

緩い不飽和非塑性シルト三軸供試体の吸水破壊シミュレーション

名古屋大学 正会員 ○吉川 高広 フェロー会員 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、より緩い条件で作製した不飽和非塑性シルト三軸供試体の吸水破壊試験結果とその数値解析結果から明らかになった弾塑性構成モデルの課題を述べる。

2. 実験条件と解析条件

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。(3)セル圧と空気圧を同時に上昇させて、セル圧 60kPa，空気圧 40kPa にする。このとき供試体下端での計測水压は約 20kPa（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压を調節して排水条件に変えた。(4)セル圧を 540kPa まで上昇させて、基底応力を 500kPa にする。(5)水压を 40kPa まで上昇させて、サクションを 0kPa にする。(6)セル圧を 560kPa，空気圧を 60kPa まで上昇させて、サクションを 20kPa にする。このとき、間隙比は 0.965，飽和度は 61%であった。(7)側圧一定の排気排水条件下で応力比が 0.7 となるまで軸荷重速度 0.8 N/min で三軸圧縮して、初期せん断を行う。(8)軸荷重を一定に保ったまま、水压を 60kPa まで上昇させて、サクションを 0kPa にする。(9)サクションは 0kPa のまま、間隙圧（空気圧と水压）を上昇させて、更なる吸水により供試体を破壊に至らしめる。

数値解析は、慣性力対応の空気～水～土連成有限変形解析コード^{2),3)}を用いた。土骨格の構成モデルには、不飽和の効果を考慮した弾塑性構成式 SYS Cam-clay model⁴⁾と複合負荷弾塑性構成モデル⁵⁾を搭載する場合の 2 種類を採用した。前者は SYS Cam-clay model⁶⁾に $v-lnp$ 関係における正規圧密線および限界状態線の切片が有効飽和度の低下に伴い上昇する手法^{7),8)}を導入したモデル⁴⁾である。後者は非関連 Drucker-Prager model⁹⁾と SYS Cam-clay model⁶⁾が同時に負荷状態を呈し得るモデルであり、現時点では不飽和の効果を考慮していない。その他、応力式には骨格応力¹⁰⁾の式を、水分特性には Gallipoli et al.¹¹⁾の間隙比依存性モデルを用いた。土骨格の構成モデルと水分特性モデルの材料定数は、小高ら¹²⁾および Yoshikawa & Noda^{3),4)}の DL クレーを用いた様々な排気排水条件下の三軸試験結果を再現するように決定した。上述の実験手順(7)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ように初期値を設定した。図 1 は有限要素メッシュ図を示す。簡単のため 1 要素で解析を実施し、円筒供試体の軸対称性を仮定し、重力の影響は無視した。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。幾何的・力学的境界条件については、下端は鉛直方向に固定して、上端は節点間に角度不変の束縛条件^{13),14)}を課して剛で摩擦が無い条件を設定し、実験と同様に軸荷重速度 0.8 N/min または軸荷重一定の条件を与えた。

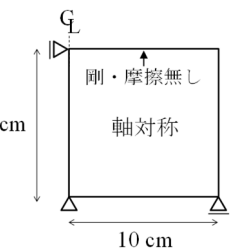


図1 有限要素メッシュ

3. 実験結果と解析結果

図 2 は実験結果を示す。図 3 と図 4 はそれぞれ、不飽和の効果を考慮した SYS Cam-clay model と複合負荷弾塑性構成モデルを用いた場合の解析結果を示す。図中に赤色で示した「軸変位進展時」は、実験で間隙圧の上昇に対して軸変位が大きく生じ始めた軸ひずみ 5%以降を示し、解析結果においても軸ひずみ 5%以降を赤色で示した。骨格応力経路の図中に示す限界状態線 $q=Mp'$ は、単調せん断試験結果⁴⁾から決定した。

キーワード 三相系解析，弾塑性解析，吸水破壊，不飽和土三軸試験

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学工学部 9 号館 3 階 315 号室

名古屋大学 大学院工学研究科 土木工学専攻 地盤工学講座 TEL052-789-3834

まず図2の実験結果について、初期せん断後のサクシオン低下過程においては、吸水して飽和度が上昇し、若干の軸変位と体積圧縮が生じている。その後の間隙圧上昇過程においては、サクシオンはゼロのまま吸水して飽和度が上昇し、骨格応力経路が $q=Mp'$ に近づくにつれて軸変位の進展が大きくなり、また軸ひずみ 10% 程度までは体積圧縮、その後は若干体積膨張している。なお、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。最終的には軸変位が収束することなく、本実験機のスローク限界である軸ひずみ 30% に到達して実験を終えた。

次に図3の不飽和の効果を考慮した SYS Cam-clay model を用いた場合の解析結果について、サクシオン低下過程においては、有効飽和度が上昇して吸水圧縮する挙動が表現されている。一方で間隙圧上昇過程では、封入空気の圧縮により吸水して飽和度が上昇する挙動は表現されている⁴⁾が、骨格応力が $q=Mp'$ の上側に状態をとるまでは軸変位が進展していない。この理由は、 $p' \sim q$ 関係図上で楕円型の降伏曲面を有する(修正) Cam-clay model では、応力経路が降伏曲面の内側に向いて「除荷」を示すためである。 $q=Mp'$ の上側に状態を移すと、塑性体積膨張を伴う軟化により、急激に軸差応力が低下して軸変位が進展し、体積膨張が生じている。

最後に図4の複合負荷弾塑性構成モデルを用いた場合の解析結果について、構成モデルに不飽和の効果を考慮していないため、サクシオン低下過程では軸変位と体積変化がほぼ生じていない。一方で間隙圧上昇過程においては、 $q=Mp'$ 下側での軸差応力の低下、軸変位の進展および体積圧縮挙動を表現できている。この理由は、Drucker-Prager model が有する特徴により、間隙圧上昇過程での応力比増大に伴い降伏曲面が拡大する負荷(硬化)挙動を呈するためである。その結果、軸ひずみに対する飽和度変化の挙動もよく再現できている。

4. おわりに

実験の間隙圧上昇過程において観察された限界状態線 $q=Mp'$ 下側での軸差応力の低下挙動は、複合負荷弾塑性構成モデル⁵⁾

を用いると、Drucker-Prager model⁹⁾が有する特徴により硬化挙動として表現可能である。その結果、軸ひずみに対する体積と吸排水量の変化挙動もよく表現できることを示した。今後は、複合負荷弾塑性構成モデルに不飽和の効果を考慮することを検討したい。

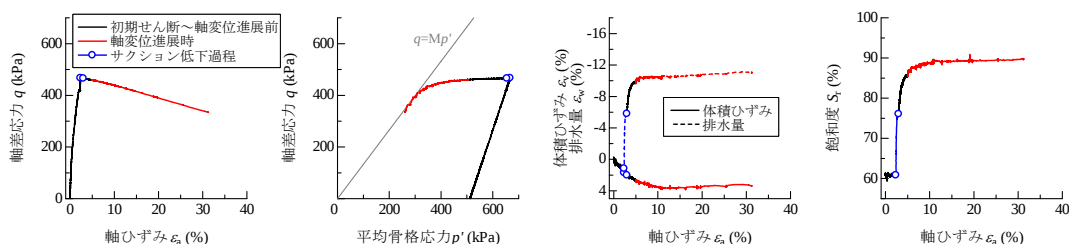


図2 吸水破壊の実験結果

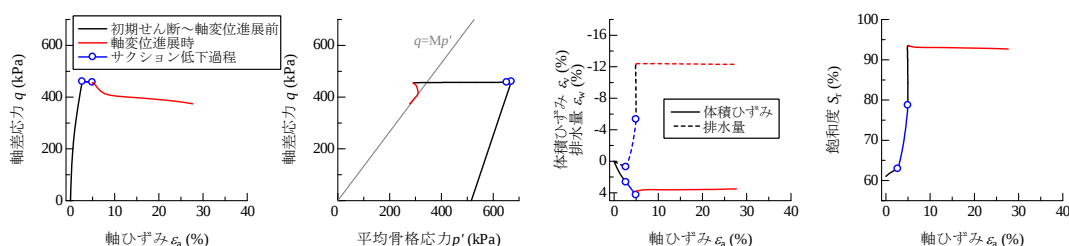


図3 不飽和の効果を考慮した SYS Cam-clay model を用いた場合の解析結果

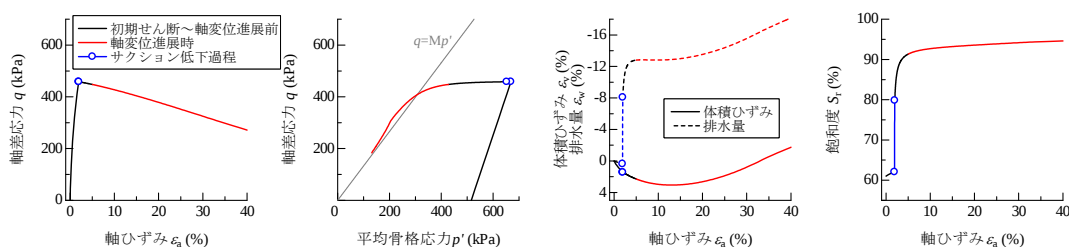


図4 複合負荷弾塑性構成モデルを用いた場合の解析結果

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) Noda & Yoshikawa (2015): Soil-water-air coupled..., S&F, 55(1), 45-62. 3) Yoshikawa & Noda (2022): Development and validation of..., Proc. of 20th ICSMGE. 4) Noda & Yoshikawa (2020): Triaxial test on..., S&F, 60(5), 1151-1170. 5) Yamada et al. (2022): Combined-loading elastoplastic..., Comput Geotech 141, 104521. 6) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic..., S&F, 42(5), 47-57. 7) 京川ら (2009): サクシオン・飽和度・密度..., 応用力学論文集, 12, 331-342. 8) Zhang & Ikariya (2011): A new model for..., S&F, 51(1), 67-81. 9) Drucker & Prager (1952): Soil mechanics..., Q Appl Math, 10(2), 157-165. 10) Jommi, (2000): Remarks on the constitutive modelling..., Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, 139-153. 11) Gallipoli et al. (2003): Modelling the variation of..., Geotechnique, 53(1), 105-112. 12) 小高ら (2006): 排気・排水条件を制御した..., 第18回中部地盤工学シンポジウム, 6. 13) Asaoka et al. (1998): Displacement/traction boundary conditions..., S&F, 38(4), 173-181. 14) Noda et al. (2008): Soil-water coupled..., S&F, 48(6), 771-790.