

V-3 五重塔の振動特性に関する研究 Research on Dynamic Characteristics of Five-story Pagodas

(研究期間 平成 16~18 年度)

構造研究グループ
Dept. of Structural Engineering

河合直人
Naohito Kawai

To clarify the dynamic characteristics of Japanese five-story wooden pagodas, the result of micro tremor measurements of three pagodas and one scaled model were examined. Measured pagodas are those of Hokekyo-ji Temple, Itsukushima Shrine and Myojo-ji Temple, and one scaled model that was used as the specimen of shaking table test. The values of primary natural period of three pagodas were from 1.15 to 1.32 (sec), secondary from 0.41 to 0.50 (sec), and third degree from 0.23 to 0.25 (sec). The values of damping factor were from 1.40 to 3.97%. Using these data, application of lumped mass system models was tried for these pagodas, and the vibration model considering both shear deformation and bending deformation was proposed.

〔研究目的及び経過〕

五重塔は古来、工匠の流儀・経験等に基づいて建造されており、歴史上の記録で五重塔が倒壊したという記録が無いことは、建築構造界における謎とされてきた。この五重塔の耐震性に関して、種々の仮説に基づく説明はいろいろとなされているが、実際の五重塔の振動性状を実測と解析から定量的に捉えた研究の蓄積は極めて乏しい。そのため、こうした五重塔の修理や新たな五重塔の建設や復元に際し、耐震性などの構造安全性を評価しがたい現状にある。本研究は、現存する五重塔に関する実測的データの整備を目指し、常時微動測定及び人力加振により振動特性の把握を行うとともに、振動モデルを作成して、振動性状の解明を行うことを目的とする。

〔研究内容〕

以下の項目について、研究を行った。

(1) 既往の研究に関する文献調査

日本建築学会、地震研究所報告、その他の学会等における五重塔に関する文献調査を行い、五重塔の構造モデル化のための基礎資料とする。

(2) 五重塔模型の常時微動測定

防災科学技術研究所で振動実験に供される 1 基の五重塔模型について、常時微動測定を行った。この模型は、飛鳥時代の五重塔の仕様にに基づき、細部まで詳細に再現された 5 分の 1 の縮小模型（高さ約 6m）である。心柱形式を変えた 4 パターンで常時微動測定、人力加振を行い振動特性を計測することにより、実際の五重塔での振動モデルを検討するための基礎資料とする。

(3) 五重塔の常時微動測定¹⁾²⁾

法華経寺五重塔（千葉県市川市）、厳島神社五重塔（広島県佐伯郡）、妙成寺五重塔（石川県羽咋市）の常時微動測定及び人力加振実験を行い、固有振動数、振動モード、減衰定数等の振動特性を明らかにする。法華経寺五重塔は、建設年 1622 年、組上げ構法は長柱構法、屋

根は銅板葺、心柱は塔身から吊る懸垂式である。厳島神社五重塔は、建設年 1407 年、組上げ構法は積重ね構法、屋根は檜皮葺、心柱は初重天井上に立つ。妙成寺五重塔は、建設年 1618 年、組上げ構法は積重ね・長柱併用構法、屋根はこけら葺、心柱は礎石上に立つ。3 基の断面図（又は立断面図）を図 1 に示す。

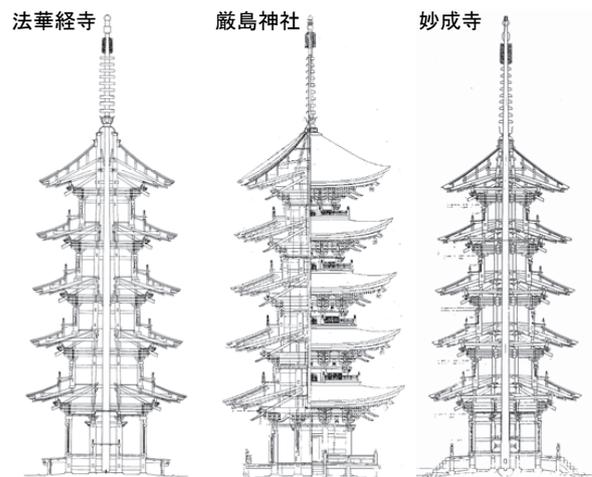


図 1 測定対象の五重塔の断面図（又は立断面図）

(4) 振動解析モデルの検討

既往の研究に関する文献調査、模型及び現存する五重塔の常時微動測定、人力加振の結果に基づいて、五重塔の振動モデルの検討を行う。

〔研究結果〕

(1) 既往の研究に関する文献調査

五重塔の振動測定、振動モデルの構築に関連する文献を収集整理した。本研究対象の 3 基を含めて、既往研究の五重塔の常時微動測定や人力加振による一次固有振動数を、総高との関係でプロットすると図 2 のようになる。総高 h_0 (m) に対する一次固有周期 T (sec) の関係は、ほぼ直線近似が成り立ち、 $T=0.0391h_0$ という関係式が

得られた。同様に塔身高さ h_1 に対しては $T=0.0528h_1$ が得られた。

(2) 五重塔模型の常時微動測定

振動台実験に供された五重塔 5 分の 1 模型の常時微動測定では、心柱が礎石から建つ場合、初重の天井上から建つ場合、四重小屋から建つ場合、心柱相輪がない場合というように心柱形式を変えた 4 つのパターンについて、一次固有振動数が 2.8Hz、3.1Hz、2.6Hz、2.9Hzと変化することが確認された。心柱の拘束効果が現れていると見ることができる。また、図 3 に示すように、人力加振により振幅が増大するにつれて、これらの固有振動数の低下が顕著に現れた。荷重変形関係の非線形性によるものと考えられる。

(3) 五重塔の常時微動測定¹⁾²⁾

法華経寺五重塔、厳島神社五重塔、妙成寺五重塔の 3 基の五重塔について、常時微動測定による塔身の固有周期及び人力加振後の自由振動による減衰定数を表 1 に示す。

また、塔身の振動モード（1 次、2 次）を 3 基について比較する形で図 4 に示す。振動モードは、いずれの塔においても 1 次並進モード、高さ方向の 2 次モード、3 次モードが確認された。この他に、ねじれの振動モードや、心柱の振動モードも確認されている。

(4) 振動解析モデルの検討

常時微動測定では、振動モードにおいて各層の両端で上下動を生じる回転が観測され、塔全体としての曲げ変形が認められた。この測定結果に基づき、各層の曲げ変形及びせん断変形を考慮した多質点系の振動モデルを提案した。また、簡易な振動モデルとして、各層のせん断変形のみを考慮したモデルの適合性の検証を行った。

(5) まとめ

実在する五重塔及び縮小模型に対する常時微動測定、人力加振により振動特性の把握を行った。現存する五重塔 3 基の常時微動測定による一次固有周期は 1.15 秒から 1.32 秒、2 次は 0.41 秒から 0.50 秒、3 次は 0.23 秒から 0.25 秒、また、自由振動による一次減衰定数は、1.40% から 3.97% であった。これらの測定及び文献調査の結果に基づき、五重塔の振動モデルの提案を行った。

【参考文献】

- 1) 前川、河合、花里、箕輪、松留、道場「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 2006 年 9 月
- 2) 前川、河合、花里、箕輪、松留、道場「伝統的木造建築物の振動特性（その 15）厳島神社五重塔の振動実験」日本建築学会大会 2007 年 8 月（予定）

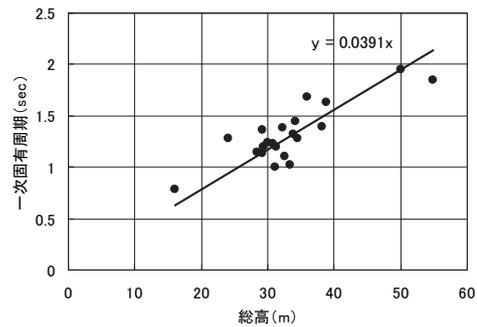
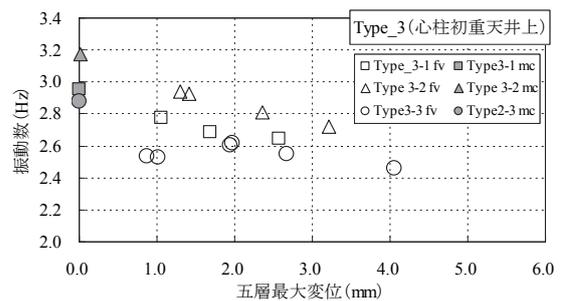


図 2 五重塔の一次固有振動数と総高の関係



凡例の Type 3 の後の数字は実験の段階（1：組立後、2：静的加力後、3：加振後）を、後の記号は測定方法（fv：人力加振、mc：常時微動測定）を表す。

図 3 五重塔縮小模型における固有振動数の変化の例 (Type3=心柱が初重天井から建つ場合)

表 1 固有振動数と減衰定数

名称	塔身固有周期 (sec)			減衰定数 (%)	
	1 次	2 次	3 次	南北	東西
法華経寺	1.23	0.41	0.23	1.56	2.10
厳島神社	1.15	0.41	0.23	2.76	3.97
妙成寺	1.32	0.50	0.25	2.15	1.40

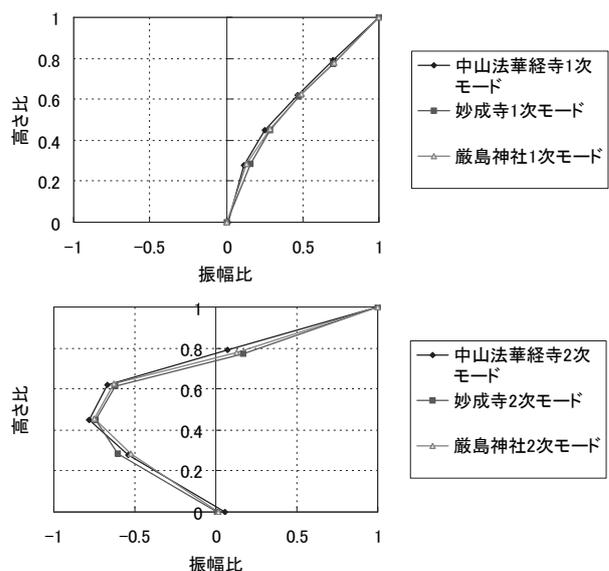


図 4 塔身の振動モード図