

1. はじめに

自然堆積地盤の内部構造は本質的に異方性をもつことが知られている。地盤材料は重力場に堆積するため、特に堆積時において鉛直方向を異方性の軸とする軸直交異方性を示す材料が多い。このような堆積環境に加えて、載荷に伴う応力・ひずみ増分に従って内部構造が変化し、異方性の方向も変化するものと考えられる。本研究では、自然堆積状態での構造異方性を堆積時の応力比テンソルによって表現し、さらに載荷に伴う異方性の方向の変化を、非線形移動硬化則を用いて表現している。本モデルを用いて、切り出し角度の異なる供試体の三軸圧縮特性を表現することを試みた。

2. 過圧密粘土の弾粘塑性構成式

岡¹⁾による非線形移動硬化則を導入した弾粘塑性構成式において、全ひずみ増分 $\dot{\epsilon}_{ij}$ は弾性ひずみ増分 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ と粘塑性ひずみ増分 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ の和であると仮定する。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \tag{1}$$

非線形移動硬化則を導入した静的降伏関数 f_y は次式で表される。

$$f_y = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^* \right) \left(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^* \right) \right\}^{1/2} - R_d = 0 \quad , \quad \eta_{ij}^* = S_{ij} / \sigma_m' \tag{2}$$

ここで χ_{ij}^* は移動硬化テンソル、 R_d は等方硬化に関するパラメータである。 σ_m' は平均応力テンソル、 S_{ij} は偏差応力テンソル ($S_{ij} = \sigma_{ij}' - \sigma_m' \delta_{ij}$)、 η_{ij}^* は応力比テンソルである。 χ_{ij}^* の発展則は以下の式で与えられる。

$$d\chi_{ij}^* = B^* (A^* de_{ij}^{vp} - \chi_{ij}^* d\gamma^{vp*}) \quad , \quad d\gamma^{vp*} = \sqrt{de_{ij}^{vp} de_{ij}^{vp}} \tag{3}$$

de_{ij}^{vp} は粘塑性偏差ひずみ増分テンソルで、 A^* 、 B^* は材料定数、 $d\gamma^{vp*}$ は粘塑性偏差ひずみ増分テンソルの第二不変量である。塑性ポテンシャル関数 f_p は次式で表現される。

$$f_p = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^* \right) \left(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^* \right) \right\}^{1/2} + \tilde{M}^* \ln(\sigma_m' / \sigma_{ma}') = 0 \tag{4}$$

$$\tilde{M}^* = -\frac{\eta^*}{\ln(\sigma_m' / \sigma_{mc}')} \quad , \quad \sigma_{mc}' = \sigma_{mb}' \exp\left(\frac{\bar{\eta}^*_0}{M_m^*}\right)$$

$\eta^* = \sqrt{\eta_{ij}^* \eta_{ij}^*}$ 、 $\bar{\eta}^*_0$ は相対応力比である。 \tilde{M}^* は現在の応力状態および σ_{mc}' によって決定する。

ここで降伏関数 f_y および塑性ポテンシャル関数 f_p 中の移動硬化テンソル χ_{ij}^* の初期値として自然堆積時の応力比テンソル $\eta_{ij}^*{}_{(0)}$ を用いる。静止土圧係数を K_0 とすると、

$$\eta_{ij}^*{}_{(0)} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \frac{(\sigma_{10}' - \sigma_{30}')}{\sigma_m'} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} \frac{(\sigma_{10}' - \sigma_{30}')}{\sigma_m'} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3} \frac{(\sigma_{10}' - \sigma_{30}')}{\sigma_m'} \end{pmatrix} = \frac{1-K_0}{1+2K_0} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

図-1 のように x_1 軸より だけ傾いた地盤を考えると、

$$\chi_{ij}^*{}_{(0)} = Q \eta_{ij}^*{}_{(0)} Q^T = \frac{1-K_0}{1+2K_0} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1-K_0}{1+2K_0} \begin{bmatrix} 2\cos^2\theta - \sin^2\theta & 0 & -3\cos\theta \sin\theta \\ 0 & -1 & 0 \\ -3\cos\theta \sin\theta & 0 & 2\sin^2\theta - \cos^2\theta \end{bmatrix} \tag{6}$$

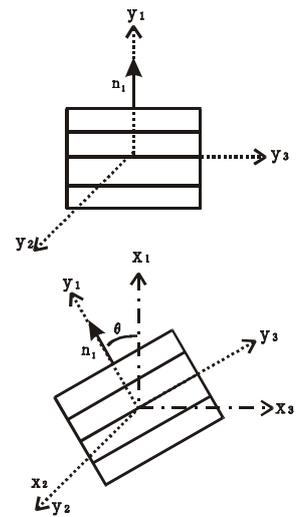


図-1 構造テンソル

Q は $y_2(=x_2)$ 軸に関する角度 回転変換テンソルである。粘塑性ひずみ増分は以下の式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \langle \Phi_{ijkl}(F_1) \rangle \Phi_2(\xi) \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{ij}} \quad \text{ここで、} \{ \langle \Phi_{ijkl}(F_1) \rangle = \Phi_{ijkl}(F_1) : F_1 > 0, \quad \langle \Phi_{ijkl}(F_1) \rangle = 0 : F_1 \leq 0 \} \quad (7)$$

式(7)中の $\langle \Phi_{ijkl}(F_1) \rangle$ は F_1 の関数であり、 $F_1=0$ は式(2)の静的降伏関数を表す。ここで $\Phi_{ijkl}(F_1)$ は4階の等方テンソル関数であるとする。 $\Phi_1(F_1)$ の具体的な形は、以下の式で与える。

$$\Phi_{ijkl}(F_1) = C_{ijkl} \Phi_1(F_1) \quad , \quad C_{ijkl} = a \delta_{ij} \delta_{kl} + b (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad , \quad \frac{\Phi_1(F_1)}{\sigma'_m} = \exp \left\{ m'_0 \left[(\eta^*_{ij} - \chi^*_{ij}) (\eta^*_{ij} - \chi^*_{ij}) \right]^{1/2} \right\} \quad (8)$$

ここで m'_0 は粘塑性パラメータである。破壊時における、ひずみ速度非依存性を考慮するため、以下の式で表される第二材料関数 $\Phi_2(\xi)$ を取り入れる²⁾。 ξ は内部変数であり、 $\bar{\eta}^*_x = \{ (\eta^*_{mn} - \chi^*_{mn}) (\eta^*_{mn} - \chi^*_{mn}) \}^{1/2}$ とする。

$$\Phi_2(\xi) = \xi + 1 \quad , \quad \xi = \frac{\bar{\eta}^*_x M^*_f}{G^*_2 \left[M^*_f - \frac{\eta^*_{mn} (\eta^*_{mn} - \chi^*_{mn})}{\bar{\eta}^*_x} \right]} \quad (9)$$

以上より、過圧密粘土の弾粘塑性構成式は以下の一般式で表される。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\sigma'_m}{\sigma'_m} \delta_{ij} + C_{01} \frac{\langle \Phi_1(F) \rangle \Phi_2(\xi) (\eta^*_{ij} - \chi^*_{ij})}{\sigma'_m \bar{\eta}^*_x} + C_{02} \frac{\langle \Phi_1(F) \rangle \Phi_2(\xi)}{\sigma'_m} \left\{ \tilde{M}^* - \frac{\eta^*_{mn} (\eta^*_{mn} - \chi^*_{mn})}{\bar{\eta}^*_x} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (10)$$

3. 非排水三軸圧縮試験のシミュレーション

以上の方法で初期構造異方性および塑性ひずみによる誘導異方性を考慮し、東大阪粘土に適用して非排水三軸圧縮試験のシミュレーションを行なった。足立・岡ら³⁾による実験結果を図-2、本モデルによる解析結果を図-3に示す。解析に用いたパラメータを表に示す。切り出し角度の異なる供試体の三軸圧縮強度の違いを表現できる。 $K_0=0.8$ のとき最大強度は $\theta=0^\circ$ のとき最大、 $\theta=90^\circ$ のとき最小となる。

参考文献 1) Oka, F. (1992): Proc. of 4th Int. Sym. on Numerical Models in Geomechanics, pp.105-114. 2) Adachi, T., Oka, F., Mimura, M. (1987): Proc. 8th of Asian Regional Conference on SMFE, pp.5-8. 3) Adachi, T., Oka, F., Hirata, T., Hashimoto, T., Pradhan, T.B.S., Nagaya, J., and Mimura, M. (1991): Triaxial and torsional hollow cylinder tests of sensitive natural clay and an elast-viscoplastic constitutive model, Proc. 10th European Conf. on SMFE, Vol. 1, pp3-6.

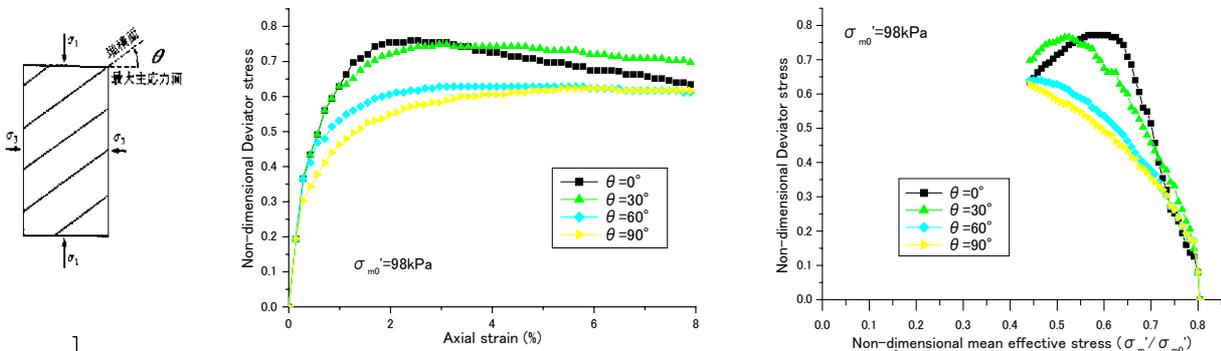


図-2 東大阪粘土による実験結果³⁾

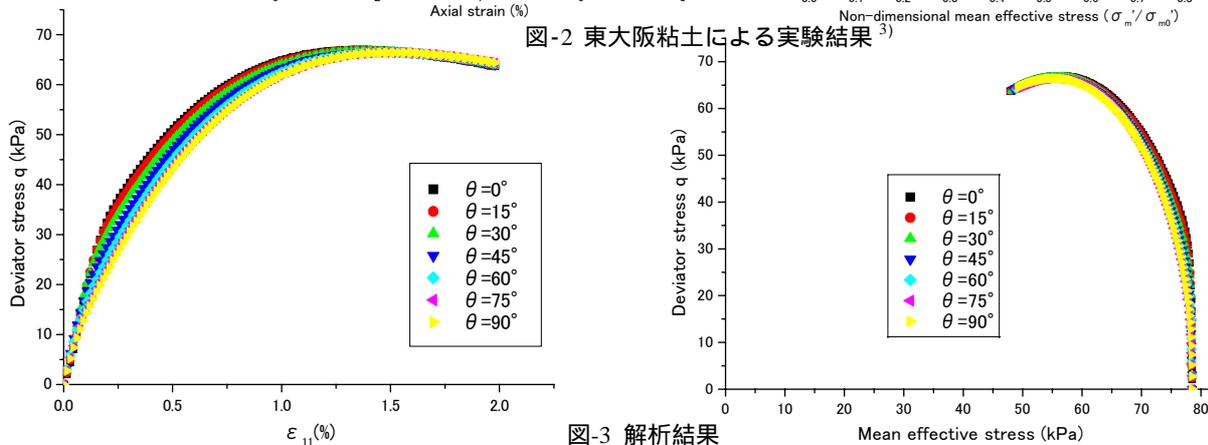


図-3 解析結果

初期圧密圧力 σ'_{m0}	78.4 (kPa)	破壊応力比 ($\sqrt{2/3} q/p$) $M^*_f (=A^*)$	1.18	粘塑性パラメータ m_0	12.8
圧密降伏応力 σ'_{mb}	93.2 (kPa)	最大圧縮時の応力比 ($\sqrt{2/3} q/p$) M^*_m	1.18	" C_{01}	9.0×10^{-8} (1/sec)
ヤング係数 E_0	23520 (kPa)	軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{11}$	6.0×10^{-3} (%/min)	" C_{02}	2.85×10^{-8} (1/sec)
圧縮指数	0.355	間隙比 e	1.806	静止土圧係数 K_0	0.8
膨張指数	0.0477	粘塑性パラメータ G^*_2	500	移動硬化パラメータ B^*	150