

石灯籠の地震応答特性に関する振動台実験と 3次元個別要素法による解析的検討

村田 晶¹・清水 諒²・宮島 昌克³

¹正会員 金沢大学理工研究域環境デザイン学系 助教(〒920-1192 金沢市角間町環境デザイン学系)

E-mail:murata@t.kanazawa-u.ac.jp

²金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻 M1(〒920-0941 金沢市旭町2-23-2 muscat-B 211号)

E-mail:rshimizu032@gmail.com

³正会員 金沢大学理工研究域環境デザイン学系 教授(〒920-1192 金沢市角間町環境デザイン学系)

E-mail:miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

日本では、地震による石造建造物の被害が多発している。特に、石灯籠や墓石の倒壊被害が多く報告されている。そこで、今回は石灯籠に着目し、無補強と有補強の石灯籠に対して地震時応答特性と耐震補強方法について実験的研究と解析的研究を行った。石灯籠に心棒を通す補強法をとったが、振動台実験や解析結果から灯籠の倒壊防止に有効な対策であることがわかった。

Key Words : stone lantern, seismic response characteristics, seismic strengthening method, mandrel

1. はじめに

日本は大規模災害の地震が多く発生する地域であり、近年も大規模な地震災害が頻発している。それに伴う石造建造物の被害も多く発生しており、特に灯籠や墓石は石材を積み重ねた単純な不安定構造物であることから、多くの被害を受けている。その例として能登半島地震(2007年3月25日)で発生した石灯籠の転倒による被害事例が挙げられる。この地震で発生した人的被害としては、輪島市で当時52歳の女性が自宅内にて転倒した石灯籠の下敷きになり死亡した例がある。図-1は当時犠牲者を出した灯籠と同様の灯籠が倒壊した模様である。この図は石材店の展示物が地震によって倒壊した様子であるが、民家や神社等に設置された石灯籠では多数の市民を巻き添えにする危険性がある。

墓石に関しては、兵庫県南部地震を契機に様々な補強方法の考案や検証が行われてきた。例えば、古川等が行った墓石の耐震補強に関する研究¹⁾では、さまざまな補強施した墓石試験体の耐震性を評価するために、実寸大模型を用いた振動台実験に基づいて、それぞれの耐震補強法の効果の検証を行っている。このように、墓石の耐震性に関する研究は行われているが、灯籠に関する耐震対策の検証はほとんど行われていない。そのため、耐震対策を施しても十分な効果が得られず灯籠が倒壊するという事例もある。それに石灯籠は強い地震が発生すれば転倒するものという認識が強いので、補強方法は一般的に普及しているとは言えない。また、昨年には東北地方太平洋沖地震が発生し、今後も大規模地震が起こる可能性がある。

このようなことから、地震に強い石灯籠の耐震補強対策について検証する必要がある。

また、灯籠の転倒が強非線形性を有した複雑な3次元挙動であることから地震動を3成分同時に作用させたときの挙動を認識する必要がある。振動台実験により実挙動を再現することが最善な策ではあるが、すべてのケースに対して実験を行うには非常に膨大な時間と費用が必要である。そこで、本研究では、数パターンの実寸大模型を用いた振動台実験により、石灯籠の耐震補強効果の検証と転倒挙動を認識し、振動台実験の結果を基に3次元個別要素法を用いて力学ベースの物理シミュレートによって別パターンの検討を行い、最適な補強方法の考案を行うことを本研究の目的とする。



図-1 灯籠の被害²⁾

2. 振動台実験による補強効果の検証

実寸大の石灯籠で一般的に普及している春日灯籠と神前灯籠を用いて耐震補強を施した場合と耐震補強を施さない場合の振動台実験を行うことにより、石灯籠の振動特性の把握と補強効果の検証を行うこととする。また、石灯籠の転倒挙動の検証を行うことにより適切な補強対策の考案ができると考えられるので、無補強の実験では転倒挙動の検証も行う。入力には2成分の兵庫県南部地震(神戸波)、岩手・宮城内陸地震(一関波)を用いる。また、正弦波加振を行うことで石灯籠の振動特性の把握も行う。

実験で使用する春日灯籠と神前灯籠の寸法、各部材の名称について表-1と図-2に示す。また、補強を施した石灯籠には、加速度計を設置した。設置場所については表-2に示す。

表-1 石灯籠の概要

春日灯籠					
部材番号	部材名称	重量(kgf)	幅(cm)	奥行き(cm)	高さ(cm)
①	芝台	194	70.0	70.0	15.0
②	台座	98	60.0	52.0	18.0
③	柱	59	30.0	30.0	58.0
④	火袋受け	59	52.0	45.0	16.0
⑤	火袋	44	34.0	29.4	32.0
⑥	板台	19	32.0	27.7	18.0
⑦	笠	101	70.0	61.9	23.0
⑧	ギボシ	10	18.0	18.0	25.0
神前灯籠					
部材番号	部材名称	重量(kgf)	幅(cm)	奥行き(cm)	高さ(cm)
①	芝台	133	66.0	66.0	11.6
②	中台	147	52.0	52.0	22.8
③	柱	84	37.4	37.4	43.9
④	火袋受け	80	43.9	43.9	16.3
⑤	火袋	26	29.3	29.3	26.0
⑥	板台	30	29.3	29.3	15.4
⑦	笠	177	68.3	68.3	32.5
⑧	ギボシ	12	17.9	17.9	30.9

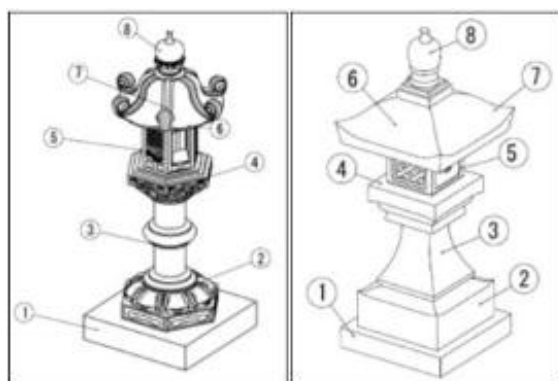


図-2 春日灯籠(左)と神前灯籠(右)

表-2 加速度計の設置位置

春日灯籠		神前灯籠	
番号	設置場所	番号	設置場所
1	芝台	1	芝台
2	台座	2	中台
4	火袋受け上部	4	火袋受け上部
8	ギボシ上部	8	ギボシ上部

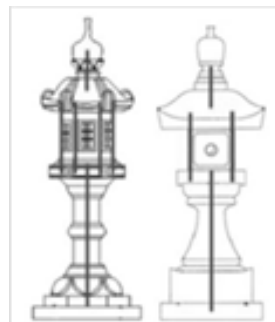


図-3 耐震補強の概要図

(1) 補強方法の設定

石灯籠は地震によって倒壊する際に、各部材がバラバラになってしまう。そのため、倒壊を防止するには各部材が離れてしまわないように、それぞれを一体化させることが有効であると考えられる。そこで本研究では、図-3のように各部材に心棒(SD295A)を通してその両端をボルトで固定し一体化させる耐震対策を施すこととする。

(2) 補強無しの実験結果

(a) 春日灯籠の実験結果

それぞれの灯籠を神戸波の振動台出力50%に調整した地震波で加振し、それで倒壊しなければ徐々に出力の割合を上げながら加振することとする。兵庫県南部地震(神戸波)を50%の加速度に調節した地震波で加振した結果、16秒後に微小なロッキングが生じ、19秒後にはロッキングが大きくなり、ロッキングと共に滑りも生じた。滑りに関しては、柱と火袋受けから上部の部材が逆方向に滑る挙動となった。そして24秒後にロッキングと同時に柱から上部が一体となり倒壊した。

(b) 神前灯籠の実験結果

50%に調整した神戸波で加振した場合、16秒後にロッキングが発生し、その後ロッキングの振幅が小さくなり21秒後に再度振幅の大きいロッキングが発生し同時に柱が回転した。しかし転倒には至らなかった。次に70%に調節した神戸波で加振した結果、16秒後にロッキングと滑りが発生し、その後ロッキングは減少することなく転倒した。回転することなく転倒する結果となった。70%の神戸波では50%の神戸波の時とは違い回転が発生することにはなかった。また、転倒方向は春日灯籠とは逆方向に転倒する結果となった。

(3) 春日灯籠,神前灯籠(補強有り)の実験結果

(a) 正弦波による春日灯籠の実験結果

正弦波加振より求めた応答倍率を図-4に示す。本実験では、振動台で計測した水平成分の加速度をそれぞれの箇所所で測定した水平成分の加速度で除した値を応答倍率とした。低振動数の1.5Hzで加振した場合は、すべての加速度の測定位置で応答倍率は1倍程度を示し、特に変化は見られなかった。高振動数の9.0Hzで加振した場合は、ギボシの上部に設置した加速度計8では、100gal,200galは5倍の応答倍率を示し、300gal,400galは3倍の応答倍率を示した。火袋受けの上部に設置した加速度計6では、100gal,200galでは2倍強の応答倍率を示し、300gal,400galでは1.5倍の応答倍率を示した。芝台、台座に設置した加速度計1と2については、1倍より低い応答倍率を示した。

この結果から、低振動数では加速度が大きくなっても石灯籠は一体となった挙動を示していることが分かる。このような挙動を示した原因はスワイプ試験の結果から求めた固有振動数が7.6Hzと高振動数であったことと、石灯籠に使用されている御影石自体の固有振動数が6～7Hz³⁾であるため1.5Hzの正弦波では振動数が大きく離れていたため影響が出なかったと考えられる。

9.0Hzで加振した場合、ギボシと火袋受けで入力が大きくなると応答倍率が減少する傾向が見られた。この原因は、入力が大きくなると石灯籠が非線形の挙動をしたため応答倍率が減少したと考えられる。これは、火袋受けやギボシがロッキング運動していたことから非線形の挙動を示していたと考えられる。また、応答倍率が下がった原因は高振動数の加振を受けることにより振動特性が変化したためであると考えられる。

(b) 正弦波加振による神前灯籠の結果

正弦波加振より求めた応答倍率を図-5に示す。4.5Hzで加振した場合は加速度の違いによる応答の変化は見られず、芝台、中台の応答倍率は1倍、火袋受けで1.8倍、ギボシで2.5倍の応答倍率であった。また、7.5Hzで加振した場合は芝台、中台の応答倍率はどの加速度で加振した場合も1を下回る結果となっていることから、1次モード以外の応答倍率の振動性状が見られることがわかった。火袋受け、ギボシの応答倍率は春日灯籠と同様に100gal,200galでは4.5以上の応答倍率となったが、300gal,400galで加振したときは4から4.2となり応答倍率は下がる結果となった。この結果から、神前灯籠も加速度が大きくなると非線形の挙動をするのではないかと考えられる。

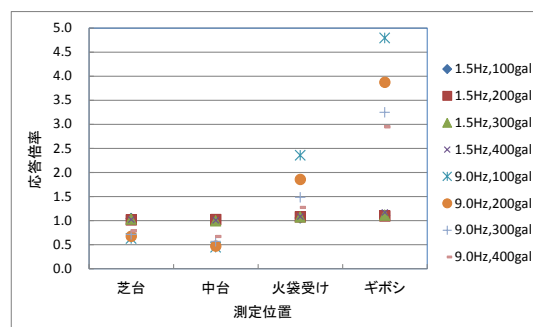


図-4 正弦波加振による春日灯籠の応答倍率

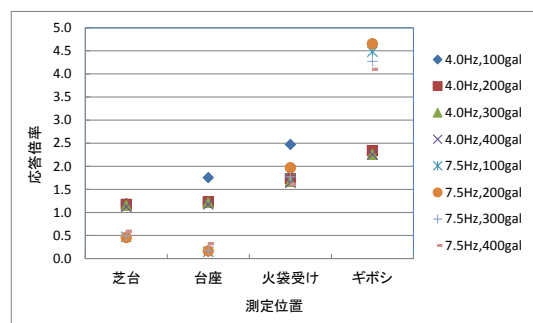


図-5 正弦波加振による神前灯籠の応答倍率

(c) 地震波加振による春日灯籠の実験結果

無補強の結果では加速度を50%に調節した兵庫県南部地震（神戸波）で倒壊したが、耐震補強を施した結果50%～100%の神戸波で加振しても倒壊することはなく破損も生じなかった。しかし、加振時の挙動としては火袋受けより上部でロッキング運動が発生していた。このことから完全に心棒を通しボルトで固定しても完全に一体化することはできないことが分かった。一方、岩手・宮城内陸地震（一関波）で加振した結果、転倒はしなかったが火袋受けより上部が激しいロッキング運動を伴い、柱の上部にひび割れ、欠損が生じた。この原因は、火袋受けの激しいロッキング運動による衝撃と圧縮力によりひび割れ、欠損が生じたと考えられる。

次に、加速度応答から振動台の入力に対する伝達関数を求め、各部材の振動数領域における結果の比較を行う。以下に、周波数に対する各部材の増幅率を図-6、図-7に示す。z方向に関しての増幅率はどの部材も1もしくは、1を下回る増幅率であった。このことからz方向には耐震補強の効果が十分に得られ一体化していると考えられる。また、x方向に関しては、4.5Hzから5Hz付近で増幅しており、加速度計の設置位置が高いほど増幅率が大きくなっている。耐震補強を施し、石灯籠を一体化することを目的としているが完全に一体化することができず、小刻みにロッキングしていた。この小刻みなロッキングの周期が4.5Hzから5Hzではないかと考えられる。神戸波のz方向の6Hz付近で増幅率が1を下回る結果を示した。この結果から高振動数の波形を受けると低減することが分かった。

(d) 地震波加振による神前灯籠の結果

無補強の結果では加速度を70%に調節した兵庫県南部地震（神戸波）で倒壊したが、耐震補強を施した結果50%～100%の神戸波で加振しても倒壊することはなく破損も生じなかった。しかし、加振時の挙動としては火袋受けより上部でロッキングが発生していた。ボルトで心棒と部材を固定しても完全に固定することができないためロッキングが発生したと考えられる。一方、岩手・宮城内陸地震（一関波）で加振した結果、転倒することはなかったが火袋受けより上部で神戸波による加振時よりも激しいロッキングが生じ回転運動が生じた。回転運動が生じた理由は加振を繰り返したことによりボルトが緩んだため回転したと考えられる。

次に加速度応答から伝達関数を求め、各部材の振動数領域における結果の比較を行う。以下に、周波数に対する各部材の増幅率を図-8、図-9に示す。x方向に関しては、神戸波、一関波共に1もしくは1を下回っていたため十分に耐震補強の効果があつたと考えられる。x方向に関しては、どの位置でも4.5Hz付近で伝達関数が最大となった。スイープ試験から求めた固有振動数は6.4Hzであったことから、加振したことにより振動特性が変化したが加振した時に小刻みなロッキングが発生し、その周期が4.5Hz付近であった可能性があると考えられる。また、芝台、中台では5Hz以上になると伝達関数が1を下回ることから高振動数では低減することが分かる。

地震波加振の結果、神戸波、一関波共に火袋受けでロッキングが発生した。また、一関波ではロッキングと同時に柱が回転した。このことからボルトで固定しても完全に一体化するのは困難であると考えられる。しかし、倒壊するには至らず十分な補強効果があつたと考えられる。

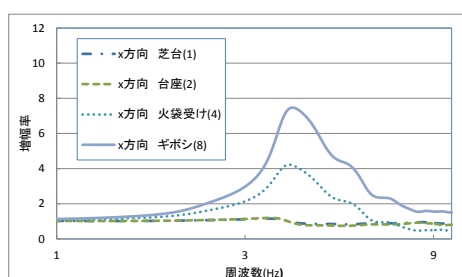


図-6 周波数による各部材の増幅率の変化(春日灯籠, 一関波)

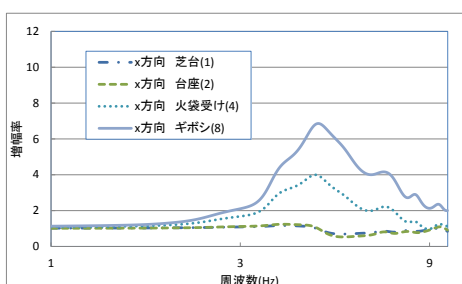


図-7 周波数による各部材の増幅率の変化(春日灯籠, 神戸波)

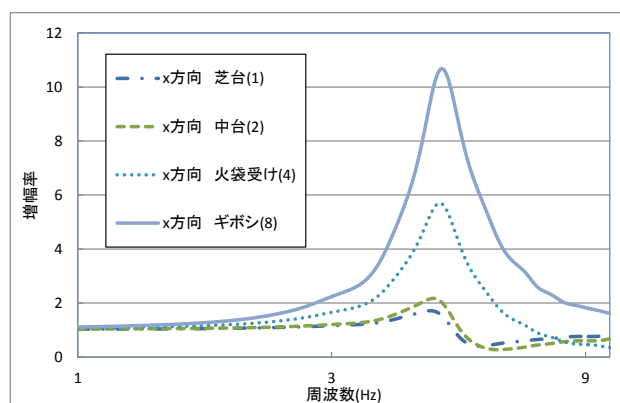


図-8 周波数による各部材の増幅率の変化(神前灯籠, 一関波)

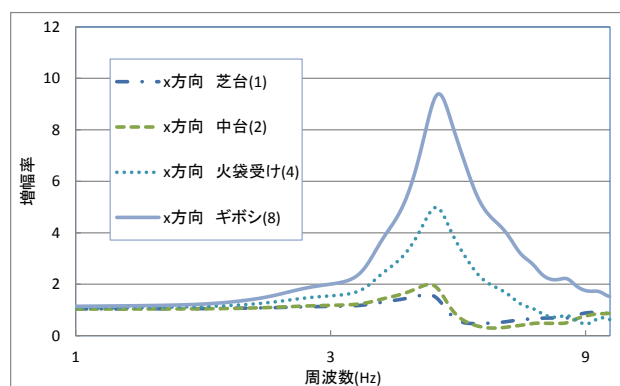


図-9 周波数による各部材の増幅率の変化(神前灯籠, 神戸波)

3. 3次元個別要素法を用いた地震時挙動解析

振動台実験の結果を基に3次元個別要素法を用いて地震時挙動解析を行うことにより、他の補強パターンの検証を行う。解析では3成分の兵庫県南部地震、岩手・宮城内陸地震を入力する。

(1) 解析の概要

本研究では、神前灯籠のモデル化を行う際に簡易的なモデルを作成したため3次元直方剛体ブロックの集合体として扱う。ただし、要素間の接触判定を簡便化するために、適当な半径 (r) を用いて、頂点を1/8 球、辺を1/4 円柱と仮定する⁴⁾。この仮定により、接触のパターンは頂点と頂点、頂点と辺、頂点と面、辺と辺の4つに分類でき、接触力算定の簡便化と鋭い角を有した理想直方体を用いた場合に生じる頂点のひっかかりなどの問題が解決される。ただし心棒を通す穴や笠などの複雑な形状をしている部材は直方剛体を剛結合することで表現した。この剛結合を表現するために、ジョイントという要素間の引張抵抗を考慮するための要素を導入した。また、簡易的なモデルではあるが神前灯籠の質量に関しては、振動台実験に使用した灯籠と同じになるように単位体積重量を調節した。石灯籠のモデル化に必要なヤング率とポアソン比に関しては一般的に使用されている $8.00 \times 107 \text{ kN/m}^2$ と0.25を用いた⁵⁾

(2) 神前灯籠(補強なし)の解析モデル

神前灯籠のモデル化を行う際に簡易的なモデルを作成するため3次元直方剛体の集合体とする。心棒を通す穴や笠などの複雑な形状をしている部材は直方剛体を剛結合することで表現する。質量は実際の神前灯籠と同じになるように密度を調節する。

(3) 神前灯籠(補強あり)の解析モデル

振動台実験の結果から柱から転倒することが分かっているため柱は心棒で固定することとして以下のパターンで補強を施した解析モデルを作成する(図-10)。

- 1: 芝台から中台,柱,火袋受けに1本の心棒を通し,火袋受けから火袋,板石に4本の心棒を通し,板石から笠,ギボシに1本の心棒を通す。
- 2: 芝台から中台,柱,火袋受けに1本の心棒を通し,板石から笠,ギボシに1本の心棒を通す。
- 3: 芝台から中台,柱に1本の心棒を通し,板石から笠,ギボシに1本の心棒を通す。
- 4: 芝台から中台,柱,火袋受けに1本の心棒を通し,火袋受けから火袋,板石に4本の心棒を通す。

(4) 補強なしの解析結果

振動台実験と同様に出力を50%に調節した兵庫県南部地震(神戸波)を入力した結果,柱より上部が一体となってロッキングしたが転倒することはなかった。70%の神戸波で加振した結果,50%で加振した時に比べ柱より上部で激しいロッキングが生じ,転倒に至った。この結果から50%の神戸波では転倒せず70%の神戸波で転倒したことや,転倒方向も振動台実験を再現できていた。

(5) 補強有りの解析結果

振動台実験と同じ補強方法で解析した結果,一関波で振動台実験と同様にロッキング,回転が発生した。また,実験値と解析値の最大加速度を比較し解析の妥当性を検証した結果,概ね一致している結果となった。よって,このパラメータを用いてそれぞれの補強パターンで解析を行った。その結果を以下に示す。

- 1: 柱,火袋,笠でロッキングが発生し,柱は僅かに回転する結果となった。ロッキングの振幅も小さく回転も僅かであるため補強効果は十分である。
- 2: 火袋を固定していないため火袋,笠,ギボシが一体となってロッキング,回転し,一関波では転倒に至ったため補強効果は十分でなかった。
- 3: 補強パターン2と同様に火袋,笠,ギボシが一体となってロッキングし,転倒に至ったため,補強効果は十分でなかった。
- 4: 笠に心棒を通してないが,パターン1と同じように挙動し,転倒に至らなかったため補強効果は十分である。

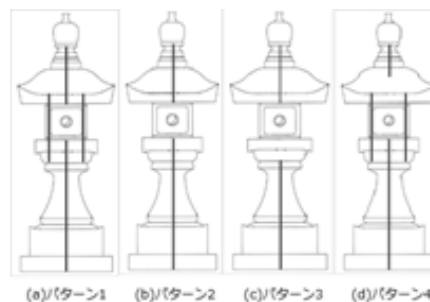


図-10 補強パターン

(6) 解析結果の妥当性

解析結果の妥当性を検証するために振動台実験と同じ補強方法で作成した解析モデルの地震時挙動を再現し比較を行った。振動台実験の補強した石灯籠の挙動は神戸波ではロッキングが発生し,一関波ではロッキング,回転が発生するという結果であった。神戸波の解析でも実験結果と同様にロッキングが発生した。一方,一関波で解析した結果も振動台実験と同様にロッキング,回転が発生した回転方向も同じであり十分に実験結果を再現できていると考えられる。また,最大加速度の値を用いて比較を行った。以下に神前灯籠を神戸波と一関波で加振した結果を示す。図-11, 図-12を見ると解析結果に比べ実験結果のギボシ部分での最大加速度が大きくなっていることがわかる。この原因は,振動台実験では心棒の先端をボルトで固定しているが完全な剛結合となっていないことから,心棒の先端を剛結合としている解析モデルより加速度が大きくなったのではないかと考えられる。また,振動台実験では中台の加速度が芝台に比べて減少する結果となった。これは,加振時に中台付近で逆位相の挙動を示したためであると考えられるが,直方体要素の組み合わせで逆位相まで再現するのは困難であると考えられる。

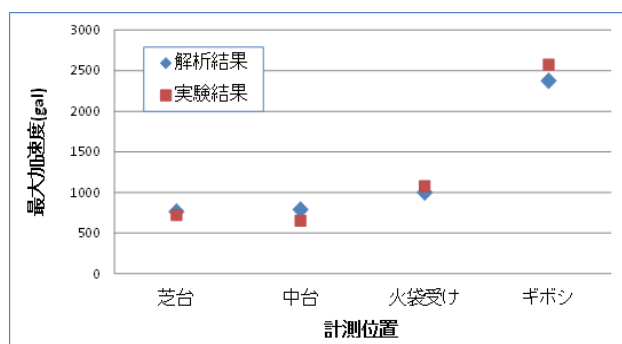


図-11 最大加速度の比較(一関波)

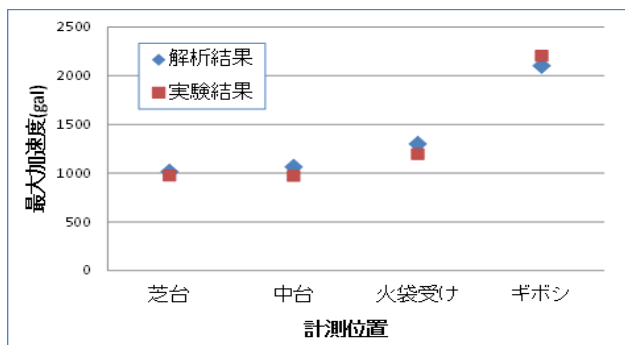


図-12 最大加速度の比較(神戸波)

4. おわりに

本研究は、単純に石部材を積み上げただけであるため地震に対して脆弱であり転倒による人的被害も発生している石灯籠について、振動台実験と3次元個別要素法を用いた地震時挙動解析により補強方法の検証を行うと共に、補強方法の提案を目的として研究を行った。その結果、以下のような結果となった。

実寸大の春日灯籠と神前灯籠を用いた振動台実験では、心棒によって石灯籠を一体化する耐震補強を施した結果、春日灯籠、神前灯籠共に完全に一体化していないためロッキングなどが生じたが転倒に至らず、耐震補強効果は十分にあると考えられる。

3次元個別要素法を用いた地震時挙動解析では、石灯籠を一体化するような補強を行わなければ、転倒を防ぐのは難しいと分かった。また、石灯籠の耐震補強を施す方法としてパターン1,4が有効であると考えられる。振動台実験より春日灯籠と神前灯籠の振動特性に大きな違いはないことから、この条件を本研究で使用した石灯籠と同様の一般的な石灯籠に適用すれば倒壊を防ぐことができることがわかった。

本研究で、石灯籠の転倒を防ぐことは振動台実験や解析結果から達成できた。この結果より、石灯籠の転倒による人的被害は防ぐことができると考えられる。しかし、振動台実験では春日灯籠に岩手・宮城内陸地震を入力し加

振した場合、ひび割れ・欠損が生じた。石灯籠は非常に高価であるため破損したからといって簡単に買い替えられるものではないことから、ひび割れ・欠損も防がなくてはならない。よって、ひび割れの生じた柱上部にロッキングを抑える対策が必要となってくる。また、心棒による耐震補強法は新しい石灯籠には適用できるが、文化財などの石灯籠に適用することは難しい。よって、今後は心棒以外の補強方法の検証も必要であり、他にも、東北地方太平洋沖地震を入力して加振し検証する必要がある。

謝辞

研究をサポートして頂いた学生各位、振動台実験の試験体を提供して頂いた越前株式会社には、心から感謝致します。また、本研究において解析に用いたプログラムの作成者である京都大学教授の清野純史氏と准教授の古川愛子氏には多くの御助言を頂き心より感謝します。

参考文献

- 1) 古川愛子, 清野純史, 三輪 滋, 縦山貴昭: 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, 地域安全学会論文集 (8), pp31-39, 2006.11.
- 2) 川上勝弥, 三田紀行: 平成 19 年能登半島沖地震におけるブロック造建物の被害状況報告, p.8.
- 3) 新潟大学農学部生産環境科学科ホームページ: <http://www.agr.niigata-u.ac.jp/seikan/study/kenkyu/kawabe.html>, 2012/09/03
- 4) 奈良禎太, 金子勝比古: 花崗岩の異方弾性定数の評価法に関する研究, 資源と素材, vol119(2003), No.6, 7 pp396-402
- 5) 榎本美咲, 目黒公郎: 3次元個別要素法を用いた家具の動的シミュレーション, 土木学会第56回年次学術講演会講演会概要集, pp236-2

(?)

THE VIBRATION EXPERIMENT ABOUT SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF THE STONE LANTERN AND ANALYTIC EXAMINATION BY THE THREE-DIMENSIONAL DISTINCT ELEMENT METHOD

Akira MURATA, Ryo SHIMIZU, Masakatsu MIYAZIMA

The damage of the Stone structure caused by the earthquake occurs frequently in Japan. The damage of a stone lantern in particular and the gravestone is reported. Therefore I paid my attention to a stone lantern this time.

I analyzed it with an experiment for no reinforcement and a stone lantern of the reinforcement existence and studied earthquake reply properties and the seismic strengthening method. I reinforced it by an axle this time. This reinforcement method understood that it was effective as reinforcement measures from an experiment and an analysis result.