

E-ディフェンス震動台実験による伝統軸組構法木造建物の損傷観察

Damage Observation for Vibration Tests of Traditional Wooden Buildings
by E-Defense Shaking Table

村田 晶¹・池本敏和¹・山田耕司²・後藤正美³・鈴木祥之⁴

Akira Murata, Toshikazu Ikemoto, Koji Yamada, Masami Gotou and Yoshiyuki Suzuki

¹金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Assistant Professor, Kanazawa University, School of Environmental Design

²豊田工業高等専門学校准教授 建築学科 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町2-1)

Associate Professor, Toyota National College of Technology, Dept. of Architecture

³金沢工業大学教授 建築学科 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

Professor, Kanazawa Institute of Technology, Dept. of Architecture

⁴立命館大学教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Global Innovation Organization

It is required for the specification of a floor, a roof and a column to clarify the influence which it has on the aseismic characteristics of the traditional wooden buildings. In this study, the vibration test to traditional wooden buildings specimen of the real scale is conducted by using the E-defense Shaking table. Since damage of buildings observes, it is evaluated the aseismic characteristics of the traditional wooden buildings.

Key Words : Tradition wooden buildings, Vibration test by E-Defense shaking table, Damage observation

1. はじめに

伝統軸組構法木造建物を構造力学的に解明し、耐震性能を評価するには、床や屋根構面など水平構面、礎石立ち柱脚仕様、直交する鉛直構面、仕口等接合部など多くの重要な課題が残されている。現在、木造建物を評価する上で、水平構面を剛床と仮定している。床構面の剛床仮定を満足するために床倍率が規定され、構造合板など床倍率の大きな床仕様が用いられている。一方、伝統軸組構法木造建物では、柔な床仕様が多く用いられてきた。変形性能を有する伝統木造軸組に要求される水平構面の特性については未解明な部分が多い。また、木造建物では、柱脚部を土台に緊結する仕様が現在一般的であるが、伝統軸組構法木造建物では、柱脚部を土台に固定することなく、足固めを設けて礎石等に載せただけの構法が多く採用されてきた。このような柱脚部の仕様が、建物の各部や全体の地震応答性状に与える影響は良く分かっていない。さらに、屋根構面の仕様についても未解明な部分が多く残されている。本研究の他にも多くの研究者がこのもんだいに取り組んできている(例えば^{1)~3)}が、このような床構面や屋根構面の仕様、柱脚部の仕様などが建物の地震応答性状や耐震性能に与える影響を明らかにするには、中小の振動台では規模的に難しく、実験的に解明することができていなかった。このような状況から、実大の伝統軸組構法木造軸組試験体を製作し、E-ディフェンス大型震動台を用いて、以下の実験を行う。

1) 水平構面の仕様とともに偏心の大きさをパラメータとした試験体を用いて加振実験を行い、地震時挙動を明らかにする。

2) 柱脚部を土台に緊結する仕様（土台仕様）と足固めを設けて柱脚部を固定しない礎石立ちの仕様（足固め仕様）の2種類の試験体を用いて加振実験を行い、柱脚部仕様が地震時挙動に与える影響を明らかにする。

3) 屋根構面の仕様、ここでは一般的な切妻屋根を対象にするが、短辺方向に切妻屋根をかける場合と長辺方向に切妻屋根をかける場合の2種類の屋根付き試験体を対象に加振実験を行い、屋根のかけ方の違いが建物の挙動に与える影響を明らかにする。

本稿では、加振実験による損傷観察結果を報告するとともに、試験体の震動応答性状と比較し考察する。損傷観察の意味としては、①試験体の仕様によって損傷の仕方が変わること、②地震被害調査時における被災建物の観察記録と今回の損傷観察結果とを対応させることによって損傷原因を推測できることが考えられる。

表1 標準試験体土台仕様

2. 実験概要と損傷観察の計画

2.1 実験概要

試験体は標準試験体と屋根試験体の2種類について加振する。加振波はホワイトノイズ波、日本建築センター模擬波（BCJ-L2）を用いる。ただし、BCJ-L2波については元波形（最大加速度 356Gal、継続時間 120 秒）のうち 0～60 秒までの波形について、最大加速度を 100gal～300gal の3パターンに調節する。標準試験体は同じ平面形状で柱脚部及び床仕様が異なる6種類の試験体を製作する。また、加振スケジュールに基づき各々の試験体の Y 方向に設けた壁配置を変更する。柱脚の仕様が土台仕様の試験体（土台試験体）については、土台を実験用架台にアンカーボルトを用いて固定し、柱脚の仕様が足固め仕様の試験体（足固め試験体）は実験用架台に設置した御影石の礎石上に固定せずに設置する。基礎寸法は玉石基礎と同等するために、鉄骨架台の上に 600mm 角で厚さ 60mm の花崗岩を敷く。壁は短時間に壁配置の変更が可能な乾式工法による荒壁パネルを用いる。標準試験体で使用した木材の材種及び断面寸法を表 1、表 2 にそれぞれ示す。平面図、立面図については、足固め仕様試験体についてを図 1、2 にそれぞれ示す。標準試験体の加振実験は、加振スケジュールに基づき、同じ軸組を用いながら床の仕様を変えて加振実験を行なう。剛床仕様は、構造用合板を住宅金融公庫の仕様に基づき構造用合板及び下地となる根太の施工を行なう。半剛床仕様の床板は、徳島県産の杉で規格化された厚さ 30 mm で本実加工が施された製品を用いる。このとき、釘は根太上に床板上部面より各々N90 を3本打ちとする。柔床仕様は、一般的な木造家屋の畳下地の施工に基づき 15 mm 厚の杉の床板を用い、根太は転ばし根太とする。半剛床、剛床及び柔床の床仕様を表 3 に示す。また、床伏図については図 3 に示す。標準試験体における各部材重量については表 4 に示す。なお、加振実験を行なうにあたり試験体の柱頭部及び2階床面位置に錘を設置する。錘の設置については、設置方法により試験体の動きを妨げる可能性があることから、錘が床面に接触することなく、試験体の動きに追従する方法で錘を設置する。

部位	材種	断面寸法(mm)
通し柱	杉	120 × 120
管柱	杉	120 × 120
胴差	杉	120 × 270
ささら	杉	120 × 210
土台	杉	120 × 120
胴差雇いほぞ	檜	24 × 100
込み栓	檜	12 × 12
車知栓	檜	6 × 30

表2 標準試験体足固め仕様

部位	材種	断面寸法(mm)
通し柱	杉	120 × 120
管柱	杉	120 × 120
胴差	杉	120 × 270
ささら	杉	120 × 210
足固め	杉	120 × 120
大引	杉	90 × 90
胴差雇いほぞ	檜	24 × 100
足固め雇いほぞ	檜	24 × 60
込み栓	檜	12 × 12
車知栓	檜	6 × 30

屋根試験体は試験体平面において短辺方向に建物への入り口があると想定し、短辺方向側に対して屋根形状がどのようになっているかで試験体の呼称を決め、短辺方向が妻形のを「妻入試験体」、平形のを「平入試験体」と定義する。妻入試験体の仕様については表 5、平入試験体の仕様については表 6 に、それぞれ示す。2つの試験体は屋根形状の違いが建物の耐震性能にどう影響するかを実験で確かめるため、小屋組の仕様がそれぞれ異なる。桁から下部の仕様は共通となっている。妻入試験体は棟木を長辺方向に平行にした試験体であり、平入試験体は棟木を短辺方向に平行にした試験体である。2つの試験体の軸組3次元モデル（差し鴨居上小壁付き）を図 4、図 5 にそれぞれ示す。試験体寸法については平面は X 方向 10,920mm（1P を 910mm とすると 12P）、Y 方向 5,460mm（6P）とする。X 方向の構面は 3,640mm（4P）ごとに X1、X5、X9、X13、Y 方向の構面は 2,730mm（3P）ごとに Y1、Y4、Y7 と定義する。屋根勾配は 4 寸勾配とし、軒、けらばの出寸法は瓦の割付に余りがなく、双方の試験体の瓦枚数に大きな違いがないよう配

慮する。

他の共通仕様としては以下の通りである。

(1) 基礎

標準足固め試験体と同様に鉄骨架台の上に 600mm 角で厚さ 60mm の花崗岩を敷く。

(2) 1階床組

柱脚部には足固めを張り間方向・桁行き方向共に柱間を繋ぐ。試験体では柱と足固めの仕口に「雇いほぞ」を用い引張り方向にも拘束力を持たせる。大引は腰掛蟻掛けで足固めと接合する。

(3) 軸組

柱は X 方向 3,640mm (4P) ごとに、Y 方向 2,730mm (3P) ごとに設ける。足固め上端より 1,820mm (内法高さ) の位置に差し鴨居を組み込み柱との仕口は雇いほぞを用いる。柱は軒桁および妻桁下までとし、柱と桁の仕口は長ほぞ込み栓止めする。

(4) 小壁 (荒壁パネル)

桁と差し鴨居の間にある小壁は荒壁パネル (高さ 510mm) とし耐震要素としている。なお、今回の試験体は X・Y 方向共に敷梁等の下端高さを軒桁下端に揃え、小壁高さを一定にした。荒壁パネルは 1 枚あたり長さ 1,800mm、幅 600mm、厚さ 26mm の木小舞下地パルプおよびセメント系固化材混入中塗土パネルである。これを床下地構法で格子状の受け材 (横 45×27mm、縦 60×27mm) に横向けに片面張りした乾式工法である。

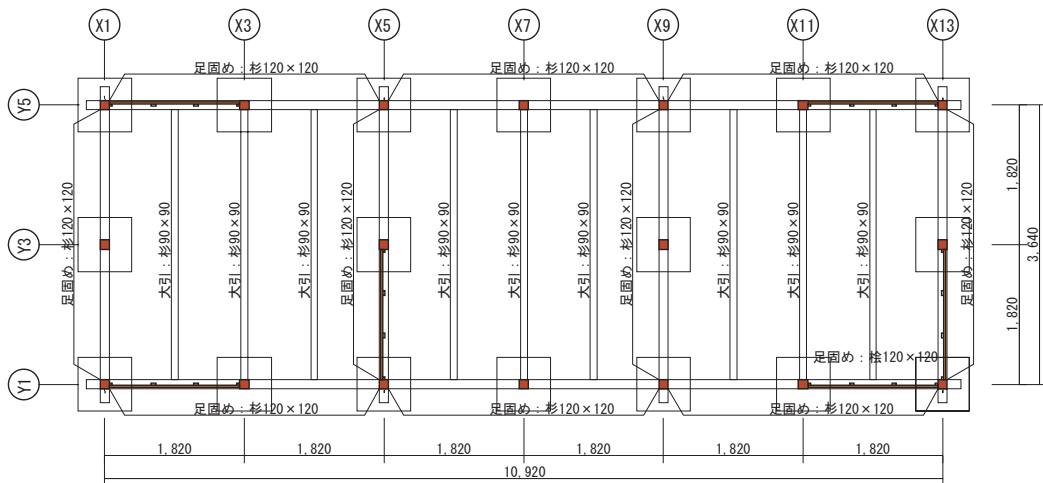


図1 標準試験体足固め仕様平面図

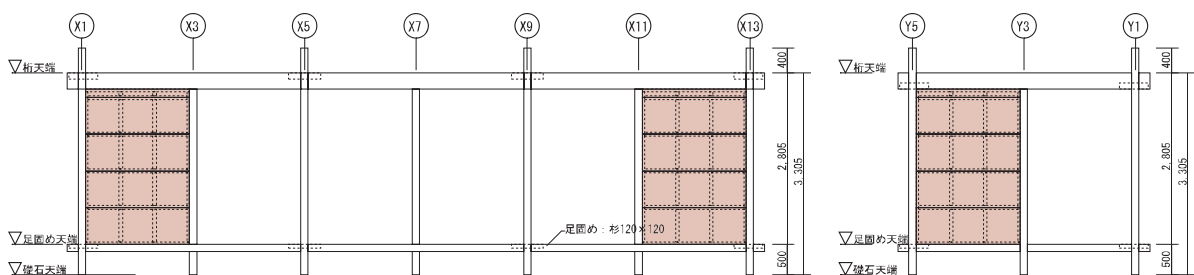


図2 標準試験体足固め仕様立面図

表3 床仕様

剛床仕様			半剛床仕様			柔床仕様		
部位	材種	寸法(mm)	部位	材種	寸法(mm)	部位	材種	寸法(mm)
床板	構造用合板	厚 24	床板	杉本実加工	厚 30	床板	杉	厚 15
根太	米松	45 × 105	根太	杉	45 × 105	根太	杉	45 × 45
釘	ササラ及び根太上にN75@150		釘	根太上にN90 3本打ち		根太掛け	杉	45 × 90
						釘	根太上にN75 2本打ち	

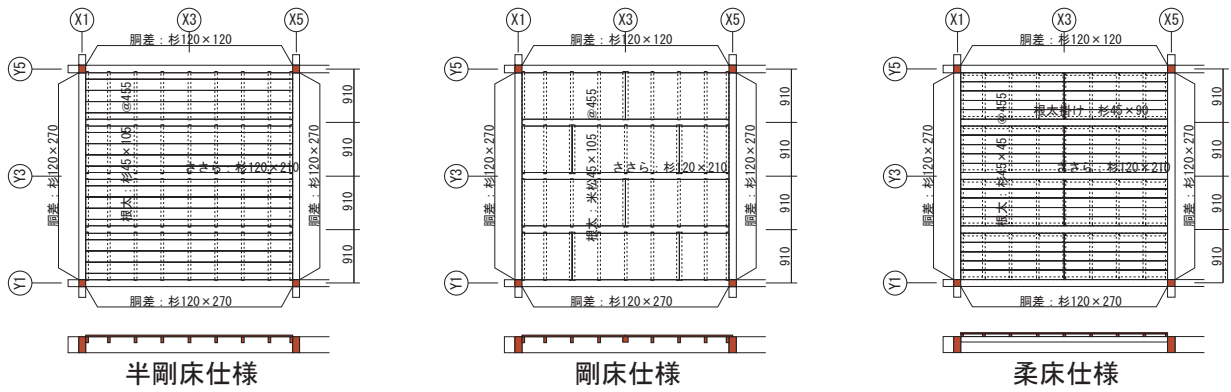


図3 床伏図

表4 試験体木材の計測結果

土台・半剛床				土台・剛床				土台・柔床			
名称	単位重量kN	数量	総重量kN	名称	単位重量kN	数量	総重量kN	名称	単位重量kN	数量	総重量kN
土台	0.24	10	2.4	土台	0.24	10	2.4	土台	0.23	10	2.3
通し柱	0.21	8	1.7	通し柱	0.21	8	1.7	通し柱	0.20	8	1.6
管柱	0.16	10	1.6	管柱	0.16	10	1.6	管柱	0.15	10	1.5
胴差し	0.45	10	4.5	胴差し	0.46	10	4.6	胴差し	0.43	10	4.3
ささら	0.42	10	4.2	ささら	0.41	9	3.7	ささら	0.39	9	3.5
鼻木	-	-	0.5	鼻木	-	-	0.3	鼻木	-	-	0.3
雇い	-	-	-	雇い	-	-	-	雇い	-	-	-
根太	-	-	1.7	根太	-	-	3.3	根太掛け	-	-	0.9
床板	-	-	4.6	添根太	0.11	6	0.7	根太	-	-	1.4
				合板	-	-	2.7	床板	-	-	5.8
合計			21.2	合計			20.8	合計			21.6

表5 妻入試験体の仕様

床面積	59.62	m ²	仕 様			
1階床高	560	mm	屋 根	瓦葺き (葺き土無：耐震仕様)	差し鴨居	杉：120mm×300mm
内法高	1820	mm			足固め	杉：120mm×120mm
軒 高	3430	mm	小 壁	荒壁パネル1枚貼 棧下地構法	敷 梁	杉：120mm×300mm
棟 高	4622	mm	壁	荒壁パネル1枚貼 棧下地構法	小屋梁	松：末口240φ
最高の高さ	5122	mm	※ 壁は実験ステージ毎に設置位置が異なる		敷 梁	杉：120mm×300mm
屋根勾配	10:04		柱	杉：150mm×150mm	野地板	杉：幅210mm×厚15mm
モジュール	910	mm			雇い、栓	樫

表6 平入試験体の仕様

床面積	59.62	m ²	仕 様			
1階床高	560	mm	屋 根	瓦葺き (葺き土無：耐震仕様)	差し鴨居	杉：120mm×300mm
内法高	1820	mm			足固め	杉：120mm×120mm
軒 高	3430	mm	小 壁	荒壁パネル1枚貼 棧下地構法	敷 梁	杉：120mm×300mm
棟 高	5614	mm	壁	荒壁パネル1枚貼 棧下地構法	小屋梁	松：末口270φ
最高の高さ	6114	mm	※ 壁は実験ステージ毎に設置位置が異なる		敷 梁	杉：120mm×300mm
屋根勾配	10:04		柱	杉：150mm×150mm	野地板	杉：幅210mm×厚15mm
モジュール	910	mm			雇い、栓	樫

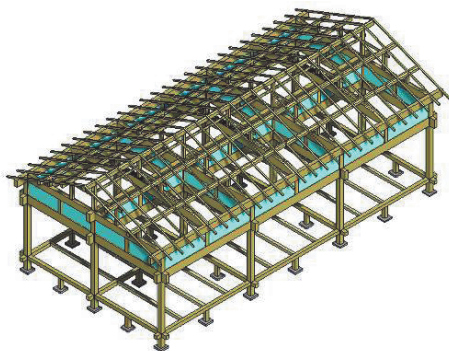


図4 妻入試験体の軸組

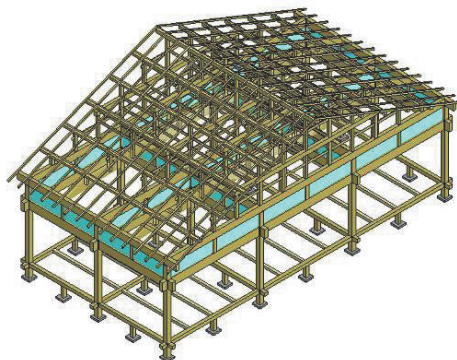


図5 平入試験体の軸組

(5) 雇いほぞ

雇いほぞは社寺の軸組に使われることが多く、既往の実験によってその変形性能が高いことが確かめられている。使用部位は主要構面を構成する柱と足固め・差し鴨居の仕口である。なお雇いほぞの大きさは厚さ 30mm、長さは梁成の 2 倍、成は梁成の 2 分の 1 である。図 6 に示すように X 方向は下端雇いほぞ込み栓打ちとし、Y 方向は上端雇いほぞ車知栓打ちとする。外周部となる通し柱と妻桁、軒桁の仕口は外側に雇いほぞを柱中心から 240mm 程度外側に設けている。

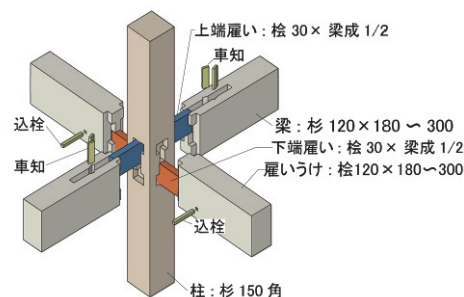


図6 雇いほぞの仕口

(6) 小屋組

妻入試験体の小屋組は Y4 通の X 方向に敷梁 150×300 を設け、X3、X7、X11 に末口 240φ の小屋梁を架ける。母屋のピッチは 910mm とし、母屋束は 1,820mm ピッチとする。母屋束を繋ぐ小屋貫(15mm×90mm)をいれている。平入試験体の小屋組は X5・X9 通の Y 方向に敷梁 150×300 を設け、Y2~Y3、Y5~Y6 間に末口 270φ の小屋梁を架ける。また、母屋束を繋ぐ小屋貫(15mm×90mm)をいれている。小屋組が高くなるため、Y1、4、7 通の X9~X11 間(軒桁上端より 957mm の位置)と Y2~Y3、Y5~Y6 間の X5~X9 間(軒桁上端より 1,339mm の位置)にそれぞれ 2 重梁を設ける。

(7) 屋根

野地板は厚さ 15mm 幅 210mm の杉板を用いる。屋根瓦は葺き土なしの耐震仕様棧瓦葺きとし、屋根重量の軽減を図る。

(8) 試験体重量

木材については兵庫県加西市内の試験体施工担当工務店作業場にて各部材毎に計測を行った。瓦については設計図より瓦枚数を計算し単位重量を掛けて算出した。妻入試験体は、木材 39.28kN、瓦 41.04kN となり総重量 80.32kN である。平入試験体は、木材 52.77kN、瓦 36.01kN となり総重量 88.78kN である。

2.2 損傷観察の項目

損傷観察項目は、以下に示す6項目で構成される。①軸組損傷：柱・梁部の損傷観察、②壁損傷：荒壁パネルの損傷観察、③柱脚の移動量：柱脚部の移動量測定、ならびに損傷観察、④柱の残存傾斜：柱の残存傾斜量の測定、⑤試験体解体後の状況：解体後の仕口部等の損傷観察。

また、損傷観察方法については以下の通りとする。①観察の時期については、足固め試験体、土台試験体(半剛床(Stage1)、剛床(Stage2)、柔床(Stage3))に関しては、図7に示す壁配置に従い、壁配置A加振前、壁配置A加振後、壁配置B加振後、壁配置C加振後、の計4回実施する。また、切妻屋根試験体(長辺折り(L)、短辺折り(S))に関しては、壁配置なし加振前、壁配置なし加振後、壁配置A加振後、壁配置B加振前、壁配置B加振後、壁配置C加振後、の計6回実施する。なお、本論文では各壁配置に対しBCJ-L2波300gal加振終了後に行われる損傷観察について考察する。②観察者については、軸組損傷観察班、壁損傷観察班、土台試験体を除く柱脚の移動量測定ならびに損傷観察班、柱の残存傾斜量測定班、打撃音録音班、で構成され、各班2~8名で行う。また、試験体解体後の損傷状況観察は3~4名で行う。

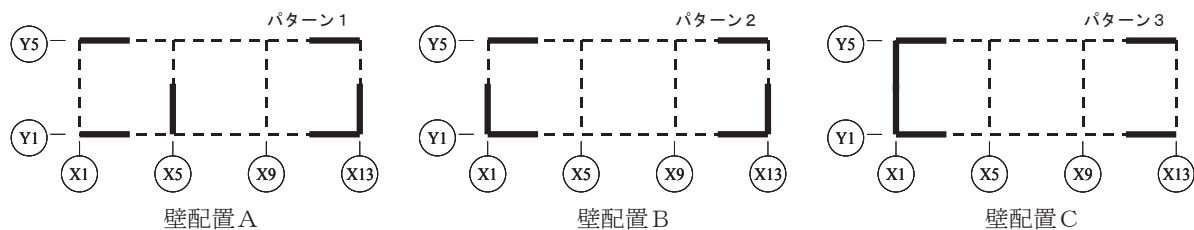


図7 壁配置パターン (—: 壁)

3. 損傷観察結果

3.1 標準試験体

半剛床 (Stage1) 足固め試験体では写真1のように足固めの湾曲が多く見られ、柱脚の束損傷も見られる。ただし、通し柱の束に関しては小規模な割れが見られるものの大きな損傷は見られない。柱には亀裂が見られるものの、柱と梁の空き、雇いの空きはほとんど見られない。壁については層間変形の大きい通りで写真2のような隅部の割れや、パネルの開きやはらみが見られる。土台試験体では土台へのめり込み・割れ・空き、柱と梁の空き、雇いの空きが各通りで見られる。壁については同様に層間変形の大きい通りで隅部の割れや、パネルの開き、はらみが見られるが、足固め試験体より被害が多く見られる。



写真1 足固め束の湾曲

剛床 (Stage2) 足固め試験体では半剛床と同様な傾向となるが、被害の程度は半剛床よりも大きい。また、Stage1では見られなかった写真3のような通し柱の柱脚に割れ損傷が見られる。壁についてもStage1と同様な被害が生じているが、より被害が多く見られる。土台試験体ではStage1と同様に土台への割れ・空きが見られる。また、柱の割れ、柱と梁の空きが見られるがStage1ほどではない。壁についてもStage1と同様であるが、Stage1より被害が多く見られる。



写真2 壁のはらみ

柔床 (Stage3) 足固め試験体ではStage1と同様な傾向が見られ、被害程度もほぼ同様な傾向を示す。また、胴差が若干湾曲しているのが見られる。壁についてもStage1と同様な被害が生じているが、最も被害が少ない。土台試験体ではStage1よりも土台割れの被害程度が大きい。また、写真4のような直交土台の抜け出しや鎌接合部のずれも生じている。ただし、全体的な被害傾向はStage1と同様である。壁についてはStage1の時とほぼ同等

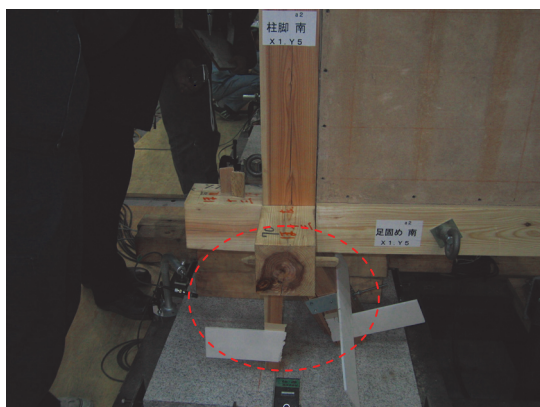


写真3 通し柱柱脚の割れ損傷

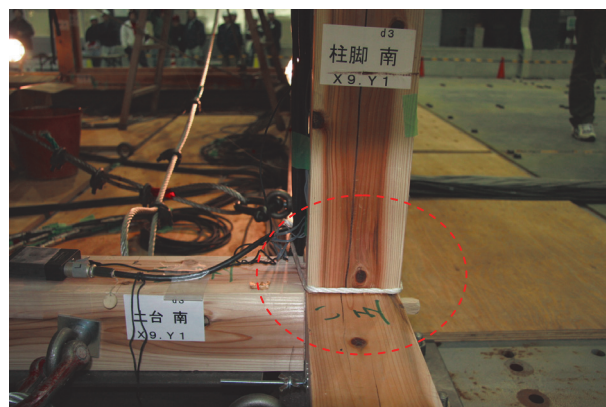


写真4 直交土台の抜け出し

な被害程度となっている。

壁被害をまとめた結果を図8に示す。壁、柱の被害をまとめると、①床剛性が高くなるにつれ、壁、柱の被害程度が増えること、②壁損傷については足固め試験体よりも土台試験体の被害程度が大きいこと、③足固め試験体については柔床、半剛床に比べ剛床における柱脚の損傷程度が増すことが言える。また、例として壁配置Cにおける足固め試験体、土台試験体のBCJ-L2波Y方向加振時の最大応答変形角を図9、図10にそれぞれ示す。また、足固め試験体、土台試験体の残留変形状況を図12～図14にそれぞれ示す。ここで図中に示す赤線の残留変形量は変形量1mmに対し実際の変形量を10cmとして拡大表示している。図に示すように応答変形角には大きな差異は見られないが、柔床に関しては足固め試験体の応答が小さい。残留変形についても同様な傾向となるが、土台仕様では床が堅いほど変形が小さくなるのに対し、足固め仕様では床が柔らかいほど変形が小さくなっていることが分かる。これら結果より、足固め試験体では床剛性に比して壁剛性のある部分での変形が増加する。そのため、変形に伴う柱、壁損傷が増えると言える。一方、土台試験体では、柔床の場合床剛性が不足するため、偏心による床変形の増加が明らかとなった。また、壁損傷の程度から、足固め試験体よりも大きく震動すると考えられる。

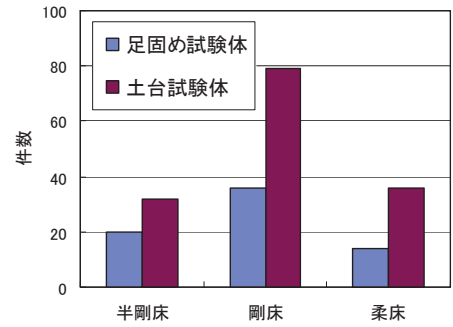


図8 壁被害結果

3.2 屋根試験体

切妻屋根試験体（長辺折り平入（L），短辺折り妻入（S））の違いによる損傷状況については、柱・柱脚では大差が見られず、柱に関してはX1通り～X13通りに割れ、雇い受けのずれなどの損傷が見られた。また、

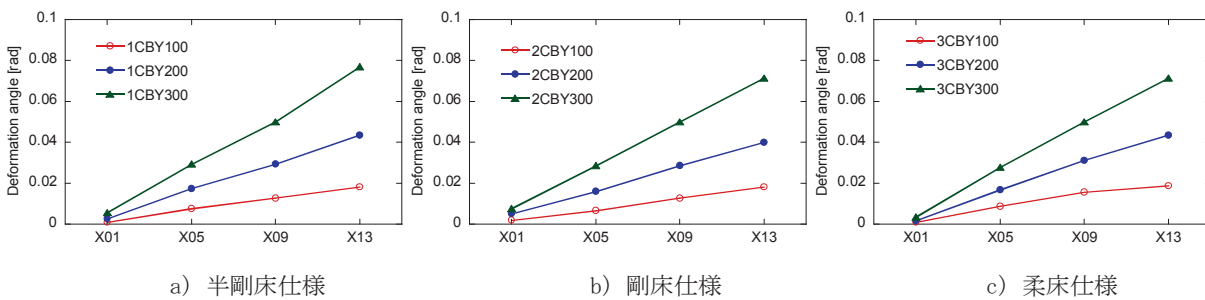


図9 足固め試験体、壁配置C、BCJ-L2波Y方向加振時の最大応答変形角

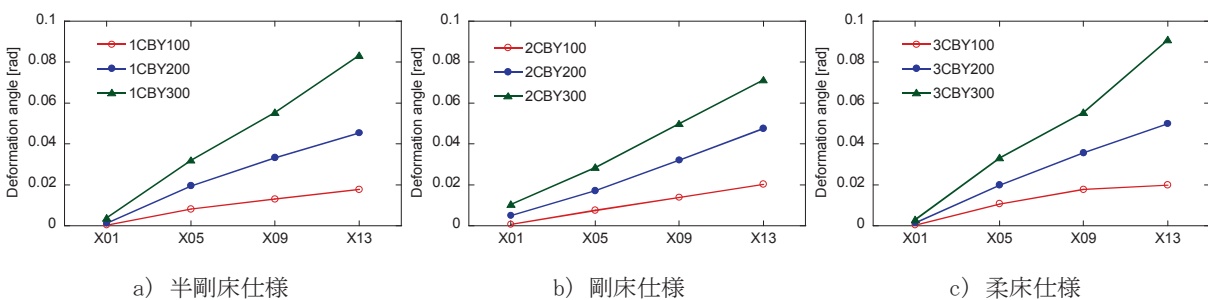


図10 土台試験体、壁配置C、BCJ-L2波Y方向加振時の最大応答変形角

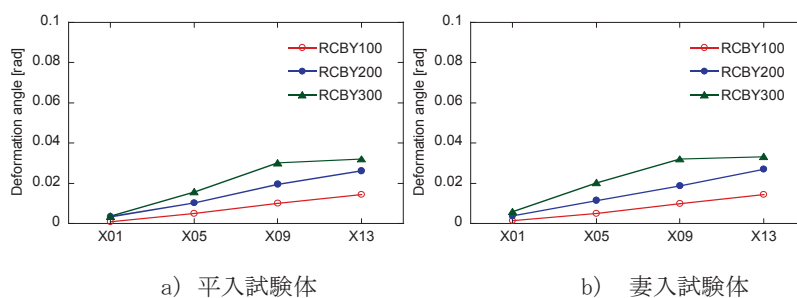


図11 屋根付き試験体、壁配置C、BCJ-L2波Y方向加振時の最大応答変形角

柱脚に関しては双方の試験体で束の割れが見られたが、通し柱の柱脚には大きな損傷が見られなかった。壁については試験体の違いによる損傷状況には大差が見られない。S試験体の壁構面に多少の隙間が生じた以外では、小壁に隙間が生じた程度の損傷にとどまっている。例として壁配置Cにおける両試験体のBCJ-L2波Y方向加振時の最大応答変形角を図11に示す。また、残留変形状況を図15に示す。図に示すように応答変形角には両試験体で大きな差異は見られない。残留変形についても同様な傾向となるが、L試験体の方が総じて変形が大きくなっていることが分かる。

4. まとめ

2007年1月～2月に実施した伝統軸組構法木造建物のE-ディフェンス震動台実験について、損傷観察結果をまとめると以下のものである。足固め試験体、土台試験体については応答変形角には大きな差異は見られないが、柔床に関しては足固め試験体の応答が小さいこと、土台仕様では床が堅いほど残留変形が小さくなるのに対し、足固仕様では床が柔らかいほど変形が小さくなっていることが分かった。また、屋根試験体については応答変形角には両試験体で大きな差異は見られないが、屋根重量の大きい平入試験体の方が残留変形が大きくなることがいえる。

謝辞：損傷観察にご協力いただきました、大学関係者はじめ関係各位に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤弘美、松田昌洋、藤田香織、腰原幹雄、坂本功：現地実験による伝統的木造住宅の構造性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第602号、pp.187-194、2006.4.
- 2) 阿川将樹、腰原幹雄、佐藤孝浩、大橋好光、宮澤健二：偏心を有する木質面材耐力壁構造の動的性状に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第558号、pp.157-164、2002
- 3) 五十田博、半田勝巳、泉尚武、森拓郎、笹川明：筋かい接合部の弾塑性特性を考慮した木造軸組平面架構の弾塑性解析モデル、日本建築学会構造工学論文集、vol.47B、pp.349-354、2001.3

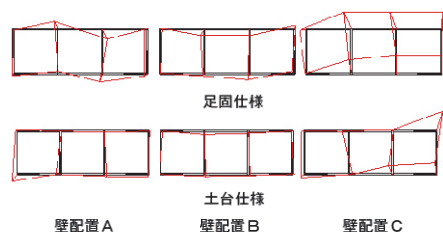


図12 残留変形 (半剛床 stage-1)

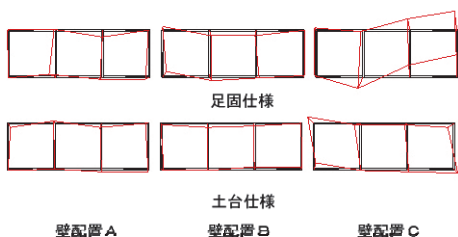


図13 残留変形 (剛床 stage-2)

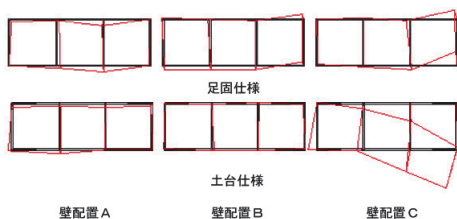


図14 残留変形 (柔床 stage-3)

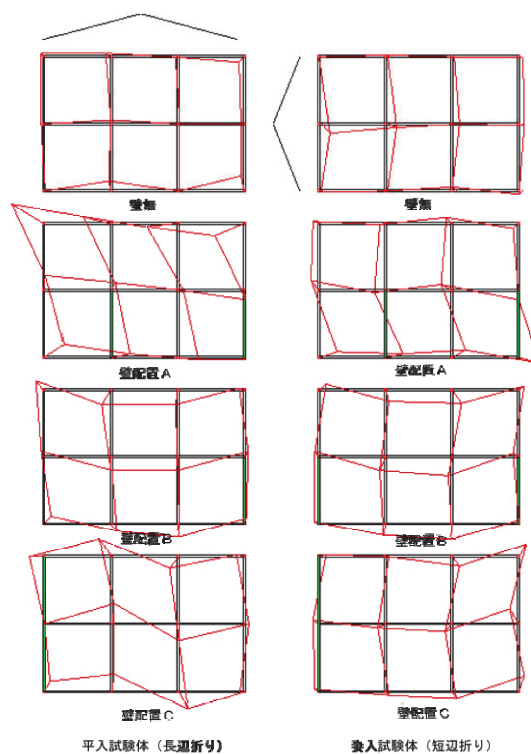


図15 残留変形 (屋根試験体)

(図12～図15の図中に示す赤線の残留変形量1mmは実際の変形量10cmとする)