

## 五重塔の耐震性の秘密

有限会社プラント地震防災アソシエイツ 稲葉 忠

(日本機械学会フェロー)

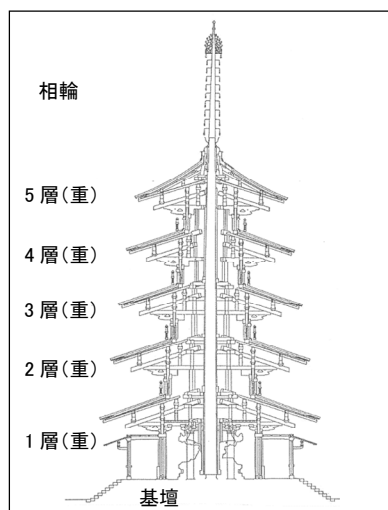
五重塔は、地震で倒れたものがほとんどなく、優れた耐震性で知られています。揺れを目撃した人は、各層が“やじろべえ”のように揺れていたとか、上下の層が互い違いに揺れていたとか、くの字になって揺れていたとか言います。最近行われた振動実験でも、同じような挙動が確認されました。五重塔が倒れないのは柔構造だからとはよく云われますが、では、どんな仕組みの柔構造でしょうか。また、心柱はどんな役割を果たしているのでしょうか。目撃談、振動試験の結果を手掛かりに、五重塔の耐震性の秘密に迫ることにします。

### (五重塔の構造)

五重塔は、独立した5つの層が下から積み重ねられた構造をしています。各層が軒の長い大きな屋根を有していること、中央を心柱が貫通して、5層の頂部でのみ接していること、5層の頂部に長い相輪が取り付けられ、心柱の先端に被せられていることなど、他の建築物に見られない特徴を有しています<sup>(2)</sup>。



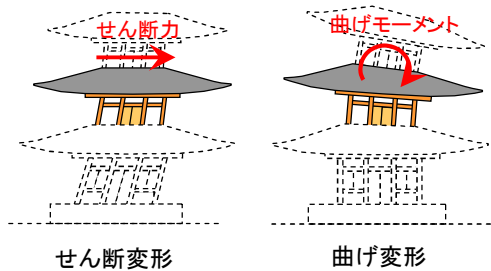
法隆寺五重塔



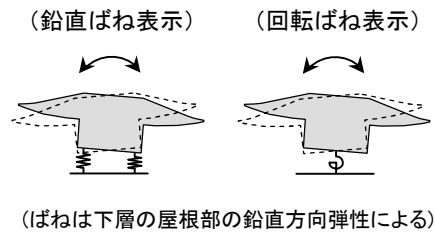
法隆寺五重塔の内部構造

### (五重塔の振動モデル)

五重塔に水平方向の地震力が作用しますと、塔にはせん断力と曲げモーメントによる変形を生じます。どちらの変形が支配的になるかは、変位を決定付ける剛性の大小関係によって決まってきます。5分の1模型を用いた振動実験のビデオ映像<sup>(3)</sup>を見ますと、1層は胴部（軸部）のせん断変形が、2層以上は曲げ変形が主体のようです。曲げ変形は屋根部（軒・組物部）の鉛直方向の変形によるもので、各層は下層の屋根部を回転のばねとしてロッキング運動をしているようです。基壇上にあつて柱の背が高い1層を除き、鉛直荷重に対する屋根部の柔らかさがせん断力に対する胴部の柔らかさを上回っているといえます。軒が長くて重量がある大屋根は、回転慣性が大きく、ロッキング運動の振動周期を長くします。

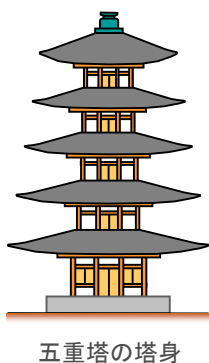


せん断変形と曲げ変形<sup>(1)</sup>

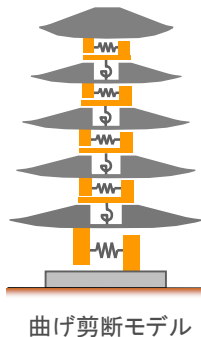


各層のロッキング運動

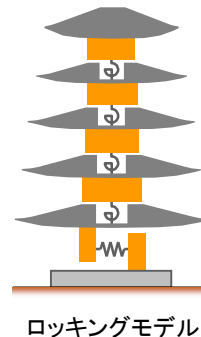
構造物の地震応答を解析するには構造物を質点系モデルに置き換えます。五重塔の塔身は、その変形性からして、概念的に1層は並進（胴部の変形による）のみ、2層以上は並進（同）と回転（屋根部の変形による）のモデルに、さらに単純には、1層は並進、2層以上はロッキングのモデルで表すことができます。ここでは前者を曲げせん断モデル、後者をロッキングモデルと呼ぶことにします。



五重塔の塔身



曲げ剪断モデル



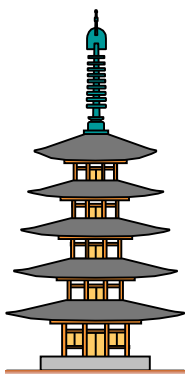
ロッキングモデル

五重塔の振動モデル<sup>(1)</sup>

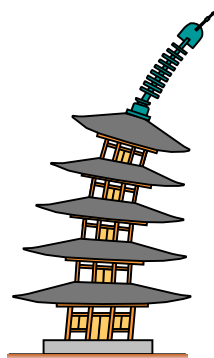
**(振動モード)**

塔の塔身と心柱は連成して振動しますが、塔身が主体になる振動モードに着目した場合、五重塔には5つの主要な振動モードがあります。詳細には解析や実験が必要ですが、1層はせん断系、2層以上は曲げ系として、概略の振動モードは類推できます。

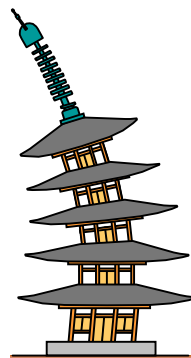
振動モードは互いに独立した関係にあつて、地震波の周期特性に応じて個別に応答し、全体の揺れはそれらが重なり合ったものとなります。地震のときに各層の屋根が互い違いに揺れるのを見たという話を聞きますが、おそらく、塔身の4次あるいは5次の振動モードで共振していたと思われます。昔の人は各層がユラユラと揺れる様子を見て“やじろべえ”と表されましたが、まさに言い得て妙であります。



塔身 1次振動モード



塔身 2次振動モード



塔身 5次振動モード

五重塔の振動モード<sup>(1)</sup>

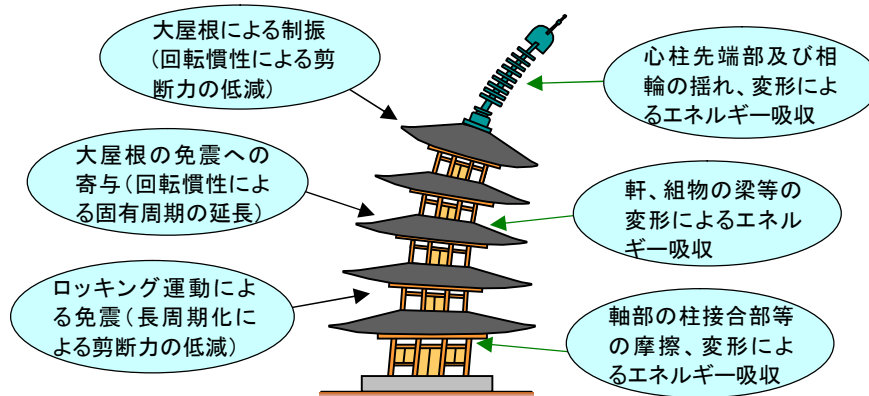
### (五重塔の免震・制振機構)

五重塔の1次固有周期が十分に長く、地震波の卓越周期領域を超えるようであれば、地震波との共振が避けられ、倒壊の危険から逃れることができます。

では、五重塔の1次振動の固有周期が実際にどのくらいかといいますと、法隆寺の五重塔で1.25秒、東寺の五重塔で1.6秒と観測されています。これは常時微動による観測結果であって、振幅が大きい実際の地震の時にはもっと長くなるものと思われます。柔構造と言ってよいでしょう。後述する浮き上がりを生じますと、振動周期は一段と長くなります。柔構造の要因（屋根部の鉛直方向の柔らかさ、幅の狭い塔身、重くて軒の長い屋根）が2～5層のロッキング運動に集約されていますので、ここではロッキング運動による免震と呼ぶことにします。

また、大屋根は回転慣性が大きく、固有周期を長くするとともに、ロッキング運動に伴う回転によってエネルギーを消費し、水平方向のせん断力を低減します。これを大屋根による制振と呼ぶことにします。

その他、各所の摩擦、変形によって満遍なくエネルギーを吸収し、地震力を軽減します。

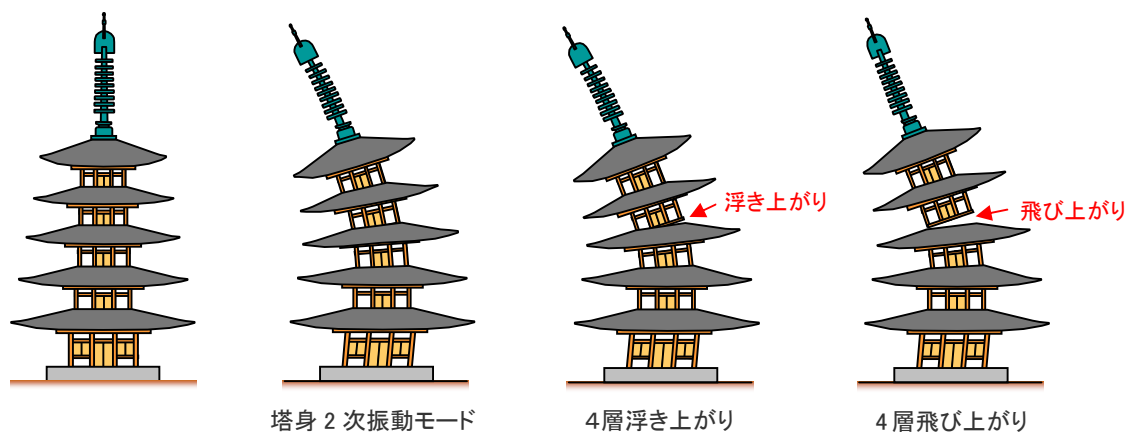


五重塔の免震・制振とエネルギー吸収<sup>(1)</sup>

### (層の浮き上がりと柱ほぞ抜け防止)

柔構造によって1次の振動モードが共振領域を外れたとしても、2次以上の振動モードが共振領域に入るとは避けられません。各層は積み重ねられているからです。ロッキング運動が激しくなりますと、片側で浮き上がりを生じます。鉛直方向の振動の影響と重なって飛び上がるかもしれません。

2次の振動モードで共振しますと、3層から4層にかけて曲げモーメントが大きくなり、上方の層では



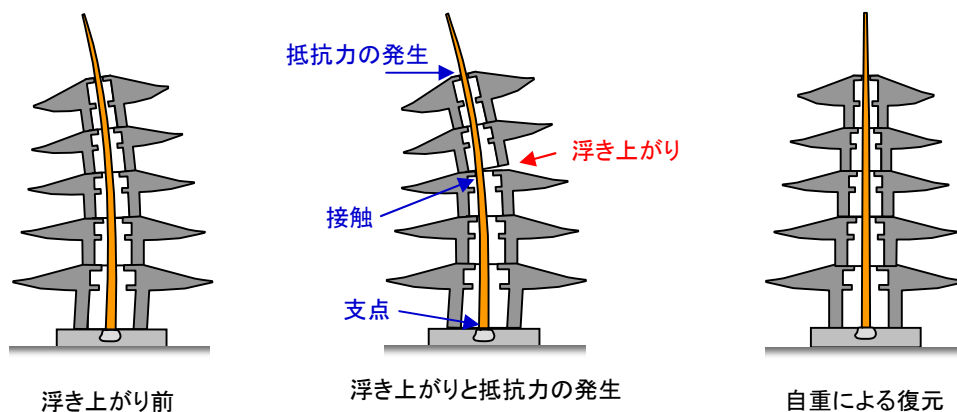
層の浮き上がりと飛び上がり<sup>(1)</sup>

自重による鉛直荷重が小さくなることと合わせ、4層あたりで浮き上がりを生じる可能性が高くなります。さらに高次の振動モードで共振しますと、5層が浮き上がることが予想されます。

ここで、層の浮き上がりの意味を考えてみます。背の高い塔状構造物は、曲げモーメントに基づく引張荷重が自重による圧縮荷重を上回る領域ができることを避けられません。上方では高次モードの影響が大きくなります。もし層同士が繋がっていて、浮き上がりができずと、鉛直上向きの引張荷重によって、柱のほぞが引き抜ける恐れが生じます。柱のほぞが引き抜けると元に戻ることができず、倒壊、崩壊の危険にさらされます。層の浮き上がりには、柱ほぞ抜け防止という、重要な意味、役割があるのです。

### (心柱による上層の落下防止)

層の浮き上がりが柱ほぞ抜け防止に必要なことは前述のとおりです。しかし、浮き上がりが度を過ぎますと、上層が転倒、落下する危険性が生じます。ここで重要な役割を果たすのが心柱です。2次の振動モードで共振した場合において、4層で浮き上がりを生じ、心柱の支持点である5層頂部の変位が大きくなりますと、心柱が3層上方の突出部（頂部又は組物の構面）と接し、変位に対する抵抗力が5層頂部に発生し、振動が抑止されます。心柱の回転慣性は大きく、偶力だけでも抵抗力になるでしょう。心柱は“綱渡りの棒”のようなもので、上方の層がバランスを崩したときに支えとなり、同層がバランスを取り戻すと再び塔身に身を委ねます。心柱は、こうして過度な浮き上がりを抑止し、上層の転倒、落下を防いでいます。



心柱による層の浮き上がりの抑制<sup>(1)</sup>

### (五重塔の耐震性の秘密)

五重塔は、ロッキング運動による免震によって柔構造を成し、大屋根による制振によって水平方向のせん断力を低減し、層の浮き上がりによって柱のほぞ抜けを防止し、また、心柱によって過度の浮き上がりを抑止し、倒壊、崩壊、転倒、落下を防いでいます。

五重塔の耐震性の秘密は、大屋根を有する5つの層の積み重ね構造と、塔身との間に間隙を置いた1本の心柱との、絶妙な組み合わせに隠されているといえます。

### 引用文献・参考文献

本稿は文献(1)の要約版です。他の参考文献は紙面の都合で割愛させていただきました。

(1) 稲葉 忠 五重塔は耐震設計の教科書、(有)プラント地震防災アソシエイツ HP

(<http://pedpa.co.jp/library/tower.html>)

(2) 上田 篤編 五重塔はなぜ倒れないか 新潮選書 1996.2

(3) (独)防災科学技術研究所、NPO木の建築フォーラム 五重塔振動実験 VIDEO