

慣性力考慮の三相系弾塑性有限変形解析による 不飽和シルト三軸供試体の二つの吸水破壊メカニズムの解明

三相系動的有限変形解析 吸水破壊 不飽和三軸試験

名古屋大学 国際会員 ○野田 利弘 吉川 高広
学生会員 服部 敦貴

1. はじめに

近年、降雨による斜面や盛土の崩壊が多発している。その崩壊要因には、不飽和土の飽和化や間隙圧上昇による強度低下、吸水による自重の増加等が挙げられているが、崩壊メカニズムの完全な解明までには至っていない。一般に降雨時の斜面・盛土の崩壊予測には、浸透解析と安定解析を組み合わせた手法が用いられる。しかし、地盤・土構造物の崩壊メカニズム解明には、浸透解析で得られる応力状態を用いて安全率が 1.0 を超えるか否かで破壊の有無を与える安定解析は全く不十分で、降雨浸透に伴う土の変形から破壊に至る一連の過程を扱う力学体系が必要である。また、破壊現象は加速度運動を伴うため、たとえ外力が降雨であっても、慣性力を考慮する必要性は言うまでもない。さらに、変形から破壊に至る大変形挙動を数値シミュレートするには、土の変形とともに現れる幾何的非線形性を考慮する有限変形論に基づく解析手法が不可欠である。

以上の認識のもと、本研究では別報¹⁾で示した不飽和シルト三軸供試体が吸水によって変形から破壊に至る二種類の実験を、慣性力考慮の空気～水～土連成有限変形解析コード²⁾により数値シミュレーションを行った。この結果、本シミュレーションにより実験で観察された二種類の吸水破壊挙動がよく再現されたことから、不飽和供試体の吸水破壊には二つの軟化挙動が大きく寄与していることを明らかにした。

2. 計算条件

別報¹⁾の(A)サクシオン低下による吸水破壊試験と(B)間隙圧上昇による吸水破壊試験の数値シミュレーションを実施した。紙幅の都合上、実験の詳細は別報¹⁾に譲るとともに、本稿では実験(B)の間隙圧上昇による吸水破壊試験の数値シミュレーション結果のみを示す。

本研究で用いる慣性力を考慮する空気～水～土連成有限変形解析コード²⁾に搭載した土骨格の構成モデルは、SYS Cam-clay model³⁾に不飽和の効果を考慮した弾塑性モデルである。京川ら⁴⁾および Zhang and Ikariya⁵⁾に倣って、 $v - \ln p$ 関係における正規圧密線 NCL および限界状態線 CSL の切片が不飽和化に伴い上昇する手法を導入した。応力式としては骨格応力⁶⁾の式を用いた。

土骨格の構成モデルおよび水分特性モデル⁷⁾の材料定数は Yoshikawa et al.⁸⁾の DL クレイの値を参考に決定した。図 1 は解析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、重力の影響は無視した。上端は剛・摩擦のキャップの条件を表現するために節点間に束縛条件（長さ不変、角度不変）を課した。下端は、図 1 中に示すように、微細多孔質膜を厚さ 2mm のスチールリングで固定した状態のペダスタルの条件を詳細に表現した。微細多孔質膜は二相系材料で変形しないものと仮定し、実験値と同じ透水係数 (7.0×10^{-8} m/s) を与えた。空気と水に関する境界条件は、上端で吸排気、下端で吸排水を制御した。せん断時は、実験と同様に、下端を鉛直方向に固定したまま上端から実験と同じ軸荷重速度または軸変位速度で圧縮した。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した。

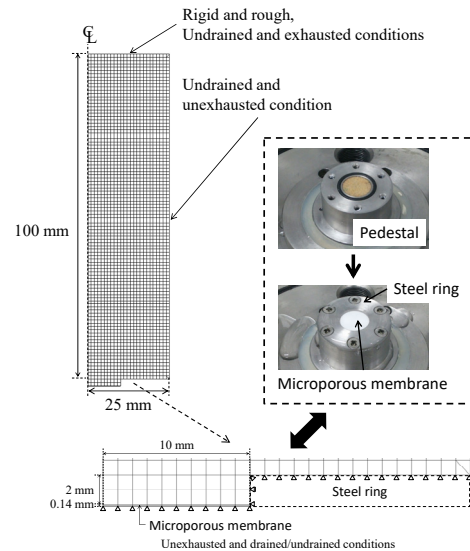


図 1 解析断面

3. 計算結果 (別報¹⁾の実験(B)のシミュレーション結果)

省略した別報¹⁾の実験(A)のシミュレーションでは、軸ひずみ 15%において軸荷重を一定に保ち、サクシオンを 20kPa から 0kPa に低下させた結果、吸水破壊試験を再現できた。本稿では軸ひずみが比較的小さい 4%で軸荷重を一定に保ち、吸水破壊させる実験(B)のシミュレーションについて述べる。図 2 と図 3 はそれぞれ実験結果と計算結果を示す。図 4 は軸ひずみ 4%でサクシオンを 20kPa から 0kPa に低下した後の軸ひずみの経時変化について、実験と計算の比較を示す。図 4 に示すように、サクシオンを 20kPa から 0kPa まで低下後、空気圧と水圧を同時に（サクシオンを 0kPa に保ったまま）上昇させることで、基底応力を 200→190→180→…と順に低下させた。なお、実験では基底応力 135kPa あ

たりで本実験機のストローク限界である軸ひずみ 25% に到達して実験を終えたが、計算では基底応力 115kPa まで実施した。各図中に示す○は、各段階の開始点（前段階の終了時点）を示す。

まず、**図 2** の実験結果と **図 3** の計算結果の比較より、計算結果は実験結果の特徴をよく捉えることができています。特に図中に青色で示したサクシオンを 20kPa から 0kPa に低下させる段階と、赤色で示した間隙圧を上昇させて基底応力を 150kPa から 140kPa に低下させる段階において、実験と計算の両方で軸変位の進展が大きく、著しい軟化挙動を呈している（軸荷重を一定に保っているが、軸変位の進展と体積膨張に伴って補正する断面積が大きくなるため、軸差応力は低下する）。また、サクシオン低下段階では飽和度上昇に伴い体積圧縮している一方で、間隙圧上昇段階では飽和度変化はほぼ無く、体積膨張している。計算では、サクシオン低下段階は、不飽和の効果を考慮した構成モデルが記述する飽和度上昇に起因した塑性圧縮を伴う軟化挙動を示す一方で、間隙圧を上昇させて基底応力を 150 から 140kPa に低下させる段階では、Cam-clay モデルの特徴である限界状態線 $q = Mp'$ 上側の有効応力（骨格応力）状態で塑性膨張を伴う軟化挙動を示したからである。**図 5** はサクシオン低下段階および基底応力 150kPa から 140kPa への低下段階における供試体内部の負荷状態を示す。上述の通り、前者は塑性体積圧縮を伴う軟化挙動が、後者は塑性体積膨張を伴う軟化挙動が観察され、このように供試体には異なる 2 種類の吸水軟化メカニズムが現れていることが明らかになった。なお、**図 4** から、最終段階で軸変位が急激に生じる様子が見られ、加速度を伴いながら運動していることがわかる。

4. おわりに

本研究では、慣性力考慮の空気～水～土連成有限変形解析コード²⁾により、別報¹⁾で示した、不飽和シルト三軸供試体が軸荷重一定条件の下、吸水時に軟化を示し、軸変位が急増して（軸方向加速度を伴って）破壊に至る挙動を概ね再現できた。このことから、不飽和の効果を考慮した構成モデルが記述する飽和度上昇（サクシオン解消）に起因した「塑性圧縮を伴う軟化挙動」と、Cam-clay モデルの特徴である $p' \sim q$ 空間上の限界状態線上側で示す「塑性膨張を伴う軟化挙動」の二つの吸水破壊メカニズムがあることを明らかにした。

謝辞 JSPS 科研費 17H01289 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 吉川ら (2020): 不飽和シルト三軸供試体の荷重一定条件下における吸水破壊試験, 第 55 回地盤工学研究発表会 (本誌).
- 2) Noda and Yoshikawa (2015): Soil-water-air coupled ..., S&F, 55(1), 45-62.
- 3) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic description ..., S&F, 42(5), 47-57.
- 4) 京川ら (2009): サクシオン・飽和度・密度を..., 応用力学論文集, 12, 331-342.
- 5) Zhang and Ikariya (2011): A new model ..., S&F, 51(1), 67-81.
- 6) Jommi (2000): Remarks on the constitutive modelling ..., Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, 139-153.
- 7) Gallipoli et al. (2003): Modelling the variation ..., Géotechnique, 53(1), 105-112.
- 8) Yoshikawa et al. (2015): Effects of air coupling ..., S&F, 55(6), 1372-1387.

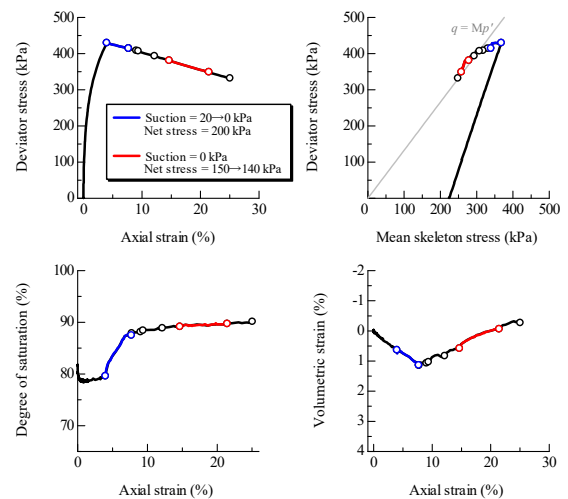


図 2 間隙圧上昇による吸水破壊の実験結果 1)

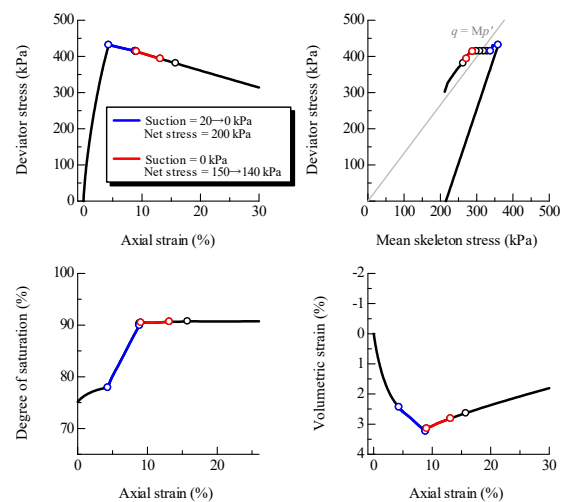


図 3 間隙圧上昇による吸水破壊の計算結果

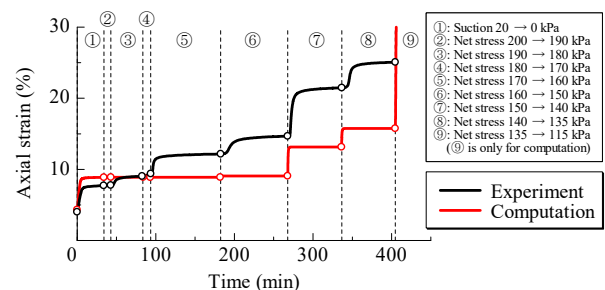


図 4 サクシオン低下時および間隙圧上昇時の軸変位進展の様子

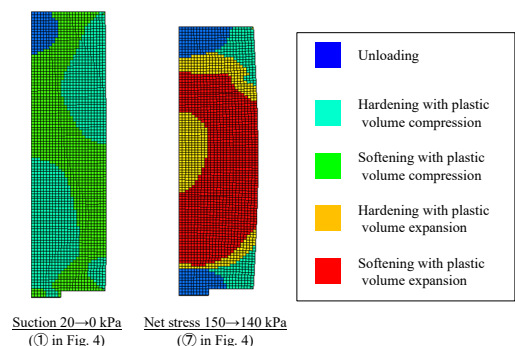


図 5 供試体内部の負荷状態の比較