

サクシオン低下と間隙圧上昇による緩い不飽和シルト三軸供試体の吸水破壊実験

不飽和三軸試験 サクシオン 吸水破壊

名古屋大学 国際会員 ○吉川 高広 野田 利弘
非会員 広瀬 祥

1. はじめに

平成 30 年 7 月豪雨や令和元年東日本台風をはじめ、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。本稿では、降雨による斜面や盛土の崩壊メカニズム解明を見据え、緩い不飽和シルト三軸供試体を荷重一定条件下でサクシオン低下と間隙圧上昇により吸水破壊させる実験を行った。

2. 実験条件

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 270kPa、空気圧 250kPa にする。
- (4) 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（サクシオン約 20kPa）で、間隙比は約 1.06、飽和度は約 51% であった。その後、供試体のサクシオンを変えないように水圧を調節して排水条件に変えた。
- (5) 水圧を 230kPa から 250kPa まで上昇させて、サクシオンを 20kPa から 0kPa に低下させる。このとき吸水コラプスが生じて供試体は体積圧縮し、間隙比は約 1.00、飽和度は約 77% となった。
- (6) 水圧を 250kPa から 230kPa まで低下させて、サクシオンを 0kPa から 20kPa に上昇させる。このとき体積変化はほぼ生じず、間隙比は約 1.00、飽和度は約 62% となった。なお、(5) および (6) の後で、サクシオン 0kPa および 20kPa の側圧一定・排気排水三軸圧縮試験を軸ひずみ速度 0.01%/min で行い、それぞれを CASE1 および CASE2 とする。
- (7) 側圧一定の排気排水条件下で軸差応力 q が 500, 450, 330, 160kPa となるまで定率軸荷重速度で三軸圧縮する（それぞれを CASE3, 4, 5, 6 とする）。軸荷重速度は、目標の軸差応力に達するまでの時間が CASE2 の実験結果と同じになるように設定した。
- (8) 軸荷重を一定に保ち、サクシオンを 0kPa に低下（水圧を 250kPa まで上昇）させ、吸水させる。このとき CASE3 では実験機のスローク限界である軸ひずみ 25% を超えたため、実験を終了した。
- (9) (8) のサクシオン低下過程で軸ひずみが 25% を超えなかった CASE4~6 では、軸荷重を一定に保ったまま、間隙圧を（空気圧と水圧を同時に）上昇させ、さらに吸水させた。以上の実験手順を図 1 にまとめた。

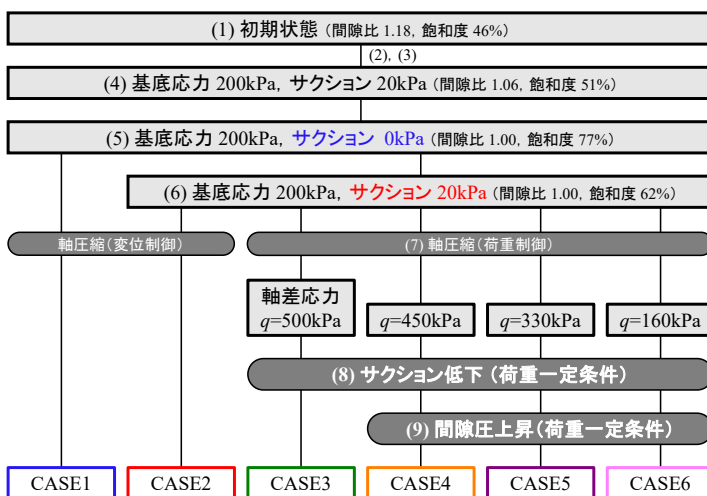


図 1 実験手順

3. 実験結果

図 2 は手順(8)のサクシオン低下による吸水試験結果を示す。図中の○は軸荷重一定条件に変えてサクシオン低下を開始した点、△は軸変位が収束した点を示す。CASE1 と 2 のサクシオン 0 と 20kPa の排気排水三軸圧縮試験結果も併せて示した。まず CASE1 と 2 の結果より、サクシオン 20kPa の方が 0kPa より強度・剛性が大きいことがわかる。次に CASE3~6 について、軸荷重を一定に保ったままサクシオンを 20kPa から 0kPa に低下させると、吸水に伴い飽和度が上昇して、軸変位の進展および軸差応力の低下（軟化）が観察された。このとき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。CASE3~6 を比較すると、軸

差応力-軸ひずみ関係において、サクシヨン低下開始時の軸差応力が大きいほど軟化の程度が大きく、CASE1 のサクシヨン 0kPa の排気排水三軸圧縮試験結果よりも軸差応力が低下する傾向がある。このとき体積ひずみと飽和度も、サクシヨン低下開始時の軸差応力が大きいほど CASE1 との差が大きい。ただし、CASE6 はサクシヨン低下開始時の軸差応力が最も小さいが、CASE1 との飽和度の差が大きいため、再実験により検証する必要がある。

図 3 は手順(9)の間隙圧上昇による吸水試験結果を示す。CASE1・2 と CASE3~6 のサクシヨン低下過程の実験結果も破線で示し、間隙圧上昇を開始した点(サクシヨン低下過程で軸変位が収束した点)を図 2 と同じく△で示した。間隙圧上昇過程は、軸荷重一定条件下でサクシヨンを 0kPa に保ったまま基底応力を低下させる過程である。サクシヨン低下過程開始時の軸差応力が大きいほど、基底応力が大きい状態で軸ひずみ 25% (本実験機のストローク限界) に到達し、CASE4, 5, 6 の順に、基底応力がそれぞれ 170, 110, 50kPa で実験を終了した。まず軸差応力-軸ひずみ関係より、軸変位の進展に伴って軟化挙動を示し、骨格応力経路より、限界状態線 $q = Mp'$ に到達する辺りで急激に軸変位が進展し、軟化する。なお、 $M=1.33$ の値は DL クレーの既往の力学試験結果²⁾から決定した値であり、CASE1・2 の単調三軸圧縮試験においても軸ひずみ 25% で応力比が 1.33 となっている。次に体積ひずみ-軸ひずみ関係より、サクシヨン低下過程では体積圧縮が生じていたが、間隙圧上昇過程では体積圧縮と膨張の両方が生じている。また飽和度-軸ひずみ関係より、間隙圧上昇過程では CASE1 のサクシヨン 0kPa の排気排水三軸圧縮試験結果よりも飽和度が高くなっている。

4. おわりに

本稿では、緩い不飽和シルト三軸供試体を荷重一定条件下でサクシヨン低下と間隙圧上昇により吸水破壊させる実験結果を示した。サクシヨン低下過程では、サクシヨン低下開始時の軸差応力が大きいほど軟化の程度が大きく、サクシヨン 0kPa の排気排水三軸圧縮試験結果よりも軸差応力が低下すること、また間隙圧上昇過程では、骨格応力経路で限界状態線に到達する辺りで急激に軸変位が進展し、軟化することを示した。

今後は本実験の初期値・境界値問題としての数値解析により吸水時の変形・破壊メカニズム解明を進める。著者らは、本稿で示した実験条件よりも密な不飽和シルト三軸供試体を用いて、同様の実験²⁾とその再現解析³⁾を実施し、吸水による変形・破壊時に加速度が生じる点や塑性体積変化の違いが生じることも明らかにしている。こちらも参照されたい。

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

参考文献

- 1) Nishimura et al. (2012): Microporous membrane technology for measurement of soil-water characteristic curve, Geotechnical Testing Journal, the American Society for Testing and Materials, 35(1), 201-208.
- 2) Yoshikawa, T. and Noda, T. (2020): Triaxial test on water absorption compression of unsaturated soil and its soil-water-air-coupled elastoplastic finite deformation analysis, Soils and Foundations, 60(5), 1151-1170.
- 3) 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, 23-1-3-07.
- 4) 野田ら (2020): 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, 第 55 回地盤工学研究発表会, 23-1-3-08.

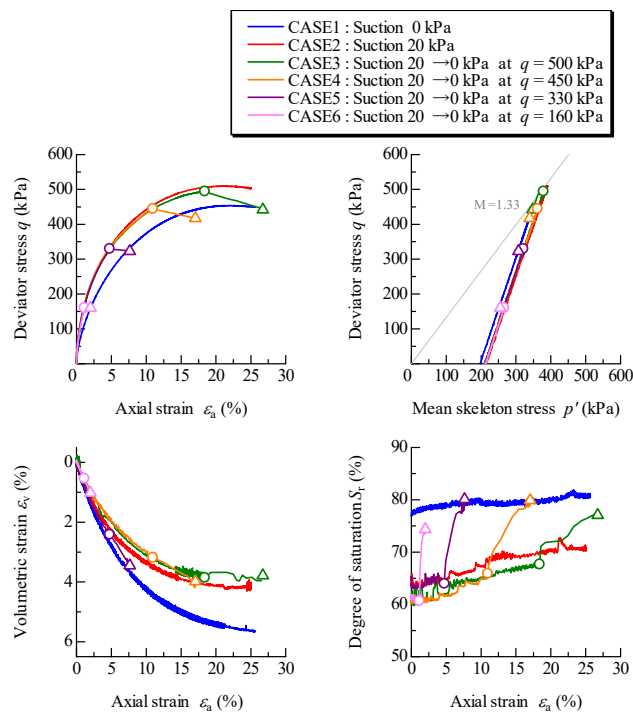


図 2 サクシヨン低下による吸水試験結果

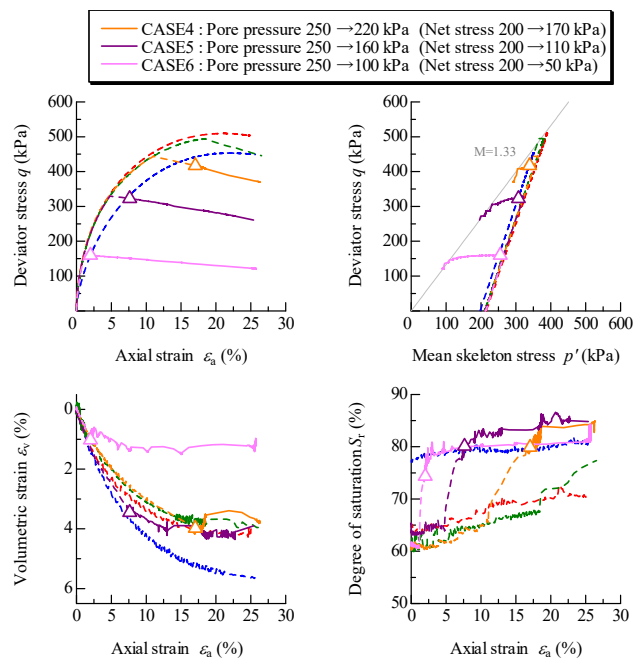


図 3 間隙圧上昇(基底応力低下)による吸水試験結果