が高まり、膨潤圧が高まったものと思われる。一方、圧密類似型試験装置の場合、拘束型試験装置の場合とは異なり、一方向から給水した場合の膨潤圧は両方向から給水した場合の膨潤圧より小さい。したがって、膨潤圧に及ぼす給水方法の影響を今回行った追加実験結果から明確にすることはできなかった。また、表 3.2-2 に試験後の供試体の飽和度が記されているが、「(a) 装置の違いによる影響に関する再確認試験」で述べたように、圧密類似型試験装置では、供試体が高さ 5mm と小さいため、試験後の除荷に伴う吸水膨張により試験後の飽和度の測定値は過大となっている。また、表 3.2-2 の※1 に記したように、試験ケース A-1-1、A-1-2、A-1-3 では膨潤圧測定時の飽和度は測定されていないなど、図 3.2-13 に示した実験結果に及ぼす供試体飽和度の影響を定量的に議論することは困難である。しかし、供試体の飽和度が低下すれば、膨潤圧は低下すると考えるのが合理的であるため、供試体の飽和度を高める努力はすべきである。

R. Pusch and Geodevelopment AB¹⁾は、試験期間の影響について、次のようなことを述べている。「拘束状態において高密度の圧縮成型体を用いた膨潤圧試験では、水和途中で最大値をとり、一旦減少した後、再度増加して第二の最大値に達する挙動を示す。また、密度が低い場合では、膨潤圧は単調に増加するという傾向を示す。さらに、供試体の密度や寸法などにもよるが、膨潤圧が 1 週間で十分平衡に達する場合や、数週間あるいは数か月を要する場合などがある。このことから、膨潤圧の発生挙動のみから供試体の飽和の可否を判断するのではなく、十分な給水時間を確保するなど、供試体の飽和化に十分留意して試験を進めることが必要である。」また、河野・西垣の方法⁴³⁾などのように背圧の変動により試験時の供試体の飽和度を測定する方法があるため、こうした方法により供試体の飽和を確認することが有効である。

(3) 試験条件による影響要因

1) 供試体の寸法の影響

鈴木・藤田は³⁾、クニゲル V1 単体を用い、乾燥密度 1.8Mg/m^3 を対象として、供試体の高さ と直径の比（供試体の高さ÷直径であり、以下縦横比と記載する）をパラメータとした膨潤圧試験を実施している。供試体の作製は、上面加圧による圧縮成型であり、初期含水比は約 10%、供試体の直径は 10、20 及び 30mm の 3 種類とし、高さは 5、10、20、30、40、及び 60mm、通水溶液は蒸留水、試験温度は室温としている。なお、試験に用いられた装置は、拘束型試験装置である。試験の結果から、供試体の縦横比が大きいほど膨潤圧も大きくなっていること（図 3.2-15）、供試体作製時の成型圧力は縦横比が大きくなるにしたがって大きく、膨潤圧は成型圧力に比例して大きくなることを示している（図 3.2-16）。なお、供試体の縦横比に比例して膨潤圧が増大する理由の一つとして、供試体作製時の密度のばらつきを挙げている。具体的には、上面加圧により圧縮成型された供試体は、圧縮面である供試体上部の密度が高くなり、上下面加圧により圧縮成型された供試体の場合は、供試体上下面の密度が高く中央部の密度が低くなるといった試験結果

を示している。それらの結果から、圧縮成型により生じた高密度領域が膨潤圧の増大に寄与していることを示唆している。なお、密度の不均一性に関する検討の概要については、「(4) 2) (b) 密度不均一性の影響」で後述する。

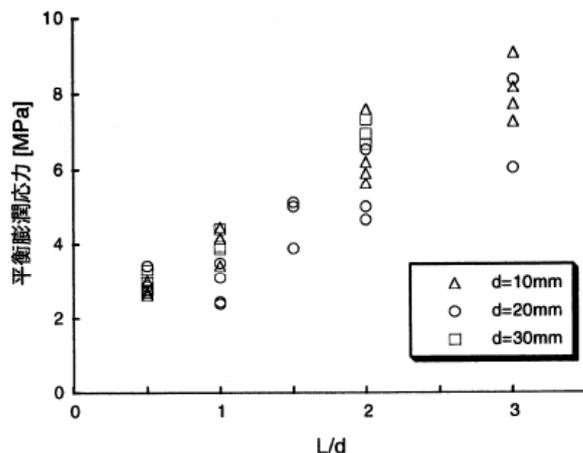


図 3.2-15 供試体の直径に対する高さの比と膨潤圧の関係³⁾

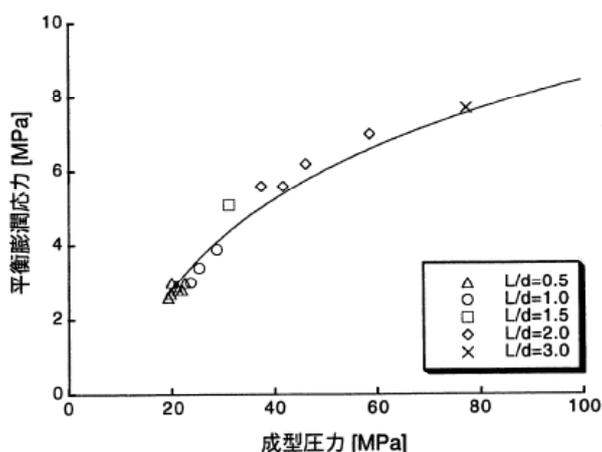


図 3.2-16 供試体作製の際の圧縮成型圧力と膨潤圧の関係³⁾

直井ほか¹⁴⁾は、異なる寸法の供試体を用いた膨潤圧試験を行っている。試験で用いられた試料はクニゲル V1 であり、ケイ砂は混合せず、供試体作製時の含水比は、7.76%となっている。供試体の寸法は、直径 28mm×高さ 10mm、直径 60mm×高さ 10mm の 2 種類が用いられている。試験に用いられたベントナイトの基本的性質は、表 3.2-4 のとおりである。図 3.2-17 に試験で用いられた試験装置（圧密類似型試験装置）の概要を示す。試験の手順としては、所定の乾燥密度（1.4～1.9Mg/m³）になるよう専用の締固め装置で圧縮成型した後、試験で使用するステンレス製リングへ移動させ、作製した供試体をリングと一緒に図 3.2-17 に示す装置に移動し、ピストン及びキャップを載せ、蒸留水をアクリル製セル水槽及びリング内に供給し試験を開始している。供試体の鉛直方向の変位量、鉛直反力は、それぞれ変位計及びロードセルによって計測されている。試験期間は、1 週間とされている。なお、膨潤圧の経時変化から膨潤圧の最大値（以後、最大膨潤

圧と記述する) が求められている (図 3.2-18)。試験により得られた最大膨潤圧と初期乾燥密度の関係から、供試体の直径が異なる条件でも、初期乾燥密度によらず最大膨潤圧には大きな差は認められない結果が得られている (図 3.2-19)。このことから、直井ほか¹⁴⁾は、ベントナイト系材料の膨潤圧に及ぼす供試体直径の影響は、極めて小さいことを示唆している。

田中ほか⁴⁰⁾は、直径 60mm と直径 200mm のクニゲル V1 供試体の膨潤圧を拘束型試験装置を用いて測定している。いずれの供試体の高さも 20mm であり、有効粘土密度は 1.391~1.426Mg/m³ でほぼ同一である。測定結果によれば、直径 60mm と直径 200mm の平均膨潤圧は、それぞれ 0.668MPa、0.680MPa であり、ほとんど一致しているという結果を得ている。

表 3.2-4 ベントナイトの基本的性質¹⁴⁾

名称	クニゲル V1
タイプ	Na 型
土粒子密度 (Mg/m ³)	2.79
液性限界 (%)	458.1
塑性限界 (%)	23.7
塑性指数	434.4
モンモリロナイト含有率 (%)	57
陽イオン交換容量 (meq/g)	0.732
交換性 Na イオン量 (meq/g)	0.405
交換性 Ca イオン量 (meq/g)	0.287
交換性 K イオン量 (meq/g)	0.009
交換性 Mg イオン量 (meq/g)	0.030

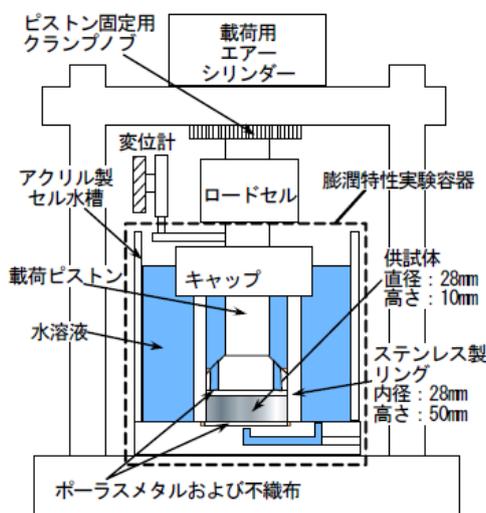


図 3.2-17 試験装置の概要 (圧密類似型試験装置)¹⁴⁾

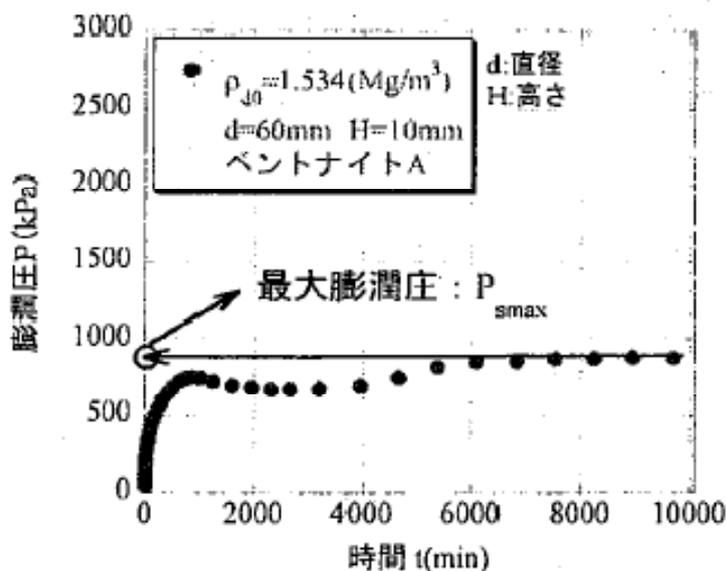


図 3.2-18 膨潤圧の経時変化曲線¹⁴⁾

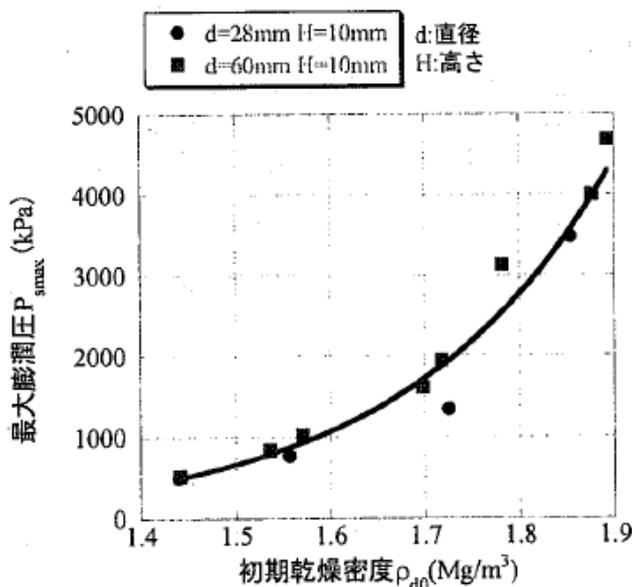


図 3.2-19 最大膨潤圧に及ぼす供試体直径の影響¹⁴⁾

棚井・菊池³²⁾は、供試体の寸法による膨潤圧への影響について把握するため、図 3.2-20 に示すような拘束型試験装置を用い、膨潤圧試験を実施している。試験には、クニゲル V1 単体を使用し、供試体の直径を 20mm、高さを 10、20、30 及び 40mm として、乾燥密度 1.2、1.4、1.6 及び 1.8 Mg/m³を対象としている。また、供試体の作製は、上面加圧による圧縮成型により行い、試験には蒸留水を用い、1000～5000 時間程度の測定を実施している。棚井・菊池³²⁾は、試験結果の取りまとめに際して、供試体の縦横比と膨潤圧との関係を整理している。試験の結果（図 3.2-21）から、①乾燥密度 1.4 Mg/m³までは供試体の縦横比の違いによる影響はほとんど見られ

ないのに対して、乾燥密度 1.8 Mg/m^3 では供試体の縦横比が大きくなるのに伴い膨潤圧も増加する傾向を示すこと、②乾燥密度 1.6 Mg/m^3 については、縦横比が 1.5 程度までは膨潤圧の変化が見られないのに対して、1.5 以上で膨潤圧が増大する結果となっていることが示されている。また、これらの影響に関する理由の一つとして、供試体作製時の密度勾配があげられている。

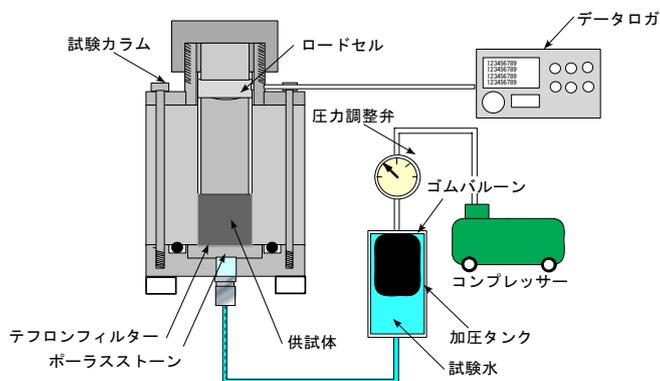


図 3.2-20 拘束型試験装置概略図³²⁾

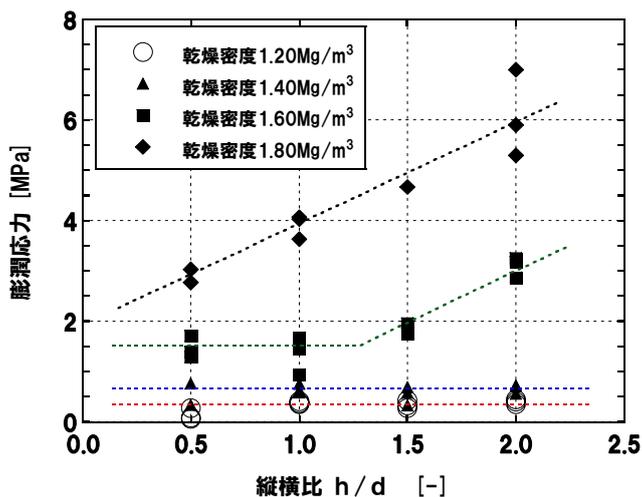


図 3.2-21 供試体の縦横比と膨潤圧の関係³²⁾

田中・廣永⁴¹⁾は、乾燥密度 1.6 Mg/m^3 のクニゲル V1 原鉱を締固めた直径 60mm で高さを 20mm、40mm、80mm（縦横比は、それぞれ 0.33、0.67、1.33）の 3 通りに変化させた供試体の膨潤圧を拘束型試験装置を用いて測定した（図 3.2-22）。図 3.2-22 より膨潤圧は「供試体の高さとともにわずかに増加するかまたは一定であった」としている。この試験結果は、図 3.2-21 に示される棚井・菊池の試験結果と整合している。

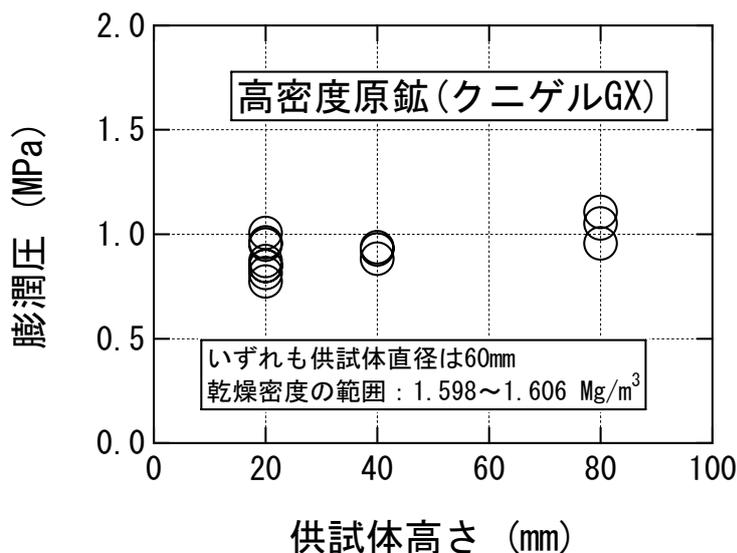


図 3.2-22 供試体の縦横比と膨潤圧の関係⁴¹⁾

以上、これまでの研究例からは、 1.6Mg/m^3 程度以上の密度になると供試体の寸法が膨潤圧に影響するというデータと、供試体の寸法による影響は極めて小さいというデータがそれぞれ得られている。そこでこれらの結果を再確認するため、再度供試体の寸法をパラメータとした膨潤圧試験を行った。試験に際しては、結果のばらつきの大きい有効粘土密度（乾燥密度） 1.8Mg/m^3 を対象に行った。以下にそれらの結果を示す。

(a) 供試体寸法の影響に関する再確認試験

① 試験条件及び方法

試験で使用したベントナイトは、クニゲル V1 単体であり、その物理特性及び粒度構成を表 3.2-5 に化学特性を表 3.2-6 に示す。試験に使用する供試体は、上面加圧による圧縮方法により成型し、供試体下面より蒸留水を給水し膨潤圧の測定を行った。膨潤圧は、写真 3.2-2～写真 3.2-5 に示すように、試験容器のピストンと反力枠の間に設置したロードセル（東京測器製）にて約 3000 時間計測した。また、写真 3.2-3 及び写真 3.2-5 の装置では、 $1/100\text{mm}$ の精度を有した変位計を設置し、ピストンの変位量を測定した。試験は、 $20^\circ\text{C}\pm 3^\circ\text{C}$ で制御された温度条件下で行った。試験条件は表 3.2-7 に示した。なお、直径 20mm、直径 50mm 及び直径 100mm の供試体を用いた試験装置は拘束型試験装置であり、直径 60mm の供試体を用いた試験装置は圧密類似型試験装置に該当する。

試験に際しては、供試体の寸法以外に以下に示す観点も考慮した。

- ・ 「(4) 2) (b) 密度不均一性の影響」での結果も踏まえ、上面加圧による圧縮成型方法でのフィルターの有無を対象とした密度分布の影響
- ・ 圧縮成型治具内で供試体を圧縮成型後そのまま膨潤圧試験を始める場合と、成型治具から供試体を一旦取り出し、別の容器にて膨潤圧試験を開始した場合の影響（後者の供試体の有効粘土密度は、別の容器に移し替える都合上、当初の 1.8Mg/m^3 より若干高密度に作製し、膨潤した段階で所定の密度となるようにした。具体的に直径 50mm、高さ 10mm

の試験を一例とすれば、圧縮成型後、治具から取出した時点の供試体の直径及び高さは、個々にリバウンド量などが異なることから、直径が 49.50～49.84mm、高さは 10.02～10.08mm であった。試験容器に移し替え時の有効粘土密度は、1.797～1.824 Mg/m³ 程度となる。また、試験終了後の重量測定によって算出された有効粘土密度は、1.793～1.802 Mg/m³ 程度である。)

表 3.2-5 試験に使用したクニゲル V1 の物理特性及び粒度構成

試料名		クニゲル V1 [®]
ロット NO.		304464
物理特性	自然含水比 [%]	6.8～8.5
	pH	10.0
	膨潤力 [ml/2g]	20
	土粒子密度 [Mg/m ³]	2.733
	液性限界 [%]	486.0
	塑性限界 [%]	31.4
	塑性指数 [%]	454.6
粒度構成	最大粒径 [mm]	0.075
	礫分 [%]	0
	砂分 [%]	0.0
	シルト分 [%]	13.2
	粘土分 [%]	86.8

表 3.2-6 試験に使用したクニゲル V1 の化学特性

試料名		クミネ工業 (製) クニゲル V1 [®]
メレンブル吸着量	[mmol/100g]	78
モンモリロナイト含有率	[wt%]	55.7
浸出陽イオン	Na ⁺ [meq/100g]	67.8
	K ⁺ [meq/100g]	4.7
	Mg ⁺⁺ [meq/100g]	2.7
	Ca ⁺⁺ [meq/100g]	47.5
	Total [meq/100g]	122.7
陽イオン交換容量	[meq/100g]	76.2
化学組成 [wt%]	SiO ₂	69.7
	TiO ₂	0.14
	Al ₂ O ₃	15.8
	Fe ₂ O ₃	1.69
	MgO	2.19
	CaO	2.00
	Na ₂ O	2.04
	K ₂ O	0.24
	MnO	0.04
	ZnO	0.01
	SrO	0.02
	ZrO ₂	-
	CuO	0.01
	Cr ₂ O ₃	0.02
	P ₂ O ₅	0.03
	Y ₂ O ₃	0.01
	BaO	0.17
	Ig-loss[%]	5.29
	Total	100.0
Cl	-	
SO ₄	0.61	



写真 3.2-2 直径 20mm 試験容器 (拘束型試験装置)

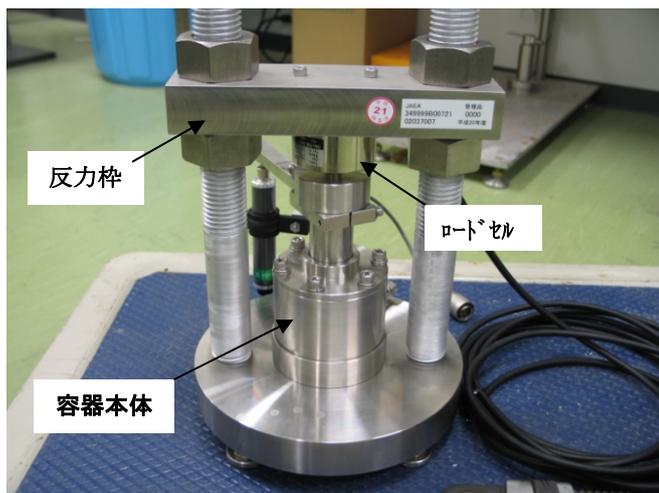


写真 3.2-3 直径 50mm 試験容器 (拘束型試験装置)

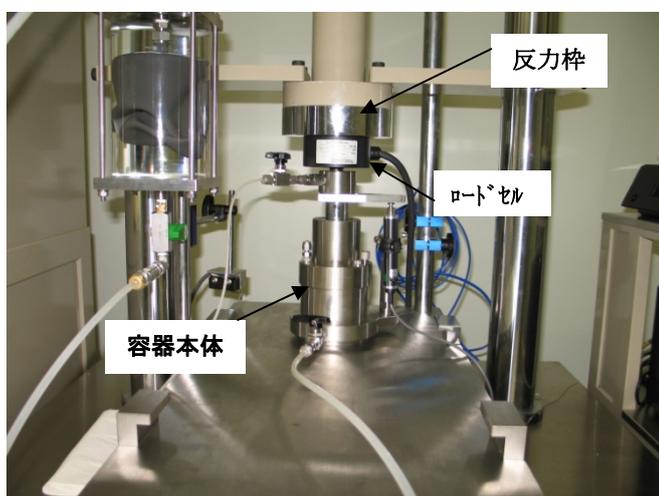


写真 3.2-4 直径 60mm 試験容器

(通常の圧密試験装置を転用しているため、圧密類似型試験装置に分類される)

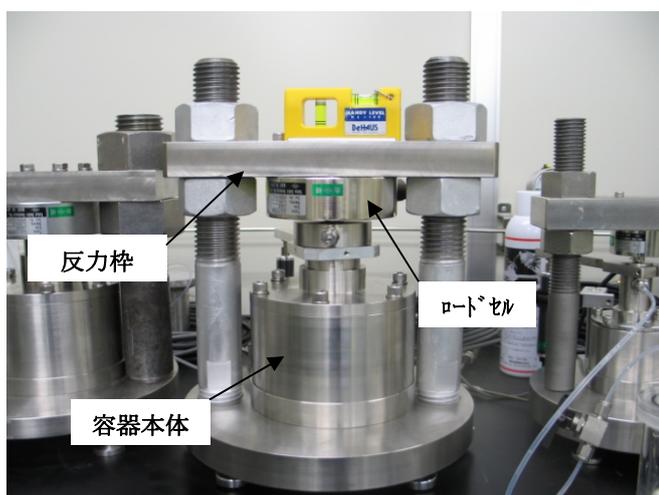


写真 3.2-5 直径 100mm 試験容器 (拘束型試験装置)

表 3.2-7 供試体の寸法を考慮した膨潤圧試験条件

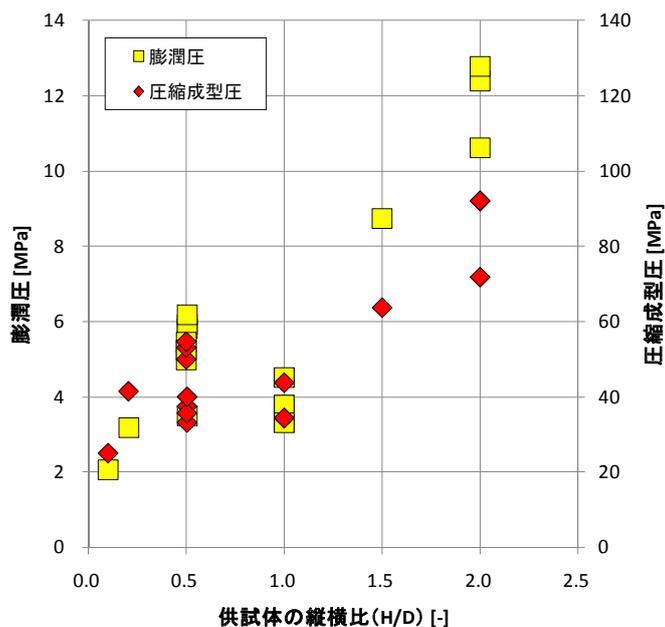
供試体の直径 [mm]		φ 20	φ 50	φ 60	φ 100
供試体寸法 [mm]	試験 No. A : 上面加圧による圧縮成型方法、フィルターなし、成型後そのまま試験を実施	φ 20×h10 (試験 No. A20)	φ 50×h10 (試験 No. A50)		
	試験 No. B : 上面加圧による圧縮成型方法、フィルターなし、一旦成型供試体を取り出して試験を実施	φ 20×h10 (試験 No. B20-1) φ 20×h20 (試験 No. B20-2) φ 20×h30 (試験 No. B20-3) φ 20×h40 (試験 No. B20-4)	φ 50×h10 (試験 No. B50)		φ 100×h10 (試験 No. B100-1) φ 100×h50 (試験 No. B100-2)
	試験 No. C : 上面加圧による圧縮成型方法、フィルター有り、一旦成型供試体を取り出して試験を実施	φ 20×h10 (試験 No. C20)	φ 50×h5 (試験 No. C50-1) φ 50×h10 (試験 No. C50-2)	φ 60×h20 (試験 No. C60)	φ 100×h10 (試験 No. C100-1) φ 100×h50 (試験 No. C100-2)
試験温度		20℃±3℃			
初期含水比 [%]		6.5～8.5	6.5～14.5	6.7	7.0～14.5

② 試験結果

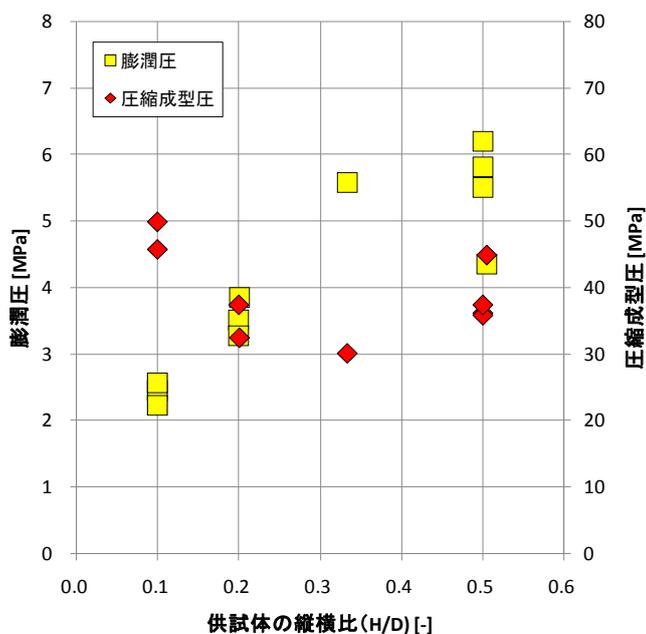
試験 No.B (フィルター無し) 及び試験 No.C (フィルター有り) の試験結果をもとに、供試体の縦横比 (供試体高さ と 供試体直径の比であり、以下、“H/D” という) と膨潤圧及び圧縮成型圧力の関係で整理したものを図 3.2-23 に示す。これらの結果から、3.2.2 節の文献調査で示した既存の研究^{3), 25), 32)}と同様に H/D に比例して膨潤圧が大きくなる傾向を示す結果が得られた。また、H/D と圧縮成型圧力、圧縮成型圧力と膨潤圧の関係に関しては、試験 No.B では H/D に比例して圧縮成型圧力が増大し、かつ、圧縮成型圧力に比例して膨潤圧も大きい結果となった。このことは、文献調査の結果でも示した研究例³⁾と同様である。一方、試験 No.C に関しては、H/D と圧縮成型圧力、ならびに圧縮成型圧力と膨潤圧との相関性は見られなかった。このふたつの試験の違いは、圧縮成型治具の底板に 5 μm のフィルターを設けているか否かである。このような結果を踏まえると、圧縮成型圧力の増加は、供試体と容器壁面の摩擦もあるが、成型時における供試体内部の空気の排出の抵抗が大きく寄与していることが推測される。なお、供試体の試験後に測定した飽和度は、106%～119%であり、いずれも 100%を超えている。

一方、前述した鈴木・藤田³⁾により示唆されている密度不均一性の影響に関して検討するため、試験 No.B (上面加圧による圧縮、フィルター無し、開放型) を一例として、試験終了後の密度分布測定結果 (図 3.2-24～図 3.2-26) を整理した。圧縮成型時の密度分布データがないことから、試験前後の密度比較はできないため、どの程度密度が変化したかは不明であるが、試験終了後のばらつきとしては、およそ 1.6～2.0Mg/m³ の範囲であった。また、必ずしも供試体上部が高密度で下部が低密度になっているわけでもなく、密度分布の傾向もばらばらである。図 3.2-23 (No.B) と図 3.2-24～図 3.2-26 の結果を照らしてみると、密度のばらつきの小さかった直径 20mm、高さ 20mm (H/D=1.0) の供試体の膨潤圧は、供試体縦横比と膨潤圧の全体的な傾向に比べて若干膨潤

圧が小さい。この結果から密度不均一性が膨潤圧に影響を与えている可能性も否定できないが、現時点のデータのみでは確定できない。さらに、後述する「(4) 2 (b) 密度不均一性の影響」では、異なった密度の供試体を重ねた試験を行い、平均的な密度の膨潤圧が発生するという結果が得られている。したがって、本試験の密度分布測定結果から供試体の平均密度を算出し、H/D の関係で整理した (図 3.2-27)。同図には膨潤圧も併記したが、ここでの試験結果からは、平均乾燥密度と膨潤圧との相関性は確認できなかった。

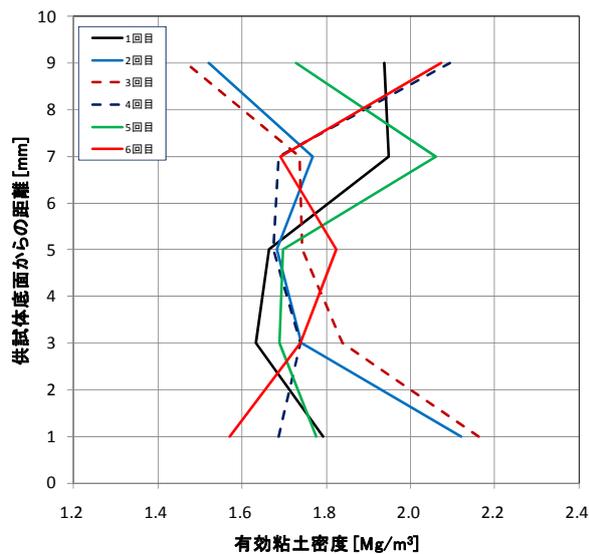


No. B (上面加圧による圧縮成型、フィルター無し)

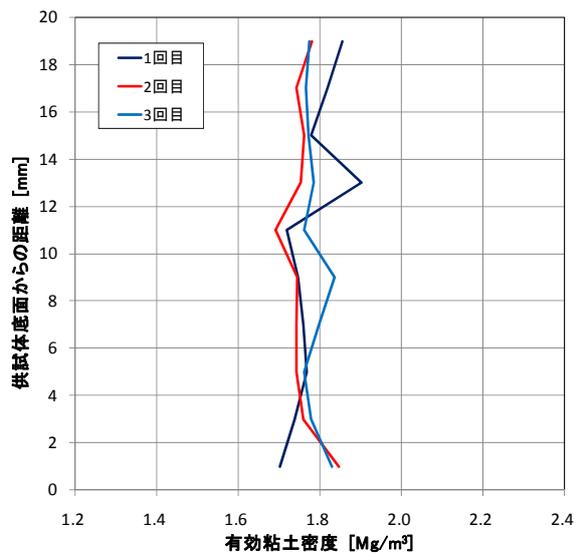


No. C (上面加圧による圧縮成型、フィルター有り)

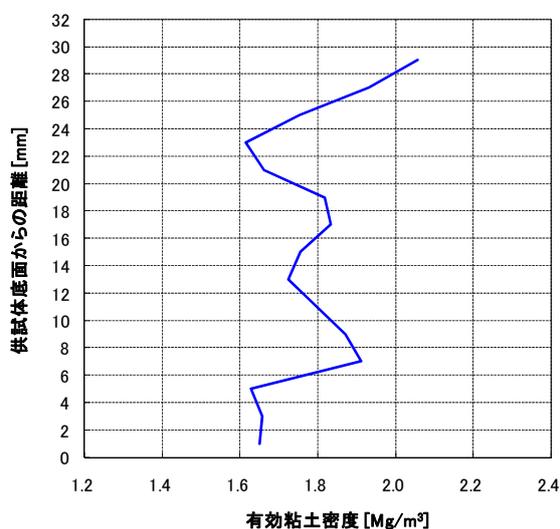
図 3.2-23 供試体の縦横比と膨潤圧及び圧縮成型圧力の関係



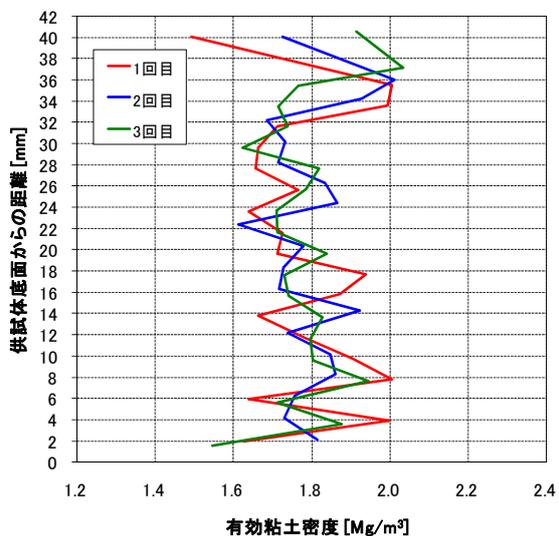
(a) 供試体高さ : 10mm



(b) 供試体高さ : 20mm



(c) 供試体高さ 30mm



(d) 供試体高さ 40mm

図 3.2-24 直径 20mm 供試体の試験終了後における密度分布 (フィルター無し、開放型)

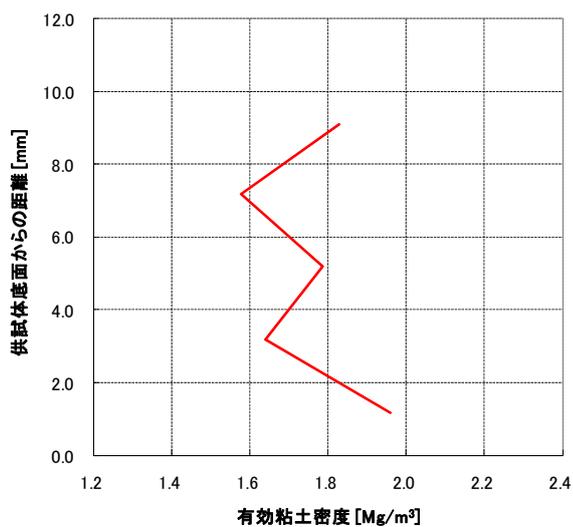
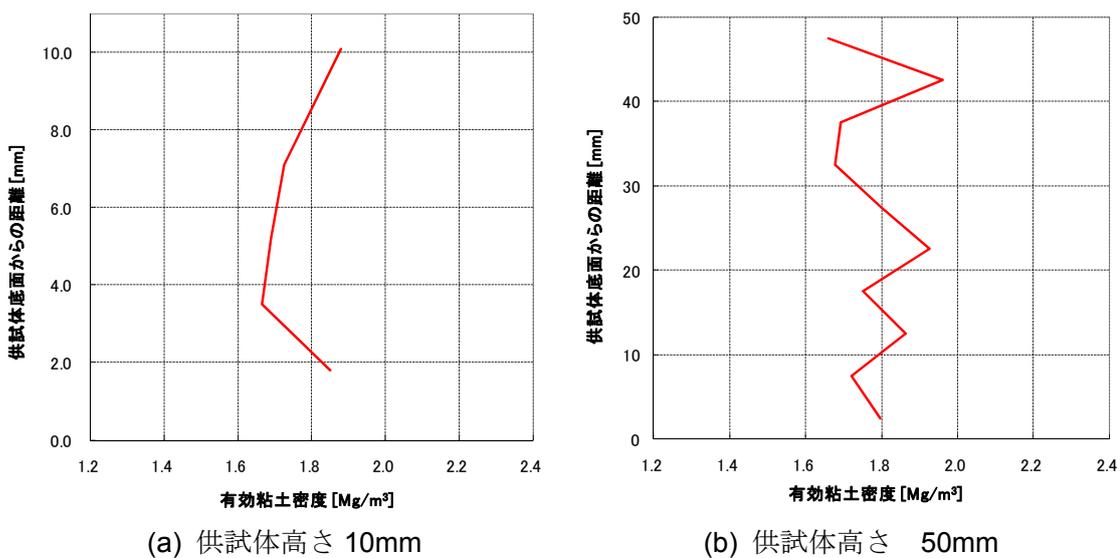


図 3.2-25 直径 50mm、高さ 10mm 供試体の試験終了後における密度分布 (フィルター無し、開放型)



(a) 供試体高さ 10mm

(b) 供試体高さ 50mm

図 3.2-26 直径 100mm 供試体の試験終了後における密度分布 (フィルター無し、開放型)

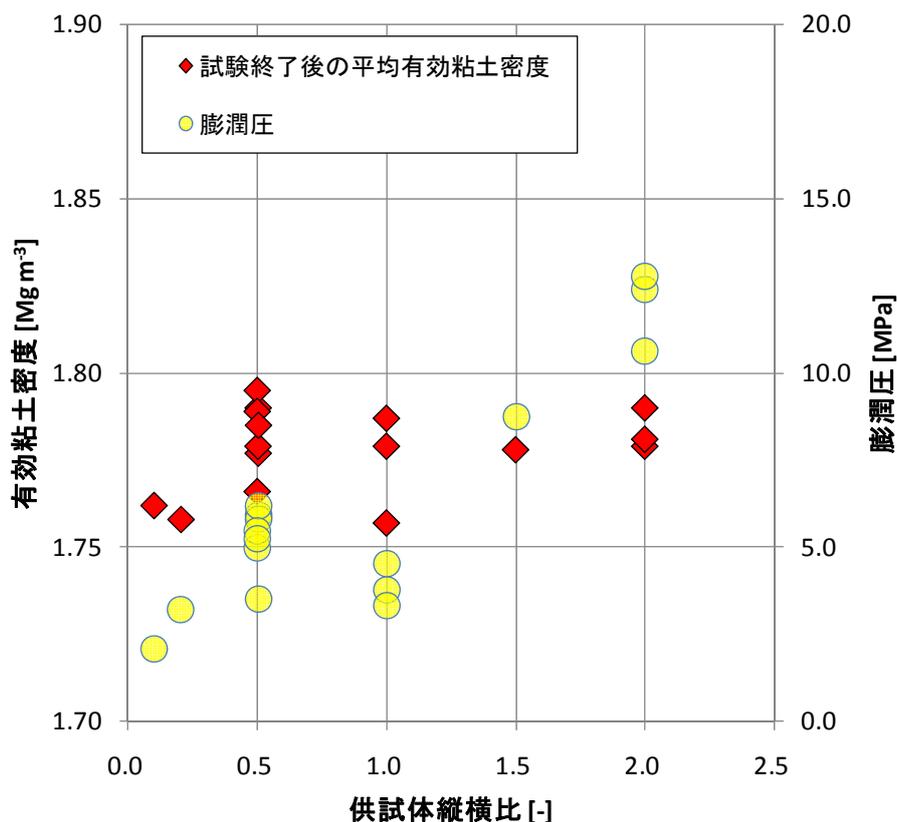


図 3.2-27 試験 No.B における試験終了後の平均有効粘土密度と膨潤圧

以上、これまでの研究例及び追加試験データなど現状での知見から、有効粘土密度が 1.5Mg/m^3 程度以下では、膨潤圧への供試体の寸法効果による影響は顕著ではないが、有効粘土密度 1.6Mg/m^3 程度以上では、供試体の寸法により膨潤圧が異なる可能性がある。これらの知見から、有効粘土密度 1.6Mg/m^3 程度以上では供試体の寸法を規定することが望ましいが、具体的な提案に際しては、更なるデータの拡充など今後の課題である。

2) 初期含水比の影響

鈴木ほかは^{3),23)}、初期含水比の異なる供試体を用いて膨潤圧の測定を行い、試験的に膨潤圧の初期含水比依存性について調べている。使用したベントナイトはクニゲル V1 (鉱物・化学組成及び物理特性は表 3.2-8 を参照) であり、ケイ砂は混合せずに試験を行っている。試験条件及び試験に用いられた装置 (拘束型試験装置) は、それぞれ表 3.2-9、図 3.2-28 に示すとおりである。供試体は、図 3.2-28 に示した試験カラム内に試験材料を充てんし、上面加圧により圧縮成型された。図 3.2-29 は、供試体の初期含水比を飽和度に換算し、膨潤圧との関係で整理されたものである。図 3.2-29 によれば、膨潤圧は初期飽和度が小さいほど大きくなる結果が得られている³⁾。また、このような膨潤圧の初期含水比依存性は、供試体内のエネルギーの蓄積という観点から供試体作製時の成型圧力に依存することも考え、供試体作製の際の成型圧力と初期飽和度との関係 (図 3.2-30) や成型圧力と膨潤圧との関係 (図 3.2-31) などについて検討を加えており、成型圧力が大きいほど膨潤圧が大きくなるという結果を示している。

表 3.2-8 試験に使用したクニゲル V1 の鉱物・化学組成及び物理特性³⁾

構成鉱物等	含有量[%]	成分	全岩	水ひ試料
モンモリロナイト	50~55	SiO ₂	69.9	61.3
石英	30~35	TiO ₂	0.18	0.16
長石	5~10	Al ₂ O ₃	14.4	22.0
沸石 (アナルサイト)	1~3 以下	Fe ₂ O ₃	1.91	1.78
ドロマイト	1~2 以下	FeO	0.47	0.22
黄鉄鉱	1~2 以下	MnO	0.06	0.02
雲母 (黒雲母)	1~2 以下	MgO	1.86	3.58
		CaO	1.87	0.68
		Na ₂ O	2.70	3.60
		K ₂ O	0.30	0.10
		P ₂ O ₅	0.05	0.02
		強熱減量 ¹⁾	5.04	6.30
		合計	98.74	99.76
土粒子密度	2.7~2.8g/cm ³	その他		
液性限界	416.0%	Cl	0.03	
塑性限界	20.9%	全S	0.55	
塑性指数	395.1%	SO ₄ ²⁻	0.21	
収縮限界	10.6%	C	0.61	
		CO ₃ ²⁻	1.7	
		乾燥減量 ²⁾	8.50	8.71

1) 1000℃
2) 室温放置試料の 105℃恒量までの減量

表 3.2-9 膨潤圧の初期含水比依存性に関する試験条件³⁾

乾燥密度 [Mg/m ³]	1.70	1.80	
供試体寸法 [mm]	φ 20×h20	φ 20×h20	φ 50×h20
初期含水比 [%]	4.9, 21.3	0, 4.9, 9.5, 11.7, 14.5	0, 9.26, 13.89
試験温度	室温		
通水溶液	蒸留水		

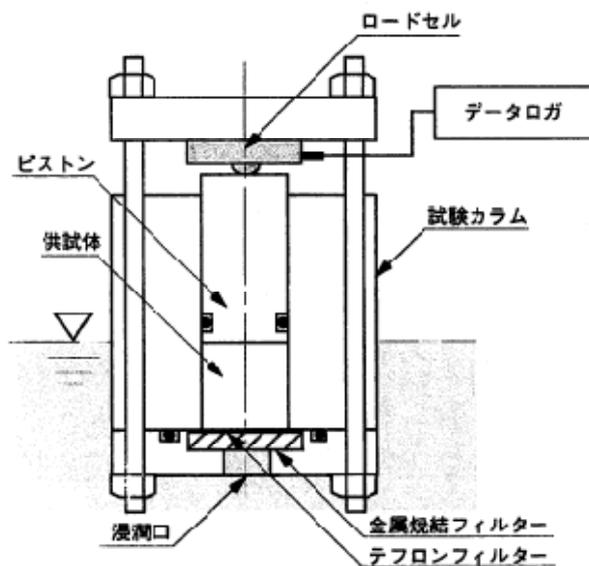


図 3.2-28 膨潤圧試験装置概略図 (拘束型試験装置)³⁾

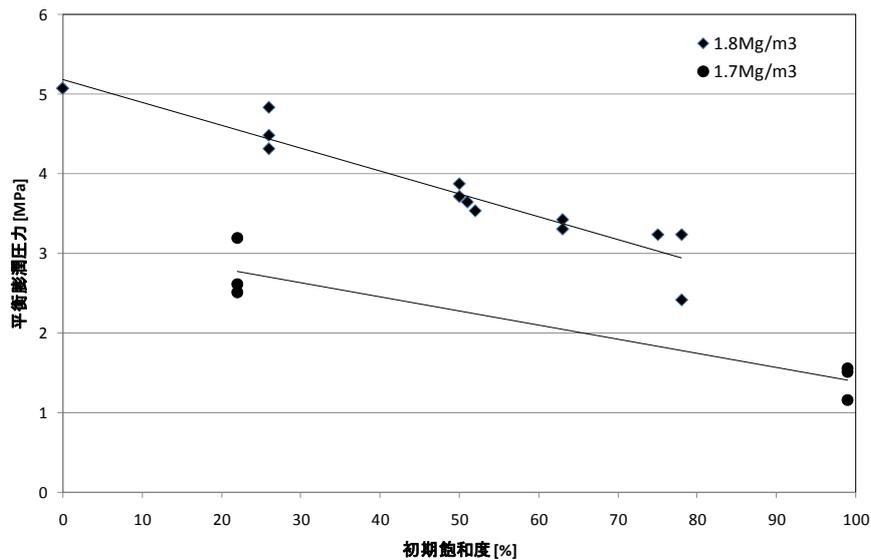


図 3.2-29 初期飽和度と膨潤圧の関係³⁾

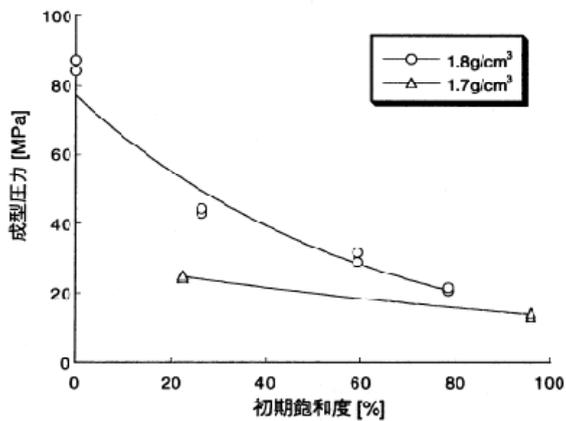


図 3.2-30 初期含水比と成型圧力との関係³⁾

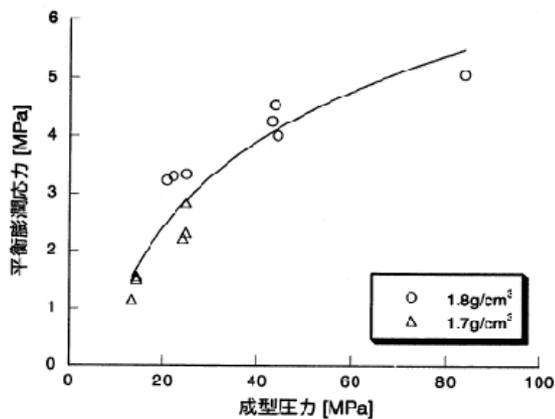


図 3.2-31 成型圧力と膨潤圧との関係³⁾

杉浦ほかは²⁶⁾、ベントナイト原鉱石を対象として、膨潤圧に初期含水比が及ぼす影響について検討を行っている。試験では最大粒径 2mm のベントナイト GX (表 3.2-10) を使用し、初期含水比は 15、18、21 及び 24% の 4 ケースとしている。初期含水比の調整には霧吹きを用いて行い 24 時間以上の養生を行っている。供試体の成型に際しては、動的締固め容器内に (写真 3.2-6) 試料を 4 分割投入し、質量 501.56g、直径 19.95mm の変水位透水試験用突棒を用いた突固めにより、直径 60mm、高さ 10mm を目標とした円柱型の供試体を作製している。膨潤圧試験に用いられた試験容器は、図 3.2-32 に示すように圧密類似型試験装置であり、試験期間は 14 日間、試験期間中での最大値を最大膨潤圧としている。膨潤圧試験の結果、初期含水比 15% の供試体の最大膨潤圧に対し、初期含水比 18%、21% 及び 24% の供試体の最大膨潤圧は低下しており、ベントナイト GX の膨潤圧は、初期含水比の影響を受けることが示されている (図 3.2-33)。また、試験結果から得られた指数近似曲線よりベントナイト GX の最大膨潤圧と初期含水比の関係が示されている (図 3.2-34)。さらに、杉浦ほか²⁶⁾は、膨潤圧試験後の供試体周辺 (図 3.2-32 に示すステンレス製リング内及びアクリルセル内の残留水) の Na⁺、Ca⁺、K⁺ 及び Mg⁺ イオン濃度をイオンクロマトグラフにより測定し、陽イオン濃度の総和が初期含水比の増加に伴って増加していることから、初期含水比の増加に伴うベントナイト GX の膨潤圧の低下の要因の一つとしてあげている。

表 3.2-10 ベントナイト GX の基本的性質²⁶⁾

	ベントナイト GX
最大粒径	2mm
タイプ	Na 型
土粒子密度 (Mg/m ³)	2.65
液性限界 (%)	355.1
塑性限界 (%)	22.8
塑性指数	332.3
モンモリロナイト含有率 (%)	41
陽イオン交換容量 (meq/g)	0.854
交換性 Na イオン量 (meq/g)	0.521
交換性 Ca イオン量 (meq/g)	0.314
交換性 K イオン量 (meq/g)	0.005
交換性 Mg イオン量 (meq/g)	0.015



写真 3.2-6 動的突固め容器²⁶⁾

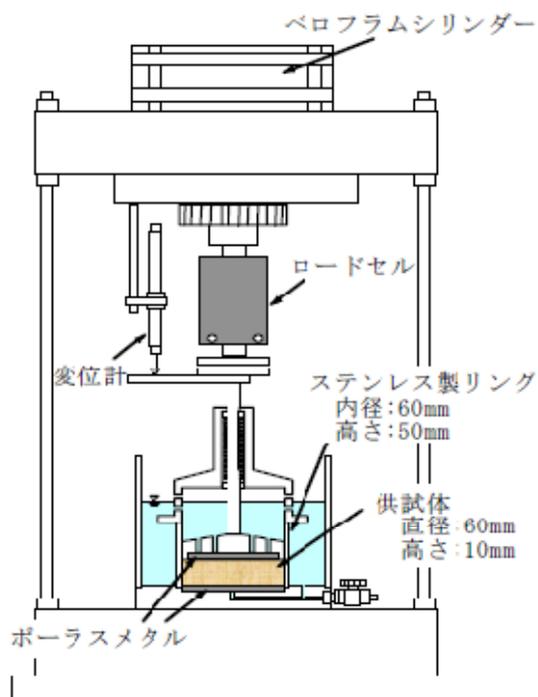


図 3.2-32 膨潤圧試験に用いた装置（圧密類似型試験装置）²⁶⁾

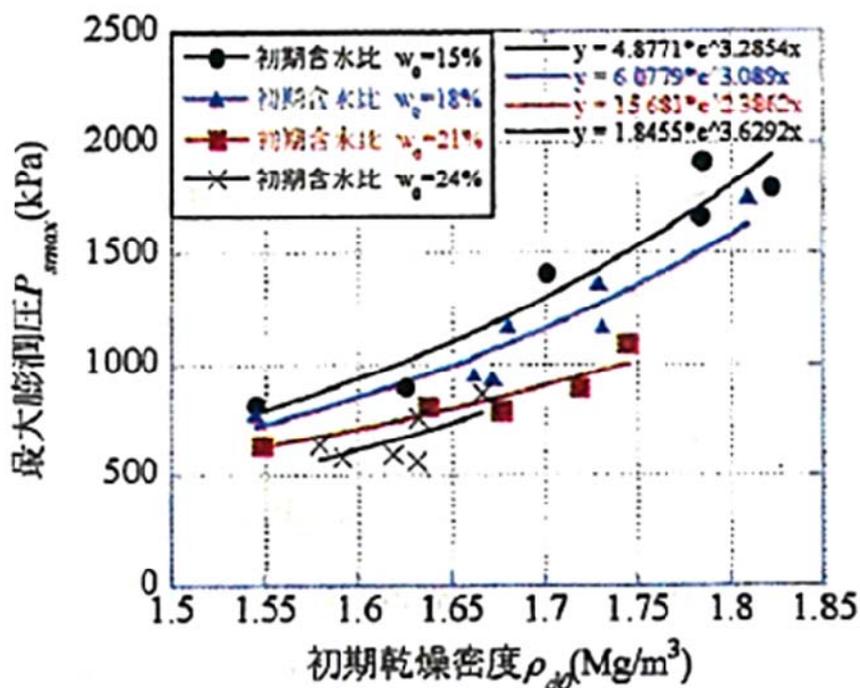


図 3.2-33 初期含水比を変化させた最大膨潤圧と初期乾燥密度の関係²⁶⁾

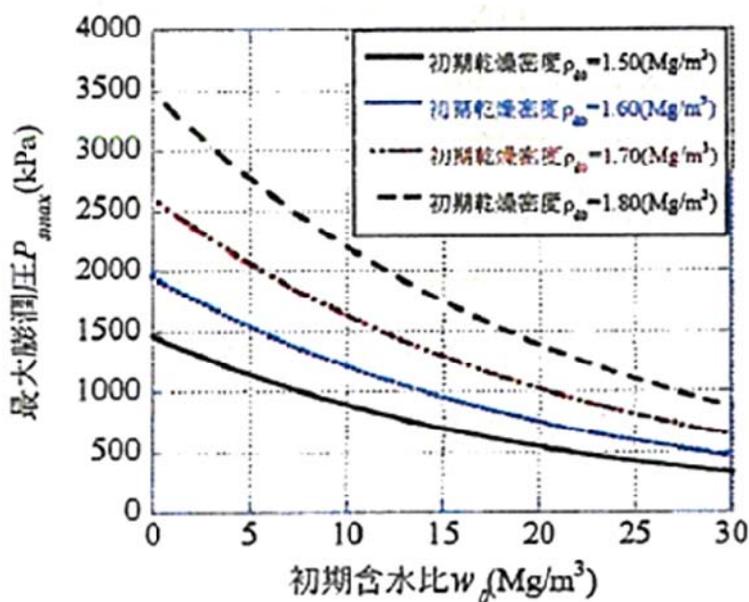


図 3.2-34 近似式から算出した最大膨潤圧と初期含水比の関係²⁶⁾

林ほかは²⁷⁾、クニゲル V1 を用い、乾燥密度 1.36 Mg/m^3 、直径 60mm 、高さ 10mm の円柱型の供試体で、自然含水比～飽和度 95% 相当の含水比までを対象に膨潤圧に及ぼす初期含水比の影響についての試験を行っている。供試体は静的圧縮にて作製され、供試体下面より水頭 (約 50cm)

のみで給水されている。試験に用いられた装置（圧密類似型試験装置）は写真 3.2-7 に示すように圧密類似型試験装置である。試験は、30 日ないし 78 日の期間で実施されている。林ほかは²⁷⁾ 初期飽和度 80%の試験結果が若干小さな値を示しているものの、その他の結果は同程度の膨潤圧を示していることから、膨潤圧に及ぼす初期含水比の影響は小さいものとしている（図 3.2-35）。

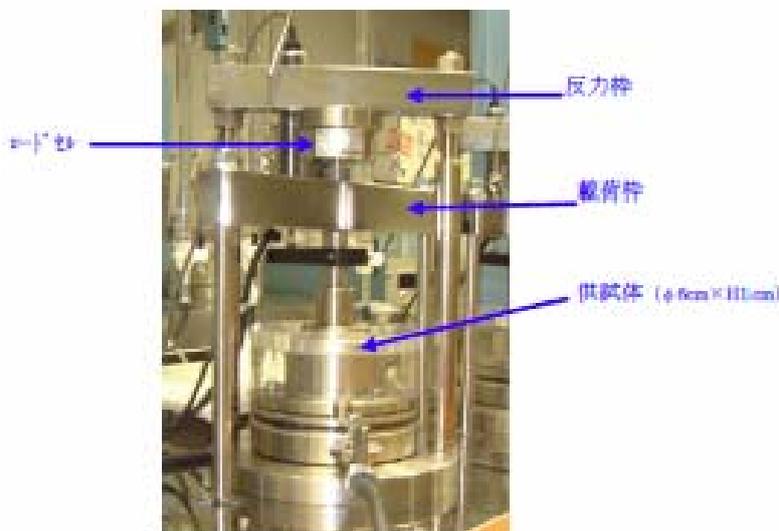


写真 3.2-7 試験に用いた試験装置（圧密類似型試験装置）²⁷⁾

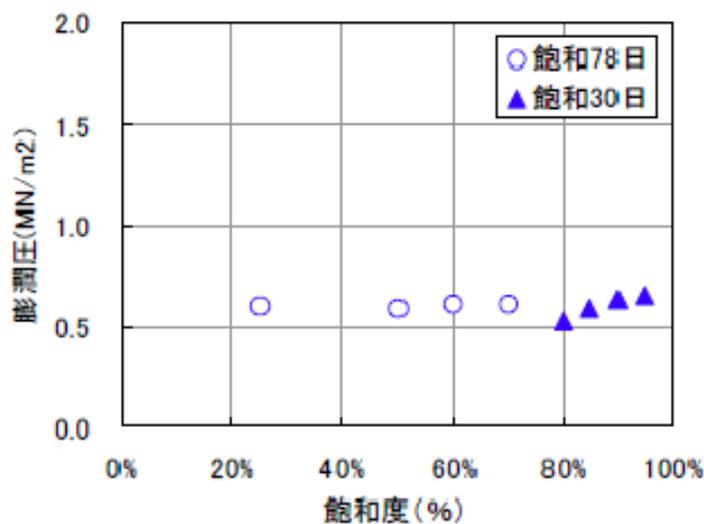


図 3.2-35 初期飽和度と膨潤圧の関係²⁷⁾

伊藤ほかは²⁸⁾、クニゲル GX を用いた完全拘束状態での膨潤圧試験を実施している。試験条件は、表 3.2-11 に示すとおりである。本検討の中で、膨潤圧に与える初期飽和度の影響について述べられており、乾燥密度が低い時は膨潤圧に与える初期飽和度の影響は小さいが、乾燥密度が高くなるにつれ、その影響は顕著になるという結果が示されている。また、その理由として、乾燥密度が高い場合、初期飽和度の違いにより供試体作製時の成型圧力が大きく異なっていることから、圧縮成型圧力の影響の可能性を示唆している（図 3.2-36 参照）。

表 3.2-11 試験ケース²⁸⁾

膨潤圧試験 (φ 60mm×H20mm)			荷重制御膨潤変形試験 (φ 60mm×H10mm)			
No.	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	初期飽和度 (%)	No.	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)	制御圧力 (kPa)
1	1.3	85	1	1.4	29.0	300
2	1.4	85	2	1.4	29.0	200
3	1.4	60	3	1.4	29.0	100
4	1.4	40	4	1.6	21.0	800
5	1.5	85	5	1.6	21.0	600
6	1.6	85	6	1.6	21.0	200
7	1.6	60	7	1.6	21.0	100
8	1.6	40	8	1.8	15.0	3000
9	1.7	85	9	1.8	15.0	2500
10	1.7	50	10	1.8	15.0	2000
11	1.8	85				
12	1.8	50				

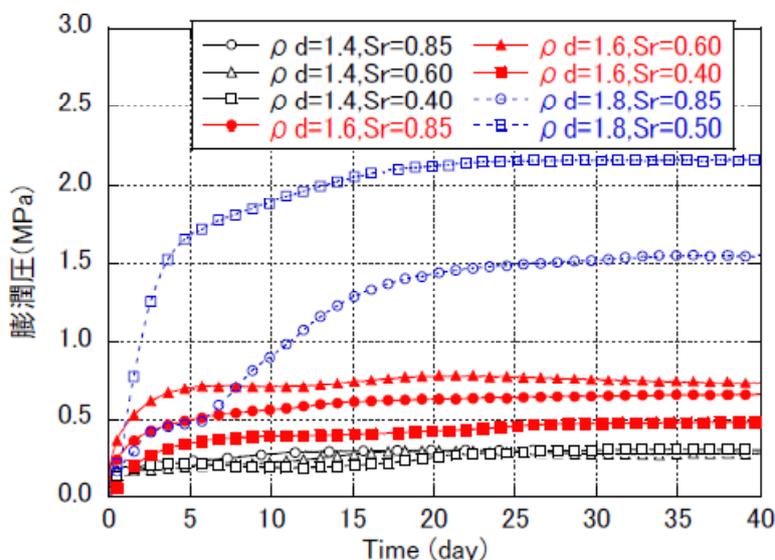


図 3.2-36 完全拘束状態での膨潤圧試験結果の例²⁸⁾

今井ほかは^{9),29)}、緩衝材を原位置締固め工法にて設置する際に緩衝材に要求される性能を満たす材料配合を把握することを目的として、クニゲル V1 を用いて膨潤圧試験を実施している。試験に用いられた装置 (圧密類似型試験装置) 及び材料配合条件を図 3.2-37、表 3.2-12、表 3.2-13 にそれぞれ示す。試験に用いられたケイ砂は、3, 4, 5, 6, 7 号ケイ砂を同じ重量比で配合されたものであり、供試体の寸法は、直径 60mm、高さ 20mm となっている。本検討の中で、初期含水比が膨潤圧に与える影響について述べられており、初期含水比の小さい Case 9 は Case 8 よりも大きな膨潤圧を示し初期含水比が膨潤圧の大きさに影響することが示唆されている (図 3.2-38、図 3.2-39 参照)。

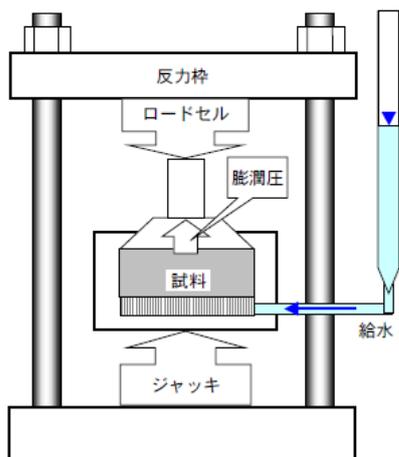


図 3.2-37 膨潤圧試験器^{9),29)}
(圧密類似型試験装置)

表 3.2-12 試験ケース⁹⁾

	珪砂混合率	乾燥密度	初期含水比
	Rs(%)	$\rho_d(\text{Mg}/\text{m}^3)$	wo(%)
case1	20	1.80	14.0
case2	20	1.70	17.7
case3	30	1.80	13.1
case4	20	1.60	21.2
case5	50	1.80	13.5
case6	30	1.60	20.7
case7	30	1.70	18.2
case8	30	1.75	16.7
case9	30	1.75	10.0

表 3.2-13 試験ケース²⁹⁾

	珪砂混合率	乾燥密度	初期含水比	最大膨潤圧	記事・試験条件等
	Rs(%)	$\rho_d(\text{Mg}/\text{m}^3)$	wo(%)	(KPa)	
室内作成試料					
case1	20	1.80	14.0	2885	
case2	20	1.70	17.7	1477	
case3	30	1.80	13.1	1915	
case4	20	1.60	21.2	763	
case5	50	1.80	13.5	737	
case6	30	1.60	20.7	530	
case7	30	1.70	18.2	488	
case8	30	1.75	16.7	686	
case9	30	1.75	10.0	988	$w_o < w_{opt}$
case10	20	1.75	16.8	962	
case11	30	1.75	16.7	650	case8と同条件
case12	30	1.75	16.7	371	初期より変位設定
case13	30	1.75	16.7	1013	変位修正なし
case14	30	1.75	10.0	1313	$w_o < w_{opt}$, 変位修正なし
原位置締め固め試験からの採取試料					
L2-3	30	1.75	16.7	979	
L2-4	30	1.75	16.7	834	
D-1	30	1.75	16.7	712	

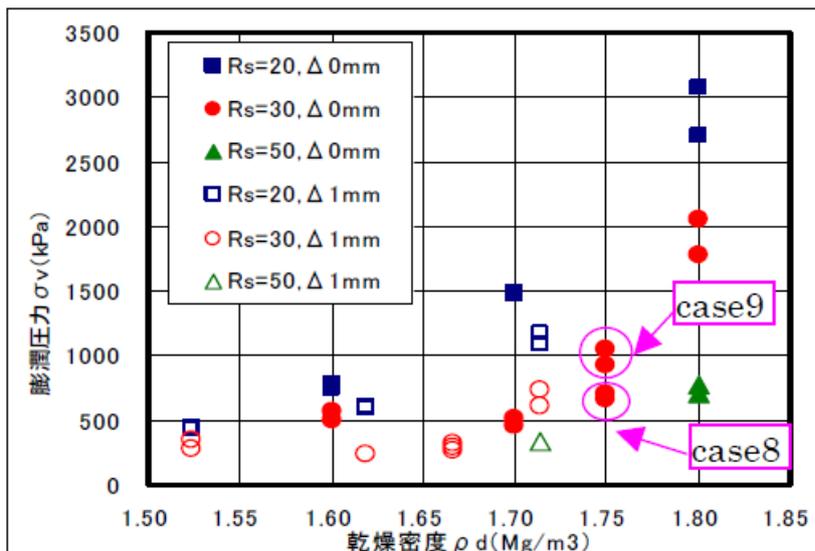


図 3.2-38 計測された膨潤圧と乾燥密度⁹⁾

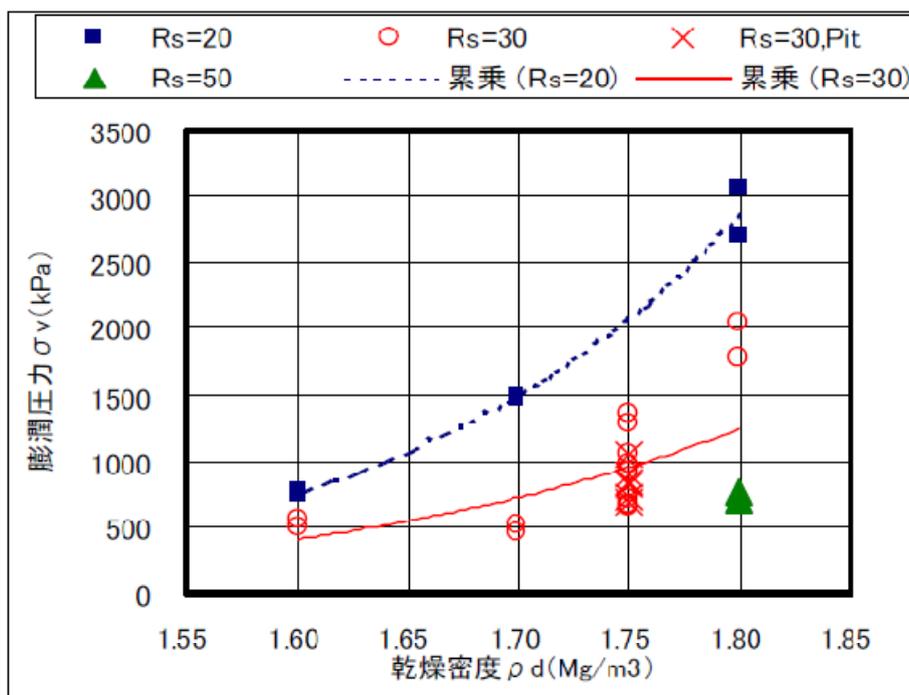


図 3.2-39 最大膨潤圧と乾燥密度、ケイ砂混合率²⁹⁾

以上、これまでの研究例で得られた知見を示したが、これらの検討結果から有効粘土密度 1.7Mg/m^3 程度以上の供試体を用いた試験では初期含水比の影響は顕著に認められるものの、有効粘土密度 1.6Mg/m^3 程度以下の供試体を対象とした試験では顕著な影響を示さないという傾向が得られている。なお、これらの試験は、それぞれ試験時期も異なることから、先述したようにモンモリロナイト含有率も異なっている可能性もある。そこで、同一ロットのベントナイトを用い、初期含水比の影響を再確認するために有効粘土密度をパラメータとして、初期含水比を変化させた膨潤圧試験を実施した。以下にそれらの結果を示す。

(a) 初期含水比の影響に関する再試験

① 試験条件及び方法

試験条件を表 3.2-2 に示す。また、本試験では、表 3.2-1 で示したクニゲル V1 を使用した。試験は、クニゲル V1 単体で実施しており、ケイ砂等は混合していない。通水溶液には、イオン交換水を使用し、試験は 23~25°C で制御した温度条件下で実施した。試験に使用する供試体は、アムスラーを用い、上面加圧により圧縮成型した。供試体の寸法は、直径 60mm、高さ 10mm である。膨潤圧は、供試体の下部に設置したロードセルと、上部の土圧計（共和電業、PGM-50KD、容量 5MPa、中央から 15mm）で測定した。上部土圧計は、中心から 15mm の位置に設置してある。図 3.2-40 に試験装置（拘束型試験装置）の概略を示す。

試験の手順を以下に示す。供試体間隙の空気をスムーズに排出し飽和度を高めるため一次元に通水して飽和させた。

- (i) 締固めた供試体を作製し、容器にセットした後に流入側、流出側のバルブを真空ポンプに接続し、真空近くまで減圧した状態で 7 日間放置した。その後、炭酸ガスを供試体内部に充填し 1 晩放置した後、再度供試体内の流入側、流出側バルブより真空近くまで減圧を半日ほど行った。
- (ii) 上記(i)の後、流出側のバルブを閉じ、流入側のバルブを開け、供試体下部より、イオン交換水を通水した後に膨潤圧を測定した。
- (iii) 試験終了後は、供試体の含水比測定を行い含水比から飽和度を推定した。

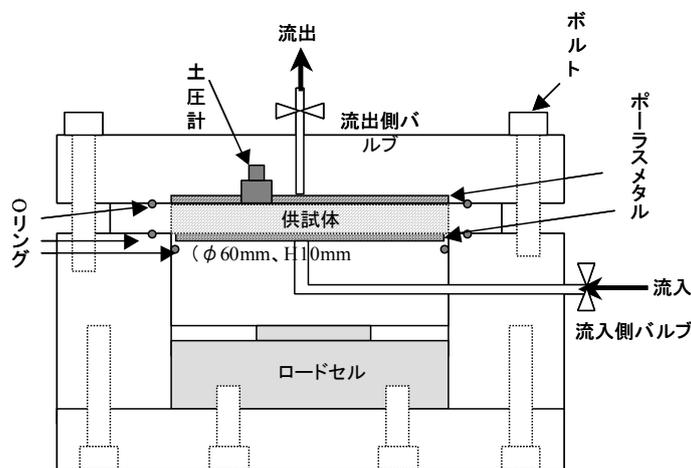


図 3.2-40 試験装置（拘束型試験装置）の概要図

② 試験結果

経過時間と膨潤圧との関係を図 3.2-41~図 3.2-43 に示した。膨潤圧については、土圧計の値から流入側の水压を差し引いた値を用いている。試験終了時の下部ロードセルならびに上部土圧計で得られた値の平均値を膨潤圧とし、有効粘土密度ごとに初期飽和度と膨潤圧の関係で整理しなおしたものを図 3.2-44 に示す。乾燥密度が 1.2、1.4 及び 1.6Mg/m³ のクニゲル V1 に対して実施した今回の試験結果によれば、初期含水比が膨潤圧に与える影響は小さかった。

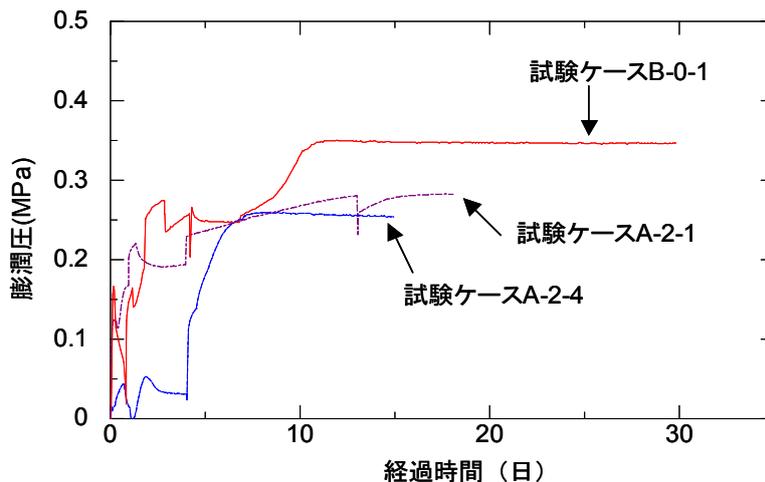


図 3.2-41 膨潤圧の経時変化に及ぼす初期含水比の影響（有効粘土密度 1.2Mg/m^3 ）

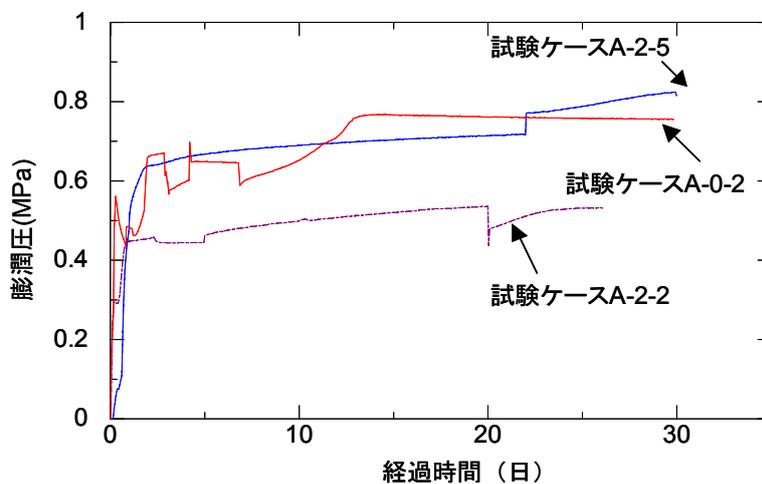


図 3.2-42 膨潤圧の経時変化に及ぼす初期含水比の影響（有効粘土密度 1.4Mg/m^3 ）

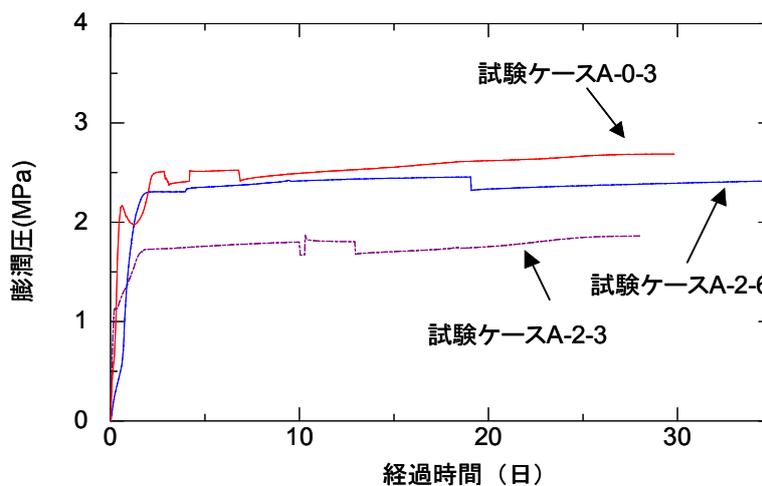


図 3.2-43 膨潤圧の経時変化に及ぼす初期含水比の影響（有効粘土密度 1.6Mg/m^3 ）

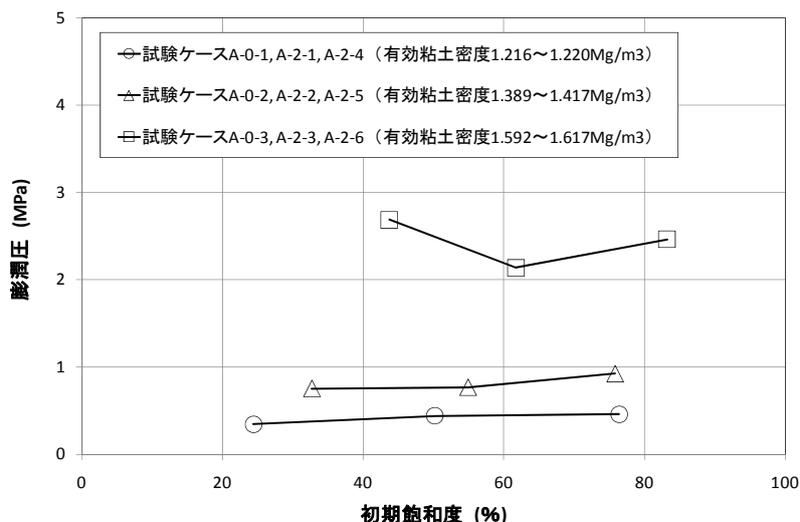


図 3.2-44 膨潤圧と初期飽和度の関係

以上、これまでの研究例と追加試験の検討結果を示したが、これらの検討結果から有効粘土密度 1.8Mg/m^3 程度では、初期含水比の影響は顕著に認められるものの、有効密度が低下するにしたがって影響程度は低下し、有効粘土密度が 1.6Mg/m^3 以下の場合ではほとんど影響がない。このように初期含水の影響は有効粘土密度によってその影響程度が変化するが、現状においては、初期含水比が試験結果に及ぼすメカニズムが明らかでないため、試験結果の解釈とその解釈を踏まえた試験結果の利用のため、試験時の供試体の初期含水比を記録しておくことが必要である。なお、今後、ベントナイトの種類毎にこれらの影響をより定量的に評価するためのデータ取得が望まれる。

3) 通水溶液の種類や組成による影響

早川ほか³⁵⁾は、NaCl 濃度の違いによりベントナイトの膨潤圧がどのような影響を受けるのか確認することを目的とした試験を行っている。試験には、クニゲル V1 (70wt%) とケイ砂 (30wt%) を混合した供試体と MX-80 単体の供試体が用いられている。供試体の寸法は、直径 60mm、高さ 20mm、試験期間は 3 週間とされている。また、試験終了後、供試体を 3 分割し高さ方向の乾燥密度及び含水比分布測定が実施されている。試験条件を表 3.2-14 に、膨潤圧の経時変化を図 3.2-45 にそれぞれ示す。なお、試験に用いられた装置に関する情報は、記載されていなかった。最終的な膨潤圧の値は、NaCl 濃度が低いほど高くなっており、ケイ砂混合供試体に比べて MX-80 の方が NaCl 濃度による影響は大きいという結果となっている。早川ほかは³⁵⁾、NaCl 濃度の違いによる最終的な膨潤圧のみならず、浸潤挙動、膨潤圧の発生状況等の違いについても比較を行っており、その結果、ケイ砂を混合した供試体の場合、浸潤挙動及び膨潤圧の発生挙動に、MX-80 の場合は最終的な膨潤圧の値に関して、NaCl 濃度の影響が見られることを示している。

表 3.2-14 膨潤圧試験条件³⁵⁾

NO	試料	NaCl 濃度 (%)	乾燥密度 (g/ cm ³)	含水比 (%)
1	ケイ砂混合体	0	1.60	4.8
2		1	1.60	4.8
3		3	1.60	4.8
4	MX-80	0	1.60	18.4
5		1	1.60	18.4
6		3	1.60	18.4

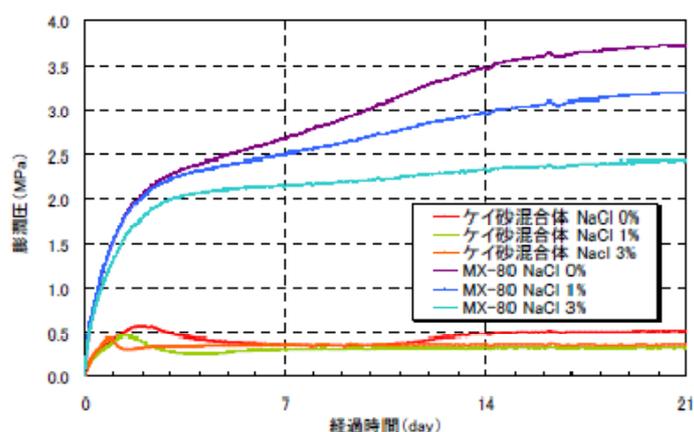


図 3.2-45 膨潤圧の経時変化³⁵⁾

田中・中村¹⁷⁾は、海水や高温履歴が各種ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響を把握するとともに、それらの定量的評価方法を提案するため、人工海水濃度（海水相当、海水の 1/10 相当濃度、海水の 1/100 相当濃度）や高温履歴の温度（60、90、110、200℃）と期間（1、21 日間、1、2 年間）を変えて膨潤圧試験を行っている。試験に用いられた材料は、クニゲル V1、MX-80、ボルクレイ、クニボンド、ネオクニボンドであり、これらの基本的性質は表 3.2-15 に示すとおりである。供試体はいずれの試験でも直径 60mm、高さ 5mm の円柱状であり、静的荷重を載荷することにより作製されている。なお、試験には圧密類似型試験装置が用いられた。田中・中村による¹⁷⁾試験結果の一例を図 3.2-46 に示す。図 3.2-46 によれば、人工海水濃度が膨潤圧に及ぼす影響の程度は、ベントナイトの種類により異なり、Ca 型ベントナイトでは、影響がほとんどないのに比べて、Na 型や Na 交換型ベントナイトでは、人工海水濃度が大きいほど膨潤圧は小さい結果が示されている。

表 3.2-15 試験に使用したベントナイトの基本的性質¹⁷⁾

項目	クニゲルV1	ボルクレイ	クニボンド	ネオクニボンド
タイプ	Na型	Na型	Ca型	Na交換型
土粒子の密度 (Mg/m ³)	2.79	2.84	2.71	2.68
液性限界 (%)	473.9	628.2	144.5	607.5
塑性限界 (%)	26.61	44.8	63.87	50.69
塑性指数	447.3	583.4	80.6	556.8
活性度	6.93	6.35	4.36	7.79
塑性比	16.81	13.02	1.26	10.98
粘土分(<2 μ m)含有率 (%)	64.5	91.9	18.5	71.5
モンモリロナイト含有率 ^{注1)} (%)	48	69	80	76
陽イオン交換容量 ^{注2)} (mequiv/g)	0.732	1.007	0.796	1.035
交換性Naイオン量 ^{注3)} (mequiv/g)	0.405	0.566	0.119	0.62
交換性Caイオン量 ^{注3)} (mequiv/g)	0.287	0.293	0.585	0.333
交換性Kイオン量 ^{注3)} (mequiv/g)	0.009	0.016	0.019	0.019
交換性Mgイオン量 ^{注3)} (mequiv/g)	0.03	0.132	0.072	0.063

注1) メチレンブルー吸着量試験により測定

注2) 交換性Na, Ca, K, Mgイオン量の総和

注3) 1N 酢酸アンモニウム (CH₃COONH₄) 抽出法により測定

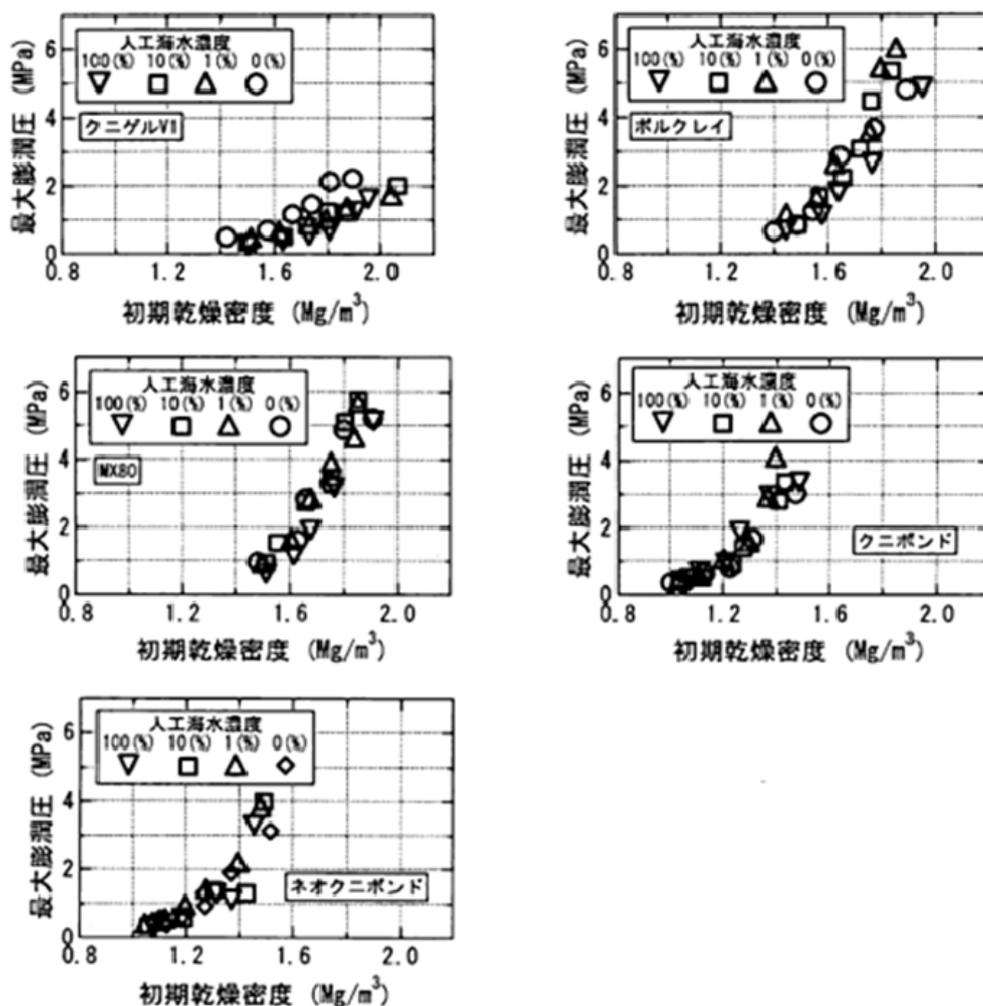


図 3.2-46 初期乾燥密度と最大膨潤圧の関係に及ぼす人工海水濃度の影響¹⁷⁾

直井ほか⁸⁾は、海外産ベントナイトを含む 5 種類のベントナイトに対して、蒸留水及び海水を通水溶液とした膨潤圧試験を実施し、膨潤圧に及ぼす海水の影響に関して検討している。試験に用いられた各ベントナイトの基本的性質は、表 3.2-16 に示すとおりであり、試験開始前の供試体の含水比は、A が 8.1～8.5%、B が 9.1～10.9%、C が 16.6～19.7%、D が 9.4～12.5%、E が 14.8～15.8%の範囲とされている。供試体は円柱型とし直径 28mm、高さ 10mm を目標値として、上下面加圧により圧縮成型された。成型された供試体は、圧縮成型用のモールドから試験で使用するステンレス製リングへ移動させて用いられている。試験に用いられた人工海水は、八洲薬品(株)製・アクアマリンである。また、試験に用いられた装置は、圧密類似型試験装置である。図 3.2-47 に直井ほか⁸⁾が膨潤圧試験により得た結果を示す。これらの結果から、ベントナイトの膨潤圧は、ベントナイトの種類によらず、海水の影響が比較的小さいこと、乾燥密度を高めることにより膨潤圧に及ぼす人工海水の影響割合を、より一層軽減できることが示されている。

表 3.2-16 各種ベントナイトの基本的性質⁸⁾

ベントナイト	A	B	C	D	E
タイプ	Na 型	Na 型	Ca 型	Na 交換型	Na 型
土粒子密度 (Mg/m ³)	2.79	2.84	2.71	2.68	2.88
液性限界(%)	458.1	565.0	128.7	453.3	437.3
塑性限界(%)	23.7	47.2	38.4	42.1	38.0
塑性指数	434.4	517.8	90.3	411.2	399.3
モンモリロナイト 含有率(%)	57	71	84	71	80
陽イオン交換容量 (meq/g)	1.166	1.054	0.795	1.035	1.348
交換性 Na イオン量 (meq/g)	0.631	0.572	0.119	0.620	0.646
交換性 Ca イオン量 (meq/g)	0.464	0.328	0.585	0.333	0.522
交換性 K イオン量 (meq/g)	0.03	0.026	0.019	0.019	0.038
交換性 Mg イオン量 (meq/g)	0.041	0.128	0.072	0.063	0.142

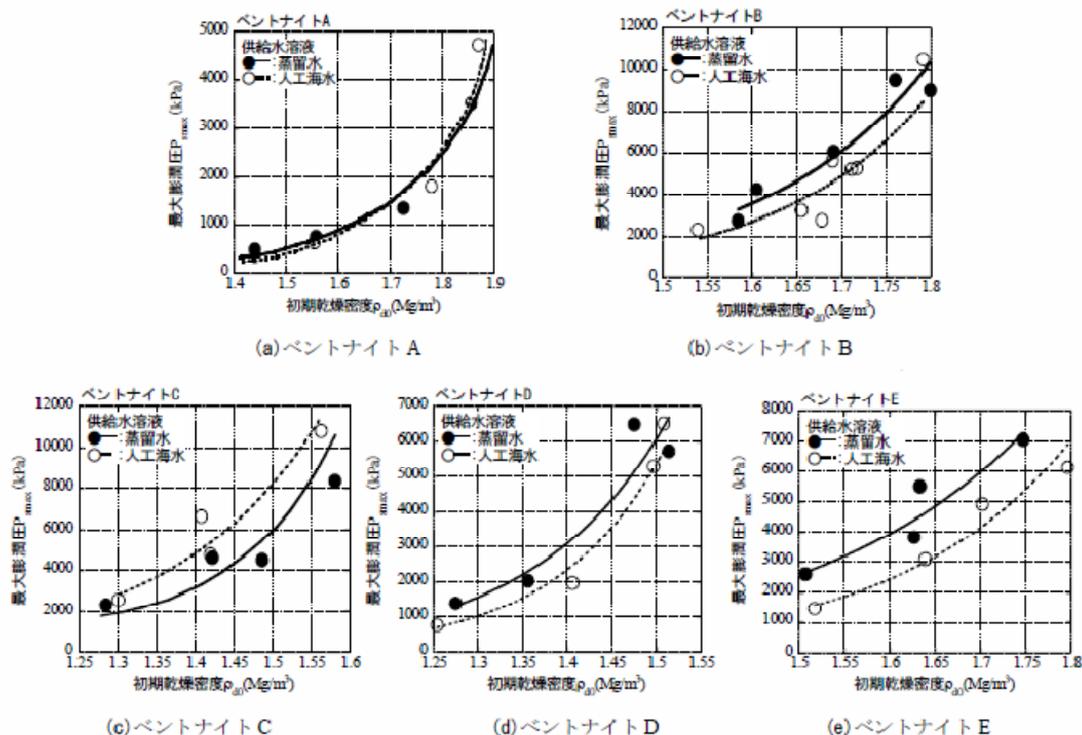
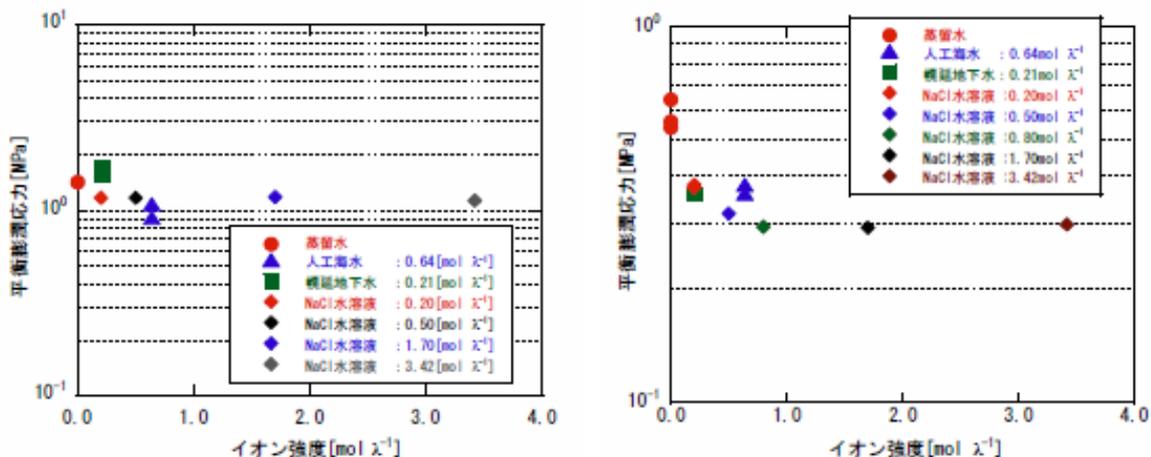


図 3.2-47 各種ベントナイトの最大膨潤圧と初期乾燥密度の関係⁸⁾

原子力機構では、拘束型試験装置を用い、ASTM D-1141-98 基準の人工海水、幌延の深地層の研究施設計画で採取された地下水及び NaCl 水溶液などのイオン種が異なる溶液を用いてイオン強度をパラメータとした膨潤圧試験を行っている³⁶⁾。図 3.2-48 に示すイオン強度と膨潤圧の関係から、有効粘土密度 1.58 Mg/m³ 以上では、各通水溶液ともに膨潤圧は同等の値を示すものの、有効粘土密度 1.37 Mg/m³ では蒸留水に比して、幌延地下水、人工海水及び NaCl 水溶液ともに膨潤圧が低下するという結果を示している。また、蒸留水及び海水系地下水条件でのデータを有効粘土密度と膨潤圧の関係を図 3.2-49 のように整理している。



(有効粘土密度 1.58 Mg/m³)

(有効粘土密度 1.37 Mg/m³)

図 3.2-48 イオン強度と平衡膨潤圧の関係³⁶⁾

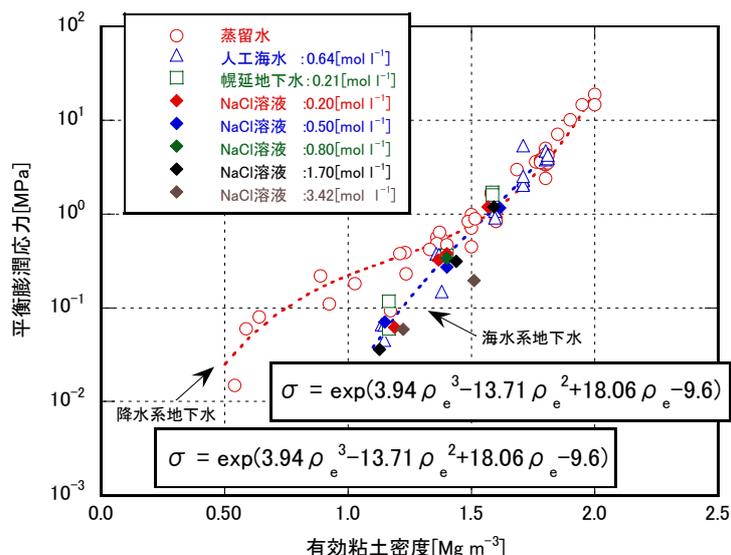


図 3.2-49 有効粘土密度と膨潤圧³⁶⁾

R. Pusch and Geodevelopment AB¹⁾は、密度と間隙水塩分濃度に関して、密度が低い場合、膨潤圧は塩分濃度や吸着陽イオンの種類に強く依存するとしている。また、塩分濃度の膨潤圧の影響は、低密度で顕著であるが湿潤密度がおおむね 2.0 Mg/m³より大きくなるとあまり影響しないことが述べられている。

以上で示した研究例は一例であり、各機関及び大学の研究者が各種ベントナイトを用いて、人工海水のみならず種々の水質を用いた試験を行っている。

これらの結果から、ベントナイトの種類や試験に用いた溶液の種類によって膨潤圧に及ぼす影響に大小はあるものの、試験結果の解釈やその解釈を踏まえた試験結果の利用のため、試験に用いた溶液の種類、溶液中のイオン組成などを記録しておくことが必要である。

4) 温度の影響

クニゲル V1 及びクニゲル OT-9607 ベントナイト単体、クニゲル V1 にケイ砂を 30wt%混合した供試体に対し、鈴木・藤田は³⁾、膨潤圧に及ぼす温度の影響に関する検討を実施している。供試体は、試験カラムに材料を充てんし、上面加圧により圧縮成型し、直径 20mm、高さ 20mm に成型させている。供試体への溶液の供給はコンプレッサーの圧縮空気が利用され 0.05MPa の水圧で行い、通水溶液には蒸留水が用いられている。試験温度は、供試体を充てんした装置を恒温槽内に設置して制御させている。温度条件は、以下の 2 通りとなっている。

- ① 同一供試体に対し温度を段階的に変化させるケース (Case A)
- ② 所定の一定温度とするケース (Case B)

試験に用いられた装置(拘束型試験装置)及び試験条件をそれぞれ図 3.2-50、表 3.2-17 に示す。試験結果から得られた温度と飽和時の膨潤圧との関係(図 3.2-51)から、温度の上昇とともに膨潤圧は低下し、試験温度が 70℃の条件での膨潤圧は、試験温度が 25℃に比べおよそ 30%低下する結果となっている。温度の上昇による膨潤圧の低下は、ベントナイトの変形係数の低下が膨潤圧を低下させる大きな要因であるとしている。

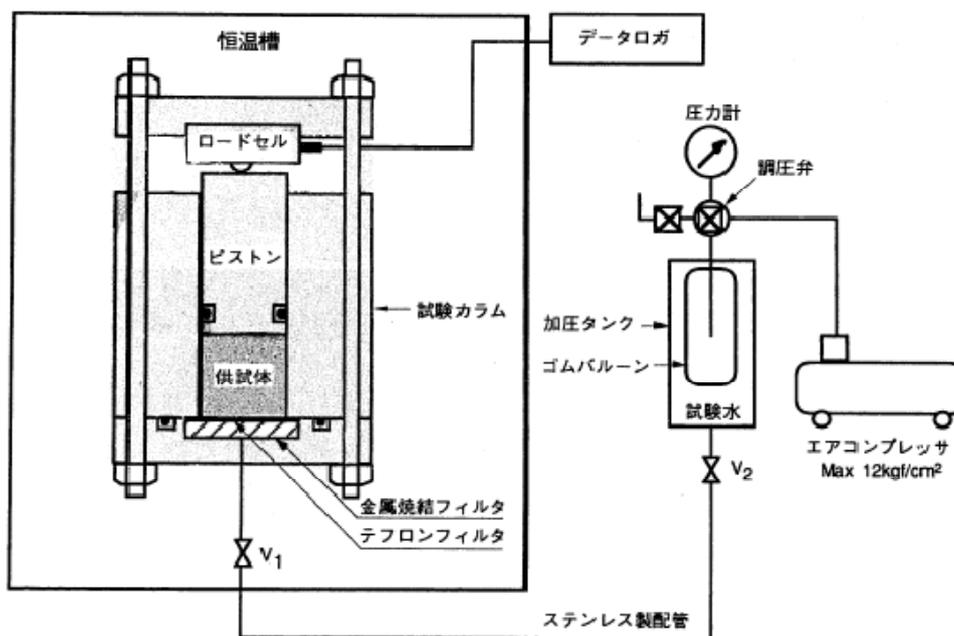


図 3.2-50 試験装置（拘束型試験装置）³⁾

表 3.2-17 試験条件³⁾

(1) CaseA

	ベントナイト KunigelV1		ベントナイト KunigelIOT-9607	ケイ砂 30wt%混合体
乾燥密度 [g/cm ³]	1.6	1.8	1.65	1.6
初期含水比 [%]	約 10	約 10	約 16	約 10
温度 [°C]	25 ⇄ 40 ⇄ 60 ⇄ 70	25 ⇄ 40 ⇄ 60 ⇄ 70	25 → 60 → 90	25 → 60 → 90
供試体寸法 [mm]	φ 20×高さ 20			
試験水	蒸留水			
試験繰返し数	3			

(2) CaseB

	ベントナイト KunigelV1		
乾燥密度 [g/cm ³]	1.8		
初期含水比 [%]	約 10		
試験温度 [°C]	25	40	60
供試体寸法 [mm]	φ 20×高さ 20		
試験水	蒸留水		
試験繰返し数	3	5	3

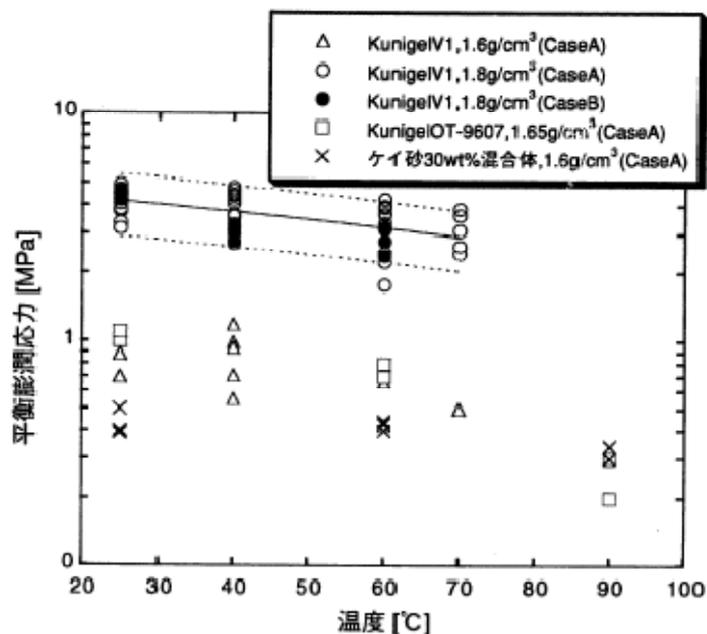


図 3.2-51 温度と膨潤圧との関係³⁾

東畑ほかは³¹⁾は、室温と 90°C で体積一定の状態でベントナイトの膨潤圧を測定したところ、90°C での最終的な膨潤圧は室温より低くなる結果を示している。この結果の理由として、東畑ほかはベントナイトを加熱すると体積収縮する傾向が強まるため、膨潤圧が低くなったとしている。

また、R.Pusch and Geodevelopment AB¹⁾は、温度の影響に関しては、22°C と 75°C 間で温度を昇降させた試験を行っており、昇温により膨潤圧が低下することを示している。

さらに、原子力機構で行った拘束型試験装置による膨潤圧試験の結果を温度の経時変化と合わせて図 3.2-52 に示す。原子力機構では空調によって温度管理した試験室内において膨潤圧試験を行っている。この図は、停電等により空調が停止し室内の温度変化が生じた際の膨潤圧の変化を強調して示したものであるが、この図からもわかるように温度の変化に伴って膨潤圧が変動している例である。このように、空調の停止や季節変動等による温度変化があった場合には、膨潤圧結果の変動要因となりうる結果も得られている。

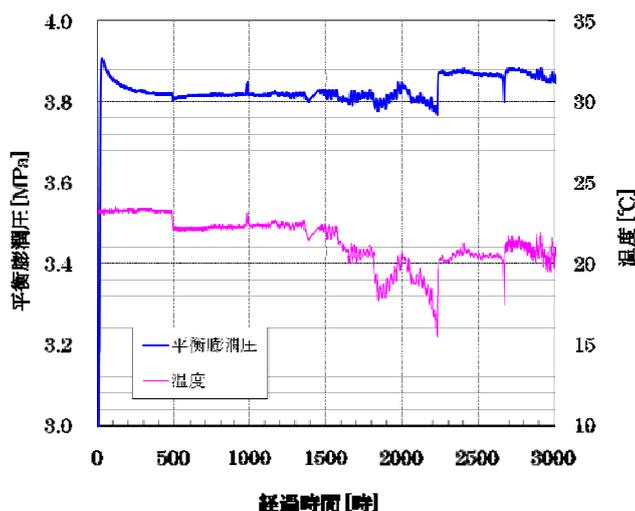
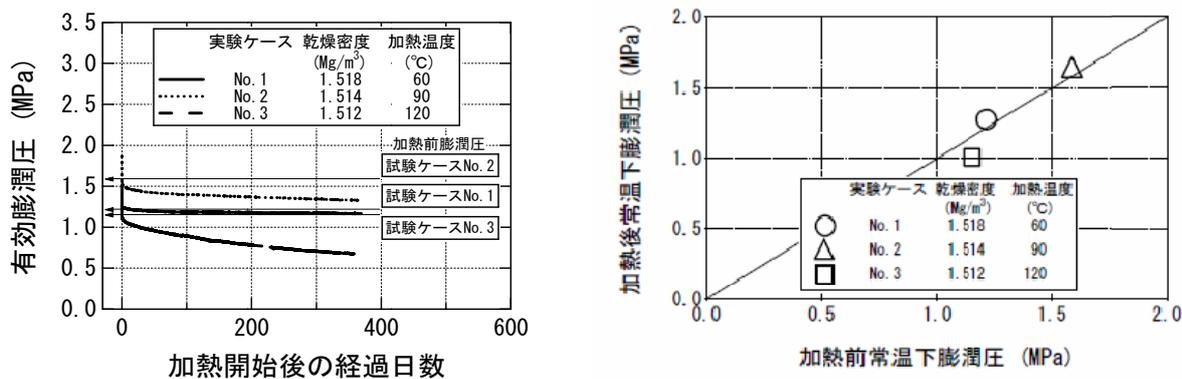


図 3.2-52 膨潤圧試験における膨潤圧と温度の経時変化の例

田中・横山⁴²⁾は、乾燥密度 1.2、1.4、1.6Mg/m³ のクニゲル V1 供試体を拘束型試験装置にセットし、飽和させた後に 60°C、90°C、120°C の恒温槽に 1 年程度入れて膨潤圧を測定している。恒温槽中の供試体の膨潤圧は時間とともに低下し、その程度は温度が高いほど大きいこと（図 3.2-53(a)参照）、恒温槽から取出し、室温下で測定した膨潤圧は恒温槽に入れる前に測定した値と大きな差はないこと（図 3.2-53(b)参照）などの実験結果を示している。



(a) 有効膨潤圧の経時変化に及ぼす温度の影響 (b) 加熱前後における膨潤圧の比較

図 3.2-53 飽和した高密度ベントナイトの膨潤圧に及ぼす高温履歴の影響⁴²⁾

以上で示した文献によれば、いずれの場合も試験時の温度は、膨潤圧の測定結果に影響を及ぼすと思われる。したがって、できるだけ温度管理が可能な環境条件で試験を行うことが望ましい。また、温度管理ができない場合は、試験中の温度測定を行い記録しておくことが必要である。

(4) 供試体の特性による影響要因

1) 定量的評価が可能な要因

(a) モンモリロナイト含有率の影響

鈴木ほかは²³⁾、ベントナイト中に含有するモンモリロナイト含有率と膨潤圧との関係を把握するため、クニピア F (モンモリロナイト含有率：約 99%)、MX-80 (モンモリロナイト含有率：約 75%)、クニゲル V1 (モンモリロナイト含有率：約 50%) を対象とした試験を行っている。クニピア F については、5 号ケイ砂を 0、20、30、40、50、60wt% で混合し、供試体中のモンモリロナイト含有率を調整して試験に用いている。供試体の寸法は直径 20mm、高さ 20mm であり、通水溶液には蒸留水が使用され、室温にて試験が行われている。また、試験には拘束型試験装置が用いられた。鈴木ほか²³⁾による試験条件及び試験結果をそれぞれ表 3.2-18、図 3.2-54 に示す。図 3.2-54 から供試体中のモンモリロナイト含有率が多くなると膨潤圧は増大し、モンモリロナイト含有率と膨潤圧の対数には、ほぼ直線の関係が認められている。また、R. Pusch and Geodevelopment AB¹⁾もモンモリロナイト含有率の影響に関して、含有率の増加に伴って膨潤圧が大きくなることを示している。

以上のことからモンモリロナイト含有率が膨潤圧に影響するという結果が得られている。また、ベントナイトの採取場所や採掘時期の違いによりモンモリロナイト含有率が異なる。原子力機構が Web 公開している緩衝材基本特性データベースに収録されているベントナイト組成表でも、モンモリロナイト含有率が約 46~49% と約 59% の 2 つのデータが示されている。

膨潤圧試験の実施に際しては、モンモリロナイト含有率が膨潤圧試験に影響するため、ベントナイト供試体中のモンモリロナイト含有率を必要に応じて記録しなければならない。

表 3.2-18 試験条件²³⁾

乾燥密度	1.80 [Mg/m ³]				
通水溶液	蒸留水				
温度	室温				
供試体の寸法	直径 20mm×h20mm				
供試体名	ケイ砂混合率 [%]	モンモリロナイト含有率 [%]	膨潤圧 [MPa]		
クニピア F+ケイ砂	0	99	37.3		
	20	80	19.1		
	30	70	10.4	12.0	
	40	60	4.6		
	50	50	3.5	2.2	2.7
	60	40	1.4	1.7	
クニゲル V1	0	50	3.7 (n=19 の平均)		
MX-80	0	75	24.7		

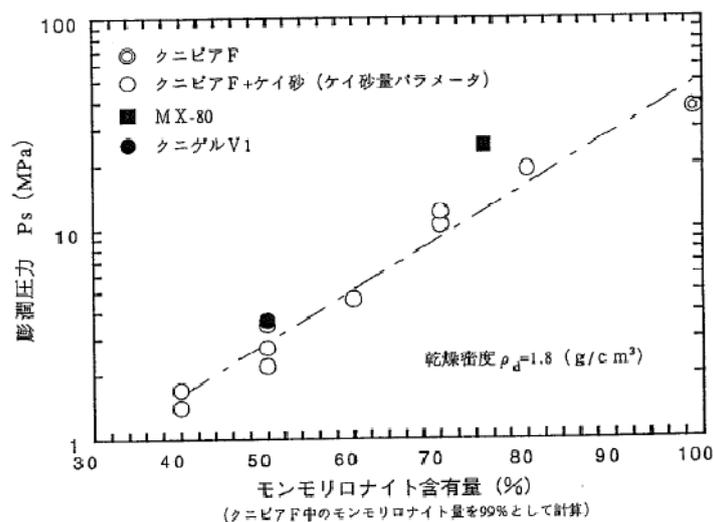


図 3.2-54 モンモリロナイト含有率と膨潤圧の関係²³⁾

(b) 土粒子密度の影響

3.1章における透水特性における記述と同様に、膨潤圧と有効粘土密度や有効モンモリロナイト密度などとの関係を求める場合や試験終了後の供試体の飽和度を求める場合には、土粒子密度を用いるのが一般的である。したがって、膨潤圧を上記指標により評価しようとする場合、計算上用いた土粒子密度の違いが影響を及ぼす。一例として、これまでの研究で用いられてきたクニゲルV1の土粒子密度は、2.7、2.733、2.79Mg/m³などである。文献調査の結果、これらの情報が記載されていないものもあった。膨潤圧試験を実施する際には、混合材及びベントナイトの土粒子密度等の情報を記録することが必要である。

(c) 交換性陽イオン組成の影響

小峯・緒方^{例えば、10)}は、ベントナイトの膨潤圧や膨潤変形特性が、間隙水のイオン濃度等の化学的な環境条件に大きく影響されることを踏まえた膨潤評価式の検討を行っている。具体的には、ベントナイトの主要な交換性陽イオンであるNa⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺の4種類に対して、それぞれの交換性陽イオンに起因する粘土結晶層間に作用する反発力と引力を算出し、各イオンの交換容量を用いて加重平均し評価する方法であり、下式に示すようなものである。また、膨潤評価式のパラメータの一部を表3.2-19に示す。

$$P = \frac{1}{CEC} \sum_{\substack{i=Na^+,Ca^{2+} \\ ,K^+,Mg^{2+}}} [EXC_i \{ (f_r)_i - (f_a)_i \}]$$

ここで、 p はベントナイトを含有する緩衝材・埋め戻し材の発生する圧力 (kPa)、 CEC は陽イオン交換容量 (mequiv./g)、 EXC_i は交換性陽イオン*i*の交換容量 (mequiv./g)、 $(f_r)_i$ は交換性陽イオン*i*に起因する反発力、 $(f_a)_i$ は交換性陽イオン*i*に起因する引力 (kPa) である。

表 3.2-19 膨潤評価式における材料パラメータ (クニゲル V1 相当) ¹⁰⁾

モンモリロナイトの土粒子密度	2.77 Mg/m ³
モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度	2.81 Mg/m ³
砂の土粒子密度	2.66 Mg/m ³
モンモリロナイトの比表面積	810 m ² /g
モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積	0 m ² /g
ベントナイトのモンモリロナイト含有率	48 %
陽イオン交換容量	0.732 mequiv./g
交換性 Na イオン量	0.405 mequiv./g
交換性 Ca イオン量	0.287 mequiv./g
交換性 K イオン量	0.009 mequiv./g
交換性 Mg イオン量	0.030 mequiv./g
交換性 Na イオンの非水和イオン半径	0.098 nm
交換性 Ca イオンの非水和イオン半径	0.1115 nm
交換性 K イオンの非水和イオン半径	0.133 nm
交換性 Mg イオンの非水和イオン半径	0.0835 nm
交換性 Na イオンの価数	1
交換性 Ca イオンの価数	2
交換性 K イオンの価数	1
交換性 Mg イオンの価数	2
モンモリロナイト結晶層厚	9.60 X 10 ⁻¹⁰ m

また、小峯³⁸⁾は、同一名称ベントナイトの産出年度による膨潤圧の変化について、モンモリロナイト含有率の影響に加えて、陽イオン交換容量等の影響についても検討を行っている。具体的には、表 3.2-20 に示すパラメータを用いるとともに、間隙水のイオン濃度(n_0)については、試験より採取したベントナイト供試体周辺の水溶液の水質分析から推定し、 $n_0=40\text{mol/m}^3$ と 50mol/m^3 と設定し計算されている。なお、試験で用いられた装置は、圧密類似型試験装置である。図 3.2-55 は、産出年度の異なるクニゲル V1 の最大膨潤圧と膨潤特性理論評価式による計算結果が示されたものである³⁸⁾。これらの結果から、産出年度の違いによるクニゲル V1 の膨潤圧の変化は、モンモリロナイト含有率、陽イオン交換容量の変化に起因することが示唆されている。

以上のことから、交換性陽イオン組成は、ベントナイト供試体の膨潤圧に影響を及ぼすと考えられるため、ベントナイト供試体の交換性陽イオン組成を必要に応じて記録する。

表 3.2-20 計算に使用したパラメータ³⁸⁾

ベントナイト	Old	New
ρ_m (Mg/m ³)	2.77	
ρ_{nm} (Mg/m ³)	2.81	2.82
S_m (m ² /g)	810	
S_{nm} (m ² /g)	0	
C_m (%)	48	57
CEC (meq/g)	0.732	1.166
EXC_{Na^+} (meq/g)	0.405	0.631
$EXC_{Ca^{2+}}$ (meq/g)	0.287	0.464
EXC_{K^+} (meq/g)	0.009	0.030
$EXC_{Mg^{2+}}$ (meq/g)	0.030	0.041
$(Rion)_{Na}$ (nm)	0.098	
$(Rion)_{Ca}$ (nm)	0.1115	
$(Rion)_K$ (nm)	0.133	
$(Rion)_{Mg}$ (nm)	0.0835	
U_{Na}	1	
U_{Ca}	2	
U_K	1	
U_{Mg}	2	
t (m)	9.60×10 ⁻¹⁰	

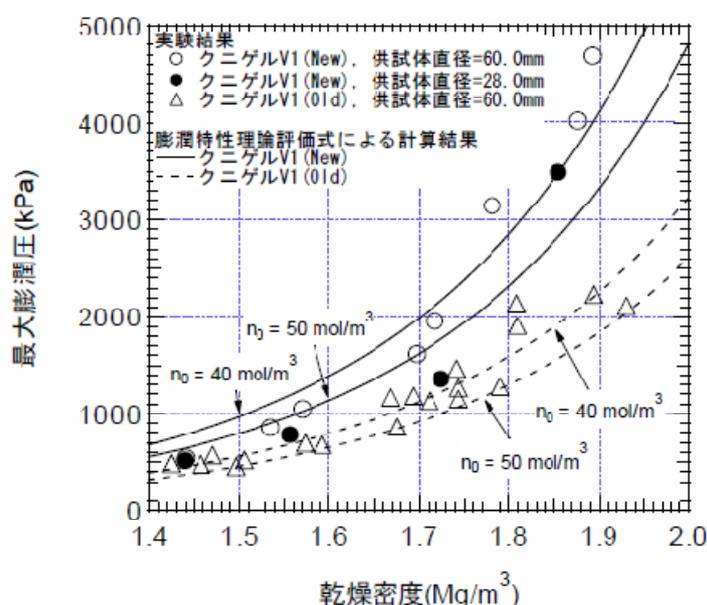


図 3.2-55 産出年度の異なるクニゲル V1 の膨潤圧と膨潤特性理論評価式による計算結果³⁸⁾

2) 定量的評価が困難な要因

(a) 土の微視的構造の影響

中野ほか³⁹⁾は、拘束された不飽和粘土の膨潤圧について、粘土粒子の層間水に発生する膨潤圧と粒子の配向について考察しており、これらを考慮した計算結果が実測値の傾向をよく表現できることを示唆している。この検討例は、土の微視的構造が膨潤圧に影響するという一つの結果であると考えられるが、現状、この他に知見が見当たらず、土の微視的構造が膨潤圧に及ぼす影響については判断が出来ない。今後、土の微視的構造の影響については、更なる検討が必要である。

(b) 密度不均一性の影響

鈴木・藤田は³⁾、前述した供試体の寸法が膨潤圧に及ぼす影響要因の検討の一つとして、供試体の圧縮成型方法による密度のばらつきについて検討を行っている。圧縮成型方法は、上面加圧により圧縮成型する方法（乾燥密度 1.8 Mg/m^3 を対象に実施）と上下面加圧により圧縮成型（図 3.2-56）する方法（乾燥密度 1.6 Mg/m^3 を対象に実施）をとっており、供試体の寸法は、直径 50mm、高さ 100mm となっている。用いられた材料は、クニゲル V1 にケイ砂を 30wt% 混合したものである。なお、試験には拘束型試験装置が用いられた。試験の結果、上面加圧による圧縮成型方法（乾燥密度 1.8 Mg/m^3 ）をとった場合、供試体中には $1.6 \sim 1.95 \text{ Mg/m}^3$ の密度勾配が生じ、圧縮面である供試体上部の密度が高くなることが示されている（図 3.2-57）。一方、上下面加圧による圧縮成型方法（乾燥密度 1.6 Mg/m^3 ）をとった場合、供試体の上部と下部での密度が高く中央部での密度が低くなり（図 3.2-58）、上面加圧による圧縮成型方法に比して密度のばらつきが小さくなることが示されている。

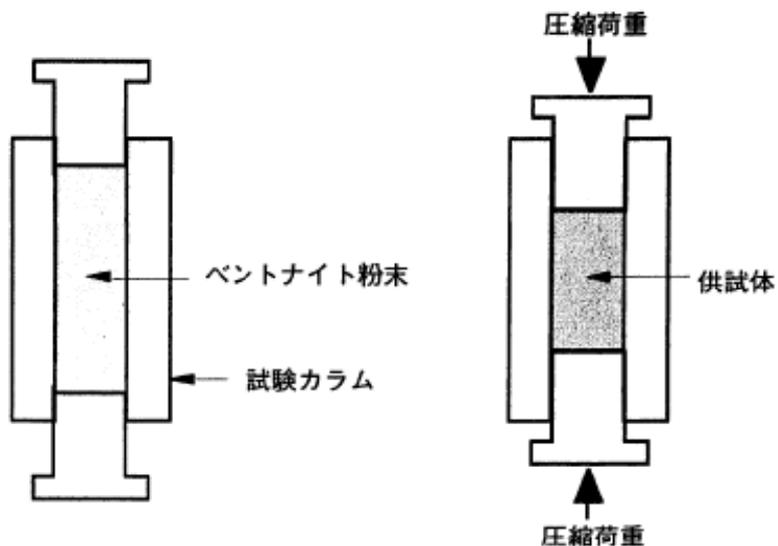


図 3.2-56 上下面加圧による圧縮成型方法³⁾

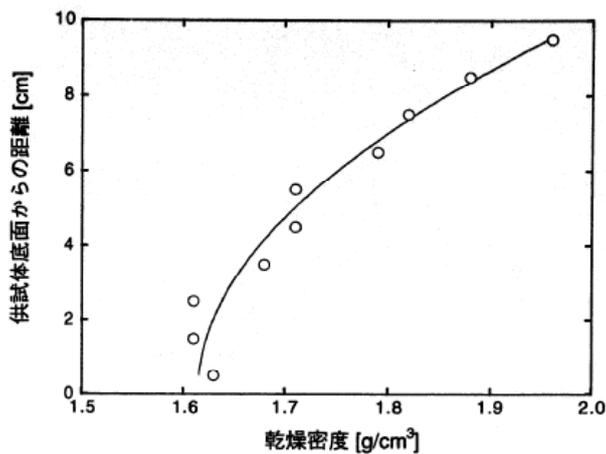


図 3.2-57 上面加圧による圧縮成型方法での密度分布（乾燥密度 1.8 Mg/m³）³⁾

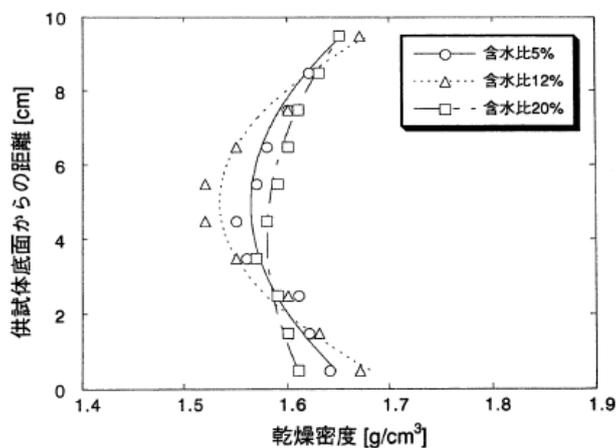


図 3.2-58 上下面加圧による圧縮成型方法での密度分布乾燥密度 1.6 Mg/m³）³⁾

鈴木・藤田³⁾の結果を踏まえ、圧縮成型方法の違いによる密度の不均一性、ならびに密度の不均一性が膨潤圧に及ぼす影響を把握する観点から確認試験を行った。以下にそれらの結果を示す。

a) 圧縮成型方法による密度不均一性に関する再確認試験

① 試験条件及び方法

室内試験で用いる供試体の圧縮成型方法については、上面加圧による圧縮成型方法と上下面加圧による圧縮成型方法に大別できる。また、圧縮成型に際しては、ベントナイト系材料のリバウンドを考慮して成型した後、成型治具より取り出し試験に用いる場合や、成型を容易にするために圧縮成型用モールドに焼結金属フィルターを設ける場合などがある。そこで、①圧縮方法、②圧縮成型後の拘束時間、③圧縮成型を容易にするための排気方法を条件とした試験を行い、成型後の供試体の密度分布に関するデータの取得を実施した。試験にはクニゲル V1 を用い、有効粘土密度 1.6 Mg/m^3 に関しては直径 30mm、高さ 10mm の供試体寸法で上述した①～③の影響を把握した。また、有効粘土密度 1.8 Mg/m^3 では直径 50mm、高さ 10mm 及び高さ 50mm を対象として、供試体の高さの影響に関するデータの取得も実施した。なお、これらの試験はクニゲル V1 単体で実施し、試験温度は室温である。試験に使用したクニゲル V1 の物理特性及び粒度構成を表 3.2-21 に、試験条件を表 3.2-22 に、また、化学特性を表 3.2-23 にそれぞれ示す。また、圧縮成型状況を写真 3.2-8～写真 3.2-11 に示す。

密度分布の測定に際しては、圧縮成型し所定の拘束時間保持後、2mm ずつ供試体を押し出し、スクレーパーにて切断、炉乾燥前後の重量測定により算出した。供試体の押し出しから供試体切断状況を写真 3.2-12～写真 3.2-15 に示す。なお、供試体の押し出し量は、ノギスにて 3 点計測を行い、その平均値とした。また、供試体を抜き出しながら切断していく過程で供試体の変形などにより当初の供試体の高さよりも最大で 6%程度の増減が認められた。したがって、最終的な密度の算出に際しては、これらの変形量分を補正して求めている。

表 3.2-21 試験に使用したクニゲル V1 の物理特性及び粒度構成

試料名		クニゲル V1 [®]
ロット NO.		304464
物理特性	自然含水比 [%]	6.8～8.5
	pH	10.0
	膨潤力 [ml/2g]	20
	土粒子密度 [Mg/m^3]	2.733
	液性限界 [%]	486.0
	塑性限界 [%]	31.4
	塑性指数 [%]	454.6
粒度構成	最大粒径 [mm]	0.075
	礫分 [%]	0
	砂分 [%]	0.0
	シルト分 [%]	13.2
	粘土分 [%]	86.8

表 3.2-22 圧縮成型方法による密度分布測定試験条件

試験 No.	有効粘土密度 [Mg/m ³]			1.6	1.8	1.8
	ケイ砂混合率			0%		
	初期含水比 [%]			7 ~ 10		
	圧縮方向	拘束時間	排気方法	供試体の寸法 φ 30×h10 [mm]	φ 50×h10 [mm]	φ 50×h50 [mm]
No.1	上面加圧	0分	胴部及びピストンとのクリアランスから自然に排気	●	●	●
No.2		15分		●		
No.3		30分		●		
No.4		60分		●		
No.5		180分		●		
No.6		240分		●		
No.7	上面加圧	0分	圧縮成型用モールド底部に焼結金属フィルター (5 μm) を設け排気	●	●	●
No.8		15分		●		
No.9	上面加圧	0分	圧縮成型用モールド底部に焼結金属フィルター (5 μm) を設け、圧縮成型時に真空ポンプで吸引し排気	●		
No.10		15分		●		
No.11	上下面加圧	0分	胴部及び上下ピストンとのクリアランスから自然に排気	●	●	●

表 3.2-23 試験に使用したクニゲル V1 の化学特性

試料名		クニミネ工業 (製) クニゲル V1 [®]
メチレンブルー吸着量	[mmol/100g]	78
モン脱時付含有率	[wt%]	55.7
浸出陽イオン	Na ⁺ [meq/100g]	67.8
	K ⁺ [meq/100g]	4.7
	Mg ⁺⁺ [meq/100g]	2.7
	Ca ⁺⁺ [meq/100g]	47.5
	Total [meq/100g]	122.7
陽イオン交換容量	[meq/100g]	76.2
化学組成	SiO ₂	69.7
	TiO ₂	0.14
	Al ₂ O ₃	15.8
	Fe ₂ O ₃	1.69
	MgO	2.19
	CaO	2.00
	Na ₂ O	2.04
	K ₂ O	0.24
	MnO	0.04
	ZnO	0.01
	SrO	0.02
	ZrO ₂	-
	CuO	0.01
	Cr ₂ O ₃	0.02
	P ₂ O ₅	0.03
	Y ₂ O ₃	0.01
	BaO	0.17
	lg-loss [%]	5.29
Total	100.0	
Cl	-	
SO ₄	0.61	



(有効粘土密度 1.6 Mg/m^3)
写真 3.2-8 上面加圧による
圧縮成型方法+自然排気



(有効粘土密度 1.6 Mg/m^3)
写真 3.2-9 上下面加圧による
圧縮成型方法



(有効粘土密度 1.8 Mg/m^3 , $\phi 50 \times h 50 \text{ mm}$)
写真 3.2-10 上下面加圧による圧縮成型方法



写真 3.2-11 真空ポンプによる吸引



写真 3.2-12 圧縮成型後の供試体の押し出し



写真 3.2-13 供試体押し出し後の状況



写真 3.2-14 供試体の切断状況 (2mm)



写真 3.2-15 切断供試体の重量測定

② 試験結果

試験における各供試体の成型圧力、初期含水比及び成型後の密度分布測定結果などを表 3.2-24～3.2-26 に示す。なお、ここでいう成型圧力は、ベントナイトのリバウンド分を考慮して負荷した値である。また、これらの表中に示した試験 No.は、表 3.2-22 で示した試験 No.と整合するものであることから、それぞれの試験条件は同表を参照されたい。なお、表 3.2-24 には、試験 No.1、7、11 にそれぞれ枝番（例えば、No.1-1 や No.1-2 といったように）が付いているが、これらについては初期含水比の違いによる影響、すなわち初期飽和度の影響を把握するための試験を行っている。

有効粘土密度 1.6 Mg/m^3 の供試体における密度分布の結果を図 3.2-59～図 3.2-69 に示す。また、これらの試験の結果を平均分散値として整理したものを図 3.2-70 に示す。

試験 No.1～6（上面加圧による圧縮成型方法、フィルターなし）の結果から、密度のばらつきの程度としては、おおよそ 1.4 Mg/m^3 ～ 1.8 Mg/m^3 の範囲にあり、圧縮面（供試体上面）あるいは供試体下面のどちらかが、特に密度が高くなるなどといった傾向は見られなかった。一方、試験 No.7～10（上面加圧による圧縮成型方法、フィルター有、又は真空ポンプで吸引したケース）の結果に示すように、フィルターを設けるなどしてエアーを抜けやすくすることで、密度のばらつきの範囲は狭まる傾向になる。また、料上下面加圧による圧縮成型に関しては、供試体上下の密度のばらつきはあるものの、供試体中央部ではほぼ目標の乾燥密度に近づく傾向にある。図 3.2-70 から、上面加圧による圧縮成型方法（図中、試験 No.1～No.6）と上下面加圧による圧縮成型方法（図中、試験 No.11）とでは、若干、後者の方が密度のばらつきは小さくなるもののそれほど大きな効果はなく、むしろフィルターの有無（図中、試験 No.7、8）、あるいは真空ポンプによる吸引（図中、試験 No.9、10）の効果の方が大きいことが分かる。

有効粘土密度 1.8 Mg/m^3 、供試体高さ 10mm の結果を図 3.2-71～図 3.2-77 に、供試体高さ 50mm における結果を図 3.2-78～図 3.2-81 に示す。供試体高さ 10mm の試験では、図 3.2-77 よりフィルターの設置の効果（図中、試験 No.7-1）よりも、上下面加圧による圧縮成型方法（図中、試験 No.11-1）の効果が大きく、また、若干、初期含水比の効果（図中、試験 No.7-2、11-2）も見られる結果となった。供試体高さ 50mm では、図 3.2-81 より上面加圧による圧縮成型方法（フィルター無し、図中、試験 No.1）>上面加圧による圧縮成型方法（フィルター有り、図中、試験 No.7）>上下面加圧による圧縮成型方法（フィルター無し、図中、試験 No.11）の順で平均分散値が小さくなる傾向は示しているが、それほど顕著な効果として表れるような結果とはならなかった。その理由の一つとして、供試体が硬く切断し難いことに加え、供試体高さ 50mm の場合は切断時の誤差がかなり結果に含まれたものと考えられる。

以上のことから、圧縮成型方法によって供試体内の密度のばらつきは生じるものの、圧縮成型方法によって供試体内の密度のばらつきをある程度抑制することが可能である。

表 3.2-24 有効粘土密度 1.8 Mg/m³, φ 50mm×h10mm

	有効粘土密度 [Mg/m ³]						成型压力 [kgf]	平均含水比 [%]
	上面 (圧縮面)	←----->				下面		
試験No.1-1	1.974	1.771	1.951	1.799	1.514	1.802	7000	7.92
	1.971	1.612	2.091	1.764	1.511	1.790	8000	7.96
	1.818	2.004	1.501	1.896	1.816	1.807	7300	7.90
試験No.1-2	1.967	1.669	1.816	1.728	1.735	1.783	7000	10.03
	2.005	1.741	1.667	1.714	1.661	1.757	8000	9.93
	1.910	1.723	2.029	1.641	1.518	1.764	7300	10.01
試験No.7-1	1.944	1.541	1.823	1.784	1.875	1.793	6700	8.02
	1.895	1.668	1.945	1.851	1.451	1.762	7000	8.07
	1.894	1.807	1.901	1.844	1.549	1.799	6900	7.99
試験No.7-2	1.926	1.708	1.848	1.602	1.878	1.792	6800	10.07
	1.863	1.637	1.640	1.744	1.945	1.766	6700	9.97
	1.945	1.736	1.804	1.896	1.552	1.787	6900	9.90
試験No.11-1	1.785	1.856	1.836	1.876	1.625	1.796	8300	7.98
	1.850	1.849	1.795	1.776	1.726	1.799	8300	7.91
	1.777	1.826	1.879	1.689	1.741	1.782	8600	7.90
試験No.11-2	1.712	1.877	1.823	1.941	1.538	1.778	7600	10.21
	1.747	1.761	1.740	1.921	1.720	1.778	7500	10.13
	1.684	1.857	1.852	1.780	1.755	1.786	7700	10.04

表 3.2-25 有効粘土密度 1.8 Mg/m³, φ 50mm×h50mm

		試験No.1			試験No.7			試験No.11		
有効粘土密度 [Mg/m ³]	下面	1.731	1.643	1.729	1.410	1.550	1.779	2.048	1.843	2.092
	↑	1.495	1.416	1.760	1.863	1.684	1.756	1.834	1.983	1.872
		1.585	1.894	1.777	1.557	1.823	1.706	1.884	1.935	1.817
		1.695	1.745	1.733	1.852	2.052	1.765	1.914	1.877	1.831
		1.842	1.563	1.752	1.621	1.644	1.778	1.871	1.872	1.827
		1.655	1.829	1.626	1.840	1.692	1.794	1.766	1.793	1.884
		1.840	1.649	1.883	1.840	1.893	1.814	1.853	1.843	1.792
		1.555	1.850	1.806	1.818	1.739	1.726	1.804	1.659	1.819
		2.019	1.859	1.762	1.889	1.791	1.903	1.703	1.817	1.917
		1.786	1.803	1.667	1.702	1.814	1.812	1.906	1.947	1.787
		1.794	1.791	1.709	1.786	1.777	1.853	1.884	1.684	1.768
		1.773	1.830	1.791	1.811	1.847	1.875	1.824	1.857	1.891
		1.749	1.886	1.987	1.627	1.834	1.762	1.731	1.613	1.756
		1.833	1.795	1.782	1.832	1.779	1.818	1.828	1.796	1.809
		1.852	1.922	1.771	1.916	1.867	1.854	1.810	1.865	1.728
		1.841	1.736	1.869	1.735	1.868	1.767	1.837	1.818	1.721
		1.851	1.723	1.884	1.901	1.856	1.829	1.671	1.809	1.832
		1.769	1.747	1.941	1.893	1.842	1.887	1.801	1.742	1.840
		1.950	1.912	1.776	1.673	1.868	1.837	1.846	1.819	1.794
		1.785	1.871	1.813	1.850	1.846	1.700	1.738	1.822	1.789
1.797	1.738	1.465	1.779	1.625	1.734	1.824	1.837	1.726		
		1.818	1.789	1.690	1.949	1.731	1.440	1.642	1.935	
				2.035	1.514	2.009	1.728	1.755	1.578	
	上面 (圧縮面)				1.806					
平均有効粘土密度 [Mg/m ³]		1.771	1.774	1.776	1.779	1.790	1.804	1.806	1.810	1.818
成型圧 [kgf]		9850	10309	10146	10258	10103	10237	7403	8616	8392
平均含水比 [%]		9.82	9.83	9.86	9.31	9.68	9.50	9.72	9.79	9.70

表 3.2-26 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ 30mm×h10mm

	有効粘土密度 [Mg/m ³]						成型 圧力 [kgf]	平均 含水比 [%]
	上面 (圧縮面)	←----->				下面		
試験No.1	1.852	1.683	1.541	1.426	1.421	1.585	830	8.05
	1.418	1.448	1.542	1.678	1.826	1.582	830	7.64
	1.673	1.559	1.726	1.596	1.533	1.617	800	6.67
	1.678	1.668	1.652	1.606	1.542	1.629	900	6.69
	1.470	1.529	1.670	1.679	1.713	1.612	1120	7.06
	1.596	1.597	1.570	1.570	1.567	1.580	1060	7.08
試験No.2	1.654	1.675	1.664	1.318	1.686	1.599	850	7.75
	1.546	1.526	1.473	1.729	1.542	1.563	820	7.66
	1.724	1.406	1.618	1.576	1.585	1.582	860	7.77
	1.549	1.624	1.577	1.609	1.546	1.581	1020	7.39
試験No.3	1.641	1.609	1.585	1.521	1.659	1.603	940	7.24
	1.505	1.715	1.670	1.511	1.499	1.580	1000	7.69
	1.535	1.655	1.491	1.544	1.597	1.564	980	7.35
	1.606	1.562	1.569	1.427	1.699	1.573	990	7.86
	1.667	1.608	1.645	1.596	1.535	1.610	1010	7.16
試験No.4	1.643	1.697	1.578	1.595	1.519	1.606	1080	6.91
	1.637	1.686	1.564	1.483	1.459	1.566	1050	7.18
	1.653	1.650	1.542	1.471	1.466	1.556	820	8.25
	1.529	1.556	1.675	1.589	1.587	1.587	900	8.18
	1.591	1.530	1.744	1.463	1.637	1.593	920	7.82
試験No.5	1.564	1.617	1.511	1.525	1.626	1.569	900	8.10
	1.506	1.700	1.583	1.486	1.549	1.565	850	7.68
	1.743	1.650	1.488	1.416	1.486	1.557	850	7.52
	1.534	1.596	1.555	1.479	1.654	1.563	870	8.02
	1.529	1.565	1.590	1.465	1.684	1.567	820	7.53
試験No.6	1.546	1.752	1.594	1.462	1.501	1.571	800	8.13
	1.514	1.532	1.701	1.450	1.652	1.570	800	8.13
	1.631	1.497	1.622	1.507	1.552	1.562	860	8.44
	1.542	1.565	1.693	1.469	1.584	1.571	820	7.87
	1.540	1.661	1.562	1.597	1.655	1.603	850	8.35
試験No.7	1.539	1.560	1.659	1.473	1.665	1.579	800	8.31
	1.670	1.605	1.602	1.566	1.537	1.596	980	7.10
	1.632	1.567	1.566	1.566	1.545	1.575	990	7.24
	1.519	1.656	1.582	1.503	1.636	1.579	880	8.18
試験No.8	1.616	1.527	1.479	1.604	1.598	1.565	870	6.91
	1.577	1.624	1.546	1.651	1.574	1.594	1100	7.39
	1.567	1.564	1.578	1.562	1.610	1.576	1100	7.18
試験No.9	1.568	1.524	1.662	1.513	1.595	1.573	1120	8.43
	1.578	1.591	1.542	1.595	1.568	1.575	1080	7.24
	1.592	1.644	1.598	1.564	1.569	1.593	1080	7.23
	1.606	1.533	1.595	1.576	1.583	1.579	1050	7.50
試験No.10	1.557	1.628	1.537	1.626	1.648	1.599	980	7.88
	1.526	1.620	1.651	1.679	1.532	1.602	940	7.69
	1.518	1.673	1.533	1.600	1.603	1.585	960	7.49
	1.574	1.633	1.615	1.529	1.492	1.569	940	8.04
	1.635	1.547	1.572	1.478	1.478	1.542	890	7.78
	1.593	1.579	1.544	1.502	1.680	1.579	800	7.74
試験No.11	1.507	1.520	1.573	1.490	1.503	1.518	1150	8.27
	1.408	1.483	1.615	1.628	1.547	1.536	1150	8.10
	1.507	1.731	1.604	1.588	1.435	1.573	1150	7.90

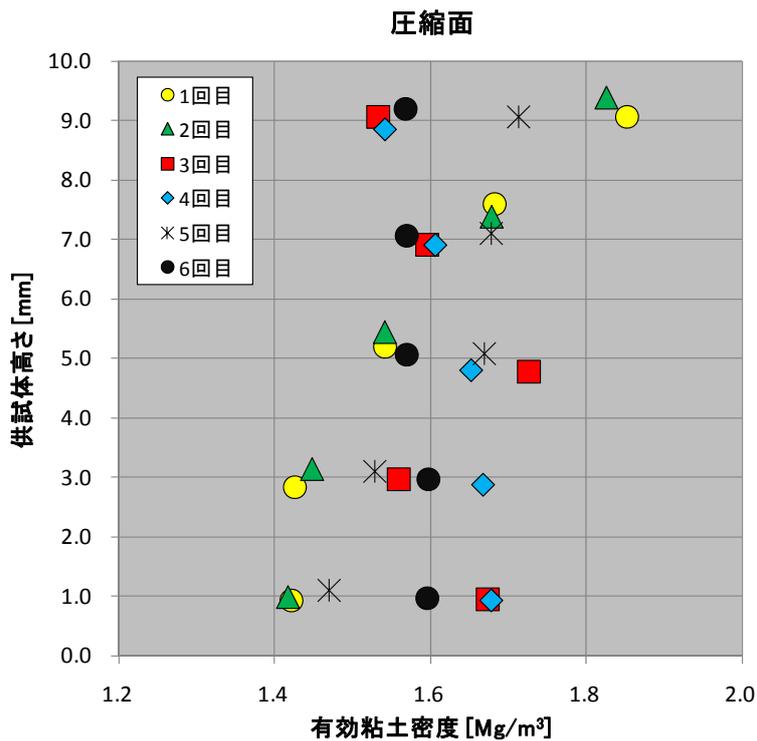


図 3.2-59 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 0 分

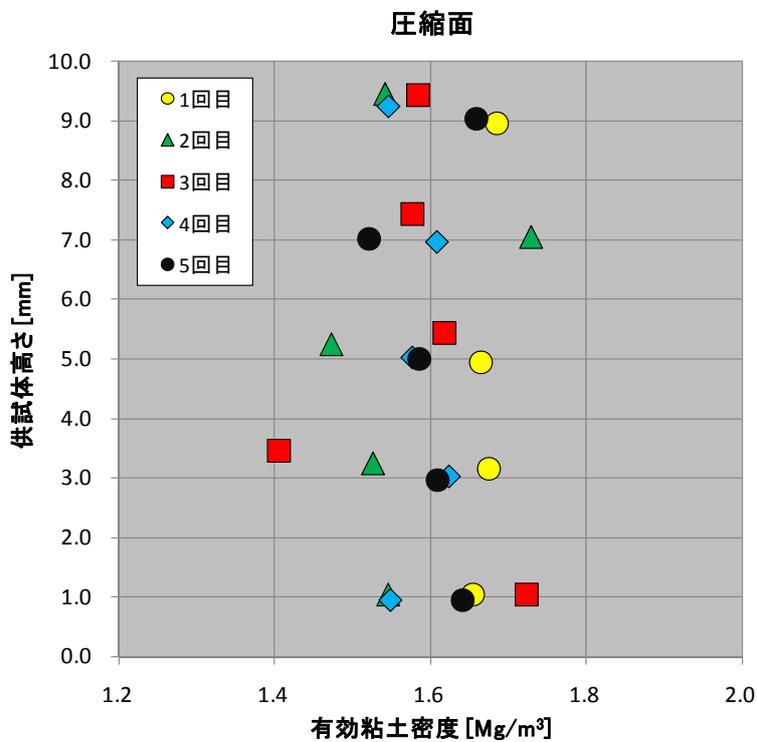


図 3.2-60 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 15 分

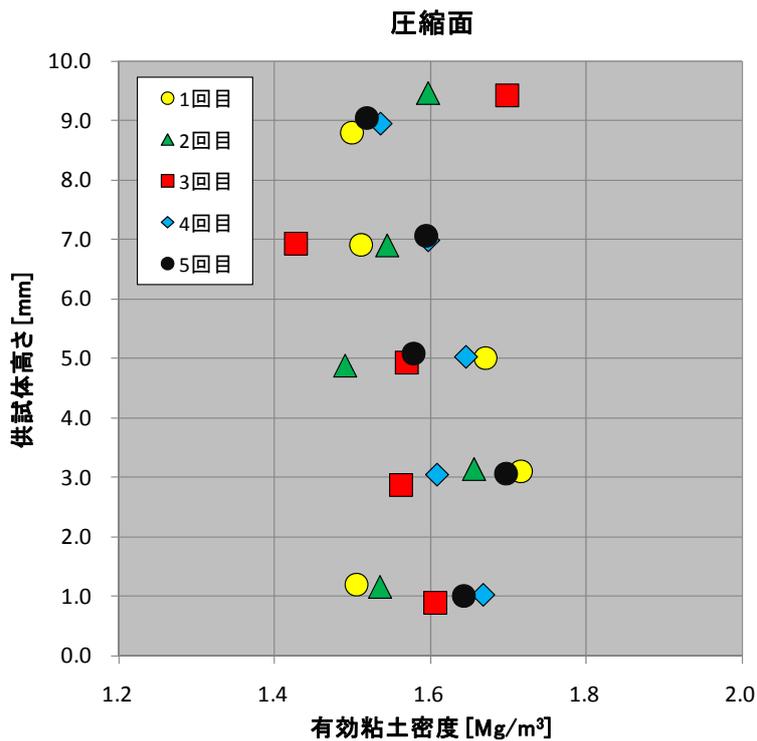


図 3.2-61 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ 30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 30 分

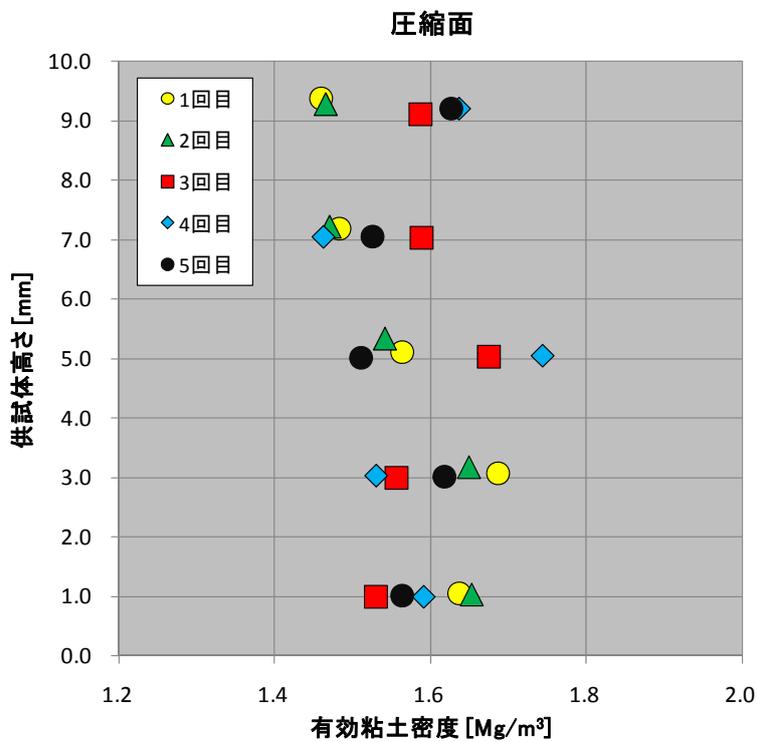


図 3.2-62 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ 30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 60 分

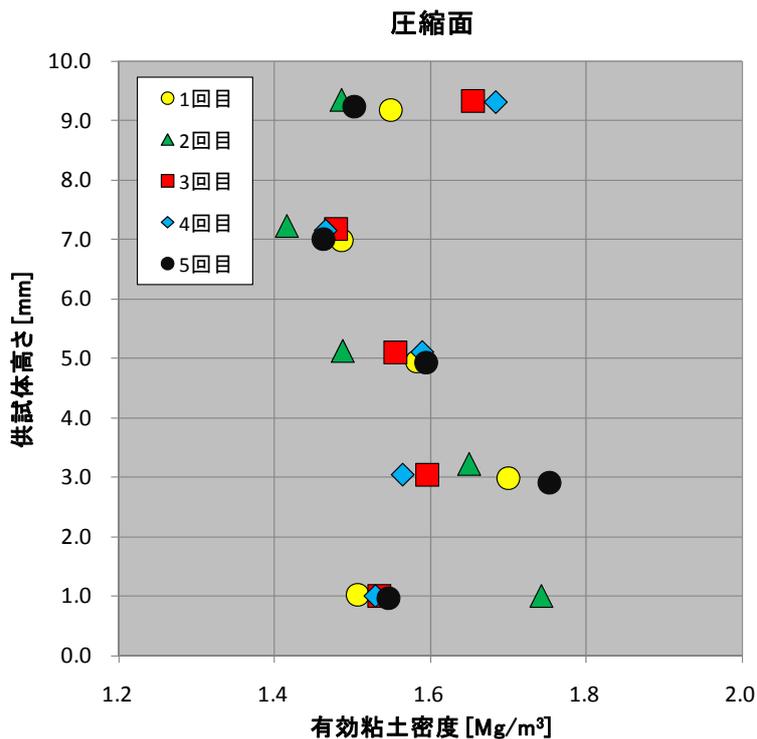


図 3.2-63 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ 30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 180 分

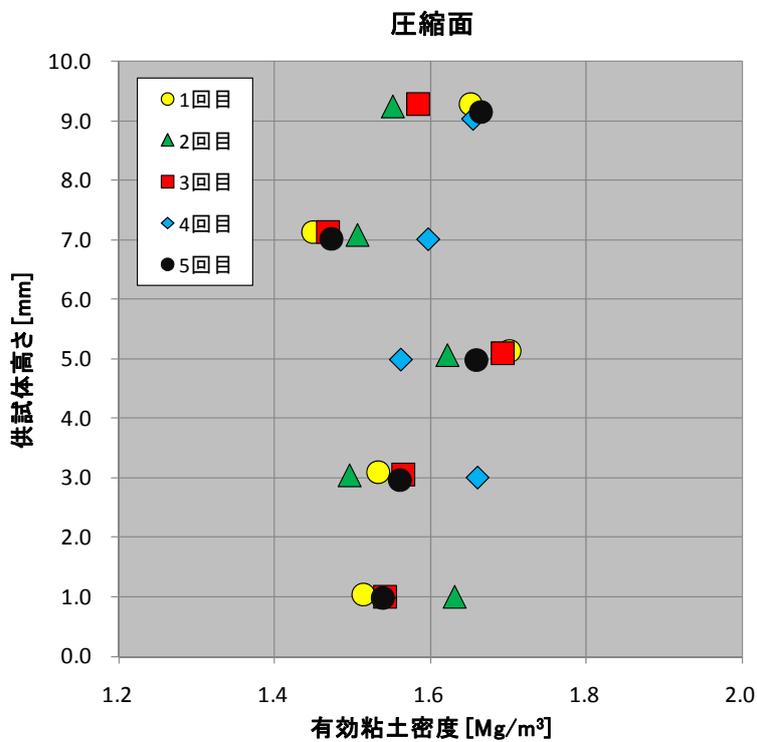


図 3.2-64 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ 30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 240 分

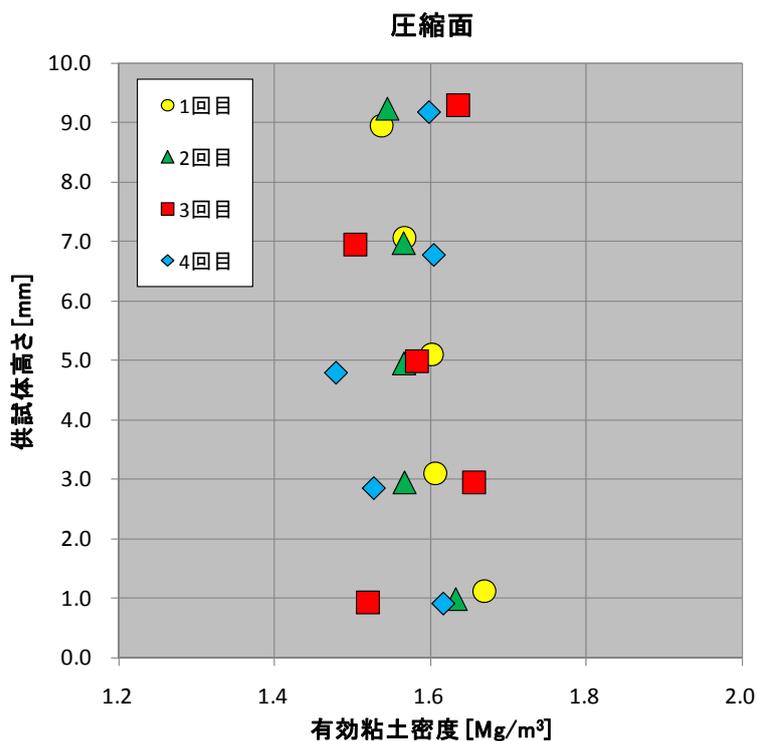


図 3.2-65 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ 30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターあり、拘束時間 0 分

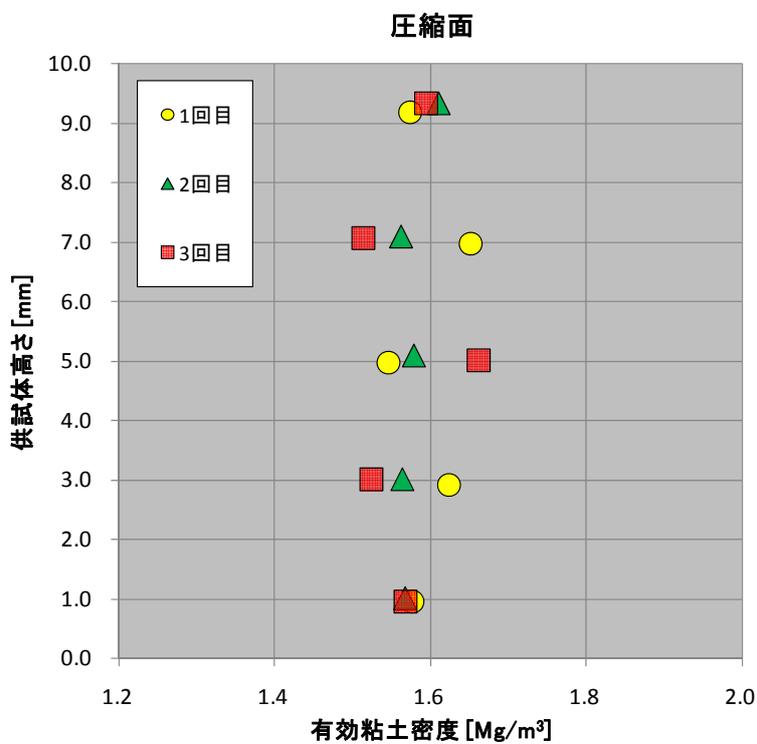


図 3.2-66 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ 30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターあり、拘束時間 15 分

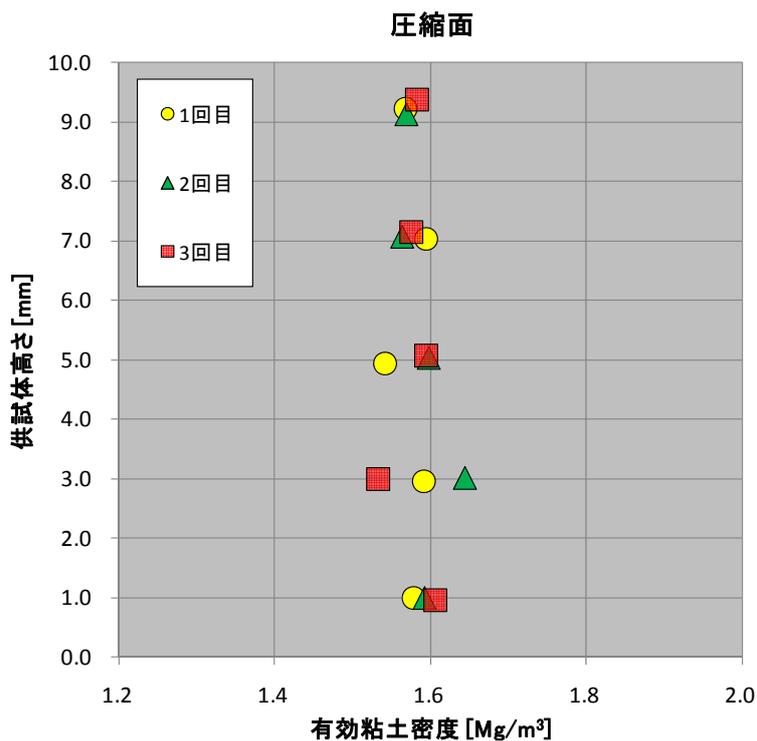


図 3.2-67 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターあり、真空ポンプによる吸引、拘束時間 0 分

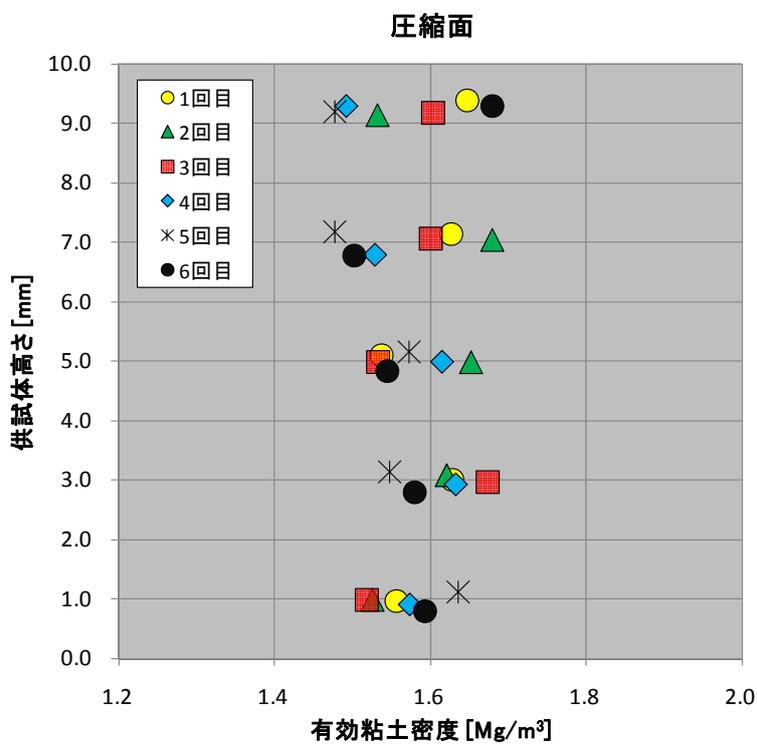


図 3.2-68 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ30×h10, 上面加圧による圧縮成型方法
フィルターあり、真空ポンプによる吸引、拘束時間 15 分

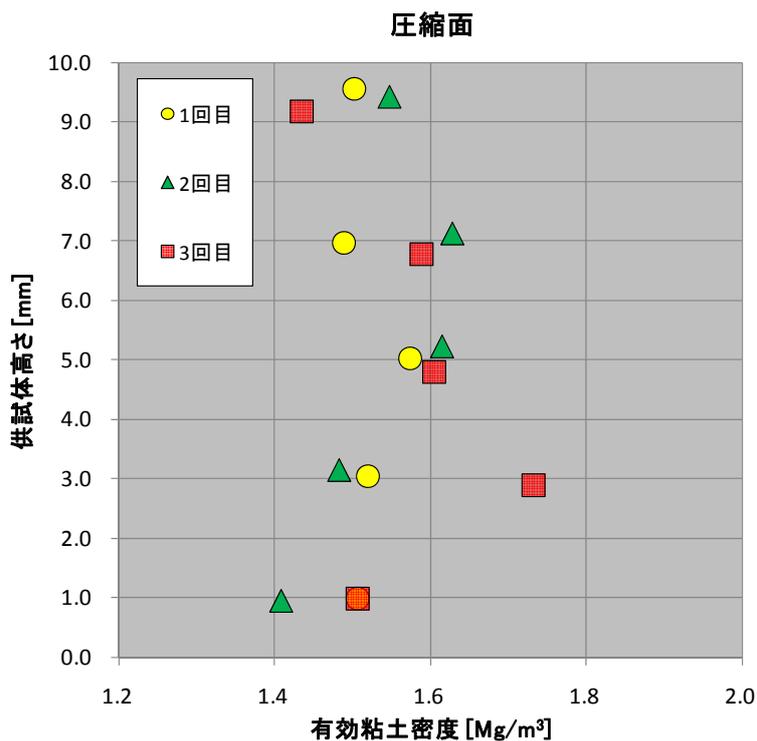


図 3.2-69 有効粘土密度 1.6 Mg/m³, φ30×h10, 上下面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 0 分

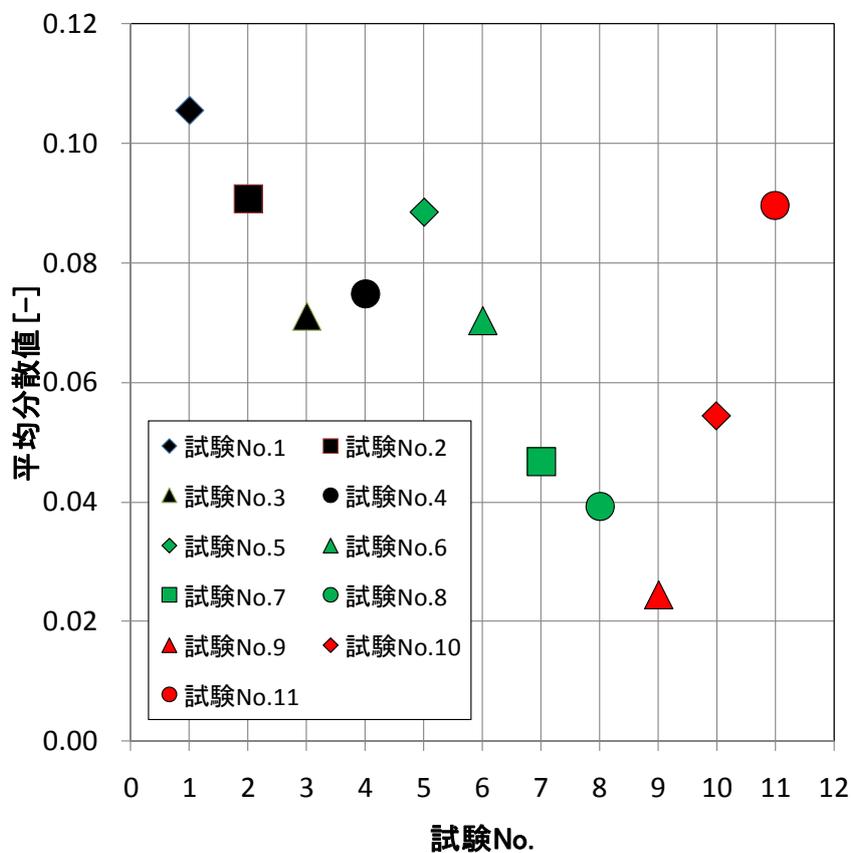


図 3.2-70 有効粘土密度 1.6 Mg/m³における各試験での平均分散値

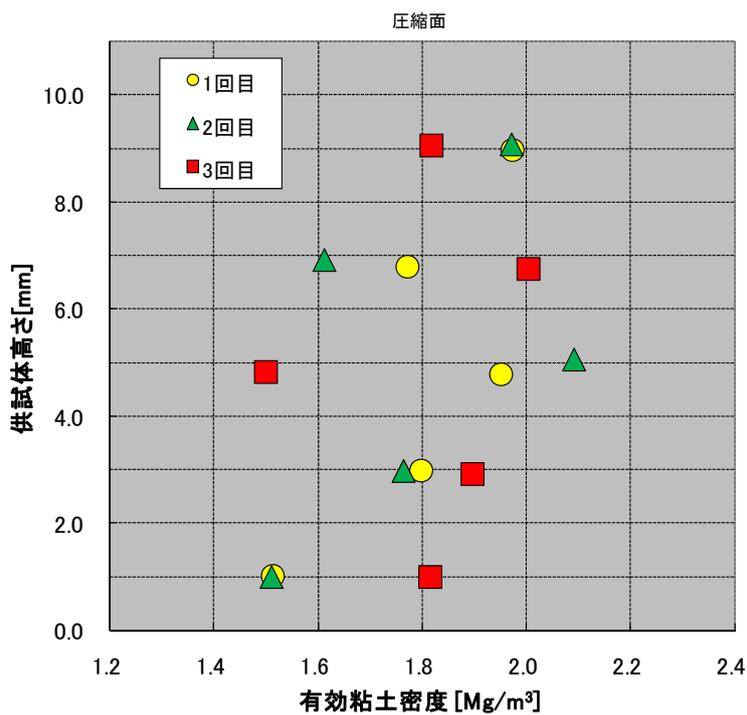


図 3.2-71 有効粘土密度 1.8 Mg/m³、φ 50×h10mm、上面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 0 分、初期含水比：約 7.9%

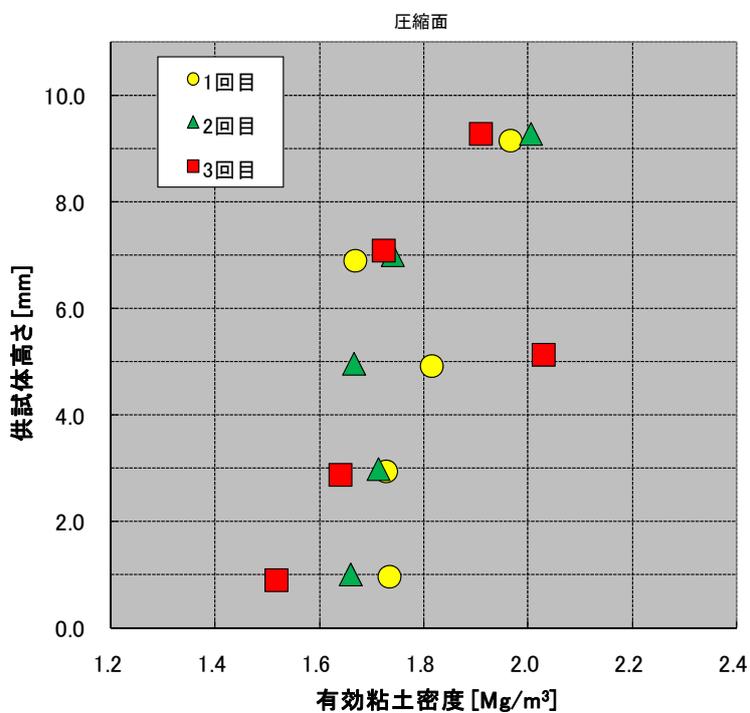


図 3.2-72 有効粘土密度 1.8 Mg/m³、φ 50×h10mm、上面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 0 分、初期含水比：約 10%

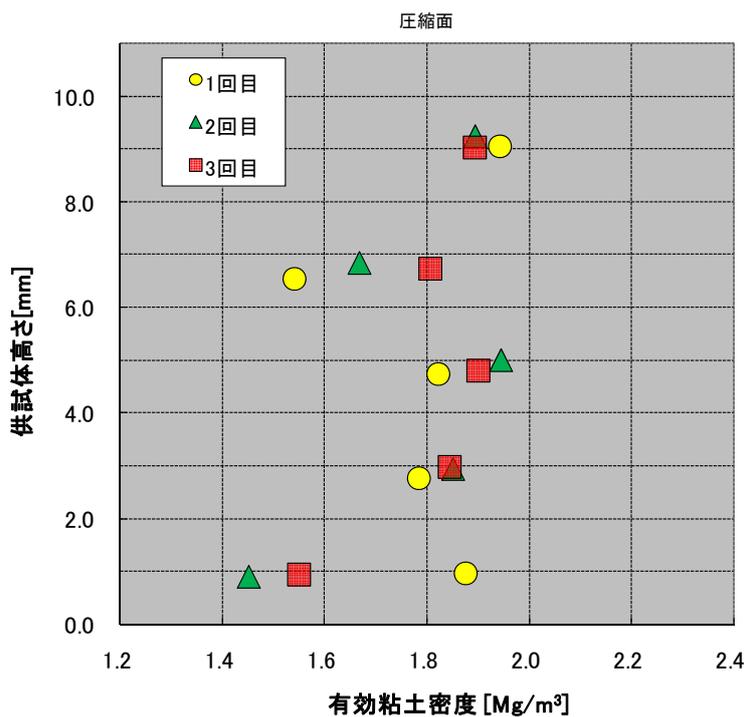


図 3.2-73 有効粘土密度 1.8 Mg/m³、φ50×h10mm、上面加圧による圧縮成型方法
フィルターあり、拘束時間 0 分、初期含水比：約 8%

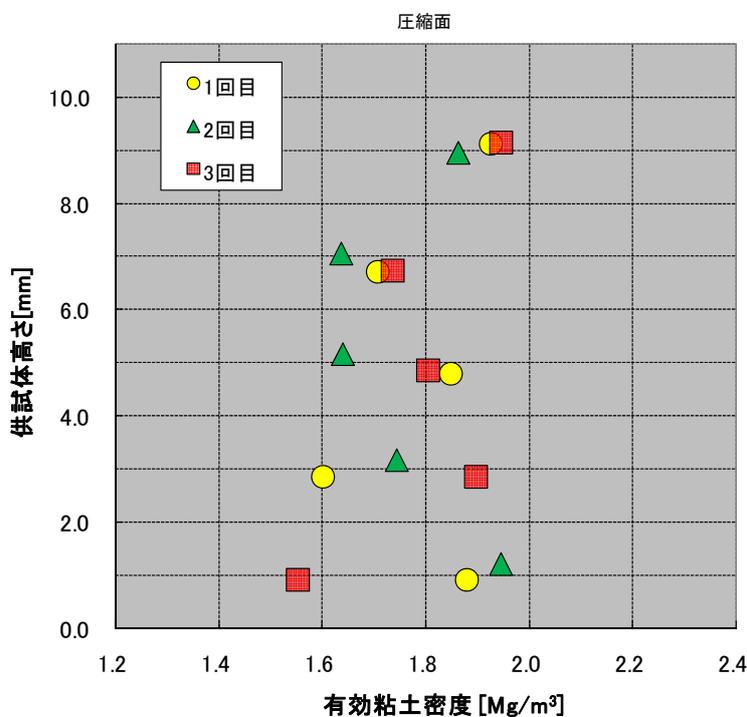


図 3.2-74 有効粘土密度 1.8 Mg/m³、φ50×h10mm、上面加圧による圧縮成型方法
フィルターあり、拘束時間 0 分、初期含水比：約 10%

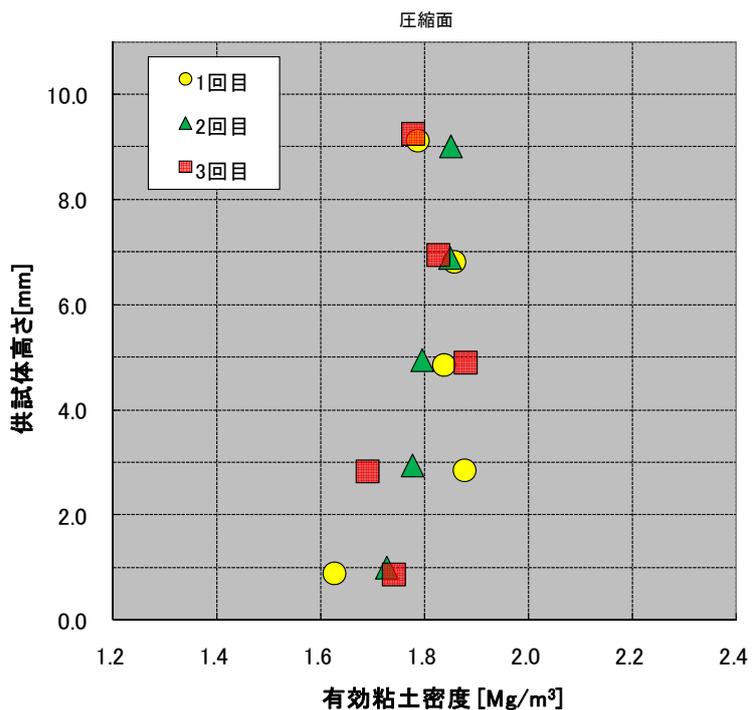


図 3.2-75 有効粘土密度 1.8 Mg/m³、φ 50×h10mm、上下面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 0 分、初期含水比：約 8%

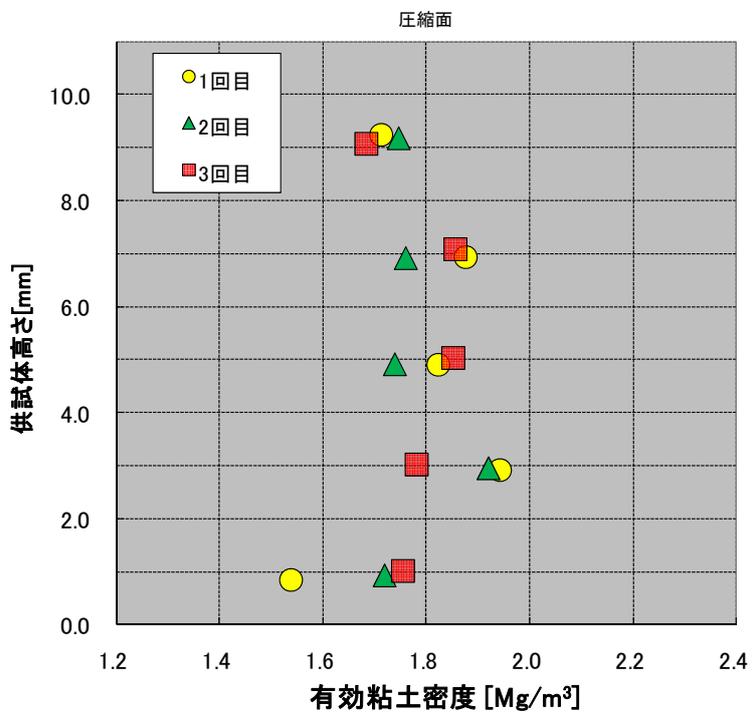


図 3.2-76 有効粘土密度 1.8 Mg/m³、φ 50×h10mm、上下面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 0 分、初期含水比：約 10%

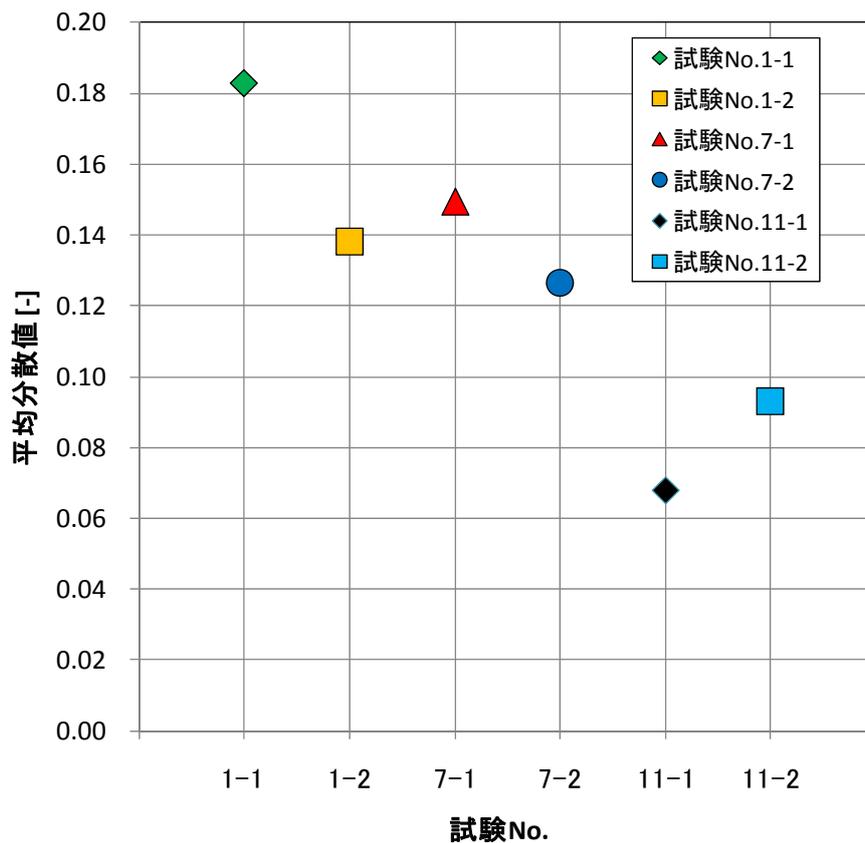


図 3.2-77 有効粘土密度 1.8 Mg/m^3 、 $\phi 50 \times h10 \text{ mm}$ における各試験での平均分散値

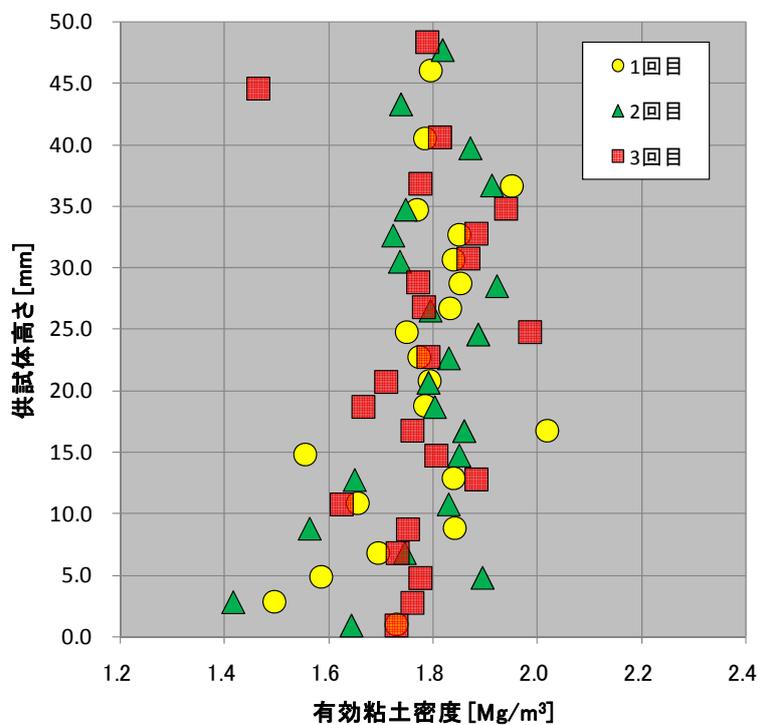


図 3.2-78 有効粘土密度 1.8 Mg/m^3 、 $\phi 50 \times h50 \text{ mm}$ 、上面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 0 分、初期含水比：約 9.8%

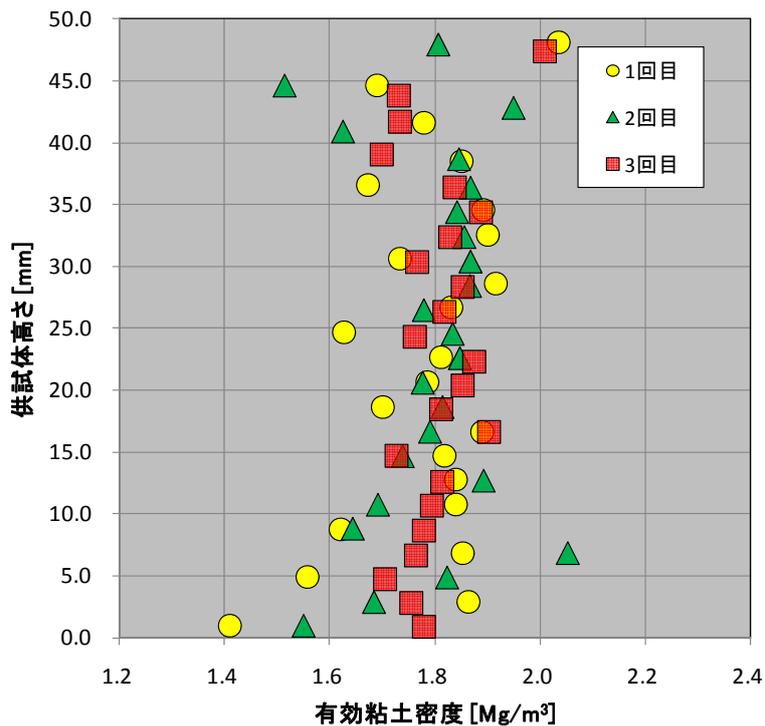


図 3.2-79 有効粘土密度 1.8 Mg/m^3 、 $\phi 50 \times h50\text{mm}$ 、上面加圧による圧縮成型方法
フィルターあり、拘束時間 0 分、初期含水比：約 9.5%

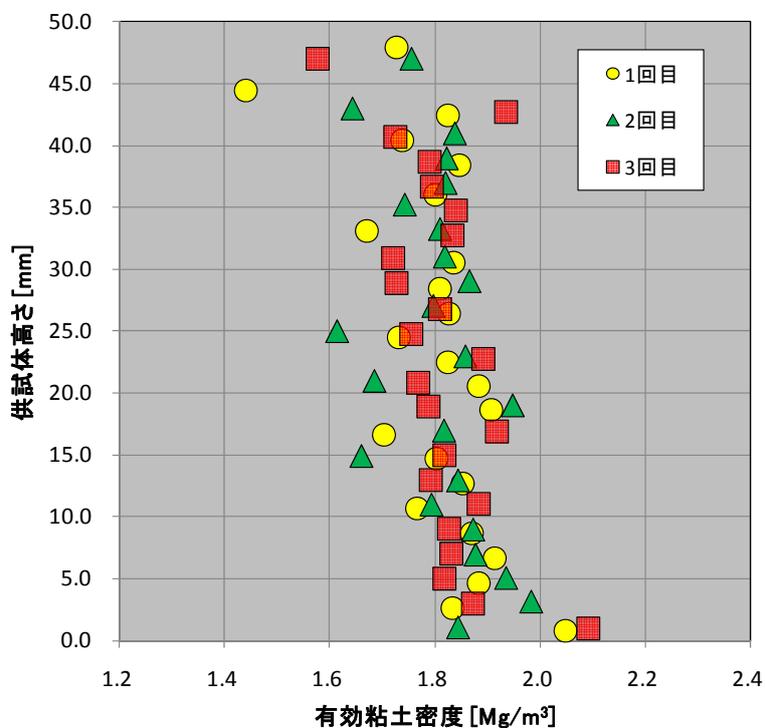


図 3.2-80 有効粘土密度 1.8 Mg/m^3 、 $\phi 50 \times h50\text{mm}$ 、上下面加圧による圧縮成型方法
フィルターなし、拘束時間 0 分、初期含水比：約 9.7%

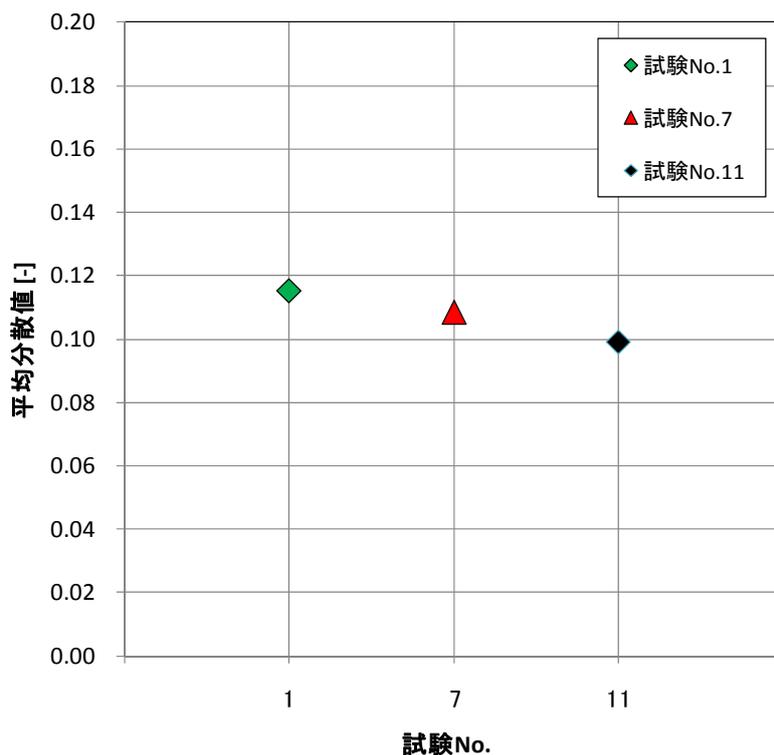


図 3.2-81 有効粘土密度 1.8 Mg/m^3 、 $\phi 50 \times h50\text{mm}$ における各試験での平均分散値

b) 供試体の不均一性の影響に関する再確認試験

ここでは、密度の不均一性が膨潤圧に及ぼす影響について把握するため、平均有効粘土密度 1.6 Mg/m^3 と 1.4 Mg/m^3 を対象とした膨潤圧試験を実施した。以下に試験法及び結果について示す。

① 試験条件及び方法

ここで述べる試験ケースは、表 3.2-2 中の A-3-1、A-3-2 及び A-3-3 である。本試験では、表 3.2-1 で示したクニゲル V1 を使用しており、ケイ砂等は混合していない。溶液には、イオン交換水を使用し、試験は $23 \sim 25^\circ\text{C}$ で制御した温度条件下で実施した。試験に使用する供試体は、アムスラーを用い、上面加圧により圧縮成型した (写真 3.2-16~写真 3.2-22)。供試体は、直径 60mm 、 10mm のものを作製し、3つを重ねた直径 60mm 、高さ 30mm のものの膨潤圧を測定した。試験ケース A-3-1 は初期有効粘土密度 1.6 、 1.4 、 1.2 Mg/m^3 のものを3つ重ねて平均有効粘土密度 1.4 Mg/m^3 、A-3-2 は初期有効粘土密度 1.7 、 1.6 、 1.5 Mg/m^3 で平均有効粘土密度 1.6 Mg/m^3 、A-3-3 は初期有効粘土密度 1.8 、 1.6 、 1.4 Mg/m^3 で平均有効粘土密度 1.6 Mg/m^3 となっている。膨潤圧は、供試体の下部に設置したロードセルと、上部の土圧計 (共和電業、PGM-50KD、容量 5MPa 、中央から 15mm) で測定した。上部土圧計は、中心から 15mm の位置に設置されている。図 3.2-82 に拘束型試験装置の概略を示す。

試験の手順を以下に示す。供試体間隙の空気をスムーズに排出し飽和度を高めるため一次元に通水して飽和させた。

- ・ 締め付けた供試体を作製し、容器にセットした後に流入側、流出側のバルブを真空ポンプに接続し、真空近くまで減圧した状態で7日間放置した。その後、炭酸ガスを供試体内部に

充填し1晩放置した後、再度供試体内の流入側、流出側バルブより真空近くまで減圧を半日ほど行った。

- ・その後、流出側のバルブを閉じ、流入側のバルブを開け、供試体下部より、イオン交換水を通水し、膨潤圧を測定した。通水では、飽和度を高めるために、圧力を試験ケース A-3-1 は 0.2MPa、試験ケース A-3-2 及び A-3-3 は 0.5MPa を設定した。
- ・試験終了後は、供試体を約 2mm 毎に切り分け、乾燥密度と含水比の分布を測定した。



(ピストン、リング、モールド)
写真 3.2-16 モールド一式



写真 3.2-17 試料計量

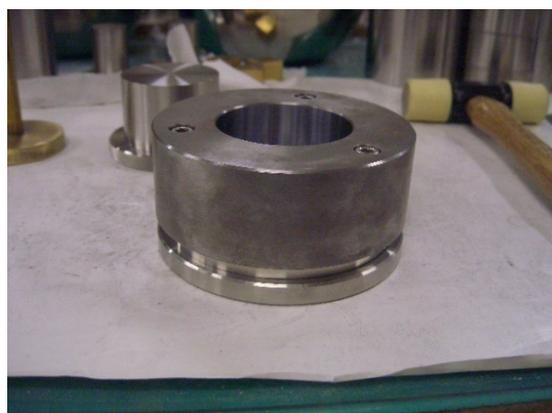


写真 3.2-18 成型モールド組み込み



写真 3.2-19 試料挿入



写真 3.2-20 モールド組み立て



写真 3.2-21 成型機への設置

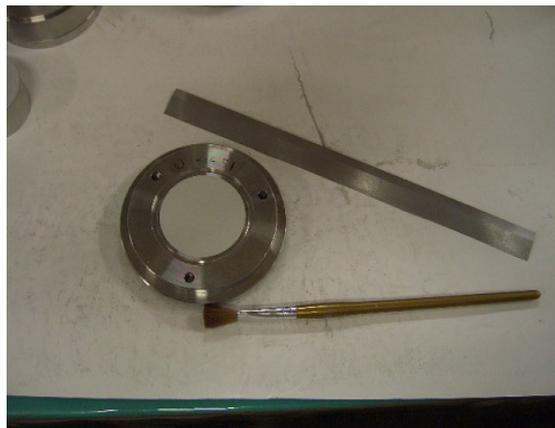


写真 3.2-22 供試体端面成形

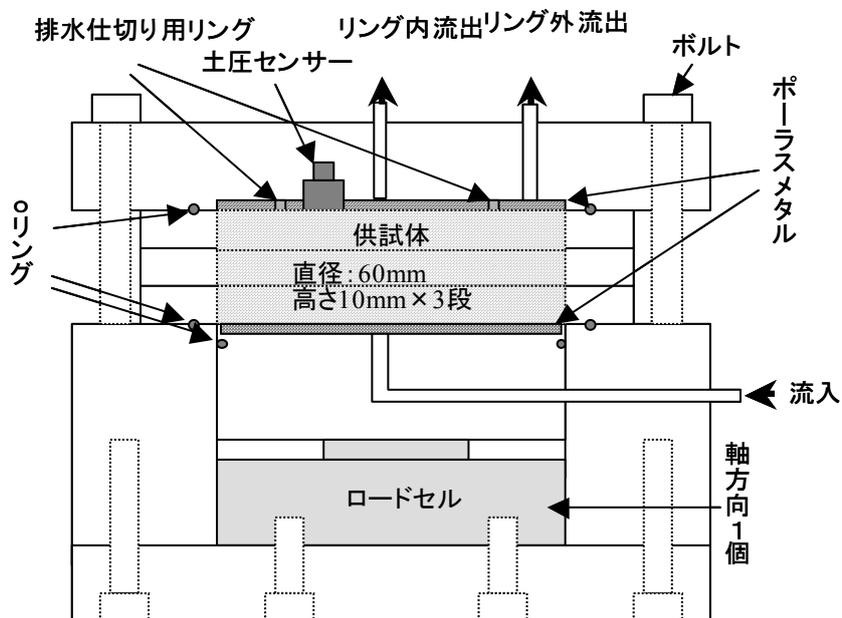


図 3.2-82 拘束型試験装置の概要図

② 試験結果

経過時間と膨潤圧との関係を図 3.2-83～図 3.2-85 に示した。膨潤圧については、土圧計の値から流入側の水圧を差し引いた値を用いている。

試験終了時の下部ロードセルならびに上部土圧計で得られた値の平均値を膨潤圧とし、同一のベントナイトで行った初期含水比の影響に関する追加試験（表 3.2-2 参照）のうち、同程度の初期含水比のベントナイトを用いて行った試験ケース A-0-1、A-0-2、A-0-3 で得られた結果を図 3.2-86 に併記した。試験ケース A-3-1、A-3-2、A-3-3 の膨潤圧は、有効粘土密度が近い、それぞれ試験ケース A-0-2、A-0-3 の 80%程度であった。このように供試体密度の不均一性が膨潤圧に影響を及ぼすことが明らかとなった。しかし、その影響は 20%程度であり、図 3.2-2 や図 3.2-8 に示されるデータのばらつきの主たる原因であるとは思われない。

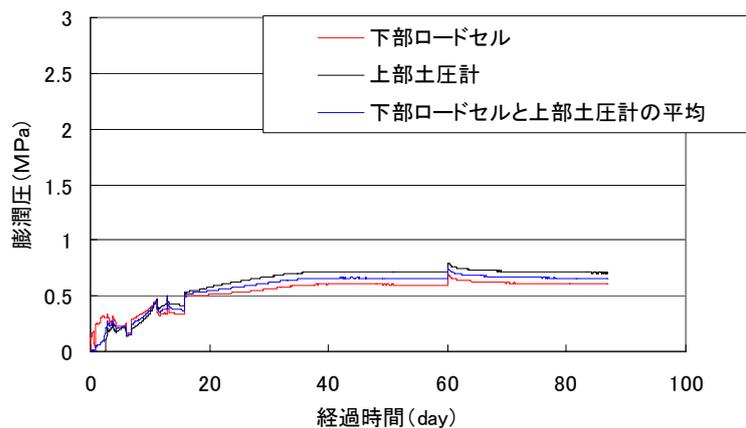


図 3.2-83 膨潤圧の経時変化(試験ケース A-3-1、上部 1.6Mg/m³、中部 1.4Mg/m³、下部 1.2Mg/m³)

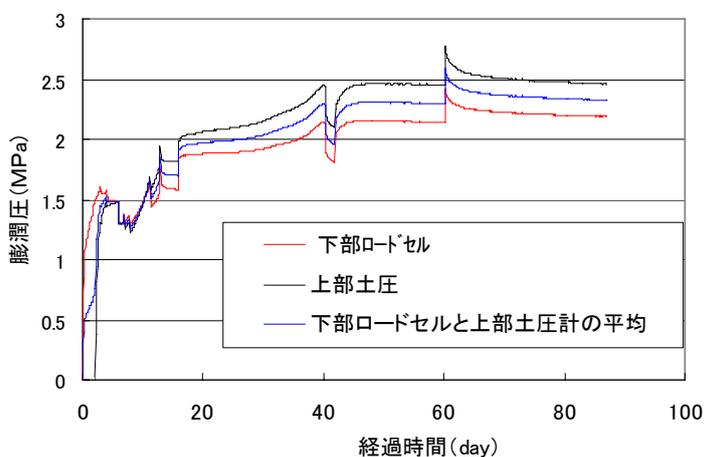


図 3.2-84 膨潤圧の経時変化(試験ケース A-3-2、上部 1.7Mg/m³、中部 1.6Mg/m³、下部 1.5Mg/m³)

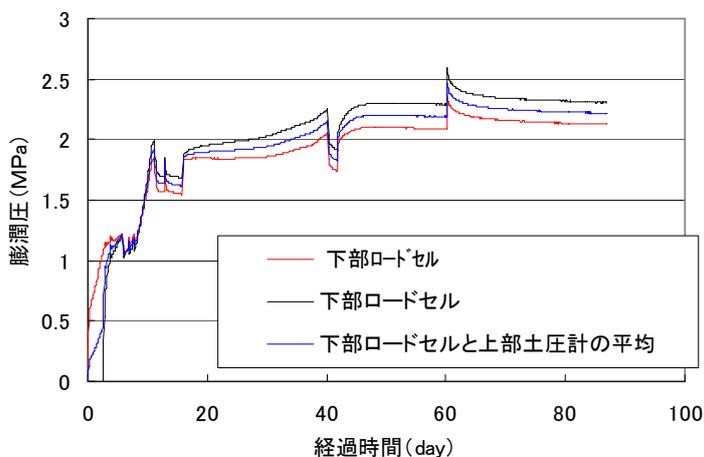


図 3.2-85 膨潤圧の経時変化(試験ケース A-3-3、上部 1.8Mg/m³、中部 1.6Mg/m³、下部 1.4Mg/m³)

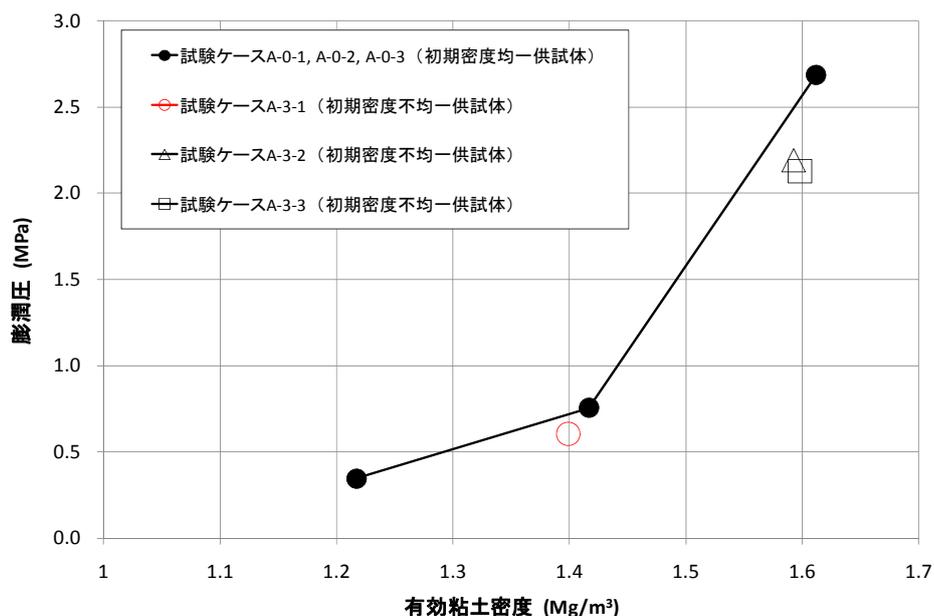


図 3.2-86 密度の不均一性が膨潤圧に及ぼす影響の検討結果（表 3.2-2 参照）

これまでの研究例や確認試験の結果から、供試体作製時に密度のばらつきは生じるものの、圧縮成型方法やフィルターの設置など、ばらつきを低減することは可能である。具体的には、できるだけエアを抜けやすくするため焼結金属フィルターなどを設置するか、上下面加圧による圧縮成型方法を用いることが有効である。密度の不均一性が膨潤圧にどの程度影響を与えるかについては、追加試験の結果からは、平均的な密度の膨潤圧が発生するという結果が得られた。しかしながら、供試体の寸法による影響においても述べたように、乾燥密度 1.8Mg/m^3 では平均的な有効粘土密度で整理できないという結果も得られている。以上のことから、密度不均一性が膨潤圧に及ぼす影響に関しては、供試体の寸法による影響と合わせて今後の課題である。

3.2.4 膨潤圧試験法の現状と課題のまとめ

3.2.2 節及び 3.2.3 節における検討を踏まえ、現状の知見を整理するとともに、これらの知見から推奨できる方法の提案と今後の課題を以下に示す。

(1) 試験法自体による影響要因

1) 試験法（試験装置）の影響

- ・ 膨潤圧試験には、拘束型試験装置と圧密型試験装置が用いられており、既往の研究例や追加で行った実験結果などから、圧密型試験装置で得られた膨潤圧が拘束型試験装置で得られた膨潤圧に比べて小さくなる傾向が見られ、装置の違いにより膨潤圧が異なる可能性が考えられる。
- ・ 膨潤圧試験装置は、供試体の膨潤圧に見合った剛性を有すること。また必要に応じて装置のひずみを把握するためのひずみ計を設置する。
- ・ 装置の違いによる影響については、供試体寸法などが異なるため、これらの要因を含めて今後の検討課題である。

(2) 試験手順による影響要因

1) 飽和化の影響

- ・ これまでの研究例などから飽和度が小さいと膨潤圧は小さくなる傾向を示す。また、供試体の寸法にもよるが、膨潤圧が平衡に達するには、1週間～数週間、高密度になると数カ月程度必要となることから、飽和時の膨潤圧を求めるため、飽和度を高める工夫としては真空ポンプによる吸引や間隙内空気の炭酸ガス置換、飽和確認方法として給排水量の測定などに関する検討がそれぞれ行われている。
- ・ 供試体内に空気が残留することで供試体が飽和に達しない可能性があることから、供試体内の空気の排出も考慮し、供試体下部から次元で給水する。または、河野・西垣による背圧を用いた飽和度確認方法をとる。なお、全ての試験において試験終了後の飽和度を記録する。

(3) 試験条件による影響要因

1) 供試体寸法の影響

- ・ これまでの研究例から膨潤圧が供試体の寸法により異なるという結果と影響しないという結果がある。また、供試体の寸法により膨潤圧が異なるという結果は、有効粘土密度 1.6Mg/m^3 程度以上から顕著である。有効粘土密度 1.8Mg/m^3 を対象に追加実験を行った結果、供試体の直径と高さの比に比例して膨潤圧が大きくなるという結果が得られた。
- ・ 標準的な供試体の寸法を決定することが望ましいが、供試体寸法の影響が何に起因しているか現状では不明である。したがって、具体的な提案を行うためには、更なるデータの拡充が今後の課題である。

2) 初期含水比の影響

- ・ 初期含水比の影響に関しては、低い有効粘土密度ではその影響は小さいものの、高い有効粘土密度になるほど顕著に表れる結果が得られた。また、有効粘土密度 1.2Mg/m^3 、 1.4Mg/m^3 、 1.6Mg/m^3 を対象に追加実験を行った結果、初期含水比が膨潤圧に与える影響はあまり大きくないという結果が得られた。これらの結果から、有効粘土密度が 1.6Mg/m^3 を超える範囲では、初期含水比の影響の可能性はある。
- ・ 有効粘土密度によっては、初期含水比による膨潤圧が異なる可能性があることから、全ての試験で初期含水比を記録する。

3) 通水溶液の水類や組成の影響

- ・ これまでの実験の結果、通水溶液の種類や組成により膨潤圧が異なるという結果があることから、イオン交換水、蒸留水、海水、地下水等の溶液の種類や溶液中のイオン組成などを記録する。

4) 温度の影響

- ・ 膨潤圧は温度の影響を受けるとのデータがある。これまでの研究例をみると、“室温”と示された文献が多数存在するが、試験の実施場所によっては季節変動によって室温が大きく異なる

ることが予想される。したがって、試験を実施する際には、温度が一定の環境条件下で膨潤圧試験を実施する。なお、温度の制御が困難な場合には、試験期間中の温度を記録する。

(4) 供試体の特性による影響要因

1) 定量的評価が可能な要因

(a) モンモリロナイト含有率による影響

- ・ 膨潤圧はモンモリロナイト含有率の影響を受ける。また、同じ名称のベントナイトでも採掘場所や採掘時期の違いにより、モンモリロナイト含有率は異なる。したがって、試験に用いる材料のモンモリロナイト含有率を必要に応じて記録する。

(b) 土粒子密度の影響

- ・ 膨潤圧試験の結果を有効粘土密度、有効モンモリロナイト密度及び飽和度といった指標を用いて整理する際には、それらの指標が混合材の土粒子密度、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイト以外の随伴鉱物の土粒子密度、試験に用いた供試体の土粒子密度等の影響を受けるため、それらの情報を必要に応じて記録する。

(c) 交換性陽イオン組成

- ・ これまでの研究結果から、交換性陽イオン組成が膨潤圧に影響する可能性があることから、ベントナイト供試体の交換性陽イオン組成を必要に応じて記録する。

2) 定量的評価が困難な要因

(a) 土の微視的構造の影響

- ・ 土の微視的構造を考慮した計算から影響があるとの結果もあるが、現状知見が少なく更なる検討が必要である。なお、異方性の影響を考慮し、供試体の圧縮成型方法を必要に応じて記録する。

(b) 密度不均一性の影響

- ・ 圧縮成型方法の違いによる供試体中の密度不均一性を把握するための追加実験を行った結果、圧縮成型方法によって密度のばらつきの範囲をある程度抑制できることがわかった。また、「(4)2(b)b) 供試体の不均一性に関する再確認試験」で実施した3か月程度の追加試験の範囲において、試験終了後の供試体の密度のばらつきを調べた結果、成型時に比べて小さくなる傾向を示すが必ずしも均一にはならない。さらに膨潤圧へ及ぼす初期の不均一性の影響は大きくないとする実験結果が示された。密度不均一性が膨潤圧に及ぼす影響に関しては、供試体の寸法による影響と合わせて今後の課題である。
- ・ 密度の不均一性をできるだけ抑制する方法として、供試体作製時に圧縮成型治具や容器に空気を抜けやすくするため焼結金属フィルターなどを設置するか、密度不均一性が最も小さかった上下面圧縮により供試体を作製するといった方法が有効である。

参考文献

- 1) R. Pusch and Geodevelopment AB : “The buffer and backfill handbook -Part 2: Materials and techniques-, SKB TR-02-12 (2001).
- 2) R. Pusch and Geodevelopment AB : “The buffer and backfill handbook – Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods -, SKB TR-02-20 (2002).
- 3) 鈴木英明, 藤田朝雄: “緩衝材の膨潤特性”, 核燃料サイクル開発機構 技術資料, JNC TN8400 99-038 (1999).
- 4) 菊池広人, 棚井憲治: “幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験”, JNC TN8430 2004-005 (2005).
- 5) 前田宗宏, 棚井憲治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘: “カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性 - 膨潤圧, 透水係数, 一軸圧縮強度及び弾性係数 - ”, PNC TN8410 98-021 (1998).
- 6) 足立格一郎, 鈴木絵理子, 田邊亮, 黄西朱: “高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト緩衝材の膨潤特性に関する研究”, 土木学会第 56 回年次学術講演会, CS1-003, pp.6-7 (2001).
- 7) 小峯秀雄, 緒方信英: “放射性廃棄物処分のための砂・ベントナイト混合試料の膨潤特性とその評価法”, 電力中央研究所報告, 研究報告 U96029 (1997).
- 8) 直井優, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 百瀬和夫, 坂上武晴: “各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響”, 土木学会論文集 No. 785/III-70,39-49 (2005).
- 9) 今井久, 小野文彦, 増田良一, トランデュクフィオアン, 雨宮清: “緩衝材原位置締固め工法の検討 - 膨潤試験 - ”, 土木学会第 55 回年次学術講演会, CS-193 (2000).
- 10) 小峯秀雄, 緒方信英: “高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋め戻し材の膨潤評価式の提案 - 砂とベントナイトの配合割合及びベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響 - ”, 電力中央研究所報告, 研究報告 U99013 (1999).
- 11) 藤崎勝利, 北本幸義, 小林一三, 中寫誠門, 田中俊行, 笹倉剛: “飽和過程におけるベントナイトの膨潤挙動に関する実験的研究”, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 3-058, pp.115-116 (2005).
- 12) 工藤康二, 田中幸久, 横倉俊幸, 北村至: “締固めたベントナイト試料の膨潤圧測定方法に関する検討”, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp. 2573-2574 (2005).
- 13) 大森浩司, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲: “供給水循環環境下でのベントナイト膨潤変形特性とその実験装置の構築”, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp. 351-352 (2005).
- 14) 直井優, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 百瀬和夫, 坂上武晴: “異なる寸法の供試体を用いたベントナイト系緩衝材の膨潤圧特性調査”, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.2205-2206 (2004),
- 15) 竹が原竜大, 九石正美, 川口光夫, 高尾肇: “緩衝材の膨潤・透水特性 - 隙間の影響 - ”, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.101-102 (2005).
- 16) 大橋良哉, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲: “短期間の温度履歴を受けたベントナイトの膨潤特性の変化”, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.213-214 (2004).

- 17) 田中幸久, 中村邦彦: “海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響”, 電力中央研究所報告, 研究報告 N04007 (2004).
- 18) 小峯秀雄, 緒方信英, 西好一: “高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材の力学特性 (その1) - 締固めたベントナイトの給水膨潤メカニズムの実験的検討 -”, 電力中央研究所報告, 研究報告 U92039 (1992).
- 19) 菅原宏, 小峯秀雄, 緒方信英, 田代勝浩: “締固めたベントナイトの膨潤圧に関する基礎的研究”, 第 27 回土質工学研究発表会, pp. 277-278 (1992).
- 20) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 百瀬和夫, 坂上武晴: “人工海水条件下における各種ベントナイトの自己シール挙動に関する実験的研究”, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.299-300 (2006).
- 21) 田中幸久: “蒸留水・人工海水長期通水中のベントナイトの膨潤圧・透水係数測定”, 日本原子力学会「2008 年秋の大会」, pp.727 (2008).
- 22) 田中幸久, 中村邦彦: “長期透水中のベントナイトの膨潤圧と透水係数の測定”, 第 44 回地盤工学研究発表会, pp.247-248 (2009).
- 23) 鈴木英明, 山形順二, 寺門一馬, 柴田雅博, 広瀬郁郎: “緩衝材の特性試験 (I)”, PNC TN8410 92-057 (1992).
- 24) 笹倉剛, 畔柳幹雄, 岡本道孝: “ベントナイト変遷挙動のモデル化のデータ取得及び調査”, JNC TJ8400 2002-025 (2002).
- 25) 直井優, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 大久保嘉雄, 坂上武晴: “ベントナイト系緩衝材の膨潤圧特性評価のための小口径供試体用膨潤特性試験装置の開発”, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.2407-2408 (2003).
- 26) 杉浦航, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲: ベントナイト原鉱石の膨潤特性に及ぼす初期含水比の影響, 第 44 回地盤工学研究発表会 pp.235-236 (2009).
- 27) 林秀郎, 朝野英一, 高橋真一, 志村友行, 廣田謙: ベントナイトの初期含水比が飽和膨潤特性に及ぼす影響, 土木学会第 64 回年次学術講演会, CS5-049, pp.231-232 (2009).
- 28) 伊藤裕紀, 庭瀬一仁, 鈴木康正, 千々松正和: “ベントナイトクニゲル GX の基本特性 (その1) 膨潤挙動に関する検討”, 土木学会第 63 回年次学術講演会, CS05-14, pp.195-196 (2008).
- 29) 今井 久, 出口 朗, 小野文彦, トランデュクフィオアン, 雨宮 清: “緩衝材原位置締固め工法の検討 - 膨潤圧試験 -”, 土木学会第 56 回年次学術講演会 (平成 13 年 10 月), pp. 16-17 (2001).
- 30) 児玉潤, 足立格一郎, 田邊亮, 鈴木絵理子, 山元茂弘: “ベントナイト・珪砂混合試料の高温環境下での膨潤特性”, 土木学会論文集 No.764, III-67, 319-328 (2004).
- 31) 東畑郁生, ピシット クンティワタナクン, 大石幹太, 竹内直樹: “粘土の工学的性質に及ぼされる高温環境の影響”, 土と基礎, Vol. 46, No.10, pp.27-30 (1998).
- 32) 棚井憲治, 菊池広人: “緩衝材の膨潤応力測定手法に関する現状と課題”, 日本原子力学会「2008 年秋の大会」, pp.722 (2008).
- 33) 田中幸久, 中村邦彦: “ベントナイトの膨潤圧に及ぼす供試体飽和度の影響の考察”, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp. 229-230 (2009).

- 34) 田代勝浩, 小峯秀雄, 緒方信英: “締固めたベントナイトの膨潤変形に及ぼす水質の影響 - Na^+ , Ca^{2+} , K^+ イオンの影響 -”, 第 31 回地盤工学研究発表会, pp.339-340 (1996).
- 35) 早川幸恵, 千々松正和, 六川武, 平賀健史, 小峰秀雄: “ベントナイトの膨潤特性に与える NaCl 濃度の影響”, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp. 349-350 (2003).
- 36) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 - 平成 17 年とりまとめ -”, JNC TN1400 2005-015 (2005).
- 37) 小峯秀雄, 緒方信英, 中島晃, 高尾肇, 植田浩義, 木元崇宏: “一次元模型実験によるベントナイト系緩衝材の自己シール性評価”, 土木学会論文集 No.757/III-66, pp.101-112 (2004).
- 38) 小峯秀雄: “同一名称ベントナイトの産出年度による違いと膨潤特性理論評価式の適用性”, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.251-252 (2005).
- 39) 中野政詩, 雨宮悠, 藤井克己, 石田朋靖, 石井明俊: “拘束された不飽和粘土の浸潤と膨張圧”, 農業土木学会論文集第 112 号, pp.55-66 (1984).
- 40) 田中幸久, 廣永道彦, 工藤康二: “飽和したベントナイトのガス移行メカニズムとそのモデル化”, 電力中央研究所報告, 研究報告 N07005 (2007).
- 41) 田中幸久, 廣永道彦: “飽和した高密度ベントナイト原鉱のガス移行特性”, 電力中央研究所報告, 研究報告 N09010 (2010).
- 42) 田中幸久, 横山信吾: “飽和した高密度ベントナイトの膨潤圧・透水係数に及ぼす高温履歴の影響”, 日本原子力学会「2010 春の年会」予稿集, pp.400 (2010).
- 43) 河野伊一郎, 西垣 誠: “室内透水試験法に関する 2, 3 の考察”, 土質工学会論文報告集, vol.22, No.4, pp. 181-190 (1982).

3.3 熱特性

3.3.1 放射性廃棄物処分でベントナイト系材料に求められる熱特性について

HLW 処分における廃棄体の埋設レイアウトは、ニアフィールド(人工バリアとその設置等により影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤と合わせた領域)の温度、空洞安定性、人工バリアに必要な寸法、地質環境特性等からくる制限や条件を満たし、合理的な処分坑道離間距離及び廃棄体ピッチの組み合わせによって設定される。このうち、ニアフィールドの温度については、廃棄体が核種の崩壊により発熱するため、ガラス固化体、緩衝材及び周辺岩盤の特性に対する熱的影響の観点から最大温度許容値を超えないよう制限される。このため処分場周辺の温度場を把握するために廃棄体の埋設密度、廃棄体の定置方式、処分深度等の種々の条件でのニアフィールド熱解析を実施する必要がある¹⁾。

また、人工バリアを設置する際の特徴としては、設置場所が地下空洞であることや放射能レベルの高い廃棄物直近での作業には遠隔操作が必要となることが挙げられている²⁾。特に緩衝材の施工管理については、遠隔操作を考慮した緩衝材の施工手法と適切な品質管理が必要となることから、近年、緩衝材の施工時の品質管理には、緩衝材の品質特性である乾燥密度や水分との相関が認められる熱伝導率に着目することにより、熱物性値の測定が遠隔操作施工時の密度と含水比の管理方法として有望であることが検討されている²⁾。

余裕深度処分において想定される廃棄体の発熱特性や施設形態に基づけば、廃棄体の発熱に伴う人工バリア(充填材・セメント系材料・ベントナイト系材料)の最高温度は埋め戻し後数年程度で発生することから、人工バリアへの影響は短期間で終了するものと考えられている³⁾。しかしながら、温度変化による変質作用がベントナイト系材料に生じた場合、その影響は発熱期間の終了後も継続する可能性があるため、温度予測のための熱伝導解析を実施しておくことは重要である。

設計における温度予測評価は、熱伝導解析については、汎用コードが整備されているため、人工バリアの温度分布の変化に関して対応可能である。ただし、境界条件として熱伝達境界を用いる場合には、熱伝導率の設定が必要となり、基本的には伝熱ハンドブック³⁾等が参考となるが、熱解析に使用する熱伝導率や比熱等の物性値は、試験等に基づいて設定することが望ましい⁴⁾とされていることから、ベントナイト系材料に係わる熱特性値測定に及ぼす影響要因について把握しておくことが必要である。

3.3.2 熱物性値測定方法の調査

ここでは、熱物性値の測定に係わる測定概論を調査するとともに、ベントナイト系材料に係わる測定法を対象として、地盤工学会、土木学会及び日本原子力学会等の学会発表や論文発表、R.Pusch and Geodevelopment AB による SKB のテクニカルレポート^{5),6)}、さらには原子力機構等で発刊されている研究報告書類を基にした文献調査からベントナイト系材料を対象とした代表的な測定手法を把握するとともに測定データを収集する。また、現状の知見について整理し、3.3.3 節における影響要因の検討に資する。

ここでいう熱物性値とは、熱伝導率及び熱拡散率を表す。

(1) 測定概論

人工バリアとして用いられるベントナイト系材料に求められる熱物性値としては、上述したようにニアフィールドの熱解析を実施するために“熱伝導率”と比熱を導きだすための“熱拡散率”が必要となる。熱伝導率も熱拡散率も測定法の基本原理は極めて簡単であるが、実際の測定においては、移動流量や温度分布の測定に大きな誤差が含まれてしまう場合が多い。そのため、測定精度を上げるためには、測定原理に合致しない移動熱量をできる限り少なくすることが必要である。また、それを避けることができない場合は、その量を正確に把握し、補正することが必要である⁷⁾。

熱伝導率や熱拡散率を把握するための測定方法としては非常に多くの種類があり、解説書等も多数出版されているが、大きくは図 3.3-1 に示すような定常法と非定常法の 2 つの手法に分類される^{7),8)}。

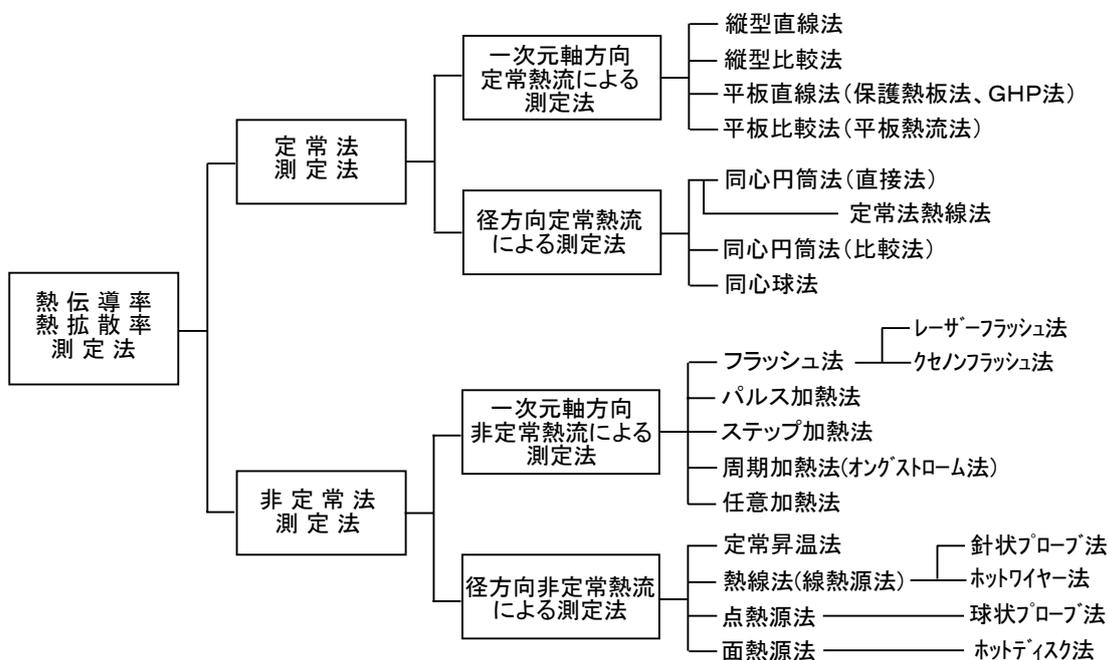


図 3.3-1 熱伝導率・熱拡散率の測定法⁷⁾⁸⁾(一部加筆)

このうち定常法は、測定物質中に水分が含有されていない場合に精度が良い測定法となるが、水分を含有している物質を測定する場合においては、定常の温度勾配によって測定物質中の水分の再配分が生じ、測定誤差に繋がる可能性がある。

これに対し、非定常法は、測定物質中の水分の再配分が起こらない程度の短い時間で測定を行うものであるため、土壌等の熱物性値を測定する場合、非定常法による測定が通例である。このため、水分を含有しているベントナイト系材料のような物質の熱物性値測定に関しては、非定常法が使用されていると考えられる。

(2) 国内外の文献調査

文献調査に際しては、クニゲル V1 に限らず、MX-80、粒状ベントナイト (OT-9607、粒径- 1.7mm、 1.7-4.5mm、 4.5-10mm) 等、ベントナイト系材料全般を対象に調査を実施するとともに、供試体の寸法、測定時間、乾燥密度、含水比(飽和度) 混合材とその有無、測定温度及び熱物性値の測定方法に関する情報について整理した。また、これらの文献から熱物性値に係わる測定データを収集した。なお、測定データの収集に関しては、3.1 章と同様に文献中に具体的な数値が記載されていない場合には、Biosoft 社製の UnGraph5 を用いてグラフから数値データを読み取った。また、これらの調査から抽出された熱物性値関係の文献及び論文等は、27 件であった。

文献調査の結果からベントナイト系材料に係わる熱物性値の測定法に関しては、大きくは、以下に示す 4 つの非定常法に関して実施されている。

1 つ目の方法としては、非定常法として最も一般的な針状のプローブを用いた線熱源法である。これまでに同様な測定原理であるにも係わらず、ヒートプローブ法や Hot wire Probe(加熱用細線)法、または、Transient Hot Strip method 等と呼称されている例^{9),10),11)}もあるが、ここでは針状のプローブを用いた非定常線熱源法(以下、針状プローブ法とする)と称する。針状プローブ法は、図 3.3-2 に示すような試料の直径に対して十分に長い長さを持った加熱線を試料の中心部に孔を開け、線熱源を挿入し、一定の出力を与えて加熱する方法である⁹⁾。温度は、図 3.3-3 に示すようなプローブの中心部に設置されている熱電対によって測定し、その温度上昇の結果を基に熱伝導率を測定する。また、熱伝導率の測定に利用した試料に対して、図 3.3-4 に示すように熱伝導率測定用プローブに加え、3 箇所熱電対を挿入することによって熱拡散率を測定することも可能である。

2 つ目の方法としては、通常の線熱源法よりも素早く、概略的な評価に簡便な測定法として広く利用されている細く直線状に張られたプローブを用いた線熱源法である。この測定法は、コンクリートや木材、プラスチック等のように熱伝導率が小さい材料に対して有効である。これまでに測定装置の名称(迅速熱伝導率計(Quick Thermal Conductivity Meter:QTM))から QTM 法やホットワイヤー法等と呼称されている例^{12),13),14)}もあるが、ここではホットワイヤーを用いた非定常線熱源法(以下、ホットワイヤー法とする)と称する。ホットワイヤー法は、図 3.3-5 に示すように一方を熱伝導率が既知の断熱性に富んだ材料に置き換え、プローブを試料に押し当てるだけで熱伝導率を測定することができる。ただし、測定装置自体が熱伝導率の測定に限定されるため、同一試料による熱拡散率の測定はできない。

3 つ目の方法としては、熊田^{15),16),17),18)}や信太ほか¹⁹⁾によって医学分野で生体の熱物性値の測定に利用されているサーミスタを点熱源とする測定法を改良したものである。従来からの測定法である針状プローブ法等に比べ、短時間で低い温度上昇で熱物性値を測定できることや試料との熱的接触抵抗による測定結果へのばらつきを低減すること等、ベントナイト系材料の熱物性値をより高い精度で測定することを目的として開発された測定法である。ここではサーミスタ(球状のプローブ)を用いた非定常点熱源法(以下、球状プローブ法とする)と称する。球状プローブ法は、図 3.3-6 に示すようにサーミスタ微粒子に白金リード線を取り付け、それをガラスで保護した構造である。また、サーミスタ自体が熱源であるとともに、

温度測定も行える。測定は、2 片の試料でサーミスタを挟み込み、サーミスタと可変抵抗を直列に繋ぎ、サーミスタの発熱で変化するサーミスタ端子間と可変抵抗間の電圧を基に熱物性値を測定する。

4 つ目の方法としては、センサーがニッケルの二重らせん構造の面状で、測定の際に試料表面の場を平均的に加熱することができ、温度上昇に伴う水分の蒸発や部分的な試料の不均一性に伴う測定誤差が少ないと考えられている非定常面熱源法 (Transient Plane Source (TPS) Technique) を応用した測定法である。ここでは、ホットディスクを用いた非定常面熱源法 (以下、ホットディスク法とする) と称する。ホットディスク法は、図 3.3-7 に示すように球状プローブ法と同様に、2 片の試料でホットディスクセンサーを挟み込み、試料温度が十分に安定した後、センサーに一定熱量を加え過渡昇温特性を基に熱物性値を測定する²⁰⁾。

なお、測定法ごとに係わる測定原理等に関しては、引用した文献等を参照して頂きたい。

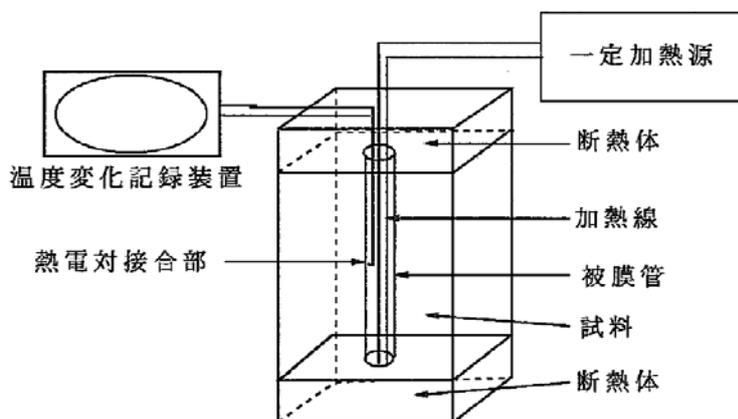


図 3.3-2 線熱源を用いた測定装置¹⁵⁾

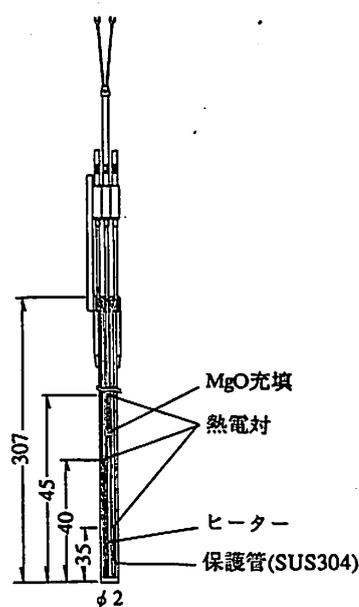


図 3.3-3 熱伝導率測定用針状プローブ⁹⁾

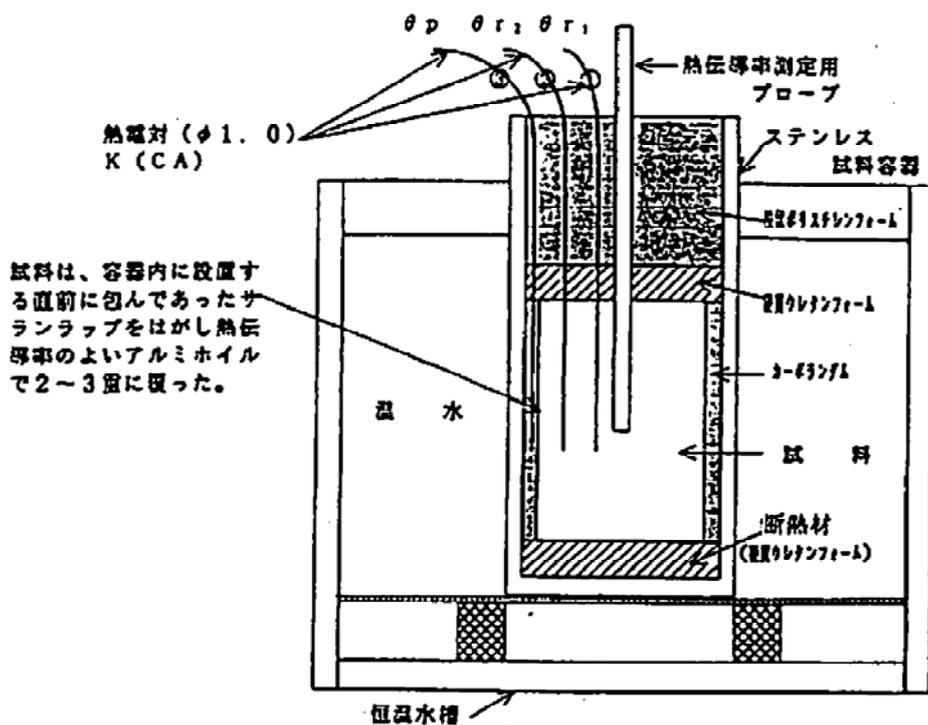


図 3.3-4 温度伝導率 (熱拡散率) 測定装置⁹⁾

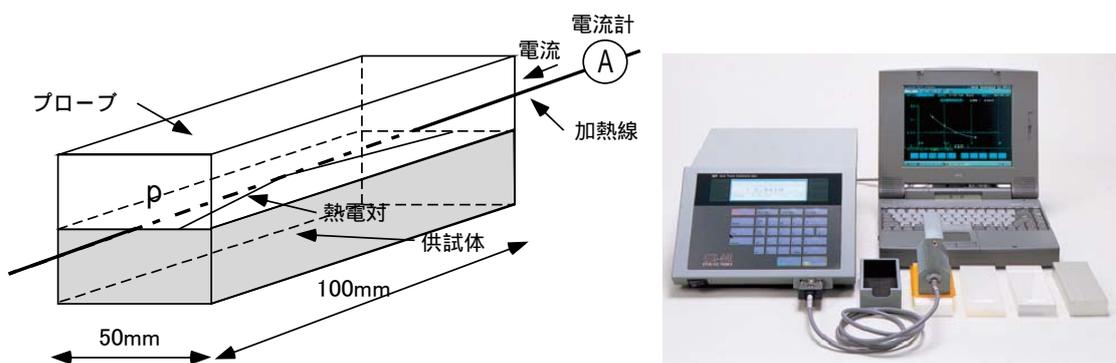


図 3.3-5 迅速熱伝導率計を用いた測定原理図及び装置図^{12),13)}

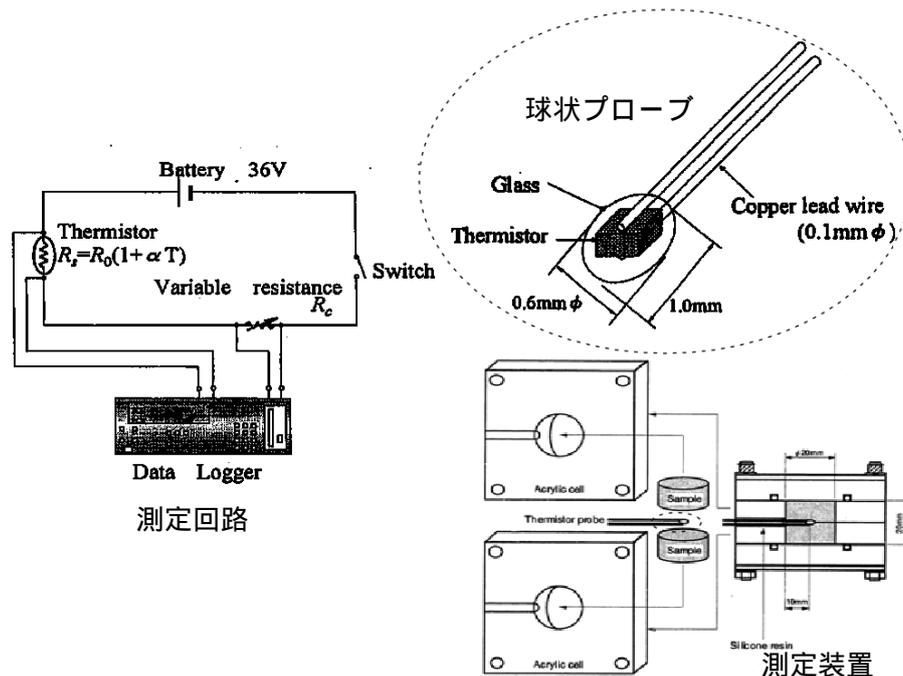


図 3.3-6 非定常点熱源法の装置構成^{13),15)}

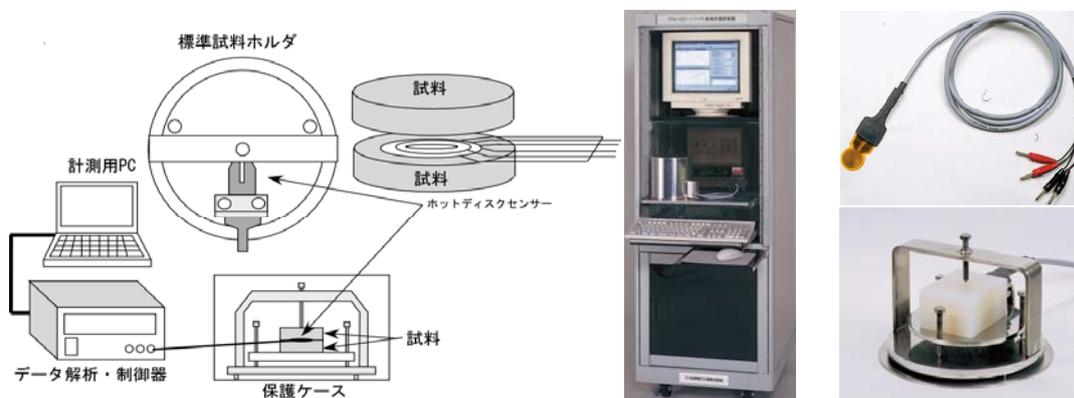


図 3.3-7 非定常面熱源法（ホットディスク法）の装置構成²⁰⁾

3.3.3 影響要因の検討

ここでは、ベントナイト系材料を対象とした代表的な熱物性値の測定法として挙げられる針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法、ホットディスク法の4つの測定法ごとに既往の研究例から抽出された測定法に関する現状の知見及び影響要因を示す。また、ホットディスク法のみとなるが、圧縮成型方法の違いによる密度の不均一性が熱物性値の測定結果に及ぼす影響について追加の測定を行い検討した。

(1) 針状のプローブを用いた非定常線熱源法

針状プローブ法に関しては、熱伝導率及び熱拡散率ともに測定が可能であり、測定時間が15分程度と比較的時間を要する。また、プローブの長さは、プローブ両端からの熱損失を検討して決定する必要があるため、媒体が土や岩石のような熱の不良導体の場合には、プローブの半径に対して60倍の長さがあれば熱損失の影響が無視できることが報告されている^{9),21)}。このことから供試体寸法が比較的大きなものとなり、例えば、藤田ほか⁹⁾は、供試体寸法に直径110mm、高さ120mmの試料を用いた測定を行っている(図3.3-8参照)。

針状プローブ法を用いて熱物性値を測定する場合、前述したように供試体寸法が比較的大きなものとなるため、供試体を圧縮成型する際には、1回のプレスでは装置の性能や圧縮成型時の摩擦により供試体を作製することができない可能性がある⁹⁾。また、供試体を圧縮成型する際には、ケイ砂等の混合材を混ぜた混合材料を一度にモールドに投入した場合、土粒子密度の高いケイ砂等の方が先に落下し、局所的にケイ砂が溜まり、不均一な状態を形成することによって測定結果に影響を及ぼす可能性も考えられる。したがって、供試体を作製する際には、混合材の混合状態による影響を考慮し、数回に分けて材料を投入することが必要である。なお、3.2章にて前述したように密度の不均一性をできるだけ抑制する方法として、供試体作製時に圧縮成型治具や容器内の空気を抜けやすくするために焼結金属フィルタ等を下部に設置するか、密度不均一性が最も小さい上下面加圧により圧縮成型するといった方法が有効である。

また、藤田ほか⁹⁾は、熱物性値に及ぼす温度の影響を確認するため、温度条件をパラメータとした測定を行っている。この際、温度の影響によって供試体中の水分が蒸発する等の水分移動が生じ、測定結果に影響を及ぼすことが考えられるため、図3.3-9に示すように供試体と測定容器との隙間にシリコンゴムを充填することや発泡スチロール等の断熱材を用いて測定容器周辺を覆い、供試体中の水分移動を防ぐ対策を講じた測定を行っている。

R.Pusch and Geodevelopment AB⁶⁾においては、供試体として三軸試験で用いた試料、もしくは幾つかの圧密試験で用いた試料を合わせて直径50mm、高さ80mmの供試体を作製し、熱伝導率の測定を行っている。また、供試体は密着性の良い筒状のプラスチックチューブに挿入し、プローブは、試料の削孔穴に挿入している。ただし、プローブを供試体の削孔穴に挿入する際には、完全に密着するようにプローブと同じ径にはつり、密着度を増し接触抵抗を低減するためにプローブをシリコングリスでコーティングする等の対策を講じた測定を行っている。また、熱伝導率を評価するための適切な時間間隔は、片対数グラフで温度を時間の関数としてプロットすることにより決定できることから、測定開始後、ある一定時間の温

度が直線的になる傾きを利用して熱伝導率を評価している。その測定精度は、約 $\pm 10\%$ 程度であることが報告されている²²⁾。なお、熱拡散率に関しては、既往の研究報告において具体的な測定範囲や精度を明記した検討例は見当たらなかった。

針状プローブ法を用いたベントナイト系材料に係わる熱物性値の測定に関しては、これまでに末岡ほか¹⁰⁾が、圧縮ベントナイトにおける熱伝導率測定法としての有効性について、供試体寸法が、直径 60mm、高さ 130mm、もしくは、高さ 160mm の試料を用いて検討を行っている。測定温度 40～60 の範囲における熱伝導率の測定結果から、針状プローブ法が熱伝導率の測定法として十分有効な方法であることを報告している。なお、温度条件が 60 において測定を行った際、供試体中に亀裂が入り、供試体中に発生する熱応力、もしくは水分の蒸発が原因で熱伝導率の測定ができなかったことを報告している。

藤田ほか⁹⁾は、圧縮ベントナイトの基本特性の把握の一環として、ベントナイト系材料にクニゲル V1 単体を用いて乾燥密度 1.42～1.82 Mg/m³ の範囲を対象に測定温度 20、40、60、100、飽和度をパラメータとした熱物性値の測定を行い、温度及び飽和度の影響についてまとめている。温度の影響に関しては、図 3.3-10 に示すように測定温度 100 以下では熱伝導率への影響は少なく、ほぼ一定の値を示すことや熱伝導率と同様に熱拡散率も温度の影響は小さく、ほぼ一定の値を示すことが報告されている。また、測定数は、少ないものの図 3.3-11 に示すように飽和度の増加に伴い熱伝導率も増加傾向にあることが報告されている。

Börgesson¹¹⁾は、ベントナイト系材料に MX-80 を用いて間隙比 0.8 の供試体を対象に飽和度をパラメータとした熱伝導率の測定を行い、飽和度の増加に伴い熱伝導率も増加することを報告している。

竹ヶ原ほか²³⁾は、隙間充填材を廃棄体と緩衝材の間及び緩衝材と処分孔の間に入れた場合等の熱特性評価を行うため、ベントナイト系材料にクニゲル V1 や粒状ベントナイト（粒径-1.7mm、1.7-4.5mm、4.5-10mm の 3 種類）供試体寸法が直径 300mm、高さ 460mm の試料を用いて、測定温度を 15、30、45、60、75、90 とした熱物性値の測定を行っている。図 3.3-12 に示すように熱伝導率は各供試体ともに温度の上昇に伴い、大きくなる傾向を示すことや熱拡散率は温度の影響は小さく、ほぼ一定の値であることが報告されている。

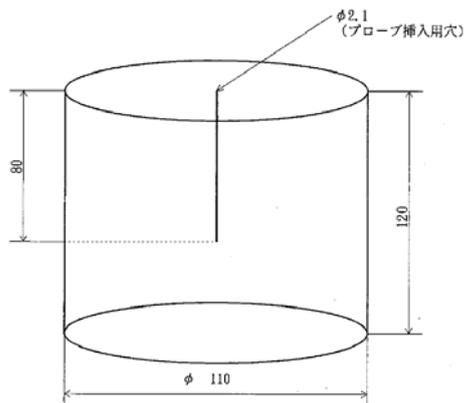


図 3.3-8 熱伝導率測定用試験体⁹⁾

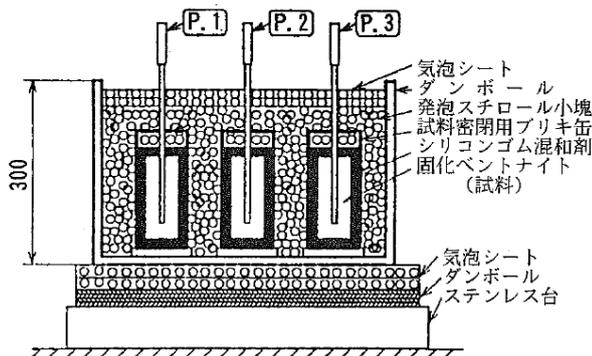


図 3.3-9 温度条件における密閉処理⁹⁾

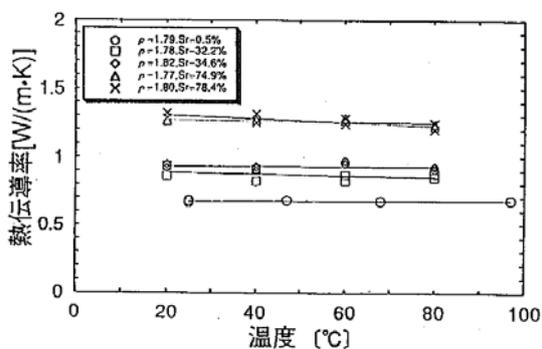


図 3.3-10 温度と熱伝導率の関係⁹⁾

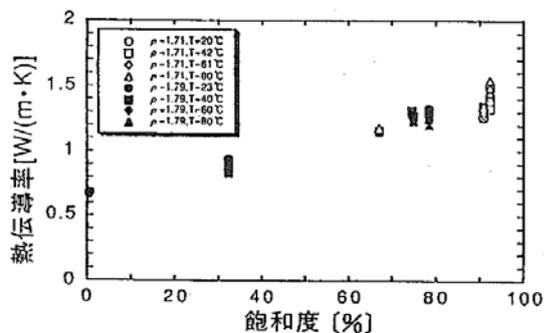


図 3.3-11 飽和度と熱伝導率の関係⁹⁾

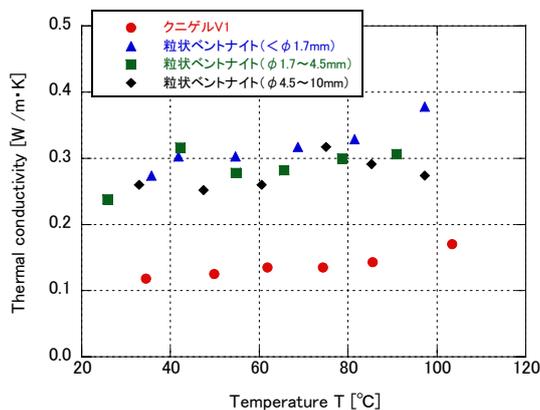


図 3.3-12 温度と熱伝導率の関係²³⁾

(2) ホットワイヤーを用いた非定常線熱源法

ホットワイヤー法に関しては、熱伝導率のみの測定となるが、測定時間が 60 秒程度で供試体に対しプローブを押し当てただけで測定が可能である。なお、市販品であるため、測定範囲が 0.02 ~ 12W/m·K と幅広く、標準プローブを用いた場合における測定精度はカタログ値で約 ±5% 程度である²⁴⁾。なお、測定前に測定対象物と同程度の熱物性値を有する標準材

料等を用いて測定精度を確認しておくことが必要である。ホットワイヤー法を用いて測定する場合は、標準プローブの寸法が幅 50mm、長さ 100mm 程度となり、供試体の厚さが 20mm 以上²⁴⁾ 必要であることから、針状プローブ法と同様に比較的供試体寸法が大きなものとなる。そのため、ベントナイト系材料にケイ砂等の混合材を混合した場合、供試体中にケイ砂が局部的に溜まり、不均一な状態を形成し、測定結果に影響を及ぼす可能性も考えられる。したがって、供試体の作製に際しては、混合材のばらつきを抑制するために数回に分けて材料を投入することが必要である。なお、密度の不均一性をできるだけ抑制する方法として、供試体作製時に圧縮成型治具や容器内の空気を抜けやすくするために焼結金属フィルタ等を下部に設置するか、密度不均一性が最も小さい上下面加圧により圧縮成型するといった方法が有効である。

鈴木・谷口¹³⁾ は、熱伝導率に及ぼす温度の影響を確認するため、恒温槽を用いて温度条件を制御した測定を行っている。この際、温度の影響によって供試体中の水分が蒸発する等の水分移動が生じ、測定結果に影響を及ぼすことが考えられることから、事前に食品包装フィルムが熱伝導率の測定に影響を及ぼさないことを確認した後、食品用包装フィルムで供試体を包むことによって、供試体中の水分を均一に保つ対策を講じた測定を行っている。

ホットワイヤー法を用いたベントナイト系材料に係わる熱物性値の測定に関しては、比較的簡便に熱伝導率の測定が可能であることから多くの報告がされている。

例えば、雨宮ほか²⁵⁾ は、熱伝導率に及ぼす影響要因を明らかにするため、ケイ砂混合率、間隙率(乾燥密度)、含水比及びケイ砂の粒度を幾通りか組み合わせた測定を行い、最も有意な影響を及ぼす要因の組合せを確認している。クニゲル V1 を用いてケイ砂の混合率を 30、60wt%、間隙率を 45、28%、含水比を 8、15% に設定して熱伝導率の測定を行っている。各要因や要因の組合せによる分散分析の結果から熱伝導率に最も有意な影響を及ぼすのは、間隙率と含水比の組合せであることを報告している。

鈴木ほか¹²⁾ は、人工バリア及び処分場周辺の熱解析用の入力データとするため、クニゲル V1 単体を用いて乾燥密度 1.4 ~ 2.0 Mg/m³ の範囲を対象に、初期含水比 0% ~ 飽和含水比程度までをパラメータとした熱伝導率の測定を行っている。また、熱伝導性の向上を目的としてケイ砂の混合率と熱伝導率の関係を把握するため、乾燥密度 1.6 ~ 2.0 Mg/m³ の範囲を対象に、初期含水比 10%、ケイ砂混合率 0、20、30、40wt% をパラメータとした測定も行っている。さらに、温度の影響を把握するために、乾燥密度 1.6 ~ 2.0 Mg/m³ の範囲を対象に初期含水比 0%、測定温度に室温(20)、40、60、80、100 とした測定を行っている。初期含水比の影響に関しては、図 3.3-13 に示すように乾燥密度が高く、初期含水比が増加するほど熱伝導率も大きくなることが報告されている。また、ケイ砂の混合率による影響に関しては、図 3.3-14 に示すように乾燥密度が高く、ケイ砂の混合率が増加するほど熱伝導率も大きくなることが報告されている。さらに、温度の影響に関しては、図 3.3-15 に示すように熱伝導率への影響は小さいことを報告している。

Fujita et.al.²⁶⁾ は、釜石原位置試験場において、人工バリアの品質性能の確認及びその実岩盤条件下での二アフィールド連成挙動を評価することを目的として、粒状ベントナイト(OT-9607)を用いた緩衝材の基本特性試験を行っており、乾燥密度 1.65 Mg/m³ を対象に、

初期含水比 0%～飽和含水比程度までの熱伝導率を測定している。図 3.3-16 に示すように含水比の増加に伴い熱伝導率は大きくなることが報告されている。

鈴木・谷口¹³⁾は、ニアフィールドの熱解析に用いる緩衝材の熱物性値の整理を目的として、クニゲル V1 を用いて乾燥密度 1.8 Mg/m^3 を対象に、ケイ砂混合率 0wt%、初期含水比 0%～飽和含水比程度のベントナイト単体供試体及び乾燥密度 1.6 Mg/m^3 を対象に、ケイ砂混合率 30wt%、初期含水比 0%～飽和含水比程度のケイ砂混合供試体を対象に測定温度 20、40、60、90 をパラメータとした熱伝導率の測定を行っている。また、ホットワイヤー法と異なる測定法である針状プローブ法を用いて得られた熱伝導率との比較を行っている。その結果、図 3.3-17 に示すように異なる測定法で得られた値と比較しても良く一致することが示された。また、図 3.3-17 及び図 3.3-18 に示すベントナイト単体及びケイ砂混合供試体の測定結果から初期含水比が増加するほど熱伝導率も大きくなることが報告されている。熱伝導率の温度の影響に関しては、図 3.3-19 及び図 3.3-20 に示すベントナイト単体及びケイ砂混合供試体の測定結果から、測定温度 20～90 の範囲では温度によらず熱伝導率はほぼ一定の値を示すことが報告されている。

谷口ほか²⁷⁾は、緩衝材の設計を行う上で、物理的に成立する緩衝材密度の下限値を確認することを目的として、クニゲル V1 を用いて乾燥密度 $1.0 \sim 2.0 \text{ Mg/m}^3$ の範囲を対象に、初期含水比 0%～飽和含水比程度、ケイ砂混合率 0～40wt%をパラメータとした測定を行っている。図 3.3-21 に示すように初期含水比と熱伝導率の関係から含水比の増加とともに熱伝導率は大きくなり、ケイ砂混合率が同じ場合、乾燥密度が大きいほど熱伝導率は大きくなることが報告されている。また、測定精度を考慮するため、縦 50mm、横 100mm、厚さ 50mm の立方体の測定供試体を圧縮成型し、供試体の 4 側面に対して 3 回ずつ熱伝導率の測定を行っている。測定値の平均値に対する標準偏差は、凡そ $\pm 2 \sim 6\%$ であり、使用した装置の測定精度が約 $\pm 5\%$ 程度であることから、測定時のばらつきを考慮した熱伝導率を用いてニアフィールドの熱解析を実施している。

増田ほか²⁸⁾は、ケイ砂混合率、初期含水比、乾燥密度の 3 つの因子を考慮した熱伝導率の定式化を図るため、クニゲル V1 を用いて表 3.3-2 に示す測定条件で熱伝導率を測定している。図 3.3-22 に示すように初期含水比と熱伝導率の関係から 3 つの因子は熱伝導率に影響し、乾燥密度が大きいほど熱伝導率に含水比の及ぼす影響が大きくなることを報告している。また、乾燥密度 0.2 Mg/m^3 の幅でグループ分けし、グループ毎の線形近似から相関式を重回帰分析より求め、3 つの因子から熱伝導率の推定式を導出している。

小林ほか¹⁴⁾は、近年、緩衝材の施工時の品質管理を目的として、遠隔操作による施工時の品質管理手法の適用性を把握するため、非破壊での計測が可能であり、緩衝材の乾燥密度との相関関係が認められる熱伝導率に着目した実験的評価を行っている。測定条件としては、クニゲル V1 を用いて、3 号ケイ砂と 5 号ケイ砂を重量比 1:1 で混合したものを使用している。乾燥密度は $1.4 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ の範囲で、初期含水比 12.6、14.0、15.3%程度、ケイ砂混合率 30wt%をパラメータとした測定を行っている。なお、供試体寸法が直径 600mm、高さ 500mm と大きいため、密度の不均一性が測定精度の影響要因とならないように、1 層あたりの仕上がり厚さを 25mm に抑え、500mm の高さの試料を 20 層に分けて供試体を作製し

ている。図 3.3-23 に示すように熱伝導率と乾燥密度の関係と、原子力機構が Web 公開している緩衝材基本特性データベース²⁹⁾の熱伝導率と乾燥密度の関係は概ね同程度の結果が得られていることが報告されている。

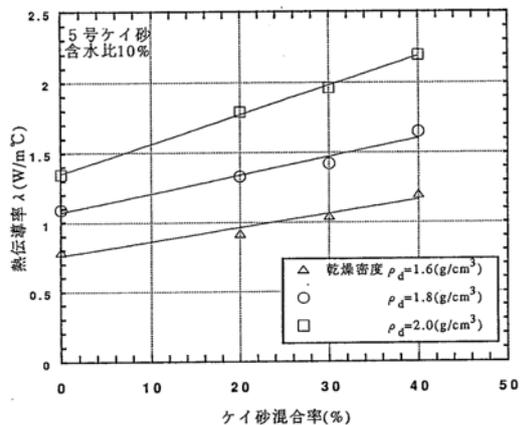
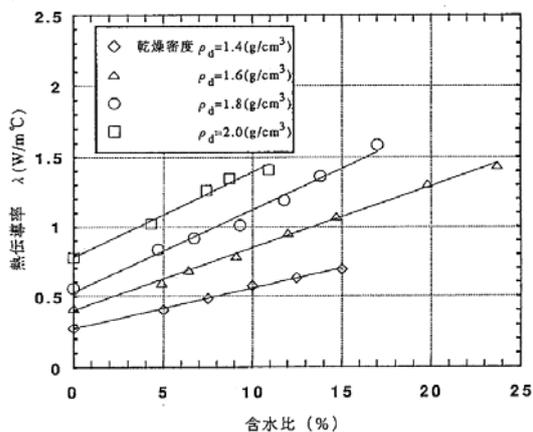


図 3.3-13 含水比と熱伝導率の関係¹²⁾ 図 3.3-14 ケイ砂混合率と熱伝導率の関係¹²⁾

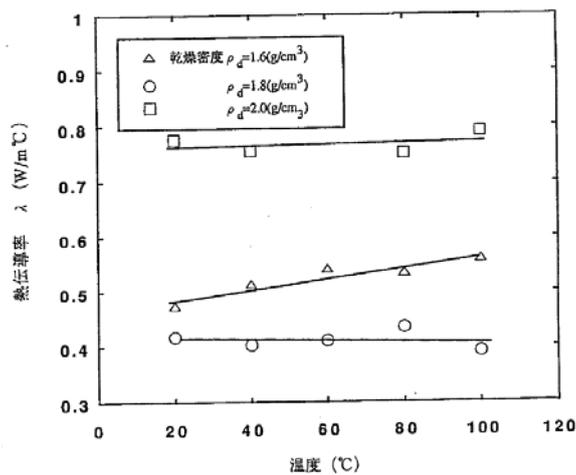


図 3.3-15 温度と熱伝導率の関係¹²⁾

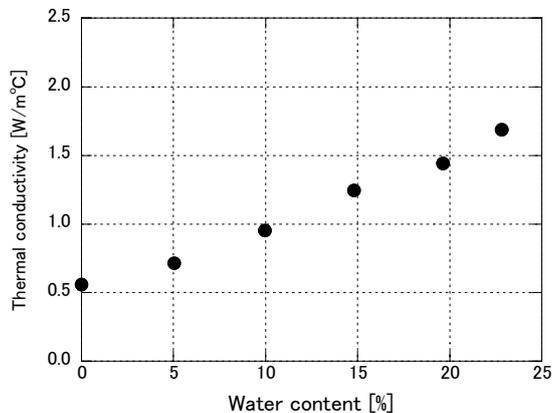


図 3.3-16 Thermal conductivity at various water content²⁶⁾

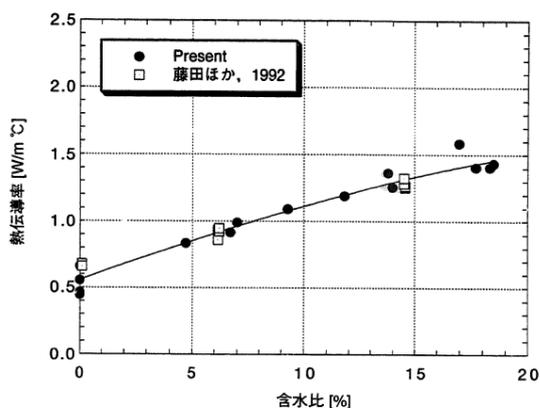


図 3.3-17 熱伝導率の測定結果¹³⁾

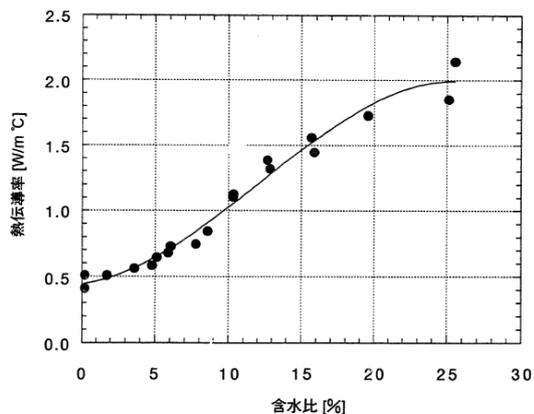


図 3.3-18 熱伝導率の測定結果¹³⁾

(ベントナイト単体供試体、乾燥密度 1.8Mg/m³)(ケイ砂混合供試体、乾燥密度 1.6Mg/m³)

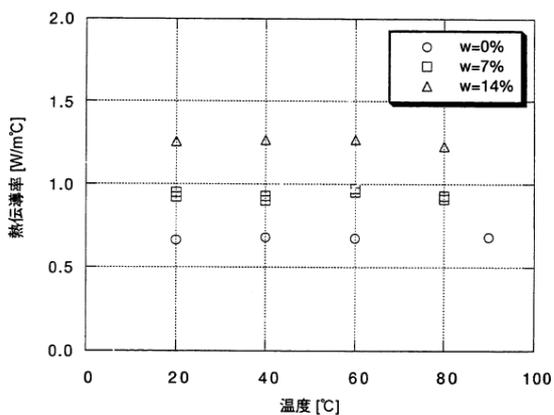


図 3.3-19 熱伝導率の測定結果¹³⁾

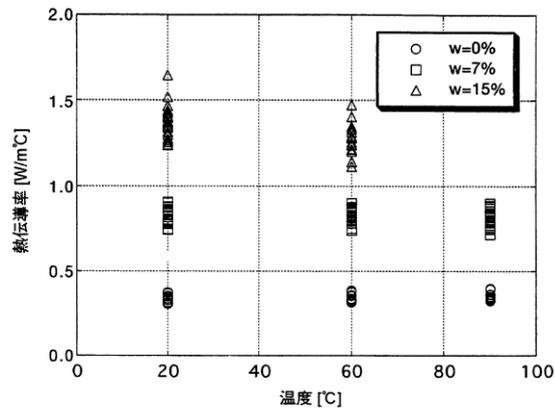


図 3.3-20 熱伝導率の測定結果¹³⁾

(ベントナイト単体供試体、乾燥密度 1.8Mg/m³)(ケイ砂混合供試体、乾燥密度 1.6Mg/m³)

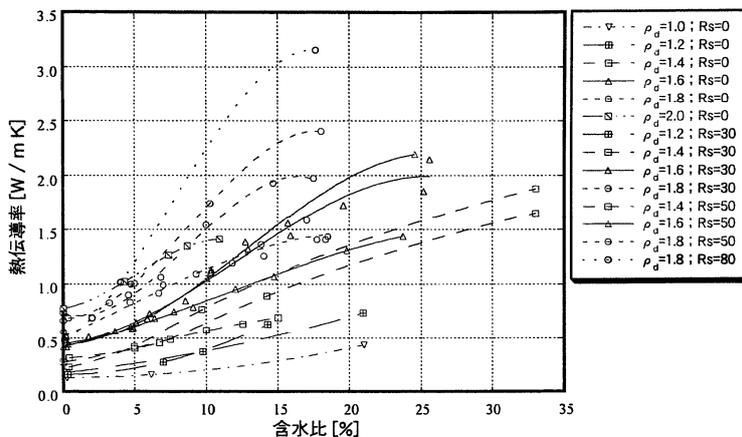


図 3.3-21 含水比と熱伝導率の関係²⁷⁾

表 3.3-2 熱伝導率測定条件²⁸⁾

ケイ砂混合率 R_s (%)	乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3)	含水比 w (%)	個数
0%	1.18~1.74	13.8~43.6	20
20%	1.27~1.83	10.4~37.6	20
30%	1.34~1.89	9.8~34.0	20
50%	1.44~1.98	7.6~28.4	20
66%	1.44~1.98	7.6~28.4	20

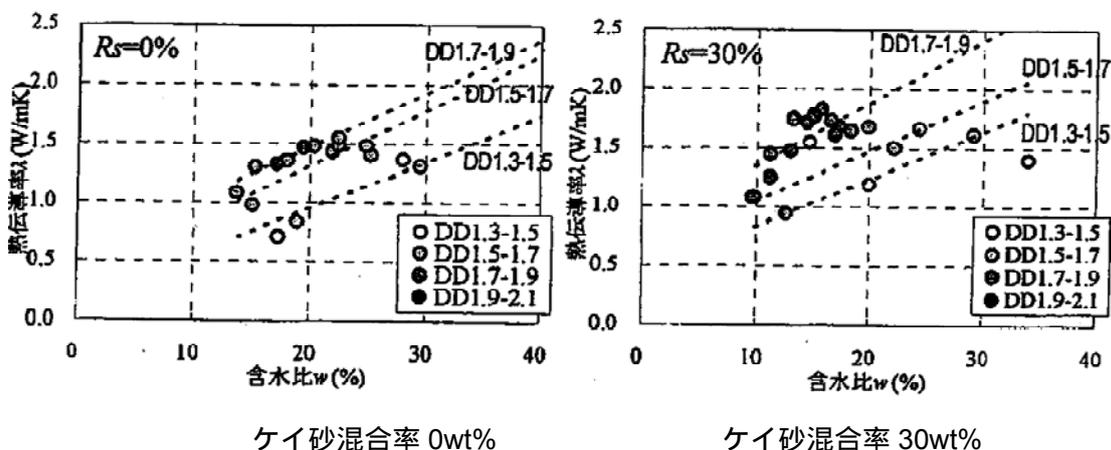


図 3.3-22 熱伝導率と含水比²⁸⁾

(凡例の DD1.3-1.5 は、乾燥密度 1.3-1.5 Mg/m^3 の範囲の試料であることを示す。)

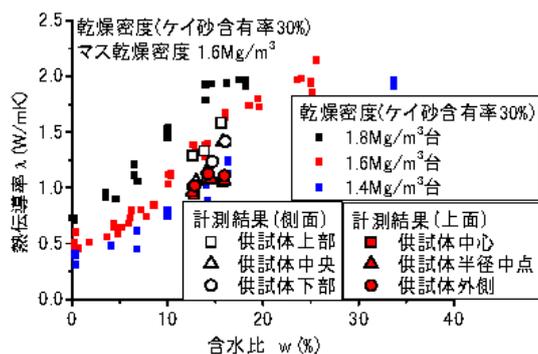


図 3.3-23 JAEA データベースと熱伝導率計測結果の比較¹⁴⁾

(3) 球状のプロブを用いた非定常点熱源法

球状プロブ法に関しては、熱伝導率及び熱拡散率ともに測定が可能であり、測定時間が 30 秒程度と比較的に迅速に測定できるが、供試体寸法が直径 20mm、高さ 10mm の円柱状の試料を 2 片用いて、球状プロブを挟んで測定する必要がある¹⁵⁾。また、供試体寸法は、上述するように比較的小さいため、粒度が大きい混合材を混合した場合、供試体作製時の混合方法によっては、ケイ砂が局所的に溜まり、密度のばらつきが生じることによって、測定精

度に影響を及ぼす可能性がある。したがって、供試体の作製に際しては、混合材のばらつきを抑制するために数回に分けて材料を投入することが必要である。なお、密度の不均一性を出来るだけ抑制する方法として、供試体作製時に圧縮成型治具や容器内の空気を抜けやすくするために焼結金属フィルタ等を下部に設置するか、密度不均一性が最も小さい上下面加圧により圧縮成型するといった方法が有効である。

熊田¹⁵⁾は、熱伝導率に係わる測定範囲と精度の確認として、既知の標準物質にゼラチン水溶液、トルエン、メタノール等を用いた球状プローブの校正を行い、熱伝導率の測定範囲として0.13~0.29 W/m・Kの測定が可能であることを示している。また、ベントナイト系材料に係わる測定精度としては、約 $\pm 3\sim 5\%$ 程度であることを示している。

なお、熱拡散率に関しては、具体的な測定範囲や精度に係わる検討例は見当たらなかったが、測定前に測定対象物と同程度の熱物性値を有する標準材料等を用いて測定精度を確認しておくことが必要である。

また、鈴木・谷口¹³⁾は、熱拡散率に及ぼす温度の影響を確認するため、恒温槽を用いて温度条件をパラメータとした測定を行っている。温度の影響によって供試体中の水分が蒸発する等の水分移動が生じ、測定結果に影響を及ぼすことが考えられることから、供試体中の水分移動を防ぐための対策として、供試体を測定容器内に設置した後、隙間部をシリコン製樹脂で充填することや測定容器を断熱材で覆う等の対策を講じた測定が行われている。

球状プローブ法を用いたベントナイト系材料に係わる熱物性値の測定に関しては、これまでに熊田^{15),16),17),18)}によって、既存の測定値と併せて新しい信頼性の高い熱物性値の推算法を確立することを目的として、クニゲルV1を用いて乾燥密度1.41~1.79 Mg/m³の範囲を対象に、ケイ砂混合率0wt%、飽和度20%から飽和度90%程度のベントナイト単体供試体及び乾燥密度1.6~2.0 Mg/m³の範囲を対象に、ケイ砂の体積率11.7~44.0%、飽和度0~60%程度のケイ砂混合供試体の熱伝導率を測定している。図3.3-24に示すように、初期含水比の増加に伴い熱伝導率は大きくなることが示されている。また、これまでに針状プローブ法によって得られた熱伝導率と球状プローブ法によって得られた熱伝導率の比較を行い、球状プローブ法で得られた熱伝導率は針状プローブ法に比べ、数%低い値もあるが極めて良く一致しており、比較した値とともに測定精度が極めて高いことを報告している¹⁶⁾。

また、坂下・熊田³⁰⁾は、ベントナイトの実効熱伝導率をより正確に推算する方法を確立するため、ベントナイトを連続母材中の立方体の間隙が分散した分散物質として簡略化して、間隙率や飽和度が熱伝導率に及ぼす影響を考慮した熱伝導モデルを提案している。

Cherif et.al.³¹⁾は、クニゲルV1やMX-80等を用いた既往の熱伝導率の測定結果に基づき、表3.3-3に示すこれまでに報告されているベントナイト系材料の熱伝導率の各種推算式に対して評価を行っている。図3.3-25に示すようにベントナイト単体の熱伝導率を推算する場合、坂下・熊田の式が最も良い精度で推算が可能であり、図3.3-26に示すようにケイ砂混合供試体の熱伝導率を推算する場合、Frikeの式等により実用上十分な精度で推算できることが報告されている。ただし、ベントナイト系材料にケイ砂等の混合材を混合した場合、測定データにばらつきが多いため、より精度の高いデータの拡充が必要であることも示されている。

鈴木・谷口¹³⁾は、ニアフィールドの熱解析に用いる緩衝材の熱物性値を整理することを

目的として、クニゲルV1を用いて乾燥密度 1.8 Mg/m^3 を対象に、ケイ砂混合率 0wt%、初期含水比 0% ~ 飽和含水比程度のベントナイト単体供試体及び乾燥密度 1.6 Mg/m^3 を対象に、ケイ砂混合率 30wt%、初期含水比 0% ~ 飽和含水比程度のケイ砂混合供試体を対象に測定温度 20、60、90 をパラメータとし、熱拡散率を測定している。図 3.3-27 に示すようにベントナイト単体及びケイ砂混合供試体ともに熱拡散率は含水比によらずほぼ一定の値となることが示されている。また、熱拡散率は温度の上昇とともに若干ではあるが大きくなることが報告されている。

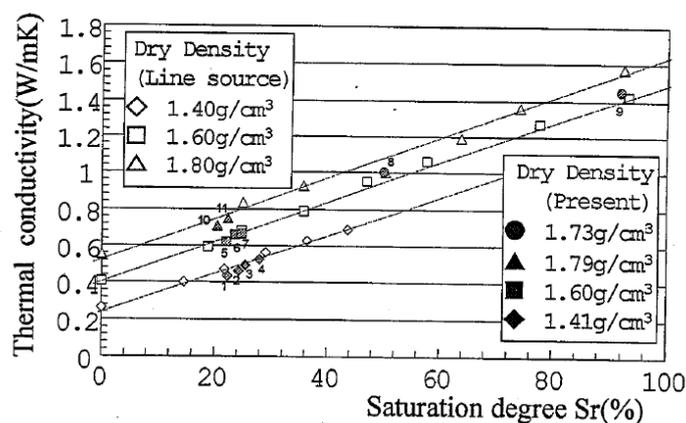


図 3.3-24 線熱源法と点熱源法の測定値比較¹⁶⁾

表 3.3-3 熱伝導率の各種推算式³¹⁾

ベントナイト単体	混合物質（ケイ砂混合材）
Kahr et.al.の式	Maxwell の式
Kuntsson の式	Broggeman の式
Kiyohasi et.al.の式	Fricke の式
坂下・熊田の式	Johnson の式
	Yamada の式

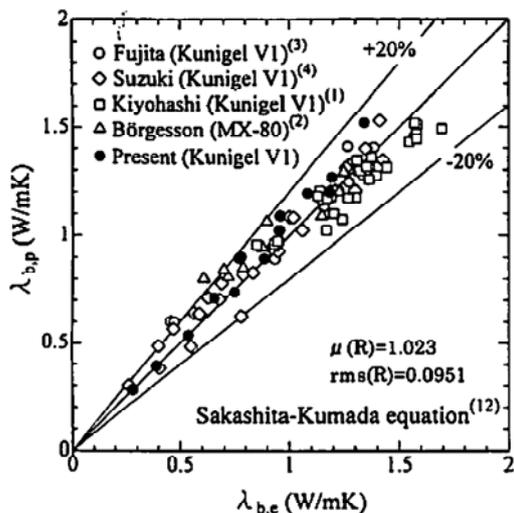


図 3.3-25 Sakashita-Kumada correlation³¹⁾

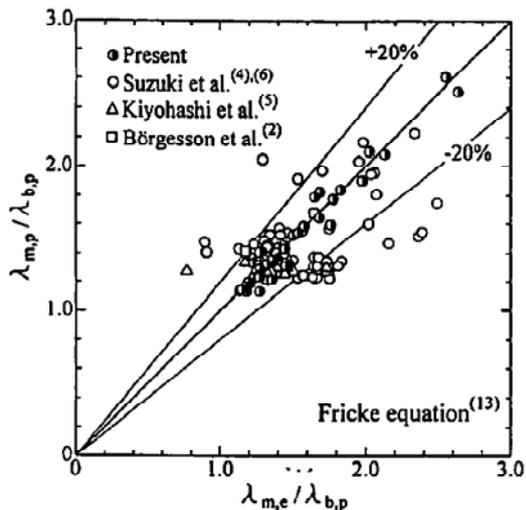
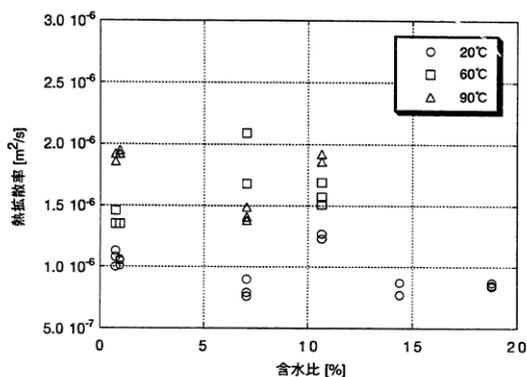
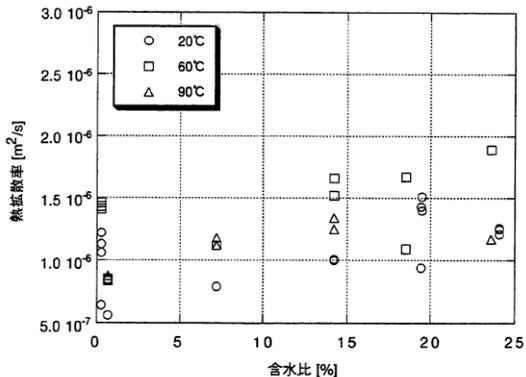


図 3.3-26 Fricke correlation³¹⁾



ベントナイト単体供試体



ケイ砂混合供試体

図 3.3-27 熱拡散率の測定結果¹³⁾

(4) ホットディスクを用いた非定常面熱源法

ホットディスク法に関しては、熱伝導率及び熱拡散率を同時に測定可能であり、測定時間が150秒程度で測定が可能である。また、ホットワイヤー法と同様に市販品の熱物性値測定装置であるため、熱伝導率の測定範囲としては0.01~400 W/m・K、熱拡散率の測定範囲としては0.02~100mm²/sと幅広い。標準プローブを用いた場合における測定精度は、熱伝導率の場合、カタログ値で約±5%程度であり、熱拡散率の場合、約±7%程度である³²⁾。なお、測定前に測定対象物と同程度の熱物性値を有する標準材料等を用いて測定精度を確認しておくことが必要である。

ホットディスク法を用いて熱物性値を測定する場合、供試体寸法としては、選定したプローブ直径の3倍以上の広さを有した直径とプローブ直径以上の厚みのある試料2片を用いてホットディスクセンサーを挟んで測定する必要がある。これまでに既往の研究報告としては、菊池・棚井²⁰⁾によって供試体寸法が直径50mm、高さ10mmの試料2片を用いた測定が行われている。なお、選定したプローブによっては、比較的供試体寸法が大きくなることも考

えられ、ベントナイト系材料にケイ砂等の混合材を混合した場合、供試体中にケイ砂が局所的に溜まり、不均一な状態を形成することによって測定結果に影響を及ぼす可能性も考えられる。したがって、供試体の作製に際しては、混合材のばらつきを抑制するために、数回に分けて材料を投入することが必要である。

ホットディスク法を用いたベントナイト系材料に係わる熱物性値の測定に関しては、これまでに菊池・棚井²⁰⁾によって、データの品質保証という観点から同一供試体を用いた熱物性値測定やホットディスク法と異なる測定法である針状プローブ法、ホットワイヤー法ならびに球状プローブ法を用いて得られた既往の研究成果との比較を行うとともに熱物性値に係わる関係式化が図られている。クニゲルV1を用いて乾燥密度 $1.2 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ の範囲を対象に、含水比0%～飽和含水比程度のベントナイト単体供試体及び乾燥密度 $1.4 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ の範囲を対象に、ケイ砂混合率30wt%、含水比0%～飽和含水比程度のケイ砂混合供試体の熱物性値を測定している。熱伝導率に係わる初期含水比の影響に関しては、図3.3-28及び図3.3-29に示すベントナイト単体供試体及びケイ砂混合供試体の測定結果から乾燥密度が高く、また、初期含水比が増加するほど熱伝導率も大きくなることが報告されている。さらに、ホットディスク法で得られた熱伝導率は、針状プローブ法やホットワイヤー法で得られた熱伝導率と良く一致することが報告されている。

熱拡散率に係わる初期含水比の影響に関しては、図3.3-30及び図3.3-31に示すベントナイト単体供試体及びケイ砂混合供試体の測定結果から乾燥密度や含水比の増加に関わらずほぼ一定の値になることが報告されている。しかしながら、異なる測定法で得られた成果と併せて比較した場合、針状プローブ法や球状プローブ法に比べ、ホットディスク法は、多少低い値を示しており、この要因についてホットディスク法に比べ、針状プローブ法、球状プローブ法ともに測定点周辺の温度変化のみを測定してしまったため、熱拡散率が低くなったものと報告されている。

菊池・棚井³³⁾は、実際の地質環境条件下における緩衝材及び埋め戻し材の基本特性を把握するため、クニゲルV1を用いて乾燥密度 $1.4 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ の範囲を対象に、ケイ砂混合率0wt%、飽和度100%程度のベントナイト単体供試体及び乾燥密度 $1.4 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ の範囲を対象に、ケイ砂混合率30wt%、飽和度100%程度のケイ砂混合供試体を用いて、ベントナイト中に含水させた人工海水（ASTM D-1141-98基準）や幌延地下水（幌延の深地層の研究施設設計画で採取された地下水（HDB-6孔GL-300m以深の地下水））のイオン濃度をパラメータとした熱伝導率と熱拡散率を測定している

ベントナイト単体供試体に対するイオン強度と熱伝導率の関係、ベントナイト単体供試体に対するイオン強度と熱拡散率の関係が図3.3-32、図3.3-33のようにそれぞれ示されている。菊池・棚井³³⁾は、塩濃度がベントナイト系材料の熱伝導率及び熱拡散率に及ぼす影響は少ないことを報告している。

以上、文献調査により、4つの測定法に対して既往の知見及び測定結果に及ぼす影響要因をまとめた。

一方、これまでに供試体内の密度不均一性が熱物性値の測定結果に対して、どの程度の影

響を及ぼすかについて検討されている事例は見当たらなかった。ここでは、圧縮成型方法の違いによる密度の不均一性が熱物性値の測定結果にどの程度の影響を及ぼすかについて検討するため、3.2.3 節において実施した圧縮成型方法に着目し、クニゲル V1 を用いて追加の確認測定を実施した。なお、用いたクニゲル V1 の特性については、3.2 章の表 3.2-21 及び表 3.2-23 に示す物理特性及び化学特性の材料を用いて実施した。

圧縮成型時の目標乾燥密度は、供試体中の密度の不均一性が生じやすいように 1.8 Mg/m^3 とした。また、飽和度は、0～100%程度を目標に調整し、供試体の圧縮成型方法としては、図 3.3-34 に示すように 圧縮成型治具内にベントナイト系材料を充填した後、上面加圧により圧縮成型する方法 (Press Type.1)、 圧縮成型治具下板部に金属焼結フィルタを設け、Press Type.1 と同様に上面加圧しつつ、下板部よりエアーを抜きながら圧縮成型する方法 (Press Type.2)、 上下面加圧により圧縮成型する方法 (Press Type.3) の 3 つの圧縮成型方法を用いた。

3.2 章において実施した圧縮成型方法の違いから供試体中の密度分布を平均分散値を用いて評価した結果を図 3.3-35 に示す。

図 3.3-35 から Press Type.1 に比べ、Press Type.2 の方が密度勾配は少なく圧縮成型されることが分かる。また、Press Type.2 に比べ、Press Type.3 の方がさらに密度勾配は少なく圧縮成型される傾向が示されており、圧縮成型方法の違いによって供試体中の密度分布に不均一性が生じる結果が得られた。

なお、熱物性値の測定に関しては、京都電子工業製のホットディスク法熱物性測定装置³²⁾ (TPA-501) を用いて測定した。測定条件を表 3.3-4 に示す。

圧縮成型方法ごとに得られた熱物性値の測定結果を表 3.3-5(1)～(3)に示す。なお、表 3.3-5 に示す測定結果において、1 測定値当りに対して供試体が 2 つある理由としては、前述したようにホットディスク法を用いて熱物性値の測定を実施する場合、2 片の試料でホットディスクセンサーを挟んで測定する必要がある。そのため、2 片の試料の平均が 1 測定値当りの平均乾燥密度となる。また、圧縮成型方法と熱伝導率の関係を図 3.3-36 に示すとともに、圧縮成型方法と熱拡散率の関係を図 3.3-37 に示す。

図 3.3-35 に示すように圧縮成型方法の違いによって供試体中に密度分布の不均一性が生じるにも拘らず、Press Type ごとに圧縮成型した供試体から得られた熱伝導率の測定結果は、図 3.3-36 に示すように極めて良く一致しており、Press Type.1、2、3 のどの Press Type を用いて圧縮成型してもあまり変わらない結果が得られている。

また、図 3.3-37 に示すように Press Type ごとに圧縮成型した供試体から得られた熱拡散率の測定結果も熱伝導率と同様に、極めて良く一致しており、圧縮成型方法の違いによって生じる 0.05 から 0.25 程度の平均分散値の違いでは、熱伝導率や熱拡散率に及ぼす影響は極めて小さいことが示された。

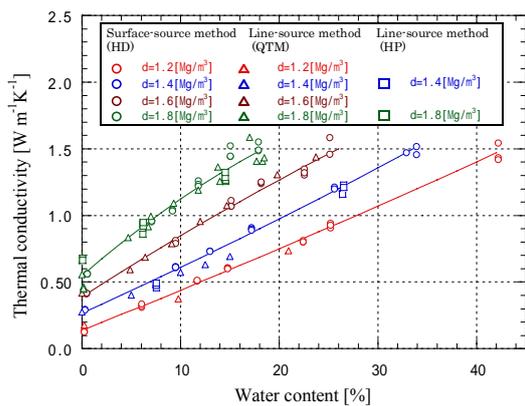


図 3.3-28 熱伝導率の測定結果¹⁹⁾
(ベントナイト単体供試体)

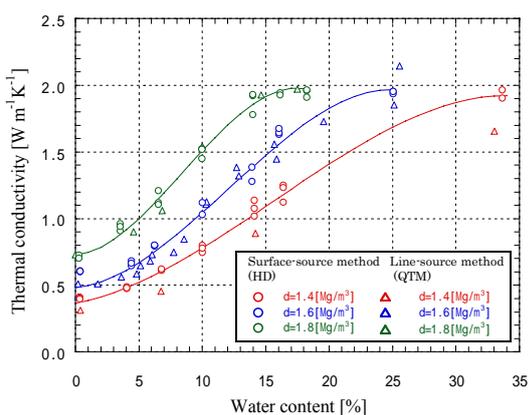


図 3.3-29 熱伝導率の測定結果¹⁹⁾
(ケイ砂混合供試体)

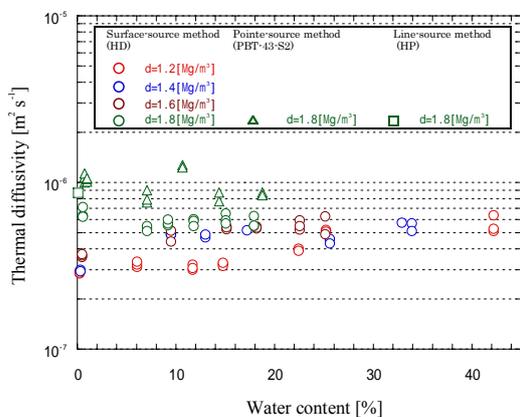


図 3.3-30 熱拡散率の測定結果¹⁹⁾
(ベントナイト単体供試体)

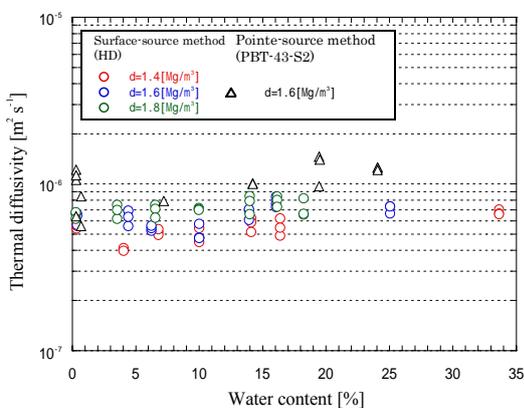


図 3.3-31 熱伝導率の測定結果¹⁹⁾
(ケイ砂混合供試体)

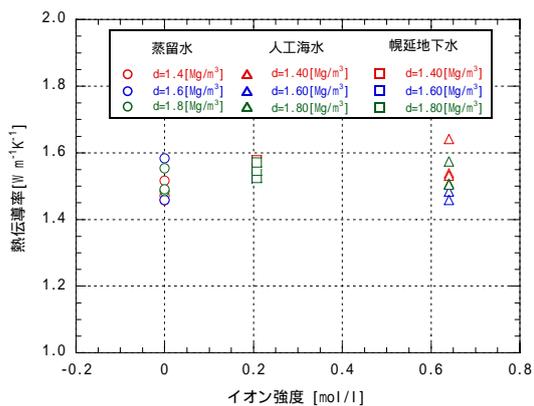


図 3.3-32 イオン強度と熱伝導率の関係³³⁾
(ベントナイト単体供試体)

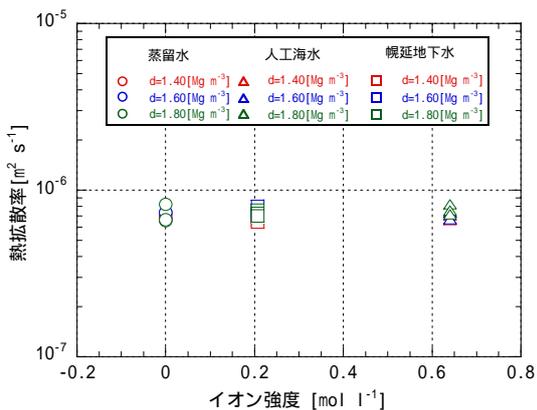


図 3.3-33 イオン強度と熱拡散率の関係³³⁾
(ベントナイト単体供試体)

表 3.3-4 測定条件

ベントナイト系材料	クニゲル V1 [®] (ロット NO. 304464)		
熱物性値測定方法	ホットディスク法熱物性値測定装置		
測定する熱物性値	熱伝導率	熱拡散率	
装置の測定精度[%]	±5	±7	
測定データの再現性[%]	±2	±5	
目標乾燥密度 ρ_d [Mg/m ³]	1.8		
ケイ砂混合率 R_s [wt%]	0		
目標含水比 w [%]	0 (0.0)、8 (42.2)、10 (52.7)、14 (73.8)、18 (94.9)		
含水比調整溶液	蒸留水		
供試体の直径 d [mm]	50		
供試体の厚さ h [mm]	10		
圧縮成型法	Press Type.1	Press Type.2	Press Type.3
測定温度 T []	室温 (20 程度)		

目標含水比の ()内は、飽和度 S_r [%]を表す。

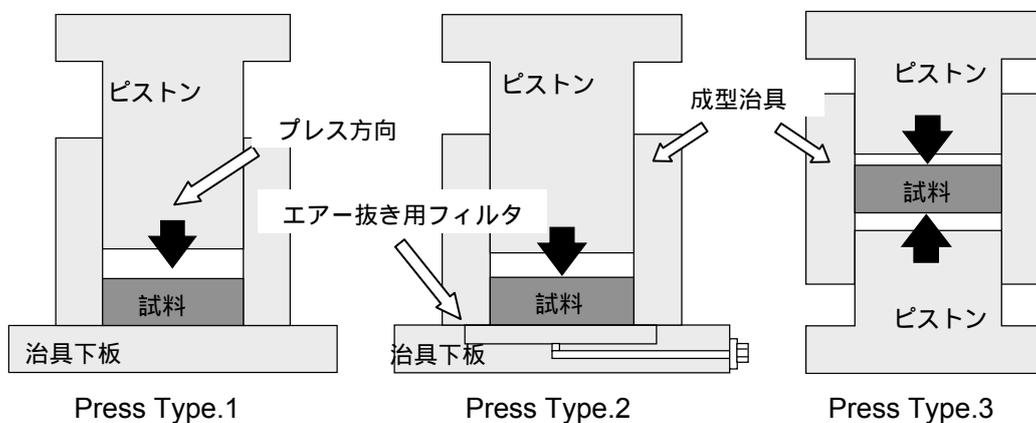


図 3.3-34 供試体の圧縮成型方法

表 3.3-5 (1) Press Type.1 で得られた熱物性値の測定結果

Press Type	NO.	乾燥密度 d[Mg/m ³]	平均乾燥密度 d[Mg/m ³]	含水比 [%]	飽和度 Sr[%]	平均飽和度 Sr[%]	熱伝導率 [W/m K]	熱拡散率 [m ² /s]×10 ⁻⁷
1	1	1.79	1.79	0.43	2.27	2.42	0.4906	4.40
		1.79		0.48	2.57			
	2	1.79	1.79	0.43	2.27	2.42	0.4851	4.16
		1.79		0.48	2.57			
	3	1.79	1.79	0.43	2.27	2.42	0.5034	4.14
		1.79		0.48	2.57			
1	4	1.79	1.79	7.92	41.3	40.9	0.9962	5.39
		1.79		7.80	40.5			
	5	1.79	1.79	7.92	41.3	40.9	1.032	5.92
		1.79		7.80	40.5			
	6	1.79	1.79	7.92	41.3	40.9	1.024	5.80
		1.79		7.80	40.5			
1	7	1.76	1.77	10.04	50.0	50.1	1.018	5.42
		1.77		10.02	50.3			
	8	1.76	1.77	10.04	50.0	50.1	1.077	5.89
		1.77		10.02	50.3			
	9	1.76	1.77	10.04	50.0	50.1	1.140	5.25
		1.77		10.02	50.3			
1	10	1.80	1.80	14.27	74.7	74.7	1.295	5.42
		1.80		14.26	74.7			
	11	1.80	1.80	14.26	74.8	75.0	1.405	5.89
		1.80		14.22	75.2			
	12	1.80	1.80	14.26	74.7	74.7	1.367	5.25
		1.80		14.26	74.7			
1	13	1.82	1.82	18.20	99.0	98.7	1.365	5.33
		1.82		18.00	98.4			
	14	1.82	1.82	18.20	99.0	98.7	1.464	5.05
		1.82		18.00	98.4			
	15	1.82	1.82	18.20	99.0	98.7	1.510	5.50
		1.82		18.00	98.4			

表 3.3-5 (2) Press Type.2 で得られた熱物性値の測定結果

Press Type	NO.	乾燥密度 d[Mg/m ³]	平均乾燥密度 d[Mg/m ³]	含水比 [%]	飽和度 Sr[%]	平均飽和度 Sr[%]	熱伝導率 [W/m K]	熱拡散率 [m ² /s]×10 ⁻⁷
2	1	1.78	1.77	0.45	2.3	2.4	0.4860	4.43
		1.77		0.48	2.4			
	2	1.78		0.45	2.3			
		1.77		0.48	2.4			
	3	1.78		0.45	2.3			
		1.77		0.48	2.4			
2	4	1.80	1.79	7.63	40.0	40.5	0.9319	4.62
		1.79		7.90	41.1			
	5	1.80		7.63	40.0			
		1.79		7.90	41.1			
	6	1.80		7.63	40.0			
		1.79		7.90	41.1			
2	7	1.77	1.77	10.06	50.3	50.3	1.028	5.62
		1.77		10.10	50.3			
	8	1.77		10.06	50.3			
		1.77		10.10	50.3			
	9	1.77		10.06	50.3			
		1.77		10.10	50.3			
2	10	1.80	1.80	14.09	74.8	74.4	1.376	6.39
		1.80		14.11	74.1			
	11	1.80		14.09	74.8			
		1.80		14.11	74.1			
	12	1.80		14.09	74.8			
		1.80		14.11	74.1			
2	13	1.80	1.80	18.34	97.91	98.5	1.483	5.45
		1.80		18.75	99.0			
	14	1.80		18.34	97.91			
		1.80		18.75	99.0			
	15	1.80		18.34	97.91			
		1.80		18.75	99.0			

表 3.3-5 (3) Press Type.3 で得られた熱物性値の測定結果

Press Type	NO.	乾燥密度 d [Mg/m ³]	平均乾燥密度 d[Mg/m ³]	含水比 [%]	飽和度 Sr[%]	平均飽和度 Sr[%]	熱伝導率 [W/m K]	熱拡散率 [m ² /s]×10 ⁻⁷
3	1	1.80	1.80	0.37	1.94	1.86	0.5686	4.83
		1.80		0.34	1.78			
	2	1.80		0.37	1.94			
		1.80		0.34	1.78			
	3	1.80		0.37	1.94			
		1.80		0.34	1.78			
3	4	1.80	1.80	7.77	41.1	41.2	1.015	5.90
		1.80		7.88	41.3			
	5	1.80		7.77	41.1			
		1.80		7.88	41.3			
	6	1.80		7.77	41.1			
		1.80		7.88	41.3			
3	7	1.80	1.80	10.12	51.4	51.62	1.096	5.88
		1.80		10.16	51.9			
	8	1.80		10.12	51.4			
		1.80		10.16	51.9			
	9	1.80		10.12	51.4			
		1.80		10.16	51.9			
3	10	1.81	1.81	14.01	75.6	75.52	1.302	4.92
		1.81		14.15	75.4			
	11	1.81		14.01	75.6			
		1.81		14.15	75.4			
	12	1.81		14.01	75.6			
		1.81		14.15	75.4			
3	13	1.82	1.82	18.21	99.8	99.3	1.483	5.19
		1.82		18.18	98.7			
	14	1.82		18.21	99.8			
		1.82		18.18	98.7			
	15	1.82		18.21	99.8			
		1.80		18.18	98.7			

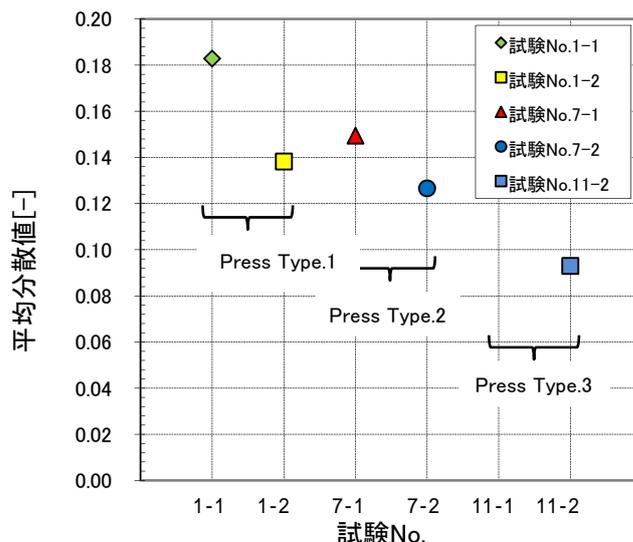


図 3.3-35 乾燥密度 1.8Mg/m³、 50×h10mm における各試験での平均分散値

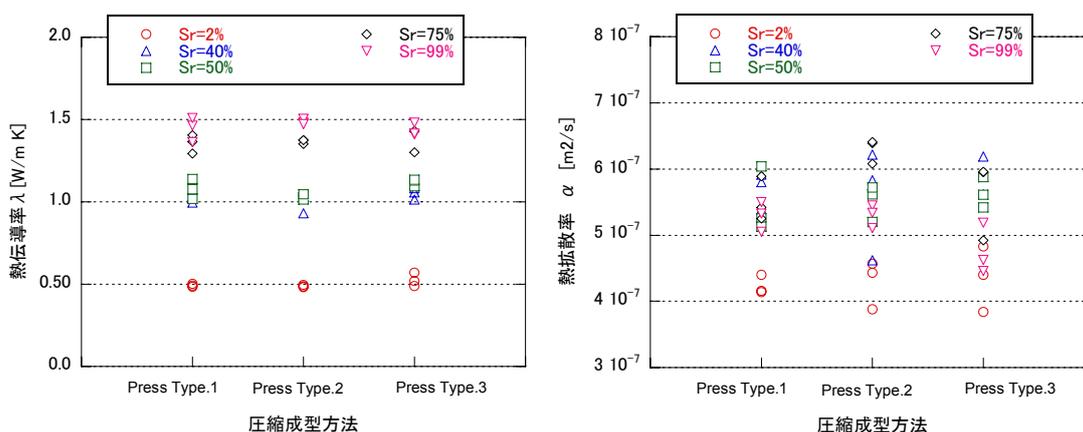


図 3.3-36 圧縮成型方法と熱伝導率の関係 図 3.3-37 圧縮成型方法と熱拡散率の関係

3.3.4 熱物性値に関する測定方法の現状と課題のまとめ

3.3.2 節及び 3.3.3 節における調査及び検討結果を踏まえ、現状の知見から得られた影響要因を整理するとともに、得られた知見から推奨できる測定方法の提案と今後の課題を以下に示す。

(1) 測定法自体による影響要因

1) 測定法（測定装置）の影響

ベントナイト系材料の熱物性値測定に関しては、針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法、ホットディスク法の 4 つの非定常法による測定が実施されている。測定法の影響に関しては、上記 4 つの測定法により得られた測定値を基にした比較が実施されており、測定法ごとに得られた結果に顕著な相違は見られなかった。

この結果からベントナイト系材料の熱物性値の測定法としては、針状プローブ法、ホ

ットワイヤー法、球状プローブ法、ホットディスク法のどの測定法を用いても特に問題がない。ただし、用いる測定法の測定精度は、測定前に測定対象物と同程度の熱物性値を有する標準材料等を用いて確認しておくことが必要である。

(2) 測定手順による影響要因

1) 混合材の混合状態による影響

ベントナイト系材料にケイ砂等の混合材を混合した混合材料を一度にモールドに投入した場合、土粒子密度の高いケイ砂等の方が先に落下し、供試体中にケイ砂が局所的に溜まり、不均一な状態を形成することによって測定結果に影響を及ぼす可能性が考えられる。ただし、その影響の程度は4つの測定法とも明確になっていない。また、ベントナイト系材料の熱伝導率に対する各種推算式の提案や評価が実施されており、これまでにベントナイト単体供試体に対しては、実用上十分な精度で推算できることが評価されているが、ケイ砂等の混合材を混合した場合、測定結果にばらつきが多いため、より精度の高いデータの拡充が必要であることが示されている。

したがって、測定法ごとに混合材の不均一性の影響を定量的に評価するためには、混合材の粒径や混合方法等を考慮したデータの拡充が今後の課題である。

なお、供試体の作製に際しては、数回に分けて材料をモールドに投入して混合材のばらつきを抑制する。

2) 水分移動の影響

供試体中や測定容器の隙間等から水分が蒸発する等の水分移動が生じ、測定結果に影響を及ぼすことが針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法に対して示されている。例えば、針状プローブ法を用いて温度条件が60℃において熱伝導率の測定を行った際、供試体に亀裂が入り、供試体中に発生する熱応力、もしくは水分の蒸発が原因で測定ができなかったことが報告されている。なお、ホットディスク法について検討された事例はなかった。

供試体中の水分移動を防ぐための対策としては、針状プローブ法の場合、供試体と測定容器との隙間にシリコンゴムを充填することや発泡スチロール等の断熱材を用いて測定容器周辺を覆う。また、ホットワイヤー法の場合、供試体を食品用包装フィルム等で包む。さらには、球状プローブ法の場合、供試体を測定容器内に設置した後、隙間部をシリコン製樹脂で充填することや測定容器を断熱材で覆う等の対策が必要である。

なお、ホットディスク法に関しては、これまでに水分移動を防ぐための対策を講じて測定を行った検討例が見当たらなかったことから、今後、供試体中の水分移動の影響がどの程度あるか把握することが今後の課題である。

(3) 測定条件による影響要因

1) 供試体寸法の影響

針状プローブ法を用いて測定する場合は、プローブの長さがプローブ両端からの熱損

失を検討して決定する必要がある。そのため、媒体が土や岩石のような熱の不良導体の場合には、プローブの半径に対して 60 倍の長さがあれば熱損失の影響が無視できることから、使用するプローブ半径に対して 60 倍の供試体高さが必要となる。

ホットワイヤー法を用いて測定する場合は、標準プローブの寸法が幅 50mm、長さ 100mm 程度となり、供試体の厚さが 20mm 以上必要となる。

球状プローブ法を用いて測定する場合は、供試体寸法が直径 20mm、高さ 10mm の円柱状の試料を 2 片用いて、球状プローブを挟んで測定する必要がある。

ホットディスク法を用いて測定する場合は、供試体寸法として、選定したプローブ直径の 3 倍以上の広さを有した直径とし、プローブ直径以上の厚みのある試料を 2 片用いて、ホットディスクセンサーを挟んで測定する必要がある。

2) 初期含水比の影響

初期含水比による熱物性値への影響に関しては、熱伝導率の場合、初期含水比が増加するほど大きくなることが 4 つの測定法で示されていた。したがって、熱伝導率の測定においては、供試体中の水分量の変化が大きく測定結果に影響を及ぼすことから、4 つの測定法とも測定前後の含水比を記録しておくことが必要である。

また、熱拡散率の場合、初期含水比の影響を受けず、ほぼ一定の値を示す結果が針状プローブ法、球状プローブ法、ホットディスク法で得られている。なお、熱拡散率に関しては、測定上、供試体中の水分量の変化による影響は受けないものの、含水比を用いたデータ整理を行う場合には、4 つの測定法とも測定前後の含水比を記録しておくことが必要である。

3) 通水溶液の種類や組成の影響

通水溶液の種類や組成による熱物性値への影響に関しては、これまでにホットディスク法を用いた熱伝導率及び熱拡散率の測定が行われており、通水溶液として人工海水、幌延地下水を用いて供試体中の水分を調整した場合、塩濃度の影響は少なく、イオン交換水等を用いて供試体中の水分を調整した場合と比べても変わらない測定結果が報告されている。なお、ここでの検討は、人工海水や幌延地下水を対象とした塩濃度の影響について検討した結果であり、種々の溶液の種類や組成を考慮した場合、種々の溶液等に対して影響がないと判断することは難しい。

針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法については、通水溶液の種類や組成に係わる検討された事例は見当たらなかったため、上記 3 つの測定法に関しても通水溶液の種類や組成の影響を確認することが今後の課題である。

以上のことを踏まえ、測定を実施する際には、イオン交換水、蒸留水、海水、地下水等の溶液の種類や、溶液中のイオン組成などを記録しておくことが必要である。

4) 温度の影響

温度による熱物性値への影響に関しては、熱伝導率の場合、針状プローブ法を用いて測定を行った結果、測定温度が 100 以下であれば熱伝導率への影響は少なく、ほぼ一定の値を示す結果と測定温度の上昇とともに熱伝導率は大きくなる傾向を示すといった異なる結果が報告されている。また、熱拡散率の場合、針状プローブ法を用いて測定を行った結果、温度の影響は小さく、ほぼ一定の値を示す結果と球状プローブ法を用いて測定を行った結果、温度の上昇に伴い若干ではあるが熱拡散率が大きくなるといった異なる結果が報告されている。このように既往の研究例の中には、温度の影響があるという結果も得られていることから、現時点で温度の影響を無視することはできない。したがって、測定を実施する際には、恒温槽等を用いて温度が一定の環境条件下で熱物性値測定を実施する必要がある。また、温度の測定が困難な場合は、測定期間中の温度を記録することが必要である。なお、現状で検討事例が見当たらなかった測定法についても、温度の影響に係わるデータの拡充が今後の課題である。

(4) 供試体の特性による影響要因

1) 定量的評価が可能な要因

(a) モンモリロナイト含有率の影響

文献調査の結果、熱物性値に及ぼすモンモリロナイト含有率の影響を検討した事例は 4 つの測定法とも見当たらなかった。

現時点において、モンモリロナイト含有率の影響の有無に関しては、明確に判断することは難しい。したがって、モンモリロナイト含有率の影響に関して確認することが今後の課題である。なお、現時点ではベントナイト系材料に含まれるモンモリロナイトやそれ以外の随伴鉱物の含有率を必要に応じて記録することが必要である。

(b) 土粒子密度の影響

文献調査の結果、熱物性値に及ぼす土粒子密度の影響を検討した事例は 4 つの測定法とも見当たらなかった。

現時点においては、土粒子密度の影響の有無に関して、明確に判断することは難しい。また、その影響に関しても無視することができない。したがって、土粒子密度の影響に関して確認することが今後の課題である。なお、3.1 章や 3.2 章に記述されるように試験終了後に飽和度を求める際に、土粒子密度を用いる場合には、ベントナイト系材料及び混合材の土粒子密度を記録することが必要である。

(c) 交換性陽イオン組成の影響

文献調査の結果、熱物性値に及ぼす交換性陽イオン組成の影響を検討した事例は 4 つの測定法ともは見当たらなかった。

現時点においては、交換性陽イオン組成の影響の有無に関して、明確に判断することは難しい。したがって、交換性陽イオン組成の影響に関しては、例えば、Na 型のクニ

ゲル V1 と Ca 型化させたクニゲル V1 を用いて測定等を行い、その測定値の比較から影響に関して確認することが今後の課題である。なお、現時点ではベントナイト系材料に含まれる交換性陽イオン組成を必要に応じて記録することが必要である。

2) 定量的評価が困難な要因

(a) 土の微視的構造の影響

文献調査の結果、熱物性値に及ぼす土の微視的構造の影響を検討した事例は 4 つの測定法とも見当たらなかった。

現時点においては、土の微視的構造の影響の有無に関して、明確に判断することは難しい。したがって、今後、土の微視的構造の影響に関して確認しておくことが必要である。なお、現時点では供試体の圧縮成型方法を必要に応じて記録する。

(b) 密度不均一性の影響

密度不均一性による供試体への影響を確認するため、供試体を上面加圧により圧縮成型する方法 (Press Type.1) と圧縮成型治具下板部に金属焼結フィルタを設け、Press Type.1 と同様に上面加圧しつつ、下板部よりエアーを抜きながら圧縮成型する方法 (Press Type.2) 及び上下面加圧により圧縮成型する方法 (Press Type.3) の 3 つの圧縮成型方法によって生じた供試体中の密度不均一性の影響を確認するため、ホットディスク法を用いた追加試験を実施した結果、密度の不均一性が熱物性値の測定結果に及ぼす影響は小さいことが示された。ただし、本結果は、ホットディスク法のみ確認であることから、針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法の 3 つの測定法に関しても密度不均一性の影響に関して確認することが今後の課題である。したがって、これら 3 つの測定法に対する密度不均一性の影響の有無が判断できない現状では、密度の不均一性をできるだけ抑制するため、供試体作製時に圧縮成型治具や容器に空気を抜けやすくするため、焼結金属フィルタなどを設置するか、密度不均一性が最も小さかった上下面圧縮により供試体を作製するといった方法が有効である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ - 分冊 2 地層処分の工学技術”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-022 (1999).
- 2) (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成 20 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第 1 分冊) 遠隔操作技術高度化開発 (2/2)” (2008).
- 3) 日本機械学会：“伝熱ハンドブック”，社団法人日本機械工学会(1993).
- 4) (社) 土木学会：“余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方” (2008).
- 5) R. Pusch：“The Buffer and Backfill Handbook -Part2: Materials and techniques-”，SKB Technical Report,TR-02-12 (2001).
- 6) R. Pusch：“The Buffer and Backfill Handbook -Part1: Definitions, basic relationships and laboratory methods-”，SKB Technical Report,TR-02-20 (2002).
- 7) 日本機械学会：“熱物性値測定法 - その進歩と工学的応用 - ”社団法人日本機械工学会，(1991).
- 8) 長崎誠三監修：“熱分析実験技術入門第 2 集”，科学技術社 (1982).
- 9) 藤田朝雄，杉田裕，納多勝，幾世橋広：“緩衝材の熱物性試験”，動燃技術資料，PNC N1410 92-052 (1992).
- 10) 末岡徹，小林淳志，今村聡，小川輝繁，村田重美：“高圧縮ベントナイトの熱的特性 - 高レベル放射性廃棄物地層処分に関する基礎的研究その 2 ”，大成建設技術研究報告書，第 23 号，pp91~96 (1990).
- 11) L. Börgesson, A. Fredrikson, L.E. Johannesson：“Heat conductivity of buffermaterials”，SKB Technical Report, TR-94-29, SKB, Stockholm (1994).
- 12) 鈴木英明，柴田雅博，山形順二，広瀬郁郎，寺門一馬：“緩衝材の特性試験(I)”，動力炉核燃料開発事業団 動燃技術資料，PNC TN8410 92-057 (1992).
- 13) 鈴木英明，谷口航：“緩衝材の熱物性試験(II)”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 99-006 (1999).
- 14) 小林一三，戸井田克，中畠誠門，戸栗智仁，朝野英一：“高レベル放射性廃棄物地層処分の遠隔ハンドリング・定置技術の開発(7) 緩衝材の施工品質管理手法の検討(その 2) 熱伝導率による緩衝材の密度管理方法”，日本原子力学会，日本原子力学会 2008 年春の大会要旨集 I56，p.459 (2008).
- 15) 熊田俊明：“点熱源法による緩衝材の熱物性値測定法の開発”，動燃技術資料，PNC TJ1600 97-004 (1997).
- 16) 熊田俊明：“点熱源法によるベントナイトの熱物性値の測定”，動燃技術資料，PNC TJ1600 98-003 (1998).
- 17) 熊田俊明：“点熱源法による緩衝材の熱物性値の測定(II)”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ8400 99-065 (1999).

- 18) 熊田俊明：“点熱源法による緩衝材の熱物性値の測定(埋め戻し材の物性測定と計測装置の改良)”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ8400 2000-017 (2000).
- 19) 信太拓，坂下弘人，熊田俊明：“点熱源法による緩衝材の熱物性値測定方法の開発”，日本原子力学会，原子力学会 1997 年秋の大会要旨集 E86 p.379 (1997).
- 20) 菊池広人，棚井憲治：“緩衝材の熱物性測定試験(III) - 面熱源法による緩衝材熱物性の取得 - ”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-009 (2003).
- 21) 幾世橋広：“高温・高圧下における岩石の熱物性値と地熱開発(2)”，地熱エネルギー，Vol.13,No.2 (1988).
- 22) R Pusch, O Karnland, A Lajudie, J Lechelle, A Bouchet, : “ Hydrothermal field test with French candidate clay embedding steel heater in the Stripa mine ” ,SKB Technical Report,TR-93-02 , SKB, Stockholm(1993).
- 23) 竹ヶ原竜大，高尾肇，佐藤由子，和田英孝，荒尾邦明，中嶋幸房，幾世橋広，植田浩義、木元崇宏：“すきま充填材としてのベントナイトの特性に関する研究(その2) すきま充填材の熱物性値評価 ”，土木学会，土木学会第 55 回年次講演会 CS-190 (2000).
- 24) 京都電子工業株式会社：迅速熱伝導率計(Quick Thermal Conductivity Meter)「QTM-500」，製品カタログ
- 25) 雨宮清，鈴木英明，柴田雅博，広瀬郁郎，石川博久，湯佐泰久，佐々木憲明：“緩衝材特性に影響をおよぼす要因の検定 高レベル廃棄物処分における緩衝材の開発 ” 動燃技術資料，PNC TN8410 90-005 (1990).
- 26) T.Fujita, H.Suzuki, K.Matsumoto, M.Chijimatsu and H.Ishikawa : “ Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Experiment at Kamaishi Mine Technical Note 11-96-04; Fundamental Properties of bentonite OT-9607 ” ,PNC Technical note PNC TN8410 97-071 (1997).
- 27) 谷口航，鈴木英明，杉野弘幸，松本一浩，千々松正和，柴田雅博：“熱的特性の緩衝材仕様に対する影響”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-052 (1999).
- 28) 増田良一，小野文彦，雨宮清，千々松正和：“ベントナイト系緩衝材の仕様と熱伝導率の関係”，日本原子力学会，日本原子力学会 2004 年春の大会要旨集 H23 , p.829 (2004).
- 29) 緩衝材基本特性データベース：<http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>
- 30) 坂下弘人，熊田俊明：“ベントナイトの熱伝導率推算のための伝熱モデルの提案”，日本原子力学会，日本原子力学会誌，Vol.40, NO.3 pp.75-80 (1998).
- 31) O. L. CHERIF, 坂下弘人，熊田俊明：“緩衝材の熱伝導率の測定と推算式の評価”，日本原子力学会，日本原子力学会誌，Vol.43, NO.9 pp.84-90 (2001).
- 32) 京都電子工業株式会社：ホットディスク法熱物性率測定装置(TPA-501) 取扱説明書
- 33) 菊池広人，棚井憲治：“幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験”，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2004-005 (2005).

4. おわりに

本研究では、ベントナイト系材料を対象とした透水試験、膨潤試験及び熱特性値測定法に着目し、今後の試験法の標準化に向けて必要となる基盤情報の整備を目的として、

①文献調査による現状の試験法の現状把握、試験法の問題点やデータのばらつきに関する整理の実施

②文献調査の結果をもとにしたデータのばらつきに与える影響要因の抽出

③影響要因に基づき、既存データや一部試験によって得られたデータによる詳細分析

を行い、標準的なベントナイト系材料の室内試験法の構築に向けての検討を行った。具体的には、透水試験、膨潤圧試験及び熱物性値測定（熱伝導率、熱拡散率）を対象に、ベントナイト試験法の現状調査ならびに試験を行い、試験結果に影響を及ぼす要因の抽出、影響程度の把握ならびにそれらへの対応策を検討し試験法（試験装置、試験手順）に関して以下の成果を得た。

透水試験に関しては、文献調査の結果、定圧透水法と圧密試験法の使用例が多かった。一般的な土に対する試験結果への影響要因として、定圧透水試験法では①動水勾配、②供試体側面のみずみち、③透水圧、④飽和度ならびに⑤供試体寸法、また圧密試験法では④、⑤に加えて⑥供試体の変形に伴う摩擦、⑦圧密荷重が考えられる。ベントナイト系材料に対する定圧透水試験法では、実用上の範囲で①、②ならびに⑤は試験結果に影響しないことが分かった。③は供試体の収縮を避けるために膨潤圧以下に設定すること、④は内部に空気が残存しにくいよう供試体下部から一次元的な通水を行うことや背圧の負荷等により容易に影響を排除することができる。一方、圧密試験法では、④については、圧密試験装置の構造上、飽和度を高めるための一次元的な通水と背圧の負荷は困難である。また、⑥を完全に排除出来ないため、摩擦の影響を補正する等の考慮が必要である。⑤の影響、⑦の影響を検討した事例は、調査した範囲で見当たらなかった。以上より、試験結果に及ぼす影響を容易に排除可能であり不明な影響要因が少ないことから、定圧透水試験法を用いるのが現状望ましいと思われる。

膨潤圧試験に関しては、文献調査の結果、拘束型の装置と圧密試験装置に類似した装置が用いられていた。両装置とも試験結果に影響を及ぼす要因としては、飽和度、供試体寸法が考えられる。飽和度は、拘束型の装置では一次元的な通水と背圧の負荷により影響を排除できる。供試体寸法は、有効粘土密度 1.6Mg/m^3 程度以上では、影響が大きいことが明らかとなった。文献調査のみならず、同一試料を用いた追加試験結果でも、拘束型の装置による膨潤圧は、圧密試験装置に類似した装置による膨潤圧よりも大きくなる傾向が得られたが、その理由の解明は今後の課題である。

熱物性値測定に関しては、今回調査した針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法、ホットディスク法であれば、どの測定法を用いても特に問題がない。ただし、ケイ砂などの混合材を混ぜる場合のばらつきや測定中における供試体中の水分移動などが、測定結果に影響を及ぼす。したがって、供試体作製時の混合材のばらつきを抑制するため、材料の投入を数回に分けるなどして均一に混合したり、測定中の供試体の水分移動を防ぐために供試体を包装フィルムなどで覆うなどの対策が必要である。

なお、文献調査等によって得られた知見と推奨方法の提案、ならびに今後の課題について、試験毎に表 4-1～表 4-3 にまとめて示す。

謝 辞

本報告書を取りまとめるにあたっては、岡山大学 西垣教授、茨城大学 小峯教授、ならびに北海道大学 坂下准教授には貴重なご指導・ご助言を賜ることができ、ここに深く感謝申し上げます。

表 4-1 抽出された影響要因と知見及び推奨方法の提案 (透水試験)

試験結果によるもの	試験結果に影響を及ぼす要因 試験法(試験装置)の影響	現状での知見	推奨方法の提案	今後の課題
試験法自体によるもの	試験法(試験装置)の影響	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査の結果、ベントナイト系材料に対する透水試験の大半は、圧密試験法と定圧透水試験法であった。 圧密試験法では、供試体側面と圧密リングの間の摩擦の影響が、透水係数を評価する上での不確実要因となる。 定圧透水試験は構造上、供試体の飽和化が容易に出来るのに対して、圧密試験は供試体の飽和化が容易に行えない。 圧密試験法において圧密荷重の影響、供試体寸法の影響について検討されている事例は見当たらなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> 試験結果に及ぼす影響を容易に排除出来、不明な影響が少ないという観点からは、定圧透水試験法を用いるのが現状望ましいと考えられる。 	
試験手順によるもの	飽和化の影響	<ul style="list-style-type: none"> 飽和度が小さいと、透水係数は小さくなる傾向を示す結果がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 飽和状態での透水係数を求めるには、供試体下部から一次元で通水したり、背圧を与える等の方法により飽和度を高めるとともに、試験終了後の飽和度を記録する 	
試験条件によるもの	動水勾配、透水压の影響 供試体寸法の影響	<ul style="list-style-type: none"> 動水勾配が透水係数の評価に影響を及ぼすというデータは見当たらない。 定圧透水試験法において、透水压が膨潤圧以下であれば、剛性セルと供試体間のみずみずの影響は小さいことを示す結果がある。 膨潤圧以上の透水压を加えると供試体が圧縮変形し、有効ベントナイト密度が変化する可能性がある。 JIS規格では、供試体の内径、及び高さは最大粒径の10倍以上が推奨されるとともに、供試体の内径10cmおよび高さ12cmが推奨されている。 既往の試験データによれば、φ50mm~φ200mmでは、供試体寸法が透水係数に影響を及ぼす結果が見られなかった。 既往の試験データから判断すると、粉末状のベントナイトの場合、供試体高さについては10mm~80mm程度であれば、透水係数に及ぼす高さはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> 動水勾配については留意する必要がある。 透水压は膨潤圧を超えない値に設定する。ただし、土圧計などが装着されておらず厳密に膨潤圧を把握出来ない場合には、予想される膨潤圧に基づいて設定する。 直径が50mm~200mm程度であれば、直径に対する留意は必要ない。なお、この範囲外の直径の供試体を用いる場合は、透水係数に及ぼす寸法効果の影響がないことを異なる寸法の試験データとの比較により確認する。 高さが10mm~80mm程度であれば、高さに対する留意は必要ない。なお、この範囲外の高さの供試体を用いる場合は、透水係数に及ぼす寸法効果の影響がないことを異なる高さの試験データとの比較により確認する。 現状では、記録しておくことが望ましい。 	
試験条件によるもの	初期含水比の影響	<ul style="list-style-type: none"> 検討事例は見当たらなかった。 膨潤圧については、初期含水比に依存するデータがあり、透水係数が膨潤圧と関係していると考えた場合には、初期含水比の影響がある可能性も考えられる。 通水溶液の種類や組成の影響を受けるデータのデータがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 通水溶液については、イオン交換水、蒸留水、海水、地下水等の溶液の種類や、溶液中のイオン組成などを記録する。 	
試験条件によるもの	通水溶液の種類や組成の影響	<ul style="list-style-type: none"> 温度の影響を受けるデータのデータがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 試験を実施する際には、なるべく温度が一定の環境条件下で透水試験を実施する。なお、温度の制御が困難な場合には、測定期間中の温度を記録する。 	
試験条件によるもの	モンモリロナイト含有率の影響	<ul style="list-style-type: none"> モンモリロナイト含有率の影響を受けるとのデータがある。また、一般には名称が同じベントナイトでも採掘場所や採掘時期の違いにより、モンモリロナイト含有率は異なる。 有効粘土密度と透水係数の関係には、ベントナイトのモンモリロナイト含有率の違いが影響するため、有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係で整理することが重要である。 	<ul style="list-style-type: none"> 供試体中のベントナイトのモンモリロナイト含有率については、必要に応じて記録する。 	
試験条件によるもの	土粒子密度の影響	<ul style="list-style-type: none"> 小峯ほかのモデルや試験結果、田中ほかのモデルによれば、影響する可能性がある。 透水係数に及ぼす微視的構造の異方性の影響は小さいとされる結果がある。 一方、透水係数に及ぼす異方性以外の微視的構造の影響については、その有無や程度を調べた研究がほとんどなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> 透水試験結果を解釈または表示する際に、有効粘土密度、飽和度を指標として用いる場合には、混合材の土粒子密度ならびにベントナイトの土粒子密度を記録する。 モンモリロナイトの土粒子密度は、必要に応じて記録する。 供試体の交換性陽イオン組成を必要に応じて記録する。 供試体の作製方法を必要に応じて記録する。 	<ul style="list-style-type: none"> 透水係数に及ぼす異方性以外の微視的構造の影響の検討については今後の課題である。
試験条件によるもの	密度不均一性の影響	<ul style="list-style-type: none"> 密度不均一性の影響は、現実的な有効粘土密度のばらつき範囲では、大きくないものと考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 密度の不均一性をできるだけ抑制するため、供試体作製時に圧縮成型治具や容器に焼結金属フィルターなどを設置し空気を抜けやすくするか、若しくは、上下面圧縮により供試体を作製するといった方法が有効である。 	

注) 上記の表のうち、「試験法自体によるもの」以外の記述は、定圧透水路法を対象としたものである。

表 4-3 (1/2) 抽出された影響要因と知見及び推奨方法の提案 (熱物性値測定)

試験結果に影響を及ぼす要因	測定法 (測定装置) の影響	現状での知見	推奨方法の提案	今後の課題
測定法自体によるもの	測定法 (測定装置) の影響	<ul style="list-style-type: none"> ペントナイト系材料に対する熱物性値 (熱伝導率・熱拡散率) 測定に関しては、針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法、ホットディスク法の4つの非定常法による測定が実施されている。 4つの測定法により得られた測定値を基に比較されており、測定法ごとに得られた結果に顕著な相違は見られていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 4つの測定法であれば顕著な相違のない測定結果が得られることから、ここで示したどの測定法を用いてもペントナイト系材料の熱物性値測定法として特に問題がない。ただし、用いる測定法の測定精度は、測定前に測定対象物と同程度の熱物性値を有する標準材料等を用いて確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定法ごとに混合材の不均一性の影響を定量的に評価するため、混合材の粒径や混合方法等を考慮したデータの拡充が今後の課題である。
測定手順によるもの	混合材の混合状態による影響	<ul style="list-style-type: none"> ケイ砂等の混合材を混合した混合材を一度にモールドに投入した場合、土粒子密度の高いケイ砂の方が先に落下し、供試体中にケイ砂が局所的に溜まり、不均一な状態を形成することによって測定結果に影響を及ぼす可能性が考えられる。ただし、その影響の程度は4つの測定法とも明確になっていない。 ケイ砂等の混合材を混合した場合、測定結果にばらつきが多いため、より精度の高いデータの拡充が必要であることが示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 供試体の作製に際しては、数回に分けて材料をモールドに投入して、混合材のばらつきを抑制する。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定法ごとに混合材の不均一性の影響を定量的に評価するため、混合材の粒径や混合方法等を考慮したデータの拡充が今後の課題である。
測定条件によるもの	水分移動の影響	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査の結果、温度条件が60℃において熱伝導率の測定を行った際、供試体に亀裂が入り、供試体中の発生する熱応力、もしくは水分の蒸発が原因で測定ができなかったことが報告されている。 供試体中や測定容器の隙間等から水分が蒸発する等の水分移動が生じ、測定結果に影響を及ぼすことが針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法に対して示されている。なお、ホットディスク法について検討された事例はなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> 針状プローブ法の場合、供試体と測定容器との隙間にシリコンゴムを充填することや発泡スチロール等の断熱材を用いて測定容器周辺を覆う ホットワイヤー法の場合、供試体を食品用包装フィルム等で包む。 球状プローブ法の場合、供試体を測定容器内に設置した後、隙間部をシリコン製樹脂で充填することや測定容器を断熱材で覆う。 	<ul style="list-style-type: none"> ホットディスク法の場合、これまで以上に水分移動を防ぐための対策を講じて測定を行った検討例が見当たらないことから、供試体中の水分移動の影響がどの程度あるか把握することが今後の課題である。
測定条件によるもの	供試体寸法の影響	<ul style="list-style-type: none"> 測定法ごとに供試体寸法が異なるため、以下に供試体寸法例を示す。 針状プローブ法の場合、これまでに供試体寸法がφ110×h120mm、φ300×h460mm、φ50×h80mm等の試料を用いた測定が行われている。 ホットワイヤー法の場合、これまでに供試体寸法がW50×L100×H50mm、φ600×h500mm等の試料を用いた測定が行われている。 球状プローブ法の場合、これまでに供試体寸法がφ20×h10mmの試料2片を用いた測定が行われている。 ホットディスク法の場合、これまでに供試体寸法がφ50×h10mmの試料2片を用いた測定が行われている。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定法ごとに標準的な供試体寸法を以下に示す。 針状プローブ法の場合、使用するプローブ半径に対して60倍の供試体高さの試料を用いる。 ホットワイヤー法の場合、標準プローブの寸法が幅50mm、長さ100mm程度となり、供試体の厚さが20mm以上の試料を用いる。 球状プローブ法の場合、供試体寸法が直径20mm、高さ10mmの円柱状の試料を2片用いる。 ホットディスク法の場合、選定したプローブ直径の3倍以上の広さを有した直径とし、プローブ直径以上の厚みのある試料を2片用いる。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定法ごとに標準的な供試体寸法を以下に示す。 針状プローブ法の場合、使用するプローブ半径に対して60倍の供試体高さの試料を用いる。 ホットワイヤー法の場合、標準プローブの寸法が幅50mm、長さ100mm程度となり、供試体の厚さが20mm以上の試料を用いる。 球状プローブ法の場合、供試体寸法が直径20mm、高さ10mmの円柱状の試料を2片用いる。 ホットディスク法の場合、選定したプローブ直径の3倍以上の広さを有した直径とし、プローブ直径以上の厚みのある試料を2片用いる。
測定条件によるもの	初期含水比の影響	<ul style="list-style-type: none"> 熱伝導率の場合、各測定法ともに初期含水比が増加するほど大きくなる。 熱拡散率の場合、初期含水比の影響を受けず、ほぼ一定の値を示す結果が、針状プローブ法、球状プローブ法、ホットディスク法で得られている。 	<ul style="list-style-type: none"> 熱伝導率は、供試体中の水分量の変化が大きく測定結果に影響を及ぼすことから、4つの測定法とも測定前後の含水比を記録する。 熱拡散率は、水分量の変化による影響は受けにくい。含水比を用いたデータ整理を行う場合、4つの測定法とも測定前後の含水比を記録する。 	<ul style="list-style-type: none"> 熱伝導率は、供試体中の水分量の変化が大きく測定結果に影響を及ぼすことから、4つの測定法とも測定前後の含水比を記録する。 熱拡散率は、水分量の変化による影響は受けにくい。含水比を用いたデータ整理を行う場合、4つの測定法とも測定前後の含水比を記録する。
測定条件によるもの	通水溶液の種類や組成の影響	<ul style="list-style-type: none"> 通水溶液の種類や組成の影響に関しては、これまでにホットディスク法を用いた熱伝導率及び熱拡散率の測定が行われており、通水溶液として人工海水、幌延地下水を用いて供試体中の水分を調整した場合、塩濃度の影響は少なく、イオン交換水等を用いて供試体中の水分を調整した場合と比べても変わらない測定結果がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状では限られた通水溶液に対する結果しかないので、種々の溶液組成を考慮した場合、影響がないと判断するのは難しい。したがって、現状ではイオン交換水、蒸留水、海水、地下水等の溶液の種類や、溶液中のイオン組成などを記録する。 	<ul style="list-style-type: none"> 針状プローブ法、ホットワイヤー法、球状プローブ法は、通水溶液の種類や組成に係わる検討例が見当たらないため、今後、上記3つの測定法についても通水溶液の種類や組成の影響を確認することが今後の課題である。
測定条件によるもの	温度の影響	<ul style="list-style-type: none"> 熱伝導率の場合、針状プローブ法を用いて測定を行った結果、測定温度が100℃以下であれば熱伝導率への影響は少なく、ほぼ一定の値を示す結果と測定温度の上昇とともに熱伝導率は大きくなる傾向を示すといった異なる結果がある。 熱拡散率の場合、針状プローブ法を用いて測定を行った結果、温度の影響は小さく、ほぼ一定の値を示す結果と球状プローブ法を用いて測定を行った結果、温度の上昇に伴い若干ではあるが熱拡散率が大きくなるといった異なる結果がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定を実施する際には、恒温槽等を用いて温度が一定の環境条件下で熱物性値測定を実施する必要がある。また、温度の測定が困難な場合は、測定期間中の温度を記録する。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状で検討事例が見当たらない測定法についても、温度の影響に係わる熱物性値データの拡充が今後の課題である。

表 4-3 (2/2) 抽出された影響要因と知見及び推奨方法の提案 (熱物性値測定)

試験結果に影響を及ぼす要因	現状での知見	推奨方法の提案	今後の課題
<p>モンモリロナイト含有率の影響</p> <p>土粒子密度の影響</p> <p>交換性陽イオン組成の影響</p> <p>土の微視的構造の影響</p> <p>密度不均一性の影響</p> <p>定量的評価が可能な要因</p> <p>定量的評価が困難な要因</p> <p>供試体の特性によるもの</p>	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査の結果、モンモリロナイト含有率の影響に係わる検討例は4つの測定法とも見当たらなかった。 モンモリロナイト含有率の影響の有無に関して、明確に判断することは難しい。 文献調査の結果、土粒子密度の影響に係わる検討例は4つの測定法とも見当たらなかった。 土粒子密度の影響の有無に関して、明確に判断することは難しく、その影響に関しても無視することができない。 文献調査の結果、交換性陽イオン組成の影響に係わる検討例は4つの測定法とも見当たらなかった。 交換性陽イオン組成の影響の有無に関して、明確に判断することは難しい。 	<ul style="list-style-type: none"> モンモリロナイトやそれ以外の随伴鉱物の含有率を必要に応じて記録する。 試験終了後に飽和度を求める際に、土粒子密度を用いる場合には、ペントナイト系材料及び混合材の土粒子密度を記録する。 交換性陽イオン組成を必要に応じて記録する。 供試体の圧縮成型方法を必要に応じて記録する。 	<ul style="list-style-type: none"> モンモリロナイト含有率の影響に関して確認することが今後の課題である。 土粒子密度の影響に関して確認することが今後の課題である。 交換性陽イオン組成の影響に関しては、例えば、Na型のクニゲルV1とCa型を用いて測定等を行い、その測定値の比較から影響に関して確認することが今後の課題である。 土の微視的構造の影響に関して確認することが今後の課題である。 針状プロープ法、ホットロイヤーマ法、球状プロープ法の3つの測定法を用いて、密度不均一性に関する課題である。
	<ul style="list-style-type: none"> 圧縮成型法の違いによる密度不均一性の影響を確認するため、ホットデイスクス法を用いた追加試験を実施した結果、密度の不均一性が測定結果のばらつきに与える影響は小さいことが示された。 	<ul style="list-style-type: none"> ホットデイスクス法に関しては、現状の供試体寸法を用いれば密度の不均一性に関する問題は問題ない。 他の測定法に対する影響の有無が判断できない現状では、密度の不均一性を由来するだけ抑制するため、供試体作製時に圧縮成型治具や容器に空気を抜けやすくするため、焼結金属フィルタなどを設置するか、密度不均一性が最も小さかった上下面圧縮により供試体を作成するといった方法が有効である。 	

付録：文献調査リスト

This is a blank page.

番号	著者	発行年	論文名	発行元	番号等	項目
1	末岡徹ほか	1990年	高レベル放射性廃棄物地層処分に関する基礎的研究-2-高圧縮バントナイトの熱的特性	大成建設	大成建設技術研究所報(23)	熱
2	末岡徹ほか	1990年	高圧縮バントナイトの土質力学的性質について	地盤工学会	第25回地盤工学研究会発表会講演発表集	透水
3	緒方信英ほか	1991年	温度履歴を受けたバントナイトの熱特性	地盤工学会	第26回地盤工学研究会発表会講演発表集	熱
4	末岡徹ほか	1991年	高圧縮バントナイトの熱伝導率	土木学会	第46回年次学術講演会第3部, pp.428-429	熱
5	藤田朝雄ほか	1992年	緩衝材の熱物性試験	動力炉・核燃料開発事業団	PNC TN1410 92-052	熱
6	鈴木英明ほか	1992年	緩衝材の特性試験()	動力炉・核燃料開発事業団	PNC TN8410 92-057	膨潤 熱 透水
7	菅原宏ほか	1992年	締固めたバントナイトの膨潤圧に関する基礎的研究	地盤工学会	第27回地盤工学研究会発表会講演発表集	膨潤
8	小峯秀雄ほか	1992年	砂とバントナイト混合材料の膨潤度変形前後の透水係数	土木学会	第47回年次学術講演会, pp.666-667	透水
9	小峯秀雄ほか	1992年	高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材の力学特性(その1) - 締固めたバントナイトの吸水膨潤挙動の実験的検討 -	電力中央研究所	電力中央研究所報告 U92039	膨潤
10	尾上篤生	1992年	バントナイト混合珪砂の圧密・膨潤特性について	土木学会	第47回年次学術講演会	膨潤
11	尾上篤生	1993年	バントナイト混合珪砂の膨潤率と膨潤圧について	土木学会	第48回年次学術講演会第3部, pp.358-359	膨潤
12	三谷泰浩ほか	1993年	バントナイト混合土の透水性と骨材のとの関係について	土木学会	第48回年次学術講演会第3部 pp.1080-1081	透水
13	谷澤房郎ほか	1993年	バントナイト・砂混合土の透水特性	土木学会	第48回年次学術講演会第3部 pp.1082-1083	透水
14	中島均ほか	1994年	放射性廃棄物処分施設におけるバントナイト混合土の膨潤圧の取り扱いに関する一考察	地盤工学会	第29回地盤工学研究会発表会講演発表集	膨潤
15	緒方信英ほか	1994年	バントナイト砂混合材料の透水係数に関する一考察	地盤工学会	第29回地盤工学研究会発表会講演発表集	透水
16	八鍬昇ほか	1994年	礫混入バントナイト混合土の透水係数に関する一考察	地盤工学会	第29回地盤工学研究会発表会講演発表集	透水
17	中村裕昭ほか	1994年	除荷過程を考慮した低透水性材料の封圧下透水試験	土木学会	第49回年次学術講演会第3部, pp.202-203	透水
18	田代勝浩ほか	1995年	締固めたバントナイトの膨潤変形に及ぼすNaCl濃度の影響	地盤工学会	第30回地盤工学研究会発表会講演発表集	膨潤
19	五十嵐孝文ほか	1996年	バントナイト・砂混合土の透水係数	地盤工学会	第31回地盤工学研究会発表会講演発表集	透水
20	中島晃ほか	1996年	難透水性材料の透水性評価に関する研究	地盤工学会	第31回地盤工学研究会発表会講演発表集	透水
21	田代勝浩ほか	1996年	締固めたバントナイトの膨潤変形に及ぼす水質の影響	地盤工学会	第31回地盤工学研究会発表会講演発表集	膨潤
22	吉田弘明	1996年	低レベル放射性廃棄物処分施設におけるバントナイト混合土の膨潤時の透水特性	土木学会	第51回年次学術講演会, pp.544-545	透水
23	三谷泰浩ほか	1996年	低レベル放射性廃棄物処分施設におけるバントナイト混合土のせん断変形時の透水特性	土木学会	第51回年次学術講演会, pp.546-547	透水

24	田代勝浩ほか	1997年	パントナイトの膨潤変形に及ぼす温度と加熱時間の影響	地盤工学会	第32回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
25	小峯秀雄ほか	1997年	温度履歴によるパントナイトの膨潤変形の低下に関する一考察	地盤工学会	第32回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
26	雨宮清ほか	1997年	パントナイト固化体の膨潤圧特性に関する一考察	地盤工学会	第32回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
27	菅野ほか	1997年	圧縮パントナイト・ロック集合体の高圧透水試験	地盤工学会	第32回地盤工学研究発表会講演発表集	透水
28	竹ヶ原竜大ほか	1997年	すきま存在でのパントナイト系材料の膨潤圧	土木学会	第52回年次学術講演会第3部(A), pp.12-13	膨潤
29	熊田俊明ほか	1997年	点熱源による緩衝材の熱物性測定方法の開発	日本原子力学会	日本原子力学会「1997年秋の大会」要旨集, 熱E86	膨潤
30	松本一浩ほか	1997年	緩衝材の飽和透水特性	動力炉・核燃料開発事業団	PNC TN8410 97-296	透水
31	小峯秀雄ほか	1997年	放射性廃棄物処分のための砂・パントナイト混合材料の膨潤特性とその評価法	電力中央研究所	電力中央研究所報告 U96029	膨潤
32	前田宗弘ほか	1998年	加シム型および加シム型パントナイトの基本特性 - 膨潤圧, 透水係数, 一軸圧縮強度および弾性係数 -	動力炉・核燃料開発事業団	PNC TN8410 98-021	膨潤
33	坂下弘人ほか	1998年	パントナイトの熱伝導率推算のための伝熱モデルの提案	日本原子力学会	日本原子力学会誌 40(3), 19981006	熱
34	田代勝浩ほか	1998年	パントナイトを含有する土質材料の膨潤特性の評価の試み	地盤工学会	第33回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
35	小峯秀雄ほか	1998年	パントナイトを含有する土質材料の膨潤評価式の提案	地盤工学会	第33回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
36	中島晃ほか	1998年	パントナイトを含有する土質材料の膨潤評価式の高レベル放射性廃棄物処分への利用	地盤工学会	第33回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
37	小峯秀雄ほか	1998年	砂とパントナイト混合材料の長期透水特性	土木学会	第53回年次学術講演会第3部(A) pp.584-585	透水
38	古市光昭ほか	1999年	高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しの検討(その2)	日本原子力学会	原子力バックエンド研究, vol.5, No.2	膨潤 透水
39	長田徹ほか	1999年	高レベル放射性廃棄物処分における緩衝材の自己シール性に関する研究(その1) - 一元シール実験による検討 -	地盤工学会	第34回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
40	小峯秀雄ほか	1999年	各種パントナイトの膨潤特性に関する実験的研究	土木学会	第54回年次学術講演会, -B372	膨潤
41	鈴木英明ほか	1999年	緩衝材の膨潤特性	核燃料サイクル開発機構	JNC TN8400 99-038	膨潤
42	高治一彦ほか	1999年	緩衝材の静的力学特性	核燃料サイクル開発機構	JNC TN8400 99-041	膨潤
43	鈴木英明ほか	1999年	緩衝材の熱物性試験()	核燃料サイクル開発機構	JNC TN8430 99-006	熱
44	谷口航ほか	1999年	熱的特性の緩衝材仕様に対する影響	核燃料サイクル開発機構	JNC TN8400 99-052	熱
45	小峯秀雄ほか	1999年	高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋め戻し材の膨潤評価式 - 砂とパントナイトの配合割合およびパントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響 -	電力中央研究所	電力中央研究所報告 U99013	膨潤
46	小峯秀雄ほか	2000年	パントナイトの交換性陽イオンの種類・組成を考慮した緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の提案	地盤工学会	第35回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤

47	田代勝浩ほか	2000年	各種パントナイトの膨潤特性への緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の適用性	地盤工学会	第35回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
48	長田徹ほか	2000年	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適用性に関する研究 - 一元圧力実験における隙間充填後の緩衝材発生圧力の予測 -	地盤工学会	第35回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
49	竹ヶ原竜大ほか	2000年	すきま充填材としてのパントナイト特性に関する研究(その2) - すきま充填材の熱物性値評価 -	土木学会	第55回年次学術講演会 CS, CS-190	熱
50	今井久ほか	2000年	緩衝材原位置締め工法の検討 - 膨潤試験 -	土木学会	第55回年次学術講演会 CS, CS-193	膨潤
51	田中益弘	2000年	Na型パントナイトの塩水化による透水及び膨潤特性の変化	土木学会	第55回年次学術講演会 CS, CS-198	透水
52	千々松正和ほか	2000年	高レベル放射性廃棄物の地層処分における熱・水・応力連成モデルを用いたニアフィールド解析評価	核燃料サイクル開発機構	JNC TN8400 2000-008	熱
53	佐藤由子ほか	2001年	粒状体の熱伝導率測定	地盤工学会	第36回地盤工学研究発表会講演発表集	熱
54	田中益弘ほか	2001年	パントナイトの三軸膨潤圧試験について	地盤工学会	第36回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
55	長谷川琢磨ほか	2001年	圧縮パントナイトの浸潤過程に関する実験的研究	地盤工学会	第36回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
56	小峯秀雄ほか	2001年	「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」によるパントナイト系緩衝材・遮水材の透水特性評価	地盤工学会	第36回地盤工学研究発表会講演発表集	透水
57	杉田裕ほか	2001年	パントナイトレットを用いた緩衝材の隙間充填性に関する検討(その1) パントナイトレットの膨潤後の止水係数に関する検討	土木学会	第56回年次学術講演会 CS, pp.2-3	透水
58	石井卓ほか	2001年	パントナイト系バリアの等価な透水係数の推定方法	土木学会	第56回年次学術講演会 CS, pp.20-21	透水
59	足立格一郎	2001年	高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるパントナイト緩衝材の膨潤特性に関する研究	土木学会	第56回年次学術講演会 CS, CSI-003	膨潤
60	中島均ほか	2001年	パントナイト系人工バリアの加圧水通水時の膨潤挙動	土木学会	第56回年次学術講演会 CS, CSI-004	透水
61	雨宮清	2001年	緩衝材原位置締め工法の検討 - 透水試験 -	土木学会	第56回年次学術講演会 CS, CSI-007	透水
62	今井久ほか	2001年	緩衝材原位置締め工法の検討 - 膨潤圧試験 -	土木学会	第56回年次学術講演会 CS, CSI-008	膨潤
63	小峯秀雄	2001年	高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の透水係数に関する理論的考察	土木学会	第56回年次学術講演会 CS, CSI-007	透水
64	白石知成ほか	2001年	パントナイト系材料の透水係数に与える動水勾配の影響	土木学会	第56回年次学術講演会 CS, CSI-011	透水
65	CHERIF ほか	2001年	緩衝材の熱伝導率の測定と推算式の評価	日本原子力学会	日本原子力学会誌 43(9), 20010930	熱
66	小峯秀雄ほか	2001年	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	電力中央研究所報告 U00041	透水
67	千々松正和ほか	2001年	高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるパントナイト緩衝材継目部の力学特性および膨潤特性	土木学会	土木学会論文集, 673巻, 54号, pp.61-70	膨潤

68	長谷川琢磨ほか	2002年	各種パントナイトの浸潤特性に関する実験的研究	地盤工学会	第37回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
69	崔紅斌ほか	2002年	一次元下でのパントナイトと砂との混合材の膨張・圧密特性	地盤工学会	第37回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
70	小峯秀雄	2002年	パントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤変形前後における透水係数の変化に対する透水特性理論評価式の適用性	地盤工学会	第37回地盤工学研究発表会講演発表集	透水
71	井上誠ほか	2002年	MSリングを用いたパントナイト系緩衝材・埋戻し材の浸潤・膨潤特性の簡易な実験法の提案	地盤工学会	第37回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
72	畔柳幹雄ほか	2002年	パントナイト系難透水材料に対する透水・圧密試験時間短縮の試み	土木学会	第57回年次学術講演会 CS, CS10-035	透水
73	雨宮清ほか	2002年	パントナイトレートの特性試験（その2） - パントナイトレートの熱物性および膨潤特性 -	土木学会	第57回年次学術講演会 CS, CS10-047	膨潤
74	直井優ほか	2003年	パントナイト系緩衝材の膨潤特性評価のための小口径供試体用膨潤特性試験装置の開発	地盤工学会	第38回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
75	佐藤由子ほか	2003年	パントナイトの熱伝導率に及ぼす影響因子について	地盤工学会	第38回地盤工学研究発表会講演発表集	熱
76	片岡哲之ほか	2003年	高密度な不攪乱パントナイト試料を対象とした透水係数の測定方法に関する検討	地盤工学会	第38回地盤工学研究発表会講演発表集	透水
77	崔紅斌ほか	2003年	パントナイトと砂の混合土の三軸応力条件下での浸水膨潤変形特性	地盤工学会	第38回地盤工学研究発表会講演発表集	膨潤
78	小松賢司ほか	2003年	各種室内試験によるパントナイト・硅砂混合土の力学特性	土木学会	第58回年次学術講演会第3部, -513, pp.1025-1026	膨潤
79	鈴木英明ほか	2003年	熱特性からみた隙間充填材としてのパントナイトレートの適用性	土木学会	第58回年次学術講演会 CS, CS7-017, pp.311-312	熱
80	石井卓ほか	2003年	1E-13/sの透水係数を短時間で測定する高速透水試験	土木学会	第58回年次学術講演会 CS, CS7-021, pp.319-320	透水
81	畔柳幹雄ほか	2003年	パントナイト系難透水材料の透水・圧密試験時間短縮の試み	土木学会	第58回年次学術講演会 CS, CS7-022, pp.321-322	透水
82	菊池広人ほか	2003年	海水条件下における圧縮パントナイトの透水性	土木学会	第58回年次学術講演会 CS, CS7-033, pp.343-344	透水
83	早川幸恵ほか	2003年	パントナイトの膨潤特性に与えるNaCl濃度の影響	土木学会	第58回年次学術講演会 CS, CS7-036, pp.349-350	膨潤
84	菊池広人ほか	2003年	緩衝材の飽和透水特性 - 海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響 -	核燃料サイクル開発機構	JNC TN8430 2003-002	透水
85	菊池広人 ほか	2003年	緩衝材の熱物性測定試験（ ） - 面熱源法による緩衝材熱物性の取得 -	核燃料サイクル開発機構	JNC TN8430 2003-009	熱

86	増田良一	2004年	パントナイト系緩衝材の仕様と熱伝導率の関係	日本原子力学会	日本原子力学会「2004年春の大会」	熱
87	崔紅斌ほか	2004年	パントナイトと砂の混合土の一次元的な浸水変形特性	土木学会	土木学会論文集 No.764/ -67, pp.275-285	
88	直井優ほか	2004年	異なる寸法の供試体を用いたパントナイト系緩衝材の膨潤圧特性評価	地盤工学会	第39回地盤工学研究会発表会講演発表集	膨潤
89	佐川修ほか	2004年	Na型パントナイト混合砂のCa置換に伴う透水係数の経時変化	地盤工学会	第39回地盤工学研究会発表会講演発表集	透水
90	佛田理恵ほか	2004年	高圧密試験装置を用いたパントナイト系緩衝材の透水係数算出における試験方法の高度化	地盤工学会	第39回地盤工学研究会発表会講演発表集	透水
91	田中幸久ほか	2004年	パントナイトの膨潤特性に及ぼす人工海水濃度の影響とその表示	地盤工学会	第39回地盤工学研究会発表会講演発表集	膨潤
92	大橋良哉ほか	2004年	短時間の温度履歴を受けたパントナイトの膨潤特性の変化	地盤工学会	第39回地盤工学研究会発表会講演発表集	膨潤
93	工藤康二ほか	2004年	締固めたパントナイト試料の真空脱気方法による飽和時間短縮に関する検討	地盤工学会	第39回地盤工学研究会発表会講演発表集	透水
94	長谷川琢磨	2004年	パントナイトの透水・湿潤特性への海水影響	電力中央研究所	電力中央研究所報告 N04005	透水
95	田中幸久ほか	2004年	海水の濃度と高温履歴がパントナイトの膨潤性に及ぼす影響	電力中央研究所	電力中央研究所報告 N04007	膨潤
96	児玉潤ほか	2004年	パントナイト・珪砂混合材料試料の高温環境下での膨潤特性	土木学会	土木学会論文集 No.764, pp.319-328	膨潤
97	佛田理恵ほか	2004年	パントナイトの透水係数に対する各種評価指標値の有効性比較	土木学会	第59回年次講演会第3部, pp.631-632	透水
98	小峯秀雄ほか	2004年	短期間の温度履歴を受けたパントナイトの膨潤特性に関する実験的調査	土木学会	第59回年次講演会第3部, 3-255	膨潤
99	伊藤弘志ほか	2004年	原鉱石から調整した粒状パントナイト特性試験(2)～透水特性について～	土木学会	第59回年次学術講演会CS, CS1-43	透水
100	小峯秀雄ほか	2004年	各種パントナイトの透水係数に対するモレロイト結晶層間流に基づく透水係数理論評価式の適用性	土木学会	第59回年次学術講演会CS, CS1-44	透水
101	中島均ほか	2004年	1E-13/sの透水係数を短時間で測定する高速透水試験 - 湿潤方式飽和法透水試験との比較 -	土木学会	第58回年次学術講演会CS, CS-46	透水
102	石井卓ほか	2004年	強制乾燥真空注水飽和法によるパントナイト系難透水特性材の短時間透水試験 - 現場サンプリング供試体の透水試験 -	土木学会	第59回年次学術講演会CS, CS1-47	透水
103	菊池広人ほか	2005年	瞬延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験	核燃料サイクル開発機構	JNC TN8430 2004-005	膨潤 熱 透水

104	高治一彦ほか	2005年	幌延の地下水環境下におけるパントライト混合土の力学特性に関する研究()	核燃料サイクル開発機構	JNC TJ5400 2004-002	膨潤
105	工藤康二ほか	2005年	締固めたパントライト試料の膨潤圧測定方法に関する検討	地盤工学会	第40回地盤工学研究発表会, pp. 2573-2574	膨潤
106	中村邦彦ほか	2005年	X線CTスキャンによるパントライト原鉱の透水性検討	地盤工学会	第40回地盤工学研究発表会, pp. 1305-1306	透水
107	大橋良哉ほか	2005年	温度履歴を受けたパントライトの膨潤変形特性とメソレベル吸着量の変化	地盤工学会	第40回地盤工学研究発表会, pp. 265-266	膨潤
108	佛田理恵ほか	2005年	高圧圧密試験装置を用いて産出したNa型およびCa型パントライトの透水係数に及ぼす人工海水の影響	地盤工学会	第40回地盤工学研究発表会, pp. 1303-1304	透水
109	大森浩司ほか	2005年	供給水循環環境下でのパントライトの膨潤変形特性とその実験装置の構築	地盤工学会	第40回地盤工学研究発表会, pp. 351-352	膨潤
110	竹内靖典ほか	2005年	高品質・高施工性パントライト系成型品の開発-4 パントライト-ル粒径配合充填施工状態の透水係数測定	日本原子力学会	日本原子力学会「2005年秋の大会」要旨集, 透水 L 33	透水
111	直井優ほか	2005年	各種パントライト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響	土木学会	土木学会論文集 No.785/ -70, pp.39-49	膨潤
112	竹ヶ原竜大ほか	2005年	緩衝材の膨潤・透水特性 - 隙間の影響 -	土木学会	第60回年次講演会第3部, pp. 101-102	膨潤
113	藤崎勝利ほか	2005年	飽和過程におけるパントライトの膨潤挙動に関する実験的研究	土木学会	第60回年次講演会第3部, pp. 115-116	膨潤
114	石井卓ほか	2005年	放射性廃棄物処分施設における小型パントライトブロック設置工法(その2) - J'ロクの継ぎ目の透水性変化 -	土木学会	第60回年次講演会第3部, pp. 631-632	透水
115	田中幸久ほか	2005年	人工海水環境下における各種パントライトの透水性に及ぼす影響の評価	土木学会	第60回年次講演会第3部, 3-322	透水
116	佛田理恵ほか	2006年	高圧圧密試験装置を用いたパントライトの透水係数算出における試験方法の高度化	土木学会	土木学会論文集 C, vol.62, No.3, pp.573-578	透水
117	田中幸久ほか	2006年	塩水環境下におけるパントライトの特性に関する考察	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会,	透水
118	小峯秀雄ほか	2006年	人工海水環境下における各種パントライトの自己シール挙動に関する実験的研究	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会, pp. 299-300	膨潤
119	高尾肇ほか	2006年	塩水環境下における隙間存在下での緩衝材の膨潤・透水特性	地盤工学会	第41回地盤工学研究発表会,	膨潤 透水
120	庭瀬一仁ほか	2006年	パントライト原鉱石を用いた遮土土の特性調査(その2)	土木学会	第61回年次学術講演会, pp. 321-322	透水
121	千々松正和ほか	2006年	現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果	土木学会	第61回年次学術講演会	膨潤 透水
122	佐藤治夫	2006年	メソレベル表面の水の熱力学特性の膨潤圧への適用	日本原子力学会	日本原子力学会「2006年秋の大会」要旨集, 膨潤 B43	膨潤

123	尾崎充弘ほか	2006年	放射性廃棄物処分施設の土質系埋戻し土の特性	日本原子力学会	日本原子力学会「2006年秋の大会」要旨集, B47	膨潤 透水
124	佐藤泰ほか	2007年	バントナイト鉱床から採取した試料の長期透水試験	日本原子力学会	日本原子力学会「2007年春の大会」要旨集, I47	透水
125	後藤宣彦ほか	2007年	バントナイトの不飽和膨潤圧実験と膨潤挙動	地盤工学会	第42回地盤工学研究発表会,	膨潤
126	浅野純ほか	2007年	浸水によるバントナイト・ケイ砂混合土の膨潤・圧縮挙動	地盤工学会	第42回地盤工学研究発表会,	膨潤
127	小峯秀雄ほか	2007年	広範囲な乾燥密度における各種バントナイトの透水係数測定	地盤工学会	第42回地盤工学研究発表会, pp. 1027-1028	透水
128	小峯秀雄ほか	2007年	人工海水環境下における各種バントナイトの透水係数に関する実験的研究	土木学会	第62回年次学術講演会, pp. 193-194	透水
129	田中幸久ほか	2007年	海水の濃度が各種バントナイトの透水係数ならびに膨潤圧に及ぼす影響のモデル化	電力中央研究所	電力中央研究所報告 N07008	膨潤 透水
130	佐藤治夫	2008年	緩衝材及び埋め戻し材の膨潤圧に及ぼす塩濃度の影響に関する熱力学的アプローチ	日本原子力学会	日本原子力学会「2008年春の大会」要旨集, I1	膨潤
131	杉浦航ほか	2008年	高圧加環境下におけるバントナイト原鉱石の膨潤圧特性調査	地盤工学会	第43回地盤工学研究発表会, pp.2127-2128	膨潤
132	小峯秀雄ほか	2008年	バントナイトの透水係数に関する既往研究データに対する透水係数理論評価式の適用性	地盤工学会	第43回地盤工学研究発表会,	透水
133	田中幸久ほか	2008年	海水の濃度がバントナイトの透水係数ならびに膨潤圧に及ぼす影響のモデル化	地盤工学会	第43回地盤工学研究発表会,	膨潤 透水
134	後藤宣彦ほか	2008年	不飽和状態におけるバントナイトの膨潤変形特性	地盤工学会	第43回地盤工学研究発表会,	膨潤
135	伊藤裕紀ほか	2008年	バントナイトゲルG Xの基本特性試験(その1)膨潤挙動に関する検討	土木学会	第63回年次学術講演会, pp. 195-196	膨潤
136	田中幸久	2008年	蒸留水・人工海水長期通水中のバントナイトの膨潤圧・透水係数測定	日本原子力学会	日本原子力学会「2008年秋の大会」要旨集, M31	膨潤 透水
137	角脇三師ほか	2008年	Ca型化率とイオン強度をパラメータとしたバントナイトの透水係数の実験的取得	日本原子力学会	日本原子力学会「2008年秋の大会」要旨集, L29	透水
138	杉浦航ほか	2009年	バントナイト原鉱石の膨潤特性に及ぼす初期含水比の影響	地盤工学会	第44回地盤工学研究発表会, pp.235-236	膨潤
139	田中幸久ほか	2009年	長期透水中のバントナイトの膨潤圧と透水係数の測定	地盤工学会	第44回地盤工学研究発表会, 124	膨潤 透水
140	小峯秀雄	2009年	バントナイトの透水現象と拡散現象に関する一考察	地盤工学会	第44回地盤工学研究発表会, 124	透水

141	田中幸久	2009年	ペンサイトの膨潤圧に及ぼす土骨格と飽和度の影響の考察	日本原子力学会	日本原子力学会「2009年秋の大会」要旨集, L32	膨潤
142	三好悟ほか	2009年	圧縮ペンサイト再冠水時の加水圧浸入の影響について	日本原子力学会	日本原子力学会「2009年秋の大会」要旨集, L33	膨潤
143	中越章雄ほか	2009年	粒状ペンサイトの最大粒径がP _{ij} 性能に与える影響に関する検討	日本原子力学会	2009年秋の大会, L34, pp.596	膨潤 透水

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	立法メートル	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	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 ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	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
酸素活性化	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間には1:1の関係がある。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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	ジュール毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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 = 60s
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 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単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	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 = 0.1 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
フオト	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)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

