

大阪大学工学部 正 会 員 阿部 信晴

大阪大学工学部 学生会員 ○ 小島 肇

1. まえがき

粘土の圧密挙動はひずみ速度とともに温度の影響を強く受ける。したがって、粘土地盤の熱環境シミュレーションのためには、これら二つの依存性を考慮しうる構成モデルが不可欠である。本報告では流動曲面履歴変数モデルに温度依存性を導入した熱弾粘塑性一次元圧密モデルが提案されている。また、その適用性が定ひずみ速度圧密実験結果にもとづいて検討されている。

2. 粘土の熱弾粘塑性モデル

提案する粘土の熱弾粘塑性一次元圧密モデルの概要は次のとおりである。

1) 熱弾粘塑性モデルの流動関数は一般的に次式で表される。

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_{zp} t \right) \right\} \exp \left(\frac{f-h}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_{zp} t \right) \right] - \varepsilon_z^{vp} = 0 \quad (1) \quad f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \ln \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{zo}} \right) \quad (2)$$

ここに、 σ_z は有効応力、 ε_z^{vp} は粘塑性ひずみ、 h は履歴変数、 t は時間変数である。

2) 全ひずみは弾性ひずみと粘塑性ひずみの和で与えられる。

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^e + \varepsilon_z^{vp} = \left[\frac{\kappa(T)}{1 + e_o} \ln \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{zo}} \right) + \alpha(T)(T - T_o) \right] + \varepsilon_z^{vp} \quad (3)$$

ここに、 T 、 T_o は温度及び基準温度、 $\kappa(T)$ は温度依存性再圧縮指数、 $\alpha(T)$ は線膨張係数である。

3) 応力速度-ひずみ速度関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_z &= \left[\frac{\kappa}{1 + e_o} \frac{1}{\sigma_z} + \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \right]^{-1} \left[\dot{\varepsilon}_z - \left[\beta + \left(\sum \frac{\partial F}{\partial s_n} \frac{\partial s_n}{\partial T} + \frac{\partial F}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial T} \right) \right] \dot{T} - \frac{\partial F}{\partial T} \right] \\ &= D^{levp} (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_z^e - \dot{\varepsilon}_z^c) \\ \beta &= \frac{\partial \kappa}{\partial T} \frac{1}{1 + e_o} \ln \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{zo}} \right) + \alpha + \frac{\partial \alpha}{\partial T} (T - T_o) \end{aligned} \quad (4) \quad (5)$$

ここに、 D^{levp} は熱弾粘塑性剛性係数、 $\dot{\varepsilon}_z^e$ は熱ひずみ速度、 $\dot{\varepsilon}_z^c$ はクリープひずみ速度、 s_n は流動関数に含まれる温度依存性のパラメータである。

4) 熱軟化・熱硬化を考慮するために履歴変数に温度履歴項（熱影響関数 $H_{th}(T)$ ）を導入する。

$$h = h_{vs} + H_{th}(T) \quad (6)$$

ここに、 h_{vs} は着目粘性ひずみによる履歴項であり、次式で与えられる。

$$h_{vs} = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \left\{ 1 - \delta \exp \left(\frac{-f + h_o}{\mu} \right) \right\} \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_{zp} t \right) \right\} \right] \quad (7)$$

熱影響関数は圧密降伏応力の温度依存性に着目して決定する。図-1は Berthierville clay, Louiseville clay, St-Jean-Vianney clay の圧密降伏応力の温度依存性を基準温度を 5℃として示したものである。圧密降伏応力の温度依存性を図中の実線で近似すれば次式の熱影響関数が求められる。

$$H_{th}(T) = A \ln \left(\frac{T}{T_o} \right) \quad (8)$$

5) 弾性ひずみと粘塑性ひずみは常に存在するものと仮定する。したがって、このモデルは負荷-除荷基準を必要としない。また、粘土の降伏挙動は粘塑性応答の中で弾粘塑性遷移過程として表現される。

6) 粘土の粘塑性硬化が進んで履歴変数 h が大きくなり、次式を満足するとき粘土は弾性核(elastic nucleus)に入ったものとする。弾性核内部では粘土は弾性挙動する。

$$h > -\mu \ln \delta \quad (9)$$

3. 数値解析例

1) 定ひずみ速度圧密試験

表-1

κ	λ_0	k_0	c_k	$\bar{e}_{co}$	μ_0	$\bar{\sigma}$	
	(cm/min)			(mm ⁻¹)			
0.025	0.975	1.8×10^{-5}	0.77	1.0×10^{-1}	2.0×10^{-2}	1.0×10^{-5}	
e_0	$\sigma_{(0)}$	h_0	A	B	c	a	k
	(kPa)						
1.7	10.0	0.665	-0.0345	0.0325	5.15	1.00	0

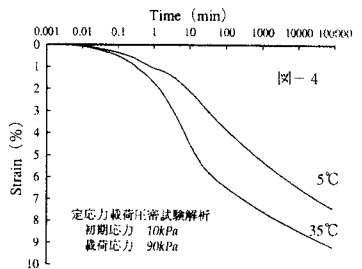
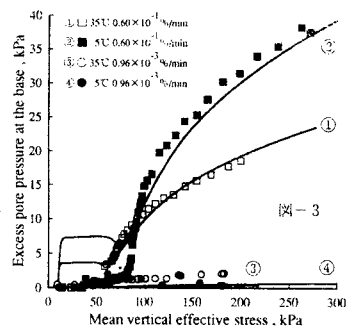
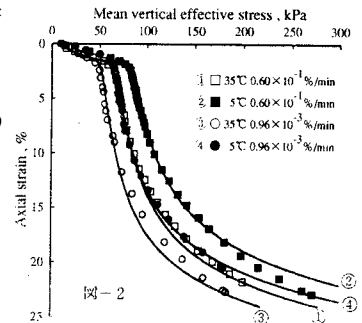
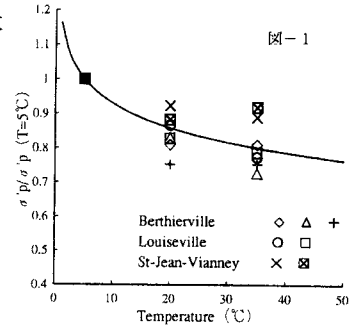


図-2, 3はBoudaliら(Boudali et al., 1994)によって実施された定ひずみ速度圧密試験の平均有効応力-ひずみ関係, 平均有効応力-間隙水圧関係について解析結果と実験結果を示したものである。異なった2つの温度(5℃, 35℃)と2種類のひずみ速度($0.60 \times 10^{-1} \%$ /min, $0.96 \times 10^{-3} \%$ /min)の組合せで4ケースの実験が行われている。解析に用いられた材料定数および基準温度5℃での初期履歴変数 h_0 はケース②(5℃, $0.60 \times 10^{-1} \%$ /min)の平均有効応力-ひずみ関係から, 熱影響関数の係数Aはケース①(35℃, $0.60 \times 10^{-1} \%$ /min)の平均有効応力-ひずみ関係(圧密降伏応力)から求めている。また, 透水係数は間隙比と温度の関数として(10)式で評価している。平均有効応力-ひずみ曲線の非線形性(曲がり)は次式のひずみ依存性の圧縮指数, 二次圧縮係数を用いて表現している。

$$k(e, T) = k(e) \{1.0 + B(T - T_0)\} \quad (10)$$

$$\lambda = \lambda_0 \exp(-c(\varepsilon_z - k)^a) \quad (11) \quad \mu = \mu_0 \exp(-c(\varepsilon_z - k)^a) \quad (12)$$

ケース②(5℃, $0.60 \times 10^{-1} \%$ /min)の実験結果に対する fitting によってパラメータを決定している。透水係数以外の材料パラメータは温度に依存しないものとしている。材料パラメータは表-1にまとめられている。ケース③, ケース④の解析結果はこれらのパラメータを用いて計算したものである。

図-2から明らかなように実験結果ではひずみ速度が速いほど, 温度が低いほど, 圧密降伏応力は大きくなっている。そして, ケース①(35℃, $0.60 \times 10^{-1} \%$ /min)とケース④(5℃, $0.96 \times 10^{-3} \%$ /min)の平均有効応力-ひずみ関係が一致している。解析結果はこれら実験結果の傾向をよく説明している。特に解析結果においてもケース①とケース④の圧密降伏応力は一致を示しており, 提案モデルによってひずみ速度と温度の等価的な効果を表現できることがわかる。図-3の平均有効応力-間隙水圧関係から, 供試体底面での間隙水圧はひずみ速度の速いケースでは圧密降伏後に急激に増加するが, ひずみ速度の遅いケースではほとんど発生しないことがわかる。しかし, 解析結果では, 実験結果と異なりひずみ速度の速いケースにおいて圧密降伏前に間隙水圧が発生している。これは自然堆積粘土の過圧密領域での圧縮性・透水性の評価に起因するものと思われる。

2) 定応力載荷圧密試験

定ひずみ速度圧密試験にもとづいて決定したパラメータを用いて定応力載荷圧密試験の解析を行った。図-4は5℃, 35℃での鉛直ひずみ-時間関係である。温度が高くなると圧密降伏応力が小さくなり, ひずみが増加することが適切に表現されている。

4. まとめ

流動曲面履歴変数モデルを拡張することにより粘土の熱弾粘塑性一次元圧密モデルを提案し, その適用性を検討した。温度変化時の間隙比の変化を無視して温度の異なる供試体の初期間隙比を等しいと仮定しているが, 解析結果は実験挙動をよく説明しており, 提案モデルの適用性が示された。

【参考文献】

- 1) Boudali, M., Leroueil, S. and Srinivasa Murthy, B. R. (1994): Viscous behaviour of natural clays, The 13th ICSMFE, Vol.1, pp411-416.
- 2) 岡・八嶋他(1995): 粘土の熱弾粘塑性構成式とその適用性について, 第30回土質工学研究発表会発表講演集, pp1111-1112