

I - B255

強震時における直方剛体の動揺・回転挙動に関する研究

京都大学大学院 学生員 ○飛田哲男
 京都大学防災研 正 員 澤田純男
 京都大学大学院 フェロー 土岐憲三

1. はじめに

1994年12月28日に発生した三陸はるか沖地震の際、気象庁八戸測候所から約30m離れた所に位置する墓地において、墓石の鉛直軸回りの回転現象が観測された。そこで、本研究ではこのような回転現象の生じる原因を、振動台実験及び数値解析を通して明らかにすることを試みた。解析は3次元DEM(個別要素法)を用い、剛体に対する入力波の振幅、振動数と位相差を変化させたケーススタディーを行い、さらに実大モデル・実地震動を用いた解析を行った。その結果、直方剛体の回転挙動に影響を与えるメカニズムとして、継続時間が短い場合には、入力波の卓越方向に動揺しやすい性質によるものと入力波の加速度粒子軌跡の回転によるものとの2つを抽出した。さらに、三陸はるか沖地震の際に観測された墓石の回転現象が、加速度波形の最大加速度付近のほぼ1波の影響によって引き起こされたことを明らかにした。

2. 室内振動台実験及びDEMパラメータの決定

室内振動台実験の目的は、回転現象を再現すること及びDEMパラメータを決定することである。実験に用いた供試体の諸元を表1に示す。実験は御影石のプレートを手台として振動台に固定し、その上に実際の墓石とはほぼ同寸の寸法比をも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。測定項目は供試体上端(2方向)及び入力との絶対加速度、高さ約20cmの位置の相対変位及び上方からの写真撮影を行ったのでそのX接点信号(シャッターの開閉信号)である。サンプリング周波数は500Hzとした。なお、用いた振動台は1方向入力型であるため、回転現象を再現するために初期位置として供試体の水平方向の1辺を振動方向に対して平行又は直交しないように置いた。実験は入力加速度の振動数5、10、15、20Hzの各場合について行った。

表1 供試体の諸元

材質	花崗岩(御影石)
寸法	9.2×9.2×22.7(cm)
密度	2.7(g/cm ³)
質量	5.2kg

解析にはDEMを用い、鉛直軸回りの回転現象を考察するため要素は3次元の直方剛体とし、要素の底面の4つの頂点それぞれに3成分のバネとダッシュポットを設けた。DEMパラメータであるバネ・粘性係数の値の決定についてはパラメトリックスタディーを行い解析による回転角が実験の回転角と一致するように求めた。これにより得られたバネ係数の値は 4.6×10^8 (gf/cm) 減衰係数の値は 5.58×10^5 (gf/cm/s) である。次節ではこの値を用いて解析を行った。

3. 剛体の回転挙動の数値解析

本研究では直方剛体の回転挙動に影響を与える因子として2つの場合を仮定した。すなわち、1)水平1方向入力により剛体が動揺しやすい方向に回転する場合、2)水平2方向の入力加速度の粒子軌跡(particle motion)の影響で回転する場合である。図1に初期位置 θ_0 と回転角 θ_r の定義を示す。また入力加速度は図1のx、y方向ともに同じ最大値、振動数をもつ正弦波で与え、y方向の位相差を変化させることにより粒子軌跡を変化させた。なお粒子軌跡の回転方向は負の方向である。ただし、半時計回りを正とする。

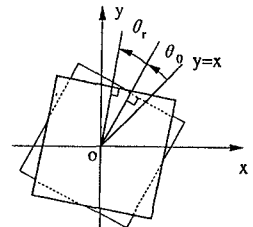
図1 初期位置 θ_0 と回転角 θ_r の定義

図2に入力加速度の振動数10Hz、600galの場合について粒子軌跡別に初期位置と回転角との関係を示す。なお入力波の継続時間は5秒とする。まず図2(左)の $\phi=0^\circ$ の場合は粒子軌跡に膨らみはなく上に述べた1)に対応している。この場合には剛体の回転方向は初期回転角に依存し、初期回転角が $\theta_0 < 45^\circ$ では負の方向に回転が生じ、 $\theta_0 > 45^\circ$ では正方向に回転が生じている。次に、図2(右)の $\phi=90^\circ$ の場合には、粒子軌跡は負の方向に円を描き、剛体の回転角は初期位置に依存せずこの場合約 $\theta_r=45^\circ$ である。

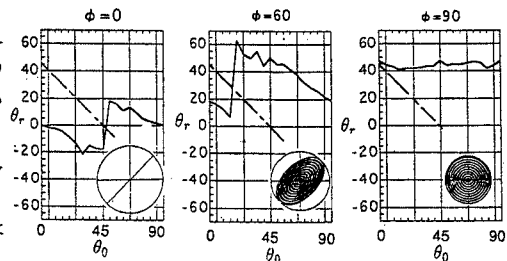


図2 初期位置-回転角関係と粒子軌跡 (10Hz, 450gal, 5sec)

キーワード: 直方剛体、回転挙動、個別要素法、粒子軌跡

連絡先: 〒611 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 耐震基礎部門

TEL(0774)38-4066 FAX(0774)38-4070

逆方向である。さらに図2(中) $\phi=60^\circ$ の場合には $\phi=0^\circ$ から $\phi=90^\circ$ への遷移状態が見受けられる。この遷移状態にある曲線の形状は、 $\phi=0^\circ$ の時の曲線形状が、ほぼその形を保ったまま図の一点鎖線に沿って左上方へ移動しているものと考えられる。このことは、遷移状態にある曲線の形状、すなわち粒子軌跡が楕円を描くときの剛体の回転角は、剛体が動揺しやすい方向に回転する影響と入力波の粒子軌跡の回転の影響との重ね合わせによって得られることを示している。しかし、粒子軌跡の形状が円形に近づくにつれて一定の回転角を示すようになり重ね合わせの傾向が見られなくなる。また、図3は入力波の継続時間を30秒とし位相差 $\phi=40^\circ$ の場合について図2と同様に示したものである。図3より継続時間が長くなると、粒子軌跡の回転による回転角が 45° を超えるため、剛体の回転角が初期回転角に依存しなくなることがわかる。

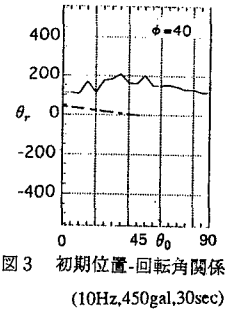


図3 初期位置-回転角関係
(10Hz,450gal,30sec)

4. 墓石の実大モデルによる回転現象の再現

三陸はるか沖地震の際に回転現象が観測された墓地では、墓石約30体の内20体ほどの墓石に同方向への回転現象が観察された。図4に八戸測候所で記録された水平2成分の時刻65秒から70秒までの加速度記録及びその粒子軌跡を示す。表2に解析に用いた墓石の諸元及び観測された回転角を合わせて示す。

表2 実大モデルの諸元
及び観測された回転角

材質	花崗岩(御影石)
寸法	30×27×47(cm)
回転角	16.7°

解析ではモデルの寸法が変化したためバネ・粘性係数を変更する必要がある。そこで実地震動3成分を実大モデルに入力し、観測によって得られたのと同じ回転角が得られるようパラメトリックスタディーを行いそれらの係数を決定した。これにより得られたバネ係数の値は 1.0×10^8 (gf/cm) 粘性係数の値は 3.48×10^5 (gf/cm/s) である。

この係数を用いて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、加速度時刻歴の最大加速度波形到達の直前5秒間と最大加速度波形を含む5秒間についてそれぞれ解析を行った。その結果前者においては回転角 0.4° 、後者においては回転角 23.4° が得られた。このことから、実地震動による回転現象が最大加速度を示す1波程度の波形によって生じたことが明らかになった。また、この時の墓石の回転方向も前節と同様、加速度粒子軌跡の回転方向とは逆方向である。

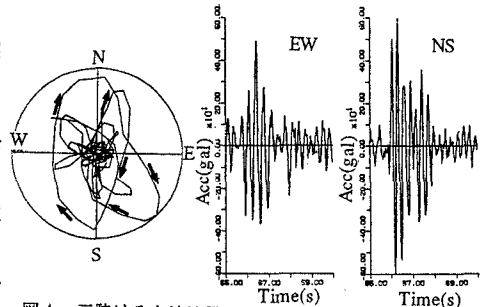


図4 三陸はるか沖地震加速度記録
(65-70秒)及びその粒子軌跡

次に、正弦波1波を2方向入力することにより回転現象の再現を試みた。この時用いた正弦波は最大加速度を600galと固定し振動数を2Hz、3Hz、4Hzと変化させた。解析においては前節と同様、剛体の初期位置及び入力波の位相差を変化させた。図5に振動数2Hzの場合の解析結果を示す。図5より位相差 70° から 90° 、初期回転角 20° から 30° 付近において 17.5° 以上の回転角が得られており、正弦波1波によっても回転現象を再現することができた。しかし、同じ回転角に対する初期回転角と位相差の組み合わせは無限にあり、回転角だけからこれらを決められないことがわかる。

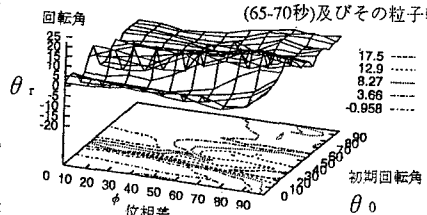


図5 正弦波1波による実大モデルの回転角と
初期位置及び位相差との関係(2Hz,600gal,5sec)

5. 結論

本研究では、地震動による直方剛体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明らかにした。得られた成果は以下の通りである。

- 1) 3次元個別要素法を用いて、振動台実験結果及び実地震動による回転現象を再現できた。
- 2) 継続時間が短い場合には、直方剛体の回転挙動が、剛体が動揺しやすい方向に回転する影響と入力波の粒子軌跡回転の影響との重ね合わせによるものであることを明らかにした。
- 3) 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方向であることを明らかにした。このことは、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している。
- 4) 三陸はるか沖地震の際に観測された墓石の回転現象が、加速度波形の最大加速度付近のほぼ1波の影響によって引き起こされたことを明らかにした。

参考文献 1) 澤田純男、プラダグン・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、2) 飛田哲男、強震時における直方剛体の回転挙動に関する研究、京都大学修士論文、1997