凍結融解試験による岩石の強度劣化の定式化と物性値との関係

日下部 祐基¹・伊東 佳彦²

¹正会員 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail: kusakabe@ceri.go.jp

²正会員 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail: yos-ito@ceri.go.jp

岩盤の凍結融解による経年劣化の評価方法を確立することを目的に、岩石の凍結融解による強度劣化を、物性値や初期強度より推定する方法を検討した。その結果、凍結融解による岩石の強度劣化を表す強度比の対数と凍結融解サイクル数 (N) の平方根との間に直線的な負の相関があることを見いだした (以下、 $\sqrt{N}$ 近似)。岩石劣化を安全側に評価するために、筆者らは $\sqrt{N}$ 近似と指数近似を用いた岩石劣化の近似法を構築し、両近似の回帰計算で求められる定数や両近似の境界サイクル数が岩石の動弾性係数と相関が高いことを示した。これらの結果は、対象岩石が今後凍結融解を何サイクル受けるとどの程度強度が低下するのかの予測などに利用できると考えられる。

Key Words : rock deterioration, freezing and thawing, estimate method

1. 序論

切削直後の新鮮で堅硬な岩盤、あるいは現状堅硬な自然岩盤において、時間の経過とともに劣化して岩盤崩壊に至る現場が時々みられる。寒冷地における崩壊要因には、凍結破砕あるいは凍結融解の繰り返しによる岩石劣化の影響が大きいと考えられる。凍結融解による岩盤斜面の変状を未然に防止、あるいは予測するには、凍結融解による岩石の経時的な劣化現象を定量的に把握して斜面管理や対策工の設計に取り込む必要がある。

寒冷地の岩盤斜面を対象とした凍結融解の影響を調査した研究は、これまでに凍結融解と凍上性の関係を調査した報告¹⁾や、実斜面において凍結融解による不安定挙動が確認され対策された報告²⁾などがある。岩石の凍結融解に関する研究では、室内試験^{3,4,5,6)}や現地調査^{7,8)}による研究、あるいは土木構造物の施工に凍結岩盤を利用した研究⁹⁾など多くの研究が行われている。

本研究に関連した岩石の凍結融解による経時的な変化を対象とした研究では、中村らがフィルダムに用いるロック材やリップラップ材の劣化予測に関する報告をしている^{10,11,12)}。特に中村¹³⁾は、流紋岩供試体の試験結果を用いて、岩石の凍結融解による破壊過程を指数分布、対数分布、ワイブル分布などにあてはめて解析している。

また、当研究所の過去の研究報告でも、根岸らが凍結

融解の影響を受けやすい岩種として熔結凝灰岩を用いて、岩石強度の低減率の推定法を超音波速度試験から求められる P 波速度と一軸圧縮強さの関係を含めて考察^{14,15)}している。

しかしながらこれらの既往の研究では、凍結融解による岩石の劣化を定式化するまでには至っていない。

一方、凍結融解による土木構造物の劣化に関する研究では、コンクリート工学の分野で歴史が古く、岩石の研究と比較してはるかに多くかつ詳細にされている。この関連では、コンクリートの凍結融解による凍害や耐久性について過去の研究を取りまとめた報告¹⁶⁾や、凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化評価の基礎的研究¹⁷⁾、あるいは凍結最低温度の影響に関する研究¹⁸⁾などの報告がある。

筆者らは、これまでに岩盤の経年劣化の評価方法を確立することを目的に、コンクリート工学の研究も参考にして室内試験結果を用いて岩石の凍結融解による強度劣化を、物性値や初期強度より推定する方法について検討した^{19,20)}。しかし用いた近似曲線は、岩石の凍結融解サイクルの初期に発生する急激な強度劣化を表せていないという問題があった。

ここでは、過去に用いた指数近似曲線にかえて、土木や地盤工学の分野で経時的な現象の推定に利用されるワイブル分布近似曲線を用いて解析した。ワイブル分布近

似曲線式では、形状パラメータと呼ばれる回帰定数が指数近似曲線式に追加されるため、より複雑な曲線形状を近似できる。しかし、回帰定数が複数になることから、組み合わせによっては近似精度が低下することが懸念される。本論文では、これらを考慮した解析を行い経時的な岩盤劣化の推定精度を向上させ、かつ岩盤斜面の崩落対策などの実務に簡易に利用できることを配慮して検討した。さらに、堆積岩や火山岩などの各種の岩石試料を用いて繰り返し凍結融解試験等を行い、汎用性のある岩石劣化の推定法を検討した。

2. 岩石試料と試験概要

(1) 試験に用いた岩石試料

試料の岩種は、堆積岩類14（礫岩2、砂岩9、泥岩3）、火山岩類3（安山岩3）、および火山砕屑岩類4（火山礫凝灰岩、水冷破碎岩など）の3岩種21試料である。試料採取地は、図-1に示すように道央（赤井川、芦別、厚真、岩内、喜茂別）、道南（乙部、鹿部）、道東（釧路町、阿寒町）の9市町村に分布している。

岩石試料の基本物性を表-1に示す。試験に用いた岩石の一軸圧縮強さは、最大値が98.0MN/m²（天寧層礫岩、釧路町）、最小値が0.8 MN/m²（凝灰質砂岩、鹿部）で軟岩を中心として、硬岩まで含まれている。

(2) 実施した岩石試験

対象岩石の凍結融解による物理力学特性値の変化を求めるため、凍結融解を任意サイクル数繰り返した後に水浸容器より取り出し、表面水をウェスで拭き取ってほぼ飽和湿潤状態で岩石の一軸圧縮試験（JGS 2521-2009に準拠、載荷方法：応力制御で1.0～5.0MPa/min）を実施²¹⁾し

た。

供試体の作製はJIS M 0301に準拠した。供試体のサイズは、直径約50mm、長さ約100mmである。各試料の供試体数量は、表-1に示すように複数本用意した。凍結融解の温度条件は、コンクリートの凍結融解試験²²⁾に準じて、供試体中心温度（制御用コンクリートダミー供試体の中心温度）で-18℃～+5℃になるように設定し、1日約8サイクル数（以下、サイクル数の単位をcと記す。）とし、凍結融解サイクル数（以下、サイクル数）を最大300cとした。

一軸圧縮強さの測定サイクル数は、比較的状态の良い岩石の場合でも、最初の測定は1日すなわち8c程度で一度測定を行った。一方、軟質な岩石などの凍結融解初期に劣化が確認された岩石では、初期サイクル時に慎重を期すため1cで測定し、供試体の状況を見ながら徐々に測定間隔を伸ばした。

図-1 試料採取位置図

表-1 岩石の基本物性試験結果

No.	試料名	岩種	採取地	吸水率 (%)	飽和密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	P波速度 (km/sec)	S波速度 (km/sec)	動弾性係数 (GN/m ²)	一軸圧縮強さ (MN/m ²)	凍結融解試験用供試体本数
1	春採層 砂岩1	堆積岩	釧路町	5.62	2.45	2.32	3.43	1.79	20.5	31.1	6
2	春採層 砂岩2	"	"	5.08	2.52	2.40	3.60	1.72	20.2	35.1	6
3	雄別層 砂岩	"	"	10.42	2.32	2.10	1.26	0.51	1.6	6.7	6
4	雄別層 泥岩	"	"	6.46	2.41	2.27	2.14	0.93	5.8	7.7	2
5	天寧層 礫岩1	"	"	1.60	2.62	2.58	4.53	2.22	34.8	98.0	5
6	天寧層 礫岩2	"	"	2.33	2.62	2.56	4.78	2.45	41.8	33.4	13
7	天寧層 砂岩	"	"	7.81	2.40	2.22	2.28	1.12	8.1	14.7	38
8	天寧層 炭質泥岩	"	"	7.67	2.21	2.05	2.42	0.85	4.5	6.7	3
9	春日層 火山礫凝灰岩	火砕岩	赤井川	14.31	2.10	1.83	2.43	1.14	7.4	9.3	9
10	春日層 風化安山岩	火山岩	"	4.77	2.47	2.35	3.86	1.86	23.0	32.8	5
11	春日層 安山岩	"	"	2.25	2.60	2.55	4.71	2.21	34.5	60.0	7
12	館層 粗粒砂岩	堆積岩	乙部	24.63	1.99	1.60	2.66	1.31	9.2	8.1	8
13	館層 細粒砂岩	"	"	33.00	1.86	1.40	2.31	1.07	5.8	9.4	6
14	流紋岩質凝灰岩	火砕岩	鹿部	14.43	2.08	1.82	2.70	1.50	12.0	12.5	6
15	凝灰質砂岩	"	"	27.09	1.95	1.54	1.22	0.59	1.9	0.8	5
16	蝦夷層群 砂岩	堆積岩	芦別	2.11	2.58	2.53	4.26	2.14	33.7	58.5	6
17	川端層 砂岩1	"	厚真	6.22	2.41	2.27	2.80	1.35	12.2	11.0	4
18	川端層 砂岩2	"	"	7.07	2.41	2.25	2.71	1.39	12.2	26.1	4
19	美笛層 風化安山岩	火山岩	岩内	5.17	2.48	2.36	4.52	2.22	33.0	26.6	6
20	水冷破碎岩	火砕岩	喜茂別	3.49	2.25	2.17	4.32	2.21	28.8	61.8	7
21	舌辛層 砂質泥岩	堆積岩	阿寒町	14.60	2.23	1.96	1.75	0.63	2.5	2.5	5

3. 試験結果と考察

(1) 凍結融解による岩石の強度劣化の定式化

過去の報告^{19, 20)}では、岩石の強度劣化の指標として任意のサイクル数 $N(c)$ 後の一軸圧縮強さ qu_c と初期一軸圧縮強さ qu_0 との比 ($=qu_c/qu_0$)を強さ比として、サイクル数との関係式に縦軸切片を1.0に固定 ($0c$ の強さ比は1.0になる。)した指数近似曲線 (以下、指数近似) を用いた。以下に式を示す。

$$S(N) = \exp(-k_1 \cdot N) \quad (1)$$

ここに、 $S(N)$: 強さ比 (サイクル数 $N(c)$ 後の一軸圧縮強さ qu_c と初期一軸圧縮強さ qu_0 との比 ($=qu_c/qu_0$))

N : サイクル数 (c)

k_1 : 回帰定数

全試料の関係を図-2 (図中の黒色破線) に示す。バラツキが大きい試料があるが、およそこの関係では最終サイクル数付近の傾向には相関がみられるが、初期サイクル数付近の急激な強度低下を表せていない。(代表的な事象例として表-1の強度が大きく異なる試料No.1, No.13, No.20について、初期サイクル数付近の急激な強度低下を図中の青線枠内に示す。)

そこで、今回はこの改善を図る目的でワイブル分布近似曲線 (以下、ワイブル近似) を用いることとした。ワイブル近似は、前述した中村¹³⁾が岩石の強度劣化の解析で用いているが、土木工学の分野では基礎杭の載荷試験結果に利用²³⁾されるなど、近似曲線としての有効性が示されている。

近似曲線は、上式のサイクル数 N を m 乗する回帰定数が追加されて下記の式で表される。

$$S(N) = \exp(-k_2 \cdot N^m) \quad (2)$$

ここに、 k_2 , m : 回帰定数

上式の両辺の対数を2回とると、以下の式のように1次式に変換でき、これを直線回帰する。(回帰式 $y=b+ax$: $y=\ln(-\ln S(N))$, $x=\ln N$, 直線の傾き $a=m$, y 軸切片 $b=\ln k_2$)

$$\ln(-\ln S(N)) = \ln k_2 + m \cdot \ln N \quad (3)$$

回帰計算結果を指数近似と同様に図-2 (図中の青色一点鎖線) に示す。指数近似に比べて、相関がよくなっていることが認められる。表-2には、各岩石の回帰定数 k_1 , k_2 , および m を示した。ワイブル近似では、後に示す強

度劣化の推定で必要になる定数が2つになる。必要になる定数が複数になると、その組み合わせにより推定値の精度が悪くなることが予想される。そこで、回帰定数のどちらかを一定値に固定して回帰計算することを試みた。

ワイブル近似の特性として回帰定数 m の値により曲線形状が異なる。ここで負の値になっている試料は、図-2 (試料No.10,11,15,16,18,19) に示すようにサイクル数に比例して強さ比が増加する傾向に回帰され、実現象と相違する。実測値の分布と回帰計算の性質から、最も相関の高い近似式が算出された結果と考える。

そこで、定数 m が負の値を除いて平均値を求めた。その結果、0.595が得られた。これを四捨五入して0.6とすることが考えられるが、実務的に簡易な利用を配慮して0.5単位で丸めて $m=0.5$, すなわちサイクル数 $N(c)$ の平方根を用いて以下の式 (以下、 $\sqrt{N}$ 近似) を提案する。

$$S(N) = \exp(-k_3 \sqrt{N}) \quad (4)$$

ここに、 k_3 : 回帰定数

上式の両辺の対数を1回とると、以下の式が得られ、原点回帰計算を行うと定数 k_3 が求められる。(回帰式 $y=b+ax$: $y=-\ln S(N)$, $x=\sqrt{N}$, 直線の傾き $a=k_3$, y 軸切片 $b=0$)

$$-\ln S(N) = k_3 \sqrt{N} \quad (5)$$

表-2には各岩石の定数 k_3 も示した。図-2にはこの近似曲線 (図中の赤色実線) も示した。よい相関が認められる。これらの近似曲線の間をみると、初期の凍結融解サイクルでは平方根を用いた $\sqrt{N}$ 近似が強さ比の急激な低下を示して実験値と相関がみられる。後半部では、指数近似と $\sqrt{N}$ 近似で大きな差が見られないが、これらの近似曲線が交差して指数近似が小さい値を示すものがある。(代表的な事象例として試料No.1, No.13, No.20について、近似曲線が交差して指数近似が小さい値を示すものを図中の赤線枠内に示した。)

このような傾向を示した原因として、筆者らは、過去に凍結融解試験後の岩石供試体を用いて薄片を作成し、き裂 (マイクロクラック) を顕微鏡下でメッシュ分割して観察計数²⁴⁾して検討した。その結果、凍結融解による強度低下が確認された試料には、き裂率と一軸圧縮強さとの間に負の相関がみられた。また、児玉ら²⁵⁾は、岩石の凍結融解による破壊プロセスを供試体の肉眼観察およびX線CTスキャナを用いて調べている。その結果では、破壊タイプが分類され、その破壊プロセスが主に水分の供給能力とき裂の進展に対する抵抗力により支配されるとしている。すなわち、凍結融解の初期段階でき裂の急

図-2 試験結果と回帰式の関係

図-2 試験結果と回帰式の関係 (つづき)

表-2 岩石の各回帰計算より求めた回帰定数 km および決定係数 R^2

No.	試料名	指数近似 k_1	指数近似 R^2	ワイブル近似 $k_2^{(注1)}$	ワイブル近似 $m^{(注1)}$	ワイブル近似 $R^{2(注1)}$	$\sqrt{N}$ 近似 k_3	$\sqrt{N}$ 近似 R^2
1	春採層 砂岩1	0.0157	0.858	0.169	0.503	0.580	0.180	0.916
2	春採層 砂岩2	0.0065	0.683	1.133	0.031	0.029	0.107	0.847
3	雄別層 砂岩	0.0214	0.662	0.467	0.297	0.760	0.218	0.933
4	雄別層 泥岩	0.1150	0.987	0.004	1.439	0.999	0.336	0.922
5	天寧層 礫岩1	0.0012	0.848	0.440	-0.091	0.003	0.019	0.875
6	天寧層 礫岩2	0.0024	0.648	0.002	1.033	0.371	0.038	0.745
7	天寧層 砂岩	0.0572	0.895	0.309	0.503	0.739	0.317	0.963
8	天寧層 炭質泥岩	0.0732	0.888	0.306	0.573	0.805	0.378	0.976
9	春日層 火山礫凝灰岩	0.0192	0.682	0.321	0.172	0.034	0.125	0.750
10	春日層 風化安山岩	0.0041	0.338	0.908	-0.126	0.046	0.062	0.516
11	春日層 安山岩	0.0013	0.073	0.557	-0.119	0.046	0.033	0.211
12	館層 粗粒砂岩	0.1328	0.929	0.126	0.971	0.711	0.373	0.864
13	館層 細粒砂岩	0.3329	0.969	0.604	0.609	0.955	0.702	0.994
14	流紋岩質凝灰岩	0.0438	0.932	0.325	0.376	0.783	0.225	0.988
15	凝灰質砂岩	0.3044	0.732	1.254	-0.036	0.002	0.679	0.797
16	蝦夷層群 砂岩	0.0013	0.355	0.307	-0.033	0.003	0.024	0.500
17	川端層 砂岩1	0.0382	0.763	0.273	0.242	0.162	0.152	0.893
18	川端層 砂岩2	0.0409	0.321	4.780	-0.999	0.540	0.196	0.546
19	美笛層 風化安山岩	0.0020	0.506	0.764	-0.241	0.047	0.032	0.556
20	水冷破砕岩	0.0033	0.743	0.116	0.315	0.135	0.053	0.829
21	舌辛層 砂質泥岩	0.3295	0.992	0.229	1.265	0.990	0.611	0.929
平均値		0.074	0.705	0.313	0.595	0.575	0.231	0.788

注1: ワイブル近似の回帰定数および決定係数は、回帰定数 m が負の値の試料を除いた平均値

激な増加や新たな発生、その後の既存き裂の伸長等が影響していると推測される。

また、表-2には各回帰計算による総変動と予測値による変動の比である決定係数 R^2 も示した。決定係数は、回帰定数を複数にして自由度を高くしたワイブル近似が最も大きくなると想定されたが、全体的には最も小さくなり、 $\sqrt{N}$ 近似の係数が最も大きな値を示し精度が高い。ワイブル近似の決定係数が小さくなった原因は、直線回帰するために両辺の対数をとる回数が他の近似では1回であるの対してワイブル近似では2回必要であることか

ら、 x, y の数値範囲が異なるためと考えられる。

(2) 回帰定数と物性値との関係

岩石の凍結融解による強度劣化の推定は、前述のように凍結融解試験と一軸圧縮試験を組み合わせで行った場合には定式化して求めることができる。しかし、この試験は多大な時間と労力が必要になる。したがって、簡易に求める方法があると便利である。

既往の研究には岩石などの凍結融解による劣化や凍上性とその物性に一般的な相関がみられないことを示すも

の²⁵⁾がある一方、1 軟岩の実験から強度劣化が飽和度に大きく依存するとして推定法を示したもの²⁶⁾もある。凍結融解による強度劣化と工学特性の関係は単純でないことが推測されるが、ここでは、実用性を考慮して岩石データを用いて統計計算による推定法を検討する。

凍結融解による強度劣化の傾向は、前述したように初期の凍結融解サイクルでは $\sqrt{N}$ 近似と実験値に相関がみられ、後半部では指数近似と $\sqrt{N}$ 近似の近似曲線が交差して指数近似が小さい値を示す。推定法として実務にこの傾向を利用するには、安全側の傾向を採用することが、現状の推定精度では適当と考える。そこで、近似曲線交差部の前半部を $\sqrt{N}$ 近似劣化、後半部を指数近似劣化として推定法を考察する。

$\sqrt{N}$ 近似劣化と指数近似劣化の関係は、劣化度すなわち強さ比が等しくなるサイクル数が境界となる。すなわち、式(1)と式(4)が等しいと置いて求められるサイクル数 $N_a(c)$ が境界値である。以下に関係式を示す。

$$N_a = \left(\frac{k_1}{k_3} \right)^2 \quad (6)$$

ここに、 N_a : 境界サイクル数 (c)

k_1, k_3 : 回帰定数

上式よりいずれか2値が求められると、未知数の残値も求められる。そこで、まず回帰定数 k_3 と代表的な物性値との関係を検討した。

回帰定数 k_3 の特性は、値が大きいくほど曲線の曲率が大きくなり、ここでは急激な強度低下の傾向を示すことになる。したがって、空隙や含水が多いなどの脆弱な岩石ほど、 k_3 が大きくなることが予想される。図-3は、空隙や含水に関係する吸水率と回帰定数 k_3 の関係を示したものである。比例関係が認められ、原点回帰の直線式は図に示したとおりである。

また、上述したように回帰定数 k_3 は、岩石の強度と負の相関があるものと予想される。図-4に一軸圧縮強さと k_3 の関係を示す。予想されたとおりの関係にあり、この関係の指数回帰式を図に示す。

図-5は、一般に一軸圧縮強さと正の相関があるとされる超音波速度測定試験結果から求められる動弾性係数 E_d と k_3 の関係を示したものである。回帰式を図に示すが、この式が他の回帰式に比べて最も決定係数が大きくなった。

回帰定数 k_1 と境界サイクル数 N_a についても同様の物性値との相関を調べた結果、 k_3 と同様に動弾性係数との相関が最も良好であった。図-6に動弾性係数と k_1 との関係を、図-7に同様に動弾性係数と N_a との関係を示す。各関係式を整理して以下に示す。

図-3 吸水率と $\sqrt{N}$ 近似の回帰定数

図-4 一軸圧縮強さと $\sqrt{N}$ 近似の回帰定数

図-5 動弾性係数と $\sqrt{N}$ 近似の回帰定数

図-6 動弾性係数と指数近似の回帰定数

図-7 動弾性係数と境界サイクル数

$$k_3 = 0.55 \exp(-0.082 \cdot E_d) \quad (7)$$

$$k_1 = 0.19 \exp(-0.14 \cdot E_d) \quad (8)$$

$$N_a = 8.7 \exp(-0.11 \cdot E_d) \quad (9)$$

ここに、 E_d : 動弾性係数 (GN/m²)

これらの関係式を用いると、簡易にサイクル数と岩石の凍結融解による長期の強度劣化を予測できることが考えられる。また、現状の岩石と新鮮な岩石の強さ比を求めることにより、現状の岩石が何サイクルの凍結融解を受けたかの推定に利用できることが考えられる。

4. 結論

岩石の凍結融解試験による強度劣化を物理力学特性値から推定する方法について検討した。得られた結論は、以下のとおりである。

- 1) 凍結融解のサイクル数の平方根と強度劣化の指標とした強さ比の関係には、凍結融解サイクルの初期段階に生じる急激な強度低下を表す傾向が認められた。
- 2) 初期の凍結融解サイクルでは平方根を用いた方が強度劣化が大きくなって実験値と相関がみられ、後半部では、指数近似と $\sqrt{N}$ 近似で大きな差が見られないが、これらの近似曲線が交差して指数近似が小さい値を示すものが認められた。
- 3) これらの傾向を $\sqrt{N}$ 近似劣化と指数近似劣化に区別して推定する方法として、各回帰定数と岩石の物性値である動弾性係数との回帰式を示した。
- 4) 本研究における実験条件は、自然条件と比較して浸水状態やサイクル温度が過酷なため、本推定法では安全側の結果になっていると考えられる。
- 5) 今後の課題として、実際の岩盤斜面の自然条件を考慮した推定法を検討する必要がある。

謝辞: 本報告をまとめるにあたり、国土交通省北海道開発局の関係各位には、岩石試料や調査資料などを提供していただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋信之, 星野吉昇, 岡部豊二, 高橋章, 小野丘: 岩盤切土斜面安定に関する凍結融解の影響検討, (社)土木学会, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.353-356, 2007.
- 2) 浅井大輔, 小早川博亮, 石田良二, 矢野康明: 寒冷地における切土軟岩斜面の凍結融解挙動, 土の凍結と室内凍上試験方法に関するシンポジウム, pp.147-152, 2001.
- 3) 山本清仁, 小林晃, 青山咸康: 塩水および凍結融解劣化による岩石の一軸圧縮挙動の変化, 材料, Vol.56, No.9, pp.809-812, 2007.
- 4) 小玉齊明, 藤井義明, 赤川敏, 石島洋二: 間隙水の凍結に伴う岩石の力学的特性変化と変形挙動, 土木学会論文集C, Vol.63, No.1, pp.24-33, 2007.
- 5) Nakamura, D., Goto, T. Suzuki, T. and Yamashita, S.: A Basic Study on Frost Susceptibility of Rock, *Cold Regions Engineering 2009, Proceedings of the 14th Conference on Cold Regions Engineering*, pp. 89-98, 2009.
- 6) 小野丘, 阿部祐介, 小笠原将人: 疑似岩石試料の凍上性と物理特性, 地盤工学会北海道支部, 技術報告集第45号, pp.71-74, 2005.
- 7) 根岸正充, 星野寔, 小林雄一, 吉田保: 岩石および岩盤の凍結と凍害, 土木試験所月報, No.268, pp.1-12, 1975.
- 8) 福田正巳, 播磨屋敏生, 原田鈺一郎: 岩石の凍結-融解による風化が基盤崩落に与える影響について,

- 月刊地球, Vol.18, No.9, pp.574-578, 1996.
- 9) 村山朔郎, 大野公男: 布引トンネルにおける凍結岩ルーフ工法設計・施工, 土木学会誌, pp.51-58, 1984.
 - 10) 中村康夫, 石塚克己: 岩石の耐久性試験の比較, (社)日本応用地質学会, 応用地質, 25 巻, 4 号, pp.21-31, 1984.
 - 11) 中村康夫: 凍結融解試験による岩石の劣化特性と耐久性の評価, (社)日本応用地質学会, 応用地質, 20 巻, 4 号, pp.2-11, 1979.
 - 12) 岡本隆一, 中村康夫, 加藤則男: 岩石の劣化速度に関する考察, 土木研究所, 土木技術資料, Vol.21, No.2, pp.29-34, 1979.
 - 13) 中村康夫: 凍結融解による岩石の破壊過程, (社)日本応用地質学会, 応用地質, 22 巻, 4 号, pp.9-19, 1981.
 - 14) 根岸正充, 小林雄一: 凍結融解作用による軟岩の強度低下率, 北海道開発局, 第 22 回北海道開発局技術研究発表会論文集, pp.51-56, 1979.
 - 15) 根岸正充: P 波により岩盤のせん断強度を推定する試法, 土木試験所報告, No.75, pp.1-22, 1981.
 - 16) (社)日本コンクリート工学協会北海道支部: 凍害と耐久性設計研究委員会報告書, pp.33-57, 2008.
 - 17) 石井清, 江川顕一郎, 堤知明, 野口博章: 凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化予測に関する研究, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.221-232, 1997.
 - 18) 野本高憲, 江川顕一郎, 野口博章, 山下英俊: 最低温度が凍結融解作用下のコンクリートの劣化に及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.1015-1020, 1992.
 - 19) 日下部祐基, 伊東佳彦, 坂本多朗: 岩石の凍結融解による強度劣化の推定法に関する研究, 寒地土木研究所月報, No.681, pp.11-20, 2010.
 - 20) 伊東佳彦, 日下部祐基, 阿南修司: 凍結融解による岩石劣化の評価法についての研究, (社)地盤工学会, 第 45 回地盤工学研究発表会, pp.437-438, 2010.
 - 21) 日下部祐基, 伊東佳彦, 岡崎健治, 高橋克也: 岩盤風化を伴う道路路床の可否判定法に関する研究, 開発土木研究所月報, No.601, pp.35-39, 2003.
 - 22) (社)土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編], pp.323-326, 2002.
 - 23) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学: 杭の載荷試験結果の整理法, 基礎工, Vol.10, No.9, pp.21-30, 1982.
 - 24) 日下部祐基, 伊東佳彦, 坂本多朗, 瀬川博忠: 岩盤路床の凍上性判定法に関する現場実証実験と劣化機構について, 寒地土木研究所月報, No.633, pp.31-40, 2006.
 - 25) 児玉淳一, 中谷匡志, 奈良禎太, 後藤龍彦, 藤井義明, 金子勝比古: 凍結融解作用を受ける岩石の破壊プロセスと耐久性の評価, Journal of MMIJ, Vol.127, No.3, pp.117-126, 2011.
 - 26) 中村大, 後藤隆司, 鈴木輝之, 伊藤陽司, 山下聡: 岩石の凍上に関する基礎的研究—岩石の内部構造, 物性値の比較を基にした凍上メカニズムの解明—, Journal of MMIJ, Vol. 124, No. 4, 5, pp. 231-239, 2008.
 - 27) 京谷孝史, 白鏞, 恩田千早: 多孔質軟岩 (大谷石) の凍結融解による力学特性劣化の定量的把握について, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.103-114, 2000.

(2014. 7. 10 受付)

FREEZING AND THAWING TESTS FOR ESTIMATING ROCK STRENGTH REDUCTIONS IN RELATION TO ROCK PHYSICAL PROPERTIES

Yuki KUSAKABE and Yoshihiko ITO

To establish a quantitative evaluation method of rock deterioration by repeated freezing and thawing, the authors studied evaluation method of the rock deterioration from initial strength or other mechanical properties of rock. As a result, we found linear negative correlation between the logarithm of reduction ratio of unconfined compression strength of rock and the square root of number (N) of freeze-thaw cycle ($\sqrt{N}$ approximation). To estimate rock deterioration safely, we constructed an approximation method by applying $\sqrt{N}$ and exponential approximation. We also found that constant obtained by regression analysis with $\sqrt{N}$ and exponential approximation and boundary number of freeze-thaw cycles of the both had high correlations with dynamic modulus of elasticity of rock. These findings can be used for evaluating the deterioration degree of rock strength quantitatively in relation to the specific number of freeze-thaw cycles that rock may undergo.