

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 高温環境下での地盤挙動の解明が課題となっているが、熱移動を伴う地盤の変形挙動解析のためには温度依存性構成モデルを用いた熱連成圧密解析法が必要である。本研究では三軸供試体の加熱圧密時の挙動を熱弾粘塑性モデルを用いた熱連成圧密解析法により解析し検討している。

2. 熱連成圧密有限要素法 応力・浸透・熱移動連成問題の支配方程式は次のように表される。

$$\text{応力のつり合い方程式} \quad \frac{\partial(\dot{\sigma}_y + u\dot{\sigma}_y)}{\partial x_j} + \rho \dot{G}_i = 0 \quad (1)$$

$$\text{間隙水の連続方程式} \quad \frac{\partial q_i}{\partial x_j} + \rho_w (\dot{\epsilon}_v + \bar{\alpha} \dot{T}) = 0 \quad (2)$$

$$\text{エネルギー（熱量）保存則} \quad (\bar{\rho} \bar{C}) \dot{T} + \rho_w C_w v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} - \dot{\phi} = 0 \quad (3)$$

これらの支配方程式を仮想仕事の原理と差分近似により離散化し、各時間ステップ毎に節点変位増分、間隙水圧、温度をそれぞれ求める。なお、間隙水の流入量はダルシー則に、熱流束はフーリエ則に従うものとしている。また、粘土(土粒子・間隙水混合体)の体積膨張係数、熱容量、熱伝導係数は間隙率を用いて次式により評価している。

$$\text{粘土の体積膨張係数} \quad \bar{\alpha} = (1-n)\alpha_s + n\alpha_w \quad (4)$$

$$\text{粘土の熱容量} \quad \bar{\rho} \bar{C} = (1-n)\rho_s C_s + n\rho_w C_w \quad (5)$$

$$\text{粘土の熱伝導係数} \quad \bar{K}_i = (1-n)K_s + nK_w \quad (6)$$

3. 熱弾粘塑性モデル 提案する熱弾粘塑性モデルでは可逆的体積ひずみおよび基準ひずみ関数(塑性体積ひずみ)はそれぞれ(7),(8)式で表される。

$$v^e = v_{mc}^e + v_{th}^e = \frac{\kappa}{1+e_o} \ln\left(\frac{p}{p_o}\right) + \frac{\kappa_T}{1+e_o} \left[(T-T_o) - \left(\frac{h}{h_o}\right) (T-T_o) \right] \quad (7)$$

$$f = v^p = v_{mc}^p + v_{th}^p = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_o} \left[\ln\left(\frac{p}{p_o}\right) + \ln\left(\frac{M^2 + \eta^2}{M^2 + \eta_o^2}\right) \right] + \frac{\lambda_T - \kappa_T}{1+e_o} (T-T_o) \quad (8)$$

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_v^p t\right) \right\} \exp\left(\frac{f-h_o}{\mu}\right) + \delta \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_v^p t\right) \right] - v^p = 0 \quad (9)$$

$$h = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ 1 - \left[1 - \exp\left(-\frac{f+h_o}{\mu}\right) \right] \exp\left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_v^p t\right) \right\} \right] + H_{th} \quad (10)$$

(7)式右辺第二項は可逆的熱体積ひずみであり、過圧密粘土の熱による体積変化挙動が過圧密比に依存するという特性が考慮されている。また、(8)式右辺第一項は力学的塑性体積ひずみであり、修正カムクレイモデルにより評価している。流動関数、履歴関数(粘性体積ひずみ)をそれぞれ(9),(10)式により与えることにより、流動曲面理論に基づき応力速度-ひずみ速度関係が求められる。

表-1 解析パラメータ

圧縮指数	λ	0.200
膨潤指数	κ	0.026
ポアソン比	ν	0.333
破壊応力比	M	1.200
初期間隙比	e_o	0.854
二次圧縮係数	μ	2.26×10^{-3}
基準ひずみ速度	$\dot{\epsilon}_v^o$ (1/min)	7.0×10^{-6}
内部拘束ひずみ速度	$\dot{\delta}$	1.0×10^{-5}
初期履歴変数	h_o	0.010
基準透水係数(鉛直方向)	k_{v0} (cm/min)	3.762×10^{-7}
基準透水係数(水平方向)	k_{h0} (cm/min)	3.762×10^{-7}
透水性変化指数(鉛直方向)	C_{vz}	0.8
透水性変化指数(水平方向)	C_{hz}	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	κ_T	2.3×10^{-5}
履歴変数基準値		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^{-6}
土粒子の熱伝導係数(鉛直方向)	K_{sz} (kcal/cm · min · °C)	8.4×10^{-5}
土粒子の熱伝導係数(水平方向)	K_{sh} (kcal/cm · min · °C)	8.4×10^{-5}
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_w (kcal/cm · min · °C)	3.0×10^{-4}
間隙水の熱膨張性変化指数	B	7.283×10^{-6}

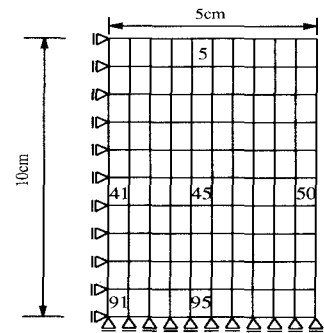


図-1 要素分割図

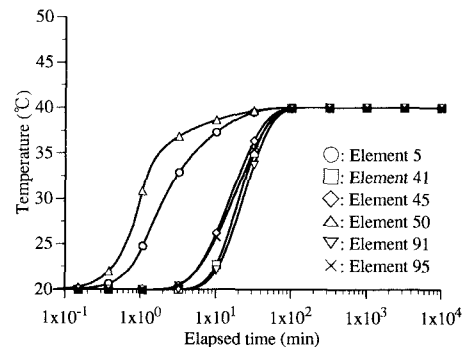


図-2 供試体内温度の経時変化

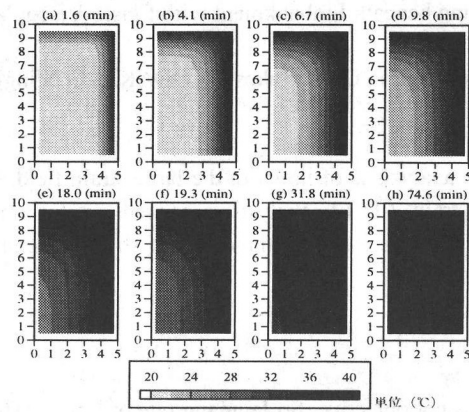


図-3 供試体内温度分布

4. 三軸供試体の加熱圧密解析 等方圧密された三軸供試体(圧密圧力 5 kgf/cm^2 、直径 10 cm 、高さ 20 cm)を正規圧密状態で加熱圧密する。排水条件は供試体全面で排水として、表面温度を 1 分間で 20°C から 40°C へと上昇させた。用いた解析パラメータは表-1 に、要素分割図は図-1 に示すとおりである。

図-2 は供試体内(図-1 に示す要素)の温度の経時変化を、図-3 は供試体内の温度分布を示している。供試体外部からの加熱によって供試体の温度は外側から上昇し、約 80 分後に供試体全体が境界温度と等しくなる。図-4 は間隙水圧の経時変化を、図-5 は供試体内の間隙水圧分布を示している。正規圧密粘土では加熱によって粘土骨格が収縮し、間隙水・粘土粒子は膨張するために正の間隙水圧が発生する。間隙水圧は外側から発生し表面排水によって消散するため、間隙水圧の高い領域は次第に供試体内部に移っていく。供試体の中心部では加熱直後、負の間隙水圧が発生する。これは加熱により供試体周辺部が膨張することに起因する。図-6 は供試体内各要素の有効応力経路を示している。供試体内では加熱により正の間隙水圧が発生するために平均有効応力が減少し有効応力経路は左方に向かう。その後間隙水圧が消散するにつれて平均有効応力が増加し、やがて等方応力状態に戻る。図-7 は供試体内各要素の軸方向ひずみの経時変化を示す。まず初めに間隙水の膨張により膨張ひずみが発生するが、その後間隙水圧の消散と共に圧縮性の粘塑性ひずみが発生する。

5. まとめ 提案する熱弾粘塑性モデルと解析手法を用いて三軸供試体の加熱圧密解析を行った。三軸供試体の加熱圧密挙動は解析結果にもとづき次のように要約できる。三軸供試体を外部から加熱すると、加熱によって間隙水が膨張するために供試体は初めに膨張挙動を示す。この時粘土骨格は収縮するため正の間隙水圧が発生する。全応力一定の状態の間隙水圧が発生すると平均有効応力は減少する。その後間隙水圧が消散すると粘塑性ひずみが発生するために間隙比は減少し、供試体は圧縮傾向を示す。また三軸供試体を外部から加熱すると供試体中心部において負の間隙水圧が発生する。これは加熱によって供試体周辺部が膨張することによる負のマンデル・クラヤー効果であると考えられる。

参考文献

1)阿部信晴・富江洋・寺西常顕：粘土の熱弾粘塑性モデルとその適用性,土木学会第 53 回年次学術講演会論文集,pp.412-413

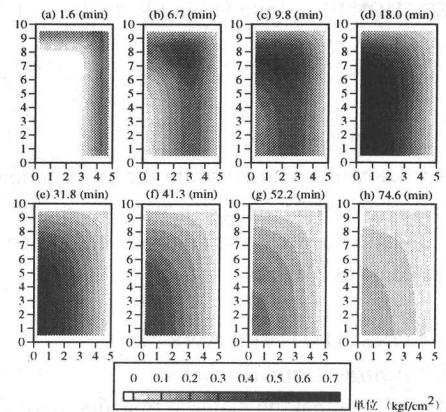


図-5 供試体内間隙水圧分布

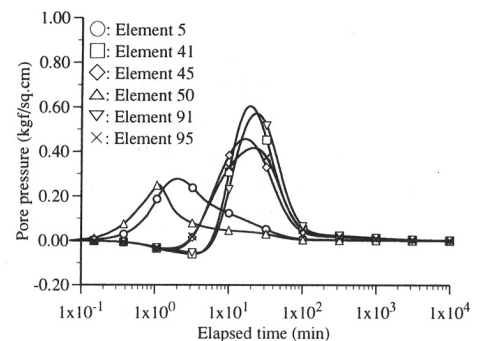


図-4 間隙水圧経時変化

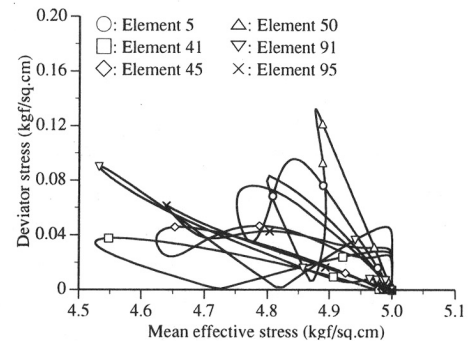


図-6 有効応力経路

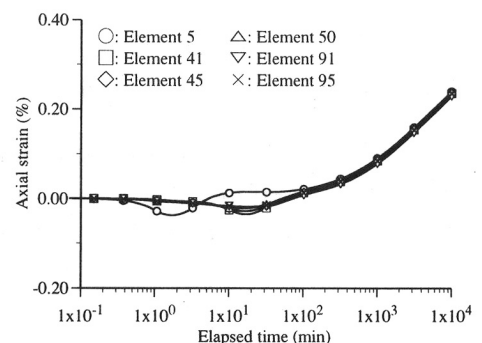


図-7 軸方向ひずみ経時変化