

## 中山寺五重塔の振動計測と振動特性

正会員 ○ 貝谷淳一\*1 同 田中健太\*2  
同 瀧野敦夫\*3 同 宮本裕司\*4

常時微動計測 固有振動数 固有値解析  
伝統木造建築 振動特性

### 1. はじめに

伝統木造建築の耐震設計モデルを構築するためには、微小変形から大変形時の振動特性を正確にモデル化する必要がある。

本報では、兵庫県宝塚市に建つ中山寺五重塔の微小変形時の振動特性を把握するため、常時微動計測と加振実験を行った。また、計測結果と質点系モデルによる固有値解析結果の比較を行い、振動モデルについての検討結果を報告する。

### 2. 対象建物の概要

対象建物は、総高 28.3m、塔身高さ 20.7m の伝統木造の五重塔である。塔身の構法は長柱構法を採用し、初重に裳階が取り付けられているのが特徴である。なお、計測時には相輪、裳階は設けられておらず、塔の周囲に足場が設置されていた。また、基壇は鉄筋コンクリート造で、基壇の上に設けられた礎石の上に塔が建っている。

### 3. 振動計測の内容

計測ケースを表1、速度計の配置図を図1に示す。ここで、Case1は南北方向、Case2は上下方向の計測を行い、計測にはサーボ型速度計 VSE-15D (㈱東京測振製) を使用した。また、加振には小型起振器 (㈱サンエス製) を使用した。サンプリング周波数は 100Hz で、計測時間は常時微動、ランダム波、スイープ波が 200 秒、サイン波、人力加振が 50 秒である。人力加振は、常時微動計測によって得られた 1 次と 2 次の固有振動数に合わせて、図1の上図に示す位置を加振した。

### 4. 計測結果

各計測における各次のピーク振動数を表2に示す。Case1において、各次のピーク振動数の平均は、1.08Hz、3.10Hz、5.36Hzである。微動計測での各ピーク時における各計測点の位相差を考慮して求めたモード図を図2に示す。図2より、1次から3次の固有振動数における振動モードが確認できる。また、Case2において、各次のピーク振動数の平均は、1.08Hz、3.10Hz、5.65Hzであり、Case1とほぼ対応している。

減衰定数は、sin 波入力および人力加振による応答振幅の揺れが収まるまでの自由振動波形から求めた。減衰定数の算定は、対数減衰率による方法と最小二乗法による方法の2通りを検討したり。入力波ごとの平均をとると、sin 波入力時に 1 次が 1.49%、2 次が 1.74%、人力加振時に 1 次が 1.63%、2 次が 1.78% となり、1 次の減衰率は人力加振時の方がわずかに大きくなった。また、算定方法ごとの平均をとると、対数減衰率による方法は 1 次が 1.59%、2 次が 1.79%、最小二乗法による方法は 1 次が 1.52%、2 次が 1.73% となり、両者とも近い値となった。



写真1 中山寺五重塔(左側:全景, 右側:初重屋根)

表1 計測パターン

方向	Case1		Case2	
	北→南		上→下	
計測内容	常時微動	2回	常時微動	2回
	ランダム波	2回	ランダム波	2回
	スイープ波(0.5~4Hz)	1回	スイープ波(0.5~4Hz)	1回
	スイープ波(2~10Hz)	1回	スイープ波(2~10Hz)	1回
	スイープ波(9~20Hz)	1回	スイープ波(9~20Hz)	1回
	サイン波(1.07Hz)	2回		
	サイン波(3.12Hz)	2回		
	人力加振(1.07Hz)	2回		
	人力加振(3.12Hz)	2回		

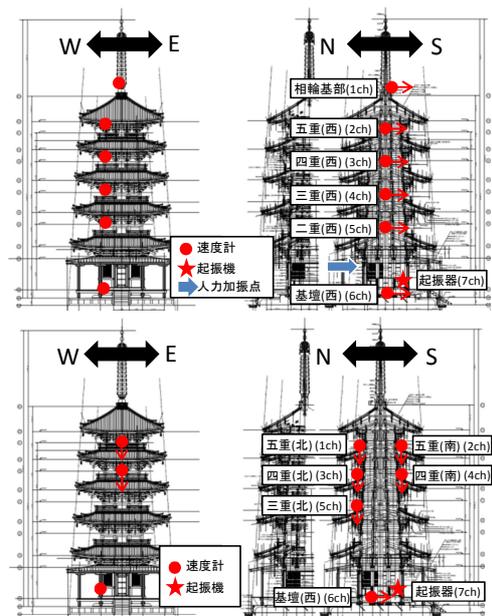


図1 速度計配置図(上図:Case1, 下図:Case2)

## 5. 既存の木造多重塔との周期の比較

図3に既往研究<sup>2)</sup>から読み取った五重塔や三重塔の塔身高さ一固有周期の関係を描き、今回の計測結果を併記した。既往の研究<sup>2)</sup>にならいプロットした各点について原点を通る直線で回帰分析を行った。これより、1次固有周期( $T_1$ )と塔身高さ(H)の関係は $T_1=0.05H$ 、2次固有周期( $T_2$ )と塔身高さ(H)の関係は $T_2=0.02H$ となった。今回の計測で得られた1次固有周期0.926秒(1/1.08Hz)と2次固有周期0.323秒(1/3.10Hz)を塔身高さ20.7mの位置にプロットしてみると、概ね一致している。なお、今回の計測では、相輪はない状態で行っているが、相輪の質量は塔身全体の質量と比べて小さいため、完成後の結果に大きな影響は及ばないと考えられる。

## 6. 質点系解析モデルによる固有値解析

五重塔を等価せん断型の5質点の質点系モデルにモデル化して固有値解析を行った。固有値解析を行った結果を表3に示す。今回の計測によって得られた固有振動数に対し、解析結果は1次が79%、2次が69%、3次が62%となり、各次とも小さな値になっている。設計モデルにおいて、質量は比較的精度良く算定できるが、剛性に関しては、振動計測時の振幅が非常に小さいため、種々の摩擦や非構造部材の影響から計測時の固有振動数は一般的に高くなる傾向があり、設計時に用いた剛性は計測時のそれと比較して小さくなる。従って、固有振動数が小さくなったものと思われる。

そこで、計測によって得られた3次までの固有振動数を先に解として定め、この3つの解と計算結果の差が最も小さくなるように各層の剛性を算定したり、1次から3次の固有振動数は、非常に精度良く対応しており、この時の剛性は設計モデルに対して、初重から順に3.16倍、0.92倍、1.79倍、1.99倍、2.97倍となった。初期剛性は、既往の研究<sup>4)</sup>から楔の打ち込みの程度等によってばらつきが大きいことが分かっている。新築の中山寺五重塔では経年による緩みが少なく、各接合部での剛性が一様に大きくなっている可能性があり、全体としての剛性も大きくなったと考えられる。

## 7. まとめ

中山寺五重塔について微動計測および加振実験を行った結果と解析モデルによる固有値解析結果との比較について報告した。

### 参考文献

- 1) 田中健太他：中山寺における振動計測と振動特性，平成29年度日本建築学会近畿支部研究報告集
- 2) 石倉英幸他：善通寺五重塔の振動特性，平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集第727号，pp.161～164
- 3) 菅谷美好他：木造三重塔の微振動計測に基づく力学機構の推定に関する研究 その1 建物の概要および常時微動計測，日本建築学会大会梗概集（近畿），pp.267～268，2014年9月
- 4) 田中健太他：社寺建築物における貫接合部を有する軸組構面の復元力特性推定に関する研究，日本建築学会大会梗概集（九州），pp.269～270，2016年8月

表2 各計測結果のピーク振動数

f(Hz)	Case1			Case2		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
常時微動(1回目)	1.09	3.09	5.35	1.08	3.13	6.08
常時微動(2回目)	1.09	3.11	5.29	1.09	3.11	6.15
ランダム波(1回目)	1.08	3.11	5.41	1.07	3.05	5.31
ランダム波(2回目)	1.09	3.05	5.38	1.09	3.11	5.38
スイープ波(0.5～4Hz)	1.08	3.10	4.00*	1.08	3.10	6.05*
スイープ波(2～10Hz)	1.09*	3.11	5.36	1.07*	3.09	5.35
スイープ波(9～20Hz)	1.08*	3.12*	5.37*	1.07*	3.11*	6.10*
平均	1.08	3.10	5.36	1.08	3.10	5.65

(注) スイープ波加振時において、波の有する周波数域から外れた位置で確認されたピークは参考値として\*を付し、平均値の計算からは除外した。

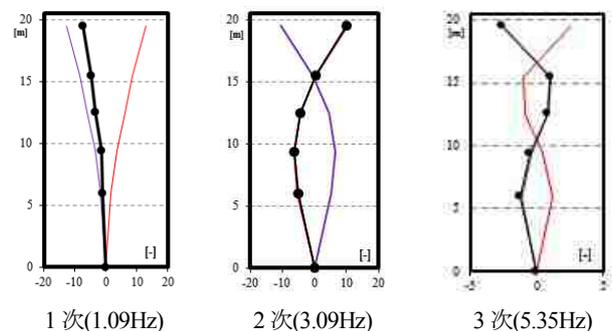


図2 モード図(微動計測時)

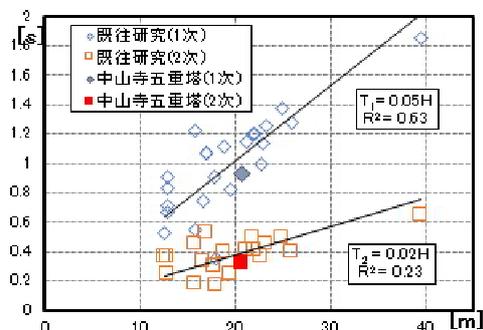


図3 塔身高さ一周期関係

表3 固有値解析結果

計測振動数	剛性(設計)	剛性(算定)	
		振動数	適合率
1次	1.08	0.85	79%
2次	3.10	2.15	69%
3次	5.36	3.30	62%

謝辞 中山寺様にはこの度の振動計測を行う機会を与えて頂いた。ここに記して謝意を表する。

\*1 能勢建築構造研究所  
 \*2 大阪大学大学院 修士課程  
 \*3 奈良女子大学 講師・工博  
 \*4 大阪大学大学院 教授・工博

Nose Structural Engineering Inc.  
 Graduate Student, Graduate School of Eng., Osaka Univ.  
 Lecturer., Nara Women's, University, Dr. Eng.  
 Prof., Graduate School of Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.