

接着・粘着工法により補強された墓石の耐震性に関する実験的検討

Experimental study on seismic performance of gravestones with bonding and adhesive reinforcement

三輪 滋*, 古川 愛子**, 清野 純史***, 樺山 貴昭****

Shigeru Miwa, Aiko Furukawa, Junji Kiyono and Takaaki Momiyama

*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)

**修(工) 九州大学助手 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

***博(工) 京都大学助教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

****修(工) 株式会社浅沼組 (〒543-8688 大阪市天王寺区東高津町 12 番 6 号)

In this study, shaking table tests of full-scale gravestone models were done in order to investigate the seismic behavior and overturning mechanism of the gravestones. Full scale Japanesetype and European-type gravestones were tested, and seismic waves with seismic intensity of 6-, 6+ and 7 were used as input ground motions. Reinforced gravestones with bonding and adhesive reinforcement were also tested and their behaviors were compared with those of un-reinforced ones. Effectiveness of reinforcement measures was discussed based on the pictures and acceleration measurements.

Key Words: gravestone, bonding and adhesive reinforcement, seismic performance, shake table test

キーワード: 墓石, 接着・粘着補強, 耐震性, 振動台実験

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震において、非常に数多くの墓石が転倒・破損したにも関わらず、未だに多くの既存墓石が地震に対して無対策のまま放置されている。2004 年の新潟県中越地震でも、墓石の被害は甚大なものであった。2004 年の中越地方は、2 度にわたる集中豪雨に見舞われ、地盤は変形しやすい状態となっており、墓石の地震被害を大きくしたと考えられる。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。しかも、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となっている。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が必要である。

地震工学の分野での墓石に関する研究を見ると、古くから被害調査の一環として墓石の転倒調査が実施されることが多い。主にその転倒現象から震度分布を推定することを目的として実施される¹⁾。地震動強さの推定においては、墓石の幅に対する高さの比が指標として用いられることが多いが、時々刻々と変化する地震動による墓石の転倒挙動は非常に複雑な現象であるため、一概に幅と高さだけで評価できるものではない。山本ら²⁾は墓石模型を用いた振動台実験を行い、幅高さ比に基づく転倒条件式は一定周波数内のみで成り立つ条件式であり、あらゆる地震動に対して用いることは出来ないことを明らかにしている。また筆者ら³⁾は、個別要素法を用いた墓石の数値解析により、幅高さ比の大きい和型墓石では幅高さ比が墓石の転倒に強い相関を持つが、洋型

墓石では幅高さ比の違いが与える影響が小さいことを示している。

このように、墓石の地震時挙動は非常に複雑であるので、振動台実験によって、挙動を調べるのが最も確実である。また、各種耐震補強効果を検証するのも、実際の地震動を用いた振動台実験によって検証するのが最善である。

以上を踏まえ、本研究では、大地震時の墓石の挙動、および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。まず、代表的な墓石のタイプである和型・洋型墓石について、全く補強のなされていないものを用意し、1995 年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された加速度波形を基に作成された模擬地震動を、震度レベルを変えることによって加振した。次に、現在多く採用されている墓石の耐震工法の中から、接着工法、そしてそれに替わる粘着補強に着目し、その耐震性向上効果を、同じく振動台実験によって検証した。

本研究のように、実大の無補強墓石と耐震補強された墓石を用いて、3 成分加振を行い、体系的に地震時挙動を調べている研究は過去に例がなく、結果自体に有用性があると考えられる。しかし、結果だけを述べるに留まるのではなく、デジタルカメラによって撮影された加振中、加振後の墓石の状態を視覚的に分析することにより、無補強墓石の転倒メカニズムを明らかにし、さらに接着・粘着工法による耐震補強効果を明らかにした。画像だけでは明らかにされないことを補うため、墓石に取り付けた加速度計で計測された加速度応答から、定量的にも補強効果を分析した。

2. 接着・粘着による補強工法と墓石試験体の概要

2.1 墓石モデル

墓石のタイプとしては、和型墓石と洋型墓石の中からそれぞれ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小ぶりのものを採用した。

2.2 無補強墓石の試験体概要

(1)和型墓石

無補強の和型墓石の概観を図-1(a)に示す。ここで、一番上の石から、棹石、上台、中台、芝台と呼ばれる。和型墓石では、全ての石の幅と奥行きが同じである。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。

振動台実験に用いた和型墓石の寸法は、上から棹石(W24.2×D24.2×H63.6cm)、上台(W42.4×D42.4×H27.3cm)、中台(W60.6×D60.6×H30.3cm)、芝台(W84.8×D84.8×H152cm)である。各石の質量を表1に示す。

(2)洋型墓石

無補強の洋型墓石の概観を図-1(b)に示す。ここで、一番上の石から、棹石、上台、芝台と呼ばれる。洋型墓石の配置方法については、すべて左右対称に配置するが、前後は非対称である。図-1(b)からわかるように、棹石の前面にはテーパがあり、天端は2寸(6.1cm)細くなる。また、棹石の下には切り込みがある。

振動台実験に用いた洋型墓石の寸法は、上から棹石(W60.6×(下D30.3、上D24.2)×H48.5cm)、上台(W75.8×D45.5×H21.2cm)、芝台(W84.8×D84.8×H15.2mm)である。各石の質量を表1に示す。

接着・粘着補強された墓石試験体は、図-1に示す無補強墓石と同じ寸法であり、石材間の補強の有無が異なる。

2.3 接着・粘着による墓石の耐震補強工法⁴⁾

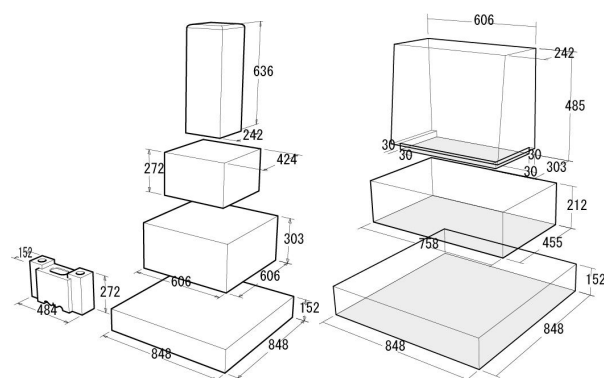
(1)接着工法

接着工法は、各石の接合部(棹石-上台間、上台-中台間、中台-芝台間の接着面)に弾性接着剤(耐震ボンド)を点付けし、補強するものであり、現在多く採用されている工法である。

エポキシ系接着剤の強度は非常に強く、石材表面の引張り強度よりも強い。ため、地震の衝撃で石材の表面が破損してしまうという被災事例が確認されており、耐震補強用としてエポキシ系の接着剤を用いることは不適切であることが分かっている。これに対し、変成シリコンなどの弾性接着剤の強度は、石材の強度と比べても適切な強度であり、弾性接着剤を用いた補強工法が多く採用されている。

(2)粘着工法

粘着工法は、ブチルゴムを用いて各石を粘着させる工法であり、中台はパッカー式(3つのパーツをコの字型に据え置きして中台とするタイプ)である。ブチルゴムとは、長年基幹産業でシール材としてだけ使用されてきたものであり、このブチルゴムの粘着性能を墓石の固定に利用した工法である。



(a)和型墓石 (b)洋型墓石

図-1 無補強墓石(単位 mm)

表-1 各石の質量(単位: kg)

試験体(工法名)	棹石	上台	中台	水鉢	芝台
無補強(和型)	104	130.5	298.8	45.9	315
接着 (和型)					
無補強(洋型)	211.1	197.8			
接着(洋型)					
粘着(和型)	103	130.5	21.4+67.3 × 2+46.9		
全面粘着(和型)	104				

弾性接着剤を用いる接着工法は、長期安全性を保障するために、多くの量の接着剤を使用することとなり、墓石を外すときに困難を伴う作業が必要となる。また、接着剤は、接着効果が発揮されて始めて意味のある補強工法となるが、接着剤の経年劣化の問題が未だに解決されていない。このような背景から、接着剤に変わる工法として、衝撃吸収性・エネルギー吸収性に優れた粘着剤を用いた補強工法が検討されている。ブチルゴムの経年劣化の問題は、接着剤のように深刻ではないが、硬化を起こし硬いゴム状となることがわかっている。

(3)全面粘着工法

全面粘着工法は、特殊ブチルゴムをテープ状、シート状にして石材間に挟む工法である。特殊ブチルゴムとは、木造住宅用として開発され、主に柱と石膏ボードの間に挟んで両者を粘着する用途に利用されている。この特殊ブチルゴムは、通常のブチルゴムにメッシュ繊維を混入したものであり、高い耐久性を有している。

2.4 接着・粘着補強された墓石の試験体概要⁴⁾

(1)接着工法

振動台実験に用いた接着工法により補強された和型・洋型墓石の概観を図-2に示す。

各石材の接着面を、洗浄剤により洗浄処理後、弾性接着剤を施した。接着剤の使用量は、和型の場合、接合面積に対し棹石-上台間で約14.4%、上台-中台間で約7.3%、中台-芝台間で約4.4%である。洋型の場合、棹石-上台間で約8%、上台-下台間で約4.7%とする。接着剤の肉厚は3mmを確保するため、四隅に5cm

角 厚さ 3mm のゴム板を使用し、目地は同じ接着剤を使用した。
各石の質量を表1 に示す。

(2) 粘着工法

振動台実験に用いた粘着工法により補強された和型墓石の概観を図3 に示す。

各接合部の表面を清掃後、プライマー処理を施した。プライマーが完全に乾いてからロープ状のブチルゴムを必要量切りながら石の上に載せ、墓石の据付に最適な厚さになるようにプラスチックハンマーで潰してから石材を据え付けた。ブチルゴムの肉厚 2mm を確保するために 2cm 角で 2mm のゴム板を四隅に置いた。中台は、パッカー方式を選択し、補強にプレートアンカーを併用した。水鉢も同じ要領でブチルゴムを使用し、下台と中台に固着させた。各石の質量を表1 に示す。ここで、中台に関しては3 種類の石を組み立てており中は空洞であり、21.4kg(後部) + 67.3kg×2(両脇) + 46.9kg(水鉢) = 202.9kg となっている。他の和型墓石に対し、粘着工法は中台の質量が軽いモデルとなっている。

(3) 全面粘着工法

振動台実験に用いた全面粘着工法により補強された和型墓石の概観を図4 に示す。

棹石 - 上台間は 220mm 角で 厚さ 3mm のシート状特殊ブチルゴムを使用した。上台 - 中台間および中台 - 下台間は幅 30mm、厚さ 1mm のテープ状特殊ブチルゴムを必要に応じて2 重 3 重にし、各接合部の外周に置き、石材を重ねて据え付けた。水鉢も同じ要領で下台にテープ状特殊ブチルゴムで取り付け付けた。各石の質量を表1 に示す。

接着剤も粘着材も物体同士を接合し一体化するための材料である。接着剤は一般に、初めは粘度の低い液体で接触面積を稼いでいき、被着材を接合した後に固化し、高い接着強さを発現するものである。一方、粘着材は、初めから高粘度で低弾性率の半固体であり、接合形成後もその状態が変わらないもの、すなわち固化の過程が必要でないもののことである。

3. 実物大模型を用いた墓石の振動台実験

3.1 試験体の設置方法

試験体は、(a)無補強の和型・洋型墓石(図-1)、(b)接着工法により補強された和型・洋型墓石(図-2)、(c)粘着工法により補強された和型墓石(図-3)、(d)全面粘着工法により補強された和型墓石(図-4)の、和型4モデル、洋型2モデルの計6 墓石である。

試験体は、振動台の中央に設置した。1.4m×1.4m の鉄板上に芝台を接着し、その上に和型墓石であれば、中台、上台、棹石を、洋型墓石であれば、中台、棹石を設置した。棹石は振動で転落することを防ぐため、棹石上につり金具を掛け、天井クレーンからワイヤで吊っておいた。模型設置の概要を図-5 に示す。図-6 に各試験体の入力地震動の方向を示す。

また、棹石の頂部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-6 に各加速度計の設置位置を併せて示す。計測にはDC レベルからの測定が可能なひずみゲージ式加速度計を用いた。

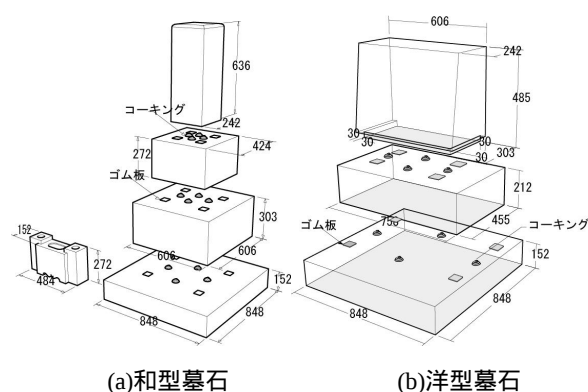


図-2 接着工法により補強された墓石(単位 mm)

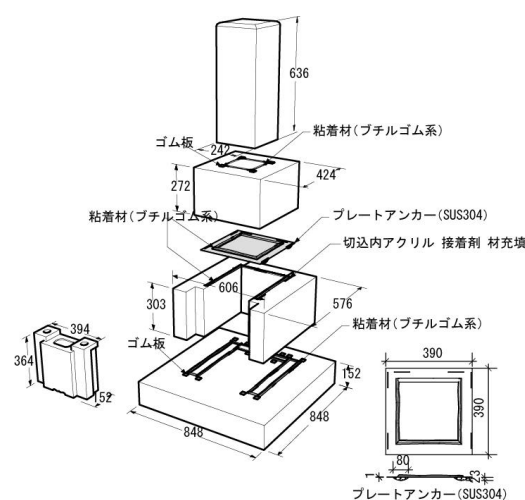


図-3 粘着工法により補強された和型墓石(単位 mm)

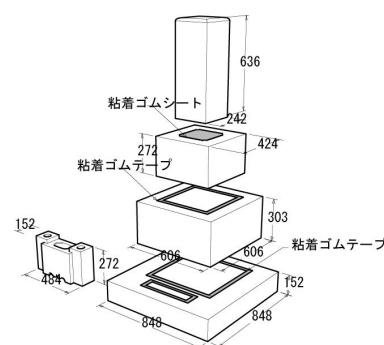


図-4 全面粘着工法により補強された和型墓石(単位 mm)

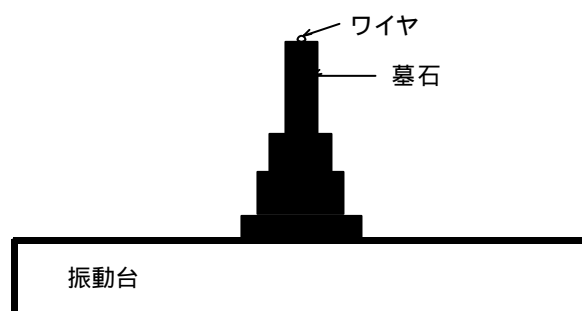


図-5 振動台への墓石試験体の設置方法

3.2 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。図-7 は、兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された記録の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）である。以下本研究では加速度応答スペクトルの減衰定数は原則として 5% で表示する。最大加速度が 800cm/s^2 を越える震度 6 強の記録であるが、この図からもわかるように、兵庫県南部地震の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評価しやすい。

そこで、設計など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模擬地

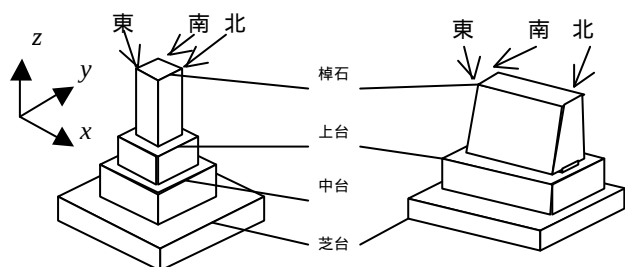
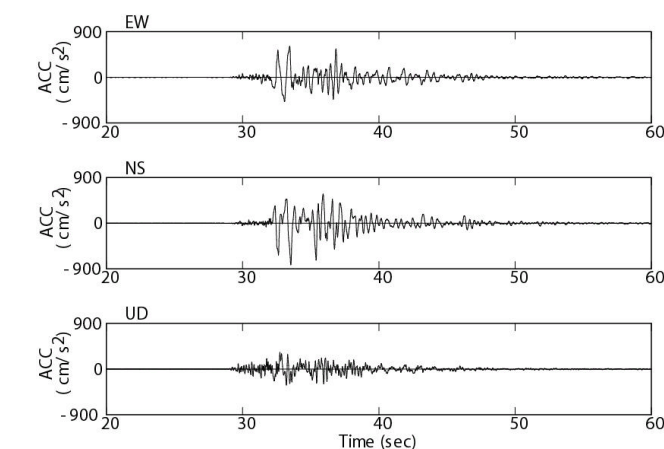
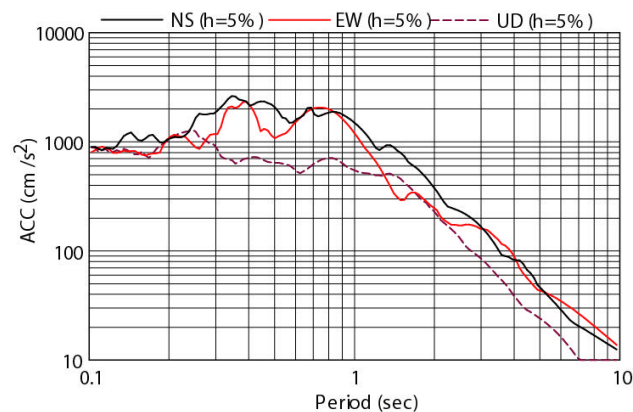


図-6 墓石試験体の設置方向と加速度計の設置箇所



(a) 加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル

図-7 兵庫県南部地震神戸海洋気象台の加速度記録

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。図-8 に上下成分のスペクトルを示す。このように元々のスペクトルは 3% 減衰で規定されている。

こ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-9 に示す。神戸海洋気象台の記録のように凹凸がなく、またスペクトルの強さも周期 1 秒以下では大きい。作成した地震動を基に、加速度レベルを調整して、震度 6 弱・震度 6 強・震度 7 の地震動とした。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-6 に示す x, y, z 方向とした。

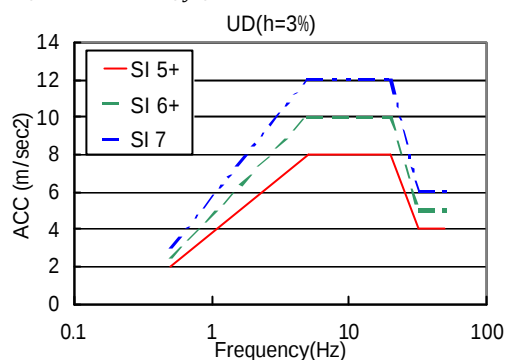
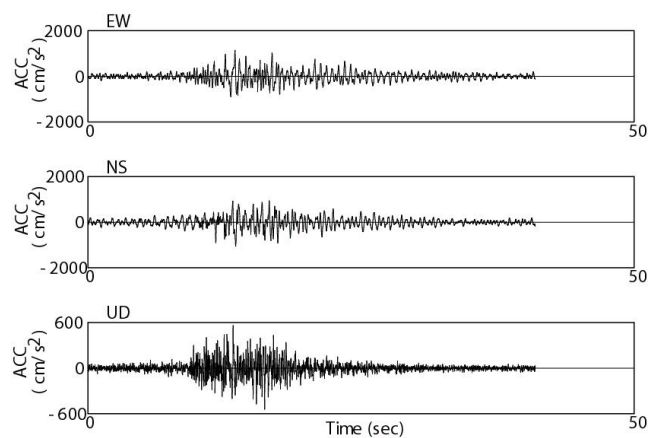
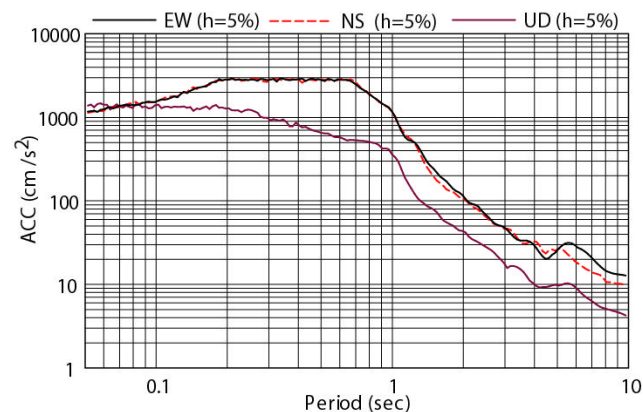


図-8 通信機器の耐震性検討に用いられる加速度応答スペクトル⁶⁾



(a) 加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル

図-9 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	x 方向	y 方向	z 方向
震度 6 弱	5.53E+02	4.84E+02	2.79E+02
震度 6 強	8.94E+02	8.18E+02	4.68E+02
震度 7	1.17E+03	1.05E+03	7.33E+02

4. 振動台実験結果

4.1 各試験体の転倒状況

各試験体の転倒状況を表-3 示す。無補強の和型墓石は震度 6 弱で変位・ずれを生じ、震度 6 強以上で転倒を生じるが、接着工法、粘着工法、全面粘着工法を施すことによって、震度 7 でも転倒しないことが分かる。また、無補強の洋型墓石は、震度 6 弱、6 強で変位・ずれを生じ、震度 7 で転倒に至るが、補強工法を施すことによって震度 7 でも転倒しないことが分かる。表-3 の転倒状況の一覧表だけでも、これら補強工法の有効性が確認できる。

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)			×
接着工法(和型)	○	○	○
接着工法(洋型)	○	○	○
粘着工法(和型)	○	○	○
全面粘着工法(和型)	○	○	○

○：変化無し ○：変位・ずれが生じる ×：転倒

4.2 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。ここでは、デジタルカメラで記録された画像から、無補強墓石の転倒メカニズムと各種補強工法の効果について明らかにする。

(1)無補強墓石（和型）

加振前の状況、および震度 6 弱、震度 6 強、震度 7 の地震動による墓石の状況を図-10 に示す。無補強であり、かつ和型墓石は幅高さ比が大きく元々転倒しやすい形状であるため、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上台の上で大きく移動した(図-10(b))。震度 6 強では、震度 6 弱より激しくロッキング運動を起こし(図-10(c))、棹石および水鉢が転倒に至った(図-10(d))。震度 7 では、更にいっそうロッキングの激しさが増し、約 15 秒後に棹石が転倒した(図-10(e))。図-10 の(d)と(f)とで、震度 6 強と震度 7 後の墓石の転倒状況を比較してみると、震度 7 経験後の方が、棹石が元の位置より遠く離れたところまで飛んでいる。

震度 7 において棹石が転倒した 15 秒後は、入力波形が最初に大きな振幅を迎えるときである。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ロッキング転倒を起こしたものと考えられる。

和型墓石のこのような転倒を防ぐためには、様々な方法が考えられるが、接着・粘着補強は、石がロッキング運動を起こさない

ように接合面を面的に固定するものである。接着剤・粘着剤が主に抵抗しなければならないのは、棹石の回転に伴う接合面法線方向の引張りの力であると考えられる。

(2)無補強墓石（洋型）

加振前の状況、および震度 6 弱、震度 6 強、震度 7 の地震動による墓石の状況を図-11 に示す。無補強であるため、震度 6 弱で既に棹石・上台が水平面内で回転を生じた(図-11(b)において、棹石、上台が時計回り方向に回転している)。震度 6 強では、さらに大きな回転を生じた。震度 7 では、棹石が上台の上で大きく滑り、約 20 秒後に棹石が上台から落下した(図-11(d))。実験では、棹石に穴を開けワイヤーで天井から吊るしていたため、上台から落下した棹石が上台に衝突し、上台をさらに移動させた(図-11(e))。衝突時に石が破損し、破片が飛散した。

無補強和型墓石の転倒メカニズムが、大きな慣性力によるロッキング転倒であったのに対し、図-11 から明らかなように、無補強の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。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。

洋型墓石のこのような転倒を防ぐためには、様々な方法が考えられるが、接着・粘着補強は、石が下の石に対して滑らないように接合面を面的に固定するものである。接着剤・粘着剤が主に抵抗しなければならないのは、水平方向の力であると考えられる。

(3)接着工法（和型）

加振前の状況、および震度 6 弱、震度 6 強、震度 7 の地震動を経験後の墓石の状況を図-12 に示す。接着効果が発揮されたため、どの震度においても棹石、上台、中台は全く動かなかった。しかし、無接着の水鉢については、震度 6 弱では動かなかったものの、震度 6 強では少しずれ(図-12(c)において左側にずれた)、震度 7 では芝台から落下した(図-12(d))。

(4)接着工法（洋型）

加振前の状況、および震度 6 弱、震度 6 強、震度 7 の地震動を経験後の墓石の状況を図-13 に示す。接着効果が発揮されたため、どの震度においても棹石、上台、中台は全く動かなかった。

(5)粘着工法（和型）

加振前の状況、および震度 6 弱、震度 6 強、震度 7 の地震動を経験後の墓石の状況を図-14 に示す。粘着効果が発揮されたため、どの震度においても棹石、上台、中台は全く動かなかった。また、水鉢も粘着補強されていたため、水鉢も全く動かなかった。

(6)全面粘着工法（和型）

加振前の状況、および震度 6 弱、震度 6 強、震度 7 の地震動を経験後の墓石の状況を図-15 に示す。粘着効果が発揮されたため、どの震度においても棹石、上台、中台は全く動かなかった。また、水鉢も粘着補強されていたため、水鉢も全く動かなかった。



(a)加振前

(b)震度6 弱加振後



(c)震度6 強加振中

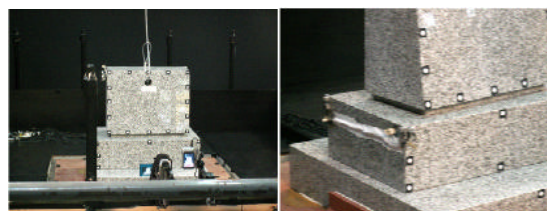
(d)震度6 強加振後



(e)震度7 加振中(15 秒後)

(f)震度7 加振後

図10 無補強墓石(和型)の実験結果



(a)加振前

(b)震度6 弱加振後



(c)震度6 強加振後

(d)震度7 加振中(20 秒後)



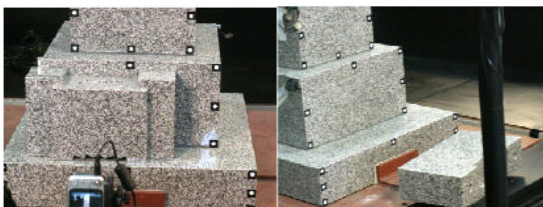
(e)震度7 加振後

図11 無補強墓石(洋型)の実験結果



(a)加振前

(b)震度6 弱加振後



(c)震度6 強加振後

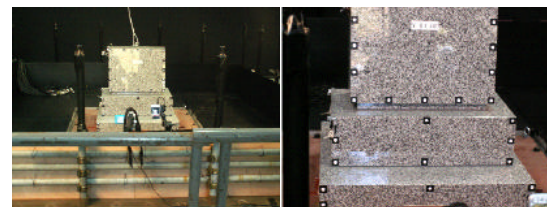
(d)震度7 加振後

図12 接着工法(和型)の実験結果



(a)加振前

(b)震度6 弱加振後



(c)震度6 強加振後

(d)震度7 加振後

図13 接着工法(洋型)の実験結果



(a)加振前

(b)震度6 弱加振後



(c)震度6 強加振後

(d)震度7 加振後

図14 粘着工法(和型)の実験結果



(a)加振前

(b)震度6 弱加振後



(c)震度6 強加振後

(d)震度7 加振後

図15 全面粘着工法(和型)の実験結果

4.3 各試験体の最大加速度の比較

4.2 におけるデジタルカメラで記録した画像では、接着工法、粘着工法、全面接着工法の有効性は示されたが、各種工法の違いまでは明らかとならなかった。そこで、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し、3つの補強工法の効果の違いを検討する。

表4(b)～(g)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。ここで、北Xとは、図6に「北」と示された棹石頂点におけるX方向の加速度記録を意味する。比較のため、入力地震動の最大加速度を表4(a)に再掲する。

(1) 無補強墓石（和型）

無補強の和型墓石(表4(b))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。実験においても、棹石が上台上でロッキングするとき、そして転倒する際に、石材の破損が確認されている。

(2) 無補強墓石（洋型）

無補強の洋型墓石(表4(c))でも、非常に大きな最大加速度が得られている。これは、無補強和型墓石と同様、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。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か、大部分のケースにおいて和型の最大加速度値を大きく下回っている。

(3) 接着工法（和型）

接着工法により補強された和型墓石の最大加速度値(表4(d))は無補強墓石(図4(b))に比べて非常に小さい。

震度6弱と震度6強では、鉛直(Z)方向の最大加速度は、表4(a)に示した振動台の最大加速度とほぼ等しい。水平2(X,Y)方向の最大加速度は、振動台の最大加速度より大きな値となっている。鉛直方向の最大加速度が振動台の加速度と等しいことが示すように、接着効果により墓石全体が剛に接着され、振動台と一体となって振動しており、振動台に対する相対運動はほとんど発生していない。水平方向の加速度が入力動より大きな最大加速度を示しているのは、固定されていない水鉢の衝突が衝撃となって現れているためであると考えられる。

震度7においては、水平2方向だけでなく、鉛直方向の最大加速度も、振動台加速度より大きな値を示している。しかしこれは、墓石が振動台に対して相対運動を生じたのではなく、水鉢が上下方向に運動したことによる衝撃を受けたためであり、加速度波形には衝撃によるパルスが表れている。水鉢を接着することで、石材の破損を防ぐことができると考えられる。

(4) 接着工法（洋型）

接着工法により補強された洋型墓石の最大加速度値(表4(e))は、無補強墓石(図4(c))に比べて非常に小さく、接着工法により補強された和型(図4(d))よりも小さい。

全ての震度において、3方向ともに表4(a)に示した振動台の最大加速度とほぼ同じレベルである。これは、接着効果が発揮され、

墓石間が剛に接合され、墓石が一体となって振動していることを意味している。

(5) 粘着工法（和型）

粘着工法により補強された和型墓石の最大加速度値(表4(f))も、無補強墓石(図4(b))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4(a)に示した振動台の最大加速度とほぼ同じレベルである。粘着効果が発揮され、墓石が一体となって振動していることを意味している。水平動はいずれの震度でも接着工法に比べ小さく、上下動は震度7で小さい。

(6) 全面粘着工法（和型）

全面粘着工法により補強された和型墓石の最大加速度(表4(g))も、無補強墓石(図4(b))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4(a)に示した振動台の最大加速度とほぼ同じレベルである。粘着効果が発揮され、墓石が一体となって振動していることを意味している。水平動はいずれの震度でも接着工法に比べ小さく、上下動は震度7で小さい。また、粘着工法に比べ水平動はやや大きい。

表4 入力地震動および各試験体の棹石の最大加速度(cm/s^2)

(a) 入力地震動

	震度6弱	震度6強	震度7
入力X	5.53E+02	8.94E+02	1.17E+03
入力Y	4.84E+02	8.18E+02	1.05E+03
入力Z	2.79E+02	4.68E+02	7.33E+02

(b) 無補強墓石（和型）

(c) 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
北X	8.80E+03	5.29E+04	3.91E+04	1.16E+03	4.04E+03	6.33E+03
北Y	6.08E+03	3.78E+04	4.02E+04	1.93E+03	3.67E+03	1.60E+04
北Z	1.06E+04	3.50E+04	2.51E+04	2.96E+03	3.47E+03	8.25E+03
南X	7.60E+03	4.86E+04	3.18E+04	1.94E+03	2.86E+03	1.07E+04
南Y	4.14E+03	4.20E+04	3.67E+04	8.64E+02	3.27E+03	4.42E+03
南Z	7.98E+03	3.54E+04	3.42E+04	1.85E+03	5.97E+03	8.69E+03
東X	6.16E+03	4.39E+04	3.46E+05	2.88E+03	3.32E+03	1.78E+04
東Y	8.54E+03	6.01E+04	1.77E+04	8.10E+02	2.94E+03	6.55E+04
東Z	6.34E+03	2.33E+04	3.07E+04	1.43E+03	3.88E+03	7.70E+03

(d) 接着工法（和型）

(e) 接着工法（洋型）

	震度6弱	震度6強	震度7	震度6弱	震度6強	震度7
北X	6.82E+02	1.06E+03	1.63E+03	5.36E+02	9.16E+02	1.21E+03
北Y	6.69E+02	1.33E+03	1.72E+03	5.64E+02	8.88E+02	1.26E+03
北Z	2.82E+02	4.71E+02	1.80E+03	2.90E+02	4.37E+02	6.27E+02
南X	7.60E+02	1.28E+03	2.04E+03	5.89E+02	9.56E+02	1.43E+03
南Y	6.37E+02	1.02E+03	1.55E+03	5.17E+02	8.86E+02	1.15E+03
南Z	3.01E+02	4.78E+02	1.12E+03	3.23E+02	5.17E+02	6.64E+02
東X	7.27E+02	1.23E+03	2.00E+03	5.74E+02	9.26E+02	1.42E+03
東Y	6.46E+02	1.01E+03	1.55E+03	5.07E+02	8.61E+02	1.17E+03
東Z	3.18E+02	5.35E+02	1.57E+03	3.16E+02	5.08E+02	6.66E+02

(f) 粘着工法（和型）

(g) 全面粘着工法（和型）

	震度6弱	震度6強	震度7	震度6弱	震度6強	震度7
北X	5.57E+02	8.55E+02	1.36E+03	6.10E+02	9.81E+02	1.40E+03
北Y	6.25E+02	8.27E+02	1.37E+03	6.10E+02	9.82E+02	1.43E+03
北Z	2.97E+02	4.28E+02	6.30E+02	2.99E+02	4.49E+02	6.30E+02
南X	6.03E+02	9.65E+02	1.40E+03	6.28E+02	9.51E+02	1.41E+03
南Y	5.54E+02	9.12E+02	1.32E+03	5.95E+02	9.83E+02	1.39E+03
南Z	3.11E+02	4.87E+02	6.73E+02	3.36E+02	4.98E+02	6.94E+02
東X	6.28E+02	1.00E+03	1.34E+03	6.22E+02	9.76E+02	1.43E+03
東Y	5.71E+02	9.47E+02	1.41E+03	6.04E+02	1.04E+03	1.46E+03
東Z	3.43E+02	5.41E+02	7.65E+02	3.89E+02	5.30E+02	7.04E+02

4.4 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-16 に、震度 7 で加振したときの、棹石の東側に設置した加速度計(図-6)で得られた振動開始から終了までの全継続時間に渡る伝達関数を示す。凡例は、左から X,Y,Z 方向を示す。

(1)無補強墓石(和型)

無補強の和型墓石の伝達関数を図-16(a)に示す。

約 1Hz 以下において増幅率が大きくなっている。特に、振動台入力波の最大加速度が最大値をとる X 方向の増幅率が非常に大きい。この理由であるが、1Hz 以下で振動するという事は、加振を開始したばかりの振動数の高い微振動や石材間の衝突による衝撃ではなく、転倒に向けて墓石の運動が大きくなってきているときの振動を指しており、入力加速度の大きい X 方向のロッキング運動が卓越したためであると考えられる。無補強墓石は各石が自由に運動し、非常に複雑で非線形性の強い地震時挙動を示すため、X、Y 方向で大きな差が生じたものと考えられる。

約 4Hz 以上においても、増幅率は大きくなっている。この運動は、加振を開始したころの微振動や、石材間の衝突による衝撃を指していると考えられる。

(2)無補強墓石(洋型)

無補強和型墓石の伝達関数を図-16(b)に示す。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難いので、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。約 4Hz 以上においても、増幅率は大きくなっている。この運動は、加振を開始したころの微振動や、石材間の衝突による衝撃を指していると考えられる。増幅率に関して、方向(X,Y,Z 方向)の違いはほとんど見られないが、これは、ロッキング運動が生じにくく、滑り運動が主要なモードであるためと考えられる。

(3)接着工法(和型)

接着工法により補強された和型墓石の伝達関数を図-16(c)に示す。増幅率は、0.7Hz~4Hz においてほぼ 1.0 を示しており、増幅は見られない。4Hz 以上の高い振動数領域では、増幅率が約 3 以下に納まっており、無補強墓石(図-16(a))と比較して、墓石の運動が抑制されていることが分かる。0.7Hz 以下の周期が長い領域でも、増幅率は 10 以下であり、墓石の運動が抑制されていることが分かる。接着効果が発揮され、転倒に向かう振幅の大きい長周期の振動が励起されないためと考えられる。

増幅率に関して、方向(X,Y,Z 方向)の違いはほとんど見られず、ロッキング運動が拘束されていることがわかる。

(4)接着工法(洋型)

接着工法により補強された洋型墓石の伝達関数を図-16(d)に示す。増幅率は、0.7Hz~4Hz においてほぼ 1.0 を示しており、増幅は見られない。4Hz 以上の高い振動数領域、0.7Hz 以下の周期が長い領域でも、増幅率は無補強の洋型墓石より抑えられていて、補強効果が発揮されている。

(5)粘着工法(和型)

粘着工法により補強された和型墓石の伝達関数を図-16(e)に示す。0.7Hz~4Hz において増幅率がほぼ 1.0 に抑えられていること、4Hz 以上の振動数領域においても、接着工法と同程度かやや低い増幅率に抑えられている。

接着工法(図-16(c))との違いは、0.7Hz 以下の比較的周期の長い領域における増幅率の違いである。粘着工法では、石同士は接着されておらず、粘着材によって粘着されているのみである。よって、剛に固定する接着工法よりも柔らかに粘着しているため、周期の長い領域の増幅率が接着工法よりも大きくなるものと考えられる。

接着工法との最大加速度の違いは、接着工法の場合、補強されていない氷鉢の衝突が衝撃となって現れているためで、伝達関数では図示していないが 10Hz 以上でその影響が見られる。

(6)全面粘着工法(和型)

全面粘着工法により補強された和型墓石の伝達関数を図-16(f)に示す。0.7Hz~4Hz において増幅率がほぼ 1.0 に抑えられていること、4Hz 以上の振動数領域においても、接着工法と同程度の増幅率に抑えられている。

接着工法(図-16(c))との違いは、粘着工法と同様、0.7Hz 以下の比較的周期の長い領域における増幅率の違いである。全面粘着工法では、石同士は剛には接着はされておらず、粘着材によって粘着されているのみである。よって、周期の長い領域の増幅率が接着工法よりも大きくなるものと考えられる。

接着工法との最大加速度の違いは、接着工法の場合、補強されていない氷鉢の衝突が衝撃となって現れているためで、伝達関数では図示していないが 10Hz 以上でその影響が見られる。

粘着工法(図-16(e))との違いは、粘着面と粘着力の違いであるが、今回の 3 通りの震度を用いた実験結果では、両工法は近い傾向を示し、最大加速度においてやや違いが見られたほかは、顕著な違いは確認できなかった。4Hz 以上の伝達関数における増幅の違いが、最大加速度の違いの要因のひとつと考えられる。

4.5 考察

接着工法は、震度 7 でも転倒に至らず補強効果が発揮された。しかし、接着による補強は経年変化によって強度が低下しやすいこと、接着効果が発揮されて初めて意味を持つ補強方法であるので、接着面の損傷・劣化が今後の課題となると考えられる。

粘着・全面粘着工法も、震度に関わらず安定して加振に耐えることができた。粘着工法は施工の簡便さにおいても優れており、有効な補強工法であると考えられる。しかし、接着工法と同様、補強部材の劣化が課題となる。

本研究における震度 6 弱、6 強、7 の加振では、いずれの補強工法も補強部が劣化することなく耐えることが出来たので、適切に補強がなされておれば、震度 6 弱、6 強、7 の地震動を連続で経験しても転倒に至らないことが示された。

5. 結論

本研究では、大地震時の墓石の挙動、および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。

まず、代表的な墓石のタイプである和型・洋型墓石について、全く補強のなされていない墓石を用意し、1995年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された加速度波形を基に作成された模擬地震動を、震度レベルを変えることによって加振した。その結果得られた知見は以下の通りである。

- 1) 無補強の和型墓石の地震時転倒メカニズムは、地震による慣性力が生じる転倒モーメントが、自重による抵抗モーメントを上回ることによる、ロッキング転倒である。
- 2) 無補強の洋型墓石の地震時転倒メカニズムは、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。
- 3) 和型墓石の方が洋型墓石よりも転倒しやすい。洋型墓石が震

度7で転倒したのに対し、和型墓石はそれより小さい震度6強で転倒した。同じ震度7では和型墓石の方が早い時間に転倒を開始した。

次に、現在多く採用されている墓石の耐震工法の中から、(a)接着工法、そしてそれに替わる(b)粘着工法、(c)全面粘着工法に着目し、その耐震性向上効果を、実物大模型を用いた振動台実験によって検証を行った。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 接着工法、粘着工法、全面粘着工法のいずれも、強い耐震効果を発揮し、いずれの墓石も、震度7でも転倒しなかった。
- 2) 接着工法は、水鉢は接着しないため、震度7では水鉢が転倒し、水鉢が墓石に接触することにより棹石は大きな衝撃力を受けていることがわかった。

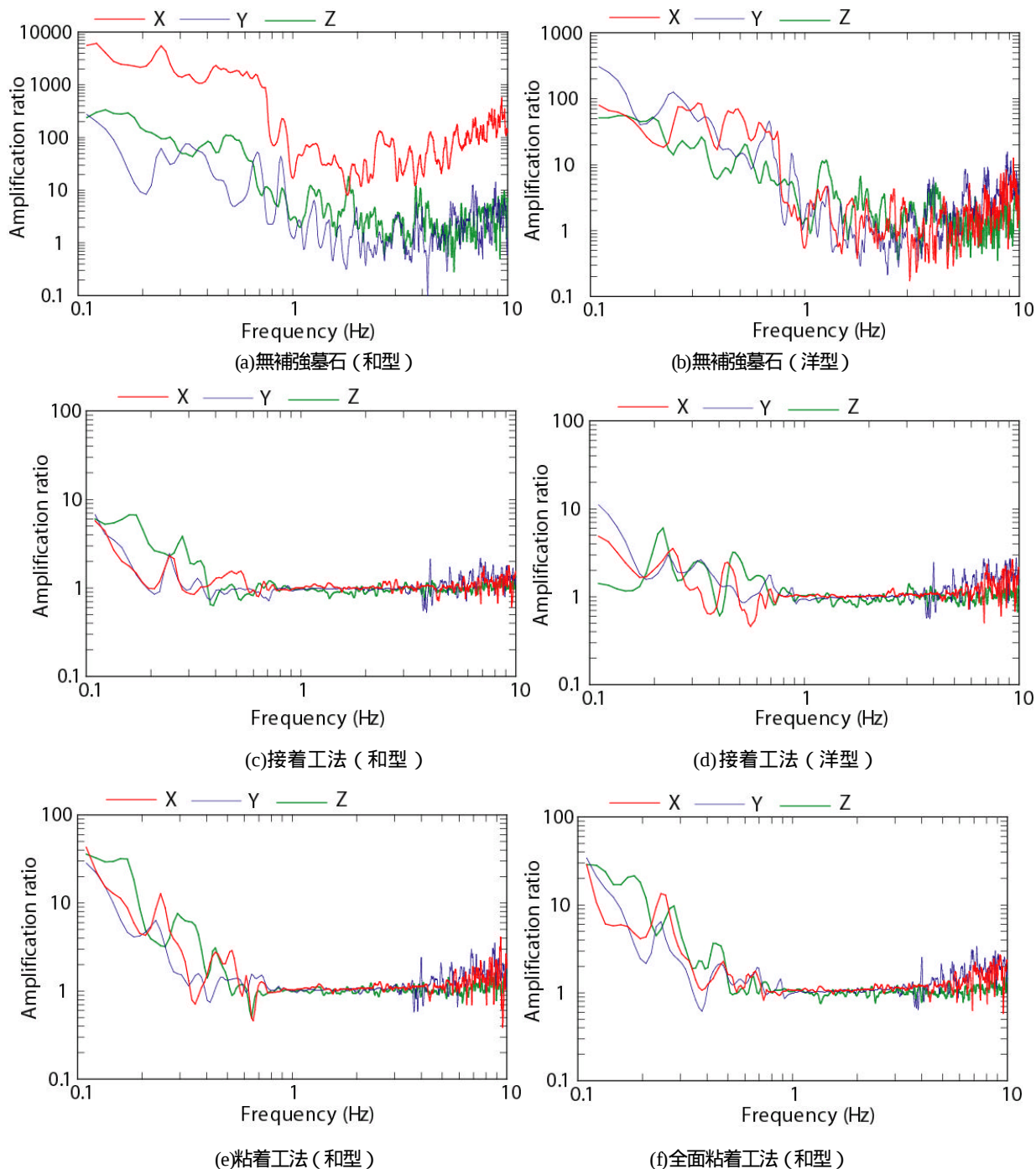


図-16 振動台に対する棹石頂点の伝達関数 (震度7)

- 3) 接着工法は墓石間を剛に接続するのに対し、粘着による補強は、墓石間を粘着するだけなので、伝達関数を比較したところ、長周期側の増幅率に違いが見られた。

以上のように、接着・粘着による補強工法の有効性を検証し、いずれも補強効果を有することが立証された。しかし、これらは接着・粘着効果が発揮されて意味を持つ工法であるので、接着面の損傷・劣化、および粘着補強部材の劣化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) 翠川三郎，藤本一雄：墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布，日本建築学会構造系論文集，Vol.480，pp.111-118，1996.12
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 日本石材産業協会：地震に強いお墓の報告書 実験編，2006.
- 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
(2006 年 9 月 11 日 受付)