

②-4 劣化過程を考慮した大規模岩盤斜面の評価・管理手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

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、倉橋稔幸、日下部祐基
岡崎健治、穴戸政仁、大日向昭彦

【要旨】

大規模岩盤斜面における崩壊に対する評価の精度は依然低く、それに基づく管理手法も万全ではない。

本研究は、精度の高い大規模岩盤斜面の評価・管理手法を開発することを目標として、劣化過程を考慮した岩盤・斜面の長期的な管理手法を検討するものである。平成 24 年度は、昨年度に引き続いて凍結温度の変化による劣化機構の検討、GIS による斜面崩壊履歴と気象データの分析、および遠心力模型実験による亀裂進展の再現試験を行った。その結果、最低凍結温度や既存背面亀裂の位置と方向の違いが、斜面の安定度に影響することなどが推察された。

キーワード：大規模岩盤崩壊、劣化過程、凍結融解、GIS、遠心力模型実験

1. はじめに

大規模岩盤崩壊については、安全と評価した箇所が発生したり危険と評価した箇所が発生しないなど評価精度は低く、それに基づく管理手法も万全ではないため国民の生命・財産が脅かされている。特に北海道、東北・北陸地方等の積雪寒冷地では、凍結融解・凍上など積雪寒冷地特有の劣化要因も加わり大規模岩盤崩壊が数多く発生しており、その適切な評価・管理手法の確立が望まれている。

そこで本研究は、積雪寒冷地における岩盤の劣化過程を明らかにして精度の高い大規模岩盤斜面の評価・管理手法を開発することを目標としている。平成 24 年度は、昨年度に引き続いて積雪寒冷地特有の劣化要因である凍結融解による岩盤劣化試験を実施し、特に凍結温度の違いによる岩盤の劣化を調査したほか、GIS により崩壊履歴と降雨データの調査について崩壊箇所の崩壊要因のデータを追加入力した。また、背面亀裂条件を変えた遠心力模型実験をおこなって、岩盤の劣化に伴う背面亀裂の進展と安定度について考察した。

2. 研究方法

2.1 岩盤の劣化過程の調査・分析

2.1.1 岩盤劣化試験及び劣化過程分析

積雪寒冷地特有の岩石の劣化要因として、凍結融解の繰り返しによる現象が挙げられる。現行の凍結融解試験

を岩盤斜面の耐久性評価に適用しようとした場合、自然環境とは最低温度および凍結速度が相違することが問題点として挙げられる。しかし、実験室における凍結融解試験結果が自然環境のもとでどのように対応するかについての知見は十分には得られておらず、自然環境下における斜面の劣化予測に室内試験の結果をそのまま用いることができない。

また、地域性の違いとして比較的温暖な道南や本州と、極寒地である道北や道東に位置する岩盤では、凍結温度条件などの違いにより強度劣化が異なることが考えられる。

ここでは、昨年度に引き続いて岩石劣化における問題解決の基礎的試験として、凍結融解試験の凍結最低温度を変化させた試験を行い、温度変化の影響を検討¹⁾²⁾した。

試験に用いた岩石試料は、釧路市東部の丘陵地から採取した古第三紀天寧累層の砂岩である。試験供試体は、道路建設現場から 20cm 角程度の岩塊を試験室に搬入し、 $\phi=66\text{mm}$ サンプラーでサンプリングしたコアを長さ 10cm に切断して作成した。試験に用いたコア数は、全 105 本である。

実施した岩石試験は、岩石の基本物性値を求めるために「密度吸水および有効間隙率試験」、「超音波速度試験」および「一軸圧縮試験」、凍結融解後の劣化度を把握するために、「凍結融解試験」と任意凍結融解サイクル数にお

ける「超音波速度試験」および「一軸圧縮試験」である。凍結融解試験は、基本試験をコンクリートの凍結融解試験に準じて行った。

凍結最低温度の変化としては、昨年度と同様に表-2.1 に示す3 ケースの温度条件（凍結最低温度 -18°C （基本試験）、 -9°C 、 -3°C ）および凍結融解時間を用いて実施した。

また、検討の結果、相対動弾性係数の平均値と強さ比とにより相関が示された。相対動弾性係数は、同一供試体の初期動弾性係数に対する任意凍結融解サイクル数の動弾性係数との比であることから、試料のバラツキの影響を受けにくい、強度の低下を直接求めることができない。それに対して強さ比は、圧縮強さという強度の低下を求めているが、その供試体は別々のものであることから試料のバラツキの影響を受ける。

このことから両値の関係が明らかになると、凍結融解による岩石の強度低下を簡易で精度よく求められることが推測される。ここでは、両値の関係が明らかにして岩石の強度低下を求める方法の精度向上についても検討した。

2. 2 岩盤の劣化過程や気象条件の分析

2. 2. 1 気象データ分析に用いる GIS データ作成

近年、北海道の国道においても局所的な集中豪雨を原因とする斜面災害が発生している。また、連続雨量による通行規制区間外においても斜面災害が発生するなど、降雨を誘因とする斜面災害の発生が後を絶たない。そこで、岩盤崩壊等斜面災害発生と雨量指数等の気象データの関係性を分析し明らかにすることで、降雨を指標としたより効果的な安全管理基準等を検討する

昨年度は、北海道内の降雨量に関する基礎的なデータを整理した。具体的には北海道を306のメッシュ（1メッシュは約20km×約20km）に分割し、メッシュ毎に各年の降雨量に関わる各指標（最大日雨量、最大時間雨量、連続時間雨量、実効雨量、土壌雨量指数）や凍結融解回数等をアメダスや開発局道路テレメータの気象データから抽出・算出して気象GISデータを作成した。また、道路防災（通行規制）データ、地質データ、崩壊履歴データをGISデータのフォーマットに変換しGISに統合した。

ここでは、平成24年度に発生した斜面災害事象の追加入力、斜面災害事象に関する新規項目として「基盤地質構造の特徴」「崩落機構」「崩壊の主たる誘因」の追加、および崩壊発生時の雨量値を個別に計算して追加入力した。

表-2.1 凍結融解試験の凍結融解温度条件および凍結融解時間

凍結融解ケース名称	凍結工程		融解工程		合計
	温度	時間	温度	時間	
ケース1（凍結温度 -18°C ）	$-18\pm 2^{\circ}\text{C}$	2時間20分	$+5\pm 2^{\circ}\text{C}$	1時間10分	3時間30分
ケース2（凍結温度 -9°C ）	$-9\pm 2^{\circ}\text{C}$	2時間20分	$+5\pm 2^{\circ}\text{C}$	1時間10分	3時間30分
ケース3（凍結温度 -3°C ）	$-3\pm 2^{\circ}\text{C}$	2時間20分	$+5\pm 2^{\circ}\text{C}$	1時間10分	3時間30分

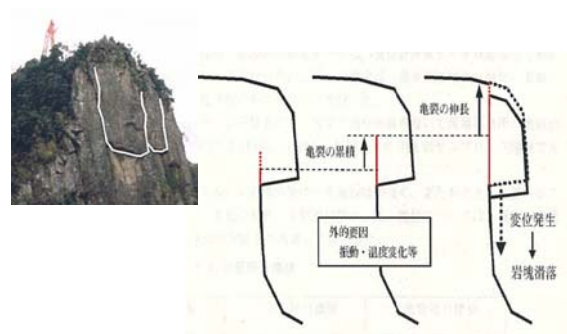


図-2.1 背面亀裂が下方にある場合の崩落イメージ⁴⁾

2. 2. 2 遠心力模型実験を用いた岩盤崩落の再現試験

大規模岩盤崩落の危険性を有する岩盤斜面の背面亀裂には、斜面の上方（天端から下へ）に存在する場合（以下、上方亀裂）と図-2.1に示すように背面亀裂が下方（オーバーハングの下端から上へ）に存在する場合⁴⁾（以下、下方亀裂）がある。昨年度の報告では、背面亀裂が上方亀裂の場合と下方亀裂の場合の岩盤崩落に関する遠心力模型実験を行って比較検討した結果⁵⁾を報告した。背面亀裂の位置は、オーバーハングした崩落危険岩体の境界面に対して内側に配置した実験シリーズ（以下、内側実験）である。

ここでは、背面亀裂をオーバーハングした崩落危険岩体の境界面に鉛直に配置した実験シリーズ（以下、鉛直実験）、および境界面に対して外側に配置した実験シリーズ（以下、外側実験）について遠心力模型実験を行ったので、その結果を昨年度の実験結果と合わせて検討⁶⁾した。

遠心力模型実験は、模型縮尺を昨年度と同様に1/70として、鉛直実験と外側実験とも上方亀裂を1ケース、下方亀裂を2ケースの計6ケースの供試体を作成して実施した。各実験ケースの供試体を図-2.2に示す（図は、遠心加速度方向を下向きにして、重力加速度方向と一致させて示している）。

なお、供試体の作成、既存背面亀裂の設置方法、用いた供試体の材料、および実験後に実施した力学試験等は前回と同様である。

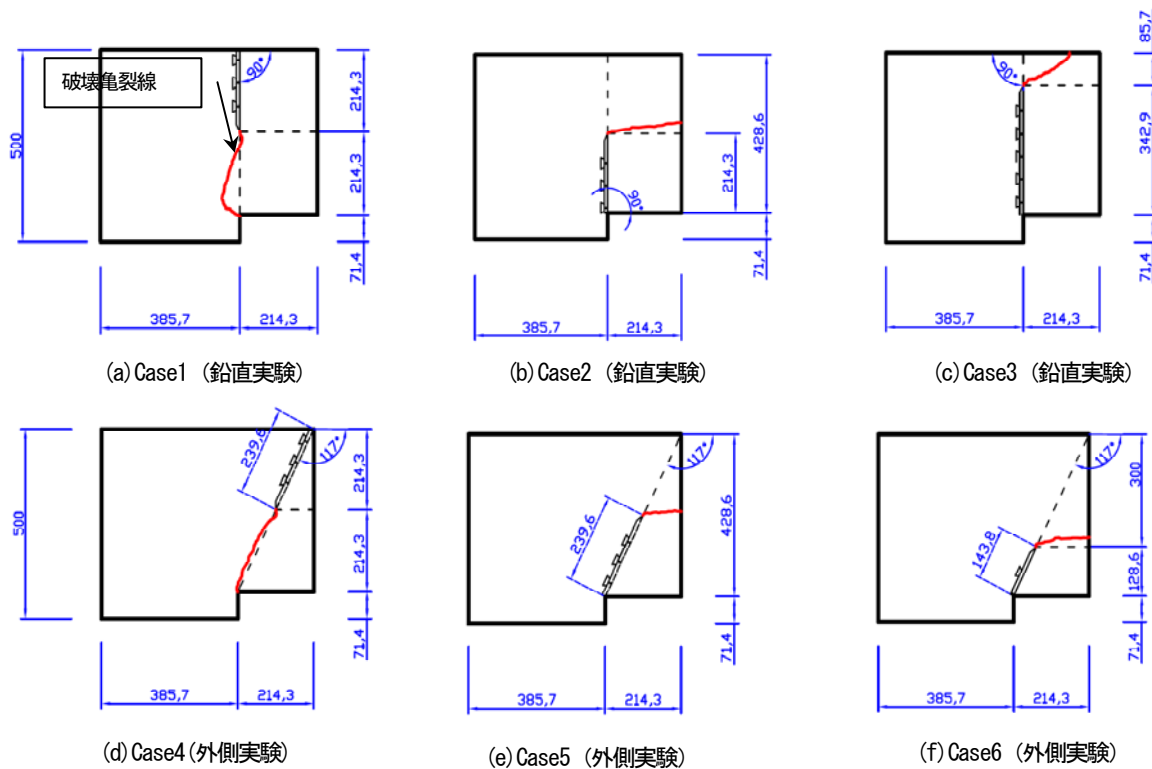


図-2.2 模型供試体の形状寸法

また、ここでは数値解析により岩盤斜面の安定度評価法を確立することを目的に、FEM 解析を用いて昨年度実施した図-2.3 に示す遠心力模型実験ケースについて、崩落加速度と崩落形状の解析⁷⁾⁸⁾を試みた。

3. 研究結果

3.1 岩盤の劣化過程の調査・分析

3.1.1 岩盤劣化試験及び劣化過程分析

(1) 凍結最低温度と強度劣化の傾向

岩石試料の基本物性の試験結果を表-3.1 に示す。一軸圧縮強さが 14.7Mpa で、一般には軟岩に分類される岩石である。

凍結融解試験後の試験結果の一例として、図-3.1 に凍結融解サイクル数と超音波速度試験による相対動弾性係数の関係を示す。凍結最低温度の低いケース 1, 2 では、凍結融解サイクル数 20 回程度の初期のサイクルで相対動弾性係数が 20%程度と急激に低下しているのに対して、相対的に凍結最低温度が高いケース 3 では凍結融解サイクル数 100 回でも相対動弾性係数が 70%程度に収束するような比較的穏やかな減少傾向を示している。同様の傾向は、図-3.2 に示すように凍結融解試験後の一軸圧縮試験の圧縮強さでも確認された。

超音波速度試験と一軸圧縮試験の結果を比較検討す

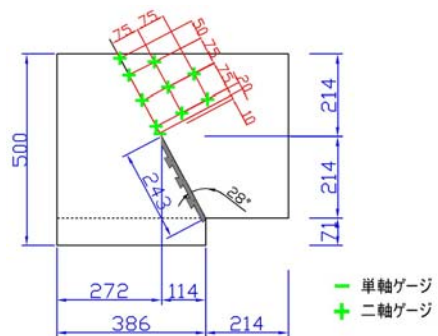


図-2.3 数値解析に用いた実験ケース

るために、超音波速度試験結果については各ケースについて凍結融解サイクル数毎に相対動弾性係数の平均値を求め、一軸圧縮試験結果については凍結融解試験前の一軸圧縮強さを初期強さとして凍結融解後の一軸圧縮強さとの比（以下、強さ比）として求めた。図-3.3 に凍結融解サイクル数とこれらの関係を示す。ケース 1, 2 とケース 3 に、試験結果と同様な傾向が認められ、さらに各ケースとも相対動弾性係数の平均値が強さ比の下限側の値を示してある程度の相関がみられる。

凍結最低温度の違いによる劣化傾向の違いについては、コンクリートの分野で確認されてその原因が考察されているが、岩石についても調査された事例がある。

表-3.1 岩石試料の基本物性値

湿潤密度	乾燥密度	飽和密度	吸水率	有効間隙率	含水比	P波速度	S波速度	一軸圧縮強さ	静弾性係数
ρ_t (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_{sat} (g/cm ³)	ab (%)	ne (%)	w (%)	V_p (km/s)	V_s (km/s)	σ_c (MPa)	$E_{t,50}$ (MPa)
2.38	2.22	2.40	7.81	17.36	7.07	2.28	1.12	14.70	2.66E+03

福田¹⁰⁾によると小樽市手宮地域の古第三紀の凝灰岩を用いて、凍結最低温度を-2℃、-4℃、-6℃、-8℃、-10℃に設定（融解温度は+10℃の一定、1日1サイクル）して10サイクル後の供試体残存損失率を求めて比較した結果、-6℃以下で急に破壊が著しいことを示している。本試験では、1サイクルの凍結融解時間を短くして多サイクル数（ケース3：最大100サイクル数）とし、長期間の劣化傾向を超音波速度試験と一軸圧縮試験で調査した。

本試験結果による同一凍結融解サイクル数における凍結最低温度と相対動弾性係数の関係を図-3.4に示す。凍結最低温度が-3℃から-9℃で相対動弾性係数が急に低下し、-9℃と-18℃では低下傾向が緩くなっていることが分かる。

このような傾向を示した原因には、コンクリートの分野¹¹⁾では最低温度が低いものほどコンクリート硬化体の細孔組織中の凍結水量の割合が多くなることが挙げられている。また、前述の福田による事例では、岩石内の水には0℃以下でも凍結しない不凍水の存在が知られており、これに岩石内に生じる水流を考慮して、岩石が凍結する温度と水の供給条件が凍結破壊の状態や程度に影響することを挙げている。今回の結果についても、同様の原因が考えられるが、メカニズムの詳細な解明については今後の課題と考える。

なお、図-3.3をみると相対動弾性係数の平均値と強さ比とにより相関性がみられる。このことについては、次項で考察する。

(2) 動弾性係数と一軸圧縮強さの関係

前項では、各実験ケースの条件に沿った平均値で示したが、ここではまず試験供試体毎の試験結果を用いて示す。図-3.5は、各ケースの動弾性係数と一軸圧縮強さの関係を示したものである。両値には相関が認められるが、ケース3のデータにバラツキが多くみられる。この原因は、ケース3では、凍結最低温度が他のケースに比べて高いことから強度変化が少なかったためと推測される。

根岸¹²⁾は、岩盤のせん断強度を推定する方法の検討

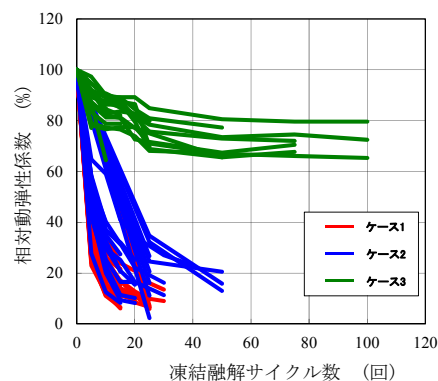


図-3.1 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数

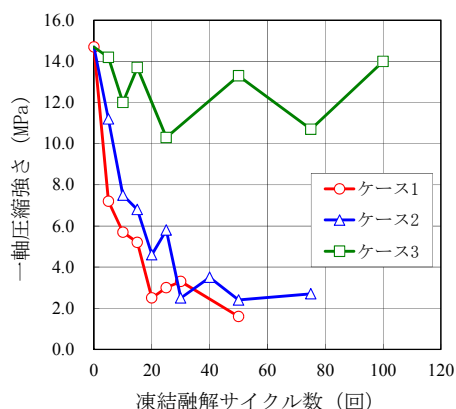


図-3.2 凍結融解サイクル数と一軸圧縮強さ

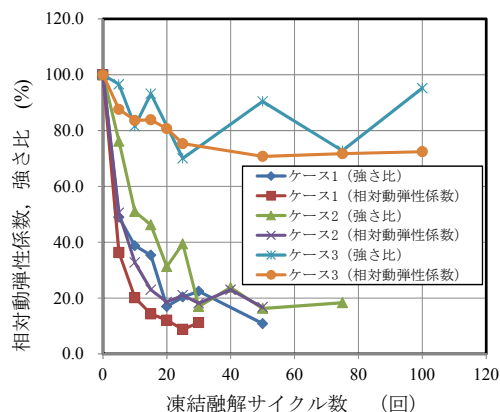


図-3.3 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数（平均値）および強さ比

として、凍結融解作用の影響を受けやすい熔結凝灰岩を用いて凍結融解の繰り返しにより供試体内に微小亀裂を発生させ、この状態が自然地山（岩盤）に近似するものとしてインタクトな岩石供試体の物性値との関係を考察している。報告では、動弾性係数に関するP波速度と一軸圧縮強さの関係を両対数グラフで示して、累乗近似式を提案している。

図-3.6は、図-3.5の動弾性係数と一軸圧縮強さの関係を両対数グラフで示したものである。（試験データ数：68 データ）各種回帰計算を行った結果、前述の根岸が示した式と同様に累乗近似式の相関がよいことが分かった。式を以下に示す。

$$qu = 0.06 \cdot E_d^{0.6} \quad (1)$$

ここに、 qu ：一軸圧縮強さ（MN/m²）， E_d ：動弾性係数（MN/m²）

式(1)の関係をを用いると、強さ比 S_q と相対動弾性係数 S_E との関係は、以下のように表せる。

$$S_q = \frac{qu_f}{qu_0} = \frac{0.06 \cdot E_{df}^{0.6}}{0.06 \cdot E_{d0}^{0.6}} = \left(\frac{E_{df}}{E_{d0}} \right)^{0.6} = S_E^{0.6} \quad (2)$$

ここに、 S_q ：強さ比， S_E ：相対動弾性係数， qu_0 ：初期一軸圧縮強さ（MN/m²）， E_{d0} ：初期動弾性係数（MN/m²）， qu_f ：凍結融解試験後の一軸圧縮強さ（MN/m²）， E_{df} ：凍結融解試験後の動弾性係数（MN/m²）

よって、相対動弾性係数を0.6乗すると強度低下を示す強さ比に換算できることになる。

さらに、凍結融解に関する一連の試験では、凍結融解試験後の供試体に対して初期動弾性係数 E_{d0} と凍結融解試験後の動弾性係数 E_{df} 、および凍結融解試験後の一軸圧縮強さ qu_f を求めている。これらの値を用いて強さ比を求める方法として、まず初期動弾性係数 E_{d0} を用いて式(1)より初期一軸圧縮強さを求め、凍結融解試験後の一軸圧縮強さとの比（前述の強さ比と S_q と区別するために、この比を以下修正強さ比 S_{qa} とする。）とすることが考えられる。

$$S_{qa} = \frac{qu_f}{qu_0} = \frac{qu_f}{0.06 \cdot E_{d0}^{0.6}} \quad (3)$$

この値は、同一供試体の一軸圧縮強さの比になることから最も精度の高い強度変化が求められていると推察される。図-3.7は修正強さ比をX軸にして相対動弾性係数およびその0.6乗とした強さ比、一軸圧縮強さの

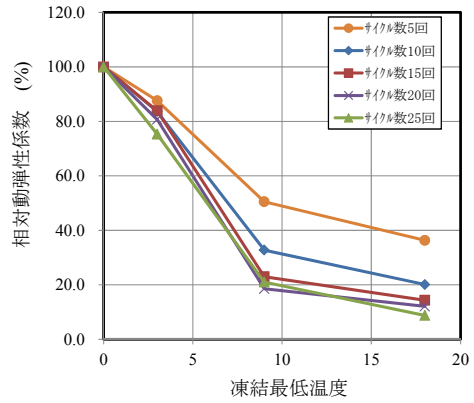


図-3.4 凍結最低温度と相対動弾性係数

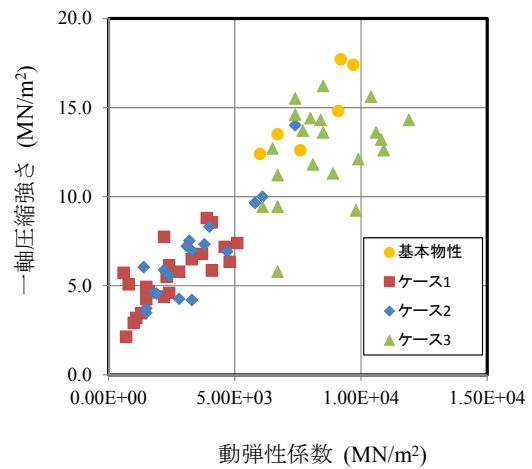


図-3.5 実験ケース別の動弾性係数と一軸圧縮強さ

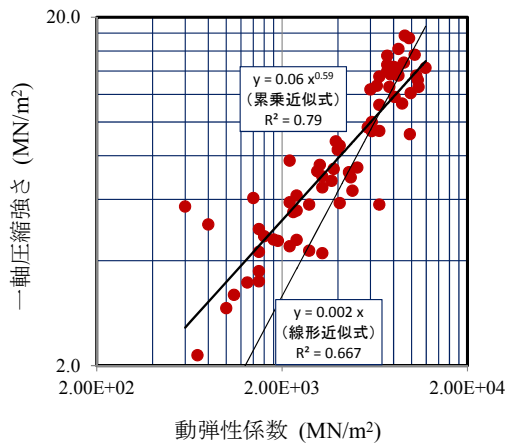


図-3.6 動弾性係数と一軸圧縮強さおよび回帰式

強さ比の関係を示したものである。各強さ比の関係にはよい相関が認められる、これらのことから強度変化を簡易に求める方法として相対動弾性係数を0.6乗する方法は有効と考えられる。

図-3.8 は、凍結融解時の凍結最低温度を変えた各実験ケースの凍結融解サイクル数と動弾性係数、強さ比および相対動弾性係数の 0.6 乗とした値を示したものである。相対動弾性係数の 0.6 乗とした値は、強さ比の平均的な値を示してよい相関が認められ、その有効性が示唆される。

3. 2 岩盤の劣化過程や気象条件の分析

3. 2. 1 崩壊履歴と気象データの GIS を用いた分析例

今回追加入力した斜面災害事象に関する新規項目の詳細を表-3.2 に示す。これらのデータを GIS データとすることにより、斜面災害の特徴を地域別に視覚できることが期待される。

図-3.9 は、分析の 1 例として斜面災害の主たる誘因が積雪寒冷地特有の「融雪」の災害分布を示したものである。斜面災害は、道南、日高海岸、積丹の西海岸で少なく、後志の内陸部から厚田、留萌、宗谷では相対的に多くなっているようにみられる。

今後、地域別の複合的な誘因との関係を分析して、岩盤の劣化過程や安定性評価の基礎資料にしたいと考える。

3. 2 遠心力模型実験を用いた岩盤崩落の再現試験

(1) 背面亀裂の進展方向の違いによる崩落加速度

表-3.3 に各実験ケースの遠心力模型実験から求められた崩落加速度実測値、および実験後供試体の室内試験結果を示す。これらの結果を比較するために、昨年と同様に崩落加速度実測値を基準値に合わせて補正した値を補正崩落加速度として示した。基準値とした引張強さ $\sigma_s (=200\text{kN/m}^2)$ と単位体積重量 $\gamma_s (=18.0\text{kN/m}^3)$ は、前回と同様である。

なお、表にある亀裂比とは、設置した亀裂ライン全長(鉛直実験ケース(実験 Case1,2,3) $=0.429\text{m}$ 、外側実験ケース(実験 Case4,5,6) $=0.479\text{m}$)に対する背面亀裂として設置した塩ビ板長さの比である。また、前章で示した図



図-3.9 「融雪」が誘因となった斜面災害分布図

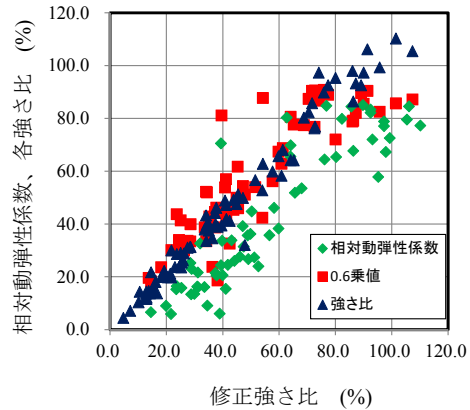


図-3.7 修正強さ比と相対動弾性係数および各強さ比

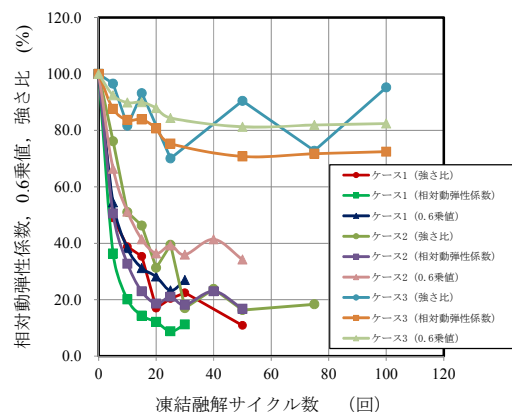


図-3.8 凍結融解サイクル数による強度低下

表-3.2 GIS 新規入力データ項目表

入力項目	備考
地質状況	基盤地質の物性 表層地質
基盤地質構造の特徴	流れ壁
	受け壁
	節理
	柱状(節理)
	弱線
	断層
	キャップブロック
	変質
	スレーキング
	劈開・片理
	層理面
	不整合面
	風化
崩壊機構	・「岩盤崩壊」のみ対象 ・「滑動」、「崩落」、「転倒」、「座屈」の4区分
主たる誘因	降雨
	融雪
	地震
	大型動物の接触
	強風
	人為的
	ヒトの接触
	凍結融解
	倒木
	雪の滑落
	経年変化
	不明
崩壊時の気象・地象	連続雨量
	実効雨量※
	土壌雨量指数※
	最大時間雨量
	震度

表-3.3 実験結果

実験Case	供試体の背面亀裂位置 (実験条件)	背面亀裂角度 θ (°)	背面亀裂長 (m)	亀裂比	崩落加速度 実測値 n_f (G)	模型縮尺 1/n	模型供試体 重心位置 半径 r' (m)	遠心力載荷 装置の有効半径 r (m)	一軸供試体の単位 体積重量 γ_t (kN/m^3)	実測引張 強さ σ_t (kN/m^2)	補正崩落 加速度 n_{fs} (G)
1	上方亀裂	90	0.214	0.50	16.0	70	3.18	3.50	17.6	169.0	16.8
2	下方亀裂	90	0.214	0.50	43.0	70	3.18	3.50	17.0	274.0	27.0
3	下方亀裂	90	0.343	0.80	16.0	70	3.18	3.50	17.1	301.0	9.2
4	上方亀裂	117	0.240	0.50	16.0	70	3.18	3.50	17.1	272.0	10.2
5	下方亀裂	117	0.240	0.50	30.0	70	3.18	3.50	17.3	308.0	17.0
6	下方亀裂	117	0.144	0.30	75.0	70	3.18	3.50	17.2	286.0	45.5

-2.2には、実験後に観察された破壊亀裂線を示した。供試体の破壊で発生した亀裂線は、設置した亀裂ライン方向と異なっているケースがある。

図-3.10 に、背面亀裂角度と補正崩落加速度の関係を示す。(背面亀裂角度 $\theta=62^\circ$ のデータは昨年度の値) 補正崩落加速度は、全ての実験シリーズで亀裂比が同値($=0.5$)において上方亀裂よりも下方亀裂の方が大きい値を示している。すなわち、下方亀裂の方が崩落し難く安全率が大きいと推測される。この理由には、昨年度の報告で示した下方亀裂では応力が亀裂先端に集中しないことに加えて、崩落岩体の体積(今回の結果では崩落岩体の断面積)が上方亀裂よりも下方亀裂が小さいことも影響していると考えられる。

(2) FEMによる遠心力模型実験結果の解析

a) 解析条件

用いた解析ソフトは、Soil Pluss (伊藤忠テクノソリューションズ(株))である。解析に用いたメッシュモデル図を図-3.11 に示す。新たな亀裂が進展することが予想された既存亀裂上端と崩落岩体側のメッシュ間隔を狭く設定した。

解析に用いた定数は表-3.4 に示すように、岩体の引張強さと単位体積重量を試験結果の補正で基準値とした値と同一にし、その他の値は既存文献¹³⁾や過去の試験結果を参考に、軟岩を想定した代表値を用いた。また、既存亀裂としたアクリル板の定数は、公表されている既存資料をもとに決定し、アクリル板と岩盤材料との間にジョイント要素として強度定数を0として接触面の抵抗力をなくした。

解析では、破壊のトリガーとなる初期破壊を数値解析で評価することが必要である。実験観察の結果から初期破壊として引張破壊に注目し FEM 解析を行った。さらに亀裂進展として、最初の解析で引張破壊箇所から最も応力が作用していると考えられるメッシュを除去し、次

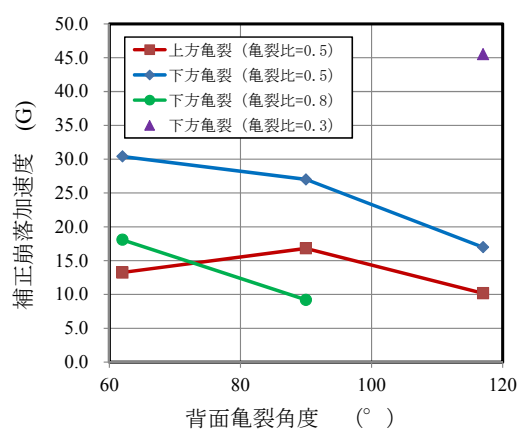


図-3.10 背面亀裂角度と補正崩落加速度

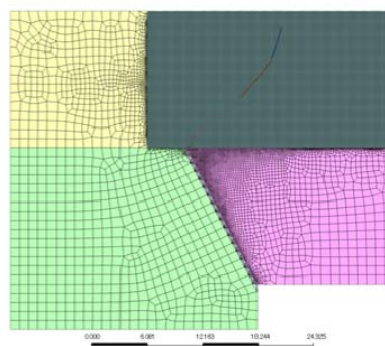


図-3.11 メッシュモデル図

表-3.4 解析に用いた定数

名称	ポアソン比 ν	ヤング率 E (kN/m^2)	単位体積重量 γ (kN/m^3)	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 φ (°)	引張強度 σ_t (kN/m^2)
人工岩盤材料	0.35	1,420,000.0	18.0	350.0	41.0	200.0
アクリル板	0.30	2,600,000.0	11.7	0.0	0.0	-
ジョイント	0.30	2,600,000.0	11.7	0.0	0.0	-

の解析を実施するステップ解析を行った。図-3.12 にステップ解析の手順を示す。

b) 解析結果

実験の供試体は、1/70 で作成されているが、数値解析では、実寸の寸法に戻して検討を行った。遠心力模型実験では、30G 载荷時に破壊が生じたため、この载荷を実寸に変換して、 $30/70=0.4G$ として自重载荷した弾塑性解析を行った。結果として14破壊ステップまでのステップ解析となった。

図-3.13 に各ステップの引張破壊範囲の解析結果を示す。実験の観察では、新たな進展亀裂は既存亀裂先端からおおよそ直角方向に発生した。解析結果は、この状態に近い状況を表現しており、供試体に生じた引張破壊が一気に拡大する様子を解析でも表現することが可能であることが示唆された。また、解析から破壊のトリガーは引張応力である可能性が高いことが推察された。この結果は、岩盤斜面の崩落現象の解析として FEM 解析の有効性が示唆されたものとする。

ただし、今回の解析では連鎖破壊のトリガー箇所を確定するための初期解析において、アクリル板周辺のメッシュサイズの設定に注意が必要となった。FEM 解析により引張破壊領域の評価を行うには、解析手法の特性上、破壊領域以下のメッシュサイズによる解析が必要となる。本解析では、メッシュサイズを $0.1m \times 0.1m$ 程度と非常に小さくすることで引張破壊領域を見つけることが可能となった。これは、遠心力模型実験で得られた破壊加速度での初期引張破壊領域が実寸で $0.1m \times 0.1m$ (模型寸法で $1.4mm \times 1.4mm$) 程度の微小領域であったことを示すものとする。

4. 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) 岩石劣化試験の結果、凍結最低温度が低い実験ケースに対して温度が高い実験ケースの相対動弾性係数および一軸圧縮強さの減少傾向が小さくなった。この原因には、コンクリートの分野で挙げられている、最低温度が低いものほどコンクリート硬化体の細孔組織中の凍結水量の割合が多くなることや、岩石の研究事例で示されている、岩石内の $0^{\circ}C$ 以下でも凍結しない不凍水の存在と岩石内に生じる水流を考慮して、岩石が凍結する温度と水の供給条件が凍結破壊の状態や程度に影響することが考えられた。メカニズムの詳細な解明については今後の課題である。

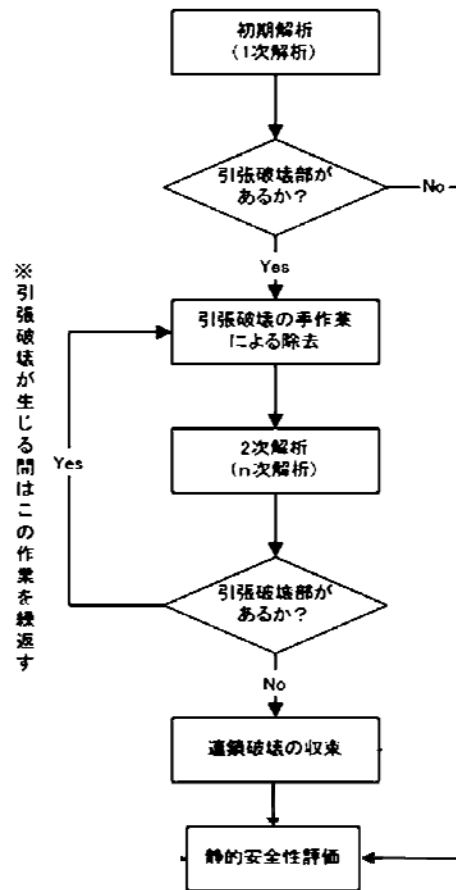


図-3.12 ステップ解析手順

- 2) ここで対象とした岩石においては、強度の変化を求める方法として相対動弾性係数の0.6乗とした値が、簡易で精度の高い方法としてその有効性が示唆された。今後は、他の岩種に対しても調査して、岩石の凍結融解による強度劣化を定量化したいと考える。
- 3) GIS データを用いた分析では、今回は追加データの入力のみであるが、今後地域別の複合的な誘因との関係を分析して、岩盤の劣化過程や安定性評価の基礎資料にしたいと考える。
- 4) 遠心力模型実験による再現試験では、背面亀裂の進展方向の違いとして、亀裂比が同値の上方亀裂と下方亀裂の崩落加速度を比較した結果、全てに実験シリーズで下方亀裂の方が崩落し難いことが推測された。
- 5) 遠心力模型実験時の破壊形態を FEM 解析で表現することができたことから、岩盤斜面の崩落現象の解析として FEM 解析の有効性が示唆された。
- 6) FEM 解析より、今回の遠心力模型実験の破壊加速度での初期引張破壊領域は、実寸で $0.1m \times 0.1m$ 程度の微小領域であることが推察された。

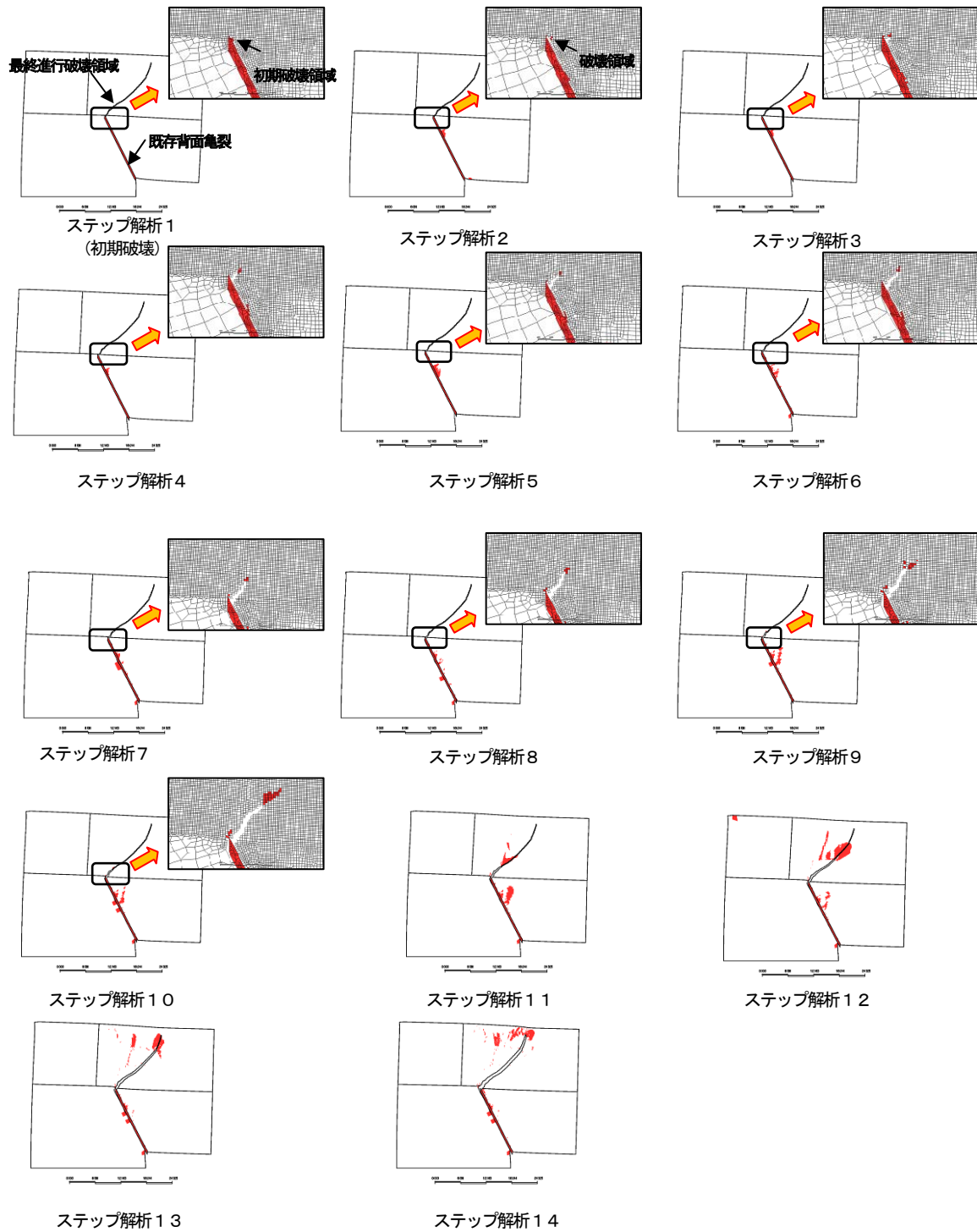


図-3.13 FEM ステップ解析結果
(破壊領域：引張破壊領域)

参考文献

- 1) 日下部祐基, 伊東佳彦, 井上豊基: 凍結融解による岩石劣化の凍結温度の影響, 地盤工学会北海道支部, 技術報告集第53号, pp271-274, 2015.
- 2) 日下部祐基, 伊東佳彦, 井上豊基: 凍結融解による岩石劣化の凍結温度の影響に関する研究 (その1), 第48回地盤工学会発表会, 2015. (投稿中)
- 3) 伊東佳彦, 日下部祐基, 井上豊基: 凍結融解による岩石劣化の凍結温度の影響に関する研究 (その2), 第48回地盤工学会発表会, 2015. (投稿中)
- 4) 山内淑人, 蔣宇静, 棚橋由彦: 動的特性の変化に着目した不安定岩塊の計測管理, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2006 論文集, 地盤工学会, pp21-26, 2006.
- 5) 日下部祐基, 伊東佳彦, 井上豊基: 背面亀裂の進展方向に着目した岩盤崩落の遠心力模型実験, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012.
- 6) 日下部祐基, 伊東佳彦, 井上豊基: 背面亀裂の進展方向に着目した岩盤崩落の遠心力模型実験 (その2), 土木学会第68回年次学術講演会, 2013. (投稿中)
- 7) 日下部祐基, 伊東佳彦, 三浦均也: 岩盤斜面の遠心力模型実験とFEM解析について, 寒地土木研究所月報, 寒地土木研究所, No. 705, pp. 45-49, 2012.
- 8) 日下部祐基, 伊東佳彦, 井上豊基: 岩盤斜面の遠心力模型実験とFEM解析について (その2), 寒地土木研究所月報, 寒地土木研究所, No. 717, pp. 10-32, 2013.
- 9) 日下部祐基, 伊東佳彦, 井上豊基, 吉田力: 亀裂進展方向に着目した岩盤崩落の遠心力模型実験とFEM解析, 岩の力学連合会, 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp91-96, 2013.
- 10) 福田正巳: 小樽手宮洞窟壁面遺跡の凍結破損防止にかかわる基礎研究, 低温科学, 物理編43, 北海道大学, pp. 171-180, 1985.3
- 11) 石井清, 江川頭一郎, 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, 1997.5
- 12) 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, pp7-21, 1981.1
- 13) 日本道路公団試験研究所: トンネルの標準設計に関する研究報告書一数値解析と施工実績の分析一, 1986.

A STUDY ON EVALUATION AND MANAGEMENT METHOD OF LARGE-SCALE ROCK SLOPE UNDER DETERIORATION PROCESS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Cold Region Construction Engineering

Research Group

(Geological Hazards Research Team)

Author : ITO Yoshihiko

KURAHASHI Toshiyuki

KUSAKABE Yuki

OKAZAKI Kenji

SHISHIDO Masahito

OBINATA Akihiko

Abstract : This paper describes the results of the literature research, freezing and thawing test, the analysis of meteorological data by GIS and the centrifugal model tests in FY2012. The results indicate that the minimum freezing temperature, and the position and inclination of existing crack are a key to reveal deterioration mechanism of rock slope failure.

Key words : large-scale rock slope failure , deterioration process, freezing and thawing, GIS, centrifugal model test