

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

(株)京阪電気鉄道 (元)京都大学大学院 正会員 渡部 泰介
 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 ○矢吹 太一

1. 序論

地震が頻発する我が国において、地盤の動的な力学特性を把握することは重要であり、飽和地盤に関しては、その動的な力学特性は明らかになってきているといえる。しかし、不飽和地盤に関してはまだまだ未知なる部分が残されており、研究の進展が必要である。そこで、本研究では飽和粘土の繰返し弾粘塑性構成式を修正・拡張した不飽和土の繰返し弾粘塑性構成式を用いて、不飽和シルトで行った繰返し載荷試験結果の再現を試みた。

2. 飽和粘土の繰返し弾粘塑性構成式の修正

従来から提案している単調載荷時および繰返し載荷時双方の挙動を同時に表現できる飽和粘土の繰返し弾粘塑性構成式中¹⁾で、新たなダイレイタンシー係数を定義した。また、剛性の低減手法も導入した。以下に繰返し弾粘塑性構成式の定式化を記す。

2.1 過圧密境界面

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

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^{vp}\right) \quad (2)$$

$$\sigma'_{ma} = \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta\sqrt{z}) \quad (3)$$

$$z = \int_0^t \dot{z} dt \quad \dot{z} = (\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \varepsilon_{ij}^{vp})^{1/2} \quad (4)$$

2.2 降伏関数

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

2.3 粘塑性ポテンシャル関数

$$f_p = \bar{\eta}_\chi^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mp}) = 0 \quad (6)$$

式(5)および式(6)中の $\bar{\eta}_\chi^*$ は移動硬化パラメータ χ_{ij}^* を導入した応力比テンソルであり次式で表される。

$$\bar{\eta}_\chi^* = \left\{ (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) \right\}^{1/2} \quad (7)$$

式(6)中のダイレイタンシー係数 \tilde{M}^* は従来形だと、等方応力状態時、粘塑性体積ひずみが発生しないという問題点があったため、新たに以下の式(8)のよう

に定義し、その問題点を改善した。式(8)中の σ_m^* は現在の応力状態を通して、過圧密境界面に相似な曲面で $\eta_{ij}^* = \eta_{ij(0)}^*$ とした時の σ'_m の値である。

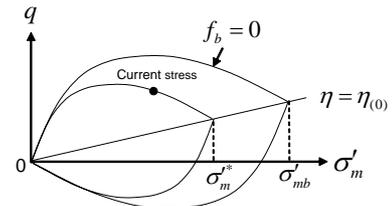


図1 ダイレイタンシー係数 \tilde{M}^* の決定(q/σ'_m 空間)

$$\tilde{M}^* = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_m^*}{\sigma'_{mb}} \right)^N M_m^* & : \text{過圧密領域} \\ M_m^* & : \text{正規圧密領域} \end{cases} \quad (8)$$

N は材料定数であり、後の解析では $N=1$ とした。

2.4 非線形移動硬化則

$$d\chi_{ij}^* = B^* (M_f^* de_{ij}^{vp} - \chi_{ij}^* d\gamma^{vp*}) \quad (9)$$

2.5 流れ則

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \left\langle \Phi_{ijkl}(f_y) \right\rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (10)$$

2.6 低減手法

繰返し載荷に伴ってひずみが増大する過程を再現するためには、粘塑性偏差ひずみの発生量に応じてせん断係数を低減させる方法が有効である。粘塑性せん断係数に関する硬化パラメータ B^* の低減に、せん断初期からの累積ひずみや、各サイクルでの累積ひずみなどを用いる方法などが提案されているが、本研究では以下の手法²⁾を飽和粘土に導入する。この手法では、応力径路が限界状態線に到達する前後で二種類の低減手法を用いる。

①限界状態線到達前

$$B^* = (B_0^* - B_1^*) \exp(-C_f \gamma_{(n)}^{vp*}) + B_1^* \quad (11)$$

$$G = G_0 \sqrt{\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}}} \quad (12)$$

②限界状態線到達後

$$B^* = (B_{max}^* - B_1^*) \exp(-C_f \gamma_{(n)}^{vp*}) + B_1^* \quad (13)$$

キーワード：不飽和土、繰返しせん断、弾粘塑性構成式

住所：〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4C クラスタ C1 棟、 電話・FAX：075-383-3193

さらに B_{max}^* を限界状態線到達後からの粘塑性ひずみの累積値 γ_{apc}^{vp*} によって、以下の式で低減させる。

$$B_{max}^* = \frac{B_0^*}{1 + \gamma_{apc}^{vp*} / \gamma_{apr}^{vp*}} \quad (14)$$

せん断弾性係数 G も同様に以下の式で低減させる。

$$G = \frac{G_0}{1 + \gamma_{apc}^{vp*} / \gamma_{apr}^{vp*}} \quad (15)$$

ここで γ_{apr}^{vp*} , γ_{apc}^{vp*} はそれぞれ粘塑性剛性の基準ひずみ、弾性剛性の基準ひずみである。

3. 不飽和土の繰返し弾粘塑性構成式への拡張

前述のように修正を加えた飽和粘土の繰返し弾粘塑性構成式において、応力変数として骨格応力 (Average skeleton stress) を導入するとともに硬化パラメータ σ''_{mb} 中でサクシジョンの効果を考慮することで、不飽和土の繰返し弾粘塑性構成式へと拡張した。

3.1 サクシジョンの効果

湿潤 (wetting), 乾燥 (drying) に伴うサクシジョンの変化を硬化パラメータ σ''_{mb} で以下のように定義する³⁾。

$$\sigma''_{mb} = \sigma''_{ma}(z) \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_{kk}^{vp}\right) \times \left[1 + S_I \exp\left\{-s_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1\right)\right\} \right] \quad (16)$$

$$= \sigma''_{ma}(P^C, z) \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_{kk}^{vp}\right) \quad (17)$$

ここで、

$$\sigma''_{ma}(P^C, z) = \sigma''_{ma}(z) \left[1 + S_I \exp\left\{-s_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1\right)\right\} \right] \quad (18)$$

とおいた。ここで、 P_i^C は初期サクシジョン、 P^C は現在のサクシジョン、 S_I は初期サクシジョン P_i^C が作用している時の強度増加率で、 s_d は強度の変化速度を調節するパラメータである。

3.2 不飽和シルトへの適用

拡張した不飽和土の繰返し弾粘塑性構成式を用いて、不飽和シルトの排気-排水条件下における、繰返し載荷試験結果の再現を行った。なお、初期サクシジョン 10kPa, 応力振幅 100kPa の条件下で行った試験結果の解析を行った。表 1 に解析に用いたパラメータを示す。また図 2 に実験結果を、図 3 にシミュレーション結果を示す。載荷初期に大きな圧縮軸ひずみ、体積圧縮ひずみが発生し、その後も載荷に伴

って、軸ひずみ、体積ひずみが徐々に発生する挙動がよく表現できている。しかし、軸ひずみに関して試験結果で発生した伸張への軸ひずみの発生がシミュレーションでは再現できなかった。

表 1 解析に用いたパラメータ

サクシジョン s (kPa)	10
圧縮指数, λ	0.095
膨潤指数, κ	0.0086
初期間隙比, e_0	1.14
初期せん断弾性係数, G_0 (kPa)	36600
圧密降伏応力, σ''_{mbi} (kPa)	205
破壊応力比, M_m^*	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)	6.0×10^{-7}
粘塑性パラメータ, C_{02} (1/s)	4.0×10^{-7}
内部構造パラメータ, σ''_{maf} (kPa)	45
内部構造パラメータ, β	2.2
移動硬化パラメータ, B^*	80
B^* の下限値, B_1^*	15
B^* の低減を制御するスカラーパラメータ, C_f	2
サクシジョンパラメータ, S_I	0.4 [†]
サクシジョンパラメータ, s_d	0.6 [†]
初期平均骨格応力, σ''_{me} (kPa)	205

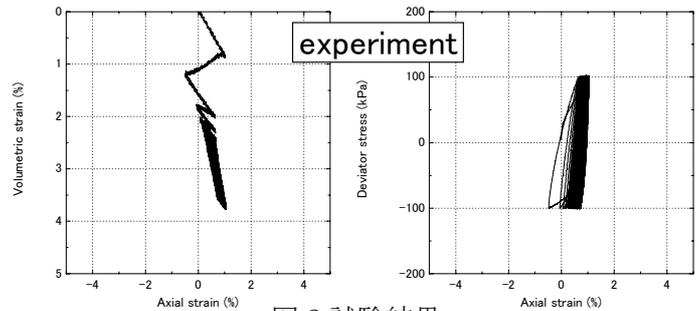


図 2 試験結果

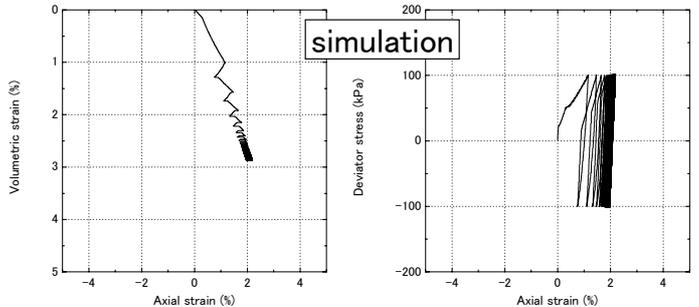


図 3 シミュレーション結果

4. 今後の課題

軸ひずみ及び体積ひずみの発生量の予測にはモデルの改善の余地があり、今後の課題である。

参考文献 1) 渡部, 岡, 小高, 木元, 谷崎: 自然堆積粘土の単調および繰返し変形特性, 第 40 回地盤工学研究発表会講演集, 函館, pp.395-396, 2005. 2) Oka, F., Furuya, K. and Uzuoka, R.: Proceedings of Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena, Triantafyllidis(ed.), Bochum, pp.85-90, 2004. 3) Oka, F., Kodaka, T., Kimoto, S., Kim, Y.-S and Yamasaki, N.: Unsaturated Soils Conference April 2-6 2006, ASCE, Carefree Arizona, Geotechnical Special Publication, No.147, ASCE, 2006, Vol.2, pp.2039-2050.