

—論文—

五重塔の構造のモデル化に関する研究

—スネークダンスをする構造モデルについて—

安宅 信行 横須賀洋平

A Study on the Creation of the Structural Model of Five-Story-Pagodas

—On the structural model dancing like a snake—

Nobuyuki Ataka Yohei Yokosuka

The five-story pagodas in Japan date back 1400 years or more. Despite the occurrence of many earthquakes during this period, there is no record of these pagodas being destroyed by earthquakes. Therefore, it is believed that these pagodas are earthquake resistant. However, the reason underlying this resistance has not been clarified yet. Of the various theories, that have been put forth, the most plausible explanation is that one offered by the snake-dance theory. According to this theory, the rocking movements of these pagodas during earthquakes, which resemble a snake dance, protects them from destruction. The pagodas are subjected to few horizontal vibrations during earthquakes. However, a structural model that can recreate these rocking vibrations has yet been created. While we attempted to create such a structural model on a laboratory scale, the aim of our study is that one of describing the structural process during the earthquake shaking, and explaining the results we obtain by writing reports.

1. はじめに

我が国で五重塔が造られるようになってから既に1400年以上経過している。この間に朽ちて壊れたもの、失火、兵火および放火に焼かれたもの、雷を受けて焼失したものなど数限りなくあるが、地震で倒壊したという記録はない。この五重塔が地震に強いという理由について昔から幾多の説がある。これらの説はそれなりに真実を伝えてはいるが、十分な説得性には欠けている。その原因は五重塔の構造のモデル化が不十分なことによると思える。これら諸説のなか、西岡・上田の「五重塔がヤジロベエを積み重ねたような構造をしていて、地震時スネークダンスをする」これにより地震力を軽く受け流す構造であると説明している。[文献1]

この説は真実にかなり近いように感じるが、現実問題として、これまで、このモデルを実験室レベルで再現しようとしたが、不安定次数が

高く極めて困難であった、今回、このモデル化に成功したので以下に報告する。

2. 五重塔の特徴

- 1) 平面は正方形がほとんどで、八角形のものもあるが、中心軸を中心にした点対称となっている。これは質量分布や剛性分布の対称性につながり、塔身のねじれや、不利な挙動の発生を抑える。
- 2) 五重塔は地上に置かれた置物である。すなわち、しっかりした基礎を持たない。床に置かれたタンスや戸棚と同じである。
- 3) 重い屋根・深い軒
側柱の列から外側に張りだされた軒組の先の丸桁で重く・深い軒屋根を支えている。各重の屋根は心柱に直行する軸に対し大きな慣性モーメントを持ち、ゆっくりしたロッキング振動をすることが予想される。

- 4) 心柱は塔の中心にあって、基本的に礎石上に自立していて、露盤の位置で緩やかに塔身に接している。相隣の荷重は露盤の位置で塔身に伝えられ、心柱には直接かかることはない。
- 5) 塔身は心柱を包み込むようにした中空な構造になっている。
- 6) 各重はそれぞれ独立しており、それらを積み上げることにより構成されている。
- 7) 軒の組物は木材（弾性体）を迫持ち状に積み上げているので、三手先斗拱は全体として板ばねとして大きな屋根を支え、このバネの強さがこの構造を特徴づけている。各重のロッキング運動を制御している。
- 8) 五重塔は階段や居室はなく、外から眺められるオブジェ的建物で、建物というより彫刻に近い。

3. 五重塔の基本構造

- 1) 五重塔は一層分（軸組+軒組+小屋組）を積み上げて構成される。各層はそれぞれ独立していて、通柱はなく、上層は下層にただ載せられているにすぎない。
- 2) 軸部は中央に心柱を囲むようにして、4本の四天柱が立ち、その外側に12本の側柱が立つ、側柱の柱頭には外側を三手先とし、丸桁を通して大屋根を支えている。
- 3) 大屋根は尾垂木、地垂木および桔木などの天秤作用によって支えられている。

4. 本研究の対象とする五重塔

五重塔が日本に建てられるようになってから1400年以上たっている。この間に外観的にはそれほど大きな変化は認められないが、構造や構法の点では大きく変わり、構造システムが異なるので、五重塔の構造を一概に論ずることは難しい。そこで、ここでは現存する日本最大の京

都の教王護国寺（東寺）の五重塔（総高：54.8 m）[文献10] を例に取り検討する。

5. 五重塔の力の流れと各部の荷重負担

- 1) 五重塔の形態を特徴付けている軒の深さについて、教王護国寺の場合屋根を桔木で丸桁位置に置かれた支点で持ち上げ、桔木尻を四天柱で抑えている。又、丸桁を丸桁桔で支え、

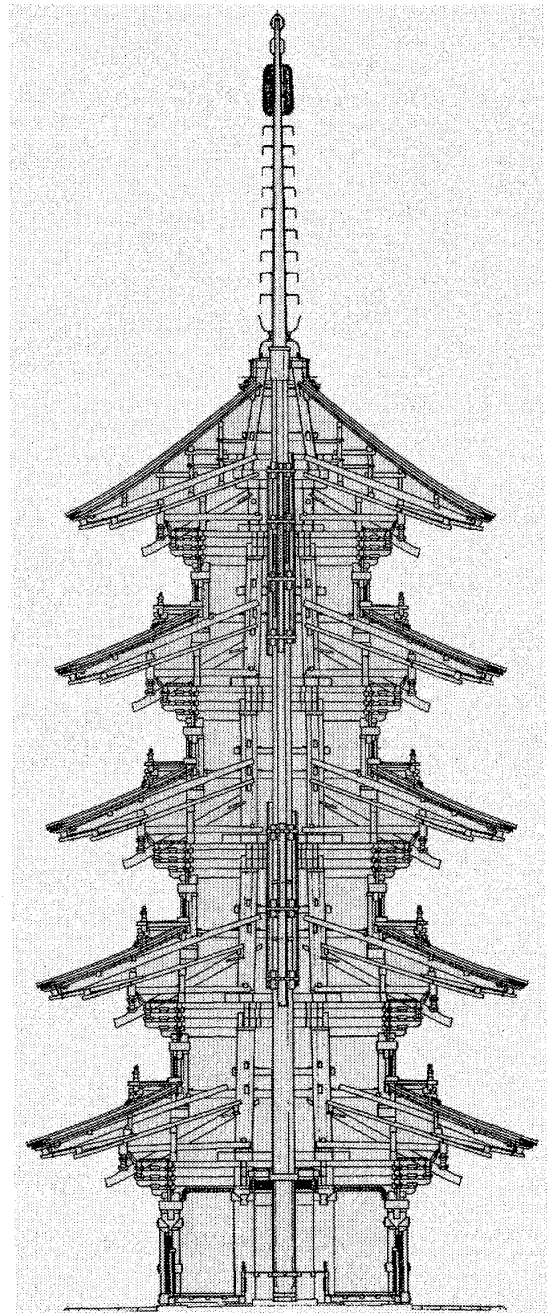


図1 教王護国寺（東寺）五重塔 断面図【文献10】

これも四天柱で抑えている。このように考えると、丸桁より外側の屋根荷重はてこの原理を用いて、四天柱にかかる荷重を大幅に軽減している。その為、各重の4本の四天柱と四天柱盤とから構成される檼は僅かな力でも容易に回転することが出来るようになっている。

- 2) 側柱には桔木の支点・丸桁・軒組を通して、屋根荷重の大部分の荷重を受ける事になる。
- 3) 軒組（三手先斗拱）は板バネとして丸桁より伝えられる大きな荷重をたわんだ状態（バネが圧縮状態）で安定している。このように大きな屋根は弾性支点で支えられており、屋根は横力を受けると支点が上下運動をして、各層は容易に回転しうる。
- 4) 軒組が側柱より外側に張りだしている。このことは側柱内だけで支えるよりも、アウトリーガー効果によりはるかに安定である。以上のことから、教王護国寺の場合、約200t/層（推定）という大きな圧縮力を受けても塔はしなやかに動きうることを示唆している。

6. 五重塔の構造のモデル化

このような五重塔の構造的特徴、基本構造、荷重伝達システムを考慮した2次元の構造モデルを考えてみた。これについては文献8に詳細に書かれている。

この構造を2次元的に表現すると、シーソーを5段積み上げたような形をしている。これだけでは片方に片寄る可能性が高いため、第1段目から中央支持点の両側に側柱に相当する支持点をおく。両サイドの支持点は中央の支持点よりはやや低くしておく、両サイドの支持点の上に板バネを挟み上重の重みでバネを押し下げ3支点が水平になるよう調整する。このようなセットを5段積み上げ、中央に心柱を通し、最上段に相輪を付けると完成である。このとき、中央支点は四天柱を想定し、板バネは軒の組物に対

応している。この構造モデルではバネの強さを変えることにより、モデルの構造的な質の変化を与えることができる。バネの剛性を強めれば曲げモデル的要因が強まり、さらに強めると剛体的モデルにかわる。一方、板バネの剛性をゆるめるとロッキングモデル的要因が強くなり、さらに緩めると不安定構造物に移行する。

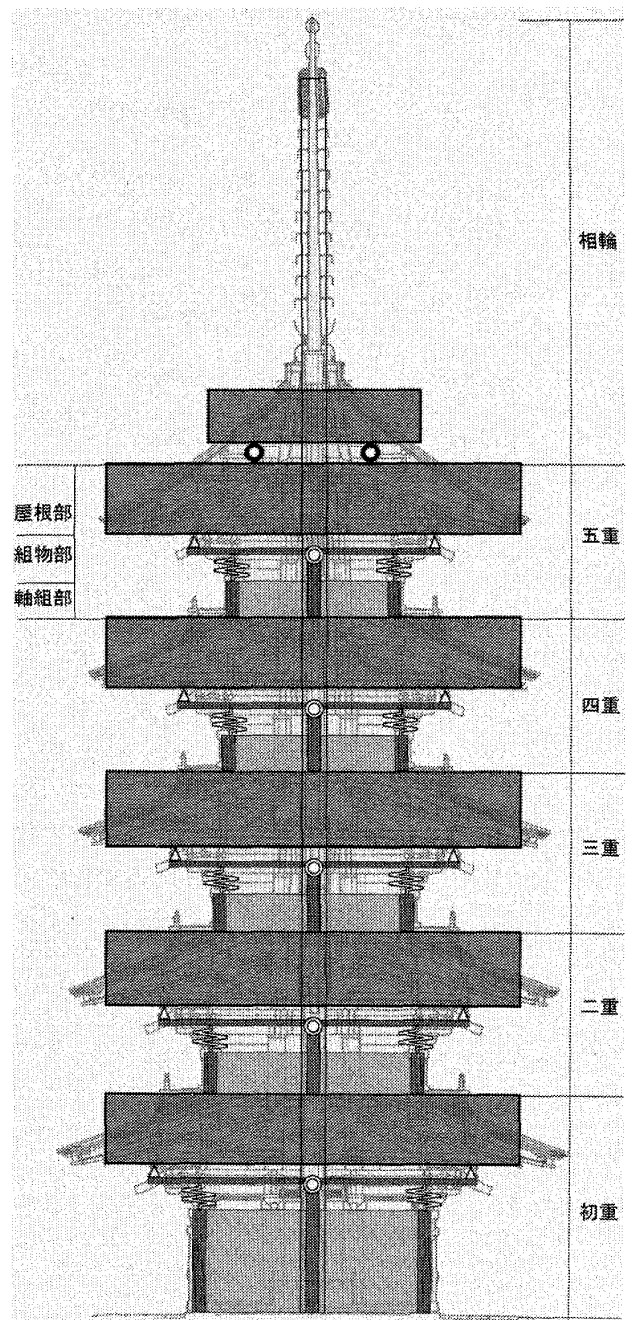


図2 教王護国寺（東寺）五重塔の構造のモデル化

7. 構造モデルの振動実験と構造モデルの特徴

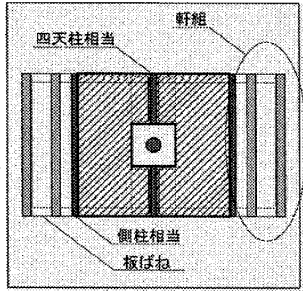
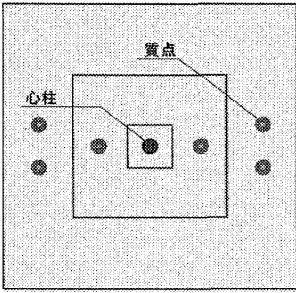


図3 五重屋根伏図 図4 初重屋根見上図

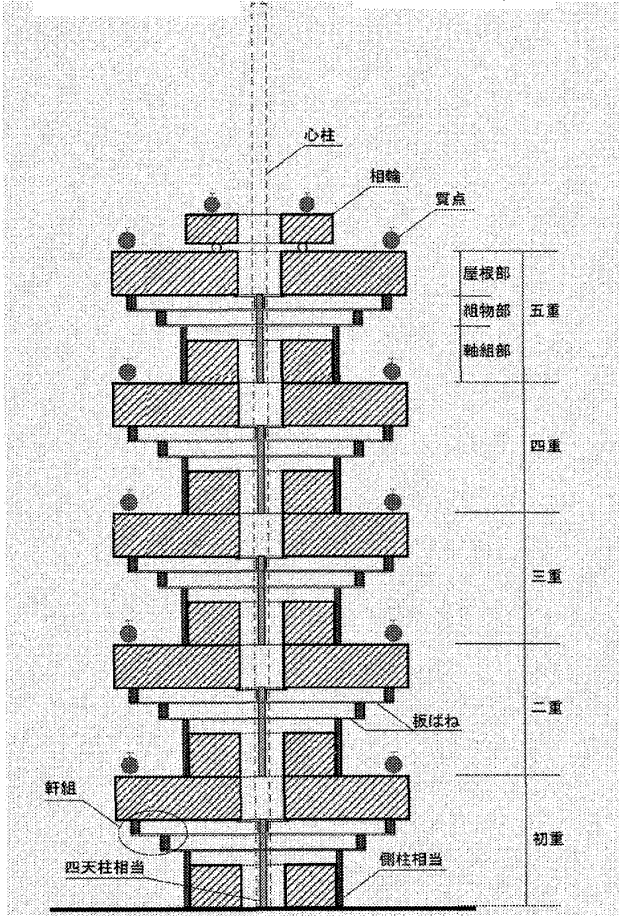


図5 構造モデル断面詳細図

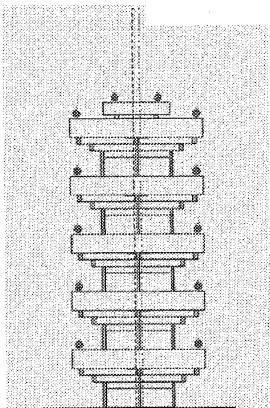


図6 正面図

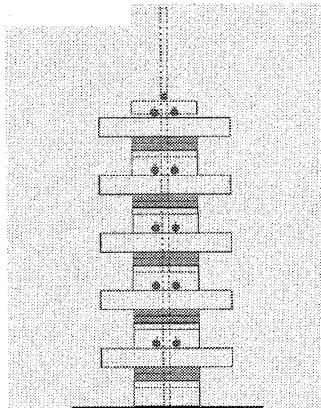


図7 側面図

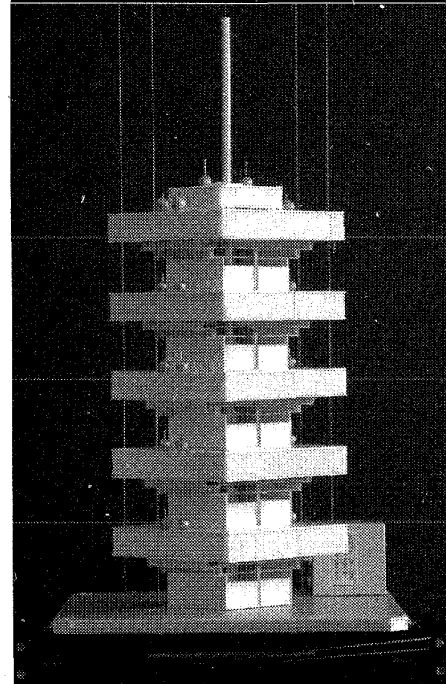
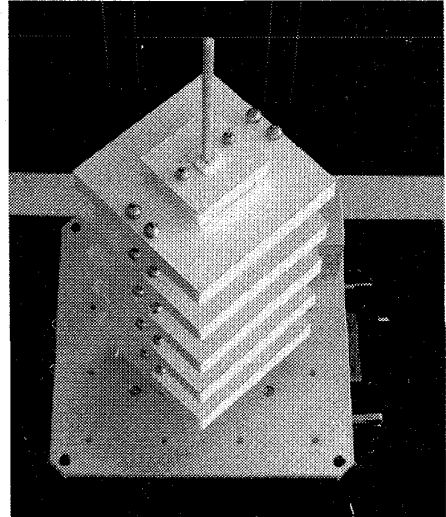


写真1、2 構造モデル外観写真

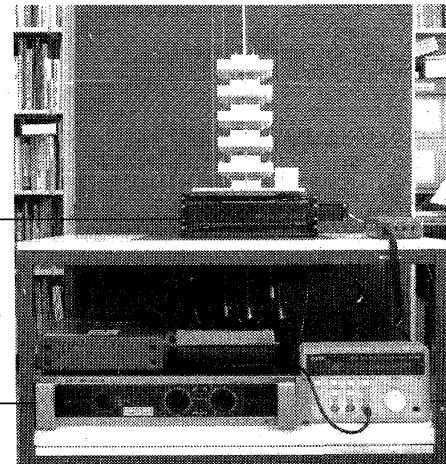


写真3 加振装置

電力増幅器 SVA-ST-30
振動加振器 SSV-105
ファンクションジェネレータ DF-1906

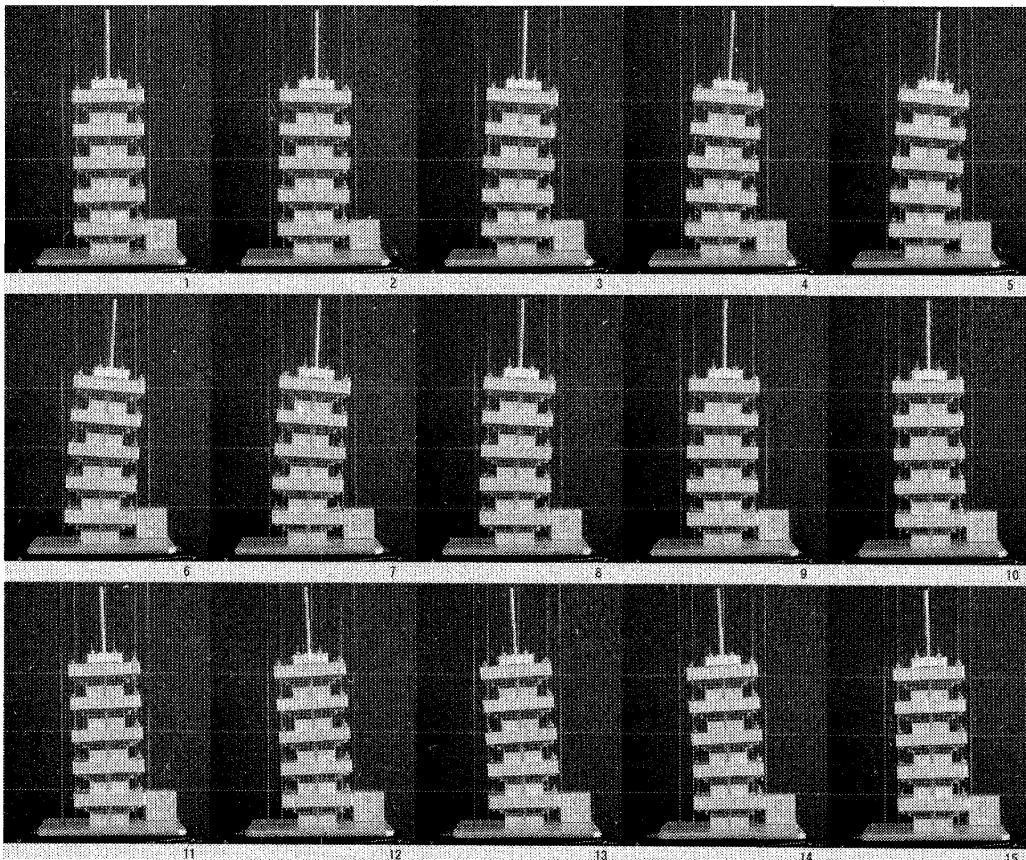
製作した構造モデルを実際に振動台に乗せ加振した。その結果次のようなことが明らかとなった。

- 1) 入力周波数にも依存するが、基本的にロッキング振動を生じる。
- 2) 地震の横波を受けて、塔は層ごとにロッキング運動を起こし、左右互い違いに塔を駆け上るような縦波に変換される。
- 3) 屋根は中央支点を回転軸にシーソー運動（上田説：ヤジロベエ的動き）をする。その結果、側柱の位置で上下方向の杵突き運動が起こるが、これを軒の組物が柔らかく受け止める。このとき、軒の斗拱の上下運動により、振動エネルギーが消費されることが推測される。

- 4) このことは、文献17に記されている、地震時に塔内で『…ゴットンゴットンゴットンという音がする』ということ軒の組物の擦れる音と、側柱を叩く（押さえつける）音ではないかと思われる。
- 5) このロッキング振動の特徴として、初重の振動はやや強いが、二重から四重までは上重の抑えも効いていて、さほど大きな振動を起こさない。しかし、五重の屋根はかなり激しくロッキング振動をしている。心柱がなければ、回転振動により、ズレが少しずつ進行し累積されて最終的には形態が変化し、五重の屋根がズレあるいは、ころげ落ちるおそれがある。

振動実験方法

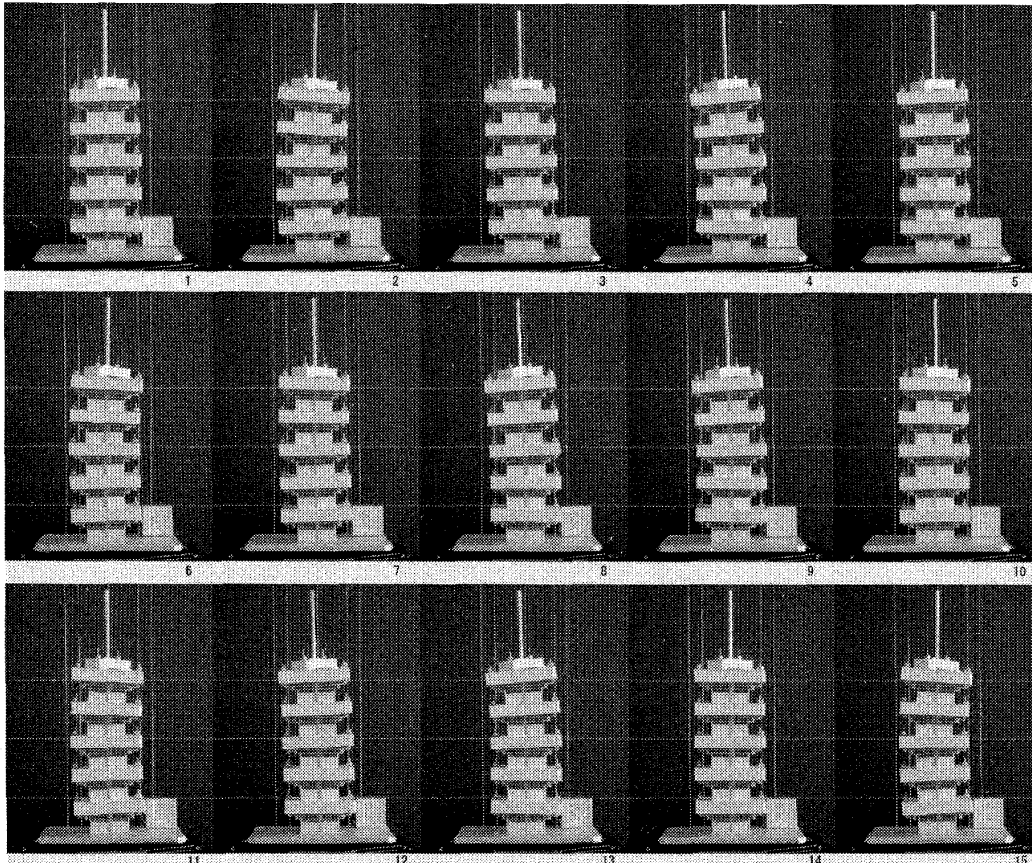
- モデルを振動台に載せて、1方向水平振動で加振する。
- 振動波形は正弦波の連続振動とし、入力周波数（ファンクションジェネレータ）、入力信号レベル（電力増幅器）を調整して加振する。
- 特徴的な振動がみられるモデルを加振条件に応じて観察し、動画撮影により記録を行う。
- 30fps（フレーム数/秒）で撮影した動画を連続写真として再現し、振動状態を表現する。



• 入力波がゆっくりした低周波数の時（2 Hz 近傍）には塔は曲げモデルの1次モード的振動をする。すなわち、各層がほぼ同時に、同じ向きに傾き、塔全体として、大きな曲げ変形が起きている状態を示している。このことは低周波数域で塔は曲げモデルとしての特徴が顕著といえる。

表1 振動 I

[加振条件]	
入力周波数	2Hz
入力信号レベル	20Db
[動画撮影性能]	
フレームレート	30fps

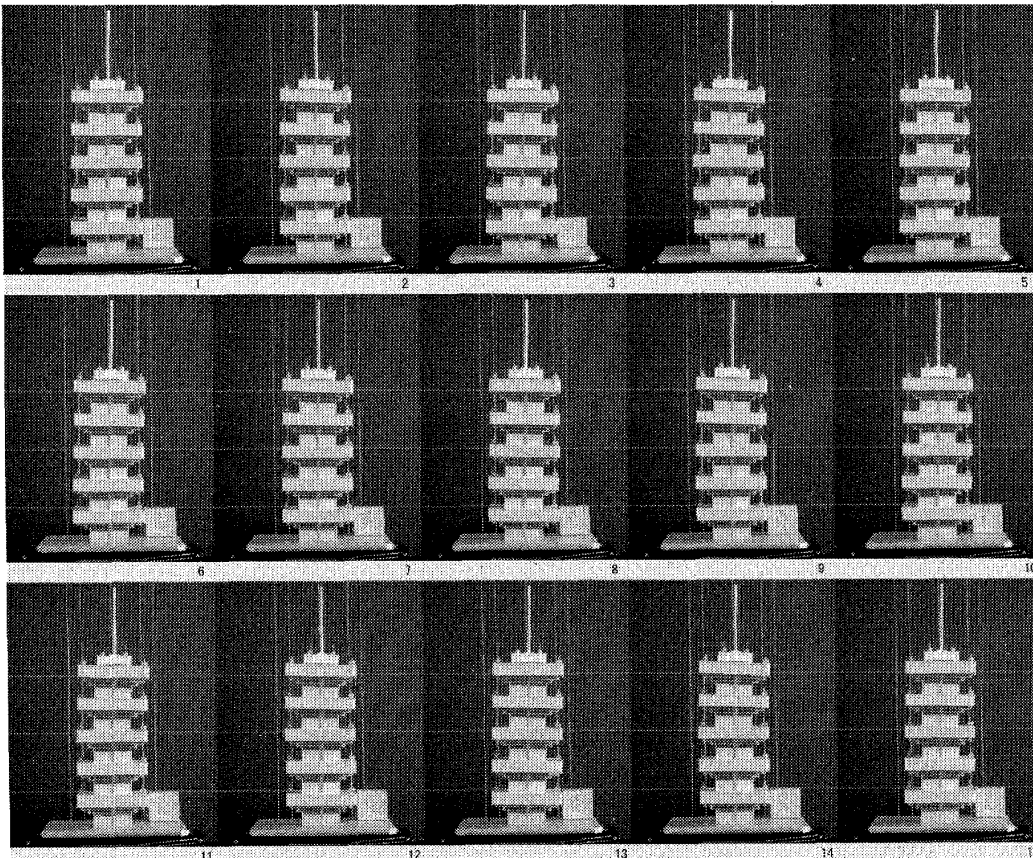


• モデルの固有周期（7 Hz近傍）に近く、あるいはそれ以上の周期ではロッキング振動的な動きをする。（各層が互い違いに運動する。すなわち、塔がスネークダンスしている。）

これは、初重と五重がほぼ同時に、反対向きに傾くことがわかる。曲げモデルの2次モードと見ることもできるが、ロッキング振動を起こしていると見る方が自然のように思える。

表 2 振動Ⅱ

[加振条件] 入力周波数 7Hz 入力信号レベル 20Db [動画撮影性能] フレームレート30fps



• 周波数が10Hzを超えるあたりでは、塔は小刻みな運動をするようになる。これ以上の周波数になると、観察できなくなるほど振動は小さくなるが、その中でも5層の動きが激しく、ついで1層がよく動く、中間層は小刻みに振動する。これはちょうど地盤の水平な揺れが各層を左右に揺らしながら階段を駆け登るように見える。

表 3 振動Ⅲ

[加振条件] 入力周波数 12Hz 入力信号レベル 20Db [動画撮影性能] フレームレート30fps
--

8. 心柱は何故存在するか

五重塔の塔の心柱は塔本体とは無関係に独立して、心礎または初重天井上の梁に立ち、最上重の小屋組頂部に組まれた、露盤を受ける井桁でゆとりをもって囲われているにすぎない。心柱はさらに上に伸びて、相輪を構成するが、相輪を構成する各種金物と直接接触することはなく、相輪の荷重は露盤を通して直接塔の本体に伝えられ、直接心柱にかかることはない。したがって、心柱は風が吹けば、塔の中でゆらゆらと揺れるといった状況にある。

注：心柱にはこのほか、地下に埋められた掘立て式の古いもの、江戸時代後期頃より、五重床よりから吊された吊り形式などもある。

- 1) 各層はそれぞれ独立しており、それらを積み上げただけであるが、心柱の存在が構造体としての統一性を与える。塔は動きやすく、塔の微動変位の累積で各層がずれないようにしている。(バインダー作用)
- 2) 不安定構造物のため各部が動きやすく、形態が変わりやすい、初期の形態が異なれば、構造のシステムも異なるので、正しい形態を保つことが求められる。心柱はこの形態安定(姿勢制御)のために必要である。(姿勢制御作用)
- 3) 構造的には、塔が地震や暴風などを受けて激しく振動するとき、最上層の回転と移動が特に激しく、下層重は上の重に抑えられる形となり最上層ほどではない。この最上層の転倒や転げ落ちを抑える働きをしている。(杖木作用)

このとき、露盤より上の相輪部および太く重たい心柱の下部は最上層の回転や移動を抑える働きをする。なお、最上層の回転や移動を抑えるのであれば、心柱が露盤位置を貫通して存在していることに意味があり、このことからすれば、心柱が掘立てであれ、心礎上であれ、吊り

形式であれ、ある程度の長さを持った「残木刹」であればよいことになる。

このように心柱は五重塔の形態安定・構造安全性に重要な働きをしている。日頃は塔の中央で眠れるごとく静かに息づいているが、一旦、地震や暴風が襲ってくると獅子奮迅の働きをする。安政の大地震の後、広重の描いた折れた相輪の五重塔の浮世絵は大地震のなかで心柱がどれほど激しい戦いをしたかの査証であろう。これにより五重塔は倒壊から免れたものと思われる。

9. 五重塔は何故倒れないか

- 1) 五重塔は礎石上に置かれていて、巨大地震に対して移動し、建物に入力される力には上限がある。
- 2) 五重塔は塔の軸幅に対して塔高は高く不安定であるが、五層に分かれていて、各層は安定しており、層間ではモーメントを伝えにくい構造になっている。(免震構造)(これは俗に言う、『のれんに腕押し』、とか、『柳に風』という表現になる。)
- 3) このしなやかさの原因は
 - ①屋根荷重はてこの作用により支点となる側柱近傍に集中している。この荷重は軒の組物(板バネ)を介して側柱に伝えられる。支点到に緩やかな上下移動を許容している。
 - ②塔中央の四天柱には、尾垂木、隅尾垂木などの浮き上がりが上重からの荷重を軽減している。このため四天柱は回転しうる可能性がある。
 - ③重い屋根が大きく張りだしている。このため屋根の慣性モーメントは大きく、回転運動を可能にしている。
- 4) 平面で見たとき、側柱で囲まれる領域を柱の断面と考えると、周辺(側柱辺)では圧縮応力が高く中央(四天柱辺)では低い応力状

態となり、倒壊は周辺の引き抜きから始まることを考えれば倒壊しにくい構造になっている。

- 5) 各層が独立した造りになっているので、地震の横揺れが各層のロッキング振動に変換され、水平方向の振動が小さく、上下方向の運動に変換される。その結果、地震エネルギーは軒組物の上下の運動により摩擦で減衰される。
- 6) ロッキング振動では最上層の振動が激しい。それ以下の層では上層で抑えられるためそれほど大きい振動はしない。もし、心柱がなければ地震振動により、ズレが累積し、最上層が転げ落ちる危険性もある。心柱は構造的意味では最上層の転倒を阻止するための重要な構造要素である。

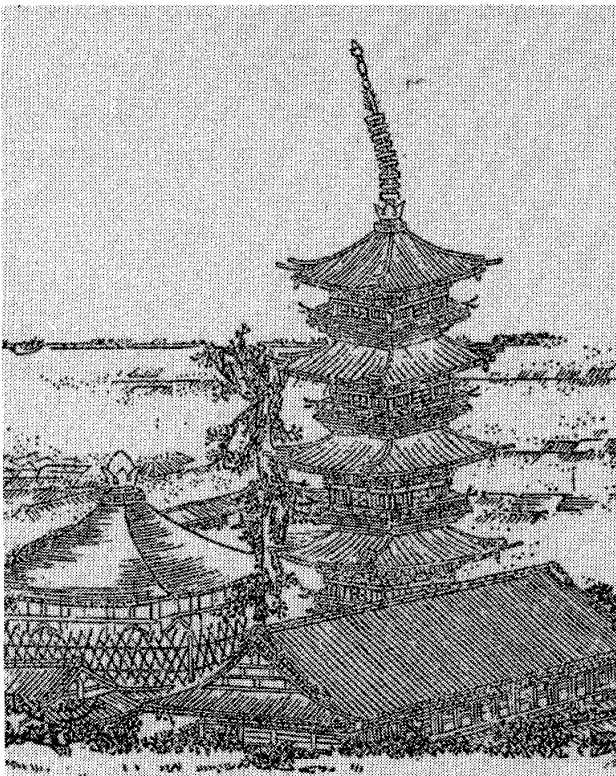


図8 浅草寺五重塔【文献18】

安政2年江戸大地震の際に九輪が折れた状態を示す歌川広重の浮世絵にも描かれている。

10. 3つの構造のモデル化に関する考察

木材が複雑に入り組んだ五重塔を単純な力学

モデルで表現することは難しい。しかし、五重塔の構造を正確に理解するには構造のモデル化は避けて通ることはできない。ここでは次の3つの構造モデルについて説明する。

1) 曲げ弾性モデル

五重塔の各層の質量と軸部の曲げ剛性から構成される構造モデルで、曲げ剛性を高めると塔が一体として挙動する剛体モデルに近づく。一方、曲げ剛性を下げると塔は柳の枝のようにしなやかになるが、このとき軸部が座屈し、安定した形態を保持できなくなる。

2) 剪断モデル

五重塔の各層の質量と軸部の剪断剛性から構成される構造モデルで、剪断剛性を高めると塔が一体として挙動する剛体モデルに近づく。一方、剪断剛性を下げると各層は独立して、軽やかに動くことができるようになる。塔として一体とした形態は保てなくなる。

3) 回転(ロッキング)モデル

五重塔の各層の質量と軸部の回転剛性から構成される構造モデルで、回転剛性を高めると塔が一体として挙動する剛体モデルに近づく。一方、回転剛性を下げると各層はピンジョイントされた鎖のようになり、安定した形態を

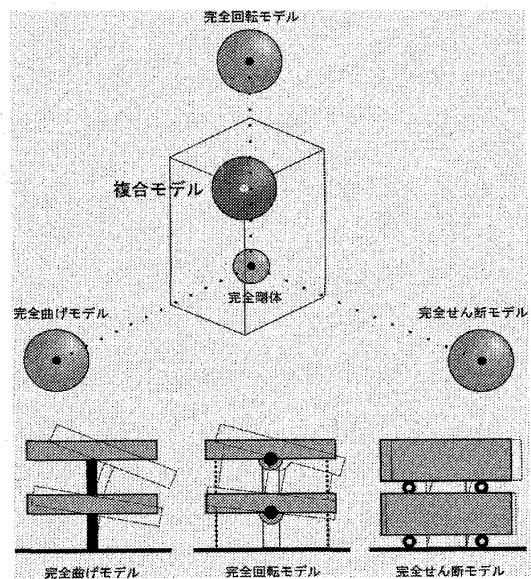


図9 3つの構造モデル

保持できなくなる。

五重塔は複雑な構成になっているので、これら3つのモデルが複合した構造モデルを構成する。そのうち五重塔は回転モデルが卓越した複合モデルといえる。

五重塔もこの1400年の間に構造形式が変化してきているが、この複合モデルには幅があり、その幅の範囲に入っているというようにも解釈される。

11. むすび

ここではロッキング振動を中心に構造のモデル化を進めてきたが、一応その目的は達せたとと思われる。ロッキング振動を起こすモデルは、側柱の上の組物の板バネ効果と上層自重に大きく関係しており、この板バネを徐々に強くしていくと曲げモデル化し、剛構造に移行する。一方、この板バネを徐々に弱くするとロッキングモデル化し、塔は柔らかくなり柔構造に移行する。さらに、板バネを弱くすると、塔は単にシーソーを積み上げたような状態となり、不安定な構造物に移行する。ロッキングモデルは不安定構造物に移行していく過程で生まれてきたものである。塔が地震力(横力)に耐えるようにするには構造物をできるだけ柔らかくする必要がある。一方、構造物を柔らかくすると形態の安定性が難しくなる。ここに関与する物として心柱の存在があるのではないかと考えており、今後はこの辺の検討と実験の精度を高めるため、現存する五重塔の質量のデータ、軒組の板バネとしての剛性評価、固有周期など基礎的データを整備し、これらを基に模型精度を上げ、地震による五重塔の不倒

伝説の真相に迫りたいと考えている。

参考文献

- 1) 上田篤:「謎の建築・五重塔」、『五重塔はなぜ倒れないか』新潮選書 1996所収
- 2) 濱島正士:「日本の塔の組み上げ構法」、前掲書所収
- 3) 西澤英和:「木塔を解体してみると」、前掲書所収
- 4) 石田修三:「心柱を科学する」、前掲書所収
- 5) 川口衛・阿部優:「木造古塔の心意気」、前掲書所収
- 6) 久徳俊治:「柳のような超高層」、前掲書所収
- 7) 上田篤・木村俊彦:「五重塔と現代建築」、前掲書所収
- 8) 安宅信行:「五重塔—その不思議な構造について—」昭和女子大学 女性教養講座講演集『女性文化 23集』2005
- 9) 西岡常一、高田好胤、青山茂、写真・寺岡房雄:『蘇る薬師寺西塔』草思社 1981
- 10) 太田博太郎編:『日本建築史基礎資料集成11 塔婆Ⅰ』中央公論美術出版 1984
- 11) 太田博太郎編:『日本建築史基礎資料集成12 塔婆Ⅱ』中央公論美術出版 1999
- 12) 濱島正士:『日本仏塔集成』中央公論美術出版 2001
- 13) 高橋慶夫:『建築はどこまで高くできるか』都市文化社 1987
- 14) 近藤豊:『古建築の細部意匠』大河出版 1967
- 15) 棚橋諒:「五重塔の耐震性の秘密」第2回世界地震工学会議講演 1960
- 16) 石田修三:「心柱門説」普請 第8号 京都伝統建築技術協会編 1982
- 17) 石田修三:「心柱のはなし—その後の心柱門説」普請 第32号 京都伝統建築技術協会編 1996
- 18) 大森房吉:「五重塔の振動に就きて」建築雑誌 35、1921

(あたかのぶゆき 生活機構学専攻 教授)

(よこすか ようへい 生活環境学科 助手)

受理年月日 平成19年9月28日

審査終了日 平成19年12月3日