

Ⅲ-A352

間隙水の相変化を伴う砂岩の弾塑性応力・浸透・熱連成解析

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
埼玉大学大学院 N.Krishna

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、温度低下とともに水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、弾塑性応力・浸透・熱連成場の数値解析²⁾により検討する。なお、ここで対象とする砂岩の供試体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

応力・浸透・熱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。ここで構成則として、弾性範囲内でのフック則とそれに続く関連流れ則を適用し、さらにダルシー則および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。ここで、未知数は変位成分 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 ($i, j = 1, 2$)。

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

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

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

D_{ijkl}^e は弾塑性性テンソル、 β はDuhamel-Neumann関係から $\beta = (3\lambda + 2\mu)$ (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全て飽和領域にあるとし $\chi=1$ ）、 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_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。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離散化した。弾塑性解析においては降伏関数としてMohr Coulomb 則を適用した。強度定数 (c, ϕ) は表1に示すとおりであり、収束計算にはNewton Raphson 法を適用した。さらに、内部に含まれる水分は、0℃で全ての水が凍結するのではなく、-20℃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こととした。

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 (%)	13.0
弾性定数 E (kgf/cm ²) ($< 0^\circ\text{C}$)	4.02E+04	***	飽和度 S_r (%)	100
ポアソン比 ν ($< 0^\circ\text{C}$)	0.37	***	飽和透水係数 k (cm/sec)	1.42E-08
密度 ρ (g/cm ³) ($< 0^\circ\text{C}$)	2.41	1.00	水の圧縮率 β_p (cm ² /kgf)	4.90E-05
熱伝導率 K_T (cal/cm·sec·°C) ($< 0^\circ\text{C}$)	5.28E-04	1.40E-03	固相の熱膨張率 α (1/°C)	8.80E-06
比熱 C_v (cal/g·°C) ($< 0^\circ\text{C}$)	1.80E-01	1.00	液相の熱膨張率 β_T (1/°C)	温度依存
	1.80E-01	4.5E-01	粘着力 c (kgf/cm ²)	74.4
			摩擦角 ϕ (deg.)	31.0

連成挙動 弾塑性 相変化

〒338-8570 浦和市下大久保255 埼玉大学工学部建設工学科 TEL048-858-3544, TEL048-855-9361

3. 二次元非定常連成解析結果

表1に示す物性を有する砂岩供試体（縦30cm，横30cm，厚さ5cm）の中央部分に1つボアホールを設け銅製凍結管（管半径2.3cm）を挿入し，その内部に-20℃に冷却した不凍液を循環させる室内凍結融解試験³を実施した．この室内試験を模擬するための解析メッシュと境界条件を図1に示した．同図は，弾塑性解析のために新たに作成したメッシュであり熱源近傍1/4断面を模擬している．熱伝達係数は， $h=1.0 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ ，外部温度は-20℃である．

図1に示した要素分割を用いて弾塑性応力・浸透・熱連成解析を実施し，凍結・融解過程における温度・変形特性について検討した．検討にあたっては，別途実施した非線形弾性解析結果³とも比較した．図2は，凍結管から半径方向に1cm離れた地点での半径方向ひずみの時間変化を表している．図中，黒丸は非線形弾性解析結果であり，白丸は弾塑性解析結果である．どちらの場合も，凍結過程の初期60分間程度は収縮し，その後急激に膨張へと転ずることが判る．さらに時間が経過すると非線形解析では，半径方向ひずみ200 μ 程度のひずみレベルで膨張速度が緩やかになり，750分でほぼ収束している．融解過程に入ると急激な収縮の後，1200分で半径方向ひずみがほとんどゼロに収束している．一方，弾塑性解析においては凍結過程において200分を過ぎてもなお膨張傾向が継続し，本解析例では750分経過後においても膨張し続けていた．融解過程においてはその初期に非線形弾性解析と同様の半径方向ひずみの変化が観察されるが最終的には約1100 μ 程度の半径方向残留ひずみが得られた．この弾塑性解析結果を温度・半径方向ひずみを軸にとって実験結果と比較し図3を得た．同図において実線で表される実験結果の凍結過程では，-12℃付近までの温度低下に伴い半径方向ひずみは＜収縮→膨張→収縮＞と挙動する傾向が観測される．この現象は，非線形弾性解析手法により表現することは出来た³が，弾塑性解析においては残留ひずみを評価できるとどまった．

4. まとめ

弾塑性応力・浸透・熱連成解析において，水の物性に温度に依存する値を用いることにより半径方向ひずみの非線形な変形挙動や凍結融解後の残留ひずみを表現することができた．

参考文献

- 1) 稲田善紀，山辺正：各種条件下における岩石の力学挙動，材料，pp.1996.
- 2) 柿沢雅樹：熱・応力・浸透連成場における岩質材料の弾塑性挙動に関する研究，埼玉大学大学院修士論文，1998.
- 3) 山辺正，石山宏二，柿沢雅樹：水の相変化を考慮・・・研究，第52回土木学会年講，III-A315，pp.630-631，1997.

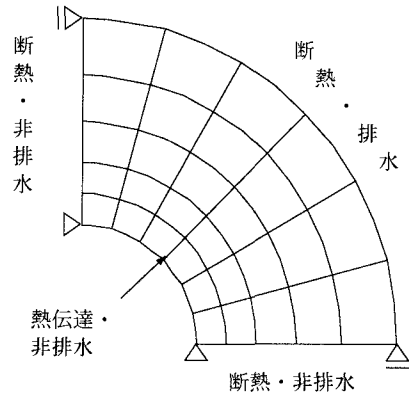


図1 弾塑性解析用メッシュ分割
（熱伝達境界部分の半径=2.3cm）

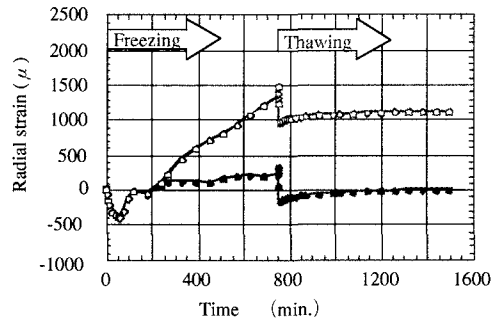


図2 1 cm地点における半径方向ひずみの時間変化
黒丸 非線形弾性解析結果
白丸 弾塑性解析結果

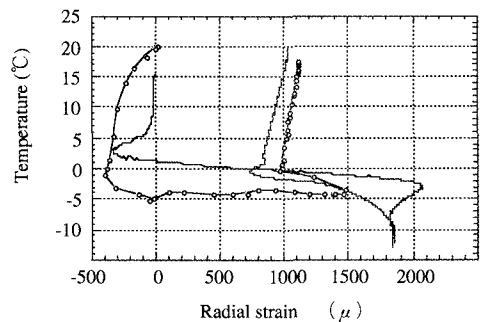


図3 1 cm地点における半径方向ひずみと
その地点の温度変化
実線 実験結果 白丸 弾塑性解析結果