

京都大学大学院 学会員 ○ 井村雄一
 京都大学大学院 フェロー 岡二三生
 京都大学大学院 学会員 肥後陽介
 京都大学大学院 学会員 金 榮錫

1. はじめに

温度変化による粘土の力学的挙動の変化は地球環境問題、メタンハイドレート生産などのエネルギー問題を通じて注目されている。本報告はこのような問題のための基礎的研究の一部である。温度上昇による粘土の粘性の減少¹⁾、温度上昇に伴う過剰間隙水圧の発生による温度圧密現象 (thermal consolidation) が実験により確認されている²⁾。また、温度圧密現象は核汚染物質の遮断材として用いられている粘土に関連して注目されている。そこで、本研究では変形に伴う温度上昇を考慮し、有限変形理論に基づく熱－水－土連成有限要素法を開発して温度圧密現象のシミュレーションを行った。

2. 構成式と定式化

温度変化を考慮した弾粘塑性構成式は粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ を式 (1)、(2)、(3) のように定義する。この構成式¹⁾では粘塑性パラメータ $C(\theta)$ が温度によって依存し、温度上昇による粘塑性ひずみ速度の増大を表現している。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \langle \Phi_1(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \cdots (1), \quad \Phi_1(F) = C(\theta) \exp \left\{ m' \left(\bar{\eta}_{(0)}^* + \bar{M}_m' \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \cdots (2), \quad \frac{C(\theta)}{C(\theta_r)} = \left[\frac{\theta}{\theta_r} \right]^{\alpha m'} \cdots (3)$$

また、本研究で用いる熱に関する支配方程式は以下のようにエネルギー保存則 (式 (4))、Vardoulakis による内部エネルギーの構成式³⁾ (式 (5))、Fourier の熱伝導の法則 (式 (6)) を用いている。

$$\rho \dot{e} = \sigma'_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} - h_{i,i} \cdots (4), \quad \rho \dot{e} = \rho C \dot{\theta} + \sigma'_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^e \cdots (5), \quad h_i = -k_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \cdots (6)$$

ここで、 F : 超過応力、 f : 動的降伏関数、 $C(\theta)$ 、 m' : 粘塑性パラメータ、 $\bar{\eta}_{(0)}^*$: 相対応力比、 θ : 温度、 θ_r : 基準温度、 $\dot{e}$: 内部エネルギー密度の時間的変化、 C : 比熱、 ρ : 密度、 k_θ : 熱伝導率、 h_i : 熱流束密度ベクトル、添え字 (0) は初期値、 $\langle \Phi_1(F) \rangle = \Phi_1(F) (F \geq 0)$, $= 0 (F < 0)$ 。

支配方程式は、上記に加え、流体相の釣り合い式、固体・流体混合相の釣り合い式である。これと構成式、有効応力の定義を用いて updated-Lagrangian 法により定式化した。

さらに、本解析では温度上昇に伴う過剰間隙水圧の発生を Campanella & Mitchell²⁾ にならい式 (7) で表現した。また、温度上昇に伴い水の粘性が減少することによる透水係数の増大を表現するために Yashima ら¹⁾ にならい式 (8) を用いた。

$$\Delta u = \frac{n \Delta \theta (\alpha_s - \alpha_w) + \alpha_{st} \Delta \theta}{m_v} \cdots (7), \quad k = \frac{K \gamma_w (\theta)}{\mu(\theta)} \cdots (8)$$

$$\mu(\theta) = -0.00046575 \ln(\theta) + 0.00239138, \quad \alpha_w = (139.0 + 6.1 \times \theta) \times 10^{-6}$$

ここで、 $\mu(\theta)$ (kPa・s): 動的粘性係数、 α_s (1/°C): 温度変化による粘土粒子の体積膨張係数、 α_{st} (1/°C): 温度による内部構造変化の物理化学的係数、 α_w (1/°C): 温度変化による水の体積膨張係数。

本研究では以上の式を用いた温度上昇による過剰間隙水圧の発生、透水係数の増大を表現できる熱－水－土連成有限要素法を開発し、温度圧密現象のシミュレーションを行った。

3. 温度圧密のシミュレーション

解析に用いたパラメータを表 1 に、温度圧密での境界条件をを図 1 に示す。図 1 に示したように供試体は一辺 2m の正方形のものを想定し 10 × 10 の 100 要素とした。供試体上端面からの载荷は無しで熱源からの温度伝播のみにより圧密を試みた。また、図 1 にある熱源の温度上昇は図 2 のように与えた。2000 秒ごとに 1 °C ずつ上がり、800000 秒で 60 °C になり、80000 秒以降は熱源の温度は 60 °C で一定とし解析を行った。次に、図 3、図 4、図 5 にはそれぞれ 5000 秒、20000 秒、100000 秒と 960000 秒時の温度分布、間隙水圧分布、変形図を

示す。図3より温度は熱源より徐々に右下方に伝播しているのが確かめられた。図4より、間隙水圧は初期熱源部で発生し、時間が経つにつれ間隙水圧が高い部分は供試体下部に移動し、層状に分布することが分かった。そして、100000秒以降は層状の分布を保ちながら徐々に消散していくことが確認できた。また、図5を見ると、時間が経つにつれ熱源部分から大きな沈下が起きていることが明らかとなった。図6には熱源の節点aにおける沈下量と時間の対数の関係を示した。この図を見ると、10000秒から沈下量が増大し始め、解析が終わった960000秒時では約11.5cm程の大きな沈下が確認できた。この図より、温度圧密現象はまだ収束しておらず、解析を続ければまだ沈下を続けたであろうと考えられる。

5. まとめ

本研究では温度上昇に伴う過剰間隙水圧の発生、透水係数の増大を表現できる熱-水-土連成有限要素法で温度圧密現象のシミュレーションを行った。その結果、温度が熱源から徐々に伝播する様子が確認できた。また、間隙水圧は温度上昇により熱源部付近で発生し、時間がたつと供試体下部から上端面にかけての分布となり、以後その分布を保ちながら消散していく様子が確認できた。さらに、間隙水圧が供試体上端面から消散することによって熱源部付近での沈下が確認できた。本研究では960000秒間解析を行ったが、供試体左上節点の沈下量を見ると、まだ960000秒時でも沈下は収まっていなかった。そのため、今後、解析の時間を960000秒より大きくとりどのくらいの時間で定常状態に至るのかを検討する必要がある。また、本研究では供試体上端面と、熱源部以外は全て断熱境界としたが、実際の地盤は断熱では無いと考えられるため、熱境界条件を変えたケースも検討したい。その他にも節点の固定条件や排水条件といった境界条件の設定を変えた解析を行い、間隙水圧の分布や変形にどのような影響が出るのか検討したい。

表1. 解析に用いたパラメータ

圧縮指数 λ	0.172
膨張指数 κ	0.054
初期間隙比 e_0	0.72
初期圧密応力 σ'_{ms}	392 (kPa)
静止土圧係数 K_0	1.0
粘弾性パラメータ m'	21.5
粘弾性パラメータ $C(\theta_r)$	4.5×10^{-8} (1/s)
破壊応力比 M_f	1.05
せん断弾性係数 G	5500 (kPa)
透水係数 $k = k_x = k_y$	1.54×10^{-8} (m/s)
基準温度 θ_r	20.0 (°C)
比熱 C	0.87 (J/kg · °C)
熱伝導率 k_p	0.14 (W/m · °C)
熱粘弾性パラメータ α	0.15
内部構造パラメータ σ'_{maf}	350.0 (kPa)
内部構造パラメータ β	10.0
材料固有の透水係数 K	1.56×10^{-12} (m ²)
温度による内部構造変化の物理化学的係数 α_{st}	-0.50×10^{-4} (1/°C)
温度による粘土粒子の体積膨張係数 α_s	0.35×10^{-4} (1/°C)

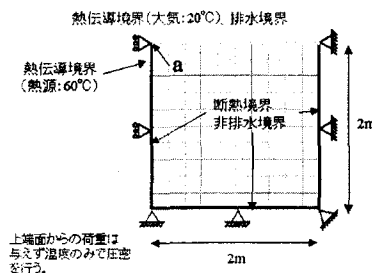


図1 境界条件

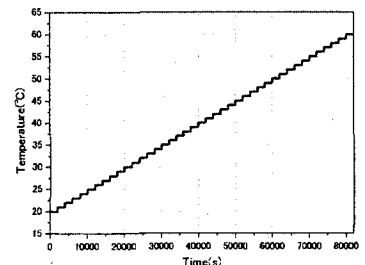


図2 熱源の温度上昇

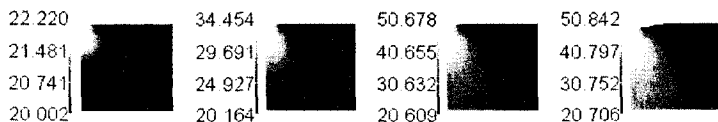


図3 温度分布図 (°C)

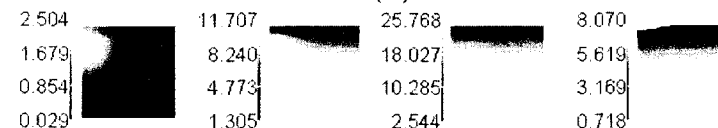


図4 間隙水圧分布図 (kPa)

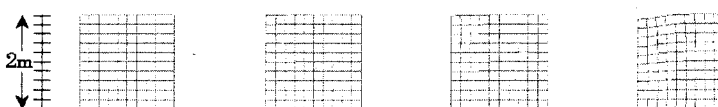


図5 変形図 (m)

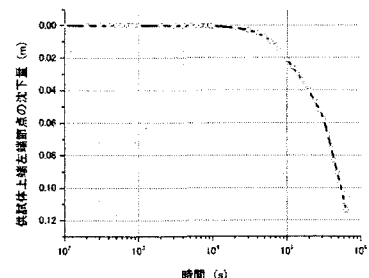


図6 熱源の節点aにおける沈下量

参考文献 1)Yashima, A. et al.,Modelling temperature and strain rate dependent behavior of clays,*Soils and Foundations*, Vol.38, No.2, pp.63-73, 1998. 2)Campanella, R. G. ,Mitchell, J. K.,Influence of temperature variations on soil behavior,*ASCE J. of SMFE*, Vol.94,No. 3, pp709-734, 1968. 3)Vardoulakis, I.,Dynamic thermo-poro-mechanical analysis of catastrophic landslides,*Géotechnique*, 52, No. 3, pp.157-171, 2002.