<総説>

(受理: 平成 21 年 1 月 28 日)

五重塔の耐震性

Earthquake Resistance of Five-story Pagodas

大場 新太郎*

Shintaro OHBA

1. はじめに

五重塔は、周知のように仏教伝来とともに大陸から渡ってきた仏塔である。その起源は仏教発祥の地インドにおいて、釈迦の舎利を祀るために造営されたストゥーパ（卒塔婆）に始まる。日本における塔の建立は、日本書紀によれば 585 年に蘇我馬子が造営したものが最初である。この塔は兵火で焼失したが、その後、蘇我氏は物部氏との戦いに勝利し、593 年、当時の政治の中心地であった飛鳥の地に飛鳥寺を創建し、塔を建立した。続いて、聖徳太子による難波の四天王寺の造営が始められ、塔が建立されたと言われている¹⁾。

現存する日本最古の木造多層塔は、奈良に建つ法隆寺五重塔（670 年焼失後 711 年前頃再建）であるが、日本古来の木造五重塔や三重塔などの多層塔は、永年にわたり風雪に耐え、その美しい姿を今に伝えている²⁻⁵⁾。写真 1 にみられるようなこの細高い木造の塔が、何故これまで幾多の地震に耐えることが出来たのか、その優れた耐震性に驚く。

建築物はすべて大地に基礎を置いて構築される。そして、鉛直・水平両方向のさまざまな外力を受けながら、それに耐えなければならない。それらの外力の一つが大地を揺るがす地震であるが、その揺れは基礎を介して建築物に入力され、これを揺らす。この揺れの大きさに耐えられなくなると、建築物は破壊し、さらには崩壊に至る。

一般に地震から建築物を守り、耐震性を高めるためには、二つの方法がある。一つは揺れても壊れない強度の大きい頑強なものを造る方法であり、現代の建築で広く行われてきた構法である。いま一つは建築物の揺れを出来るだけ小さくして損傷を免れようとする方法であり、近年多く開発された免震あるいは制震と言われる構法である。それでは、

写真 1 善通寺五重塔

五重塔はどのような構法が採られ、耐震性を高めるためにどのような工夫がなされているのであろうか。

2. 五重塔の構造

五重塔の構造形式は時代とともに変化し、次第に単純化

大場 新太郎

略歴：1963年大阪工業大学工学部建築学科卒業。
1967年大阪工業大学工学部建築学科助手、同講師、同助教授を経て、1989年同教授（2005年まで）。
2005年大阪工業大学名誉教授。
2005年広島国際大学教授・副学長（2008年まで）。
2008年広島国際大学客員教授。
工学博士（大阪大学）。
専門：建築構造学、地震工学。

* 広島国際大学
広島県呉市広古新開 5-1-1 〒737-0112
Hiroshima International University
5-1-1 Koshingai Hiro Kure, Hiroshima 737-0112, Japan

写真2 基壇上の土台と側柱

写真3 塔の中心に独立する心柱

図1 普通寺五重塔断面図⁶⁾

されてきた。その構造形式は大きく3つの構法に分けられ、古い時代から順に積重ね構法、長柱構法、檜構法と変化してきた⁵⁾。

木造多層塔の構築は、先ず堅固な基壇を築造することから始まる。そして、この基壇の上に塔の柱の基礎となる礎石が据えられる。写真2に示すように、礎石の上に塔の土台と柱が据えられるが、これらは礎石に緊結されることはなく、水平に滑動あるいは左右に回転することができる、一種の免震構造となっている。

基壇上に建てられる塔の構造は、図1⁶⁾に示すように「心柱」と「塔身」とから成る。心柱は、塔の中心に長い柱を心礎、あるいは2層下部の梁で支持されて垂直に立つ。ときに極めて少数ではあるが、上層部から吊り下げられたものもある。いずれの構造でも、この心柱は写真3に見られるように、一般に中間層では塔身と接することなく、最上層の頂部においてのみ塔身と接合され、心柱と塔身とは構造的に完全に分離されている。そして、屋根の頂部を突き抜けて垂直に天空に向けて立ち、相輪となる。

一方、塔身の構造は一層ごとに積重ねていくもので、柱・梁などの軸部、柱の上で軒を支える組物、軒とから成り、心柱の周りを取り囲む、いわば心柱を保護する架構である。塔身の構造上の特色は、柱はすべて各層ごとに切断され、2層以上にわたる通し柱は一本も無く、写真4に示すように、各層の上下は「斗拱（ときょう）」と呼ばれる組物を介して、金具を用いず巧みに接合されていることである。

これらの現代建築と異なる構造上の特色は、塔の振動性状に大きく影響し、塔の優れた耐震性と深く関係しているものと考えられ、以下に塔の振動特性について考察する。

3. 木造多層塔の振動特性

塔の振動特性を探るため、普通寺五重塔を例にとり、常時微動時と人力による加振時において、主として塔身と心柱との動的相互作用に関して検討する。その上で、塔の固

写真4 側柱上部の組物

有周期について、現代の建築物と比較して考察する。

善通寺は香川県善通寺市に在り、空海の発願によって813年に創建された。その後、初代の塔は大風により転倒し、2代目、3代目は焼失したが、その都度再建されてきた。4代目となる現在の塔は、明治35年(1902年)に檜構法によって再建されたものであり、東寺(京都市)、興福寺(奈良市)に次いで日本で3番目に高い塔である。図1に示すように、その総高は基壇の高さ0.96mを含め45.225m、塔身高は31.68m、初重幅は6.40mであり、塔身高と初重幅の比が5.0という細高い塔である⁶⁾。この塔の構造上の特徴は、日本でも数少ない懸垂式の心柱を有することであり、心柱は5層上部で鎖によって吊るされている。心柱と塔身の相互作用を検討する上で、興味深い塔である。

3.1 善通寺五重塔の振動性状

3.1.1 常時微動時の振動性状

塔身の5層と2層中間付近の心柱のNS・EW両方向の常時微動時における水平変位波形を示すと図2のとおりである。本図によれば、塔身は同じ周期で単調な振動が繰り返されるのに対し、心柱はこの単調な振動に加えて1秒以下の短い周期の振動が重なり、両者の間に明確な振動性状の違いが認められる。そこで、塔身と心柱の振動性状の違いが顕著に表れている5~10秒と30~35秒の各5秒間の平面上の軌跡を、図3の上段に塔身、下段に心柱について描く。本図によれば、塔は主たる振動の方向がNSからEW方向へと時間と共に変化することが分かる。さらに、塔身と心柱のローカスを比較すると、塔身は楕円を描いてゆったりとした動きをするのに対し、心柱は塔身の約1/3の振幅で塔身に比べてやや複雑な動きをしていることが知られる。常時微動時における塔と心柱の平面上の軌跡の違

図2 常時微動時の水平変位波形

図3 塔身と心柱のローカス

いと、両者の固有周期の相違を知ることができる。

3.1.2 塔身と心柱の固有周期

図2の常時微動波形のNS・EW両方向についてフーリエスペクトルを求め、図4に示す。本図から幾つかの卓越周期が読み取れるが、塔身と心柱個々の固有周期を求めるために、塔身に対する心柱のスペクトル比を求めて図5に示す。本図から心柱の固有周期は、NS方向の1次が0.59秒、2次が0.27秒、EW方向の1次が0.56秒、2次が0.32秒と読み取れる。塔身高に対して心柱の固有周期が短い、この原因は、本塔の場合には心柱が1層上部の天井部分で板によって拘束されていることが影響しているものと考えられる。一方、塔身の固有周期は、図4の卓越周期から心柱の固有周期を除いて、NS・EW両方向ともに1次が1.64秒、2次が0.75秒、3次0.34秒と読み取ることがで

図4 常時微動時のフーリエスペクトル

図5 塔身に対する心柱のスペクトル比

きる。塔身はNS・EW両方向の固有周期が等しく、平面的に対称性を保ち、均衡のとれた建築物である。

塔身と心柱の固有周期が一致する場合、両者は完全に逆位相で振動し、最も有効に制振作用が生じるのであるが、以上の実測結果からみると、心柱の固有周期が短く、塔身と心柱の1次固有周期は大きく異なっており、両者が近似するのは塔身の2次固有周期より高次で1秒以下の短周期領域のみである。しかし、強震時には心柱の下部を拘束している板が大きく変形し、心柱の自由度が増すために、より長い周期で振動することが予測される。

3.1.3 振動モード

五重塔の各層と2層付近の心柱の水平変位波形をもとに、常時微動時における塔身と心柱の振動モードの0.1秒ごとの変化を、塔身を実線、心柱を点線で描き、図6に示す。本図によれば、塔身は1次モードで各層が独立して異なる傾斜角をもって動き、1次固有周期でゆっくり振動してい

ることが分かる。これに対して心柱は、塔身の上層に比べて振幅が小さく、ときに塔身と逆方向に振動する様子が見られる。この振動モードを見ると、本塔のように塔身と心柱の固有周期が異なった場合においても、心柱は塔身に対して制振作用を及ぼすことが予見できる。

3.1.4 人力加振時の振動性状

建築物は、あらかじめその固有周期を測定しておき、得られた固有周期で繰り返し加振すると共振して大きく揺れる。いま、五重塔の5層において、NS方向に塔身の1次固有周期で人力(2人)によって塔身に10回の加振を行い、得られた塔身と心柱の水平変位波形を示すと、図7(a)のように表される。本図から、塔身は加振を繰り返すにつれて振幅が増幅し、加振停止とともに減衰していく状況が知られる。この時、心柱は塔身の約1/3の振幅で塔身と同位相で振動し、明確な制振効果は認め難い。しかし、塔の3層においてNS方向に心柱の1次固有周期で塔身に10回の加振を行った場合の塔身と心柱の水平変位波形を示すと、図7(b)のように表される。本図によれば、心柱は加振された心柱の1次固有周期に同調して大きく揺れ、塔身も心柱の振動の影響を受けて周期が変化し、振幅が1/2以下に減少する。これは、心柱の1次固有周期に塔身の2次固有周期が近似していた結果と考えられる。このように特定の周期が入力される時、心柱が塔身に対して明確に制振作用を及ぼす現象が認められることに注目する必要がある。

3.2 木造多層塔の固有周期

これまでに当研究室において調査した五重塔13基と三重塔10基の常時微動時の振動測定データをもとに、これら多層塔の塔身高と1次および2次固有周期の関係を示すと図8のように表される。図中に実測値を示すにあたってその記号を、1次固有周期は五重塔を○印、三重塔を△印とし、2次固有周期は五重塔を●印、三重塔を▲印とする。参考として鉄筋コンクリート造(RC造)および鉄骨鉄筋コンクリート造(SRC造)五重塔の1次固有周期の実測値を□印、2次固有周期を■印で示す。図から塔身高(m)

図6 常時微動時における振動モードの経時変化

が増すと共に固有周期（秒）が増す傾向が認められ、この関係を最小自乗法によって求めると次式が得られる⁷⁾。

$$1 \text{ 次固有周期 } T_1 = 0.050h \quad (1)$$

$$2 \text{ 次固有周期 } T_2 = 0.020h \quad (2)$$

実測値はこの2つの直線式の上下に分布しているが、このばらつきは、塔の屋根葺き材（本瓦、檜皮、柿、銅板）や建立年代などの違いの影響によるものである。例えば薬師寺の場合、同一規模の東・西両塔の振動測定を行ったところ、730年建立の東塔の1次固有周期は1.20秒、新しく1981年に建立された西塔は1.00秒で、古い東塔は西塔に比べて1.2倍長い⁷⁾。老朽化が固有周期に顕著に影響することが分かる。

ここで注目すべきは、日本古来の木造多層塔の固有周期

(a) 塔身の1次で加振

(b) 心柱の1次で加振

図7 人力加振時の水平変位波形

図8 塔身高と固有周期の関係

はRC造やSRC造の塔に比べて約3倍も長いことである。また、筆者が実施した現代のRC造やSRC造建物約450棟の実測値と比べても顕著に長い⁸⁾。これらの事実は、木造多層塔が現代の鉄筋コンクリート造などのリジッドな剛構造物に比べて、極めてフレキシブルな柔構造であることを示している。なお、現代の鉄筋コンクリート造の1次固有周期の算定式は、塔の2次固有周期の(2)式に該当する。

建築物は一般に、大きな外力を受けて変形が大きくなり、部材や接合部に亀裂が発生した場合にその固有周期は延びる。木造多層塔は、力と変形の関係に強い非線形性があり、その固有周期は、振動時の振幅に極めて顕著に依存する。実測によれば、振幅が常時微動時の100倍程度の弱い振動でもその固有周期は1.3倍にも延びることが確認されている⁷⁾。強震時には塔はさらに大きく変形し、その固有周期はより長くなることが予測される。固有周期の延びが顕著な原因は、塔の各層間の接合部が剛に接合されず、斗拱などの組物によって緩く接合され、しなやかに大きく変形するためと考えられる。このことは、塔が地震動を受けてその卓越周期と塔のもつ固有周期とが一致して共振し、大きく揺れようとした場合、塔に損傷が生じる前に塔自らのもつ固有周期が変化し、共振を避けることができる可能性を示している。

4. 現代建築への応用

木造多層塔の優れた構法は、振動理論に裏付けされて現代の建築に応用され、耐震性の高い建築物を生み出している。その一例として、写真5に見られる主要用途がオフィスビルである地下4階、地上27階建ての建物の構造について述べる⁹⁾。当ビルは平面寸法が28m×56m、建物高さ130mで、高さとの比が4.64の超高層ビルであり、地下

写真5 免震・制震装置を備えた超高層ビル

部が鉄骨鉄筋コンクリート造（一部鉄筋コンクリート造）の耐震壁を有する剛構造，地上部が鉄骨造である。ビルの特徴は，2階を免震層として，摩擦係数0.01程度のリニアスライダー，鉛プラグ入り積層ゴム，多機能ダンパーを備えたハイブリッド免震システムを装備し，最上層に空調用の氷蓄熱槽を用いた振り子式ダンパー（TMD）を設置して，地震時および暴風時の水平振動を低減していることである。リニアスライダーは免震層上部の建物の鉛直荷重を支持し，同時に水平移動を可能にして入力地震動を軽減し，鉛プラグ入り積層ゴムと多機能ダンパーは水平振動の減衰と過大変位の抑止機能を備えている。当ビルは，低層部の2階に免震層を設けて上・下層の構造を分離することにより，下層の柱配置にとらわれないフレキシビリティの高いオフィス空間を創出している。

五重塔の柔軟な構造の設計理念は，近年，超高層建築以外に鉄筋コンクリート造建築やプレハブ住宅の基礎免震にも幅広く取り入れられてきた。さらに，最近では鉄筋コンクリート造建物の基礎が滑ることによって入力地震動が軽減し，上部構造の応答が低下することなども大型震動台を用いた実大実験によって検証されている¹⁰⁾。

5. むすび

木造五重塔の耐震性について，普通寺五重塔を例に採って検討し，これに23基の多層塔の振動測定結果を加えて考察してきた。その結果，木造多層塔の耐震性に関して，現代の一般的建築と異なる幾つかの振動特性が明らかになった。しかし，強震動観測記録が無く，微振動の測定データに基づく考察のため未解明の問題も多い。これまでの研究成果をまとめると次のとおりである。

- 1) 地震動は基壇から礎石を介して入力されるが，塔身の土台や柱は礎石に緊結されていないために一種の免震層となり，地震入力を軽減することができる。
- 2) 塔に入力された地震動は下層から上層に伝播していくが，各層間は剛接されず「斗拱」などの組物によって緩く接合されているために地震エネルギーを吸収し，接合部が一種の制震装置となっている。
- 3) 塔身の揺れは，心柱との相互作用によって一定の制御がなされ，心柱が塔身に対して制震作用を及ぼすこと

が期待できる。

- 4) 塔身は，接合部の組物に工夫を凝らして剛接していないため，固有周期の長いフレキシブルな構造となり，地震時において共振を避けてしなやかに振動する。

多層塔の優れた耐震性の最大の要因は接合部にある。木材を構造材として用い，塔身を1層から上層へ順次積み上げ，各層間を「斗拱」を中心とした組物によって接着するフレキシブルな接合法が地震エネルギーを吸収し，あの構造的に不安定な細高い塔を地震から守っているものと考えられる。この工法を成し遂げた高度な匠の技が塔の耐震性を高め，現在まで千数百年にわたって幾多の地震に耐え，その姿を伝えることができた源であると考えられる。

優れた耐震性をもつ日本古来の多層塔の設計理念は，現代建築にも次第に広く応用され，耐震性の向上に寄与している。まさに塔は，免震と制震を兼ね備えた優れたハイブリッド耐震構造といえる。

謝辞：本論をまとめるにあたり，普通寺ならびに多くの寺院にご理解とご協力を頂いた。記して関係各位に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 梅原猛，“塔，梅原猛著作集9”，集英社（1982年3月）。
- 2) 藤島亥治郎，“塔”，光村推古書院（昭和53年9月）。
- 3) 太田博太郎，“日本建築史基礎資料集成十一塔婆Ⅰ”，中央公論美術出版（昭和59年7月）。
- 4) 太田博太郎，“日本建築史基礎資料集成十二塔婆Ⅱ”，中央公論美術出版（平成11年10月）。
- 5) 濱島正士，“日本仏塔集成”，中央公論美術出版（平成13年2月）。
- 6) 伸和建設(株)編，“総本山普通寺五重塔修理工事報告書”（平成5年11月）。
- 7) 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，559，47（2002）。
- 8) 大場新太郎，地盤条件を考慮した建物の1次固有周期の推定式，日本建築学会大会学術講演梗概集，773（1984）。
- 9) 田中利幸・格英顕・山根一三，免震建築紹介「梅田DTタワー」，menshin，日本免震構造協会，37，3（2002）。
- 10) 壁谷澤寿一・壁谷澤寿海，基礎滑り挙動を伴う直接基礎建物の地震応答推定手法，日本建築学会構造系論文集，634，2151（2008）。