

## ベントナイト膨潤圧試験における壁面摩擦力の影響に関する粒状体個別要素法解析

東北大学流体科学研究所 正会員 ○清水 浩之  
 (独) 日本原子力研究開発機構 菊池 広人  
 同上 正会員 棚井 憲治  
 同上 正会員 藤田 朝雄

### 1. はじめに

ベントナイト系材料の膨潤圧は長期的な人工バリアの力学的な状態を評価する上で重要な物性値である。しかし、室内試験においては不明瞭な点が残されており、得られた結果にばらつきがあるのが現状である<sup>1)</sup>。例えば、ベントナイト供試体と試験装置間に作用する摩擦力は膨潤圧試験結果に影響を及ぼす可能性があるが、試験中の供試体内部の変位や壁面摩擦係数を直接計測することは困難であり、その影響度は十分に検討されているとはいえない。そこで、本研究では土質材料中における破壊や大変形を良好に再現することが可能である粒状体個別要素法 (Distinct element method、DEM)<sup>2)</sup>により膨潤圧試験のシミュレーションを行い、壁面摩擦力が膨潤圧試験結果に与える影響およびそのメカニズムについて検討を行った。

### 2. 膨潤圧試験のシミュレーションの概要

膨潤圧試験のシミュレーションには、流体流動を考慮できるように拡張を行った粒状体個別要素法を用いた。図-1に示すように、ベントナイト供試体の膨潤圧試験を表現したモデルは四方を固定された壁面で囲まれた粒子の集合体で表現される。モデルの粒子数は9443個であり、粒子半径は設定した最大粒子半径1mm、最小粒子半径0.5mmの間で乱数により偏りなく一様にばらつくように与えた。流体の注入はモデル下端より行い、モデル内の飽和率の増加に比例して粒子半径を増加させ、同時に破壊強度や弾性係数などの力学特性を低下させた。この操作により、ベントナイトの膨潤特性および飽和率の変化に伴う力学特性の変化を表現することができる。供試体モデルの初期飽和率は45%とした。モデルの力学特性を決定する入力パラメータについては、ベントナイト供試体に対する非圧密非排水三軸試験結果<sup>3)</sup>を対象としたDEMシミュレーションを繰り返すことで調整した。膨潤圧はモデル上端の壁面に接する粒子から壁面に作用する反発力の総和をモデルの幅で除すことにより算出する。壁面と粒子の間の摩擦に関しては、壁面摩擦係数 ( $\tan\phi_w$ ) を平井ら<sup>4)</sup>の推定値0.238より少し大きい  $\tan\phi_w=0.3$  とした場合と摩擦の影響を考えない  $\tan\phi_w=0$  とした場合のシミュレーション結果を比較することにより、その影響を考察する。

### 3. シミュレーション結果および壁面摩擦影響に関する考察

膨潤圧試験のシミュレーションにより得られた膨潤圧およびモデル内の平均飽和率の経時変化を図-2に示す。壁面摩擦係数の違いによる流体浸潤挙動の変化は見られなかった。しかし、壁面摩擦係数を  $\tan\phi_w=0.3$  とした場合の膨潤圧が壁面摩擦力を考慮しない場合 ( $\tan\phi_w=0$ ) に比べ、大きくなるのが分かる。この結果については供試体モデル側方壁面での摩擦影響により以下のように説明することができる。

図-3(a)は、それぞれの壁面摩擦係数の場合について、モデル内の平均飽和率が初期値である45%から60%になるまでの期間の粒子の変位分布と、モデル側方壁面に作用している応力の分布を示している。膨潤圧試験初期には流体浸潤面近傍のみが膨潤を始めるため、図-3(a)に示すように供試体上部の側方壁面に作用する応力が小さい。そのため、大きな摩擦力が作用せず、いずれの壁面摩擦係数の場合でも供試体は流体浸潤面から上方へと変位する。一方、図-3(b)は、平均飽和率が60%から70%に達するまでの期間の変位分布と壁面応力分布を示している。流体の浸潤が進行して供試体モデル下部の領域がほぼ完全に飽和した状態になると、不飽和状態にあるモデル上部と比べてモデル下部の強度や弾性係数といった力学特性が低下している。さらに、すでに飽和状態にあるモデル下部よりも飽和率の増加を続けるモデル中・上部のほうが粒子の膨潤量も大きい。し

たがって、これらの領域での粒子の膨潤に押し返されるため、図-3(b)に示すように壁面摩擦力が作用しない  $\tan\phi_w=0$  の場合にはモデル下部の粒子が下降を始める。しかし、この時点ではモデル全体が膨潤しており、側方壁面全体に応力が作用している。そのため、 $\tan\phi_w=0.3$  とした場合にはモデルと側方壁面の間に大きな摩擦力が作用し、粒子の流体浸潤面側への変位及び上部膨潤による押し返しが抑制されるため、モデル上端で発生する膨潤圧が大きくなると考えられる。

5. おわりに

本研究ではベントナイトの膨潤特性を考慮したDEMモデルを開発し、ベントナイト供試体と壁面の間に作用する摩擦力に着目した膨潤圧試験のシミュレーションを行った。その結果、壁面摩擦力が膨潤圧試験結果に及ぼす影響およびそのメカニズムについて新たな知見を得る事ができた。今後、ベントナイト系材料の標準的試験法の構築に資するためにはこのような摩擦影響について実験による検証を行う必要がある。特に、供試体と試験装置の間の摩擦係数、膨潤圧試験における供試体内部の変位分布、飽和率の増加に伴う供試体の膨潤量と力学特性の変化について定量的に把握することが重要であると考えられる。なお本研究は、経済産業省資源エネルギー庁の「平成23年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム化学影響評価高度化開発）」の一部として実施したものである。

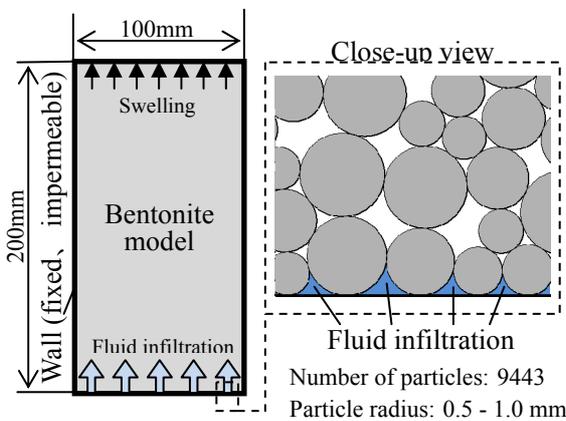


図-1 膨潤圧試験シミュレーションの概要

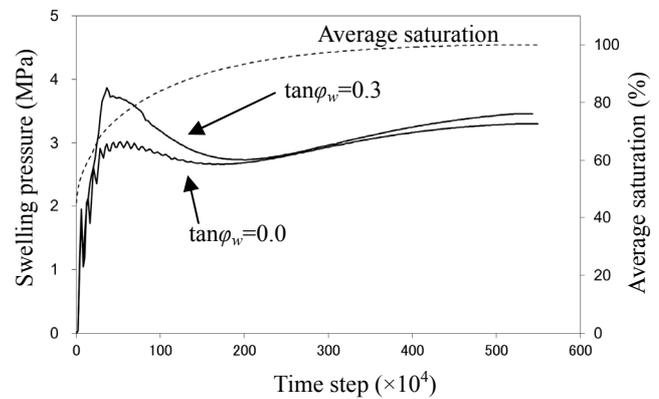


図-2 膨潤圧および平均飽和率の経時変化

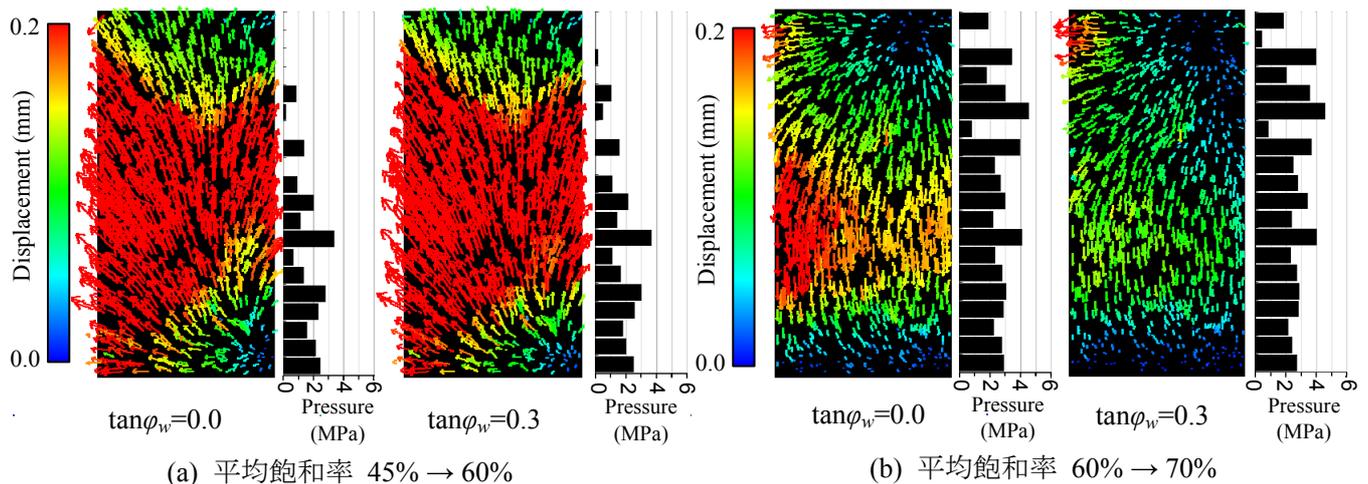


図-3 各期間における粒子の変位分布および壁面応力分布

参考文献

- 1) 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦: ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討, JAEA-Research 2010-025 (2010).
- 2) H. Shimizu: Distinct element modeling for fundamental rock fracturing and application to hydraulic fracturing, PhD thesis, Kyoto University, (2010).
- 3) 藤田朝雄, 五月女敦, 原啓二: 緩衝材の力学試験、動燃技術資料、PNC TN8410 92-170 (1992).
- 4) 平井卓, 重野善政, 高治一彦, 飯塚敦: 膨張性土質材料の過圧密時の摩擦を考慮した弾塑性構成則の改良, 建設工学研究所論文報告集, 49, pp.67-76 (2007).