

寺院建築物における伝統木造軸組の 構造力学特性のモデル化による骨組解析

前野将輝*・鈴木祥之・松本慎也**

* (株) 前野建築設計 (前京都大学大学院工学研究科)

** 広島大学大学院工学研究科

要 旨

本研究では、寺院建築物における伝統木造軸組をモデルとした立体架構試験体を製作し、振動台実験及び静的水平力載荷実験を実施して、伝統木造軸組構法が持つ柱－横架材接合部の曲げモーメント抵抗性能や柱傾斜復元力特性を実験的に把握した。実験結果に基づいて、横架材の曲げモーメント抵抗や柱傾斜復元力特性などの非線形復元力モデルを構築し、地震応答解析を行って、本モデル化手法ならびに本解析手法の妥当性を検証した。

キーワード：伝統木造軸組，柱傾斜復元力特性，柱－横架材接合部，曲げモーメント抵抗，地震応答解析

1. 序論

我が国の寺院にみられるような伝統的木造建築物は、独特の構造力学特性を有する軸組構法を主要な構法として育まれてきた。構造力学特性として、大径柱に軸力が加わることによる柱傾斜復元力特性、複雑な木組みによる組物の減衰性能、柱－横架材接合部のめり込みによる曲げモーメント抵抗性能、柱脚部の滑り挙動などが挙げられる。これらの構造力学特性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などから、力学的な解明が非常に難しく、その分析は十分になされていない。一方で、伝統的木造建築物の保存・修復技術の早期開発が要望されており、これら構造力学特性を定量的かつ定性的に把握する必要性が指摘される。このような状況から、今日までに様々な実験的研究や解析的研究がなされてきた。

柱傾斜復元力特性については、坂 (1941a) や Kawai (1996) による研究が挙げられる。ここでは、縮尺模型試験体などを用いて単純載荷を行い、変位量と復元力の関係から柱傾斜復元力を求めており、また理論解析から、柱傾斜復元力の定式化を行っている。

組物については、藤田ら (2001) や楠ら (2005) による研究が挙げられる。藤田ら (2001) は、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、組物の剛性をその形状や材料特性から推測する方法を提案している。また、楠ら (2005) は、唐招提寺金堂で用いられる斗組をモデルとした実大試験体による実験的研究を行って、水平力に対する斗組の耐力を、大斗底面の力の釣合から評価する計算方法を提案し、その計算結果が実験結果と良い一致を示していることを明らかにしている。

柱－横架材接合部の曲げ抵抗については、坂 (1941b) や後藤 (1986) による研究が挙げられる。坂 (1941b) は、貫耐力に関する実験的研究を行い、貫の挿入は貫せいの少なくとも 2 倍以上ないと貫の抵抗力を完全に発揮できないこと、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は無関係であることなどを知見として挙げている。後藤 (1986) は、貫通仕口による木造ラーメン構造の研究を行い、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、貫通仕口の回転変形は降伏後においても相当の復元力を有していることなどを知見として挙げている。

また、柱－横架材接合部の曲げ抵抗に密接に関連する木材のめり込みについては、稲山（1991）や棚橋ら（2006）の研究が挙げられる。稲山（1991）は、木材のめり込み実験を行って、縁端距離、材厚など実際の設計に関わる幾何学因子の変化とめり込み荷重－変位関係への影響を明らかにしている。そして、等分布めり込み弾性変形理論式などめり込み理論式を導いて、実験による荷重－変位関係との比較をし、理論曲線が良く一致することを確認している。また、同様に三角形めり込みに関する理論式展開を行っており、今日までの木材のめり込み理論の基礎的研究と位置づけられている。また、棚橋ら（2006）は、めり込みの力学モデルにパステルナーク・モデルを適用し、直交異方性を考慮しためり込み変位の定式化を行って、定式化に基づいてめり込み実験を行っている。その結果、めり込みの大変形時の耐力維持機構を解明し、木材の歪硬化特性が耐震性能評価上重要な意義を持つことを明らかにしている。

柱脚部の挙動については上谷ら（2004）の研究が挙げられる。ここでは、柱脚部と礎石間の接触に関する実験を行い、柱脚底面に変形が集中することに着目して、仮想的な剛体としてモデル化する手法を提案している。この柱脚モデルの幾何学的関係式と釣合式を用いて、集中反力の作用位置を誘導し、また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導いている。

しかし、これらの既往の研究は、各構造力学特性個々の実験が中心であり、架構全体の中で各要素を扱っていないため、その結果、構造力学特性が組み合わさって構成される架構全体の実現象を検証できていない。また、めり込みに関する既往の研究を利用して、骨組解析モデルを作成し、地震応答解析を実施することで、伝統的木造構造物の地震時挙動を明らかにすることは可能と考えられるが、架構全体の復元力特性など、解析結果と比較対象となる実験結果は十分に得られていない。架構全体の挙動を予測するためには、これら構造力学特性を全て盛り込んだ実大立体軸組架構による振動台実験の実施が強く望まれる。

このような状況を鑑みて、架構全体の復元力特性や各部の曲げ抵抗などを実験的に解明することを目的として、大径柱や組物、3種類の柱－横架材接合部、柱脚－礎石のディテールなどを盛り込んだ、伝統的な実大立体軸組架構試験体を製作し、振動台実験を行った。また、柱傾斜復元力特性の抽出を目的として、静的水平力載荷実験も併せて実施した。本報では、伝統木造軸組の振動台実験及び静的水平力載荷実験結果を述べると共に、得られた実験結果を

用いて、寺院建築物が有する構造力学特性のモデル化を行う。また、構造力学特性の各非線形復元力モデルを用いて骨組解析モデルを作成し、地震応答解析を行って、振動台実験結果との比較を行う。まず2章では、本実験の概要を説明する。3章では、本実験結果より、伝統木造軸組架構の復元力特性、柱－横架材接合部の曲げモーメント抵抗について明らかにする。また、柱頭部及び柱脚部の曲げモーメント抵抗を示し、柱に生じる力の釣合関係を明らかにして、試験体の復元力特性に寄与する横架材の曲げモーメント抵抗と柱傾斜復元力特性について検証する。4章では、3章で明らかにした各構造力学特性についてモデル化を行い、地震応答解析を行って、本振動台実験結果との比較を行う。

2. 実験概要

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～2003年に渡り実施した（鈴木ら（2003））。写真1に振動台に設置した試験体の全体写真を示す。

2.1 試験体概要

図1に本振動台実験で使用した標準試験体を示す。試験体は1スパン×1スパン（3.75m×2.25m）の4本柱立体軸組であり、高さは礎石を含めて約5mとした。これは実在する寺院建築物のほぼ実物大とし、伝統的な軸組構法の典型的な特徴である、大径柱、柱－横架材接合部、組物のディテールを盛り込んだ実験モデルである。



Photo 1 Shaking table test of specimen

礎石は、御影石を使用し、その表面をびしゃんで叩いて平滑に仕上げた。柱は、振動台上に固定された礎石の上に、金物やダボなどで固定することなく設置した。横架材は、試験体下から足固め、内法貫、頭貫で構成した。各横架材接合部は釘を一切使用せず、仕口で接合した。足固めは断面を切り欠いたほぞを、柱ほぞ穴に差し込んだ単純な通しほぞによって接合した。内法貫は相欠きで接合し、試験体長手短手両方向から楔を打ち込んで固定した。頭貫は柱頭部に相欠きで接合し、上から組物を載せて固定した。柱頭部の組物は、肘木を十字に組んで杵肘木とし、その上に斗を置いた出三斗形式とし、接合に釘を一切使わないダボ接合により頭貫の上に設置した。そして、組物上に桁梁を設置し、その上部に屋根荷重に相当するコンクリート製板状の重り約54.8kN(5.59ton)を2枚設置した。その際、重り自体が新たな振動系を構成しないように、ボルトで桁梁に固定した。その他ねじれの影響を少なくし、平面的な剛性を上げるために、足固め、頭貫、桁梁の各レベルで四隅に火打を取付け、ボルトで固定した。試験体の総重量は(重りなし)、28.6kN(2.92ton)であった。図2に各横架材の仕口詳細図を、図3に組物の詳細図をそれぞれ示す。

また、柱傾斜復元力特性を抽出することを目的として、標準試験体から内法貫、長手方向足固め、足固め火打を除いた柱－頭貫試験体を用いた振動台実験および静的水平力載荷実験も併せて実施した。なお、柱－頭貫試験体は、ねじれの影響から試験体の倒壊の恐れがあったため、短手方向の足固めは残して実験を行った。図4に柱－頭貫試験体の試験体図を示す。

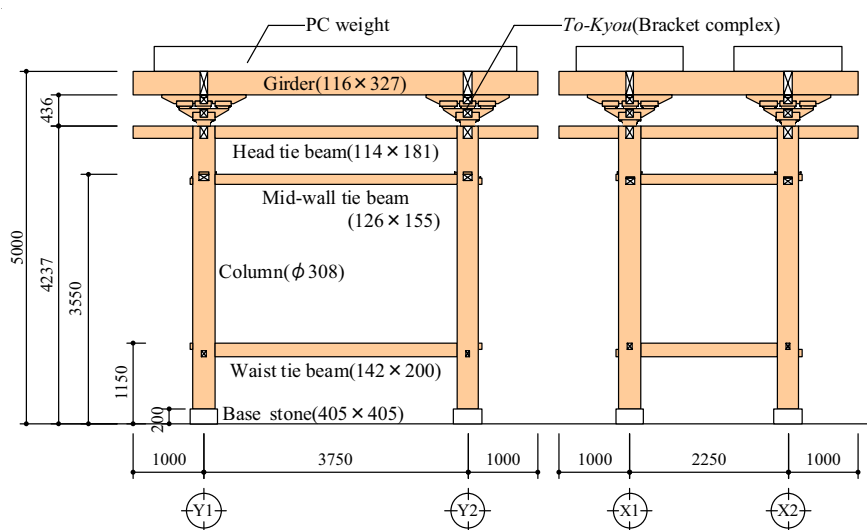


Fig. 1 Wooden frame of basic specimen (unit:mm)

2.2 振動台実験概要

標準試験体を用いた実地震動波加振実験では、1940 El Centro及び1995 JMA Kobeの観測記録波形を主とし、振動状況や破壊状況に応じて最大加速度振幅を徐々に上げつつ、繰り返して実験を行った。加振方向は、試験体長手方向1方向を主とし、水平2方向入力も行った。また、柱－頭貫試験体による振動台実験では、試験体長手1方向のみの正弦波加振実験を行った。用いた正弦波の卓越振動数は、事前のスweep波加振実験で得られた試験体の持つ固有振動数近傍とし、振動状況に応じて最大加速度振幅を徐々に上げつつ、繰り返して実験を行った。なお、本報では、標準試験体を用いたEl Centro NS, JMA Kobe NS長手1方向入力及び柱－頭貫試験体を用いた正弦波長手1方向入力による実験結果を中心に示す。

2.3 静的水平力載荷実験概要

本静的水平力載荷実験は、柱傾斜復元力特性の抽出を目的として、図4に示すように軸組部分が柱－頭貫のみで構成される柱－頭貫試験体を用いて実験を行った。図5に静的水平力載荷実験概要を示す。本静的実験では、2枚のコンクリート製板状重りにリブで補強した溝形鋼を渡し、その中央部にアクチュエーターで加力した。また、加力に対して、試験体外周に設置された鉄骨製の安全フレームを反力フレームとして用いることによって反力を得た。

2.4 計測概要

図6に、本実験における計測概要図を示す。試験体各部の変位計測については、レーザー変位計および

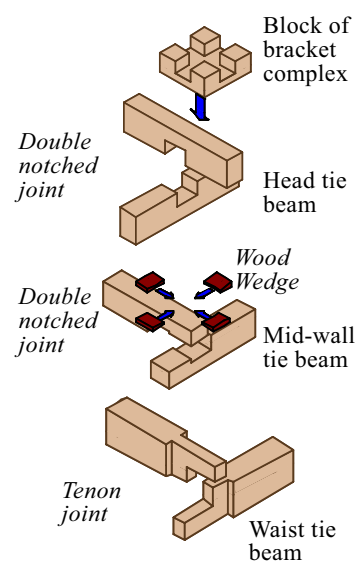


Fig. 2 Details of column-beam joints

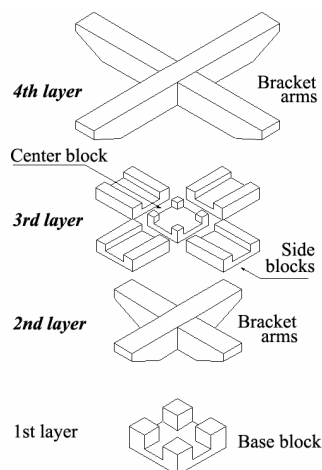


Fig. 3 Details of bracket complex

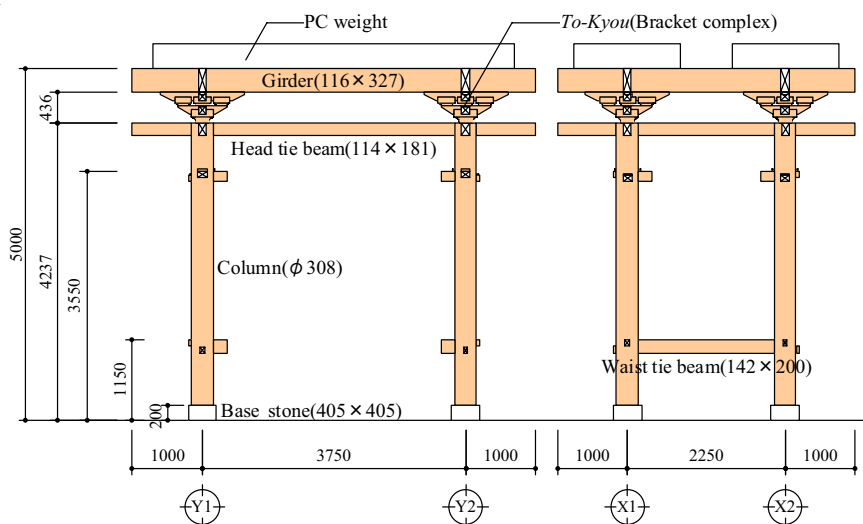


Fig. 4 Wooden frame of simple frame (column-head tie beam) specimen (unit:mm)

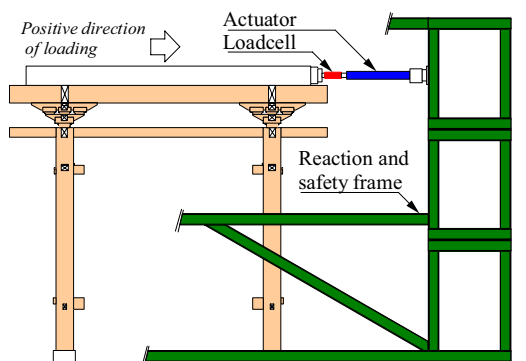


Fig. 5 Static lateral loading tests of traditional wooden

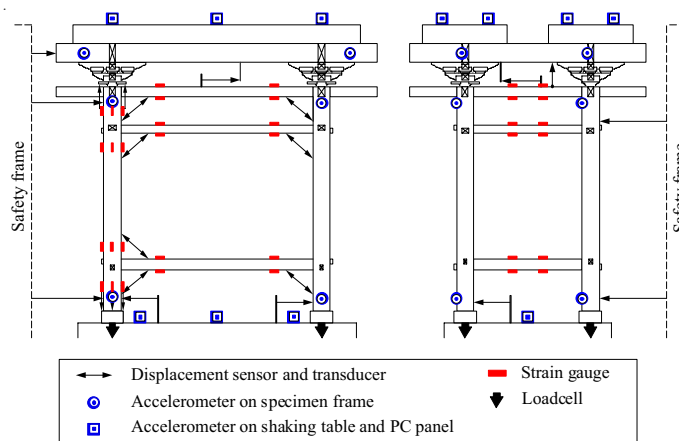


Fig. 6 Allocation of instruments and sensors

ワイヤー変位計を用いて計測した。主な計測は、柱頭部および柱脚部の水平変位とし、両者の差を柱高さで除して層間変形角を近似的に算出した。試験体各部の加速度計測については、半導体型小型加速度計を用いて、試験体頂部重り上、柱頭部、振動台上で計測した。横架材における曲げモーメント計測については、ひずみゲージを使用した。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、図7に示すように、柱表面位置に補正した。柱と横架材の接合部回転角については、図8に示すように、横架材の上下面に取り付けた摺動式変位計から得られた変位を用いて、幾何学的関係より近似的に求めた。その他、柱軸力を計測するために、ロードセルを礎石下に設置した。

2.5 部材の材料特性

実験終了後に、試験体を解体し、京都大学生存圏研究所（旧木質科学研究所）木質材料実験棟におい

て含水率及び動的ヤング係数、曲げヤング係数の計測を行った。含水率は高周波容量含水率計（（株）ケット科学研究所製：HM-520）を、動的ヤング係数はハンドヘルドFFTアナライザー（（株）小野測器製：CF-1200）を使用して計測した。曲げヤング係数は、3等分点4点曲げ試験を行い計測した。表1に各部材の平均値をとった計測結果を示す。

3. 実験結果

本章では、振動台実験及び静的水平力載荷実験結果より、まず試験体の復元力特性を明らかにする（鈴木ら（2003））。また、柱－横架材接合部の曲げモーメント抵抗（前野ら（2006））及び柱頭部・柱脚部の曲げモーメント抵抗を明らかにし、柱に生じる力の釣合関係を明らかにして、試験体の復元力特性に寄与する柱－横架材の曲げモーメント抵抗と柱傾斜復元力特性について検証する（前野ら（2007b））。

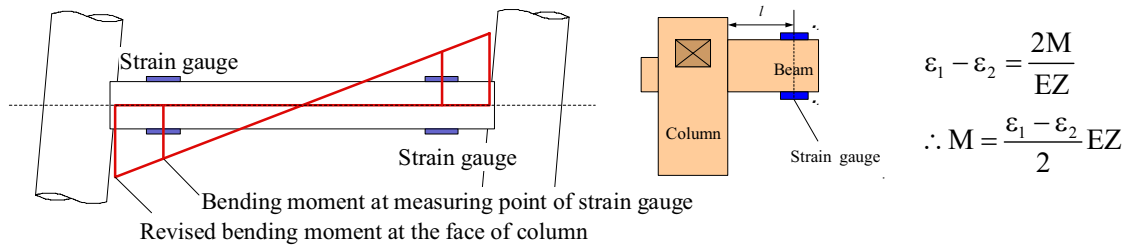


Fig. 7 Measurement of strain near column-beam joint and method of calculating bending moment at the joint

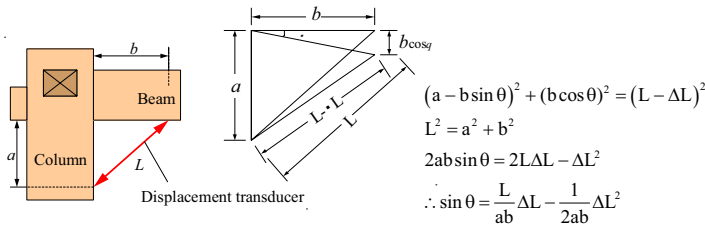


Fig. 8 Measurement of displacement near column-beam joint and method of calculating rotation at the joint

Table 1 Properties of column and beams

	Water content [%]	Dynamic Young's modulus [kN/mm ²]	Young's modulus in bending [kN/mm ²]
Column	13.7	6.43	6.85
Girder	10.0	10.32	7.75
Head tie beam	9.2	10.64	9.12
Mid-wall tie beam	9.9	11.12	10.52
Waist tie beam	11.2	12.71	10.71

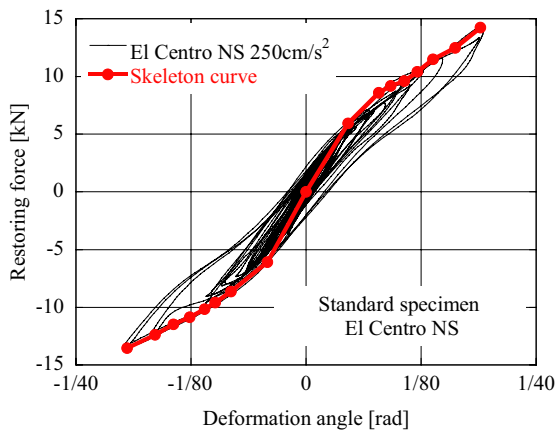


Fig. 9 Total restoring force of basic specimen in X-direction under El Centro NS

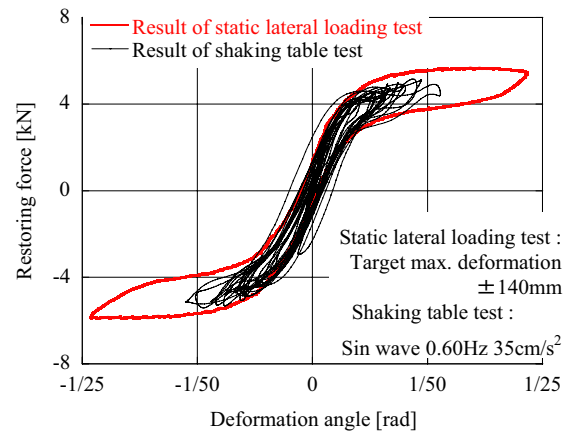


Fig. 10 Comparison between hysteretic restoring force under shaking table test and static lateral loading test (simple frame specimen)

3.1 試験体の復元力特性

本節では、振動台実験及び静的水平力載荷実験結果より、試験体の復元力特性を明らかにする。ここで、層せん断力は試験体の応答加速度に試験体上半分の重量を乗じ、層間変形角は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。

(1) 振動台実験による試験体の復元力特性

図9に、標準試験体を使用した振動台実験より、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）入力時における試験体長手方向の復元力特性及び一連のEl Centro NS波入力における試験体長手方向の復元力特性の包絡曲線をそれぞれ示す。図9より、標準試験体の復元力特性は履歴ループを描いており、概ねバイリニア

型復元力特性を示していることが明らかとなった。

(2) 振動台実験結果と静的水平力載荷実験結果の比較

ここで、試験体の復元力特性について、柱一頭貫試験体の振動台実験及び静的水平力載荷実験結果の比較を行う。図10に、柱一頭貫試験体における振動台実験：正弦波0.60Hz 35Gal入力時及び試験体の目標頂部変位を±140mmに制御した静的水平力載荷実験（以後、静的実験：目標頂部変位量±140mm加力時のように記す）における試験体の復元力特性を示す。なお、静的水平力載荷実験による試験体の層せん断力は、試験体頂部のコンクリート製板状重り中央部を加力したアクチュエーターの先端に取り付けた、ロードセルの計測値を使用した。図10より、振動台

実験結果と静的水平力載荷実験結果は概ね一致しているといえる。

3.2 柱－横架材接合部の曲げモーメント抵抗

本節では、振動台実験及び静的水平力載荷実験結果より、柱－頭貫、内法貫、足固め各接合部の曲げモーメント－回転角関係（以後 $M-\theta$ 関係とする）を明らかにする。なお、各接合部の曲げモーメント及び接合部回転角は、図7及び図8に示す算出方法を用いた。また、曲げモーメント算出に使用したヤング係数は、2章に示す材料実験によって計測された曲げヤング係数を用い、頭貫 9.12kN/mm^2 、内法貫 10.52kN/mm^2 、足固め 10.71kN/mm^2 とした。

(1) 柱－頭貫接合部

図11に、標準試験体を使用した振動台実験より、El Centro NS 250Gal入力時における柱－頭貫接合部の $M-\theta$ 関係図と、一連のEl Centro NS波入力時における柱－頭貫接合部の $M-\theta$ 関係の包絡曲線をそれぞれ示す。図11より、柱－頭貫接合部の $M-\theta$ 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、足固めと比較して明らかな非対称のループ形状を示している。これは、図2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、楔を用いて固定した内法貫と比べて組物の拘束が小さく、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、組物大斗底面の端部と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。

(2) 柱－内法貫接合部

図12に、標準試験体を使用した振動台実験より、El Centro NS 250Gal入力時における柱－内法貫接合部の $M-\theta$ 関係図と、一連のEl Centro NS波入力時における柱－内法貫接合部の $M-\theta$ 関係の包絡曲線をそれぞれ示す。図12より、柱－内法貫接合部の $M-\theta$ 関係は非対称な履歴ループを描いている。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2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較して、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有している。これは、内法貫が相欠きによる接合方法で、直交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が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－内法貫接合部においても同様に見られた。

(3) 柱－足固め接合部

図13に、標準試験体を使用した振動台実験より、El Centro NS 250Gal入力時における柱－足固め接合部の $M-\theta$ 関係図と、一連のEl Centro NS波入力時における柱－足固め接合部の $M-\theta$ 関係の包絡曲線をそれぞれ示す。図13より、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は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。

(4) 振動台実験結果と静的水平力載荷実験結果の比較

ここでは、柱－横架材接合部における曲げモーメント抵抗について、柱－頭貫試験体の振動台実験及び静的水平力載荷実験結果の比較を行う。図14に、柱－頭貫試験体における振動台実験：正弦波 0.60Hz 35Gal入力時及び静的実験：目標頂部変位量 $\pm 120\text{mm}$ 加力時における柱－頭貫接合部の $M-\theta$ 関係図を示す。図14より、振動台実験での回転剛性がやや低下しているものの、振動台実験と静的水平力載荷実験は比較的良い一致を示した。

3.3 柱に加わる力の釣合関係と柱傾斜復元力特性の抽出

本節では、まず柱頭部・柱脚部に生じるめり込みによる曲げモーメント抵抗について明らかにする。次に、柱頭部・柱脚部の曲げモーメント抵抗と、前節で示した柱－横架材接合部の曲げモーメント抵抗を利用して、柱に加わる力の釣合関係を検証し、架構全体の復元力特性との比較を行う。最後に、検証した力の釣合関係式を用いて、架構全体の復元力を、組物を含む柱の傾斜復元力と柱－横架材接合部の曲げモーメント抵抗に分解することで、柱傾斜復元力特性を抽出する方法を提案し、大変形レベルに至るまでの柱傾斜復元力特性と柱－横架材接合部の曲げモーメント抵抗の効果について検証する。

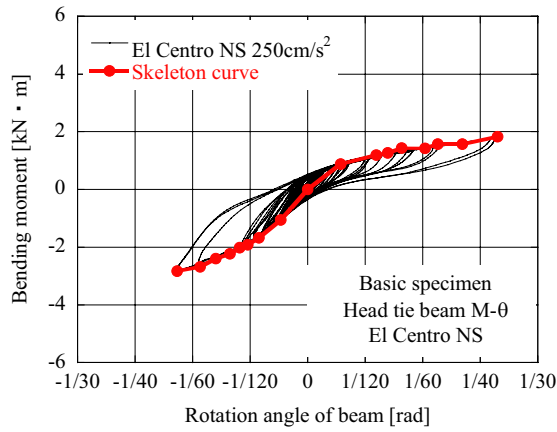


Fig. 11 Moment-rotation relationship at the joint of column-head tie beam of basic specimen in X-direction under El Centro NS

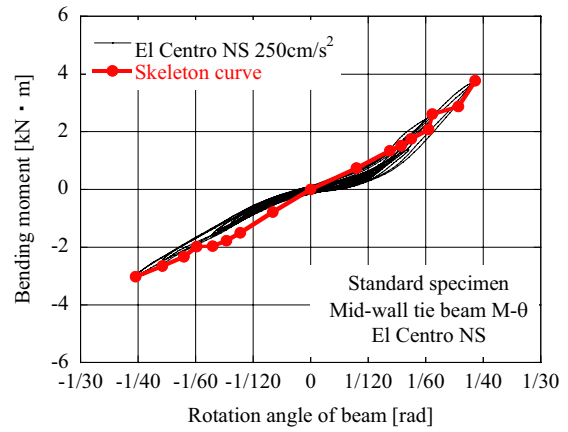


Fig. 12 Moment-rotation relationship at the joint of column-mid wall tie beam of basic specimen in X-direction under El Centro NS

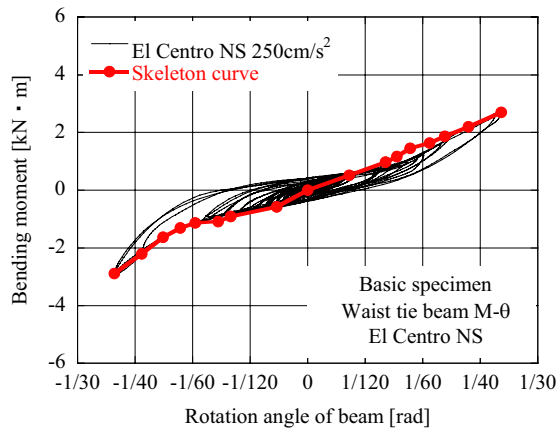


Fig. 13 Moment-rotation relationship at the joint of column-waist tie beam of basic specimen in X-direction under El Centro NS

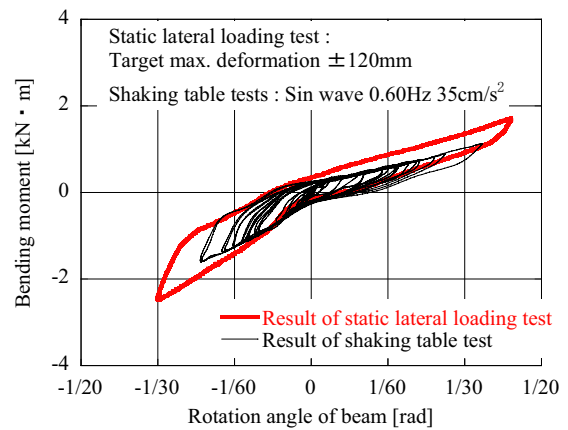


Fig. 14 Comparison between moment-rotation relationship at the joint of column-head tie beam under shaking table test and static lateral loading test (simple frame specimen)

(1) 柱頭部・柱脚部の曲げモーメント抵抗

図15及び図16に、標準試験体を使用した振動台実験より、El Centro NS 250Gal入力時における、柱頭部及び柱脚部のM-θ関係を示す。なお、柱頭部及び柱脚部の曲げモーメントは、柱各部で計測したひずみに柱のヤング係数Eと断面係数Zを乗じて算出した曲げモーメントを、柱計測位置間の幾何学的関係や各横架材接合部における釣合条件を利用して柱上端及び柱下端に補正した値とした。回転角は、柱傾斜角（本研究では、層間変形角と同様の算出方法とした）を使用した。なお、曲げモーメント算出に使用したヤング係数は、2章に示す材料実験により計測された曲げヤング係数を使用し、 6.85kN/mm^2 とした。

図15より、柱頭部・柱脚部におけるM-θ関係は共に履歴ループを描いている。また、柱頭部のM-θ関係は負勾配を示しているが、曲げモーメント算

出の際に用いた正負関係は、図17に準じて算出したため、柱頭部では、柱の傾斜を抑えようとする方向に曲げモーメントが生じていることが示された。また図16及び図17より、柱脚部においても柱の傾斜を抑えようとする方向に曲げモーメントが生じていることが示された。

(2) 柱に加わる力の釣合関係

本実験では、柱や横架材の各部においてひずみ計測を行い、柱頭部、柱脚部、各柱一横架材接合部における曲げモーメント抵抗を明らかにした。ここでは、図18に示すような柱頭部、柱脚部及び柱一横架材接合部の曲げモーメント抵抗と、架構軸組部分の復元力との釣合関係

$$\Sigma M = M_{tc} + M_{bc} + M_{hb} + M_{mb} + M_{wb} = Ph \quad (1)$$

の成立可否について検証を行う。ここで、

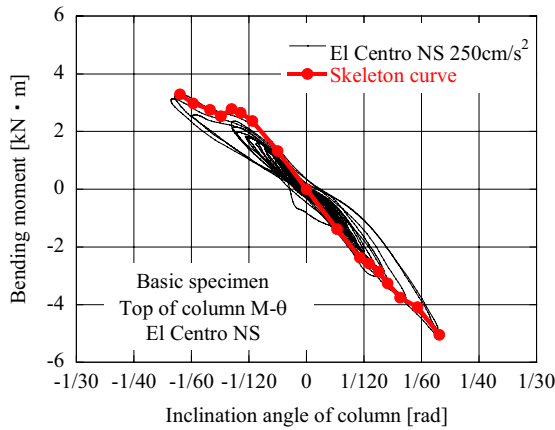


Fig. 15 Moment-rotation relationship at the top of column of basic specimen under El Centro NS

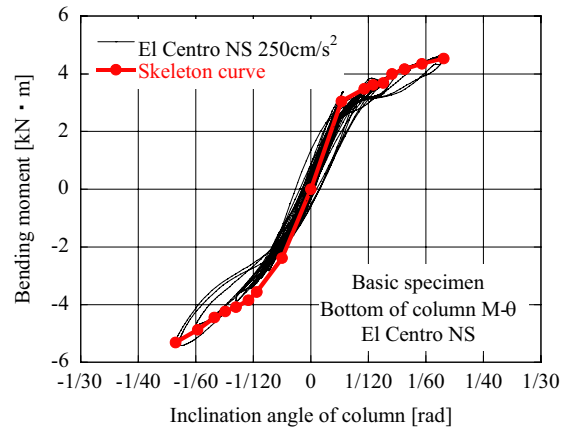


Fig. 16 Moment-rotation relationship at the bottom of column of basic specimen under El Centro NS

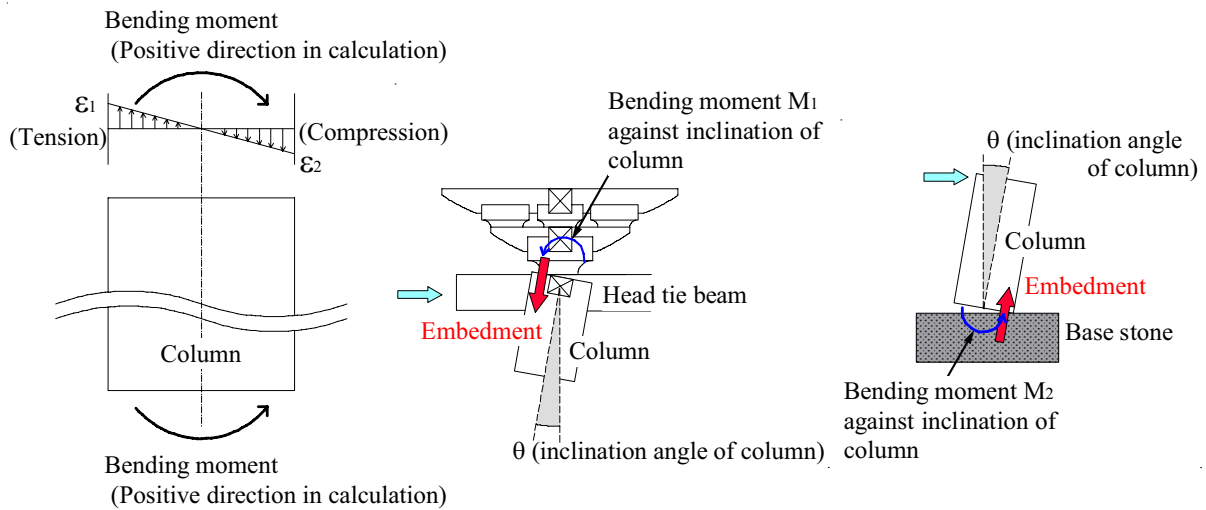


Fig. 17 Moment at the top and bottom of column

M_{tc} : 柱頭一組物部に加わる曲げモーメント
 M_{bc} : 礎石一柱脚部に加わる曲げモーメント
 M_{hb} : 柱一頭貫接合部の曲げモーメント
 M_{mb} : 柱一内法貫接合部の曲げモーメント
 M_{lb} : 柱一足固め接合部の曲げモーメント
 とする。柱頭一組物部に加わる曲げモーメントは、節点の釣合関係から、柱頭部の曲げモーメントと、前節に示す柱一頭貫接合部の曲げモーメントを利用して求めた。礎石一柱脚部に加わる曲げモーメントは、柱脚部の曲げモーメントを利用した。柱1本分の復元力モーメント Ph は、試験体を組物部分と柱一横架材で構成する軸組部分の2質点系とし、柱頭部及び桁梁部で計測した加速度に質点重量を乗じて求めた軸組部分の復元力 P を、柱1本分に換算して柱高さ h を乗じて求めた。

図19に、標準試験体を使用した振動台実験より、El Centro NS 250Gal入力時における架構軸組部分の復元力から求めた柱1本分の復元力モーメント Ph と

各部曲げモーメントの加算による加算モーメント($M_{tc} + M_{bc} + M_{hb} + M_{mb} + M_{lb}$)の時刻歴の比較を示す。また、同様に柱一頭貫試験体における正弦波0.60Hz 35Gal入力時における復元力モーメントと加算モーメントの時刻歴の比較を図20に示す。また、標準試験体の一連のEl Centro NS波入力及び柱一頭貫試験体の一連の正弦波入力における復元力モーメントと加算モーメントの包絡曲線を図21及び図22にそれぞれ示す。なお、横軸には回転角として、軸組部分の層間変形角を用いた。

図19及び図20より、試験体ディテールに関わらず、復元力モーメントと加算モーメントの時刻歴波形はほぼ一致した。この傾向は、JMA Kobe NS波などその他の振動台実験でも同様に見られた。また、図21及び図22より、入力加速度振幅レベルを問わず、復元力モーメントと加算モーメントの包絡曲線はほぼ一致した。以上より、伝統木造軸組架構では、架構の横架材構成や入力加振波、入力加速度振幅レベル

にかかわらず、柱1本分の復元力モーメント Ph と各部曲げモーメントの加算による加算モーメント($M_{tc} + M_{bc} + M_{hb} + M_{mb} + M_{lb}$)は非常に高い相関を示していることが、実大立体架構試験体を使用した振動台実験結果でも明らかとなった。

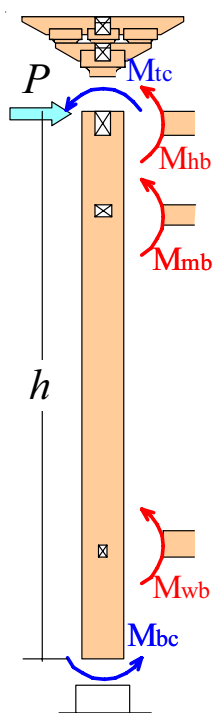


Fig. 18 Moment equilibrium of column

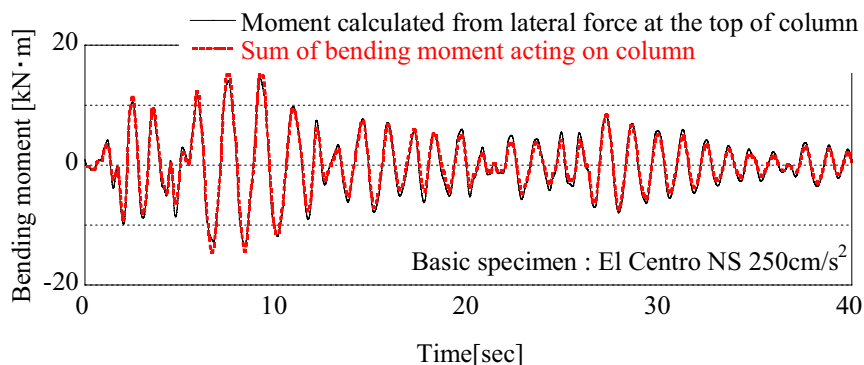


Fig. 19 Time histories of moment calculated from the total restoring force and from summation of all bending moments of basic specimen under El Centro NS 250cm/s²

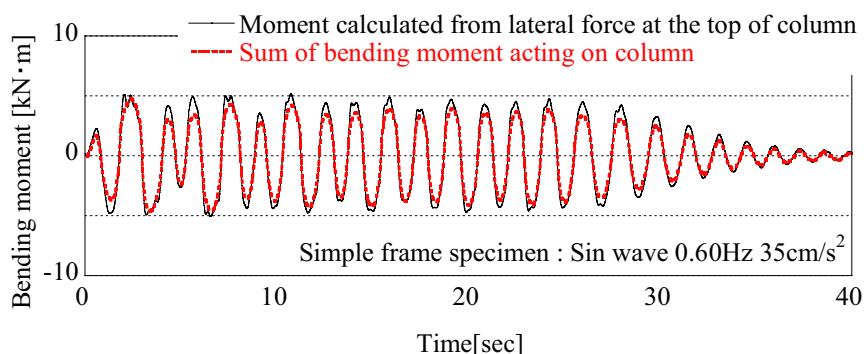


Fig. 20 Time histories of moment calculated from the total restoring force and from summation of all bending moments of simple frame specimen under Sin 0.60Hz 35cm/s²

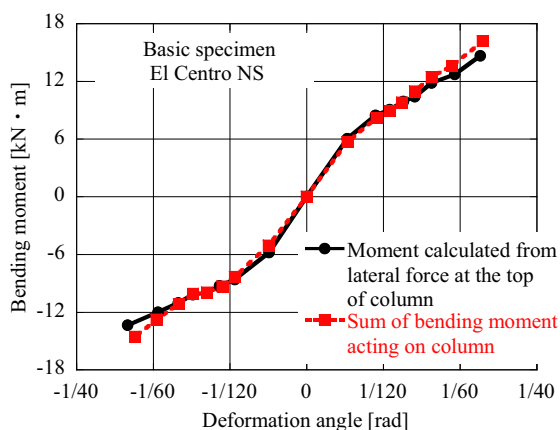


Fig. 21 Skeleton curves of bending moment calculated from the total restoring force and from summation of all bending moments of basic specimen under El Centro NS

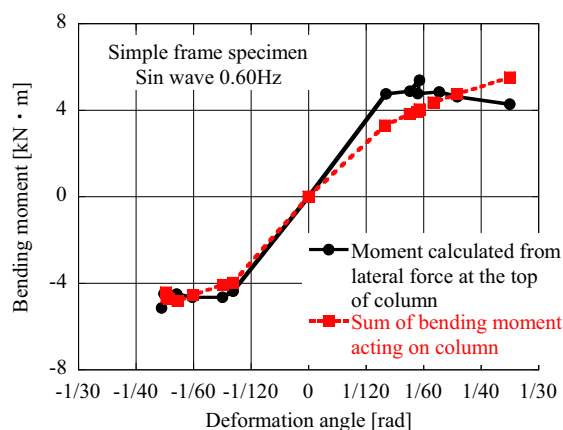


Fig. 22 Skeleton curves of bending moment calculated from the total restoring force and from summation of all bending moments of simple frame specimen under Sin 0.60Hz

想される。そこで、柱に加わる力の釣合関係より、横架材の構成がより単純な柱一頭貫試験体を用いて、組物を含む柱の傾斜復元力特性を抽出する。ここで、組物を含む柱の傾斜復元力とは、(1)式を用いることで、架構全体の復元力モーメントから、柱一頭貫試験体の唯一の横架材要素である柱一頭貫接合部の曲げモーメント抵抗を減じて、組物部分と柱頭部や柱脚部の柱要素に加わる曲げモーメントを算出し、柱高さに組物高さを加えた試験体高さで除して復元力に換算したものとす。なお、本節では、 $1/15\text{rad}$ 程度の大変形レベルまで加力を行った静的水平力載荷実験による結果を示すものとする。

図23に、柱一頭貫試験体における静的実験：目標頂部変位量+300mm加力時の試験体の復元力特性と組物を含む柱の傾斜復元力特性を示す。また、柱一頭貫試験体における一連の静的水平力載荷実験結果より、試験体の復元力特性及び組物を含む柱の傾斜復元力特性の包絡曲線を示す。同時に、既往の研究（Kawai (1996)；文化庁 (2001)）により近似的に算出された柱傾斜復元力も図24に示す。ここで、既往式に使用した柱幅は、既往の研究を参考に、本試験体の柱直径308mmと、組物大斗底幅173mmの平均値240.5mmとした。なお、図23及び図24における復元力は、架構全体の復元力を柱数で等分し、柱1本分に換算して使用した。

図23より、組物を含む柱の傾斜復元力特性は履歴ループを描いており、加力時と除荷時の傾きがほぼ等しい。これは、柱傾斜復元力の性状に組物の履歴特性が加わったためと考えられる。図24より、既往の研究において柱傾斜復元力が最大値を記録する変形レベルに比べて、本実験による組物を含む柱の傾斜復元力の最大値は大きな変形レベルで記録している。これは、組物の履歴特性を含むことで、柱単体

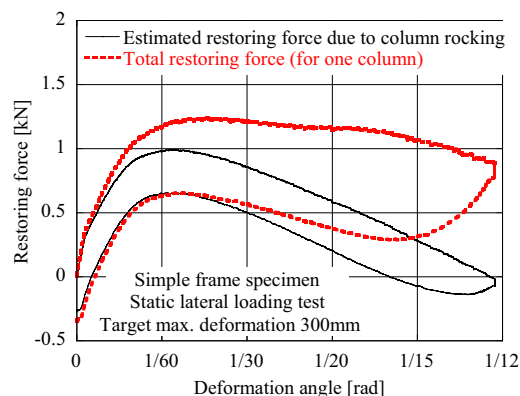


Fig. 23 Total restoring force and restoring force due to column rocking on the static test of simple frame specimen

での傾斜復元力に比べて変形性能が高くなっていることを示唆している。また、既往の研究における最大傾斜復元力は剛体仮定時の約0.75～0.85倍の復元力を有しているに対し、本実験による組物を含む柱の傾斜復元力の最大値は、既往の研究よりも小さい値を示した。これは、本実験に使用した試験体がすでに3期に渡って実施しており、一連の振動台実験や静的水平力載荷実験を経て、柱頭部や柱脚部にめり込み変形が残留したためと考えられる。柱傾斜復元力の最大耐力は、経験変形角により、施工直後の最大耐力よりも徐々に低下することが指摘されるが、本実験より、架構全体の復元力から柱一横架材接合部の曲げモーメント抵抗を減ずることで、組物の履歴特性を含んだ形での柱傾斜復元力を推測できることを示した。

また、層間変形角 $1/15\text{rad}$ を超える変形レベルでは、組物を含む柱の傾斜復元力が負の値を示している。これは、既往の研究では転倒限界とされてきた変形領域であるが、本実験では試験体は転倒せず、また架構全体の復元力も急激に低下する傾向は見られない。柱一頭貫試験体を構成する唯一の横架材である頭貫の曲げモーメント抵抗によって、柱傾斜復元力特性の効果が期待できない大変形レベルにおいても、十分な耐力を保つことが示された。

4. 構造力学特性のモデル化と地震応答解析

本章では、前章までに示した構造力学特性について、非線形復元力モデルの提案を行う（前野 (2007a)）。また、提案した各構造力学特性の非線形復元力モデルを用いて平面骨組モデルを作成し、地震応答解析を行って、本モデル化手法の妥当性を検証する。

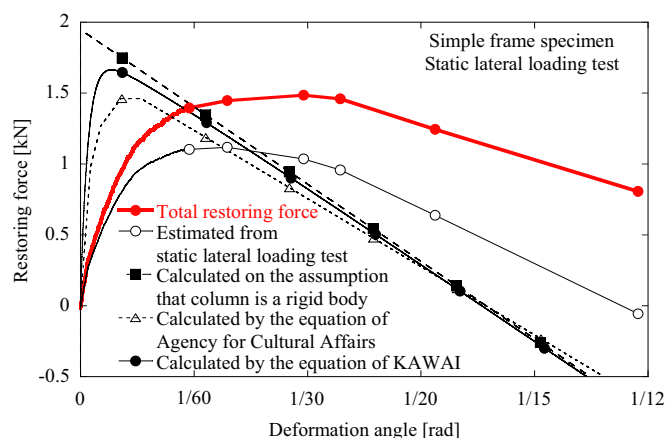


Fig. 24 Skeleton curves of total restoring force and restoring force due to column rocking on the static test of simple frame specimen

4.1 半剛接合部を有するはり要素モデル

本解析では、図25に示すような、要素両端にせん断バネ剛性、曲げバネ剛性を有するはり要素モデルを用いる。本要素は、バネ剛性を0から ∞ まで扱えるように一般的な定式化を行っており、あらゆる接合部剛性を容易に解析することができる。なお、このはり要素モデルは、既往の解析的研究と同様とした（松本（2000））。

4.2 各構造力学特性のモデル化

(1) 柱－横架材接合部の曲げモーメント抵抗特性

3.2節にも示すように、実験で得られた柱－横架材接合部の $M-\theta$ 関係は、非対称なループ形状を示しており、モデル化には複雑である。そこで、本解析では試験体各横架材接合部全4カ所の $M-\theta$ 関係を平均化し、モデル化する手法を提案する。

図26～図28に、El Centro NS 250Gal入力時における柱－頭貫、内法貫、足固め各接合部の平均 $M-\theta$ 関係図を示す。ここで、平均 $M-\theta$ 関係図とは、4本柱の立体軸組架構試験体における接合部4カ所で計

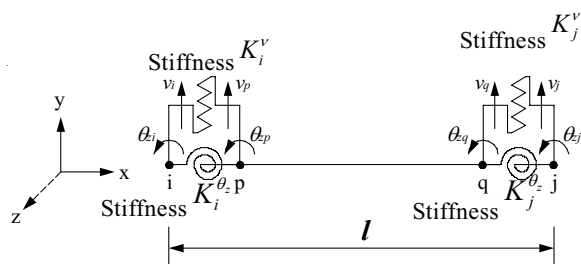


Fig. 25 Element model of beam with rotational spring and shear spring

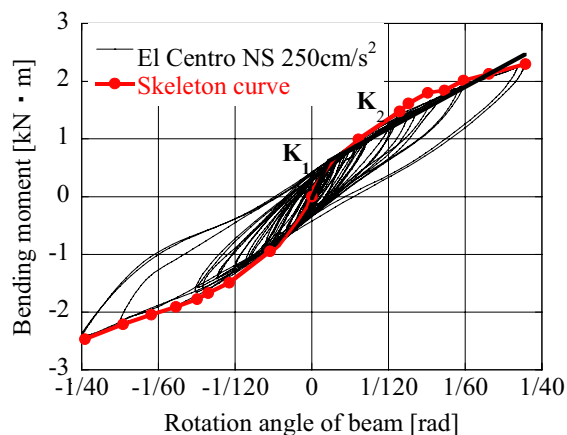


Fig. 26 Average of moment-rotation relationship at all the joint of column-head tie beam of basic specimen in X-direction under El Centro NS

測した曲げモーメント値及び接合部回転角値を、それぞれ単純に加算して平均化したものを図化したものとする。図26より、柱－頭貫接合部の平均 $M-\theta$ 関係は、概ね図29に示すようなバイリニア型の復元力特性を示した。また、図27及び図28より、柱－内法貫接合部及び足固め接合部の平均 $M-\theta$ 関係は、頭貫接合部と比較して明確な3次剛性が表れ、概ね図30に示すようなマルチリニア型の復元力特性を示した。

(2) 柱傾斜復元力特性

3.3節で、柱頭部及び柱脚部の曲げモーメント抵抗が、柱傾斜復元力と密接に関係しており、架構全体の復元力特性を各横架材接合部と柱頭部・柱脚部の曲げモーメント抵抗で表現できることを明らかにしている。よって、本解析では柱傾斜復元力特性を、要素上下端に曲げバネを有するはり要素モデルでモデル化する。

図31に、El Centro NS 250Gal入力時における柱脚部の $M-\theta$ 関係図を示す。図31より、柱脚部の $M-\theta$ 関係は概ね図32に示すような、変形レベルが小さい場合はバイリニア型の復元力特性を示すが、変形が大きくなるとその除荷曲線が3折線となる復元力特性を示した。

(3) 組物の復元力特性

図33に、El Centro NS 250Gal入力時における試験体組物部分の復元力特性を示す。ここで、組物部分の復元力特性とは、試験体を柱－横架材で構成される部分と組物部分の2層からなると仮定し、柱頭部及び試験体頂部で計測した応答加速度にその質点に相当する部分の重量を乗じて求めた層せん断力を縦軸

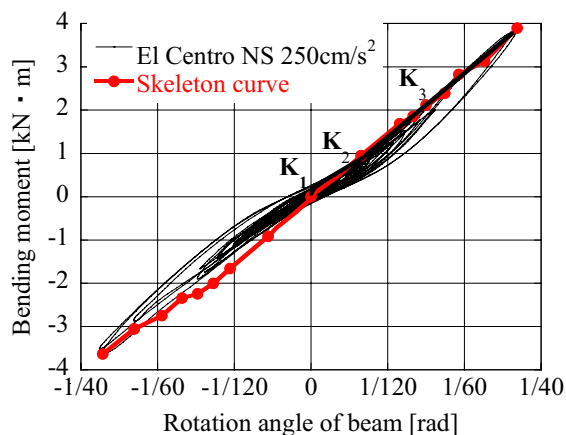


Fig. 27 Average of moment-rotation relationship at all the joint of column-mid wall tie beam of basic specimen in X-direction under El Centro NS

に、柱頭部及び桁で計測した水平変位の差を、組物高さと除して幾何学的に求めた層間変形角を横軸にとって図化したものとする。図33より、組物の復元力特性は概してバイリニア型を示した。

4.3 地震応答解析

本解析では、半剛接合部を有するはり要素の剛性マトリクス $[K(t)]$ を用いて、平面骨組全体の運動方程式を次式のように定式化した。

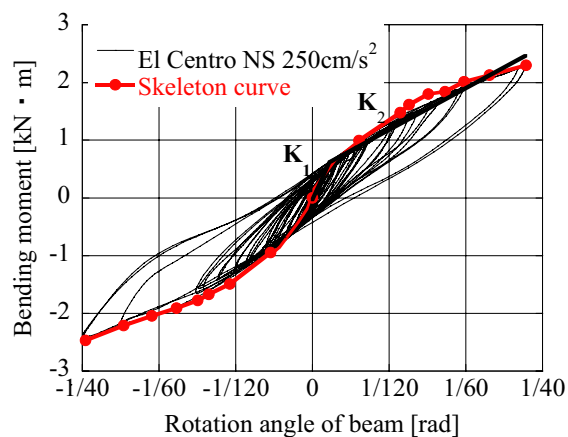


Fig. 28 Average of moment-rotation relationship at all the joint of column-waist tie beam of basic specimen in X-direction under El Centro NS

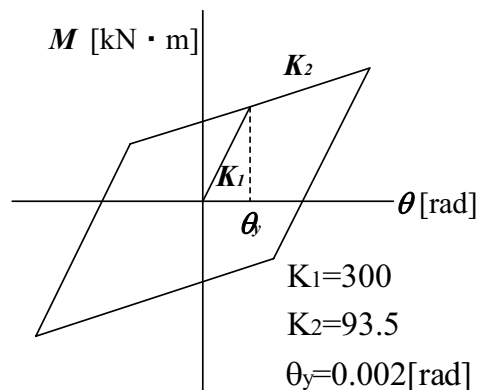


Fig. 29 Hysteresis model of moment-rotation relationship at the joint of column-head tie beam

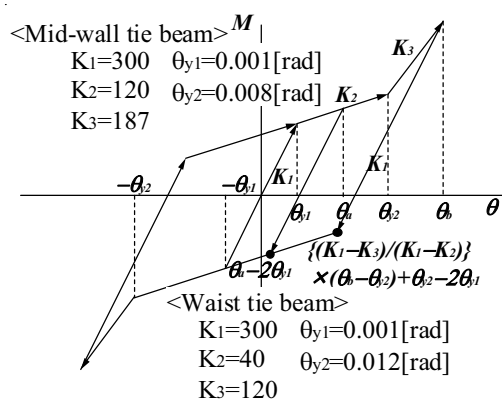


Fig. 30 Hysteresis model of moment-rotation relationship at the joint of column-mid wall tie beam and waist tie beam

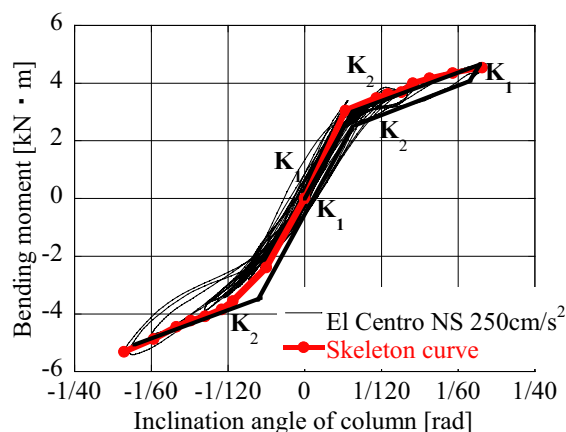


Fig. 31 Average of moment-rotation relationship at all the bottom of column of basic specimen in X-direction under El Centro NS

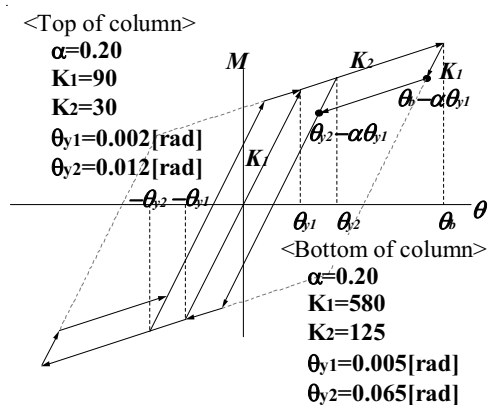


Fig. 32 Hysteresis model of moment-rotation relationship at the top and bottom of column

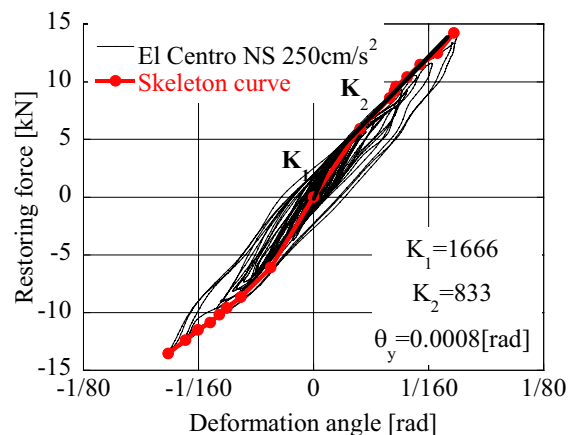


Fig. 33 Restoring force of bracket complex in X-direction under El Centro NS

速度法)を用いて計算した。

本解析に用いた平面骨組モデルを図34に示す。なお、本解析では、標準試験体を対象に解析を行い、前節に示す各モデルを用いて解析を行った。また、比較のため、従来の解析的研究（松本ら（2003））で提案された、横架材接合部の曲げ抵抗についてはスリップバイリニア型復元力特性で、柱傾斜復元力

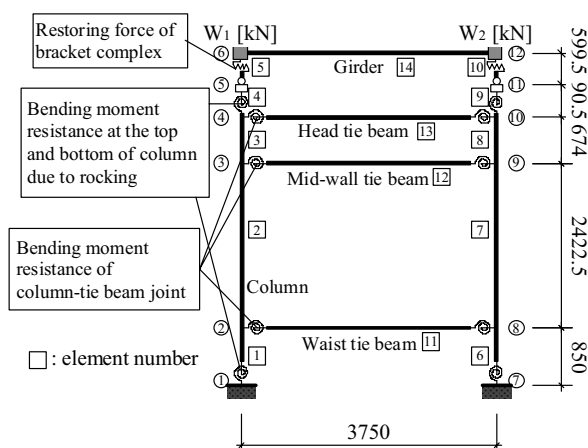
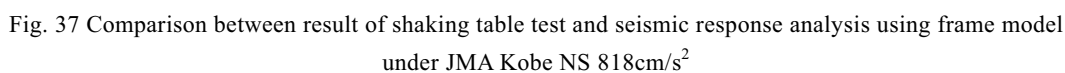
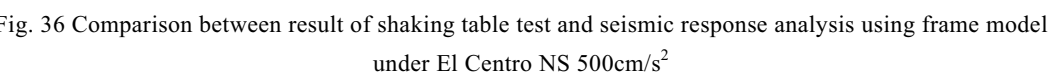


Fig. 35 Analysis model of wooden frame (former)



特性については負勾配を持つ3折線型復元力特性でそれぞれモデル化し、図35に示すような、これら各モデルを材端に有する平面骨組による解析も同時に行った。

図36及び図37にEl Centro NS 500Gal入力時及びJMA Kobe NS 818Gal入力時の試験体頂部変位について、振動台実験結果と解析結果の比較を示す。図36及び図37より、実験結果と本解析結果は比較的良い一致を示した。例えば、従来の解析モデルでは実際の実験結果を追跡できなかったJMA Kobe NS 818Gal入力時において、振動台実験で記録した最大頂部変位は319.5mmであったが、本解析では313.2mmを記録した。従来の解析モデルでは適用が困難な1/10rad程度までに至る大変形領域においても、本解析手法は実験結果を十分に追跡できる事を明らかにした。

5. 結論

本報では、寺院建築物を中心とした伝統木造軸組の実大立体架構試験体を用いて、振動台実験及び静的水平力載荷実験を実施して、構造力学特性の解明を行った。また、得られた各構造力学特性の非線形復元力モデルを用いて伝統木造軸組の構造解析法の構築を行った。得られた結果と考察から以下のよう

- 1) 伝統木造軸組架構全体の復元力特性を明らかにするとともに、柱頭部・柱脚部や柱-横架材接合部の曲げモーメント抵抗性能について示した。これらを利用して、柱に加わる力の釣合関係式を導出した結果、伝統木造軸組では、架構の横架材構成や入力加振波、入力加速度振幅レベルに関わらず、架構全体の復元力が横架材の曲げ抵抗と柱の傾斜を抑える柱頭部・柱脚部の曲げ抵抗に分解できることを明らかにした。
- 2) 柱に加わる釣合関係式を用いて、実験計測から直接的に評価できない柱傾斜復元力を抽出した。その結果、柱頭に設置された組物は、柱傾斜復元力を助長するメカニズムを有することを指摘した。また、既往の研究では転倒限界とされてきた変形レベルにおいて、組物を含む柱の傾斜復元力は負の値を示したにも関わらず、架構全体の復元力は急激な耐力低下も見られず、試験体も転倒しなかったことから、柱傾斜復元力特性の効果が期待できない大変形レベルにおける横架材効果が確認された。
- 3) 半剛接合部を有するはり要素モデルを用いて骨組モデルを作成し、実験で得られた各構造要素の復元力特性を基にして横架材の曲げ抵抗と柱傾斜復元力特性の非線形復元力モデルを構築した。各モデル

を用いた平面骨組による地震応答解析の結果、従来の解析モデルでは適用が困難な1/20rad～1/10radに達する変形領域においても、実験結果を十分に追跡できることを確認し、本モデル化手法ならびに本解析法の妥当性を示した。

本研究で得られた伝統木造軸組の構造力学メカニズムや構造解析法と併せて、今後要素実験などの分析が加味されることで、寺院建築物など伝統木造建築物のより詳細な耐震設計法や耐震補強法の構築に有用と考えられる。

謝 辞

実験及び解析に際して、京都大学大学院工学研究科上谷宏二教授、井上一朗教授から貴重なご意見を頂いた。材料実験では、京大大学生存圏研究所小松幸平教授、瀧野眞二郎助教、森拓郎助教にご協力頂いた。実験では、京都大学防災研究所市川信夫技官、当時京都大学大学院工学研究科清水秀丸氏、西塔純人氏、当時金沢工業大学大学院工学研究科大下達哉氏にご協力頂いた。試験体製作では、アラキ工務店のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 稲山正弘：木材のめり込み理論とその応用－靱性に期待した木質ラーメン接合部の耐震設計法に関する研究－，東京大学学位論文，1991.12
- 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，pp.117-122，2004.8
- 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，pp.129-136，2005.6
- 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，pp.119-125，1986.8
- 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，pp.135-142，2003.12
- 棚橋秀光，清水秀丸，鈴木祥之：歪硬化を考慮した直交異方性木材の弾塑性めり込み性能，第12回日本地震工学シンポジウム，No.0179，2006.11
- 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，pp.252-258，

- 1941.4(a)
 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, pp.259-268, 1941.4(b)
 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, pp.121-127, 2001.5
 文化庁文化財建造物課:重要文化財(建造物)基礎
 診断実施要項, 2001.4
 前野将輝, 鈴木祥之: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, 日本建築学会構造系論文集, No.601,
 pp.113-120, 2006.3
 前野将輝:寺院建築物における伝統木造軸組の構造
 力学特性と耐震性能, 京都大学学位論文, 2007.3(a)
 前野将輝, 西塔純人, 鈴木祥之:伝統木造軸組の実
 大実験による柱に加わる力の釣合関係と柱傾斜復
 元力特性の評価, 日本建築学会構造系論文集,
 No.615, pp.153-160, 2007.5(b)
 松本慎也:半剛接合部を有する建築骨組の構造解析
 に関する研究, 広島大学学位論文, 2000.2
 松本慎也, 藤谷義信, 野島千里, 岩佐裕一, 檜原健
 一:伝統木造建築物の地震応答解析, 構造系論文集
 Vol.49B, pp.251-257, 2003.3
 Kawai, N.: Column rocking resistance in Japanese
 traditional timber buildings, Proceedings of the
 International Wood Engineering Conference, Volume1,
 pp.183-190, 1996.10

Frame Analysis Based on Modeling of Structural Characteristics in Traditional Wooden Frames like Temples

Masaki MAENO*, Yoshiyuki SUZUKI and Shinya MATSUMOTO**

*Maeno Architectural Design Inc. (Former Graduate School of Engineering, Kyoto University)

** Graduate School of Engineering, Hiroshima University

Synopsis

This paper deals with frame analysis based on modeling of structural characteristics from full-scale shaking table tests and static lateral loading tests in traditional wooden frames. From experiments, the equilibrium relationship between the total restoring force and the sum of the bending moment acting on the column is established. Modeling method by averaging of bending moment resistance at all the column-beam joints and restoring force due to column rocking by using bending moment resistance at the top and bottom of column is also determined. Results of frame analysis based on these models quite agree with the results of shaking table tests under large deformation.

Keywords: Traditional wooden frame, Restoring force due to column rocking, Column-beam joint, Bending moment resistance, Seismic response analysis