

第VII章 天平塔の構造解析の評価

1 はじめに

A 目的

本章は、東大寺が文建協に委託し、文建協と立石構造設計がおこなった各構造解析の結果にもとづき、第VI章で作成した天平塔の復元原案が、長期荷重(固定荷重)に対して構造的に実現し得えたか、評価することを目的とする。すなわち、建設中や完成時に固定荷重(自重)で倒壊するようなことがないか、建物として成り立つかという最低限の確認である。例えば、平城宮第一次大極殿の復元過程では、復元検討中の案を構造解析したところ、長期荷重に対する構造的な問題が判明し、復元案が抜本的に見直された¹⁾。なお、今回の構造解析は作成した復元原案の検証・評価が目的であり、構造解析の結果を復元原案の作成(部材配置・寸法の決定など)に反映させたわけではない。

第D項で述べるように、構造解析は天平塔の復元原案および興福寺五重塔を対象としておこなわれた²⁾。また、構造解析は天平塔の内部柱検討案(第VI章)についてもおこなわれ、その結果の評価については付章IIIで述べる。文建協と立石構造設計が作成した構造解析の報告書は、構造解析資料として、本書〔図版・資料編〕に収録した。

B 方針

天平塔の構造解析では、完成時に建物として成り立つかという観点から、固定荷重のみを扱う。積載荷重はないものとして、考慮しない。短期荷重(地震力・風圧力・積雪荷重)や経年変化に対する構造的な評価はおこなわない。したがって、本章で述べる応力などは、すべて固定荷重に対するものである。木材は、奈良時代創建期の東大寺の主要堂塔として、良材を想定する。

今回の構造解析は、復元原案の実現可能性を評価するためのものである。したがって、現代建築としての法規を遵守し、実際に建設することを目的とした復元実施案の構造的検討とは性格が異なる。

C 用語の定義

構造解析に関わる用語について、以下のように用いる。

現行基準 建築基準法に定められた各種の基準を指す。

荷重・重量 各部材に作用する部材外部からの力(外力)や各部材の重さを指す。単位はN、kNであるが、kgf、tfを用いる場合もある。

応力 荷重・重量により、各部材の内部に生じる力を指す。ここでは、軸力(圧縮力)・曲げ

モーメント・せん断力の3つの応力を扱う。単位は、N、kNなどである。

応力図 各部材に生じる応力を示した図を指す。各応力に対して、曲げモーメント図・せん断力図などがある。

応力度 単位面積あたりの応力を指す。単位は、N/mm²である。

基準強度 現行基準で定められる材料の強度を指す。材料は、木材、鋼材やコンクリートなどがあるが、ここでは、特に木材の強度を指す。後述する許容応力度を算出するための基準となる。樹種(ヒノキ・ケヤキなど)や規格(日本農林規格(JAS)・無等級材など)などに応じて、種々の基準強度が定められる。単位は、N/mm²である。

許容応力度 基準強度をもとに算出され、超過しないよう定められた応力度を指す。長期荷重と短期荷重に対して、それぞれ長期許容応力度と短期許容応力度が定められる。原則として現行基準で定められるが、日本建築学会の規準もある³⁾。

検定比 許容応力度に対する応力度の割合を指し、応力度/許容応力度で算出される。応力度は各部材で一様でないため、断面寸法が一定の場合、最大の応力度を用いる。現行基準では、応力度が許容応力度を超過しないようにするため、検定比1.00以下で安全とみなされる。

許容値 第D項で述べるように、今回の構造解析で設定した、許容する検定比の上限値を指す。

D 方 法

i 評 価

天平塔の復元原案の構造解析結果で示される、各部材の検定比を用いて評価する。しかし、第3節で述べるように、この検定比だけでは構造的な評価が困難であった。現存する古代建築でも現行基準などを満たさない場合があるが⁴⁾、建物が倒壊するわけではない。そこで、類例建物を構造解析し、天平塔と比較することで、天平塔の構造解析結果を評価することとした。類例建物の検定比を確認し、評価の参考とする。

ii 比較の対象

類例として、興福寺五重塔を比較の対象とする。現在の興福寺五重塔は、応永33年(1426)の建立であり、盃面戸まで一本造り出しの手先肘木や丸桁桔・桔木など、中世的な技法が多分に含まれる点は否めない。しかし、組み上げ構造は側柱・四天柱ともに積み重ね構法を探り、和様で統一された大規模な五重塔であるため、比較の対象として適当であると考えた⁵⁾。

興福寺五重塔は、奈良県所蔵の図面を参考に、部材寸法や納まりを把握した⁶⁾。隅行き方向や細部など、図面で把握できない箇所については現地調査をおこない、可能な範囲で観察、実測や写真撮影などをおこなった⁷⁾(Table VII-1-1)。これらにもとづき、平面図・立面図・断面図・伏図などの各種図面を作成した。ただし、すべての部材寸法や納まりを把握することはできないため、未確認の部分は想定で検討をおこなった。

なお、興福寺五重塔の構造解析は、天平塔の復元原案との比較のためにおこなったものであり、荷重の設定、構造モデルや各部の納まりなどは細部に拘泥しない。そのため、興福寺五重塔についてはおよその性状の把握に留まり、天平塔に比べ定性的な検討である。

iii 許容値

今回の構造解析の目的を鑑みて、各応力に対する検定比の許容値を1.45に設定した。先行研究⁸⁾から、検定比1.45の場合、各部材が100年程度は保ち得ると考えられる。ここでは、許容値以下の部材を安全とみなす。ただし、めり込みについては、検定比1.00を超える場合の、検定比と破壊までの荷重継続時間との関係が判然としないため、許容値は現行基準通り1.00とする。すなわち、圧縮・曲げ・せん断に対する許容値を1.45、めり込みに対する許容値を1.00とする。

iv 検討部材

検討した部材と項目を一覧にまとめた(Table VII-1-2)。対象は、各部を構成する主要かつ応力が大きいと想定される部材とした。軸部は、特に初重の柱の座屈が懸念された。組物は、大斗の圧縮破壊と、一～四の肘木(平・隅とも)および平の尾垂木・隅行尾垂木の曲げ・せん断破壊がそれぞれ懸念された。軒は、特に積み重ね構法で側1間を受ける地隅木と地垂木の曲げ・せん断破壊が懸念された。圧縮に比べ、曲げ・せん断は破壊に繋がりやすく、注意が必要である。

v 各種の設定

構造解析の具体的な方法、各種の設定や仕様などは、第2節や[図版・資料編]に収録した構造解析資料で詳述されている⁹⁾。ここでは、要点を述べる。

a 前提条件

荷重は長期荷重(固定荷重)のみを扱い、木材は良材を想定する(第B項)。検定比について、許容値を設定する(第iii号)。

b 樹種

樹種は、天平塔については未検討であるため、一部の参考のための検討を除き、すべてヒノキと仮定する。興福寺五重塔については、目視確認で判断した各部材の樹種(ヒノキ・ケヤキ)に応じて設定するが、不明な部材はヒノキと仮定する。

c 部材数量

第2節で述べるように、固定荷重の資料として、天平塔の復元原案について、木部・壁・屋根・相輪・軒風鐸の部材数量をそれぞれ抽出・算出・推定した。天平塔の相輪重量は、主に藻

Table VII-1-1 興福寺五重塔の調査経過

対象	調査日	参加者	内容	成果物
興福寺五重塔	2021年2月10日	箱崎和久、福嶋啓人、山本光良(以上、奈文研)、春日井道彦、中西 将(以上、文建協)、立石 一、藤澤喜久子(以上、立石構造設計)、観察、簡易計測、写真撮影 森本公穂、西崎卓也、南部裕樹、中川二美、福田さよ子(以上、東大寺)	実測図、写真	

参加者の所属は調査当時。

Table VII-1-2 検討した部材と項目

部材 項目	軸部			組物			軒		
	柱	柱盤	台輪	大斗	一～四 の肘木	平の尾垂木 隅行尾垂木	丸桁	地隅木 飛檻隅木	地垂木 飛檻垂木
圧縮	曲げ せん断 めり込み	めり込み	めり込み	曲げ せん断	曲げ せん断	曲げ せん断	曲げ せん断	曲げ せん断	曲げ せん断

師寺東塔にもとづく。薬師寺東塔の相輪の一部(露盤・平頭など)は、解体修理時に実見し、観察、実測や写真撮影などをおこなった¹⁰⁾(Table VII-1-3)。興福寺五重塔の相輪重量は判然としなかつたため、建立年代は異なるものの、規模が近似する教王護国寺五重塔に倣い約6.4tf(6,380.5kgf)とした¹¹⁾。

Table VII-1-3 薬師寺東塔の調査経過

対象	調査日	参加者	内容	成果物
薬師寺東塔相輪 (解体中)	2018年8月1日	福嶋啓人、目黒新悟(以上、奈文研)	観察、実測、写真撮影等	実測図、写真
薬師寺東塔	2018年8月30日	箱崎和久、海野聰、福嶋啓人、目黒新悟 (以上、奈文研)、春日井道彦、中西将(以上、文建協)	観察、写真撮影	写真
薬師寺東塔相輪 (解体中)	2019年12月25日	目黒新悟(奈文研)	観察、写真撮影	写真

参加者の所属は調査当時。

註

- 1) 『平城宮第一次大極殿の復原に関する研究2木部』奈良文化財研究所学報(81)、奈良文化財研究所、2010。
- 2) 天平塔の構造解析は復元原案の作成と併行しておこなわれたため、最終の復元原案とは部材断面寸法や部材数量など、細部に微差が生じる。しかし、全形のおよその復元は終えていたため、構造解析の目的を達成する上では支障がないものと判断した。
- 3) 『木質構造設計規準・同解説(第4版)』日本建築学会、2006。
- 4) 唐招提寺金堂では、修理にともなう構造解析によって、各部材の長期荷重に対する断面検定において、「野垂木、地垂木、尾垂木、肘木、隅木の一部が規準を超える」ことが判明した。
『国宝唐招提寺金堂修理工事報告書「彩色調査・構造補強調査編」』奈良県教育委員会、2009。
- 5) 現存最大の層塔として、興福寺五重塔より僅かに大きい教王護国寺五重塔が挙げられる。教王護国寺五重塔の組み上げ構造は、側柱を積み重ね構法とし、四天柱を長柱構法とする併用構法である。側1間を積み重ね構法とする天平塔とは、組み上げ構造が異なる。
- 6) 興福寺五重塔の図面については、奈良県から写真データの提供を受けた。
- 7) 調査にあたっては、興福寺の協力を得た。
- 8) 杉山英男「Clouser 実験式(含水率6%)」『建築構造学大系22 木構造』134頁、彰国社、1971。
- 9) 現在の興福寺五重塔には枯木が存在する。枯木は、本検討では構造解析の目的や納まりなどを踏まえ、屋根の荷重に含まれるものとみて、原則として架構ではなく荷重としてモデル化された。
- 10) 調査にあたっては、薬師寺および奈良県文化財保存事務所の協力を得た。
- 11) 『国宝教王護国寺五重塔修理工事報告書』京都府教育庁文化財保護課、1960。

なお、相輪重量は、当麻寺西塔で約1.0tf、薬師寺東塔で約2.9tf、醍醐寺五重塔で約4.1tfである。

2 固定荷重の資料

A 経緯

天平塔の復元原案を構造解析するにあたり、部位ごとの固定荷重の設定が必要である。そこで、固定荷重を設定・検証するために、天平塔の復元原案について、木部の体積、壁の面積、屋根の面積、瓦の枚数・重量、相輪の重量を各種の図面などにもとづき抽出・算出・推定した¹⁾ (Table VII-2-1)。そして、最終的な建物重量は、この抽出作業にもとづく値と大差ないことを確認した上で、相輪重量以外は構造解析プログラムの自動計算による値を用いた²⁾ ([図版・資料編])。

B 部材数量・仕様

木部 木部の体積は、計約1,921 m³である。体積の抽出は実寸に即したが、曲面形状をなす斗については、簡略化して抽出した。すなわち、斗縁を斗尻外角と斗面下端外角で結んだ直線とみなした。組物の欠き込みは減じた。肘木曲線は考慮せず、直方体とみなした。隅行きの肘木や隅行尾垂木は、平の長さを $\sqrt{2}$ 倍した³⁾。配付けとなる地垂木と飛檐垂木は、中間の長さと枝数から抽出した。地隅木と飛檐隅木は、作成した伏図を参考に長さを抽出した。

軒の垂木間の仕様は、化粧裏板張りないし木舞編みの揚げ塗りであるが(第VI章)、ここでは厚さ1寸(30mm)の化粧裏板張りと仮定した。これ以外の屋根下地は想定していない。

壁 壁の面積は、計約284m²である。初重の腰壁と各重の台輪上の小壁(組物間小壁)の面積を抽出した。壁は土壁を想定し、厚さは4寸(約120mm)と仮定した。

屋根 屋根の面積は、計約2,670 m²である。勾配があるため、軒平瓦瓦当部から側柱盤外面までの引渡しの距離を用いて算出した。

瓦の枚数は計108,720枚、重量は計約328.6tfである。出土遺物にもとづき⁴⁾、伏図などを作成して枚数・重量を抽出・算出した。瓦下地は、全体を葺土(ベタ葺き)と想定した。

相輪 相輪の重量は、計約27.0tfである⁵⁾。薬師寺東塔⁶⁾と当麻寺西塔⁷⁾を参考に、天平塔の規模に拡大して推定した(Table VII-2-2)。相輪は、薬師寺東塔の相輪を水平方向2.85倍、垂直方向2.52倍しており(第VI章)、その拡大倍率を用いた。薬師寺東塔の露盤(側板)は、厚さ15~25mmである。これを単純に等比拡大(2.85倍)すると、露盤は厚さ42.75~71.25mmとなる。しかし、大規模な大安寺西塔跡出土露盤片⁸⁾の厚さ約20mmと比べて過大である。そこで、相輪の各部材の厚さは規模に関わらずおよそ一定と考えた。すなわち、天平塔の露盤の厚さが最低20mmとなるよう、拡大による重量の増加率を低減した。その結果、天平塔の露盤は厚さ20~33mmとなる。水煙は、当麻寺西塔の水煙を水平方向3.77倍、垂直方向3.39倍しており、拡大による重量の増加率の低減は、薬師

Table VII-2-1 天平塔の復元原案の各部材数量

木部体積	壁面積	屋根面積	瓦枚数・瓦重量	相輪重量
1,921.460m ³	284.431m ²	2,669.777m ²	108,720枚	328.570tf

Table VII-2-2 天平塔の相輪重量の推定

単位: kgf

名 称	類例の重量	拡大による重量の増加率	重 量	参考とした類例
宝珠	19.350	9.576	185.296	薬師寺東塔。
最頂部檫管	47.250	9.576	452.466	〃
龍舍	29.400	9.576	281.534	〃
砲弾型檫管 (上)	28.800	9.576	275.789	〃
水煙 (南北)	38.600	22.541	870.089	当麻寺西塔。
水煙 (東西)	45.300	22.541	1,021.115	〃
水煙取付部品	4.500	9.576	43.092	薬師寺東塔。
相輪鳳鐸 (80個)	696.00	1.000	696.000	大安寺西塔跡出土相輪鳳鐸 (87kgf/個)。
砲弾型檫管 (下)	34.875	9.576	333.963	薬師寺東塔。
九輪 (下から9)	65.625	9.576	628.425	〃
檫管 (下から9)	40.125	9.576	384.237	〃
九輪 (下から8)	78.000	9.576	746.928	〃
檫管 (下から8)	45.750	9.576	438.102	〃
九輪 (下から7)	58.500	9.576	560.196	〃
檫管 (下から7)	39.188	9.576	375.260	〃
九輪 (下から6)	76.313	9.576	730.769	〃
檫管 (下から6)	46.875	9.576	448.875	〃
九輪 (下から5)	90.375	9.576	865.431	〃
檫管 (下から5)	52.500	9.576	502.740	〃
九輪 (下から4)	98.250	9.576	940.842	〃
檫管 (下から4)	53.625	9.576	513.513	〃
九輪 (下から3)	104.625	9.576	1,001.889	〃
檫管 (下から3)	55.125	9.576	527.877	〃
九輪 (下から2)	97.500	9.576	933.660	〃
檫管 (下から2)	57.000	9.576	545.832	〃
九輪 (下から1)	92.063	9.576	881.591	〃
檫管 (下から1)	159.750	9.576	1,529.766	〃
平頭	83.625	9.576	800.793	〃
覆鉢	152.625	9.576	1,461.537	〃
蓋板	338.250	9.576	3,239.082	〃
露盤	498.150	9.576	4,770.284	〃
計			26,986.971	

寺東塔の露盤などから算出したものに倣った。相輪風鐸は、計696kgfである。大安寺西塔跡出土相輪風鐸⁹⁾を参考に、8.7kgf／個とした。九輪それぞれに8個、水煙に8個取り付くため、計80個である。なお、薬師寺西塔で復元された平頭上の花弁は、重量が判然としないため、相輪重量に含んでいない。拡大による重量の増加率の計算式は、以下の通りである。

$$\cdot \text{水煙と相輪風鐸以外} : X2.85 \times Y2.85 \times Z2.52 \times (20/42.75) = 9.576$$

$$\cdot \text{水煙} : X3.77 \times Y3.77 \times Z3.39 \times (20/42.75) = 22.541$$

軒風鐸 軒風鐸は、計336kgfである。大安寺西塔跡出土軒風鐸片¹⁰⁾を参考に、12kgf／個とした。各重の軒の四隅に取り付くため、計28個である。

C 部材数量にもとづく建物重量

天平塔の復元原案の部材数量(第B項)および構造解析で設定した部位ごとの固定荷重など([図版・資料編])にもとづき、建物重量を算出した(Table VII-2-3)。

各部の寸法や数量から算出した建物重量は計2,192.0tfである。構造解析プログラムの自動計算による値(計2,307.0tf)の方が大きい([図版・資料編])。つまり、構造解析上は、抽出した建物重量より5%程度安全側の数値で検討したと言える。この差異は、部位ごとの固定荷重などの設定において、構造解析プログラムで安全側をみて端数を切り上げて設定したことや、より詳細に部材数量が抽出されたことなどによると思われる。

Table VII-2-3 抽出した部材数量にもとづく天平塔の復元原案の建物重量と内訳

単位:tf

木 部	壁	屋 根	相 輪	計	備 考
864.7	45.5	1,254.8	27.0	2,192.0	相輪重量は、薬師寺東塔や当麻寺西塔などにもとづく。

各部の寸法や数量から算出(構造解析プログラムによる自動計算値ではない)。

註

- 1) 復元原案の作成と併行してこれらの抽出をおこなったため、最終の復元原案とは微差が生じるが、構造解析の目的を達成する上では支障がないものと判断した。
- 2) この抽出作業にもとづく建物重量より大きい。天平塔の相輪重量は、構造解析プログラムの自動計算ではなく、第B項で述べる推定にもとづく。
- 3) 抽出作業時は、隅行断面図が未作成であった。
- 4) 出土瓦の寸法や重量は、東大寺境内史跡整備計画室から教示を得た。
- 5) 興福寺五重塔の相輪重量は、教王護国寺五重塔に倣い約6.4tfとした(第1節)。
- 6) 『薬師寺東塔及び南門修理工事報告書』奈良県教育委員会文化財保護課、1956。
- 7) 「国宝当麻寺西塔保存修理事業 相輪編」文化財建造物修理現場見学会パンフレット、奈良県教育委員会、2018年5月26日作成(<https://www.pref.nara.jp/securer/195933/taima3.pdf> 2020年4月23日閲覧)。
- 8) 松浦五輪美「史跡大安寺旧境内(西塔跡)の調査 第105次」『奈良市埋蔵文化財調査概要報告書 平成16年度』33-34頁、奈良市教育委員会、2007(DOI <http://doi.org/10.24484/sitereports.310>)。
- 9) 『図説平城京事典』柊風舎、2010。
- 10) 松浦五輪美「西塔地区の調査 第110次」『奈良市埋蔵文化財調査年報 平成17(2005)年度』71-73頁、奈良市教育委員会、2008(DOI <http://doi.org/10.24484/sitereports.1925>)。

3 検定比

天平塔の復元原案と興福寺五重塔について、[図版・資料編] に収録した構造解析資料にもとづき各部材の検定比を抽出し、本節の末尾にまとめた。なお、天平塔と興福寺五重塔とも、飛檻垂木と飛檻隅木は安全側に余裕のある結果であったため、ここでは割愛する。

A 天平塔 復元原案

i 軸 部

a 柱

柱の圧縮の検定比は、すべての柱において、許容値以下である(0.06~0.99) (Fig.VII-3-1)。

b 柱 盤

柱盤は、三重～五重の入側柱盤で曲げ・せん断検定比が許容値を超え(1.79~6.49)、それ以外は許容値以下である(0.07~1.33) (Table VII-3-1)。入側柱盤の曲げ・せん断検定比は、三重で最大である(2.44・6.49)。なお、入側柱盤の曲げ・せん断検定比が二重で小さいのは(0.24・0.07)、二重の平の入側柱と初重の平の入側柱上の小屋束の見付位置が揃うためと考えられる。

柱盤のめり込みの検定比は、二重の入側柱盤の各柱位置と三重の入側柱盤の隅で許容値を超え(1.10~1.92)、それ以外は許容値以下である(0.12~0.90) (Fig.VII-3-2)。柱盤のめり込みの検定比は、二重の入側柱盤の隅で最大である(1.92)。

c 台 輪

台輪のめり込みの検定比は、各重の各柱位置で許容値以下である(0.12~0.75) (Fig.VII-3-3)。

ii 組 物

a 大 斗

大斗のめり込みの検定比は、初重の入側柱筋の隅、二重の入側柱筋の各位置、三重の入側柱筋の隅で許容値を超え(1.10~1.92)、それ以外は許容値以下である(0.19~0.90) (Fig.VII-3-4)。大斗のめり込みの検定比は、二重の入側柱筋の隅で最大である(1.92)。

b 肘 木

平の肘木 平の一の肘木は、初重のせん断検定比が許容値を超え(1.58)、それ以外は許容値以下である(0.20~1.18)。平の二の肘木は、二重のせん断検定比と四重の曲げ検定比が許容値を超え(1.62・1.72)、それ以外は許容値以下である(0.44~1.37)。平の三の肘木は、各重で曲げ・せん断検定比が許容値以下である(0.41~1.44)。平の四の肘木は、初重・二重のせん断検定比と四重の曲げ・せん断検定比が許容値を超え(1.70~2.06)、それ以外は許容値以下である(0.28~1.43)。平の肘木の曲げ検定比は四重の二・四の肘木で、せん断検定比は初重の四の肘木でそれぞれ最大である(1.72・2.06)。

隅行きの肘木 隅行一・三の肘木は、各重で曲げ・せん断検定比が許容値以下である(0.10~1.29)。隅行二の肘木は、二重のせん断検定比が許容値を超え(1.58)、それ以外は許容値以下である(0.23~1.41)。隅行四の肘木は、初重～三重の曲げ・せん断検定比が許容値を超え(1.56~2.43)、それ以外は許容値以下である(0.23~1.34)。隅行きの肘木の曲げ・せん断検定比は、初重の四の肘

木で最大である(2.39・2.43)。

c 尾垂木

平の尾垂木 平の尾垂木は、初重～四重の曲げ・せん断検定比、五重のせん断検定比、六重の曲げ検定比が許容値を超え(1.54～8.93)、それ以外は許容値以下である(1.20～1.44)。平の尾垂木の曲げ検定比は四重で、せん断検定比は初重でそれぞれ最大である(4.45・8.93)。

隅行尾垂木 下方隅行尾垂木は、初重～三重の曲げ・せん断検定比と四重の曲げ検定比が許容値を超え(1.46～3.56)、それ以外は許容値以下である(0.17～1.27)。上方隅行尾垂木は、初重の曲げ・せん断検定比と二重のせん断検定比が許容値を超え(1.69～3.39)、それ以外は許容値以下である(0.17～1.41)。隅行尾垂木の曲げ・せん断検定比は、初重の下方隅行尾垂木で最大である(1.81・3.56)。

iii 軒

a 丸 桁

丸桁は、各重で曲げ・せん断検定比が許容値以下である(0.66～1.06)。

b 地垂木

地垂木は、側柱盤位置では、初重・二重の曲げ・せん断検定比および三重・四重の曲げ検定比が許容値を超え(1.48～2.73)、それ以外は許容値以下である(0.48～1.33)。丸桁位置では、各重で曲げ・せん断検定比が許容値以下である(0.19～1.22)。地垂木の曲げ・せん断検定比は、初重の側柱盤位置で最大である(2.73・1.81)。

c 地隅木

地隅木は、初重～四重の曲げ・せん断検定比および五重のせん断検定比が許容値を超え(1.58～5.58)、それ以外は許容値以下である(0.17～1.06)。地隅木の曲げ・せん断検定比は、初重で最大である(2.71・5.58)。

iv まとめ

許容値以下の部材 軸部は、柱の圧縮と台輪のめり込みの検定比および側柱盤・四天柱盤の曲げ・せん断・めり込みの検定比が許容値以下である。組物は、側柱筋と四天柱筋の大斗のめり込みの検定比および平の三の肘木と隅行一・三の肘木の曲げ・せん断検定比が許容値以下である。軒は、丸桁の曲げ・せん断検定比が許容値以下である。

許容値を超える部材 軸部は、入側柱盤の曲げ・せん断・めり込みの検定比が許容値を超える。組物は、入側柱筋の大斗のめり込みの検定比および平の一・二・四の肘木と隅行二・四の肘木、平の尾垂木・隅行尾垂木(下方・上方とも)の曲げ・せん断検定比が許容値を超える。軒は、地垂木(側柱盤位置)と地隅木の曲げ・せん断検定比が許容値を超える。最大の検定比は、曲げ・せん断がともに平の尾垂木で、四重の曲げ検定比4.45、初重のせん断検定比8.93であり、めり込みが二重の入側柱盤および二重の隅の入側柱上大斗で、ともにめり込みの検定比1.92である。

B 興福寺五重塔

i 軸 部

軸部については、すべて許容値以下である。

ii 組 物

組物については、大斗以外はすべて許容値以下である。

大斗のめり込みの検定比は、初重の隅で許容値を超え(1.10)、それ以外は許容値以下である(0.16~0.80)。

iii 軒

軒については、地隅木以外はすべて許容値以下である。

地隅木は、初重の曲げ・せん断検定比および二重~四重のせん断検定比が許容値を超える(1.51~6.40)、それ以外は許容値以下である(0.14~1.17)。地隅木の曲げ・せん断検定比は、初重で最大である(1.51~6.40)。なお、桔木は側柱盤の上にあり側柱からの荷重を直接受けないが、地隅木はその上の隅柱などから荷重を受ける。これらの納まりと付章IIIで述べる地隅木の応力分布を踏まえれば、桔木は地隅木の検定比に大きく影響しないと思われる¹⁾。

iv まとめ

許容値以下の部材 軸部は、検討したすべての部材が許容値以下である。組物は、平と隅行きの肘木および平の尾垂木・隅行尾垂木(下方・上方とも)の曲げ・せん断検定比が許容値以下である。軒は、丸桁および地垂木の曲げ・せん断検定比が許容値以下である。

許容値を超える部材 組物は、大斗のめり込みの検定比が許容値を超える。軒は、地隅木の曲げ・せん断検定比が許容値を超える。最大の検定比は、曲げ・せん断がともに初重の地隅木で、曲げ検定比1.51、せん断検定比6.40であり、めり込みが初重の隅柱上大斗で、めり込みの検定比1.10である。

C 比較

天平塔の復元原案で許容値を超える各部材について、興福寺五重塔との比較から評価する。

i 軸部

天平塔の復元原案では、入側柱盤の曲げ・せん断・めり込みの検定比が許容値を超える。興福寺五重塔の各柱盤の検定比はいずれも許容値以下であるから、これらの比較から評価できない。一方で、第iii号で述べるように本検討では、現存する興福寺五重塔は地隅木の曲げ検定比1.51、せん断検定比6.40と大きな値を示す。これを踏まえれば、天平塔の復元原案は入側柱盤が原因で、建設中や完成時に倒壊するとは断言できない。

ii 組物

a 大斗

天平塔の復元原案では、大斗のめり込みの検定比が許容値を超える。本検討では、現存する興福寺五重塔の大斗のめり込みの検定比は1.10で、許容値を僅かに超える。ここから、天平塔の復元原案で同程度の検定比を示す二重の平の入側柱上大斗は、建設中や完成時の倒壊に及ぼす影響が少ないと判断する。また、天平塔の復元原案ではめり込みの検定比が最大で1.92となり、興福寺五重塔のめり込みの検定比1.10を超える分についてはこれらの比較から評価できない。一方で、第i号で述べたように本検討における興福寺五重塔の地隅木の各検定比を踏まえれば、天平塔の復元原案は大斗が原因で、建設中や完成時に倒壊するとは断言できない。

b 肘木

天平塔の復元原案では、平の一・二・四の肘木と隅行二・四の肘木の曲げ・せん断検定比が許容値を超える。興福寺五重塔の同部材の検定比はいずれも許容値以下であるから、これらの比

較から評価できない。一方で、第 i 号で述べたように本検討における興福寺五重塔の地隅木の各検定比を踏まえれば、天平塔の復元原案は肘木が原因で、建設中や完成時に倒壊するとは断言できない。

c 尾垂木

天平塔の復元原案では、平の尾垂木と隅行尾垂木(下方・上方とも)の曲げ・せん断検定比が許容値を超える。興福寺五重塔の同部材の検定比はいずれも許容値以下であるから、これらの比較から評価できない。一方で、第 i 号で述べたように本検討における興福寺五重塔の地隅木の各検定比を踏まえれば、天平塔の復元原案は尾垂木が原因で、建設中や完成時に倒壊するとは断言できない。

iii 軒

a 地垂木

天平塔の復元原案では、地垂木の曲げ・せん断検定比が許容値を超える。興福寺五重塔の地垂木の検定比は許容値以下であるから、これらの比較から評価できない。一方で、第 i 号で述べたように本検討における興福寺五重塔の地隅木の各検定比を踏まえれば、天平塔の復元原案は地垂木が原因で、建設中や完成時に倒壊するとは断言できない。

b 地隅木

天平塔の復元原案では、地隅木の曲げ・せん断検定比が許容値を超える。本検討では、現存する興福寺五重塔の地隅木も曲げ・せん断検定比が許容値を超え、特にせん断検定比は天平塔の復元原案を上回る大きな値を示す。そのため、せん断検定比については、興福寺五重塔の6.40を下回るから、地隅木は建設中や完成時の倒壊に及ぼす影響が少ないと判断する。

曲げ検定比については、興福寺五重塔の1.51を超える分についてはこれらの比較から評価できない。一方で、本検討における興福寺五重塔の地隅木のせん断検定比を踏まえれば、天平塔の復元原案は地隅木が原因で、建設中や完成時に倒壊するとは断言できない。

なお、天平塔は隅木の修理にともなうとみられる記録が散見する(第Ⅱ章)。天平塔の復元原案の地隅木が大きな曲げ・せん断検定比を示すことは、これらの記録と符合する²⁾。

註

- 1) 軒の垂下に対して有効と思われる。桔木は、本検討では構造解析の目的や納まりなどを踏まえ、屋根の荷重に含まれるものとみて、原則として架構ではなく荷重としてモデル化された([図版・資料編])。
- 2) 柱盤、大斗・肘木・尾垂木や地垂木を修理したと断定できる記録は認められない。ただし、修理にともなう記録で、範囲や規模が判然としないものは散見する。

Table VII-3-1 天平塔 復元原案の各部材の検定比（曲げ・せん断）

部材名称		種類	七重	六重	五重	四重	三重	二重	初重
軸部	側柱盤	曲げ	0.17	0.60	0.44	0.47	0.57	0.51	—
		せん断	0.29	0.48	0.95	1.05	1.24	1.24	—
四天柱盤	入側柱盤	曲げ	—	0.54	2.38	1.79	2.44	0.24	—
		せん断	—	0.15	2.48	3.85	6.49	0.07	—
尾垂木	曲げ	1.33	—	—	0.52	0.34	0.51	—	—
		せん断	0.57	—	—	0.62	0.78	0.91	—
四の肘木	曲げ	1.39	1.54	1.44	4.45	3.83	3.11	3.86	—
		せん断	1.31	1.20	3.30	3.43	4.46	7.14	8.93
平三の肘木	曲げ	0.31	0.28	0.49	1.72	0.95	1.05	1.29	—
		せん断	0.41	0.52	0.91	1.77	1.43	1.70	2.06
二の肘木	曲げ	0.49	0.41	0.62	1.44	0.67	0.59	0.87	—
		せん断	0.56	0.52	0.79	0.89	0.64	0.73	1.12
一の肘木	曲げ	0.64	0.62	0.93	1.72	1.34	1.11	1.36	—
		せん断	0.48	0.44	0.87	1.37	1.37	1.62	1.37
組物	上方隅行尾垂木	曲げ	0.22	0.61	0.65	1.26	1.41	1.31	1.69
		せん断	0.17	0.40	1.27	0.84	1.40	2.60	3.39
隅行四の肘木	曲げ	0.33	0.73	0.65	1.46	1.67	1.49	1.81	—
		せん断	0.17	0.47	1.27	0.96	1.66	2.94	3.56
隅行三の肘木	曲げ	0.26	0.57	0.87	1.34	1.62	1.98	2.39	—
		せん断	0.23	0.58	0.95	1.18	1.56	2.01	2.43
隅行二の肘木	曲げ	0.28	0.26	0.46	0.49	0.49	0.62	0.95	—
		せん断	0.10	0.14	0.25	0.31	0.33	0.39	0.62
(側柱筋)	曲げ	0.46	0.57	0.80	0.93	1.16	1.39	1.41	—
		せん断	0.23	0.52	0.69	0.73	1.31	1.58	0.91
(側柱筋)	曲げ	0.10	0.12	0.15	0.18	0.18	0.20	0.27	—
		せん断	0.22	0.30	0.39	0.47	0.47	0.53	0.69
(丸桁位置)	曲げ	—	—	—	—	—	—	—	0.88
		せん断	—	—	—	—	—	—	1.29
(丸桁)	曲げ	0.85	0.90	0.99	1.06	1.11	1.22	1.22	—
		せん断	0.19	0.29	0.19	0.29	0.29	0.29	0.29
(側柱盤位置)	曲げ	—	0.60	1.10	1.48	1.73	2.14	2.73	—
		せん断	—	0.48	0.76	1.14	1.33	1.52	1.81
軒丸桁	曲げ	0.66	0.72	0.81	0.77	0.92	0.95	1.06	—
		せん断	0.71	0.76	0.83	0.76	0.82	1.02	1.02
地隅木	曲げ	0.24	1.06	1.03	2.18	2.32	2.06	2.71	—
		せん断	0.17	0.76	2.05	1.58	2.53	4.29	5.58

網掛けは、許容値（検定比1.45）を超える箇所を示す。

Table VII-3-2 興福寺五重塔の各部材の検定比 (曲げ・せん断)

部材名称		種類	五重	四重	三重	二重	初重
軸 部	側柱盤	曲げ	0.21	0.35	0.37	0.50	—
		せん断	0.38	0.48	0.57	0.67	—
四天柱盤	入側柱盤	曲げ	—	—	—	—	—
		せん断	—	—	—	—	—
尾垂木	曲げ	0.05	0.08	0.08	0.08	—	—
		せん断	0.10	0.13	0.09	0.08	—
四の肘木	曲げ	0.42	0.50	0.52	0.90	0.92	—
		せん断	0.23	0.23	0.25	0.43	0.41
平 三の肘木	曲げ	0.29	0.40	0.58	0.76	1.45	—
		せん断	0.17	0.24	0.33	0.45	0.86
二の肘木	曲げ	0.25	0.29	0.36	0.54	1.16	—
		せん断	0.17	0.17	0.24	0.31	0.67
一の肘木	曲げ	0.08	0.09	0.17	0.21	0.69	—
		せん断	0.24	0.29	0.46	0.64	1.26
組 物	上方隅行尾垂木	曲げ	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08
		せん断	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
隅 物	下方隅行尾垂木	曲げ	0.12	0.12	0.16	0.16	0.24
		せん断	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08
隅 行四の肘木	曲げ	0.29	0.19	0.40	0.34	0.66	—
		せん断	0.18	0.23	0.46	0.57	0.69
隅 行三の肘木	曲げ	0.13	0.19	0.28	0.34	0.60	—
		せん断	0.05	0.05	0.07	0.08	0.15
隅 行二の肘木	曲げ	0.15	0.18	0.25	0.38	0.73	—
		せん断	0.09	0.13	0.23	0.30	0.34
(側柱筋) 隅行一の 肘木	曲げ	0.12	0.16	0.18	0.31	0.51	—
		せん断	0.20	0.27	0.37	0.53	0.63
(入側柱筋)	曲げ	—	—	—	—	—	—
		せん断	—	—	—	—	—
地垂木	(丸桁位置)	曲げ	1.02	0.90	0.90	0.76	1.17
		せん断	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
軒	(側柱盤位置)	曲げ	—	0.41	0.58	0.69	0.84
		せん断	—	0.48	0.76	0.95	1.33
丸桁	曲げ	0.31	0.30	0.29	0.47	0.38	—
		せん断	0.31	0.33	0.36	0.40	0.27
地隅木	曲げ	0.19	0.37	0.65	1.17	1.51	—
		せん断	0.14	1.82	3.13	4.47	6.40

網掛けは、許容値（検定比1.45）を超える箇所を示す。

七重	0.07	0.06	0.06	0.07	
	0.06	0.10	0.10	0.06	
	0.06	0.10	0.10	0.06	
	0.07	0.06	0.06	0.07	
六重	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08
	0.07	0.28	0.19	0.28	0.07
	0.08	0.19	XX	0.19	0.08
	0.07	0.28	0.19	0.28	0.07
	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08
五重	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11
	0.12	0.40	0.31	0.40	0.12
	0.12	0.31	XX	0.31	0.12
	0.12	0.40	0.31	0.40	0.12
	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11
四重	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12
	0.11	0.46	0.24	0.24	0.46
	0.11	0.24	0.31	0.31	0.24
	0.11	0.24	0.31	0.31	0.24
	0.11	0.46	0.24	0.24	0.46
	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12
三重	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
	0.12	0.77	0.41	0.41	0.77
	0.12	0.41	0.42	0.42	0.41
	0.12	0.41	0.42	0.42	0.41
	0.12	0.77	0.41	0.41	0.77
	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
二重	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14
	0.14	0.99	0.56	0.56	0.99
	0.14	0.56	0.50	0.50	0.56
	0.14	0.56	0.50	0.50	0.56
	0.14	0.99	0.56	0.56	0.99
	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13
初重	0.15	0.19	0.18	0.18	0.19
	0.19	0.37	0.23	0.23	0.37
	0.18	0.23	0.16	0.16	0.23
	0.18	0.23	0.16	0.16	0.23
	0.19	0.37	0.23	0.23	0.37
	0.15	0.19	0.18	0.18	0.19

数字の位置は、平面的な柱配置と対応する。

天平塔 復元原案

興福寺五重塔

Fig. VII-3-1 天平塔 復元原案と興福寺五重塔の柱の検定比（圧縮）

七重	0.13	0.12	0.12	0.13	
	0.12	0.19	0.19	0.12	
	0.12	0.19	0.19	0.12	
	0.13	0.12	0.12	0.13	
六重	0.16	0.14	0.14	0.14	0.16
	0.14	0.54	0.36	0.54	0.14
	0.14	0.36	X	0.36	0.14
	0.14	0.54	0.36	0.54	0.14
	0.16	0.14	0.14	0.14	0.16
五重	0.20	0.24	0.23	0.24	0.20
	0.24	0.79	0.61	0.79	0.24
	0.23	0.61	X	0.61	0.23
	0.24	0.79	0.61	0.79	0.24
	0.20	0.24	0.23	0.24	0.20
四重	0.24	0.22	0.21	0.21	0.22
	0.22	0.90	0.47	0.47	0.90
	0.21	0.47	0.55	0.55	0.47
	0.21	0.47	0.55	0.55	0.47
	0.22	0.90	0.47	0.47	0.90
	0.24	0.22	0.21	0.21	0.22
三重	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
	0.23	1.50	0.79	0.79	1.50
	0.23	0.79	0.76	0.76	0.79
	0.23	0.79	0.76	0.76	0.79
	0.23	1.50	0.79	0.79	1.50
	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
二重	0.24	0.27	0.28	0.28	0.27
	0.27	1.92	1.10	1.10	1.92
	0.28	1.10	0.87	0.87	1.10
	0.28	1.10	0.87	0.87	1.10
	0.27	1.92	1.10	1.10	1.92
	0.24	0.27	0.28	0.28	0.27
	0.16	0.08	0.08	0.16	
	0.08	0.29	0.29	0.08	
	0.08	0.29	0.29	0.08	
	0.16	0.08	0.08	0.16	
	0.31	0.15	0.15	0.31	
	0.15	0.46	0.46	0.15	
	0.15	0.46	0.46	0.15	
	0.31	0.15	0.15	0.31	
	0.47	0.21	0.21	0.47	
	0.21	0.31	0.31	0.21	
	0.21	0.31	0.31	0.21	
	0.47	0.21	0.21	0.47	
	0.60	0.31	0.31	0.60	
	0.31	0.50	0.50	0.31	
	0.31	0.50	0.50	0.31	
	0.60	0.31	0.31	0.60	

網掛けは、許容値（検定比1.00）を超える箇所を示す。数字の位置は、平面的な柱配置と対応する。

天平塔 復元原案

興福寺五重塔

Fig.VII-3-2 天平塔 復元原案と興福寺五重塔の柱盤の検定比（めり込み）

七重	0.13	0.12	0.12	0.13	
	0.12	—	—	0.12	
	0.12	—	—	0.12	
	0.13	0.12	0.12	0.13	
六重	0.16	0.14	0.14	0.14	0.16
	0.14	—	—	—	0.14
	0.14	—	X	—	0.14
	0.14	—	—	—	0.14
	0.16	0.14	0.14	0.14	0.16
五重	0.20	0.24	0.23	0.24	0.20
	0.24	—	—	—	0.24
	0.23	—	X	—	0.23
	0.24	—	—	—	0.24
	0.20	0.24	0.23	0.24	0.20
四重	0.23	0.21	0.21	0.21	0.23
	0.21	—	—	—	0.21
	0.21	—	—	—	0.21
	0.21	—	—	—	0.21
	0.21	—	—	—	0.21
	0.23	0.21	0.21	0.21	0.23
三重	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23
	0.22	—	—	—	0.22
	0.23	—	—	—	0.23
	0.23	—	—	—	0.23
	0.22	—	—	—	0.22
	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23
二重	0.24	0.27	0.28	0.28	0.27
	0.27	—	—	—	0.27
	0.28	—	—	—	0.28
	0.28	—	—	—	0.28
	0.27	—	—	—	0.27
	0.24	0.27	0.28	0.28	0.27
初重	0.30	0.38	0.36	0.36	0.38
	0.38	0.75	0.46	0.46	0.75
	0.36	0.46	0.33	0.33	0.46
	0.36	0.46	0.33	0.33	0.46
	0.38	0.75	0.46	0.46	0.75
	0.30	0.38	0.36	0.36	0.38

数字の位置は、平面的な柱配置と対応する。

天平塔 復元原案

興福寺五重塔

Fig.VII-3-3 天平塔 復元原案と興福寺五重塔の台輪の検定比（めり込み）

七重	0.21	0.20	0.20	0.21
	0.20	0.19	0.19	0.20
	0.20	0.19	0.19	0.20
	0.21	0.20	0.20	0.21

六重	0.21	0.19	0.19	0.19	0.21
	0.19	0.54	0.36	0.54	0.19
	0.19	0.36	0.19	0.36	0.19
	0.19	0.54	0.36	0.54	0.19
	0.21	0.19	0.19	0.19	0.21

五重	0.28	0.33	0.32	0.33	0.28
	0.33	0.79	0.61	0.79	0.33
	0.32	0.61	0.61	0.61	0.32
	0.33	0.79	0.61	0.79	0.33
	0.28	0.33	0.32	0.33	0.28

0.24	0.16	0.16	0.24
0.16	—	—	0.16
0.16	—	—	0.16
0.24	0.16	0.16	0.24

四重	0.34	0.31	0.30	0.30	0.31	0.34
	0.31	0.90	0.47	0.47	0.90	0.31
	0.30	0.47	0.55	0.55	0.47	0.30
	0.30	0.47	0.55	0.55	0.47	0.30
	0.31	0.90	0.47	0.47	0.90	0.31
	0.34	0.31	0.30	0.30	0.31	0.34

0.39	0.16	0.16	0.39
0.16	—	—	0.16
0.16	—	—	0.16
0.39	0.16	0.16	0.39

三重	0.35	0.34	0.34	0.34	0.34	0.35
	0.34	1.50	0.79	0.79	1.50	0.34
	0.34	0.79	0.76	0.76	0.79	0.34
	0.34	0.79	0.76	0.76	0.79	0.34
	0.34	1.50	0.79	0.79	1.50	0.34
	0.35	0.34	0.34	0.34	0.34	0.35

0.62	0.24	0.24	0.62
0.24	—	—	0.24
0.24	—	—	0.24
0.62	0.24	0.24	0.62

二重	0.38	0.42	0.44	0.44	0.42	0.38
	0.42	1.92	1.10	1.10	1.92	0.42
	0.44	1.10	0.87	0.87	1.10	0.44
	0.44	1.10	0.87	0.87	1.10	0.44
	0.42	1.92	1.10	1.10	1.92	0.42
	0.38	0.42	0.44	0.44	0.42	0.38

0.80	0.36	0.36	0.80
0.36	—	—	0.36
0.36	—	—	0.36
0.80	0.36	0.36	0.80

初重	0.48	0.60	0.57	0.57	0.60	0.48
	0.60	1.19	0.72	0.72	1.19	0.60
	0.57	0.72	0.51	0.51	0.72	0.57
	0.57	0.72	0.51	0.51	0.72	0.57
	0.60	1.19	0.72	0.72	1.19	0.60
	0.48	0.60	0.57	0.57	0.60	0.48

1.10	0.60	0.60	1.10
0.60	—	—	0.60
0.60	—	—	0.60
1.10	0.60	0.60	1.10

締掛けは、許容値（検定比100）を超える箇所を示す。数字の位置は、平面的な柱配置と対応する。

天平塔 復元原案

興福寺五重塔

Fig.VII-3-4 天平塔 復元原案と興福寺五重塔の大斗の検定比（めり込み）

4 まとめ

天平塔の復元原案は、組物と軒を中心に許容値を超える検定比がみられた。興福寺五重塔は、大斗と地隅木にのみ許容値を超える検定比がみられた。そのため、大斗と地隅木以外の部材は、両者の比較から評価できなかった。しかし、興福寺五重塔の地隅木の各検定比の大きさを踏まえれば、天平塔の復元原案は平城宮第一次大極殿の復元過程のように構造的に重大な問題があるとまでは言えず¹⁾、建設中や完成時に倒壊するとは断言できない。したがって、天平塔の復元原案としては妥当であり、断定はできないもののここでは建物として成立し得ると考える。

当然ながら、古代建築は現行基準を満たすようには建てられておらず、構造的な問題があつたことが現存建物や文献史料から窺える。天平塔の復元原案では平の尾垂木が最大の検定比を示すが、例えば醍醐寺五重塔は平の尾垂木が折損しつつも(Fig.VII-4-1)、倒壊せず現存している。醍醐寺五重塔の尾垂木は後補材も多く²⁾、構造的弱点であったことを物語る。また、天平塔と同時代・同境内の大規模な天平大仏殿は、宝亀2年(771)に副柱が設置された(『東大寺要録』巻7)。これは、構造上の無理が表れたための補強工事とみられている³⁾。完成後間もない補強工事の実施から、構造的に万全でなかつたことがわかる。このほか、大斗のめり込みは例が多くあるし、奈良時代末期建立の建物では、唐招提寺金堂や当麻寺東塔などで修理前に柱の傾きや軒の垂下などが顕著であった⁴⁾(図版第56図)。天平塔を含む古代建築は、当然ながら現行基準でみた構造的な問題が多く潜在することを再確認した。

なお、天平塔の復元原案は各部材に生じる応力が大きく、構造的に弱点となる部分が存在することも事実である。それらは応力分布と関連しており、付章IIIで述べる。

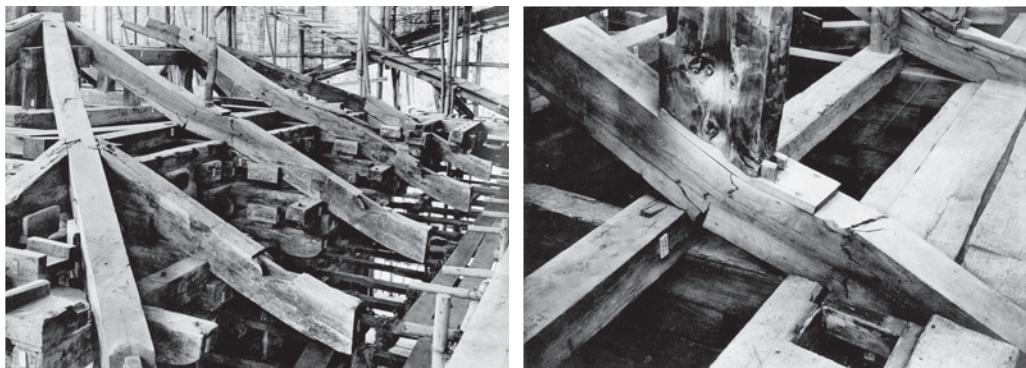


Fig.VII-4-1 醍醐寺五重塔 昭和修理前の初重尾垂木の折損

註

- 1) 平城宮第一次大極殿の復元過程では、復元検討中の案を構造解析したところ、長期荷重に対する構造的な問題が判明し、復元案が抜本的に見直された。
『平城宮第一次大極殿の復原に関する研究2木部』奈良文化財研究所学報(81)、奈良文化財研究所、2010。
- 2) 『国宝建造物醍醐寺五重塔修理工事報告書』京都府教育庁文化財保護課、1960。
- 3) 福山敏男『寺院建築の研究 中』福山敏男著作集2、中央公論美術出版、1982。初出は、福山敏男「東大寺大佛殿の第一期形態」『佛教藝術』(15)、14-34頁、毎日新聞社、1952。
- 4) 『国宝唐招提寺金堂修理工事報告書 [彩色調査・構造補強調査編]』奈良県教育委員会、2009。
岡田英男「当麻寺東塔」『日本建築史基礎資料集成11 塔婆I』解説95-100頁、中央公論美術出版、1984。