

Ⅲ-A198 高温発熱体が埋設された飽和粘土地盤の圧密解析

大阪大学大学院 正 会 員 阿部 信晴

大阪大学大学院 学生会員 富江 洋

大阪大学工学部 学生会員 八杉 信

1. **まえがき** 熱変換・蓄熱技術の向上により熱利用の形態が多様化しており、高温物質を取り扱う地下施設あるいは埋設輸送施設が増加している。このため、熱伝導による周辺地盤への影響が問題となっており、熱移動に伴う地盤変形を適切に予測することの必要性が高まっている。著者らは高温加熱圧密試験にもとづき粘土の弾粘塑性圧密モデルを提案し、その適用性を明らかにしてきた。本報告は提案する熱弾粘塑性圧密モデルを用いた熱連成圧密解析を行い、埋設された高温発熱体による飽和粘土地盤の圧密挙動について検討したものである。

2. **熱弾粘塑性モデルと連成圧密解析法** 解析に用いた熱弾粘塑性圧密モデルは流動曲面履歴変数モデルに温度変化によって生じる熱ひずみを導入したものである。このモデルでは熱弾性ひずみは応力・温度・時間履歴に依存するが、熱塑性ひずみは応力状態には依存しないと仮定されている。提案モデルの高温加熱圧密試験に対する適用性については文献^{1),2),3)}を参照されたい。解析は応力の平衡方程式、間隙水の連続方程式、粘土のエネルギー保存則を支配方程式とする熱連成一次元圧密有限要素法により行っている。

3. **解析概要** 飽和粘土地盤は層厚10mであり、深さ4mの位置に発熱体が埋設されている。排水境界条件は地表面が排水、底面が非排水であり、温度境界条件は地表面がニュートン冷却境界（熱伝達率： $2.0 \times 10^{-5} \text{ kcal/cm}^2\text{-min-}^\circ\text{C}$ ）、底面が温度指定境界である。粘土地盤の初期温度は 20°C 一定としている。モデル地盤の圧密履歴は、正規圧密地盤では初期圧密状態（初期圧密応力 3 tf/m^2 +自重）に圧密荷重 6 tf/m^2 を1日で載荷した後、5年間圧密が行われている。過圧密地盤Aは5年間の圧密後、 3 tf/m^2 の荷重を1日で除荷した後、1年間放置したものであり、過圧密地盤Bは 6 tf/m^2 の荷重を除荷した後、1年間放置したものである。それぞれの平均過圧密比は1.29, 1.88である。解析は埋設発熱体の温度を1時間で 20°C から 60°C に上昇させ、その後20年間の圧密計算を行っている。表1は粘土の解析パラメータを、表2は解析条件を示す。

4. **解析結果** 図1は飽和粘土地盤の地表面沈下-時間関係である。埋設発熱体の温度上昇後、約2カ月（ 1×10^5 分）間地表面は隆起し、その後沈下傾向を示す。隆起は加熱による間隙水・土粒子の膨張に、沈下は発生した間隙水圧の消散に起因しており、これらは粘土地盤の熱伝導特性と透水特性に依存する。間隙水圧の消散過程における沈下量は過圧密地盤では小さいが、正規圧密地盤では大きなクリープ沈下が生じることが分かる。図2, 3は地盤内温度の経時変化と分布である。熱移動が定常状態となるのに約2年（ 1×10^6 分）を要する。用いた熱伝達率では大気中への熱放射が比較的大きく、地表面の温度上昇量は 1°C 程度である。図4, 5は地盤内間隙水圧の経時変化と分布を示したものである。

キーワード: 圧密、温度効果、時間効果、熱弾粘塑性、有限要素法

連絡先: 大阪府吹田市山田丘 2-1, TEL 06-6879-7624, FAX 06-879-7629

図1 解析パラメータ

圧縮指数 λ	0.2155
膨張指数 λ_c	0.033
初期間隙比 e_0	1.664
二次圧縮係数 H	3.00×10^{-2}
基準ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_0$ (1/min)	1.0×10^{-2}
内部拘束ひずみ速度 $\dot{\sigma}$	1.0×10^{-2}
初期履歴変数 h_0	0.004
基準透水係数 k_{sp} (cm/min)	6.0×10^{-7}
透水性変化指数 C_α	0.5
熱透水性変化指数 λ	4.7×10^{-7}
熱圧縮指数 α_t	8.0×10^{-4}
熱膨張係数 α_v	2.0×10^{-2}
履歴変数基準値 $\bar{h}$	0.050
土粒子の密度 ρ_s (kg/cm ³)	2.60×10^{-3}
土粒子の比熱 C_s (kcal/kg $\cdot^\circ\text{C}$)	0.25
土粒子の熱膨張係数 α_s (1/ $^\circ\text{C}$)	5.0×10^{-5}
土粒子の熱伝導係数 K_s (kcal/cm $\cdot\text{min}\cdot^\circ\text{C}$)	3.0×10^{-10}
間隙水の密度 ρ_w (kg/cm ³)	1.00×10^{-3}
間隙水の比熱 C_w (kcal/kg $\cdot^\circ\text{C}$)	1.00
間隙水の熱膨張係数 α_w (1/ $^\circ\text{C}$)	2.10×10^{-4}
間隙水の熱伝導係数 K_w (kcal/cm $\cdot\text{min}\cdot^\circ\text{C}$)	8.4×10^{-10}
間隙水の熱膨張性変化指数 B	7.283×10^{-7}

表2 解析条件

	初期圧密 応力	圧密 荷重	除荷 荷重	温度変化
正規圧密地盤	3 tf/m^2	6 tf/m^2	—	$20^\circ\text{C} \rightarrow 60^\circ\text{C}$
過圧密地盤A	3 tf/m^2	6 tf/m^2	3 tf/m^2	$20^\circ\text{C} \rightarrow 60^\circ\text{C}$
過圧密地盤B	3 tf/m^2	6 tf/m^2	6 tf/m^2	$20^\circ\text{C} \rightarrow 60^\circ\text{C}$

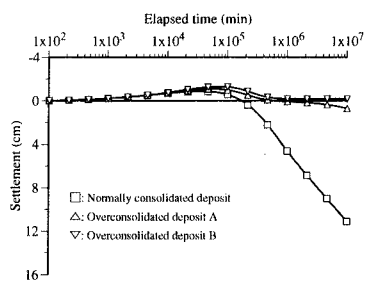


図1 地表面沈下-時間関係

温度上昇に伴う間隙水・土粒子の膨張により正規圧密地盤・過圧密地盤で正の間隙水圧が発生する。その発生量は粘土骨格の熱変形特性に依存しており、正規圧密地盤で大きく、過圧密地盤は小さい。過圧密地盤では過圧密比が大きいほど発生する間隙水圧は小さくなる。図5、6は地盤内ひずみの経時変化と分布である。正規圧密地盤で生じるクリープひずみは地盤内温度分布と関連しており、温度の高いところほどひずみは大きくなる。

5. まとめ 熱弾粘塑性圧密モデルを用いた熱連成圧密解析を行い、埋設された高温発熱体による飽和粘土地盤の圧密挙動について検討した。熱負荷によって正規圧密地盤では大きな沈下を生じるが、過圧密地盤の沈下は小さいことが示された。過圧密化することによって高温環境下での粘土地盤の沈下を低減することができる。

参考文献 1) 阿部・富江・寺西(1998): 粘土の熱弾粘塑性モデルとその適用性, 第 53 回土木学会年次学術講演会, pp.412-413. 2) 阿部・富江・寺西(1998): 粘土の熱弾粘塑性圧密モデル, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.489-490. 3) 阿部・富江・寺西(1998): 粘土の高温圧密挙動の熱弾粘塑性解析, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.491-492.

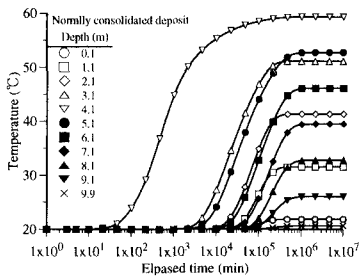


図2 温度-時間関係

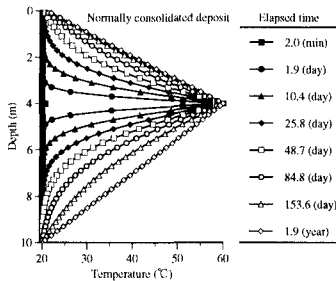


図3 温度分布

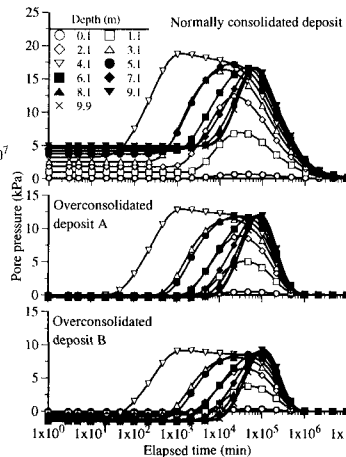


図4 間隙水圧-時間関係

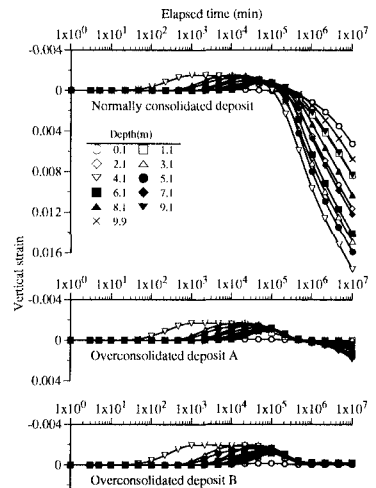


図6 ひずみ-時間関係

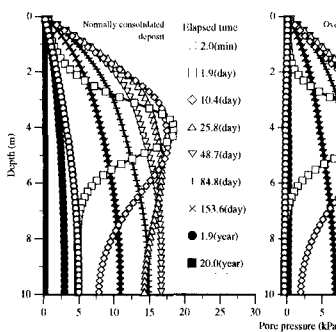


図5 間隙水圧分布

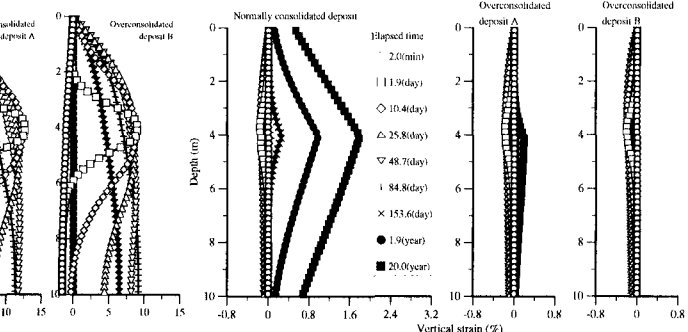


図7 ひずみ分布