

石川県穴水町指定文化財「明泉寺燈籠」モデルの転倒実験

A Fall Experiment of the Model “Myousenji-temple Lantern”
Designated Cultural Assets of Anamizu Town, Ishikawa

中嶋裕典¹・野村直樹¹

Yusuke Nakajima and Naoki Nomura

¹関西大学大学院博士課程後期課程 理工学研究科総合理工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

Doctoral Program, Graduate School of Kansai University, Science and Engineering, Integrated Science and Engineering Major

This study describes the lanterns that are essential to Japanese culture. The structure of the lantern is only a stack of several members, and there is a risk of falling due to external factors such as earthquakes. In this experiment, we used a steel lantern in Anamizu-cho, Ishikawa Prefecture as a model, and performed tilting and vibration experiments. In the tilt test, it was found that a fall would occur at 0.12 G to 0.16 G, and it was confirmed that the fall occurred at the same acceleration as the calculation result, and the experimental result was evaluated. The vibration experiment showed a maximum displacement of 3.43 mm in the Kasa of 2.9 Hz.

Keywords: *anamizumachi, myousenji, garden lantern, , static test, vibration test*

1. はじめに

(1) 研究の背景

燈籠は寺院の境内や神社の参道のほか、個人の庭園などにも数多く設置されている。これら燈籠は複数の部材を積み木のように積み上げただけの単純な構造形式であるため、強い地震力を受けると簡単に倒壊して二次被害を発生する危険性が高い。しかしながら、燈籠についての研究は意匠や歴史、倒壊した石燈籠の破損状況から過去の地震の特徴を知ることが出来るのかといった研究がある。

2007年3月25日に石川県輪島市の西南西40kmの日本海を震源とする能登半島地震(M6.9)が発生した。輪島市、七尾市、穴水町で最大震度6強の揺れが観測されたが¹⁾、震源に近い輪島市では石燈籠が倒壊して1名の人命が失われた。(図1参照)

一方、穴水町では“能登中居鋳物館”に展示されていた2基の町指定文化財「明泉寺燈籠」が写真1のように基部を残して倒壊落下して大きく破損した。本研究は当該鋳鉄燈籠の修復と並行して、燈籠の安全対策に関する基礎資料を得ることを目的として、縮小模型を用いた傾斜実験や人力打突試験並びに振動台実験を行ったものである。

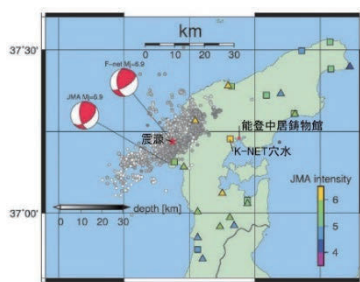


図1 震度分布¹⁾



写真1a 左基の転倒状況



写真1b 右基の転倒状況

(2) 明泉寺燈籠について

「明泉寺燈籠」は1対の大型の鑄鉄燈籠で、伝承では嘉永2(1849)年に鳳至郡曾山村(現:穴水町曾山)の甚右衛門が願主となって、大工の吉岡宇兵衛と小工の原田九郎右衛門が製作したという。被災前の展示状態を写真2に示す。燈籠は2基で構成され、向かって左を左基、右を右基と呼んでいるが、左基は2007年能登半島地震以前既に火袋は失われていたので、写真2のように提燈状の鉄製籠を補足して展示されていた。

本燈籠は図2に示すように、上から鑄鉄製の宝珠・笠・火袋と4分割された受竿(受竿1~受竿4)・地輪(台座)の8個と石製基壇1個の合計9個の部材で構成されている(図2参照)。総高は約2600mmで、基壇を除いた重量は左基は3822N、右基は3616Nである。

写真1 a,bは両燈籠の被害状況である。左基(写真1a)では受竿2より上部、右基(写真1b)では受竿3より上部が崩れて床に落下。その衝撃で鑄鉄部材に割れや亀裂が生じた。

因みに最も一般的な燈籠は図3aに示す“春日形”といわれており、その形態的な特徴は受竿はくびれない円形柱で、火袋と笠は六角形とすることである。これに対し明泉寺燈籠は図3b示す“八日月形”で、受竿の中央付近が上弦の月のように円弧状にくびれて細く、火袋や笠の輪郭が円形となっている点異なる。



写真2 地震前の燈籠の展示状況

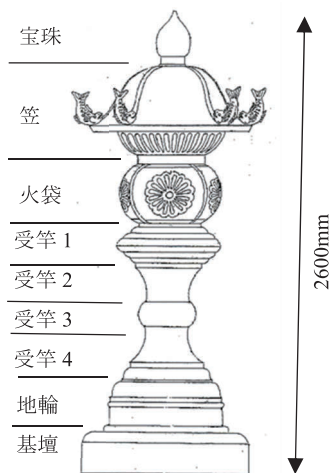


図2 燈籠の立面図写真

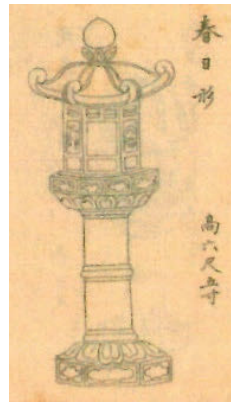


図3a 春日形燈籠²⁾



図3b 八日月形燈籠²⁾

2. 試験体の概要

(1) 縮尺モデルの形状寸法

試験体は明泉寺燈籠の1/2の縮小模型である。実物は轆轤(ろくろ)曳きで成形された回転体の主型(おもかた)の内側に中子(なかご)を入れて、白銑鑄鉄を鑄込んで作られているので、部材はすべて中空の円形断面となっている。

一般に石燈籠の接合部は一方にダボ状の突起をもうけて、他方にはこれを受けるホゾ穴を穿って上下の芯を合わせるが、当該燈籠は中空構造であるため、部材の接合形式はフランジ継手で、下材を受け材とし、上材の下面に円弧状の突起を設けて嵌め合せている。

図4aは上に開いた円錐形の受竿2の詳細で、下側の突起の高さは6mmである。一方、これを受ける下側の受竿3の上面フランジの内径は、受竿2の下部の円弧上の突起の直径より5mmほど大きくして、実物と同様、横力を受けると部材は容易に離間してロッキングを生じる。

なお、フランジ接合部は一辺6mm角鉄でリングを作り、外形は実物を模して、厚さ2.3mmの薄鋼板を溶接で組立てた八角形断面材とした。(写真4) 模型図面を図4bに、完成した試験体を写真5に示す。

コンクリート製基壇を含めて模型の総高さは1,400mm、実物の高さ2800mmの2分の1よりやや高くなった。その他模型と実物との相違点は以下の通りである。

- ・笠の外周の“鯉”の飾りは付けていない。
- ・実物の基壇は凝灰岩であるのに対して、模型ではプレタスコンTYPE-1を使用し割れ防止に8φの鉄筋を籠状に配筋し打設した。

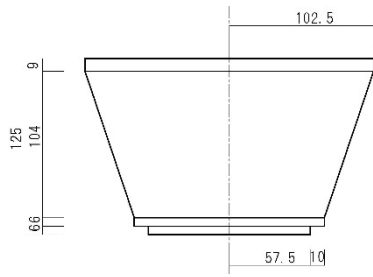


図 4a 部材詳細 (受竿 2)



写真 4 部材詳細 (受竿 2)

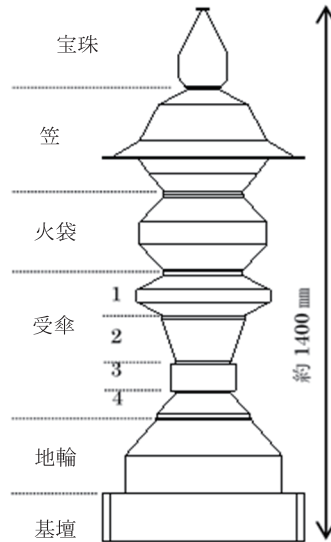


図 4b 試験体全体図



写真 5 試験体 (全体)

(2) 試験体重量

試験体の重量と実物燈籠の重量とを表1に比較する。ただし、左基は地震前に火袋が滅失していたので右基を対象とする。

表 1 各重量および割合

| 番号 | 部材名称 | 実物 | | 模型 | |
|------|------|-------|----------|-------|----------|
| | | 重量(N) | 鉄部重量比(%) | 重量(N) | 鉄部重量比(%) |
| 1 | 宝珠 | 108 | 3 | 7.25 | 3 |
| 2 | 笠 | 2127 | 59* | 122 | 43 |
| 3 | 火袋 | | | 57.2 | 20 |
| 4 | 受竿① | 382 | 11 | 20.6 | 7 |
| 5 | 受竿② | 137 | 4 | 12.9 | 5 |
| 6 | 受竿③ | 98 | 3 | 9.6 | 3 |
| 7 | 受竿④ | 764 | 21* | 10.3 | 4 |
| 8 | 地輪 | | | 44.1 | 16 |
| 鉄部合計 | | 3616 | 100 | 284 | 100 |
| 9 | 基壇 | 4596 | | 595 | |
| 全体合計 | | 8212 | | 879 | |

実物の①～⑧の铸铁部分の重量は3616N、模型で284Nであった。また、基壇は実物が4596N、模型が595Nであり、基壇を含む総重量は実物で8212N、模型で879Nであった。また、基壇を含む全体重量に対する基壇の重量比率は実物：56%、模型：68%であった。なお、表1の実物重量における2か所の“*”部：(笠と火袋)及び(受竿4と台座)をまとめた重さである。これは部材を分離するのが難しかったためである。

各部材の重量配分に関しては 実物・模型とも最下部の2部材：(台座⑧と受竿④)の合計重量が約20%を占めるが、上部の(笠②と火袋③)の重量は更に大きく、全体の約60%に達するなど当該燈籠は著しくtop-heavyである。

3. 静的傾斜実験

(1) 実験概要

図5aに載荷方法を示す。実験は丁番で止めた載荷版に模型試験体と基壇を水平に載せたあと、載荷版を徐々に傾斜させる、これによりすべての部材に均一の傾斜を作用させることができ、試験体の一部が転倒し始めた瞬間の傾きからを図5bより求めた(1)式に従って試験体に作用した加速度を算出する。

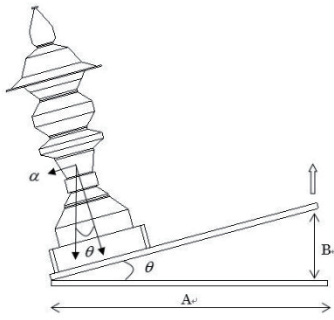


図 5a 傾斜実験

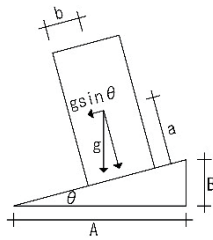


図 5b 傾斜復元力

$$\begin{aligned}
 &a:b=A:B \text{ より、} \\
 &\alpha = g \sin \theta \quad (G) \quad (1) \\
 &\theta = \arctan(B/A) \\
 &\text{or} \\
 &\theta = \arctan(a/b)
 \end{aligned}$$

(2) 実験結果

嵌合部には約 5mm の遊びがあるので、写真 6 および写真 10 に示すように厚さ 1mm、高さ 6mm、長さ 50mm 程の天然ゴムの防振シートを 4 枚重ねたものを 4 か所挿入して、フランジ間の滑りを拘束して傾斜試験を行った。

実験結果は表 2 に、写真 7a~d に実験番号ごとの倒壊開始位置を示す。

- ・ 実験番号 1~3 : (ノーマル・フランジ接合部に処置を施さない場合) ⇒ 全て受竿 3 から転倒
- ・ 実験番号 4 : (受竿 4 と受竿 4 間にゴム材を詰めて動きにくくする場合) ⇒ 受竿 2 から転倒
- ・ 実験番号 5 : (受竿 2 と受竿 3 間にゴム材を詰めて動きにくくする場合) ⇒ 受竿 3 から転倒
- ・ 実験番号 6 : (受竿 2, 3, 4 間にゴム材詰め、更にシャコマンにて拘束) ⇒ 受竿 4 から転倒

以上より、接合部を拘束しない場合には受竿 3 のくびれ部分から 0.12G~0.16G の加速で転倒したが、この程度の軽微な防振ゴムを挿入してもほとんど改善は認められなかった。

表 2 傾斜実験結果



写真 6 防振ゴム取付状況

| 番号 | パターン | A(mm) | B(mm) | 加速度(G) | 転倒箇所 |
|----|-------------------------|-------|-------|--------|------|
| 1 | ノーマル | 1400 | 232.5 | 0.16 | 受竿3 |
| 2 | | | 212.5 | 0.15 | 受竿3 |
| 3 | | | 175.5 | 0.12 | 受竿3 |
| 4 | ゴム(受竿3-4) | | 181.5 | 0.13 | 受竿2 |
| 5 | ゴム(受竿2-3-4) | | 219.5 | 0.16 | 受竿3 |
| 6 | ゴム(受竿2-3-5) +シャコマン固定 | | 294 | 0.21 | 受竿4 |

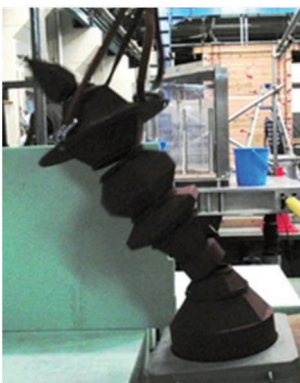


写真 7a 1-3 の転倒状況

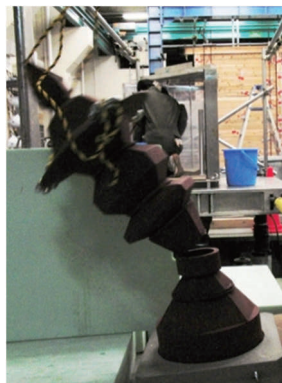


写真 7b 4 の転倒状況



写真 7c 5 の転倒状況



写真 7d 6 の転倒状況

(3) 転倒加速度の比較

図 6 の①~⑧の各高さ以上の部分が転倒するのに必要な加速度(a)、重心高さ(h)、底面幅(b)から算出する。転倒開始時の水平加速度は「柱傾斜復元力」モデル(図 7)に基づき、(2)式から(5)式で算定する。

また、実験は鋼板で組んだだけの状態(実物の 1/13 とした)と、鉛板を張り付けて模型の縮尺にパーツの重量分布に可能な限り近づけた場合の 2 種類について実施した。

計算結果を表 3 に示す。これより燈籠のくびれ部分の受竿 2 から受竿 4 の箇所では重量調整した場合もしい場合も 0.12G~0.16G の水平加速で転倒することがわかった。この結果は表 2 の傾斜実験結果をほぼ正確に評価していることが確認される。

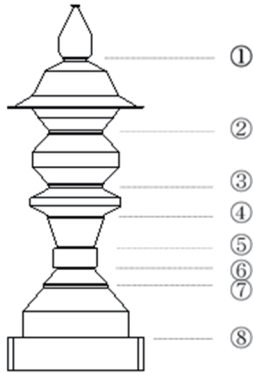


図 6 算出箇所

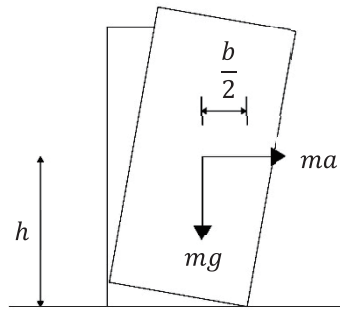


図 7 転倒時の水平加速度の算出モデル

$$ma \times h \geq mg \times \frac{b}{2} \quad (2)$$

$$a \geq \frac{gb}{2h} \quad (3)$$

$$a = \frac{gb}{2h} \quad (gal) \quad (4)$$

$$a = \frac{b}{2h} \quad (G) \quad (5)$$

(4) 相似則

試験体の縮尺を1/Sとした場合の、重量・転倒水平加速度・剛性および固有振動数に関する相似則は表4に示すとおりである。

4. 人力加振実験

(1) 実験方法

燈籠模型の笠(L1)の部分にゴムハンマーを用いて軽く打突して、その後8秒間の燈籠各部の自由振動の様子をKEYENCEのCCDレーザー変位計LK-500を用いて計測する。計測位置は図8に示すように、笠(L1)・火袋(L2)・受竿(L3)・受竿2(L4)の4点とした。写真8は実験状況である。

表 3 転倒加速度の算出結果

| 算出箇所 | 加速度(G) | | |
|------|--------|------|--------|
| | 錘なし | 錘あり | 実物(右基) |
| ① | 0.47 | 0.47 | 0.45 |
| ② | 0.65 | 0.65 | 0.53 |
| ③ | 0.32 | 0.28 | 0.27 |
| ④ | 0.27 | 0.26 | 0.25 |
| ⑤ | 0.13 | 0.12 | 0.12 |
| ⑥ | 0.16 | 0.16 | 0.13 |
| ⑦ | 0.22 | 0.21 | 0.2 |
| ⑧ | 0.31 | 0.31 | 0.32 |

表 4 相似則

| | 実物灯籠 | 縮尺1/S模型 |
|-------|------|------------------|
| 重量 | W | W/S ² |
| 加速度 | a | a |
| 剛性 | K | K/S |
| 固有振動数 | F | √SF |

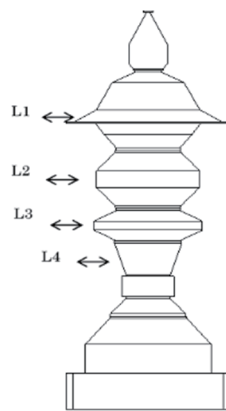


図 8 計測機器設置位置

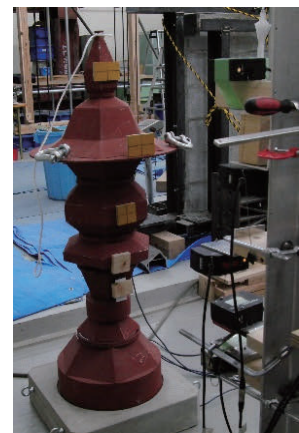


写真 8 実験状況

(2) 実験結果

笠部を一回打突した場合の笠・火袋・受竿 1 及び受竿 2 の水平変位の時刻歴波形を図 9 に示す。

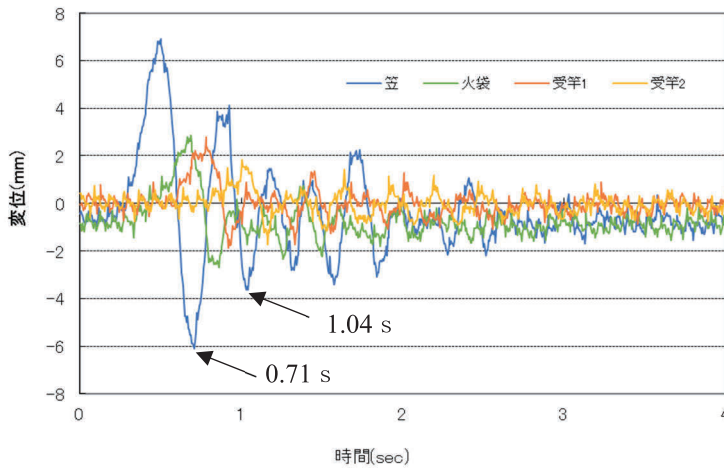


図 9 変位の時刻歴波形

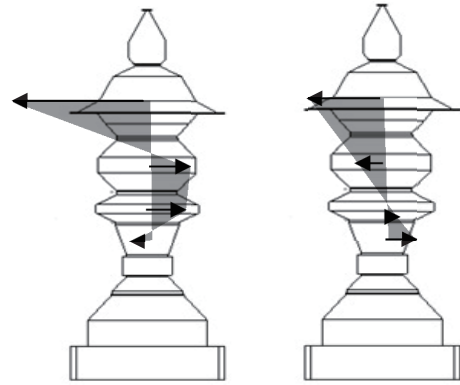


図 10 0.71s 応答分布

図 11 1.04s 応答分布

打突点の笠の初期変位は約 7mm であったが、周期約 0.46 秒で一度大きく揺れた後は周期 0.3 秒程度の揺れを繰り返しながら 2.5 秒で揺れは収束した。図 10 に示すように 0.71 秒付近では火袋は笠とは逆位相で振動する傾向を示し 1.04 秒付近では同位相に近い揺れを示した。

5. 振動台実験

(1) 実験方法

振動台を用いて、80 秒間の定常加振を行った。計測位置を図 12 に示す。加振パターンは、2.5Hz~4.5Hz までを 0.1Hz 刻みずつ段階的に周波数を変化させた。本実験では一般に地震波に多く含まれるとされる 2Hz ~3Hz の振動を、表 4 の相似則に従ってやや短周期化したものである。

なお、最上部の宝珠は実験中に大きく揺れて落下する恐れがあるので、宝珠と笠の接続箇所を防振ゴムで半固定にして加振した。取付けは写真 6 と同じである。

(2) 実験結果

各振動数における応答変位振幅の最大値をプロットしたものが図 13 である。笠(L1)においては加振振動数が 2.9Hz の時に最大 3.43mm を記録し、火袋では、加振振動数が 2.8Hz の時に最大値を記録した。また、「笠(L1)と火袋(L2)」、「受竿 1(L3)と受竿 2(L4)」の振動の傾向は類似しており、「笠・火袋」と「受竿 1・2」がそれぞれ一体となって、ロッキングする傾向を示した。図 14 は最大応答変位を示した 2.9Hz 時の振動モードで、受竿 2 だけが反対に揺れることがわかる。

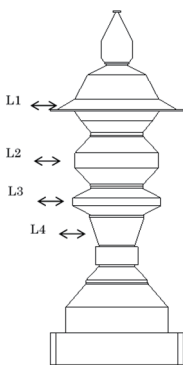


図 12 計測位置

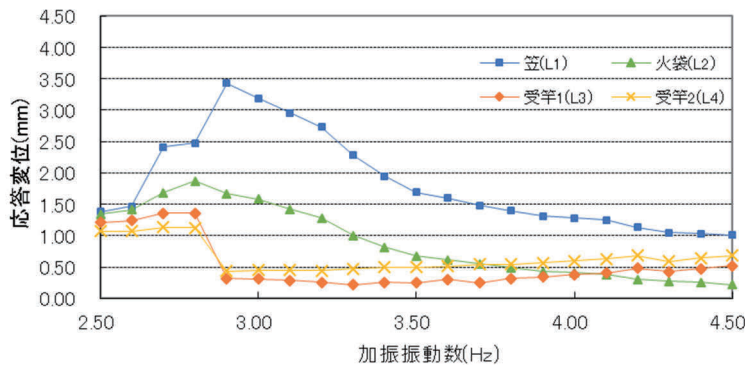


図 13 各振動数による応答変位

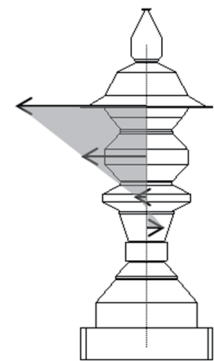


図 14 2.9Hz 時応答分布

6. 倒壊防止対策の試み

(1) 実験方法

今回は、燈籠の倒壊防止対策として以下の2つを試みた。

- ① Case1: 基壇の下面にローラーを入れる(写真 9)。ローラーは日本トムソンの IKO フラットケージの FT10080-500 を用いた。
- ② Case2: 各パーツのフランジ継手の隙間に厚さ 1mm の防振ゴムを 4~5 枚挿入する(写真 10)。使用したゴムシートは一般的に売られている天然ゴムシートをカットして用いた。

これらの試験体を 2.5Hz~4.5Hz までを 0.1Hz 刻みずつ変化させて、80 秒間の定常加振を行い、応答変位について考察した。



写真 9 ①基壇下のローラー支承

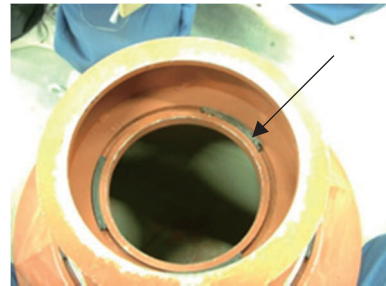


写真 10 受竿のフランジの隙間に防振ゴムを挿入

(2) 実験結果

各実験における笠・火袋・受竿1, 2の応答変位の最大値と振動台の加振周波数の関係を図15および図16に示す。

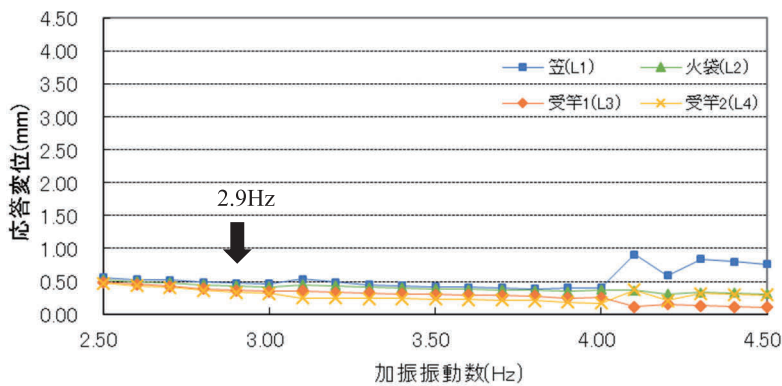


図 15 Case1の各加振振動数に対する応答変位

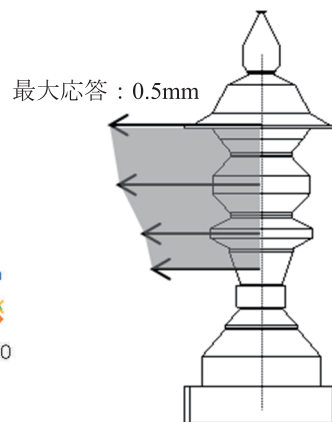


図 17 Case1の2.9Hz時の応答分布(正規化)

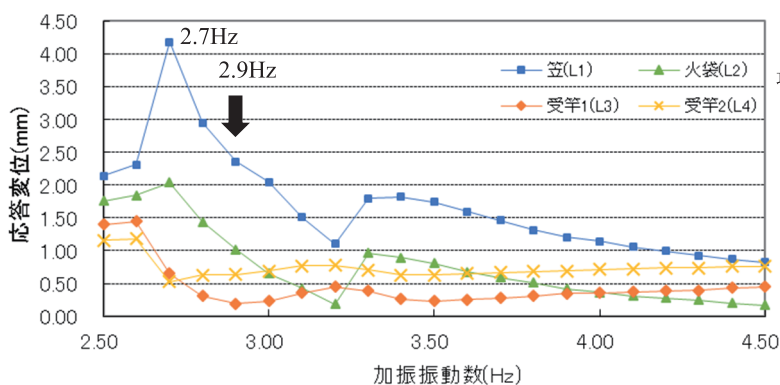


図 16 Case2の各加振振動数に対する応答変位

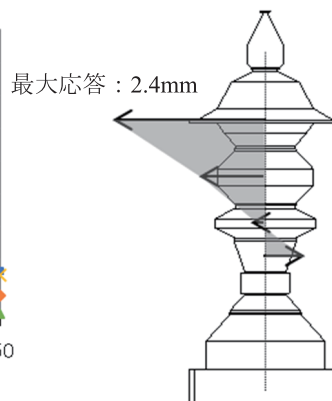


図 18 Case2の2.9Hz時の応答分布(正規化)

Case1では、どの加振振動数に対しても応答変位は大幅に軽減されており、ほぼ水平加速度は遮断されることが確認された。Case2では加振振動数2.7Hzにおいて笠の応答変位がピーク値を示したが、図13の倒壊防止対策を施していない場合に比べると、笠(L1)の応答変位は増大しており効果は認められなかった。

図17及び図18は対策前の実験において最大応答変位を記録した2.9HzにおけるCase1とCase2の笠部の応答変位を1として各Caseごとに正規化した応答分布を示したものである。各図の上部に最大応答値を示している。ローラーを挿入したCase1ではL4からL1は同位相で振幅の差は少なく応答変位が0.5mmとほぼ動いていないのに対し、防振ゴムを挿入したCase2では図14と同様に受竿2(L4)は逆位相となっている。応答変位は2.4mmと軽減はされていたが、2.7Hzにおいて笠(L1)で最大応答変位4.2mmを示し、5章の振動実験の結果を上回る変位となり、倒壊防止対策としては効果が少ないことがわかる。

7. まとめ

穴水町指定文化財明泉寺の燈籠をモデルを作成して、静的傾斜試験や各種の振動実験を行った結果、受竿の中間が細く絞られた「八日月」型燈籠について次の結論を得た。

(1) 傾斜実験

- ・受竿中間の最も直径の小さい箇所付近から上部がロッキングして転倒する。
- ・転倒時の水平加速度は「柱傾斜復元力」モデルにより精度よく評価できる。

(2) 振動実験

- ・燈籠の揺れは笠と火袋など重量の大きい部位に集中し、それ以下の受竿の変位は小さい。
- ・模型においては加振振動数が2.9Hz付近で笠の変位が最大となった。

(3) 倒壊防止対策

- ・パーツの接合箇所に防振ゴム材を挿入した場合、逆に応答変位が増加する傾向を示した。
- ・基礎下にローラーを設置することで、応答変位は大幅に減少した。

当該燈籠は平滑な室内床に設置されるので、ローラ支承は倒壊防止の有効な手法となりうる。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、安居美幸氏の協力を得た。また、関西大学大学院理工学研究科高度化研究費の助成を得た。

参考文献

- 1) 飛田哲男,その他:平成19年(2007年)能登半島地震被害調査速報,自然災害科学,J.JSNDS 26-1 69-78(2007)
- 2) 石燈籠図-国立国会図書館デジタルコレクション-, 「石燈籠図」,
< <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/2533706> >(参照2019-4-25)