半値幅法による損失係数への振動モードの影響*

安達 瑛 二^{*1}, 佐藤 純 一^{*2}Effects of Vibration Modes on the Viscoelastic
Loss Factor Measured by the Half-Power Method

Eiji ADACHI and Junichi SATOH

The loss factor of a viscoelastic damping material is commonly measured by the half-power method using a composite beam with the viscoelastic layer. However, the method involves problems of large measurement errors and of the beam shape, which does not represent practical applications. This paper discusses the relationship between vibration modes and measurement accuracy, and presents specimen dimensions which materialize the bending mode for the accurate loss factor. The vibration modes are classified into torsion, warping, torsion and warping, and bending. According to the discriminants this study induces, the beam shape has satisfy $(l/b)(d_1/b) \geq 0.06$ to materialize the bending mode. The loss factor of the viscoelastic damping material obtained by the composite beam within the dimension limits and the Oberst theory had good agreement with the loss factor of the same material measured by the nonresonance forced vibration method, and was certified to be sufficiently accurate.

Key Words: Loss Factor, Half-Power Method, Damping Material, Vibration Mode, Discriminant

1. 緒 言

金属等の弾性はりと粘弾性制振材とからなる積層試験片の損失係数 η_c については, Oberst によって理論的に研究されている⁽¹⁾. Oberst の式を用いると損失係数 η_c から逆に粘弾性制振材自身の損失係数 η_d を算出できる. 損失係数 η_c は, 通常, 半値幅法⁽²⁾により求めるが, 半値幅法は測定による差が大きく, また, 幅に対する長さの比(アスペクト比)が10倍以上のく形板を試験片に用いることになっている^{(3)~(5)}ため, 試験片が自動車のフロアパネルなど制振材の主な使用部位の実用状態を近似できず, 多くの問題を持っている.

本研究は半値幅法による損失係数 η_c の測定精度への振動モードの影響と試験片形状の関係を検討し, 振動モードを分類する判別式を設定し, 高精度な損失係数の測定法を実験的に求め, また試験片形状の範囲を拡大するものである. なお, 半値幅法による損失係数 η_c から Oberst の式を用いて得る粘弾性制振材の損失係数 η_d を強制振動非共振法⁽⁶⁾による値と比較しその精度を確認している.

2. 損失係数の測定精度と振動モード

半値幅法による損失係数測定では, 測定条件が同じでも試験片形状によって損失係数の差とばらつきが大きい. この要因の一つは試験片が測定中正しく曲げモードで振動していないことによるものと考え, 測定精度に及ぼす振動モードの影響を検討した.

実験では, 長さ l (x 方向で 50~500 mm), 幅 b (y 方向で 20~50 mm), 厚み d_1 (z 方向で 0.8~3.2 mm) の長方形鋼板に厚み d_2 (25 mm) の粘弾性制振材(スポンジゴム, 材質: クロロブレンゴム, 比重: 0.08)を接着した積層試験片を用い, 一端固定一端自由とし, 振動共振時の半値幅より損失係数を求めた(図1). 測定は室温(23°C)で試験片を正弦波掃引信号により力一定(0.1 N)で加振し, 加振力と応答点での振動加速度から伝達関数のゲインと位相とを求めた. 測定は5回ずつ行った. 応答点は試験片の幅方向(y 方向)に3点, 長さ方向(x 方向)に5点の計15点とした. 本研究では, 加速度ピックアップの質量(1.2 g)の振動モードへの影響を除くため, 測定点にあらかじめ加速度ピックアップ相当分の質量を取付け, 測定時にピックアップと交換する方法をとった.

2.1 振動モードの分類と判別 試験片形状(l, b ,

* 平成2年3月14日 東海支部第39期総会講演会において講演, 原稿受付 平成2年3月23日.

^{*1} 正員, 豊田工業大学 (〒468 名古屋市天白区久方2-12-1).

^{*2} 准員, 豊田合成(株) (〒492 稲沢市北島町西の町30).

d_1)を変えると共振時の振動モードはねじり, 反り, ねじりと反り, 曲げのいずれかを示す(図2)。その時ねじり, 反り, ねじりと反りの振動モードにおける損失係数は曲げ振動モードにおける損失係数($\eta_c=0.05 \sim 0.06$)よりも大きな値になることが多く, そのばらつきも大きい(図3)。すなわち, 積層試験片の損失係数 η_c から Oberst の式を用いて粘弾性制振材の損失係数 η_d を高精度で求めるためには, η_c は曲げ振動モードのそれとなければならない。そこで, ねじり, 反り, ねじりと反りの判別式を作り, これらの振動モードが生じない試験片形状を求め, 曲げ振動モードにおける損失係数 η_c のみを求める方法を考える。

(1) ねじりの判別式: ねじれ角(θ_i)が発生する変形を言う(図2)。試験片の y 方向の両端の変位 a_{i1} , a_{i3} , 幅 b の時, 試験片のねじりの量を式(1)で表す。

$$\overline{\tan \theta} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \tan \theta_i \quad (1)$$

ただし,

$$\tan \theta_i = \frac{|a_{i1} - a_{i3}|}{b} \quad (i=1, \dots, 5)$$

図1 実験システムおよび試験片

平均値 $\overline{a_i}$ の測定による誤差を ± 0.5 dBとすると, 測定誤差による試験片のねじりの量 $\overline{\tan \theta_c}$ に対する $\overline{\tan \theta}$ の比(ねじり率 T_r と呼ぶ)が1.0(測定による誤差分)より大きい時にねじりが発生していると判別する[式(2)]。

$$T_r = \overline{\tan \theta} / \overline{\tan \theta_c} \quad (2)$$

ただし,

$$\overline{\tan \theta_c} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{a_{ie}}{b}$$

$$a_{ie} = \overline{a_i} \times (10^{+0.5/20} - 10^{-0.5/20})$$

(2) 反りの判別式: 試験片の断面が湾曲する変形を言う(図2)。湾曲部の面積 S_{bi} (断面の3測定点の変位点で作る三角形の面積), 幅 b の時, 反りの量を式(3)で表す。

$$\overline{S} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 S_i \quad (3)$$

ただし,

$$S_i = \frac{S_{bi}}{b^2} \quad (i=1, \dots, 5)$$

平均値 $\overline{a_i}$ の測定による誤差を ± 0.5 dBとすると, 測定誤差による試験片の反りの量 $\overline{S_c}$ に対する $\overline{S}$ の比(反り率 W_r と呼ぶ)が1.0より大きい時に反りが発生していると判別する[式(4)]。

$$W_r = \overline{S} / \overline{S_c} \quad (4)$$

ただし,

$$\overline{S_c} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{a_{ie} b / 2}{b^2}$$

(3) ねじりと反りの判別式: ねじりと反りが同時に発生している変形を言う(図2)。ねじり率 T_r と反り率 W_r がそれぞれ1.0より大きい振動モードをねじりと反りと判別する。

(4) 曲げの判別: 試験片の変形がねじり, 反り, ねじりと反りを含まない変形を言う(図2)。ねじり率 T_r と反り率 W_r がそれぞれ1.0以下の振動モードを曲げと判別する。

2.2 曲げ振動モードが得られる試験片形状の範囲

Mode of vibration	Mode shape of cross section	Discrimination
Torsion		$T_r > 1$ $W_r \leq 1$
Warping		$T_r \leq 1$ $W_r > 1$
Torsion and Warping		$T_r > 1$ $W_r > 1$
Bending		$T_r \leq 1$ $W_r \leq 1$

図2 振動モードの分類

図3 振動モードと損失係数

l/b が小の場合、ねじりや反りが生じやすく、 d_1/b が小の場合、反りが生じやすい。すなわち、 $(l/b)(d_1/b)$ がねじり、反り、ねじりと反りに関係する。そこで測定データを $(l/b)(d_1/b)$ の関数とみなし、最小二乗法によって双曲線で近似すると、近似曲線によく合致する(図4、図5)。図で明らかのように、 $(l/b)(d_1/b) \leq 0.05$ では、ねじり率1.0以上、反り率1.1以上となり、ねじりと反りの振動モードとなる。 $0.05 < (l/b)(d_1/b) < 0.06$ では、ねじり率0.84~1.0、反り率0.94~1.1となり、ねじりまたは反りの振動モードとなる。 $(l/b)(d_1/b) \geq 0.06$ では曲げ振動モードとなり、ねじりと反り、ねじり、反りは生じない。

2.3 ねじり率、反り率と損失係数のばらつき

ねじり、反りが発生しているときは損失係数のばらつきも大きくなる(図3)。損失係数のばらつき $\Delta\eta_c$ を測定値の最大値 $(\eta_c)_{\max}$ と最小値 $(\eta_c)_{\min}$ の差の平均値 $\bar{\eta}_c$ に対する%で表すと、 T_r あるいは S_r が大きくなる(振動モードが曲げからねじりあるいは反りを含むモードに変る)につれ $\Delta\eta_c$ が大きくなる(図6、図7)。ねじり率 T_r と反り率 W_r が1.0以下の曲げ振動モードでは $\Delta\eta_c$ が約15%以下になり、さらにねじり率を0.5以下、反り率を0.7以下にすると $\Delta\eta_c$ を10%以下にできる。図中の曲線は最小二乗法により指数曲線で近似したものである。

図4 $(l/b)(d_1/b)$ とねじり率

図5 $(l/b)(d_1/b)$ と反り率

3. 粘弾性制振材の損失係数の精度確認

金属はりとは粘弾性制振材とからなる積層試験片の損失係数 η_c の精度向上の方法が得られた。ここでは粘弾性制振材自身の損失係数 η_d の精度向上を確認する。粘弾性制振材自身の損失係数 η_d は、Oberst の式⁽¹⁾ [式(5)] を用いて、 η_c から計算される。

$$\eta_d = \frac{1}{\alpha} \eta_c \dots \dots \dots (5)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{a\xi}{1+a\xi} \frac{(3+6\xi+4\xi^2+2a\xi^3+a^2\xi^4)}{1+2a(2\xi+3\xi^2+2\xi^3)+a^2\xi^4}$$

$$a = E_2/E_1$$

$$\xi = d_2/d_1$$

なお、

E_1 : 金属はりのヤング率

E_2 : 粘弾性制振材のヤング率

d_1 : 金属はりの厚み

d_2 : 粘弾性制振材の厚み

2.2 節で述べた方法により、曲げ振動モードとなる試験片形状で、半値幅法で求めた粘弾性制振材(スポンジゴム)自身の損失係数 η_d を強制振動非共振法で求めた同じ粘弾性制振材の損失係数 η_{dr} と比較し、半値幅法による η_d の精度を確認した。強制振動非共振

図6 ねじり率と損失係数のばらつき

図7 反り率と損失係数のばらつき

法は、粘弾性制振材のみを供試し、測定精度は高いが制約（測定周波数域が 100 Hz 以下、測定時間が長い、など）も多いため通常は用いられない。比較の結果、2・2 節で述べた半値幅法による η_d と強制振動非共振法による η_{df} とは良好な一致を見た（図 8）。なお、発泡体のヤング率 E_2 は強制振動非共振法による初期ひずみ 0 の場合の値である。以上のように、本研究の結果を用いると、半値幅法で高精度な粘弾性制振材の損失係数が容易に得られることが確認された。

4. 結 言

高精度な損失係数の測定法を求め試験片形状の範囲を拡大するため、振動モードをねじり、反り、ねじりと反り、曲げに分類する判別式を設定して実験を行った結果、次の点が明らかになった。

（1）曲げ振動モードとなる試験片形状の範囲で実験を行えば、半値幅法による積層試験片の損失係数 η_c から Oberst の式によって求める粘弾性制振材の損失係数 η_d は強制振動非共振法による粘弾性制振材の損失係数 η_{df} と良好な一致を示す。すなわち高精度な η_d が得られる。

（2）振動モードは試験片の形状パラメータ $(l/b)(d_1/b)$ と関係し、ほぼ $(l/b)(d_1/b) \geq 0.06$ で曲げ振動モードとなる。本研究により曲げ振動モードとなる試験片形状の範囲はアスペクト比で $l/b = 1.5 \sim 3.0$ と

図 8 半値幅法と強制振動非共振法による損失係数の比較

なり、JASO の範囲より大幅に拡大した。

（3）振動モードが曲げ振動モード以外の場合（ねじり、反り、ねじりと反りを含む場合）損失係数の値は誤差が大きいかつ測定値のばらつきも大きくなる。

文 献

- （1）Oberst, H. and Frankenfeld, K., *Acustica*, 2, (1952), AB 181.
- （2）井上・ほか 2 名, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 881 (1988-5), 231.
- （3）ASTM E 756-83.
- （4）JASO M 306-88.
- （5）JASO M 329-88.
- （6）高分子学会（レオロジー委員会）編, レオロジー測定法, (1965), 203, 共立出版.