

凍結融解等による岩切法面の経年劣化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ
（防災地質）

研究担当者：伊東 佳彦、阿南 修司
倉橋 稔幸、日下部祐基
井上 豊基、高橋 幸継

【要旨】

北海道のような積雪寒冷地において岩盤を切削した法面では、凍結破砕あるいは凍結融解の繰り返しによる強度劣化が大きな要因となって、法面崩壊に至る現場が時々みられる。ここでは、岩盤の経年劣化の評価方法を確立することを目的に、室内試験結果を用いて岩石の凍結融解や乾湿繰り返しによる強度劣化を、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、岩石の吸水率や一軸圧縮強さを用いて、各強度劣化を予測する手法を考案した。さらに、凍結融解による強度劣化については、現場モニタリングのデータを用いて推定法の適用性の検証を試み、均質な岩盤では劣化の傾向を捉えられる可能性があることを示した。

キーワード：岩切り、法面、凍結融解、乾湿繰り返し、劣化

1. はじめに

道路や鉄道などの建設に伴う岩切法面は、切削時や完成直後には新鮮な岩盤で安定していても、時間の経過とともに劣化して変状が発生し、時には崩壊に至ることがある。これらの変状・崩壊は、供用開始後に生じることが多いため、道路や鉄道などの管理者にとって重要な注意事項の一つになっている。

岩石の劣化要因には、物理的風化、化学的風化、および生物的風化等¹⁾²⁾がある。また、岩石の強度低下に大きく関与すると考えられる物理的風化には、応力解放や降雨や地下水による乾湿繰り返し、さらには北海道のような積雪寒冷地での凍結破砕や凍結融解の繰り返しなどがある。このうち凍結融解による岩切法面の劣化に関する研究はこれまでも行われている³⁾⁴⁾が、劣化現象を定量的に把握するには至っていない。また、乾湿繰り返しによる劣化についても多くの研究²⁾⁵⁾が行われているが、強度低下等を定量的に把握するには至っていない。

本研究では、岩盤の経年劣化の評価方法を確立することを目的に、凍結融解や乾湿繰り返しによる岩石の強度低下の要因や各物性値との関係等を調査検討した。また、凍結融解による強度低下推定法について、現場モニタリングによりその検証を試みた。こ

こではその結果について報告する。

2. 凍結融解等による岩切法面の経年劣化の実態調査

北海道の切土法面の崩壊については、これまでも調査報告⁶⁾がある。本章では、凍結融解等による岩石の経年劣化が原因と考えられる岩切法面の経年劣化の実態調査結果について報告する。

2. 1 調査結果（岩切法面の変状事例）

2. 1. 1 岩切法面施工中に発生した吹き付け法枠及びグラウンドアンカーの変状

写真-2.1、2.2に、平成 18 年 12 月から平成 19 年 2 月に施工されていた吹き付け法枠及びグラウンドアンカーの変状状況を示す。変状は、法面頂部で 20cm 程度開き、斜め下に滑動した現象を示している。対象現場の地質は、中新世～鮮新世の火山砕屑岩類（凝灰岩、凝灰角礫岩）である。

この変状の原因は、施工が冬期になり、岩切法面の表面にあった風化した表土が湧水により凍結、凍上した状態でグラウンドアンカーの掘削、注入、定着、緊張の一連の施工を行い、凍結・凍上していた表土が春先に融解し高含水状態となって地山表面を緩めたためと考えられた。この現象は、当該年度の



写真-2.1 施工中の法面変状



写真-2.2 施工中の法面変状詳細



写真-2.3 グラウンドアンカー頭部の変状



写真-2.4 アンカー頭部の変状詳細

暖冬・少雪という異常気象が影響して急激に進行したためと推測された。

2. 1. 2 施工後約 10 年経過後の岩切法面で発生したグラウンドアンカーの浮き上がり変状

写真-2.3、2.4 に、施工後約 10 年を経過したグラウンドアンカー頭部が 15cm 程度浮き上がった変状を示す。地質は、鮮新世～第四紀の火山岩類である。地質特性で特筆すべきは、下位層が著しい熱水変質を受けていることである。この変質は、鮮新世～現在まで継続する火成作用に伴う熱水による局所的な水/岩石比の大きい熱水変質作用と想定されている。

変状斜面の周辺では、アンカーの浮き上がりのほかに法面崩壊や植生マットのずれ落ちなどの変状も確認された。これらの変状は、いずれもこの下位層の分布域で発生しており、法面変状箇所で開催された地質調査では、工事前の調査で把握できなかった

局所的な粘土化変質帯の分布が報告されている。従って、アンカーや法面崩壊などの変状原因としては、粘土化変質帯の分布が重要な役割を果たしている可能性が指摘されている。

2. 1. 3 施工後約 10 年経過後の岩切法面グラウンドアンカーの緊張力低下

対象現場は、道央圏と道東圏を結ぶ幹線道路の法面である。当該現場では、平成 12 年度にフリーフレーム及びグラウンドアンカーが施工されていた。平成 19 年に実施した定期巡回では、コンクリート法枠表面の亀裂とグラウンドアンカー頭部の損傷が確認されたが、亀裂やはらみだし等の法面変状は確認されていなかった。

平成 21 年 4 月に落石が発生したことを受けて、路線に近接する斜面の長期的な安定を確認する必要があるとされ、3 カ所の法面でグラウンドアンカーの



写真-2.5 小段ステップの変状



写真-2.6 小段ステップの変状詳細

リフトオフ試験が実施された。その結果、1 法面のアンカーで設計値を満たさないものが全体の10%、2 法面で全体の1%とわずかであるが、緊張力低下が確認された。

現場は地形的には地すべり等の不安定地形に位置しておらず、地質が崖錐堆積物、強風化花崗岩（マサ）から構成されていることから、凍上しやすい崖錐堆積物や強風化花崗岩が、山岳地という厳しい気候により凍上を起こして法枠工を持ち上げたことが、グラウンドアンカーの変状要因と考えられる。現状のグラウンドアンカー耐力で安定計算を行ったところ、各法面とも安全率は1.0以上を示した。このため斜面が急に不安定化することはないが、長期的な安定を考慮した対策工の検討を行うこととしている。

2. 1. 4 施工後約10年経過後の岩切法面法枠工及びグラウンドアンカーの変状

写真-2.5、2.6に、当該現場の法面法枠工の小段ステップに発生した亀裂を示す。現場ではこのほかにアンカー頭部の浮き上がりや、法枠工フレームにヘアクラックなどの変状が確認されている。当該現場の地質は鮮新世の熔結凝灰岩で、法枠工表面には凝灰角礫岩や火山角礫岩が分布している。

変状原因は、現地調査試験の結果から経年的な凍結融解等により法面表面が劣化して凍上性の地質となり、法枠が凍上・融解の繰り返し荷重を受けたことと推測された。現地で実施されたグラウンドアンカーのリフトオフ試験結果によると、アンカーの緊張力が低下しているものと増加して過荷重になっているアンカーがあり、法面表面の部分的な劣化あ

るいは劣化速度の異なることにより法面全体の荷重の再配分が生じた可能性がある。

なお、寒冷地特有の岩石劣化による凍上や凍結融解による法面の変状は、北海道だけでなく本州の寒冷地においても事例報告⁷⁾されている。

3. 凍結融解等による岩石劣化データの分析

本章では、室内試験データを分析することにより、岩石の凍結融解および乾湿繰り返しによる劣化のメカニズムや強度低下の定量的な推定法について検討した結果を報告する。

3. 1 凍結融解による岩石強度低下の評価法検討

室内試験結果を用いて、岩石の凍結融解による強度低下を物性値や初期強度より推定する方法を検討した。

3. 1. 1 試験に用いた岩石

試料の岩種は、堆積岩類12（礫岩1、砂岩8、泥岩3）、火山岩類4（安山岩4）、および火山砕屑岩類4（火山礫凝灰岩、水冷破碎岩等）である。試料採取地は、図-3.1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）の8市町村に分布している。

3. 1. 2 試験方法

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めるため、凍結融解を繰り返した後の比重吸水試験、超音波伝播試験、および一軸圧縮試験を実施した⁸⁾。

供試体の作成はJIS M 0301に準拠した。供試体のサイズは直径約50mm、長さ約100mmであり、数量

は1試料複数本用意した。凍結融解の温度条件は、コンクリートの凍結融解試験⁹⁾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)が-18℃~+5℃になるように設定し、1日約8サイクル(以下、サイクルの単位をcと記す。)とし、凍結融解サイクルを最大300cとした。

一軸圧縮強さ等の測定サイクルは、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広がげた。

3. 1. 3 試験結果

試験結果を表-3.1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0.8MN/m²(凝灰質砂岩、鹿部)で軟岩を中心として、硬岩をカバーしている。

同表に示した圧縮強さ比係数と崩壊サイクルは、岩石の強度劣化を定量化する指標として考えたものである。圧縮強さ比係数 sf とは、任意凍結融解サイクル c 後の一軸圧縮強さ qu_c と初期一軸圧縮強さ qu_0 との比を圧縮強さ比 $s_c(=qu_c/qu_0)$ として、これをもとに凍結融解サイクル c との回帰計算により自然対数の指数で表したものである。回帰計算には、縦軸切片を1.0に固定(0cの圧縮強さ比は1.0になる。)した指数近似曲線を用いた。縦軸切片を固定した指数近似曲線とすることにより、後述する強度劣化の指標とする推定値の数を減らすことができる。回帰計算による圧縮強さ比を s として式で示すと以下のとおりである。

$$s = \exp(sf \cdot c) \quad (3.1)$$

春採層砂岩1における圧縮強さ比係数の算出例を図-3.2に示す。縦軸切片を1.0に固定すると、圧縮強さ比係数 $sf=-0.0157$ が得られる。この係数が小さいほど(絶対値は大きいほど)強度低下が大きいことを示す。図-3.3に、全試料の凍結融解サイクルと圧縮強さ比との関係を示す。対数軸の凍結融解サイクルに対して圧縮強さ比は、直線的に減少する傾向を示す試料が見られる。

崩壊サイクル cf とは、凍結融解を繰り返した後に一軸圧縮強さが測定できた限界サイクルを示したものである。厳密にはこの崩壊サイクル後に供試体が崩れたことになるが、正確な崩壊サイクルが求められなかったため、一軸圧縮試験の最終実施サイクルで示した。なお、崩壊サイクルの値が300となって



図-3.1 試料採取位置図

表-3.1 実験結果表

No.	試料名	岩種	採取地	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)	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 (kN/m ²)	一軸圧縮強さ (MN/m ²)	圧縮強さ比係数	崩壊サイクル(c)
1	春採層 砂岩 1	堆積岩	釧路町	5.62	13.05	2.45	2.32	3.43	1.79	2.05E+07	31.1	-0.0157	186
2	春採層 砂岩 2	"	"	5.08	12.16	2.52	2.40	3.60	1.72	2.02E+07	35.1	-0.0065	300
3	雄別層 砂岩	"	"	10.42	21.86	2.32	2.10	1.26	0.51	1.61E+06	6.7	-0.0214	106
4	雄別層 泥岩 1	"	"	6.46	14.63	2.41	2.27	2.14	0.93	5.75E+06	7.7	-0.1939	11
5	雄別層 泥岩 2	"	"	6.46	14.63	2.41	2.27	2.38	0.77	4.00E+06	3.3	-0.3472	7
6	天寧層 礫岩	"	"	1.60	4.13	2.62	2.58	4.53	2.22	3.48E+07	98.0	-0.0010	300
7	天寧層 炭質泥岩	"	"	7.67	15.77	2.21	2.05	2.42	0.85	4.53E+06	6.7	-0.0732	32
8	春日層 火山礫凝灰岩	火砕岩	赤井川	14.31	26.32	2.10	1.83	2.43	1.14	7.43E+06	9.3	-0.0192	54
9	春日層 風化安山岩	火山岩	"	4.77	11.24	2.47	2.35	3.86	1.86	2.30E+07	32.8	-0.0041	200
10	春日層 安山岩	"	"	2.25	5.75	2.60	2.55	4.71	2.21	3.45E+07	60.0	-0.0010	300
11	館層 粗粒砂岩	堆積岩	乙部	24.63	39.20	1.99	1.60	2.66	1.31	9.16E+06	8.1	-0.1328	13
12	館層 細粒砂岩	"	"	33.00	46.38	1.86	1.40	2.31	1.07	5.78E+06	9.4	-0.3329	6
13	流紋岩質凝灰岩	火砕岩	鹿部	14.43	26.25	2.08	1.82	2.70	1.50	1.20E+07	12.9	-0.0438	37
14	凝灰質砂岩	"	"	27.09	41.55	1.95	1.54	1.22	0.59	1.89E+06	0.8	-0.3044	6
15	蝦夷層群 砂岩	堆積岩	芦別	2.11	5.24	2.58	2.53	4.26	2.14	3.37E+07	58.5	-0.0011	300
16	川端層 砂岩 1	"	厚真	6.22	14.05	2.41	2.27	2.80	1.35	1.22E+07	11.0	-0.0235	40
17	川端層 砂岩 2	"	"	7.07	15.91	2.41	2.25	2.71	1.39	1.22E+07	26.1	-0.1127	40
18	美笛層 風化安山岩 1	火山岩	岩内	5.17	11.82	2.48	2.36	4.52	2.22	3.30E+07	20.8	-0.0004	300
19	美笛層 風化安山岩 2	"	"	13.08	25.65	2.22	1.97	3.01	1.53	1.33E+07	5.4	-0.1677	20
20	水冷破砕岩	火砕岩	喜茂別	3.49	7.53	2.25	2.17	4.32	2.21	2.88E+07	61.8	-0.0032	300

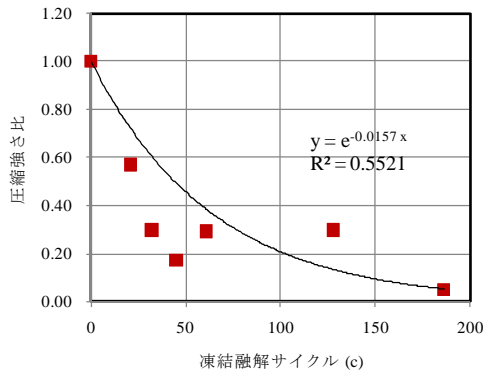


図-3.2 凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係
(圧縮強さ比係数を求めた1例)

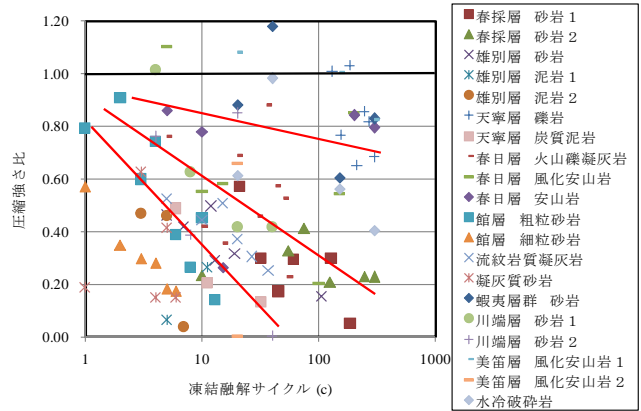


図-3.3 全試料の凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係

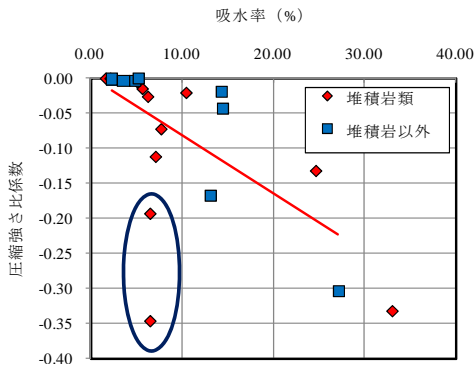


図-3.4 吸水率と圧縮強さ比係数の関係

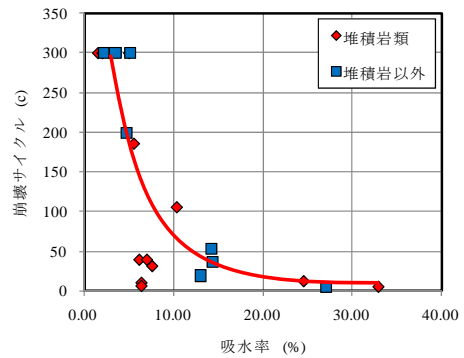


図-3.5 吸水率と崩壊サイクルの関係

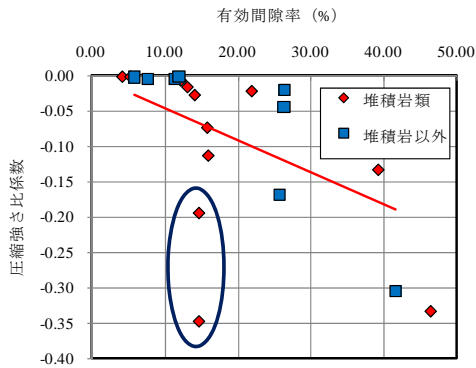


図-3.6 有効間隙率と圧縮強さ比係数の関係

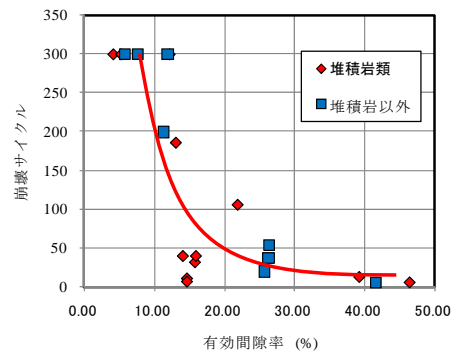


図-3.7 有効間隙率と崩壊サイクルの関係

いるものは、凍結融解試験の最大サイクル 300c で崩壊しなかった試料である。これらの試料については、その後どの程度のサイクルで崩壊するかは予想できない。特に圧縮強さの大きい試料では、強度劣化が確認できないものもあった。

3. 1. 5 各指標の相関

強度劣化の指標とした圧縮強さ比係数および崩壊サイクルと、物理力学特性値との関係を示して次項

の強度劣化の推定に用いる特性値を決定する。

図-3.4, 3.5 に、吸水率と強度劣化の指標の圧縮強さ比係数および崩壊サイクルとの関係を示す。ばらつきがあるものの圧縮強さ比係数は、吸水率が大きいほど小さくなり（絶対値は大きくなる）負の比例関係がみられる。崩壊サイクルと吸水率には、反比例の関係がみられる。

吸水率や密度が関係する有効間隙率と強度劣化の

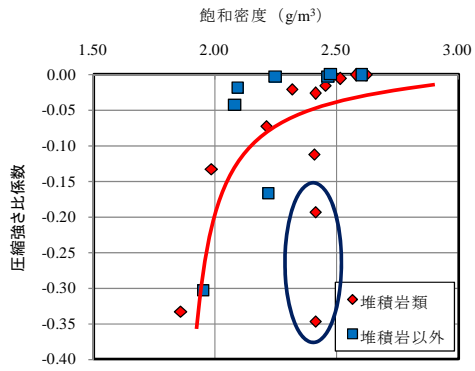


図-3.8 飽和密度と圧縮強さ比係数の関係

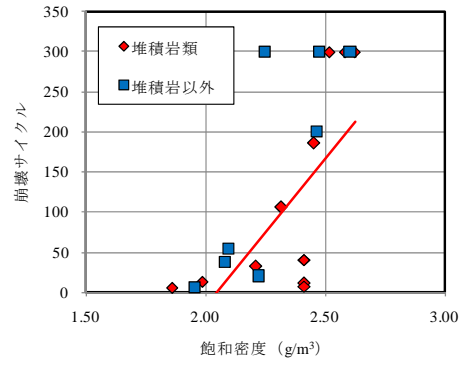


図-3.9 飽和密度と崩壊サイクルの関係

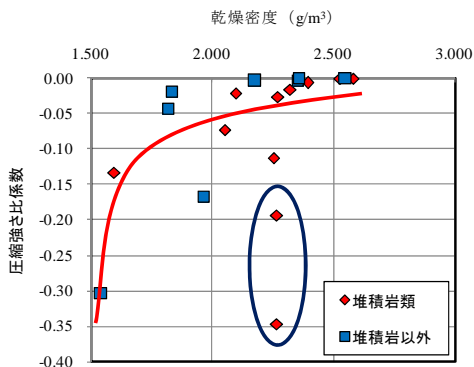


図-3.10 乾燥密度と圧縮強さ比係数の関係

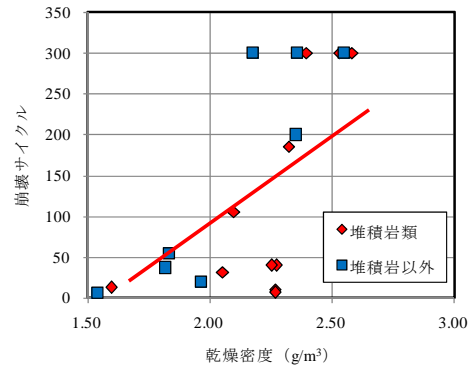


図-3.11 乾燥密度と崩壊サイクルの関係

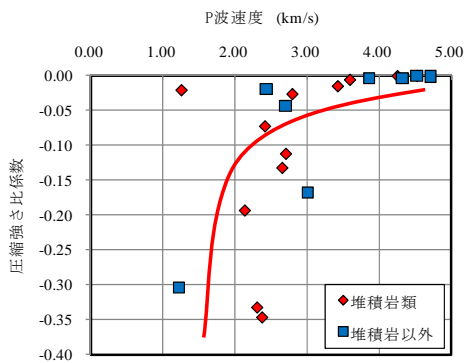


図-3.12 P波速度と圧縮強さ比係数の関係

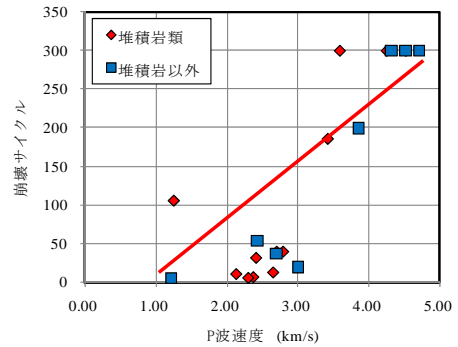


図-3.13 P波速度と崩壊サイクルの関係

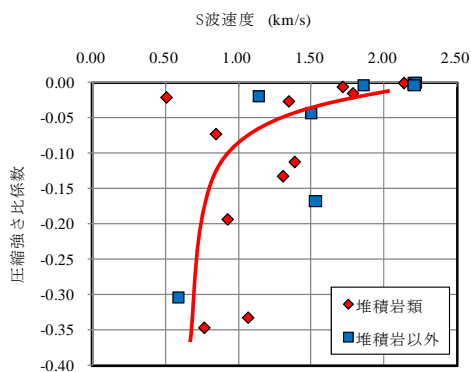


図-3.14 S波速度と圧縮強さ比係数の関係

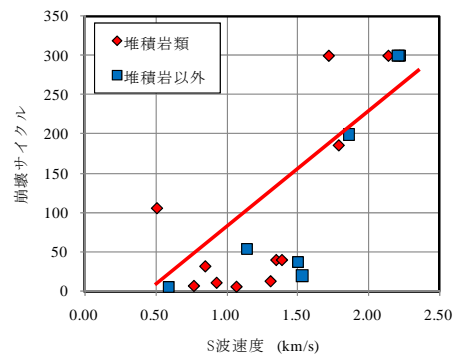


図-3.15 S波速度と崩壊サイクルの関係

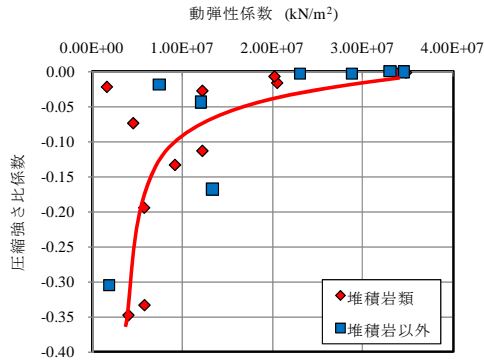


図-3.16 動弾性係数と圧縮強さ比係数の関係

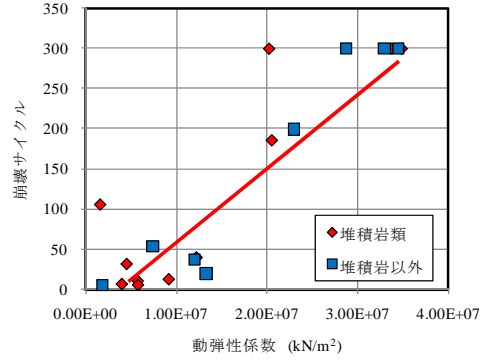


図-3.17 動弾性係数と崩壊サイクルの関係

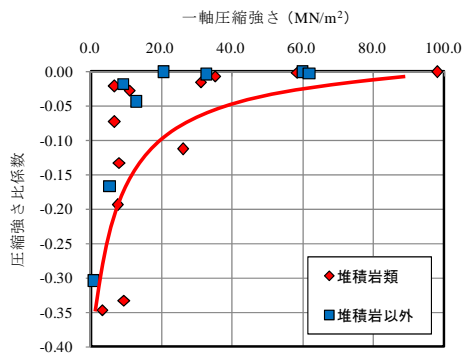


図-3.18 一軸圧縮強さと圧縮強さ比係数の関係

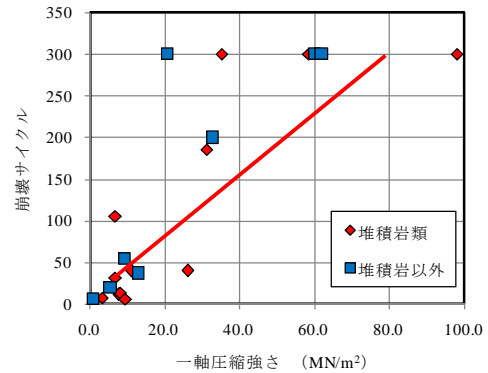


図-3.19 一軸圧縮強さと崩壊サイクルの関係

指標では、図-3.6, 3.7 に示すように吸水率と同様に圧縮強さ比係数には負の比例関係が、崩壊サイクルには反比例の関係がみられる。

図-3.8~3.11 に、飽和密度、乾燥密度と強度劣化の指標との関係を示す。飽和密度と乾燥密度とも同様に、圧縮強さ比係数と密度は負の反比例の関係が、崩壊サイクルと密度には正比例の関係がみられる。

強度や密度に関係するとされるP波速度、S波速度およびこれらの値から求められる動弾性係数と、強度劣化の指標との関係を図-3.12~3.17 に示す。これらの関係では、各特性値とも前述した密度と同様に圧縮強さ比係数には負の反比例の関係が、崩壊サイクルには正比例の関係がみられる。

一軸圧縮強さと強度劣化の指標との関係を、図-3.18, 3.19 に示す。密度やP波、S波の弾性波速度と同様に、圧縮強さ比係数には負の反比例の関係が、崩壊サイクルには正比例の関係がみられる。

以上の関係から、強度劣化の指標とした圧縮強さ比係数および崩壊サイクルと、物理力学特性値との間には2種類の傾向が確認される。1つは吸水率や

有効間隙率との関係にみられた圧縮強さ比係数には負の比例関係が、崩壊サイクルには反比例の関係があるもの、もう1つは、密度、弾性波速度および一軸圧縮強さにみられた圧縮強さ比係数には負の反比例の関係が、崩壊サイクルには正比例の関係があるものである。次項の強度劣化の推定に用いる特性値としては、それぞれの傾向の代表値として、物理特性の吸水率と力学特性の一軸圧縮強さをを用いるものとする。

なお、全関係図において、堆積岩類（礫岩、砂岩、泥岩）とそれ以外の岩とを分けて示した。図-3.4, 3.6, 3.8, 3.10 の中に丸で囲んで示したように、各特性値と圧縮強さ比係数との関係に、堆積岩類のばらつきが大きくなる傾向がみられた。図中の丸にある2点は、堆積岩類の試料 No.4 と No.5 の雄別層泥岩で同一試料である。試料 No.4 が堆積層の層理を水平にして、試料 No.5 が層理を鉛直にして、一軸圧縮強さを求めたもので、吸水率などの物性値は同じ値になる。このことから、堆積岩では層理面の方向の違い、換言すると異方性がこれらの相関に影響することが分かる。今回の試験データでは、同一試料で

層理の方向を変えた試験は、この1試料のみであることからこの影響を定量的に明らかにすることができなかった。今後の検討課題と考える。

3. 1. 6 考察

1) 強度劣化の指標とした圧縮強さ比係数と崩壊サイクルの推定式の検討

既往研究では、岩石などの凍結融解による劣化や凍上性とその物性に普遍的な相関がみられないことを示すもの¹⁰⁾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¹¹⁾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と推測されるが、ここでは実用性を考慮して20種類の岩石データを用いて統計計算による推定法を検討する。

推定法は、強度劣化の指標とした圧縮強さ比係数および崩壊サイクルを、前述した特性値の吸水率と一軸圧縮強さとの相関式を求めて推定するものである。相関式は回帰計算により求めるが、計算に用いる各特性値および指標を平均値あるいは最大値で除して正規化した。これは回帰計算から求められる係数の位を同程度にするためである。

各値の正規化は、圧縮強さ比係数 sf と吸水率 $ab(\%)$ —一軸圧縮強さ qu (MN/m^2) には平均値 (圧縮強さ比係数の平均値 $A=0.1$, 吸水率の平均値 $C=10\%$, 一軸圧縮強さの平均値 $D=25\text{MN}/\text{m}^2$) を、崩壊サイクル $cf(c)$ には試験最大サイクル $B=300c$ を用いた。これらの正規化した値を以後、圧縮強さ比係数比 ($=sf/A$)、崩壊サイクル比 ($=cf/B$)、吸水率比 ($=ab/C$)、一軸圧縮強さ比 ($=qu/D$) と呼ぶ。

図-3.20~3.23に、吸水率比と一軸圧縮強さ比、および圧縮強さ比係数比と崩壊サイクル比のそれぞれの関係を示す。前述したように圧縮強さの大きい岩石において300cで崩壊しなかった試料が、その後の程度のサイクルで崩壊するか予想できないため、ここでは一軸圧縮強さ $qu=50\text{MN}/\text{m}^2$ (一軸圧縮強さ比 $qu/D=2.0$) 以下を対象とすることにした。一軸圧縮強さを限定した理由は、図-3.19に示すように $qu=50\text{MN}/\text{m}^2$ 以上では全ての試料の崩壊サイクルが300cになっているが、 $qu=50\text{MN}/\text{m}^2$ 以下では崩壊サイクルが300c以下であるものが混在しているためである。回帰計算の対象範囲として、全ての試料を対象として崩壊サイクル300cを示した範囲を全て

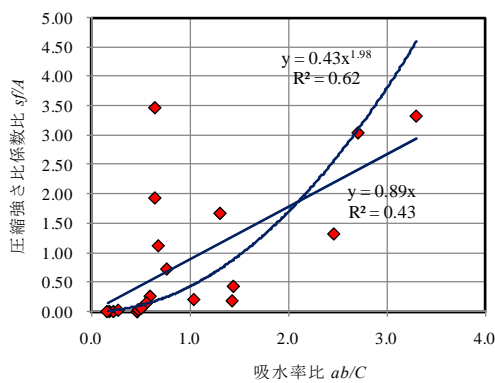


図-3.20 吸水率比と圧縮強さ比係数比の関係

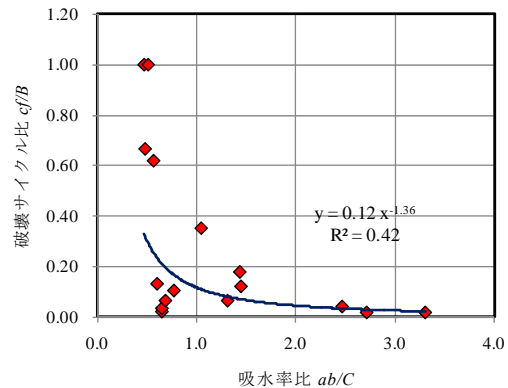


図-3.21 吸水率比と崩壊サイクル比の関係

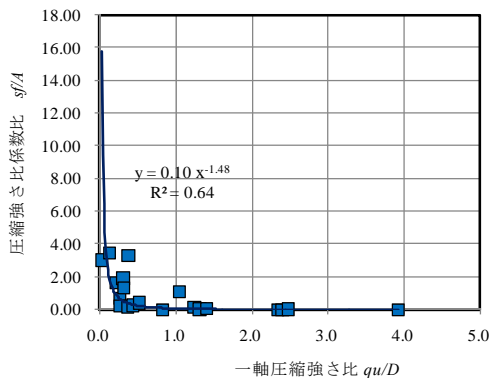


図-3.22 一軸圧縮強さ比と圧縮強さ比係数比の関係

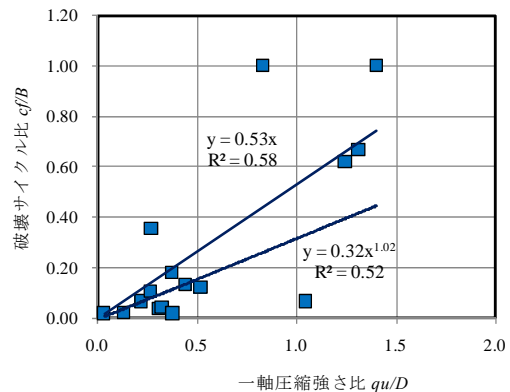


図-3.23 一軸圧縮強さ比と崩壊サイクル比の関係

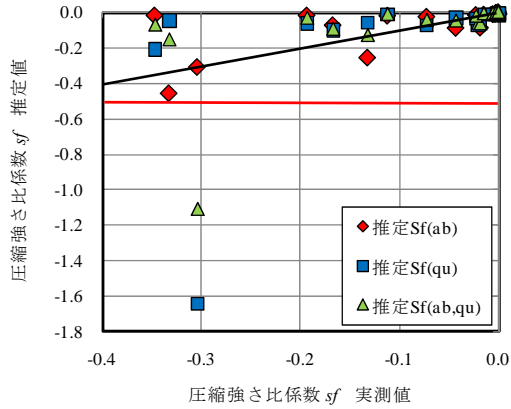


図-3.24 圧縮強さ比係数の実測値と推定値の関係

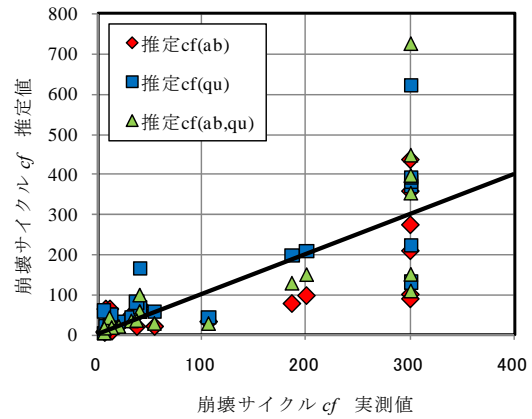


図-3.25 崩壊サイクルの実測値と推定値の関係

表-3.2 吸水率 ab をパラメーターにした
凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係表

凍結融解 サイクル	圧縮強さ比 $ab=1\%$	圧縮強さ比 $ab=3\%$	圧縮強さ比 $ab=5\%$	圧縮強さ比 $ab=10\%$	圧縮強さ比 $ab=30\%$
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	0.998	0.980	0.947	0.807	0.151
10	0.996	0.961	0.897	0.651	0.023
15	0.993	0.942	0.849	0.525	0.003
20	0.991	0.924	0.804	0.423	0.001
30	0.987	0.888	0.721	0.275	0.000
40	0.982	0.853	0.647	0.179	0.000
50	0.978	0.820	0.580	0.116	0.000
75	0.967	0.743	0.442	0.040	0.000
100	0.956	0.673	0.336	0.014	0.000
125	0.945	0.609	0.256	0.005	0.000
150	0.935	0.552	0.195	0.002	0.000
200	0.914	0.453	0.113	0.000	0.000
250	0.894	0.371	0.066	0.000	0.000
300	0.874	0.304	0.038	0.000	0.000
崩壊サイ クル cf	825	185	92	36	8

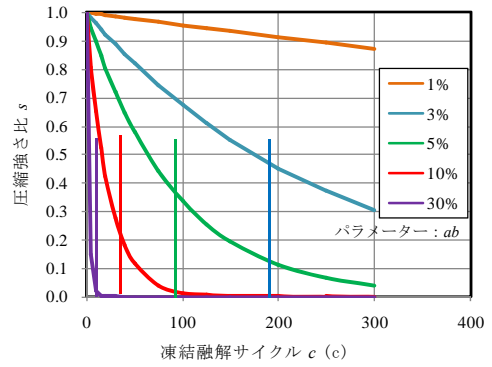


図-3.26 吸水率 ab をパラメーターにした
凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係

表-3.3 一軸圧縮強さ qu をパラメーターにした
凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係表

凍結融解 サイクル	圧縮強さ比 $qu=5\text{MN/m}^2$	圧縮強さ比 $qu=15\text{MN/m}^2$	圧縮強さ比 $qu=40\text{MN/m}^2$	圧縮強さ比 $qu=100\text{MN/m}^2$
0	1.000	1.000	1.000	1.000
5	0.582	0.899	0.975	0.994
10	0.339	0.808	0.951	0.987
15	0.197	0.727	0.928	0.981
20	0.115	0.653	0.905	0.975
30	0.039	0.528	0.861	0.962
40	0.013	0.427	0.819	0.950
50	0.004	0.345	0.779	0.938
75	0.000	0.202	0.688	0.908
100	0.000	0.119	0.607	0.879
125	0.000	0.070	0.536	0.852
150	0.000	0.041	0.473	0.825
200	0.000	0.014	0.369	0.773
250	0.000	0.005	0.287	0.725
300	0.000	0.002	0.224	0.680
崩壊サイ クル cf	32	95	254	636

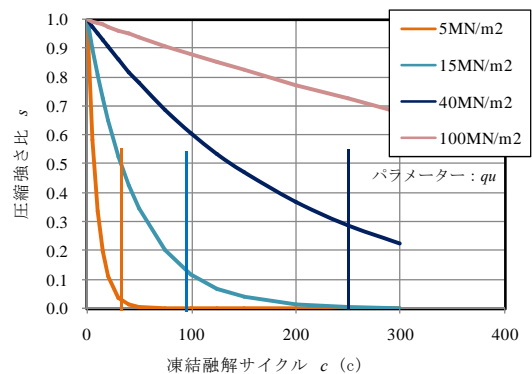


図-3.27 一軸圧縮強さ qu をパラメーターにした
凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係

含めた場合、あるいは崩壊サイクル 300c 以下が混在する一軸圧縮強さ $qu=50\text{MN/m}^2$ 以下に限定して崩壊サイクル 300c を除外した場合には、相関式は過小な値を示し、過度な安全側の評価となる。

各図中には反比例の関係にあるものは累乗近似曲線を、正比例の関係にあるものは線形近似直線も加えて示した。累乗近似曲線を主に用いた理由は、正・反比例の両方の関係を 1 つの式で表せるためである。これら図-3.20~3.23 の関係から相関係数を考慮して、以下の相関式を推定式とした。

吸水率と圧縮強さ比係数：

$$\left(\frac{sf}{A}\right) = 0.43 \left(\frac{ab}{C}\right)^{1.98} \quad (3.2)$$

吸水率と崩壊サイクル：

$$\left(\frac{cf}{B}\right) = 0.12 \left(\frac{ab}{C}\right)^{-1.36} \quad (3.3)$$

一軸圧縮強さと圧縮強さ比係数：

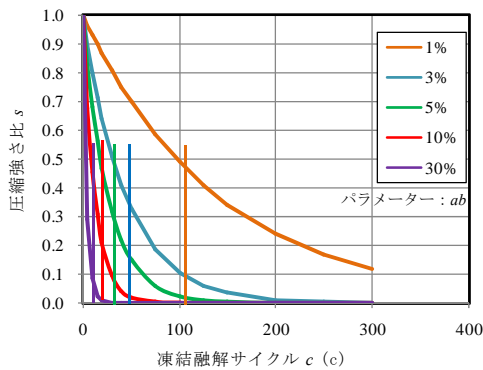
$$\left(\frac{sf}{A}\right) = 0.10 \left(\frac{qu}{D}\right)^{-1.48} \quad (3.4)$$

一軸圧縮強さと崩壊サイクル：

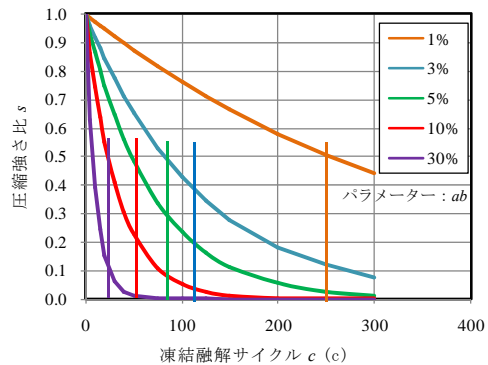
$$\left(\frac{cf}{B}\right) = 0.53 \left(\frac{qu}{D}\right) \quad (3.5)$$

また、吸水率比と一軸圧縮強さ比を変数として、圧縮強さ比係数および崩壊サイクル比を累乗関係式に置き、その両辺を対数にして多項式に置き換えて、それぞれ重回帰計算を行った。得られた式は次の通りである。

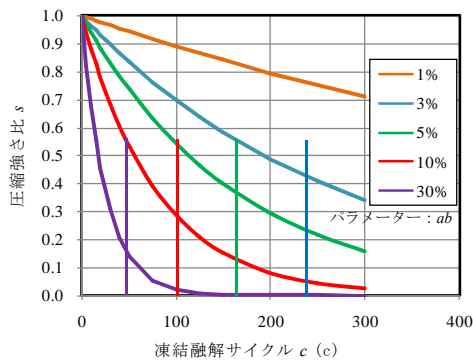
$$\left(\frac{sf}{A}\right) = 0.19 \left(\frac{ab}{C}\right)^{1.04} \left(\frac{qu}{D}\right)^{-0.88} \quad R^2=0.671 \quad (3.6)$$



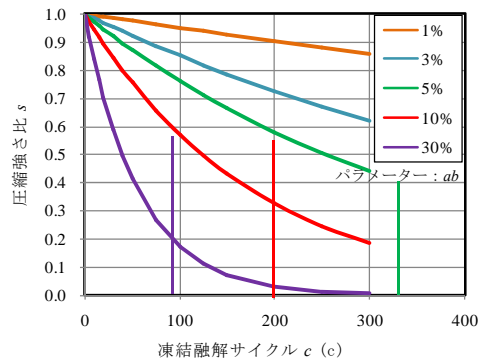
(a) $qu=5\text{MN/m}^2$ (固定) の ab パラメーターとした凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係



(b) $qu=15\text{MN/m}^2$ (固定) の ab パラメーターとした凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係



(c) $qu=40\text{MN/m}^2$ (固定) の ab パラメーターとした凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係



(d) $qu=100\text{MN/m}^2$ (固定) の ab パラメーターとした凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係

図-3.28 式(6)、(7)による ab 、 qu をパラメーターとした凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係

$$\left(\frac{cf}{B}\right) = 0.24 \left(\frac{ab}{C}\right)^{-0.71} \left(\frac{qu}{D}\right)^{0.74} \quad R^2=0.537 \quad (3.7)$$

2) 推定式の実測値との対比

これらの式の関係より、圧縮強さ比係数と崩壊サイクルの推定値を求めて実測値と比較した。図-3.24、3.25にそれらの関係を示す。圧縮強さ比係数の関係では、推定値が実測値と大きく外れているものがある。今回の結果でみると、推定値の下限値を $sf = -0.5$ としてそれ以下になるもの（絶対値では 0.5 以上）は異常値として対象外にすることが望ましいと思われる。崩壊サイクルの関係については、実測値 300c 以上に対して推定値もそれ以上になるものがあるが、推定値で 300c 以下になるものもあり、これらは過小評価されることが想定される。

表-3.2 および図-3.26 は、式(3.2)、(3.3)を用いて吸水率 ab をパラメーターにして凍結融解サイクルと圧縮強さ比および崩壊サイクルの関係を示したものである。表-3.3 および図-3.27 に、式(3.4)、(3.5)を用いて一軸圧縮強さ qu をパラメーターにして凍結融解サイクルと圧縮強さ比および崩壊サイクルの関係を示す。図-3.28 に、式(3.6)、(3.7)を用いて吸水率 ab および一軸圧縮強さ qu をパラメーターにして凍結融解サイクルと圧縮強さ比および崩壊サイクルの関係を示す。これらの関係図を用いると、対象岩石の物性値から概略の凍結融解サイクルと圧縮強さ比および崩壊サイクルの関係を求めることができる。なお、各図の同色鉛直線は吸水率 ab あるいは一軸圧縮強さ qu をパラメーターとした各崩壊サイクルを示したものである。

3) 推定式の活用

これらの式や関係図は、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かの予測や、現状の岩石と新鮮な岩石の圧縮強さ比から現状の岩石が何サイクルの凍結融解を受けたかの予測に利用できるものとする。崩壊サイクルについては、対象岩石がどの程度の凍結融解サイクルで自立しなくなるかの目安にすることができると考える。

ただし、崩壊サイクル後の岩石は、一軸圧縮強さが測定不可になることを意味するものであって、岩石強度が 0 になるものでないことに留意する必要がある。崩壊サイクル後の岩石は、土砂と同様に粘着力や内部摩擦角によるせん断強さを有していることが予測される。今後は、実際の法面での推定式の適

用を検討する必要があると考える。

3.2 乾湿繰返しによる岩石の強度低下推定法に関する検討

全国的な現象である岩石の乾湿繰返しによる強度低下の原因や各物理特性値との関係、さらに凍結融解による劣化との違いを比較検討した。

3.2.1 試験に用いた岩石

試験に用いた試料は、3 岩類（堆積岩 3、火山岩 2、火砕岩 1）6 岩石である。表-3.4 に各岩石の物性値を示す。岩石の一軸圧縮強さは、5.4~61.8MPa で一般にいわれる軟岩から硬岩までを含んでいる。図-3.29 に物性値の関係の 1 例として、吸水率と一軸圧縮強さの関係を示す。各物性値の関係には反比例の関係がみられ、既往文献にみられる一般的な傾向¹²⁾と一致する。

3.2.2 試験方法

前項で示した岩石の基本物性試験は、地盤工学会

表-3.4 岩石試料の物性値

岩石名	岩種	飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	吸水率 ab (%)	P波速度 Vp (km/s)	一軸圧縮強さ qu (MPa)
岩石A	堆積岩	2.54	2.7	3.8	56.1
岩石B	堆積岩	2.44	6.2	2.9	11.0
岩石C	堆積岩	2.42	6.6	2.8	26.1
岩石D	火山岩	2.40	6.5	4.3	20.8
岩石E	火山岩	2.27	11.9	3.1	5.4
岩石F	火砕岩	2.32	3.5	4.4	61.8

基準¹³⁾等に準拠して実施した。

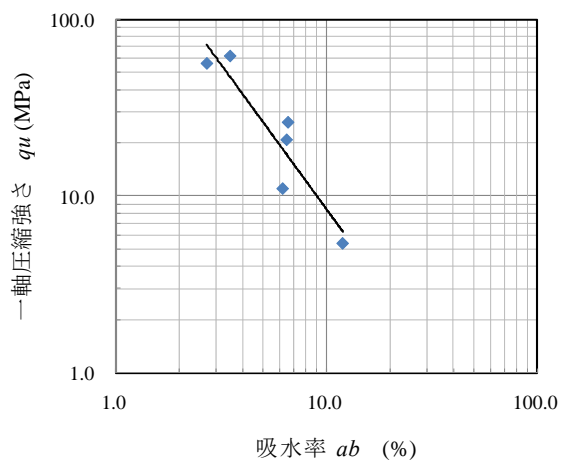


図-3.29 吸水率と一軸圧縮強さとの関係

岩石の乾湿繰返し試験では、所定の乾湿繰返し後に一軸圧縮試験を実施した。乾湿繰返しは、湿潤（水浸）過程を1日、乾燥過程を乾燥温度 $110 \pm 5^\circ \text{C}$ で1日の工程を1サイクルとし、最大9.5サイクル数（以下、サイクル数の単位を c と記す）を行った。一軸圧縮試験は、供試体を複数本用意して湿潤過程を終了後の強度として $2.5c$ 、 $5.5c$ 、 $9.5c$ の3サイクルを基本に実施した。

乾湿繰返し試験は、JHS111-2006（H19 NEXCO 試験方法¹⁴⁾）に準拠して湿潤過程からはじめた。既往の研究¹⁵⁾によると、乾湿繰返しによる湿潤状態と乾燥状態の一軸圧縮強さは大きく異なり、乾燥状態が大きくなっている。ここでは実斜面において岩石強度が小さくなる状態を想定して、求める岩石強度を湿潤過程終了後とした。このため各サイクルには、 $0.5c$ の半サイクルが付加されている。

供試体の作成は JIS M 0301 に準拠し、供試体のサイズは、直径約 50mm、長さ約 100mm である。図-3.30 に、乾湿繰返し試験のフロー図を示す。試験では、準拠した試験法に基づいて吸水量増加率を求めている。

また、凍結融解による強度低下との比較のため、所定の凍結融解繰返し後に一軸圧縮試験を実施して

いるが、この試験は前項で示した方法と同様である。

3. 2. 3 試験結果

乾湿繰返しおよび凍結融解の試験結果を表-3.5 に示す。同表に示した圧縮強さ比 s_c とは、任意の乾湿繰返しあるいは凍結融解のサイクル後の一軸圧縮強さ qu_c と初期一軸圧縮強さ qu_0 との比 ($=qu_c / qu_0$) を

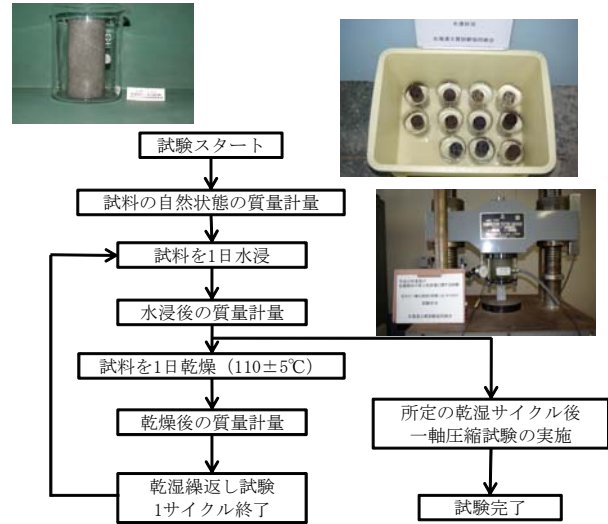


図-3.30 乾湿繰返し試験フロー

表-3.5 強度劣化試験結果

岩石名	乾湿繰返し				凍結融解		
	サイクル数 c	一軸圧縮強さ qu (MPa)	圧縮強さ比 s_c	吸水量増加率 (%)	サイクル数 c	一軸圧縮強さ qu (MPa)	圧縮強さ比 s_c
岩石 A	0	56.1	1.00		0	56.1	1.00
	2.5	42.5	0.76	0.01	20	42.0	0.75
	5.5	46.0	0.82	0.04			
	9.5	46.3	0.83	0.01			
	平均値 s_{GV}		0.80				
岩石 B	0	11.0	1.00		0	11.0	1.00
	2.5	5.6	0.51	0.09	4	7.5	0.68
	5.5	7.5	0.68	0.06	8	6.9	0.62
	9.5	8.1	0.74	0.04			
	平均値 s_{GV}		0.64				
岩石 C	0	26.1	1.00		0	26.1	1.00
	2.5	9.31	0.36	0.07	4	12.8	0.49
	5.5	13.1	0.50	0.16	8	10.4	0.40
	9.5	15.2	0.58	0.03			
	平均値 s_{GV}		0.48				
岩石 D	0	20.8	1.00		0	20.8	1.00
	5.5	13.4	0.64	0.12	40	16.1	0.77
	9.5	19.3	0.93	0.05			
	平均値 s_{GV}		0.78				
	岩石 E	0	5.4	1.00		0	5.4
2.5		2.6	0.47	0.15	20	1.2	0.22
5.5		1.5	0.28	0.41			
9.5		1.1	0.21	0.27			
平均値 s_{GV}			0.32				
岩石 F	0	61.8	1.00		0	61.8	1.00
	2.5	43.0	0.70	0.09	20	33.4	0.54
	5.5	40.0	0.65	0.07			
	9.5	24.7	0.40	0.05			
	平均値 s_{GV}		0.58				

示したものである。また、各岩石の乾湿繰返しにおける圧縮強さ比の下段に示した平均値は、0cの圧縮強さ比 $s_c=1.0$ を除いた値の平均値を示している。

今回注目した乾湿繰返し試験についてみると、試験から求められる吸水量増加率は、乾燥・水浸に伴う岩石内部の間隙量の増大、すなわち岩石の固結度の低下を表すものと考えられ、岩石の初期強度からの強度低下を表す圧縮強さ比に関係することが推測される。図-3.31 に吸水量増加率と圧縮強さ比の関係を示す。吸水量増加率が大きくなるほど、圧縮強さ比が小さくなる傾向がみられる。このことから乾湿繰返しによる強度低下の原因の一つとして、岩盤内部の空隙の増大が考えられる。

ただし、既存のスレーキングに対する耐久性に関しては、吸水量増加率による岩質区分などの基準値¹⁶⁾に、5.0~10.0 (%/回)の値が用いられている。それに比べて、今回の試験で得られた最大値は0.41 (%/回)で、極めて小さい値になっているが、この範囲にあっても強度低下する傾向を示したものと見える。

また、これに関連して今回の試験実施のために収集した試料に、物性値が十分安定した値を示すものの、乾湿繰返し試験が不可になった岩石（以下、特異岩石）があった。表-3.6 にその物性値を示す。一軸圧縮強さが 70MPa の一般には硬岩に分類される岩石である。この特異岩石は、現場採取時の肉眼観察で判明していたことに、岩盤掘削の2~3日後の岩塊がボロボロに崩れる現象が確認されていた。この現象は実験室内でも確認され、結果的に乾湿繰返しおよび凍結融解用の供試体が作成不能になった。

この原因についての検討は、今回実施していないが、既往の岩石のスレーキングに関する研究¹⁷⁾では、岩石に含まれる粘土鉱物にあたるモンモリロナイトの含有量が大きく影響することが示されている。本研究でも原因究明の検討が必要と考えるが、この現象は現場において肉眼で容易に観察確認できる。このような現象がみられる岩石には、後述する各物性値と強度低下の関係や、前項で示した凍結融解による強度劣化の推定法¹⁸⁾、さらに以前に示した岩盤路床の合否判定法¹⁹⁾が適用できない可能性があることに留意されたい。

3. 2. 4 考察

1) 乾湿繰返しおよび凍結融解による圧縮強さ比の比較

図-3.32 に各岩石の乾湿繰返しおよび凍結融解サイクル数と圧縮強さ比の関係を示す。凍結融解試験

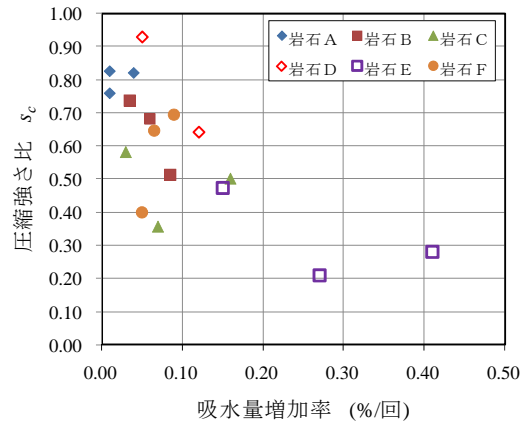


図-3.31 吸水量増加率と圧縮強さ比との関係

表-3.6 特異岩石試料の物性値

岩石名	岩種	飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	吸水率 ab (%)	P波速度 V_p (km/s)	一軸圧縮強さ qu (MPa)
特異岩石	堆積岩	2.60	2.3	5.6	69.8

は、長期の強度低下を調査するために行った経緯から、9.5c 以下の圧縮強さ比を求めていない岩石がある。その場合には、最も近隣のサイクル数 (20c または 40c) の値を示した。

これらの図より、まず乾湿繰返しによる圧縮強さ比の変化をみると、岩石 A, B, C, D の 4 岩石では乾湿繰返しの最初の計測サイクル数 2.5c の圧縮強さ比が最も小さくなっている。既存の研究²⁰⁾²¹⁾では、乾湿繰返しを受けた岩石の一軸圧縮強さは、1 回目の乾湿繰返しで大きく低下し、2 回目以降の強度低下は小さいことが示されている。このことから、4 岩石の乾湿繰返しによる強度低下は 1c で大きく低下して、その後の試験で求めた 2.5c, 5.5c, 9.5c の強度低下の違いは、供試体強度のバラツキを示していることが考えられる。

ただし、この傾向は全ての岩石に該当するのではなく、岩石 E ではサイクル数が増すと圧縮強さ比が一定値に収束する傾向が、また岩石 F ではさらに圧縮強さ比が減少する傾向がみられる。

次に乾湿繰返しおよび凍結融解のサイクル数と圧縮強さ比の関係を比較すると、凍結融解試験で 9.5c 以下の圧縮強さ比が求められている岩石 B と C の傾向では、ほぼ同じ圧縮強さ比に収束していることがわかる。岩石 A, D, E では、凍結融解の最初の計測サイクル数が 9.5c 以上になっているため、乾湿繰

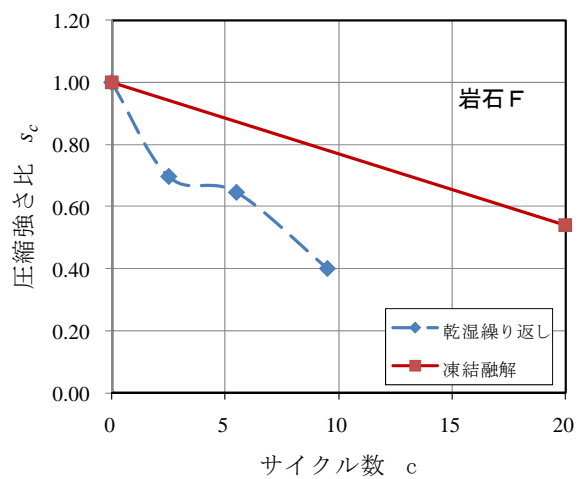
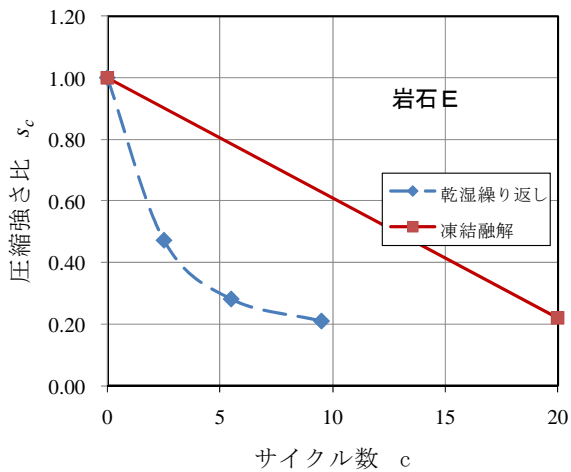
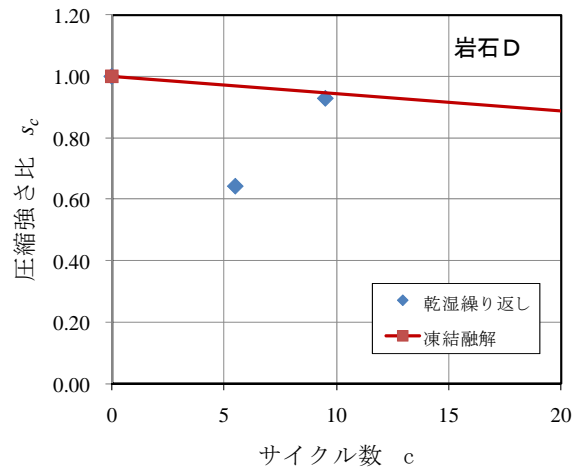
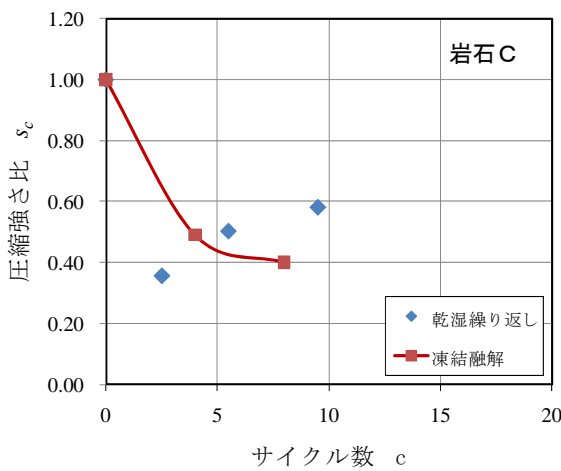
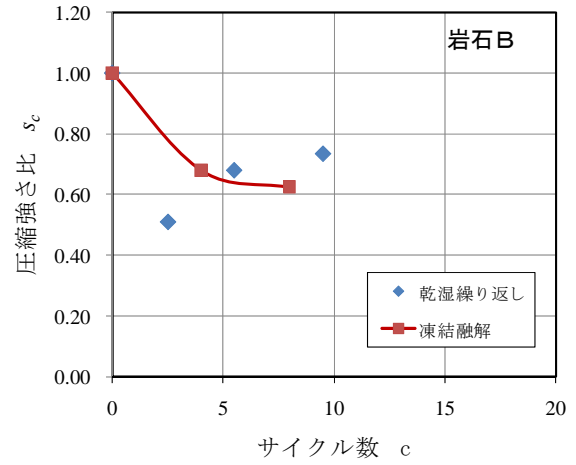
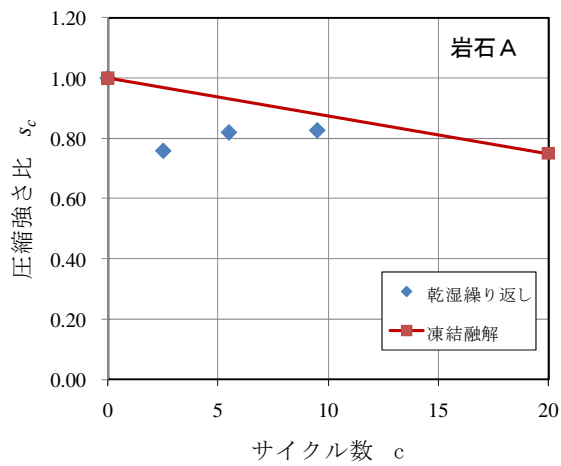


図-3.32 乾湿繰り返しおよび凍結融解サイクル数と各強度低下比の関係

返しのサイクル数での傾向を比較ができないが、圧縮強さ比については同程度の値を示している。さらに岩石Fでは、乾湿繰返しによる圧縮強さ比の減少傾向が凍結融解によるものより早くなっているようにみられる。これらのことから今回の試験条件では、

乾湿繰返しによる強度低下が凍結融解繰返しによるものと同程度か、あるいはさらに早く進展していることが推察される。

2) 乾湿繰返しによる強度低下と各物性値
乾湿繰返しによる強度低下は、前項で示したよう

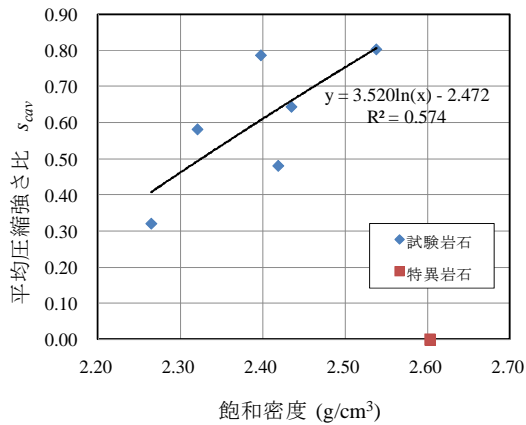


図-3.33 飽和密度と平均圧縮強さ比の関係

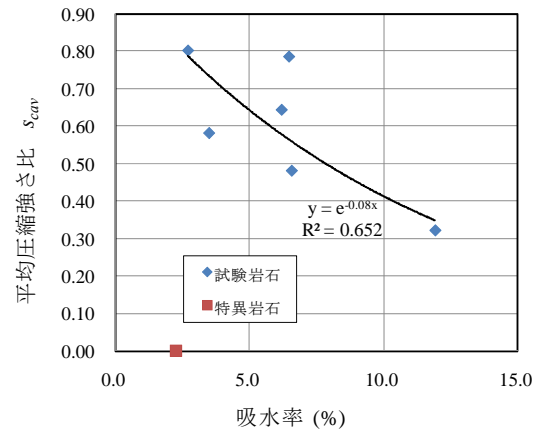


図-3.34 吸水率と平均圧縮強さ比の関係

に初期サイクルで大きく低下し、その後は極めて緩やかに低下あるいは一定値に収束する傾向を示すものが多い。そこで、今回の試験結果について全ての岩石が初期サイクルで強度低下したと仮定して、その強度低下を各サイクル数の圧縮強さ比の平均値（以下、平均圧縮強さ比）として求め、各物性値との相関を検討した。

図-3.33~3.36 に飽和密度、吸水率、P波速度および一軸圧縮強さと、平均圧縮強さ比との関係を示す。各物性値と平均圧縮強さ比の関係では、飽和密度、P波速度、一軸圧縮強さに正比例の関係が、吸水率とに反比例の関係がみられる。各図には相関性のある関係式を記載したが、特に下記に示す吸水率と平均圧縮強さ比との関係式は、相関性が最も高く ($R^2=0.652$)、縦軸切片 $s_{cav}=1.0$ になって初期強度を超えるような異常値を示さない式になっている。

$$s_{cav} = \exp(-0.08 \cdot ab) \quad (3.8)$$

ここに、 s_{cav} : 平均圧縮強さ比

ab : 吸水率 (%)

このことから、岩石の乾湿繰返しによる初期の強度低下を定量的に推定する式として、期待できるものとする。

図-3.33~3.36 では前述した物性値が安定した値（表-3.6）を示しているが、乾湿繰返し試験が不可になった特異岩石について、平均圧縮強さ比 $s_{cav}=0$ として各値をプロットして示した。物性値が十分安定した岩石でもスレーキングにより崩壊し、各関係式に全くあてはまらないことがわかる。このような特異岩石では、現場での経時観察が重要である。

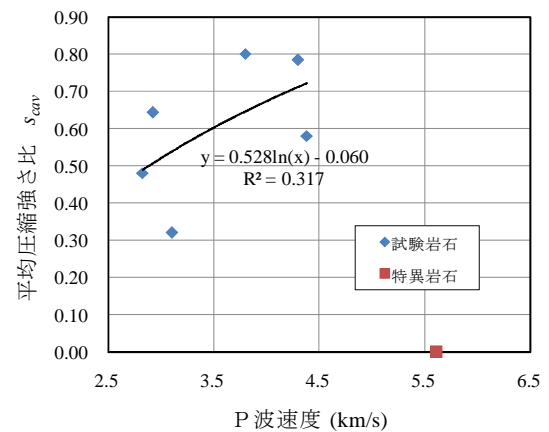


図-3.35 P波速度と平均圧縮強さ比の関係

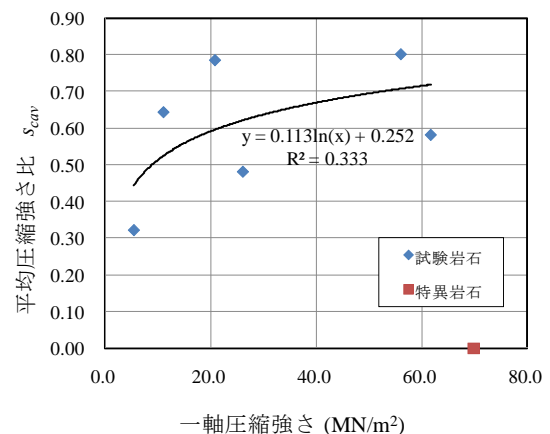


図-3.36 一軸圧縮強さと平均圧縮強さ比の関係

4. 凍結融解等による岩切法面の経年劣化の評価方法の提案—凍結融解による強度低下推定法の検証—

4.1 研究概要

岩石の凍結融解による強度劣化については、過去に超音波P波速度と一軸圧縮強さの低減率比と凍結融解サイクル数の関係が報告²²⁾されているが、強度劣化の予測手法の確立までには至っていない。本章では、前章で示した凍結融解による岩石の強度低下推定法について、現地モニタリングによる検証結果を報告する。

4.2 現地観測概要

試験対象岩石は、北海道釧路町別保地区に分布す

る古第三紀の春採層礫岩・シルト岩と雄別層砂岩、および北海道赤井川村轟地区に分布する中新世の春日層火山礫凝灰岩・風化安山岩の2現場、5岩種である。表-4.1、4.2に釧路町別保地区および赤井川村轟地区の対象岩石の基本物性値を示す。

現地観測は、現地岩石の凍結融解サイクルを求めするために、釧路町別保地区の春採層礫岩・シルト岩は2002年から2010年まで、雄別層砂岩は2005年から2010年まで、赤井川村轟地区の春日層火山礫凝灰岩・風化安山岩は2008年から2011年まで実施した。観測では、各岩石が分布する岩盤を平坦にしてボーリングを行い、その孔内に地中温度計を深度方向に

表-4.1 対象岩石の基本物性値（釧路町別保地区）

地層名称・岩種	湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	飽和密度 $\rho_{\text{sat}}(\text{g/cm}^3)$	吸水率 $ab(\%)$	有効間隙率 $ne(\%)$	含水比 $W(\%)$	一軸圧縮強さ $qu(\text{MPa})$	静弾性係数 $E_{50}(\text{MPa})$
春採層 礫岩	2.540	2.455	2.542	3.54	8.70	3.47	49.43	6.89E+03
春採層 シルト岩	2.511	2.395	2.516	5.08	12.16	4.84	35.06	5.20E+03
雄別層 砂岩	2.327	2.110	2.327	10.27	21.67	10.23	9.39	1.82E+03

表-4.2 対象岩石の基本物性値（赤井川村轟地区）

地層名称・岩種	湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	飽和密度 $\rho_{\text{sat}}(\text{g/cm}^3)$	吸水率 $ab(\%)$	有効間隙率 $ne(\%)$	含水比 $W(\%)$	一軸圧縮強さ $qu(\text{MPa})$	静弾性係数 $E_{50}(\text{MPa})$
春日層 火山礫凝灰岩	2.153	1.976	2.202	11.53	22.65	6.60	15.17	3.31E+03
春日層 風化安山岩	2.461	2.380	2.479	4.22	9.98	5.15	45.90	1.41E+04

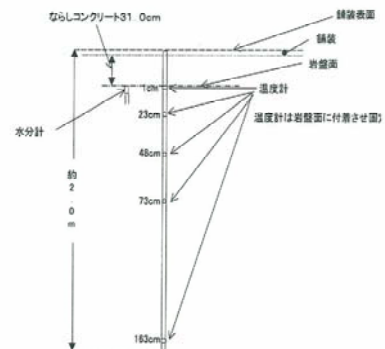
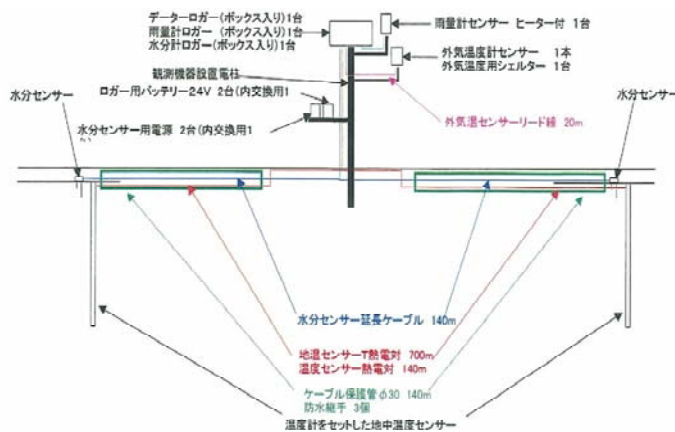


図-4.1 センサー配置の一例

表-4.3 現地観測結果（釧路町別保地区）

一軸圧縮試験 実施年度	春採層 礫岩			春採層 シルト岩			雄別層 砂岩		
	凍結融解サイクル (累計)	一軸圧縮強さ q_u (MPa)	圧縮強さ比	凍結融解サイクル (累計)	一軸圧縮強さ q_u (MPa)	圧縮強さ比	凍結融解サイクル (累計)	一軸圧縮強さ q_u (MPa)	圧縮強さ比
2002	0	49.43	1.00	0	35.06	1.00			
2003	5	30.45	0.62	4	27.93	0.80			
2004	45	30.42	0.62	15	27.15	0.77			
2005	53	40.83	0.83	19	34.53	0.98	0	9.39	1.00
2006	61	28.11	0.57	24	24.10	0.69	12	10.26	1.09
2008	68	52.40	1.06	31	29.70	0.85	38	7.94	0.85
2010	72	28.80	0.58	66	12.50	0.36	40	3.63	0.39

表-4.4 現地観測結果（赤井川村轟地区）

一軸圧縮試験 実施年度	春日層 火山礫凝灰岩			春日層 風化安山岩		
	凍結融解サイクル (累計)	一軸圧縮強さ q_u (MPa)	圧縮強さ比	凍結融解サイクル (累計)	一軸圧縮強さ q_u (MPa)	圧縮強さ比
2008(初期値)	0	15.17	1.00	0	45.90	1.00
2010	26	10.07	0.67	32	29.10	0.63
2011	34	14.80	0.98	44	38.70	0.84

数点設置して 30 分間隔の自動観測を実施した。図-4.1 に観測センサー配置の一例として、赤井川村轟地区の配置図を示す。

また、現地岩石の凍結融解後の強度劣化を求めるために、越冬後に各観測孔近隣でコアを採取して一軸圧縮試験を実施した。なお、釧路町別保地区においては、地中温度計による自動計測は、計器の長期耐久性の限界により 2010 年に終了撤去した。赤井川村轟地区においても同様の理由から、2012 年度で終了する予定である。

4.3 試験結果と考察

表-4.3、4.4 に現地観測結果を示す。各岩石の凍結融解サイクルは、各深度の観測温度がマイナスからプラスに変化した回数を計数し、岩盤表面より深度 70cm(図-4.1 の赤井川村轟地区では 73cm の温度計値を含む) までの観測点の平均値を用いた。これは、強度劣化を求めるためのコア採取深度がおおよそ 70cm 以浅になったことに合わせたものである。表中の圧縮強さ比とは、現地観測初年度の一軸圧縮強さに対する各年度の一軸圧縮強さとの比である。

図-4.2~4.6 に各岩石の現地観測と室内試験の結果、および強度劣化推定法による予測値の凍結融解サイクルと圧縮強さ比の関係を示す。推定法による予測値は、前章で示した関係式のうち比較的高かった(3.6)式より圧縮強さ比係数 sf を求め、同様に(3.1)式に代入して任意凍結融解サイクル c 後の圧縮強さ比 s を算出した。以下に、関係式を再掲する。

$$\left(\frac{sf}{A}\right) = 0.19 \left(\frac{ab}{C}\right)^{1.06} \left(\frac{qu}{D}\right)^{-0.87} \quad (3.6)$$

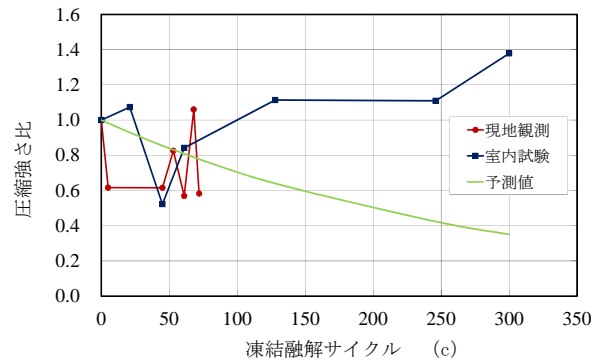


図-4.2 凍結融解回数累計と圧縮強さ比（春採層礫岩）

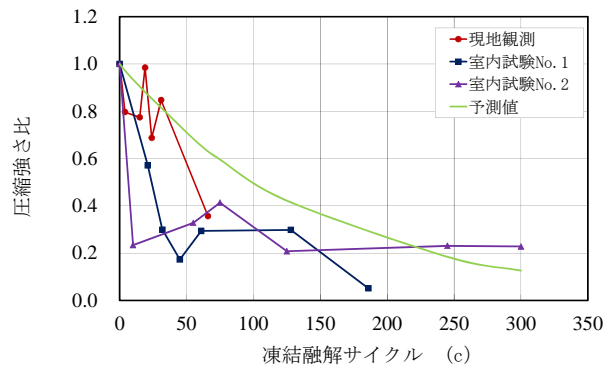


図-4.3 凍結融解回数累計と圧縮強さ比（春採層シルト岩）

ここに、 sf : 圧縮強さ比係数、 ab : 吸水率 (%)

qu : 一軸圧縮強さ (MN/m²)

定数 : $A=0.1$, $C=10\%$, $D=25\text{MN/m}^2$

$$s = \exp(sf \cdot c) \quad (3.1)$$

ここに、 s : 圧縮強さ比 (任意凍結融解サイクル 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)

図-4.2の春採層礫岩では、現地観測と室内試験の値はおおむね調和的であるが、予測値とは合致しない。この岩石の室内試験の結果では、長期劣化がみられないとの判定であったが、推定法に各物性値を代入すると必ず強度劣化が数値で求められる。このことから推定法の適用限界値を設定する必要があると推測される。

図-4.3の春採層シルト岩では、現地観測値は室内試験と予測値とも類似して減少傾向を示している。

図-4.4の雄別層砂岩では、現地観測結果は初期の凍結融解サイクルで圧縮強さ比が1.0以上を示し、室内試験結果や予測値と異なった傾向を示している。これは、対象岩盤が不均質であることが考えられる。

図-4.5、4.6の春日層火山礫凝灰岩・風化安山岩では、よい相関は認められないが、現地観測値は室内試験および予測値と類似した傾向を示している。

5. まとめと今後の課題

本研究の成果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 変状斜面の実態調査の結果、岩盤劣化による変状には短期的なものと長期的なものがあり、変状の原因には、寒冷地特有の岩石劣化による凍上や凍結融解が主因になっている法面が多いことがわかった。
- 2) 岩石の凍結融解による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結果、吸水率と一軸圧縮強さを用いて、強度劣化の指標とした圧縮強さ比係数および崩壊サイクルを推定する式を考案した。
- 3) 岩石の乾湿繰返しによる劣化について検討した結果、乾湿繰返しによる強度低下の原因の一つとして、岩盤内部の空隙の増大が考えられ、強度低下の傾向は、初期サイクルで大きく低下し、その後は極めて緩やかに低下するものが多いことなどがわかった。
- 4) 本研究で考案した凍結融解による岩石の強度低下の推定式について、現地観測により検証した結果、ある程度均質な岩盤では推定式が現地観測結果と類似した傾向を示したが、不均質な岩盤では現地の状態を表すことが難しいことがわかった。
- 5) 実斜面では、劣化要因とした凍結融解や乾湿繰返しなどが重複して強度低下を引き起こすことが予想され、そのメカニズム解明や定量的な推定法の構築などは今後の課題である。

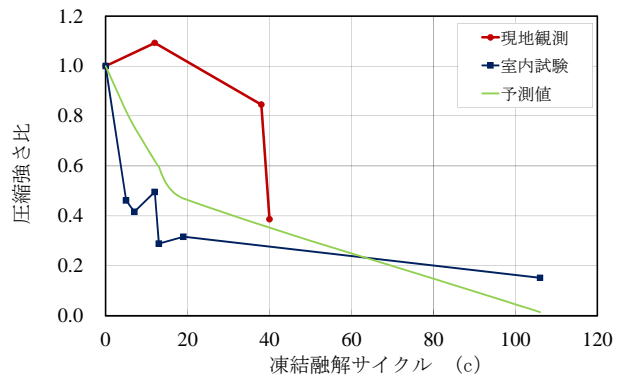


図-4.4 凍結融解回数累計と圧縮強さ比
(雄別層砂岩)

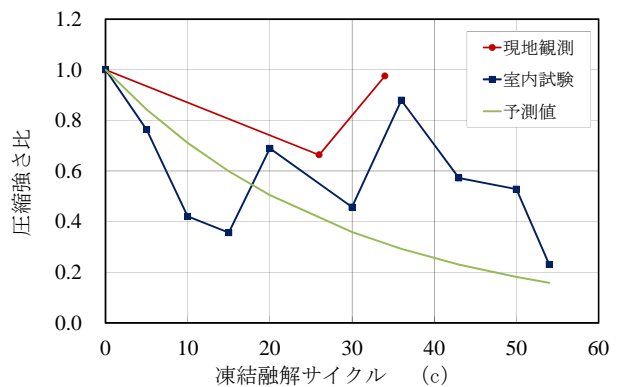


図-4.5 凍結融解回数累計と圧縮強さ比
(春日層火山礫凝灰岩)

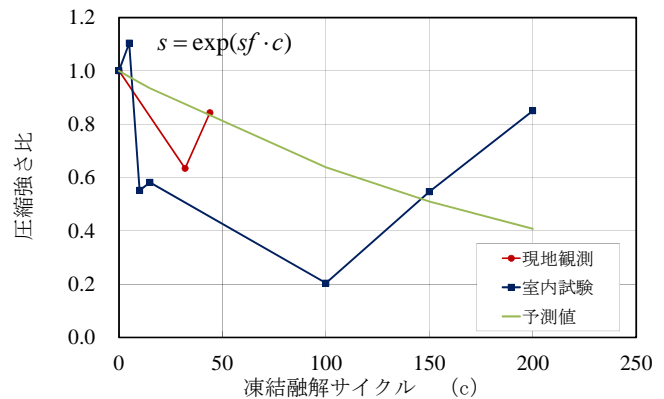


図-4.6 凍結融解回数累計と圧縮強さ比
(春日層風化安山岩)

6. おわりに

本研究では、寒冷地特有の劣化要因である凍結融解、および一般的な要因の乾湿繰返しによる強度低下について室内試験結果をもとに検討し、劣化の傾向や定量的な推定法を考案した。本研究で得られた成果が、岩切法面の設計・施工、あるいは維持管理に

関しての一助になれば幸いである。

謝辞：本報告をまとめるにあたり、北海学園大学工学部（博士）小野丘教授には、貴重なご助言をいただいた。また、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の提供をしていただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地質研究室：「岩石・岩盤の風化について」、寒地土木研究所月報, No.589, pp.46~47, 2002
- 2) C.D.Ollier (松尾新一郎 監訳)：「風化—その理論と実態」、丸善株式会社, pp.1~72, 1971
- 3) 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, 2007.1
- 4) 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, 2001.10
- 5) 奥園誠之：「切取りノリ面の風化とその対策」, (社)地盤工学会, 土と基礎, Vol.26, No.6, pp.37~44, 1978
- 6) 泉沢大樹, 西本聡：「北海道における切土法面被害の形態について」, 社団法人地盤工学会北海道支部, 技術報告集第47号, pp.199~204, 2007.
- 7) 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」, 社団法人地盤工学会, 土の凍上と室内凍上試験方法に関するシンポジウム, pp.147~152, 2001
- 8) 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合否判定法に関する研究」, 開発土木研究所月報, No.601, pp.35~39, 2003.6
- 9) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 [規準編], pp.323~326, 2002.3
- 10) 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
- 11) 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, 2000.6
- 12) (社)地盤工学会：「岩石の工学的性質と設計・施工への応用」, pp.103~104, 1974
- 13) (社)地盤工学会：「岩の調査と試験」, pp.371~447, 1989
- 14) 各日本高速道路株式会社：「試験方法 第1編 土質関係試験方法」, (株)高速道路総合技術研究所, pp.26~28, 2007
- 15) 一ノ瀬政友, 松井紀久男, 後藤研：「岩石の水分履歴による強度特性の変化」, 資源・素材学会誌, Vol. 108, No.1, pp.51~56, 1992
- 16) 各日本高速道路株式会社：「設計要領第一集（土工編）」, NEXCO 中央研究所, pp.参 3-10~参 3-15, 2006
- 17) 松倉公憲, 谷津栄寿：「頁岩および凝灰岩のスレーキングについて（II）」, 第15回土質工学研究発表会, pp.1397~1400, 1980
- 18) 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
- 19) 日下部祐基, 伊東佳彦, 坂本多朗：「岩盤路床の長期安定性に関する判定法の研究」, 寒地土木研究所月報, No.678, pp.10~16, 2009
- 20) 横山幸満, 石原義之, 上野勝利：「乾湿履歴が堆積軟岩の一軸圧縮強度に及ぼす影響」, 第28回土質工学研究発表会, pp.1405~1406, 1993
- 21) 中山武樹, 岩下夏季, 平井光之, 吉村和彦：「乾湿繰返しを受けた泥岩の長期強度の推定」, (社)土木学会第46回年次学術講演会 pp.492~493, 1991
- 22) 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」, 第22回北海道開発局技術研究発表会論文集, pp.51~56, 1979

RESEARCH ON ROCK DEGRADATION OF CUT SLOPE BY FREEZING AND THAWING

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2009-2011

Research Team : Cold Region Construction
Engineering Research Group
(Geological Hazards Research Team)

Author : ITO Yoshihiko

ANAN Shuji

KURAHASHI Toshiyuki

KUSAKABE Yuki

INOUE Toyoki

TAKAHASHI Yukitsugu

Abstract : In this research, the evaluation method of rock degradation of cut slope by repetition of freezing and thawing, and by the repetition of dry and wet was studied. As a result, the evaluation method of rock degradation was developed by using water absorption and unconfined compressive strength of rock. In addition, the applicability of the method was verified by using site monitoring data in Kushiro.

Key words : cut slope, rock degradation, freezing and thawing, dry and wet repetition