

振動台加振実験による合板壁付木造軸組架構の地震時損傷評価

岩 井 哲*・松 森 博 孝**

(平成15年9月2日受理)

Earthquake damage evaluation of wooden framed structures with plywood wall by shaking table test

Satoshi IWAI and Hirotaka MATSUMORI

(Received Sep. 2, 2003)

Abstract

Shaking table test of wooden framed structures was conducted under light, moderate or heavy dead load. Fundamental dynamic behavior of one-story, one-bay wooden framed structure with plywood wall was investigated. This test is focusing on changes of damage level, natural period, response magnification factor and damping factor under earthquake load with stepwise increasing input accelerations. Dynamic response analysis of wooden structures has been done, in which combination models of tri-linear Masing type and slip type for restoring-force characteristics were employed, and the earthquake acceleration level in which the specimen experienced plastic deformation is examined. Seismic property of wooden framed structures was evaluated from static horizontal loading test to make models for hysteresis loops.

Key Words: wooden framed structures with plywood wall, shaking table test, dead load, natural period, response magnification factor, damping factor, damage evaluation

1. 研究目的

本研究では、単純な骨組架構からなる合板壁付木造軸組試験体に、実際の建物で想定される建物重量を載荷し、振動台加振実験を行い、地震発生による構造物への損傷を定量的に評価できるかを考察した。損傷を定量的に評価するために、構造物の振動特性である固有周期、応答倍率、減衰定数を計測し、変化や増減を基に評価できるかを考察した。ここでは、載荷する建物重量を $2.0 \cdot 4.0 \cdot 5.9 \text{ kN/m}^2$ の3種類、入力地震動の加速度レベルを $200 \sim 2000 \text{ cm/s}^2$ 、上下振動の有無、地震波の違いがどの程度影響するかを調べた。

また、trilinear型とslip型を組み合わせた復元力特性を用いた地震応答解析を行い、試験体が塑性変形に達する

入力地震動レベルを検討した。

2. 試験体概要

試験体は図1に示すように、4本柱と直交する土台・梁からなる立体架構である。寸法・仕様は共通とし、柱芯間隔を加振方向ならびに加振直交方向共に910mm、横架材(土台と梁)の高さを1,820mmとする1層1スパンの軸組架構2組を、載荷方向に並列させた。試験体数は振動実験用2体、静的実験用2体の計4体である。耐力壁仕様は、構造用合板(壁倍率2.5)で4体とも共通とし、接合部に10kN用HD(ホールダウン)金物を使用したもの(WHD)と、長ほぞ込栓仕様のもの(WCD)の2種類を設定した。

各試験体の柱、桁、梁、土台断面寸法は $105 \text{ mm} \times 105 \text{ mm}$ 、間柱は $35 \text{ mm} \times 105 \text{ mm}$ である。構造用合板は

* 広島工業大学工学部建設工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科博士前期課程土木工学専攻

9mm 厚のものを、釘は N50 を用い、150mm 間隔で止め付けた。表 1 に試験体の材種、気乾密度、含水率を示す。

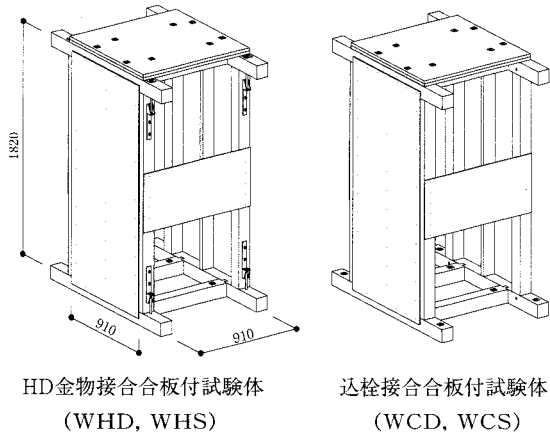


図 1 試験体立体図

表 1 試験体部材の材種、気乾密度、含水率

部材名	材種	気乾密度 (g/cm ³)	含水率 (%)
柱・間柱	レッドウッド	0.52	13.0
梁・桁	ベイマツ	0.52	10.5
土台	ヒノキ	0.51	13.8
込栓	ケヤキ	0.78	7.0

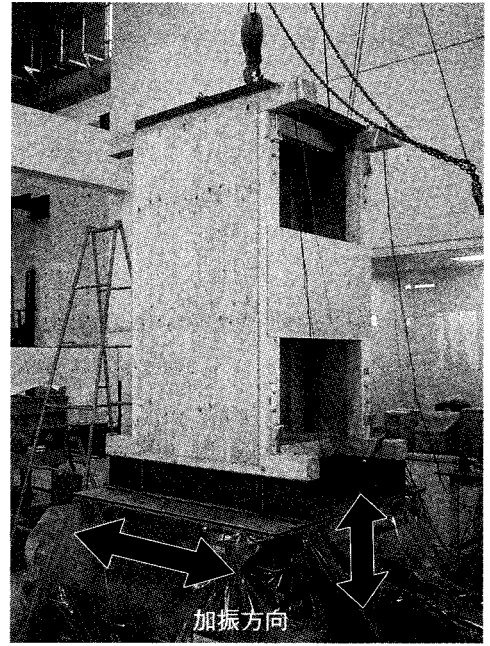


写真 1 試験体設置状況

<u>H</u>	-	<u>1</u>	-	<u>K</u>
H : 水平方向		1 : 100~200cm/s ²		K : JMA Kobe
V : 上下方向		2 : 200~500cm/s ²		T : JR Takatori
HV : 水平上下方向		3 : 300~800cm/s ²		M : Miyagi

図 2 加振段階の表示法

3. 上載する建物重量の設定

建築基準法に基づく床面積当りの各階重量は、平屋建もしくは 2 階建の 2 階部分で 2.0kN/m² (200kg/m²)、2 階建の 1 階部分で重い屋根の場合 4.5kN/m² (460kg/m²)、軽い屋根の場合 3.5kN/m² (360kg/m²) である。本研究では 2.0kN/m² (200kg/m²)、4.0kN/m² (400kg/m²)、5.9kN/m² (600kg/m²) の 3 種類設定した。なお、加振時の建物重量の違いを表現するため試験体名を表 2 の通りとしている。

表 2 建物重量の違いによる試験体名

	試験体名	建物重量 (kN/m ²)
HD金物接合合板付 (WHD)	WHD-200	2.0
	WHD-400	4.0
	WHD-600	5.9
込栓接合合板付 (WCD)	WCD-200	2.0
	WCD-400	4.0
	WCD-600	5.9

4. 実験方法

本実験での試験体設置状況を写真 1 に、加振プログラムを図 3 に示す。ここでは建物重量を軽いものから重いもの

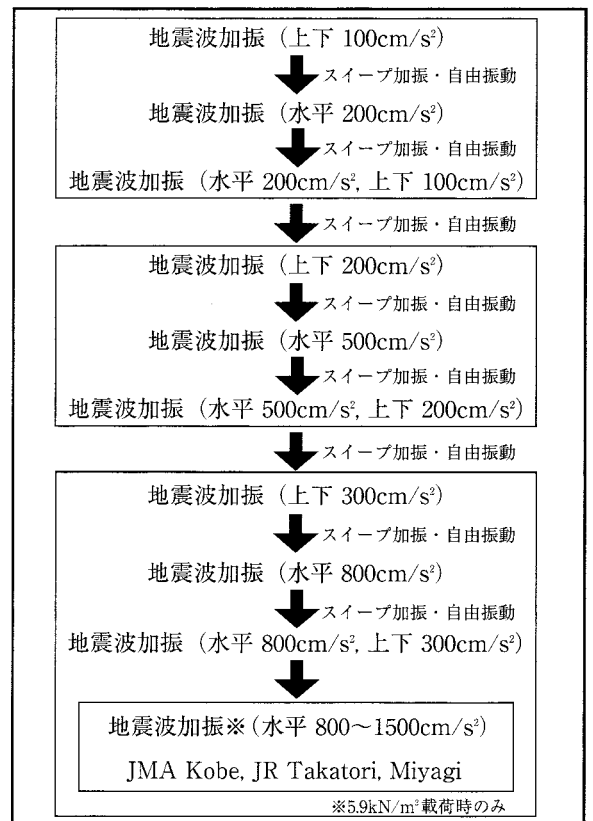


図 3 加振プログラム

へ3段階に分けて、それぞれで入力地震動の加速度レベルを小さいものから大きいものへと上げる順序をとった。さらに上下振動、地震波の違いを入れて、固有周期、応答倍率、減衰定数に変化があるかどうかを調べている。スイープ加振・自由振動加振は、地震波加振の前後に行い算定した。スイープ加振では入力加速度レベルを 30~50cm/s² に設定し、振動数範囲を 1~30Hz まで 1Hz ずつ変化させた。自由振動は、試験体頂部梁に人力でハンマーにより衝撃力を与えて生じさせた。地震波加振で使用した地震波は、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録 (JMA Kobe) NS・UD 成分を使用した。建物重量 5.9kN/m² 時の最後に1978年宮城県沖地震 (Miyagi) EW 成分、1995年兵庫県南部地震の JR 鷹取記録 (JR Takatori) EW 成分をそれぞれ加振した。各地震記録の時刻歴を図4に、振動台上から得られた地震記録の振動数特性を図5に示す。卓越振動数が高いものは JR 鷹取波・宮城波で約 5.0Hz、JMA 神戸波は最も低く約 3.0Hz となっている。

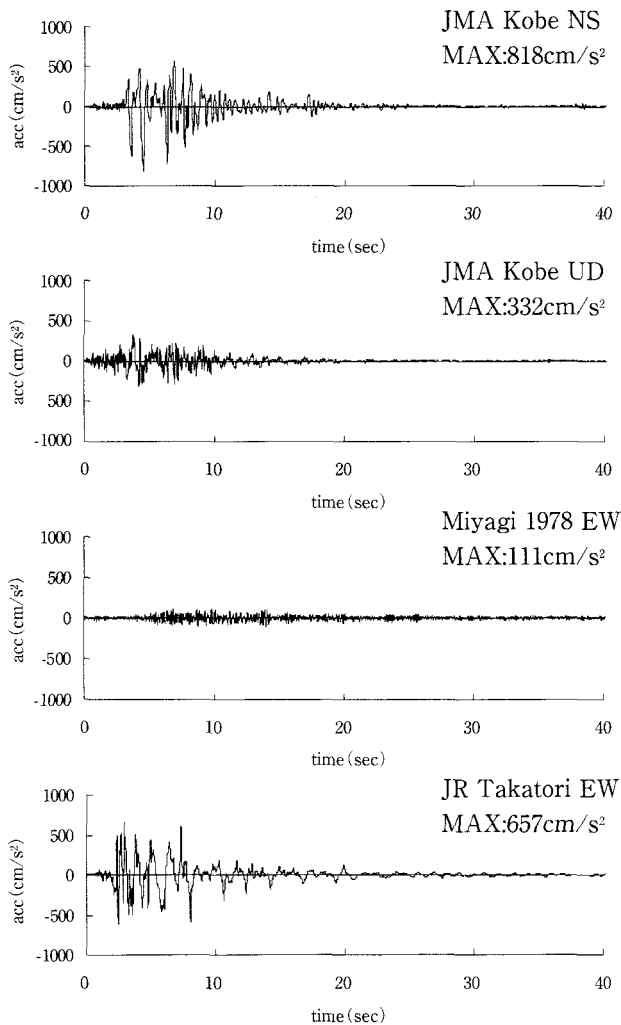


図4 各地震の時刻歴波形

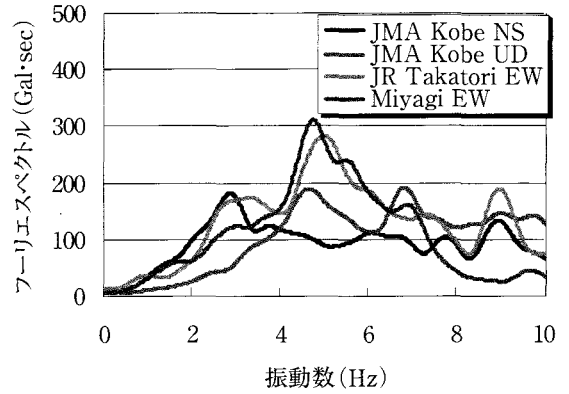


図5 振動台上で得られた地震波振動特性

5. 応答加速度の推移

地震波加振時の土台部・頂部応答加速度を求めた結果は、以下の通りとなった。水平方向加振では、図6より加速度の応答倍率は WHD で 2.0、4.0kN/m² 載荷時で1.5倍程度、5.9kN/m² で2.3倍となり、載荷重量が大きくなるにつれて大きく応答した。一方、WCD では 2.0、4.0、5.9kN/m² 載荷時とも 1.0~1.5倍程度応答しており、載荷重量による大きな変化は生じなかった。試験体の違いでは WHD の方が大きく応答している。一方、上下方向加振では、図7より両試験体とも加速度の応答倍率は1.0~1.5倍程度であり、水平方向ほど大きく応答しないことが分かった。また WHD の方が応答倍率のばらつきは小さい。

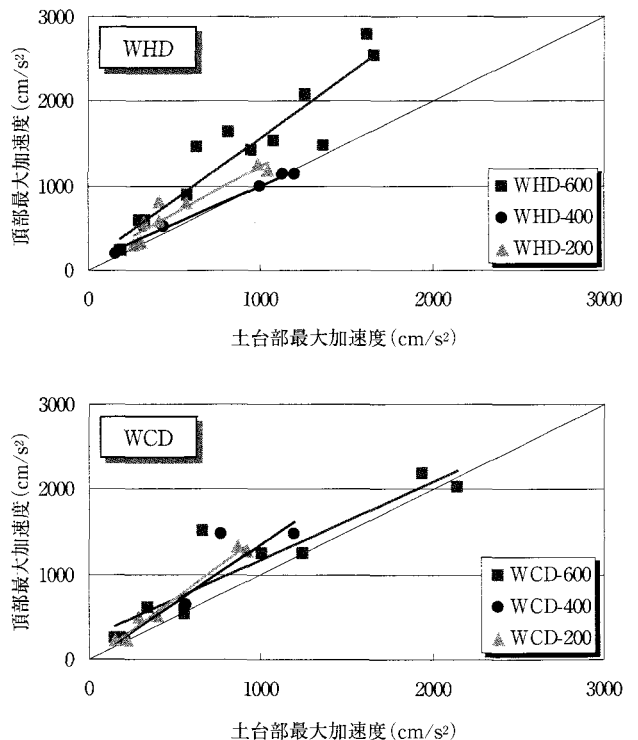


図6 水平方向加振時の頂部・土台部応答加速度

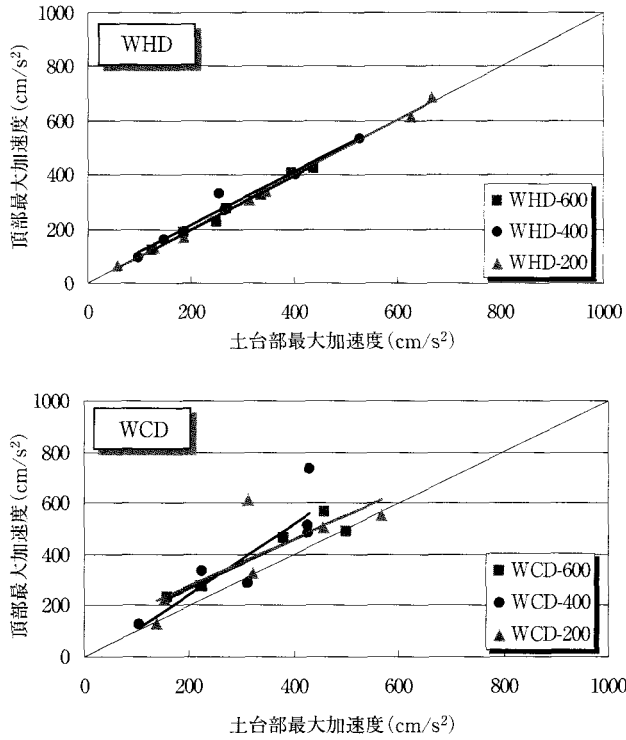


図7 上下方向加振時の頂部・土台部応答加速度

6. 加振による固有周期と減衰定数の変化

地震波加振前後による固有周期の変化を示したものを WHD については図8に、WCD については図9に示す。WHD では、4.0kN/m² 載荷時の水平 800cm/s² 加振時 (H-3-K) に0.07秒から0.08秒へ、5.9kN/m² 載荷時の水平 500cm/s² 加振時 (H-2-K) に0.09秒から0.10秒へ、水平 1500cm/s² 加振時 (H-3-K) に0.10秒から0.11秒へそれぞれ上昇した。減衰定数は、5~20%付近であり、ばらつきが大きく変化が生じたかはわからなかった。

WCD では 4.0kN/m² 載荷時の水平 800cm/s² 加振時 (H-3-K) に0.08秒から0.09秒へ、5.9kN/m² 載荷時の JR 鷹取波 1000cm/s² 加振時 (H-2-T) で0.10秒から0.11秒へ上昇した。減衰定数は、5~15%であり WHD よりばらつきは若干小さかった。しかし変化が生じたか明らかではなかった。

両試験体とも固有周期に変化が見られたのは2階建の軽い屋根の1階部分を想定した 4.0kN/m² 以降の 800cm/s² 加振時であった。

7. 地震波加振時の固有周期と応答倍率

地震波加振による土台部への入力最大加速度と固有周期・応答倍率との関係を図11, 12に示す。両試験体とも建物重量が多くなるにつれて、また入力加速度が大きくなるにつれて固有周期は大きくなる傾向が生じた。特に WCD では最大で0.10秒から0.25秒へと2.5倍近く周期が長くなっ

ていた。一方、土台に対する頂部の応答倍率は、建物重量が増加すると入力加速度が大きくなるにつれて減少する傾向が認められた。

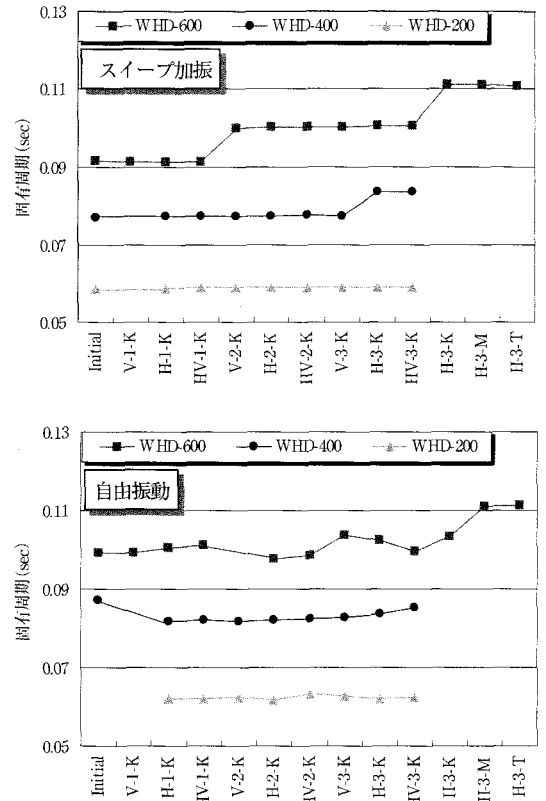


図8 WHDの固有周期変化

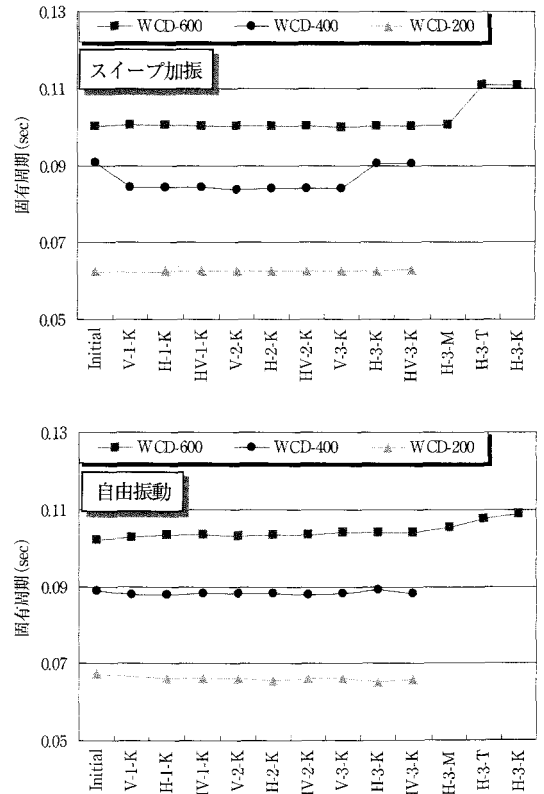


図9 WCDの固有周期変化

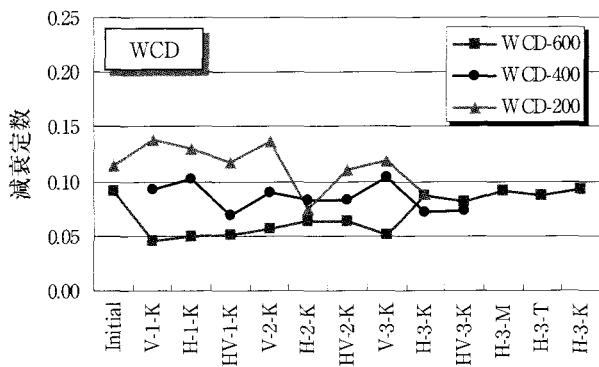
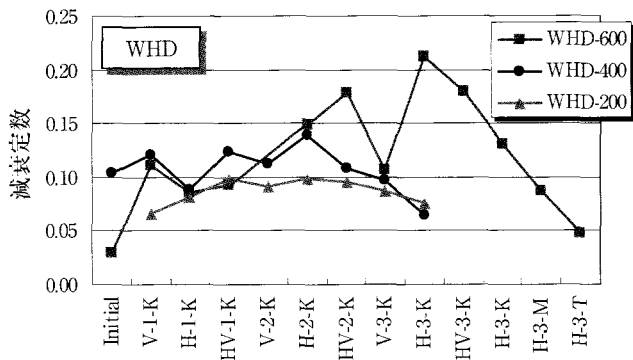


図10 各試験体の減衰定数変化

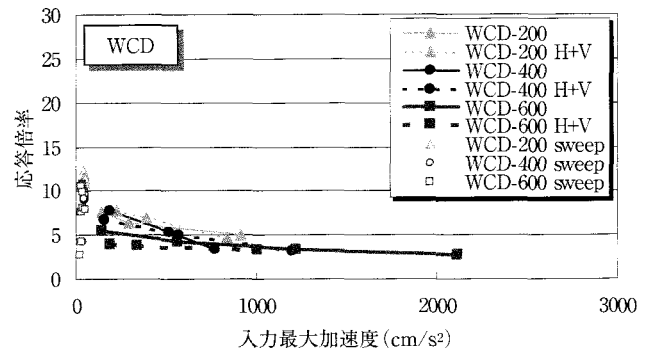
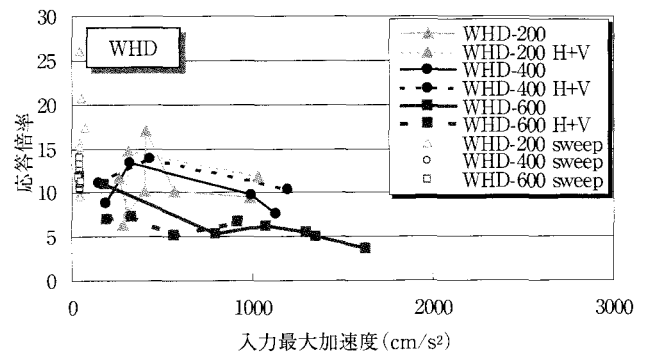


図12 入力加速度と応答倍率の関係

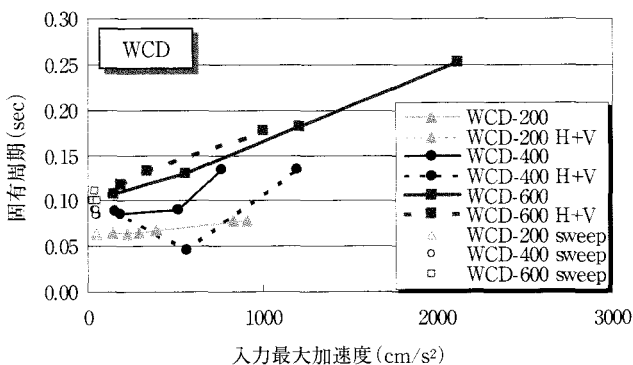
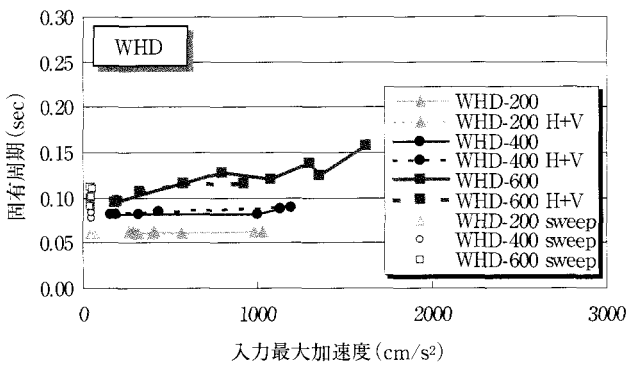


図11 入力加速度と固有周期の関係

8. 耐力・剛性の変化による損傷評価

水平 800~1500cm/s², 上下 300cm/s² の加振によって損傷を受けた後の試験体 (WHS-2, WCS-2) とまだ損傷していない試験体 (WHS, WCS) をそれぞれ静的荷重実験を行い, 履歴曲線, 耐力, 剛性を算出し損傷の定量的評価を行った。結果は表3と図13である。これより終局耐力は両試験体とも25%程度低下, 剛性は WHS で10%, WCS で3%程度低下していることがわかった。

表3 耐力・剛性の結果

		WCS	WCS-2	WHS	WHS-2
降伏耐力	P_y (kN)	11.96	11.86	15.39	14.14
降伏変位	δ_y (mm)	10.10	22.83	12.20	15.20
初期剛性	K (kN/mm)	1.18	0.52	1.26	0.93
降伏点変位	δ_v (mm)	13.92	25.84	20.20	20.67
終局耐力	P_u (kN)	17.35	13.24	25.48	19.14
1/120rad 時の耐力	$P_{1/120}$ (kN)	14.14	13.72	16.98	15.09

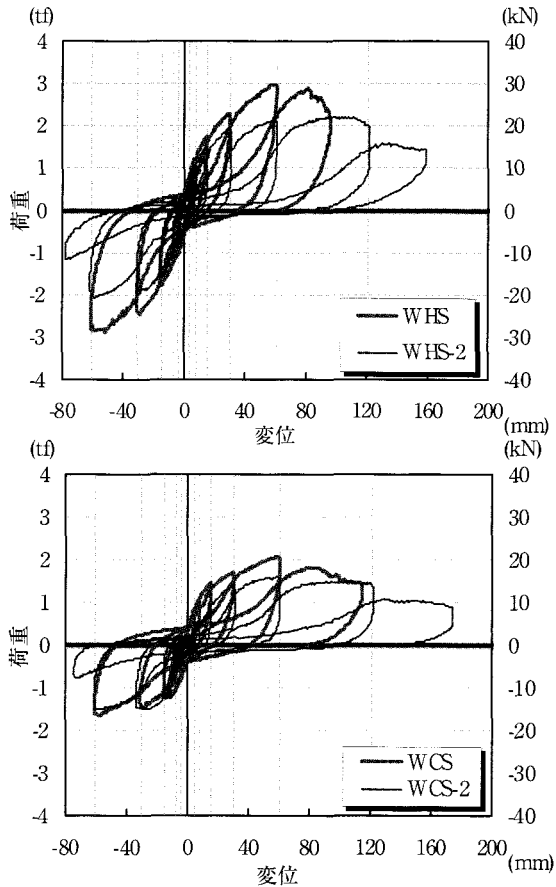


図13 各試験体の履歴曲線

9. 塑性変形に達する地震動レベルの検討

試験体がどの程度の加速度で塑性化するかを推定するため地震応答解析を行った。trilinear型復元力モデルのみでは滑り性状を持つ木造軸組架構の復元力特性を表すことができないため、slip型復元力モデルを併せて用いた。なおモデルに使用する降伏耐力、降伏変位、終局耐力、終局変位は静的載荷実験より算出した(表4参照)。

解析で用いた入力地震波は、振動台加振実験で使用した神戸海洋気象台記録(JMA Kobe) NS成分、1978年宮城県沖地震(Miyagi) EW成分、1995年兵庫県南部地震のJR鷹取記録(JR Takatori) EW成分の3波であり、最大加速度を増幅係数により徐々に増加させた。また、すべて

表4 特性値一覧

	WHD	WCD
第1降伏変位 δ_y (cm)	1.2	1.0
第2降伏変位 δ_p (cm)	4.0	3.2
終局変位 δ_u (cm)	9.6	11.5
第1降伏耐力 P_y (kN)	15.1	12.3
第2降伏耐力 P_p (kN)	25.0	17.1
終局耐力 P_u (kN)	25.0	17.1

の復元力特性に占める trilinear 型の比率は文献4より0.2と設定した。

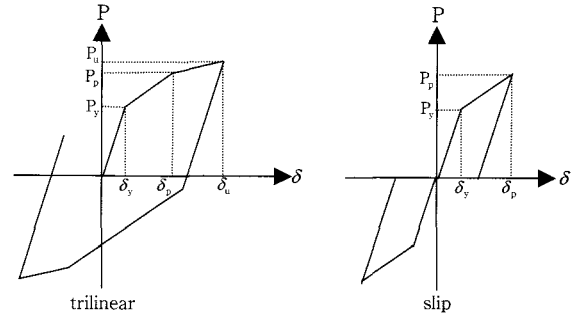


図14 復元力モデル

図15, 16に最大地動加速度と最大層間変形の関係を示す。なお塑性化の判別は、第1降伏変位 δ_y を越えることとしている。2.0kN/m² 載荷時では HD 金物接合で 7000cm/s²、込栓接合で 6000cm/s² 以上でないと塑性化しなかった。4.0kN/m² 載荷時では HD 金物で 4000cm/s²、込栓接合で 3000cm/s²、5.9kN/m² 載荷時では両試験体とも 2000cm/s² 程度で塑性化することが推測される。

建物重量 5.9kN/m² で地震波記録を変化させた場合、神戸波では 2000cm/s² 以上で、JR鷹取波は 1500cm/s² 以上で、宮城波は 800cm/s² 以上で塑性領域に至った。よって最も塑性化しやすかったのは宮城波である。

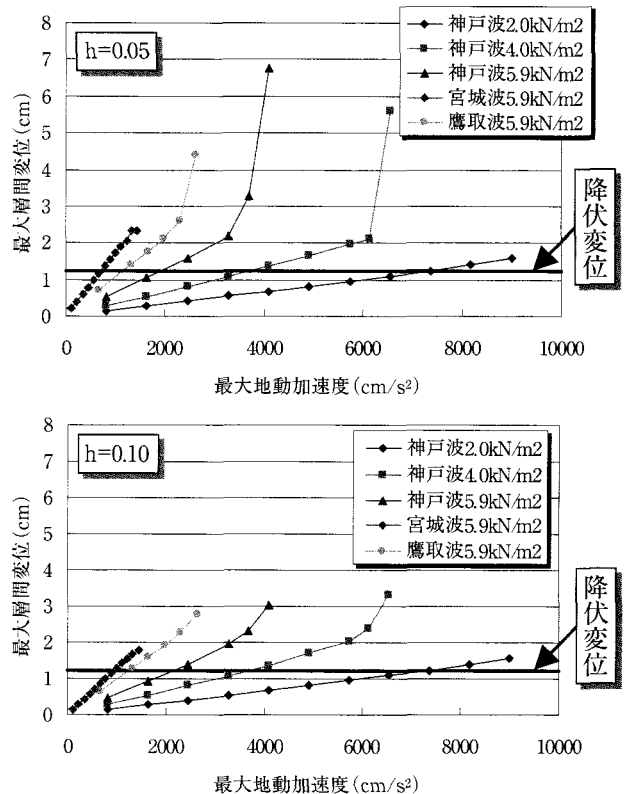


図15 最大地動加速度と最大層間変形の関係 (WHD)

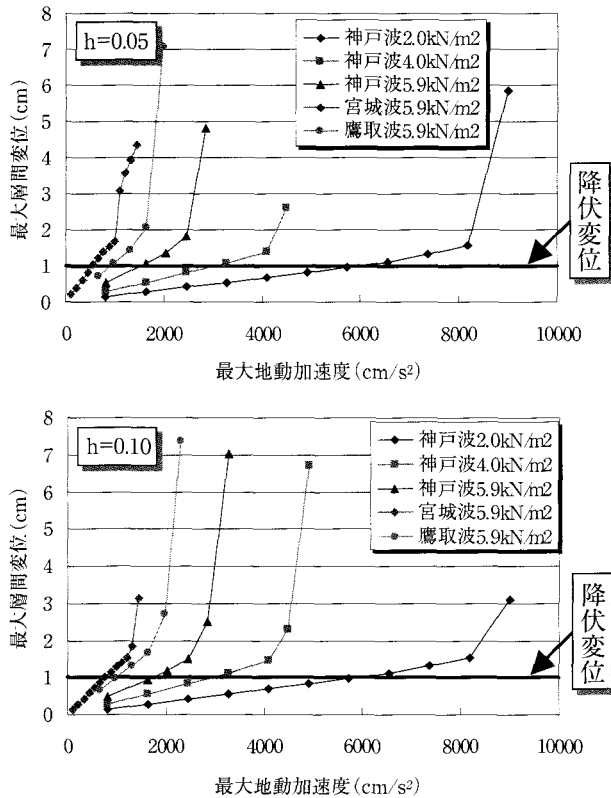


図16 最大地動加速度と最大層間変形の関係 (WCD)

10. 結 論

単純な骨組架構からなる合板壁付木造軸組試験体を用いて、振動台加振実験を行い、地震による木造在来軸組構造の損傷を評価する方法を調べた。建物重量が軽い場合から重い場合まで 2.0, 4.0, 5.9kN/m² の3種類を設定し、入力地震動の最大加速度レベルを200から 2000cm/s² まで段階的に変化させて、上下振動の有無、入力地震波の違いと併せ、構造物の固有周期、加速度応答倍率、減衰定数にどの程度影響が現れるかを考察した。得られた結果は以下の通りである。

1) 建物重量の影響：入力地震の加速度が大きくなるにつれて構造物の固有周期が長くなる傾向が認められる。重い建物重量 5.9kN/m² の場合は、固有周期は、HD (ホールダウン) 金物接合 (WHD) で0.10秒から0.15秒、込栓接合 (WCD) で0.10秒から0.25秒へと上昇する傾向が特に顕著であった。一方、土台部に対する頂部の水平方向加速度応答倍率は、HD 金物接合で14倍から5倍へ、込栓接合で10倍から3倍へと減少した。地震波加振によって固有周期に変化が現れたのは、建物重量が中位の 4.0kN/m² 以上で、水平入力地震の最大加速度が 800cm/s² を超えた場合であった。減衰定数は、HD 金物接合で5~20%、込栓接合で5~15%であるが、値のばらつきが大きいので、地震波加振に

よって明確な変化が生じたと判別できるほどではない。

- 2) 接合部仕様の影響：HD 金物接合の場合、水平方向地震波加振による土台部に対する頂部の加速度応答は、建物重量が中程度以下の 2.0kN/m² と 4.0kN/m² では1.5倍程度であるが、重い場合の 5.9kN/m² で2.3倍となり、建物重量が相当に大きくなると急激に大きく応答する傾向が現れた。一方、込栓接合の場合、3種類の建物重量 2.0, 4.0, 5.9kN/m² の違いに拘わらず土台部に対する頂部の加速度応答はいずれも1.0~1.5倍程度であり、柱の固定度が HD 金物接合に比べて緩く、建物重量による大きな変化は見られなかった。
- 3) 上下方向加振の影響：上下方向加振による構造物の土台部に対する頂部の上下方向の加速度応答は、HD 金物接合・込栓接合とも1.0~1.2倍程度となったが、水平方向加振による構造物の水平方向加速度応答ほど大きくはない。また上下方向加振による固有周期、水平方向加速度応答倍率の変化への影響は小さい。
- 4) 地震入力による損傷：水平地震入力の最大加速度が 800cm/s² 以上の加振を行った後の架構に対する静的載荷実験によって、加振により、初期状態よりも木造在来軸組合板壁付構造の最大耐力は25%、剛性は10%程度、それぞれ減少したことが認められた。
- 5) 地震時損傷の評価：静的載荷実験によって得られた架構の剛性と耐力を用いて、1質点系モデルによる弾塑性地震応答解析を行った。実験に用いた神戸海洋気象台記録 (JMA Kobe) の NS 成分を入力した場合、応答解析では、建物重量が中位の 4.0kN/m² 以下では水平入力地震の最大加速度が 4000cm/s² 以上で最大層間変位が降伏変位を越えることになるが、建物重量が重い場合の 5.9kN/m² 時では、最大加速度が 1500cm/s²~2000cm/s² 程度で降伏変位を越えることになった。この応答解析結果によると、振動台加振実験で構造物の固有周期が急激に上昇変化する傾向を示したのは、構造物が降伏変位領域に達したことに対応する。これより合板壁付の木造在来軸組構造について、固有周期による損傷の評価が定量的に可能になると推察される。特に、剛性の高い HD 金物接合仕様を用いた方が、込栓接合より加速度応答は大きく、損傷への影響がより大きく現れることになる。

参 考 文 献

- 1) 北原昭男, 藤原悌三：都市における建築構造物の地震被害推定に関する基礎的研究 - 木造構造物の地震応答推定 -, 京都大学防災研究所年報 第31号 B-1, 1988年4月, pp.139~142.

- 2) 後藤正美, 鈴木有: 在来構法の木造骨組模型を用いた静的及び動的力学特性実験的検討 - (その2) 加振波の特性と応答波の卓越振動数の関係 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 1992年8月, pp.135~136.
- 3) 坂本功, 宮澤健二, 大橋好光, 牧勉, 林晃正, 難波蓮太郎: 木造住宅実大振動実験中間報告書, 日本住宅・木材技術センター, 1996年6月.
- 4) 岩井哲, 松森博孝, 神鳥和志, 一反田康啓: 木造建物における動的特性に関するデータベース構築と軸組架構の動的ならびに静的載荷実験, 広島工業大学紀要研究編 第37巻, 2003年2月, pp.83~92.
- 5) 清水秀丸: 在来軸組構法木造住宅の変形性能を考慮した耐震性能評価に関する研究, 京都大学学位論文, 2003年3月.
- 6) 松森博孝, 岩井哲, 神鳥和志: 振動台加振実験による木造軸組架構の損傷評価 (その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2003年9月, pp.383~386.