伝統木造軸組の実大振動実験・静的水平力載荷実験

FULL-SCALE DYNAMIC AND STATIC TESTS OF TRADITIONAL WOODEN FRAME

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*****

Yoshiyuki SUZUKI, Masaki MAENO, Sumito SAITO, Akio KITAHARA,
Masami GOTOU, Tatsuru SUDA and Tatsuya OHSHITA

To clear the response characteristics of Japanese traditional wooden buildings, shaking table tests and static lateral loading tests using a full-scale model of traditional wooden frame were carried out. From experiments, it is found that traditional wooden frame has high performance of deformability and dumping. The hysteretic characteristics of the whole frame obtained from shaking table tests correlate closely with those of static tests. The whole restoring force increases in proportion to increase of vertical load acting on the column capitals in the model with the minimum figuration of tie-beam. The effect of the frames with / without tie-beams on the restoring force were also examined. Then, the restoring force characteristics due to column rocking and the moment resistance of tie-beam play important roles in structural mechanism of traditional wood buildings.

Keywords: Japanese traditional wooden frame, Shaking table tests, Static lateral loading tests, Response characteristics, Hysteretic characteristics, Damage condition

伝統木造軸組, 振動台実験, 静的水平力載荷実験, 応答特性, 復元力特性, 破壊性状

1. 序

我が国の伝統的な木造建築物は、独特の構造的特徴を有する軸組構法を主要な構法として育まれてきた。構造的特徴として、大径柱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、柱一貫接合部のめり込み抵抗、柱脚のすべり挙動などが挙げられる。しかし、木組みの複雑さや木材の不均質性・不確定性ゆえに、詳細な構造解析が極めて難しく、その結果、永年にわたる大工棟梁の知恵が積み重なって築かれてきた構法が構造力学的に解明されていない。また、壁量規定に基づく現行の木造建物の耐震設計法は、耐力壁に支配され、伝統軸組構造には対応していない。一方で文化財としての社寺建築など伝統的な木造建築物の保存・修復技術の早期開発が要望されている。このような現状から、構造的特徴の把握を目的とした実験的研究^{1)~6)}が行われてきた。

柱傾斜復元力特性については、坂¹⁾が社寺骨組の力学的研究を行い、鉛直荷重作用時の変位と復元力の関係を実験的に求め、実際の復元力は柱が完全な剛体である場合と比較して小さくなることを検証し、柱傾斜復元力の定式化を行っている。また、河合²⁾が柱上端及び下端にめり込みが生じているとして円柱、角柱のモデル化を行い、柱の浮き上がり前後における柱傾斜復元力の算定式を提案するとともに、静的実験を行い、坂の研究を参考に定式化を行っている。

柱一貫接合部については、坂³⁾が社寺骨組の力学的研究の中で貫

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は貫の位置に無関係であること、貫が復元力を発生する場合、柱の復元力に貫により生じる復元力を加算しなければならないなどを知見として挙げている。また、後藤⁴⁾が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などを知見として挙げている。

組物については、藤田⁵⁾が伝統的な木造建築の組物の振動実験⁵⁾及び静的水平力載荷実験⁶⁾を行っている。振動実験の結果から、組物を構成する要素が増えるほど剛性、固有振動数は低下し、減衰定数は大きくなること、組物試験体を1質点せん断系モデルとした地震応答解析の結果が実験結果とよく一致することなどを知見として挙げている。また、静的実験から、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、実験結果と理論値を比較することで、組物の剛性をその形状や材料特性から推定する方法を提案している。

しかし、これらの既往の研究は、伝統木造軸組の部分的な構造要素の構造的特徴を把握するために行われた模型実験や実大静的実験であり、多くの構造要素からなる伝統木造軸組の実大試験体による振動実験が行われておらず、実際の伝統木造構造物の地震時挙動や相互関連を有する各構造要素の力学的特性を把握することが困難である。また、伝統木造構造物の破壊性状はほとんど解明されておらず、伝統木造構造物の地震被害を想定する上で変形性能と破壊性状

* 京都大学防災研究所 教授・工博
** 京都大学大学院工学研究科 博士後期課程・工修
*** 京都大学大学院工学研究科 修士課程
**** 鳥取環境大学環境デザイン学科 助教授・博士(工学)
***** 金沢工業大学建築学科 助教授・博士(工学)
***** 木四郎建築設計室 工修
***** ㈱ジェイホーム 工修

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.
Graduate School of Engineering, Kyoto University, M. Eng.
Graduate School of Engineering, Kyoto University
Assoc. Prof., Tottori University of Environmental Studies, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Kanazawa Institute of Technology, Dr. Eng.
Kishirou Architectural Design Office, M. Eng.
J-Home Corp., M. Eng.

を明らかにする必要がある。

そこで、写真1に示すような伝統的木造建築物が有する構造力学的特徴を盛り込んだ実大軸組試験体を製作し、振動台実験及び静的水平力載荷実験を行った。まず2章では、本実験の概要を述べ、実験終了後に行った材料実験結果について示す。3章では、一連の振動実験及び静的実験結果について述べる。

写真1 試験体全体写真

2. 実大振動台実験・静的水平力載荷実験の概要

本実験^{7)~9)}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期にわたって実施した。本研究ではそれぞれ第1期、第2期、第3期実験と称する。表1に各実験の実験日程と実験主目的、表2に実験進行手順を示す。

2.1 試験体概要

第1期実験に使用した試験体を図1に、第2期及び第3期実験に使用した試験体を図2に示す。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。これは実在する社寺建築のほぼ実物大とし、伝統的な軸組構法の典型的な特徴である、礎石の上に置いただけの大径柱、柱一貫構造、組物を盛り込んだ実験モデルである。なお、試験体に用いた木材は、柱が国産ヒノキ、組物はアフリカ産アサメラ、その他の部材は北米産ベイマツとした。楔は第1期及び第2期実験ではアサメラ、第3期実験ではヒノキとした。

礎石は花崗岩(御影石)を使用し、その表面をびしょん仕上げで平滑にした。振動台上に固定された礎石の上に、柱を金物やダボなどで固定することなく設置した。

横架材は頭貫、内法貫、大引で構成した。各接合部は釘を一切使わずに、仕口を用いて接合した。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。第1期試験体における内法貫は断面欠損を伴わない通し貫で、長手方向貫及び短手方向貫が互いに交わらないように、図1に示すように上下にずらして接合し、楔によって固定した。第2期以降の試験体における内法貫は相欠きで接合し、長手短手両方向から楔を用いて固定した。また、第1期試験体と第2期以降の試験体で、内法貫の仕口形状及び頭貫と内法貫の断面寸法を変更した。頭貫及び内法貫の梁せいを約10%小さくし、そ

れぞれ202mmから181mm、174mmから155mmに変更した。これは、仕口形状や断面寸法の変更が、試験体の動特性や復元力特性に与える影響を把握するためである。大引は断面を切り欠いたほぞを、柱のほぞ穴に差し込んだ単純な通しほぞによって接合した。第2期以降の試験体における各貫の仕口のディテールを図3に示す。

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。図4に組物詳細図を示す。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桁梁、頭貫、大引レベルの四隅に火打を取り付け、ボルトで固定した。

また、第3期実験では、火打効果や貫効果を把握するために、柱と頭貫、内法貫、大引で構成された試験体Aを基本試験体とし、試験体Aから大引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、長手方向大引、大引火打を取り除いた試験体Dを用いて実験を行った。表3にそれぞれの試験体仕様を示す。なお、試験体Dにおいて、ねじれの影響から試験体の倒壊の恐れがあったために、短手方向の大引は残して実験を行った。図5～図7に試験体B～Dの試験体図を示す。

試験体の総重量(重りなし)は、第1期試験体で約30.5kN(3.11ton)、第2期試験体で約28.3kN(2.89ton)、第3期試験体Aで約28.6kN(2.92ton)であり、各試験体での重量差は、横架材の断面寸法を変更したことや部材の乾燥収縮、損傷の大きかった部材を取り替えたことによるものである。また、第3期実験試験体Dを使用した静的水平力載荷実験では、鉛直荷重の増加による架構全体の復元力に及ぼす影響を把握するために、桁梁上に設置した重りの増設も行った。増設した重りは、約80.3kN(8.19ton)とした。

2.2 振動台実験

本振動実験では、まず試験体の動特性の把握を目的として、スイープ波加振実験及び自由振動実験を行った。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、その他1952 Taft、1968 Hachinoheを用い、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1方向を主とし、水平2方向加振も行った。また、静的水平力載荷実験との比較に用いた第3期試験体Dによる振動実験では、試験体長手1方向のみ正弦波加振実験を行った。用いた正弦波の卓越振動数は、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、El Centro NS、JMA Kobe NS及び正弦波の長手1方向入力による実験結果を示す。

2.3 静的水平力載荷実験

本静的実験では、柱傾斜復元力を把握することを目的として、表3に示す柱一頭貫だけの単純な軸組構造である試験体Dを用いて実験を行った。図8に静的実験概要を示す。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。

表1 実験の日程と主目的

実験期間	実験日程	実験主目的
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	貫効果・柱傾斜復元力特性の把握

表2 実験の進行手順

実験名	実験内容	実験目的・説明
第1期実験	実験(I) スイープ・自由振動実験	地震動波入力前の動特性把握
	実地震動波加振実験	微小加振～1/40rad程度まで
	仕口タイプ粘弾性ダンパー付実験 ⁽¹⁰⁾	
	実験(II) スイープ・自由振動実験	ダンパー付実験後の動特性把握
	実地震動波加振実験	変形角1/40rad程度までの加振
	実験(III) スイープ・自由振動実験	1/40rad変形経験後の動特性把握
第2期実験	実験(I) スイープ・自由振動実験	1/40rad変形経験後の動特性把握
	実地震動波加振実験	損傷が生じるまでの加振
	実験(II) スイープ・自由振動実験	1/40rad変形経験後の動特性把握
	実地震動波加振実験	損傷が生じるまでの加振
	実験(III) スイープ・自由振動実験	地震動波入力後の動特性把握
	実地震動波加振実験	破壊に至るまでの大加振

実験名	実験内容	実験目的・説明
第2期実験	常時微動計測	微小領域の動特性把握
	実験(I) スイープ・自由振動実験	地震動波入力前の動特性把握
	実地震動波加振実験	微小加振～1/40rad程度まで
	仕口タイプ粘弾性ダンパー付実験 ⁽¹⁰⁾	
	実験(II) スイープ・自由振動実験	1/40rad変形経験後の動特性把握
	実地震動波加振実験	損傷が生じるまでの加振
第3期実験	実験(III) 実地震動波加振実験	破壊に至るまでの大加振
	常時微動計測	微小領域の動特性把握
	実験(I) スイープ・自由振動実験	地震動波入力前の動特性把握
	実地震動波加振実験	微小加振～1/40rad程度まで
	常時微動計測	地震動波後の動特性把握
	実験(II) スイープ・自由振動実験	地震動波入力前の動特性把握

実験名	実験内容	実験目的・説明
第3期実験	常時微動計測	微小領域の動特性把握
	実験(I) スイープ・自由振動実験	地震動波入力前の動特性把握
	実地震動波加振実験	微小加振～1/40rad程度まで
	常時微動計測	地震動波後の動特性把握
	実験(II) スイープ・自由振動実験	地震動波入力前の動特性把握
	実地震動波加振実験	微小加振～1/40rad程度まで
第3期実験	常時微動計測	地震動波後の動特性把握
	粘性体制震壁付実験 ⁽¹¹⁾	
	常時微動計測	微小領域の動特性把握
	実験(I) スイープ・自由振動実験	地震動波入力前の動特性把握
	実地震動波加振実験	微小加振～1/40rad程度まで
	常時微動計測	地震動波後の動特性把握
第3期実験	粘性体制震壁付実験 ⁽¹¹⁾	
	スイープ加振	地震動波入力前の動特性把握
	正弦波加振実験	15Gal～50Galまで
	静的水平力載荷実験	構造的特徴の挙動把握

図3 貫仕口詳細図

図4 組物詳細図

図5 第3期試験体

図1 第1期試験体図

図2 第2期・第3期試験体図

表3 試験体の仕様

試験体名	試験体軸組部分の貫構成			大引火打
	頭貫	内法貫	大引	
試験体A	○	○	○	○
試験体B	○	○	○	○
試験体C	○	○	○	○
試験体D	○	○	○	○

図6 第3期試験体C (内法貫なし)

図7 第3期試験体D (内法貫・大引なし)

2.4 計測計画

図9に計測位置概要図を示す。試験体各部の変位計測については、レーザー変位計及びワイヤー変位計を用いて計測した。主な計測は、柱頭部及び柱脚部の水平変位、柱脚のすべり変位、頭貫と桁梁の相対水平変位である。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、振動台上、各柱の柱脚部、柱頭部、桁梁、コンクリート製板上で計測した。柱と貫の相対回転角は、治具を用いて柱-貫接合部に斜めに取り付けた撓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算出した。第2期実験より、各部の挙動をより正確に把握するために、変位計、加速度計に加え、柱軸力計測のためにロードセルを礎石の下に設置し、また曲げモーメント計測のためにひずみゲージを試験体各部に取り付けた。第2期及び第3期実験で行った常時微動計測実験では、速度計を振動台上、試験体の頭貫上、コンクリート製板上に設置して、計測を行った。

2.5 柱・貫の材料特性

第1期及び第3期実験の終了後に、試験体を解体し、京都大学木質科学研究所において含水率及び動的ヤング係数の計測を行った⁷⁾。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。第3期実験終了後には、第2期実験で使用した部材についても材料実験を行った⁷⁾。振動実験においてひび割れが生じた試験体長手方向の内法貫、大引については、3等分点4点曲げ試験を行い、ヤング係数を計測した。また、長手方向の頭貫についても同様に実験を行った。表4に結果を示す。なお、表4中の値は各部材の平均値をそれぞれ示す。含水率や部材寸法の計測では、部材の乾燥収縮の影響が見られた。また、非破壊的に求めた動的ヤング係数は、強度性能の推定に十分有効であると考えられる。

図8 静的水平力載荷実験の概要図

図9 計測位置の概要図

表5 常時微動計測による試験体の1次固有振動数 (Hz)

実験名	試験体	実験段階	方向	
			長手方向	短手方向
第2期		実験前	1.32	1.46
		実験後	—	—
第3期	A	実験前	1.26	1.29
		実験後	1.15	1.29
	B	実験前	1.12	1.29
		実験後	1.11	1.28
	C	実験前	1.10	1.17
		実験後	1.11	1.17

表6 スイープ波加振実験による試験体の1次固有振動数 (Hz)

実験名	試験体	実験段階	方向	
			長手方向	短手方向
第1期		(I) 前	0.99	1.00
		(II) 前	0.86	0.95
		終了後	0.77	0.92
第2期		(I) 前	0.84	0.89
		(II) 前	0.81	0.83
		終了後	0.77	0.79
第3期	A	実験前	0.87	0.84
	B	実験前	0.77	0.79
	C	実験前	0.66	0.76
	D	実験前	0.50	—

表4 部材の材料特性

部材名	樹種	実験実施期間	公称断面	含水率	動的ヤング係数	曲げヤング係数
			mm	%	kN/mm ²	kN/mm ²
柱	檜	第1期	φ=308	19.6	7.42	—
		第3期	φ=308	13.7	6.43	6.85
桁梁	米松	第1期	116×327	22.3	9.35	—
		第3期	113×322	10.0	10.32	7.75
頭貫	米松	第1期	116×202	19.6	10.13	—
		第3期	114×181	9.2	10.64	9.12
内法貫	米松	第1期	128×174	18.1	12.75	9.13
		第3期	126×155	9.9	11.12	10.52
大引	米松	第1期	145×202	18.0	8.10	7.05
		第3期	142×200	11.2	12.71	10.71

表7 自由振動実験による試験体の対数減衰率 (%)

実験名	試験体	実験段階	方向	
			長手方向	短手方向
第1期		(I) 前	8.6	9.1
		(II) 前	8.7	10.5
		終了後	10.0	10.6
第2期		(I) 前	10.7	8.1
		(II) 前	7.8	9.9
		終了後	10.0	10.6
第3期	A	実験前	7.3	11.9
	B	実験前	7.8	11.3
	C	実験前	8.2	12.1
	D	実験前	7.4	—

3. 実験結果

3.1 試験体の動特性

表5に第2期及び第3期実験において計測した常時微動計測より、得られた速度フーリエスペクトルから求めた伝達関数を用いて算出した試験体の固有振動数を示す。また、表6にスイープ波加振実験より得られた加速度フーリエスペクトルから求めた伝達関数を用いて算出した試験体の固有振動数を示す。また、表7に自由振動実験より得られた変位データを用いて、隣り合う1周期ごとの振幅比から算出した対数減衰率を示す。

表5より、常時微動計測から得られた第3期実験における試験体の固有振動数は、第2期実験と比べて小さい値を示した。これは、部材の乾燥収縮などによる木組みの緩みが原因と考えられる。また、試験体A～Dの結果より、常時微動計測では、火打や貫を減じた効果はほとんど見られなかった。

表6より、スイープ波加振から得られた試験体の固有振動数は、第1期、第2期実験では実験段階が進むにつれて低下する傾向を示した。また、試験体A～Dの結果から、火打や貫を減じたことによって、固有振動数が低下する傾向が明らかとなり、微小変形領域では現れなかった火打や貫の効果が示された。

表7より、自由振動実験から算出した試験体の対数減衰率は、長手方向で約7～11%、短手方向で約8～12%という高い値が計測された。これは、本試験体のような伝統構法が持つ特有な柱-貫接合部や、柱頭部に取り付けた組物など、多くの減衰要素による影響により、高い減衰性能が得られたものと考えられる。

3.2 試験体の破壊性状

第1期及び第2期実験において、柱-貫接合部付近で損傷が確認されている⁷⁾。本節では、損傷が生じた柱-内法貫及び柱-大引各接合部について、実地震動波入力実験の進行状況と共に述べる。

(1) 柱-内法貫接合部

写真2 柱-内法貫接合部の損傷
(柱部の割れ (第2期))

写真3 大引仕口折損状況
(第1期実験)

ひび割れは変形角 $1/40\text{rad}$ を超える変形レベルより、柱-貫接合部付近で発生することが目視により確認された。しかし、その後の加振でひび割れは伸張したが、第1期、第2期実験共に貫自体の破壊や折損には至らなかった。 $1/10\text{rad}$ 程度の大変形レベルでは内法貫ではなく、柱側に損傷が見られるようになった。写真2は、第2期実験で、最大加速度振幅を 700Gal に調整したJMA Kobe NS波(以後、JMA Kobe NS 700Gal のように記す。)入力時(最大層間変形角 $1/14\text{rad}$)において、接合部付近の柱表面に生じたひび割れの様子を示す。

(2) 柱-大引接合部

写真3は、第1期実験終了後、解体時に確認された大引仕口の折損の様子を示す。同様の折損は、第2期実験にも見られた。写真3より、ほぼ断面の最も小さい部分で折損していたことが分かる。ひび割れは内法貫と同様、層間変形角 $1/40\text{rad}$ を超える変形レベルより多数発生することが確認されたが、折損は柱はぞ穴内部で生じていたため、目視だけの観察では折損に至る入力加振波を正確に把握することは出来なかった。

3.3 試験体の応答特性

図10に、第1期実験のEl Centro NS 400Gal 入力時(最大層間変形角 $1/24\text{rad}$)における、振動台上、柱頭部、桁部の試験体長手方向の水平加速度及び水平層間変位の時刻歴を示す。ここで、各部の加速度は対象とする構面に該当する各柱における平均、柱-貫軸組部の層間変位は柱頭部と柱脚部の水平変位の差から求めた。

柱頭部及び桁部の応答加速度を見ると、両者ともほぼ同様の波形を示している。また、柱-貫軸組部と組物部分の層間変位は変形レベルは大きく異なるがほぼ相似な波形を示し、概ね1次モードで振動していることが明らかとなった。

3.4 試験体の復元力特性

(1) 試験体の復元力特性

図11に、第1期から第3期実験のEl Centro NS 250Gal 入力時における試験体長手方向の復元力特性を、図12及び図13に一連のEl Centro NS波、JMA Kobe 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。層せん断力は試験体の応答加速度に試験体上部の重量を乗じ、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。図12、13より、第2期及び第3期実験の復元力特性の包絡曲線は同様の傾向を示し、第1期実験に比べて剛性が低下する傾向が見られたことから、内法貫仕口の形状を変更し、頭貫及び内法貫の梁せいを小さくした試験体を使用した影響が見られた。第2期実験より、柱-貫接合部のひび割れが伸張し、層間変形角が $1/15\text{rad}$ を超えても耐力が急激に低下する傾向はほとんどなく、大引折損の影響も見られない

図10 試験体の応答加速度・変位 (第1期: El Centro NS 400Gal)

図11 試験体の復元力特性
(El Centro NS 250Gal 入力時: 長手方向)

図12 試験体の復元力特性の包絡曲線
(El Centro NS: 長手方向)

ことから、伝統木造軸組は変形性能が高い構造と考えられる。

次に、火打や貫効果と復元力特性の変化について、図14に第3期試験体A～CのEl Centro NS 200Gal入力時における試験体長手方向の復元力特性を、図15に一連のEl Centro NS波入力実験における試験体長手方向の復元力特性の包絡曲線を示す。図14、15より、貫を減じるに従って剛性、耐力が低下する傾向が見られた。

(2) 固有振動数の評価

ここでは、第3期実験における実地震動波入力時の試験体の復元力特性を利用して、試験体の固有振動数を算出し、火打や貫効果の影響を示す。図16に、入力した全ての実地震動波に対する試験体の固有振動数を、試験体の復元力特性の割線剛性による等価固有振動数から算出し、横軸にその最大層間変形角をとって図16に示す。

図16より、各試験体の等価固有振動数は、変形に寄らず試験体A>試験体B>試験体Cの関係を示した。変形角1/100rad程度で、各試験体の等価固有振動数は試験体Aが約0.60Hz、試験体Bが約0.55Hz、試験体Cが約0.40Hzを示した。また変形角1/50rad程度で、試験体Aが約0.50Hz、試験体Bが約0.45Hz、試験体Cが約0.40Hzを示した。試験体の固有振動数は、変形が進むと対数関数的に減少する傾向が明らかとなり、内法貫を減じた試験体Cでその傾向が強く見られた。

図13 試験体の復元力特性の包絡曲線
(JMA Kobe NS: 長手方向)

図14 試験体の復元力特性 (第3期試験体A～C)
(El Centro NS 200Gal入力時: 長手方向)

(3) 等価減衰定数の評価

ここでは、復元力特性の最大ループに着目し、最大ループ面積をそのループの最大変形時のポテンシャルエネルギーで除して等価減衰定数 h_e 算出し、試験体の減衰性能評価を行った。図17に第1期から第3期実験の一連のEl Centro NS波及びJMA Kobe NS波入力における試験体の等価減衰定数を、図18に試験体A～Cの一連のEl Centro NS波入力における試験体の等価減衰定数を、横軸にその最大層間変形角をとってそれぞれ示す。

図17及び図18より、いずれの場合も約5～15%であり、比較的高い減衰性能を示した。また、図13より火打や貫要素の変化と等価減衰定数の変化に相関はほとんどなく、等価減衰定数には火打効果や貫効果は見られなかった。

(4) 振動実験と静的実験の比較

ここでは、試験体の復元力特性について、試験体Dの振動実験及び静的実験結果の比較を行う。図19に、振動実験: 正弦波0.60Hz 35Gal入力時及び静的実験: 変位量±140mm加力時における試験体の復元力特性を示す。図19より、振動実験結果と静的実験結果は概ね一致しているといえる。

(5) 鉛直荷重の増加による復元力特性の変化

ここでは、本静的実験で行った重りの増設による鉛直荷重の増加

図15 試験体の復元力特性の包絡曲線
(第3期試験体A～C El Centro NS: 長手方向)

図16 全地震動入力時における試験体の等価固有振動数の変化
(第3期試験体A～C: 長手方向)

が試験体の復元力特性に及ぼす影響について考察する。図20に、試験体Dにおける重り増設あり静的実験：変位量 $\pm 155\text{mm}$ 加力時と、重り増設なし静的実験：変位量 $\pm 190\text{mm}$ 加力時の試験体の復元力特性の比較を示す。既往の研究より^{11,12)}、柱傾斜復元力特性は履歴ループを描くことなく、柱径の0.1倍程度を超える変形レベルから負勾配となるが、試験体の復元力特性は、頭貫や組物などの効果が加わり、履歴ループを描いており、急激に耐力低下することなく安定した形状を保っている。試験体の最大復元力は、重り増設なし静的実験において、正加力時で 4.89kN 、負加力時で 5.17kN を示したのに対し、重り増設あり静的実験では、正加力時で 7.37kN 、負加力時で 7.65kN と増加している。柱1本当当たりの鉛直荷重は、柱脚部ロードセル計測値で約 32.7kN (3.34ton) から約 52.8kN (5.39ton) に増加しており、 161.5% の鉛直荷重の増加に対して、復元力は正加力側が 150.7% 、負加力側が 148.0% の増加を示した。鉛直荷重の増加と試験体全体の復元力の増加は完全な比例関係ではなく、復元力は鉛直荷重増加に対して正側、負側で 93.3% 、 91.6% の増加にとどまっている。これは、頭貫や組物など鉛直荷重に関わらない抵抗要素が含まれているためと考えられる。また、静的実験で用いた試験体Dは、横架材が頭貫だけであったため、柱傾斜復元力特性を顕著に見ることができた。

図17 試験体の等価減衰定数の変化
(El Centro NS, JMA Kobe NS: 長手方向)

図18 試験体の等価減衰定数の変化
(第3期試験体A～C El Centro NS: 長手方向)

4. まとめ

本研究では、伝統的木造建築物が有する構造的特徴を盛り込んだ実大軸組試験体を製作し、振動台実験及び静的水平力載荷実験を行って、伝統木造軸組の振動特性、復元力特性とともに破壊性状について調べ、得られた実験結果とその考察から以下のようにまとめられる。

- 1) 試験体の固有振動数について、常時微動計測の結果からは火打や貫を減じた影響はほとんど見られなかったが、スイープ波及び実地震動波加振実験からは火打や貫を減じた影響が見られた。また、試験体の減衰定数については、自由振動実験による対数減衰率は約7～12%であり、実地震動入力による等価減衰定数 h_{eq} は約5～15%であり、比較的高い減衰性能を示している。柱一貫接合部のモーメント抵抗などは、スリップ特性が見られることから伝統的木造軸組構法建物の減衰性能については、今後、検討を要する。
- 2) 柱一貫接合部に生じるひび割れは $1/40\text{rad}$ を超える変形レベルで多数発生することが、目視観察で確認された。また、仕口形状が単純通しほぞであった大引仕口の折損が、試験体解体時に確認された。しかし、試験体の耐力は、試験体各部のひび割れが伸張し、 $1/15\text{rad}$ を超える変形レベルにおいても急激に低下する傾向はなく、大引仕口の折損の影響も見られないことから、伝統木造軸組の高い

図19 試験体の復元力特性の比較
(第3期実験 試験体D: 長手方向)

図20 鉛直荷重の増加による試験体の復元力特性の変化
(第3期実験 試験体D: 長手方向)

変形性能が明らかとなった。

3) 架構全体の復元力は、柱傾斜復元力と横架材によるモーメント抵抗などから構成されと考えられ、横架材の数が少なくなるに従い、架構全体の剛性や耐力が低下しており、柱一貫接合部のモーメント抵抗は重要な抵抗要素であることが明らかとなった。また、横架材の数が少ない架構においては、柱傾斜復元力特性がより顕著に見られ、柱傾斜復元力の鉛直荷重の増加による影響が大きく、架構全体の復元力に大きく寄与していることが分かった。

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特性、さらに組物や柱脚部の挙動、柱一貫接合部のモーメント抵抗など各部構造要素の詳細な分析等について報告する。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究（A）（1）、課題番号：13305036、研究代表者：鈴木祥之）及び平成11年度京都市防災対策調査研究助成金のもとに実施した。また日本建築学会「木構造と木造文化の再構築」特別研究委員会の研究活動の一環として行った。実験に際して、京都大学上谷宏二教授から貴重なご意見を頂き、材料実験では京都大学木質科学研究所小松幸平教授、瀧野真二郎助手、森拓郎助手、京都大学大学院農学研究科の学生諸君、実験では京都大学防災研究所技官市川信夫氏、京都大学大学院博士課程清水秀丸氏他、京都工芸繊維大学、金沢工業大学の学生諸君、ビデオ撮影では金沢工業大学主任技師木谷幸造氏にご協力頂きました。試験体製作ではアラキ工務店のご協力を、また（株）鴻池組、（株）竹中工務店、（株）大林組からのご支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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

- 2) Naohito Kawai: Column Rocking Resistance in Japanese Traditional Buildings, Proceeding of the International Wood Engineering Conference Volume1, pp183-190, 1996.10
- 3) 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
- 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
- 5) 坂本功、藤田香織他：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（その1）～（その2）、pp37-40、1997、日本建築学会大会学術講演梗概集、vol.C-1、（その3）～（その4）、pp263-266、1998.9、（その5）、pp159-160、1999.9、（その6）、pp147-148、2000.9、（その7）、pp171-172、2001.9
- 6) 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
- 7) 鈴木祥之他：伝統木造軸組の実大振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol.C-1、（その1）～（その12）、pp103-126、2000.9、（その13）～（その19）、pp177-190、2001.9、（その20）～（その23）、pp239-246、2002.8
- 8) 鈴木祥之、北原昭男、須田達、前野将輝、西塔純人：伝統木造軸組の実大振動実験による動特性、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.1349-1354、2002.11
- 9) 鈴木祥之、後藤正美、大下達哉、前野将輝：伝統木造軸組の柱傾斜復元力特性に関する実大静的・動的実験、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.1361-1366、2002.11
- 10) 岩佐裕一、樫原健一、鈴木祥之：仕口ダンパーを用いた伝統木造軸組の耐震補強—実大振動実験と応答解析—、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.1815-1820、2002.11
- 11) 山本雅史、東野雅彦、木林長仁、長瀬正、佐分利和宏、鈴木祥之：粘性体制震壁を用いた伝統木造軸組の制震に関する振動台実験、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.1809-1814、2002.11

（2003年3月10日原稿受理、2003年9月2日採用決定）