

凍結・融解過程における岩盤き裂の挙動について

西松建設株式会社 正員○石山宏二, 正員 野本 寿

埼玉大学工学部 正員 武田聖司, 正員 渡辺邦夫, 正員 山辺 正

1. はじめに

極低温物質の地下岩盤内貯蔵等、将来的に大規模な地下空間の利用が予想される。しかし、これらを設計するためには、熱環境の変化にともなう岩盤の挙動を予測・評価できなければならない。そこで、低温下における実岩盤の複雑な挙動を把握するために、現在釜石鉱山の坑底にて岩盤の凍結・融解試験を実施している^{1), 2)}。低温下の岩盤挙動は多様であり、特に氷点前後のき裂の変形は著しい。本研究は、試験より得られた氷点前後のき裂の挙動について報告する。

2. サイトおよびその熱環境

現在までに5サイクルの凍結・融解試験を行った。図1に試験サイト平面図を示す。実線はカルサイトを含む顕著なき裂で、細破線はクロライト系のき裂を表す。これらき裂の開口変位を測定するために、B-1～8の単軸き裂計を配置した。また、観測孔およびき裂計直下に熱電対を設置し、岩盤温度を測定した。

試験サイトを凍結させる方法は、図中●で示す凍結管を鉛直に挿入し、その中に -20°C に設定したブライン(不凍液)を循環させる方式を採用した。凍結管と岩盤との間隙はサイト周辺の岩のパウダーで充填している。融解方法は、通常ブラインクーラおよびブラインの循環を停止させ、周囲から伝わる熱で融解させる自然融解方式とし、4サイクルまでこの方法を適用した。5サイクルでは凍結開始後すぐにクーラのみが停止し融解過程へと移行したが、循環用ポンプが作動中のため、時間経過とともにブラインが摩擦熱を持ち、その温度は約 26°C まで上昇した。融解開始後約1週間で循環を停止させ、岩盤が 9°C 前後の初期温度状態に戻るのを待ち、本サイクルの終了とした。

図2に5サイクル時における観測孔L3-6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示す。坑内気温はRoom Temp.で表示した。岩盤温度の経時変化は4サイクルまでのそれと異なり²⁾、凍結時間が極めて短いので深度(-1m), (-2m)における熱伝達速度に差が生じず、(-3m)では零度以下に致らなかった。また、融解過程ではブラインに生じた摩擦熱の影響により岩盤温度が坑内気温以上に上昇し、その後坑内気温より約 1°C 低い初期温度へと緩やかに下降した。また、通常一定の坑内気温に変動が見られた。

3. 氷点前後のき裂の変形特性

湿潤状態にある岩盤を凍結・融解試験により低温化する際、その温度が氷点より上あるいは下の条件により、岩盤の変形特性に差が生じることが予想される。岩盤に含まれる水分は零度近傍で相変換し、それに相当する体積膨張が生じて内部応力が增大するからである。特に空隙率の高いき裂ではその傾向が著しいはずである。そこで、き裂周囲の岩盤温度が氷点前後となるケースを取り上げ、き裂の変形特性に着目した。

図3は凍結管軸と直交方向に位置し、カルサイトを含むき裂(図1のCa1)、図4は凍結管軸に沿う同様のき裂(図1のCa3)、図5はクロライトで充填されているき裂の変形挙動である。それぞれ異なる熱環境

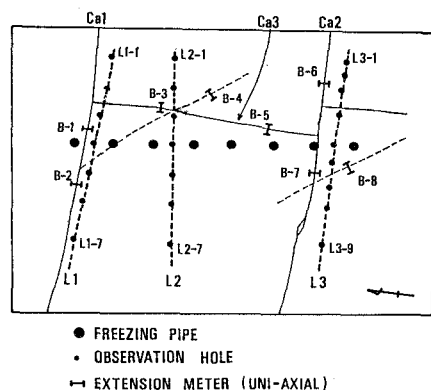


図1 試験サイト平面図

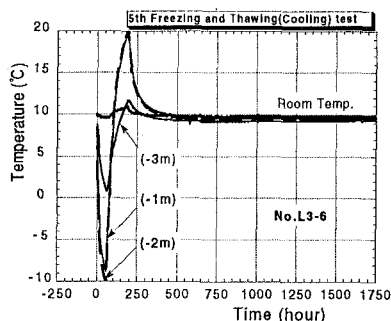


図2 岩盤の深度方向温度経時変化

にある(a)4サイクル時、(b)5サイクル時を比較し、変形挙動の違いを明らかにする。すでに報告したように、4サイクルまでは同様の熱環境にあり、繰返しに伴う変形経路に差異は認められない²⁾ので、代表として取り上げた。図中の温度はき裂計直下の岩盤温度を示し、正の変位はき裂の開口を表す。き裂変位は温度低下に伴い増加し、上昇により減少する傾向が見られる。特に1~2℃以下になる場合、大きな変位の発生が認められた。また図5(b)を除いて、凍結過程と融解過程では変形経路が明らかに異なる。これらの現象は、岩盤そのものの変位の温度依存性によるものではなく、水の相変化により生じた内部応力の増大に起因したものであると考える。各図(a)、(b)で比較した場合、岩盤の初期温度における変位に着目すると、(a)は正のき裂変位が残留し、試験の繰返しにより開口変位は累積する傾向が見られる²⁾。(b)は残留する変位量が少なく、凍結開始時の変位にほぼ収束する。ただし、図3~5のき裂では変位が収束する過程にやや差がみられる。これは、水の相変化が始まる温度と各き裂近傍における岩盤温度との差、あるいはき裂内の水分量の差に起因していると考えられ、その程度に応じた変形特性が示されたと考ええる。また温度が初期状態で安定した後に変形が見られるが、理由は明らかでない。各き裂の変形特性を比較した場合、図3、4は同じカルサイトを含んだき裂のものであるが、特に1,2℃以下で変形経路に大きな差が見られる。これは、水の相変化による影響が顕著に反映された結果である。また両者に違いが生じた理由は、き裂方位に対する熱伝達方向の影響、あるいは凍結前線の進展によるき裂内の水の移流およびその方向により内部応力の発生過程と増分に影響が生じたためと考える¹⁾。

4. おわりに

岩盤凍結・融解試験を実施し、低温下のき裂の挙動について把握を試みた。その結果、含まれる水の相変化、それに伴い生じる水の移流と熱伝達方向との相互作用による影響が、内部応力の発生過程および増分に関与する可能性が高いことを示した。

参考文献 1)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. 2)石山宏二、野本 寿、武田聖司、渡辺邦夫、山辺 正: 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, pp.221-225, 1993.

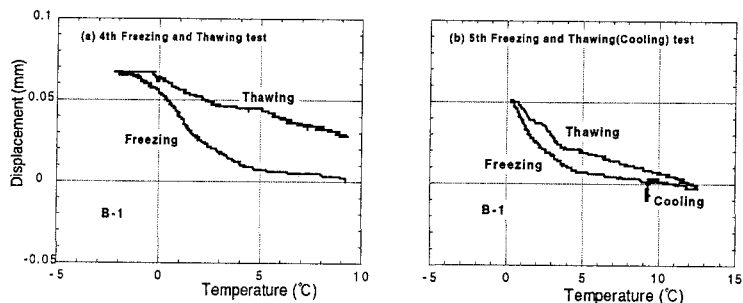


図3 凍結管軸と直交し、カルサイトを含むき裂(Ca1)の変形挙動

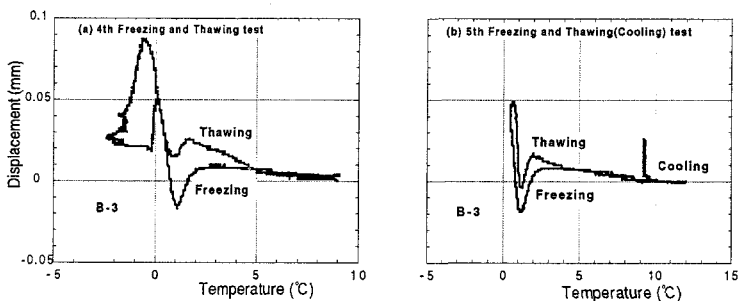


図4 凍結管軸に沿う、カルサイトを含むき裂(Ca3)の変形挙動

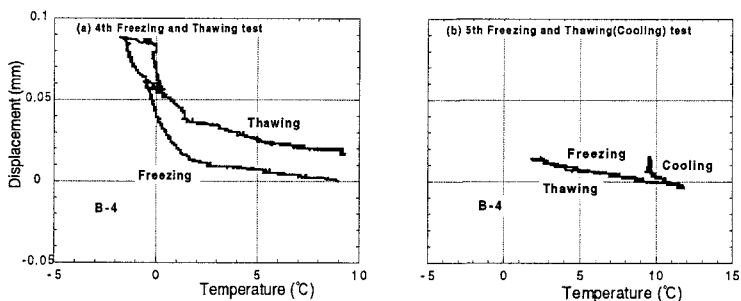


図5 クロライトで充填されているき裂の変形挙動