

論文の内容の要旨

論文題目 伝統木造建築の耐震要素の組み合わせによる
地震時挙動の変化 ―五重塔を例にして―

氏 名 津和 佑子

近年、文化財あるいは公的な指定を受けていなくても歴史的文化的に意味のある建物の保存や活用が活発に行われ、社寺仏閣などの伝統木造建築に関して構造的視点からみた保存・修復が進められている。そのため、こうした木造建築を対象に、実験的、解析的研究が進められ、現代の構造解析手法によってこれらの建物の構造的評価を行い、構造解析、構造設計の実施が増加している。工学的、法的に外に置かれてきた伝統木造建築も工学的に見直され、伝統的な構法であっても現代の建物として十分な耐震性能を有する必要がある。

社寺仏閣などの伝統木造建築は、在来軸組構法による住宅等と比べ特徴的な部材が多く用いられ独特の構造要素を有している。例えば、住宅と比較すると柱の径が大きく柱の復元力特性といった特徴的な構造特性や、斗や肘木からなる組物といった柱と屋根の間にある鉛直荷重を支える独特の構造部分がある。また建物規模、屋根重量も住宅等と比べると大きいものが多く、小屋組を構成する部材数も多くなることがある。異なった構造要素によって建物が成り立っているため、建物全体の構造特性も社寺と住宅では異なり、建物に即した構造性能の評価が必要である。

伝統木造建築に用いられる構造要素の耐震性に関しては実験的、解析的研究も増え、各要素の耐震性能の評価が行われてきた。しかし、これらの研究は要素を対象に個別に行われ、架構全体で要素を取り扱っていないため、架構全体の中での各要素の挙動は十分に明らかにされていない。一方、いくつかの伝統的な構造要素を組み合わせた軸組を対象とし

た既往の研究では、静的、動的な実験や解析から架構の耐震性能の検証が行われている。しかし、架構全体の中での要素について、既に提案されている構造要素のモデルでの比較検討はあまりなされておらず、各要素が架構全体でどのようにモデル化されるべきかは十分に解明されていない。

さらに、木造社寺建築の建物全体を対象にした研究として、振動特性の把握を目的とした常時微動測定や地震観測は増えてきているが、実物大あるいはそれに近い模型を用いた静的あるいは動的な実験は少なく、耐力低下が見られる大変形時までの建物全体の挙動に関しても十分に明らかにされていない。また、特定の建物の修理や復原を目的として実施されているものも多く、必ずしも汎用性が高いとは言えない。すでに提案されている耐震要素の評価方法を用いた建物全体の耐震性の評価や、耐震要素が組み合わさった際の伝統木造建築の地震時の挙動や、各構造要素がどのように相互に影響しあうのか、また建物全体の中での力学特性をどのように評価するかは十分に解明されていない。したがって、伝統的な木造建築の構造解析、耐震診断のためには、構造物のさらなる定量的把握が重要である。

そこで本研究では伝統木造建築の建物全体のモデルとして五重塔を例にして、構造要素の把握と要素を組み合わせた場合の地震時の挙動を定量的に把握することを目的とする。本論文は次の8章で構成した。

第1章「序論」では、本研究の背景、伝統木造建築の構造要素やいくつかの要素を組み合わせた構造体あるいは建物全体を対象にした耐震性に関する既往の研究についてまとめ、本研究の目的を示した。本論文は、五重塔を建物の例にして、伝統木造建築の構造要素と建物のモデル化の方法、組物の構造性能の把握、小屋組の構造性能の把握、柱組物構面の耐震性能、建物全体のモデル化の検討と地震時挙動の把握から構成されることを示し、各章の目的を明示した。

第2章「構造要素と建物モデル化の方法」では、伝統木造建築の建物として五重塔を例にして、考えられる耐震要素の中で耐震性能の評価方法が提案されているものといないものを明確にし、本論文での着目点、検討する耐震要素について示した。また五重塔全体のモデル化の方法として、既往の研究で提案されているものを整理し、本研究では組物と小屋組の鉛直剛性を含んだモデル化の方法（図1）を示した。

第3章「組物の構造性能」では、組物単体を対象に圧縮実験を行った。鉛直荷重のかかり方について、最上部の通肘木と力肘木に対して、一点にかかる場合、二点、三点、四点、全面にかかる場合の8ケースを想定し実験を行った。各ケースの組物の鉛直剛性は、荷重のかかり方が一点、二点の場合や非対称にかかった場合は組物全体の鉛直剛性が低くなる結果を得た。また、五重塔では地震時に各層がロッキングすることから、組物層にモーメントとせん断が同時にかかることを想定し、組物二基を対象にモーメントとせん断を同時

に与える静加力実験を実施した。この実験から得た組物一基の鉛直剛性は組物単体の圧縮実験の圧縮剛性より約 1.4~1.8 倍高い値となった。せん断剛性については、左右の各組物のせん断剛性が異なることが認められた。これは組物二基全体でのロッキングによって組物一基ごとにかかる軸力が変動し、摩擦力が変化することが原因であることが確認された。

第 4 章「小屋組の構造性能」では、五重塔の小屋組の鉛直性能を把握するために、小屋組の 3 次元立体モデルを作成し鉛直载荷の静的解析を行った。肘木、柱盤、尾垂木などの横架材および束は梁要素で置換し、接合部は部材の繊維直交方向の圧縮を考慮した鉛直バネを用いてモデル化した。荷重のかかり方については、四天柱と側柱に荷重がかかる場合、側柱にのみ荷重がかかる場合の 2 ケース、支点の位置は四天柱に支点がある場合とない場合を考慮し、計 4 ケースの解析を実施した。その結果、いずれの場合も柱盤と隅木の節点で大きくたわむことを確認した。また、五重塔初層を台輪までの構面、組物、小屋組の 3 層に分け、上層荷重が作用した場合とモーメントが作用した場合のそれぞれの鉛直剛性を算出し比較した。その結果、いずれも小屋組層の鉛直剛性が最も小さくなり小屋組で鉛直変形しやすいことが示唆された。

第 5 章「柱組物構面の耐震性能」では、大径の柱、腰貫、地貫、台輪、組物から構成される軸組を基本形として壁剛性を変えた 3 種類の構面（壁がない構面、土壁がある構面、土壁よりもせん断剛性の高い壁がある構面）を対象として振動台実験を実施し、要素の組み合わせ方を変えた場合の地震時挙動の違いについて定量的に把握した。壁のせん断剛性の低い構面（壁がない構面と土壁がある構面）では、架構全体の挙動はせん断変形が卓越した。一方、土壁よりもせん断剛性の高い壁を想定した構面では、架構全体の挙動は回転変形が卓越し、柱脚の浮き上がりが見られた（図 2）。次に、それぞれの構面について各耐震要素をバネにした 3 次元立体モデルを作成し動的解析を行った。その結果、壁のせん断剛性が低くせん断変形が卓越した構面では、各耐震要素の足し合わせで構面全体の耐震性能が算出できることが分かった。せん断剛性の高く構面全体で回転変形が卓越した構面では、柱脚の浮き上がりのバネを考慮する必要があることが確認された。また、回転変形が卓越する場合、せん断変形が卓越する場合と違い柱腰貫接合部でのめり込み量が小さいことが確認された。以上のことから、同じ耐震要素の組み合わせでも、組み合わせ方によっては、全体の变形としてせん断変形が卓越する場合と回転変形が卓越する場合があります、各耐震要素の挙動も変化することが明らかになった。

第 6 章「建物全体のモデル化の検討」では、第 2 章から第 5 章で得た知見をもとに、五重塔を例にして建物全体のモデル化の方法と各構造要素のモデル化の方法について検討した。建物モデルは振動台実験が実施されている飛鳥様式五重塔の縮尺 1/5 にした模型とした。耐震要素として、柱の傾斜復元力による回転バネ、柱貫接合部の回転バネ、壁のせん断バ

ネ、組物のせん断バネ、組物の圧縮引張バネ、小屋組の横架材間の圧縮引張バネを考慮し建物全体のモデルを構築した。また例とした五重塔以外の建物においてモデル化を考える際の留意点を考察しまとめた。

第 7 章「建物全体の地震時挙動」では、第 6 章で示した建物モデルを用いて、地震応答解析を行った。建物を小屋組層、組物層、壁構面の 3 つの層に分け、それぞれの剛性の組み合わせを変えたパラメトリック解析を行い、耐震要素の組み合わせの違いによる建物の地震時挙動の変化について解析的に検証した。壁の剛性の変化が建物全体の挙動に大きく影響することが分かった。壁の剛性を高くした場合は、初層のせん断変形が小さくなり、二層から五層の各層でのロッキングが大きくなることが認められた。同じ耐震要素でも剛性の組み合わせ方によって、建物全体の地震時の挙動が変化し、変形の性状が変わることが確認された。

第 8 章では、「結論」として、五重塔を例に伝統木造建築の構造要素と建物全体のモデル化の検討、組物と小屋組の構造要素の性能や、いくつかの耐震要素を組み合わせた柱組物構面や建物全体の地震時挙動について実験、解析を通して得た結果を総括した。またモデル化の改良点など本研究で得られた今後の課題を示した。

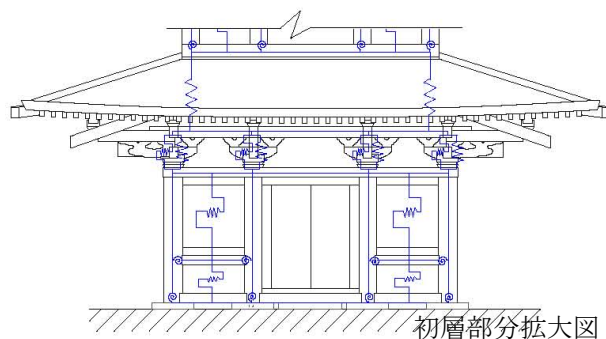


図 1 組物と小屋組の鉛直性能を含んだモデル化の方法

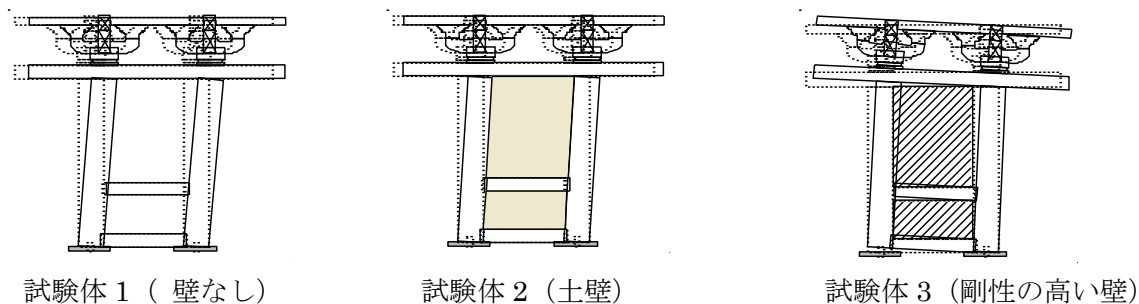


図 2 柱組物構面の変形状