

(20) 釜石鉱山における岩盤凍結・融解試験(その1)

—室内割れ目凍結実験と原位置試験場の設定—

西松建設

石山 宏二, 野本 寿

埼玉大学

○ 渡辺 邦夫, 山辺 正, 武田聖司

K&H AG (NAGRA)

Paul Bossart

Freezing and thawing test in the Kamaishi Mine (Part 1)

- Laboratory test on the freezing mechanism in a model of a high permeable fracture and the geological features of fractures in the in-situ test site -

Nishimatsu Const. Corp. Ishiyama, K., Nomoto, H.

Saitama University

Watanabe, K., Yamabe, T., Takeda, S

K & H AG (NAGRA)

Bossart, P

ABSTRACTS: A freezing and thawing test has been carried out in the Kamaishi Mine, north-eastern part of Japan. Nine boreholes of 2.5m deep were drilled from the floor of the test site area of 3m×4m wide and nine freezing pipes were installed in these boreholes. 23 boreholes were also drilled in this site for the measurement of the transient temperature changes around these freezing pipes. Prior to the in-situ test, the freezing mechanism of water within a high permeable fracture was studied by using an idealized fracture model. It was found that water around a frozen zone flows divergently from this zone due to the volumetric increase of water, that is occurring when water is frozen. The geologic features of fractures in the test site was also investigated in detail to decide properly the location of every borehole for the installation of the freezing pipe and/or the thermistor.

はじめに

岩盤の凍結と融解を総合した現象の把握は、シベリアなどの寒冷地の地下開発、あるいは LNGなどの低温物質の地下貯蔵、地下冷凍庫の建設に際し極めて重要である。また最近、岩盤中の放射性核種を用いたトレーサー試験の評価のため、岩盤を凍結させ試量を採取する計画もされている¹⁾。こういったことから、岩盤の凍結・融解現象に関する理論的あるいは室内実験的な研究は従来から多く行われている。しかしながら、これらの研究は主に均質岩盤、あるいはその中に数本の理想的な割れ目を設定した岩盤を取り扱っていた。一方、実際の岩盤では不連続面(割れ目)が多数発達し均質体とは考えられないし、割れ目の性質も極めて複雑である。そのため、実岩盤を用いた原位置試験が極めて重要になる。また試験に先立って、対象岩盤の複合体としての地質的特性を十分に把握することが大事となる。今回そういった観点に立って、釜石鉱山における現位置試験を計画した。

本研究では、まず、単一割れ目モデルを用いた室内実験によって、岩盤浸透流のどんな性質が凍結現象で大事かを調べた。その結果を考慮しながら、対象岩盤中の割れ目系の詳細調査を行った。割れ目の構造地質的性質の把握は、この試験に限らず一般的な原位置試験で不可欠なものであり、この調査法を考えることも本研究の主要な目的である。

1. 岩盤凍結融解に支配的な影響を与える浸透流の特性と室内実験による性質把握

凍結融解は、温度変化や中に含まれる水の相変化によって、岩盤の体積変化を生ずる。とりわけ岩盤中の水の相変化による体積変化が大きく、この時、凍結域周りの水が排除されなければ大きな内部応力が生ずることになる。発生する内部応力の大きさは、結局、凍結(相変化)時の、未凍結水の移動しやすさに依存すると言える。凍結によって体積が増加した分、水が系外に速やかに移動すれば、体積増加にともなった内部応力の発生は小さくなるはずである。逆に、水が移動せず体積増加を起こしたならば、極めて大きな内部応力の発生になる。つまり、水の流れやすさ、浸透しやすさが大きく影響するはずである。

この現象をまず簡単な高透水性割れ目モデルを用いて室内試験によって検証した。図-1に用いた実験装置を示す。割れ目モデルはそれぞれ90cm×60cmの大きさの2枚の

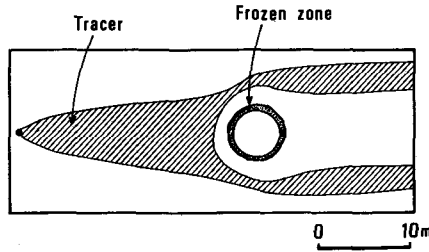


図-2 凍結域周りのトレーサの動き

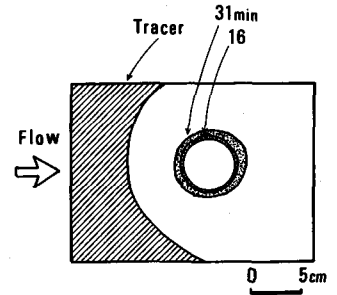


図-3 凍結域とトレーサー

モデルの周囲はゴムパッキンにより止水され、図中に示したようにモデル両端部のパイプを通して水を流す。これらのパイプはそれぞれ定水位タンクにつながれている。つまり、湧き出し・吸い込みを持ったモデルと言うことになる。モデル中央部に凍結管が差し込まれ、割れ目モデル内にある径6cmのディスクを介してモデル内の水を凍結する。この時、ディスク周辺に凍結域が形成されることになる。凍結管は最大-85℃まで管外壁の温度を低下させることができる。凍結と同時に図中に示されるトレーサーパイプを通してインクが流れ、モデル中の水の流れを可視化する。なお、実験装置は、発砲スチロールで覆い、断熱した。

図-2は実験にみられた凍結域とモデル中心線位置で投入されたトレーサの広がりを見たものである。なおこの実験では流量を $9\text{cm}^3/\text{s}$ に設定した。図中左端の黒丸位置より投入したトレーサーが、凍結ディスク周囲に形成された凍結域に到達せず、凍結域から数cm離れた所を流れているのがわかる。さらに図-3は別のケースは流量を $3\text{cm}^3/\text{s}$ とした場合であり、実験開始後それぞれ16,31分後の凍結域の広がり、31分後のトレーサの流れ域を示している。図-2と同様、トレーサーは凍結域に達していない。トレーサーが凍結域に達しない理由は、ディスク周囲の水が凍結することによる体積増加によって、凍結域周囲の水が押し除けられ、放射状の外向きの流れが形成されることによると考えられる。これらの実験から、まだ定性的ではあるが、高透水性割れ目には凍結域の拡大にともなって水が放射状に流れることがわかり、凍結速度と水の排除速さが岩盤中の内部応力の発生に大きな影響を与えることがわかる。この現象が、岩盤の凍結さらには融解現象に影響する、最も大きな浸透流の特性と考える。

2. 釜石原位置試験場に見られる割れ目系の地質解釈

原位置試験は現在、2つの種類を考えている。1つの実験は、図-4に示すようにトンネル底面上のトンネル軸方向の1つの線上に9本の凍結管を並べるものである。管の深さは2.5mである。いわば、凍結管の並んだ線源から周囲に凍結させるものである。他の1つの実験は、トンネルの一部区間を全面的に凍結させる実験である。今回は図-4の試験の対象岩盤の割れ目特性について述べる。図-4に示されるように、坑底の凍結管周辺の岩盤を露出させてある。この区域の上・下流境界はコンクリートのしきりが作られており、この区域に流入する水を防いでいる。今回設定した原位置試験場の場所は、釜石

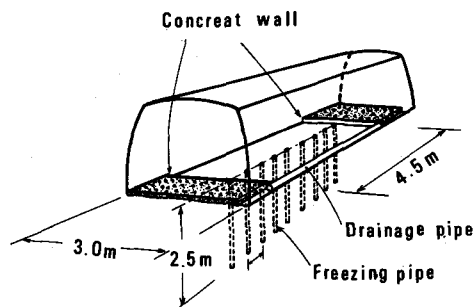


図-4 原位置凍結・融解試験

鉱山550m坑道、坑口より約1.5km入ったところであり、釜石鉱山の坑道群の東端に位置している。地質は花崗閃緑岩より成る。次に、試験区域の割れ目系について述べる。図-4に示したように、この区域ではコンクリートの仕切りにより、トンネル底面に沿った流れを遮断しているが、この区域に坑壁や坑底を通して流入する水が底面の一部に貯っていた。まず割れ目図の作製方法について述べる。岩盤表面には、発破による割れ目系が多数形成されている。そのため、割れ目系のスケッチにあたっては、最初に発破による新規の割れ目を除外しなければならない。しかし、この除外はきわめて難しい。そのため今回、割れ目の分類を行った。この区域には性質からみて、大まかに3種類の、表面で開口した割れ目が発達している。1つは緑泥石(chrolite)によって充填された割れ目であり、2つめは方解石(calcite)

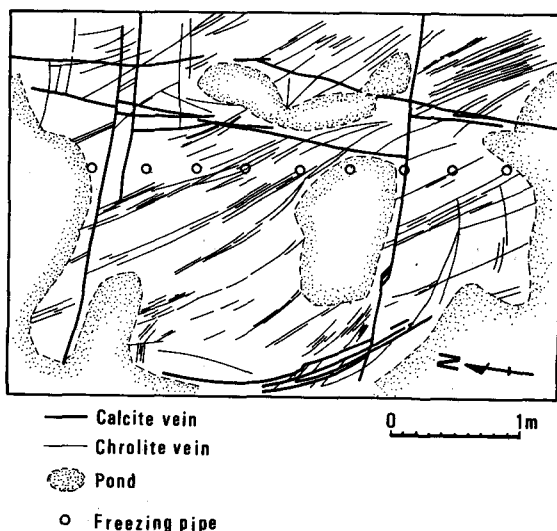


図-5 原位置試験場の割れ目系

によって充填されたものである。最後は表面で割れているが何も充填していないものである。緑泥石に充填された割れ目に沿った部分は、数

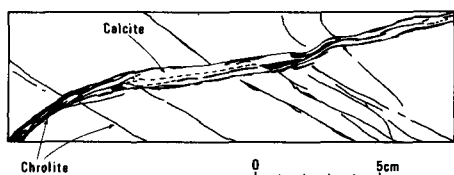


図-6 方解石割れ目と緑泥石割れ目

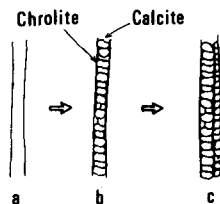


図-7 Extension jointの形成

■から数cmの幅でいわゆる Bleachingの作用を受けて白色化している。これらの割れ目うち、何も充填していないものは長さも短く、また直線的に延びていないものが多く、発破によるものと考えた。緑泥石もしくは方解石で充填された割れ目のみを取り出したものが図-5である。図中には併せて凍結管挿入用のボーリングの位置を示した。図-5から、緑泥石で充填された多数の割れ目があり、それらの多くは、NW-SE の走向を持っていることがわかる。なお、これらの割れ目の一部は、岩盤表面で開いていた。方解石で充填された割れ目は、数は少ないが相対的に長いものが多く、割れ目相互の連結性も良い。またほとんど全部、表面で開口していた。

次に、これらの割れ目の形成と相互の関係について詳しく見てみる。図-6は、図-5に示された凍結管挿入用ボーリングのうち、左から3番目の孔から得られたコアの、上から170~180cmの位置に見られた割れ目のスケッチである。方解石と緑泥石に充填された割れ目と緑泥石にのみ埋められた割れ目（以下それらの方解石割れ目、緑泥石割れ目と称する）の関係を示している。この図から、まず、緑泥石割れ目の多くが方解石割れ目に切られていることがわかる。また方解石割れ目の内部に緑泥石が線状に入っていることが見られる。なお、ほとんどのボーリングコアは緑泥石割れ目から分断していなかった。このことから、緑泥石割れ目は、岩盤の中ではもともと開口していなかったことがわかり、岩盤表面で見られた開口は、発破の影響と言える。つまり緑泥石割れ目は、この試験区域ではたとえ岩盤の表面で長く伸びまた開口していても、浸透流の観点から見たとき、あまり重要でないと言える。一方、方解石割れ目である。方解石割れ目の中に緑泥石が線状に入っている構造から、この割れ目が、少しずつ開口していったExtension joint (fault) であることが想定できる。図-7はExtension joint の形成メカニズムを模式的に示したものである。この図は、少しずつ開口してゆく割れ目が次々と方解石で埋められてゆく過程を示している。ここで、これら方解石割れ目が浸透流に対してどんな影響を与えているか、また、緑泥石割れ目の成因はどんなものを地質的にできるだけ深く追求してみる。

図-8は、方解石割れ目と一部の緑泥石割れ目を取り出した図である。方解石割れ目は、その方向から、 F_A 、 F_B 、 F_C の3種類に分けられている。このうち F_A については、図中 P_A 点に見られるように明瞭なステップ構造が認められ、これから水平ズレの方向が図中矢印のように判定される。水平的にはこのようなズレ成分を持つことと、前述したようにこの割れ目がExtension joint であることは矛盾しない。また、 F_B も方向性から見て、スケールはより大きいがこれと同様なステップ構造の一部と考えた。一方、 F_C は F_A にはっきりと切られている。これから、 F_C は F_A 以前に形成された割れ目と思われる。しかし、 F_B と同様ステップ構造の一部という可能性も残っている。さらに、 F_D は緑泥石割れ目であり、湾曲した形状を持っている。すべての緑泥石割れ目がこのように湾曲した形状を有していないが、 F_D については、前述したようにBleachingが見られることもあり、開口したCooling joint であつたと考えられる。もちろんこの情報からすべての緑泥石割れ目に対して断定することはできないが、他の緑泥石割れ目も、Cooling joint である可能性が高い。Cooling joint であれば、初生的なもので、さらに充填されていることもあり、地下水の通り道としては考えなくとも良いと言える。Cooling joint でなくとも、かなり初期に形成された割れ目であることは確かである。

以上の考察から、水を通す可能性の最も高い割れ目は、今回の試験区域内において最も形成年代が新しく、少なくとも過去にExtension joint であつた F_A 、 F_B のセットと考えた。これらの割れ目の開口が現在も続いているかどうかは、今の所情報が無い。しかし、少なくとも方解石は水に溶け易く、そういう意味で水み

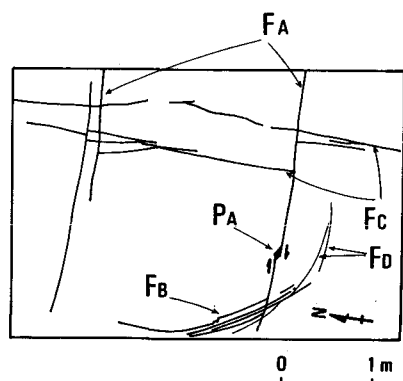


図-8 方解石割れ目の形成

ち（チャンネル）を作り易い充填物である。従って、 F_C 割れ目も F_A 、 F_B に切られてはいるが、チャンネルを形成する可能性が高い。とくにこれらの割れ目の交線部は破砕度も高く、水みちとなり易い。実際、この試験区域付近を調査した所、多数の方解石割れ目の交線部で、極めて著しい湧水点を確認された。こういった考察に基づいて、今回方解石割れ目を試験区域内の主要な浸透経路と考えた。

もちろんこういった考え方は、まだ推定の部分が多く、今後ボーリング調査などを通じてより詳しく調べてゆかねばならない。しかし、このような地質解釈とそれに基づく割れ目図の作成は、凍結・融解試験に限らず、一般的原位置試験において、試験目的を明確化し、妥当性の高い試験をする上で基礎的で不可欠なものと考えている。次に、対象岩盤の割れ目系特性を踏まえた実験計画の設定について述べる。

3. 試験場の割れ目系の特性を基礎とした現場試験項目の設定と観測井配置計画

以上示した割れ目系の地質解釈を基にして、今回の岩盤凍結・融解試験の目的として、単に一般的な岩盤の凍結特性を調べる以外に、以下のような項目を設定した。

- (1) 透水性の高いチャンネル部を有していると考えられる F_A 、 F_B 、 F_C に沿った温度変化と凍結現象の解明。
- (2) 緑泥石割れ目が多く存在する部分の凍結現象と岩盤変形の解明。

前述したように、緑泥石割れ目は、地下水流れへの寄与は小さいと考えられる。しかし、凍結に伴う岩盤変形を考えた場合には弱線となる割れ目である。これらの試験項目の設定に沿って、図-9に示す観測井などの設置を行った。図中の黒丸は凍結管位置である。白丸は、主に岩盤の温度分布変化を調べるための観測井である。図中のSupport bar は岩盤表面の変位を計るために設置された。

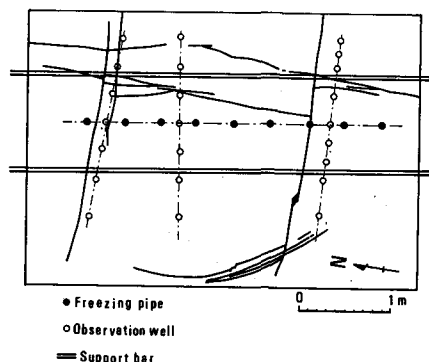


図-9 凍結管（黒丸）と観測井（白丸）の配置図

4. 結論

岩盤の原位置凍結・融解試験を行うにあたって、浸透流のどんな性質が岩盤変形に最も大きく影響するかを明確にし、また、対象岩盤の割れ目系の地質的特性をできるだけ詳細に把握しておかねばならない。こういった観点に立って、まず高透水割れ目モデルを用いた室内実験を行った。その結果、凍結速度と凍結域周辺の流れ易さが極めて重大であることがわかった。また、釜石鉱山の原位置試験対象区域の割れ目系の特性を地質学的に調査し、方解石で充填された割れ目が主要な浸透経路となりうることを示した。これらの研究を通じて、実験計画と観測井配置が定められた。とくに本研究で示されたような割れ目系の評価は、一般的原位置試験で極めて重要と思われる。

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, NAGRA Interner Bericht, 91-43, pp. 1-47, 1991.