磁性流体を用いた同調液柱管ダンパーにおける液柱減衰力の変化が制振力に及ぼす影響

The effect to the damping performance of magnetic fluid tuned liquid column damper induced by various damping coefficient of liquid column

碓 一暉^{*1} (学生員), 近藤 真也^{*1}, 澤田 達男^{*1} (正員)

Kazuki IKARI(Stu. Mem.), Sinya KONDO, Tatsuo SAWADA(Mem.)

Magnetic fluid tuned liquid column damper (MF-TLCD) is a kind of semi-active damper that uses magnetic fluid as its working fluid. An MF-TLCD alters the natural frequency of the magnetic fluid column that forms the resident liquid inside the MF-TLCD by applying a magnetic field. We quantitatively investigated the damping coefficient generated by the flow of magnetic fluid, which is strongly related to the damping performance. Three kind of U-pipes that have each different shape ((1) conventional (2) equipped with an orifice (3) curved fluently) were prepared and single-degree-of-freedom oscillation was performed with each those pipes. Finally, we discussed the effect to the damping performance of MF-TLCD induced by various damping coefficient subjected to magnetic field and configurations of those U-pipes.

Keywords: magnetic fluid, tuned liquid column damper, damping coefficient, magnetic field, U-pipe

1 緒言

U 字管内の液体揺動は、船舶の横揺れ防止のための制振装置として従来から用いられており、これはアンチローリングタンク(ART, Anti Rolling Tank)[1]と呼ばれている。この ART と作動原理がほぼ同じで、その制振対象を船舶から構造物へ変更したものが同調液柱管ダンパー(TLCD, Tuned Liquid Column Damper)[2]である。TLCD は、U 字管内の液体振動で生じる水平方向の慣性力を制振力として利用する制振装置で、外部からのエネルギーを必要としないパッシブダンパーである。TLCD の特徴としては、固有振動数が液柱長のみで変化させられること、液柱運動が管軸方向に沿った一自由度運動として容易に解析できることが挙げられる。しかし、他のパッシブダンパーと同様に同調の誤差に敏感で制振効果が発揮できる周波数帯が狭いことや、U 字管中央に取り付けたオリフィスの水頭損失から生じる減衰が非線形なため、制振性能が振幅に依存するなどの欠点が存在する。

このような欠点を改善するために TLCD のセミアクティブ化が図られており、それらはほとんどが液柱減衰力を制御する方式である。減衰力を制御する方法と

しては、バルブ調節によってオリフィスの開口率を可変にする方法[3,4]と作動流体に MR 流体を用いて磁場印加による粘性力増加を利用する方法[5]の二種類が提案されている。

本研究では、作動流体に磁性流体を用いた TLCD (以後、MF-TLCD と略記) を提案している。MF-TLCD は、電磁石による定常磁場を利用して磁性流体に磁気力を与え、減衰ではなく磁性流体液柱の復元力を変化させることで固有振動数を制御可能としたセミアクティブダンパーである。よって、印加磁場によって常に最適な同調比を満たすことができ、高い制振効果を広周波数帯で発揮可能である。小山田ら[6]は MF-TLCD の固有振動数変化を線形解析によって明らかにすると共に、構造物-MF-TLCD 二自由度強制振動実験を行うことによって、従来の TLCD よりも MF-TLCD の制振効果が高いことを実証した。

本研究では、U 字管形状と磁場印加条件が MF-TLCD の液柱減衰比をどの程度変化させるかを定量的に求め、その減衰比変化が制振力に及ぼす影響を考察することを目的とした。U 字管形状としては (1)従来形状(2)オリフィス付加(3)曲がり管を緩やかにした U 字管の三種類を用意した。これら U 字管を用いて一自由度磁性流体液柱強制振動実験を行い、液面振幅周波数応答を測定し、共振点振幅から減衰比を算出した。そして、減衰比の値をそれぞれの U 字管形状にて比較を行った。

連絡先: 澤田 達男, 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1,
慶應義塾大学理工学部機械工学科,
e-mail: sawada@mech.keio.jp

^{*1} 慶應義塾大学

2 理論

2.1 定常磁場下での一自由度磁性流体液柱強制振動

Fig. 1 のように U 字管内の磁性流体液柱の一自由度強制振動を考える。磁性流体は非圧縮とし、スロッシングによる液面動揺は無視する。また、U 字管内に働く磁場強さは半径方向に依存しないものとする。磁性流体液柱に働く磁気体積力項を F_m とすれば、液面変位 x_m の運動方程式は以下のように表せる。

$$\rho A l \ddot{x}_m + c_m \dot{x}_m + 2\rho A g x_m - F_m = -\rho A b \ddot{y} \quad (1)$$

ここで、 y は外部加振による U 字管の水平方向変位、 ρ は磁性流体密度、 A は液柱断面積、 l は液柱長さ、 b は液柱の水平方向長さ、 c_m は管内流れが層流だと仮定した場合の減衰係数、 g は重力加速度である。また、磁気体積力項 F_m は以下のように表せる[7]。

$$F_m = -\frac{A\mu_0\chi}{2} \left[\{H(x_m)\}^2 - \{H(-x_m)\}^2 \right] \quad (2)$$

$$H(x_m) = \frac{NI}{2L} \left[\frac{x_m - h + L/2}{\sqrt{(x_m - h + L/2)^2 + r^2}} - \frac{x_m - h - L/2}{\sqrt{(x_m - h - L/2)^2 + r^2}} \right] \quad (3)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 χ は磁性流体の磁化率、 h は一つの実験系における電磁石位置で、静水面から電磁石中心までの距離で表される。ただし、静水面より上側(+)か下側(-)かでそれぞれ符号を持つ。 h は両側の電磁石で同じ値に設定され、対称な定常磁場が U 字管内に働いている。更に、 H はソレノイドが作る磁場と

Fig. 1 Analytical model of MF-TLCD.

した時の磁場強さであり、電磁石巻数 N 、電磁石長さ L 、電磁石内径 r 、供給電流 I によって求められる。

2.2 磁気体積力項の線形化による固有振動数解析

式(2)で示したように、磁気体積力項 F_m はそのままでは非線形なため解析が難しい。そこで、液面変位 x_m を微小と仮定してやることで F_m の線形化を行う。その結果、 F_m は以下のように置き換えられる。

$$F_m \approx -2A\mu_0\chi H(0) \cdot H'(0) \cdot x_m \quad (4)$$

H' は磁場強さ H を変位 z で微分した時の磁場勾配を表している。更に、この線形化によって磁性流体液柱の固有振動数 f_n が以下のように求められる。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g^*}{l}} \quad (5)$$

$$g^* = g - \frac{\mu_0\chi H(0) \cdot H'(0)}{\rho} \quad (6)$$

ここで、 g^* は定常磁場下において磁性流体液柱に働く見かけの重力加速度である。式(6)より、磁場勾配 $H'(-h) < 0$ の時 g^* は増加し、 f_n も増加する。一方、 $H'(-h) > 0$ の時 g^* は減少し、 f_n も減少することがわかる。

Fig. 2 は、式(2)と式(4)で求められる F_m に関して $h = -30, 30$ mm, $I = 2.0$ A の時の値をそれぞれ示した図である。本実験では -0.02 m $< x_m < 0.02$ m となるように加振振幅を設定したため、 x_m の微小の仮定は成立し、式(4)で定めた線形化は妥当であると言える。

Fig. 2 Magnetic force acting on the liquid surface.

3 実験

3.1 一自由度強制振動実験方法

実験装置の概略を Fig. 3 に示す。MF-TLCD は、U 字管容器、円形電磁石、作動流体の磁性流体で構成される。U 字管両側に設置された寸法の同じ電磁石に一定の電流を供給することで定常磁場を印加し、磁性流体に磁気体積力が加えられる。

まず、加振器によって任意の加振振幅と周波数を持つ正弦波を U 字管に与え、液面振動が定常になるまで待機する。そして、定常後の液面振動の波形をレーザー変位計によって測定することによって一自由度強制振動時の液面振幅を得た。ここで、レーザー照射位置によって液面振幅の値が少し異なることが確認されたが、それによるばらつきは小さいため本実験では照射位置が及ぼす振幅への影響は無視した。

加振振幅 $a_0 = 2.0$ mm、電磁石位置 $h = -30, 0, 30$ mm、供給電流 $I = 0 \sim 2.0$ A (0.25 A 刻み)、加振周波数 $f = 0.5 \sim 1.8$ Hz (0.02 Hz 刻み) として一自由度磁性流体液柱の液面振幅周波数応答を測定した。ここで、共振周波数付近では刻み幅を 0.01 Hz として細かく測定した。また、 h は両電磁石で同じ値に設定し、対称磁場を磁性流体に与えている。

使用磁性流体は Ferrotec 社のケロシンベース磁性流体 MSGS60 とした。密度は 1327 kg/m^3 、飽和磁化は 58.7 mT である。本実験で使用した電磁石の中心軸上の磁場分布を Fig. 4 に示す。

Fig. 3 Experimental apparatus.

3.2 U 字管容器寸法

本実験で使用した 3 種類の U 字管容器寸法図を Fig. 5 ~ 7 に示す。管内径は全て 40 mm であり、U 字管の水平方向の幅もほぼ全て同じになるように作製した。これら U 字管の無磁場での液柱固有振動数 f_n は Fig. 5 ~ 7 で順番にそれぞれ 1.04, 0.95, 1.12 Hz である。

4 結果

4.1 減衰比の定義と算出方法

液面振幅周波数応答より算出を試みる減衰比 ζ は以下のように定義される無次元数である。

$$\zeta = \frac{c_m}{c_c} \quad (c_c = 2m_m\omega_m) \quad (7)$$

ここで、 c_c は磁性流体液柱の臨界減衰係数、 m_m は磁性流体質量、 ω_m は磁場印加後の液柱固有角振動数である。ここで、 c_c はその系の減衰自由振動の挙動が振動するか否かの境界となる値を意味している。 c_c は ω_m によって決まる値で、磁場印加によって ω_m は変化することから、 c_c は磁場印加に伴って変化する。

減衰比 ζ を液面振幅周波数応答より算出するためにハーフパワー法を用いた。これは、減衰が比較的小さい場合の共振曲線のピークに着目して振動系の減衰を求める方法である。共振点 ω の両側に共振点の最大振幅のハーフパワー点（振幅では $1/\sqrt{2}$ ）に等しい点を取り、その二点の周波数をそれぞれ ω_1 , ω_2 とした時 ζ は以下のように表される。

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2 + \omega_1} \quad (8)$$

Fig. 4 Distribution of magnetic flux density

4.2 液面振幅周波数応答

従来型 U 字管に対して $h = -30, 0, 30$ mm として、一自由度強制振動実験を行った場合の無次元液面振幅 a_m / a_0 周波数応答を Fig. 8 ~ 10 に示す。なお、 a_m は磁性流体液柱液面振幅を表す。レーザー変位計を用いて液面振幅を測定することによって、共振点付近を含めて全体的に滑らかな応答曲線を得ることができた。しかし、 $h = 30$ mm で磁場を強く与えると液面勾配が急になり測定結果に少しばらつきが見られた。

Fig. 5 The configuration of conventional U-pipe.

Fig. 6 The configuration of U-pipe equipped with orifice.

Fig. 7 The configuration of curved fluently U-pipe.

一自由度強制振動系では、周波数応答の極大値（共振点）における加振周波数が液柱固有振動数と一致する。実験結果を見てみると、 $h = -30$ mm の場合には電流を大きくし磁場を強めることで共振点が右側へ推移していることがわかる。つまり、この場合には液柱固有振動数は増加している。逆に、 $h = 30$ mm の場合には磁場を強く与えるほど固有振動数は減少している。また、 $h = 0$ mm の場合、左右の液面に働く磁気体積力が振動中に常に互いに打消しあうため、見かけ上は磁

Fig. 8 Frequency response of dimensionless liquid surface displacement when $h = -30$ mm. Fig. 9 Frequency response of dimensionless liquid surface displacement when $h = 0$ mm. Fig. 10 Frequency response of dimensionless liquid surface displacement when $h = 30$ mm.

性流体に力が加えられていない状態となる。しかし、Fig. 9 を見ると磁場を強くするにつれて少しずつではあるが固有振動数が減少している。これは磁場印加による液面形状変化が原因であると考えられる。磁場印加時、液面は中心位置が下がるように勾配を作る。この傾向は磁場が強いほど顕著であり、これによって設定した h よりも少し大きな値を実際の h は取ったため固有振動数は減少したと考えられる。

Fig. 11 Comparison of frequency response for three types of U-pipes when $h = -30$ mm.

Fig. 12 Comparison of frequency response for three types of U-pipes when $h = 0$ mm.

Fig. 13 Comparison of frequency response for three types of U-pipes when $h = 30$ mm.

4.3 共振点振幅の比較

三種類の U 字管で液面振幅周波数応答を $h = -30, 0, 30$ mm の場合に比較した図をそれぞれ Fig. 11 ~ 13 に示す。ここで、これらは電流 $I = 1.0$ A 与えた時の結果である。また、実験の都合上、三種類の U 字管における無磁場での液柱固有振動数 f_0 はそれぞれ少し異なっている。そこで、共振点振幅を比較しやすくするため、今回は

Fig. 14 Transition of damping coefficient ζ with increasing current (conventional U-pipe).

Fig. 15 Transition of damping coefficient ζ with increasing current (U-pipe with an orifice).

Fig. 16 Transition of damping coefficient ζ with increasing current (U-pipe curved fluently).

加振周波数 f を U 字管それぞれの f_0 で無次元化した。

Fig. 11 ~13 を見ると、曲がり管が緩やかな U 字管での共振点振幅が最も大きいことがわかる。これは、曲がり管を緩やかにしたことによって流体抵抗が減少し、減衰力も減少したと考えられる。一方、オリフィスを付けた U 字管で最も共振点振幅が小さくなったのは、オリフィスによって流体抵抗が増加したからだと考えられる。

4.4 磁場と U 字管形状が減衰比に与える影響

液面振幅周波数応答からハーフパワー法を用いて減衰比を求め、U 字管形状毎にまとめた結果を Fig. 14 ~16 に示す。まず、それぞれの U 字管で無磁場での減衰比を比較すると、共振点振幅の大きさからも理解できるように、減衰比は曲がり管を緩やかにした U 字管で最も小さくなる。一方、オリフィスを付けた U 字管では最も大きくなる。

次に、磁場印加による減衰比の変化を見てみると、 $h = 30 \text{ mm}$ の場合のみ磁場を強めるにつれて減衰比が増加していく傾向が見られた。これは全ての U 字管形状で見られる傾向である。 $h = -30, 0 \text{ mm}$ の場合には、磁場を印加しても減衰比には大きな影響は見られなかった。ただし、 $h = -30 \text{ mm}$ よりも $h = 0 \text{ mm}$ の場合の方が減衰比は常に少し大きな値を取った。よって、 h をより大きくし、かつ磁場も強めてやることで減衰比を更に大きくすることが可能だと考えられる。

このように、液面振幅周波数応答から減衰比を定量的に算出することができた。これらの値は U 字管形状や磁場によって異なる値を取り、かつ電磁石位置によってもその傾向が異なることが確認されたため、求められた減衰比の値には一定の妥当性があると考えられる。

4.5 液柱減衰力の変化が制振力に及ぼす影響

減衰比が U 字管形状や磁場によって変化した場合、その変化が MF-TLCD の制振力へ及ぼす影響について考察する。一般的に、パッシブダンパーが最も制振力を発揮するのは固有振動数と外部からの加振振動数が一致する時であり、その時の振幅だけ見れば減衰比が小さい方が制振力が高いと言える。MF-TLCD は固有振動数可変なセミアクティブダンパーであり、加振振動数との同調が可能である。よって、MF-TLCD において減衰比はなるべく小さい方が制振力を高くすることができると考えられる。したがって、Fig. 7 のような曲がり管を緩やかにした U 字管を用いて、かつ $h =$

-30 mm とした場合が MF-TLCD を利用して制振を行うには最適であると考えられる。

5 結言

MF-TLCD で用いる U 字管形状として三種類の U 字管を用意し、一自由度磁性流体液柱強制振動実験を行いハーフパワー法によって減衰比を求めた結果、以下の知見を得た。

1. U 字管形状に関係なく、電磁石が静水面より下側に設置された場合、磁場強度増加に伴って減衰比は変化しない。一方、電磁石が上側に設置された場合、磁場強度増加に伴って、減衰比は増加する。
2. MF-TLCD では、曲がり管が緩やかな U 字管を用いて、電磁石を静水面より下側に設置した時、最適制振が可能となる。

(2015 年 4 月 17 日受付)

参考文献

- [1] 渡邊, 減揺水槽の設計に就て, 造船協会會報, Vol. 46 (1930), pp. 125-153.
- [2] 坂井, 高枝, 玉木, 液柱管ダンパー(Tuned Liquid Column Damper)の提案-液柱管の振動特性-, 土木学会構造工学論文集, Vol. 35A (1989), pp. 543-552.
- [3] 木村, 阿部, 藤野, 可変オリフィスを利用したセミアクティブ同調液柱管ダンパーの制御則, 構造工学論文集, Vol. 43A (1997), pp. 671-678.
- [4] S. K. Yalla and A. Kareem, Semiactive tuned liquid column dampers: Experimental study, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129 (2003), pp. 960-971.
- [5] J. Y. Wang, Y. Q. Ni, J. M. Ko and B. F. Spencer, Magneto-rheological tuned liquid column dampers (MR-TLCDs) for vibration mitigation of tall buildings: modeling and analysis of open-loop control, *Computers and Structures*, Vol. 83 (2005), pp. 2023-2034.
- [6] T. Oyamada, H. Masuda, K. Ikari and T. Sawada, Damping characteristics of a magnetic fluid tuned liquid column damper under static magnetic fields, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 45 (2014), pp. 659-665.
- [7] H. Masuda, T. Oyamada and T. Sawada, Experimental study on damping characteristics of the tuned liquid column damper with a magnetic fluid, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 41 (2013), 012049 (9pp).