

砂岩の凍結融解における物性パラメータの影響に関する数値解析

埼玉大学工学部 ○正会員 山辺 正
 埼玉大学大学院 学生会員 小出 祐毅
 SIIT, Thammasat Univ. N.M.Krishna

1. はじめに

寒冷地における凍結融解に伴って発生すると考えられる地盤表面のゆるみを考える場合や、各種の低温熱源が岩盤内に存在する場合には、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、弾塑性応力・浸透・熱連成場の数値解析により検討する。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は、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、下添字は総和規約に従うものとする($i, j = 1, 2$)。

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

$$- \rho_0^{(f)} n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0^{(f)} n S_r \rho^{(f)} g \beta_p \frac{\partial h}{\partial t} + \rho^{(f)} C(\varphi) \frac{\partial h}{\partial t} + \rho^{(f)} S_r \frac{\partial U_{ii}}{\partial t} - \rho^{(f)} k(\theta)_{ij} h_{,ji} - \rho^{(f)} \psi^{(f)} = 0 \quad (2)$$

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

D_{ijkl}^ep は異方弾塑性係数テンソル、 β 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 は流体の移動速度、 K_{tij} 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に示す通り、 C に温度依存性を持たせた。収束計算には Newton Raphson 法を適用し、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 (MPa) (< 0)	応力依存	***	飽和度 S_r (%)	100
	応力依存	9.00E+03	飽和透水係数 k (cm/sec)	1.42E-08
ポアソン比 ν (< 0)	0.37	***	水の圧縮率 C_p (/MPa)	4.90E-04
	0.37	0.35	固相の熱膨張率 α (1/)	1.30E-06
密度 ρ (kg/m ³) (< 0)	2.41E+03	1.00E+03	液相の熱膨張率 β_T (1/)	温度依存
	2.41E+03	9.17E+02	粘着力 C (MPa)	温度依存
熱伝導率 K_t (W/m・K) (< 0)	2.21E-01	5.86E-01	摩擦角 Φ (degree)	31
	2.21E-01	2.30		
比熱 C_v (J/kg・K) (< 0)	7.53E+02	4.19E+03		
	7.53E+02	1.88E+03		

連成挙動 弾塑性 相変化

〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255 埼玉大学工学部建設工学科 TEL048-858-3544 FAX048-858-7374

3. 解析境界条件と入力物性値の温度，応力依存性

縦横30cmの比較的均質な白浜砂岩湿潤供試体の中央に直径4.6cmのボアホールを開け，銅パイプを挿入し，内部に - 20 の不凍液を循環させる室内凍結融解試験を実施した．解析メッシュと境界条件を図1とした．同図は供試体1/4断面のさらに熱源付近を模擬している．この砂岩について低温下の力学特性を検討するため，直径5cm，高さ10cmの円柱供試体を用いて，温度を制御した三軸試験を実施した²⁾．凍結下三軸圧縮試験の結果より，強度特性としての粘着力の温度依存性を図2に示す．同図は内部摩擦角一定とした時の粘着力の変化であり，-5 以下の時，粘着力が著しく増加する．また図3は一軸状態の応力-ひずみ関係を示したもので，その接線ヤング率は，初め大きな値をとり，その後一度低下し再び大きな値に返ることがわかる．これら粘着力の温度依存性・ヤング率の応力依存性³⁾を取り込んだ弾塑性・浸透・熱連成解析を実施し，熱伝達係数・熱膨張率についても見直しを行った．

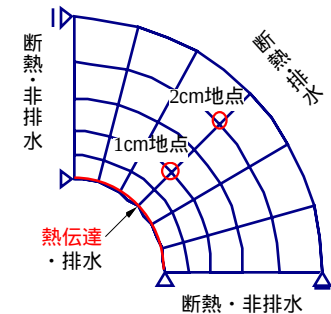


図1 解析メッシュと境界条件

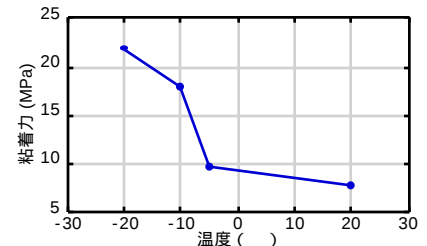


図2 粘着力の温度依存性

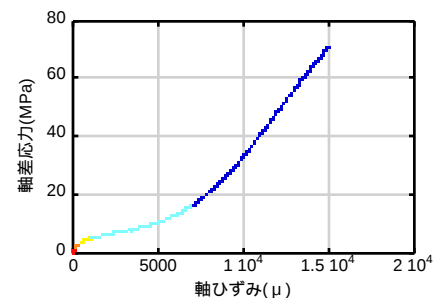


図3 ヤング率の応力依存性

4. 弾塑性・浸透・熱連成解析解析結果

図4は熱源から 1 cm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従来・解析結果と実験値について比較したものである（引張ひずみを正）．ここで従来・解析とは，前節に示した粘着力の温度依存性・ヤング率の応力依存性を考慮していない解析のことである．図5は同じく熱源から 1 cmの地点での温度低下による半径方向ひずみの変化を新・解析結果と実験値について比較したものである．新・解析とは，粘着力の温度依性・ヤング率の応力依存性を考慮した解析である．

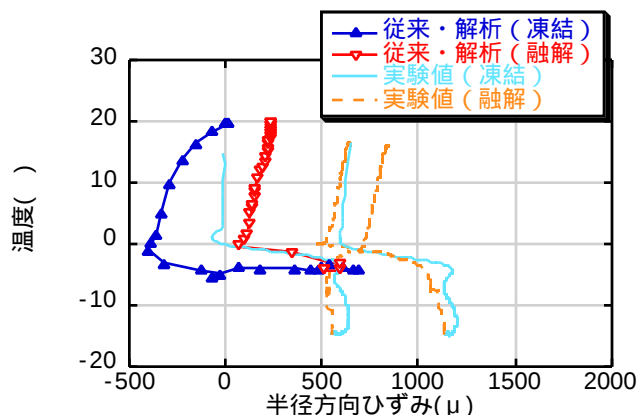


図4 従来・解析と実験値の比較

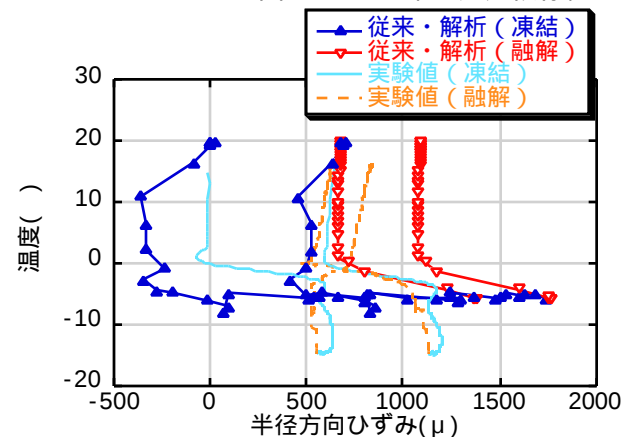


図5 新・解析と実験値の比較

図4，5において三角印が従来・解析，丸印が新・解析，実線が実験値を示しており，両図により粘着力・ヤング率にそれぞれ依存性を考慮する事で，凍結初期でのひずみ挙動や凍結融解終了時の残留ひずみが大きく変化する事がわかる．新・解析結果において残留ひずみが実験値に近づいたことについては，ヤング率の影響が大きいと考えられる．また凍結融解繰り返しにより，実験値に見られるような残留ひずみの蓄積が確認できる．

5. まとめ

応力・浸透・熱連成解析において，粘着力に温度依存性，ヤング率に応力依存性を考慮する事で，解析結果としての残留ひずみは実験値に近づいた．ただし，凍結初期のひずみ挙動について今後さらに検討する必要がある．

参考文献 1) N. M. Krishna, T. Yamabe and R. Yoshinaka : Simulation of a , Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol.36 No.5, pp. 563~580, 1999. 2) 山辺 正，小林 城幸他：低温下における砂岩の変形強度特性に関する実験的研究，第54回土木学会年次学術講演会，pp. 646~647，1999. 3) 山辺 正，小出 祐毅，小泉 泰三：低温下における砂岩・凝灰岩の弾塑性挙動に関する実験的研究，第54回土木学会年次学術講演会，2000.