

遠心力模型実験を用いた岩盤斜面の 安全率評価法の適用事例

土木研究所寒地土木研究所 ○日下部祐基
同 上 石川 博之
豊橋技術科学大学 三浦 均也

これまでの研究成果をもとに提案した岩盤崩落の遠心力模型実験による安全率評価法を、岩盤斜面に適用して評価法を検証した。岩盤斜面の3次元模型を作成し、その岩盤模型を用いて一連の遠心力模型実験を行って、岩盤の形状と亀裂に関する幾つかのパラメータによる岩盤安全率の変化特性を検討した結果、本評価法の有効性を示すことができた。

キーワード：岩盤斜面、安全率、崩落、遠心力模型実験

1. はじめに

自然災害の1つである道路や鉄道などに近接する岩盤斜面の崩壊は、我が国の地形・地質特性から発生のおそれのある箇所が広域に存在する。しかしながら、詳細な調査・計測事例が少なく、岩盤崩壊に関するメカニズムの解明や予測技術については、十分に進展していないのが実情である。積雪寒冷地である北海道では、大規模な岩盤崩落として1996年に一般国道229号豊浜トンネル¹⁾、1997年に同第2白糸トンネルの各崩落事故²⁾、さらに2001年に一般国道333号北見市北陽³⁾、2004年には一般国道336号えりも町⁴⁾で各道路斜面の崩落事故が発生している。これらの崩落事故を受けて、北海道開発局をはじめ多くの機関で調査研究が実施されている。

筆者らは、大規模岩盤崩落のメカニズムを明らかにするために、一連の遠心力模型実験を実施してきた。これまでに、矩形岩体や地形デジタルデータを用いて作成

した岩盤斜面模型に自重（遠心加速度）を作用させて破壊に至らせる実験⁵⁾⁶⁾を行った。観察した崩落現象を有限要素法および極限つりあい法によって解析した。前回の報告⁷⁾では、これまでの研究成果をもとに遠心力模型実験を用いた岩盤斜面の安全率評価法を提案した。ここでは、岩盤斜面に安全率評価法を適用する機会を得たので、その結果を報告する。

2. 対象斜面と実験条件

対象とした岩盤斜面（以下、実岩盤斜面）は、道南の海岸沿いに位置する岩盤斜面である。写真-1に実岩盤斜面を示す。実岩盤斜面を含むこの地区には、ほぼ直交する明瞭な沢状地形（開口亀裂）が認められ、地表踏査及びクライミング調査によって、この沢状地形部に変質粘土化した凝灰角礫岩の存在が確認された。この地区を



写真-1 実岩盤斜面



写真-2 実岩盤模型



写真-3 模型型枠

表-1 遠心力模型実験条件

実験No.	模型縮尺 $1/n$	切欠き高さ H		浸食深さ Z		実岩盤斜面 引張強さ σ_s (MN/m^2)	実岩盤斜面 単位体積重量 γ_s (kN/m^3)
		実岩盤 (m)	実岩盤 (m)	実岩盤 (m)	実岩盤 (m)		
		模型 (mm)	模型 (mm)	模型 (mm)	模型 (mm)		
1	60	10.80	0	0	0	2.13	25.0
		180	0				
2	60	7.80	0	0	0	2.13	25.0
		130	0				
3	60	4.80	0	0	0	2.13	25.0
		80	0				
4	60	7.80	2.00	33	33	2.13	25.0
		130	33				
5	60	7.80	4.00	67	67	2.13	25.0
		130	67				

構成する地質は、新第三紀中新世の火砕岩（水冷破碎岩）である。現地露頭観察の結果、火砕岩は数十 cm～1m 大の安山岩礫を含む凝灰角礫岩と自破碎溶岩（安山岩）からなり、相対的に軟質な凝灰角礫岩主体相が実岩盤斜面の低標高部に出現している。

過去に実施された地質調査で得られた実岩盤斜面の岩石試験結果では、一軸圧縮強さおよび密度ともばらつき大きい結果となったが、密度が高い供試体は圧縮強さが高く、密度の低い供試体では圧縮強さも低い傾向が認められた。実岩盤斜面の引張強さとしては、過去に実施された地質調査の岩石試験結果から、安全側の値として引張強さの小さい凝灰角礫岩と自破碎質安山岩の平均値 2.13MN/m^2 を、単位体積重量は 25.0kN/m^3 を採用した。

実験では、遠心力載荷装置に設置可能な供試体形状として一辺が 0.6m の立方体を目安とし、実岩盤斜面を模擬した縮尺 1/60 の岩盤模型（以下、実岩盤模型）を 3次元地形測量で得たデジタル地形データを用いて作成した。写真-2 は、検討用に作成した発泡スチロールの実岩盤模型を示したものである。写真-3 は、模型に繊維強化プラスチック（FRP）を貼付して作成した模型型枠である。実験に用いる実岩盤模型を構成する材料モルタルの配合は、遠心力載荷装置の最大加速度 100g 以内に岩盤崩落が再現できる引張強さを設定して、別途実施した室内配合試験により決定した。

実験ケースは、表-1に示すように模型縮尺1/60として切欠き高さ H および浸食深さ Z を変化させて5ケース実施した。図-1に代表実験ケースとして、実験No.5の上面、正面、側面の模型による想定岩盤斜面図を示す。ここで切欠き高さ H とは、岩盤斜面の背面に想定した既存亀裂の位置を示すもので、図-1に示す岩盤斜面底部に設定した基準面から切欠き先端の高さを表している。浸食深さ Z とは、同様に図-1に示す浸食位置から下部の岩体を表面から任意の厚さ削り取った深さを示している。

切欠き高さ H と岩盤安全率の関係では、切欠き高さ H が小さくなるほど新たに発生する亀裂の進展長さが短くなる

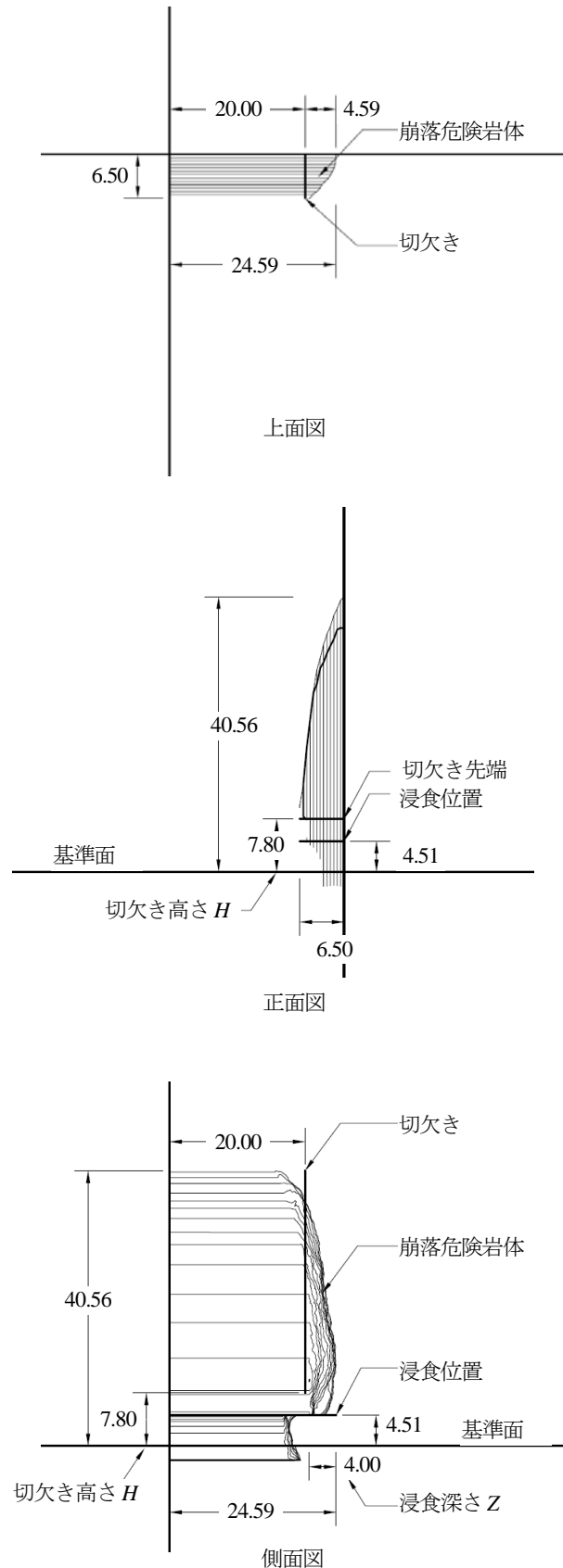


図-1 模型による想定斜面図例（実験 No.5）

単位：m

ため、岩盤安全率が低下することが推測される。浸食深さと岩盤安全率の関係では、浸食深さが大きいほど新たに発生する亀裂の進展方向が岩盤表面より深い方向に進展して崩落岩体の体積が増加するため、岩盤安全率が小さくなることが推測される。

3. 岩盤斜面の実験パラメータと安全率

表-2 に実験結果を示す。本遠心力模型実験では、前述したように各実岩盤模型の引張強さを 100g 以内の遠心加速度で岩盤崩落が再現できる引張強さに設定したため、実岩盤斜面の引張強さと異なっている。そこで供試体の実測引張強さ σ_t と実岩盤斜面の引張強さ σ_s ($=2.13\text{MN/m}^2$) の比を α ($=\sigma_t/\sigma_s$)、また単位体積重量についても各供試体の単位体積重量 γ_t (湿潤密度: ρ_t (t/m^3) $\times 9.81$) と実岩盤斜面の単位体積重量 γ_s ($=25.0\text{kN/m}^3$) の比を β ($=\gamma_t/\gamma_s$) として実岩盤斜面の岩盤安全率を求める式を導く。

式の条件としては、模型の破壊加速度 $n_f g$ に注目して、 $1/n$ 模型斜面が $n_f g$ の遠心加速度で破壊したときの模型斜面の岩盤安全率 F_{ms} が 1.0 になることを用いる。これを破壊時に発生する亀裂が鉛直方向に進展すると仮定して式に示すと、以下ようになる。

$$F_{ms} = 1.0 = \frac{\sigma_t (B/n - L/n)^2}{3(n_f \gamma_t) B/n (h/n)^2}$$

$$= \frac{\alpha \sigma_s (B/n - L/n)^2}{3(n_f \beta \gamma_s) B/n (h/n)^2} = \frac{\alpha \cdot n}{\beta \cdot n_f} F_{ps} \quad (1)$$

ここに、 F_{ms} : 岩盤模型が破壊加速度 $n_f g$ において引張強さ σ_t (MN/m^2) で単位体積重量 γ_t (kN/m^3) の場合の岩盤安全率

F_{ps} : 岩盤斜面が引張強さ σ_s (MN/m^2) で単位体積重量 γ_s (kN/m^3) の場合の岩盤安全率

B : 崩落危険岩体の高さ (m)

L : 既存切欠きの深さ (m)

h : 崩落危険岩体の幅 (m)

n : 模型縮尺 ($1/n$)

n_f : 破壊加速度 (g)

上式より岩盤斜面の岩盤安全率 F_{ps} が以下のように求められる。

$$F_{ps} = \frac{\beta \cdot n_f}{\alpha \cdot n} \quad (2)$$

実験結果は、上式により岩盤安全率を求めて各種パラメータとの関係を検討した。なお、実験 No.1 は、予想に反して 100g 以内の遠心加速度で実岩盤模型が破壊しなかったため、破壊加速度を 100g とし岩盤安全率を Yuki KUSAKABE, Hiroyuki ISHIKAWA, Kin-ya MIURA

表-2 遠心力模型実験結果

実験No.	崩落加速度 実測値 n_f (g)	実験後抜き取り試料				
		湿潤密度 ρ_t (t/m^3)	一軸圧縮強さ σ_c (MN/m^2)	破壊ひずみ ε_f (%)	静弾性係数 E_{50S} (GN/m^2)	引張強さ σ_t (MN/m^2)
1	100以上	1.81	3.19	0.15	4.61	0.35
2	100	1.86	1.96	0.15	1.70	0.42
3	69	1.86	3.20	0.09	7.00	0.52
4	37	1.84	3.28	0.15	3.92	0.45
5	75	2.22	18.10	0.20	14.40	1.64

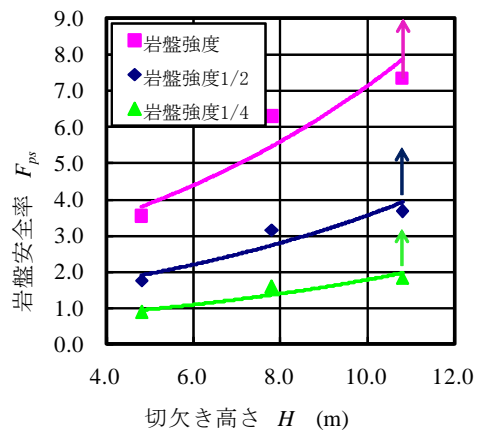


図-2 切欠き高さ H と岩盤安全率 F_{ps} (浸食深さ $Z=0.0\text{m}$)

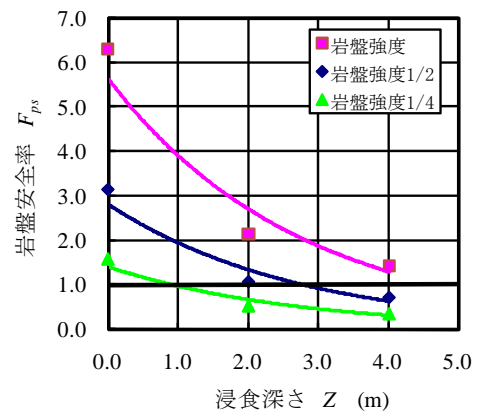


図-3 浸食深さ Z と岩盤安全率 F_{ps} (切欠き高さ $H=7.80\text{m}$)

求めた。したがって、実際の岩盤安全率は求められた値以上を示すことになる。

図-2 に切欠き高さ と岩盤安全率、図-3 に浸食深さと岩盤安全率の関係をそれぞれ示す。切欠き高さが小さいほど、また浸食深さが大きいほど、岩盤安全率は小さくなる傾向がみられ、実験条件で推測された傾向と一致する。

さらに両図を見ると、実験に用いた実岩盤斜面の引張

強さ (2.13MN/m²) と単位体積重量 (25.0kN/m³) では、実験パラメータで最も危険な状態にある切欠き高さ $H=4.80\text{m}$ および浸食深さ $Z=4.00\text{m}$ においても、岩盤安全率 $F_{ps}=1.0$ 以上を示しており、この条件では実岩盤斜面は安全と評価される。現場からの報告では、実岩盤斜面の頂部周辺において亀裂の変位を計測中であるが、現状では異常な変化がみられていないということであった。このことは実験結果と調和的であるといえる。

しかし、実岩盤斜面を含めて自然岩盤斜面は、地質不連続面などの強度の小さい弱面が存在発達することや、経年的な岩盤の風化により劣化することが予想される。現状の調査技術では、弱面の強度や劣化による強度低下を定量的に知ることができない。既存文献によると、岩石のせん断応力に関して岩石がせん断された後の残留せん断応力は、せん断応力のピーク値である最大せん断応力の 0.3~0.6 程度⁸⁾といわれている。また、岩盤壁面の有効圧縮強さは、不連続面に充てん物が無い場合の安全側の値として母岩一軸圧縮強さの 1/4 の値⁹⁾を用いることが推奨されている。これらを参考値として実岩盤斜面に採用した引張強さの 1/2、1/4 とした場合の関係を図-2、3 に示した。引張強さの 1/2 で浸食深さが増すと岩盤安全率 F_{ps} が 1.0 以下になる状態が現れ、1/4 の強度低下では切欠き高さ 5.0m 程度で浸食深さ無しで岩盤安全率 F_{ps} が 1.0 以下になる。

これらを考慮して実岩盤斜面を総合的に評価すると、実験条件で採用した実岩盤斜面の引張強さおよび単位体積重量では、実験で用いた各パラメータの最も危険な状態においても岩盤安全率 $F_{ps}=1.0$ 以上を示し、また現地で計測中の亀裂変位に異常な変化がみられていないことから、現状では実岩盤斜面は安定していると推察される。しかし、経年的な強度低下を想定して岩盤強度を1/2、1/4にした場合には、岩盤安全率 $F_{ps}=1.0$ 以下になる結果が得られたことから、今後の長期的な安全性を考慮すると、何らかの斜面防災対策が必要になると推察される。

4. まとめ

ここでは、遠心力模型実験を用いた岩盤斜面の安全率評価法の有効性を検討した。以下に得られた結論を示す。

- (1) 安全率評価法の適用性を検討するために、実岩盤斜面を対象に3次元模型の遠心力模型実験を行い、背面の切欠き高さや浸食深さをパラメータにして岩盤安全率の変化特性を検討した。その結果、想定した傾向と一致したことから提案した手法の妥当性を示すことができた。
- (2) 本論文で紹介した実岩盤斜面について、遠心力模

型実験と現地計測の結果をもとに評価すると、現状では実岩盤斜面は安定していると推察された。しかし、経年的な劣化を想定して実岩盤斜面の引張強さを低下させた場合には、岩盤安全率 $F_{ps}=1.0$ 以下になる結果が得られたことから、今後の長期的な安全性を考慮すると、何らかの斜面防災対策が必要になると推察された。

以上のことから、遠心力模型実験による岩盤斜面安全率評価法は、岩盤斜面の安定性を評価する手法として有効であることが示せたと考える。

なお、現在遠心力模型実験による岩盤斜面の安全率評価法は、模型作成や切欠きの設置方法等を含めて特許出願中である。

謝辞：本論文をまとめるに当たり、国土交通省北海道開発局函館開発建設部の関係各位には、既存調査資料の提供などご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 豊浜トンネル崩落事故調査委員会：豊浜トンネル崩落事故調査報告書，pp.3-1-3-56，1996.
- 2) 第2白糸トンネル崩落事故調査委員会：第2白糸トンネル崩落事故調査報告書，pp.3-1-3-63，1998.
- 3) 一般国道333号北陽土砂崩落調査委員会：一般国道333号北陽土砂崩落調査報告書，pp.3-1-3-14，2002.
- 4) 一般国道336号えりも町斜面崩壊調査委員会：一般国道336号えりも町斜面崩壊調査報告書，pp.3-1-3-23，2004.
- 5) 日下部祐基，池田憲二，渡邊一悟，三浦均也：切欠きを有する岩盤の遠心力場における崩落実験，地盤工学会，第47回地盤工学会シンポジウム論文集，pp.327-334，2002.
- 6) 日下部祐基，三浦均也，池田憲二，渡邊一悟：切欠きを有する模擬岩盤の崩落に関する遠心力載荷実験，土木学会，第33回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，pp.57-64，2004.
- 7) 日下部祐基，石川博之，三浦均也：遠心力模型実験を用いた岩盤斜面の安全率評価法，第49回(平成17年度)北海道開発技術研究発表会論文集，2005.
- 8) Goodman,R.E.：不連続性岩盤の地質工学(赤井浩一，川本朧万，大西有三共訳)，pp.140-142，森北出版，1978.
- 9) 土木学会：岩盤斜面の調査と対策，pp.100-101，1999.