

(31) 岩盤斜面の地震時挙動に関するモデル検討とその解析

京都大学工学部 正会員 足立 紀尚  
京都大学工学部 正会員 矢野 隆夫  
京都大学工学部大学院 辻 賢之

1. 序論

昭和59年9月の長野県西部地震による山腹の大崩壊など、地震時の斜面崩壊は、発生の機構を含めて未解明の点が少ない。昭和53年の伊豆大島近海地震では、地震動によって岩盤内の既存の弱面が開き、岩塊に分離して飛散したとか、表層上に埋れていた岩塊が、飛び出して崩落するという現象が見られた。また、昭和55年のイタリア南部地震では尾根の稜線にある角石積みの建物のみが崩壊したと報告されている。これからみて、不連続面(弱面)が内在することを念頭に置き、衝撃波が地盤深部から伝達するとき、斜面表層地盤がいかに運動するかを明らかにする必要がある。すなわち、斜面の地震時挙動は従来の連続体とした振動論的検討のみでは十分でないといえる。

本研究は、図-1に示す金属球の集合体から成る基盤と山部モデルを用い、基盤の一端に衝撃エネルギーを与えたとき、山部表層に位置する球がいかに挙動するかを調べるとともに、モデルを弾性体とした予備的解析を行ない考察を加えたものである。この結果、衝撃波入力反対側山腹斜面中腹部に位置する球が最も激しく運動し、頂上の球が浮き上がることを、予備的解析はこの現象を定性的に説明し得ることが明らかとなった。

2. 実験方法

直径19mm、重さ28.2gfの金属球の集合体として図-1のように基盤と山部から成る二次元モデルを傾斜した板上に準備する。釣糸で吊した金属球を種々の高さから振り降し、モデル基盤の一端に衝突させることで衝撃エネルギーを与える。この際のモデルの挙動をビデオカメラで撮影する。

実験結果は一こまずつ再生し、

トレーシングペーパーに写しとって、初期

の位置の変位置、方向角を求める。これらの値から、各球の初速、その水平及び鉛直成分を計算して、各球の得たエネルギーを算出する。一方、導入エネルギーは振り降ろした球の衝突直前の速度を測り、運動エネルギーとして求めた。

しかしながら、挙動観測に通常のビデオカメラを用いたため、瞬時の挙動を正確に記録できず、定量的解析に供し得るデータが求まらなかったことを付記しておく。

3. 実験結果

図-1中に示す異なるエネルギー(球を振り降す位置を $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ と変化させる。なお( )内には衝突直前の球の速さを与える)を与えたときの衝撃波入力反対側斜面を形成する各球の運動を図-2(a)、(b)、(c)に、また、計測結果に基づき算出した変位、その方向、初速、エネルギーを表-1(a)、(b)、(c)に与えている。

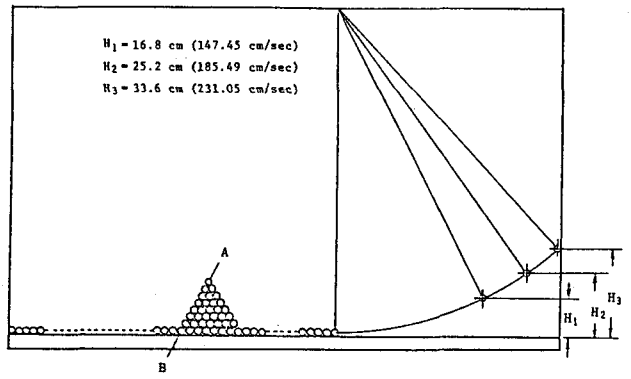


図-1. 実験モデルと衝撃波の与え方

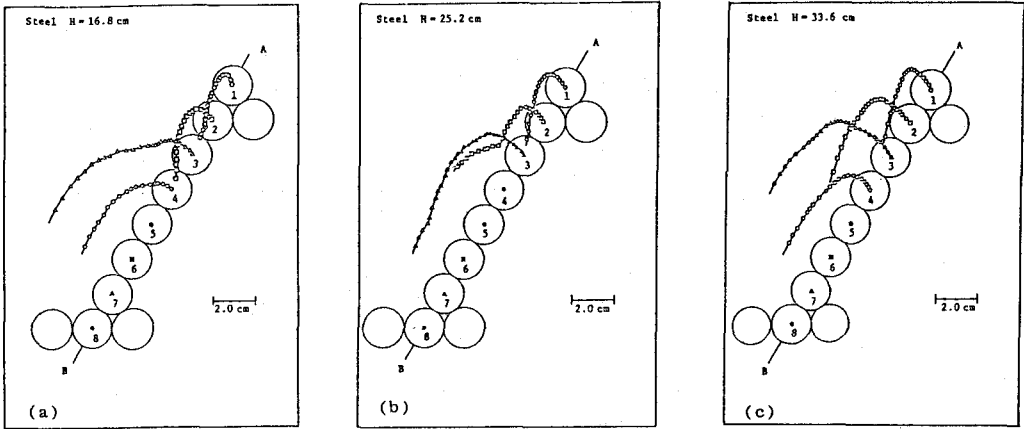


図-2. 衝撃波入力反対側山腹斜面に位置する各球の運動の様子, (a) H = 16.8 cm, (b) H = 25.2 cm, (c) H = 33.6 cm

表中の各項目の意味するところは,

Y max : 球の鉛直上方への最大変位量 (mm)

Angle : 球の初期運動方向と水平面との角度 (°)

V : 球の初速 (cm/s)

V<sub>x</sub> : 初速の水平方向成分 (cm/s)

V<sub>y</sub> : 初速の鉛直方向成分 (cm/s)

Energy : 球の得たエネルギー

E.P. : 球の得たエネルギーと導入エネルギーとの比

表-1. 各球の変位, その方向, 速度, エネルギー等

(a) H = 16.8 cm

No.	Y max (mm)	Angle (°)	V (cm/s)	V <sub>x</sub> (cm/s)	V <sub>y</sub> (cm/s)	Energy (g cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	E.P. (%)
1	4.87	72.0	30.91	9.56	29.39	1.35×10 <sup>4</sup>	4.39
2	5.17	57.9	31.82	16.92	26.95	1.43×10 <sup>4</sup>	4.66
3	6.82	54.8	36.57	21.07	29.89	1.89×10 <sup>4</sup>	6.15
4	2.53	39.3	22.29	17.24	14.13	7.01×10 <sup>3</sup>	2.28
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0

これらの図及び表から求まる知見は,

- (1) 衝撃入力反対側山腹斜面中腹部に位置する上から3番目の球が最も激しい運動をする。すなわち, 変位量 Y max, 初速 V, エネルギーとも最大値を示している。
- (2) また, 3番目の球に着目すると, 球の得た導入エネルギーに対する比, E.P. は導入エネルギーの大小にかかわらずほぼ等しい値を示している。このことは山腹斜面部に与えられるエネルギーは, 導入エネルギーの大小によらず, 導入エネルギーの入力方向と, 斜面の幾何学的形状によって決定されることが推測される。

(b) H = 25.2 cm

No.	Y max (mm)	Angle (°)	V (cm/s)	V <sub>x</sub> (cm/s)	V <sub>y</sub> (cm/s)	Energy (g cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	E.P. (%)
1	6.34	58.1	35.24	18.60	29.93	1.75×10 <sup>4</sup>	3.61
2	6.73	58.3	36.31	19.06	30.91	1.86×10 <sup>4</sup>	3.83
3	10.33	54.8	45.00	25.93	36.78	2.86×10 <sup>4</sup>	5.89
4	0.10	45.7	4.37	3.05	3.13	2.70×10 <sup>2</sup>	0.06
5	0.19	45.7	6.18	4.32	4.42	5.39×10 <sup>2</sup>	0.11
6	0.10	45.7	4.37	3.05	3.13	2.70×10 <sup>2</sup>	0.06
7	0.19	64.0	6.18	2.71	5.56	5.39×10 <sup>2</sup>	0.11
8	0	0	0	0	0	0	0

- (3) 山腹表層部の球の受ける力の方向は, 表中の角度から判定されるが, これらからみて, 斜面上部に位置する程, 鉛直上方に向かうといえる。すなわち, 稜線ほど激しい上下動を受けることになる。さて, 表-2 は, 導入エネルギーのどれだけが斜面表層部に位置する1-7までの球に伝播するかを検討

したものである。伝播エネルギーは1-7までの各球の得たエネルギーの総和、 $E_n$ として求めたが、その算定にあたっては、 $Y_{max}$ によるものと、 $V$ による2通りで行った。

なお、実験は各導入エネルギー値に対して3回ずつ実験をしており、表-2(a)には各実験結果を、表-2(b)にはそれぞれの導入エネルギー値に対する3回の実験結果の平均値を与えている。

先に述べた、山腹斜面部に伝播するエネルギーは、導入エネルギーの大小によらず、導入エネルギーの方向と斜面の幾何学形状によって決るとするならば、比率はすべて等しくなるはずである。特に、 $V$ による算定値はばらつきがみられるが、 $Y_{max}$ による結果は上述の事象を証明しているものと考えられる。

#### 4. 解析手法

前節までに述べたモデル実験結果を証明するため、モデルを理想弾性体とした予備的解析を行った。すなわち、2次元波動方程式を差分法によって解析することとした。

差分法を適用するに当たっては、計算の対象とする点を含め、その周辺の9点の現時点の値を必要とする。したがって、値の未知の点に対しては境界条件を設定し、それを差分化することで計算した。

#### 5. 解析条件

解析には、図-3に示すモデルを用い、基盤左端を固定、右端にある変位を与えるという条件のもとで行った。前節で論じた解析手法を適用し、各時間ステップ毎に繰り返し計算を行い、変位を求めた。

材料定数としては密度、 $\rho$ 、ヤング率、 $E$ 及びポアソン比、 $\nu$ 、が必要である。しかし、定性的に現象を把握するとの観点から、 $\rho=1, E=1, \nu=1/3$ なる値を与え、その結果求まる $\lambda=3/4, \mu=3/8$ を用いた。

さて、縦波の速さ、 $c$ 、は次式で与えられるから、

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$\lambda, \mu, \rho$  を代入することで、この場合  $c=1.22$  となる。計算に用いる時間間隔  $\Delta t$  は計算の安定性を考慮して、 $\Delta t=0.2$  とした。

(c)  $H=33.6$  cm

No.	Y max (mm)	Angle (°)	V (cm/s)	$V_x$ (cm/s)	$V_x$ (cm/s)	Energy ( $g\text{ cm}^2/s^2$ )	E.P. (%)
1	10.04	74.7	44.36	11.70	42.79	$2.78 \times 10^4$	3.69
2	10.92	41.5	46.26	34.65	30.65	$3.02 \times 10^4$	4.01
3	15.89	40.8	55.81	42.26	36.45	$4.39 \times 10^4$	5.83
4	6.63	56.9	36.05	19.66	30.21	$1.83 \times 10^4$	2.43
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0.10	45.7	4.37	3.05	3.13	$2.70 \times 10^2$	0.04
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0

表-2. 表層に位置する1-7の球が得る総エネルギーと導入エネルギーの比

#### (A) 各実験結果

No.	En.(by Y) ( $\times 10^4$ dyn)	En.(by V) ( $\times 10^4$ dyn)	Input ( $\times 10^4$ dyn)	Ratio(Y) (%)	Ratio(V) (%)
H <sub>1</sub> -a	6.0	3.5	30.7	19.6	11.7
	6.2	3.6	30.7	20.2	12.0
	5.3	3.1	30.7	17.1	10.2
H <sub>2</sub> -a	8.3	7.4	48.5	17.1	15.3
	8.3	7.4	48.5	17.1	15.3
	8.9	7.9	48.5	18.3	16.3
H <sub>3</sub> -a	13.9	16.6	75.3	18.5	22.0
	12.6	15.0	75.3	16.8	20.0
	12.1	14.4	75.3	16.0	19.1

#### (B) 導入エネルギーの大きさ毎の平均値

No.	En.(by Y) ( $\times 10^4$ dyn)	En.(by V) ( $\times 10^4$ dyn)	Input ( $\times 10^4$ dyn)	Ratio(Y) (%)	Ratio(V) (%)
H <sub>1</sub>	5.8	3.4	30.7	18.9	11.7
H <sub>2</sub>	8.5	7.6	48.5	17.5	15.7
H <sub>3</sub>	12.9	15.3	75.3	17.1	20.4

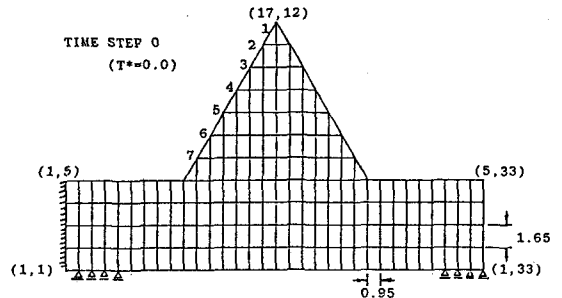


図-3 解析モデルのメッシュ図

実験モデルと解析モデルには明らかな差異がある。

- (1) 実験モデルは鋼球の集合体から成っているが、解析モデルは連続体であるとした。
- (2) 解析に際しては重力の影響を考慮に入れていない。
- (3) 解析においては基盤右端にある変位を強制的に与える方法を採用したが、導入エネルギーとの整合性を検討すべきである。
- (4) 材料定数も実験モデルに対応する値を用いるべきである。
- (5) 解析の都合上、解析モデルの基盤部の厚さは実験モデルのそれより厚く採っている。

このように、実験結果を定量的に解析するには一層の考慮が必要である。

## 6. 解析結果

前節に述べた波動方程式を差分法によって、解析モデルの変位挙動を解析した。その結果、ここには図を与えないが、変位の伝播挙動から定性的にはモデル実験結果を説明できてきていることが判った。

さて、解析結果と実験結果の比較に当っては、各点の速度、加速度また時間について検討する必要がある。しかし、材料定数を単位量と考えたから、解析結果も定量的な物理量ではない。そこで、以下解析結果としての速度、加速度及び時間は定性的な物理量であることから、それぞれ  $v^*$ 、 $\alpha^*$  及び  $t^*$  と表すことにする。

図-4は縦軸に各点の加速度  $\alpha_1^*$  を、横軸に時間ステップをとり、斜面表層に位置する各点の加速度が時間とともにいかに変化するかを示している。なお、作図に当っては、No.6の点の加速度  $\alpha_6^*$  の最小の極大値によって他の点の加速度  $\alpha_1^*$  を規準化しており、また横軸を時間  $t^*$  に換算するには0.2倍してやればよい。

さて、斜面表層にある物体が、表層から離脱して飛散するかどうかの判定はいかに考えたら良いのであろうか。この点に関しては、通常、接する2つの物体を考え、それら物体間の抗力、 $N$ 、が正から負に変化するときに分離が生ずるものと考えられる。

しかしながら、本解析の結果求まる加速度

は定性的な値を与えているに過ぎず、重力加速度  $g$  との定量的な比較は不可能であるから、どの点が離脱するかの判定に供することはできないが、以下の様に検討をすすめてみる。

実際には  $\alpha_1^*$  の方向に対する検討が必要であるが、簡単のため、解析結果から得られた  $\alpha_1^*$  がすべて鉛直上向きの加速度と考える。すると斜面表層に置かれた物体は  $\alpha_1^*$  が重力加速度  $g^*$  (解析条件のもとの重力加速度) を超過すれば鉛直上方に浮き上がることになる。 $g^*$  の値は特定できないから、 $g^* = 1.0, 0.8, \dots \times \alpha_6^*$  と考えると、いずれの場合もNo.6の点の加速度が時間的に最も早く  $\alpha_6^* \geq g^*$  を満足するから、解析上は最も早く離脱が生じることになる。しかしながら、斜面下部に位置する球には上部の球の上載圧が作用するから、現時点で結論づけることはできない。先に述べた解析上の不備を正し、さらに検討を進める必要がある。

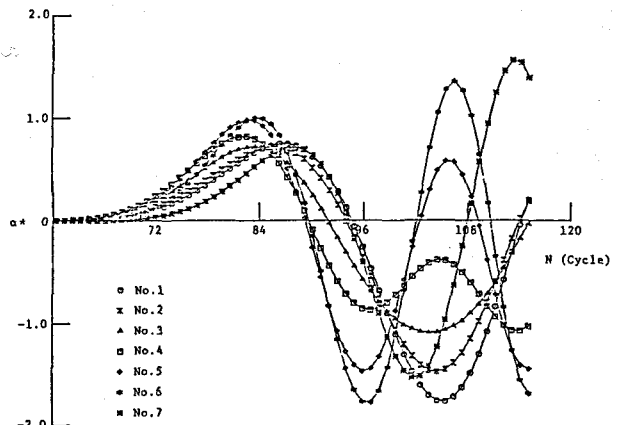


図-4 各点の解析による加速度の時間的变化

## 7. 結論

地震時の岩盤斜面挙動の解明を目的にモデル実験と実験結果を説明するための予備的解析を行った。実験からは、山腹中腹部が最も激しい運動を示すことなど興味ある事実が得られた。しかし、実験結果を定量的に説明するにはより高度の解析を要することが判った。

(31) MODEL AND ANALYTICAL STUDY ON ROCK SLOPE BEHAVIOR DURING EARTHQUAKE

Toshihisa ADACHI, Kyoto University  
Takao YANO, Kyoto University  
Takayuki TSUJI, Kyoto University

There still remain such unexplained facts as the trigger mechanism of rock slope failure during earthquake. At the Izu-Oshima-Kinkai Earthquake of 1978, rocks buried under surface soil flew out by the earthquake shock and fell down. It was also reported that square stone houses built on mountain ridge only broke down in the case of the South-Italy Earthquake of 1980.

From the evidences, to investigate how surface portion of rock slope behaves when the earthquake shock wave reaches is definitely required. Namely, the conventional study of slope stability during earthquake is not good enough only based on the oscillational point of view.

In this study, first of all, a model assembled by steel balls which consists of foundation and mountain was prepared. The motions of balls located on the model mountainside were investigated when a shock wave propagated from one end of foundation. Secondary, preliminary analyses were carried out to simulate the model test results on the basis of theory of elasticity.

In the model tests, it was observed that the ball on the mid-slope of mountain flew out most heavily and the ball on the top of mountain flew up. The preliminary analyses can at least qualitatively explain the model test results.