

III-72

粘土の弾塑性モデル(t_{ij} -clay model)の移動硬化モデルへの拡張

名古屋工業大学 正 員 ○ 中井 照夫

“ 大学院 学生員 星川 拓哉

実際問題の解析によく適用されているモデルであるCam-clay model¹⁾は簡便で土質パラメーターも少なく決めやすい粘土の弾塑性構成モデルであるが、①中間主応力の変形・強度特性におよぼす影響、②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の評価等に問題を有している。現在までに、力学量 t_{ij} を用いることにより①を評価し、降伏関数やひずみ硬化パラメーターは1つであるものの塑性ひずみ増分を2つに分けることにより②を評価した粘土の弾塑性モデル(t_{ij} -clay model)²⁾を提案している。しかし、いずれのモデルも等方硬化モデルであるため③の評価はできないことになる。ここでは、砂の等方硬化型モデル³⁾を移動硬化型モデルに拡張した方法⁴⁾を用いて、 t_{ij} -clay modelを③の評価も可能にしたモデルに拡張する。

1. 等方硬化型 t_{ij} -clay modelの概要

このモデルでは降伏関数 f は

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left[\ln \frac{t_N}{t_{NO}} + \frac{-\alpha}{1 - \alpha} \ln \left| 1 - (1 - \alpha) \frac{X}{M^*} \right| \right] - H = 0 \quad (H = \epsilon_V^P) \quad (1)$$

で与えられ、全塑性ひずみ増分は t_{ij} 空間で関連流動則を満足する成分 $d\epsilon_{ij}^{P(AF)}$ と等方的な圧縮成分 $d\epsilon_{ij}^{P(IC)}$ の和として与えられる。通常の構成モデルで用いられる応力パラメーターと t_{ij} モデルで用いられる応力パラメーターの概要と比較は末尾の付表参照。

$$d\epsilon_{ij}^P = d\epsilon_{ij}^{P(AF)} + d\epsilon_{ij}^{P(IC)} \quad (2)$$

$$d\epsilon_{ij}^{P(AF)} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial t_{ij}} \quad (3)$$

$$d\epsilon_{ij}^{P(IC)} = K < dt_N > \frac{\delta_{ij}}{3} \quad (4)$$

さて、(2), (3), (4)式より

$$d\epsilon_{ii}^P = d\epsilon_V^P = dH = \Lambda \frac{\partial f}{\partial t_{kk}} + K < dt_N > \quad (5)$$

したがって、 Λ は次式で与えられる。

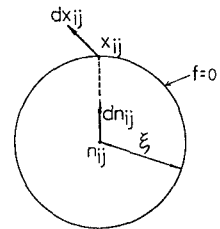
$$\Lambda = \frac{dH - K < dt_N >}{\frac{\partial f}{\partial t_{kk}}} \quad (6)$$

ここに、(1)式より

$$dH = d\epsilon_V^P = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left[\frac{1}{t_N} dt_N + \frac{\alpha}{M^* - (1 - \alpha)X} dX \right] \quad (7)$$

また、

$$K = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \cdot \frac{1}{t_{N1}} \quad (8)$$



stress ratio x_{ij} space

図-1 移動硬化の説明図

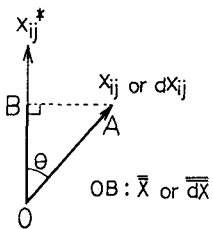


図-2 $\bar{X}$, $d\bar{X}$ の説明図

2. 移動硬化型 t_{ij} -clay model への拡張

一般に、粘土も平均応力 (p あるいは t_N) の変化に対しては等方硬化的な弾塑性挙動 (圧密試験の載荷・除荷時の $e \sim \log p$ 関係からもわかる) を示し、応力比の変化には移動硬化的な弾塑性挙動 (繰り返しせん断時の応力 $\sim$ ひずみ挙動からもわかる) を示すので、kinematic t_{ij} -sand model 同様付表の x_{ij} を使って移動硬化型のモデルに拡張する。つまり、付表の(7b), (8b)式の間に単調な応力経路下では $X = X^* + n$ なる関係が成り立つので、(1)式の X を $X^* + n$ で置き換え次式で降伏関数を与える。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \frac{-\alpha}{1 - \alpha} \ln \left| 1 - (1 - \alpha) \frac{X^* + n}{M^*} \right| \right] - c = 0 \quad (9)$$

ここに、 $n = \sqrt{n_{1j} n_{1j}}$ であり、 n_{1j} は応力比 x_{1j} 空間における降伏関数の中心(図-1参照)を意味する。また、 $f=0$ & $df>0$ の時に塑性ひずみが発生するが、図-1の応力比空間において現在の応力状態 x_{1j} から外側に応力比が変わるとき($dX^*>0$)は $X^*=\xi$ を保ちながら移動硬化し、応力比一定($x_{1j}=\text{const.}$)で平均応力(p あるいは t_N)が増えるようなときは n_{1j} はfixしたままで等方あるいは異方硬化する。また、 x_{1j} が変化し、 p あるいは t_N も増えるようなときは移動硬化と等方(異方)硬化がmixした硬化をすることになる。塑性ひずみは等硬化化モデル同様(2),(3),(4)式で計算されるが、 Δ に関しては(7)式中の X , dX を $\bar{X}$, $d\bar{X}$ に置き換える。

$$dH = d\varepsilon_p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\frac{1}{t_N} dt_N + \frac{\alpha}{M^* - (1 - \alpha)\bar{X}} d\bar{X} \right] \quad (10)$$

$$\bar{X} = X \cos \theta = \frac{x_{1j} x_{1j}^*}{X^*} \quad (11)$$

$$d\bar{X} = dX \cos \theta = \frac{dx_{1j} x_{1j}^*}{X^*} \quad (12)$$

ここに、 $\bar{X}$ および $d\bar{X}$ は図-2に示すように $O A$ の x_{1j}^* 方向の成分 $O B$ を表している。図-3は $p=2.0$ kgf/cm^2 のもとで $q/p=1.2$ まで三軸圧縮側で、その後伸張側にせん断した時の $q/p \sim \varepsilon_d \sim \varepsilon_v$ 関係の3つのモデルによる解析結果を示す。kinematic tij-clay modelではこのような繰り返しせん断挙動が説明できるが、等硬化化モデルでは表現できないことがわかる。図-4は $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = (3.6, 1.2, 1.2) \text{ kgf/cm}^2$ の応力状態から主応力を一定のままで主応力軸だけを $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 0^\circ$ と x - y 面内で回転したときの kinematic tij-clay modelによる解析結果(ひずみ増分方向と大きさ)を表す。なお、等硬化化モデルではこのような場合塑性ひずみは発生しない。本講演概要集別報⁵⁾では提案モデルと実測値(平面ひずみ試験)の比較を示している。

文献 1) Schofield・Wroth(1968): Critical State Soil Mech. 2) 中井・松岡(1986): S & F, Vol. 26, No. 3, 81-98. 3) 中井(1989): S & F, Vol. 29, No. 1, 119-137. 4) 中井・藤井・瀧(1989): Proc. NUMOG III, 36-45. 5) 星川・中井(1990): 本講演概要集

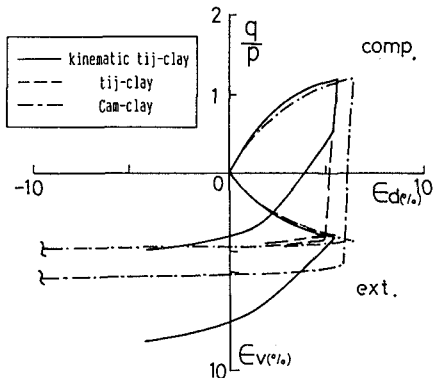


図-3 繰り返し試験の解析結果

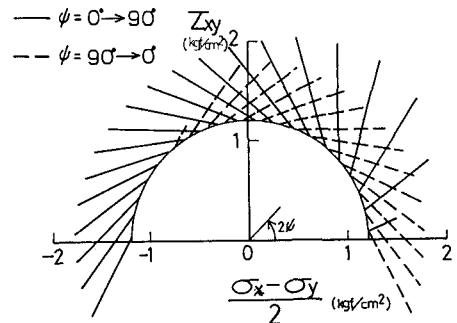


図-4 主応力方向回転試験の解析結果

ordinary concept		t_{1j} - concept	
σ_{1j}	(1a)	$t_{1j} = \sigma_{1k} a_{kj}$	(1b)
δ_{1j} (unit tensor)	(2a)	a_{1j}	(2b)
$p = \sigma_{1j} \delta_{1j} / 3$	(3a)	$t_N = t_{1j} a_{1j}$	(3a)
$s_{1j} = \sigma_{1j} - p \delta_{1j}$	(4a)	$t_{1j}' = t_{1j} - t_N a_{1j}$	(4b)
$q = \sqrt{(3/2) s_{1j} s_{1j}}$	(5a)	$t_S = \sqrt{t_{1j}' t_{1j}'}$	(5b)
$\eta_{1j} = s_{1j} / p$	(6a)	$x_{1j} = t_{1j}' / t_N$	(6b)
$\eta \equiv q / p = \sqrt{(3/2) \eta_{1j} \eta_{1j}}$	(7a)	$X \equiv t_S / t_N = \sqrt{x_{1j} x_{1j}}$	(7b)
$\eta^* = \sqrt{(3/2) (\eta_{1j} - \eta_{1j0}) (\eta_{1j} - \eta_{1j0}^*)}$	(8a)	$X^* = \sqrt{(x_{1j} - n_{1j}) (x_{1j} - n_{1j}^*)}$	(8b)

付表⁴⁾

通常の概念と t_{1j} の概念で用いられている応力および応力比量の比較