

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289195

研究課題名(和文) リンク機構を有する流体慣性ダンパによる建築物の制振に関する研究

研究課題名(英文) Seismic Response Control of Structures Using Inertia Mass Dampere with Link Mechanism

研究代表者

曾田 五月也 (Satsuya, Soda)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70134351

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は低層の軽量構造物の耐震安全性を向上させるための制振構造システムを提案し、その有効性・実用性を明らかにすることが目的である。提案するデバイスは負剛性を発現する流体慣性ダンパに油圧式リンク機構による変形分布制御機構を持たせたものであり、負剛性により変形低減効果と加速度低減効果のトレードオフの関係を緩和することで高い制振効果を得られることが特徴である。また、上記の制振効果を高めるために試作したデバイスの単体加力試験を繰り返し行い、その性能の高度化と機構の設計手法の整備を行った。最後に、小型および大型構造の振動台実験により提案する構造システムが意図通りの制振効果を発揮することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a vibration control system for relatively low-rise light-weight frame structures using hydraulic linked oil dampers. The system consists of two hydraulic cylinders which are linked with two bypass tubes. The device exhibits negative stiffness due to inertia mass of the fluid and the deflection distribution control force by hydraulic link mechanism. When the device is installed between adjacent two stories, it can adjust the story deflection as well as the floor acceleration response effectively. We performed a series of dynamic loading tests on some sample devices to raise vibration control performance by parametrically studying the mechanical properties of the fluid, rigidity and dimensions of bypass tubes etc. We also conducted shaking table tests on a scaled as well as a full-scale test frame and confirmed that the newly developed vibration control system really works as we had intended.

研究分野：耐震構造、制振構造、免震構造

キーワード：流体慣性ダンパ 油圧式リンク機構 負剛性 変形分布制御 単体加力試験 性能高度化 振動台試験

1. 研究開始当初の背景

地震防災体制の向上のためには低層戸建住宅・共同住宅の耐震性能をレベルアップすることが急務である。今後想定すべき大地震動の多様性を考慮すれば、建築物の剛性・耐力を増すという従来型の構造法では対応が困難な場合が多く、代わりに免震あるいは制振構造を一般化する事が優位である。特に、上部構造にダンパを設置する制振構造では、加速度を居住性・使用性を失わぬ程度に抑える事で、建築物の耐震安全性、また長期使用性を向上できる可能性が高い。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、軽量構造が強い地震動を受ける時の上部構造の揺れの低減効果を十分に発揮させるための仕組みとして油圧式リンク機構を併せ持つ流体慣性ダンパを用いた制振構造システムの有用性を実験的、解析的に明らかにすることを目的とする。また、提案するダンパの単体加力試験による基本性能の検証や高性能化手法、性能の定量的評価指標についても整理する。

(2) 図1に提案するダンパの基本機構を示す。ダンパは2つのシリンダ、ピストンロッド、リンクチューブにより構成される。一方のピストンロッドを動かすと内部に封入された作動流体がシリンダからチューブに流れ込み、もう一方のシリンダに流れ込むことで他方のピストンロッドが追従する仕組みである。本ダンパは各部の仕様や作動流体諸元を変更することで粘性減衰係数や負剛性の大きさ、リンク機構の変形比率を任意の値に調整することができる。

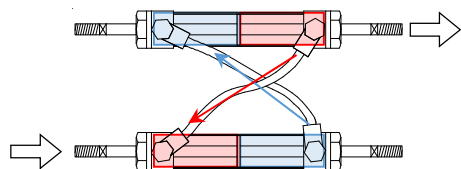
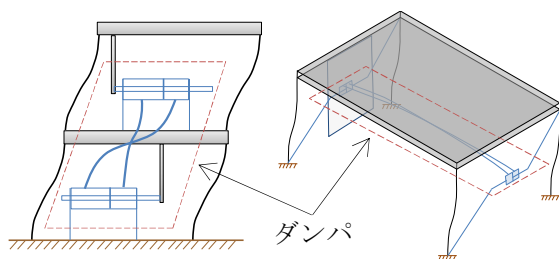


図1 提案するダンパの基本機構

(3) 提案するダンパは図2.aのように設置することで建物各層の変形分布を一様化したり、特定層に変形を集中させることが可能である。また、図2.bのように設置すれば同一平面内の各構面の変形を一様化でき、揺れ振動の抑制にも効果を発揮する。



a) 損傷集中の抑制 b) 揺れ振動の抑制

図2 制振構造システムの概念図

3. 研究の方法

(1) 本研究では提案するダンパのリンク効果と慣性質量効果による負剛性の再現性が高いことを最も重視している。各部の仕様変更に対して理論通りに性能が変えられるか、また、後に実施する振動台実験に対して最適な力学特性を策定することを目的としてダンパの単体加力試験を実施する。

(2) 提案する構造システムの特徴である変形分布の制御について、これまではフレームモデルにメカニカルリンク機構を導入することで計算を行ってきた。本研究ではより実践的にせん断質点系モデルに直接挿入可能な力学モデルを構築する。これにより、パラメトリックな解析的検討を容易に行えるようになるためダンパの最適な配置方法や必要性能を策定する。

(3) 小型または実大の多層フレームを用いて提案する構造システムの制振効果を検証する。ダンパは上下層間の損傷集中を抑制することを目的として設置する場合と、揺れ振動を抑制することを目的として設置する場合の2通りについて検討する。また、2.で構築した力学モデルを用いて解析的検討を行い実験結果と比較することで、力学モデルの精度検証を併せて実施する。

4. 研究成果

(1) 提案するダンパの基本性能と高性能化

①提案するダンパの基本性能を検証し、力学特性に関する性能設計法を整備するために片ロッド形式の小型ダンパを製作し、単体加力試験を実施した。本研究では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」と定義しており、理論的に慣性質量を大きくするためにはチューブを長くすることで容易に達成できる。そこで、全長1.6[m]のナイロンチューブ、ウレタンチューブ、銅チューブのそれぞれ用いてリンクチューブの剛性が力学特性に与える影響について検証した。各チューブを設置した試験体に振動数と振幅をパラメータとした正弦波を入力したところ、最も柔らかいナイロンチューブを使用した場合には加振速度が大きくなるとリンク効果によるピストン変位の追従性が悪くなり位相遅れを生じるだけでなく、ダンパ単体の荷重変形関係が負剛性を発揮しなくなることが明らかになった。一方で剛性の高い銅チューブを使用した場合には図3に示すように良好なリンク効果を発揮することで2つのピストン変位が完全に一致しておりダンパ単体の荷重変形関係は明瞭な負剛性を発揮することを確認できた。以上の試験結果より、ダンパに大きな抵抗力を発揮させ、良好なリンク効果を発揮させるためにはチューブには硬い素材を用いる必要があることが明らかとなった。

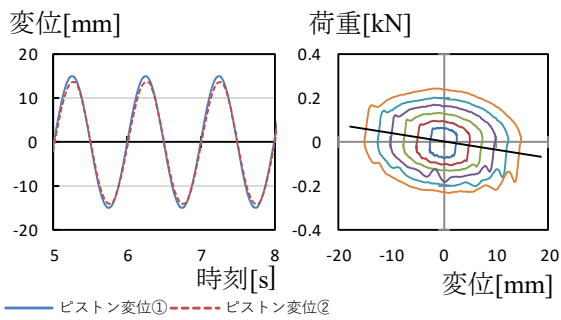


図3 基本性能試験結果(銅チューブ、1.0[Hz])

②次いで、ダンパの高性能化を実現するために容易に慣性質量を大きくできる手法として作動流体の密度を変更した場合について同様に単体加力試験を実施した。検討に用いた作動流体は、一般的な鉱物系の作動流体で密度 $0.84[\text{g}/\text{cm}^3]$ の鉱物油、フッ素系の作動流体で密度 $1.88[\text{g}/\text{cm}^3]$ のフッ素オイル、無害な比重分離用溶液として用いられている密度 $3.00[\text{g}/\text{cm}^3]$ の重液の三種類とする。なお、リンクチューブには長さ $1.6[\text{m}]$ の銅チューブを用いた。各種正弦波を入力した結果、図4に示すように理論通り流体密度を大きくすることで負剛性が大きくなることを確認できた。なお、図3に示した荷重変位関係はフッ素オイルを封入した場合の試験結果である。しかし、重液ほどの高密度流体は非常に高価であり入手が難しい。また、フッ素オイルについても動粘度が他の流体と比べて大きく粘性減衰力が大きくなることから高性能化には非効率となる問題が挙げられる。

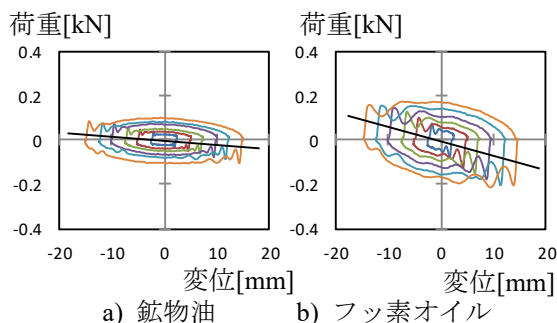


図4 流体密度の違いによる比較 (1.0[Hz])

③高密度な流体を封入した場合においても、流体動粘度が大きい場合には効率的に高性能化を達成できない。そこで、流体動粘度の温度依存性を利用して動粘度を低減することで負勾配を変えずに粘性減衰力のみを低減する手法を提案する。ダンパには $1.6[\text{m}]$ の銅チューブを使用するものとし、作動流体にはフッ素オイルを用いる。この時、チューブを加熱することで流体温度を調整することで、 30°C 、 40°C と流体温度を上昇させる。図5に流体を加熱した時の正弦波を入力した時の荷重変位関係を示す。負勾配の傾きは保ちながら粘性減衰力による履歴の膨らみのみが小さくなっていることを確認できる。

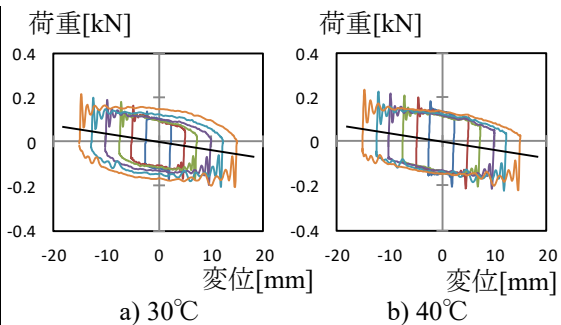


図5 流体温度の比較(フッ素オイル、1.0[Hz])

④これまでにチューブ材質、流体密度、流体温度に関する高性能化手法を検討した。最後に、各手法を適用した場合の力学特性の定量的評価手法を確立するために、各正弦波を入力した時の弾性ひずみエネルギーと履歴吸収エネルギーを用いて等価粘性減衰定数を算出する。高性能化の定義は「粘性減衰力に対する慣性力の比率を相対的に大きくすること」であるので、等価粘性減衰定数が小さく評価されるほど意図通りに高性能化したと判断できる。まず、流体密度については重液のように高比重でありながら低動粘度の作動流体を封入することで等価粘性減衰定数は小さくなり高性能化手法として効果的であることを確認できる。一方で、密度は大きくとも流体動粘度が大きくなるフッ素オイルについても流体を加熱することで等価粘性減衰定数は重液と同程度まで小さくなることから高性能化手法として有効であると判断できる。このように、等価粘性減衰定数を算出してダンパの性能を評価することで負勾配と粘性減衰力の両者を同時に評価することが可能となった。

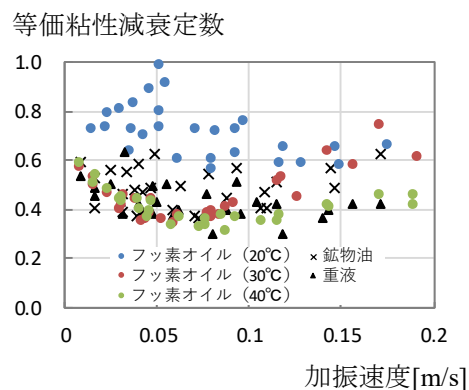


図6 高性能化の定量的評価

(2) 小型鉄骨2層フレーム振動台実験

①1.で検証したダンパの高性能化手法として、高密度流体を封入したダンパを図7に示す小型2層鉄骨フレーム試験体の上下層間の損傷集中を抑制することを目的として設置した場合の振動台実験を実施した。同様な試験体に対して流体密度の異なるダンパを設置したところ、地震動入力時の最大層間変形低減効果は流体密度の違いによらず同程度とな

ったが、最大応答加速度については高密度流体を封入した場合の方が低減効果は大きかった。つまり、慣性質量効果による負剛性を効果的に取り入れることで加速度と変形のトレードオフの関係を緩和できたということであり、意図通りの制振効果が得られたことになる。また、ダンパを設置しない試験体は2層に対して1層が極めて大きく変形する損傷集中が生じたが、ダンパを設置することでリンク効果により各層の変形を一様化することで損傷集中の抑制にも効果的であることを確認した。

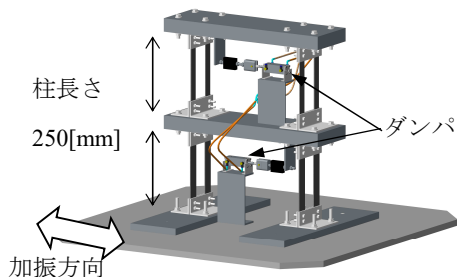


図7 小型2層鉄骨フレーム振動台実験パース

②先に実施した振動台実験において提案する構造システムが意図通りの制振効果を発揮することは確認できたが、各層のシリンダにおける荷重変形関係に着目すると一方の層では正の剛性、もう一方の層では大きな負剛性を発揮していることが明らかになった。これは、ダンパの発揮する見かけの剛性は慣性質量効果による負勾配だけではなく、リンク機構も見かけの剛性を発揮するからだと考えられる。この時、各層のダンパ荷重を足し合わせて描く荷重変形関係にはリンク機構の影響は現れておらず、単体加力試験で見られたような明瞭な負勾配と楕円形を描くことから、リンク機構の抵抗力はリンクされた層同士の力を足し合わせることで打ち消される性質があると判断できた。この、リンク機構の抵抗力と主構造の剛性分布の関係については今後さらなる検討が必要である。

(3) 解析モデルの構築と解析的検討

2.で実施した小型振動台実験を解析的に検証するためにせん断質点系モデルにリンク機構を組み込んだ力学モデルを構築する。リンク機構は上下層間の変形差に比例して抵抗力を発揮する機構であり、容易にせん断質点系モデルの運動方程式に組み込むことが可能である。また、上記の力学モデルを用いることで2.で実施した小型2層鉄骨フレーム振動台実験を精度よく模擬できることを確認している。次いで、実大の構造物を想定した時の制振構造システムに必要なダンパ性能に関するパラメトリックな検討を行った。各階の主質量に対して0.5倍の慣性質量、各層の主構造に対して0.5倍のリンク剛性があれば意図通りの加速度低減効果と変形制御効果が得られることを明らかにした。

(4) 縮小2層フレーム振動台実験

①図8に示す階高を1500[mm]に縮小した縮小2層フレームの振動台実験を実施した。主構造は摩擦式エネルギー吸収機構を内蔵する耐力壁を設置した薄板軽量形鋼造とした。本試験体の各層に提案する大型のダンパを設置することで加速度と変形の両者の低減効果が得られるか検証した。なお、ダンパを設置しない場合の主架構のみの加振では2層に対して1層の変形が大きくなることを確認している。低レベルのホワイトノイズの入力から算出した伝達からはリンク効果による2次モードの影響を取り除く効果や、粘性減衰効果による1次モードのピーク低減効果を確認できたが、極めて強い地震動入力したところ意図した通りのリンク効果や加速度低減効果を得ることができなかった。

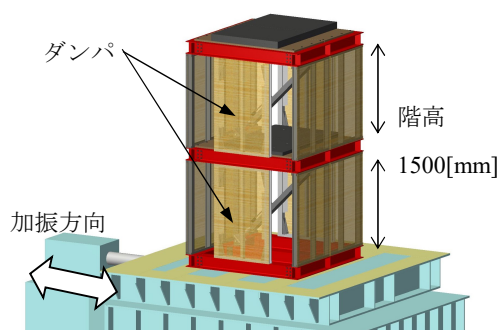


図8 縮小2層フレーム振動台実験パース

②振動台実験で意図した制振効果が得られなかった原因を追究するために、振動台実験で使用したダンパの単体加力試験を改めて実施した。実験前に行った単体加力試験においては良好なリンク効果を発揮していたが、振動台実験後に行った単体加力試験ではリンク効果が非常に小さく追従側のピストン変位が追従しないことが明らかとなった。振動台実験において試験体にダンパを設置する時に流体が漏れ出したことで、ダンパ及びチューブ内に多くの空気が混入したことがリンク効果の低減に影響したと推測できる。

③振動台実験後に行ったダンパの単体加力試験をもとに空気混入時のダンパの力学モデルを構築して解析的検討を行ったところ、解析結果は実験結果を概ね精度よく模擬できることが明らかになった。これにより、振動台実験において意図した通りの制振効果が得られなかった原因が多量の空気混入によるものであると断定できた。制振構造システムの実用化に向けて設置作業の簡易化や空気混入のリスクを小さくする必要があることから、これらに対処できる手法を提案する必要がある。しかし、解析的検討によりダンパが想定通りの力学特性を発揮した場合には意図通りの加速度低減効果やリンク効果による変形の一様化と損傷集中の抑制に効果を発揮することを確認している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 渡井 一樹、曾田 五月也、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、査読有、Vol.82、No.737、2017.7【掲載決定】
- ② 曾田 五月也、渡井 一樹、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、査読有、Vol.81、No.725、pp.1071-1079、2016.7

[学会発表] (計5件)

- ① 渡井 一樹、曾田 五月也、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にする場合、日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集、福岡大学(福岡県福岡市)構造II、CDROM-21132、pp.263-264、2016.8
- ② 渡井 一樹、曾田 五月也、金井佳吾、高性能リンク式流体慣性ダンパの開発、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2016、山口大学(山口県宇部市)、USB 論文集 233、2016.08
- ③ 曾田 五月也、渡井 一樹、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(関東)学術講演梗概集、東海大学(神奈川県平塚市)、構造II、CDROM-21341、pp.681-682、2015.9
- ④ 曾田 五月也、渡井 一樹、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、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015 USB 論文集 320、弘前大学(青森県弘前市)、2015.8
- ⑤ 曾田 五月也、渡井 一樹、瀬戸 純平、矢野 遥、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(近畿)学術講演梗概集、神戸大学(兵庫県神戸市)、構造II、CDROM-21404、pp.807-808、2014.9

6. 研究組織

(1)研究代表者

曾田 五月也 (SODA, Satsuya)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：70134351

(2)研究分担者

宮津 裕次 (MIYAZU, Yuji)
広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教
研究者番号：70547091

(3)連携研究者

(4)研究協力者

渡井 一樹 (WATAI, Kazuki)
早稲田大学・理工学術院・助手
研究者番号：30778189