

応力履歴を受けた粘土の3次元応力～ひずみ特性

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○渡辺 浩二
名古屋工業大学 正会員 中井 照夫
名古屋工業大学学部生 岩堀 憲二

3次元任意応力経路下の粘土の応力～ひずみ挙動を統一的に説明するために、移動硬化型の粘土の弾塑性構成モデル(kinematic t_{ij} -claymodel)¹⁾を提案しているが、このモデルでは繰返しせん断時の間隙比の減少による強度増加をまだ表現できない。ここでは、従来のモデルを間隙比の減少による強度の増加を考慮できるモデルに拡張するとともに、関連流動則によって発生する塑性ひずみ増分の大きさを決定する硬化パラメーターについてもより整合性を持つ定式化を行っている。そして、その解析結果を3主応力制御試験結果や従来のモデルによる解析結果と比較・検討する。

1. 繰返し載荷時の間隙比の減少による粘土の硬化と強度増加の表現

正規圧密された粘土でも、繰返し(排水)せん断すると間隙比が減少し各サイクルで発生する塑性ひずみは、サイクル数の増加にともない徐々に小さくなっていき、強度も単調せん断時よりも大きくなる。前報²⁾では、繰返しせん断時の粘土の変形の硬化特性の表現を試みたが、ここではこの方法をさらに改善し変形の硬化特性だけでなく強度増加をも表現可能なモデルへと拡張する方法について述べる。

図-1でC点まで正規圧密された粘土を平均応力 t_N 一定で、A点(平均応力 t_N 、応力比 $X = \sqrt{x_{ij}x_{ij}}$ 、降伏関数の中心軸と t_N 軸とのなす角 $n = \sqrt{n_{ij}n_{ij}}$ 、応力比パラメーター $X^* = \sqrt{(x_{ij} - n_{ij})(x_{ij} - n_{ij})}$)まで単調せん断し、その後繰返しせん断によってA点と同じ応力状態であるにもかかわらずA'点まで間隙比が減少したとする。図-2はA(A')点における移動硬化モデルの降伏関数を $t_s - t_N$ 平面で表したものであるが、ひずみ硬化量を決める応力点 t_{N1} 、 t_{N2} は次のように与えられる。

$$t_{N1} = t_N \exp(g(X^* + n)), \quad t_{N2} = t_{N1} \exp(-g(2n)), \quad g(z) = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \ln \left| 1 - (1-\alpha) \frac{z}{M^*} \right| \quad (1)$$

また、A'点における塑性体積ひずみから求められるNCL上の応力点を t_{N1e} とすると、 t_{N1e} は次のように表される。

$$t_{N1e} = t_{N0} \exp \left(\frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \epsilon_v^p \right) \quad (2)$$

ここに、 t_{N0} は $X=0$ で $\epsilon_v^p=0$ となる基準状態の t_N で与えられる。

ここでは、 t_{N1}/t_{N1e} 、 t_{N2}/t_{N1e} を間隙の詰まり具合を表す量として本研究発表会別報³⁾で示した硬化パラメーターにかけることで載荷時の変形の繰返し硬化特性を表現する。

一方、せん断で $t_N = t_{N1}$ 、間隙比 e_t でピーク強度に至ったとした時、NCL上で $t_N = t_{N1}$ における間隙比を e_{NCL} 、応力比を $X_t (= (t_s/t_{N1}))$ とすると X_t と $(e_{NCL} - e_t)$ の間には、実験結果から図-3のような線形関係を得ることができる。 X_{cs} を限界状態の応力比として式示すと、

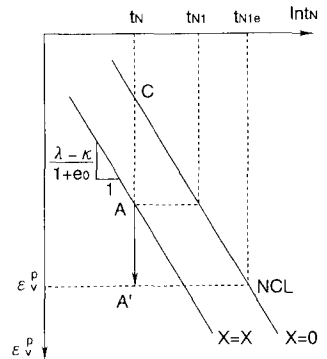


図-1 $\epsilon_v^p \sim \ln t_N$ 関係で表した t_{N1} および t_{N1e}

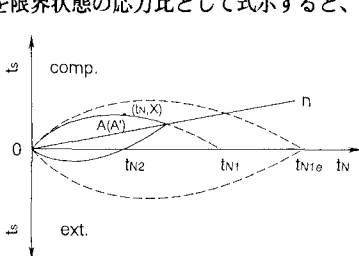


図-2 $t_s \sim t_N$ 関係で表した t_{N1} 、 t_{N2} および t_{N1e}

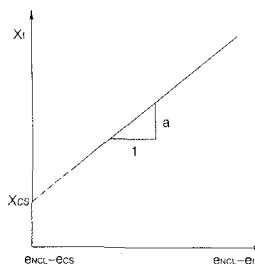


図-3 ピーク強度(X_t) $\sim$ ($e_{NCL} - e_t$) 関係

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}
ϕ (comp.)	33.7°
α	0.7
v_e	0.0
ξ	0.2

$$X_f = a(e_{NCL} - e_f) + X_{CS} \quad (3)$$

上式は間隙の詰まり具合によりピーク強度が変化することを意味しており、 X_f を用いて正規状態でない時の強度を規定する。

2. 実験結果による検証

解析に用いた土質パラメーターを表-1に示す。実験は応力制御で行っており、その応力経路を図-4に示すが各応力点を $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ ($\times 98 \text{ kPa}$)で表すと、 $O_2=(2,2,2)$, $A_3=(4.5,3,1.5)$, $B_4=(6,2,4)$, $O_5=(5,5,5)$, $D_4=(2,6,4)$, $E_3=(1.5,3,4.5)$ である。なお、経路 O_2C_2 だけは、 $\dot{\epsilon}_y=0.63 \times 10^{-5} / \text{min.}$ のひずみ制御で破壊までせん断している。

図-5、図-6は主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3) \sim$ 主ひずみ (ϵ_y) 、体積ひずみ $(\epsilon_v) \sim$ 主ひずみ (ϵ_y) 関係を示すが、拡張されたモデル(実線)はせん断過程の挙動だけでなく、間隙比の減少とともに増加するピーク強度についても妥当に表現しているといえる。従来の移動硬化モデル(破線)では強度の増加だけでなく、図-6に示す正のダイレイタンスも説明できない。なお、等方硬化モデル(点線)ではこのような応力経路下の応力～ひずみ挙動を表現できない。図-7はoct面上の応力経路に投影したひずみ増分方向を表すが、ここでも拡張されたモデルは実測値の傾向をよく表現している。

参考文献 1) Nakai & Hoshikawa (1991): Proc. 7th IACMOG, Vol.1, pp.655～660.

2) 中井・升本・渡辺 (1993): 粘土の繰返し硬化とFading Memoryの表現について, 第28回土質工学研究発表会. 3) 中井・升本・東本 (1994): 繰返し載荷時の粘土の応力～ひずみ～強度特性, 本研究発表会.

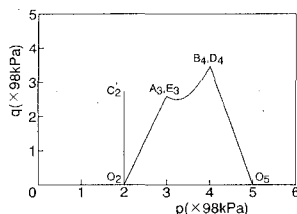
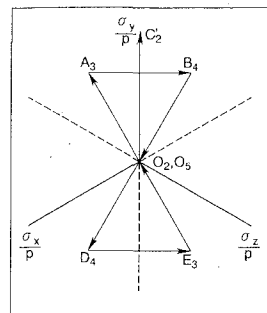


図-4 応力経路図

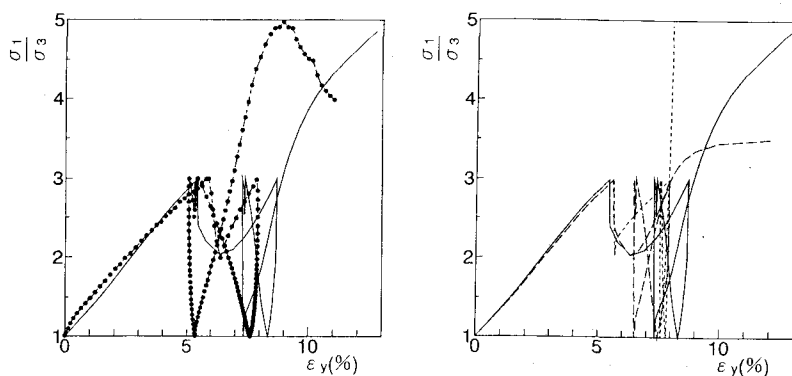


図-5 主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3) \sim$ 主ひずみ (ϵ_y) 関係

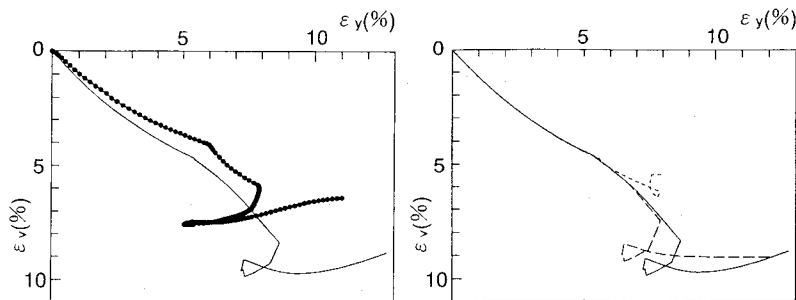


図-6 体積ひずみ $(\epsilon_v) \sim$ 主ひずみ (ϵ_y) 関係

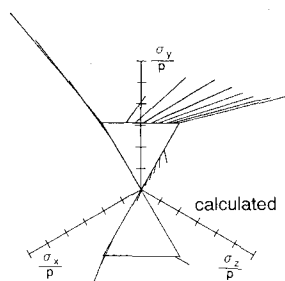
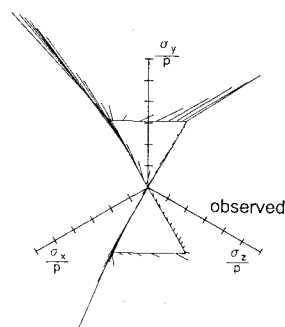
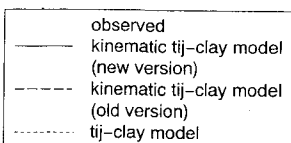


図-7 oct面上に投影した応力経路とひずみ増分方向