

# 振動台における地震時の墓石挙動

山本哲朗<sup>1</sup>・鈴木素之<sup>2</sup>・竹田直樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>山口大学工学部教授 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

E-mail: tyamamot@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>2</sup>山口大学工学部助手 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

E-mail: msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>3</sup>山口大学大学院博士前期課程 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

E-mail: z045fd@stu.cc.yamaguchi-u.ac.jp

2002年9月16日、鳥取県倉吉市立見に震源をもつ鳥取県中・西部地震 (M=5.3) が発生した。現地調査により墓石の移動および転倒が数多く確認された。本文では、地震時に見られる墓石の転倒現象の観察から各地の地震動の強さと方向を推定するため、振動台を用いた実験を行い、いわゆる $k=b/h$ の転倒条件式の検討および墓石挙動と周波数および加速度との関係を調べた。その結果、転倒の条件式は一定周波数内でのみ成立する条件式であり、あらゆる地震動に対して一般的に用いることはできないこと、また、墓石の最終移動量は周波数の増加に伴い増加し、転倒条件式より一義的に定まる値以上の加速度が作用すると急激な移動が生じることが明らかになった。

**Key Words :** tombstone ,  $k=b/h$  , acceleration , frequency , shaking table test

## 1. はじめに

2002年9月16日、鳥取県倉吉市立見に震源をもつ鳥取県中・西部地震 (M=5.3) が発生した。著者らは、震央付近の現地調査を実施し、墓石の移動および転倒を数多く確認した。墓地は至るところに存在し、墓石の構造が単純であることから、墓石を用いて地震動の強さや方向を推定する方法は古くから行われている。この方法によると、墓石などの直方体が地震動により転倒するための条件は水平震度 $k=b/h$  ( $b$ : 幅 $B$ の1/2,  $h$ : 高さ $H$ の1/2) であるとされている<sup>1)</sup>。しかし、この条件式は地震動を静的に考えた場合に適用できるものであり、実際の地震動のように複雑に振動する力に対して適用できるか否かは不明である。本文では鳥取県中・西部地震の調査報告および水平方向加振の振動台を用いて、正弦波で振動する力に対して墓石の転倒の条件式および墓石挙動の検討を行った結果について述べる。

## 2. 鳥取県中・西部地震

### (1) 地震概要

鳥取県中・西部地震 (M=5.3) は2002年9月16日10時10分頃に発生した地震であり、震央位置は北緯35.4度、東経133.7度、震源深さは約10 kmとなっている。最大加速度は震央から10 km離れた鳥取県倉吉市で記録された南北成分174.3 gal、東西成分79.2

gal、上下成分47.6 galである。図-1に震度分布図を示す。震央付近で最大震度4が観測されたのははじめ九州、中国、四国、近畿地方という広範囲で震度1から4が観測された。著者らは震央付近の被害調査を行ったので、その結果を示す。

### (2) 調査結果

図-2に著者らが調査した地点を示す。各調査地点で神社の被害が2ヶ所、家屋の被害が4ヶ所、墓地の被害が9ヶ所中7ヶ所で確認することができた。

神社の被害とは灯籠の転倒が主であり、2000年鳥取県西部地震復旧記念に造られた鳥居に破損が生じているのも確認された (写真-1)。

家屋の被害はいずれの4ヶ所においても屋根の棟

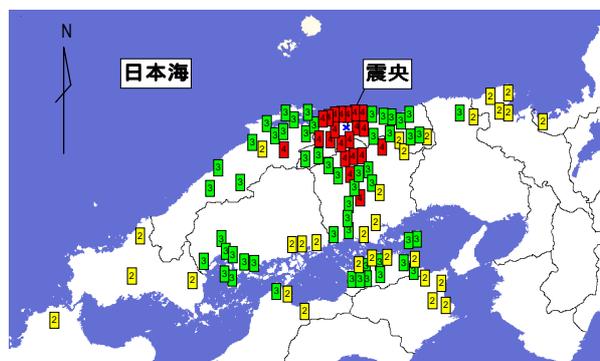


図-1 震度分布図

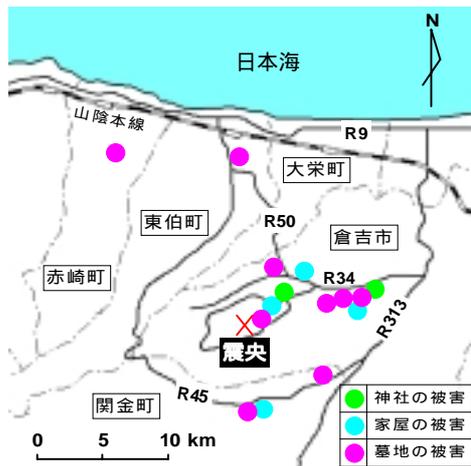


図 - 2 調査地点



写真 - 2 家屋の被害 (倉吉市横手)



写真 - 1 鳥居の破損 (番田稻荷神社)



写真 - 3 墓地の被害 (倉吉市服部)

部分に載せる雁振瓦のずれが確認された (写真-2)。

墓地の被害は今回の地震の調査では最も数多くみられた被害であり、9地点中7地点でみられた。主に墓石の転倒や移動のことであるが (写真-3)、猫足付きの墓石が転倒しているのが目立った。図-3に墓石各部名称を示す。石塔のみの墓石は移動しているのにとどまっていた。一方、猫足付きのものは移動が生じた結果、足が上台から外れて石塔がすべり落ちていた。

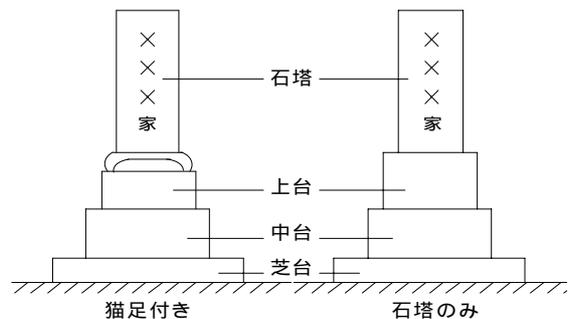


図-3 墓石各部名称

### 3. 振動台実験

#### (1) 実験の目的

著者らは、これまでの地震災害調査において、各地点における加速度を墓石の転倒条件式 $k=b/h$ を用いて推定することを検討してきた。墓石の転倒条件式とは地震動を静的に考えた際に墓石の幅と高さの比により墓石転倒に必要な加速度を推定する試みである<sup>2)</sup>。この式は地震動を静的に考えているため、実地震動の波形のように種々の周波数で振動する力に対して適用できるか否かは不明である。そこで、振動台を用いた実験を行い、振動する力に対して墓石の移動および転倒までの過程を観察するとともに、

転倒条件式の妥当性や転倒に至るまでの墓石挙動を検討することとした。

#### (2) 予備実験

実験を始めるにあたり振動台を用いて墓石を振動させる予備実験を行い、墓石挙動を確認した。使用した墓石は、幅と奥行きが0.2 m、高さが0.8 m (転倒条件 $b/h=0.25$ ) の花崗岩である。この墓石は転倒条件式により約250 gal付近で転倒が生じるものと考えられる。周波数 $f=1.5$  Hzおよび2.0 Hzの異なる周波数で実験を行い、加速度を徐々に上昇させた。

f=2.0 Hzでは加速度400 galまで上昇したが、墓石はロッキング現象を伴いながら移動が生じるだけで転倒には至らなかった。f=1.5 Hzでは加速度約200 galまで上昇させたところで墓石は転倒した。これより、転倒条件式が成立するためには周波数が大きく関係していることが示唆される。

### (3) 転倒条件と周波数

墓石の転倒条件には周波数の影響が大きく作用していると考えられる。そこで、転倒条件が成立する周波数を求めるために、f=1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0 Hzに設定し、墓石が転倒するまで加速度を上げ、転倒時の水平加速度  $a_H$  を記録するという実験を行った。実験結果を図-4に示す。図からこの墓石はf=1.0および1.5 Hzでしか転倒しないことがわかる。また、墓石転倒の際には墓石形状から一義的に定まる転倒加速度250 gal付近で転倒が生じた。2.0 Hz以上の周波数では加速度500 gal以上を与えたが転倒には至らない。これ以上の周波数になると、本研究では正弦波状加速度を用いているために慣性力が墓石転倒よ

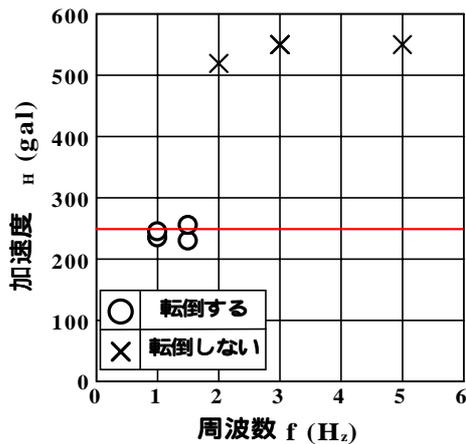


図 - 4 転倒に要する加速度と周波数の関係

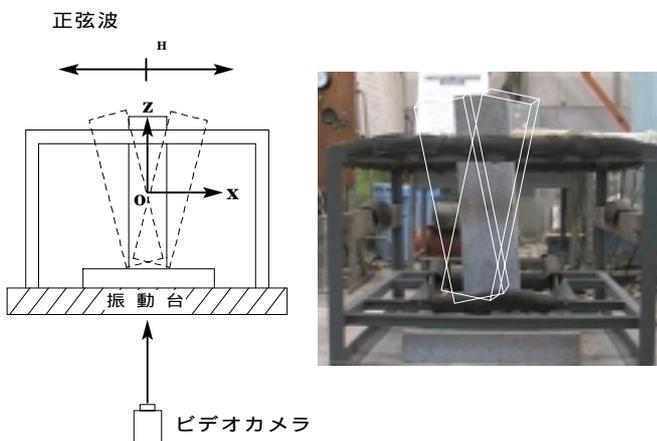


図 - 5 実験状況

りも早く作用するため、墓石転倒が妨げられたものと考えられる。

### (4) 墓石挙動の周波数特性

移動量が測定できるように印をつけた台の中心に墓石を設置し、 $a_H=250$  galとして、fを変化させて振動台を駆動させるという実験を行い、墓石挙動の周波数特性を調べた。実験状況を図-5に示す。図-6は周波数ごとの墓石中心の水平方向に対する挙動である。f=2.0 Hzでは墓石の水平方向の挙動は大小のばらつきがみられるが、fが大きくなるにしたがい、水平変位xの振幅が小さくなりロッキング現象も大きくなっている。周波数と最終移動量の関係を図-7に示す。現段階では断定することはできないが、両者には線形関係がみられ、周波数の増加に伴い墓石の移動量も増加する傾向がある。

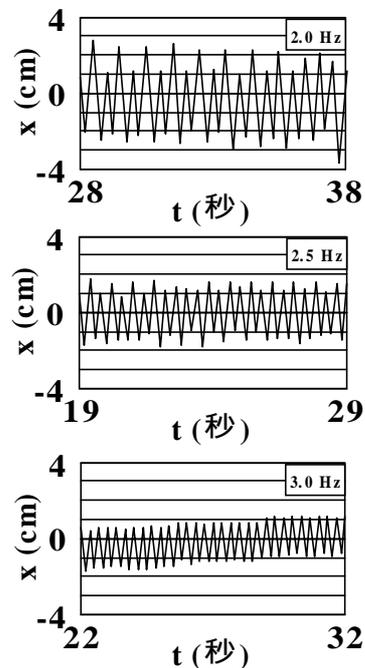


図 - 6 周波数ごとの墓石中心の水平方向に対する挙動

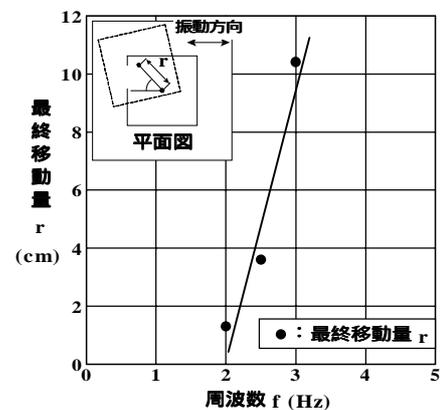


図 - 7 周波数と最終移動量

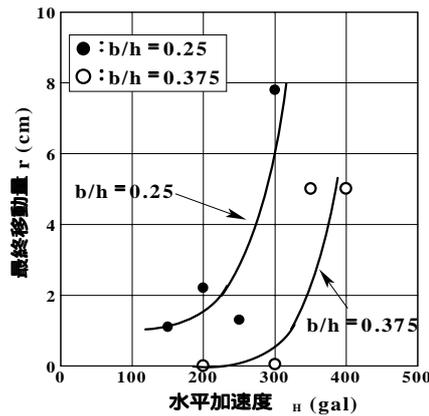


図 - 8 加速度と最終移動量

(5) 墓石挙動の加速度特性

前実験と同様に台の中心に墓石を設置し、 $f=2.0$  Hzとし、 $H$ を幾通りかに変化させて振動台実験を行い、墓石挙動の加速度特性を調べることとした。設定加速度に達した後、30秒間の墓石の動きをビデオカメラで撮影し、墓石の挙動を確認した。また、振動後の墓石の最終移動量を調べるため初期状態における位置と振動後の位置との距離を測定した。実験結果を図-8に示す。比較のために別の寸法の墓石 ( $B=0.3$  m,  $H=0.8$  m,  $b/h = 0.375$ ) の結果も示す。

墓石の移動は、転倒条件式より一義的に定まる値以上の加速度が作用すると、急激に生じる。ただし、実際には設定加速度に達するまでの移動量が考慮されておらず、今後移動量の測定方法を工夫する必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 鳥取県中・西部地震では大きな被害はなく、墓石の移動や転倒が多くみられた。
- (2) 転倒条件式は、一定周波数内でのみ成立する条件式であり、あらゆる地震動において一般的に用いることはできない。
- (3) 周波数と移動量には線形的な関係が認められ、周波数の増加に伴い移動量も増加することが示唆される。
- (4) 墓石の転倒を起こさない周波数で振動させた場合、転倒条件式より一義的に定まる値以上の加速度が作用すると、急激な移動が生じる。

参考文献

- 1) 物部長穂：地震上下動に関する考察並に振動雑論，土木学会誌，第10巻，第5号，pp1063-1094，1926.
- 2) 地震工学会：地震と地盤，p. 24，1965.

(2003. 10. 30 受付)

BEHAVIOR OF TOMBSTONE IN SHAKING TABLE TEST

Tetsuro YAMAMOTO, Yamaguchi University, Prof.  
 Motoyuki SUZUKI, Yamaguchi University, Res. Asso.  
 Naoki TAKEDA, Yamaguchi University, Graduate Student

This paper describes behavior of a tombstone in shaking table test to evaluate acceleration characteristic of ground due to earthquake. The shaking table tests on the tombstone made from granite were carried out under conditions of different frequencies and accelerations. Main conclusions are summarized as follows. An acceleration equation when the tombstone fall down, was suitable in a certain range of the frequency. There seems to exist a correlation between the maximum displacement of the tombstone and the frequency during shaking test. The displacement of the tombstone remarkably increased immediately after the acceleration reached a value derived from the equation.