MR グリースを用いた可変ダンパの基本特性と構造物への応用

○学 杉山 慎也 (横浜国大院) 学 三井田悠磨 (横浜国大院)
正 白石 俊彦 (横浜国大) 正 森下 信 (横浜国大)

Basic Properties of Variable Damper Using MR Grease and the Application to Structure

Shinya SUGIYAMA, Yuma MIIDA, Toshihiko SHIRAISHI and Shin MORISHITA

Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University
79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501 Japan

A variable damper applying Magneto-Rheological (MR) Grease was designed and its performance was also investigated, and the dynamic characteristics of the model structure with MR Grease damper were measured. MR fluid is known as one of functional fluids, whose rheological properties can be controlled by the applied magnetic field strength. MR damper has attracted much attention as the semi-active control device. MR fluid is composed of micron-sized magnetic particles and a carrier oil such as mineral oil or silicon oil. But the particles dispersed in the fluid would precipitate and make sedimentation due to the difference of density. In order to reduce or avoid the sedimentation of the magnetic particles in MR fluid, grease was introduced instead of base oil and MR grease was developed. In this paper, MR grease was adapted to a cylindrical damper, and its properties were investigated. Furthermore, the frequency responses of the model structure equipped with MR Grease damper were measured.

Key Words : Magneto-rheological Fluid, Magneto-rheological Grease, MR Damper , Damping, Vibration Control

1. はじめに

近年、機能性流体を用いたセミアクティブダンパの研究が盛んに行われている。機能性流体とは外部から加えた信号により流動特性が変化することを特徴とした流体である。電気粘性流体、液晶、磁性流体、磁気粘性流体等はその代表例であり、外部から電場あるいは磁場を受けると、場の強さに応じて見かけの粘度が大幅に変化する。しかも応答性は良好である。本論文では磁気粘性効果を有するグリースを作動流体として用いた可変ダンパとその構造模型への応用について述べる。

磁気粘性流体 (Magneto-Rheological Fluid; MR 流体) とは、鉱油やシリコン油等の基油中に直径数～十数ミクロンの鉄の微粒子を分散させ、外部から磁場を加えることで粒子のクラスタ形成を促し、結果として流動特性を変化させる機能性流体である⁽¹⁾。この MR 流体を作動流体として用いた可変ダンパ (以下 MR ダンパ) は加える磁場の大きさを変化させることによって減衰力特性が可変となるダンパである。従来もオイルダンパをベースとするセミアクティブダンパが開発されているが、可変減衰型オイルダンパは減衰力を可変にするための精密な弁機構が設けられており、この弁機構を外部から電氣的に制御している。一方、MR ダンパの場合には、このような弁機構が不要であり、磁場を発生させるための電磁石を設置するだけでよく、構造を単純にして部品点数を減らすことが可能である。また、応答性が良く、比較的小さい消費電力で大きな特性の変化が得られるといった利点から、MR ダンパはセミアクティブダンパとして注目を集めている⁽²⁾⁽³⁾。

しかし、MR ダンパの課題として、分散された磁性粒子の沈降問題がある。MR 流体では分散媒と磁性粒子の密度差が原因で、時間の経過とともに分散された粒子が沈降して沈殿を生じる。自動車用サスペンション等のような振動を抑制するための装置の場合には、その振動により沈降した粒子の再分散が期待できるが、耐震用ダンパ等、振動が比較的稀な頻度で起こるような事象への適用においてはこの問題が重要視される。沈殿が硬い場合には再分散は困難であり、長期間の静置により MR ダンパの性能に多大な影響を及ぼす。そこで、本研究では磁性粒子の沈降問題の解決を目指し、従来 MR 流体の分散媒として用いられてきた鉱油やシリコン油の代わり

にグリースを用い、グリース中に磁性粒子を分散させた「MR グリース」を用いたダンパの開発を行った。まず、MR グリースの基本特性を実験的に把握し、可変ダンパに適用したときの基本性能を測定した。さらに構造物をモデル化した3層からなる模型にこのダンパを設置して、構造物の動特性の変化を実験的に示したので報告する。

2. MR グリースの基本特性

2・1 グリースの概要

グリースは古くから潤滑剤として使われ、液状の潤滑剤と固体の増ちょう剤からなる半固体または固体状の潤滑剤として定義されている。ある意味では潤滑油の最大の利点である流動性を犠牲にして、潤滑が必要な部分に付着して潤滑剤としての役目を果たしている特殊な潤滑剤である。製造方法とグリース特性の関連性等については経験により判断されることが多く、詳細な潤滑のメカニズムについては不明な部分が残っている潤滑剤でもある。しかし、基本的には内部の増ちょう剤が3次元網目構造を形成しており、この網目構造によって基油が保持されることでグリース特有の流動特性をもつようになると推定されている。基油や増ちょう剤に関しては既に多くの種類が検討されており、増ちょう剤としては、リチウムセッケンに代表されるセッケン系や芳香族ジウレアといったウレア系などが主なものとして流通されている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。増ちょう剤の電子顕微鏡写真を図1に、また著者らが撮影した位相差顕微鏡による写真を図2に示している。スケールをみてもわかるように、電子顕微鏡写真では真空中での撮影のために基油は取り除いてあり、電子顕微鏡写真に見られる増ちょう剤と位相差顕微鏡写真に見られる基油中に存在する増ちょう剤とは大きな違いがある。著者等は基油中では増ちょう剤は基油により膨潤した状態で存在すると考えている。

本研究で注目したのは、グリース内部に形成される3次元網目構造である。著者等が別途行った研究では、増ちょう剤は数～数十ミクロンの太さの繊維であり、グリース内部で様々な太さおよび長さの繊維が複雑に絡み合っている。MR グリースにおいては、この網目構造により磁性粒子が保持され、分散された粒子の沈降を抑制できると期待される。

Fig.1 Photo by electron microscope

Fig.2 Photo by phase contrast microscope

2・2 実験方法

図3にMR グリースの基本特性の測定に用いた回転式粘度計の概要を示す。測定部の基本構造は2重円筒であり、主に装置を設置するための土台、入力側円筒、出力側円筒の3つの部品で構成されている。入力側円筒は軸を可変速度モータにより回転させて、測定対象に与えるせん断速度をある範囲内で変化させることができる。出力側円筒には円環状の溝が設けてあり、この溝に上部の入力側円筒が差し込まれる構造となっている。この2つの円筒間の隙間部分は、深さ16 mm、隙間幅1.0 mmである。この隙間に測定対象であるMR グリースを満たし、入力側円筒を回転させるとMR グリースを介して出力側円筒にせん断力が伝わる。土台に固定されているロードセルによりこのせん断力を測定することで基本特性を取得できる。出力側円筒の内部には電磁石用コイルが内蔵

されており、図3に示すような磁気回路が形成され、測定対象のせん断方向に対して磁場が垂直方向に横切りになっている。また、ホール素子が装置内部に組み込まれており、測定対象の内部に生じる磁束密度を測定することができる。

実験では、MR グリースに与える磁束密度、せん断速度を変えて、MR グリースに作用するせん断応力の変化を測定した。また、表1に試料として用いたMR グリースの仕様を示す。電磁石のコイルに流す電流は0~5 A、せん断速度は $0 \sim 232 \text{ s}^{-1}$ の範囲で変化させた。測定中の試料の温度は特に制御してはいないが、 25°C 程度であった。

Table.1 Specification of sample

Base oil	Mineral oil
Fraction of particles	75 wt%
Thickener	Lithium soap
Fraction of thickener	1 wt%

Fig.3 Schematic view of rotational viscometer

2・3 実験結果

図4および図5に実験結果を示している。図4はMR グリースに与える外部磁場を変化させた時のせん断応力とせん断速度の関係を示しており、流体に生じる磁束密度毎に整理している。このような整理をした図における各線の勾配がいわゆるニュートン粘度を与える。この結果より、磁束密度を一定とした場合には、せん断速度に対してせん断応力は直線的に変化していることがわかる。また、特性を表す直線は磁束密度の増加に伴い、ほぼ平行移動をしている。従って、MR グリースはMR 流体同様に基本的にはビンガム流体の特性を有し、しかも磁場の大きさによって直線の傾き、すなわちニュートン粘度はほとんど変わらない。MR 流体に磁場を加えると分散された磁性粒子がクラスタと呼ばれる鎖状の構造を形成するが、MR 流体がビンガム流体特性を示すのは、このクラスタが流れに対して抵抗となり、降伏応力を持つためであると推察される。MR グリースにおいても同様に磁性粒子がクラスタを形成するため、ビンガム流体の特性を示すと考えられる。さらにMR グリースに与えられる磁場の大きさを大きくすると、クラスタがより強固なものとなるため降伏応力が上昇すると考えられる。

Fig.4 Shear stress to shear rate

Fig.5 Shear stress to magnetic flux density

図5はせん断速度ごとのせん断応力と磁束密度の関係を示したものである。せん断速度が一定の場合は磁束密度が大きくなるのに伴いせん断応力が大きくなるが、さらに、せん断速度の増加に伴いせん断応力も大きくなっているが、その増加率は磁束密度の増加に対するせん断応力の増加率に比べると小さい。これより、MR グリースは従来の MR 流体同様、外部磁場により流動特性を制御可能なことが明らかである。

3. MR グリースダンパの特性

3・1 ダンパの構造

使用した MR グリースダンパの模式図を図6に示す。このダンパは単筒式構造であり、外径は 12 mm、シリンダ長さは 47 mm である。シリンダ内部は MR グリースで満たされている。ピストン部にはコイルが内蔵されており、シリンダロッドの内部を通じて電線を外部に引き出している。ピストン内蔵のコイルに電流を流すことで、ピストンとシリンダの隙間に対して垂直に横切る磁場を形成させることができる。電流の大きさを調節することで、磁場の強さが変化し、隙間を通過する MR グリースの特性が変化することで結果としてダンパの減衰特性が変わる。ダンパの主な仕様を表2に示す。

Fig.6 Schematic view of MR grease damper

Table.2 Principal specification of MR grease damper

Stroke	24 mm
Cylinder bore	10 mm
Piston diameter	8.2 mm
Piston length	10 mm
Piston rod diameter	3 mm
Coil	72 turns

3・2 実験方法

図7に実験装置全体の概略図を示す。MR グリースダンパは床面と水平になるように固定し、ダンパのピストンロッドは治具を介して油圧サーボシリンダに取り付けられている。サーボシリンダは専用のコントローラにより変位制御を行う。ピストン変位と発生する減衰力は、サーボシリンダに設置されている位置センサとロードセルにより測定し、デジタルスコープに取り込む。ダンパ内のコイルには直流電源から電流を供給している。

油圧サーボシリンダは振動数一定、変位振幅一定の正弦波で往復運動させ、そのときのピストン変位とダンパに生じる減衰力を測定した。振動数は 0.1～5.0 Hz、振幅は 0.5～5.0 mm、またコイルに印加する電流の大きさは 0～4.0 A とした。

Fig.7 Schematic of experimental set up

Fig.8 Force-displacement diagram at 4.0 Hz

Fig.9 Force-displacement diagram at 2.0 mm

3・3 実験結果

図8は加振振動数を4 Hzで固定し、変位振幅を変化させたときのピストン変位とMRグリースダンパに発生する減衰力の履歴曲線を示している。また、図9は変位振幅を2 mmで固定し、振動数を変化させたときのピストン変位と減衰力の履歴曲線を示している。これらの図には、コイルに印加する電流を0から4 Aまで変化させた時の各電流値での履歴曲線を重ね書きしている。

これらの結果より全般的な特徴を抽出すると、まずコイルに電流を印加し作動流体としてのMRグリースに磁場を作用させることにより、履歴曲線は摩擦減衰を主とし粘性減衰を加えたような形状を示すことがわかる。また、減衰力は印加した電流値の大きさ、すなわち磁場の強さに伴って増加している。振動数1 Hz、振幅2 mmとしたときには、電流を印加しない状態での減衰力が約1.4 Nであったのに対し、4 Aの電流を流した状態での減衰力は約4.2 Nであり、およそ3倍程度の増幅率である。

図8、図9より、変位振幅および振動数の増加とともに減衰力が大きくなっており、さらに履歴曲線に丸みを持つことが確認できる。これらはMRグリースのもつ粘性抵抗の影響が原因であると考えられる。各条件における電流0 A時の履歴曲線の様子を比較してみると、振幅および振動数を大きくするほど減衰力が大幅に増加しているのがわかる。すなわち、振幅および振動数の増加に伴いMRグリースの粘性抵抗の影響を多く受けるようになり、その結果、ダイナミックレンジは減少している。したがって、MRグリースダンパのダイナミックレンジを大きくするためには、無磁場の状態での減衰力を小さくすることが要求される。ピストンとシリンダ間の隙間を広げることで粘性抵抗の影響を小さくして改善できる可能性もあるが、その分MR効果が小さくなるため、一概には判断できない。

4. 構造物への適用

4・1 実験方法

MR グリースダンパに加える電流値を変化させることで構造物の応答がどの程度変化するかを検証するために図 10 に示す構造模型に MR グリースダンパを設置し加振実験を行った。構造模型は 3 つの階に相当する厚板の両端を板ばねで挟み、下部を台座に固定してある。1 階に相当する台座には逆 V 字型の筋交が設けてあり、筋交頂部と 2 階との間にダンパが設置されている。板ばねの厚さは 1.5 mm であり、各階の質量はそれぞれ約 1.5 kg、全体の質量は約 7.5 kg である。台座はリニアベアリングに取り付けられており、電磁加振機によって台座部分に水平方向の強制変位が与えられる仕組みになっている。

実験は、電磁加振機によって台座部分を水平方向に振幅 0.5 mm の正弦波で加振し、振動数を 2~20 Hz の範囲で速度 0.15 Hz/sec で掃引させることにより各階の周波数応答を測定した。各階の変位は非接触のレーザー変位計により計測した。ダンパに電流を印加しない場合と 4 A の電流を印加した時の応答について測定を行った。

4・2 実験結果

測定結果を図 11 に示す。図 11(a)が MR グリースダンパに電流を流さない場合、図 11(b)が 4 A の電流を印加した場合の結果であり、上から 4 階、3 階、2 階の変位と振動数の関係を表している。電流を流さない場合の結果より、この構造模型の 1 次、2 次、3 次の固有振動数がそれぞれ 4.1 Hz、11.7 Hz、17.3 Hz 付近に存在することがわかる。また 1 次の共振点では 4 階が最も大きく振れている。同様に、2 次の共振点では 2 階、3 次の共振点では 3 階付近がそれぞれ大きく振れていることが確認された。

また、電流を印加した場合の応答をみると、電流を印加することによって各階の変位が減少することがわかる。特に共振点における変位は約 50%程度低減されている。同時に、共振振動数が上昇していることが確認される。1 階と 2 階が完全に固定された場合に 2 自由度系の振動モードが現れるが、ダンパに電流を流すことで抵抗力が大きくなり、その傾向がいくらか現れたためであると推察される。

このように、MR グリースダンパに電流を印加し、その減衰特性を変化させることで、構造物の振動モードが大きく変化することが確認された。従って、MR グリースダンパ内部の電磁石に加える電流を制御することで構造物の応答を制御できることが容易に推定される。次の段階としては、何らかの制御系を導入して構造物の振動制御を行う予定である。

Fig.10 Schematic of model structure

Fig.11 Frequency response at floors of model

5. おわりに

本研究では、まず MR グリースの基本特性を明らかにするために、MR 効果測定用に開発した回転式粘度計を用いて、磁束密度およびせん断速度とせん断応力の関係を測定した。これより、MR グリースは MR 流体同様にビンガム流体としての特性を有しており、外部磁場により流動特性の制御が可能であることを示した。また、MR グリースを作動流体に用いた可変ダンパの基本性能を実験的に求めた。その結果、減衰力は印加電流値の大きさに伴い増加すること、グリースの粘性が性能に影響を及ぼすことが確認された。ただし、磁場を加えない状態での等価粘度が高いために、応用分野として MR 効果のダイナミックレンジを広げるためにはさらに工夫が必要である。さらにこのダンパを構造模型に適用し制振実験を行った結果、MR グリースダンパに電流を印加し、その減衰特性を変化させることで、構造物の動特性が大きく変化することが確認された。

文 献

- (1) Rabinow,J., The Magnetic Fluid Clutch, AIEE Transactions, 67(1948), 1308-1315.
- (2) J.D.Carlson, D.M.Catanzarite, K.A.St. Clair, Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices, 5th Int. Conf. on ER, MR Suspensions and Associated Technology (1995)
- (3) Hiroshi Sodeyama, Kohei Suzuki, Katsuaki Sunakoda, Development of Large Capacity Semi-Active Seismic Damper Using Magneto-Rheological Fluid, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.126(2004), 105-109
- (4) 星野道男, グリース潤滑の理論, トライボロジスト, 47-1, (2002), pp.8-14
- (5) P.M.Lugt, A review on Grease Lubrication in Rolling Bearings, tribology Transactions, 52 (2009), 470-480
- (6) 日本潤滑学会, 潤滑ハンドブック(1978), 324-341