

研 究 報 告

令和 7 年 4 月 18 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 早稲田大学創造理工学部社会環境工学科

氏 名 : 伊藤 大知

研究課題名 : ベントナイト・砂質土混合材料の透水特性における砂質土の粒度・配合率による影響評価

助成金額 : 1 0 0 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 3 1 日

ベントナイト・砂質土混合材料の透水特性における砂質土の粒度・配合率による影響評価

Influence of particle size and mixing ratio of sand materials on hydraulic properties of bentonite-sand mixture

早稲田大学創造理工学部社会環境工学科 講師(任期付) 伊藤 大知

（研究計画ないし研究手法の概略）

地層処分を含む各種放射性廃棄物の処分施設において、ベントナイトと砂質土の混合材料（以下、混合材料）を締固めて遮水材として用いることが有力である。遮水材の材料仕様、特にベントナイト配合率は施設内の箇所や廃棄物の放射能レベルによって異なる。混合材料における遮水性発揮のメカニズムとして、ベントナイト中の膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトが吸水膨潤して間隙を埋めることが想定されている。よって、多くの既往研究ではモンモリロナイト含有率や乾燥密度に基づいた有効モンモリロナイト密度を用いて整理・評価されている¹⁾。しかし、特にベントナイト配合率を低く設定した際に、粒度の粗い砂質材料を混合した場合、モンモリロナイトが間隙を充填できず、十分な遮水性を発揮できない可能性が危惧される。本研究の目的は、ベントナイト・砂質土混合試料の透水特性に対する混合材料の粒径および配合率の影響を実験的に明らかにすることである。ベントナイト系材料は極めて低透水性であり、透水試験に数か月以上の長期を要することや計測結果にバラつきが見られることがネックとなり、既往研究においては実務での使用を想定した、限られた材料仕様のみで実験されている。本研究では、後述する「実施した透水試験の概要」に示す極薄供試体を活用した試験装置も用いることで透水係数の取得に要する試験期間を大幅に短期化し、砂質系材料の粒度、ベントナイト配合率 α 、乾燥密度をパラメータとして多数の試験ケースを確保した。これらのデータに基づき、ベントナイト配合率や供試体寸法、砂質系材料の粒度が計測される透水係数に与える影響について考察した。

・使用した試料および供試体作製条件

本研究では、日本の放射性廃棄物処分関連の研究で広く用いられている Na 型ベントナイト・クニゲル V1（クニミネ工業）を用い、配合する砂質系材料は珪石粉（三河珪石製・珪砂を 0.075mm 以下に粉碎したもの）、珪砂 V7 号、珪砂 V3 号（三河珪石製）とした。使用したベントナイトの基本的性質を表 1 に示す。

表 1 使用したベントナイトの基本的性質

試料名	クニゲル V1
土粒子密度 $\rho_b(\text{Mg/m}^3)$	2.76
液性限界 $w_L(\%)$	527
塑性限界 $w_p(\%)$	49.7
塑性指数 I_p	477.3
メチレンブルー吸着量(mmol/100g)	82.0
モンモリロナイト含有率 $C_m(\%)$	59

また，砂質系材料の基本的性質を表 2 に，粒径加積曲線を図 1 にそれぞれ示す．

表 2 使用した砂質系材料の基本的性質

試料名	珪石粉	珪砂 V7 号	珪砂 V3 号
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.69	2.66	2.67
平均粒径 D_{50} (mm)	0.011	0.192	1.42
均等係数 U_c	7.50	1.47	1.65

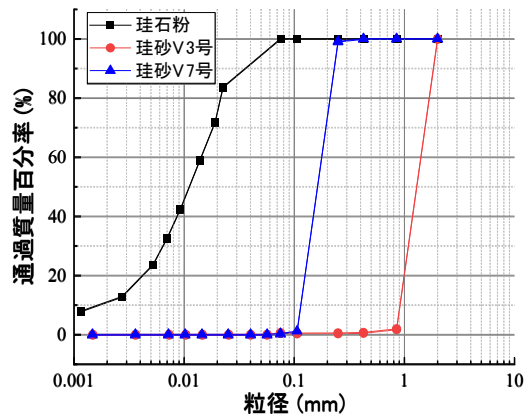


図 1 珪石粉・珪砂 V3 号の粒径加積曲線

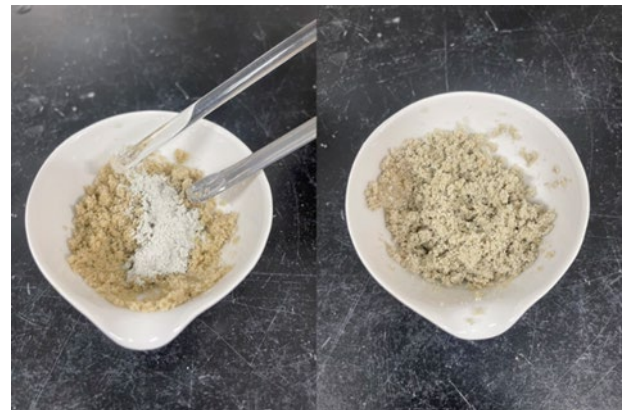


図 2 試料混合の様子

粒度の異なる 3 種類の砂質系材料をベントナイトと混ぜ，混合材料を作製した．混合の際，供試体寸法，乾燥密度およびベントナイト配合率に基づき砂およびベントナイトの必要量を計算した．所定量の砂に含水比 10%となるよう霧吹きで加水した後，ベントナイトを投入し試料と水が均一になるよう混合した（図 2 参照）．作製した混合試料を締め固め用モールドに投入し，所定時間荷重を静的に载荷して供試体を作製した．実験条件を表 3 に示す．珪石粉は直径 28 mm，厚さ 2mm および 10 mm の供試体，珪砂 V7 号は直径 28 mm，厚さ 2mm または 10 mm，および直径 60 mm，厚さ 20 mm の供試体を作製し，珪砂 V3 号は最大粒径を踏まえ直径 60 mm，厚さ 20 mm の供試体を作製した．ベントナイト配合率および乾燥密度については，地層処分など各種放射性廃棄物処分で設定される範囲を想定し，設定した．

表 3 本研究で実施した実験条件

	珪石粉	珪砂 V7 号	珪砂 V3 号
ベントナイト配合率 α (%)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 90	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	5, 10, 15, 20, 30
供試体厚さ h (mm)	2, 10	2, 10 (一部 20)	20
供試体直径 ϕ (mm)	28	28 (一部 60)	60
乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	1.3, 1.5, 1.6, 1.8 ($h=10\text{mm}$ は 1.6)	1.6	1.4, 1.5, 1.6

・実施した透水試験の概要

本研究では，図 3 に示す加圧型変水位透水試験装置を用いた．本装置では，試験期間

の短縮化および砂質材料の粒径を考慮し、表 3 に示した通り厚さ 2 mm×直径 28mm の極薄供試体、厚さ 10 mm×直径 28 mm、および厚さ 20 mm×直径 60mm の供試体を併用して実験を行った。極薄供試体を用いた試験系については、ベントナイトのような低透水性材料であっても 1 週間程度の短期で透水係数を計測でき、研究代表者が中心となって開発した²⁾。後者については、砂・ベントナイト混合土を取り扱った既往検討³⁾でも用いられている。試験にあたっては、前項で述べた方法で供試体を作製した後、供試体上下にメンブレンフィルター（孔径 0.45 μm、厚さ 140 μm）を設置し試験容器を組み立て、真空脱気（-98 kPa）のもとで厚さ 2 mm 供試体の場合 2 日間、厚さ 10 mm および 20 mm 供試体の場合は 1 週間、供試体上下から浸水させて飽和させた。その後、試験容器の流入側・流出側二重管ビュレットを接続し、試験期間中にビュレットに空気圧を付加することで差圧および動水勾配を変化させながら、一定時間ごとにビュレット内水位を計測した。以下の式(1)、(2)に基づき透水係数 k を算出した⁴⁾。

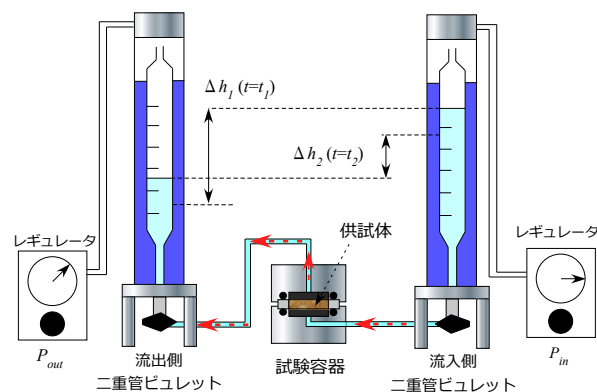


図 3 加圧型変水位透水試験装置の概要図

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

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

ここに、 k_T : $T^\circ\text{C}$ 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(cm^2)、 A_{out} : 流出側の二重管ビュレットの断面積(cm^2)、 L : 供試体の厚さ(cm)、 A_{spe} : 供試体断面積(cm^2)、 t_2-t_1 : 測定時間(s)、 Δh_1 : 時刻 t_1 における水位差(cm)、 Δh_2 : 時刻 t_2 における水位差(cm)、 γ_w : 水の単位体積重量(kN/m^3)、 ΔP : 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。

（実験調査によって得られた新しい知見）

・各配合における透水係数と動水勾配の関係

図 4 に、各砂質材料を配合した場合の透水係数と動水勾配の関係を示す。ダルシーの法則 ($v=ki$) に則るとすれば、動水勾配 i によらず透水係数は一定になるが、各材料にお

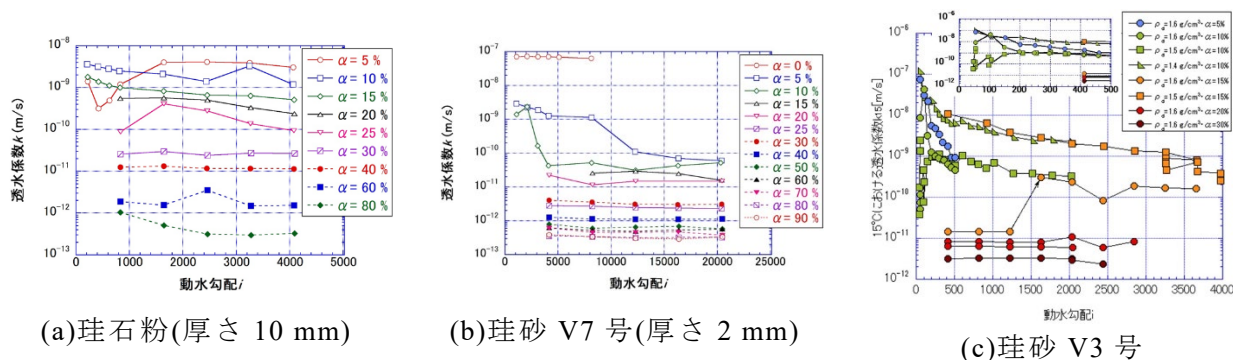


図 4 透水係数と動水勾配の関係

いて砂の配合率が低い (α 20%以下) ケースで、大幅な変動が見られた。これは、動水勾配を設ける際に与えた差圧により、供試体中の土粒子骨格に変化が起きている可能性が考えられる。すなわち、透水圧によりベントナイトもしくは砂粒子の移動が生じ透水性が一時的に上昇し、その後下流側で粒子が閉塞してマッドフィルム等が計測され透水係数が下がるような現象が生じたことが推察される。実際、試験後の供試体（珪砂 V7 号、 α 20%，乾燥密度 1.51 Mg/m^3 ）を X 線 CT により撮影した画像において、粒子の移動と下流側での閉塞現象が生じた可能性が高いことが確認されている⁵⁾。以上から、ベントナイト配合率が 20%以下の供試体の透水試験を行う場合は与える差圧に十分留意する必要があることが分かった。

・透水係数とベントナイト配合率の関係

図 5 に珪石粉において、乾燥密度を $1.3 \cdot 1.5 \cdot 1.8 \text{ Mg/m}^3$ と変えた供試体に関する透水係数とベントナイト配合率の関係を示す。これより、ベントナイト配合率が 50%以下の範囲で、乾燥密度の影響はほとんど見られなかった。しかし、それ以上の高配合率になるにつれ、乾燥密度による影響が大きくなる傾向が見られたが、乾燥密度とベントナイト配合率の積で整理すると透水係数との間に一意な関係が見られた。故に、ベントナイト配合率と乾燥密度の 2 パラメータを把握しておくことで透水係数を予測可能であることが示された。

図 6 に砂質材料の粒度および供試体寸法を比較した透水係数とベントナイト配合率の関係を示す。まず砂質材料の粒度に着目すると、ベントナイト配合率が 15～80%の領域において、珪砂 V3 号と珪砂 V7 号に比べ、珪石粉の透水係数が 1 オーダー程高い傾向が見られた。15%以下の領域で粒度の影響が見られない理由として、砂質材料により骨格が形成されており、その間隙

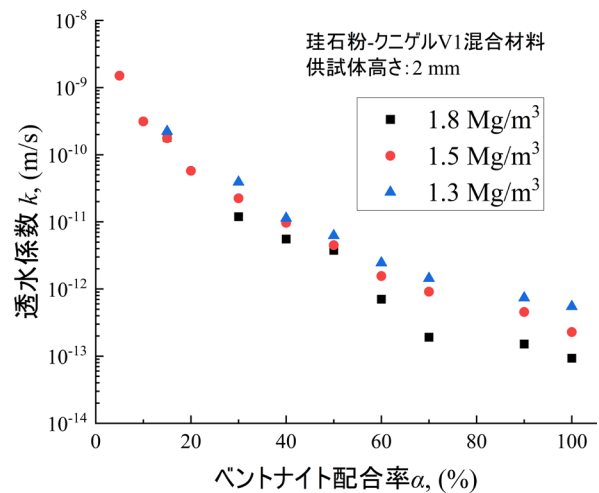


図 5 透水係数－ベントナイト配合率(珪石粉，乾燥密度の比較)

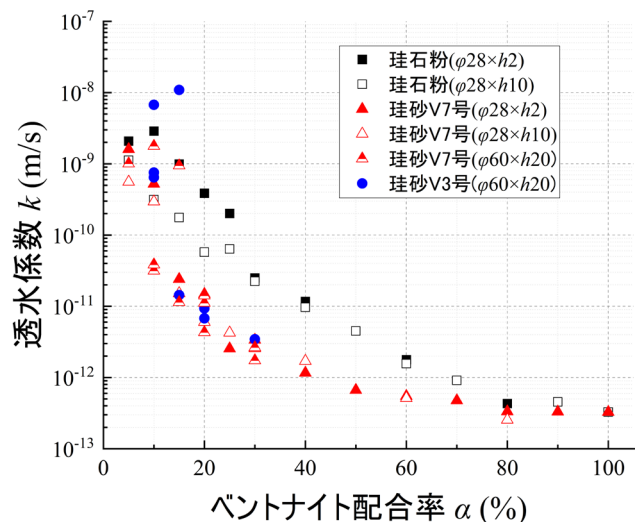


図 6 透水係数－ベントナイト配合率(粒度・供試体直径の比較)

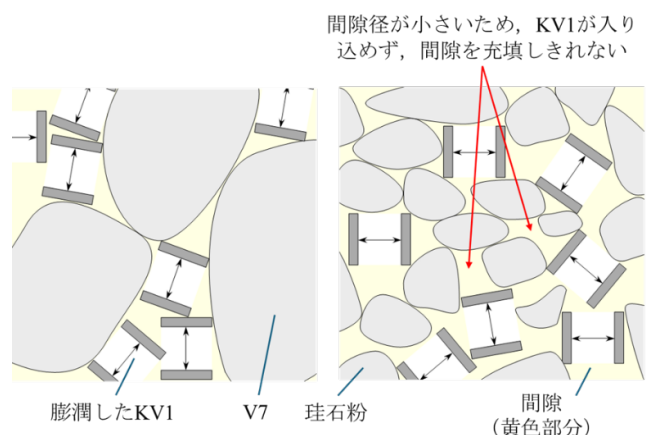


図 7 V7 号と珪石粉における骨格とベントナイトの膨潤挙動の違いの概念図

を埋められるほどのベントナイトが存在していないことが要因として考えられる。また、15～80%の領域において珪石粉の透水係数が高い理由として、図 7 に示すように珪石粉の粒径が非常に小さいため形成される間隙も小さくなり、ベントナイトの膨潤に伴う間隙の充填が十分になされていない可能性が考えられる。しかし、V3 号および V7 号の透水係数はほぼ同程度であり、砂相当の粒径を有する材料については、粒度による影響は小さいものと考えられる。また、供試体の寸法に着目すると、いずれの砂質土においても今回行った供試体寸法において透水係数の値に大きな差は見られなかった。このことから、厚さ 2 mm 供試体を用いた透水試験法により得られた結果の妥当性が示されたと考えられる。

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—, JAEA-Research2010-025, 2010.
- 2) Daichi Ito, Hailong Wang, Hideo Komine: Hydraulic conductivity test system for compacted, 2-mm-thick bentonite specimens, Soils and Foundations, Vol.62, No.5, 101210, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101210>, 2022 年 10 月.
- 3) 倉持 隼斗, 小峯 秀雄, 伊藤 大知, 関口 高志, 三浦 玄太: 新しく開発した変水位透水試験による砂・ベントナイト混合土の材料条件に応じた適切な試験装置・試験方法の検討, 地盤工学シンポジウム論文集, 60, pp.37-42, 2016 年.
- 4) 地盤工学会(JGS)基準・同解説: 低透水性材料の透水試験方法, JGS 0312-2018, 2019.
- 5) 小山すず, 岩原将斗, 浦野知治, 小峯秀雄, 伊藤大知, 阮坤林: 差圧の変動に対する低配合ベントナイト・砂混合土の透水係数変化, 第 21 回地盤工学会関東支部発表会 GeoKanto2024, 材料 2-7, 2024 年 11 月.

(発 表 論 文)

- 1) 小山すず, 岩原将斗, 浦野知治, 小峯秀雄, 伊藤大知, 阮坤林: 差圧の変動に対する低配合ベントナイト・砂混合土の透水係数変化, 第 21 回地盤工学会関東支部発表会 GeoKanto2024, 材料 2-7, 2024 年 11 月.
- 2) 小山すず, 岩原将斗, 浦野知治, 小峯秀雄, 伊藤大知, 阮坤林, 王海龍, 関口高志: 低配合ベントナイト-砂混合土における動水勾配の変動に伴う粒子移動と透水係数の変化, 第 60 回地盤工学研究発表会, 2025.7.(投稿中)
- 3) 伊藤大知, 岩原将斗, 王海龍, 小峯秀雄: 砂・ベントナイト混合材料の透水試験法における厚さ 2mm 供試体の適用性評価, 第 80 回土木学会全国大会, 2025.9.(投稿中)