

# 財産保持性に優れた戸建制振住宅に関する研究開発

東京工業大学 笠井 和彦、和田 章、坂田弘安、大木洋司  
 建築研究所 緑川 光正、五十田博

木質構造 制振構造 応答評価法  
 壁動的載荷実験 振動台実験 基礎構造の検討

## 1. はじめに

都市の地震災害の大小は、多数存在する住宅の被害によって決まると言っても過言ではない。国民の大多数が生活の基盤としている戸建て住宅の被害を最小化し、人命を守ることはもとより、個人的・国家的な経済損失、都市の経済活動の低下を防ぐ必要がある。

我国において戸建住宅の数は約 2,500 万戸であり、その半分以上において耐震性に問題があるとも言われている。大地震での倒壊防止・人命保護という従来からの目標に対比し、本研究では地震後の財産保持までを目標として、膨大な数の新旧住宅の耐震性を向上させるような設計・施工技術の開発を行っている。

特に本研究では、高層建築で培われてきたパッシブ制振技術を戸建住宅に展開している。すなわち、制振は大規模建築の常識となりつつあるが、それを住宅にも健全かつ加速度的に普及させることを考えている。木質および軽量鉄骨架構の力学特性を加味した接合法の開発、低コスト小型制振ダンパーの開発、短周期領域での地震応答やその抑制法について、接合部、ダンパー、制振システムそれぞれの詳細な実験と解析により探求し、応答低減・損傷制御に優れた制振住宅の確立を目指している。

## 2. 制振性能に関する留意点および簡易評価法

図 1 は、本研究で開発した制振壁の例を示すものである。これらの形式に限らず、制振壁に対する水平力と層間変形の殆どをダンパーに伝達することができ、かつダンパーが充分大きいと高い制振性能が得られると言える。

このために、例えば図 1(a)のシェアリンク型では、水平力の伝達のため接合部の回転剛性を小さくし、また、

- 1. 欧州赤松集成材 105x180mm, 2. 赤イトウッド集成材 105x105mm, 3. 欧州赤松集成材 105x105mm, 4. 構造用合板 12mm, 5. スリムプレート, 6. ホルダー 金物 Φ16, 7. アンカーボルト Φ12
- 1. 欧州赤松集成材 105x180mm, 2. 赤イトウッド集成材 105x105mm, 3. 欧州赤松集成材 105x105mm, 4. スタッドコーナ, 5. アンカーボルト Φ12, 6. 粘弾性ダンパー

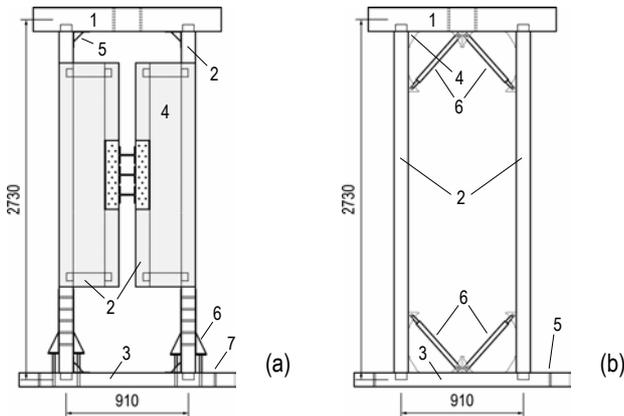


図 1 開発した制振壁の例:(a) シェアリンク型、(b) 方杖型

層間変形の伝達のために、梁・柱・パネルの剛性、接合部のせん断・軸剛性を高くすることが肝要である。また、図 1(b)の方杖型または既往の仕口型の場合も同様なことが言えるが、この架構の形状により、ダンパーの変形は元来小さく、かつ通常の剛性をもつ梁・柱はダンパー力により曲げ変形がおこるため、さらにダンパー変形を減らすという傾向がある。このため、一般に制振性能は低い。また、両形式とも勿論ダンパー取付け部の剛性を高くし、ダンパーに注入する変形量を損なわないように注意する必要もある。

以上のように、制振壁の性能は一般に梁、柱、接合部、ダンパー、取付け部の剛性のバランスに支配される。これらの関係を定量的に表す簡易評価法が必要であり、本研究では一貫して静的解析による評価法を用いている。

図 1 の制振架構の部材、接合部(図 2)、取付け部(図 3)を含む骨組み解析モデルを作成し、ダンパー部が剛の場合、ダンパー無しで自由の場合それぞれに対し、静的水平力  $F$  による層間変形、ダンパー部変形、ダンパー力を求める。これらを「ダンパー固定解析」、「ダンパー解除解析」、または「状態 A 解析」、「状態 B 解析」と呼ぶ(図 4)。

状態 A 解析からは、ダンパーが非常に硬い場合の周辺部の変形、およびダンパーへの力の分担、状態 B 解析ではダンパーが非常に柔らかい場合のダンパー部の変形量が明らかになる。また、1 サイクルの载荷中には、ダンパー割線剛性が上記 2 状態をとる時点が必ずあるため、

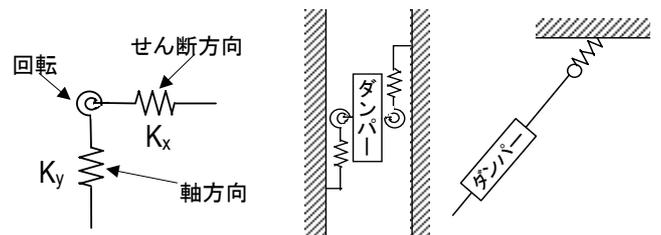


図 2 柱・梁接合部モデル化

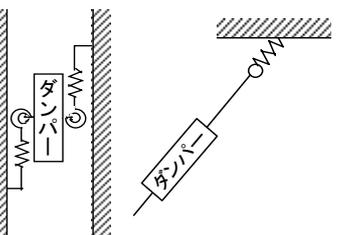
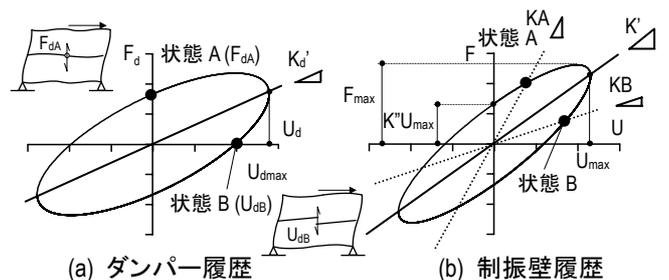


図 3 取付け部変形、すべりのモデル化



(a) ダンパー履歴

(b) 制振壁履歴

図 4 粘弾性ダンパーと架構の描く履歴

ダンパー履歴曲線を数学的に表した上で、上記 2 つの解析結果を利用して、制振壁全体の履歴曲線、ひいては剛性とエネルギー吸収も評価できる。さらに、ダンパー量を変化させた場合の制振壁の性能変化も追加解析無しでグラフ化でき、最適なダンパー量や、他部材・接合部の必要剛性値も簡易に求めることができる。

図 5 は上記の評価法によって得られた、シアリンク型粘弾性ダンパー制振壁の特性である。層間変形角 1/120 で の性能評価に必要な制振壁の等価剛性  $K'$ 、損失剛性  $K''$ 、最大層せん断力  $F_{max}$ 、およびダンパー最大変形  $u_{dmax}$  が、導入ダンパー量（ダンパー剛性  $K_d$  として考慮）や  $\alpha\theta$ （仕口回転剛性の梁曲げ剛性に対する比）に対して、どのように影響されるかが簡易に評価できる。

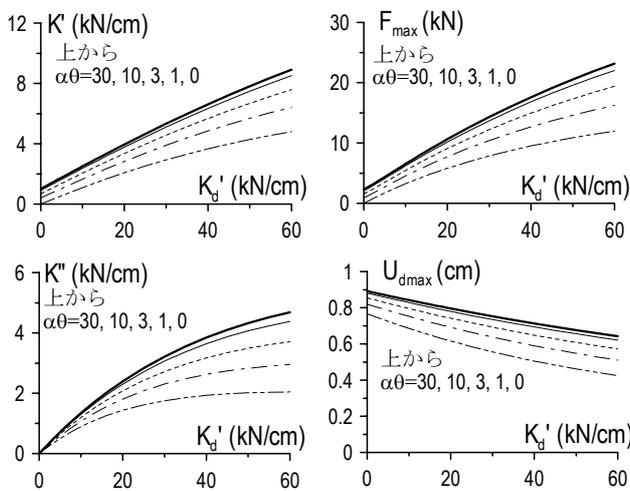


図 5 ダンパー量、仕口回転バネ剛性の制振壁特性への影響（シアリンク型、粘弾性ダンパー、層間変形角 1/120）

### 3. 接合部・ダンパーの繰返し載荷実験による性能評価

上述したように、制振壁の性能評価のためには、予め接合部やダンパーの特性を知る必要がある。

これまで在来木造住宅に用いられてきた接合金物は、引張接合を成立させるために用いられてきており、研究も引張耐力に限られてきた。しかし、前述のように制振壁の評価のためには、耐力のほか剛性も重要であり、また、引張だけでなく、せん断や曲げの評価も重要となる。併せて、既存住宅の場合は現接合部の耐力・剛性が不十分である可能性が大きく、その補強・補剛を行った場合の評価も重要である。

そこで本研究では、図 6 に示すせん断、引張、曲げそれぞれの繰返し実験を多数の接合部に行った。2 章で述べた評価法により、様々なレベルの制振性能ごとに接合部

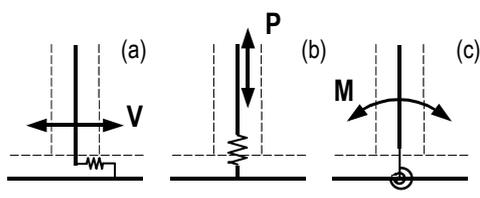


図 6 接合部実験：(a) せん断、(b) 引張、(c) 曲げ

の必要剛性値および選択すべき金物の種類が決まるが、本成果を活用することにより、それが可能となる。実験では、金物はホールダウン金物(HW99-3-4, B-HD25)、フリーダムコーナー(F-C)、スタンドコーナー(SC)、かすがい(C120)を採用したほか、金物を用いない短ほぞのみの場合についても検討している。

同じ金物に対して 3 体ずつ行われた実験結果は、以下に示す方法に従い、荷重  $P$ ・変形  $\Delta$  曲線をモデル化されている。すなわち各試験体について、繰返し実験の荷重・変形曲線の包絡線を求め、3 体の包絡線の平均を、以下に示す曲線に適合させている。

$$P = \frac{(k_i - k_p)\Delta}{\left(1 + \left|\frac{(k_i - k_p)\Delta}{P_0}\right|^n\right)^{\frac{1}{n}}} + k_p\Delta \quad (1)$$

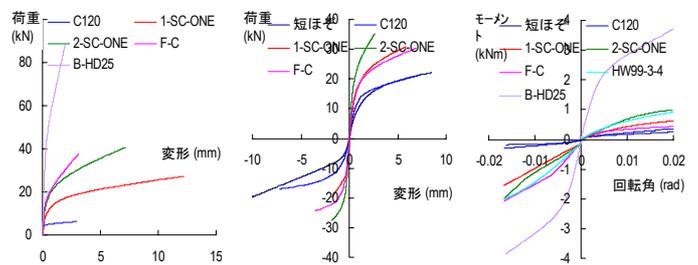


図 7 引張、せん断、曲げに対する接合部の荷重・変形

式(1)中、 $k_i$ 、 $k_p$ 、 $n$ 、 $P_0$  は接合部ごとに求まる係数である。引張、せん断実験では、 $P$ 、 $\Delta$  は荷重と変形であるが、曲げせん断実験では、モーメントと回転角になる。各実験の接合金物について、得られたモデル曲線を図 7 に示す。図 7 や式(1)から接合金物の剛性・耐力を得て、2 章の評価法により、架構の性能を得ることができるばかりでなく、有限要素法で制振架構の解析を行う場合に、接合部のモデル化へ適用し、より詳細な検討を行うことできる。

また本研究では、小型かつ簡易な粘弾性ダンパー、鋼材ダンパー、摩擦ダンパーの開発を行っている。図 5 に線形粘弾性ダンパー、非線形(軟化型)粘弾性ダンパー、鋼材弾塑性ダンパーの履歴曲線を示す。

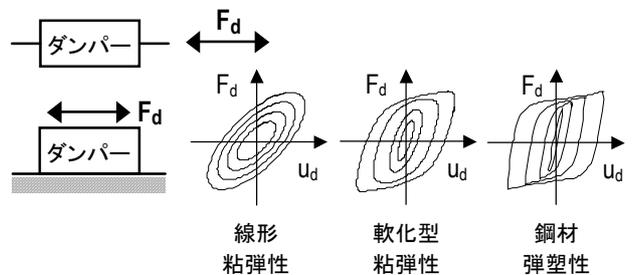


図 8 実験で検討したダンパーの例

粘弾性ダンパーは、高精度な時刻歴解析モデルと剛性・粘性の評価式が研究代表者により提案されている。鋼材ダンパーは既往のバイリニアモデルを用いているが、曲線履歴形状をもつモデルの開発もさらに進めている。

#### 4. 制振壁および耐震壁の動的載荷実験

図 1 に示した制振壁の試験体を作成し、動的繰返し載荷実験を行った。これらの壁架構については、3 章で言及した小型の線形粘弾性ダンパー、非線形(軟化型)粘弾性ダンパー、鋼材ダンパーを用いている。

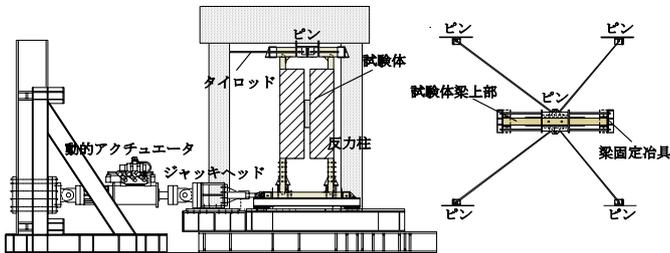


図 9 動的載荷試験装置

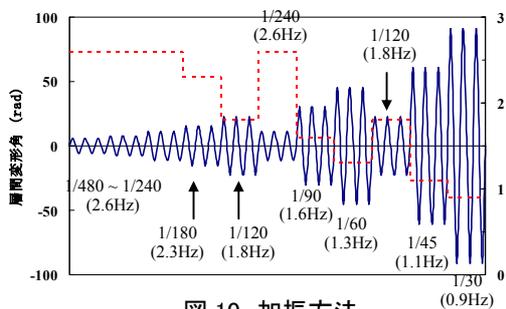


図 10 加振方法

図 9 は、動的載荷試験装置である。試験体の土台梁は一方のみに移動を拘束された台車に固定されており、アクチュエータがこれに接続される。試験体の上部は、剛な加力フレームに固定されたタイロッドによって、梁の中心でピン接合される。また図 10 は動的載荷時の加振方法である。振幅は層間変形角 1/480 から 1/30 までを考慮し、特に速度依存性のある粘弾性ダンパーをもつ制振壁の実験では、加振振動数も 2.6Hz から 0.9Hz まで変化さ

せた。振動数は、層間変形角 1/240rad までは線形で、これ以降の層せん断力が  $C_0 = 0.3$  となる完全弾塑性モデルとして、ある想定した建物質料と等価剛性から求めたものである。

表 1 は、提案した制振壁および性能比較のための在来耐震壁(構造用合板使用)の一覧である。前述の通り、ダンパーは粘弾性、弾塑性からなり、試験体 P1-VE, K-VE の粘弾性体は線形、Pi-4VE, Pi-VE では非線形タイプを用い、壁倍率の大きいものは新築用、壁倍率の小さいものは既存住宅の補強用を想定している。金物は、ホールダウン金物(HW99-3-4, B-HD25)、フリーダムコーナー(F-C)、スタンドコーナー(SC)を採用している。実験結果から各試験体の壁倍率を得ると、試験体 P1-VE, P1-S, K-VE は壁倍率 5、K-S は 4.4、Pi-4VE は 1.2、Pi-VE は 1.4、合板は壁倍率 3.3 となった。これらの壁倍率の評価は、層間変形角 1/120 での層せん断力、最大せん断力の 2/3 のうち、小さい方の値から得ており、減衰性能を特別に考慮した算定方法は用いていない。つまり実際の応答特性は、減衰が加味されることで、より性能が向上すると考えられる。

#### 5. 制振架構の振動台実験

さらに、振動台による検証実験も行い、提案した制振システムの性能について検証した。

本実験において、基本モデルとなる試験体の架構を図 11 に示す。この架構は 2730×2730×2730mm の箱型で、2 層木造軸組住宅の、1 層部分の架構の一部をモデル化した実大試験体である。試験体の重量  $W$  は、試験体床面積に対し、一般住宅では壁倍率 2.0 の耐力要素が 2 枚あると想定し、層せん断力係数  $C_0 = 0.2$  として  $W = 35.7\text{kN}$  を得た。表 2 に示す耐力要素の組合せを、中央構面に配置した試験体で比較検討を行った(合計 9 体)。なお表 2 には、壁単体の実験で壁倍率 5 以上となった場合の耐力の、壁 1m あたり 200kgf に対する比を、実壁量として示した。

表 1 試験体一覧 (K-VE, K-S, Pi-VE は特許出願準備中のため図示していない)

試験体名	P1-VE	P1-S	K-VE	K-S	Pi-4VE	Pi-VE	合板	
ダンパー種類	粘弾性	弾塑性	粘弾性	弾塑性	粘弾性	粘弾性	-	
接合金物	左柱頭	HW99-3-4	HW99-3-4	F-C	F-C	2-SC-ONE	F-C	2-SC-ONE
	右柱頭	HW99-3-4	HW99-3-4	F-C(1個)	F-C(1個)	2-SC-ONE	F-C	2-SC-ONE
	左柱脚	HW99-3-4 & B-HD25	HW99-3-4 & B-HD25	F-C & M16アンカー ボルト	F-C & M16アンカー ボルト	2-SC-ONE	F-C	2-SC-ONE
	右柱脚	HW99-3-4 & B-HD25	HW99-3-4 & B-HD25	F-C & M16アンカー ボルト	F-C & M16アンカー ボルト	2-SC-ONE	F-C	2-SC-ONE
目標壁倍率	5	5	5	5	1~1.5	1~1.5	3	

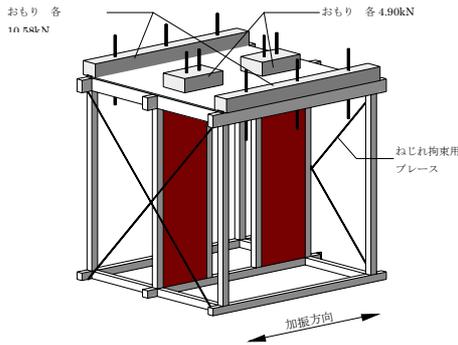


図 11 振動台試験体

入力には、JMA 神戸(NS)波、Taft(EW)波、八戸波を 200gal(レベル 1)に基準化した 3 波、神戸波、Taft 波を 600gal(レベル 2)に基準化した 2 波、合計 5 波を入力地震動として用いた。また各加振の間にランダム波 100gal を入力し、伝達関数から剛性、減衰の変化を確認した。

表 3 に実験結果を示す。在来工法である試験体 1 ~ 3 に比較して制振壁の応答は小さく、その優位性が確認できる。また構造用合板からなる試験体 1 は神戸波 600gal を経験した後、釘の抜出しによって剛性が著しく低下するが、制振試験体ではその傾向が小さい。これは、大変形時の応答低減のみならず小変形での減衰性能が保持されることを意味し、居住性能にも貢献すると考えられる。

表 2 振動台試験体一覧

試験体	耐力要素	実壁量	公称壁量
1	構造用合板+構造用合板	11.8	3+3
2	筋交+筋交	3.7	1.5+1.5
3	筋交+筋交(接合部補強)	5.1	1.5+1.5
4	シアリンク粘弾性+シアリンク粘弾性	15.7	5+5
5	シアリンク弾塑性+シアリンク弾塑性	12.9	5+5
6	Kプレース粘弾性+Kプレース粘弾性	13.5	5+5
7	Kプレース弾塑性+Kプレース弾塑性	10.8	5+5
8	Kプレース粘弾性+構造用合板	11.8	5+3
9	Kプレース弾塑性+構造用合板	12.3	5+3

表 3 振動台実験結果

試験体	神戸波200gal(1回目)			神戸波600gal		
	層間変形(mm)	1/	加速度(gal)	層間変形(mm)	1/	加速度(gal)
1	15.5	176	337.3	108.4	25	1455.9
2	83.7	33	-276.8	205.7	13	-567.8
3	27.8	98	311.7	259.0	11	1196.8
4	7.9	343	261.6	29.2	93	695.9
5	13.1	208	436.9	50.3	54	-710.4
6	8.7	314	254.0	38.8	70	-751.5
7	19.6	140	489.8	79.3	34	-710.4
8	11.7	233	282.7	58.7	46	856.8
9	11.6	235	424.6	52.7	52	-816.8

## 6. 基礎構造の耐力

制振住宅が、その性能を十分に発揮するためには基礎が健全であることが前提となる。図 13 は制振住宅モデルの例であり、制振壁から基礎に伝わる引き抜き力の許容値  $F_{max}$  を、一般に用いられる簡便法以外に、2次元および3次元での有限要素法を用いて検討した。表 4 は基礎構造の例であり、地盤条件として I(軟らかい地盤)、II(標準的な地盤)、III(硬い地盤)の 3 種を考慮した。

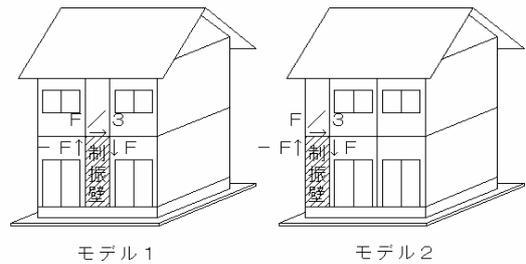


図 13 基礎耐力を検討する制振住宅モデル

表 4 基礎耐力を検討する基礎構造の例

基礎タイプ	A	B	C
断面			
コンクリート	$F_c 15$	$F_c 18$	$F_c 21$
上端筋	1-D13	1-D13	1-D13
下端筋	1-D13	1-D13	1-D13
あばら筋	9Φ@300	9Φ@200	D10@200

表 5 に結果を示すが、 $F_{max}$  は曲げ耐力によって決まるほか、壁が端部に配置されるモデル 2の方が、耐力が小さいことがわかった。しかしながら基礎にヒンジが発生した場合にも、その後の変形の進行が小さいことが確認されており、比較的耐力の小さい基礎に制振壁を適用しても、その性能に及ぼす影響が小さいことを示唆している。

表 5 制振壁からの柱軸力の許容値  $F_{max}$  (単位:kN)

		モデル1			モデル2		
		簡便法	二次元	三次元	簡便法	二次元	三次元
基礎 A	地盤 I	20.5	24.3	15.0	10.3	17.0	12.0
	II		27.9	22.0		17.3	15.8
	III		33.7	28.6		17.9	19.7
" B	地盤 I	34.5	39.9	15.1	16.7	23.4	12.8
	II		41.6	22.2		23.5	15.7
	III		43.9	29.8		23.9	19.5
" C	地盤 I	48.6	55.3	18.4	23.0	29.4	14.6
	II		55.5	24.2		29.5	16.9
	III		57.2	32.0		29.8	20.5

## 7. まとめ

財産保持性に優れた戸建制振住宅の開発を目標に、木質構造の力学的特性を加味しながら、パッシブ制振技術を木質構造へ展開した。静的解析法に基づく簡易な性能評価法を提案し、多種の柱梁接合部に対して行った繰返し載荷実験結果と併せて、壁倍率 5 倍の新築用や、壁倍率 1 倍の既存住宅補強用の制振壁を開発した。これらの制振壁は、実際に動的載荷実験を行い、その力学的特性を確認した上で、実大の振動台実験へ展開した。振動台実験では、制振壁は在来の合板や筋交を用いた耐震要素と比較して変位応答が低減されて、その優位性が確認された。さらに、繰返し地震を経験した後の性能低下が小さく、小振幅でも減衰性能を保持した。ちなみに、実験は行わなかったが、基礎構造の数値解析により耐力評価し、制振壁が十分に性能を発揮するためのクライテリアについても検討した。