

(77) 不連続性岩盤斜面におけるトッピング崩壊機構に関する研究

九州大学工学部	正会員	江崎哲郎
九州大学工学部	正会員	蔣 宇静
九州大学大学院	学生会員	○永富雅幸
電力中央研究所	正会員	岡田哲実
九州電力	正会員	神谷誠一郎

Studies on Toppling Failure Mechanism of Slope in Discontinuous Rockmass

Tetsuro ESAKI, Yujing JIANG and Masayuki NAGATOMI
Faculty of Engineering, Kyushu University
Tetsuji OKADA
Central Reserach Insitute of Electric Power Industry

Abstract

The stability of natural slopes and excavated slopes in rock mass is always of great concern in rock engineering works for the constructions of facilities or preventing disasters. As rock mass in nature is usually discontinuous, the stability of rock slopes will be governed by the distribution of discontinuities and their mechanical properties. Especially the toppling failure occurs frequently, in where the dominated discontinuities exist in the form of nearly vertical sets, the explanation of its mechanism is coming to an important theme on the evaluation of stability of rock slopes and reinforcement.

This paper describes numerical and physical model studies of discontinuous rock slopes using the distinct element method (DEM) and newly developed base friction model technique in order to analyze and explain the mechanism of the toppling failure. Models of the slopes are constructed by blocks which are arranged to generate cross-continuous orthogonal-discontinuity sets or intermittent orthogonal-discontinuity sets. The failure modes and their development process calculated using the DEM are compared with those of experiment and discussed in detail with changing the main parameters against the toppling failure.

1. はじめに

不連続性岩盤斜面では、多種多様な不連続面が内包されており、その崩壊形態には、絶壁などで発生する分離・崩落 (rock fall)、斜面の形状と岩盤内部の性質に支配されるすべり (sliding)、および相互作用する岩塊の回転を含む動力学的な崩壊様式である転倒 (toppling) などがある。殊に、垂直に近い節理の卓越した岩盤斜面等の場合では、しばしば転倒崩壊 (以下トッピング) が発生し、道路や線路に接した斜面、採掘のベンチなど斜面付近の施設に多大な影響を及ぼしている。よって、このトッピング破壊の解明は、不連続性岩盤斜面の安定性評価と監視および補強対策において重要な課題となっている。

しかし、トッピング破壊は、岩盤内の不連続面の幾何学的分布状態や不連続面の物性値など多くのパラメータに影響されるため、その崩壊機構を解明するためには、連続体の仮定に基づいた従来の解析法では困難が生じ、新しい評価法の確立が必要である。

本研究は、一般的な斜面を想定して、不連続面の傾斜角、相対密度などの分布特性と、内部摩擦角などの力学的特性を主要なパラメータとして、トッピング破壊に及ぼす影響効果を基礎的に検討し、その崩壊機構を明らかにすることを目的とする。研究手法としては、不連続体の挙動の表現に有効な方法と考えられる個別要素法 (DEM)、および底面摩擦模型実験方法を用いて、比較的検討を行う。

2. トッピング破壊に関する研究現状

不連続性岩盤斜面におけるトッピング破壊に関する研究は、単体ブロックモデルの挙動解明から始められた¹⁾。しかし、単体ブロックの挙動特性が斜面全体の挙動特性には直接につなげられないため、ブロック群としての考慮が必要とされた。1970年代後半から、不連続性岩盤斜面をブロックの集合体と仮定して、限界平衡法や有限要素法を用いた研究がなされたが^{2),3)}、前者は、その挙動がある仮定したすべり面に限定され

る点に問題があり、後者は、連続体の公式化による方法により不連続性岩盤斜面をモデル化するには問題がある。一方、1971年にCundallによって開発された個別要素法⁴⁾は、不連続性岩盤をブロックの集合体としてその挙動を解析する手法であり、この方法では、ブロック間の分離や各ブロックの多大な変位や回転を考慮できて、不連続面を数多く含む岩盤に対して有効な手法であると考えられる。ただし、モデル解析の信頼性は、ジョイント挙動の的確さに依存するため、ジョイントの幾何的モデル化、および力学的特性を正確に決定する必要がある。

また、実験的方法では、主に傾斜台実験と底面摩擦模型実験が行われている^{5),6)}。前者は、破壊の最終状態が視覚的に明確な点が利点として挙げられるが、実験に多くの手間がかかったり、破壊状態の定量的評価が困難である問題がある。一方、後者は、不連続性岩盤の変位挙動や崩壊プロセスを比較的忠実に表現でき、モデル挙動の定量的評価も可能である特徴を有する。

したがって、本研究では、以上を踏まえ、不連続性岩盤斜面の崩壊機構について、個別要素法と底面摩擦実験方法を用いて、両者の利点を生かしながら比較的检查を行うことにする。

3. DEMによる数値解析と考察

(1) DEMの概要⁴⁾

個別要素法は、不連続性岩盤をブロックの集合体として扱い、ブロック間をバネでモデル化し、バネの剛性を調整することにより、異なる不連続面の特性を表現する。個々の剛体ブロックの挙動はニュートンの第2法則に従って判断される。また、運動方程式の解は、連続的な時間経過の繰り返しにより得られる。

(2) 解析モデル

トッピング崩壊が問題となっている熊本県人吉市のある崩壊地を対象として、不連続性岩盤斜面のモデル化を行った⁷⁾。Fig.1に示すように、斜面の概形は斜

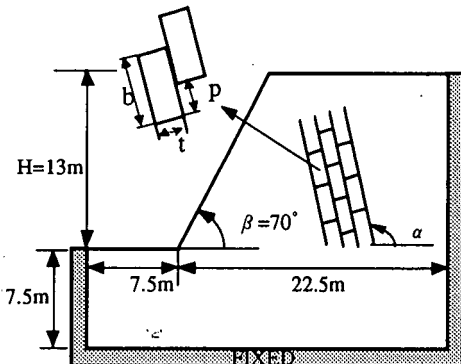


Fig.1 Geometry and boundary condition for UDEC model.

Table 1 Rock properties used in UDEC analysis.

Parameter	Unit	Value
Density	kg/m ³	2500
Normal stiffness	Pa/m	1.0×10^8
Shear stiffness	Pa/m	1.0×10^8
Joint friction angle	°	31
Joint cohesion	Pa	0
Round length	m	10% of t

Table 2 Cases and input values of parameters in UDEC analysis.

Case	Range of parameter	Fixed parameter
a	$\alpha = 95^\circ \sim 120^\circ$ $H/t = 5 \sim 20$	$b/t = 2$ $\phi = 31^\circ$ $p/b = 1/2$
b	$\alpha = 95^\circ \sim 120^\circ$ $H/t = 5 \sim 20$ $b/t = 1, 2$	$\phi = 31^\circ$ $p/b = 1/2$
c	$H/t = 5 \sim 20$ $\phi = 21^\circ, 31^\circ, 41^\circ$	$\alpha = 105^\circ$ $b/t = 1$ $p/b = 1/2$
d	$\alpha = 95^\circ \sim 120^\circ$ $H/t = 5 \sim 20$ $p/b = 1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 7/8, 1$	$b/t = 2$ $\phi = 31^\circ$

面高さ(H)13m、のり面の角度(β) 70° である。不連続面の配列は、貫通したものとこれと垂直して貫通せず千鳥状に配列した2セットの不連続面を考えた。解析領域では重力のみの作用を考える。

Table 1は、モデルの物性値を示す。各解析モデル内で、ブロックはすべて同じ大きさとして考え、変動させるパラメータは以下の通りであり、その他は固定パラメータとする。

- ブロックの縦横比 (b/t)
- 貫通した不連続面の間隔幅 (t)
- 水平から反時計方向に貫通した不連続面の傾斜角 (α)、貫通せぬ不連続面の傾斜角 ($\alpha - 90^\circ$)
- ブロック間のかみ合い長さ (p)
- 不連続面の摩擦角 (ϕ)

なお、以下では、以上のパラメータをそれぞれブロック縦横比、間隔幅、傾斜角、かみ合い長、摩擦角と略称することにする。また、解析では、 t で無次元化した(H/t)を不連続面の相対密度と定義し(以下相対密度と略称する)、この相対密度の影響に特に注目し、Table 2に示す4つのケースについて検討する。

(3) 解析結果及び考察

解析結果によると、岩盤斜面のトッピング崩壊形

態としては、全てのケースで、まずのり先付近でなく、のり肩部の貫通した不連続面に沿って隙間を生じる。次に複数のブロックが一体となり、柱のような挙動を示し、斜面前方にトップリングする。さらに時間が経過するとトップリング破壊の領域が後列へと拡大する。しかし、個々のパラメータの違いにより不安定領域と破壊の進展は、かなり異なった。以下に各パラメータの影響を考察する。

a) . 傾斜角と相対密度の影響

傾斜角(α)と相対密度(H/t)の関係をFig.2に示す。図中の曲線は、推定したトップリングと安定の境界である。図より、相対密度の増加、つまり、不連続面の間隔幅が狭くなるに伴いトップリングが生じやすくなる。本解析条件下では、トップリングを生じる限界は $H/t=10$ 付近であった。また、傾斜角の影響を考えると、 $\alpha=105^\circ$ 付近を中心に 100° から 110° が最も不安定となることが分かった。

b) . ブロック形状の影響

ブロック形状の影響は、 $b/t=1, 2$ に関して比較

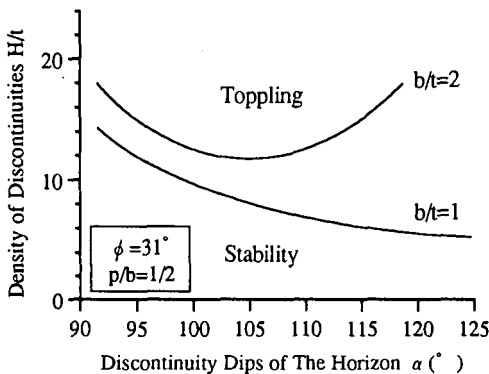


Fig.2 Relationship between H/t and α .

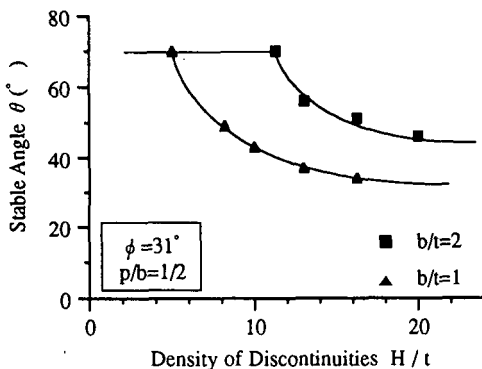


Fig.3 Relationship between θ and H/t under changing the block proportion.

を行った。 $b/t=1$ のケースの傾斜角と相対密度の関係は、Fig.2に示す。 $b/t=2$ (Case a)と同様に H/t の増加によりトップリングを生じやすくなるが、トップリングと安定の境界は $b/t=2$ で $H/t=10$ 付近であったのに対し、 $b/t=1$ では $H/t=5$ 付近と大きく違いが見られた。また、両者で傾斜角の影響を考えても、最も不安定となる角度は、 $b/t=2$ で $\alpha=105^\circ$ 付近なのに対し、 $b/t=1$ では、 α の増加に伴いトップリングを生じる限界の相対密度が減少し続け、 $H/t=5$ 付近で一定に近づくことが分かる。

Fig.3は、相対密度に対する安定角の変動をCase aの結果と合わせて示したものである。なお、安定角(θ)とは、斜面上の安定ブロックとトップリングによる破壊部分との境界線が水平面となす角度と定義する。両者の傾向は似ており、不連続面の間隔幅が狭くなるにつれ、破壊領域は増加する。また、同じ相対密度では、 $b/t=1$ のケースが $b/t=2$ のケースより破壊を生じる範囲が広がる傾向が見られる。しかし、安定角の差は、相対密度の増加にともない減少し、ある相対密度に達すると、一定の傾向になり円弧すべりモデルの安定角に近づくと考えられる。

c) . 摩擦角の影響

摩擦角(ϕ)と安定角(θ)の関係は、 $\phi=21^\circ, 31^\circ, 41^\circ$ に対して $b/t=1$ の結果をFig.4に示す。 H/t が13および16.25の場合では、安定角はあまり摩擦角の影響を受けないが、 $H/t=10$ の場合では非常に顕著となり、 $\phi > 30^\circ$ となると、 ϕ とともに安定角が増大し、つまり、安定領域が大きく広がる。また、よって、ブロック間の摩擦角 ϕ は、不連続面の相対密度がある範囲では、トップリング崩壊を大きく左右するパラメータの1つであることが本解析により明らかになった。

d) . 不連続面のかみ合いによる影響

かみ合い長(p)の変化に伴う傾斜角(α)と相対密度

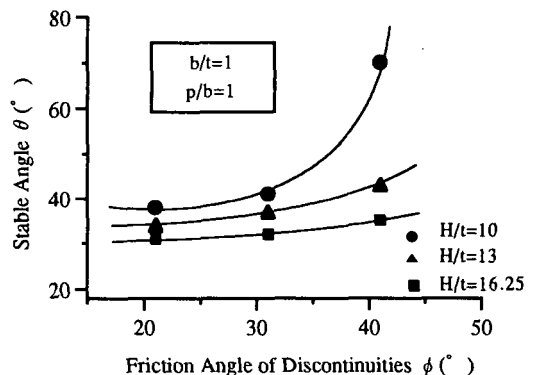


Fig.4 Relationship between θ and ϕ .

(H/t)の関係をFig.5に示す。ここで、かみ合い長は、のり先ブロックの右隣のブロックが、半分のかみ合い状態 ($p/b=1/2$) から、 $p/b=1/2, 1/4, 1/8, 1$ のように上方にずれるケースと $p/b=1/2, 3/4, 7/8, 1$ のように下方にずれるケースを考えた。なお、図中の曲線は、安定とトップリング破壊の境界を示し、境界線以下では安定で、以上はトップリングを生じる領域である。

まず、前者の場合を考えると、 $p/b=1/2$ (case a) では、 $\alpha=105^\circ$ 付近で境界線が最小値となるが、 $p/b=1/4, 1/8, 1$ (格子配列) と変化すると共に、 H/t の最小値を示す不連続面の傾斜角が大きくなる傾向が見られたが、傾斜角 100° 付近までは、配列による影響はほとんど見られない。一方、後者では、 $p/b=3/4, 7/8$ に対するトップリング破壊の境界線はほぼ同じであったが、格子配列に変化すると前者と同様な傾向を示した。この両者の違いは、明らかに斜面モデルの構成上の違いによるもので、とくに、のり先ブロックに対し右隣に位置するブロックの拘束力が異なることにより、斜面全体に対する影響が違ってくる。

4. 模型実験結果による検証と比較

(1) 模型実験モデル

ここでは、解析のCase aに相当する $\alpha=105^\circ$ の場合について底面摩擦模型実験を行い、画像解析システム⁷⁾により模型挙動の定量的評価を行って、数値解析で得られた結果との比較検討を行う。

実験では、全てのケースで同じ大きさのブロックを使用したため、相対密度(H/t)の変化は、 t を一定と

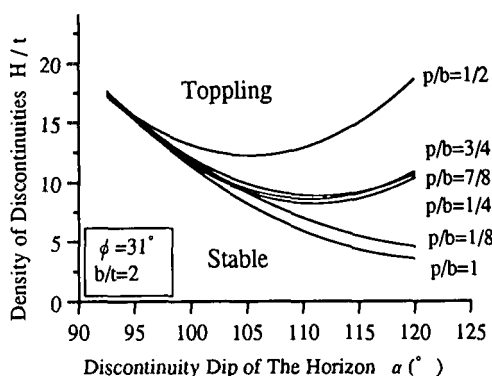


Fig.5 Relationship between H/t and α under changing the arrangement of blocks.

して H を変化させることにより表現した。

(2) 模型材料

ブロックの大きさは、縦幅(b)が24mm、横幅(t)12mm、厚さは18mmで一定である。このブロックの材料は、石膏：石灰：水で重量比で1：2：2.5の割合で混合した試料を型枠に流し込み、乾燥炉で 30°C で24時間乾燥させた後、更に温度を 80°C まで上昇させ48時間養生して硬化させた。この材料でつくったブロック間の摩擦角は 31° 、粘着力はゼロと考える。

(3) 実験方法

実験で変化させた相対密度は $H/t=4.875, 6.50, 10.00, 13.00, 16.25$ である。なお、初期のつり合い状態を得るためにのり面を固定した状態で摩擦プレート

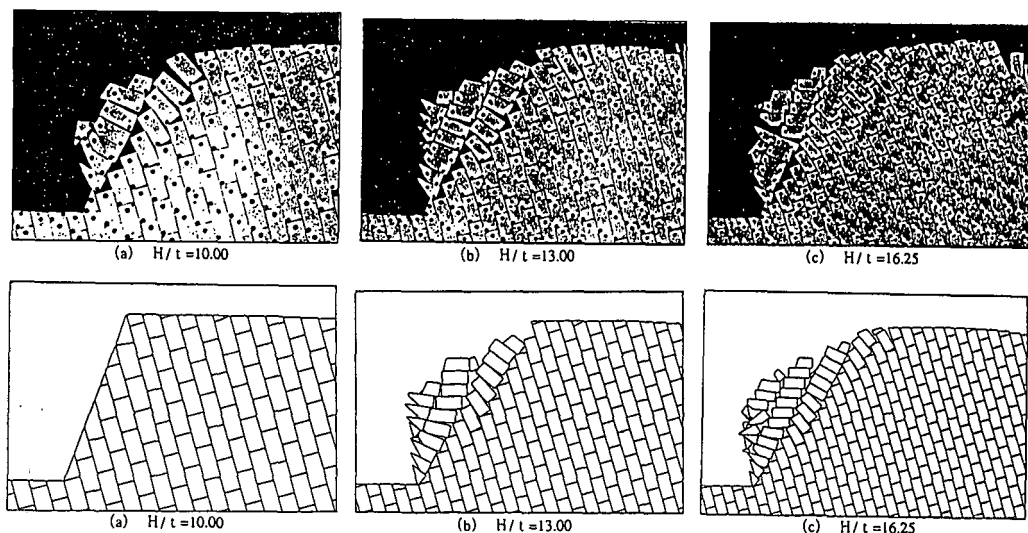


Fig. 6 Toppling failure of slope ($b/t=2, \alpha=15^\circ$).

(The upper is the results obtained in the model test, the lower is obtained in UDEC analysis.)

を2分間動かして摩擦力が一定となる状態を初期状態と考えた。

(4) 実験結果および考察

$H/t=10.00, 13.00, 16.25$ の3ケースの最終状態について、実験結果と解析結果を合わせてFig.6に示す。図より $H/t=10.00$ のケースでは、実験でトップリングを生じたのに対して、解析は安定であった。しかし、相対密度の増加に伴い、崩壊状態は、模型実験と解析ともほぼ同様の結果が得られた。

DEM解析で得られたトップリング破壊プロセスは、模型実験でも同じ傾向が観察され、検証された。破壊の形状は、のり先から数列目までは階段状に破壊し、それ以降は、後列にトップリングが進展するに従い破壊領域が深部に移行している。ほとんどのケースで縦方向の貫通した不連続面で隙間が生じたため、柱状のブロックを形成した。時間が経過するとその柱状ブロックが更に前方に倒れ、破壊領域は時間の経過とともに増加する。全体の斜面の挙動特性は相対密度の増加に伴い、解析で得られた破壊プロセスが模型実験結果でも示された。

実験結果から得られた相対密度と安定角の関係を、解析のCase aの結果と合わせて示すとFig.7のようになる。相対密度が小さい範囲では実験の方が破壊しやすいことが分かる。その原因は、個別要素法では全てのブロックが剛体で取り扱われ、ブロックの変形や接触点での集中力による破壊などが考慮されていないためであると考えられる。模型実験では、接触点が丸みを帯びており、トップリングを生じやすくなる。また、実験のブロックの加工誤差も1つの原因として挙げられ、相対密度が小さくなるほど、1つのブロックが斜面全体に与える影響が大きくなる。一方、相対密度が大きくなるほど両者の差が小さくなり、ほぼ一致するようになる。

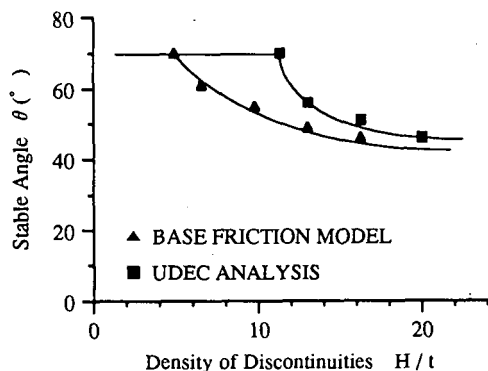


Fig.7 Comparison between experiment and analysis about relation of θ and H/t .

5. おわりに

本研究では、不連続性岩盤斜面でしばしば発生するトップリング崩壊機構の解明に焦点を置き、個別要素法と模型実験を用いて基礎的な検討を試みた。トップリング崩壊のプロセスに関してよい一致性が得られた。解析的および実験的に検討した結果、以下のことが分かった。

1). 岩盤斜面のトップリング崩壊は、不連続面の配列により破壊領域や安定角の違いがみられた。また、相対密度の増加とともに崩壊領域は広がり、安定角は減少するが、ある相対密度で一定の値に近づく。

2). ブロックのかみ合い状態、特にのり先部周辺の状態は、斜面全体の安定性に対して影響度が大きく異なる。

3). 不連続面の摩擦角の影響が、顕著に見られるのは、相対密度が小さい時であり、また、各相対密度に対して摩擦角と安定角の関係は、ブロック形状の影響が見られないため、摩擦角や形状よりも、不連続面の相対密度による影響は大きいと考えられる。

本研究では、重力効果におけるブロックの変形を考慮せず、剛体として解析を進めたが、今後は、さらにブロックが変形可能な場合について、また、キープブロックに対する補強設計についても研究を積み重ねていく所存である。

参考文献：

- 1) Sagaseta, C. (1986) : On the Mode of Instability of a Rigid Block on an Inclined Plane, Rock Mechanics and Rock Engineering 19, pp. 261 - 266.
- 2) Prichard, M.A. & Savigny, K. W. (1989) : Numerical Modelling of Toppling, Geological Engineering Program, Department of Geological Sciences, the University of British Columbia.
- 3) Niyon, D. & Sakurai, S. (1992) : Study on Rock Slope Protection on Toppling Failure of Physical Modellings, 26th US Symp. on Rock Mechanics.
- 4) Cundall, P. A. (1971) : A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movement in Blocky Rock System, Int. Symp. on Rock Fracture, France.
- 5) 江崎哲郎他 (1993) : 大深度に対応できる底面摩擦模型実験装置の開発, 資源と素材, 109, No.7, pp. 49-54.
- 6) Esaki, T. et al. (1993) : Development of a new base friction technique and its application to geotechnical study, Int. Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Turkey, pp. 403-408.
- 7) 江崎哲郎他 (1992) : 底面摩擦模型実験を用いた不連続性岩盤斜面の崩壊機構に関する基礎的研究, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 425-429.