

不飽和マサ土の力学的・水理学的特性に関する実験的研究およびそのモデル化

Experimental study on hydraulic/mechanical behavior of unsaturated completely decomposed granite and its modeling

Xiong Xi¹, 沖野頌悟², 已上諒太¹, 馬俊男¹, 岩井裕正¹, 張鋒¹

1 名古屋工業大学・大学院・工学研究科・社会工学専攻・E-mail: cho.ho@nitech.ac.jp

2 愛知県

概 要

自然地盤の多くは不飽和状態であり、間隙に水と空気が混在しているため、飽和土や乾燥土に比べて複雑な力学挙動を示している。それを正確に表現するためには水理学的特性を考慮しなければならない。地盤の挙動予測は簡易化のため飽和土の構成則を用いることが多い。しかし、降雨による斜面崩壊など水分量の変化に起因した地盤挙動を正確に表現するためには、変形を含めた不飽和土の力学的・水理学的特性を理解し、その特性を定式化する必要がある。本稿では、変形によるマサ土の水分特性曲線の特徴を把握するための保水性試験と、さまざまな条件下で不飽和マサ土の力学挙動を調べるための三軸圧縮試験を行った。得られた実験結果より、変形の影響を考慮に入れた新しい水分特性曲線を提案した。最後に実験結果の要素シミュレーションを行い、提案するモデルの解析精度を検証した。

キーワード：不飽和土，保水性試験，三軸圧縮試験，水分特性曲線，モデル化

1. はじめに

自然界に存在する地盤の多くは、不飽和状態であり、間隙に水と空気が混在した状態であるため、飽和土と比較して複雑な力学挙動を示す。そのため、これまでは飽和土を対象とした構成則が多く提案されており、地盤の挙動予測にも飽和土の構成則を用いることが多い。しかし、降雨による斜面崩壊など水分量の変化に起因した地盤挙動を正確に表現するためには、変形を含めた不飽和土の力学的・水理学的特性を理解し、その特性を定式化する必要がある。

これまでに、多くの研究者は、水分特性曲線に対する変形の影響を不飽和土の基本的な関係と見なす、それを考慮した水分特性曲線モデルがいくつか提案された¹⁻³⁾。これらの水分特性曲線モデルでは、空気侵入値は間隙比に依存するか、またはサクシオンは間隙比に依存すると仮定されている。一方、本研究グループでは有限変形を考慮に入れた新たなパラメータを導入することによって、より精度の高い水分特性曲線を提案し、構成モデルの精度向上に努めてきた⁴⁾。

本稿では、変形によるマサ土の水分特性曲線の特徴を把握するための保水性試験と、さまざまな条件下で不飽和マサ土の力学挙動を調べるための三軸圧縮試験を行った。得られた実験結果より、変形の影響を考慮に入れた新しい水分特性曲線を提案した。最後に実験結果に基づいた要素シ

ミュレーションを行い、提案するモデルの解析精度を検証した。

2. まさ土の材料特性

本試験には、試料として2.0 mm以下にふるい分けを行ったマサ土を使用した。土の液性限界・塑性限界試験(JIS A 1205)の結果を表1まさ土の物理特性に示す。なお、液性限界と塑性限界が求められない場合はNP(Non-Plastic)と記述する。粒径加積曲線と締固め曲線を図1および図2にそれぞれ示す。突き固め方法と種類は、A-a法を用いた。

表1 まさ土の物理特性

Liquid limit w_L (%)	NP
Plasticity index I_p (%)	NP
Specific gravity G_s (-)	2.66
Standard Proctor Maximum dry density ρ_d (Mg/m ³)	1.85
Standard Proctor Optimum water content w_{opt} (%)	13.7

3. 保水性試験

3.1 圧密試験装置

図3に不飽和土一次元圧密試験機の概略図を示す。本試験機で制御可能な圧力は、軸方向圧力、間隙空気圧(セル圧)、間隙水圧の3種類である。加圧板法により、複雑な応力経路およびサクシオン変化を制御することができ

る。なお、試験に用いたセラミックディスクの空気侵入値 (AEV) は 294kPa である。

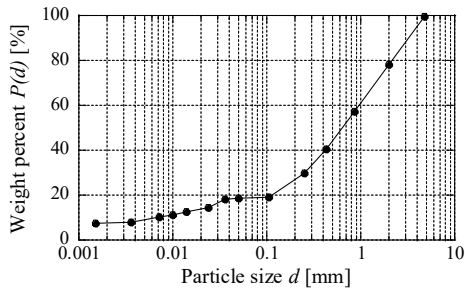


図 1 まさ土の粒径加積曲線

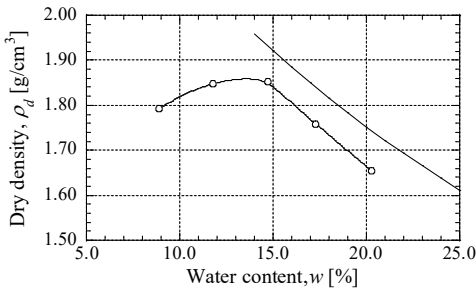
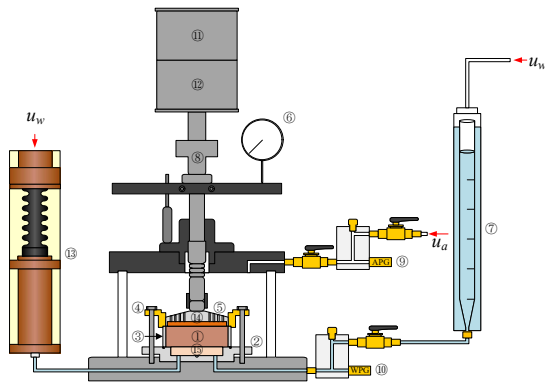


図 2 まさ土の締め固め曲線



① Specimen, ② Pedestal, ③ Compression ring, ④ Guide ring, ⑤ Pressure plate, ⑥ Dial gauge, ⑦ Double burette, ⑧ Load cell, ⑨ Pore air piezometer, ⑩ Pore water piezometer, ⑪ Axial cylinder (top), ⑫ Axial cylinder (bottom), ⑬ GDS PVC, ⑭ Porous stone, ⑮ Ceramic disk

図 3 圧密試験装置の概略図

3.2 供試体作製方法

圧密試験機に設置した圧密リングに所定のまさ土試料を入れ、直径 6.0 cm×高さ 1.0 cm、間隙比 0.65 を目標に、一層で静的に締め固めた。目標含水比は 15% に設定する。

3.3 試験方法

初期載荷圧として非排気・非排水条件で基底応力 50 kPa を載荷する。次に、間隙空気圧、間隙水圧を 50 kPa まで同時に載荷させ、その状態をサクシオン 0 kPa とする。その後、サクシオン載荷過程を図 4 に示す。基底応力を一定に保ちながらサクシオンを所定の値になるまで増加させ、サクシオンを段階的に載荷し、排水曲線を得る。一方、サクシオンの除荷過程は、所定のサクシオンの値になるまでサ

クシオンを段階的に除荷し、吸水曲線を得る。

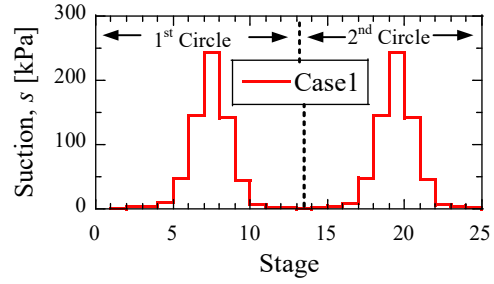
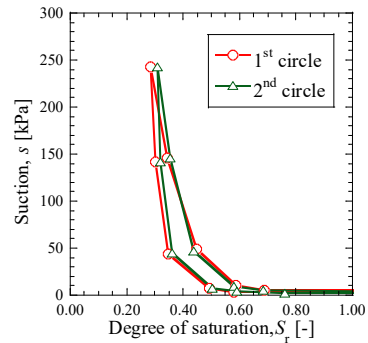


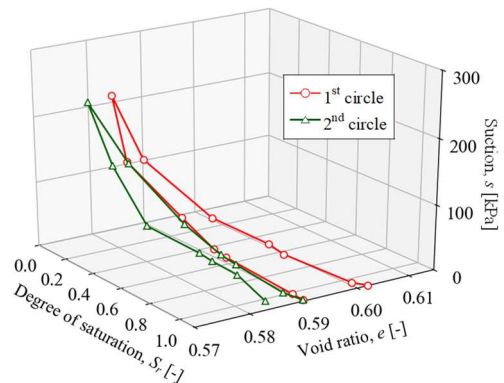
図 4 サクシオン載荷過程

3.4 試験結果

飽和度～サクシオン関係、飽和度～サクシオン～間隙比関係を図 5 に示す。図 5(a)より、排水曲線と吸水曲線のヒステリシスを確認できる。また、図 5(b)より、サクシオンの上昇とともに、間隙比は減少する。サクシオンが減少すると間隙比は増加するが、載荷前の間隙比に戻らないことが確認できる。ここで、図 5(a)において、サクシオンを繰り返し載荷した、 $s=250$ kPa 時の残留飽和度は異なる値を示した。これは、図 5(b)より変形による間隙比の影響が原因であると考えられる、間隙比が減少すると飽和度は大きくなっている。



(a) 飽和度～サクシオン



(b) 飽和度～サクシオン～間隙比

図 5 保水性試験結果

4. 三軸圧縮試験

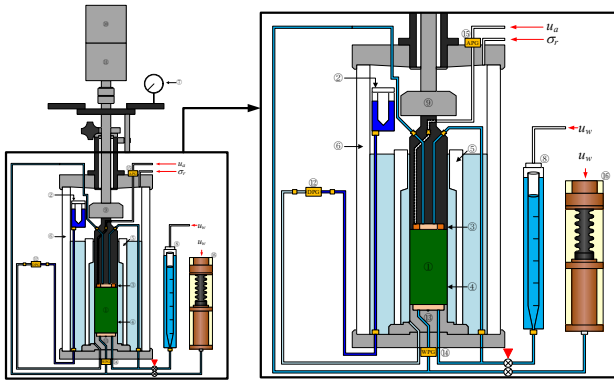
4.1 三軸試験装置

本試験に使用した不飽和土三軸圧縮試験装置の概要を

図 6 に示す。試験装置の主な特徴は、下記の通りである。

- 1) PVC(Pressure/Volume Controller) (⑯) を導入することで、間隙水の圧力制御に加え、体積制御を可能とした。
- 2) 内部に通水経路を確保したペDESTAL (⑬) を使用することで供試体に影響を与えることなく PVC とビュレット間の通水を可能とした。
- 3) 軸キャップ (③) にポーラスストーンとセラミックディスクを埋め込み、両面排水とすることで試験時間の短縮を図った。

なお、試験に用いたセラミックディスクの AEV は 294kPa である。



①Specimen, ②Standard burette, ③Axial cap, ④Rubber membrane, ⑤Inner cell, ⑥Outer cell, ⑦Dial gauge, ⑧Double burette, ⑨Load cell, ⑩Axial cylinder (top), ⑪Axial cylinder (bottom), ⑫Differential manometer, ⑬ Pedestal, ⑭ Pore water piezometer, ⑮ Pore air piezometer, ⑯GDS PVC

図 6 三軸試験装置の概略図

4.2 供試体作製方法

はじめに最適含水比より若干高い 15% の試料を高さ 11.7 cm × 直径 5.0 cm のモールドを用いて、三層に分け鉛直静的載荷によりに締固める。次に、高さ 10.0 cm × 直径 5.0 cm のモールドを用いて、供試体の高さが 10.0 cm になるように成型し、残りの試料から供試体の含水比を測定した。

4.3 試験方法

せん断前の圧密応力経路を図 7 に示す。基底応力を非排気・非排水状態で 20 kPa 載荷した後、排気・排水状態に切り替え、間隙空気圧を載荷することで所定のサクシオンを載荷する。排水量が安定したところで、基底応力を 50 kPa まで上昇させる。排水量の安定を再度確認し、ひずみ速度 0.0025%/min でせん断を開始する。本稿では、せん断条件がサクシオン一定、飽和度一定、非排気・非排水の 3 種類を 3 ケースずつ、計 9 ケース実施した。

飽和度一定制御は、間隙空気圧一定の状態、供試体からの排水量を間隙水圧の増減によって調整する Burton et al.⁶⁾ が提案した手法を採用した。飽和度一定に制御するための条件式を以下に示す。

$$dV_w - S_{r(\text{init.})} \cdot dV_v = 0 \quad (1)$$

ここで、 dV_w は間隙水の体積変化、 $S_{r(\text{init.})} dV_v$ は初期飽和度と間隙の体積変化の積である。

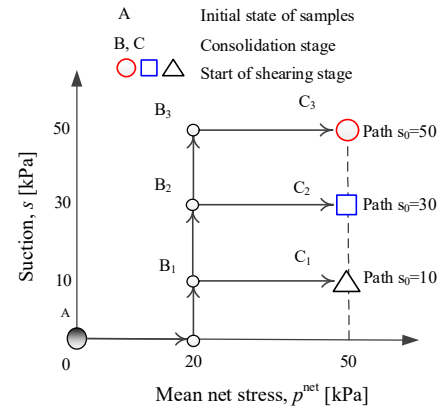


図 7 せん断前の圧密応力経路

4.4 試験結果

三軸試験に用いられた供試体物性値を表 2 に示す。ここで、「供試体作製時」は初期圧密を開始する時点での供試体物性値、「試験開始時」は全ての圧密が終了し、せん断試験を開始する前の時点での供試体物性値、「試験終了時」は最後の目標値に到達した時点での供試体物性値を意味する。

表 2 より、初期サクシオンが低下するとともに、試験開始時の飽和度は上昇する傾向が観察できる。これはサクシオンの低下により、含水比が高くなったことが原因だ。

表 2 供試体物性値

せん断条件	Case	供試体作成時			試験開始時			試験終了時		
		w ₀ (%)	e ₀ (-)	S _{r0} (-)	w ₀ (%)	e ₀ (-)	S _{r0} (-)	w _f (%)	e _f (-)	S _{rf} (-)
サクシオン一定	s ₀ =50	15.1	0.59	0.68	11.7	0.54	0.53	10.8	0.59	0.44
	s ₀ =30	15.1	0.62	0.65	12.2	0.56	0.58	11.5	0.60	0.51
	s ₀ =10	14.5	0.61	0.64	11.4	0.57	0.53	11.0	0.56	0.52
飽和度一定	s ₀ =50	14.9	0.61	0.65	10.9	0.56	0.52	11.5	0.59	0.52
	s ₀ =30	14.8	0.62	0.63	11.4	0.57	0.53	11.6	0.58	0.53
	s ₀ =10	15.0	0.62	0.64	12.5	0.56	0.59	12.5	0.56	0.59
非排気・非排水	s ₀ =50	14.7	0.60	0.65	10.7	0.54	0.53	10.7	0.54	0.52
	s ₀ =30	14.8	0.61	0.65	11.9	0.58	0.55	11.8	0.56	0.56
	s ₀ =10	14.5	0.61	0.63	12.5	0.55	0.61	12.5	0.55	0.61

サクシオン一定三軸圧縮試験結果を図 8 に示す。図 8(a) より、初期サクシオンが高いほど、最大軸差応力が大きくなる傾向が確認できた。また、s₀=10 のケースはせん断開始直後に急激に圧縮したが、その後の体積変化はみられなかった。対して、s₀=30, s₀=50 のケースは軸ひずみの増加に伴って膨張した。図 8(b) より、初期サクシオンが大きいほど飽和度の減少量が大きくなる傾向が確認できた。これは圧縮に伴い、飽和度が高く、膨張に伴い、飽和度が低くなったと考えられる。

飽和度一定三軸圧縮試験の飽和度～軸ひずみ関係を図 9 に示す。図 9 より、飽和度は軸ひずみが増加しても一定

であり、せん断中に飽和度を一定に制御ができていることが分かる。軸差応力～体積ひずみ～軸ひずみ関係、サクシオン変化～軸ひずみ関係を図 10 に示す。図 10(a)より、最大軸差応力は初期サクシオンが低いほど大きくなる傾向にある。また、体積ひずみは圧縮から膨張に転じる傾向にあり、膨張に転じた後の膨張量は飽和度が低いほど大きくなる。一方、図 10(b)より、軸ひずみが増加すると、サクシオンは変化している。初期サクシオンが高いほどサクシオンの減少量が大きくなった。これより、間隙の変化はサクシオンの変化に影響を与えることが分かる。

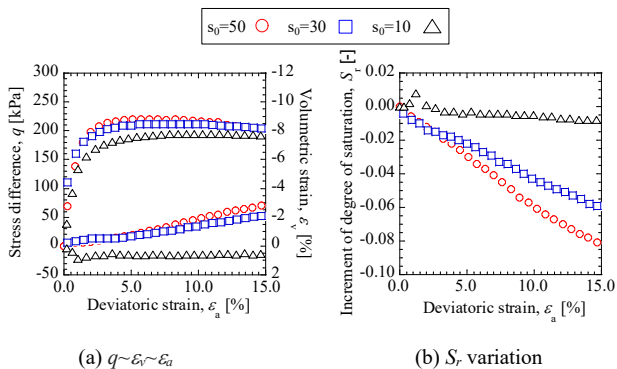


図 8 サクシオン一定三軸圧縮試験結果

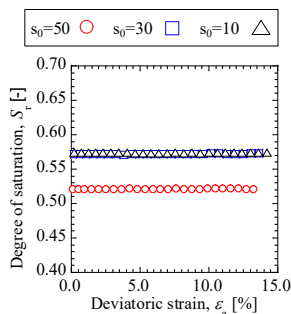


図 9 飽和度一定三軸圧縮試験の飽和度～軸ひずみ関係

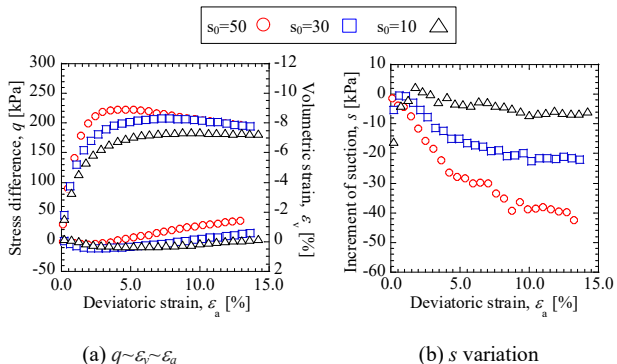


図 10 飽和度一定三軸圧縮試験結果

図 11 に非排気・非排水条件下における三軸圧縮試験結果を示す。図 11(a)より、初期サクシオンが高いほど最大軸差応力が大きくなる傾向が確認できた。また、体積ひずみは膨張傾向を示し、膨張量は初期サクシオンが高いほど大きくなる。一方、図 11(b)より、 $s_0=30$ 、 $s_0=50$ のサクシ

ンが高いケースでは、軸ひずみの発生に伴ってサクシオンが急激に低下し、軸ひずみ 1.5%以降は軸ひずみの増加に伴い、サクシオンが緩やかに減少した。対して、 $s_0=10$ のケースでは、軸ひずみの発生に伴い、サクシオンが低下するが、その後軸ひずみの増加に伴ってサクシオンが回復する傾向を示した。

飽和マサ土の三軸圧縮試験の結果⁷⁾を用いて、限界状態における飽和・不飽和マサ土の応力状態を図 12 に示す。図中の黒色の実線は、試験結果から推定した限界状態線である。せん断条件は異なるが、限界状態線の傾きの値は一定値の 1.55 であり、飽和・不飽和マサ土の力学的・水理学的特性を統一的な式で表現することが可能となった。また、不飽和土の力学的・水理学的特性を定式化するために、変形の影響を考慮に入れた水分特性曲線を提案する必要があることも示唆された。

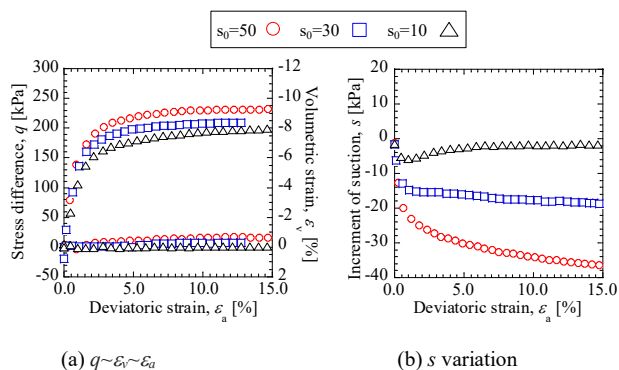


図 11 非排気・非排水三軸圧縮試験結果

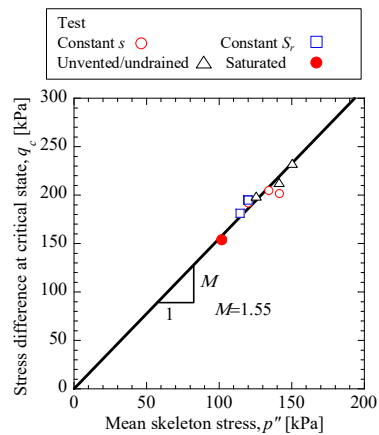


図 12 限界状態における飽和・不飽和マサ土の応力状態

5. 飽和・不飽和弾塑性構成モデルによる解析

本研究は既存の不飽和土弾塑性構成モデル⁵⁾に改良を加え、新しい水分特性モデルを提案し、それを用いた要素シミュレーションを行い、実測値と比較することで修正モデルの適用性を検討する。

5.1 水分特性曲線モデルの改良

Zhang and Ikariya が提案した飽和・不飽和弾塑性構成モデル⁵⁾は、骨格応力 ($\sigma' = \sigma_{net} + S_r s$) と飽和度 (S_r) を状態

変数として用いる。ここで σ_{net} は基底応力、 s はサクシオンを表す。また、不飽和土の正規圧密線 (N.C.L.S.) は飽和土の正規圧密線 (N.C.L.) に平行であり、N.C.L.S. は N.C.L. より上方にあると仮定している。

本研究では、Zhang and Ikariya が提案したモデル⁵⁾の概念を用いて、その中の水分特性曲線モデルをベースして改良を加えた。この水分特性曲線モデルには 8 項目のパラメータが関与しており、 c_1 、 c_2 、 c_3 の 3 項目のパラメータはフィッティングにより決定され、他の k_{s0} 、 S_r^s 、 S_r^r 、 s_d 、 s_w の 5 項目のパラメータは、保水性試験より容易に決定できる。

一方で、保水性試験と三軸試験結果より、サクシオンと飽和度の変化は間隙比の変化 (体積ひずみ) に依存する。本研究では、飽和度の変化をサクシオンによるもの ($dS_r = k_s^{-1} ds$) と、間隙比増分 de による二つの成分の和で簡単に表現する。すなわち、

$$dS_r = -k_s^{-1} ds - c_{sr} de \quad (2)$$

ここで、 c_{sr} は水分特性曲線に変形の影響を考慮に入れたフィッティングパラメータである。これより、水分特性の主曲線は、以下の 3 つの式のように定義する。

(i) 初期排水曲線 (Initial drying curve) :

$$S_r = S_r^{s0} - \frac{2}{\pi} (S_r^{s0} - S_r^r) \arctan((e^{c_1 s} - 1) / e^{c_2 s_d}) - c_{sr} (e - e_0) \quad (3)$$

(ii) 主排水曲線 (Main drying curve) :

$$S_r = S_r^r - \frac{2}{\pi} (S_r^s - S_r^r) \arctan((e^{c_1 s} - 1) / e^{c_2 s_d}) - c_{sr} (e - e_0) \quad (4)$$

(iii) 主吸水曲線 (Main wetting curve) :

$$S_r = S_r^s - \frac{2}{\pi} (S_r^s - S_r^r) \arctan((e^{c_1 s} - 1) / e^{c_2 s_w}) - c_{sr} (e - e_0) \quad (5)$$

ここで、 s_d は空気侵入値に相当するサクシオン、 s_w は水侵入値に相当するサクシオンである。また、 c_1 、 c_2 は主曲線の形状を決めるフィッティングパラメータである。 S_r^r は残留飽和度、 S_r^{s0} は飽和状態とした時の飽和度であり $S_r^{s0} = 1$ に等しい。

水分特性の主曲線間における排水・吸水過程を走査曲線として、サクシオンと飽和度の増分は次式で表される。

$$k_s = \begin{cases} k_w + k_{d\max} r^{I_d} & s \geq 0 \\ k_w + k_{d\max} r^{I_w} & s < 0 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 k_w はサクシオンが同じの時点での主排水曲線に相当する接線剛性係数、 $k_{d\max}$ は主排水曲線に接線剛性係数の最大値である。また、 r は現在の時点のサクシオンと残留飽和度時のサクシオンの比、 I_d 、 I_w は走査曲線の形状を決めるフィッティングパラメータである。

以上より、新たに提案した水分特性曲線モデルを図 13 に示す。すなわち、変形の影響を考慮することで、より一般的な水分特性を表現することができる。尚、非排気・非排水状態で、間隙比 e と水飽和度 S_r および含水比 w は次式を満足しなければならない。

$$dw = 0, \quad dS_r = \frac{S_r de}{e} \quad (7)$$

ここで、 G_s は比重である。この時、式(2)と(7)より、

$$ds = \left(\frac{S_r}{e} - c_{sr} \right) k_s de \quad (8)$$

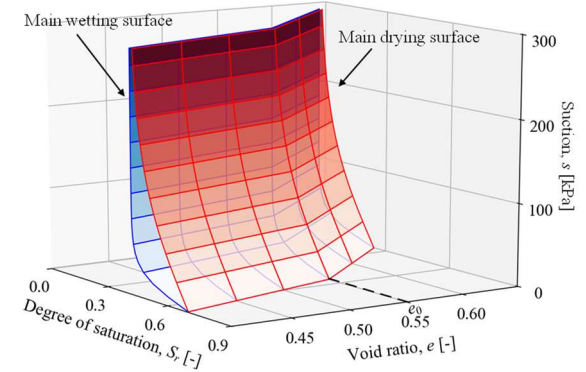


図 13 水分特性曲面(曲線)の3D 鳥瞰図

5.2 パラメータ

解析に使用したパラメータは表 3 および表 4 に示したとおりである。また、解析の初期条件は表 2 に示す通りであり、過圧密パラメータ ρ_c の値は 0.190 であり。

表 3 水分特性曲線の解析パラメータ

	Compression	Dilatancy
Saturated degree of saturation S_r^s	0.65	
Residual degree of saturation S_r^r	0.27	
Drying AEV (kPa) S_d	6.00	
Wetting AEV (kPa) S_w	1.00	
Influence of finite deformation on degrees of saturation C_{sr}	0.6	2.0
Parameter of shape function c_1	0.011	
Parameter of shape function c_2	0.042	
Parameter of scanning curve (kPa) I_d	1.6	
Parameter of scanning curve (kPa) I_w	1.1	

表 4 弾塑性構成モデルの解析パラメータ

Compression index λ	0.089
Swelling index κ	0.008
Critical state parameter R_{cs}	3.65
Void ratio N ($p^* = 98$ kPa on N.C.L.)	0.60
Poisson's ratio ν	0.25
Parameter of overconsolidation a	10.0
Parameter of suction b	20.0
Parameter of overconsolidation β	10.0
Void ratio N_r ($p^* = 98$ kPa on N.C.L.S.)	0.63

5.3 要素シミュレーション

図 14 に保水性試験結果と要素シミュレーション結果の比較を示す。残留飽和度は間隙比が低いほどが大きくなる傾向を精度良く表現できていることがわかる。すなわち、変形の影響を考慮することで水分特性曲線モデルの精度を向上させた。

図 15~図 17 に三軸圧縮試験の試験結果と要素シミュレーション結果の比較を示す。これより、最大軸差応力と体積膨張量は初期サクシオンが高いほど大きくなる傾向に表現できている。また、さまざまな条件における飽和度とサクシオンの変化も定性的に表現できている。図 16(b)と図 17(b)より、せん断開始直後、サクシオンの実験結果が解析結果より低かった。ただし、飽和度とサクシオンの減少により、軸差応力は小さくなる傾向によく表現できていることがわかる。すなわち、新しい水分特性モデルを用いたことにより、解析の精度を向上させた。

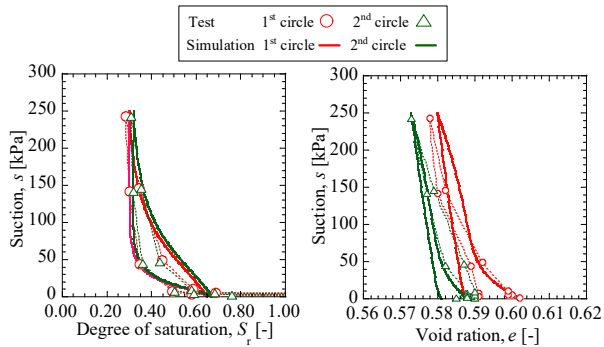
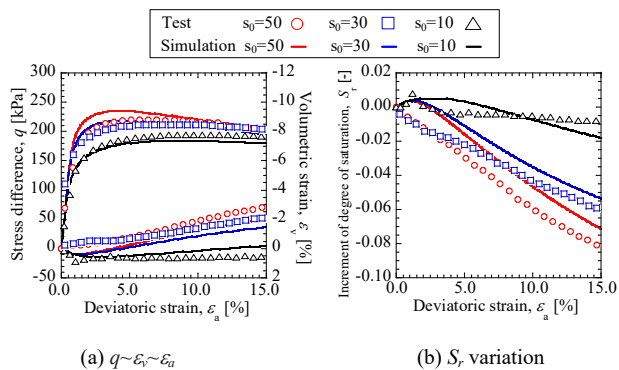


図 14 保水性試験結果と解析値の比較



(a) $q \sim \varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ (b) S_r variation

図 15 サクシオン一定試験結果と解析値の比較

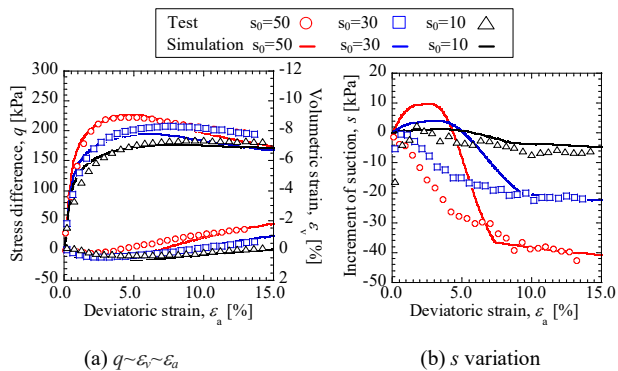
6. まとめ

本稿では、変形によるマサ土の水分特性曲線の特徴を把握するための保水性試験と、さまざまな条件下で不飽和マサ土の力学挙動を調べるための三軸圧縮試験を行った。得られた実験結果より、変形の影響を考慮に入れた新しい水分特性曲線を提案した。最後に実験結果に基づいた要素シミュレーションを行い、提案するモデルの解析精度を検証した。以下の結論を得られた。

- 1) 保水性曲線試験より、水分特性曲線は変形による間隙比の影響を受けるが分かり、間隙比の減少に伴い飽和度は大きくなった。
- 2) さまざまな条件下で行った三軸圧縮試験結果より、初期サクシオンが高いほど、不飽和マサ土の最大軸差応力と体積ひずみの膨張量が大きくなる傾向が分かった。軸ひずみの増加に伴い、飽和度とサクシオンは変化することを示した。これは、供試体の間隙比の変化

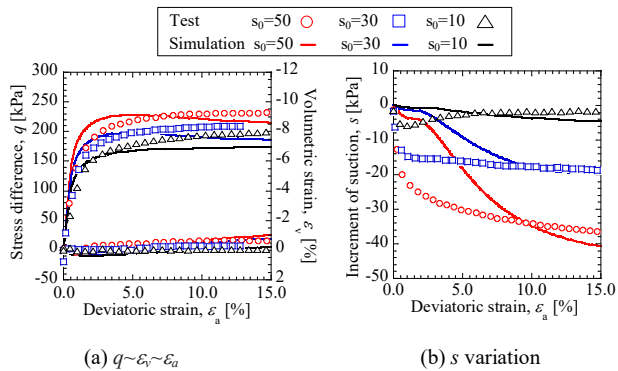
により、水分特性曲線が変化したためと言える。

- 3) せん断条件は異なるが、限界状態線の傾きの値は一定値であり、飽和・不飽和マサ土の力学的・水理学的特性を統一的に表現できることが明らかになった。
- 4) 解析結果より、変形の影響を考慮に入れた新しい水分特性曲線を提案することによって、構成モデルの精度を向上させた。



(a) $q \sim \varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ (b) s variation

図 16 飽和度一定試験結果と解析値の比較



(a) $q \sim \varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ (b) s variation

図 17 非排気・非排水試験結果と解析値の比較

参考文献

- 1) Sheng, D., Fredlund, D. G., Gens, A.: A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 4, pp. 511-534, 2008.
- 2) Nuth, M., Laloui, L.: Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils, *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, No. 6, pp. 835-844, 2008.
- 3) Sheng, D., Zhou, A. N.: Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 48, No. 5, pp. 826-840, 2011.
- 4) Xiong Xi, 沖野頌悟, 常本貴史, 岩井裕正, 張鋒: 飽和度一定三軸圧縮試験による不飽和マサ土力学特性の精査およびそのモデル化, 第 30 回中部地盤工学シンポジウム, pp. 1~6, 2018.
- 5) Zhang, F. and Ikariya, T.: A new model for unsaturated soil using skeleton stress and degree of saturation as state variables, *Soils and Foundations*, Vol. 51, No.1, pp. 67-81, 2011.
- 6) Burton, G. J., Pineda, J. A., Sheng, D., Airey, D. and Zhang, F.: Exploring one-dimensional compression of compacted clay under constant degree of saturation paths, *Géotechnique*, Vol. 66, No. 5, pp. 435-440, 2015.
- 7) 小林聖二: 不飽和土の力学特性に関する実験的研究およびそのモデル化, 名古屋工業大学修士論文, 2016.