速度依存ダンパーをもつ木質架構の振動台実験

SHAKING TABLE TESTS OF WOOD FRAMES
WITH VELOCITY-DEPENDENT DAMPERS坂田 弘安^{*1}, 笠井 和彦^{*2}, 和田 章^{*3}, 緑川 光正^{*4}, 大木 洋司^{*5}中川 徹^{*6}, 松田 和浩^{*7}*Hiroyasu SAKATA, Kazuhiko KASAI, Akira WADA, Mitsumasa MIDORIKAWA,
Yoji OOKI, Toru NAKAGAWA and Kazuhiro MATSUDA*

Passive control schemes to mitigate seismic damage of wood houses are discussed. Extensive shaking table tests are conducted for various full-size wood-frame specimens. This paper focuses on the specimens with velocity-dependent dampers, and compares their dynamic properties and performance with those of conventional wood frame as well as passively controlled frame utilizing deformation-dependent dampers. Dynamic properties are defined by equivalent periods and damping ratios. Performance is assessed by referring to story drifts, accelerations, base shear forces, damper deformations and forces, and connection deformations. Test results are also predicted by proposed simplified rules based on the dynamic properties and response spectra.

Keywords: *shaking table test, wood-frame, passive control, viscoelastic damper, response spectrum*

振動台実験、木質架構、パッシブ制振、粘弾性ダンパー、応答スペクトル

1. はじめに

我国には既存不適格戸建木造住宅が全国に多数存在している。地震時における人命確保に向けた既存不適格建物の耐震補強のみならず、財産保持という観点からすると新築戸建木造住宅においてもより高い耐震性能が求められる。一方で、補助金制度があるにもかかわらず耐震補強などが普及していない現状があり、その理由の一つとして、耐震化メニューの少なさが挙げられる。住宅の耐震性向上を活性化させるためにも、パッシブ制振技術を耐震化の選択肢の一つとして導入する合理的方法を検討することは重要である。

筆者らが文献1で言及したように、木質構造に対する制振ダンパー適用に関する研究は多く行われるようになってきている。これまでの研究結果を概観すると制振ダンパーに粘弾性体を用いたものの研究が最も多い。その理由としては、粘弾性ダンパーは小変形から大変形までの広い範囲の振動に対して減衰効果を発揮できること、面材に貼付するなど容易に作成することができること、小型で安価なものとすることが可能であること、等が背景にあると考えられる。

その中で、筆者らは様々な履歴特性をもつ制振壁を開発・提案し、強制変形加振などによりその有効性を検討してきた^{1), 2)}。また、2層木造軸組住宅の一部をモデル化した実大の木質架構に対して、変位依存ダンパーからなる制振壁や筋かい・構造用合板からなる既存形式の耐力壁を組み込んだ試験体の振動台実験を行うことにより、それらの動的特性の比較検討を行った³⁾。本報では、速度依存ダンパーからなる制振壁を組み込んだ試験体の振動台実験に関して報告する。このように、様々な履歴特性を持つ多数のダンパーを用いた

振動台実験を行っている研究例は少なく、それらが地震時に木質住宅に及ぼす影響に関して、減衰等の特性を把握するような検討はされていない。

そこで、以下の2点を目的として本研究を実施した。①速度依存ダンパーからなる制振壁を用いた試験体に関して、文献3と同様の形式で振動台実験を行うことにより、その基本的な動的挙動を把握する。すなわち、破壊性状、応答変位、層せん断力、局所の挙動、エネルギー吸収能力および等価周期と等価減衰等の変動特性を把握する。②文献3で報告した既存の耐力壁・変位依存ダンパーによる制振壁および本報で報告する速度依存ダンパーによる制振壁の特性の違いを比較検討する。

2. 実験概要

2. 1 実験の概念と試験体の設定

図1に示すように、試験体の基本形状は文献3と同様である。すなわち、強度等級 E95F315 の集成材を用い(柱に用いたスプルス集成材は、曲げヤング係数 9.3GPa、曲げ強度 48.3MPa)、芯線で1辺が 2730mm の箱型試験体に対して中央構面には壁要素を配置し、外側構面は層せん断力をほとんど負担しない形状となっている。

壁倍率2をもつ壁要素が2P(P=0.91m)存在する場合を標準と定めたため、標準耐力は7.13kNとなる(付録1)。1層階高中央以上の総重量は35.7kNとなるようにおもりの量を決定しており、それは標準地震層せん断力係数0.2との積が標準耐力となるようにしている。また、おもりの配置は柱の長期圧縮力を考慮して決定した。

^{*1} 東京工業大学建築物理研究センター 准教授・工博^{*2} 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph.D.^{*3} 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博^{*4} 北海道大学 教授・工博^{*5} 東京工業大学建築物理研究センター 助教^{*6} 大林組^{*7} 東京工業大学 大学院生

Assoc. Prof., Struct. Eng. Res. Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Struct. Eng. Res. Center, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.

Prof., Struct. Eng. Res. Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Hokkaido University, Dr. Eng.

Research Assoc., Struct. Eng. Res. Center, Tokyo Institute of Technology

Obayashi Corporation

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

図1 試験体概要

表1 試験体一覧

配置	制振+制振		制振+既存	
試験体				
試験体名	VP-VP	VK-VK	VK-WP	VB-VB(WP)
架構	粘弾性ダンパー合板型 粘弾性ダンパー合板型	粘弾性ダンパーK型 粘弾性ダンパーK型	粘弾性ダンパーK型 構造用合板	粘弾性ダンパー方杖型 粘弾性ダンパー方杖型
壁量	5.0×1P+5.0×1P	5.0×1P+5.0×1P	5.0×1P+3.0×1P	2.0×1P+3.0×1P+2.0×1P
初期周期 (s)	0.32	0.32	0.29	0.32

2. 2 試験体の概要

試験体一覧を表1に示す。表中の壁量とは、各壁要素の壁倍率にその長さを乗じたものの和と定義する。壁要素の種類と配置が異なる計4体の試験体を用いた。各試験体に関し以下に述べる。なお、試験体名のVは粘弾性ダンパー(Viscoelastic)、Pは合板型架構(Plywood)、KはK型架構、Bは方杖型架構(Brace)、WPは構造用合板(Wood Panel)を意味する。

(1) 壁要素を全て制振壁とした試験体

- VP-VP: 壁倍率5以上の粘弾性ダンパー合板型¹⁾を2P配置した試験体。柱脚には柱両側のホールダウンと片側の1枚ハンチ型金物2個を併用し、柱頭には1枚ハンチ型金物を2個用いた。

- VK-VK: 壁倍率5以上の粘弾性ダンパーK型²⁾を2P配置した試験体。柱脚にはブレースと一体のホールダウンと内使いL型金物2個を併用した。柱頭には内使いL型金物を2個用いた。

(2) 制振壁と既存耐力壁を混合させた試験体

- VK-WP: 粘弾性ダンパーK型を1P、構造用合板を1Pずつ配置した試験体。WP部は1Pあたり壁倍率3の構造用合板2級9mm厚(釘CN50、外周部@100mm、中間部@200mm)である。VK部の詳細は前述と同一である。

- VB-VB(WP): 壁倍率2の粘弾性ダンパー方杖型を両側に2P、構造用合板を中央に1P配置した試験体。VB部の柱脚・柱頭には内使いL型金物2個を用いた。WP部の詳細は前述の通りである。

なお、振動台実験の前に各ダンパー構面1Pの試験をそれぞれ強制変形加振によって検証した。その詳細は文献1,2で示したが、それらの文献で触れていないVB架構に関してのみ、架構の詳細および強制変形加振実験結果を付録2に示す。

2. 3 粘弾性ダンパーの種類

本研究では、図2のような履歴特性を持つ2種の粘弾性体を採用した。VP-VP・VK-VK・VK-WP試験体には自己接着性を有するアクリル系^{4),5)}を、VB-VB(WP)試験体には鋼管の間に粘弾性体を付着させなければならないため、溶着型のイソブチレン・スチレン系⁶⁾を用いた。2種の材料の履歴特性に関して以下に記述する。

アクリル系の粘弾性体は応力-歪曲線が楕円となり、低温または高振動になるにつれ楕円の傾きと面積、つまり剛性とエネルギー吸収が増加する。このように温度、振動数によって決まる楕円の形状は小振幅の加振ではサイクル数に関わらず一定であり、かつ楕円の大きさが振幅に比例するという線形挙動が得られる。一方、大振幅では非線形挙動を示し、1サイクル目から歪の増加に伴い楕円の傾きが低下し、後続波で更に低下する。

イソブチレン・スチレン系の粘弾性体は、小振幅で楕円、大振幅

図2 ダンパーの応力-歪関係

図3 試験体設置・計測位置

でバイリニア型の履歴を示す特徴をもち、これにより、ダンパーの支持部材へ入力される力を過大にすることなく、なおかつエネルギー吸収を大きくする効果がある。また、貯蔵剛性や損失剛性の温度依存性が小さく、十分な変形能力を有している。

2. 4 試験体設置・計測方法

試験体設置と計測に関しても文献3と同様の形式で行った(図3)。すなわち、振動台上に設置した剛な計測用タワーに変位計を設置し($u_0 \sim u_3$)、梁と土台の木口面の相対変位を計測することで層間変形を算出した。振動台、核構面の土台・梁の中央部には加速度計を配置し($a_0 \sim a_6$)、試験体の質量から層せん断力 F を算出した。これらの計測により、試験体土台・基礎フレーム・固定フレーム間のずれ、試験体のねじれが発生していないことも確認した。

柱頭・柱脚には1箇所あたりに2つの変位計を柱芯位置から左右にずらした位置に設置することで($u_4 \sim u_{19}$)、柱頭・柱脚の引き抜け量および回転量を算出した。引き寄せ金物のボルトにはロードセルを取りつけてボルト軸力の変動を、K型ブレース・方杖の鋼管部には歪ゲージを貼付してダンパー力を計測した。サンプリング周波数は0.001秒である。

2. 5 入力加振波

表2に入力加振波一覧を示す。使用した波は1968 八戸波 NS、1952 Taft波 EW、1995 JMA 神戸波 NSであるが、それぞれに対して最大加速度が表2右列の値となるように基準化して用いた。なお、

表2 入力加振波一覧

No.	Name	Acc _{max} (g)
1	W1	0.1
2	0.2g八戸波	0.2
3	W2	0.1
4	0.2gTaft波	0.2
5	W3	0.1
6	0.2g神戸波(1回目)	0.2
7	W4	0.1
8	0.6g神戸波	0.6
9	W5	0.1
10	0.2g神戸波(2回目)	0.2
11	W6	0.1
12	0.6gTaft波	0.6
13	W7	0.1

W1~W7は最大加速度0.1gのホワイトノイズ波(gは重力加速度)

VP-VP 試験体のみ 0.6g 神戸波が目標に対して 13%程度小さく、0.6gTaft 波では 20%程度大きく入力される結果となった。地震波の前後には最大加速度 0.1g のホワイトノイズ波を入力することで、微小変形時における試験体の動的特性の変化を把握した。なお、粘弾性ダンパーは全て加振前の温度を 20℃に統一して加振を行った。

3. 全体応答

3. 1 層間変形の時刻歴応答と挙動の概要

図 4 に、全試験体の 0.2g 神戸波(1 回目)、0.6g 神戸波、0.2g 神戸波(2 回目)の入力による層間変形 u の時刻歴を示す。図中の破線は層間変形角 $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ を示す。

VP-VP 試験体と VK-VK 試験体は、0.2g 神戸波(1 回目)の入力に対し、 $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ 以内に留まった。これは、粘弾性ダンパーが 0.2g の入力において十分に機能したためと考えられる。0.6g 神戸波で VP-VP 試験体は $\theta = 1/100 \text{ rad.}$ 、VK-VK 試験体は $\theta = 1/71 \text{ rad.}$ と変形したが、外観上の損傷は確認できず、残留変形も見られなかった。その後の 0.2g 神戸波(2 回目)の入力に対しては、両試験体とも 1 回目とほぼ同形状の波形を示したことから、0.6g 神戸波の入力においても架構の損傷はほとんど無いと言える。

VK-WP 試験体は、0.2g 神戸波(1 回目)の入力に対し $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ 以内に留まった。0.6g 神戸波の入力に対し $\theta = 1/46 \text{ rad.}$ 変形したが、外観上の損傷は確認できなかった。しかし、0.2g 神戸波(2 回目)の入力に対し、0.2g 神戸波(1 回目)と比較して周期が伸びていることから、合板の釘が緩み剛性が低下したと考えられる。そのため、1 回目と比べ変形も大きくなったものの、 $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ 程度に留まった。

VB-VB(WP)試験体は、0.2g 神戸波(1 回目)の入力に対して、他の制振壁に比べ目標壁量が少ないため変形が大きいものの、 $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ 以内に留まった。0.6g 神戸波に対して、合板が完全に浮き上がり、釘が抜けたため、層間変形は大きく、 $\theta = 1/22 \text{ rad.}$ 変形した。このため 0.2g 神戸波(2 回目)の入力に対して、壁要素が粘弾性ダンパー方杖型のみとなり、周期が伸びるとともに大きく変形した。

3. 2 層せん断力と層間変形の関係

図 5 に、入力地震波に対する層せん断力と層間変形の関係を示す。図中破線は $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ に相当する変位を示す。また、表 3 に事前に行った架構実験より得た壁倍率をもとに算出した試験体の壁量評

価値、本試験体の重さに対して標準地震層せん断力係数を 0.2 として設計したときに必要とされる壁長、および 0.6g 神戸波までの入力から得た壁量実験値と $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ 時の耐力 $F_{1/120}$ 、最大層せん断力 $F_{\max}$ 、最大応答加速度 $a_{\max}$ 、および最大層間変形 $u_{\max}$ を示す。

まず、制振壁のみの試験体について述べる(図 5 上段)。制振壁の壁量実験値は全て壁量評価値を上回り(表 3)、目標とする耐力を得ることが容易であることが分かる。VP-VP 試験体と VK-VK 試験体を比較すると、VP-VP の等価剛性がやや大きい。これは、VP-VP の柱脚の両側に配したホールダウン金物の曲げ剛性が高いため、架構の剛性も高くなったと考えられる。また、両試験体ともに 0.2g の各 3 波に対し楕円の履歴を示した。文献 3 の変位依存ダンパー制振試験体に比べ層せん断力が低いことから、小振幅の入力に対して速度依存ダンパーが有効であることが分かる。0.6g 神戸波では 0.2g の各 3 波に比べ等価剛性がやや低いが、これは粘弾性体が損傷したからではなく、温度上昇によるものである。これは、0.2g 神戸波(2 回目)で 1 回目と同形状の履歴を示していることから明らかである。

次に、制振壁と既存耐力壁の両方をもつ試験体について述べる(図 5 下段)。VK-WP 試験体は、WP 部の剛性が VK 部に比べて低いため VK-VK に比べ等価剛性は低くなったが、0.2g の各 3 波に対して $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ 以内に留まった。また、0.6g 神戸波では構造用合板に打ちつけた釘に緩みが生じるため、その履歴は楕円の履歴にスリップが足された形状を示した。0.2g 神戸波(2 回目)では、合板の釘が緩むことから等価剛性は低くなるも $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ 程度に留まった。

VB-VB(WP)試験体は、0.2g の各 3 波に対し、他の制振試験体に比べ壁量が小さいため変形は大きくなったが $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ 程度に留まった。0.6g 神戸波では構造用合板が浮き上がり、 $\theta = 1/22 \text{ rad.}$ と大き

表 3 0.6g 神戸波入力時の層せん断力と層間変形の最大値と壁量

No.	試験体	壁量※1 評価値(m)	壁量※2 実験値(m)	必要 壁長(m)	$F_{1/120}$ (kN)	$F_{\max}$ (kN)	$a_{\max}$ (g)	$u_{\max}$ (mm)
1	VP-VP	9.1	12.7	3.8	22.7	26.9	0.71	29.5
2	VK-VK	9.1	12.7	3.8	22.6	28.9	0.77	39.1
3	VK-WP	7.3	11.9	3.8	21.3	32.0	0.87	59.0
4	VB-VB(WP)	6.4	8.6	3.8	15.3	26.8	0.82	120.7

※1 1P の強制変形加振実験から求めた壁倍率¹⁾、²⁾から算出

※2 壁量実験値は最初に 1/120rad. に達した時の層せん断力から算出

図 4 層間変形の時刻歴

図5 層せん断力と層間変形の関係

図6 ダンパー力とダンパー変形の関係

く変形した。このため、0.2g 神戸波(2 回目)では WP 部の剛性が著しく低下し、方杖ダンパーの効率が低下し大きく変形した。

4. 局所応答

4. 1 ダンパーの力と変形の関係

図 6 に、各ダンパー可動方向の力 $\hat{F}_d$ と変形 $\hat{u}_d$ の関係を示す。制振壁が 2 構面組み込まれた試験体では、その履歴形状がほぼ一致したため、片側の制振壁のダンパーのみに言及する。

VK-VK 試験体の粘弾性ダンパーは、0.2g の各 3 波で楕円の履歴を示したことから小振幅の入力に対しても機能していることが分かる。0.6g 神戸波では、入力中に温度が上昇したため等価剛性がやや低下している。また、0.2g 神戸波(2 回目)では 1 回目と履歴が同じであることから 0.6g 神戸波入力時にもダンパー自身に損傷は無かったと言える。0.6g Taft 波においてもダンパー自身の損傷は無かった。

VK-WP 試験体の粘弾性ダンパーは、0.2g の各 3 波で VK-VK と同

様に楕円の履歴を示した。等価剛性も同様であったことから、粘弾性ダンパーが有効に機能したと言える。0.6g 神戸波ではせん断至 500%に相当する 15mm 程度まで変形し、エネルギー吸収量を示す楕円の面積も VK-VK よりも大きく、ダンパー温度が急激に増加したことからダンパーの貯蔵剛性が低下した⁷⁾。また、その後の 0.2g 神戸波(2 回目)の入力ではダンパーの貯蔵剛性が 1 回目よりも下がっていることから、ダンパー自身に損傷が生じていることがわかる。

VB-VB(WP)試験体の粘弾性ダンパーは、0.2g の各 3 波で楕円の履歴を示すものの、K 型ダンパーと比べて $\hat{F}_d$ が高いことから、ダンパーの効率が低いといえる。0.6g の入力では最大で約 50kN のダンパー力が生じ、それを柱 1 本のみで受け持つとした時には、柱 1 本の曲げ強度を越えることになるが、隣に併設している構造用合板が効果的に機能したため、柱に損傷はみられなかった。また、ダンパーに引張荷重が作用した場合にも付録 2 に示したピン治具に損傷は見られなかったことから、ビスが効果的に機能したことがわかる。

4. 2 粘弾性ダンパーの温度の時刻歴

粘弾性体は外力仕事を分子運動により熱エネルギーに変換する材料であり、ある時点での温度上昇量はそれまでの総エネルギー吸収量を粘弾性体の比熱と密度の積で割ることにより求められる⁹⁾。

計算により求めたダンパー温度と実験値との比較として、図7に神戸0.6g入力時におけるVK-VK, VK-WP試験体のダンパー温度の時刻歴と、その時のダンパー変形(細い線)を示す。t=5[sec]付近から粘弾性体の変形と共に温度が急激に上昇し始め、その後の約5秒間は計算値と実験値が概ね一致していることがわかる。t=10[sec]付近からは粘弾性体の変形が小さくなるため、計算値の温度は緩やかに上昇するが、実験値の温度は外気による粘弾性体の冷却効果の影響が強くなるため徐々に下降する。以上のことから、長時間継続する地震波の時刻歴応答解析を厳密に行う場合、ダンパー冷却の影響による粘弾性体の温度低下も考慮に入れる必要があることがわかる。

図7 神戸0.6g入力時におけるダンパー温度と変位の時

4. 3 柱脚の軸力と変形の関係

図8に、0.6g神戸波における引き寄せボルト引張力と柱浮き上がり量の最大値を示す。柱は図の左より①～④とする。図中の破線は、アスペクト比3と壁要素2Pをふまえ、層せん断力の最大値 F_{max} を3/2倍した値、つまり2枚の壁要素が同等にせん断力を負担し、かつ壁頂部の回転拘束がない場合の各脚部の転倒モーメントによる軸力の推測値である。

VP-VP試験体の引き抜け量が小さいことから、引き寄せ金物を柱の両側に配した接合部の剛性の高さが確認できる。また、全ての柱の最大引張力が $1.5F_{max}$ に近いことから引張力のほとんどを引き寄せボルトが負担していることがわかる。

VK-WP試験体からはVK部の柱の引張力がWP部の柱の引張力より大きいにもかかわらず、柱の引抜け量はVK部の方がWP部よりも小さいことからK型架構の引き寄せ金物は一般の引き寄せ金物よ

図8 神戸0.6g入力での引き寄せボルトの引張力と柱脚引抜け変形量の最大値

り高性能であることがわかる。

VB-VB(WP)試験体は外側の柱にホールダウン金物を取り付けていないため、外側柱の引抜け量が大きくなった。

4. 4 ダンパーの力と変形の分担

壁要素の柱・横架材接合部をピンと仮定した場合、壁要素のアスペクト比が3であることから、2つのダンパーに働くせん断力の和は架構のせん断力の3倍となり、ダンパーの変形は層間変形の1/3倍となる。実際には接合部のピン仮定は成立せず、接合部の引き抜け等によるダンパー変形の低減や、接合部の曲げ抵抗等による架構の耐力上昇があるため、本架構はエネルギー吸収能力のバランスを考慮した接合部の設計を行っている^{11, 12)}。そこでダンパー力の層せん断力に対する寄与分と、ダンパー変形の層間変形に対する変形効率に関して考察する。

図9に0.2g神戸波(1回目)、0.6g神戸波入力時の層せん断力 F と層間変形 u のダンパー寄与分を時刻歴で示す。ダンパー力の寄与分はダンパー力の和を1/3倍、ダンパー変形の寄与分はダンパー変形の3倍としている。試験体はVK-VK試験体と、比較のために文献3のFK-FK試験体も示している。FK架構はK型ブレースのダンパー部に摩擦ダンパー(Friction)を用いた試験体である。

層せん断力に注目すると、0.2g神戸波(1回目)において、VK-VK試験体ではダンパー力が層せん断力の9割弱を負担しているのに対し、FK-FK試験体では層せん断力のほぼ全てを負担しているといえる。これはダンパー部の初期剛性の差による影響であり、FK-FK試験体はダンパー部以外の架構の初期剛性と比べてダンパー部の初期剛性が高いためである。0.6g神戸波入力ではダンパーの負担するせん断力が架構の負担するせん断力に比べて大きくなるため、どちらの試験体も層せん断力のほぼ全てを負担している。一方、層間変形に注目すると、VK-VK試験体は0.2g神戸波(1回目)、0.6g神戸波共

図9 層せん断力と層間変形のダンパー寄与分の時刻歴

に一定の割合で層間変形に寄与している。これに対し、FK-FK 試験体は 0.2g 神戸波(1 回目)ではほとんど変形せず、0.6g 神戸波入力では架構が大きく変形するときに、ダンパー部にはすべり荷重を超えたダンパー力が発生し、ダンパー部がすべることによって架構の変形に追従するように変形はするものの、架構が微小な変形をするときにダンパー部はほとんど変形しない。すなわち、このときはダンパー部以外の架構の弾性変形が生じている。

このことから、粘弾性ダンパーは小変形から大変形までの広い範囲において安定したエネルギー吸収能力を示すのに対し、変位依存ダンパーでは大変形時のみに制振性能を示すことが確認できる。

5. 剛性と減衰の傾向

5. 1 エネルギー吸収能力

図 10 は、各地震波の入力終了までの、試験体とダンパーのエネルギー吸収量を加振ごとに示している。試験体全体のエネルギー吸収量は層せん断力・層間変形の履歴面積(図 5) から、ダンパーのエネルギー吸収量は各ダンパーの履歴面積(図 6) の合計から評価した。なお、VP-VP 試験体においてはダンパー荷重を計測できないため、架構全体のエネルギー吸収量のみを示す。

VP-VP 試験体の全体のエネルギー吸収量は、0.6g 神戸波入力では他の試験体より少なく、0.6gTaft 波では他の試験体より多い。これは加振の都合上 0.6g 神戸波では目標よりも入力加速度が小さくなり、0.6gTaft 波では目標よりも入力加速度が大きくなったためである。VK-VK 試験体は、入力に関わらず全体に対するダンパーのエネルギー吸収量が一定で、ダンパーが全体に対して約 7 割のエネルギーを吸収した。文献 3 で示した変位依存ダンパーの制振試験体と比較すると、粘弾性を有する試験体は小振幅時のエネルギー吸収に長けていることが分かる。この傾向は他の試験体においても同様で、全体に対するダンパーのエネルギー吸収量が VK-VK 試験体よりは低いものの、全体の吸収エネルギーに対して VK-WP 試験体で約 6 割、VB-VB(WP)試験体で約 5 割のエネルギーをダンパーが吸収した。

図 10 架構全体とダンパーのエネルギー吸収

(a)=0.2g 八戸, b=0.2gTaft, c=0.2g 神戸 1 回目, d=0.6g 神戸, e=0.2g 神戸 2 回目, f=0.6gTaft)

5. 2 微小変形時の周期と減衰

地震波の入力前後には最大加速度 0.1g のホワイトノイズ波を入力している(表 2)。応答は層間変形で 1/900rad.以下と非常に小さく、よって線形と仮定できると考え、土台加速度から桁頂部加速度への伝達関数と概ね一致する伝達関数をもつ線形一質点系の固有周期と

減衰定数を、試験体の微小変形時における固有周期・減衰定数 T_0, h_0 と定義した。以上より、各地震波入力後の試験体の特性の変化を把握した。図 11 に、ホワイトノイズ W1~W7(表 2)の入力より算出した固有周期 T_0 , 減衰定数 h_0 , 粘性減衰係数 C_0 を示す。比較のため、文献 3 の試験体も含めてある。

図 11 左列は文献 3 で記述した既存耐力壁の試験体の特性を示している。0.6g 神戸波・0.6gTaft 波の入力により T_0 の値が上昇し、それに伴い h_0 の値も上昇するが、それらは等価剛性が低下したことによるものであり、その時の C_0 は減少しているため、エネルギー吸収能力の低下が起こっていることに注意する。

一方、制振壁の等価周期・減衰定数 T_0 と h_0 の傾向は、以下の如くである(図 11 中列)。VP-VP, VK-VK 試験体は入力波に関わらず T_0 と h_0 がほぼ一定であることから、本論で用いた制振壁の場合、架構に損傷がほとんどないことが予測できる。また、文献 3 の変位依存ダンパー制振試験体と比べ h_0 と C_0 が常に高いことから、微小変形においても粘弾性ダンパーが有効に機能していることが分かる。

既存耐力壁と制振壁の両方をもつ試験体において(図 11 右列)、VK-WP 試験体は、0.6g 神戸波の入力後、合板の釘の緩みにより T_0 と h_0 が大きくなった。また、 C_0 の値に大きな変化がないことから、エネルギー吸収能力は低下していないことがわかる。VB-VB(WP)試験体においては既存耐力壁と同様の傾向を示しており、ダンパーの効率としては低いといえるだろう。

地震波による大変形時の特性に関しては様々な算出法で抽出したが、それを用いて線形スペクトルから応答予測しても、線形的な挙動となる場合は良い精度を示すものの、非線形的な挙動となるほど精度は悪くなった。従って、6 章で示す応答スペクトルによる予測法で検討を行う。応答スペクトルによる予測法は経験に基づくものだが、良い精度を示すものと考えられる。

図 11 固有周期と粘性減衰の変動特性(微小変形時)

6. スペクトル解析による応答予測

文献 3 でスペクトル解析を用いて弾塑性ダンパーを有する試験体の最大応答を予測できることを示した。ここでは、既存耐力壁および粘弾性ダンパーを有する試験体に関しても、スペクトル解析を行い、予測値と実験値との比較検討を行う。応答スペクトルで包括的な傾向を把握することは、設計を行う際に有用である。

6. 1 既存耐力壁による試験体の応答予測

構造用合板による試験体の応答予測の流れは文献3と同様とする。しかし、構造用合板による試験体の履歴は弾塑性ではなくスリップ形となるため(図12)、等価減衰定数の算出が異なってくる。すなわち、塑性率 μ' を示すサイクルにおける等価減衰定数 $h'_{eq}(\mu')$ は、履歴吸収エネルギーと弾性エネルギーの比から式(1)のように求められる。さらに、文献8, 9のNewmark-Rosenblueth式と同様の概念で、 $h'_{eq}(\mu')$ を μ' に対して0から最大値 μ まで平均化することにより、等価減衰定数を式(2)のように得る。その時の等価周期は式(3)として求まる。ただし、初期減衰定数 h_0 は0.05、スリップ時の剛性は二次剛性($p \cdot K_0$)、スリップ時の y 切片は $q \cdot F_y$ 、 μ は1以上とする。

図12 スリップ履歴特性の定義

$$h'_{eq}(\mu') = h_0 + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta ABC}{\Delta AOD} = h_0 + \frac{(\mu' - 1)(1 - p + q)^2}{2\pi\mu'(1 - p)(1 - p + p\mu')} \quad (1)$$

$$h_{eq} = \frac{1}{\mu} \int_0^\mu h'_{eq}(\mu') d\mu' = h_0 + \frac{(1 - p + q)^2}{2\pi\mu(1 - p)^2} \ln \frac{(1 - p + p\mu)}{\mu^p} \quad (2)$$

$$T_{eq}(\mu') = T_0 \sqrt{\frac{\mu}{1 - p + p\mu}} \quad (3)$$

塑性率 μ での最大変位 U と最大せん断力 F は、式(4), (5)を用い、弾性系の最大変位 U_{el} と最大せん断力 F_{el} を基準に、木質架構が該当する加速度一定領域では以下のように予測できる。

$$U = U_{el} D_h \frac{T_{eq}}{T_0} \cdot \frac{T_{eq}/T_0 + 1}{2}, \quad F = F_{el} \frac{U}{U_{el}} \left(\frac{T_{eq}}{T_0} \right)^2 \quad (4), (5)$$

ここに D_h は減衰定数を h_0 から h_{eq} に変化させた場合の減衰による応答低減を加味する減衰効果係数で、以下の式で表される。

$$D_h = \sqrt{(1 + 25h_0)/(1 + 25h_{eq})} \quad (6)$$

図13 係数の設定(スリップ履歴)

図14 構造用合板を持つ架構の最大応答予測値と実験値

式(6)が実地震波の統計的な精度を良く表すことは、筆者らの研究より明らかである¹⁰⁾。試験体の一次固有周期は基準法スペクトル¹¹⁾の加速度一定領域にあたり、入力した0.6gの地震波の減衰定数3.3%における擬似加速度応答スペクトルは、その領域において平均で1.6gとなる。基準法スペクトルでの加速度応答1.1gをレベル2とすれば1.6gはその約1.5倍にあたり、よって入力した0.6gの地震波はレベル3相当とみなすことができる³⁾。また、式(6)を用いることで $h_0=0.05$ での擬似加速度応答スペクトルは、平均で1.44gとなる。

WP-WP, WP-WP(4G)試験体における各係数は以下のように定めた(図13)。0.6g神戸波入力時の履歴を用い、WP-WPでは降伏変位 U_y を1/120rad.(=22.75mm)、WP-WP(4G)では U_y を1/240rad.(=11.38mm)と設定し、その時の正負のせん断力の平均から初期剛性 K_0 を算出した。これはWP-WP(4G)の場合、石膏ボードの影響で降伏変位が小さくなることに起因している。二次剛性比 p は最大層せん断力および最大変形が一致するように、スリップ耐力比 q は履歴曲線にフィッティングさせることで求めた。

それらを用いて式(1)~(6)にあてはめることで変位・加速度の低減効果を示す曲線を得る(図14)。各耐力壁の復元力特性は図中太線のようにになる。白丸が示すように、これらの交点で試験体の最大変位・せん断力が予測され、黒丸は対応する実験結果である。

WP-WP(4G)試験体は石膏ボードが初期変位から層せん断力を負担し、初期剛性が高いことから変形が小さくなっていることがわかる。また、両者の降伏せん断力はほぼ等しいため、最大耐力にはほとんど差が生じていないことがわかる。この応答予測法に対して多数の検証を行ったわけではないが、両者とも予測値と実験値が概ね一致していることから、スリップ履歴を有する建物に対しても展開できる可能性を示しているといえるだろう。

6. 2 粘弾性ダンパーによる試験体の応答予測と制振効果の概念

粘弾性ダンパーを用いたVP-VF, VK-VK試験体の最大応答を、架構の等価周期と等価減衰定数に基づき考察・検討する。VK-VK試験体の地震時の履歴に対して最小二乗法を用いることで、等価剛性 K_{eq} 、等価減衰定数 h_{eq} を求められる¹²⁾。

図16 粘弾性履歴特性の定義

それらを用いた1質点時刻歴解析と実験値はよく一致する(図15)ため、試験体を図16のような線形システムとして仮定できる。0.6g神戸波入力時の履歴から、同様に最小二乗法で求まる K_{eq} 、 h_{eq} は、図17に示すとおり、実験値と非常に良い対応を示している。

ここで、線形システムにおいては式(7)が成り立つ。

$$U = D_h \left(T_{eq} / 2\pi \right)^2 S_{pa}(T, h_0 = 0.05) \quad (7)$$

前節と同様に、加速度応答スペクトルは1.44gで一定であることから、式(5)~(7)を用いることにより図18の予測値を得る。なお、VP-VFは加振の都合上0.53gしか入力されていない。そのため、実験値の層せん断力および層間変形は1.13倍(=0.60/0.53)している。

VK-VK試験体は、VP-VF試験体に比べ等価剛性は低いものの、等価減衰定数も大きいため、変位応答が小さく収まったことが分かる。また、この応答低減率を用いた予測値と実験値はよく一致している。よって、この予測法が粘弾性体を用いた1層木質制振架構を十分評価できると言える。

加速度応答スペクトルは一定と仮定されていることから、等価減衰定数が等しければ、架構の周期に関わらず層せん断力は等しくなる。等価減衰定数を初期減衰定数 $h_0=0.05$ から $h_{eq}=0.10, 0.20, 0.35$ と増加させると、応答変位、応答加速度(層せん断力)ともに $h_0=0.05$ 時の値にその応答低減係数を乗じた値、つまり $0.80, 0.61, 0.48$ 倍に減少する。一定の変形以内に留めるためには、剛性を高めるか減衰を高めるかのどちらかであるが、変位応答は周期の2乗に比例し、また、前者の場合において加速度応答(層せん断力)が大きくなることもふまえると、粘弾性を用いた制振架構を設計する際には過度に等価周期を短くするのではなく、減衰定数を高めるべきである。

図15 一質点時刻歴解析と実験値の比較

図17 係数の設定(粘弾性履歴)

図18 粘弾性ダンパーを持つ架構の最大応答予測値と実験値

7. まとめ

筆者らが開発した制振壁を組み込んだ実大試験体の振動台実験により制振壁の有効性を立証した。以下にまとめる。

- (1) 制振壁を用いることでレベル3相当の地震でも部材・接合部を守り、加振前とほぼ同じ動的特性を保つことが可能である。
- (2) 粘弾性ダンパーは変位依存ダンパーと異なり、微小変形においても優れたエネルギー吸収能力を示す。
- (3) 粘弾性ダンパー方杖型は、開口部にも設置可能な小型のダンパーであるため、実際の住宅にはさらに多く設置することでより良い制振性能を得ることができる。
- (4) 最大応答の予測は、前報³⁾も含めることで変位依存ダンパー・速度依存ダンパー・既存耐力壁のどれを有する場合でも、提案した手法¹⁰⁾で簡便にかつ良好な精度で行うことができると考えられる。

謝辞

本論文は、平成15年度国土交通省建設技術研究開発費補助金の助成によるプロジェクト「財産保持性に優れた戸建制振住宅に関する研究開発(研究代表者:笠井和彦)」の成果の一部を報告した。また、信州大学助教授 五十田博氏、(社)日本免震構造協会 永井潔氏には貴重なご助言を頂きました。試験体の作成には(株)カナイ常務取締役 並木高氏、(株)住宅構造研究所 金井健二氏にご尽力頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 坂田弘安, 笠井和彦, 和田章, 宮下健: 合板パネルによるシアリンク制振機構を用いた木質架構の動的挙動に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第594号, pp. 65-73, 2005.8
- 2) 笠井和彦, 坂田弘安, 和田章, 宮下健: K型ブレースによるシアリンク制振機構を用いた木質架構の動的挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第598号, pp. 51-60, 2005.12
- 3) 笠井和彦, 和田章, 坂田弘安, 緑川光正, 大木洋司, 中川徹: 変位依存ダンパーをもつ木質架構の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第594号, pp. 101-110, 2005.8
- 4) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性を考慮した構成則(その1 線形領域における温度・振動数依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第543号, pp. 77-86, 2001.5
- 5) 笠井和彦, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性を考慮した構成則(その2 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp. 55-63, 2002.11
- 6) 笠井和彦, 大木洋司, 雨宮健吾, 木村勝彦: イソブチレン系粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性を考慮した非線形力学モデルの構築, パッシブ制振構造シンポジウム論文集2002, pp. 181-194, 2002.12
- 7) 所健, 笠井和彦, 大熊潔: 粘弾性体の破壊挙動に関する実験的研究 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 315-316, 2001.9
- 8) Newmark, N.M. and Rosenblueth, E. "Fundamentals of Earthquake Engineering." Prentice-Hall Inc., 1971
- 9) Iwan, W.D. and Gates, N.C. "Estimating Earthquake Response of Simple Hysteretic Structures." Journal of the Earthquake Mechanics Division, ASCE, pp. 391-405, 1979
- 10) 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚: 等価線形化手法による一質点系弾塑性構造の最大応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第571号, pp. 53-62, 2003.9
- 11) 木造軸組構法建物の限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計マニュアル, 日本建築総合試験所 木造軸組構法建物の限界耐力計算による耐震設計法編集委員会, 2003.7
- 12) 笠井和彦, 大熊潔: 振動数に依存する制振構造の等価周期・減衰定数の評価法とその精度, 日本建築学会構造系論文集, 第580号, pp. 51-59, 2004.6

付録1 壁倍率の算定

壁倍率は、特定変形角時強度、降伏強度、最大耐力の2/3の強度、および終局耐力と靱性から決まる値の最小値により決定されるが、本報では特定変形角(1/120rad.)時の強度のみを用いて壁倍率と称している。

付録2 強制変形加振実験におけるVB試験体詳細および実験結果

VB試験体の詳細を図A-1に示す。ダンパー端部の詳細は振動台実験と同様である。実際に使用する際は、振動台実験のようにVB架構の隣に合板の耐力壁や内外装材が配置されることを想定し、ダンパー端部が取り付け側の柱(図中の左柱)を柱と断面の角材と3.2mm厚の鋼板で補強してある。イソブチレン・スチレン系の粘弾性体をφ42.7mmとφ34mmの鋼管の間に溶着し、ダンパーを製作した。ダンパー端部はピン接合にし、ダンパーには純粋な軸方向力だけが作用する。ピンの治具は柱・梁に対してM6のビス計20本で固定され、ダンパー力に対して十分な引抜・せん断耐力を有する設計となっている。

図A-2に、VB架構単体の強制変形加振実験から得られた層せん断力と層間変形の関係を示す。この履歴曲線は層間変形角±1/30rad.までの結果であり、試験方法は文献1, 2で述べた制振壁の強制変形加振実験と同様である。

図A-1 1Pの強制変形加振実験におけるVB試験体詳細

(2006年7月10日原稿受理, 2007年1月5日採用決定)