

大林財団 2023 年度研究助成実施報告書

所属機関名 愛知淑徳大学
申請者氏名 古田智基

研究課題	多種の木造住宅向け制震装置の性能検証を通した耐震性能評価手法の構築ならびに地震被害軽減に向けた取り組み
(概要)	
本研究は、静的実験によって多種の制震装置の性能を把握し、制震装置を搭載した木造住宅の地震応答を高い精度で計算できる手法を構築した。また、工務店向けの地震応答の計算手法のマニュアルや、住宅購入者に向けた普及・啓発用の資料を作成した。申請者らのこれまでの研究によって、耐力壁が繰り返し地震荷重を受けると、剛性が低下していくことが分かっているが、本研究によって、複数回大地震に遭遇しても安心して継続使用できる木造住宅を増やすことができ、持続可能な未来の実現につながることを可能にした。	

1. 研究の目的
木造住宅を対象とした制震装置は、2011 年の東北地方太平洋沖地震を契機に開発が盛んになり、現在では、大手住宅メーカーだけではなく、小規模な工務店が手掛ける木造住宅にも多く搭載されるようになってきている。しかしながら、制震装置による地震応答の低減効果が適切に算定されている例は非常に少ない。木造住宅の制震装置の多くは、住宅の X、Y 各方向で 2 箇所程度しか設置されておらず、また、2 階建の場合、2 階には設置されない。これでは、耐力壁全体の耐力に対する制震装置の負担耐力は、10%程度かそれ以下である。このような形で制震装置を利用しても、大地震時に木造住宅の応答変位や損傷を抑制できるとは考え難い。これは、設計に用いることのできる制震装置の性能特性（荷重－変位関係）が不明であり、また、工務店が利用できるような制震効果の評価法がないためである。 木造制震の現状は、制震装置の効果を適切に評価できていないため、制震装置の効果を過大に謳った広告宣伝が散見されており、制震装置の特性を活かした設計がなされていない。これでは、大地震時に制震装置が効果を発揮できず、制震技術に対する信頼が損われる可能性がある。学術的にみて適切な制震効果の評価法を構築し、健全に制震技術が利用されるように、普及・啓発されるべき時に来ている。また制震装置は、一般的に、繰り返し载荷でも性能が低下しにくい特徴があり、制震装置が適切に設計されて搭載されていれば、大地震後でも木造住宅を継続して使用できることも広く周知していかなければならない。 そこで、本研究では、申請者らがこれまで行ってきた振動台実験結果をもとに、静的载荷実験によって多種の制震装置の性能を把握し、制震装置を搭載した木造住宅の地震応答を高い精度で計算できる手法を構築する。また、工務店向けの地震応答の計算手法のマニュアルや、住宅購入者に向けた普及・啓発用の資料も作成する。申請者らのこれまでの研究によって、耐力壁が繰り返し地震荷重を受けると、剛性が低下していくことが分かっているが、本研究によって、複数回大地震に遭遇しても安心して継続使用できる木造住宅が増えると、持続可能な未来の実現につながる。

2. 研究の経過

① 静的載荷装置による制震装置の構造性能の把握

制震装置はそれぞれ構造性能に特徴があり、まず、静的載荷実験により現在普及している制震装置 4 種類と、データが不足している耐力壁のそれぞれの性能特性（荷重－変位関係）のデータを採取した。

② 実験結果の分析、地震応答解析用復元力特性モデルの構築

実験結果より、多種の制震装置などの性能特性（荷重－変位関係）や等価粘性減衰定数などを整理した。また、地震応答解析のための復元力特性モデルを作成した。

③ 制震装置を搭載した木造住宅の地震応答解析ソフトの制作

地震応答解析によって、制震装置を搭載した木造住宅の地震応答の計算手法を構築した。具体的には、木造住宅の床面積や耐力壁の数、制震装置の数などの基本的な情報から大地震時の地震応答を計算できるソフト（アプリ）を制作した。また、最大応答変位から内外装材の損傷を推定する機能も加えた。

④ 普及・啓発用各種資料の制作

木造住宅の耐震構造や制震に関する解説、制作した地震応答解析ソフトのマニュアルを工務店用に作成した。住宅購入者に向けては、冊子やパンフレットを制作して自由にダウンロードできるようにするほか、動画を制作して公開する。

本研究では、制震装置の効果を工務店や住宅購入者に直接訴求することで、大地震後でも継続使用できる木造住宅を増やし、地震被害の軽減につなげることを目的とした。

3. 研究の成果

1. はじめに

木造住宅用の制震装置は 2000 年頃から開発が始まり、現在では様々なものが製品化されている。木造住宅に制震装置を設置することにより、地震時の応答低減、また、複数回の地震での構造性能低下の抑制が期待されるが、小規模な木造住宅では、その効果が適切に評価され、さらに、ユーザーに説明されているケースは少ないと考えられる。

制震装置の効果を適切に評価するためには、制震装置の荷重変形関係などの構造性能が公開されている必要があり、さらに、動力学に基づく解析も必要である。ここでは 4 基の制震装置の静的せん断加力実験を実施した結果ならびに木造住宅の床面積や耐力壁の数、制震装置の数などの基本的な情報から大地震時の地震応答を計算できるソフト（アプリ）に関して報告する。

2. 実験概要

図 1 に静的せん断加力実験を実施した制震装置 A～D の概要を示す。文献 1) に示されている分類に基づく、横リンク型、縦リンク型、筋かい型（K 形）および方杖型であり、ダンパー部は、高減衰ゴム、摩擦材および鋼材である。なお、柱と横架材との仕口には 25kN のホールダウン金物を取り付けて実験を行った。図 2 に加力履歴を示す。1/900 rad～1/30 rad の範囲での漸増 3 回繰り返しを基本としたが、本震の後の余震を想定した 1/2 の変形角での加力も行った。また、1/100 rad と 1/75 rad では 10 回繰り返しとした。

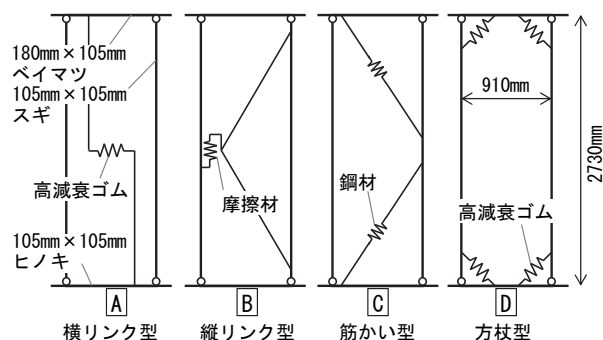


図 1 制震装置

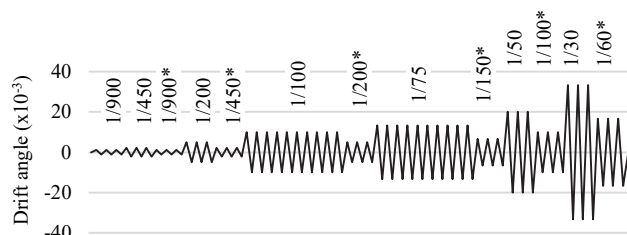


図 2 加力履歴
(*印は余震を想定した加力)

3. 実験結果

3.1 荷重変形関係と等価粘性減衰定数

図 3 に各制震装置の荷重－変位関係を示す。変形角が小さい領域では、スリップ成分を含むものやループ面積が小さいものなどもある。1/75 rad 時の耐力は、A～C では 9～12kN 程度であり、D では 3kN 程度である。1/30 rad 時の耐力が最も高いものは横リンク型(A)の 21.8kN、最も低いものは、方杖型(D)の 5.3kN であった。

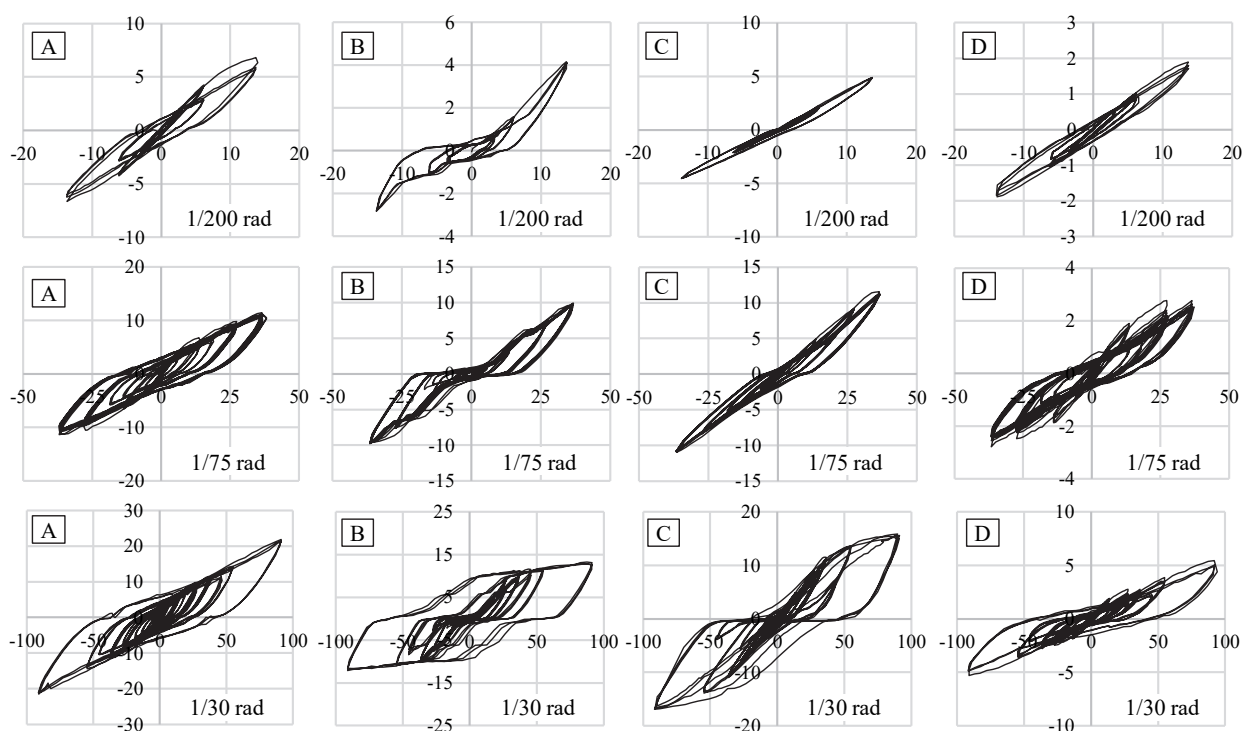


図 3 荷重－変位関係
(縦軸は kN、横軸は mm)

図 4 は、本震想定に加力と余震想定に加力における各ループの最大せん断力である。A と B では、繰り返し加力においても、余震想定に加力においても、最大せん断力の低下は少ない。C においては、1/30 rad の加力後の 1/60 rad では最大せん断力の低下がみられた。D においては、繰り返し加力、また、余震想定に加力においても最大せん断力の低下がみられた。

図5は、各ループの等価粘性減衰定数(H_{eq})である。概して、変形角が大きくなるに従って増加する傾向である。1回目の加力において、1/200 rad ではいずれも10%以下であるが、1/75 rad では7~14%、1/30 rad では15%~30%程度である。ダンパー部が高減衰ゴムであるAとDでは、余震想定に加力時のほうが大きく、Aでは繰り返し加力に伴う低下がみられる。

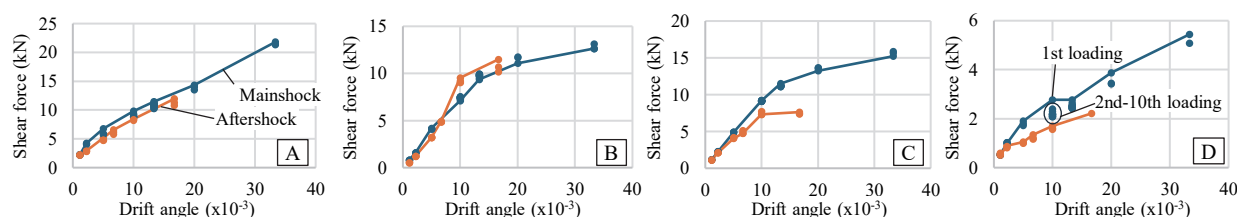


図4 各ループの最大せん断力の推移

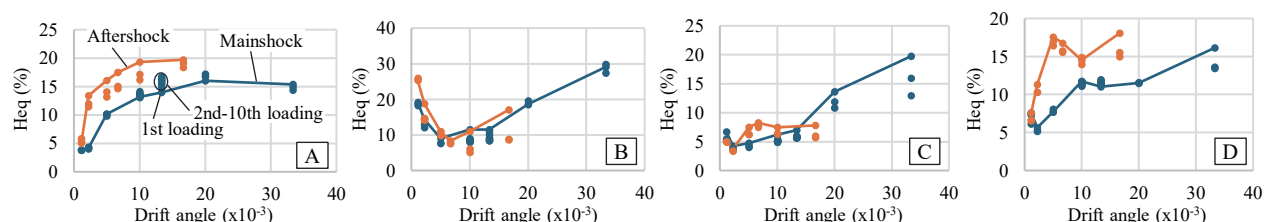


図5 各ループの等価粘性減衰定数(H_{eq})の推移

3.2 ダンパー部での変形

図6は、ダンパー部以外では変位が生じないものとして計算したダンパーの部の変位に対する実験で計測した変位の割合である。

概して、小変形域でのダンパー部の変位はほとんどなく、ダンパー部が高減衰ゴムであるAとDでは1/200 rad 付近から変位が生じている。Bでは1/100 rad 付近から、Cでは、1/75 rad 付近から変位が生じているが、上側と下側の部材で変位の差がみられる。Dにおいても設置位置によって差がみられるが、ホールダウン金物による柱頭・柱脚の回転拘束の影響であると考えられる。

4. 制震装置を搭載した木造住宅の地震応答解析ソフト

これまでの実験結果をもとに、制震装置の性能特性（荷重－変位関係）や等価粘性減衰定数

などの整理を通して検討した地震応答解析のための復元力特性モデルを反映したソフト（アプリ）のインプット画面を図7に、アウトプット画面の一部を図8に掲載する。さらに図9に示すように制震効果の振動状況の比較が目で見えて把握できるようにアニメーション機能を追加した。

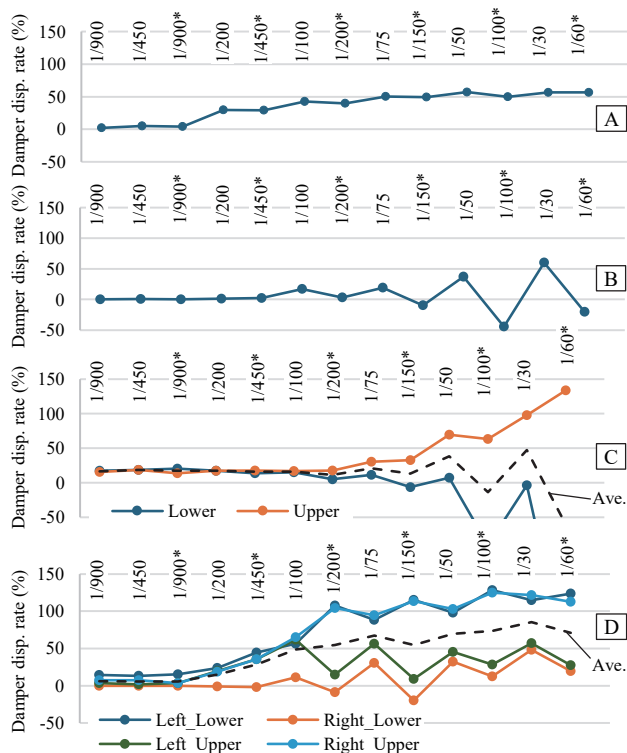


図6 ダンパー部の変位の割合

5. まとめ

木造住宅用の制震装置 4 基の静的せん断加力実験を実施した結果、1/75 rad 時の耐力は、方杖型以外では 9~12kN 程度、 H_{eq} は 7~14%であった。また、制震装置の形状やダンパー部の種類によって、ダンパー部に生じる変位に差がみられた。

また、これらの実験結果をもとに地震応答解析によって制震装置を搭載した木造住宅の地震応答の計算手法を構築し、木造住宅の床面積や耐力壁の数、制震装置の数などの基本的な情報から大地震時の地震応答を計算できるソフト（アプリ）を開発した。ここには、最大応答変位から内外装材の損傷を推定できる機能も加えた。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：木質構造における制振技術の方向性、2023 年度日本建築学会大会（近畿）パネルディスカッション資料、2023.9

4. 今後の課題

本研究では、木造住宅用の主要な 4 基の制震装置を対象に、静的せん断加力実験を実施し、荷重－変位関係、等価粘性減衰定数、ダンパー部の変位を把握した。試験装置の制約により、今回は静的加力実験を行ったが、本来、制震装置の評価には動的加力を行い、速度依存性などを考慮することが望ましい。また、実験は主に夏期に実施したが、温度依存性の影響も考えられるため、冬期にも実験を行い、総合的な性能評価を行うことで、より適切な評価が可能となる。今回の静的加力実験では、速度依存性が小さく、変位依存性が高い制震装置を選定したが、制震装置には速度や温度の影響を受けやすいオイルなどの粘性体を用いたものも存在する。今後は、速度依存性や温度依存性を考慮した評価が必要となる。その際、今回の結果を踏まえると、パラメータや試験体数を過度に増やさずに、合理的な実験計画とすることが可能である。

上記のような制震装置の単体性能評価に加え、制震装置を設置した木造住宅の地震応答や損傷評価についても検討を進める必要がある。単体では性能が低い制震装置であっても、多数設置することで建物の構造性能が向上する場合がある。一方で、性能の高い制震装置であっても、設置数や配置によっては建物の構造性能の向上に十分寄与しない可能性がある。この際、建物自体の構造性能も影響を及ぼす。制震装置を設置しない状態で構造性能が高い建物の場合、相当数の制震装置を設置しなければ、建物全体の構造性能の顕著な向上は期待できない。したがって、様々な建物モデルを設定し、制震装置の種類、数、配置を変化させた際の地震応答を計算・分析し、効果的な制震装置の設置方法を示すことが求められる。このような検討を行わない場合、制震装置を設置していたとしても、大地震時に深刻な損傷が生じる可能性がある。

我が国では巨大地震が頻発しており、木造住宅は国民の生命と財産を守る重要な役割を担っている。さらに、複数回の巨大地震に遭遇した場合でも、安心して使用を継続できる性能が求められる。この要求に応えるためには、免震以外には制震装置の利用しかなく、ユーザーが理解しやすい形で、制震装置の性能や、制震装置を備えた木造住宅の構造性能を明確に説明できるようにする必要がある。