

博士論文概要

論文題目

リンク式流体慣性ダンパによる
構造物の地震応答制御に関する研究

Seismic Response Control of Structures
Using Linked Fluid Inertia Mass Damper

申請者

渡井	一樹
Kazuki	WATAI

建築学専攻 建築構造設計研究

2017年 12月

1995年兵庫県南部地震以降多発している震度7クラスの地震動は、戸建住宅をはじめとする低層構造物に甚大な被害をもたらしている。これらの地震動は現行の建築基準法で構造物の終局耐震安全評価の基準として想定している極めて稀な地震動を遥かに上回る破壊力を持っているが、建築防災体制の観点からも如何に強い地震動であろうとも少なくとも構造物の倒壊を防ぐことが必要である。しかし、2016年熊本地震のように震度7クラスの地震動が短期間で数回発生した場合には、従来のように耐力壁を増設することで耐震性能を向上させようとする耐震構造法では対応しきれないことが明らかとなった。

近年、構造物の耐震性能を向上させるためにダンパと呼ばれるエネルギー吸収装置を付加する制振構造や、構造物と地面の間にアイソレータと呼ばれるせん断剛性の低い免震支承を設置する免震構造に関する研究が盛んに行われている。制振・免震構造は中高層及び超高層建築物に対しては広く普及しているものの、小規模な構造物は耐震構造法が主な補強方法となっている。また、耐震構造法により構造物の剛性・耐力が高められていたとしても、僅かな剛性・耐力のばらつきにより特定層に変形が集中する層崩壊が生じる恐れがある。特に、直下型の地震に伴って発生することの多い指向性パルス波は、相対的に弱層となる層に損傷集中を生じさせて層崩壊を生じさせる傾向が非常に強い。層崩壊は崩壊層において人命を著しく脅かすことから、その防止に効果的な構造システムの開発が求められている。

以上のような背景の下、近年では戸建住宅に対して制振構法を適用する有為性が認識され始めており、戸建住宅用の制振装置が開発されている。いずれの制振構法も構造物のエネルギー吸収性能を向上させることで耐震性能を向上させることを目指したものである。本論文で提案するリンク式流体慣性ダンパはエネルギー吸収性能を向上させる粘性減衰効果だけでなく、絶対加速度の低減に有利となる負剛性制御を流体の慣性質量を用いてパッシブ制御により実現できる。また、油圧式リンク機構によりダンパを設置した構面同士の損傷分布を任意に制御できることから損傷集中の抑制に期待できる。既往の制振装置では実現できない多彩な制振効果を簡易な機構で実現することができるリンク式流体慣性ダンパは、構造物の耐震性能の向上だけでなく、制振構法の高度化にも大きく資するものとなる。本論文では、提案するリンク式流体慣性ダンパを用いた制振構法の原理を明らかにし、実際に製作したリンク式流体慣性ダンパを用いた実験により安定した基本性能を発揮するための基本仕様を策定し、ダンパを高性能化させるための具体的な手法を提案した。次に、ダンパが発揮する制振効果を定量的に把握することでダンパの有する制振性能と地震応答低減効果の関係を明らかにした。最後に、リンク式流体慣性ダンパを設置した構造システムの制振効果を検証するために実大を想定した実寸2層小型フレームによる振動台実験を行った。本論文は6章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章は序論で、本研究の背景、既往の研究の概要、研究の目的、本論文の構成を記した。

第 2 章では、提案するリンク式流体慣性ダンパの基本機構を記した。同ダンパは粘性減衰効果に加えて流体の高速運動に伴う慣性質量効果を利用して簡易な機構で負剛性制御を実現でき、さらに、リンク機構により構造物の変形分布を任意に制御することで損傷集中の抑制に大きな効果が期待できるデバイスであることを示した。また、リンク機構を応用することで上下層間の損傷集中の抑制だけでなく、振れ振動の抑制や免震構造物のロッキング応答の抑制にも効果を発揮する設置方法を提案した。

次に、試作したリンク式流体慣性ダンパの単体性能試験を実施することで、ダンパの基本性能として速度の 2 乗に比例した抵抗力を発揮する粘性減衰力と、慣性質量と円振動数の 2 乗の積により求まる等価剛性がピストン変位に比例した慣性力を発揮することを確認した。また、2 つのピストンロッドがリンクして動くためのリンク剛性は混入空気が圧縮される低振幅時にはやや小さい値をとるが、流体の圧縮剛性が働く振幅域では良好なリンク効果を発揮することを示した。力学モデルの構築においてはリンク機構の剛性を線形近似した場合においても実験結果を精度よく模擬できることを示した。

第 3 章では、「リンク式流体慣性ダンパの高性能化」を粘性減衰力に対する慣性力を相対的に大きくすることと定義して、小型ダンパを用いて安定した基本性能を発揮するための基本仕様の策定及び高性能化手法の有用性を検証するために単体性能試験を実施した。単体性能試験により、ダンパの基本性能として安定した粘性減衰力とリンク効果を発揮するためには、リンクチューブには硬い材質を用いる必要があることを示した。さらに、ダンパの高性能化には密度の大きな流体を封入することで慣性質量を大きくする手法と流体動粘度を軽減して粘性減衰力を低減することで相対的に慣性力を大きくする手法のいずれも有効であることを明らかにした。

次に、リンク式流体ダンパを設置した小型 2 層鉄骨フレームによる振動台実験により、慣性質量効果とリンク効果により高い制振効果が得られることを示し、高性能化したダンパを設置することで慣性質量効果による絶対加速度の低減効果が意図通り大きくなることを示した。

第 4 章では、リンク式流体慣性ダンパによる層間変形制御機構の動力学特性を把握するために、2 つのピストンロッドの移動量の比率が異なる仕様とした場合の単体性能試験を実施し、ダンパの基本仕様が同様であればピストンロッドの移動量の比率を変えた場合にも同様なリンク剛性を発揮することを示した。

次に、層間変形制御機構を構造物に設置した場合の振動特性の変化を把握するために調和振動に対する定常振動解を導出し、リンクされた層の間では層間変形制御機構によりせん断力の再分配が行われることを示した。また、層間変形制御機構を設置した構造物は主構造が本来有する振動特性とは異なる見かけの剛性に依存した振動特性を発揮することを明らかにした。このとき、せん断力の再分配量は原振動系の固有値と層間変形制御機構の変形分布の比率を用いることで時刻歴応答解析を行わずに算出できることを示した。さらに、上下層間の剛性分布が異なる試験体を用いて振動台実験を行い、理論的に想定される層間変形制御機構の動力学特性が実際に発揮されることを確認した。

第5章では、実大を想定したリンク式流体慣性ダンパを設置した実寸2層小型フレームによる振動台実験を行った。リンク式流体慣性ダンパを設置することで2次モードの周期低減効果とダンパを設置しない場合と比べて系全体の減衰定数が向上することを確認した。また、同ダンパを設置した構造システムが最大層間変形角を大幅に低減できるだけでなく、リンク効果により上下層間の変形差を小さくすることで損傷集中を抑制し、構造物全体でエネルギー吸収を行うことで高い制振効果が得られることを実証した。

次に、実験結果を基に主構造及びリンク式流体慣性ダンパの力学モデルを構築し、実験結果の傾向を概ね精度よく模擬できることを確認した。また、構築した力学モデルを用いてダンパの各力学要素が制振効果に与える影響について定量的に評価することで、粘性減衰効果が最大応答変形の低減効果に、リンク効果が損傷集中の抑制効果にそれぞれ効果を発揮することで総合的に高い制振効果が得られることを明らかにした。

第6章は、結論である。第2章から第5章までの検討から得られた知見を総括した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 渡井 一樹 印

(2018年 2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	リンク式流体慣性ダンパによる層間変形制御機構の動力学特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.83、No.746、渡井一樹、曾田五月也【掲載決定】
講演	実寸2層小型薄板軽量形鋼造を主構造とする制振建物の振動台実験、第6回制振構造デザイン技術の高度化に関するシンポジウム、pp.76-93、2017年9月、曾田五月也、脇田健裕、渡井一樹、宮津裕次
講演	油圧式リンク機構による変形分散型制振システムの開発、第6回制振構造デザイン技術の高度化に関するシンポジウム、pp.56-65、2017年9月、曾田五月也、渡井一樹
講演	油圧式変位増幅機構を用いたパッシブマスタライバーの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.667-668、2017年8月、渡井一樹、曾田五月也
講演	超高層建築物のリンク機構による振動モード制御手法に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.723-724、2017年8月、金井佳吾、曾田五月也、渡井一樹
講演	リンク式流体慣性ダンパによる構造物の層間変形制御システムの動力学特性に関する研究、Dynamics and Design Conference 2017 講演論文集、No.205、2017年8月、渡井一樹、曾田五月也
○論文	リンク式流体慣性ダンパの性能設計法に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.82、No.737、pp.991-1001、2017年7月、渡井一樹、曾田五月也
講演	リンク式流体慣性ダンパによる2層建物の変形・絶対加速度の制御、第5回制振構造デザイン技術の高度化に関するシンポジウム、pp.62-73、2016年9月、曾田五月也、渡井一樹
講演	リンク式流体慣性ダンパの高性能化、第5回制振構造デザイン技術の高度化に関するシンポジウム、pp.26-35、2016年9月、曾田五月也、渡井一樹
講演	リンク式流体慣性ダンパの高性能化に関する研究(その3.2つのピストン変位を任意の比率にする場合)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.263-264、2016年8月、曾田五月也、渡井一樹
講演	高性能リンク式流体慣性ダンパの開発、Dynamics and Design Conference 2016 講演論文集、No.233、2016年8月、渡井一樹、曾田五月也
○論文	リンク式流体慣性ダンパによる建物の制振に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.81、No.725、pp.1071-1079、2016年7月、曾田五月也、渡井一樹
講演	リンク式流体慣性ダンパによる建築物の制振に関する研究、第4回制振構造デザイン技術の高度化に関するシンポジウム、pp.45-65、2015年9月、曾田五月也、渡井一樹

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	リンク式流体慣性ダンパの高性能化に関する研究 (その 2.小型リンク式流体慣性ダンパの単体性能実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.681-682、2015年9月、曾田五月也、渡井一樹
講演	リンク式流体慣性ダンパを用いた構造物の制振に関する研究、Dynamics and Design Conference 2015 講演論文集、No.320、2015年8月、曾田五月也、渡井一樹
講演	リンク式流体慣性ダンパの制振効果に関する研究、第3回制振構造デザイン技術の高度化に関するシンポジウム、pp.84-93、2014年9月、曾田五月也、渡井一樹
講演	リンク式流体慣性ダンパの高性能化に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.807-808、2014年9月、曾田五月也、渡井一樹、瀬戸純平、矢島遥