

木造三重塔の構造特性に関する実験的考察

－第1報 縮小模型を用いた静的載荷実験について－

A STUDY ON THE STRUCTURAL CHARACTERISTIC OF
A TRADITIONAL WOODEN THREE STORIED PAGODA

－ Static loading test of a small scale model －

西川 英 佑*, 西澤 英 和**

Eisuke NISHIKAWA and Hidekazu NISHIZAWA

In this study, we performed static horizontal loading tests with a 1/10 model of a traditional wooden three storied pagoda by changing the weight of the model. We obtained the following results from this test.

- The weight of the model affects characteristics of deformation and restoring force against horizontal load.
- When the weight of the model is 1/100 of the full scale, restoring force is greater and more dissipative than that of the other conditions of the weight, and the model bent like a bow.
- When the weight of the model is about 1/400, 1/1000 of the full scale, restoring force is smaller than that of the above, and the model tilted like a rigid body.

And in accordance with old documents about a restoration of a pagoda after earthquake, we pull down diagonally the Sorin, which is the prolonged central post above the topmost roof of the pagoda.

By this loading, the Roban, which is the bottom of the Sorin, deformed, and the Tokyougumi of the top story, which is the capital supporting the eave, also deformed.

Keywords : three storied pagoda, structural characteristics, seismic property, traditional wooden architecture, scale model

三重塔, 構造特性, 耐震性, 伝統的木造建築, 縮小模型

1. 緒言

層塔の耐震性に関する工学的な研究の歴史は古く、その固有周期や減衰特性については既に明治末、大森房吉博士によってわが国の代表的な塔の観測結果が示されている¹⁾。このような知見は関東大震災後、佐野利器博士や真島健三郎博士による柔剛論争にも影響を与えた²⁾。

伝統的な木造建築の架構の実験に関しては、昭和4年(1929)に開催された万国工業会議で、武藤清博士が高さ156cmの層塔の簡略模型の振動実験について報告しており³⁾、更に昭和13年には東京帝国大学地震研究所の斎田時太郎博士が実物の木造家屋を牽引し、倒壊実験を行っている⁴⁾。また昭和15年頃、国宝法隆寺金堂の昭和修理に際して、坂静雄博士が1/2の模型を用いた引き倒し実験の他、航空機用のゲッチンゲン風洞による風洞実験を行い、金堂の構造安全性を検討した⁵⁾。

戦後になると、文化財の保存修理事業に際して、その耐震安全性を検討するために、現場での実物試験が試みられるようになった。昭和29年から35年にかけての国宝醍醐寺五重塔の解体修理では、塔の上部にワイヤーロープを繋いでウィンチで牽引して、その変形

性能のほか、ロープを切断して自由振動実験を行っている。同様に姫路城の大修理では昭和31年に棚橋諒博士の指導の下、大天守4層北側外壁に直径16ミリのワイヤーをかけて自由振動試験を行い振動特性や減衰性能を観測し、その結果をもとに大天守の構造強度の評価を試みている⁶⁾。

また近年では西岡らが実大の茶室を振動台で加振する実験を行い⁷⁾、千葉らは法隆寺五重塔の1/3縮尺模型の振動実験を行った⁸⁾。他にも実物大の木造家屋の振動実験など大型振動台を用いた実験が行われるようになってきた。

一方、本研究は小型模型による実験的研究である。小型模型実験は大型模型実験と比べて、実験変数を変化させるのが容易で、さらに加力装置や計測フレームの規模が小さく研究費用が少ない点で有利である。また最近、計測装置やセンサーの小型精密化により、従来は設置が難しかった小型模型に対する多点精密計測が可能になりつつあり、小型模型実験の方法論としてのメリットが大きくなった。

このような観点から本研究では縮尺1/10の三重塔の模型実験を行った。本報では各部の荷重と変形の関係とともに、外力が増大した場合に想定される各層の浮き上りについて特に注目し、それらの

* 東京工業大学大学院理工学研究科 博士後期課程・工修

** 関西大学都市環境工学部 教授・工博

Graduate School, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
Prof., Kansai University, Ph. D.

基本的な性状を明らかにするため、塔の露盤に水平力を加えて1次モードに類似した変形を与えるとともに、各層の重量を数種類に変化させた実験を行った。

また地震で木造層塔が被災した際、被災後にしばしば建物頂部に綱をかけて歪み直しが行われてきた。この歪み直しを模型で再現実験し、歪み直しの際に塔に加わる負担についても分析した。

2. 試験体概要

2-1. 模型の構造

実験に用いた模型は実物と同一の形状に精巧に製作した。縮尺は1/10で、材料は檜、重量は30.3kgである(図1、写真1左)。モデルとした三重塔には以下のような特徴がある。

- ①二・三層の側柱(A)・四天柱(B)が地垂木上の柱盤(C)に建っていること
- ②四天柱(B)が側柱(A)より長く、力肘木(D)が四天柱(B)を貫通し対辺の軒を支える構造となっていること
- ③初層の柱は礎石(E)の上に直接載っているだけであること
- ④柱上には台輪・斗拱を順にだぼを介して積み重ねていること
- ⑤部材同士は仕口や継手を用いて組み合わせていること
- ⑥心柱(F)は地上に届いておらず、初層の四天柱の上部を貫いた横材に載せた梁(G)に建てていること
- ⑦初層の縁束は1~2mmほど浮いているため、建物下部の回転が小さい範囲では曲げモーメントに抵抗しないこと

なお屋根は銅板葺きを想定しているため、実物建物を考えた場合に屋根重量(1.6ton)は全体重量(32ton)の約5%と小さい。

2-2. 重量条件

模型の縮尺は1/10のため体積は1/1000、重量も約1/1000となる。本研究では模型の重量条件が模型の復元力特性に与える影響を考察するため、①体積の縮尺に合わせ模型の重量を縮尺1/10の3乗に当たる約1/1000とした場合、②柱に生じる軸方向応力度が実物と同じになるように縮尺1/10の2乗に当たる約1/100とした場合⁹⁾、③両者の間となる1/400とした場合¹⁰⁾のそれぞれで実験を行った(表1)。それぞれの状態を、“錘なし”、“錘あり”、“錘一部あり”と称する。

各条件の模型の全体重量は30kg・319kg・83kgである。模型の重量は鉄板の錘で調整した。なお実物建物の重量条件に合わせるには、建物重量の殆どを占める木部の重量に合わせ、錘を木部位置に積載することが望ましいが、寸法上の制約から全て各層の屋根上にボルトで錘を固定した¹¹⁾。錘ありの状態を写真1右に示す。

また相輪の重量を再現するために相輪の模型を、実物重量の1/100のもの(3.15kg)と、1/1000のもの(0.35kg)の2種類作成し、錘ありには前者、錘なし・錘一部ありには後者を付けた。

3. 水平载荷実験

3-1. 実験方法

静的载荷実験のシステムを図2に示す。露盤の高さの位置にワイヤー(①)を取り付け、そのワイヤーを载荷用柱(②)に固定した滑車(③)に通し、ワイヤーの先端を電動アクチュエーター(④)で牽引した。両側から同じシステムで交互に牽引することで、正負繰り返し载荷(1/240rad, 1/120rad, 1/90rad, 1/60rad, 1/40rad,

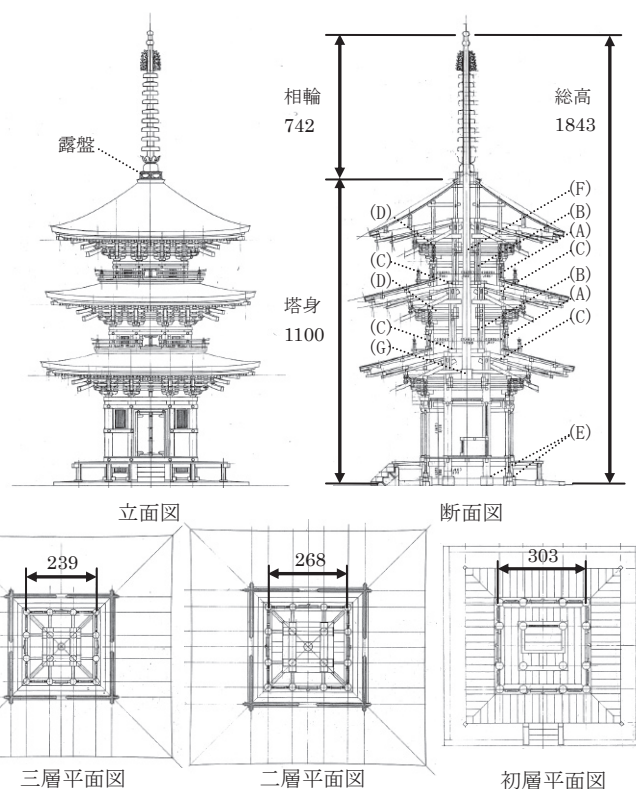


図1 模型の概要 数値の単位: mm

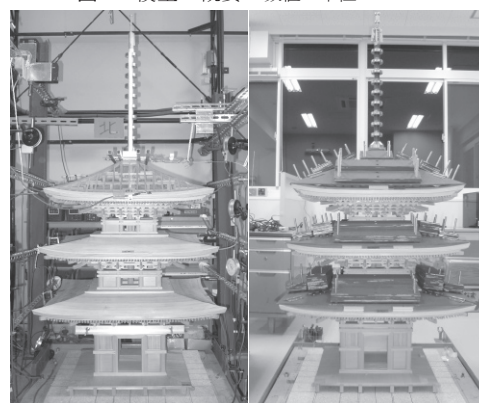


写真1 模型全体像(左:錘なし 右:錘あり)

表1 実物建物と各条件の模型の重量 実物の括弧内の数値は屋根重量

	実物 ton	錘なし kg	錘一部あり kg	錘あり kg
三層	9.3(0.6)	8.67	29.07	92.07
二層	9.8(0.5)	9.30	24.90	98.50
初層	12.5(0.5)	12.01	28.81	125.41
相輪	0.5	0.35	0.35	3.15
合計	32.1(1.6)	30.33	83.13	319.13
重量縮尺	1/1	1/1058	1/386	1/101

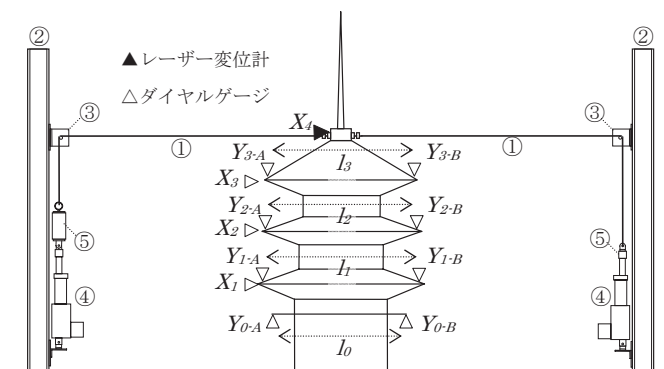


図2 静的载荷実験システム

1/30rad)を行った。載荷荷重をロードセル (⑤) で、変形状をレーザー変位計 (▲) とダイヤルゲージ (△) で測定した。レーザー変位計・ダイヤルゲージは計測フレームに取り付けており、測定した変位は絶対変位である。各点での測定変位について塔身頂部の水平変位 (X_d)、各層の軒の水平変位 ($X_1 \sim X_3$)、建物下部の回転角 (θ_a)、各層の軒の回転角 ($\theta_1 \sim \theta_3$) を図 2、式 1 に示すように定義した。

$$\theta_i = \frac{Y_{i-A} - Y_{i-B}}{l_i} \dots \text{式1}$$

3-2. 重量条件の違いによる復元力特性の比較

各条件での塔身頂部における荷重変位関係を図 3 に示す。このうち正側 1/30rad のループを図 4 で比較する。錘なしの状態では 1/120rad 以降、錘一部ありの状態では 1/60rad 以降、建物下部が浮き上り復元力がほぼ一定となるのに対し、錘ありの場合は 1/30rad まで復元力は増加し続ける。図 4 には、模型の初層幅を底辺幅とし模型と同じ重量と重心高さ¹²⁾を持つ剛体の復元力を式 2 から求め、点線で示した。

$$P = W \cdot g \cdot \left(\frac{b}{h_g} - \frac{X_d}{h} \right) \dots \text{式2}$$

P : 復元力 W : 全体重量

X_d : 頂部変位 b : 底辺幅 (303mm)

h_g : 重心高さ (錘なし: 684mm 錘一部あり: 708mm 錘あり: 684mm)

h : 塔身頂部までの高さ (1100mm)

上述の式の底辺幅は初層の縁の分を含んでいない。錘なしと錘一部ありの状態の復元力はこの線におおまかに漸近しながら、少し上回る。この上回った分は、縁が曲げの抵抗要素として働いたものと考えられる。実験では、塔身頂部の変位が小さい範囲においては前述のように縁束は浮いていたが、変位の増大に伴い縁束が地面と接触し縁が変形していた。また錘ありの場合も 1/30 以降は同様の傾向を示すと考えられ、初層下部が浮き上ることにより剛体が浮き上るような復元力特性に移行すると推定される。

各条件の 1/30rad での復元力・割線剛性・履歴消費エネルギー (以下、消費エネルギーと呼ぶ) と、これから求めた等価粘性減衰定数を表 2 に比較して示す。錘ありの状態の減衰定数が一番大きく約 10% で、次いで錘なしの状態が大きい。ただし錘なしの状態の実験は複数回の載荷試験後に行ったので模型の損傷が進み、減衰定数が大きくなった可能性がある。

次に各条件での消費エネルギーと塔身頂部の変位の関係を図 5 で比較した。錘一部ありや錘なしの状態では 1/60rad で建物下部が浮き上って以降、消費エネルギーの増加が小さい。一方、錘ありの場合は他の二つと比較して、消費エネルギーが大きく、かつ変形に伴う増加の割合も大きい。特に 1/240 以降で増加の割合が大きいことが注目される。

3-3. 重量条件の違いによる変形状の比較

各条件の +1/30rad における塔身の変形状を各層の水平変位・回転角をもとに図 6 の模式図で比較した。変形状を分かりやすくするために、変形を 10 倍に拡大して図化した。

錘なし・錘一部ありの状態では塔身がロッキングして建物下部が浮き上っている (写真 2)。これに対し、錘ありの状態では塔身の曲げ変形が認められ、特に三層の層間回転角が著しく大きい。これは三層小屋組の斗拱が台輪より浮き上ったためである (写真 3)。

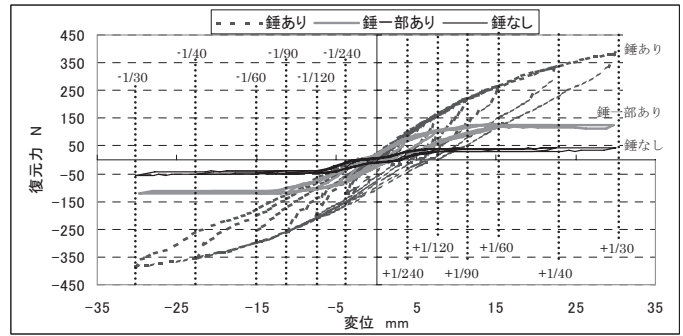


図 3 各条件の塔身頂部における荷重変位関係

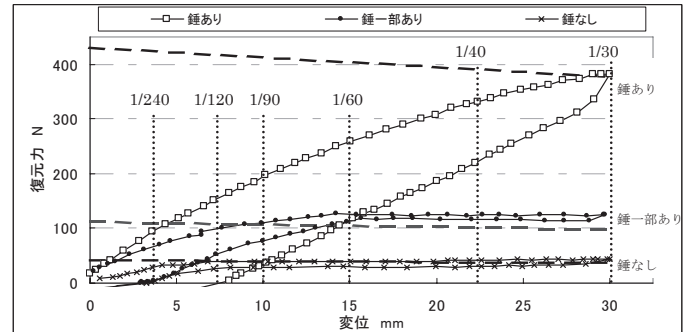


図 4 荷重変位関係と剛体と仮定した場合の復元力の比較 (+1/30 ループ)

表 2 各条件の剛性・減衰定数の比較 (1/30 変形時)

	錘なし	錘一部あり	錘あり
復元力 N	45	126	382
割線剛性 N/mm	1.5	4.2	12.7
消費エネルギー J	0.72	1.30	6.93
減衰定数 %	8.5	5.5	9.6

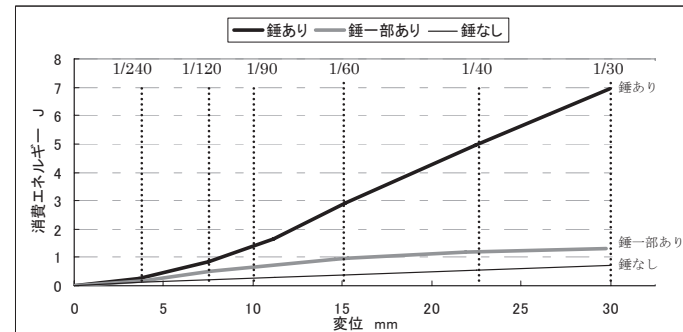


図 5 各条件の消費エネルギーと塔身頂部の変位の関係

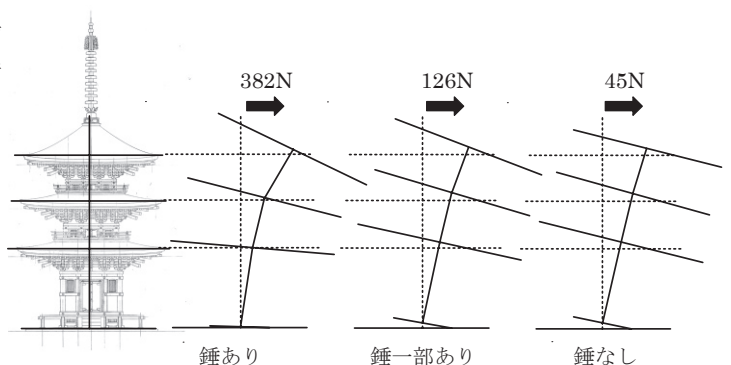


図 6 各条件の変形状の比較 (+1/30 変形時)

次に頂部変位 X_4 ・各層の回転角 $\theta_1 \sim \theta_3$ ・高さ寸法（それぞれ図 8 に記載）を用いて、塔身頂部の変位のうち各層の回転に伴う変形（以下、“曲げ変形”と呼ぶ）¹³⁾・建物下部の浮き上りに伴う変形（以下、“浮き上り”と呼ぶ）、それぞれの占める割合 $\alpha \cdot \beta$ とした。またこれら以外の変形が各層の剪断変形による変形（以下、“剪断変形”と呼ぶ）となるが、この変形の占める割合を γ とした。 α, β, γ を式 3～5 より求めた。

$$\alpha = \frac{(\theta_3 - \theta_2) \cdot h_{r3} + (\theta_2 - \theta_1) \cdot h_{r2} + (\theta_1 - \theta_0) \cdot h_{r1} \dots}{X_4} \text{式3}$$

$$\beta = \frac{\theta_0 \cdot h_{r0} \dots}{X_4} \text{式4}$$

$$\gamma = 1 - \alpha - \beta \dots \text{式5}$$

+1/30 変形時における各条件の $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ を表 3 に示す。錘ありでは曲げ変形が 68% を占めるのに対し、錘一部あり・錘なしでは浮き上りが 70%・84% を占める。重量条件が軽い場合には頂部の変位はほとんどが浮き上りによるものであることが分かる。

錘ありについて、各層の層間回転角ならびに建物下部の回転角と塔身頂部の変位との関係を図 7 に示す。先述の通り、三層小屋組の斗拱が台輪より浮き上るため三層の層間回転角が他の層に比べ大きい、1/40rad 以降で二層の層間回転角の増加率が大きくなり、同時に三層の層間回転角の増加率が低下している。これは二層小屋組の斗拱でも浮き上りが生じ始めたことによると考えられる。また図 7 では 1/33 以降で建物下部の回転角の増加率が上がる。これは建物下部で浮き上りが生じ始めるためである。実験の際、1/240 以降は模型から軋む音が出ていたが、1/33 で建物下部から浮き上り始めると軋む音が出なくなったことが確認できた。また錘ありについて、変形の増大に伴う $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ の変化を表 4 に示す。建物下部の浮き上りが大きくなり β が増加する一方で、剪断変形の占める割合 γ が低下していることが分かる。

3-4. 各層の履歴消費エネルギーの分担率

実験で観察された模型の変形形状を踏まえ、図 8 に示すモデルを作成した。各剪断バネ ($Ks_1 \sim Ks_3$) の剪断力 ($Q_1 \sim Q_3$)・剪断変形 ($dX_1 \sim dX_3$)、各回転バネ ($Kr_0 \sim Kr_3$) のモーメント ($M_0 \sim M_3$)・回転角 ($d\theta_0 \sim d\theta_3$) を式 6～9 で評価する。

$$d\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (i=1 \sim 3) \quad d\theta_0 = \theta_0 \quad \dots \text{式6}$$

$$dX_i = X_i - X_{i-1} - h_{ri} \cdot \theta_i - h_{r,i-1} \cdot \theta_{i-1} \quad (i=1 \sim 3) \quad \dots \text{式7}$$

$$Q_i = P \quad (i=1 \sim 3) \quad \dots \text{式8}$$

$$M_i = P \cdot h_{ri} \quad (i=0 \sim 3) \quad \dots \text{式9}$$

錘ありの $\pm 1/30$ のループにおける各バネの剪断力と剪断変形、モーメントと回転角の関係を図 9、10 に示した。各バネの復元力ループから消費エネルギーを算出し、全体の消費エネルギーに対する割合を各ループ毎に求めた（図 11）。これらより以下のことが指摘できる。

- ① 全体の消費エネルギーのうち、曲げ変形によるものと剪断変形によるものはほぼ同じくらいで、この比率は変形の大小であり変化しない。曲げ変形については小屋組の回転に伴い、斗拱のめり込み変形や浮き上り、四天柱の引き抜き（図 12）が起きていることが目視で確認できた。これらの変形が曲げ変形の消費エネルギーに大きく関与していると考えられる。
- ② 変形角が大きくなると三層の回転バネの消費エネルギーの分担率が小さくなっている。これは三層の小屋組の浮き上りの増大に伴

い、消費エネルギーの増加率が低下したためと考えられる。

3-5. 重量条件による剪断・回転バネの復元力特性への影響

各条件の実験結果についても各層のバネの復元力特性を求め比較した。図 13～15 は各条件での初層の剪断バネ・回転バネと建物下部の回転バネの復元力特性である。

図に示すように剪断バネの剛性は鉛直荷重の大小にあまり影響されないが、回転バネの剛性は鉛直荷重が大きいほど高い。この傾向は他層でも確認できたが¹⁴⁾、特に初層、すなわち鉛直荷重の大きくかかる層で顕著であった。錘ありを基準として比較した場合、他の条件の回転バネの復元力は表 5 に示す倍率で低下しており、各条件の回転バネの復元力にこの倍率の逆数を乗じて比較すると、図 16 に示すようにおおむね一致する。また図 15 に示すように、建物下部の回転バネは初期剛性・復元力一定となる最大モーメントとともに鉛直荷重が大きい方が大きいことが分かった。

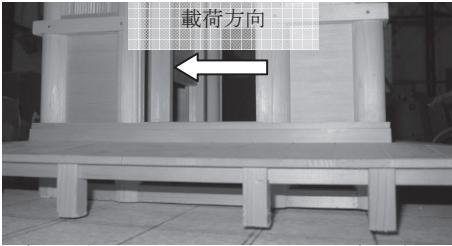


写真 2 建物下部（錘一部あり+1/30 変形時）
右側の柱が浮き上っている

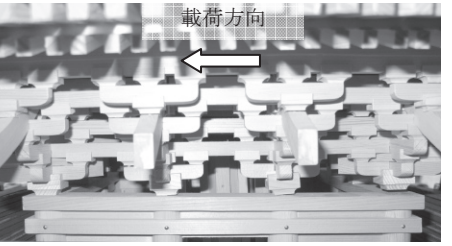


写真 3 三層小屋組の斗拱（錘あり+1/30 変形時）
右側の斗拱が浮き上っている

表 3 各条件の $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ の比較（+1/30 変形時）

	α	β	γ
錘あり	68%	11%	21%
錘一部あり	29%	70%	1%
錘なし	7%	84%	9%

表 4 $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ と塔身頂部の変位の関係（錘あり）

	α	β	γ
+1/240	68%	3%	29%
+1/120	70%	4%	27%
+1/90	68%	4%	28%
+1/60	70%	5%	26%
+1/40	70%	6%	24%
+1/30	68%	11%	21%

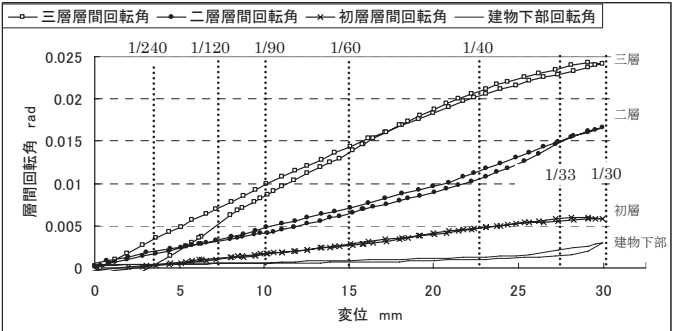


図 7 層間回転角と塔身頂部の変位の関係（錘あり+1/30 ループ）

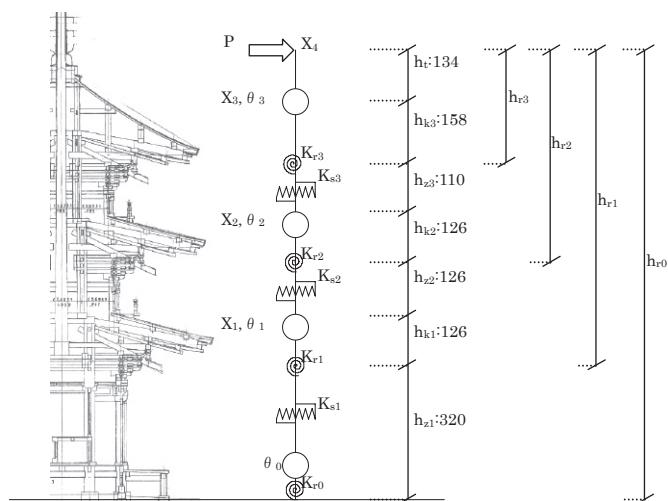


図8 カ学モデル

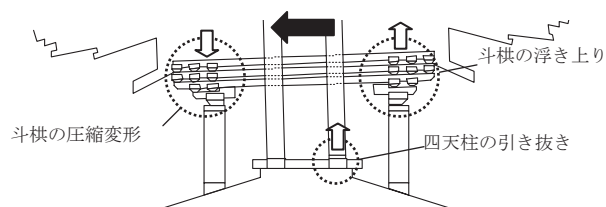


図12 小屋組の回転に伴う曲げ変形

表5 各回転パネの復元力の重量条件による低下率

	錘あり	錘一部あり	錘なし
三層	1	0.8	0.7
二層	1	0.6	0.4
初層	1	0.6	0.4
建物下部	1	0.4	0.1

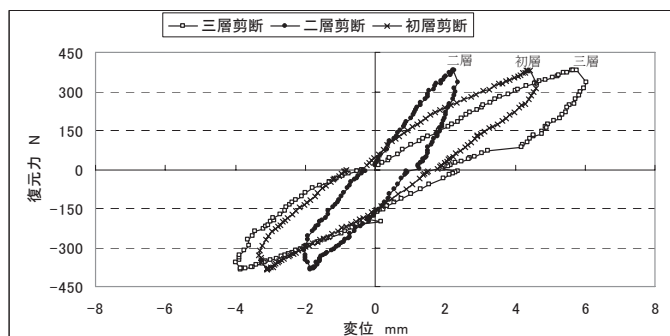


図9 各層の剪断パネの復元力特性(錘あり±1/30 ループ)

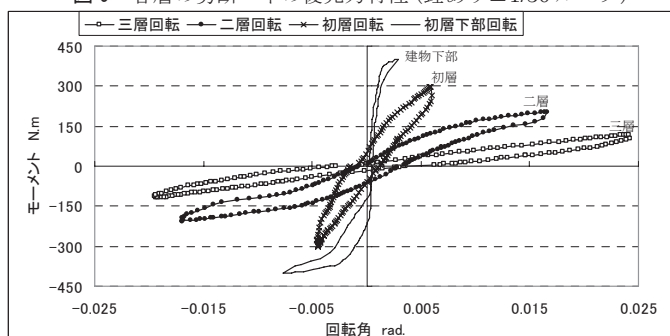


図10 各層の回転パネの復元力特性(錘あり±1/30 ループ)

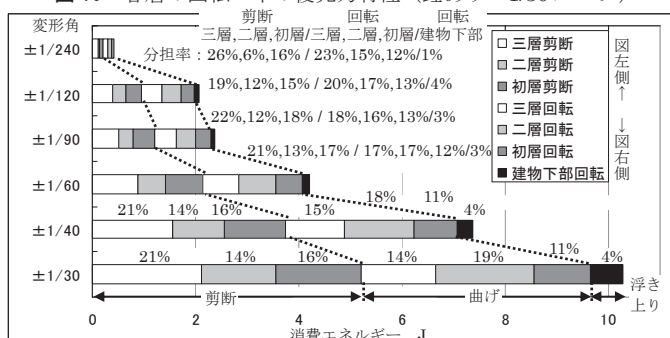


図11 各グループでの消費エネルギーの分担率(錘あり)

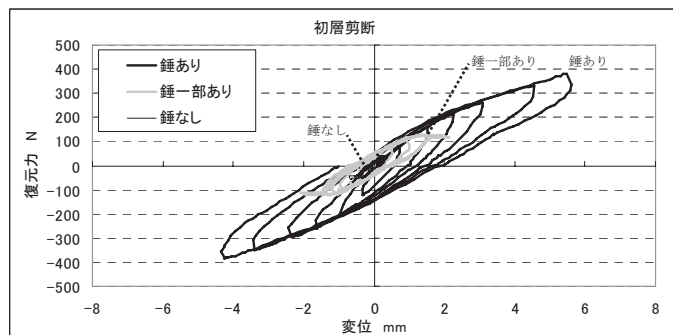


図13 各条件の初層の剪断パネの復元力特性

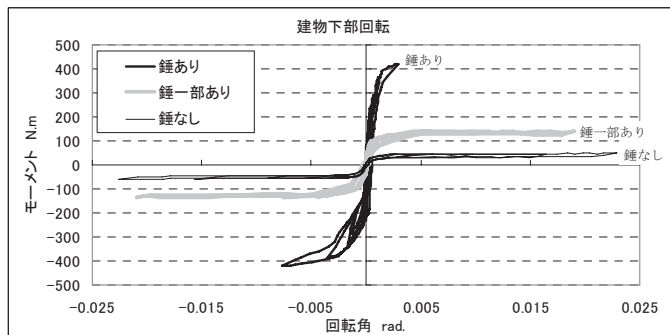


図15 各条件の建物下部の回転パネの復元力特性

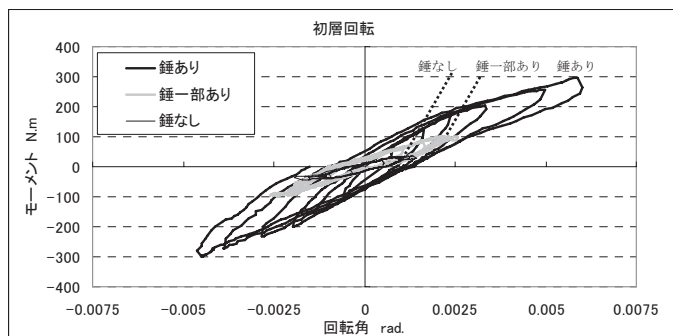


図14 各条件の初層の回転パネの復元力特性

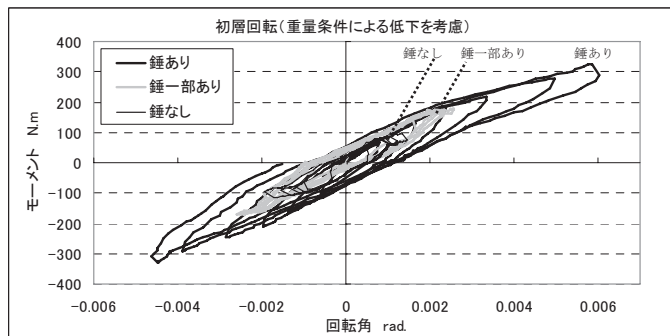


図16 各条件の初層の回転パネの復元力特性

表5の低下率の逆数を乗じて比較

4. 歪み直しを再現した斜め下荷実験

4-1. 実験概要

地震で木造層塔の塔身や相輪が歪んだ場合、復旧のために相輪に綱を掛けて歪み直しを行ったという記録が散見される。例えば、醍醐寺五重塔は天正地震（1586）で五層の東側軒が落下し、後日には初層から五層の南側軒が崩壊し、相輪が弓のように彎曲した。このため翌年に相輪に綱をかけ、南東方向の山際に滑車を設置し、歪み直しを行っている¹⁵⁾。また薬師寺東塔は安政奈良地震（1854）で相輪とともに塔身三層が傾いた。そこで2年後に相輪に綱をかけ、北西にあった金堂の柱に滑車を設置し、歪み直しを行っている¹⁶⁾。また層塔ではないが小田原城でも天明の大地震後、歪み直しのために綱をかけて引いており、このような方法は木造の高層建物の歪み直しとして各地で行われていたと考えられる。

薬師寺東塔の歪み直しの場合は、綱の角度が水平：垂直が約1:0.8であったことが分かっている。今回はこれに合わせ図17、写真4右上のようにワイヤーとジャッキを設置し、歪み直しの状態を再現する実験（以下“斜め下荷”と呼ぶ）を行った。この実験でのワイヤーの張力の水平方向分力とほぼ等しい大きさで露盤高さを水平方向のみに牽引した実験（以下“水平載荷”と呼ぶ）の結果と比較し考察する。

4-2. 実験結果

載荷はワイヤーの張力が256Nとなるまで行った。この時の水平分力は197N、鉛直分力は158Nとなり、相輪の載荷位置での水平変位は70mmであった。図18は塔身頂部における水平変位と水平力の関係を、斜め下荷と水平載荷の場合で比較したものである。同じ水平力に対し斜め下荷の方が大きく変形していることが分かる。これは各層の回転バネにかかるモーメントが、載荷位置が278mm高くなったことで増大し、各層の回転角が大きくなり塔身の曲げ変形が増大したと考えられる。

斜め下荷と水平載荷に対する三層・二層の回転バネの復元力特性を図19で比較すると、三層の回転バネの変形量は斜め下荷の場合、水平載荷よりも約2.3倍大きく、二層のそれは約1.4倍大きい。これより三層の回転バネの変形の増大が他層のそれに比べ大きいことが分かる。

最大変形時には相輪が露盤位置から載荷方向に大きく傾斜し（写真4左上・左下）、塔身内部では心柱の位置が載荷方向とは逆向きにずれていることや、露盤の載荷方向の逆側が浮き上ること（写真4右下）が確認できた。

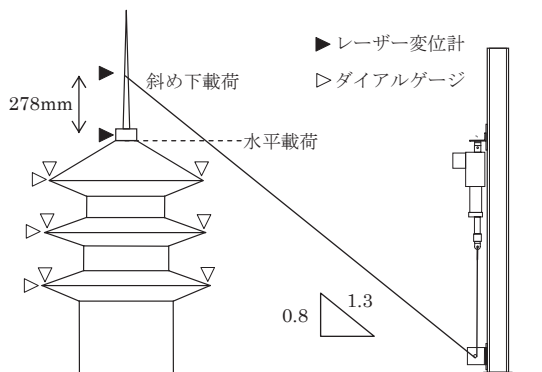


図17 歪み直し再現実験概要

以上よりこのような載荷を行った場合、相輪や露盤に負担が加わり、さらに三層の小屋組が大きく回転することで斗拱にも負担が加わることが分かった。

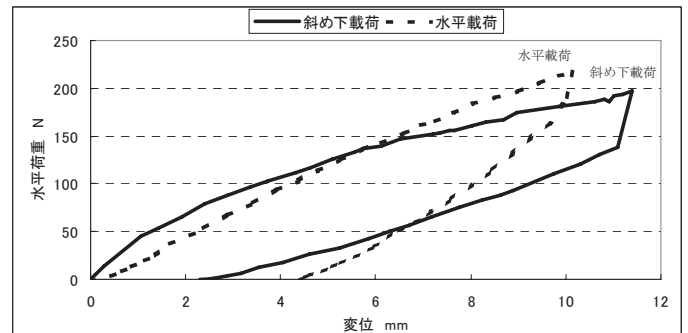


図18 塔身頂部における荷重変位関係
斜め下荷と水平載荷の比較

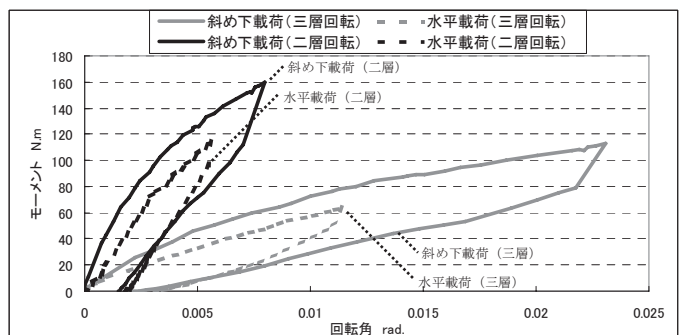


図19 三層・二層回転バネの復元力特性
斜め下荷と水平載荷の比較

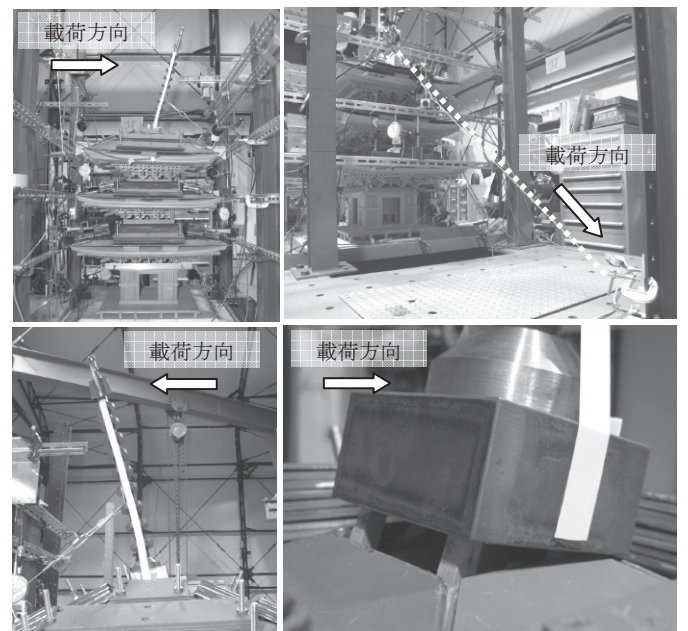


写真4 斜め下荷実験の状況（最大変形時）

左上：全景 右上：載荷治具（点線がワイヤー）

左下：相輪 右下：露盤

4-3. 実験後の模型の損傷状況

実験後に相輪と露盤を外すと、柄差し仕口の仕口で作られた露盤組台が平行四辺形に歪んでいた（写真 5 左上、図 20-A）。また心柱は実験中に柱脚の柄が梁から外れずれていたことが分った（図 20-B）。塔身から心柱を抜き出して観察すると、所々に圧痕が見られた（図 20-△印）。圧痕は写真 5 右・図 20 に示す三箇所の高さで見られ、まず心柱柱脚より 305mm の高さ前後、二層の尾垂木の尻や三層の四天柱が載る井桁あたりに、心柱の四方に付けられた添木全てに圧痕があり、特に载荷方向と逆側の面の圧痕が顕著である（写真 5 左下）。次に 560mm の高さ、三層の桔木尻や差義長柱の土台となる井桁あたりに、心柱の载荷方向側とその逆側の添木に圧痕があり、载荷方向側の圧痕の方が大きい。さらに 675mm の高さ、すなわち露盤の高さで、心柱の载荷方向側に鋭い圧痕があった。

以上より、斜め下载荷によって露盤に大きな力加わり変形したことや、心柱と塔身がぶつかり心柱に圧痕を残したことが分かる。また、圧痕によっては一面だけでなく各面にあることから、静的载荷実験や振動実験を繰り返す中で塔身と心柱が衝突してきた可能性が高い。

5. まとめ

本研究では三重塔の縮小模型を用いた実験・考察を行い、以下のことが分かった。

- ・模型の復元力特性は重量条件によって大きく異なる。
- ・鍾ありの場合、紡錘型の復元力特性を持ち、塔身頂部を载荷すると塔身は曲げ変形する。
- ・鍾一部あり・鍾なしの場合、塔身頂部を一定以上の力で载荷すると建物下部から浮き上がり、剛体がロッキングしたような状態となる。
- ・鍾ありの場合、頂部载荷に対する履歴消費エネルギーは塔身の剪断変形・曲げ変形が同じ位の割合で負担している。
- ・各層の回転剛性は上部からの鉛直荷重が大きいほど高くなる傾向がある。
- ・相輪に綱を掛けて塔の歪み直しを行うという復旧法を再現して斜め下载荷を行った結果、相輪が大きく傾き心柱が塔身内部でずれ、露盤にも負担が加わった。また三層の小屋組が大きく回転することで斗拱にも負担が加わった。
- ・実験後の模型の損傷状況を観察した結果、露盤の組台が大きく歪んだことや、塔身との衝突により心柱に圧痕が付いたことが分かった。

次報では振動実験を行い、模型の重量条件が振動特性に与える影響について考察する予定である。

謝辞

本研究を進めるに当たって、模型作成の際に大沼芳則氏の指導と、中島義勝棟梁、伊藤和光氏の協力を得ました。また実験およびデータ解析等については関西大学保存工学研究室の藤田朋子氏（(株) 富士通中国システムズ）、西川陽子氏（大末建設（株））、乾崇彦氏（(株) 建研）に協力して頂きました。ここに感謝の意を表します。

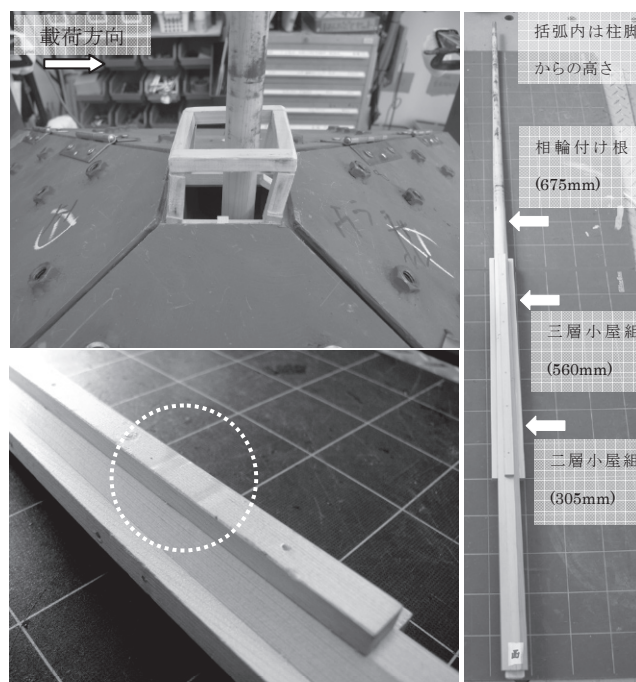


写真 5 実験後の模型の損傷状況

左上：露盤組台 右：心柱全体

左下：心柱の二層小屋組高さ西面の圧痕

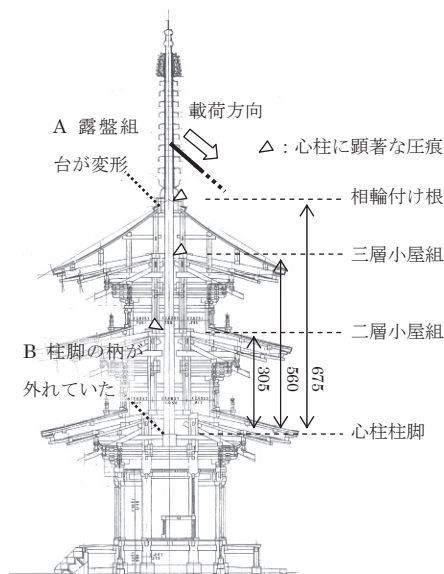
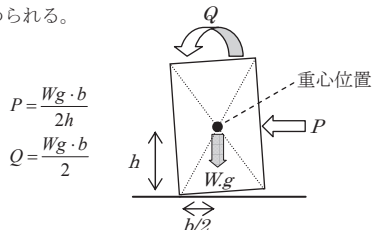


図 20 実験後の模型の損傷箇所位置

注

- 1) 大森房吉：五重塔の振動に就きて、『建築雑誌』, Vol.35, No.417号, pp.219-226, 1921.1
- 2) 佐野利器：耐震構造上の諸説、『建築雑誌』, Vol.41, No.491, pp.39-66, 1927
真島健三郎：耐震構造問題に就て『建築雑誌』, Vol.41, No.491, pp.67-94, 1927など
- 3) Kiyoshi Muto : Gojunoto and Earthquake, 『WORLD ENGINEERING CONGRESS TOKYO 1929 PROCEEDINGS VOL.V III Architecture and Structural Engineering Part 2』, pp.269-293, 1931
- 4) 斎田時太郎：木造家屋の振動及び倒壊実験, 『東京帝国大学地震研究所彙報』第17号, 東京帝国大学地震研究所, pp.152-166, 1939
- 5) 坂静雄：社寺骨組の力学的研究(第1部 柱の安定復元力), 『建築学会論文集』, Vol.21, pp.252-258, 1941 や同著：社寺骨組の力学的研究(第2部 貫の耐力), 『建築学会論文集』, Vol.21, pp.259-268, 1941
- 6) 棚橋諒、石崎澄雄、金多潔、鈴木計夫：姫路城の振動測定について, 『日本建築学会論文報告集』, Vol.54, pp.437-440, 1956
- 7) 西岡聡、森山敏行、西澤英和：国宝妙喜庵待庵の実物大モデルの振動台実験 基礎と柱とを緊結しない形式の伝統木造建築の耐震性に関する実験的研究, 『日本建築学会構造系論文集』, Vol.608, pp.93-100, 2006
- 8) 千葉一樹、藤田香織、腰原 幹雄、河合 直人、箕輪 親宏、花里 利一、坂本 功：振動台加振実験から得られた伝統的木造構法五重塔の基礎的な振動特性 伝統的木造構法五重塔の縮小模型実験その1, 『日本建築学会構造系論文集』, Vol.614, pp.69-75, 2007
- 9) 筆者らは模型で復元力特性・変形特性を実物同様に再現するには重量の縮尺を模型の縮尺の2乗とするべきであると考えている。以下これについて次元解析により説明する。模型の大きさの縮尺を α 、重量の縮尺を β とする。木造建物の剪断剛性(ここでは復元力/剪断変形角を考慮) [N/rad] や回転剛性 [N.m/rad] は構成部材の曲げヤング係数 [N/m²] やめり込み剛性 [N/m²] に比例する。この値が模型の縮尺に影響されず一定であるとするれば、剪断剛性・回転剛性は模型の長さの次元の2乗・3乗を乗じることとなり、模型の剪断剛性・回転剛性は実物のそれの $\alpha^2 \cdot \alpha^3$ 倍となる。基礎を緊結しない建物は外力を加えていった場合にある一定以上の水平荷重・転倒モーメントが加わると浮き上りを生じる。この時の水平荷重 P[N]・転倒モーメント Q[N.m] は下図のような単純な建物と考えた場合、以下の式で求められる。



よって、浮き上りを開始する水平荷重・転倒モーメントは実物の β 倍・ α ・ β 倍となる。浮き上りを開始する時点での建物の剪断変形角・回転角は、この水平荷重・転倒モーメントを剪断剛性・回転剛性で割った値であるから、模型のそれはどちらも実物の β/α^2 倍となる。つまり $\beta=\alpha^2$ であれば実物と模型は同じ変形状態で浮き上りを開始するが、もし $\beta=\alpha^3$ であれば模型の浮き上り開始時の剪断変形角・回転角は実物の α 倍となり、 $\alpha < 1$ となるような縮小模型を用いた場合に、実物よりも小さな変形状態で浮き上りを開始することとなる。以上より、建物の浮き上り現象を実物と同様に模型で再現するためには模型の重量の縮尺を大きさの縮尺の2乗とする必要がある。この時の模型の諸要素の実物に対する縮尺を表にまとめた。

表 模型の諸要素のスケール

寸法	実物	模型
寸法	m	1
重量	kg	α^2
回転慣性	kg.m ²	α^4
復元力	N	α^2
復元モーメント	N.m	α^3
剪断剛性	N/m	α
	N/rad	α^2
回転剛性	N.m/rad	α^3
固有振動数	Hz	$1/\sqrt{\alpha}$
時間軸	sec.	$\sqrt{\alpha}$
変位	m	α
速度	m/s	$\sqrt{\alpha}$
加速度	m/s ²	1

なお、模型に外力を加えていった時、模型のプロポーションによっては浮き上るのではなく、滑る場合もある。この場合の滑り始める水平荷重[N]も鉛直荷重[N]に比例する。摩擦係数が模型の大きさの縮尺によらないとす

れば、模型の滑り始める水平荷重は実物の β 倍となる。このため、浮き上りの場合と同様、模型で実物の変形特性を再現するためには $\beta=\alpha^2$ とする必要がある。

- 10) 模型一部ありの場合は実大建物の重量を 1/400 とした場合の理論値とは下表に示すように各層の重量バランスが少しずれているが、おおむね一致している。

表 鍾一部ありの各層の重量

	鍾一部あり	
	理論値	実験条件
三層	29.07	23.40
二層	24.90	25.11
初層	28.81	32.44
相輪	0.35	0.95
合計	83.13	81.89

- 11) 屋根上に鍾を積載した場合、その鍾は実大建物の木材重量を再現していることとなるが、木材の多くが小屋組に存在することから、模型の重量の高さ方向の分布は実大建物のそれとある程度良く再現できていると考えられる。しかし平面方向においては、実大建物より模型の方が、外側に重量が存在することとなり、このため模型の回転慣性は実大建物のそれを正確に再現できておらず、振動実験ではこの点を考慮に入れなければならない。
- 12) 各条件における重心高さは以下の式で求めた。各層の重量の重心高さは木部材・鍾の分布状況から各層の屋根面の中央の高さ(図8中に質点を示した位置)とした。相輪はその中央高さを重心位置とした。各寸法と式より求めた全体の重心高さを下表に示す。

表 各層と全体の重心高さ

	h_4	h_3	h_2	h_1	h_g
鍾なし					684
鍾一部あり	1471	966	698	446	708
鍾あり					684

W_i : 各層重量($i=1\sim3$)と相輪重量($i=4$)

h_i : 各層と相輪の重心高さ

h_g : 全体の重心高さ

- 13) 曲げ変形の中には各層の小屋組の浮き上りが含まれている。
- 14) 鍾なしの実験結果では各層の剪断バネ・回転バネの変形が小さいためはっきりと復元力特性を捉えることができなかったが、本文中で述べた傾向があることはおおむね確認することができた。
- 15) 京都府教育庁文化財保護課：『国宝建造物醍醐寺五重塔修理工事報告書』, p.2, 1960
- 16) 西川英佑、山内淳子、藤岡洋保、西澤英和：国宝薬師寺東塔の地震被害の履歴について, 『日本建築学会計画系論文集』, Vol.647, pp.271-278, 2010

(2009年11月20日原稿受理, 2010年3月12日採用決定)