

3次元個別要素法を用いた石灯籠の地震応答特性に関する解析的検討

金沢大学理工研究域 正会員 ○村田 晶
金沢大学理工学域環境デザイン学類 田中宏和
金沢大学理工研究域 正会員 宮島昌克
金沢大学大学院自然科学研究科 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。一例として2007年能登半島地震で発生した石灯籠の転倒により、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ている。

ここで墓石に関しては、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¹⁾}。しかしながら、灯籠に関しての耐震対策の検証はほとんど行われておらず、石灯籠の耐震対策について検討する必要がある。そこで筆者らは実大石灯籠による振動実験と3次元個別要素法を用いた石灯籠の地震応答特性に関する解析的検討を行っている²⁾が、多くの被害が発生した東北地方太平洋沖地震における検討は行っていない。灯籠の転倒は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が、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、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、既往の研究で提案した石灯籠の耐震補強効果の検証を行うことを目的とする。

2. 3次元個別要素法を用いた地震時挙動解析

2-1 解析の概要

本研究では、3次元個別要素法を用いた地震応答解析を行うことにより、地震時挙動について耐震補強を施していないモデルと、耐震補強により安全性を高めたモデル（パターン1～パターン4）に対して行う。入力地震動は1995年兵庫県南部地震（JMA神戸）、2008年岩手・宮城内陸地震（K-NET一関）および2011年東北地方太平洋沖地震（K-NET栗原）を用いる。解析モデルには一般的な石灯籠の例として神前灯籠をモデル化する。灯籠をモデル化するには簡易的なモデルとして扱うため、積み上げた石は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、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。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する。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する。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、既往研究で行った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する。ここで、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、石材料として一般的に使用されている $8.00 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ と0.25をそれぞれ用いる⁵⁾。

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。

神前灯籠(補強あり)の解析モデルについては、挙動として柱から転倒することが分かっていることから、柱は心棒で固定することにし、図-1に示す以下のパターンで補強を施した解析モデルを作成する。

パターン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。パターン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。パターン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。パターン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。

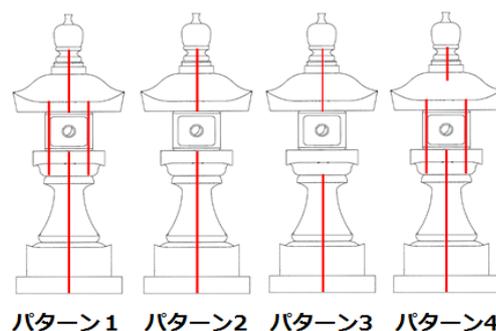


図-1 補強パターン概要

2-2 解析結果および考察

補強なしの解析結果例として入力レベルを70%に低下させたJMA神戸波で加振した結果を図-2に示す。加振後16秒から柱より上部で激しいロッキングが生じ，既往の実験結果と同様に転倒に至った。ゆえに震度5相当以上の地震動を受けた場合，倒壊する可能性がかなり高いといえる。

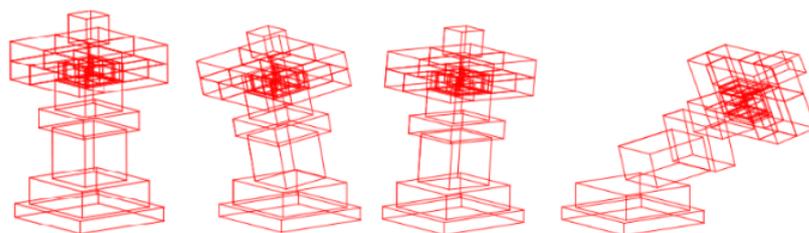


図-2 地震時変位挙動の様子
(JMA神戸波70%，左から16, 17, 18, 19秒後)

補強ありの解析結果例として，K-NET一関波による結果を図-3に示す。図に示すように，パターン1～パターン4の挙動については，それぞれ以下のようなものである。パターン1では，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。パターン2では，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い。パターン3では，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い。パターン4では，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。なお，詳細については研究発表会にて報告する。

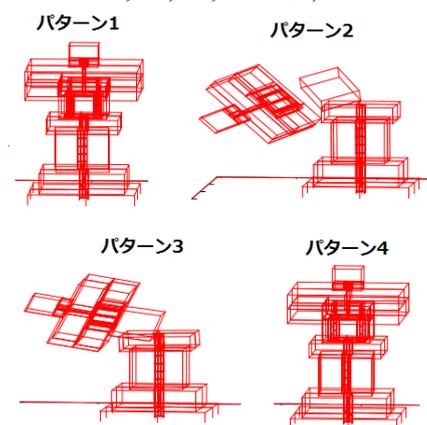


図-3 地震時変位挙動の様子
(K-NET一関波，補強あり)

3. おわりに

3次元個別要素法による地震時挙動解析結果は次のようである。補強を施さない石灯笼モデルでは強震時に倒壊すること，また補強に関しては石灯笼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こと，が明らかとなった。また，石灯笼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。なお，本研究を進めるにあたり，実験の試験体を提供して頂いた越前株式会社から感謝いたします。また，実験をサポートして頂いた伊藤氏（現名古屋市），小松氏（現東工大大学院生）をはじめとする研究室学生諸氏にも感謝いたします。なお，実験・解析に用いた強震記録はK-NET，およびJMAの観測記録を利用させていただきました。最後に，本研究において解析に用いたプログラムは京都大学教授の清野純史氏と准教授の古川愛子氏が開発したものを利用させていただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献：1)村田ら：石灯笼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，土木学会第32回地震工学研究発表会，1-266, CD-ROM, 2011. 10.
2)古川ら：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, 2006.11.