

締固めたベントナイトの膨潤変形に伴う 乾燥密度・含水比・飽和度分布の経時変化の実験的評価

早稲田大学 正会員 ○伊藤 大知, 王 海龍, 小峯 秀雄

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、ベントナイト系材料を締固めて緩衝材として廃棄体周囲に施工することが有力である。

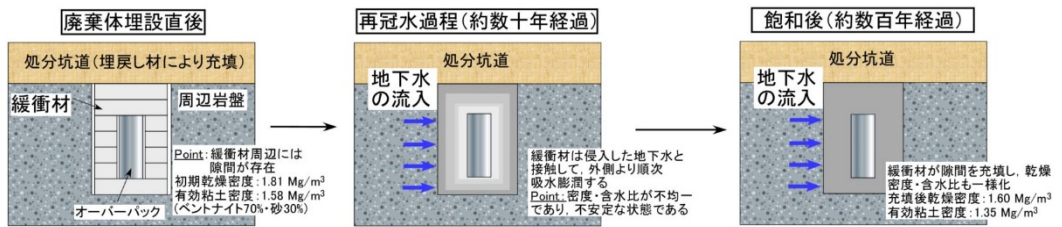


図1 緩衝材定置→再冠水に伴う吸水膨潤→内部状態の一樣化に至る経時変化の概念図

ベントナイト系緩衝材には自己シール性（施工上生じる廃棄物収容容器・周辺岩盤と緩衝材間の隙間を膨潤変形により充填する性能）が要求される。従来研究の多くは、自己シール性の設計に関して、供試体および緩衝材の乾燥密度・含水比を一定と仮定し、隙間充填後の発生圧力により評価してきた（例えば 2),3）。一方で、緩衝材が地下水と接触して隙間を充填し、内部状態が一樣に収束するまでの遷移期間として数十年～数百年程度の長期間を要すると考えられ（図 1）、モニタリング精度向上の観点から、隙間充填過程における膨潤変形挙動に伴う状態変化を実験・理論の両面から把握する必要がある。本研究では、締固めたベントナイト供試体に対して分割式モールドを有する実験装置により低鉛直圧（20 kPa）下で膨潤変形実験を行い、乾燥密度や含水比、飽和度といった状態量の内部分布の経時変化を実験的に評価した。

2. 使用した試料

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（クミニネ工業製、以下 K_V1）を用いた。表 1 に使用したベントナイト K_V1 の基本的性質を示す。本ベントナイトは日本の放射性廃棄物処分に関する研究で標準的に使用されている。試料は密閉容器内で保管しており、初期含水比は 8.9～9.3%であった。

表 1 ベントナイト K_V1 の基本的性質

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

3. 分割式モールドを活用した膨潤変形実験装置の概要

本研究で用いた、分割式モールドを活用した膨潤変形実験装置を図 2 に示す。本装置のモールドは、厚さ 2 mm の SUS303 リング（内径 28 mm，外径 38 mm）複数枚と、それらのリング間に厚さ 0.30 mm の 2 枚組リングを挟んで構成されている。モールドの外側には固定用容器を設けており、実験中のモールド積層体の移動を防いだ。供試体作製時は、SUS303 リング 2 枚と 2 枚組リング 1 セットを組み立てて、その中に試料を所定量投入し、静的荷重を加えて締固めた。実験開始時の供試体寸法は直径 28 mm，高さ 4.3 mm であった。供試体上下にメンブレンフィルター（孔径 0.45 μm，厚さ 0.140 mm）を設置し、実験装置を組み立てて下面から給水した。所定の期間給水した後、モールドを取り出し、2 枚組リングを取り除いて、ダイヤモンドワイヤー（線径 0.15 mm）を用いて 2 mm ごとにスライスした。分割式モールドの使用法や実験後供試体の分割方法は Wang et al. (2020)⁹⁾を参考とした。その後、モールドと供試体の合計質量および含水比を測定し、乾燥密度や飽和度を算出した。また、膨潤変形量については変位計（最大容量 25 mm，最小目盛り 0.002 mm）を用いて測定し、初期高さで除して膨潤変形率として整理した。

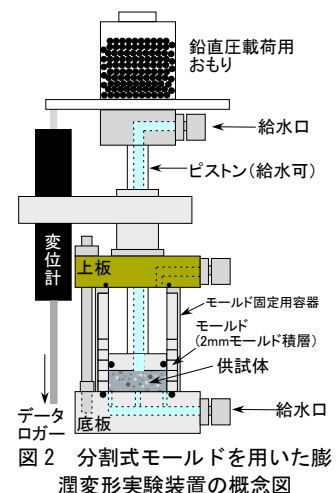


図2 分割式モールドを用いた膨潤変形実験装置の概念図

キーワード ベントナイト, 膨潤変形, 乾燥密度・飽和度分布, 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

4. 膨潤変形挙動における乾燥密度等状態量の供試体内分布の経時変化

分割式モールドによる膨潤変形挙動への影響を把握するため、乾燥密度 1.6 Mg/m^3 付近で締固めた供試体 ($\phi 28 \text{ mm} \times h 4.3 \text{ mm}$) を用いて、分割式モールド (多リング) と通常リング (内径 $28 \text{ mm} \times h 50 \text{ mm}$) の膨潤変形率の経時変化を比較した (図3)。これより、実験期間全体にわたって同程度で推移しており、分割式モールドによる影響は小さいといえる。また、実験後にモールドを分割した際、モールド間から試料や水の漏れは確認されなかったため、本モールドをベントナイトの膨潤変形実験に適用可能と判断した。

次に、初期乾燥密度 $1.32 \sim 1.34 \text{ Mg/m}^3$ の4供試体を用いて、実験期間を1,3,7,11日とした結果を示す。図4に各ケースの膨潤変形率の経時変化を示す。4ケースはほぼ同様の経時変化を示しており、一定の再現性が見られた。図5に給水面からの距離と試験終了時乾燥密度の関係、図6に給水面からの距離と含水比の関係を、図7に給水面からの距離と飽和度の関係をそれぞれ示す。なお、給水面からの距離は各モールド高さの中央を代表値としている。図5より全ケースで給水面から離れるほど終了時乾燥密度が高かった。なお、7日、11日の場合図4において膨潤変形率の増加が収束しているものの、乾燥密度分布は一様ではないため、膨潤変形収束後も乾燥密度の一様化に時間を要すると推察される。図6より、最下部において含水比は最大値を取り、1日の場合給水面から離れるほど低下する傾向であり、その他は130~140%でほぼ一様であった。図7より飽和度分布について、バラつきはあるものの4ケースとも給水面から離れるほど飽和度が上昇する傾向であった。また、全ケースとも飽和度90%程度以上と飽和に近い状態であることから、本研究の供試体スケールでは、まず供試体全体が飽和した後に給水面側から膨潤変形挙動がはじまり、経時とともに全体的に膨潤変形して乾燥密度が一様化すると推察される。今後、より広範な乾燥密度、実験期間の条件で本検討を行うとともに、不飽和のベントナイト供試体中の水分拡散挙動と膨潤変形挙動を練成的に解析可能な理論モデルの構築を目指す。

図3 分割式モールドと通常リングを用いた場合の膨潤変形率の比較

図4 膨潤変形率の経時変化曲線比較

図5 給水面からの距離と試験終了時乾燥密度-試験終了時乾燥密度関係

図6 給水面からの距離-含水比関係

図7 給水面からの距離-飽和度関係

5. 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) ベントナイトの膨潤変形実験に対する、厚さ 2 mm リングによる分割式モールドの適用性を確認できた。
- 2) 初期乾燥密度 $1.32 \sim 1.34 \text{ Mg/m}^3$ の供試体で、実験期間1,3,7,11日の4ケースについて、乾燥密度、含水比、飽和度分布を取得できた。今後はより広範な条件でデータを取得し、水分拡散・膨潤変形挙動を練成的に解析できるモデルの構築を目指す。

謝辞: 本研究は鹿島学術振興財団研究助成の成果の一部である。また、本研究の一部は平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業(放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務)の支援のもと行われた。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) 小峯秀雄, 長田徹, 高尾肇, 植田浩義: 高レベル放射性廃棄物処分施設の縦置き孔模型実験における緩衝材発生圧力の予測・評価, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.69, No.1, 108-117, 2013. 3) Jia, L.Y., Chen, Y.G., Ye, W.N., Cui, Y.J.: Effects of a simulated gap on anisotropic swelling pressure of compacted GMZ bentonite, Engineering Geology, No.248, 155-163, 2019. 4) Wang, H., Shirakawabe, T., Komine, H., Ito, D., Gotoh, T., Ichikawa, Y., Chen, Q.: Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 57, pp. 921-932, 2020.