

45 岩石の凍上に関する基礎的研究

— 2 分した岩石の境界部分で起こる凍上 —

Basic study on frost heaving of rock

— A frost heaving in the part of the boundary where rock was divided into two. —

中村 大*, 後藤 隆司**, 森 訓保***, 平松 雅弘****

Dai Nakamura, Takashi Goto, Noriyasu Mori, Masahiro Hiramatsu

これまで行われてきた低温の影響による岩石の劣化に関する研究は冷気を供試体の全ての面から当てて行うというものであった。

しかしながら、自然環境下における岩石は冷気と接している面からのみ冷却されるため岩石内部にはほぼ一方向の温度勾配が生じる。また、それと同時に岩石下部からは水の供給があると考えする必要もある。

本研究ではより自然環境に近い状態で岩石に低温の影響を与えることの出来る実験装置を作製して、岩石劣化のメカニズムを解明することに取り組んだ。

今回は、以下の 2 点について報告する。

- ① 3 種類の岩石の凍上性と物性値を比較した実験結果
- ② 岩石の引張強度が凍上に及ぼす影響

キーワード：岩石、凍上、実験装置、岩石物性、引張強度

rock, frost heaving, apparatus, rock properties, tensile strength

1. はじめに

現在、私たちが日常生活を送るうえで、各都市間における人々の移動や物資の輸送といったことが最も重要なものの一つとなっている。これらのことを円滑に行うためには、各都市間を結ぶ高速道路や新幹線、幹線道路等の交通機関を充実させることが必要であり、様々な公共事業が行われている。しかし、北海道のような寒冷地において、山間部や海岸沿いでトンネルや道路の工事を行う際に、多くの問題が生じている。例として、1997 年に北海道島牧村第 2 白糸トンネルで起きた岩盤崩落事故をあげることができる。このような事故の原因の一つとして岩盤の凍上による劣化があげられている。¹⁾

凍上に関しては様々な研究がなされているが、その多くが土の凍上に関するものである。岩石の凍上については、大谷石の凍上に関する研究は多く行われている。^{2) 3)} しかし、大谷石以外の岩石の凍上に関する研究が十分になされているとは言えない。また、土の凍上に関する研究においても、凍上機構については未知の部分が多く、解明するまでにはいたっていないのが現状である。

本研究では、下記の 2 つの実験を軸に岩石の凍上機構を解明する事に取り組んでいる。

- ① 凍上性岩石と非凍上性岩石の諸物性値の比較
- ② 室内凍上試験装置を用いた岩石の凍上機構の解明

2. 凍上現象とは

土が冷却される時に、土中に含まれている水（間隙水）が氷へと相変化する現象を土の凍結という。この際、土中に含まれている水分が移動せずにそのままの位置で氷へと相変化するのだとすると、排水条件の良い土であれば相変化に伴う体積膨張分の水分を排水してしまうので、土は膨張しない。排水条件の悪い土でも、その水分の体積の約 9% が体積増になるだけなので、土全体としては数% の体積増にしかならない。しかし、様々な条件が備わると、土が凍る前に較べて凍った後では、体積が 2 倍以上になることもある。体積増が著しい凍土の断面を見ると、図 1 に示すようなレンズ状の氷の層が幾重にも発生しているのが確認されている。

* 北見工業大学 助手
 ** 北見工業大学 助教授
 *** 北見工業大学 教授
 **** 北見工業大学 技官

Assistant, Kitami Institute of Technology
 Assistant Professor, Kitami Institute of Technology
 Professor, Kitami Institute of Technology
 Officer, Kitami Institute of Technology

この場合、凍結条件や土の諸物性によっては多大な体積膨張を引き起こす。このような現象を指して、一般に土の凍上という。⁴⁾

岩石、岩盤の凍上も上記とほぼ同様の機構であると考えられ、凍上性の高い大谷石と粘性土を同様に扱った研究もすでに発表されている。⁵⁾

2-1. 本研究で考える岩石の凍上現象のプロセス

本研究では、赤川氏の提案する「凍上現象におけるアイスレンズの発生条件」⁵⁾を参考に以下のようなプロセスを考えた。

- ①岩石が寒気によって冷却され、岩石内部に温度勾配が生じる。
- ②岩石が冷却されるのにしたがって、0℃線が下方へと移動する。
- ③あるところで0℃線が安定。0℃線より上方の凍結部分では間隙水が凍結し間隙氷となるが、一部は不凍水となって、間隙氷と共存する。
その後、間隙氷は時間の経過と共に成長するが、その際に発生する力が岩石の引張強度を上回ると、亀裂が発生する。(アイスレンズの発生)

- ④亀裂に不凍水が流入し、潜熱を発生しながら氷へと相変化する。(アイスレンズの成長)

本研究では、③凍上初期段階における亀裂の発生に重点をおいて研究を進めた。

3. 凍上性岩石と非凍上性岩石の判定

凍上性を持つ岩石、非凍上性の岩石を、判定するために以下の実験を行った。

3-1. 供試体

本実験で使用した岩石試料は、札幌軟石、大谷石、来待砂岩の3種類の岩石である。供試体は、直径55mm、長さ150mmの円柱形となるようにカット及び整形した。実験には湿潤状態の供試体を用いた。札幌軟石、大谷石は蒸留水中に3日間、来待砂岩は7日間放置して湿潤させた。

3-2. 実験装置概要および実験方法

本研究では、簡便に、そしてより自然環境に近い状態で岩石に低温の影響を与えるために、図2に示すような実験装置を作製した。実験装置の特徴を以下に示す。

- ・冷気が供試体の上面からのみあたるように、供試体側面は発泡スチロールによって断熱されている。
- ・供試体の下面からは、ヒーターによって温められた水が供給されるため、供試体内部にはある一定の温度勾配が生じるようになっている。

実験は、上記の実験装置を-30℃に設定した冷凍庫に入れて行った。また、実験時には、装置内部のヒーターを+15℃に設定した。

3-3. 実験結果

結果は表1のようになった。札幌軟石は破壊及び凍上が起きなかったが、大谷石、来待砂岩には亀裂が生じアイスレンズが形成され凍上が起

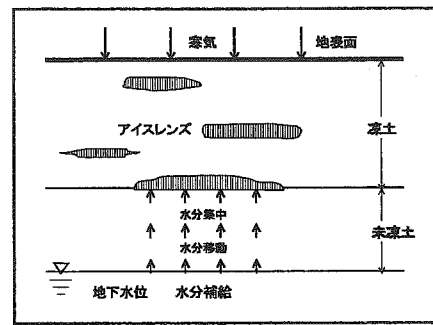


図-1 凍上機構模式図

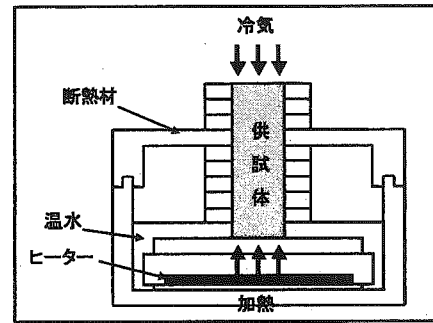


図-2 実験装置図

表-1 凍上量

凍結時間	大谷石		来待砂岩	
	1週間	2週間	1週間	2週間
凍上量 (mm)	3.83	8.61	0	1.62

こった。しかしながら、来待砂岩の凍上量は2週間で、1.62mmと小さく、凍上性に乏しい事がわかる。

以上の結果から、本研究では、札幌軟石を非凍上性岩石、大谷石、来待砂岩を凍上性岩石と判定して、以下のような実験を行った。

4. 凍上性岩石と非凍上性岩石の物性値の比較による凍上機構の解明

4-1. 実験概要

凍上が起こる岩石と凍上が起こらない岩石が生じる原因を解明するために、以下のような実験を行った。

実験① 基本的な諸物性値の比較：

吸水率、空隙率、かさ比重、みかけ比重、乾燥・湿潤状態における弾性波速度の比較。

実験② 一軸圧縮試験・円盤圧裂引張試験：

乾燥、湿潤状態時の圧縮強度、引張強度を比較。

実験③ ポロシメータによる空隙半径、容積の測定：

水銀ポロシメータを使用。空隙の大きさを比較。

実験④ 吸水実験：

直径55mm、長さ150mmの乾燥状態の円柱供試体を水深10mmの水槽に入れ、毛細管現象による吸水量と吸水高さを測定した。

実験⑤ X線回析：鉱物組成の比較。

4-2. 実験結果

実験①：結果は図3～図8のようになった。

実験②：結果は図9、図10のようになった。大谷石、来待砂岩の湿潤状態での圧縮・引張強度は、乾燥状態でのそれに比べ、極端に小さくなっている。札幌軟石は乾燥状態でも湿潤状態でも、強度に差は見られない。

実験③：結果は図11のようになった。札幌軟石では細孔半径 $10^3 \sim 10^4 \text{ nm}$ の空隙が多く存在し、大谷石、来待砂岩では細孔半径 $10 \sim 10^2 \text{ nm}$ の空隙が多く存在していることがわかった。

実験④：結果は図12のようになった。札幌軟石は2時間で約100g吸水したが、大谷石、来待砂岩は24時間でも20gに満たない程度しか吸水しなかった。

実験⑤：結果は表2のようになった。大谷石、来待砂岩には、多量の沸石系鉱物と、少量のス멕タイトが存在している。

4-3. 考察

以上の結果に基づいて、凍上性岩石と非凍上性岩石について以下のような比較をおこなった。

実験①の結果より、それぞれの物性値を比較したが、これらの物性値から、凍上性岩石と非凍上性岩石の明確な差を見つけるのは非常に難しい。

実験②の結果より、凍上性の大谷石、来待砂岩の湿潤状態における引張強度は、乾燥状態に比べると極めて低いことがわかる。このため、凍結時において大谷石、来待砂岩は間隙氷が成長する際に生じる力に耐えるだけの強度を持っておらず、破壊に至ってしまったと考えられる。ここで、非凍上性の札幌軟石に注目してみると、札幌軟石は湿潤状態における引張強度が来待砂岩よりも小さいにも関わらず、破壊するに至っていない。この原因について、以下のように推定した。

実験③の結果から、札幌軟石は大谷石、来待砂岩に比べて細孔半径の大きな空隙を多く含んでいる。このことから、札幌軟石は、大谷石、来待砂岩に比べ、水の移動が容易であると考えられる。

また、実験④の結果より、札幌軟石は大谷石、来待砂岩に比べ吸水性に富んでいることがわかる。このことから、札幌軟石は、大谷石、来待砂岩に比べ、水の移動が容易であると考えられる。

以上のことから、凍上性岩石、非凍上性岩石の亀裂発生時における 0°C 線近傍の状態を赤川氏の提案する「割裂の発生条件」⁵⁾ を参考に図13のように仮定した。図のように仮定すると、札幌軟石では間隙氷が間隙水へと相変化する際に発生する膨張力で未凍結の間隙水を排水してしまい、内圧は発生しない。また、不凍水膜は繋がっていないため、間隙氷の成長も考えられない。大谷石では不凍水膜は未凍結部分に繋がっているため、間隙氷の成長が可能である。また、間隙氷は不凍水に囲まれているため、間隙氷が成長する際に発生する力によって図の太線で示す位置で亀裂が発生すると推定できる。

実験⑤の結果において、3種類の岩石の鉱物組成で最

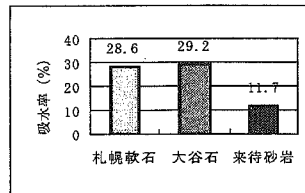


図-3 吸水率

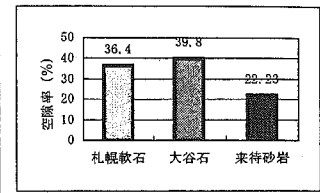


図-4 空隙率

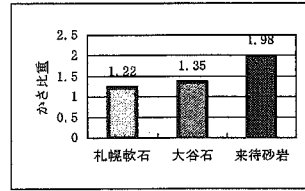


図-5 かさ比重

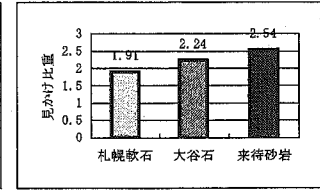


図-6 みかけ比重

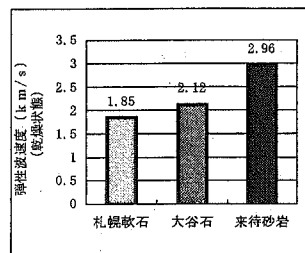


図-7 弾性波速度 (乾燥状態)

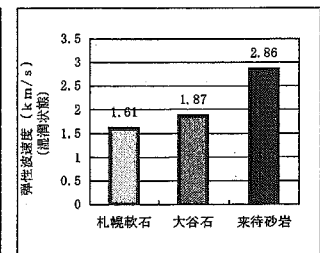


図-8 弾性波速度 (湿潤状態)

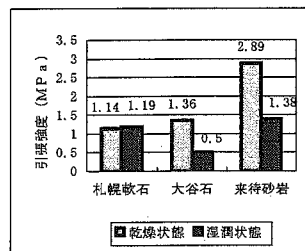


図-9 引張試験結果

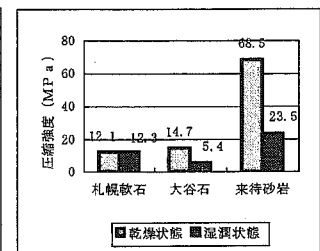


図-10 圧縮試験結果

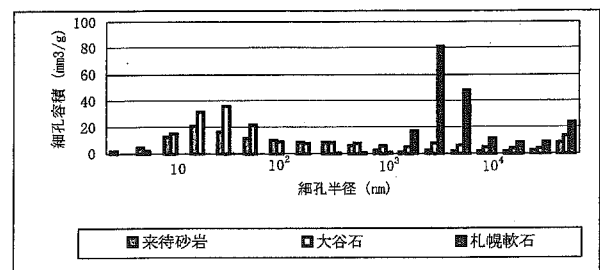


図-11 ポロシメータ試験結果

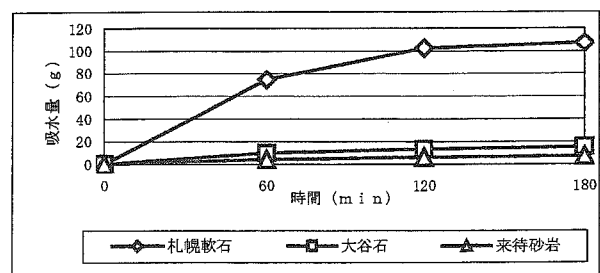


図-12 吸水実験結果

も注目すべき点は、大谷石、来待砂岩に含まれる膨潤性粘土鉱物「スメクタイト」と、沸石系鉱物「輝沸石-斜ブチロル沸石系鉱物」の存在である。

膨潤性粘土鉱物は、自重の何倍もの水分を吸水し保持する性質を持っている。このことと、凍上現象の関わりについては今後の課題である。

沸石系鉱物は、長時間常温の水につけていると若干ではあるが塩基性イオンが溶出する性質を持っている。沸石系鉱物内の塩基性イオンが岩石の間隙水に溶出することは、間隙水の凝固点を低下させている可能性も考えられる。間隙水の凝固点降下は、岩石が保持しうる不凍水分量を増加させることとなるため、凍上を引き起こす要因の1つになりえると考えられる。

5. 室内凍上試験装置を用いた岩石の凍上機構の解明

凍上機構をより詳細に理解するために、室内凍上試験装置を作製し、以下の2つの実験を行った。

実験① 0℃線を一定の位置に固定した凍上実験：

凍上性岩石の凍上挙動をより詳細に理解する。

実験② 2分した供試体を使用した凍上実験：

引張強度が凍上に及ぼす影響を考慮するため、2分した供試体（引張強度 0）で凍上実験を行った。これは非凍上性岩石である札幌軟石が供試体の境界部分（引張強度 0）の状態でも非凍上性を示すのかを検証するためでもある。

5-1. 供試体

実験①：岩石試料として大谷石、来待砂岩を用いた。供試体は直径 55mm、長さ 70mm の円柱形となるようにカット及び整形した。

実験②：岩石試料として大谷石、来待砂岩、札幌軟石を用いた。供試体は上部と下部の2つからなり、直径 55mm、上部の長さ 33mm、下部の長さ 37mm の円柱形となるようにカット及び整形した。上記の境界部分は、上部と下部の端面を合わせた部分である。

①、②ともに、実験には蒸留水中に放置して湿潤させた供試体を使用した。

5-2. 実験装置概要

本研究で使用した実験装置を図 14 に示す。

実験装置の特徴を以下に示す。

- ・ 供試体上下端面の温度は、上盤と底盤を流れる循環水によって制御されているので、正確な設定が可能である。また、上盤と底盤に流れる循環水の温度は、独立した温度制御装置によって制御されるので、別々に設定することが可能である。
- ・ 水分供給は、給水管を通過して、供試体下面に行われる。また、供試体下面に設置するポーラスストーンによって、供試体へ水が一様に供給される
- ・ 供給された水の蒸発を防ぐために、発泡スチロールの蓋を設置している。
- ・ 供試体設置後、周囲にセルを立て、セル内部に粒状断熱材を敷き詰める。粒状の断熱材で供試体側面を直接

表-2 X線解析結果

岩石名	鉱物組成
札幌軟石	火山ガラス 「石英」、「長石」
大谷石	輝沸石-斜ブチロル沸石系鉱物 「オパールCT」、「石英」、「長石」 「スメクタイト」
来待砂岩	斜長石、石英 輝沸石-斜ブチロル沸石系鉱物 イライト/スメクタイト混合物

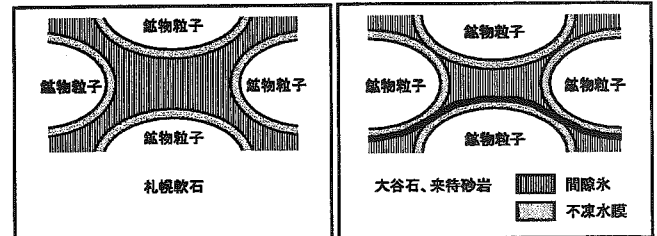


図-1-3 亀裂発生時における0℃線近傍の模式図

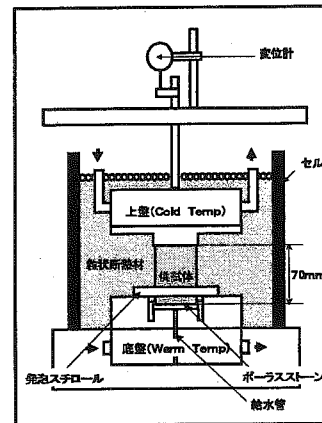


図-1-4 凍上試験装

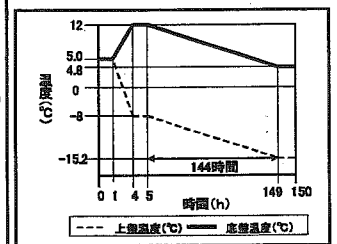


図-1-5 上盤、底盤の温度設定

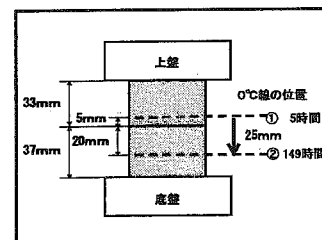


図-1-6 0℃線の推移

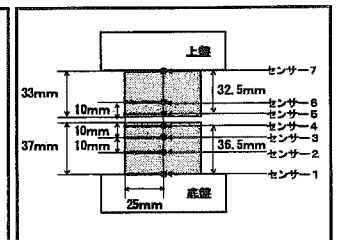


図-1-7 センサー設置位置

断熱するため、供試体と断熱材との凍着によって凍上量の測定に誤差が生じるのを防ぐ事ができている。

- ・ 粒状の断熱材を使用しているため、供試体内部温度測定時の熱電対の設置が容易である。
- ・ 凍上量は装置上方の変位計によって計測される。

5-3. 実験方法

実験はまず、上盤、底盤の温度を+5℃に設定し、供試体の内部温度をほぼ+5℃に安定させてから行った。

実験①：上盤を-15℃、底盤を+5℃に設定し、ある一定の位置に0℃線を固定して実験を行った。

実験②：上盤、底盤を図 15 のように設定し、0℃線を図 16 のように移動して実験を行った。

供試体の上面から凍結を進行させ、5 時間かけて上盤を-8℃、底盤を+12℃に変化させ、0℃線を図 16 の①へ移動する。その後、144 時間かけて上盤を-15.2℃、底盤を+4.8℃に変化させて、0℃線を①から②へ移動させる。その間、上盤と底盤の温度差は常に 20℃で保たれ、供試体に生じる温度勾配は 0.29℃/mm である。

実験中、供試体内部の温度測定を行った。センサーには熱電対を使用し、供試体側面に深さ 25mm の穴をあけて設置した。図 17 にセンサーの設置位置を示す。

凍上量及び供試体内部温度は 5 分ごとに測定した。

5-4. 実験結果

実験①：大谷石、来待砂岩の凍上量を図 18 に示す。

大谷石は約 72 時間で 10mm の凍上量に達したが、来待砂岩は 336 時間で 4mm 程度しか凍上しなかった。

実験②：大谷石の供試体内部の温度測定結果を図 19(A)、

その凍上量と凍上速度のグラフを図 19(B)に示す。

来待砂岩の供試体内部の温度測定結果を図 20(A)、

その凍上量と凍上速度のグラフを図 20(B)に示す。

札幌軟石の供試体内部の温度測定結果を図 21(A)、

その凍上量と凍上速度のグラフを図 21(B)に示す。

5-5. 考察

実験①：図 18 から、大谷石の方が来待砂岩に較べて凍上しやすいことは明らかである。

また、大谷石は実験開始直後から凍上し始めるが、来待砂岩は実験開始から約 78 時間後に凍上し始めていることがわかる。岩石の凍上は 2. の③のように亀裂はいることから始まるので、引張強度の小さい大谷石のほうが来待砂岩よりも早く凍上し始めていると考えられる。

実験②：境界部分の凍上期間を図 19～図 21 の破線で示した。

(1) 大谷石 (凍上性)

大谷石の供試体には無数のクラックが発生していた。しかしクラックの氷は境界部分に形成されたアイスレンズ程の厚さではない。このことから境界部分において凍上現象が起こりやすいことがわかる。

図 19 から凍上量が 13 時間目から増加しているのがわかる。これは凍上が供試体上部から境界部分へ移行し、境界部分の間隙氷へ不凍水が流入することによって、間隙氷が成長し始めたためだと考えられる。このことから境界部分の凍上開始時刻を 13 時間目とした。境界部分の凍上開始時刻までの全凍上量は 0.8mm である。その凍上量に、実験終了後に測定した境界部分の凍上量 4.0mm を加えた凍上量は 4.8mm である。この凍上量から凍上終了時刻を 87 時間目と推定することができるが、これは凍上速度が減少から増加へと変化している時刻と一致する。このことから 87 時間目を境界部分における凍上終了時刻とした。

この時、境界部分で不凍水を保持できる限界の温度に

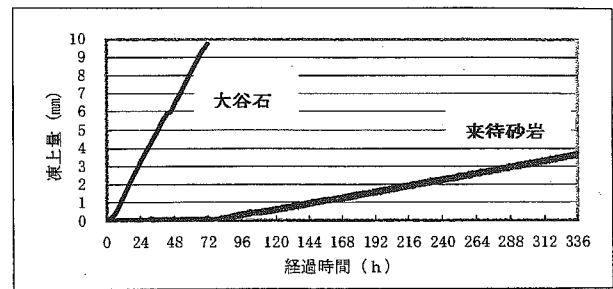


図-18 上盤温度-15℃における大谷石と来待砂岩の凍上量の比較

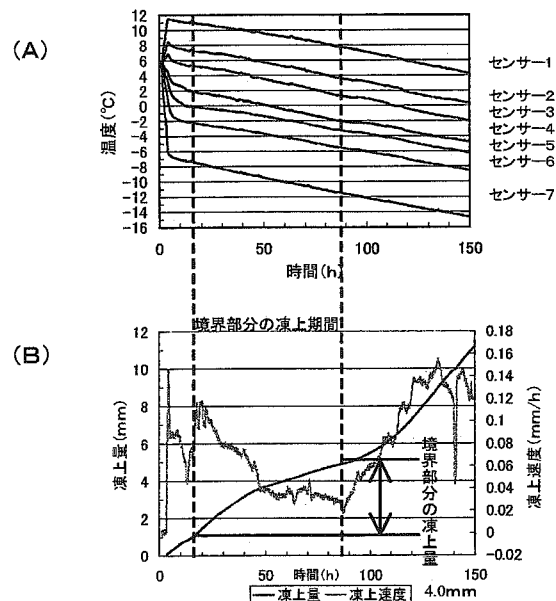


図-19 大谷石の供試体内部温度 (A) 大谷石の凍上量と凍上速度 (B)

達したため、凍上が境界部分から供試体下部へと移行したと考えられる。20 時間目から 87 時間目にかけて、凍上速度が徐々に減少していることがわかる。これは供試体の温度が低下することによって、境界部分への不凍水の流入量が減少していることを示していると推定できる。

(2) 来待砂岩 (凍上性)

来待砂岩は凍上性であるが、供試体上部にはクラックが全く確認できなかった。また、供試体下部においても微細なクラックが 1 箇所しか確認できなかった。このことと①の結果から、来待砂岩にクラックが発生するためには、0℃線がある程度の時間停滞しなくてはならないということがわかる。

来待砂岩の境界部分における凍上量は約 1.5mm と大谷石の 4.0mm に比べて小さい。このことから来待砂岩の境界部分において不凍水の流入量が、大谷石のそれに比べて少ないことが推測できる。また、4. の結果から、来待砂岩の吸水率は 11.7%、大谷石の吸水率は 29.2% である。このことから来待砂岩の保持する不凍水量が大谷石に比べて少ないことが推測できる。

(3) 札幌軟石（非凍上性）

札幌軟石では、供試体にクラックが発生していなかった。このことから、札幌軟石では間隙氷が成長する際に、岩石にクラックを発生させるほどの力を発生していないことがわかる。

図 21 から札幌軟石でも約 70 時間かけて境界部分に氷が生成されていることがわかる。このことから境界部分においては非凍上性の札幌軟石でも凍上のような現象が起こっていると考えられる。しかしながら、札幌軟石の凍上量は 0.6mm と大谷石の 4.0mm に比べて非常に小さい。考えられる要因として、岩石が保持しうる不凍水分量の違いを上げることができるが、今回の実験では言及するまでには至っていない。

以上のことから、岩石の引張強度が凍上に少なからず影響を及ぼしていることが明らかになった。

7. おわりに

①凍上性岩石と非凍上性岩石の諸物性値の比較

- ・ 湿潤状態での圧縮・引張強度が、乾燥状態でのそれに比べて極端に小さい。
- ・ 細孔半径 10~10²nm の空隙が多く存在している。
- ・ 吸水性に乏しい。
- ・ 鉱物組成に沸石系鉱物と、膨潤性粘土鉱物を含む。

物性値に以上のような傾向が見られると岩石は凍上すると考えられる。今後、更にサンプル数を増やして、物性値の比較を行っていく予定である。

②室内凍上試験装置を用いた岩石の凍上機構の解明

凍上性岩石では、境界部分において凍上が起こり易く、非凍上性岩石では、境界部分においてわずかではあるが凍上を起こすことがわかった。以上のことから岩石の引張強度が凍上に少なからず影響を及ぼすことが明らかになった。

参考文献

- 1) 北川 修三、川上 義輝：地山凍結によるトンネルの変状とその対策，鉄道土木，p281-p287,1985-5
- 2) 赤川 敏：Studies on the process of frost damage to stone remains under cold environments and its preservation methods, Ph. D Thesis, Hokkaido University, 1991
- 3) Takeshi Ishizaki：Frost deterioration of historical stone monuments and its preventive measures, Ground Freezing, p79-p83, 2000

4) 木下 誠一：凍土の物理学，森北出版，1982

5) 赤川 敏：凍上現象におけるアイスレンズの発生条件，地盤工学会，北海道支部，技術報告集，第 41 号，p133-p138,2001

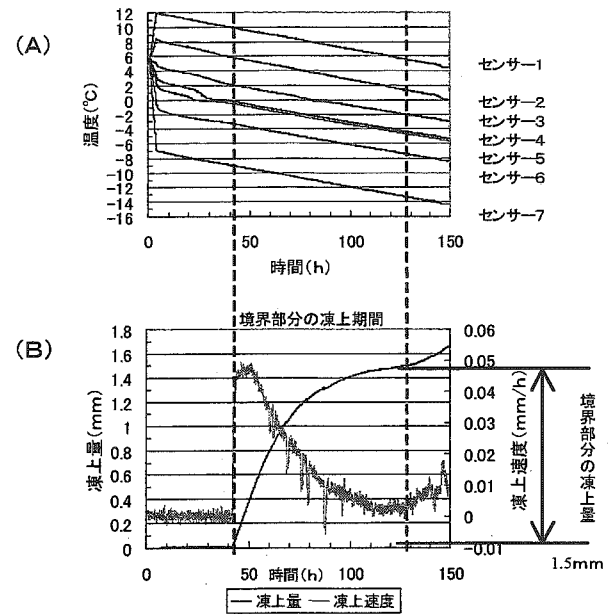


図-20 来待砂岩の供試体内部温度(A)
来待砂岩の凍上量と凍上速度(B)

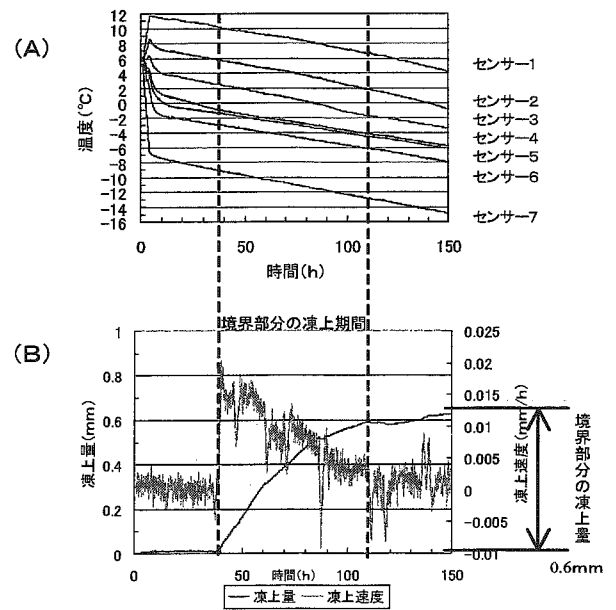


図-21 札幌軟石の供試体内部温度(A)
札幌軟石の凍上量と凍上速度(B)

Most studies have been made on rock weakening processes by freezing samples in a cold chamber, where freezing front penetrates from the surface to the central part of each sample.

However, the penetration of freezing front is approximately uni-directional with a supply of water from a deeper part of rock under a natural condition.

A basic study was conducted by using a laboratory-made apparatus to investigate influence of freezing under experimental conditions close to natural environments.

This time, Experimental results will be reported about two points of the following.

- ①Comparing the case study on three kinds of rocks.
- ②An influence which the frost heaving takes by Tensile strength of the rock .