

(33) 不連続性岩盤斜面の崩壊形状に関する実験的研究

名城大学 正会員○清水 泰弘

名古屋大学 " 市川 康明

" " 川本 脩 万

1. はじめに

最近、山岳道路または原子力や水力発電所などの建設に於いて、しばしば長大斜面の工事が必要になる。しかしながら、このような現場でよく出現する広域変成岩や堆積岩は、岩盤の変形性や力学的な異方性が卓越する層理、節理、亀裂を持っている。これらの不連続面を含む斜面の安定性を論ずる上で、斜面周辺の断層活動性、地質構造、岩石分布、岩質などを解明して、さらに合理的な調査、試験法に基づいて的確な評価を行う事が必要である。この不連続岩盤の安定性を評価するには、不連続を構成している物の地震時における挙動を把握する事も重要である。そこで、不連続性岩盤斜面の地震時の挙動を二次元状態の模型実験で調べてみた。しかし、遠心力載荷装置等の大型実験装置以外ではこの種の模型実験に最も必要な自重をシュミレートすることが非常に困難である。そこで、それぞれの力学的特徴を生かした三種類の実験方法で斜面崩壊実験を行い比較してみた。即ちブロックの表面摩擦係数が最も影響する静的傾斜破壊実験、水平振動を加える振動破壊実験、それにブロックとゴムベルトの摩擦によって自重を増加させる底面摩擦実験である。

2. 実験方法

2-1. 実験装置

a. 静的傾斜破壊実験： 実験装置は、 $180 \times 100 \times 180$ cmの木製（一部鋼製）の装置である。この装置は、図-1に示すような形状であり、鋼製の支持台の上に木製のテーブルが一本の水平シャフトと軸受で固定されている。そして、支持台に取り付けてあるスクリュウシャフトを回すことによりテーブルを傾斜させる事が出来るようになっている。テーブルの背面には黒色に塗った合板が立ててあり、その合板には $30'$ ごとに傾斜角度が記してあり指標が取り付けられている。この合板とブロックの間には5mmの間隔が設けてあり、斜面模型が合板に接触しないようになっている。斜面の破壊過程は写真撮影によって一定傾斜角度と大きな変形が生じた時にその都度記録し、全体破壊が生ずるまで続けた。

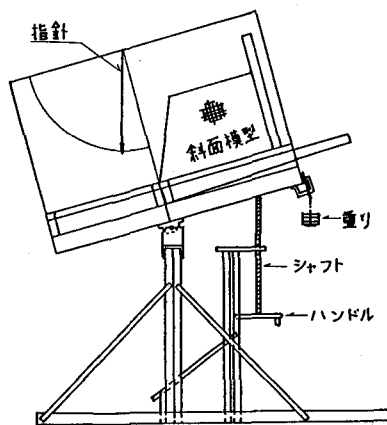


図-1 静的傾斜破壊実験装置

b. 振動破壊実験： この装置は、斜面模型を搭載して加振する振動テーブルとその静圧軸受け、油圧加振機制御装置および油圧発生装置により構成されている。今回の実験では、入力波全て2.5ヘルツの正弦波を用いたが、この周波数は予備実験で周波数を変えた実験を行ってさだめた。実験は全体破壊が生ずるまで加振度入力振幅を増加させて行い、一定間隔および斜面に大きな変化が生じた時に写真撮影によって記録し、同時にビデオに収録した。

c. 底面摩擦模型実験¹⁾ この実験装置は、エンドレスのゴムベルトを可変速小型モーターを使用して等速度（ 9.6 cm/min ）で駆動する。そして、固定された障壁によって次々と出てくるゴムベルトから拘束される模型内に重力効果を生じさせるものである。模型を固定する枠の大きさが $50 \times 50 \text{ cm}$ であり、その枠内に斜面模型に地震荷重を作用させるための傾斜装置を取り付けたため斜面模型の大きさが制限され、他の実験に使用した 1 cm 角のブロックではなく $5 \times 5 \times 10$ 、 $5 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ の物を使用した。斜面模型の破壊形状の記録は、一定間隔の傾斜

角度と斜面模型に大きな変化が見られた時に写真撮影により行った。

2-2. 斜面模型の概要

斜面模型は、檜のブロックの角柱を積み上げて成形する。実験は、ブロックの寸法、積み方、斜面角度そして初期成層角度をそれぞれ変えて行った。これらの実験条件を以下に示す。

- 1) ブロックの材料および寸法： 良く乾燥した檜を使用し、 5×5 、 5×10 、 10×10 、 10×20 mmの角断面で長さ50 mmの物を約2万本製作した。
- 2) ブロックの積み方： ブロックの角を揃えた方眼積み（Aタイプ）と隣接するブロックを互いに1/2の長さだけずらした千鳥積み（Bタイプ）の二種類とした。
- 3) 斜面角度： 90° 、 63° 、 45° の三種類について行った。
- 4) 初期成層角度： 水平より時計回り（差し目）に 15° の間隔で6種類と反時計回り（流れ目）に同様に6種類を考えた。

斜面模型は底辺長さ60 cm、高さ40 cm（底面摩擦模型実験では底辺長さ30 cm、高さ20）の大きさとした。また、初期成層角度が 0° もしくは 90° 以外では、そのままではブロックを積み上げることが出来ないため、初期成層角度に合わせた鋸歯状の木型を作りテーブルとブロックの間に使用した。

2-3. 模型材料の表面摩擦係数

このような実験では、ブロックの表面摩擦係数が大きな影響を及ぼす。一般に摩擦則は、

$$\tau = \mu' \sigma_n + c'$$

とかける。ここで、 σ_n は垂直応力、 τ はせん断応力であり、材料定数 μ' は摩擦係数、 c' は粘着力とよばれる。ただし、 c' は零となる事が多い。摩擦係数と粘着力を決定するために、断面 10×10 cm、厚さ2 cmの檜の板を同じ材料の板の上に載せて垂直荷重を載荷し、荷重変換器を介して水平荷重を載荷して、滑り出し時および滑り開始後の荷重-変位を計測した。その計測結果を示すと図-2の様である。なお、檜は木目が平行になる場合と、木目同士が垂直に交わる場合の二種類の試験をおこなった。これらの結果より、各ブロックが滑り出した後の摩擦係数（即ち動摩擦係数）粘着力は次の様になる。

木目平行：

$$\mu' = \tan(28.6^\circ) = 0.55$$

$$c' = 4 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$$

木目直角：

$$\mu' = \tan(22.8^\circ) = 0.42$$

$$c' = 3 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$$

2-4. 相似則

岩盤構造物の力学挙動は、母岩の力学特性、不連続面の規模、不連続面における充填物の有無、岩盤の初期応力状態等に影響されて、極めて複雑である。従って、模型実験によってこれをシュミレートする場合単に幾何形状を相似にするだけでは、岩盤の力学特性をトレースできない。ここでは、不連続岩盤斜面とその模型の相似性が①斜面形状、②分布不連続面の幾何特性、③材料の密度および④滑り面の特性によって支配されているとかがえる。いま実際の岩盤斜面と模型の斜面角度および層傾斜が同一であり、岩盤内の亀裂間隔（スペーシング）と斜面高の比は、模型ブロックの大きさと模型斜面の高さの比と等しいとする。これによって斜面形状と分布不

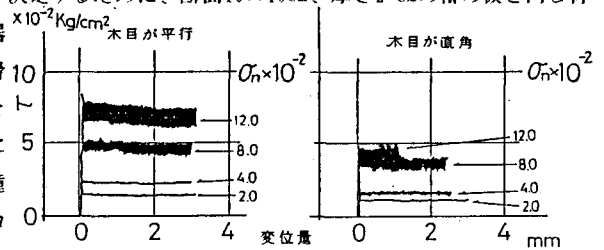


図-2(a) 檜の表面摩擦試験結果

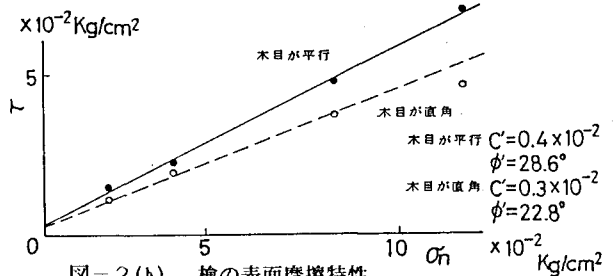


図-2(b) 檜の表面摩擦特性

写真-1. (a) 静的傾斜破壊実験結果：10×10、傾斜角63°、成層角-30° <方眼積み>

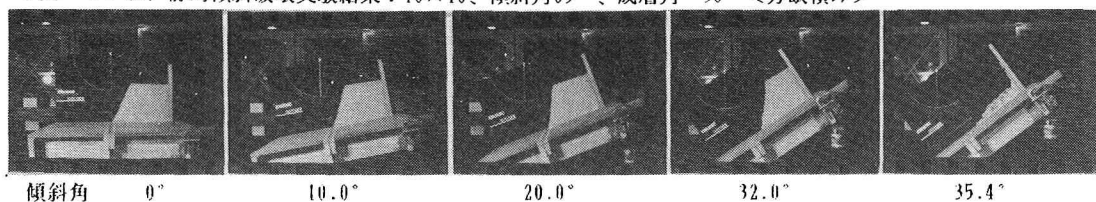


写真-1. (b) 静的傾斜破壊実験結果：10×10、傾斜角63°、成層角-30° <千鳥積み>

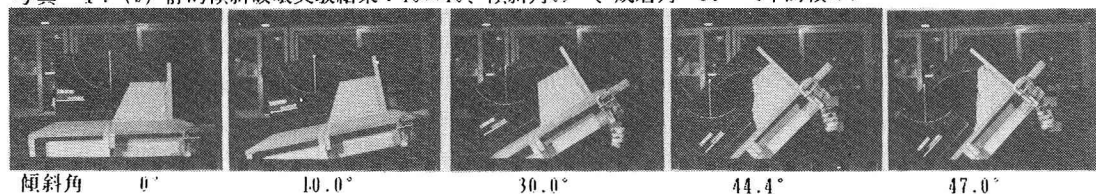


写真-2. (a) 振動破壊実験結果：10×10、傾斜角63°、成層角-30° <方眼積み>

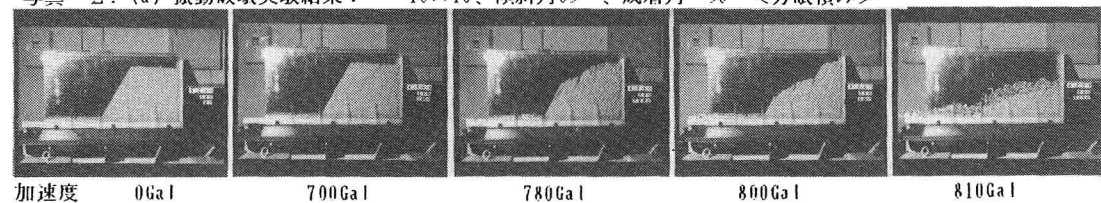


写真-2. (b) 振動破壊実験結果：10×10、傾斜角63°、成層角-30° <千鳥積み>

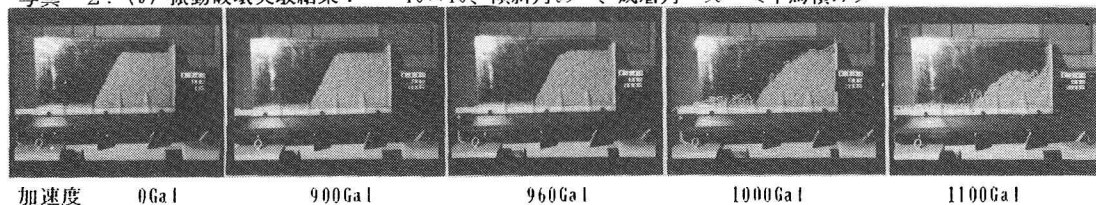


写真-3. (a) 底面摩擦模型実験結果：10×10、傾斜角63°、成層角-30° <方眼積み>

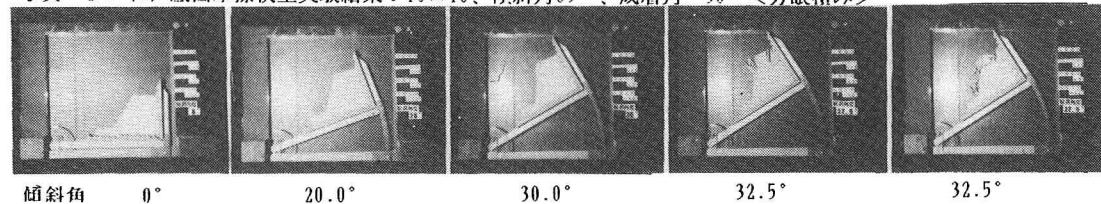
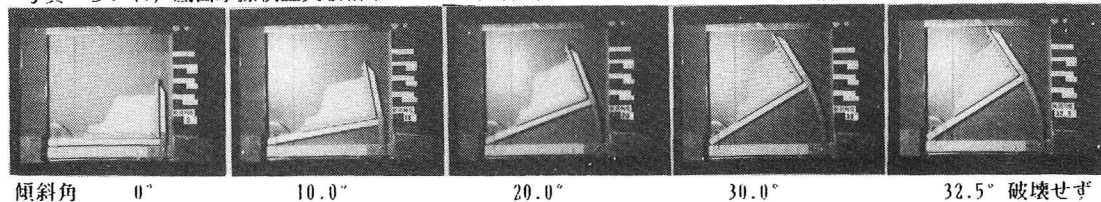


写真-3. (b) 底面摩擦模型実験結果：10×10、傾斜角63°、成層角-30° <千鳥積み>



連続の幾何特性の相似性は保証されるものとする。

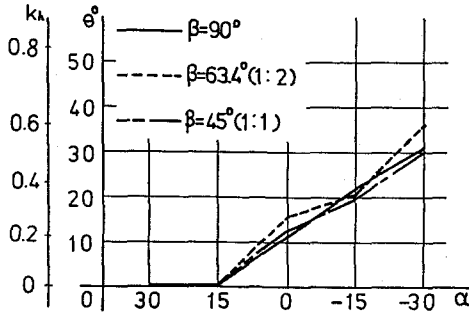


図-3(a) 静的傾斜破壊実験結果 (方眼積み)

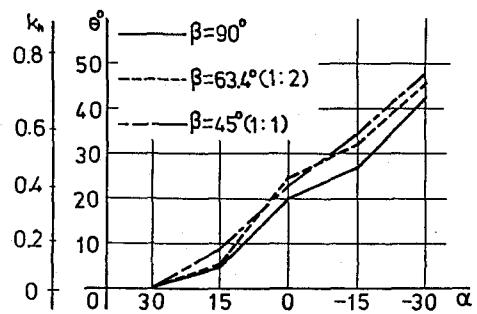


図-3(b) 静的傾斜破壊実験結果 (千鳥積み)

3. 実験結果及び考察

それぞれの実験結果から、ブロック寸法が $10 \times 10 \text{ mm}$ (底面摩擦模型実験は $5 \times 5 \text{ mm}$)、斜面角度 63° 、初期成層角度 -30° (差し目) のケースを例にとり、方眼積み、千鳥積みの両方についての破壊過程を写真-1より写真-3に示す。また、この破壊過程について概略説明すると以下のようである。

写真-1の(a)(b)は静的傾斜実験の結果であり、一つの実験を五枚の写真で構成してある。(a)の方眼積みでは傾斜角 25° までは殆ど変化が無く、 32° で法肩の部分に初期破壊が見られ、 35.4° で一気に崩壊している。(b)の千鳥積みの場合は、傾斜角が 35° まで変化が無く 39.6° になって法肩が初期破壊を起こし、 44° より全体に崩壊が始まっている。両ケースを比較しても明らかな様に方眼積みよりも千鳥積みの方が破壊しにくいようである。この実験方法の結果を全体的にみると、流れ目の場合は初期成層面に沿って平面滑り破壊を起こし、差し目の時は初期成層角が急な場合にトップリング破壊が見られ、緩いときや初期成層角が 0° では円弧滑り破壊が生じた。この実験結果をまとめて図-3に示す。この図では、初期成層角度が流れ目の $+30^\circ$ から差し目の -30° までが示してある。ブロックの積み方で比較すると千鳥積みのほうが方眼積みより約 10° 程破壊しにくい事初期成層角度が斜面の強度差に非常に影響を与えるが、斜面角度には影響しない事等が明かとなった。

写真-2の(a)(b)は振動破壊実験の結果であり、周波数を 2.5 Hz に固定し、加速度を順次増加させて実験したものである。(a)の方眼積みでは、 600 Gal 付近まで変化が無く 750 Gal で斜面表面部分のブロックが移動したり落下し始め、加速度の増加と共に同様な減少が上部から進行し、 780 Gal で全体に及んだ。(b)で斜面表面のブロックの移動が始まったのが 880 Gal で、その現象が暫く続いた後 1000 Gal になって急速に全体崩壊に至った。この時斜面上部の斜面より隔たった所でより深く崩壊した。この実験方法では、斜面上表面でブロックが陥ったり転倒移動したり落下したりする現象が殆どのケースについて確認された。

写真-3の(a)(b)は、底面摩擦模型実験の結果である。(a)は、方眼積みのケースで傾斜角度が 25° に成るまで変化は見られず、 30° で上部よりブロックの配列方向に内部に向かってブロック間に隙間が生じ始め、 32.5° になると時間の経過と共に、高さの $2/3$ 付近より上部の全てのブロックがトップリング破壊を起こした。(b)は千鳥積みのケースであり、実験装置の最大の傾斜角に成っても法肩の一部が滑落しただけであった。この実験方法では、ゴムベルトの速さで個々のブロックが非常にゆっくりと移動し、回転し、衝突した。

これらの三種類の実験結果を総合的に見ると、斜面崩壊の過程にはそれぞれの装置の特徴が顕著に表れた。しかし、斜面角度や初期成層角度それにブロックの積み方による崩壊の傾向には大差がないことが判明した。

4. おわりに

本報告では、三種類の実験結果を詳細に比較する所まで至らなかった。以後については次の機会に報告する。

5. 参考文献

- 1). 川本脛万・尾原祐三・市川康明: 日本鉱業会誌, 99 [1139] 1-6 (1983)

(33) A Model Study of Dynamic Fracturing Process for
Jointed Rock Mass

Y. Shimizu *

Y. Ichikawa **

T. Kawamoto **

ABSTRACT

Recently, rock slope cuts in large scale is often accompanied with the construction of nuclear and water power plants and mountain roads. However, rock in nature has a number of discontinuities such as bedding planes, joints, fracture zones and others. As a result, their mechanical behaviour and properties become highly anisotropic. Therefore, it is necessary to take this anisotropic characteristics into consideration in the case of investigation of the stability of slopes.

The authors have carried out two dimensional model tests, in which the static and dynamic failures have been produced by an inclining (tilting) slope model, a base friction model and a shaking table simulation, respectively, as a part of research program regarding the seismic stability of large scale slopes.

The results of physical modelling tests of three kinds are described and discussed in this paper from view points of:

- 1). The mechanical behaviours and failure state and modes of slope in the three different physical test techniques.
- 2). The relations and comparisons of the results of these tests.

* Dept. of civil Engineering, Meijo University

** Dept. of geotechnical Eng., Nagoya University