

Ⅲ-A207

粘土の熱弾粘塑性モデルとその適用性

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

粘土の力学挙動は温度の影響を強く受けるが、同時にひずみ速度の影響も受ける。また、高温環境下での飽和粘土の圧密は応力・間隙水の流れ・熱移動が相互に関連する連成挙動である。このため、その挙動予測は粘土の温度依存特性と時間依存特性の両者を考慮しうる構成モデルを用いた応力・浸透・熱連成解析法によらなければならない。本報告では流動曲面履歴変数理論にもとづく熱弾粘塑性一次元圧密モデルを提案し、高温加熱圧密試験の連成解析によりその適用性を検討している。

2. 流動曲面履歴変数理論にもとづく粘土の熱弾粘塑性モデル

提案する熱弾粘塑性モデルの概要は次のとおりである。

1) ひずみ速度は弾性ひずみ速度と粘塑性ひずみ速度の和で与える。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

2) 弾性ひずみ速度は有効応力による力学弾性ひずみ速度と温度変化による熱弾性ひずみ速度の和で与える。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^e = C_{ijkl}(\sigma_{mn}, T, h) \dot{\sigma}_m + L_{ij}(\sigma_{mn}, T, h) \dot{T} \quad (2)$$

σ_{ij} は有効応力、 T は温度、 h は履歴変数である。 C_{ijkl} は温度依存性弾性構成マトリックス、 L_{ij} は熱膨張関数である。

3) 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。

$$F = F(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p, T, h, \xi, t) = F(f, \epsilon_{ij}^p, h, \xi, t) = 0 \quad (3)$$

$$f = v^p = f(\sigma_{ij}, T) \quad (4)$$

ϵ_{ij}^p は粘塑性ひずみ、 ξ は硬化パラメータ、 t は時間、 f は基準ひずみ関数、 v^p は塑性体積ひずみである。流動関数はクリープ特性式から、また粘塑性ひずみ速度は粘塑性流動則から求められる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

4) 適応条件から応力速度・ひずみ速度関係が求められる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = \left[D_{ijkl} - \frac{D_{ijmn} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{op}} D_{opkl}}{H + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{qr}} D_{qrst} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{st}}} \right] \dot{\epsilon}_{ij} - \left[L_{ij} + \frac{\partial F}{\partial T} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right] \dot{T} - \frac{\partial F}{\partial h} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \dot{h} \quad (6)$$

$$= D_{ijkl}^{thep} (\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^e - \dot{\epsilon}_{ij}^e)$$

$$H = \left[\frac{\partial F}{\partial \epsilon_{ij}^p} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial F}{\partial \xi} \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \right) \right] \quad (7)$$

D_{ijkl}^{thep} は熱弾粘塑性構成マトリックス、 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ は熱ひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ はクリープひずみ速度である。

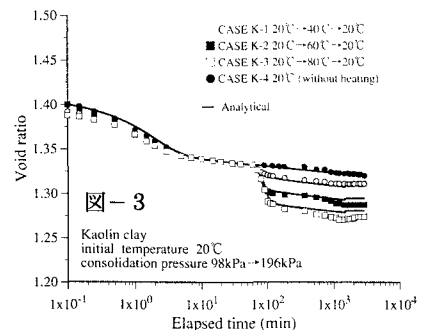
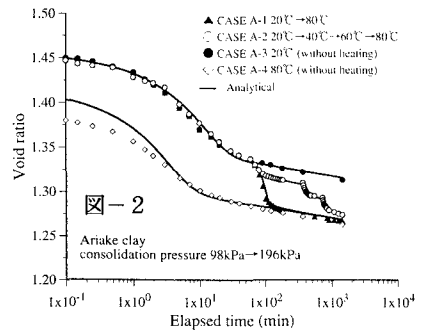
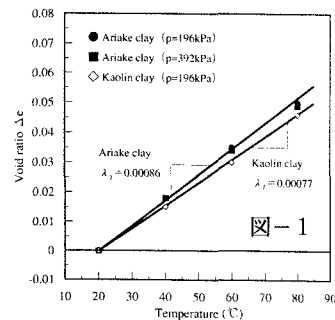
5) 履歴変数は粘性ひずみによる履歴項 h_{vs} とは熱ひずみに依らない温度の影響を表す熱影響関数 $H_{th}(T)$ の和として定義する。

$$h = h_{vs} + H_{th}(T) \quad (8)$$

6) 弾性ひずみと粘塑性ひずみは常に存在するものとし、粘土の降

キーワード：温度効果、時間依存性、粘土、熱弾粘塑性モデル、熱連成圧密解析

連絡先：吹田山田丘2-1, TEL 06-879-7624, FAX 06-879-7629



伏挙動は粘塑性応答における弾粘塑性遷移過程として表現される。

3. 熱弾粘塑性一次元圧密モデル

温度変化による粘土の体積変化特性は次のように要約される。

1) 正規圧密状態で加熱すると粘土(土粒子骨格)は圧縮し、その後の冷却により膨張する。図-1は正規圧密粘土の高温加熱圧密試験における間隙比の減少量と温度の関係である(上ら, 1996)。両者は直線関係を示し、この関係は圧密応力に依存しない。

$$\Delta e = \lambda_T (T - T_0) \quad (9)$$

λ_T は熱圧縮係数である。

2) 過圧密粘土の体積変化挙動は過圧密比に依存する。すなわち、過圧密比が小さいと圧縮し、過圧密比が大きくなると膨張する。膨張量(間隙比の増加量)と温度は直線関係にあり(Towhata et al., 1993), 熱膨張係数(間隙比の増加量~温度関係の直線の勾配)は過圧密比の関数となる。過圧密粘土の膨張量は次式で与えられる。

$$\Delta e = \kappa_T (T - T_0) = \kappa_{T_0} \left(1 - \frac{\log n}{\log \bar{n}} \right) (T - T_0) \quad (10)$$

κ_T , κ_{T_0} は熱膨張係数, 正規圧密状態での熱膨張係数の値である。 n , $\bar{n}$ は過圧密比, $\kappa_T = 0$ のときの過圧密比の値である。

これらの体積変化特性にもとづいて熱弾粘塑性一次元圧密モデルは以下のように導かれる。

1) 熱的負荷によって熱ひずみが発生し、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し、弾性ひずみ、基準ひずみ関数をそれぞれ次式で与える。

$$\epsilon_s^e = \epsilon_{s0}^e + \epsilon_{sh}^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \ln \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}} \right) + \frac{\kappa_{T_0}}{1+e_0} (T - T_0) - \frac{\kappa_{T_0}}{1+e_0} \left(\frac{h}{h_0} \right) (T - T_0) \quad (11) \quad f = \epsilon_s^p = \epsilon_{s0}^p + \epsilon_{sh}^p = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \ln \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}} \right) + \frac{\lambda_T - \kappa_{T_0}}{1+e_0} (T - T_0) \quad (12)$$

擬似過圧密を考慮するため、(11)式において熱膨張係数は履歴変数の関数と仮定する。

2) 粘性ひずみに関する次式のクリープ特性式から流動関数、履歴変数が導かれる。

$$\frac{\dot{\epsilon}_s^v + \dot{h}_0}{\mu} = -\ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_s^v}{\dot{\epsilon}_s^v} + \delta \right) \quad (13) \quad F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_s^v t \right) \right] \exp \left(\frac{f - h_0}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_s^v t \right) \right] - \epsilon_s^v = 0 \quad (14)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \left[1 - \delta \exp \left(-\frac{f + h_0}{\mu} \right) \right] \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\epsilon}_s^v t \right) \right] \right] + H_0 \quad (15)$$

4. 数値解析例

提案モデルの適用性を高温加熱圧密試験結果(上ら, 1996)にもとづいて検討する。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われている。図-2は有明粘土を二次圧密時に加熱した場合の間隙比-時間関係であり、図-3はカオリン粘土を二次圧密時に加熱した後、さらに冷却した場合の間隙比-時間関係である。両図において解析結果は実験結果と良好な対応を示している。図-4, 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試験結果である。高温のまま試験を行うと間隙比-圧密圧力曲線は高温下での圧密時の間隙比減少量だけ下方に平行移動し、圧密降伏応力は変化しない。冷却後に試験を行うと、間隙比-圧密圧力曲線は20℃一定の曲線に漸近し、温度差が大きいほど圧密降伏応力が大きくなる。解析結果はこれら実験挙動を良く説明している。

参考文献

1) 上・藤原・勝村(1996): 二次圧密時に温度効果を受けた粘土の圧密特性, 土木学会論文集, No. 554/Ⅲ-37, pp. 47-55. 2) Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., Seko, I and Ohashi, K. (1993): Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 33, No. 4, pp. 170-183.

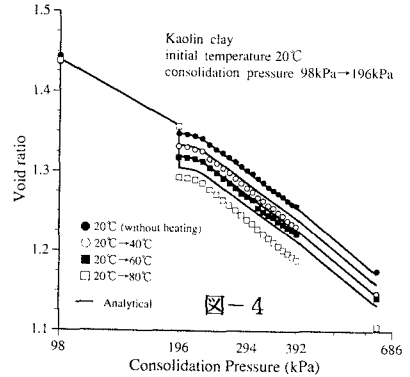


図-4

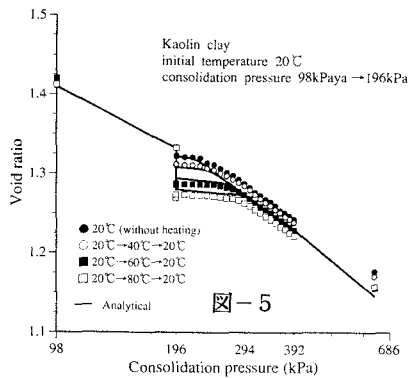


図-5