中空ねじり試験結果を用いた粘土の構成モデルの適用性

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○宮田眞由美
名古屋工業大学 正会員 中井照夫・檜尾正也
名古屋工業大学大学院 陳蘭 ・森河由紀弘

<u>はじめに</u>　地盤の変形予測に FEM（有限要素法）がしばしば用いられる。妥当な予測結果を得る為には地盤材料の変形挙動を的確に表現できる構成モデルが不可欠であり、どのような応力変化にも同一の材料パラメータで妥当な変形挙動を表現できる構成モデルが望まれる。本研究では、中空ねじり試験結果を用いて、粘土の変形挙動を実験結果と等方硬化型の *subloading* t_{ij} *model* を用いた解析結果について比較し、モデルの適用性を検討した。

<u>構成モデルの概要</u>　今回の検証に用いた *subloading* t_{ij} *model*[1),2)]は、修正応力 t_{ij} を導入した t_{ij}-*clay model*[3)]に下負荷面の概念を取り入れた等方硬化型構成モデルである。t_{ij}-*clay model* と同様に、中間主応力の影響を同一のパラメータで表現でき、塑性ひずみ増分方向の応力経路依存性を考慮されている他に、密度や拘束応力の影響も取り入れられている。

降伏関数 f は、t_{ij} 空間で関連流動則を仮定し、図 1 に示す応力比～塑性ひずみ増分比関係式と直交条件($dt_N \cdot de_{SMP}^{*p} + dt_S \cdot dg_{SMP}^{*p} = 0$)から、平均応力 t_N と応力比 $X(=t_S/t_N)$を用いて式(1)のように与えられ、M^*は応力比～塑性ひずみ増分比関係の縦軸切片での応力比(t_S/t_N)である。密度・拘束応力の影響は、橋口による *subloading surface* の考え方を参考に、通常の塑性係数Lの分母に $G(d)$の項を加えることで表現可能である[4)]（式(3)(4)参照)。d は、図 2 と式(5)に示すように現在の応力状態(過圧密状態)における間隙比とその同じ応力状態で考えられる正規圧密状態での間隙比の差である。また通常、塑性ひずみ増分方向は応力増分方向の影響を受けないと考えられるが、実測値ではその影響を受けている。そのため $dt_N>0$ かつひずみ硬化時（$h^p>0$）の時、全塑性ひずみ増分は式(6)のように関連流動側に従う成分 $de_{ij}^{p(AF)}$と等方的な圧縮成分 $de_{ij}^{p(IC)}$の和として表せるように、塑性ひずみ増分を決定することで応力経路依存性を表現している。

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

$$de_{ij}^{p(AF)} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial t_{ij}} \qquad (2)$$

$$\Lambda = \frac{df}{h^p} = \frac{df}{\dfrac{1}{C_p}\left(\dfrac{\partial f}{\partial t_{ii}} + \dfrac{G(d)}{t_N}\right)} \qquad (3)$$

$$G(d) = ad^2 \qquad (4)$$

$$d = (l-k)\ln\frac{t_{N1e}}{t_{N1}} \qquad (5)$$

$$de_{ij}^{p} = de_{ij}^{p(AF)} + de_{ij}^{p(IC)} \qquad (6)$$

$$de_{ij}^{p(AF)} = \frac{df - \dfrac{1}{t_{N1}}\langle dt_N\rangle}{h^p}\cdot\frac{\partial f}{\partial t_{ij}} = \Lambda^{(AF)}\cdot\frac{\partial f}{\partial t_{ij}} \qquad (7)$$

$$de_{ij}^{p(IC)} = \frac{1}{\dfrac{1}{C_p}\left(1+\dfrac{G(d)}{a_{kk}}\right)}\cdot\frac{\langle dt_N\rangle}{t_{N1}}\frac{d_{ij}}{3} \qquad (8)$$

$$\frac{t_N}{t_{N1}} = \exp(-z(X)) = \exp\left(-\frac{1}{b}\left(\frac{X}{M^*}\right)^b\right) \qquad (9)$$

<u>構成モデルの検証</u>　せん断応力t_{aq}を載荷することにより、主応力軸が回転する複雑な応力経路下での 5 種類の排水せん断試験結果について検討する。また今回解析に用いた粘土（藤の森粘土）の材料パラメータを表 1 に示す。表中の N は、平均主応力 p=98kPa での等方応力状態(基準状態)における正規圧密粘土の間隙比である。

応力経路は図 3 に示す通りであり、Test1～Test4 は平均主応力 p=196kPa で一定の圧縮もしくは伸張試験、Test5 は側圧一定の圧縮試験となっている。それぞれの実験結果と解析結果の主応力比と各種ひずみの関係を図 4～図 8 に示す。

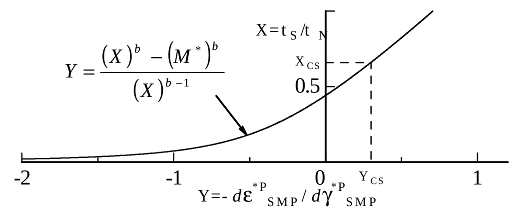


図 1：応力比～塑性ひずみ増分比関係

全体的にはどの試験結果も解析結果が実験結果の特徴を表現できていると言える。平均主応力 p が増える図 8 の Test5 の主応力比～偏差ひずみ関係では、t_{aq}一定でs_aを増加させる応力経路下の初期部分において、わずかではあるが、解析結果の de_d が負となり実験結果と異なる区間がある。これはL>0（式(3)）であっても、式(7)の$L^{(AF)}$が負となる区間があることによる。なおこの時 $de_{ij}^{p(AF)}$は、降伏曲面の内側を向くことになるが、$de_{ij}^{p}=de_{ij}^{p(AF)}+de_{ij}^{p(IC)}$は、図 9 に示すように降伏曲面の外側を向いている。しかし$L^{(AF)}$が負になる領域を避けるため、図 10 に示すようにIV領域を設け、この区間では全ての塑性ひずみが等方的に発生すると仮定する。その全塑性ひずみは式(10)で表され、適用条件より$L^{(IC)}$は式(11)で与えられる。図 11 にIV領域を考慮した解析結果を示すが、上記の de_d が負となる区間について解消されている。また、このようなIV領域を設けても、II・III領域の境界と同様にIII・IV領域の境界でもひずみの発生はスムーズに変化する。実際の地盤の数値解析への適用例では、IV領域の考慮の有無は結果にほとんど影

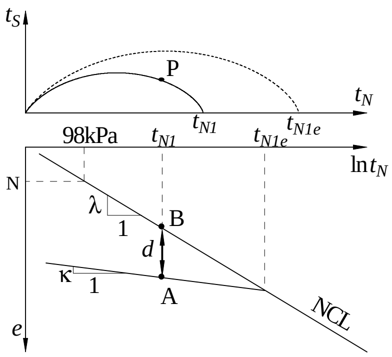


図 2：d の説明

キーワード　構成式、粘土、ねじり
連絡先　〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町　電話・FAX：052-735-5485

響を与えない。

　また、どの試験の解析結果も主応力比～体積ひずみ関係は実験結果の挙動に沿った良い対応を示しており、各種ひずみや偏差ひずみの評価に差を残すことから、塑性ひずみ増分の方向示す項にも改良の余地があると思われる。

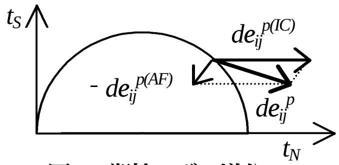


図9：塑性ひずみ増分

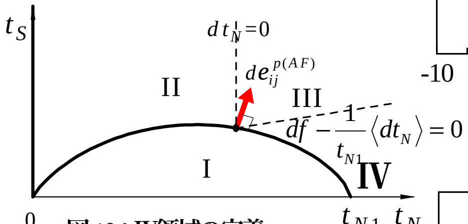


図10：IV領域の定義

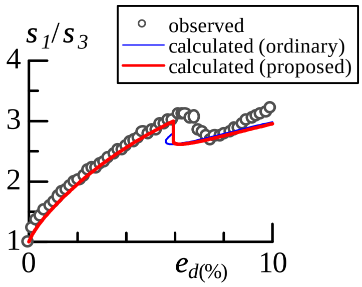


図11：IV領域を導入した Test5 s_1/s_3～e_d関係

$$de^p_{ij} = de^{p(IC)}_{ij} = \Lambda^{(IC)} \cdot \frac{d_{ij}}{3} \qquad (10)$$

$$\Lambda^{(IC)} = \frac{df}{\frac{1}{C_p}\left(1+\frac{G(d)}{a_{ii}}\right)} \qquad (11)$$

結論　*subloading t_{ij} model* は、用いるパラメータが少なくとも粘土の中空ねじり試験条件による変形挙動についても、実験結果に沿うような良い対応を示すことがわかる。多少改善すべき点はみられるが、実際の地盤の変形予測に十分に適用できるモデルであると言える。

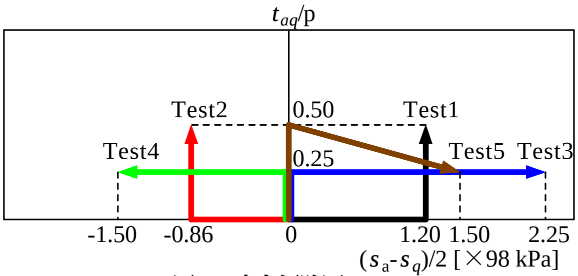
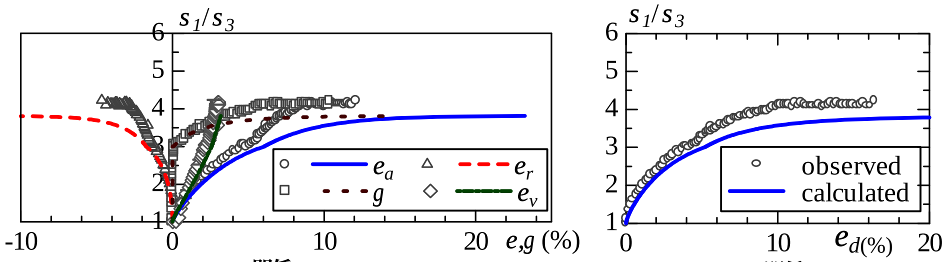


図3：応力経路図

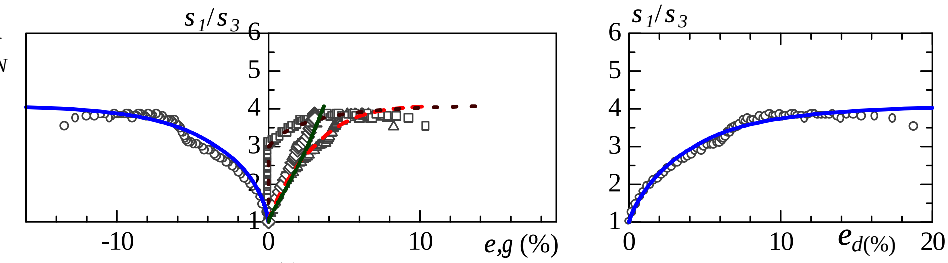
表1：土質パラメータ

$C_t = l/(1+e_0)$	5.08×10^{-2}
$C_e = k/(1+e_0)$	1.12×10^{-2}
N	0.753
R_{CS}	3.5
β	1.5
ν	0.2
a	500



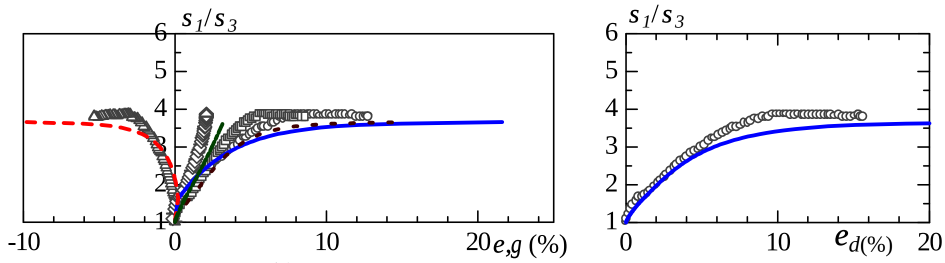
(a) s_1/s_3～(e_a,e_r,g,e_v)関係　(b) s_1/s_3～e_d関係

図4：Test1 の実験結果と解析結果



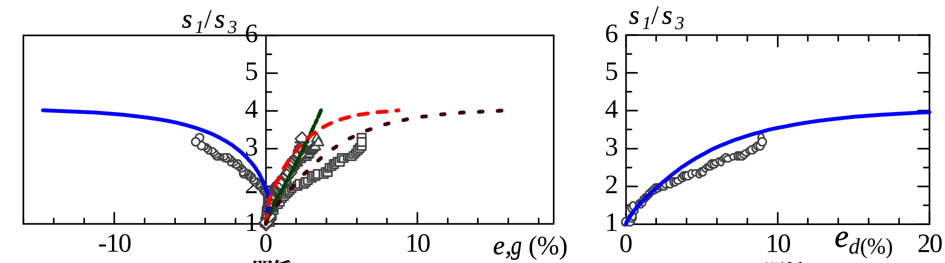
(a) s_1/s_3～(e_a,e_r,g,e_v)関係　(b) s_1/s_3～e_d関係

図5：Test2 の実験結果と解析結果



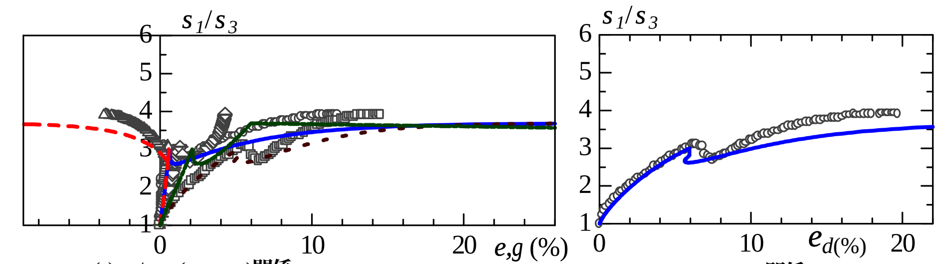
(a) s_1/s_3～(e_a,e_r,g,e_v)関係　(b) s_1/s_3～e_d関係

図6：Test3 の実験結果と解析結果



(a) s_1/s_3～(e_a,e_r,g,e_v)関係　(b) s_1/s_3～e_d関係

図7：Test4 の実験結果と解析結果



(a) s_1/s_3～(e_a,e_r,g,e_v)関係　(b) s_1/s_3～e_d関係

図8：Test5 の実験結果と解析結果

参考文献

1) 中井・檜尾・城戸・西村・宮田(2002)：第37回地盤工学研究発表会 pp379~380

2) Nakai & Hinokio(2002)：proc. of Iws-Calgary pp3~16

3) Nakai (1989)：S&F, 29(1), pp119-137

4) 檜尾・中井・星川・吉田(2001)：地盤工学論文報告集 Vol.41, No3, pp125-140