

力学量 t_{ij} を用いた粘土の移動硬化型弾・粘塑性モデルについて

名古屋工業大学 正員 中井 照夫 学生員 ○ 星川 拓哉
" 松井 康司 都築 篤

一般に、粘土の応力・ひずみ関係式を記述するには、①変形・強度特性におよぼす中間主応力の影響、②塑性ひずみ増分方向の応力経路依存性、③繰返し載荷や主軸の回転等を含む誘導異方性、④時間効果特性などを考慮する必要がある。著者らはこれまでに、力学量 t_{ij} を用いた粘土の移動硬化型の弾・塑性構成モデル(kinematic t_{ij} -clay model)^{1), 2)}を提案して①、②、③の評価を可能にしている。また、中井・都築³⁾は等硬化型の弾・塑性モデル(t_{ij} -clay model)⁴⁾に開口⁵⁾による粘塑性理論を導入することによって、①、②、④の評価を可能とした非定常流動曲面型の弾・粘塑性構成モデル(VP t_{ij} -clay model)を開発している。

ここでは、等硬化型 t_{ij} -clay modelを非定常流動曲面型VP t_{ij} -clay modelに拡張した方法を参考にして、移動硬化型 t_{ij} -clay modelを①～④の全てを評価可能とするモデルに拡張する。また、併せて異方圧密粘土の応力速度一定($\dot{q} = \dot{\sigma}_1 - \dot{\sigma}_3 = \text{const.}$)非排水三軸圧縮および三軸伸張試験を行い、提案モデルによる解析結果と実測値の比較を示す。

1. 力学量 t_{ij} を用いた粘土の移動硬化型弾・粘塑性モデル

移動硬化型 t_{ij} -clay modelに開口⁵⁾による粘塑性理論を導入して、新たに非定常流動曲面型の弾・粘塑性構成モデル(kinematic VP t_{ij} -clay model)を誘導する。粘土の粘塑性体積ひずみ ϵ_v^p が塑性成分 ϵ_v^p と粘性成分 ϵ_v^v の和として表せるとすると

$$\epsilon_v^{vp} = \epsilon_v^p + \epsilon_v^v = \epsilon_v^p + C_\epsilon \ln \frac{\dot{\epsilon}_v^o}{\dot{\epsilon}_v^{vp}} \quad (1)$$

となる。(1)式の常微分方程式を解けば

$$\epsilon_v^{vp} = C_\epsilon \ln \left\{ \frac{\dot{\epsilon}_v^o t}{C_\epsilon} \exp \left(\frac{\epsilon_v^p}{C_\epsilon} \right) + 1 \right\} \quad (2)$$

となる。ここに、 C_ϵ は2次圧縮指数を表し、塑性体積ひずみ ϵ_v^p は、移動硬化型 t_{ij} -clay model^{1), 2)}ではその増分 $d\epsilon_v^p$ が

$$d\epsilon_v^p = \frac{\lambda - K}{1 + e} \left[\frac{1}{t_N} dt_N + \frac{\alpha}{M^* - (1 - \alpha)\bar{X}} d\bar{X} \right] \quad (3)$$

で表されることを利用して、その積分 $\epsilon_v^p = \int d\epsilon_v^p$ で与える。

さて、開口による粘塑性理論では粘塑性ポテンシャル F は次式で与えられる。

$$F = C_\epsilon \ln \left\{ \frac{\dot{\epsilon}_v^o t}{C_\epsilon} \exp \left(\frac{f}{C_\epsilon} \right) + 1 \right\} - c = 0 \quad (4)$$

ここでは(4)式中の f を移動硬化型 t_{ij} -clay modelの降伏関数を利用して次式で与えるものとする。

$$f = \frac{\lambda - K}{1 + e} \left[\ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \frac{-\alpha}{1 - \alpha} \ln \left| 1 - (1 - \alpha) \frac{X^* + n}{M^*} \right| \right] \quad (5)$$

そして、等硬化モデル同様、粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ は、関連流動則成分と等方的な圧縮成分の和として表されるとすると、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ は

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \Lambda \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} + K \langle \dot{t}_N \rangle \frac{\delta_{ij}}{3} \quad (6)$$

で計算される。ここに、係数 Λ は $\dot{\epsilon}_v^{vp} = \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \cdot \delta_{ij} = \Lambda \cdot (\partial F / \partial t_{ij} + K \cdot \langle \dot{t}_N \rangle)$ の関係より次式となる。

$$\Lambda = \frac{\dot{\epsilon}_v^{vp} - K \langle \dot{t}_N \rangle}{\frac{\partial F}{\partial t_{kk}}} \quad (7)$$

と表され、 $\dot{\epsilon}_v$ は(2)式の時間微分として与えることができる。なお、提案モデルは除荷を含まない単調荷時には等方硬化型のVP tij-clay model³⁾と一致する。

2. 解析結果と実測値の比較

実験は、藤の森粘土($W_L=41\%$, $W_P=23\%$, $G_s=2.67$)を異方圧密($\sigma_v=2.0\text{kgf/cm}^2$, $\sigma_h=1.0\text{kgf/cm}^2$)した後、応力速度一定($\dot{q}=\dot{\sigma}_v-\dot{\sigma}_h=0.01\text{kgf/cm}^2/\text{min.}$)条件の下で非排水三軸圧縮および三軸伸張試験を行った。その結果を提案モデルによる解析結果と比較する。表-1は解析に用いた粘土の土質パラメーターであるが、これらの値は従来のモデルと共通である。図-1は偏差応力(q)~偏ざひずみ(ϵ_d)関係(a図)と q ~平均主応力(p)関係で表した有効応力経路図(b図)の実測値を示す。(ここに、グラフ上の応力は初期の拘束応力($p_0=1.33\text{kgf/cm}^2$)で正規化している。また、図-2は提案モデル(実線)と従来の等方硬化型モデル(一点鎖線)による解析結果を示している。両モデルは主働側では一致するが、最大主応力方向が変化する受働側では従来の等方硬化モデルでは実測値の傾向を説明できないことがわかる。図-3は応力速度を変えた解析結果を示すが、応力~ひずみ挙動および非排水有効応力経路の応力速度依存性を説明している。

表-1 藤の森粘土の土質パラメーター

$\lambda/(1+e_0)$	5.08×10^{-2}
$\kappa/(1+e_0)$	1.12×10^{-2}
$\phi'(\text{comp.})$	33.7°
α	0.74
V_e	0.0
ξ	0.2
C_E	0.001
$E_{v0}(\%/min)$	7.0×10^{-5}

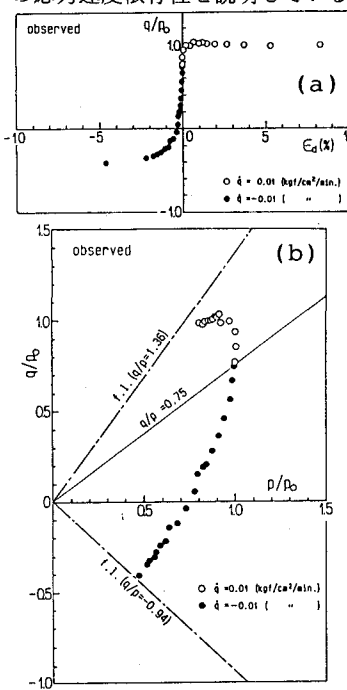


図-1 定応力速度非排水三軸試験の実測値

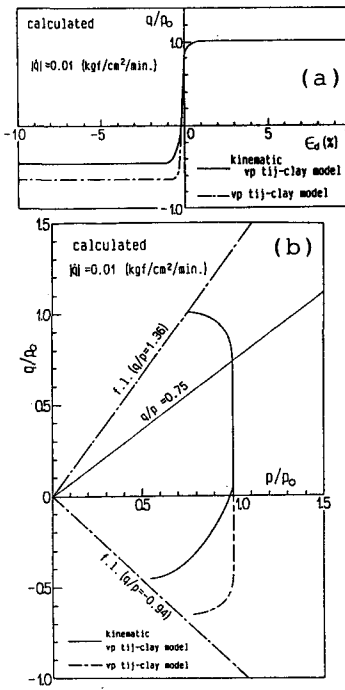


図-2 移動硬化型および等方硬化型弾・粘塑性モデルによる解析結果

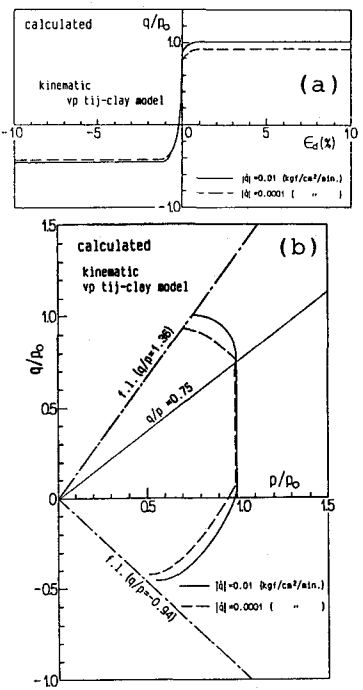


図-3 応力速度を変えた移動硬化型弾・粘塑性モデルによる解析結果

参考文献

- 1) 中井・星川(1990) : 第45回土木学会年講, III-72, 180-181.
- 2) 中井・星川(1991) : Proc. IACMAG 91, Cairns (投稿中)
- 3) 中井・都築(1988) : 6th NUMOG, Vol.1, 521-527.
- 4) 中井・松岡(1986) : S & F, Vol.26, No.3, 81-98.
- 5) 関口(1977) : 9th ICSMFE, Vol.1, 289-292.