

各種ベントナイト系材料の透水特性データベース構築および理論的評価方法の高度化

早稲田大学

○伊藤 大知 1*

小峯 秀雄 1*

ベントナイト 透水係数 放射性廃棄物処分
交換性陽イオン 高透水圧 トラベルタイム

研究の目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分をはじめとする各種放射性廃棄物処分施設において、ベントナイト系材料は緩衝材や遮水材として用いられ、設計にあたっては透水係数を正確に把握することが求められる。しかし、既往の試験方法では、数か月単位の長期間を要することや、得られるデータにバラつきが見られることが課題であった。本研究では、研究代表者が開発した供試体厚さを 2 mm と薄くした透水試験装置を用い、ベントナイトの透水特性データベース構築と理論的評価方法の高度化に取り組んだ。また、地層処分におけるベントナイト系緩衝材の設計や安全性評価に向けた取り組みとして、実処分環境で想定される境界条件の 1 つである高い透水圧の下での地下水の流入を想定し、高透水圧環境におけるベントナイトへの透水係数の測定を行うとともに、地下水が緩衝材中を移行する際のトラベルタイムを算出した。

産地の異なるベントナイトでも 2 倍以内の透水係数の変動に収まっており、新規の材料においても主要な交換性陽イオン種およびモンモリロナイト含有率を予め把握しておくことで、有効モンモリロナイト密度を代替指標として透水係数を良好に予測できる可能性が示唆された。

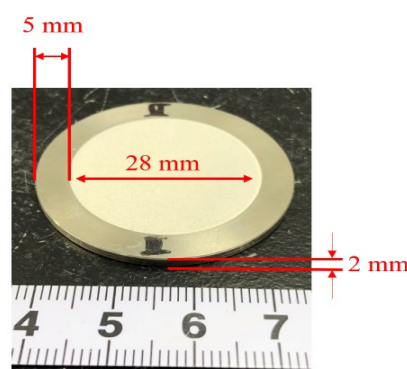


図 1 厚さ 2 mm 供試体の様子

研究の内容

本研究では、産地やベントナイトの主要粘土鉱物であるモンモリロナイトの有する交換性陽イオン組成の異なる 6 種類のベントナイト、モンモリロナイト試料を選定した。選定した試料は、国産 Na 型ベントナイトであるクニゲル V1、国産 Ca 型ベントナイトであるクニボンド、米国産 Na 型ベントナイトである MX-80 およびボルクレイ、国産 Na 型モンモリロナイトであるクニピア F（クニゲル V1 を精製してモンモリロナイト分を抽出したもの）、および国産 Ca-Mg 型ベントナイトである三川原鉱である。

これらの試料を静的荷重により締固め、図 1 および図 2 に示す厚さ 2 mm 供試体を用いた透水試験装置を用いて、各種ベントナイト系材料の透水試験を実施した。透水係数は式(1)により算出した。

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

各ベントナイトの透水係数－乾燥密度関係を整理したところ、既往検討と同様の傾向かつバラつきの小さい関係を取得できていることが分かった。全てのベントナイトの結果を統一的に評価するため、有効モンモリロナイト密度を用いて統一的に評価した（図 3）。これより、Na 型ベントナイト 4 種、また Ca 型および Ca・Mg 型ベントナイトのそれぞれにおいて、良好な相関性が見られた。

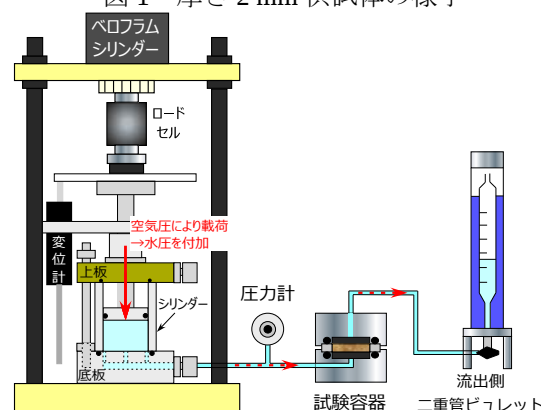


図 2 透水試験系の一例（高透水圧対応）

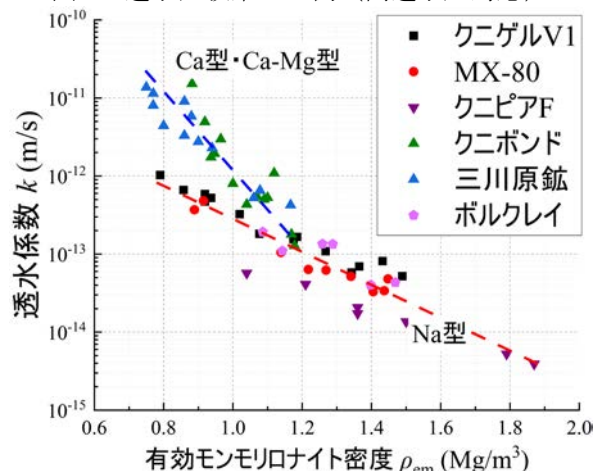


図 3 透水係数－有効モンモリロナイト密度

X線回折によりベントナイト中のモンモリロナイト底面間隔を測定し、モンモリロナイト結晶および結晶層間を不透水と仮定した層間外間隙比の概念を導入し、透水係数との整理を試みた(図4)が、陽イオン種の異なる試料間での統一評価はできなかった。今後、結晶層間内の固定層、拡散層の厚を組みこむことで、実際の透水現象における通水可能な間隙に即した間隙比を提案する。

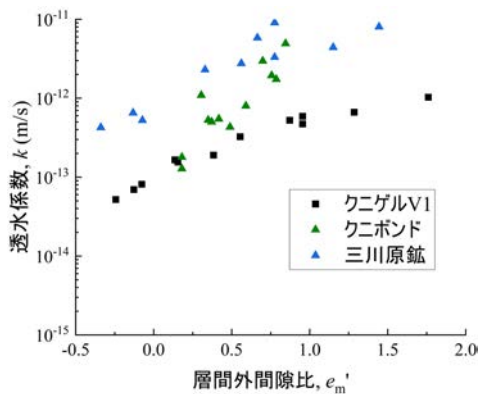


図4 透水係数—層間外間隙比の関係

また、地層処分で想定される高圧の地下水の流入を模擬した、高透水圧(最大 4.5 MPa)・高動水勾配(最大 23 万)環境での透水試験を実施した。図5に各透水圧条件における透水係数—乾燥密度関係を示す。これより、水圧が高いほど透水係数がやや下がる傾向が見られたが、その差異は2倍程度と小さかった。故に、今回与えた透水圧・動水勾配環境においてクニゲルV1はダルシーの法則に則った安定的な透水挙動を示すことが示唆された。

最後に、本研究で用いた試料を緩衝材として施工した場合の、地下水のトラベルタイムを算出した。動水勾配 500, 1000, 5000 の3ケースを想定して計算した結果を抜粋したものを表1に示す。各ベントナイトにおいて、高乾燥密度に締固めることでトラベルタイムを著しく長期化できることが示された。特に、Na型ベントナイトにおいては、動水勾配 500 の下で 10^3 年オーダーのトラベルタイムとなり、地下水と放射性廃棄物の接触を著しく遅延できることが示唆された。なお、Na型ベントナイトであっても動水勾配 5000 の下では数十年程度となるため、母岩の水理特性や地下水水頭を長期的に低減可能な対策は必要不可欠であることが示された。

研究の成果、新知見

交換性陽イオン組成の異なる国産・海外産ベントナイト6種について、バラツキの小さい透水係数データベースを取得できた。異なる産地のベントナイト試料であっても、交換性陽イオンおよびモンモリロナイト含有率を把握すれば有効モンモリロナイト密度を代替

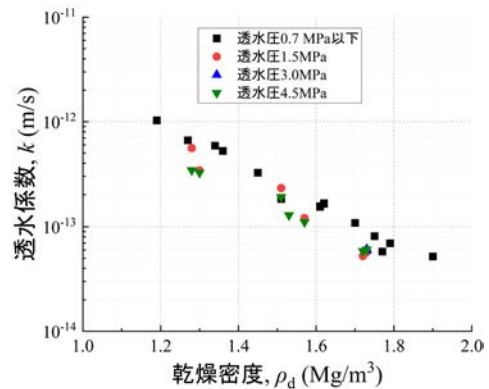


図5 各透水圧における透水係数—乾燥密度関係

表2 各ベントナイトのトラベルタイム

材料名	乾燥密度 (Mg/m ³)	透水係数 k(m/s)	トラベル タイム(i 500, yr)	トラベル タイム(i 1000, yr)	トラベル タイム(i 5000, yr)
クニゲル V1	1.61	1.55×10^{-13}	2.9×10^2	1.4×10^2	29
	1.79	6.95×10^{-14}	6.4×10^2	3.2×10^2	64
	1.90	5.20×10^{-14}	8.5×10^2	4.3×10^2	85
MX-80	1.62	6.22×10^{-14}	7.1×10^2	3.6×10^2	71
	1.79	4.80×10^{-14}	9.3×10^2	4.6×10^2	93
クニピア F	1.63	1.47×10^{-14}	3.0×10^3	1.5×10^3	3.0×10^2
	1.87	3.92×10^{-15}	1.1×10^4	5.7×10^3	1.1×10^3
ボルクレ イ	1.53	1.34×10^{-13}	3.0×10^2	1.7×10^2	33
	1.71	4.33×10^{-14}	1.0×10^3	5.1×10^3	1.0×10^2
クニボン ド	1.31	5.01×10^{-13}	89	44	8.9
	1.40	1.28×10^{-13}	3.5×10^2	1.7×10^2	35
三川原鈹	1.47	5.25×10^{-13}	85	42	8.5
	1.57	4.25×10^{-13}	1.00×10^2	52	10

指標として透水係数を予測可能であることが分かった。また、透水圧 4.5 MPa(動水勾配約 23 万)においても透水特性はダルシーの法則に則ることが確認された。Na型ベントナイトを高乾燥密度で締固めることで、 10^3 年オーダーのトラベルタイムが試算できた。

今後の予定

検討試料および対象とする動水勾配環境を広げ、より実事業に資するデータベースを構築する。また、理論評価手法の高度化および交換性陽イオンの違いを統一的に評価できる代替指標の獲得に向け、新たなパラメータの導入や、結晶層間距離および電気二重層厚さに基づき通水部間隙比を現象に即した形で発展させる。

謝辞
X線回折試験の実施には、Cai Guodong氏(元早稲田大学建設工学専攻博士課程)の尽力を得た。研究遂行にあたり王海龍特任准教授(東京大学)、および早稲田大学地盤工学研究室各位と議論させて頂いた。