MR 流体を用いた可変ダンパの開発

守谷 皇太*1, 市川 慎太郎*1, 岡田 健*2, 小川 隆申*3

Development of a Variable Damper Using MR Fluid

Kota MORIYA^{*1}, Shintarou ICHIKAWA^{*1}, Ken OKADA^{*2}, Takanobu OGAWA^{*3},

ABSTRACT : We developed a variable coefficient damper with a spring immersed in a MR fluid. The properties of this MR damper and its dependency on the magnetic field were experimentally investigated. The result of an experiment to measure the holding capability shows that the MR damper can control the release of elasticity energy by changing the magnetic field. We also conducted a vibration experiment and found that the damping factor and the spring constant increase with the strength of a magnetic field. We applied this MR damper to an isolator. The experimental result shows the isolator gives significant performance under a magnetic field.

Keywords : MR fluid, Damper, Vibration, Frequency Response, Hysteresis Loops.

(Received March 31, 2006)

1. はじめに

近年,大地震が日本ばかりでなく世界各地で頻発して いる。世界を結ぶ通信網は止めることのできない設備と なっており,それら機器設備を地震から守る手だてとし て,各種免震装置が開発されている[1]。免震装置は,1) 加重支持をする部分2)振動を抑える減衰部(ダンパ部) 3)構造物を初期位置にもどす復元機構部によって構成さ れており,とりわけ減衰機構部が重要である。減衰機構 は,パッシブ減衰機構,アクティブ制御減衰機構,および セミアクティブ制御減衰機構の三種類に分類することが できる[1]。本研究では,アクティブ制御よりも簡単な機 構で減衰力を可変にできるセミアクティブ制御減衰機構 を開発することを目的とし,可変減衰を実現するために 磁気反応機能性流体(Magneto Rheological Fluid, MR) を用いた。

現在,磁気反応機能性流体はオイルの中に分散させる 磁性粉末の粒子の大きさにより,磁性流体(粒子径10[nm] 程度),磁気粘性流体(粒子径数[µm]程程),および磁性

*1:工学部機械工学科学部生

(㈱エス・アイ・テクノロジー

*3:理工学部エレクトロメカニクス学科

体と磁気粘性流体を混合した磁気混合流体に分類されて いる[2]。本研究では磁性粉末の大きさ(粒子径2[µm]) から磁場を掛けた場合,比較的強いクラスタを形成し見 かけ上の粘度が大きくなる磁気粘性流体を採用し実験を 行った。ここで磁気粘性流体を用いたダンパをMRダン パと呼ぶ。

免震装置は地震による急激な衝撃力を受け被免震物が 運動をする時のエネルギを吸収しなければならない。エ ネルギ吸収の方法として1)バネによる弾性エネルギ,2) 摩擦エネルギ,3)位置のエネルギなどがある[1]。過去の 研究では、バネと MR ダンパを並列に配置した研究が多 かった[3][4][5]。本研究では、バネをダンパ内に入れ、 そのバネ周りに MR 流体を満たす新しい構造の MR ダ ンパを開発した。この構造は、衝撃力をバネで弾性エネ ルギとして蓄え、そのエネルギを解放する時、MR 流体 の磁場による見かけの粘性抵抗の制御を行うことによっ て、徐々にエネルギを解放させることが期待できる。そ こで我々は、MR ダンパの保持能力、磁場の変化による 減衰力とバネ定数の変化、MR ダンパの性質を調べるた めに保持能力実験と振動実験を行った。

dm063111@cc.seikei.ac.jp (守谷)

^{*2:}工学部機械工学科非常勤講師,

2. 開発したMRダンパの概要

開発した MR ダンパの構造を Fig.1 に示す。コイルバ ネを非磁性体のアクリルシリンダ内の片端に固定し,抵 抗体としてコイルバネの外径に等しい円盤をコイルバネ 他端に取り付けた。その円盤中心に加振用ロッドを垂直 に取り付け,そのロッドがシリンダ軸方向に往復運動す る構造となっている。シリンダ内にはコイルバネ部分が 全て浸るように MR 流体が満たされている。使用した MR 流体は, 溶質である鉄粉の粒子径が 2[μm] でポリ α オレフィンベースを用いたシグマハイケミカル社の E-600 である。シリンダ外部には銅線を密に巻きつけ、 ソレノイドコイルを製作した。コイルに電流を流すこと で、シリンダ円筒の軸方向に一様な磁場を作る。ソレノ イド内磁束密度は、ソレノイドコイルの長さと直径を考 慮した長岡係数を用いて理論値を計算し[6],開発する MR ダンパの大きさを決定した。MR 流体を満たしたソ レノイド内の磁束密度はホール素子を用いて計測した。 MR 流体場の比透磁率は 1.27 である。



Fig.1 Schematic diagram of a MR damper

3. MRダンパの保持能力

MR ダンパ内のバネが縮んだとき, MR 流体の見かけ の粘度によってどの程度バネの復元力を保持できるかを 実験的に調べた。この結果を用いて, 開発するダンパの 形状ならびに磁場の強さを決定した。

バネは線径と形状の違う下記に示す2種類のバネを使 用して実験を行った。バネの線径が ϕ 1.4[mm]でコイル 外径 ϕ 14.0[mm],バネ定数1.04[N/mm]の ϕ バネと, 角型 3×1[mm](幅×厚さ)でコイル外径 ϕ 20.5[mm], バネ定数2.35[N/mm]の角型バネを使用し、2種類の MR ダンパ(以後,それぞれ ϕ バネ MR ダンパ,角型バ ネ MR ダンパと呼ぶ)を製作した。 ϕ バネ MR ダンパの コイルは全長0.069[m]で、銅線を4層に巻き、巻き線 密度は7400[巻き/m]で製作した。角型バネ MR ダンパ のコイルは全長0.08[m]で、銅線を5層にし、巻き線密 度は9250[巻き/m]で製作した。コイルに使用した銅線 は共にポリウレタン樹脂を銅線に焼き付けた UEW(ポ リウレタン銅線, Polyurethane Enameled copper Wire) の ϕ 0.5[mm]である。

Fig.2 に本実験装置のモデル図を示す。本実験では, 自然長の MR ダンパの長さを初期位置とし, MR ダンパ を手で押すことにより圧縮した。圧縮後, コイルに電流 を流し磁場を印加する。 φバネ MR ダンパには電流 1.65[A] ~ 3.4[A] を流し, 磁束密度 0.0185[T] ~ 0.0382[T]を得た。角型バネ MR ダンパには電流 2.2[A] ~3.4[A]を流し, 磁束密度 0.0188[T]~0.0291[T]を得 た。



Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus for measuring hold ability

MR 流体に印加した磁束密度をパラメータに、バネの 変位をレーザー変位計を用いて計測した。 o バネ MR ダ ンパおよび角型バネMR ダンパのバネの伸びを最大変位 で割った変位比を縦軸に、時間を横軸にとったグラフを それぞれ Fig.3, Fig.4 に示す。本図より, 各磁束密度に おいて変位比が平衡状態になる点があることが分かる。 この時バネが伸びようとする力を,ここでは「MR 保持 力」と呼ぶことにする。平衡状態になる理由は、 MR 流体の抵抗とバネの復元力が釣り合うためである。すな わち印加する磁場の強さを増加するにしたがって、MR 流体の抵抗が増加し変位比は1に近づく。よって、磁場 の強さを制御することにより、強い磁場の時はバネの伸 びが抑制され、磁場が弱くなるに従って徐々に解放され ていく。つまり磁場を制御することにより、バネに蓄え られたエネルギの解放を制御できることがわかる。Fig.5 に横軸を磁束密度,縦軸に MR 保持力をとったグラフを 示す。本図より、本実験範囲では MR 保持力と磁束密度 の関係が φ バネ,角型バネ共に直線関係となった。同じ

磁束密度でも φ バネに比べ,角型バネのほうが MR 保持 力は平均して約 1.4 倍大きくなった。よって,バネの素 線形状が MR 流体の見かけの粘性抵抗を強く受けるので 保持力が強く,角型バネのほうが φ バネに比べ本ダンパ には有効であることが分かった。



Fig.3 Time histories of the displacement ratio for the ϕ 1.4 spring MR damper



Fig.4 Time histories of the displacement ratio for the rectangular spring MR damper



Fig.5 Relationship between force and magnetic Flux Density

4. MRダンパの振動特性

次に MR ダンパの振動特性を測定する実験装置を Fig.6 に示す。MR ダンパの下端部にカピックアップを 設置し基盤に垂直に取り付けた。コイルスプリングの加 振用ロッド部に加速度ピックアップを設置した。コイル に電流 1.5[A]~3.5[A]を流し、磁束密度 0.017[T]~ 0.04[T]を得た。



Fig.6 Schematic diagram of the experimental apparatus for measuring the vibration characteristic

正弦加振を行い,加速度ならびに変位を入力信号,シ リンダ底部にかかる力を出力信号として周波数応答並び にヒステリシスループを求め,減衰特性を調べた。

4.1 正弦加振による周波数応答

本 MR ダンパは磁場を変化させることにより,減衰係 数hを可変にすることを目的とする。まず初めに磁束密 度をパラメータとして周波数応答を調べた。本 MR ダン パの振動モデルを考えると、1自由度バネマス系の減衰 振動と考えられる。よって、振動伝達率 τ は次式(1)で表 される。ここでhは減衰係数(Damping Factor), f_0 は 式(2)で示される固有振動数である。

$$\tau = \sqrt{\frac{1 + (2hf/f_0)^2}{\left\{1 - (f/f_0)^2\right\}^2 + (2hf/f_0)^2}} - (1)$$
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} - (2)$$

磁束密度を変化させて得られた入力と出力の力の周波 数応答曲線を Fig.7 に示す。図中の減衰係数hは実験デ ータより式(1)を用いて求めた。本図より、磁束密度の変 化に関わらず、振動伝達率のピークが同じ振動数比にと どまっていることが分かる。ここで、バネ定数一定状態 での無磁場時での固有振動数 f_0 と印加磁場がある状態 での固有振動数 f_R の関係と、減衰比 ζ をそれぞれ式(3)、 式(4)に示す。バネ定数が一定の場合,減衰係数hが大き くなる,すなわち減衰比 ζ が大きくなると,式(3)から 印加磁場がある場合の固有振動数 f_R は無磁場時での固 有振動数 f_0 よりも小さくなるので,振動伝達率のピーク を示す振動数比 f/f_R は大きな方向に移動する [10][11]。さらに、本 MR ダンパはバネが MR 流体中 に存在するので,磁束密度の増加にともなって MR 流体 の見かけの粘度(磁場)が大きくなり、バネ定数kが無磁 場時に比べ大きくなる。よって,式(2)より無磁場時での 固有振動数 f_0 が印加磁場ありの固有振動数 f_R よりも大 きくなる。したがって、振動伝達率のピークを示す振動 数比 f/f_0 が小さくなる。よって、この二つの性質が打 ち消しあったため、振動伝達率のピークはほぼ同じ振動 数比でとどまっている。



Fig.7 Frequency responses



磁束密度と減衰係数の関係を Fig.8 に示す。減衰係数 は、Fig.8 より振動伝達率のピークの値とその時の振動 数比から式(1)を用いて求めた。この時の固有振動数は 32.5~35[Hz]である。本図より減衰係数*h*は無磁場時で は0.27,0.017[T]では0.34,0.034[T]では0.45となり, 本実験範囲では、磁場を印加することにより減衰係数が 線形的に増加することがわかった。



Fig.8 Relationship between magnetic flux density and damping factor

4.2 正弦加振によるヒステリシスループ

加振振動数を 32.5[Hz]に固定し,その時の変位を 2[mm]に設定した状態で,カー変位を計測した。そのヒ ステリシスループを Fig.9 に示す。初期条件として印加 した磁場は 0.017[T], 0.027[T], 0.034[T], 0.038[T] である。



Fig.9 Hysteresis loops

ー般にヒステリシスループは、変位の最大と最小の点 を結ぶ直線の傾きがバネ定数、粘性の特性は楕円形状で 表され、ヒステリシスループで囲まれた面積が振動の 1 サイクル中に消費されるエネルギを表す[10]。減衰係数 hはポテンシャルエネルギWとヒステリシスループの 1サイクルの間に消費するエネルギΔWから式(5)を用 いて求められる。ポテンシャルエネルギWとヒステリシ スループの1サイクルの間に消費するエネルギΔWの 求め方もFig.10に示す。





Fig.10 The potential energy of Hysteresis loop

Fig.9 より、磁束密度が増加するにしたがって、変位 の最大値と最小値間の幅が狭くなり、変位が0の時の力 の最大値と最小値間の幅が大きくなる。さらに、弱い磁 場の時は粘弾性ダンパの性質を示し、磁場が強い時は変 位の変化が0のときに力が急激に変化する, MR 流体特 有のビンガム流体的な性質を示す。 Fig.9 と式(5)を用 いて求まる減衰係数は、0[T]では h=0.38, 0.017[T]で はh=0.49,0.027[T]ではh=0.56,0.034[T]ではh=0.59, 0.038[T]では h=0.61 である。Fig.11 に磁束密度と減衰 エネルギの関係を示す。本図より磁場を強くすると、減 衰エネルギΔW が線形的に大きくなることがわかった。 次に、周波数応答およびヒステリシスループから求めた 磁束密度と減衰係数の関係を Fig.12 に示す。磁束密度と 減衰係数の関係は,磁束密度に比例して減衰係数が大き くなる。さらに Fig.9 に示すヒステリシスループと式(5) より求めた減衰係数は、振動伝達率の周波数応答より求 めた減衰係数よりも大きく表れており、値が一致してい ないが両者は平行移動したもので同じ傾向を示している。 この違いを今後追及する必要がある。



and damping energy



Fig.12 Relationship between magnetic flux density and damping factor

4.3 磁場の印加による位相のずれ

次に, 無磁場時と磁場印加時の変位と力の関係を Fig.13, Fig.14 に示す。一般に弾性体の系であれば、応 力は弾性率と歪みの積になるので応力と歪の位相にずれ は生じない。粘性流体のせん断応力は、歪みの時間微分 で表されるずり速度と粘性率の積なので, 歪みが最大, もしくは最小となる時,応力は0となる。また,歪みが 0の時、応力は最大値、もしくは最小値となる。すなわ ち,粘性流体では応力と歪の位相はπ/2 ずれる[7]。弾 性体の系と粘性流体の系での応力と歪の関係を、応力を σ , 歪を ε としてそれぞれ式(6), 式(7)に示す。Fig.13 より, 無磁場時では変位は力よりも約0.37πだけ位相が 進んでいる。また、変位および力の波形は正弦波の形状 を保っている。それに比べ、磁場をかけた場合、Fig.14 のように、変位と力の位相のずれが約0.16πと小さくな り、入力の変位波形は正弦波の形状を保っているにも関 らず、力の波形は図示のように変形している。無磁場時 では位相差が 0.37 π,磁場印加時では 0.16 π と粘性の特 性が弱くなり、弾性の特性が強いダンパに変わっていく 様子が見られる。



Fig.13 Phase difference under non magnetic field



Fig.14 Phase difference under magnetic field



Fig.14 に見られる力の変化が Fig.15 に示すフォーク トモデルであると考えると、その特徴は同図左のグラフ に示すように荷重をかけた際、徐々に歪みを増加し、荷 重を除く際、緩やかに歪みを解除する特性がある[8]。こ れは粘弾性の粘性係数が高くなると、より緩やかになる。 本ダンパは、この歪みの制御を MR 流体の磁場による粘 度の変化を利用して、作動させようとするものである。



Fig.15 Voigt model

5. 免震装置を使用したダンパの特性実験

5.1 免震装置と実験方法

開発した MR ダンパを実際に免震装置に取り付け免 震性能を調べる実験を行った。使用した免震装置は、転 がり系のアイソレータを使用し、地盤に設置する段、振 動を与える段、被免震物を乗せる段の3段から構成され ている。本実験装置の写真を Fig.16 に示す。本実験では、 振動を与えるのに直流モータを使用した。



Fig.16 The picture of experimental apparatus of measuring isolator ability

本免震装置の特徴は,免震台の最上段(被免震物を乗せ る段)と中段(振動を与える段)がバネ,ダンパで接続され ていないことである。そのため、本免震装置は振動が高 周波数のとき、上段と中段は非常に弱い摩擦で取り合っ ているため、上段は被免震物の慣性力からその場に留ま る事が予想される[1]。

MR ダンパの効果を調べるため、比較対象としてやじ り型の金属製衝突部を MR ダンパの代わりに用いた。 Fig.17 はこの衝突部と、衝突部の受け手側にあたる緩衝 ブロックの配置関係を示す。緩衝ブロックにはゴムシー トを貼り付けることで、金属製衝突部が粘弾性ダンパと して機能するようにした。



Fig. 17 A collision part and buffering blocks

5.2 実験結果

本実験では免震装置の特性を、上段、中段に移動方向 にとりつけた加速度ピックアップを用いて調べた。中段 に取り付けた加速度ピックアップの信号を入力振動とし て Fig.18 に示す。上段に取り付けた加速度ピックアップ の信号を出力振動として Fig.19~Fig.22 に示す。測定し たケースはそれぞれ、衝突部と緩衝ブロックが非接触時 をケース 1, 金属製衝突部設置時の振動をケース 2, 印加 磁場が無い場合の MR ダンパ設置時の振動をケース 3, 印加磁場あり,制御無しの場合の MR ダンパ設置時の 振動をケース 4 に示す。



Fig.18 Acceleration of the middle stairs



Time[ms]
Acceleration of the top stairs

Fig.21

with contact (MR damper) (case 3)



Fig.22 Acceleration of the top stairs with contact (MR damper in magnetic field) (case 4)

Fig.19~22 より,本免震装置は高周波数の振動では上 段はほとんど動かずダンパと緩衝ブロックが接触しない ので,被免震部の出力加速度は小さい。また,金属製衝 突部と印加磁場無しの MR ダンパでは, MR ダンパの 方が加速度変化の勾配が緩やかになり, MR ダンパに磁 場を印加すると,印加磁場無しの状態よりも出力加速度 がさらに小さく,またその勾配も小さくなることがわか った。したがって,MR ダンパに磁場を印加することに より,印加磁場無しの MR ダンパならびに金属製衝突部 より衝撃加速度が小さくなることがわかる。

6. 結 論

本研究では,バネまわりに MR 流体を満たす新しい構 造を持った MR ダンパの基礎的特性を調べた。基礎的特 性としての,1) MR 保持力,2) ダンパ特性の結果につい て示す。

ダンパの保持能力を測定した結果,MR 流体に磁場を 印加し見かけの粘度を増大させることで,バネの伸びを 保持することが出来た。これはMR 流体に印加する磁場 を増加すると,MR 流体の見かけの粘性抵抗がバネの復 元力と釣り合うためで,印加磁場の制御によって蓄えら れたバネの弾性エネルギの解放を制御できることがわか った。

MR ダンパの振動特性を調べた結果,印加する磁場を 強くすると粘性の特性が強くなり,磁場を弱くすると弾 性の特性が強くなる粘弾性ダンパとして機能することが わかった。Fig.7 より磁場の強さを変えることにより, MR 流体の見かけの粘性抵抗が変化し,減衰係数とバネ 定数が可変に出来た。また,減衰係数は磁場の増大に従 って線形的に大きくなることが分かった。

さらに,この MR ダンパを免震装置に使用して,その 免震性能を調べたところ,免震台の中段と上段をダンパ とバネで接続していないので,ある周波数からは免震台 上段はほとんど揺れなくなり、大きな免震効果が得られ ることが分かった。さらに金属製の衝突部に比べ、本 MR ダンパは免震装置上段の衝撃加速度の変化を緩やか にすることができ、磁場を印加することによりさらに衝 撃加速度を小さくすることができた。

参考文献

- [1] 日本免震構造協会:「免震構造入門」,オーム社,1995 年
- [2] 渡辺 洋之(秋田県立大学),山中 大輔,島田 邦夫, 須知 成光,神山 新一,菅野 秀人,「MCF(磁気混 合流体)ダンパに関する実験的研究」,東北学生会第 33回学生員卒業研究発表会,2003年
- [3] David.I.Jones 著 鈴木 浩平監訳:「粘弾性ダンピン グ技術ハンドブック」, 丸善株式会社, 2003 年
- [4]青山 剛・飯盛 健史・橋場 優:「せん断力を用いた
 MR ダンパの基礎実験」,成蹊大学工学部機械工学
 科卒業論文,2003 年

- [5] 秋山 聡史・佐野 穣:「磁性流体を用いた制震装置の 開発」,成蹊大学工学部機械工学科卒業論文,2004 年
- [6] 脇島 修:「電磁石の強さの考察」,大阪府教育センター,2005 年
- [7] 種谷 真一,「物質の変形と流動 やさしいレオロジー 工学」,工業調査会,1990 年
- [8] 尾崎 邦宏:「レオロジーの世界」,工業調査会,2005 年
- [9] D.Carlson, D.M.Catanzarite and K.A.St. Clair, 「COMMERCIAL MAGNETO-RHEOLOGICAL FLUID DEVICES」, Lord Corporation, 1999年
- [10] 公害防止の技術と法規編集委員会:「公害防止の技術と法規振動編」,社団法人産業環境管理協会, 1996年
- [11] 黒田 道雄:「機械振動学」,学献社, 1996年