

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06284

研究課題名(和文)粘性マスダンパー付き免震建物の最適設計手法開発と振動台実験による有効性の検証

研究課題名(英文) Feasibility study on base isolated structure incorporated with viscous mass damper

研究代表者

池永 昌容 (Ikenaga, Masahiro)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：50552402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：粘性マスダンパーを免震構造物に導入するための基礎的検討として、(1)実物ダンパーの加力実験、(2)数値解析によるダンパーの具体的な設計事例、の2点を研究した。実験ではリアルタイムハイブリッドシミュレーション手法を用い、ダンパーについては動的アクチュエータを用いた動的加力実験で、ダンパーを導入する免震建物部分は数値解析で並行して実験および計算を実施した。その結果、ダンパーを建物モデルに入れた場合の挙動と同じ変位を実験で与え、非線形性能について把握した。数値解析では4種類のダンパー設計変数を最適設計手法を利用して決定しつつ、一般的なダンパーとの比較検討を通して、粘性マスダンパーの優位性を論じた。

研究成果の概要(英文)：Feasibility study on viscous mass damper for base isolated structures are considered. Two big topics are done, first the dynamic loading test by real-scale viscous mass damper, second numerical analysis for damper design. In the dynamic test, real time hybrid simulation is adopted to know the damper behavior under seismic events. The result shows that the damper behavior shows strong non-linearity and the characteristics becomes clear for the analysis model. On the numerical analysis study, four damper parameters are decided by the optimum design method. The optimized viscous mass damper are compared with the ordinary oil damper and the advantages of the viscous mass damper are discussed. The results indicate that the optimized viscous mass damper incorporated into the base isolated structures shows better result as to not only the seismic control but also the isolated capability.

研究分野：建築構造

キーワード：免震構造 粘性マスダンパー 最適設計手法

1. 研究開始当初の背景

免震構造の普及する中で、長時間長周期地震動の発生が危惧されている。免震構造の目的は上部構造の床応答加速度の低減と免震層変位の抑制が目的となる。一般的にはオイルダンパーが用いられるが、大地震を想定した設計がなされており、中小地震時の免震性能や長周期地震時・巨大地震時の変形抑制性能が確保されているとは言えない。

また免震構造の設計では、特性の上で大きくなる免震層変位についてはしばしば設計上のクライテリアとして設定されるが、実務設計において上部構造の加速度が取りざたされることはそれほど多くない。ただし免震性能とは一般的に免震構造よりも上部の建物部分に作用する衝撃の緩和であり、具体的には上部構造の床応答加速度に対する評価が必要となる。

2. 研究の目的

近年普及が著しい免震構造物を対象に以上の背景をふまえて、巨大地震や長周期地震に対しても免震層変位を低減しつつ、上部構造の免震性能を保持できる減衰装置を検討した。申請者らは特に回転慣性質量と粘性減衰を並列に配置し、それらに軸力制限機構を直列結合した粘性マスダンパー（以下、免震用粘性マスダンパー）を検討している。既往研究から、免震用粘性マスダンパーは4種類のダンパー定数を独立して設計できるため、既存の粘性系ダンパーと比べてダンパー設計は煩雑であるが、免震性能を損なわずに高い減衰性能を実現できることが示されている。本研究では、最適設計手法を利用した免震用粘性マスダンパーの設計手法提案、免震用粘性マスダンパーを免震層に設置した3層フレーム縮小試験体を用いた振動台実験による動的特性と制振効果検証、の2項目を目的とした。ただし、振動台実験については当初利用を想定していた振動台が故障したため、代替案として振動台実験の一部を動的実験で行い、その他の要素をすべて数値解析で補うリアルタイムハイブリッドシミュレーション(以下、RTHS)による検討を進めた。

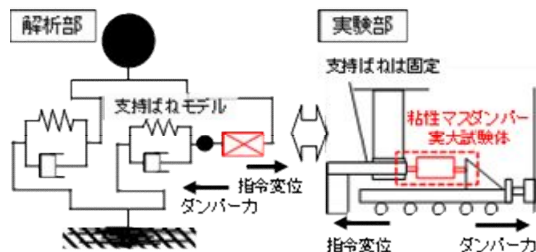


図1 解析モデルとRTHS

3. 研究の方法

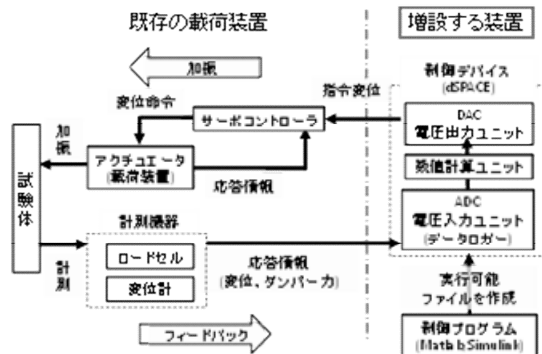
研究の項目は大別すると以下の3種類に分かれている。(1) 実験のためのRTHS実験環境の構築、(2) RTHS実験による粘性マスダンパーの性能評価、(3) 最適設計手法を用いた

粘性マスダンパーの設計と性能評価。

(1) 実験のためのRTHS実験環境の構築

免震構造の粘性マスダンパーについての数値解析をまずは進めた。数値解析では、まず免震構造を図1に示す1質点系に置き換えた状態での解析を行い、設計変数が多い粘性ダンパーの特性をおおよそ把握した。その後、RTHS実験を実物大ダンパーを用いて実施した。RTHS実験を行うに当たっては図2に示す概略図のシステムを第一に構築し、その実験結果が妥当か否かを数値解析と照合した上で目的となる粘性マスダンパーに対する実験を行った。

図2 RTHSの概略図



RTHSの制御環境は、既存の載荷装置に増設する形で図4のように構築する。電圧信号を出力、計測する装置としてはdSPACE社製リアルタイムコントローラDS1202を使用し、制御コードはホストコンピュータ上のソフトウェアMATLAB/Simulink環境で作成した。図中の指令変位が出力される際、載荷装置の伝達特性により、解析部と実験部との間に位相差や振幅差が生じ、制御の精度が悪くなるとともに、場合によっては不安定になる。この問題を回避するため、載荷装置の伝達特性を補償するfeed-forward controllerを設ける。本載荷装置は変位制御であるため、指令変位に対する計測変位の伝達関数が補償対象である。実大ダンパーを設置した状態で、バンド幅0-5Hzのホワイトノイズを指令変位として加振し、応答倍率の振幅特性および位相特性を作成した。以上の振動制御理論を利用したシステム開発によって、本研究で用いる粘性マスダンパーに対するRTHS実験を可能とした。

(2) RTHS実験による粘性マスダンパーの性能評価

試験体および載荷装置の全景を図3に示す。実大試験体は鋼材キャンチレバーとゴムユニットからなる支持ばねに、ダンパー部を接続することで構成する。加振機には最大荷重±3000kN、最大振幅±0.1m/s、最大速度±0.3m/sの動的アクチュエータを使用している。用いた粘性マスダンパーの諸元は、付加質量で2500トン、付加質量と支持ばねで構成される振動系の固有周期は2.8秒となる振動

系とした。また粘性要素については、付加振動系における減衰定数が 20%となるように設定している。

用いた粘性マスダンパーをもとに、RTHS の解析部での建物モデルを設定した。調和地動における変位応答倍率のピーク値を最小化する最適応答制御法を使用し、試験体の線形解析モデルに対して定点理論解を満たしてダンパーが挙動する 1 質点系建物モデルを設計した。その結果、建物モデルとしては固有周期 3 秒、建物質量に対する付加質量の比は 7.8%となっている。

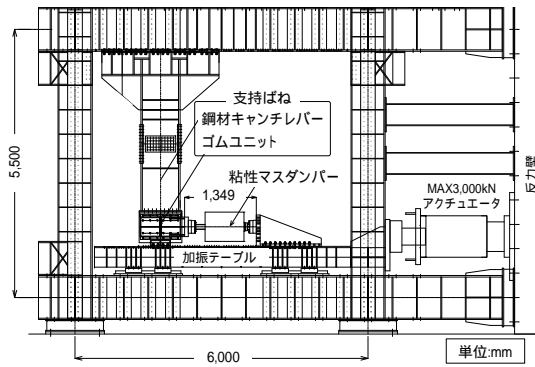


図 3 RTHS 実験の実験装置全景

(3) 最適設計手法を用いた粘性マスダンパーの設計と性能評価

最適設計手法を用いる検討では、実験は行わずに数値解析のみでの検討とした。検討対象建物は 20 階建ての免震建物として、免震層に本研究で用いている粘性マスダンパーを導入した場合の応答を分析した。また、比較対象としては一般的に実用されているリリーフ付きオイルダンパーも同時に検討し、粘性マスダンパーの優位性について論じた。

粘性マスダンパーの解析モデルとしては、図 4 に示すような非線形要素を含む解析モデルとし、(2) で得られた知見を利用した解析モデルを構築している。なお粘性マスダンパーの設計変数は非線形次数を含めると 5 種類あるため、この 5 種類については最適設計手法の中でもラインサーチ法で求めたものを用いた。

建物モデルとしては、免震層と上部 20 質点系の計 21 質点系、総質量 20495ton、1 次固有周期は免震建物時 4.13 秒、基礎固定時 1.19 秒の免震中層建物とする。免震層には、簡単のために粘性マスダンパーのみを導入した場合を検討している。

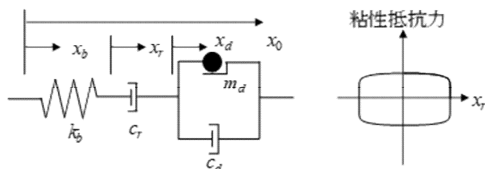


図 4 粘性マスダンパーの解析モデル
4. 研究成果

(1) 実験のための RTHS 実験環境の構築、本研究で用いた載荷装置は変位制御であるため、指令変位に対する計測変位の伝達関数が補償対象である。実大ダンパーを設置した状態で、バンド幅 0-5Hz のホワイトノイズを指令変位として加振し、応答倍率の振幅特性および位相特性を図 5 のように作成した。さらに s 領域における低次関数で両特性を近似し、式(1)を算出した。

$$TF(s) = \frac{7.007 \times 10^5}{s^2 + 2.591 \times 10^4 s + 7.007 \times 10^5} \quad (1)$$

式 (1) の逆数である feed-forward controller は、分母次数が分子次数より小さく因果律を満たさない。そこで Taylor 展開を用い、ステップ目における逆伝達関数からの出力値を、式(2)のように離散的に導出するものとする。

$$u_i = Ax_i + Bx_{i-1} + Cx_{i-2} + Dx_{i-3} \quad (2)$$

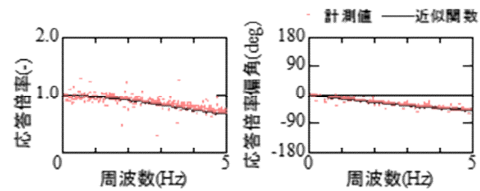


図 5 載荷装置の伝達特性と近似関数

(2) RTHS 実験による粘性マスダンパーの性能評価

El-Centro 波を入力地震動として入れたときの実験結果を図 6 に示す。

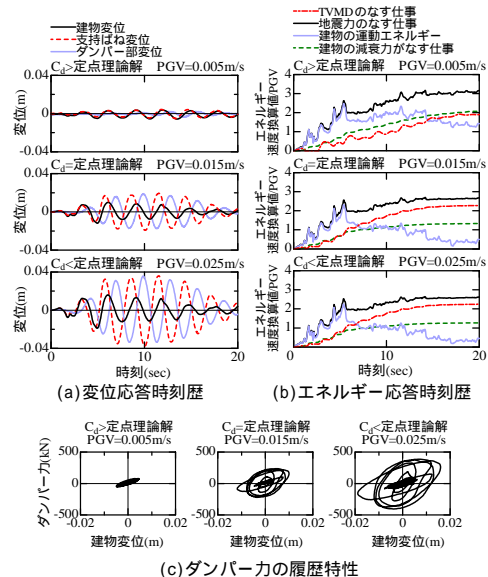


図 6 付加減衰係数ごとの実験結果

El Centro 波の実験結果について、付加減衰係数 Cd が定点理論解付近の結果を基準に、PGV が小さく Cd が高い場合、逆に PGV が大きく Cd が下がる場合の応答を比較する。

各要素の変位応答時刻歴、エネルギー応答時刻歴の内訳、およびダンパー力の履歴形状

を図2に示す。なお、エネルギーは速度換算値をPGVで基準化して記載する。

定点理論解に比べ付加減衰係数が高い場合は、ダンパー部が動きにくく、主系変位に対しダンパー部変位が増幅されていない。履歴におけるエネルギー吸収も第1、3象限に限られ、粘性マスダンパーのなす仕事の割合も低下している。一方、PGVが大きく付加減衰係数が低下する場合は、主系変位に対しダンパー部変位が大きく動き、粘性マスダンパーのなす仕事の割合は定点理論解時とほぼ等しい。

図7に付加減衰係数の非線形性が最大応答値に及ぼす影響を検討するため、PGV-最大主系変位、PGV-最大ダンパー部変位関係を、地震波ごとに重ねて記す。

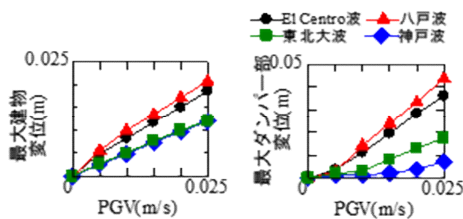


図7 付加減衰係数ごとの実験結果分析

地震動の種類に関わらず、PGVが小さく付加減衰係数が高い場合に、ダンパー部が動きにくく、粘性マスダンパーの変位低減効果が劣化する。一方、レベルが大きく付加減衰係数が低下する領域では、主系変位とダンパー部変位が一定の増加傾向を示し、制振性能が確保されている。

(3) 最適設計手法を用いた粘性マスダンパーの設計と性能評価。

ダンパーの設計変数をすべて変動させて、最適設計値を求めるために最大応答値をパレートフロントで表現した。時刻歴解析結果のうち、繰り返しが多く海洋型地震動に分類される三の丸波(模擬地震動)での解析結果を図8に、直下型地震動に分類される鷹取波(1995年兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録)での解析結果を図9に示す。図から、それぞれの地震動において粘性マスダンパーは比較対象であるリリース付きオイルダンパーと比べて同じ最大変位であれば床応答加速度が小さい、もしくは、同じ床応答加速度であれば最大変位が小さいといった、免震性能の高いプロットが複数見られることがわかる。このことは、本研究で扱っている粘性マスダンパーは設計変数が多いため、免震・制振性能にリリース付きオイルダンパーと比べてより広い幅を持たせることが可能であることを示している。

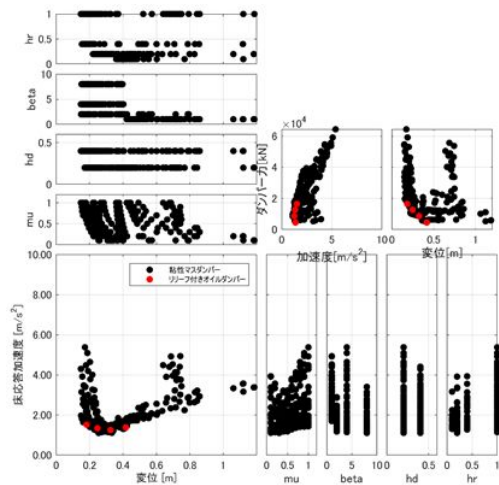


図8 三の丸波入力時のパレートフロント解

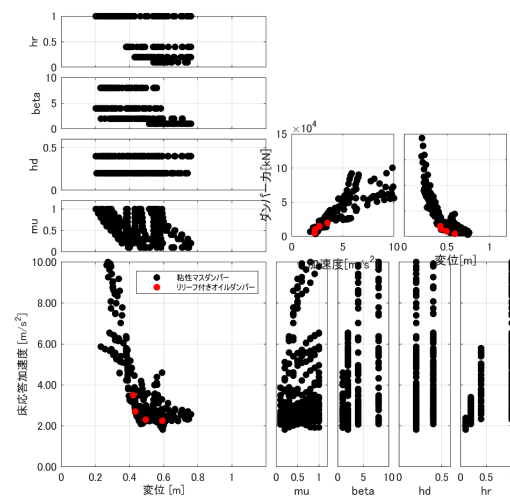


図9 鷹取波入力時のパレートフロント解

以上、研究成果として得られた知見を以下にまとめる。

- ・振動台の代替実験として、リアルタイムハイブリッドシミュレーション実験を行うために、その実験環境を構築した。振動制御学の既往の知見と実験装置を利用しつつ、数値解析と動的加力実験を同時に実施するRTHS実験の実施環境を構築することができた。

- ・実物大の粘性マスダンパーに対するRTHS実験の結果、粘性マスダンパーは想定の手動を示すこと、またRTHS実験によってダンパー単体加振実験ではあるものの、建物部分の手動を反映した加振が可能であることがわかった。また、実物大ダンパーの非線形特性について把握した。

- ・数値解析のみでの多質点系建物を検討することで、実験では検討することができなかった制振性能と免震性能の両面について、既往の実用ダンパーと比較検討した。その結果、粘性マスダンパーは設計変数が多いものの、適切にそれらを設定することで高い性能を示すことを示した。

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1件)

谷口 洵、池永 昌容、中南 滋樹、五十子 幸樹、井上 範夫、同調粘性マスダンパー制振システムの特性変動を検討する実験環境の構築、日本建築学会技術報告集、査読有、23巻、2017、815-820
DOI:.org/10.3130/aijt.23.815

〔学会発表〕(計6件)

池永 昌容、谷口 洵、中南 滋樹、五十子 幸樹、井上 範夫、同調粘性マスダンパー制振システムの特性変動が制振性能に及ぼす影響 その1~その2、日本建築学会大会、2017

佐々木 裕一、黒澤 祐、谷口 洵、五十子 幸樹、池永 昌容、菅野 秀人、因果的デジタルフィルタ制御を適用したMRダンパーによる免震建物の地震時応答変位制御 その1~その2、日本建築学会大会、2017

南 遼太、護法 亜弥、池永 昌容、五十子 幸樹、地震動入力レベルを考慮した粘性-マス直列型ダンパー免震システムの多目的最適設計、日本建築学会大会、2016

池永 昌容、谷口 洵、黒澤 祐、五十子 幸樹、菅野 秀人、PHILLIPS Brian、非線形性を有するダンパーに対するリアルタイム・ハイブリッドシミュレーションの適用、日本建築学会大会、2016

護法 亜弥、菊地 淳哉、池永 昌容、五十子 幸樹、井上 範夫、粘弾性要素支持された粘性マスダンパーを有する免震構造物の地震時応答変位制御 その1 ダンパー概要とその基本応答性状、日本建築学会大会、2015

菊地 淳哉、護法 亜弥、池永 昌容、五十子 幸樹、井上 範夫、粘弾性要素支持された粘性マスダンパーを有する免震構造物の地震時応答変位制御 その2 設計法と地震時応答制御、日本建築学会大会、2015

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

池永 昌容 (IKENAGA, Masahiro)
関西大学・環境都市工学部・准教授
研究者番号: 50552402

(2)研究分担者

五十子 幸樹 (IKAGO, Kohju)
東北大学・災害科学国際研究所・教授
研究者番号: 20521983

(3)研究協力者

井上 範夫 (INOUE, Norio)
東北大学・名誉教授
研究者番号: 50250725