

# 不連続性岩盤斜面のたわみ性トッピング崩壊機構の解析的検討

九州大学工学部 学生会員 ○新井 克弥 九州大学大学院 正会員 三谷 泰浩  
九州大学大学院 正会員 蔡 耀 九州電力(株) 正会員 山下 裕司

## 1. はじめに

岩盤斜面の安定は、岩盤に内包する節理、層理などの不連続面の方向や配列状況、岩盤基質部の風化や変質などに支配されており、その安定評価手法は確立されていないのが現状である。特に、これまで安定と考えられていた斜面に対して、差し目状の節理を持つ、比較的固結度の高い岩盤斜面で崩壊が確認された。これは、たわみ性トッピング崩壊が原因であると考えられたが、そのメカニズムは、まだ解明されておらず、岩盤斜面の安定評価に不可欠な課題の一つである。

本研究では、たわみ性トッピング崩壊に対して、不連続体モデルによる数値解析と理論解析を行い、そのメカニズムについて検討する。

## 2. 数値解析による検討

個別要素法(解析コード: UDEC, Itasca 社製)を用いて、Fig.1 に示すような差し目状の岩盤斜面(法面勾配  $\theta = 70^\circ$ 、不連続面の傾斜角  $\alpha = 60^\circ$ 、不連続面の間隔  $t = 1.0\text{m}$ ) に対する数値解析を行う。基質部、不連続面の力学的物性値は今村ら<sup>1)</sup>の値を用いる。

解析結果として、Fig.2 に斜面法先付近の破壊の種類とその位置および主応力線図を示す。図に示すように基質部各ブロックの右側には、圧縮によるせん断破壊が、左側には曲げによる引張破壊が生じる。この傾向は Fig.3 に示すように法先部から斜面奥部上方へ向かって確認される。この引張破壊を生じる位置を結んだ線を塑性境界線と定義すると、この線は概ね、不連続面の傾斜角にほぼ直行する角度で斜面法先部付近から斜面上まで達する。

この塑性境界線の上部和下部で基質部に働く応力、不連続面のせん断変位、斜面の変形を比較すると、上部では、曲げによる引張応力が広範囲にわたって生じるが、下部では、このような現象は確認されない。また、上部の不連続面では、不連続面間でずれが生じ、局所的に大きなせん断変位を生じるが、下部では、ごく小さなせん断変位しか生じていない。また、ブロックの変形は、塑性境界線上で曲率が最大となり、塑性境界線の上部の領域で、斜面前方に倒れこむような変形が生じるが、下部の領域ではほとんど変形を生じない。

以上から、たわみ性トッピング崩壊は、塑性境界線

より上で発生すると考えられる。

## 3. 理論解析による検討

数値解析で得られた塑性境界線上の破壊のメカニズムを確認することを目的として、不連続斜面を、数値解析から得られた塑性境界線と不連続面で区切られる長方形ブロックの集合体としてモデル化し、その個別のブロックに対して、力のつりあいを考える理論解析を行う。

Fig.4 に解析モデルの概念図を示すとともに、ブロックに作用する力の状況を示す。塑性境界線が斜面上部と交差する位置から  $i$  番目のブロックについて考えると、 $i$  番目のブロックを支持するために必要な力、 $P_{i+1}$  は次式のようになる。

$$P_{i+1} = \frac{-1}{3(h_{i+1} + \mu t)} [\gamma b t h_i (t \cos \alpha_i - 3 h_i \sin \alpha_i) + 3 P_{i-1} (\mu - h_{i-1}) + |\sigma_i| b t^2] \quad (1)$$

ここで、 $h_i$ : 斜面上部から  $i$  番目のブロックの塑性境界

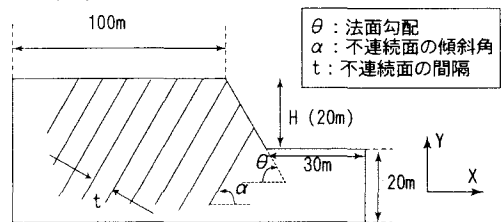


Fig.1 Model of numerical analysis.

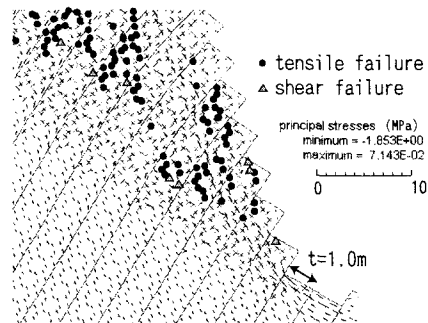


Fig.2 Principal stress distribution and failure pattern at the toe of slope.

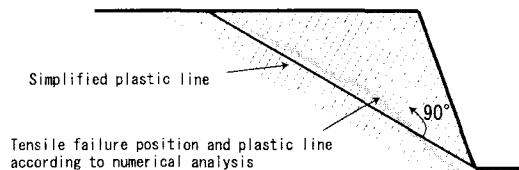
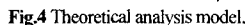


Fig.3 Illustration of failure position and simplified plastic line.



次に  $i+1$  番目以降のブロックによる抵抗抗として、斜面の曲げ引張抵抗抗  $P''$  とせん断抵抗抗  $P'$  を考える.

$$P^\sigma = \frac{|\sigma_i|W}{h_{i+1}/2} + \sum_{l=i}^{i+2} T_l \quad (2)$$

$$P^{\tau} = (c + \sigma_n \tan \phi)(2H - it) \quad (3)$$

ただし,

$$\sigma_n = (\sum_{l=1}^n N_l) / (2H - it) \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_1$ : ブロックの引張強度、 $W$ : ブロックの断面係数、 $T_i$ 、 $N_i$ :  $i$ 番目のブロックにかかる重量  $W_i$  の塑性境界線に対する水平、垂直方向成分、 $\phi$ : ブロックの内部摩擦角、 $H$ : 斜面高さである。

曲げ引張抵抗力  $P^a$  は、 $i+1$  番目のブロックの引張強度を考慮した力のつり合い条件から得られた抵抗力とし、せん断抵抗力  $P^s$  は Coulomb による摩擦力と仮定した。

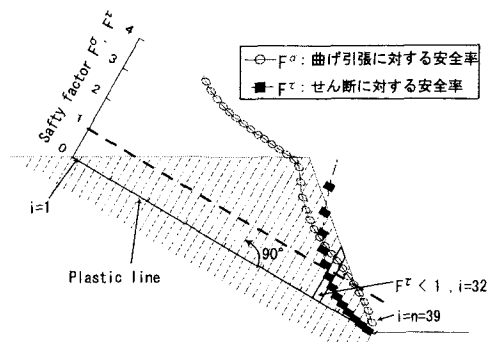
最終的にブロックの曲げ引張に対する安全率  $F^o = P^o / P_{i+1}$ 、せん断に対する安全率  $F^r = P^r / P_{i+1}$  を考え、ブロックの斜面上の位置と  $F^r, F^o$  の関係を **Fig.5** に示す。図に示すように法先部近く ( $i=32$  のブロック) でせん断に対する安全率  $F^r$  が 1.0 を下回り、せん断破壊を生じる。数値解析の結果も併せて考慮すると、このせん断破壊が曲げ引張破壊を助長する契機となると考えられる。

#### 4. 法面勾配と不連続面の傾斜角の影響

前述した個別要素法解析コードを用いて不連続面の間隔  $t=1.0\text{m}$ 、法面勾配  $\theta$  を  $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、不連続面の傾斜角  $\alpha$  を  $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$  と変化させ、これらの影響について検討する。

得られた結果として、法面勾配、不連続面の傾斜角による斜面の安定状況を **Table 1** に示す。このパラメータ解析の結果からも前述の結果と同じ傾向が見られ、不安定となるすべてのケースにおいて同様の破壊のメカニズムが成り立つといえる。

また、表に示すように、不連続面の内部摩擦角を考慮



**Fig.5** Safety factor of block in slope.

**Table 1** Summary of numerical analysis results.

| t= 1.0m                     |     | Angle of joint (°) |     |     |     |     |     |
|-----------------------------|-----|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                             |     | 80°                | 70° | 60° | 50° | 40° | 30° |
| Angle<br>of<br>slope<br>(°) | 70° |                    | ×   | ×   | ○   | ○   |     |
|                             | 60° | ×                  | ×   | ○   | ○   |     |     |
|                             | 50° | ×                  | ○   | ○   |     |     |     |
|                             | 40° | ○                  | ○   |     |     |     |     |

× : Unstable , maximum displacement  $\geq 1\text{m}$

○ : Stable , maximum displacement  $< 0.1\text{m}$

すると、法面勾配が  $90^\circ$  から不連続面の傾斜角  $\alpha$  を引いたものと不連続面の内部摩擦角  $\phi_j$  の和で表される角度の時に斜面が安定となる限界の法面勾配となっている。これは、不連続面の内部摩擦角が  $20^\circ$  の時も成立する。

以上から、曲げトッピング崩壊による限界法面勾配  $\theta_{max}$  に対する経験式を以下で定義する。

$$\theta_{\max} = (90^\circ - \alpha) + \phi_i \quad (5)$$

## 5. 結論

本研究では、個別要素法を用いた数値解析および理論解析を行い、斜面法先部付近の基質上部で、まず、せん断破壊を生じ、それより上に位置する岩盤ブロックが支持されなくなり、曲げ引張破壊を生じて全体の崩壊に至るというメカニズムを明らかにした。また、この曲げ引張破壊の位置を結んだ線は、斜面の法先部付近をとおり、不連続面の傾斜角とほぼ直交する線となり、この線より上部の岩体が、トップリング崩壊を起こすことが分かった。さらに、法面勾配と不連続面の傾斜角に注目して整理し、これらと不連続面の内部摩擦角の関係から、トップリングを起こす限界となる法面勾配を提案できた。

## 参考文献

- 1) 今村氏郎他：不連続性岩盤斜面のたわみ性トップリング崩壊のメカニズム，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.A-262-A-263，2003.