石灯篭に関する実寸大模型を用いた振動台実験による耐震補強効果の検証

金沢大学理工学域環境デザイン学類　学生会員　○中村友香
金沢大学理工研究域環境デザイン学系　正会員　村田　晶
金沢大学理工研究域環境デザイン学系　正会員　宮島昌克
金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻　清水　諒

1. はじめに

日本は大規模災害となるような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．それに伴う石造構造物の被害も多く発生しており，特に灯篭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．

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が，灯篭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篭が倒壊するという事例もある．また，一昨年には東北地方太平洋沖地震が発生した．これによる灯篭被害は，全壊・半壊・小壊・一部損傷，すべて合わせて 960 件もの被害が報告されている [1]．これまでに，古川，清野等による墓石の振動台実験 [2]や伊藤等による灯篭の振動台実験 [3]が行われてきたが，いずれも東北地方太平洋沖地震の地震波を用いた実験はなされていない．

そこで本研究では，実寸大模型を用いた振動台実験で芯棒によって耐震化された石灯篭に東北地方太平洋沖地震の地震波を用いて補強効果を検証する．

2. 振動台実験の概要

2.1 供試体概要

今回の実験では，御影石を石材とした神前灯篭と春日灯篭を使用する．本研究では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る．そこで本研究では，各部材に対しステンレス芯棒を通し，その両端をボルトで固定することで一体化させる耐震対策を施すこととする．

2.2 実験概要

本研究では，補強効果の検証のために地震波波形を用いて加振を行う．入力地震動には，東北地方太平洋沖地震で最大加速度が最も大きかった K-NET 築館，補強済みの石灯篭の固有振動数と地震波の卓越周波数が同程度である K-NET 大宮の 2 波を選定する．また，既往の研究との比較のため，兵庫県南部地震(JMA 神戸), 岩手・宮城内陸地震(K-NET 一関西)の合計 4 波を用いて加振する．なお加振の順番は，大宮，築館，神戸，一関の順で行う．ここで紙面の都合上，実験結果については神前灯篭の結果のみ記載する．

3. 地震波加振による神前灯篭の結果

3.1 部材ごとの応答倍率

地震波加振の結果，神前灯篭ではどの地震波で加振しても倒壊，ひび割れは見られなかった．しかし，築館 100％レベルで加振した場合に柱の下部でロッキングが発生した．ここで，それぞれの地震動に対する高さごとの加速度応答倍率を**図-1** に示す．図に示すように，部材の位置が上部になるにつれて応答が大きくなることから，芯棒の効果により石灯篭は一体となって振動していたと考えられる．

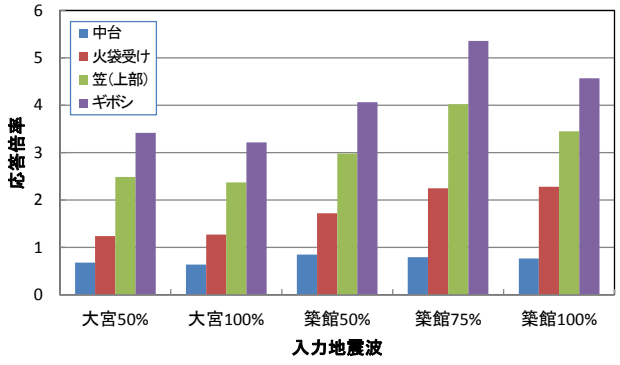

図-1　神前灯篭の応答倍率(水平方向)

3.2 ロッキングの発生原因

次に，ロッキングが発生した原因について考える．実験終了後に石灯篭を解体した際，芯棒と石を固定する為のボルトがかなり緩んでいることがわかった．これより，ロッキングはボルトの緩みにより石どうしの摩擦力が低下したためであると考える．では，どの地震波でボルトが緩んでしまったのかをそれぞれの地震波に関する部材ごとの伝達関数から考察する．大宮 100%レベル加振時(図-3)では，卓越周波数が 5.2Hz 付近であることがわかる．この結果は，自由振動で求めた神前灯篭の固有振動数 5.2Hz と同じであった．つまり，大宮 100%加振時では振動特性が変化していないことがわかる．次に，築館 100%レベル加振時(図-4)では，周波数の卓越点が 4Hz と 5Hz 付近の 2 箇所にあることがわかる．このことから，築館 100%レベルでの加振によりボルトが大きく緩み，剛性が変化し振動特性が変化したのだと考えられる．また，築館 100%レベルで加振した際の火袋受けの左右に設置した加速度計の応答を図-4 に示す．左右の位相が逆位相の時，部材がロッキングしていると仮定する．図に示すように，左右の位相が逆位相になっており，実際に築館 100%レベル加振時にロッキングしていることがわかる．

4. おわりに

本研究は，灯篭被害が数多く発生した東北地方太平洋沖地震のような観測史上最大規模の地震に対しても芯棒を用いた耐震補強により効果が得られるのかを検証する為，実寸大模型を用いた振動台実験により研究を行なった．

その結果，倒壊を防ぐという点では今回の補強方法は成功した．しかし，石灯篭は非常に高価であるため破損したからといって容易に買い替えられるものではないので，ひび割れも防ぐ必要がある．しかし，ロッキングを防ぐことは難しいのでロッキングによる影響が少ない部分で発生させ，ひび割れが生じるのを防ぐ方法が考えられる．また，芯棒による耐震補強は新しい石灯篭には適用できるが，文化財等の既存の石灯篭に適用することは難しい．よって今後は芯棒以外の補強方法も検証する必要があると考えられる．

謝辞

実験をサポートして頂いた学生各位，振動台実験の供試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，入力地震波として K-NET 観測記録および，JMA を利用させていただき有り難うございました．

参考文献

1)宗教者災害救援マップ：
https://sites.google.com/site/fbnerjmap/，(2013/12/11 ｱｸｾｽ)
2)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，Vol.8，pp.31-39，2006.
3)伊藤直洋：振動台実験と 3 次元個別要素法を用いた地震挙動解析による石灯篭の耐震補強法の提案，平成 23 年度金沢大学大学院修士学位論文，2012.

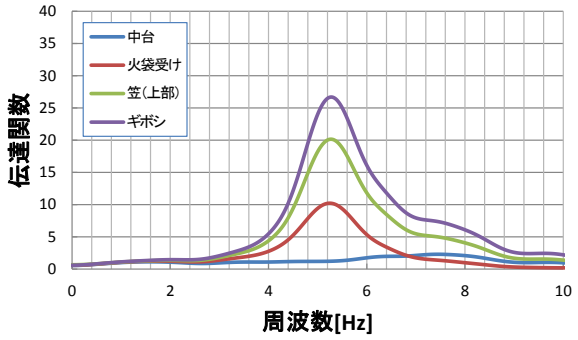

図-2　大宮 100%加振時の伝達関数(水平方向)

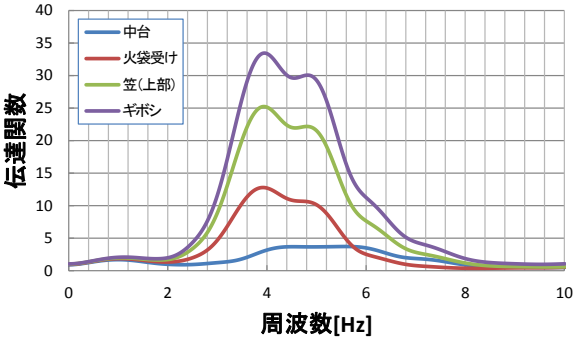

図-3　築館 100%加振時の伝達関数(水平方向)

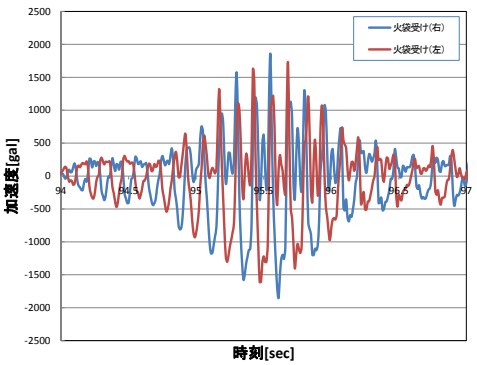

図-4　築館 100%加振時の加速度応答(火袋受け左右)