

弾粘塑性構成式による不飽和シルトの三軸圧縮試験のシミュレーション

大阪ガス (元 京都大学大学院)	正会員	○ 鈴木 宏尚
京都大学大学院	フェロー	岡 二三生
京都大学大学院	正会員	小高 猛司
京都大学大学院	正会員	木元 小百合

1. はじめに

地盤材料は一般に、土粒子骨格およびその間隙を埋める空気と水から成る多相混合体であり、その力学特性はサクシオンに依存していることを報告した¹⁾。本報では、不飽和シルトに対して排気・排水三軸圧縮試験を行い、その力学挙動に及ぼすサクシオンの影響を把握するとともに、サクシオンの影響を考慮した弾粘塑性構成式を用いて試験結果のシミュレーションを行った。構成式は、内部構造の変化を考慮した飽和土の弾粘塑性構成式²⁾にサクシオンの影響を考慮することにより不飽和土にも適用できるように拡張した³⁾。また、構成式中の応力変数として平均化骨格応力 (Average skeleton stress)⁴⁾を用いている。

2. 不飽和土の弾粘塑性構成式

混合体理論の枠組みの中、多孔質媒体理論に基づき、応力変数として平均化骨格応力を用いると同時に、サクシオンの影響を弾粘塑性構成式中で考慮する。平均骨格応力、過圧密境界面、静的降伏関数および粘塑性ポテンシャル関数は以下のように定義した。

平均化骨格応力

平均化骨格応力は、多孔質媒体理論に基づいて気相と液相を一つの流体と見なし、骨格とその間隙を流れる流体の分応力から求められる平均間隙圧によって定義される応力であり、以下のように表される。

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} \cdots (1), \quad P^F = (1 - S_r)u_a + S_r u_w \cdots (2)$$

ここで、 σ'_{ij} は平均化骨格応力、 σ_{ij} は全応力、 P^F は平均間隙圧、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧、 S_r は飽和度、 δ_{ij} は Kronecker's delta である。

過圧密境界面

正規圧密領域 ($f_b \geq 0$) および過圧密領域 ($f_b < 0$) を定義する過圧密境界面は、以下のように表現する。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0 \cdots (3), \quad \bar{\eta}_{(0)}^* = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \cdots (4)$$

$$\eta_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma'_m} \cdots (5), \quad \sigma'_{mb} = \sigma'_{ma}(P^C, z) \exp \left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} \varepsilon_v^{vp} \right) \cdots (6)$$

ここで、 S_{ij} は偏差応力テンソル、 M_m^* は破壊応力比、 $\eta_{ij(0)}^*$ は異方圧密後の応力比である。 $\sigma'_{ma}(P^C, z)$ はサクシオンの効果を考慮した項目であり、以下のように定義している。

$$\sigma'_{ma}(P^C, z) = \sigma'_{ma}(z) \left[1 + S_I \exp \left\{ -s_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1 \right) \right\} \right] \cdots (7)$$

ここで、 $\sigma'_{ma}(z)$ は内部構造変化を考慮した応力、 P_i^C は初期サクシオン、 P^C は現在のサクシオン、 S_I は初期サクシオン P_i^C が作用している時の強度増加率、 s_d は強度の変化速度に関するパラメータである。

静的降伏関数 f_y および粘塑性ポテンシャル関数 f_p

静的降伏関数 f_y および粘塑性ポテンシャル関数 f_p は以下の式で与える。

$$f_y = \bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m(s)}} = 0 \cdots (8), \quad f_p = \bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mp}} = 0 \cdots (9)$$

正規圧密領域では、 $\tilde{M}^* = M_m^*$ 、過圧密領域では、 $\tilde{M}^* = -\frac{\sqrt{\eta_{ij(0)}^* \eta_{ij}^*}}{\ln(\sigma'_m / \sigma'_{mc})}$ 、 $\sigma'_{mc} = \sigma'_{mb} \exp \frac{\sqrt{\eta_{ij(0)}^* \eta_{ij}^*}}{M_m^*}$ とする。ただし、 $\tilde{M}^* = M_m^*$ に達した後は $\tilde{M}^* = M_m^*$ とする。

粘塑性ひずみ速度発展則

粘塑性ポテンシャル関数は以下のように与えられる。

キーワード：不飽和土、弾粘塑性構成式、三軸試験

連絡先：〒 606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤力学研究室 075-753-5086

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \langle \Phi_1(f_y) \rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \cdots (10), \quad C_{ijkl} = a\delta_{ij}\delta_{kl} + b(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}), C_{01} = 2b, C_{02} = 3a + 2b \cdots (11)$$

全ひずみ速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij}$ は弾性ひずみ速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ と粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ の和で表現され、以下のように定義する。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \cdots (12)$$

3. 多相系地盤における弾粘塑性構成式

試験試料はシルト分が90%を占め均一な粒径を持つDLクレーであり、高さ100mm、直径50mmの供試体を静的に締固めることにより作製している。また、試験装置は供試体の側方変位を計測するためにギャップセンサーをセル内に設置することにより体積変化を測定している¹⁾。本研究では、セル圧は450kPa、間隙空気圧は250kPa、間隙水圧は所定の初期サクシオンに応じた圧力を作用させており、ひずみ速度を0.05%/minとし、排気・排水条件で三軸圧縮試験を行った。なお、通常、不飽和地盤を土骨格・間隙空気・間隙水の三相混合体として定式化を行うためには、土骨格の構成則に加え、サクシオンと飽和度の関係である水分特性曲線を構成則として用いる必要がある。しかし、本研究における解析条件は、せん断中のサクシオンが一定であり飽和度変化がほとんど生じない排気・排水条件であるため、土骨格の構成則のみでシミュレーションを行った。

表 1: 解析に用いたパラメータ

サクシオン s (kPa)	0	10	50	100
圧縮指数, λ	0.095	0.095	0.114	0.114
膨潤指数, κ	0.0086	0.0086	0.0102	0.0102
初期間隙比, e_0	1.01	1.03	1.07	1.04
初期せん断弾性係数, G_0 (kPa)	34800	36600	45100	46800
圧密降伏応力, σ'_{mbi} (kPa)	200	205	217	222
破壊応力比, M_m^*	1.00	1.00	1.00	1.00
粘塑性パラメータ, m'	52.0			
粘塑性パラメータ, C_{01} (1/s)	1.0×10^{-11}			
粘塑性パラメータ, C_{02} (1/s)	1.5×10^{-11}			
内部構造パラメータ, σ'_{maf} (kPa)	200	205	217	222
内部構造パラメータ, β	0			
サクシオンパラメータ, S_I	0.5			
サクシオンパラメータ, s_d	0.25			
初期平均骨格応力, σ'_{me} (kPa)	200	205	217	222
応力経路の傾き, q/σ'_m	2.99	2.98	3.01	3.01

先に述べた不飽和土の弾粘塑性構成式を、排気・排水三軸圧縮試験に適用した。表1に解析に用いたパラメータを、図1および図2にシミュレーション結果と試験結果の比較を示す。試験結果において、サクシオンの増加に伴い、図1に示す軸差応力～軸ひずみ関係では同一軸ひずみに対する軸差応力が増加し、また図2に示す体積ひずみ～軸ひずみ関係では体積ひずみが減少している。そして、いずれのサクシオンにおいても、シミュレーション結果と試験結果では大きな違いはなく、ほぼ再現できていることがわかる。

4. まとめ

応力変数として平均化骨格応力を導入し、サクシオンの影響を考慮した不飽和土の弾粘塑性構成式を用いて、排気・排水三軸圧縮試験のシミュレーションを行った結果、試験結果を再現することができた。

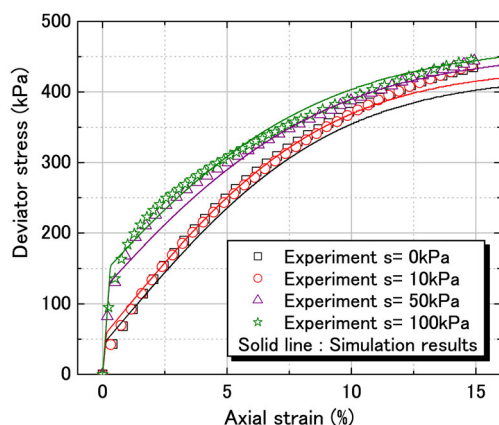


図 1: 軸差応力～軸ひずみ関係

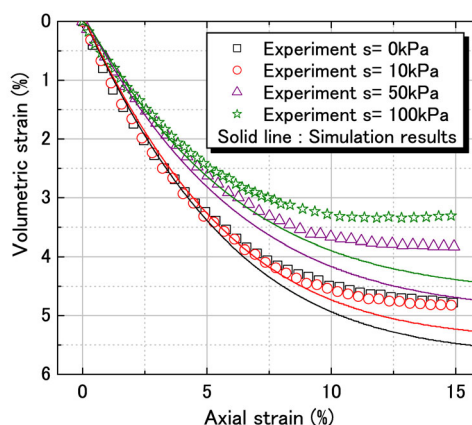


図 2: 体積ひずみ～軸ひずみ関係

参考文献

- 1) 小高猛司, 岡二三生, 鈴木宏尚: 排気・排水条件下での不飽和シルトの力学特性, 第41回地盤工学研究発表会, 2006.
- 2) Kimoto, S. and Oka, F.: An elasto-viscoplastic model for clay considering destructuralization and consolidation analysis of unstable behavior, *Soils and Foundations*, **45**, No.2, pp.29-42, 2005.
- 3) Oka, F. Kodaka, T. Kimoto, S. Kim, Y-S. and Yamasaki, N.: A multi-phase coupled FE analysis using an elasto-viscoplastic model for unsaturated soil, Proc. of 2nd GI-JGS Workshop, Sep. 8-10, 2005, Osaka, Japan.
- 4) Jommi, C.: Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Tarantino, A. and Mancuso, C. eds., Balkema, pp.139-153, 2000.