

せん断履歴を受けた粘土の3次元応力・変形特性

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 山田薫夫

繰返しを含む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、すでに t_{ij} を用いた粘土の移動硬化型の弾塑性モデル (kinematic t_{ij} -clay model) ¹⁾を提案しているが、本発表会別報²⁾でも述べたようにこのモデルでは、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等をまだ表現できない。ここでは、①、②の特徴も説明可能なモデルにkinematic t_{ij} -clay modelを拡張するとともに、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. 粘土の移動硬化モデル(kinematic t_{ij} -clay model)の拡張(等方圧縮等による応力誘導異方性の消失)

一般に地盤材料は、異方圧密あるいはせん断(応力比の変化)によって応力誘導異方性が発達するが、等方圧縮すれば圧縮応力が大きくなるに従い、その異方性は小さくなっていく。これは、例えば K_0 圧密された粘土試料でもセル内である応力レベル以上に等方圧縮すれば、ほぼ等方性試料となることからわかる。さて、図-1はせん断時及び異方圧密時のkinematic t_{ij} -clay modelの降伏曲面の変化の様子を t_{ij} モデルの応力パラメーターである(t_N , t_S)空間で描いたものである。せん断時には応力比(x_{ij})の変化にともない、降伏関数の中心軸 n_{ij} が $X^* = \sqrt{(x_{ij} - n_{ij})(x_{ij} - n_{ij})} = \xi$ を保ちながら動く(降伏曲面は原点を中心に回転する)が、応力比の変化しない異方圧密時は n_{ij} は一定のままで、等方的に降伏曲面は膨らむ。さて、図-1(b)に示すように $x_{ij} = x_{ij0}$ までせん断し、その後等方応力まで除荷($x_{ij} = 0$)した粘土を等方圧縮する場合にも、このモデルでは n_{ij} は変化せず降伏曲面は相似的に膨らみ、等方圧縮過程で異方性の消失は表現できないことになる。

そこで、このようなせん断履歴を与えた後の等方圧縮のように、 $X (= \sqrt{x_{ij}x_{ij}}) < n (= \sqrt{n_{ij}n_{ij}})$ で $df > 0$ の時は $X^* = \sqrt{(x_{ij} - n_{ij})(x_{ij} - n_{ij})} = \xi$ を一定に保ちながら降伏曲面が回転するのではなく、 $X^* \leq \xi$ であっても n_{ij} は図-2に示すように異方的に膨らむと考える。この時、 n_{ij} の増分 dn_{ij} は $X > n$ 側の降伏曲面の形状が変化しないという条件と適応条件より最終的に次式で与えられる。

$$dn_{ij} = - \frac{\frac{1}{t_N} dt_N + \frac{\alpha}{M^* - (1-\alpha)(X^* + n)} \frac{1}{X^*} (x_{kl} - n_{kl}) dx_{kl}}{\frac{\alpha}{M^* - (1-\alpha)(X^* + n)} \left(-(X^* + n) + \frac{n_{kl} x_{kl}}{n} \right)} (x_{ij} - n_{ij}) \quad (1)$$

以上の定式化により、例えばせん断履歴を受けていても、等方圧縮すれば n_{ij} は等方軸に近づくことになり、応力誘導異方性の消失が表現可能となる。

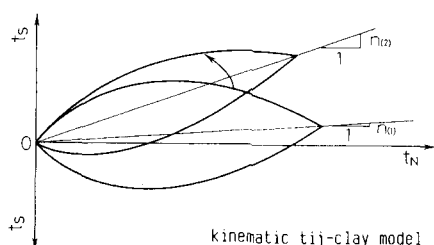


図-1 (a) せん断時の降伏曲面の変化の仕方

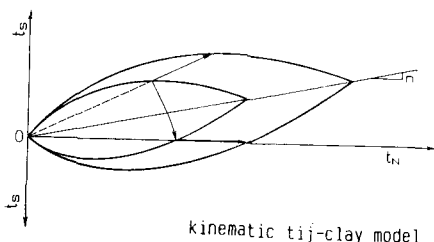


図-1 (b) 異方圧密時およびせん断後の等方圧縮過程における降伏曲面の変化の仕方

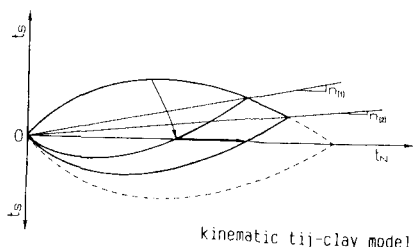
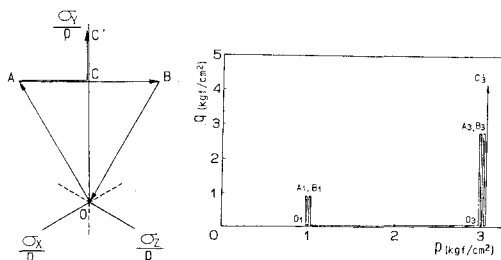
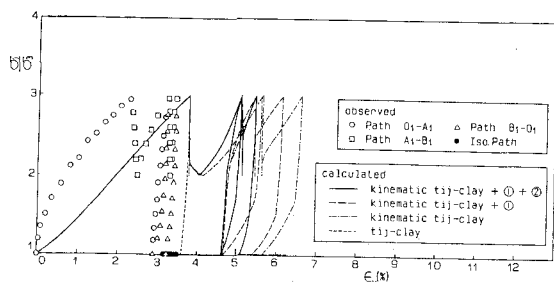
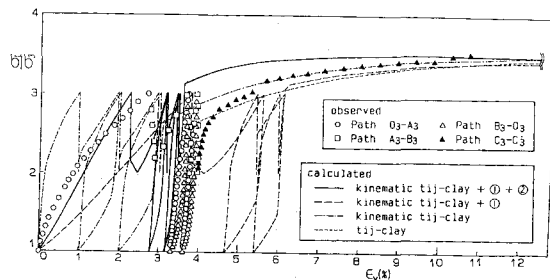
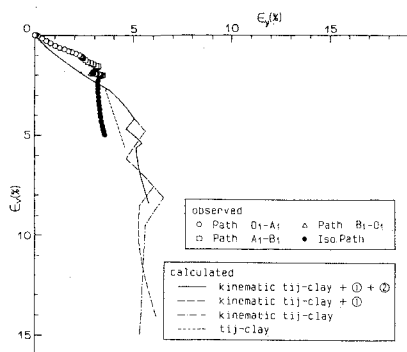
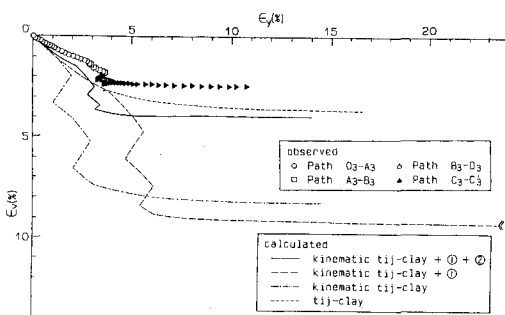


図-2 せん断後の等方圧縮過程における降伏曲面の変化の仕方

2. 3 主応力制御試験結果による検証

図-3に今回行った実験の応力経路を示す。 $p=1.0\text{kgf/cm}^2$ で $O_1A_1B_1O_1$ の経路で2周した後、 $p=3.0\text{kgf/cm}^2$ まで等方圧縮し、その後 $O_3A_3B_3O_3$ で2周している。また、解析に用いたモデルのパラメータは従来のものと同じである³⁾。図-4,5は $p=1.0\text{kgf/cm}^2$ のせん断およびその後の等方圧縮過程を、図-6,7は $p=3.0\text{kgf/cm}^2$ のせん断時の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3) \sim$ 主ひずみ (ϵ_y) 関係、および主ひずみ $(\epsilon_y) \sim$ 体積ひずみ (ϵ_v) 関係を示す。

図-4,6の実測値（プロット）から、 $p=1.0\text{kgf/cm}^2$ で繰返しせん断した後、 $p=3.0\text{kgf/cm}^2$ まで等方圧縮すると $p=3.0\text{kgf/cm}^2$ のせん断開始時に $p=1.0\text{kgf/cm}^2$ とほぼ同じ応力 $\sim$ ひずみ挙動を示している、せん断による異方性は等方圧縮過程で消失していることがわかる。従来のモデル（一点鎖線）では等方圧縮過程では降伏関数の中心軸 n_{ij} は動かないので、図-6の実測値の傾向を表現できないが、このことを考慮にいたモデル（実線や破線）では妥当に表現されている。また、②の粘土の硬化特性を考慮にいたモデル（実線）の方がより妥当に実測値の傾向を表している。なお、等方硬化モデル（点線）ではこのような応力経路下の粘土の応力 $\sim$ ひずみ挙動を説明できないのは周知の通りである。

図-3 正八面体面上および p - q 平面上的応力経路図図-4 $p=1.0\text{kgf/cm}^2$ のせん断およびその後 $p=3.0\text{kgf/cm}^2$ までの等方圧縮過程における主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3) \sim$ 主ひずみ (ϵ_y) 関係図-6 $p=3.0\text{kgf/cm}^2$ のせん断における主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3) \sim$ 主ひずみ (ϵ_y) 関係図-5 $p=1.0\text{kgf/cm}^2$ のせん断およびその後 $p=3.0\text{kgf/cm}^2$ までの等方圧縮過程における主ひずみ $(\epsilon_y) \sim$ 体積ひずみ (ϵ_v) 関係図-7 $p=3.0\text{kgf/cm}^2$ のせん断における主ひずみ $(\epsilon_y) \sim$ 体積ひずみ (ϵ_v) 関係