

繰返し吸排水履歴に関する不飽和シルト三軸試験と
封入空気を考慮した水分特性モデルを用いた数値シミュレーション
(Triaxial tests on cyclic water absorption-drainage history of unsaturated silt and their
numerical simulations using a SWC model taking trapped air into consideration)

吉川高広¹，野田利弘²，中澤一眞³

1 名古屋大学大学院・工学研究科土木工学専攻・yoshikawa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学・減災連携研究センター

3 西日本旅客鉄道株式会社

概 要

不飽和土の水分特性曲線が吸排水時のヒステリシス性を持つ要因として、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、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とその数値シミュレーションを実施した。まず実験結果から、繰返し吸排水履歴の違いにより不飽和土の水分特性に違いが生じ、特にサクション 0kPa での飽和度が吸排水履歴の違いにより異なることを示す。次にその数値シミュレーションにおいては、封入空気を考慮した水分特性モデルを用いることで、有効飽和度～サクション関係にヒステリシス性を導入せずとも、実験で得られた飽和度の吸排水時のヒステリシス性や、サクション 0kPa での飽和度が吸排水履歴の違いにより異なる挙動を表現できることを示す。

キーワード：不飽和土，水分特性，封入空気，三軸試験

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、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とその数値シミュレーションを実施した。シミュレーションに用いた水分特性モデルの特徴は、間隙空気を「封入空気」と「連続した相として存在する空気（連続空気）」に明確に分け、この考え方に基づいて新たに定義した有効飽和度を用いる点と、封入空気と連続空気が吸排水に伴い遷移する点である。まず、次章では解析手法の概要を述べる。

2. 解析手法の概要

解析手法の詳細は別文献¹⁾²⁾³⁾を参照されたい。ここではその要点を述べる。図 1 は土の示相図および各種諸量の定義を示す。土を「土粒子」「吸着水」「自由水」「封入空気」「連続空気」に明確に分けて扱う。土粒子と吸着水が一体となって「土骨格」を形成し、土粒子と吸着水を除く部分を土骨格の体積変化に有効な間隙（以後「有効間隙」と考える。有効間隙が土全体に占める体積割合を有効間隙率 n_e とする。封入空気は自由水に封入されているため、自

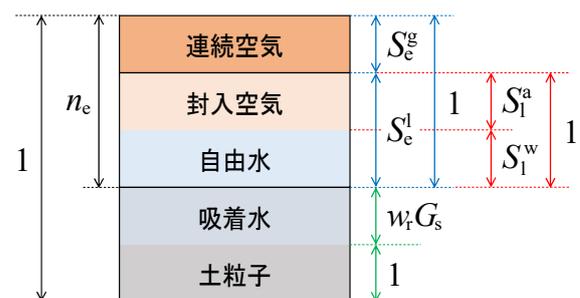


図 1 土の示相図および各種諸量の定義
(全て体積に関する諸量)

由水+封入空気が有効間隙に占める体積割合を新たに有効飽和度 S_e^i と定義し、 S_e^i とサクシオン・間隙比等を水分特性式で関係付ける。また、自由水が自由水+封入空気に占める体積割合を自由水飽和度 S_w^i と定義し、未知変数として扱う。吸着水は、高サクシオン時に土粒子表面に吸着した水であるため、含水比 w_r で定義し、簡単のため材料定数と考える（吸着水は非圧縮と仮定）。最終的に解くべき方程式は、運動方程式、自由水～土骨格連成式、封入空気～土骨格連成式および連続空気～土骨格連成式である。既往の空気～水～土骨格連成の変形解析手法と比べて、 S_w^i が新たに未知数として増えるが、連続空気に加えて封入空気の質量保存則も支配方程式として用いるため、未知数と方程式の数は一致する。ただし、封入空気の圧力は自由水の圧力に等しいと仮定する。

また不飽和土は、例えば、吸水時には連続空気の一部が封入空気に、排水時には封入空気の一部が連続空気に遷移すると考えられる。そこで、封入空気と連続空気の質量交換を考慮するため、封入空気と連続空気がそれぞれ単位時間・単位体積当たり湧き出す質量 m_{la} と m_{ga} に対して、次に示す簡単な遷移モデルを考える。なお、本論文では、封入空気と連続空気の質量交換のみを考えるため、 $m_{la} + m_{ga} = 0$ とする。

(i) 連続空気から封入空気への遷移 ($\dot{S}_e^i \geq 0$ の場合)

有効飽和度 S_e^i の土骨格から見た物質時間微分 $\dot{S}_e^i \geq 0$ のときに遷移すると考える。 $S_e^e = 0$ で連続空気が存在しないとき、および、 $S_e^e = 1$ で自由水が存在しないときは封入空気への遷移は生じないため、次に示すようなモデルを考えた。

$$\frac{m_{la}}{\rho_{la}} = n_e \alpha^* S_e^i (1 - S_e^e) \dot{S}_e^i \quad (1)$$

ここに α^* は材料定数で、値が大きいほど遷移量が多い。

(ii) 封入空気から連続空気への遷移 ($\dot{S}_e^i < 0$ の場合)

$\dot{S}_e^i < 0$ のときに遷移すると考える。 $S_e^a = 0$ で封入空気が存在しないときは遷移しない。また、 $S_e^a = 1$ のときは自由水が存在せず、有効間隙が全て連続空気であることを意味するため、このような状態は定義できない。このため、次に示すようなモデルを考えた。

$$\frac{m_{ga}}{\rho_{ga}} = n_e \mu^* \ln(1 - S_e^a) \dot{S}_e^i \quad (2)$$

ここに μ^* は材料定数で、値が大きいほど遷移量が多い。

本稿では、 S_e^i に Gallipoli et al.⁴⁾ の水分特性式を用いる。 S_e^i に対してはヒステリシス性モデルを導入せず、式(1)と式(2)に示した封入空気と連続空気の遷移に起因する飽和度～サクシオン関係のヒステリシス性に注目して、数値シミュレーションを行った。本解析モデルでは α^* と μ^* が材料定数として新しく加わるが、「最大飽和度」と「ヒステリシス性を表現するために導入するパラメータ」が不要なため、一般的なヒステリシス性モデルと材料定数の数は同じである。また、土骨格の弾塑性構成式は、SYS Cam-clay model⁵⁾ に対して、京川ら⁶⁾・Zhang & Ikariya⁷⁾ を参考に、正

規圧密線の切片 N と限界状態線の切片 Γ が S_e^i に応じて変化する手法を導入し、応力の式には骨格応力⁸⁾を用いた。なお、本稿では、一様変形場を仮定して三軸試験の数値シミュレーションを実施し、構成式と水分特性式の応答を出力した。

3. 実験条件と計算条件

3.1 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⁹⁾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。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) 同じサクシオンで繰返す吸排水試験と(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である。以下に各実験の手順を示す。

(A) 同じサクシオ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、サクシオンは約 20kPa）。(iv) 供試体のサクシオ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、まずサクシオン 20kPa から 0kPa に低下させて（この過程を 0 回目と呼ぶ）、その後サクシオンを 0 と 30kPa の間で吸排水を 2 回繰返す試験を実施した。

(B) 排水時のサクシオ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、サクシオンは約 20kPa）。(iv) 供試体のサクシオ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、サクシオン 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、サクシオン 0kPa から、0→20→0→25→0→30→0kPa と排水時のサクシオ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)の後にサクシオン 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)の過程後にもサクシオン 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、サクシオンを変化させる際は、基底応力一定の下、サクシオン上昇時にはセル圧と空気圧を、サクシオン低下時には水圧を上昇させた。

3.2 計算条件

サクシオン 0kPa のときは封入空気量(自由水飽和度 S_1^w の値)が明確であるため、(A)では 1 回目の排水過程開始時、(B)では 0 回目の吸水過程終了後の背圧上昇過程開始時を初期状態とした。また、(A)と(B)の実験において、吸水コラプスが生じた 0 回目の吸水過程終了後は、吸排水過程を繰返しても間隙比変化がほぼ生じなかったため、まずは水分特性モデルのみの妥当性を検証するために、変形が生じない条件下で、数値シミュレーションを行った。

表 1 土骨格の構成式に関する材料定数

弾塑性パラメータ		
$S_1^s=1$ における限界状態線の $p'=98.1\text{kPa}$, $q=0\text{kPa}$ のときの比体積	Γ	1.95
$S_1^s=0$ における限界状態線の $p'=98.1\text{kPa}$, $q=0\text{kPa}$ のときの比体積	Γ_r	2.07
限界状態定数	M	1.33
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.05
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.01
ボアソン比	ν	0.3
発展則パラメータ		
正規圧密土化指数	m	0.3
構造劣化指数	a	1.0
構造劣化指数	b	1.0
構造劣化指数	c	1.0
構造劣化指数	c_s	0.8
回転硬化指数	b_r	0.0
回転硬化限界定数	m_b	-

表 2 水分特性に関する材料定数およびその他の物性値

水分特性		
吸着水含水比 %	w_r	0.0
van Genuchten ¹⁰⁾ パラメータ kPa^{-1}	α	0.044
van Genuchten パラメータ ($m'=1-1/n'$)	n'	2.1
Gallipoli パラメータ	ψ	3.0
封入空気への遷移パラメータ	α^*	2.62
連続空気への遷移パラメータ	μ^*	1.65
物性値		
土粒子密度 g/cm^3	ρ^s	2.704
水の体積弾性係数 kPa	K_w	2.19×10^6
空気の気体定数 $\text{m}^2/\text{s}^2/\text{K}$	\bar{R}	287.04
絶対温度 K	Θ	293.15

表 3 実験(A)と(B)のシミュレーションに用いた初期値

		(A)	(B)
構造の程度	$1/R_0^*$	3.06	2.24
過圧密比	$1/R_0$	1.20	1.20
間隙比	e_0	0.98	0.97
応力比	η_0	0.0	0.0
異方性の程度	ζ_0^*	0.0	0.0
自由水飽和度 %	S_{10}^w	81.36	81.52

表 1 は土骨格の構成式に関する材料定数を示す。Yoshikawa et al. ¹¹⁾の DL クレーのパラメータを参考にして値を決定した。表 2 は水分特性式に関する材料定数およびその他の物性値を示す。水分特性式に関する材料定数は、(A)の 1 回目の吸排水過程と、別で実施した初期間隙比が異なる場合の 1 回目の排水過程を最もよく再現できる値に決定した。この材料定数を用いて、(A)の 2 回目の吸排水過程と(B)のシミュレーションを行った。表 3 は実験(A)と(B)のシミュレーションに用いた初期値を示す。実験結果に基づいて各初期値を設定した。

4. 実験結果と計算結果の比較

4.1 (A)同じサクシオンを繰返す吸排水試験

図 2 は(A)の 3.1 節で前述した(v)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の実験結果を示す。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、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。

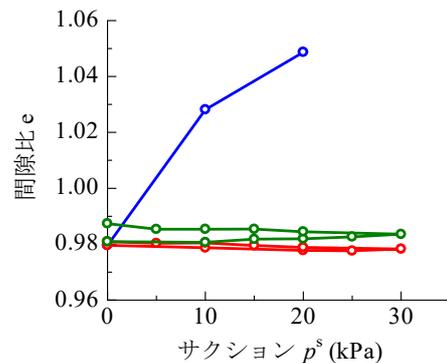
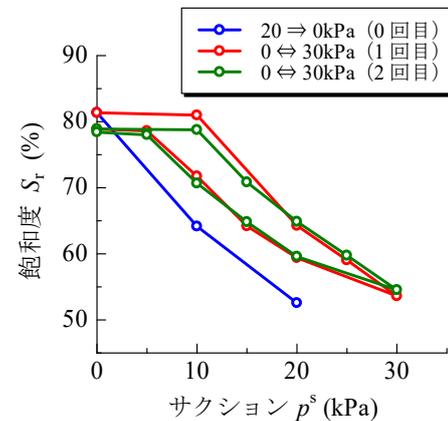


図 2 (A)の実験結果

図 3 は数値シミュレーション結果を示す。3.2 節で前述した通り、1 回目の排水過程開始時を初期状態として、変形が生じない条件下で数値シミュレーションを行った。まず、有効飽和度 S_e^i ~ サクシオン p^s 関係にヒステリシスを導入せずとも、封入空気と連続空気の遷移を考慮するだけで、実験結果の飽和度 $S_r \sim p^s$ 関係のヒステリシスを表現可能である。特に $p^s=0\text{kPa}$ のときに注目すると、吸水過程終了時の飽和度が、1 回目より 2 回目の方が排水過程開始時の飽和度に近づく様子も再現できている。これは式 (2) より、自由水飽和度 S_1^w が低くなるほど、封入空気が連続空気に遷移する量が大きくなるためである。

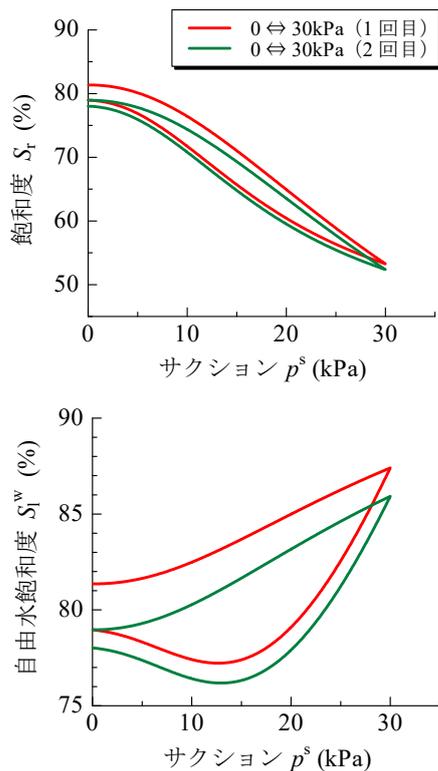


図 3 (A)の計算結果
(ヒステリシスの表現)

4.2 (B)排水時のサクシオンを段階的に上昇させつつ繰り返す吸排水試験

図 4 は(B)の 3.1 節で前述した(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の実験結果を示す。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り返すと、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。

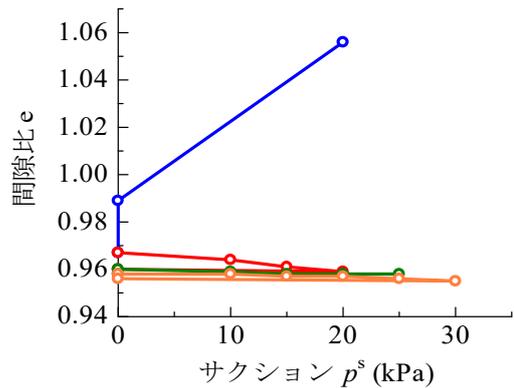
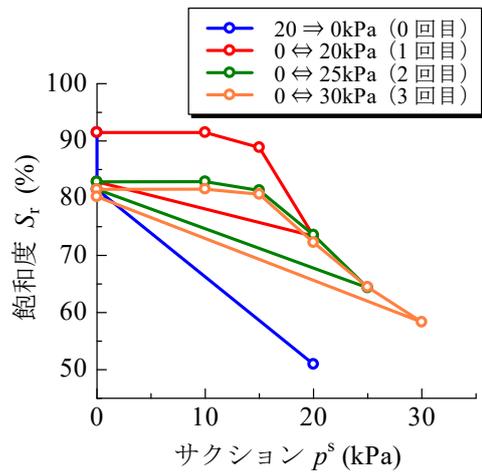


図 4 (B)の実験結果

図 5 は数値シミュレーション結果を示す。3.2 節で前述した通り、0 回目の吸水過程終了後の背圧上昇過程開始時を初期状態として、変形が生じない条件下で数値シミュレーションを行った。まず背圧上昇過程において、 $p^s=0\text{kPa}$ での飽和度上昇を封入空気の圧縮 (S_1^w の上昇) により表現可能である。次に、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り返すと、 $p^s=0\text{kPa}$ での飽和度が徐々に低下し、空気の封入量が増加していく (S_1^w が低下する) 様子が再現できている。ただし、実験に比べて数値シミュレーションでは、1 回目の吸排水過程における空気の封入量が小さい。今後は式(1)と式(2)の遷移モデルを中心に、解析手法の改良を行う必要がある。

図 6 は(viii)の過程について、背圧上昇過程後および吸排水過程を 3 回繰り返した後の、サクシオン 0kPa における非排気・非排水三軸圧縮試験の実験結果を示す。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 回繰り返した供試体をせん断した場合は、硬化し続け、両者で強度が倍半分異なっている。

図 7 は数値シミュレーション結果を示す。ここまでは変形が生じない条件を与えていたが、その制約を取り外して、両ケースとも同じ背圧上昇過程開始時を初期状態としてせん断までの一連の過程をシミュレートした。実験結果とシミュレーション結果を比較すると、吸排水履歴が異なる非排気・非排水三軸圧縮挙動の特徴を捉えられている。

特に吸排水過程を繰り返さない場合の骨格応力経路では、SYS Cam-clay model の上負荷面が記述する構造の劣化により、限界状態線下側での軟化挙動を表現できている。

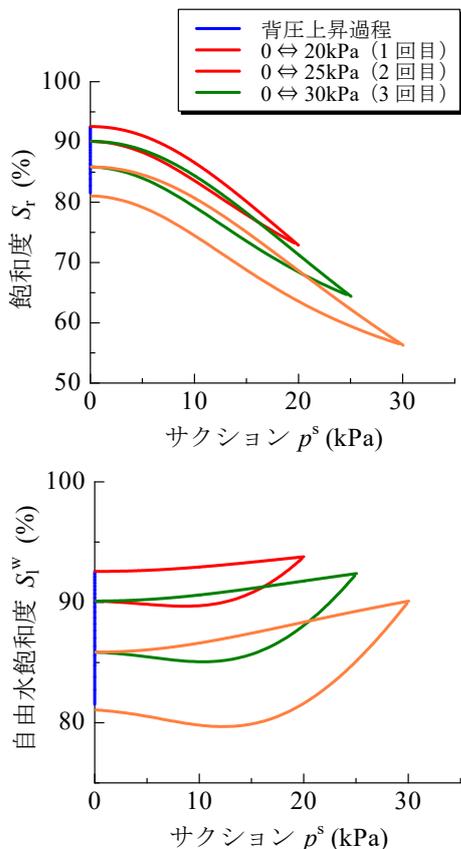


図 5 (B)の計算結果 (ヒステリシス性の表現)
(吸排水の繰り返しに伴い間隙水に空気が封入されていく様子の表現)

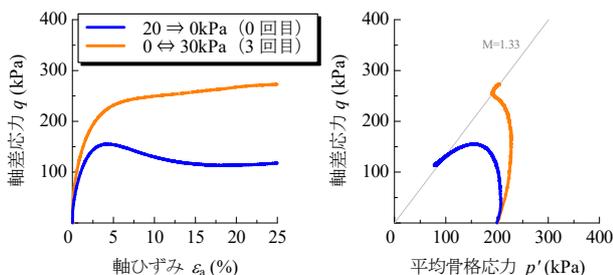


図 6 (B)の非排気・非排水せん断の実験結果

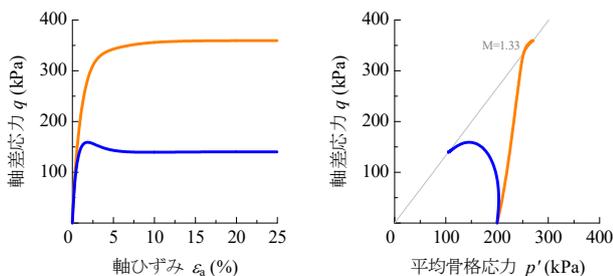


図 7 (B)の非排気・非排水せん断の計算結果
(限界状態線下側での軟化と硬化の違いを表現)

5. おわりに

本稿では、不飽和シルトを用いた繰り返し吸排水履歴に関する三軸試験と封入空気を考慮した水分特性モデルを用いたその数値シミュレーションを行った。まず、封入空気と連続空気の吸排水に伴う遷移を考慮するだけで、有効飽和度～サクシオン関係にヒステリシス性を導入することなく、実験で得られた飽和度～サクシオン関係のヒステリシス性を表現できることを示した。また、サクシオンが同じゼロであっても、吸排水履歴の違いで飽和度が異なる挙動を表現でき、さらには、それら供試体に対して実施した非排気・非排水三軸圧縮試験において、吸排水履歴の違いにより、一方は軟化、他方は硬化を示す挙動も表現できることを示した。本稿では、サクシオンがゼロでの飽和度変化に注目したシミュレーション結果を示したが、最大飽和度を材料定数で与える既往の手法ではこのような挙動を表現できない点を強調しておく。

謝辞

JSPS 科研費 17H01289 と 17K14720 の助成を受けた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 野田利弘, 吉川高広, 西垣隆士: 新たに定義する有効飽和度に基づく不飽和土の有限変形解析手法の提案, 第53回地盤工学研究発表会, pp. 725-726, 2018.
- 吉川高広, 野田利弘, 西垣隆士: 封入空気を考慮可能な不飽和土の有限変形解析手法の妥当性確認, 第53回地盤工学研究発表会, pp. 727-728, 2018.
- 吉川高広, 野田利弘, 西垣隆士: 新たに定義する有効飽和度に基づく不飽和土の有限変形解析手法の開発と検証, 第30回中部地盤工学シンポジウム, pp. 13-18, 2018.
- Gallipoli, D., Wheeler, S.J. and Karstunen, M.: Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil, *Geotechnique*, 53(1), 105-112, 2003.
- Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils. *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57, 2002.
- 京川裕之, 菊本統, 中井照夫, Hossain Md. Shahin: サクシオン・飽和度・密度を統一的に考慮できる不飽和土の弾塑性モデル, *応用力学論文集*, 12, 331-342, 2009.
- Zhang, F. and Ikariya, T.: A new model for unsaturated soil using skeleton stress and degree of saturation as state variables, *Soils and Foundations*, 51(1), 67-81, 2011.
- Jommi, C.: Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils* (eds. by Tarantino, A. and Mancuso, C.), Balkema, 139-153, 2000.
- 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.
- van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898, 1980.
- Yoshikawa, T., Noda, T. and Kodaka, T.: Effects of air coupling on

triaxial shearing behavior of unsaturated silty specimens under constant confining pressure and various drained and exhausted conditions, *Soils*

and Foundations, 55(6), 1372-1387, 2015.