

国宝薬師寺東塔及び復原薬師寺西塔の振動性状の差異について

その1 現地観測の概要と観測結果

On the difference of dynamic characteristics between the East pagoda and the rebuilt west pagoda in Yakushi-ji Temple

Part1 Outline and results of the site observation

西川英佑*, 西澤英和**

Eisuke NISHIKAWA and Hidekazu NISHIZAWA

Structural degradation of the East pagoda in Yakushi-ji Temple built about 1300 years ago has become apparent in recent years. In this research, in order to evaluate seismic property of the east Pagoda, many seismographs were set at various points of the pagoda, and vibration tests were performed. By comparing the results of the West pagoda rebuilt about 25 years ago, we have understood that the dynamic characteristics of central pillar of the East pagoda is unusual and the upper layer of the East pagoda shake widely.

Keywords : three story pagoda, wooden architecture, vibration test, site observation

三重塔、木造建築、振動実験、現地観測

1. 緒言

1.1 研究の背景

世界遺産・国宝薬師寺東塔は奈良時代の初め730年の建立とされ、国宝法隆寺五重塔に次ぐ現存最古の木造層塔建築である。この塔は創建以来1300年の間に幾多の大地震や台風被害に見舞われ、何度も修理が繰り返されてきた。比較的詳しい修理記録の残る明治以降については、明治31(1898)年から同33年にかけて、軸部材の取替えを含む大修理が行われた。そして、昭和25年(1950)から同27年にかけては、相輪を解体して露盤を再鋳するとともに、腐朽劣化の著しかった各層身舎の屋根を解体して垂木や野地を修理し瓦を葺き替え、更に裳階の軒瓦を葺き替えた。しかしながら、戦後修理から半世紀を経た現在では、主要な構造部材の劣化に起因すると考えられる変状が顕在化している。特に、平成7年の兵庫県南部地震や同10年の台風第7号では心柱が3層付近から全体的に傾斜した上、相輪が屈曲するなど、昭和56年に復原された西塔には見られない被害が生じた。現在このような相輪の変形はほぼ地震前の形状に自然に戻っているが、近年東塔の心柱を中心に破損調査を行なった所、柱の3層付近の継ぎ手は過去何度も修理されてきたが、現在では添え木の補強ボルトが弛緩し、強風時にはその付近が軋み音を立てて動く。(写真1)

初心柱は礎石の上に建っていたが、江戸初期に基部が約1m切り詰められて柱根石に載っている。内視鏡による観察の結果、図1に示すように一階の天井付近まで内部が砲弾型に完全に空洞化し、場所

によっては直径約90cmの心柱も周囲数cmを残すのみとなっており、約13tと推定される心柱と相輪の自重をかるうじて支持しうる程度の残存断面しかない。

心柱の基部から、一層天井より上部1.5mにまで達する幅約2cmの大きな亀裂が進展している。(写真2)

一層の四天柱の基部などに相当な蟻害が認められる。

など、塔の構造強度に影響を及ぼしかねない損傷が見つかった。

本報告は、このような東塔の現況を踏まえて、大地震や台風災害に対する構造安全性の検討に資することを目的として多点観測手法を用いた現地観測を行った。

1.2 既往の研究

五重塔の振動特性に関する現地観測による研究の歴史は古い。大森房吉博士は明治43年7月、法隆寺五重塔での測定を嚆矢として、関東大震災前の大正8年から9年にかけて、日光、浅草、上野東照宮、池上本門寺、東寺の計6塔の振動観測を行った¹⁾²⁾。博士は5乃至30倍の簡易微動計を設置し、4または5層において人力で心柱を周期1乃至1.5秒で加振することにより塔に有感振動を与えた後、自由振動を含めて観測を行った。博士の観測の結果、法隆寺で1.25秒、東寺1.6秒、複式振り子構造を有する日光、浅草、本門寺は概ね1.35乃至1.39秒の自然周期を有することが明らかになった。博士の塔の揺れに関する研究は関東大震災後の柔剛論争にも大きな影響を与えた。戦後には起振装置や振動観測装置の高性能化が進み、周波数解析手法の普及によって復元力特性や減衰性状に関する詳し

*東京工業大学大学院理工学研究科 博士後期課程・工修

**京都大学大学院工学研究科 講師・工博

Graduate School of Engineering, Tokyo Institute of Technology

Lecturer, Kyoto University, Ph.D.

い評価も可能となった。山辺・金井博士による五重塔の振動観測³⁾をはじめとして、大場、内田博士等の研究^{4) 5) 6)}により多くの木造層塔の水平振動の特性が系統的に把握できるようになり、最近では振動台を使った木造層塔の大型模型の加振実験も行われている⁷⁾。

1.3 塔の構造形式

東塔・西塔（写真3・4）の断面図・平面図を図2～図5に示す。塔の規模は総高が約33m、1層目の一辺が約10mで、裳階付の3層構造であるが、本報告では図2のように裳階を1層と数え6層構造として表記する。

心柱は塔身中央に塔身とは構造的に分離して基壇上に建ち、6層目上部の露盤付近で塔身とわずかに接している。図2に示すように東塔心柱は当初から5層目付近で2本継ぎになっていたと推定されるが、現在では5・6層目のほぼ全域にわたって矧木や添木など補修や補強が施されている。一方、復原西塔の心柱は3本継ぎであり、図4に示

すように初層天井から最上層に至るまで、心柱の4隅に長大な添木を当て、和釘で止めつけている。尚、東塔の心柱は重量約10tで、その上部には約3tの相輪が被さる。

塔身の木組みは両塔ともにほぼ同じで、下層の垂木の上に柱盤を置いてその上に上層の身舎を塔身の組み上げる構造となっている。裳階は身舎の長い側柱を外側から囲繞して構造的に固めるように木組みがなされている。

西塔では東塔に変状が生じていることから、次のような構造補強が講じられている。

5層・6層目に四天柱を付加していること。

尾垂木を添木や帯鉄で強化していること。

創建当初の礎石と版築の基壇遺構を保存するため、旧基壇の上部にSRC造の基壇を新設して、そこに塔の荷重を伝達していること。

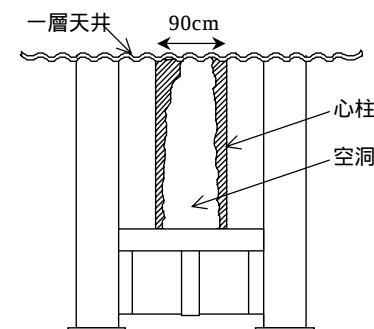


図1 心柱根元断面図



写真1 心柱継手(5層目付近)



写真2 心柱根元の亀裂



写真3 東塔



写真4 西塔

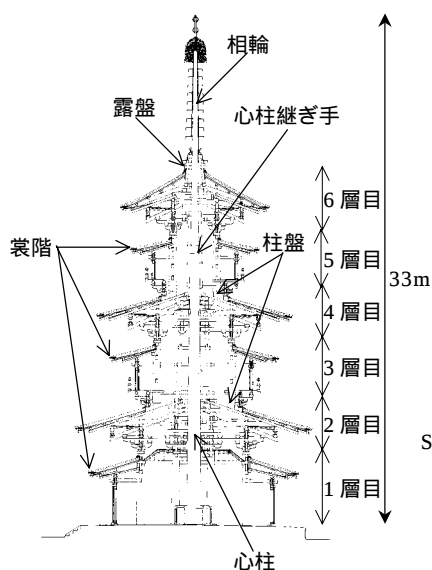


図2 東塔の断面図

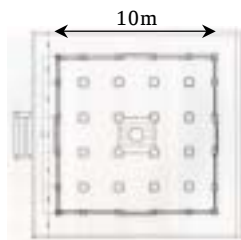


図3 東塔の平面図

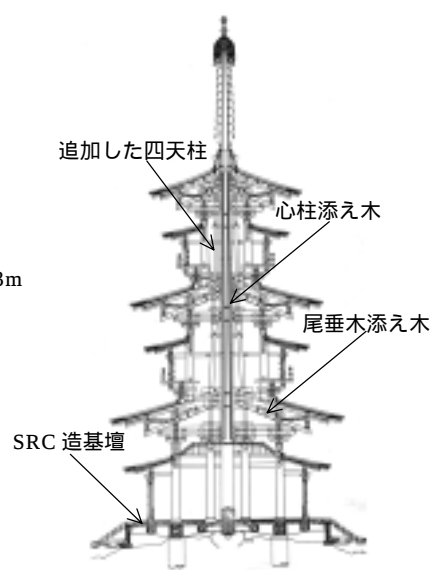


図4 西塔の断面図

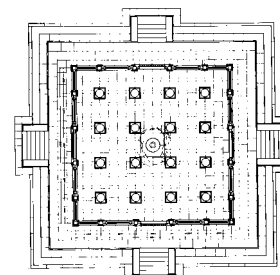


図5 西塔の平面図

2. 観測概要

2.1 観測の基本的な考え方

塔身の各層平面の XYZ の直行軸に対し、従来は主として水平 2 軸 (X・Y) 方向の観測が行われてきたが、本研究では図 6 に示すような上下方向の他に 3 成分の回転振動を観測するために振動計を図 7 に示すように塔身各層の 4 辺に設置し、式 ~ で 6 成分の振動を分離した。

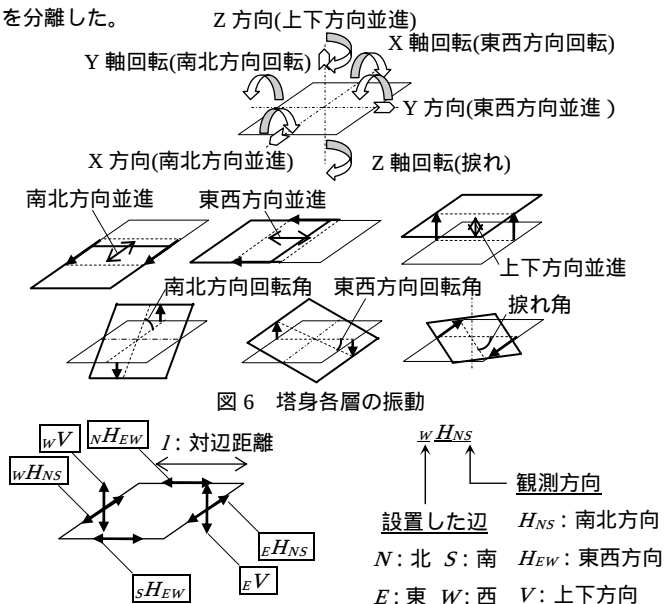


図 7 塔身各層の振動の観測方法

$$\begin{aligned}
 \text{南北方向並進振動} &: \frac{[E H_{NS}] + [W H_{NS}]}{2} \quad \dots \text{式} \\
 \text{東西方向並進振動} &: \frac{[N H_{EW}] + [S H_{EW}]}{2} \quad \dots \text{式} \\
 \text{捩れ振動} &: \frac{[E H_{NS}] - [W H_{NS}]}{l} (= \frac{[N H_{EW}] - [S H_{EW}]}{l}) \quad \dots \text{式} \\
 \text{上下方向並進振動} &: \frac{[E V] + [W V]}{2} (= \frac{[N V] + [S V]}{2}) \quad \dots \text{式} \\
 \text{南北方向回転振動} &: \frac{[N V] + [S V]}{l} \quad \dots \text{式} \\
 \text{東西方向回転振動} &: \frac{[E V] + [W V]}{l} \quad \dots \text{式}
 \end{aligned}$$

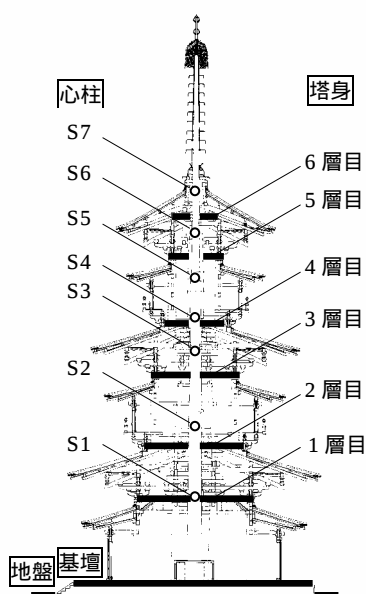


図 8 振動計の高さ方向の配置位置

2.2 設置位置

振動計の高さ方向の配置位置を図 8 に示す。また各高さでの振動計の配置は図 9 に示す配置 A ~ 配置 D の 4 種類である。尚、配置 A では速度計の方向をもりかえることにより心柱の東西・南北両方向の測定を行った。配置 B では速度計のもりかえは行わず観測した。配置 C では上下動速度計をもりかえて各層の東西・南北両方向の回転を測定した。配置 D では小型加速度計 4 台のうち、S7 に設置した加速度計を基準として、残り 3 台を S1 ~ S3 に設置する場合と、S4 ~ S6 に設置する場合の 2 種類のそれぞれで東西・南北両方向の測定を行った。

2.3 観測項目

観測は 2003 年 3 月 ~ 6 月にかけて実施した。測定条件はサンプリング周波数 200Hz・100 秒間とし、各観測項目につき 5 ~ 10 回ずつ実施した。測定項目を以下に列記し、表 1 にまとめる。

○ 強風時両塔同時観測

配置 A で強風時に両塔同時観測を行った。

○ 常時微動観測

配置 B・配置 C・配置 D のそれぞれで、各塔の常時微動観測を行った。

○ 加振実験

・ 人力加振実験

配置 A で塔身を人力加振する実験と、配置 D で心柱を人力加振する実験を各塔で行った。

・ 振り子加振実験

配置 A で塔身を振り子加振する実験を各塔で行った。

表 1 観測項目一覧

観測項目		観測対象	機材の設置
強風時観測		両塔同時	配置 A
		各塔単独	配置 B
常時微動		各塔単独	配置 C
		各塔単独	配置 D
		各塔単独	配置 A
加振実験	人力加振	塔身	各塔単独
	振り子加振	心柱	配置 D
		各塔単独	配置 A

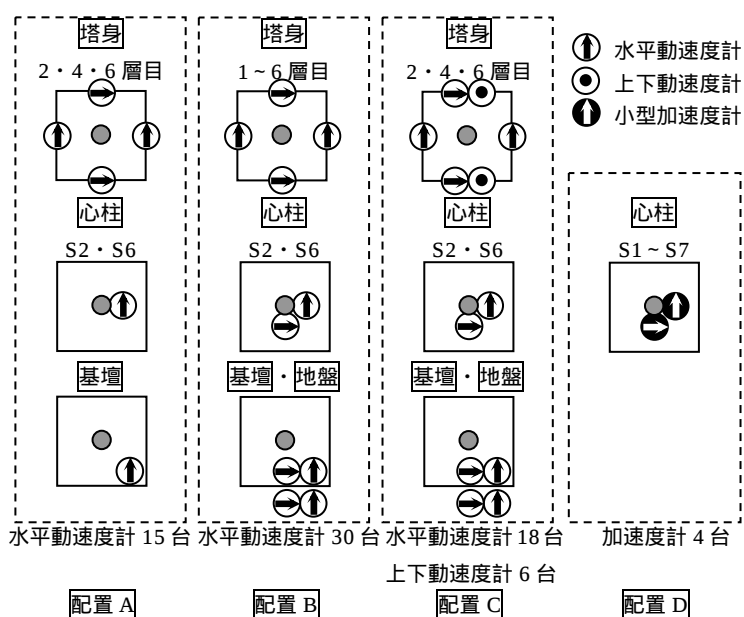


図 9 振動計の配置位置

2.4 加振実験の方法

○ 人力加振

加振は人間一人が数回押すことで行った。塔身の加振は図 10 の点で、心柱の加振は図 10 の点で行った。(注 1) 加振後に自由振動を観測した。

○ 振り子加振

加振条件は表 2 に示す 6 種類とした。設置状況を写真 5 に示す。振り子は重量と長さの異なる a・b の 2 種類で、振り子の振動数は $0.35\text{Hz} \cdot 0.5\text{Hz}$ である。(注 2) パターン a1・a2 は塔身中央付近の図 10 の点・点 を振り子 a で加振し、各層を並進振動させた。パターン b1・b2 とパターン b'1・b'2 は塔身の外周部付近の 2 箇所、図 10 の点・点 に振り子 b を設置し、パターン b は振り子 2 つを同相で揺らし並進振動を、パターン b' は逆相で揺らし捩れ振動を起こさせた。

3. 観測結果

3.1 強風時における振動特性

2003 年 5 月 31 日に行った強風時の両塔同時観測の結果について考察する。(注 3) 図 11 は東西両塔の塔身 6 層目および心柱 S6 における南北方向の速度波形を比較したものである。また、図 12 は両塔の塔身と心柱の速度波形を比較したものである。

表 3・表 4 は図 11 の東西両塔の卓越振動数・平均振幅を比較したものである。両塔の卓越振動数は塔身と心柱では異なり、心柱は東塔では塔身の約 1.3 倍の 1.0Hz、西塔では塔身の 1.5 倍の 1.5Hz であった。また、西塔の塔身と心柱がほぼ同じ平均振幅 0.04kine で揺れて

いるのに対し、東塔の塔身と心柱は異なる揺れ方を示し、心柱の平均振幅 0.16kine で塔身より約 8 割大きかった。東西両塔で比較してみると、東塔の平均振幅は塔身において西塔の約 2 倍、心柱において約 4 倍であった。

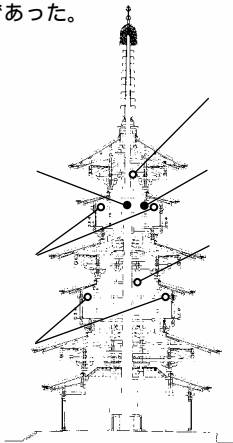


図 10 加振点の位置



写真 5 振り子の設置状況

表 2 振り子の加振条件

	揺らし方	振り子	重量 kg	長さ mm	振動数 Hz	片振幅 mm	加振点
パターンa1		振り子a	85kg × 1個	2040	0.35	400	
パターンa2							
パターンb1	同相加振	振り子b	42.5kg × 2個	1000	0.5	300	
パターンb2							
パターンb'1	逆相加振						
パターンb'2							

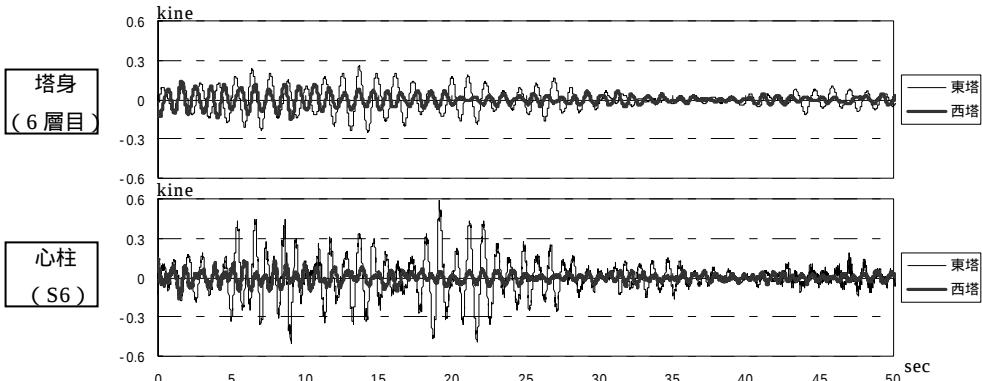


図 11 強風時の両塔における観測波形の比較

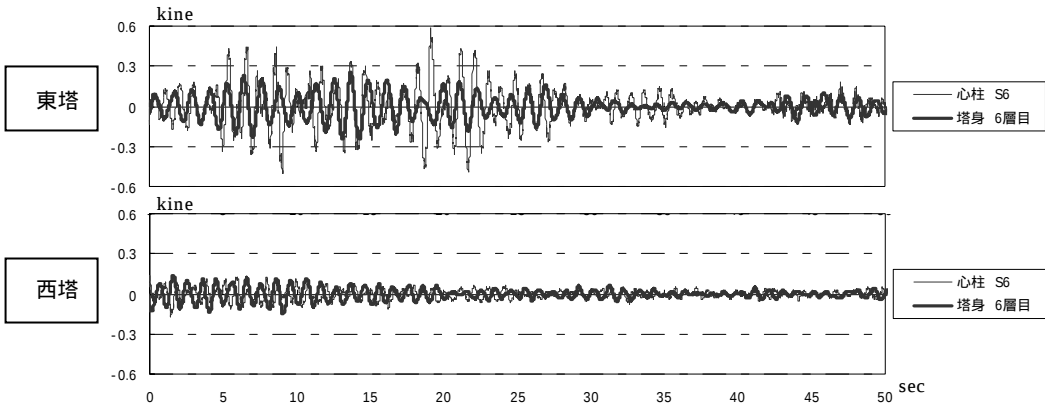


図 12 強風時の塔身・心柱における観測波形の比較

表 3 両塔の卓越振動数

		東塔	西塔	東塔/西塔
卓越振動数 (Hz)	塔身	0.8	1.0	0.8倍
	心柱	1.0	1.5	0.7倍

表 4 両塔の平均振幅

		東塔	西塔	東塔/西塔
平均振幅 (kine)	塔身	0.09	0.04	2.3倍
	心柱	0.16	0.04	4.0倍

3.2 常時微動の振動特性（注4）

3.2.1 塔身の水平振動・曲げ振動および心柱の曲げ振動について

図13・図14は東塔・西塔の加速度のスペクトルである。上段が塔身各層の並進振動、中段が塔身各層の回転振動、下段が心柱各点の水平振動のスペクトルである。東西両塔のスペクトルで異なるのは、西塔では3つの振動成分のピークが明瞭に判読できるのに対し、東塔の心柱のスペクトルについてははっきりとしたピークが分離できないことである。

表5・6は得られた各振動成分の固有振動数であり、空白は固有振動数が読取れなかったことを示す。（注5）

図15は振動モードである。図15の●が塔身1～6層目、●に入った傾斜線が各層の回転、○が心柱S1～S7を表している。固有振動数が認められなかった箇所と、振動モードの形状が観測データ毎

に異なっていた箇所（表5・6で振動数に（ ）が付いている箇所）はプロットしていない。

図15より

- ・西塔では塔身と心柱の振動が連成して高次振動モードに分離できるのに対し、東塔は塔身と心柱がバラバラに振動しており、心柱についてはモードの分離が困難であった。
- ・1次の固有振動数は前節の強風時の観測結果の値とほぼ一致した。
- ・1次振動モードを比較すると、東塔では塔身上層が振られるような性状を示す。
- ・2次の振動モードを比較すると、西塔の心柱ではS5付近を中心に屈曲するのに対し、東塔の心柱ではS6付近で著しく屈曲している。

ことが分かる。

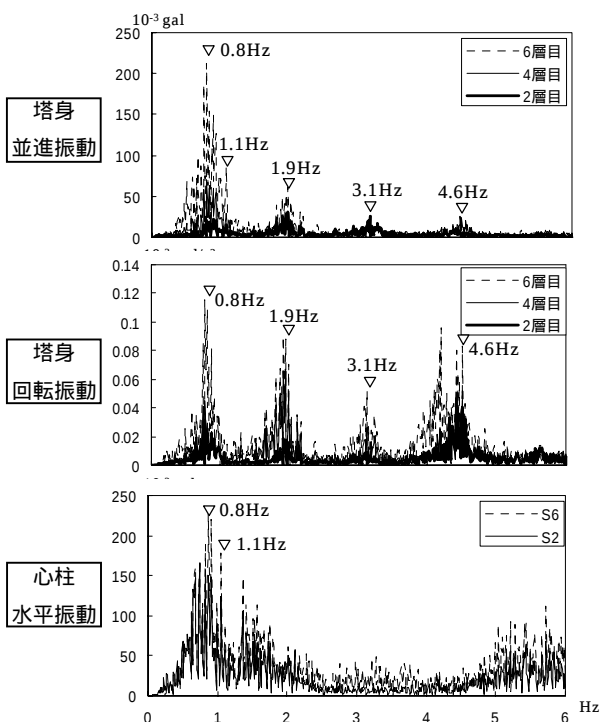


図13 東塔の加速度のスペクトル

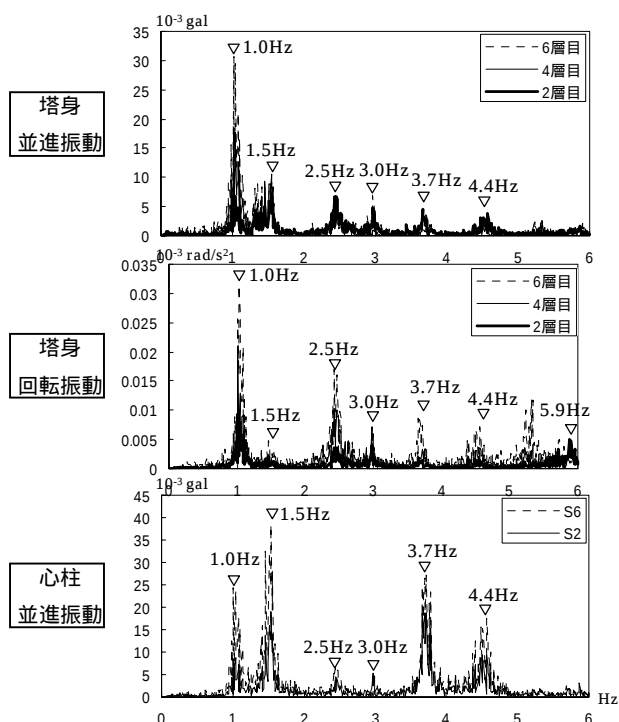


図14 西塔の加速度のスペクトル

表5 東塔の固有振動数

	固有振動数(Hz)			
	1次	2次	3次	4次
塔身並進	0.8	1.1	1.9	3.1
塔身回転	0.8		1.9	3.1
心柱並進	(0.8)	1.1		

表6 西塔の固有振動数

	固有振動数(Hz)					
	1次	2次	3次	4次	5次	6次
塔身並進	1.0	1.5	2.5	3.0	3.7	4.4
塔身回転	1.0	(1.5)	2.5	3.0	3.7	4.4
心柱並進	1.0	1.5	2.5	(3.0)	3.7	4.4

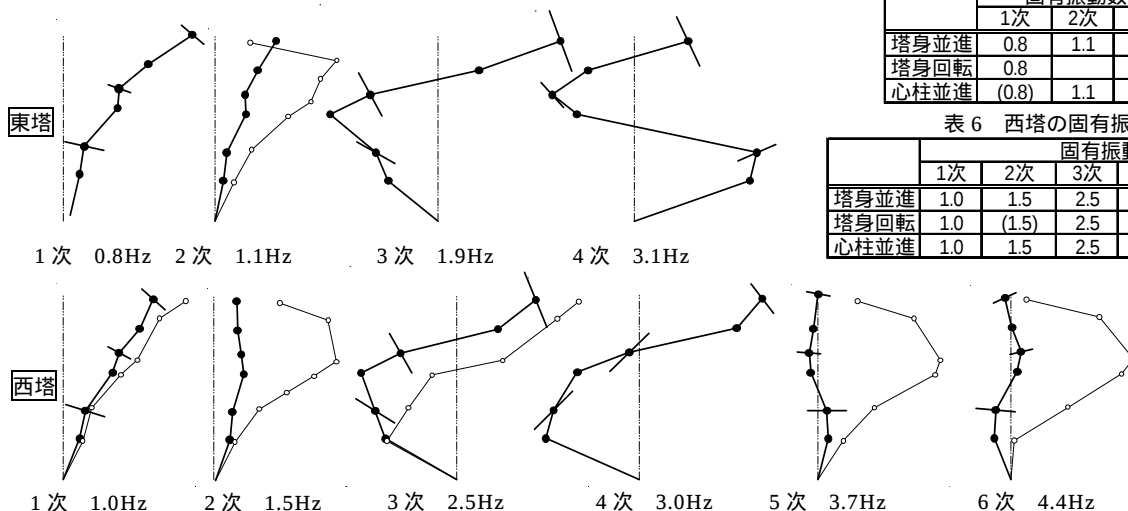


図15 東塔・西塔の塔身の水平・曲げおよび心柱の曲げからなる振動モード

3.2.2 塔身の捩れ振動について

図 16・図 17 は東塔・西塔の塔身の捩れ振動のスペクトルであり、表 7 は各次の固有振動数である。また、図 18 は両塔の塔身の捩れの振動モードである。両塔を比較すると 1 次固有振動数は東塔・西塔がそれぞれ 1.1Hz・1.3Hz で、2 次・3 次の振動数についても西塔が大きい。但し、モード形状はよく似ていることが分かる。

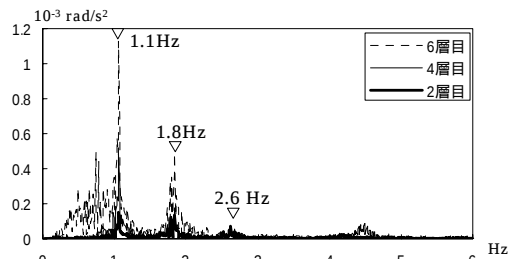


図 16 東塔の捩れ振動のスペクトル

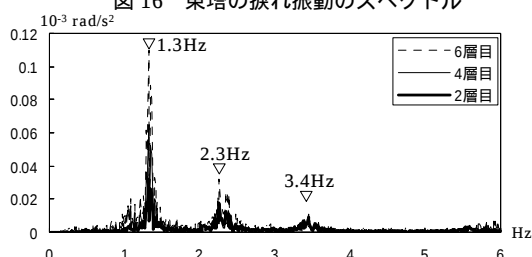


図 17 西塔の捩れ振動のスペクトル

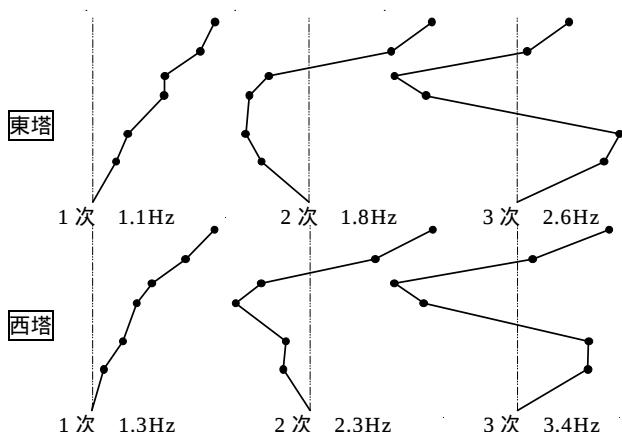


図 18 塔身捩れの振動モード

表 7 両塔の塔身捩れの固有振動数

	固有振動数 (Hz)		
	1次	2次	3次
東塔	1.1	1.8	2.6
西塔	1.3	2.3	3.4

3.2.3 塔身の伸縮振動について

図 19・図 20 は東塔・西塔の塔身の上下振動のスペクトルである。各スペクトルの 1 次固有振動数は東塔・西塔がそれぞれ 4.6Hz・5.9Hz である。図 21 は塔身の上下振動・回転振動のスペクトルから求めた両塔の塔身の伸縮振動の振動モードである。モード形状を比較すると東塔の方が各層の回転がやや大きいことが分かる。

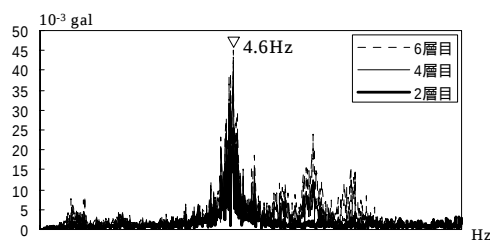


図 19 東塔の塔身各層の上下のスペクトル

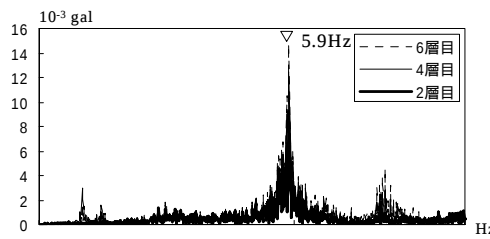


図 20 西塔の塔身各層の上下のスペクトル

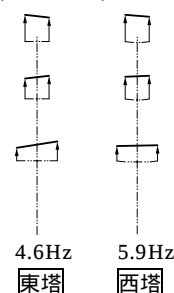


図 21 塔身伸縮の振動モード

3.3 人力加振後の自由振動の減衰性状

人力加振後の自由振動から両塔の塔身・心柱の減衰定数を求め、比較する。(注 6) 図 22 は図 10 の点 (塔身) の加振後に測定した塔身 6 層目の自由振動の速度波形である。また図 23 は図 10 の点 (心柱) の加振後に測定した心柱 S6 の波形である。図 22 の塔身の波形は東塔で 0.8Hz、西塔 1.0Hz の波が卓越する。これは常時微動で観測した 1 次の固有振動数に等しい。一方、図 23 の心柱の波形は両塔ともに高次の波形が重畳したもので、東塔では 1.1Hz・1.9Hz、西塔では 1Hz・3.7Hz の波が卓越した。

振幅が常時微動レベルまで減衰する時間は、塔身では両塔ともに 30 秒、一方心柱では東塔で 5 秒、西塔で 20 秒であった。この区間の波形の包絡線を指数関数で近似して減衰定数を求めた。結果を表 8 に示す。(注 7)

両塔を比較すると、塔身の減衰定数はほぼ同じ約 1.5% であるのに対して、心柱の減衰定数は東塔の方が 3 倍大きく、見かけ上の減衰定数は 9% に達した。

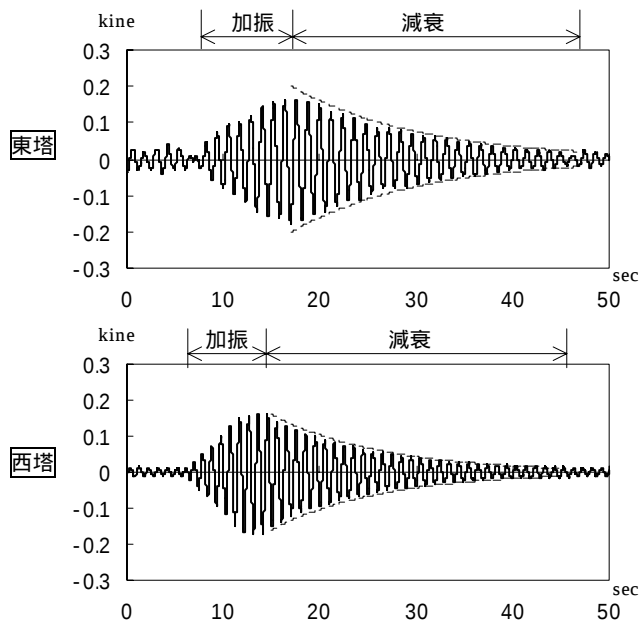


図 22 加振後の塔身 6 層目の自由振動波形

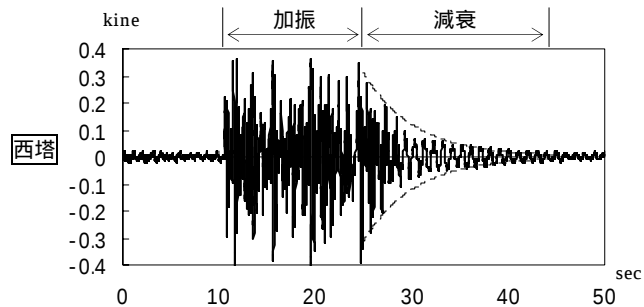
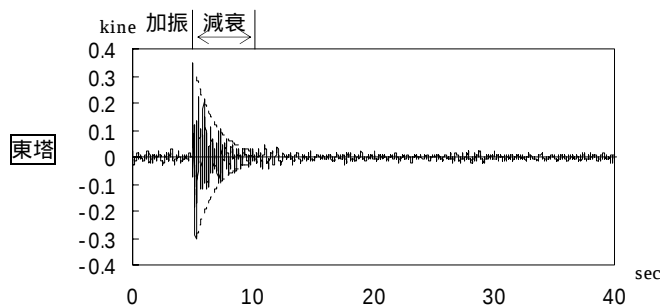


図 23 加振後の心柱 S6 の自由振動波形

3.4 振り子加振に対する応答特性

振り子加振に対する塔身の応答について両塔を比較する。(注 8) 図 24 は西塔をパターン a1 で加振した時の塔身 2・4・6 層目の並進振動の速度波形で、図 25 は各層の変位のスペクトルである。(注 9) 図 25 より塔身は加振振動数と 1 次固有振動数で振動していることが分かる。

図 26 はパターン a1・a2 で、図 27 はパターン b1・b2 で加振した時の各層の並進の振幅を示したもので、図 28 はパターン b'1・b'2 で加振した時の各層の捩れの振幅を示したものである。図 26～28 の左側が塔身上層(・)で、右側が塔身中层(・)で加振を行なったものである。

図 29 は各条件の振り子加振実験における塔身 4 層に対する 6 層の振幅の倍率である。図 29 より東塔は全ての加振条件に対して西塔より塔身上層が振られる傾向があることが分かる。

図 30 は各加振実験の西塔に対する東塔の塔身 6 層の振幅の倍率である。塔身各層を並進振動させた場合は、どの場合も東塔の振幅の方が大きい。これに対して塔身各層を捩れ振動させた場合は、塔身上層を加振した時(パターン b'1)は東塔の方が大きく揺れるが、塔身中层を加振した時(パターン b'2)は西塔の方が大きく揺れることが分かった。

表 8 両塔の減衰定数

	減衰定数(%)	
	塔身	心柱
東塔	1.5	9.0
西塔	1.4	3.0

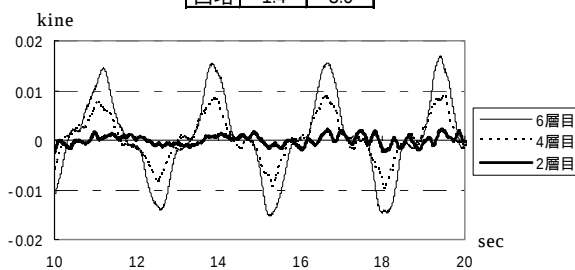


図 24 各層の並進振動の速度波形

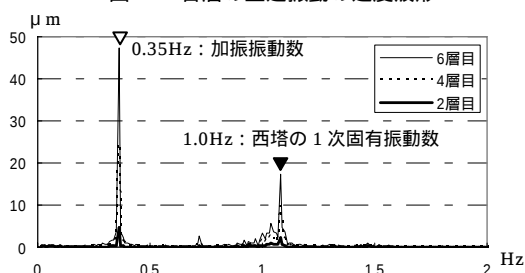


図 25 各層の並進振動の変位のスペクトル

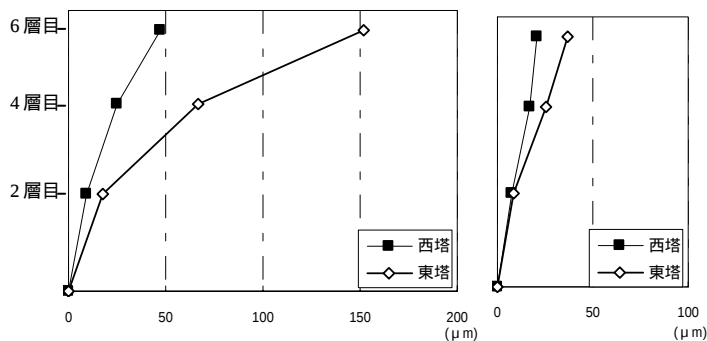


図 26 パターン a (0.35Hz) で加振した時の並進

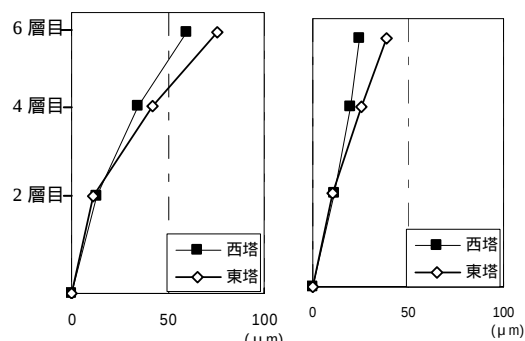


図 27 パターン b (0.5Hz・同相) で加振した時の並進

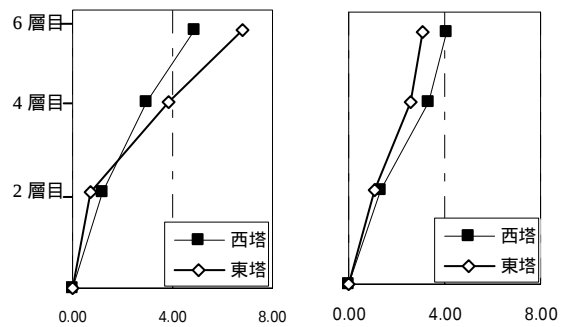


図 28 パターン b' (0.5Hz・逆相) で加振した時の捩れ

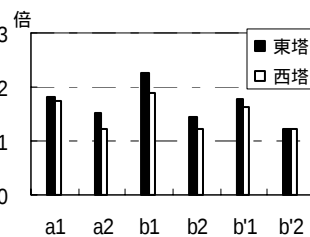


図 29 両塔の塔身 4 層に対する塔身 6 層の振幅の倍率

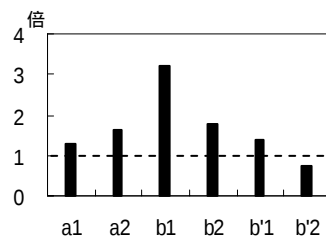


図 30 西塔に対する東塔の塔身 6 層の振幅の倍率

4. 結語

奈良時代に建立された薬師寺東塔と復原西塔の振動特性を比較するために、塔身各層の6成分(東西・南北・上下方向の並進とそれぞれの方向を軸とした回転)と心柱の水平2成分(東西・南北方向の並進)の振動性状を多数の振動計を用いた観測システムによって評価した。

その結果、

- 東塔は西塔に比べ、塔身の水平・曲げおよび心柱の曲げの1次固有振動数が0.8Hzで0.8倍、塔身の捩れ振動の1次固有振動数が1.1Hzで約0.9倍、塔身の伸縮振動の1次固有振動数が4.6Hzで約0.7倍であった。
- 西塔では塔身と心柱が一体に振動するのに対し、東塔では塔身と心柱が別個に振動する傾向が認められた。
- 東塔では心柱の傷みの著しい継ぎ手付近上部で大きく屈曲して振動し、塔身の上部も大きく振られる。
- 東塔の心柱の振動の減衰は西塔に比べ約3倍大きい。

ことが分かった。

このような結果についての解析は次報で論ずる。

謝辞

本研究では実験を行なうにあたり法相宗大本山薬師寺の方々にお世話になりました。ここで厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 大森房吉 五重塔の振動に就きて 建築雑誌第35巻第415号 大正10年 pp219-226

2) 大森房吉 浅草凌雲閣振動観測 建築雑誌第35巻第417号 大正11年 pp377-379

3) 山辺克好、金井清 五重塔の耐震性に関する研究 日本大学生産工学部報告 第21巻第2号,pp91-110 1988年12月

4) 内田昭人、河合直人、前川秀幸 伝統的木造建築の振動特性 その5 薬師寺東塔および西塔の常時微動観測 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)1997年9月、p219

5) 大場新太郎、木下顕宏 木造多層塔の振動特性 日本建築学会構造系論文集第559号 pp47-54,2002年9月

6) 藤田香織、腰原幹雄、坂本功 伝統的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(北陸)2002年10月 p251

7) 箕輪親宏、河合直人、藤田香織、藤田聡、千葉一樹、坂本功 五重塔の耐震性に関する縮小模型実験 その1 概要 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)2005年10月 p481

8) 山辺克好、浜保文雄、金沢政雄 五重塔の耐震性について(序報) 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)昭和49年10月 p575

9) 山辺克好、森本富夫 五重塔の耐震性に関する研究(第一報) 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)昭和51年10月 p657

10) 池田孝生、松井徹哉、山田耕司 日光東照宮五重塔における懸垂式心柱の制振効果について 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)1992、p1069

11) 金多潔、西澤英和：歴史的建造物の振動観測(木造層塔と煉瓦造建築の常時微動観測)都市耐震センター研究報告 第8号、pp83-101、(1994.Apr.)

12) 浅野 清：薬師寺東塔に関する調査報告書、法相宗大本山薬師寺、1981.4

13) 奈良県教育委員会文化財保存課：薬師寺東塔及び南門修理工事報告書、1952.11

注1

塔身の人力加振は1次固有周期に合わせて約10回押すことで行った。心柱の加振は、西塔で約10回押すことで、東塔で1回押すことで行った。東塔の心柱は1回簡単に押すだけで十分に揺らすことができた。

注2

振り子による加振振動数は、応答倍率が減衰定数の影響を受けやすい共振点近傍を避け、共振点より低い振動数とした。(～0.8Hz) また、速度計の持つ測定可能周波数の範囲内とした。(0.1Hz～)

注3

観測当日の午後1時の風向は南向き、風速は10m/s。奈良地方気象台発表

注4

東塔・西塔のスペクトルは各塔で別々に観測した波形から求めたものである。加速度のスペクトルは速度波形をフーリエ変換して求めたスペクトル値に各振動数における角速度を乗じて求めた。尚、両塔の南北方向・東西方向のスペクトルはほぼ同じ特性を持っていたため、ここでは東西方向のスペクトルについて考察している。

注5

東西両塔の固有振動数に関する既往の研究結果と比較すると次表のようになる。

文献4				文献5			
	固有振動数(Hz)				固有振動数(Hz)		
	1次	2次	3次		塔身	心柱	
東塔	0.86	2.06	3.38	東塔	1次	2次	1次
西塔	1.05	2.48	3.75	西塔	0.83	2.08	1.11
					1.00	2.44	1.85
							2.44

注6

両塔の減衰性状は南北方向・東西方向でほぼ同じ特性を持っていたため、ここでは東西方向の減衰性状について考察している。

注7

包絡線のフィッティングは減衰定数を塔身については0.1%刻み、心柱については0.5%刻みで合わせた。

東西両塔の減衰定数に関する既往の研究結果と比較すると次表のようになる。尚、大場博士(文献10)は振幅による東塔塔身の減衰定数の依存性について考察しているが、今回の実験の加振力は小さいので大きな振幅時の減衰定数は評価できなかった。

文献4		文献5	
減衰定数(%)		減衰定数(%)	
東塔	3.8	東塔	1.7(6.0)
西塔	3.5	西塔	2

注8

振り子加振に対する両塔の応答は南北方向・東西方向でほぼ同じ特性を持っていたため、ここでは東西方向の応答特性について考察している。

注9

変位のスペクトルは速度波形をフーリエ変換して求めた速度のスペクトル値に各振動数における角速度を除いて求めた。

(2005年6月10日原稿受理、2005年11月25日採用決定)