

埼玉大学 正会員 山辺 正
 埼玉大学 学生会員 渡辺 孝浩

1. はじめに

近年、地盤内の熱移動現象を解明した上で安定解析を実施する必要性が高まりつつある。熱源が地盤内に存在する事によって生ずる温度変化は、地盤に対して外力として作用すると共に地盤材料の構成関係そのものにも影響を及ぼす。本研究では比較的均質な軟岩相当の地盤材料を対象として力学特性の異方性を考慮した熱・応力・浸透連成場の数値解析により、変形挙動について検討した。なお、硬質岩盤を対象として熱源が岩に与える影響を実験的に解明しようとする研究や、熱・応力・浸透の連成現象を取り扱った解析的研究^{1)~6)}も進められている。

2. 熱・応力・浸透連成解析手法に関する検討

熱環境の効果を取り込んだ定式化を行い熱・応力・浸透連成解析を実施する際の支配方程式においてはエネルギー保存則・運動量保存則・質量保存則を適用し、構成則として熱伝導に関するフーリエ則・異方弾性係数を表す一般化フック則・異方透水係数を意味するダルシー則を用いた。具体的な支配方程式は、温度 T ・変位成分 u_i ・水頭 h を未知数として以下のように書き下すことができる。

$$\left(\frac{1}{2}C_{ijkl}(u_{k,l} + u_{l,k}) - \beta\delta_{ij}(T - T_0) - \chi\delta_{ij}\rho^{(f)}h\right)_{,j} + (n\rho^{(f)} + (1-n)\rho^{(s)})b_i = 0 \quad (1)$$

$$(\rho^{(f)}k_{ij}h_{,i})_{,j} - \rho_0^{(f)}nS_r\rho^{(f)}g\beta_p\frac{\partial h}{\partial t} - \rho^{(s)}C(\phi)\frac{\partial h}{\partial t} - \rho^{(f)}S_r\frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \rho^{(f)}nS_r\beta_T\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & (nS_r\rho^{(f)}C_v^{(f)} + (1-n)\rho^{(s)}C_v^{(s)})\frac{\partial T}{\partial t} + nS_r\rho^{(f)}C_v^{(f)}V_i^{(f)}T_{,i} - (nS_rK_t^{(f)} + (1-n)K_t^{(s)})T_{,ii} \\ & + nS_rT\frac{\beta_T}{\beta_0}k_{ij}h_{,ij} + (1-n)\beta_T\frac{\partial u_{k,k}}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、上添字 (f) は水を、 (s) は固相を表す。また、下添字は index notation に従い $i, j = 1, 2$ とする(2次元問題)。 C_{ijkl} は異方性弾性係数テンソルであり、 β は等方弾性体に対しては Duhamel-Neuman 関係から $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha$ 、とおくことができ α は線膨張係数、 λ と μ はラーメの定数である。異方性地盤に対しては $\beta = \alpha(C_{11} + C_{22} + 2C_{12})/2$ とした。ただし、 C_{11}, C_{22}, C_{12} は、 C_{ijkl} の非零成分である。 χ は不飽和パラメータ、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 ρ は密度、 n は間隙率、 b_i は物体力、 k_{ij} は異方透水テンソル、下添字の 0 は基準状態を表している。 S_r は飽和度、 g は重力加速度、 β_p は水の圧縮係数、 t は時間、 $C(\phi)$ は比水分容量、 β_T は水の熱膨張率、 C_v は比熱、 V_i は流体の移動速度、 K_t は熱伝導率を表している。特に、 C_{ijkl} あるいは k_{ij} については異方性を考慮した構成関係⁷⁾が提案されており、それらを用いる事が可能である。(1)~(3)式で表される支配方程式には飽和-不飽和浸透現象を含んでいるが、本研究の解析で対象とした問題は飽和領域である。なお、流体の移動および熱伝達は準静的で液相・固相間に熱交換はなく、温度の基準状態は 20℃ とした。以上の支配方程式に平面歪条件下で、Galerkin 的離散化を適用した。離散化においては、変位に 2 次・温度と間隙水圧に 1 次の形状関数を用いている。

3. 二次元非定常連成解析結果

解析プログラムの検証のために、第一に変形・浸透連成解析問題について検討した。図 1 は一次元圧密問題を対象とした解析結果であり、図の縦軸は圧密度、横軸は時間係数であり図中に一点鎖線で示した Terzaghi の理論解とよく対応していることが判る。解析に用いた物性値は表 1 に与える通りである。図 2 は、20℃ の地盤中に 80℃ の熱源を置いた場合を想定した有限要素分割であり、同図において熱源から水平に 2, 6, 10 m 隔たった 3 地点に対する解析結果を図 3 に与える。図 3 は、時間軸(横軸: 対数表示)に対して温度および全水

圧(縦軸)でプロットされている。地表面からの深度は全て10mであり、時間経過にともなって間隙水圧が一時上昇し地盤内の温度が定常になる前に、静水圧状態に向うことが判る。これは主に地盤材料と間隙流体の熱膨張率の差に起因し、同時に地盤の透水係数にも依存した現象であることが本解析により明らかになった。

表1 解析に用いた物性値

地盤の弾性係数 E	1000.0 tf/m ²
地盤のポアソン比 ν	0.333
地盤の透水係数 k	1.0 × 10 ⁻⁴ m/day
地盤の間隙率 n	44.4 %
地盤の単位体積重量 γ	1.65 tf/m ³
地盤の比熱 $C_v^{(s)}$	2.5 × 10 ² kcal/tf °C
地盤の熱伝導率 $K_t^{(s)}$	43.2 kcal/m °C day
地盤の熱膨張率 α	5.0 × 10 ⁻⁶ /°C
水の比熱 $C_v^{(f)}$	1.0 × 10 ³ kcal/tf °C
水の熱伝導率 $K_t^{(f)}$	12.1 kcal/m °C day
水の熱膨張率 β_T	2.1 × 10 ⁻⁴ /°C
水の圧縮係数 β_p	4.9 × 10 ⁻⁶ m ² /tf

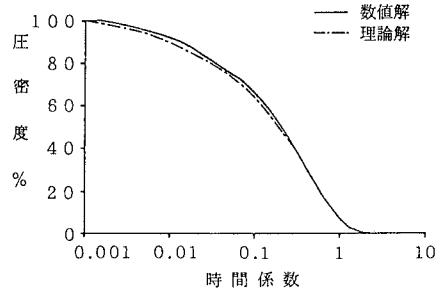


図1 応力・浸透連成解析結果

4. まとめ

熱・応力・浸透が連成する場の支配方程式を離散化した数値解析コードを作成し、熱環境下の圧密問題に適用した。熱が伝達する過程で、初期に内部間隙水圧が急激に上昇することを確認した。また上記の現象は、地盤を構成する材料の熱物性や透水係数に強く依存しており、今後、地盤物性の温度依存性や非線形性に関する検討をすすめる必要がある。また、極端に内部間隙水圧が上昇し何らかの自由面が存在する場合には、内部で破壊が進行する可能性についても考慮しなければならない事が判明した。

参考文献

1) Noorishad, J., Tsang, C.F. & Witherspoon, P.A. : Coupled thermal-hydraulic-mechanical phenomena in saturated fractured porous rocks : Numerical approach, J. Geophy. R. vol.89, No.B12, pp.10365-10373, 1984. 2) Booker, J.R. & Savvidou, C. : Consolidation around a Point Heat Source, Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol.9, pp.173-184, 1985. 3) Hart, R. D. & C. M. ST. John : Formulation of a fully-coupled thermal-mechanical-fluid flow model for non-linear geologic systems, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23, No.3, pp.213-224, 1986. 4) 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, 土木学会論文集第370号/Ⅲ-5, pp.151-158, 1986. 5) Lewis, R.W. & Schrefler, B.A.: The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media, pp.165-193, 1987, John Wiley & Sons. 6) 市川康明: 地盤中の熱伝導と熱輸送の数値解析, 土と基礎, 第37巻11号, pp.81-91, 1989. 7) Oda, M. : An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses, Water Resources Research, 22(13), 1845-1856, 1986.

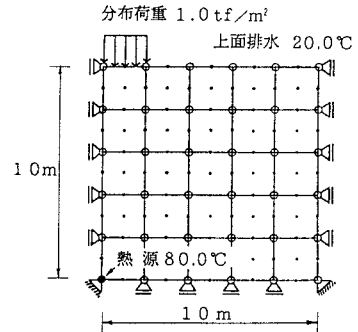


図2 熱・応力・浸透連成解析の要素分割

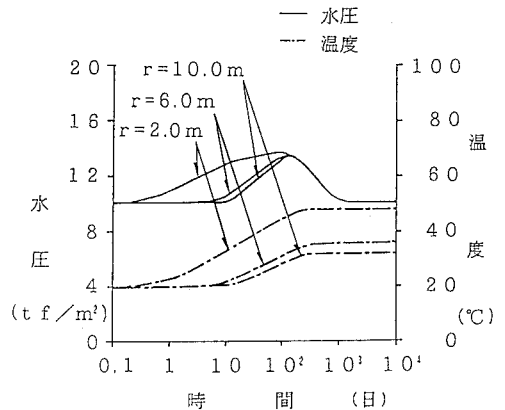


図3 熱・応力・浸透連成解析結果