

## 2次元極限平衡解析による岩盤斜面崩落の簡易安定度評価法

遠心力模型実験 岩盤斜面 極限平衡解析

土木研究所寒地土木研究所 国際会員○日下部祐基  
 豊橋技術科学大学 国際会員 三浦 均也  
 土木研究所寒地土木研究所 正会員 伊東 佳彦  
 土木研究所寒地土木研究所 表 真也

### 1. はじめに

岩盤崩落では、背面の亀裂の進展や前面のオーバーハングの形成、および岩盤の強度劣化などが重要な要因と考えられるが、これらを考慮して岩盤斜面の安定度を定量的に評価する方法は確立されていない。ここでは、遠心力模型実験結果をもとに2次元極限平衡解析による簡易安定度評価法<sup>1)</sup>を考案したので報告する。

### 2. 対象崩落形態と岩盤斜面および実験条件

本安定度評価法で対象としている崩壊形態は、不連続面が少なく均質であるが脆さを有する軟岩斜面において、オーバーハングを有し背面亀裂が進展して比較的大規模な崩落に発展する形態である。実験対象としたのは、北海道の5箇所の岩盤斜面である。表-1に各岩盤斜面の代表的な構成岩石と崩落危険岩体高さ $H$  (最大高さ)、および遠心力模型実験で採用した模型縮尺を示す。

遠心力模型実験の実験ケースを表-2に示す。各岩盤斜面において切欠き高さ $H_c$ 、浸食深さ $Z$ および切欠き面交角 $\chi$ の異なる全23ケースである。ここで、切欠き高さ $H_c$ とは、斜面背面に想定した既存亀裂の位置を示し、斜面底部に設定した基準面から切欠き先端までの高さを表している。切欠き面交角 $\chi$ とは、切欠き面が2面になる場合の交角であり、浸食深さ $Z$ とは、基準面から下部の岩体を表面から任意の厚さ削り取った長さを示す。

### 3. 極限平衡解析による岩盤斜面崩壊の解析

用いた極限平衡解析は、岩盤斜面背面に設定した切欠き先端と崩落時に発生する亀裂面(以下、進展亀裂面)の先端を結ぶ直線の3分の2の位置を中心に、崩落危険岩体の自重による起動モーメントと、進展亀裂面に生じる応力による抵抗モーメントのつり合いを解いたものである。崩落は、切欠き先端に発生する引張応力が、岩盤斜面を構成する岩石の引張強さを超えたときに発生することになる。解析に用いる強度定数が引張強さだけの簡易な解析法である。斜面の安定解析と同様に、安定係数 $N_s$ を以下のように定義する。

$$N_s = \frac{\gamma H}{\sigma_t} \tag{1}$$

ここに、 $N_s$ : 岩体の崩落に対する安定係数  $H$ : 岩体の代表的な高さ (m) (以下、崩落危険岩体高さ)  $\gamma$ : 単位体積重量 ( $N/m^3$ )  $\sigma_t$ : 切欠き先端における最大引張応力 ( $N/m^2$ )

安定係数 $N_s$ は無次元であり、形状には依存するが寸法には依存しない。遠心力場における模型であれば、応力レベルを再現できるので、遠心力模型実験で得られた安定係数は実岩盤斜面のそれに等しいと考えることができる。仮に安定係数の値が既知であれば、安全率 $F_s$ を次式で計算できる。

$$F_s = \frac{\sigma_t}{\sigma_t} = \frac{\sigma_t}{\gamma H} N_s \tag{2}$$

ここに、 $\sigma_t$ : 切欠き先端の引張強さ ( $N/m^2$ )  
 上式より安定係数 $N_s$ が大きいほど岩盤斜面の安全率が大きくなり、安定していることがわかる。

図-1のように危険岩体を直方体でモデル化した単純な2

表-1 対象岩盤斜面

斜面名	構成岩石	崩落危険岩体高さ $H$ (m)	模型縮尺 $1/n$
K斜面	火砕岩	14.7	30
H斜面	//	6.7	15
G斜面	//	13.1	20
T斜面	//	34.7	60
S斜面	//	32.5	60

表-2 遠心力模型実験ケース一覧

No.	実験No.	切欠き高さ $H_c$ (m)	浸食深さ $Z$ (m)	切欠き面交角 $\chi$ (°)
1	K-1	3.90	6.00	0
2	K-2	3.00	6.00	0
3	K-3	2.10	6.00	0
4	K-4	3.00	3.60	0
5	K-5	3.00	5.10	0
6	K-6	3.00	6.00	15
7	K-7	3.00	6.00	45
8	H-1	1.80	0.00	0
9	H-2	1.80	1.35	0
10	H-3	1.80	0.60	0
11	H-4	1.50	0.00	0
12	H-5	1.20	0.00	0
13	H-6	1.20	0.00	45
14	G-1	3.83	3.50	0
15	G-2	2.83	3.50	0
16	T-1	10.39	10.00	67
17	T-2	7.39	10.00	67
18	T-3	4.39	10.00	67
19	T-4	4.39	15.00	67
20	T-5	4.39	20.00	67
21	S-1	3.30	0.00	0
22	S-2	3.30	2.00	0
23	S-3	3.30	4.00	0

Centrifuge model test using 3-D model of rock slop by laser scanner

Yoshihiko ITO, Yuki KUSAKABE, Shinya OMOTE: Civil Engineering Research Institute of Hokkaido  
 Kinya MIURA: Toyohashi University of Technology

次元条件では、安定係数 $N_s$ が解析的に求められる。岩盤斜面の安定性をモーメントのつり合いで評価するものとして、起動モーメント $M_d$ と抵抗モーメント $M_r$ を以下のような式で表し、それらの関係から安定係数を以下のように定義できる。ただし、ここでは、図-1における岩盤崩落により新たに発生する進展亀裂面（図中のab線）の引張応力の分布を図-2に示すように直線的に仮定して、実際との差を応力集中係数 $\psi$ で評価している。

$$M_r = \frac{1}{6} \bar{\sigma}_t \frac{\tilde{H}_c^2 + \tilde{L}^2}{\psi}, \quad M_d = \gamma H \times \left[ \frac{\tilde{B}^2}{2} + \frac{2\tilde{B}\tilde{L}}{3} + \frac{\tilde{H}_c \tilde{L}^2}{6} \right] \quad (3)$$

$$M_r = M_d \quad (4)$$

$$N_s = \frac{\gamma H}{\bar{\sigma}_t} = \frac{\tilde{H}_c^2 + \tilde{L}^2}{\psi (3\tilde{B}^2 + 4\tilde{B}\tilde{L} + \tilde{H}_c \tilde{L}^2)} \quad (5)$$

$$\tilde{B} = B/H, \quad \tilde{H}_c = H_c/H, \quad \tilde{L} = L/H$$

ここに、 $\psi$ ：応力集中係数（次項では形状補正係数） $H, B$ ：図-1に示した崩落危険岩体高さ（m）と厚さ（m） $H_c$ ：切欠き先端から斜面下部まで鉛直に測った高さ（以下、切欠き高さ）（m） $L$ ：切欠き先端位置を基準にした進展亀裂面が出現する位置までの水平距離（以下、オーバーハング深さ）（m）

式中には、崩落危険岩体高さ $H$ で正規化した値を用いて式を単純化している。実際の不整形な岩盤斜面では、上式のように解析的に安定係数を求めることはできないので、応力集中係数の値も含めた形で、本研究で採用した遠心力模型実験によって実験的に求めることになる。次項での解析では、応力集中係数 $\psi$ が断面形状の影響を強く受けることから形状補正係数と呼ぶ。

#### 4. 実験結果と考察

遠心力模型実験の岩盤模型崩落時は、安全率 $F_s$ が1まで低下していて、発生する引張応力は引張強さに等しい（ $\bar{\sigma}_t = \sigma_t$ ）ので、安定係数 $N_s$ は遠心力模型実験結果より以下のように求めることができる。

$$N_s = \frac{n_f \gamma_m H_m}{\sigma_{tm}} \quad (6)$$

ここに、 $n_f$ ：遠心力模型実験による崩落加速度（g） $\gamma_m$ ：岩盤模型の単位体積重量（N/m<sup>3</sup>） $H_m$ ：岩盤模型の崩落危険岩体高さ（m） $\sigma_{tm}$ ：岩盤模型の引張強さ（N/m<sup>2</sup>）

実岩盤斜面に2次元極限平衡解析を適用する方法としては、解析に必要な形状寸法を、岩盤斜面の代表値として用いた。代表値としては、崩落危険岩体高さ $H$ と厚さ $B$ には最大値を、切欠き高さ $H_c$ には実験条件の値を用いた。オーバーハング深さ $L$ については、進展亀裂面が発生する位置を決定するのが難しい。そこで、簡易な設定方法として初期値が崩落危険岩体厚さ $B$ の1/2の負の値、浸食深さ $Z$ がある場合にはそれをプラスして求めた。

安定係数 $N_s$ は、(5)式右辺の式を用いて各形状寸法比から求めることができる。形状補正係数 $\psi$ を1.0とした安定係数を、以下、形状安定係数 $N_{sm}$ と呼ぶ。図-3に安定係数 $N_s$ と形状安定係数 $N_{sm}$ の関係を示す。両者には正の相関が認められ、形状安定係数の方が小さく算出されている。形状安定係数が安定係数のほぼ下限値を通る直線式は、以下ようになる。

$$N_s = 2.5 \cdot N_{sm} = \frac{1}{0.4} N_{sm} \quad (7)$$

上式のように係数2.5を(5)式の形状補正係数（応力集中係数） $\psi$ に換算すると逆数の $\psi=0.4$ が得られる。この値を(5)式右辺の式に代入して、岩盤斜面の形状寸法から安定係数 $N_s$ が安全側の値として求められる。

#### 5. まとめ

1) 実岩盤斜面に2次元極限平衡解析を適用する方法として、安全率を求めるための安定係数 $N_s$ の簡易算出法を考案した。

参考文献：1) 日下部祐基，三浦均也，伊東佳彦，表真也：遠心力模型実験と2次元極限平衡解析を用いた岩盤斜面の簡易安定度評価法，平成21年度土木学会北海道支部 論文報告集，第66号，C-2，2010。

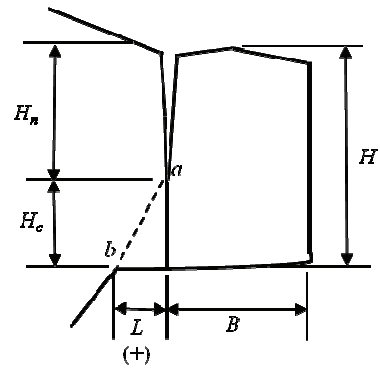


図-1 岩盤斜面形状概念図

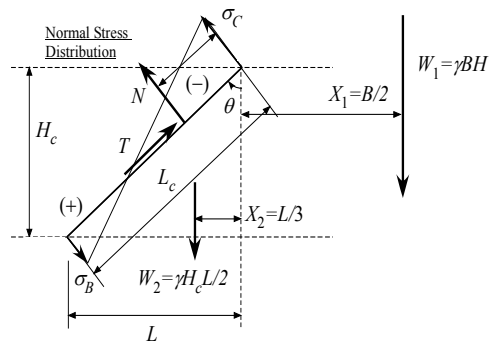


図-2 進展亀裂面の応力分布概念図

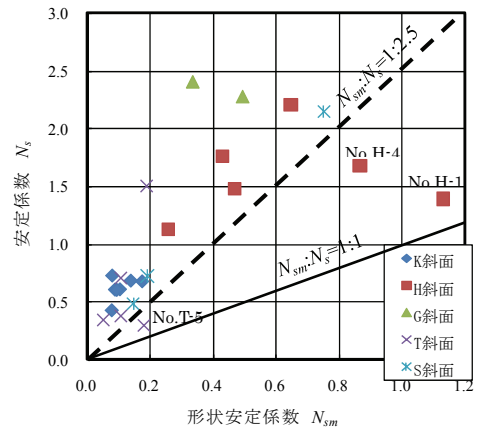


図-3 形状安定係数と安定係数