自然堆積粘土の圧密降伏特性と弾粘塑性モデル化

大阪大学工学部　正　員　阿　部　信　晴
大阪大学工学部　学生員○隅　水　友　顕

1．まえがき

自然堆積粘土の圧密挙動に強い関心が寄せられており，一次元圧密の構成モデルに関する研究においても時間−負荷履歴をもつ擬似過圧密粘土の構成特性の評価とそのモデル化が重要なテーマとなっている。著者らは自然堆積粘土の圧密降伏挙動を適切に表現するためにクリープポテンシャル理論に基づく弾粘塑性モデルを提案し，その適用性を検討している。さらにモデル特性とパラメータの関連などを明らかにするため，間隙水の存在を考慮しない非連成の解析解を求め，その定ひずみ速度圧密試験への適用性を検討している。

2．一次元クリープポテンシャルモデル(CPM)

クリープポテンシャル理論では，負荷・除荷に関わらずすべての応力状態において弾性ひずみとクリープ(粘塑性)ひずみが常に存在するという基本仮定に基づいて弾粘塑性モデルが定式化される。時間−負荷履歴効果を表現するために履歴変数を導入した粘土の一次元CPMは以下に示す２つのversionで提案されている。

①一次元CPM(creep strain version)

$$\dot{\varepsilon}_z^c = \dot{\varepsilon}_{zr}^c \left\langle \exp\left(\frac{f^p - h - \varepsilon_z^c}{\mu}\right) - \delta \right\rangle \quad (1),\qquad 塑性鉛直ひずみ：f^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0}\ln\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}}\right) \quad (2)$$

ここに，σ_z，σ_{z0}は有効応力とその初期値，ε_z^c，$\dot{\varepsilon}_z^c$はそれぞれクリープ(粘塑性)ひずみとその速度，λ，κはそれぞれ圧縮指数，再圧縮指数，e_0は初期間隙比，$\dot{\varepsilon}_{zr}^c$は基準粘性ひずみ速度，μは二次圧縮係数，δは内部拘束ひずみ速度，hは履歴変数，$\langle\cdot\rangle$はMacaulayの括弧である。

②一次元CPM(total strain version)

$$\dot{\varepsilon}_z^c = \dot{\varepsilon}_{zr}^c \left\langle \exp\left(\frac{f^{ep} - h - \varepsilon_z}{\mu}\right) - \delta \right\rangle \quad (3),\qquad 弾塑性鉛直ひずみ：f^{ep} = \frac{\lambda}{1 + e_0}\ln\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}}\right) \quad (4)$$

ここに，ε_zは鉛直ひずみである。

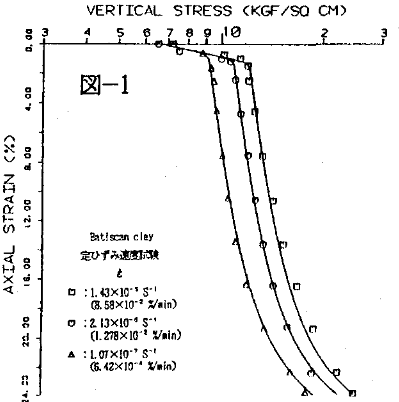
3．一次元CPMによる解析例

一次元CPMの２つのversionについて有限要素プログラム(ELVIS: Elasto-viscoplastic finite element codes)を作成し，自然堆積粘土の定ひずみ速度圧密試験を解析してその適用性を検討した。

図−1は，Batiscan粘土の定ひずみ速度圧密試験結果と一次元CPM(creep strain version)による解析結果を示したものである。モデルのパラメータはひずみ速度6.42×10⁻⁴%/minの実験結果から求められている。また，Batiscan粘土の圧密降伏後の圧縮特性及び二次圧縮特性のひずみ依存性を考慮するため，圧縮指数λ，二次圧縮係数μをそれぞれ次式により評価している。

$$\lambda = \lambda_0 \exp(-s\langle\varepsilon_z - k\rangle^m) \qquad \mu = \mu_0 \exp(-s\langle\varepsilon_z - k\rangle^m) \qquad (5)$$

図から明らかなように，一次元CPMによって圧密降伏挙動のひずみ速度依存性がよく表現されている。



4．定ひずみ速度圧縮における応力−ひずみ−時間関係

一次元CPM(total strain version)では，間隙水は存在しないと仮定すれば解析解が得られる。変形条件

Nobuharu Abe, Tomoaki Sumizu

$\dot{\varepsilon}_z=\overline{\dot{\varepsilon}_z}$ (一定)[$\varepsilon_z=\overline{\dot{\varepsilon}_z}\,t$]，初期条件t=0，$\sigma_z=\sigma_{z0}$によって得られる定ひずみ速度圧縮時の応力－ひずみ－時間関係は次のように表される。

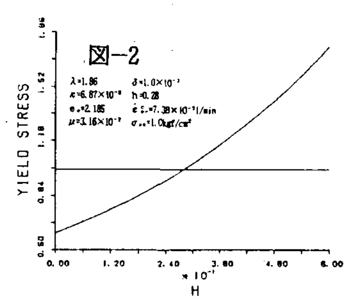
$$\sigma_z=\sigma_{z0}\left[\exp\left(-\frac{\varepsilon_z}{\mu}\right)\left[\frac{\alpha}{\beta}\exp\left(-\frac{h}{\mu}\right)\left\{1-\exp\left(-\frac{\lambda}{\kappa}\frac{\beta}{\mu}\varepsilon_z\right)\right\}+\exp\left(-\frac{\lambda}{\kappa}\frac{\beta}{\mu}\varepsilon_z\right)\right]\right]^{-\frac{\mu(1+e_0)}{\lambda}} \tag{6}$$

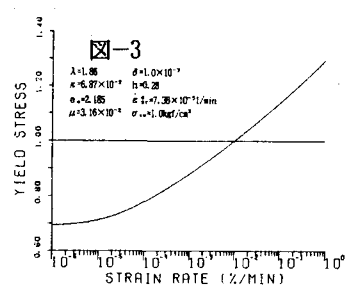
ここに，$\alpha=\dfrac{\dot{\varepsilon}^{c}_{zr}}{\overline{\dot{\varepsilon}_z}}$ ，$\beta=1-\dfrac{\kappa}{\lambda}+\alpha\delta$ (7)

(6)式の両辺の対数をとり，鉛直ひずみε_zで微分すると応力～ひずみ曲線の勾配$d\varepsilon_z/d\ln\sigma_z$が得られる。いま，過圧密領域と正規圧密領域における勾配の平均勾配［$(\lambda+\kappa)/2(1+e_0)$］のひずみの点で降伏が生じるとすると，定ひずみ速度圧縮時の降伏応力σ_{zy}は次のように求められる。

$$\sigma_{zy}=\sigma_{z0}\left[2\left\{\frac{\alpha\exp\left(-\frac{h}{\mu}\right)}{1-\frac{\kappa}{\lambda}+2\alpha\delta}\right\}^{\frac{1+\alpha\delta}{1-\frac{\kappa}{\lambda}+\alpha\delta}}\left\{\frac{\alpha\exp\left(-\frac{h}{\mu}\right)}{1-\frac{\kappa}{\lambda}+\alpha\delta-\alpha\exp\left(-\frac{h}{\mu}\right)}\right\}^{\frac{\frac{\kappa}{\lambda}}{1-\frac{\kappa}{\lambda}+\alpha\delta}}\right]^{-\frac{\mu(1+e_0)}{\lambda}} \tag{8}$$

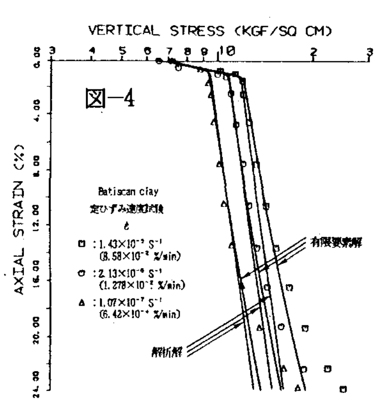
図－2，3は，(8)式による降伏応力σ_{zy}と履歴変数h，ひずみ速度$\overline{\dot{\varepsilon}_z}$ の関係を示したものである。降伏応力の堆積履歴依存性，ひずみ速度依存性が表現されていることがわかる。





5．解析解による計算例

図－4は，Batiscan粘土の定ひずみ速度圧密試験結果と解析解（(6)式）による計算結果を示したものである。パラメータは試験結果($\overline{\dot{\varepsilon}_z}=6.42\times10^{-4}$%/minの結果)に解析解が一致するように求めている。また，比較のために有限要素解も示している(モデルは一次元CPM(total strain version)，パラメータは解析解と同じ)。図からひずみ速度が小さい場合，解析解と有限要素解の差が大きくなるのは圧密降伏後ひずみがかなり大きくなってからであるが，ひずみ速度が大きい場合は解析解は小さい圧密降伏応力を与える。



6．まとめ

クリープポテンシャル理論に基づく一次元モデルによって顕著な降伏特性を示す自然堆積粘土の一次元圧密挙動を表現することができることを明らかにするとともに，本モデル(total strain version)の間隙水の存在を考慮しない非連成の解析解を求めた。自然堆積粘土の定ひずみ速度圧密試験では，ひずみ速度が小さい場合，圧密降伏するまで間隙水圧の影響は比較的小さいので，解析解は履歴変数hなどの推定に有効に利用できると考えている。

【参考文献】

①Leroueil et al.:Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, Geotechnique. 35, No. 2, pp. 159-180, 1985