

封入空気と連続空気の連成を考慮した 不飽和シルト三軸供試体の吸水破壊シミュレーション

三相系解析 吸水破壊 不飽和三軸試験

名古屋大学 特別会員 ○吉川 響貴
国際会員 吉川 高広 野田 利弘

1. はじめに

著者らはこれまでに、降雨による斜面崩壊のメカニズム解明を見据えて、不飽和非塑性シルト三軸供試体の吸水破壊試験とその数値解析を実施してきた¹⁾。本稿では、新たに封入空気と連続空気の両方を連成させた土骨格～毛管水～封入空気～連続空気連成有限変形解析コード²⁾を用いて数値解析を行い、土供試体の吸水時の変形・破壊挙動を表現するためには、封入空気の圧縮性を考慮する必要があることを示す。

2. 実験条件と解析条件

実験に用いた三軸試験機について、供試体下端では微細多孔質膜³⁾を用いて水圧を、上端では撥水性のポリフロンフィルターを用いて空気圧を、それぞれ独立して制御した。体積変化は、二重セルシステムを用いて、内セルの水位変化から算出した。実験に用いた土試料は非塑性シルト（DL クレー，土粒子密度 2.70）である。実験手順を以下に示す。
(1) 含水比 20%になるように調整した土試料をモールド内で静的に締め固めて、間隙比 1.18，飽和度 46%の円筒供試体（直径 50mm，高さ 100mm）を作製する。(2) 供試体を三軸試験機に設置し，排気非排水条件下でセル圧を 20kPa まで上昇させる。供試体の体積変化が収束後，セル圧と空気圧を同時に上昇させて，セル圧 270kPa，空気圧 250kPa にする。(3) 排気非排水条件下でセル圧を 450kPa まで上昇させる（基底応力 200kPa）。このとき供試体下端での計測水圧は約 230kPa（サクション約 20kPa）であった。その後，供試体のサクションを変えないように水圧を調節して排水条件に変えた。(4) 水圧を 230kPa から 250kPa まで上昇させて，サクションを 20kPa から 0kPa に低下させる。(5) 水圧を 250kPa から 230kPa まで低下させて，サクションを 0kPa から 20kPa に上昇させる。(6) 側圧一定の排気排水条件下で応力比が 1 になるまで，定率軸荷重速度で三軸圧縮する。(7) 軸荷重を一定に保ち，サクションを 0kPa に低下（水圧を 250kPa まで上昇）させ，吸水させる。(8) サクションは 0kPa のまま，間隙圧を（空気圧と水圧を同時に）10kPa ずつ上昇させることで，供試体をさらに吸水させて，最終的には軸ひずみが 20%に達するまで実験を行った。

数値解析には，慣性力対応の土骨格～毛管水～封入空気～連続空気連成有限変形解析コード²⁾を用いた。本解析手法は，間隙水を毛管水と吸着水に，間隙空気を封入空気と連続空気（間隙に連続した相として存在する空気）に明確に分けて扱い，各相の運動方程式や質量保存式を支配方程式として連立させる。特に封入空気相の質量保存式により封入空気の圧縮性を考慮可能となり，本研究ではサクションがゼロであっても封入空気の圧縮により飽和度が上昇する挙動を表現できる点に注目している。また，土骨格の構成モデルとしては不飽和の効果を考慮した弾塑性構成式 SYS Cam-clay model⁴⁾を，水分特性モデルとしては Gallipoli のモデル⁵⁾を搭載して，各モデルの材料定数は Yoshikawa & Noda²⁾の DL クレーの値を用いた。上述の実験手順(5)を解析開始時として，このときの間隙比と飽和度の実験値を満たす初期値を設定した。
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。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で圧縮した。次章の解析結果は供試体を 1 要素として見た場合の見かけの挙動を示した。

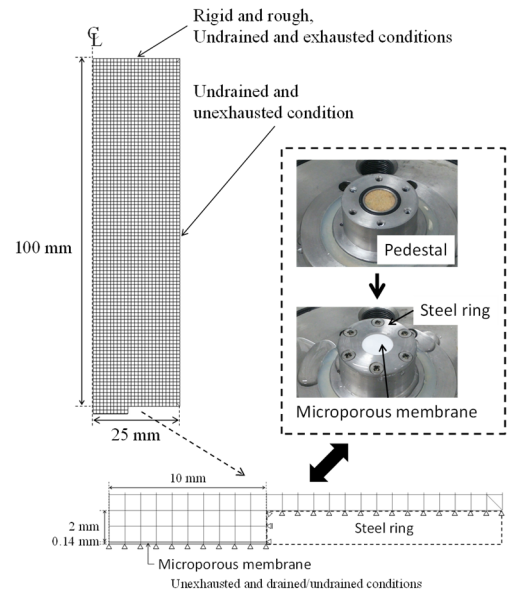


図 1 有限要素メッシュ図と境界条件

3. 実験結果と解析結果

図 2 はせん断過程における実験結果と解析結果の比較を示す。図中の○と△はそれぞれ，実験手順(7)において軸荷重一定条件に変えた後に，サクション低下過程を開始した点と終了した点（間隙圧上昇過程を開始した点）を示す。まず，(a)軸ひずみ～軸差応力関係より，実験においては軸ひずみがサクション低下過程で 3%程度，その後の間隙圧上昇過程でさらに大きく進展しており，解析においても程度の違いはあるものの，その挙動を表現できている。なお，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、軸差応力は低下した。(b)平均骨格応力～軸差応力関係より、実験では限界状態線 $q=Mp'$ を超えたあたりから軸差応力が急激に低下しており、解析においてもその挙動をよく表現できている。サクシオン低下過程の変形挙動は土骨格の構成モデルに考慮した不飽和の効果により表現され、間隙圧上昇過程の変形挙動は Cam-clay model の特徴である $q=Mp'$ 上側での塑性体積膨張を伴う軟化挙動として表現される。次に、(c)体積ひずみ～軸ひずみ関係、(d)排水量～軸ひずみ関係および(e)飽和度～軸ひずみ関係より、解析結果は実験結果の体積変化と吸排水量の挙動をよく表現できている。特に(e)飽和度～軸ひずみ関係より、間隙圧上昇過程においてはサクシオンがゼロで一定にもかかわらず、飽和度が上昇する挙動を表現できている。このとき(f)毛管水飽和度～軸ひずみ関係より、毛管水飽和度が上昇している。ここで、毛管水飽和度とは、毛管水と封入空気の体積に占める毛管水の体積割合と定義される²⁾。間隙圧上昇過程では、サクシオンがゼロで一定であっても、間隙水圧の上昇に伴って封入空気が圧縮され、毛管水と置き換わるため、飽和度が上昇し得る。本解析コードではこの挙動を、封入空気相の質量保存式を支配方程式として連立し、毛管水飽和度を未知数として解くことで表現可能である。実際の斜面崩壊においても、水分量の上昇が一旦収まった後、再度上昇する過程において大きな変形が生じることが観測されており⁹⁾、このような降雨による斜面崩壊時の特徴的な挙動を、本解析コードは表現できると考えている。

また、慣性力の効果を把握するために、力のつりあい式を解く場合との比較も行った。ここまで用いてきた解析コードでは、土全体の運動方程式に対して土骨格から見た物質時間微分を行い、躍度(加速度の1階時間微分項)を直線と仮定して時間積分を行っている。これに対して、力のつりあい式に対して物質時間微分を行い、速度を直線と仮定した場合との比較を行った。図3は速度～時間関係と加速度～時間関係の比較を示す。間隙圧を310kPaから320kPaに上昇させる過程に対して、運動方程式を解く場合の解析の初期値を引き継ぐ形で力のつりあい式を解く場合の解析を行った。ここでは両者ともに時間ステップ間隔を 2.5×10^{-3} 秒として、非常に小さい値を用いた解析を行った。力のつりあい式を解く場合には、図中に×で示す加速度が大きく生じ始めた点において解析結果が収束せず、解析を止めた。斜面の変形から破壊までを解析するためには、たとえ外力が降雨であったとしても、慣性力を考慮する必要があると言える。

4. おわりに

不飽和非塑性シルト三軸供試体を荷重一定条件下でサクシオン低下および間隙圧上昇により吸水破壊させる実験に対して、慣性力対応の土骨格～毛管水～封入空気～連続空気連成有限変形解析コード²⁾による数値解析を行った結果、サクシオン低下および間隙圧上昇による供試体の変形・破壊挙動を再現できることを示した。特に封入空気の圧縮性を考慮することで、サクシオン低下後の間隙圧上昇過程における飽和度上昇挙動を毛管水飽和度の増加として表現できることを示した。また、慣性力を考慮せず力のつりあい式を解く場合との比較を行い、慣性力考慮の必要性を示唆した。

謝辞 JSPS 科研費 20K14821 および 17H01289 の助成を受けた。

参考文献 1) Noda & Yoshikawa (2022): Two types of..., Proc. of 20th ICSMGE. 2) Yoshikawa & Noda: Soil-water-air coupled..., S&F, submitted. 3) Nishimura et al. (2012): Microporous membrane technology..., Geotech. Testing J., Am. Soc. Testing Mater., 35(1), 201–208. 4) Yoshikawa & Noda (2020): Triaxial test..., S&F, 60(5), 1151–1170. 5) Gallipoli et al. (2003): Modelling the variation of..., Geotechnique, 53(1), 105–112. 6) 小泉ら (2017): 降雨時の..., 土木学会論文集 C, 73(1), 93–105.

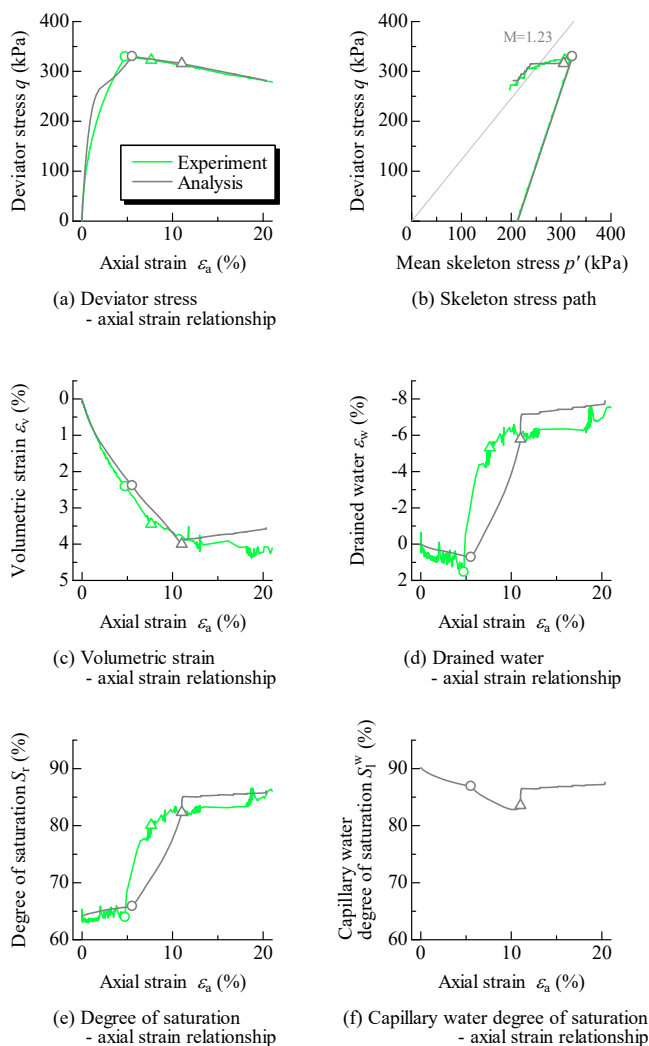


図2 実験結果と解析結果の比較

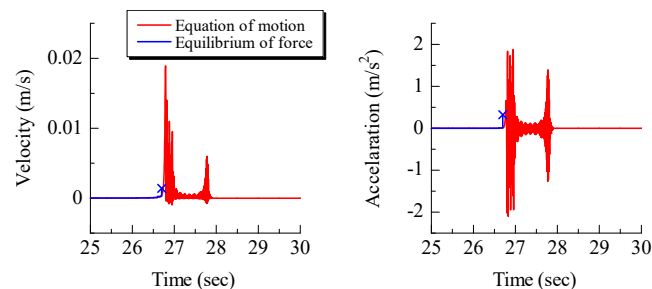


図3 慣性力考慮の有無の比較