

弾粘塑性構成式における粘塑性ポテンシャル関数の改良と静的降伏関数の定式化

京都大学大学院 正会員 ○木元 小百合
 京都大学大学院 フェロー会員 岡 二三生
 京阪電鉄(元京都大学大学院) 正会員 渡部 泰介
 京都大学大学院 学生会員 澤田 茉伊

1. 目的

本研究では、従来から提案している内部構造変化を考慮した弾粘塑性構成式¹⁾中の粘塑性ポテンシャル関数の形を決定するダイレイタンシー係数を、等方圧縮時の粘塑性体積ひずみの発生を表現できるよう改良した。これにより、従来のモデルでは表現できなかった過圧密領域での等方応力状態下での体積変化、クリープ、等方応力緩和を表現することが可能である。また、静的降伏関数の初期の大きさを決定するパラメータの再定式化により、構造劣化のみでなく構造形成にも対応するモデルであることを示した。

2. 過圧密境界面

正規圧密領域と過圧密領域の境界を与える過圧密境界面は、従来どおり以下の式で与える。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0, \quad \bar{\eta}_{(0)}^* = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \right\}^{1/2}, \quad \eta_{ij}^* = S_{ij} / \sigma'_m \quad (1)$$

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp \left(\frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^{vp} \right), \quad \sigma'_{ma} = \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta z), \quad z = \int_0^t \dot{z} dt, \quad \dot{z} = \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \right)^{1/2} \quad (2)$$

σ'_{ma} は上式のように粘塑性ひずみの蓄積に伴って増加あるいは減少し、内部構造変化による硬化、軟化を表現する。

3. ダイレイタンシー係数と粘塑性ポテンシャル関数

$$f_p = \bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mp}} = 0 \quad (3)$$

ここで σ'_{mp} はポテンシャル面と σ'_m 軸との交点の σ'_m である。正規圧密領域では $\tilde{M}^* = M_m^*$ で一定値とする。過圧密領域におけるダイレイタンシー係数 $\tilde{M}^*$ は従来以下の式で与えていた。

$$\tilde{M}^* = -\frac{\eta^*}{\ln(\sigma'_m / \sigma'_{mc})}, \quad \sigma'_{mc} = \sigma'_{mb} \exp \frac{\sqrt{\eta_{ij(0)}^* \eta_{ij(0)}^*}}{M_m^*}, \quad \eta^* = \sqrt{\eta_{ij}^* \eta_{ij}^*} \quad (4)$$

しかし、応力状態が等方応力状態にある場合 $\tilde{M}^* = 0$ となり、粘塑性体積ひずみが発生しないという問題点があった。そこで本研究では以下のように改良する。

$$\tilde{M}^* = \left(\sigma'^*_{m'} / \sigma'_{mb} \right)^N M_m^*, \quad \sigma'^*_{m'} = \sigma'_m \exp \left(\bar{\eta}_{(0)}^* / M_m^* \right) \quad (5)$$

ここで $\sigma'^*_{m'}$ は過圧密領域において、現在の応力状態を通り過圧密境界面と相似形の曲面で $\eta_{ij}^* = \eta_{ij(0)}^*$ とした時の σ'_m の値である。 N は材料定数であり本研究では $N=1$ としている。図1と図2に $\eta_{ij(0)}^* = 0$ の場合の過圧密境界面及び過圧密領域における粘塑性ポテンシャル面を示す。

4. 静的降伏関数の定式化

$$f_y = \bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'^{(s)}_{my}} = 0, \quad \sigma'^{(s)}_{my} = \frac{\sigma'_{ma}}{\sigma'^{(s)}_{mai}} \sigma'^{(s)}_{myi} \exp \left(\frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^{vp} \right) \quad (6)$$

$\sigma'^{(s)}_{myi}$ は $\sigma'^{(s)}_{my}$ の初期値であるが、これに初期構造の程度 σ'_{mai} の影響を含めるため次式のように置く。

$$\sigma'^{(s)}_{myi} = \frac{\sigma'_{mai}}{\sigma'_{mar}} \sigma'^{(s)}_{myr} \quad (7)$$

キーワード 構成式, 弾粘塑性, ダイレイタンシー係数, 降伏関数

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4 京都大学桂キャンパス C1-4, 京都大学工学研究科社会基盤工学専攻, TEL:075-383-3192

$\sigma'_{myr}^{(s)}$ は σ'_{mai} が基準圧 σ'_{mar} に等しい時の $\sigma'_{myi}^{(s)}$ である。 σ'_{mar} 、 $\sigma'_{myr}^{(s)}$ は基準パラメータであり、後述のように最終的に粘塑性パラメータ C_0 中に含まれる。粘塑性流れ則は以下の超過応力型のものを用いる。

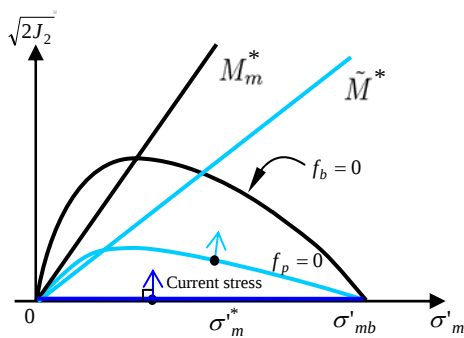


図1 従来の粘塑性ポテンシャル面

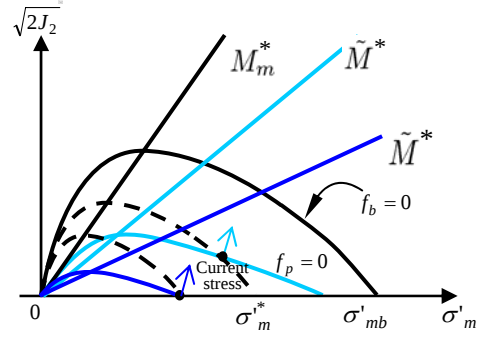


図2 改良後の粘塑性ポテンシャル面

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \left\langle \Phi_1(f_y) \right\rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{ij}}, \quad \langle \Phi_1(f_y) \rangle = \begin{cases} \Phi_1(f_y) & ; f_y > 0 \\ 0 & ; f_y \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\gamma \Phi_1(f_y) = C' \sigma'_m \exp \left\{ m' \left(\bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{myr}^{(s)}} \right) \right\} = C' \sigma'_m \exp \left(m' \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_{mar}}{\sigma'_{myr}^{(s)}} \right) \exp \left\{ m' \left(\bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma} \exp((1+e_0)/(\lambda-\kappa)\epsilon_v^{vp})} \right) \right\} \quad (9)$$

ここで $C_0 = C' \sigma'_m \exp \left(m' \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_{mar}}{\sigma'_{myr}^{(s)}} \right)$ とおく。このように、粘塑性パラメータ C_0 は σ'_{mai} を含まない形となり、(9)式中の σ'_{ma} 内に σ'_{mai} の影響を含むことになる。このことにより σ'_{maf} が σ'_{mai} より小さい構造劣化過程および、 σ'_{maf} が σ'_{mai} を超える構造形成過程も表現しうるようになる。これについてはサンプリングによる乱れが考えられる試料などについて既に適用例がある^{2),3)}。

5. ダイレイタンシー係数を改良した構成式によるシミュレーション結果

図3～図5に改良前後の構成式による非排水三軸試験のシミュレーション結果の比較を示す。材料パラメータは文献1)の過圧密比6.0のものを用いた。応力-ひずみ、応力径路には違いが見られない。図5より、初期のダイレイタンシー係数の値は従来のものではほぼ0であるが、改良したものでは0.2程度となっている。したがって改良した構成式は σ'_m 軸上での体積変化を表現し得るが、応力比が大きくなると従来のモデルとの差は小さく、従来のモデルも有用である。また、この方法は砂のモデルにも適用することができる。

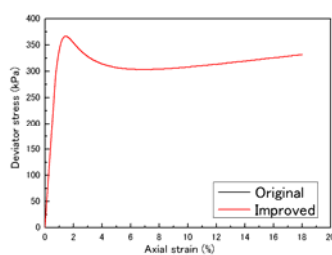


図3 応力-ひずみ関係

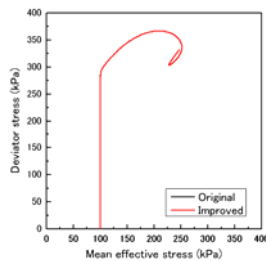


図4 応力径路

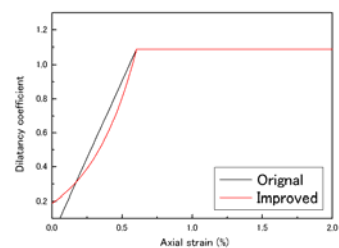


図5 ダイレイタンシー係数 $\tilde{M}^*$ の変化

6. まとめ

ダイレイタンシー係数すなわち粘塑性ポテンシャル関数の改良は、過圧密領域での粘塑性体積ひずみの影響が大きい等方除荷、再載荷過程、繰り返し載荷時などではその影響が重要であると考えられ、今後これらについて検討する必要がある。一方、応力比が大きい場合は従来の構成式でもほぼ同じ結果を得た。また、構造変化の表現は $\sigma'_{myi}^{(s)}$ を再定式化することにより、劣化 $\sigma'_{mai} > \sigma'_{maf}$ がのみでなく構造形成に伴う硬化 $\sigma'_{mai} < \sigma'_{maf}$ にも用いることができる。

参考文献 : 1) Kimoto S and Oka F (2005): An Elasto-viscoplastic Model for Clay Considering Destructuralization and Consolidation Analysis of Unstable Behavior, Soils and Foundations, 45 (2): pp29-42., 2) 渡部ら(2006): 第41回地盤工学研究発表会, No.165., 3) 荻迫ら(2007): 大水深海底地盤採取試料の三軸圧縮試験についてのシミュレーション, 第42回地盤工学研究発表会 (投稿中).