

岩石・岩盤を対象とした熱・応力・浸透連成現象の解析と問題点
Simulation and It's Problem on Fully Coupled Thermal—Mechanical—Fluid Flow System for
Freezing and Thawing of Rocks and Rock Masses

山辺 正
Tadashi YAMABE

1. はじめに

岩盤内に熱源が存在する場合を想定し熱応力が岩石に与える影響を実験的に解明しようとする研究¹⁻³や、長時間にわたる連成現象に関する興味⁴や予測の必要性から熱・応力・浸透連成現象を取り扱った数値解析の研究⁵⁻⁷が進められてきた。高温側の熱環境としては熱水の地下貯蔵、地熱や油田の開発、放射性廃棄物の地層処分などの分野があり、低温側では液化ガスの岩盤内貯蔵、寒冷地における凍害、各種の凍結工法などが関係する。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、凍結前線が移動する熱移動現象⁸を取り扱うことになる。本文では連成現象について概観した後、特に低温熱源を伴う場合の室内実験と現位置試験および数値解析手法について考察する。

2. 熱・応力・浸透連成問題

熱・応力・浸透連成問題を考える上で、すでにどのような問題が解かれているのかを知ることは重要であり、個別の現象間に見られる一般的な相互作用を図1に示した。応力・浸透連成現象は地盤工学における圧密問題として多くの研究があり、有限変形弾塑性・浸透連成問題までも解くことが出来る段階に至っている⁹。熱・応力連成現象も定常・非定常を問わず幾つかの境界条件に対して厳密解¹⁰が知られており、物性の温度依存性も含めた解析が行われている。さらに、熱と流れの連成現象については流体力学の分野において乱流・強制対流問題¹¹までもすでに解くことが出来るようになった。

岩盤を対象として熱・応力・浸透連成現象を数値解析により解明することが必要になった背景には、高温環境での現象として地熱や油田の開発においてガス・油・水を含む流体が、変形する多孔質体中を浸透する問題を解析する必要に迫られた^{12,13}ためと思われる。また、放射性廃棄物の地層処分が現実に対処しなければならない問題として認識されてからの熱・応力・浸透連成現象に関する研究の進歩は目覚ましい¹⁴⁻²⁰。一方低温熱源を含む問題としてすでに実績のある解析例には、LNGタンク周辺

の応力解析手法²¹を挙げることが出来る。この場合には、地盤を構成する土質毎の凍上率から温度変化の影響を初期ひずみとして解析に取り込んだ形式をとっている。これら個別の現象で既に実績のある連成関係を構成則に全て取り込むことも可能であろうが、まずは基本的な法則の確認と最も感度の高いパラメータが何であるかを検証しておく事が必要であり、それさえ明らかになれば連成解析ではなく個別の解析で十分かもしれない。

図1に示すような応力・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。

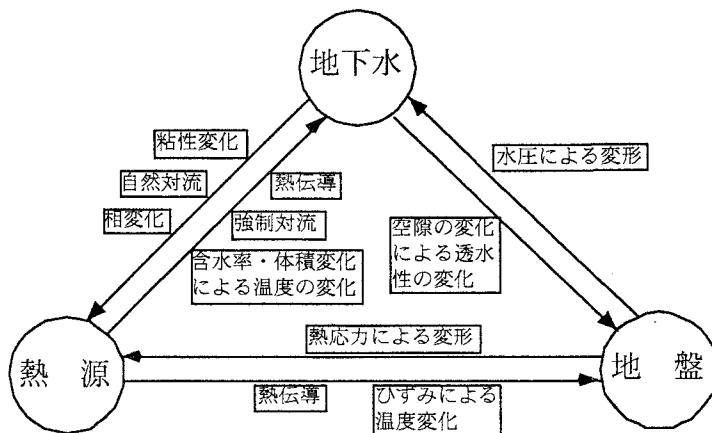


図1 熱・応力・浸透連成場における一般的な相互作用

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。

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

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

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

D_{ijkl}^e は弾塑性テンソル、 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おり、下添字の0は基準状態を表している。支配方程式の導出にあたっては、式(2)の誘導においてダルシー則が固相と液相の相対速度に透水テンソルを乗じた構成則であること、水の密度が温度と圧力に依存していることに注意すればよい。式(3)は古典的な熱力学の範囲内での誘導に従っている。いずれにしても構成関係をなるべく簡便な形式に留めておき、対応するパラメータも独立した実験から求めることが出来る量とし、複雑な連成現象を見通し良くすることが重要である。離散化にあたっては、未知数の自由度に応じて適切なアイソパラメトリック要素を組み合わせること、移流項が解の安定性に対して問題になるとときには形状関数を変更することなどが必要である。

3. 低温熱源の存在する室内実験とその解析^{22),23)}

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°C に冷却した不凍液を循環させる室内凍結融解試験を実施した。この室内試験を模擬するため凍結管の熱伝達係数を、 $h=1.0 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 、外部温度を -20°C とした。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°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こととした。

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 程度のひずみで膨張速度が緩やかになり750分ではほぼ収束している。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。融解過程では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と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°C 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。これらの結果は、内部変数としての水の物性値に温度依存性を取り入れることによって実現した。

表1 室内実験結果の連成解析に用いた物性値

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 ($\text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$) ($< 0^{\circ}\text{C}$)	5.28E-04	1.40E-03	固相の熱膨張率 α ($1/^{\circ}\text{C}$)		8.80E-06
比熱 C_v ($\text{cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$) ($< 0^{\circ}\text{C}$)	1.80E-01	1.00	液相の熱膨張率 β_T ($1/^{\circ}\text{C}$)	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

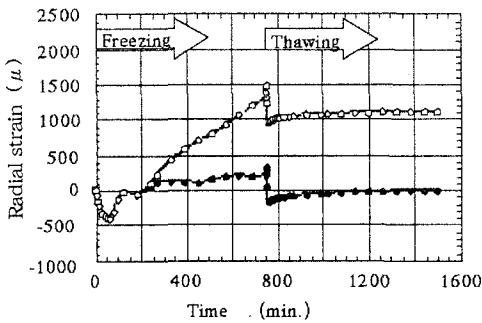


図2 半径方向ひずみの時間変化
(黒丸；非線形弾性，白丸；弾塑性解析)

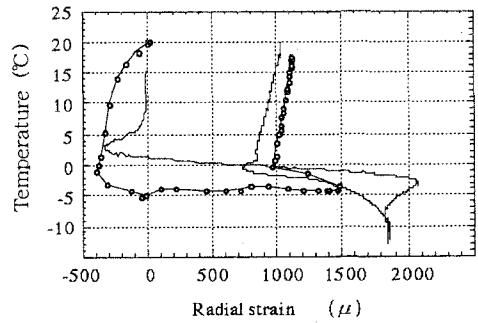


図3 半径方向ひずみと温度の関係
(実線；実験，白丸；弾塑性解析)

4. 低温熱源の存在する現位置試験^{24),25)}

不連続性岩盤内に低温熱源が存在する場合の熱・応力・浸透連成現象を計測した例として、花崗閃緑岩からなる釜石鉱山の坑道内において岩盤の凍結・融解試験を実施した例から試験中の熱伝導特性についての結果を述べる。

凍結融解試験を繰返し実施した試験場の計測計器設置状況と亀裂分布の平面図を図4に示す。岩盤表面において図中のCaで表される方解石系の不連続面と、点線で表される緑泥石をはさむ不連続面が観察された。同図の中央にある一列の白丸（9点）は深さ方向2.5mまで埋設した凍結管を表している。L1～L3の温度測線に、深さ方向3mにまで総計44点の熱電対を設置し、8サイクルにわたる凍結融解過程における岩盤中の非定常温度分布を測定した。また、同図には各種の変位計を設置した状況も併せて示す。

凍結過程における温度経時変化の一例を図5に示す。同図は、第3サイクル時の凍結過程において測線1に沿う深度1m地点で計測された岩盤中の温度分布の経時変化を示す。試験開始前は測線に沿いほぼ一定であった岩盤温度は、凍結過程に入るとすぐに凍結管軸上に位置する観測孔No.4で温度が低下し、そこを中心として左右ほぼ対称に下に凸状の温度分布形状を描く。凍結過程終了直前では、凍結管により近い観測孔の熱伝達速度ほど遅くなっている傾向が読み取れる。これらの観察から対象とした岩盤の熱特性は連続体として近似して良いことを支持している。変形特性の詳細は参考文献²⁶⁾にゆずるが、凍結融解に伴う岩盤表面での変形は非線形特性を示し、室内試験でも観察された収縮→膨張→収縮と挙動する傾向を示した。

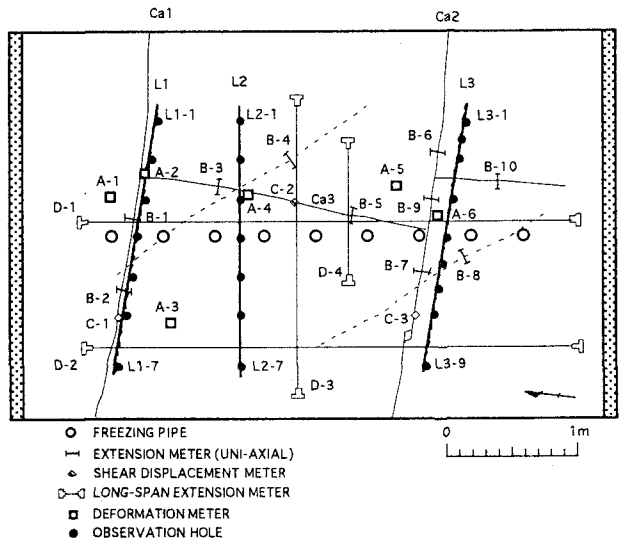


図4 釜石鉱山凍結融解試験場の不連続面および計器配置状況（平面図）

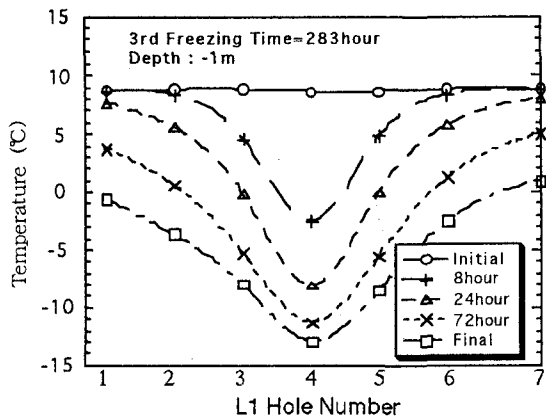


図5 凍結過程の測線1，深度1mにおける温度分布変化

5. まとめ

熱・応力・浸透連成現象とその解析方法について概観した後、室内実験を模擬した熱・弾塑性応力・浸透連成解析において、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ることを示した。また、不連続性岩盤を対象とした凍結融解試験から得られる熱伝導特性について述べた。

6. 参考文献

- 1) 稲田善紀, 八木則男: 低温下における岩石の熱物性値, 材料, 29巻, 327号, pp.1228 - 1233 (1980) .
- 2) Inada Y. and Yokata K. Some Studies of Low Temperature Rock Strength *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* Vol. 21, No. 3, pp. 145-153 (1984).
- 3) 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, Vol. 45, No. 3, pp. 352 - 358 (1996) .
- 4) Biot M.A. General Theory of Three Dimensional Consolidation, *J. of App. Physics*, 12, 155-164 (1941).
- 5) Thunvik R. and Braester C. Hydrothermal Conditions around a Radioactive Waste Repository. In W. Lutze (ed), *Scientific Basis for Nuclear Waste Management V*, Material Research Society, Symposium proceedings, Volume II, Elsevier (1982).
- 6) Marsily G. An Overview of Coupled Process with Emphasis on Geohydrology. In C.-F. Tsang (ed), *Coupled processes associated with nuclear waste repositories*. Academic Press (1987).
- 7) Amy M. O. and Rouset G. Thermo-hydro-mechanical Modeling of an Underground Radioactive Wastes Disposal. In I. M. Smith (ed), *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, A.A. Balkema, (1994).
- 8) Crank, J. *Free and Moving Boundary Problems*, , Oxford Science Publication, Oxford University Press, (1984).
- 9) Asaoka, A. , Nakano, M. and Noda, T.: Soil-water coupled behaviour of saturated clay near / at critical state, *Soils and Found.*, Vol.34, No.1, (1994).
- 10) 矢川元基: 流れと熱伝導の有限要素法入門, 培風館 (1980). 11) 保原充他編: 数値流体力学, 東京大学出版会 (1992).
- 12) Bear J. and Corapcioglu M.Y.: A Mathematical Model for Consolidation in a Thermoelastic Aquifer due to Hot Water Injection or Pumping, *Water Res. Research.*, 17, 723-736 (1981).
- 13) R.W. Lewis & B.A. Schrefler *The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media* , John Wiley (1987).
- 14) Hart R. D. *A fully coupled thermal-mechanical-fluid flow model for non-linear geologic systems*, Ph.D. thesis, Univ. of Minnesota (1981).
- 15) Hart R. D. and John C. M. St. Formulation of a fully coupled thermal-mechanical-fluid flow model for non-linear geologic systems. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* Vol. 23, No. 3, pp. 213-224 (1986).
- 16) Aboustit B.L., Advani S.H. and Lee J.K. Variational Principles and Finite Element Simulations for Thermo-elastic Consolidation., *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 9, 49-69 (1985).
- 17) Booker J.R. and Savvidou C. Consolidation Around a Point Heat Source, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 9, 173-184 (1985).
- 18) Ohnishi Y. and Kobayashi A. Thermal-Hydraulic-Mechanical Coupling Analysis of Rock Mass. In J.A. Hudson (Ed.) *Comprehensive Rock Engineering*, Analysis and Design Method Vol. 2, Pergamon Press, (1993).
- 19) Seneviratne H.N., Carter J.P and Booker J.R, Analysis of Fully Coupled Thermo-mechanical Behavior around a Rigid Cylindrical Heat Source Buried in Clay, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 18, 177-203 (1994).
- 20) Giraud A. and Rouset G. Thermoelastic and Thermoplastic Response of a Porous Space Submitted to a Decaying Heat Source, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 19, 475-495 (1995).
- 21) 土質工学会編: 土の凍結—その理論と実際—第1回改訂版 (1994).
- 22) 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) .
- 23) 山辺正, 石山宏二, 柿沢雅樹: 間隙水の相変化を考慮・・・研究, 第52回土木学会年講, III-A315, pp.630-631 (1998)
- 24) 山辺 正, 渡辺邦夫, 黒澤聡, 石山宏二, 野本 寿: 現位置凍結融解試験に伴う地下き裂の熱応力挙動解析, 第9回岩の国内シンポジウム講演論文集, pp.211-216 (1994) .
- 25) 石山宏二, 渡辺邦夫, 山辺 正, 野本 寿: 低温熱環境下における岩盤の温度分布特性—釜石鉱山における岩盤凍結融解試験, 応用地質, Vol.37 No.2, pp.2-10 (1996) .