

凍結融解による劣化を考慮した岩盤斜面の安定性評価に関する考察

日下部 祐基^{1*}・倉橋 稔幸¹

¹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

北海道のような積雪寒冷地の岩盤斜面では、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斜面崩壊に至る場合がある。本論では、これまでの成果を整理して凍結融解による劣化を考慮した岩盤斜面の安定性能曲線を考案し、崩壊履歴を有する斜面において考案した安定性能曲線の適合性を検討した。その結果、安定性能曲線から求めた安全率 $F_s \leq 1$ になる年数と、対象斜面が完成後に発生した崩落年数とに8年の差異が生じた。その原因として含水条件の違いにより対象岩盤斜面が凍結融解試験ほど急激な劣化が生じていなかったことや、実際の岩盤の凍結温度および凍結融解サイクル数が、地域によって大きく異なる可能性があることなどが考察された。

Key Words : rock slope, freezing and thawing, strength deterioration, stability performance curve

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地の岩盤斜面では、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斜面崩壊に至る場合がある。筆者らは、これまでに凍結融解による岩石の強度劣化が凍結融解サイクル数の平方根と相関があることや、回帰計算で求められる定数が岩石の動弾性係数と相関が高いことなどを示した¹⁾。また、岩石の凍結融解の凍結最低温度と岩石劣化の関係性を調査して、凍結最低温度が相対的に高いほど劣化速度が遅くなることを示した²⁾。

本論では、これらの成果を整理して凍結融解による劣化を考慮した岩盤斜面の安定性能曲線³⁾を考案し、崩壊履歴を有する斜面において考案した安定性能曲線の適合性を検討したので報告する。

2. 対象岩盤斜面と地質調査概要

(1) 対象岩盤斜面

調査対象とした岩盤斜面は、北海道の日本海に面した積丹半島西側の海岸線に位置し、古宇郡神恵内村大字珊内地内の一般国道 229 号沿いの道路切土斜面である。図-1 に調査位置を示す。調査地周辺の地形は、積丹半島西側一帯に広がる山岳地帯となっている。海岸線沿いは、

ほとんどが急崖をなし、海食崖などの海岸浸食地形が明瞭である。また、調査地周辺は川白地すべりと呼ばれる大規模な地すべり地形の末端部に位置し、特に海岸線に沿う急峻な斜面には大小様々な地すべり地形や崩壊地形が認められる。

調査地周辺の地質は、新第三紀中新世の尾根内層が広く分布しており、川白地すべり地内であるため地すべり堆積物とみられる角礫・亜角礫が上部を占めている。尾根内層は、下部の硬質頁岩凝灰岩互層、中部の変質安山岩類、上部の火砕岩層からなり、下部の硬質頁岩凝灰岩



図-1 調査位置図

互層は板状節理のよく発達した硬質頁岩と軽石凝灰岩・スコリア凝灰岩の互層で所々にパーライト質流紋岩溶岩を挟在するとされている⁴⁾。

調査対象とした岩盤斜面には、海底火砕流によって堆積したパーライト質小岩片を含む軽石凝灰岩が分布している。斜面上方の緩傾斜面には、地すべりによる角礫～亜角礫が散在しており、火砕岩層の火山角礫岩が広く分布している。

対象斜面の履歴は、道路建設が平成 6,7 年に施工され完成して、比較的大きな崩落が平成 18 年から平成 26 年の間で発生していることが、現地の撮影写真の比較から判明している。ここでは、崩落発生を撮影写真の中間年と考えて平成 22 年、道路建設完成年度を平成 7 年として、道路完成後 15 年で斜面崩落が岩石劣化により発生したと推定した。

(2) 地質調査概要

調査は、対象岩盤斜面の現状および道路建設完了時の地質断面を作成するために、機械ボーリング、ハンドオーガーボーリング、簡易動的コーン貫入試験、および岩盤の地盤定数を求めるための室内岩石試験を実施した。表-1に室内岩石試験結果を示す。対象岩石には、強度にバラツキがみられるが、代表値として平均値を用いる。

3. 対象岩盤斜面の安定性能曲線

(1) 道路建設完了時（当初）の岩盤斜面安全率

道路建設完了時の対象岩盤斜面の形状は、既存資料を調査したが不明である。そこで、地質調査結果から現状の地質断面図を求めた（図-2）。断面図には、過去の現場写真から推定した崩落岩体を記載した。この断面図をもとに、解析に用いる断面として、崩壊前の地形を復元した。また調査においては、定常的な地下水が確認されていないことから、切土当初の安全率を推定する解析

においては、地下水は存在しないと考えた。さらに対象岩盤斜面は、劣化が進みやすい軟岩に相当し、道路斜面として切土を行う場合の勾配は1:1.0~1:1.2に相当すると考え、切土勾配1:1.2の断面でも解析を行った。

すべり面の形状は、崩壊箇所の断面においては、今回の崩壊面を再現したもの、切土勾配 1:1.2 の断面については、法頭から法尻に抜ける形状について解析した。これらの解析断面を図-3、4に示す。

表-1 岩石試験結果

供試体番号			No.1	No.2	平均値
深度(m)			9.30~9.45m	13.80~13.95m	
密度試験	湿潤密度	ρ_t g/cm ³	1.797	1.677	1.74
	乾燥密度	ρ_d g/cm ³	1.359	1.156	1.26
	飽和密度	ρ_{sat} g/cm ³	1.797	1.677	1.74
吸水及び有効間隙試験	吸水率	a_b %	32.25	45.03	38.64
	有効間隙率	n_e %	43.91	52.16	48.04
	含水比	w %	32.25	45.03	38.64
超音波伝播速度測定	P波速度	V_p km/s	1.44	1.84	1.64
	S波速度	V_s km/s	0.34	0.33	0.34
	単位堆積重量	ρ_n g/cm ³	1.774	1.752	1.76
	動弾性係数	E_d MN/m ²	6.03E+02	5.67E+02	5.85E+02
	動ポアソン比	ν_d	0.470	0.483	0.48
圧縮強度試験	圧縮強度	σ_c MN/m ²	2.66	0.219	1.44
	変形係数	E_t MN/m ²	2.29E+02	9.18E+00	1.19E+02

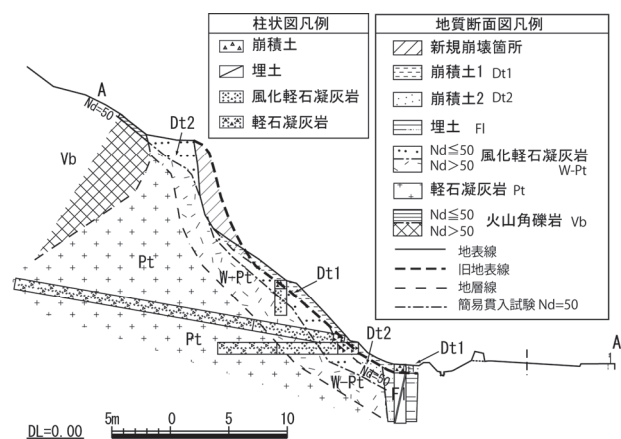


図-2 地質断面図

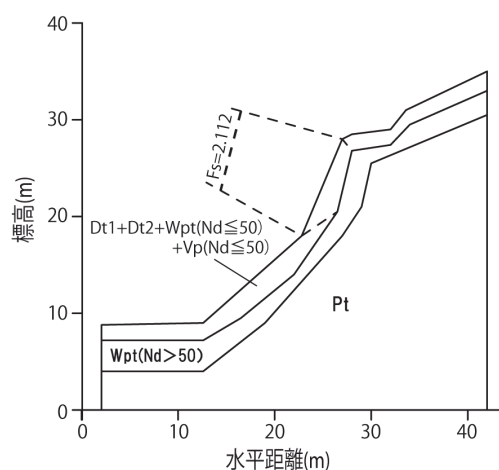


図-3 復元した断面図

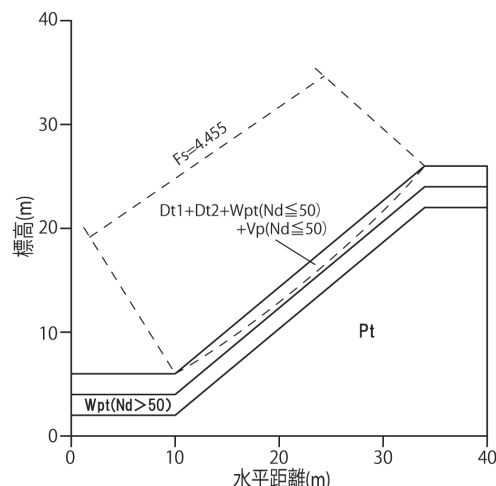


図-4 切土勾配 1:1.2 の断面図

地盤定数の設定は、既往文献^{5),6)}に基づきボーリング調査および室内岩石試験の結果から図-5に示す地盤定数を算出した。調査の結果、斜面を構成する軽石凝灰岩の新鮮部では、 $RQD > 50\%$ 、一軸圧縮強度 $q_u=1.440\text{MN/m}^2$ の結果が得られている。このことから、軽石凝灰岩の新鮮部は、図-5のIVまたはIV'に相当する。さらに、岩石供試体は、自立するボーリングコア試料であったことから粘着力を有すると考え、IV'に相当とするとし、土質定数を粘着力 $C=30\text{ (kN/m}^2)$ 、内部摩擦角 $\phi=35$ 度、単位体積重量 $\gamma_t=17.0\text{ (kN/m}^3)$ （室内試験結果から）に設定した。

安定解析は、修正 Fellenius 法により実施した。安定解析の結果、崩壊箇所断面では安全率 $F_s=2.11$ 、切土勾配断面では $F_s=4.56$ が得られた。岩盤としては比較的強度が低いことを反映して安全率は $F_s=2\sim 5$ 程度と算出された。道路完成時の岩盤斜面は、十分安全と予想されたことを考えて、大きい値を示す切土勾配の安全率 $F_s=4.56$ を当初安全率とした。

(2) 安定性能曲線

安定性能曲線は以下の手順により作成した。

a) 室内凍結融解試験による凍結融解サイクルと強さ比の関係による実験回帰式

安定性能曲線は、前半部（初期サイクル付近）を $\sqrt{N}$ 指数近似曲線、後半部（交点以降）を指数近似曲線で構成⁷⁾される。

（指数近似式）

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

ここに、 $S(N)$ ：強さ比（サイクル数 N (c)後の一軸圧縮強さ q_u と初期一軸圧縮強さ q_{u0} との比（ $=q_u/q_{u0}$ ）

N ：サイクル数 (c)

k_1 ：回帰定数

（ $\sqrt{N}$ 近似式）

$$S(N) = \exp(-k_3 \sqrt{N}) \quad (2)$$

ここに、 k_3 ：回帰定数

上式の回帰定数 k_1, k_3 を動弾性係数を用いて下記の式より求める。

$$k_3 = 0.55 \exp(-0.082 \cdot E_d) \quad (3)$$

$$k_1 = 0.19 \exp(-0.14 \cdot E_d) \quad (4)$$

ここに、 E_d ：動弾性係数 (GN/m²)

強度区分名	強度定数	
	c (kN/m ²)	ϕ°
I	2,000	50
II	1,500	45
III	1,000	40
IV	500	40
V	100	37
VI	0	35
VII	0	30
VI'	30	35
VII'	15	30

A法（各物理試験、一軸圧縮試験、RQD、肉眼観察、その他強度試験を実施した場合）

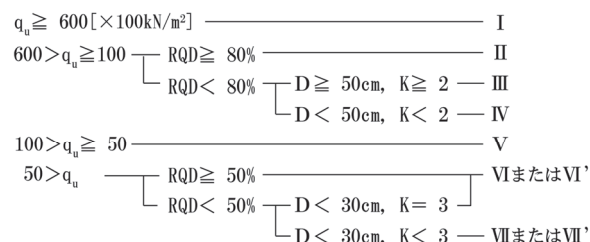


図-5 地盤定数算定法

現場試料の動弾性係数は $E_d=585\text{MN/m}^2=0.585\text{GN/m}^2$ なので、 $k_3=0.52$ 、 $k_1=0.18$ が求められる。

式(1)、(2)に代入すると凍結融解サイクル数と強さ比の関係が得られ、この曲線式が $\sqrt{N}$ 指数近似曲線と指数近似曲線となる。

b) 凍結最低温度の補正曲線の推定

次に凍結最低温度を補正した曲線²⁾を求める。これまでの実験では、最低温度が高いほど強さ比の減少傾向が小さく、劣化速度が遅いことがわかっている⁷⁾。この補正を行うために以下の式を用いる。なお、式は指数近似曲線の回帰定数 k_1 と凍結融解の凍結最低温度比の関係から求められたものであるが、ここでは便宜的に $\sqrt{N}$ 指数近似曲線の回帰定数 k_3 にも適用する。

$$y = 0.50 \times \ln(x) + 1.01 \quad (5)$$

ここに、 y ： k_3, k_1 それぞれの任意温度の値と -18°C の値の比

x ：温度比（ここでは -3°C と仮定して、 $-3^\circ/-18^\circ=0.17$ ）

上記から $y=0.13$ となり、以下のとおり求められる。

$$\text{補正 } k_3 = 0.52 \times 0.13 = 0.068$$

$$\text{補正 } k_1 = 0.18 \times 0.13 = 0.023$$

c) 安定性能曲線の推定

年間の凍結融解サイクル数を北海道東部で測定された過去の実績から年9回^{8),9)}と仮定し、各解析断面における安定性能曲線を作成した。図-6に最低凍結温度 -18° （温度補正前）および最低温度 -3° （温度補正後）の安

定性能曲線を示す。温度補正前では1年程度、温度補正後では7年程度で安全率 $F_s \leq 1$ になると計算された。前述したように対象岩盤斜面では、道路完成後15年に斜面崩落が発生したと推定されたことから、温度補正後の年数と比較しても8年の差異がある。

4. 考察

今回の解析では、凍結最低温度を -3°C に補正し年9回の凍結融解サイクル数を仮定して求めた安全率 $F_s \leq 1$ になる年数と、対象斜面が完成後に発生した崩落年数とに8年の差異が生じた。この原因としては、解析の計算条件と対象斜面の自然条件に、以下のような不確定要因が含まれるものと考えられる。

対象岩盤斜面を形成する軽石凝灰岩は多孔質であるが、ボーリング調査結果では岩体境界部付近以外に湧水などが認められず、完全な飽和湿潤状態にないことが推測された。凍結融解試験は10cm程度に成形した供試体を浸水させた状態で行われるが、自然斜面における表層からの浸水深度はさほど深くなく、含水条件の違いにより凍結融解試験ほど急激な劣化が生じていない可能性が考えられる。

また、凍結融解サイクル数は、北海道東部の計測データであり、気象条件が異なる地域のものである。図-7に気象庁が公開している、対象岩盤斜面に近い神恵内観測所と解析に用いた道東地域にある釧路観測所の日最高・最低気温の平年値(1981年～2010年の平年値)を示す(<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> : 国土交通省気象庁HP)。

対象岩盤斜面に近い神恵内観測所では、冬期の平均日最低気温が -6°C 程度で真冬日前後の、 0°C 以下になる日数は89日である。それに対し、道東地域の釧路観測所の同値は -12°C 程度で110日となっている。この両観測所はともに海洋近傍に位置し内陸に比べ気温の変化は緩慢と推察されるが、日本海側に位置する対象岩盤斜面は積雪量も多く冬期の大半は雪に覆われた状態にある。従って、実際の岩盤の凍結温度および凍結融解サイクル数は、地域によって大きく異なる可能性が考えられる。

崩壊発生年数を対象岩盤斜面で推定した15年程度として、 -3° の補正曲線を用いて安全率 $F_s \leq 1$ となる年間の凍結融解サイクル数を逆算すると、4.5回/年が得られた。図-6には、逆算して求めた安定性能曲線を示した。年間の凍結融解サイクル数を地域毎に求めて安定性能曲線を作成することにより、対象岩盤斜面の安全率 $F_s \leq 1$ になる年数を精度よく推定できることが推察される。

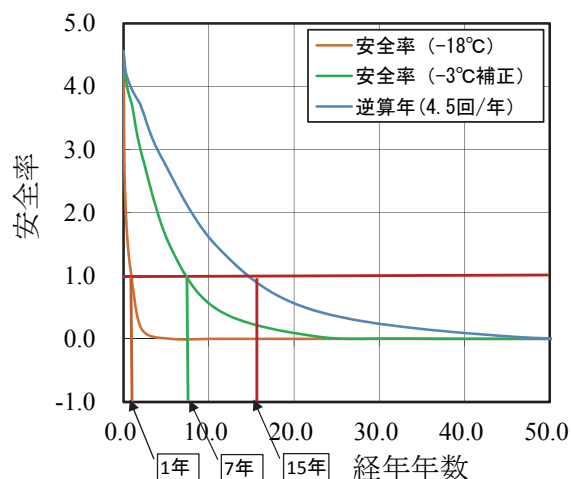


図-6 安定性能曲線

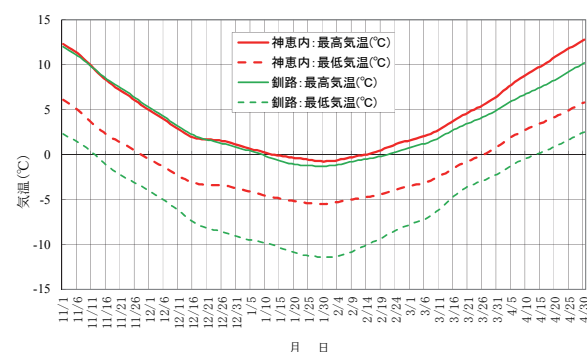


図-7 各観測所の日最高・最低気温(平年値)

5. まとめ

- 1) 今回の解析では、凍結最低温度を -3°C に補正し年9回の凍結融解サイクル数を仮定して求めた安全率 $F_s \leq 1$ になる年数と、対象斜面が完成後に発生した崩落年数とに8年の差異が生じた。
- 2) 差異が生じた原因には、含水条件の違いにより凍結融解試験ほど急激な劣化が生じていない可能性や、実際の岩盤の凍結温度および凍結融解サイクル数が、地域によって大きく異なる可能性があることなどが考えられた。
- 3) 年間の凍結融解サイクル数を地域毎に求めて安定性能曲線を作成することにより、対象岩盤斜面の安全率 $F_s \leq 1$ になる年数を精度よく推定できることが推察された。

6. あとがき

道央から道南にかけて分布するいわゆるグリーンタフ地域には、今回対象とした岩盤斜面と同様の成因を持つ軽石凝灰岩がしばしば分布しており、切土法面・自然斜面の崩壊が生じている箇所もみられる。従って、このような斜面に対しては、実際の斜面性状、冬期岩盤温度の継続観測等を積み重ね、凍結最低温度・凍結融解サイクル数などの条件を明確化し、精度の高い検証を行うことが必要であると考えます。

謝辞：本論をまとめるに当たり資料提供していただいた、国土交通省北海道開発局小樽開発建設部岩内道路事務所の関係各位には、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 日下部祐基，倉橋稔幸，伊東佳彦：凍結融解試験の凍結最低温度と岩盤劣化に関する一考察，第 59 回地盤工学会シンポジウム，pp.623～626，2015.
- 3) 沖村孝：自然斜面崩壊予測技術の従来課題と背景，地盤工学会誌，Vol.60，no.3，pp1～5，2012.
- 4) 5 万分の 1 地質図副：余別および積丹岬，北海道立地下資源調査所，PP5-9，1979.
- 5) 坂野俊一，西川純一，日下部祐基：岩盤の強度定数 c ， ϕ の評価手法に関する研究，第 39 回北海道開発局技術研究発表概要集(1)，pp97～104，1995.
- 6) 日下部祐基，西川純一，坂野俊一：岩盤強度定数推定法の提案と現場調査結果，第 31 回地盤工学研究発表講演集，pp1469～1470，1996.
- 7) 福田正巳，播磨屋敏生，原田鉦一郎：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.
- 8) 日下部祐基，伊東佳彦：岩石の凍結融解による強度劣化の室内試験と現地観測結果の比較，第 47 回地盤工学会研究発表会平成 24 年度発表講演集，地盤工学会，pp.865-866，2012.
- 9) 日下部祐基，伊東佳彦，井上豊基：岩切法面の長期維持管理手法に関する研究，第 30 回日本道路会議論文集 pp.187-188，2013.

CONSIDERATION CONCERNING STABILITY EVALUATION OF ROCK SLOPE DETERIORATED BY FREEZING AND THAWING

Yuki KUSAKABE, Toshiyuki KURAHASHI

In the rock slope in the snowy cold region, the strength deterioration by the repetition of the freezing and thawing becomes a factor, and the slope failure might occur. In this report, a past result was arranged, the stability performance curve of a rock slope deteriorated by the freezing and thawing was designed, and adaptability was examined on the slope with the experience of collapsing. As a result, there was a difference for eight years at the sudden fall years generated after the stability performance curve and the object slope were completed. It was thought not to have caused deterioration rapid like the freezing and thawing test because the included water condition was different as the cause.