

不飽和シルトを用いた繰返し吸排水履歴に関する三軸試験

不飽和土 水分特性曲線 ヒステリシス

名古屋大学 国際会員 ○吉川 高広 野田 利弘
名古屋大学 学生会員 中澤 一眞

1. はじめに

近年、豪雨による斜面や盛土等の不飽和地盤・土構造物の崩壊が相次いで発生し、その被災メカニズムの解明が強く求められている。降雨と乾燥の繰返し履歴を受ける不飽和土の力学挙動を把握するためには、水分特性を把握することが重要である。不飽和土の水分特性の主な特徴としては、吸排水時のヒステリシス性と間隙比依存性が挙げられる。吸排水時のヒステリシス性が生じる要因としては、インク瓶効果、間隙水と土粒子の接触角の影響、空気の封入の影響が挙げられている。本研究では、特に空気の封入の影響により生じるヒステリシス性に注目して、不飽和シルトを用いた繰返し吸排水履歴に関する三軸試験を実施した。

2. 実験条件

実験に用いた三軸試験機について述べる。供試体下端では微細多孔質膜¹⁾を用いて水圧を、上端では撥水性のポリプロピレ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。非排気試験を行う場合は、三軸セル内の供試体から極力近い位置に設置した電磁弁を閉じて、供試体内の空気の圧力と圧縮量を評価できるように努めた。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) である。繰返し吸排水履歴に関する実験を 2 種類実施した。(A) 同じサククションで繰返す吸排水試験と(B) 排水時のサククションを段階的に上昇させつつ繰返す吸排水試験である。以下に各実験の手順を示す。

(A) 同じサククションで繰返す吸排水試験

(i) 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。(ii) 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。(iii) 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 (このとき水圧は約 230kPa、サククションは約 20kPa)。(iv) 供試体のサククションを変えずに排水条件にして、セル圧を 450kPa まで上昇させて、基底応力 200kPa で等方圧密する。(v) 基底応力一定の下、まずサククション 20kPa から 0kPa に低下させて (この過程を 0 回目と呼ぶ)、その後サククションを 0 と 30kPa の間で吸排水を 2 回繰返す試験を実施した。

(B) 排水時のサククションを段階的に上昇させつつ繰返す吸排水試験

実験(A)の場合と(i), (ii)の過程は同じである。(iii) 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 (このとき水圧は約 20kPa、サククションは約 20kPa)。(iv) 供試体のサククションを変えずに排水条件にして、セル圧を 240kPa まで上昇させて、基底応力 200kPa で等方圧密する。(v) 水圧を 40kPa まで上昇させて、サククション 20kPa から 0kPa に低下させる (この過程を 0 回目と呼ぶ)。(vi) セル圧・空気圧・水圧を同時に上昇させて、セル圧を 450kPa、空気圧と水圧を 250kPa にする。この過程は飽和土の三軸試験における背圧上昇過程に対応して、実験(A)の場合より飽和度は高くなる。(vii) 基底応力一定の下、サククション 0kPa から、0→20→0→25→0→30→0kPa と排水時のサククションを段階的に上昇させて吸排水を 3 回繰返す試験を実施した。(viii) (vii)の後にサククション 0kPa で非排気・非排水三軸圧縮試験を行った。また、別の供試体を用いて、吸排水を繰返す前の(vi)の過程後にもサククション 0kPa の非排気・非排水三軸圧縮試験を行った。

なお、(A)と(B)のどちらにおいても、サククションを変化させる際は、基底応力一定の下、サククション上昇時にはセル圧と空気圧を、サククション低下時には水圧を上昇させた。

3. 実験結果

(A) 同じサククションで繰返す吸排水試験

図 1 は(v)の過程における飽和度および間隙比とサククションの関係を示す。なお、各サククションで得られた飽和度および間隙比の実験値の点を便宜的に直線で結んでいる。ま

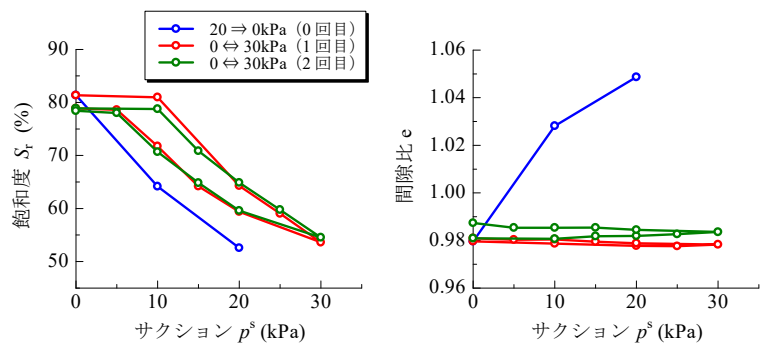


図 1 (A)の場合の飽和度および間隙比とサククションの関係

ず、飽和度～サクシオン関係より、吸排水時のヒステリシス性を確認できる。サクシオン 0kPa における飽和度は、0 回目の吸水過程終了時より 1 回目の方が若干低い。つまり、0 回目より 1 回目の方が封入空気の割合が高いと言える。一方で、1 回目と 2 回目の吸水過程終了時の飽和度は等しく、また吸水過程全体を通じて同じサクシオン～飽和度関係になっている。次に間隙比～サクシオン関係を見ると、0 回目の吸水過程で体積圧縮（吸水コラプス）しているが、それ以降は吸水コラプスが生じていない。

(B) 排水時のサクシオンを段階的に上昇させつつ繰返す吸排水試験

図 2 は(v)～(vii)の過程における飽和度および間隙比とサクシオンの関係を示す。なお、各サクシオンで得られた飽和度および間隙比の実験値の点を便宜的に直線で結んでいる。まず、飽和度～サクシオン関係より、背圧を上昇させて飽和度を高めた後に、排水時のサクシオンを段階的に上昇させて吸排水過程を繰返すと、サクシオン 0kPa での飽和度が徐々に低くなり、空気の封入量が増加していく。これにより、吸排水時のヒステリシス性が観察されるが、1 回目の吸排水過程以降は、排水過程で同じサクシオンに戻ったときに飽和度も同じ値に戻っている点は興味深い。次にサクシオン～間隙比関係を見ると、(A)と同様で、0 回目で吸水コラプスを示すが、それ以降は吸水コラプスが生じていない。

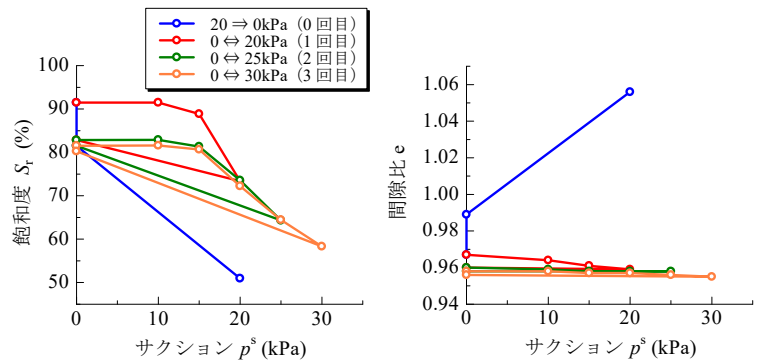


図 2 (B)の場合の飽和度および間隙比とサクシオンの関係 (吸排水の繰返しに伴い間隙水に空気が封入されていく)

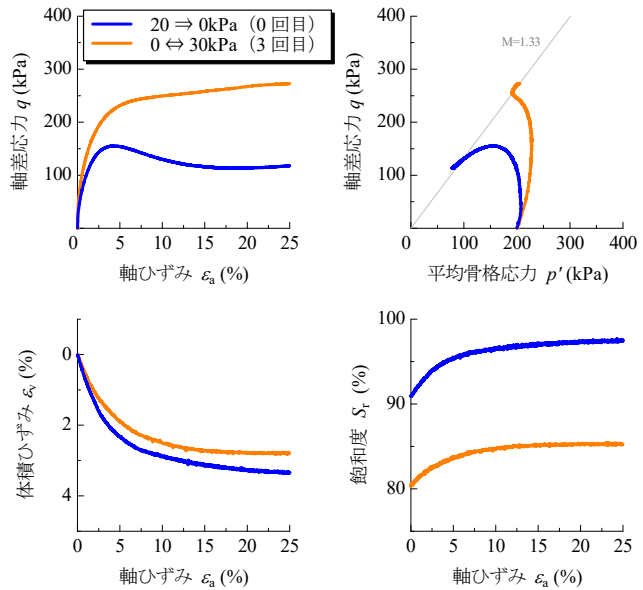


図 3 非排気・非排水三軸圧縮試験結果 ((B)の(viii)の過程) (吸排水履歴の違いで非排気非排水せん断挙動が大きく異なる)

図 3 は(viii)の過程について、吸排水履歴の違いによるサクシオン 0kPa での非排気・非排水三軸圧縮試験結果の違いを示す。サクシオン 0kPa での非排気・非排水条件であるが、どちらも間隙空気の圧縮により体積圧縮と飽和度上昇が生じている。0 回目の吸水過程後に背圧上昇させた供試体をせん断した場合は、限界状態線の下側での軟化挙動が見られるが、吸排水過程を 3 回繰返した供試体をせん断した場合は、硬化し続け、両方で強度が倍半分異なっている。

4. まとめ

本稿では、微細多孔質膜でサクシオン制御を行う三軸試験機を用いて、含水比 20%で静的に締固めた不飽和シルト（非塑性シルト：DL クレー）供試体に対して、繰返し吸排水履歴を与える実験を 2 種類実施した。(A) サクシオン 0 と 30kPa を繰返す吸排水試験については、吸排水時のヒステリシス性が観察された。サクシオン 0kPa において、吸水過程 0 回目より吸水過程 1 回目の方が飽和度は低く、空気の封入量が若干多かったが、1 回目と 2 回目では吸排水の両過程においてサクシオン～飽和度関係は同じ結果となった。また、吸水コラプスは、吸水過程 0 回目では生じたが、その後の吸水過程では生じなかった。(B) 0 回目の吸水過程後に背圧を上昇させて飽和度を高めた供試体に対して、排水時のサクシオンを段階的に上昇させつつ吸排水過程を繰返した結果、サクシオン 0kPa での飽和度が徐々に低くなり、空気の封入量が増加していき、ヒステリシス性が観察された。さらに、異なる吸排水履歴の供試体に対するサクシオン 0kPa での非排気・非排水三軸圧縮試験では、一方は軟化、他方は硬化挙動を示し、両者は大きく異なる結果となった。別報²⁾では、(A)と(B)の実験を、封入空気を考慮した水分特性モデルにより数値シミュレートした結果について述べる。

謝辞：JSPS 科研費 17H01289 および 17K14720 の助成を受けた。名城大学の小高猛司教授には、実験方法に関するご助言をいただいた。足利工業大学の西村友良教授には、実験装置に関するご助言をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献：1) Nishimura, T., Koseki, J., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (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)野田利弘, 吉川高広, 中澤一真 (2018) : 封入空気を考慮した水分特性モデルによる不飽和シルトの吸排水時ヒステリシス性の表現, 第 54 回地盤工学研究発表会 (本誌) .