

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14602

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05537

研究課題名(和文) 伝統技術に基づく木造社寺建築物の耐震性能評価法と耐震補強法の確立

研究課題名(英文) Establishment of seismic performance evaluation method and earthquake resistance reinforcement method for wooden shrines and temples based on traditional technology

研究代表者

瀧野 敦夫 (Takino, Atsuo)

奈良女子大学・生活環境科学系・講師

研究者番号：10403148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,800,000円

研究成果の概要(和文)：奈良をはじめ日本に数多く現存する伝統的木造建築物である社寺建築物は、国宝や重要文化財の指定を受けるものが多く、観光資源としても非常に価値が高い。近年はこのような建物の耐震改修工事が頻繁に行われつつあるが、社寺建築物に特化した耐震性能評価法や耐震補強法が未確立であるため、耐震性能を過小評価することが多く、また鉄骨などによる安易な補強が目立つ状況である。本研究では、大工棟梁による伝統技術も含めた建物の文化的価値向上を目指し、既存建物の構造調査や、社寺建築物仕様の実験、解析を行い、既存社寺建築物の耐震性能評価を行うとともに、金物を極力用いない伝統仕様の耐震補強法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Many temples and shrines, which are traditional wooden buildings existing in Nara and other places in Japan, are designated as national treasures or important cultural properties, and are extremely valuable as tourism resources. In recent years, seismic retrofitting work of such buildings is being carried out frequently, but since seismic performance evaluation method and seismic reinforcement method specialized for temples and shrines are not yet established, seismic performance is often underestimated and seismic reinforcement using steel frames is often done. In this research, seismic performance evaluation of existing shrines and temples was carried out by conducting structural investigations of existing buildings and experiments and analyses of shrines and temples. In addition, we proposed a traditional earthquake resistant reinforcement method which does not use joint metals as much as possible.

研究分野：木質構造

キーワード：社寺建築物 伝統構法 貫 板壁 土壁 柱の傾斜復元力特性 三重塔 小屋組

1. 研究開始当初の背景

奈良をはじめ日本に数多く現存する伝統的木造建築物である社寺建築物は国宝や重要文化財の指定を受けるものが多く、観光資源としても非常に価値が高い。近年はこのような建物の耐震改修工事が頻繁に行われつつあるが、社寺建築物に特化した耐震性能評価法や耐震補強法が未確立であるため、耐震性能を過小評価することが多い。この原因として、現行規準において耐震設計に考慮できる耐力要素が少ないことが挙げられる。伝統木造構法の耐震構造に関する研究開発は近年盛んに行われるようになってきたが、住宅を対象とした研究事例が非常に多いのが実状である。住宅と社寺建築物では断面の大きさや接合ディテールの仕様などが異なるため、必ずしも住宅仕様と同じ復元力特性になるとは限らない。実際に、研究代表者らが過去に実施した寺院建築を対象にした軸組構面の実験においても、想像以上の耐力と変形性能を有していることがわかり、社寺建築物に用いられる耐震要素の復元力特性の評価には未だ課題が多く残されていると言える。

また、近年では文化財の改修工事に合わせて耐震補強も実施するケースが多いが、鉄骨や金物を用いた補強事例もよく見られる。鉄骨や実験などによって既に性能評価を受けた金物工法などを用いることは耐震設計上有利であり、設計者にとっては合理的な選択肢でもあるが、木造文化財としての価値を考えれば、耐震補強構法も伝統技術に基づき確立し、建物だけでなく大工棟梁の伝統技術も文化財としての価値の一つとして見いだすことが重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、伝統木造構法の中でも社寺建築物を対象として、社寺建築物特有の耐震要素の復元力特性を適切に評価するとともに、社寺建築物に相応しい伝統技術に基づく耐震補強法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 建物調査

現存する建物の構造調査を実施し、耐震要素の調査や建物全体の構造特性を把握する。調査は外観調査による仕様の調査や、可能な建物では振動計測も含めた詳細な構造調査を実施する。

(2) 各耐震要素の構造実験・解析的検討

貫や板壁、土壁、柱の傾斜復元力特性等の耐震要素の復元力特性を明らかにするため、実験や解析による検証を行う。試験体に用いる材料は通常の住宅仕様の実験で用いる断面寸法 105×105mm の材料ではなく、今回の研究では断面寸法 180×180mm を標準寸法とし、樹種にはヒノキ材を用いる。

(3) 耐震補強法の提案と検証実験

伝統技術に基づく耐震補強法を考え、実験によりその性能を検証する。

4. 研究成果

(1) 新築木造三重塔の常時微動計測

伝統構法による木造三重塔の新築工事を調査する機会を得たため、図1に示す各建設過程において振動計測を行い、固有値の変化を計測するとともに、固有値解析およびフレーム解析による地震応答解析を実施した。計測値は固有値解析から得られた結果と概ね対応する結果が得られたが、瓦の重量が付加された最後の計測結果は解析結果よりも大きな値を示した。これは、瓦重量が増えたことで、勘合接合である各接合部が強く締め付けられたと考えられ、このことが原因で固有値が高くなったと考えられる。地震応答解析結果からは、耐震補強材を付け加えることで層間変形角を抑えることができるが、柱脚のロッキングや滑動が生じる可能性が示された。

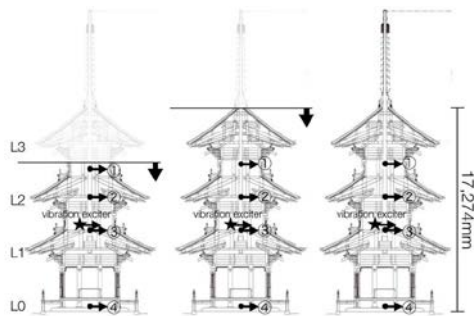


図1 計測時の三重塔の状態

(2) 寺院建築の小屋組の地震時挙動

住宅に比べて非常に大きい小屋組を有する寺院建築では、耐震設計時に考慮する質点系の仮定が成立しない可能性が考えられる。そこで、改修工事中の既存寺院の小屋組において、常時微動計測を行うとともに、フレーム解析による地震応答解析を実施した。計測結果および解析結果から、寺院建築の小屋組は図2に示すような高さ方向にも幅方向にも波打つような固有モードが存在することを明らかにした。また、小屋組を構成する束と貫の接合部でのめり込みによる非線形特性の効果によって、地震時に作用する慣性力が質点系モデルで解析した場合と比べて小さくなることを明らかにした。

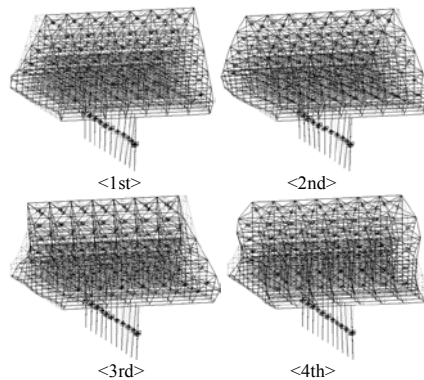


図2 小屋組の固有モード図

(3) 2016年熊本地震で被災した神社の調査
 2016年熊本地震で被災した神社(図3)の構造調査を実施するとともに、フレーム解析による地震応答解析を行い、被害原因の分析を行った。解析結果から、柱脚のロッキングと滑動が生じたことにより土台が礎石から滑り落ちたことが一番の原因であることを明らかにした。



図3 被災した神社

(4) 貫接合部の構造性能評価

社寺建築物に用いられる貫接合部について、十字型試験体を用いた曲げせん断実験を行い(図4)、接合部の構造性能評価を行った。試験体は一般的な楔を用いた接合部を標準試験体として、柱内部で継手を有する場合や楔のない場合などいくつかのパラメータを設定した。めり込みに基づく既往の理論式と比べて、楔を有する場合や継手を有する場合に接合部耐力が低下することを明らかにした(図5)。

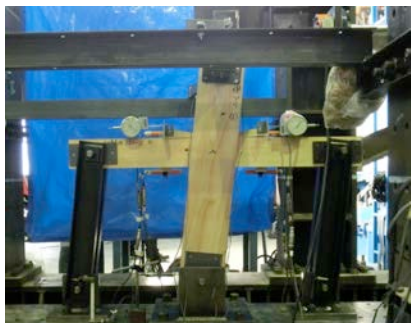


図4 貫接合部試験体の終局時の様子

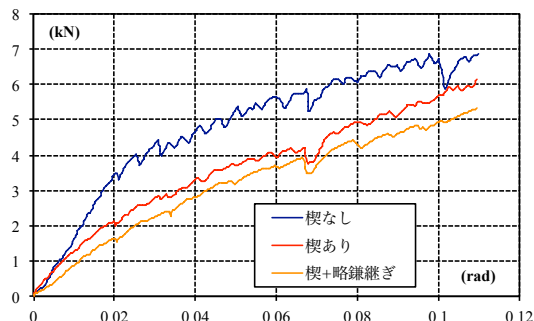


図5 荷重-変形角関係の正側の包絡線の比較(貫十字型試験体)

(5) 板壁構面の構造性能評価

貫接合部で構成された軸組に板壁を有する場合の復元力特性を明らかにするため、井

形状の試験体を製作し、板壁の有無、配置方向などをパラメータに曲げせん断実験を行い、板壁構面の構造性能評価を行った。板壁を横方向に配置した場合には、板壁が柱に直接めり込むため貫接合部には大きな影響を及ぼさないが、柱脚が礎石建ち仕様の場合には柱の曲がりや柱脚の滑動が生じる可能性が示された。一方で、板壁を縦方向に配置した場合には、板壁が貫にめり込むため、貫の曲げ変形が生じること(図6)や貫接合部に過大な応力が生じ、このことが原因で耐力や剛性も横方向に配置した場合に比べて低くなる傾向にあることを明らかにした。また、図7に示したように、貫接合部の形状の違いによって、板壁の配置パターンと耐力との関係に差があることがわかる。

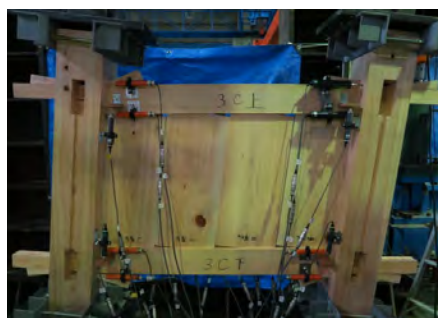


図6 縦に配置した板壁によって曲がった貫

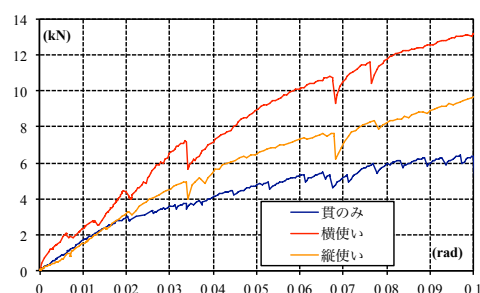
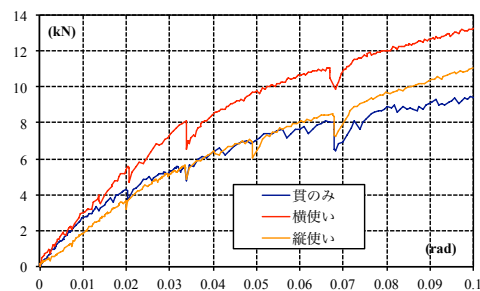


図7 荷重-変形角関係の正側の包絡線の比較(井形試験体/上:通し貫+楔あり/下:交差部材あり(柱断面内で貫の断面欠損あり)+楔あり)

(6) 土壁構面の構造性能評価

寺院建築における土壁構面の場合、通常の民家と異なり貫の断面が大きいために、土壁が貫によって分断される場合が多い。土壁構面の実験は非常に多くあるが、寺院建築を想定した実験事例はほとんどない。そこで、寺院建築を想定した柱-貫接合部からなる土壁

試験体の水平せん断加力試験を行った。図 8 に示すように、土壁部分に生じたひび割れの入り方が民家仕様の土壁と大きく異なり、貫ごとに分断された小壁のような破壊性状を示した。また、柱や貫の断面が大きいことから、土壁に対する軸組の耐力寄与率が大きいため、小壁の耐力が壁高さに比例しないことや土壁の耐力が壁長さに比例しないことを明らかにした。

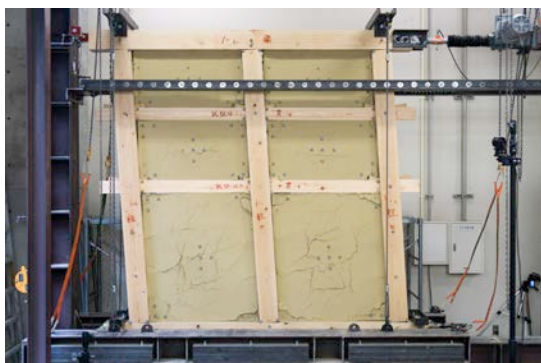


図 8 寺院建築の土壁構面の破壊性状

(7) 長押を用いた耐震補強方法の提案

意匠上の制約の少ない床下での補強法として、長押材を用いた耐震補強法をこれまでも提案している。さらに、高さに制約の多い床下では x、y の両方向に長押を配置する必要があるが、それら二方向の長押を接合することで効率よく長押材を配置することが可能となる。本研究では、二方向長押の接合部に金物を使わない接合方法を考え、その構造性能を検証した(図 9)。二方向長押接合部に金物を使わないと、一方向長押の場合と比べて剛性および耐力ともに低くなるが、粘り強い特性を示したため大変形時の耐力は設計用の耐力を十分に満足する結果を得ることができた(図 10)。

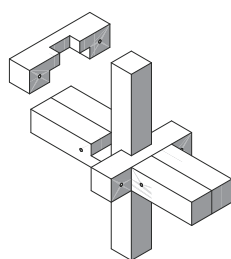


図 9 金物を使わない二方向長押補強接合部のイメージ図

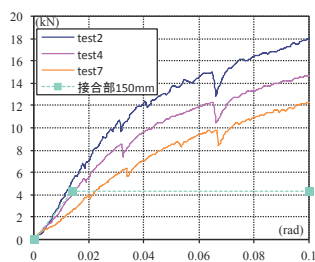


図 10 荷重-変形角関係の正側の包絡線の比較 (長押補強試験体 / test2 : □150×150 一

段長押+角柱 / test4 : □150×150 一段長押+丸柱 / test7 : □150×150 二方向長押(150mm せい) +角柱)

(8) 炭素繊維を用いた柱の根継ぎの補強法

文化財の修復工事では内観など意匠に関わる部分の変更を行うことが難しい。そのため、先述したような床下での長押補強構法が有効になるが、一方で古い木造建築の場合、柱脚が腐っているため根継ぎによって柱脚だけ新しい材に取り替えることがよく行われる。この際、根継ぎ部は曲げ性能が低いために限りなくピン接合に近い状態になるため、床下での長押補強の効果を得ることができなくなる。そこで、根継ぎ部を炭素繊維補強し、その効果を実験により検証した。

実際の建物での施工状況も考慮し、試験体は金輪継手を炭素繊維補強したものと、足固め貫用の貫穴を併用して炭素繊維補強した試験体を準備した。炭素繊維シートをエポキシ系含浸接着剤により複数層重ねることで、根継ぎのない一体的な材と同程度の曲げ性能を有することを確認した(図 11)。

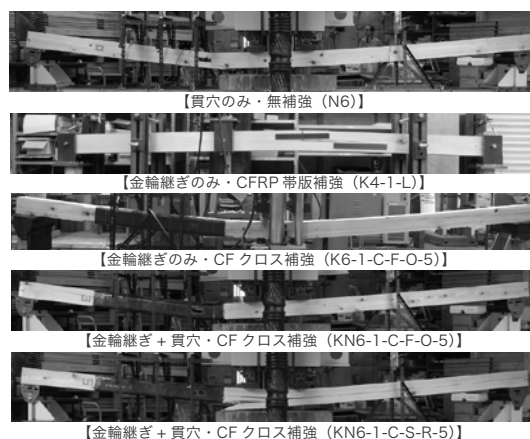


図 11 炭素繊維補強した試験体の曲げ破壊時の様子

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

① 瀧野敦夫、佐藤滯、向坊恭介、鈴木祥之：平成 28 年(2016 年)熊本地震で被災した八王神社の解析的研究、歴史都市防災論文集 Vol. 11, pp. 49-56, 2017. 7

② 瀧野敦夫、八神紗良、村上雅英：根継ぎ部に炭素繊維補強を施した柱の曲げ実験、日本建築学会技術報告集、Vol. 24, No. 56, pp. 141-146, 2018. 2

〔学会発表〕(計 17 件)

① 田中健太、瀧野敦夫、宮本裕司：社寺建築物における貫接合部を有する軸組構面の復元力特性推定に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp. 605-608, 2016. 6

② 池内砂織、大川碧、瀧野敦夫：長押補強接

合部の曲げ性能に関する実験的研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp. 609-612、2016. 6

③八神紗良、瀧野敦夫：根継ぎ部に炭素繊維補強を施した柱の曲げ実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp. 25-26、2016. 8

④田中健太、瀧野敦夫、宮本裕司：社寺建築物における貫接合部を有する軸組構面の復元力特性推定に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp. 269-270、2016. 8

⑤池内砂織、大川碧、瀧野敦夫：長押補強接合部の曲げ性能に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp. 267-268、2016. 8

⑥池内砂織、瀧野敦夫：寺院建築の小屋組の地震時挙動に関する解析的検討、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp. 369-372、2017. 6

⑦江南桃、瀧野敦夫、功刀厚志：社寺建築物における柱の傾斜復元力特性の解析的検証、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp. 373-376、2017. 6

⑧佐藤滯、池内砂織、瀧野敦夫：平成 28 年（2016 年）熊本地震で被災した神社の被害状況に関する解析的研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp. 381-384、2017. 6

⑨井上祥子、瀧野敦夫、村本真：社寺建築物で用いられる軸組に土壁を有する架構の繰り返し載荷実験とその解析、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp. 385-388、2017. 6

⑩木田綾女、下川千晴、瀧野敦夫他：木造三重塔の微振動計測に基づく振動特性の検証、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp. 401-404、2017. 6

⑪池内砂織、瀧野敦夫：寺院建築の小屋組の地震時挙動に関する解析的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp. 581-582、2017. 8

⑫江南桃、瀧野敦夫、功刀厚志社寺建築物における柱の傾斜復元力特性の解析的検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp. 547-548、2017. 8

⑬佐藤滯、池内砂織、瀧野敦夫、向坊恭介、鈴木祥之：平成 28 年（2016 年）熊本地震で被災した神社の被害状況に関する解析的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp. 583-584、2017. 8

⑭井上祥子、瀧野敦夫、村本真：社寺建築で用いられる軸組に土壁を有する架構の繰り返し載荷実験とその解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp. 281-282、2017. 8

⑮木田綾女、下川千晴、瀧野敦夫他木造三重塔の微振動計測に基づく振動特性の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 133-134、2017. 8

⑯Atsuo Takino, Ayame Kida, Kyosuke Mukaibo: Analytical study on the seismic performance of new-built wooden three-stories pagoda based on the field survey, Proc. of the fifteenth East

Asia-Pacific conference on structural engineering & construction (EASEC-15), pp. 1192-1197, 2017. 10

⑰Atsuo Takino, Saori Ikeuchi: Analytical and experimental study on the seismic performance of roof structure of Japanese traditional temples, World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2018, 2018. 8 (予定)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀧野敦夫 (TAKINO Atsuo)

奈良女子大学・研究院生活環境科学系・講師

研究者番号：10403148