

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：倉橋稔幸、日下部祐基
矢島良紀、宍戸政仁

【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 26 年度は崩落岩体形状の違いによる新たな亀裂の進展方向、および崩落加速度を遠心力模型実験で再現し、その結果を FEM により数値解析した。また、岩石の凍結融解による強度劣化についてワイブル分布近似曲線を用いて解析した。

その結果、FEM による解析によって遠心力模型実験の崩落時に発生した新たな亀裂形状を再現できたことから、数値解析により岩盤崩壊の形状把握が可能であることが示唆された。また、凍結融解による岩石の強度劣化について近似曲線が交差するサイクル数の前半部を \sqrt{N} 近似、後半部を指数近似とした予測法を構築した。

キーワード：大規模岩盤崩壊、凍結融解、遠心力模型実験、FEM 解析

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、大規模岩盤崩壊の安定性評価の精度は低く、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、岩盤崩壊に関する遠心力模型実験¹⁾²⁾や岩石劣化に関する岩石室内試験³⁾⁴⁾を行っている。

平成 26 年度は、崩落岩体形状の違いによる新たな亀裂の進展方向、および崩落加速度を遠心力模型実験で再現し（図-1 図-2）、FEM により数値解析した。また、岩石の凍結融解による強度劣化を土木や地盤工学の分野で経時的な現象の予測に利用されるワイブル分布近似曲線を用いて解析し、新たな予測法を構築した。

2. 研究方法

2.1 遠心力模型実験による岩盤崩壊の再現試験と FEM 解析

2.1.1 再現試験について

再現試験に用いた供試体は、1/70 の縮尺としてモルタルで作成した（図-3）。既存背面亀裂として所定長さの塩

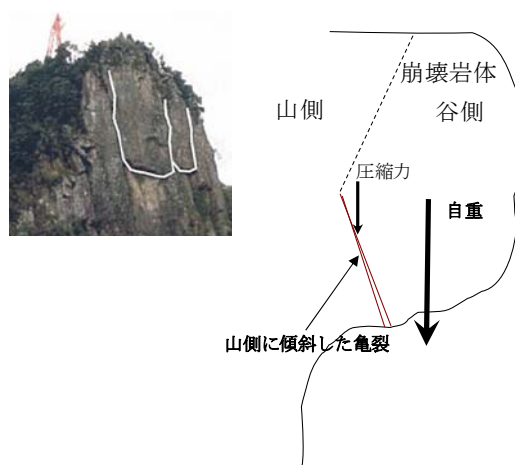


図-1 実験対象イメージ図

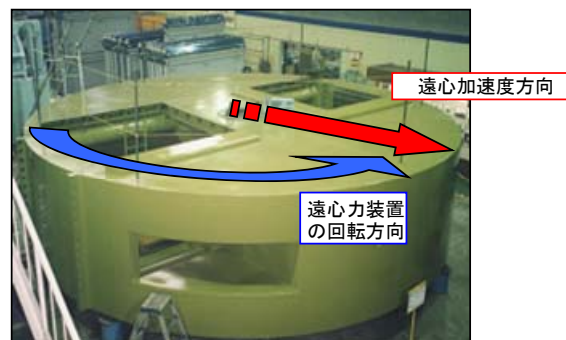


図-2 遠心力装置

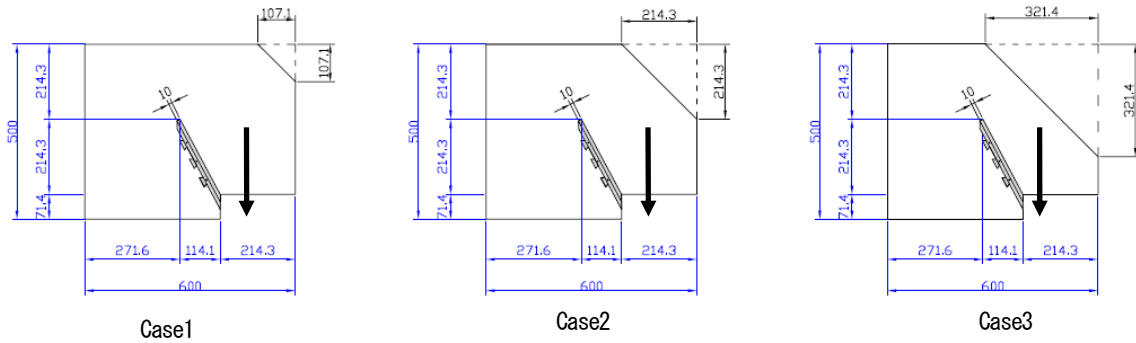


図-3 供試体概要図

び板の片面に発砲スチロールを貼り付けて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。また、遠心力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 $\sigma_t=180\text{kN/m}^2$ とした。崩落岩体形状を図-3 に示すように、供試体のオーバーハング上部岩体の角部が欠けた形状として、角欠け部の大きさをオーバーハング長の 1/2、2/2、3/2 とした。

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、供試体に作用する遠心载荷方向が重力と一致するように設置した (図-2)。

遠心力载荷は、制御パネルおよびモニター画面を確認しながら、遠心加速度を 5G 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。载荷中は、ひずみの増加傾向やクラックの発生状況を常時観察し、最終的には崩落した加速度を計測した。また、実験終了後の供試体状況を観察記録した。

2.1.2 二次元平板要素を用いた FEM 解析について

二次元平板要素を用いた FEM 解析には、(株)フォーラムエイト社製のプログラム(UC-win/WCOMD Ver2.00.02)を使用した。人工岩盤材料を無筋コンクリート要素として、岩盤亀裂部分を模擬した塩ビプレートならびに発砲スチロールを弾性要素として、人工岩盤材料と亀裂材料の境界面にジョイント要素を設けて亀裂面の境界を再現した。その他、材料構成則としては、人工岩盤材料に非線形材料構成則を与え、その他の部分は弾性体としてモデル化した。

また、拘束条件としては、実際の岩盤の状況を考慮した上で、実験時の固定状況と同様に拘束条件を入力した。

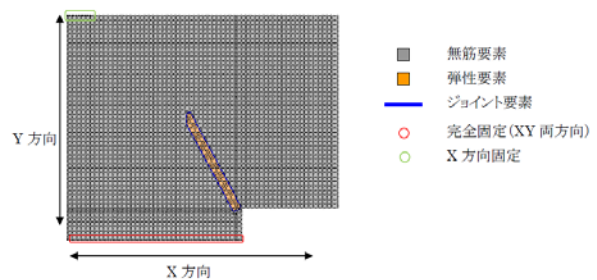


図-4 解析モデル

表-1 無筋要素 (人工岩盤材料) の諸元

	Case1	Case2	Case3
湿潤密度 ρ_t (kN/mm ³)	1.734	1.733	1.793
一軸圧縮強さ q_u (N/mm ²)	1.757	1.553	1.790
静弾性係数 E_s (N/mm ²)	0.827	0.850	0.947
破壊ひずみ E_f (%)	488	281	387
引張強さ σ_t (N/mm ²)	0.299	0.223	0.307

表-2 弾性要素の諸元

	塩ビ板 (亀裂土台)	発砲スチロール
密度 ρ_t (kN/m ³)	11.7	0.114
静弾性係数 E_s (N/mm ²)	2600	2.258
ポアソン比	0.3	0.3

図-4の解析モデルに示すように、上面の左側端部は実験で回転防止の固定をしていることから X 方向の動きを拘束した。底面については、X および Y 方向 (遠心加速度载荷方向) を完全固定した。

各要素の諸元を表-1 表-2 に示す。モデルの模擬岩盤要素は、実験終了後の供試体から採取したコアの各試験結果から得られた物性値を用いた。岩盤亀裂部分の弾性

表-3 岩石試料の試験結果一覧

No.	地質年代	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	古第三紀始新世	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	新第三紀中新世	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	白亜紀	中部蝦夷層群 砂岩	堆積岩	芦別	2.11	2.58	2.53	4.26	2.14	33.7	58.5	6
17	新第三紀中新世	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	新第三紀鮮新世	水冷破砕岩	火砕岩	喜茂別	3.49	2.25	2.17	4.32	2.21	28.8	61.8	7
21	古第三紀始新世	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

要素は、使用した塩ビプレートには一般的な物性値を、発砲スチロールについては材料の圧縮試験を行い、その際のひずみ値・変位より求めた静弾性係数を用いた。

一方、境界条件の設定では、人工岩盤材料（無筋要素）と表面に発砲スチロールを貼り付けた塩ビプレート（弾性要素）の間に挿入し、2つの要素間の開口を表現した。本モデルでは塩ビプレート面の表側（発砲スチロール面側）で亀裂を表現し、裏側では人工岩盤材料との一体化を表現することとしてジョイント要素を設定した。

FEM 解析による崩落加速度の算出方法としては、計算ひずみが模型部材の引張強度と弾性係数から算出したひび割れひずみを越えた分布形状（以下、これをひび割れ分布形状と呼ぶ）が遠心加速度により進展して、供試体を貫通した瞬間を崩落とみなして崩落加速度とした。

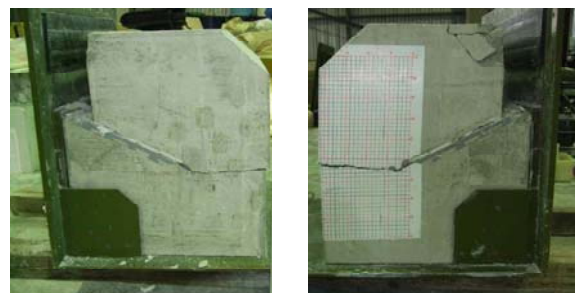
2.2 劣化過程を考慮した岩盤斜面の管理手法の検討

これまでに岩盤の経年劣化を考慮した管理手法を確立することを目的として、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、物性値や初期強度から指数近似曲線を用いて予測する方法を構築した³⁾⁴⁾。しかし近似曲線が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十分に表せていないという問題があった。そこで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予測に利用されるワイブル分布近似曲線を用いて3岩種21種類の試料について解析⁵⁾した。

試料は、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、水冷破砕岩など）の3岩種 21 試料である。表-3 に岩石試料の基本物性を示す。

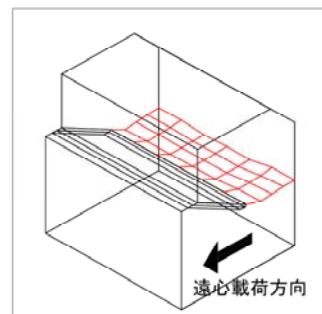
表-4 載荷加速度と崩落加速度

CaseNo.	載荷加速度	崩落加速度
1	5→10→15→20G	19.4G (15→20G 上昇中に崩落)
2	5→10→15→20→25→30G	29.0G (25G→30G 上昇中に崩落)
3	5→10→15→20→25G	21.2G (20→25G 上昇中に崩落)



(a) 左側面の亀裂形状

(b) 右側面の亀裂形状



(c) 亀裂面形状

図-5 実験後の供試体観察結果例 (Case 1)

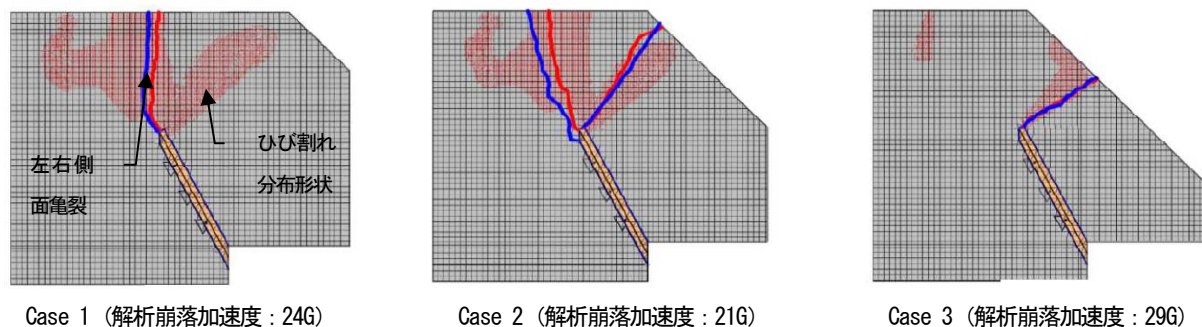


図-6 崩落時の亀裂形状の比較

3. 研究結果

3.1 遠心力模型実験による岩盤崩壊の再現 試験と FEM 解析結果

3.1.1 再現試験結果

表-4 に、遠心力模型実験の载荷加速度と崩落加速度を示す。各実験 Case とも遠心加速度上昇中に崩落し、崩落加速度はおおよそ 20G 前後の値を示した。また、角欠け部の大きさと崩落加速度には、相関がみられなかった。これには、新たに発生した亀裂形状が影響していると考えられる。

図-5 に遠心力模型実験終了後の供試体観察結果の一例として実験 Case 1 の結果を示す。供試体観察では、崩落時に新たに発生した亀裂について左右側面の形状、および亀裂面をトレースした。

3.1.2 FEM 解析結果

FEM の解析結果を図-6 に示す。解析によって得られた破壊時のひび割れ分布形状と遠心力模型実験の破壊で発生した新たな亀裂形状を重ね合わせて比較した。赤線と青線はそれぞれ供試体左右側面の亀裂形状である。いずれも解析上で算出されたひび割れ分布形状に概ね近い形状で亀裂が発生していることから、数値解析により岩盤崩落の形状把握が可能であることを示唆していると考えられる。

また、崩落加速度の実験値と解析値の関係を図-7 に示す。両値には、大きな差異が認められた。解析では、亀裂材料である発泡スチロールの物性値のうち、静弾性係数が 2.258 (N/mm²) と非常に小さい値であり、ソフト上の弾性要素の入力範囲 (10 N/mm² 以上) が制限されていることから、強制的にメッシュ生成データに実測値を静弾性係数として入力した。そのために解析上の誤差が大きくなった可能性が考えられる。

3.2 劣化過程を考慮した岩盤斜面の管理手法の検討

3.2.1 ワイブル分布近似曲線による解析結果

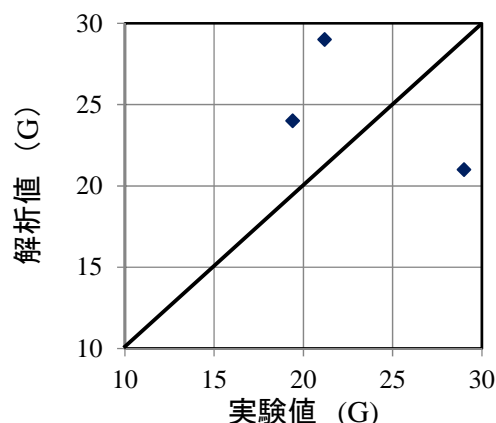


図-7 崩落加速度の実験値と解析値

これまでの報告³⁾⁴⁾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。

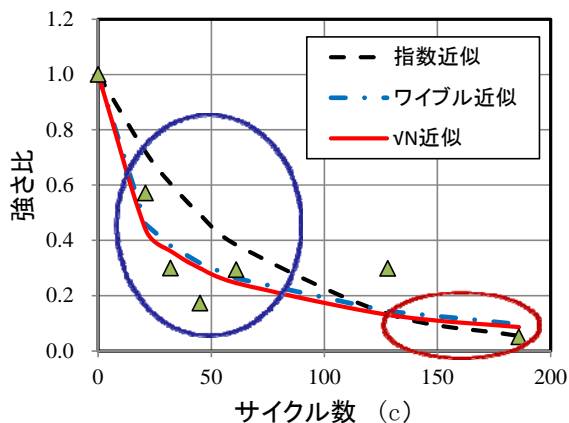
$$S(N) = \exp(-k_1 \cdot N) \quad (1)$$

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 ($=qu_c/qu_0$))

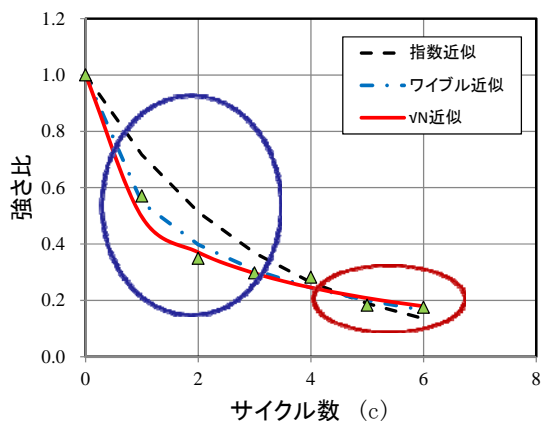
N : サイクル数 (c)

k_1 : 回帰定数

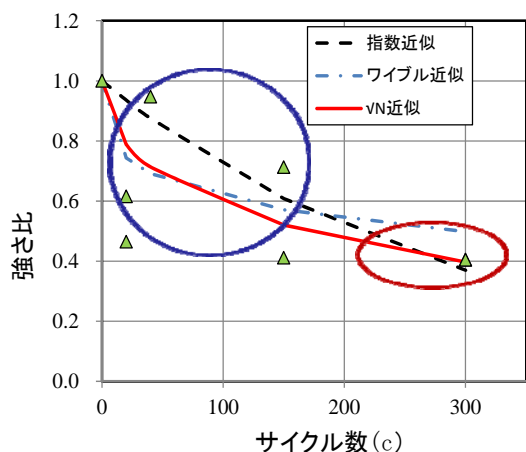
また、本報告で用いたワイブル分布近似曲線 (以下、ワイブル近似) を以下に示す。ワイブル近似は、中村⁹⁾ が岩石の強度劣化の解析で用いているが、土木工学の分野では基礎杭の载荷試験結果に利用⁷⁾されるなど、近似



(a) No.1 春探層砂岩 1



(b) No.13 館層細粒砂岩



(c) No.20 水冷破碎岩

図-8 試験結果と回帰式の関係例

曲線としての有効性が示されている。

ワイブル分布近似曲線は、上式のサイクル数 $N(c)$ 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

代表的な分析結果として、表-3 に示した試料 No. 1、No.13、No.20 について、指数近似の適用例を図-8 に黒色破線で示す。おおよその関係では最終サイクル数付近の赤丸範囲の傾向に相関がみられるが、初期サイクル数付近は図中の青丸範囲で示すように急激な強度低下を表せていない。

次にワイブル近似曲線の回帰計算結果を指数近似と同様に図-8 に青色一点鎖線で示す。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-5 に各岩石の回帰定数 k_1, k_2 、および m を示した。

ただし、ワイブル近似では、後に示す強度劣化の予測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予測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。

まず、定数 m が負の値になっているものは実現現象の傾向と異なることから除いて、定数の平均値を求めた。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。

$$S(N) = \exp(-k_3 \sqrt{N}) \quad (3)$$

ここに、 k_3 : 回帰定数

表-5 に各岩石の定数 k_3 を示す。さらに、図-8 にこの近似曲線を図中の赤色実線で示すと、測定値と \sqrt{N} 近似にはよい相関が認められる。これらの近似曲線の間をみると、指数近似と \sqrt{N} 近似の近似曲線が交差するサイクル数 (以下、交差サイクル数) の前半部では \sqrt{N} 近似と実験値に相関がみられ、後半部では指数近似が小さい値を示した。予測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適当である。したがって、交差サイクル数の前半部を \sqrt{N} 近似劣化、後半部を

表5 岩石の各回帰計算より求めた回帰定数 k, m 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	水冷破碎岩	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 が赤字で示した負の値の試料を除いた平均値

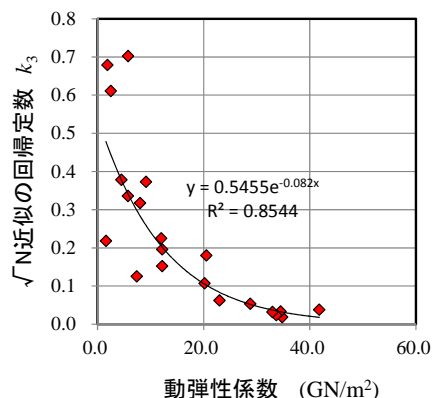


図-9 動弾性係数と \sqrt{N} 近似の回帰定数

指数近似劣化とすることが、予測法として適当であると考えられる。

近似曲線の交差サイクル数は、式(1)と式(4)が等しい場合のサイクル数 $N_a(c)$ となる。以下に関係式を示す。

$$N_a = \left(\frac{k_3}{k_1} \right)^2 \quad (4)$$

ここに、 N_a ：交差サイクル数 (c)

k_1, k_3 ：指数近似(1)式および \sqrt{N} 近似(3)式の回帰定数

知数の残値も求められる。そこで、これらの値と物性値の関係性を調査した。その結果、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から求められる動弾性係数 E_d と k_3 の関係の回帰式が最も大きい決定係数を示した (図-9)。また、回帰定数 k_1 と交差サイクル数 N_a についても、同様に動弾性係数との相関が最も良好であった。

よって、これらの相関から k_3, k_1, N_a と動弾性係数との関係は、以下の関係式で示される。これらの関係式を用いることで、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。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のかを予測することも可能になる。

$$k_3 = 0.55 \exp(-0.082 \cdot E_d) \quad (5)$$

$$k_1 = 0.19 \exp(-0.14 \cdot E_d) \quad (6)$$

$$N_a = 8.7 \exp(0.11 \cdot E_d) \quad (7)$$

ここに、 E_d ：動弾性係数 (GN/m²)

3. 2. 2 回帰定数と物性値の関係

式(4)より N_a, k_1, k_3 いずれか2値が求められると、未

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) 解析によって得られた崩落時のひび割れ分布形状と遠心力模型実験の崩落時に発生した新たな亀裂形状を比較した結果、類似した形状が認められたことから、数値解析により岩盤崩落の形状把握が可能であることが示唆された。ただし、崩落加速度の実験値と解析値の関係には、大きな差異が認められた。
- 2) 凍結融解による強度劣化の傾向についてワイブル近似曲線を用いて解析した結果、交差サイクル数の前半部では \sqrt{N} 近似と実験値がよい相関を示した。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、指数近似の方が小さくなる、換言すると劣化の進行が早くなる傾向を示した。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予測する方法として、近似曲線式の回帰定数と岩石の物性値である動弾性係数との関係式を示した。
- 3) 今後の課題として、本報告では岩石の強度劣化を凍結融解サイクル数との関係で示したが、これを実斜面の維持管理などに用いるためには、時間軸に置き換える必要がある。現在実斜面において年間の凍結融解サイクル数を計測中であるので、本報告と現場計測の結果を組み合わせ、経時的な岩盤斜面の劣化過程を考慮した維持管理手法を提案する予定である。

参考文献

- 1) 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壊の遠心力模型実験, 土木学会, 第67回年次学術講演会, pp.673-674, 2012.
- 2) 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, pp.237-238, 2013.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 日下部祐基, 伊東佳彦: 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, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.71, No.1, pp.47~54, 2015.
- 6) 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.
- 7) 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.

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 : KURAHASHI Toshiyuki

KUSAKABE Yuki

YAJIMA Yoshinori

SHISHIDO Masahito

Abstract : This paper describes results of centrifugal model tests and FEM analysis of the crack formation pattern of rock slope, and proposal of estimation method of rock deterioration tendency by freezing and thawing test in FY2014. As a result, rock crack distributions obtained by centrifugal model test was able to be almost reproduced by FEM analysis. We also proposed the forecast method of the strength deterioration that combined \sqrt{N} approximation with the exponential approximation.

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