

伝統木造建築物の全体架構モデルに関する研究

Numerical Study on the Whole Structural Model of Traditional Wooden Structure

吉富信太¹・尾崎訓応²・向坊恭介³

Shinta Yoshitomi, Norio Osaki and Kyosuke Mukaibo

¹立命館大学准教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Engineering

²元立命館大学大学院修士課程学生 理工学研究科環境都市専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

³立命館大学助教 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Engineering

In this paper, some static and dynamic response analyses are performed using detailed 3D structural model of traditional wooden structure. Though several models of joints of wooden members have been proposed, characteristics of whole structural model of traditional wooden structure have not been examined sufficiently. Therefore, a model of Amida-do at Higashi Honganji is used as an example of traditional wooden structure with large roof and some response analysis is demonstrated. In the previous investigation on the earthquake-resistant performance of Amida-do, buckling of a column have been reported. A cause of this phenomenon is examined by using of detailed 3D model.

Keywords : *traditional wooden structure, buckling of column, whole structural model*

1. 序

近年発生が懸念される巨大地震に対して、歴史的価値を持つ伝統木造建築の耐震化を行うことは重要な課題である。しかしながら、伝統木造建築の構造は機構が複雑であるため、現状では木造建築の構造特性が十分に解明されているとは言えない。あらゆる建物に対して調査や実験を行うのは現実的でないため、解析モデルを構築して計算機上で検討することが一般的であり、精度の良い解析モデルの確立が望まれる。

木造建築物のモデル化に関して、建物の部分の詳細なモデル化の研究は盛んに行われている。全体の挙動を検討する際は、部分の詳細モデルを組み合わせて建物全体をモデル化している(例えば^{1,2})。米田・小浜¹)は、実在の伝統木造建築を対象として、各耐力要素をモデル化し固有値解析を行い、解析結果と実測した固有周期の比較している。そこでは、実調査と解析結果で差があるもののモード間の比は良く対応することを確認している。伝統木造建築物の全体架構モデルの構造解析の適用として、国宝唐招提寺金堂の修復工事³)がある。しかしながら、適用例はまだ少なく建物全体のモデル化の検討は現状では十分ではない。

さらに、屋根は軸組に比べて梁、束、貫など多くの部材が複雑に入り組んだ剛性の高い構造体であり、屋根架構に着目した研究もなされているが(例えば⁴⁻⁶)、従来の研究では一体化した1質点系モデルとして扱われることが多い。また、柱に作用する小屋組等の屋根荷重を柱の支配屋根面積の割合で単純に集計することが多い。しかしながら、伝統木造建築の複雑な小屋組等の屋根架構の地震時挙動や屋根の荷重伝達に関する研究は少なく、屋根構造の力学的挙動が明らかにされているとは言い難い。

本研究の目的は、大規模な屋根を有する伝統木造建築について、全体架構モデルを構築して、静的鉛直荷重の伝達特性や地震時の屋根挙動について検討することにある。本研究では、伝統木造建築物の中でも大

きな屋根を有する東本願寺阿弥陀堂を対象建物とする。また、そこで耐震調査が行われた際に観察された柱座屈⁷⁾について、実状況をモデルに取り入れることで、荷重伝達経路の検討を行う。さらに、地震時の建物全体の変形挙動についての検討を行う。

2. 全体架構モデルについて

構造解析ソフト MIDAS Gen を使用し、東本願寺阿弥陀堂の全体架構をモデル化した図1の3次元立体モデルを作成する。モデル化方針について以下に示す。

- 1) 天井, 床, 壁, 屋根板等の板要素はモデル化しない。
- 2) 柱脚は, 全てピン支持とする。
- 3) 接合部は半剛接またはピン接合とする。半剛接では, 部材端部の曲げ剛性を50%に低減する。
- 4) 等方性材料を仮定し, 木材の弾性定数は, 10.5kN/mm^2 , 比重は 4.9kN/m^3 とした。

木造建物の応答の定量的な評価には, 材料の異方性, 接合部の非線形特性, 壁のモデル化, 傾斜復元力の考慮が必要である。本研究では, 特に全体架構モデルの屋根架構に着目して, 定性的な検討を目的としており, これらの項目については考慮していない。従って, 本構造の主たる抵抗要素は貫や仕口の回転抵抗のみである。なお, 半剛接を剛接としても解析結果の定性的な傾向は変わらないことを確認している。

応答解析は鉛直荷重に対する静的解析により評価する。静的解析については, 屋根荷重がどのように伝達するののかについて, 桔木の影響, 支点反力, 柱への応力分布から明らかにすることを目的とする。屋根面単位荷重は, 既往の調査結果の値を用いた。単位荷重の値は図2に記す。屋根面は, 瓦, 葺土, 棧木, 土居葺, 野地小舞, 野垂木を含んでいる。軒天井は, 垂木, 力垂木, 野地板, その他を含めた数値である。

動的解析については, 地震時の建物全体の挙動を明らかにすることを目的とする。特に, 小屋組, 桔木の挙動に注目して考察を行う。時刻歴応答解析には El Centro NS 1940 原波および JMA 神戸 NS 1995 を用いる。

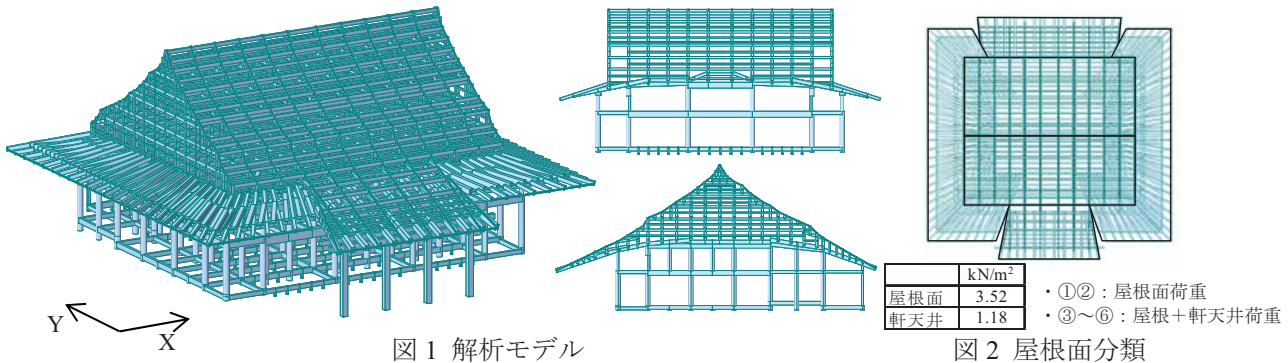


図1 解析モデル

図2 屋根面分類

3. 静的鉛直荷重に対する挙動

静的な屋根荷重に対する鉛直方向の支点反力を図3に示す。網がけの外周柱に力が流れていることが分かる。これは, 桔木先端に軒荷重が作用し, 桔木の建物側で上に跳ね上げる反力が生じることで, 内側の柱の軸力が軽減され, 逆に支点となる外周柱に軸力が集中することによる(図4)。一般的なラーメン構造では柱の支配面積で負担荷重を積算する簡易評価法が用いられるが, 伝統木造では適切でないことがわかる。

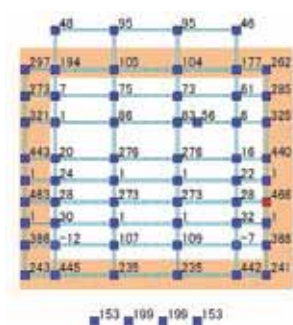


図3 反力(kN)

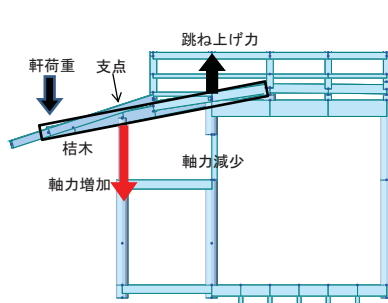


図4 桔木のメカニズム

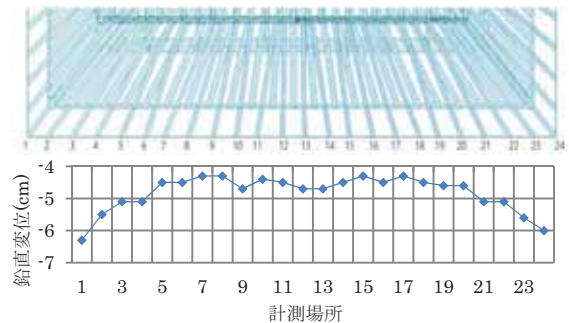


図5 軒先端鉛直方向変位

図 5 に、軒先端位置の鉛直変位を示す。最小値は 4.3cm、最大値は 6.3cm であり、四隅の鉛直変位が大きいことが分かる。これは、中央部は部材が短く剛で、端部は部材が長く柔になるためだと考えられる。

4. 柱座屈発生メカニズムに関する検討

東本願寺阿弥陀堂において行われた耐震調査⁷⁾において、阿弥陀堂の柱列の中に、内倒れの傾斜および曲げによる亀裂が確認された柱がある(図 6)。柱座屈の検討では、柱の断面欠損による偏心曲げの影響、力垂木・桔木の接触による影響、過去の地震により生じた水平力による曲げが原因となったことが予想されている。そこで、力垂木・桔木の接触による影響について分析する。

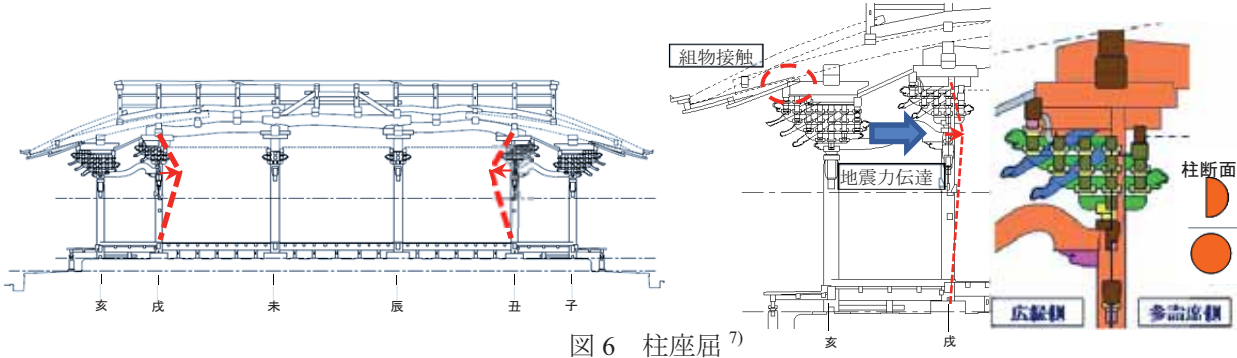


図 6 柱座屈⁷⁾

(1) 桔木と組物の接触が及ぼす影響

図 1 の立体モデルにおいて、図 6 の組物と桔木の接触箇所を再現したモデルの解析を行う。比較のため、組物と桔木の接触のないモデルの解析も行う。桔木と組物の接触の有無による影響のみに着目して、戌通りの非接触組物は柱の断面欠損を考慮して組物は無視し、亥通りの組物はトラス材とし、非接触時は 1 本、接触時は 3 本のトラス材でモデル化した(図 7,8)。

図 7, 8 に組物の接触のない場合とある場合の変位と組合せ応力度を示す。接触時の切欠き柱の水平変位が、接触なしの場合に比べ 0.7cm 増(図 8(a))となった。柱切欠き部の応力も増加した(図 8(b))。桔木と組物の接触により水平荷重伝達が生じ、内倒れが生じ、半円状に切り欠いた柱の応力が増加することが示された。

図 3 の反力より、組物と桔木の接触の生じる外周部柱に大きな軸力が生じるため、より水平力の伝達が助長される。また、図 5 に示すように、長期荷重により屋根の鉛直変位が生じるため、組物と桔木が接触したことも予想される。その一方で、長期の屋根荷重だけでは内倒れ量や、柱応力の増加はそれほど大きくないため、地震時の振動の影響により大きな内倒れが生じたと考えられるため、次節では地震時の屋根挙動について検討する。

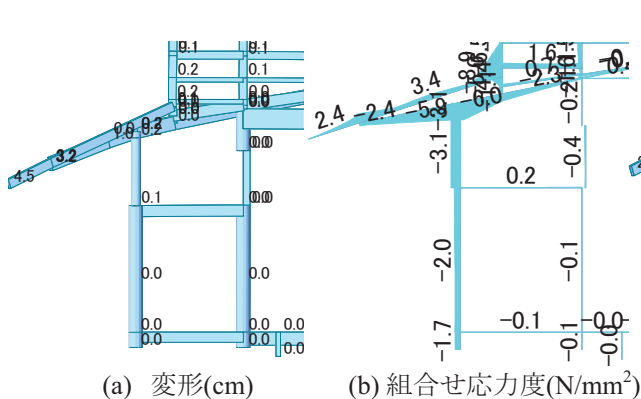


図 7 組物接触なし

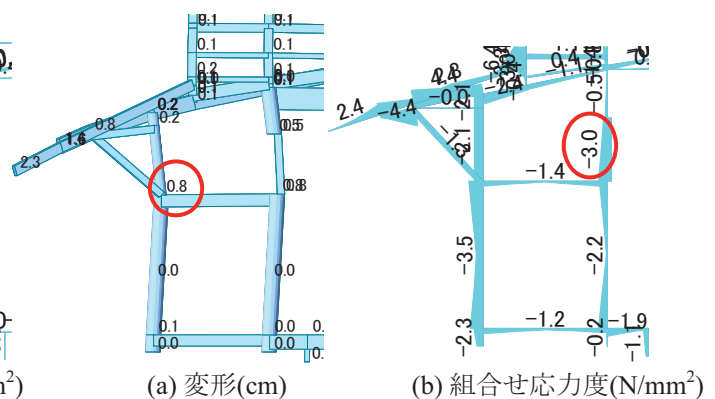


図 8 組物接触あり

(2) 地震時挙動

地震時の屋根の挙動について検討するために、図 9 に示すように桔木先端部及び軒先端部に 1 から 8 の番号をつけ、その位置における地震時の応答を示す。

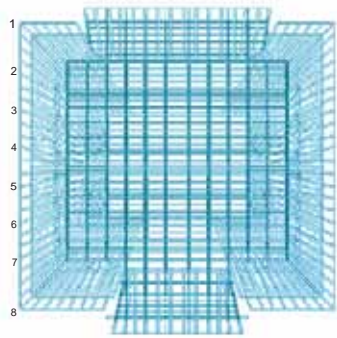


図9 軒・桔木番号

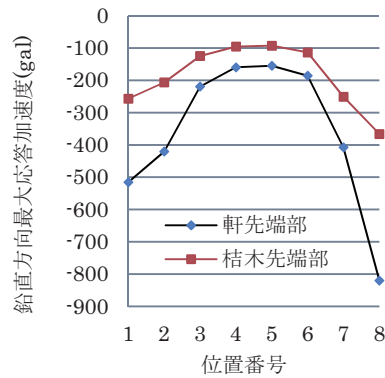


図10 最大加速度(gal)

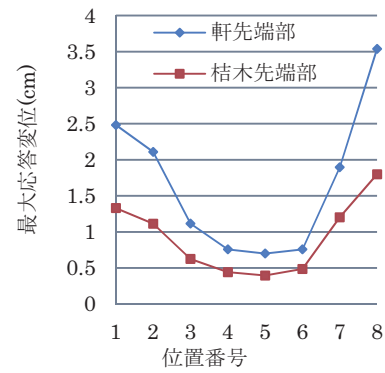


図11 最大変位(cm)

水平地震動 (EL Centro) を X 軸方向に入力したときの、桔木・軒先端部の最大の鉛直方向応答加速度を図 10 に、最大の鉛直方向応答変位を図 11 に示す。水平最大地動加速度 349.9gal に対して桔木先端部の上下方向に最大で 800gal 程度の応答加速度が生じることが分かった。特に 1, 8 番で影響が大きく、これが前節の柱座屈に影響すると考えられる。地震時の内倒れ (鉛直荷重時の内倒れを除く) は、組物と桔木の接触なしの時に 0.3cm に対して接触を考慮すると 0.9cm に増大した。また、JMA 神戸の地動加速度に対しても、同様の傾向が得られた。従って、前節の鉛直荷重に加えて、水平方向の地震動によって柱の内倒れが助長されたと考えられる。さらに、鉛直地震動の入力によってさらに内倒れが引き起こされることも考えられる。

また、地震荷重だけでなく風荷重に対しても同様な現象が生じることが予測される。本論では木造全体架構モデルの定性的な性質把握を目的として 2 節で述べた簡便な設定を用いた。現状の損傷の原因となった地震や風荷重のレベルを定量的に評価するためには、より実情に合わせた精緻なモデルにすることが今後の課題である。

6. 結論

- (1) 東本願寺阿弥陀堂を対象とした伝統木造建築物の全体架構モデルを作成し、応答特性について検討した。
- (2) 静的屋根荷重に対する解析結果より、この原理により支点となる外周部の柱に屋根荷重が集中し、柱支配面積による荷重集計とは差が大きいことを示した。また、実際に観察された柱座屈の原因として、桔木と組物の接触による水平荷重伝達の可能性が示唆された。
- (3) 地震応答解析結果より、水平地震入力により、屋根の上下動が生じることが示され、これにより柱座屈が助長された可能性が示唆された。

謝辞：日建設計より解析モデル構築に必要な資料を提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)米田隼人, 小浜芳朗: 伝統木造建築システムの構造モデル化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.443-444, 2005.9
- 2)中村秋,大和田義正: 伝統的木造建築物の耐震性能に関する解析的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.443-444, 2005.9
- 3)奈良県教育委員会事務局 文化財保存事務所: 国宝唐招提寺金堂修理工事報告書[色彩調査・構造補強調査編], 奈良県教育委員会, 2009.12
- 4)松田昌洋, 花里利一, 腰原幹雄, 坂本功: 水平力伝達機構を考慮した伝統的木造住宅の構造解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.617-618, 2006.9
- 5)堀田真宏, 西川英佑, 西澤英和: 伝統的社寺建築の小屋組の構造特性に関する研究～大分県四日市別院本堂を事例に～, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 339-340, 2009.7
- 6)片岡靖夫, 小川晃司, 大丸隆: 桔木の構造的考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.255-256, 2002.8
- 7)東本願寺阿弥陀堂耐震調査研究報告書 (2008~2011年), 東本願寺耐震調査等研究委員会, 2011.8