

応力誘導異方性を考慮した等方硬化型 subloading t_{ij} model

名古屋工業大学大学院	学生会員	京川 裕之
名古屋工業大学	国際会員	中井 照夫
名古屋工業大学	国際会員	張 鋒
名古屋工業大学	国際会員	檜尾 正也
名古屋工業大学	国際会員	菊本 統
日揮株式会社	正会員	柳生 案理

1. はじめに

土は過去の応力履歴によって振る舞いを変える材料である。従来、せん断履歴(せん断応力あるいは応力比の変化)による応力誘導異方性は移動硬化則(あるいは回転硬化則)を用いて表現することが多い。しかし、せん断履歴による応力誘導異方性は、異なる方向へのせん断によって変化するだけでなく、圧密によって徐々に消滅することも実験的に確認されている。このようなせん断・圧密過程における応力誘導異方性の発達や解消は、応力比の変化に着目した従来の移動硬化則(あるいは回転硬化則)では統一的に表現するのが困難であった。そこで本研究では、修正応力を用いて誘導異方性を評価し、等方硬化モデルの範疇で応力誘導異方性の表現を試みる。

2. 中間主応力と応力履歴を考慮した新しい修正応力 t_{ij}^*

2. 1. 中間主応力を考慮した修正応力 t_{ij}^1 と応力誘導異方性の関係

ここで、Fig.1に示す模式図を用いて修正応力による誘導異方性の表現の意義を考える。同図は、ある異方的な応力が土要素に作用する様子を示している。まず、(a)図に示すように、土粒子間の接触面の法線方向の分布は徐々に最大主応力 σ_1 方向に偏ることが実験的に観察されている。これを連続体で考えるには、(b)図のように σ_2 方向に比べて σ_1 方向の剛性が大きくなる状況、すなわち異方性の発達を想定すればよい。一方、(c)図のように修正応力を用いれば、異方性の発達に応じて通常の応力 σ_{ij} を修正することにより、材料特性の等方性を仮定したまま、誘導異方性を表現することができる。

佐武ら²⁾は要素内の粒子構造に着目した構造テンソル F_{ij} を用いて、修正応力を求めた。この修正応力は次式で表される。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{2} F_{ik}^{-1} \sigma_{kj} \quad (1)$$

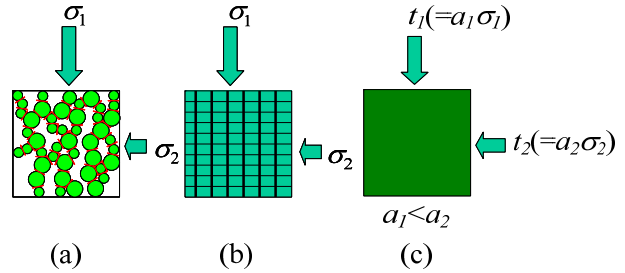


Fig.1 修正応力による異方性の表現

ここに、構造テンソル F_{ij} は次式で表される。

$$F_{ij} = \frac{\sigma^\alpha}{tr(\sigma^\alpha)} \quad (2)$$

式中の α は異方性誘導度である。単調な応力経路下では $\alpha = 0.5$ となり、構造テンソルと一般応力テンソルの主値は以下の関係が確認されている。

$$\frac{F_1}{F_2} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{0.5} \quad (3)$$

しかしながら、種々の応力履歴に伴う経路下では異方性の発達・消散を適切に考慮して F_{ij} の変化を定量的に規定するのは難しく、このような考えで定式化された構成式はまだない。

これまでに本研究室では、中間主応力が地盤材料の変形・強度特性に及ぼす影響を適切に評価するため、修正応力 t_{ij} の概念¹⁾を提案している。修正応力 t_{ij} は、通常の応力テンソル σ_{ij} を直交テンソル a_{ij} で変換することにより次式で表される。

$$t_{ij} = a_{ik} \sigma_{kj} \quad (4)$$

ここに、 a_{ij} は次式で表される。

$$a_{ij} = \sqrt{\frac{I_3}{I_2}} \cdot r_{ij}^{-1} \quad (r_{ik} r_{kj} = \sigma_{ij}) \quad (5)$$

式中の I_2, I_3 は応力の2次,3次不変量である．以上を主値で表せば,

$$t_i = a_i \sigma_i \quad (6)$$

$$a_i = \sqrt{I_3 / (I_2 \cdot \sigma_i)} \quad (7)$$

となる．なお, a_{ij} は対称テンソルであり, a_{ij} と一般応力テンソルの主値の比が

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^{0.5} \quad (8)$$

と表されることから, 式(3)より, a_{ij} が構造テンソル F_{ij} の逆テンソルになっていることが分かる．

地盤材料では, 最大主応力と最小主応力だけで考えることができる金属とは異なり, 単調な応力経路下であっても, 中間主応力が材料の変形強度特性に大きく影響することが実験から確認されている．これは, せん断中の応力誘導異方性の発達が顕著であることに起因する．つまり, 地盤材料のような粒状材料の中間主応力の影響と誘導異方性の影響は本質的に同じであることを意味する．

以上のことから, 中間主応力による異方性と応力履歴による異方性は修正応力 t_{ij} で統一的に表現することができる．さらに, 異方性を表すテンソル a_{ij} の発展則を規定することで, 修正応力 t_{ij} を導入した等方硬化モデルで応力誘導異方性を表現を可能にする．

2. 2. 変換テンソル a_{ij}^* の応力誘導異方性への拡張

前節では, 修正応力 $t_{ij}^{(1)}$ により誘導異方性を表現できることを示した．本節以降では, 応力履歴による異方性を表現する新しいテンソル a_{ij}^* を提案するとともに, a_{ij}^* の発展則を構築する．以降は, 中間主応力の影響を考慮した(単調な応力経路下での)修正応力を t_{ij} , t_{ij} への変換テンソルをと a_{ij} 呼ぶ．また, 中間主応力と応力履歴の影響を統一的に考慮した(一般的な応力経路下における)修正応力を t_{ij}^* , t_{ij}^* への変換テンソルと a_{ij}^* 呼ぶ．

変換テンソルと a_{ij}^* を規定するため, 以下の実験事実³⁾に着目する．**Fig.2**はせん断履歴を受けた土 (a)図:応力経路 A→B→C→D) と受けない土(a)図:応力経路 A→C→D)の異方圧密初期の軸ひずみ～体積ひずみ関係(b)図)である．この二つの土の違いは主応力比 $R = 4$ のせん断応力履歴の有無である．せん断履歴を受けた土は, 異方性の発達により, 異方圧密初期において軸方向にひずみが生じにくいことがわかる．また, 前述したような, 圧密に伴った異方性の消散が確認できる．

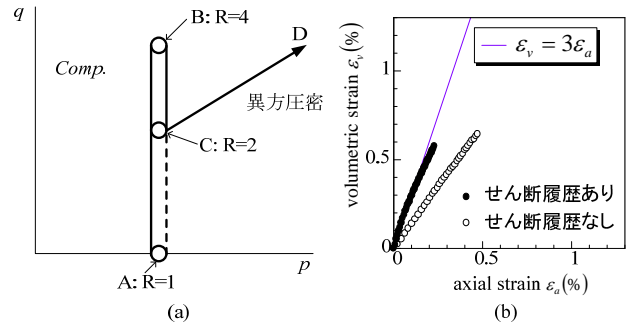


Fig.2 せん断履歴の有無による異方圧密挙動の差異

さらに, この実験結果は, 主応力比 R_{max} のせん断後, 同じ経路で主応力比 $\sqrt{R_{max}}$ まで除荷した土がその後の異方圧密の初期段階において等方的に変形することを示しており, このような現象は, 土の種類や主応力比 R_{max} を変化させた幾つかの実験ケースによらず確認することができた³⁾．

このような主応力比 $\sqrt{R_{max}}$ における等方的変形を修正応力を用いて表現するには, a_{ij}^* が主応力比 R_{max} からの除荷時に変化せず主応力比 R_{max} における a_{ij} に等しければよい．これは, 式(1)および(7)より, a_{ij} が各応力成分の-1/2乗に比例することから理解できる．

以上の実験事実ならびに修正応力 t_{ij} の概念から, 異方性を表現するテンソル a_{ij}^* (構造テンソルの逆テンソルに相当する)を提案する．一方で, せん断履歴のない単調載荷時であれば, a_{ij}^* は a_{ij} に一致することが既に示されている⁴⁾．つまり, 単調な応力経路下では中間主応力の影響(a_{ij})と応力履歴の影響による異方性の影響(a_{ij}^*)は本質的に同じであり, より一般的な応力条件下で a_{ij}^* (もしくは da_{ij}^*)が定義できれば応力誘導異方性の表現が可能だといえる．

2. 3. a_{ij}^* の発展則

これまでの実験事実³⁾ならびに修正応力 t_{ij} の概念から, a_{ij}^* は以下の条件を満足する必要がある．

- ① せん断履歴のない単調載荷時や破壊近くでは a_{ij}^* は式(5)により求まる a_{ij} に一致する．
- ② 弾性除荷時には a_{ij}^* は変化しない．
- ③ 応力履歴を受けて a_{ij}^* と a_{ij} が一致なくなると, 以後の弾塑性挙動により a_{ij}^* はその時々に応力状態で規定される a_{ij} に近づく．

以上の条件より, 応力履歴の影響の程度は, a_{ij} と a_{ij}^* の相対的位置によって決まることから, 式(9)に示す a_{ij} と a_{ij}^* のなす角 θ で考えればよい．

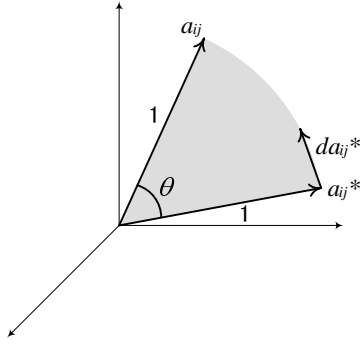


Fig.3 a_{ij} と a_{ij}^* の相対位置と a_{ij} の発展則

$$\theta = \arccos(a_{ij}^* \cdot a_{ij}) \quad (9)$$

θ を用いることで、応力履歴の影響をテンソルの差からスカラー量に置き換えることができ、取り扱い易いものとした。 a_{ij}^* が常に a_{ij} に向かって変化するという条件(3)は、 da_{ij}^* が a_{ij} 及び a_{ij}^* と同一平面に存在するという式(10)と等価である。

$$da_{ij}^* = ka_{ij} + la_{ij}^* \quad (10)$$

また、 a_{ij}^* は a_{ij} と同様に無次元のノルムが 1 のテンソルであるため、次式を満たす。

$$\|a_{ij}^*\| = \|a_{ij}\| = 1 \quad (11)$$

Fig.3では式(9)、式(10)と式(11)の条件から、 a_{ij} と a_{ij}^* の相対的位置関係及び da_{ij}^* を示す。

以上の条件から、式(10)に示す係数 k , l を求めると、係数 k , l はスカラー量 θ の関数として表される。つまり、テンソル a_{ij}^* の発展則はスカラー量 θ の発展則 $d\theta$ に置き換えられる。なお、 θ の増減はそれぞれ応力履歴の影響の発展、消散に対応する。 $\theta=0$ の場合、塑性変形に伴って θ は 0 に近づく(応力履歴の影響が消失する)という条件から、 $d\theta$ (すなわち da_{ij}^*) の大きさは次式で規定される。

$$d\theta = -\sqrt{\omega_{IC} |d\varepsilon_{ij}^{p(IC)}|^2 + \omega_{AF} |d\varepsilon_{ij}^{p(AF)}|^2} \quad (12)$$

式中の ω_{IC} , ω_{AF} は材料パラメータであり、それぞれ塑性ひずみ増分の等方圧縮成分及び関連流動則に伴う応力履歴の消散の速さを表す。

以上の手順で決定したテンソル a_{ij}^* により、中間主応力と応力履歴の影響を考慮した修正応力テンソル t_{ij}^* を次式で与える。

$$t_{ij}^* = \frac{1}{2} (a_{ik}^* \sigma_{kj} + \sigma_{ik} a_{kj}^*) \quad (13)$$

なお、式(13)では a_{ij}^* と σ_{ij} が非共軸であるので、修

正応力 t_{ij}^* を対称化している。こうして得られた t_{ij}^* を従来の t_{ij} に置き換えれば、誘導異方性を説明可能な形へと構成モデルを簡単に拡張できる。

3. 修正応力 t_{ij}^* の subloading t_{ij} model³⁾への適用

3.1. 提案モデルの定式化

修正応力テンソル t_{ij}^* の概念を subloading t_{ij} model⁴⁾に適用し、応力誘導異方性を表現できるモデルへ拡張する。降伏関数 F と流れ則は、式(14)および式(15)で与える。

$$F = f(\sigma_{ij}, a_{ij}^*) - H(\varepsilon_v^p) \\ = \ln \frac{t_N^*}{t_{N0}^*} + \frac{1}{\beta} \cdot \left(\frac{X^*}{M^*} \right)^\beta - H(\varepsilon_v^p) = 0 \quad (14)$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f(t_{ij}^*, a_{ij}^*)}{\partial t_{ij}^*} \quad (15)$$

ただし、従来のモデル⁴⁾とは異なり、降伏関数 F では a_{ij}^* が σ_{ij} とは独立な変数となることに注意が必要である。また、従来のモデルでは、式(15)の $a_{ij}^{\#}$ と a_{ij}^* は等しいテンソル (a_{ij}) であったが、等方硬化則に則って構成式を展開するには、 $a_{ij}^{\#}$ は t_{ij}^* 及び $d\varepsilon_{ij}^p$ と共軸なテンソルなければならない。このようなテンソルは、修正応力 t_{ij} の概念における t_{ij} と a_{ij} の関係から、式(16)で与えられる。

$$a_{ij}^{\#} = \frac{I_{13}^*}{\sqrt{I_{12}^{*2} - 2I_{11}^* I_{13}^*}} \cdot t_{ij}^{*-1} \quad (16)$$

なお、 I_{11}^* , I_{12}^* , I_{13}^* は t_{ij}^* の第1~3不変量である。式(14)中の、 t_N^* , X^* 及びその他の応力変数、応力テンソルは $a_{ij}^{\#}$ を用いて以下の式で表される。

$$t_N^* = t_{ij}^* a_{ij}^{\#} \quad (17)$$

$$t_{ij}^{*'} = t_{ij}^* - t_N^* a_{ij} \quad (18)$$

$$t_S^* = \sqrt{t_{ij}^{*'} t_{ij}^{*'}} \quad (19)$$

$$x_{ij}^* = \frac{t_{ij}^{*'}}{t_N^*} = \frac{t_{ij}^*}{t_N^*} - a_{ij} \quad (20)$$

$$X = \frac{t_S^*}{t_N^*} = \sqrt{x_{ij}^* x_{ij}^*} \quad (21)$$

また、ひずみ増分変数は以下の式で表される。

$$d\varepsilon_{SMP}^p = d\varepsilon_{ij}^p a_{ij}^{\#} \quad (22)$$

$$d\varepsilon_{ij}^{*p} = d\varepsilon_{ij}^p - d\varepsilon_{SMP}^{*p} a_{ij}^{\#} \quad (23)$$

$$d\gamma_{SMP}^{*p} = \sqrt{d\varepsilon_{ij}^{*p} d\varepsilon_{ij}^{*p}} \quad (24)$$

M^* は、従来のモデル⁴⁾と同様に、限界状態での主応力比 $X_{CS}=(t_s/t_N)_{CS}$ と塑性ひずみ増分比 $Y_{CS}=(d\varepsilon_{SMP}^{*p}/d\gamma_{SMP}^{*p})$ を用いて以下のように表される。

$$M^* = (X_{CS}^\beta + X_{CS}^{\beta-1} Y_{CS})^{1/\beta} \quad (25)$$

ここで、 X_{CS} と Y_{CS} は三軸圧縮条件での限界状態の主応力比 R_{CS} から次式で表される。

$$X_{CS} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left(\sqrt{R_{CS}} - \frac{1}{\sqrt{R_{CS}}} \right) \quad (26)$$

$$Y_{CS} = \frac{1 - \sqrt{R_{CS}}}{\sqrt{2}(\sqrt{R_{CS}} + 0.5)} \quad (27)$$

3. 2. 応力 - ひずみ関係の記述

ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}$ は、従来のモデルと同様に、弾性ひずみ $d\varepsilon_{ij}^e$ 、塑性ひずみ増分のうち関連流動則に従う成分 $d\varepsilon_{ij}^{p(AF)}$ 及び等方圧縮成分 $d\varepsilon_{ij}^{p(AF)}$ に分け、ひずみ増分方向の応力経路依存性⁴⁾を表現する。塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}^p$ は流れ則より式(15)で示した(以後、塑性ひずみ増分は $d\varepsilon_{ij}^{p(AF)}$ でのみ考える)。また、弾性ひずみ増分は等方弾性式(Hooke's Law)により、ポアソン比 ν_e 及び弾性係数 E_e を用いて次式で表される。

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu_e}{E_e} d\sigma_{ij} - \frac{\nu_e}{E_e} d\sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (28)$$

次に、前述したように独立変数 a_{ij}^* に注意して適合条件を求めると、以下の式になる。

$$dF = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial a_{ij}^*} da_{ij}^* - \frac{\partial H}{\partial \varepsilon_{ij}^p} d\varepsilon_{ij}^p = 0 \quad (29)$$

よって、式(15)より塑性乗数 Λ は以下の式で表される。

$$\Lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial a_{ij}^*} da_{ij}^*}{\frac{\partial H}{\partial \varepsilon_{ij}^p} \frac{\partial f}{\partial t_{ij}^*}} \quad (30)$$

以上の関係から導かれる応力-ひずみ関係を次式に示す。

$$d\sigma_{ij} = D_{ijmn}^{ep} d\varepsilon_{mn} - d\sigma_{ij}^* \quad (31)$$

式中の D^{ep} は弾塑性性テンソルであり、式(28)から求まる弾性テンソル D^e を用いて次式で表される。

		応力履歴の影響	
		表現できない	表現できる
中間主応力の影響	表現できない	従来の等方硬化モデル (Cam Clay modelなど) $\sigma_{ij} \text{---} \bigcirc \text{---} d\varepsilon_{ij}^p$ 等方硬化則	移動硬化モデル $\sigma_{ij} \text{---} \star \text{---} d\varepsilon_{ij}^p$ 移動硬化則
	表現できる	修正応力 t_{ij} (Subloading t_{ij} modelなど) $\sigma_{ij} \text{---} \bigcirc \text{---} d\varepsilon_{ij}^p$ $a_{ij} \text{---} \bigcirc \text{---} t_{ij}$	拡張された修正応力 t_{ij}^* (提案モデル) $\sigma_{ij} \text{---} \star \text{---} d\varepsilon_{ij}^p$ $a_{ij}^* \text{---} \star \text{---} t_{ij}^*$ $a_{ij}^{\#} \text{---} \bigcirc \text{---} t_{ij}^*$

○:共軸, ☆:非共軸

Fig.4 提案モデルの特徴と他のモデルとの比較

$$D_{ijmn}^{ep} = D_{ijmn}^e - \frac{D_{ijmn}^e \frac{\partial f}{\partial t_{mn}^*} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} D_{pqkl}^e}{h_p + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} D_{mnpq}^e \frac{\partial f}{\partial t_{pq}^*}} \quad (32)$$

また、 $d\sigma_{ij}^*$ は a_{ij}^* の増分に関する項であり、以下の式で表される。

$$d\sigma_{ij}^* = \frac{D_{ijmn}^e \frac{\partial f}{\partial t_{mn}^*} \frac{\partial f}{\partial a_{kl}^*}}{h_p + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} D_{mnpq}^e \frac{\partial f}{\partial t_{pq}^*}} da_{kl}^* \quad (33)$$

式(32)、(33)中の h_p は次式で表される。

$$h_p = \frac{\partial H}{\partial \varepsilon_{ij}^p} \frac{\partial f}{\partial t_{ij}^*} \quad (34)$$

このように、提案モデルの応力-ひずみ関係式は、弾塑性性テンソルを用いた一般的な関係式に、 a_{ij}^* の増分(a_{ij}^* の発展則)に関する項を付加項とする関係式となる。

3. 3. 応力と塑性ひずみ増分の非共軸性

Fig.4 に提案モデルと他のモデルとの比較をまとめた。提案モデルは、修正応力 t_{ij}^* により中間主応力と応力履歴の影響を簡単かつ統一的に表現できる。このとき、応力履歴による異方性を考慮したテンソル a_{ij}^* と σ_{ij} が必ずしも共軸ではないことが、提案モデルの要衝である。まず、非共軸な関係にある σ_{ij} と a_{ij}^* から得られる修正応力 t_{ij}^* は、 σ_{ij} とは非共軸である。一方、修正応力 t_{ij}^* と塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}^p$ は、流れ則の仮定により、互いに共軸なテンソル $a_{ij}^{\#}$ を介して共軸性が確保される。従って、提案モデルは共軸な修正応力 t_{ij}^* と塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}^p$ を用いて応力ひずみ関係が規定された等方硬化モデルでありながら、応力テンソル σ_{ij} と塑性ひずみ増

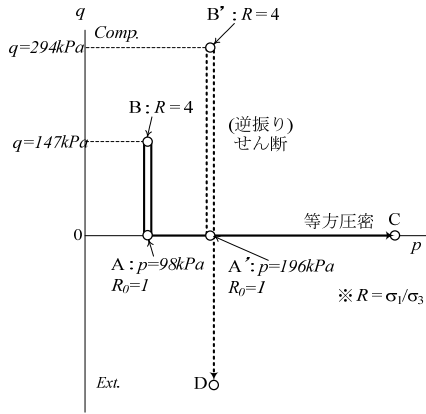


Fig.5 応力経路 (等方圧密, 三軸圧縮伸張試験)

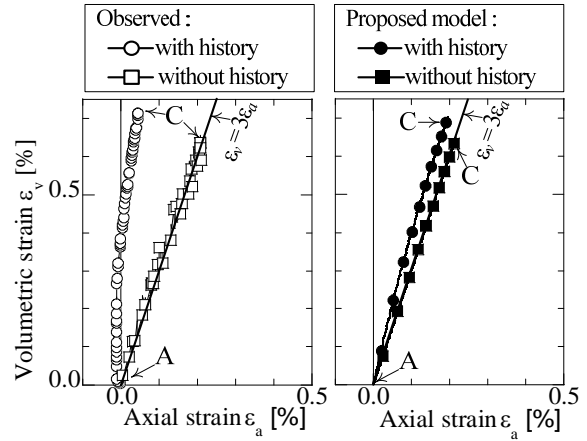


Fig.6 せん断履歴の有無による圧密挙動の差異

Table1 構成パラメータ

λ	0.0700	Cam Clay modelと 同様のパラメータ	
κ	0.0045		
e_{NC} at $p=98\text{kPa}$ & $q=0\text{kPa}$	1.1		
$R_{cs} = (\sigma_1/\sigma_3)_{s(comp.)}$	3.2	降伏関数の形状	
v_c	0.2		
β	2.0	密度と拘束圧の影響に関 するパラメータ	
a	a_{AF}		35
	a_{IC}	500	
ω	ω_{AF}	9	応力履歴の消散 に関するパラメータ
	ω_{IC}	1000	

分 $d\varepsilon_{ij}^p$ の非共軸な挙動を表現できるわけである。なお、 a_{ij}^* が a_{ij} と等しくなるように発展則を与えれば、提案モデルは従来のモデルと完全に一致する。

4. 提案モデルによる解析値と実験値の比較

本節では、提案モデルの解析値と実験値を比較することで提案モデルの検証を行う。実験値として、密な砂の等方圧密試験及び三軸圧縮伸張試験の結果を用いる。Fig.5 に各試験の応力経路を、Table1 に解析での構成パラメータを示す。なお、従来のモデル⁴⁾と提案モデルでは、応力履歴の消散に関するパラメータを除く全てのパラメータに同一の値を設定した。等方圧密試験(Fig.5 中の実線)は、初期拘束応力 $p = 98\text{kPa}$ の等方応力状態から、平均主応力一定のせん断履歴 ($R = 4$) を受けた土(経路: $A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C$)とせん断履歴を受けない土(経路: $A \rightarrow C$)で行った。一方、三軸圧縮伸張試験(Fig.5 中の破線)は、拘束応力 $p = 196\text{kPa}$ 一定で行った(経路: $A' \rightarrow B' \rightarrow D$)。

Fig.6 はせん断履歴を受けた土と受けていない土の等方圧縮時の軸ひずみ～体積ひずみ関係である。実験値より、せん断履歴を受けた土は、等方的な応力増加を与えたにもかかわらず、初期段階では異方

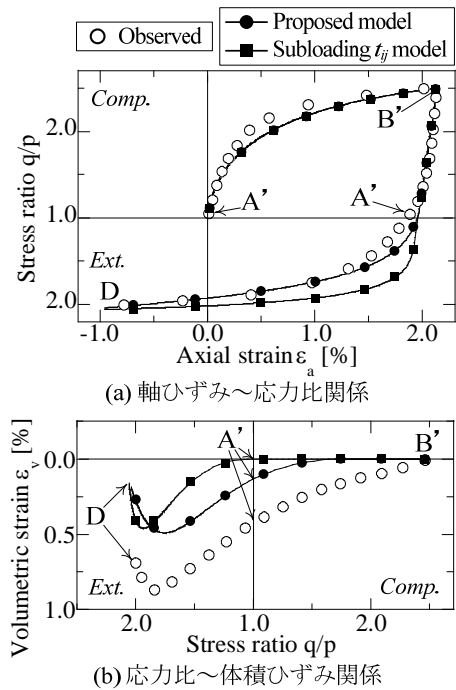


Fig.7 三軸圧縮伸張試験の結果

的に変形する。しかし、圧密圧力の増加に伴って異方性は解消し、せん断履歴を受けていない土と同様の変形挙動を呈する ($\varepsilon_v = 3\varepsilon_a$ の傾きに近づく) ようになる。一方、解析値は定量的にはまだ実験値を捉えていないものの、せん断履歴の影響によって軸ひずみが生じにくくなる現象を再現できていることがわかる。また、提案モデルは回転硬化則では困難であった誘導異方性の圧密による消散を表現できることもわかる。これは、式(12)に示す異方性の度合い θ の発展則が塑性ひずみの関数になっているためである。Fig.7 は三軸圧縮伸張試験の結果である。(a)

図には軸ひずみ～応力比 q/p 関係, (b)図には応力比 q/p ～体積ひずみ関係を示す. 解析値には提案モデルとともに, 従来の subloading t_{ij} model⁴⁾を示し, 比較する. Fig.7(a)図より, 単調載荷時(経路: A'→B')には応力履歴の影響が生じないため従来のモデルと提案モデルによる解析値は同一であり, とともに実験値を捉える. 一方, 伸張時(経路: B'→A'→D)の挙動に着目すると, 実験値に見られる等方応力状態(A')になる前(経路: B'→A')の剛性低下やダイレイタンスの発生を提案モデルは表現できることがわかる. 一方, 従来のモデルでは, 等方応力以前(経路: B'→A')には弾性変形しか生じない. また, 提案モデルは塑性変形に伴って応力履歴の影響が解消し, 最終的には所定の破壊応力比に達する様子も表現できることがわかる.

5. まとめ

本稿では, 中間主応力の影響を適切に考慮した修正応力 t_{ij} の利点はそのままに, 中間主応力と応力履歴の影響を統一的に考慮した修正応力 t_{ij}^* へと拡張した. さらに, 修正応力 t_{ij}^* を従来の subloading t_{ij} model⁴⁾に導入することにより, 等方硬化モデルの範疇において誘導異方性の表現を可能にした. また, 移動硬化則(あるいは回転硬化則)では表現困難な応力比一定載荷での異方性の解消を提案モデルは表現できた. 今後は, さらに一般応力条件下で解析を行い, 提案モデルの更なる検証と改良を進めていく予定である.

参考文献

- 1) Nakai, T and Mihara, Y: A NEW MECHANICAL QUANTITY FOR SOILS AND ITS APPLICATION TO ELASTOPLASTIC CONSTITUTIVE MODELS, SOILS AND FOUNDATION, vol.24, No.2, pp.82-94, 1984.
- 2) 佐武 正雄: 粒状態の誘導異方性について, 応用力学論文集, vol.7, pp.725-736, 2004.
- 3) 長井他: 第 38 回地盤工学研究発表会, pp. 441-442, 2003.
- 4) Nakai, T and Hinokio, M: A SIMPLE ELASTOPLASTIC MODEL FOR NORMALLY AND OVER CONSOLIDATED SOILS WITH UNIFIED MATERIAL PARAMETERS, SOILS AND FOUNDATION, vol.44, No.2, pp.53-70, 2004.