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、宍戸政仁、大日向昭彦

【要旨】

本研究では、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的として、平成25年度は岩石の 凍結融解による強度低下と関係する動弾性係数などの物性値の調査、背面亀裂を伴う岩盤崩落を模した遠心力模 型実験による再現試験、および劣化過程を考慮した安定性能曲線についての課題抽出を行った。その結果、堆積 岩に分類される岩種が凍結融解の影響を受けやすいことや、亀裂周辺の弾性係数の低下やその厚みが岩盤崩落に 影響すること、および安定性能曲線を作成するための課題を明らかにした。

キーワード:大規模岩盤崩壊、劣化過程、凍結融解、遠心力模型実験

1. はじめに

北海道、東北、北陸などの積雪寒冷地では、凍結融解・ 凍上など積雪寒冷地特有の劣化要因も加わって大規模岩 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。しかし、大規模岩盤崩壊は安 全と評価した箇所で発生したり危険と評価した箇所で発 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。

そこで本研究では、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的としている。

平成25年度は、岩石の凍結融解による強度低下と関係 する動弾性係数などの物性値を調査した。また、背面亀 裂を伴う岩盤崩落を模した遠心力模型実験による再現試 験、および斜面安全率の低下を経時的に示す安定性能曲 線についての課題抽出を行った。

2. 研究方法

2.1 岩盤劣化試験及び劣化過程分析

凍結融解により岩石の強度低下が生じると伴に、物性も

No.	試料名 (採取地層名・岩種)	岩石 グループ	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)	ー軸圧縮強さ (MPa)	凍結融解最終サイクル数(回)
1	春採層 砂岩1	堆積岩	釧路町	5.62	2.45	2.32	3.43	1.79	31.1	186
2	春採層 砂岩 2	11	11	5.08	2.52	2.40	3.60	1.72	35.1	300
3	雄別層 砂岩	11	11	10.42	2.32	2.10	1.26	0.51	6.7	106
4	天寧層 炭質泥岩	11	11	7.67	2.21	2.05	2.42	0.85	6.7	32
5	天寧層 礫岩2	11	"	2.33	2.62	2.56	4.78	2.45	33.4	300
6	天寧層 砂岩	11	11	7.81	2.40	2.22	2.28	1.12	14.7	50
7	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	9.3	54
8	春日層 風化安山岩	火山岩	11	4.77	2.47	2.35	3.86	1.86	32.8	200
9	春日層 安山岩	11	11	2.25	2.60	2.55	4.71	2.21	60.0	300
10	館層 粗粒砂岩	堆積岩	乙部	24.63	1.99	1.60	2.66	1.31	8.1	13
11	館層 細粒砂岩	11	11	33.00	1.86	1.40	2.31	1.07	9.4	6
12	流紋岩質凝灰岩	火砕岩	鹿部	14.43	2.08	1.82	2.70	1.50	12.5	37
13	凝灰質砂岩	11	11	27.09	1.95	1.54	1.22	0.59	0.8	6
14	蝦夷層群 砂岩	堆積岩	芦別	2.11	2.58	2.53	4.26	2.14	58.5	300
15	川端層 砂岩 1	11	厚真	6.22	2.41	2.27	2.80	1.35	11.0	40
16	川端層 砂岩 2	11	11	7.07	2.41	2.25	2.71	1.39	26.1	40
17	美笛層 風化安山岩 1	火山岩	岩内	5.17	2.48	2.36	4.52	2.22	26.6	300
18	水冷破砕岩	火砕岩	喜茂別	3.49	2.25	2.17	4.32	2.21	61.8	300
19	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	5

表-1 初期物理力学特性値および凍結融解最終サイクル数

変化することが推測される。ここでは、軟岩を含めた強度 的に広範囲な岩石について凍結融解に起因する、動弾性係 数などの物性の変化を調査した。

試験に用いた岩石試料の初期物理力学特性値、および凍 結融解最終サイクル数を表-1に示す。これらの試料は、道 路切土法面の掘削現場より採取されたので、過去に凍結融 解作用を受けていないと考えられる。

試験では、凍結融解試験前に水浸前後の超音波伝播速度 を測定した。凍結融解試験の最大凍結融解サイクル数は 300回を基本とした。各試料複数の供試体を用意して、任 意の凍結融解サイクル数終了後に一軸圧縮強さ、超音波伝 播速度、質量減少率などを計測した。

ただし、凍結融解最終サイクル数が300回以下となって いる試料は、このサイクル数で一軸圧縮試験などのいずれ かの試験を実施できたが、その後供試体が崩壊したもので ある。

これらの結果を堆積岩とそれ以外の岩石に分け、さらに過去の研究¹⁾より岩盤路床の合否判定の指標である吸水率 6%を境界に分けて、凍結融解サイクル数と相対動弾性係数や質量減少率との相関などを解析した。

2.2 遠心力模型実験を用いた岩盤崩落の再現試験

大規模岩盤崩落のメカニズム解明として、崩落危険岩 体の背面にある亀裂の位置による影響を調査する目的で、 これまでに亀裂が岩盤の上端や下端にある場合の遠心力 模型実験を行った。その解析結果²³³から、亀裂が上端に ある場合よりも下端にある場合の方が、斜面の安定度が 高くなり、崩壊し難いことを明らかにしてきた。さらに、 この一連の実験と解析では、亀裂が下端にある場合の実 験ケースに、亀裂周辺の岩石の変形が強く影響するもの があることが分かった。その実験ケースとは、オーバー ハングした崩落危険岩体の背面亀裂が、下端に存在する 場合でオーバーハング垂直面に対して内側に位置するも のである。自然斜面においても亀裂周辺は、湧水や雨水 による乾湿や凍結融解の影響を受けて劣化しやすいこと から、亀裂周辺の弾性低下が容易に生じることが推測さ れる。

そこで、この実験ケースの安定度を定量的に把握する ために、模型岩体の背面亀裂材の弾性係数やその厚さを 変化させた遠心力模型実験を行った。実験に用いた遠心 力載荷装置と供試体概要を図-1に示す。図-1の概要図は、 遠心加速度方向を下向きにして、重力加速度方向と一致 させている。モルタルで縮尺1/70の供試体を作成し、背 面亀裂の劣化を再現した。供試体材料の配合は、配合比 =セメントC:砂S:カオリン粘土N=1:4:1、水セメント 比W/C=2.25 とした。遠心力載荷装置の最大遠心加速度 100G以下で模型供試体が崩落する強度を想定し、モルタ ルの目標強度を引張強さσ,=180kN/m²とした。

供試体には、既存背面亀裂として所定長さの塩ビ板の 片面に、表-2に示すように5ケースの弾性係数の異なる、 あるいはその厚さを変えたものを張り付けて埋め込んだ。 写真-1に、各実験ケースに用いた背面亀裂材の貼り付け 状況を示す。亀裂周辺の劣化厚の変化を想定して、厚み を10mm刻みで30mmまで変化させたり、材質を塩ビ、 ゴム、発泡スチロールに変えて弾性係数を変化させた。

遠心力模型実験では、供試体の切欠き先端から新たな 亀裂の進展が予想される位置にひずみゲージを貼付して 遠心力載荷装置に設置したほか、CCD カメラやレーザ変 位計などの計測センサーを取り付けた。

遠心力載荷は、制御パネルおよびモニター画面を確認



実験に用いた遠心力載荷装置

供試体概要図

図-1 遠心力載荷装置と供試体概要図



表-2 各実験 Case に用いた背面亀裂材

実験ケース	背面亀裂材質
1	硬質発砲塩ビ板(厚さ t=10mm)
2	ゴムプレート(厚さ t=10mm)
3	発泡スチロール(厚さ t=10mm)
4	ゴムプレート(厚さ t=20mm)
5	ゴムプレート(厚さ t=30mm)

写真-1 背面亀裂材貼り付け状況

岩種	吸水率	有効間隙	飽和密度	乾燥密度	P波速度	S波速度	動弾性係数	一軸圧縮強さ
	(%)	率(%)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(km/sec)	(km/sec)	(MN/m ²)	(MN/m ²)
砂質泥岩	14.6	27.7	2.234	1.957	1.75	0.63	2.52E+03	7.32

表-3 対象岩石の物性値

しながら、遠心加速度を所定の値まで基本的に 5~10G (想定破壊加速度の 70%まで 10G ステップ、以後 5G ス テップ)のステップで段階的に増加させ、1 ステップ 5 分間以上維持した。載荷中は、ひずみの増加傾向やクラ ックの発生状況を常時観察した。なお、ひずみの発生量 が急増した場合には、遠心加速度を一定に保ち、ひずみ がクリープ的に増加していないことを確認してから、次 の加速度段階に移行し、最終的には崩落した加速度を計 測した。この実測加速度とモルタルの物性値から補正崩 落加速度を算出し、背面亀裂の弾性係数やその厚さと対 比させることで、岩盤斜面の安定度に与える影響を解析 した。

2.3 劣化過程を考慮した岩盤斜面の管理手法の検討

沖村(2012)⁴は、対象斜面の風化作用による斜面安全率 の低下を経時的に示す、斜面の安定性能曲線の作成を目 指すべきであることを述べている。図-2に安定性能曲線 の概念図を示す。斜面の長期的な維持管理の計画立案に 役立つと考えられる。

ここでは、本手法の予察として道路改良工事の岩切斜 面のデータを用いて適用性を検討した。斜面勾配は1:1.2 で、地層は古第三紀の砂質泥岩である。表-3に岩石の物 性値を示す。また、凍結融解による強度劣化をみるため





(この例では許容安全率 FS=1.5 として、これに達する年数が9 年目でこの時点で劣化対策を行うこととして、その前年の8年目 に詳細調査・設計、中間年の4年目に劣化の確認調査を行うこと を想定している。)

に、ボーリングコアから一軸圧縮試験用供試体5本を作 成して凍結融解後の一軸圧縮強さを計測した。

凍結融解の劣化による斜面安全率の長期的な低下を把 握するために、岩切終了時の初期斜面安全率を求めた。 岩盤強度定数は、物性値をもとに既往資料⁵⁰を参考にし て粘着力c=100kN/m²、せん断抵抗角 $\varphi=37^{\circ}$ とした。ま た、本地区の凍結深度がおおよそ 1m であることから、 最大すべり線深度を 1m として斜面の安定計算を実施し た。



3. 研究結果

3.1 岩盤劣化試験及び劣化過程分析

3. 1. 1 岩石グループ・吸水率別凍結融解サイクル数 と物性変化

図-3 に岩石グループ別・吸水率別の凍結融解サイク ル数と相対動弾性係数の関係を示す。堆積岩の相対動 弾性係数は、それ以外の岩石と比較して吸水率 6%以 上・未満とも凍結融解サイクル数の増加に対して低下 している。堆積岩が大きく凍結融解の影響を受けやす いと考えられる。

図-4 に、凍結融解サイクル数と質量減少率の関係を 示す。岩石グループごとに違いが見られないが、吸水 率6%未満の試料は凍結融解サイクル数100回以上に多 く位置しているのに対して、6%以上の試料のほとんど が100回以下に位置している。吸水率が6%以上の試料 では、凍結融解サイクル数が100回を超えると供試体 が崩壊して、質量減少率を求めることができなかった からである。このことから、吸水率が岩盤劣化の指標 に有効であることが推察される。

3.1.2 岩石グループ・吸水率別強さ比と物性値

任意凍結融解サイクル後の一軸圧縮強さと初期圧縮 強さの比を強さ比として、相対動弾性係数との関係を 図-5 に示す。正の比例関係が認められる。相対動弾性 係数が岩石の強度低下を推定する指標となる可能性を 示唆している。

図-6 に強さ比と質量減少率の関係を示す。強さ比が 大きいほど質量減少率は小さくなり、負の比例関係が 予想された。しかし、今回のデータは大きくバラツキ、 相関が明瞭ではない。



図-4 凍結融解サイクル数と質量減少率







図-6 強さ比と質量減少率

3.1.3 凍結融解試験前後の物性変化の傾向

岩石の自然状態と凍結融解試験後の各物性値の変化 を分析した。図-7 に一軸圧縮強さと動弾性係数の関係 を岩石グループ別に凍結融解試験前と後に別けて示す。 岩石グループごとで回帰式の勾配が異なっている。さ らに自然状態を示す試験前の回帰式の勾配も、試験後 のものと異なっている。既往の研究^のでは、熔結凝灰岩 の動弾性係数に関係するP波速度と一軸圧縮強さの関 係に同様な傾向を見いだしており、今回の傾向はこれ に合致している。

ただし、この関係では動弾性係数が試験前と後で条 件が異なっている。試験前の試験条件は、自然状態の 供試体を測定しているため、飽和されていないのに対 して、試験後の供試体は水浸されていることから飽和 状態になっている。図-8 に同一供試体の水浸前と後の 動弾性係数の関係を示す。ほぼ1:1の関係にあることか ら、大きな影響はないと考える。

なお、この関係には全体的な傾向として水浸後の動 弾性係数が水浸前のものよりも大きくなっている。こ れは、供試体の水浸により供試体内の空隙が水で満た されて超音波が伝播し易くなったためと考えられる。

図-9 に一軸圧縮強さと飽和密度の関係を岩石グルー プ別の凍結融解試験前後に別けて示す。この関係には、 試験前後の傾向に違いがみられない。このことから凍 結融解前後の飽和密度の変化傾向の違いは、微小であ ることが推測される。

3.2 遠心力模型実験を用いた岩盤崩落の再現試験結果

表4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岩石試験結果 を示す。これらの結果を比較するために、これまでと同 様に下記の(1)式を用いて遠心力模型実験結果による崩 落加速度実測値を補正した。(1)式では、各実験ケースの 差異の補正として基準値とした引張強さ σ_s(=200kN/m²) と単位体積重量 y_s (=18.0kN/m³)への換算、および測定す る遠心加速度の半径位置を補正した。同表に計算による 補正崩落加速度も示す。また、各ケースの背面亀裂材の 圧縮試験から求めた物性値を表-5 に示す。

$$n_{fs} = \frac{\beta}{\alpha} n_f \frac{r'}{r} \tag{1}$$

ここに、n_f: 補正崩落加速度(基準値に置き換えた崩 落加速度)(G)



図-9 一軸圧縮強さと飽和密度

実験Case	背面亀裂長 (m)	亀裂比	崩落加速 度実測値 <i>n_f(</i> G)	模型縮尺 1/n	模型供試 体重心位 置半径 <i>r</i> '(m)	遠心力載 荷装置の 有効半径 <i>r</i> (m)	ー軸供試 体の単位 体積重量 ア _t	実測引張 強さ <i>σ_t</i>	補正崩落 加速度 <i>n_{fs}(</i> G)
							(kN/m ³)	(kN/m^2)	
1	0.243	0.50	35.0	70	3.18	3.50	17.4	282.0	21.7
2	0.243	0.50	27.0	70	3.18	3.50	18.1	351.0	14.0
3	0.243	0.50	25.0	70	3.18	3.50	17.0	339.0	12.7
4	0.243	0.50	33.0	70	3.18	3.50	16.6	327.0	16.9
5	0.243	0.50	24.0	70	3.18	3.50	16.4	375.0	10.6

表-4 遠心力模型実験結果

表-5 背面亀裂材および母材モルタルの物性値

実験Case	背面亀裂材 厚さ (mm)	背面亀裂材 引張強さ (MPa)	背面亀裂材 弾性係数 <i>E</i> _h (MPa)	モルタル 一軸圧縮強さ (MPa)	モルタル 弾性係数 E _m (MPa)	弾性係数比 (E _h /E _m)
1	10	16.0	468.00	1.75	585	0.800
2	10	3.2	5.60	2.27	483	0.012
3	10	0.02	2.30	2.03	584	0.004
4	20	3.2	5.60	2.21	371	0.015
5	30	3.2	5.60	2.70	385	0.015

n_f:実測崩落加速度(G)

- α :供試体の実測引張強さ σ_t と引張強さの基準値 σ_s (=200kN/m²)の比(= σ_t/σ_s)
- β:実測単位体積重量 γ_t と単位体積重量の基 準値 γ_s (=18.0kN/m³)の比 (=γ_t/γ_s)
- r':模型供試体重心位置の半径(m)
- r:遠心力載荷装置の有効半径(m)

図-10に、実験ケース1,2,3の弾性係数比として各背面 亀裂材料と供試体の母材であるモルタルの弾性係数の比 を求めて、補正崩落加速度との関係を示す。弾性係数比 が小さいほど崩落加速度が小さくなり、背面亀裂材料が 柔らかいほど崩落しやすいことがわかる。これは、崩落 岩体が崩落するときに回転モーメントが作用して既存亀 裂面に圧縮力が生じるが、その時に背面亀裂面が柔らか いほど崩落岩体は亀裂面側に変位して、新たに発生する 亀裂面の引張力が再配分され、ある部位に集中して補正 崩落加速度が小さくなったことが考えられる。

一方、背面亀裂の劣化範囲の影響として、実験ケース 2,4,5 の結果を用いて、図-11 に背面亀裂材の厚さと補正



崩落加速度の関係を示す。背面亀裂材厚さが20mmで補 正崩落加速度が大きくなっているが、これは異常値と思 われる。背面亀裂材厚さ10mmと30mmでは、亀裂材が 厚い30mmの方が補正崩落加速度は小さくなっている。 この結果でも背面亀裂材の厚さが大きいほど崩落岩体が 亀裂面側に変位しやすくなり、新たに発生する亀裂面の 引張力が再配分され、補正崩落加速度が小さくなったこ とが推測される。

以上の結果から、遠心実験結果は各種パラメータとの 関係において弾性係数が小さいほど、あるいは背面亀裂 材の厚さが大きいほど、崩落加速度が小さくなることが 確認された。このことは、自然斜面において既存亀裂周 辺が柔らかいほど、あるいは劣化範囲が深いほど崩落し 易くなると考えられる。

3.3 劣化過程を考慮した岩盤斜面の管理手法の検討

斜面の安定計算の結果、初期の斜面安全率 Fs =15.5 が 得られた。安定計算式は、せん断強さの一次式であるこ とから、凍結融解による一軸圧縮強さの強さ比が斜面安 全率の低下比と同等と推測される。そこで、凍結融解サ イクル数と強さ比の近似式の強さ比に斜面安全率を乗じ て安全率低下曲線を求めた。図-12 に凍結融解数と強さ 比の関係を示す。本岩石は凍結融解による強度劣化が激 しく、凍結融解サイクル数5回で初期強さとの比が 20% 以下になることが確認された。長期劣化を定量的に求め るための指数近似曲線も示した。式を以下に示す。

$$s = \exp(-\kappa \cdot c) \times 100 \tag{2}$$

ここに、s: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 qu₀との 比 (=qu_c/qu₀))

- κ:回帰係数(回帰結果, κ=0.33)
- c:凍結融解サイクル数 (回)

また、本地区近隣で過去に地中温度を最長8年程度測定して、年間の凍結融解サイクル数を求めた。その結果から年平均の凍結融解サイクル数を求めると9回/年が得られたことから、凍結融解サイクル数を経過年数に換算して斜面安全率の低下曲線を求めると図-13 が得られる。この曲線(凡例:安全率(-18°C))が凍結融解による劣化を考慮した斜面の安定性能曲線である。図では、斜面安全率が1年目でFs=1.0を下回って崩壊する結果となっている。しかし、一冬経過した現場には全く変状がみられていない。

これまでの研究⁷⁾では、今回の凍結融解試験に用いた コンクリートの試験法の凍結最低温度-18℃と、実地盤の 凍結最低温度-3℃程度(深度 30cm 以深)では、劣化速 度が大きく異なることが明らかにされている。その実験 結果から求めた補正値1/22.5 を、(2)式の回帰係数 κ (=0.33) に乗じて κ =0.015 を算出した。図-13 には、この結果を



用いて補正した曲線(凡例:安全率(-3℃))を示した。 許容安全率 Fs=1.5 と仮定すると、それを下回るのが約 18 年後と推定される。

対象現場では、現在地中変位計や温度計、土壌水分計 などを設置して現地計測を実施中である。今後、これら の詳細を検証する計画である。

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。

- 岩石グループ別・吸水率別の凍結融解サイクル数と 相対動弾性係数の関係では、堆積岩がそれ以外の岩 石に比べて凍結融解の影響を受けやすい。
- 2) 岩石グループ別・吸水率別の強さ比と相対動弾性係 数との関係に正の比例関係が認められ、相対動弾性 係数が岩石の強度低下を推定する指標となる可能 性が示唆された。
- 3) 一軸圧縮強さと動弾性係数の関係を岩石別に凍結 融解試験前と後に別けて検討した結果、岩石グルー プ別で回帰式の勾配が異なっていることがわかり、 さらに自然状態を示す試験前の回帰式の勾配も、試 験後のものと異なっていることが示された。
- 4)背面亀裂材の弾性係数比が小さいほど補正崩落加 速度が小さくなり、既存亀裂周辺が柔らかいほど崩 落しやすい傾向が示された。
- 5) また、背面亀裂材が厚いほど補正崩落加速度は小さ くなり、既存亀裂周辺の劣化範囲が深いほど崩落し やすくなる傾向が示された。

6)斜面の安定性能曲線を推定するには、初期斜面安全率を求めるための強度定数などの設定法、凍結融解サイクル数の経過年数への換算法、凍結最低温度の推定、さらにはその他の劣化要因として乾湿繰返しや応力解放による劣化程度の定量化などが挙げられる。

参考文献

- 日下部祐基,伊東佳彦,坂本多郎: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, pp10-16, 2009.
- 日下部祐基,伊東佳彦,井上豊基(2012):背面亀裂の進展方向に着目した岩盤崩壊の遠心力模型実験,土木学会,第67回年次学術講演会,pp673-674,2012.
- 3)日下部祐基,伊東佳彦,井上豊基(2012):背面亀裂の進展方向に着目した岩盤崩壊の遠心力模型実験(その2),土木学会,第68回年次学術講演会,pp237-238,2013.
- 4) 沖村孝:自然斜面崩壊予測技術の従来の課題と背景,地盤工
 学会誌, Vol. 60, no. 3, pp1~5, 2012.
- 5) 北海道開発局:道路設計要領 第3集橋梁 第1編道路橋 付属資料, pp3-B-1~3-B-12, 2013.
- 6) 根岸正充: P波により岩盤のせん断強度を推定する試法, 寒 地土木研究所, 土木試験所報告, No. 75, pp7~21, 1981.
- 7) 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, pp.271~274, 2013.

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 results of either the cyclic freezing and thawing test or centrifugal model tests for rock slope with back crack under deterioration process in FY2013. As a result, cyclic freezing and thawing was suggested to affect for sedimentary rock so much compared with non-sedimentary rock. And, deterioration of modulus of elasticity around back crack and its width affected the rock slope. We also discussed the problem to estimate the stability curve for rock slope with long-term deterioration.

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