

## 不連続性岩盤斜面のたわみ性トッピング崩壊に関する研究

九州大学工学部 学生員 ○久留須 靖 九州大学大学院 正会員 江崎 哲郎  
九州大学大学院 正会員 三谷 泰浩 九州電力(株) 正会員 香月 理

## 1. はじめに

岩盤斜面では、平面破壊、くさび破壊、円形破壊、トッピング(転倒破壊)など様々な破壊様式が考えられる。このような破壊様式の違いは、岩盤内部に存在する不連続面に大きな影響をうける。一般に、斜面に対して流れ目状の不連続面を有する岩盤斜面では、平面すべりなどのすべり破壊が問題となるのに対して、斜面に対して差し目状の不連続面を有する岩盤斜面では、斜面を構成する岩柱あるいは岩塊が斜面前方へ倒れ込むように崩壊するトッピング破壊を起こす場合がある。このような、トッピング破壊に関して、岩塊ブロックのトッピング挙動に関する研究事例は幾つか存在する<sup>1)</sup>が、岩盤の曲げに伴い不連続面がずれを起こして、塊状に崩壊するトッピング、いわゆるたわみ性トッピング破壊についてはそのメカニズムについて十分な説明がなされていない。

本研究では、法面の角度および不連続面の傾斜角の違いがたわみ性トッピング破壊に及ぼす影響について、数値解析による検討を行う。

## 2. 数値解析

解析は、各ブロックを変形体として考慮でき、岩盤斜面の形状および不連続面の幾何学的状況を比較的忠実にモデル化できる不連続体解析手法のうち、個別要素法(解析コード: UDEC, Itasca社製)を用いて数値解析を行う。

## 2.1 岩盤斜面のモデル化

解析では、規則的な差し目状の不連続面が岩盤斜面全体に分布する2次元化した斜面を想定する。

Fig.1に示すように、斜面高さを20mとし、解析モデルの左右境界は、掘削に伴う岩盤の変形がモデル境界の影響を受けない位置となるように十分に長く設定する。また、下部境界も同様に斜面高さ以上となるように設定する。斜面全体の形状はパラメータの影響を把握しやすいように、法肩から左側を水平面とする。法肩から右側の側方境界を結ぶ線を地山線とする。不連続面は斜面に対して差し目状となるように規則的に配置し、不連続面の間隔を0.4mとする。

基質部の力学的特性値については、斜面の崩壊が顕著に再現できるように非常に弱い物性値を与える。設定に際しては、一軸圧縮強度 $\sigma_c$ を基準として、その他の物性値を参考文献2)を参考に設定する。また、不連続面の力学的物性値については、過去に実施した頁岩の一面せん断試験結果<sup>3)</sup>の値を採用する。岩盤基質部および不連続面の力学的特性値をTable 1, Table 2に示す。

## 2.2 解析手順および解析ケース

解析手順としては自重解析終了後、掘削を行う。解析パラメータは、法面の角度 $\theta$ 、不連続面の傾斜角 $\alpha$ を水平面から反時計回りに45°から59°(6分から1割勾配)、60°から80°とする。解析ケースをTable 3に示す。

## 3. 解析結果および考察

Fig.2に斜面の変形図および内部主応力の拡大図の例を示す。本解析では基質部は連続体として扱われるため、塑性破壊が発生した以降の挙動を完全に再現することはできないが、斜面より緩い角度で曲率の最大となる位置に直線状に塑性破壊が生じる。その部分では、基質部の右側に圧縮応力、左側に引張応力を生じていることから、岩盤部では曲げによるたわみを生じていることが分かる。また、曲げによるたわみが生じるとき、不連続面が弱面となることから、不連続面間でのずれを伴う変形の挙動としては各ケースとも同様で、法肩で最大変位を生じる。各ケース毎の法肩位置での最大変位をTable 3に示す。法面の角度が45°の時、不連続面の傾斜角が60°、70°、80°と大きくなるに従って法肩の変位は60°の場合(0.038m)の3.9倍、47.0倍となる。法面の角度が51°の時、変位は60°の場合(0.041m)

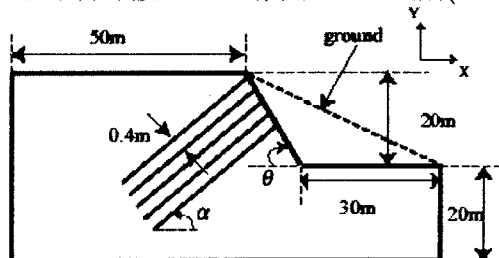


Fig.1 Simplified of analysis model.

Table 1 Mechanical properties of model material.<sup>2)</sup>

| $\sigma_c$<br>[MPa] | $\sigma_t$<br>[MPa] | c<br>[MPa] | $\phi$<br>[°] | E<br>[MPa] | $\nu$<br>[-] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] |
|---------------------|---------------------|------------|---------------|------------|--------------|--------------------------------|
| 1.00                | 0.072               | 0.132      | 60            | 500        | 0.3          | 2645                           |

$\sigma_c$ : Compressive strength;  $\sigma_t$ : Tensile strength;  
c: Cohesion;  $\phi$ : Friction; E: Young's modulus;  
 $\nu$ : Poisson's ratio;  $\rho$ : Density

Table 2 Mechanical properties of model joint.<sup>3)</sup>

| $K_n$<br>[MPa/m]    | $K_s$<br>[MPa/m]    | $c_j$<br>[MPa] | $\phi_j$<br>[°] | $\sigma_{tj}$<br>[MPa] |
|---------------------|---------------------|----------------|-----------------|------------------------|
| $1.833 \times 10^4$ | $0.088 \times 10^4$ | 0              | 30              | 0                      |

$K_n$ : Normal stiffness;  $K_s$ : Shear stiffness;  $c_j$ : Cohesion of joint;  $\phi_j$ : Friction of joint;  $\sigma_{tj}$ : Tensile strength of joint

Table 3 Case of DEM analysis model and maximum displacement.

|       | Angle of slope (°) | Angle of joint (°) | maximum displacement(m) |
|-------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| Case1 | 135                | 60                 | 0.038                   |
| Case2 |                    | 70                 | 0.148                   |
| Case3 |                    | 80                 | 1.787                   |
| Case4 | 129                | 60                 | 0.041                   |
| Case5 |                    | 70                 | 0.624                   |
| Case6 |                    | 80                 | 3.947                   |
| Case7 | 121                | 60                 | 0.091                   |
| Case8 |                    | 70                 | 3.025                   |
| Case9 |                    | 80                 | 7.116                   |

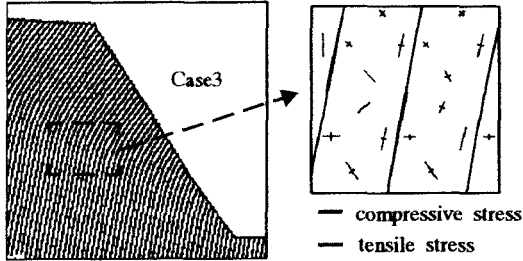


Fig.2 Deformation figure and principal stress.

の15倍, 96倍, 法面の角度が59°の時, 変位は60°の場合(0.091m)の33倍, 78倍となり, 不連続面の傾斜角が大きくなるに従い法肩の変位も大きくなる。一方, 不連続面の傾斜角が60°の時, 法面の角度が45°, 51°, 59°と大きくなるに従って法肩の変位は45°の場合(0.038m)の1.1倍, 2.4倍, 不連続面の傾斜角が70°の時, 変位は45°の場合(0.148m)の4.2倍, 20倍, 不連続面の傾斜角が80°の時, 変位は45°の場合(1.787m)の2.2倍, 4.0倍となり, 法面の角度が大きくなるに従い法肩の変位も大きくなるが, 不連続面の傾斜角による影響に比べて, その影響の程度は小さい。

次に, 不連続面の傾斜角の違いによる影響についてCase7, Case8, Case9, を用いて検討する。Fig.3に各岩盤基質部において, 曲げによる変形により, 曲率が最大となる位置(この位置を, 以降塑性境界と称す)を示す。この位置より上方には, 曲げによる引張応力が発生し, 塑性状態となる。引張応力はまず, 法肩から伸びる不連続面付近に発生し, それが法尻方向に広がった後, 斜面の奥へと進行していく。また, この塑性境界は帯状にほぼ直線的に生じる。この塑性境界より右上の三角形の領域がトップリングを生じる領域である。不連続面の傾斜角が60°, 70°, 80°と大きくなるに従って, 塑性境界の角度は, 水平面から時計回りに34°, 25°, 18°と変化していく。また, トップリングを生じる三角形の領域は, 不連続面の傾斜角が大きくなるに従って拡大する。このような挙動は法面の角度が同じ時には, 同様の傾向を示す。一方, 法面の角度の違いによる影響についてCase2, Case5, Case8, を用いて検討する。Fig.4に曲げによる変形により, 曲率が最大となる位置を示す。法面の角度が45°, 51°, 59°と大きくなるに従って, 塑性境界の角度は, 水平面から時計回りに27°, 26°, 25°と

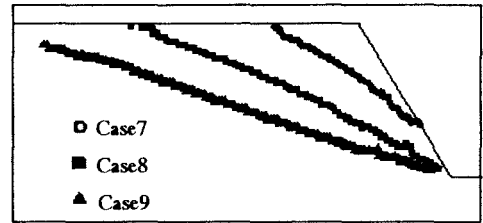


Fig.3 Maximum curvature position of different joint angle.

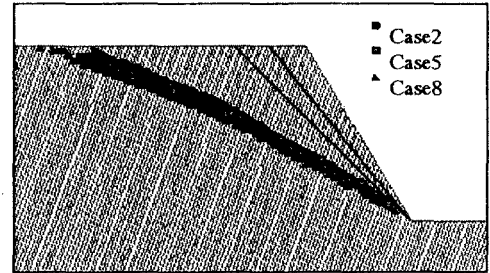


Fig.4 Maximum curvature position of different slope angle.

なる。また, 塑性境界の位置はほとんど変わらないため, トップリングを生じる三角形の領域には相対的に影響がないといえる。このような挙動は不連続面の傾斜角が同じ時には, 同様の傾向を示す。今回行った不連続面の傾斜角60°, 70°, 80°および法面の角度45°, 51°, 59°の範囲においては, 塑性境界は法尻付近より斜面の奥に向って緩い傾斜をなし, その角度は不連続面の傾斜角によって決まり, 不連続面に対して約95°となる。また, トップリングを生じる三角形の領域が拡大するに従って最大変位も大きくなるが, 斜面の変形が収束するため, たわみ性トップリングでは大きな変位を生じて, 力の平衡は保たれていると考えられる。

#### 4. 結論

本研究では個別要素法を用いた解析により, 法面の角度および不連続面の傾斜角がたわみ性トップリングに及ぼす影響について検討した。その結果, たわみ性トップリング破壊が岩盤の曲げ引張破壊に起因して発生すること, 塑性境界は法面付近より斜面の奥に向って不連続面に対して約95°の傾きで生じること, およびその広がり方, トップリングを生じる三角形の領域は, 不連続面の傾斜角によって支配され, 不連続面のずれによってトップリングが進行していくことが分かった。これらよりトップリング破壊には不連続面の傾斜角の影響が大きいことが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 例えば, R.E.Goodman & J.W.Bray: Toppling of Rock Slope, Rock Engineering for Foundations and Slopes, Vol.2, pp.201-234.
- 2) 九州電力株式会社総合研究所: 岩石及び岩盤の工学的諸性質, 研究報告, 1986.
- 3) T.Esaki: Modeling jointed rock masses and prediction of slope stabilities by DEM, The 37th U.S.Rock Mechanics Symposium, pp.83-90, 1999.