

不飽和砂質土の非排気-非排水せん断時の力学特性および水分特性のモデル化

京都大学大学院 正会員 ○木元 小百合
 (現 中日本高速道路株式会社) 京都大学大学院 学生会員 石川 椋
 京都大学大学院 学生会員 赤木 俊文

1. 研究の背景と目的

近年、不飽和土の多相連成解析手法が種々提案されてきており、不飽和土の特徴的な力学挙動を再現できる構成モデルの提案や応力変数の取り扱いについて議論されている。本研究では、砂質土を用いた不飽和土非排気-非排水三軸圧縮試験¹⁾について、サクシヨンの効果を考慮した土骨格の構成式と水分特性モデルを用いて再現し、その適用性について検討した。

2. 土骨格の構成式と水分特性モデル

2.1 不飽和土の三軸圧縮挙動の支配方程式

不飽和土の変形挙動は、一般に固相・液相・気相の質量保存則、運動量保存則、材料の構成則として土骨格の構成式、水分特性モデル、水および空気の構成式によって表すことができる。非排気-非排水条件では各相の応力、ひずみ、飽和度が変化するため、これらを考慮して要素シミュレーションを行う必要がある。ここでは軸ひずみ制御($d\varepsilon_1 = \text{known}$)、非排気-非排水条件を考慮して以上の式を書き下し、未知数を軸差応力増分 dq 、平均骨格応力増分 $d\sigma'_m$ 、体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v$ 、間隙空気圧増分 du_a 、間隙水圧増分 du_w 、飽和度増分 dS_r とした連立一次方程式を解くことにより、要素シミュレーションを行った。なお空気の構成式については理想気体の状態方程式に従うとした。

2.2 土骨格の弾粘塑性構成式

土骨格の構成式は Oka et al.²⁾による応力変数に骨格応力テンソルを用い、過圧密境界面と静的降伏曲面にサクシヨンによる硬化・軟化を取り入れた不飽和土の弾粘塑性構成式を用いた。過圧密境界面は以下の式で与える。 M_m^* は限界状態における応力比である。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mb}) = 0 \quad (1)$$

$$\bar{\eta}_{(0)}^* = \left\{ (\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*) (\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで、 $\eta_{ij}^* (= S_{ij} / \sigma'_m)$ は応力比テンソル (S_{ij} :せん断応力テンソル、 σ'_m は平均骨格応力)、 $\eta_{ij(0)}^*$ は圧密終了時

の応力比テンソルである。 M_m^* は限界状態における応力比である。 σ'_{mb} は過圧密境界面の大きさを決定する硬化パラメータであり、下記の式で内部構造劣化による軟化、サクシヨン増減による硬化・軟化、粘塑性体積圧縮膨張による硬化・軟化を考慮している。

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma}(z) N_s \exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} \varepsilon_v^{vp}\right) \quad (3)$$

$$N_s = 1 + S_I \exp\left\{-s_d \left(\frac{s_r^C}{s} - 1\right)\right\} \quad (4)$$

$\sigma'_{ma}(z)$ は内部構造劣化の項であり、粘塑性ひずみの第二不変量の蓄積量 z の関数で与える。 λ, κ, e は圧縮指数、膨張指数、間隙比、 ε_v^{vp} は粘塑性体積ひずみである。 N_s はサクシヨンによる硬化軟化項であり、 s はサクシヨン、 s_r^C は基準サクシヨン、 S_I は基準サクシヨンが作用している時の強度増加率、 s_d は強度の変化率を与えるパラメータである。静的降伏曲面についても同様にサクシヨンによる硬化・軟化を取り入れている。

2.3 水分特性モデル

本研究では Gallipoli et al.³⁾による体積変化の影響を考慮したモデルを用いた。これは van Genuchten モデルの α を間隙比を考慮して $\alpha = \phi e^\psi$ として拡張したモデルであり、次式で表される。

$$S_{re} = \left\{ 1 + (\phi e^\psi s)^{n'} \right\}^{-m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n'} \quad (5)$$

$$S_r = S_{r\min} + (S_{r\max} - S_{r\min}) S_{re} \quad (6)$$

$S_{r\max}$ 、 $S_{r\min}$ は最大、最小飽和度、 S_{re} は有効飽和度、 α, ψ, n' は材料パラメータである。

表-1 解析に用いた材料パラメータ

材料パラメータ	U1-10	U1-50	U1-80
変相応力比 M_m		1.410	
基準サクシヨン s_i^C [kPa]		80.0	
サクシヨンパラメータ S_I, s_d		1.20, 0.90	
水分特性パラメータ n'		1.50	
水分特性パラメータ ϕ [kPa]	6.50×10^6	1.10×10^3	5.00
水分特性パラメータ ψ	30.0	12.0	1.0
最大・最小飽和度 $S_{r\max}, S_{r\min}$ [%]		77.6, 40.0	

キーワード 不飽和土, 三軸圧縮試験, 構成式, 水分特性曲線

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂4 TEL 075-383-3193

3. 試験結果とシミュレーション

3.1 試験結果

別報¹⁾では、初期の平均骨格応力が同じで初期サククションが異なる条件で非排気-非排水三軸圧縮試験を行い、初期サククションの影響について検討している。ここでは初期平均骨格応力を104 kPaとし、サククションをそれぞれ10, 50, 80 kPaとした3ケース(U1-10, U1-50, U1-80)についてシミュレーションを行った。図-1に試験結果を示す。なお、応力径路の応力変数については平均骨格応力 $\sigma'_m = \sigma_m - P^F$, $P^F = S_r u_w + (1 - S_r) u_a$ を用いた。軸差応力-軸ひずみ関係より、せん断初期にはサククションが大きいほど軸差応力は大きい、軸ひずみ10%あたりで大小関係が逆転し、軸ひずみ20%での軸差応力はサククション10kPaのケースで最大となった。これは、せん断中のサククションの変化による硬化・軟化、体積圧縮による硬化の影響によるものであると考察できる。つまり、せん断初期には初期サククションが大きいほど剛性が大きい、せん断に伴い初期サククション10kPaのケースでは体積圧縮による硬化と、サククション増加による硬化が顕著に生じると考えられる。

3.2 要素シミュレーション

図-2に要素シミュレーション結果を示す。表-1に解析に用いた材料パラメータの一部を示す。なお非排水条件では含水比が一定であるので $eS_r = wG_s$ を用いて、サククション-飽和度関係の等含水比線を作成できる。本研究では各初期サククション時の水分特性の等含水比線を再現できるようにパラメータ ϕ, ψ をそれぞれ決定した。図-2より、図-1で示した初期サククションによる軸差応力-軸ひずみ関係、サククション-飽和度関係の違いなどをよく再現できている。なお今回のシミュレーションでは、水分特性パラメータについてはそれぞれのケースについてせん断中の水分特性挙動を再現できるように設定したが、水分履歴の影響などを考慮した水分特性モデルの拡張が今後の課題である。

参考文献

- 1) 石川, 木元, 赤木, 不飽和砂質土の非排気-非排水せん断時の力学特性および水分特性に関する研究, 土木学会全国大会, 2016 (投稿中) .
- 2) Oka, F., Kodaka, T., Kimoto, S., Kim, Y.S. and Yamasaki, N. : An elasto-viscoplastic model and multiphase coupled

FE analysis for unsaturated soil, *Unsaturated Soils 2006*, ASCE, pp.2039-2050, 2006.

- 3) Gallipoli, D., Gens, A., Chen, G. and D'Onza, F. : Modelling unsaturated soil behavior during normal consolidation, *Computers and Geotechnics*, Vol.35, pp.825-834, 2008.

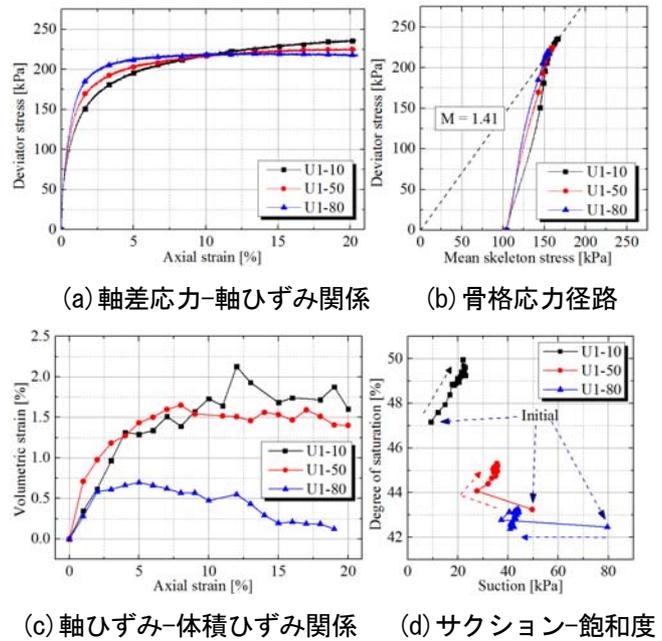


図-1 非排気-非排水三軸試験結果

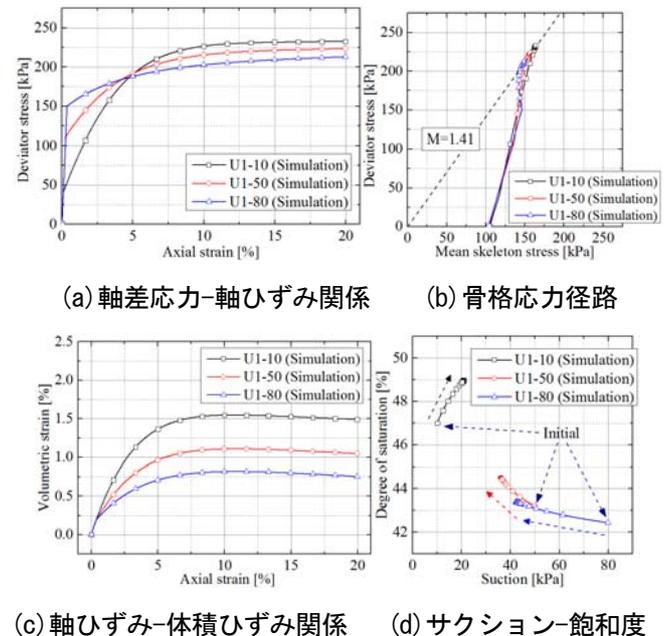


図-2 非排気-非排水三軸試験シミュレーション