

実寸大模型を用いた振動台実験に基づく 墓石の各種耐震補強策の効果の検証

Verification of Reinforcement Measures for Gravestones Based on Shaking Table Test Using Full Scale Models

古川 愛子¹, 清野 純史², 三輪 滋³, 樺山 貴昭⁴

Aiko FURUKAWA¹, Junji KIYONO², Shigeru MIWA³ and Takaaki MOMIYAMA⁴

¹九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

Department of Civil Engineering, Kyushu University

²京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻

Department of Urban Management, Kyoto University

³飛鳥建設株式会社 防災R&Dセンター技術開発部

Technological Research Institute TOBISHIMA Corporation

⁴株式会社浅沼組

ASANUMA Corporation

A gravestone in Japan is a simple structure in which each stone is merely stacked without any reinforcements. Therefore, gravestones are easy to overturn during earthquakes. In the earthquake damage survey, the overturning rate or the aspect ratio of overturned gravestones has been used to estimate the seismic intensity or peak ground acceleration on the site. In this way, gravestones have been used as the indicator of the seismic intensity. However, overturning of gravestones should be avoided because it has the possibility to hurt people and gravestones are for worship of our ancestors. Therefore, the reinforcement of gravestones is important from the view point of the prevention of overturning. In this study, shaking table tests of full scale models were done in order to investigate the seismic behavior of the gravestones and the effectiveness of reinforcement measures.

Key Words : gravestones, earthquake, overturning, reinforcement, shaking table test

1. はじめに

墓石は先祖を祀るためのとても大切なものであり、非常に高価なものであることから、地震によって転倒したり破損したりしないようにすることが望ましい。また、お墓参りの最中に地震が発生し、人的被害が生じることは避けなければならない。さらに、墓地は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。近年発生が予想される南海トラフ沿いなどの日本各地での大地震に備えて、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。大多数の墓石の形状が直方体であるため、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ている¹⁾。強震記録網の整備が進んだ現在においても、震源域における強震記録は未だ十分とは言えず、これに対して墓地は比較的広範囲に分布しているため、強震記録を補うことの出来る有効な材料として利用されている。

また、地震の水平力による転倒モーメントと重力による抵抗モーメントの静的なつりあい式から算定される転倒加速度は、墓石の幅に対する高さの比（幅高さ比）によって決定される。地震動強さの推定においても、墓石の幅高さ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動的な現象であるため、一概に幅高さ比だけで評価できるものでもないと考えられる。

古川ら²⁾はこの点に着目し、3次元個別要素法を用いて、地震時における墓石の動的挙動のシュミレーションを行い、和型・洋型墓石の転倒メカニズムを明らかにしている。具体的には、代表的なタイプの和型墓石・洋型墓石それぞれに対して、幅高さ比の異なる5モデルを用意し、幅高さ比が地震動レベルと転倒挙動の関係に及ぼす影響について検討を行っている。その結果、ロッキング運動により転倒しやすい和型墓石においては幅高さ比が墓石の転倒に強い相関を持つが、滑り運動により転倒に至る洋型墓石については幅高さ比の違いが墓石の転倒に与える影響が小さいことを示している。

このように、既存の研究の多くは強い地震が発生すれば墓石は当然転倒するものという仮定に基づいており、

墓石の耐震設計といった概念は存在していない。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。しかし昨今では、墓石の転倒防止という観点から地震外力に対して何らかの補強を行おうという機運が高まっている。

そこで本研究では、実寸大模型を用いた振動台実験によって、墓石の耐震性向上のための分析・課題の検討を行う。具体的には代表的な墓石のタイプである和型・洋型墓石について、様々な補強を施されたもの、及び全く補強のなされていない未補強のものを合わせて実寸大の和型 9 モデル、洋型 3 モデルを用意し、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、各墓石試験体の耐震性を調査し、各耐震補強策の効果および課題について検討を行った。

2. 実寸大模型を用いた墓石の振動台実験

(1) 試験体の分類

試験体は日本石材産業協会の仕様による和型墓石・洋型墓石（図1）であり、耐震性向上のために粘着や接着、及び心棒での連結などが施されている。またそれらの効果を比較するために、何も加工を施していない試験体も和型・洋型それぞれ1体ずつ実験する。

各試験体を区別するための記号は、和型がW0101～W0103及びW0401～W0701の9モデル、洋型がY0101～Y0103の3モデルとしている。各試験体がどのように補強されているかを表1に、補強の部位や種類の分類を表2にまとめる。

また、図2に各試験体の補強の詳細、表3に試験体の重量、表4に静止摩擦係数を示す。和型墓石のみ水鉢があり、寸法は幅484mm×奥行き152mm×高さ272mmである。

振動台への設置方法としては、1.4m×1.4mの鉄板上に芝台を接着し、鉄板をボルトで振動台に固定した。

表1 各試験体の補強

試験体	様式	補強方法
W0101	和型	各石を補強無しで積み重ねたまま
W0102	和型	各石の間に耐震ボンドで接着
W0103	和型	棹石下面と上台上面に穴を開け、棹石と上台の間にステンレス棒を1本挿入
Y0101	洋型	各石を補強無しで積み重ねたまま
Y0102	洋型	各石の間に耐震ボンドで接着
Y0103	洋型	棹石下面と上台上面に穴を開け、棹石と上台の間にステンレス棒を2本挿入
W0201	和型	各石の間に強固な金具を設置
W0301	和型	各石の間に積層ゴムを設置
W0401	和型	各石の間に接着剤ではない粘着材（ソフトファスナー）を設置
W0501	和型	各石の間に全面粘着シートを設置
W0601	和型	各石を貫通した器具を取り付けてターンバックルにより締める
W0701	和型	各石の間に発泡樹脂緩衝材とステンレスワイヤーを設置

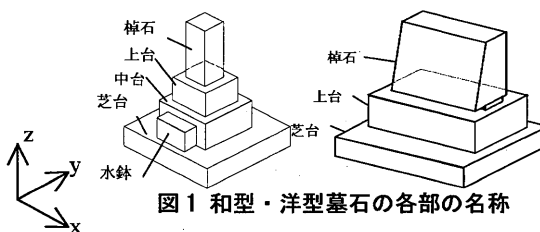


図1 和型・洋型墓石の各部の名称

表2 各試験体の補強の分類

試験体	補強				補強する場所
	面補強	心棒	縦補強	横補強	
W0101	×	×	×	×	—
W0102	○	×	○	○	棹石から芝台まで全て
W0103	×	○	×	○	棹石と上台の間のみ
Y0101	×	×	×	×	—
Y0102	○	×	○	○	棹石から芝台まで全て
Y0103	×	○	×	○	棹石と上台の間のみ
W0201	○	×	○	○	棹石から芝台まで全て
W0301	×	○	○	○	棹石から芝台まで全て
W0401	○	×	○	○	棹石から芝台まで全て
W0501	○	×	○	○	棹石から芝台まで全て
W0601	×	○	○	○	棹石から芝台まで全て
W0701	○	○	○	○	棹石から芝台まで全て

表3 試験体の重量 (kg)

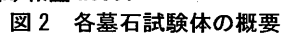
試験体	棹石	上台	中台	水鉢	芝台
W0101, W0102, W0103	104	130.5	298.8	45.9	315
Y0101, Y0102, Y0103	211.1	197.8			
W0201, W0301	104		298.8	45.9	
W0401	103	130.5	156.0	46.9	
W0501	104		298.8		
W0601	98.9	134.6	226.4	45.9	
W0701	104	130.5	298.8		

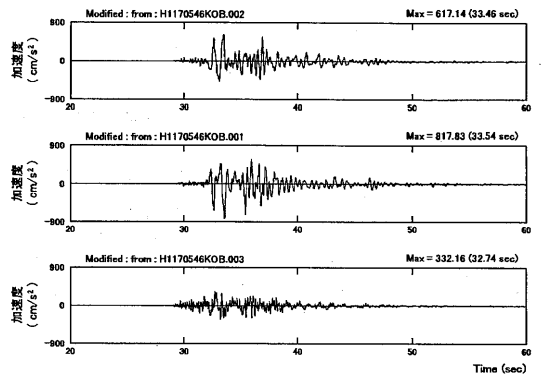
表4 静止摩擦係数（芝台と各石材との間の摩擦係数）

石部材の種類		静止摩擦係数
和型	中台	0.321
	上台	0.258
洋型	棹石	0.331
	上台	0.425
	棹石	0.319

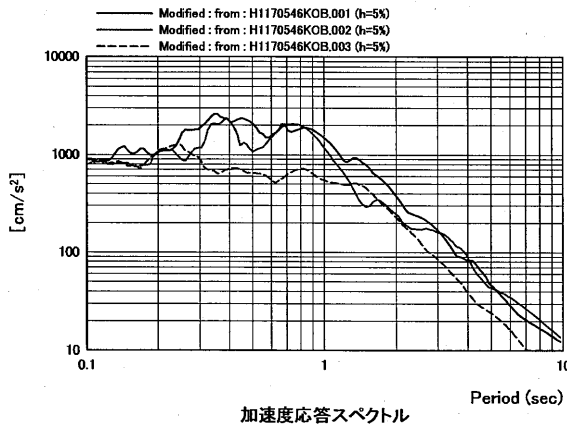
(2) 入力地震動

本研究では、あらゆる建築・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る。図3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/s²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。

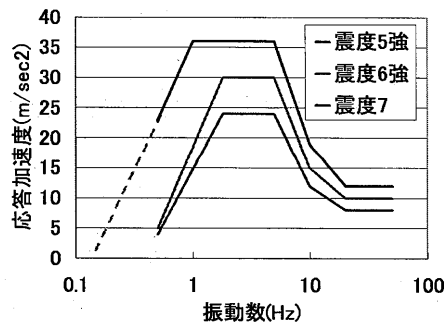




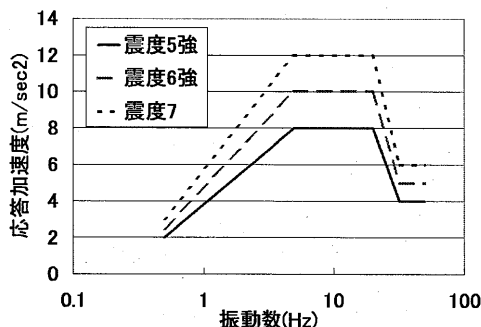
(a) 加速度波形(上から順に, EW, NS, UD成分)



(b) 加速度応答スペクトル(凡例の上から, NS, EW, UD成分)
図3 兵庫県南部地震神戸海洋気象台の加速度記録



(a) 水平方向

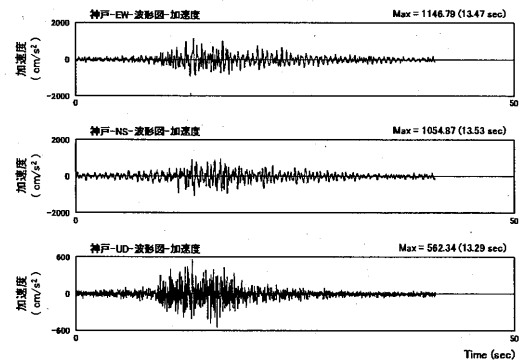


(b) 上下方向

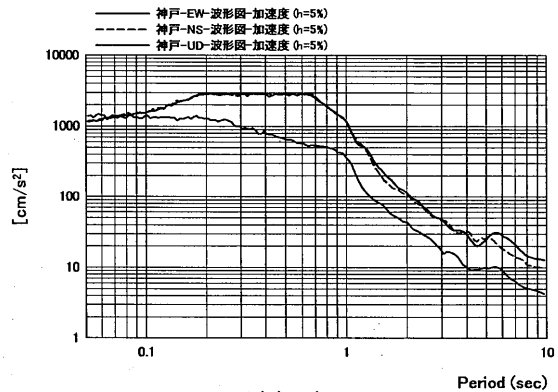
図4 通信機器の耐震性検討に用いられる加速度応答スペクトル

そこで, 設計などに用いられる加速度応答スペクトルと兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の記録³⁾の位相特性を用いて模擬地震動を作成する。振動台実験では三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⁴⁾は水平上下成分を分けて規定している。図4にスペクトルを示す。このスペクトルは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5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を図6, 7, 8に示す。EW, NS, UD成分をそれぞれ, x, y, z方向とした(図1)。



(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時刻歴波形と加速度応答スペクトル

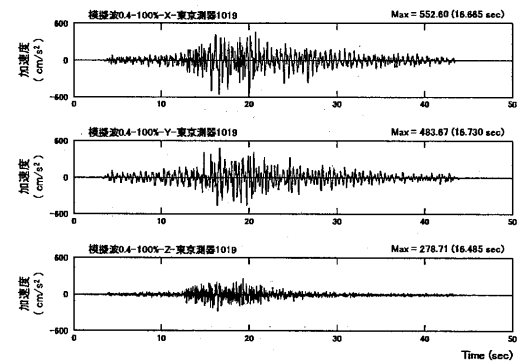


図6 震度6弱の加速度波形(上から順に, X, Y, Z成分)

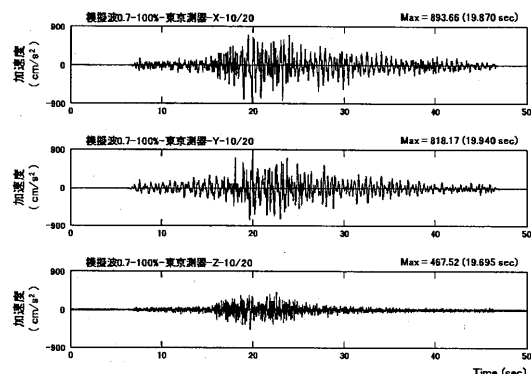


図7 震度6強の加速度波形(上から順に, X, Y, Z成分)

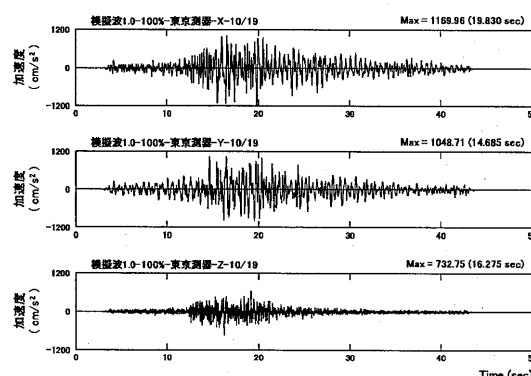
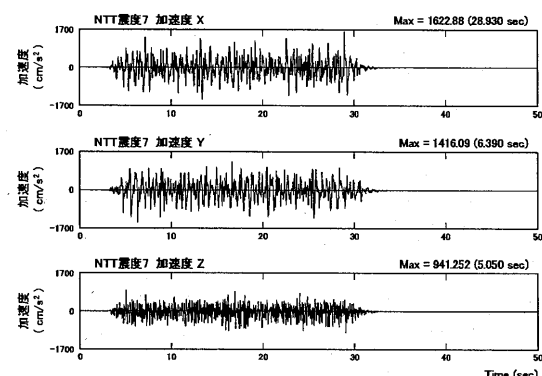
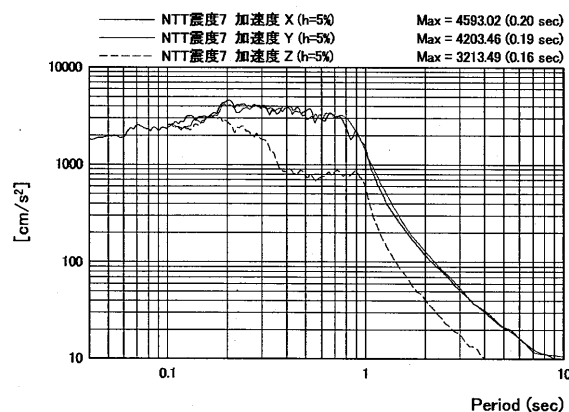


図8 震度7の加速度波形(上から順に, X, Y, Z成分)



(a) 加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル

図9 NTT 震度7の加速度波形と加速度応答スペクトル

また, 和型墓石 W0101, W0102, W0103 と, 洋型墓石 Y0101, Y0102, Y0103 については, この作成した模擬地震動の震度7相当の入力でも転倒しなかった場合には, 別途NTTが作成している震度7相当の波形を入力した(以下「NTT 震度7」と記す)。この模擬波は震度7であるが, 強震継続時間が前述の修正した神戸海洋気象台波よりもかなり長く, 構造物にとってはさらに厳しい波形となっている。この模擬波の加速度時刻歴と応答スペクトルを図9に示す。

表5 試験体の転倒状況

試験体	震度6弱	震度6強	震度7	余震6強	NTT震度7
W0101	△	×	×	△	△
W0102	○	○	○	○	○
W0103	△	△	×	△	△
Y0101	△	△	×	△	△
Y0102	○	○	○	○	○
Y0103	△	△	△	△	△
W0201	○	○	○	○	○
W0301	×	△	△	△	△
W0302	△	×	×	×	×
W0401	○	○	○	○	○
W0501	○	○	○	○	○
W0601	○	○	○	○	○
W0701	△	△	×	△	△

※○: 変化無し △: 変位・ずれが生じる ×: 転倒

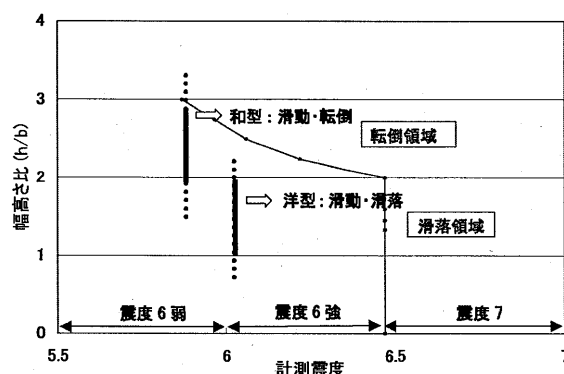


図10 個別要素法解析で求めた転倒基準⁵⁾

3. 実験結果

(1) 試験体の転倒状況

表5に各試験体の転倒状況を示す。各試験体は転倒に至った時点で加振を終了し, それ以降の加振は行わない。震度6弱から震度6強, 震度7と順次加振していく。和型のW0101, W0102, W0103と洋型のY0101, Y0102, Y0103の場合は, 震度7にも耐えると, 余震として震度6強の地震波をさらに加振し, さらに強震期間の長い震度7の地震波を加振する。W0301・W0302については, 一回目の加振(震度6弱)で転倒に至ったことから, 補強部材である積層ゴムの厚さを薄くして再度加振したものがW0302としている。

既往の研究成果として, 和型・洋型墓石の転倒基準を,

計測震度と幅高さ比をパラメータにとって整理したものを図 10 に示す⁵⁾。これは、3 次元個別要素法を用いた検討結果である。1995 年の兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台の観測波形を振幅調整することにより、様々な震度の地震波を作成し、これを様々な幅高さ比を有する和型墓石・洋型墓石に入力している。個別要素法の接触パラメータは、模型墓石を用いた振動台実験から決定している。

図 10 から、和型墓石の場合は幅高さ比が転倒基準と強い相関があり、今回の実験で用いた棹石の幅高さ比は 2.63 (高さが 636mm, 幅が 242mm) であるので、震度 6 弱では転倒に至らず、震度 6 強以上で転倒に至ると予想される。また、震度 6 弱から滑動を開始することが予想される。

洋型墓石の場合は、図 10 より、震度 6 弱では滑動も転倒もせず、震度 6 強以上では滑動し、震度 7 以上で転倒に至ると予想される。

震度 6 弱、6 強、7 における各試験体の挙動をまとめると以下のとおりである。

(2) 和型墓石 W0101 の挙動

a) 震度 6 弱

加振開始後 12 秒で棹石がロッキング運動をはじめ、同時に上台・中台・水鉢もすべり運動を開始した。20 秒後に棹石のロッキング運動によって上台の端部が破損した。最終的には棹石は上台端部で留まり、上台・中台・水鉢は若干の回転運動による変位に留まった。

b) 震度 6 強

加振開始後すぐに棹石が小刻みなロッキング運動・水鉢がすべり運動をはじめ、13 秒後に挙動が激しくなり始めた。22 秒後に棹石のロッキング運動によって上台の端部が破損し、棹石は転倒した。水鉢は芝台端部に達すると、ロッキング運動を開始して 25 秒後に転倒に至った。上台・中台は若干の回転運動による変位に留まった。

c) 震度 7

加振開始後 7 秒で棹石が回転を伴うロッキング運動、上台・中台・水鉢がすべり運動をはじめ、15 秒後に水鉢が転倒した。21 秒後に棹石が激しい回転・ロッキング運動を伴ったまま上台から落下した。上台・中台はその後回転を伴ったすべり運動を続けたが、転倒に至ることはなかった。

d) 総評

棹石は高さが 636mm, 幅が 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り合い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 552.6gal の震度 6 弱の地震動では転倒に至らず、静的な釣り合い式では評価できないことが分かる。

次に、図 10 の転倒基準との比較を行う。震度 6 弱で棹石が滑動するが転倒はせず、震度 6 強以上で転倒に至るという結果は、図 10 の転倒基準とよく対応している。無補強の和型墓石の耐震性評価に対する個別要素法の適用性が示される。

幅高さ比の小さい上台や中台は滑り運動を起こすため、より強い地震を経験した場合は、下の台から滑り落ちる可能性があると考えられる。

また、転倒しない震度 6 弱でも、地震波の振幅が小さい時点から棹石はロッキング運動を起こしており、棹石と上台との衝突により石材の破損を引き起こしている。

震度が大きくなるにつれ、棹石の運動は単にロッキング運動だけでなく、滑り・回転を伴った複雑な運動を示した。

(3) 和型墓石 W0102 の挙動

a) 震度 6 弱

加振開始後 13 秒でわずかに水鉢がずれた他は一切の変化はなかった。

b) 震度 6 強

加振開始後 15 秒で水鉢がすべり運動を開始したが転倒には至らず、その他の石も変化はなかった。

c) 震度 7

加振開始後 14 秒で水鉢がすべり運動を開始し、16 秒で転倒に至ったが、他の石には変化がなかった。

d) 総評

接着補強をしていない水鉢の転倒を除いて、見た目の変位は全く生じていない。これは接着効果が高かったためと思われる。

(4) 和型墓石 W0103 の挙動

a) 震度 6 弱

加振開始後 15 秒で棹石がロッキングし始めるが、ステンレス棒の影響で運動自体は小さく、また回転もわずかであった。その他の石は同じく 15 秒で滑り出すが、わずかに回転したのみであった。

b) 震度 6 強

加振開始後 15 秒で棹石がロッキング運動を始め、それに伴って上台が棹石に引きずられるようにすべり出した。23 秒で上台が中台の端部に達すると、棹石と上台がひとつとなってロッキング運動し始め、中台の端部に破損が生じたが、転倒には至らなかった。回転運動はほとんど見られなかった。

c) 震度 7

加振開始 13 秒で棹石が小刻みなロッキング運動を始め、16 秒で全ての石が大きく回転を伴うすべり運動を始めるとすぐに水鉢が転倒した。21 秒で上台のすべり運動によって中台の端部に破損が生じ、24 秒で棹石と上台がひとつとなったまま転倒した。

d) 総評

ステンレス棒の役目は、上台と棹石を連結することによって、棹石のすべり運動・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る。しかし、震度 6 強の転倒を免れることには成功したが、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、滑り運動に対する検討が課題であることがわかった。

回転に対する抵抗はほとんど無いにもかかわらず、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、ステンレス棒は、棹石と上台に開けた穴に挿すだけであり、穴がステンレス棒に比べてやや大きかったので、棹石のロッキング運動は完全には防止されておらず、小刻みに振動していた。これは、棹石と上台の間で衝突が小刻みに起こることを意味していて、石材の破損の原因となると考えられる。

(5) 洋型墓石 Y0101 の挙動**a) 震度 6 弱**

加振開始後 15 秒で棹石・中台がすべり運動をし始めたが、わずかに変位したのみで倒壊には至らなかった。

b) 震度 6 強

加振開始 15 秒で棹石・中台ともにすべり運動を開始し、24 秒で変位が止まった。最終的には両石ともに水平面内で少し回転して変位していた。

c) 震度 7

実験開始後 15 秒で棹石がわずかなロックンク運動を伴ってすべり運動を始め、17 秒で転倒した。

d) 総評

洋型墓石の転倒メカニズムは、過大な変位により下の台から滑り落ちる、滑り運動による転倒である。

震度 6 弱・震度 6 強においてはすべり運動のみが起こった。元々ロックンクはほとんど生じない洋型墓石であるが、震度 7 ではわずかではあるがロックンク運動を生じた。滑り運動にロックンク運動が伴うことで、転倒しやすくなることがわかった。

この結果は、図 10 の転倒基準と非常によく対応しており、無補強の洋型墓石の耐震性評価についても個別要素法の適用性が示された。

(6) 洋型墓石 Y0102 の挙動**a) 震度 6 弱**

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

b) 震度 6 強

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

c) 震度 7

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

d) 総評

和型 0102 の場合と同じく、補強効果が十分に発揮され、どの震度においても全く変化は見られなかった。

(7) 洋型墓石 Y0103 の挙動**a) 震度 6 弱**

実験開始後 15 秒で棹石と中台が一体となってすべり運動を始め、25 秒で停止した。棹石はステンレス棒で中台に固定されているが中台の上での回転は見られなかった。最終的に中台は水平面内でわずかに回転して変位していた。

b) 震度 6 強

加振開始後 15 秒で棹石と中台が一体となってすべりはじめ、30 秒で停止した。中台上で棹石の回転は見られなかった。移動量・加振時の挙動ともに、震度 6 弱の場合とほとんど変化が無く、わずかに変位が大きかった程度であった。

c) 震度 7

加振開始 12 秒で中台がすべり運動を始めた。17 秒で中台が芝台端部に達すると破損を生じたが、転倒には至らなかった。棹石は中台の上で特に変位は見られなかった。

d) 総評

どの震度でもロックンク運動は見られなかった。また、全体を通して水平面内の回転運動はわずかに見られる程度であった。震度 7 での転倒を免れることができたが、

棹石と上台が一体となって棹石の上で大きく滑っているため、より強い地震動や、より継続時間の長い波を経験した場合は、一体となって棹石から滑り落ちる危険性があるので、上台・棹石間の対策も必要であると考えられる。

(8) 和型墓石 W0201 の挙動**a) 震度 6 弱**

加振開始後 16 秒で棹石がロックンクし始めたが、残留変位は生じなかった。また、その他の石に特に変化が無かった。

b) 震度 6 強

加振開始後 10 秒から棹石がロックンク、上台・中台がすべり運動をし始めた。しかし、変位は出ているにもかかわらず補強部材が元に戻そうとするので、大きく挙動したものの残留変位は生じなかった。

c) 震度 7

加振開始 7 秒で棹石・上台がロックンク運動、中台がすべり運動し始めた。棹石のロックンク運動はかなり激しく見えたが、補強部材が元に戻そうとするので加振終了後の変位はわずかで、目立った損傷も無く補強部材はしっかりと働いていたと思われる。

d) 総評

地震時の 3 つの墓石挙動（ロックンク・すべり・回転）のうち、ロックンクをある程度許して、回転とすべりを抑えるという補強であった。振動を抑えるよりも、残留変位を抑える方を重視したものであり、震度 7 の地震動においても役割をしっかりと果たしていた。ただ、ロックンクの許容による上台・補強部材の破損が課題となるとと思われる。

(9) 和型墓石 W0301 の挙動**a) 震度 6 弱**

加振開始後 6 秒で棹石がロックンクし始めた。16 秒で回転運動が加わり始めると上台上で移動し始め、21 秒で上台端部の破損を起こして転倒に至った。その他の石は少しのずれが生じるのみであった。

b) 総評

ロックンク運動を和らげるための補強部材であったが、逆にばねのような働きをしてロックンク運動を助長してしまった。すべり運動を抑えられていたが、棹石の底部が支点となってロックンク運動を助長してしまったようであった。すべり運動を抑えてもロックンクと回転運動のみで棹石が上台上で端部まで移動していく様子も見て取れた。

(10) 和型墓石 W0302 の挙動**a) 震度 6 弱**

加振開始後 15 秒で棹石がロックンクし始め、19 秒で回転運動が大きくなり、30 秒で停止した。転倒には至らなかったが無補強墓石の震度 6 弱と比べてもロックンク運動が激しかった。その他の石は水鉢が多少すべり運動していた程度で、上台・中台ともにそれほど大きな挙動は見られなかった。

b) 震度 6 強

加振開始後 10 秒で棹石のロックンク運動が始まり、16 秒で上台の端部に破損を生じ、激しく回転しながら 20 秒で転倒に至った。補強されていない水鉢は、激しくすべり運動を起こしていたが、転倒には至らなかった。

また、中台にはほとんど変化は無かった。上台は、棹石が転倒時に衝突したため移動したが、上台自身の振動によって移動したのではない。

c) 総評

和型墓石 W0301 の積層ゴムの厚さを減じたケースである。震度 6 弱を加振すると、W0301 に比べ少しロッキング運動を減少させることができたが、無補強墓石より運動が大きかった。震度 6 強では激しいロッキング・回転の両運動が起こり、転倒に至った。補強されていない水鉢と比べてみても、また上台の破損具合を見ても、ロッキングが激しく起こっているのがわかった。

上台・中台にに変位が見られなかったことから、すべり運動に対しては補強効果が発揮されていることがわかるので、ロッキングを起こしにくい部位には有用である。

(11) 和型墓石 W0401 の挙動

a) 震度 6 弱

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

b) 震度 6 強

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

c) 震度 7

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

d) 総評

この試験体は中台部分が 3 つの部位から成り、中央に空洞が空いているため、耐震性は少し劣るかと思われたが、震度に関わらず全く変化が無かった。従って、ロッキング・すべり・回転の全てにおいて有用な補強であった。

(12) 和型墓石 W0501 の挙動

a) 震度 6 弱

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

b) 震度 6 強

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

c) 震度 7

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

d) 総評

補強効果が発揮され、目に見える変化は見られなかった。

(13) 和型墓石 W0601 の挙動

a) 震度 6 弱

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

b) 震度 6 強

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

c) 震度 7

全く運動・振動が生じず、残留変位も全く生じなかった。

d) 総評

補強効果が発揮され、目に見える変化は見られなかった。

(14) 和型墓石 W0701 の挙動

a) 震度 6 弱

加振開始後 5 秒で棹石の微小なロッキング運動が確認できた。15 秒でロッキングが激しくなるとともに、17 秒で棹石の補強部位が見えるほどの傾きが生じたが、転倒には至らなかった。上台は棹石に補強部分を介して引っ張られる格好となり多少の変位が生じたが、中台はほとんど変位しなかった。水鉢もわずかにずれただけであった。

b) 震度 6 強

加振開始後 14 秒で棹石のロッキング運動が始まり、18 秒付近で補強部材が棹石から抜けそうになるが転倒には至らず、30 秒付近でゆっくりと少し回転運動を生じて停止した。上台・中台は回転運動によるずれを生じ、水鉢はすべりによる変位で芝台端部まで変位したが、転倒には至らなかった。

c) 震度 7

加振開始後 11 秒で棹石のロッキング運動が始まり、16 秒で水鉢が転倒するとともに棹石の補強部材がむき出しになった。18 秒で上台から補強部材が抜けて棹石は転倒に至った。棹石の無くなった後に上台がロッキングし始め最終的に上台・中台は元の位置からかなり回転して停止した。

d) 総評

補強部材は心棒に粘りをもたせることによってロッキングを軽減しようとしたものであったが、加振時の棹石の挙動を見るとすべりを抑えるといった心棒としての効果はあるものの、ロッキングを軽減させるための効果が少なかった。これは墓石の重量に対するロッキングを軽減させるばねの剛性が小さいためである。また、転倒に至ったときの状況において、上台側が抜けてしまっていることから、もう少し長めに打ち込むと効果があったと考えられる。

4. 各試験体の地震時挙動および耐震補強効果のまとめ

振動台実験の結果を補強工法毎にまとめると以下のようになる。

(1) 無補強時：W0101, Y0101

無補強の和型墓石は、震度 6 強以上で、洋型墓石は震度 7 以上で倒壊に至った。補強を施さない場合、洋型墓石の方が耐震性が高いこと、和型墓石はロッキング運動によって倒壊に至りやすいこと、洋型墓石は滑り運動によって倒壊に至る可能性が高いことがわかった。

(2) ステンレス棒による補強：W0103, Y0103

ステンレス棒で連結する補強方法を採用した場合、無補強時に震度 6 強で転倒した和型墓石は震度 6 強で転倒せず、無補強時に震度 7 で転倒した洋型墓石は震度 7 でも転倒には至らず、補強の効果が確認できた。ただし、和型墓石の場合、震度 7 の地震動に対しては、棹石と上台が一体となって中台上で滑り、転倒に至った。棹石と上台をステンレス棒で連結することによって、棹石と上台は一体となって運動することとなり、重心の位置が下がるため、ロッキングに対する抵抗力が増す。このように、棹石のロッキング運動を抑えることが出来るという点で効果があると思われる。しかし、連結していない石部材間の滑り運動に対する抵抗力は有していないので、

滑りを抑えることのできる他の手法と併せて用いる必要がある。また、上下動によってステンレス棒が抜ける可能性もあるので十分な長さのステンレス棒を用いることが必要である。

(3) 接着・粘着による補強：W0102, Y0102, W0401, W0501

面と面を接着・粘着するタイプは、墓石構造自体を剛に固定するため、振動に強く、また破損も起こしにくい。本実験では、和型・洋型墓石のいずれのケースも、震度 7 を経ても倒壊に至らなかった。ロッキング運動・滑り運動の両方に効果的な補強方法であると言える。しかしこの種類の補強手法は、接着・粘着剤の経年変化など、補強部材の損傷・劣化が問題となる。地震の繰り返しの耐えられるかどうかという点も課題となる。

本補強方法は、接着・粘着効果が発揮されて始めて意味のあるものである。接着・粘着効果がどのように劣化していくのかを把握し、適切なタイミングで補強する必要があると考えられる。また地震後には接着・粘着効果がどの程度劣化しており、余震や今後の地震に対して十分耐えうるレベルであるのかどうかを把握する必要があると考えられる。

(4) 金具による固定：W0201

地震時の 3 つの墓石挙動(ロッキング、滑り、回転)のうち、ロッキングをある程度許して、回転とすべりを抑えるという補強である。振動より残留変位を抑えることを重視したものであり、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。しかし、ロッキング運動を許容するため、石同士の衝突による上台・補強部材の破損が課題となる。

(5) 緩衝材による衝撃吸収：W0301, W0302

面と面との間に積層ゴムを敷いて衝撃を吸収することを目的とした補強方法であるが、ゴムの上で墓石がロッキング運動を起こしやすくなり、無補強時よりも倒れやすくなるケースがあった。2 種類の厚さを持つ緩衝材を用いて実験を実施したが、W0301 では震度 6 弱で、W0302 では震度 6 強で倒壊に至った。墓石全体の振動特性を把握した上で、その墓石が振動しやすい地震動成分を吸収できるよう適切な緩衝材の厚さを選択する必要があると考えられる。

(6) ターンバックル：W0601

棹石から下台までが堅固に固定され一体となって運動し、震度 7 でも転倒には至らなかった。年数が経っても繰り返しの地震動を受けても固定効果が保たれるのなら、効果のある補強方法であると考えられる。

(7) エアーロック：W0701

震度 6 弱、6 強の地震動に対しては転倒せず耐えたが、震度 7 の地震動に対してはロッキングにより転倒に至った。滑り運動を抑える効果はあるものの、ロッキング運動を低減させる効果が少ないことがわかった。これは、墓石の重量に対して心棒の剛性が小さかったためである。また、上台が心棒から抜けてしまったことから、もう少し心棒を長めに打ち込むと効果があったと考えられる。墓石のサイズに応じた心棒の固さ、強度、長さの検討が必要と考えられる。

5. 今後の課題

本研究では、様々な補強を施した墓石試験体の耐震性を評価するために、実物大の墓石試験体を作成し、振動台実験を行った。各種耐震補強策の効果および課題について検討を行った。

実寸大模型を用いた実験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。今後は、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) の適用を検討する。今回の実験結果より、解析に必要なパラメータを決定し、決定したパラメータを元に、実験では行えなかった形状の墓石・異なる地震動についても、各耐震補強策が有効であるかどうかについて検討する予定である。

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ります。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) 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) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 2002
- 4) 日本電信電話公社: 通信装置等の耐震試験方法, 1998. 12
- 5) 日本石材産業協会, 地震に強いお墓の報告書, 2005. 6

(原稿受付 2006. 5. 26)

(登載決定 2006. 9. 16)