

III-A 322 水の相変化を考慮した岩質材料の熱・応力・浸透連成挙動に関する研究

埼玉大学大学院 学生員 ○柿沢 雅樹
 埼玉大学工学部 正会員 山辺 正
 西松建設 正会員 石山 宏二

1. はじめに

近年、地盤にLNGなどの低温熱源が存在することを考慮した解析を実施する必要性が高まりつつある¹⁾²⁾。この場合、地盤内部に含まれている水分が氷へと相変化することにより地盤の変形は非常に複雑な挙動を示す。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手法³⁾により変形挙動について検討する。

2. 熱・応力・浸透連成解析手法に関する検討

熱・応力・浸透連成場を支配する基本法則は、運動量保存則・質量保存則・エネルギー保存則である。また、構成則として、一般化フック則、一般化ダルシー則、熱伝導に関するフーリエ則を採用し、形式上すべて線形構成則を用いた。未知数を変位成分 U_i 、温度 T 、水頭 h として以下のように書き下すことができる。

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

$$- \rho^{(f)} n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} + \rho^{(f)} n S_r \rho^{(f)} g \beta_p \frac{\partial h}{\partial t} + \rho^{(f)} C(\varphi) \frac{\partial h}{\partial t} + \rho^{(f)} S_r \frac{\partial U_{i,i}}{\partial t} - \rho^{(f)} k(\theta)_{ij} h_{,ji} - \rho^{(f)} \psi^{(f)} = 0 \quad (2)$$

$$\left(n S_r \rho^{(f)} C_v^{(f)} + (1-n) \rho^{(s)} C_v^{(s)} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + n S_r \rho^{(f)} C_v^{(f)} V_i^{(f)} T_{,i} - \left(n S_r K_{ij}^{(f)} + (1-n) K_{ij}^{(s)} \right) T_{,ji} - n S_r T \frac{\partial \beta_T}{\partial \beta_p} k(\theta)_{ij} h_{,ji} - (1-n) \beta T \frac{\partial U_{i,i}}{\partial t} + \bar{q}_T = 0 \quad (3)$$

ここで、上添字 (f) 、 (s) は、それぞれ水、固相を示し、下添字はsummation conventionに従い、 $ij=1,2$ とする（2次元問題）。 D_{ijkl} は異方弾性係数テンソルであり、 β は異方弾性体に対してはDuhamel-Neumann関係から $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha$ 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。 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 χ は不飽和パラメータ、 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、 $C(\varphi)$ は比水分容量、 β_T は水の熱膨張率、 C_v は比熱、 $V_i^{(f)}$ は流体の移動速度、 K_i は熱伝導率を表している。これらの支配方程式を、平面歪条件下で変位に2次、温度と間隙水圧に1次の形状関数を用いてGalerkin的離散化を施した。(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79.6 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体積に比例して潜熱を放出する事とした。

表1 解析に用いた砂質凝灰岩物性値

材料物性	固相部分	液相部分
弾性定数 E	1.00×10^4	***
kgf/cm ² (< 0°C)	1.00×10^4	9.00×10^4
ポアソン比 ν	0.25	***
(< 0°C)	0.25	0.35
密度 ρ	1.83	0.917
g/cm ³ (< 0°C)	1.83	1.00
熱伝導率 K_i	2.50×10^{-3}	5.50×10^{-3}
cal/cm ² ·sec·°C (< 0°C)	2.50×10^{-3}	1.40×10^{-3}
比熱 C_v	1.95×10^{-1}	0.45
cal/g·°C (< 0°C)	1.95×10^{-1}	1.00
その他の材料物性		
間隙率 n	22.4	%
飽和度 S_r	100	%
飽和透水係数 k	1.00×10^{-5}	cm/sec
水の圧縮率 C_p	4.90×10^{-5}	cm ² /kgf
固相の熱膨張率 α	9.00×10^{-6}	1/°C
液相の熱膨張率 β_T	温度依存性	1/°C

3. 二次元非定常連成解析結果

表1に解析に用いた砂質凝灰岩（通称 田下石）の物性値を示す。この岩質材料を用いて、単一の凍結管を有する供試体（縦60cm、横40cm、管半径2.3cm）において室内凍結融解試験をおこなった。図1に供試体の4分の1断面を模擬した解析メッシュおよび境界条件を示す。図2には、室内実験で観測された温度の時間変化（太線）と、数値解析結果（細線）の比較を示した。実線、点線はそれぞれ熱源から1cm、2cmの場所（図中参照）であるが、これより本解析コードは、実験において観測される温度の時間変化を表現できていると言える。図3は、熱源から1cmの場所（図中参照）での温度変化に対する半径方向ひずみの挙動を示しており、実線、黒丸線は、それぞれ実験値、解析値を表す。実験値がS字になる現象の原因として、10℃付近までは岩質材料の温度低下による収縮、そこから4℃付近までは1cmの場所より孔壁に近い場所における間隙水の凍結膨張の影響での収縮、さらに-5℃付近までは1cmの場所での間隙水の凍結による膨張、そして-10℃付近までは1cmより外側の場所の凍結膨張の影響での収縮ということが考えられる。この凍結膨張の一連の様子（収縮→膨張→収縮）が解析により表現できているといえる。図4は、解析結果における熱源からの距離に対する半径方向ひずみの時間経過に伴う挙動を示した。線上の黒丸はその時間における0℃の場所である。1cmの場所について見ると時間経過により収縮→膨張→収縮という流れをしていることがわかる。これは、他のどの場所でも起こっており、さらにそれは、時間により場所的推移していることが表されている。

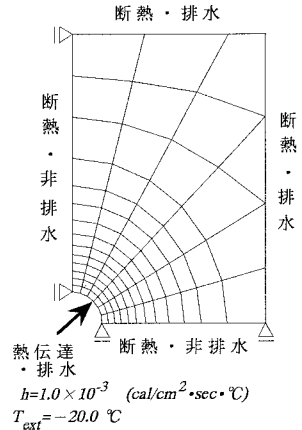


図1 解析メッシュと境界条件

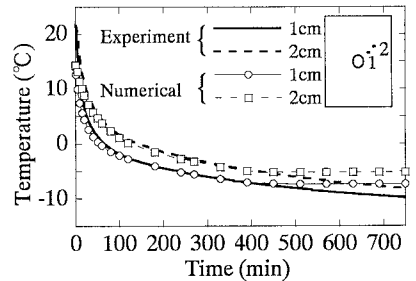


図2 温度の時間変化

4. まとめ

熱・応力・浸透連成解析において、見かけの構成則が線形であっても、内部変数として温度に依存する物性値を用いることで、全体として非線形な変形挙動を表現することができた。また、内部での凍結に伴う変形挙動が、時間により場所的に推移していく様子を表すことができた。今後、荷重を加えるなど境界条件を変化させた場合の解析や、弾塑性域まで考慮する解析などについて検討する必要がある。

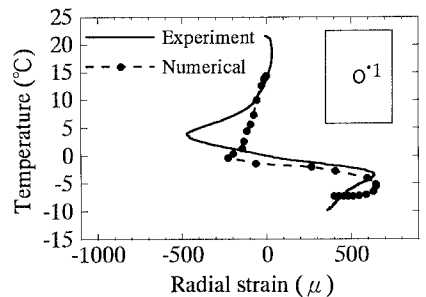


図3 温度低下に伴う変形挙動

参考文献

- 1) 小林晃, 藤田朝雄, 千々松正和, 大西有三: 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 放射性廃棄物処分場ニアフィールドの連成解析, pp.361-365, 1996.2.
- 2) 稲田善紀, 山辺正: 材料, 各種条件下における岩石の力学挙動, 1996.3.
- 3) 黒澤聡: 埼玉大学大学院修士論文, 相変化を考慮した熱移動・応力・浸透連成解析に関する研究, 1995.

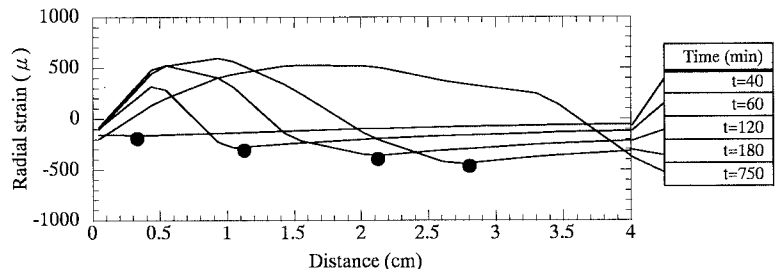


図4 内部での変形挙動とその時間変化