

東三河伝統構法民家の耐震性能評価実験

STATIC LOADING TEST FOR EVALUATION OF SEISMIC CAPACITY OF TRADITIONAL HOUSE IN HIGASHI-MIKAWA

中治弘行^{*1} 鈴木祥之^{*2} 後藤正美^{*3} 岩本いづみ^{*4}

NAKAJI Hiroyuki SUZUKI Yoshiyuki GOTOU Masami and IWAMOTO Izumi

The objective of this study is to confirm the seismic capacity of a wooden house constructed with Japanese traditional structural method which is recognized less earthquake proof in Building Standard Law today. In September 2004, horizontal loading experiment of a wooden house built in 1898 in Higashi-Mikawa region in Japan was conducted to investigate the seismic performance of such a house built with traditional structural method. The maximum load P_{max} was 106.6 kN and the average deformation angle at P_{max} was about 1/10 rad. The failure occurred at the joint of column and Sashi-Gamoi, when the average deformation angle was about 1/25 rad. After bending failure of all columns occurred around P_{max} , the house still kept the loading capacity more than 80% of P_{max} . Total weight of the house was about 661kN which was examined by weighing members and parts of it after the loading test. The house concerned is much more anti-seismic than expected in the Law because the base shear coefficient at P_{max} was $C_0 = 0.16$.

Keywords: *wooden house, seismic capacity, traditional structural method, horizontal cyclic loading test, base shear coefficient*

木造住宅、耐震性能、伝統構法、繰り返し水平加力実験、ベースシア係数

1 はじめに

愛知県田原市で改築予定の築 100 年以上の伝統構法木造民家を詳細に調査し、構造的特徴を把握するとともに微動計測、振動実験、静的加力実験等を実施して、振動特性と耐震性能を明らかにするとともに、当時の建築技術についての理解を深める。

実在木造住宅の力学特性や振動特性などの構造性能を現地での調査や実験を通して把握することで、実験室で行われる要素実験よりはるかに多くの知見を得ることが期待できる。木造住宅については、要素実験の組み合わせで建物全体の構造性能を評価する手法を構築中であり、リファレンスとなる実在木造住宅の実験結果は貴重である。同様の伝統構法木造住宅に関する実験には、後藤らによる徳島県の古民家を対象とした調査実験^{1)~4)}や中園、坂本らによる山口県の伝統的木造住宅の実験^{5)~7)}などがある。本調査実験では、東三河の築 100 年以上の伝統構法木造民家を詳細に調査し、構造的特徴を把握するとともに微動計測、振動実験、静的加力実験等を実施して、振動特性と耐震性能を明らかにすることを目的とする。

本調査実験では、現地での実測として、建物の構造詳細調査、木材の強度・耐久性等調査、静的加力実験、重量計測、微動計測を行った。実験終了後、計測データに基づいた限界耐力計算、

地震応答解析、損傷検出同定シミュレーションを行った。本報では、調査実験対象建物の概要と構造詳細調査⁹⁾および水平力載荷実験^{8), 12)}について述べる。

2 調査実験対象建物の概要

図 1 に示す愛知県田原市の O 邸は明治 31 年に建築された伝統構法による木造住宅である。大きな大黒柱はないが、壁のほとんどない、いわゆる田の字の平面形式となっている。建築された当時は屋内で養蚕を行っていたので、西側の和室の床下には暖房のための炉の跡が残っている。加力実験に先だって行った構造調査から、柱は礎石の上に立っており、南北方向にのみ足固め材が通っていることがわかった。しかし、この足固め材は、特に下面の腐食が激しい。通し柱には差鴨居が取り付け、差鴨居の継ぎ手には車知栓が用いられている。差鴨居の上には、欄間あるいは土塗りの小壁がついている。小屋組は 3 重の和小屋で、屋根は、土葺き瓦である。

主要な部材の樹種は、通し柱がヒノキ、差鴨居がマツ、足固め材がツガである。屋根の野地には板ではなく竹が用いられ、その上に葺き土が 10cm 以上乗っている。

X11 構面より東側の屋根裏部分は、床が張られ、物置として

*1 高松工業高等専門学校 建設環境工学科 講師・工博

*2 京都大学防災研究所 教授・工博

*3 金沢工業大学環境・建築学部建築学科 助教授・工博

*4 大阪府立工業高等専門学校建設工学科 講師・工博

Assistant Prof., Department of Civil Engineering, Takamatsu National College of Technology, Dr. Eng.

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

Assoc. Prof., Dept. of Civil and Environmental, College of Environmental Engineering and Architecture, Kanazawa Institute of Technology, Dr. Eng.

Assistant Prof., Department of Civil Engineering, Osaka Prefectural College of Technology, Dr. Eng.

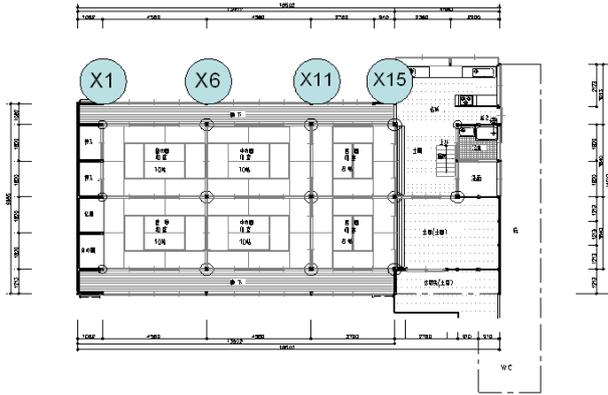


図1 調査実験対象住宅

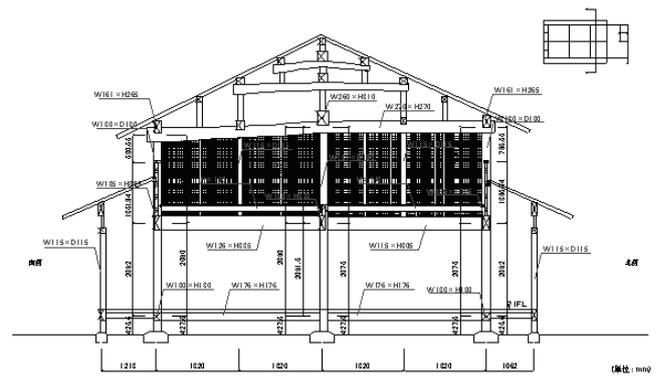
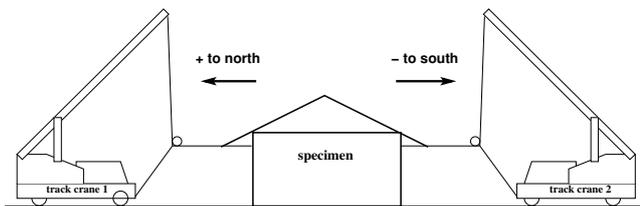
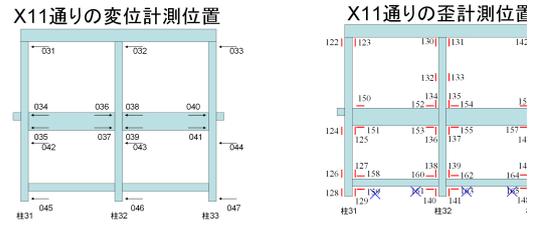


図2 X11 構面の構造詳細図



(a) 加力方法



(b) 計測位置 (X11 構面)

図3 加力と計測の方法

利用されている。X11 構面には柱頭 (初重) まで土塗り小壁があるため、また、屋根裏への階段が X15 構面の東側にあるので、建物の東側は西側に比べて剛性が高いことが予想される。西側の妻面は外壁として荒壁があるが損傷が大きく、耐力壁としての性能はあまり期待できない。

2.1 構造の特徴

図1に示す愛知県田原市のO邸は明治31年に建築された伝統構法による木造住宅である。大きな大黒柱はないが、壁のほとんどない、いわゆる田の字の平面形式となっている。建築された当時は屋内で養蚕を行っていたので、西側の和室の床下には暖房のための炉の跡が残っている。加力実験に先だって行った構造調査から、柱は礎石の上立っており、南北方向にのみ足固め材が通っている。

しかし、この足固め材は、特に下面の腐食が激しい。通し柱には差鴨居が取り付け、差鴨居の継ぎ手には車知栓が用いられている。差鴨居の上には、欄間あるいは土塗りの小壁がついている。小屋組は3重の和小屋で、屋根は、土葺き瓦である。

主要な部材の樹種は、通し柱がヒノキ、差鴨居がマツ、足固め材がツガである。屋根の野地には板ではなく竹が用いられ、その上に葺き土が10cm以上乗っている。

X11 構面より東側の屋根裏部分は、床が張られ、物置として利用されている。X11 構面には柱頭 (初重) まで土塗り小壁があるため、また、屋根裏への階段が X15 構面の東側にあるので、建物の東側は西側に比べて剛性が高いことが予想される。X6 構面にも土塗り小壁があり、水平抵抗力が期待できる。ただし、X11 構面とは異なり、壁が天井裏で途切れて小屋組の初重との間に壁がないため、X11 構面より水平抵抗が弱いと予想された。西側の妻面は外壁として荒壁があるが損傷が大きく、耐力壁としての性能はあまり期待できない。

2.2 構造詳細調査

木造建物の構造を的確に捉えることは、実験結果の分析や今後の解析において、大変に重要なことである。対象となる東三河伝統木造民家の構造詳細を下記の手順で把握するために、使用されている木材、個々の構造要素の特性、構造総体の特性を調査した。構造調査は1次と2次の2回行い、模型や詳細図の作成に当たった。

構造調査に先立ち、各部材 (柱、梁など) や壁について統一した番号でデータを作成するために番号付けを行った。部材の断面寸法、含水率、ピロディン値などのデータを統一したデータシートに格納した。ナンバリングでは、各構造要素に番号をプレートに記入して釘で留めた。

1次の構造詳細調査では、主に梁間方向の軸組の採寸調査を中心に行った。2次の構造詳細調査では、主に桁行方向の軸組の三寸調査を行った。湾曲部材は基本的には軸線上で左右、中央の3カ所のデータを測定した。

1次構造調査 (望月、中治、岩本を中心に実施された) に基づき、各梁伏図あるいは断面図を作成した。この構造図面に基いて、1/50の軸組模型を作成し、実験計画や1次構造の調査での漏れがないかを確認し、1次構造調査の各図面を修正した。2次構造調査では、この1/50模型を使いながら、1次構造調査では不明な部分や調査漏れをチェックしつつ構造図面の精度を向上させた。

今後の解析や実験結果の整理に必要な構造要素を選定し、実験終了後、解体時に必要な接合部や土壁部分をサンプリングあるいは解体して、込み栓やほぞなどの断面寸法といった詳細なデータを記録した。

構造詳細調査の結果に基づいて、東西方向、南北方向の主要な構面について詳細図を作成した。X1~X15 構面の詳細図を図2に示す。この図では右側が北である。図2に示すように、12本の通し柱を「柱11」~「柱43」と名付け、変位やひずみ計測

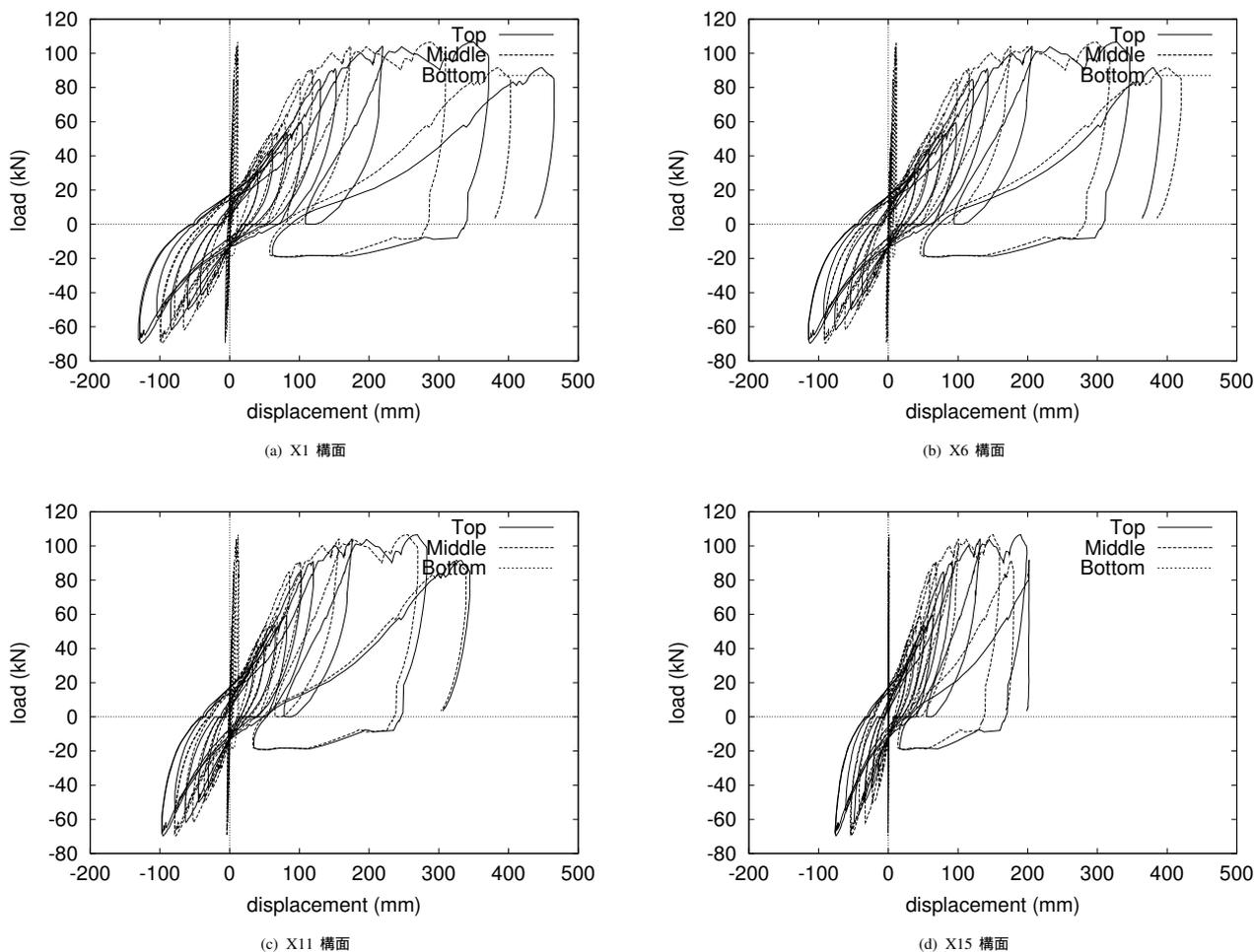


図 4 荷重と変形の関係

の場所を決定した。

2.3 建物重量算定

静的加力実験終了後、解体作業のかたわら、容量 100kg の台秤 2 台を用いて可能な限り実測した。構造部材のうち、ひずみを計測した通し柱、差鴨居、足固め材についてはすべて、小屋組の部材については、構造詳細調査でナンバリングしたものを実測した。その他の部材については、構造詳細調査で得られた材積と実験後に行われた材料試験結果¹⁰⁾から得られた比重から算定した。

屋根重量については、屋根面 1m² の瓦と葺き土、棟などでは長さ 1m の瓦と葺き土を実測して瓦 1 枚当たりの重量を算出した。瓦は、種類ごとに枚数を数えた結果、平瓦は 5485 枚、鬼瓦は 9 枚であり、のし瓦・棟瓦の延べ長さは約 49m であった。これらの値と解体時に計測した瓦の単位重量によって重量を算出した。屋根面の総面積は約 293m² であり、単位重量 0.34kN/m² を乗じることによって重量を算出した。母屋部分の屋根下地は竹であった。一方、建物外周の底部分の屋根下地は野地板であった。野地板、垂木ともに比重は、材料調査¹⁰⁾により得られた全部材に対する比重の平均値である 0.51 から重量を算出した。

土壁重量については、解体作業中に 1000mm × 800mm × 75mm の小壁をサンプルとして健全な形で取り出し、重量を計測した。これを基準として、単位体積当たりの重量を定め、部位により壁厚さや見付け面積に応じて比例計算で合計した。建物東側のモルタル壁と浴室内部のタイル壁に関しては、単位面

積当たりの重量が 75mm 厚の土壁と同じであるとして算出した。

以上の実測および仮定に基づき、それぞれの要素の重量が表 1 のように算定され、建物全体の重量は 660.75kN であった。

表 1 建物重量算定結果

項目	重量 (kN)	小計 (kN)	全体重量 (kN)	
軸組部分	構造部材	132.16	372.81	660.75
	壁	240.66		
屋根面	平瓦	85.47	287.93	
	葺き土	99.85		
	棟瓦	5.98		
	のし瓦	23.16		
	葺き土(のし)	53.65		
	鬼瓦	1.05		
	野地板(竹)	14.38		
	垂木	4.39		

3 静的加力実験

3.1 静的加力実験の概要

図 1 に示す調査実験対象住宅の南北方向に正負繰り返し加力を行った。正負繰り返し加力は、(1) 北へワイヤーで引っ張る、(2) それを荷重が 0 になるまで緩める、(3) 南へ引っ張る、(4) 荷重が 0 になるまで緩める、を繰り返すことで実施した。したがって、荷重は北側と南側の 2ヶ所で計測した。前日に行った小変形加力実験結果から、建物の重心位置で加力するとねじれ変形が大きくなることが予想されたので、剛心に近いと考えられる X11 構面側に近づけた位置で加力を行った。加力は表 3 に示す

ような変位制御の繰り返し载荷とした。目標とする柱頭変位は X1～X15 構面のうち最大のものとした。X1 構面の柱頭変位が 400mm を超えるまで加力して、全ての通し柱が差し鴨居との接合部で損傷した時点で実験を終了した。

図 1 の平面図で示された X1～X15 の 4 つの構面について、図 3(b) に示すように、柱頭変位 (12 点)、柱の差し鴨居高さでの水平変位 (12 点)、差し鴨居の抜け出し (28 点)、柱脚の変位 (12 点) と柱と差し鴨居のひずみ (全 136 点) をそれぞれ計測した。当初、足固め材の上下でひずみを計測する予定であったが、腐朽が進んでいるために、足固め材の下面でのひずみ計測は断念した。

3.2 各構面の剛性評価

2004 年 9 月 17 日に行った X1～X15 構面の小加力実験結果より得られた各構面の柱頭変位が約 10mm の時の割線剛性を表 2 に示す。前報⁸⁾で述べた通り、X11 と X15 の剛性が X1、X6 に比べて高い。X6 と X11 構面は差し鴨居より上が土塗り小壁となっているが、X11 の方が初重まで壁となっているため X6 よりも剛性が高い。X15 構面は一部 2 階となっているために、床面の抵抗が影響して剛性が高くなっていると考えられる。

表 2 各構面の初期剛性 (kN/cm)

	X1	X6	X11	X15
剛性	9.7	11.4	18.2	15.4

表 3 加力スケジュール

見かけの変形角 (rad)	1/200	-1/200	1/150	-1/150
柱頭変位 (mm)	20	-20	30	-30
見かけの変形角 (rad)	1/100	-1/100	1/75	-1/75
柱頭変位 (mm)	40	-40	60	-60
見かけの変形角 (rad)	1/50	-1/50	1/40	-1/40
柱頭変位 (mm)	80	-80	100	-100
見かけの変形角 (rad)	1/30	-1/30	1/25	-1/25
柱頭変位 (mm)	130	-130	150	-150
見かけの変形角 (rad)	1/20	-1/20	> 1/10	
柱頭変位 (mm)	200	-200	> 400	

3.3 荷重変形関係と損傷状況

図 1 の X1～X15 構面の荷重と変形の関係を図 4 に示す。横軸は各構面における 3 本の柱について、柱頭、鴨居下、柱脚変位の平均値である。

柱脚の変位について、X1 構面の柱頭変位ピークが 220mm(1/20rad) までは計測ができているが、その後の除荷以降、測定限度を超えている。実験終了後の観察で目立った柱脚のズレの跡を見いだせなかったことも考慮すると、本加力実験では柱脚が礎石から大きくずれるほどの変形は生じなかったのではないかと考えられる。X15 構面の柱頭に取り付けた変位計が測定限度のため、1/20rad を超える大変形を追跡できていない。

西側の X1、X6 構面に比べて東側の X11、X15 構面の剛性が高いため、全体的にねじれ変形を起こしていることがわかる。最大耐力は 106.6kN であった。その 3 にあるように、建物重量が 661kN であるから、ベースシアア換算で $C_0 = 0.16$ の耐力である。

X6 構面には天井高さまで、X11 構面には柱頭すなわち初重梁高さまで小壁がついている。木造住宅で用いられる土塗り小壁も構造性能に寄与していることはよく知られている。図 4 の荷重変位関係から、特に X11 構面では小壁がほとんど変形することなく耐力を発揮している様子が看取される。X6 構面において

も、小壁の耐力負担により、差し鴨居高さでの変位と柱頭変位の差が X1 構面や X15 構面に比べると小さいが、X11 構面の方が顕著である。したがって、小壁の耐力負担を期待する場合、見るところだけではなく、軸組の内側を壁土で塗り込めることが重要であると言える。

途中の顕著な破壊状況は、以下の構面である。1/300rad までは目立った損傷は見られない。見かけの変形が 1/100rad を超えるころから、土塗り壁の隅角部での壁土の損傷が見られ、1/60～1/50rad では、一部の土塗り壁にせん断変形による壁土のひび割れが観察された。1/30rad で、床の間の鴨居が外れる、X6 構面の北側の差し鴨居と柱仕口で鼻栓の曲げ変形が見られる、といった損傷が目立ちはじめる。1/25rad を超える変形になると、X15 以外のすべての構面で、柱が差し鴨居との接合部で曲げ破壊を起こした。しかし、柱材の損傷は、折れたということではなく、表層にひびが入った程度である。

3.4 建物全体のねじれ変形

実験対象建物は伝統的な軸組構法であるため、剛床仮定が成り立たず、水平構面のせん断変形が起きるので、建物全体として大きなねじれ変形を生じた。

最大荷重時の柱頭変位および鴨居下での柱変位による建物全体のねじれ変形状況を図 6 に示す。このときのせん断変形角は X1～X6 間で 0.48×10^{-2} (rad)、X6～X11 間で 1.29×10^{-2} (rad)、X11～X15 間で 2.14×10^{-2} (rad) である。X1～X6、X6～X11、X11～X15 の各スパンでのせん断変形角は、東側ほど大きく、わずかに X11 構面が出っ張る「く」の字の形に変形していると言える。加力が X11 構面の近くであったことがわずかではあるが「く」の字に変形する要因として考えられる。また、X15 構面の剛性が大きく、西側に比べて変形しにくいために、相対的に X11～X15 構面間のせん断変形が大きくなっている。

3.5 柱・差し鴨居の負担モーメント、せん断力

柱と差し鴨居で計測したひずみと材料試験¹⁰⁾から得られた柱および鴨居材のヤング係数を用いて、柱と差し鴨居の負担するモーメント分布を算定した。ヤング係数の平均値を表 4 に、最大荷重時の X1～X15 構面の曲げモーメント分布をそれぞれ図 5 に示す。図の左側が正加力方向である。表 4 には、設計で用いられるヤング係数を併せて示している。差し鴨居と柱の接合部付近で柱のモーメントが最大となっている。特に建物中央部分で大きい。表 5 にこれらの値を示す。

表 4 柱と差し鴨居の平均ヤング係数 (kN/mm²)

柱	7.56	ヒノキ (8.82) ¹⁶⁾
差し鴨居	9.28	マツ (7.84) ¹⁶⁾

表 5 差し鴨居仕口での柱の曲げモーメント (kN·cm)

	X1	X6	X11	X15
北	239.09	385.46	274.31	445.23
中央	551.86	420.36	537.32	814.86
南	423.59	125.36	150.56	310.50

差し鴨居の下および床上で計測した柱の曲げモーメントから、各柱の負担するせん断力を式 (1) で算定した。ただし、差し鴨居下での曲げモーメントを M_U 、床上の曲げモーメントを M_L 、その間の高さを H とした。

$$Q = \frac{M_U - M_L}{H} \quad (1)$$

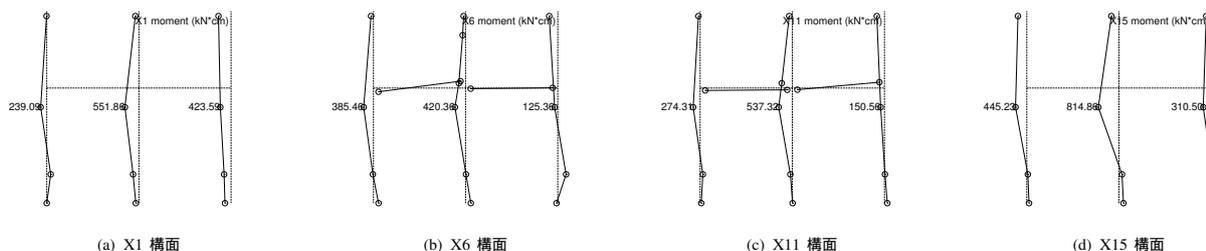


図5 最大荷重時のモーメント分布

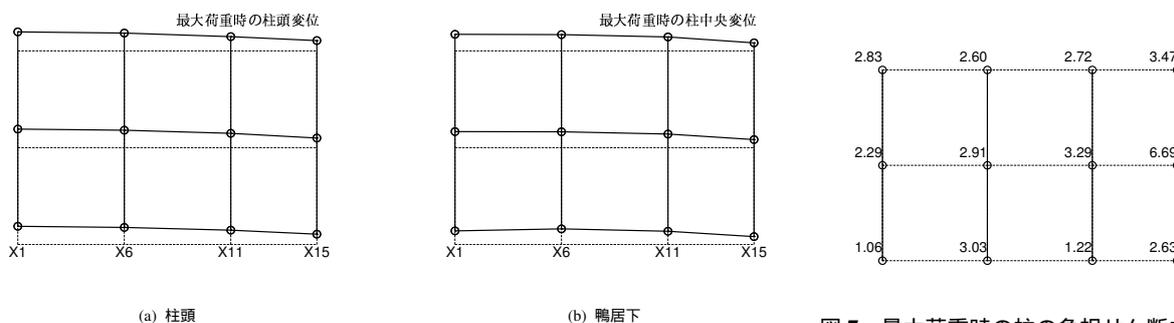


図6 最大荷重時のねじれ変形

図7 最大荷重時の柱の負担せん断力 (kN)

式(1)で算定された柱の負担するせん断力の合計と載荷した荷重の負担割合は、最大荷重に達するまではほぼ40%であるが、最大荷重以後、柱のひび割れなどの損傷が目立ってくると、この負担割合が30%程度に低下する。

最大荷重時の各柱の負担せん断力を図7に示す。図7からもX1～X15で異なる剛性の影響が見られ、西側に比べて東側の柱の負担せん断力が大きいことがわかる。

4 まとめ

明治時代に伝統構法で建築された木造民家で行った水平加力実験について、構造詳細調査について述べ、荷重と変形の関係および破壊状況を示した。

この結果、以下の事柄が明らかになった。

1. 最大荷重は106.6kN、ベースシア係数に換算すると $C_0 = 0.16$ である。
2. 各構面の初期剛性は9.7kN/cm～18.2kN/cmである。小壁寸法や床組の影響が見られる。
3. 水平構面の抵抗が小さいので全体に大きくねじれ変形する。各構面間のせん断変形は $0.48 \times 10^{-2} \sim 2.14 \times 10^{-2}$ (rad)であり、東側ほど大きい。
4. 差鴨居より下の柱が負担するせん断力は載荷荷重の約40%である。柱の損傷により30%に低下する。

実験結果で注目する点として、見かけの変形が1/10radを超えても倒壊に至るような大きな損傷がなかった。したがって、本実験で用いた築100年を過ぎた伝統構法木造住宅の力学性能はじゅうぶん大きいと考えられる。

謝辞

本調査実験を行うに際し、住宅を提供して下さった小野吉彦様とご家族に深く感謝いたします。実験の準備・実施にご協力いただいた望月昭様をはじめ、東三河伝統木造民家・小野家耐震調査実験WGメンバーならびに各大学・高専の学生諸君に謝意を表します。

本研究の一部は「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」Ⅱ、震動台活用による構造物の耐震性向上研究(木造建物実験)の

一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 長谷川翠・岡村雅克・西村督・後藤正美・網田克明・鈴木祥之・鈴木有: 徳島県に建つ古民家の構造詳細調査及び実大実験 その1 調査の概要. 日本建築学会大会梗概集, pp.51-52, 2004年9月
- 2) 岡村雅克・長谷川翠・西村督・後藤正美・網田克明・鈴木祥之・鈴木有: 徳島県に建つ古民家の構造詳細調査及び実大実験 その2 実験の概要. 日本建築学会大会梗概集, pp.53-54, 2004年9月
- 3) 岡村雅克・長谷川翠・後藤正美・網田克明・鈴木祥之・鈴木有: 徳島県に建つ古民家の耐震性能評価 その1 静的加力実験による検討. 日本建築学会大会梗概集, pp.465-466, 2005年9月
- 4) 長谷川翠・岡村雅克・後藤正美・鈴木祥之: 徳島県に建つ古民家の耐震性能評価 その2 常時微動計測による検討. 日本建築学会大会梗概集, pp.467-468, 2005年9月
- 5) 出水文二・松田昌洋・佐藤弘美・腰原幹雄・中園真人・坂本功: 山口県の伝統的木造住宅の実大水平加力実験 その1 実験概要及び常時微動測定. 日本建築学会大会梗概集, pp.475-476, 2005年9月
- 6) 佐藤弘美・松田昌洋・出水文二・藤田香織・中園真人・坂本功: 山口県の伝統的木造住宅の実大水平加力実験 その2 大変形加力. 日本建築学会大会梗概集, pp.477-478, 2005年9月
- 7) 松田昌洋・佐藤弘美・出水文二・腰原幹雄・中園真人・坂本功: 山口県の伝統的木造住宅の実大水平加力実験 その3 水平構面剛性の算定. 日本建築学会大会梗概集, pp.479-480, 2005年9月
- 8) 中治弘行・鈴木祥之・後藤正美・岩本いづみ・秦正徳・山田耕司・清水秀丸: 東三河伝統構法木造住宅の水平加力実験. 日本地震工学会大会 2004 梗概集, p.148-149, 2005年1月.
- 9) 後藤正美・中治弘行・鈴木祥之・望月昭・岩本いづみ・山田耕司・清水秀丸: 東三河伝統民家の耐震調査実験 その1 耐震調査実験の概要. 日本建築学会大会梗概集, pp.451-452, 2005年9月
- 10) 秦正徳・堀江秀夫・鈴木祥之・中治弘行・望月昭: 東三河伝統民家の耐震調査実験 その2 材料特性. 日本建築学会大会梗概集, pp.453-454, 2005年9月
- 11) 松岡崇夫・中治弘行・鈴木祥之・伊藤淳: 東三河伝統民家の耐震調査実験 その3 重量算定. 日本建築学会大会梗概集, pp.455-456, 2005年9月
- 12) 中治弘行・鈴木祥之・後藤正美・岩本いづみ・清水秀丸・望月昭・伊藤淳: 東三河伝統民家の耐震調査実験 その4 大振幅静的加力実験. 日本建築学会大会梗概集, pp.457-458, 2005年9月
- 13) 岩本いづみ・中治弘行・清水秀丸・鈴木祥之・望月昭: 東三河伝統民家の耐震調査実験 その5 柱-差鴨居接合部要素実験. 日本建築学会大会梗概集, pp.459-460, 2005年9月
- 14) 具典淑・鈴木祥之・中治弘行: 東三河伝統民家の耐震調査実験 その6 損傷同定シミュレーション. 日本建築学会大会梗概集, pp.461-462, 2005年9月
- 15) 山田耕司・鈴木祥之・中治弘行: 東三河伝統民家の耐震調査実験 その7 応答解析. 日本建築学会大会梗概集, pp.463-464, 2005年9月
- 16) 日本建築学会: 木質構造設計標準・同解説.