

墓石の回転挙動から推定される地震動特性

澤田純男¹・土岐憲三²・飛田哲男³

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所地震災害研究部門 (〒 611-0011 京都市宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生会員 工修 南カリフォルニア大学大学院

墓石の転倒に関する研究は古くから行われているが、墓石の回転現象と地震動特性との関係を明らかにした研究はほとんど見当たらない。そこで本研究では、強震時の直方剛体の動的挙動、特にその鉛直軸まわりの回転挙動が生じる原因を、振動台模型実験及び3次元DEM解析を通して検討した。直方剛体の回転挙動は、振動の卓越する方向に回転する挙動と、入力波の粒子軌跡が回転することによって剛体が逆方向に回転する挙動の2つに分類できることがわかった。さらに、三陸はるか沖地震の際に回転した墓石の極く近傍で観測された加速度記録を用いてその回転挙動を再現した。これらの検討の結果、特殊な場合を除けば、墓石の回転方向は地震動の加速度粒子軌跡の回転の逆方向を表わしていると結論された。

Key Words : tomb stone, rigid body, rotation response, distinct element method (DEM), particle motion

1. はじめに

地震後の被害調査項目の一つとして、古くから墓石の転倒状況調査がなされてきた¹⁾。また墓石の転倒に関する理論的研究も古くから行われている^{2),3),10)}。墓地は比較的広い範囲に分布しており、単純な構造である墓石が転倒するかしないかによって、その地域に生じた地震動の強さの推定がおこなわれてきた。

この様な墓石の転倒調査報告の中に、墓石の回転に関する記述が見られる場合がある⁴⁾。最近の1993年釧路沖地震⁵⁾や1993年北海道南西沖地震⁶⁾の際にも強震時に墓石が回転したことが報告されている。しかしながら、墓石の回転の原因について取り扱った研究はほとんど見当たらない。そこで本研究では、地震動がどのような特性を持つ場合に墓石が回転するか、逆にいえば、墓石の回転を調査することによってどのような地震動の特性が明らかになるのかについて検討する。

本論文の構成は以下の通りである。まず、実物の3分の1程度の大きさのモデルを用いて室内振動台実験を行い、実際に直方剛体の回転が起こるか検証する。さらに、DEM^{7),11)}の定式化を行い、解析と振動台実験結果とを比較することにより解析精度の検証を行う。また、振動台実験のデータを用いてDEMで用いるバネ・減衰係数等の解析パラメータを決定する。次に、入力波の振幅及び位相差を変化させたケーススタディーを行い、直方剛体の回転基本挙動をDEM解析によって調べる。最後に、実大モデルに対して実地震動を入力し回転現象の再現を行うとともに、強震時の墓石の回転現象がどのよう

な理由で生ずるのかを考察する。解析の入力地震動として、三陸はるか沖地震後の現地調査において墓石の回転現象が観察された墓地に極めて近い、気象庁八戸測候所で観測された加速度記録を用いる。

2. 振動台実験

振動台実験の目的は、実際に回転現象が起こるかどうかの確認と、解析に用いるパラメータの推定を行うための基礎データを得ることにある。なお、実験に用いた振動台は、1方向振動型である。

実験に用いた供試体の諸元を表-1に、実験の概観を図-1に示す。御影石のプレートを振動台に固定し、その上に実際の墓石とほぼ同じ寸法比を持つ御影石を供試体として置き、1方向の正弦波を入力した。測定した項目は表-2に示す5項目である。サンプリング周波数は500Hzとした。加速度計は、非接着型ひずみゲージ式のものを用い、供試体の上端2ヶ所及び振動台に固定した。なお、供試体の相対応答変位を測定する目的で、レーザー変位計を振動台上に設置したが、固定治具の剛性不足から適切な測定結果が得られなかった¹²⁾ので、本論文の検討では用いなかった。

実験は2パターン行った。1つは、供試体の1辺を振動方向に対して直角に置き、入射波の振動数を、1Hz間隔で1Hzから10Hz(5Hz欠測)、12Hz、15Hz、20Hzとした各場合について、入力加速度を徐々に増加させた。これを本論文では「動揺振動だけを起こす場合」とする。

他の1つは、回転現象を再現するために、供試体の1

表-1 供試体の諸元

材質	御影石(花崗岩)
寸法	0.092 × 0.092 × 0.227(m)
密度	2.7 × 10 ³ kg/m ³
質量	5.2 kg

表-2 振動台実験における測定項目

Ch.1	供試体上端の絶対加速度
Ch.2	供試体上端の Ch.1 と直交方向の絶対加速度
Ch.3	入力加速度
Ch.4	供試体上部の相対変位
Ch.5	X 接点信号(シャッターの開閉信号)

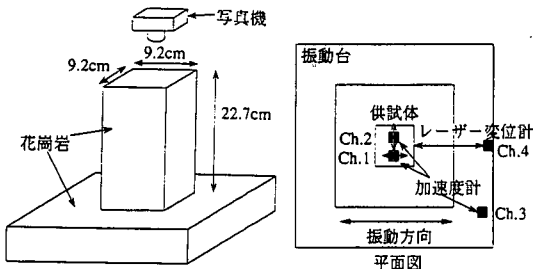


図-1 実験の概観

辺を振動方向に対してある角度をなすように置き、入射波の振動数を 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz とした各場合について、1 方向入力の場合と同様に実験を実施した。また、この場合については約 0.2 秒間隔で供試体上方から写真撮影も行った。これを本研究では「回転運動を起こす場合」とする。

(1) 動揺振動だけを起こす場合

図-2, 図-3 に実験より得られたデータの例として、入力加速度がそれぞれ 8Hz, 及び 15Hz の場合を示す。両図とも上から、Ch.1, Ch.3 の記録を示している。

いずれの振動数においても、入力振動方向と一致する方向の加速度記録 (Ch.1) において、動揺振動に起因すると考えられる方形波の波が見られる。すなわち、振動方向に直交する底面の 1 辺を中心として、供試体が一方へ傾いてから元の状態に戻るまでの間に一定の加速度を受けており、その周期が動揺振動の周期を表している。また、反対方向への動揺振動の開始時においてインパルス状の波が見られるが、これは接地時の衝撃によるものであると考えられる。

Ch.3 は入力加速度を示しているが、供試体の動揺振動に伴って波形の乱れが見受けられる。これは、Ch.3 の

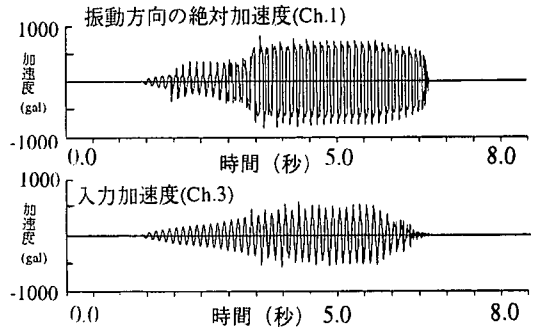


図-2 振動台実験により得られた時刻歴データ (1 方向入力: 入力加速度 8Hz)

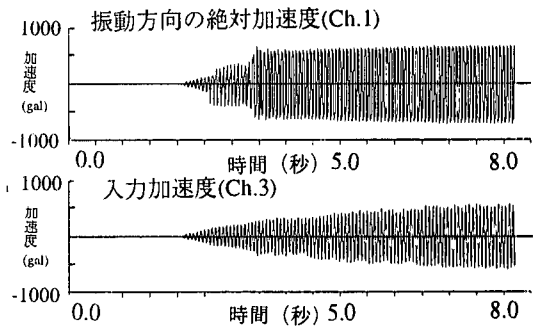


図-3 振動台実験により得られた時刻歴データ (1 方向入力: 入力加速度 15Hz)

加速度計が振動台に固定されていたため、動揺振動による影響を受け波形が乱れたものと考えられる。

図-2, 3 の Ch.1 の記録から、いずれの振動数においても入力加速度が約 120~150gal を越えると鋭いピークが現れ始め、さらに入力加速度を大きくすると最大値約 500~600gal をもつ定常的な方形波が現れることがわかる。このことから、供試体は入力加速度が大きくなるとともに徐々に動揺振動状態へ移行し、加速度がある大きさを越えた瞬間に定常的な動揺振動を開始するといえる。方形波が現れる直前、すなわち定常的な動揺振動が始まる直前の加速度の大きさは約 300~400gal である。一方、今回実験に用いた供試体の静的転倒加速度は、次式より求めることができる。

$$\alpha_{static} = \frac{b}{h} \cdot g = 397 \text{ (gal)} \quad (1)$$

ここに、 α_{static} : 静的転倒加速度, b : 底辺長の 2 分の 1,

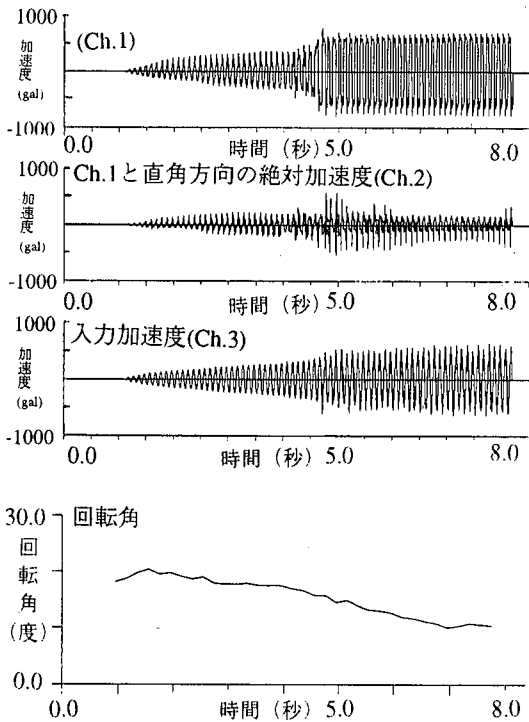


図-4 振動台実験において回転現象を再現した場合に得られたデータ (10Hz)

h : 高さの2分の1, g : 重力加速度である。すなわち, 定常的な動揺振動を開始する瞬間の加速度が式(1)より求められる静的転倒加速度とほぼ等しくなっている。

(2) 回転運動を起こす場合

先に述べたように, 今回実験に用いた振動台は1方向振動型である。このため, この振動台を用いて供試体を回転させるために, 供試体の初期位置を, その1辺が振動方向に対して直交しないように置いた。ここで, 供試体の初期位置の定義として, その1辺が振動方向と直交する場合を 0° とし, その位置からの回転角で表すことにする。なお, 反時計回りを正とする。

実験より得られたデータ及び写真から得られた回転角の時刻歴の1例として, 入力振動数が10Hzの場合を図-4に示す。この図より, Ch.1の加速度記録に振幅の大きな方形波, Ch.2の加速度記録に振幅の小さな方形波が見受けられる。これは, 加速度計が供試体上面の4辺に平行または直角に設置されており, 振動方向に対する供試体の初期位置が $\pm 20^\circ$ 付近であるため, 入力振動方向に近い方向の加速度計に大きな振幅が現れたものと考えられる。

また, 5Hzの場合には並進と回転が同時に起こり, 最終状態として供試体の中心が初期位置から4cm程度変

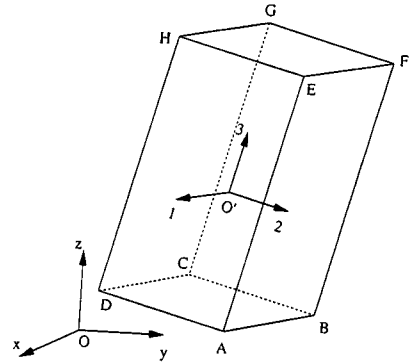


図-5 座標系(絶対系(x,y,z)要素系(1,2,3))

位した。しかし, その他の振動数では回転現象が卓越し, 供試体の中心はほぼ初期位置を保ったままで回転のみが生じた。

3. 解析手法及びパラメータ

(1) 運動方程式

本研究では, 解析手法として個別要素法(以下DEMと略す)を用いる。要素は直方体であり, 鉛直軸回りの回転現象を考察するため解析は3次元で行う。自由度は剛体の変位と回転角(各3成分)である。剛体ブロックは底面の4つの頂点のみで剛床面と接触しており, これらの点を通して力の伝達が行われる。剛体ブロックの動的挙動は, 滑動, 動揺, 跳躍, 転倒, 回転, またそれらの複合した複雑な挙動を示す非常に非線形性の高い現象である。DEMを用いる利点は, これらの現象を場合分けすることなく, 単に4つの頂点の接触問題とみなして解析できる点にある。欠点としては, 接触力としてバネとダッシュポットによる反力を用いているが, 直方体と床面との接触面積はこれらの角度と共に変化するので物質の剛性等からバネ定数や粘性係数を求めることは困難であり, 現時点ではこれらの係数が理論的に決定できないことである。従ってその値を実験的に求めなければならない。その値の物理的意味が不明確である。定式化はおおむね木山ら⁸⁾, 澤田ら⁹⁾に従う。座標系は, 図-5に示すように, 絶対座標系と要素の重心を中心とする要素座標系の2つを用いる。直方剛体の底面の4つの頂点それぞれにバネとダッシュポットを3成分設け, これらの反力を用いて要素の運動方程式を立て, 前進差分により要素の運動を追跡する。

並進運動の場合, 要素に作用する力は物体力 F_b と接触力 F である。絶対座標系(x,y,z)において運動方程式

は次式で表される。

$$m \cdot \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = \mathbf{F}_b + \sum_{A,B,C,D} \mathbf{F} = \mathbf{F}_b + \sum_{A,B,C,D} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$m = \rho \cdot (2a) \cdot (2b) \cdot (2c) \quad (3)$$

ここに、 \mathbf{F}_b : 物体力, m : 剛体の質量, ρ : 密度, $2a, 2b, 2c$: それぞれ 1, 2, 3 軸方向の辺長, A,B,C,D: 接触点とする。

一方、回転運動に対する運動方程式は、要素座標系 (1,2,3) において、次式で表される¹³⁾。

$$\frac{d^2 \mathbf{L}}{dt^2} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{L} = \sum_{A,B,C,D} \mathbf{N} \quad (4)$$

ここに、 \mathbf{L} : 角運動量, d/dt : 要素系に対する時間微分, $\boldsymbol{\omega}$: 角速度, \mathbf{N} : 外力モーメントとする。ここで \times は外積を表す。式 (4) は Euler の運動方程式とも呼ばれる。要素の位置は、式 (2), 式 (4) を前進差分法を用いて積分することにより求められる。

(2) 鉛直方向の作用力

図-6(a) に示すように、微小時間増分 Δt 間の鉛直方向の相対変位増分 Δu_z に比例した抗力増分 Δe_z を生じる弾性バネ (バネ係数 K_n) と相対速度増分 $\Delta u_z / \Delta t$ に比例した抗力増分 Δd_z を生じるダッシュポット (減衰係数 C_n) の並列配置を仮定する。すなわち、

$$\Delta e_z = K_n \cdot \Delta u_z \quad (5)$$

$$\Delta d_z = C_n \cdot \Delta u_z / \Delta t \quad (6)$$

ただし、圧縮方向を正とする。したがって、時刻 t において鉛直方向に作用する弾性抗力 $[e_z]_t$ と粘性抗力 $[d_z]_t$ は次式のようになる。

$$[e_z]_t = [e_z]_{t-\Delta t} + \Delta e_z \quad (7)$$

$$[d_z]_t = \Delta d_z \quad (8)$$

ここで、要素間の引張力を認めないため (図ではノーテンション・ジョイントで示す), 式 (7), (8) には、次式の条件が付加される。

$$[e_z]_t < 0 \text{ のとき}, [e_z]_t = [d_z]_t = 0 \quad (9)$$

以上より、時刻 t における鉛直力 $[F_z]_t$ は次式で計算される。

$$[F_z]_t = [e_z]_t + [d_z]_t \quad (10)$$

(3) 水平方向の作用力

図-6(b) に示すように、水平方向の相対変位増分 Δu_x , Δu_y についても同様に、せん断抗力を与える弾性バネ (バネ係数 K_h) とダッシュポット (減衰係数 C_h) の並列配置を仮定する。すなわち、

$$\Delta e_i = K_h \cdot \Delta u_i \quad (11)$$

$$\Delta d_i = C_h \cdot \Delta u_i / \Delta t \quad (12)$$

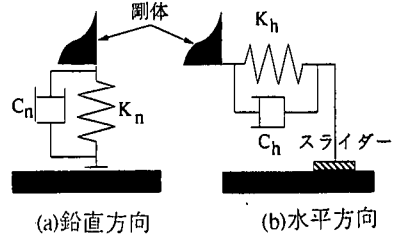


図-6 バネ及びダッシュポットのモデル化

ただし、以後添字 i は x または y とする。したがって、時刻 t における接線方向の弾性抗力 $[e_x]_t$, $[e_y]_t$ と粘性抗力 $[d_x]_t$, $[d_y]_t$ は次式のようになる。

$$[e_i]_t = [e_i]_{t-\Delta t} + \Delta e_i \quad (13)$$

$$[d_i]_t = \Delta d_i \quad (14)$$

ただし、上式に次の2つの条件が付される。

1) $[e_z]_t < 0$ のとき、

$$[e_i]_t = [d_i]_t = 0 \quad (15)$$

2) $\sqrt{[e_x]_t^2 + [e_y]_t^2} > \eta [e_z]_t$ のとき、

$$[e_x]_t = \eta [e_z]_t \times \text{Sign}([e_x]_t) \times \cos \beta$$

$$[e_y]_t = \eta [e_z]_t \times \text{Sign}([e_y]_t) \times \sin \beta$$

$$[d_x]_t = 0$$

$$[d_y]_t = 0 \quad (16)$$

ここに、 η は底面と床との動摩擦係数, $\text{Sign}(z)$ は変数 z の正負を表す。また、 $\cos \beta$, $\sin \beta$ は、滑りが生じている場合の動摩擦力をそれぞれ x, y 方向へ配分するための項であり、

$$\beta = \tan^{-1} ([e_y]_t / [e_x]_t) \quad (17)$$

である。条件式 (15) は、非接触条件を、式 (16) 及び式 (17) は摩擦力の限界をそれぞれ表している。

以上より、時刻 t における水平方向のせん断力 $[F_x]_t$, $[F_y]_t$ は次式で計算される。

$$[F_i]_t = [e_i]_t + [d_i]_t \quad (18)$$

なお時間増分 Δt とバネ係数 K との間には、要素の位置を前進差分で数値積分して求める際に安定かつ精度良く解を得るためには、時間増分を系の固有周期の8分の1より小さく取る必要があり、本研究では、時間増分 Δt は、要素底面の4つの頂点が全て剛床面に接している場合でも安定して解が得られるように、要素の質量の4分の1の大きさを持つ質点-バネ系の固有周期の8分の1よりも小さくなるように設定した。

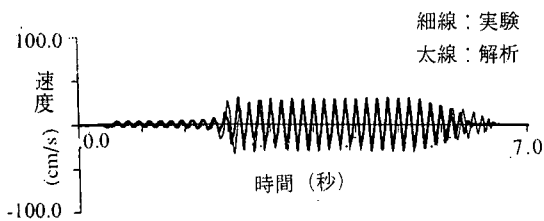


図-7 実験及び解析により得られた相対速度の比較(入力振動数 8Hz)

(4) 振動台実験のシミュレーションと解析パラメータの推定

本節では、定式化と解析精度の検証を行うため、前節で述べた振動台実験により得られたデータを用いて実験と解析とを比較する。解析に用いる剛体の諸元は、表-1に示す振動台実験で用いたものと同一とする。

解析における入力加速度は実験から得られた入力加速度時刻歴を、時間増分 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ 秒となるよう線形補間して用いた。図-7に、実験で得られた相対加速度(Ch.1-Ch.3)を積分して得られた相対速度、及び解析により得られた相対速度を重ねて示す。いずれの入力振動数においても、大きさ、位相とも良く一致した。また、実験では滑りが生じた結果、残留変位が見られる場合があるが、解析においてこれを再現することはできていない。これは、入力は正負対称であるから残留変位はゼロが妥当であり、実験では供試体底面四隅の微妙な形状や摩擦係数の違いから残留変位が生じたものと考えられるが、本論文の主題は回転挙動であるので、この点についてはこれ以上議論しない。

なお、この時、動摩擦係数 η は、花崗岩の静止摩擦係数 $\eta_s = 0.7$ の80%の値とし、 $\eta = 0.56$ とし、バネおよび粘性係数は後述の最適値を用いている。さらに、解析において振動方向と剛体の初期位置を、反時計回りに 45° 回転させた場合にも全く同じ結果が得られた。以上より3次元解析が適切に行われていることが示され、剛体の動揺・回転挙動の解析を行う手法としての適用性が確認できた。

解析に用いるバネ及び粘性係数は、実験から得られた回転角と解析結果を比較することにより、以下に示す方法で最適値を求めた。なお簡単のため、底面の4つのバネ及びダッシュポットはそれぞれ独立であり、バネ係数 K と粘性係数 C は鉛直方向、水平方向共に同じ値と仮定する。

図-8に実験で行った最も高い振動数である20Hzの場合について、粘性係数を 3.92×10^5 (Ns/m) 又は、 5.47×10^5 (Ns/m) に固定し、バネ係数を 9.8×10^7 (N/m) から

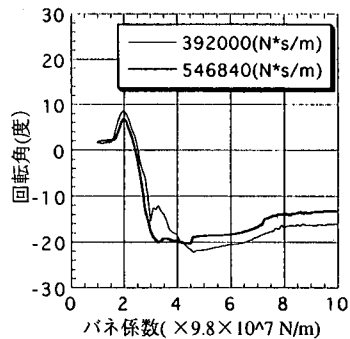


図-8 バネ係数と回転角との関係(入力振動数 20Hz)

0.98×10^7 (N/m) 刻みで 9.8×10^8 (N/m) まで変化させた時の回転角の変化を示す。実験における回転角は -22.6° であり、解析が一致したのは、バネ係数 4.51×10^8 (N/m)、粘性係数 3.92×10^5 (N/m) の場合である。次に15Hzの場合について、バネ係数は一定のまま、実験と解析とが一致するよう粘性係数のみを変化させた。以下同様に粘性係数のみを変化させて10Hz、5Hzの場合について求めた。求められた粘性係数の値はいずれの周波数においてもほぼ 10^5 のオーダーとなった。

以上の結果から解析で用いるバネ係数は入力振動数20Hzの場合に得られた値 4.51×10^8 (N/m) とし、粘性係数に関しては全ての場合の平均値をとり 5.47×10^5 (Ns/m) とした。同じ回転角を与えるバネ係数と粘性係数の組み合わせが複数ある可能性は否定できないが、広い周波数範囲で実験結果とほぼ合致する結果を与えるバネ係数と粘性係数は、オーダーが変わるほど広い範囲で存在する訳ではない。従って本節で示した推定方法は最適な方法ではないかも知れないが、十分適切な値を推定できているものと考えられる。

4. 剛体の動揺・回転挙動の基本挙動

本節では、3.(4)で決定したパラメータを用い、直方剛体の回転挙動のメカニズムについて数値解析及び考察を行う。直方剛体の回転挙動に影響を与える因子としては2つ考えられる。

- 1) 実験で回転現象を再現したように、1方向入力によって振動の卓越する方向に回転する場合。
- 2) 入力加速度の粒子軌跡 (particle motion) が円を描く場合。

さらに、1)と2)の中間的な状態、すなわち、粒子軌跡が楕円を描く場合についてそれぞれの基本挙動について考察する。

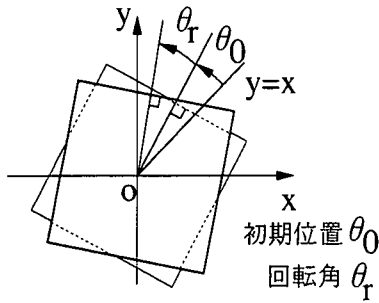


図-9 初期位置 θ_0 及び回転角 θ_r の定義

(1) 1方向入力の場合

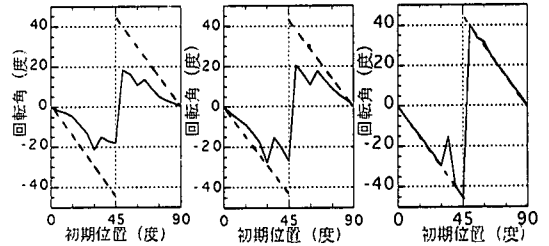
まず、初期位置 θ_0 と回転角 θ_r を定義する。図-9に示すように剛体の1辺が直線 $y=x$ と直交する位置を、初期位置 $\theta_0 = 0^\circ$ とする。この直線 $y=x$ と平行な方向を振動方向とする。その位置から角度 θ_0 だけ反時計方向に回転した位置を初期位置 θ_0 とし、その位置からの回転角を θ_r (反時計方向正)とする。解析では、初期位置 $\theta_0 = 0^\circ$ の位置から反時計方向に 5° 刻みで $\theta_0 = 90^\circ$ まで初期位置 θ_0 を変化させた。

図-10に入力加速度の振動数10Hz、最大値450gal、継続時間5秒、10秒、30秒と変化した時の初期位置と回転角との関係を示す。図より初期位置 θ_0 が 0° 、 90° 付近においては回転が生じていないことがわかる。また、 45° 付近を境に回転角の正負が反転している。これらは剛体の初期位置が加振方向に対して軸対称であるためである。剛体が最も動揺しやすいのは θ_0 が 0° および 90° の状態であり、それ以外の初期位置の場合には、回転することによって $\theta_0 + \theta_r = 0^\circ$ 又は 90° の状態になろうとする。この状態になるための回転角を図-10に破線として示す。継続時間5秒の場合には、初期位置 $\theta_0 = 45^\circ$ に対する回転角 θ_r は約 -18° に留まっている。ところが、継続時間が10秒、30秒と長くなるにつれて、回転角は破線に近付き、ほぼ $\theta_0 + \theta_r = 0^\circ$ 又は 90° となっている。なお、初期位置が $30 \sim 60$ 度付近の場合には回転角がスムーズに変化していないが、これは頂点1点で立つような不安定な状態になりやすく、数値誤差等の影響を大きく受けるためだと考えられる。

この様に、入力加速度の方向が1方向である場合には、剛体の回転角は初期位置に大きく依存する。また、振動の卓越する方向に回転が生じ、最終的に振動方向に対して、剛体の水平な1辺が直交又は平行する位置で回転が止まり、動揺振動だけの状態になる。

(2) 加速度粒子軌跡が円を描く場合

以下では、入力加速度はx、y方向共に同一の最大値を持つ正弦波で与え、y方向の入力加速度の位相差 ϕ を



(a) 継続時間5秒 (b) 継続時間10秒 (c) 継続時間30秒

図-10 初期位置-回転角関係(10Hz, 位相差 $\phi = 0^\circ$)

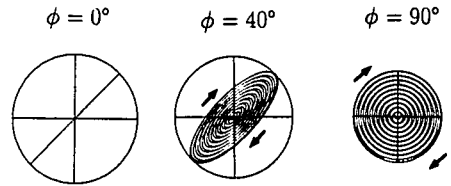
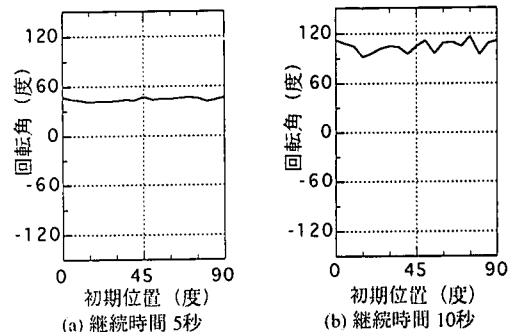


図-11 位相差を変化させた場合の粒子軌跡の例



(a) 継続時間5秒 (b) 継続時間10秒

図-12 初期位置-回転角関係(10Hz, $\phi = 90^\circ$)

変化させることにより粒子軌跡を変化させる。この時与える正弦波を次式に示す。

$$\alpha_x = p \cdot \sin(2\pi ft)$$

$$\alpha_y = p \cdot \sin(2\pi ft + \phi)$$

ここで、 α_x 、 α_y ：それぞれx、y軸方向の入力加速度、 p ：入力加速度の最大値、 f ：振動数、 t ：時刻、 ϕ ：位相差である。ただし、入力加速度の大きさによらず、継続時間の内の最初と最後の1秒間の振幅を漸増減させることにより、剛体に作用する力が急激に変化しないようにした。図-11に位相差 ϕ を変化させた場合の粒子軌跡の例を示す。位相差 ϕ が大きくなるにつれて粒子軌跡の膨らみが大きくなり、 $\phi = 90^\circ$ では円を描く。 $\phi = 90^\circ$ の時の半径は入力加速度の最大値 p に対応する。また、粒子軌跡の回転方向は時計回りである。

図-12に粒子軌跡が円を描く場合($\phi = 90^\circ$)について、入力加速度の振動数10Hz、最大値450gal、継続時間

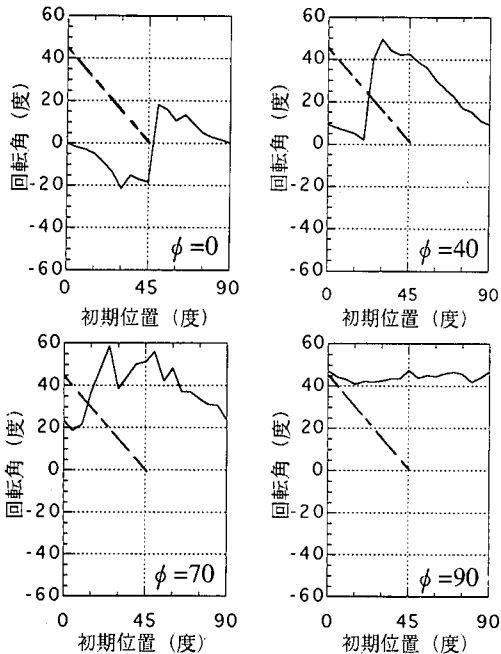


図-13 初期位置-回転角関係 (10Hz, 継続時間 5 秒)

5 秒及び 10 秒を与えた時の回転角 θ_r と初期位置 θ_0 との関係を示す。ここで、加速度粒子軌跡の回転方向が負であるのに対して、剛体の回転方向は正となっている。これは、以下のような運動によって生じるものと考えられる。すなわち、ある瞬間に剛体に作用する慣性力(外力)によって底面の 1 辺回りのロッキングが生じ、これに引き続く慣性力の回転に伴って底面の 1 つの頂点に剛体のはは全重量が作用する瞬間が生じる。さらに慣性力の回転と重力とによって、その頂点回りの回転が生じ、隣の 1 辺を中心とするロッキング状態へと移行する。この時の回転方向は、加速度の粒子軌跡の回転方向とは逆方向である。この様に、1 つの頂点回りの回転を次々に繰り返すことによって、加速度の粒子軌跡とは逆方向に剛体の回転現象が生ずる。

図-12(a)より剛体の回転角は初期位置によらずほぼ 45°程度となっている。これは、加速度粒子軌跡が円を描くため、卓越振動方向が存在しないためである。また、図-12(b)より継続時間の増加によって回転角が増加しており、継続時間が 2 倍となれば、回転角も約 2 倍の 90°となることわかる。

この様に、入力加速度の粒子軌跡が円を描く場合には、剛体の回転角は初期位置に依存せず、継続時間に応じて剛体は回転し続ける。

(3) 加速度粒子軌跡が楕円を描く場合

加速度粒子軌跡が楕円を描く場合は、位相差が $0^\circ < \phi < 90^\circ$ の場合に相当する。図-13は、入力加速度の振動数 10Hz, 最大値 450gal, 継続時間 5 秒の場合について、位相差を変化させた時の初期位置 θ_0 と回転角 θ_r との関係を示す。図は左上から位相差 $\phi = 0^\circ$, 右上 40° , 左下 70° , 右下 90° に対応する。前述したように、一方向入力の場合には、初期位置が 45° 付近で回転角の正負が反転する特徴的な形をしている。位相差の増加に伴ってこの特徴的な形を保ったまま図-13に一点鎖線で示した傾き -1 の線に沿って左上方に移動していることがわかる。また、位相差が 90° に近づくにつれ曲線の不連続な変化が見られなくなる。このことから、曲線の左上方への移動は位相差 ϕ , つまり粒子軌跡の回転の影響によるものであり、また曲線の不連続な変化は卓越振動方向に回転する影響によるものと考えられる。これより、入力加速度の継続時間が短い場合、粒子軌跡が楕円を描く時の剛体の回転挙動は、4.(1)で調べた 1 方向入力による影響と、4.(2)で調べた粒子軌跡が円を描く場合の影響との重ね合わせで表現されると考えることができる。

次に、入力加速度の継続時間の影響を調べる。図-14(a)及び(b)は入力加速度の継続時間を 30 秒とし、それぞれ位相差 $\phi = 40^\circ$, $\phi = 70^\circ$ の場合について示したものである。この場合には、座標 $(\theta_0, \theta_r) = (0.0, 45.0)$ と $(45.0, 0.0)$ とを結ぶ左上方への移動は見られない。すなわち、継続時間が 5 秒の場合とは異なり、この曲線が剛体の初期位置の影響と位相差の影響との重ね合わせで表現されると考えることはできない。このことは継続時間が長くなれば、粒子軌跡が回転することによって生じる回転角が 45° を越えると、1 方向入力による回転方向が反転するために、剛体の回転角が単純に初期位置に依存しなくなることを意味している。

5. 実在墓石の回転現象の再現

三陸はるか沖地震の際、気象庁八戸測候所のごく近くの墓地において、墓石の鉛直軸回りの回転現象が多数観察された。そこで、本節ではこのような墓石の回転現象がどのような地震動によって生じたのかを数値解析により検討した。さらに、実在墓石のモデルに対して正弦波 3 波の位相及び最大加速度等を変化させたものを入力し、実現現象を単純化することで墓石の回転と地震動特性の関係について考察した。

(1) 三陸はるか沖地震で観測された墓石の回転現象

図-15に示すように墓石の回転現象が見られた墓地と、八戸測候所内の地震計(気象庁 87 型強震加速度計)設置地点との直線距離は約 34m と非常に近接している。ま

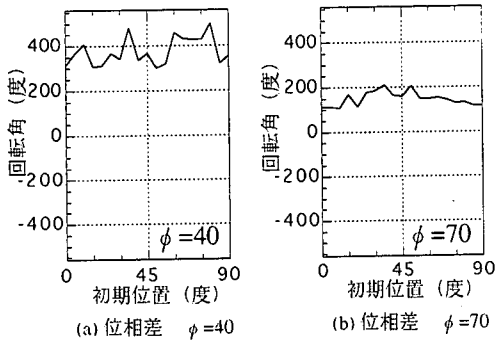


図-14 初期位置-回転角関係 (10Hz, 継続時間 30 秒)

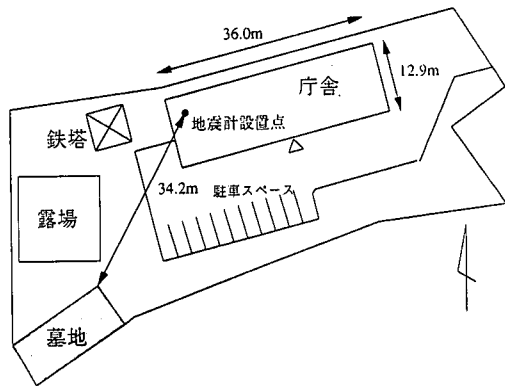


図-15 気象庁八戸測候所と墓石の回転現象が観測された墓地の位置関係

た、この測候所及び墓地は図-16に示すように標高 27.3m の丘の頂上付近に位置し、8~9m の表土又は風化層の下に岩盤が存在する地盤構造と思われる。また、図-17に示すように、この墓地には約 30 体の墓石があり、転倒又は回転現象は墓地南西側の 6 体を除くほぼ全ての墓石で認められた。回転した墓石については、風化のため形のいびつな 1 つを除いて全てが反時計方向に回転していた。また、平面形状が横長で高さ方向に細長い形状の墓石までもが、転倒せずに回転していることが観察された。また、通常の墓石は 3 段又は 4 段重ねであるが、墓石によっては回転現象が最下段を含むいずれの段においても見られ、さらにそれらが同方向に回転していた。

一方、転倒した墓石については、墓石内部に転倒防止のために墓石と同じ材質の補強柱が設けられているものもあったが、この補強柱ごと折れて転倒しているものも観察された。また、この墓地の南西側の 6 体の墓石の南側は垂直の擁壁によって 1.5m 程低くなっており、地震時にこの部分が自由端となって地表面に大きな揺れをもたらしたものと考えられる。このことは、この 6 体の墓石すべてが前方に押し出されるように位置をずらしていたことから推察できる。しかし、その 6 体を除く他の墓石には回転現象が卓越しており、押し出された

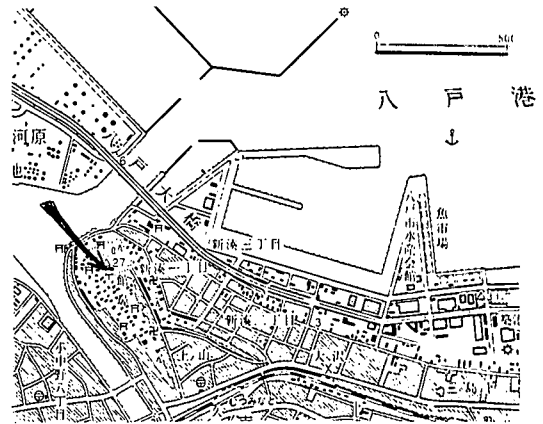


図-16 気象庁八戸測候所の位置と周辺地形 (国土地理院発行 25000 分の 1 地形図「八戸東部」に加筆)

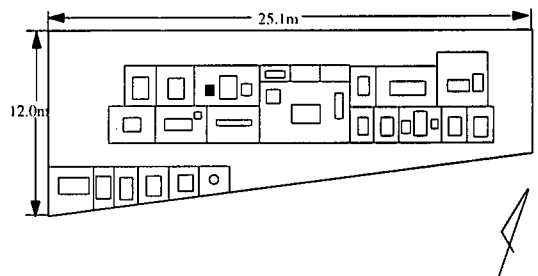


図-17 墓石の回転現象が観測された墓地の墓石の配置

ように位置をずらしているものは認められなかった。

図-18に三陸はるか沖地震の際に八戸測候所で観測された加速度記録を示す。また、図-19にそのフーリエスペクトルを示す。この図から、卓越振動数は 4Hz(NS 成分)、3Hz(EW 成分)、1Hz(UD 成分)となっており、比較的高周波成分が卓越していることがわかる。

(2) 加速度観測波形によるシミュレーション

解析に用いた墓石の寸法及び観察された回転角をまとめて図-20に示す。この墓石は、図-17で黒く塗りつぶした位置のものである。また写真-1に三陸はるか沖地震後の現地調査において撮影されたこの墓石の回転の様子を示す。この墓石は上部に高さ約 7cm の盛り上がった部分を持つが、解析の際には無視している。また、この墓地の中では比較的小さな墓石であり、2 段重ねであったが、解析においては上部のみを用いた。この墓地では、ほとんどすべての墓石が北から約 25°西の方角へ正面又は背面が向いており、地震後の現地調査において観察されたこの墓石の回転角は 16.7°反時計方向であった。

この墓石に対して図-18に示す三陸はるか沖地震 3 成分を入力し、バネ及び減衰係数についてパラメトリックスタディーを行った。この結果に基づき、現地調査に

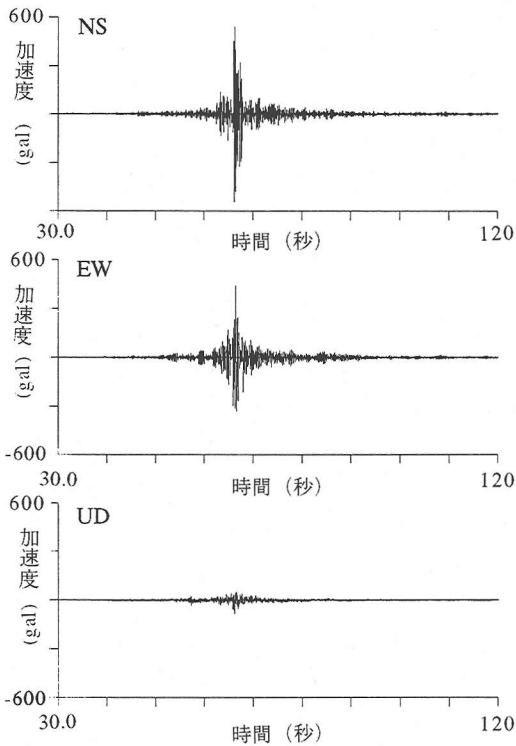


図-18 八戸測候所における三陸はるか沖地震本震の加速度時刻歴

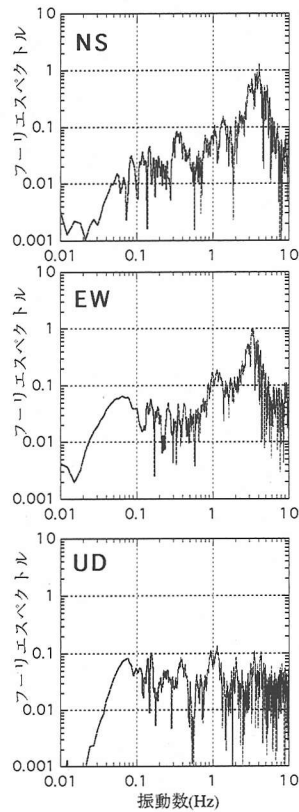


図-19 八戸測候所における三陸はるか沖地震本震のフーリエスペクトル

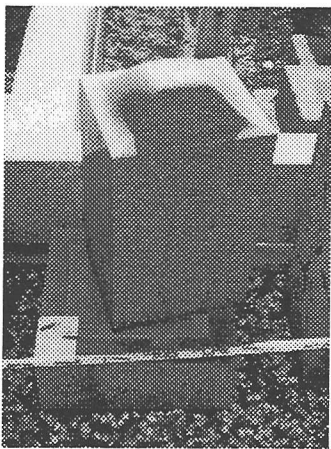


写真-1 地震後の現地調査の際に撮影された墓石の回転の様子

よって得られた回転角 16.7° と等しい回転角を与えるバネ・粘性係数として、バネ係数 9.8×10^7 (N/m), 粘性係数 3.41×10^5 (Ns/m) を選択した。この値を用いて解析した結果、主要動の到達時刻を含む、時刻 $t = 64.0$ (s) から $t = 68.0$ (s) の間に回転が生じ、その後は一定の角度を保っていることがわかった。

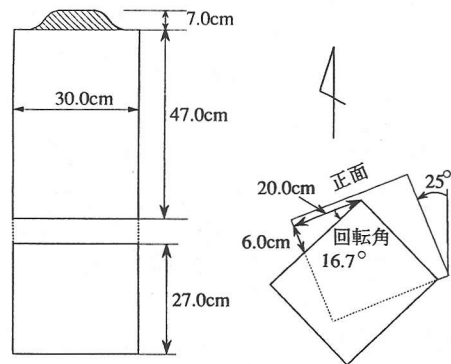


図-20 解析に用いた墓石

そこで、実地震動による回転現象がいつ生じているのかについて、加速度時刻歴の主要動付近の5秒間について調べ、回転現象を引き起こす加速度がどのような特性を持つかを考察する。解析区間としては、最大加速度波形の到達直前の5秒間と最大加速度波形を含む5秒間の2つの区間をとった。

図-21(a)に最大加速度成分の到達する直前の時刻60

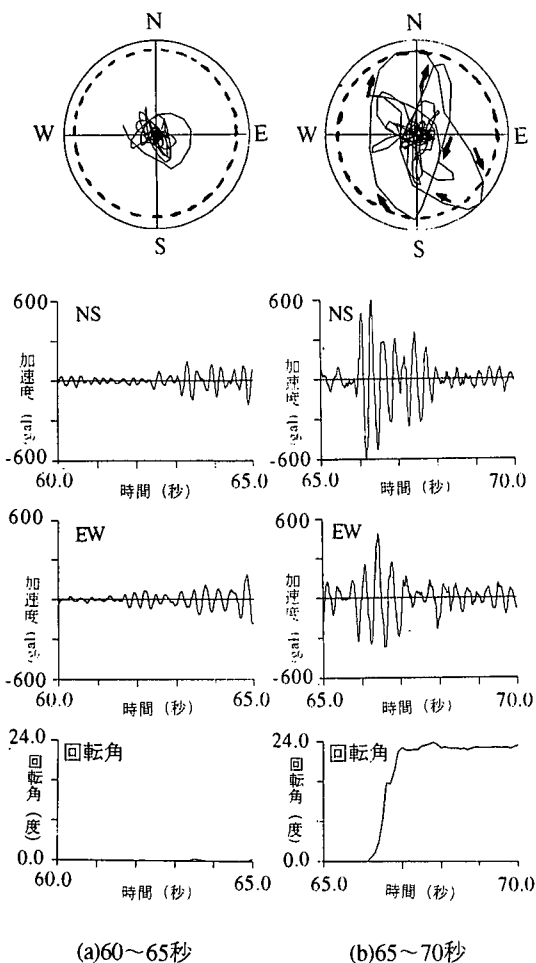


図-21 入力地震動の加速度粒子軌跡と時刻歴波形および剛体の回転角

秒から 65 秒の 5 秒間について、その水平加速度の時刻歴と粒子軌跡を示す。粒子軌跡を示す図の破線の円の半径はこの墓石の静的転倒加速度である約 626gal を示している。この時の卓越した粒子軌跡の形状は中心付近で半径 300gal 程度の円を描いている。解析の結果、この時の回転角は 0.4° と非常に小さく、この区間の加速度では回転が生じていない。

次に、図-21(b) に最大加速度波形を含む時刻 65 秒から 70 秒の 5 秒間について、その水平加速度の時刻歴と粒子軌跡を示す。この図より NS 方向に長軸を有する大きな楕円を描く粒子軌跡が見られ、S45°E の方向に最大加速度 675gal が生じている。この卓越した粒子軌跡の回転方向は、矢印で示すように中心付近から北へ延び、時計回りに回転する方向である。一方、墓石の回転方向は反時計方向であり、加速度粒子軌跡の回転方向とは逆

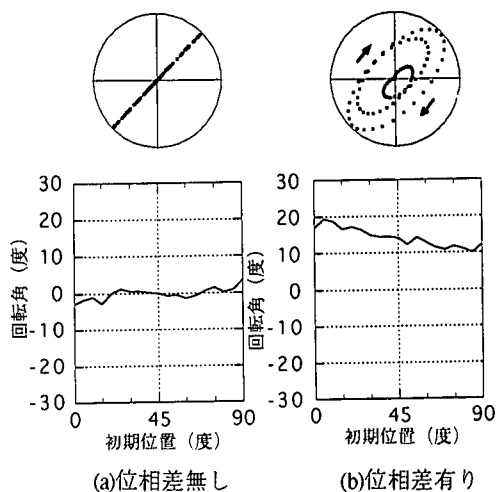


図-22 三陸はるか沖地震の卓越振動数、最大加速度を有する正弦波 3 波を入力した時の墓石の初期位置と回転角との関係及び粒子軌跡

向きである。

ここで、この墓石の回転が、振動の卓越する方向に回転したものであるのか、粒子軌跡の回転によるものであるのかを考える。図-20 に示したモデルに対し、三陸はるか沖地震の水平加速度の卓越振動数の平均値 3.43Hz、最大加速度 675gal と同じ振動数と振幅をもつ正弦波 3 波に、最初と最後の一波部分が傾斜した台形の包絡線関数をかけた入力波を与えた時の初期位置と回転角の関係を図-22 に示す。ここで、図-22(a) は粒子軌跡が回転しない場合、(b) は位相差 50° を与え図-21(b) に示す実地震動の粒子軌跡の形状に近い形状とした場合である。これらの図より、粒子軌跡が回転しない場合には墓石の回転も生じておらず、粒子軌跡が回転することによって墓石の回転が生じていることがわかる。したがって、三陸はるか沖地震の際に観測された回転現象は、地震動の主要動部分の粒子軌跡が回転することにより生じたものと考えられる。

(3) 墓石の回転現象と地震動特性

本小節では図-23 に示すような粒子軌跡をもつ正弦波 3 波を墓石に入力し、墓石の初期位置と回転角との関係について調べる。

ここで、墓石の動揺振動の等価固有振動数を定義する。すなわち、2 次元動揺振動の運動方程式、

$$I\ddot{\theta} - mg(b - h \tan \theta) = -hm\ddot{z} \quad (19)$$

より、割線剛性係数 k_c を次式のように定める。

$$k_c = \frac{mgb}{\theta_{max}} \quad (20)$$

ここで、 θ_{max} は墓石の傾きの最大角であり、

$$\theta_{max} = \tan^{-1} \frac{b}{h} \quad (21)$$

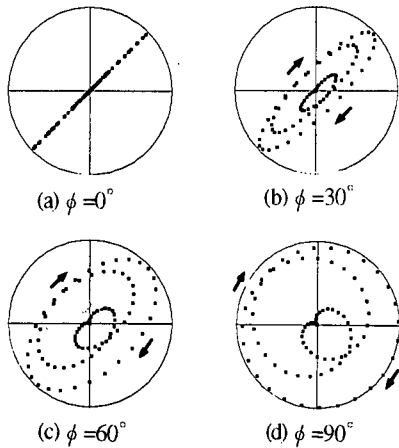


図-23 解析に用いた入力波の粒子軌跡

のように表される。これを用いて墓石の動揺振動の等価固有振動数 f_e を定める。

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3gb}{\theta_{max}(b^2 + h^2)}} \quad (22)$$

ここで、 I :慣性モーメント、 m :墓石の質量、 g :重力加速度、 b :底辺長の2分の1、 h :高さの2分の1である。

解析は、入力振動数を2.45Hz(墓石の動揺振動の等価固有振動数 f_e)、3.6Hz、4.9Hzとし、そのそれぞれについて入力加速度の最大値を286gal(静的転倒加速度以下)と600gal(静的転倒加速度程度)として計6パターン行った。その解析結果を、図-24に位相差 ϕ をパラメータとして、入力振動数、入力加速度別に示す。

図-24(b), (d), (f) より、入力加速度が600gal、位相差が0°の場合、入力地震動の卓越振動数が、等価固有振動数と同じか、それよりやや高い場合のみ初期位置によって最大10°程度回転している。しかし入力地震動の振動数が高くなるとほとんど回転しなくなる。すなわち、位相差のない入力地震動で回転が生じるためには、等価固有振動数付近の卓越振動数をもつことが必要とわかる。一方、位相差がある場合には、入力振動数が高くなっても5~10°程度回転し、すべての振動数において位相差が0°の場合よりも大きな回転角を示している。すなわち、位相差がある場合には無い場合より1サイクルあたりの回転角が大きいことがわかる。なお、(b)の位相差30°以上の場合、回転角が初期位置によって大きく変動するのは、入力振動数が等価固有振動数に近いため大きく動揺振動し、一頂点で立っている不安定な時間が長くなるためと考えられる。

入力加速度が小さい場合を示した図-24(a), (c), (e) では、位相差0°の場合にはすべての振動数でほとんど回転しないのに対し、位相差を与えると高振動数の場合には10°前後回転している。すなわち、位相差のない入力地震

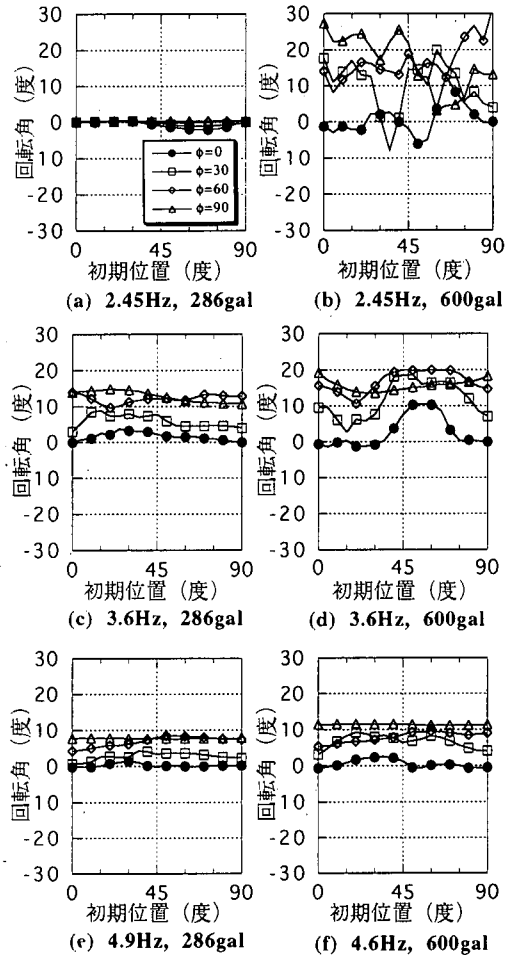


図-24 正弦波3波からなる入力波を与えた場合の初期位置と回転角との関係

動で回転が生じるためには、静的転倒加速度と同程度の大きな加速度が入力されることが必要だが、位相差がある場合は小さな入力加速度でも回転することがわかる。

以上より、位相差のない入力地震動で回転が生じるためには、

- 1) 等価固有振動数付近の卓越振動数をもつこと、
- 2) 静的転倒加速度と同程度以上の大きな加速度が入力されること、
- 3) 1サイクルあたりの回転角が小さいことから、2)の条件を満たす時間が比較的長いこと、
- 4) 振動方向が墓石の一辺と直角でないこと、

が必要と考えられる。このような条件を満たすような地震動が観測される例として、

- 1) 斜面の頂上近くなど、一方向の振動が大きく増幅されやすい場所、かつ
- 2) 地盤の卓越振動数が、墓石の等価固有振動数に近い場合

等が考えられる。

一方、位相差があり粒子軌跡が回転する場合は、広い加速度範囲、広い振動数範囲で墓石の初期位置に関係なく墓石は回転する。

6. 結論

本研究では、振動台実験と3次元DEMによって、直方剛体の動揺・回転挙動を再現し、回転挙動が振動の卓越方向に回転する挙動と、入力加速度の粒子軌跡が回転することによる挙動の2つに分類されることを明らかにした。後者の場合は、入力加速度の粒子軌跡の回転方向と、直方剛体の回転方向とが逆向きである。

さらに、三陸はるか沖地震の際に生じた墓石の回転現象を、その加速度記録3成分及び実大モデルを用いて再現することができた。また、波形の最大加速度を与える1~2波の粒子軌跡の動きが墓石の回転を引き起こしたことが明らかとなった。

以上の検討より、墓石の回転と地震動特性の関係について以下のことがいえる。

1) 動揺振動の等価固有振動数付近で、動的転倒加速度以下で静的転倒加速度程度以上の一方向地震動が、比較的長い時間与えられた場合には、地震動の卓越する方向に墓石が回転する。

2) その他の場合では、墓石の回転の原因は地震動の加速度粒子軌跡が回転するためであり、墓石の回転方向は粒子軌跡とは逆方向である。

従って1)の条件がすべて満たされるような特殊な場合を除き、墓石の回転方向は地震動の主要動部分の加速度粒子軌跡の回転方向の逆向きを示していると考えられる。

今後の課題としては、墓石の回転方向と震源のメカニズムとの関連を調べるなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 大森房吉: 明治24年10月28日濃尾大地震調査第2回報告、震災予防調査会報告、第32号、pp.67-88、1900.
- 2) Housner, G. W.: The behaviour of inverted pendulum structures during earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 53, pp.403-417, 1963.
- 3) 望月利夫・小林計代: 単体の運動から地震動加速度を推定するための研究-単体の動的挙動の解析-, 日本建築学会論文報告集、第248号、pp.63-70、1976.
- 4) Nirei, H., Kondou, S., Suzuki, K., Oguri, H., Tsukamoto, T., Kawaguchi, Y., Kamura, K., Kusuda, T., Satoh, K., Hara, Y. and Furuno, K.: Local characteristics of land quake under earthquake, *地質学論集*, 第35号, pp.91-96, 1990.
- 5) 飛鳥建設(株)技術本部: 1993年釧路沖地震の被害調査速報, 1993.
- 6) 佐藤工業(株)中央技術研究所: 1993年北海道南西沖地震・被害調査報告, 1993.
- 7) Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, *Proc. Int. Symp. on Rock Fracture*, Vol. II-8, 1971.
- 8) 木山英郎, 藤村尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, *土木学会論文報告集*, 第333号, pp.137-146, 1983.
- 9) 澤田純男, プラダン・テージ B. S.: 3次元個別要素法による粒状体のせん断解析, 第28回土質工学研究発表会(神戸), pp.525-526, 1994.
- 10) Winkler, T., Meguro, K. and Yamazaki, F.: Response of rigid body assemblies to dynamic excitation, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 24, pp.1389-1408, 1995.
- 11) Cundall, P. A.: Rational design of tunnel supports - a computer model for rock mass behavior using interactive graphics for the input and output geometrical data, *Technical Report MRD-2-74, Missouri River Divisions, U.S. Army Corps of Engineers*, 1974.
- 12) 飛田 哲男: 強震時における直方剛体の動揺・回転挙動に関する研究, 京都大学修士論文, 1997.
- 13) 喜多秀次, 宮武義郎, 徳岡善助, 山崎和夫, 幡野茂明: 基礎物理コース力学, 学術図書出版社, 1974.

(1997. 9. 5 受付)

CHARACTERISTICS OF SEISMIC GROUND MOTION ESTIMATED FROM ROTATION RESPONSE OF TOMB STONES

Sumio SAWADA, Kenzo TOKI and Tetsuo TOBITA

Shaking table tests and the three dimensional distinct element analyses were carried out to investigate the rotation response of tomb stones, which are excited by seismic motion. It is clarified that rotation response of a rigid body is caused by two reasons, one is the rocking caused by one directional input motion and the other is caused by the rotation of particle motion of input motion. The rotation response of a real tomb stone was simulated using the acceleration record observed during 1994 Sanriku-Haruka-Okai Earthquake. It is concluded that, except for special cases, the direction of rotation of a rigid body represents the reverse rotation direction of particle motion of seismic motion.