

# 排気・排水三軸圧縮試験の 間隙比依存性水分特性を考慮した空気～水～土連成シミュレーション

空気～水～土連成解析 水分特性曲線 不飽和三軸試験 名古屋大学 国際会員 ○野田利弘 吉川高広 中井健太郎  
非会員 高根澤巧也 中澤一眞

## 1. はじめに

著者らは、サクシオン効果を導入した<sup>1),2)</sup>弾塑性構成式 SYS Cam-clay model<sup>3)</sup>を搭載した空気～水～土骨格連成有限変形解析コード<sup>4)</sup>により、小高ら<sup>5)</sup>の不飽和シルト三軸試験における、サクシオン作用・等方圧密と、その後の側圧一定下での排気排水せん断までの一連の過程をシミュレートした<sup>6)</sup>。その結果、三軸試験のような室内試験といえども初期条件・境界条件が明確に整備された初期値・境界値問題として捉える立場から、サクシオン制御用のセラミックディスクにおける低透水性に注目して実験結果を精緻に再現できたものの、純粋な土要素の力学挙動を解析できたのかという点に疑問が残った。

本研究では、特に低サクシオン下の実験時にセラミックディスクの低透水性の影響で苦慮しないために、微細多孔質膜<sup>7)</sup>を用いて、小高ら<sup>5)</sup>を参照した不飽和シルト三軸試験を新たに実施するとともに、その空気～水～土連成有限変形シミュレーションを行った。その結果、間隙比依存性考慮の水分特性モデルを新たに導入することで、サクシオン作用・等方圧密と、その後の排気排水せん断までの一連の実験結果をよく再現できることがわかった。

## 2. 解析手法の概要

計算は空気～水～土骨格連成有限変形解析コード<sup>4)</sup>を用いて実施した。土骨格の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model<sup>3)</sup>には、京川ら<sup>1)</sup>および Zhang and Ikariya<sup>2)</sup>に倣って、限界状態線  $e-\ln p'$  の切片が不飽和化に伴い上昇する手法を導入した。水分特性には、Gallipoli et al.<sup>8)</sup>の間隙比依存性モデルを用いた。これは、次式に示すように、van Genuchten 式<sup>9)</sup>の材料パラメータ  $\alpha$  を間隙比の関数にするモデルである。

$$S_e = \left\{ 1 + (\alpha e^{\psi} p^s)^n \right\}^{-m'}, \quad m' = 1 - 1/n', \quad s^w = s_{\min}^w + S_e (s_{\max}^w - s_{\min}^w) \quad (1)$$

ここに、 $S_e$  は有効飽和度、 $e$  は間隙比、 $p^s$  はサクシオン、 $\alpha$ 、 $\psi$ 、 $n'$ 、 $m'$  は水分特性に関する材料パラメータ、 $s^w$  は飽和度、 $s_{\max}^w$  は最大飽和度、 $s_{\min}^w$  は最小飽和度である。Gallipoli et al.<sup>8)</sup>のモデル導入により、van Genuchten モデル<sup>9)</sup>から新たに増えるパラメータは、 $\psi$  のみである。図 1 は Gallipoli et al.<sup>8)</sup>のモデルによる水分特性曲線の一例である。4 章で示すサクシオン 30kPa の排気排水せん断の計算結果において、せん断直前の間隙比  $e=1.07$  のときと、せん断終了時の間隙比  $e=0.94$  のときの水分特性曲線を描いた。このように、同一サクシオンであっても、間隙比が小さい方が飽和度が高いという性質を表現できるモデルである。

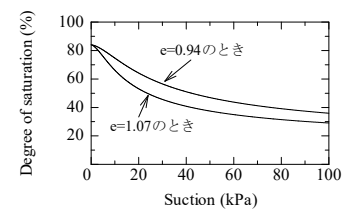


図 1 水分特性曲線の一例

## 3. 実験の概要と計算条件

実験概要は次の通りである。(i)含水比 20%になるように調整した非塑性シルト (DL クレー) を用いて、間隙比 1.14、飽和度 46~47%の不飽和供試体を作製する (初期サクシオンは約 20kPa)。(ii)供試体を三軸試験機に設置し、非排水条件下でセル圧を 20kPa まで上昇させた後、セル圧と空気圧を同時に 250kPa 上昇させる。(iii)所定のサクシオン (0, 10, 30kPa の 3 ケース) となるように水圧のみを変化させ、その後セル圧を 450kPa まで上昇させて圧密する。(iv)以上の過程を経た供試体を、側圧一定・排気排水せん断する。実験装置の概要は、別報<sup>10)</sup>を参照されたい。図 2 はシミュレーションに用いた有限要素メッシュ図と境界条件を示す。簡単のため、円筒供試体の軸対称性を仮定した。上下端は剛・摩擦のペダスタルの条件を表現するために束縛条件を課し、隅角部に変形の自由度を上げるための処理を施した。せん断時は上端から軸変位速度一定でせん断し、実験と同様に軸ひずみ速度を 0.05%/min に設定した。材料定数および初期値は、基本的には Yoshikawa et al.<sup>11)</sup>と同じ値を用い、限界状態における間隙比の実験結果から、水分特性モデルの最大飽和度  $s_{\max}^w$  以上の切片  $\Gamma=1.92$ 、水分特性曲線の最小飽和度  $s_{\min}^w$  以下の切片  $\Gamma_r=2.16$  を設定した。水分特性モデルのパラメータは、 $s_{\max}^w=0.84$ 、 $s_{\min}^w=0.12$ 、 $\alpha=0.08$  (kPa<sup>-1</sup>)、 $\psi=4.5$ 、 $n'=1.6$  とした。透水係数と透気係数のモデルは Mualem モデル<sup>12)</sup>を用い、飽和透水係数  $k_s^w=4 \times 10^{-6}$  (m/s) とした。なお、次章の計算結果は供試体を 1 要素として見た場合の見かけの挙動を示す。

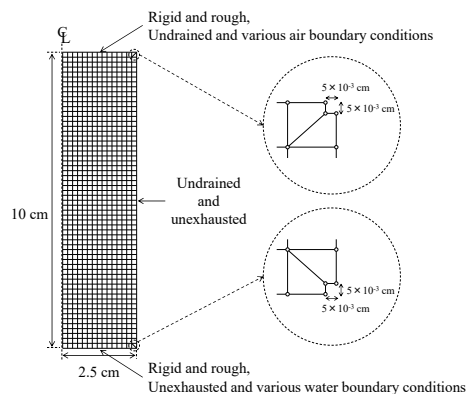


図 2 有限要素メッシュ図と境界条件

上下端は剛・摩擦のペダスタルの条件を表現するために束縛条件を課し、隅角部に変形の自由度を上げるための処理を施した。せん断時は上端から軸変位速度一定でせん断し、実験と同様に軸ひずみ速度を 0.05%/min に設定した。材料定数および初期値は、基本的には Yoshikawa et al.<sup>11)</sup>と同じ値を用い、限界状態における間隙比の実験結果から、水分特性モデルの最大飽和度  $s_{\max}^w$  以上の切片  $\Gamma=1.92$ 、水分特性曲線の最小飽和度  $s_{\min}^w$  以下の切片  $\Gamma_r=2.16$  を設定した。水分特性モデルのパラメータは、 $s_{\max}^w=0.84$ 、 $s_{\min}^w=0.12$ 、 $\alpha=0.08$  (kPa<sup>-1</sup>)、 $\psi=4.5$ 、 $n'=1.6$  とした。透水係数と透気係数のモデルは Mualem モデル<sup>12)</sup>を用い、飽和透水係数  $k_s^w=4 \times 10^{-6}$  (m/s) とした。なお、次章の計算結果は供試体を 1 要素として見た場合の見かけの挙動を示す。

## 4. 実験結果と計算結果の比較

サクシオン作用・圧密過程に関して、図 3 は実験結果を示す。図 4 は間隙比依存性有りの水分特性モデル (以後「e 有 SWCC」と略す) を用いた場合、図 5 は間隙比依存性無しの水分特性モデル (以後「e 無 SWCC」と略す) を用いた

場合の計算結果を示す。図中の白抜き点は、セル圧を 450kPa まで上昇させる直前の点を示す。ここでは、間隙比依存性有無の違いが顕著に表れたサクシオン 10kPa の結果に注目して説明する。図 3~図 5 より、e 有 SWCC を導入することで、特に(a)吸排水量と(c)飽和度の経時変化の再現に改善が見られる。白抜き点で示すセル圧上昇時以降の挙動に注目すると、e 無 SWCC の場合は、セル圧上昇によって体積圧縮し、このとき飽和度を一定に保つために排水する。一方で、e 有 SWCC の場合は、セル圧上昇により体積圧縮（間隙比減少）すれば、サクシオン一定であっても飽和度が上昇できるため、必ずしも排水するとは限らない。事実セル圧上昇後には若干吸水し、実験結果と似た挙動を示している。

排気排水せん断過程に関して、図 6 は実験結果を示す。図 7 は e 有 SWCC を用いた場合、図 8 は e 無 SWCC を用いた場合の計算結果を示す。ここでは、(b)体積ひずみ・排水量~軸ひずみ関係と(c)飽和度~軸ひずみ関係に注目する。サクシオン 0kPa の場合、実験結果においても間隙比依存性の有無にかかわらず飽和度変化はほとんど生じず、計算結果においても飽和度変化は生じていない。これは、図 1 に示した水分特性曲線の一例を見てもわかるように、サクシオン 0kPa の場合は、間隙比に依存しないモデルだからである。一方で、サクシオン 10、30kPa の場合は、体積圧縮しながら吸水するという飽和土では全く考えられない挙動を示すが、e 有 SWCC を用いれば、サクシオン一定であっても飽和度が上昇できるため、特にサクシオン 30kPa の場合にはこの挙動が表現できている。また、体積ひずみに注目すると、e 有 SWCC を用いた場合は、サクシオン 0kPa に比べて、サクシオン 10、30kPa で体積圧縮量が大きい挙動を表現できている。これは、e 有 SWCC を導入し、せん断中の飽和度変化をよく再現できるようになったことで、限界状態線  $e\text{-ln}p'$  の切片が飽和度変化に応じて変化する手法を導入した弾塑性構成式が機能したためである。

## 5. おわりに

不飽和土特有の吸水コラプスは、サクシオン低下時の吸水圧縮挙動である。本研究では、実験によりサクシオン一定のせん断時においても吸水圧縮挙動が現れることを見出し、またこの挙動は間隙比依存性考慮の水分特性モデルを導入した連成解析により表現できることを示した。

謝辞：JSPS 科研費 25249064 の助成を受けた。名城大学の小高猛司教授には、実験結果に関するご助言をいただいた。足利工業大学の西村友良教授には、実験装置に関するご助言をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献：1) 京川ら：サクシオン・飽和度・密度を…，応用力学論文集，12，331-342，2009。2) Zhang and Ikariya: A new model …，S&F, 51(1), 67-81, 2011。3) Asaoka et al.: An elasto-plastic description …，S&F, 42(5), 47-57, 2002。4) Noda. and Yoshikawa: Soil-water-air coupled …，S&F, 55(1), 45-62, 2015。5) 小高ら：排気・排水条件を…，第 18 回中部地盤工学シンポジウム，6，2006。6) 吉川ら：セラミックディスクの…，第 51 回地盤工学研究発表会，705-706, 2016。7) Nishimura et al.: Microporous membrane technology …，Geotechnical Testing Journal, the American Society for Testing and Materials, 35(1), 201-208, 2012。8) Gallipoli et al.: Modelling the variation …，Geotechnique, 53(1), 105-112。9) van Genuchten: A closed-form …，Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898, 1980。10) 吉川ら：不飽和シルトの排気・排水三軸試験結果に…，第 52 回地盤工学研究発表会，2017 (本誌)。11) Yoshikawa et al.: Effects of air …，S&F, 55(6), 1372-1387, 2015。12) Mualem: A new model…，Water Resources Research, 12, 513-522, 1976。

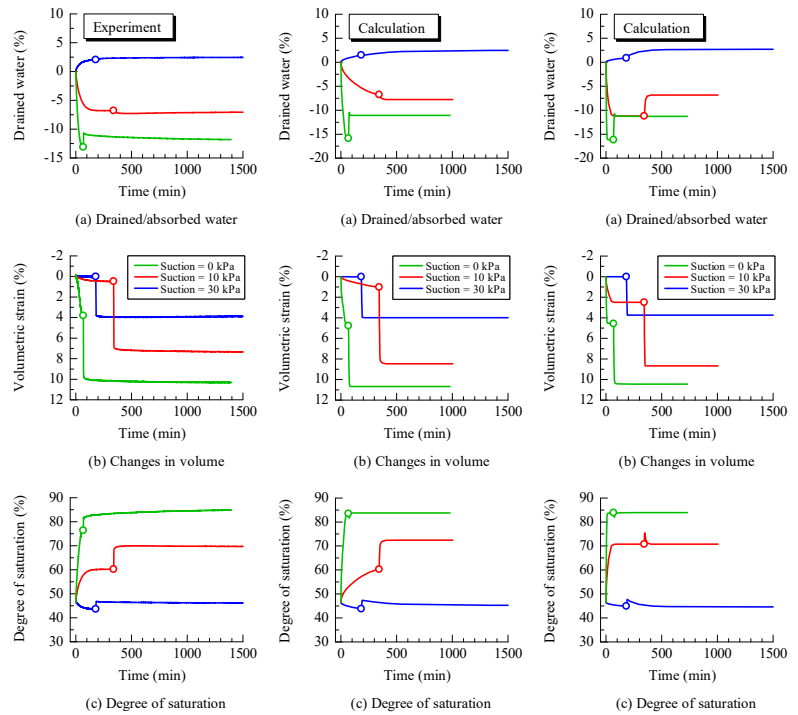


図 3 サクシオン作用・圧密過程の実験結果

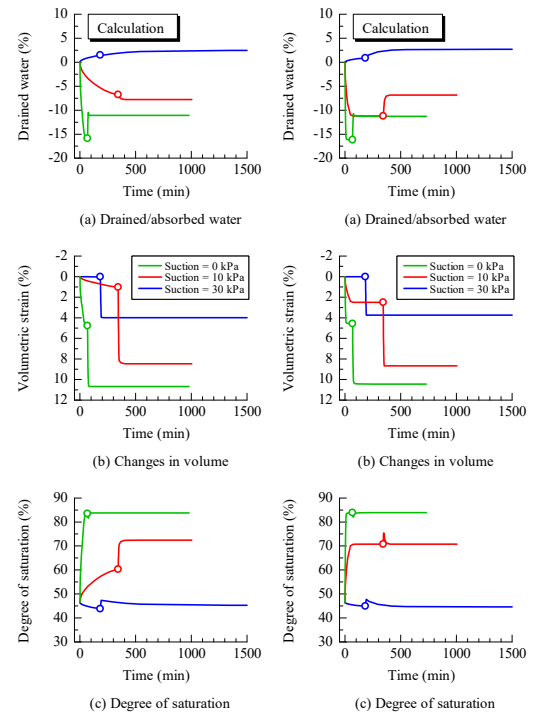


図 4 サクシオン作用・圧密過程の計算結果 (e 有 SWCC)

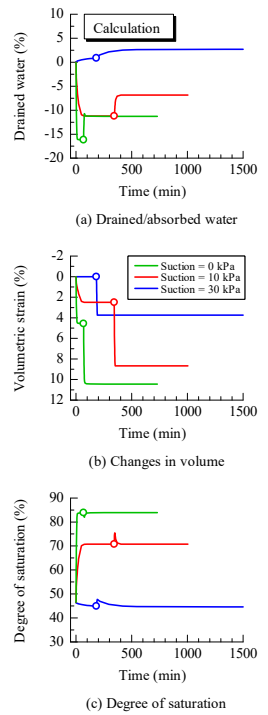


図 5 サクシオン作用・圧密過程の計算結果 (e 無 SWCC)

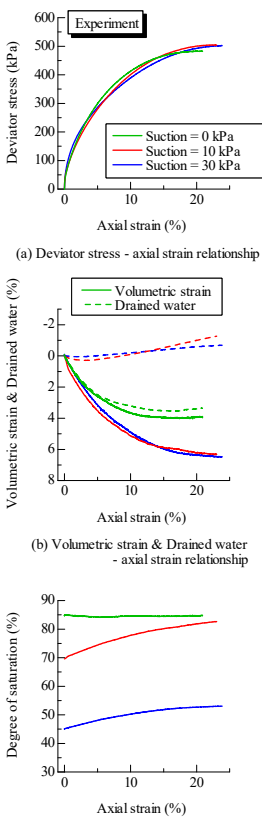


図 6 せん断過程の実験結果

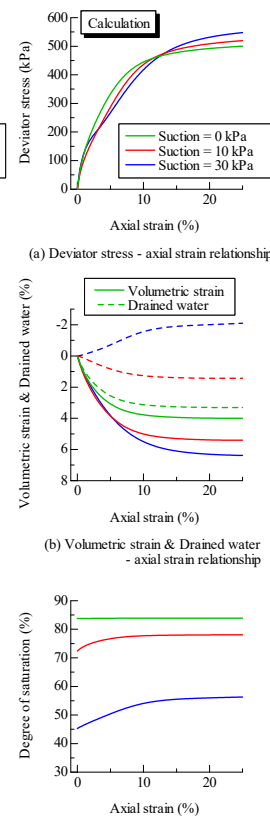


図 7 せん断過程の計算結果 (e 有 SWCC の場合)

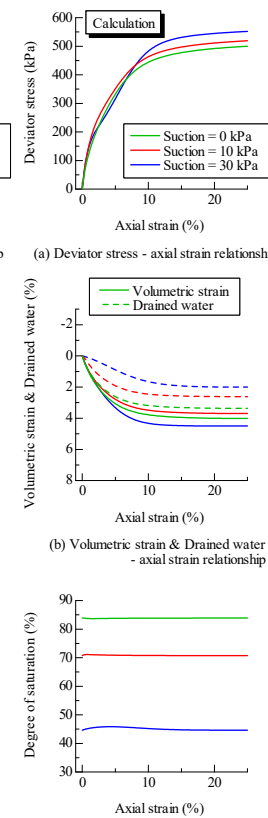


図 8 せん断過程の計算結果 (e 無 SWCC の場合)