

飽和度一定三軸圧縮試験による不飽和まさ土力学特性の精査およびそのモデル化  
Triaxial compression tests on unsaturated Masado under constant-degree-of-saturation  
condition and its modeling

Xiong Xi<sup>1</sup>, 沖野頌悟<sup>1</sup>, 常本貴史<sup>2</sup>, 岩井裕正<sup>1</sup>, 張鋒<sup>1</sup>

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 京都府

## 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三相のものになっているため、飽和土や乾燥土に比べてより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正確に記述しなければならない。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・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。本研究グループでは状態変数として骨格応力と飽和度を用いた飽和・不飽和土の力学特性を統一的に表現できる弾塑性構成モデルを提案している。本稿では、飽和度一定三軸圧縮試験を行い、得られた実験結果より、新たに提案した水分特性曲線の精度を検証し、さらに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で構成モデルの精度を向上させた。

キーワード：不飽和土，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、土粒子間の間隙に水と空気を含む不飽和状態である。不飽和土は、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。しかしながら、降雨による斜面崩壊など水分量の変化が影響する地盤挙動を正確に予測するためには、不飽和土の力学挙動をより正確にモデル化する必要がある。

これまでに、Alonso et al.<sup>1)</sup>の Barcelona Basic Model (BBM)をはじめ、不飽和土の応力～ひずみ特性を考慮した構成モデルがいくつか提案されている。これらの構成モデルでは、応力変数に全応力、基底応力、あるいは Bishop の有効応力を用いるなど著者によって異なる。一方、本研究グループでは状態変数として骨格応力と飽和度を用いた飽和・不飽和土の力学特性を統一的に表現できる弾塑性構成モデル<sup>2)</sup>を提案し、本構成モデルの精度向上に努めてきた。

本稿では、飽和度一定条件における不飽和土のせん断挙動を調査するために、マサ土を用いた飽和度一定三軸圧縮試験を行った。また、実験結果より、解析パラメータを決定し、要素シミュレーションを行った。さらにサクシオン～飽和度の関係を水分特性曲線のみで表現することを可能にし、有限変形を考慮に入れた新たなパラメータを導入す

ることで解析の精度を向上させた。

## 2. 本稿の研究背景

本研究が提案する飽和・不飽和弾塑性構成モデル<sup>2)</sup>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  $\sigma_{net}$  は基底応力、 $s$  はサクシオンを表す。また、図 1 に示すように、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。この時、N.C.L.S. と限界状態線 (C.S.L.S.) は次式の関係が成り立つ。

$$N.C.L.S.: e = N(S_r) - \lambda \ln \frac{p}{p_r}, \left( \eta = \frac{q}{p} = 0 \right) \quad (1)$$

$$C.S.L.S.: e = \Gamma(S_r) - \lambda \ln \frac{p}{p_r}, \left( \eta = \frac{q}{p} = M \right) \quad (2)$$

$N(S_r)$  と  $\Gamma(S_r)$  はある飽和度での基準の平均骨格応力 ( $p_r = 98$  kPa) 時における N.C.L.S. および C.S.L.S. の間隙比、 $\lambda$  は圧縮指数、 $p$  は平均骨格応力、 $q$  は偏差骨格応力、 $M$  は限界状態時の応力比である。また、間隙比  $N(S_r)$  は次式で与えられる。

$$N(S_r) = N + \frac{N_r - N}{S_r^s - S_r^f} (S_r^s - S_r) \quad (3)$$

$S_r^s$  と  $S_r^f$  は湿潤飽和度と残留飽和度であり、保水性試験より求められる。 $N_r$  は残留飽和度で基準の平均骨格応力  $p_r$  における N.C.L.S. 上の間隙比である。

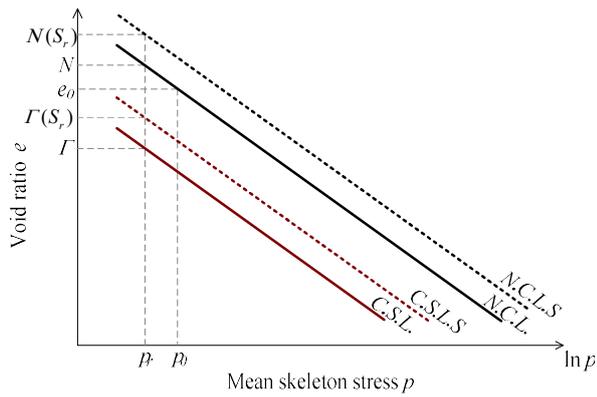


図 1 e-lnp 関係模式図

### 3. 飽和度一定三軸圧縮試験

#### 3.1 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まさ土を使用した。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 2 および図 3 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 $\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1.85
Standard Proctor Optimum water content $w_{opt}$ (%)	13.7

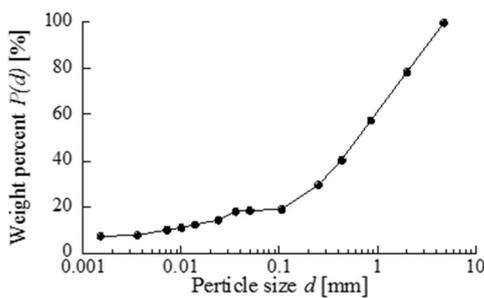


図 2 まさ土の粒径加積曲線

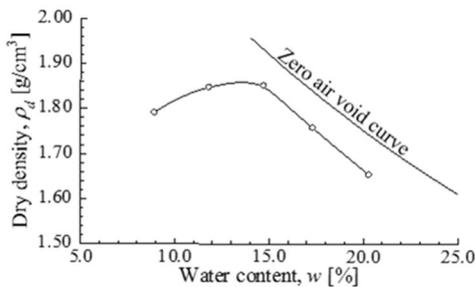


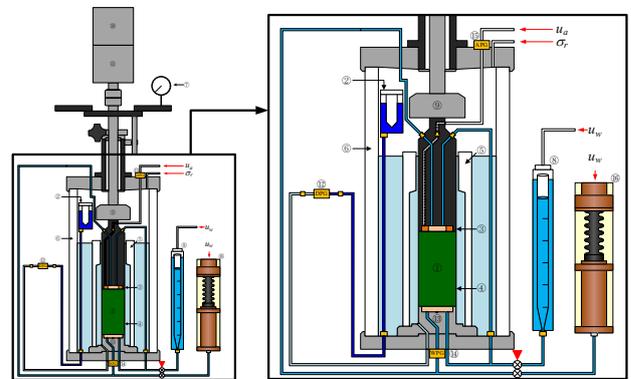
図 3 まさ土の締固め曲線

#### 3.2 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略図を図 5 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) (⑩) 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。ペDESTAL は図 6 に示す Barrera<sup>3)</sup> が使用したペDESTAL を参考とした。また、体積変化を正確に計るために、三軸試験中漏れ出した空気を除去する空気フラッシング作業が必要であるが、図 4 に試験中空気フラッシングに用いられるペDESTAL の構造概略も示す。
- 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。

三軸試験装置の計測系と圧力系について説明する。供試体の軸変位はダイヤルゲージ (⑦)、排水量は GDS 製の PVC (⑩) で計測する。不飽和土の力学試験を実施する場合、体積変化の計測は一つの課題である。間隙に空気と水が混在している場合、体積変化を実際の供試体の変形として計測しなければならない。そこで、本試験装置は体積変化の計測を基準水面となるビュレット (②) と内セル (⑤) の水圧の差を差圧計 (⑫) で計測する二重セル方式により行った。



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

図 5 三軸試験装置の概略図

軸方向・側方方向圧力は、手動または電気・空気 (E-P) レギュレータにより空気圧で制御できる機構となっている。軸方向圧力は、試験装置の上部に設置したシリンダー (⑩および⑪) を介して供試体に作用させる。軸シリンダーを二重構造にすることで、三軸圧縮試験のみではなく三軸伸張試験を行うことが可能である。また、試験機下部に昇降装置を備えており、ひずみ制御試験を実施することも可能である。なお、セラミックディスクの空気侵入値は 1.5 MPa である。

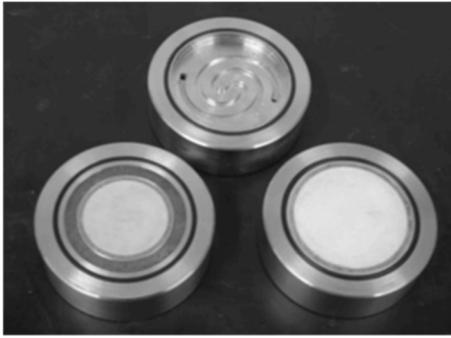


図 6 ペDESTALの通水経路<sup>3)</sup>

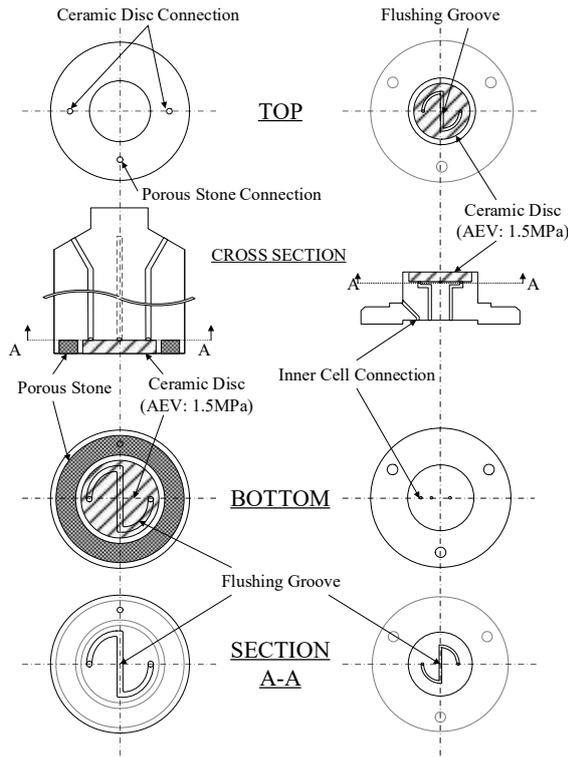


図 7 三軸試験中空気フラッシングに用いられるペDESTALの概略

### 3.3 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荷重によりに締め固める。この時の荷重圧は、約 1 MPa である。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。

### 3.4 試験方法

せん断前の締め固め応力経路を図 8 に示す。基底応力を非排気・非排水状態で 20 kPa 荷重した後、排気・排水状態に切り替え、間隙空気圧を荷重することで所定のサクシオンを荷重する。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、飽和度一定制御に切替えて、ひずみ速度 0.0025%/min でせん断を開始する。本稿では、目標の初期サクシオンが 10, 30, 50 kPa の 3 種類を 2 ケースずつ、計 6 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では、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.<sup>4)</sup>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。

$$dV_w - S_{r(\text{init.})} \cdot dV_v = 0 \quad (4)$$

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。

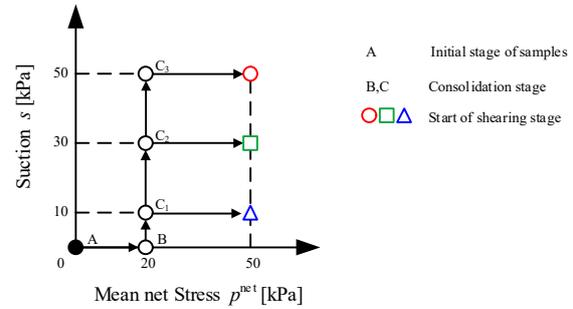


図 8 せん断前の締め固め応力経路

### 3.5 試験結果

飽和度一定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。

これらの結果より、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。これはサクシオンが低下すると、含水比が高くなったと考えられる。

表 2 供試体物性値

Case	供試体作成時			試験開始時			試験終了時		
	$w_0$ (%)	$e_0$ (-)	$S_{s0}$ (-)	$w_0$ (%)	$e_0$ (-)	$S_{s0}$ (-)	$w_f$ (%)	$e_f$ (-)	$S_{s_f}$ (-)
s50-1	15.0	0.611	0.65	11.0	0.558	0.52	11.6	0.586	0.52
s50-2	14.3	0.629	0.61	11.1	0.571	0.52	11.2	0.577	0.52
s30-1	14.8	0.622	0.63	11.4	0.569	0.53	11.6	0.579	0.53
s30-2	14.7	0.608	0.64	11.3	0.536	0.56	11.4	0.541	0.56
s10-1	14.4	0.610	0.63	11.9	0.549	0.59	11.9	0.550	0.59
s10-2	14.3	0.612	0.62	12.7	0.557	0.60	12.6	0.556	0.60

飽和度～軸ひずみ関係を図 9 に示す。これより、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、軸差応力・骨格応力比～体積ひずみ～軸ひずみ関係を図 10 に示す。図 10 (a)より、最大軸差応力は飽和度が低いほど大きくなる傾向にある。また、体積ひずみはせん断開始直後にバラつきがみられるが、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。図 10

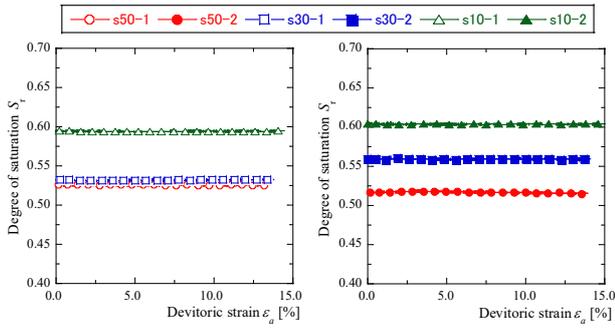
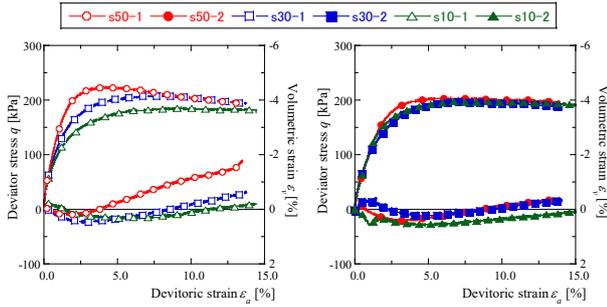
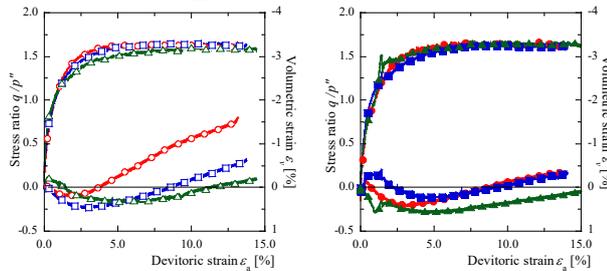


図 9 飽和度一定三軸圧縮試験の飽和度～軸ひずみ関係



(a) 軸差応力～体積ひずみ～軸ひずみ関係



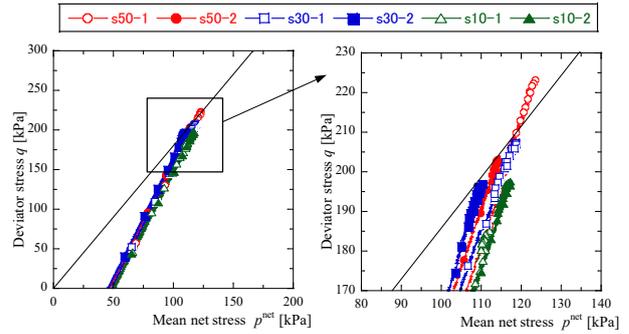
(b) 軸差応力・骨格応力比～体積ひずみ～軸ひずみ関係

図 10 飽和度一定三軸試験結果

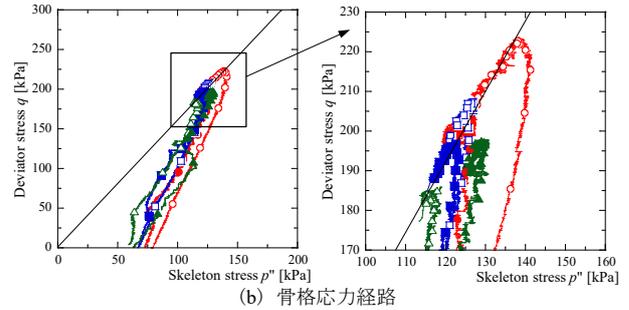
(b)より、飽和度が異なるケースにおいても、軸差応力・骨格応力比は同様な値になることが分かる。

飽和度一定三軸試験を基底応力と骨格応力で整理した応力経路を図 11 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。図 11 (a)より、基底応力した場合の限界状態線の傾きの値は応力経路によって異なる。一方、図 11 (b)より骨格応力で整理した限界状態線の傾きの値は一定値の 1.59 であり、骨格応力で整理した方がより合理的に不飽和土の力学特性を統一的に表現できることが明らかになった。

サクシオン～軸ひずみ関係、排水量～軸ひずみ関係を図 12 に示す。図 10 の結果から、供試体が圧縮から膨張に転じることが確認されたが、図 12 (b)の排水量においても圧縮・膨張に対応して排水から吸水に転じていることが分かる。また、図 12 (a)より、軸ひずみが増加すると、サクシオンは低下している。すなわち、供試体の膨張、つまり吸水によってサクシオンが低下することが分かる。したがって、水分特性曲線をモデルする場合、飽和度一定条件におけるサクシオン～間隙の変化の関係をきちんと定式化する必要があることを示唆している。

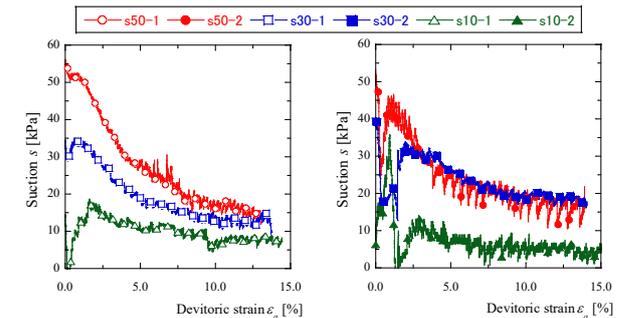


(a) 基底応力経路

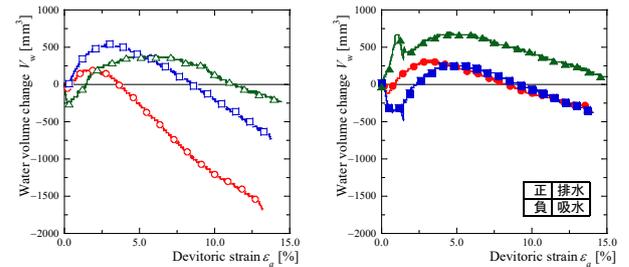


(b) 骨格応力経路

図 11 飽和度一定三軸圧縮試験の応力経路



(a) サクシオン～軸ひずみ関係



(b) 排水量～軸ひずみ関係

図 12 サクシオン～排水量～軸ひずみ関係

#### 4. 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<sup>2)</sup>に改良を加え、新しい水分特性モデルを提案し、それを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。

##### 4.1 水分特性曲線モデルの改良点

本研究では、Zhang and Ikariya が提案したモデル<sup>2)</sup>の概念を用いて、その中の水分特性曲線モデルをベースとして

修正を加えた。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、サクシオン一定条件における三軸試験結果<sup>5)</sup>より、サクシオンだけでなく、飽和度の変化も不飽和土の変形に依存する。この時、状態変数(間隙比 $e$ )と水理学的状態変数(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。

$$w = \frac{S_r e}{G_s}, \quad dS_r = \frac{G_s dw + S_r de}{e} \quad (5)$$

ここで、 $G_s$ は比重である。飽和度増分は間隙比増分 $de$ だけではなく、含水比増分 $dw$ にも依存することがわかる。

本研究では、飽和度の変化をサクシオンによるもの( $dS_r^s = k_s^{-1} ds$ )と、間隙比増分 $de$ と含水比増分 $dw$ によるもの $dS_r^e$ の単純な和で表現することとする。また、図10および図12より、含水比増分 $dw$ は間隙比増分 $de$ と正の相関がある。すなわち、

$$dS_r^e = -c_{sr} \frac{S_r de}{e} \quad (6)$$

ここで、 $c_{sr}$ は飽和度に有限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、

$$ds = -k_{fd} dS_r^e = k_{fd} c_{sr} \frac{S_r de}{e} \quad (7)$$

ここで、 $k_{fd}$ はサクシオンに有限変形を考慮に入れたフィッティングパラメータである。 $c_{sr}, k_{fd}$ はサクシオン一定と飽和度一定三軸試験より決定している。圧縮(排水)および膨張(吸水)条件において、 $k_{fd}$ は異なる値であり、水分特性のヒステリシスを表現できる。

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、従来の主曲線と走査曲線(サクシオンと飽和度はいずれも変化する場合)に、サクシオンと飽和度はそれぞれ一定である2ケース(合計3種類がある)を加えることで、より一般的な水分特性を表現することとした。尚、飽和度一定時に、サクシオンの変化と有限変形がもたらした飽和度の増分は大きさこそ同じであるが、正負は逆である( $dS_r = dS_r^s + dS_r^e = 0$ )。

#### 4.2 パラメータの決定

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 $\rho_c$ の値は0.132であり。

図14に飽和三軸圧縮試験の実測値と解析値の比較を示す。図14より、飽和三軸圧縮試験の挙動をよく表現できていることがわかる。 $R_{cs}, a, \beta$ は飽和三軸圧縮試験より決定している。不飽和マサ土の飽和度一定三軸圧縮試験の解析結果は、この飽和三軸圧縮試験の解析に用いたパラメータを変えず、 $b, c_{sr}, k_{fd}$ のみを変化させて、飽和度一定三軸圧縮試験の試験結果を表現している。

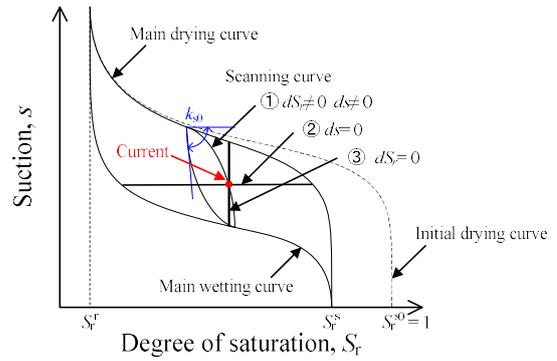


図13 水分特性曲線の模式図

表3 水分特性曲線の解析パラメータ

	Compression	Dilatancy
Saturated degree of saturation $S_r^s$	0.80	
Residual degree of saturation $S_r^r$	0.30	
Drying AEV (kPa) $S_d$	5.00	
Wetting AEV (kPa) $S_w$	1.00	
Initial stiffness of scanning curve (kPa) $k_{s0}^e$	1500	
Influence of finite deformation on degrees of saturation $c_{sr}$	2.00	
stiffness of scanning curve in finite deformation (kPa) $k_{fd}$	100	1000
Parameter of shape function $c_1$	0.020	
Parameter of shape function $c_2$	0.080	
Parameter of shape function $c_3$	50	

表4 弾塑性構成モデルの解析パラメータ

Compression index $\lambda$	0.089
Swelling index $\kappa$	0.008
Critical state parameter $R_{cs}$	3.95
Void ratio $N$ ( $p' = 98$ kPa on N.C.L.)	0.69
Poisson's ratio $\nu$	0.25
Parameter of overconsolidation $a$	23.0
Parameter of suction $b$	10.0
Parameter of overconsolidation $\beta$	5.0
Void ratio $N_r$ ( $p' = 98$ kPa on N.C.L.S.)	0.71

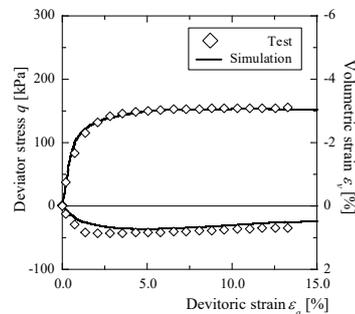


図14 飽和三軸圧縮試験の試験結果と解析値の比較

#### 4.3 飽和度一定三軸圧縮試験の要素シミュレーション

図15~図17に飽和度一定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。飽和度一定条件におけるサクシオンの変化を定性的に表現できている。また、

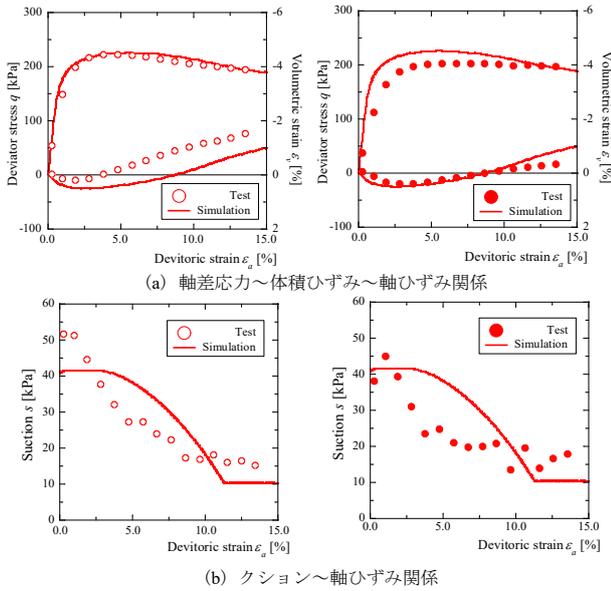


図 15 試験結果と解析値の比較 (s50-1,2)

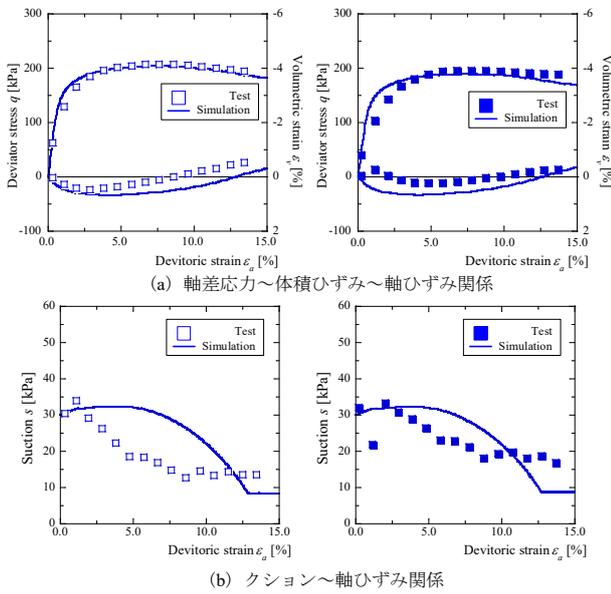


図 16 試験結果と解析値の比較 (s30-1,2)

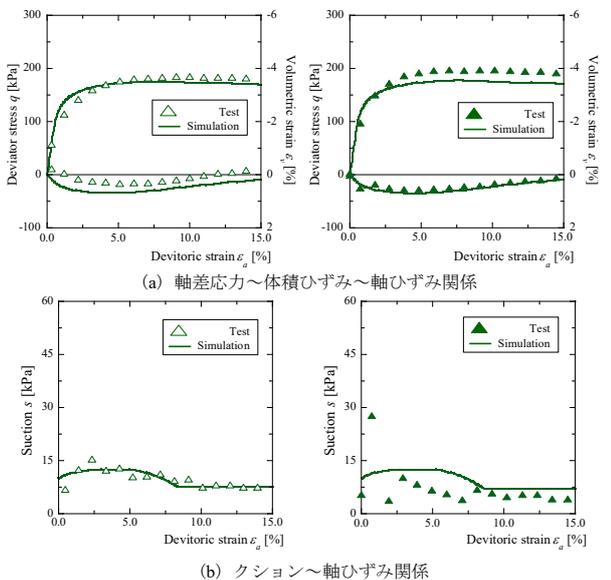


図 17 試験結果と解析値の比較 (s10-1,2)

図 15(a)より、s50-2では、s50-1よりも、最大軸差応力が低かったため、実験結果が解析結果より低い結果となった。図 17(a)より、s10-2では、s10-1よりも、軸差応力が高いため、実験結果が解析結果より高い結果となった。ただし、最大軸差応力および体積膨張は飽和度が低いほどが大き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、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で構成モデルの精度を向上させた。

## 5. まとめ

本稿では、本研究グループが提案する不飽和土構成モデルの精度向上を目的に、マサ土を用いた飽和度一定三軸圧縮試験を実施し、飽和度一定条件での不飽和土のせん断挙動を調査した。また、実験結果に基づき構成式に含まれるパラメータを決定し、要素シミュレーションを行った。さらに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、構成モデルの精度を向上させた。以下の結論を得られた。

- 1) 飽和度が低いほど、最大軸差応力が大きくなるが、限界状態における骨格応力比は同じ値をとる。
- 2) 体積ひずみは、せん断に伴って圧縮から膨張に転じる傾向にあり、飽和度が低いほど、その膨張量は大きい。
- 3) 基底応力で整理した場合限界状態線の傾きの値は応力経路によって異なる。一方、骨格応力で整理した場合その値は一定値であり、より合理的に不飽和土の力学特性を統一的に表現できることが明らかになった。
- 4) 軸ひずみの増加に伴い、供試体は圧縮から膨張に転じる傾向を示したが、この挙動に対応し、水の出入りも排水から吸水に転じた。また、軸ひずみの増加に伴い、サクシオンは低下する傾向を示した。これは、供試体の膨張により、吸水したためと言える。
- 5) 飽和度～サクシオン関係に有限変形を考慮した新たなパラメータを導入することによって、構成モデルの精度を向上させた。

## 参考文献

- 1) Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A.: A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, Vol. 40, No.3, 405-430, 1990.
- 2) 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.
- 3) Barrera, M.: Estudio experimental del comportamiento hidromecánico de suelos colapsables, PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2002.
- 4) 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.
- 5) 沖野頌悟, 熊曦, 常本貴史, 岩井裕正, 張鋒: 不飽和マサ土を用いた飽和度一定およびサクシオン一定三軸圧縮試験, 第53回地盤工学研究発表会, pp. 1~2, 2018