

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

Effect of size and installation method of steel bar on seismic performance of gravestones
based on shaking table test and numerical test using full scale models

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㈱ 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)

Recently, many reinforcement measures have been developed to prevent gravestones from overturning. In this study, we focus attention on the interlocking reinforcement measure 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. To clarify the adequate size and installation method of steel bars, 3-dimensional shaking table tests of full-scale Japanesetype gravestones are conducted. Seismic waves with seismic intensity of 6, 6+ and 7 are used as input ground motions. Seismic behavior of four gravestones, one without reinforcement, one with a long and thick steel bar, one with a short and thin steel bar, one with two short and thin steel bars, are compared. Moreover, numerical simulations of gravestones are done using 3D DEM, and effective reinforcement measures are discussed.

Key Words: gravestone, steel bar, optimal installation method, seismic performance, shaking table test, numerical test

1. はじめに

2007 年の新潟県中越沖地震では、柏崎市、刈羽村などにおいて震度 6 強が、小千谷市、出雲崎町などにおいて震度 6 弱が観測され、構造物やライフラインに多くの被害が生じた。墓石、灯籠、鳥居や石材店の展示品にも甚大な転倒被害が生じた¹⁾²⁾。

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³⁾)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³⁾)など、様々な補強方法が考案され実用に使われるようになった。三輪ら¹⁾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。

写真-1(a)(b)は、新潟県中越沖地震後に、震源近傍の墓石転倒調査を行った際に撮影されたものである。写真-1(a)の墓石は転倒しておらず、耐震補強された墓石であると考えられる。一方、石材店に展示された墓石は、石を積み上げただけで無補強であるため、写真-1(b)のように甚大な被害を被っている。

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、墓石の耐震補強の必要性は明らかである。し

かしながら、新潟県中越沖地震では、耐震補強をした墓石の被害も報告されている。写真-1(c)の左は、接着工法の施された墓石の棹石(1 番上の石材)が転倒した様子であり、写真-1(c)右は転倒した棹石下面の拡大図である。4 箇所に接着剤が塗布されていたのだが、接着剤が剥がれ、転倒に至ったことがわかる。一般に、接着剤には経年劣化や繰り返しの地震動による強度劣化があることが知られている。写真-1(c)の被害が劣化によるものなのか、施工不良によるものなのか、容易に判断できないが、接着剤の長期的な強度特性を把握するために、今後実験等によって経年劣化・強度劣化について検討する必要があると考えられる。

写真-1(d)は、2003 年の宮城県北部地震後の被害調査の際に撮影された、ダボ工法の施された墓石の棹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 番目の石材)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、転倒に至ったものと考えられる。棹石の跳躍量よりも心棒の長さが長ければ、心棒が抜け出ることはなく、このような被害は発生しなかったものと考えられる。もしくは、1 本の心棒でなく、複数の心棒で連結されていたならば、被害が軽減されたのではないかと考えられる。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⁴⁾はこれまで、最適な墓石の耐震補強工法の構築を目的として、実用に供されている代表的な補強方法のうち、接着工法、粘着工法、連結工法、免震工法などから、8工法について、実寸大の墓石試験体を用いた3次元振動台実験を実施し、効果および問題点について検討を行ってきた。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、実験において耐震性向上効果が認められたダボ工法について、更なる検討を進めていくこととした。

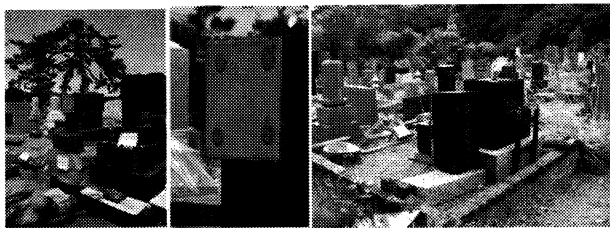
ダボ工法は、従来からよく用いられている工法であるが、心棒の寸法や本数など、設置方法に関する規定がなく、経験に基づいた施工法が各地で行われているのが現状である。心棒が長いと設置の際に棹石を持ち上げるクレーンが必要となり施工が困難になるが、逆に心棒が短すぎると、写真-1(d)の被害が物語るように補強が意味をなさない。過去の研究において、心棒の寸法や本数が耐震性に及ぼす影響について検討を行った事例はなく、これらについて検討を行うことは意義深いと考えられる。

本研究ではこの点に着目し、長さが400mmと比較的長い心棒1本を用いて補強したモデル、施工の簡便な150mmの心棒1本を用いて補強したモデル、150mmの心棒2本を用いて補強したモデル、比較のための無補強のモデルの4モデルについて、実寸大模型を用いた3次元振動台実験を実施した。画像および応答加速度から補強効果を分析し、適切な心棒の設置方法に関する知見を得ることを目的とする。

さらに、3次元個別要素法⁴⁾を用いた数値シミュレーションにより、振動台実験結果を再現するとともに、振動台実験では検討できなかった直径と長さを有する心棒で補強されたモデルの補強効果について検討を行った。ダボ工法を改善した、より耐震性の高いモデルの提案も行った。



(a) 墓地に立つ無被害の墓石 (b) 石材店の展示場の甚大な被害を受けた無補強墓石



(c) 接着補強された棹石の転倒(左)・棹石下面の接着剤が剥がれた様子(右) (d) 心棒で連結された棹石が宙返りして転倒した様子

写真-1 地震後の被害調査で撮影された墓石の転倒の様子

2. 墓石の試験体・補強工法および振動台実験の概要

2.1 無補強墓石の試験体概要

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。

無補強墓石の試験体の概観を図-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。

本研究では、無補強墓石をモデル1と名づける。各石の寸法および質量を表-1に示す。

2.2 ダボ工法により耐震補強された墓石の試験体概要

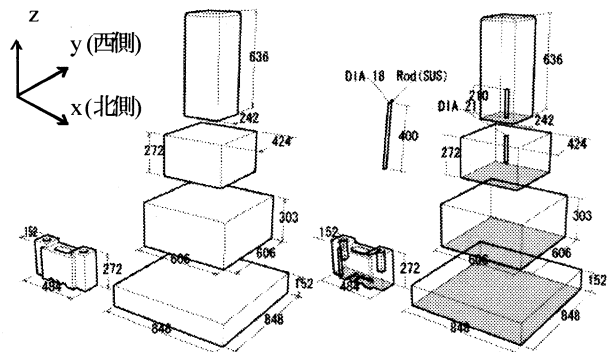
ダボ工法とは、棹石の下面と上台の上面に穴を空け、この穴にステンレスの丸棒(心棒)を通すことにより、棹石と上台とを連結する補強工法である。心棒は、モルタルや接着剤で固着させてはならず、ただ石材の穴に挿しただけで無接着である。上台-中台間、中台-芝台間は全く補強されない。現在多く使用されている工法である。

本研究では、心棒の直径、長さおよび本数の異なる3通りの試験体(モデル2~4)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2の概観を図-1(b)に示す。棹石と上台に開けた穴は、図-1(a)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●で示す。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。

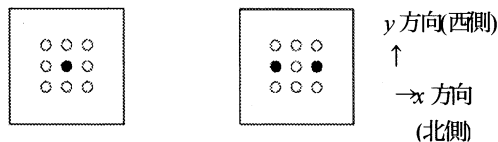
モデル3は、モデル2と同様に心棒の本数は1本であるが、心棒の寸法が異なり、直径が10mm、長さが150mmである。棹石と上台に開けた穴は、直径12mm、深さ80mmである。

モデル4は、モデル3と同じ寸法の心棒が2本設置されている。棹石と上台に開けた穴のサイズも、モデル3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、穴の中心間隔は約115mmである。



(a) モデル1(無補強墓石) (b) モデル2(補強墓石)

図-1 墓石試験体の概要(単位 mm)



(a)モデル2 および3

(b)モデル4

図2 棹石下面に開けられた心棒設置用の穴(●が心棒の設置位置)

表1 墓石モデル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
1	なし	—	W242 ×	W424 ×	W606 ×	W848 ×	W484 ×
2	1本	d18 L400	D242 ×	D424 ×	D606 ×	D848 ×	D152 ×
3	1本	d10 L150	H636 質量	H273 質量	H303 質量	H152 質量	H272 質量
4	2本	d10 L150	108kg	142kg	322kg	315kg	46kg

(d:直径, L:長さ, W:幅, D:奥行き, H:高さ)

2.3 入力波形

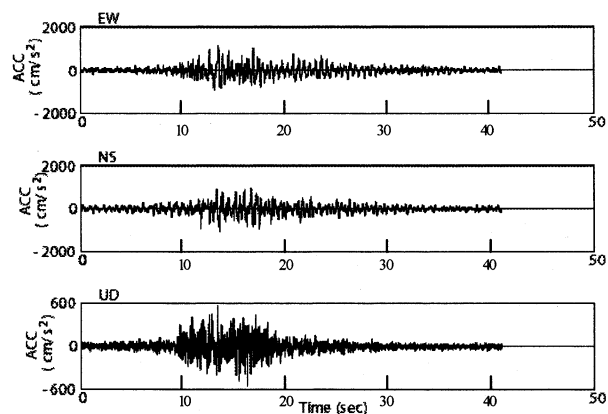
本研究では、建築・土木構造物のみならず、数多くの墓石にも甚大な被害を与えた 1995 年兵庫県南部地震の波形を基本入力波形として用いた。

実地震動記録を用いた場合には、スペクトル特性に凹凸がある。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⁵⁾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⁶⁾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-3 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。

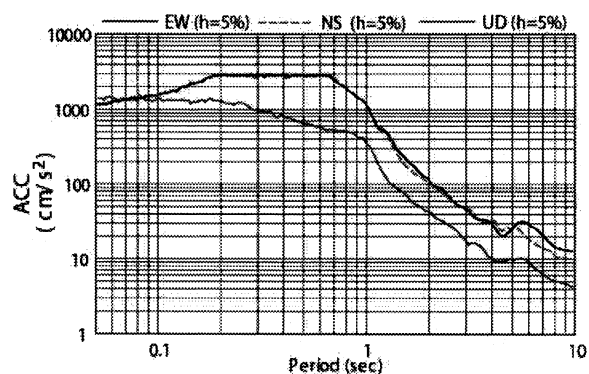
作成した 3 方向の加速度波形に対し、3 方向同一の比例係数により振幅調整し、震度 6 弱 (計測震度 5.84)・震度 6 強 (計測震度 6.26)・震度 7 (計測震度 6.56) の地震動を作成した。作成した加速度波形の最大加速度を表-2 に示す。なお、EW, NS, UD 方向をそれぞれ、図-1 に示す x, y, z 方向とした。これ以降では、簡単のため、それぞれの地震動を震度 6 弱、震度 6 強、震度 7 と呼ぶ。

表-2 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



(a)加速度波形



(b)加速度応答スペクトル

図-3 模擬地震動の加速度波形と加速度応答スペクトル

3. 振動台実験結果

3.1 各試験体の転倒状況

各試験体の転倒状況を表-3 に示す。無補強のモデル 1 は、震度 6 弱で変位・ずれを生じ、震度 6 強以上で転倒した。補強墓石は、いずれのモデルも、震度 6 強までは転倒しないが、震度 7 では棹石と上台が一体となって転倒に至った。心棒の直径が大きく長いモデル 2 と、心棒の直径が小さく短いモデル 3, 4 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。加振中の挙動については次項にまとめる。

表3 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
1	なし	—	△	×	×
2	1本	d18 L400	△	△	※
3	1本	d10 L150	△	▽	※
4	2本	d10 L150	△	▽	※

△: 変位・ずれが生じる

▽: 変位・ずれが生じ、水鉢のみ転倒

×: 棹石・水鉢が転倒 ※: 棹石・上台・水鉢が転倒

3.2 各試験体の加振中の挙動

実験時、デジタルカメラによって墓石挙動の動画を撮影した。各モデルの挙動をまとめるとともに、心棒の効果および寸法・本数の違いによる挙動の差異を明らかにする。

(1)モデル1 (無補強墓石)

写真-2に震度6弱、6強、7加振中の墓石の状況を示す。

a)震度6弱

震度6弱における特徴的な運動は、棹石のロッキングと、それに伴う移動であった。棹石は上台端部まで移動したが、転倒には至らなかった(写真-2(a))。上台・中台・水鉢はわずかに回転運動を起こした。

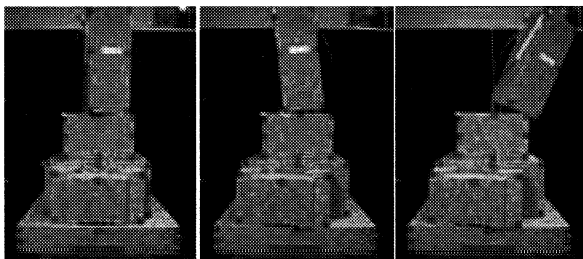
b)震度6強

震度6強では、棹石が激しくロッキングを起こした(写真-2(b))。棹石はロッキングしながら上台端部まで移動して、約22秒後に転倒に至った(写真-2(c))。上台・中台は僅かな回転運動に留まり、水鉢は約25秒後に転倒に至った。

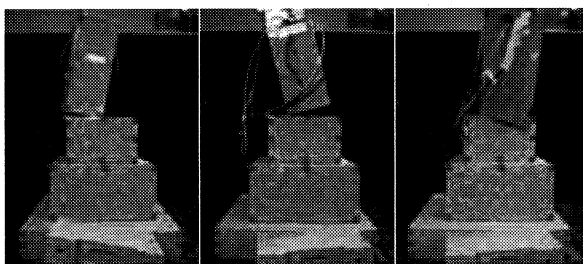
c)震度7

震度7では、更に一層ロッキングの激しさが増し(写真-2(d)(e))、約21秒後に棹石が転倒した(写真-2(f))。水鉢は約15秒後に転倒した。上台・中台は回転を伴ったすべり運動を続けたが、転倒に至ることは無かった。

無補強のモデル1では、幅高さ比(幅に対する高さの比)の大きい棹石のロッキング運動が卓越した。棹石は、ロッキングをしながら上台の上を移動し、上台の端部まで移動し、転倒に至るという転倒メカニズムであった。



(a)震度6弱加振後 (b)震度6強加振中 (c)震度6強転倒時



(d)震度7加振中 (e)震度7加振中 (f)震度7転倒時

写真-2 モデル1(無補強墓石)の実験結果

(2)モデル2 (直径18mm、長さ400mmの心棒1本)

写真-3に震度6弱、6強、7加振中の墓石の状況を示す。

a)震度6弱

写真-3(a)に震度6弱加振後の様子を示す。心棒によって棹石は上台に連結されているため、棹石のロッキングが抑制され、棹石はほとんどロッキングも回転もしなかった。

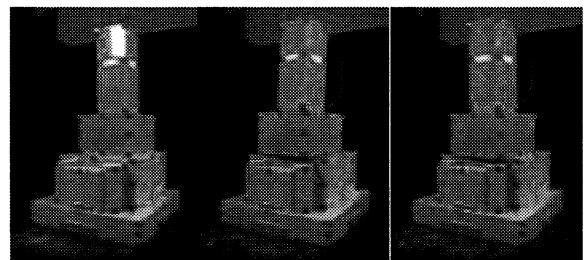
b)震度6強

写真-3(b)に震度6強加振中の様子を示す。心棒による連結効果が発揮され、棹石と上台が一体となって移動した。写真-3(a)と(b)を比較すれば、写真-3(b)の上台の水鉢側が僅かに持ち上がっているのが確認できる。一体となった棹石と上台は、重心の位置が低いため、ロッキングの際の傾きは僅かであり、むしろ一体となって中台上で滑る運動モードが特徴的であった。上台は中台の端部まで移動したが、転倒には至らなかった(写真-3(c))。棹石の回転運動はほとんど見られなかった。

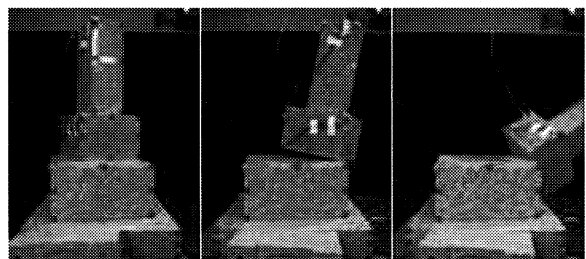
c)震度7

震度7では、棹石と上台が一体となって、回転を伴いながら中台上で滑った(写真-3(d))。約24秒後に上台と棹石が一体となって中台から落下した(写真-3(e)(f))。心棒による棹石と上台の一体化により、無補強のモデル1に比べてロッキングは抑制されたが、震度7の大きな地震動に対しては転倒を免れなかった。転倒モードとしては、ロッキングにより上台がわずかに浮き上がって中台との間の摩擦がなくなったときに、大きく滑り、中台の端部まで移動した後に落下するというものであった。上台-中台間の補強も併せて行う必要があると考えられる。

また、心棒周りの回転運動がほとんど見られなかった。この理由として、心棒の直径が18mmと大きいため、心棒と棹石の穴の間の摩擦力により、回転運動を抑制する効果が発揮されたものと考えられる。



(a)震度6弱加振後 (b)震度6強加振中 (c)震度6強加振後



(d)震度7加振中 (e)震度7転倒時 (f)震度7転倒時

写真-3 モデル2(直径18mm、長さ400mmの心棒1本)の実験結果

(3)モデル3 (直径10mm、長さ150mmの心棒1本)

写真-4に震度6弱、6強、7加振中の墓石の状況を示す。

a)震度6弱

写真-4(a)に震度6弱加振中の様子を示す。棹石の下面がロッキングにより浮き上がっているのが見て取れる。加振後の様子(写真-4(b))より、棹石は心棒周りに回転している。棹石の特徴的な運動は、ロッキングと心棒周りの回転運動

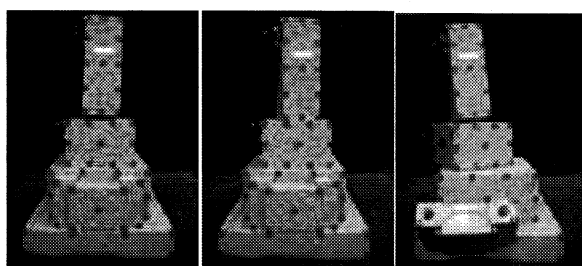
であり、いずれも棹石単体の運動で、上台はほとんど運動しなかった。他の石材は、僅かな変位に留まった。

b)震度6強

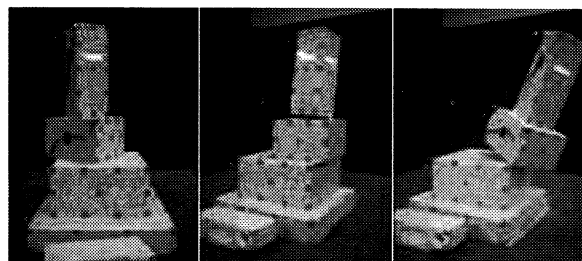
写真-4(c)に震度6強加振中の様子を示す。棹石の下面がロッキングにより浮き上がっている様子、上台が棹石に引っ張られる形で移動している様子が現れてとれる。棹石は上台と完全に一体とはなっておらず、上台に対する棹石の相対運動が見られた。棹石と上台は回転を伴いながら中台上で大きくすべり、中台の端部近くまで移動したが、転倒には至らなかった(写真-4(d))。

c)震度7

写真-4(e)に震度7加振中の様子を示す。棹石の下面がロッキングにより浮き上がっている様子、上台が棹石に引っ張られる形で移動している様子が見てとれる。棹石と上台は激しく回転、すべり運動をして、約20秒後に転倒した(写真-4(f))。中台にはほとんど変化がなかった。



(a)震度6弱加振中 (b)震度6弱加振後 (c)震度6強加振中



(d)震度6強加振中 (e)震度7加振中 (f)震度7転倒時
写真4 モデル3(直径10mm、長さ150mmの心棒1本)の実験結果

(4)モデル4(直径10mm、長さ150mmの心棒2本)

写真-5に震度6弱、6強、7加振中の墓石の状況を示す。

a)震度6弱

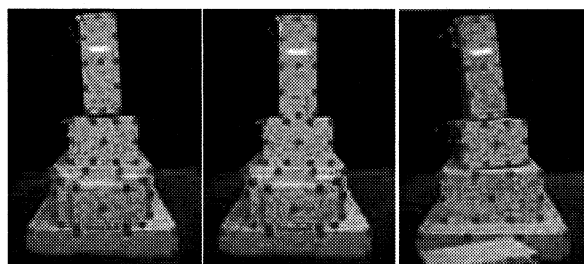
写真-5(a)に震度6弱加振中の様子を示す。棹石の下面がロッキングにより浮き上がっているのが見て取れる。心棒が2本あるため、モデル3で特徴的であった心棒周りの回転運動はみられなかった(写真-5(b))。棹石の特徴的な運動は、ロッキングであった。

b)震度6強

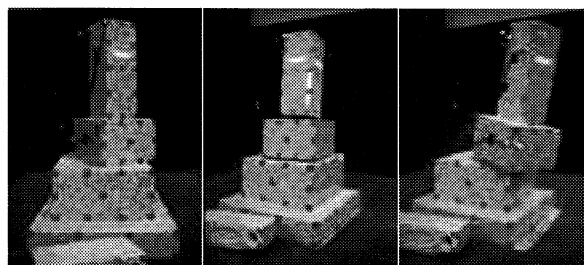
写真-5(c)に震度6強加振中の様子を示す。棹石と上台は一体となり回転を伴いながら中台上で大きくすべり、中台の端部近くまで移動したが、転倒には至らなかった(写真-5(d))。棹石の心棒周りの回転運動は見られなかったが、ロッキング運動は激しく、棹石は上台に対して相対運動を起こした。棹石と上台が一体となって運動するというより、ロッキング運動を起こす棹石に引っ張られる形で上台が動くという振動モードであった。

c)震度7

写真-5(e)に震度7加振中の様子を示す。棹石と上台は激しく回転、すべり運動をして、約20秒後に転倒した(写真-5(f))。運動が非常に激しかったため、写真-5(f)では石材の破片が舞っているのが見て取れる。



(a)震度6弱加振中 (b)震度6弱加振後 (c)震度6強加振中



(d)震度6強加振中 (e)震度7加振中 (f)震度7転倒時

写真5 モデル4(直径10mm、長さ150mmの心棒2本)の実験結果

(5)総評

心棒の役目は、上台と棹石を連結することによって、棹石のロッキング・すべり運動を防止し、棹石の転倒を免れようとするものであった。連結することにより、一体となって運動することになるので、重心の位置が下がり、ロッキングに対する抵抗が高まる。また、重量が重くなるので、摩擦により滑り運動に対する抵抗力も増すと期待された。

しかし、震度7の強い地震動に対しては効果を発揮することができなかった。震度7では、棹石と上台が一体となって中台から滑り落ちる形で転倒に至ったので、上台と中台の間の補強が必要であることがわかった。

モデル2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、モデル3では、心棒周りの棹石の回転運動が顕著で、また、モデル3、4ともに、棹石と上台の相対運動が目立ち、モデル2とは運動のメカニズムが異なった。この相対運動は、石材の破損や、棹石の飛び跳ねなど、振動を増長または被害を大きくする方向に働いているので、棹石と上台の相対運動が生じないように心棒の寸法を設定すべきであると考えられる。

モデル3とモデル4は、心棒の本数が違う。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、棹石と上台間の相対運動を抑制することはできなかった。施工の簡便性を考えると、心棒は1本で、連結効果が発揮される程度に太く長い心棒を採用するのがよいと考えられる。

また、モデル3,4の場合、地震動がより強くなり、棹石のロッキングがより激しくなれば、写真1(d)のように、棹石が心棒から抜け出て転倒するというモードが発生する可能性があると考えられる。この心棒が抜け出る原因が、心棒が細いためか、それとも短いためか、本実験結果からは推測できない。次節では、個別要素法による数値シミュレーションによって、直径と長さか転倒モードに与える影響について検討する。

3.3 棹石天端の最大加速度と補強効果

表4に、各墓石の棹石上面の北西側(図-1)の隅に設置した加速度計で得られた最大加速度を示す。図-4は、モデル1に対して震度7の加振を行った際の加速度波形である。棹石が転倒した時刻(約21秒後)において最大加速度が発生していることから、最大加速度が意味するのは、振動の大きさではなく、石材間の衝突による衝撃の大きさであることがわかる。一般に、衝撃力の再現性は著しく低いため、定量的な検討は難しい。しかし、心棒があればロッキングが抑制され、最大加速度が低減されと考えられるため、ここでは最大加速度をモデル毎に比較することによって、心棒による補強効果を定性的に検討する。

(1)震度6弱

震度6弱では、いずれの墓石も転倒しなかった。最大加速度の大きい順に、「モデル3≧モデル4>モデル1>モデル2」である。無補強のモデル1を基準にして考察する。心棒が太くて長いモデル2は、連結効果が発揮され、心棒のロッキングが軽減されたため、モデル1より最大加速度が小さくなったと考えられる。一方、心棒が細くて短いモデル3と4は、不完全な拘束により棹石が上台の上で小刻みなロッキングを起こし、棹石と上台が激しい衝突を繰り返すため、モデル1よりも衝撃が激しくなったものと考えられる。モデル2のように適切な寸法の心棒を用いれば、たとえ1本であっても、運動を軽減する効果を発揮するが、太さまたは長さが適切でないと、棹石が激しく振動し、石材を破損させてしまう恐れが高まることわかる。

(2)震度6強

震度6強では、モデル1のみ転倒した。最大加速度の大きい順に、「モデル1>モデル3>モデル4>モデル2」である。モデル1の最大加速度が最も大きい理由は、棹石が転倒したためである。それ以外のモデルを比較すると、心棒が太く長いモデル2の最大加速度が最も小さく、これは連結効果が発揮されたためである。モデル3の方がモデル4より僅かに最大加速度が大きい理由は、モデル3は心棒が1本しかないため、心棒周りの回転運動が発生するためであると考えられる。

(3)震度7

震度7では、いずれのモデルも転倒したため、最大加速度に明瞭な差は認められなかった。

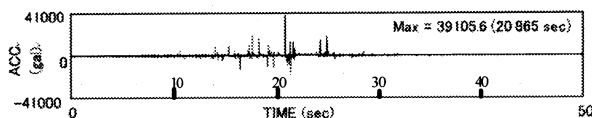


図4 モデル1の棹石の震度7加振時の加速度波形

表4 棹石の最大加速度(gal)

モデル名		震度6弱	震度6強	震度7
1	x	8.81E3	5.33E4	3.91E4
	y	6.07E3	4.09E4	4.04E4
	z	1.06E4	3.39E4	2.43E4
2	x	5.78E3	1.49E4	3.71E4
	y	5.55E3	1.90E4	3.27E4
	z	9.03E3	2.11E4	3.40E5
3	x	1.28E4	2.58E4	3.58E4
	y	1.38E4	2.25E4	3.87E4
	z	2.46E4	4.39E4	4.57E4
4	x	1.34E4	1.95E4	7.17E4
	y	1.61E4	2.71E4	5.18E4
	z	2.12E4	2.66E4	3.13E4

3.4 応答加速度の時間一周波数解析

次に、棹石のx方向の応答加速度の時間一周波数解析(ウェーブレット解析)により、心棒による補強効果および心棒の寸法・本数の影響を考察する。

石材の固有振動数を把握した上で、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伝達関数を求めた(図-5)。直方剛体の固有振動数は、ロッキング傾斜角に依存することが知られている⁷⁾。すなわち、固有振動数はロッキング傾斜角を生じさせる入力波の特性に依存するので、入力条件を揃えるため震度7加振による伝達関数を示している。棹石のx方向の1次の固有振動数は約2Hzであり、上台は約4Hzと約8Hzに大きなピークを有している。棹石より上台の方が高い振動数の運動が卓越することがわかる。

棹石が単体で振動するモデル1では、約2Hzの運動が卓越し、棹石と上台が一体となって振動するモデル2では、より高い振動数の運動が卓越すると考えられる。モデル3、4のように棹石と上台が完全に一体となっていないモデルでは、棹石の相対運動は約2.0Hzで、一体として運動するときはより高い振動数の運動が卓越し、広い領域の振動数において応答が大きいものと予想される。以上のことを念頭において、ウェーブレット解析結果を考察する。

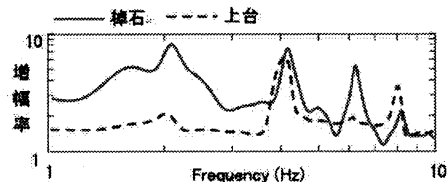


図-5 石材単体の伝達関数

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x方向の応答加速度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1,2,3,4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。

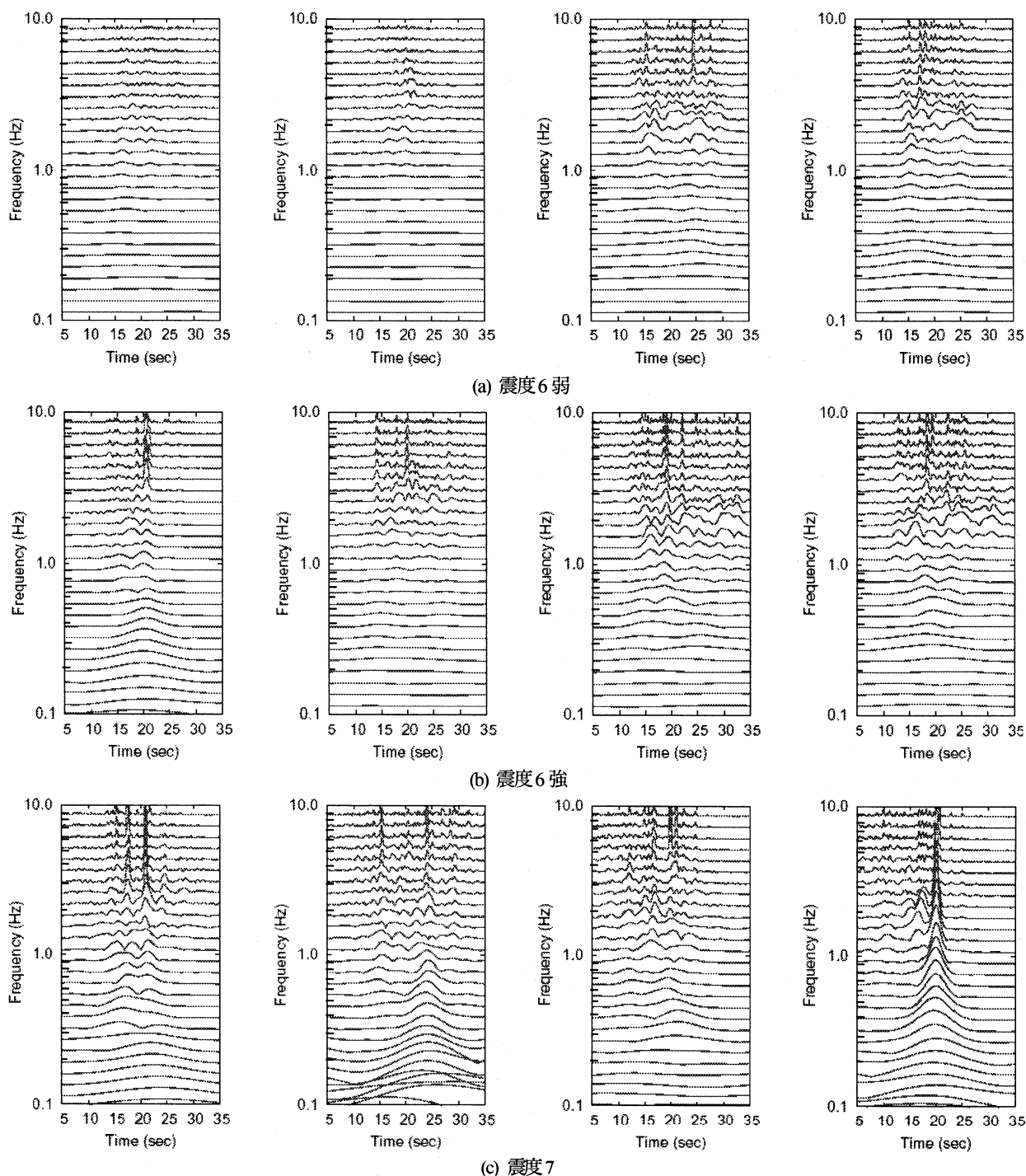


図6 棹石の応答加速度のウェーブレット (左から、モデル1, 2, 3, 4)

(1) 震度 6 弱

震度 6 のウェーブレットを図-6(a)に示す。モデル 1 を基準として比較する。モデル 2 は、心棒により棹石と上台が一体となり振動するため、約 4Hz の高振動数側においてモデル 1 より振幅が大きいことが見て取れる。また、モデル 3 および 4 では、心棒が棹石の振動を抑制できておらず、長い継続時間にわたって、振動が収まらないことがわかる。モデル 3 と 4 にほとんど違いはみられない。

(2) 震度 6 強

震度 6 強のウェーブレットを図-6(b)に示す。モデル 1 の振幅が約 20 秒後に収まっているのは、棹石が約 20 秒後に

転倒して静止したからである。転倒しないモデル 2~4 は、20 秒以降も運動を続けるが、心棒が太く長いモデル 2 はモデル 3,4 よりも早い時間に振動が収束している。また、モデル 3 および 4 は、約 2.0Hz における振幅がモデル 2 よりも大きい、これは棹石の上台に対する相対運動に対応していると考えられる。震度 6 強においても、モデル 3,4 の違いは認められない。

(3) 震度 7

震度 7 のウェーブレットを図-6(c)に示す。モデル 1,2,3,4 の転倒時間は、それぞれ約 21, 24, 20, 20 秒後であり、転倒以前の応答のみを比較する。モデル 1 は 1.0Hz 以下の

成分を比較的多く含んでおり、一方、モデル2は2.0Hz以下の成分はほとんどない。モデル3,4は、1.0Hz以下の成分もあるが、2.0Hzの成分が相対的に大きい。これらから、モデル2は棹石単体の挙動が抑制されており、棹石と上台のほぼ完全な一体化がなされていること、モデル3および4は、不完全な一体化であり、棹石単体の運動が抑制できていないことがわかる。

以上のように、モデル1は棹石が独立した運動、モデル2は棹石と上台が一体とした運動、モデル3および4は、一体とした運動の中に、棹石の相対運動が認められること、モデル3と4の違いはほとんどないことが確認でき、画像から考察したことと同じ結論が導かれた。

4. 数値実験による最適な心棒の寸法及び補強案の検討

4.1 解析概要

本節では、3次元個別要素法⁴⁾により、モデル1~4の震度6弱、6強、7の地震動に対する地震時挙動を再現し、振動台実験結果との比較を行った。

さらに、モデル2とモデル3の挙動の違いが、心棒の太さの違いによるものなのか、それとも長さの違いによるものなのかについて検討するため、モデル2で用いた直径18mmの心棒の長さを150mm、200mm、250mmと短くしたモデル、モデル3で用いた直径10mmの心棒を200mm、250mm、400mmと長くしたモデルについて、震度7の地震動を入力した数値解析を実施した。新たに追加したモデルを表-5に示す。

最後に、上台と中台の間を心棒により連結したモデルの解析を行い、震度7にも耐えうる補強案の提案を行った。

表5 心棒の直径と長さの異なる墓石のモデル名
(括弧内は実験結果)

	直径18mm	直径10mm
長さ150mm	モデル2a	モデル3 (一体*)
長さ200mm	モデル2b	モデル3b
長さ250mm	モデル2c	モデル3c
長さ400mm	モデル2 (一体*)	モデル3d

*一体： 棹石と上台が一体となって転倒

表6 接触パラメータ(単位質量あたり)

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

4.2 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-6に示す値⁴⁾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。

4.3 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。Cundall⁸⁾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)に本研究で用いる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本研究のような場合には目安の1つにしかならない。そこで、この条件式を満足し、かつその精度を向上させる値として、1オーダー小さい $dt=1 \times 10^{-4}(\text{sec})$ を用いて解析を行った。

4.4 モデル化

(1)モデル1 (無補強墓石)

棹石、上台、中台、芝台は、それぞれ1個の直方体要素でモデル化した。実験に用いた棹石、上台、中台、芝台も直方体であるので、実験模型と全く同じ形状である。水鉢は厳密には直方体でないが、幅484mm×奥行き152mm×高さ272mmの直方体でモデル化し、質量を等しくした。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)モデル2~4 (補強墓石)

実験模型では、棹石の底部と上台の上面に、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。

4.4 振動台実験再現結果

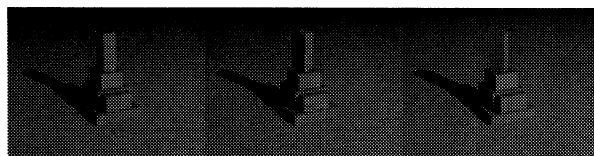
(1)モデル1 (無補強墓石)

図-7に、モデル1が震度6弱、6強、7を経験したときの10、20、30秒後の様子を示す。解析結果では、震度6弱では棹石が上台の上で滑りながら回転したものの転倒には至らず、震度6強、震度7では棹石がロッキングして倒壊に至るという結果となった。これは、写真-2に示した振動台実験結果に対応している。震度6弱では、回転の方向まで再現できており、震度6強では棹石の転倒方向も再現できた。震度7では、棹石の転倒方向は実験と解析とで逆であるが、転倒の有無は再現できた。

(2)モデル2 (直径18mm, 長さ400mmの心棒1本)

図-8に、モデル2が震度6弱, 6強, 7を経験したときの10, 20, 30秒後の様子を示す。解析結果では、震度6弱, 6強では棹石と上台が一体となって中台上で僅かに滑るものの転倒には至らず、震度7では棹石が上台と一体となって中台から滑り落ちるという結果になった。これは、写真-3に示した振動台実験結果に対応している。震度6強の移動量や震度7の転倒方向が、実験と解析とで一致していないが、実験では石材間の衝突により発生した石材の破片が散らばっていて、より滑りやすくなっていたため、実験のほうが移動量が多く、転倒方向にも差が生じたものと考えられる。

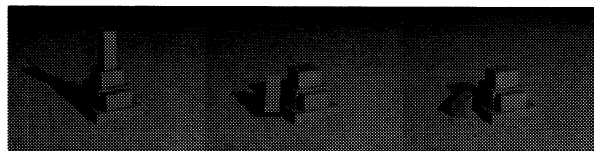
以上のように、モデル1,2では、いずれの震度に対して、転倒する・しないが再現できており、かつ転倒したケースの転倒メカニズムも再現できた。



(a)震度6弱

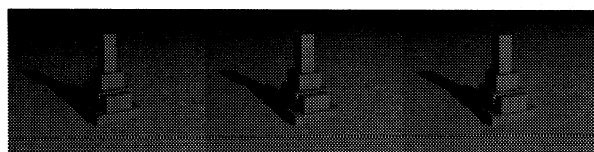


(b)震度6強

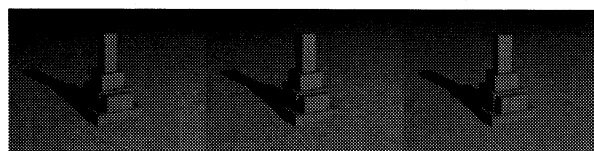


(c) 震度7

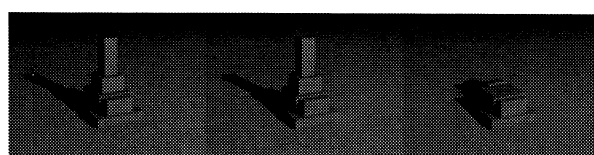
図7 モデル1の解析結果 (左から, 10, 20, 30秒後)



(a)震度6弱



(b)震度6強



(c) 震度7

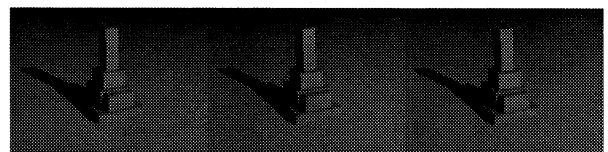
図8 モデル2の解析結果 (左から, 10, 20, 30秒後)

(3)モデル3 (直径10mm, 長さ150mmの心棒1本)

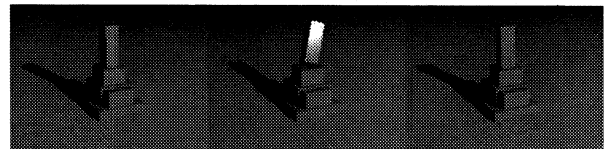
図-9に、モデル3が震度6弱, 6強, 7を経験したときの10, 20, 30秒後の様子を示す。

震度6弱において、いずれの石も転倒せず移動量も小さいことが、解析で再現できている。震度6強においては、図-9(b)の中央の図から明かなように、棹石が心棒によって上台と連結されているにも関わらず、上台の上でロッキングしていることが再現できおり、写真-4(c)で述べた運動モードと非常によく対応している。加振終了後には棹石が元に戻っている様子も、図-9(b)の右の図のとおり再現できている。震度7では、図-9(c)の中央の図から明かなように、棹石の心棒が抜けて、棹石のみが転倒している。この転倒モードは写真-4(f)に示す転倒モードとは異なるものであるが、写真-1(d)に示すように過去の地震の被害調査で確認された転倒モードである。

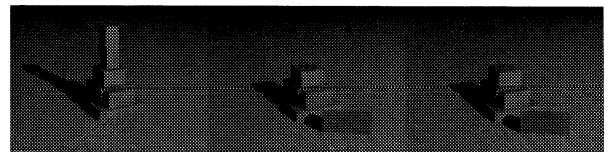
棹石が心棒から抜け出て転倒に至るメカニズムを図-10に示す。棹石がロッキングにより心棒とともに浮き上がり(図-10(a))、心棒が上台の穴に戻って棹石から外れた後(図-10(c))、再度心棒の上に被さろうと棹石が元に戻ろうとしたときに、心棒の先端が棹石の穴以外の底面に引っかかり(図-10(d))、その反動とその後の地震動により棹石が転倒に至る(図-10(f))というものであった。棹石が心棒の上に被さるかどうか、転倒モードを分けると考えられる。



(a)震度6弱

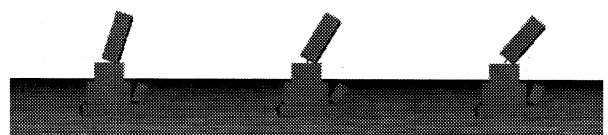


(b)震度6強



(c) 震度7

図9 モデル3の解析結果 (左から, 10, 20, 30秒後)



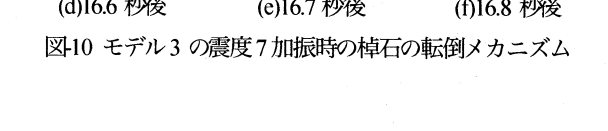
(a)16.3秒後



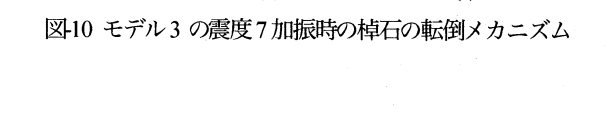
(b)16.4秒後



(c)16.5秒後



(d)16.6秒後



(e)16.7秒後



(f)16.8秒後

図10 モデル3の震度7加振時の棹石の転倒メカニズム

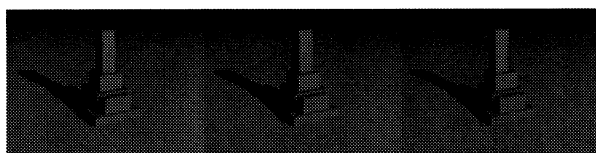
(4)モデル4 (直径 10mm, 長さ 150mm の心棒 2 本)

図-11 に、モデル4 が震度 6 弱, 6 強, 7 を経験したときの 10, 20, 30 秒後の様子を示す。

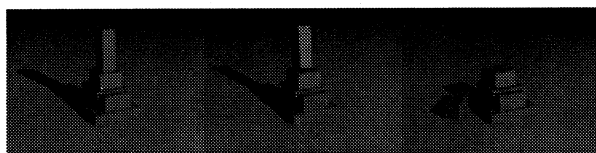
震度 6 弱において、いずれの石も転倒せず移動量も小さいことが、解析で再現できている(図-11(a), 写真-5(b))。震度 6 強においては、心棒の本数の違いが解析で再現された。2 本の心棒で連結されているため、心棒周りの棹石の回転はみられず(図-11(b)中央), 心棒 1 本のモデル 3(図-9(b)中央)よりも棹石のロッキングの程度は小さい。震度 7 では、図-11(c)の右の図から明らかなように、棹石が心棒から抜け出して転倒している。この転倒モードは写真-5(f)に示す実験の転倒モードとは異なるものである。最終的に転倒してしまうものの、モデル 3 と比べ転倒に至る時間が遅くなっており(図-9(c), 11(c)), 解析結果には心棒の本数の違いが現れている。



(a)震度 6 弱



(b)震度 6 強



(c) 震度 7

図-11 モデル4 の解析結果 (左から, 10, 20, 30 秒後)

4.5 直径と長さの異なる心棒で連結された墓石の解析結果

表-7 に、直径と長さの異なる心棒で連結された墓石モデルに震度 7 の地震動を入力した場合の転倒状況の解析結果を示す。図-12 に、心棒の長さ 150mm, 200mm, 400mm のものについて、転倒後の様子を図示する。

心棒の直径が 18mm のときは、長さが 150mm (モデル 2a) でも棹石が抜け落ちることなく、棹石と上台が一体となって転倒に至った。長さが 150mm, 200mm, 400mm の心棒に対する転倒後の様子を図-12(a)(b)(c)に示す。棹石と上台は一体となって転倒に至った。

一方、心棒の直径が 10mm のときは、長さが 200mm までは棹石が心棒から抜け落ちて転倒した。長さが 250mm 以上になると、棹石と上台は一体となって転倒した。長さが 150mm, 200mm, 400mm の心棒に対する転倒後の様子を図-12(d)(e)(f)に示す。

いずれのモデルも転倒に至ったことに違いはないが、心棒の寸法によって転倒モードが異なることが解析によっても確かめられた。直径が 18mm と太い心棒を用いる場合は、

150mm の短い心棒で連結効果が得られること、直径が 10mm と小さい心棒を用いる場合は、連結効果を発揮するには 250mm 以上の長さが必要であることがわかった。

施工の簡便性の観点から、適切な心棒の直径・長さについて考察する。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、クレーンなどで吊り上げて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。

表-7 心棒の直径と長さの異なる墓石の
数値解析結果 (括弧内は実験結果)

	直径18mm	結果	直径10mm	結果
長さ 150mm	モデル2a	一体	モデル3 (一体)	棹石
長さ 200mm	モデル2b	一体	モデル3b	棹石
長さ 250mm	モデル2c	一体	モデル3c	一体
長さ 400mm	モデル2 (一体)	一体	モデル3d	一体

一体： 棹石と上台が一体となって転倒

棹石： 心棒から抜け落ちて棹石のみ転倒



(a)モデル 2a



(b)モデル 2b



(c)モデル 2



(d)モデル 3



(e)モデル 3b



(f)モデル 3d

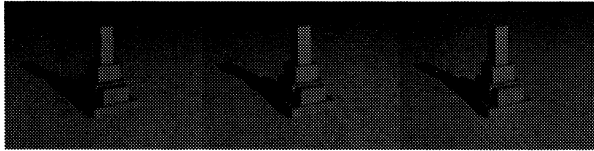
図-12 直径と長さの異なる心棒を用いた墓石の解析結果(震度 7)

4.6 棹石-上台間 上台-中台間を連結した墓石の解析

前項より、心棒の直径が 18mm の場合は、長さが 150mm でも棹石と上台の連結効果が得られることが確認された。しかし、上台と中台の連結が施されていなかったため、棹石と上台は一体となって転倒した。そこで、上台の下面と中台の上面にモデル 2a と同じ寸法の穴をあけ、直径 18mm, 長さ 150mm の心棒を挿入して連結することを想定した。図-13 は、このようにして棹石-上台間のみならず、上台-中台間も連結した墓石の加振 10, 20, 30 秒後の様子であり、どの石も転倒に至らないことがわかった。このように、上台-中台間の連結も併せて実施することで、震度 7

に耐えられる可能性のあることが示された。

写真-1(b)に示すように、石材店の展示場の墓石は、ただ積み上げているだけなので強震時に甚大な被害が発生するが、直径 18mm、長さ 150mm の心棒を棹石—上台間と上台—中台間に 1 本ずつ挿入するだけで、震度 7 の転倒を防げる可能性がある。石材店で墓石の物損被害、および展示品の見学に訪れた人々や従業員の人的被害を防ぐためにも、心棒を用いた簡便な方法で補強対策をとることが必要であると考えられる。



(a)10 秒後 (b)20 秒後 (c)30 秒後

図13 棹石—上台間と上台—中台間を直径18mm、長さ15mmの心棒で連結した墓石の解析結果（震度7）

5. まとめ

本研究では、心棒により連結補強された墓石の耐震性を評価するために、実寸大の墓石試験体を作成し、振動台実験を行った。心棒の直径、長さおよび本数の異なる3通りのモデルの地震時挙動を、無補強墓石の実験結果と比較することで、心棒の寸法と本数が耐震性に与える影響について検討を行った。

振動台実験の結果、無補強では転倒に至る震度6強の地震動でも、心棒で補強することにより転倒しないことがわかった。しかし、さらに強い震度7では、棹石と上台が一体となって転倒することがわかった。転倒の有無についてのみ比較すれば、心棒の寸法と本数に関係なく、同じ結果となったが、加振中の挙動は、心棒の寸法と本数により異なったものであった。細く短い心棒が1本だけ挿入された場合は、連結が不完全であり、棹石は上台に対して相対運動を起こし、心棒周りの回転運動も起こすことがわかった。心棒を2本に増やすことで、心棒周りの回転運動を抑えることはできたが、棹石の相対運動は防げなかった。一方、太く長い心棒を用いた場合は、1本であっても、棹石と上台の連結効果が発揮され、棹石は相対運動も回転運動も起こすことなく、棹石と上台が一体となって転倒した。このような振動メカニズムの違いは、撮影された画像だけでなく、ウェーブレットの分析結果からも明らかとなった。

以上のように、振動台実験によって、同じ心棒1本による補強でも、心棒の直径と長さの違いによって、振動メカニズムが異なることが明らかとなった。連結効果を得るには、適切な心棒の寸法の決定が必要であることがわかった。

適切な心棒の寸法を決定するために、実寸大モデルを用いた実験を実施することは、実現象把握の面から重要であるが、多大な費用と労力がかかる。そこで、振動台実験の代わりとなる解析手法として、3次元個別要素法（DEM）を適用して、適切な心棒の寸法の検討を行った。

検討に際して、まず、解析結果の信頼性を確認する必要

があるので、振動台実験を実施した4モデルの挙動の再現を試みた。その結果、転倒の有無については解析によって再現が可能であることを確認した。モデル3と4に震度7を加振した場合は、棹石が心棒から抜け落ちるという実験では確認できなかった転倒モードが解析で得られたが、これは過去の地震調査で明らかにされている現象であり、起こりうる妥当なモードであると判断した。解析結果の信頼性を確認した後、振動台実験では実施できなかった、直径が太く短い心棒、直径が細く長い心棒により補強された墓石の地震時挙動の再現を試みた。その結果、直径が18mmと太ければ、150mmと短い心棒で連結効果が発揮されること、直径が10mmと細ければ、250mm以上の長い心棒が必要であることがわかった。心棒が長いと設置時に多くの労力を要するが、直径を太くすることで、労力の少ない短い心棒を採用できることがわかった。さらに、上台と中台の間に直径18mmで長さ150mmの心棒を設置すれば、震度7でも転倒に至らないことも検証できた。

今後の課題として、心棒の変形および強度劣化を考慮した検討を実施したいと考えている。

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。京都大学の辻啓氏には、実験とデータ整理にご協力いただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 翠川三郎、三浦弘之、石井一徳、鬼頭順三、駒澤真人、佐藤慶一：2007年新潟県中越沖地震での地震動強さと強震観測点における地盤震動特性について、東京工業大学地震工学研究レポート、No.103、pp.45-54、2007.09.
- 3) 日本石材産業協会：地震に強いお墓の報告書、2005.6
- 4) 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.
- 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) Housner, G.W.: The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes, BSSA, 53(2), pp.403-417, 1963.
- 8) 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.

(2008年4月14日 受付)