

(48) 原位置凍結・融解試験における温度分布特性とその解析

埼玉大学大学院	○武田 聖司
西松建設技術研究所	石山 宏二
埼玉大学工学部	渡辺 邦夫
埼玉大学工学部	山辺 正

Analysis of three dimensional temperature distribution observed during an in-situ freezing and thawing test

Seiji Takeda, Saitama University
Koji Ishiyama, Nishimatsu Const.Corp
Watanabe kunio, Saitama University
Yamabe Tadashi, Saitama University

Abstract

An in-situ freezing and thawing test has been carried out in a part of fractured rock mass of the Kamaishi Mine, Japan. Nine freezing pipes were installed in the rock mass and the transient temperature changes has been continuously measured during the test. This three dimensional temperature changes around the pipes were numerically simulated by calculating the basic equation for the conductive-convective transfer of heat. Galerkin' technique was used for the calculation. The fractured rock mass was assumed as an equivalent porous medium. Thermal properties used in the calculation were estimated by some laboratory tests. The simulated temperature distribution was in a good agreement with the measured one. It was concluded that the equivalent porous medium model was well accepted for the rock mass of this test site.

1、はじめに

岩盤の凍結・融解をともなう一連の現象に関する研究は、低温物質の岩盤内貯蔵、寒冷地における地下開発、また最近では、岩盤中の放射性核種を用いたトレーサー試験を評価するための試料採取を凍結により行なう計画¹⁾など、多方面にその重要性が高まっている。そこで現在、釜石鉱山の坑道内において不連続性岩盤を対象とした原位置凍結・融解試験を実施している。本研究は、特に凍結過程における試験対象領域の温度分布の特性に注目した。また、対象岩盤を3次元均質領域としてモデル化を行ない、有限要素法により非定常熱伝導解析を試みた。解析では、熱物性値の温度依存性、凍結潜熱、熱境界条件、さらに地下水による熱輸送効果などを考慮し、各パラメーターの熱伝導に及ぼす影響を原位置試験の温度計測結果との比較から明らかにした。

2、試験領域のモデル化と3次元非定常熱伝導解析の概要

まず、現在進行中の原位置凍結・融解試験の概要を説明する。試験は、図-1に示すトンネル底面部に、深さ2.5mの位置まで凍結管を坑軸に平行に9本挿入し、周囲を凍結させるものである。計測は、温度計測、変位計測、湧水量計測の3種類行なっている。温度計測は、図-1に見られる3本の測線上に位置する23ヵ所の観測孔で、それぞれ地表から-1m、-2m、-3mの深さにサーミスターを設置し自動計測により行なっている。試験場の地質は花崗閃緑岩からなり、また観察される割れ目系は緑泥石(chrolite)割れ目と方解

石 (calcite) 割れ目である。これら 2 種類の割れ目系には単軸亀裂変位計 (8ヶ所) と 2 軸亀裂変位計 (2ヶ所) を設置し、凍結・融解時における割れ目の変形を計測している。変位計は他に 3 軸変位計 (6ヶ所)、を岩盤表面にセットし 3 次元的な岩盤の変形を計測している。なお、原位置試験に関する詳細は石山ら²⁾、地質調査の詳細については文献³⁾・⁴⁾によりすでに報告している。

原位置凍結・融解試験における温度特性を把握するための第 1 段階として、有限要素法による 3 次元非定常熱伝導解析を試みた。今回、試験対象領域を飽和多孔体とし、岩と水の温度が等しいものとする通常の混合系熱伝導理論を用いることにした。流速 V による熱移動の効果を考慮した熱伝導方程式は

$$(\rho c) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) - (\rho c)_f V \cdot \nabla T$$

で与えられる。ここに、 ρc は混合系の体積熱容量、 κ は混合系の熱伝導率、 $(\rho c)_f$ は水の体積熱容量を表す。図-2 に解析モデルの概念図を示す。試験領域の岩盤表面は水平面ではなく、最大 16cm の高低差が見られる。解析では表面を水平とし、図-2 に示すように深さ方向 (Z 軸) に対し仮想基準面を設けた。解析領域の範囲は、測線 1・2 と 5 本の凍結管を含む切羽側 (北側) 領域 4.2m × 3.0m、深さ 4.1m に設定した。この仮想基準面から各観測孔における岩盤表面までの平均距離は 30.5cm であるが、解析モデルでは岩盤表面を平面近似し 30cm の位置にあるものとした。また温度計測はこの仮想基準面から -1m、-2m、-3m の各深さで行なっている。次に有限要素法に用いたメッシュ分割図を図-3 に示す。要素数は 3136、節点数は 3825 である。凍結管 (2.5m) 上の節点数は合計 45 であり、温度を原位置試験に使用したブライン温度 (-20.0℃) に設定した。

熱境界条件を表-1 に示す。まず側面境界のうち南側境界は断熱境界とし、北・東・西側境界及び下部境界は一定温度境界とした。一定温度境界の温度は、凍結試験前にあらかじめ測定しておいた岩盤内温度の平均値 8.0℃ に設定した。さらに上部境界は熱伝達境界とし、上面からの熱の流入を考慮した。岩盤表面近傍における急激な温度変化の生じる温度境界層厚さを今回 3.0cm と考え、空気の熱伝達率から平均熱伝達率 2.0×10^{-5} (cal/cm²・sec・℃) で計算した。この時岩盤表面温度と温度境界層外部の温度 (外部基準温度) との差が必要となる。今回、外部基準温度はトンネル内温度の 10℃ を用いた。

表-1、境界条件一覧

南側境界	断熱境界
北・東・西側境界 及び下部境界	一定温度境界 8.0℃
上部境界	熱伝達境界

・熱伝達率 = 2.0×10^{-5} (cal/cm²・s・℃)
・外部基準温度 = 10℃

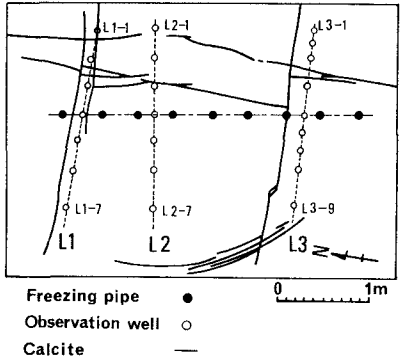


図-1、原位置試験場の凍結管と温度センサーの位置

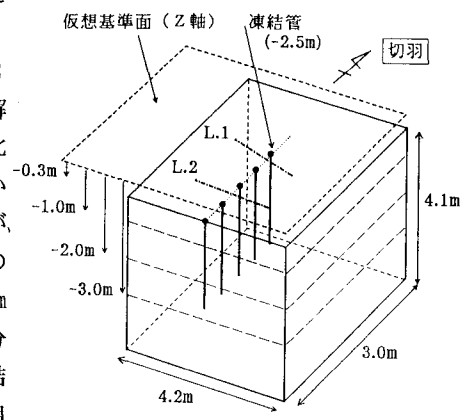


図-2、解析領域のモデル化

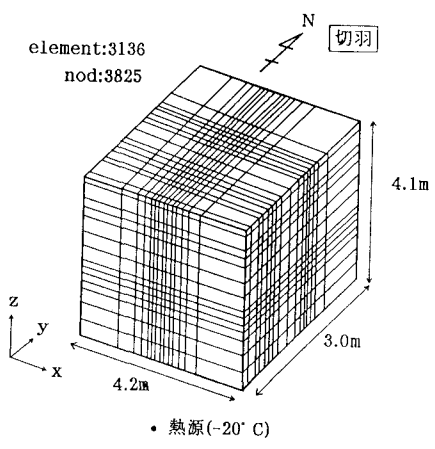


図-3、メッシュ分割図

次に、解析に必要な花崗岩の各物性値について述べる。熱物性値については、原位置試験場からサンプリングした供試体を用いて、比熱及び熱伝導率の温度依存性を調べた。乾燥及び湿潤状態における比熱の温度依存性を図-4に示す、0℃付近の水が相変化する温度領域で、大きな比熱の変化が見られる、これは水の相変化にともなう潜熱の影響によって、見かけ上比熱が上昇したものと考えられる。しかし、今回の解析対象となる温度範囲(-20℃～10℃)では、0℃付近に温度依存性が見られるほかは値に大きな変化はなく、この傾向は熱伝導率に関しても同様である。今回の解析では、凍結の前後で熱物性値を一定と扱うことにした。表-2に解析に用いた物性値の一覧を示す。掘削時の発破による割れ目の開口³⁾を考慮し、平均間隙率を3%としている。比熱の0℃付近に見られた潜熱による影響は、原位置試験の温度計測結果にも現われている²⁾、そこで、図-5のフローチャートに従い、各節点で凍結潜熱を考慮することにした。潜熱取り扱いのフローは、まず、熱伝導方程式を解くことで各節点温度を求める。0℃以下の節点ではある時間ステップに蓄えられた熱量DQを計算し、今までのトータル熱量TQを見積もる。次にTQが凍結に必要な潜熱量Lに達したかを判定する。達していなければ、まだその節点を凍結中とみなし節点温度を0℃とする、達した場合、凍結後の温度を潜熱量を越えた熱量から新たに求めることにする。各節点に与える単位体積あたりの凍結潜熱は次式で与える。

$$L = \gamma_d \cdot \omega \cdot L_1$$

ここに、 γ_d は乾燥密度、 ω は含水比、 L_1 は水の凍結潜熱を表す。

熱の移動は、熱伝導の効果以外にも地下水流れによる移流の影響も考えられる。実際、試験場にも著しい湧水点が数箇所見られ²⁾、十分に地下水流が熱の移動に影響を及ぼしていることが考えられる。試験場周辺の水理環境の調査は現在計画段階であり、割れ目の透水性や圧力分布などの水理情報は今のところ不確定である。しかし、移流効果を解析に導入することは移流による熱輸送の影響を把握するうえで重要であるので、今回、流速は試験場への湧水量から推定する。凍結試験前に測定された総湧水量と流出面積から初期流速を 1.5×10^{-5} (cm/s)とし、方向は岩盤表面に向かう流れと仮定し全要素に与えた。凍結領域の成長が、地下水流れに与える影響も考慮しなければならない。しかし、解析上、3次元的に内部境界を追跡することは凍結領域の結合の問題などもあり極めて困難である。よって解析では、便宜上、凍結状況によって要素内流速を下げる手段を考えた。つまり、1つの直方体要素には8つのコーナー節点があり、潜熱を考慮したプログラムにおいて凍結後と判定された節点の個数に応じて流速を低下させるものである。8節点すべて凍結後と判定されれば流速は0となる。

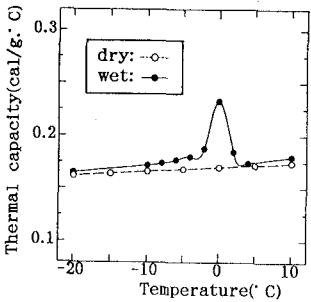


図-4、比熱の温度依存性

表-2、解析に用いた物性値

乾燥密度	γ_d (g/cm ³)	2.64
間隙率	ϕ (%)	3.0
飽和度	S_r (%)	100
含水比	ω (%)	1.13
湿潤密度	ρ (g/cm ³)	2.67
比熱	c (cal/g·°C)	0.172
熱伝導率	κ (cal/cm·sec·°C)	7.1×10^{-5}
凍結潜熱	L_1 (cal/g)	80.0

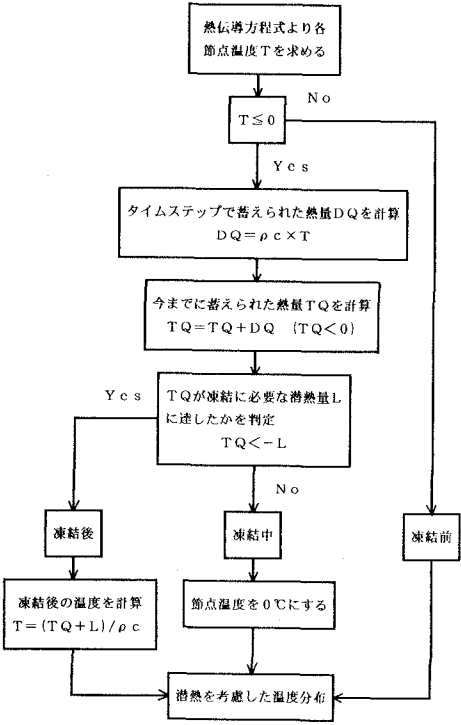


図-5、潜熱フローチャート

以上より、今回の3次元非定常熱伝導解析は次の3ケースについて8日間の凍結過程を想定し行なった。

- ・ case 1 : 熱伝導による解析
- ・ case 2 : 潜熱を考慮した熱伝導解析
- ・ case 3 : case 2に移流の効果を考慮した解析

3、温度計測結果と解析結果との比較検討

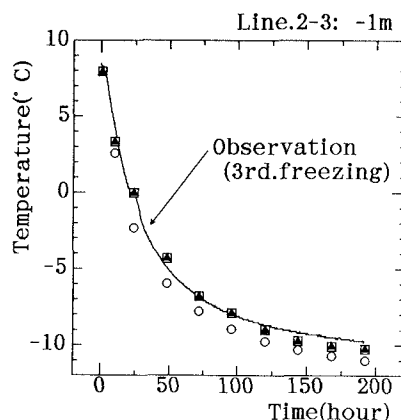
case 1～3の解析結果と第3回の凍結試験より得られた実測値との比較例を図-6に示す。図-6の(a), (b), (c)はそれぞれ図-1の観測孔2-3の各深さ(-1m, -2m, -3m)での温度の経時変化を表している、実測値は実線で示している、case 1 (白丸)の結果は潜熱の影響を考慮していないため熱移動が大きくなり、0℃付近の温度を境に実測値を下回る結果となっている。case 2 (白四角)とcase 3 (実三角)の結果は、各深さにおいても実測値の温度低下の割合と極めて良い一致が見られる。今回の潜熱を含めた解析は、水の相変化に伴う温度変化の不連続性のある精度の範囲で表現できたと言える。しかし、-1mと-2mの実測値はどの観測孔においても-2mでの温度が最も低い値を示していたが、岩表面からの熱流入を考慮してもその傾向を十分に表現できなかった。これはまず1つに、熱伝達境界の設定の誤差による影響が考えられる。2つめに、発破などの影響によって-1m程度の深さを境に岩盤構成に違いが生じ、岩の熱伝導や潜熱に影響を及ぼしたものと考えられる。case 2とcase 3の-1m、-2mにおける非定常変化には差が見られず、移流による熱輸送の効果はほとんど現われていない。特に、-3mにおける温度変化にその効果が認められる、観測孔2-3の-3mにおける実測値と各解析

ケースの結果の一覧を表-3に示す。

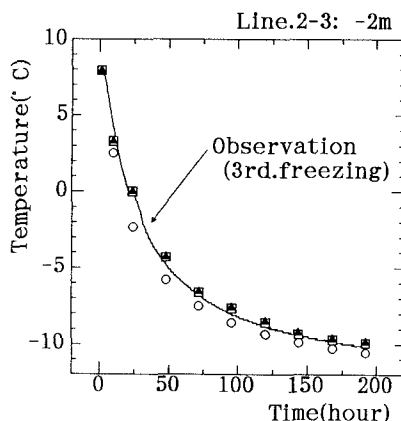
表-3、実測値と各解析結果
の一覧 (L.2-3:-3m)

case 3で120時間後に0℃に達するまでcase 2との温度差は徐々に大きくなり、0℃以下になるとほぼ温度差に変化は見られない、192時間後には0.5℃の温度差が生じた。凍結管の挿入深さが-2.5mであるため、-3m位置での温度変化が下から岩盤表面に向う移流の

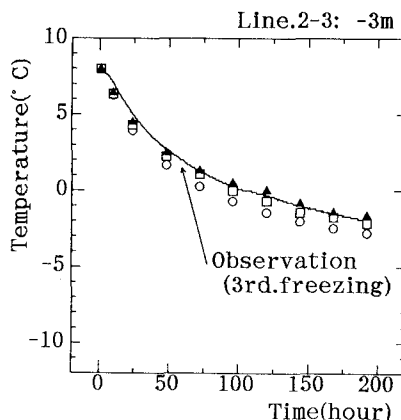
経過時間 (hour)	case1 (℃)	case2 (℃)	case3 (℃)	実測値 (℃)
1	7.99	7.99	7.99	7.9
10	6.27	6.34	6.41	7.1
24	3.94	4.31	4.48	5.1
48	1.65	2.23	2.47	2.7
72	0.26	1.07	1.30	1.3
96	-0.72	0.00	0.50	0.3
120	-1.46	-0.70	0.00	-0.3
144	-2.02	-1.44	-0.85	-1.0
168	-2.46	-1.75	-1.44	-1.5
192	-2.78	-2.14	-1.64	-1.9



(a)



(b)



(c)

case1:○ case2:□ case3:▲

図-6、温度の非定常変化の比較

影響を最も受けやすいと言える。また、深さ-3mにおける移流による影響は凍結管ラインより離れた位置において顕著に現われている。これは、熱源に近い位置にある岩盤ほど温度勾配が大きくなり熱伝導に支配された形の熱移動形態をとると考えられる。逆に、遠い位置にある岩盤は温度勾配が緩やかになり移流の効果を受けやすくなったものと考えられる、図-7は凍結管ラインから最も遠い位置にある観測孔2-7における実測値との比較を表したものである。

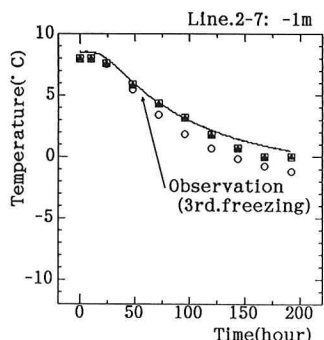
case 2, case 3の解析結果の比較でも120時間以降1℃程度のずれが生じているが、精度的には問題ないものと思われる。また、他の観測孔で見られる実測値との温度のずれは最大±1.5℃程度に収まり第1次近似として試験領域の温度分布を再現できたと考えられる。図-8は、case 2の凍結終了時における3次元温度分布を表している。岩盤表面からの熱流入や凍結管からの熱の広がり状況が表現されている、また、今回の研究では解析値に影響を及ぼす一定温度境界の位置、つまり解析領域の大きさについて検討することも目的の1つとした。この点について解析領域を変化させた計算を行なったが、今回報告した解析領域でも上記に示したように十分な結果が得られることがわかった、熱伝達境界については、今回熱伝達率を仮定し解析を行なったが、原位置において境界層厚さを計測し正確な熱流入を見積もることが必要である。

4、結論

花崗岩を対象とした原位置凍結・融解試験の温度計測結果に対し、試験場から得られた情報をもとに均質多孔体モデルによって数ケースの3次元非定常熱伝導解析を試みた。その結果、潜熱を考慮することにより第1次近似として試験領域の温度分布を表現することができた、また、各熱境界条件の温度分布に及ぼす影響から解析領域の大きさについて検討することができた。移流を考慮した解析においてはZ方向の一樣流を仮定しその影響を評価することを試みた。このように解析では実際の現象をうまく表現できたが、岩盤における凍結融解現象では局所的な割れ目内の流れが温度分布に大きな影響を及ぼすことが考えられる。実際、原位置試験場で観測される湧水の多くは割れ目における位置で観察されている。割れ目モデルによる室内試験においても、水の凍結に伴う体積膨張によって、凍結域周辺の水が排除され、外向きの流れが生じることも確認されている^{3) 5)}。さらに温度による密度差が原因で生じる自然対流の影響も考えられ、今後、凍結に伴う割れ目の変形挙動を把握するためにも割れ目内の流れを含めた熱伝導解析が必要である。

参考文献

- 1) Alexander w. r., Grimsel test site: The migration experiment: Current status of the excavation project and proposals for phase 3, NAGURA Interner Bericht, 91-43, pp. 1-47, 1991.
- 2) 石山ら：釜石鉱山における岩盤凍結融解試験(その2)、第25回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, 1993.
- 3) 渡辺ら：釜石鉱山における岩盤凍結融解試験(その1)、第24回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp. 96-100, 1992.
- 4) 武田ら：原位置岩盤凍結融解試験における実岩盤の三次元モデルの設定, 第47回土木学会年次学術講演会論文集Ⅲ, pp. 1134-1135, 1992.
- 5) 石山ら：凍結に伴う、岩盤割れ目中に含まれる水の排除現象の数値解析, 第47回土木学会年次学術講演会論文集Ⅲ, pp. 1132-1133, 1992.



case1:○ case2:□ case3:▲
図-7、温度の非定常変化の比較

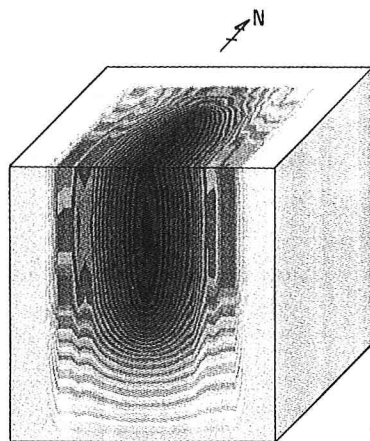


図-8、3次元温度分布図(case2)