

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：10106

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820212

研究課題名(和文) 岩質・亀裂・風化を考慮した実岩盤斜面における凍上危険性の評価

研究課題名(英文) Risk Assessment of the Frost Heaving of In-situ Sloping Bedrock in Light of Its Lithologic Character, Fissures and Weathering

研究代表者

中村 大(Nakamura, Dai)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90301978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、岩盤の凍上に起因する被害や災害が相次いで報告されており、土に比べて明らかに研究例の少ない岩盤、特に大災害に繋がる危険性が高い岩盤斜面の凍上について注目が集まっている。そこで本研究ではまず、実際の岩盤斜面において、凍結深さ及び凍上量の計測を、複数年に渡って行った。次に、実際の岩盤斜面で計測された凍結速度を用いた実験と、実際の岩盤斜面の亀裂を模擬した供試体を用いた実験の、2種類の凍上実験を実施した。これらの実験結果から、凍結速度と亀裂が岩石の凍上現象に影響を与えていることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Recent years have seen a spate of reports of disasters and damage resulting from bedrock frost heaving. This reflects a growing attention to the frost heaving of bedrock, particularly of sloping bedrock, which has a higher risk of triggering a major disaster. Clearly fewer frost heaving studies have conducted on bedrock than on soil so far. To evaluate the risk of frost heaving of sloping bedrock, this study first conducted an in-situ measurement of freezing depths as well as frost heaving amounts over a multiple years. Second, we conducted two kinds of frost heaving experiments. The first one is the experiment that used the freezing speed measured at actual sloping bedrock. The other one is the experiment that used specimen simulating the fissures of the actual sloping bedrock. From the results of these experiments, we clarified that the freezing speeds and the fissures have the effects on rock frost heaving.

研究分野：岩盤工学

キーワード：凍上 岩石 岩盤 土 凍結速度 温度勾配 亀裂 岩屑

1. 研究開始当初の背景

寒冷地のトンネルや道路、のり面保護工といった土木構造物では、寒冷気候に起因して多くの問題が生じている。北海道では1996年に一般国道229号線豊浜トンネルで大規模岩盤崩落が発生したが、その原因の一つとして岩盤の凍上現象が指摘されている。また、岩盤の凍上がトンネルの側壁にクラックを生じさせたり、のり面に施工されたロックボルトを浮き上がらせたりするといった事例も報告されている。このような背景から、岩石及び岩盤の凍上性を把握することの重要性が近年高まっている。特に、急勾配な岩盤斜面は積雪が少ないため凍結の影響を受けやすく、いったん凍上で岩盤の崩落が発生すれば大災害に繋がる危険性もあることから注目度も高い。2010年に地盤工学会北海道支部から発行された「斜面の凍上被害と対策のガイドライン」では、岩盤の凍上に関する注意喚起がなされたが、凍上に関する研究の大部分は土を対象としたものであるため、岩石・岩盤を対象としたさらなる研究の必要性が謳われている。

申請者は過去十数年間にわたって、独自に開発した凍上試験装置を用いて、岩石の凍上に関する研究を継続的かつ精力的に進めており、申請時はこれまでに得られた知見を用いて、岩石の凍上性判定方法を確立することに取り組んでいた。研究は固結した未風化の岩石については簡便な調査方法で判定が可能などころまで進展していたものの、この岩石の凍上性判定方法を実際の岩盤の凍上危険性の判定へ応用することを考えた場合、以下のような課題が存在していた。

- (1) 実際の岩盤の凍結深さ（地表面から凍結線までの深さ）及びその推移に関する報告例は少なく、その凍上挙動は全く明らかにされていなかった。
- (2) 実際の岩盤斜面内の温度勾配は室内試験で供試体に与えている大きさに比べて格段に小さいことが予想され、室内試験結果をそのまま適用できない可能性があった。また、申請者は凍結線（0℃線）をある一定の箇所留めた凍上試験しか実施しておらず、凍結線を移動させた場合に岩石がどのような凍上挙動を示すのか把握できていなかった。
- (3) 実際の岩盤内部には複数の亀裂が潜在し、この亀裂部分に風化作用によって脆弱化した岩屑が堆積している箇所も存在する。これらの凍上への影響については解明できていなかった。

申請者が着手していた岩石の凍上性判定方法を、岩質・亀裂・風化を網羅した総合的なものへと発展させて、さらに施工技術者がそれを用いて寒冷地の岩盤斜面の凍上危険性を判定できる指標を提案するためには、以上の3点について早急に明らかにすることが必要であった。

2. 研究の目的

申請者が着手していた固結した未風化の岩石の凍上性判定方法を、寒冷地の岩盤斜面の凍上危険性を判定できる手法へと発展させるためには、実際の岩盤がどのように凍結し、凍上するのか把握することが不可欠である。また、実際の岩盤には亀裂や岩屑が内在しており、これらが岩石・岩盤の凍上性に与える影響についても把握しておくことが重要であると考えられる。

そこで、本研究ではまず第1に、岩質の異なる複数の岩盤斜面に温度計や変位計を設置することで、実際の岩盤斜面の冬期間を通じた凍結深さの推移や凍上量を正確に把握することを目的とした。

第2に、上記の実際の岩盤斜面で計測された凍上速度や温度勾配を室内試験で再現し、凍結速度や温度勾配が岩石の凍上性に与える影響について明らかにすることを目的とした。これにより、実際の岩盤斜面で発生している岩石の凍上挙動の詳細を把握することが可能になると考えられる。

第3に、人工的に亀裂を作製した供試体やその亀裂に岩屑堆積物を含んだ供試体を用いて凍上実験を実施することで、亀裂や岩屑堆積物が岩盤の凍上量や凍上速度をどの程度変化させるのか明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では上記の3つの目的を達成するために、以下のような野外計測と室内実験を実施した。

(1) 実際の岩盤斜面における凍結深さ及び凍上量の野外計測

北見市柏木地区の軟質な岩盤斜面（軽石質凝灰岩、凝灰質砂岩）と、硬質な岩盤斜面（玄武岩）の合計3箇所、複数の温度センサを配置した温度計測ロッドと、凍上量計を設置して、岩盤内部の温度変化と岩盤表面の変位を計測することに取り組んだ。この計測を複数シーズン（最長3シーズン）実施することにより、実際の岩盤の凍結深さ、凍結速度、温度勾配、凍上量の4つの項目の時間変化について明らかにした。

(2) 実際の岩盤斜面の凍結速度・温度勾配を模擬した室内実験

実験に使用した岩石試料は、これまでの研究において凍上性の高低が明らかとなっている大谷石と来待砂岩、さらに非凍上性の札幌軟石の3種類の岩石である。実験に用いた供試体は円柱形で、直径55mm、長さ70mmである。実験には飽和度90%以上の供試体を使用した。

図1に凍上実験装置の模式図を示す。供試体はゴムスリーブで覆い、上下盤で挟み込むように設置した。凍結は供試体の上面をマイナスの温度、下面をプラスの温度で制御して行った。さらに、供試体下面には、地下水を模擬して、水分の供給も実施している。

上記の凍上実験装置を用いて、複数の温度勾配 (0.14, 0.29, 0.43, 0.57 °C/mm) で、凍上性を有する大谷石、来待砂岩に対して実験を行った。また、凍結速度については、3種類の速度 (0, 0.7, 7 mm/hr) を設定して、大谷石で実験を行っている。

さらに、図1の凍上実験装置の給水経路に圧力変換機を組み込み、3種類の岩石で凍上試験を実施し、その過程で発生する吸水圧の計測も実施した。

(3) 岩盤内部に潜在する亀裂を模擬した室内実験

実験に使用した岩石試料は前述の3種類の岩石である。亀裂は図2(a)のように、2つの円柱供試体を上下に重ね合わせることで模擬した。供試体寸法は直径55mm、長さは上部が33mm、下部が37mmであり、上部と下部を重ね合わせた全長は70mmである。

さらに、上記の供試体の亀裂部分に粉末状の岩石を挟み込んで、亀裂内部に岩屑が堆積した岩盤を模擬した実験も行った。この実験に用いた岩石試料は札幌軟石のみであるが、岩屑を模擬した粉末状の岩石は札幌軟石と大谷石の2種類である。粉末状の岩石を最適含水比に調整して、締固め度85%で締固めて、供試体上部と下部の境界部分に設置した。この時の粉末の厚さは1mm、2mm、5mmの3種類である(図2(b))。供試体の長さは、凍上実験時の温度勾配を一定に保つことを目的として、粉末状の岩石の厚さも含めて、全長70mmで統一している。

以上の供試体を前述の凍上実験装置を用いて凍結させた。この実験時の具体的な温度勾配は0.29 °C/mm、凍結速度は0.17 mm/hrである。

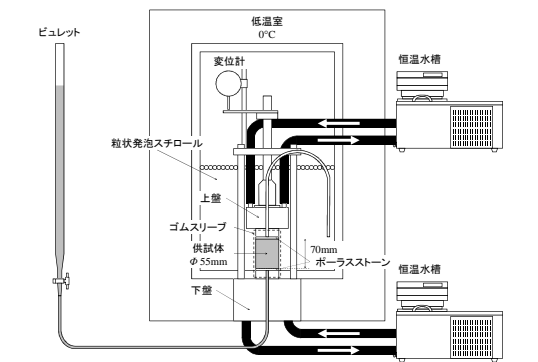


図1 凍上実験装置

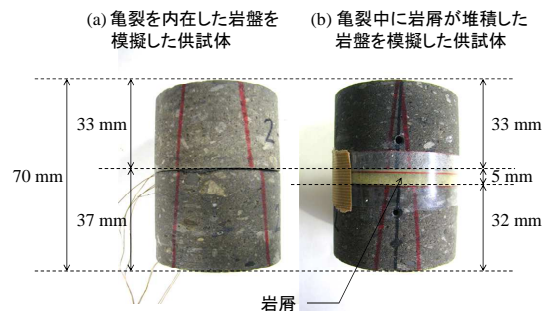


図2 供試体

4. 研究成果

(1) 実際の岩盤斜面における凍結深さ及び凍上量の野外計測

図3に1シーズン目(2013-2014年)における軟質な岩盤斜面(軽石質凝灰岩, 凝灰質砂岩)の凍上量, 岩盤内温度, 凍結深さ, 温度勾配の経時変化について示す。1シーズン目は岩盤斜面の除雪を積極的に行った。図から、2013年12月下旬以降から岩盤中に凍結線が進行し始めていることがわかる。軽石質凝灰岩層では凍結線の進行とともに変位が計測され始め、最大で約1.2mmの凍上量に達しているものの、凝灰質砂岩層では全く凍上変位が計測されていない。凍結速度に着目すると、軽石質凝灰岩層で0.286~0.607 mm/hr, 凝灰質砂岩層で0.298~0.965 mm/hrであり、乾燥密度が大きい凝灰質砂岩層において凍結速度が大きな値を示す結果となった。軽石質凝灰岩層では晩冬の2014年2月24日から

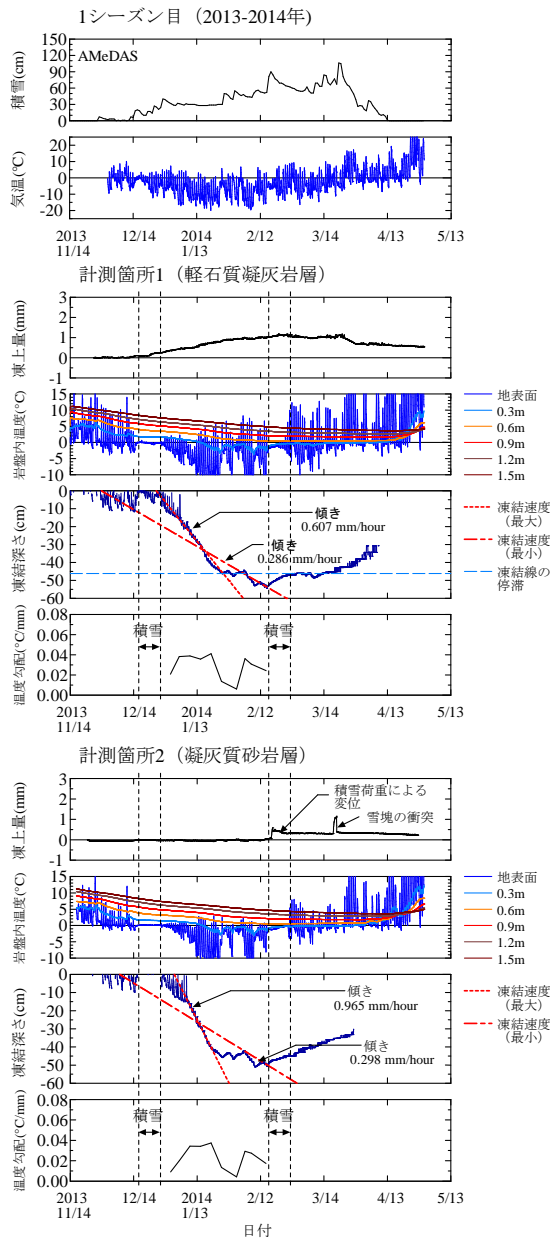


図3 軟質な岩盤の凍上量, 岩盤内温度, 凍結深さ, 温度勾配の経時変化

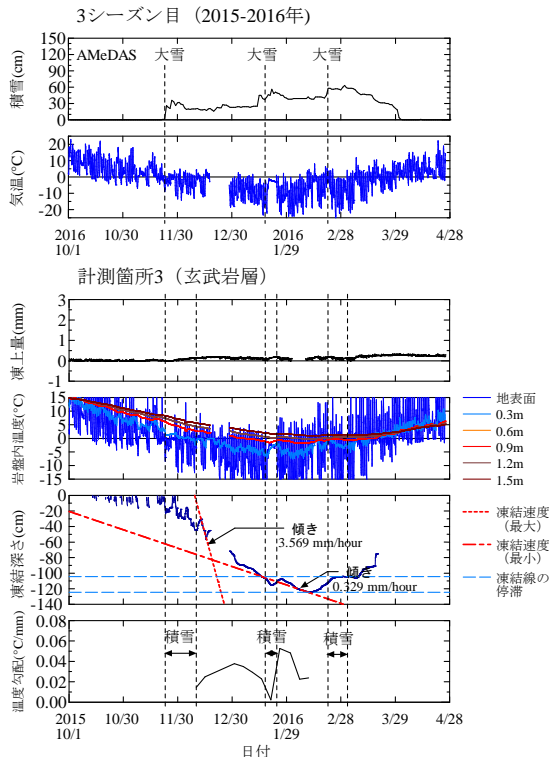


図4 硬質な岩盤の凍上量, 岩盤内温度, 凍結深さ, 温度勾配の経時変化

3月8日にかけて凍結線が停滞している期間が存在しており, その停滞時間は約280時間であった. 両計測箇所における温度勾配は最大で0.041 °C/mmであり, これまで室内凍上実験で採用してきた温度勾配0.29 °C/mmの約1/7と非常に小さな値であることが明らかとなった.

図4に3シーズン目(2015-2016)における硬質な岩盤斜面(玄武岩)の凍上量, 岩盤内温度, 凍結深さ, 温度勾配の経時変化について示す. 3シーズン目も1シーズン目同様に, 除雪を積極的に行った. 図から, 2015年11月下旬以降から岩盤中に凍結線が進行し始めていることがわかるが, 硬質な玄武岩層では凍上変位は計測されていない. 凍結速度は0.329~3.569 mm/hrであり, 軟質な岩盤に比べて大きな凍結速度となった. 晩冬の2016年2月24日から3月6日にかけて凍結線が停滞している期間が存在しており, その停滞時間は約261時間であった. 温度勾配は最大で0.053 °C/mmであり, これまで室内凍上実験で採用してきた温度勾配0.29 °C/mmの約1/5であることが明らかとなった.

以上の計測により, 実際の岩盤の凍結深さ及びその推移と, 岩盤の凍上挙動を明らかにすることができた.

(2) 実際の岩盤斜面の凍結速度・温度勾配を模擬した室内実験

図5に複数の温度勾配で実施した大谷石と来待砂岩の凍上実験結果を示す. 図から, 大谷石の最大凍上速度は, 温度勾配が0から0.4 °C/mmの領域において, 温度勾配が大きくなるに従って, 大きくなっていることが明

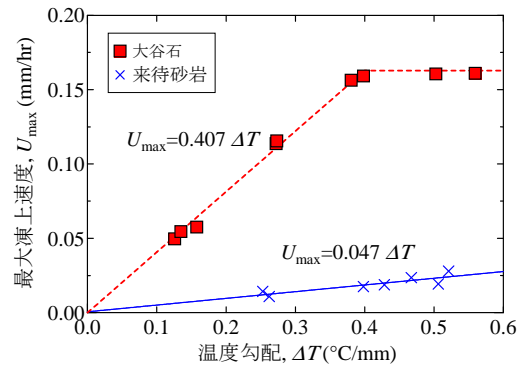


図5 温度勾配と最大凍上速度

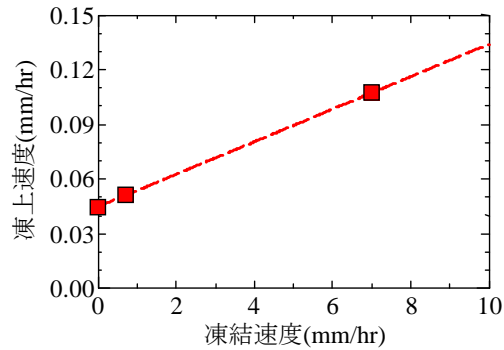


図6 凍結速度と凍上速度

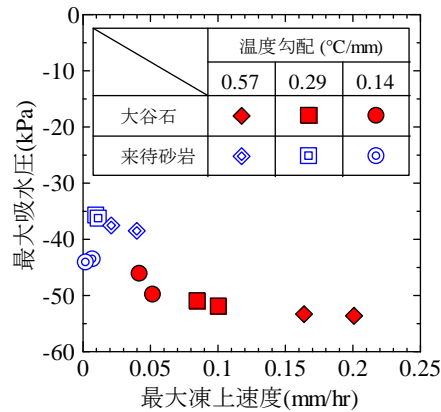


図7 最大凍上速度と最大吸水圧

らかである. 来待砂岩の最大凍上速度も同様で, 温度勾配が大きくなるに従って, 大きくなっている. 先述したように, 実際の岩盤斜面で計測された温度勾配は室内試験で供試体に与えていた温度勾配に比べて非常に小さかったことから, これまでの室内試験で得られていた凍上速度は実際の岩盤で発生する凍上速度に比べて, 大きな値であることが明らかとなった.

図6に複数の凍結速度で実施した大谷石の凍上実験結果を示す. 図から, 大谷石の凍上速度は凍結速度が大きくなるに従って, 大きくなっていることがわかる. この実験により, 軟質な岩石では凍結線を移動させることにより, 岩石の凍上性が増すことが明らかとなった.

図7に大谷石, 来待砂岩の最大吸水圧と最

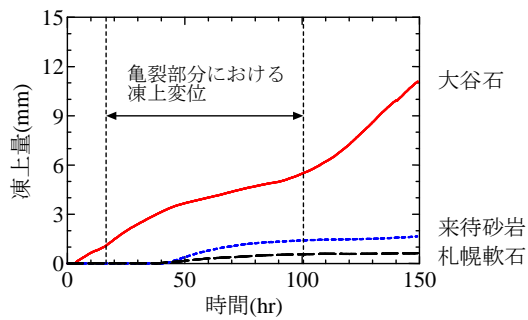


図8 亀裂を模擬した凍上実験の結果

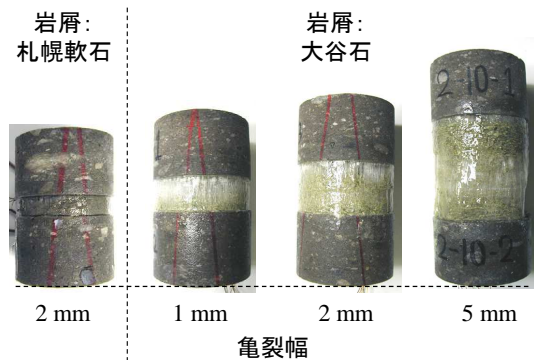


図9 亀裂を模擬した凍上実験の実験終了後の供試体の様子

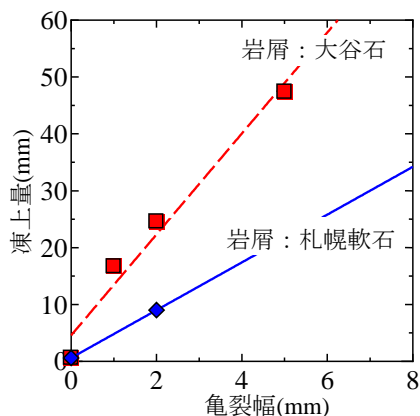


図10 亀裂内部に岩屑が堆積した岩盤を模擬した凍上実験の結果

大凍上速度の関係を示す。吸水圧が発生しなかった札幌軟石は図示していない。図から、同じ温度勾配であっても、大谷石の方が来待砂岩に比べて最大凍上速度、最大吸水圧ともに、大きな値となっていることがわかる。

以上の3種類の凍上実験から得られた知見により、実際の岩盤斜面で発生している岩石の凍上挙動をより詳細に理解することが可能になったと考えられる。

(3) 岩盤内部に潜在する亀裂を模擬した室内実験

図8に岩盤内部に潜在する亀裂を模擬して実施した凍上実験の結果を示す。3種類の岩石とともに、亀裂部分において凍上変位が計測された。このことから、亀裂が凍上性を増加させることは確かなようである。しかしながら、凍上性が低い来待砂岩と札幌軟石におい

て計測された凍上変位は非常に小さく、亀裂そのものが岩石の凍上性に与える影響は比較的小さなものであることが確認された。

図9に亀裂内部に岩屑が堆積した岩盤を模擬した凍上実験の実験終了後の供試体の様子を示す。亀裂部分に岩屑を模擬した粉末状の岩石を挟み込むことで、非凍上性の札幌軟石でも大きな凍上変位が計測された。

図10に亀裂内部に岩屑が堆積した岩盤を模擬した凍上実験の結果を示す。岩屑に大谷石を用い、亀裂幅を5 mmとして行った実験では、最大で50 mmに達するほどの凍上変位が計測されている。また、岩屑に札幌軟石を用いた実験においても約10 mmの凍上変位が計測された。さらに、図10から亀裂幅が大きくなるに従って、凍上量が大きくなる傾向も確認することができる。以上の結果から、亀裂部分に凍上性を有する風化した岩屑等が存在すれば、凍上量が大幅に増加することが明らかとなった。

以上の2種類の凍上実験から得られた知見により、亀裂や風化によって発生した岩屑が岩石の凍上性に与える影響を明らかにすることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

①中村大, 他5名, 北見市柏木の軟岩斜面で実施した凍上変位と凍結深さの計測, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 査読無, 56, 2016, 291-296

〔学会発表〕(計 2件)

①中村大, 他6名, 岩石の凍上に関する基礎的研究—凍上過程で発生する吸水圧の計測例—, 資源素材学会北海道支部, 2015年6月13日, 函館市国際水産・海洋総合研究センター(北海道・函館市)

②中村大, 他5名, Measurement of Suction Pressure Generated in the Process of Frost Heaving in Rock, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014. 10. 14-16, Royton Sapporo, Hotel and Convention Center (Hokkaido・Sapporo)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況（計 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 大 (NAKAMURA, Dai)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号：90301978

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：