

締固めたベントナイトの膨潤圧と圧密特性に及ぼす初期含水比の影響—その 2

早稲田大学 正会員 ○王 海龍

1. 目的：本研究では、高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト系緩衝材に着目し、膨潤変形が拘束された締固めたベントナイトが吸水時に発生する見かけの膨潤圧(p_s)に及ぼす初期含水比の影響のメカニズムを検討した。本研究内容の一部となる膨潤圧試験と圧密試験については、文献 1 にて発表する予定であり、本研究の詳細内容は、文献 2 にご参考いただく。

2. 研究方法：本研究で実施した試験内容は表 1 に示しており、すべての試験においてナトリウム型ベントナイトクニゲル V1 単体（以降：K_V1）を使用しひていた。K_V1 の土粒子密度は $2.80 \pm 0.03 \text{ Mg/m}^3$ 、モンモリロナイト含有率は 53%、陽イオン交換容量は、 71.9 meq/100g となっている。膨潤圧試験では、K_V1 の初期含水比(w_i)が 0, 7, 18, 20, 33%となる 5 ケースを調整した。0% 試料は $110^\circ\text{C} \cdot 24$ 時間の炉乾燥、7%試料は実験室保管環境 ($23^\circ\text{C} \cdot 50\%$ 相対湿度) での養生による準備した。一方、18, 20, 33%の試料は、7%初期含水比の試料への直接加水、混合および 1 ヶ月以上の養生により作製した。直径 28mm、厚さ 2mm の供試体はステンレス供試体リング内で静的締め固めにより作製し、供試体の体積変形を拘束した条件下で膨潤圧を計測し膨潤圧が平衡に達してから試験を終えた。厚さ 2mm の供試体を用いる実験方法は文献 3 にご参考いただく。圧密試験の 0%と 7%試料は、膨潤圧試験の試料と同様の方法で作製した。20%と 25%の試料は、7%初期含水比の試料を湿度 100%の環境でそれぞれ 1 ヶ月と 2 ヶ月程度で養生して得られたものである。X 線回折試験は、無拘束と拘束ありの 2 種類を実施した。前者では 7%初期含水比の試料への直接加水、混合および養生により作製し内径 28mm 厚さ 2mm のステンレスリングに試料を均質に充填し供試体を準備した。後者では 0%または 7%の初期含水比試料を同様のステンレスリングに所定の乾燥密度まで静的締め固めにより作製し、文献 4 に示した XRD・膨潤圧装置設置し体積変形を拘束した条件下で給水により膨潤圧を発生させた。本研究で示した X 線プロファイルは、平衡膨潤圧を達した後に膨潤圧を解放した状態のものである。

表 1 本研究で実施した試験のまとめ表			
試験名	w_i 代表値	w_i 範囲 %	ρ_d 範囲 Mg/m^3
膨潤圧試験 (p_s test)	0%	0-0.5	1.13-1.88
	7%	7.0-7.4	1.07-1.83
	18%	17.4-18.0	1.11-1.80
	20%	20.2-20.5	1.12-1.70
	33%	33.3-35.8	1.10-1.39
X 線 回折 試験	無拘束	-	29.4-103
	拘束あり	0	1.16-1.70
圧密試験 (p_c test)	7%	6.9-8.4	1.04-1.66
	0%	0.5-0.6	1.04
	7%	7.7	0.96-0.97
	20%	19.3-21.4	0.66-0.72
	25%	24.7	0.75-0.76

3. 結果および考察：図膨潤圧試験で得られた平衡膨潤圧と乾燥密度の関係を図 1 示す。殆どのケースでは平衡膨潤圧は初期含水比によらず ρ_d の増加に連れて指数的に増加し、片対数グラフ上では平衡膨潤圧と乾燥密度の関係は $\rho_d = 1.45$ と 1.72 Mg/m^3 から三つの直線区分がおおむね確認される。一方、 $\rho_d > 1.7 \text{ Mg/m}^3$ の条件下では、 $w_i = 18\%$ ケースの膨潤圧は同乾燥密度条件の $w_i = 0\%$ と 7%ケースの膨潤圧より明らかに低いことが確認された。図 2 では初期含水比の異なる試料の圧密試験結果（载荷経路のみ）として载荷荷重と载荷に対応する収束乾燥密度の曲線を示す。また、同図では膨潤圧試験で得られた乾燥密度と平衡膨潤圧の関係データを試験終了時の含水比(w_f)を指標として $36\% \geq w_f \geq 24.7\%$ (データ群 1)、 $w_f < 24.7\%$ (データ群 2) と $w_f > 36\%$ (データ群 3) の三つのデータ群に区分して加えた。初期含水比の 24.7%の圧密曲線は、群 1 のデータ分布とよく一致しているが、群 3 のデータは平衡膨潤圧が低いほど曲線から離れていく傾向が見られた。群 2 のデータはおおむね 24.7%の圧密曲線と

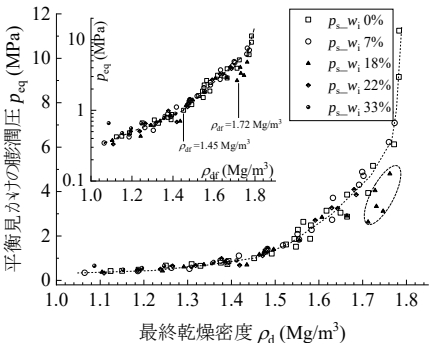


図 1 膨潤圧試験結果

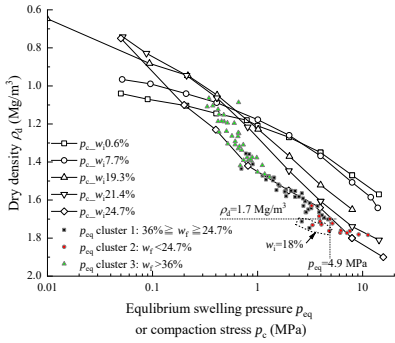


図 2 膨潤圧試験と圧密試験結果

一致する部分があるが平衡膨潤圧が高いほど曲線から離れる傾向も若干現れた。

X 線回折試験から得られた代表的な回折プロファイルおよびそれに対応する含水比を図 3 に示す。含水比 103%のプロファイルでは回折角度 1.8° にピーク（以下浸透性ピーク）が現れており、それはモンモリロナイトの 001 面の回折ピークであると知られている。このピークは、含水比の減少に連れて右側に移動し、次第に含水比 65% 付近に浸透性ピークが 2.3° 付近に移動し 4.7° 付近に 2 個目のピーク（結晶性ピーク）が同時に現れた。また含水比が 36% 以下にさらに減少すると、浸透性ピークが消失し結晶性ピークのみが残っていた。図 3 の結果からブラッグの法則の元にモンモリロナイトの底面間隔 (d_{001}) を算出し含水比との関係を図 4 に示した。同図には Wang ら(2020)が同じ試料で取得したデータも加えた。

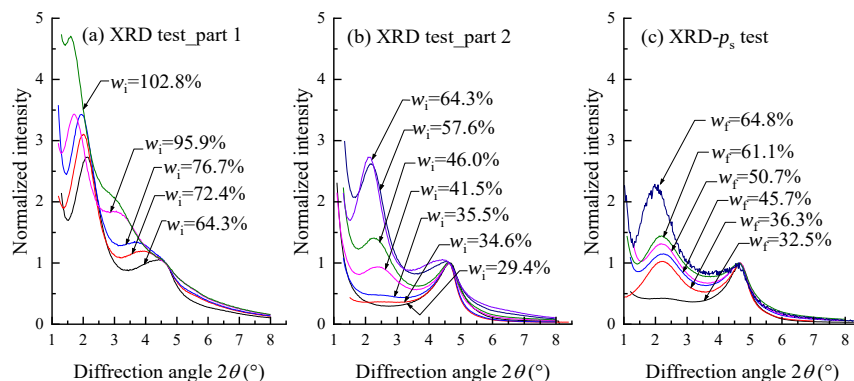


図 3 X 線回折試験による回折プロファイル (a,b) 無拘束 (c) 拘束あり

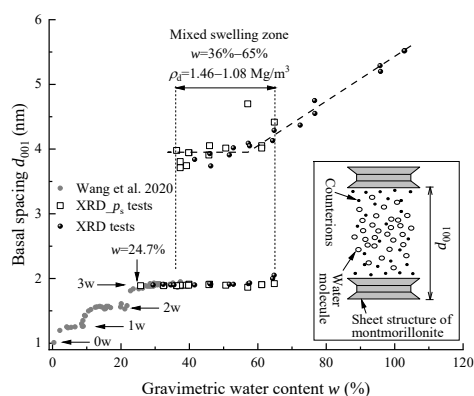


図 4 含水比と底面間隔の関係

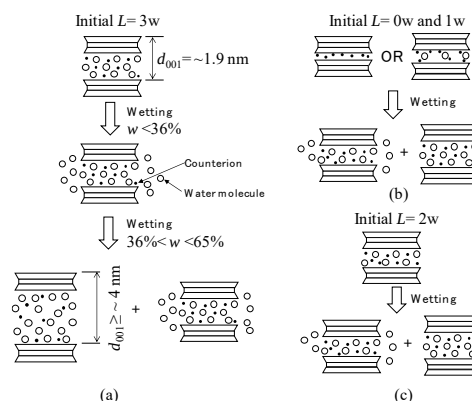


図 4 乾燥密度と p_{eq} の関係

0%～36%の含水比範囲は、含水比の増加に伴い底面間隔は段階的に上昇しモンモリロナイトの結晶性膨潤に対応することが明瞭である。各段階は層間の水分子の層数に対応する。一方、含水比が 65%以上になると含水比と底面間隔は一本の直線で近似できモンモリロナイトの浸透性膨潤に対応する。36～60%の含水比範囲では結晶性膨潤と浸透性膨潤が共存する範囲となっており。図 2 のデータ群 1 と 24.7%の圧密曲線の共通点は、データの取得時にモンモリロナイトの層間に 3 層の水分子が充填していることである。そのため、24.7%～36%含水比範囲においては、モンモリロナイトの層間水は 3 層であるため、圧密曲線と膨潤圧試験で得られた平衡膨潤圧と密度の関係と等価であることが唆される。これは、膨潤圧試験の供試体の初期含水比が 24.7%以上になったものの実験終了時の含水比が 36%以下になった場合には、モンモリロナイトの層間水は 3 層のままとされており膨潤圧が発生しないとも推察できる。本研究ではこのようなデータがないが完全に 0MPa の膨潤圧が考えにくい、図 4(a)に示すようにモンモリロナイトの浸透性膨潤が局所的に発生し見かけの計測膨潤圧に寄与し、初期含水比の低い試料の膨潤圧と比べて明らかに低い膨潤圧となると予想される。一方、含水比が 24.7%未満の図 2 のデータ群 2 の場合は、膨潤圧試験の終了時にモンモリロナイトの層間水は 2 層と 3 層の混合状態と考えられる。この場合は、図 4(b,c)に示すように初期の含水比状態も 2 層層間水 ($w_i=18\%$) のケースでは、その膨潤圧が 0 層 ($w_i=0\%$) と 1 層 ($w_i=7\%$) のケースと比べて低いことが考えられる。

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。本研究は、早稲田大学特定課題研究助成費(課題番号：2022C-473)および JSPS 科研費 22K04320 の助成による研究成果である。

参考文献：①王海龍「締固めたベントナイトの膨潤圧と圧密特性に及ぼす初期含水比の影響—その 1」第 58 回地盤工学研究発表会,2023.07 予定。②Wang, H., Ito, D., Shirakawabe, T., Ruan, K., and Komine, H. (2022) On swelling behaviors of a bentonite under different water contents. *Géotechnique*, in press, <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00312>. ③Wang, H., Ruan, K., Harasaki, S., and Komine, H. (2022) Effects of specimen thickness on apparent swelling pressure evolution of compacted bentonite. *Soils and Foundations* 62(1): 101099. ④H.Wang T.Shirakawabe H.Komine D.Ito T.Gotoh Y.Ichikawa Q.Chen. "Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 57 No. 6 p. 921-932, 2020