

不飽和マサ土を用いた飽和度一定次元圧密試験とそのモデル化

Uniaxial compression tests on unsaturated Masado under constant-degree-of-saturation and its modeling

常本 貴史¹, 小林 聖二², Qiu Xiaoye³, 栗本 悠平³, 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 清水建設株式会社

3 名古屋工業大学・大学院・工学研究科・創成シミュレーション工学専攻

概 要

自然地盤は間隙に水と空気が混在する不飽和状態になることが多く、その力学挙動は飽和度の変化によって複雑になる。また、不飽和土に関する要素試験は、高度な技術と多大な時間がかかることから飽和土に比べて、データの取得が難しく、その力学挙動に関する構成モデルの構築は遅れている。そのため、不飽和土特性を実験的に把握し、構成モデルを定式化することが必要とされている。これまで本研究グループでは、骨格応力と飽和度を状態変数とした飽和・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、同モデルの検証を行ってきた。本稿では、状態変数の一つである飽和度に着目し、不飽和土圧密試験機を用いてマサ土の飽和度一定次元圧密試験を行い、異なる飽和度における不飽和マサ土の力学特性を調べた。また、提案したモデルを用いて実験結果の再現シミュレーションを実施し、試験結果と解析結果を比較することで提案する飽和・不飽和土弾塑性構成モデルの妥当性を検証した。

キーワード：不飽和土，飽和度，骨格応力

1. はじめに

本研究では、その不飽和土特性を実験的に把握し、構成モデルで定式化することを目的としている。不飽和土のモデルは、Alonso et al. (1990)¹⁾が Barcelona Basic Model (BBM)を提唱して以来、多くの研究者が様々な構成モデルを開発、提案している。その構成モデルの多くは基底応力、サクシオン、飽和度を状態変数として用いている。これらは Cam-Clay モデルを基礎とした不飽和土のモデルである。また、基底応力とサクシオンを独立な状態変数として扱う代わりに、飽和度も含めた有効応力を状態変数として用いる構成モデルも多数提案された。飽和度を含めた有効応力や骨格応力を用いる利点は不飽和状態から飽和状態に変化する挙動をスムーズに表現できるところにある。ここで、基底応力および骨格応力は次式で定義される。

$$\text{基底応力： } \sigma^{net} = \sigma - u_a \quad (1)$$

$$\text{骨格応力： } \sigma^s = \sigma^{net} + S_r(u_a - u_w) = \sigma^{net} + S_r s \quad (2)$$

ここで、 σ は全応力、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧、 S_r は飽和度、 s はサクシオンである。そして、骨格応力を用いることにより、土の保水性についても説明ができる。モデルの構築により、飽和・不飽和状態の地盤に対して、

数値解析が可能となることが期待される。

本研究グループでは、骨格応力と飽和度を状態変数とした飽和・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²⁾を提案し、同モデルの検証実験を行ってきた。本稿では、状態変数の一つである飽和度に着目し、不飽和土圧密試験機を用いてマサ土の飽和度一定次元圧密試験を実施し、異なる飽和度における不飽和マサ土の力学特性を調べた。また、提案した構成モデルを用いた実験結果の再現シミュレーションを実施し、試験結果と解析結果を比較した。骨格応力～間隙比関係、基底応力～サクシオン関係を比較することで、正規圧密線 (N.C.L.) の位置と飽和度一定条件下でのサクシオン変化について考察し、提案する飽和・不飽和土弾塑性構成モデルの適用性を検証した。

2. 不飽和マサ土の飽和度一定次元圧密試験

2.1 試験概要

試験には 2 mm 以下には、ふるい分けしたマサ土を使用した。マサ土の物性値を表 1 に示す。圧密試験機に設置した圧密リングに所定のマサ土試料をいれ、直径 6.0 cm × 高さ 1.0 cm、間隙比 0.65 を目標に、一層で静的締め固めた。

表 1 マサ土の物性値

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

試験ケースは締固め試験より得られた最適含水比付近と、その乾燥側と湿潤側の2ケースずつ、計5ケースの目標含水比 ($w=9, 12, 15, 18, 21\%$) で行った。本試験では、初期飽和度の違いによる力学特性の違いを検証するために、不飽和土圧密試験機を用いた加圧板法により飽和度一定試験を実施した。試験に用いたセラミックディスクの空気侵入値 (AEV) は 1500 kPa である。なお、飽和度一定試験を実現するために、間隙水圧と間隙水体积を同時に制御できる PVC (Pressure/Volume Controller) を導入した。

2.2 飽和度一定の制御方法

試験は、基底応力を 20 kPa 載荷した後、サクシオンを 100 kPa ($u_a = 500$ kPa, $u_w = 400$ kPa) 載荷し、供試体の排水量が落ち着くまで放置した。排水量が安定した後、飽和度一定制御に切り替え、基底応力を 60 kPa/h の載荷速度で 20 kPa から 965 kPa まで載荷した。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 Glen ら³⁾が提案した手法を採用した。飽和度一定の制御を実施するための条件式を以下に示す。

$$dV_w - S_{r(\text{init})}dV_v = 0 \quad (3)$$

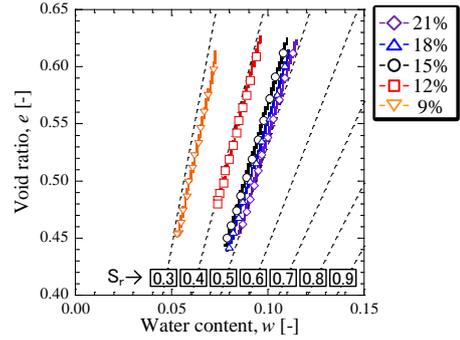
ここで、 dV_w : 間隙水体积変化、 $S_{r(\text{init})} dV_v$: 初期飽和度と間隙水体积変化の積である。一次元圧密時には、間隙水体积変化 (dV_w) は供試体断面積と供試体変位の積 (Adh) より得られ、間隙水体积変化 (dV_w) は圧力ユニット PVC で調節することで飽和度一定を保持できる。つまり、飽和度を一定に保持する際は、間隙水体积を下げるために間隙水圧が減少し、サクシオンは増加する。

2.3 不飽和マサ土を用いた飽和度一定一次元圧密試験の結果

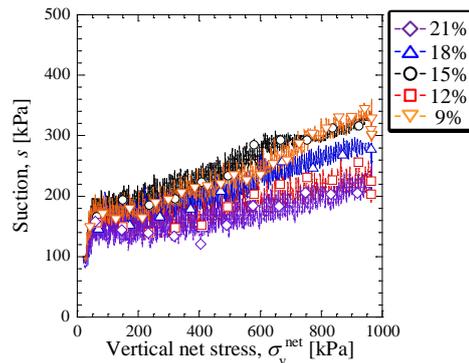
表 2 に飽和度一定試験の供試体諸量を、図 1 に試験結果を示す。供試体作製時とは、試験機に供試体を設置した時点での値である。また、飽和度一定試験開始時は飽和度一定制御に切り替えた時、飽和度一定試験終了時は目標値に達した時の値である。

表 2 飽和度一定試験の物性値

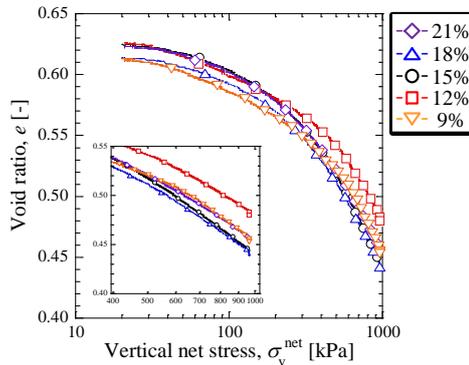
	供試体作製時			S_r 一定試験開始時			S_r 一定試験終了時		
	w_0 [%]	e_0 [-]	S_{r0} [-]	w [%]	e [-]	S_r [-]	w_f [%]	e_f [-]	S_{rf} [-]
▽	8.5	0.642	0.35	7.4	0.613	0.32	5.3	0.453	0.31
□	12.1	0.650	0.49	9.6	0.625	0.41	7.3	0.479	0.41
○	15.0	0.650	0.62	11.0	0.625	0.47	8.0	0.446	0.48
△	17.8	0.651	0.73	11.1	0.613	0.48	7.9	0.441	0.49
◇	21.8	0.660	0.88	11.5	0.623	0.49	8.5	0.455	0.50



(a) 含水比～間隙比関係



(b) 基底応力～サクシオン関係



(c) 基底応力～間隙比関係

図 1 飽和度一定一次元圧密試験の結果

表 2 より、試験開始時の飽和度が目標含水比 15, 18, 21%において概ね一致した。目標含水比 21%の供試体作製時における含水比は他のケースと比べて誤差が大きくなった。図 1(a)より、破線 ($eS_r = wG_s$) に沿う形で含水比と間隙比が変化しており、飽和度を一定に保持できていることが確認できる。図 1 (b)より、基底応力が増加すると飽和度一定時におけるサクシオンは増加した。試験開始時 ($s = 100$ kPa) から試験終了時のサクシオンの差をサクシオン増分とすると、サクシオン増分は初期飽和度によって異なると言える。試験開始時の飽和度が概ね一致した最適含水比付近と湿潤側のケースでは、サクシオン増分は上から 15% (○) 18% (△) 21% (◇) となった。乾燥側では、初期飽和度 12% (□) のケースよりサクシオン増分が 9%

(▽) のケースのほうが大きい。図 1(c)より、正規圧密線の位置は最適含水比付近および湿潤側より、乾燥側が上方に位置しており、12% (□) のケースが最も高い位置にある。また、最適含水比付近と湿潤側の正規圧密線の位置に顕著な差は見られない。

図 2 は縦軸を間隙比、横軸を骨格応力で整理した図である。図 1(c)と比較すると、正規圧密線は最適含水比付近と湿潤側より乾燥側が上方に位置することが確認できた。また、骨格応力でまとめたケース毎の正規圧密線の位置に大きな変動はない。

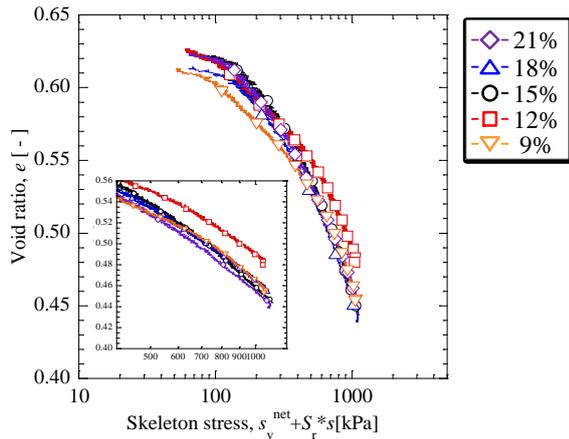


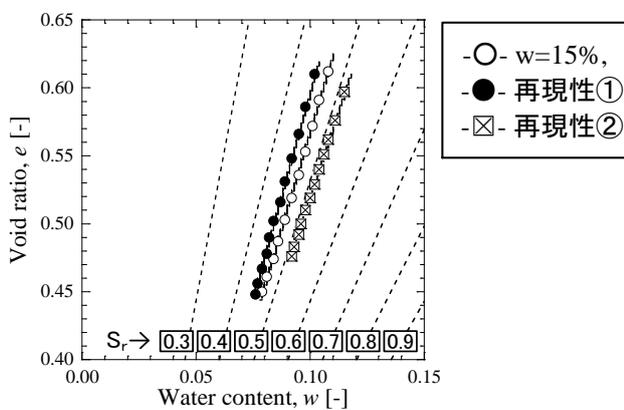
図 2 骨格応力～間隙比関係 (実験値)

2.4 w = 15%における飽和度一定試験の再現性

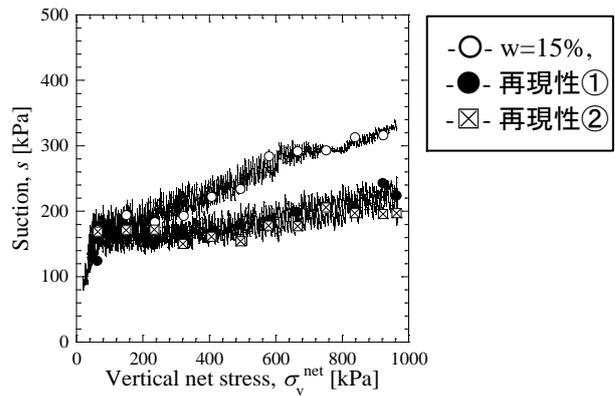
目標含水比 $w = 15\%$ に対して、追加で 2 ケースの飽和度一定一次元圧密試験を行い、再現性を示す。表 3 に供試体諸量を、図 3 に試験結果を示す。

表 3 $w = 15\%$ の飽和度一定試験の物性値

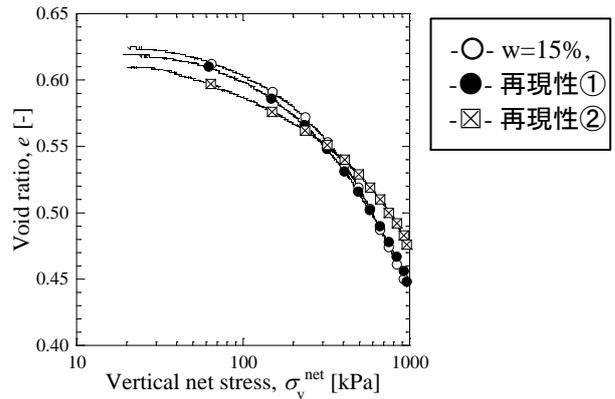
	供試体作製時			S_r 一定試験開始時			S_r 一定試験終了時		
	w_0 [%]	e_0 [-]	S_{r0} [-]	w [%]	e [-]	S_r [-]	w_f [%]	e_f [-]	S_{rf} [-]
○	15.0	0.650	0.62	11.0	0.625	0.47	8.0	0.446	0.48
●	15.2	0.638	0.63	10.4	0.619	0.45	7.5	0.447	0.45
⊠	14.6	0.645	0.60	11.8	0.609	0.52	9.1	0.473	0.51



(a) 含水比～間隙比関係



(b) 基底応力～サクシオン関係



(c) 基底応力～間隙比関係

図 3 飽和度一定一次元圧密試験の再現性 ($w = 15\%$)

表 3 より、試験開始時の飽和度は再現性②のケースに誤差が見られる。図 3(a)より試験結果はこれまでの結果と同様に、飽和度を一定に保持できていることが確認できる。また、図 3(b)より、サクシオン増分に違いが見られ、再現性①、②のサクシオン増分が一致した。このことから、初期のケースのサクシオン増分が再現性の 2 ケースより高い結果となった。図 3(c)より、初期ケースと再現性①は正規圧密線がほぼ一致した。

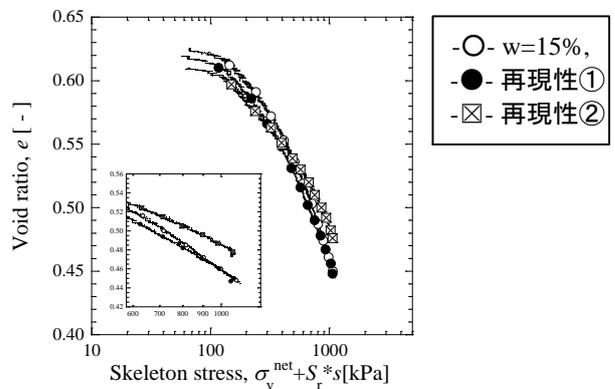


図 4 骨格応力～間隙比関係 (再現性)

図 4 は縦軸を間隙比、横軸を骨格応力について整理した

図である。図 3(c)のグラフと同様に初期ケースと再現性①は正規圧密線が一致した。再現性の試験結果より、精密な供試体を作製し、初期含水比の値を合わせ、また、試験開始時の飽和度にも注意が必要である。図.5(a), (c)より、再現性②の結果に着目すると、試験開始時の飽和度が他のケース大きくなり、間隙比変化が小さいことが確認できる。

3. 不飽和マサ土の飽和度一定次元圧密試験解析

3.1 解析概要

本研究グループが提案する構成モデルの検証を行うことを目的として、飽和度一定次元圧密の解析を行い、実験結果と解析結果を比較し、モデルの妥当性について検討する。

3.2 飽和・不飽和弾塑性モデルの概要

本研究の飽和・不飽和弾塑性構成モデルは、骨格応力と飽和度を状態変数として用いる。また、図 5 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。

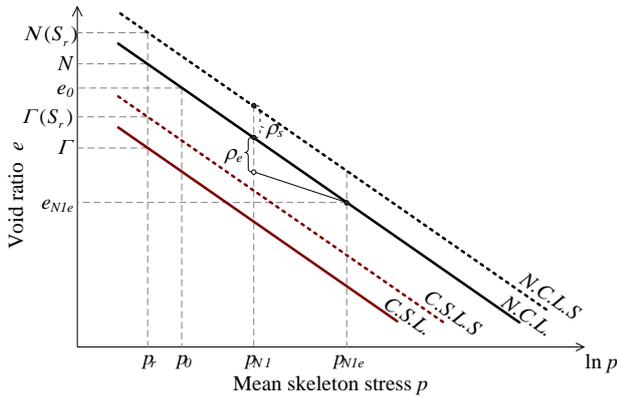


図 5 e - $\ln p$ 関係の模式図

この時、*N.C.L.S.* と *C.S.L.S.* は次式の関係が成り立つ。

$$N.C.L.S. : e = N(S_r) - \lambda \ln \frac{p}{p_r} \left(\eta = \frac{q}{p} = 0 \right) \quad (4)$$

$$C.S.L.S. : e = \Gamma(S_r) - \lambda \ln \frac{p}{p_r} \left(\eta = \frac{q}{p} = 0 \right) \quad (5)$$

$N(S_r)$ 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、 λ 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。

$$N(S_r) = N + \frac{N_r - N}{S_r^s - S_r^r} (S_r^s - S_r) \quad (6)$$

S_r^s と S_r^r は完全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。

不飽和土の力学挙動は、飽和度とサクシヨンの関係で表

される水分特性に強く影響する。不飽和状態から飽和状態へと移行する不飽和土の水分特性曲線は、排水過程と吸水過程がそれぞれ別の過程を辿るヒステリシスを呈することが特徴である。本研究グループでは、ヒステリシスを表現できる簡易的な水分特性曲線モデルを提案しており、その主曲線は、以下の 3 つの式で定義する。

(i) 初期排水曲線 (initial drying curve) :

$$S_r = S_r^{s0} - \frac{2}{\pi} (S_r^{s0} - S_r^r) \tan^{-1} \left(\frac{e^{c_1 s} - 1}{e^{c_1 s_d}} \right) \quad (7)$$

$$\text{または、} s = \frac{1}{c_1} \ln \left[1 + e^{c_1 s_d} \tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{S_r^{s0} - S_r}{S_r^{s0} - S_r^r} \right) \right] \quad (8)$$

(ii) 主排水曲線 (Main drying curve) :

$$S_r = S_r^{s0} - \frac{2}{\pi} (S_r^s - S_r^r) \tan^{-1} \left(\frac{e^{c_1 s} - 1}{e^{c_1 s_d}} \right) \quad (9)$$

$$\text{または、} s = \frac{1}{c_1} \ln \left[1 + e^{c_1 s_d} \tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{S_r^s - S_r}{S_r^s - S_r^r} \right) \right] \quad (10)$$

(iii) 主吸水曲線 (Main wetting curve) :

$$S_r = S_r^s - \frac{2}{\pi} (S_r^s - S_r^r) \tan^{-1} \left(\frac{e^{c_2 s} - 1}{e^{c_2 s_w}} \right) \quad (11)$$

$$\text{または、} s = \frac{1}{c_2} \ln \left[1 + e^{c_2 s_w} \tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{S_r^s - S_r}{S_r^s - S_r^r} \right) \right] \quad (12)$$

ここで s_d は、図 6 に示した通り、空気侵入値に相当するサクシヨン、 s_w は水侵入値に相当するサクシヨンである。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、 S_r^{s0} は飽和状態における飽和度であり、 $S_r^{s0} = 1.0$ である。

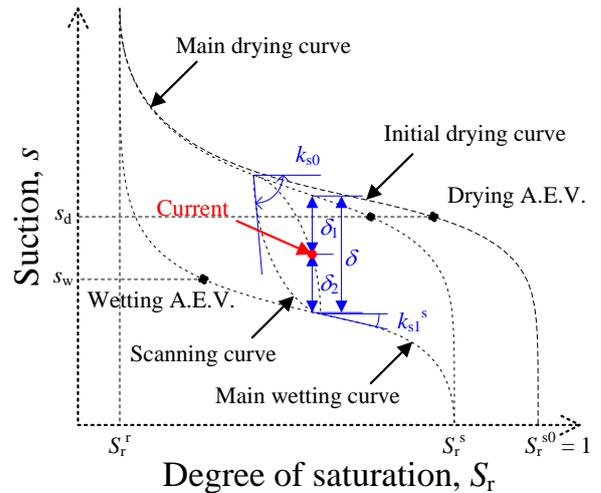


図 6 水分特性曲線の模式図

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、サクシヨンと飽和度の増分は次式で表される。

$$k_s^{-1} = k_{s0}^{-1} + k_{s1}^{-1} \quad (13)$$

k_{s0} は内部変数 $r = 0$ におけるサクシオン～飽和度関係の接線剛性であり、 k_{s1} は次式で表される。

$$k_{s1} = k_{s1}^s \left(1 - c_3 \frac{1-r}{r} \right) \quad (14)$$

ここで、 c_3 は走査曲線の曲率を決めるフィッティングパラメータである。また、 k_{s1}^s は内部変数 $r = 1$ 時点での走査曲線に相当する接線剛性係数である。さらに、内部変数 r を次式で定義する。

$$r = \begin{cases} \delta_2/\delta & ds > 0 \\ \delta_1/\delta & ds \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式(11)より、 k_s の接線剛性係数は k_{s0} と k_{s1} から成る。そして、走査曲線のサクシオンと飽和度の増分は次式で与えられる。

$$dS_r = k_s^{-1} ds \quad (16)$$

ここで、 k_s はサクシオン～飽和度関係の接線剛性係数である。以上より、本研究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^t 、 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。水分特性曲線の解析に用いたパラメータは表4に示す通りである。

以上より、飽和度一定時の正規圧密線を算出し、飽和度による正規圧密線の移行について検討する。なお、解析に用いた載荷経路は、飽和度一定一次元圧密試験と同様とし、基底応力 20 kPa の状態からサクシオンを 100 kPa まで載荷した後、基底応力を増加させた。この時、設定する初期飽和度は、解析から得られた水分特性曲線の主排水曲線と主吸水曲線の内側に飽和度とサクシオンが位置する値となる $S_r = 0.350$ 、 0.375 、 0.400 の3ケースとした。本解析に使用したパラメータを表5に示す。

表4 水分特性曲線の解析に用いたパラメータ

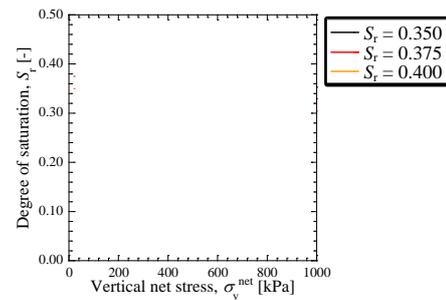
Saturated degree of saturation S_r^s	0.85
Residual degree of saturation S_r^t	0.27
Parameter corresponding to drying AEV (kPa) s_d	5.0
Parameter corresponding to wetting AEV (kPa) s_w	1.0
Initial stiffness of scanning curve (kPa) k_{s0}	2000
Parameter of shape function c_1	0.014
Parameter of shape function c_2	0.060
Parameter of shape function c_3	50.0

表5 飽和度一定一次元圧密の解析に用いたパラメータ

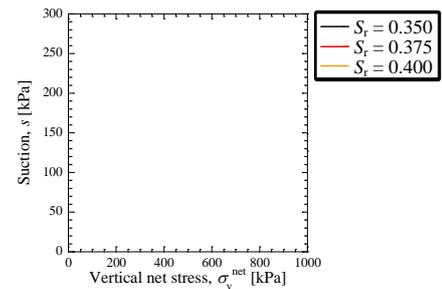
Compression index λ	0.089
Swelling index κ	0.008
Critical state parameter R_{cs}	4.010
Void ratio N ($p' = 98$ kPa on <i>N.C.L.</i>)	0.69
Poisson's ratio ν	0.25
Parameter of overconsolidation a	60.0
Parameter of suction b	20.0
Parameter of overconsolidation β	2.0
Void ratio N_r ($p' = 98$ kPa on <i>N.C.L.S.</i>)	0.71
State variable of overconsolidation ρ_e	1.65

3.3 マサ土を用いた飽和度一定一次元圧密試験の解析結果

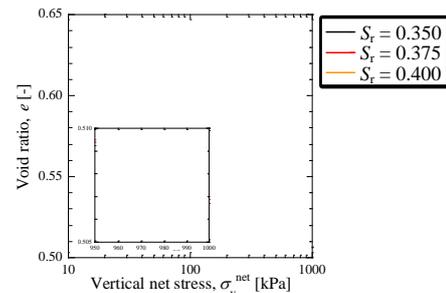
図7に飽和度一定一次元圧密の解析結果を示す。飽和度一定一次元圧密試験の載荷経路を再現しているため、試験開始前の基底応力 20 kPa、サクシオン 100 kPa を載荷した経路も含まれている。図7(a)より、サクシオン載荷により飽和度が低下した後、基底応力の増加に対して飽和度が一定に保たれていることが確認できる。図7(b)より、基底応力の増加と共にサクシオンが 100 kPa の状態から増加する様子が再現できている。サクシオン増分は飽和度が低い時ほど、高い値を示した。図7(c)より、基底応力でまとめた正規圧密線は各ケース概ね一致する結果となった。また、拡大図により飽和度による違いを確認すると、飽和度が低い場合の正規圧密線が、飽和度が高いものよりも上方に位置する結果となった。飽和度による正規圧密線の変化が実験ほど出なかった理由として、設定した飽和度が実験に比べて範囲が狭かったこと、 N 、 N_r の値にあまり差が出なかったことが考えられる。



(a) 基底応力～飽和度関係



(b) 基底応力～サクシオン関係



(c) 基底応力～間隙比関係

図7 飽和度一定一次元圧密の解析結果

3.4 実験値と解析値の比較

図1(b)と図7(b)を比べると、解析のサクシオン増分よりも実験値のサクシオン増分が高い値を示している。解析ではサクシオンが最も高い値でも200 kPaを越えていないが実験値は最も高い値では300 kPaまで達している。しかし、基底応力の増加と共にサクシオンが上昇する傾向は解析により表現できている。

図8は骨格応力～間隙比関係の解析結果と実験結果をまとめた図である。基底応力でまとめた場合と同様に、正規圧密線は概ね一致する結果となった。そして、飽和度による違いを確認すると、飽和度が低い正規圧密線が高い正規圧密線よりも上方に位置する結果となった。正規圧密線は骨格応力が100 kPaから400 kPaまで変化する間は概ね挙動が一致していると確認できる。また、400 kPa以降の傾向は解析結果の方が上方に位置する結果となった。実験値は異方応力状態で、解析値は等方応力状態であるため、解析結果は実験値を表現できると考えられる。

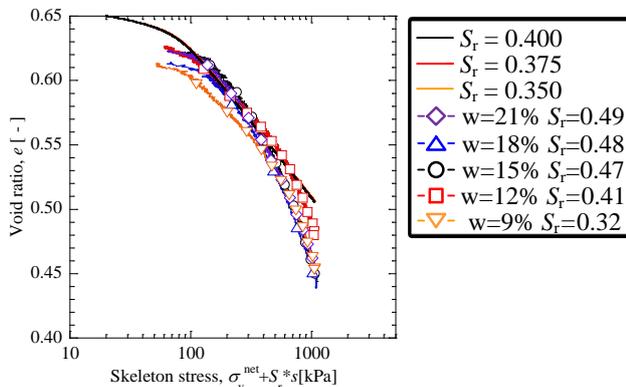


図8 骨格応力～間隙比関係（解析値，実験結果）

4. 結論

4.1 まとめ

本稿では、骨格応力と飽和度を状態変数とした弾塑性構成モデルを検証するために、飽和度一定一次元圧密試験を行い、飽和度の違いによる正規圧密線の変化について検討した。そして、目標含水比 $w = 15\%$ のケースについて再現性を確認するために飽和度一定一次元圧密試験を行った。また、モデルの検証を行うために、飽和度一定一次元圧密の解析を行い、実験結果と解析結果を比較し、モデルの妥当性について検討した。

実験結果より以下のことが確認できた。

1. 含水比～間隙比関係より、飽和度一定に保持できていることが確認できた。
2. 基底応力の増加とともにサクシオンは上昇する傾向が確認できた。サクシオン増分は飽和度によって違いが見られた。
3. 正規圧密線は、乾燥側が湿潤側より上方に位置する傾向が確認できた。最適含水比、湿潤側では正規圧

密線に顕著な違いが見られなかった。

次に一次元圧密試験の再現性試験結果より以下のことがわかった。

4. 含水比～間隙比関係、基底応力～間隙比関係はこれまでの実験結果と同様な傾向が得られている。
5. 基底応力～サクシオン関係はこれまで実験結果より低い値となった。

最後に、飽和・不飽和弾塑性構成モデルを用いた、実験結果の再現解析を実施した。基底応力～サクシオン関係、骨格応力～間隙比関係について解析結果と実験結果を比較すると以下のことがわかった。

6. 基底応力の増加に対して飽和度が一定に保持されていることが確認できる。
7. 飽和度が低下すると正規圧密線は上方に移動する結果を表現できている。
8. 基底応力が増加するとサクシオンが増加する様子が表現できている。間隙比の変化量に課題はあるものの概ね実験と同様の傾向を示している。

今後の課題として以下のことが言える。

1. 再現性の試験結果より、より精密な試験を行うため、供試体作製時の含水比を正確にすること、試験開始時における飽和度の値を合わせる工夫が必要となる。
2. 飽和度一定の一次元圧密の解析では、基底応力の増加によるサクシオンの増加は飽和度が低いと高くなる傾向が確認できた。しかし、実験結果において飽和度の違いによるサクシオン増分の大小関係は明確になっていないため、再現性を確認する必要がある。
3. 概ね実験値と同様に解析値は飽和度の低いケースが上方に位置する傾向が得られた。しかし、適用できる飽和度の範囲が狭く、直接実験値と比較できていない。今後多くの実験データを得て、水分特性曲線などの精緻なパラメータを決定し、モデルの適用性を検討していく。

参考文献

- 1) Alonso, E. E., Gens, A., and Josa, A. (1990): A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique*, 40(3), 405-430.
- 2) F. Zhang and T. Ikariya (2011): A new model for unsaturated soil using skeleton stress and degree of saturation as state variable, *Soils and Foundation*, 51 (1), 67-81
- 3) G. J. Burton, J. A. Pineda, D. Sheng, D. Airey and F. Zhang (2015): Exploring one-dimensional compression of compacted clay under constant degree of saturation paths, *Geotechnique*, 66(5), 435-440, <http://dx.doi.org/10.1680/jgeot.14.P.181>.