

交換性陽イオン組成の異なるベントナイトの透水係数の測定

早稲田大学 正会員 ○伊藤 大知, 王 海龍, 小峯 秀雄

1. 研究背景と目的

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系緩衝材には、放射性核種と地下水の接触を遅延させるため、低透水性が求められる¹⁾。地層処分事業は数十年以上の長期にわたるとともに、事業全体で300万トン程度と大量のベントナイトが必要であると推算されており、緩衝材として適用性を有する材料を複数把握しておく必要性が指摘されている²⁾。以上の観点を踏まえて、筆者らはベントナイト系材料を対象として、透水係数を数日から1か月程度の短期間で精度よく測定可能な実験装置を開発した³⁾。本論文では、日本国内外で用いられている、交換性陽イオン組成の異なるベントナイト4種を用いて透水係数を測定した結果を示す。

表1 使用したベントナイトの基本的性質

試料名	K_V1	KB	MG	MX
土粒子の密度 (Mg/m ³)	2.80	2.72	2.53	2.77
液性限界 (%)	535.4	118.0	99.0	437.3
塑性限界 (%)	26.7	45.9	35.3	38.0
塑性指数	508.7	72.1	63.7	399.3
モンモリロナイト含有率 (%)	52.8	71.1	48.7	60.0
浸出 Na ⁺ イオン容量 (cmol/kg)	53.8	8.3	8.1	69.3
浸出 Ca ²⁺ イオン容量 (cmol/kg)	35.5	61.8	22.7	41.1
浸出 K ⁺ イオン容量 (cmol/kg)	定量下限値 (<1.0) 以下			
浸出 Mg ²⁺ イオン容量 (cmol/kg)	1.6	15.3	21.2	9.2

1) 地層処分事業は数十年以上の長期にわたるとともに、事業全体で300万トン程度と大量のベントナイトが必要であると推算されており、緩衝材として適用性を有する材料を複数把握しておく必要性が指摘されている²⁾。以上の観点を踏まえて、筆者らはベントナイト系材料を対象として、透水係数を数日から1か月程度の短期間で精度よく測定可能な実験装置を開発した³⁾。本論文では、日本国内外で用いられている、交換性陽イオン組成の異なるベントナイト4種を用いて透水係数を測定した結果を示す。

2. 使用した試料と透水試験方法の概要

本研究で使用したベントナイトは、クニゲル V1 (クニミネ工業, K_V1), クニボンド (クニミネ工業, KB), 三川原鉱 (ホーجون, MG), および MX-80 (MX) の4種類である。K_V1・KB・MGは粉体状で、MXは顆粒状である。支配的な交換性陽イオンは、K_V1・MGはNa⁺, KBはCa²⁺, MGはCa²⁺およびMg²⁺である。表1に使用したベントナイトの基本的性質を示す。供試体作製の際は、これらの試料をリング内に直接投入し、静的荷重を加えて所定の乾燥密度になるまで締固めた。

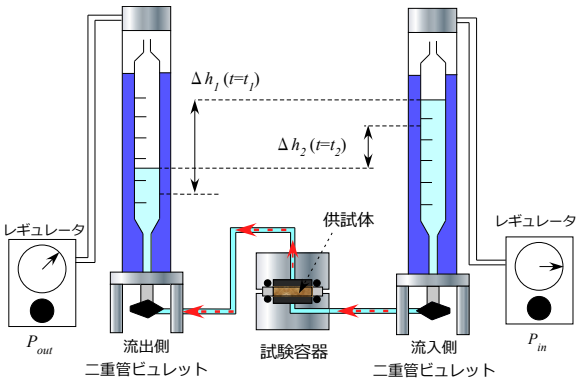


図1 透水試験装置の概念図

本研究で用いた透水試験装置を図1に示す。試験期間の短期化を目的として、直径28mm、厚さ2mmの極薄供試体を用いている。供試体作製後、試験容器を組み立て1日間減圧下で給水させた後に試験を開始した。流入側・流出側の両方に二重管ビュレットを用い、空気圧を付加することで動水勾配・背圧を変化させた。透水係数の算出は式(1)・(2)で行った。

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

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

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。

3. 透水係数と乾燥密度・有効モンモリロナイト密度の関係

図2に、各ベントナイトの透水係数と乾燥密度の関係を示す。なお、いずれのケースにおいても供試体への流入・流出水量はよく釣り合っており、流量の収支が取れていることを確認した。また、流速と動水勾配の関係も比例関係にあり、供試体中の水の流れはダルシー則を満たしていた。

図2においては、それぞれの試料を用いて飽和透水係数を算出した既往検討結果^{2), 4)-8)}についても併記した。キーワード ベントナイト, 透水係数, 高レベル放射性廃棄物の地層処分

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学西早稲田キャンパス 58-203 TEL 03-5286-2940

これらの図から、各ベントナイト試料において透水係数と乾燥密度の間に負の相関性がみられた。また、本研究で得られた結果はいずれの既往検討とも近い値を示すとともに、特に K_V1 や MX において、既往検討に比べてバラつきの小さい結果が得られていることが分かる。このようなバラつきの小さい関係を得られたことで、地層処分における緩衝材をはじめとする、ベントナイト系材料を用いる遮水工の設計をより精度よく行うことができる。

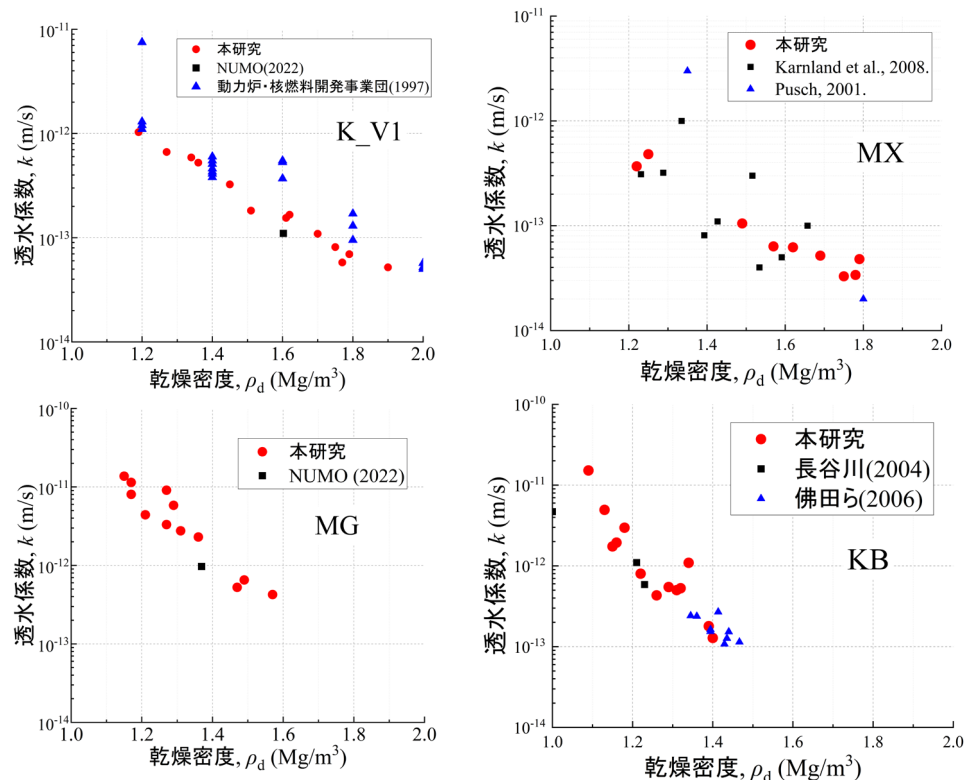


図2 透水係数－乾燥密度関係（左上：K_V1，右上：MX，左下：MG，右下：KB）

これら4種のベントナイトの結果を統一的に示すため、図3に供試体中のモンモリロナイトの乾燥密度である有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を示す。これより、交換性陽イオンとして Na^+ が優勢であるK_V1とMXは同様の傾向を示すとともに、 Ca^{2+} が優勢であるKBおよび $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ が優勢であるMGも同様の傾向を示すことが分かった。以上から、 Mg^{2+} は交換性陽イオンとして、ベントナイトの透水特性に対し同じ2価の陽イオンである Ca^{2+} と同様の影響を及ぼすことが推察される。

4. まとめ

本論文により得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 日本国内外で用いられる交換性陽イオン組成の異なるベントナイト4種について、透水係数と乾燥密度の関係を既往検討に比べてバラつきを小さく求めることができた。
- 2) 透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係から、交換性陽イオンとして1価の陽イオン(Na^+)優勢のベントナイトと、2価の陽イオン($\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$)優勢のベントナイトのそれぞれで一意な関係を見出した。

謝辞：本研究の一部は、早稲田大学・理工学術院総合研究所重点領域・持続的未來社会研究所の活動として行われた。本研究はJSPS 科研費21K04260の成果の一部である。ベントナイトMGの入手にあたっては、千々松正和氏をはじめとする安藤ハザマ技術研究所原子力部の皆さまのご協力を得た。ここに感謝いたします。

参考文献：1) 緒方信英, 小崎明郎, 植田浩義, 朝野英一, 高尾肇：高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術-その4 人工バリアの設計と製作-, 原子力バックエンド研究 Vol. 5, No.2, 103-121, 1999. 2) 原子力発電環境整備機構(NUMO)：国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ, NUMO-TR-21-02, 2022. 3) Ito, D., Wang, H. and Komine, H.: Hydraulic conductivity test system for compacted, 2-mm-thick bentonite specimens, Soils and Foundations, Vol.62, 101210, 2022. 4) 動力炉・核燃料開発事業団：緩衝材の飽和透水特性, PNC TN8410 97-296, 1997. 5) Karnland, O., Nilsson, U., Weber, H. and Wersin, P.: Sealing ability of Wyoming bentonite pellets foreseen as buffer material - Laboratory results, Physics and Chemistry of the Earth, Vol.33, pp. S472-475. 6) Pusch, R.: The microstructure of MX-80 clay with respect to its bulk physical properties under different environmental conditions, SKB Technical Report, TR-01-08, 2001. 7) 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. 8) 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.

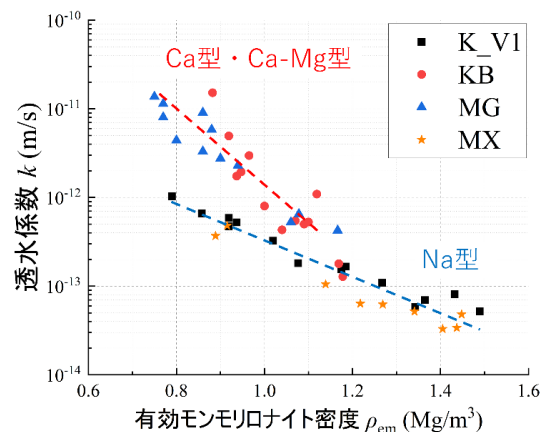


図3 透水係数－有効モンモリロナイト密度関係