

III-647

岩盤の凍結を考慮した熱・応力・浸透解析

埼玉大学 正員 ○ 山辺 正
電源開発 正員 渡辺 孝浩

1. はじめに

地盤が低温熱源などにより冷却されると地盤内の水分が相変化して凍結するために、地盤は複雑な挙動を示す。このように地盤の凍結現象は熱移動と水分移動が連成した現象であり、これを実験的な手法だけで解明することは難しい。本研究は地盤が凍結する際の挙動を説明できる構成関係の探求とその数値解析手法の開発を目的としている。これらの現象を解析的に解明しようとした研究にはステファン問題¹⁾としての取り組み²⁾³⁾をはじめとしていくつかの試みがある。ここでは熱移動・応力・浸透の各現象が連成する場の支配方程式を連続体力学に沿って誘導し、有限要素法を用いて離散化した結果に基づいて解析コードを作成した。また、凍結域を考慮する場合の構成則に含まれる物性値の温度依存性についても考察した。

2. 解析コードの検証

本研究が対象としている問題では、熱移動・間隙水の移動・変形現象が相互に連成しており、これらの現象が同時に発生している場の数値解析を可能にする有限要素解析コードを作成した。開発した解析コードの妥当性を、一次元非定常熱伝導問題と半無限媒体中の円孔周りの非定常熱伝導問題に対する厳密解⁴⁾による検証を別途済ませた⁵⁾。そこでここでは、乾燥状態の岩質材料の冷却実験を対象として検証を進めた。凍結融解試験に用いた直方供試体は、奥行き12cm×幅30cm×高さ45cmの砂質凝灰岩である。この供試体の中央に直径46mmのボアホールが設けてあり薄肉の銅パイプ中に冷媒を循環させる事により供試体が冷却される。実験に用いた試料の物理的性質と変形特性については別報⁶⁾を参考にして頂きたい。この実験を模擬した解析結果と実挙動の比較が図-1である。解析に用いた要素分割は同図中に示す通りであり、円孔壁面からの距離 $r = 0.5, 1.5$ cm の位置における温度の時間変化が良く表現できている。なお、解析には複合6節点および複合9節点のアイソパラメトリック要素を用いている。

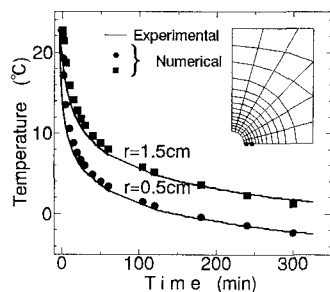


図-1 温度－時間関係（乾燥状態）

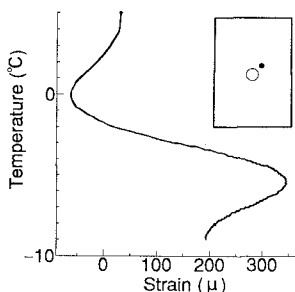


図-2 温度－ひずみ関係（湿潤状態）

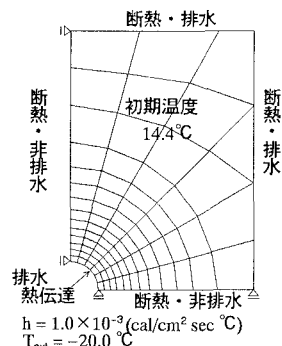


図-3 要素分割と初期・境界条件

3. 凍結域を考慮した連成解析

凍結域を考慮した解析に先立ち低温域での岩質材料の基本的な性質を調べる目的で室内凍結試験を実施した。結果の一例を図-2に示す。同図は湿潤供試体の表面に貼り付けたロゼットゲージから求めた主歪と温度の関係を表している。ロゼットゲージは多数枚貼りつけたが、一例として円孔右上45°の位置（図-2参照）にあるロゼットゲージのデータを示す。5°Cから0°Cまで収縮し、0°Cから-5°Cの間に急激に膨張している

様子が読み取れる。この挙動は、まさに間隙内部に含まれる水の物性を反映したものであるが、 0°C から -5°C まで膨張が続く事は、間隙内部の水が徐々に凍結していく事を表しており、凍結現象が間隙の大小に依存していると考えられる。そこで、凍結膨張現象のモデル化にあたっては、間隙水と岩質部分の二相混合材料の連成挙動として考慮し、間隙水の物性値の温度依存性、浸透特性、凍結温度に関していくつかのモデルケースを想定して数値実験を行い、それらの結果を比較検討した。さらに凍結温度以下においても未凍結の水分の存在することが予想されるため、凍結域近傍の未凍結水分量を評価し考慮することが必要かつ重要であることが判明した。これらを踏まえて、直方供試体による凍結融解実験を模擬した数値解析を実施した。解析に用いた要素分割と初期条件・境界条件を図-3 に示す。また、図-2 の結果と石塚らの実験値⁷⁾を同一グラフ上に表すために正規化したひずみを横軸にとり、凍結膨張の影響を数値解析によって調べると図-4 となる。数値解と実験値は必ずしも一致しないが、第1次近似として採用できそうである。なお、解析に用いた物性値を表に示す。

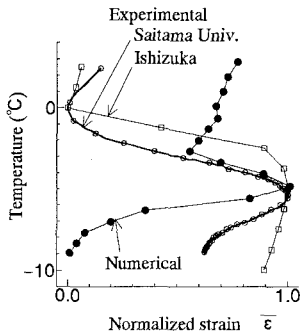


図-4 数値解と実験値の比較

材料物性	温度域 $^{\circ}\text{C}$	値
弾性定数	-20.0 $\sim$ 20.0	1.0×10^4 [kgf/cm^2]
ポアソン比	-20.0 $\sim$ 20.0	0.25
固相の密度	-20.0 $\sim$ 20.0	1.83 [g/cm^3]
水の密度	-20.0 $\sim$ 0.0	0.917 [g/cm^3]
	0.0 $\sim$ 20.0	1.0
間隙率	-20.0 $\sim$ 20.0	22.2 [%]
飽和度	-20.0 $\sim$ 20.0	100 [%]
水の圧縮率	-20.0 $\sim$ 20.0	4.9×10^{-5} [cm^2/kgf]
飽和透水係数	-20.0 $\sim$ 20.0	1.0×10^{-5} [cm/sec]
固相の熱伝導率	-20.0 $\sim$ 20.0	2.5×10^{-3} [$\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$]
水の熱伝導率	-20.0 $\sim$ 0.0	5.5×10^{-3} [$\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$]
	0.0 $\sim$ 20.0	1.4×10^{-3}
固相の比熱	-20.0 $\sim$ 20.0	0.195 [$\text{cal}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$]
水の比熱	-20.0 $\sim$ 0.0	0.45 [$\text{cal}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$]
	0.0 $\sim$ 20.0	1.0
固相の熱膨張率	-20.0 $\sim$ 20.0	9.0×10^{-6} [$1/^{\circ}\text{C}$]
水の熱膨張率	-20.0 $\sim$ 20.0	温度依存性 [$1/^{\circ}\text{C}$]

4. まとめ

本研究は、地盤が凍結する際の熱移動現象および変形挙動を模擬できる数値モデルを、凍結域を考慮した熱移動・応力・浸透連成解析手法による数値実験から探求したものである。その結果、

- (1) 間隙水の材料物性値の温度依存性、特に熱膨張係数が凍結域の変形挙動を支配する。;
 - (2) 0°C 以下の未凍水分量（液状水量）とその挙動を考慮して解析することにより凍結膨張現象を定性的に表わすことができる；
 - (3) 岩質材料の間隙中の水分は 0°C の凍結温度以下においてもその全てが凍結するのではなく未凍水分が存在すると考えられ、この未凍水分が凍結域の変形挙動において大きな役割を果たすと考えられる；
- などの知見を得た。

参考文献

- 1) 山口昌哉, 野木達夫: ステファン問題, 数理解析とその周辺 17, 1976.
- 2) Ichikawa, Y. & Kikuchi, N.: Int. J. Num. Meth. Engng, 14, 1221-1239, 1979.
- 3) Crank, J.: Free and Moving Boundary Problems, Clarendon Press, 1984.
- 4) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C.: Conduction of Heat in Solids (2nd.ed.), Clarendon Press, 1980.
- 5) 渡辺孝浩 他: 凍結融解を受ける岩質材料の伝熱特性に関する数値解析, 第47回土木学会年講, 1992.
- 6) 山辺 正 他: 凍結融解を受ける岩質材料の変形特性に関する実験的研究, 第47回土木学会年講, 1992.
- 7) 石塚 与志雄, 名古屋大学学位論文, 1988.