

連結・免震による墓石の耐震性向上効果の実験的検証

清野純史¹・三輪滋²・古川愛子³

¹博(工) 京都大学准教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²博(工) 飛鳥建設株式会社 防災 R & D センター技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

E-mail: Shigeru_Miwa@tobishima.co.jp

³博(工) 九州大学助教 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: furukawa@doc.kyushu-u.ac.jp

地震時の墓石の転倒現象については、実験と解析の両面から多くの研究が行われているが、耐震補強された墓石の地震時挙動や補強効果について検証を行った研究は見当たらない。本研究では、墓石の代表的な耐震補強工法の効果を検証することを目的として、墓石の実寸大模型を用いた振動台実験を実施した。現在多く採用されている耐震補強工法の中から、連結工法と免震工法に着目した。連結工法の中からダボ工法と長ボルト工法、免震工法の中から免震金具工法、免震ゴム工法、エアーダンパー工法を採用した。デジタルカメラで撮影された画像と墓石試験体の加速度記録から、各補強工法の効果と問題点について検討・考察を行った。連結工法である長ボルト工法と免震工法である免震金具工法の効果が確認できた。

Key Words : gravestone, interlocking reinforcement, seismic isolation system, seismic performance, shake table test

1. はじめに

我が国の墓石は単に石を積んでいるだけの簡単な構造のものが多く、特別に補強を施しているもので無い限り、地震が起こると転倒しやすい。2004年の新潟県中越地震での墓石の被害は甚大なものであり、2005年の福岡県西方沖地震では転倒した墓石の下敷きになってけがをした人がいた。このように、地震による墓石の転倒は、単に墓石の破損・損壊という物的被害に収まらず、人的被害にもつながる非常に深刻な問題である。それにも関わらず、未だに多くの既存墓石が地震に対して無対策のままで放置されている。最近では、墓地が緊急避難場所に指定されている場合もあるため、二次災害を防止する意味でも墓石の耐震性の検討は重要課題である。地震に強い墓石の構造及び補強方法について検討することは非常に重要であると考えられる。

地震時の剛体および墓石の転倒現象については、過去に数多くの研究が行われている。金子ら¹⁾は、剛体の幅と高さの比が転倒率に与える影響が大きく、寸法の影響はあまり大きくないこと、剛体の転倒率は、低振動数が卓越する地震動の場合は最大加速度との相関が大きく、高振動数が卓越する地震動の場合は最大速度との相関が大きいことを明らかにしている。また筆者ら²⁾は、個別要素法を用いた検討により、和型墓石と洋型墓石の転倒メカニズムの違い

を明らかにしている。他に、地震後の墓石の転倒率から地震動強さを推定している研究もある³⁾。

墓石がロッキング運動により転倒を起こさなくても、移動量が大きく下の石から落下するケースもあるため、地震動と墓石の移動量に関する検討も重要である。山本ら⁴⁾は、正弦波入力による無補強墓石の振動台実験により、入力の振動数と墓石の移動量には線形関係が認められ、振動数の増加に伴い移動量も増加することを示している。

このように、剛体単体や無補強墓石の地震時挙動については、実験と解析の両面から多くの研究が行われているが、現状では、耐震補強された墓石の地震時挙動や各種補強工法の効果について検証を行った研究は見当たらない。最近では墓石の耐震補強に関する意識が徐々に高まりつつあり、様々な耐震補強工法が提案され、実用化されてきている。補強された墓石の地震時挙動は、剛体単体の地震時挙動のように単純ではなく、振動台実験によって補強効果を検証する必要があると考えられる。

以上を鑑み、本研究では、各種耐震対策の効果を検証することを目的として、墓石の実寸大模型を用いた振動台実験を実施した。現在多く採用されている墓石の耐震工法の中から、連結工法と免震工法に着目した。比較のため、無補強墓石についても実験を行った。デジタルカメラで撮影された画像と墓石試験体の加速度記録から、各種補強工法の効果と問題点について検討・考察を行った。

b) 免震ゴム工法

免震ゴム工法は、各接合部（棹石 - 上台間，上台 - 中台間，中台 - 芝台間）にゴムを置くだけであり，接着はしない．建築物に採用されている積層ゴムよりも，反発力を軽減して設計されている．ゴムの剛性は計測していない．試験体の概観を図-3(c)に示す．各石材間に 10cm 角で厚さが 2mm のゴムを 4 箇所，計 12 枚設置した．

c) エアーダンパー工法

エアーダンパー工法とは，2 重構造の筒状治具(穴の直径 32mm)の中に，ダンパー機能を有するステンレス製のワイヤー(直径 18mm，長さ 160mm)を挿入したものを，各接合部（棹石 - 上台間，上台 - 中台間，中台 - 芝台間）に接着し，更に各石材間に 3mm の発泡シートを挟み置いて，墓石を一体化・免震化する工法である．試験体の概観を図-3(d)に示す．

3. 実寸大模型を用いた墓石の振動台実験

(1) 試験体の設置方法

試験体は，和型 6 モデル，洋型 2 モデルの計 8 墓石である．試験体は，振動台の中央に設置した．棹石が振動で転落することを防ぐため，棹石上につり金具を備え，天井クレーンからワイヤで吊った．図-4 に各試験体の入力地震動の方向を示す．棹石の頂角部 3 箇所には加速度計を設置し，それぞれの位置を”北”，”南”，”東”と名づけた．図-4 に各加速度計の設置位置を併せて示す．

(2) 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．墓石の各石に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⁶⁾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⁷⁾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-5 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．

水平動と上下動を異なる指針から作成したが，道路橋示方書と NTT の水平動の応答スペクトルは形状も値も比較的近いことから，水平動と上下動の

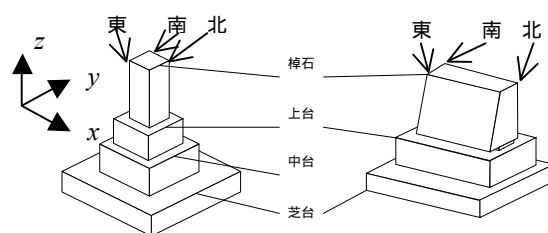
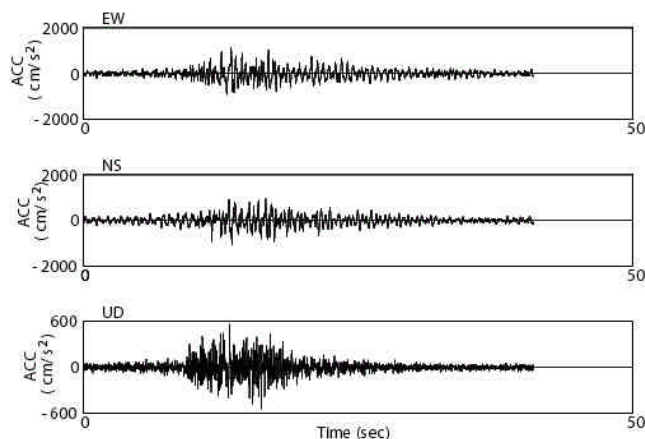
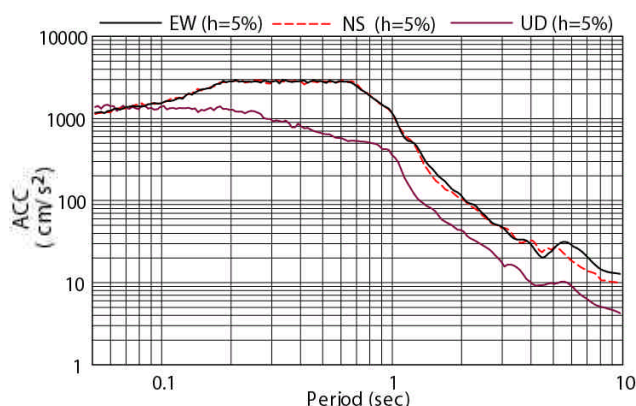


図-4 墓石試験体の設置方向と加速度計の設置箇所



(a) 加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル

図-5 模擬地震動の加速度波形と加速度応答スペクトル

表-2 各震度に対する入力波の最大加速度(cm/s²)

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

組み合わせは適切であると判断した．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．作成した加速度時刻歴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-4 に示す x，y，z 方向とした．

表-3 試験体の転倒状況

試験体	震度 6 弱	震度 6 強	震度 7
無補強(和型)		×	×
無補強(洋型)			×
ダボ工法(和型)			×
ダボ工法(洋型)			
長ボルト工法	○	○	○
免震金具工法	○	○	○
免震ゴム工法	×	-	-
エアードンパー工法		-	-

○：変化無，　　：変位・ずれが生じる，×：転倒，-：実験せず

4. 振動台実験結果

(1) 各試験体の転倒状況

各試験体の転倒状況を表-3 示す。

和型墓石に関して、無補強の墓石は震度 6 弱で変位・ずれを生じ、震度 6 強以上で転倒した。ダボ工法は、震度 6 強では滑ったものの転倒はしないが、震度 7 では転倒してしまい、効果が低いことがわかった。長ボルト工法と免震金具工法を施した場合は、震度 7 でも転倒せず、残留変位も生じず、耐震効果が確認された。免震ゴム工法を用いた場合は、無補強墓石より激しく運動し、震度 6 弱で倒壊に至った。エアードンパー工法は、震度 6 弱で無補強墓石と同様に変位・ずれを生じた。震度 6 弱で免震ゴム工法とエアードンパー工法の効果が確認できなかったため、震度 6 強、7 の加振は行わなかった。

洋型墓石に関して、無補強の墓石は震度 6 弱、6 強で変位・ずれを生じ震度 7 で転倒に至るが、ダボ工法を施すことによって震度 7 でも転倒しない。しかし滑りは生じており効果は小さいことがわかった。

(2) 各試験体の地震時挙動

実験時、デジタルカメラの動画機能を用いて墓石挙動の撮影を行った。画像から各種補強工法の効果を明らかにする。

a) 無補強墓石（和型）

図-6 に震度 6 弱、6 強、7 加振後の墓石の状況を示す。震度 6 弱において棹石が大きなロッキング運動を起こしながら大きく移動した(図-6(a))。震度 6 強では、激しくロッキングを起こし棹石および水鉢が転倒に至った(図-6(b))。震度 7 では、更に一層ロッキングの激しさが増し 15 秒後に棹石が転倒した(図-6(c))。いずれも、慣性力による転倒モーメントが、自重による抵抗モーメントに打ち勝って、転倒を起こしたものと考えられる。

棹石は高さ 636mm、幅 242mm であるので、地震の慣性力と自重によるモーメントの釣合式から求まる静的転倒加速度は 372gal である。しかし、最大加速度が 500gal 超の震度 6 弱の地震動では転倒に至らず、静的な釣合式では評価できないことが分かる。

b) 無補強墓石（洋型）

図-7 に震度 6 弱、6 強、7 加振後の墓石の状況を示す。震度 6 弱、6 強では棹石・上台が水平面内で回転を生じた(図-7(a),(b))。震度 7 では、棹石が上台の上で大きく滑り、20 秒後に棹石が上台から落下した(図-7(c))。衝突時に石が破損し、破片が飛散した。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。よって震度 7 では、和型が転倒した 15 秒後でも棹石は転倒に至ることはなく上台の上で滑り続け、20 秒後に上台から滑り落ちている。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、棹石が上台から滑り落ちるというものである。

c) ダボ工法（和型）

図-8 に震度 6 弱、6 強、7 加振後の墓石の状況を示す。震度 6 弱・6 強では転倒はしなかったものの、棹石と上台が一体となって中台上で滑った(図-8(a),(b))。震度 7 では上台と棹石が一体となって中台から落下した(図-8(c))。ステンレス棒による棹石と上台の一体化により重心の位置が下がり、無補強墓石に比べて抵抗モーメントは増したが、震度 7 の大きな地震動に対しては抵抗できなかった。上台 - 中台間、中台 - 芝台間の補強も併せて行う必要があると考えられる。

d) ダボ工法（洋型）

図-9 に震度 6 弱、6 強、7 加振後の墓石の状況を示す。震度 6 弱において、棹石と上台が一体となって芝台の上で滑った(図-9(a))。震度 6 強では棹石 - 上台の変位が更に増した(図-9(b))。震度 7 では棹石 - 上台は芝台の端まで変位した(図-9(c))。主要動の継続時間がもう少し長かったり、地震動レベルがもう少し大きければ、棹石 - 上台は和型墓石と同様、一体となって落ちることが予想される。震度 7 においては、ロッキング運動も示しており、ロッキングによる上台 - 芝台間の衝突により石材の破損が確認された。ダボ工法を施した和型墓石と同様、大きな震度の場合は棹石だけでなく上台まで大きく滑り落下に至る危険性があるため、上台 - 芝台間の補強も併せて行う必要があると考えられる。

e) 長ボルト工法（和型）

図-10 に震度 6 弱、6 強、7 加振後の墓石の状況を示す。連結効果が発揮されどの震度においても棹石、上台、中台は全く動かず、補強効果が確認された。

f) 免震金具工法（和型）

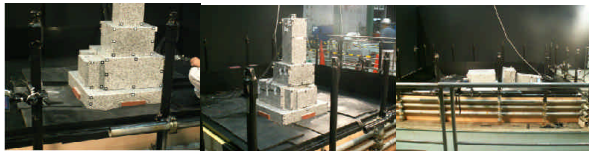
図-11 に震度 6 弱、6 強、7 加振後の墓石の状況を示す。免震金具は石材間を剛に結合するものではなく、あそびがあり運動をある程度許容する。震度 6 弱では棹石がロッキング運動を起こしていた(図-11(a))。震度 6 強、7 では、棹石、上台がロッキング運動を起こし、中台が水平面内の回転運動を起こした。特に棹石のロッキング運動は非常に激しかった。



(a)震度 6 弱加振後 (b)震度 6 強加振後 (c)震度 7 加振後
図-6 無補強墓石(和型)の実験結果



(a)震度 6 弱加振後 (b)震度 6 強加振後 (c)震度 7 加振後
図-7 無補強墓石(洋型)の実験結果



(a)震度 6 弱加振後 (b)震度 6 強加振後 (c)震度 7 加振後
図-8 ダボ工法(和型)の実験結果



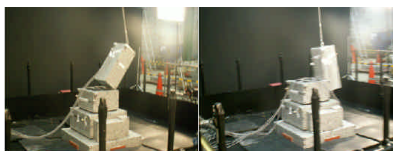
(a)震度 6 弱加振後 (b)震度 6 強加振後 (c)震度 7 加振後
図-9 ダボ工法(洋型)の実験結果



(a)震度 6 弱加振後 (b)震度 6 強加振後 (c)震度 7 加振後
図-10 長ボルト工法の実験結果



(a)震度 6 弱加振後 (b)震度 6 強加振後 (c)震度 7 加振後
図-11 免震金具工法の実験結果



(a)震度 6 弱加振中 (b)震度 6 弱加振後
図-12 免震ゴム工法



(a)震度 6 弱加振中 (b)震度 6 弱加振後
図-13 エアードンパー工法

しかし、運動が発生しても補強部材が元に戻そうと働くため、いずれの震度においても残留変位はほとんど生じなかった(図-11(b)(c))。目だった損傷もなく補強効果が確認された。

g) 免震ゴム工法

無補強墓石でさえ転倒しなかった震度 6 弱において棹石が大きくロッキング運動(図-12(a))を起こし転倒した(図-12(b))。衝撃の緩衝材としての補強材料のはずが、逆に運動を助長するばねのような働きをしていた。

h) エアードンパー工法

震度 6 弱加振中、棹石は大きくロッキング運動を起こし(図-13(a))、全体的に石材間のズレを生じた(図-13(b))。衝撃吸収効果を期待して設置した棹石・上台間の発泡シートが、期待した振動抑制効果とは逆に運動を大きくしており、またエアードンパーは運動の抑制機能を発揮できていないようであった。

(3) 各試験体の最大加速度の比較

本項では、棹石の頂部で記録された加速度波形から最大加速度を求め、定量的に補強効果を検討する。

表-4 に、各墓石の棹石に設置した加速度計で得られた最大加速度を示す。振動台上で計測した加速度波形の最大値も併せて示す。

a) 無補強墓石(和型)

無補強の和型墓石(表-4(a))では、非常に大きな最大加速度が得られている。これは、棹石が上台と衝突したときや、落下したときの衝撃が含まれているためである。非常に大きな衝撃力である。実験でも石材の破損が確認されている。

b) 無補強墓石(洋型)

無補強の洋型墓石(表-4(b))でも、墓石間の衝突・転倒の衝撃のため、非常に大きな最大加速度を示している。しかし、洋型墓石は棹石の高さが低く、和型よりは転倒しにくい形状をしているため、ロッキング運動は激しくなく、大部分のケースにおいて和型の最大加速度を大きく下回っている。

c) ダボ工法(和型)

ダボ工法により補強された和型墓石の最大加速度を表-4(c)に示す。震度 6 弱と 7 では、無補強墓石(表-4(a))に比べ、補強による最大値の低減は確認できない。震度 6 強では、無補強墓石が転倒したのに対しダボ工法(和型)は転倒していないので、全てのデータにおいて無補強墓石に比べて小さい。

震度 7 の最大加速度を比べてみても、無補強墓石と比べてそれほど改善されているとも思えず、棹石と上台を連結するだけの補強は、大きな震度では効果が低いと考えられる。

d) ダボ工法(洋型)

ダボ工法により補強された洋型墓石の最大加速度(表-4(d))は、無補強墓石(表-4(d))に比べて全体的に

小さいが、表-2 の振動台の入力に比べて大きい。これは、棹石と上台がステンレス棒で連結されているだけで、運動が抑えられたわけではないためである。

e) 長ボルト工法

長ボルト工法により補強された和型墓石の最大加速度(表-4(e))は、無補強墓石(表-4(a))に比べて非常に小さい。全ての震度において3方向ともに表-2に示した振動台の最大加速度とほぼ同じレベルである。墓石全体が剛に連結されており、振動台と一体となって振動しているため相対変位は生じていないことを意味している。連結効果が発揮されていることが確認できる。

f) 免震金具工法

免震金具工法で補強された墓石の最大加速度を表-4(f)に示す。震度6弱では、全体的に無補強墓石よりやや小さい最大加速度を示している。本工法はあそびがあるため棹石はロッキング運動を起こすので、石材間が衝突して棹石は衝撃力を受ける。そのため、表-2に示した振動台での最大加速度に比べて非常に大きな値になっており、石材の劣化の恐れがある。しかし、金具で連結しているため無補強墓石よりは運動が抑制されているので、無補強墓石よりは小さな加速度(衝撃)を示していると考えられる。震度6強、7でも転倒していないため、転倒した無補強墓石より小さな最大加速度が得られている。

g) 免震ゴム工法

免震ゴム工法により補強された墓石の最大加速度を表-4(g)に示す。震度6弱ではあるが、ゴムによりロッキング運動が増幅して棹石が転倒したため、転倒しなかった無補強墓石の震度6弱(表-4(a))より非常に大きな値が得られている測定値があり、補強効果は確認できない。

h) エアーダンパー工法

エアーダンパー工法により補強された墓石の震度6弱での最大加速度を表-4(h)に示す。発泡シートの影響で棹石のロッキング運動が増したため、無補強墓石(表-4(a))に比べて全体的に大きな値を示しており、石材間の衝突により石材の破損の恐れがある。

(4) 各試験体の伝達関数の比較

次に、加速度波形から振動台の入力に対する伝達関数を求め、振動数領域における結果の比較から、各補強工法の効果の違いを検討する。

図-14に、棹石の東側に設置した加速度計(図-4)で得られた震度7での伝達関数を示す。免震ゴム工法とエアーダンパー工法については、震度6弱の結果を示す。

a) 無補強墓石(和型)

無補強の和型墓石の伝達関数を図-14(a)に示す。約4Hz以上において増幅率が大きくなっている。約4Hz以上の成分は、加振を開始したころの振動数の

表-4 各試験体の棹石の最大加速度(cm/s²)

(a) 無補強墓石(和型) (b) 無補強墓石(洋型)

	震度6弱	震度6強	震度7		震度6弱	震度6強	震度7
入力X	538	850	1184	入力X	536	861	1167
入力Y	492	827	1080	入力Y	488	824	1092
入力Z	331	648	589	入力Z	296	438	576
北X	8795	52875	39070	北X	1159	4044	6326
北Y	6077	37815	40225	北Y	1925	3668	16047
北Z	10592	34965	25066	北Z	2958	3466	8254
南X	7596	48641	31792	南X	1940	2855	10699
南Y	4140	42010	36674	南Y	864	3266	4420
南Z	7983	35431	34233	南Z	1853	5969	8692
東X	6163	43895	345996	東X	2881	3319	17772
東Y	8542	60067	17703	東Y	810	2938	65520
東Z	6343	23298	30687	東Z	1429	3882	7701

(c) ダボ工法(和型) (d) ダボ工法(洋型)

	震度6弱	震度6強	震度7		震度6弱	震度6強	震度7
入力X	528	851	1163	入力X	536	857	1169
入力Y	489	831	1092	入力Y	490	828	1079
入力Z	302	626	858	入力Z	290	435	576
北X	5773	14885	35343	北X	998	1754	5011
北Y	5538	19050	32551	北Y	1723	2003	4566
北Z	9036	21101	433399	北Z	1822	3157	12585
南X	5297	9298	57022	南X	1696	2522	2927
南Y	4767	9985	39513	南Y	884	1291	3613
南Z	10418	20414	75891	南Z	987	1684	4370
東X	7462	13512	346384	東X	1597	2007	5635
東Y	8829	10808	35966	東Y	1007	1705	4903
東Z	11868	18716	24564	東Z	900	2236	5005

(e) 長ボルト工法(和型) (f) 免震金具工法(和型)

	震度6弱	震度6強	震度7		震度6弱	震度6強	震度7
入力X	528	849	1190	入力X	531	832	1197
入力Y	487	828	1079	入力Y	484	829	1107
入力Z	301	424	587	入力Z	293	448	559
北X	582	893	1200	北X	3462	10623	10917
北Y	586	990	1418	北Y	6338	8894	9470
北Z	314	460	640	北Z	5936	8821	13087
南X	588	1055	1425	南X	3996	9392	12435
南Y	534	845	1141	南Y	3900	7728	10741
南Z	334	509	692	南Z	7067	11916	14759
東X	602	983	1333	東X	4442	8291	9684
東Y	614	886	1194	東Y	2768	14345	11377
東Z	330	550	737	東Z	4377	16855	12872

(g) 免震ゴム工法(和型) (h) エアーダンパー工法(和型)

	震度6弱
入力X	526
入力Y	483
入力Z	291
北X	3946
北Y	20995
北Z	7215
南X	31475
南Y	6497
南Z	7678
東X	12850
東Y	4725
東Z	382826

	震度6弱
入力X	540
入力Y	487
入力Z	295
北X	10944
北Y	10233
北Z	12917
南X	8207
南Y	4790
南Z	12715
東X	8558
東Y	12176
東Z	5978

高い微振動や、石材間の衝突による衝撃を指していると考えられる。約1Hz以下においても増幅率が大きくなっている。約1Hz以下の成分は、転倒に至る前の墓石の運動が大きくなってきているときの振動

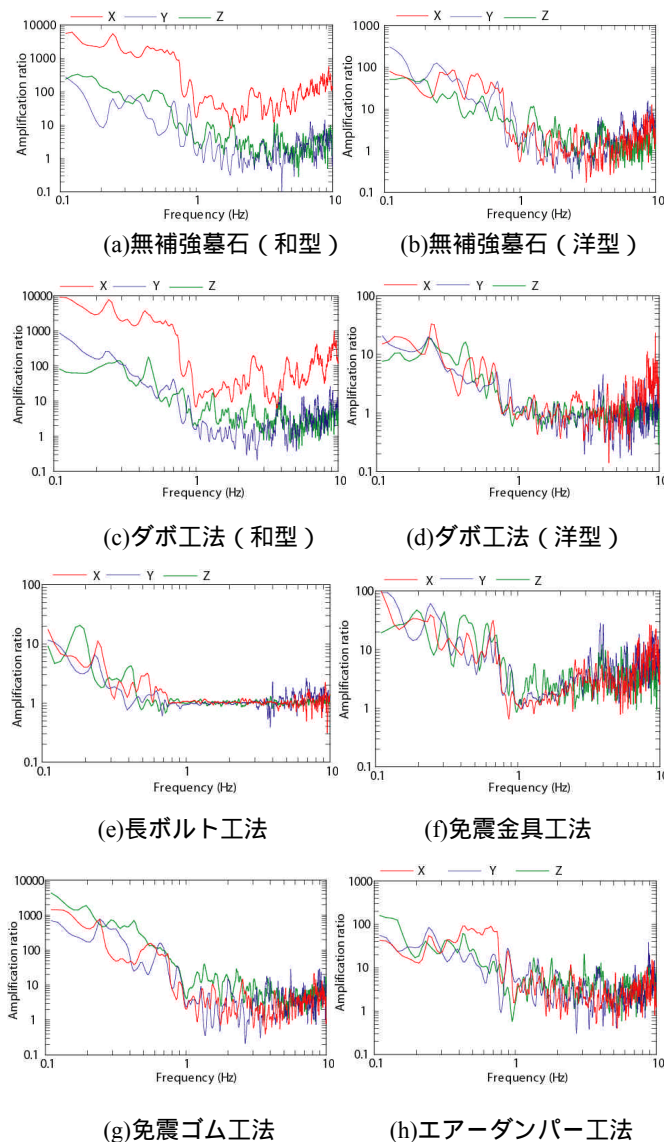


図-14 振動台に対する棹石頂点の伝達関数
(震度 7, (g)(h)は震度 6 弱)

を指していると考えられる。

b) 無補強墓石（洋型）

無補強和型墓石の伝達関数を図-14(b)に示す。約 4Hz 以上と約 1Hz 以下において増幅率が大きくなっている。幅高さ比が小さく和型墓石より倒れにくいので、無補強の和型墓石よりも増幅率は小さい値となっている。

c) ダボ工法（和型）

ダボ工法により補強された和型墓石の伝達関数を図-14(c)に示す。無補強墓石と同様の傾向を示している。増幅率に関して、無補強墓石との違いはほとんど見られず効果が確認できない。

d) ダボ工法（洋型）

ダボ工法により補強された洋型墓石の伝達関数を図-14(d)に示す。増幅率は 0.7Hz ~ 4Hz においてやや 1.0 に近い値を示しており、無補強の洋型墓石に比べて若干の増幅率の減少が見られる。転倒に至る前の墓石の運動を表す 0.7Hz 以下の長周期領域では、

全体的に無補強墓石の 1/10 程度の増幅率を示している。この理由は、無補強の洋型墓石が転倒したのに対し、この墓石が転倒しなかったからである。

e) 長ボルト工法

長ボルト工法により補強された和型墓石の伝達関数を図-14(e)に示す。0.7Hz ~ 4Hz において増幅率がほぼ 1.0 に抑えられている。加振を開始したところの振動数の高い微振動や、石材間の衝突による衝撃を表す 4Hz 以上の振動数領域においても、ほぼ 1.0 に近い増幅率に抑えられている。大きな補強効果が確認される。0.7Hz 以下の比較的周期の長い領域においては、増幅率が大きくなっているが、無補強墓石やダボ工法に比べると遥かに小さい値である。

伝達関数の比較においても、多くの振動数領域において長ボルト工法の効果が発揮されていることが確認された。

f) 免震金具工法

免震金具工法により補強された墓石の震度 7 加振時の伝達関数を図-14(f)に示す。転倒に至る前の墓石の運動を表す 1.0Hz 以下の振動数において無補強墓石より増幅率が小さく、工法の効果が確認できる。しかし、約 4Hz 以上では増幅率は比較的大きな値である。この理由は、金具のあそびの範囲内での微振動や、石材間の衝突による衝撃を指している。この許した運動により、補強材料の強度が低下する恐れもあると考えられる。装置の減衰機能を高め、効率的に運動を抑えるようにすることで、工法の有効性が向上すると考えられる。

g) 免震ゴム工法

免震工法により補強された墓石の、転倒に至った震度 6 弱加振時の伝達関数を図-14(g)に示す。0.7Hz 以下では、震度 7 での無補強墓石の値より大きい成分もあり、転倒に至る前の墓石の運動が大きくなっているときの振動の激しさが確認され、運動を抑えるところか増長させてしまったことが分かる。

h) エアーダンパー工法

エアーダンパー工法により補強された墓石の震度 6 弱における伝達関数を図-14(h)に示す。ほぼ全ての振動数において長ボルト工法の震度 7 での伝達関数より大きく、0.7Hz 以下において免震金具工法の震度 7 での伝達関数より大きい。

最後に、墓石のロッキング運動の卓越振動数について考察する。転倒に至った墓石では約 1Hz 以下に大きな増幅が見られ、約 1Hz 以下の成分が転倒に至るロッキング転倒に関与しているものと考えられる。

5. 結論

本研究では、連結・免震補強された和型・洋型墓石の地震時挙動と耐震補強効果を調べるために、実

寸大模型を用いた 3 次元振動台実験を行った。得られた結論は以下の通りである。

- 1) ダボ工法は、棹石と上台を連結するだけであり、大きな震度では棹石と上台が一体となって転倒してしまう。上台 - 中台 - 芝台間の補強効果も併せて行う必要がある。
- 2) 長ボルト工法のように、全体を連結した工法では、いずれの震度においても転倒防止に成功し、効果が確認された。
- 3) 免震金具工法は、減衰効果を有する免震金具で石材間を連結する工法であり、震度 7 の地震動を経ても転倒に至らず補強効果が表れていた。墓石の運動の発生を押さえるというよりも、発生した運動を低減させることと残留変位を抑えることを重視したものであり、ロッキング運動を許容するため、石材同士の衝突による石材の損傷、および補強部材の破損が課題となると考えられる。
- 4) 免震ゴム工法は、面と面との間に衝撃吸収剤を敷く工法である。一度発生したロッキング運動を抑制する効果は少なく、またゴムによって反発力が発生し、ロッキング運動を助長してしまい効果が確認できなかった。墓石の振動低減に効果的な緩衝材の設計を選択する必要があると考えられる。
- 5) エアーダンパー工法は、ステンレス棒に粘りを持たせ、ダンパー機能を発揮させることによってロッキング運動を低減しようとしたものである。震度 6 弱の地震動に対しては転倒せず耐えたが、発泡シートの影響で棹石のロッキング運動が増し、それに対するステンレス棒の振動抑制効果は確認できなかった。改善策として、ステンレス棒の剛性を大きくしたりダンパー機能を高めることで補強効果が発揮される可能性があると考えられる。

以上により、ダボ工法は強い震度において効果が

小さいこと、免震ゴム工法とエアーダンパー工法は改善が必要であること、長ボルト工法と免震金具工法に補強効果があることが立証された。長ボルト工法と免震金具工法はそれぞれの治具による効果が発揮されて意味を持つ工法であるので、補強部材の劣化に関する検討が今後の課題になると考えられる。

謝辞

本研究は、日本石材産業協会の平成 17 年度委託研究費を得て執り行われたものである。補強工法の説明においては、詳細なアドバイスを得た。協会各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 金子美香，林康裕：剛体の転倒率曲線の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol.536，pp.55-62，2000.10.
- 2) 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.
- 3) 林康裕，北原昭男，平山貴之，鈴木祥之：2000 年鳥取県西部地震の地震動強さの評価，日本建築学会構造系論文集，Vol.458，pp.35-41，2001.10.
- 4) 山本哲朗，鈴木素之，竹田直樹：振動台における地震時の墓石挙動，土木学会地震工学論文集，Vol.27，2002.
- 5) 日本石材産業協会：地震に強いお墓の報告書実験編，2006.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，2002
- 7) 日本電信電話公社：通信装置等の耐震試験方法，1998.12.

(2007.4.6 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF GRAVESTONES WITH INTERLOCKING REINFORCEMENT AND SEISMIC ISOLATION SYSTEM

Junji KIYONO, Shigeru MIWA and Aiko FURUKAWA

Gravestones are easy to overturn during an earthquake. Recently, many reinforcement measures have been developed to prevent gravestones from overturning. In this study, we focus attention on the reinforcement measures using interlocking reinforcement and seismic isolation system. 3-dimensional shaking table tests were done in order to investigate the seismic behavior of the gravestones with the reinforcement. Full-scale Japanese-type and European-type gravestones were tested, and seismic waves with seismic intensity of 6-, 6+ and 7 were used as input ground motions. Effectiveness of reinforcement measures was discussed based on the pictures and acceleration measurements.