

地震による半埋没物体の跳躍について

EARTHQUAKE-INDUCED JUMPS OF OBJECTS PARTLY EMBEDDED IN THE GROUND

大町達夫* 荒井靖博** 竹田尚史料

By Tatsuo Ohmachi, Yasuhiro Arai and Yoshifumi Taketa

It is said that in the source region of the 1984 Western Nagano Earthquake ($M=6.8$), a number of stones gave evidence of jumping out of ground holes in which the stones were originally embedded. But this is not an indication of ground motion accelerations much greater than the acceleration of gravity. Because jumping of partly embedded stones relative to the ground holes can take place when earthquake response acceleration of the stones exceeds the acceleration of gravity. This is here demonstrated by vibration experiments, numerical simulation and response analysis using near field accelerograms.

1. はじめに

地震動の強さを物体の移動状況から推定することは従来よく行われており、墓石の転倒調査はその好例である。このことに関連して、物体の転倒現象と地盤震動との関係も詳細に調べられている。これらによれば^{1), 2)}、墓石のような単純な矩形形状物体は、転倒に先立って3種類のロッキングモード、すなわち同位相ロッキング、逆位相ロッキングおよびサブハーモニックロッキングの何れかをおこすため、ウエストの公式で推定される地動の最大加速度は常に実際の加速度を適切に表現するとは限らない。物体が転倒するのに必要な加速度は、振動数によってはウエストの式で与えられる値を大幅に越えることはもちろん、ある場合にはこれを下回ることもある。これは、物体と地盤との間に動的な相互作用が働いたためであると見なしてもよい。

地震による物体の跳躍現象について、N. M. Newmark は同様の趣旨のことを述べている³⁾。すなわち、彼によれば、地表近くの物体が空中へ飛び出すことが地動の鉛直加速度が重力加速度を上回った証拠にはならない。なぜなら、これには物体と地盤とで構成される振動系の地震応答加速度が重力加速度を上回りさえすれば十分であるからであり、要は地震に対する物体の応答に注目する必要があるというのである。他方、G. W. Housner は、1960年チリ地震の際、安定そうに見える多くの構造物が著しい被害をうけた中

* 工博 東京工業大学 総合理工 社会開発工学専攻 (227 横浜市緑区長津田町4259)

** 大学院修士課程 同上

で、一見不安定な高架水槽が無事であった理由を振動系の地震応答に関連させて巧みに説明している⁴⁾。

1984年長野県西部地震では、御岳山の山腹における大規模な斜面崩壊をはじめ多くの地盤災害が発生したが、震源近傍において多数の石や倒木が空中へ飛び上がったことが報告されている^{5)・6)・7)}。一連の報告には、最大寸法 70x70x40cm、重量 200~250kgにもおよぶ石が 2.3mも飛んだ例をはじめ、多数の興味深い現地調査結果が紹介されている。この現地調査は、目撃者の話をもとに実施され、地表近くに半ば埋没していたと思われる石や倒木が元の穴を残したまま移動した例を探すという方法で行われたものであり、この調査結果は高い信頼性をもつものと判断できる。ここでは、一見特異なこのような現象が、いかなる機構で生じるかを物体の地震応答という観点から簡単な実験と解析で検討し、これをもたらしめた地盤震動について考察してみた。

2. 弾性地盤における物体の跳躍実験

(1) 目的、使用材料および実験方法

地表近くの物体が地震動を受けて跳躍する現象を理解するために、まず実際にこれを実験室内で再現し観察してみることにした。ここでは土質地盤の代用としてスポンジゴムを使い、跳躍させる物体として、直径 10mm、質量 4.1g の鋼球と、直径 15mm、質量 0.33g のコルク球を用いた。スポンジゴムの裏面は平坦であるが、表面は図 1 に示す最大起伏をもつ正弦波の格子状となっている。これを振動台にのせ、上面に物体を置き下面を加振した。スポンジゴムの表面を上面とし、これに 2 種類の球体をのせると、図 1 に示すように球体はともに半ば埋没した状態となる。これらの球体のほかに、直径 20mm、質量 0.14g の発泡スチロール球も比較のため使用した。

振動台とスポンジゴムとは剝離しないように両面接着テープで固定した。振動台の加振状況は圧電型加速度計を用いて常時検出した。また、跳躍物体の加速度を検出する目的で直径 6mm、高さ 10mm の小型加速度計を石膏で固めて直径約 15mm の球体を作りこれを他の球体と同様に加振した。これらの加速度計の振動数範囲は 1 ~ 25,000Hz となっている。

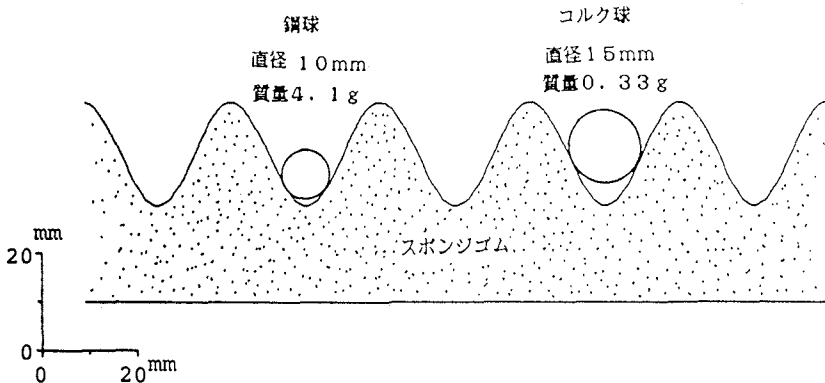


図 1 振動実験に使用したスポンジゴムの最大断面および球体との相対位置関係

(2) 平坦な弾性地盤上での球体の跳躍

スポンジゴム板の裏面を上、表面を下にして、下面を鉛直方向に正弦加振し、上面にのせた球体を鉛直に跳躍させた。加振振動数をたとえば 15Hz とし、加振振幅を徐々に変化させると、鋼球の次のような運動が観察される。

振幅が小さいうちは鋼球はゴム板と不離一体の運動をするが、加振加速度の振幅が 1.0G (G は重力加速度、以下同様) に達すると鋼球はゴム板を離れ跳躍運動を開始する。この運動は跳躍高さが約 5mm の定常的なものであり、加速度を増加させてもしばらくこの定常運動が観察される。加速度が 1.4G 程度になると、鋼球の跳躍運動とゴム板の振動とに位相の食い違いが生じ始め一定高さの跳躍運動ではなくなる。さらに加速度を 1.8G まで高めると位相の食い違いはさらに著しくなり、振幅が変化するうなりのような跳躍が観察される。この場合には、跳躍高さが 3cm に達することもある。逆に振幅を徐々に減少させていくと、順に上述の運動が観察されるが、跳躍を開始した加速度 1.0G を下回っても鋼球はまだ定常的な跳躍を継続し、加速度が 0.4G にまで落ちてはじめて跳躍を停止する。

上に述べた鋼球の跳躍運動は再現性が非常によく、何度繰り返してもほぼ同じ運動が観察されることに特徴がある。また、鋼球が跳躍を開始したり停止したりする加速度や跳躍高さは、振動数によって異なる。実験によって観察された、跳躍開始時および跳躍停止時の加速度振幅を図示すると、図 2 のようになる。図中、三角印と丸印は、振動数を一定として振幅を変化させた場合と、発振器の出力を一定として振動数を変化させた場合にそれぞれ対応している。また白丸印と白三角印および黒丸印と黒三角印は、それぞれ跳躍の開始と停止に対応している。矢印は、一つの実験で対をなす跳躍の開始と停止の組を示している。

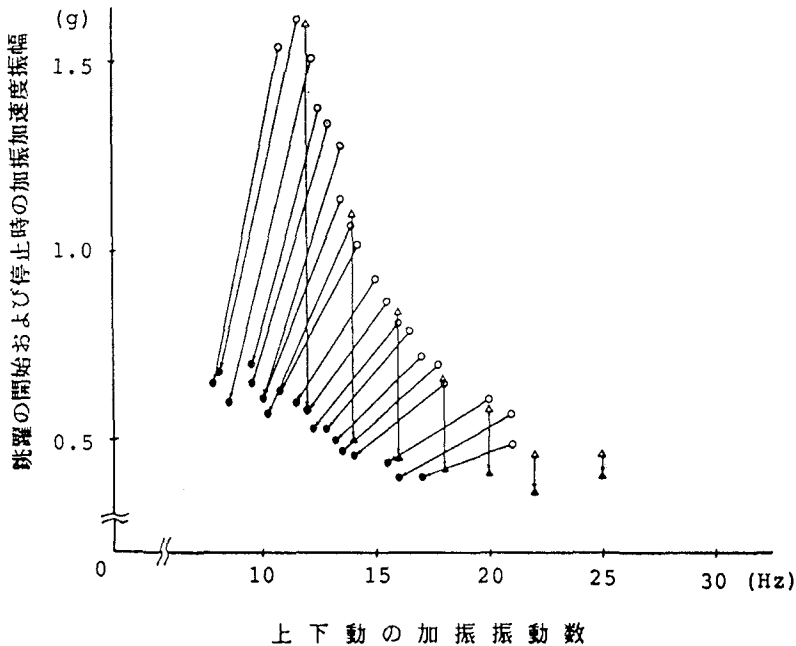


図2 平坦な弾性地盤上で跳躍の開始と停止を生じる鉛直加速度振幅

図より明らかなことは、まず、振動数が 14Hz 以上であれば、地盤振動の鉛直加速度が 1 G 以下でも鋼球の跳躍は生じることである。振動数が高いほど小さな加速度で鋼球は跳躍を開始するが、25Hz 程度になると跳躍高さは非常にわずかで 1 mm にも及ばない。次に、振動数が 15Hz より低くなるにつれ、跳躍を開始するに要する加速度は急激に増加することも明らかである。しかし、一度跳躍を開始すると、地盤の加速度が跳躍開始加速度の半分程度まで低下しても跳躍は継続する。したがって、物体が跳躍しているときの地盤加速度を推定することは大きな誤差を伴うが、跳躍を開始するときの加速度は振動数さえ決めれば比較的精度良く推定できることになる。なお、振動数が 15Hz 以下での定常的な跳躍高さは 10mm ないし 15mm であった。

鋼球の代わりにコルク球を使い 15Hz で加振すると、加速度が 1.4G 程度に達する頃から球とスポンジ板との接触面にずれが生じ、球がわずかに不規則な回転を始めた。さらに加速度が増加し 1.5G に達すると鋼球の場合と似た跳躍を開始した。接触面のずれに伴う回転と、その後の跳躍は他の振動数でも観察されるが、鋼球の跳躍と比較するとコルク球のほうが跳躍開始加速度は全般に高く、跳躍の高度は低い。また鋼球の場合には見られなかったざり回転がコルク球で起こった一因として、コルク球の真円度が不足し表面が不均質であることも考えられるが、表面が比較的滑らかなスチロール球を用いてもざり回転が観察されたことから、軽量の物体が明瞭な跳躍を起こす前段階に観察される一般的現象とも考えられる。

(3) 弾性地盤に半ば埋没した物体の跳躍

a) 水平加振による跳躍

スポンジ板の裏面を振動台に固定し、スポンジ板表面の窪みに鋼球 10x10個を写真 1 に示すように格子状に配置し、その外側に比較のためコルク球 8 個を配置した。このようなスポンジ板および鋼球とコルク球を載せた振動台を水平方向（写真の左右方向）に正弦振動させ、球体の運動を観察するとともに、石膏で丸くくるんだ加速度計を用いて球体の振動状況を検出した。

振動台の加速度が小さいうちは、球体は振動台と全く一緒に正弦振動をするが、加速度がある程度大きくなると幾つかの鋼球が突然に窪みから飛び出す現象が生じる。さらに加速度を増すと窪みから飛び出す鋼球の数は増加しその動きも激しさを増す。この状況を例示したのが写真 2 および 3 である。水平振動によって球体が窪みから飛び出す現象は、次のような特徴をもっている。

- ① 振動数範囲がほぼ 13 ~ 20Hz に限定されており、これ以上高い振動数では加速度が大きくても窪みの中で小刻みに揺れるだけで、窪みから飛び出すことはあまりない。
- ② どの鋼球が飛び出すかは予測できない程ランダムであり、たまたま不安定になり浮き上がった鋼球が飛び出すもののように見受けられる。そのため、一度窪みから飛び出すと以後何度も跳躍を繰り返すことが多い。
- ③ 飛び出す方向は振動台の振動方向が卓越しているが、全てがその方向ではない。跳躍の距離についてもランダム性が強く一定しない。見方によっては、火の中で豆が弾けるように飛び上がるとも言える。
- ④ 鋼球の激しい跳躍運動に比較して、コルク球の運動はおとなしく窪みを出るにしても転動しながら出た次の窪み内に落ち着くことが多い。

スポンジの窪みの中で、球体が動き始めるときの加速度を検出した結果の一例を図 3 に示す。図の上部は振動台の加速度を、下部は窪み内の球体の加速度を示している。球体内の加速度計の向きは当初は加振方向（水平）であるが、窪みに対して相対運動を始めると球体は回転するのでどの方向の加速度とも言い難い。この球体の質量が鋼球に比較して小さいことや加速度計のリード線が無視できない程の剛性をもつなどのため、図示した例では加速度計を内蔵した球体は窪みから飛び出さず、ただ窪みの中で飛び跳ねているだけの状態であった。

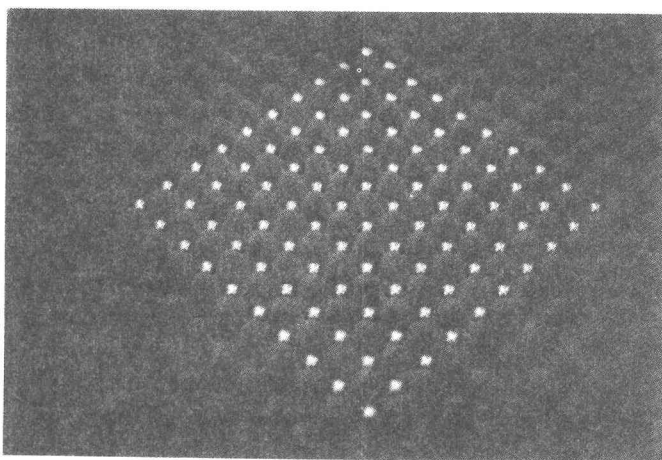


写真1 格子波状表面をもつスポンジゴム上に配置した100個の鋼球群
(加振の際は比較のため、この外側にコルク球を配置した。)

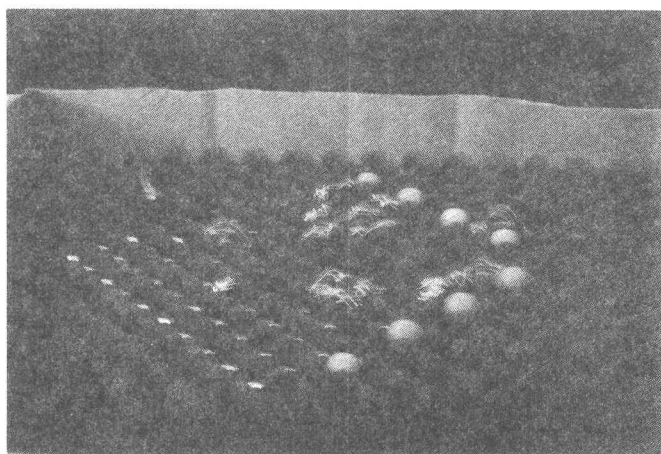


写真2 水平加振によって鋼球が跳躍を開始した状態
(白く尾を引いて見えるのが鋼球の跳躍軌跡。大きな白丸は、コルク球。
左上方には、小型加速度計とリード線が見える。)

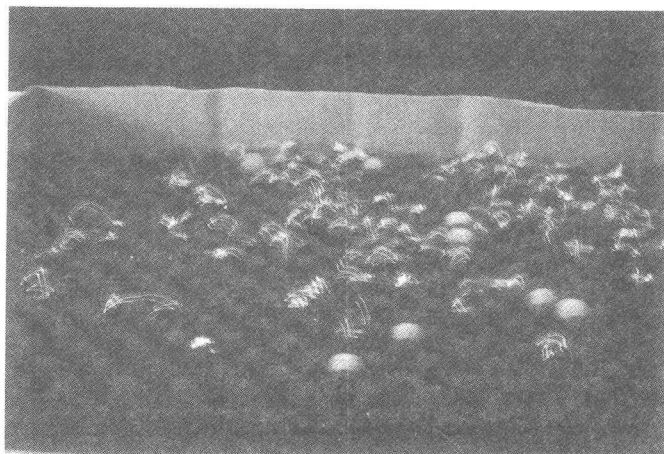


写真3 水平加振によって鋼球が激しく跳躍している状態
 (跳躍は全体として非常にランダムであることに注目。)

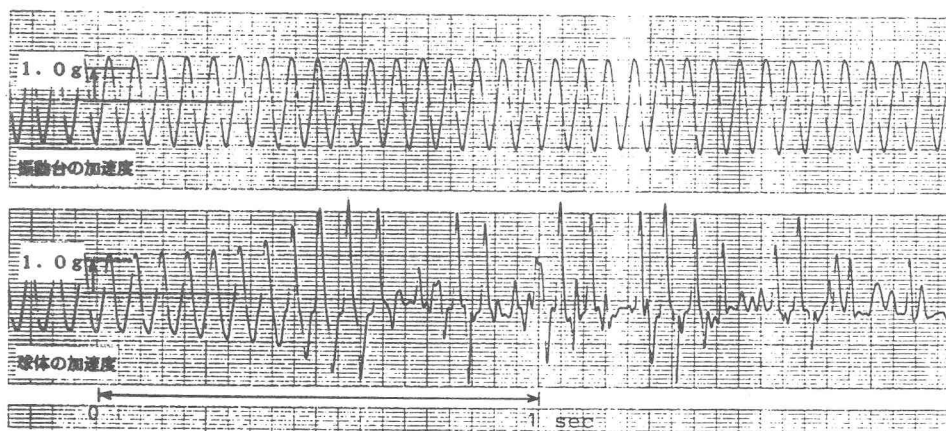


図3 振動台の水平加速度と球体の加速度の実測例
 (振動台の振動数は 17Hz、加速度振幅は約 1.3G)

図3から振動台の加速度振幅が 1.3G 程度に達すると、球体の加速度は振動台の正弦的な加速度とは異なる鋭い波形を示し最大加速度は 3G を越えていることが読み取れる。このような不規則で高い加速度値をもつ波形は、明らかにスポンジ板と球体との相互作用によって生じたものである。このことは、振動台と球体の加速度波形のピークの位相が当初は一致していたものが、次第にずれていることから推察できる。球体の実測加速度記録において、振動台と同様な正弦的波形からせいぜい 5 波程度の波数、すなわちこの場合には 17Hz の振動であるので時間にして 0.3 秒弱の短時間内にこのような不安定な波形を描き始めることは特に注目される点である。

前述のように加速度計を内蔵した石膏の球体は実際には窪みから飛び出さなかったのに、窪みから飛び出した鋼球の運動形態とは厳密には異なるが、鋼球が窪みに対して相対運動を開始した直後の加速度は図3と類似の特徴を示すものと考えられる。従って、鋼球が水平地動によって窪みから飛び出すときには、鋼球が窪みの中で 4、5 回程度窪みの両壁と小刻みの衝突を繰り返すうちに、両壁からの反発力によって鉛直方向にも重力加速度を越える大きな応答加速度を獲得し、最終的に窪みから飛び出すのであろうと推察される。

b) 上下加振による物体の跳躍

前述の鋼球、コルク球およびスチロール球とスポンジ板を使い上下加振によって物体を跳躍させた。水平加振の場合と比べて次のような点が注目された。加速度振幅が 1G を越えるとどの球も跳躍を始める。3種類の球のなかでは軽量なスチロール球が跳躍につれて場所を移動するが、重量のある鋼球が窪みから抜けて場所を移動することはあまりない。跳躍が目立つ振動数は水平加振の場合とほぼ等しく、15Hz ないし 20Hz である。また全ての鋼球がほぼ同じような上下運動を示し、水平加振の場合より跳躍運動にランダム性が少ない。

3. 個別要素法による数値解析シミュレーション

(1) 手法の概要

地面に半ば埋没した物体が地震によって穴から飛び出す現象を数値解析によりシミュレーションするには、個別要素法が適している。筆者らは、以前に、この方法を地震動による墓石の転倒現象に適用し、その有効性を確認している⁹⁾。この手法には、開発以来幾つかの変形手法が提案されているが、ここで用いたものは、次のような最も簡単な 2 次元的手法である。

物体と境界をともに剛体とみなし、両者が接触しているときには、両者の間に力の授受を考える。力の授受は、接線方向と垂直方向に分離して考え、接線方向には弾性ばね、粘性ダッシュポットおよびクーロン摩擦に対応するスライダを、また垂直方向には弾性ばねと粘性ダッシュポットを介して行う。それぞれのばね定数や減衰定数、摩擦係数は、物体の固有周期や減衰特性、せん断抵抗角などをもとに定める⁹⁾。物体の各時刻の状態は、運動方程式を逐次積分して算出する。物体も境界も剛体と考えるので、本来ならば接触することはあっても、重なり合うことはありえないが、本手法では重なり合いを許し、その重なり程度によってばねを介して授受する力の大きさを計算する。

(2) 数値解析シミュレーションによる考察

本手法を前述の実験に適用し、手法の有用性を確かめるとともに、解析結果をもとに物体の跳躍機構について検討してみた。解析対象としたのは、弾性地盤に半ば埋没した球体の水平地動による飛び出し運動である。これについての前述の実験では一度に多数の球体を使用したのが、それは非常にランダムな現象を効率よく観察するためであって、1 個の球体が窪みから飛び出すことに他の球体が干渉し影響を及ぼしているとは考えられない。従って、このシミュレーションでは一個の球体の運動を取り扱った。

球体と窪みとの間のばね定数や減衰定数を正確に定める基準は各方面で研究されているが、確立されたものは今のところない。ここでは、摩擦係数を 0.8とし、球体の上下振動とせん断振動の無減衰固有振動数がそれぞれ 60Hzと 35Hzとなるようにばね定数を、また減衰比が両振動とも 0.1となるように減衰定数を定めた。地表の窪み形状を簡単に台形とみなし、地面を 17Hzで水平に正弦振動させた。

地動の加速度振幅が 0.5Gでは球体は窪みから飛び出さないが、1.5Gでは図4(a)のように飛び出した。このシミュレーション解析における地面の加速度と球体重心に関する水平、鉛直方向の加速度を図4(b)に示す。図において、球体の水平加速度が中立軸で不連続になっているのは、球体が空中に浮き上がり窪みと接触していない時には水平加速度が零となるためであり、その時には鉛直方向の加速度は重力加速度に等しくなるので、鉛直加速度波形にも水平部分が表れている。実験で観察された図3の加速度記録は、前述のように空中に飛び出した球体のものではなく、また球体が回転した後は水平と鉛直の両成分の加速度が含まれている。そのため図3と図4の加速度波形の比較には注意を要するが、次の点に類似点が見られる。すなわち、水平加速度が窪みの壁との相互作用(衝突)により次第に大きくなること、また加速度がピークに達する時刻が振動台と球体とで一致しないこと、更にシミュレーションによる鉛直加速度のように一方にだけ突出したピークが実測の加速度波形にも見られることなどの点である。これらのことから、弾性地盤の穴に半ば埋没している物体が地震で飛び出す機構も、このような簡単なモデルでほぼ説明できるものと考えられる。

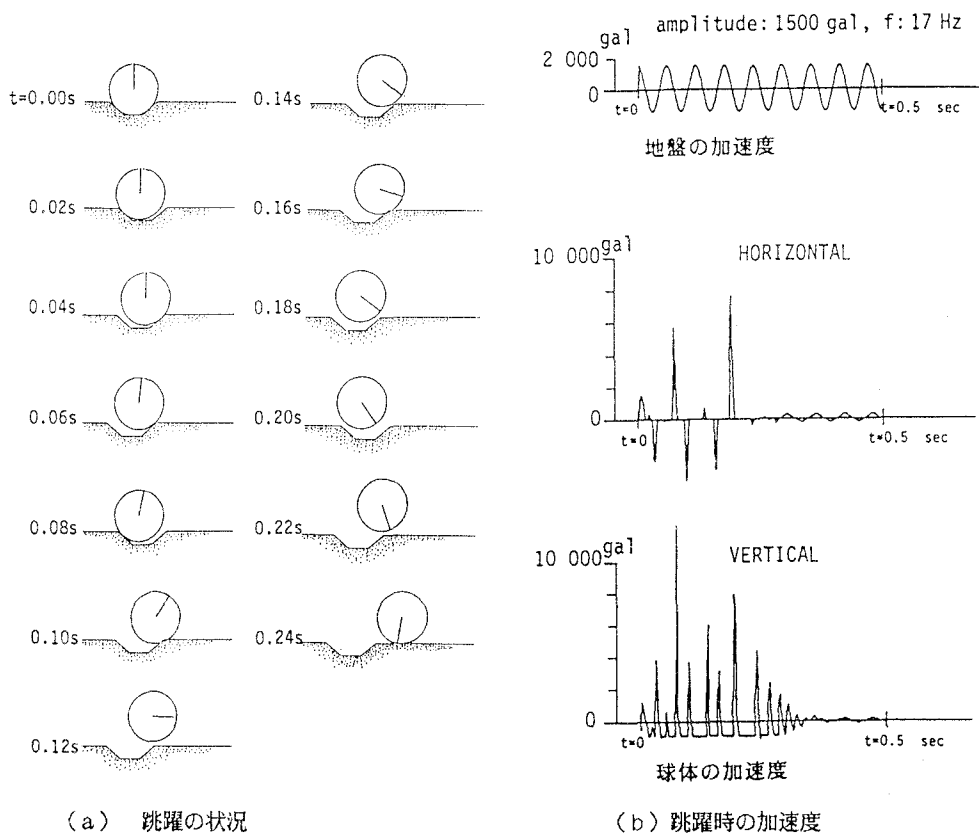


図4 数値解析シミュレーションによる半埋没物体の跳躍

4. 震源近傍における地震記象の加速度応答スペクトル

以上に述べた実験および解析の結果から、地表の穴から物体が飛び出すのは、その物体と地面との相互作用による結果であること、換言すればその物体の地震応答による結果である、という推論が導かれる。そこで、震源近傍での地震応答加速度が重力の加速度を大幅に上回る可能性について、実記象をもとに検討してみた。

残念ながら1984年長野県西部地震の際には、震源近傍で本震の良好な記象が得られていないので、米国 California における2つの地震についての解析例を次に示す。長野県西部地震 (M6.8) の断層運動は右横ずれとされ、1979年 Imperial Valley地震 (M 6.6) および 1984年 Morgan Hill地震 (M6.2) もともに右横ずれ断層の運動によるものとされている^{10), 11)}。これら2つの地震では、震源近傍の幾つかの地点で加速度記象が得られているが、それらの中から El Centro #6 地点における前者の記象と Coyote Lake Dam 地点における後者の記象を図5に示す。各地点の水平成分の角度は北から時計方向に計った方向である。図6はこれらの記象に対応する加速度応答スペクトルを示している。何れのスペクトル図においても横軸は周期 (秒)、縦軸は応答加速度 (gal) であり、減衰比 0, 5, 10, 50% に対する各スペクトルが描かれている。

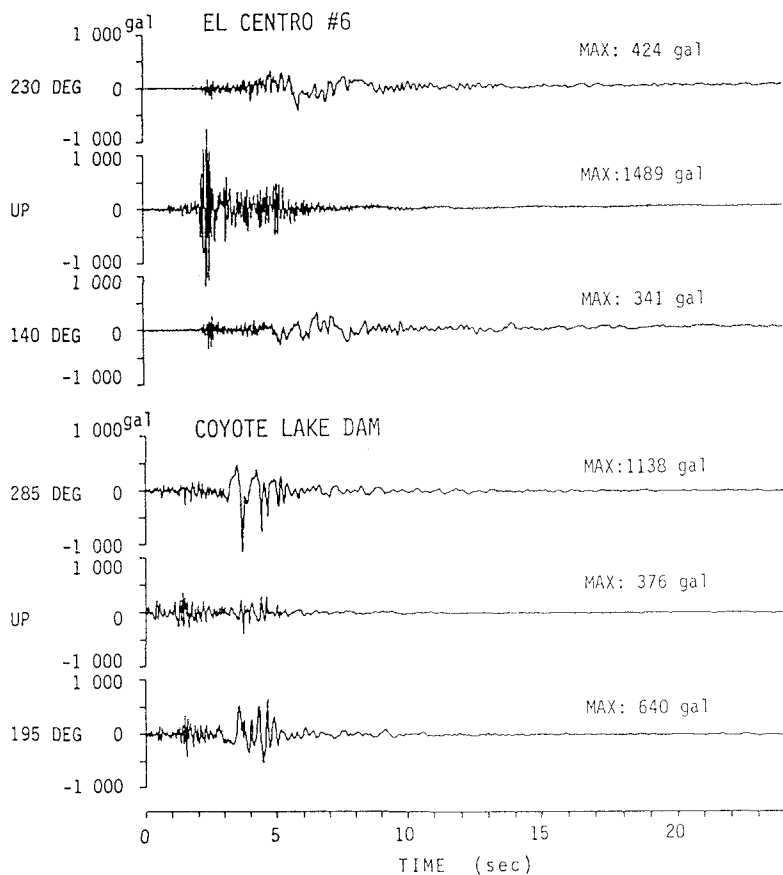


図5 1979年 Imperial Valley地震(EL CENTRO #6) と 1984年 Morgan Hill地震(COYOTE LAKE DAM) の加速度記象

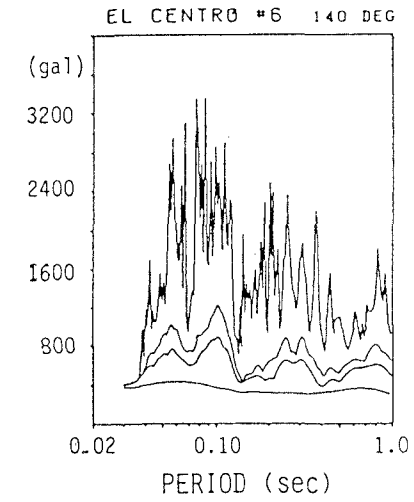
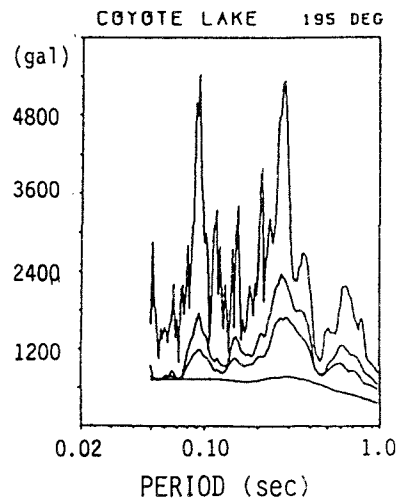
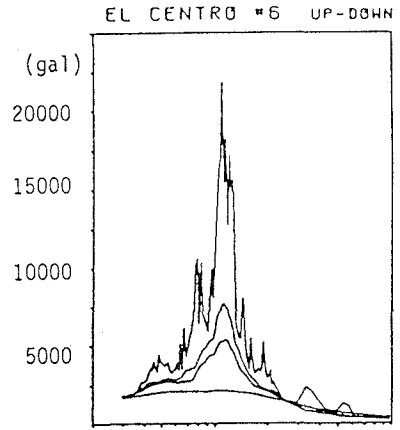
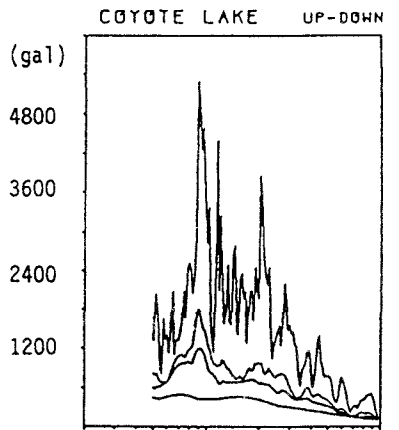
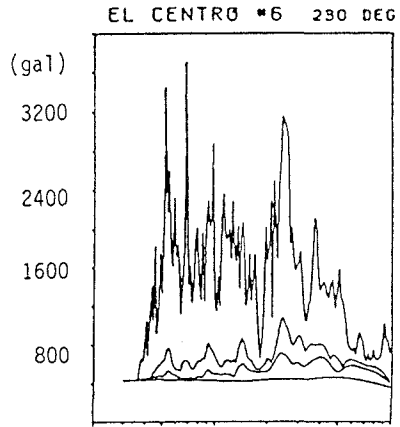
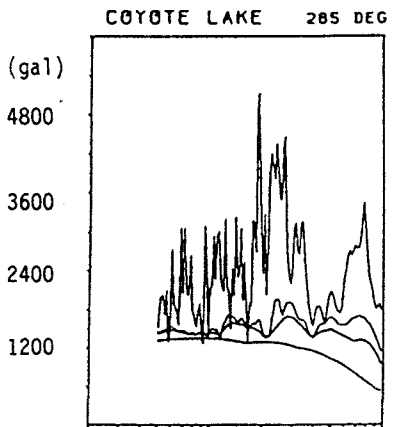


図6 震源近傍における加速度応答スペクトルの例

たとえば10%減衰の加速度応答に注目してみると、1979年 Imperial Valley 地震における El Centro #6 地点の記象は鉛直方向の応答加速度が約5 Gに達するものであり、1984年 Morgan Hill 地震における Coyote Lake Dam 地点の記象は3成分とも1 Gをかなり上回る加速度応答を与えるものであることが、これらの図からわかる。しかも、重要なことは、0.1秒以下の短周期領域で1 Gを越えている点であろう。図5にも示されているように、両地点とも原記象の最大加速度は重力加速度の1.5倍以内であるが、この程度の強さをもつ地震動によって、物体の跳躍に特に関連すると思われる0.1秒以下の短周期成分の応答加速度が重力加速度をはるかに越えうことは注目してよい。

地震応答加速度は、振動系の減衰特性によってかなり大幅に変化することは図6においても明らかである。長野県西部地震で飛び上がった石や倒木の振動減衰性は不明であるが、従来の簡単な理論¹²⁾から次のようなことは考えられる。半径と高さが等しい円筒形の物体が、平坦な弾性地盤上で振動するとき、上下、水平、ロッキングの各振動モードに対応する減衰比として次のような概算値がえられる。

上下振動 0.48、 水平振動 0.48、 ロッキング振動 0.17

ただし、地盤のポアソン比を $1/3$ 、地盤と石の密度比を $2/3$ と仮定している。これらの概算の基礎には、地盤と物体との密着や圧力分布についての大胆な仮定があるので、各数値の絶対値については、それほど高い信頼性をもつとは考えられないが、各モードごとの減衰比の比率やオーダーには注目してよい。すなわち、ロッキングモードの減衰は他のモードに比べ $1/3$ 程度低く、10%ないし 20%程度である。この程度の減衰比であれば、先の例が示すように震源域近傍で物体の地震応答加速度が重力加速度を上回ることは十分ありうることであり、物体が回転を伴って空中に飛び上がる可能性は大きいと言える。物体が空中に飛び上がる前にロッキング振動あるいはそれに似た回転運動が卓越する状況は、振動実験および数値解析で見られた状況ともよく似ているように思われる。

5. 結語

長野県西部地震についての前述の論文には、飛び上がった石について次のような記述がある。「(図の説明文の中で)白抜きの丸は反転しなかった石を、メッシュをほどこしたものは反転した石を示す。矢印のない白丸は動かなかった石で、メッシュのあるものはその場で反転した石である。．．．調査域全体からすれば石の飛びに系統性はなく。．．」このほかにも、「ほとんどすべてが元の穴からずり上がるか穴が石の動きで大きくなっていった。」「あたかも羽子板でたたかれたかのように何度か飛びあがった。．．」「地割れの中から石がふき出す。．．」などと記述されている。

ここで行った実験や数値解析は、実現象を非常に簡略化しており、実験や数値解析と実物との相似則など更に詳細に検討する必要のある点も多い。しかし、石が飛んだ際のこれらの状況は、これまでに述べてきたロッキング振動、あるいはそれに近い振動モードが卓越した石の地震応答を想定すれば理解し易い。実験で確認したように、半埋没物体が水平地動によって跳躍する場合には非常にランダムな運動となる。また、その物体自体は回転しながら飛び上がる。そして一旦飛び上がると、地動の震動レベルが多少低下しても跳躍を継続する。

これらのことを考え合わせると、長野県西部地震で、石が地面の穴から飛び出した現象もあながち不思議なこととは思われない。そして、石が飛んだ地域の地盤震動の加速度が驚くほど大きな値である必要もなく、従来の常識程度とは言わないまでも、他に知られている事例程度の地震動であったものと考えて差し支えないものと思われる。

引用文献、参考文献

- 1) Yuji Ishiyama: Motions of Rigid Bodies in Response to Earthquake EXcitations, Trans. of A.I.J., No.314, 1982, pp.33-47.
- 2) Yuji Ishiyama: Criteria for Overturning of Bodies by Earthquake Excitations, Trans. of A.I.J., No.317, 1982, pp.1-14.
- 3) N. W. Newmark: Interpretation of Apparent Uptthrow of Objects in Earthquakes, Proc. of 5WCEE, No.294, 1973.
- 4) G. W. Housner: The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 53, No.2, 1963, pp.403-417.
- 5)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、1985.3, pp.89-96.
- 6)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、京大防災研究所年報 第28号B-1, 1985.4, pp.1-14.
- 7)梅田康弘、黒磯章夫、伊藤 潔、飯尾能久、佐伯龍男：1984年長野県西部地震による震央付近の大加速度、地震 第2輯 第39巻、1986, pp.217-228.
- 8)大町達夫、荒井靖博：個別要素法による墓石の転倒現象の解析、第40回土木学会年次学術講演会講演集第1部 I-381, 1985.
- 9)大町達夫、荒井靖博：個別要素法で用いる要素定数の決め方について、構造工学論文集 Vol.32A, 1986, pp.715-723.
- 10) R. J. Archuleta: A Faulting Model for the 1979 Imperial Valley earthquake, J. Geophys. Res., 89, 1984, pp.4559-4585.
- 11) S.N. Hoose: The Morgan Hill, California Earthquake of April 24, 1984, USGS Open file Report 84-498 A.
- 12) Jr.F.E.Richart, Jr.J.R.Hall and R.D.Woods: Vibration of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Inc., (岩崎、嶋津訳：土と基礎の振動、鹿島出版会、1975)

(1986年10月17日受付)