拘束型磁性制振材の制振特性*
(第2報, 損失係数の計算および実験検証)半坂 征則^{*1}, 林 巖^{*1}, 岩 附 信行^{*1}
御 船 直人^{*2}, 森 川 広一^{*1}, 香 川 美 仁^{*3}The Damping Property of Magnetic Rubber Dampers
with a Constraining Layer
(2nd Report, Estimation of the Loss Factor of Magnetic Rubber Dampers with a
Constraining Layer and Experimental Demonstration)Masanori HANSAKA^{*4}, Iwao HAYASHI, Nobuyuki IWATSUKI,
Naoto MIFUNE, Koichi MORIKAWA and Yoshihito KAGAWA^{*4} Department of Mechanical Engineering for Production, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

The authors have been developing magnetic rubber dampers with a constraining layer (MRDC). They are generally installed on vibrating steel plates with the magnetic attractive force of the magnetic rubber layer. The damping performance of these MRDC depends mainly on the frictional loss due to the relative slip motion arising between the magnetic rubber layer and the vibrating steel plate. In the previous paper, the flexural vibration of a beam with a sheet of MRDC was theoretically analyzed by taking the frictional loss due to the relative slip motion into account and the equation to calculate the loss factor of the beam with a sheet of MRDC was derived. In this paper, the modal loss factors of the beam with a sheet of MRDC were calculated based on the derived equation, and those calculated values were compared with the data obtained experimentally using the method of resonance. Also, the relationship between the loss factor of the beam with a sheet of MRDC and material properties-magnetic attractive force, the content of ferrite powder, the thicknesses of constraining-, magnetic rubber-, and base-layers has been discussed.

Key Words: Loss Factor, Damping, Damping Material, Frictional Vibration, Magnetic Rubber Damper

1. 結 言

著者らがこれまでに施工性を高めるために開発を進めてきた拘束型磁性制振材⁽¹⁾⁻⁽³⁾は、フェライト粉末を配合し着磁した磁性ゴム層に拘束層を接着積層したもので、磁性ゴム層の磁力吸着力により鋼製の振動体に保持する。そのため、磁性ゴム層と振動体間に相対すべり変位を生じ、このすべり変位による摩擦損失が拘束型磁性制振材の減衰性能を大きく支配する。そこで著者らは、この相対すべりによる摩擦損失を考慮したはりの曲げ振動解析を行い、その結果に基づいて拘束型磁性制振材の損失係数を求める式を導出し、第1報において報告した⁽⁴⁾。

本報では、共振法を用いた損失係数の測定実験を行い、第1報で導出した式に基づく損失係数の計算値と比較検討した。そして、相対すべりによる摩擦損失を

考慮したはりの曲げ振動解析の妥当性、および導出した損失係数の計算式の妥当性の検証を行った。

さらに、磁性粉量、磁力吸着力、拘束層・磁性ゴム層・基層の厚さによる拘束型磁性制振材の損失係数の変化について理論計算および実験の両面から検討し、拘束型磁性制振材の損失係数の特性を明らかにした。

2. 拘束型磁性制振材の
損失係数の計算式

第1報⁽⁴⁾で導いた拘束型磁性制振材の損失係数の計算式を簡単に引用する。図1に拘束型磁性制振材を全面に貼付した片持ばりに示す。図2にその変型状態を示す。この拘束型磁性制振材を全面に貼付した片持ばりの損失係数 η は次式で求められる。

$$\eta = \frac{L_{fs}/2\pi + \eta_2 P_2}{P} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 L_{fs} は曲げ振動1サイクル当たりの摩擦損失、 η_2 は磁性ゴム層の損失係数、 P_2 は磁性ゴム層のひずみエネルギー、 P は三層(拘束層、磁性ゴム層、基層)全体のひずみエネルギーである。三層全体のひずみエネルギー P は次式で求められる⁽⁵⁾。

⁽⁵⁾ 以下、下付添字 1, 2, 3 は、それぞれ基層、磁性ゴム層、拘束層を表す。

* 原稿受付 2000年10月12日。

^{*1} 正員、東京工業大学大学院理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)。^{*2} (財)鉄道総合技術研究所(〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)。^{*3} カリフォルニア大学デービス校機械航空工学科(One Shields Avenue, Davis, CA 95616-5294, USA)。

E-mail: hansaka@rtri.or.jp

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 P_1, P_2, P_3 は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{2} \int_0^L \left[K_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} \right)^2 + D_1 \left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \right)^2 \right] dx \\ P_2 &= \frac{G_2 s^2}{H_2} \int_0^L \left(u_1 - u_3 + h \frac{\partial w_2}{\partial x} \right)^2 dx \\ P_3 &= \frac{1}{2} \int_0^L \left[K_3 \left(\frac{\partial u_3}{\partial x} \right)^2 + D_3 \left(\frac{\partial^2 w_3}{\partial x^2} \right)^2 \right] dx \end{aligned} \right\}$$

u_1 と u_3 はそれぞれ基層と拘束層の中央面の x 軸方向変位、 w_1, w_2 , および w_3 はそれぞれ基層、磁性ゴム層、および拘束層の z 軸方向変位で、すべて等しく $w_1 = w_2 = w_3 = w$ として扱っている。また、 E_1 と E_3 は基層と拘束層の縦弾性係数、 K_1 と K_3 は基層と拘束層の伸び剛性、 D_1 と D_3 は基層の拘束層の曲げ剛性で、それぞれ $K_1 = E_1 H_1$, $K_3 = E_3 H_3$, $D_1 = (E_1 H_1^3)/12$, $D_3 = (E_3 H_3^3)/12$, である。また、 G_2 は磁性ゴム層の横弾性係数、 L は拘束型磁性制振材の長さである。 s は磁性ゴム層のせん断ひずみと磁性ゴム層を基層に接着したときのせん断ひずみとの比である。また、 $h = H_2 + (H_1 + H_3)/2$ である。

また、基層と磁性ゴム層間の相対すべりによる摩擦損失 L_{fs} は次式で与えられる。

$$L_{fs} = 4\mu F_M (1-s) \int_0^L \left(u_{10} - u_{30} + h \frac{\partial w_0}{\partial x} \right) dx \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 μ は基層と磁性ゴム層間の摩擦係数、 F_M は

Fig. 1 A magnetic rubber damper attracted on a strip of steel plate

Fig. 2 Deformation of a magnetic rubber damper with a constraining layer (MRDC)

単位面積当たりの磁力吸着力、 u_{10}, u_{30} , および w_0 は u_1, u_3 , および w の振幅である。

3. 損失係数, せん断ひずみ比, 摩擦係数の測定実験

3.1 損失係数の測定

3.1.1 試験片 試験片の基層部分(長さ 250 mm, 幅 10 mm)は、片持ばりの固定部分から予測し得ない影響を避けるために、SS 400 鋼のブロックから支持部(長さ 150 mm, 幅 50 mm, 高さ $40 + H_1$ mm)と一体で削りだした。

次に、拘束型磁性制振材は、ストロンチウム系フェライト粉体を配合着磁したブチルゴムの磁性ゴム層(長さ 248 mm, 幅 10 mm)に SS 400 鋼の拘束層(長さ 248 mm, 幅 10 mm)をシアノアクリレート系接着剤により接着して作成した。また、比較のために同じ寸法で拘束層がなく磁性ゴム層のみの非拘束型磁性制振材も準備した。

これらの拘束型磁性制振材および非拘束型磁性制振材を前述の基層部分に磁力で吸着させて損失係数測定用試験片とした。各試験片の三層の厚さ $H_1 \sim H_3$, 磁性粉含有量 V , および単位面積当たりの磁力吸着力 F_M を表 1 に、試験片の素材と基本特性を表 2 に示す。また、磁性ゴム層の横弾性係数および損失係数の計算式を表 3^(注2) に、磁性粉量 45 vol% の例を図 3 に示す。

3.1.2 損失係数の測定法 図 4 に損失係数の測定装置の概略を示す。基層と一体成形した支持部を $300 \times 450 \times 420$ mm の鋼製定盤にボルトで固定し、基

Table 1 The sizes of tested specimens

	H_1 mm	H_2 mm	H_3 mm	V vol %	F_M kPa
MRDC	2	3	2	40	3.9~7.8
				45	2.5~8.3
				50	4.3~11.8
				60	4.3~17.2
	2~16 ^(a)	1~6 ^(b)	0~10 ^(c)	45	8.3

(a) H_1 : 2, 4, 8, 16 mm

(b) H_2 : 1, 2, 3, 4, 5, 6 mm

(c) H_3 : 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.2, 1.6, 2, 2.3, 3, 4, 5, 6, 8, 10 mm

Table 2 The fundamental properties of each layer

Layer	1: Steel base 3: Constraining	2: Magnetic rubber
Material	SS400 steel	Butyl rubber
Young's modulus E	206 GPa	-
Density ρ	7.8×10^3 kg/m ³	2.8×10^3 kg/m ³

^(注2) 文献(5)に記載されている方法による測定値を元に導いた実験式。

層の自由端を加振器により 50 Hz～3.2 kHz の正弦波で掃引加振した。加振器上端に取付けたインピーダンスヘッドにより加振力を、基層の固定端から 50 mm の箇所に貼付した加速度計により振動加速度を測定した。そして振動モビリティの周波数特性を求め、半値幅法により各モードにおける損失係数を求めた。なお、加振条件は、拘束型磁性制振材の主たる適用目的である鋼鉄道橋において、過去の測定事例より推定すると制振材貼付時の振動加速度が標準で 10 m/s² 程度であることなどを考慮して、前述の測定点において rms 振幅値で 10 m/s² となるよう調整した。

Table 3 The shear modulus and loss factor of magnetic rubber

	V vol%	Experimental equation (f:Hz)
G_2 MPa	40	$16.7 + 2.56 \times 10^{-3}f - 3.68 \times 10^{-7}f^2$
	45	$23.8 + 4.52 \times 10^{-3}f - 14.40 \times 10^{-7}f^2$
	50	$34.0 + 6.22 \times 10^{-3}f - 16.70 \times 10^{-7}f^2$
	60	$74.0 + 8.59 \times 10^{-3}f - 15.80 \times 10^{-7}f^2$
η_2	40	$0.755 + 10.60 \times 10^{-5}f - 2.85 \times 10^{-8}f^2$
	45	$0.716 + 9.28 \times 10^{-5}f - 2.55 \times 10^{-8}f^2$
	50	$0.671 + 9.41 \times 10^{-5}f - 2.77 \times 10^{-8}f^2$
	60	$0.614 + 6.45 \times 10^{-5}f - 1.59 \times 10^{-8}f^2$

Fig. 3 The Young's modulus and loss factor of magnetic rubber (ferrite content $V=45\text{ vol}\%$)

Fig. 4 The experimental setup to measure loss factor

3.2 セン断ひずみ比と摩擦係数の測定

3.2.1 試験片 図5に、拘束型磁性制振材を基層に磁力吸着させたとときと接着させたとときのせん断ひずみの比 s , および磁性ゴム層と基層間の摩擦係数 μ の測定用試験片を示す。これらの試験片は、損失係数測定用試験片と同じ素材で寸法のみ異なる。図5(a)が鋼製プレート(基層)の面積が磁性ゴム層の面積の4倍、図5(b)は逆に磁性ゴム層の面積が鋼製プレートの面積の4倍で、図5(a), (b)ともに鋼製プレートを磁性ゴム層に磁力により吸着させたものである。図5(c)は、図5(a)とおなじ寸法で、鋼製プレートを磁性ゴム層に接着したものである。なお、いずれの試験片も、拘束層は磁性ゴム層と同じ大きさである。

3.2.2 セン断ひずみ比と摩擦係数の測定法 図6に実験装置を示す。試験台上に固定した大形アルミ製ブロック側面に、図5(a)～(c)に示した各試験片の拘束型磁性制振材の拘束層をボルトで固定する。そして、加振器に取付けた鋼製プレートを磁性ゴム層に磁力吸着させるか、または接着固定して、鋼製プレ-

Layer	Steel base	Magnetic rubber	Constraining
(a)		10mm×10mm	
(b)	20mm×20mm	40mm×40mm	
(c)		10mm×10mm	

Fig. 5 Specimens to measure frictional coefficient and shear strain ratio s

Fig. 6 The experimental setup to measure the frictional coefficient and shear strain ratio s of magnetic rubber layer

トを上下方向に加振し、そのときに鋼製プレートに作用する力を測定した。そして以下に説明する方法でせん断ひずみ比および摩擦係数を算出した。なお、測定に使用した機器は、3・1節で示した損失係数測定用装置と同じである。

図5(a)での鋼製プレートに作用する力 F_1 は、磁性ゴム層におけるせん断力、磁性ゴム層と鋼製プレート間の摩擦力、および鋼製プレートのみを加振したときの慣性力 F_0 が作用するので、次式で表される。

$$F_1 = (G_2 \gamma + \mu F_M) A + F_0$$

$$= (G_2 \gamma^* s + \mu F_M) A + F_0 \quad (4)$$

ここに、 γ は磁性ゴム層のせん断ひずみ、 F_M は単位面積当たりの磁力吸着力、 A は鋼製プレートと磁性ゴム層の接触面積である。また、 γ^* は磁性ゴム層を鋼製プレートに接着したときのせん断ひずみである。

図5(b)での鋼製プレートに作用する力 F_2 は、磁性ゴム層が鋼製プレートに比べて大きいために近似的にそのせん断ひずみが小さく無視でき、次式で与えられる。

$$F_2 = \mu F_M A + F_0 \quad (5)$$

図5(c)での鋼製プレートに作用する力 F_3 は、磁性ゴム層が鋼製プレートに接着されているために、磁性ゴム層のせん断力と F_0 であるから、次式で与えら

れる。

$$F_3 = G_2 \gamma^* A + F_0 \quad (6)$$

鋼製プレートに作用するこれら F_1, F_2, F_3 を用いて、せん断ひずみ比 s および摩擦係数はそれぞれ次式で求める。

$$s = (F_1 - F_2) / (F_3 - F_0) \quad (7)$$

$$\mu = (F_2 - F_0) / (F_M A) \quad (8)$$

なお、上記の慣性力 F_0 は、鋼製プレートをインピーダンスヘッドを介して加振器先端に固定し、磁性ゴム層に接触させることなくフリーの状態に加振して測定した。また、加振条件は、予備試験の結果 $x = 50$ mm 測定点において垂直方向の振動加速度が 10 m/s^2 の加振時に基層の水平方向の振動加速度が $4 \sim 5 \text{ m/s}^2$ と測定されたことなどを考慮して、インピーダンスヘッド測定値で 4.5 m/s^2 (rms 振幅値) となるよう調整した。

3・2・3 セン断ひずみ比と摩擦係数の測定結果
せん断ひずみ比 s に関する測定結果の一例を図7に示す。これは、磁性粉量 45 vol% 試料において、着磁電圧を制御して磁力吸着力 F_M を $2.5 \text{ kPa} \sim 8.3 \text{ kPa}$ まで変化させたときの s の値である。このようにせん断ひずみ比 s は、磁力吸着力の増加に伴って増加す

Fig. 7 Shear strain ratio s on magnetic attractive force ($V = 45 \text{ vol\%}$, $H_1 = 2 \text{ mm}$, $H_2 = 3 \text{ mm}$, $H_3 = 2 \text{ mm}$)

Fig. 8 Frictional coefficient μ on ferrite content (at full mag., $H_1 = 2 \text{ mm}$, $H_2 = 3 \text{ mm}$, $H_3 = 2 \text{ mm}$)

Fig. 9 Loss factor η of MRDC on magnetic attractive force ($V = 45 \text{ vol\%}$, $H_1 = 2 \text{ mm}$, $H_2 = 3 \text{ mm}$, $H_3 = 2 \text{ mm}$)

Fig. 10 Loss factor η of MRDC on constraining layer thickness ($V = 45 \text{ vol\%}$, $H_1 = 2 \text{ mm}$, $H_2 = 3 \text{ mm}$)

る。つまり、磁力吸着力の増加によって磁性ゴム層がより強く基層に吸着され、せん断ひずみが増加することがわかる。このせん断ひずみ比は、磁性粉量=45 vol%, フル着磁, 基層厚=拘束層厚=2 mm, 磁性ゴム層厚=3 mmの標準的な試料で0.66となった。

図8に、拘束型磁性制振材の磁性粉量 V を変化させて摩擦係数を測定した結果を示す。図8からわかるように、摩擦係数は磁性粉量の増加とともに低下する。本測定範囲では磁性粉量が低い20%のときに摩擦係数は最大になり、約0.7~0.8の値となった。

以上、せん断ひずみ比 s および摩擦係数 μ の実測値を、曲げ弾性振動方程式に適用して振動解を求めるとき、および式(2)のひずみエネルギーおよび式(3)の摩擦損失の計算において適用した。

3.3 損失係数の計算値と実験値の比較検討

図9に、磁性粉量 $V=45$ vol%について、磁力吸着力 F_M を2.5 kPa~8.3 kPaまで変化させたときの損失係数の計算値(曲線)と実験値(記号)の例を示す。図9からわかるように、計算値と実験値は磁力吸着力に対する傾向がよく一致している。また、計算値の実験値に対する誤差は、-6%~10%であり、損失係数が精度よく求められていると言える。磁性粉量 $V=40, 50, 60\%$ についても同様な結果が得られた。

Table 4 The error of calculated loss factor

H_1	H_2	Error %	
		$H_3 \leq 4\text{ mm}$	$H_3 \geq 5\text{ mm}$
2 mm	3 mm	-11.1~14.9	-22.2~59.4
4 mm		-13.8~13.4	8.8~66.4
8 mm		-9.1~56.0	14.0~61.0
16 mm		-53.6~100	3.5~73.6

Table 5 The error of calculated loss factor

H_1	H_2	H_3	Error %
2 mm	1~6 mm	2 mm	-10.9~9.4
4 mm			-20.8~10.6
8 mm			11.7~41.3
16 mm			31.7~74.0

Fig. 11 Loss factor of MRDC on magnetic rubber layer thickness ($V=45$ vol%, $H_1=2$ mm, $H_3=2$ mm)

図10に、磁性粉量 $V=45$ vol% (磁力吸着力 $F_M=4.4$ kPa~8.8 kPa) とし、拘束層厚 H_3 を0 mm から10 mmまで変化させたときの損失係数の計算値と実験値の例を示す。図10から、計算値と実験値は H_3 の変化に対応する傾向がよく一致していると言える。また、計算値の実験値に対する誤差をまとめた結果を表4に示す。表4から、 $H_1=2$ mm, 4 mmで $H_3=4$ mm以下、の場合に誤差が小さく $\pm 20\%$ 以内に入り、それ以外の場合には誤差が大きくなっていることがわかる。

図11に、磁性粉量 $V=45$ vol% (磁力吸着力 $F_M=4.4$ kPa~8.8 kPa) とし、磁性ゴム層厚 H_2 を1 mmから6 mmまで変化させたときの損失係数の計算値と実験値の例を示す。図11からわかるように、計算値と実験値は磁性ゴム層厚の変化に対応する傾向がよく一致している。さらに、基層厚 H_1 を4 mm, 8 mm, 16 mmとして同様な実験を行い、図9の結果を含めて損失係数の計算値の実験値に対する誤差をまとめた。その結果を表5に示す。表5から、基層厚 $H_1=2$ mm, 4 mmの場合には、誤差はほぼ $\pm 20\%$ 以内であるが、基層厚 $H_1=8$ mm, 16 mmの場合には誤差が大

Fig. 12 The frequency dependencies of loss factor of MRDC

Fig. 13 The frequency dependencies of frictional resistance and sliding displacement ($V=45$ vol%, $F_M=8.3$ kPa, $x=50$ mm)

きくなることがわかる。

以上の結果をまとめると、磁性粉量 40~60 vol%, 磁力吸着力 2.5 kPa~17.2 kPa, 基層厚 4 mm 以下, 拘束層厚 4 mm 以下, および磁性ゴム層厚 1 mm~6 mm の範囲で、損失係数の計算値は実験値とよく一致し、この範囲において第 1 報で述べた拘束型磁性制振材の曲げ振動解析および損失係数の計算法が妥当であることが明らかとなった。

4. 拘束型磁性制振材の損失係数

4.1 周波数依存性 図 9 からわかるように、振動モードが高次になり固有振動数が高くなるにつれて損失係数が低下している。そこで、磁性粉量 $V=40, 45, 50, 60$ vol% について、それぞれの損失係数の最大値について周波数依存性を調べた。その結果を図 12 に示す⁽ⁿ³⁾。なお、基層、磁性ゴム層、拘束層の厚さは、 $H_1=2$ mm, $H_2=3$ mm, $H_3=2$ mm である。図 12 から、どの磁性粉量の場合にも固有振動数つまり周波数が高くなるにつれて損失係数が低下していることが明白にわかる。その他の試験片についても同様の結果が

Fig. 14 Loss factor of MRDC on magnetic attractive force (2nd mode)

Fig. 15 The multiplication of frictional resistance with sliding displacement (2nd mode, $V=45$ vol%, $x=50$ mm)

得られた。

図 13 に、 $x=50$ mm におけるすべり変位 $l(x)$ および単位面積当たりの摩擦抵抗力 F_R の周波数依存性を示す。ここで、摩擦抵抗力 F_R は $F_R=\mu F_M$ で与えられる量である。摩擦係数 μ は 3.2 節で示した方法により実測値を与える。磁力吸着力 F_M についても以下の方法により実測した。直径 30 mm, 厚さ 20 mm の円柱状鋼材を拘束型磁性制振材試験片に磁力吸着力させた。円柱状鋼材を材料試験機を用いて引き上げ、円柱状鋼材が試験片から離れるときの最大荷重を記録した。そして、最大荷重の測定値を鋼材の面積で除して F_M を算出した。

図 13 に示されるように、周波数の増加に伴い、すべり変位および摩擦抵抗力ともに急激に小さくなっている。したがって、この二つの量の積である摩擦損失も周波数の増加に伴って小さくなるために、拘束型磁性制振材の損失係数も周波数の増加とともに低下したと考えられる。

4.2 磁性粉量・磁力吸着力依存性 図 14 に、磁性粉量 40, 45, 50, 60 vol% の全試験片の二次モードにおける損失係数の磁力吸着力に対する変化を示す。この図から、(1) 損失係数にピーク値があること、

Fig. 16 Loss factor of MRDC on frictional resistance (2nd mode)

Fig. 17 Sliding displacement on ferrite content (2nd mode, $x=50$ mm)

⁽ⁿ³⁾ 図中に示した F_M は、それぞれの磁性粉量において損失係数が最大となった磁力吸着力である。

(2) 磁性粉量の増加に伴って損失係数がピーク値となる磁力吸着力が大きくなること、および(3) 磁性粉量の増加に伴って損失係数のピーク値が低下すること、が見出される。

まず、損失係数がピーク値を有することについて検討する。図15に、すべり変位 $l(x)$ および摩擦抵抗力 F_R の磁力吸着力依存性を示す。磁力吸着力の増加に伴い摩擦抵抗力は単調に増加し、すべり変位は単調に減少する。この二つの量の積である摩擦損失 $F_R \times l(x)$ は、●印で示したように、磁力吸着力に対してピーク値を持っている。拘束型磁性制振材の損失係数は、この摩擦損失に大きく依存するために、同じように磁力吸着力に対してピーク値を持つものと考えられる。なお、磁性粉量40%の試験片ではフル着磁においても磁力吸着力が低く、そのため損失係数はピーク値にまで達しなかったものと思う。

次に、損失係数がピーク値となる磁力吸着力が磁性粉量の増加とともに大きくなることについて検討する。図8に示した磁性ゴム層の摩擦係数の磁性粉量依存性から、摩擦係数は磁性粉量の増加に伴って単調に低下していることがわかる。次に、図16に磁性粉量40, 45, 50, 60 vol%の各試験片について損失係数の摩擦抵抗力 F_R に対する変化を示す。図16から、損失係数がピーク値となる摩擦抵抗力は、磁性粉量によらずほぼ2.9 kPaで、ほとんど一定であるとみなせる。したがって、摩擦係数と磁力吸着力の積である摩擦抵抗力が一定であることから、磁性粉量の増加に伴って

摩擦係数が低下するため、(損失係数がピーク値となる) 磁力吸着力は磁性粉量の増加に伴って大きくなることになる。

最後に、磁性粉量の増加に伴って損失係数のピーク値が低下することについて検討する。まず摩擦損失 L_{fs} について考えると、 L_{fs} は磁性ゴム層の摩擦抵抗力 F_R と滑り $l(x)$ の積で与えられるが、図16からわかるように損失係数がピーク値となる F_R は磁性粉量に依存しないほぼ一定である。また図17に示すように滑り $l(x)$ も磁性粉量に依存しない。したがって、摩擦損失 L_{fs} は磁性粉量に依存せずほぼ一定とみなしてよい。次に磁性ゴム層の内部損失 $\eta_2 P_2$ について考える。損失係数 η_2 は、表3に示したように周波数 f の二次曲線(上に凸)で与えられている。そして曲線の式からわかるように最大値は1.6 kHz~2 kHzにあるため、その周波数まではいずれも単調に増加する曲線である。したがって、磁性粉量が40%から60%に増加するに伴って曲線の切片が0.755から0.614に低下していることから、磁性ゴム層の損失係数 η_2 が磁性粉量の増加に伴って低下することがわかる。したがって、磁性ゴム層の内部損失 $\eta_2 P_2$ は磁性粉量の増加に伴って小さくなる。以上の二つの点、つまり(1) 摩

Table 6 The dependence of loss factor on the magnetic attractive force

V vol%	Peak value		At full mag.	
	η	F_M kPa	η	F_M kPa
45	0.33	7.8 (94%)	0.30	8.3 (100%)
50	0.31	9.3 (89%)	0.28	10.5 (100%)
60	0.24	9.8 (58%)	0.20	17.0 (100%)

注) () 内の数値は着磁率を示す。

Fig. 18 Loss factor of MRDC on constraining layer thickness (2nd mode, $V=45$ vol%, $H_1=2$ mm)

Fig. 19 Loss factor of MRDC on constraining layer thickness (2nd mode, $V=45$ vol%, $H_1=4$ mm)

Fig. 20 Loss factor of MRDC on magnetic rubber layer thickness (2nd mode, $V=45$ vol%, $H_3=2$ mm)

Fig. 21 Frictional resistance on magnetic rubber layer thickness (2nd mode, $V=45$ vol%, $H_3=2$ mm)

擦損失 L_{fs} は磁性粉量に依存せずほぼ一定であること、および(2)磁性ゴム層の内部損失 $\eta_2 P_2$ は磁性粉量の増加に伴って低下することから、拘束型磁性制振材の損失係数は磁性粉量の増加に伴って低下し、そのためピーク値も低下すると考えられる。

さて、損失係数のピーク値とそのときの磁力吸着力、およびフル着磁時の損失係数の値を表6に示す。表6から、拘束型磁性制振材の損失係数をできるだけ大きくするためには、磁性粉量をほぼ45%、着磁率をほぼ94%(実用的には90%以上)とすればよいことがわかる。

4.3 拘束層・基層厚依存性 図18および図19に、それぞれ基層厚 $H_1=2$ mm および $H_1=4$ mm のときについて、磁性ゴム層厚をパラメータとした拘束層厚に対する二次モードの損失係数の変化を示す。図18から、どの磁性ゴム層厚に対しても拘束層厚 H_3 が1 mm 付近、つまり基層厚 $H_1=2$ mm の1/2 付近で損失係数がピーク値に達していることがわかる。図19においても、同様に拘束層厚 H_3 が2 mm 付近、つまり基層厚 $H_1=4$ mm の1/2 付近で損失係数がピーク値に達している。なお、他の振動モードについても同様の結果が得られた。

これらの結果から、拘束型磁性制振材を貼付した三層積層はりの損失係数は、拘束層厚が基層厚の1/2 のときにほぼ最大になると言える。

次に、基層厚 H_1 が2 mm の場合と4 mm の場合について、同じ磁性ゴム層厚同士のピーク値を比較すると $H_1=4$ mm のときの損失係数は $H_1=2$ mm のときの損失係数の約1/2 になっていることがわかる。

4.4 磁性ゴム層厚依存性 図20に、拘束層厚 $H_3=2$ mm の場合について、磁性ゴム層厚 H_2 に対する損失係数の変化を示す。なお、基層厚 H_1 は2 mm と4 mm である。図20から基層厚が2 mm と4 mm いずれの場合においても、損失係数は磁性ゴム層厚

H_2 が増すとともに大きくなり、 $H_2=4$ mm 付近のときピーク値に達していること、そして磁性ゴム層厚がそれ以上増しても損失係数はほぼ同じ値であるかあるいは低下していることがわかる。

図21に、摩擦抵抗力 F_R の磁性ゴム層厚 H_2 に対する変化を示す。図21から、基層厚によらず H_2 が増加するとともに F_R が大きくなり、 $H_2=3$ mm~4 mm のとき F_R がほぼ最大になっていることがわかる。拘束型磁性制振材は摩擦損失が大きく影響するから、この磁性ゴム層厚に対する摩擦抵抗力の特性によって H_2 が4 mm 付近で損失係数 η がピーク値に達したものと考えられる。

以上の点から、磁性ゴム層厚 $H_2=4$ mm 付近(実用的には3 mm~5 mm)で損失係数が最大になるといえる。

5. 結 言

ストロンチウム系フェライト粉体を配合着磁したブチルゴムの磁性ゴム層とSS 400 鋼の拘束層からなる拘束型磁性制振材を作成し、これを鋼製基層に貼付した三層はりの二次~五次の振動モードにおける損失係数を共振法により測定した。そして、第1報で報告した三層はりの曲げ振動の理論解析に基づく損失係数の計算値と比較検討し、検証を行った。さらに、その結果に基づいて損失係数の磁性粉量、磁力吸着力、拘束層・磁性ゴム層・基層の厚さに対する依存性について理論計算および実験の両面から検討し、拘束型磁性制振材の損失係数の特徴を明らかにした。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 摩擦を考慮した曲げ振動解析に基づく損失係数の計算値は、基層厚および拘束層厚が4 mm 以下、磁性ゴム層厚1 mm~6 mm の範囲で実験値とよく一致し、この範囲において曲げ振動の理論解析が有効であり、それに基づいた損失係数の予測計算が可能である。

(2) 拘束型磁性制振材の損失係数には次の特徴がある。

(a) 損失係数が最大となる磁力吸着力があり、磁性粉量の増加に伴ってこの値は大きくなる。

(b) 損失係数が最大となる拘束層厚があり、その値は基層厚の約1/2 である。

(c) 損失係数は、磁性ゴム層厚が3 mm くらいまでは急激に増加するが、4 mm 以降ではやや漸減傾向を示す。

(3) 拘束層厚を基層厚の約1/2、磁性ゴム層厚を3 mm~5 mm とし、磁性粉量を45%、着磁率を90%

以上(このときの磁力吸着力は 8 kPa 前後)とすれば, 拘束型磁性制振材を貼付した三層はりの損失係数がほぼ最大となる。なお, このときの損失係数の値は, 基層厚 $H_1=2$ mm のとき 0.35~0.40, $H_1=4$ mm のとき 0.18~0.23(いずれも二次振動モードの値)である。

文 献

- (1) Morse, P. M., *Vib. Sound*, 2 (1948), 151, McGraw-Hill.
- (2) 半坂征則・御船直人, 磁性複合型制振材の制振特性, 騒音制御, 17-4 (1993), 206-211.
- (3) 半坂征則・佐藤仁・御船直人, 磁性複合型制振材の制振機構 (その 1), 騒音制御, 21-6 (1997), 419-427.
- (4) 半坂征則・林巖・岩附信行・御船直人, 拘束型磁性制振材の制振特性 (第 1 報), 機論, 67-662, C (2001), 25-31.
- (5) 岡崎明彦・浦田喜彦・大河内禎一・立道有年, 粘弾性コアをもつ部分 3 層ばりの振動解析, 機論, 53-486, C (1987), 300-306.