

多相連成解析法による不飽和土の変形シミュレーション

株式会社 奥村組 正会員

○ 山崎 順弘

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

小高 猛司・木元 小百合・金 榮錫

1. はじめに

多相系地盤を土骨格、間隙水、間隙空気から成る三相混合体とみなし、空気-水-土連成有限要素解析法を開発した。新たな応力変数として、混合体理論に基づき平均骨格応力 (Average skeleton stress)¹⁾²⁾を導入すると同時にサクシジョンの影響を弾粘塑性構成式で考慮し、多相地盤材料における弾粘塑性構成式を提案する。

2. 多相系地盤における支配方程式の定式化

多孔質媒体理論 (Theory of Porous Media) に基づき、新たに気相の連続式を加えて三相混合体における支配方程式を定式化する。さらに Cauchy 応力の Jaumann 速度を用いた updated Lagrangian 法により有限要素離散化を行う。未知数は変位、間隙水圧、間隙空気圧とする。

(1) 分応力と平均骨格応力 各相にはたらく応力を分応力と定義し、全応力は分応力の和で表されるものとする。各相の分応力は以下の式で表されるものとする。

$$\text{固相} : \sigma_{ij}^S = \sigma'_{ij} + n^S P^F \delta_{ij} \quad (1)$$

$$\text{液相} : \sigma_{ij}^W = n^W P^W \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\text{気相} : \sigma_{ij}^G = n^G P^G \delta_{ij} \quad (3)$$

ここで、 n^S , n^W , n^G はそれぞれ固相、液相、気相における間隙率を表し、 P^W , P^G はそれぞれ液相、気相にはたらく圧力で、 P^F は間隙流体の平均圧力であり飽和度 s で重み付けし、次式で定義されるものとする。

$$P^F = sP^W + (1-s)P^G \quad (4)$$

また σ'_{ij} について、全応力 σ_{ij} と式 (1)~式 (4) を用いると、

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} \quad (5)$$

のように導かれる。つまり、 σ'_{ij} は全応力から平均間隙圧を引いたものとして表され、これが土骨格にはたらく応力であるとし、平均骨格応力 (Average skeleton stress) と呼ぶものとする。

(2) 不飽和特性の定義 サクシジョンと飽和度の関係である水分特性曲線を構成式として用い、van Genuchten 式により定義するものとする。すなわち、

$$S_{re} = \{1 + (\alpha P^C)^n\}^{-m} \quad (6)$$

と表される。ここで、 α , n , m は形状パラメータで、 n と m には $m = 1 - 1/n$ の関係があるものとする。また、

P^C はサクシジョンで、 S_{re} は有効飽和度である。

(3) つり合い式 多孔質媒体理論に基づき、相互に作用し合う連続体から成るモデルとし、各相の重ね合わせを考える。さらに、増分型境界値問題としてつり合い式を導くと、

$$\int_V \dot{S}_{ki,k} dV = 0 \quad (7)$$

と書ける。ここで $\dot{S}_{ki}$ は公称応力速度テンソルである。

(4) 液相および気相における連続式 本研究では、三相混合体として定式化を行うため、気相についても連続式を考える。ここで、間隙水は非圧縮性、間隙空気は圧縮性であるものとする。液相および気相における連続式は次のように書ける。

$$\text{液相} : s\dot{\epsilon}_v + \dot{s}n = -V_{i,i}^W + \frac{Q_M^W}{\rho^W} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{気相} : (1-s)\dot{\epsilon}_v - \dot{s}n + (1-s)n\frac{\dot{\rho}^G}{\rho^G} \\ = -\frac{(\rho^G V_{i,i}^G)_{,i}}{\rho^G} + \frac{Q_M^G}{\rho^G} \end{aligned} \quad (9)$$

3. 多相系地盤における弾粘塑性構成式

全ストレッチングテンソル D_{ij} は、次式のように弾性ストレッチングテンソル D_{ij}^e と粘塑性ストレッチングテンソル D_{ij}^{vp} の和で表されるものとする。

過圧密領域と正規圧密領域とを区別する過圧密境界面 $f_b = 0$ の存在を仮定し、さらに静的降伏関数 $f_y = 0$ を次式で定義する。

$$f_b = \bar{\eta}^* + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0 \quad (10)$$

$$f_y = \bar{\eta}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{my(s)}} = 0 \quad (11)$$

ここで、 $\bar{\eta}^*$ は相対応力比で初期の応力比に対する現在の応力比を表し、 η_{ij}^* は現在の応力比テンソルで $\eta_{ij}^* = S_{ij}/\sigma'_m$ と書ける。 M_m^* はひずみが圧縮から膨張へ転じるときの応力比で変相応力比と呼び、 $\tilde{M}^*$ はダイレイタンス係数で正規圧密領域と過圧密領域で異なる値をとる。 σ'_{mb} は過圧密境界面の大きさを決める硬化パラメータであり、Kimoto et al.³⁾ は σ'_{mb} において内部構造の変化を考慮している。本報では、この σ'_{mb} の中でサクシジョンの影響を考慮する。

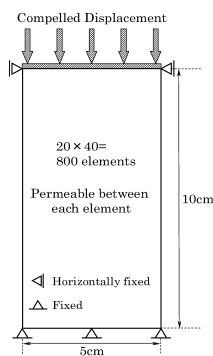


図 1: 解析モデル

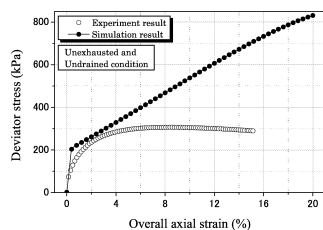


図 2: 軸差応力～軸ひずみ関係

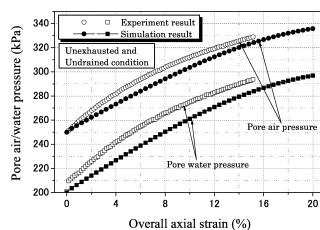


図 3: 間隙空気圧・間隙水圧～軸ひずみ関係

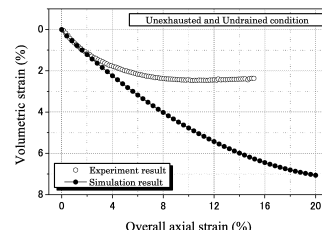


図 4: 体積ひずみ～軸ひずみ関係

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp \left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} \varepsilon_{kk}^{vp} \right) \left[1 + S_I \exp \left\{ -s_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1 \right) \right\} \right] \quad (12)$$

$$= \sigma'_{ma}(P^C) \exp \left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} \varepsilon_{kk}^{vp} \right) \quad (13)$$

ここで,

$$\sigma'_{ma}(P^C) = \sigma'_{ma} \left[1 + S_I \exp \left\{ -s_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1 \right) \right\} \right] \quad (14)$$

とおいた。また、静的硬化パラメータ $\sigma'_{my}(s)$ においてもサクシジョンの影響を考慮し、以下のように表されるとする。

$$\sigma'_{my}(s) = \frac{\sigma'_{ma}(P^C)}{\sigma'_{mai}} \sigma'_{myi} \exp \left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} \varepsilon_{kk}^{vp} \right) \quad (15)$$

非関連流動則を用いると粘塑性ストレッチングテンソル D_{ij}^{vp} は次のように表すことができる。

$$D_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \exp \left\{ m' \left(\bar{\eta}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (16)$$

4. 不飽和土の変形シミュレーション

上で定式化した空気-水-土連成有限要素解析法により、非排気・非排水条件下における不飽和土の挙動をシミュレートする。解析は平面ひずみ条件で行うものとし、図1に示すモデルおよび表1に示すパラメータを用いるものとする。図2～図6に解析結果を示す。図3より間隙空気圧の発生挙動を表現できており、実験結果²⁾の傾向ともよく一致している。体積ひずみの発生挙動も定性的には表現できており、不飽和土の力学挙動を再現できている。図5よりX型のせん断帯が生じていることがわかる。間隙空気および間隙水の挙動は図6より、主に四隅から中央への流れが卓越していると考えられる。

5. 結論

本報では空気-水-土連成有限要素法を開発し、非排気・非排水条件下における不飽和土の変形シミュレーションを行い、その力学挙動を再現できることを示した。今後は、三軸試験結果に対して三次元解析を行っていく予定である。本研究は河川環境管理財団・河川整備基金助成事業の援助を受けて行いました。記して謝意を表します。

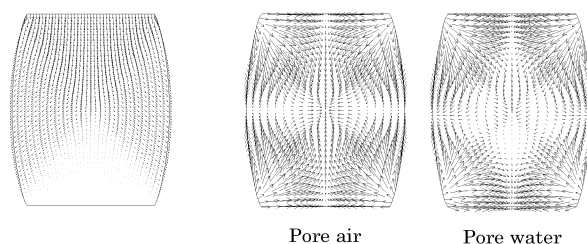


図 5: 変位増分ベクトル 図 6: 間隙空気・水流速ベクトル (空
トル (軸ひずみ 20%) 気 1.0×10^5 倍, 水 2.5×10^5 倍)

表 1: 解析に用いたパラメータ²⁾

圧縮指数, λ	0.144
膨潤指数, κ	0.0186
初期間隙比, e_0	1.03
初期せん断弾性係数, G_0	20000 (kPa)
圧密降伏応力, σ'_{mbi}	216 (kPa)
静止土圧係数, K_0	1.0
破壊応力比, M^*	1.01
粘塑性パラメータ, m'	23.0
粘塑性パラメータ, C_1	1.3×10^{-11} (1/s)
粘塑性パラメータ, C_2	2.3×10^{-11} (1/s)
内部構造パラメータ, σ'_{maf}	216 (kPa)
内部構造パラメータ, β	0.0
サクシジョンパラメータ, S_I	0.2
サクシジョンパラメータ, s_d	5.0
飽和透水係数, k_s^W	1.0×10^{-6} (m/s)
飽和透気係数, k_s^G	1.0×10^{-5} (m/s)
透水係数比形状パラメータ, a	3.0
透気係数比形状パラメータ, b	2.3
最大飽和度, S_{rmax}	1.0
最小飽和度, S_{rmin}	0.0
van Genuchten パラメータ, α	0.13 (1/kPa)
van Genuchten パラメータ, n	1.65

参考文献

- 1) 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.
- 2) Kim, YoungSeok.: *Elasto-viscoplastic Modeling and Analysis for Cohesive Soil Considering Suction and Temperature Effects*, Doctoral thesis, Kyoto University, 2004.
- 3) Kimoto, S., Oka, F. and Higo, Y.: Strain localization analysis of elasto-viscoplastic soil considering structural degradation, *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **193**, pp.2845-2866, 2004.