

## 縮固めたベントナイトの膨潤圧発生に伴うモンモリロナイト底面間隔の遷移—その2

早稲田大学 正会員 ○王 海龍, 小峯秀雄, 学生会員 伊藤大知

**1. 目的:** 高レベル放射性廃棄物の地層処分バリアシステムにおいて、ベントナイト系緩衝材の使用が有力である。その中、膨潤変形が拘束されるベントナイトブロックの吸水に伴い発生する膨潤圧は、緩衝材の仕様設計に対して重要な物理量である。本研究は、膨潤圧の経時変化とベントナイトに含まれるモンモリロナイトの膨潤との関係性を究明するために、膨潤圧 ( $p_s$ ) とモンモリロナイトの底面間隔 ( $d_{001}$ ) の経時変化を同時に計測した。計測した結果をもとに、膨潤圧の発生メカニズムを考察した。

**2. 研究方法:** 本研究では、文献 1~2) で紹介された XRD\_膨潤圧装置 (図 1) を用いた。図 1e に示すように、本装置は、厚さ 2 mm、直径 28 mm の縮固めたベントナイト供試体を装置の下版(Base plate)に設置し、給水口(water inlet)から給水する際に供試体の膨潤変形を低減するため、供試体の上部を柵状の中版(middle plate)と上版(top plate)を下版に固定した。また、中版と供試体の間には、X線が透過できるベリリウム板(厚さ: 0.1 mm)と汚染防止のフィルム(厚さ 6  $\mu\text{m}$ )を、供試体と下版の間には、送水するためのろ紙と金属メッシュを設置した。 $p_s$  は下版に設置した圧力センサー(容量: 7 MPa)で計測し、 $d_{001}$  は X線を中版の柵状空間から透過させ、供試体上面から計測した。実験では、XRD\_膨潤圧装置を X線回折装置のステージに装着した後に、初期の X線プロファイルをスキャンした後に、給水を開始し、 $p_s$  が平衡膨潤圧に至るまでに X線プロファイルを連続に取得する。本研究では、X線回折装置(リガク RINT-TTR III)で発射する平行 Cu K $\alpha$ ビームを用いて、事前に炉乾燥したクニゲル V1 で作製した初期乾燥密度  $\rho_{\text{di}} = 1.29, 1.40, 1.51, 1.70 \text{ Mg/m}^3$  の供試体を対象とした。

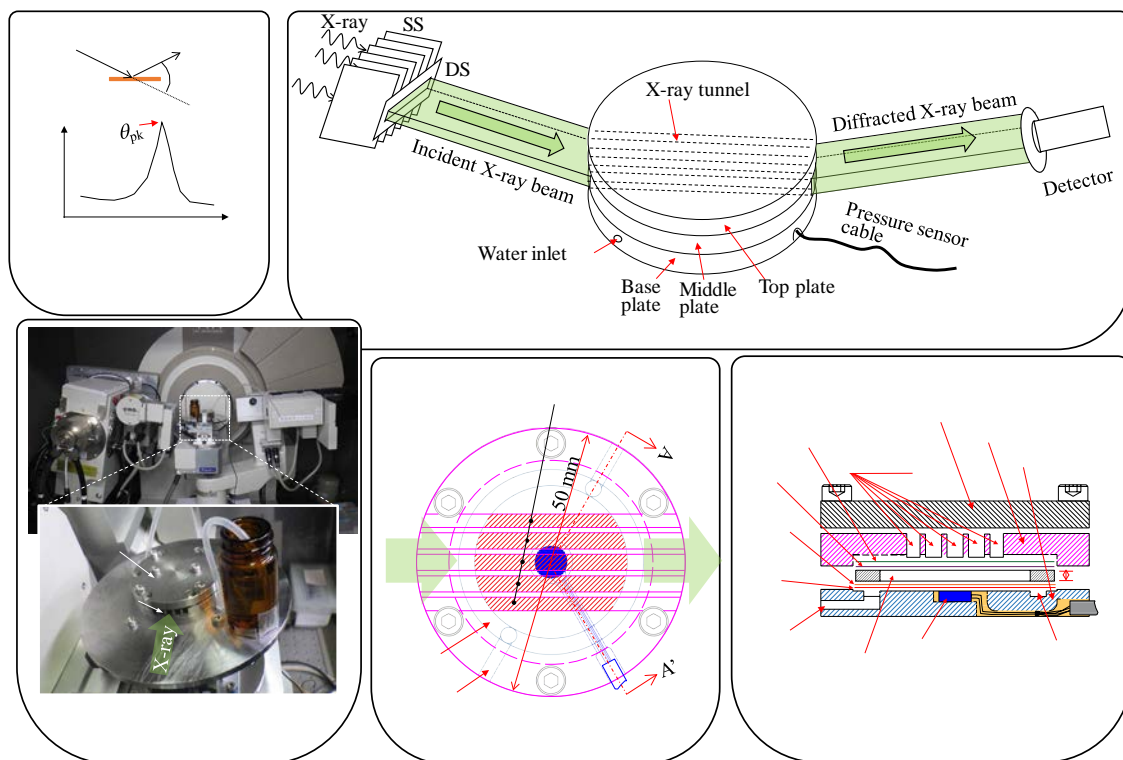


図 1 XRD\_膨潤圧装置: (a) X線回折の原理, (b)装置の全体図, (c)装置を X線回折装置のステージに設置した様子, (d)装置下版の設計図, (e)装置の断面図

**3. 結果:**  $\rho_{\text{di}} = 1.29, 1.70 \text{ Mg/m}^3$  供試体の実験結果を代表として図 2 に示す。X線スキャンを行った時点をもとに  $p_s$  の経時変化曲線上に○で示しており、吸水前のプロファイルを 1 番として、時間順で番号を付けた。 $p_s$  の経時曲線の下部に、代表的なプロファイルを示した。ベントナイトの吸水に伴いモンモリロナイトの回折ピーク位置は、 $2\theta = 9.0^\circ$ ,

から  $7.0^\circ$ ,  $5.7^\circ$ そして  $4.8^\circ$ までに移動したことが確認された。既往の研究<sup>3-7)</sup>でも同様の結果が確認され、それぞれモンモリロナイトの結晶層間の水分子状態 ( $L$ ):  $0$ 層水分子 ( $0w$ ),  $1w$ ,  $2w$  および  $3w$  に対応すると考えられる。また、 $L$ が  $3w$ になった後に、 $\rho_{di}=1.29 \text{ Mg/m}^3$  供試体のプロファイルピークがさらに左側に移動し、 $2\theta=2\sim 3^\circ$ 付近にブロードなピークが現れた。一方、 $\rho_{di}=1.70 \text{ Mg/m}^3$  の供試体の場合は、 $2\theta=2\sim 3^\circ$ 付近におけるプロファイル強度の経時増加が殆どなかった。平衡膨潤圧になった後に、供試体を取り出し、ベリリウム板がない状態で行った X 線スキニングは、最終プロファイル(final profile)として、図 2 にも示した。最終プロファイルからでも、供試体密度の増加につれ、 $2\theta=2.3^\circ$ 付近におけるピークの強度がなくなる傾向が確認された。

既往の研究<sup>3-7)</sup>で得られたモンモリロナイトの含水比と  $d_{001}$  の関係を図 3 に示すように、含水比の増加に伴い、 $d_{001}$  が  $d_{001}=1.9 \text{ nm}$  までに段階的に、その後、直線的に増加することが確認された。段階的な部分は、結晶性膨潤 (Crystalline swelling)、直線の部分は浸透性膨潤 (Osmotic Swelling) と区別され、前者は水和力、後者は浸透力に支配されると考察した。図 2 の結果によると、締固めたベントナイトの吸水過程において、ほとんど結晶性膨潤が関与していることが確認された。この結果を踏まえて、膨潤圧の経時変化における膨潤圧の減少と再上昇段階は、図 4 に示すようにモンモリロナイトの膨潤および非膨潤性土粒子の移動によるものと考察している。本研究の詳細については、参考文献 2 も照されたい。

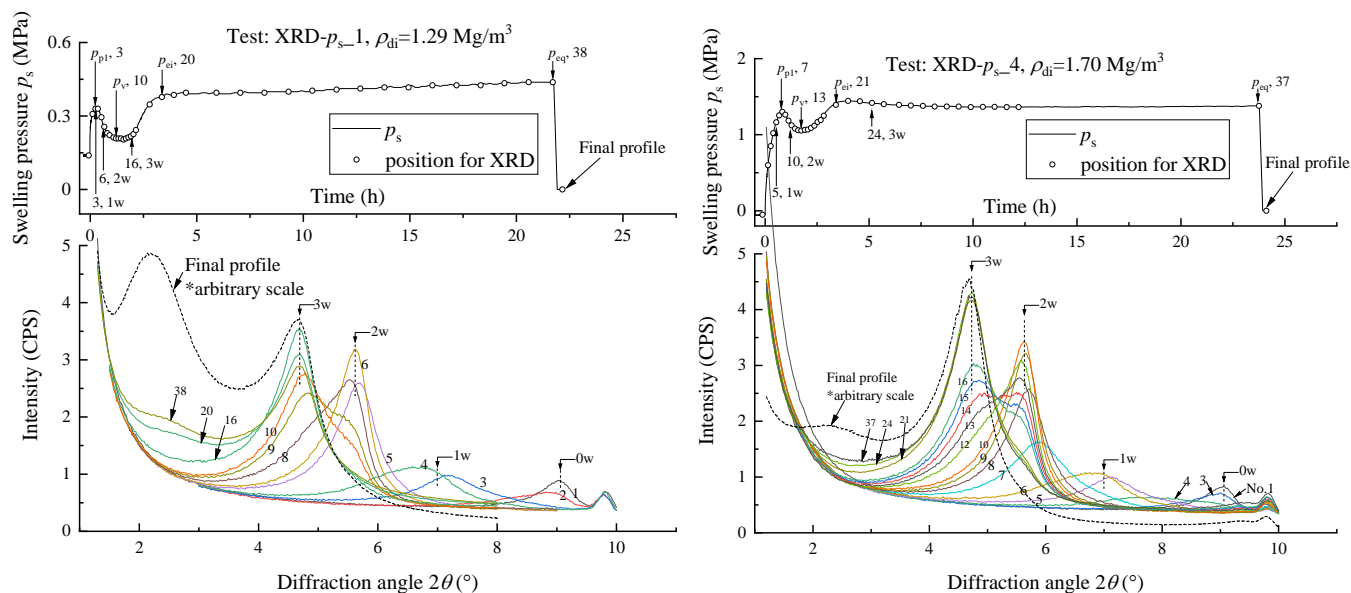


図 2 膨潤圧の経時変化および x 線プロファイルの代表的な結果 (左)  $\rho_{di}=1.06 \text{ Mg/m}^3$ , (右)  $\rho_{di}=1.69 \text{ Mg/m}^3$

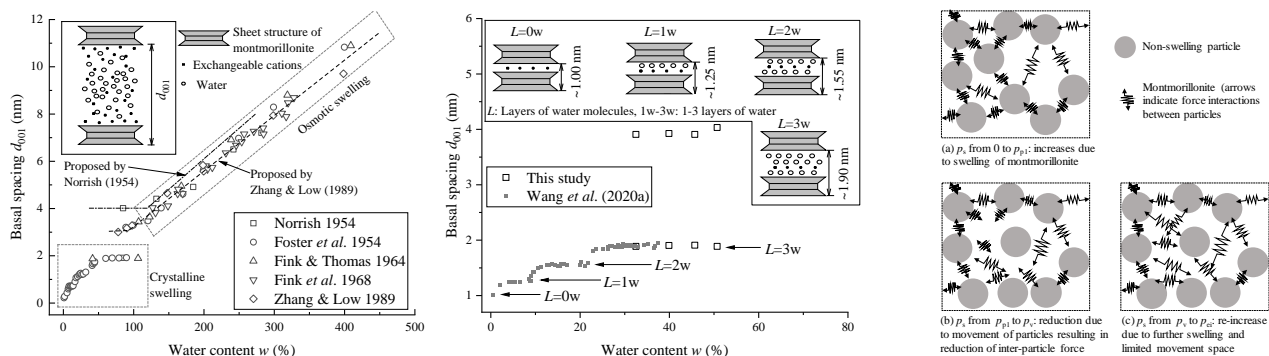


図 3 (左) 含水比と底面間隔の関係図 (右) 結晶性膨潤の拡大図 図 4 膨潤圧経時変化のメカニズム模式図

**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。本研究の一部は、平成 30 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)、早稲田大学特定課題研究助成費 (課題番号: 2020C-647, 2020C-039) による研究成果の一部である。

参考文献: 1) 王ら, 地盤工学会誌, 2021.1. 2) Wang, H. et al. *Geotechnique*, 2021, <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.00005>. 3) Norrish, K., *Nature* **173**, 256-257, 1954. 4) Foster, W.R. et al., *Clays Clay Miner* **3**, 296-316, 1954. 5) Fink, D. H. & Thomas, G. W., *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **28**, 747-750, 1964. 6) Fink, D. H. et al., *Soil Sci.* **105**, 71-77, 1968. 7) Zhang Z. Z. & Low P. F., *J. Colloid. Interface Sci.* **133**, 461-472, 1989.