

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

エネルギーを有効利用する方法として、粘土地盤中に 70℃を超える高温で蓄熱する土壤蓄熱システムが開発されている。しかし、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蓄熱解析を行い、熱の拡散過程と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。土壤蓄熱システムは加熱パイプの配置より、well type, wall type, panel type の3つに分けられるが、ここでは、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に加熱し、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. 飽和粘土地盤の熱連成圧密解析

**解析概要** 解析モデルは、図1に示すように  $K_0$  正規圧密地盤に深さ 10m の wall type の土壤蓄熱システムの発熱体を解析領域（幅 30m, 深さ 20m）の中央に配置した平面ひずみ問題である。発熱体では温度指定境界および排水境界としている。その他の境界条件は図1に示すとおりである。解析は、定常状態で75℃で加熱し続ける長期加熱解析と6か月間の加熱と採熱を5年間繰り返す繰返し蓄熱解析を行っている。

**熱弾粘塑性モデルと解析方法** 解析に用いた熱弾粘塑性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り、その応力速度～ひずみ速度関係は次式で与えられる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = \left[ D_{ijkl} - \frac{D_{ijmn} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{op}} D_{opkl}}{H + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{qr}} D_{qrst} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{st}}} \right] \dot{\epsilon}_{kl} - \left( \varphi_{ij} + \frac{\partial F}{\partial T} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \right) \dot{T} - \frac{\partial F}{\partial t} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \quad (1)$$

ここに、 $H = -\frac{\partial F}{\partial v^p} \frac{\partial F}{\partial p}$  (2),  $\varphi_{ij}$  : 可逆熱ひずみ関数,  $F$  : 流動関数

$K_0$  圧密された正規圧密粘土の可逆熱ひずみ関数  $\varphi_{ij}$ , 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ている。

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{3} \left( \frac{\kappa_T}{1 + e_o} \right) \left[ 1 - S(T - T_o) \left( \frac{h}{\bar{h}} \right) \right] \delta_{ij} \quad (3)$$

$$F = \mu \ln \left[ \frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_i^p \right) \right\} \exp \left( \frac{f_i - h_o}{\mu} \right) + \delta \exp \left( -\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_i^p \right) \right] - v^p = 0 \quad (4)$$

$$f_u = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left[ \ln \left( \frac{p}{p_o} \right) + \left( \frac{\alpha_u}{\alpha_o - 1} \right) \ln \left[ \frac{M_u + (\alpha_u - 1)\eta}{M_o + (\alpha_o - 1)\eta} \right] \right] + \frac{\lambda_T - \kappa_T}{1 + e_o} (T - T_o), \quad \eta \geq \eta_{eo} \quad (5)$$

$$f_p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left[ \ln \left( \frac{p}{p_o} \right) + \left( \frac{\alpha_p}{1 - \alpha_p} \right) \ln \left[ \frac{M_p + (1 - \alpha_p)\eta_{eo}}{M_p + (1 - \alpha_p)\eta} \right] \right] + \frac{\lambda_T - \kappa_T}{1 + e_o} (T - T_o), \quad \eta \leq \eta_{eo} \quad (6)$$

$$h = \mu \ln \left[ \frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \left[ 1 - \delta \exp \left( -\frac{f + h_o}{\mu} \right) \right] \exp \left( -\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_i^p \right) \right\} \right] + H_{th}(T, t) \quad (7)$$

$S(x)$  は Heaviside's step function,  $\delta_{ij}$  は Kronecker's delta,

加熱位置：中心部

図4-5-11 編纂元図表 1: 100°

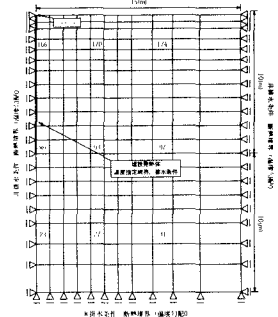


図1 解析メッシュ図

表1 解析パラメータ

|                                                    |                      |
|----------------------------------------------------|----------------------|
| 圧縮指数 $\lambda$                                     | 0.200                |
| 膨張指数 $\kappa$                                      | 0.026                |
| ポアソン比 $\nu$                                        | 0.333                |
| 破壊力比 $M$                                           | 1.200                |
| 初期膨脹比 $e_o$                                        | 1.477                |
| 一次圧縮係数 $\mu$                                       | $2.26 \times 10^3$   |
| 基準ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_i^*$ (1/min)               | $7.0 \times 10^6$    |
| 内部摩擦ひずみ速度 $\delta$                                 | $1.0 \times 10^3$    |
| 初期履歴変数 $h_o$                                       | 0.001                |
| 基準透水係数 (鉛直方向) $k_{vo}$ (cm/min)                    | $2.26 \times 10^6$   |
| 基準透水係数 (水平方向) $k_{ho}$ (cm/min)                    | $2.26 \times 10^6$   |
| 透水性変化指数 (鉛直方向) $C_v$                               | 0.8                  |
| 透水性変化指数 (水平方向) $C_h$                               | 0.8                  |
| 熱透水性変化指数 $A$                                       | $4.731 \times 10^4$  |
| 熱圧縮指数 $\lambda_T$                                  | $8.6 \times 10^3$    |
| 熱膨張指数 $\kappa_T$                                   | $2.3 \times 10^3$    |
| 履歴変数基準値 $\bar{h}$                                  | 0.044                |
| 土粒 $f$ の密度 $\rho_f$ (kg/cm <sup>3</sup> )          | $2.67 \times 10^3$   |
| 土粒 $f$ の比熱 $C_f$ (kcal/kg · °C)                    | 0.25                 |
| 土粒 $f$ の熱膨張係数 $\alpha_f$ (1/°C)                    | $5.0 \times 10^{-6}$ |
| 土粒 $f$ の熱伝導係数 (鉛直方向) $K_{fv}$ (kcal/cm · min · °C) | $3.0 \times 10^4$    |
| 土粒 $f$ の熱伝導係数 (水平方向) $K_{fh}$ (kcal/cm · min · °C) | $3.0 \times 10^4$    |
| 間隙水の密度 $\rho_w$ (kg/cm <sup>3</sup> )              | $1.0 \times 10^3$    |
| 間隙水の比熱 $C_w$ (kcal/kg · °C)                        | 1.00                 |
| 間隙水の熱膨張係数 $\alpha_w$ (1/°C)                        | $2.1 \times 10^{-4}$ |
| 間隙水の熱伝導係数 $K_w$ (kcal/cm · min · °C)               | $8.4 \times 10^4$    |

( $x$ )はMacauley's bracketである。

解析法は応力の平衡方程式、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熱連成圧密有限要素法である。表1に解析パラメータを示しているが、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。透水係数については、間隙比、温度による変化を考慮している。提案モデルと解析法の詳細については文献を参照されたい。

#### 4. 解析結果

図2～4は長期加熱時の解析結果である。図2、3は地盤内の温度と過剰間隙水圧の経時変化を示したものである。地盤内の温度が定常状態となるの長時間を要すること、また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ため長期にわたって沈下が継続する。図4は地表面の沈下性状であるが、加熱開始後10年で20cm程度の沈下が発生する。図5～8は繰返し蓄熱時の解析結果である。図6、7は加熱・採熱の繰返しに伴う地盤内温度と間隙水圧の経時変化を示したものである。発熱体近傍は加熱・採熱によって温度の上昇・下降を繰り返すが、発熱体から離れた要素では温度が次第に上昇し温度上昇領域が拡大する(図8)。発熱体近傍では、加熱・採熱による急激な温度変化によって、加熱段階では正の間隙水圧が、採熱段階では負の間隙水圧が発生し、時間とともに消散する。発熱体から離れた要素では熱伝導に時間を要した温度上昇量が小さいために加熱・採熱の影響をあまり受けずにクリープによる間隙水圧が増加する。図5は繰返し蓄熱時の地表面沈下を示したものである。発熱体近傍では加熱時に一旦膨張した後沈下し、採熱時にも沈下する。加熱・採熱を繰り返すと沈下が累積し、長期加熱時の沈下より大きくなる。

#### 5. まとめ

- 1) 粘土地盤を加熱すると過剰間隙水圧が発生し、その消散にともなって沈下が生じる。
- 2) 正規圧密粘土は、加熱時には土粒子・間隙水の熱膨張によって一旦膨張した後に圧縮性の熱ひずみの発生に伴って沈下傾向を示し、採熱時においても負圧の発生に伴う平均有効応力の増加により沈下傾向を示す。そのため、加熱・採熱を繰り返すと沈下量が增大する。
- 3) 発熱体近傍では温度変化量が大きく、熱ひずみの発生量が大きいために発熱体近傍の沈下量は大きくなり不等沈下となる。

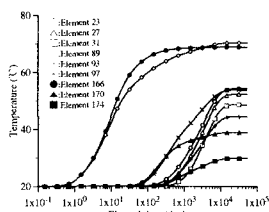


図2 地盤内温度経時変化

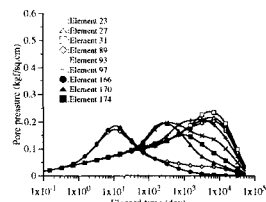


図3 間隙水圧経時変化

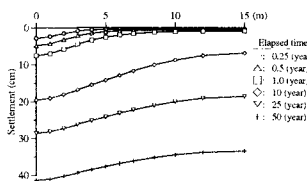


図4 地表面沈下経時変化

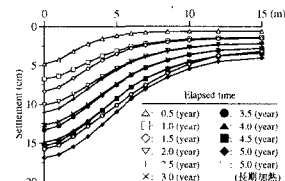


図5 地表面沈下形状

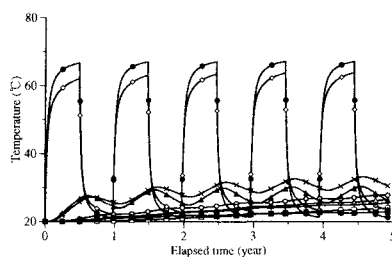


図6 地盤内温度経時変化

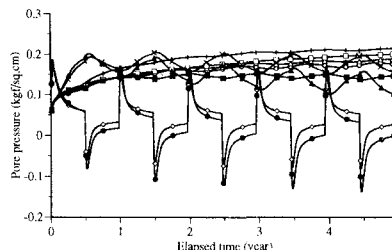


図7 間隙水圧経時変化

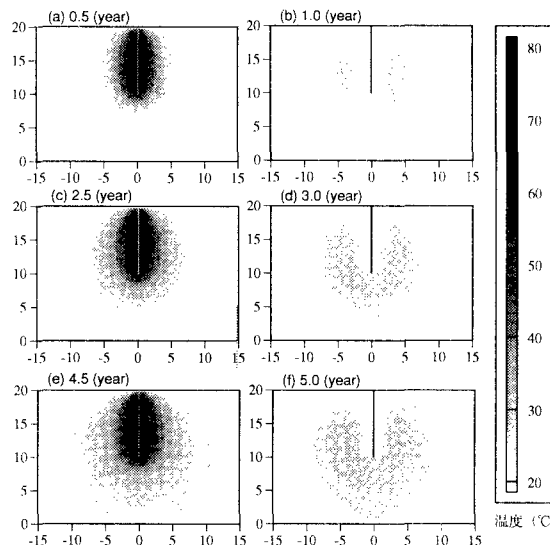


図8 温度分布経時変化