

大阪大学大学院 正会員 阿部 信晴
大阪大学大学院 学生員 ○富江 洋

1. はじめに 高温環境下での地盤挙動の解明が課題となっている。温度変化に伴う粘土地盤の挙動は応力-浸透-熱連成現象であり、その挙動の解明には粘土の温度依存性を考慮した構成モデルと応力-浸透-熱連成圧密解析法が必要である。本報告は著者らが提案する粘土の熱弾粘塑性モデルと熱連成多次元有限要素圧密解析法により発熱体が飽和粘土地盤の圧密挙動に与える影響について検討したものである。

2. 解析概要 飽和粘土地盤は図 1 に示される幅 50m、厚さ 10m の盛土地盤であり、盛土中央、盛土法肩および盛土法先直下深さ 4m の点に一辺 50cm の発熱体が設置されている。排水境界条件は地表面および底面が排水、左右面は非排水である。温度境界条件は地表面は大気温度(20℃)、底面は地下水温度(14℃)を指定し、左右面は地盤深さ方向に 20℃～14℃の温度を指定した。粘土地盤の初期温度は地盤深さ方向に 20℃～14℃の温度を指定し、初期応力状態は自重の影響を考慮して地盤深さ方向に $\sigma_v=3.3\text{tf/m}^2\sim 8.9\text{tf/m}^2$ である。解析は盛土荷重を 30 日間かけて載荷した後、1 年後に発熱体の温度を 80℃に 1 週間で上昇させている。

3. 構成モデルと解析法 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可逆ひずみ v_{th}^e と熱不可逆ひずみ v_{th}^p を導入したものである。提案モデルは応力による変形特性と温度変化による変形特性が互いに依存しないと仮定している。熱可逆ひずみ v_{th}^e は応力-時間-熱負荷履歴に依存し、熱不可逆ひずみ v_{th}^p は応力状態に依存しないと仮定している。可逆体積ひずみ v^e および基準ひずみ関数 f (塑性体積ひずみ)はそれぞれ(1),(2)式で表される。

$$v^e = v_{me}^e + v_{th}^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\kappa_T}{1+e_0} \left[(T-T_0) - \left(\frac{h}{h_0}\right)(T-T_0) \right] \quad (1)$$

$$f = v_{me}^p + v_{th}^p$$
$$= \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \left[\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\alpha_a}{\alpha_a - 1} \ln\left(\frac{M_a + (\alpha_a - 1)\eta}{M_a + (\alpha_a - 1)\eta_0}\right) \right] + \frac{\lambda_T - \kappa_T}{1+e_0} (T - T_0) \quad (\text{主働状態}) \quad (2)$$
$$= \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \left[\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\alpha_p}{1 - \alpha_p} \ln\left(\frac{M_a + (1 - \alpha_p)\eta_0}{M_a + (1 - \alpha_p)\eta}\right) \right] + \frac{\lambda_T - \kappa_T}{1+e_0} (T - T_0) \quad (\text{受働状態})$$

また流動関数 F 及び履歴変数 h を(3), (4)式のように与えると流動曲面理論より応力速度-ひずみ速度関係が求まる。

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^e\right) \right\} \exp\left(\frac{f - h_0}{\mu}\right) + \delta \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^p\right) \right] - v^p = 0 \quad (3)$$

$$h = h^v + h^h = \mu \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \left\{ 1 - \delta \exp\left(\frac{-f + h_0}{\mu}\right) \right\} \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^p\right) \right\} \right] + H_h(\Delta T) \quad (4)$$

解析法の支配方程式を以下に示す。

平衡方程式
$$\frac{\partial(\dot{\sigma}_i + \dot{u}\delta_{ij})}{\partial x_j} + \rho \dot{G}_i = 0 \quad (5)$$

間隙水の連続式
$$\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \rho_w(\dot{\epsilon}_v + \bar{a}\dot{T}) = 0 \quad (6)$$

熱伝導方程式
$$(\bar{\rho} \bar{C})\dot{T} + \rho_w C_w v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} - \varphi = 0 \quad (7)$$

平衡方程式は仮想仕事の原理により、連続式、熱伝導方程式は差分近似により離散化し、時間増分毎の節点変位増分、間隙水圧、温度を求める。

4. 解析結果 図 2 は盛土中央部のケースにおける地盤内の温度分布の経時変化を示したものである。熱移動が定常状態になるのに 3 年程の時間を要する。また解析ケースでは熱影響範囲が小さいことが分かる。図 4 は加熱ケースおよび非加熱ケースにおける発熱体

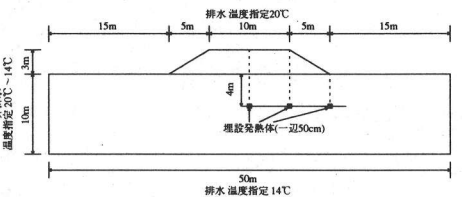


図 1 解析概要図

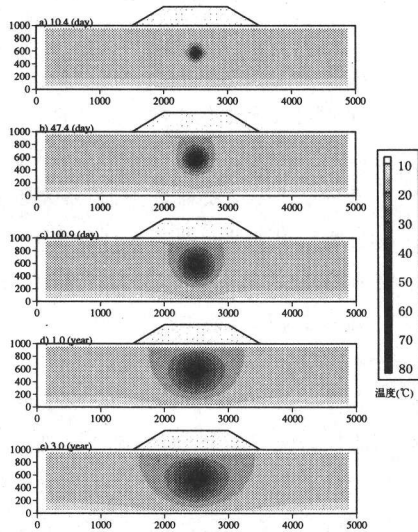


図 2 温度分布(盛土中央)

Nobuharu ABE, Hiroshi TOMIE

周辺要素の間隙水圧の経時変化を示したものである。温度上昇に伴う間隙水・土粒子の熱膨張と粘土骨格の熱収縮により間隙水圧は増加する。しかし、その後の消散速度はあまり変わらない。図 5 は発熱体に接する要素 102 の有効応力経路および全応力経路を示している。有効応力経路は盛土荷重の载荷により限界状態線に近づき、間隙水圧の消散に伴い反転する。しかし、加熱により間隙水圧が上昇するため応力経路は再度限界状態線に近づき限界状態に達する。その後間隙水圧の消散に伴い応力経路は K_0 線上に移動する。図 6 は加熱ケースおよび非加熱ケースの地表面沈下の経時変化を示している。発熱体埋設位置において加熱ケースの沈下量は非加熱ケースの沈下量より大きくなるが、発熱体の熱影響範囲が小さいためその差は小さなものになる。図 7 は加熱ケースと非加熱ケースの沈下量の差を示したものであり、これは加熱により引き起こされる沈下を示している。加熱直後、間隙水・土粒子の熱膨張により加熱ケースの沈下量は非加熱ケースより小さいが、間隙水圧の消散に伴い、

粘土骨格の熱収縮により加熱ケースの沈下量の方が大きくなる。また、加熱による透水性の増大により加熱ケースの圧密が促進される。このため間隙水圧消散過程である 5, 10 年後における沈下量の差は間隙水圧が完全に消散した 30 年後より大きくなる。

5. まとめ 熱弾粘塑性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が盛土地盤の圧密挙動に与える影響について検討した。その結果、発熱体の温度上昇により発熱体周辺地盤が限界状態に達することが示された。しかし、発熱体の熱影響範囲が小さい場合、限界状態に達する地盤は発熱体近傍に限定されるので、地盤全体に与える影響は小さい。

参考文献 阿部・富江・寺西, “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講演集, pp489-490, 1999 年 7 月

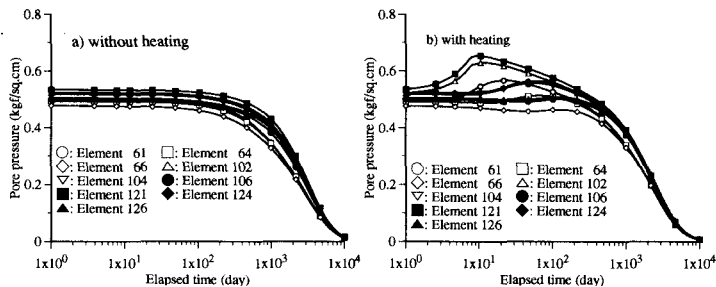


図 4 間隙水圧経時変化(盛土中央)

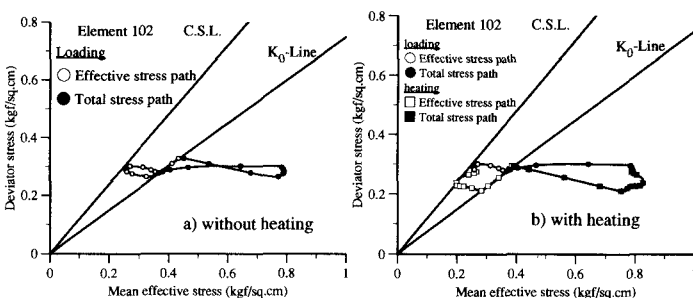


図 5 有効応力経路(盛土中央)

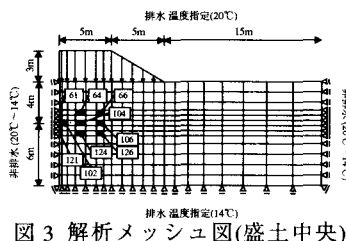


図 3 解析メッシュ図(盛土中央)

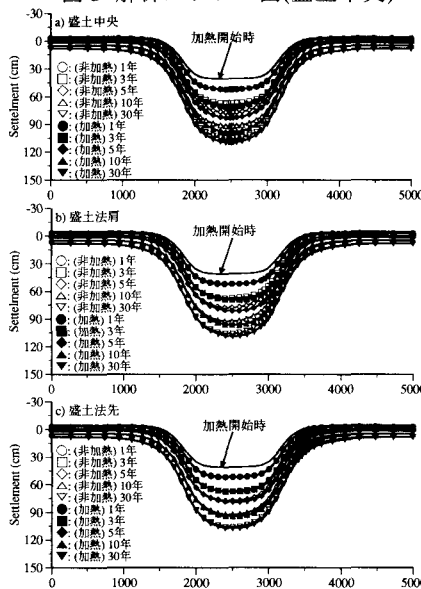


図 6 地表面沈下

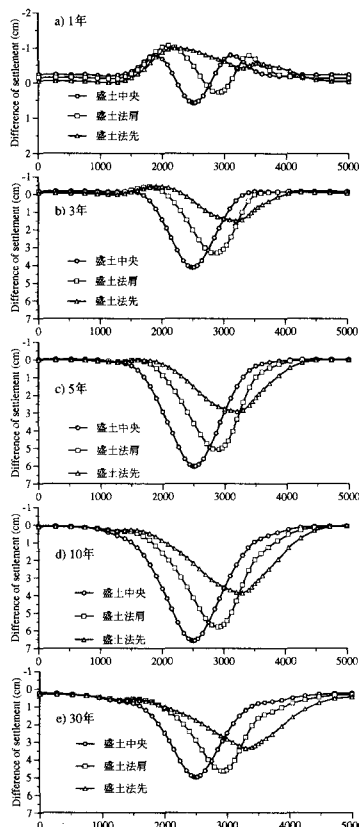


図 7 地表面沈下量差