

III-184 粘土の一次元弾粘塑性ひずみ軟化モデル

大阪大学大学院 学生会員 平尾 謙一
 大阪大学工学部 正会員 阿部 信晴
 大阪大学工学部 正会員 松井 保
 大阪大学大学院 学生会員 橋本 和晃

1. まえがき

過圧密粘土や疑似過圧密粘土の原位置での一次元圧縮特性はサンプリング試料の室内圧密試験から得られる応力～ひずみ関係とかなり異なっていることが指摘されている^{1,2)}。図-1は、原位置で測定された応力～ひずみ関係と室内圧密試験結果を比較したものである²⁾が、圧密試験結果は原位置での圧縮性を過圧密領域では過大に、正規圧密領域では過小に評価していること、原位置での応力～ひずみ曲線では正規圧密領域でひずみ軟化挙動が生じていることが示されている。本報告では、このようなひずみ軟化を伴う場合の圧密挙動解析を行うための一次元弾粘塑性ひずみ軟化モデルを提案する。

2. 一次元弾粘塑性ひずみ軟化モデル

過圧密粘土や疑似過圧密粘土のひずみ軟化挙動を粘土構造の劣化過程と仮定し、粘土要素の全体変形は変形剛性の異なる二つの弾粘塑性変形成分、すなわち、粘土の過圧密領域において主要な成分と正規圧密領域で主要な成分の和によって与えられるとする³⁾。ここでは前者を非損傷成分、後者を損傷成分と呼ぶことにする。構造劣化の効果はこれら二成分の全体変形に対する寄与率の変化に起因する応答として表現される。

損傷率 粘土要素、非損傷成分および損傷成分の体積をそれぞれ V, V_n, V_d (ただし、 $V=V_n + V_d$) とし、 $r=V_d/V$ と定義すれば、非損傷成分、損傷成分の全体に対する寄与率は、それぞれ、 $1-r, r$ となる。 r は損傷率で、載荷前は0であり、圧縮変形の増加とともに増大し、ある量で極限值 r_u に達する。

変形成分の構成関係 二つの変形成分は流動曲面理論による弾粘塑性成分とする。その構成関係は次式によって与えられる。

$$\dot{\epsilon}_z = \dot{\epsilon}_z^e + \dot{\epsilon}_z^{vp} = \frac{\kappa}{1+e_0} \frac{\dot{\sigma}_z}{\sigma_z} + \left(-\frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \dot{\sigma}_z + \frac{\partial F}{\partial t} \right) \quad (1)$$

$$\dot{\sigma}_z = \frac{\dot{\epsilon}_z - \frac{\partial F}{\partial t}}{\left[\frac{\kappa}{1+e_0} \frac{1}{\sigma_z} + \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \right]} = D \left(\dot{\epsilon}_z - \frac{\partial F}{\partial t} \right) \quad (2)$$

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[\left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_z r t \right) \right\} \exp \left(\frac{f}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_z r t \right) \right] \right]$$

$$-e_z^{vp} = 0 \quad (3), \quad f = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \ln \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}} \right) \quad (4)$$

粘土要素の応力～ひずみ関係 粘土要素の応力～ひずみ関係を導くために

次の条件を仮定する。①粘土要素の応力 $\bar{\sigma}_z$ は、二つの変形成分の応力 σ_{zn} 、損傷成分 σ_{zd} の平均の応力として与えられる((5)式)。②各成分の全ひずみ $\epsilon_{zn}, \epsilon_{zd}$ は粘土要素の全ひずみ $\bar{\epsilon}_z$ に等しい((6)式)。

$$\bar{\sigma}_z = (1-r)\sigma_{zn} + r\sigma_{zd} \quad (5), \quad \bar{\epsilon}_z = \epsilon_{zn} = \epsilon_{zd} \quad (6)$$

$$(5)式を時間微分することにより, \quad \dot{\bar{\sigma}}_z = (1-r)\dot{\sigma}_{zn} + r\dot{\sigma}_{zd} - \dot{r}(\sigma_{zn} - \sigma_{zd}) \quad (7)$$

(2), (6)式から,

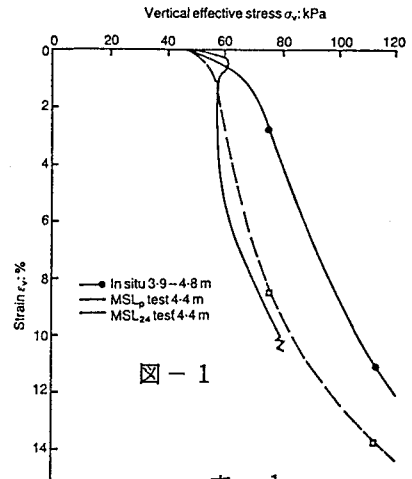


表-1

非損傷成分	$\kappa_n = 0.003$ $\lambda_n = 0.08$ $\mu_n = 0.005$ $\dot{\epsilon}_z r n = 5.0 \times 10^{-6}$ $\delta_n = 0.001$
損傷成分	$\kappa_d = 0.003$ $\lambda_d = 2.0$ $\mu_d = 0.05$ $\dot{\epsilon}_z r d = 5.0 \times 10^{-6}$ $\delta_d = 0.001$

$$\dot{\sigma}_{zn} = D_n \left(\dot{\epsilon}_z - \frac{\partial F_n}{\partial t} \right) \quad (8), \quad \dot{\sigma}_{zd} = D_d \left(\dot{\epsilon}_z - \frac{\partial F_d}{\partial t} \right) \quad (9)$$

(7)式に(8), (9)式を代入して,

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_z &= (1-r)D_n \left(\dot{\epsilon}_z - \frac{\partial F_n}{\partial t} \right) \\ &\quad + rD_d \left(\dot{\epsilon}_z - \frac{\partial F_d}{\partial t} \right) - \dot{r}(\sigma_{zn} - \sigma_{zd}) \\ &= [(1-r)D_n + rD_d] \dot{\epsilon}_z - \left[(1-r)D_n \frac{\partial F_n}{\partial t} \right. \\ &\quad \left. + rD_d \frac{\partial F_d}{\partial t} + \dot{r}(\sigma_{zn} - \sigma_{zd}) \right] \\ &= D \dot{\epsilon}_z - L \quad (10) \end{aligned}$$

また, $\dot{\epsilon}_z = D^{-1}(\dot{\sigma}_z + L)$ (11) ここに,

$$D = (1-r)D_n + rD_d \quad (12)$$

$$L = (1-r)D_n \frac{\partial F_n}{\partial t} + rD_d \frac{\partial F_d}{\partial t} + \dot{r}(\sigma_{zn} - \sigma_{zd}) \quad (13)$$

$$D_n = \left[\frac{\kappa_n}{1+e_o} \frac{1}{\sigma_{zn}} + \frac{\partial F_n}{\partial \sigma_{zn}} \right]^{-1} \quad (14)$$

$$D_d = \left[\frac{\kappa_d}{1+e_o} \frac{1}{\sigma_{zd}} + \frac{\partial F_d}{\partial \sigma_{zd}} \right]^{-1} \quad (15)$$

損傷率 r は粘土要素の粘塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_z^{vp}$ の関数と仮定し, 次式で定義する。

$$r = r_u [1 - \exp(-h(\bar{\epsilon}_z^{vp} - k)^m)] \quad (16)$$

$\bar{\epsilon}_z^{vp}$ は各変形成分の粘塑性ひずみの平均値として与えられる。

$$\bar{\epsilon}_z^{vp} = (1-r)e_{zn}^{vp} + r e_{zd}^{vp} \quad (17)$$

3. 計算例

図-2は, 定ひずみ速度での一次元圧縮試験の計算結果を示したものである。材料パラメータは表-1に示す値を用いている。(10)式は図-1の原位置でのひずみ軟化挙動を適切に表現しており, ひずみ速度の影響も妥当なものとなっている。図-3~5は, 損傷率 r の定義式に含まれるパラメータ m, h, r_u のひずみ軟化挙動に与える影響を示したものである。大きなひずみ域での応答は r_u の値に極めて敏感であることがわかる。

参考文献(1) Leroueil et al. (1988): Study of the validity of a $\sigma_v - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$ model in situ condition, S. & E., Vol. 28, No. 3, pp13-25 (2) Kabbaj et al. (1988): In situ and laboratory stress-strain relationships, Geotech., 38, No.1, pp83-100 (3) Frantziskonis et al. (1987): Elastoplastic model with damage for strain softening geomaterials, Acta Mechanica, 68, pp151-170

