

(87) 底面摩擦模型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

九州大学工学部	正 会 員	江崎哲郎
九州大学工学部	〇正 会 員	相川 明
九州大学工学部大学院	学生会員	蔣 宇静
清水建設株式会社	正 会 員	三谷泰浩

An Experimental Study on Stability of Discontinuous Rock Slopes using Base Friction Model

Tetsuro ESAKI, Akira AIKAWA and Yujing JIANG
Faculty of Engineering, Kyushu University
Yasuhiro MITANI, Shimz Construction Co Ltd

Abstract: The base friction technique is one of the most effective experimental methods for two dimensional ground models taking account of gravity field. This paper describes an experimental approach of the failure process of the discontinuous rock slopes, in which a boundary weak seam inclines with slope at 20 degrees. The model of the discontinuity rock slopes is assumed and consists of an number of rigid rectangular blocks divided by two discontinuity sets, through a site investigation. Each block is made from plaster, lime and sand mixture. The effects of persistence of joints (cross continuous arrangement and intermittent arrangement) and the surface condition of the boundary weak seam are investigated for the failure mode and for the stability, as a parameter of inclination of discontinuity sets. The test results are: (1) The difference of the persistence of joints influences a failure mode of slopes, but it plays a negligible for the required slope angles of stability. (2) The performance of the discontinuous slopes, including a sliding boundary seam beneath them, is dominated by sliding with respect to the properties of the boundary. In the case, it is necessary to consider not only toppling failure but also secondary slump failure. The base friction model is effective for reappearing the real movement and failure of discontinuous rock slopes and for evaluating the stability of them.

1. はじめに

岩盤斜面の破壊様式には、絶壁などで発生する崩落 [rock falls] と、斜面の形状と岩盤の特性に支配されるすべり [sliding], および 岩塊の回転を含む動力学的な破壊様式である転倒 [toppling] がある。このうち転倒破壊は、垂直に近い節理の卓越した斜面でしばしば発生しており、転倒に注目した崩壊機構の解明が重要な課題となっている。しかしながら、不連続岩盤斜面の挙動は、不連続面の分布や特性が大きく関与しており、安定性を評価するには、岩盤を不連続面で区切られた剛体ブロックの集合体とみなして検討すべきで

あるが、その評価法はまだ確立していないのが現状である。斜面を対象とした極限解析法や極限平衡法は古くから応用されてきているものの、これらの方法では応力の平衡は考えるが変位については考慮が不足している。また、個別要素法や不連続性を考慮した有限要素法も活用されてきているが、破壊様式をあらかじめ想定することが難しく、破壊の内容が要素の性質に左右されるなど問題が多い。

一方、模型実験は原型に類似した材料を用いて模擬するため、原型の挙動を容易に表現できる。しかも、現象を視覚的に把握でき、変形や破壊過程に関する影響因子の関連性を把握し易く、実際の挙動の推定に有

効な情報を与える優位性がある。転倒破壊を扱うには動力学的に安定から不安定に移行する過程を考慮する必要があり、特に、すべりやすい層がその岩盤体の下に存在する場合には、転倒はすべりと同時に生じることが多く、転倒のみの検討だけでなく、すべりとの関連性も考慮した検討が必要になってくる。各種種模型実験のなかでも、底面摩擦模型実験法はこの問題に対して有効であると考えられる。

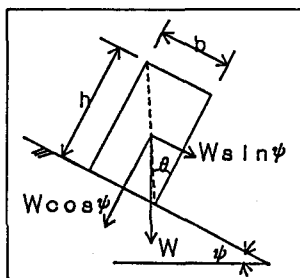


Figure 1 Geometry of a rigid rock block on an inclined plane.

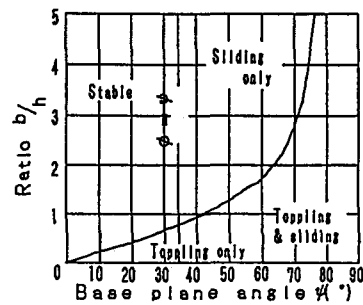


Figure 2 Stability of a block on an inclined plane against sliding and toppling.

本論文は転倒破壊が問題となっている九州のある崩壊地を対象とし、不連続性の岩盤斜面の破壊過程およびそのメカニズムを底面摩擦模型を用いて検討する。

2. 単一剛体ブロックの転倒破壊機構

一般に、岩盤斜面の転倒の挙動を把握するためには Fig.1 のような傾いた平面上に乗っている 1つの剛体ブロックを考える。ブロックのすべり落ちる運動に抵抗する力は摩擦力だけであり、ブロックの動きはブロックの重力ベクトルと平面の傾きψに依存する。このように単一の矩形ブロックを考える場合には、ブロックの幾何的な条件を考慮すれば Fig.2 に示すように

破壊の状況を確定できる。しかしながら、実際の斜面はこれらのブロックの集合体として考えるべきであり、集合体としての検討がされて初めて斜面の安定性が評価できることとなる。

3. 実験モデルおよび実験方法

3.1 地質構造

本研究で対象とした 斜面の地盤想定断面を Fig.3 に示す。この斜面は平均傾斜 30°前後の比較的起伏の少ない単傾斜面であり、この上部台地に引張亀裂が発生し、次第に拡大しつつあるのが観測された。また、斜面の麓部にはブロック状の落石が多くみられる。これらの現地調査より、この変状は、すべり または 転倒によって進展していると考えられる。またこの台地の下には、層厚が約 13mの安山岩層が分布しており、岩の不連続面の発達が多く、脆い岩体となっている。安山岩中に みられる割れ目には、顕著なものとして 2~3m ピッチに発達した柱状節理があり、横方向にも 3~4m 間隔にクラックが発達する。安山岩層の下位の凝灰岩は節理、亀裂の発達はみられず、均質である。しかし、上部安山岩層との境界部には、軟質粘土に変質したものが所々挟まれている。さらにその下には傾斜角 20°前後の安定した安山岩層がある。

3.2 モデル化と実験方法¹⁾

以上のような地質構造のモデル化を行った。幾何スケールを 1/100とし、多亀裂の安山岩層を表現するために、縦30mm×横18mm×厚さ25mmのブロックとした。材料には、不連続面を明確に定義できること、材料の製作が容易であることから、石膏:石灰:標準砂:水を重量比で 1:3:12:3.61の割合で混合した試料を型枠に流し込み、乾燥器で30°Cで 24時間乾燥させた後、さらに温度を80°Cまで上げて48時間養生し硬化させたものを、ブロックに加工した。材料の圧縮強度は 14.2kgf/cm²

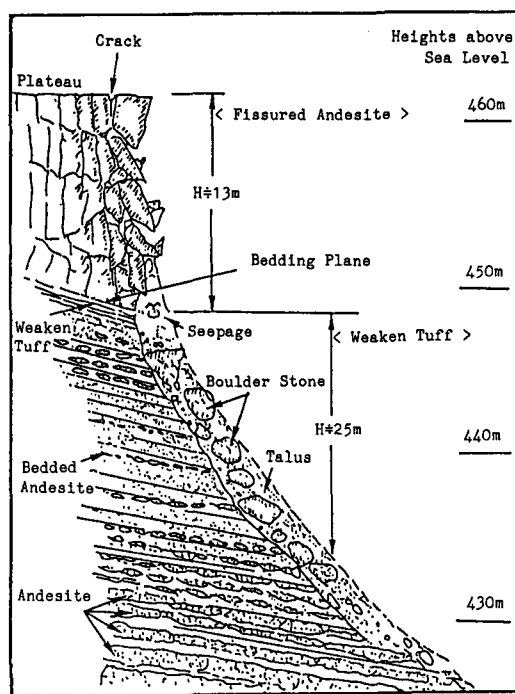


Figure 3 Geological profile of the slope.

であり、材料の不連続面相互間の内部摩擦角は 30° であり、粘着力は 0 である。

このブロックを底面摩擦模型実験装置上に並べてモデルを作製し、実験を行った。底面摩擦模型実験は、垂直二次元のモデルを摩擦板上に水平に置き、重力に相当する物体力を、底面摩擦板の水平移動による摩擦力によって作用させ、模型の変形や破壊状況を再現するものである。この方法によると、安定した重力効果が得られ、岩盤斜面の変形、破壊、崩落の逐次的な変化過程を連続的に把握できる。なお、本装置は、電動スクリーギアにより摩擦板を直接駆動する方式を採用している。

模型の挙動は、装置上方に吊下げたビデオカメラを、二軸アクチュエータを用いて自動的に移動させて、ビデオフロッピーに分割画面として記録する。実験の画像データは、画像解析装置を用いてグラフィック処理し、X-Yプロッタで出力させるとともに、ブロックの回転・並進挙動を数値として把握し、ブロックのすべり、転倒、安定の判定を行う。

層厚約 13m の上部安山岩層については、現地調査では亀裂の状況が明確でないことから、不連続面が貫通している場合とそうでない場合を考え、ブロックを格子状に配列した場合と千鳥状に配列した場合の 2通りのモデル化を行った。この安山岩層の下方にある凝灰岩層および安山岩層は、基層であると考え不動とし、境界部は傾斜角 20° の流れ盤とした。この境界層は、単なるすべりのみならず、上部岩盤の崩壊に敏感であるため、上部の不連続面相互間と同じ程度の力学的特性を持ち、すべらない場合 ($\phi = 30^\circ$) と、内部摩擦角が小さく、すべる場合に分け、後者の場合テフロンシートを用いて材料との摩擦角を $\phi = 16^\circ$ に調整した。本実験ではすべり層上に配列されたブロックの角度を、水平方向からの不連続面の傾斜角 α で表現し、 α をパラメータとして $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ と変化させた。

3. 実験結果

3.1 境界層がすべらない場合の斜面の破壊様式

(a) 格子配列の場合

Fig. 4 に、格子配列のモデルで、しかも境界層がすべらない場合の結果を図示する。図には最初の状態と

■:Collapse ■:Toppling ■:Sliding ■:Toppling & Sliding □:Stable

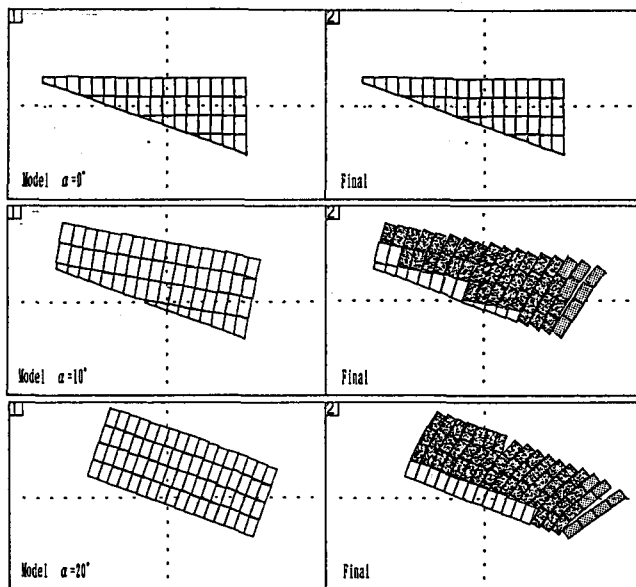


Figure 4 Movement of rock blocks, cross continuous arrangement.

■:Collapse ■:Toppling ■:Sliding ■:Toppling & Sliding □:Stable

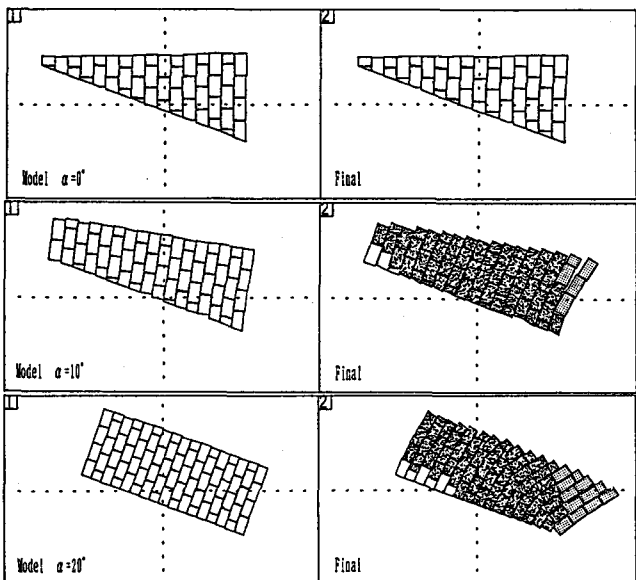


Figure 5 Movement of rock blocks, intermittent arrangement.

最終的な状態のみを示す。不連続面の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ の場合には、すべてのブロックが安定である。 $\alpha = 10^\circ$ の場合には1列4個のブロックが柱状に一体となって転倒を始める。そして最終的には最前列から4列目まで

は最下部から転倒し、5～8列目までは上3段が転倒し、9～15列目までは上2段が転倒するというように、転倒の発生位置が段々と斜面上部に移行しているのがわかる。 $\alpha = 20^\circ$ でも1列4個のブロックが一体となって、最前列のブロックから後方へと順に転倒破壊が進行する。最終的には最前列から4列目までは最下部から、5～14列目までは上3段が、15～17列目までは上2段が転倒する。

(b) 千鳥配列の場合 (Fig. 5).

$\alpha = 0^\circ$ の場合には、すべてのブロックが安定である。 $\alpha = 10^\circ$ の場合には、転倒破壊が発生する。 $\alpha = 20^\circ$ でも転倒破壊が発生するが、図によると、法先から、明確な破断された面が形成されていることがわかる。この面を境にして、上側のブロック群では転倒と同時にすべりによる破壊が生じ、下方のブロック群では転倒による破壊が卓越して、2つの群に分断される。このように、不連続面の幾何的な構造の違いが、岩盤斜面の破壊様式に大きく影響することが分かる。

3.2 境界層がすべる場合の破壊状況

本実験で境界層のすべりを考慮した場合には、境界層の摩擦角は $\phi = 16^\circ$ であり、境界層上に単一の剛体ブロックが存在する場合には、理論上はすべりが発生する。しかし、本実験のように斜面を剛体ブロックの集合体とすれば、各ブロックの相互作用のため、すべり以外の破壊も発生する可能性がある。

(a) 格子配列の場合 (Fig. 6)

$\alpha = 0^\circ$ の場合には、各列とも下方のブロックが斜面前方にすべり出し、斜面は安定しない。また前列のブロックほど移動が大きく、不連続面の傾斜角が負となるような移動を示し、法先部が突出して落下するという形式となる。この形式は、現場の崩落にも見受けられる。最終的には、このような崩落を繰り返すことになる。 $\alpha = 10^\circ$ の場合も、すべり面の移動で、最前列のブロックが法先から崩落するが、すべり面のない場合と比べて、転倒よりもすべりの方が卓越する傾向にある。

$\alpha = 20^\circ$ の場合は、ほとんどのブロックがすべりと転倒を生じる。すべり面が存在しない場合には、最下段には転倒しない安定なブロックが存在していたが、すべりによってブロック間に間隔が生じ転倒しやすくなる。

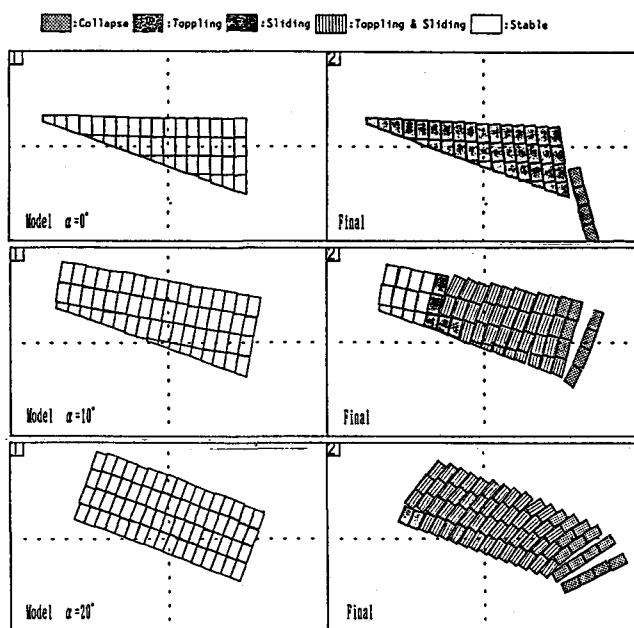


Figure 6 Movement of rock blocks, cross continuous arrangement with sliding surface.

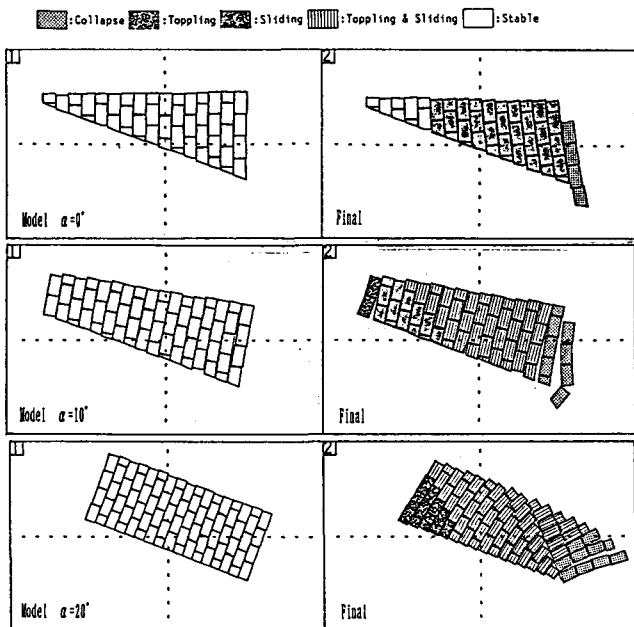


Figure 7 Movement of rock blocks, intermittent arrangement with sliding surface.

(b) 千鳥配列の場合 (Fig. 7)

$\alpha = 0^\circ$ の場合には、格子の場合と同様に、前方のブロックほどすべりによる移動が大きく、法先部が突出して落下する。 $\alpha = 10^\circ$ の場合には、転倒よりすべり

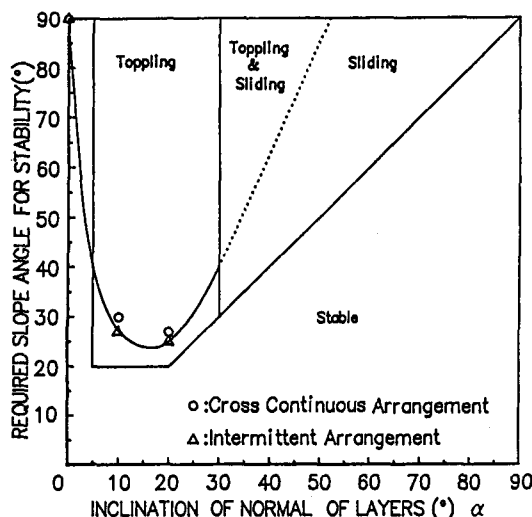


Figure 8 Required slope angles for stability against toppling and sliding with respect to two different block arrangements.

が卓越する傾向にあり、すべり面の移動で最前列および2列目が法先から落下する。 $\alpha = 20^\circ$ の場合にも、ほとんどのブロックが転倒とすべりを生じる。すべりによりブロック間に隙間が生じ、転倒しやすくなる。千鳥配列で、すべり面のない場合と同じく、法先より斜め後方に向かって、明確に破断された面が生じ、この面より上方のブロックでは転倒とともに、破断面に沿ったすべりが生じ、この面を境に2つの群に分断される。また、斜面後方のブロックには転倒のみで、すべりを生じていないブロックも存在している。

実験結果からわかるように、境界層がすべる場合には、その挙動はすべり面の性質に支配的であり、転倒に比べて、すべりの影響が卓越する。本実験のように、すべる可能性のある境界層が、その岩盤体の下に存在する場合には、転倒のみの検討だけでなく、すべりも考慮することが必要である。

4. 考察

不連続面の幾何的構造の違いによる破壊状況の相違について、実験より得られた安定角をもとに考察する。

Fig.8は不連続面の傾斜角と斜面の安定角との関係を示したものである。図中の直線は、力のつりあい条件式による解析の結果である。つりあい条件式では、不連続面の傾斜角 $\alpha = 5^\circ$ の状態までは斜面は完全に安定である。傾斜角が 5° を超えると斜面は転倒により破壊するため、安定角は傾斜角 α に等しくなる。そ

の後、すべり破壊の条件(傾斜角 α =内部摩擦角 ϕ)を満足するまで、安定角は傾斜角と等しくなる。傾斜角が不連続面の内部摩擦角を超えると、斜面に沿うすべりを生じるため、破壊領域は、転倒のみ、すべりと転倒、すべりのみの3領域に分かれる。

この図中に、実験で得られた転倒を生じる限界角を示す。転倒の条件に関しては、解析値に比べ実験値の方が安定域が増加しており、傾斜角 α が $10^\circ \sim 20^\circ$ の間で、安定角は減少から増加へと変化すると考えられる。

また、図には、不連続面が貫通する場合と、そうでない場合の安定角を同時に示しているが、これらを比較すると、不連続面の幾何的構造の差異による安定角の差はわずかである。前章の実験結果で述べたように、不連続面の幾何的構造の違いは、斜面の破壊様式には影響があるものの、斜面の安定角にはほとんど影響を与えないと判断できる。

5. まとめ

不連続性の岩盤斜面について、岩盤を不連続面で区切られたブロックの集合体と仮定し、不連続面の傾斜角をパラメータとして、不連続面の幾何的構造の差異、および境界層のすべりの状態に対する斜面の安定性を、底面摩擦模型を用いて検討した。その結果以下のことが明かとなった。

- (1) 不連続面の幾何的な構造の違いにより破壊様式が異なる。しかし、斜面の安定角に対してはほとんど影響を与えない。
- (2) 境界層がすべる場合には、その挙動はすべり面の性質に支配的であり、転倒はわずかに抑制される一方で、すべりの影響が卓越する。本実験のように、すべる可能性のある境界層が、その岩盤体の下に存在する場合には、境界層の性質が斜面全体の挙動に大きく関与しており、転倒ばかりでなく、すべりも考慮する必要がある。
- (3) 転倒の条件に関しては、単一ブロックの場合に比べて実験結果の方が安定域が増加しており、実際の挙動を把握するには、模型実験が効果的である。

今後は現場の不連続面の評価、三次元性の考慮、法面勾配の影響、時間的効果などの検討も行ない、補強方法や崩落の予測方法の確立につとめたい。

<参考文献>

- 1) 江崎哲郎,他(1991):22回岩盤力学に関するシンポジウム。