# 振動台実験に基づく

# 木造軸組構法用制振装置の性能評価

佐藤利昭 —— \*1 井口道雄 —— \*3 真崎雄一 —— \*2

キーワード:

軸組木造住宅、制振構造、粘弾性ダンパー、性能評価

Keywords :

Woodframe house, Seismic vibration control system, Visco-elastic damper, Performance evaluation

## 1. はじめに

木造住宅の耐震対策としては、これまでも様々な策が講じられて きたが、大地震の発生毎に甚大な被害が繰り返されている。殊に、 建物の倒壊・崩壊による人的被害は大きく、木造住宅に対する減災 対策が重要な課題となっている。

本報告は、木造軸組構法住宅の耐震安全性向上を目的に、新たに 開発した粘弾性制振装置の性能評価試験の結果をまとめたものであ る。本制振装置の性能評価試験は、これまで、動的加振力による交 番繰返し実大実験によって行われてきたが<sup>1),2)</sup>、本報では実地震動 記録を入力とする振動台実験結果について述べる。

## 2. 粘弹性制振装置

開発した粘弾性制振装置は、1 スパン長(910mm 長)のダイアモンド形状筋かいを単位とし、斜材の上下頂部に配した、アクリル系粘弾性体(以下 VEM と記す)を内蔵した金物を上下梁と接合し、 VEM のエネルギー吸収によって制振効果を発揮させる機構である。 以下、これを制振装置 GVA と呼ぶ。制振装置 GVA の概要図、および木造軸組架構への設置例を図1に示す。



\*1(有) MASA 建築構造設計至 工学修工 (〒278-8510 千葉県流山市南流山 4 - 1 - 4 シゲビル 5F)

- \*2(有) MASA 建築構造設計室
- \*3 東京理科大学理工学部 教授 工学博士

## PERFORMANCE EAVLUATION OF A PASSIVE

## CONTROL DEVICE FOR WOODFRAME HOUSES

## BASED ON SHAKING-TABLE-TEST

Toshiaki SATO — \*1 Yuichi MASAKI — \*2 Michio IGUCHI — \*3

A passive control device with viscous energy absorber has been developed to mitigate the earthquakes damage to wooden houses. This paper describes the experimental results conducted for performance evaluation of houses with the control devices based on shaking-table-tests. Five framed specimens with and without the control device have been tested. It was shown that the maximum displacement of the structures with control device has decreased about as much as 1/3 to 1/2 comparing to the structure without the control device.

実験に用いた制振装置 GVA は,幅 90mm と45mm の2種類であ り,これら装置の性能を振動台実験により検証する。90mm タイプ (以下 GVA 90)は,柱および梁の全幅に装置を設置するのに対し, 45mm タイプ(以下 GVA 45)は,断熱材の設置スペースの確保 を目的に開発され,建物の外周構面に設置するためのものである。 制振金物に内蔵された VEM は,GVA 90では2枚,GVA 45では 4枚としており,VEM がせん断変形する断面積は両タイプで等しく, エネルギー吸収能力が両者で同等となるようにしてある。

## 3. 実験概要

実施した振動台実験は、実記録地震波を入力とする1層軸組架構 の実大試験である。図2に実験の概要図を示す。実験を行った試験 体は全5体で、図3にこれら試験体を示す。試験体はいずれも、2ス パン×3スパンの木造軸組架構に、耐震要素(構造用合板,筋かい, 制振装置 GVA)を組み込んだもので、これら試験体を以下 PLY, Brace, PLY+GVA, Brace+GVA, GVA と呼ぶ。試験体上部には、2階 建て住宅の2階部分の荷重に相当する、重り4tonの鉄板を載せた。



\*1 MASA Architectural Design Bureau, M.Eng.

\*2 MASA Architectural Design Bureau

\*3 Professor, Tokyo University of Science, Dr.Eng.



表1 部材寸法と補強金物一覧

	木材寸法		補強金物	粘弹性制振装置
	角材	面材-構造用合板		
各試験体共通	柱:120×120		ホゾバイプ	
	土台:120×120	基礎:t=15mm	PP230	-
	根太 : 120 × 120	1階床 : t = 24mm		
	軒桁:120×240			
制振装置設置	間柱:30×30	耐力壁 : t = 9mm	ブレイブホールダウン	PLY+GVA : GVA-45
試験体	筋かい:45×90	N50@150	(HD-30)	Brace+GVA : GVA-90

試験項目	PLY	Brace	PLY+GVA	Brace+GVA	GVA *1
ハンマー打撃試験					-
(試験前)					-
正弦波スイープ試験					
(試験前)					-
ハンマー打撃試験					
(地震波加振前)					
地震波入力					
(25kine)					
ハンマー打撃試験					
(25kine後)	-				*2
地震波入力					
(50kine)					
ハンマー打撃試験					
(50kine後)	-				*2
地震波入力					
(原波)					
ハンマー打撃試験					
(原波入力後)	-	-			
(					

表2 各試験体の試験項目

\*1: Brace+GVAの加振終了後、筋かいを取り外した試験体 \*2:ホールダウン金物を締め直した後に固有振動数を同定

## 表3 加速度計と変位計の仕様

ひずみ型加速度計	レーザー変位計		
メーカー : 共和電業 (AS5HB)	メーカー:キーエンス (LKG405)		
測定加速度範囲:0~5G	測定変位範囲:400 [mm] ± 100[mm]		
周波数範囲:DC ~ 100 [Hz]	周波数範囲:DC ~ 50 [kHz]		

各試験体は、表1に示す部材と金物を用いて作成し、表2の各項 目について試験を実施した。図3に示すように、試験体 GVA は軸組 架構に、制振装置 GVA のみを組込んだもので、試験体 Brace+ GVA の試験終了後に、筋かいをすべて除去した試験体である。つまり、 試験体 GVA は、大地震経験後を想定した試験体である。

表 2 の試験項目に示す「ハンマー打撃試験」では、試験体頂部に 木槌による衝撃力を人力によって与え、記録した自由振動波形より 卓越振動数を抽出した。「正弦波スイープ試験」は、最大加速度を 30galに基準化した正弦波を振動台に入力し、振動数を10Hz~1Hz まで段階的に変化させるスイープ試験で、各振動数毎の応答特性を 把握するための試験である。さらに「地震波入力」では、JMA -KOBE NS 成分(1995 年兵庫県南部地震・神戸海洋気象台記録、最 大加速度 818gal)を 25kine、50kine に基準化した波形および原波 を入力とした。JMA - KOBE NS 成分の加速度波形を図4に示す。

計測は、図 2 の加速度計と変位計以外にも、部材の軸歪みおよび VEM の温度変化を計測しているが、本報では主に、頂部および土 台梁に設置した加速度計および変位計の結果を分析の対象とする。 また、表 3 に示すように、変位計の測定範囲は 400mm ± 100mm で あるため、入力レベルが大きい場合には計器が飽和し、計測波形の 一部に欠損が生じる場合があった。この補正として本報告では、 25kine 入力で得られた加速度および変位波形よりキャリプレーシ ョンを行い、0.5Hz~10Hz でフラットなバンドパスフィルター処理 を行った加速度波形を数値積分することで、変位波形の欠損部分を 補うことにした。参考までに、図 5 には観測した波形と補正した変 位波形を示す。図 5 より、波形の欠損部分を除き、変位波形の観測 値と計算値が良く対応しているのが分かる。



#### 4. 試験結果

4.1 ハンマー打撃試験による固有振動数

ハンマー打撃試験で得られた固有振動数の結果を,表4に示す。 図6には、試験体 Brace, Brace+GVA, GVA について、固有振動数 $f_0$ をもとに式(1)より剛性 k を算出した結果を示す。

表4 各試験体における固有振動数の推移

試験体名	PLY	Brace	PLY+GVA	Brace+GVA	GVA
試験前	5.50	4.50	5.88	5.88	2.88
25kine後	-	4.00	5.75	5.75	2.88 *1
50kine後	-	3.50	4.75	5.13	2.63 *1
原波後	-	-	2.25	4.00	2.00
:ホールダウン金物を締め直した後に試験実施 Unit:Hz					

$$= m \cdot \left(2\pi f_0\right)^2 \tag{1}$$

表4の各振動台実験開始前後に行った試験結果は、極めて微小な 歪みレベルにおける結果である。表4の試験体 PLY+GVA と試験体 Brace+GVA の結果を比較すると、地震動の最大速度 25kine 入力後 までの固有振動数はほぼ等しいのに対し、50kine 入力後及び原波入 力後の試験体 PLY+GVA の固有振動数は相対的に低く、試験体 Brace+GVA に比して剛性が大きく低下している様子が伺える。

k

図 6 より, 試験体 GVA 及び試験体 Brace+GVA は, 試験体 Brace に比べ剛性低下が少ないことがわかる。また目視によれば, 試験体 GVA と試験体 Brace+GVA については、最大速度 50kine 入力試験 後,試験体のホールダウン金物に若干の緩みがあった以外,目立っ た損傷は観察されなかった。つまり、制振装置 GVA を含む架構は、 高入力レベルの地震動に対しても損傷が殆んどなく、安定した耐震 性能を保持することが確認された。



4.2 正弦波スイープ試験による共振曲線

本節では,正弦波スイープによる振動台実験結果について考察す る。振動台入力加速度は 30gal としており、この時の建物頂部絶対 加速度の共振曲線を、図7に示す。



図7の共振曲線に対し、ばね 質量 ダッシュポット系1質点モ デルの理論式を当てはめ、試験体の固有振動数ωと等価粘性減衰 定数 h を同定した。同定の方法は,次の共振曲線の理論式

$$\left|S_{a}(\omega)\right| = \sqrt{\frac{1+4h^{2}(\omega/\omega_{0})^{2}}{\left\{1-(\omega/\omega_{0})^{2}\right\}^{2}+4h^{2}(\omega/\omega_{0})^{2}}}$$
(2)

に対し、式(3)に示すように各円振動数ωについて、実験値と理論値 の残差二乗和を最小とする, 最小二乗法の規範によってパラメータ



を同定した。

$$J = \sum_{i} \left\{ S_a(\omega_i, \omega_0, h) - S_i \right\}^2$$
(3)

図 8 には、試験体 Brace について、共振曲線の実験値と同定され た,固有振動数f<sub>0</sub>=3.35Hzと等価粘性減衰定数h=0.08をもとに計算 した理論曲線が示してある。図8より、回帰されたピーク振動数は 実験値とよく対応しているが、理論曲線と実験値には乖離が認めら れる。これは式(2)で仮定した、減衰を粘性とする振動モデルが、試 験体の応答特性を十分に表現できていないことを表している。つま り, 各試験体には, 微小変形レベルの応答においても非線形特性が 現れ、線形理論では十分説明できないことを示唆している。

現在提案されている木造住宅の復元力特性 例えば 3).4) では、層間 変形角 1/720rad.に満たない変形領域において、線形モデルを用い ることが多いが、その適用範囲には注意を要する。本報では、等価 粘性減衰定数は議論から除外し、固有振動数の抽出結果のみを表 5 にまとめる。表5と表4の結果を比べると、表5の振動数はいずれ も小さく, 歪みレベルの影響が顕著に現れていると考えられる。

表5 各試験体の弾性時における固有振動数

試験体	PLY	Brace	PLY+GVA	Brace+GVA
固有振動数 [Hz]	4.35	3.35	5.19	4.89

## 4.3 地震波入力に対する試験結果

本節では、各試験体の試験結果のうち、履歴ループ特性、目視に よる損傷と破壊性状、さらに加速度および層間変位応答をもとに求 めた、履歴曲線について考察を加える。

## ) 試験体 PLY

最大速度 25kine, 50kine 入力試験後の目視によれば、構造用合板 と柱・梁の接合部で釘の抜け出しが認められ、柱・梁と合板が異な る挙動を呈していたが、柱・梁に損傷は認められなかった。図9,10 には、入力波形の主要動と考えられる 10sec~30sec における各フ エーズの層間変位波形と、波形の各区間に対応する履歴曲線を示す。



図 9 層間変位波形,履歴曲線(試験体 PLY, 25kine 入力)



図 10 層間変位波形,履歴曲線(試験体 PLY, 50kine 入力)

図9より,25kine 入力試験時においては、繰り返しによる剛性低下が認められる。さらに図10より、50kine 入力試験時では大きな損傷を受け、b区間でピンチング挙動が認められる。つまり50kine 入力試験後には、試験体が大きな損傷を受けていたと推察され、続いて実施した原波入力試験で完全崩壊に至った。

## ) 試験体 Brace

最大速度 25kine 入力試験後の目視によれば, 試験体に目立った 損傷は観察されなかったが, 50kine 入力試験時には筋かい2本が面 外方向に座屈破壊した。図 11 には, 50kine 入力試験時における層間 変位波形と, 波形の各区間に対応する履歴曲線を示す。



図 11 層間変位波形,履歴曲線(試験体 Brace, 50kine 入力)

図11のa区間の履歴特性より,筋かいの破壊によって正側に急激 な剛性低下が起こり,これに起因してその後のb区間で変形が大き くなったと推察される。これは変位波形において,a区間よりb区間 の波形周期が増大していることとも整合する。

続く原波入力試験では、50kine入力試験で破壊した2本の筋かい を取り替えた上で試験を行ったが、組み込んだすべての筋かいが座 屈破壊した。図12には、原波入力試験時の応答加速度波形を示す。



図中の に示す通り,加速度波形にはスパイク状の突出部分が認 められる。これは,部材が損傷する際に発生する高周波のパルスと 推察され,加速度波形から筋かいの破壊する瞬間を捉えることがで きる。原波入力に対し倒壊には至らなかったが,2度にわたり筋かい が破壊したことが,波形から認められる。

#### ) 試験体 PLY+GVA

最大速度 25kine, 50kine 入力試験に対して, 試験体 PLY と同様 に釘の抜け出しが観察されたが, 釘の破断などの大きな損傷は認め られなかった。図 13 には, 50kine 入力試験時における層間変位波 形と, 波形の各区間に対応する履歴曲線を示す。



図 13 層間変位波形,履歴曲線(試験体 PLY+GVA, 50kine 入力)

図 13 の a 区間では試験体 PLY との対応から,主に構造用合板が 水平力を負担していると考えられるが, b 区間では紡錘型の履歴特 性を示しており,構造用合板の損傷により制振装置の効果が顕著に 発揮され,エネルギー吸収により変形を抑制したと推察される。

#### ) 試験体 Brace+GVA

試験体 Brace+GVA と試験体 Brace の結果を対応させて観察する と、制振装置の効果が明瞭に現れているのが分かる。25kine,50kine 入力試験時における層間変位波形と履歴曲線を図 14,15 に示す。



図 14 層間変位波形, 履歴曲線(試験体 Brace+GVA, 25kine 入力)



図 15 層間変位波形,履歴曲線(試験体 Brace+GVA, 50kine 入力)

図15の履歴曲線から確認されるように、試験体 Brace+GVA では 微小変形時から VEM の特性が現れている。また試験体 Brace では 50kine 入力試験時にピンチング挙動が確認されたのに対し、制振 装置を組み込んだ試験体では、そのような履歴性状は認められない。 続く原波入力では、目視による限り制振装置の損傷は認められず、 また最大層間変形角が安全限界内(層間変形角1/30rad.)に収まり、 高い耐震安全性を有することが実証された。

## ) 試験体 GVA

試験体 GVA は前述の通り,一度大地震を経験した制振装置 GVA を組み込んだ,軸組架構の試験体である。さらに壁量から考えれば,他の試験体と比べ地震力に対する抵抗要素が少なく,図 16 および図 17 に結果を示す 25kine, 50kine の入力に対して,変形量は相対的に大きいものの,目視による大きな損傷は認められなかった。



図 17 層間変位波形, 履歴曲線(試験体 GVA, 50kine 入力)

図 16,17 で着目すべき点は、各フェーズにおける a 区間と b 区間 の応答変形量の関係である。前述の 4 試験体では剛性低下により, a 区間の変形量に比べ b 区間で応答が大きくなる傾向を示したが、試 験体 GVA では、a 区間に比べ b 区間で応答が小さくなる傾向を示し ている。これは、表 4 に示したように、試験体 GVA の固有振動数が 他の試験体に比して小さいためと推察される。また図 17 の履歴特 性より、50kine 入力試験時には剛性の硬化傾向も認められ、制振金 物のストッパー効果が現れていることが分かった。さらに続く原波 入力では、制振装置のダイアモンド形状筋かいが破損したが、軸組 部分の損傷は少なく、倒壊には至っていない。

以上に示した5試験体の試験結果のまとめとして,表6には各試 験体の最大層間変形角応答の結果を,図18には各試験体の骨格曲 線を示す。

#### 表6 最大層間変形角応答(rad.)

試験体	Brace		PLY		C)/A
	GVAなし	GVAあり	GVAなし	GVAあり	GVA
25kine	1/132	1/323	1/230	1/319	1/84
50kine	1/33	1/104	1/44	1/84	1/39
原波	1/13	1/32	- *1	1/21	1/15





表 6 より, 筋かいおよび構造用合板に本制振装置を付加すること によって, 最大応答は低減している。また図 18 より, 本制振装置は 筋かいや構造用合板の降伏した大変形時においても, 安定した性能 を保持しているのが分かる。図 18 で, 試験体 GVA が大変形時にお いて剛性低下しているのは, 制振装置のダイアモンド形状筋かいの 破損によるものである。

#### 5. 試験結果と性能評価

### 5.1 地震時の建物性状の経時変化

地震時における建物応答性状の経時変化を捉えることは、本震後 に予測される余震に対する建物安全性を検討する上で、極めて重要 となる。本節では架構の相対加速度応答波形に対し、ガウス窓を用 いたランニングスペクトルを計算し、卓越振動数の経時変化に着目 して考察する。窓フーリエ変換は次式で表される。

$$F(b,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot w(t-b) \cdot e^{-i\omega t} dt$$
(4)

ここで *b* は、窓関数 *w*(*t*)の時間軸上の平行移動を表す。またガウス 窓は、次式のものを採用した。

$$w(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot e^{-t^2/\sigma^2}$$
(5)

本報では $\sigma$ =0.8(時間窓=±2.5sec.)とし,窓関数の移動時間刻み は、これの 1/4 とした。試験体 Brace の 25kine,50kine 入力試験時 および試験体 Brace+GVA の 50kine 入力試験時の解析結果(コン ター図)と、解析結果から抽出した各時刻における卓越振動数の推 移(折れ線図)を、図 19~図 21 に併せて示す。

図 19 に示す試験体 Brace の 25kine 入力の結果では、初期に 4.3 Hz の振動数が最大応答時に 3.0Hz まで低下し、その後 4.3Hz に完 全に回復している様子が認められる。続く図 20 に示す 50kine 入力 では、初期に 4.5Hz であった振動数が最大応答時に 1.3Hz となり、 試験終了時には 3.0Hz となっている。この結果を剛性の変化に置き 直すと、最大応答時の剛性は初期剛性の約 (1.6 / 4.5)<sup>2</sup> = 1/8 に低下 し、地震終了時の剛性は初期剛性の約 1/4 まで復活したことになる。



これに対し, 図 21 に示す試験体 Brace+GVA の 50kine 入力試験 時には,初期に 5.1 Hz の振動数が最大応答時に 3.0Hz となり,その 後 4.6Hz まで回復している。同様にして,これを剛性の変化に置き 直すと,最大応答時の剛性は初期剛性の約 1/3 に,地震終了時の剛 性は初期剛性の約 1/1.2 と,ほぼ初期剛性まで復活したことになる。 以上より,本制振装置を設置することによって損傷が抑制され,同 時に地震終了後の剛性の復帰も大きく,余震に対する耐震安全性の 確保も期待されることが分かる。

## 5.2 限界耐力計算による性能検証

一般的な性能評価手法として確立されている,限界耐力計算法に より,本制振装置の耐震性能を検証する。木造住宅で限界耐力計算 を行う場合,減衰の取り扱いが問題となるが,本報告では式(6)によ り等価減衰定数の評価を行う。<sup>5)</sup>

$$h = \frac{\Delta_s / 2 - A_s \cdot M_u / 2K_e}{\pi \cdot \Delta_s} + 0.05 \tag{6}$$

ここでAs: 屈曲点の加速度, s: 屈曲点の水平変形, K<sub>e</sub>: 弾性剛 性を表す。試験体 Brace・試験体 Brace+GVA の両試験体について, 骨格曲線と限界耐力計算によって算出した,極めて稀に発生する地 震動に対する必要性能スペクトルを,図 22, 23 に示す。





図 22, 23 より、制振装置を設置した架構は、設置していない架構 に比べ、耐力・変形性能ともに十分余力を持っていることが認めら れる。これより、制振装置の付加による木造軸組架構の耐震性能の 向上が認められる。

## 6. まとめ

本報では,粘弾性制振装置の付加による木造軸組架構の耐震安全 性の向上について,実記録地震波を入力とする振動台実験に基づき 評価した。得られた成果は以下の通りである。

- ・標準的な木造住宅を想定した,筋かい架構・構造用合板架構は, 50kine 入力レベルの地震動に対し,最大層間変形角応答が安全 限界内に収まり,各試験体の壁量が適切であったと確認された。 またこれらについて,本制振装置を付加することにより,筋かい 架構で約1/3,構造用合板架構で約1/2に応答が低減した。
- 筋かい架構に本制振装置を設置することにより、地震終了時の 剛性の復帰は大きくなり、余震に対する耐震安全性の向上が期 待される。また限界耐力計算に基づき、本制振装置を設置することによる、耐震性能の向上を確認した。
- 減衰性能に関する定量的評価に向け、制振装置の履歴特性を表現できる履歴モデルを構築し、応答解析により強震時のエネル ギー吸収量の評価を行うことを、今後の課題とする。

## - 謝辞 -

本実験は、(有) MASA 建築構造設計室、(株)カナイ、(株)住友 スリーエム、(株)アイ・エム・エー、(株)原田木材の多大な協力 のもとに実施されたものである。また、電源開発(株)茅ヶ崎研究 所関係各位には、水中振動台の使用にあたり、多くの便宜を戴いた。 ここに記して謝意を表します。

- 参考文献 -

- 佐藤利昭他:木造軸組構法における制振構造の研究 木造用筋違制振装置の制振性能評価,日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿),C1 (22044),PP87~88,2005.9
- 2) 佐藤利昭他:木造軸組構法における制振構造の研究 実大試験結果に基づく構造要素特性の抽出、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、 C1(22154), PP307~308, 2006.9
- 3) 坂本功,大橋好光:木造住宅の地震応答解析 標準的な在来構法住宅の モデルに関して,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),構造, PP2651~2652、1984.10
- 社団法人 日本建築構造技術者協会編:木造 建築構造の設計, PP69~ 101, 2004.8
- 5) 財団法人 日本住宅・木材技術センター編:木造軸組工法住宅の限界耐 力計算による設計の手引き,2005.3