

排気・排水／非排水条件下における不飽和シルトの体積圧縮時の水分特性に関する研究 (Study on soil-water characteristics of unsaturated silt during volume compression under exhausted-drained/undrained conditions)

服部敦貴¹, 吉川高広¹, 野田利弘², 北折陽一¹, 中澤一真³

- 1 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 hattori.atsuki@h.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。本研究では、間隙比依存性(体積圧縮時)の水分特性に注目して、まずは不飽和シルトの排気・排水／非排水条件下の三軸試験を実施した。その結果、空気圧および水圧を一定に保つ排気・排水条件(サクシオン一定条件)下において体積圧縮時の吸水挙動が、排気・非排水条件下において体積圧縮時の水圧低下(サクシオン上昇)挙動が観察された。次に、本実験の数値シミュレーションを行った結果、この一見不思議に思える力学挙動は、水分特性の間隙比依存性により説明できることを示した。

キーワード：不飽和土、水分特性、三軸試験

1. はじめに

近年、豪雨や地震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。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必要がある。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。本研究では、間隙比依存性(体積圧縮時)の水分特性に注目して、不飽和シルトの排気・排水／非排水条件の三軸試験とその数値シミュレーションを実施した。

2. 実験条件

2.1 土試料

実験に用いた土試料は非塑性シルト(DLクレイ)であり、その粒径加積曲線を図1に示す。また、その土粒子密度は 2.70g/cm^3 であった。

2.2 実験機の概要

不飽和三軸試験機に関して、供試体下端に微細多孔質膜(Nishimuraら¹)またはセラミックディスクを、上端に撥水性を持つポリフロンフィルタを用い、間隙水と間隙空気の経路を分離し、サクシオンを制御した。本研究で与えたサクシオンは10, 20, 30, 50kPaの4ケースであり、Nishimuraらを参考に、10, 20, 30kPaの場合は微細多孔質膜を、50kPa

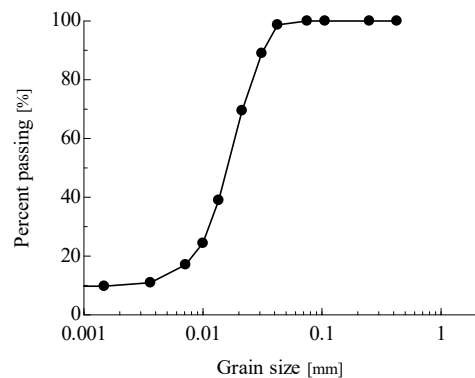


図1 粒径加積曲線

の場合はAEVが50kPa以上のセラミックディスクを用いて実験を行った。また体積変化は、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。

2.3 実験手順

小高ら^{2,3)}の実験手順を参照して、次の通りに実験を行った。(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) 円筒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) セル圧と空気圧をそれぞれ270kPa, 250kPaまで同時に上昇させた後、所定のサクシオン(本稿では10, 20, 30, 50kPaの4ケース)を与える。(iv) 排気条件でセル圧を上昇させて基底応力200kPaで等

方圧密する。(v) 排気条件で軸ひずみ速度 0.05%/min で三軸圧縮試験を行う。ここで、(iv)および(v)の過程では、排水条件および非排水条件の2つの条件下で実施する。つまり、(iii)のサクシオン 4 ケースのそれぞれに対して、(iv)以降は排水条件および非排水条件の2種類となる合計8ケースの実験を行った。本稿では、(iv)と(v)の実験結果について示す。なお、(iii)の過程のサクシオンの値 (10, 20, 30, 50kPa) を用いて実験ケースを呼称する。

3. 実験結果

3.1 等方圧密過程

図 2 と図 3 は、それぞれ排水条件と非排水条件の実験結果を示す。体積ひずみ-時間関係より、排水・非排水条件に関わらず、サクシオンが小さいほど体積圧縮量が大き

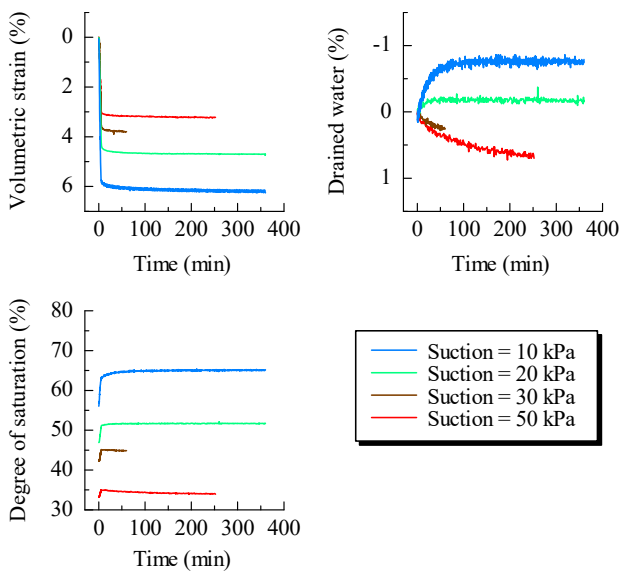


図 2 等方圧密過程 (排水条件) の実験結果

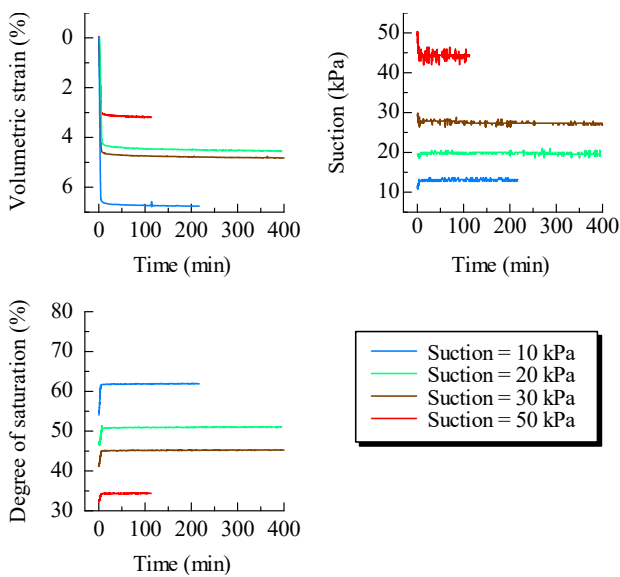


図 3 等方圧密過程 (非排水条件) の実験結果

いことがわかる。また、排水条件の場合は、吸排水量-時間関係より、サクシオン 10, 20kPa のときに、サクシオン一定条件にも拘らず、体積圧縮時に吸水し、非排水条件の場合は、体積圧縮時に水圧が低下してサクシオンが上昇している点は興味深い。不飽和土特有の吸水コラプス挙動は、サクシオン低下時の吸水圧縮であり、サクシオン一定時の吸水圧縮挙動とは異なる。一方で、サクシオン 30, 50kPa のときは、排水条件の場合は、体積圧縮時に排水し、非排水条件の場合は、水圧が上昇してサクシオンが低下している。さらに、飽和度-時間関係より、全ケースにおいて飽和度が上昇し、その飽和度上昇量は、体積圧縮量が大きいサクシオンが小さいケースほど大きいことがわかる。

3.2 三軸圧縮過程

図 4 と図 5 は、それぞれ排水条件と非排水条件の実験結果を示す。まず、軸差応力-軸ひずみ関係、骨格応力経路および体積ひずみ-軸ひずみ関係より、排水条件・非排水条件およびサクシオンの大きさに関わらず、全てのケースでほぼ同じ挙動を示している。これは、排気条件下で側圧一定の三軸圧縮を行ったため、どのケースにおいても骨格応力経路はほぼ 1:3 の直線を示し、大きな違いが生じなかったと考える。また、等方圧密過程と同様に、サクシオン 10, 20kPa のときに、排水条件の場合は吸排水量-軸ひずみ関係より、サクシオン一定条件下で体積圧縮時に吸水し、非排水条件の場合はサクシオン-軸ひずみ関係より、体積圧縮時に水圧が低下してサクシオンが上昇している

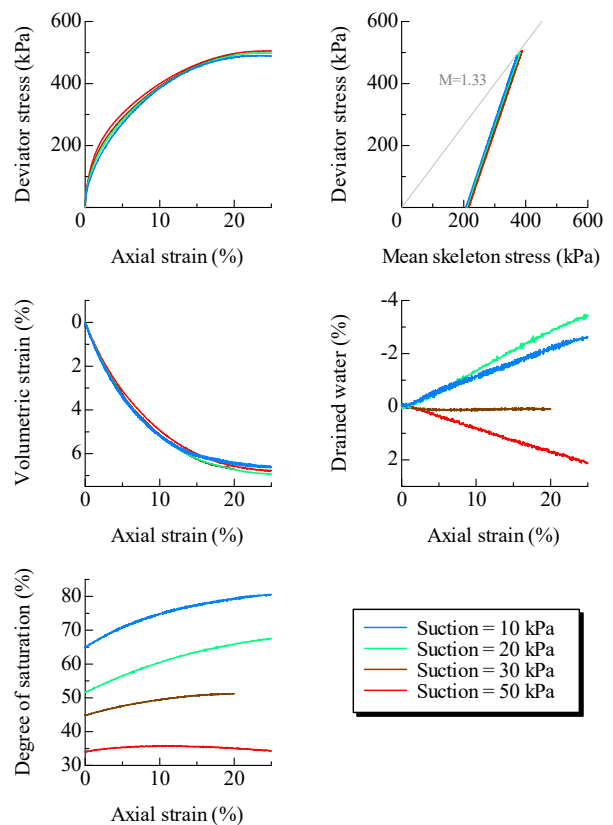


図 4 三軸圧縮過程 (排水条件) の実験結果

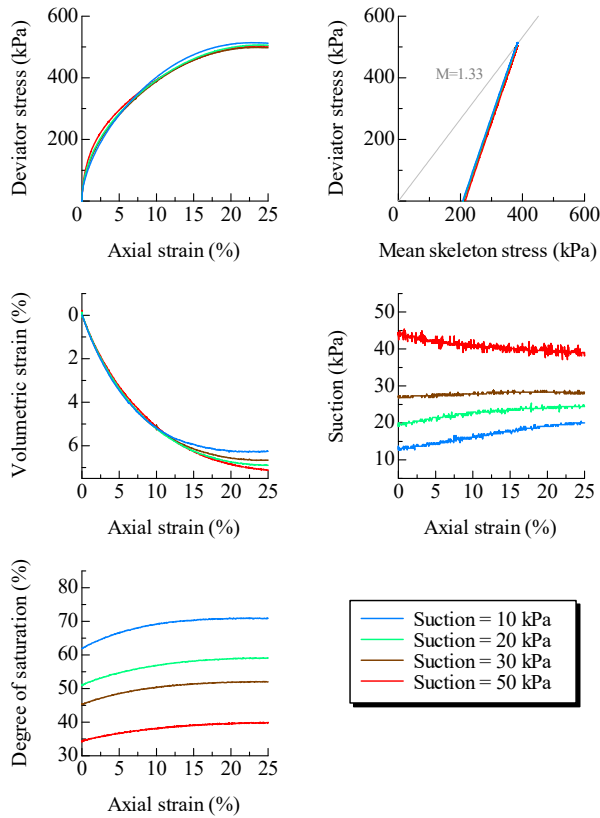


図5 三軸圧縮過程（非排水条件）の実験結果

点は興味深い。一方で、サクシオン 30, 50kPa のときは、排水条件の場合は体積圧縮時に排水し、非排水条件の場合は水圧が上昇してサクシオンが低下している。さらに、飽和度一軸ひずみ関係より、全ケースにおいて飽和度が上昇し、その飽和度上昇量は、サクシオンが小さいケースほど大きいことがわかる。

4. 計算結果

4.1 計算手法の概要

本稿では一様変形場を仮定して、前述の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。土骨格の弾塑性構成式は、SYS Cam-clay model⁴⁾ に対して、京川ら⁵⁾・Zhang & Ikariya⁶⁾を参考に、正規圧密線の切片 N と限界状態線の切片 Γ が飽和度に応じて変化する手法を導入し⁷⁾、応力の式には骨格応力⁸⁾を用いた。

水分特性式には、Gallipoli ら⁹⁾の間隙比依存性モデルを用いた。これは、次式に示すように、van Genuchten¹⁰⁾モデルの材料パラメータ α を間隙比の関数にするモデルである。

$$S_e = \left\{ 1 + (\alpha e^w p^s)^{n'} \right\}^{-m'}, \quad m' = 1 - 1/n' \quad (1)$$

ここに、

$$s^w = s_{\min}^w + S_e (s_{\max}^w - s_{\min}^w) \quad (2)$$

である。 S_e は有効飽和度、 e は間隙比、 p^s はサクシオン、 s^w は飽和度、 s_{\max}^w は最大飽和度、 s_{\min}^w は最小飽和度、 α 、 w 、 n' 、 m' は水分特性に関する材料パラメータである。

Gallipoli らのモデル導入により、van Genuchten モデルから新たに増えるパラメータは、 ψ のみである。式(1)より、サクシオン p^s が同じであっても、間隙比 e が小さいほど飽和度が大きいことを表現可能である。さらに、対象とする実験において、初期のサクシオン 20kPa から、サクシオンを低下させて吸水させる場合 ($p^s = 10\text{kPa}$) と、サクシオンを上昇させて排水させる場合 ($p^s = 30, 50\text{kPa}$) の両方があるため、本稿では、水分特性モデルの吸排水時のヒステリシスを菊本ら¹¹⁾に倣って導入した。

4.2 計算条件

表 1 は土骨格の構成式に関する材料定数と初期値を、表 2 は水分特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値を示す。実験の全 8 ケースで共通である 2.3 節で示した手順(ii)の排気・非排水条件下でセル圧を 20kPa 与え終わったときを初期状態として、その後の背圧上昇過程、サクシオン変化過程、等方圧密過程、三軸圧縮過程のシミュレーションを、一組の材料定数と初期値を用いて行った。

表 1 土骨格の構成式に関する材料定数と初期値

弾塑性パラメータ		
$S_e^1 = 1$ 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	1.965
$S_e^1 = 0$ 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	2.09
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
ポアソン比	ν	0.3
発展則パラメータ		
正規圧密土化指数	m	1.3
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	-
初期値		
初期構造の程度	$1/R_0^*$	5.0
初期過圧密の程度	$1/R_0$	1.7
初期間隙比	e_0	1.16
初期応力比	η_0	0.0
初期異方性の程度	ζ_0	0.0

表 2 水分特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値

水分特性曲線		
最大飽和度 %	s_{\max}^w	0.84
最小飽和度 %	s_{\min}^w	0.08
van Genuchten パラメータ (排水時) kPa^{-1}	α_d	0.023
van Genuchten パラメータ (吸水時) kPa^{-1}	α_w	0.065
van Genuchten パラメータ ($m' = 1 - 1/n'$)	n'	2.5
ヒステリシスパラメータ	ξ	50.0
初期飽和度 kPa	s_0^w	47.0
初期サクシオン kPa	p^s	20.0
その他の物性値		
土粒子密度 g/cm^3	ρ^s	2.70
水の体積弾性係数 kPa	K_w	2.19×10^6
空気気体定数 $\text{m}^2/\text{s}^2/\text{K}$	\bar{R}	287.04
絶対温度 K	Θ	293.15

4.3 等方圧密過程の計算結果

図 6 と図 7 は、それぞれ排水条件と非排水条件の計算結果を示す。計算開始時と終了時の点を直線で繋いだ図で示した。まず、体積ひずみの計算結果より、実験結果と同様に、排水条件と非排水条件の両方において、サクシオンが小さいほど体積圧縮量が大きい挙動を表現できている。次に、飽和度の計算結果より、Gallipoli らの間隙比依存性の水分特性モデルを用いているため、排気・排水（サクシオン一定）条件下であっても、体積圧縮（間隙比低下）に伴い飽和度上昇する挙動を表現可能である。非排水条件の場合も、実験と同様の飽和度変化を表現できている。ただし、サクシオン 10kPa の計算結果では、等方圧密開始時（サクシオン変化過程終了時）の飽和度が、実験結果に比べて高かった。しかし、飽和度の変化量で見ると、全てのサクシオンの場合において実験結果をよく表現できている。次に、排水条件の吸排水量に注目する。なお、 $es^w = wG_s$ (w : 含水比、 G_s : 土粒子の比重) の関係があるため、体積ひずみ (e) と飽和度 (s^w) より、吸排水量 (w) は自動的に計算される。サクシオン 10kPa のときの計算結果を見ると、実験結果と同様に、サクシオン一定条件にも拘らず、体積圧縮時に吸水する挙動を再現できている。間隙比依存性の水分特性モデルにより、体積圧縮（間隙比低下）に伴う飽和度上昇挙動として説明されることがわかる。つまり、サクシオン 10kPa のときは、体積圧縮時に吸水するほどに飽和度が上昇する水分特性であったと言える。これに対応して、非排水条件では水圧が低下してサクシオンが上昇している。一方で、サクシオン 30、50kPa のときは、サクシオン 10kPa のときほどは飽和度が上昇せず、排水条件では体積圧縮時に排水し、非排水条件では水圧が上昇してサクシオンが低下している。

4.4 三軸圧縮過程の計算結果

図 8 と図 9 は、それぞれ排水条件と非排水条件の計算結果を示す。まず、軸差応力-軸ひずみ関係、骨格応力経

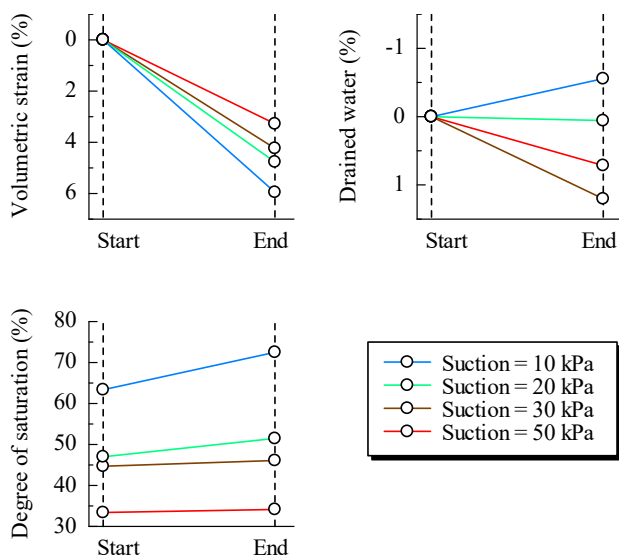


図 6 等方圧密過程（排水条件）の計算結果

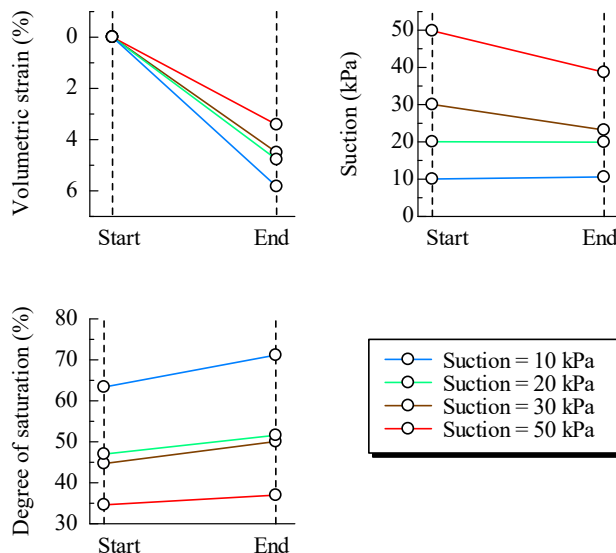


図 7 等方圧密過程（非排水条件）の計算結果

路および体積ひずみ-軸ひずみ関係の計算結果は、実験結果との整合性が高い。飽和度-軸ひずみ関係を見ると、全てのケースで飽和度が上昇する様子を表現できている。また、実験結果と同様に、サクシオン 20kPa のときに、排水条件の場合は吸排水量-軸ひずみ関係より、サクシオン一定条件下で体積圧縮時に吸水し、非排水条件の場合はサクシオン-軸ひずみ関係より、体積圧縮時に水圧が低下してサクシオンが上昇している。この挙動は、前述の通り、間隙比依存性の水分特性モデルにより、体積圧縮（間隙比低下）に伴う飽和度上昇挙動として説明可能である。一方で、サクシオン 30、50kPa のときは、排水条件の場合は体積圧縮時に排水し、非排水条件の場合は水圧が上昇してサクシオンが低下している。しかし、サクシオン 10kPa のときは、排水条件下の吸水挙動や非排水条件下のサクシオン上昇挙動を表現できなかった。その原因として、三軸圧縮過程前までの、特にサクシオン変化過程の飽和度変化を再現できていないためだと考えられる。今後、パラメータや水分特性モデルの再検討を行っていく必要がある。

5. おわりに

本論文では、排気・排水/非排水条件下における不飽和シルトの力学挙動、特に体積圧縮時の水分特性に着目した。実験では、空気圧および水圧を一定に保つ排気・排水条件（サクシオン一定条件）下において体積圧縮時の吸水挙動が、排気・非排水条件下において体積圧縮時の水圧低下（サクシオン上昇）挙動が観察された。計算では、この挙動を、間隙比依存性の水分特性モデルにより、体積圧縮（間隙比低下）に伴う飽和度上昇挙動として説明されることを示した。しかし、一組の材料定数と初期値を用いて実験の一連過程をシミュレートしたが、三軸圧縮過程のサクシオン 10kPa の挙動を表現できていないなどの課題もあり、今後はパラメータの再検討や水分特性モデルの改良を行っていきたい。

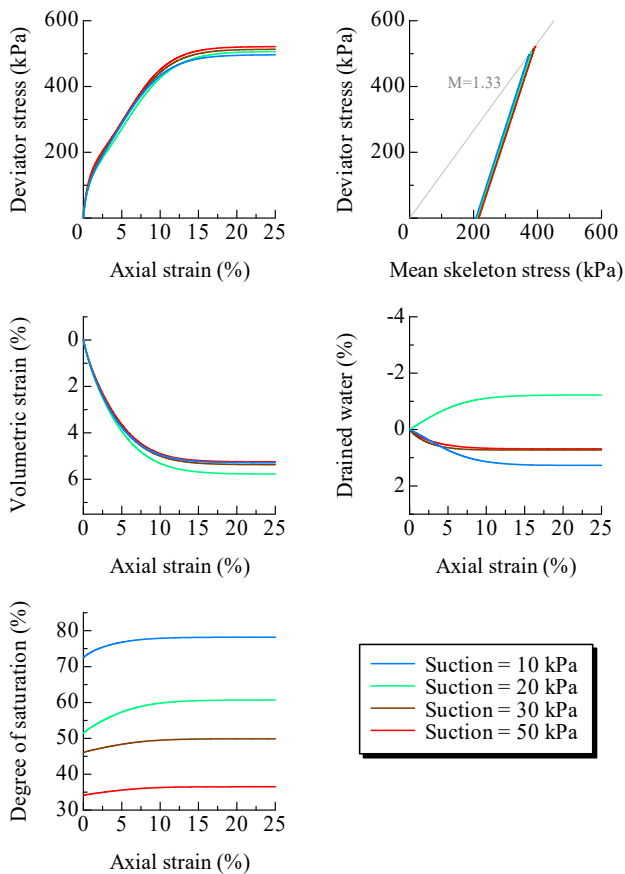


図 8 三軸圧縮過程（排水条件）の計算結果

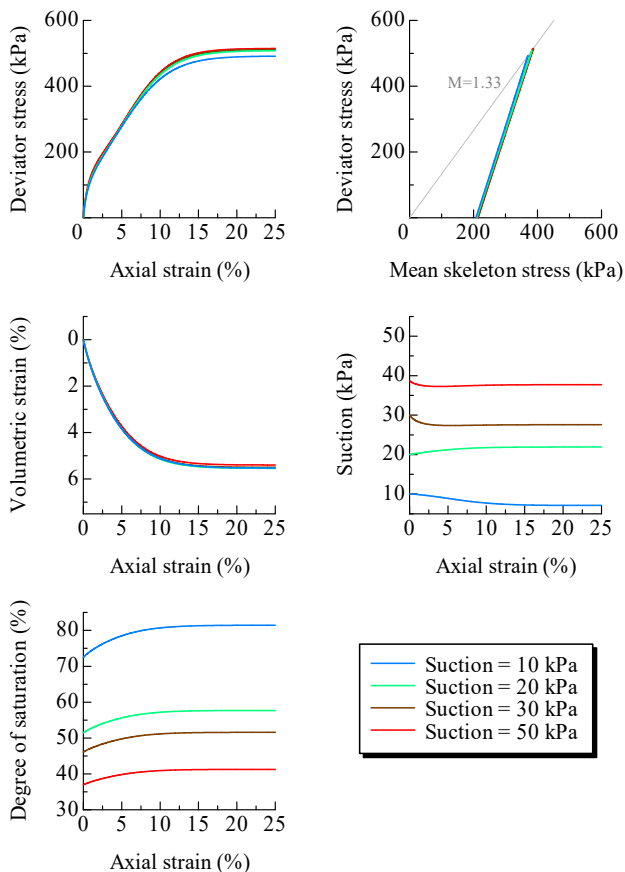


図 9 三軸圧縮過程（非排水条件）の計算結果

また、本稿では飽和度～サクシオン関係に吸排水時のヒステリシスを考慮した。著者らの研究グループでは、封入空気を考慮することで、飽和度～サクシオン関係のヒステリシスを表現できることも示しており¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾、今後はその手法を用いた数値シミュレーションも実施していく予定である。なお、サクシオン一定条件下の吸水圧縮挙動や排気・非排水条件下の水圧低下（サクシオン上昇）挙動は、ヒステリシスの考慮だけでは表現できず、間隙比依存性の水分特性モデルが必要である。

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

- 1) Nishimura, T., Koseki, J., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.: Microporous membrane technology for measurement of soil-water characteristic curve, *Geotechnical Testing Journal, the American Society for Testing and Materials*, 35(1), 201-208, 2012.
- 2) 小高猛司, 鈴木宏尚, 岡二三生: 排気・排水条件を制御した不飽和シルトの三軸圧縮試験, 第18回中部地盤工学シンポジウム, 地盤工学会中部支部, 6, 2006.
- 3) Oka, F., Kodaka, T., Suzuki, H., Kim, Y.-S., Nishimatsu, N. and Kimoto, S.: Experimental study on the behavior of unsaturated compacted silt under triaxial compression. *Soils and Foundations*, 50(1), 27-44, 2010.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 吉川高広, 野田利弘: 不飽和土の排気・排水三軸圧縮シミュレーションを通じた水分特性モデルにおける間隙比依存性考慮の必要性, 第22回計算工学講演会, F-04-5 (CD-ROM), 2017.
- 8) 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.
- 9) Gallipoli, D., Wheeler, S.J. and Karstunen, M.: Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil, *Géotechnique*, 53(1), 105-112, 2003.
- 10) 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.
- 11) 菊本統, 京川裕之, 中井照夫: サクシオン履歴・間隙比・温度の影響を考慮した水分特性曲線モデル, *応用力学論文集*, 12, 343-352, 2009.
- 12) 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.
- 13) 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.

- 14) 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.
- 15) 吉川高広, 野田利弘, 中澤一眞: 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, 第31回中部地盤工学シンポジウム, 2019.