

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560672

研究課題名(和文)パルス性地震動と長周期地震動に対する免震構造の制御

研究課題名(英文)Structural

研究代表者

藤谷 秀雄 (Fujitani, Hideo)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10344011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：パルス性地震動と長周期地震動に対する免震構造の安全性と機能性を高めるために、床応答加速度と応答変位を低減することを目的とした。磁気粘性流体(MR流体)を用いて粘性を可変にできる回転慣性質量ダンパー(MR回転慣性質量ダンパー)を製作し、解析およびリアルタイムハイブリッド実験によって、制御効果を検証した。

セミアクティブ制御により、標準的な入力地震動の他、断層近傍のパルス性地震動や長周期地震動など建築基準法の水準を超える多様な地震動に対して、最大床応答加速度を平均6%程度、最大応答変位を平均28%程度低減するなど、床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を低減できることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)： A damper developed by authors uses both the mass effect by rotary inertia and the variable damping effect by magnetorheological fluid. The negative spring property by inertia mass and significant energy absorption by MR fluid are confirmed. Authors intend to carry out practical realization of rotary inertia mass damper using MR fluid. In this research, through the real-time-hybrid experiment with the use of "MR rotary inertia damper", the seismic response properties are discussed by changes in the parameters on building structure. From the knowledge obtained by the experiment, the authors propose the semi-active control method focused on input velocity of earthquake.

Then, in comparison with passive control, it has been confirmed the effects of the displacement reduction in the all case of experiments performed in this research. Especially, in the case of near-fault earthquake ground motion, it has been confirmed both floor response acceleration and displacement were reduced.

研究分野：建築構造

科研費の分科・細目：建築材料・構造

キーワード：免震構造 パルス性地震動 長周期地震動 MR慣性質量ダンパー パッシブ制御 セミアクティブ制御

1. 研究開始当初の背景

1994年のノースリッジ地震を契機に、内陸型地震の断層近傍で発生するパルス性地震動による免震構造の挙動に警告を發したことで、Heatonらの研究は有名であった。しかし、そこで扱われている免震構造のモデルは日本では非現実的なもので、必ずしも一般論として適切な議論にはなっていないが、問題点を指摘したことは評価できる。1995年の兵庫県南部地震以後でも、断層近傍に免震構造の建物はなかったが、上町断層による被害想定も実施され、断層近傍の建物の応答特性が研究されている。

免震構造においては、応答変位を低減するためにダンパーを付加すると、免震構造の特徴である揺れの穏やかさが損なわれる(床応答加速度が上昇する)ことは自明である。このようなパルス性地震動が作用する免震構造に対して、床応答加速度を上昇させないで、応答変位を低減する方法が示されていない状況であった。

一方、長周期地震動に対しては、2003年9月の十勝沖地震による地震被害を契機に、関係学会の共同の研究が実施され、日本建築学会からも研究成果が公表されている。また防災科学技術研究所が中心となって、免震構造の長周期地震動作用時の室内の什器等の挙動について研究が進んでいた。これに対してセミアクティブ制御によれば、床応答加速度を上昇させないで応答変位を制御する可能性は申請者らも示していたが、パッシブ制御によれば明確な方法が示されていない状況であった。

2. 研究の目的

パルス性地震動および長周期地震動など、建築基準で想定される水準を超える地震動に対して、免震構造の床応答加速度を上昇させないで、応答変位を低減する制御方法を提案することを目的とした。

パッシブ制御に用いられるダンパーには、履歴系ダンパー、粘性系ダンパー、回転慣性系ダンパーなどがあるが、これらをそのまま使用してパルス性地震動や長周期地震動に対応しようとする、ダンパー量を増やす結果になる。そうすると再現期間50年程度のレベル1地震動および再現期間500年程度のレベル2地震動作用時の機能維持性能を低下させる可能性がある。大変形領域だけで機能する新しいタイプのパッシブダンパーまたはセミアクティブダンパーを提案し、それによって床応答加速度を許容範囲に抑制した上で変位制御を行う方法を提示する。このとき、既存建物にも増設できることが望ましい。

また上部構造が、擁壁に衝突することも起こりうる。衝突した際には機能維持は困難となるが、上部構造の安全性は確保するための考え方とそれを確認する解析方法を提案する。

3. 研究の方法

以下の方法で研究を実施した。

(1) パッシブおよびセミアクティブ制御に要求される性能の決定

まず文献調査によって、想定すべきパルス性地震動と長周期地震動の波を選定し、それらの地震動波に対する免震構造のクライテリアを設定し、そのクライテリアを満足するために必要とされるパッシブおよびセミアクティブ制御に要求される性能を、解析研究によって決定する。

(2) 回転慣性系を用いたセミアクティブ制御装置と制御アルゴリズムの開発・設計

(1)の段階で得られた要求性能を満足できるセミアクティブ制御装置の設計とそれをコントロールする制御アルゴリズムを開発する。このとき、初期段階の解析研究の結果、回転慣性機構が床応答加速度低減に有効だと考えたので、それを念頭において研究した。

(3) 解析とリアルタイム・ハイブリッド実験による制御方法の検証

(2)の結果に基づき、セミアクティブ制御装置を製作する。これを過去の科学研究費で製作した高速加振装置で性能検証を行った。その上で、過去の科学研究費で構築したセミアクティブ制御のリアルタイム・ハイブリッド実験システムを用いて、制御方法の妥当性の検証を行った。リアルタイム・ハイブリッド実験(図1)は、構造部分をモデル化して解析を行い、開発中のダンパーを高速試験器で加振することで、モデル化誤差と時間遅れの影響を反映した検証が行える。

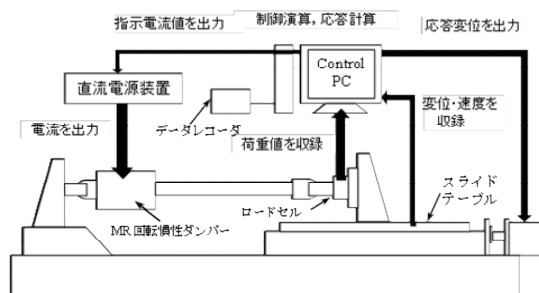


図1 リアルタイム・ハイブリッド実験システム

(4) 免震構造が擁壁に衝突した際のフェイルセーフの検討

制御を行っても、想定以上の地震動が作用する可能性がある。免震層の変形が十分に制御できなかったときは、擁壁に衝突することが考えられる。したがって、擁壁に衝突した際に上部構造に与える損傷を解析で予測する。

4. 研究成果

(1) 要求性能と実現可能性

本研究は、免震構造の床応答加速度を上昇させないで、応答変位を低減する制御方法によって、建物の建設地の地震環境に応じて、

パルス性地震動と長周期地震動のいずれに対しても適用可能な制御方法を提案することを目的とした。

まず想定すべきパルス性地震動と長周期地震動を選定し、それらの地震動に対する免震構造の要求性能を検討したところ、パッシブ制御に用いられるダンパーの中ではオイルダンパーの有効性が確認できたので、より有効にオイルダンパーを使用する方法を研究した。再現期間 500 年程度の地震動作用時の機能維持性能を低下させない方法として、オイルダンパーをある境界変位より大きい大変形領域のみで作動させることで床応答加速度を上昇させない可能性が見いだされた。しかしより厳しく変位低減を行うためにはオイルダンパーの量を増やす必要があり、床応答加速が上昇する結果となった。

そこで回転慣性を付加することによって床応答加速度を低減できる可能性を検証した。回転慣性を常時作用させることで、床応答加速度が低減され、境界変位以上でオイルダンパーを稼働させることと併せて、より良好な結果がえられることが明らかになった。回転慣性と粘性抵抗の効果を定量的に評価したところ、回転慣性が大きくなればなるほど応答変位の低減効果が大きい、床応答加速度が増し、それに粘性抵抗を適度に加えることによってより適切な応答低減が図れることが明らかになった。

さらに粘性抵抗を可変とすることの効果を検証した。磁気粘性流体 (MR 流体) を使用して粘性抵抗を可変とする可変ダンパーを想定して、セミアクティブ制御を行った。その結果、最適制御で制御力を決定し、スカイフック制御のルールによってセミアクティブ制御を実施することによって、良好な結果が得られることがわかった。これに基づいて、次年度で実施する実験に用いるダンパーの設計を行った。

(2) 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパー (MR 回転慣性ダンパー) の製作

製作した MR 回転慣性ダンパーの構造を図 2 に示す。MR 回転慣性ダンパーの出力発生部は、主にボールねじとボールナット、フライホイール (付加質量) および MR 流体と磁場発生機構 (電磁石) で構成されている。ボー

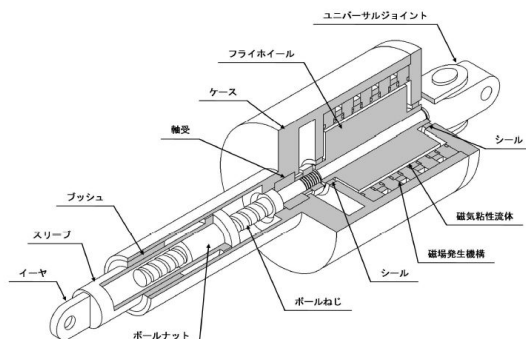


図 2 MR 回転慣性ダンパーの構造

ルねじとボールナットにより直線運動が回転運動に変換され、ボールねじの先に取り付けられたフライホイールが回転することにより回転慣性力が発生し、回転慣性力により増幅された質量効果が、ボールねじを介して直線運動として伝達され、軸方向加速度に比例した慣性力が出力される。フライホイールの実質量 $m (=20\text{kg})$ に対して、増幅機構による等価質量は 27.4ton となり、1370 倍の慣性力を得ることができる。一方、フライホイールが回転することで、フライホイールとケース間の相対変位からせん断速度が生じる。これにより、慣性力と同時にフライホイールの周囲に充填された MR 流体自身のせん断流れに対する抵抗による減衰力を得ることができる。

MR 流体は磁性体粒子を液体中に分散させたもので、図 3 に示すように、この磁性体粒子は磁場を受けると分極して液体中に鎖状の粒子が組織化 (クラスターを形成) するため、せん断流れや圧力流れに対する抵抗が生じて粘度が上昇する。抵抗の大きさは与える磁場の大きさにより異なり、ある範囲まではより強い磁場を発生させるほど見かけの粘度は上昇する。逆に磁場を与えることをやめればクラスターも崩れ、磁性粒子が分散した状態に戻り、抵抗も元に戻るようになる。そのため、図 3 に示すように、磁場が作用していないときはせん断速度とせん断応力は概ね比例関係となり、ニュートン流体の特性を示し、磁場が作用した場合には降伏応力度をもつビンガム流体の特性をもつ。

本実験に用いた MR 回転慣性ダンパーの正弦波加振による単体性能試験を行い、図 4 に正弦波加振試験結果と近似式の比較を示す。図 4 (a) に示すように荷重-変形関係が右下がりになることで加速度を低減する効果が期待され、ループの面積でエネルギー吸収を行うことができる。また試験結果と近似式は概ね良い対応を示すことが確認できる。

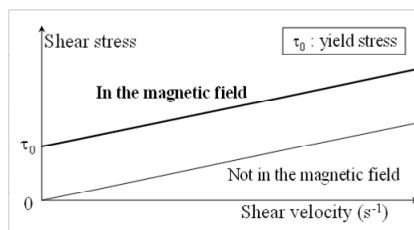
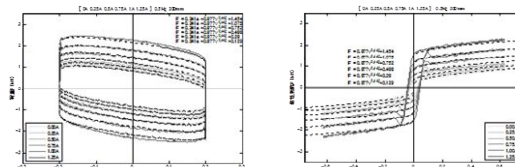


図 3 MR 流体のせん断応力-せん断速度関係



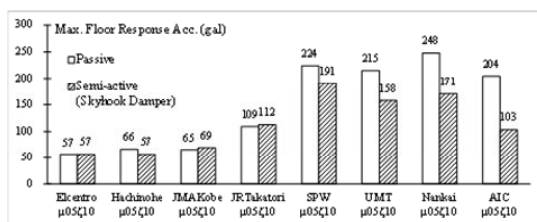
(a) 荷重-変形関係 (b) 荷重-速度関係
図 4 MR 回転慣性ダンパーの力学特性

(3) 解析およびリアルタイム・ハイブリッド実験による検証

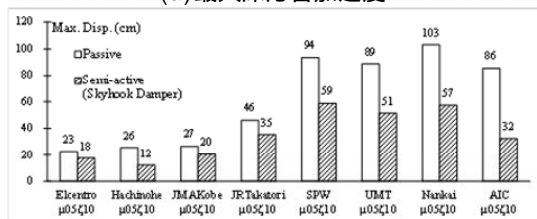
MR 回転慣性質量ダンパーを用いて、パルス性地震動および長周期地震動に対する免震構造の制御効果を、解析およびリアルタイム・ハイブリッド実験によって検証した。

まず固有周期 4 秒の免震構造物モデルを対象として、周波数領域における伝達関数および地震動に対する時刻歴応答の観点から検討を行った。周波数領域における伝達関数から、回転慣性の質量比を適切に設定することにより、減衰を大きくするよりも加速度伝達率および変位伝達率をととも小さくできる領域があるが、質量比と減衰比を調整することにはトレードオフ関係があり、それはパッシブ制御のみでは解消できないことが明らかになった。そこでセミアクティブ制御を行うことにより、適切な質量比および減衰比を取ることにより、特に周期 1~2 秒程度に大きな振幅を持つようなパルス性地震動に対しては、床応答加速度を効果的に減少させることができた(図 5)。

また各種の入力地震動に対するセミアクティブ制御効果を確認したところ、最大床応答加速度を平均 6%程度、最大応答変位を平均 28%程度低減することができた。この結果より、MR 回転慣性質量ダンパーを用いたセミアクティブ制御により、標準的な入力地震動の他、断層近傍のパルス性地震動や長周期地震動など建築基準法の水準を超える多様な地震動に対して、床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を低減できることを示した。



(a)最大床応答加速度



(b)最大応答変位

図 5 パッシブ制御時とセミアクティブ制御時の応答の最大値の比較

(4) 擁壁との衝突

やむを得ず、免震構造の上部構造が擁壁に衝突する場合を想定して、その場合の挙動を解析で検討した。解析モデルは 1 質点系モデル、多質点系モデル、部材モデルの 3 種類とした。衝突に関しては、擁壁に緩衝ゴムがある場合と無い場合の 2 種類のバネでモデル化した。

衝突の有無によって応答を比較すると、衝

突時には大きな衝撃力と床応答加速度が発生した。また緩衝ゴムなしの場合では、緩衝ゴムありに比べて大きな床応答加速度が発生しており、緩衝ゴムを付けることで応答を抑えることができる。

解析モデルによる比較を行うと、部材モデルと多質点系モデルの結果はよく一致しているが、1 質点系モデルは応答結果が異なる。これは、1 質点系モデルでは、上階の挙動を考慮できないためと考えられる。これより、擁壁への衝突を含めた応答解析をする際には、多質点系モデルで行うことが必要といえる。

また建物の質量を $M(\text{kg})$ 、衝突前後の速度差を $V(\text{m/s})$ とすると、衝突前後での運動量の変化量は $M \times V$ となる。この $M \times V$ と衝突時の層せん断力の関係を図 6 に示す。運動量の変化量が同じときは、擁壁の剛性(図 5 の $k(\text{kN/mm})$)が大きくなるにつれて衝突時の層せん断力も大きくなっている。しかし、剛性がある値に達すると層せん断力がある値以上に大きくなっていない、つまり上限があることがわかった。さらに荷重-変形関係に層せん断力(擁壁の剛性 $k=1000(\text{kN/mm})$ の場合)をプロットすると(図 7)、全層で第二折れ点には達しているが、それを大きく超えることはないことから、重大な損傷を起こすものではないことがわかった。

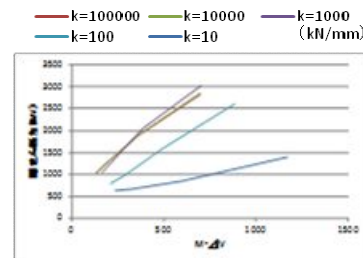


図 6 $M \times V$ - 層せん断力関係

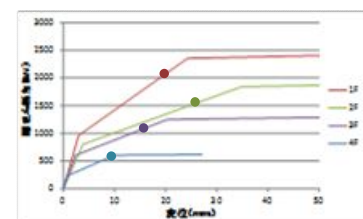


図 7 衝突時の層せん断力と復元力特性

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 5 件)

Yuya Aoyama, Hideo Fujitani, Mai Ito, Yoichi Mukai, Kazuhiko Shibata and Yusuke Sato : Response Reduction by Passive and Semi-active Control of Base-isolation System by Using Magnetorheological Rotary Inertia Damper against Near-fault Pulse and Long-period Ground Motions,

Proceedings of 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, No.184, 2014.7.「査読有」

富澤徹哉、伊藤麻衣、青山優也：リアルタイム・ハイブリッド実験による磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの応答制御、神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要、第5巻、2013. DOI.10.5047/gseku.j.2013.006.「査読有」

富澤徹哉：磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーによるパルス性地震動に対するセミアクティブ制御、神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要、第5巻、2013.「査読有」
DOI.10.5047/gseku.j.2013.005

富澤徹弥、高橋 治、藤谷秀雄、柴田和彦、佐藤友祐：磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの性能試験とその解析的検証、日本建築学会構造系論文集、第78巻、第693号、pp. 1859-1867、平成25年11月.「査読有」

Hideo Fujitani, Yoichi Mukai, Tetsuya Tomizawa, Keiko Hirata, Yuki Mazuka and Hideki Fujii : Response Reduction of Base-Isolation System Against Near-Fault Pulse and Long-Period Ground Motions, Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering, No.2002, 2012.9.「査読有」

〔学会発表〕(計10件)

佐藤友祐、柴田和彦、高橋治、富澤徹弥、藤谷秀雄：MR流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御(その5)減衰力特性並びに粘性の変化、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014.9.12-14、神戸大学.

富澤徹弥、藤谷秀雄、柴田和彦、佐藤友祐：MR流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御(その6)周波数領域におけるスカイフック制御の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014.9.12-14、神戸大学.

佐藤友祐、柴田和彦、高橋治、富澤徹弥、藤谷秀雄：MR流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御(その3)耐久性性能試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.407-408、2013.8.31-9.1、北海道大学.

富澤徹弥、藤谷秀雄、柴田和彦、佐藤友祐：MR流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御(その4)瞬間入力速度による制御方法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.409-410、2013.8.31-9.1、北海道大学.

青山優也、藤谷秀雄、向井洋一：免震層に設置する回転慣性力可変のダンパーのセミアクティブ制御則の提案 25年大会、

日本建築学会大会学術講演梗概集、No.21201、pp.401-402、2013.8.31-9.1、北海道大学.

佐藤栄児、佐々木智大、福山國夫、田原健一、梶原浩一：E-ディフェンスを用いた実大実験による免震技術の高度化(その1)研究プロジェクトの概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、No.21376、pp.752-753、2013.8.31-9.1、北海道大学.

藪田智裕、藤谷秀雄、伊藤麻衣、佐藤栄児、佐々木智大：E-ディフェンスを用いた実大実験による免震技術の高度化(その4)衝突を伴う応答解析と層せん断力の考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、No.21379、pp.758-759、2013.8.31-9.1、北海道大学.

間塚由貴、藤谷秀雄、向井洋一：免震層の過大変形に対するパンプダンパーの組合せによる応答抑制、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、No.21373、pp.745-746、2012.9.12-14、名古屋大学.

富澤徹弥、藤谷秀雄、向井洋一、平田恵子、柴田和彦、佐藤友祐：MR流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御(その1)免震構造への適用とその有効性、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、No.21251、pp.501-502、2012.9.12-14、名古屋大学.

平田恵子、藤谷秀雄、向井洋一、富澤徹弥、柴田和彦、佐藤友祐：MR流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御(その2)セミアクティブ制御、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、No.21252、pp.503-504、2012.9.12-14、名古屋大学.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ：<http://www.lab.kobe-u.ac.jp/eng-scm/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤谷 秀雄 (FUJITANI, Hideo)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10344011

(2) 研究分担者

向井 洋一 (MUKAI Yoichi)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：70252616

佐藤 栄児 (SATO Eiji)
防災科学技術研究所・研究員

研究者番号：60343761

伊藤 麻衣 (ITO Mai)
神戸大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：90647421