

セラミックディスクの透水性が不飽和土三軸試験結果に及ぼす影響の数値解析的考察

空気～水～土骨格連成解析 不飽和土三軸試験 セラミックディスク 名古屋大学 国際会員 ○吉川高広, 野田利弘
名城大学 国際会員 小高猛司

1. はじめに

著者らは、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、これまでに側圧一定の不飽和シルト三軸試験¹⁾の数値シミュレーションを行ってきた²⁾。この結果、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model³⁾を搭載した空気～水～土骨格連成有限変形解析コード⁴⁾を用いれば、一組の材料定数と初期値により、サクシオン付与・等方圧密過程およびその後の様々な排水・排気条件下における側圧一定の不飽和シルト三軸圧縮試験結果を概ね再現できることを示した。その一方で、吸水コラプス挙動のように、土骨格の構成式にサクシオンの効果を導入しなければ表現できない挙動についても、初期値・境界値問題の観点から考察を加えてきた。

本稿では、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model に、Zhang and Ikariya⁵⁾による比較的簡単な手法を用いてサクシオンの効果を導入し、再度不飽和シルト三軸試験¹⁾の数値シミュレーションを行った。その結果、サクシオン効果を土骨格の構成式に考慮するだけでなく、三軸供試体下部のペダスタルにおいて間隙水制御を行うセラミックディスクの透水性を初期値・境界値問題の中で考慮することにより、小高ら¹⁾のサクシオン付与・等方圧密過程において観測された吸水コラプス時の遅れ挙動の時間関係をよく再現できることを示す。さらに、等方圧密後の排水排気せん断試験においてもセラミックディスクの透水性が影響を及ぼすことを示唆する解析結果も示す。

2. 土骨格の構成モデルの概要

Zhang and Ikariya⁵⁾の、限界状態線 $v\text{-ln}p'$ の切片が不飽和化に伴い上昇するという実験事実に基づく手法に倣って、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model³⁾にサクシオンの効果を導入した。具体的には、水分特性曲線の最大飽和度 s_{\max}^w 以上の切片を Γ 、水分特性曲線の最小飽和度 s_{\min}^w 以下の切片を Γ_r とおき、2 点間の切片を飽和度 s^w の関数 $\Gamma(s^w)$ として線形補完する。また、正規圧密線 $v\text{-ln}p'$ の切片についても、 s_{\max}^w 以上の切片を N 、 s_{\min}^w 以下の切片を N_r とおき、飽和度 s^w の関数 $N(s^w)$ として補完する。このとき、 $N(s^w) - \Gamma(s^w)$ は一定と仮定する⁵⁾。その結果、 $\Gamma(s^w)$ と $N(s^w)$ は式(1)で表される。

$$\Gamma(s^w) = \Gamma + \frac{s_{\max}^w - s^w}{s_{\max}^w - s_{\min}^w} (\Gamma_r - \Gamma), \quad N(s^w) = N + \frac{s_{\max}^w - s^w}{s_{\max}^w - s_{\min}^w} (N_r - N) \quad (1)$$

これを用いて、Asaoka et al.³⁾と同様に、弾塑性諸法則を適用して定式化した。この結果、飽和度 s^w の増減も土骨格の負荷状態に影響を与える。本手法は、増える材料パラメータが Γ_r の 1 つだけで少ないため、本研究で用いることにした。

3. 参照実験¹⁾と解析条件

参照実験の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 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)所定のサクシオンとなるように水圧のみを変化させ、その 15 分後にセル圧を 450kPa まで上昇させて、約 1 日間圧密させる。(iv)以上の過程を経た供試体を、様々な排水・排気条件下でせん断する。本稿では、排水排気せん断試験結果を示す。なお、試験装置には、供試体下部にセラミックディスク (AEV 200kPa) 付きのペダスタルを用いて

いる。図 1 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。次章の解析では、セラミックディスク(以後、単にディスクと呼ぶ)の透水性を考慮しない場合と考慮する場合(本稿では、ディスクの透水係数を 6.0×10^{-10} m/s に設定した)の結果を示す。考慮する場合は、図 1 に示すように、解析断面底部に二相系弾性体でモデル化した有限要素を追加し、簡単のためディスクは変形しない条件を与えた。材料定数および初期値は、基本的には Yoshikawa et al.²⁾と同じ値を用い、限界状態における比体積の実験結果から、 $\Gamma=1.97$ と $\Gamma_r=2.10$ を決定した。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。

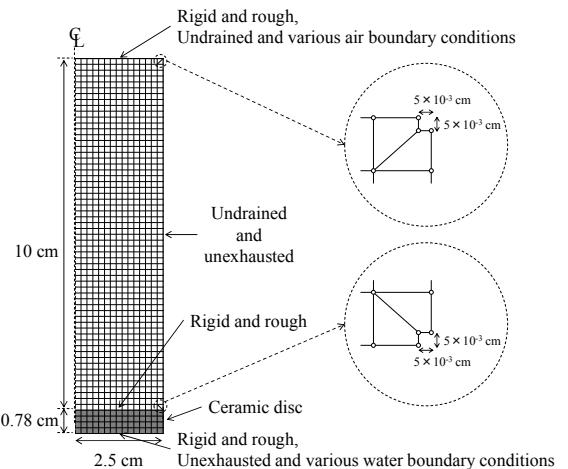


図 1 有限要素メッシュ図と境界条件

4. 解析結果

図 2 はサクシオン付与・等方圧密過程における実験結果¹⁾と計算結果の比較を示す。まず(i)実験結果と(ii)ディスクの透水性を考慮しない場合の計算結果を比較する。サクシオン付与直前のサクシオン値は約 20kPa であるため、サクシオン 30, 50, 100kPa の場合は排水し、0, 10kPa の場合は吸水する。吸水時の体積圧縮量が大きく、コラプス挙動を表現できているが、実験で観測された吸水量と体積ひずみが収束しにくい挙動までは表現できていない。解析ではサクシオンが小さい(飽和度が高い)ほど透水係数が大きくなる。このため、サクシオンが小さいほど収束が早い結果となり、この傾向は土骨格の構成式へのサクシオン効果の考慮の有無にかかわらず同じである²⁾。次に、(iii)ディスクの透水性(透水係数 = 6.0×10^{-10} m/s)を考慮した場合の結果を見ると、

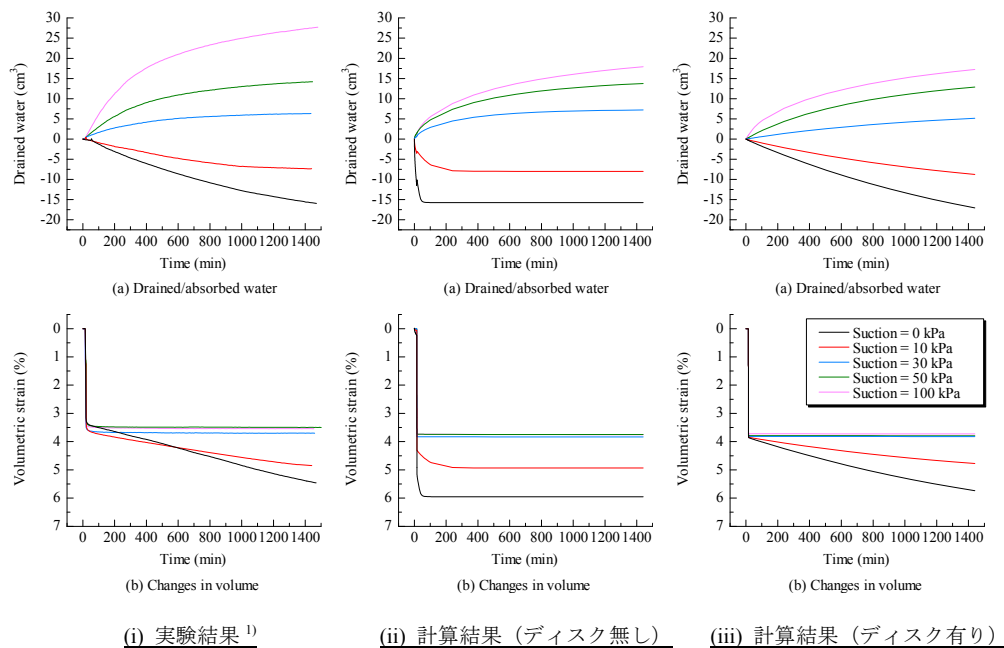


図 2 サクシオン付与・等方圧密過程における実験結果¹⁾と計算結果

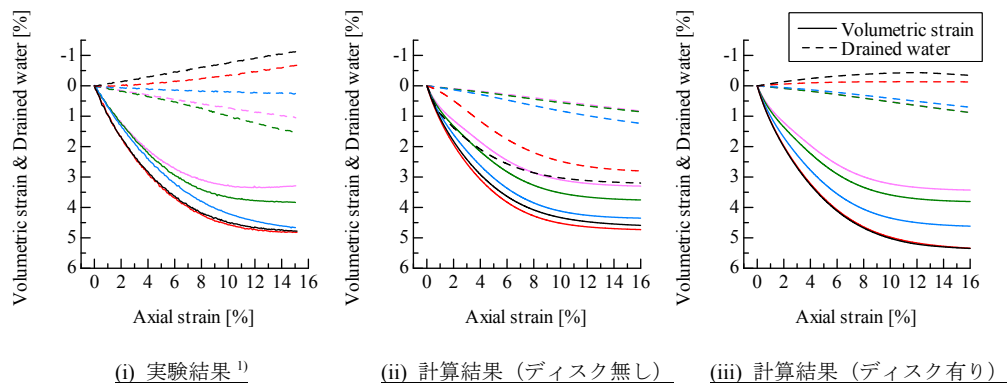


図 3 排水排気せん断試験における体積ひずみ・吸排水量～軸ひずみ関係の実験結果¹⁾と計算結果

吸水挙動の収束が遅くなる現象も含めて、計算は実験をよく再現できている。これは、ディスクの透水係数が小さく、吸(排)水量が少なくなるためである。吸排水量に関して、(iii)ディスク有りの場合を(ii)ディスク無しの場合と比較すると、サクシオンが大きく、飽和度が低いほど、ディスクの透水性を考慮した影響は小さい。これは飽和度が低く、供試体の透水係数が小さくなるにつれて、相対的にディスクの低透水性の影響を受けにくくなるためである。

図 3 はサクシオン付与・等方圧密過程を経た後に実施した排水排気せん断試験の体積ひずみ・吸排水量～軸ひずみ関係の実験結果と計算結果の比較を示す。特に吸排水量に注目すると、(iii)のディスクの透水性を考慮した場合は、(ii)では表現できていないサクシオン 0, 10kPa の場合に吸水する挙動を表現できている。

5. おわりに

土骨格の構成式にサクシオンの効果を導入することに加えて、セラミックディスクの低い透水性を仮定すると、吸水コラプスの遅れ挙動およびその後の排水排気せん断時の吸水挙動をよく表現できることを示した。なお、セラミックディスクの透水性が、今回用いた土材料の力学挙動には影響を与えない程度に大きいこと(透水係数 = 約 3.0×10^{-7} m/s)を力学試験に先立ち確認しているため、今後更なる検証が必要なものの、この解析事実は、特に不飽和土の場合、三軸試験といえども初期値・境界値問題として捉えていなければ、今回示した吸水コラプス時の時間遅れ挙動までをモデル化する危険性、換言すれば、構成式研究においては室内試験を初期値・境界値問題として捉える必要性を示唆している。謝辞: JSPS 科研費 25249064 の助成を受けた。感謝の意を表す。

参考文献: 1) 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. 2) Yoshikawa et al.: Effects of air ..., S&F, 55(6), 1372-1387, 2015. 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) Zhang and Ikariya: A new model..., S&F, 51(1), 67-81, 2011.