

# 跳び石現象の衝撃理論的検討

## Impact Analysis of Upthrow Stone

○ 野中 泰二郎 (京大防災研) 梅田 康弘 (京大防災研) 高島 秀雄 (金沢工大)

Taijiro NONAKA, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji City, Kyoto Prefecture

Yasuhiro UMEDA, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji City, Kyoto Prefecture

Hideo TAKABATAKE, Kanazawa Institute of Technology, Ohogigaoka 7-1, Ishikawa-gun, Ishikawa

Key Words: Structural Analysis, Vibration, Shock and Impact

### 1. 跳び石の特徴

(1) 地面に半ば埋もれていた岩石が、強い地震動によって抜け出る現象が大地震の震央付近で数多く見つかっている。跳び石現象と呼ばれるこの現象は、地震動の効果が地球の重力加速度 (1 g) を越えた事を示すもので、地震学上も地震工学上も注目される。(図1)



1992 Landers, California, Earthquake(M7.4) (Yasuhiro UMEDA)

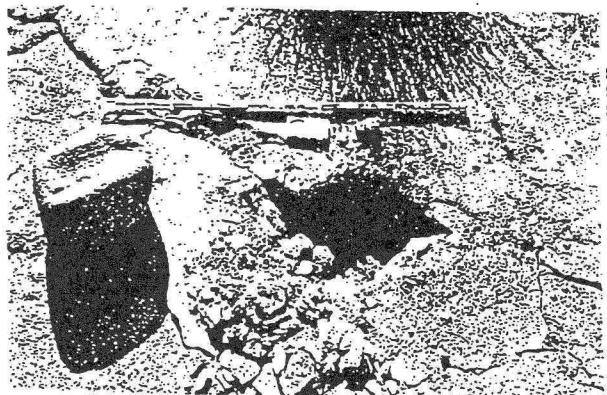


図1 跳び石の実例

1989年ロムプリエタ地震 (M7.1)

1990年ルソン島地震 (M7.8)

1992年ランダース地震 (M7.4)

1994年ノースリッジ地震 (M6.6)

1995年兵庫県南部地震 (M7.2)

1996年リージャン地震 (M7.0)

(3) これらの調査で共通している事実を挙げると以下の通りである。

- ① 跳び石現象は震央付近に限られた領域で見られる。
- ② この領域の広さは地震の規模にほぼ比例している。
- ③ この領域の中心は震央とは一致せず、少し離れている。
- ④ この領域は断層変位が最大となる場所とは、必ずしも一致しない。

(4) 跳んだ石の大きさや元の位置に関しては以下の通りである。

- ⑤ 跳んだ石の大半は直径 256mm 以上の巨礫で、重さは 10 kg~100 kg が多い。
- ⑥ これよりずっと小さな小石や、逆にこれよりはるかに大きい岩石は、ずれることはあってもほとんど跳ばない。
- ⑦ 石がある程度、土に埋まっている場合はソケットの形状が保存されており、ソケットの端はほとんど乱れていない。即ち、多くの石は唯一回の衝撃的な揺れによって跳びだしたと考えられる。
- ⑧ ソケットの深さが無い場合でも多くの跳び石が見つかる。このことは、ソケットと石の横方向の相互作用が無くても石は跳び上がることを示している。
- ⑨ 石の跳んだ距離は 20 cm~50 cm が多い。
- ⑩ 石の跳んだ方向は地震断層に平行方向が多い。

(5) 松尾、伊藤、梅田は<sup>(1)</sup>、跳んだ石の水平飛距離  $d$  (cm) から地面の加速度  $a$  (g)、速度  $v$  (cm/s) を求めるために、シーソー型 (回転型) の石投げ飛ばし装置をつくって実験を行った結果、次の経験式を得た。

$$a = 0.1 d - 0.5$$

$$v = 1.2 d + 100$$

これによれば、飛距離  $d = 30$  cm の場合、地面の加速度  $a = 2.5$  g、地面の水平及び垂直速度  $v = 136$  cm/s となる。尚、

(2) 跳び石現象が系統的に調査された最近の地震は次の 7 例である。

1984年長野県西部地震 (M6.8)

加速度、速度とも水平方向と垂直方向は同じと仮定、つまり、物体の跳ぶ方向は45°と仮定している。

## 2. 本研究の方法

(1) 上述の実験には以下に述べるいくつかの制約がある。

①装置の耐久上、高速度衝撃を与えられない。ある程度振動的な運動に限られる。

②この装置ではパルス幅は余り変えられない。

③実験に用いた石の重量は10kgである。実際に地震で跳んだ石はもっと重い、装置の制約上余り大きな石では実験できない。

④石の下に敷くことの出来る土の厚さはせいぜい20cm程度であり、自然の地盤状態とはかなり異なっている。

(2) これらの制約をクリアするためには実験に代わる数値シミュレーションを実行するのが適切と考えられる。

(3) 既往の研究は、振動応答解析が主であり、大町・翠川氏<sup>(2)</sup>、中川氏等の研究<sup>(3)</sup>で示された様に、振動が継続し、石とソケットの相互作用によって石がソケットから跳び出すというものである。しかし、観察された実際の跳び石のソケットは深さがほとんど無いものが多い。また、深さがあってもソケットの縁はほとんど乱されていない。つまり、石とソケットの相互作用が無い場合でも多くの石が飛散しているという事実と反する。

(4) そこで、本解析では、跳び石現象を上下動の波動論的思考に基づいて検討する。ここで展開する上下動説の方が跳び石現象を矛盾なく説明できる。

## 3. 解析モデル

(1) 地盤と岩石の連成効果を衝撃解析により解析するため、図2に示す地盤①～③、岩石④共にbeam要素からなる解析モデルを用いる。各要素の長さは20cm以下とする。岩石④が地盤より浮上がるかどうかを見るため、岩石直下点に地盤③を設ける。地盤は深さを30mとし、岩石直下部である地上面より上部4m(地盤①)とそれ以下(地盤②)との2層からなるとみなす。岩石の形状は立方体と仮定する。地盤③の断面積は岩石底面積と同じであり、地盤①②の断面積は岩石底面積の16倍(各辺4倍)と仮定する。

表1 材料定数

	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	質量密度 (kg/m <sup>3</sup> )
地盤①, 接点③	200	663	1600
地盤②	750	1500	2000
岩石④	3740	6820	2850

(2) 本解析では、応力波の伝ばを垂直方向のみに考える。数値計算は衝撃解析用汎用ソフトMSC/DYTRANを使用する。

(3) 岩石の跳び上がる条件は、地盤③の応力が引張状態になり、その時刻での岩石④の速度が上向き(正の方向)であり、更に、加速度が重力の効果をなくす大きさに達したときと考える。

(4) 入力波としては下記の上動パルスを上述の解析モデルにおいて地盤の基盤面に入力させる。

$$\text{変位} : X = X_0 e^{-\alpha t^2}$$

定数 $\alpha$ 、 $X_0$ をパラメトリックに変化させることにより、時刻 $t$ に関する異なる入力波形を作ることが出来る。 $\alpha$ が増加すると、衝撃性が高くなる。表2は加速度の絶対値の最大値を300galとする $\alpha$ と $X_0$ の場合を示す。図3a～cは $\alpha = 100$ の場合の変位、速度、加速度を示す。座標軸は上向を正に取る。

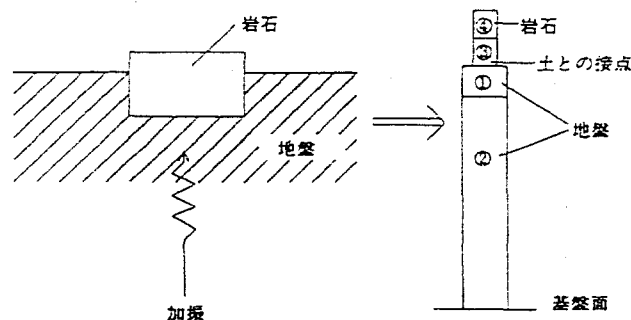


図2 解析モデル

表2 パルス波

$\alpha$	$X_0$	最大加速度 (m/sec <sup>2</sup> )	最大速度 (m/sec)	最大変位 (m)	パルス幅 (sec)
5	0.3	3.000	0.575	0.3	1.095
15	0.1	3.000	0.332	0.1	0.632
25	0.06	3.000	0.257	0.06	0.490
50	0.03	3.000	0.182	0.03	0.346
75	0.02	3.000	0.148	0.02	0.283
100	0.015	3.000	0.129	0.015	0.245
150	0.01	3.000	0.105	0.01	0.200
600	0.0025	3.000	0.053	0.0025	0.100
2400	0.0006	3.000	0.026	0.0006	0.050
4800	0.0003	3.000	0.019	0.0003	0.036

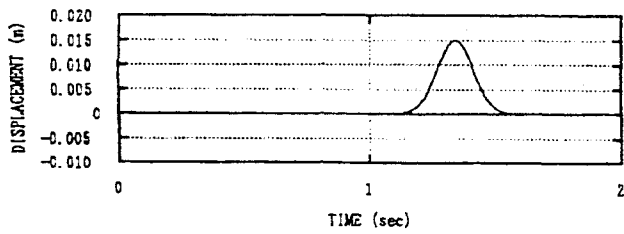


図 3-a 変位

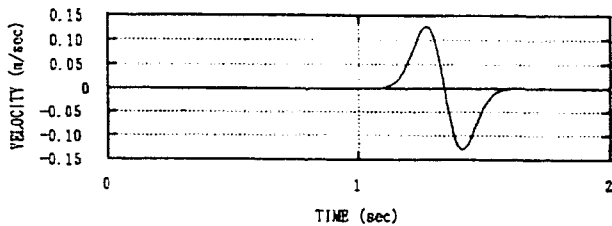


図 3-b 速度

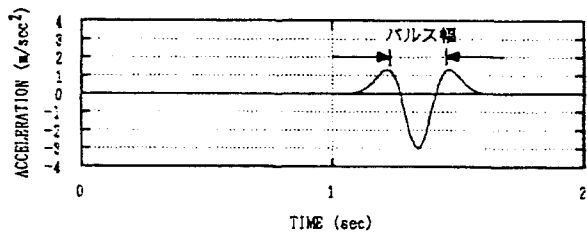


図 3-c 加速度

#### 4. 数値計算結果

(1) 岩石の重量を 1 kg、10 kg、100 kg、1000 kg、入力パルスの形状パラメータ  $\alpha$  の値を 5~4800、最大加速度を 300gal としてパラメトリックスタディを行う。

(2) 地盤深さ 30m、岩石の重量 100 kg に、 $\alpha=150$ 、600、2400 の上下動のパルス波を入力したときの応答を図 4~6 に示す。これらの応答値の測定点は、岩石直下の地盤③での値を示す。これらの図においてパルス波の入力により、岩石直下点の地盤の応力は静止状態である自重による圧縮応力状態から引張方向に近づく。一方、加速度は静止状態を 0 と表示すると、入力波によって生じる加速度が  $-9.8 \text{ m/sec}^2$  を示すと、岩石に作用する重力効果がなくなる。

(3) 岩石直下面での応答値と  $\alpha$  の関係を図 7~9 に示す。ここに、岩石重量は 100 kg とする。図 7 の縦軸は、図 4-a に示すように、静止状態圧縮応力  $\Delta\sigma_{f0}$  の入力波による減少分の最大値  $\Delta\sigma_f$  の倍率を示す。この傾向は、入力波のパルス性が高くなると増加する傾向にあるが、 $\alpha=600$  (パルス幅 0.1 秒) 近傍がピークを示しており、パルス性がそれより高くなっても、応答値は大きくなる。

図 8 は静止状態からの浮き上がり変位の倍率を示す。 $\alpha=600$  近傍でピークを示している。

図 9 は、岩石直下点の応答加速度の最大値と基盤面に対する比を示す。ここに  $|a_f|$  及び  $|a_g|$  の値は、岩石直下点

及び基盤面での上向き加速度の最大値の絶対値を示す。

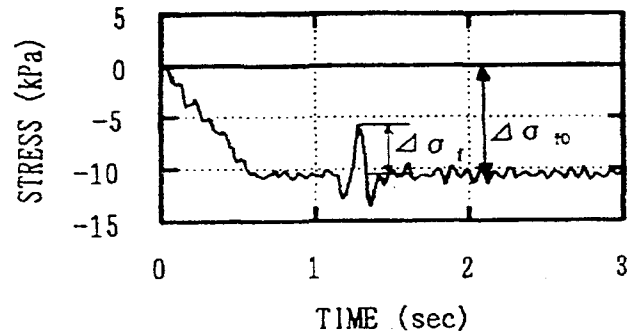


図 4-a 応答応力の時刻歴 ( $\alpha=150$ )

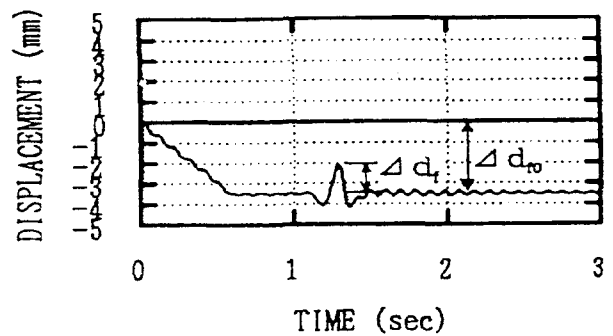


図 4-b 応答変位の時刻歴 ( $\alpha=150$ )

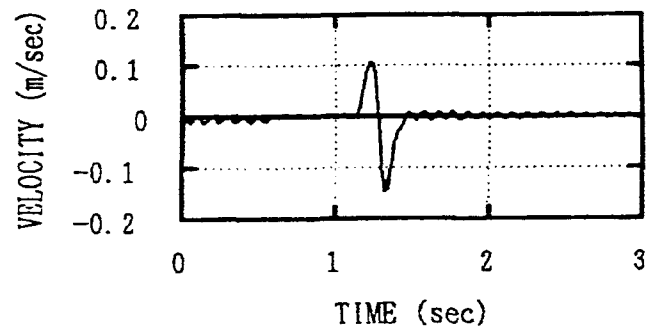


図 4-c 応答速度の時刻歴 ( $\alpha=150$ )

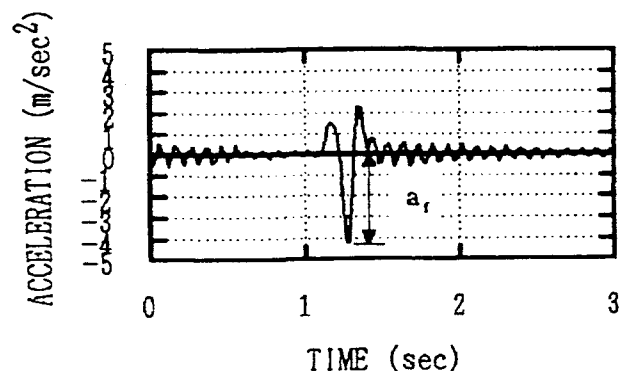


図 4-d 応答加速度の時刻歴 ( $\alpha=150$ )

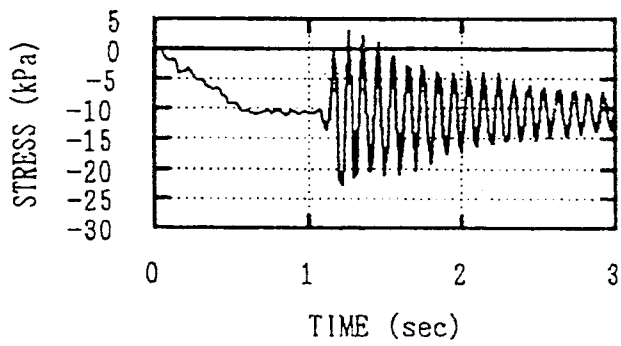


図 5-a 応答応力の時刻歴 ( $\alpha=600$ )

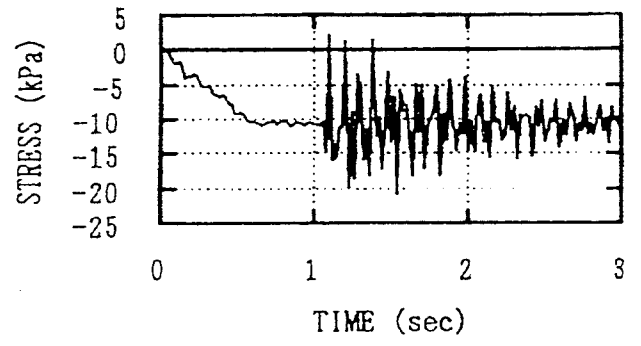


図 6-a 応答応力の時刻歴 ( $\alpha=2400$ )

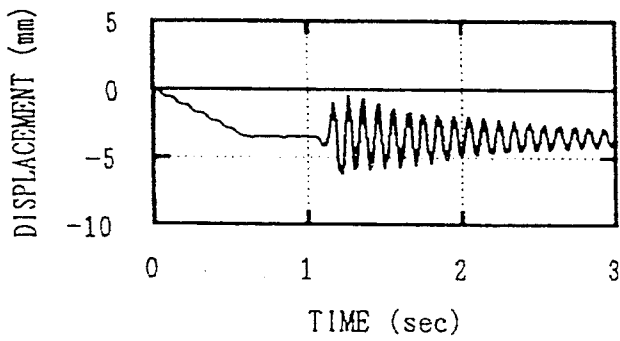


図 5-b 応答変位の時刻歴 ( $\alpha=600$ )

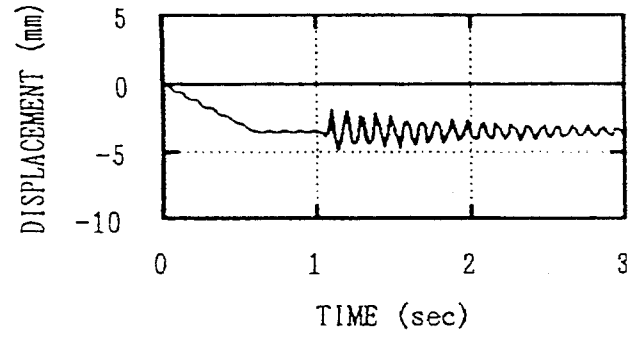


図 6-b 応答変位の時刻歴 ( $\alpha=2400$ )

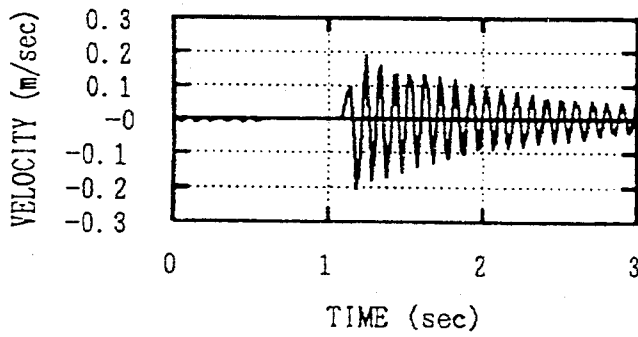


図 5-c 応答速度の時刻歴 ( $\alpha=600$ )

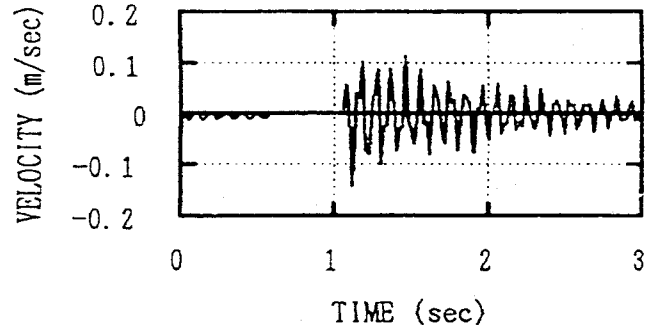


図 6-c 応答速度の時刻歴 ( $\alpha=2400$ )

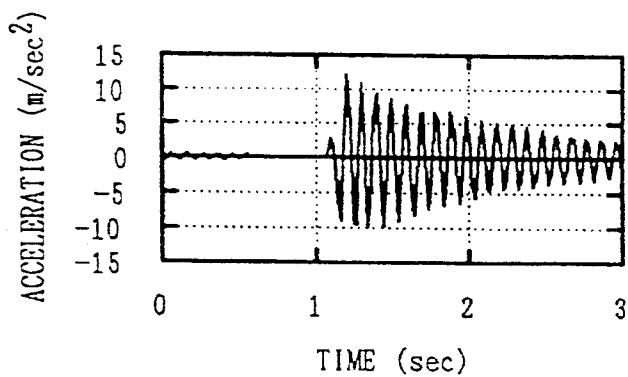


図 5-d 応答加速度の時刻歴 ( $\alpha=600$ )

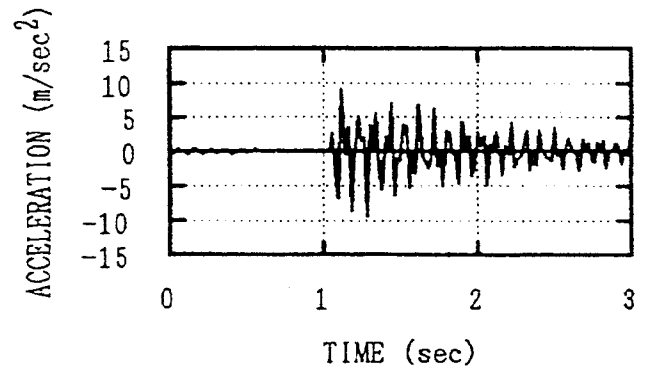


図 6-d 応答加速度の時刻歴 ( $\alpha=2400$ )

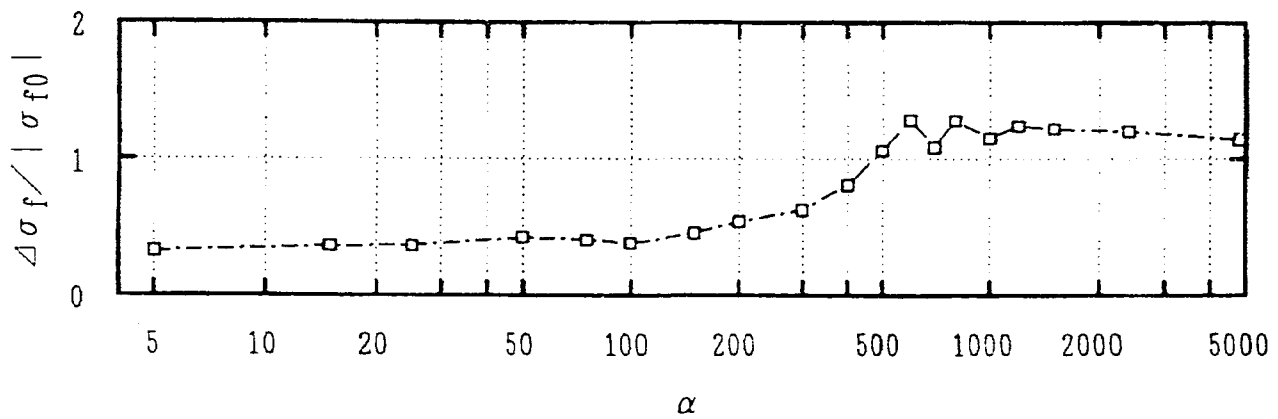


図7 応力応答倍率 (岩石直下)

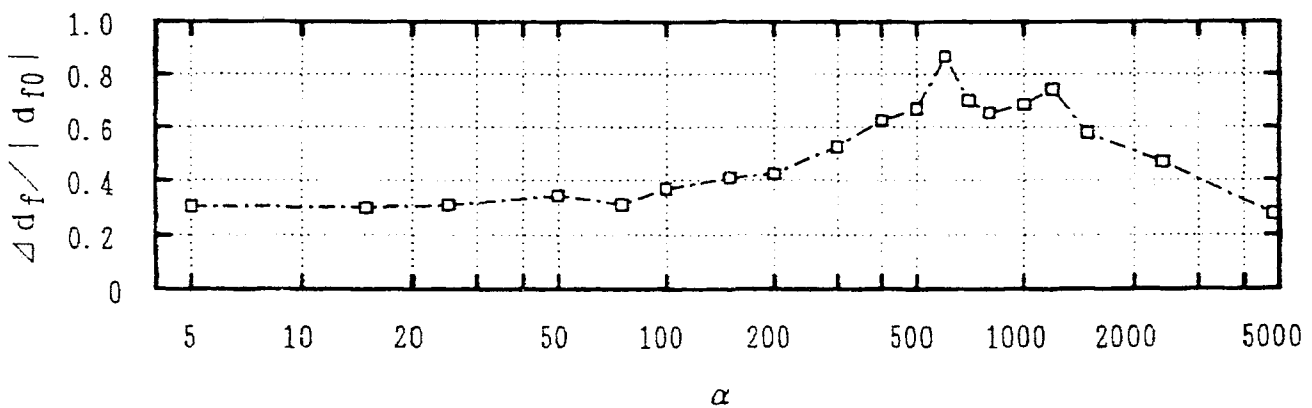


図8 変位応答倍率 (岩石直下)

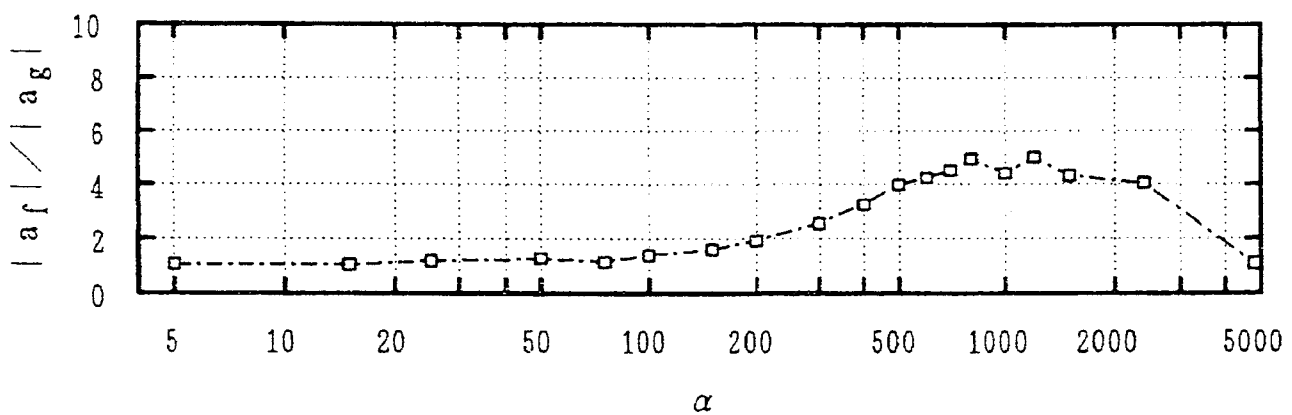


図9 加速度応答倍率 (岩石直下)

## 5. 結論

(1) 地震による跳び石現象を衝撃理論よりシミュレートした。既往の振動理論で説明できなかった現象が、本解析の手法を用いれば、説明できることが分かった。

(2) 今回は石の重量と地層の厚さをそれぞれ100 kg、30 mに固定し、パルス形状を変化させて応答特性を調べた。

(3) パルス幅0.1秒 ( $\alpha=600$ ) でいずれの応答も最大となり、応力応答倍率は1.3、加速度応答倍率は4.2となった。従って、地表の物体が跳び上がるのに必要な基盤入力加速度は1 g/4.2以上あればよいことになる。

(4) 本研究はまだ予備検討の段階にあり、跳び石現象の解明にはより詳細なシミュレーションが必要である。

謝辞 本研究の一部は、京都大学防災研究所特定共同研究「構造物の衝撃的破壊メカニズムの解明と防止」(課題番号 8P-1 研究代表者 野中泰二郎)および文部省科学研究費補助金を受けて行われたものであり、ここに記して感謝の意を表す。数値計算結果は、日本M S C社 Dr. Sherif Rashid 氏の有益な助言によるところが大きく、また、本研究の計算の一部は、菱友計算(株)萩野純氏の協力によるものであり、ここに感謝の意を表す次第であります。数値計算は、金沢工業大学高島研究室の鈴木精彦、増井隆浩君の助力に負うところが大きく、ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

1. 松尾成光, 伊藤勝祥, 梅田康弘, 石の投げ飛ばし実験, 京都大学防災研究所年報 第36号 B-1, 373-379, 1993.
2. T. Ohmachi, S. Midorikawa, Ground-motion intensity inferred from upthrow of boulders during the 1984 Western Nagano prefecture, Japan, earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82, No. 1, 44-60, 1992.
3. S. Nakagawa, M. Kuno, Y. Hayashi, M. Kaneko, and T. Watanabe, Estimation of ground-motion intensity from the upthrow of boulders, Structural Mechanics in Reactor Technology, Polto Alegre, Brazil, 1995.