

III-137

加熱による圧密促進効果についての数値解析

(株)熊谷組

正会員 藤木 広一

正会員 村田 均

1. はじめに

近年、高温環境下における粘土の物理・化学的特性についての研究が各方面でなされている。その工学的応用研究として、筆者らは既に、高温環境のもとでは土の透水係数が増加することを利用して、従来のサンドドレーン工法のドレーン材の中に熱源を埋設して地盤の圧密促進をはかる方法について実験的研究を行ない、その効果を確認した¹⁾。

高温環境下の圧密現象は応力・変形問題、浸透問題および熱問題が互いに連成した問題として取り扱うのが厳密な捉え方であると考えられる。そこで本研究では、数値解析による実験のシミュレーションを試み、その結果を実験結果と比較して考察を加えたのでその結果を報告する。

2. 解析方法

応力-浸透-熱問題の定式化は文献2)などによって示されており、本解析における定式化もこれらの文献を参考とした。本解析では土の力学モデルとして弾粘塑性モデル(関口・太田モデル)を用いることとした。

同問題の定式化に用いた主な仮定は、①土は飽和しているものとする、②水の圧縮を考慮しない、③水の相変化を考慮しない、④土粒子と水の微視的レベルにおける熱平衡を仮定する、⑤水の圧縮、土粒子骨格の変形に伴う内部エネルギーの変化を無視する、などである。

以上の仮定のもとで、応力-浸透-熱問題の基本方程式である、力の釣り合い方程式、土中水の連続式および熱量の保存則はそれぞれ次のように表せる。

$$[D_{ijkl}]^{vvp} \{-(\dot{u}_{k,i} + \dot{u}_{i,k})/2 + \alpha_s \dot{T} \delta_{ki}\} - \dot{\sigma}_{ij} + \delta_{ij} \gamma_f \dot{h}\},_{j,j} = 0 \quad \dots(1)$$

$$kh_{,i} - \dot{u}_{i,i} + n \beta_T \dot{T} = 0 \quad \dots(2) \quad \bar{\rho} \bar{C}_v \dot{T} + n \rho_f C_{vf} v_{fi} T_{,i} - \bar{K} T_{,i,i} = 0 \quad \dots(3)$$

ここに、 u_k : 変位ベクトル、 h : 全水頭、 T : 温度、 $D_{ijkl}]^{vvp}$: 土の弾粘塑性モデル(関口・太田モデル)の構成マトリックス、

α_s : 土粒子の熱膨張率、 σ_{ij} : 緩和応力テンソル、 γ_f : 水の単位体積重量、 k : 水の透水係数、 n : 間隙率、 β_T : 水の熱膨張率、 $\bar{\rho} \bar{C}_v$: 土の熱容量、 C_{vf} : 水の比熱、 v_{fi} : 間隙水の水速度ベクトル、 $\bar{K}$: 土の熱伝導率
なお、 $\cdot$ は時間微分を表し、ひずみおよび圧力は圧縮を正とし、表示には総和規約を適用している。

また、初期条件と境界条件はそれぞれ次のように表される。

$$(\text{初期条件}) \quad u_i(x, 0) = \hat{u}_i(x), \quad h(x, 0) = \hat{h}(x), \quad T(x, 0) = \hat{T}(x) \quad \dots(4)$$

$$\left. \begin{aligned} (\text{境界条件}) \quad & \text{変位境界: } u_i(x, t) = \bar{u}_i(x, t) \quad \text{または} \quad \text{応力境界: } \sigma_{ij}(x, t) n_j(x) = -\bar{t}_i(x, t) \\ & \text{水理境界: } h(x, t) = \bar{h}(x, t) \quad \text{または} \quad \text{流量境界: } kh_{,i}(x, t) n_i(x) = -\bar{q}(x, t) \\ & \text{温度境界: } T(x, t) = \bar{T}(x, t) \quad \text{または} \quad \text{熱量境界: } KT_{,i}(x, t) n_i(x) = -\bar{q}_T(x, t) \end{aligned} \right\} \dots(5)$$

ここに、 x : 位置ベクトル、 t : 時間、 n_i : 外向き単位法線ベクトル、 $\hat{u}_i$ 、 $\hat{h}$ 、 $\hat{T}$ 、 $\bar{u}_i$ 、 $\bar{t}_i$ 、 $\bar{h}$ 、 $\bar{q}$ 、 $\bar{T}$ 、 $\bar{q}_T$: 既知量

さて、以上のように定式化された初期値・境界値問題に対して、(1)に有限要素法、(2)と(3)に積分差分法を適用して式の空間領域に対する離散化を行う。ここで、未知量である変位 $u_i(x, t)$ は分割要素内で一次近似し、全水頭 $h(x, t)$ と温度 $T(x, t)$ はともに要素内で一定近似した。次に、中央差分法を適用して式の時間領域に対する離散化を行うと次に示す形の一组の連立方程式が各要素について得られる。

$$\begin{bmatrix} K & C & G \\ A & H/2 & D \\ 0 & 0 & M+V-U/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u^*_{i,t} \\ h^*_{t,t} \\ T^*_{t,t} \end{Bmatrix} + \sum_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -H_m/2 & 0 \\ 0 & 0 & U_m/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u^*_{m,t} \\ h^*_{m,t} \\ T^*_{m,t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Ch^*_{t,t} + GT^*_{t,t} + \Delta R + \Delta F \\ -H/2h^*_{t,t} + \sum H_m/2h^*_{m,t} + DT^*_{t,t} + \Delta Q \\ (M+V+U/2)T^*_{t,t} - \sum U_m/2T^*_{m,t} + \Delta Q_T \end{Bmatrix} \quad (6)$$

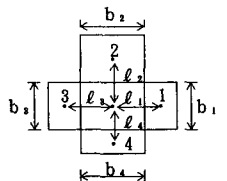
ここに、 $\Delta u^*_{i,t}$: 節点の変位ベクトルの増分、 $\Delta h^*_{t,t}$: 時間 t における要素の全水頭、 $T^*_{t,t}$: 時

間 t における要素の温度、 $K = \int_V B^T D^{vvp} B dV$ ($\Delta \varepsilon = B \Delta u^*$)、 $C = \int_V B_v B_v dV$ ($\Delta \varepsilon_v = B_v \Delta u^*$)、

$G = \int_V B^T \beta dV$ ($\Delta \sigma^T = \beta \Delta T$)、 $A = C^T$ 、 $H_m = -\Delta t k b_m / l_m$ 、 $H = \sum H_m$ 、 $D = n \beta_T V_e$ (V_e : 要素体積)、

$M = \bar{\rho} \bar{C}_v V_e$ 、 $U_m = -\Delta t \bar{K} b_m / l_m$ 、 $U = \sum U_m$ 、 $V = \Delta t \int_V s n \rho_f C_{vf} v_{fi} dS$ 、 $\Delta R = \Delta t \int_V B^T \dot{\sigma}^* dV$ 、

$\Delta F = \Delta t \int_V s N^T (d\bar{t}/dt) dS$ ($u = Nu^*$)、 $\Delta Q = \Delta t \int_V s \bar{q} dS$ 、 $\Delta Q_T = \Delta t \int_V s \bar{q}_T dS$



(6)の左辺の第2項は、対象とする要素に隣接する要素が、この要素の土中水の連続式と熱量の保存則に寄与する成分を表す。本数値解析手法においては、(6)を全要素について加算して構成される全体連立方程式を初期条件(4)と境界条件(5)のもとで反復法を適用しながら時間ステップごとに計算していく。なお、時間分割は対数時間について等間隔に行った。

3. 解析結果および考察

本数値解析法を用いて実験のシミュレーションを行った結果を以下に示す。対象とする問題は軸対称問題として取り扱うことができる。解析に用いたモデルと材料定数をそれぞれ図-1と表-1に示す。カオリン粘土の弾粘塑性体モデルのパラメーターは、カオリンの塑性指数や予圧密した供試体から採取した試料の標準圧密試験結果をもとに文献(3)等を参考して決定した。また透水係数は、高温環境のもとで実施した標準圧密試験から得られた温度および間隙比との関係式¹⁾を用いている。

図-2には、実験で得られた圧密沈下量と時間の関係と同時に、本数値解析から得られた結果を示してある。この図から、高温で圧密した場合は常温で圧密した場合よりも圧密が早く終了し、また沈下量も幾分小さくなることが確認できる。

解析による圧密沈下量が実験結果より大きくなった原因は、(1)解析では圧密容器と試料の間に実際あると考えられる摩擦を考慮していない点、(2)解析に用いた材料定数は本来三軸圧縮試験から得られるものであるが今回は簡略的に標準圧縮試験の結果をもとに決定した点が考えられる。

実験結果によると、高温で圧密した場合と常温で圧密した場合の最終沈下量の差は解析結果より大きくなった。これは初期状態における供試体の間隙比の相違にもよるが、高温で圧密した場合は前述のように温度効果により粘土の一軸圧縮強度が大きくなり、これに伴って粘土地盤の剛性も高くなっていることも要因であると考えられる。また、解析結果では、圧密終了の速さの差は実験結果ほど顕著に現れなかった。これは解析においては水平方向と鉛直方向の透水係数が等しいとした点、さらに高温条件下において土粒子の構造変化が透水係数に及ぼす影響を水平方向と鉛直方向に対して同等に評価した点などが考えられる。

4. まとめ

以上、高温環境下における圧密現象を応力-浸透-熱連成問題として取り扱った数値解析手法を用いて、模型実験のシミュレーションを試みた結果、地盤を加熱することによる圧密促進効果が確認できた。また、実験結果と解析結果を比較した結果、地盤を加熱しながら圧密した場合、圧密沈下量は、予想されるものより小さくなり、また圧密の終了は予想されるものより早くなった。

(参考文献)

- 1) 村田 他、加熱による圧密促進効果についての実験的研究、第29回土質工学研究発表会、1994。
- 2) 大西 他、有限要素法による応力-浸透-熱移動連成問題解析手法、土木学会論文集、第37号、pp.151-158、1986。
- 3) A. IIZUKA and H. OHTA, A Determination Procedure of Input Parameters in Elasto-viscoplastic Finite Element Analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87, Sept.1987.

表-1 解析に用いた材料定数

項 目	カ オ リ ン 粘 土		ドレーン材
	常温圧密 供試体	高温圧密 供試体	
非可逆比 $\lambda = 1 - \kappa / \lambda$	0.614	—	—
限界状態パラメーター M	1.05	—	—
グレイテンション係数 D	0.057	0.056	—
ポアソン比 ν'	0.35	—	—
圧密降伏応力 σ_{vs}' (kPa)	49	—	—
静止土圧係数 K_0	0.55	0.50	—
圧密降伏応力に対する間隙比 e_s	1.825	1.892	—
初期鉛直方向圧力 σ_{v1}' (kPa)	5.0	5.0	—
過圧密領域における静止土圧係数 K_1	2.0	—	—
二次圧縮指数 α	0.001	—	—
基準体積ひずみ速度 $\dot{\gamma}_s$ (1/S)	5.0×10^{-8}	—	—
基準透水係数 k_s (cm/s)	3.1×10^{-7}	0.015	—
Taylor式中の係数 λ_s	0.607	(∞)	—
Laméの常数 λ (kPa)	—	980	—
Laméの常数 μ (kPa)	—	490	—
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.686	2.640	—
土粒子の熱膨張率 α_s (1/K)	8.0×10^{-7}	8.0×10^{-7}	—
土粒子の比熱 C_{vs} (cal/g K)	0.2	0.2	—
土粒子の熱伝導率 K_s (cal/s cm K)	0.004	(1.0)	—

水の密度 ρ_w (g/cm ³)	0.9998(0°C)~0.9553(100°C)
水の粘性係数 η (cm ² /s)	0.635×10^{-4} (0°C)~ 4.035×10^{-4} (100°C)
水の熱膨張率 β_w (1/K)	5.0×10^{-4}
水の比熱 C_w (cal/g K)	1.0
水の熱伝導率 K_w (cal/s cm K)	1.4×10^{-4}

図-1 解析モデル

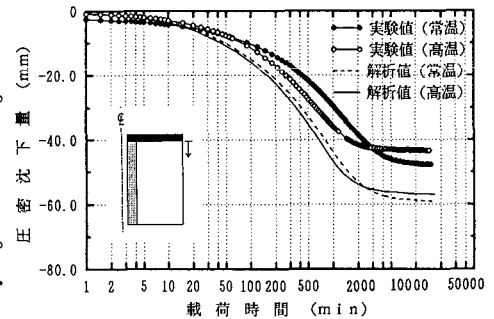


図-2 圧密沈下量と時間の関係