

Ⅲ - A315 水の相変化を考慮した砂岩の熱・応力・浸透連成挙動に関する研究

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

1. はじめに

LNG地下貯蔵施設や凍結工法などにより岩盤内に低温熱源が存在する場合には、周辺岩盤に含まれる水分は、温度低下とともに氷へと相変化し岩盤全体も複雑な挙動を示す¹⁾。本研究では低温環境におかれた含水状態にある砂岩の挙動について、熱・応力・浸透連成場の数値解析^{2),3)}により検討する。なお、ここで対象とする岩質材料には明らかな亀裂は含まれていないことを想定している。

2. 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（式（1））・質量保存則（式（2））・エネルギー保存則（式（3））である。ここで構成則として、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すれば、支配方程式は以下のように書き下すことができる。式（1）～（3）においては未知数を変位成分 u_i 、温度 T 、水頭 h とし、上添字 (f) は水、 (s) は固相を示し、下添字はsummation conventionに従うものとする（2次元問題により $i, j = 1, 2$ ）。

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

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

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

D_{ijkl} は異方弾性係数テンソル、 β は異方弾性体に対してはDuhamel-Neumann関係から $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha$ （ α は線膨張係数、 λ と μ はラーメの定数）、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 χ は不飽和パラメータ（但し本研究の解析で対象とした問題は飽和領域であり、 $\chi = 1$ ）、 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、 S_r は飽和度、 g は重力加速度、 β_p は水の圧縮率、 t は時間、 $C(\varphi)$ は比水分容量、 β_r は水の熱膨張率、 C_v は比熱、 $V_i^{(f)}$ は流体の移動速度、 K_{ij} は熱伝導率を表している。また下添字の0は基準状態を表している。これらの支配方程式を、平面ひずみ条件下で変位に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。本研究に用いた砂岩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わかっている。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 解析に用いた砂岩と水の物性値

材料物性	固相部分	液相部分	間隙率 n (%)	24.1
弾性定数 E	4.02E+04	***	飽和度 S_r (%)	100
(kgf/cm ²) ($< 0^\circ\text{C}$)	4.02E+04	9.00E+04	飽和透水係数 k (cm/sec)	1.42E-08
ポアソン比 ν	0.37	***	水の圧縮率 β_p (cm ² /kgf)	4.90E-05
($< 0^\circ\text{C}$)	0.37	0.35	固相の熱膨張率 α (1/ $^\circ\text{C}$)	8.80E-06
密度 ρ	2.41	0.917	液相の熱膨張率 β_T (1/ $^\circ\text{C}$)	温度依存
(g/cm ³) ($< 0^\circ\text{C}$)	2.41	1.00		
熱伝導率 K_i	5.28E-04	5.50E-03		
(cal/cm $\cdot$ sec $\cdot$ $^\circ\text{C}$) ($< 0^\circ\text{C}$)	5.28E-04	1.40E-03		
比熱 C_v	1.80E-01	4.5E-01		
(cal/g $\cdot$ $^\circ\text{C}$) ($< 0^\circ\text{C}$)	1.80E-01	1.00		

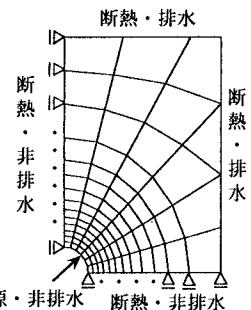


図1 1/4平面図の解析メッシュと境界条件

連成挙動 非線形 相変化

〒338 埼玉県浦和市下大久保255 埼玉大学工学部建設工学科 TEL 048-858-3544 FAX 048-855-9361

3. 二次元非定常連成解析結果

単一の凍結管を有する供試体（縦60cm、横40cm、高さ15cm、管半径2.3cm、物性値は表1参照）を用いた室内凍結融解試験を模擬するため、解析メッシュと境界条件を図1および図2とした。両図は、供試体の平面図と断面図であり、共に供試体の4分の1を模擬している。

図1の要素分割による解析結果を図3に示す。これは熱源から1cmの地点における、温度低下による半径方向ひずみの変化を表している（引張ひずみを正）。20℃から0℃にかけて、岩質材料そのものの収縮による圧縮ひずみがみられる。続いて0℃から-7℃付近では、間隙水の凍結による急激な膨張ひずみが発生する。-7℃付近の凍結膨張量が最大となり、その後は他の地点で発生した膨張ひずみの影響を受け、再び収縮ひずみへと移り変わる。この一連の「収縮→膨張→収縮」という現象⁴⁾は、飽和した岩質材料の凍結時によくみられるものであり、本解析手法により表現することができた。しかし、室内凍結融解試験の凍結・融解過程終了後には、熱源周辺において凍結膨張による破壊が観測された。試験中は、供試体を断熱材で保護してあるために、どの段階で凍上現象がおき、またいつ破壊に至ったのかを観測することは困難である。そこで、図2に示すように、凍結管を縦に切る断面の4分の1を模擬した要素分割をもちいて解析を行なった。その結果のうち、凍結開始から3600秒後、7200秒後、45000秒後のそれぞれの時間に対する供試体表面の温度分布および変形を図4および図5に示す。図4から、熱源近傍が最も低温であり、距離が離れるほど温度が高いということは明らかである。また、図5では時間の経過により、凍結膨張量の最大となる位置が熱源から徐々に遠ざかる様子が見える。ここで、図4と図5を重ね合わせて考察すると、各距離における表面の変形は、そのときの温度に大きく影響されていることがわかる。図4で各時間における-7℃の時刻が、図5においても凍上量が最も大きくなる位置に近いことがわかる。このように供試体表面を大きく凍上させる温度（ここでは-7℃）は、時間により熱源から遠ざかる方向に移動していくが、それと同時に供試体表面の破壊領域も熱源から遠ざかる方向に進展していくことが予想され、室内凍結融解試験で破壊に至ったと考えられる。しかし本解析は非線形弾性解析であり、この破壊現象を表現するには不十分であるために、今後、さらに解析手法を検討する必要がある。

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、供試体表面を大きく凍上させる温度が存在し、時間とともに最大凍上量を与える位置が熱源から遠ざかる方向に進展していくことがわかった。破壊領域を考慮するために、今後さらに解析手法を改良していきたい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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、pp.361-365, 1996.
- 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.
- 4) 石塚与志雄、木下直人、奥野哲夫：土木学会論文集370号/Ⅲ-5, 1986.6.

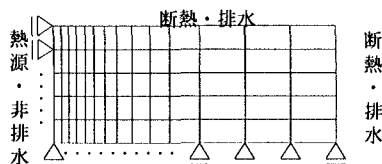


図2 1/4断面図の
解析メッシュと境界条件

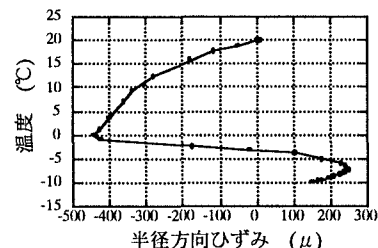


図3 熱源より1cmの地点における温度
低下による半径方向ひずみの変化
(図1のメッシュに対応)

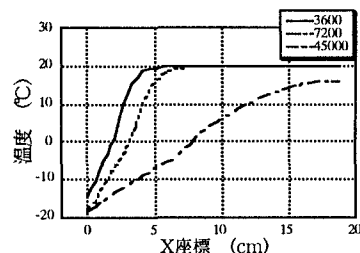


図4 時間経過による供試体表面の
温度分布
(図2のメッシュに対応)

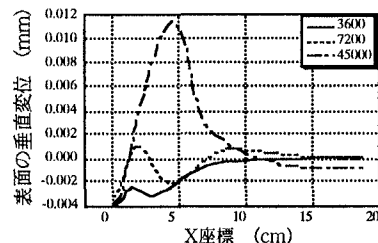


図5 時間経過による供試体表面の
表面変位
(図2のメッシュに対応)