

(47) 釜石鉱山における岩盤凍結・融解試験(その2)

西松建設 正会員 ○石山宏二, 正会員 野本 寿
埼玉大学工学部 正会員 武田聖司, 正会員 渡辺邦夫
埼玉大学工学部 正会員 山辺 正

Freezing and thawing test in the Kamaishi Mine (Part 2)

Koji ISHIYAMA, Toshi NOMOTO, Nishimatsu Const. Co. Ltd.
Seiji TAKEDA, Kunio WATANABE, Saitama University
Tadashi YAMABE, Saitama University

Abstract

A large scale in-situ freezing and thawing test has been in progress in a drift of Kamaishi Mine to know the influence of the groundwater flow, the transient temperature distribution and the deformation of the fractured rock mass during freezing and thawing. Four cycles of the freezing and thawing test have been already carried out. The freezing periods and the thawing periods were about 10 days and 1 months respectively. Brine was circulated in nine freezing pipes installed in the rock during the freezing process. It was fixed at -20°C . The cooling and circulation of Brine were stopped during the thawing process. This paper discusses the behaviour of the heat conduction and the deformation in fractured rock mass during freezing and thawing test.

1. はじめに

掘削した岩盤空洞内におけるLNGなど極低温物質の貯蔵および消費、あるいは超伝導電力設備などの建設に伴う岩盤の強制的な低温化が計画されるようになり、地下での岩盤凍結・融解現象の把握が必要となってきている。従来、低温下における岩石の力学特性を把握するために、数値解析あるいは室内実験がなされてきた¹⁾。これらの研究は、均質岩盤あるいは理想的なき裂を数本含んだ場合を想定していることが多いようである。しかしながら、実際の岩盤にはき裂が多数存在し、その性質は極めて複雑である。き裂を含む実岩盤の力学特性の把握や解析手法の改良など多くの課題が残されている現状において、実岩盤を用いた原位置試験を実施することは極めて重要である。そこで、釜石鉱山の坑道を利用し、地質的特性を把握した上で原位置岩盤凍結・融解試験を計画、実施した²⁾。

本報告では原位置試験の概要を述べるとともに、現在までに実施された4サイクルの凍結・融解試験結果から得られた原位置岩盤の伝熱、変形および水理特性について述べる。

2. 原位置凍結・融解試験概要

原位置凍結・融解試験を実施している場所は、図1に示すように釜石鉱山の550m坑道の内、地下水の存在が近傍の側壁で確認された坑底を利用している。岩盤を露出させるために、深さ40cm程の敷き詰められた碎石を取除き、できるだけ坑底面を平坦にするよう努めた。また、坑底表面に水が流入しないよう上・下流境界にコンクリート壁を設けた。またき裂か

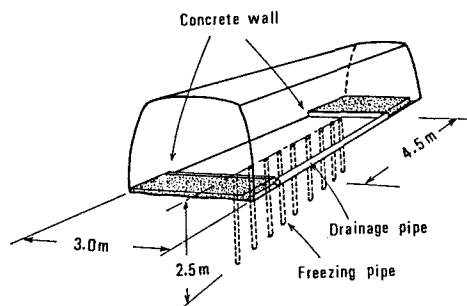


図1 原位置試験場概念図

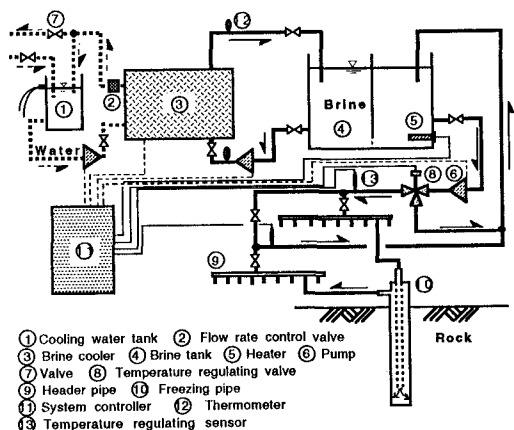


図2 ブライン温度制御および循環配管図

ら少量の湧水が見られたので、表面集水箇所から水中ポンプで常時排水をしている。試験場での地質調査の結果、岩は花崗閃緑岩から成り、坑軸とほぼ直角方向、およびそれと共役な方向にほぼ鉛直で顕著な方解石 (calcite) を含むき裂と、緑泥石 (chlorite) で充填されたき裂が存在する他に、発破の影響によると考えられるき裂が多少表面に存在することがわかった。また、方解石を含むき裂は主要な水みちとなりうることも明らかになっている²⁾。

原位置試験場を凍結させる方法として、岩盤底面に鉛直に凍結管を設置し、その中にブライン (不凍液) を循環させる方式を採用した。坑軸に沿って長さ2.5m、φ76の凍結管挿入孔を40cm間隔で9本直線上に削孔し、挿入後、その周囲の伝熱特性を岩盤と同じにするために、試験場の岩をパウダー状にしたもので孔内を充填した。図2に一定温度のブラインを循環させるための制御・配管図を示す。凍結過程では凍結管に流入するブラインを-20℃に維持し、融解過程ではブラインの循環をとめ、岩盤表面等周囲から伝わる熱で融解する自然融解方式を採用した。試験中、坑道内の熱環境の制御が問題ではあるが、坑内温度は常に10℃前後に保たれており、自然の恒温・恒湿室になっている。試験のサイクルは、図3に示すように凍結過程で10日前後、融解過程で1ヵ月前後としている。

本試験では、図4に示すように熱伝達過程におけるき裂の影響を把握するために、凍結管軸に対しほぼ直角方向に3つの測線を計画し、その内2測線は方解石を含むき裂近傍に沿って設けた。測線上にφ30の観測孔を合計23本削孔し、図5に示すようにT型熱電対を1m

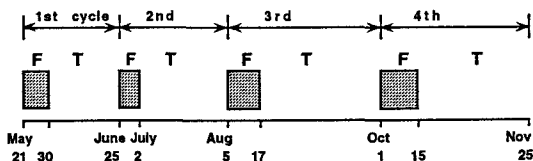
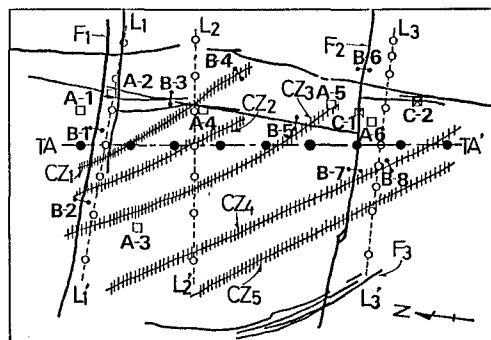


図3 試験サイクル。F:凍結過程, T:融解過程



- Freezing pipe
- Observation well
- ↓ Uni-axial displacement meter
- Bi-axial displacement meter
- Tri-axial deformation meter
- Calcite
- //// Chlorite zone

図4 試験場における顕著なき裂ならびに各種計測用センサー配置平面図

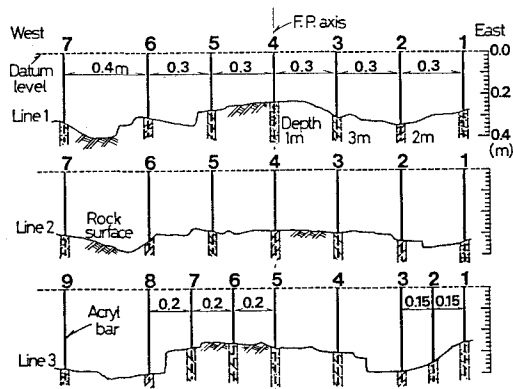


図5 観測孔配置縦断面図

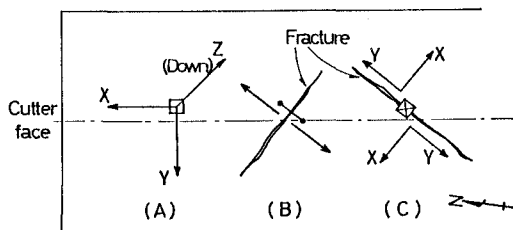


図6 各変位計の座標系

間隔にて装着したアクリル棒を挿入して、深度1,2,3mにおける温度分布と伝達状況を計測している。測線は北から順に、また観測孔No.は東から順に付している。挿入後の孔内は凍結管と同様に花崗閃緑岩のパウダーで充填した。また、き裂の開口変位を測定するための単軸・二軸のき裂変位計、および岩盤の変形を観察するためのxyz変位計を16ヵ所に設置しており、総計30成分の変位を測定している。図6に各変位計の座標系を示す。これらはいずれも岩盤表面での計測であるが、10ヵ所のき裂変位計については極近傍の岩盤表面に熱電対を張り付け表面温度も計測している。また、坑内の環境温度変化および各凍結管先端の温度を確認するためにそれぞれ熱電対を配置している。

3. 計測結果

3.1 水理特性

目視で観察できた試験場内の湧水地点、および表面集水箇所と設置された4台の排水ポンプ位置を図7に示す。湧水地点は(A)～(Q)の17ヵ所あり、コンクリート壁境界からの流入を除けば12ヵ所から湧水が観察された。そこで、試験状態にかかわらずコンクリート壁からの流入量は一定であると仮定し、2サイクル時の凍結過程において、凍結開始直前から各ポンプで排水される水量の経時変化を測定した。その結果、図8に示すようにポンプ1を除き、排水される水量(湧水量)は時間経過にともない減少する傾向が見られた。湧水量が減少する理由は、凍結前線の進展にともない、き裂内の水みちが遮断され水源からの供給が止ったからと考える。またポンプ1から排水される水のほとんどはコンクリート壁から流入したものであり、先の仮定と整合する結果となった。また目視観察によって凍結過程時に東側岩盤表面の乾燥が確認された。これは、マスの部分で吸水現象が生じた可能性を示すと考える。

3.2 伝熱特性

図9に3サイクル時の凍結過程における測線2の深度(-1m)における水平温度分布の経時変化を示す。凍結管軸上にあるNo.4は温度伝達が最も速く、凍結管軸から遠ざかるにつれて温度低下速度は小さい。また全ての観測孔で0℃近く

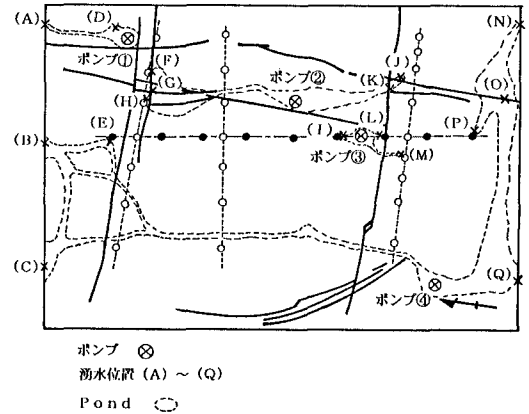


図7 試験場表面の湧水地点、集水箇所および排水ポンプ配置平面図

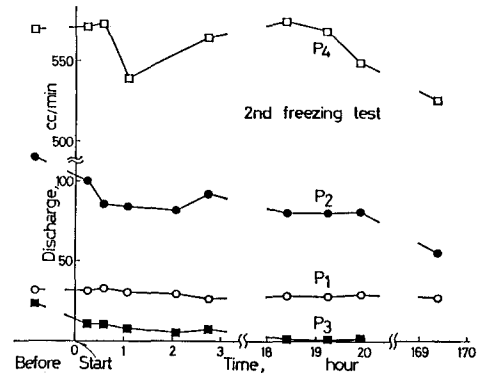


図8 凍結過程の各ポンプ排水量の経時変化

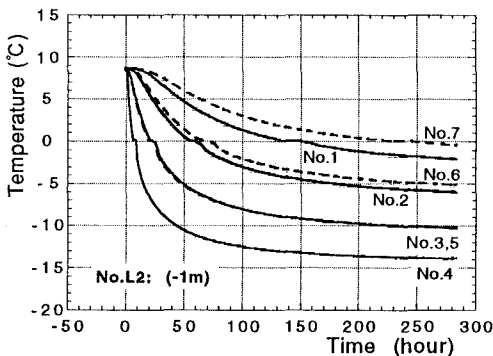


図9 測線2(深度-1m)の水平温度分布経時変化

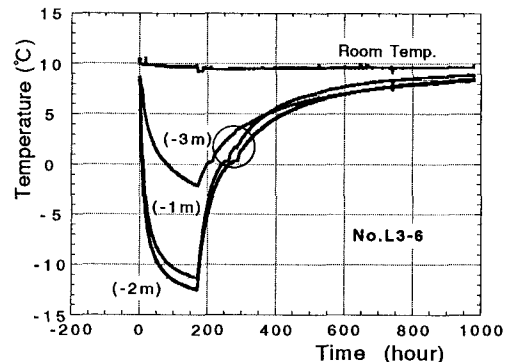


図10 深度方向温度の経時変化。○は不規則変化域

において潜熱の影響による温度一定期間が見られる。ここで、凍結管軸から等距離に位置するNo.3と5およびNo.2と6の経時変化に着目する。No.3と5の計測結果がほとんど等しいのに対し、No.2と6には温度低下速度に差が見られる。この理由として観測孔までの距離測定における誤差、あるいはNo.2と3の間に存在する顕著なき裂（水みち）の影響等が考えられるが明らかでない。

また、2サイクル時において測線3観測孔6で計測された深度方向の温度および坑内気温の経時変化を図10に示す。坑内気温は図中Room Temp.で示し、常に10℃前後である。凍結管の範囲外である(-3m)では熱が最も遅く伝達し、凍結管から水平方向に熱が直接伝わる(-2m)の温度低下速度は速い。また(-1m)と(-2m)の温度差は少ないが、(-1m)の方がやや温度が高い。これは熱が地表から供給されるためである。この影響は融解過程の後半にも顕著に表れており、全ての観測孔で観察された。ここで、図中○で囲まれた範囲の不規則な温度変化に着目する。融解過程において凍結前線が(-2m)にまで後退すると、(-1m)ではいったん温度が低下した後上昇し、(-3m)では急激な温度上昇が起きている。これは、測線3観測孔6が図7に示した湧水地点で孔内は水みちであり、凍結により遮断されたが、融解によりまた流れが生じ始めた。その結果、(-3m)では周囲から移流により熱が運ばれ温度が上昇し、(-1m)では直下の冷たい水が運ばれてくるためいったん温度が低下した後上昇したと考える。

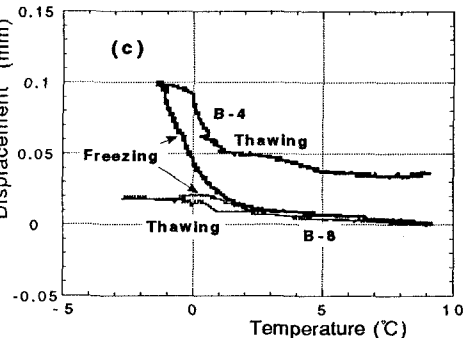
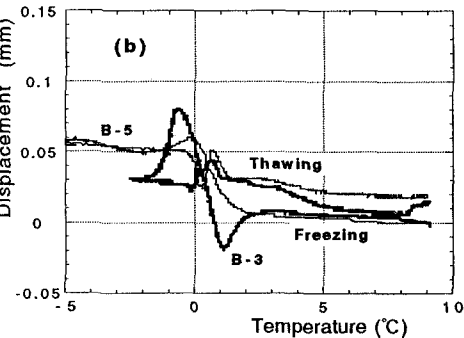
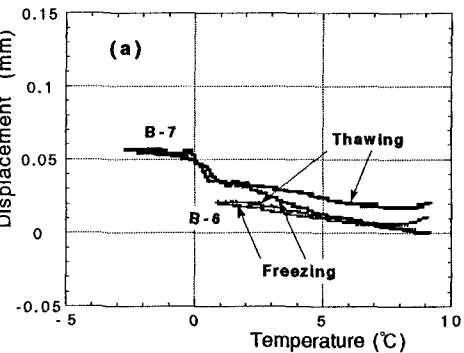


図11 各き裂の開口変位特性の比較。(a)方解石を含み凍結管軸に対し直交する,(b)方解石を含み凍結管軸に沿う,(c)緑泥石にて充填。

則な温度変化に着目する。融解過程において凍結前線が(-2m)にまで後退すると、(-1m)ではいったん温度が低下した後上昇し、(-3m)では急激な温度上昇が起きている。これは、測線3観測孔6が図7に示した湧水地点で孔内は水みちであり、凍結により遮断されたが、融解によりまた流れが生じ始めた。その結果、(-3m)では周囲から移流により熱が運ばれ温度が上昇し、(-1m)では直下の冷たい水が運ばれてくるためいったん温度が低下した後上昇したと考える。

3.3 変形特性

方解石を含んだき裂と緑泥石で充填されたき裂の温度変化にともなう変形特性を3サイクル時を例としてあげ、図11と比較してみる。(a)凍結管軸に対してほぼ直交方向に位置し方解石を含みき裂、(b)凍結管軸に沿った方解石を含みき裂、(c)緑泥石で充填されたき裂のそれぞれ開口変位を示している。図中の温度は単軸き裂計直下の岩盤表面温度を示す。全ての変位は凍結過程において増加し融解過程で減少するが、凍結時と融解時では変形経路が異なっている。(a)は0℃近傍で急激な変形が見られることからき裂内に水が存在し、それが大きく影響していると考ええる。

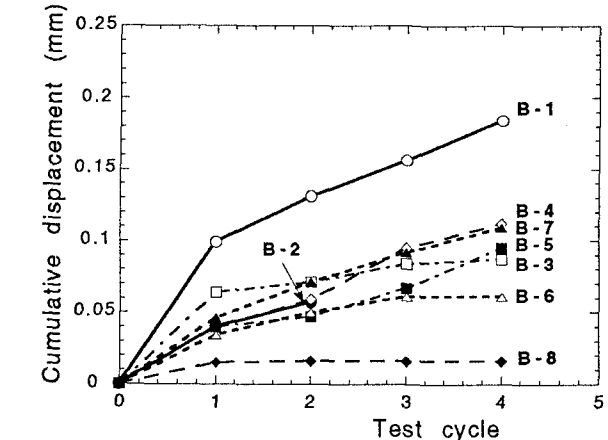


図12 繰返し試験に伴うき裂の累積変位

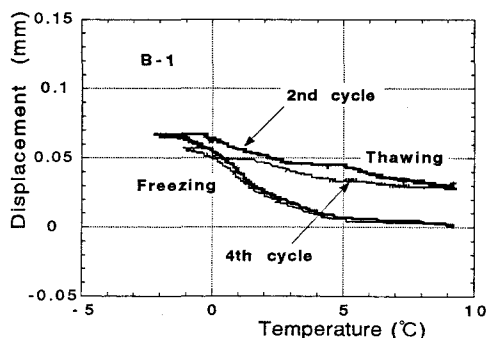


図13 異なるサイクル時における
き裂(B-1)の変形挙動の比較

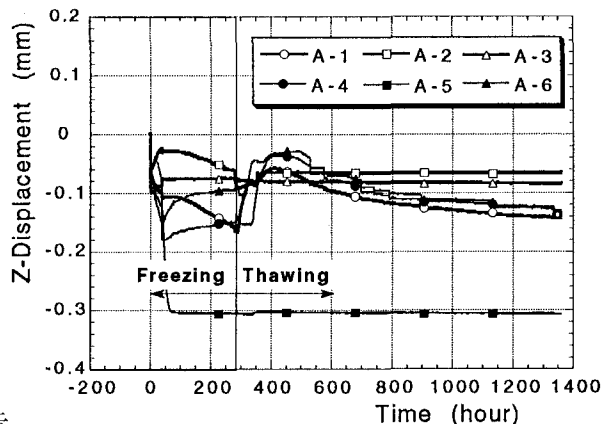


図14 Z方向変位の経時変化

(c)は約2℃以下で比較的なめらかな変形曲線を示

すが、融解時に0℃近傍でわずかに水の影響が見

られる。一方(b)は他のき裂と異なる挙動を示しているのがわかる。凍結過程のB-3は2～1℃にかけていったんき裂は収縮し、その後-1℃まで開口し再度収縮を始める。この挙動は間隙率の比較的大きい湿潤供試体でも確認されている⁹⁾。しかし、B-5では0℃以上での収縮は見られない。融解過程のB-3は氷点下で温度が上昇するとともにき裂は収縮し、0℃近傍でいったん開口した後再び徐々に収縮し始める。B-5では0℃近傍で急激な収縮・開口が生じ、その後徐々に収縮する。(a)と(b)の変形挙動の差は凍結前線の進展方向に対するき裂(水みち)の方位に起因すると考えられるが、同じき裂系において異なる挙動を示す理由は不明である。

図12に繰返し試験によるき裂の累積変位量を示す。B-2は3サイクル時の融解過程より計測データがドリフトし始めたので2サイクル時までのデータを示す。全てのき裂で1サイクル時に大きな変位が残留し、その後も回を重ねる毎に累積している。B-1の累積変位は約0.19と極めて大きいのに比べ、B-8は約0.02と小さい。それ以外は約0.06～0.11の累積変位である。また回数によってそれぞれの変位量は異なるが、図13に示すように2および4サイクル時におけるB-1で計測されたき裂の変形挙動を比較した場合、類似した傾向が見受けられる。このような繰返し試験に伴うき裂の変形挙動の類似性は全ての単軸変位計で観察された。

3サイクル時における6個のxyz変位計で測定されたZ方向変位の経時変化を図14に示す。凍結開始とともに全ての変位は負となり、試験場底面が持ち上げられる凍上現象が見られる。その後の凍結過程では、A-1およびA-2でわずかな凍上が見られる以外ほぼ変動は見られない。融解過程に入った直後、A-1、A-2の変位に影響が見られる。A-1では収縮が始まるが、その後徐々に凍上する傾向があり、A-2では階段状の変形が見られる。A-3、A-5の変位には融解過程の影響がほとんど見られず凍上したまま安定している。特にA-5の変位は他の変位に比べて大きい。A-4、A-6の融解過程の挙動は類似しており、徐々に凍上が進行する傾向にある。これらの変形挙動の内、A-2で見られた階段状の変形は、繰返し試験によって再現性は得られない。

4. おわりに

本研究ではき裂を含んだ実岩盤の温度変化に伴う非線形連成現象を把握するために、釜石鉱山坑道を利用して原位置凍結・融解試験を実施した。その結果、低温化に伴い生じる水の移流・相変化により、湿潤状態のマス部分、および不連続面として、あるいは水みちとしてのき裂に大きく影響し、複雑な伝熱および変形挙動をすることがわかった。今後、実験結果をさらに詳細に検討するとともに、非定常熱・応力・浸透連成解析、あるいは室内凍結・融解実験結果と比較し、これら複雑な岩盤の挙動を明らかにしていく予定である。

【参考文献】

- 1) 稲田善紀, 八木則男: 低温の影響を受けた岩石の力学特性, 材料, 28, 313, pp.61-67, 1979.
- 2) 石山宏二, 野本寿, 渡辺邦夫, 山辺正, 武田聖司, Paul Bossart: 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.
- 3) 山辺正, 岩井隆章, 渡辺邦夫, 石山宏二: 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回土木学会年次講演会, 1992.