

繰返し応力下の粘土の応力・ひずみ挙動の解析

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○升本 隆士  
名古屋工業大学 正会員 中井 照夫  
名古屋工業大学学部生 嶋 明夫

粘土の移動硬化弾塑性モデル(kinematic  $t_{ij}$ -clay model<sup>1)</sup>)では、等方硬化モデル( $t_{ij}$ -clay model<sup>2)</sup>)では説明できない粘土の応力誘導異方性や繰返し載荷時の応力・ひずみ挙動を説明できる。しかし、繰返しによる間隙比減少の影響が考慮されていないため、モデルは繰返し載荷時に蓄積されるひずみを過大評価する。ここでは、この移動硬化モデルを繰返し載荷時の間隙比の変化も考慮できるモデルに拡張する。そして、このモデルによる解析結果を、粘土の三軸試験機を用いた繰返し載荷試験結果や従来のモデルによる解析結果と比較し、その適用性について検討する。

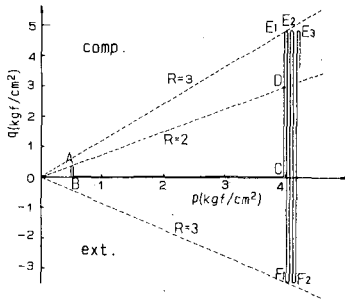


図-1.経路(a)の応力経路

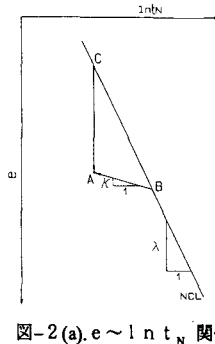


図-2(a).  $e \sim \ln t_N$  関係

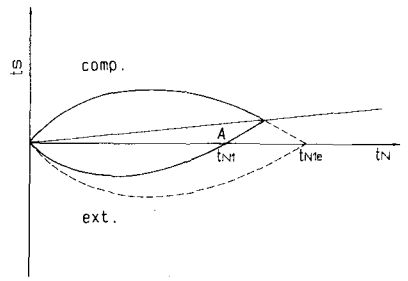


図-2(b).  $t_{N1}$  と  $t_{N1e}$  の定義

1. 粘土の移動硬化モデル(kinematic  $t_{ij}$ -clay model)の拡張 (繰返し載荷時の粘土の硬化特性)

いま図-1のA点の異方応力状態 (例えば $K_0$ 圧密) にある粘土を等方圧縮し、その後平均主応力一定で繰返しせん断する場合を考える。この時BCの等方圧縮区間では、はじめ等方圧縮であるにもかかわらずA点での異方応力状態の影響 (応力誘導異方性) が残り等方的に変形しないが、平均主応力 $p$ の増加にともない初期の応力誘導異方性が消失し等方的な試料となる。また、繰返しせん断時においても、繰返しサイクルの増加にともない各サイクルで発生するひずみ (例えば $E_1E_2$ ,  $E_2E_3$ ,  $E_3E_4$ , ...) は小さくなることから知られている。

このような応力経路下の挙動を等方硬化モデル (例えばCam-clay model<sup>3)</sup>,  $t_{ij}$ -clay model<sup>2)</sup>) で解析すれば、BC区間の途中で弾性域から弾塑性域に変わることになるが異方性を表現できないためこの間常に等方的な変形しか起こらない。また繰返しせん断区間においても $CE_1$ 間では塑性ひずみが生じるが、その後は弾性ひずみだけが生じ体積変化も起こらない。

一方、応力比空間で移動硬化則を考える kinematic  $t_{ij}$ -clay model<sup>1)</sup> ではBC間で異方的な塑性ひずみが生じるが、平均主応力 $p$ が大きくなっても異方性の程度は変わらずひずみ増分方向は異方的なままである。繰返しせん断区間でも、CD間で弾性挙動した後、繰返し弾塑性挙動を表現できるが、各サイクルでの発生ひずみは等しく繰返し回数の増加にともないひずみは同じ割合で蓄積されていく。ここでは、これらの①等方圧縮過程における応力誘導異方性の消失、②繰返しせん断時の粘土の硬化 (繰返し回数の増加にともない剛性の増加) を kinematic  $t_{ij}$ -clay model の中で考慮することを試みているが、紙面の都合上②の考慮のみについて述べる。(①の特性については本発表会概要集別報参照)

さて、等方応力状態にある粘土でも、図-2(a)のA点のように正規圧密線(NCL)からずれている場合、B点からの等方膨潤によることもあれば、例えばC点からのせん断履歴によることもある。さて、等方硬化モデルではどちらの場合もA点は図-2(b)の破線で示された降伏関数の内側になる。一方、移動硬化モデルでは、C点からのせん断履歴による場合図-2(b)の実線で示す降伏曲面となり、その後の逆方向へのせん断時や等方圧縮時の塑性ひずみの発生が表現可能である。しかし、この時に生じる塑性ひずみはC点にある粘土のせん断時や等方圧縮時の塑性ひずみより小さくなる。ここでは、この発生するひずみの大小はA点とC点の間隙比の差異にあると考え、構成式の中で考慮する方法について述べる。いまNCL上の、すなわち圧密・せん断履歴のない粘土の降伏関数  $f$  は等方硬化モデルと同じとなる。

$$f = \ln t_N + \frac{-\alpha}{1-\alpha} \ln |1-(1-\alpha) \frac{X}{M^*}| - \ln t_{N1} = 0 \quad \text{or} \quad t_{N1} = t_N \left\{ 1 - (1-\alpha) \frac{X}{M^*} \right\}^{\frac{-\alpha}{1-\alpha}} \quad (1)$$

一方、図-2(a)のC→A間に生じる塑性体積ひずみ  $\epsilon_v$  はC→B間に生じる塑性体積ひずみと同じなので、A点で間隙比と等価なNCL上の平均応力を $t_{N1e}$ とすればCA (CB) 間に生じる塑性体積ひずみは次式で表される。

$$e_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{t_{NIe}}{t_{NO}} \quad (2)$$

その結果、等価平均応力 $t_{NIe}$ は

$$t_{NIe} = t_{NO} \exp \left( \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} e_v^p \right) \quad (3)$$

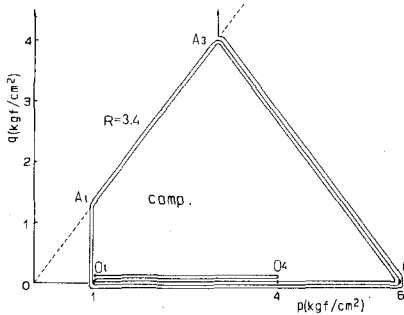


図-3.経路(b)の応力経路

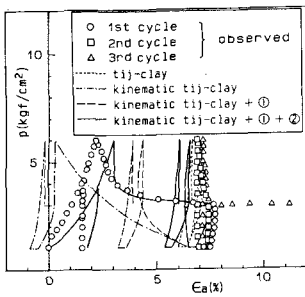


図-4.経路(b)の平均主応力 $p$ ～軸ひずみ関係

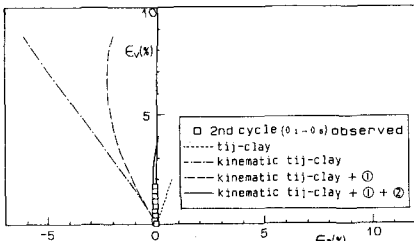


図-5.経路(b)の $O_1 \rightarrow O_6$ 間の体積ひずみ～軸ひずみ関係 (2nd cycle)

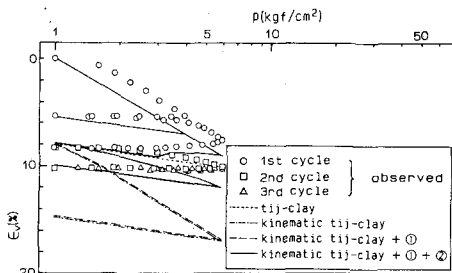


図-6.経路(b)の体積ひずみ～平均主応力関係

したがって、C点とA点の間隙の差異は $t_{NI}$ と $t_{NIe}$ の比 $t_{NI}/t_{NIe}$ としても評価できるのでこの比を構成式の中に導入し、繰返しせん断時の粘土の硬化を表現する。ここでは最も簡単な導入方法として従来の kinematic  $t_{ij}$ -clay model のひずみ硬化係数にこの比をかけている。

## 2. 解析結果と実測値の比較

図-4～6は図-3の経路の実測値(プロット)と解析値(それぞれ図参照)を平均主応力 $p$ ～軸ひずみ $(\epsilon_a)$ 、体積ひずみ $(\epsilon_v)$ ～ $\ln p$ 、 $\epsilon_v$ ～ $\epsilon_a$ 関係で示す。これらの図より、移動硬化モデルに①と②を考慮したモデル(実線)は圧密・せん断を含む繰返し載荷時の応力～変形挙動をよく説明していることがわかる。図-7, 8は図-1の経路の解析結果を示すが、詳細は実測値とともに発表当日 OHP で示す。

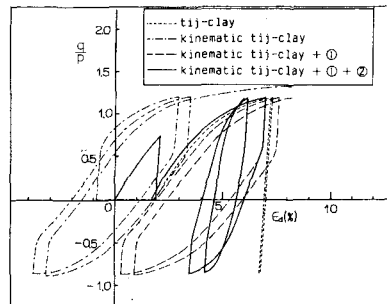


図-7.経路(a)の応力比 $(q/p)$ ～せん断ひずみ関係

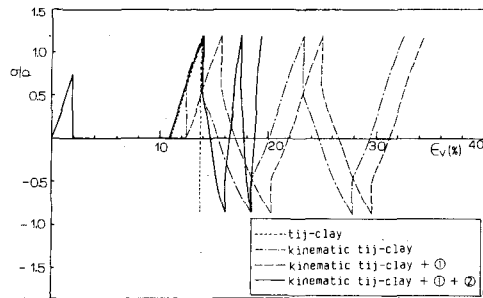


図-8.経路(a)の応力比 $(q/p)$ ～体積ひずみ関係

- 文献 1) Nakai & Hoshikawa (1991): Proc. 7th IACMOG, Vol. 1, 655～660  
 2) Nakai & Hoshikawa (1986): A generalized elastoplastic constitutive model for clay in three-dimensional stress, Vol. 26, No. 3, pp. 81～98  
 3) Schofield & Wroth (1968): Critical State Soil Mech.  
 4) 渡辺・中井・山田 (1993): 本研究発表会「せん断履歴を受けた粘土の3次元応力・変形特性」