

締固めたベントナイトの透水係数測定に向けた 厚さ 2 mm の供試体を用いた変水位透水試験の適用性評価

早稲田大学 学生会員 ○伊藤大知, 貞松暁大

早稲田大学 正会員 小峯秀雄, 王海龍

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分をはじめとする各種放射性廃棄物処分においては、遮水性を期待してベントナイト系材料を廃棄体周辺に施工することが有力である。遮水性能の設計・評価において、透水係数が重要な材料特性である。また、処分方法に応じて Na 型、Ca 型など使用するベントナイトの種類や、施工時の乾燥密度が異なることが考えられるため、ベントナイトの透水係数を広範な試験条件で精度よく測定し、データベースを構築することは極めて重要である。しかし、ベントナイト系材料の透水係数は最小で 10^{-14} (m/s) オーダーと極めて低く、既往の検討¹⁾で用いられている供試体サイズでは測定に数か月の長期間を要するため、データベースの構築は困難である。そこで本研究では、試験期間を短期化するために供試体の直径を 28 mm、厚さを 2 mm と極めて小型化した変水位透水試験装置を開発し、測定精度の観点から適用性を考察した。

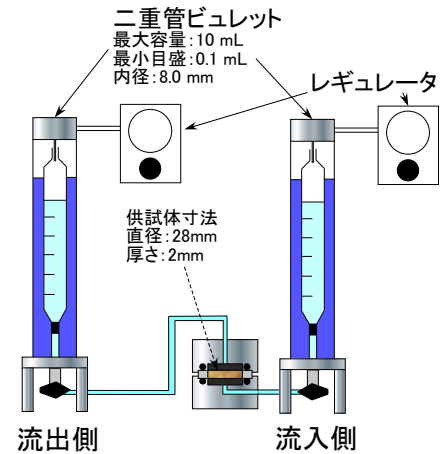


図1 本研究で使用した
変水位透水試験装置

2. 使用した試料および供試体作製方法

山形県月布鉱山産の Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 (クニミネ工業株式会社製、以下 K_V1 と呼称) を用いた。表 1 に使用したベントナイト K_V1 の基本的性質^{2,3)}を示す。また、所定の乾燥密度になるよう静的荷重を加えることで K_V1 試料を締固め、SUS303 製供試体リング (内径 28 mm, 外径 38 mm, 厚さ 2 mm) 内に供試体を作製した。

3. 本研究で実施した変水位透水試験の概要

本研究で使用した変水位透水試験装置を図 1 に示す。試験装置は SUS303 製試験容器 (供試体リング, ポーラスメタル付上版・下版), 流入・流出水量測定用二重管ビュレット (最大容量 10 mL, 最小目盛り: 0.1 mL) および背圧・動水勾配付加用レギュレータ (最大圧力: 3500 kPa, 設定範囲: 15~1000 kPa) で構成される。2 で述べた方法で供試体を作製後, 上下にメンブレンフィルター (PALL 製スーポア, 孔径 0.45 μm) を置いて, 試験容器を組み立てた。試験容器を蒸留水中に浸漬し, 真空引きして減圧したタンク内に 1 日静置して吸水と脱気を促進させた。その後脱気した蒸留水を流入・流出側二重管ビュレットおよび配管系に満たし, 試験容器と接続した。シンフレックスチューブにより二重管ビュレットとレギュレータを接続し, 空気圧を付加した。流入・流出水量が安定して確認できるようになった時点から, 随時二重管ビュレットの水位および水温を測定した。また, レギュレータを操作して背圧および動水勾配を適宜変更した。透水試験の終了目安として, JGS 試験基準⁴⁾も参照し, 初期間隙体積と同体積の通水量を確認した時点とした。測定データから, 式(1)・(2)を用いて透水係数を算出した。

表 1 ベントナイト K_V1 の基本的性質^{2),3)}

土粒子の密度(Mg/m ³)	2.76
液性限界 (%)	535.4
塑性限界 (%)	26.7
塑性指数	508.7
モンモリロナイト含有率 (%)	52.8
浸出 Na ⁺ イオン量 (cmol/kg)	53.8
浸出 Ca ²⁺ イオン量 (cmol/kg)	35.5
浸出 Mg ²⁺ イオン量 (cmol/kg)	4.1
浸出 K ⁺ イオン量 (cmol/kg)	1.6

$$k_T = 2.303 \frac{(a_{in} \times a_{out})L}{(a_{in} + a_{out})A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1 \gamma_w \times 10 + P}{h_2 \gamma_w \times 10 + P} \times \frac{1}{100} \quad (1)$$

$$k_{15} = k_T \times \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \quad (2)$$

ここに, k_T : T°Cにおける透水係数(m/s), a_{in} : 流入側の二重管ビュレットの断面積(cm²), a_{out} : 流出側の二重管ビュレットの断面積(cm²), L : 供試体の厚さ(cm), A : 供試体断面積(cm²), $t_2 - t_1$: 測定時間(s), h_1 : 時刻 t_1 における水位差(cm), h_2 : 時刻 t_2 における水位差(cm), γ_w : 水の単位体積重量(kN/m³), P : 差圧(Pa), k_{15} : 15°Cにおける透水係数(m/s), η_T/η_{15} : 15°Cにおける透水係数算出のための補正係数である。

キーワード 地層処分, ベントナイト, 変水位透水試験

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 TEL03-5286-2940

4. 透水試験結果と厚さ 2 mm 供試体を用いた変水位透水試験の適用性評価

図2に一例として、乾燥密度 1.79 Mg/m³ の供試体の透水係数の経時変化を示す。これより、透水係数は試験期間を通じて1点を除いて 10⁻¹⁴ オーダーにあり、変動幅も透水係数平均値の±50%以内に収まっていることがわかる。なお、その他の試験ケース（乾燥密度：1.34・1.51・1.62・1.70・1.77 Mg/m³）についても、透水係数の変動は平均値の±50%以内に収まっていた。

図3に透水係数と動水勾配の関係を示す。これより、試験中における動水勾配の変化に因らず、透水係数の値に大きな変動は見られなかった。このことから、本研究で実施した動水勾配の範囲においては、供試体の破壊や変形等の透水挙動に大きな影響を及ぼす事象は生じず、流量と動水勾配が比例するダルシーの法則を満たしていると考えられる。

図4に乾燥密度 (1.77 Mg/m³)・動水勾配 (約 4100)・初期含水比 (9.2%) および試験系を統一した条件で、供試体厚さのみ 2 mm および 10 mm に変更した試験における、累積流入水量と経過時間の関係を示す。これより、供試体厚さ 10 mm の試験においては初期間隙体積 (2.21 cm³) の 1/2 の流入量に至るまで約 53 日を要しているのに対し、厚さ 2 mm では約 9 日で初期間隙体積 (0.46 cm³) 相当、約 31 日で初期間隙体積の 2 倍相当の流入量に達していることがわかる。故に、供試体厚さを 2 mm とすることで、試験期間を大幅に短縮できることが分かった。

最後に、本研究で得られた透水係数の妥当性を確認するため、図5に既往検討の変水位透水試験 (厚さ 10 mm, 本研究と同様の試験系)²⁾・定圧透水試験⁵⁾・高圧圧密試験⁶⁾の結果および透水係数理論評価式⁷⁾の算出結果を併記した透水係数と乾燥密度関係を示す。これより、本研究で得られた透水係数-乾燥密度関係は、他の検討と同様の傾向にあると同時に、バラつきが小さいことがわかる。故に、厚さ 2 mm 供試体を用いた変水位透水試験の測定精度および試験結果の妥当性が示された。

5. まとめ

厚さ 2 mm 供試体を用いた変水位透水試験について、試験結果の妥当性および測定精度の高さが示された。今後は、本試験装置を用いて対象試料の幅を広げ、各種放射性廃棄物処分施設や一般・産業廃棄物処分場の設計に資する、ベントナイト系材料の高精度な透水係数データベースを構築する予定である。

謝辞：本研究は一般社団法人環境地盤工学研究所・若手研究者研究助成の成果の一部である。また、本研究の一部は早稲田大学特定課題研究助成費（課題番号：2020C-630）による研究成果である。ここに感謝いたします。

参考文献：1) 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦：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), JAEA-Research 2010-025, 2010. 2) 貞松暁大, 小峯秀雄, 後藤茂, 王海龍, 関口高志, 北原慎也, 伊藤大知, 市川雄太：変水位透水試験による締固めたベントナイト供試体の透水係数の測定および試験方法, 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-1-3-07, 2020. 3) 白河部匠, 王海龍, 後藤茂, 山本修一, 小峯秀雄：塩化バリウム水溶液を用いたベントナイトの陽イオン交換容量測定方法の検討, 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-5-5-02, 2020. 4) 地盤工学会基準・同解説：低透水性材料の透水試験方法, JGS 0312-2018, 2019. 5) 長谷川琢磨：ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所報告, N04005, 2004. 6) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲：人工海水環境下における各種ベントナイトの透水係数, 土木学会論文集 C (地盤工学), Vol. 67, No. 2, pp. 276-287, 2011. 7) H. Komine: Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 134, No. 4, pp.497-508, 2008.

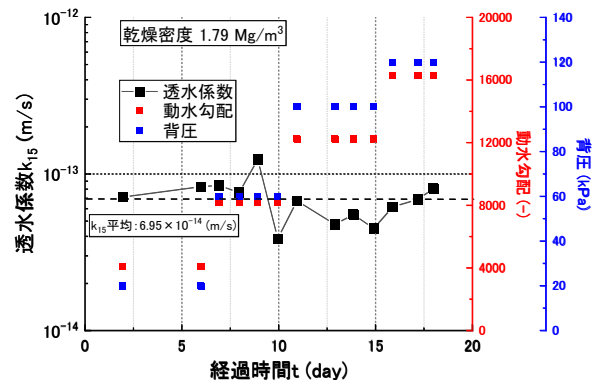


図2 透水試験結果 (乾燥密度 1.79 Mg/m³)

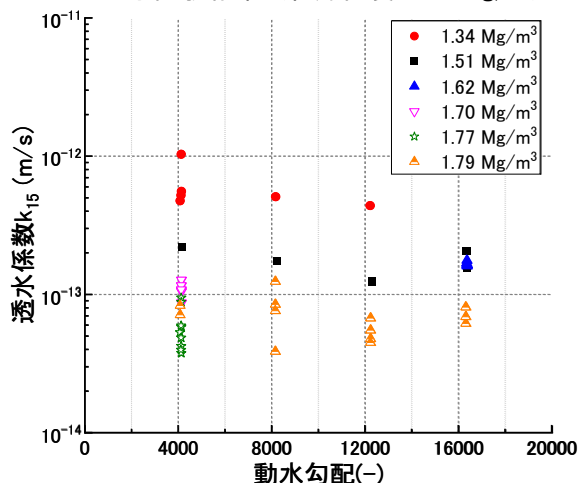


図3 透水係数と動水勾配の関係

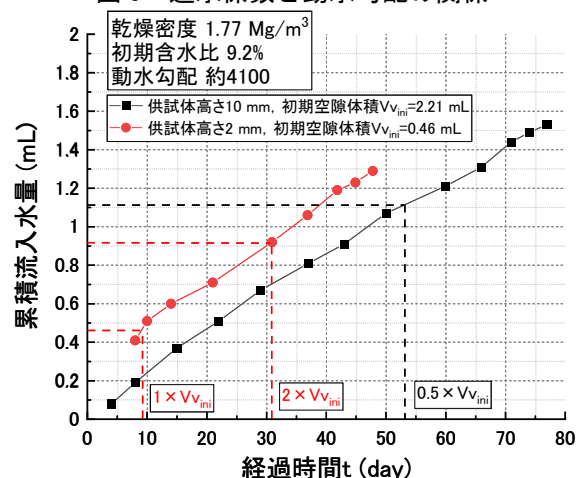


図4 累積流入水量の経時変化における供試体厚さ 2 mm と 10 mm のケースの比較

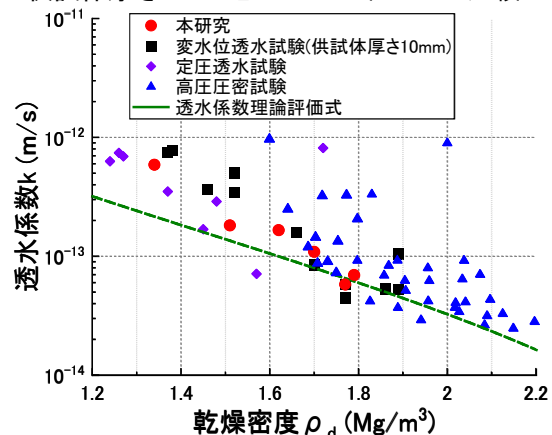


図5 透水係数-乾燥密度関係 (既往検討と比較)