

繰返し加熱を受ける粘土地盤の熱連成圧密解析

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 八杉 信
大阪大学大学院 学生会員 ○上本勝広

1. まえがき

エネルギーを有効に利用する方法の一つとして、粘土地盤に蓄熱する土壤蓄熱システムが開発されている。初期の土壤蓄熱システムでは、40 程度の比較的低い温度で加熱していたためヒートポンプが必要であった。しかし、最近では 70 を超える高温での蓄熱が、ヒートポンプを必要としない経済的な方法として注目されている。高温での蓄熱では粘土地盤の沈下と強度の低下が問題となる。本報告では、提案している粘土の熱弾粘塑性モデルと熱連成圧密解析法を用いて粘土地盤中に設けられた土壤蓄熱システムの繰返し加熱解析を行い、蓄熱過程と粘土地盤の圧密沈下挙動について検討している。

2. 土壤蓄熱システムの概要

土壤蓄熱システムとは地盤中に設置したパイプに高温の液体を循環させることにより、地盤を加熱し蓄熱するものである。通常はエネルギーに余裕のある季節に蓄熱し、エネルギーの逼迫する季節に蓄熱した地盤から採熱する。本報告では、加熱（採熱）パイプを壁状に設置する wall type の土壤蓄熱システムを取り上げる。地表から 10 m の深さまで溝を掘り、その中に加熱（採熱）パイプを挿入して埋め戻すことにより壁状の発熱体を構成する。加熱（採熱）パイプは熱交換器・蓄熱器に接続されており、75 の液体を 6 か月間循環させて地盤を加熱し、その後、20 の液体を循環させて、6 か月間採熱する。このサイクルを 5 回（5 年間）繰り返す。

3. 飽和粘土地盤の繰返し加熱解析

解析概要 解析地盤は K_0 正規圧密地盤であり、長さ 10m の wall type の壁状発熱体を解析領域（幅 30m、深さ 20m）の中央に配置した平面ひずみ解析である。図 1 に示すように対称性からその右半分を有限要素に分割している。境界条件は図に示すとおりである。解析は、75 で加熱し続ける長期加熱解析と 6 か月間の加熱（75）と採熱（20）を 5 年間繰返す繰返し加熱解析を行っている。

熱弾粘塑性モデル 粘土の構成モデルとして流動曲面履歴変数モデルを用いており、全ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ は、弾性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 、可逆熱ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{th}$ と粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ の和として与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{th} + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$$

$$= C_{ijkl} \dot{\sigma}_{kl} + \frac{1}{3} \left(\frac{K_T}{1+e_0} \right) \left[1 - S(T-T_0) \left\langle \frac{h}{h_0} \right\rangle \right] \dot{T} \delta_{ij} + \Lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1)$$

応力速度 - ひずみ速度関係は(2)式で与えられる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl}^{thvp} (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^{th} - \dot{\epsilon}_{kl}^{cr})$$

$$= \left[D_{ijkl} - \frac{D_{ijmn} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{op}} D_{opkl}}{H + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{qr}} D_{qrst} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{st}}} \right] \dot{\epsilon}_{kl} - \left(\phi_{kl} + \frac{\frac{\partial F}{\partial T} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}}}{H} \right) \dot{T} - \frac{\frac{\partial F}{\partial t} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}}}{H} \quad (2)$$

$S(x)$ は Haeviside's step function, δ_{ij} は Kronecker's delta, $\langle x \rangle$ は Macauley's bracket である。

K_0 正規圧密粘土の流動関数 F , ひずみ関数 f , 履歴関数 h はそれぞれ以下のように与えられる。

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\nu}_r^v t \right) \right\} \exp \left(\frac{f_i - h_0}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\nu}_r^v t \right) \right]$$

$$- \nu^{vp} = 0 \quad (3)$$

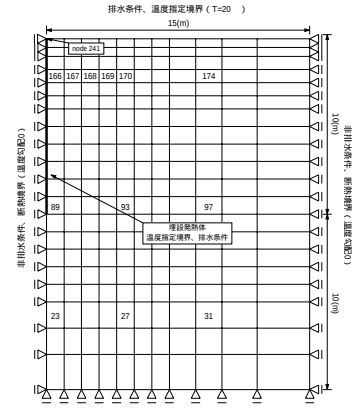


図 1 解析メッシュ図

表 1 解析パラメータ

圧縮指数 λ	0.200
膨潤指数 κ	0.026
ボアソン比 ν	0.333
破壊応力比 M	1.200
初期間隙比 e_0	1.477
二次圧縮係数 μ	2.26×10^{-3}
基準ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{cr}^v$ (1/min)	7.0×10^{-6}
内部拘束ひずみ速度 δ	1.0×10^{-5}
初期履歴変数 h_0	0.001
基準透水係数 (鉛直方向) k_{v0} (cm/min)	2.26×10^{-6}
基準透水係数 (水平方向) k_{h0} (cm/min)	2.26×10^{-6}
透水性変化指数 (鉛直方向) C_{kz}	0.8
透水性変化指数 (水平方向) C_{kr}	0.8
熱透水性変化指数 A	4.731×10^{-2}
熱圧縮指数 λ_T	8.6×10^{-4}
熱膨張係数 K_T	2.3×10^{-5}
履歴変数基準値 $\bar{h}$	0.044
土粒子の密度 ρ_s (kg/cm ³)	2.67×10^{-3}
土粒子の比熱 C_s (kcal/kg · °C)	0.25
土粒子の熱膨張係数 α_s (1/°C)	5.0×10^{-5}
土粒子の熱伝導係数 (鉛直方向) K_{zs} (kcal/cm · min · °C)	3.0×10^{-4}
土粒子の熱伝導係数 (水平方向) K_{xs} (kcal/cm · min · °C)	3.0×10^{-4}
間隙水の密度 ρ_w (kg/cm ³)	1.0×10^{-3}
間隙水の比熱 C_w (kcal/kg · °C)	1.00
間隙水の熱膨張係数 α_w (1/°C)	2.1×10^{-4}
間隙水の熱伝導係数 K_{wv} (kcal/cm · min · °C)	8.4×10^{-5}

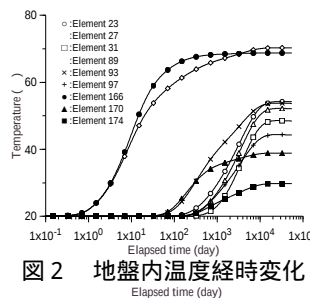


図 2 地盤内温度経時変化

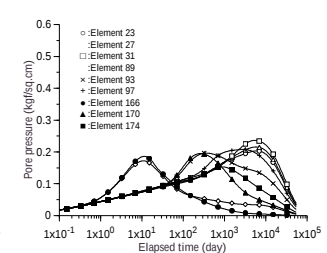


図 3 間隙水圧経時変化

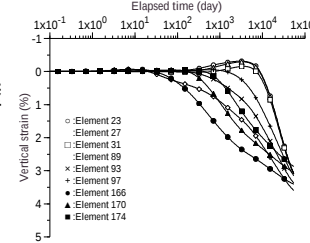


図 4 鉛直ひずみ経時変化

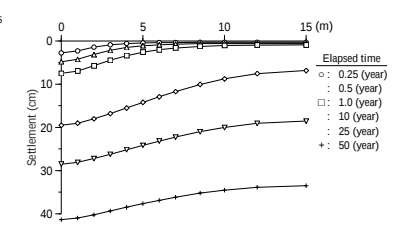


図 5 地表面沈下経時変化

キーワード：土壤蓄熱システム，繰返し加熱，熱弾粘塑性モデル，熱連成圧密解析

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

$$f_a = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left[\ln \left(\frac{p}{p_o} \right) + \left(\frac{\alpha_a}{\alpha_a - 1} \right) \ln \left[\frac{M_a + (\alpha_a - 1)\eta}{M_a + (\alpha_a - 1)\eta_{ko}} \right] \right] + \frac{\lambda_T - \kappa_T}{1 + e_o} (T - T_o), \quad \eta \geq \eta_{ko} \quad (4)$$

$$f_p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left[\ln \left(\frac{p}{p_o} \right) + \left(\frac{\alpha_p}{1 - \alpha_p} \right) \ln \left[\frac{M_p + (1 - \alpha_p)\eta_{ko}}{M_p + (1 - \alpha_p)\eta} \right] \right] + \frac{\lambda_T - \kappa_T}{1 + e_o} (T - T_o), \quad \eta \leq \eta_{ko} \quad (5)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \left[1 - \delta \exp \left(\frac{-f + h_o}{\mu} \right) \right] \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r t \right) \right] \right] + H_{th}(T, t) \quad (6)$$

表1に解析パラメータを示しているが、これらは熱的性質に関するパラメータを含めて有明粘土のものを用いている。

解析方法 解析法として、応力の平衡方程式、間隙水の質量保存則および熱の伝導方程式を支配方程式とする土・水・熱連成圧密有限要素解析法を用いている。解析法の詳細については文献等を参照されたい。

4. 解析結果

図2～5は長期加熱時の解析結果である。地盤内の温度が定常状態となるには長時間を要することが分かる。加熱によって粘土粒子・間隙水は膨張し粘土骨格が収縮するため正の過剰間隙水圧が発生する。このため、排水面から離れた粘土は膨張挙動を示す。そして、間隙水圧の消散に伴って地盤沈下が生じる。図6～9は繰返し加熱時の解析結果である。図6は発熱体近傍（地盤表面）での沈下挙動を示したものである。加熱によってわずかに隆起し、その後沈下が発生する。そして、冷却（採熱）によっても沈下が生じることが分かる。図中には長期加熱時の沈下曲線も示しているが、両者の沈下傾向は大きく変わらない。図7、8は繰返し加熱時の温度と間隙水圧の経時変化を、図9は粘土地盤内の温度分布の経時変化を示している。発熱体近傍は繰返し加熱により温度上昇・下降を繰り返すが、発熱体から離れた粘土では温度が次第に上昇し温度上昇領域が拡大する。繰返し加熱による急激な温度変化によって加熱時には正の間隙水圧が、冷却時には負の間隙水圧が発生し、時間とともに消散する。

5. まとめ

1) 正規圧密粘土地盤を加熱すると過剰間隙水圧が発生し、その消散に伴って長期にわたる沈下が発生する。

2) 繰返し加熱時、正規圧密粘土は加熱による粘土粒子・間隙水の膨張により一旦膨張した後に圧縮性の熱ひずみの発生にともなって沈下傾向を示し、冷却（採熱）時においても負圧の発生により平均有効応力の増加により沈下が発生する。このため、加熱・冷却（採熱）を繰り返すと沈下量が増大する。

参考文献

1) 阿部・富江・八杉(1999): 飽和粘土の熱連成圧密解析, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第3部(A), 394-395

2) 阿部・上本(2000): 熱クリープモデルによる粘土の高温三軸圧密解析, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集第3部(A), 394-395

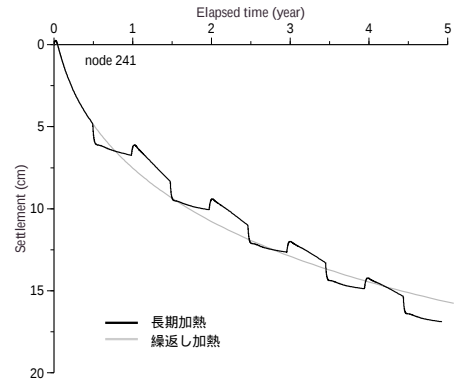


図6 沈下曲線

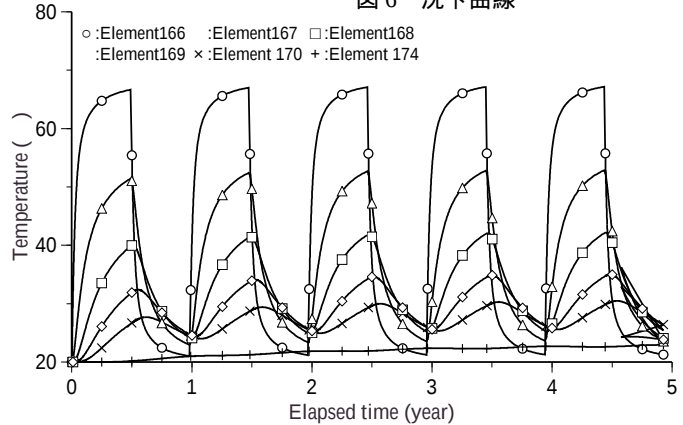


図7 地盤内温度経時変化

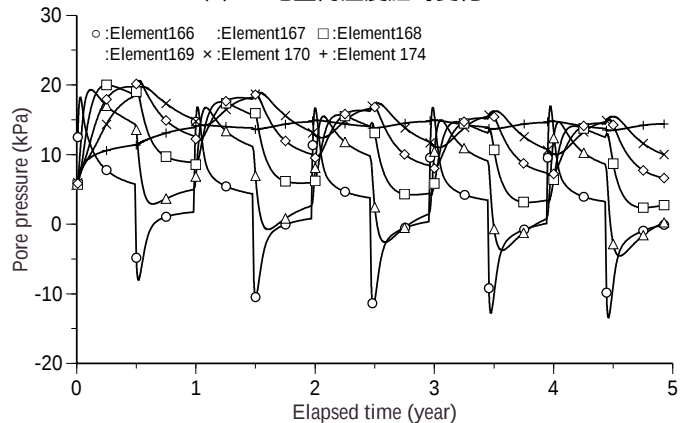


図8 間隙水圧経時変化

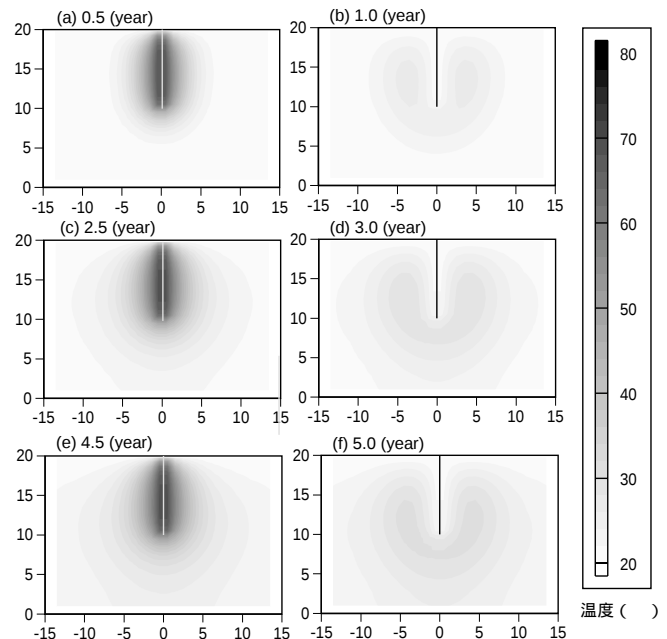


図9 温度分布経時変化