

壁面摩擦の影響を考慮したベントナイト膨潤圧試験シミュレーション

(株) オリエンタルコンサルタンツ 正会員 ○小山 円香
 神戸大学 学生会員 伊藤 真司
 神戸大学 正会員 橘 伸也
 神戸大学 正会員 飯塚 敦

1. 背景と目的

放射性廃棄物の地層処分における緩衝材として、粘土の一種であるベントナイトが有益な材料として考えられている。緩衝材であるベントナイトと、緩衝材が接する他材料との間には摩擦力が発生することが考えられる。この摩擦力はベントナイトの膨潤圧や乾燥密度に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、初期条件や境界条件が明確なベントナイト膨潤圧試験をとりあげ、膨潤するベントナイトとその周辺の壁面との間に発生する摩擦力の有無やその大小が、ベントナイトの膨潤圧や乾燥密度の分布等に与える影響を数値解析的に検討することを目的とする。

2. 解析手法

本研究では、膨潤圧シミュレーションに不飽和土/水連成有限要素解析コードを用いる。また、土骨格の構成式には、伊藤ら(2018)が提案した修正 Cam-clay モデルに「塑性膨潤の概念」を導入したモデル¹⁾に大野ら(2008)による「有効飽和度変化に伴う剛性変化」の概念²⁾を取り入れたものを用いる。飽和ベントナイト弾塑性構成モデルを拡張し、不飽和ベントナイトの力学挙動を表現し、不飽和化に伴う剛性変化には、降伏曲面の拡大・縮小(硬化・軟化)を制御する硬化則パラメータとして、塑性体積ひずみだけでなく、有効飽和度が採用されている。

3. 解析条件

本研究は、ベントナイト膨潤圧試験において、供試体が壁面摩擦の影響を受けているとした数値実験を行う。そこで、壁面摩擦力を供試体に作用させるため、有限要素法のソリッド要素の節点間に軸方向、およびせん断方向にばねを用いることにより、不連続な挙動を表現するジョイント要素を用いる。

(1) 摩擦係数の決定

Dueck et al. (2014)による、ベントナイト膨潤圧試験の試験装置内壁の材質の違いによる摩擦角を求める実験³⁾を基に本研究で用いる摩擦係数を決定する。実験結果より、スチールやプラスチック、アクリルプラスチック等の材料で、摩擦角はおおよそ $5 \sim 20^\circ$ の間に入っており、摩擦係数換算すると $0.09 \sim 0.36$ となる。この範囲を考慮して本研究で用いる摩擦係数 $\tan \phi$ は、摩擦のない状態である $\tan \phi = 0.0$ 、摩擦のある状態として $\tan \phi = 0.3$ とする。

(2) 解析モデル

キーワード ベントナイト, 膨潤圧試験, 壁面摩擦, 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

解析対象となる供試体は、①直径 60mm 高さ 20mm (縦横比 0.33), ②直径 30mm 高さ 20mm (縦横比 0.67) の 2 種類の円柱形であり、2 次元軸対称条件を用いて計算を行う。また、図 1 に示すように、壁面摩擦力を受ける上面、下面、右側面にはジョイント要素を設ける。

供試体内部の要素と直接的に壁面摩擦力を受ける外側の要素では、膨潤圧の大きさなど供試体の受ける影響度合いが異なるため、右側面の要素と排水境界である下面の要素が細くなるように設定する。また、水を供試体底面から給水し、下端面の水頭を初期水頭から 0m まで上昇させる。つまり、水頭境界条件は、下面のみを排水境界、その他の面はすべて非排水境界とする。変位境界条件は、試験装置側のジョイント要素は x 方向 y 方向ともに固定、左側面は x 方向固定 y 方向自由とした。図 1 に、解析モデルと境界条件について示す。

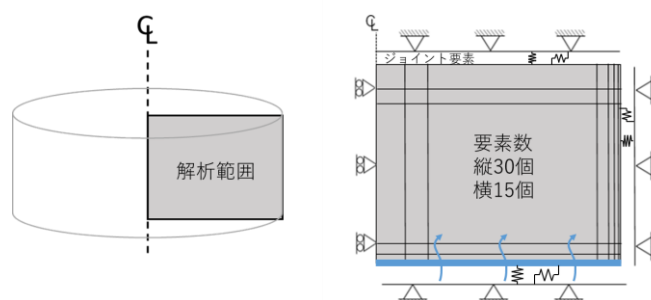


図 1 解析モデルと境界条件

4. 解析ケース

シミュレーションで想定する材料は、Na 型ベントナイトのクニゲル V1 とした。渡邊らの微小変位制御によるベントナイトの膨潤圧試験(2014)⁴⁾を参考にして、初期乾燥密度と初期含水比の組み合わせは $1.599(\text{Mg/m}^3)/9.53(\%)$ とする。①の供試体の大きさで、摩擦係数 $\tan \phi = 0.0$ を Case1, $\tan \phi = 0.3$ を Case2 とし、摩擦係数を変え、壁面摩擦力の有無が膨潤圧試験結果に与える影響を検討する。また、同様の初期乾燥密度と含水比の組み合わせで、供試体の直径を半分の 30(mm)で②の供試体の大きさとし、摩擦係数 $\tan \phi = 0.3$ を Case3 とする。ここでは、縦横比の大きさの違いが膨潤圧試験結果に与える影響を検討する。

5. 解析結果

(1) 膨潤圧の経時変化

膨潤圧の経時変化を図2に示す。壁面摩擦力が働く場合（Case2）は壁面摩擦力が働かない場合（Case1）と比べて、経過時間全体について膨潤圧が大きくなることからわかる。また、縦横比が大きい場合のCase3では、摩擦係数 $\tan \phi = 0.3$ が同じであるCase2と比べて、膨潤圧のピーク値や最終の膨潤圧の値が大きくなっていることが分かる。

(2) 最終乾燥密度と各側面での膨潤圧分布

Case1, Case2, Case3の経過時間15日の最終乾燥密度の分布と、経過時間0.05日、1日、2日、15日の摩擦の影響を受ける各側面での膨潤圧の分布を図3に示す。Case1では、供試体下部、上部共に、壁面摩擦力を受けないため、半径方向に対して一定の膨潤圧の値をとる。一方、Case2の供試体上部では、経過時間0.05日で、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られ、経過時間1日、2日、15日では、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られる。反対に、供試体下部では経過時間0.05日で、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られ、経過時間1日、2日、15日では、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られた。ここで、縦横比の大きさの違いで膨潤圧が大きくなる原因について検討する。Case2とCase3で、縦横比の大きさの違いによって、供試体上面、下面で摩擦力を受けた膨潤圧分布の反り方は変わらない。しかし、縦横比が大きくなると、供試体上面では、供試体幅の中で膨潤圧が大きくなっている割合が大きくなる。そのため、膨潤圧の経時変化で縦横比が大きいと膨潤圧が大きくなると考えられる。

また、Case2の供試体変位の経時変化とせん断応力の経時変化を図4に示す。供試体変位の経時変化から分かるように、経過時間0.05日で、供試体変位は供試体上向きである正の方向に変位している。この時、せん断応力の経時変化では、せん断応力は下向きの摩擦力が働いており、全体としても供試体壁面に下側の摩擦力が作用する。よって、供試体上部では、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られ、供試体下部では、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られる（図3参照）。経過時間1日、2日、15日も、同様に考えることができる。さらに、上側に作用する摩擦力が殆どの時間で発生しており、壁面摩擦力が働く場合に壁面摩擦力が働かない場合と比べて、膨潤圧が大きな値をとる要因であると考えられる。

6. 結論

- ・壁面摩擦力の有無が膨潤圧の大きさに違いを与える。
- ・働く摩擦力の向きが供試体内の膨潤圧分布や膨潤圧の経時変化の大きさの違いの原因となる。
- ・供試体の縦横比が大きいと膨潤圧は大きくなる。

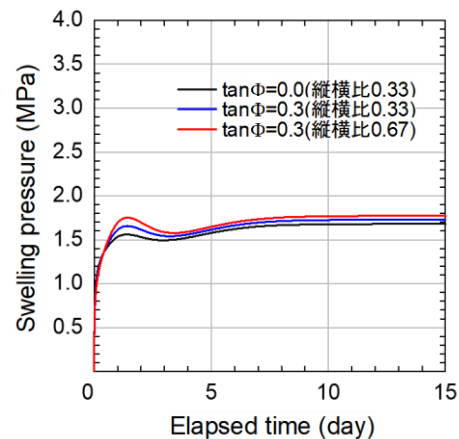


図2 膨潤圧の経時変化

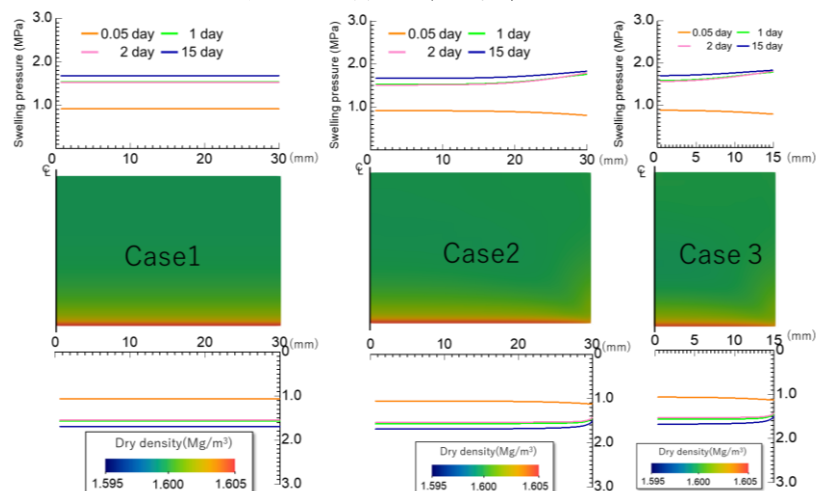


図3 最終乾燥密度と上下面の膨潤圧分布

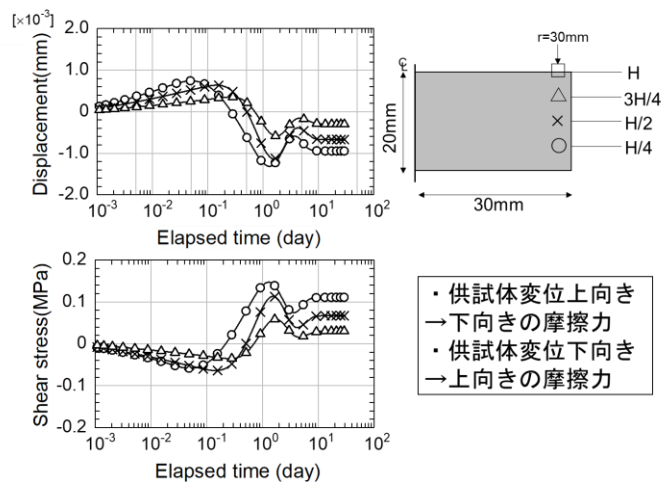


図4 変位の経時変化(上), せん断応力の経時変化(下)

参考文献

- 1) 伊藤真司・橘伸也・飯塚敦：除荷過程における地盤材料の塑性軟化特性を考慮した弾塑性構成モデルの提案，第53回地盤工学研究発表会，2018。
- 2) 大野進太郎，河井克之，橘伸也：有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル，土木学会論文集，63，No. 4，pp.1132-1141,2007。
- 3) Dueck A., Goudarzi R. and Börgesson L., Buffer homogenization, status report 2. SKB-14-25, 2014, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 4) 渡邊保貴，田中幸久：微小変位制御によるベントナイトの膨潤圧試験，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，CS9-018，pp.35-36,2014。