

地震時の鐘樓の跳躍に関する研究

石丸 和宏* 松本 光** 長谷川 尚輝**

A Study of the Upthrow of Shoro(Bell Towers) by Earthquakes

Kazuhiro ISHIMARU, Hikaru MATSUMOTO, Naoki HASEGAWA

ABSTRACT

The phenomenon of upthrow of Shoro(bell towers) often occurs by big earthquakes but little is known about the cause of this phenomenon. In this study, the shaking table tests and the analysis of the behavior of Shoro(bell towers) during earthquakes were conducted. As the result, it was found that rocking motion occurs when Shoro(bell towers) are shaken at a particular frequency and the phenomenon occurs at that time.

KEY WORDS: upthrow, Shoro, earthquake, rocking motion, frequency

1. はじめに

地震時には石などの物体が跳躍する事例が報告されている。例えば 1909 年に発生した姉川地震, 1995 年に発生した兵庫県南部地震, 2007 年能登半島地震, などの地震では, 図 1 のように寺の鐘樓が跳躍, 移動したという事例が報告されている^{1), 2), 3)}。

鐘樓の柱の下端には, ほぞまたは栓を用いて踏石の上で移動しないように作られている¹⁾。よって鐘樓が移動するためには栓が破壊するか上方向に飛び上がらなければならない。

この現象に関して様々な実験や考察が行われており, 柱がたわみを発生させた時に柱がばねのような役割をして鐘樓が射出されると考えるもの²⁾, 鐘樓全体が共振した際に跳躍が発生したと考えるもの³⁾, 釣鐘のみが共振した際に跳躍が発生したと考えるもの³⁾, ロッキング振動により鐘樓に上向きに大きな加速度が生じたときに跳躍すると考えるもの⁴⁾。など様々な説が存在しており, この現象の原因は明確に解明されていないと言える。これまで, この現象についての実験

は行われているが, シミュレーションと両面から取り組んだ研究は見られない。本研究では模型実験と数値解析によりこの現象のメカニズムを調べる。



図 1 鐘樓の跳躍現象³⁾

2. 模型実験

2・1 実験方法

2・1・1 概略

鐘樓の跳躍現象を再現するために, 鐘樓の模型を作成し, 加振装置によって水平方向の振動を与えその挙

*都市システム工学科 **建築・都市システム工学専攻

動を調べる。表1に使用した加振装置の諸元を示す。与える振動は単振動と実際の地震動を再現したものを使用する。

表1 加振装置の諸元

名前	ロングストローク 低域振動試験装置	
型番	CVL-40-100	
加振力	正弦波	400N
	実測波	400N
最大加速度	7.2m/s ²	
最大速度	50cm/s ²	
最大変位	100mmp _p	
可動部質量	55kg	
振動数範囲	1~100Hz	
最大搭載質量	300kg	
振動台寸法	600×600mm	
環境条件	温度	0~40℃
	湿度	0~85%RH

2・1・2 模型

模型の作成に当たり、兵庫県明石市魚住町薬師院ポタン寺に存在する鐘樓の現地観測を行い寸法を決定した。また、観測が不可であった屋根と釣鐘に関して、釣鐘は以前から研究室で所持していた模型を用いた。屋根は過去の文献に基づき、重量を釣鐘の重量の2倍とした⁵⁾。

作成した模型を図2に示す。模型の木材部分はひのき材、ベニヤ板、釘で作成し、瓦の重量を再現するため屋根部分に錘を設置している。また釣鐘部分には鎖を用いて錐形の錘を吊り下げた。釣鐘部分の挙動が模型全体の挙動に与える影響を調べるため、この錘は取り外し可能な構造とした。以下釣鐘部分の模型を外した状態を釣鐘ナシ、取り付けした状態を釣鐘アリと示す。



図2 鐘樓模型

基礎的な検討をするため模型の縮尺は加振装置に載せることが可能であり、作成の比較的容易である1/10で作成し、部材については弾性挙動を調べるために前述の木材を使用した。

また実際の鐘樓に存在している柱部分下端のほぞを再現するために、柱部分の大きさに合わせた穴を開けたプラスチック板を用意し加振装置に設置し模型を加振装置に載せた際に水平方向に移動しないよう固定した。

2・1・3 使用波形と実験方法

異なる周波数の単振動を鐘樓模型(釣鐘アリ)に与えその挙動の変化を調べる実験と、過去に発生した地震波を再現した振動を与えその挙動を調べる実験を行った。

単振動実験では釣鐘の共振、建物部の共振に鐘樓の移動が関係あるか調べるため、前もって釣鐘を単振子と考えた場合の釣鐘の固有振動数を求めた。また、実験により鐘樓模型(釣鐘ナシ)の固有振動数を調べた。その後、鐘樓模型(釣鐘アリ)にそれぞれの固有振動数の単振動を与え、その挙動を観察した。

入力した地震波振動は、2003年十勝沖地震、新潟県中越沖地震、岩手・宮城内陸地震、東北地方太平洋沖地震の水平方向の地震波形と同様の振動を与えその挙動を観察した。この内、新潟県中越沖地震では鐘樓の移動が確認されており、2003年十勝沖地震、岩手・宮城内陸地震、東北地方太平洋沖地震の3つの地震では鐘樓の移動が確認されていない。

2・2 実験結果及び考察

2・2・1 単振動を用いた実験

鐘樓模型(釣鐘アリ)に2・1・3で示した固有振動数の単振動及び、振動数を変化させることで挙動が大きく変化した6.5[Hz]、7.0[Hz]の単振動で加振した際の挙動を表2に示す。地震時の跳躍現象は鉛直方向の振動によるものと考えてられている場合もあるが、この結果より鐘樓は水平方向の振動のみでも跳躍は可能であるといえる。また、振動数の変化により模型の挙動に大きな変化が見られることが確認できた。

また釣鐘が梁に衝突しなかった場合では柱が交互に浮き上がり鐘樓全体が振動することが確認でき、この時、柱はほとんど変形しなかった。

この結果から振動鐘樓の跳躍現象には2つのパターンがあると考えられる。1つは振動が釣鐘と共振し大きく揺れることで、釣鐘が鐘樓の木材部分と衝突し、その衝撃によって跳躍するもの、もう一つは鐘樓全体

が振動し跳躍するものである。鐘楼全体の振動による跳躍は、鐘楼模型(釣鐘アリ)が 6.5[Hz]の際に大きく移動しており、鐘楼模型(釣鐘ナシ)の固有振動数と異なることから、鐘楼模型(釣鐘ナシ)に釣鐘を取り付けられると相互作用を及ぼし合い、連成振動を起こした際に発生したロッキング現象により跳躍したと考えられる。

表 2 振動数による模型の挙動の変化

釣鐘の固有振動数 1.2[Hz]	鐘楼模型の(釣鐘ナシ)固有振動数 5.9[Hz]	6.5[Hz]		7.0[Hz]	
		大きく移動	移動なし	大きく移動	移動なし
釣鐘が梁に衝突し移動	足が浮いたが移動なし	大きく移動	移動なし	大きく移動	移動なし

2・2・2 地震波振動を用いた実験

使用する地震波の特性を調べるために実験で使った地震波形のスペクトル解析を行った。また、今回実験に用いた鐘楼模型は単振動実験により 6.5[Hz]の際に最も移動したため、6.5[Hz]における応答加速度が大きい地震波形ほど、連成振動が起こって移動しやすいと考えられる。よって最も卓越していた振動数と 6.5[Hz]における応答加速度を表 3 に示す。

また、それぞれの地震波で鐘楼模型(釣鐘アリ)に加振した際に、鐘楼模型が移動した方向と距離を表 4 に示す。実験の結果、2003 年十勝沖地震(NS)の地震波で加振した際に、大きな鐘楼模型の移動がみられた。このとき釣鐘は大きく振動しており、また釣鐘が移動した方向に鐘楼全体も移動する様子が確認できた。この地震波形は今回使った中で最も 6.5[Hz]における応答加速度が大きいものであった。しかし 6.5[Hz]にお

表 3 卓越振動数と 6.5[Hz]における応答加速度

地震名	作用方向	最多振動数 [Hz]	最多振動数時の値 [gal]	6.5[Hz]時の値 [gal]
2003 年十勝沖地震	NS	3.6	171.2	12.4
	EW	3.6	134.3	9.9
新潟県中越沖地震	NS	3.1	10.9	3.8
	EW	1.3	7.9	2.5
岩手・宮城内陸地震	NS	6.0	11.3	5.9
	EW	9.6	14.7	0.9
東北地方太平洋沖地震	NS	5.8	81.9	10.5
	EW	5.8	48.8	6.3

表 4 地震波実験の結果

使用した地震波		実験結果
地震名	作用方向	
2003 年十勝沖地震	NS	NS : 30mm EW : 5mm 移動
	EW	NS : 85mm EW : 100mm 移動
新潟県中越沖地震	NS	NS : 1mm EW : 2mm 移動
	EW	移動なし
岩手・宮城内陸地震	NS	移動なし
	EW	NS : 1mm EW : 1mm 移動
東北地方太平洋沖地震	NS	足が浮いたが移動なし
	EW	足が浮いたが移動なし

る応答加速度が 10.5[gal]である東北地方太平洋沖地震(NS)では模型移動が発生しておらず、また、6.5[Hz]における応答加速度が 0.9[gal]であった:岩手・宮城内陸地震(EW)で模型移動が見られた。このため単振動で大きく模型が振動した際の振動数の応答加速度が大きい場合に移動するとは限らないと言える。どの地震波で加振した際にも、釣鐘と鐘楼の梁が衝突し跳躍する挙動はみられず、単振動を用いた実験で釣鐘が梁に衝突しなかった場合とほぼ同様の挙動を示した。このことから釣鐘が鐘楼の木材部分と衝突した衝撃で跳躍するのではなく、地震波形と鐘楼の連成振動により発生したロッキング現象が跳躍の主な原因であると考えられる。

3. 数値解析

3・1 解析方法

3・1・1 概略

鐘楼を模したモデルデータを作成し、これに振動を与えた際の挙動を調べる。与える振動は模型実験と同様に単振動と実際の地震波を再現したものを使用する。

また本解析では個別要素法を用いる。これは解析対象を非連続な剛体要素の集合体としてモデル化し、各要素の接触面についてはばねで接続されているものと

して接触力を求め、その結果得られた各要素の運動方程式を時間積分することにより動的解析を行う手法である。本解析は弾性挙動であるため木材部分の各要素は2本のばねにより結合しているものとして、計算を行っている。また釣鐘部分は剛体とした。

3・1・2 モデル

図3に示す形状のモデルを作成した。モデルの主なパラメータを表5に示す。柱、梁に相当する部分の重量、ばね定数などの材料定数はひのきと同等となるように設定した。また屋根部分の重量は3000[kg]、釣鐘部分の重量は380[kg]とした。また、釣鐘と梁をつなぐ部分(以下接続部と示す)は曲げに抵抗しない。釣鐘部分は剛体とした。モデルの縮尺は1/1程度とし、高さ3.8mである。

また振動は地面に相当する部分を移動させることで発生させる。この地面部分は鐘楼部分と接続されていないが、踏石を再現するために小さな凹凸を設けており、左右には移動しないようになっている。

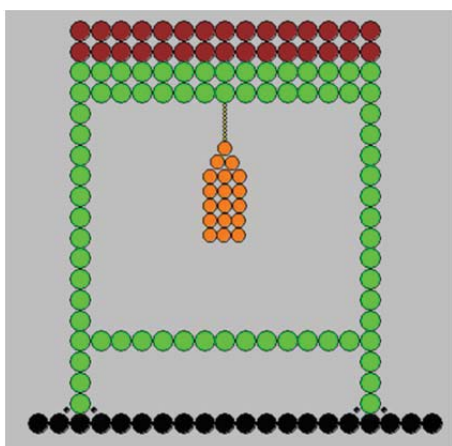


図3 モデル

表5 モデルの主なパラメータ

特性値	数値
粒子(柱・梁)の密度	490 [kg/m ³]
粒子(釣鐘)の密度	26400 [kg/m ³]
粒子(屋根)の密度	15000 [kg/m ³]
木材部分 軸方向ばね定数	7.125×10 ¹¹ [Pa/m]
木材部分 せん断方向ばね定数	2.740×10 ¹⁰ [Pa/m]
木材部分の要素接触点 の軸方向ばね定数	4.77×10 ⁹ [Pa/m]
木材部分の要素接触点 のせん断方向ばね定数	4.77×10 ⁹ [Pa/m]

3・1・3 使用波形

釣鐘と梁の接続部の長さを変化させながら、新潟県中越沖地震、能登半島地震、岩手宮城内陸地震の水平方向と鉛直方向の自身波形と同様の振動を与え、その挙動を調べた。

次に単振動で加振しその挙動を調べた。その後振動数を変化させながら加振し、挙動の変化を調べた。

3・1・4 評価指標

挙動の変化の指標として図4に示すように柱部分下端に位置する要素の下端から地面部分の上端までの距離が最も大きくなった瞬間の距離を用いて評価するものとする。また、2つの下端の要素のうちより高くまで上昇した方の値を採用する。以後この距離を上昇距離と呼ぶ。

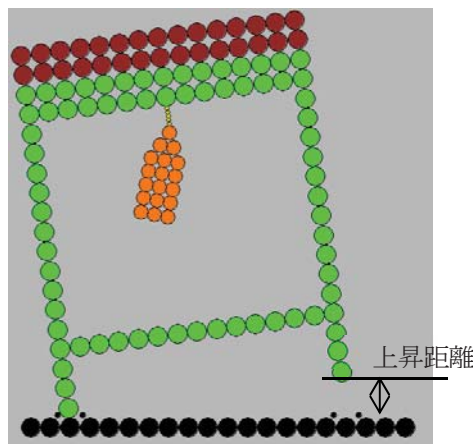


図4 評価に用いる高さ

3・2 解析結果及び考察

3・2・1 地震波振動を用いた解析

釣鐘を吊る接続部の長さが鐘楼の挙動に及ぼす影響を調べるため、接続部の長さを変化させながら、新潟県中越沖地震、能登半島地震、岩手宮城内陸地震の地震波形で加振した際の上昇距離をそれぞれ図5、6、7に示す。

新潟県中越沖地震のデータを用い、接続部の長さが0.20[m]の場合上昇距離が他の場合と比較し上昇距離が最も大きくなった。また、接続部の長さが異なる場合上昇距離も異なることから、接続部の長さとお上昇距離には何らかの関係があると考えられる。

3・2・2 単振動を用いた解析

与える振動の違いが鐘楼の挙動に及ぼす影響を調べるために、接続部の長さを一定とし、異なる振動数の単振動で加振した。接続部の長さは0.2[m]とした。振動数は0.2[Hz]~1.0[Hz]では0.2[Hz]間隔で、1.0[Hz]

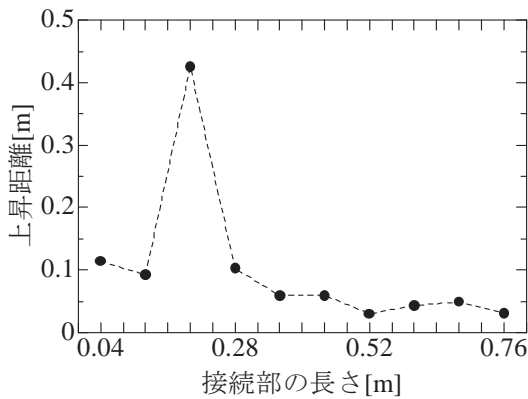


図 5 新潟県中越沖地震の地震波形での挙動

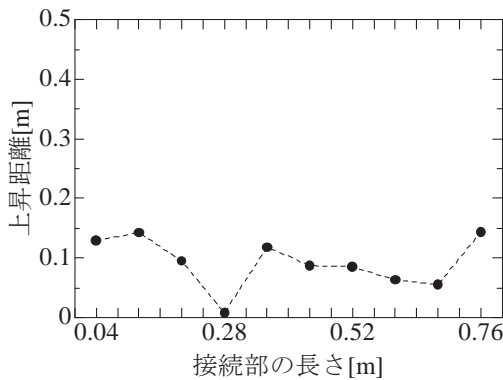


図 6 能登半島地震の地震波形での挙動

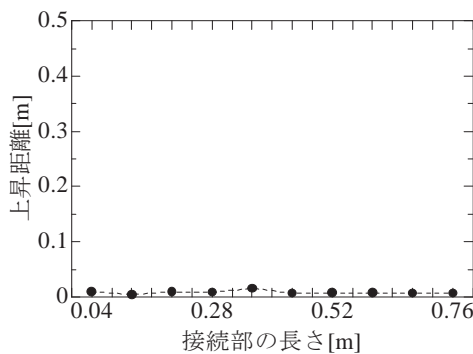


図 7 岩手宮城内陸地震の地震波形での挙動

以上では 1.0[Hz]間隔で振動数を変更して解析を行った。また釣鐘を単振り子と見なした際の固有振動数 0.579[Hz]の場合でも解析を行った。速度は最大速度が 100[kine]となるように設定した。単振動を与えた際の周波数と上昇距離の関係を図 8 に示す。0.4[Hz]の単振動を与えた場合に大きな上昇距離が見られた。これはモデルが転倒したためである。実際に鐘楼が倒れるほ

ど柱が大きく傾けば、柱の水平方向の移動を制限しているほぞや栓が破損し踏石の上から柱が離れ、本解析とは異なる挙動を示すと考えられる。また、転倒する直前には釣鐘部分が右に移動すればモデル全体が右に傾き、釣鐘部分が左に移動すればモデル全体も左に傾く挙動が見られ、倒れる瞬間も釣鐘部分が移動した方向へとモデルが転倒した。これらのことから釣鐘の移動方向と鐘楼全体の移動方向が一致した時、ロッキング現象が発生し、鐘楼が大きな移動をされると考えられる。

釣鐘を単振り子と見なした場合の固有振動数である 0.579[Hz]の場合では特別大きな上昇距離は見られなかった。よって釣鐘を単振り子と見なした場合の固有振動数の単振動では鐘楼の跳躍現象が発生しないと考えられる。

また 3・2・1 で使用した地震波形のスペクトル解析を行った結果では、0.4[Hz]の加速度応答スペクトルは新潟県中越沖地震で最も大きく、岩手宮城内陸地震で最も小さかった。上昇距離も同様に新潟県中越沖地震で最も大きく、岩手宮城内陸地震で最も小さかったことから、実験と異なり特定の周波数の加速度応答スペクトルが卓越している地震で大きく鐘楼が上昇すると考えられる。

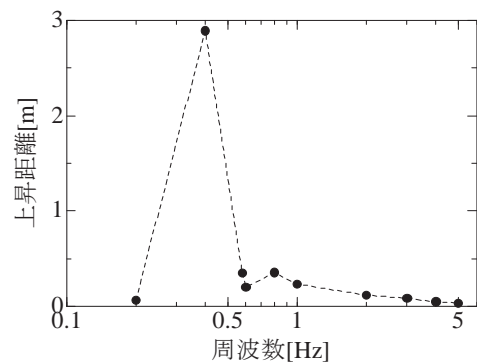


図 8 単振動を与えた際の挙動

3・2・3 釣鐘の動きを制限した場合の解析

前項の解析により釣鐘の移動方向と鐘楼全体の移動方向が一致した時に鐘楼の移動が発生すると予測される。そこで図 9 に示すように釣鐘の動きを阻害する部材を取り付けたモデルに単振動を与えた際の挙動を解析により調べた。部材の位置によって結果が異なる可能性を考慮し図 9 と左右対称のモデルも作成し同様の解析を行い、より上昇距離の大きい方を結果とした。

釣鐘の動きを制限した状態のモデルに単振動を与えた際の周波数と上昇距離の関係を図 10 に示す。釣り鐘の動きを阻害する部材を用いなかった場合の解析結果である図 8 と比較すると 0.4[Hz]の単振動を与えた際の上昇距離が大きく減少していることが分かる。釣鐘が大きく振動すると鐘楼全体の振動も大きくなるが、一定以上大きくなると取り付けた部材に接触し挙動が変化、振動が小さくなる現象がみられた。このことから釣鐘の動きは鐘楼全体の動きに大きく影響を与えていることが分かる。しかし、上昇距離は 1[m]以上であり、今回の解析の様に取り付けるだけでは鐘楼の移動の抑制には不十分である。よって柱が浮かないように地面に固定する必要があると考えられるが、柱が全く動かないように固定した場合、ロッキング現象が発生した際、部材に大きな力が発生するため、これまで破壊が発生しなかった箇所でも破壊する可能性がある。したがってロッキング現象そのものが発生しないようさらなる検討が必要である。

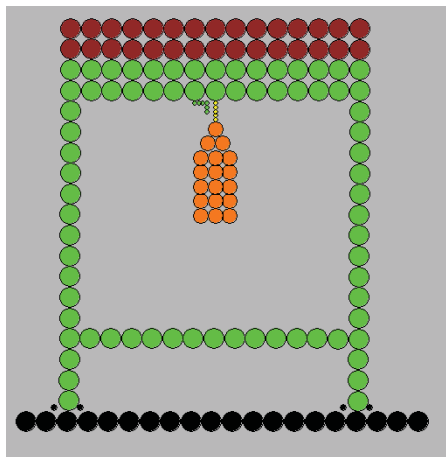


図 9 モデルの変化

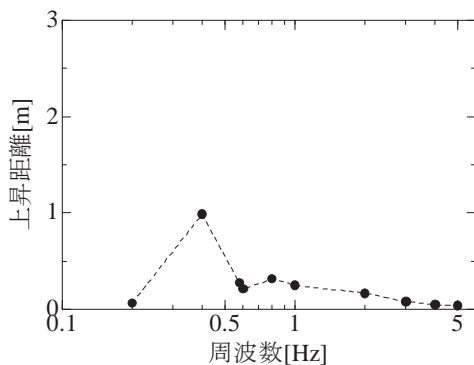


図 10 釣鐘の動きを制限した際の挙動

4. 終わりに

本研究では地震時の鐘楼の移動現象の解明を目的

に、過去の文献より代表的な 1 つの鐘楼模型、モデルを作成し、釣鐘の長さを変更しながら周波の異なる単振動と複数の地震波振動を鐘楼の模型とモデルに与え、振動の変化と鐘楼の移動現象の関連性を調べる模型実験と解析を行った。その結果以下の結論が得られた。

1. 実験と解析の両方において、与える振動数が変化すると挙動は変化し、特定の振動数の場合のみ大きな移動や動きが見られた。釣鐘を単振り子と見なした場合の固有振動数では鐘楼全体が大きく動く現象は確認できなかったため鐘楼の連成振動によって発生したロッキング現象が原因である考えられる。
2. 実験により、釣鐘が大きく動いた際、釣鐘が大きく動いた方向に鐘楼全体が大きく移動することがある事が判明した。また釣鐘が大きく動かない場合には鐘楼全体が大きく動く挙動は見られなかった。
3. 解析の結果、釣鐘の動きを制限するように部材を取り付けることで鐘楼全体の振動が小さくなる事が判明した。しかし、鐘楼の移動を抑制するには不十分でありロッキング現象そのものが発生しないようにさらなる検討が必要である。
4. 単振動で加振した際に鐘楼の挙動が最も大きくなる周波数の応答加速度スペクトルの大きさと入力した地震波形の卓越振動数は、模型実験では関係性は薄く、解析では関係性は大きいという結果になった。今後実験と解析の両面を見直し、この 2 つの関連性を調べる必要がある。

参考文献

- 1)大町達夫, 翠川三郎, 本多基之: 1909 年姉川地震での鐘楼の移動から推定した地震動強さ, 構造工学論文集, 土木学会, Vol41A, pp.701-708, 1995
- 2)橋本直, 大町達夫: 実測による最明寺の振動特性について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol53, No.1B, pp.984-985, 1998
- 3)翠川三郎, 三浦弘之: 2007 年能登半島地震における物体の移動事例と地震観測点での地盤特性, 地震工学研究レポート, Vol.102, pp. 7-18, 2008
- 4)石丸辰治, 石垣秀典, 秦一平, 大倉久礼, 倉形純一: 伝統的木造建築物の地震時挙動に関する研究-小型模型を用いた基礎実験-, 日本大学理工学部 学術講演会論文集, pp.258-261, 2005
- 5)森山敏行, 宮高芳信, 西川英佑, 西澤英和: 伝統的な木造鐘楼の振動性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), Vol.F-2, pp.131-132, 2006