

地層処分におけるベントナイトオプシンの検討
不飽和土／水連成有限要素解析による膨潤圧試験シミュレーション

神戸大学 正会員 ○橋 伸也, 正会員 伊藤 真司, 非会員 太田 有祐
電力中央研究所 正会員 渡邊 保貴, 非会員 横山 信吾, 正会員 新橋 美里
原子力発電環境整備機構 正会員 山本 陽一, 正会員 後藤 考裕

1. 目的

地層処分が必要とするベントナイトの量は緩衝材として数十万トン, 埋め戻し材として百万トン以上に及ぶことが見込まれている. そのため, 地層処分に求められる安全性と性能の確保を前提として, 調達性と経済合理性を有するベントナイトを複数確保できることの見通しを得ておく必要がある. 本研究では, 産地等が異なる複数のベントナイトに対して取得した特性データから不飽和土／水連成有限要素解析¹⁾に必要なパラメータを決定し, 膨潤圧試験のシミュレーションを実施する. ここでは, 主な交換性陽イオン種が Na 型, Ca 型に分類されるベントナイトをそれぞれ 1 種抽出し, 解析結果として得られる膨潤圧試験中の供試体内の状態変化および膨潤圧の発生状況を纏める.

2. 膨潤圧試験シミュレーションの概要

Na 型ベントナイト B および Ca 型ベントナイト D について, イオン交換水を試験用水とした膨潤圧試験をシミュレーションの対象とする. いずれも供試体のベントナイト混合率は 100% (ベントナイト単体) である. ベントナイトの名称は山本ほか²⁾に準じており, その物理的・化学的性質は山本ほか²⁾を参照されたい. また,

表-1 各解析ケースの初期条件

試料	Case	乾燥密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	飽和度 (%)	サクシオン (MPa)
B	B1	1.602	20.2	80.7	33.82
	B2	1.504	24.3	83.5	15.91
	B3	1.402	29.8	87.8	6.38
	B4	1.300	34.3	86.7	3.47
	B5	1.200	39.4	85.7	1.89
D	D1	1.601	20.1	85.1	13.26
	D2	1.501	25.1	90.4	4.61
	D3	1.399	30.4	93.2	2.02
	D4	1.372	29.8	87.6	3.94
	D5	1.299	35.0	91.8	1.23

解析対象となる透水膨潤圧試験の概要は渡邊ほか³⁾を参照されたい. 解析では高さ 10 mm のベントナイト供試体を対象とし, 高さ方向に均等に 60 要素分割した有限要素モデルを用いた. 供試体の体積変化を拘束した条件下で, 供試体下面から面的に様な浸水条件を与える. 供試体の初期状態は全ての物理量を均一・一様と仮定した. 試験条件に応じて定めた各解析ケースの供試体の初期条件を表-1 に纏める. ベントナイト B と D のどちらも, 約 1.6Mg/m³ の初期乾燥密度を筆頭に密度が高い順にケース番号を振っている. 初期サクシオンは, 保水性試験の結果⁴⁾を基に水分特性曲線を同定し, これを満足するよう決定している. また, 初期全応力は全ての成分をゼロとし, 有効応力式 ($p' = p + sS_e$) から初期有効応力を決定した. 解析では, 供試体の不飽和から飽和状態への変遷を取り扱うが, 間隙空気圧は常に大気圧と等しい完全排気条件とする. すなわち, サクシオンは間隙水圧の異符号となる. 試験では供試体上面で膨潤圧が計測されている. 解析では自重を無視しており, 側壁内面との摩擦も考慮しないため, 供試体高さ方向の軸圧は常に一様であり, 内部では軸方向のみの変形と浸潤が生じる一次元問題となる. ただし, 側圧変化は陽に考慮している.

材料の構成モデルは伊藤ほか⁵⁾と同様のモデルを用いている. 透水係数モデルのパラメータは, 対象材料に対する透水試験の結果³⁾を基に決定した. 試験では供試体飽和後の飽和透水係数が得られている. したがって, 透水係数の乾燥密度依存性を把握し, これをモデルに反映したが, 飽和度依存性は同定困難なため考慮していない. 不飽和弾塑性構成モデルのパラメータは, 圧密試験, 三軸せん断試験, 膨潤圧試験の結果⁴⁾を基に試料ごとに決定した. 決定すべきパラメータおよびそれらの決定方法については伊藤ほか⁶⁾を参照されたい.

キーワード 放射性廃棄物処分, ベントナイト, 膨潤圧, 数値解析

連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL 078-803-6281

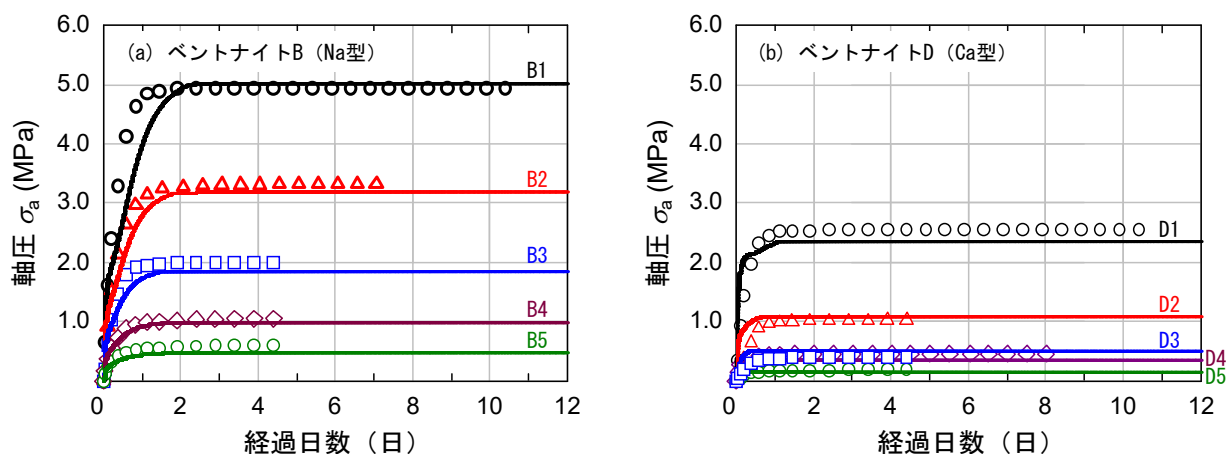


図-1 発生膨潤圧の経時変化：(a)ベントナイトB、(b)ベントナイトD

3. 解析結果と考察

図-1 に発生膨潤圧の経時変化を示す．プロットが試験結果，実線が解析結果である．ベントナイトBとDのどちらの解析でも，供試体の乾燥密度が高いほど大きい平衡膨潤圧が発生するという試験結果が示す傾向を忠実に再現できており，平衡膨潤圧の値の再現性も高い．また，同程度の乾燥密度であっても，Na型であるベントナイトBの方がCa型のベントナイトDよりも大きな膨潤圧が発生するという傾向も表現できており，膨潤圧試験の再現に適したパラメータ選定ができていることが窺える．ただし，膨潤圧の発生速度の表現には課題が残る．

解析ケースB1について，供試体高さ方向に採った7要素の側圧，間隙比，飽和度，含水比の経時変化を図-2に示す．増減のある給水開始から3日後までを示しており，増減が読み取れるよう時間は対数軸を採っている．吸水面に近い底部の要素1は，給水開始後から含水量が徐々に増すが，間隙比は暫く変化していない．0.01日を過ぎたあたりから膨潤変形が急激に生じ始め，それをカバーするために，要素1以外は含水量が増加しながらも僅かに収縮するという複雑な応答を見せている．要素1が飽和状態に至ったあたりから要素1以外も徐々に浸潤がおよび膨潤し始め，要素1には排水を伴う再圧密が生じている．平衡状態に至る頃には，再圧密の末，供試体底部の要素1が最も密になっている点は興味深い．

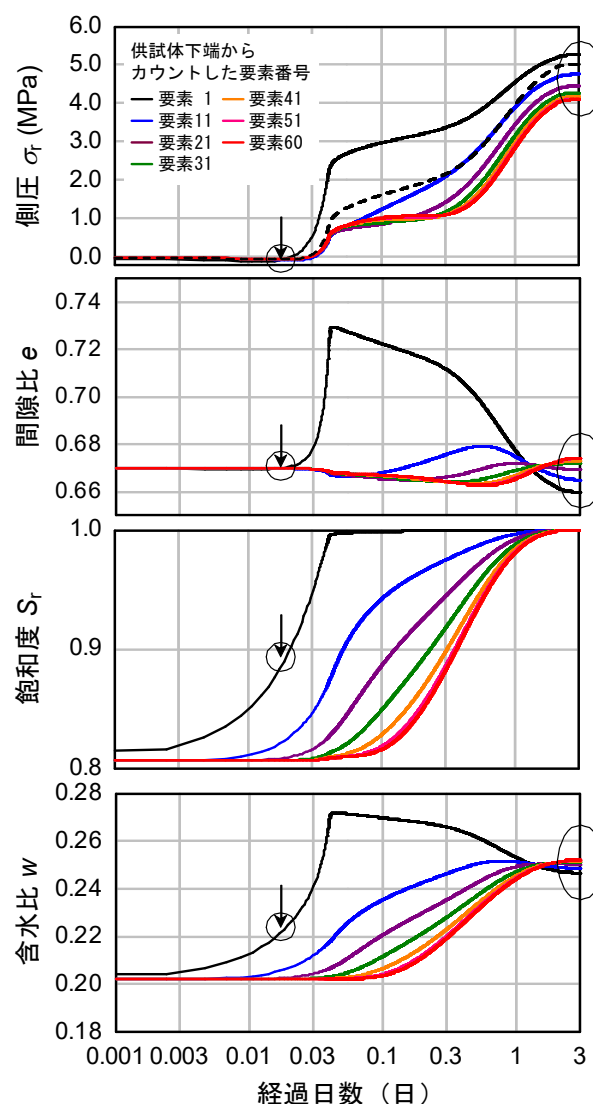


図-2 供試体内の物理量変化 (Case B1)

参考文献 1) Takeyama et al.: Int. J. Mater. Science and Eng., 2 (1), 20-25, 2015. 2) 山本陽一ほか：第74回土木学会年次学術講演会，2019. 3) 渡邊保貴ほか：第75回土木学会年次学術講演会，2020. 4) 伊藤歩夢ほか：第75回土木学会年次学術講演会，2020. 5) 伊藤真司ほか：第55回地盤工学研究発表会，2020. 6) 伊藤真司ほか：第55回地盤工学研究発表会，2020.