



カオリナイトを混合したベントナイト混合土の膨潤圧

高山, 裕介
安田, 理佐子
橘, 伸也
竹山, 智英

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 29:52-59

(Issue Date)

2025-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100496651>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496651>



カオリナイトを混合したベントナイト混合土の膨潤圧

Swelling pressure of bentonite-kaolinite mixture

高山 裕介¹⁾

Yusuke Takayama

安田 理佐子²⁾

Risako Yasuda

橘 伸也³⁾

Shinya Tachibana

竹山 智英⁴⁾

Tomohide Takeyama

概要: 高レベル放射性廃棄物の地層処分では、数万年を超える評価期間の間に緩衝材中のベントナイトが非膨潤性の粘土鉱物に変化し、膨潤性等の期待される機能に影響を与える可能性が懸念されている。本研究では、非膨潤性粘土鉱物であるカオリナイトをベントナイトと混合した材料を用い、混合比が異なる条件で膨潤圧試験を行った。その結果、同程度の乾燥密度条件で比較すると、膨潤圧は混合比に依存せず概ね同程度の値を示し、カオリナイトの混合比が増加しても膨潤圧は低下しなかった。また、得られた膨潤圧を有効モンモリロナイト密度に対して整理した場合には明確な相関性は認められず、有効モンモリロナイト密度で整理すると膨潤圧との関係が一意的に決まるという既往の知見とは整合的ではなかった。有効モンモリロナイト密度が低い場合には、モンモリロナイト以外の鉱物の影響が大きくなり、カオリナイトのような高い膨潤圧を示す粘土鉱物の場合は膨潤圧と有効モンモリロナイト密度は一意的な関係にはならないことが示唆された。

キーワード: ベントナイト、膨潤圧試験、非膨潤性粘土

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、放射性廃棄物の潜在的危険性から人間と環境を保護するために、地下深部が本来的に有する安定的な性質を利用し、さらに閉じ込めにかかわる安全機能を高めるための工学的な対策(人工バリア)を施すこととなっている。

高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの例を図1に示す。高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体をオーバーパックと呼ぶ金属製の容器で包むことで、ガラス固化体の放射能が高い期間は地下水とガラス固化体の接触を防ぐことが期待されている。さらに、ベントナイトを主成分とする緩衝材でこれらを囲むことによって、オーバ

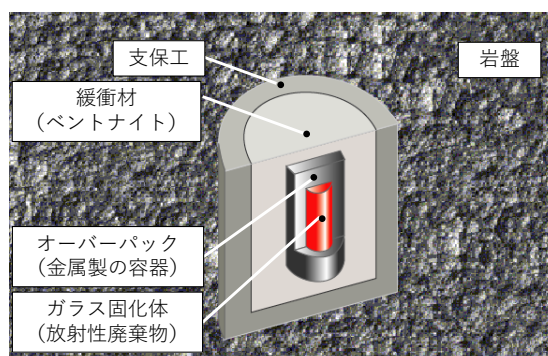


図1 高レベル放射性廃棄物処分に対する人工バリア（処分孔縦置き方式の例）

ーパック破損後はガラス固化体からの放射性物質の溶出と周辺岩盤への移動を遅らせる。すなわち、地層処分の安全評価の期間において緩衝材には、放射性物質の移行の抑制や収着、物理的緩衝性など、閉鎖後の処分場の長期的な安全確保に関して重要な機能が期待されている。

しかし、高レベル放射性廃棄物の地層処分は評価期間が数万年を超える長期であり、この間に緩衝材が曝される環境によっては緩衝材に変化が生じ、期待される機能に影響を与える可能性が懸念されている。例えば、オーバーパックの腐食に伴い鉄に富む環境が緩衝材中にもたらされると、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトが 1:1 型非膨潤性粘土鉱物などの鉱物学的に別の鉱物へと変質する可能性が想定されている¹⁾。実際に、80℃にて、鉄分と共存したモンモリロナイトが 1:1 型の非膨潤性粘土に変質することが報告されている²⁾。鉱物学的変質についてはオーバーパックと緩衝材の境界面付近でのみ発生すると考えられているものの、1:1 型非膨潤性粘土鉱物の様な非膨潤性の鉱物に変質した場合には、膨潤性が低下し、緩衝材性能へ影響を与える可能性が懸念されている¹⁾。さらに、変質の進展にともなう緩衝材性能の変化については、変質した緩衝材の特性値が取得されておらず、変質後の緩衝材特性に関する情報の整備が必要とされている¹⁾。

本研究では、地盤工学の分野で広く用いられている 1:1 型非膨潤性粘土鉱物であるカオリナイトをベントナイトと混合した材料を用い、カオリナイトとベントナイトの混合比が異なる条件で膨潤圧試験を行い、混合比に応じた膨潤圧の違いを把握することを目的とした。

2. 使用した材料

本試験では、ベントナイトにはクニゲル V1(山形県産)、カオリナイトにはエカライト No.1(オーストラリア産)を用いた。クニゲル V1 は Na 型ベントナイトであり、約 50%がモンモリロナイトである。エカライト No.1 はカオリナイトや石英などから構成され、90%程度がカオリナイトである³⁾。自然含水比はそれぞれ 7%、1%であった。

ベントナイトの基本的な物性値の一つである膨潤力を測定した結果を表 1、図 2 に示す。表 1 は試験の結果、図 2 に試験開始 24 時間経過時の様子である。

膨潤力(単位は mL/2g)とは、材料が水分を吸収した際に体積が増加する能力のことであり、蒸留水が 100mL 入ったメスシリンダーに材料 2.0g を入れ、24 時間経過後に容器内に沈殿した材料の見かけの容積を読み取る試験である。ここでは、ベントナイトとカオリナイトの混合比が 10:0、7:3、5:5、3:7、0:10 となるように混合し、それぞれの試料に対して試験を 2 回行った。なお、膨潤力試験は一般的には含水比 8%の試料に対して実施されるが、ここでは、炉乾燥により含水比を 0%の状態にした試料を用いて試験を実施した。

本研究で用いたベントナイトとカオリナイトは、ベントナイトの混合比が大きいほど膨潤力は大きくなり、ベントナイト単体での膨潤力はカオリナイト単体の 4 倍の膨潤力を示す材料であった。

表 1 膨潤力試験の結果

ベントナイトとカオリナイトの混合比	10:0	7:3	5:5	3:7	0:10
膨潤力(1 回目)	20.0	17.0	14.0	10.5	4.9
膨潤力(2 回目)	20.0	16.5	14.0	10.0	5.0

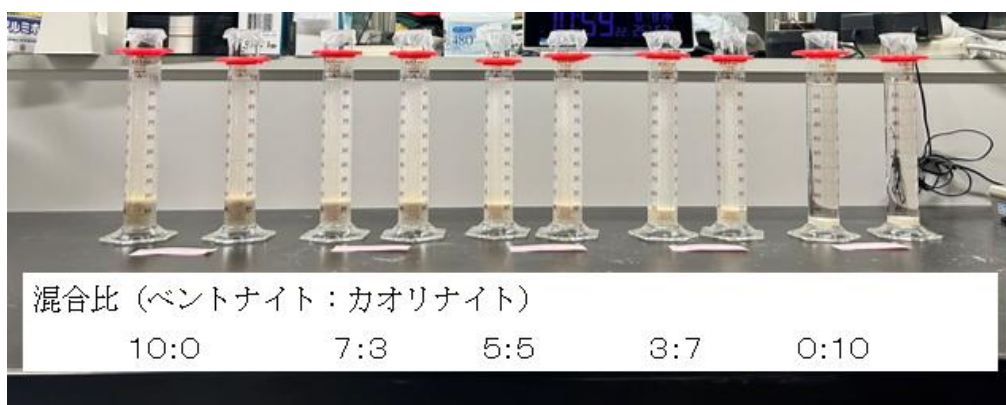


図 2 試験開始 24 時間経過時の様子

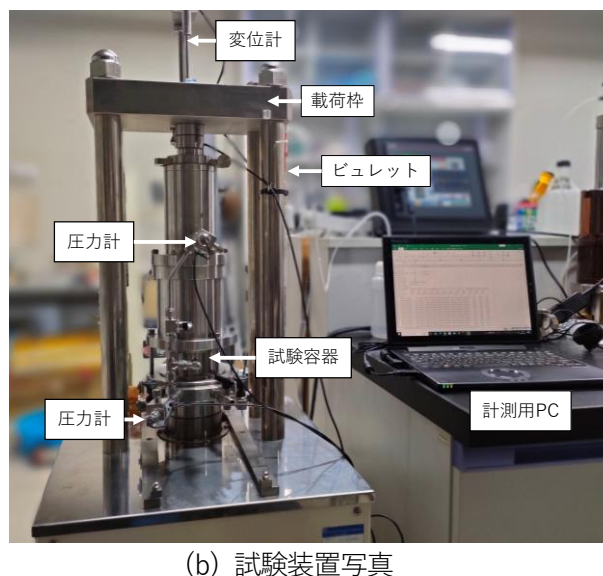
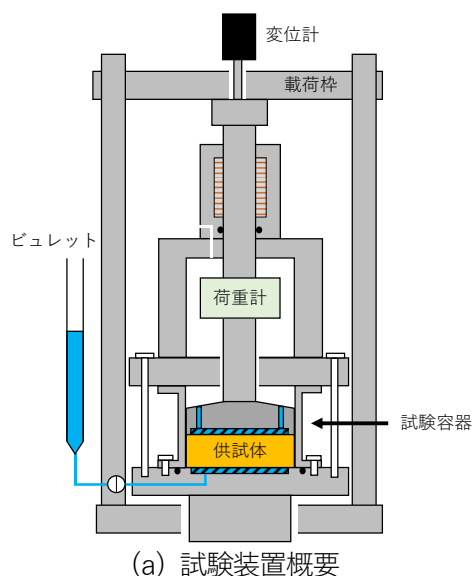


図3 試験装置

表2 試験ケース

Case	混合比 (カオリナイト:ベントナイト)	乾燥密度 (Mg/m ³)	試験後飽和度 (%)
1-1	10:0	1.36	123
1-2	10:0	1.40	110
1-3	10:0	1.40	112
1-4	10:0	1.39	121
1-5	10:0	1.35	106
2-1	7:3	1.40	128
2-2	7:3	1.48	137
2-3	7:3	1.51	138
2-4	7:3	1.35	125
3-1	5:5	1.36	129
3-2	5:5	1.34	142
3-3	5:5	1.42	122
3-4	5:5	1.42	113
4-1	3:7	1.51	119
4-2	3:7	1.38	102
4-3	3:7	1.39	120
4-4	3:7	1.41	127

3. 膨潤圧試験

(1) 試験の概要

膨潤圧試験とは、締固めた供試体に対し、膨潤変形しないよう体積を拘束した状態で給水し、発生する圧力を測定する試験である。

本試験では、ベントナイトとカオリナイトを乾燥重量比で 3:7、5:5、7:3、10:0 に混合した試料に対して試験を実施した。供試体の直径は 60mm、目標高さは 10mm、供試体の目標乾燥密度は 1.4Mg/m³ とした。試験装置の概要を図3に、試験ケースを表2にまとめる。表中には、試験後に測定した乾燥密度と飽和度も併せて示している。いずれのケースでも乾燥密度に若干のばらつきがみられるものの、概ね目標乾燥密度である 1.4Mg/m³ に近い値となっている。

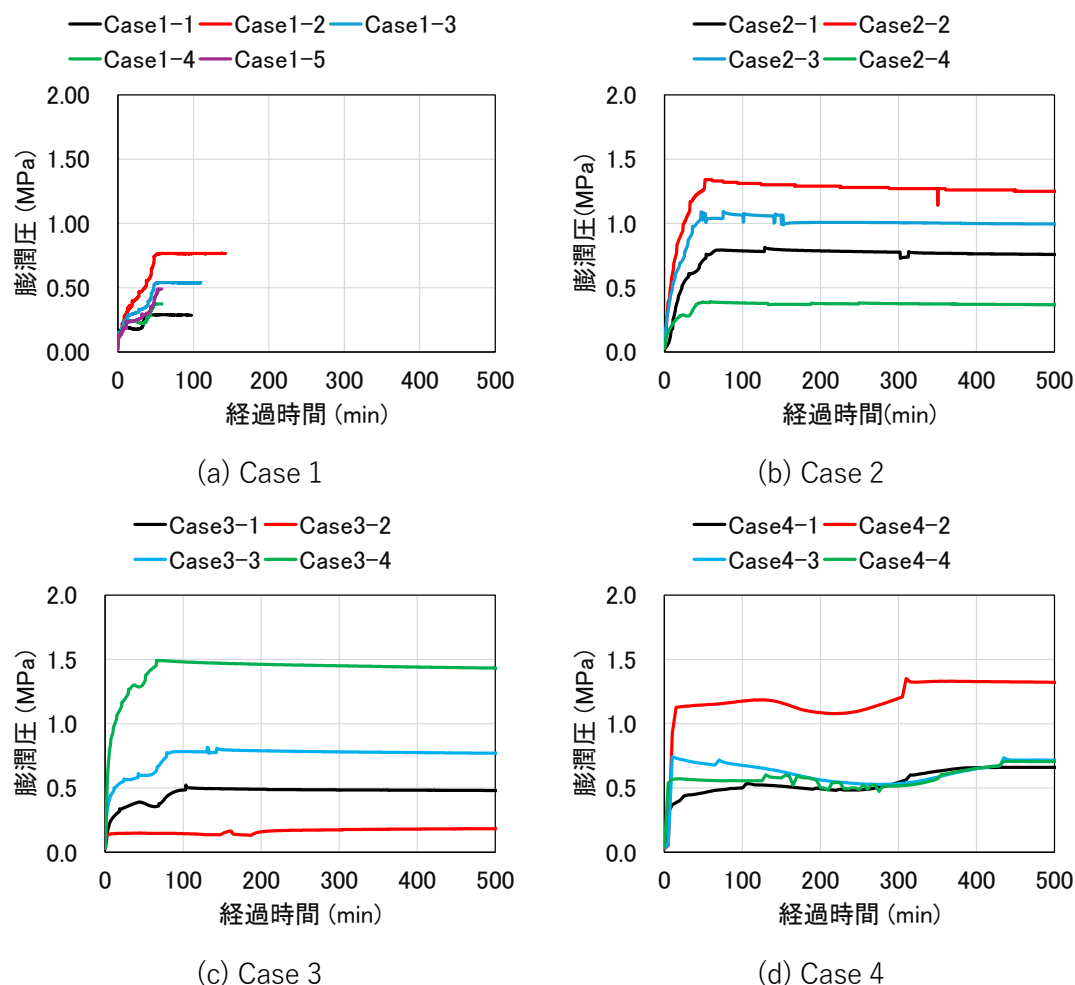


図 4 膨潤圧の経時変化

試験手順を以下に示す。

1. 試料を目標高さまで締め固めた際に目標乾燥密度になるように各試料を秤量する。
2. 各試料を混合し、十分にかき混ぜる。
3. 試験容器に試料を投入し、試験装置を組み立てる。
4. 試料を高さ 10mm となるまで圧縮し、除荷する。その際に除荷時の変形量を測定しておく。
5. 10mm から除荷時の変形量を引いた高さまで再度圧縮と除荷を行い、高さ約 10mm の供試体を作製する。
6. 供試体の体積変形が生じないように装置を固定する。
7. ビュレットに蒸留水を入れ、供試体下部から供試体への給水を開始する。
8. 発生する膨潤圧の計測を行う。
9. 膨潤圧が平衡状態に達したら供試体が飽和したと仮定し、装置の解体を行う。
10. 試験容器から供試体を取り出し、供試体の重量を測定する。
11. 供試体を 24 時間以上 110℃で乾燥させる。
12. 乾燥させた試料の重量を測定し、供試体の乾燥密度、含水比、飽和度を計算する。

(2) 試験結果

各試験で得られた膨潤圧の経時変化を図 4 に示す。いずれのケースでも、浸潤開始とともに膨潤圧が発生しているのが確認できる。試験ケースごとに比較すると、同一混合比でも生じる膨潤圧にはばらつきがあることがわかる。表 2 に示したように、各ケースで乾燥密度が若干異なるなど、供試体ごとの初期条件の違いが生じる膨潤圧のばらつきの要因の一つと考えられる。

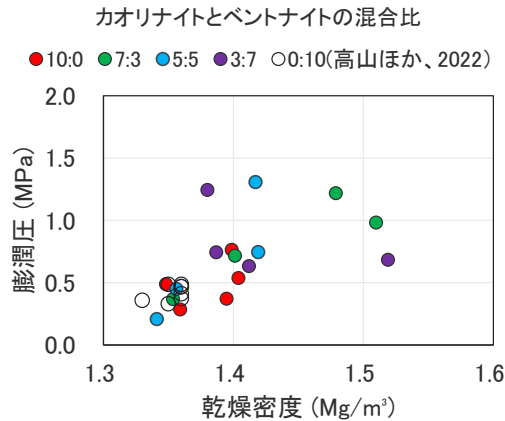


図5 膨潤圧と乾燥密度の関係

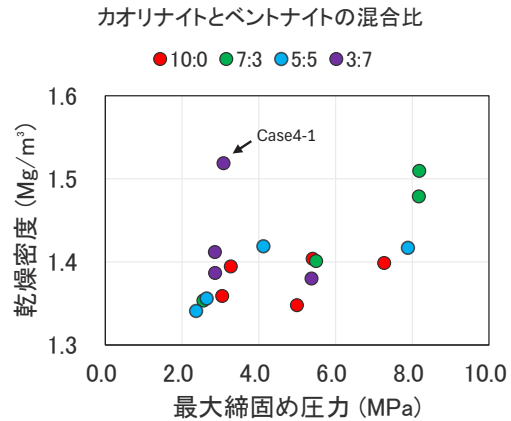


図6 乾燥密度と最大締固め圧力の関係

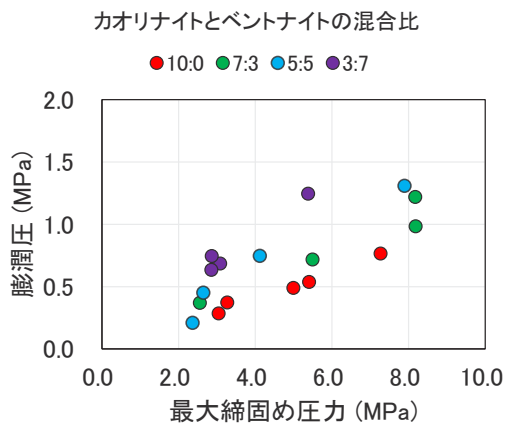


図7 膨潤圧と最大締固め圧力の関係

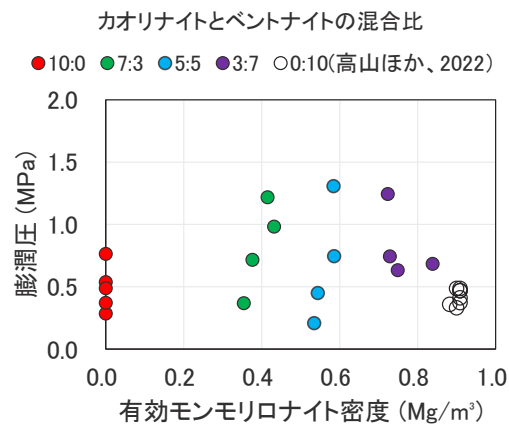


図8 膨潤圧と有効モンモリロナイト密度の関係

得られた膨潤圧はいずれのケースも約 0.2～1.5MPa の範囲にあり、混合比の変化に伴う明確な傾向性は確認できない。一方、膨潤圧が定常に落ち着くまでに要する時間はベントナイトの混合比が大きくなるにつれて大きくなっている。ベントナイトの透水係数はカオリナイトと比べて小さいことから、ベントナイトの混合比が大きいほど、飽和状態に達するのに時間がかかると考えられる。なお、表 2 に示したように試験後試料の飽和度はいずれのケースでも 100%以上であったことから、試験終了時には飽和状態であったと考えられる。

試験で得られた最終的な膨潤圧と乾燥密度の関係を、カオリナイトとベントナイトの混合比ごとに整理したものを図 5 に示す。図中には、ベントナイト単体での膨潤圧試験の結果⁴⁾も併せて示している。ばらつきはあるものの、乾燥密度が大きいほど膨潤圧は大きくなる傾向があることがわかる。また、同程度の乾燥密度条件で比較すると、カオリナイトとベントナイトの混合比に依存せず膨潤圧は概ね同程度の値を示していることがわかる。図 2 に示したように、自由に膨潤できる状態ではベントナイトとカオリナイトの膨潤変形量は大きく異なるものの、体積が拘束された状態で発揮する膨潤圧には大きな差異がないことがわかった。

小峯・緒方(2002)⁵⁾はベントナイトと砂の混合材料を用いた膨潤圧試験を実施し、ベントナイトと砂の混合材料ではベントナイト配合率の増加に伴い膨潤圧は指数関数的に増加することを報告している。このことから、カオリナイトを混合した場合と、砂を混合した場合では得られる傾向が異なることがわかる。

図 6 に乾燥密度と最大締固め圧力の関係を示す。最大締固め圧力の増加に伴い乾燥密度が増加する傾向がある。また、Case4-1を除くと、最大締固め圧力と乾燥密度の関係には混合比の影響はほとんど見られない。一方、ベントナイトにケイ砂を混合した場合には、ケイ砂混合率の増加に伴い最大締固め圧力が低減することが知られている⁶⁾。カオリナイトを混合した場合にはそのような傾向は認められないことから、膨潤圧と同様に、締固め特性は混合する材料に依存することがわかる。ケイ砂と比較してカオリナイトは粒径が細かいため、同一乾燥密度に締め固めるにはより大きな圧力が必要となると考えられる。

図 7 に膨潤圧と最大締固め圧力の関係を示す。最大締固め圧力が大きいほど膨潤圧が大きくなる傾向があり、最大締固め圧力と比較すると膨潤圧は 1 オーダー程度小さい。また、最大締固め圧力が同程度であれば、ベントナイトの配合比が大きいほど膨潤圧が大きい傾向がみられる。

図 8 に膨潤圧と有効モンモリロナイト密度の関係を示す。有効モンモリロナイト密度とは、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトと間隙で構成される乾燥密度であり、以下の式で表される。

$$\rho_{em} = \frac{\frac{C_m}{100}\rho_d}{1 - \left(1 - \frac{C_m}{100}\right)\frac{\rho_d}{\rho_{nm}}} \quad (1)$$

ここに、 ρ_{em} は有効モンモリロナイト密度 (Mg/m^3)、 C_m はモンモリロナイト含有率(%)、 ρ_d は乾燥密度 (Mg/m^3)、 ρ_{nm} は随伴鉱物の平均土粒子密度 (Mg/m^3)である。本研究では C_m には 50%、 ρ_{nm} には 2.7 Mg/m^3 を用いた。

一般的に、膨潤圧を有効モンモリロナイト密度で整理すると、ベントナイトの種類及びケイ砂の混合率に関係なく、膨潤圧との関係が一意的に決まり、有効モンモリロナイト密度の増加に対し指数関数的に膨潤圧が増加することが知られている⁷⁾。

しかしながら、図 8 に示すように、本研究で得られた膨潤圧と有効モンモリロナイト密度のデータにはそのような関係は認められない。有効モンモリロナイト密度が低い場合には、モンモリロナイト以外の鉱物の影響が大きくなり、膨潤圧と有効モンモリロナイト密度は一意的な関係にはならないことが示唆される。非膨潤性粘土であっても、カオリナイトのような比表面積の大きな粘土の場合には大きな膨潤圧が発生することが知られている⁸⁾。本研究で用いたカオリナイトは、カオリナイト単体でもベントナイトと同程度の膨潤圧を示したため、有効モンモリロナイト密度が低下しても指数関数的に膨潤圧が低下しなかったと考えられる。

4. 結論

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、数万年を超える評価期間の間に緩衝材が曝される環境によっては緩衝材中のベントナイトが非膨潤性の粘土鉱物に変化し、期待される機能に影響を与える可能性が懸念されている。本研究では、地盤工学の分野で広く用いられている 1:1 型非膨潤性粘土鉱物であるカオリナイトをベントナイトと混合した材料を用い、カオリナイトとベントナイトの混合比が異なる条件で膨潤圧試験を行った。

その結果、いずれの混合比においても乾燥密度が大きいほど膨潤圧は大きくなる傾向があった。また、同程度の乾燥密度条件で比較すると、カオリナイトの混合比が増加しても膨潤圧は低下せず、膨潤圧は混合比に依存せず概ね同程度の値を示した。ベントナイトと砂の混合材料では、ベントナイト配合比の増加に伴い膨潤圧は指数関数的に増加することが知られているが、本研究で用いたカオリナイトは、カオリナイト単独でもベントナイトと同程度の膨潤圧を示したため、砂を混合した場合とでは傾向が異なった。

膨潤圧と有効モンモリロナイト密度には明確な相関性は認められず、有効モンモリロナイト密度で整理すると膨潤圧との関係が一意的に決まるという既往の知見とは整合的ではなかった。有効モンモリロナイト密度が低い場合には、モンモリロナイト以外の鉱物の影響が大きくなり、カオリナイトのような高い膨潤圧を示す粘土鉱物の場合は膨潤圧と有効モンモリロナイト密度は一意的な関係にはならないことが示唆された。

参考文献

- 1) 上野健一, 笹本広, 陶山忠宏, 緩衝材長期安定性に関する概略的評価, JAEA-Research 2008-073, 2008.
- 2) Lantenois, S., Lanson, B., Muller, F., Bauer, A., Jullien, M. and Plançon, A., Experimental Study of Smectite Interaction with Metal Fe at Low Temperature: 1. Smectite Destabilization, Clays and Clay Minerals, 53, 6, 597-612, 2005.
- 3) Kása, E., Szabados, M., Baán, K., Kónya, Z., Kukovecz, A., Kutus, B., Pálinkó, I., Sipos, P., The dissolution kinetics of raw and mechanochemically treated kaolinites in industrial spent liquor – The effect of the physico-chemical properties of the solids, Applied Clay Science, 203, 15, 1-10, 2021.
- 4) 高山裕介, 佐藤大介, 菊池広人, 膨潤圧試験中のベントナイトの膨潤圧変化に与える吸水圧縮挙動の影響, 原子力バックエンド研究, 29, 2, 101-111, 2022.

- 5) 小峯秀雄、緒方信英：砂・ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨潤特性、土木学会論文集 No. 701/Ⅲ-58, pp. 373-385, 2002.
- 6) 増田良一，雨宮清，千々松正和，足立格一郎，小峯秀雄，ベントナイトを用いた緩衝材の材料仕様と締固め特性の関係，土木学会論文集，771, Ⅲ-68, 157-171, 2004.
- 7) 電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構，TRU 廃棄物処分技術検討書 根拠資料集 分冊 1, JNC TY1450 2005-001(1)，2005.
- 8) 河野勝宣，粘土鉱物の種類に着目した締固めた粘土試料の膨潤圧と透水係数，材料，70，3，272-278, 2021.

筆者:1) 高山 裕介、都市安全研究センター、准教授;2) 安田 理佐子、工学部市民工学科、学生;3) 橘 伸也、都市安全研究センター、教授;4) 竹山 智英、工学研究科市民工学専攻、教授

Swelling pressure of bentonite-kaolinite mixture

Yusuke Takayama
Risako Yasuda
Shinya Tachibana
Tomohide Takeyama

Abstract

In the geological disposal of high-level radioactive waste, there is a concern that bentonite in the buffer material may change to a non-swelling clay mineral during the evaluation period, which may exceed tens of thousands of years, and that this may affect the expected functions such as swelling properties. In this study, swelling pressure tests were conducted under different mixing ratios using a material made by mixing kaolinite, a non-swelling clay mineral, with bentonite. As a result, under the same dry density condition, the swelling pressure did not decrease even if the mixing ratio of kaolinite increased, and the swelling pressure showed approximately the same value regardless of the mixing ratio. Furthermore, no clear correlation was found between swelling pressure and effective montmorillonite density. Under conditions of low effective montmorillonite density, the influence of minerals other than montmorillonite on the swelling pressure becomes greater, and it was found that when non-swelling clay minerals that exhibit high swelling pressure, such as kaolinite, are mixed, there is no unique relationship between the swelling pressure and the effective montmorillonite density.

©2025 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.