

靖國神社大灯籠の免震レトロフィット



木村 誠
清水建設



谷口 尚範
同



平 嵩雄
同



熊谷 仁志
同

1 はじめに

靖國神社の大灯籠は、伊東忠太氏の設計による日本一の規模を有する石灯笼である(写真1、2、3参照)。

東日本大震災時に重さ約26tの頂部笠石が大きく揺動するのが視認され、その下側にある火袋石の上縁を一部破損・落下させる被害が生じた。余震対応として地上に降ろしていた笠石の復旧にあたり、震度6強程度の大地震に対しても参拝者の安全確保が図られるように、笠石の免震化と積石目地部の補強を組み合わせた耐震改修を実施したので、その概要を報告する。

概要

所在地：東京都千代田区九段北 靖國神社境内(2基)
規模：高さ12.47m、重量約490トン
構造：組石造(鉄骨鉄筋コンクリート造心材)
建造年：昭和10年(1935年)／設計者：伊東忠太
改修年：平成24年3月竣工
設計者：清水建設株式会社 一級建築士事務所
施工者：同 建築事業本部東京支店 社寺建築・住宅部
改修方法：滑り振り子式免震装置による笠石免震化
棒鋼挿入による石目地の耐震補強

2 鉄骨鉄筋コンクリート心材を有する石灯笼

神社に保管されていた建造時の図面や計算書を手掛かりに各種調査を実施して灯笼の内部構造を把握した。表1に調査結果の概要を示す。

外観は笠石、火袋石、竿部、台座、基壇の各石材が積み上げられた組積造であるが、石の内部がくり抜かれて鉄骨鉄筋コンクリート造の心材を内蔵する耐震構造となっていることが確認された。使用され



写真1 大灯籠のロケーション

表1 調査結果概要

■形状計測	→ 3Dスキャン
■材料強度試験	
・石 材	圧縮強度：197N/mm ² 、割裂強度：8.5N/mm ² 弾性係数：E=50000N/mm ² (※補修用の同産地材)
・コンクリート	圧縮強度：13.4～20.4N/mm ²
・鉄 筋	引張強さ：389～467N/mm ²
・鋼 材	引張強さ：431～451N/mm ² (L形鋼)、 624～640N/mm ² (平鋼)
■内部調査	
・石材の肉厚調査	→ 電磁波レーダー法／電磁誘導法
・火袋石の一時撤去	による心材の目視確認
・コアボーリング	→ 鉄骨の埋め込み深さ確認

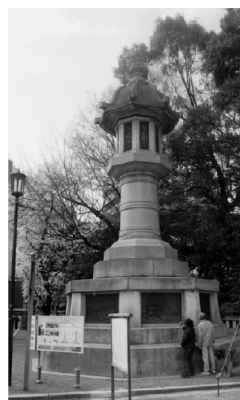


写真2 全景



写真3 笠石の撤去時の状況

ている石材は銘石の一つである岡山県産北木石（花崗岩）で、コンクリートの約5倍の強度と2.5倍近い剛性がある。鉄骨心材はほぼ図面通り台座内まで達していることも判明した。また心材上端は笠石まで達しているものの図面とは異なり一体性はなく、今回の地震で置き重ねられただけの笠石・火袋石の境界部分がずれ動いて石材の損傷が生じた。

3 振り子式免震装置による笠石の免震化

耐震改修の概要を図1に示す。塔体の約3割の重量を占める笠石の免震化により軸部の転倒モーメントを低減し、台座に鋼棒を挿入して目地を曲げ補強する計画とした。大正関東地震の直後に建造された大灯籠は耐震設計がされており、これに現代の技術を付加して再評価することで合理的な改修計画とした。

免震装置は火袋石の内部に新設する鋼管支柱の上部に取り付け、火袋石と笠石とが迫り合わない仕組みとした。薄型でコンパクトなサイズの滑り振り子式免震装置（図2参照）を限られたスペースに3台配置し、火袋石と笠石との見え掛かりの隙間を約80mmに抑えて外観への影響を最小限とした。免震層の周期は装置の滑り面の曲率で決まる約4秒、滑り面の摩擦係数は0.024である。

なお、水平変形が免震装置の限界変形（400mm）に達しても笠石が脱落しないように鋼管支柱内にストッパーとして長さ1.25m、径φ90mmの棒鋼を設置した。棒鋼は笠石と鋼管支柱間の変位差に応じて自由に傾斜できるが、免震装置の限界変形に達すると鋼管支柱の内部2か所に接触して門として働くように工夫した。

笠石の復旧工事の手順を図3に示す。鋼管支柱の頂部には免震装置を据えるための天板を設けているが、その外形寸法が火袋石の繰り孔よりも大きいた

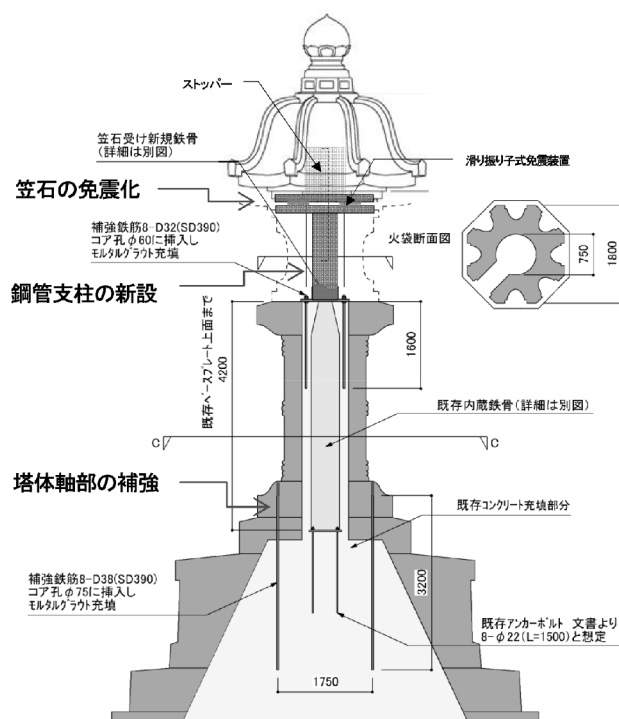


図1 耐震改修の概要

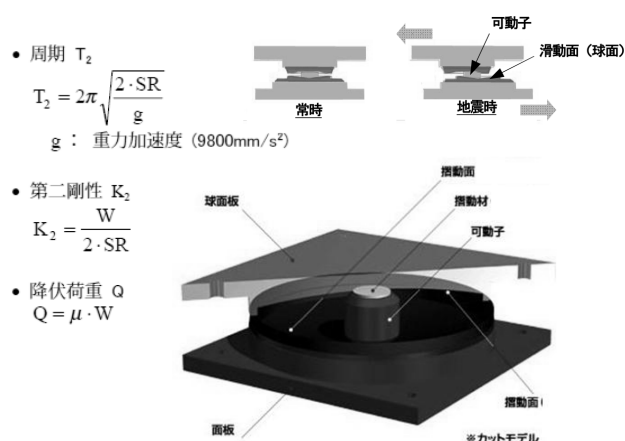


図2 滑り振り子型免震装置の概要

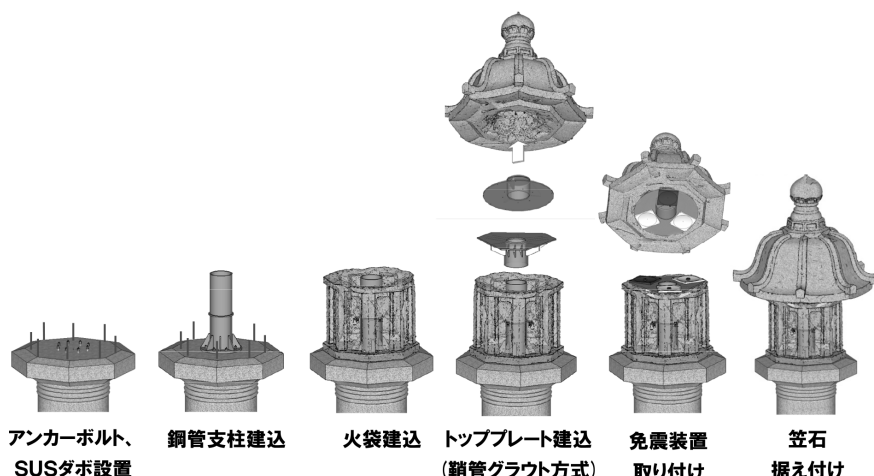


図3 笠石の復旧工事の手順



写真4 鋼管支柱の仮組

め、支柱を上下に分割して火袋石設置後に鞘管グラウト方式で現地組み立てすることとした。鞘管の隙間精度を確保するため、鋼管支柱は工場で仮組し調整を行った（写真4参照）。

4 石材のすべりを考慮した3次元FEM解析

台座部を補強する異形棒鋼は直径38mm、長さ3.2m×8本をφ75mmの穿孔に挿入し、隙間を無機系グラウト材で充填して石材または基壇内部のコンクリートと一体化した。補強筋の引抜耐力は石材とグラウト材界面の付着で決まるため、同一産地石材を用いた引き抜き試験を実施して性能を検証した。試験結果は図4に示すとおりで、最大強度2～4N/mm²が生じた後に平均1.5N/mm²程度の比較的安定した滑り抵抗を示す。

補強を含む灯籠塔体の断面性能の評価については、石の水平目地や石材界面での付着性能、補強鉄筋の抜け出し等の影響により平面保持の仮定が成立しない可能性があるため、3次元モデルによるFEM解析により検討を行った。（応答解析には図7に示すように断面解析を使っている。）

図5に終局時レベルの応力・変形図を示す。補強をしない場合には、中立軸が圧縮側に大きく偏って中央の鉄骨心材が全断面引張材として働く。アンカーボルトが降伏した後で圧縮側の石材が割裂破壊に至る。補強後は補強鉄筋が降伏強度の1/2位の応力状態までは抜け出さずに機能し、アンカーボルトが一部降伏した後で引張側のコンクリート界面付近の石材が割裂破壊に至る。石材が圧縮側では剛性・耐力が高く、引張側では界面で滑って目地が開くという断面特性を解析で評価できた。

5 動的解析により耐震改修効果を検証

基礎のスウェイ・ロッキングを考慮した多質点系モデルによる地震時刻歴応答解析を行い耐震改修の効果を確認した。図6にモデルの概要を示す。塔体の断面性能については、想定している応答レベルでは石材の付着強度の影響が小さく、図7に示す1本棒モデルによる断面解析の結果と3次元FEM解析の平均付着モデルの結果とがよく合うことを確認できたので（図8参照）、断面解析の結果を適用した。

図9に補強前後の応答最大曲げモーメント分布と各断面の耐力線の比較を示す。補強前は告示波レベル2の入力地震動（大正関東地震再現波の位相）に対して台座部分の損壊が懸念される結果となる。補

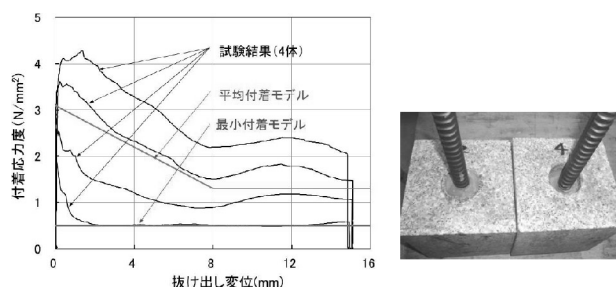


図4 鉄筋の引き抜き試験結果

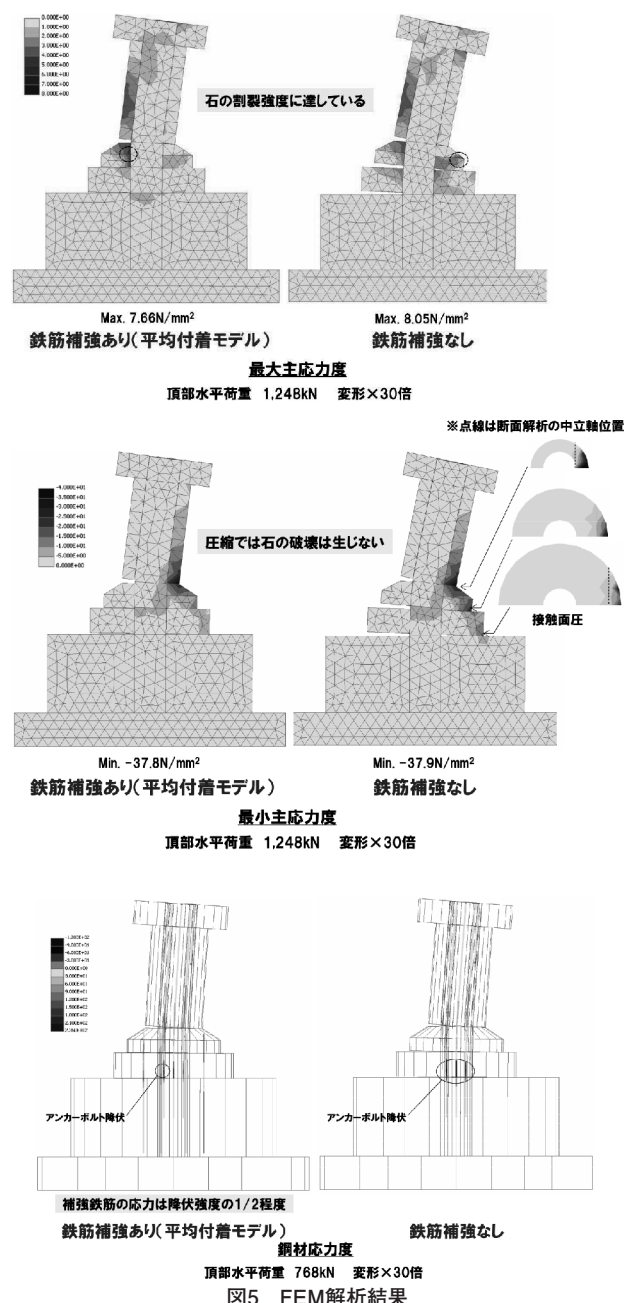


図5 FEM解析結果

強後は笠石の免震化による応答の低減と台座部の補強による耐力向上の結果、各所の余裕度がバランスよく確保される結果となった。

6 まとめ

- ・ 大灯籠は鉄骨鉄筋コンクリート造の心材を内蔵する耐震構造となっていることを調査で把握した。
- ・ 東日本大震災では置き重ね構造になっていた笠石がずれ、それを支える火袋石が部分的に損傷した。
- ・ 「外観保存」と「損傷防止」を目標として笠石部を「免震化」し石目地部の曲げ補強を行った。
- ・ 簡便な断面解析に基づく1本棒モデルで燈籠の構造挙動を表現できることが、FEM解析との比較によって確かめられた。
- ・ レベル2相当の地震時においても損傷が軽微にとどまることを時刻歴応答解析により検証した。

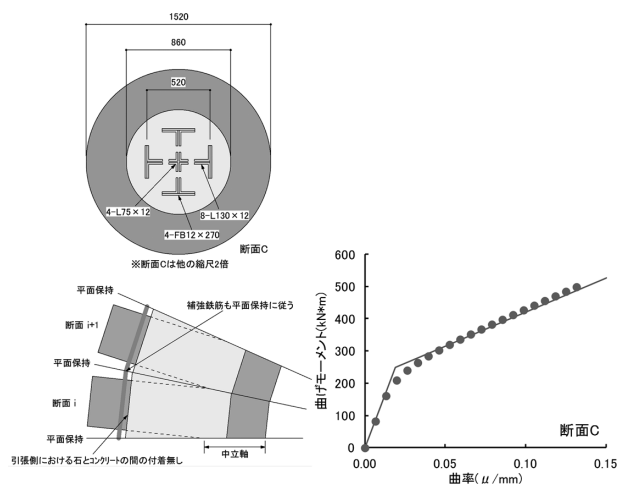


図7 1本棒モデルにおける断面解析結果を多直線で近似

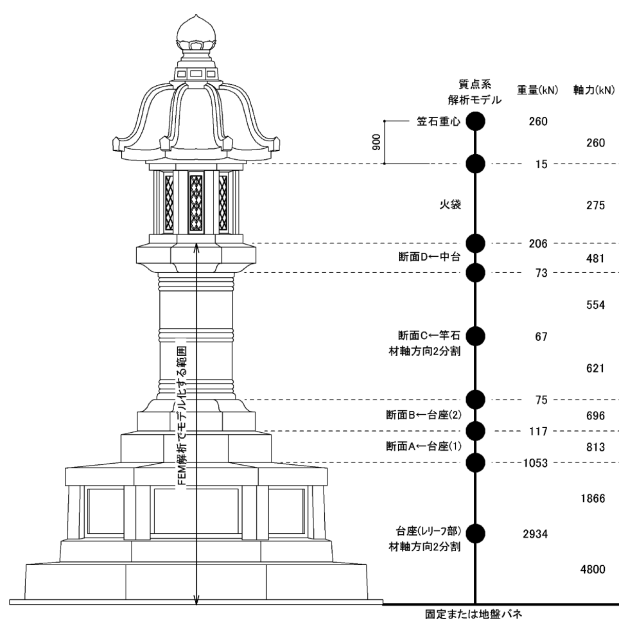


図6 動的解析モデル

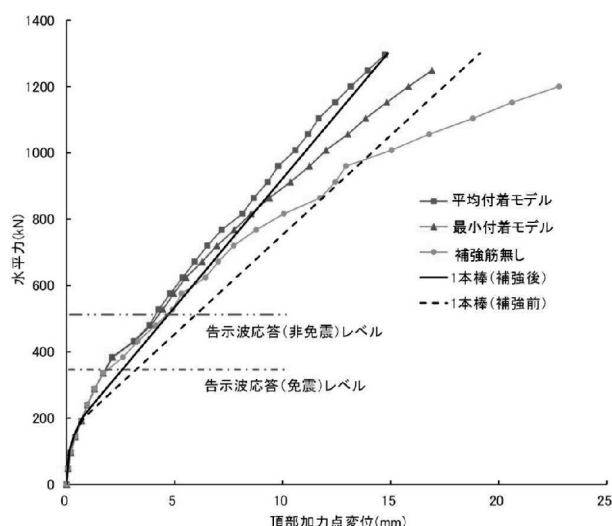


図8 荷重変形関係の比較

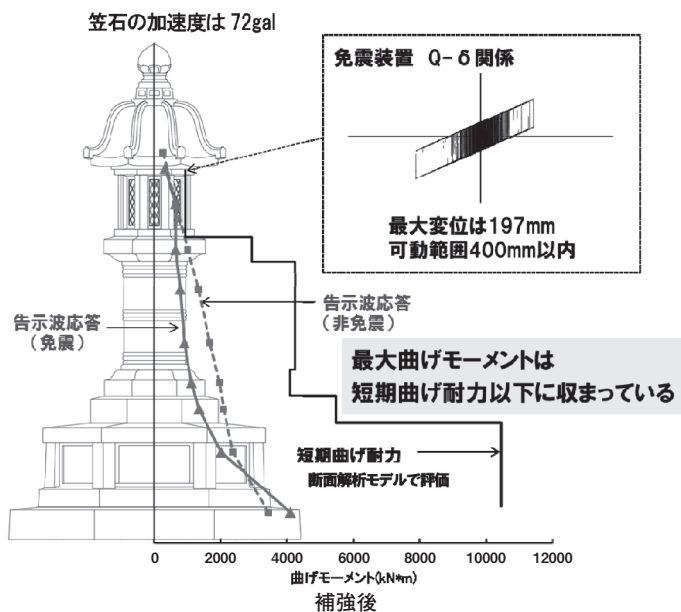
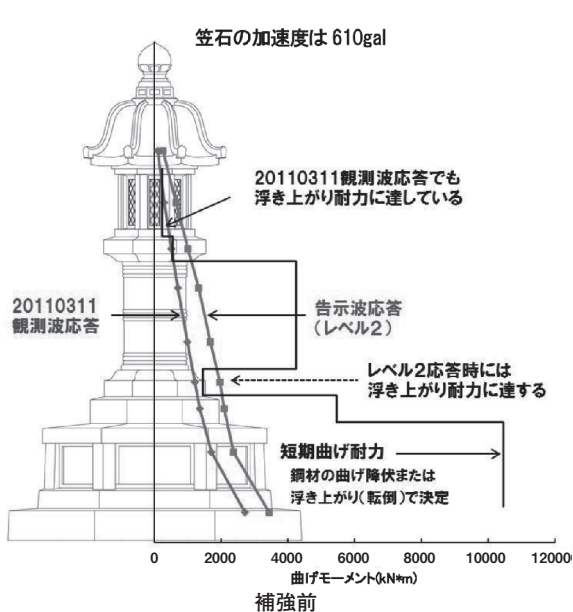


図9 補強前後の応答最大曲げモーメント分布