

地震で飛ぶ石の振動特性

小泉 誠・松尾 成光・伊藤 勝祥・梅田 康弘

THE FREQUENCY RESPONSES OF UPTHROWN STONES BY THE LARGE EARTHQUAKES.

By Makoto KOIZUMI, Shigemitsu MATSUO, Katsuyoshi ITO and Yasuhiro UMEDA

Synopsis

In the source area of large earthquakes, many upthrown stones have been found. The surface objects might be struck by high acceleration exceeding earth's gravity at a time of main shock. Almost all of dislodged stones were the boulders with the dimension of greater than 256mm. On the contrary, small stone such as a pebble or very big stone was not dislodged. This fact suggests that there is a resonant frequency produced by a vibrating system with a stone and surface soil. This frequency is certainly predominant frequency at a time of earthquake.

The frequency responses of various size of stone were examined by using vibration excitor. Small sensors were attached on each stone. At 30~70Hz, the boulder was highly excited comparison with other smaller or larger stones.

1. はじめに

大地震時に地上の石が飛翔するという現象は1984年長野県西部地震^{1), 2), 3)}, 1989年ロマプリエタ地震⁴⁾, 1990年ルソン島地震^{5), 6)}, 1992年ランダース地震⁷⁾で確認されている。また1994年の米国ノースリッジ地震の震源域での現地調査で確認した。石が飛んだ現場では非常に大きな地震動があったことが予想されるが、現場で測定できるのは石の飛距離である。この測定値から振動の大きさ、すなわち地面の速度や加速度を見積るにはどうしても地震時の振動周波数に関する情報が必要となる。

一方これまでの現地調査から、石が飛ぶか否かは石の大きさ(重さ)によることが分かっている。すなわち0.1kg以下の小石や逆に1,000kgの大石は飛ばない。飛び散った石の大半は10~100kgである。この事実は石と土から成る振動系が周波数特性をもち、その特性が石の重量によって異なるためと考えられる。このことを逆に利用すれば地震時に石を飛ばした振動周波数を推定することができる。

昨年京都大学宇治構内において石の大小による周波数応答の違いを調査した結果、振動周波数が40~80Hzにおいては小さい石より大きい石の方が振動振幅が大きくなることがわかった⁸⁾。ただ宇治構内での実験は人工的な埋め立て場所で行われたので、今回は自然の山の中で同様の実験を行った。

2. 実験と観測

石の振動応答実験を行うに際して、前もってその場所の地盤状況を知る必要があり、屈折法による地表近くの弾性波速度構造の調査を行った。Fig. 1 下図のように東西方向に一直線上に速度型上下動地震計を8

台並べ、東端の高さ約 1.7m の崖の側面をハンマーで叩き、得られた記録の P 波初動時刻から走時曲線を描くと Fig. 1 上図となり、水平成層構造であると仮定すると、これから第 1 層の深さは約 6 m, P 波速度は約 500m/sec, 第 2 層同 700m/sec が求められた。

つぎに石の振動応答を調べるため重量約 400kg の動電式起振機による振動実験を行った。特に起振機の

振動周波数を変化させ、地面上に置かれた大小の石がどのような振動応答を示すかを調べた。起振機を中心として半径約 5 m の円周上に土に埋まっている重さ 1 トン以上と思われる大石、転石を土に固着させた重さ 140kg の中石、同じく 24kg の小石を配置し、それぞれの石の上および地面直接与に固有周波数 2 Hz の速度型上下動地震計（マークプロダクツ社製、L22D）を設置した。石の上の地震計は石膏で固定し、地面のそれは少し埋めた。また地面との固着をより一層強固にするため直径 40mm, 肉厚 5 mm のパイプを土中に 65cm 打ち込み、パイプの上に同じ地震計を固定したものをを用いた。また起振機本体上と直近の地面上にも同型地震計を設置した。これらの配置図を Fig. 2 に示す。ここで用いたすべての地震計は実験に先立ちキャリブレーションを行った。キャリブレーションは全地震計を同一の台上に乗せ振動を与えて特性を調べた。

記録器には東京測振社製の携帯記録計 SPC-35G（分解能は 16 ビット、内蔵ハードディスク 120MB）を使用、サンプリング周波数は 1000Hz である。最大 1 万倍（80dB）の増幅器を使用した。起振機から地盤に与える加速度の大きさにより適宜増幅器の倍率を変えた。起振機の各振動周波数に対して得られる地震計記録、および後で述べる地面叩きの記録はいずれも 2 秒間取得した。振動加速度は正弦波で周波数を 10Hz から 250Hz まで 10Hz ないし 30Hz 間隔で与えた。また必要と思われるところは 5 Hz 間隔でも与えた。加速度の大きさは 100gal から 500gal の範囲である。起振機用の電源は別途の発電機から供給されるが、それを搭載した電源車の振動が加わらないように充分距離をとり、また風雨による振動も避けるため風のない晴天の日を選んで実験を行った。

震源域で実際に飛び散った石の近くで上述のような石の振動応答を調べることが最良であるが、常に現場へ起振機を搬入できるとは限らない。このような場合は地面をハンマーで叩くなどの簡便な手法をとらざるを得ないが、それが有効か否かの検定をやっておかねばならない。そこで各地震計から等距離にある起振機付近で掛矢（木製

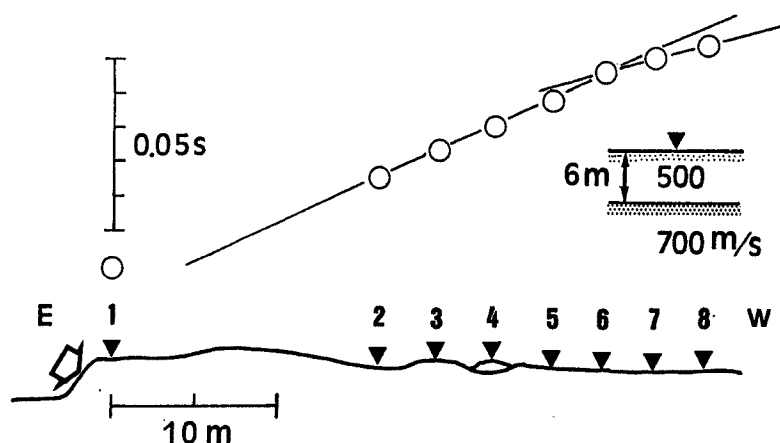


Fig. 1 Lower: Location of shot point (E) and sensor (W). Upper: Travel time table and obtained velocity structure for the experiment surface.

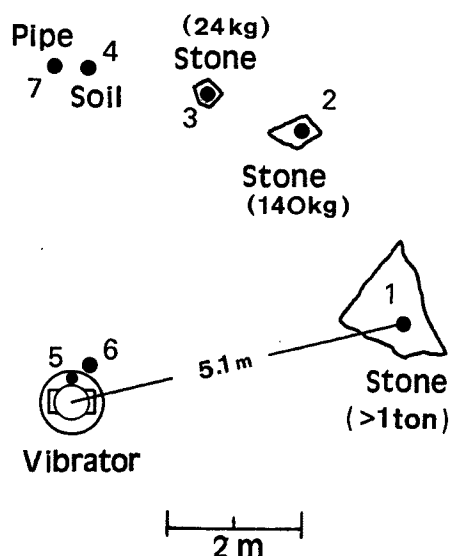


Fig. 2 Distribution of various weight of stones and vibrator. Solid circle indicates a small seismometer.

の大きな槌)を使って地面を叩き、大小の石や地面の振動記録からスペクトルを求め、起振機の方法と比較し代用の可能性を探った。

3. 解析結果

起振機の振動周波数 50Hz, 同加速度振幅 100gal の正弦波振動を与えた時の振動応答の記録の例を Fig. 3 に示す。上から大石, 中石, 小石, 地面上に置いた地震計の速度出力で, 140kg の中石の振動振幅が 1 トン以上の大石や 24kg の小石に比べて極めて大きくなっていることが分かる。

Fig. 4 は土と石から成る振動系の周波数特性を調べたもので, 横軸は起振機で与えた振動周波数, 縦軸は地震計出力電圧 (両振幅値) を加速度に換算して表示してある。いずれも起振機の加速度を 100gal, 増幅器倍率を 500 倍として規格化してある。重さの異なる 3 種類の石と地面の振動スペクトルから, 30~70Hz に地盤の共振周波数があることが分かる。また中石, 小石, 地面の振動応答は 100Hz と 200Hz の間にもう一つの小さなピークがある。尚, 70~80Hz 付近に見られるごく小さくした変化については 4 節の議論のところで取り上げたい。

重さの異なる 3 種類の石の振動応答についてまとめた図を Fig. 5

に示す。今回の実験でこの 3 者の間には大きな振動振幅応答の違いがあることが分かった。すなわち 1 トン以上の大石の振動振幅は共振周波数域で中石 (140kg) や小石 (24kg) に比較して非常に小さく, また中石と小石は 20Hz 以下の周波数と 70Hz 以上の周波数ではほぼ同じ振動振幅を示すが地盤の共振周波数 50Hz 付近で約 10 倍ほど中石の振幅が大きくなっていることが分かった。ちなみに中石と大石では約 100 倍の違いがあった。この実験結果が大地震時に飛び散る石と飛ばない石を決定づけていると考えられる。地盤の共振周波数は場所によって異なると考えられる。昨

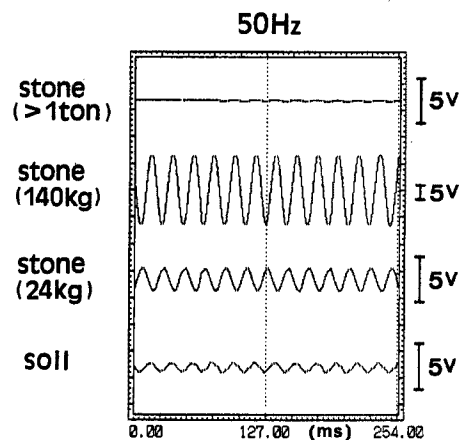


Fig. 3 An example of output signal at vibratory frequency of 50Hz.

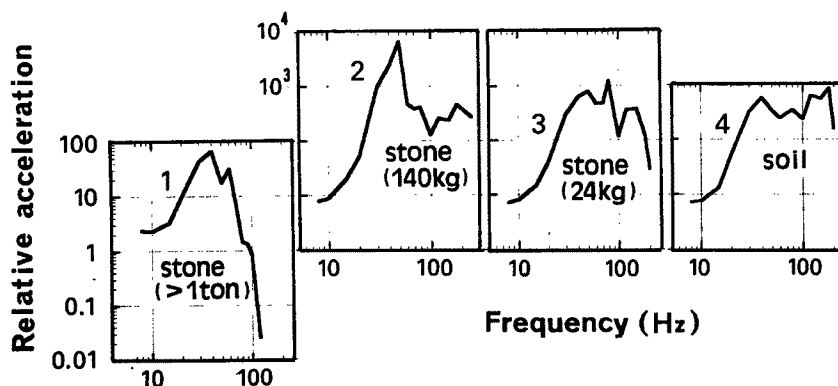


Fig. 4 Frequency responses of various weight of stones and soil. Number inserted in figure corresponds to the seismometer in Fig.2.

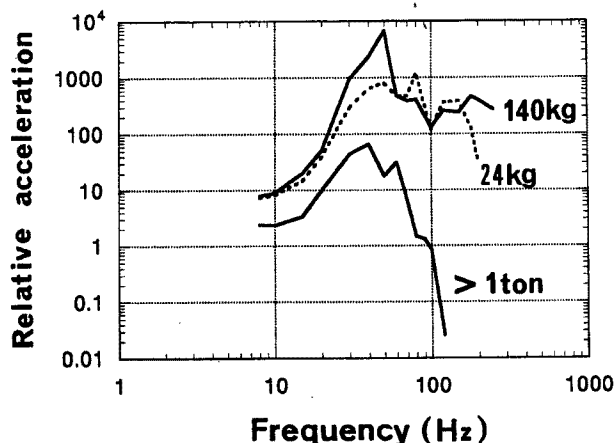


Fig. 5 Relative frequency responses of different weight of stone.

年宇治構内で行われた実験ではこの周波数は70Hz付近であった。本論では詳しく述べないが、ランダース地震(1992年6月に米国カリフォルニア州で発生したM7.5の地震)で飛び石の発見された地域での地盤の共振周波数は30Hzであった。このように地盤の共振

周波数は場所によって異なるので、その都度求められなければならない。しかし、いつも起振機による実験が可能とは限らないので、共振周波数を見出す簡便な方法も開発しておく必要がある。そのひとつが前節で述べた掛矢で地面を叩いて石の応答スペクトルを見る方法である。

Fig. 6 は掛矢で地面を叩いて得た記録で、上から大石、中石、地面上それぞれに設置した地震計の速度波形である。3者の図上の倍率は同じである。振動振幅は中石が大きく、次いで地面で、大石は小さい。この傾向は起振機による実験結果と一致している。この記録からスペクトルを求めたものが**Fig. 7**で横軸に周波数を、縦軸は地震計の出力電圧を加速度に換算したものである。起振機実験から得られたスペクトルと比較すると、地面叩きで求められた地盤共振周波数は50Hz～60Hz付近であり、振動振幅では中石は大石より約10倍大きいことを示している。グラフの下部分はSN比が悪く、20Hz以下の低周波域は精度はないが、基本的な傾向は起振機による実験結果と一致し、ハンマーで地面を叩く方法も有効であることが分かった。

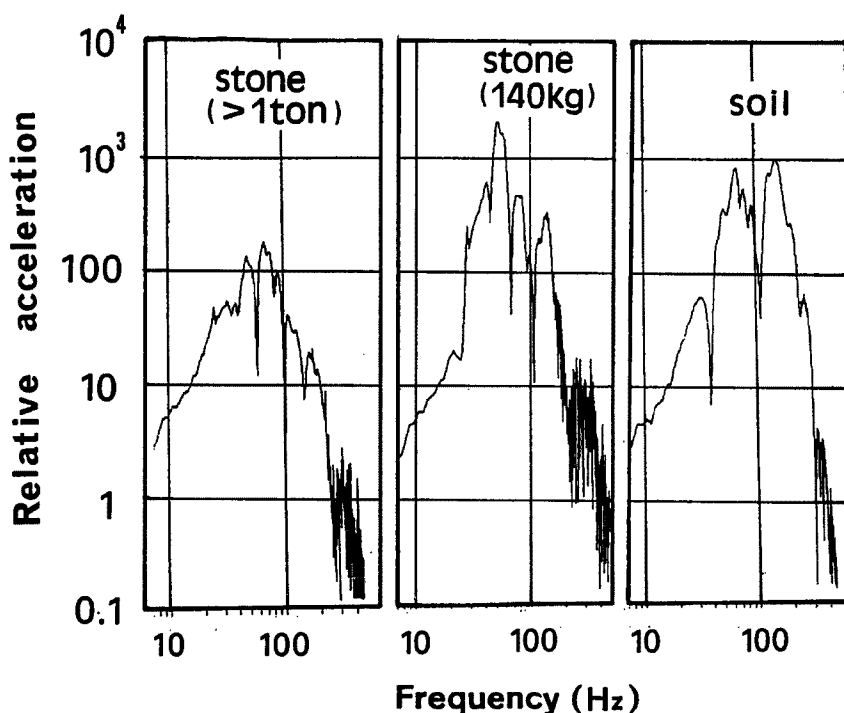


Fig. 7 Spectra for artificial source.

4. 議 論

今回の実験でも石の大小による振動応答に顕著な相違が認められた。すなわち大きな石の振動振幅は非常に小さく、小さな石も比較的小さい。しかし140kgの転石は大石に比べて共振周波数のところでは2桁も大きく、小石に比べても約1桁大きいことが分かった。特に小石との関係でみると20Hzまでと60Hz以上では振動振幅はほぼ同じであるが共振周波数の30~50Hz付近で中石の振幅が極めて大きくなっていることは注目すべきであろう。阿武山では地盤特性の共振のピークは40~50Hz付近で宇治構内とはやや異なる結果を得た。共振周波数がどこになるかはその場所の地盤特性により決定づけられるものと考えられる。

地面叩きによりインパルスを与える方法が起振機の代わりになりうるかという問題は、20Hzより低い周波数域では精度が落ちるように思われるが、それより高い周波数の部分では200Hz 辺りまでなら十分カバー出来るようである。また地面叩きによる石や地面の振動振幅の絶対値は、起振機の場合ほど精度は出ないが、大小関係の傾向は十分知ることができる。

さて今回の起振機の実験で8~25Hzの振動を与えたときに基本波上にやや高い周波数の震動が重畳した。Fig. 8は8Hzの振動周波数を与えた時に140kgの中石、24kgの小石、土、パイプに現れた記録例である (Fig. 8上)。これをスペクトル解析した結果、50~180Hz ぐらいにわたる周波数を含んでいることが分かった (Fig. 8下)。

この中で特に目立つのが70~80Hzの振動で3節の解析結果で触れた各種の石の振動応答曲線がぎくしゃくする原因でもあるようだ。この原因については今のところよく分からないが最上層の腐葉土や植物の根などの複合作用によって引き起こされるものかも知れない。しかし起振機の周波数を順次高く変化させて行くに従ってこの種の振動は見られなくなったが、振動周波数が180Hzを越えると中石はその振動に追従する場合としない場合があった。

5. まとめ

(1) 阿武山での土と石からなる振動系の地盤応答特性は、30~70Hzに共振周波数を持つことが分かった。この共振周波数がどこになるかはその場所の地盤構造に依存する。

(2) 起振機を用いて石の振動応答を調べた結果、1トンを越える大石の振動振幅は極めて小さい。しかし140kgの石の場合、共振周波数での振動振幅は24kgの石の約10倍、大石の約100倍にも達することが分かった。この違いが大地震時に飛ぶ石と飛ばない石を決定づけると考えられる。

(3) 地面叩きの方法でも起振機の方法と同様に地盤応答特性の傾向は一致した。共振周波数での振動振幅については起振機ほどの精度はないが十分代用しうることが分かった。

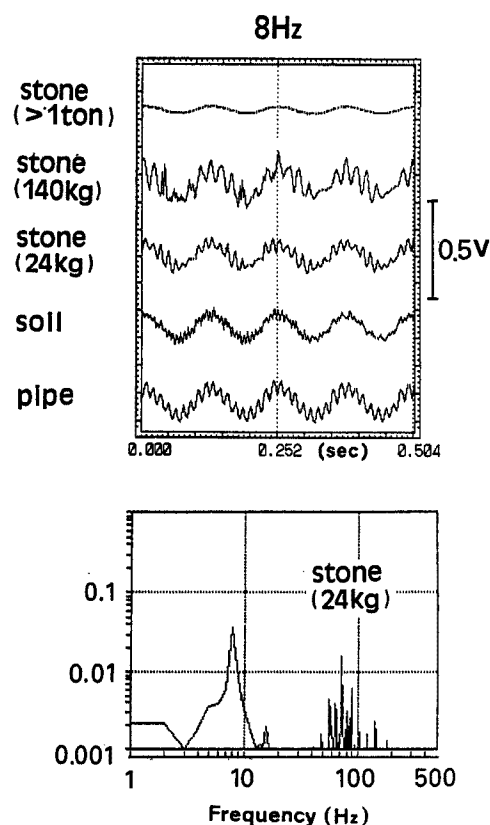


Fig. 8 Upper: Output signals at vibrate frequency of 8Hz. High frequency noises around 50~180Hz was superimposed. Lower: Spectrum for the stone (24Kg).

謝 辞

この実験および観測を行うにあたり、阿武山観測所の片尾 浩博士にはボアールホールの地震計出力の提供と分岐作業をして頂いた。また同観測所斎田市三技術長を初めとする観測所員の皆様には実験作業を援助して頂いた。理学部の小林芳正教授、地震動部門の入倉孝次郎教授、地震予知研究センターの渡辺邦彦博士には貴重な御助言を頂いた。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 伊藤 潔・飯尾能久・黒磯章夫・梅田康弘・村松郁栄：1984 年長野県西部地震で加速度が $1g$ を越えた領域の調査，自然災害特別研究突発災害研究成果「1984 年長野県西部地震および災害の総合調査」，研究代表者飯田汲事，1985-a，pp.89-96.
- 2) 黒磯章夫・伊藤 潔・飯尾能久・梅田康弘・村松郁栄：1984 年長野県西部地震の地変および大加速度域の調査，京大防災研年報，28 号，B-1，1985，pp.171-184.
- 3) Umeda, Y., A. Kuroiso, K. Ito and I. Muramatsu: High accelerations produced by the Western Nagano Prefecture, Japan, earthquake of 1984, Tectonophysics, 141, 1987, pp.335-343.
- 4) 梅田康弘・M.J.Rymer：ロマ・プリータ地震で飛び上がった石の調査，地震学会講演予稿集，1990，No.1，p.108.
- 5) 梅田康弘・伊藤 潔・加藤 護・R.D.Arboleda：1990 年フィリピン地震によって飛び跳ねた石，京大防災研年報，34 号，B-1，1991，pp.211-219.
- 6) 梅田康弘：飛び石と地動，1990 年フィリピン・ルソン地震震害調査報告，1993，pp.44-52.
- 7) 梅田康弘：1992，カリフォルニア，ランダース地震（M7.4）による飛び石，地震学会講演会予稿集，1992，No.2，p.125.
- 8) 松尾成光・伊藤勝祥・梅田康弘：石の投げ飛ばし実験，京大防災研年報，36 号，B-1，1993，pp.373-379.