

## 心棒の寸法・本数が洋型墓石の地震時挙動に及ぼす影響の分析

Effect of size and number of steel bars on seismic behavior of European-type gravestones

古川愛子\*, 三輪 滋\*\*, 清野 純史\*\*\*

Aiko Furukawa, Shigeru Miwa and Junji Kiyono

\*正会員 博(工) 九州大学大学院工学研究院 助教 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

\*\*正会員 博(工) 飛鳥建設(株) 技術研究所 所長 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

\*\*\*正会員 博(工) 京都大学工学研究科 准教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

In this study, we focus attention on an interlocking reinforcement measure for European-type gravestones using steel bars. This reinforcement measure is widely used, but there are no specifications as to how long, how thick and how many steel bars should be used. First, results of 3-dimensional shaking table tests of full-scale gravestones with and without steel bars are investigated to clarify the effect of thickness, length and the number of steel bars on the seismic behavior of European-type gravestones. Then, the DEM analysis is conducted for more elaborate study. Finally, an optimal retrofit measure using steel bars for European-type gravestones is proposed.

*Key Words: European type gravestone, steel bar, seismic behavior, seismic reinforcement*

キーワード：洋型墓石，心棒，地震時挙動，耐震補強

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を契機に、墓石に対する地震対策の意識が向上し、接着剤で石材間を結合する補強方法（接着工法<sup>1)</sup>）や、石材に穴を開けてステンレス製の丸棒（心棒）を通すことで石材間を連結する補強方法（ダボ工法<sup>1)</sup>）など、様々な補強方法が考案され、実用に供されるようになった。三輪ら<sup>2)</sup>による転倒調査でも、兵庫県南部地震以前に建立された墓石と以後に建立された墓石とでは、転倒率に大きな差があることが報告されている。

このように、補強の有無によって被害程度が大きく異なることから、耐震補強の必要性は明らかである。しかし、補強墓石の被害も報告されている。写真-1は、2003年の宮城県北部地震でダボ工法の施された墓石の棹石（1番上の石）が転倒した様子である。棹石の下面には穴が開いており、上台（上から2番目の石）に設置した心棒に被さるように設置されていた。しかし、地震動により棹石が飛び上がり、心棒が抜け出て転倒したものと考えられる。心棒が長ければ、もしくは複数の心棒で連結されていたならば、被害が軽減された可能性があると考えられる。

以上のことから、適切な補強を施さない限り補強墓石であっても地震で転倒する可能性があり、効果的な耐震補強策を検討する必要があると考えられる。

筆者ら<sup>3)4)</sup>はこれまで、採用実績、施工性、メンテナンスの簡便性などを踏まえた結果、ダボ工法を用いた最適な墓石の耐震補強工法に関する検討を行ってきた。ダボ工法は、従来からよく用いられている工法であるが、心棒の寸法や本数など、設置方法に関する規定がなく、経験に基づいた施工法が各地で行われているのが現状である。心棒が長いと設置の際に棹石を持ち上げるクレーンが必要となり施工が困難になるが、逆に心棒が短すぎると、写真-1の被害が物語るように補強が意味をなさない。過去の研究において、心棒の寸法や本数が耐震性に及ぼす影響について検討を行った事例はない。以上を鑑み、筆者らはこれまで、棹石が直方体で高さ幅比（幅に対する高さの比）の大きい和型墓石を対象に心棒の寸法（直径・長さ）と本数が墓石の耐震性に及ぼす影響を分析し、最適補強案の検討を行ってきた<sup>3)4)</sup>。本論文では、棹石が台形で高さ幅比が比較的小さい洋型墓石を対象とし、同様の検討を行うものである。



写真-1 地震被害調査で撮影された補強墓石の転倒の様子

まずに、和型と洋型の墓石試験体と振動台実験の概要について説明する。次に、和型墓石を対象とした検討結果をまとめる。その後、実寸大の洋型墓石を用いた3次元振動台実験結果を踏まえ、和型墓石と洋型墓石の転倒メカニズムの違いを明らかにした上で、心棒の寸法・本数が洋型墓石の地震時挙動に及ぼす影響について詳細に分析する。さらに、3次元個別要素解析により、本数、直径、長さの影響を個別に分析し、心棒を用いた洋型墓石の最適補強案の検討を行った。

## 2. 墓石試験体・補強工法および振動台実験の概要

### 2.1 和型墓石の試験体概要

#### (1) 無補強和型墓石

和型墓石の中から代表的な形状を選択することとし、東京周辺で多用されているものを用いた。無補強和型墓石の試験体(モデル W1)の概観を図-1(a)に示す。1番上の石から、棹石、上台、中台、芝台と呼ばれる。芝台上には前面に水鉢を置くため、中台は後方に下げて配置する。棹石、上台、中台の重心の位置が一直線上に載るよう、棹石と上台は左右対称に配置する。各石の寸法および質量を表-1に示す。

#### (2) ダボ工法により補強された和型墓石

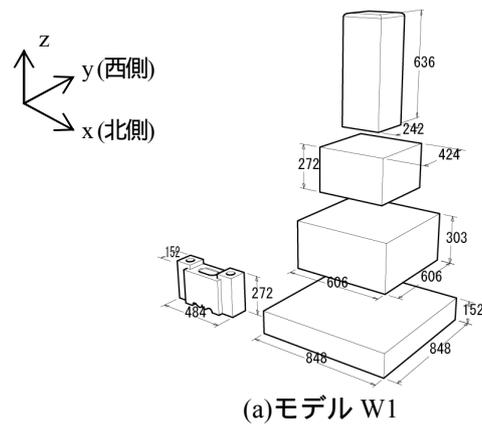
ダボ工法とは、棹石の下面と上台の上面に穴を空け、この穴にステンレスの丸棒(心棒)を通すことにより、棹石と上台とを連結する補強工法である。心棒は、モルタルや接着剤で固着させてはならず、ただ石材の穴に挿しただけで無接着である。上台-中台間、中台-芝台間は全く補強されない。現在多く使用されている工法である。

本研究では、心棒の直径、長さおよび本数の異なる3通りの和型墓石試験体(モデル W2~W4)に対して振動台実験を実施した。補強墓石の概要と質量を表-1に示す。

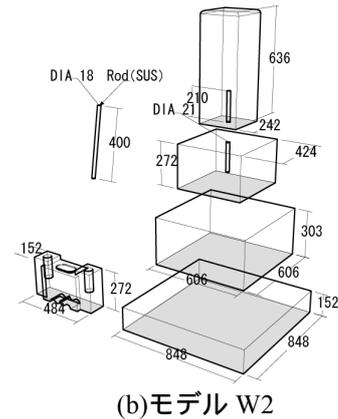
モデル W2 の概観を図-1(b)に示す。棹石と上台に開けた穴は、図-1(b)のとおりであり、それぞれの中心に1箇所である。棹石下面の穴の位置を図-2(a)に示す。穴の寸法は直径21mm、深さ210mmである。そこに通すステンレスの心棒は、直径18mm、長さ400mmである。

モデル W3 は、モデル W2 と同様に心棒の本数は1本であるが、心棒の寸法が異なり、直径が10mm、長さが150mmである。棹石と上台に開けた穴は、直径12mm、深さ80mmである。

モデル W4 は、モデル W3 と同じ寸法の心棒が2本設置されたものである。棹石と上台に開けた穴のサイズは、モデル W3 と同じである。棹石下面の穴の位置は、図-2(b)のとおりであり、穴( )の中心間隔は58mmである。

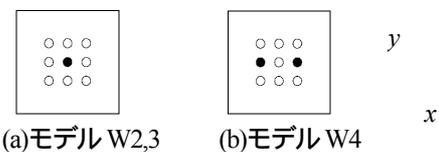


(a)モデル W1



(b)モデル W2

図-1 和型墓石試験体の概要(単位 mm)



(a)モデル W2,3

(b)モデル W4

図-2 和型墓石の棹石下面の心棒設置用の穴( が設置位置)

表-1 和型墓石の分類と各石の寸法・質量(長さの単位:mm)

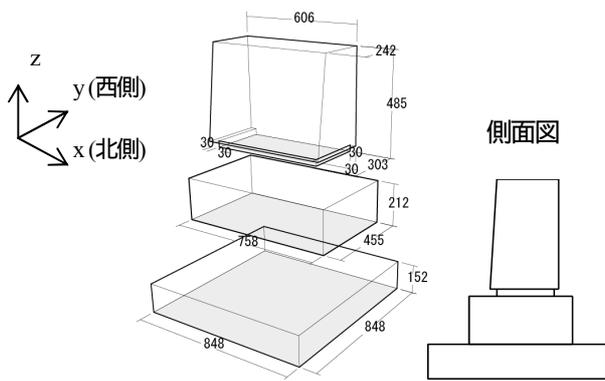
モデル名	心棒本数	心棒の寸法	棹石	上台	中台	芝台	水鉢
W1	なし	-	W242 ×	W424 ×	W606 ×	W848 ×	W48 4×
W2	1本	d18 L400	D242 ×	D424 ×	D606 ×	D848 ×	D152 ×
W3	1本	d10 L150	H636	H273	H303	H152	H272
W4	2本	d10 L150	質量 108kg	質量 142kg	質量 322kg	質量 315kg	質量 46kg

(d: 直径, L: 長さ, W: 幅, D: 奥行き, H: 高さ)

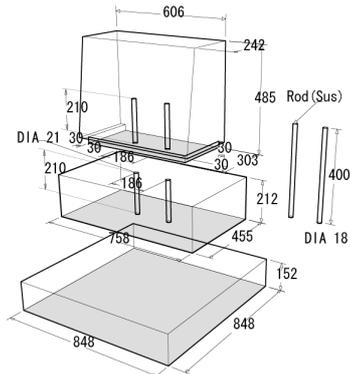
### 2.2 洋型墓石の試験体概要

#### (1) 無補強洋型墓石

無補強の洋型墓石の試験体(モデル Y1)の概観を図-3(a)に示す。一番上の石から、棹石、上台、芝台と呼ばれる。各石を全て左右対称に配置するが、前後は非対称である。



(a)モデル Y1



(b)モデル Y2

図-3 洋型墓石試験体の概要(単位 mm)

表-2 洋型墓石の分類と各石の寸法・質量(長さの単位: mm)

モデル名	心棒本数	心棒の寸法	棹石	上台	芝台
Y1	なし	-	W606 × 上面 D242 下面 D303 × H485 質量 231kg	W758 × D455 × H212 質量 211kg	W848 × D848 × H152 質量 315kg
Y2	2本	d18 L400			

(d: 直径, L: 長さ, W: 幅, D: 奥行き, H: 高さ)

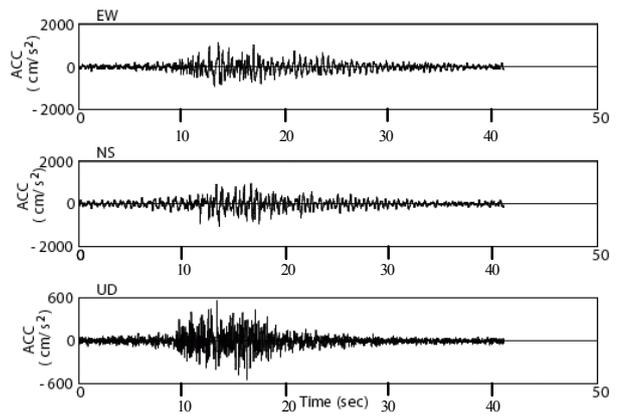
図-3(a)の側面図に示すように, 棹石の側面は台形形状で, 天端は底面より 6.1cm 細い. 台形部分の下に切り込みがあり, 厚さ 3cm の直方体形状をしている.

### (2) ダボ工法により補強された洋型墓石

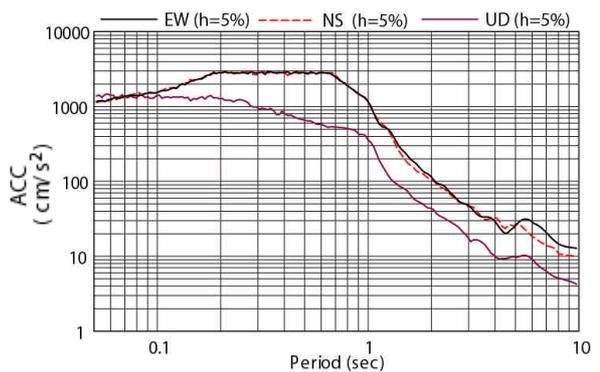
試験体 (モデル Y2) の概観を図-3(b)に示す. 棹石と上台に開けた穴は 2 箇所である. 穴の寸法とステンレスの丸鋼の寸法は和型墓石のモデル W2 と同じである. 洋型の補強墓石はモデル Y2 の 1 通りとした. 各石の寸法および質量を表-2 に示す.

### 2.3 墓石形状の違いが地震時挙動に与える影響

無補強の場合は, 和型・洋型ともに棹石単体の運動が支配的である. 和型の棹石は高さ幅比が大きいいためロッキング



(a)加速度波形



(b)加速度応答スペクトル

図-4 模擬地震動の加速度波形と加速度応答スペクトル

表-3 各震度に対する入力波の最大加速度(gal)

計測震度	震度 6 弱	震度 6 強	震度 7
x 方向	553	894	1170
y 方向	484	818	1049
z 方向	279	468	733

グが, 洋型の棹石は高さ幅比が小さいため滑動が支配的である. 補強によって棹石単体の運動が抑制され, 上台との相互作用が生じるが, 補強効果は墓石形状によって異なったものとなる. 詳細は次節以降に述べる.

### 2.4 入力波形

本研究では, 1995 年兵庫県南部地震の波形を基本入力波形として用いた. 墓石の各石は固有振動数に違いがあるため, できるだけフラットな振動特性を有する地震動のほうが耐震性を評価しやすい. そこで, 設計に用いられる加速度応答スペクトル<sup>5)</sup>と兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の記録の位相特性を用いて水平成分の模擬地震動を作成した. 振動台実験では 3 次元の地震動を用いる必要があるが, 水平・上下双方のスペクトルを規定している設計法はあまりない. NTT の通信機器耐震性検討用のスペクトル<sup>6)</sup>は水平上下成分を分けて規定している. この上下成分のスペクトルをターゲットスペクトルとし,

兵庫県南部地震の記録の位相を用いて模擬地震動を作成した。作成した地震動とその加速度応答スペクトルを図-4に示す。凹凸がなく、またスペクトルの強さも周期1秒以下では大きい。

作成した3方向の加速度波形に対し、3方向同一の比例係数により振幅調整し、震度6弱(計測震度5.84)・震度6強(計測震度6.26)・震度7(計測震度6.56)の地震動を作成した。それぞれの最大加速度を表-3に示す。なお、EW, NS, UD方向をそれぞれ、図-1.3に示すx, y, z方向とした。これ以降では簡単のため、それぞれの地震動を震度6弱、震度6強、震度7と呼ぶ。

### 3. 心棒を用いた和型墓石の耐震補強効果のレビュー

#### 3.1 概説

心棒を用いた洋型墓石の耐震補強案の検討をするにあたって、既に明らかとなっている和型墓石に対する心棒の補強効果<sup>3)4)</sup>をまとめる。

#### 3.2 心棒の本数・寸法が和型墓石の耐震性に与える影響(振動台実験から得られた知見)

振動台実験によって明らかとなった各和型試験体の転倒状況を表-4に示す。写真-2に、震度7加振による転倒時の様子を示す。耐震補強の効果を知るクライテリアは、各震度の地震動に対して変位・ずれが生じるかどうか、転倒するか否かとした。

和型墓石の棹石は、幅に比べて高さが高いため、ロッキング運動を起こし易い。無補強の和型墓石(W1)の転倒メカニズムは、棹石がロッキング運動を起こし転倒に至るというものであり(写真-2(a))、震度6強以上で転倒した。

和型墓石に対する心棒の役目は、上台と棹石を連結することによって、棹石単独のロッキング運動を防止し、棹石の転倒を免れようとするものである。しかし、いずれの補強墓石も、震度7の強い地震動に対しては、棹石と上台が一体となって中台上で滑動した後に転倒し、効果が得られなかった。心棒が太く長いモデルW2と、心棒が細く短いモデルW3, W4は、転倒の有無については同じ結果となったが、加振中の挙動には違いが見られた。

太く長い心棒1本で連結したモデルW2では、棹石の回転運動があまり見られず、回転運動を抑制する効果が確認された。また、棹石と上台が一体として運動するという期待通りの効果が発揮された。一方、細く短い心棒1本で連結したモデルW3では、上台に対する棹石の2つの相対運動が生じた。1つはロッキング運動であり、もう1つは心棒周りの棹石の回転運動であった。モデルW4では、心棒を2本に増やすことによって心棒周りの回転運動は抑えられたが、棹石のロッキングの相対運動は抑制でき

表-4 和型墓石試験体の転倒状況

モデル名	心棒本数	心棒の寸法	震度6弱	震度6強	震度7
W1	なし	-		×	×
W2	1本	d18/L400			
W3	1本	d10/L150			
W4	2本	d10/L150			

：変位・ずれが生じるが転倒はしない

：棹石と上台が一体となって転倒

×：棹石単体が転倒



(a)モデルW1 (b)モデルW2 (c)モデルW3 (d)モデルW4  
写真-2 和型墓石の実験結果(震度7加振後)

表-5 心棒の太さと長さが棹石の相対運動に及ぼす影響

心棒長さ	直径18mm	直径10mm
150-200mm	相対運動は生じない	相対運動が生じる
250-400mm		相対運動は生じない

なかった。棹石が上台に対してロッキングの相対運動を起こすとき、心棒で連結された上台を持ち上げ、相対運動を伴いながら一緒に転倒するという転倒メカニズムであった。相対運動により石材の破損・破片の飛び跳ねが生じた。

#### 3.3 心棒の太さと長さが棹石の上台に対する相対運動に及ぼす影響(個別要素解析によって得られた知見)

モデルW2とモデルW3の挙動の違い(棹石の相対運動が生じるか否か)が、心棒の太さの違いによるのか、長さの違いによるのか、実験結果だけでは明らかでない。これについて個別要素解析を用いて検討を行った結果についてまとめる。直径18mmと10mmの心棒の長さを150mm, 200mm, 250mm, 400mmと変化させた計8モデルに、震度7の地震動を入力した結果、棹石の相対運動を抑えるには、心棒の直径が18mmと太い場合は150mmの長さで十分であること、直径が10mmと細い場合は250mm以上の長さが必要であることがわかった(表-5)。

#### 3.4 心棒を用いた和型墓石の補強案

心棒の本数・寸法に関わらず転倒の有無については同じ結果となったが、心棒が細く短いと棹石の相対運動が生じ、石材の破損が生じることがわかった。モデルW2のように心棒が太いと、心棒1本で相対変位を抑制でき石材の破損が起こりにくいので、心

棒は1本でよいと考えられる。心棒が長い場合、棹石を設置する際に棹石を高くまで持ち上げる必要があり、クレーンなど設置する必要が生じる。人力で持ち上げられる程度のできるだけ短い心棒の方が施工し易いと考えられることから、直径の大きい18mmを用いて心棒長さを150mmと短くするのがよいと考えられる。そして、上台と中台間にも心棒を設置するなどして、一体となった棹石と上台が転倒するのを防ぐ必要がある。

#### 4. 振動台実験による洋型墓石に対する心棒の影響の分析

##### 4.1 洋型墓石の転倒メカニズムおよび心棒の効果

洋型の各試験体の転倒状況を表-6に示す。

###### (1) モデルY1

写真-3に、震度6弱、6強、7加振後のモデルY1の状況を示す。震度6弱、6強では棹石・上台が水平面内で回転を生じた。震度7では、棹石が上台の上で大きく滑動し、上台の端部から転倒した。洋型墓石は幅高さ比が和型に比べて小さいため、ロッキングに対する抵抗力が大きい。よって棹石はロッキングで転倒に至ることはなく滑動を続け上台の端部から転倒している。このように、洋型墓石の転倒メカニズムは、棹石が上台の上で過大な変位を生じることにより、上台の端部から転倒するというものである。

###### (2) モデルY2

写真-4にモデルY2の結果を示す。いずれの震度においても、心棒の連結効果により棹石と上台が一体となって芝台の上で滑った。震度が増すにつれて滑動量も増した。震度7では、棹石・上台は芝台の端まで滑動したものの転倒は免れた。主要動の継続時間がもう少し長い、地震動レベルがもう少し大きければ、棹石・上台は一体となって芝台の端部から転倒すると予想される。

##### 4.2 作用外力と滑動可能距離に心棒が与える影響の分析

洋型墓石の場合、転倒を引き起こすのは滑動による過大な変位である。ここでは、心棒が墓石転倒を抑制するメカニズムについて定量的に考察する。簡単のため、棹石と上台が完全に連結されていると仮定し、棹石の相対変位は考えないこととする。また、棹石・上台間と上台・芝台間の摩擦係数と粘着力は同じであると仮定する。滑動に対する特性を「作用外力」と「滑動可能距離」に分けて考察する。「作用外力」とは、滑動を起こす外力(地震外力)から滑動に抵抗する力(接触面に作用する摩擦力・粘着力)を引いたもの、「滑動可能距離」とは、下の石の端部から転倒するまでに滑動することのできる距離のことである。

###### (1) 作用外力

心棒によって棹石・上台を一体化することによって、滑動を起こさせる外力(地震外力)と抵抗力(摩擦力・粘着力)には次のような変化が生じる。

表-6 洋型墓石試験体の転倒状況

モデル名	心棒本数	心棒の寸法	震度6弱	震度6強	震度7
Y1	なし	-			×
Y2	2本	d18/L400			

○：変位・ずれが生じるが転倒はしない

●：棹石と上台が一体となって滑るが転倒はしない

×：棹石が転倒



写真-3 モデルY1の結果(左から、震度6弱・6強・7加振後)



写真-4 モデルY2の結果(左から、震度6弱・6強・7加振後)

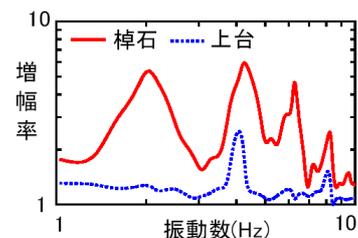


図-5 石材単体の伝達関数(y方向)

###### ・地震外力

地震外力は質量と入力加速度の積であるため質量に比例する。補強前後における地震外力の比は「(棹石の質量+上台の質量)/(棹石の質量)」である。

棹石の質量は231kg、棹石と上台の総重量は231+211=442kgであるため、連結することによって442/231=1.91倍となる。

###### ・摩擦力

摩擦力は接触面に作用する法線方向の外力に比例する、即ち、質量に比例するので、補強前後における摩擦力の比は地震外力と同様に、連結によって1.91倍となる。

###### ・粘着力

粘着力は、下の石との接触面積に比例する、補強前後における粘着力の比は「(上台の底面積)/(棹石の底面積)」である。

棹石の底面積は606mm×303mm=183618mm<sup>2</sup>、上台の底面積は758mm×455mm=344890mm<sup>2</sup>である。よって、粘着力は連結によって344890/183618=1.88倍となり、地震外力・摩擦力の比率1.91とほぼ同程度である。ただし、滑動が進み下の石からはみ出る場合、接触面積は減少する。

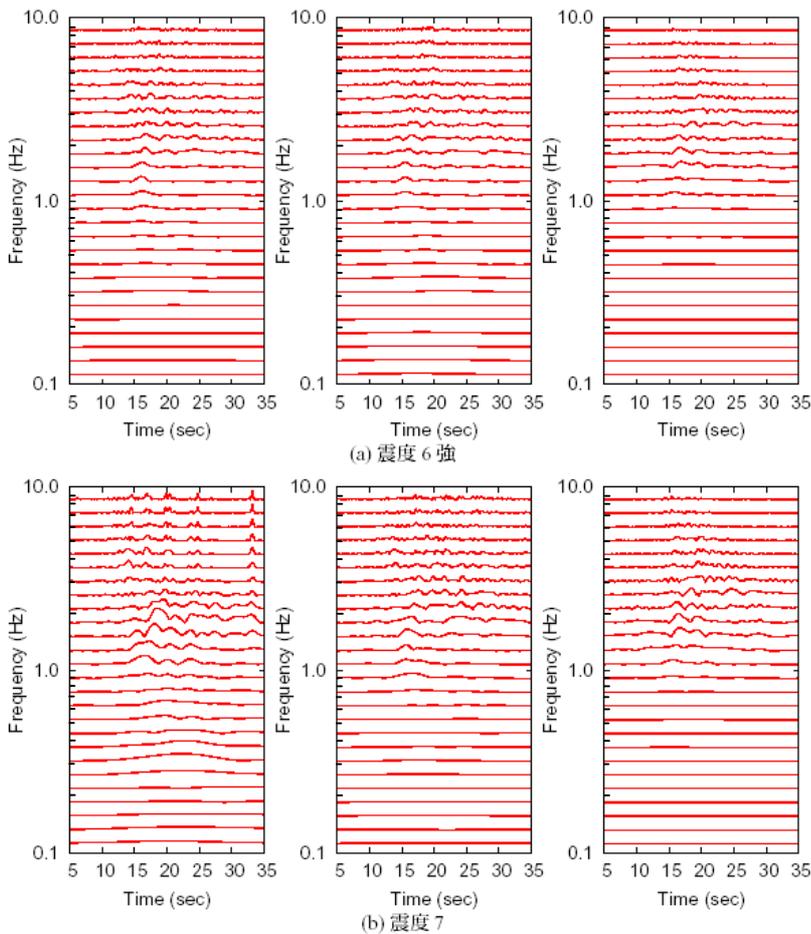


図-6 棹石のy方向応答加速度のウェーブレット(左から,Y1,Y2,地震動)

摩擦力と粘着力を足した抵抗力の増加割合は、外力の増加割合と同程度なので、心棒で連結しても単位質量あたりの作用外力はほとんど変わらないことがわかる。

以上は静的な力のつりあいによる考察であり、実際の複雑な動的な現象を考慮したものではない。心棒が動的な振動特性に与える影響については、4.3で考察を行う。

#### (2) 滑動可能距離

棹石の底面の幅が303mmであるのに対し、上台の幅はわずか455mmしかないため、棹石が上台上で滑動できる距離が短く、心棒で連結しない場合に棹石が転倒し易いことがわかる。

一方、上台の幅が455mmであるのに対し、芝台の幅は848mmもあるので、一体となった棹石と上台が芝台の上で滑動できる距離は遥かに長い。心棒による連結は、滑動可能距離の増加に関して、顕著な効果があることがわかる。

以上より、洋型墓石に対する心棒の効果として、滑動可能距離の増加が挙げられる。心棒は作用外力を低減するものではない。

#### 4.3 ウェーブレット解析による心棒が墓石の動的な振動特性に与える影響の分析

棹石の応答加速度のウェーブレット解析により、心棒が墓石の振動特性に与える影響を分析する。

#### (1) 石材単体の伝達関数

石材の振動特性を把握した上で、ウェーブレット解析結果を考察することが望ましいと考え、棹石と上台の石単体を用いた振動台実験によりy方向の伝達関数を求めた(図-5)。伝達関数がピークをとる最小の振動数は、棹石が約2Hz、上台が約4Hzである。

#### (2) ウェーブレット解析の概要

図-6は、棹石の北西側の隅に設置された加速度計で計測されたy方向の応答加速度およびy方向の入力地震動のウェーブレットである。本研究ではMorletウェーブレットを用いた。左からモデルY1,Y2,入力地震動の順に示している。グラフの横軸は時間、縦軸は振動数であり、応答の各振動数成分が時間とともにどのように変化していくのかが見て取れる。ここでは、各モデルのウェーブレットの大きさを相対的に比較することを目的としているため、振幅の大きさは図示していないが、すべてのグラフにおいて縮尺は同じである。

#### (3) 震度6弱・6強加振時のウェーブレット

震度6弱および6強では両モデルともに転倒しなかったため、ウェーブレットも同様の傾向を示した。震度6強加振時のウェーブレットを例として図-6(a)に示す。いずれも、入力地震動と同様の形状のウェーブレットを示しており、どの振動数成分にも目立った増幅は見られない。

#### (4) 震度7加振時のウェーブレット

震度7のウェーブレットを図-6(b)に示す。

##### ・約10～15秒後

図-4(a)より、入力地震動が開始するのは約10秒後だが、開始直後の約10～15秒の間は、モデルY1,Y2ともに約4Hzの成分がわずかに卓越している。図-5より棹石の伝達関数は約2Hzが卓越したが、モデルY1に2Hzの増幅はほとんどみられない。これは、モデルY1は粘着力・摩擦力によって棹石と上台が一体となっており、棹石単体の運動を示していないためである。Y2は心棒で強制的に棹石と上台が連結されており、棹石単体の運動は生じないので、2Hzに増幅は見られない。

##### ・約15～25秒後

約15～25秒の入力地震動の成分が大ききとき、モデルY1では棹石単体の運動である約2Hz弱の成分が大きくなる。これは、棹石単体の運動が卓越しており、上台上で滑っていることを表す。一方、モデ

ル Y2 の約 2Hz 弱の振幅は、入力地震動より小さく、棹石単独の運動が現れておらず、棹石と上台が一体となっていることがわかる。

#### (5) 心棒が動的振動特性に及ぼす影響

以上より、棹石単独の滑動は約 2Hz の成分が卓越したが、棹石と上台が一体となった滑動は約 4Hz の成分が卓越した。心棒で連結することによって振動特性が変化することがわかった。

このように、振動特性が変化するので、同じ大きさの外力に対する滑り易さも変化する。4.2(1)において、静的な力のつりあいを比較したところ、心棒により単位質量あたりの作用外力（地震外力 - 抵抗力）は、ほとんど変化しないことがわかった。しかし、心棒により卓越振動数が約 2Hz から約 4Hz に変化する。滑動量は異なると考えられる。一般的に、加速度振幅が同じ場合、卓越振動数が高い方が変位振幅は小さいので、滑動量は小さくなる傾向にあると考えられる。すなわち、動的特性が変化することによって、滑動面に作用する外力は同じであっても、滑動量が減少することがわかる。

このように、心棒により振動特性が変化し、滑動量が小さくなる上に、4.2(2)で述べた滑動可能量が增加するために、転倒しにくくなるものと考えられる。

#### 4.4 心棒の太さ・長さ・本数が洋型墓石の地震時挙動に与える影響の分析

和型墓石の場合、心棒の目的は棹石のロッキング防止であるため、心棒は太く長ければ棹石 - 上台間の一体化が増し、棹石単体のロッキングが起りにくくなるので、太く長い心棒ほど補強効果が高い。

洋型墓石の場合、元々棹石のロッキングは起りにくく、転倒を引き起こすのは棹石の滑動である。従って、心棒の役目は棹石の滑動防止である。

以下、心棒が太い場合と細い場合とに分けて、心棒の長ささと心棒の本数の影響を分析する。和型墓石から得られた以下の知見は、和型・洋型の別を問わないと考えられるため、この知見を元に心棒の影響を分析する。

心棒が太い場合、心棒が短くても棹石 - 上台の連結効果が得られる

心棒が細い場合、長さにより連結効果が異なる。十分な連結効果を得るには十分な長さが必要

心棒が細い場合、1 本の場合には心棒回りの棹石の回転とロッキングが生じるが、2 本の場合はロッキングのみ生じる

##### (1) 心棒が太い場合

###### ・心棒の長さの影響

心棒が太い場合は、短くても棹石 - 上台間の連結効果が得られるため、長さが結果に与える影響は小さいと考えられる。

###### ・心棒の本数の影響

心棒が太い場合は、心棒 1 本でも棹石の相対運動を抑制できるので、1 本と 2 本とで結果に大差ないと考えられる。よって、施工の簡便な心棒 1 本でよいと考えられる。

##### (2) 心棒が細い場合

###### ・心棒の長さの影響

一方、心棒が細い場合、棹石の滑動を防止できたとしても、心棒の長さ不十分で連結効果が弱いと、棹石が上台に対して相対運動（心棒回りの回転とロッキング）を起こす可能性がある。洋型墓石の棹石はロッキングが起りにくく滑動が主体であると述べたが、それは補強がなされていない状況での特性である。心棒により滑動が起りにくい場合、棹石に開けた穴と心棒の間に余分なスペースがあれば、相対運動が励起される可能性がある。

棹石の相対運動が生じた場合、この相対運動が「棹石 - 上台」の地震時挙動にどのような影響を与えるのか（運動を助長するのか、抑制するのか）、心棒の長さがどのような影響を与えるのか、実験結果だけから推察することはできないが、心棒の長さによって相対運動の程度が異なるため、心棒の長さは地震時挙動を支配する主要因となると考えられる。

###### ・心棒の本数の影響

棹石のロッキングの相対運動は心棒が 1 本でも 2 本でも生じるが、心棒回りの棹石の回転運動は心棒が 1 本のときのみ生じる。和型墓石の場合、棹石の底面積が正方形であるためか、回転運動の影響はほとんど見られなかった。しかし、洋型墓石の場合、棹石の底面積は長方形であり、心棒回りの棹石の回転運動によって引き起こされる上台の運動が変わってくると考えられるため、心棒の本数も地震時挙動を支配する主要因となると考えられる。

以上述べた、棹石の相対運動が棹石 - 上台の運動に及ぼす影響と、心棒の長ささと本数の関係については、実験結果から推察できないので、次節で個別要素解析により検討を行う。

#### 5. 数値解析による最適な心棒の寸法と本数の検討

##### 5.1 解析概要

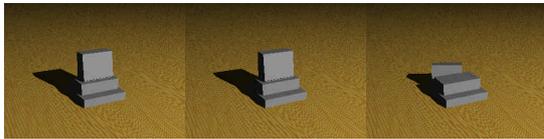
本節では、3 次元個別要素法<sup>7)</sup>により、心棒の本数、太さ、長さが地震時挙動に及ぼす影響を調べる。

##### 5.2 解析諸元

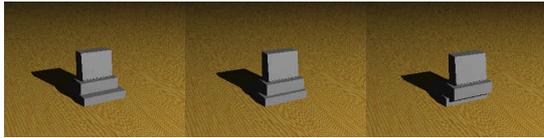
個別要素法では、要素間に仮想のばねとダッシュポットおよびスライダを設けて数値解析を行うため、ばね定数、減衰係数、動摩擦係数の値をそれぞれ決定する必要がある。本研究では、墓石の縮小模型を用いた振動台実験の結果に一致するように決定された表-7 に示す値<sup>8)</sup>を用いた。要素が接触する際は、これらのばね・ダッシュポットが直列につながるとして接触力を算出した。

表-7 接触パラメータ(単位質量あたり)

ばね定数(N/m/kg)		減衰係数(N・sec/m/kg)		摩擦係数
法線方向	接線方向	法線方向	接線方向	
3947.8	1579.1	125.66	50.265	0.438



(a) モデルY1



(b) モデルY2

図-7 個別要素法による再現結果(左から、震度6弱,6強,7後)

### 5.3 解析時間間隔

個別要素法による解析では、解析時間間隔  $dt$  が解の安定性に大きな影響を及ぼすことから、適切な時間間隔  $dt$  を決定することが必要となる。Cundall<sup>7)</sup>は、差分近似する際の解の収束性と安定性を得るための条件から、次式を満足するように時間間隔  $dt$  をとることを推奨した。

$$dt < 2\sqrt{m/K_n} \quad (1)$$

ここに、 $m$  は要素質量、 $K_n$  は法線方向のばね定数である。式(1)に本研究のパラメータを代入すると、 $dt < 0.0318$  という条件が得られる。しかし、式(1)は1要素1接点に簡略化した運動方程式から導かれた条件であり、1要素が複数個の接点を有する場合には目安の1つにしかならない。そこで、1オーダー小さい  $dt=1 \times 10^{-4}$ (sec) を用いて解析を行った。

### 5.4 モデル化

#### (1)無補強墓石(モデルY1)

上台、芝台は、それぞれ1個の直方体要素でモデル化した。棹石は、側面が台形の6面体と厚さ30mmの直方体を剛に連結することでモデル化した。実験において芝台は振動台に固定されていたため、解析においても芝台を固定とした。

#### (2)補強墓石

実験モデルでは、棹石の下面と上台の上面に、心棒を通すための円形の穴が開いている。解析モデルでは、穴の断面形状を穴の直径と等しい長さの辺を持つ正方形とした。穴の開いた棹石と上台は、複数の直方体要素を組み合わせ、剛に結合することでモデル化した。心棒は円柱でモデル化した。墓石と心棒の間の接触パラメータは、墓石の接触パラメータと同じ値を用いた。

### 5.5 振動台実験再現結果

個別要素法の信頼性を示すため、振動台実験の再現を試みる。定量的な比較が望ましいが、墓石の転倒は非線形性の強い現象であり実験の再現性は高くないと考えられることから、ここでは定性的な比較に留め、転倒の有無を比較する。次節においても、解析によって判定された転倒の有無をクライテリアとする。

#### (1)無補強墓石(モデルY1)

図-7(a)に、解析で得られた無補強の洋型墓石(モデルY1)が震度6弱,6強,7を経験した後の様子を示す。実験では、震度6強以上で棹石が滑り、震度7において棹石が転倒した。解析結果では、震度6弱,6強ではどの石も少ししか滑らず、震度7では棹石は後方に(y方向)滑動して後方に転倒した。表-6および写真-3に示した振動台実験結果と同じ傾向を示している。

滑動量の程度は実験結果と異なるものの、各震度の地震動に対する転倒の有無を再現することができた。

#### (2)補強墓石(モデルY2)

図-7(b)に、解析で得られた連結補強された洋型墓石(モデルY2)の震度6弱,6強,7を経験後の様子を示す。解析結果では、いずれの震度でも転倒しなかった。棹石と上台は一体となって芝台上で滑るが、震度レベルが上がるにつれて滑動量が増加した。これらは、表-6および写真-4に示した振動台実験結果に一致している。また、実験では震度7において上台が前方に滑り、一部が芝台より外にはみ出しているが、この様子も解析で再現できている。

本解析によって、縮小墓石の振動台実験の加速度波形を精度よく再現できること<sup>8)</sup>、実寸大の和型墓石の転倒の有無・メカニズムおよび転倒方向を補強・無補強ともに良好な精度で再現できること<sup>3)4)</sup>を確認済である。洋型に関しても、両モデルとも、全ての震度に対して転倒する・しないが再現できており、転倒メカニズムも再現できたので、個別要素解析を用いてより詳細な検討を実施することとする。

### 5.6 心棒の本数・太さ・長さが洋型墓石の地震時挙動に与える影響の検討

#### (1)検討ケース

心棒の本数、太さ、長さが墓石の地震時挙動に及ぼす影響について検討するために、実験されていないケースの個別要素解析を実施する。心棒の本数は1本と2本の2通り、直径は10mmと18mmの2通り、長さは150mm,200mm,250mm,300mm,350mm,400mmの6通りの、合計24通りのモデルの解析を実施した。入力地震動は震度7の地震動を用いた。

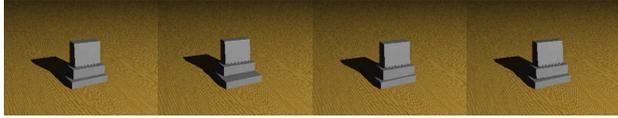
心棒を2本用いる場合、心棒を通す穴の位置はモデルY2と同じとした。心棒1本を用いる場合は、上台の中心位置に穴を設置した。



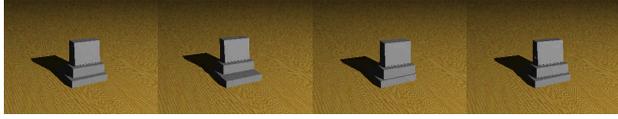
(a)心棒長さ 150mm



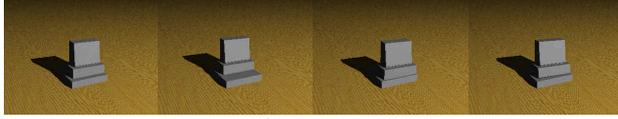
(b)心棒長さ 200mm



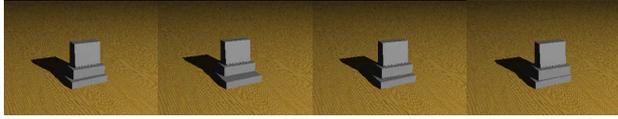
(c)心棒長さ 250mm



(d)心棒長さ 300mm

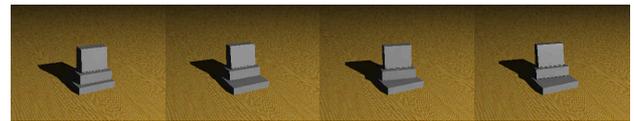


(e)心棒長さ 350mm

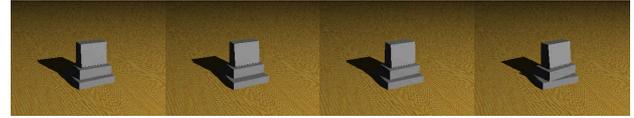


(f)心棒長さ 400mm

図-8 直径 10mm の心棒 1 本 (左から,16,17,18,19 秒後)



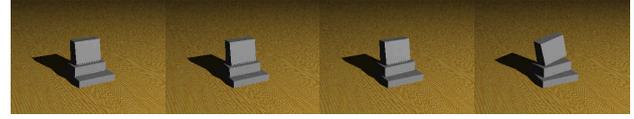
(a)心棒長さ 150mm



(b)心棒長さ 200mm



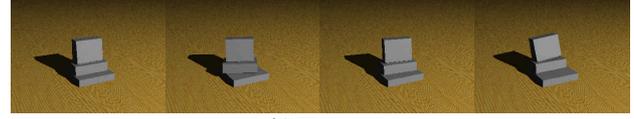
(c)心棒長さ 250mm



(d)心棒長さ 300mm



(e)心棒長さ 350mm

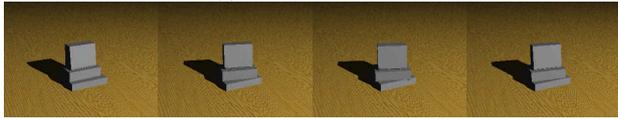


(f)心棒長さ 400mm

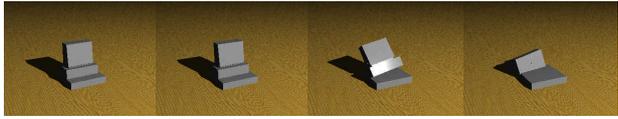
図-10 直径 10mm の心棒 2 本(左から,16,17,18,19 秒後)



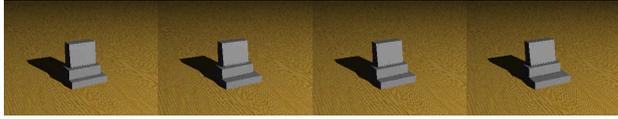
(a)心棒長さ 150mm



(b)心棒長さ 200mm



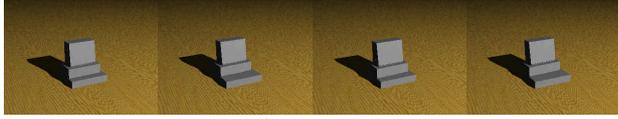
(c)心棒長さ 250mm



(d)心棒長さ 300mm

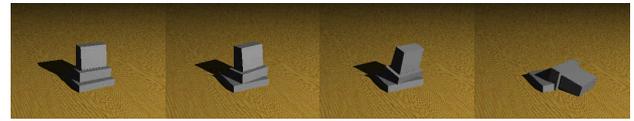


(e)心棒長さ 350mm

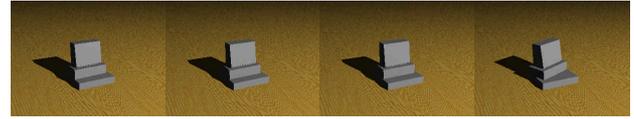


(f)心棒長さ 400mm

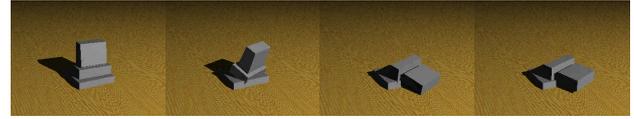
図-9 直径 18mm の心棒 1 本(左から,16,17,18,19 秒後)



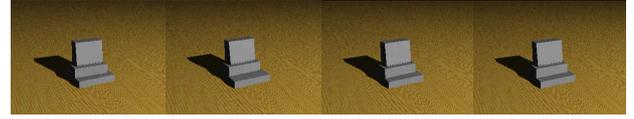
(a)心棒長さ 150mm



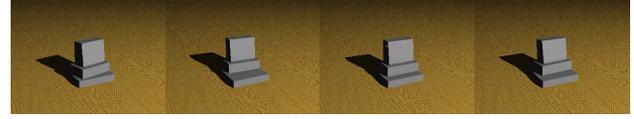
(b)心棒長さ 200mm



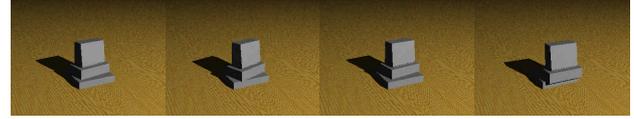
(c)心棒長さ 250mm



(d)心棒長さ 300mm



(e)心棒長さ 350mm



(f)心棒長さ 400mm

図-11 直径 18mm の心棒 2 本(左から,16,17,18,19 秒後)

(2) 解析結果

図8～11に、心棒の太さと本数毎に分けて、墓石の地震時挙動を示す。心棒の設置の違いによる挙動の違いが見られる加振後16, 17, 18, 19秒の様子を示す。秒数は図4(a)に示す加速度波形の秒数に対応している。表8に各モデルの転倒結果を示す。

・細い心棒1本を用いた場合

心棒が1本で直径が10mmと細い場合、いずれの長さの心棒を用いても、棹石と上台は転倒しないことがわかった(図8、表8)。表8に示すように、心棒が250mm以下では棹石と上台の滑動量は小さく芝台からはみ出ることにはなかった。心棒が300mm以上になると、転倒はしないが滑動量が増し上台の一部が芝台よりはみ出した。

4.4(2)で述べたように、心棒が1本で細い場合、棹石 - 上台間の連結効果が低いいため、棹石が上台に対して心棒回りの回転とロッキングの相対変位を起こした。この相対変位は、心棒が短いほど激しかった。この相対運動により、加振後しばらくは棹石のみが振動し、その後、棹石と上台が一体となって滑り始めたため、棹石と上台が滑動を開始する時間が遅くなり、結果として滑動量が小さくなったと考えられる。また、棹石と上台が滑りながらも、棹石は相対運動を続けた。地震によるエネルギーが、棹石のロッキングと棹石と上台の滑動とに分散されたことも、滑動量が小さくなった要因の一つと考えられる。

・太い心棒1本を用いた場合

心棒が1本で直径が18mmと太い場合、長さ250mmの心棒を用いたときは棹石と上台が一体となって芝台の端部から転倒したが、それ以外の長さの心棒では、転倒は免れたが滑動量が大きく芝台からはみ出した(図9、表8)。心棒が1本で直径が細いケースに比べ、耐震性の低いことがわかった。4.4(1)で述べたように、心棒が太い場合は150mmの長さでも連結効果が得られるため、心棒長さの違いによる効果の違いはほとんど見られなかった。連結効果が発揮されたため、棹石単独の相対運動が起こらず、加振開始後の早い時刻から棹石と上台が一体となった滑動が起こるため、最終的な滑動量が大きくなったものと考えられる。

・細い心棒2本を用いた場合

心棒が2本で直径が10mmと細い場合、長さ350mmの心棒を用いた場合を除いて、心棒が1本で太い場合と同じ結果となった(図10、表8)。心棒が細くても、2本で連結することで、太い心棒1本と同様の連結効果が得られたためと考えられる。また、細い心棒1本を用いた場合と結果が大きく異なった。これは、細い心棒1本を用いた場合は、心棒回りの棹石の回転を許すことにより、棹石のロッキング運動がより激しくなるためと考えられる。

・太い心棒2本を用いた場合

心棒が2本で直径が18mmと細い場合、長さ150mmの心棒を用いた場合を除いて、心棒が1本で太い場合と同じ結果となった(図11、表8)。長さ150mmの心棒を用いた場合、1本では転倒しなかったが、2本にすると転倒した。

表8 心棒の本数・直径・長さが地震時挙動に及ぼす影響 (d:直径, L:長さ, 単位:mm)

本数	直径	L150	L200	L250	L300	L350	L400
1本	d10						
	d18			×			
2本	d10			×			
	d18	×		×			

：滑動量は小さく芝台からはみ出さない

：転倒はしないが滑動量が大きく芝台からはみ出る

×：過大な滑動により芝台の端部から転倒する

5.7 心棒を用いた洋型墓石の補強案

解析結果より、心棒が1本で細く短いと、棹石の相対運動が生じ、これにより棹石 - 上台が一体となった滑動が抑制され、転倒を防止する効果のあることがわかった。いずれの長さでも転倒はせず、250mm以下の心棒では滑動量も小さいものとなった。

心棒を太く、本数を増やすと、棹石と上台間の連結効果が増し、棹石の相対運動が抑制され、棹石 - 上台の一体とした滑動量が増し、転倒するケースも生じた。

以上より、洋型墓石の場合、心棒は1本で、相対運動が生じる程度に細く短い方が転倒防止できることがわかった。これは、3.4で述べた和型墓石に対する補強案と逆の結果となった。この補強案は、相対運動により石材間の衝突が起きるため、石材の軽微な破損が生じる可能性がある。しかし、一旦石材が転倒するとその被害は破損程度では済まされないため、石材の軽微な破損を許すことで、転倒を防止する方がよいと考えられる。

6. 結論

本研究は、心棒の寸法・本数が洋型墓石の地震時挙動に及ぼす影響の詳細な分析を行い、心棒の最適配置について検討を行ったものである。

まず、実寸大の洋型墓石試験体を用いた3次元振動台実験結果より、洋型墓石に対する心棒の効果を確認した。

次に、摩擦係数や粘着力が一定などの理想的な仮定のもとで、心棒の効果を、(1)作用外力(滑動を起こす外力)、(2)滑動可能量(転倒するまでに滑動できる距離)、(3)振動特性の変化、に分けて分析を行った。その結果、(1)～(3)に関して以下の知見が得られた。

- (1)心棒で連結しても単位質量あたりの作用外力はほとんど変わらない。
- (2)滑動可能量には顕著な効果がある。
- (3)心棒によって振動特性が変化するので、滑動面に作用する作用外力は同程度であっても、滑動量が減少する。

以上より、心棒の転倒抑制メカニズムは(2)と(3)であることがわかった。

さらに、和型墓石の振動台実験結果から、太さ・

長さ・本数の一般的な影響を整理した上で、これらが洋型墓石の地震時挙動に及ぼす影響について推察を行った。太さ・長さ・本数の個々の影響を別けて分析するため、3次元個別要素解析も実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・ 心棒が細く短いと、棹石の相対運動が生じ、棹石 - 上台の一体となった滑動が抑制され、転倒防止効果がある。
- ・ 逆に、心棒を太くし本数を増やすと、棹石 - 上台間の連結効果が増し、棹石 - 上台の一体とした滑動が増し、転倒する可能性が高まる。

最後に、心棒を用いた洋型墓石の最適な補強案について考察を行った。先に実施した和型墓石に対する補強案と併せてまとめると以下の通りである。

- ・ 和型墓石の場合は、棹石と上台の連結が十分に発揮される太い心棒を用いることが望ましい。本数は少なく短いほうが施工上望ましいため、「太く短い心棒 1 本」を用いた補強案が最適と考えられる。
- ・ 洋型墓石の場合は、棹石と上台の連結効果が弱い方が、一体となった滑動量が低減される。「細く短い心棒 1 本」を用いた補強案が最適と考えられる。

以上のように、和型墓石と洋型墓石では最適な心棒の太さが異なる結果となった。

謝辞

本研究は、平成 19 年度科学研究費補助金(基盤研究(c))の援助を受け、執り行われたものであります。日本石材産業協会の関係者の皆様からは、実験の実施にあたり非常に

多くのご支援とご協力を頂戴しました。日本大学の服部仁先生には、墓石被害調査の写真をご提供頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本石材産業協会：地震に強いお墓の報告書，2005.
- 2) 三輪滋，本山寛：2007 年新潟県中越沖地震における墓石転倒調査，日本地震工学会大会 2007 梗概集，pp.458-459，2007.11.
- 3) 古川愛子，三輪滋，清野純史：実寸大模型を用いた振動台実験および数値実験に基づく心棒の寸法および本数が墓石の耐震性に及ぼす影響の検討，応用力学論文集，No.11，pp.603-613，2008.8.
- 4) 古川愛子，三輪滋，清野純史：石材店展示場の墓石の簡易な地震対策について，地域安全学会論文集，Vol. 10，pp.271-279，2008 年 11 月。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，2002.
- 6) 日本電信電話公社：通信装置等の耐震試験方法，1998.12.
- 7) Cundall, P. A.: Rational design of tunnel supports - A computer model for rock mass behavior using interactive graphics for the input and output of geometrical data, *Technical Report MRD-2-74, Missouri River Division, U.S. Army Corps of Engineers*, 1974.
- 8) 古川愛子，清野純史，三輪滋：物理シミュレーションによる兵庫県南部地震時の墓石の転倒メカニズムの解明，地域安全学会，No.7，pp.221-230，2005.11.  
(2008 年 9 月 18 日 受付)