

III-648

対流を考慮した熱・応力・浸透連成挙動の解析

名古屋市役所	正会員	○ 都築 敦
名古屋大学大学院	学生会員	清木隆文
名古屋大学工学部	正会員	市川康明

1. はじめに 近年、地下空間の特性である隔離性、耐震性、恒温性を利用し、エネルギーの地下備蓄や放射性廃棄物の地下処分を目的とした土木構造物の建設が計画されている。これらの構造物はできるだけ健全な岩盤を選んで計画されるが、岩盤中に存在する地下水の影響は無視できないと考えられる。そこで本研究では岩盤中に人工熱源が存在する場合を想定し、自然対流を考慮した熱・応力・浸透の連成挙動の数値解析を行い、対流が浸透流や地表面の変動に及ぼす影響を考察した。

2. 対流を考慮した支配方程式 液相の密度が間隙水圧と温度に依存すると仮定したFernandezの式[3]を級数展開して一次近似した式

$$\rho_w = \rho_w^0 \left\{ 1 - \beta_w (T - T_0) + \frac{1}{K_w} (p - p_0) \right\} \quad (1)$$

をBoussinesq近似[2]に基づき、混合体理論により導出した各支配方程式に代入する。その結果得られる浸透式、静的な力のつり合い式、エネルギー輸送式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{(浸透式)} \quad & \left\{ \operatorname{tr} \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} - \frac{1}{3K_s} \operatorname{tr} \left(D \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} \right) \right\} + \left\{ \frac{1-n}{K_s} + \frac{n}{K_w} - \frac{1}{(3K_s)^2} \operatorname{tr}(D I) \right\} \frac{\partial p}{\partial t} \\ & + \left\{ -(1-n)\beta_s - n\beta_w + \frac{\beta_s}{9K_s} \operatorname{tr}(D I) \right\} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \left\{ \frac{k}{\rho_w^0 g} (\nabla p + \rho_w g \nabla z) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

(静的な力のつり合い式)

$$\nabla \cdot (D \boldsymbol{\varepsilon}) + \nabla \cdot \left(D \frac{p}{3K_s} I \right) - \nabla \cdot \left(D \frac{\beta_s}{3} T I \right) - \nabla p + (1-n)b_s + nb_w = 0 \quad (3)$$

(エネルギー輸送式)

$$\left\{ (1-n)\rho_s C_s + n\rho_w^0 C_w \right\} \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_w^0 C_w \frac{k}{\rho_w^0 g} (\nabla p + \rho_w g \nabla z) \cdot \nabla T - \nabla \cdot \{ \lambda (\nabla T) \} = 0 \quad (4)$$

ここで n は間隙率、 ρ_s 、 ρ_w は固相と液相の密度、 C_s 、 C_w は各相の比熱、 β_s 、 β_w はそれぞれ固相と液相の熱膨張係数、 K_s 、 K_w は各相の体積弾性係数、 k 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はそれぞれ透水テンソル、全ひずみ、 g は重力加速度成分、 p は静水圧成分、 T は温度、 z は自由水面の基準面からの高さ、 λ は平均熱伝導率テンソル、 $b_s (= \rho_s g L)$ 、 $b_w (= \rho_w g L)$ は各相の体積力(ただし、 $L^T = [0 \ 1 \ 0]$)であり2次元では鉛直軸方向のみ働く。また添字0は初期定常状態の値である。(2),(3),(4)式をガラーキン有限要素法により離散化する。そして、 θ 法[4](後退差分 $\theta = 1$)により時間差分化して解析を行った。

3. 解析例 地盤内に人工熱源がある状態を想定した地盤の解析例を示す。解析モデルと材料定数をそれぞれ図-1,表-1に示す。実際の岩盤では熱の輸送による長期的な地盤への影響が問題とされる。そのため、最大35000日(約100年)までの影響を時間ステップ25日で解析した。解析を熱の輸送が熱伝導のみによる場合と熱伝導と対流による場合の2つのパターンについて行った。以下に比較した結果を示す。

表-1 材料定数

密度(固相) ρ_s	$tf \cdot s^2/m^4$	0.221
密度(液相) ρ_w	$tf \cdot s^2/m^4$	0.102
体積弾性係数(固相) K_s	tf/m^2	1.000×10^{30}
体積弾性係数(液相) K_w	tf/m^2	1.000×10^{30}
熱伝導率(固相) λ_s	$tf/^\circ C \cdot day$	1.844×10
熱伝導率(液相) λ_w	$tf/^\circ C \cdot day$	5.070
熱膨張係数(固相) β_s	$1/^\circ C$	5.000×10^{-4}
熱膨張係数(液相) β_w	$1/^\circ C$	5.000×10^{-4}
比熱(固相) C_s	$m^2/s^2 \cdot G$	1.046×10^3
比熱(液相) C_w	$m^2/s^2 \cdot G$	4.183×10^3
弾性係数 E	tf/m^2	1.000×10^3
透水係数 k	m/day	8.640×10^{-3}
ポアソン比 ν		0.330
閉隆率 n		0.444

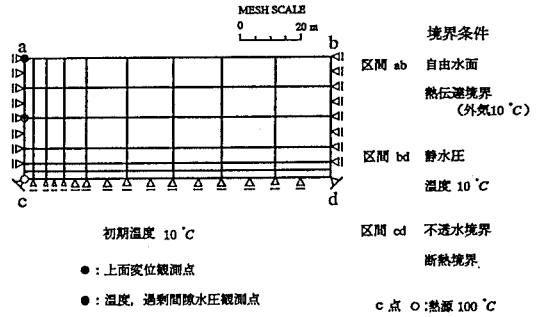
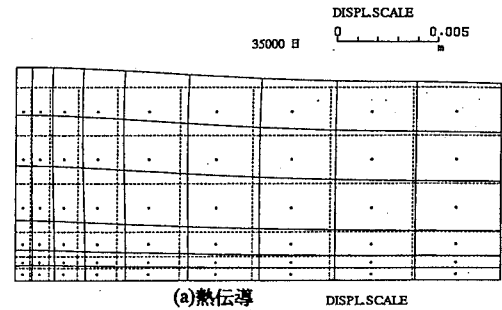
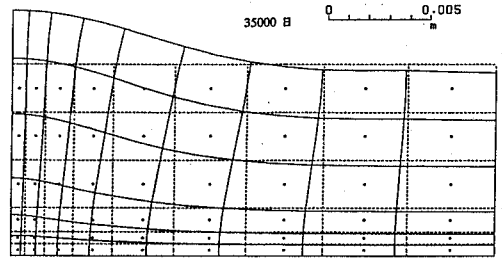


図-1 解析モデル

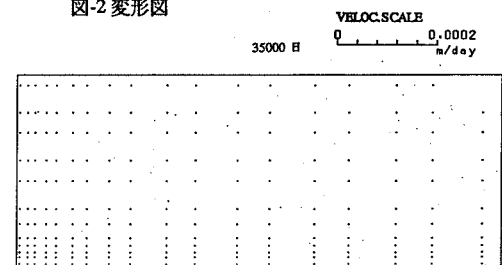


(a)熱伝導

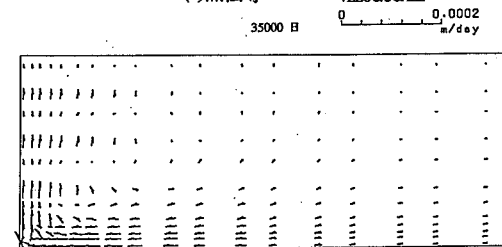


(b)熱伝導、対流

図-2 変形図



(a)熱伝導



(b)熱伝導、対流

図-3 流速分布図

まず、図-2に变形図を示す。両者の地盤変動を比較すると熱伝導、対流を考慮した場合、熱伝導のみの場合の約3倍上面変位となることがわかる。図-1における温度、過剰間隙水圧観測点において温度変化と過剰間隙水圧の時間変化を測定した。温度変化は両者の相違が見られなかったのに対し、過剰間隙水圧は、熱輸送が熱伝導のみの解析パターンでは熱源に熱を与えた直後に過剰間隙水圧がピークを示し次第に消散しているのに対して、対流も考慮した場合は熱源に熱を与えてから対流による過剰間隙水圧が次第に増加し時間経過に伴って平衡状態になっていることがわかった。このことから両者の上面変位の相違は対流による過剰間隙水圧によると考えられる。

次に35000日(約100年)における流速分布図を図-3に示す。熱伝導のみを考えた場合は図に示すスケールではほとんど浸透流が現われていないのに対して、熱伝導と対流を考慮した流速分布図では水の密度変化に伴って熱源から上方に向かう浸透流が発生し、それと同時に熱源に流れ込む浸透流が発生していることがわかる。また対流による循環流の発生も見られる。

4. むすび 対流を考慮した場合の地表面の上昇は熱伝導だけを考慮した場合に比較して約3倍程度大きく、無視できないことがわかった。このことから地盤内に熱源を設置したとみなせる構造物が周辺環境に及ぼす影響をチェックする場合、浸透流の予測が非常に重要であるとともにその現状を把握する必要があることが確認された。

5. 参考文献 [1] 大西有三, 柴田裕章, 小林晃, 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, No.370, 1986, pp151-158 [2] Conbar nous, M.A. and Bories, S.A., Hydrothermal Convection in Saturated Porous Media [3] R. W. Lewis & B. A. Schref fler, The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media, WILEY, 1987 [4] 市川康 明, 地盤力学における有限要素法, 日科技連, 1990