

不連続性岩盤斜面の地震時における安定性と崩壊形状

DYNAMIC STABILITY AND FAILURE MODES OF SLOPES IN DISCONTINUOUS ROCK MASS

清水泰弘*・Ömer AYDAN**・市川康明***・川本脩万****

By Yasuhiro SHIMIZU, Ömer AYDAN, Yasuaki ICHIKAWA and Toshikazu KAWAMOTO

The stability of rock slopes during earthquakes are of great concern in rock engineering works such as highway, dam, and nuclear power station constructions. As rock mass in nature is usually discontinuous, the stability of rock slopes will be governed by the spatial distribution of discontinuities in relation with the geometry of slope and their mechanical properties rather than the rock element. The authors have carried out some model tests on discontinuous rock slopes using three different model tests techniques in order to investigate the dynamic behaviour and failure modes of the slopes in discontinuous rock mass. This paper describes the findings and observations made on model rock slopes with various discontinuity patterns and slope geometry. In addition some stability criterions are developed and the calculated results are compared with those of experiments.

Keywords : rock slope, dynamic stability, discontinuity, model test

1. はじめに

大規模な岩盤斜面の掘削は、山岳道路、水力発電所、および原子力発電所の建設や露天掘鉱山においてよくみられる。しかしながら、自然な岩盤には層理、節理、破碎した部分等のきわめて多種多様な不連続面が内包されており、これらが結果的に岩盤の力学的特性を特徴付けている。

岩盤斜面の不安定現象は、母岩の破壊に基づくことはまれで、大部分は岩盤ブロックの構造的弱面となる不連続面によるものがほとんどである。したがって、岩盤斜面の地震時における安定性を考える場合、これら不連続面を十分に考慮した評価をしなくてはならない。

地震時における岩盤斜面の安定性を評価するには、地震力を静的に等価な外力に置き換えて作用させる方法と動的に外力を作用させる手法が用いられる。また、それぞれに対して解析的アプローチと実験的アプローチがある。

解析的アプローチとして、静的手法では地震時に①岩塊の質量に比例して最大加速度を考慮した慣性力（地震力）が作用すること、②ある破壊面上に載った岩体は破壊しない剛体とみなせること、③加速度が時間に依存しないこと、④一定の加速度が岩体に均一に加わることを基本的に仮定している。また、このとき破壊のモードを導入する必要もある。この方法は、実際現象と異なった力学条件のもとでのアプローチであることが指摘されているが、簡便なために現在も多くの耐震設計に用いられている。

一方、一般に地盤の材料特性や幾何学的形状が複雑であるため、有限要素法や剛体ばねモデル、それに個別要素法などを用いた数値解析が行われている^{1)~3)}。

しかしながらこれらの解析手法では、不連続面を数多く含む岩盤の挙動を十分正確に表現し得るかどうか明らかでなく、また動的な解析には多大な計算時間を要するために、工学的に実用的な段階に至ってはいないと考えられる。

岩盤斜面の実物実験は、規模が大きいことや費用の面で困難が多く、もっぱら実験的アプローチには、模型実験が多く用いられている。そして、この模型実験は、多くの場合解析的アプローチと併用される。これらの方法は、地震時に対する構造物と地盤の動的影響をシミュ

* 正会員 名城大学講師 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501)

** 正会員 工修 名古屋大学助手 工学部地盤工学科
(〒464 名古屋市千種区不老町)

*** 正会員 工博 名古屋大学助教授 (同上)

**** 正会員 工博 名古屋大学教授 (同上)

レートするものであり、過去の震害記録や地震観測例とともに新しい耐震技術に取り入れられている。

著者らは、長大斜面の地震時安定性に関する研究の一環として、二次元状態で多数の木製ブロックを積み上げて形成した斜面模型による各種の実験を行ってきた^{4)~6)}。この種の実験には、Maslov⁷⁾による自然斜面におけるトップリングの研究、Niyom⁸⁾による掘削時における斜面安定の研究等があるが、地震荷重を考慮した動的問題に関する実験的研究はほとんど見出せない。

本研究では、地震力を考慮するために振動台を使った実験と、震度法の考え方をもとにした傾斜破壊実験および底面摩擦模型実験を実施し、個々のブロックの挙動と斜面崩壊形状について調べた。さらに震度法に基づいた不連続性岩盤斜面の理論的な安定条件式を導き、各種条件下における計算を行って、実験結果およびこれまでに観測された実際の不連続性岩盤斜面の破壊例との比較検討を行った。

2. 不連続性岩盤斜面の破壊モード

岩盤斜面の挙動は母岩の変形よりも不連続面の挙動により多く支配されることは前に述べたとおりである。したがって岩盤斜面の安定性は、計画された掘削の幾何形状とともに、不連続面の三次元的分布とその連続性および不連続面のせん断特性等によって支配される。

不連続性岩盤斜面の破壊形態は、次の三種に分けられる。

- a) すべり破壊
- b) トップリング破壊
- c) バックリング破壊

さらに、岩塊に働く力の状態によって a), b) は能動型 (active mode) と受動型 (passive mode) の2つに分けて考えられる (Fig. 1)。

以下では主としてすべり破壊とトップリング破壊の各モードにおける破壊条件について考えてみることにする。

3. 不連続性岩盤斜面の安定

不連続性岩盤斜面の安定性を検討する前に、まず、単一の平行六面体の岩盤ブロックの安定条件について考え、これを不連続性岩盤斜面に拡張することを図ろう。

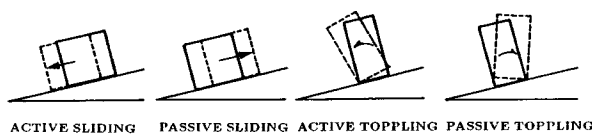


Fig. 1 Failure modes of a block.

(1) 岩柱の安定条件

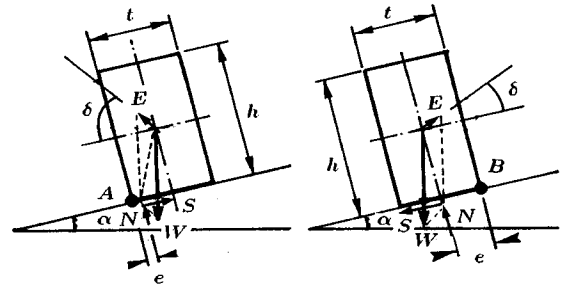
単一の岩柱の滑動および転倒モードは Fig. 1 に示されるとおりである。また、能動型と受動型について示すと Fig. 2 のようである。ここで、 α をベース面の勾配、 δ を地震荷重とベース面のなす角度、 W をブロックの自重、 N を α 面に対して垂直な力、 S を α 面に対して平行な力、 e を地震力 E とブロックの自重 W の合力線がベース面と交差する点よりブロックの角点 A または B 点までの距離、 h をブロックの高さ、 t をブロックの幅、 ϕ を岩石ブロックの表面摩擦角とし、能動型と受動型の各力学系について、滑動に対するつり合い条件式を適用すると、

$$\frac{S}{N} \begin{cases} > \tan \phi & \text{不安定 (滑動)} \\ = \tan \phi & \text{平衡状態} \dots \dots \dots (1) \\ < \tan \phi & \text{安定} \end{cases}$$

となる。一方、トップリングに対しては、 $\tan \phi > S/N$ の条件のもとで

$$\begin{cases} e < 0 & \text{不安定 (転倒)} \\ e = 0 & \text{平衡状態} \dots \dots \dots (2) \\ e > 0 & \text{安定} \end{cases}$$

となる。



Active mode Passive mode

Fig. 2 Force systems acting on a block under active and passive states.

さらに、岩柱の自重の η 倍の地震力がベース面より角度 δ の方向で加わるとすれば安定条件式は

能動型
すべりに対して

$$\eta \leq \frac{\sin(\alpha - \phi)}{\cos(\delta - \phi)} \dots \dots \dots (3)$$

トップリングに対して

$$\eta \leq \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\cos(\delta - \theta)} \dots \dots \dots (4)$$

受動型
すべりに対して

$$\eta \leq \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\cos(\delta - \phi)} \dots \dots \dots (5)$$

トップリングに対して

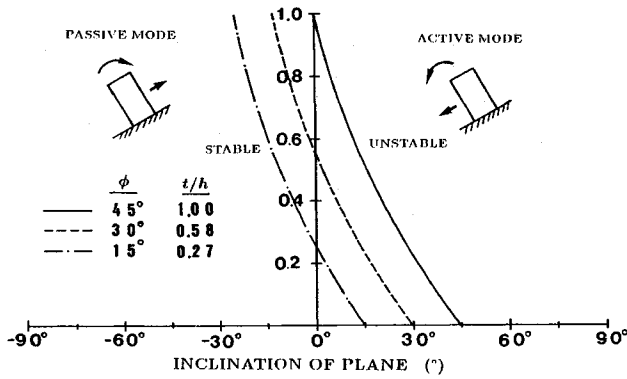


Fig. 3 Stability charts for a block under active and passive states.

$$\eta \leq \frac{\sin(\alpha + \theta)}{\cos(\delta - \theta)} \quad (6)$$

と求まる。ここで

$$\theta = \tan^{-1}(t/h) \quad (7)$$

である。これらの条件に従い、安定および不安定領域を図示すると Fig. 3 のようになる。

(2) 不連続性岩盤斜面の安定条件

不連続性岩盤斜面の安定条件に対する理論的な式を誘導するための出発点として、斜面が1つの岩柱あるいはいくつかの岩柱で構成されたものとする^{9)~12)}。

また一般的に堆積岩、変成岩、火成岩等には、層理面、片理面、流理面等の少なくとも1つ以上の不連続面をもっている。その他に地質構造変化によって節理、へき開等の不連続面の存在がよくみられる。これらの不連続面を二次元的に単純化し大別して示すと Fig. 4 に示すような方眼状 (cross continuous) と千鳥状 (intermittent) の形状にパターン化することができるものとする。

さらに、滑動や転倒を生ずる岩塊 (不安定岩塊とよぶ

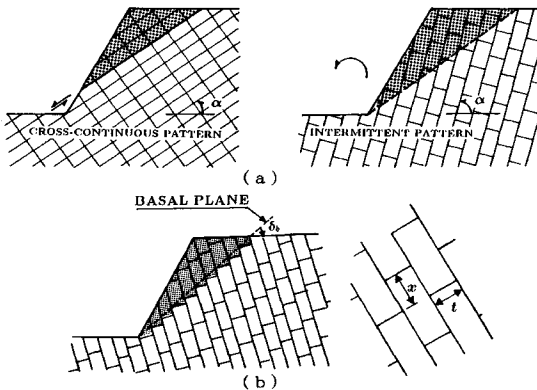


Fig. 4 Illustration of potential failure regions and definition of the basal plane.

: Fig. 4(a) 内で加速度の大きさと方向が一樣に分布すると仮定すると破壊面と水平面のなす角 δ_b は

$$\delta_b = \begin{cases} \alpha + \xi & \text{能動型に対して} \\ 0 & \delta_b < 0 \text{ に対して} \\ \xi - (90 - \alpha) & \delta_b > 0 \text{ かつ受動型に対して} \end{cases} \quad (8)$$

である。ここで x および t を Fig. 4 (b) のように取ると $\xi = \tan^{-1}(x/t)$ である。なお、岩盤の各ブロックが方眼積み形態のときには $\xi = 0^\circ$ 、同じ形の岩盤ブロックが千鳥形態のときには $\xi > 0$ となることに注意する (今回のケースでは $\xi = 26.5^\circ$ あるいは 45° である)。

不安定岩盤内の i 番目の岩柱の安定性を考える場合 (Fig. 5), すべりに対する安定条件は前の章で述べたように1つの岩柱における安定条件と同一である。一方、トップリングに対しては、 i 番目の岩柱のつり合い方程式より $i-1$ 番目の岩柱から働く力 P_{i-1} が各モードに対して次のように求められる。

能動型のトップリングに対して

$$P_{i-1} = \frac{1}{h_{i-1}} \{ W_i [(\sin \alpha + \eta \cos \delta) \frac{h_i}{2} - (\cos \alpha - \eta \sin \delta) \frac{t_i}{2}] + P_{i+1} (h_i - t_i \tan \phi_2) \} \quad (9)$$

受動型のトップリングに対して

$$P_{i-1} = \frac{1}{h_{i-1}} \{ W_i (-\sin \alpha + \eta \cos \delta) \frac{h_i}{2} - (\cos \alpha - \eta \sin \delta) \frac{t_i}{2} + P_{i+1} (h_i - t_i \tan \phi_2) \} \quad (10)$$

ここで $T_{i-1} = \tan \phi_2 P_{i-1}$, $T_{i+1} = \tan \phi_2 P_{i+1}$, $E_i = \eta W_i$ とそれぞれ仮定する。また、 ϕ_1 はベースと岩柱の間の摩

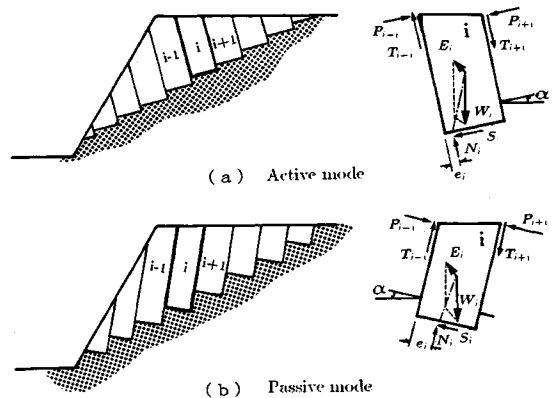


Fig. 5 Notation and force systems acting on a representative column under active and passive states.

擦角, ϕ_2 は岩柱間の摩擦角とする。

これらの式を不連続面の摩擦特性, 斜面形状に対する不連続面の方向および不連続面のパターンとの関係で示すと Table 1 のようである。

同様な考え方で Goodman らも理論式を提案しているが著者らの理論は, Fig. 4 (b) に示してある Basal plane の決定方法を明確にし, 安定解析で能動型だけではなく受動型の考え方も取り入れ, 地震荷重を作用させた点等で Goodman らと異なっており, 解析的により詳細に進んだ考え方をしている。

以上に示した手法は, 不連続面の間隔と斜面高さの比率が小さい場合に長い計算時間を必要とするため, 次のような 2 ケースの簡便な計算手法を導入する。

a) 最も高い岩柱の安定を考える手法 最も高い岩柱は潜在的に最も不安定と考えられる。したがって, 工学的にはこの岩柱の安定性を考えれば安全であろう。安定条件式は式 (7) の θ の代わりに

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{t_h}{h_h}\right) \dots \dots \dots (11)$$

を代入すると単一の岩柱に対する式と同一となる。

b) 平均化された岩柱の安定を考える手法 斜面の平均的な安定性は岩柱の平均的な高さに依存すると考えられる。したがって

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\sum_i^n t_i/h_i}{N}\right) \dots \dots \dots (12)$$

とすると, この不安定岩塊の安定性は単一の岩柱の安定性に帰結される。ただし, n はブロックの数である。

4. 模型実験

不連続面を多数内包している物体の力学挙動を理論的に, あるいは数値解析的に求めるのはきわめて困難である。ここでは, 地震荷重を入力したときの不連続性岩盤斜面の力学挙動をシミュレートするために各種の模型実

験を実施し, 前章で提案した安定条件の妥当性を確かめることとする。実施した実験は, 振動台を用いた動的実験, 静的な震度入力を提案した傾斜破壊実験および底面摩擦模型実験である。これらの模型実験の概要は以下のとおりである。

振動台実験は, 終極振動破壊実験装置を使用して行われた。装置の主要諸元を Table 2 に示す。この装置の振動テーブルの上に振動方向に合わせて 1400×1000×100 mm の模型枠を設置し, その中に 600×400×50 mm の斜面模型を形成した。入力波は, 水平一方向の正弦波を用い, 震動数および加速度をそれぞれ変えて実験を行った。

傾斜破壊実験では, 1800×1200×200 mm の大きさの模型枠の底面部材中心に取り付けた軸受けにより模型全体に垂直に回転させることができる装置を作成し, 手動により所定の地震荷重に応じた傾斜角まで毎分約 5° の割合で回転を与えた。斜面は, 振動実験法と同一の大きさの模型を型枠内に成形した。

底面摩擦模型実験は, 一定速度で回転するエンドレスのゴム製ベルトと, その上に置かれた斜面模型との間の摩擦によって斜面模型に物体力を作用させるものであり型枠内で斜面模型をゆっくりと傾斜させて所定の地震荷重に相当する傾斜角を与えた。なお, 型枠の大きさが 500×500 mm であるため, 斜面模型を他の実験の 1/2 の大きさとした。この底面摩擦模型実験装置の詳細は川本・尾原・市川を参照されたい。

振動実験および傾斜破壊実験の模型材料には, 断面が 10×10 mm および 20×10 mm で長さが 50 mm の 2 種類の檜材のブロックを使用した。一方, 底面摩擦模型実験では断面が 5×5 mm, および 5×10 mm で長さが 10 mm のブロックを用いた。これらのブロックの表面摩擦角(動摩擦角)を一面せん断試験によって求めた。上下の木材の木目が互いに平行になるように配置した場合の垂直応力下のせん断挙動が Fig. 6 (a) に示してあり,

Table 1

| | | | | | | |
|------------------|------------------------|---------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| CROSS-CONTINUOUS | SLIDING | ACTIVE | Eqn. 3 | -- | Eqn. 3 | -- |
| | | PASSIVE | -- | Eqn. 5 | -- | Eqn. 5 |
| | TOPPLING | ACTIVE | Eqs. 4 & 8 | -- | Eqs. 4 & 8 | -- |
| | | PASSIVE | -- | Eqs. 6 & 9 | -- | Eqs. 6 & 9 |
| INTERMITTENT | α (°) | | $0 \leq \alpha < i_s$ | $i_s \leq \alpha < 90$ | $90 \leq \alpha < i_s + 90$ | $90 + i_s \leq \alpha < 180$ |
| | ADDITIONAL REQUIREMENT | | -- | $i_s > \xi + \alpha$ | $i_s > \xi + \alpha - 90$ | $i_s > \xi + \alpha - 90$ |
| | SLIDING | ACTIVE | Eqn. 3 | -- | Eqn. 3 | -- |
| | | PASSIVE | -- | Eqn. 5 | -- | Eqn. 5 |
| | TOPPLING | ACTIVE | Eqs. 4 & 8 | -- | Eqs. 4 & 8 | -- |
| PASSIVE | | -- | Eqs. 6 & 9 | -- | Eqs. 6 & 9 | |

Table 2

| | |
|-----------------------|---|
| VIBRATION DIRECTION | HORIZONTAL-ONE DIRECTION ONLY |
| OPERATION METHOD | ELECTRIC-OIL SERVO |
| SHAKING TABLE SIZE | 1.3 x 1.3 m |
| LOAD | Max. 3 ton |
| ALLOWABLE MOMENT | 4 t · m |
| STROKE | About 150 mm |
| MAX. ACCEL. AMPLITUDE | 5 G |
| MAX. VIBRAT. LEVEL | Dynamically ± 5 ton |
| WAVE FORM | Harmonic, Triangular, Rectangular, Random |
| CONTROL | DISPLAC. CONT. or ACCEL. CONT. |

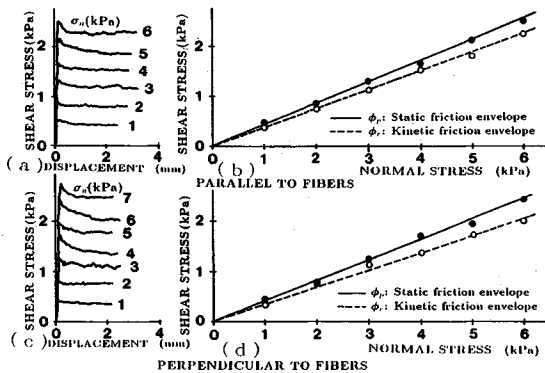


Fig. 6 Shear behaviour of the interface between blocks.

これより垂直応力とせん断応力の関係が Fig. 6 (b) のように描かれ、動摩擦角が $\phi = 24^\circ$ と求まる。同様に、木目を直角に配置したのが Fig. 6 (c), (d) であり、動摩擦角は、 $\phi = 20^\circ$ である。

各実験ともにブロックの積み方は、Fig. 4 に示すように方眼積みと千鳥積みの2種類とした。

不連続面の角度は模型底面より反時計方向に計ったものを成層角度 (α) とし、この成層角度を 0° から 180° の間で 15° 間隔で設定して実験を行った。一方、斜面角度は 45° , 60° , 75° の3種類とした。

斜面模型の変形状態および破壊状態は、写真撮影およびビデオ装置により記録して解析した。

5. 実験結果および考察

(1) 斜面破壊形状

それぞれの実験法による斜面崩壊実験の結果を破壊パターン別にまとめて Photo 1~3 に示す。ここに示す写真は、それぞれの実験装置上で斜面模型が崩壊していく過程を連続的に撮影したうちの1枚で、崩壊直前かもしくは直後のものである。これらの写真には、個々のブロックが能動的あるいは受動的にすべったり、トップリングして崩壊してゆくさまが明瞭に現われている。振動台の実験結果の破壊形状についてまとめると次のようである。

Photo 1 (a) は、能動型すべりのパターンを示したものである。表面摩擦角と自重とのバランスにより斜面部の上半分に最も大きな変位が生じているが、この直後の 265 gal に達したときのり尻を起点として約 70° の角度でブロック状に一群となって崩壊した。

Photo 1 (b) は、能動型トップリングのパターンを示している。斜面上部にクラックが垂直に多数発生し、その深さは斜面高さの約 $1/2$ にまで達している。斜面表面近くのブロックは、振動を伴いながら回転して落下している。崩壊直前のブロックは数個が1本の柱状を形成し

その最下端部を軸として回転しているのがみられる。

Photo 1 (c) は、受動型すべりのパターンを示している。表面よりかなり深い部分に大きな開口が生じている。この後 995 gal で斜面上部がすべって崩壊したが、すべり面は写真に出ている大きな開口部分までは達しなかった。

Photo 1 (d) は、受動型トップリングを示しており、340 gal 程度から斜面表面付近の個々のブロックが振動の周期に従って分離し始め、420 gal に達するあたりから 450 gal に至るまでに上位のブロックから順次回転しながら崩壊した。

Photo 2 には、傾斜破壊実験の結果が、また Photo 3 には底面摩擦模型実験の結果が示してある。これらの写真もすべて破壊パターンによって分類してあり、それぞれの破壊パターンで崩壊する状態がみられる。特に傾斜実験ではブロックが一塊となって崩壊したり、大きな変形の後、相当な程度の傾斜角度に至るまで崩壊せずにとどまるなど、特徴のある崩壊過程が明らかにできた。

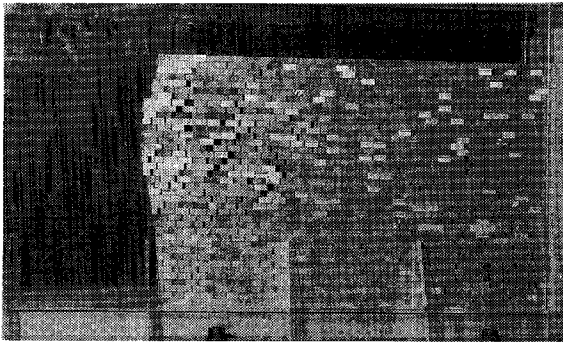
振動台の実験では振動方向の反転に伴い部分的な間隙の開閉を繰り返しながらしだいに限界状態に接近し、終わりには崩壊に至ったが、傾斜実験では傾斜角度が増加するにつれ部分的に間隙が拡大され、それが縮小することなく限界状態に到達し、崩壊した。このようにそれぞれの実験において崩壊するまでの個々のブロックの挙動は異なるが、その破壊パターンは Photo 1~3 をみても明らかなように同様な傾向を示している。

(2) 斜面破壊角度

斜面破壊角度を3種類の実験装置ごとにまとめて示すと Fig. 7 のようである。ここに示す8枚の図は、縦軸に振動台実験では規準震度 $\eta = \text{地震加速度} / \text{重力加速度}$ 、両傾斜実験には Base の水平からの回転角度の \tan 、横軸に成層角度をとり 3. で示した3種類の方法による岩盤斜面の安定計算、すなわち、Table 1 に示す正確な方法 (Method 1)、最も高い岩柱の安定を考える簡便法 (Method 2)、平均的な岩柱の安定を考える簡便法 (Method 3)、の各計算結果と、前述のそれぞれの実験結果を併せて示してある。

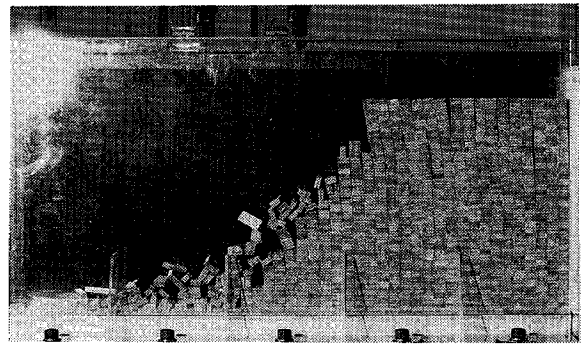
Fig. 7 にはまた3種類の模型実験結果もプロットしてある。このうち振動台実験では、振動数を 2.5 Hz に定め加速度を順次増加させ斜面が崩壊したときの値をプロットしたものである。また、図中のプロットされた印のうち上向きに矢印が付してあるものは、振動台以外の実験装置がもつ能力の上限に達しても崩壊しなかったケースを示している。

これらの図は、斜面角度、ブロックサイズ、ブロックの積み方等を区別して示してある。図中ではブロックサイズを $10 \times 10 \text{ mm}$ を 1×1 、 $10 \times 20 \text{ mm}$ を 1×2 と表示



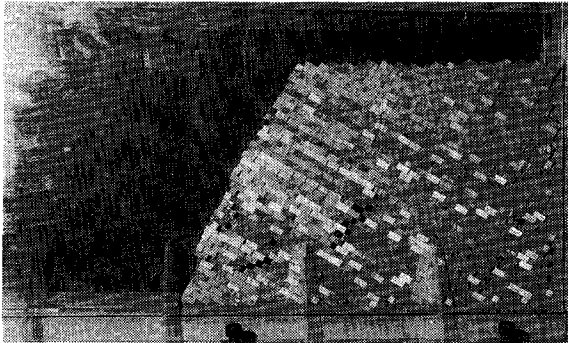
Active Sliding
(a)

| | |
|--------------------------|---------|
| Intermittent arrangement | |
| Slope angle | 90° |
| Stratification angle | 0° |
| Dimensions of blocks | 10×20 |
| Frequency | 2.5 Hz |
| Acceleration | 260 gal |



Active Toppling
(b)

| | |
|------------------------------|---------|
| Cross continuous arrangement | |
| Slope angle | 60° |
| Stratification angle | 0° |
| Dimensions of blocks | 10×20 |
| Frequency | 2.5 Hz |
| Acceleration | 130 gal |



Passive Sliding
(c)

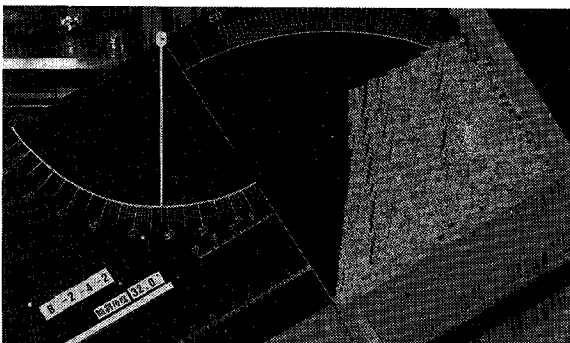
| | |
|--------------------------|---------|
| Intermittent arrangement | |
| Slope angle | 60° |
| Stratification angle | 150° |
| Dimensions of blocks | 10×20 |
| Frequency | 2.5 Hz |
| Acceleration | 910 gal |



Passive Toppling
(d)

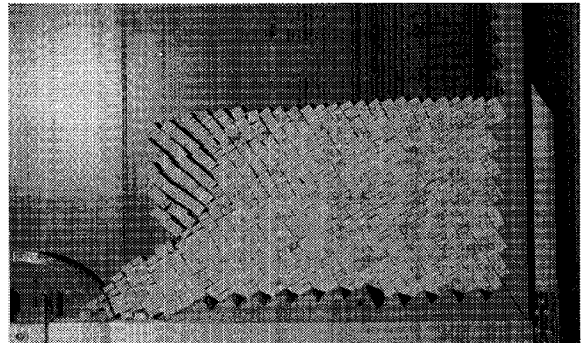
| | |
|--------------------------|---------|
| Intermittent arrangement | |
| Slope angle | 45° |
| Stratification angle | 75° |
| Dimensions of blocks | 10×20 |
| Frequency | 2.5 Hz |
| Acceleration | 400 gal |

Photo 1 Observed failure modes in shaking table tests.



Passive Sliding

| | |
|--------------------------|-------|
| Intermittent arrangement | |
| Slope angle | 60° |
| Stratification angle | 165° |
| Dimensions of blocks | 10×10 |
| Rotation angle | 32.0° |



Active Toppling

| | |
|------------------------------|------|
| Cross continuous arrangement | |
| Slope angle | 90° |
| Stratification angle | 30° |
| Dimensions of blocks | 5×10 |
| Rotation angle | 0° |

Photo 2 Observed failure mode in a tilting test.

Photo 3 Observed failure mode in a base friction test.

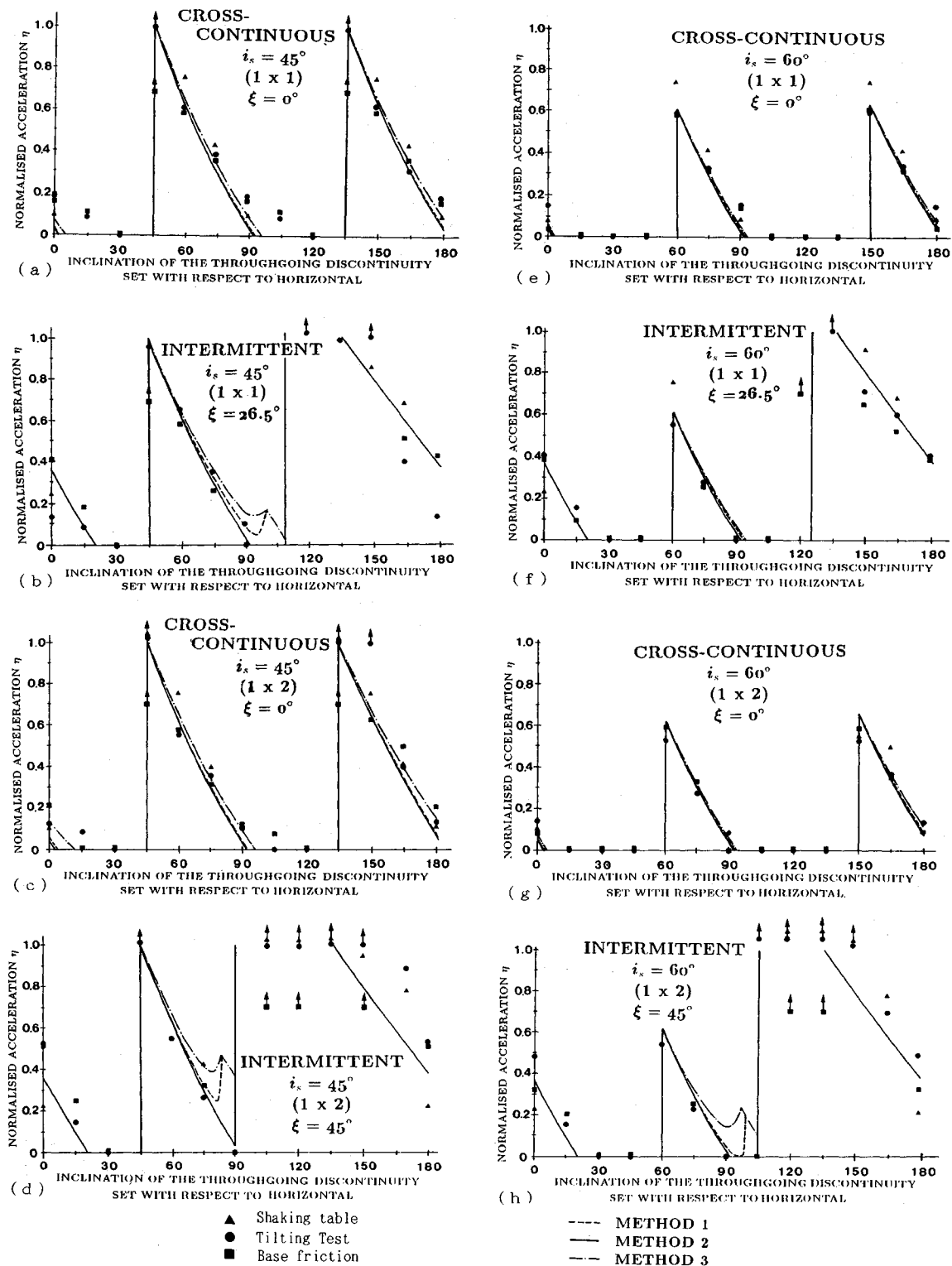


Fig. 7 Comparisons of experimental results with the calculated results.

Table 3

| Figure No. | Slope angle | Dimensions of blocks | Arrangement | ξ (°) |
|------------|-------------|----------------------|-------------|-----------|
| (a) | 45° | 10 x 10 | C | 0.0 |
| (b) | | (1 x 1) | I | 26.5 |
| (c) | | 10 x 20 | C | 0.0 |
| (d) | | (1 x 2) | I | 45.0 |
| (e) | 60° | 10 x 10 | C | 0.0 |
| (f) | | (1 x 1) | I | 26.5 |
| (g) | | 10 x 20 | C | 0.0 |
| (h) | | (1 x 2) | I | 45.0 |

C : Cross continuous I : Intermittent

している。各図のこれらの関係を示すと Table 3 のようである。ここで、ブロックサイズとブロックの積み方を変えることは ξ の値を変えることであり、これによって basal plane の角度 (δ) が決まる。この研究ではブロックサイズが 10×10 mm で cross continuous のとき $\xi=0^\circ$ 、intermittent のとき $\xi=26.5^\circ$ 、10×20 mm で cross continuous のとき $\xi=0^\circ$ 、intermittent のとき $\xi=45^\circ$ となる場合のみ取り扱った。

Fig. 7 に示されている安定性の解析結果では、Method 2 がすべてのケースにおいて、またどの成層角度においても他の Method に比べ小さい η の値を示している。このことは、解析が一番簡単な手法であるが他の解析手法と比較すれば一番安全側であり、言い換えれば一番不経済な値を示す結果となっている。

これら 8 枚の図に示されている実験結果を全体的にみると振動台実験の結果がやや大きな値を示していることがわかる。これは、他の 2 つの実験方法と異なり振動させていることから、反復作用の時間的な影響によるものと考えられる。

この図に示されている 8 ケースでは、ブロックサイズや斜面角度に関係なく cross continuous の 4 ケースの解析結果と実験結果に特によい一致がみられた。

しかし、intermittent については、大部分の両者の間にほぼ満足のいく関係にあるが、130°以上の成層角度

の一部分に実験結果のばらつきがみられる。原因として考えられることは、この成層角度の領域が差し目の状態になり、崩壊の初期段階でブロックが個々に落下する現象がよくみられた。ゆえに崩壊時を決定する斜面破壊角度の計測に多少幅が出たものと考えられる。

Fig. 7 から理解できることは、実験方法により個々のブロックの挙動は異なるとしても、入力規準震度に対する斜面の破壊条件にはほとんど差がないとゆうことである。まとめると

a) 不連続性岩盤斜面の安定には、斜面角度より成層角度の方がより大きな影響力をもつ。

b) 流れ目より差し目の方が破壊角度が大きい。すなわち、大きな領域で破壊が生ずる。

c) 方眼積みと比べ千鳥積みは、より安定しているが破壊角度は大きくなる。差し目で千鳥積みの場合に最も安定しているが、破壊するときは大規模な領域で一挙に崩壊が引き起こされる。

6. 現場実測データとの比較

3. で示した方法、あるいは Fig. 7 を再整理すると原位置で地層の傾斜が求まった場合の各設計震度に対する限界斜面角を定めることができる。すなわち、方眼状あるいは千鳥状の各岩盤に対して Fig. 8 のように震度ごとの成層角と斜面角の関係を求めておくと、このチャートより容易に限界斜面が求められる。Fig. 8 は、縦軸に斜面角度を取り、横軸に成層角度を取って限界斜面を示したものである。解析の一例として図中に示すような $H/t=40$ (H は斜面高さ、 t は層厚) $\xi=0^\circ$ および 26.5° 、 $\phi=30^\circ$ ブロックサイズが 1×1 のときの η の値を 0.0, 0.1, 0.2, と変化させたときの曲線が示されている。

すなわち、現場における H/t , ξ , ϕ をもとにして震度 η の値を増やしたチャートを作成しておけば、原位置での地層の傾斜と斜面勾配の値を計測しチャートにプロットすることで、設計震度に対する限界斜面を知ることができる。ただし、このチャートを適用する場合に地

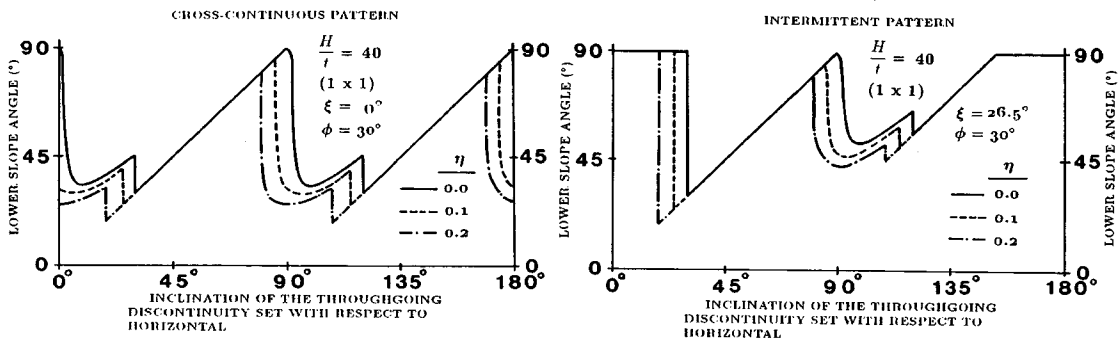


Fig. 8 Stability charts for slopes for various values of normalised accelerations.

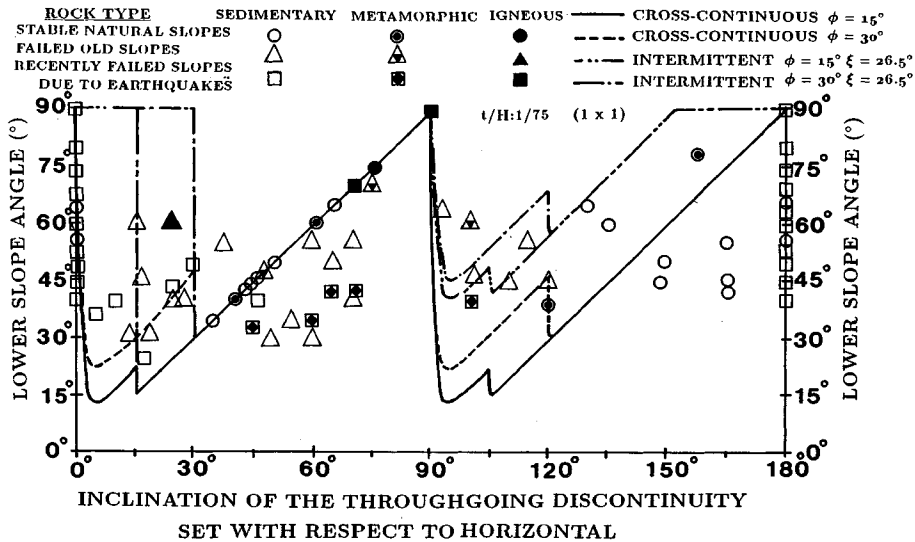


Fig. 9 Plotting of stable and failed rock slopes.

層の走行線は斜面の軸に平行か、あるいはほぼ平行でなければならないことに注意を払う必要がある。

この方法が妥当であるかどうかを調べるために、各種の文献 (Bulletin of Seismic Society of America, US Geol. Survey Professional Papers) から該当するデータを抽出し、岩種 (堆積岩, 変成岩, 火成岩) ごとに安定している斜面, 近年の地震によって崩壊した斜面, 有史以前に破壊した斜面に分類して Fig. 9 に示した。

さらにこの図には、定性的な傾向を抽出するために解析の一例として $\phi = 15^\circ$ と 30° , $t/H = 1/75$ で cross continuous のときが $\xi = 0.0^\circ$, intermittent のときが $\xi = 26.5^\circ$ の場合の $\eta = 0.0$, つまり静的状態の斜面の安定条件を同時に図中に示した。

一般的に、成層角度が 0° より 90° 付近までは岩盤が流れ目の状態になる。この領域の特に成層角度が 30° 以上の岩盤では、intermittent と cross continuous との間において同一の限界斜面を示す。そして、この領域にプロットされている堆積岩や変成岩の破壊事例は示された実線の下部にある。

説明を簡単にするため上記領域を例に取るとする。もし静的で岩石自身の破壊を含まないならばプロットされた破壊事例は、ここで示された実線上か実線よりも上部の領域になければならない。

この図の実線より下部にプロットされている堆積岩や変成岩の破壊事例は、これまでに地震によって崩壊した斜面である。これらの傾向は、Fig. 8 で計算されたものと同じ傾向であることを意味している。このことから、提案された理論式によって、ある地域の斜面の受けた地震履歴を推定することが可能である。

この図より、斜面角度が 30° より小さいときには斜面が崩壊していないことがわかる。このことは Keefer (1984)^{(14), (15)} の結論と同一である。しかし、Keefer は斜面の高さと斜面角度のみを岩盤斜面のパラメーターとして考えたが、自然斜面の安定性を論ずるにはそれだけでは不十分であり、斜面の幾何学的形状と関連して不連続面の空間的分布と不連続面の力学特性は、自然斜面が安定する角度を決定するうえで重要な役割をもつことが理解されよう。

7. まとめ

この研究では、不連続性岩盤斜面の安定性に対する地震力の影響を明らかにするために地震動を考慮した振動台による実験と、震度法の考え方をもとにした傾斜破壊実験および底面摩擦模型実験を行い、個々の岩塊および岩柱ブロックの挙動および斜面崩壊形状について調べた。また、震度法に基づいて不連続面の幾何学的分布と斜面形状を考慮した安定条件式を提案した。そして、この理論式によって得られた計算結果と模型実験結果を比較検討したところよい一致をみた。

続いて、これまでに計測された有史以前に破壊した岩盤斜面と既知な地震によって破壊した岩盤斜面および今なお安定を保っている自然斜面の斜面角度を諸外国の文献より引用し、ここで導いた理論式の計算結果を図示したものにプロットしたところ定性的により一致をみた。

以上の結果より人工的に手が加えられていない岩盤斜面の斜面角度を計測することにより、その斜面に加わった動的な履歴を研究することが可能と考えられる。

本研究に採用した現場実測データを計測し、提供して

くれた数多くの諸外国の研究者に深い感謝の意を表するものである。これらのデータは非常に貴重なものであり、著者らも機会あるごとにデータの収集に努め、かつ公表していく考えである。

参 考 文 献

- 1) Goodman, R. E., Taylor, R. L. and Brekke, T. L. : A model for the mechanics of jointed rock, ASCE Vol. 94 (SM 3), pp. 637~659, 1968.
- 2) 川井忠彦：新しい要素モデルによる個体力学諸問題の解析，生産セミナーテキスト（コース29），生産技術研究所奨励会，1977.
- 3) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Proc. Symp. ISRM, Nancy, France, pp. 8~11, 1971.
- 4) 清水泰弘・市川康明・川本眺万：不連続性岩盤斜面の崩壊形状に関する実験的研究，第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 161~165, 1986.
- 5) Shimizu, Y., Aydan, Ö., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T. : A model study on dynamic failure modes of discontinuous rock slopes, Proc. of the Int. Symp. on Engineering in Complex Rock Formations, Beijing, pp. 183~189, 1986.
- 6) 清水泰弘・オメル・アイダン・市川康明・川本眺万：不連続性岩盤斜面の動的強度とその安定性について，第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 501~505, 1987.
- 7) Maslov, N. N., Pavlisheva, T. V. and Phonarev, P. A. : Evaluation of tensile strength of fractured rock according to the estimation of the degree of their stability, Proc. of the Int. Symp. on Weak Rock, Tokyo, pp. 259~265, 1981.
- 8) Niyom, D. : Study on toppling of rock slopes by physical modeling, Dr. Thesis, Kobe Univ., 1985.
- 9) Ashby, J. : Sliding and toppling modes of failure in model and jointed rock slopes, M. Sc. Thesis, Imperial College, London, 1971.
- 10) Aydan, Ö.・川本眺万：不連続岩盤斜面のトップリング破壊とその安定化について，日本鉱業会誌，Vol. 103, pap. No. 1197, pp. 763~770, 1987.
- 11) Hoek, E. : Recent rock slope stability research at the royal school of mines, London, Proc. of Conf. on Geotechnical Practice for Stability of Open-pit Mining, SME, AIME, 1972.
- 12) Zambak, C. : Experimental evaluation of stability analysis methods for some rock slopes by a physical model, Ph.D Thesis, Univ. of Illinois, 1978.
- 13) Goodman, R. E. and Bray, J. W. : Toppling of rock slopes, Proc. of Speciality Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, Boulder Colorado, ASCE, Vol. 2, pp. 201~234, 1976.
- 14) 川本眺万・尾原祐三・市川康明：底面摩擦模型実験装置および模型材料の力学特性，日本鉱業会誌，pp. 1~6, 1983.
- 15) Keefer, D. K. : Landslides caused by earthquakes Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, pp. 406~421, 1984.
- 16) Keefer, D. K. : Rock avalanches caused by earthquakes, Source Characteristics : SCIENCE, Vol. 223, pp. 1288~1290, 1984.

(1988. 3. 14・受付)