

博士論文審査報告書

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

2018年2月

1995年兵庫県南部地震以降多発している震度7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性の評価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は如何に強い地震動に対しても少なくとも構造物の倒壊を防ぐことが必要である。2016年熊本地震のように震度7クラスの地震動が連続して発生する場合には、従来のように構造物の剛性・耐力を増すことで耐震性能を向上させる耐震構造法では対応しきれないことも明らかとなっている。したがって近年は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免震支承を設置する免震構造の実用化研究が盛んに行われている。制振・免震構造は中高層構造物に対しては広く普及しているものの、小規模な構造物では耐震構造法が主な補強方法となっている。耐震構造法により構造物の剛性・耐力が高められていても、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こともよく知られている。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を含む地震動では、相対的に弱層となる層に損傷集中を生じて層崩壊を生じる傾向が非常に強い。層崩壊はそれにより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。本研究では既往の制振装置では実現できない制振効果を実現し、構造物の耐震性能を向上させるための制振構造システムとしてリンク式流体慣性ダンパを活用することを提案し、その効果を検証している。

近年では戸建住宅に対しても制振構造を適用することが効果的であると認識され始めており、戸建住宅用の制振装置が各種開発されている。いずれの制振構造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。本研究で提案してい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発揮する慣性質量を活かすパッシブ制御により実現でき、さらに複数台のダンパの動きをリンクさせることでダンパを設置した構面同士の変形分布を任意に制御できる。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造の原理を定式化し、同ダンパの力学特性及び制振効果を実験的・解析的に検討することで、既往の制振装置では実現できない高い制振効果が得られることを示し、構造物の耐震性能の向上に有効な構造システムであることを明らかにしている。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ている。

第 2 章には、提案するリンク式流体慣性ダンパの基本機構を記している。同ダンパは通常のオイルダンパと同様に粘性減衰効果を発揮する。また、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る。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変形分布の制御に大きな効果を期待できる。リンク機構を応用することで上下層の変形分布の制御のみならず、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が可能であることも述べている。

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、ダンパの基本性能を確認している。一対のピストンロッドの動きのリンク効果はオイル中の混入空気が圧縮される低振幅時にはリンク剛性が低いことによりやや小さいが、流体の圧縮剛性が働く振幅域では良好に効果を発揮することを確認している。

第 3 章では、リンク式流体慣性ダンパの高性能化について検討している。本論では高性能化を粘性減衰力に対する慣性力の割合を相対的に高めることと定義して、安定した基本性能を発揮するためのダンパ各部の仕様を策定し、高性能化手法の有用性を単体性能試験により検証している。その結果、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得るためには、リンクチューブには剛性の高い材料を用いる必要があることを示している。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の動粘度を低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ている。

次に、リンク式流体ダンパを設置した小型 2 層鉄骨フレームを用いた振動台実験により、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、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をより高められることを明らかにしている。

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が振動系の動力学特性に与える影響について検討している。初めに、2 つのピストンロッドの移動量の比率のみ異なる仕様とした場合のダンパの単体性能試験を実施し、ピストンロッドの移動量の比率によらず同様なリンク効果を発揮することを示している。次に、層間変形制御機構を構造物に設置した場合の構造モデル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せん断力の再分配が行われることを指摘している。また、層間変形制御機構を設置した構造物は主構造のみの場合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ている。

次に、上下層の剛性分布を変えた試験体を用いて振動台実験を行い、理論的に定ま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ている。

第5章では、小住宅での実用化を想定して設計・製作を行ったリンク式流体慣性ダンパを設置した実寸2層フレームによる振動台実験を行っている。リンク式流体慣性ダンパを設置することで2次モードの出現を抑える効果とダンパを設置しない場合と比べて構造系全体の減衰定数が向上することを確認している。また、同ダンパを設置することで構造システムの地震動入力に対する最大層間変形角が大幅に低減するだけでなく、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ている。

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ている。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ている。

第6章は、結論である。第2章から第5章までの検討により得られた知見を総括している。

以上を要するに、著者の提案するリンク式流体慣性ダンパを設置した構造システムは既往の制振装置では実現できない高い制振効果を発揮して、構造物の耐震性能を大幅に向上させることが明らかにされている。本論文で著者は、リンク式流体慣性ダンパの力学特性を検討するために単体性能試験を実施し、同ダンパが有する制振性能を実験的・理論的に示している。また、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小型及び大型フレーム試験体を用いて実験的に明らかにするとともに、提案する構造システムが様々な制振性能を総合的に発揮することで高い制振効果を得られることを解析的に示している。

本研究により得られた成果は、中低層構造物の耐震性能の向上及び制振構造の高度化に大きく資するものであり、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2018年2月

審査員(主査) 早稲田大学教授	工学博士 (早大)	曾田五月也
早稲田大学教授	Ph.D. (コロンビア大学) 工学博士 (早大)	西谷 章
早稲田大学教授	博士 (工学) (早大)	前田寿朗
早稲田大学教授	工学博士 (早大)	山田 眞