伝統木造軸組の実大実験による柱—横架材接合部の曲げモーメント抵抗に関する研究

A STUDY ON BENDING MOMENT RESISTANCE AT COLUMN AND BEAM JOINTS OF TRADITIONAL WOODEN FRAME BY FULL-SCALE TESTS

前野 将輝*, 鈴木 祥之**

Masaki MAENO and Yoshiyuki SUZUKI

To investigate the bending moment resistance at column and beam joints of traditional wooden frames, shaking table tests and static loading tests were carried out for full-scale models of traditional wooden frame. The behaviors of the bending moments at several joints during earthquakes were investigated quantitatively and qualitatively. The relationships between deformation angle and bending moment resistance of beam were also examined by noting specifically the deformation angle occurring damages of joints. From these tests, it is found that the vertical force acting on the column has little influence on the bending moment resistances of beams. Although beams were broken at the part of tenon, the beam can keep the bending moment resistance unless the part of tenon comes off from the mortise. These results are available for the seismic design and retrofit of traditional wooden structures.

Keywords : Japanese traditional wooden frame, Full-scale test, Column and beam joints, Bending moment resistance, Double notched joint, Tenon joint

伝統木造軸組, 実大実験, 柱—横架材接合部, 曲げモーメント抵抗, 相欠き接合, ほぞ接合

1. 序

社寺仏閣に代表される伝統的な木造軸組建築物は、大径柱による柱傾斜復元力特性、柱上部の屋根荷重を支える組物、柱—横架材接合部の曲げモーメント抵抗、柱脚のロッキング効果など独特の構造要素を有する。それぞれの構造要素が相互に作用することで、架構全体の復元力に寄与しているものと考えられるが、その木組みの複雑さや木材の不均質性、不確定性ゆえに、これらの構造的特徴を力学的に解明することが困難であり、力学モデルや構造解析法が十分構築されていない。その一方で、文化財としての木造建築物の保存や修復技術の開発が要望されており、これらの構造的特徴の挙動を定量的かつ定性的に把握する必要性が指摘される。

各構造要素については、様々な要素実験が行われてきた¹⁻⁸⁾。柱傾斜復元力については、実験より柱傾斜復元力の定式化を行った坂による社寺骨組の力学的研究が挙げられる¹⁾。また最近では、河合が円柱、角柱のモデル化により柱傾斜復元力の算定を行い、模型を用いた実験から、坂の研究を参考に定式化を行っている²⁾。組物については、藤田らがマルチリニア型の履歴モデルを提案し、剛性を木材のめり込み理論から算出している³⁾。また、楠らが唐招提寺金堂で用いられる斗組の実大試験体を用いて静的水平力載荷実験を行い、斗組の耐力を大斗底面の力の釣合から評価する計算方法を提案している⁴⁾。柱—横架材接合部の曲げモーメント抵抗については、坂が貫の耐力についての研究を行い、貫の耐力は柱が貫に比べて著しく太い場合には貫位置に無関係であることなどを明

らかにしている⁵⁾。また、後藤が貫通仕口による木質ラーメン構造の研究において、貫通構造の剛性は小さく、実際には太い柱を必要とすることや貫通材のめり込み剛性が高ければ柱をやや細くできることを明らかにしている⁶⁾。その他、三宅らが柱—横架材接合部の繰返し曲げ実験を行い、実験曲線から履歴モデルを提案している⁷⁾。柱脚のロッキングについては、上谷らが柱脚部と礎石間の接触に関する実験を行っている⁸⁾。ここでは、仮想的な剛体としてモデル化された柱脚の幾何学的関係式及び釣合式から、集中反力の作用位置を誘導し、実験から鉛直方向反力の重心位置を柱脚の回転角で表現する実験式を求めている。

しかしながら、これらの既往の研究は要素実験が中心で、個別にモデル化することを主目的としているが、架構全体の中で構造要素を扱っていないため、各構造要素が組み合わされた架構全体の挙動は不明であり、また各構造要素が軸組全体にどの程度寄与するのかについても明らかではない。軸組全体の挙動を予測するためには、構造要素をすべて盛り込んだ実大試験体による実験が必要であり、構造要素をすべて盛り込むことで、これらの問題点は解決されと考えられる。

このような状況から、大径柱や組物、3種類の柱—横架材接合部、柱脚—礎石の接触など、伝統的な木造軸組建築物が有する構造的特徴を盛り込んだ実大試験体を製作し、振動台実験及び静的水平力載荷実験を実施した。既報⁹⁾において、伝統木造軸組の振動特性、復元力特性について明らかにし、柱傾斜復元力特性と柱—

* 京都大学大学院工学研究科 博士後期課程・修士(工学)

** 京都大学防災研究所 教授・工博

Graduate School of Engineering, Kyoto University, M. Eng.

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.

図1 試験体図 (第2期実験試験体、第3期実験試験体A、C、D)

図2 試験体図
(第3期実験試験体B)

図3 横架材の仕口形状

表1 実験日程と実験目的

実験期間	実験日程	実験主目的	ひずみ計測 (柱-貫接合部)
第1期	1999年10月25日 ～11月26日	損傷発生する変形レベルの把握 復元力特性の抽出	—
第2期	2000年9月22日 ～11月16日	試験体が転倒・破壊する危険のある 大変形レベルでの試験体の挙動抽出	○
第3期	2001年5月22日 ～7月12日	横架材の効果・柱傾斜復元力特性の把握	○

表2 試験体の仕様

実験名 試験体名	試験体軸組部分の横架材構成	足固め 火打
第2期実験 試験体A	頭貫 内法貫 足固め	○
試験体B	頭貫 内法貫 足固め	○
試験体C	頭貫 内法貫 足固め	○
試験体D	頭貫 内法貫 足固め	○

図4 ひずみ計測とモーメントの補正

図5 変位計測と接合部回転角の補正

横架材接合部の曲げモーメント抵抗の力学的説明の重要性を示した。そこで本研究では、実大試験体で盛り込んだ構造要素の中でも柱-横架材接合部に着目し、前述の実大実験の中で得られた実験データを基に、柱-横架材接合部の曲げモーメント抵抗に関する分析を行う。まず2章では、既報⁹⁾に示した本実験の概要を改めて説明する。3章では、振動実験結果から、各柱-横架材接合部における曲げモーメント抵抗について明らかにする。4章では、足固め火打や内法貫を除いた場合について、各柱-横架材接合部の曲げモーメント抵抗の変化を明らかにする。5章では、既報⁹⁾で示した架構全体の復元力を基に、本論3章、4章で示す各横架材の曲げモーメント抵抗の負担割合を定量的に明らかにする。6章では、柱-横架材接合部の曲げモーメント抵抗について、振動実験と静的実験結果の比較を行う。7章では、鉛直荷重の増加による柱-横架材接合部の曲げモーメント抵抗の変化について検証する。8章では、既報⁹⁾で報告した試験体の破壊性状について、図1に示す損傷発生箇所(柱-内法貫、柱-足固め各接合部)における曲げモーメント抵抗の変化について明らかにし、損傷発生状況を検証する。

2. 実験概要

表1に各実験の実験日程と実験目的を示す。本実験は京都大学防災研究所強震応答実験室において、1999年、2000年、2001年の3期に渡って実施した⁹⁾。本研究では、それぞれ第1期、第2期、第3期実験と称する。なお本研究では、柱-横架材接合部でひずみ計測を行った第2期、第3期実験について報告する。

試験体⁹⁾は、第2期実験では試験体軸組部分が柱と頭貫、内法貫、足固めで構成された試験体のみを使用した。第3期実験では、試験体軸組部分が柱と頭貫、内法貫、足固めで構成された試験体Aを基本として、火打の効果や横架材の効果を確認するために、試験体Aから足固め火打を除いた試験体B、試験体Aから内法貫を除いた試験体C、試験体Aから内法貫、長手方向足固め、足固め火打を除いた試験体Dを用いて実験を行った。図1及び図2に本実験で使った試験体図を、表2に各試験体の仕様をそれぞれ示す。また、図3に本試験体で使った横架材の仕口形状を示す。

なお、仕口部分で既報⁹⁾に記したような折損や損傷が生じない限り、試験体の横架材は実験毎に新調はせず継続的に使用したが、第3期実験の振動実験では第1期及び第2期実験の結果を踏まえて、一連の加振実験を経験したことによって柱-横架材接合部に損傷が発生しないと考えられる、1/40rad程度を最大目標層間変形角として、最大加速度振幅を徐々に上げつつ繰り返し実験を行った。その他、振動台実験及び静的水平力載荷実験の概要、試験体各部構造要素の詳細については、既報⁹⁾に示す通りである。

3. 柱-横架材接合部の曲げモーメント抵抗

本章では、柱-横架材接合部のひずみ計測を行った第2期及び第3期の振動実験結果から、柱-頭貫、内法貫、足固め各接合部のモーメント-回転角関係(以後M-θ関係とする)を明らかにする^{10, 11)}。なお、各接合部の曲げモーメントは、図4に示すように、横架材の両端において計測したひずみに各横架材の断面係数Zとヤ

ング係数 E を乗じて算出した曲げモーメントを、柱-横架材接合部の柱表面位置に直線補正した値とした。接合部回転角は、図5に示すように各接合部に設置した変位計を用いて幾何学的に算出した。また、曲げモーメント算出に使用したヤング係数は、材料実験によって計測された曲げヤング係数を使用し、頭貫 9.12kN/mm^2 、内法貫 10.52kN/mm^2 、足固め 10.71kN/mm^2 とした。なお、各接合部の曲げモーメント及び接合部回転角は、柱1本分に対する各接合部を対象とし、それぞれ算出した。

図6(a)～(c)に、試験体Aを使用した第3期実験で、最大加速度振幅を250Galに調整したEl Centro NS波(以後El Centro NS 250Galのように記す。)入力時における柱-頭貫、内法貫、足固め各接合部のM- θ 関係図と、一連のEl Centro NS波入力時における各接合部のM- θ 関係の包絡曲線をそれぞれ示す。また、第2期実験における一連のEl Centro NS波入力時の包絡曲線についても同時に示す。

3.1 柱-頭貫接合部

図6(a)より、柱-頭貫接合部のM- θ 関係は履歴ループを描いている。また、正加力側で負加力側よりも低い回転剛性を示し、内法貫、足固め各接合部と比較して明らかな非対称なループ形状を示している。これは、既報⁹⁾に示すように、頭貫上にダボ接合により組物を載せて固定したため、楔を使用して固定する内法貫に比べて組物による拘束が小さく、図7(a)に示すように、加振毎に組物が柱頭から相対的に浮き上がるように挙動することが目視観察で確認されている。それによって、頭貫では組物大斗尻の端部及び柱ほぞ穴でめり込みが生じるため、加振方向によって回転中心の移動が生じ、非対称なループ形状となると考えられる。このような傾向は、その他の柱-頭貫接合部でも同様に見られた。

また、第2期実験と第3期実験結果より、第2期の方が第3期と比べて若干小さい曲げモーメント抵抗を示したが、M- θ 関係に関する前述の傾向は第2期実験でも同様に見られた。よって両実験における頭貫の曲げモーメント抵抗性能は概ね一致していると考えられる。

3.2 柱-内法貫接合部

図6(b)より、柱-内法貫接合部のM- θ 関係は非対称な履歴ループを描いており、そのループ面積は小さい傾向を示した。ループ形状が非対称となったのは、内法貫接合部が相欠きであることから、図7(b)に示すように仕口部分の断面が母材に比べて小さく、柱軸線に対して左右非対称であるためと考えられる。また、内法貫はその他の横架材と比べて、接合部回転角が $1/40\text{rad}$ 程度においても高い回転剛性を保っている。これは、内法貫が相欠きによる接合方法で、直行する横架材と噛み合うことで十分な曲げモーメント抵抗を維持できることに加え、楔固定による拘束の効果も十分にあることを示している。このような傾向は、その他の柱-内法貫接合部でも同様に見られた。

また、第2期実験と第3期実験より、柱-内法貫接合部のM- θ 関係はほぼ同様の傾向を示し、両実験における内法貫の曲げモーメント抵抗性能は概ね一致していると考えられる。

3.3 柱-足固め接合部

図6(c)より、柱-足固め接合部のM- θ 関係は非対称な履歴ループを描いている。これは、足固めの仕口形状が通しほぞであ

(a) 頭貫接合部

(b) 内法貫接合部

(c) 柱-足固め接合部

図6 柱-各横架材接合部のM- θ 関係
(試験体A: El Centro NS波入力時: 長手方向)

り、図7(c)に示すように、柱軸線に対して左右非対称であるためと考えられる。また、その他の横架材と比べてスリップ型の履歴特性がより顕著に見られた。これは、足固め仕口が単純な通しほぞで

図7 柱-各横架材接合部の挙動と内法貫・足固めの仕口形状

図8 柱-各横架材接合部のM-θ関係の包絡曲線(第3期試験体A~C)(El Centro NS波入力時:長手方向)

接合しており、相欠き接合の横架材のように直交する横架材と噛み合っていないために加振毎に生じる、柱ほぞ穴から足固めほぞ仕口が徐々に抜ける現象が影響しているものと考えられる。実際、加振終了毎の目視観察で、足固めが柱ほぞ穴から徐々に抜ける状況が確認されている。このような傾向は、その他の柱-足固め接合部でも同様に見られた。

また、第2期実験と第3期実験結果より、第2期の方が第3期と比べて大きな耐力を示した。これは、足固めのような通しほぞ接合が、施工直後は高い曲げモーメント抵抗を示すが、経過年数や経験変形角により、その他の柱-横架材接合部と比べて柱ほぞ穴や仕口に残留するめり込み変形が大きく影響し、曲げモーメント抵抗性能が低下することを示唆している。

4. 足固め火打・内法貫の有無による柱-横架材接合部の曲げモーメント抵抗の変化

本実験では、火打材や横架材要素数を減らすことによる柱-横架材接合部の曲げモーメント抵抗の変化を検証するために、試験体Aから足固め火打を除いた試験体B、及び試験体Aから内法貫を除いた試験体Cを使用して振動実験を行った。本章では、試験体A~Cにおける各柱-横架材接合部のM-θ関係の変化について記す¹²⁾。図8(a)~(c)に、一連のEl Centro NS波入力時における柱-頭貫、内法貫、足固め各接合部のM-θ関係の包絡曲線をそれぞれ示す。

4.1 柱-頭貫接合部

図8(a)より、柱-頭貫接合部のM-θ関係は、試験体によって大きく回転剛性が低下することなく、包絡曲線もほぼ同様の傾向を示したことから、足固め火打や内法貫を除いた影響は比較的小さいと考えられる。

4.2 柱-内法貫接合部

図8(b)より、試験体Aに比べて足固め火打を除いた試験体Bの方が、耐力の低下がみられた。試験体Aでは、1/200rad程度の変形レベルまでは回転剛性が增大せず、履歴ループにスリップ特性の傾向が見られたが、試験体Bでは、1/100rad程度まで回転剛性が增大しない傾向を示した。足固め火打を除いた影響から、足固め高さレベルでの平面剛性の低下によって、内法貫の曲げモーメント抵抗性能が低下したことに加え、加振毎に楔が抜ける影響から、楔固定の効果が現れる接合部回転角が、試験体Aに比べて試験体Bの方が大きかったと考えられる。

4.3 柱-足固め接合部

図8(c)より、試験体Aに比べて足固め火打を除いた試験体Bや内法貫を除いた試験体Cの方が、耐力の低下がみられた。図6(c)に示すような、試験体Aでもみられた履歴ループのスリップ特性の傾向は、試験体Bや試験体Cでも顕著にみられた。前章でも示したように、足固めのような通しほぞ接合が、経過年数や経験変形角により、柱ほぞ穴や仕口に残留するめり込み変形がその他の柱-横架材接合部と比べて大きく影響し、また足固め火打や内法貫を除いた影響から架構全体の剛性低下に伴って、足固めの曲げモーメント抵抗性能が低下したものと考えられる。

5. 各横架材接合部の曲げモーメント抵抗負担割合

本研究では、前述の通り接合部単体の要素実験ではなく、3種の異なるディテールの横架材と柱を組み合わせた立体架構全体を対象とした実大実験を行った。本章では、実大振動実験結果から3章及び4章で明らかにした各横架材接合部の曲げモーメント抵抗が、既報⁹⁾で示した架構全体の復元力にどの程度寄与しているかについて定量的に明らかにする。

第2期実験及び試験体A~Cを利用した第3期実験で、一連のEl

図9 架構全体の復元力に対する
各横架材の曲げモーメント負担抵抗割合
(第2期試験体, El Centro NS波入力時:長手方向)

Centro NS波入力時において、架構全体の復元力が最大値を示したときを着目した。その時の各横架材接合部の曲げモーメントの値を架構全体の最大復元力で除し、縦軸にその値の変化を、横軸に試験体全体の層間変形角をそれぞれとって図9及び図10(a)～(c)に示す。また、図9及び図10(a)～(c)に示す各横架材の架構全体の復元力に対する負担割合について、全ての横架材の負担割合を加えて図11に示す。なお、架構全体の復元力は、既報⁹⁾に示すとおり、試験体の応答加速度に試験体上部の重量を乗じて算出し、各接合部の曲げモーメントを除して無次元化するために、柱高さを乗じた復元力モーメントとした。また、本研究では各横架材の曲げモーメント抵抗が、柱1本分を対象としているため、架構全体の復元力も柱本数で除して、柱1本分とした。層間変形角についても、既報⁹⁾に示すとおり、柱頭部と柱脚部の水平変位の差を柱高さで除して近似的に算出した。

5.1 柱－頭貫接合部

図9及び図10(a)～(c)より、第2期実験では、足固めの抵抗負担割合が大きいため頭貫の抵抗割合が小さくなっている。第3期実験の試験体A及びBでは、正加力側においては各変形レベルを通じて約12～15%程度とほぼ横ばいであったのに対し、負加力側においては変形レベルが大きくなるにつれて約17%から約22%と緩やかに抵抗割合が増している。また、正加力側において試験体Aでは層間変形レベル1/100rad程度、試験体Bでは1/65rad程度でその他の横架材よりも負担割合が小さくなるが、負加力側では層間変形レベル1/50rad程度まで横架材の中で一番負担割合が大きくなっている。また、第3期試験体Cでは、内法貫を除いた影響から、頭貫の負担割合が大きくなっている。特に負加力側では、層間変形レベル1/250rad程度では約17%であったのが、1/50rad程度では約28%となった。

5.2 柱－内法貫接合部

図9及び図10(a)～(b)より、第2期実験では足固めの抵抗負担割合が大きいものの、第2期、第3期の各試験体を通じて、層間変形レベルが大きくなるにつれて、内法貫が大きな抵抗要素であることを明らかとなった。小さな層間変形レベルでは、内法貫の

(a) 第3期試験体A

(b) 第3期試験体B

(c) 第3期試験体C

図10 架構全体の復元力に対する
各横架材の曲げモーメント負担抵抗割合
(El Centro NS波入力時:長手方向)

負担割合は全体の10%程度にすぎないが、1/50rad程度では正加力側で全体の約24～27%、負加力側で全体の約20%と大きな負担割合を占めた。

図11 架構全体の復元力に対する
全横架材の曲げモーメント抵抗
(El Centro NS波入力時：長手方向)

5.3 柱一足固め接合部

図9及び図10(a)～(c)より、第2期実験では3章に示す通り高い曲げモーメント抵抗性能を示したため、1/40rad程度で正加力側が全体の約25%、負加力側が約37%と大きな負担割合を占めているが、第3期実験の試験体A及びBでは第2期実験より小さい傾向を示した。また、内法貫と同様、層間変形レベルが大きくなるにつれて、足固めが大きな抵抗要素であったことを示している。小さな層間変形レベルでは、足固めの負担割合は全体の5～10%程度にすぎないが、1/50rad程度では全体の約20%の負担割合を占めた。また、第3期試験体Cでは、層間変形レベル1/50rad程度で正加力側では約16%、負加力側では約23%程度で、頭貫のように内法貫を除いた影響は大きく見られなかった。

5.4 全横架材が架構の復元力に対して占める負担割合

図11より、各層間変形レベルで全ての横架材の曲げモーメント抵抗負担割合を加えてみると、層間変形レベルが大きくなるにつれて、横架材の曲げモーメント抵抗の重要性が指摘される。第2期実験において、小さい変形レベルで約39～47%を示したが、1/40rad程度の層間変形レベルでは、約68～70%と横架材の曲げモーメント抵抗の負担割合が大きくなっている。第3期実験の試験体A及びBにおいて、小さい層間変形レベルでは約28～39%、1/50rad程度では約57～64%と、第2期実験同様全体の復元力に寄与する横架材の曲げモーメント抵抗の負担割合は大きくなっている。第3期実験の試験体Cにおいては、内法貫を除いた影響から、小さい層間変形レベルでは約16～25%、1/50rad程度では正加力側で約30%、負加力側で約50%と、その他の実験結果と比べると全横架材の負担割合は小さいが、ここでも層間変形レベルが大きくなるにつれて、横架材の曲げモーメント抵抗の負担割合が増す結果となった。

6. 振動実験結果と静的実験結果の比較

ここでは、柱一横架材接合部における曲げモーメント抵抗について、試験体Dの振動実験及び静的実験結果の比較を行う¹¹⁾。図12に、振動実験：正弦波0.60Hz 35Gal入力時及び試験体の頂部変位を±120mmに制御した静的水平力載荷実験（以後、変位量±120mmのように記す。）における柱一頭貫接合部のM-θ関係図を示す。

図12 振動実験及び静的実験結果による
柱一頭貫接合部のM-θ関係の比較（試験体D：長手方向）

図13 鉛直荷重の増加による
柱一頭貫接合部のM-θ関係の比較（試験体D：長手方向）

図12より、振動実験での回転剛性がやや低下しているものの、振動実験と静的実験結果は比較的良い一致を示した。

7. 鉛直荷重の増加による曲げモーメント抵抗の変化

ここでは、本実験において行った重りの増設による鉛直荷重の増加が、柱一頭貫接合部における曲げモーメント抵抗に及ぼす影響を考察する¹¹⁾。図13に、試験体Dにおける重り増設なし静的実験：変位量±140mm加力時と、重り増設あり静的実験：変位量±155mm加力時の、柱一頭貫接合部のM-θ関係の比較を示す。

図13より、重りの増設前後で頭貫のM-θ関係に差異は見受けられず、頭貫の曲げモーメント抵抗に鉛直荷重が大きな影響を及ぼしている傾向はない。従って、柱一頭貫接合部における曲げモーメント抵抗は、鉛直荷重の増加に依らないと考えられる。

8. 破壊性状と柱一横架材接合部の曲げモーメント抵抗の変化

既報⁹⁾3.2節に示すように、第2期実験では図1に示す柱一内法貫接合部と柱一足固め接合部において、大きな損傷が発生した。しかし、柱一足固め接合部における足固め仕口の折損は、柱ほぞ穴内部で生じており、正確な損傷発生状況が明らかではなかった。そ

図14 柱-内法貫接合部M- θ 関係 包絡曲線
(第2期実験 El Centro NS波・JMA Kobe NS波:長手方向)

ここで、正確な損傷発生状況を把握するために、損傷が発生した接合部における曲げモーメント抵抗の変化を明らかにし、曲げモーメント抵抗の変化と損傷状況との関係について示す¹⁰⁾。

8.1 柱-内法貫接合部

図14に、第2期実験の一連のEl Centro NS波及びJMA Kobe NS波入力実験における、損傷の発生した柱-内法貫接合部のM- θ 関係の包絡曲線を示す。図14より、柱側に損傷の生じた内法貫では、JMA Kobe NS 700Gal (最大層間変形角1/14rad) 入力をピークに、耐力が低下する傾向が見られた。そこで、正確な損傷発生状況を把握するために、図15にJMA Kobe NS 700Gal及び直後のJMA Kobe NS 818Gal (最大層間変形角1/13rad) 入力時における柱-内法貫接合部のM- θ 関係を示す。図15より、既報⁹⁾に示す700Gal入力時の柱表面の損傷程度は、柱-横架材構造の致命的な破壊には至っていないと考えられるが、その直後の818Gal入力時において、最大変形時のループ形状に変化が生じ、耐力が低下する傾向が見られることから、JMA Kobe NS 818Gal入力時に、仕口内部にも至る大きな破壊が生じたと考えられる。

8.2 柱-足固め接合部

図16に、第2期実験の一連のEl Centro NS波及びJMA Kobe NS波入力実験における、損傷の発生した柱-足固め接合部のM- θ 関係の包絡曲線を示す。図16より、横架材側に損傷が生じた足固めでは、El Centro NS 300Gal (最大層間変形角1/31rad) 入力をピークに耐力が低下する傾向が見られた。これは、横架材仕口の損傷の進行が耐力の低下をもたらしていると考えられる。そして、El Centro NS 400Gal (最大層間変形角1/24rad) 入力後、耐力が大きく低下している。そこで、正確な損傷発生状況を把握するために、図17(a)にEl Centro NS 300Gal及び直後のEl Centro NS 325Gal (最大層間変形角1/28rad) 入力時における柱-足固め接合部のM- θ 関係図を、図17(b)にEl Centro NS 400Gal及び直後のEl Centro NS 450Gal (最大層間変形角1/21rad) 入力時における柱-足固め接合部のM- θ 関係をそれぞれ示す。図17(a)より、300Gal入力時では安定した履歴ループを保っているが、直後

図15 柱-内法貫接合部M- θ 関係図
(JMA Kobe NS 700, 818Gal入力時)
(第2期実験:長手方向)

の325Gal入力時において最大変形時のループ形状に変化が生じ、耐力が低下する傾向がみられた。そして、450Gal入力時において最大変形時のループ形状が大きく乱れ、耐力が大きく低下する様子が明らかとなった。従って、El Centro NS 325Gal入力時から徐々に損傷が進み、El Centro NS 450Gal入力時に足固め仕口が完全に折損したものと考えられる。しかし図16から、耐力は低下しているが、折損後も曲げモーメントに抵抗している。これは、折損した箇所が足固め仕口のほぞの部分で、足固め自体は柱のほぞ穴から完全に抜け落ちておらず、図18に示す部分で足固め接合部に加わる曲げモーメントに抵抗し得たためと考えられる。

9. まとめ

本研究では、伝統木造軸組が有する構造要素を組み合わせた実大立体試験体を用いて、振動台実験及び静的水平力载荷実験を行い、構造要素の中でも柱-横架材接合部の曲げモーメント抵抗に關して分析を行った。得られた実験結果とその考察から以下のように

図16 柱-足固め接合部M- θ 関係 包絡曲線
(第2期実験 El Centro NS波・JMA Kobe NS波:長手方向)

図17(a) 柱一足固め接合部M- θ 関係図
(El Centro NS 400, 450Gal入力時)
(第2期実験：長手方向)

図17(b) 柱一足固め接合部M- θ 関係図
(El Centro NS 300, 325Gal入力時)
(第2期実験：長手方向)

図18 足固め仕口の折損箇所

まとめられる。

1) 架構全体の復元力に対して、全横架材の占める負担割合は、層間変形レベルが大きくなるほど増す傾向にあり、横架材の曲げモーメント抵抗の重要性が指摘された。本実験において、3種類の横架材を使用した試験体では、層間変形角1/50～1/40rad程度で、全横架材の曲げモーメント抵抗は架構全体の復元力の約57～70%の負担を占めていることが明らかとなった。2種類の横架材を使用した試験体では、層間変形角1/50rad程度で約30～50%にとどまった。

2) 柱一横架材接合部の曲げモーメント抵抗は、鉛直荷重の増加に依らず、仕口形状や接合状況により変化する。本実験において、頭貫は相欠きで接合したが、頭貫上に組物を載せて固定したため、加振方向によって回転中心の移動が生じ、非対称のループ形状となった。内法貫は、相欠きで接合したため、直交する横架材と一体となって抵抗し、また楔固定の効果も十分にみられたことから、高い回転剛性を保った。足固めは、通しほぞで接合したため、施工直後は高い耐力を有するが、経過年数やめり込みによる累積残留変形により、曲げモーメント抵抗性能が低下する傾向が見られた。

3) 本実験のひずみ計測から、柱一横架材接合部のモーメントー回転角関係の変化によって、目視できない柱仕口内部の損傷状況や損傷発生時の変形レベルが明らかとなった。相欠き接合・楔固定による横架材は、1/15radを超える大変形レベルまで比較的大きな耐力を有し、致命的な破壊は発生しなかった。通しほぞによる横架材は、仕口部分での損傷や折損が生じた。本実験では、1/30radを超える変形レベルで損傷が徐々に進み、1/20rad程度でほぞが折損した。しかしながら、ほぞが折損しても横架材自体が柱ほぞ穴から脱落しなければ、折損後も耐力は減少するものの曲げモーメントに抵抗しうる事が指摘された。

これらの得られた知見を基に、横架材接合部における要素単体の実験結果も照合した各構造要素モデルや履歴モデルを用いて、伝統木造軸組の構造解析手法の構築や設計法の開発を進めることで、実際の構造物にも適用できると考えられる。今後、伝統木造軸組の復元力特性に大きな影響を与える柱傾斜復元力など柱に生ずる力の分析について報告する。

注 既報（日本建築学会構造系論文集No.574）pp.137における図7の試験体Dの長手足固めの有無を、本論図1のように訂正し、ここにお詫び申し上げます。また、既報において大引と称していた部材について、部材の性質上、本報より一般的に呼ばれる足固めに変更し、ここにお詫び申し上げます。

参考文献

- 坂静雄：社寺骨組の力学的研究（第1部 柱の安定復元力），日本建築学会論文集第21号，pp252-258，1941.4
- Naohito Kawai: Column Rocking Resistance in Japanese Traditional Buildings, Proceeding of the International Wood Engineering Conference Volume1, pp183-190, 1996.10
- 藤田香織，木村正彦，大橋好光，坂本功：静的水平加力試験に基づく伝統的木造建築の組物の履歴モデルと剛性評価，日本建築学会構造系論文集，No.543，pp121-127，2001.5
- 楠寿博，長瀬正，木林長仁，林良彦，植田哲司：伝統木造建築における斗組の構造特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.592，pp129-136，2005.6
- 坂静雄：社寺骨組の力学的研究（第2部 貫の耐力），日本建築学会論文集第21号，pp259-268，1941.4
- 後藤一雄：貫通仕口による木造ラーメン（大黒柱）構造の研究，日本建築学会構造系論文集，pp119-125，1986.8
- 三宅祐子，森迫清貴：伝統的木造建築の組物の振動台実験，日本建築学会関東支部研究報告集，pp109-112，平成14年度日本建築学会近畿支部研究報告集，2002
- 上谷宏二，荒木慶一，家倉優人，吉田亘利：伝統木造建築物柱脚の平面接触モデルに関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.582，pp117-122，2004.8
- 鈴木祥之，前野将輝，西塔純人，北原昭男，後藤正美，須田達，大下達哉：伝統木造軸組の実大振動実験・静的水平力載荷実験，日本建築学会構造系論文集，No.574，pp135-142，2003.12
- 鈴木祥之，前野将輝，大下達哉，清水秀丸，北原昭男：伝統木造軸組の実大振動実験による柱一貫接合部のモーメント抵抗メカニズム，第11回日本地震工学シンポジウム，pp.1355-1360，2002.11
- Masaki MAENO, Yoshiyuki SUZUKI, and Sumito SAITO: Moment Resistance of Traditional Wooden Structure by Dynamic and Static Tests, 8th World Conference on Timber Engineering WCTE 2004, No.4507, 2004.6
- Masaki MAENO, Yoshiyuki SUZUKI, Tatsuya OHSHITA, and Akio KITAHARA: Seismic Response Characteristics of Traditional Wooden Frame by Full-Scale Dynamic and Static Tests, 13th World Conference on Earthquake Engineering, No.1184, 2004.8

(2005年6月9日原稿受理，2005年11月28日採用決定)