

| | | | |
|----------|-----|-----|----|
| 名古屋港管理組合 | 正会員 | ○星川 | 拓哉 |
| 名古屋工業大学 | 正会員 | 中井 | 照夫 |
| 兵庫 県 | | 松井 | 康司 |
| 刈谷 市 | | 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繰り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⁾に関口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に関口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。

関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。

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

ここでは(1)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。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \frac{-\alpha}{1 - \alpha} \ln \left| 1 - (1 - \alpha) \frac{X^* + n}{M^*} \right| \right] \quad (2)$$

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、 t_{ij} 空間で関連流動則を満足する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

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

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

$$\Lambda = \frac{\dot{\epsilon}_v^{vp} - K \langle \dot{t}_N \rangle}{\frac{\partial F}{\partial t_{kk}}} \quad (4)$$

となり、係数Kは次式で与えられる³⁾。

$$K = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{1}{t_{N1}} \frac{\partial F}{\partial f} \quad (5)$$

さて、関口によれば粘塑性体積ひずみは、塑性体積ひずみ ϵ_v^p と時間tの関数として

$$\epsilon_v^{vp} = C_\epsilon \ln \left\{ \frac{\dot{\epsilon}_v^p t}{C_\epsilon} \exp \left(\frac{\epsilon_v^p}{C_\epsilon} \right) + 1 \right\} \quad (6)$$

で与えられるので、(4)式中の $\dot{\epsilon}_v^{vp}$ はこの時間微分をとることにより決定できる。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 $d\epsilon_v^p$ が次式で表されること

$$d\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\frac{1}{t_N} dt_N + \frac{\alpha}{M^* - (1 - \alpha)\bar{X}} d\bar{X} \right] \quad (7)$$

を利用して、その積分 $\epsilon_v^p = \int d\epsilon_v^p$ で与える。なお、提案モデルは除荷を含まない単調載荷時には等方硬化型の VP t_{ij}-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($\sigma_v = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_r = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $p = (\sigma_v + 2\sigma_r)/3 = 1.33 \text{ kgf/cm}^2$)した後、応力速度一定($\dot{q} = \dot{\sigma}_v - \dot{\sigma}_r = 0.0001 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$. および $0.1 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$.)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^{2), 3)}と共通である。

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} |
| $\phi^0(\text{comp.})$ | 33.7° |
| α | 0.74 |
| Ve | 0.0 |
| ξ | 0.2 |
| Cε | 0.001 |
| Ev0(%/min) | 7.0×10^{-5} |

図-1は $\dot{q} = 0.0001 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$.の試験について $q \sim \epsilon_d$ 関係(a図)と、 $q \sim p$ 関係で表した有効応力経路図(b図)の実測値(プロット)と提案モデル

(実線)および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。両モデルは主動側では一致するが、最大主応力方向が変化する受働側では従来の等方硬化型モデルでは実測値の傾向を説明できないことがわかる。一方、提案モデルでは受働側でのせん断初期にpを多少過大評価するものの、主動せん断・受働せん断時の応力~ひずみ挙動を妥当に表現している。

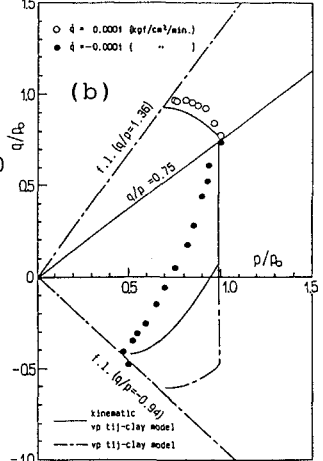
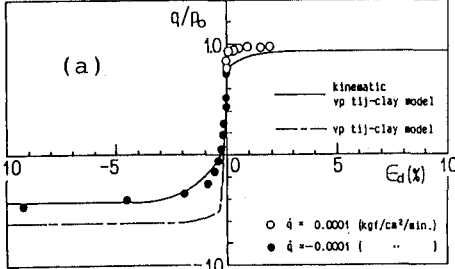


図-1 $\dot{q} = 0.0001 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$.の実測値と移動硬化型および等方硬化型弾・粘塑性モデルによる解析結果

図-2は時間効果特性をみるため2種類の応力速度での、実測値と提案モデルによる解析結果を示している。提案モデルは、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ことがわかる。

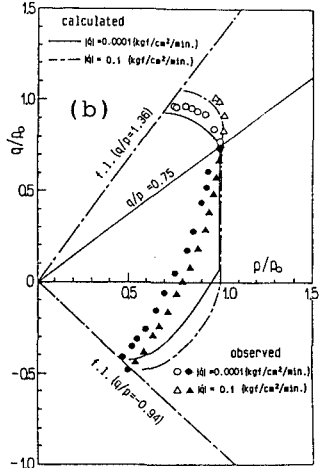
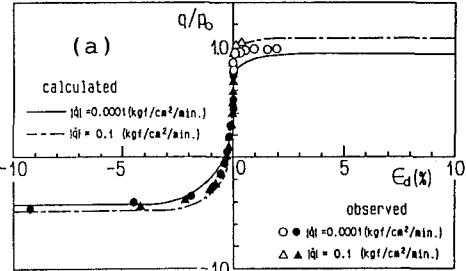


図-2 応力速度を変えた場合(1000倍)の実測値と移動硬化型弾・粘塑性モデルによる解析結果

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.
- 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.