

# 粘土の三軸，中空ねじり，および3主応力制御試験の解析

名古屋工業大学 学生会員： 城戸 拓  
 正会員： 中井 照夫  
 学生会員： 山田 正太郎

## 概要

現在までに SMP\* の概念を一般化した修正応力  $t_{ij}$  を用いることにより、3次元応力下における粘土の応力～ひずみ関係を表現できる kinematic  $t_{ij}$  clay model<sup>1)</sup> が提案されているが、ひずみ硬化パラメータに粘土では塑性体積ひずみ  $v^p$  を、砂では塑性仕事相当量  $W^p$  を用いている為、粘土と砂ではモデルが異なっていた。また、せん断過程における密度の変化を考慮できない為、繰返し載荷時に見られるひずみの収束性を表現することができなかった。そこで、橋口による下負荷面の概念<sup>2)</sup>を参考に、密度変化の影響を考慮できるモデルに拡張する。ここでは、このモデルの適応性を三軸，中空ねじりおよび3主応力制御試験で検証する。

## モデルの拡張

今回の提案モデルでは Chowdhury & Nakai の stress-dilatancy 式<sup>3)</sup>を参考に、降伏関数を式(1)から式(2)に変更する。この降伏関数の形状を Fig.1 に示す。これにより、降伏曲面の  $t_N=0$  および  $t_N=t_{N1}$  における特異点が存在しなくなる。

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

$$f = \ln t_N + \frac{1}{b} \left( \frac{X}{M^*} \right)^b - \ln t_{N1} = 0 \quad (2)$$

また、従来のモデルでは流れ則や塑性係数は式(3)のように表されるが、提案モデルでは式(4)のように書き改める。

$$de_{ij}^{p(AF)} = L \frac{\partial f}{\partial t_{ij}}, \quad L = \frac{C_p \cdot df}{\frac{\partial f}{\partial t_{kk}}} \quad \left( C_p = \frac{1-k}{1+e} \right) \quad (3)$$

$$de_{ij}^{p(AF)} = L \frac{\partial f}{\partial t_{ij}}, \quad L = \frac{C_p \cdot df}{\frac{\partial f}{\partial t_{kk}} + \frac{a}{t_N} \cdot (d)^l} \quad (4)$$

ここで、 $d$  は  $d = (1-k) \ln \left( \frac{t_{Ne}}{t_{N1}} \right)$  で表され、Fig.2 で示すように同じ応力状態にある正規圧密粘土との間隙比の差（距離

AB）になる。 $d = 0$ （正規状態）では、 $L$  は従来の粘土のモデルに一致する。

## 拡張モデルの適用性の検討

三軸繰返し試験...Figs.3(a),(b)は平均応力を一定に保ちながら ( $q/p$ ) 一定幅で、Figs.4(a),(b)は同様に ( $q/p$ ) を大きくしながら繰返した応力～ひずみ関係の実測値(プロット)と解析値(提案モデルを実線で従来モデルを破線で示す)である。解析を従来の移動硬化モデルで行った場合、Figs.3(a),(b)ではひずみの収束性が表現できていないのに対し、提案モデルでは繰返す毎に  $d$  が大きくなり、結果的にひずみが小さくなっていくことが分る。

中空ねじり試験...Figs.5(a),(b)は、側圧一定 ( $\sigma_r = 98 \text{ kPa}$ ) 条件で  $\sigma_3 = 294 \text{ kPa}$  まで三軸圧縮した後、せん断応力  $\sigma_1$  を載荷して破壊させ、Figs.6(a),(b)は同じ側圧で  $\sigma_3 = 49 \text{ kPa}$  までねじりせん断した後、三軸圧縮破壊させたときの各実測値と解析値である(Figs.7 参照)。(a)図は応力～各ひずみ関係を、(b)図は塑性ひずみ増分の方向を示す。塑性ひずみ増分の方向(角度  $\theta$ )は、Fig.7 に塑性ひずみ増分を重ね合わせた時に  $\sigma_1/P$  軸方向から右側を正とした角度である。このような繰返しを含まない応力経路では常に  $d = 0$  となり  $L$  は従来のモデルに一致するが、降伏曲面の形を変えた為、より実測値に近い応力～ひずみ関係が得られている。下負荷面を考えた提案モデルでは、従来の移動硬化モデルとの弾性域の大きさを等しくする為、パラメータ  $l$  を 2 倍にした。その結果、移動硬化の中心軸が動きにくくなり、等方硬化モデルの挙動に近くなったと考えられる。

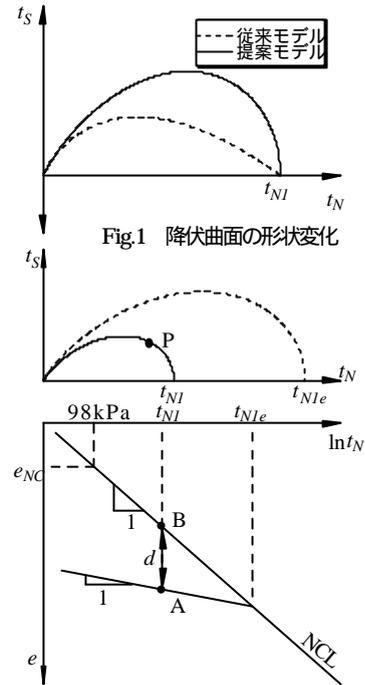


Fig.1 降伏曲面の形状変化

Fig.2 d の説明

キーワード：粘土、繰返し載荷、三軸試験、構成式、密度

連絡先（住所：名古屋市昭和区御器所町、電話・FAX：052-735-5485）

3主応力制御試験...Fig.8に3主応力試験の正八面体面上での応力経路を、Fig.9に実測値と解析値(提案モデル)の応力～ひずみ関係を示す。提案モデルでの解析は、複雑な3主応力条件下の繰返し载荷時においても、実測値と良く対応しており、粘土の三次元挙動を表現できている。解析に用いたパラメーターをTable.1に示す。

Table.1 土質パラメーター

$l$	0.0899
$k$	0.0198
$R_{CS}$	3.5
$b$	1.5
$a$	500
$l$	2
$x$	0.4
$n$	0.2

結論

- ・従来の移動硬化モデルに、下負荷面の概念を取り入れた提案モデルでは、従来表現できなかった繰返し载荷時のひずみの収束性について、その量を抑えて表現することが分った。
- ・提案モデルでは、単調・ねじり・繰返し载荷条件下での粘土の挙動を、妥当に表現できていることが分った。

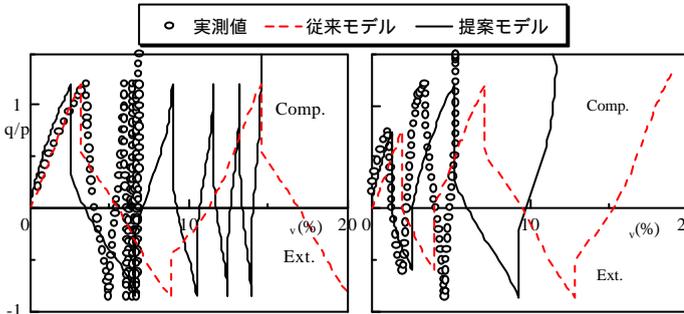
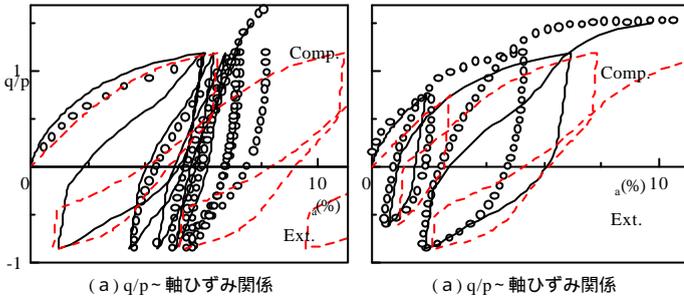


Fig.3 繰返し三軸試験(q/p一定幅)

Fig.4 繰返し三軸試験(q/pを増加)

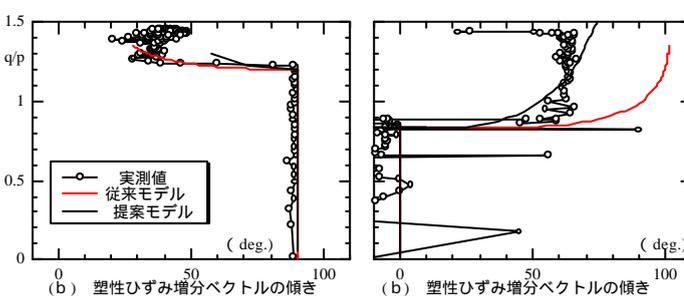
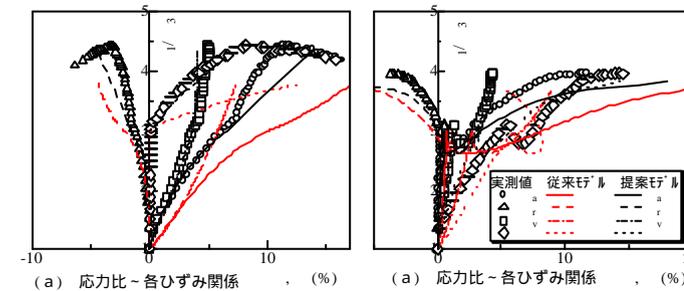
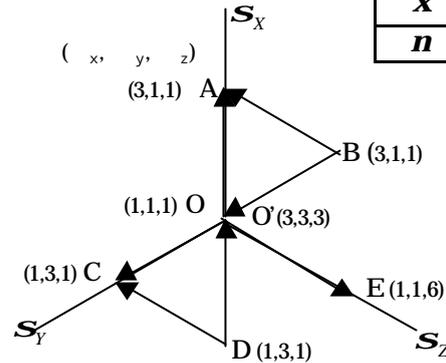


Fig.5 中空ねじり試験(応力経路A B D)

Fig.6 中空ねじり試験(応力経路A C E)



Path: O-A-B-O-C-D-O-E  
Fig.8 3主応力試験応力経路図

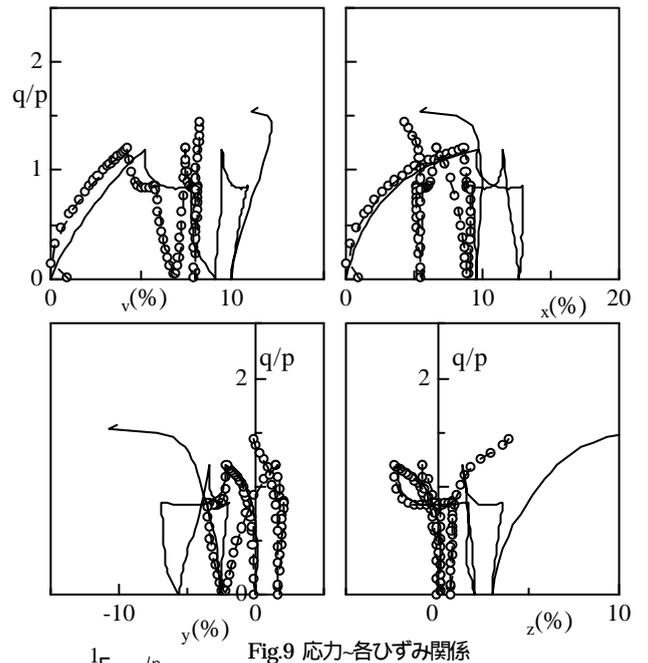


Fig.9 応力-各ひずみ関係

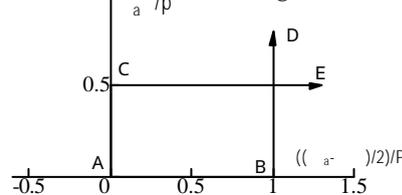


Fig.7 中空ねじり試験の応力経路

《参考文献》

- 1) Nakai, T & Hosikawa, T (1991) : Kinematic hardening model for clay in three-dimensional stresses, Proc. 7th IACMAG, vol.1 pp.655-660
- 2) 橋口 公一 (1990) : 最新弾塑性学, 朝倉出版
- 3) E.Q. Chowdhury & T. Nakai (1998) : Consequences of the  $t_{ij}$ -concept and a new modeling approach, Computers and Geotechnics 23 (1998) 131-164