

CS-7 低温下の水の相変化を考慮した岩質材料の変形挙動に関する研究

埼玉大学 正会員 山辺 正
東京電力 正会員 黒澤 聡

1. はじめに

近年、エネルギー資源の地盤内貯蔵に関連して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。このような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を変化させる事が問題を複雑にしている。本研究では比較的均質な岩質材料が低温環境におかれた時に内部に含まれる水の相変化を考慮した熱・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、熱源が岩盤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)~5)}が進められている。

2. 熱・応力・浸透連成解析手法に関する検討

熱・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運動量保存則・質量保存則・エネルギー保存則を適用し、構成則としては形式上すべて線形のものを用いた。すなわち、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・熱伝導に関するフーリエ則である。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。

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

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

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

ここで、上添字 (f) は水を、 (s) は固相を表す。また、下添字は summation convention に従い $i, j = 1, 2$ とする (2次元問題)。 C_{ijkl} は異方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。 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。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。離散化にあたっては、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。(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り、 $\chi = 1$ とした。また、水が液相から固相へ相変化する事による潜熱の放出量は 80 cal/g である。本研究に用いた岩質材料の比熱および熱伝導率の要素試験結果を参考にすると、内部に含まれる水は -20°C に至るまで徐々に凍結する事が判っている。この効果を表現するために、数値解析においても 0°C で全ての水が凍結するのではなく、 -20°C に至る過程で固相に変化した比率に応じて潜熱を放出する事とした。

3. 二次元非定常連成解析結果

図 1 に単一の凍結管を有する場合の室内凍結融解試験に用いた供試体 (縦 60cm, 横 40cm) について四分の一断面の要素分割と境界条件を示した。図 2 には、この供試体において計測された温度の時間変化 (点線) と、数値解析結果 (実線) の比較を示した。数値解析については、潜熱を付加しない場合 (黒丸) と潜熱を付加した場合 (白丸) も同時に示した。比較した位置は図中の 1 と 2 である。潜熱の効果を考慮した解析は、実験結果に近い値を与えている。

図3は図2と同一の実験結果について、熱流方向のひずみの最大変動値で無次元化したひずみの値を縦軸にとったグラフである。図中の供試体模式図において、黒丸位置の変形挙動に関する経時変化を表しており、温度変化にともなう収縮・膨張の傾向を良く表現している。

表1 解析に用いた物性値

岩石の物性			
弾性係数	E	1.0×10^4	kgf/cm ²
ポアソン比	ν	0.25	
透水係数	k	1.0×10^{-5}	cm/sec
間隙率	n	22.4	%
密度	$\rho^{(s)}$	1.83	g/cm ³
比熱	$C_v^{(s)}$	0.195	cal/g °C
熱伝導率	$K_t^{(s)}$	2.5×10^{-3}	cal/cm °C sec
熱膨張率	$\alpha^{(s)}$	9.0×10^{-6}	/°C
水の物性			
密度	$\rho^{(f)}$	1.0	g/cm ³
($< 0^\circ\text{C}$)	$\rho^{(f)}$	0.917	g/cm ³
比熱	$C_v^{(f)}$	1.0	cal/g °C
($< 0^\circ\text{C}$)	$C_v^{(f)}$	0.45	cal/g °C
熱伝導率	$K_t^{(f)}$	1.4×10^{-3}	cal/cm °C sec
($< 0^\circ\text{C}$)	$K_t^{(f)}$	5.5×10^{-3}	cal/cm °C sec
圧縮係数	β_p	4.9×10^{-5}	cm ² /kgf
熱膨張率	β_T	温度依存性	

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、低温環境下の凍結問題に適用した。見かけの構成則は線形であっても、内部変数に非線形な物性値を用いる事により変形挙動の非線形性を表現する事が出来た。今後、地盤物性の温度依存性や非線形性に関する検討を更にすすめる必要がある。

参考文献

1) Booker, J.R. & Savvidou, C.: Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol.9, pp.173-184, 1985. 2) Hart, R. D. & C. M. ST. John : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23, No.3, pp.213-224, 1986. 3) 大西有三, 柴田裕章, 小林晃: 土木学会論文集第370号/Ⅲ-5, pp.151-158, 1986. 4) Lewis, R.W. & Schrefler, B.A.: The Finite Element ... of Porous Media, pp.165-193, John Wiley & Sons, 1987. 5) 山辺 正, 渡辺邦夫, 他: 第9回岩の力学国内シンポジウム, pp.211-216, 1994.

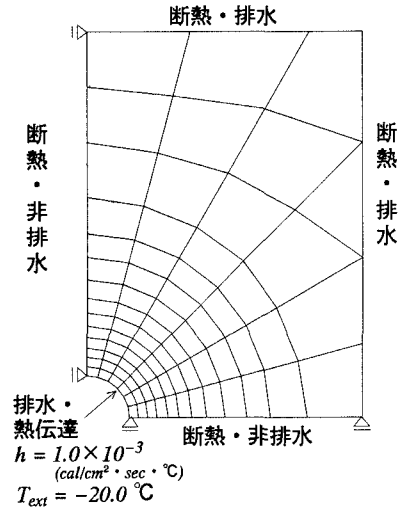


図1 要素分割と境界条件

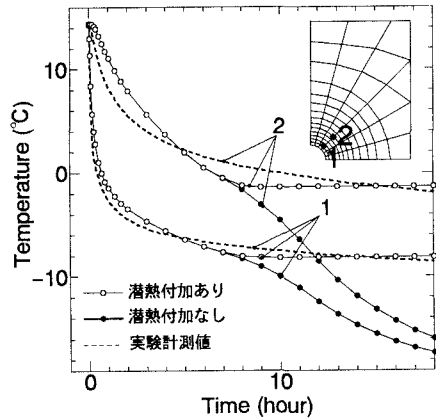


図2 温度の経時変化

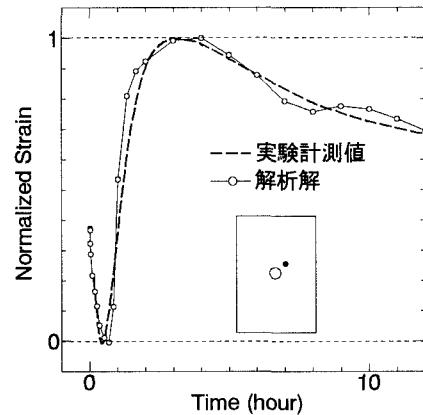


図3 変形挙動の経時変化