

# 五重塔の振動特性の評価

## Evaluating the Vibration Characteristics of a Five-Storeyed Pagoda

平野 晋\* 山上 聡\*\* 中嶋邦彦\*\*\* 吉田峰敏\*\*\*

### 要 旨

伝統木造建築物である五重塔は、一般的に耐震性に優れていると言われている。これまでに被災記録の調査や微動観測などによる研究事例はあるが、実建物の地震観測データに基づき、その振動特性を定量的に検証した研究はほとんどない。

そこで、五重塔の耐震性の把握を目的として、静岡県富士宮市の大石寺五重塔の常時微動観測、自由振動実験、地震観測を行った。また、実験および観測から得られた振動特性に基づいて、せん断型質点系の解析モデルを作成し、地震時の五重塔建物応答の、シミュレーションの適用性について検討した。

本報告では、地震観測による五重塔の動的な特性を報告するとともに、地震時の建物応答のシミュレーション解析を実施し、モデル化の適用性、および今後の課題について報告する。

キーワード：重要文化財建造物、五重塔、地震観測、地震応答解析、シミュレーション

### 1. まえがき

伝統木造建築物である五重塔は、一般に耐震性に優れていると言われており、大地震時に五重塔が倒壊したという歴史的な記録は現存しない。しかし、地震時の五重塔の観測記録に基づいた、振動特性の定量的な研究はあまりない。

静岡県富士宮市の大石寺五重塔(写真-1)は、江戸時代以前に建てられ現存する22塔のうちの1塔である。

建設時期と歴史地震の発生時期から、これまで、1854年の安政東海地震や、1944年の東南海地震など、富士宮市で震度5以上と想定される地震を複数経験しているはずだが、倒壊などの記録はない。これまで常時微動観測や、自由振動試験も行われておらず、地震時の観測もされていなかった。

この五重塔は、東海地方唯一の五重塔であり、駿河トラフ、南海トラフを震源とする巨大地震発生時には強震域となる可能性がある地域である。

既往の研究では、五重塔の歴史地震による被災記録の調査報告<sup>1)</sup>や、重要文化財五重塔14塔で常時微動観測、自由振動試験の報告<sup>2)~15)</sup>がある。観測結果より、五重塔の固有振動数は高さに反比例すること、固有振動数や減衰定数などが報告されている。

今回、五重塔の耐震性の把握のため、地震計を設置して、常時微動観測、自由振動、地震観測を行った。また、地震時の応答特性を明らかにするために、せん断型質点系の解析モデルを作成し、地震時の建物応答シミュレ-

ーションを試みた。解析結果と観測値を比較し、モデル化の妥当性、および適用性を確認した。

### 2. 建物概要

大石寺五重塔は、1749年6月建立、様式は和様、三



写真-1 大石寺五重塔

\*東日本支社建築設計部 \*\*技術研究所建築研究グループ \*\*\*東日本支社建築部

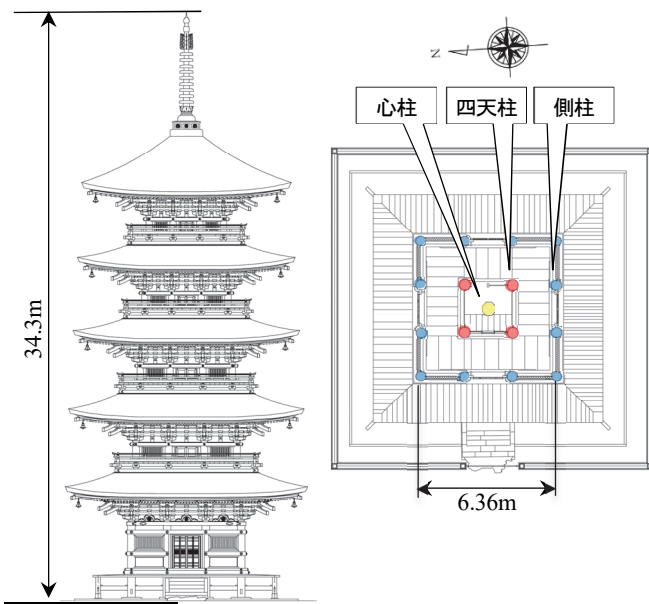


図-1 西立面図、平面図

表-1 柱部材の断面諸元

部位	寸法	形状	その他
心柱	八角形部：575mm×340mm 円形部：340mm×180mm	内部は八角形 相輪部は円形	5本継ぎ：金輪継ぎ 最上部はヒノキ それ以外はケヤキ
四天柱	470mm×360mm	八角形	ケヤキ
側柱	440mm×380mm	外面部分は円形 内部は八角形	ケヤキ

間、五重、銅板葺き形式である。1966年に国重要文化財建造物に指定されている。塔の高さは、地面から五層の屋根上部まで28.8m、相輪の宝珠の最上部まで約34.3m（図-1）、心柱は礎石式（礎石の上に心柱が載っている形式）である。軸組構法は長柱構法と檼構法の併用構法（四天柱、側柱とも柱盤の上に載っている）である。

図-1、2に示すように、五重塔の柱は、建物中心部を地盤面から最上部の屋根を突き抜けて、「相輪」と呼ばれる金属製の装飾物を支える「心柱」、心柱の周りの4本の「四天柱」、五重塔の室内外を区切る12本の「側柱」の3種類から構成されている。最も高さが低い屋根を「初重」、その直上の屋根を「二重」、最上部の屋根は「五重」と呼ばれている。心柱以外の柱と、各重屋根で構成される構造物を「塔身」と呼ぶ。また、各重と横架材とその直下の塔身の柱で構成される門型の架構をここでは「層」と称する。心柱以外の各層の柱は、通し柱ではなく、柱脚部は「柱盤」、柱頭部は「台輪」という横架材で接続されている。

心柱は、最下端は前述のように地盤上の「礎石」に載っており、途中では塔身と接続されておらず、五重の最上部で木製のくさびを介して塔身と接続されている<sup>16)</sup>。心柱、側柱、四天柱の断面諸元を表-1に示す。

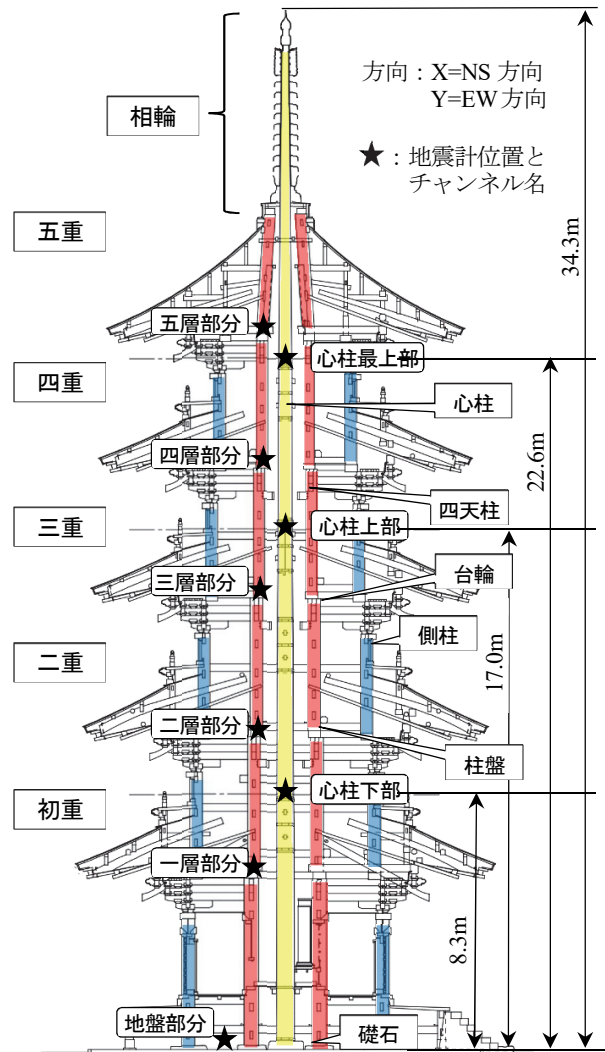


図-2 北断面図と地震計設置箇所と名称

表-2 地震計の仕様

	仕様
センサー	サーボ型加速度計 AS-303D3W2：（東京測振） 分解能：5/1000cm/s <sup>2</sup> 計測範囲：0～±3000cm/s <sup>2</sup>
収録装置	ネットワーク対応計測震度計 SAMTAC-20-27ch：（東京測振）

### 3. 観測概要

#### 3.1 地震計の設置位置

地震計はNS、EW、UDの三成分の計測が可能で、塔身の五次モードまで・心柱の三次振動モードまでを把握出来るように、地盤面、各重の柱盤上（5箇所）、心柱（3箇所）の計9箇所に設置した（図-2）。

#### 3.2 観測方法

地震計は表-2に示すように、微動観測にも対応できるものである。

観測は、常時とトリガーの2種類である。常時観測は、

常時微動および日常的なモニタリングを目的としてサンプリング100Hz、30分ごとにファイルを作成する。トリガー計測では、地盤加速度が $1\text{cm/s}^2$ 以上で記録を開始するように設定した。記録時間は可変長であり、地盤加速度が30秒間、 $1\text{cm/s}^2$ 以下で記録を終わらせ、最大記録時間は300秒である。トリガー計測時、トリガー感知前の記録時間は20秒とした。

#### 4. 常時微動観測

##### 4.1 固有振動数

2018年4月1日3時30分からの30分間の常時微動記録の観測データを用いて固有振動数を求めた。図-3に30分間の加速度波形を示す。NS、EW各方向とも、塔身部の応答は $0.07\sim 0.15\text{cm/s}^2$ 、心柱は $0.74\sim 1.36\text{cm/s}^2$ で

あり、心柱の応答は塔身に比べ大きかった。各方向のフーリエスペクトルを図-4に示す。塔身を青線で、心柱を赤線で、いずれも最上部を太線で、それ以外を細線で示す。図-4のフーリエスペクトルから各モードと想定されるモード図を図-5に示す。各モードに対応した固有振動数を表-3にまとめて示す。

一次、二次、三次のNS方向の、塔身の固有振動数は、 $0.88\text{Hz}$ 、 $2.30\text{Hz}$ 、 $3.97\text{Hz}$ 、心柱は、 $1.13\text{Hz}$ 、 $1.89\text{Hz}$ 、 $3.64\text{Hz}$ だった。

建物形状は正方形で、構造架構は、心柱を中心とした点対称であるが、NS方向とEW方向で固有振動数が若干違っていた。構成する部材寸法差などの違いが影響していると考えられる。また、微動観測記録を用いたRD法による塔身の減衰評価は、NS、EW両方向とも、 $h=0.02$ 前後であった。

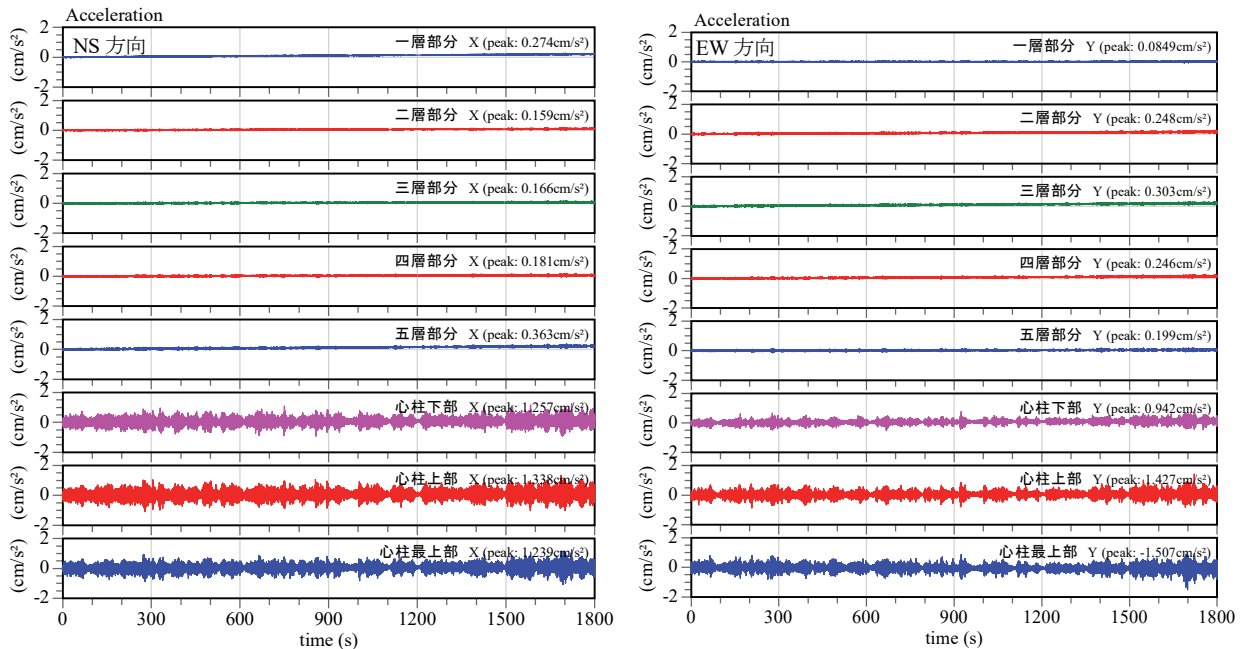


図-3 常時微動観測結果

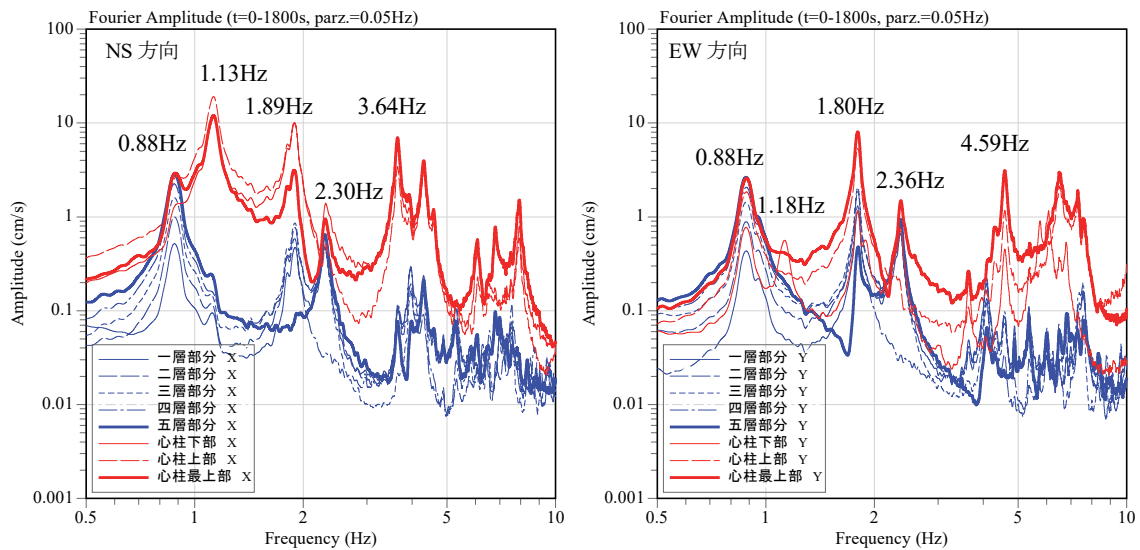


図-4 常時微動観測結果 フーリエスペクトル

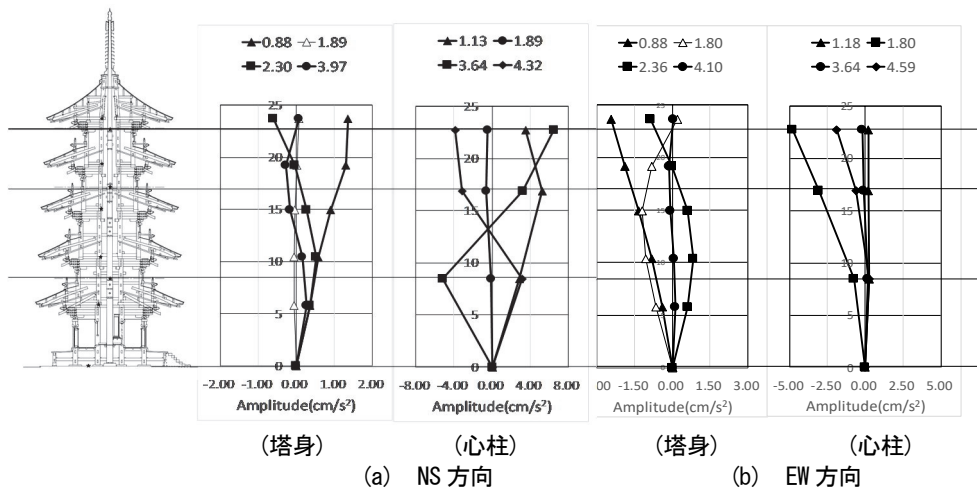


図-5 微動時のモード

5. 人力加振実験による減衰定数の推定

人力加振実験により減衰定数を推定した。加振振動数は事前の微動観測で一次固有振動数と推定した 0.88Hz とした。

四重の柱頭部の横架材に 1 人が立ち、人体の体重移動による慣性力を利用して加振した。一定の振幅が確認された後に、加振を停止し、その後の応答波形から指数曲線の近似により、減衰定数を算出した。

人力加振実験における、NS 方向加振時の応答波形を図-6 (a)に、EW 方向加振時の応答波形を図-6 (b)に示す。自由振動の開始時刻を図中の破線で示した。

NS、EW 両方向ともに、加振直交方向が、加振方向の半分程度の加速度レベルで応答していた。加振方向の振動が収まっても、直交方向の振動は比較的長く継続していた。既往の研究事例<sup>1)、2)</sup>でも、同様の結果であった。減衰定数は NS 方向、0.036、EW 方向 0.048 となった。減衰定数の算出において、加振方向の自由振動波形から対数減衰率により減衰定数を評価したが、直交方向も振動していることについては、今後、検討の余地があると思われる。

なお、自由振動時における塔身の固有振動数は、NS 方向 0.82Hz、EW 方向 0.84Hz となった。

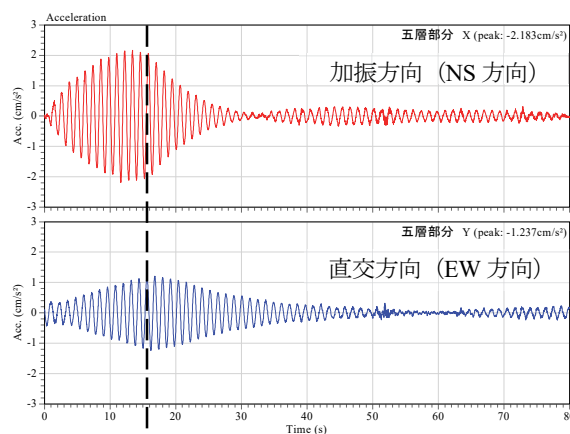
6. 地震観測記録

2018 年 6 月 9 日 22 時 50 分、静岡県東部を震源とする M3.6 の地震が発生した。震央距離は 6km、震源深さ 17km と直下型の地震であった。観測した加速度波形を図-7に示す。地盤の加速度記録から計測震度は 1.6 であった。地盤の加速度の最大値は NS 方向で 16 cm/s<sup>2</sup>であったが、塔身の加速度は 6~10cm/s<sup>2</sup>、心柱の加速度は 38~49cm/s<sup>2</sup>で、塔身の応答は入力加速度より小さくなるが、心柱の加速度は大きくなる傾向を示した。

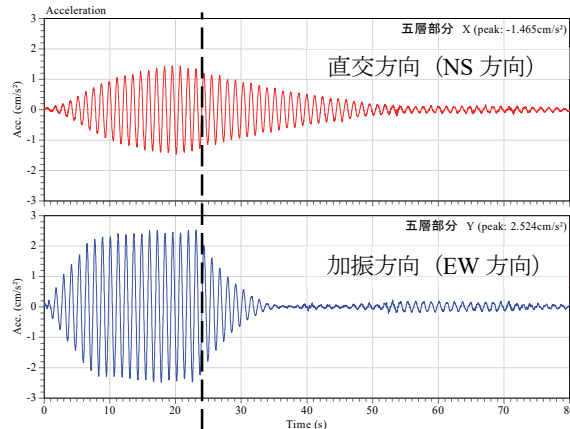
表-3 常時微動記録から得られたモードの固有振動数

		NS方向		EW方向	
次数	モード名	塔身	心柱	塔身	心柱
一次	塔身	0.88	0.88	0.88	0.89
	心柱		1.13		1.18
二次	心柱	1.89	1.89	1.80	1.80
	塔身	2.30	2.30	2.36	2.36
三次	心柱		3.64		3.64
	塔身	3.97		4.10	
四次	心柱		4.32		4.59

単位(Hz)



(a) NS 方向加振



(b) EW 方向加振

図-6 自由振動加速度波形 (5層、NS、EW 各方向)

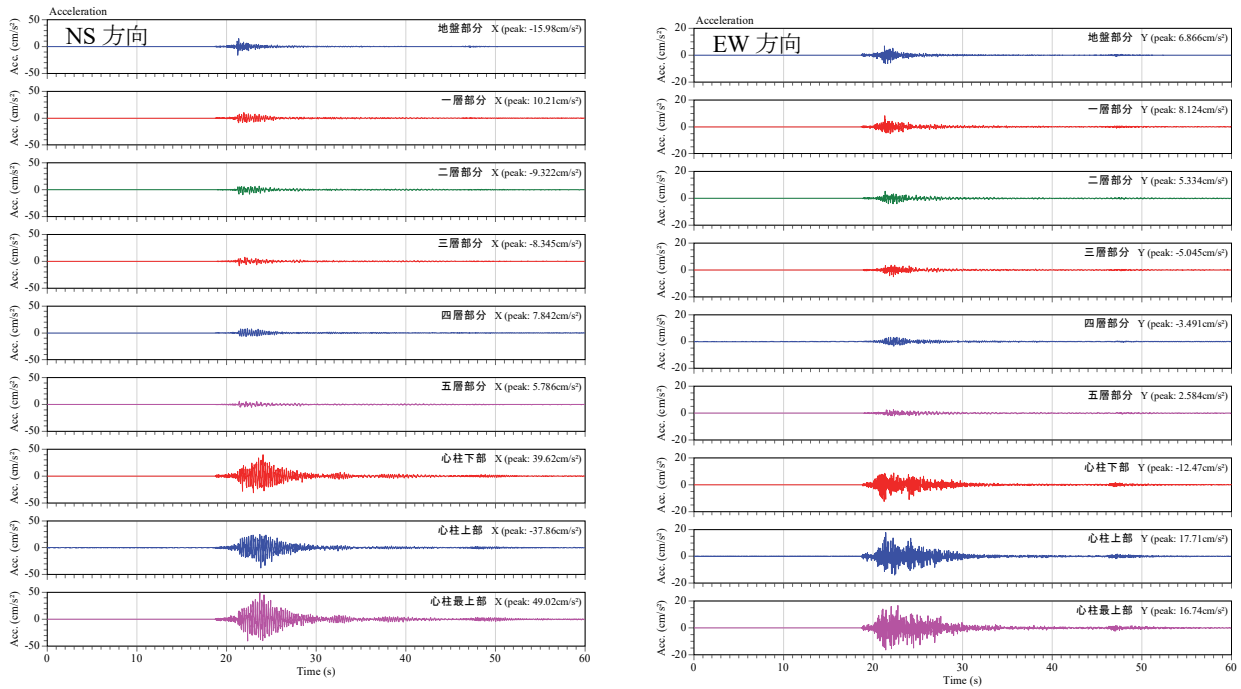


図-7 地震観測記録 加速度波形

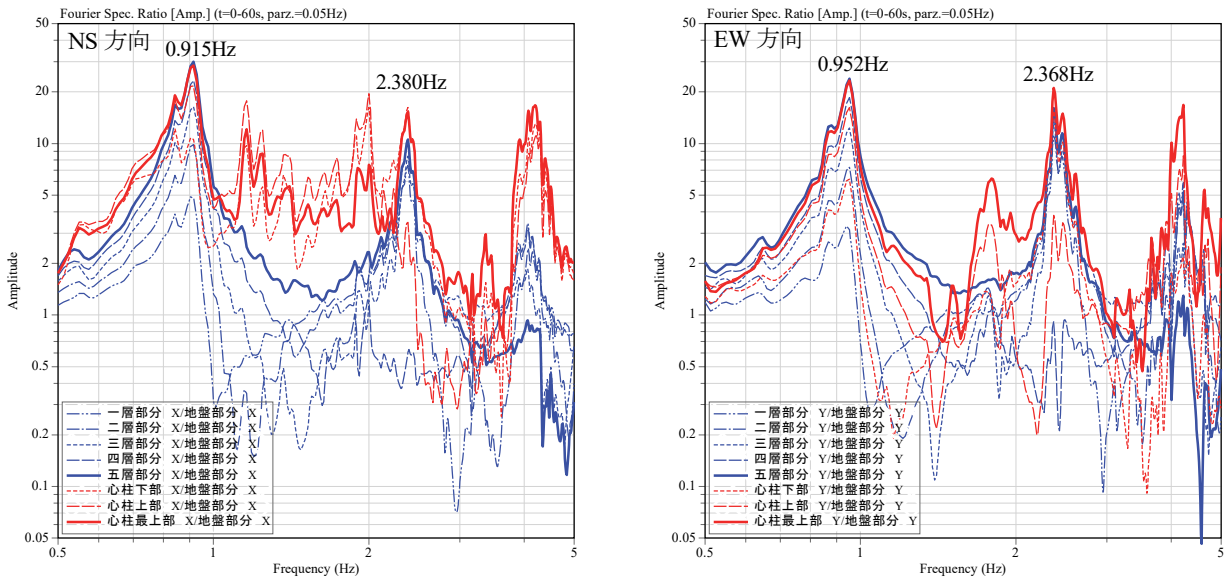


図-8 地震観測記録 フーリエスペクトル比

地盤に対する各点のフーリエスペクトル比を図-8に示す。一次の固有振動数は、NS方向で0.915Hz、EW方向で0.952Hzと微動観測時より大きくなった。微動観測で見られた心柱の一次固有振動数の立ち上がりは小さい。外乱のレベルにより、振動性状が異なっていることが伺える。

## 7. 五重塔のモデル化

### 7.1 モデル化概要

地震応答解析によって、建物の振動性状を評価するこ

とを目的として、五重塔のモデル化を試みた。

解析モデルについて、塔身は五層のせん断モデルとした。心柱の脚部はピン支持と仮定し、7質点の梁要素とした(図-9)。

心柱の節点は、相輪の最頂部、相輪の下部、心柱上の地震計設置高さ、地震計設置位置の中間部に設けた。塔身については、各柱頭部の横架材レベルに節点を設けた。

塔身と心柱は、2章の「建物概要」で記述したように、五重の最上部でくさびを介して接続されているため、五重屋根高さにある心柱の節点6と塔身の五重の水平変位が一致するものと仮定した。

解析には、株式会社構造システム SNAPVer.7を用いた。

### 7.2 質量・ヤング係数等

塔身の主となる木材材種はケヤキであった。また、塔身の質量は、2015～2016年改修工事時の木材の材積調査と大石寺内の三門の実測調査より得た、ケヤキの単位質量  $0.59\text{t/m}^3$  の積とした。さらに、それらの質量に、各

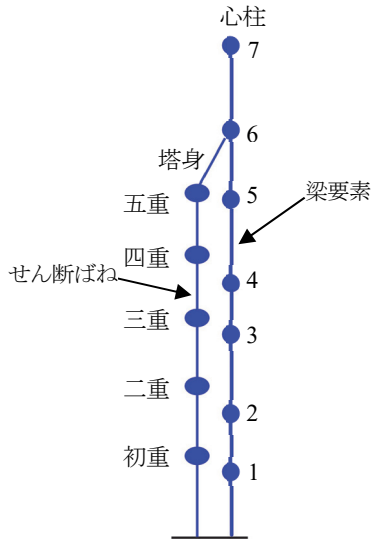


図-9 質点系モデル

表-4 質量  
(a) 塔身

部位	材積 ( $\text{m}^3$ )	単位 質量 ( $\text{t/m}^3$ )	木材 質量 (t)	銅板 ・防水 質量 (t)	合計 (t)
五重	52.5	0.59	31.05	1.869	32.9
四重	38.9	0.59	22.98	1.281	24.3
三重	52.0	0.59	30.74	1.361	32.1
二重	54.6	0.59	32.29	1.427	33.7
初重	85.1	0.59	50.30	1.472	51.8

総合計 174.8t

(b) 心柱

心柱 節点 番号	地盤面か らの高さ (mm)	形状	外接 円 半径 (mm)	断面積 ( $\text{mm}^2$ )	長さ (mm)	単位 質量 ( $\text{t/m}^3$ )	木材 質量 (t)	相輪 等質 量(t)	合計 (t)
7	32867	円形	95	28501	2818	0.59	0.10	0.52	0.6
6	27232	八角形	184	95766	5127	0.59	0.29	1.03	1.3
5	22614		225	142676	5108	0.59	0.43	0.00	0.4
4	17016		244	168503	4513	0.59	0.45	0.00	0.4
3	13589		262	194064	4342	0.59	0.50	0.00	0.5
2	8333		285	230078	4567	0.59	0.62	0.00	0.6
1	4456		298	251511	4027	0.59	0.60	0.00	0.6

総合計 4.4t

表-5 塔身の初期剛性

層	NS方向 初期剛性 kN/mm	EW方向 初期剛性 kN/mm
五層	15.91	17.48
四層	16.36	17.91
三層	15.14	16.50
二層	14.93	16.17
初層	10.74	11.55

層の屋根仕上げ、および防水材料の実測質量を加えて求め、節点に配置した(表-4(a))。

心柱の材種は、最上部のみヒノキであり、それ以外はケヤキであった。また、心柱の単位質量は、塔身と同様に  $0.59\text{t/m}^3$  とした。断面形状は、建物内は八角形であり、相輪部のみ円形であった。心柱の質量は、節点間中央の部材断面と単位質量の積とし、相輪部の節点 6、7 は相輪の質量を加算した(表-4(b))。

次に、塔身節点に塔身質量を配置し、心柱上の節点には、心柱質量を配置した。

心柱の材料定数は、普通構造材<sup>17)</sup>ケヤキの繊維方向特性値からヤング係数  $8000\text{N/mm}^2$ 、せん断弾性係数はヤング係数の  $1/15$  とした。

### 7.3 初期剛性

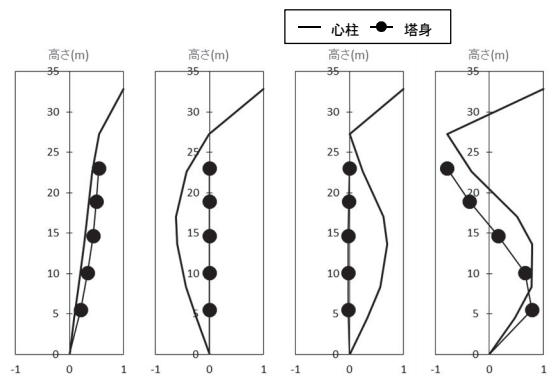
塔身の剛性については、塔身の各部材を考慮した3次元立体フレームモデルの増分解析結果から、各層のせん断バネを算出した。また、心柱の剛性は、部材断面から梁要素に置換した。なお、微動計測で得られた固有振動数と振動モードを表現するため、ヤング係数とせん断弾性係数は2.1倍した。塔身の方向ごとの初期剛性を表-5に示す。

### 7.4 固有値解析

固有値解析結果を表-6に示す。図-10に、心柱・塔身の一次、二次の固有振動モードと想定されるモードを示す。各固有振動数に対応するモードは観測値のモードとなっていることが確認できた。

表-6 固有値解析結果

次数	モード名	振動数		
		f	$\beta_x$	$\beta_y$
一次	塔身NS	0.916	2.335	0.000
	塔身EW	0.952	0.000	2.497
	心柱NS	1.112	-1.084	0.000
	心柱EW	1.112	0.000	-1.208
二次	心柱NS	1.913	-0.652	0.000
	心柱EW	1.916	0.000	-0.612
	塔身NS	2.533	0.463	0.000
	塔身EW	2.638	0.000	-0.381



(a) 塔身一次 (f=0.916Hz) (b) 心柱一次 (f=1.112Hz) (c) 心柱二次 (f=1.913Hz) (d) 塔身二次 (f=2.533Hz)

図-10 固有モード

8. 五重塔の地震時の振動特性

減衰定数は剛性比例型減衰とし、直交方向の挙動も合わせて評価していると考えられる微動観測より得られた減衰定数と、地震観測記録におけるフーリエスペクトル比の応答倍率を考慮し、 $h=0.016$ とした。

塔身五重NS方向の応答加速度波形を図-11に観測値と合わせて示す。下段には主要動付近である20秒から30秒までを示した。主要動については概ね再現しているが、高次の応答に違いが見られる。応答加速度の最大値は、観測値  $5.8\text{cm/s}^2$  に対し、 $4.4\text{cm/s}^2$  とやや小さくなっている。

地盤に対するフーリエスペクトル比を図-12に示す。図より、二次固有振動数が異なっている。また、5Hz以上について、観測値に見られる応答が解析モデルでは小さい。したがって解析モデルでは剛性比例型減衰を設定したが、非比例型減衰の設定などが今後必要になると思われる。

また、心柱の解析結果は観測とは異なっていた。心柱は、塔身とは五重のみで接続されていることから、心柱の接合部の剛性、減衰定数の設定を含め、調整が必要と考える。さらに、地震観測とそのシミュレーションを行って、解析モデルの適用性を確認していく必要がある。

9. まとめ

静岡県大石寺の五重塔について、微動時、地震時の振動特性、人力加振試験による減衰定数を求めた。その結果、

- i. 一次固有振動数は、微動時で  $0.88\text{Hz}$ 、地震時では  $0.916\text{Hz}$  を示した
- ii. 人力加振による建物の減衰定数の推定値は  $0.036 \sim 0.048$  を示した

また、せん断型の振動解析モデルを作成した。固有値解析、観測地震の建物応答のシミュレーション解析の結果より、

- i. 塔身をせん断モデル、心柱を梁要素とした質点モデルで実測した固有振動数とモード形状を再現することができた。ただし剛性については、振幅レベルに応じた調整が必要である

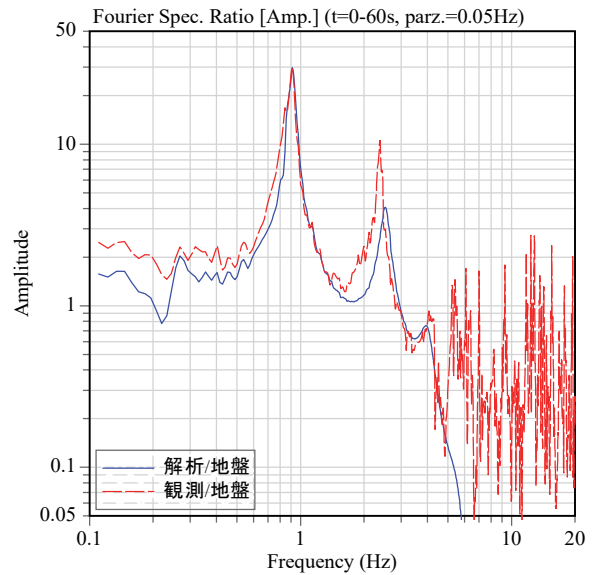


図-12 塔身五重 NS 方向のフーリエスペクトル比

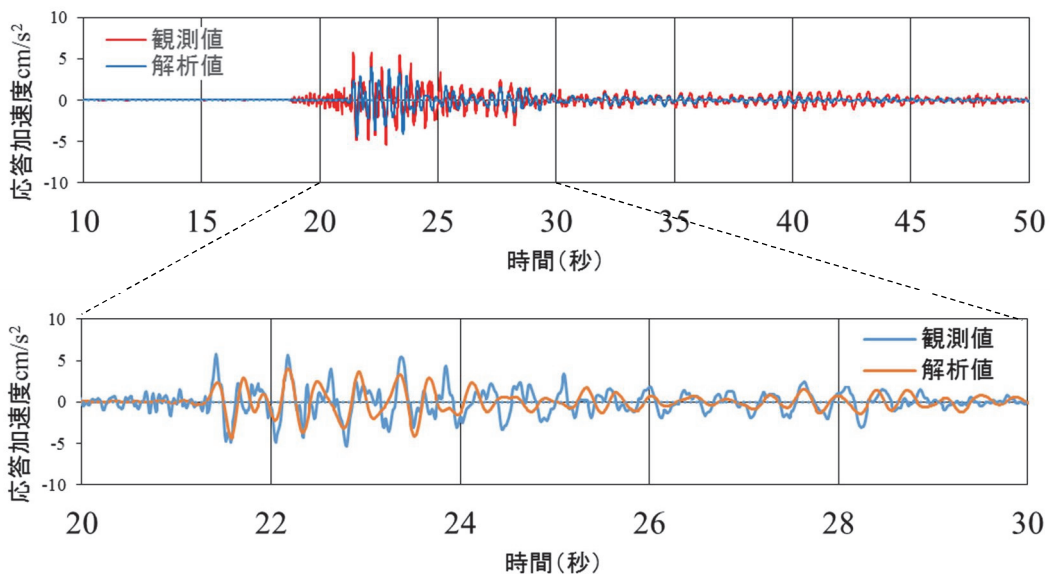


図-11 塔身五重 NS 方向の応答比較

- ii. 地震時の建物応答のシミュレーション解析を行い、減衰定数の設定など、今後の課題を確認した

## 10. あとがき

五重塔の振動特性、耐震性の把握を目的として、観測値とシミュレーション結果を比較し、減衰定数等の検討課題を確認した。

また、微動記録、人力加振試験、観測地震において、建物の応答は、微小な変形レベルの応答だった。駿河トラフ、南海トラフを震源とする巨大地震に対するシミュレーションには、剛性の非線形性の設定などが今後の課題となる。

地震計設置に当たり、大石寺には多大なご協力を頂いた。五重塔の立体三次元フレームモデルの作成に当たっては、株式会社構造システム川邊氏に多くのご協力・ご助言を頂いた。宮大工の株式会社アイチケン三輪氏、林氏には、五重塔の調査、修理時の情報を頂いた。地震記録の波形処理は、国立研究開発法人建築研究所のViewWaveVer2.2.2.0を利用した。

関係各位に心より感謝の意を表す。

### 【参考文献】

- 1) 藤田香織他、「伝統的木造五重塔の振動特性に関する研究」、第11回日本地震工学シンポジウム、2002.11、pp.1529-1534
- 2) 植田康夫他、「教王護国寺（東寺）五重塔の振動特性」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2002.8、pp.893-894
- 3) 広瀬恵美他、「構造形式の異なる2基の五重塔の振動特性」、日本建築学会近畿支部研究報告集、1994、pp.297-300
- 4) 木下顕広他、「興福寺五重塔と三重塔の振動特性について」、日本建築学会近畿支部研究報告集、2000、pp.401-404
- 5) 平瀬恵美他、「人力加振実験による五重塔の振動特性」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994.9、pp.1114-1120
- 6) 井上郁朗他、「醍醐寺五重塔の振動特性」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003.9、pp.851-852
- 7) 藤田香織他、「伝統木造五重塔の振動特性に関する研究（その2 池上本門寺五重塔の微動測定）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2002.8、pp.251-252
- 8) 内田昭人他、「伝統的木造建築物の振動特性（その2 法隆寺五重塔の常時微動測定）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1996.9、pp.171-172
- 9) 林 弘倫他、「伝統的木造五重塔の振動特性に関する研究（その7 妙宣寺五重塔の微動測定）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009.8、pp.541-542
- 10) 登坂弾行他、「伝統的木造建築物の振動特性（その11、旧寛永寺五重塔の振動実験）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003.9、pp.467-468
- 11) 登坂弾行他、「伝統的木造建築物の振動特性（その12 日光東照宮五重塔の振動実験）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004.8、pp.245-246
- 12) 内田昭人他、「伝統的木造建築物の振動特性（その13 最勝院五重塔の振動実験）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2005.9、pp.491-492
- 13) 前川秀幸他、「伝統的木造建築物の振動特性（その14 中山法華経寺五重塔の振動実験）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2006.9、pp.467-468
- 14) 前川秀幸他、「伝統的木造建築物の振動特性（その15 巖島神社五重塔の振動実験）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2007.8、pp.407-408
- 15) 石倉英幸他、「瑠璃光寺五重塔と巖島神社五重塔の振動特性の比較」、日本建築学会近畿支部研究報告集、2004、pp.177-178
- 16) 麓 和善、「伝統を永遠に」総本山大石寺五重塔修復工事六四三日全記録、大日蓮出版、2017.3
- 17) 「木質構造設計基準・同解説」、日本建築学会、2006.12、p.399