

III-A 12 飽和砂の非排水単純せん断試験でのひずみ軟化挙動（その2）

奥村組 電算センター 正会員 ○森尾 敏  
奥村組 技術研究所 正会員 日下部 伸

1. まえがき

筆者らは、非共軸性の評価を取り入れた砂の繰返し弾塑性構成則を提案し、液状化強度試験（非排水単純せん断試験）のシミュレーション解析に基づき、せん断初期の強い非共軸性が表れる領域からピーク時の共軸に至る過程をいかにモデル化するかが重要であることを示した<sup>1)</sup>。

しかし、本モデルは3. で後述するように、過去の応力履歴に依存する強い非共軸性を評価すると、液状化に伴ういわゆる側方流動の原因と考えられる非排水時、あるいは間隙水圧の移動に伴うひずみ軟化挙動<sup>2)</sup>を表現することが困難となる。

このため、本報告では橋口の拡張流動則<sup>3)</sup>に基づき、強い非共軸性とひずみ軟化挙動を同時に表現できる新たな流れ則を提示する。モデルの修正箇所は、偏差応力空間での流れ則のみである。さらに、中空ねじりせん断試験機を用いたゆる詰め飽和砂の等方および異方応力状態での非排水単純せん断試験のシミュレーション解析を実施し、新たな流れ則のひずみ軟化挙動への適用性を調べる。

2. 非共軸性の評価を取り入れた砂の構成則<sup>1)</sup>

ここでは、単調載荷時の偏差応力空間での流れ則についてのみ示す。塑性偏差ひずみ増分 $d\epsilon^p_{ij}$ の方向を示す単位テンソル $G_{ij}$ は次式で表される。

$$G_{ij} = d\epsilon^p_{ij} / |d\epsilon^p_{ij}| = Q_{ij} / |Q_{ij}| \cdots (1)$$

上式のテンソル $Q_{ij}$ として次式を導入している。

$$Q_{ij} = Q^h_{ij} + \chi (1 - R) Q^h_{ij} \cdots (2)$$

ここに、 $Q^h_{ij}$ は負荷曲面 $f$ の偏差応力空間での外向き法線方向単位テンソル、 $\chi$ は応力履歴に依存する非共軸性の程度を表す定数、 $R$  ( $0 \leq R < 1$ )は基準化空間での $f$ の半径、 $Q^h_{ij}$ は偏差応力空間での直前の応力経路の方向を示す単位テンソルである。上式は、 $\chi \neq 0$ のとき過去の応力履歴 $Q^h_{ij}$ に依存する非共軸性を表現することができる。また、 $R = 1$ 、すなわち $f = F$ に接近するにつれて $Q^h_{ij}$ の効果は低下し、 $R = 1$ 近傍では主応力方向と塑性主ひずみ増分方向が一致する共軸性を表現する。

ただし、 $F$ は正規降伏曲面である。

また、塑性ひずみ増分 $d\epsilon^p_{ij}$ の方向を示す単位テンソル $g_{ij} (= d\epsilon^p_{ij} / |d\epsilon^p_{ij}|)$ は、非共軸性の評価を取り入れたCam-Clay型のStress-Dilatancy関係から得られる体積成分を式(1)の $G_{ij}$ に重ね合わせて、得られる。

3. 塑性応答の応力増分方向依存性について

塑性応答の応力増分方向依存性を何らかの形で評価した弾塑性構成則は、一般に

①：ひずみ制御型試験の解析、および変位法に基づく有限要素法解析において、弾塑性係数テンソルを陽な形で表現できない。

②：液状化に伴ういわゆる側方流動の原因と考えられる非排水時、あるいは間隙水圧の移動に伴うひずみ軟化挙動の表現が困難である。

という課題を有している。①は、増分非線形モデルの本質的な課題である。②は、1次元応力へひずみ関係において、ひずみ軟化時に全ひずみ増分方向と塑性ひずみ増分方向が逆向きになることを考えると明らかである。

②の問題点は、過去の応力履歴に依存する非共軸性を評価した2. のモデルにおいてもいえる。このため、次章では強い非共軸性とひずみ軟化挙動を同時に表現できる新たな流れ則を提示する。

4. 新たな流れ則

橋口の拡張流動則<sup>3)</sup>によると、塑性ひずみ増分 $d\epsilon^p_{ij}$ の方向を示すテンソル $g^p_{ij}$ は、体積ひずみ増分への依存性を無視すると次式で表される。

$$g^p_{ij} = n_{ij} + P_i^* d\epsilon_{ij} / |d\epsilon_{ij}| \cdots (3)$$

ここに、 $n_{ij}$ は負荷曲面 $f$ の外向き法線方向単位テンソル、 $d\epsilon_{ij}$ は全偏差ひずみ増分、 $P_i^*$ は定数で、 $P_i^* \neq 0$ のとき $d\epsilon^p_{ij}$ の $d\epsilon_{ij}$ への依存性を表現する。ここでは、式(3)に基づき、式(2)の $Q^h_{ij}$ として新たに次式を考える。

$$Q^h_{ij} = d\epsilon^h_{ij} / |d\epsilon^h_{ij}| \cdots (4)$$

ここで、 $d\epsilon^h_{ij}$ は直前のステップにおける全偏差ひずみ増分であり、この $Q^h_{ij}$ は過去のひずみ履歴

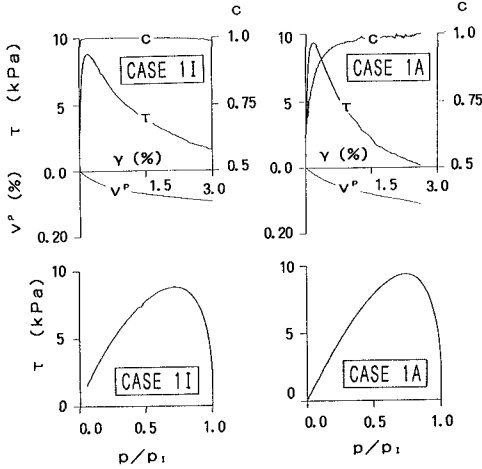


図-1 非排水単純せん断試験結果

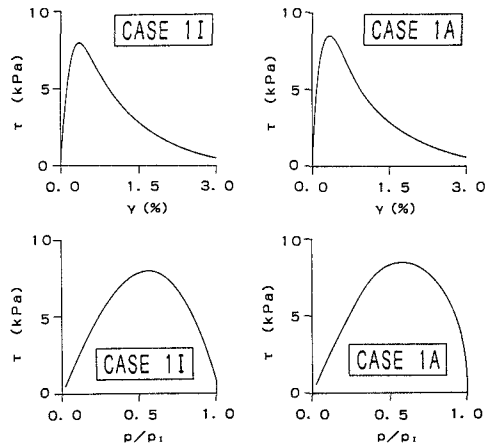


図-2 解析結果 (χ = 3)

に依存する非共軸性を表現することになる。また、式(1)、(2)、(4)を用いた流れ則は、以下の特徴を有する。

- ①：ひずみ制御型試験の解析、変位法に基づく有限要素法解析、および応力制御型試験の解析においても、弾塑性係数テンソルを陽な形で表現できる。
- ②：弾塑性論の基本式である次式が成立する。

$$d\varepsilon^p_{ij} = \lambda g_{ij}, \quad \lambda = |d\varepsilon^p_{ij}| \dots \dots (5)$$

5. 実験結果と解析結果の比較

ゆる詰め豊浦砂 (Dr = 36%) の非排水単純せん断試験結果<sup>4)</sup>を図-1に示す。CASE1I は等方圧密 ( $\sigma'_a = \sigma'_v = 41.16$  kPa)、CASE1A は異方圧密 ( $\sigma'_a = 61.74$ ,  $\sigma'_v = 30.87$  kPa) からのせん断で、両試験の平均有効主応力 p は等しい。図-1 上段には、せん断応力  $\tau \sim$  せん断ひずみ  $\gamma$  関係、塑性体積ひずみ  $V^p \sim \gamma$  関係、非共軸性の程度を表すスカラー変数  $c \sim \gamma$  関係を、下段には  $\tau \sim p/p_1$  平面での有効応力経路を示す。

異方圧密の CASE1A では、 $\gamma$  の増加に伴い、 $c = 0.7$  (強い非共軸) 付近から  $c = 1.0$  (共軸) に接近しているのが分かる。

図-2 に 4. で提案した流れ則を用いた解析結果を示す。入力データは表-1 であり、 $\chi = 3$  を用いた。等方、異方応力状態にかかわらず、ゆる詰め砂の非排水時のひずみ軟化挙動がうまく表現されている。

図-3 に  $\chi = 0, 2, 3, 4$  としたときの CASE1A の  $\tau \sim \gamma$  関係、有効応力経路を、図-4 に  $c \sim \gamma$  関係を示す。ただし、等方応力状態の CASE1I では、 $\chi$  の値は結果に何等影響しない。図-3、4 で、 $\chi$  を大きくすると、せん断初期の  $Q^H_{ij}$  に依存する強い非共軸性が表現され、ひずみ軟化時のピークせん断応力  $\tau_{max}$  が低下する。また、CASE1I と CASE1A の  $\tau_{max}$  が接近し、実験結果に近似する。

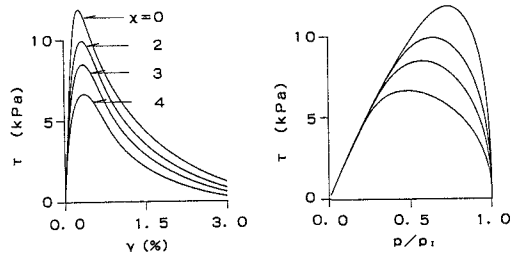


図-3 χ = 0, 2, 3, 4 の場合の解析結果

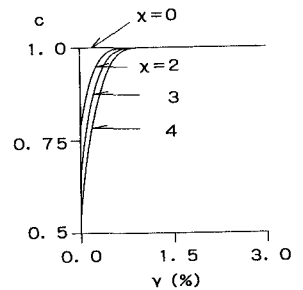


図-4 c ~ γ 関係  
表-1 入力データ

$\phi_c = 31.5^\circ$	$G_1 = 7800$ kPa
$\phi_{mc} = 33.5^\circ$	$\nu = 1/3$
$r = 1.0$	$\chi = 3.0$

参考文献

1)：森尾敏他、土木学会論文集、No. 487/Ⅲ-26、1994    2)：森尾敏他、土木学会論文集、No. 499/Ⅲ-28、1994  
3)：橋口公一、土木学会論文集、No. 507/Ⅰ-30、1995    4)：森尾敏他、第30回土質工学研究発表会、pp. 489-496