不飽和砂質土の非排気-非排水三軸試験のシミュレーション

（現西日本旅客鉄道）京都大学大学院　正会員　○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
京都大学大学院　学生会員　狩野　修志

1. はじめに

本研究では，不飽和地盤の力学挙動のモデル化を目的とし，Feng[1] により提案されている不飽和弾粘塑性構成式を用いた空気 - 水 - 土連成有限要素法により，非排気 - 非排水条件下における砂質土の三軸圧縮試験結果[2]の再現を試みた．

2. 繰返し弾粘塑性構成式の定式化

応力変数として骨格応力テンソル σ'_{ij} を用いた．

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} = \sigma_{ij} - \{ s u_w + (1-s) u_a \} \delta_{ij} \tag{1}$$

ここで，σ_{ij} は全応力テンソル，P^F は平均間隙圧で間隙空気圧 u_a，間隙水圧 u_w，飽和度 s によって定義される．

2.1 過圧密境界面

$$f_b = \bar{\eta}^*_{(0)} + M^*_m \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0 \tag{2}$$

ここで，$\bar{\eta}^*_{(0)}$ は相対応力比，σ'_{mb} は硬化パラメータ，M^*_m はダイレイタンシー係数であり，次式で表わされる．

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

2.2 サクションの効果

本研究ではサクションの効果を次式で考慮している．

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma}(z) \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon^{vp}_{kk} \right) \left[1 + S_I \exp\left\{ -s_d \left(\frac{P^C_i}{P^C} - 1 \right) \right\} \right] \tag{4}$$

$$= \sigma'_{ma}(P^C, z) \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon^{vp}_{kk} \right) \tag{5}$$

$$\sigma'_{ma}(z) = \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta\sqrt{z}) \tag{6}$$

ここで，P^C_i は基準サクション，P^C は現在のサクション，S_I は基準サクション P^C_i が作用しているときの強度増加率で，s_d は強度変化速度を調節するパラメータ，z は粘塑性ひずみ速度の第 2 不変量の累積値である．

2.3 粘塑性流れ則

粘塑性ひずみ速度は，次の流れ則によって与える．

$$\dot{\varepsilon}^{vp}_{ij} = C_{ijkl} \langle \Phi(f_y) \rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \tag{7}$$

3. 空気 - 水 - 土連成有限要素法

3.1 増分型つりあい式

$$\int_V \dot{S}_{ji,j} dV = 0 \tag{8}$$

$\dot{S}_{ij}$ は現在の配置における公称応力速度テンソルである．

3.2 液相および気相の連続式

$$\text{液相：} \ sD_{ii} + \dot{s}n = -V^W_{i,i} \tag{9}$$

$$\text{気相：} \ (1-s)D_{ii} - \dot{s}n + (1-s)n \frac{\dot{\rho}^G}{\rho^G} = -V^G_{i,i} \tag{10}$$

ここで，n は間隙率，D_{ii} はストレッチング，V^W_i，V^G_i は液相，気相の見掛けの速度，ρ^G は気体の密度である．

3.3 水分特性曲線

水分特性曲線については以下の van Genuchten 式を用いている．

$$s_e = (s_{\max} - s_{\min}) \left\{ 1 + \left(\alpha P^C \right)^{n'} \right\}^{-m} + s_{\min}, \quad m = 1 - 1/n' \tag{11}$$

ここで，α，n'，m は水分特性に関する材料パラメータ，s_e は有効飽和度を表す．

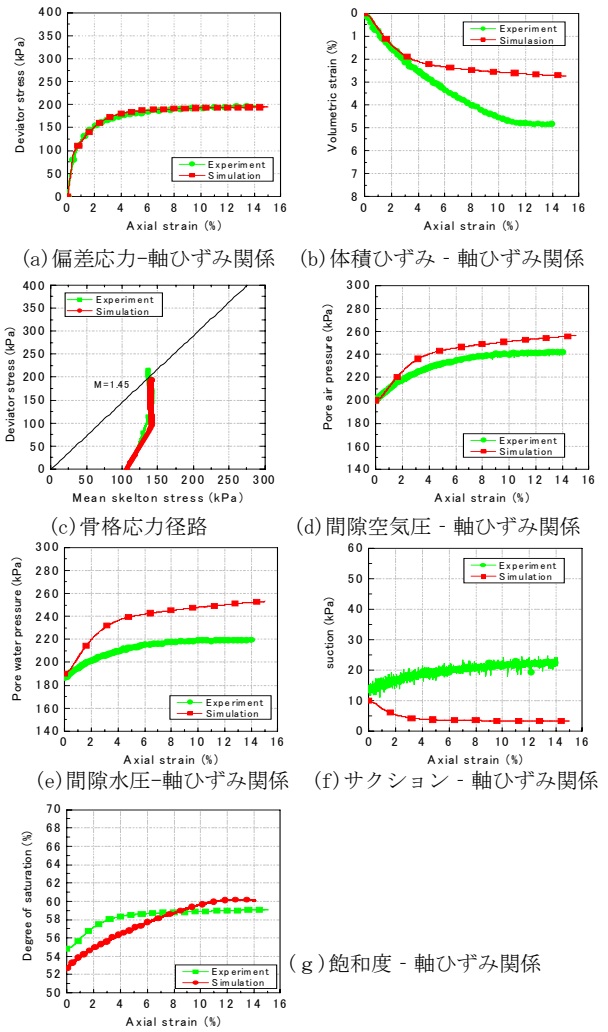
4. シミュレーション結果

シミュレーションに用いたパラメータを表 1 に示す．地盤の弾粘塑性パラメータは排気-排水三軸試験の要素シミュレーションによって決定した．

表 1. 解析に用いた材料パラメータ（非排気 – 非排水）

サクション s (kPa)	10
基準サクション P_i^C	50
圧縮指数 λ	0.0804
膨潤指数 κ	0.009
初期間隙比 e_0	0.655
初期せん断弾性係数 G_0 (kPa)	8000
擬似過圧密比 $\sigma'_{mai} / \sigma'_{m0}$	1.2
変相応力比 M_m^*	1.18
粘塑性パラメータ m'	40
粘塑性パラメータ C_{01} (1/s)	1.0×10^{-15}
粘塑性パラメータ C_{02} (1/s)	2.5×10^{-15}
内部構造パラメータ σ'_{maf} (kPa)	84.88
内部構造パラメータ β	1
サクションパラメータ S_I	0.1
サクションパラメータ s_d	0.2
初期平均骨格応力 σ'_{m0} (kPa)	106.1
van Genuchten パラメータ α (1/kPa)	2
van Genuchten パラメータ n	1.2
飽和透水係数 k^w (m/s)	1.0×10^{-5}
飽和透気係数 k^G (m/s)	1.0×10^{-4}
透水係数形状パラメータ a	3
透水係数形状パラメータ b	2.3
最大飽和度 s_{max}	0.75
最小飽和度 s_{min}	0

キーワード　不飽和土，ＦＥＭ，サクション，構成式
連絡先　〒615-8540　京都市西京区京都大学 4C クラスターC1 棟　TEL 075-383-3193



(a) 偏差応力-軸ひずみ関係　(b) 体積ひずみ - 軸ひずみ関係

(c) 骨格応力径路　(d) 間隙空気圧 - 軸ひずみ関係

(e) 間隙水圧-軸ひずみ関係　(f) サクション - 軸ひずみ関係

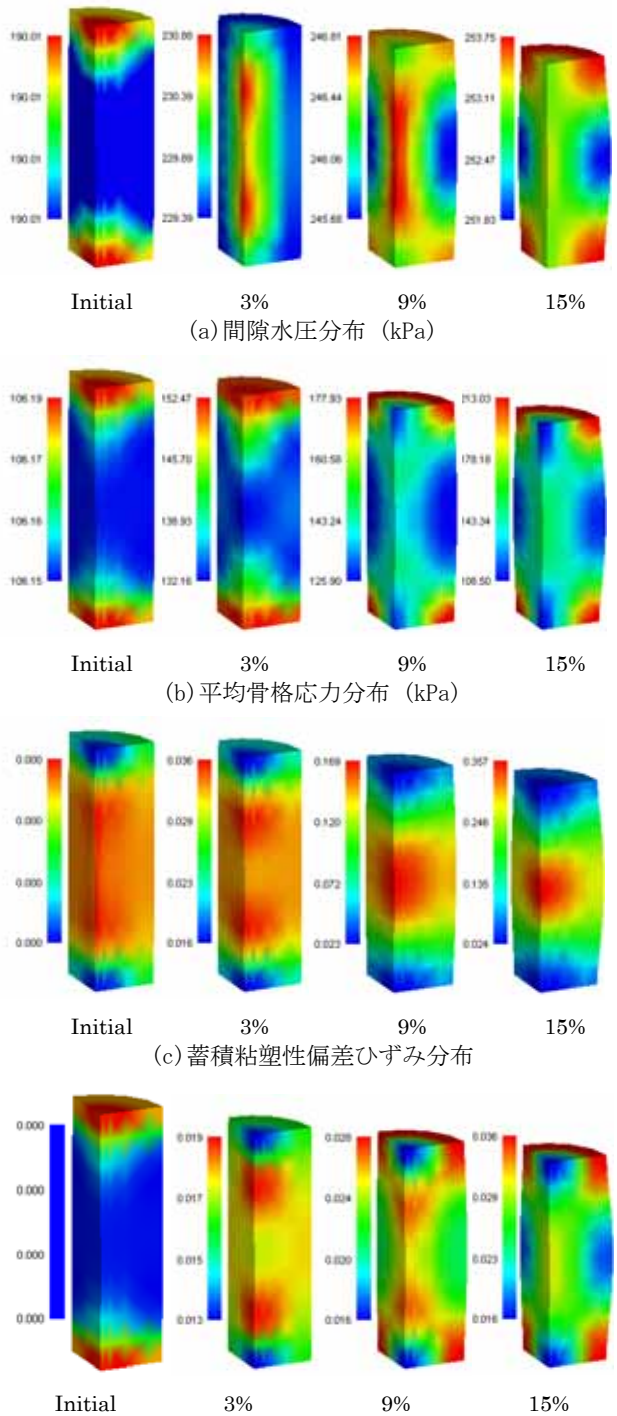
(g) 飽和度 - 軸ひずみ関係

図 1　解析結果（全要素平均）と実験結果の比較

図 1 にひずみ速度 0.1%/min, 初期サクション 10 kPa のケースの実験結果と有限要素解析結果の比較を示す．(a) の応力-ひずみ関係では，初期に偏差応力が大きく発生し，載荷とともに偏差応力の増加が緩やかになって，序々に増加していく様子が再現できた．(b) の軸ひずみ-体積ひずみ関係では，体積ひずみが 2%を超えたあたりで体積ひずみの発生量が小さくなっているが，試験結果では大きく増加している．また，図 2 に解析より得られた 3 次元コンター図を示す．すべて軸ひずみ 0，3，9，15%時における分布を示す．(a) の間隙水圧分布より，載荷初期では供試体中央部での間隙水圧が高く供試体表面は低くなっている．その後，供試体上部と下部に広がり，上下部での間隙水圧が高くなっている．(b) の平均骨格応力分布図より，供試体中心部での値が低いことが分かる．(c) の蓄積粘塑性ひずみ分布図より，供試体中心部においてひずみが大きくなっている．(d) の体積ひずみ分布図より，供試体上下部において体積圧縮ひずみが大きくなっている．

5．まとめ

応力 - ひずみ関係と間隙空気圧 - 軸ひずみ関係の再現はできたが，間隙水圧 - 軸ひずみ関係では間隙水圧が試験結果よりもシミュレーション結果の方が大きく上昇している．これは，試験結果では間隙水圧は供試体下部中央で計測しているが，供試体内で分布していることが考えられる．また，3 次元解析を行うことで，応力，ひずみの分布を明らかにすることができた．



(a) 間隙水圧分布（kPa）

(b) 平均骨格応力分布（kPa）

(c) 蓄積粘塑性偏差ひずみ分布

(d) 蓄積体積ひずみ分布

図 2　解析結果（コンター図）

参考文献

1) Feng, H：Multiphase Deformation Analysis of Elasto-viscoplastic Unsaturated Soil and Modeling of Bentonite, Doctoral Thesis, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2007.

2) 福谷準也：不飽和砂質土の排気・非排気条件下における強度・変形特性，京都大学大学院修士論文，工学研究科，2008.