

不飽和砂質土の排気・排水三軸試験とそのモデル化

京都大学大学院 学生会員 ○松本 真明
 京都大学大学院 フェロー会員 岡 二三生
 京都大学大学院 正会員 木元 小百合
 京都大学大学院 正会員 肥後 陽介

中日本高速道路(元 京都大学大学院) 正会員 矢吹 太一

1. はじめに

本研究では、地震時における不飽和地盤の力学特性の把握を目的とし、排気・排水条件下での不飽和繰返し三軸試験を行い、諸条件が挙動に及ぼす影響について検討を行った。また、不飽和モデルの構築を目的として不飽和土の繰返し弾粘塑性構成式を用いて排気・排水試験結果の再現を試みた。

2. 試験概要

本研究では、淀川の堤防の改修に用いられている砂質土を試料として用いた。三軸試験では、2 mm以下にふるい分けを行った試料で試験を行った。また、供試体は、最適含水比 13.7%に調整したものを、高さ 100 mm、直径 50 mm、締固め度が 85%、90%となるように、静的締固め機を用いて締固めた。供試体諸量は表 1 に示す。

表 1 供試体諸量

締固め度 (%)	85	90
高さ(cm)	10.0	
直径(cm)	5.0	
体積 (cm ³)	196.3	
重量 (g)	353.1	373.9
飽和度 (%)	53.4	61.9
乾燥密度 (g/cm ³)	0.602	1.697
間隙比	0.682	0.589

せん断開始後の体積変化を測定するため、側方変位を計測するギャップセンサーをセル内に設置¹⁾した。また、供試体上部で間隙空気圧を計測するためポリフロンフィルターを、下部で間隙水圧を計測するためセラミックディスク (A. E. V. 200kPa) 付きのペDESTALを用いた。より正確に間隙空気圧を測定するため、間隙空気圧計を供試体上部のキャップに取り付け、供試体から間隙空気圧計までの距離を短くしてある。

試験条件は、セル圧 300kPa、空気圧 200kPa、初期サクシオン 0, 10, 50kPa、応力振幅 50, 60kPa、ひずみ速度 0.1, 0.01, 0.75%/min、繰返し回数 50 回とした。

3. 応力変数

混合体理論に基づき、応力変数として次式で表される平均骨格応力 $\sigma_m^{*2)}$ を用いて、試験結果を整理した。

$$\sigma_m^* = \sigma_m - P^F = \sigma_m - [(1 - S_r)u_a + S_r u_w] \quad (1)$$

ここで、 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、 σ_m は平均全応力である。

4. 試験結果

図 1 に排気・排水条件下でのひずみ速度 0.1%/min、締固め度 85%、応力振幅 50kPa、初期サクシオン 0kPa、50kPa のケースの試験結果を示す。応力-ひずみ関係より、初期サクシオン 0kPa のケースでは、繰返し载荷 1 回目に軸ひずみが大きく発生し、伸張側が特に大きくなった。初期サクシオン 50kPa のケースでは、初期サクシオン 0kPa のケースよりも軸ひずみの発生が抑えられている。軸ひずみ-体積ひずみ関係より、初期サクシオン 0kPa のケースでは、大きく体積ひずみが発生している。一方、初期サクシオン 50kPa のケースでは、体積ひずみの発生量が抑えられている。

5. 不飽和繰返し弾粘塑性構成式

本研究では、渡部⁴⁾により提案された不飽和繰返し弾粘塑性構成式を用い、応力振幅 50kPa、締固め度 85% の排気・排水試験結果の再現を試みた。構成式の定式化については以下の通りである。

過圧密境界面

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mb}) = 0 \quad (2)$$

ここで、 σ'_{mb} は硬化パラメータ、 $\tilde{M}^*$ はダイレイタンシー係数であり、次式のように表される。

$$\tilde{M}^* = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_m^*}{\sigma'_{mb}} \right) M_m^* & : \text{過圧密領域} \\ M_m^* & : \text{正規圧密領域} \end{cases} \quad (3)$$

静的降伏関数

$$f_y = \bar{\eta}_\chi^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'^{(s)}_{my}) = 0 \quad (4)$$

粘塑性ポテンシャル関数

$$f_p = \bar{\eta}_\chi^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'^{mp}_{mp}) = 0 \quad (5)$$

$\bar{\eta}_\chi^*$ は移動硬化パラメータ、 χ_{ij}^* を導入した相対応力比テンソルであり次式で定義される。

$$\bar{\eta}_\chi^* = \left\{ (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) \right\}^{1/2} \quad (6)$$

非線形移動硬化則

$$d\chi_{ij}^* = B^* (M_f^* de_{ij}^{vp} - \chi_{ij}^* d\gamma^{vp*}) \quad (7)$$

ここで、 M_f^* は破壊応力比、 de_{ij}^{vp} は粘塑性偏差ひずみ

キーワード 不飽和土、繰返し载荷、サクシオン

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学 4C クラスタ C1 棟 TEL 075-383-3193

増分テンソル, $d\gamma^{vp*}$ は粘塑性偏差ひずみテンソルの第2不変量である。

流れ則

粘塑性流れ則により, 粘塑性ひずみ速度が次式より求まる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \left\langle \Phi(f_y) \right\rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (8)$$

サクシジョンの効果

本研究ではサクシジョンの効果を次式で考慮している。

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma}(z) \exp \left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_{kk}^{vp} \right) \left[1 + S_I \exp \left\{ -s_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1 \right) \right\} \right] \quad (9)$$

$$= \sigma'_{ma}(P^C, z) \exp \left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_{kk}^{vp} \right) \quad (10)$$

$$\sigma'_{ma}(z) = \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta \sqrt{z}) \quad (11)$$

ここで, P_i^C は基準サクシジョン, P^C は現在のサクシジョン, S_I は P_i^C が作用している時の強度増加率, s_d は強度の変化速度を調節するパラメータである。

6. シミュレーション結果

シミュレーションに用いたパラメータを表2に, 結果を図1に示す。応力-ひずみ関係において, 初期サクシジョン 0kPa のケースでは, 初期に軸ひずみが大きく発生し, 载荷とともに軸ひずみの増加が緩やかになっていく様子が再現できた。初期サクシジョン 50kPa のケースに関しては, 軸ひずみの発生が抑えられている様子が再現できた。軸ひずみ-体積ひずみ関係において, 初期サクシジョン 0kPa のケースでは, 体積ひずみが徐々に増加していく様子が再現されている。しかし, 繰返し载荷 1 回目に体積ひずみがほとんど発生していない様子については, 再現できていない。これは, 排気-排水試験を行ったが, せん断初期において供試体内部は, 非排気-非排水状態に近くなっていた可能性がある。初期サクシジョン 50kPa のケースに関しては, 繰返し初期にせん断前より体積膨張を示した様子がよく再現できている。

表2 材料パラメータと初期条件

Degree of compaction (%)	85		
Deviator stress amplitude (kPa)	50		
Strain rate (%/min)	0.1		
Initial suction, s (kPa)	0	10	50
Compression index, λ	0.0804		
Swelling index, κ	0.0090		
Initial void ratio, e_0	0.652	0.656	0.660
Initial elastic shear modulus, G_0 (kPa)	15000	16000	20000
Initial value for σ'_{mai} , σ'_{mai} (kPa)	150		
Initial yield stress, σ'_{mbi} (kPa)	150	159	180
Stress ratio at critical state, M_{fc}^*	1.18		
Stress ratio at critical state, M_{fs}^*	0.978		
Viscoplastic parameter, m'	40.0		
Viscoplastic parameter, C_{01} (1/s)	1.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Viscoplastic parameter, C_{02} (1/s)	1.5×10^{-5}	1.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}
Structural parameter, σ'_{maf} (kPa)	60	80	80
Structural parameter, β	3.0	1.0	1.0
Material parameter, B^*	80		
Material parameter, B_f^*	15		
Material parameter, C_f	2		
Suction parameter, S_I	0.2		
Suction parameter, s_d	0.4		
Initial mean skeleton stress, σ'_{ms} (kPa)	100	107	126

7. まとめ

試験結果については, 初期サクシジョンが大きい方が軸ひずみ, 体積ひずみともに発生量が抑えられ, サクシジョンにより変形強度が増加した。シミュレーション結果は, 比較的良好に実験結果を再現している。

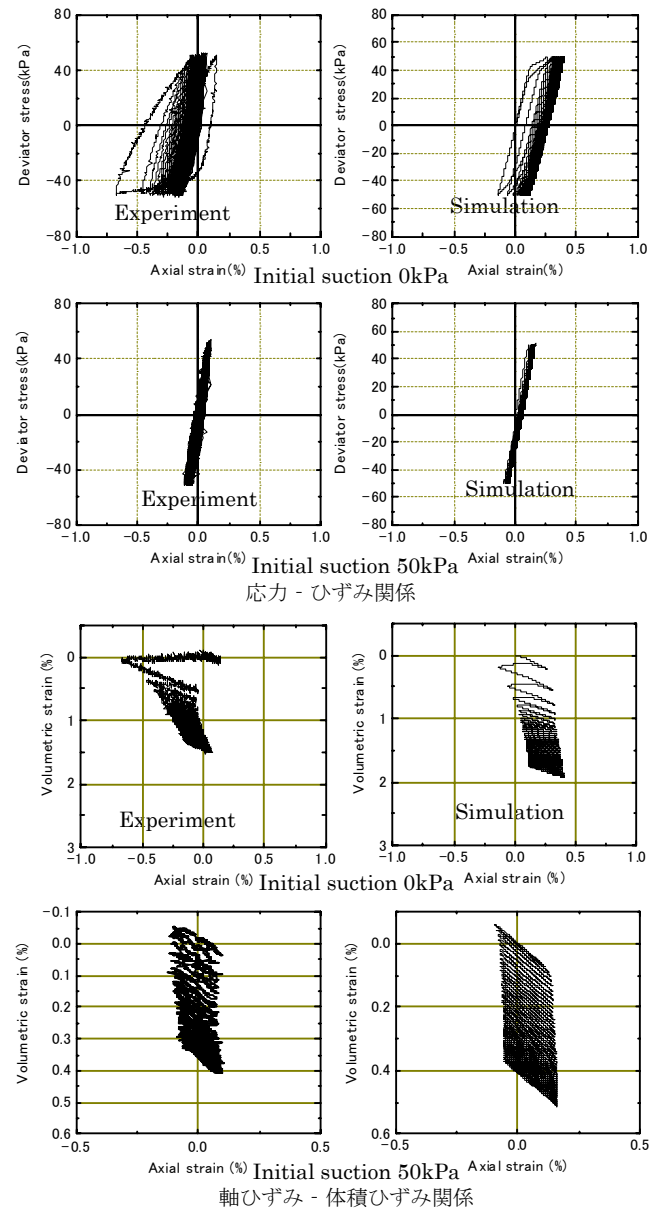


図1 排気-排水試験結果とシミュレーション結果

参考文献

- 1) Kim, Y. S. : *Elasto-viscoplastic Modeling and Analysis for Cohesive Soil Considering Suction and Temperature Effects*, Doctoral thesis, Kyoto University, 2004.
- 2) Jommi, C. : *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Tarantino, A. and Mancuso, C. eds., Balkema, 139-153, 2000.
- 3) Oka, F. et al.: Proc. 1st European Conference on Unsaturated Soils, Durham, Taylor & Francis Group, pp.735-741, 2008.
- 4) 渡部泰介: 弾粘塑性構成式による不飽和シルトの繰返し三軸試験のシミュレーション, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007.