ER 流体を用いた減衰力可変ダンパの基本特性*

小林 博 栄^{*1}, 小林 信 之^{*2}, 横 井 領^{*1}
斉 藤 修^{*2}, 森 下 信^{*3}Fundamental Performance of the Controllable Vibration Damper
using Electro-Rheological FluidHiroe KOBAYASHI, Nobuyuki KOBAYASHI, Ryoh YOKOI,
Osamu SAITOH and Shin MORISHITA

A new controllable damper is proposed for suppressing the vibration of the piping system in a wide frequency range. Electro-Rheological fluid (ERF) is enclosed in the damper casing of metallic bellows in place of viscous oil, and the apparent viscosity of ERF can be varied by applying an electric field strength. The construction of an ERF vibration damper was proposed both for suppressing small amplitude vibration and for releasing thermal movement of piping systems. Performance of this damper was investigated using a simple L-shaped piping model with rotary-type excitor. The experimental results show the effectiveness of the controllable damper for suppressing small amplitude vibration.

Key Words: Vibration Control, Vibration Control Device, Damper, Electro rheological Fluid, Metallic Bellows

1. 結 言

火力および原子力発電や化学プラント等の施設には数多くの配管系があり、それらは想定される振動問題に十分な安全裕度をもつように、一般には剛構造とするように設計されている。しかしながら、安全性を重視するあまり過度に剛な設計になっている場合もあり、合理的な減衰機構を取付けることにより振動応答の低減を計ることはコスト削減、信頼性向上のため重要なことである。地震のように比較的振動数が低く振幅の大きな振動には従来より使用されてきたメカニカルスナッパなどの耐震支持装置のほかに、弾塑性ダンパ、摩擦ダンパなどの適用が検討されその有用性が評価されている⁽¹⁾。

しかし、発電設備や LNG プラントなどの高温または低温の内部流体を有する配管系では数百度の温度変化があるため、配管系の熱移動や配管自体の熱膨張に

対応するために、これらの支持装置、ダンパおよび支持構造物のガタ・ギャップの存在が避けられない。

配管系の振動には上記の地震によるもの以外に、ポンプの不釣り合い振動や内部流体に起因する比較的振動数が高く振幅の小さな振動がプラント稼動中に発生することがある。このような振動に対しては上述の支持装置やダンパは連結部や内部のガタと摩擦の存在のため必ずしも有効でない。従来より、このような比較的振動数が高く、振幅の小さい振動に対しては動吸振器の適用が検討されてきた⁽²⁾⁽³⁾。しかし、動吸振器の特性上、減衰力を大きくできないので中小口径配管系への適用に限定される。

一方、電界強度を変えることにより見掛けの粘性が変化する流体が1949年に Winslow により報告されている⁽⁴⁾。この流体は一般に電気粘性流体または ER 流体(Electro-Rheological Fluid)と呼ばれており、エンジンの防振マウント、ダンパなどへの応用研究が行われている⁽⁵⁾。

ここでは、大口径配管および機器類の微小振幅の振動抑制のため、ダンパの外部より電界強度を変化させることにより、振動特性に即応して減衰力を最適に制御できる ER 流体を作動油とした減衰力可変ダンパの開発を最終目的として、ダンパ本体の基本構成を検討

* 原稿受付 平成5年4月28日。

^{*1} 正員, 石川島播磨重工業(株)原子力事業部(〒235 横浜市磯子区新中原町1)。^{*2} 正員, 石川島播磨重工業(株)技術研究所(〒135 東京都江東区豊州3-1-15)。^{*3} 正員, 横浜国立大学工学部(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

した。さらに、ポンプの不釣り合い振動を模擬した試験体による振動試験により確認した減衰力可変ダンパの基本特性について報告する。

2. 電気粘性流体

ER流体は印加された電界強度により、そのレオロジ的あるいは流れ性質が粘塑性形の性質に変化し、それによって見かけの粘性が短時間に変化する流体を総称したものである。一般に、ER流体に電場が印荷されていない場合はニュートン流体としての特徴を有している。ER流体は電場の印荷によってその特徴がニュートン流体から、降伏応力を有するビンガム(Bingham)流体としての特徴を有するようになり、この降伏応力が印荷される電界強度により変化することにより、見かけの粘性抵抗が変化する。通常、絶縁性の分散媒中に固定粒子を分散懸濁して得られる流体で、電場に流体中の固定粒子が誘電分極を起し粒子のクラスタを形成する。これが電極間の流体の抵抗となり、レオロジ的性質が変化する。シリカゲル、でんぷん、セルロース、アルミナ、イオン交換樹脂などが粒子として用いられる。

3. 可変ダンパの機構

本研究で試作した可変ダンパの構造の概略を図1に示す。二つの金属ベローズⅠ、Ⅱ間にフランジBを設置し、そのフランジ内にあるスリット状のオリフィスに電極を相対させ、ER流体を封入する。金属ベローズⅠの端部と電極部分を配管と固定部にそれぞれ連結する。配管と固定部の間に相対変位が生じると金属ベローズⅠ内のER流体がフランジBのオリフィスを通して金属ベローズⅡ内に流入する。このとき、電極に電圧を加えることにより、ER流体の見掛けの粘性を変化させてダンパの減衰力を制御することができる。

図1 減衰力可変ダンパの概略構造

すなわち、通常のオイルダンパにおいてオリフィス径を変化させることと同等の効果をもたせることができる。

コントローラを用いて外部より電界強度を可変にすれば、系の振動特性や外力の特性の変化に応じて振動抑制効果が最適となるように減衰力を調整することができる。電界強度を時不変にしておけばパッシブダンパとなり、時変にすればセミアクティブダンパとなる。

本ダンパはその機構により以下に示す特長を有する。

(1) ダンパ本体内部や対象物との接続部がたががなく、かつ、通常のオイルダンパのようなシール機構における摩擦もないので、微小振幅の振動にも減衰効果が期待できる。

(2) 電極間の電界強度を制御することにより作動油の見掛けの粘性を変えられるので、任意の減衰力を発生させることができる。

(3) 電界強度を変化させる制御系が万一故障しても、パッシブダンパとして電界強度(E. F. S)0 kV/mm時の減衰力が必ず保証される。

図2 振動試験用配管モデル

図3 振動試験用配管モデル

(4) 金属ベローズを用いているため、ベローズの変形追従性により配管につきものの熱変形を許容できる。

4. 配管モデルによる振動試験

減衰力可変ダンパの特性を把握するために、図2に示す試験体による振動試験を実施した。試験体は平面L形配管で、その先端にポンプを模擬した集中質量を付加し、その重心位置に可変ダンパを取付けた。偏心質量を取付けた円盤をモータで駆動し、不釣り合い力を発生させる形式の加振機を集中質量頂部に設置して加振を行った。試験装置の写真を図3に示す。

加振力 F は式(1)で与えることができるので、静不釣り合い $m_p r_p$ を調節することにより設定することができ、加振振動数は回転数(ω_p)を制御することで設定した。

$$F = m_p \cdot r_p \cdot \omega_p^2 \cdots \cdots (1)$$

ここで、

m_p : 偏心質量

r_p : 偏心質量取付け半径

ω_p : モータ回転円振動数

本試験ではダンパの基本的特性を調べるために、が

表 1 試験条件

Unbalance (kg・mm)	Voltage (KV)	E.F.S (kV/mm)
0.11	0.0	0.
0.13	0.4	0.33
0.15	0.8	0.67
0.17	1.2	1.00
0.19	1.6	1.23
0.20	2.0	1.67

Unbalance and voltage are combined each other in the vibration test

表 2 自由振動試験結果

Damper	w/o	with			
E.F.S (kV/mm)	—	0	0.33	1.0	1.7
Natural Freq.(Hz)	7.3	9.7	9.7	9.5	9.4
Damping Ratio	0.004	0.011	0.016	0.027	0.034

た、摩擦などの非線形性を有する要素をできるだけ除くようにした。

本試験のパラメータは静不釣り合い量(加振力)と電極への印加電圧(電界強度)である。試験条件を表1に示す。ハンマリングによる自由振動試験および加振力一定の正弦波掃引試験の2種類の加振を行った。ER流体の粘度は温度依存性があるので、試験温度は $50 \pm 3^\circ\text{C}$ になるように加温した。なお、 50°C におけるER流体の粘度は $22 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ であった。

今回の試験では、幅 20 mm、長さ 36 mm の電極を、隙間 1.2 mm で 18 枚並べたものをフランジ(B)に埋め込んで使用し、印加する電圧は直流とした。

静的加力試験により求めた試験体のダンパ取付け部のばね定数は、配管単体で 99.8 N/mm、ダンパを取付けたときに 198.8 N/mm であった。

5. 実験結果および考察

5・1 自由振動試験 図4にはハンマリングによる試験体頂部加速度の自由振動波形の一例として、ダンパを取付けない場合と、ダンパを取付けて電界強度を 0 kV/mm および 1.67 kV/mm に設定した場合の結果を示す。自由振動波形より得られた試験体の共振振動数および減衰比をまとめて表2に示す。ダンパを取付けると、ベローズの剛性により試験体の固有振動数は約 30% 上昇する。ダンパ内の電極間の電界強度を変化させた場合、電界強度の増加に伴い共振振動数はわずかに低下するが、その大きさは約 3% と小さく無視し得る量である。一方、電界強度の増加に伴い ER 流体の見掛けの粘性抵抗は増加し、試験体の減衰比は

図 4 自由振動波形

約3～9倍大きくなる。試験体の減衰比はER流体に印加される電界強度が1.67 kV/mmの場合、0 kV/mmに比べ約3倍大きくなることが確認された。

5・2 正弦波掃引試験 図5には静不釣合いが0.11 kg・mmの条件下で得られた配管頂部加速度のパワースペクトルを電界強度をパラメータとして示す。電界強度の増加によるER流体の見掛けの粘性抵抗の増加により共振時の応答が低下するが、共振振動数は電界強度を変えてもほとんど変化しない。なお、12.5 Hz近傍のピークは、 x 方向に振動する2次モードの影響がダンパ取付方向である z 方向に表れたものである。図6には電界強度と配管頂部の共振変位の関係を静不釣合いをパラメータとして示す。図7には電界強度とダンパの等価粘性減衰係数との関係を示す。等価粘性減衰係数は正弦波掃引試験より求めた試験体の減衰比と試験体のモード剛性、共振振動数より算出した。図8には共振振動数と電界強度の関係を加振力をパラメータとして示す。電界強度が0.67 kV/mm以上では加振力が小さいほど共振振動数が高くなる傾向を有するが、その変動は最大で5%程度である。

以上の検討より、以下のことが明らかになった。

図5 正弦波掃引試験によるパワースペクトル

図6 電界強度と配管頂部の共振変位の関係

(1) 0.1 mm以下の微小振幅の振動に対しても本ダンパは効果があり、応答を0.01 mmのオーダにまで低減できる。

(2) 電極間の電界強度の増加とともに応答が低減する。電界強度が0 kV/mmから0.33 kV/mmで応答変位は急激に低下する。それ以上の電界強度では変位の低減の割合は小さくなる。

(3) 電界強度が小さい場合、減衰比に明確な静不釣合い依存性は見られないが、0.33 kV/mm以上の電界強度では静不釣合いが小さいほど減衰比が大きくなる傾向を有する。特に図7の電界強度1.23, 1.67 kV/mmで静不釣合いが0.11 kg・mmの場合、減衰比が急激に高くなっている。

(4) これは以下に示す理由によって発生していると推定されるが、詳細は今後の検討課題である。試験体の共振振動数は電界強度にかかわらず一定であるため、振幅が小さい場合電極間を通過するER流体の速度が小さくなり、ER流体に発生するひずみ速度は小さくなる。一方、負荷される電界強度が強いほどER流体のビンガム流体としての降伏応力(または降伏ひずみ速度)は大きくなる。このため、電界強度が強くと振幅が小さい場合は、電極間のER流体に生じるせん断応力は降伏応力以下となり、見掛けの粘性が急激に上昇し、試験体の減衰比が大きくなった。

(5) (3)項に示したように、共振振動数の加振力、電場の強さによる変化が小さいことより本ダンパの力学モデルは、ペローズの剛性を模擬したばね要素と、電界強度によって変化するER流体の粘性抵抗を等価粘性減衰係数の変化で代表するダッシュポットの並列

図7 電界強度とダンパの等価粘性減衰係数の関係

図 8 共振振動数の変動の電界強度と関係

図 9 ER 流体温度と配管頂部の共振加速度の関係

モデルとして表現できる。

図 9 には ER 流体の温度を変化させた場合の試験体頂部の共振加速度の変化を示す。温度が高くなるにつれて応答加速度は大きくなる傾向を有する。温度が 30°C から 55°C まで上昇すると応答加速度は約 25% 増加する。つまり、30°C から 25°C の温度上昇により等価粘性減衰係数は 25% 低下することになる。したがって、減衰力を外部より制御しようとする場合は必要に応じて温度の制御も必要となる。

6. 結 論

配管の熱変形に追随し、しかも、微小振幅の振動も抑制することを目的として、金属ベローズと電極を組合せ、ER 流体を作動油とした減衰力可変ダンパを考案した。本ダンパの基本特性を調査するため、L 形配管モデルにダンパを取付け、ポンプの不釣り合い力を模擬した振動試験を実施した。試験結果の考察より以下のことが明らかとなった。

(1) 振幅 0.1 mm 以下の微小振幅で高い減衰効果を有する。

(2) 電極間の印加電圧の増加とともに応答が低減し、電界強度 1.67 kV/mm では 0 kV/mm 時の 3 倍

程度の減衰力が得られる。

(3) 本ダンパの力学モデルは、ベローズの剛性を模擬したばね要素と、電界強度によって変化する ER 流体の粘性抵抗を等価粘性減衰係数の変化で代表するダッシュポットの並列モデルとして表現できる。

(4) 本ダンパはパッシブダンパとしても高い減衰効果の得られる構造である。

今後は、電極構造とダンパ特性の関連、配管系に非線形性がある場合の応答低減効果などを解明し、本ダンパに最適なコントロールアルゴリズムを検討していく予定である。

本研究は東燃(株)から ER 流体のサンプル供与を受けて実施したものである。関係各位に感謝する。

文 献

- (1) 例えば, Shibata, H., ほか 9 名, *ASME, PVP*, 211 (1991), 63-69.
- (2) 山下・ほか 2 名, *機論*, 55-518, C(1989), 2511.
- (3) 背戸・ほか 2 名, *機論*, 54-508, C(1988), 2966.
- (4) Winslow, W. M., *J. of Applied Physics*, 20(1949), 1137-1140.
- (5) 例えば, Morishita, S., ほか 2 名, *ASME, PVP*, 229 (1992), 127-132.