

切欠きを有する岩盤模型を用いた遠心力模型実験による
危険度評価法適用例

Application of safety factor assessment method by centrifugal model test using rock slope model with notch

(独)土木研究所寒地土木研究所○正 員 日下部祐基(Yuki Kusakabe)
豊橋技術科学大学 正 員 三浦 均也(Kinya Miura)
(独)土木研究所寒地土木研究所 正 員 伊東 佳彦(Yoshihiko Ito)
(独)土木研究所寒地土木研究所 正 員 石川 博之(Hiroyuki Ishikawa)
(独)土木研究所寒地土木研究所 正 員 表 真也(Shin-ya Omote)

1. まえがき

我が国では、地すべりや岩盤崩壊などの斜面災害が毎年多数発生しており、土木構造物に多大な被害をもたらし、時には人的被害を伴う重大事故も生じさせている。また、このような地盤災害により道路や鉄道などの交通機関が遮断されると、その地域住民の生活基盤に甚大な被害が生じる。そのため、安全・安心でかつ合理的な道路の整備や維持管理に資する、道路防災水準向上を目的とした研究が急務となっている。

著者らは、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、所定の位置に設定した切欠きを有する岩盤模型について自重（遠心加速度）を作用させて破壊に至らせる実験、および自重に加えて切欠き内に水圧を作用させて破壊に至らせる実験¹⁾²⁾を行った。観察した崩落現象を有限要素法および極限平衡法によって解析した。

ここでは、本研究で提案した遠心力模型実験による岩盤斜面の危険度評価法³⁾⁴⁾について、実斜面に適用してその有効性を検討したので報告する。

2. 対象斜面と実験条件

写真-1に対象とした岩盤斜面（以下、実岩盤斜面）を示す。実岩盤斜面を含むこの地区の地形は、遷急線を標

高100m前後に持つ溶岩台地の裾部にあたり、遷急線より上方は緩斜面が連続する。斜面高さは、区間中央付近を最高点とし両側に向かうに従って漸減する。地質は、新第三紀鮮新世の溶岩と火砕岩からなる。当該地区に分布する火砕岩は、砂～砂質泥を基質とした火山円礫岩を主とする。火山円礫岩は、 $\phi 0.3\sim 1.5\text{m}$ 、まれに $\phi 5\text{m}$ に達する安山岩礫を含み、段丘堆積物のような様相を示すこともある。表-1に対象地区で収集した安山岩の岩石試験結果を示す。実岩盤斜面の引張強さとしては、岩石試験結果の平均値 7.72MN/m^2 を、単位体積重量は 26.4kN/m^3 （=湿潤密度 $\rho_t: 2.69\text{g/cm}^3\times 9.810$ ）を採用した。

実験では、装置に設置可能な岩盤模型の形状を考慮して、実岩盤斜面を模擬した縮尺1/15の岩盤模型（高さ $h=0.55\text{m}$ ）を作成した。写真-2に、発泡スチロールで作成

表-1 岩石試験結果表

供試体番号	岩石名	湿潤密度 ρ_s (g/cm^3)	吸水率 ab (%)	一軸圧縮強さ σ_c (MN/m^2)	引張強さ σ_s (MN/m^2)
1	安山岩	2.66	1.33	174.8	7.82
2		2.70	1.37	175.4	8.90
3		2.71	1.39	116.7	6.44
平均値		2.691	1.36	155.6	7.72



写真-1 実岩盤斜面



写真-2 岩盤模型

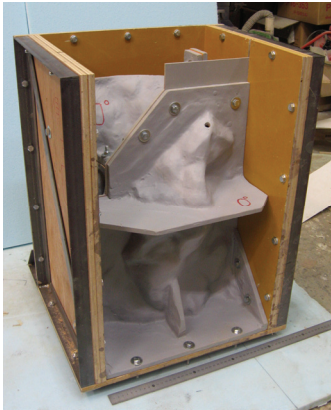


写真-3 岩盤模型型枠

表-2 遠心力模型実験一覧

実験番号	模型縮尺 $1/n$	切欠き高さ H	浸食深さ Z	切欠き面 交角
		実斜面 (m) 模型 (mm)	実斜面 模型 (m)	χ°
1	15	1.80 120	0.00 0	0
2	15	1.80 120	1.35 90	0
3	15	1.80 120	0.60 40	0
4	15	1.50 100	0.00 0	0
5	15	1.20 80	0.00 0	0
6	15	1.20 80	0.00 0	15
7	15	1.20 80	0.00 0	45

した岩盤模型を示す。写真-3に、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を示す。岩盤模型の強度は、実岩盤斜面の引張強さとして採用した 7.72MN/m^2 では、岩盤模型が装置の最大加速度 $100g$ に達しても破壊しないことが想定されたため、 $100g$ 以内で破壊する引張強さとして 0.20MN/m^2 を用いた。材料モルタルの配合は、これを目標値として決定した。実験に用いた配合は、室内配合試験の結果からセメント(c)、砂(s)およびカオリン粘土(N)を、C:S:N=1:4:0.5として水セメント比 $W/C=2.0$ とした。

遠心力模型実験では、表-2に示すように、切欠き高さ H 、浸食深さ Z および切欠き面交角 χ の異なる7個の岩盤模型を作成した。図-1に代表実験ケースとして、実験 No.2 の模型による想定斜面断面図を示す。ここでの切欠き高さ H とは、斜面背面に想定した既存亀裂の位置を示すもので、図-1に示す斜面底部に設定した基準面（浸食位置の面）から切欠き先端の高さを表している。浸食深さ Z とは、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。切欠き面交角 χ とは、切欠き面が2面になる場合の交角である。

3. 実岩盤斜面の実験パラメータと岩盤安全率

表-3 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。単位体積重量を求めるための湿潤密度についても、対象岩盤斜面に採用した値と異なる。そこで岩盤模型の引張強さ σ_t と実岩盤斜面の引張強さ σ_s ($=7.72\text{MN/m}^2$) の比 α ($=\sigma_t/\sigma_s$) および各岩盤模型の単位体積重量 γ_t と実岩盤斜面の単位体積重量 γ_s ($=26.4\text{kN/m}^3$) の比 β ($=\gamma_t/\gamma_s$) を用いて極限つり合い式を補正して、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、

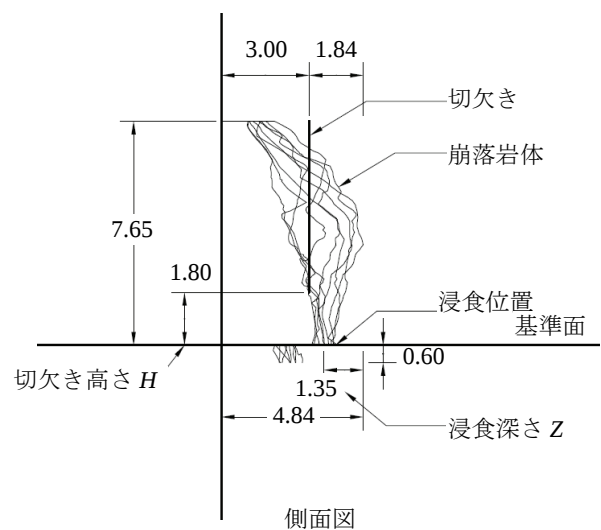
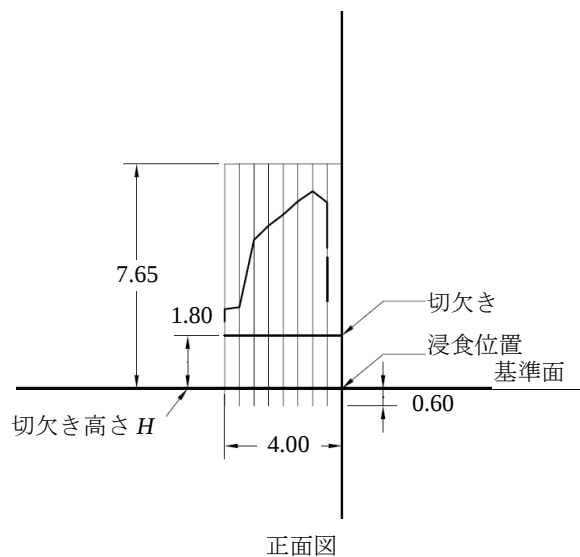
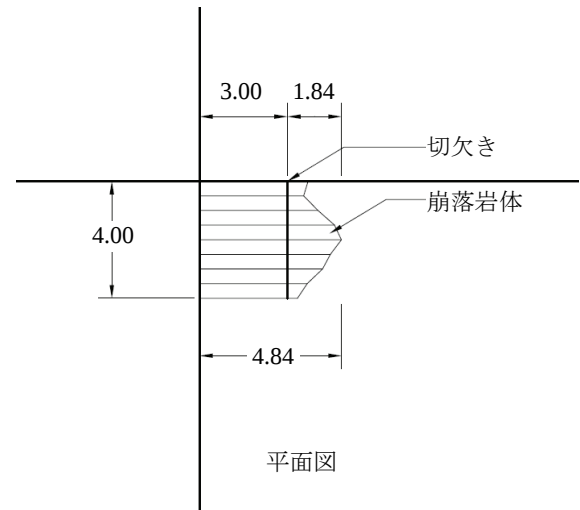


図-1 模型による想定斜面図例
(実験 No.2) 単位: m

表-3 破壊加速度および実験後岩盤模型の室内試験結果表

実験番号	破壊加速度 実測値 $n_f (g)$	実験後抜き取り試料							
		湿潤密度	一軸圧縮強さ	破壊ひずみ	静弾性係数	ポアソン比	引張強さ	強度定数	
		ρ_t (g/cm^3)	σ_c (MN/m^2)	ε_f (%)	E_t (GN/m^2)	ν	σ_t (MN/m^2)	C_{uu} (MN/m^2)	φ_{uu} (度)
1	75	1.82	2.36	0.07	2.53	0.12	0.39	0.89	13.5
2	58	1.81	2.33	0.16	2.70	0.17	0.37	—	—
3	85	1.83	2.25	0.29	1.53	0.16	0.35	—	—
4	75	1.80	2.18	0.15	2.23	0.19	0.32	—	—
5	100	1.84	2.01	0.06	5.24	0.32	0.33	—	—
6	100以上	1.75	2.43	0.19	2.05	0.17	0.28	—	—
7	90	1.78	2.83	0.16	3.84	0.23	0.43	0.91	14.2

1/n 模型斜面が $n_f g$ の遠心力場で破壊したときの模型斜面の岩盤安全率 F_{mt} 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。

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

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

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

F_{ps} ：岩盤斜面が引張強さ $\sigma_s (MN/m^2)$ で単位体積重量 $\gamma_s (kN/m^3)$ 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。

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

実験結果を用いて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。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、図-4 に切欠き面交角と岩盤安全率の関係を示す。

実岩盤斜面の引張強さとした $7.72MN/m^2$ と単位体積重量の $26.4kN/m^3$ では、実験パラメータの最も危険な状態である切欠き高さ $L=1.80m$ 固定の浸食深さ $Z=1.35m$ (図-3 参照) においても、岩盤安全率 $F_{ps}=54.5$ と大きな値を示していることから、この条件では実岩盤斜面は十分安全と評価される。

実岩盤斜面を含めて自然岩盤斜面では、経年的に岩盤が降雨や地下水、さらに寒冷地特有の凍結融解などにより風化して、強度低下することが予想される。現状の調査技術では、風化による強度低下を定量的に知ることが

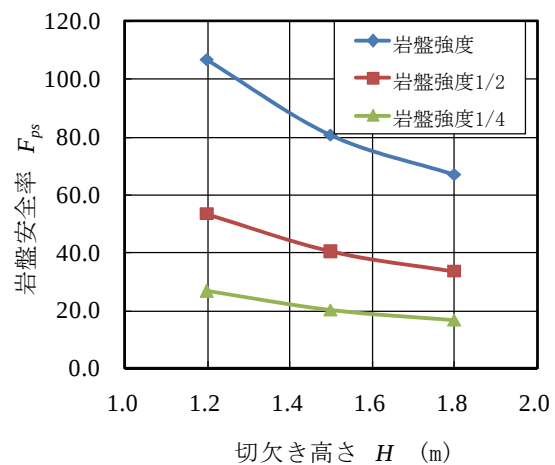


図-2 切欠き高さと岩盤安全率
(浸食深さ $Z=0.00m$ 固定)

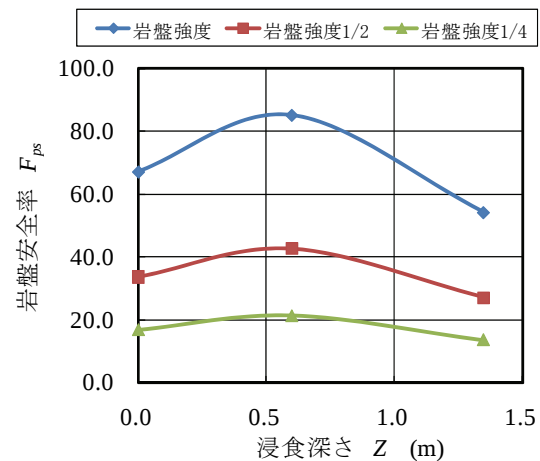


図-3 浸食深さと岩盤安全率
(切欠き高さ $H=1.80m$ 固定)

できない。既往文献によると、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 $0.3 \sim 0.6$ 程度にな

ること⁵⁾が示されている。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 の値を用いることを推奨している報告⁶⁾がある。これらを参考値として当初想定強度の 1/2、1/4 とした場合の関係を各図に示した。

各図において、岩盤安全率は強度低下させた場合でも $F_{ps}=10.0$ 以上を示し、十分大きな岩盤安全率を示している。これらのことから危険度を評価すると、実岩盤斜面は強度低下を考慮しても安定していると評価される。

なお、ここで示した岩盤安全率と各種パラメータの関係は、一般的に想定される傾向と異なっている。図-2 の切欠き高さと岩盤安全率では、切欠き高さが大きくなるほど、崩落の抵抗力になる新たな亀裂進展長が大きくなるため岩盤安全率が増加すると予想されるが、図では減少傾向がみられる。オーバーハングがみられない場合には、切欠き高さが大きくなって新たな亀裂進展長が大きくならない場合が考えられるが、図-1 にある対象斜面の断面図では確認できない。また、図-3、4 の関係では凸型の傾向が見られるが、これも想定される傾向と異なる。

これらの原因には、複雑な 3 次元モデルであることに加えて、実験から求められた岩盤安全率をみても分かるように、実岩盤斜面が強度に加えて地形形状でも安定した状態にあるために、破壊時に発生した亀裂が複雑な方向に進展したことが考えられる。このことは、実験後の破壊状態の観察において、予想外の進展亀裂位置を確認できたことから想定される。

4. まとめ

ここでは、遠心力模型実験を用いた岩盤斜面の危険度評価法について、実岩盤斜面への有効性を検討した。その結果、実岩盤斜面について採用した引張強さと単位体積重量では、実験パラメータの最も危険な状態となる切欠き高さおよび浸食深さにおいても、岩盤安全率 $F_{ps}=54.5$ と大きな値を示していることから、この条件では実岩盤斜面は十分安全と評価された。また、経年的な風化などによる強度低下を想定した、当初引張強さの 1/2、1/4 とした場合の関係においても、岩盤安全率は $F_{ps}=10.0$ 以上を示し、十分大きな岩盤安全率を示したことから、実岩盤斜面は強度低下を考慮しても安定していると評価された。以上のことから、遠心力模型実験による岩盤斜面の危険度評価法は、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唆されたと考える。

なお、3次元モデルによる遠心力模型実験による評価法は、想定した危険岩体の範囲や背面切欠き位置に対しての岩盤安全率を求めるものである。したがって、この岩盤安全率が現時点での岩盤斜面の岩盤安全率と必ず一致しているとは言えない。換言すると、遠心力模型実験で求められる岩盤安全率は、仮定した条件での値であり、これに対して岩盤斜面の現状、あるいは今後の経年変化を想定して適用することになる。このことから、今後は岩盤斜面の背面亀裂や強度などを把握する精度の高い調査手法が求められる。

岩盤模型実験用に開発した遠心力載荷装置の特殊構造、

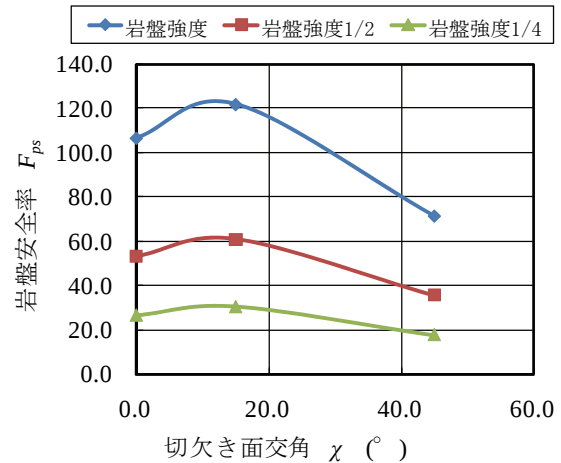


図-4 切欠き面交角と岩盤安全率
(切欠き高さ $H=1.20\text{m}$, 浸食深さ $Z=0.00\text{m}$ 固定)

および遠心力模型実験による岩盤斜面の危険度評価法は、現在それぞれ特許出願中である。

参考文献

- 1) 池田憲二、中井健司、日下部祐基、原田哲朗：岩盤亀裂発生装置（大型遠心力載荷装置）の製作、開発土木研究所月報、No.571、pp.31-39、2000.
- 2) 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.
- 3) 日下部祐基、石川博之、伊東佳彦、國松博一、三浦均也、上堂蘭四男、只野暁、山本真裕、中田賢：遠心力模型実験による岩盤斜面の安全率評価法、平成 17 年度土木学会北海道支部 論文報告集 第 62 号、2006.
- 4) 日下部祐基、三浦均也、伊東佳彦、石川博之、表真也：切欠きを有する岩盤模型の遠心力模型実験による危険度評価法の適用例、土木学会、第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集、2009. (投稿中)
- 5) Goodman, R.E.：不連続性岩盤の地質工学（赤井浩一、川本脩万、大西有三共訳）、pp.140-142、森北出版、1978.
- 6) 土木学会：岩盤斜面の調査と対策、pp.100-101、1999.