

振動台を用いた実大石灯籠の耐震補強効果に関する実験的検証

金沢大学理工研究域 正会員 村田 晶

同 正会員 宮島昌克

(株) 日本海コンサルタント 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建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振動台実験や解析等により様々な補強方法の考案や検証が行われてきた¹⁾が、石灯籠に関する耐震対策の検証は十分に行われていると言えない。石灯籠の場合、墓石と異なり意匠を施されているため、耐震対策に制約があり、形状を考慮した対策が求められる。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。また、2011 年東北地方太平洋沖地震による灯籠被害は、全壊・半壊・小壊・一部損傷を合わせて 960 件もの被害が報告されている²⁾。筆者らはこれまでに石灯籠の振動台実験³⁾を行っているが、東北地方太平洋沖地震を扱った実験は行っておらず、長時間震動による建造物への影響が評価できていない。

そこで本研究では、振動台実験で芯棒によって耐震化された実寸大石灯籠に対し、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ことを目的とする。

2. 振動台実験の概要

石灯籠試験体については、御影石を石材とした石灯籠のうち、神前灯籠と春日灯籠と呼ばれるタイプについて検証する。地震による倒壊を防止するため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、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。

入力地震動については、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 築館と、予備実験により補強済みの石灯籠の固有振動数と地震波の卓越周波数が同程度であると確認した、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、一関西の順とする。入力レベルは原波入力を 100%とし、他に 50%、75% レベルによる加振を行う。なお紙面の都合上、実験結果については神前灯籠の結果のみ記載する。

3. 神前灯籠における加振実験結果および考察

3.1 部材ごとの応答倍率

地震波加振の結果、神前灯籠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。ここで、それぞれの地震動に対する各部材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籠の応答としては 1 次モードが卓越し、ほぼ一体となって振動すると考えられる。しかし、入力地震動レベルが大きくなるとロッキング振動が表れる。例として、築館 100% レベルで加振した際の火袋受けの左右における加速度応答を図-2 に示す。図に示すように加速度波形が逆位相を示していることから、ロッキングが発生していることが分かる。なお、実際には築館 100% レベルで加振した場合、柱の下部でロッキングが発生していた。ロッキング振動が起きると部材の端部に大きな応力が発生するため、写真-1 に示すような石部材の割れが発生しやすくなる。割れが発生すると石灯籠としての経済的・文化的価値が大きく毀損してしまう。石部材の割れは石の強度に依存するが、強度を上げることは難しいため、ロッキングの影響を回避する方法か、ロッキングの発生を抑制する方法を考慮することが必要である。

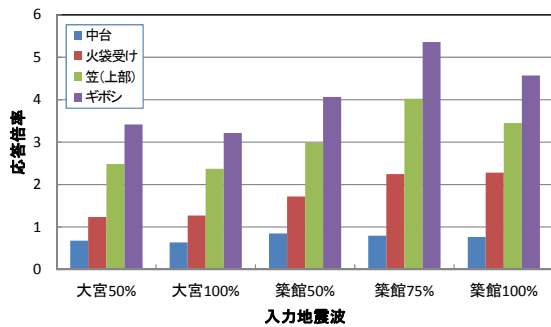


図-1 神前灯籠の加速度応答倍率(水平方向)

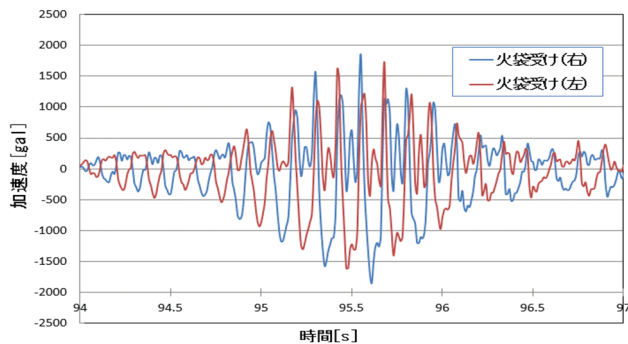


図-2 築館 100%加振時の加速度応答(火袋受け左右)



写真-1 ひび割れが発生した柱下部(春日灯籠)

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。実験終了後に石灯籠を解体した際、芯棒と石部材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部材同士の摩擦力が低下したためであると考えられる。ロッキングは強振時に発生していたため、強振による振動特性の変化を検証する。そのために、得られた波形を強振前、強振中、強振後に分けてフーリエ変換しスペクトルの増幅率で表したものを図-3に示す。ここで築館波は強振となるところが2回あるため、図中にはそれぞれ強振中1、強振中2と表記する。図に示すように、ロッキングが発生した築館100%の強振中2で卓越振動数が4Hz付近から3Hz付近へと変化することがわかる。この結果から、ロッキングにより石部材が一体化しきれず、石灯籠の固有振動数も変化したことがわかった。

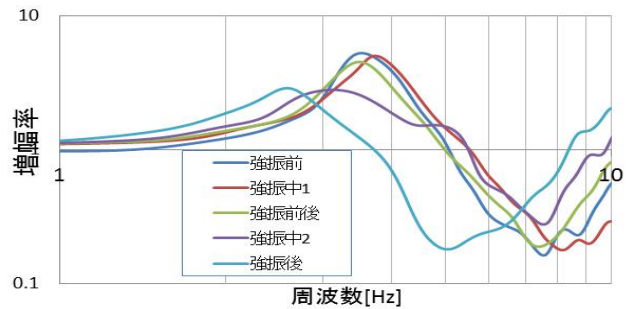


図-3 強振前、中、後に分割したスペクトルの増幅率

4. おわりに

灯籠被害が数多く発生した東北地方太平洋沖地震のような長継続時間の地震動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した。その結果、倒壊を防ぐという点では既往の地震のみならず、東北地方太平洋沖地震の地震動でも本方法による補強効果のあることが分かった。しかし、ロッキング振動の影響により、石部材の割れを防ぐことができなかった。しかし、本方法ではロッキングを防ぐことは難しい。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等も考えられるが、まずはロッキングの発生を抑制する方法を考慮することが必要である。また、今回の補強法は新しい石灯籠に適用しているが、既存の石灯籠に適用することは簡単でないため、既存の石灯籠に適用可能な補強方法も検討する必要がある。

謝辞

実験をサポートして頂いた中村氏(現(株)CPU)をはじめとする学生各位、振動台実験の供試体を提供して頂いた越前(株)に、心から感謝申し上げます。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ました。

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, Vol.8, pp.31-39, 2006.
- 2) 宗教者災害救援マップ:
<https://sites.google.com/site/fbnerjmap/>, (2013/12/11 アクセス)
- 3) 村田 晶, 清水 諒, 宮島昌克, 伊藤直洋: 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, 土木学会論文集, A1, Vol.69, No.4, pp.I-965~I-972, 2013.