

墓石の回転挙動と地震動特性

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 京都府宇治市五ヶ庄)

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 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

³正会員 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の生じる原因を、振動台模型実験及び数値解析を通して明らかにした。解析手法は3次元DEMを用い、入力波の振動数、振幅及び位相を変化させたケーススタディーを行った。その結果、直方剛体の回転挙動は、剛体が動揺しやすい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結果、主要動の粒子軌跡が回転していたために墓石が回転したことがわかった。

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。また墓石の転倒に関する研究も古くから行われている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。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。

このよう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。最近の1993年釧路沖地震や1993年北海道南西沖地震の際にも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した。

解析は個別要素法(DEM)を用いたが、解析を行うに先立ち室内振動台実験を行い、解析精度の検証とDEMパラメータの決定を行った。

次にDEMによる数値解析により、墓石の動的回転挙動を調べ、地震動のどのような特性が回転挙動に影響するかを明らかにし、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明らかにした。その結果、墓石の回転は動揺しやすい方向、すなわち地震動の卓越振動方向に回転する挙動と、地震動の粒子軌跡が回転した場合にその逆向きに回転する挙動の2つに分類できることがわかった。

一方、三陸はるか沖地震の際、気象庁八戸測候所の

ごく近傍(地震計の設置地点から墓地まで約34m)にある墓地において、墓石約30体の内20体ほどの墓石に、その鉛直軸まわりの回転現象が観察された。しかも、経年による風化のためその形状が著しくいびつな1つを除いて他の全てが同方向に回転していた。また、水平断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。

そこで、三陸はるか沖地震後の現地調査で回転現象が観察された墓石と同寸の実大モデルに対して、気象庁八戸測候所で観測された加速度記録(3成分)を用いて回転現象の再現を試みた。なお解析を行うにあたり、バネ及び減衰係数の値についてパラメトリックスタディーを行い、現地調査で得られた回転角に一致するようにこれらの値を決定した。

本論文では、特に三陸はるか沖地震の際の墓石の回転を再現した結果について述べる。

2. 三陸はるか沖地震で観測された墓石の回転

図-1に示すように回転現象が観測された墓地と、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。また、この測候所及び墓地は小高い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下構造と推定される。また、図-2に示すように、この墓地には約30の墓石があり、転倒又は回転現象は墓地南西側の6つを除くほぼ全ての墓石で観測された。回転現象が観測された墓石については、1つを除いて全てが同じ方向

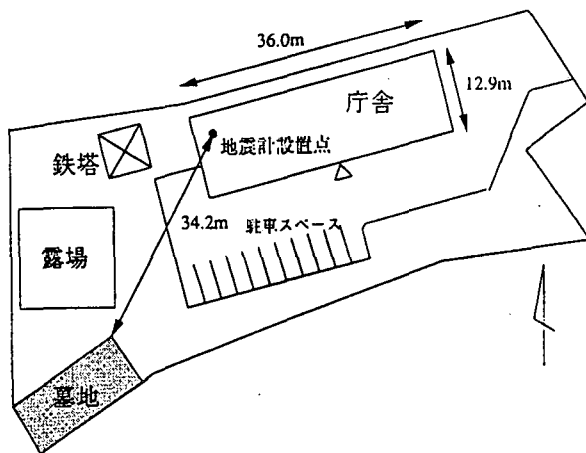


図-1 気象庁八戸測候所と墓石の回転現象が観測された墓地の見取図

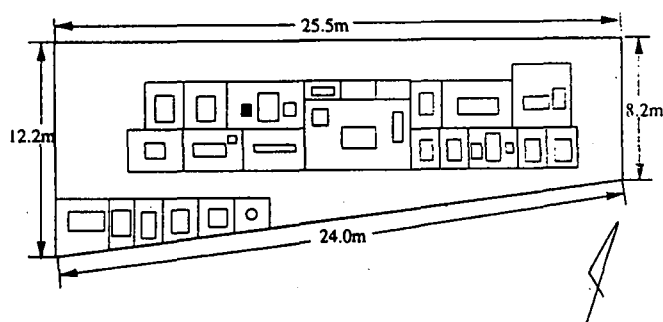


図-2 墓石の回転現象が観測された墓地の墓石の配置図

に回転していた。回転方向は、反時計方向である。

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観測され、さらにそれらが同方向に回転していることが観測された。

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測された。

この墓地の南西側の6つの墓石の後ろ側は切り土になっているため、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つ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、それらを除く他の墓石では回転現象が卓越しており、押し出されたように位置をずらしているものは観測されなかった。

図-3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3成分を示す。また、図-4には、そのフーリエスペクトル3成分を示す。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

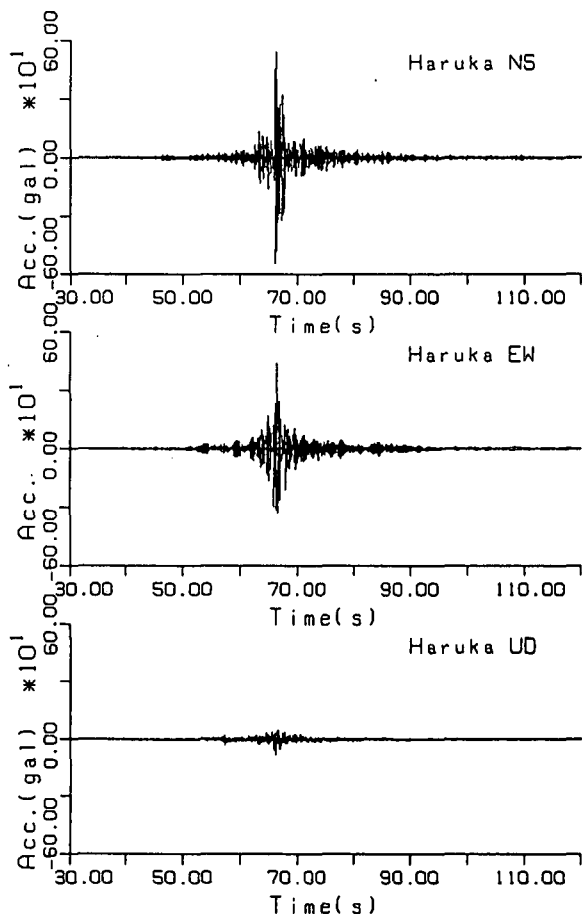


図-3 三陸はるか沖地震(八戸測候所)加速度時刻歴

かる。

3. 観測波形を用いたシミュレーション

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-5に示す。この墓石は、図-2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。この墓石の寸法は、高さ47cm、幅30cm、奥行き27cmである。上部に高さ約7cmの傾斜した部分を持つが、解析においてはこの部分を削除した。また、この墓石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-3に示す三陸はるか沖地震3成分を入力し、バネ係数及び減衰係数についてハラムトリックスタディーを行った。この結果に基づき、現地調査によって得られた回転角16.7°とほぼ等しい回転角を与えるバネ・粘性係数として、バネ係数 $9.8 \times 10^7 (N/m)$ 、粘性係数 $3.41 \times 10^5 (Ns/m)$ を選択した。シミュレーション結果から、主要動の到達時刻を含む、時刻 $t = 64.0 (s)$

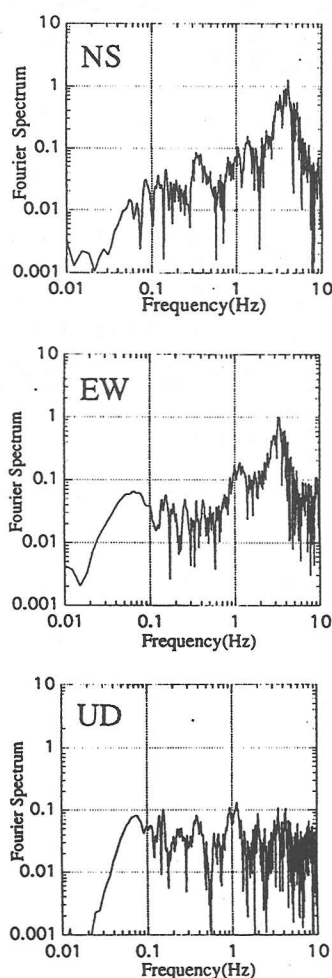


図-4 三陸はるか沖地震（八戸測候所）フーリエスペクトル

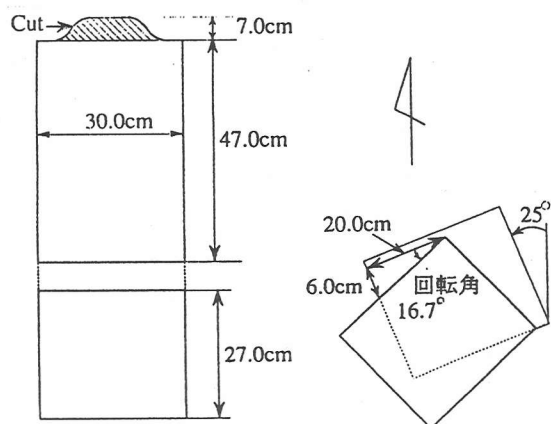


図-5 解析に用いた墓石

から $t = 68.0(s)$ の間に回転が生じ、その後はほぼ一定の角度を保っていることがわかった。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 10 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。なお、解析においては加速度波形 3 成分を用い



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

ている。

図-6(a) に最大加速度成分の到達する直前の時刻 60 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内円の半径はこの墓石の静的転倒加速度約 626gal である。この時の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。

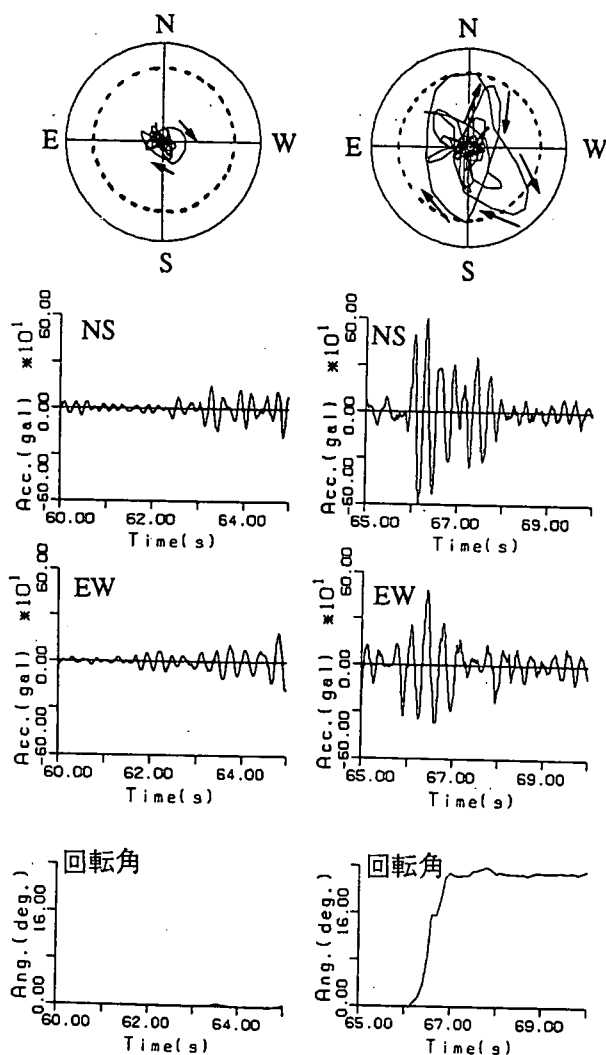
次に、図-6(b) に最大加速度波形を含む時刻 65 秒から 70 秒の 5 秒間について、その水平加速度の時刻歴と粒子軌跡を示す。この図に見られる粒子軌跡は、おおまかに見て NS 方向に大きな楕円を描き、 $S45^\circ E$ の方向に最大加速度 675gal が生じている。一方、この粒子軌跡の回転方向は、矢印で示すように中心付近から北へ延び、時計回りに回転する方向であり、これにより墓石は反時計方向に回転することになる。この 5 秒間の回転角は反時計まわりに 23.4° である。

以上より、三陸はるか沖地震の際に観察された回転現象は、地震動の加速度粒子軌跡が時計まわりに回転した影響によるものと推察される。また、地震動の最大加速度の到達と共に回転が発生したといえる。

4. 結論

本研究では、地震動による直方剛体の動的挙動、特にその鉛直軸まわりの回転挙動の生じる原因を、振動台実験及び数値解析を通して検討し、墓石の回転方向が入力加速度の粒子軌跡の回転方向と逆向きであることを示した。このことは、地震後の現地調査において墓石の回転方向からその地点に入射した加速度の粒子軌跡を推定することが可能であることを示唆している。

今後の課題としては、墓石の回転方向と震源のメカ



(a)60秒-65秒

(b)65秒-70秒

図-6 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 ((a)60-65 秒 (b)65-70 秒)

ニズムとの関連を調べることなどが挙げられる。

参考文献

- 1) J. Milne, 'Experiments in observational seismology', Trans. seism. soc. Japan 3, pp.12-64, 1881.
- 2) 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
- 3) G. W. Housner, 'The behaviour of inverted pendulum structures during earthquakes', Bull. seism. soc. Am. 53, pp.403-417, 1963
- 4) 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
- 5) Y. Ishiyama, 'Motions of rigid bodies in response to earthquake excitations', Trans A.I.J., 314, pp.33-45, 1982
- 6) P. A. Cundall, 'A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems', Pro c. int. symp. on rock fracture II-8, 1971

- 7) 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
- 8) 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
- 9) T. Winkler, K. McGuro and F. Yamazaki, 'Response of rigid body assemblies to dynamic excitation', Earthquake eng. struct. dyn., Vol. 24, 1389-1408, 1995
- 10) P. A. Cundall, 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
- 11) 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
- 12) 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