

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 富 江 洋

大阪大学工学部 学生会員 ○ 寺 西 常 顕

1. まえがき

飽和粘土の高温加熱圧密が応力・浸透・熱移動が相互に関係する連成現象であるため、圧密挙動に与える温度の影響のみを評価することがむずかしく、粘土の温度依存性挙動のモデル化はこれまで十分には行われていない。本報告では実験結果にもとづく温度依存特性を考慮した粘土の熱弾粘塑性圧密モデルを提案し、熱連成一次元圧密解析法による高温加熱圧密試験の解析を行い、その適用性について検討している。

2. 粘土の温度依存性圧密挙動とそのモデル化

1) 一次元圧密された飽和粘土を正規圧密状態で加熱すると圧縮挙動を示し、正の間隙水圧が発生する。その後冷却すると膨潤し、負の間隙水圧が発生する。すなわち、正規圧密粘土の土粒子骨格は加熱によって収縮し、冷却によって膨張する。図-1は正規圧密粘土の高温加熱圧密試験における加熱時の圧縮量(間隙比の減少量)と温度の関係(上ら, 1996)を示したものである。圧縮量(間隙比の減少量)と温度は直線関係を示し、この関係は圧密応力に依存しない。加熱圧密時に発生する間隙水圧が小さい場合、粘土の熱弾塑性ひずみは次式で評価することができる。

$$\Delta e_z^p = \frac{\lambda_T}{1+e_0} (T - T_0) \quad (1)$$

2) 一方、過圧密粘土の高温加熱圧密時の挙動は過圧密状態(過圧密比)、すなわち有効応力状態に依存する。過圧密比が小さいときは圧縮し、過圧密比が大きくなると膨潤する。図-2は過圧密粘土についての実験結果(Towhata et al., 1993)であるが、過圧密比が約 1.7 以上になると過圧密粘土の土粒子骨格は加熱によって膨張すること、加熱による膨張量(間隙比の増加量)と温度は直線関係にあることがわかる。熱膨張係数(間隙比の増加量-温度関係の直線の勾配)は過圧密状態(過圧密比)に依存するが、提案するモデル化では擬似過圧密粘土への適用を考慮して熱膨張係数を履歴変数の関数として次式で与える。

$$\Delta e_z^e = \frac{\kappa_{T_0}}{1+e_0} (T - T_0) - \frac{\kappa_{T_0}}{1+e_0} \left(\frac{h}{\bar{h}} \right) (T - T_0) \quad (2)$$

$\langle \cdot \rangle$ はMacauley bracketであり、(2)式の右辺第2項は加熱時のみ発生する膨張ひずみである。加熱時の熱弾性ひずみは、履歴変数の小さい正規圧密状態では圧縮ひずみであるが、過圧密が進んで履歴変数が $\bar{h}$ より大きくなると膨張ひずみとなる。 κ_{T_0} は $h=0$ のときの κ_T の値であり、 $\bar{h}$ は $\kappa_T=0$ のときの h の値である。温度変化に伴って発生する熱弾性ひずみは次式で定義する。

$$\Delta e_z^p = \frac{\lambda_T - \kappa_{T_0}}{1+e_0} (T - T_0) \quad (3)$$

3) 粘土の熱弾粘塑性圧密モデル

熱的負荷によって熱ひずみが発生し、粘土のひずみは有効応力の変

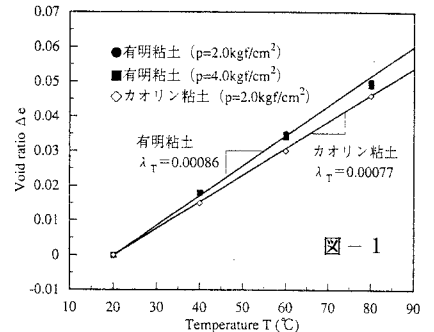


図-1

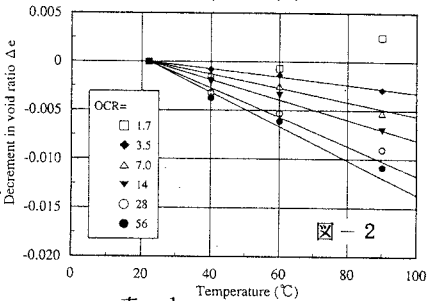


表-1

圧縮指数	λ	0.165
膨潤指数	κ	0.017
初期履歴変数	h_0	0.117
初期間隙比	e_0	1.437
初期間隙率	n_0	0.590
初期透水係数	k_0 (cm/min)	9.8×10^{-6}
透水性変化指数	C_t	0.8
基準ひずみ速度	$\dot{\epsilon}_v^*$ (min ⁻¹)	8.0×10^{-4}
二次圧縮指数	μ	1.43×10^{-2}
内部拘束ひずみ速度	δ	1.0×10^{-5}
熱圧縮係数	λ_T	7.7×10^{-4}
熱膨張係数	κ_T	2.3×10^{-5}
履歴変数基準値	$\bar{h}$	3.600×10^3
土粒子の密度	ρ_s (kg/cm ³)	2.65×10^3
間隙水の密度	ρ_w (kg/cm ³)	1.0×10^3
土粒子の熱膨張係数	α_s (°C ⁻¹)	5.0×10^{-6}
間隙水の基準熱膨張係数	α_w (°C ⁻¹)	2.1×10^{-4}
土粒子の熱伝導係数	K_s (kcal/cm/min/°C)	3.0×10^{-4}
間隙水の熱伝導係数	K_w (kcal/cm/min/°C)	8.4×10^{-5}
土粒子の比熱	C_s (kcal/kg/°C)	0.25
間隙水の比熱	C_w (kcal/kg/°C)	1.0
熱透水性変化係数	A	4.731×10^{-4}

化による力学ひずみと熱ひずみの和で与えられるものとし、力学ひずみは温度に、熱ひずみは有効応力に依存しないと仮定すれば、提案モデルの弾性ひずみ、塑性ひずみはそれぞれ次式で与えられる。

$$\varepsilon_x^e = m_x \varepsilon_x^p + a_x \varepsilon_x^t = \frac{\kappa}{1+e_0} \ln \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_m} \right) + \left[\frac{K_{Te}}{1+e_0} (T - T_0) - \frac{K_{Te}}{1+e_0} \left(\frac{h}{h_0} \right) (T - T_0) \right] \quad (4)$$

$$\varepsilon_x^p = m_x \varepsilon_x^p + a_x \varepsilon_x^t = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \ln \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_m} \right) + \frac{\lambda_T - K_{Te}}{1+e_0} (T - T_0) \quad (5)$$

流動関数 F 、ひずみ関数 f 、履歴変数 h は(6)、(7)、(8) 式で与える。

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_x^p t \right) \right\} \exp \left(\frac{f - h_0}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_x^p t \right) \right] - \varepsilon_x^p = 0 \quad (6)$$

$$f = \varepsilon_x^p = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \ln \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_m} \right) + \frac{\lambda_T - K_{Te}}{1+e_0} (T - T_0) \quad (7)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \left[1 - \delta \exp \left(-\frac{f + h_0}{\mu} \right) \right] \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_x^p t \right) \right\} \right] + H_A \quad (8)$$

ここに、 H_A はひずみに依らない温度の影響を表す熱影響関数である。

3. 熱連成一次元圧密解析法

解析は有限要素法による熱連成一次元圧密解析法により行っている。応力・浸透・熱移動連成問題（一次元問題）に対する支配方程式を仮想仕事の原理と差分法により離散化し、各時間ステップごとの節点変位増分 Δd 、間隙水圧 u 、温度 T を逐次求めている。支配方程式中のパラメータは以下のように評価している。

1) 粘土の熱膨張係数、熱伝導係数、熱容量はそれぞれ次式で与える。 n は間隙率である。

$$\bar{a} = (1-n)a_s + na_w \quad (9) \quad \bar{K} = (1-n)K_s + nK_w \quad (10)$$

$$\bar{\rho}C = (1-n)\rho_s C_s + n\rho_w C_w \quad (11)$$

2) 間隙水の熱膨張係数は温度に、透水係数は間隙比と温度に依存する。 T_0 は基準温度である。

$$a_w(T) = a_{w,T-T_0} + B(T - T_0) \quad (12) \quad k_i(e, T) = k_w 10^{\left(\frac{e - e_0}{C_k} \right)} [1 + A(T - T_0)] \quad (13)$$

4. 高温加熱圧密試験の解析

実験は上ら(上ら, 1996)によって実施されたものであり、二次圧密時に高温加熱されたカオリン粘土(厚さ 2cm、1.0 kgf/cm² で予圧密、20℃、上下面排水)に漸増荷重載荷試験(荷重増分 0.1 kgf/cm²、載荷時間間隔 10 分)が行われている。図-3 は載荷・高温加熱時(圧密応力 1.0 kgf/cm² を載荷し、1 時間後高温加熱(40℃、60℃、80℃)し、高温のまま 24 時間放置)の間隙比-時間関係について解析結果と実験結果を示したものである。解析に用いたパラメータを表-1 に示す。加熱により圧密が促進され、間隙比が急激に減少するが、温度が一定になった後の圧密速度は温度によらずほぼ一定の値となることからわかる。解析結果はこれら実験結果とをよく一致している。

図-4、図-5 は温度を高温一定に保った場合と高温から 20℃ に冷却した場合の漸増荷重載荷試験結果である。高温のまま漸増荷重載荷試験を行うと間隙比-圧密圧力曲線は加熱時の間隙比減少量だけ下方へ平行移動し、圧密降伏応力は変化しない。冷却後、漸増荷重載荷試験を行うと間隙比-圧密圧力曲線は 20℃ 一定の曲線に漸近する。すなわち、温度差が大きいほど圧密降伏応力は大きくなる。解析結果はこれら実験挙動をよく説明している。

5. まとめ

提案する熱弾粘塑性圧密モデルによって粘土の高温加熱時挙動、温度負荷履歴による粘土の擬似過圧密化を説明することができる。

