

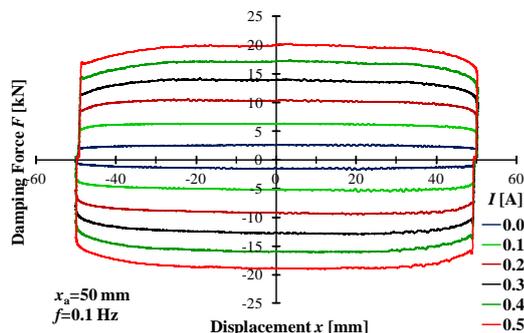
中野政身教授らのグループが清水建設と共同で、 MR流体コンポジットを用いた免震・制振用の革新的な減衰力可変ダンパを開発！

東北大学流体科学研究所の中野政身教授らのグループは、清水建設(株)技術研究所と共同で、MR流体コンポジット回転ブレーキを活用した免震・制振用の革新的な減衰力可変の直動型ダンパを開発した。

磁場の印加により降伏せん断力が変化するMR流体を用い減衰力が可変な建築構造物用の高機能かつ高性能な免震・制振ダンパの開発が試みられてきているが、長時間静置時のMR流体中に分散した強磁性体微粒子の沈降が信頼性などの実用上の問題となり、広範な普及に至っていないのが現状である。そこで、中野教授らは、MR流体を不織布等の多孔質体に含浸させることで、上述の粒子沈降の問題が解決でき、かつ密閉のための流体シールが不要なMR流体コンポジットを開発している。このMR流体コンポジットを活用した回転型MRブレーキとその回転を直動に変換するボールネジとを用いた 20kN 級の建築構造物の免震・制振用の減衰力可変の直動型MRダンパを開発した。

開発したMRダンパは、MR流体を多孔質材に含浸させたMR流体コンポジットとして使用しているため、MR流体を単に流体のままを用いる場合のように強磁性体粒子の沈降による性能劣化の懸念はなく、長期にわたってダンパ性能と信頼性を確保することができる。また、MR流体コンポジットを回転円盤とそれに積層した固定円盤との間に介装した構成のブレーキ機構をダンパ抵抗力発生源としているため、シリンダ内にMR流体を封入するタイプの従来のMRダンパに比較して、MR流体の使用量がはるかに少なく、かつMR流体を封入するための高度なシール技術も必要とはしないので、大幅なコストダウンが図り易いなどの特徴を有する。

なお、本MRダンパは、特許出願 (MRダンパ: 特願 2012-197438 号) されており、JFPS 平成 25 年秋季フルードパワーシステム講演会 (2013. 11. 7, 8 in 神戸) と Tenth Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2013) (2013. 11. 25-27 in 仙台) で発表予定である。



開発したMRダンパの減衰力特性



振動台免震試験時の開発されたMRダンパの設置

問い合わせ先：
流体科学研究所 知能流体制御システム研究分野
教授 中野 政身
Tel: 022-217-5878
E-mail: m-nakano@fmail.ifs.tohoku.ac.jp

40. MR流体コンポジット回転ブレーキを活用した 免震・制振用直動ダンパとその減衰力特性

○中野政身*, 稲場智亮*, 戸塚厚*, 福喜多輝**

Development of Linear Seismic Damper Using MR Fluid Composite Rotary Brake and Its Damping Force

Masami NAKANO*, Tomoaki INABA*, Atsushi TOTSUKA*, Akira FUKUKITA**

In the applications of MR (Magneto-Rheological) fluid damper to seismic isolation and suppression technologies, one of serious problems is the sedimentation of dispersed particles in the MR fluid in the off-working state. To solve this problem, "MR fluid porous composite" made of porous materials impregnated with MR fluid has been fabricated. And also, a seismic linear motion MR damper utilizing MR fluid porous composite has been designed and developed, which mainly consists of a ball screw and a rotary MR brake. The rotary MR brake has multi-disks between which the sheets of MR fluid porous composites are installed, and an electromagnet. The ball screw works to convert the linear motion (damping force) of the MR damper to the rotation (braking torque) of the MR brake with almost no transmission loss. The damping properties of the developed seismic MR damper were investigated experimentally to be found that the damping force of 20 kN is produced when applying an electric current of 0.5 A as designed.

Key Words : Smart Fluid, MR Fluid Composite, Brake, Seismic MR Damper, Damping Force

1. 緒言

MR(Magneto-Rheological)流体は、シリコン油等の基油に μm オーダーの粒径の強磁性体粒子を分散した懸濁液で、磁場の印加によってそのレオロジー特性（厳密には、降伏せん断応力）が変化する現象（MR効果）を示す機能性流体である¹⁾。このMR流体を用い減衰力が可変な建築構造物用の高機能かつ高性能な免震・制振ダンパの開発が試みられてきているが²⁾、長時間静置時のMR流体中に分散した強磁性体微粒子の沈降が信頼性などの実用上の問題となり、広範な普及に至っていないのが現状である。

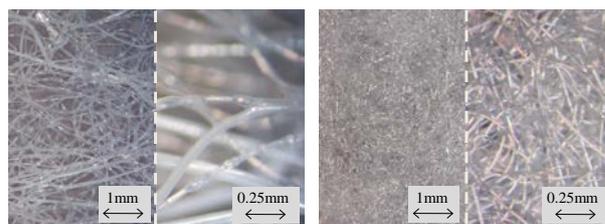
本研究では、MR流体をスポンジ等の多孔質体に含ませしめることで、上述の粒子沈降の問題が解決でき、かつ密閉のための流体シールが不要なMR流体コンポジットを開発している³⁾。多孔質体として細かい繊維が密に絡み合う不織布を用いることによってMR流体単体で用いた場合よりも1.7倍程度高いせん断応力を示すことを明らかにしている。このMR流体中の粒子沈降が回避できるMR流体多孔質コンポジットを活用した回転型MRブレーキとその回転を直動に変換するボールネジとを用いた20kN級の免震・制振用の直動型MRダンパを開発している。

ここでは、開発したMRダンパに使用したMR流体多孔質コンポジットのMR効果の特性とダンパの概要を述べ、加振試験によって得たその発生減衰力の基本特性について検討している。

2. MR流体コンポジットとそのMR効果

MR流体コンポジットの多孔質体として、図1に示すように、浪華絹綿製の“KN-60-3”（厚さ $t_0=0.8\text{mm}$ 、横弾性率 $G=11.2\text{kPa}$ ）と“TRF-50H”（ $t_0=0.5\text{mm}$ 、 $G=26.5\text{kPa}$ ）の内部構造が大きく異なる二種類の不織布を用いた。これらの不織布にLord社製MR流体(MRF-132DG)を十分量含浸させてMR流体多孔質コンポジットとした。

図2には、往復せん断モードにおけるダブルギャップレオメーター（ギャップ間隙： $h=0.5\text{mm}$ ）³⁾を用いて測定した、MR流体コンポジット（多孔質材：TRF-50H）のせん断ひずみ γ に対するせん断応力 τ ヒステリシスループの印加磁束密度 B による変化の代表的な例を示す。ヒステリシスループは、降伏前の弾性域と降伏後のせん断応力がほぼ一定となる塑性域とからなるほぼ矩形形状を呈し、 B の増大に伴って



(a) KN-60-3, $t_0=0.8\text{mm}$ (b) TRF-50H, $t_0=0.5\text{mm}$

Fig.1 Enlarged pictures of tested nonwovens ($\times 82, \times 328$)

* 東北大学流体科学研究所
(〒980 - 8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)
(E-mail: m-nakano@fmail.ifs.tohoku.ac.jp)

** 清水建設株式会社技術研究所
(〒135 - 8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

* Institute of Fluid Science, Tohoku University

** Institute of Technology, Shimizu Corporation

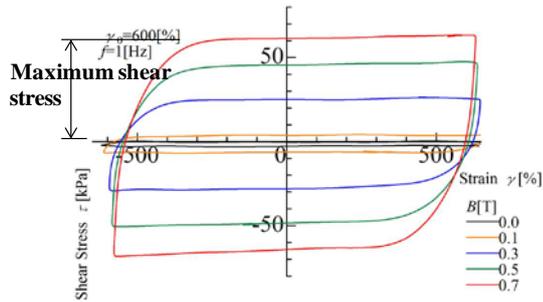


Fig.2 Changes of γ - τ hysteresis loop with applied magnetic flux density B (TRF-50H, Sliding plate:Iron, $h=0.5$ mm)

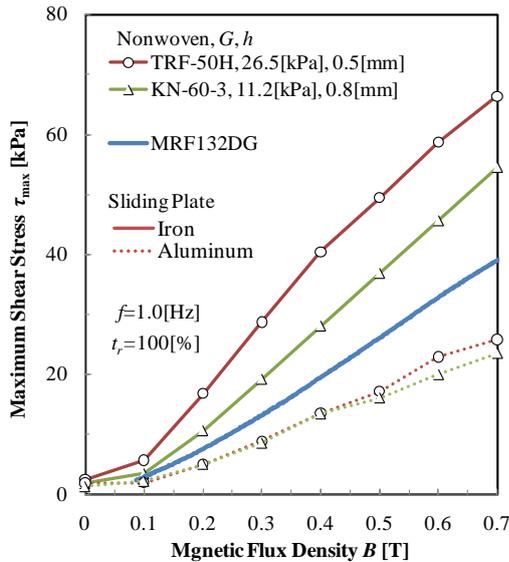


Fig.3 Changes of maximum shear stress with B for two species of nonwoven and sliding plate

塑性域の一定せん断応力が増大し、 B によって降伏せん断応力が可変なことがわかる。これらの特性は、MR 流体自身の MR 効果が反映されたもので、MR 流体とほぼ同等の MR 特性を示している。ヒステリシスループの塑性域のせん断応力の最大値を最大せん断応力 τ_{max} と定義する。

図 3 には、二種類の不織布それぞれを用いた MR 流体コンポジットの最大せん断応力 τ_{max} の印加磁束密度 B に対する変化を示す。いずれのコンポジットでも τ_{max} は B の増大に伴い増加する。コンポジットに接触してせん断を与える可動平板は、アルミニウム製のものに比して鉄製の方が、2 倍以上高い最大せん断応力を示す。MR 流体コンポジットでは、そのすべり面が可動平板との接触面に限定されるため、接触面の材質（磁性体か否か）が大きく影響を及ぼすことを示唆している。また、KN-60-3 に比べ、TRF-50H の不織布を用いたものの方がより高い最大せん断応力を発生することから、横弾性率 G が大きく細い繊維が密に絡み合う不織布を用いたコンポジットがより高い MR 効果を発揮することがわかる。以上より、MR ダンパには TRF-50H の不織布を用い

た MR 流体コンポジットを用いた。

3. 開発した免震・制振用直動ダンパの概要

開発した直動型 MR ダンパは、図 4 に示すように、ダンパの直線運動を回転運動に変換するボールネジを用いた直動-回転変換機構、リニアガイドを用いたネジ軸回転防止機構、ボールネジの回転ナット部に直結した回転型 MR 流体コンポジットブレーキの三要素で構成される。ダンパの最大全長 800mm、幅 240mm、ストローク ± 100 mm、設計減衰力は 20kN である。回転型 MR 流体コンポジットブレーキは、図 5 に示すように多層円盤構造となっており、回転軸に固定された円盤が 4 枚、その両側に固定円盤に接着された円環状の MR 流体コンポジット（厚さ 0.5mm）が計 8 枚配置されており、電磁石 ($N=1300$ turns, $R=59\Omega$) によって磁場が印加される。回転円盤にはこの MR 流体コンポジットとの間にせん断応力が働き、回転型 MR ブレーキは可変制動トルク T を発生する。この MR ブレーキが発生する制動トルク T と MR ダンパの発生減衰力 F との間にはボールネジ機構によって次の関係が成り立つ。

$$F = (2\pi/l\eta)T \quad (1)$$

ここで、 l 及び η は、それぞれボールネジのリード長 ($l=0.03$ m) と伝達効率 ($\eta=0.95$) である。また、直動型 MR ダンパの変位 x と回転型 MR ブレーキの回転角 θ との関係は、 $\theta=(2\pi/l)x$ で表される。

4. 回転 MR ブレーキのトルク特性

図 6 には、回転型 MR 流体コンポジットブレーキのトルク特性の予測値と実測値を比較して示す。予測値は、磁場解析によって求めた各印加電流の際のコンポジットに印加される磁束密度と図 3 の MR 流

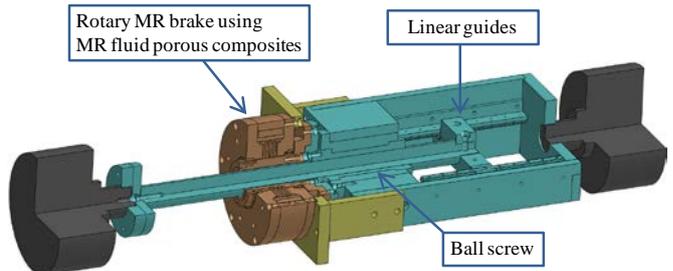


Fig.4 Seismic linear MR damper using rotary MR brake

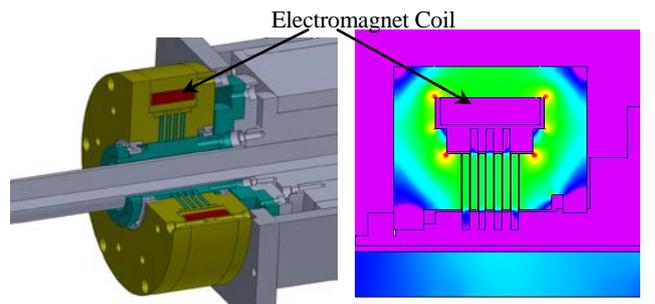


Fig.5 Rotary MR brake using MR fluid composite

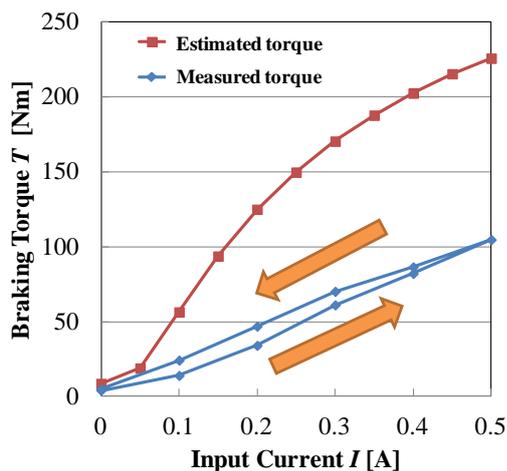


Fig.6 Changes of MR brake torque T with applied electric current I

体コンポジットのせん断応力特性とからトルク値を算出したものである。実測値は予測値の約半分程度となっている。これは、コンポジットを貼るために用いた接着剤（非磁性体）の厚さ 0.2mm を考慮した磁場解析の結果、コンポジットに印加される磁束密度が約半分となることから、この接着剤の厚さ分だけ印加磁場が低下したことによるものである。実測値では $I=0.5\text{ A}$ で $T=105\text{ Nm}$ のトルクが得られ、式(1)から MR ダンパの減衰力は 23 kN となり、設計目標 20 kN を満足している。

5. 直動 MR ダンパの発生減衰力特性

図 7, 8 には、MR ダンパの正弦波加振試験 (Servo Pulser:EHF-UV30, Shimadzu) によって得られた印加電流 I 及び振動振幅 x_a による x - F ヒステリシスループ (x : 変位, F : 減衰力) の変化を示す。ヒステリシスループは MR 流体コンポジットの MR 効果 (可変降伏せん断応力) に対応してほぼ矩形を描いている。最大ダンパ減衰力は、印加電流値 I の上昇に伴って増大し (図 7), $I=0.5\text{ A}$ において設計値の約 20kN に達している。また、減衰力がほぼ一定値を示す変位領域で若干ながらループが湾曲していることから僅かな速度依存性が認められる。振動振幅 x_a が大きくなると (図 8), 減衰力がほぼ一定の領域が拡大してループ面積が広がる。

図 9 には、ダンパを一定速度で動かした状態で、電流増幅器であるサーボアンプにステップ状の入力電圧信号 $V=1.0\text{ V}$ を与えた際のコイルへの入力電流 I とダンパ減衰力 F の過渡応答を示す。ステップ入力後、 I が瞬時に立ち上っているにもかかわらず、 F は約 $t=20\text{ ms}$ 後に徐々に増大しており、 F の応答はむだ時間 L + 一次遅れ系 (時定数 T_0) で近似できる。むだ時間 L はダンパ速度 v によらずほぼ一定で約 20ms であるが、時定数 T_0 は v が速くなるほど短くなり、 $v=40\text{ mm/s}$ で $T_0=37\text{ ms}$ である。

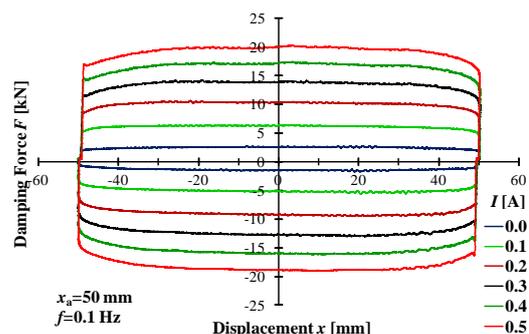


Fig.7 Changes of x - F hysteresis loops with coil current I

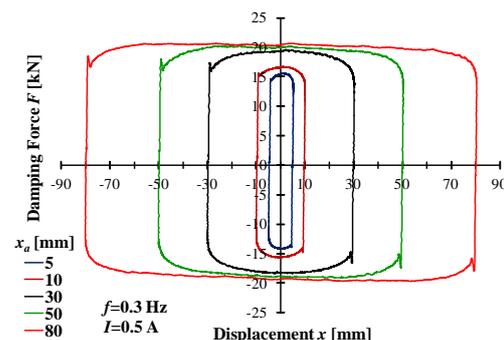


Fig.8 Changes of x - F hysteresis loops with amplitude x_a

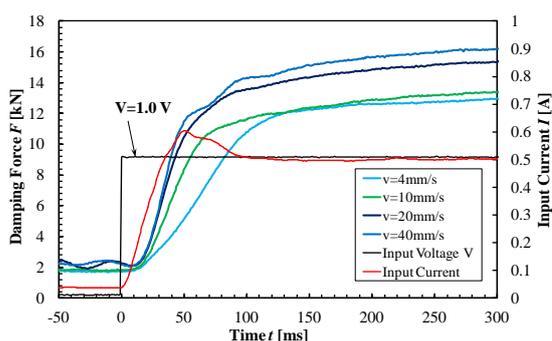


Fig.9 Step responses of damping force F depending on damper speed v

6. 結 言

開発した MR 流体コンポジットダンパは、MR 流体コンポジットの MR 効果を反映して、可変摩擦力ダンパと類似した減衰力特性を示し、 $I=0.5\text{ A}$ で設計値の約 20kN の減衰力を発揮した。また、その減衰力特性を明らかにすることができた。

本研究は、科学研究費助成事業 (基盤研究 B : (No.24360087)) (平成 24~26 年度) の補助を受けた。

参考文献

- 1) Nakano M, et al. : Dynamic viscoelasticity of a magnetorheological fluid in oscillatory slit flow, Int. J. of Modern Physics B, **13-14**, 15&16, 2068/2076 (1999)
- 2) Spencer B. F., Nagarajaiah S. : State of the art of structural control, J. of Struct. Eng., **129-7**, 845/856 (2003)
- 3) 中野政身 : MR 流体コンポジットの開発とその応用, フルードパワーシステム, **42-1**, 41/45 (2011)