

木造住宅用制振装置の性能評価 — 振動台実験による加算則の検証と動 特性評価 —

EVALUATION OF PASSIVE CONTROL SYSTEM FOR WOODEN HOUSES : VERIFICATION OF SUMMATION RULE AND EVALUATION OF DYNAMIC PRO- PERTIES BY SHAKING TABLE TESTS

佐藤利昭 — * 1 肥田剛典 — * 1
加藤 惇 — * 2 井口道雄 — * 3
真崎雄一 — * 4 永野正行 — * 5

Toshiaki SATO — * 1 Takenori HIDA — * 1
Jun KATO — * 2 Michio IGUCHI — * 3
Yuichi MASAKI — * 4 Masayuki NAGANO — * 5

キーワード：
粘弾性ダンパー, 履歴ダンパー, 木造軸組構法住宅

Keywords:
Visco-elastic damper, Hysteresis damper, Wooden post and beam
houses

This paper describes a seismic performance of two types of passive control systems for wooden houses. These performances are evaluated by shaking table tests. The test results show that the passive control systems can be restrained an initial performance after strong motion comparing to typical aseismic elements, and especially one of the systems which incorporate visco-elastic material has high damping performance through wide deformation range.

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震以降, 木造住宅の耐震安全性に関する関心は高く, 近年では免震・制振技術を採用した住宅も少なくない。これらの社会的需要に対し, 著者らは数年に渡り, 金物を介して木材と粘弾性体を組み合わせた制振装置を開発し, その実験的評価¹⁾や地震応答計算の方法²⁾を検討してきた。また一方で, 鋼材と粘弾性体で構成した制振装置の開発をはじめ, 解析的検討³⁾を踏まえた改良を重ねる中で, 解析モデルの構築も進めてきた^{4), 5)}。

本稿は, これら2種類の制振装置のうち, 後者の制振装置とその装置が有する鋼材の弾塑性履歴による制振効果のみを利用した安価な制振装置の性能を, 実大振動実験によって調べたものである。

2. 制振装置の開発概要

開発した制振装置の概要として, 図1左に粘弾性制振装置, 同図右にそれと接合金物を共有する装置が示してある。粘弾性制振装置は, ダイヤモンド型に組んだ鋼製斜材の上下頂点に, 粘弾性体を内蔵した制振金物を配したもので, 架構の水平変位を斜材によって制振金物に伝達する。柱-斜材接合部は, 両装置で共通の接合金物とし, この金物の一部には, 大変形領域で鋼材の延性による弾塑性履歴を確保するため, 切り欠きを設けてある。図1右の制振装置は, 大変形領域で接合金物の弾塑性履歴によるエネルギー吸収を図ったもので, 小変形領域では耐震要素と同等の剛性を保持する。

両装置が目標とする性能は, 制振部材が有する減衰効果によって建物応答を低減させることであるが, この他にも, 次の2点を基本思想としている。1つは, 筋かいや構造用合板などの一般的な耐

震要素の耐力が低下し始める損傷限界以降の変形領域で, 安定的な性能を保持すること, もう1つは, 安全限界を超える変形領域で装置自体を大きく損傷させ, それに伴うエネルギー吸収によって建物の倒壊を防止することである。

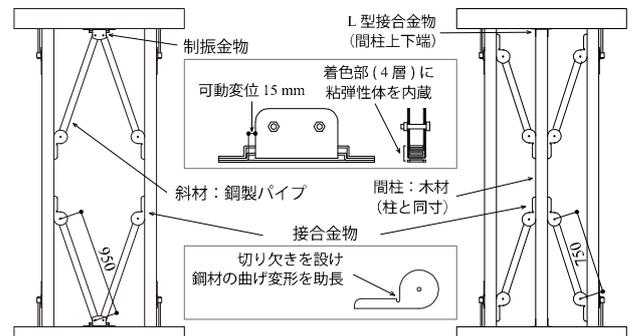


図1 粘弾性制振装置と弾塑性履歴を有する装置の概要

3. 振動台実験の実施概要

3.1 実験および試験体の概要

本稿で対象とする振動台実験は, 2 × 3 スパン (1 スパン = 910 mm) の1層軸組架構に対する実大振動実験である。実験は, (独) 防災科学技術研究所の大型耐震実験施設にて実施したもので, 全9体の試験体を3体ずつ3日間に分けて加振した。試験期間は, 準備も含めて約3週間に及ぶが, 加振日と加振日の間隔は最大でも5日間で, 外気温などの試験環境は, すべての試験で同一と考えている。本実験の概要を, 図2にまとめる。

¹⁾ 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士 (工学)

(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²⁾ 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻 修士課程

³⁾ 東京理科大学理工学部建築学科 名誉教授・工博

⁴⁾ (有) MASA 建築構造設計室 代表取締役

⁵⁾ 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)

¹⁾ Assist. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

²⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Science

³⁾ Prof. Emeritus, Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

⁴⁾ Director, MASA Architectural Design Bureau

⁵⁾ Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

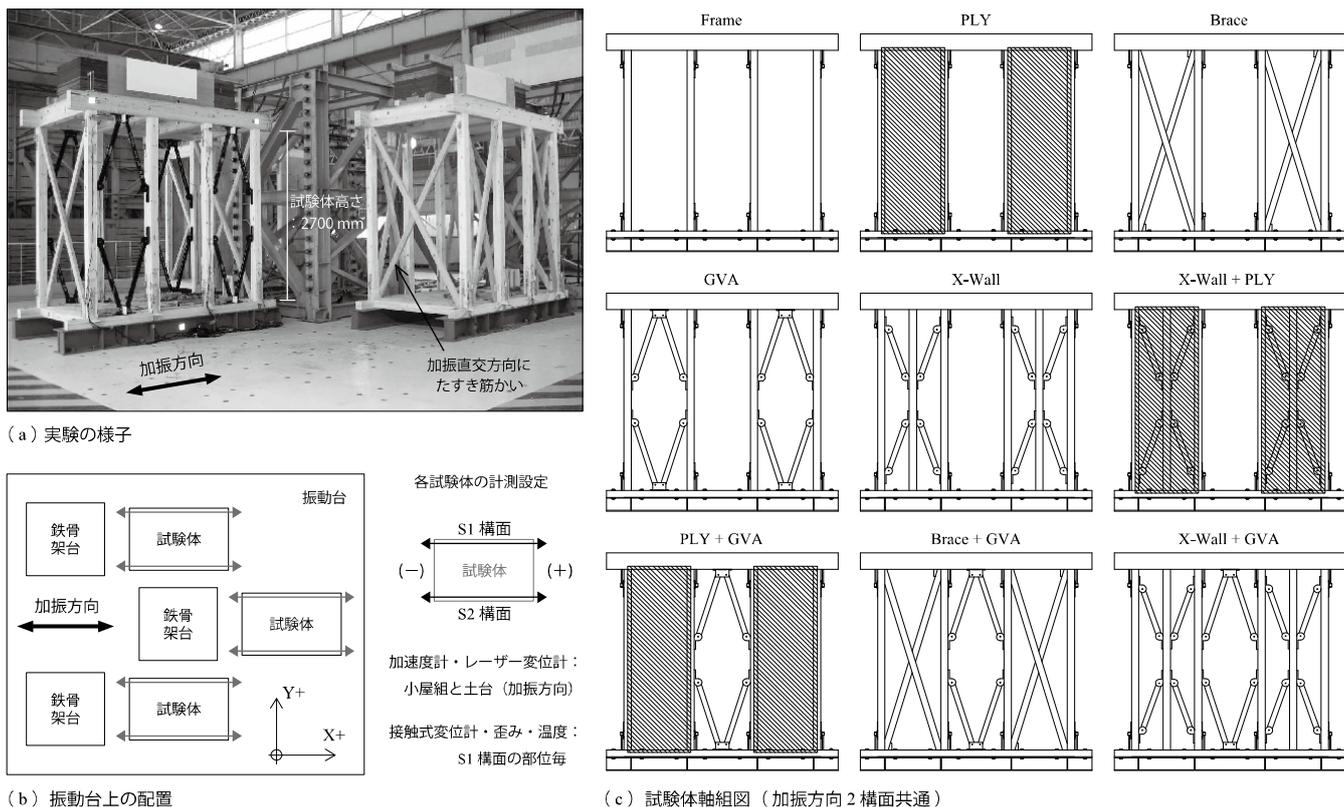


図 2 振動台実験の概要と試験体軸組図

図 2 (a) に実験の様子を、(b) に振動台上での試験体配置と本稿で共通する各軸の正負方向および加振方向の通り名称、(c) に各試験体の加振方向の軸組図が示してある。同図 (a) から分かるように、本実験は 1 軸方向入力の試験で、各試験体の加振直交方向には、ねじれ応答抑制のため、たすき筋かいが配してある。

全 9 体の試験体は、共通の柱－横架材接合部（ホールダウン金物 B-HD 30：短期許容耐力 36.8 kN）で構成された軸組架構の各柱間に、耐震要素や制振装置を組み込むことで作成した。軸組架構に使用した部材は、柱と土台が 120 mm 角の同一等級構成集成材 E105-F345、梁および桁が 120 mm × 240 mm の対称異等級構成集成材 E105-F300 である。小屋組には、24 mm の構造用合板を N75 釘で横架材に直接打ち付ける仕様を採用し、その上に積載荷重として 4 ton の錘を載せ、ボルトで緊結した。

試験体の設計は、軸組架構のみの試験体 Frame を基準に、その加振方向 2 構面に、構造用合板（N50@150）、たすき筋かい（半割、2 倍用筋かい金物）、粘弾性制振装置、弾塑性履歴のみを有する装置をそれぞれ 2 スパンずつ組み込むことで、試験体 PLY, Brace, GVA, X-Wall を設定した。また、これらの要素を複合した試験体として、X-Wall + PLY, X-Wall + GVA, PLY + GVA, Brace + GVA の組み合わせによる 4 体を準備し、合計 9 体を実験対象とした。

3.2 試験方法及び計測概要

試験は、STEP 波加振と地震波加振を交互に実施した。STEP 波加振は、片振幅 0.5 mm の変位制御加振で、インパルス応答から固有振動数を調べる試験である。表 1 に試験スケジュールを、図 3 に試験に用いた地震波の時刻歴と擬似速度応答スペクトルを示す。

表 1 試験スケジュール（全加振共通）

試験番号	加振項目	加振レベル
1	STEP 波加振：1 回目	—
2	地震波加振：BCJ - Lv. 1 (50%)	最大加速度：103.5 gal
3	STEP 波加振：2 回目	—
4	地震波加振：BCJ - Lv. 1	最大加速度：207 gal
5	STEP 波加振：3 回目	—
6	地震波加振：BCJ - Lv. 2	最大加速度：355 gal
7	STEP 波加振：4 回目	—
8	地震波加振：JMA - KOBENS (1 回目)	最大加速度：818 gal
9	STEP 波加振：5 回目	—
10	地震波加振：JMA - KOBENS (2 回目)	最大加速度：818 gal
11	STEP 波加振：6 回目	—

(注) 試験体 Frame のみ、試験番号 7 で試験を中止

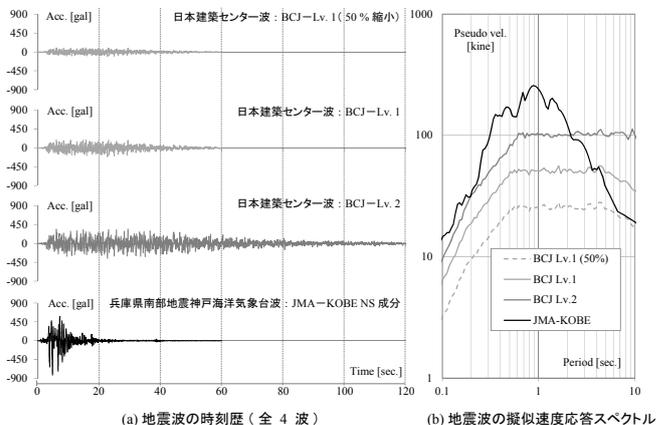


図 3 振動台実験に用いた地震波の概要

主要な計測項目は、振動台上および 1F 床組、小屋組における加速度記録、鉄骨架台に設置したレーザー変位計による土台と小屋梁に対する相対変位で、本稿ではこれらの結果を用いる。この他、計測構面とした図 2 (b) に示す S1 構面では、柱脚部の浮き上がり変位とホールダウン金物のボルトの軸歪み、また試験体仕様にあわせて粘弾性体のせん断変形量、筋かい・鋼製斜材の軸歪み等も計測した。なお、粘弾性体の温度は、試験結果に影響を及ぼす因子²⁾であるため、本試験では標準的な応答を調べる意味で、15 ~ 20 °C程度に安定させるように、ヒーターで暖めてから各試験を実施した。

4. 試験結果の分析と性能評価

4.1 評価項目の選定

現在、木造住宅用に開発された制振装置の性能を、統一的に評価する方法は提示されていない。したがって、振動台実験の結果を基に、制振装置による応答低減効果を調べる上では、評価項目とその位置づけを明確にする必要がある。本節では、先に述べた本装置の開発における基本思想を踏まえた上で、その性能評価に必要と考える 2 項目を取り上げ、その位置づけを述べる。

一般的な耐震要素と制振装置の対比を考えると、壁倍率の考え方や、すなわち静的荷重を想定した性能評価が、1 つの目安となり得る。壁倍率は、初期剛性や最大耐力、靱性を考慮した指標などから定められるが、静的荷重下の骨格曲線がその評価の基本となっている。本実験は、動的な非正常応答を調べたものであるが、その結果を骨格曲線に整理することで、筋かいや構造用合板など既に壁倍率を与えられている要素と比較でき、主に耐力に着目した性能評価が可能となる。この評価は、制振装置の開発目標でもある大変形領域までの耐力を確保するという思想に対し、地震応答時にそれを達成できているか否かを検証する意味も持つ。

もう 1 つの評価項目は、各試験体の剛性と減衰の変化である。等価線形化の考え方に従えば、建物応答に寄与する因子は、等価な周期と減衰に代表され、非線形性を有する一般的な構造物では変形の増大に伴いこれらが変化する。ここでは、時系列に変化する各試験体の固有振動数と減衰定数を、各々の変形レベルと対応させて評価する。また、各試験の間に実施した損傷観察の結果も踏まえ、それらの評価結果に影響を及ぼした因子の分析も併せて行う。

以降では、続く 4.2 節で上記の性能評価の基本となる全般的な試験結果を示し、4.3 節で骨格曲線に基づく性能評価、4.4 節で固有振動数と減衰定数による性能評価の結果を示す。

4.2 試験結果と各試験体の履歴特性

本節では、試験結果を代表する項目として、全試験体の最大層間変位と代表的な加振時における履歴曲線を示す。表 2 に軸組架構のみの特性である試験体 Frame と、それに 1 種類の耐震要素、もしくは制振装置を付加した試験体 PLY, Brace, GVA, X-Wall の各試験時における最大層間変位を、表 3 にそれらを除く複数の要素を併用した試験体 X-Wall + PLY, X-Wall + GVA, PLY + GVA, Brace + GVA の最大層間変位を一覧にして示す。また、各試験体の履歴特性として、図 4、5 に代表的な加振時における履歴曲線をまとめて示す。履歴曲線は、試験体頂部の加速度記録より算定した層せん断力と、レーザー変位計によって計測した層間変位の時刻歴の関係から描いたものである。

表 2 軸組架構と 1 種類の要素を付加した試験体の最大層間変位

入力地震波	最大層間変位 [mm]				
	Frame	PLY	Brace	GVA	X-Wall
BCJ - Lv.1 (50%)	51.9	4.2	4.5	3.9	3.3
BCJ - Lv.1	123	8.8	9.8	9.3	7.7
BCJ - Lv.2	234	44.6	19.6	29.0	20.9
JMA - KOBE (1回目)	—	250	177	81.4	58.2
JMA - KOBE (2回目)	—	—	—	101	70.9

表 3 複数の要素を併用した試験体の最大層間変位

入力地震波	最大層間変位 [mm]			
	PLY + GVA	Brace + GVA	X-Wall + GVA	X-Wall + PLY
BCJ - Lv.1 (50%)	2.6	2.6	2.3	1.7
BCJ - Lv.1	5.4	5.7	4.9	3.4
BCJ - Lv.2	14.5	11.2	12.9	7.4
JMA - KOBE (1回目)	72.5	54.9	42.9	22.5
JMA - KOBE (2回目)	134	55.2	39.1	26.1

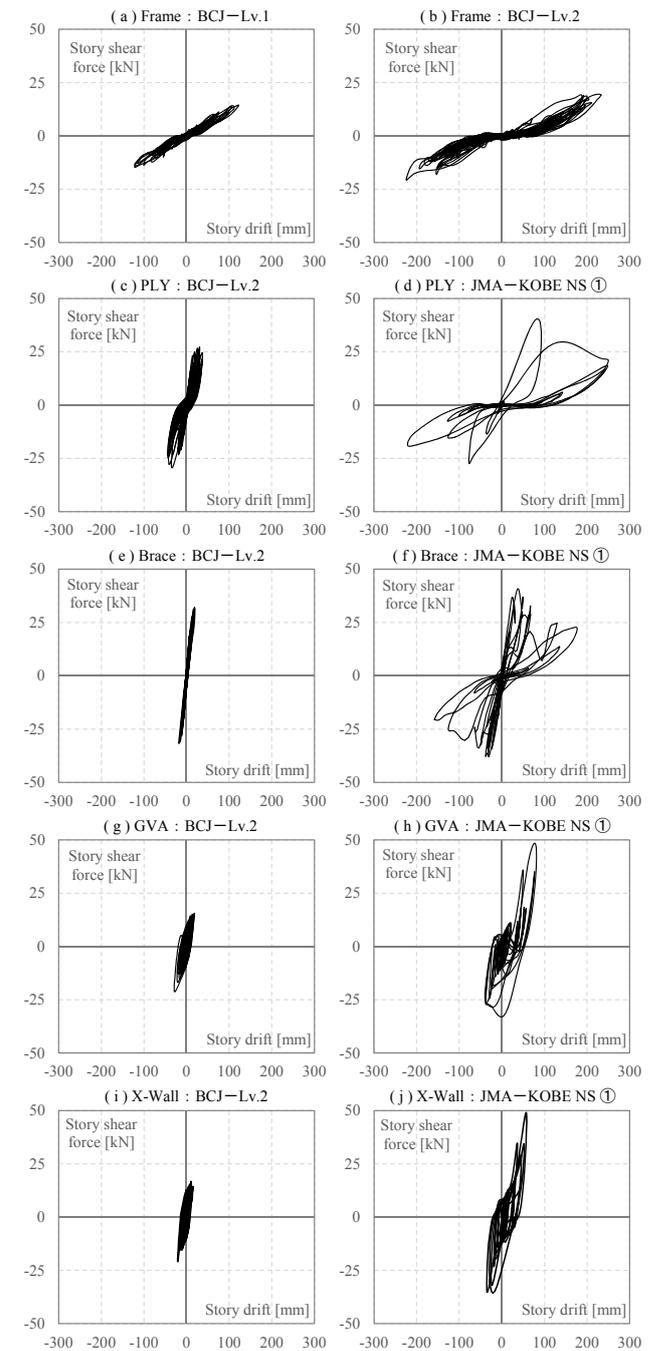


図 4 軸組架構と 1 種類の要素を付加した試験体の履歴曲線

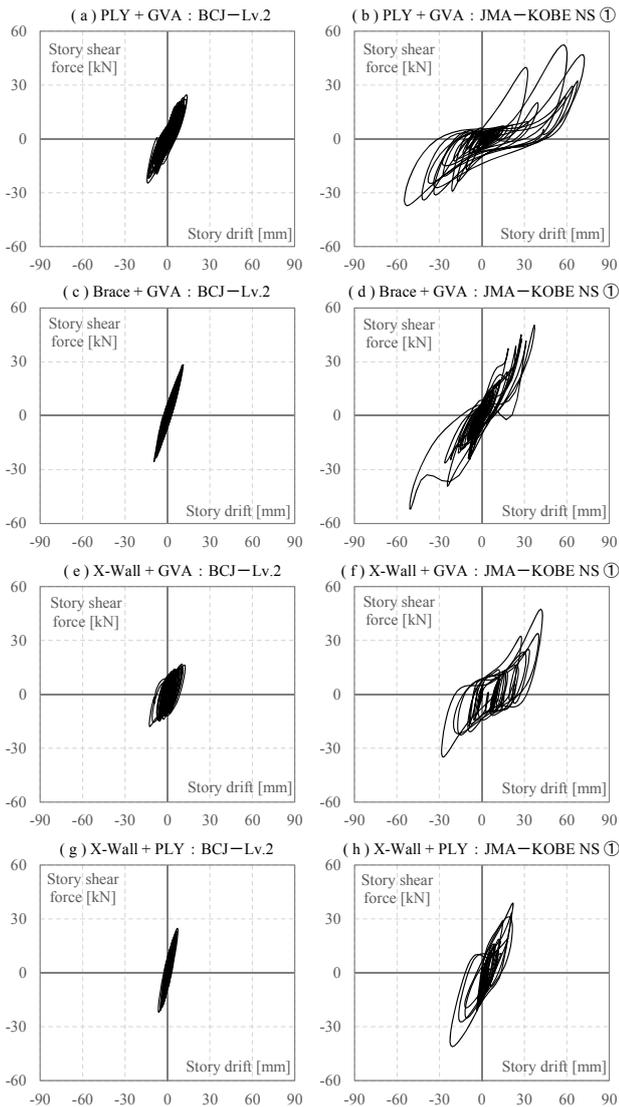


図 5 複数の要素を併用した試験体の履歴曲線

図 4 では、試験体 Frame のみ応答変位が大きいため、BCJ-Lv.1, Lv.2 入力時の結果が示してある。表 2 および図 4 に示す結果より、制振装置を組み込んだ試験体 GVA, X-Wall は、BCJ-Lv.2 入力時で試験体 Brace より 1.0 ~ 1.5 倍程度の応答変位を示した。一方、履歴曲線を見れば紡錘型を描き、負担せん断力も 0.5 倍程度に抑えられていることが確認できる。

JMA-KOBE 入力時に着目すると、一般的な耐震要素で構成された試験体 PLY と Brace の応答変位は、安全限界（層間変形角 = 1/30 rad.）を超過し、また大変形時の履歴曲線が軸組架構の特性を表す試験体 Frame と類似していることから、両者とも耐震要素としての機能を損失したことが推察される。一方、制振装置の履歴特性には、スリップ性状が確認されるが、著しい剛性低下は認められず、その後の 2 回目の JMA-KOBE 入力においても、応答変位の増大は 2 割程度に留まっている。スリップ性状の要因は、ボルト接合部のあそびの影響と考えられる。ここでは示さないが、両制振装置にはその後も加振を続け、合計 5 回の JMA-KOBE 入力でも倒壊には至らなかったことを別途確認している。

表 3 および図 5 に結果を示した複数の要素を併用した試験体に着目すると、先の結果より全般的に応答レベルが小さく、応答変位は、JMA-KOBE 入力時でも安全限界内にある。この要因は、要素数の増大に伴う短周期化により、応答変位が抑えられたためと考えられるが、履歴曲線には減衰効果による影響も現れている。

4.3 骨格曲線による性能評価

前節に示した試験結果より、各試験体の骨格曲線を求めることで、耐力に着目した性能評価を試みる。骨格曲線は、すべての地震波加振の結果を基に、次の手順で計算した。まず、試験の実施順に履歴曲線を求め、正側と負側を区別した上で履歴ループ毎に変位の最大点を定めていく。次に、その点が処女載荷、すなわち当該荷重レベルにはじめて達したか否かを判定し、該当した場合には骨格曲線の 1 点として、正側と負側の骨格曲線をそれぞれ求める。最終的には、本実験の試験体に加振方向に対称であるため、正側と負側の結果を平均的に処理し、当該試験体の特性とした。荷重の平均値の計算にあたり、正側と負側で変位が異なる区間に関しては、双方の特性を線形補間によって補うことで計算を進めた。また、負担せん断力が増加傾向にあるにも関わらず、前後の履歴ループの影響から、明らかに低い結果と判断される点は排除した。

前節の整理と同様に、軸組架構に 1 種類の要素を付加した 4 つの試験体の特性を、試験体 Frame の特性と共に図 6 に示す

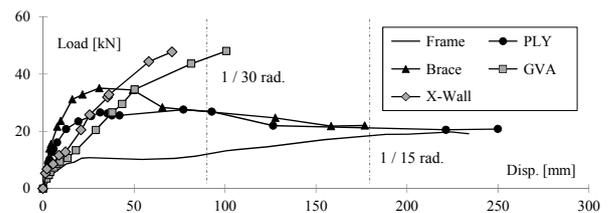


図 6 軸組架構と 1 種類の要素を付加した試験体の骨格曲線

図 6 の結果で、試験体 Frame が示す軸組架構の特性は、層間変位 20 mm 程度まで、柱-横架材接合部のモーメント抵抗により、高い剛性を保持することが分かる。この影響は、制振装置の特性にも影響し、軸組架構が期待したせん断変形を呈さなかったことで、装置が十分に機能しなかったことが示唆される。軸組架構と各試験体の特性を比較すると、各試験体が負担する荷重のうち、軸組架構が負担するのは、1/30 rad 以下の変形領域で最大 5 割程度、1/15 rad 以上の大変形領域ではほぼ全てであることが確認できる。

これらの関係を踏まえると、耐震要素や制振装置の性能をより正確に把握する上では、軸組架構の影響を除去する方が適切と言える。そこで、加算則の考え方に従い、図 6 の各試験体の特性より軸組架構が負担する荷重を差し引くことで、要素特性を抽出する⁶⁾。抽出した耐震要素および制振装置の要素特性を、図 7 に示す。

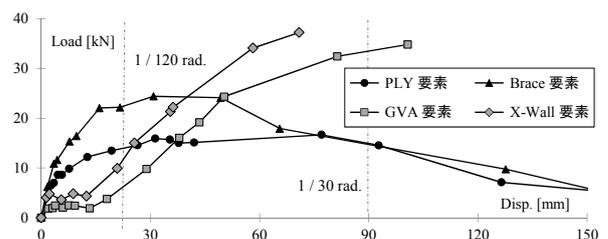


図 7 耐震要素と制振装置の要素特性

図 7 では、耐震要素と制振装置の差異を明確にするため、図 6 より表示範囲を狭めてある。最大耐力に着目すると、両制振装置の要素特性では 35 kN 程度であるのに対し、Brace 要素が約 25 kN、PLY 要素が約 16 kN となった。この結果で、Brace 要素と PLY 要素の最大耐力の関係は、壁倍率の比率 1.6 倍 (= 4.0 / 2.5) と対応する。壁倍率は、本来複数の指標で評価されるが、この対応関係を踏まえ、両制振装置の壁倍率を試算すると 5.6 となる。一方、損傷限界を 1 / 120 rad とし、当該変位における各要素の荷重レベルをみると、Brace 要素が約 22 kN、PLY 要素が約 14 kN、X-Wall 要素が約 12 kN、GVA 要素が約 6 kN となる。Brace 要素と PLY 要素の関係は、この場合でも約 1.6 倍で、壁倍率評価が一般的な耐震要素の特性を適切に反映することが示唆される。しかし、先と同様に制振装置の壁倍率を試算すると、X-Wall 要素で 2.1、GVA 要素で 1.1 となり、最大耐力からの評価と対比すれば、最大で 5 倍程度の差異があることになる。

本制振装置は、鋼製斜材をボルトで接合するため、当該部にあそびが生じる。変形レベルによる壁倍率評価の差異は、これを要因とし、GVA 要素ではさらに粘弾性体が可動するため、壁倍率が 1.0 程度低く試算されている。ダンパーは、減衰効果を見ればこのような変形のロスを与える。制振装置の性能評価をこれら耐力に着目した評価の拡張として考える場合、この結果は、評価項目を見直す必要性を示唆している。なお、両装置のあそびは改善可能だが、一般的な耐震要素より大きな変形領域で有効に機能するという開発目標の 1 つは達成できており、問題とは考えていない。

複数の要素を併用した試験体に着目する。これらは、要素特性の足し合わせで評価されると考え、ここでその検証を行う。各試験体の試験結果と要素特性の和を比較し、図 8 に結果を示す。

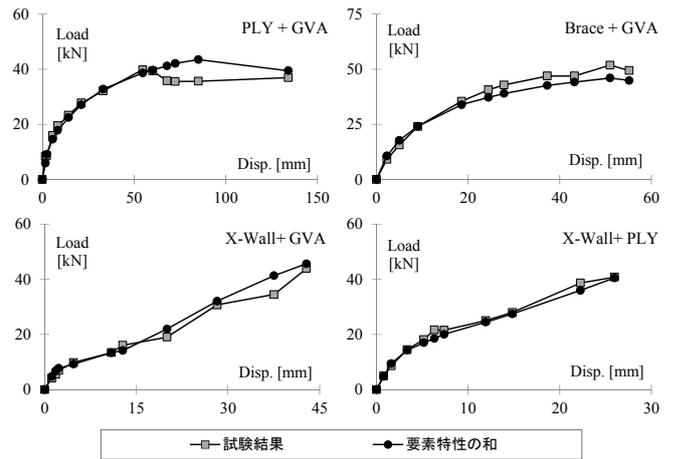


図 8 要素特性の加算則に基づく評価結果と試験結果の比較

図 8 より、最大で 8 kN 程度の誤差が認められるものの、全般的に両者は良く対応している。したがって、要素特性に基づく性能評価は、様々な構成要素の組合せが考え得る木造住宅の特性を、統一かつ精度良く再現できる方法であると考えられる。

4.4 固有振動数と減衰定数による性能評価

耐力による性能評価で確認されたように、複数の要素から成る試験体の特性は、個別の要素特性から説明可能である。これを踏まえ、本節では 1 種類の要素特性と軸組架構で構成された 4 つの試験体の試験結果に着目し、各試験体の固有振動数と減衰定数の変化から性能評価を試みる。ここで各特性の同定には、部分空間法に基づくシステム同定手法である MOESP 法⁷⁾を利用した。図 9 に、同定した各特性の経時変化をまとめて示す。

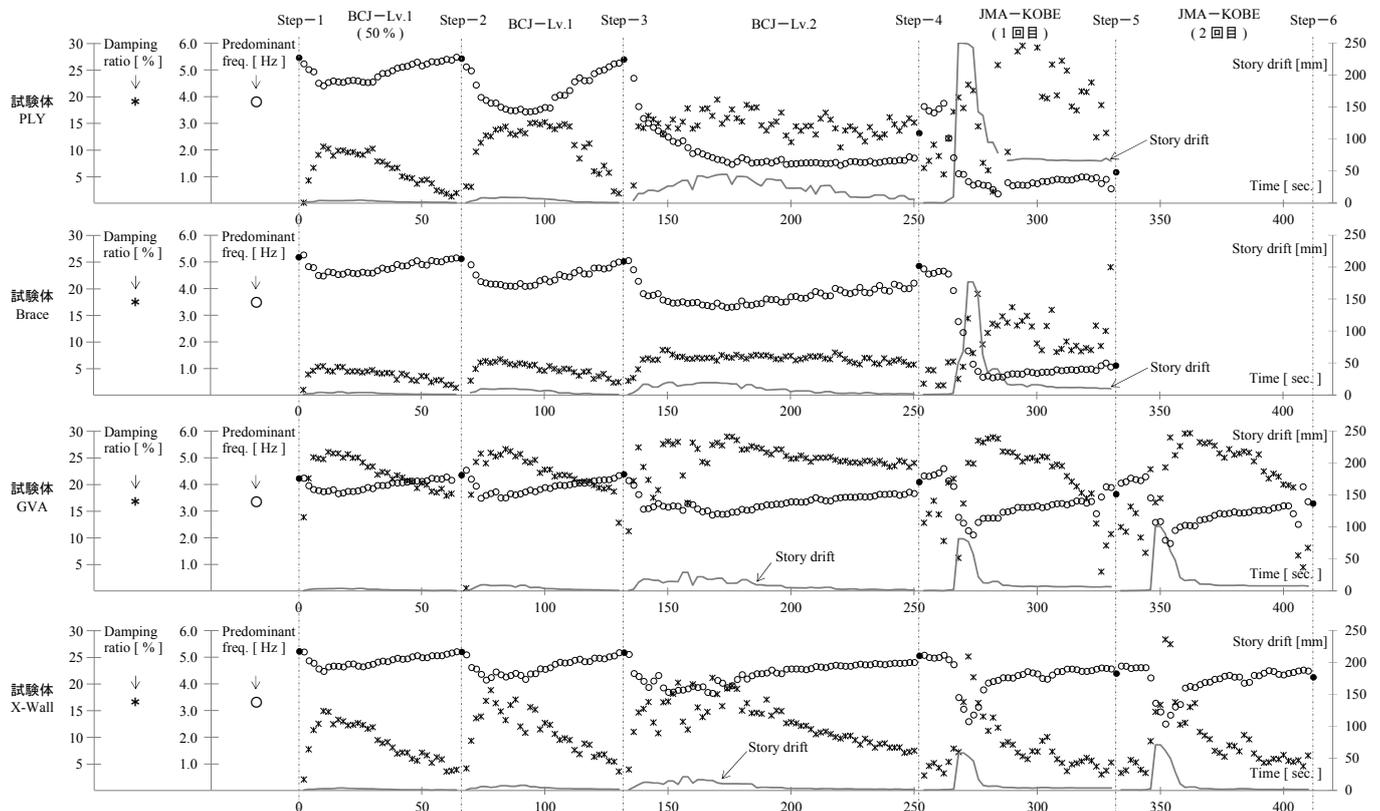


図 9 固有振動数と減衰定数の時系列変化

図 9 の計算に使用したデータは、時間幅を 4 sec (移動時間 2.0 sec) として 1 階床組および小屋組の加速度記録である。同図では、上段から順に試験体毎の結果をまとめてあり、固有振動数を ○ 印、減衰定数を * 印でプロットした。各図の横軸は時刻を表すが、各地震波加振間の経過時間を無視し、それに換わって STEP 波加振の結果から伝達関数を求めて固有振動数を評価した結果を ● 印で示してある。ここで、○ 印と ● 印の対応関係を確認しておく、前後の地震波加振を結ぶ中間的な位置に、STEP 波の結果が評価されており、採用した同定手法の妥当性が確認できる。

一般的な耐震要素の特性を代表する試験体 PLY および Brace の結果には、変形の増大に伴う固有振動数の低下と減衰定数の上昇が認められる。過度な損傷がない比較的小さな変形領域に着目すると、減衰定数は構造用合板で 10 ~ 15 %、たすき筋かいで 5 ~ 10 % 程度となっている。固有振動数には、各試験後に実施した損傷観察と合致する変化が確認され、BCJ-Lv. 2 入力後に認められた試験体 PLY のパンチングアウト等の損傷、JMA-KOBE 入力試験後の試験体 Brace における筋かいの屈曲破壊や筋かい金物の損傷などが、当該試験時の固有振動数の急落と結び付けられる。

制振装置の特性からは、試験体 PLY, Brace と比較して固有振動数の低下量が少ない傾向が窺え、特に試験体 X-Wall の振動数は、試験前に 5.2 Hz、全試験終了時に 4.2 Hz とその差は小さく、初期性能に対して 6 ~ 7 割程度の性能を保持したと言える。JMA-KOBE 入力試験時には、固有振動数が急落する箇所が確認されるが、試験終了時には加振前と同程度まで復帰しており、脆性的な損傷は免れたことが推察される。これらの要因と考えられる試験終了時に観察された 2 種類の代表的な破壊性状を、図 10 に示す。

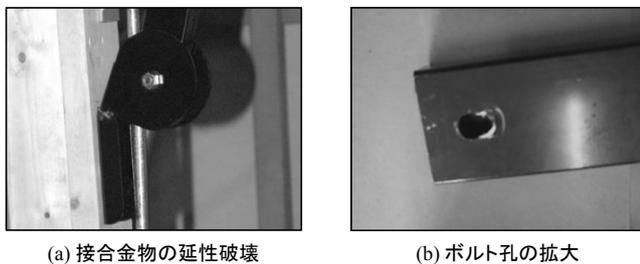


図 10 制振装置に確認された 2 種類の破壊性状

図 10 (a) の破壊性状は、両装置に共通する接合金物の塑性化によるもので、この性質によって当該部以外は過度に損傷せず、大変形を経験した後も固有振動数が復帰したものと考えられる。一方、同図 (b) に示したボルト孔の拡がりは、鋼製斜材の局所的な破壊の結果であり、加振毎に進展することも予想されるため、損傷が蓄積してしまう要因として、今後改善の余地がある。

制振装置の減衰性能に着目すると、粘弾性制振装置の特性を表す試験体 GVA は、初期から平均的にみて 25 % 程度の高い減衰性能を示している。試験体 X-Wall の減衰定数は、構造用合板と同程度と判断されるが、安定性という観点からみれば、鋼材の延性を利用した両制振装置は、複数回の地震動に対しても性能を維持し、応答レベルによらず、高い減衰性能を発揮できることが示唆される。

一般に木質構造の履歴特性は、強い非線形性を有することで知られ、定常応答でもその評価が難しい。本節では、各試験体の結果に

同様の手法を適用することで、固有振動数と減衰定数を求め、結果として、試験体の損傷と固有振動数の変化に対応関係が認められた。減衰性能に関しては、前節に述べた耐力に基づく指標では評価できない特性であり、耐力面では変形量が小さい領域で筋かいの 1 / 3 以下の性能と評価された試験体 GVA の性能は、減衰定数で 25 % 程度と高い性能を有していることが明らかとなった。

5. まとめ

本稿では、粘弾性制振装置とその技術の一部を応用した安価な制振装置の性能を、振動台実験の結果を基に評価した。筋かいと構造用合板を一般的な耐震要素と考え、それらと比較しながら得られた知見をまとめると、次の通りとなる。

- ・ 制振装置の応答は、BCJ-Lv. 2 入力時に耐震要素より層間変位が大きい場合もあったが、JMA-KOBE 入力時には半分以下に抑えられ、履歴曲線にも減衰効果による影響が認められた。
- ・ 骨格曲線に基づく分析より、大変形領域で制振装置が有効に機能することが確認された。一方、耐力に着目した評価が、制振装置の性能評価にとって、適当な指標ではないことが示唆された。
- ・ 固有振動数の同定結果より、制振装置は JMA-KOBE 入力後でも初期の 6 ~ 7 割程度の性能を維持でき、特に粘弾性制振装置では耐震要素の 2 倍程度の減衰性能を有することが確認された。

謝辞

本報は、制振装置 GVA および X-Wall の性能検証を目的とした実大振動台実験の結果を利用したもので、(株)カナイ、(株)住友スリーエム、(株)アイ・エム・イー、(株)原田木材には多大なご協力を頂きました。また、実験の実施にあたり、(独)防災科学技術研究所 御子柴正氏には多くの便宜を頂き、(株)テクノラボ、中村商事 (株)にもご助力頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤利昭, 真崎雄一, 井口道雄: 振動台実験に基づく木造軸組構法住宅用制振装置の性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第 26 号, pp.545-550, 2007. 12
- 2) 佐藤利昭, 永野正行, 井口道雄, 真崎雄一: 粘弾性制振装置を付加した木造住宅の地震応答解析—木造制振住宅の耐震設計手法の構築—, 日本建築学会構造系論文集, 第 690 号, pp.1449-1458, 2013. 8
- 3) 青木拓哉, 永野正行, 佐藤利昭, 真崎雄一, 井口道雄: 粘弾性制振装置を付与した木造軸組架構の擬似動的解析による性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第 38 号, pp.165-170, 2012. 2
- 4) 加藤惇, 佐藤利昭, 真崎雄一, 井口道雄, 永野正行, 肥田剛典: 粘弾性制振装置の接合部特性の評価 その 1 接合部の要素実験, 日本地震工学会大会, CD-R, 2012. 11
- 5) 佐藤利昭, 加藤惇, 真崎雄一, 井口道雄, 永野正行, 肥田剛典: 粘弾性制振装置の接合部特性の評価 その 2 接合部のモデル化とフレーム解析, 日本地震工学会大会, CD-R, 2012. 11
- 6) 佐藤利昭, 井口道雄, 真崎雄一: 木造軸組構法住宅の地震応答シミュレーション—履歴特性のモデル化と振動台実験による検証—, 日本建築学会構造系論文集, 第 631 号, pp.1569-1576, 2008. 9
- 7) M. Verhaegen and P. Dewilde: Subspace model identification, Part 1: The output-error state-space model identification class of algorithms, Int. J. Control, Vol.56, No.5, pp.1187-1210, 1992.

[2013年10月15日原稿受理 2014年1月24日採用決定]