

3次元個別要素法を用いた東北地方太平洋沖地震における 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
金沢大学大学院自然科学研究科		田中宏和
金沢大学理工研究域	正会員	宮島昌克
同上	正会員	池本敏和

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2011年東北地方太平洋沖地震を始め大規模な地震災害が頻発している。それに伴う石灯籠や墓石、鳥居のような石造構造物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。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例もある。

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いないことから、石灯籠の耐震対策について検討する必要がある。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、東北地方太平洋沖地震における検討は十分に行っていない。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、既往研究で解析妥当性を確認した3次元個別要素法を用いて、東北地方太平洋沖地震における、補強を施した石灯籠の安全性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、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に対し、3次元個別要素法を用いた地震応答解析を行う。入力地震動については2011年東北地方太平洋沖地震本震記録を用いる。東北地方太平洋沖地震は地震の規模が非常に大きかったことから、広範囲にわたり石灯籠等の被害が報告されている³⁾。波形の選定にあたっては石灯籠が倒壊する主原因は加速度の大きさにあると考えられるが、強震動の形状や卓越周期等の特性による影響も否定できない。本研究では観測記録のうち12地点(築館、塩竈、日立、仙台、銚田、大宮、山元、今市、白河、芳賀、西郷、八枝(いずれもK-NET観測点))を用いて解析を行う。なお、解析モデル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。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、既往の実験により地震時挙動として柱から倒壊することが

分かっていることから、補強方法として芝台から中台、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。

2-2 解析結果および考察

補強なし、補強ありの解析結果例として K-NET 築館波で加振した結果を図-1～図-3 に示す。補強なしの場合は図-2 に示すように加振後 20 秒過ぎにギボシが外れる挙動を示し、図-1、図-2 に示すように 67 秒過ぎで転倒に至った。補強ありの場合は図-3 に示すようにねじれるような挙動を示すものの転倒には至らないことが分かる。また、柱、火袋、笠でロッキングが発生していることも分かる。しかしながら、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と言える。紙面では割愛するが他の 11 地点における解析結果も同様な傾向を示し、地震波による転倒は見られないことから、本研究で用いる補強方法で十分安全であると考えられる。

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うことにより、転倒を防ぐことが可能であることが明らかとなった。しかしながら、無被害には至らず石材の回転が発生すること、ロッキングの発生に起因する石材の割裂被害が起こりえることが解析結果より示唆できる。なお、本研究を進めるにあたり、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。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献：

- 1)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.
- 2)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, 2012. 10.
- 3)宗教者災害救援マップ
<https://sites.google.com/site/fbnerjmap/>, (2012/8/24 アクセス),

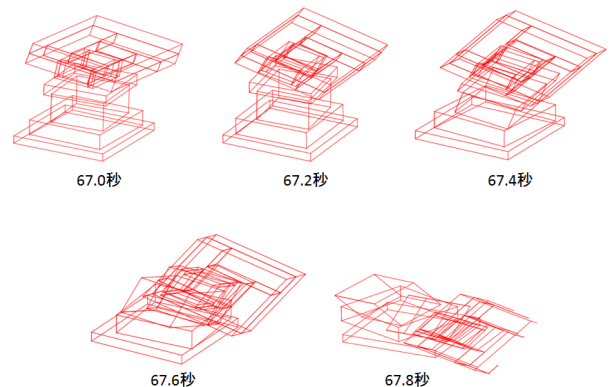


図-1 補強なし石灯笼の地震時変位挙動 (K-NET築館)

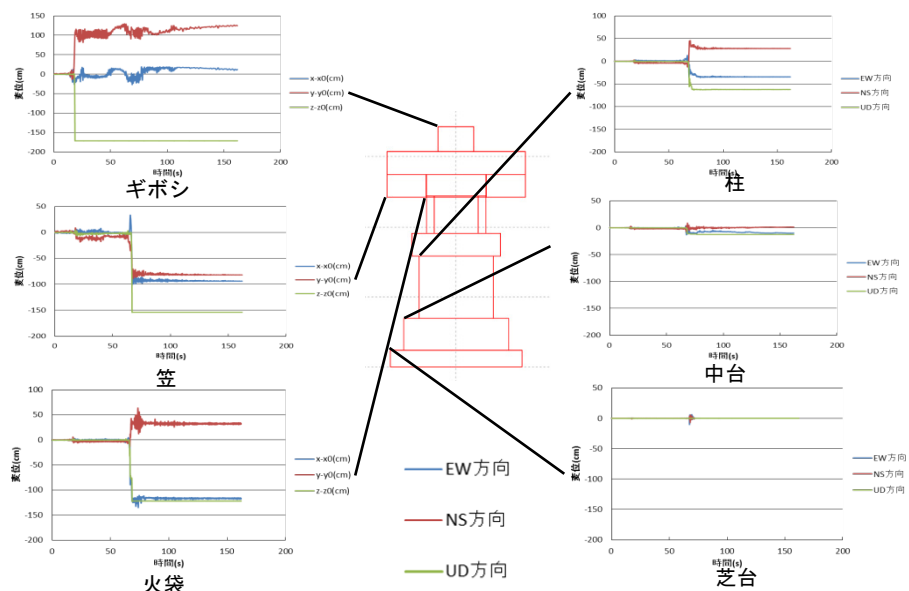


図-2 補強なし石灯笼の地震時変位挙動時刻歴 (K-NET築館)

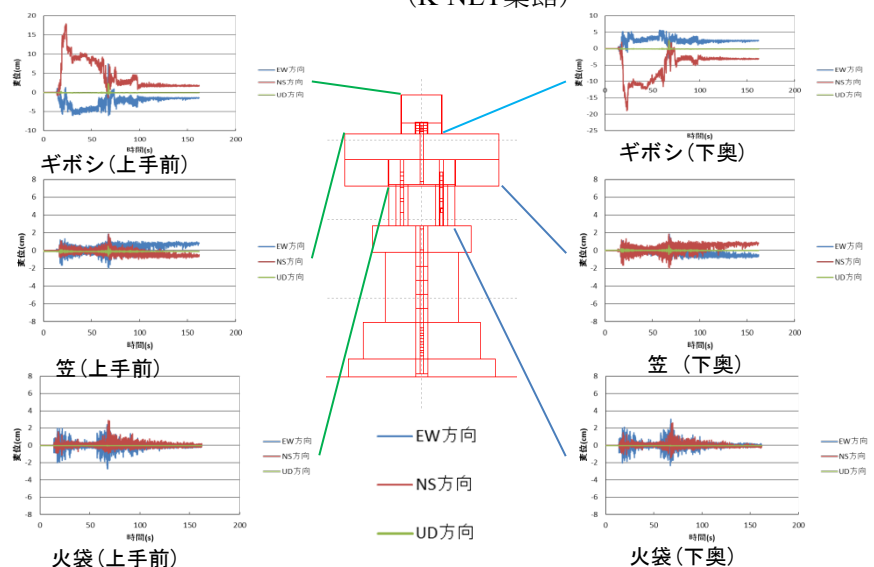


図-3 補強あり石灯笼の地震時変位挙動時刻歴 (K-NET築館)