

制振鋼板の振動減衰特性の最適化

遠藤 紘*・丸岡 邦明*²・門脇 伸生*²・伊藤 耿一*³・柴田 勝久*⁴

The Best Suitability of Damping Properties
on Vibration Damping Steel Sheet Having Three Layered Structure

Hiroshi ENDO, Kuniaki MARUOKA, Nobuo KADOWAKI, Koichi ITO and Katsuhisa SHIBATA

Synopsis : The characteristics of vibration damping steel sheet, which has three layered structure of steel/viscoelastic resin/steel, were examined. They were affected theoretically by material conditions, such as viscoelastic properties of resin and configuration of each layer, and also by mechanical vibration conditions, such as vibration mode and supporting condition. The influences of material conditions on the loss factors were examined experimentally under several constant conditions of mechanical vibration conditions. It is concluded from the present results that loss factors of vibration damping steel sheet are determined by not only a loss factor of resin itself but also rigidity and thickness of resin as well as steel sheet. These results give a guide for the best suitability for a loss factor of vibration damping steel sheet.

Key words : composite material ; vibration damping steel sheet ; damping ; loss factor ; viscoelastic properties ; viscoelastic resin.

1. 緒言

機械構造物の騒音・振動を重量などを増加することなく低減するために、機械構造材料自身に振動エネルギーを吸収する機能、即ち振動減衰性能を付与させることによって、構造部材の振動を制御し、機械の騒音の発生を低減させる方法が考えられる。粘弾性樹脂をコアとする三層積層構造の制振鋼板は、このような目的に適合する高い振動減衰性能を有する材料¹⁾であり、自動車、電機、建築部材として実用的に用いられるようになってきた。

制振鋼板の曲げ振動において、非常に高い振動減衰能が得られるのは、コアの樹脂層の動的せん断変形による振動エネルギーの吸収に基づく。しかし、その振動減衰能は温度、周波数、コアの樹脂の粘弾性特性値、コアと上下の板の厚さや振動モード、支持条件など多くの条件・因子の影響を受け、変化し易い特性でもある。このような三層積層板の振動減衰特性について多くの理論的解析研究^{2)~5)12)}がなされてきた。それらの中で振動減衰特性の予測式としてよく知られているUngar, Kerwin, Ross²⁾らの解析モデルにおいては、コアの樹脂の粘弾性特性、樹脂層の厚さ、上下の板の曲げ剛性などの材料スペックが与えられると、温度・周波数に対して損失係数が一意的に定まると見なされてきた。しかし、Meadら⁴⁾の解析理論およびそれを基にした解

析的研究⁸⁾¹²⁾によって三層積層板の損失係数は材料スペックの他に、振動モードや支持条件などの機械的振動条件の影響を受け、温度周波数に対して1つの損失係数が対応するとは限らないことが明らかになった。これらの解析理論において、三層積層板の損失係数は相互に影響を及ぼし合う支配因子の関数として表され、それぞれの因子の単独の影響を求めることができない。そこで本研究では、特定の条件で最適な粘弾性樹脂が見いだされた場合、実用的な条件でその効果を発揮させるための樹脂特性の改良や任意の鋼板厚さで最適な効果を発揮させる樹脂厚さの選定などの制振鋼板の最適設計を行なうため、その振動減衰特性のそれぞれの支配因子の影響を実験的に明らかにし、さらに、コアの樹脂の最適な粘弾性特性の選定法、上下板厚とコア樹脂層の厚さの最適構成法を明確にする。

2. 制振鋼板の損失係数の支配因子の検討

制振鋼板の振動減衰特性について、Fig. 1の構成要素に対し多くの理論的解析研究^{2)~5)12)}がなされてきた。Ungar²⁾らは無限長さのほりに励起された正弦波の伝播を仮定し、損失係数 η の予測式として次の式を提示した。

$$\eta = \frac{\beta XY}{1 + (2 + Y)X + (1 + Y)(1 + \beta^2)X^2} \dots\dots\dots (1)$$

平成6年8月15日受付 平成7年3月3日受理 (Received on Aug. 15, 1994; Accepted on Mar. 3, 1995)

- * 新日本製鐵(株)鉄鋼研究所 (現:秋田工業高等専門学校) (Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corp., now Akita National College of Technology, 1-1 Bunkyo-cho Iijima, Akita 001)
- * 2 新日本製鐵(株)鉄鋼研究所 (Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)
- * 3 東北大学大学院情報科学研究科 (Graduate School of Information Sciences, Tohoku University)
- * 4 東北大学工学部 (Faculty of Engineering, Tohoku University)

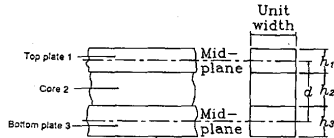


Fig. 1. Configuration of vibration damping steel sheet (three layered composite steel). Top and Bottom plates (1,3) are steel sheet. Core 2 is viscoelastic resin layer. $d=h_2+(h_1+h_3)$

ここで

$$\frac{1}{Y} = \frac{E_1 h_1^3 + E_3 h_3^3}{12 d^2} \left(\frac{I}{E_1 h_1} + \frac{1}{E_3 h_3} \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$X = \frac{G'_2}{p^2 h_2} \left(\frac{I}{E_1 h_1} + \frac{1}{E_3 h_3} \right) \dots \dots \dots (3)$$

但し、

β = 樹脂の損失係数

G'_2 = 複素せん断弾性率の実部

$p = 2\pi/\lambda$; p = 波数, λ = 波長

E, E_3 = 上下の板のヤング率

h_1, h_3 = 上下の板の厚さ

$d = h_2 + (h_1 + h_3)/2$

この予測式は、その見通しがよいことや比較的簡便に利用できることから、材料設計などにこれまでよく用いられてきた³⁾⁵⁾¹¹⁾。この式によれば、三層積層はりの損失係数はコアの樹脂の複素せん断弾性率と樹脂層と上下の板の厚さ（構成要素）および周波数によって支配されると見なされ、三層積層板の材料構成スペックが決まれば周波数に対して一意的に定まる結果を与える。

一方、Meadら⁴⁾は三層積層はりの曲げ振動に関して以下に示すような複素係数の6階の微分方程式を提示し、種々の支持条件に対応する強制振動解と一般的特性を示した。

$$W_n^{vi} - g(1+Y) W_n^{iv} - \omega_n^2 (1+i\eta_n) \left(\frac{m}{D_t} \right) (W_n''' - gW) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

$$g = \frac{G'_2}{h_2} \left(\frac{1}{E_1 h_1} + \frac{1}{E_3 h_3} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$Y = \frac{d^2}{D_t} \left(\frac{E_1 h_1 E_3 h_3}{E_1 h_1 + E_3 h_3} \right) \dots \dots \dots (6)$$

W_n = 減衰固有モード

η_n = モード損失係数

$D_t = D_1 + D_2$

(D_1, D_2 は上下の板の曲げ剛性)

さらに、著者ら⁷⁾⁸⁾¹²⁾はMeadらの解析理論をもとに種々の境界条件に対する基本的解法を提示し、実験的にもこの解析法が正しいことを明らかにした。この結果、一般には三層

積層はりの損失係数は、材料スペック条件だけでなく、はりに励起された振動の波形、はりの支持条件、振動モードなどの機械的振動条件によって変化することが明らかになった。これまでの三層積層はりの損失係数の評価において、支持条件や振動モードなどの影響は考慮されていなかったため、測定法およびデータ整理が曖昧とされてきた。

以上のように、制振鋼板の損失係数は多くの支配因子の影響を受け、また、それらは相互に影響を及ぼし合うことから、個々の支配因子の影響を解析式やモデルから単純に推定⁵⁾⁶⁾⁸⁾¹²⁾することはできない。制振鋼板の最適な材料設計のためには、損失係数に及ぼす材料スペック条件すなわちコアの樹脂の粘弾性特性や樹脂層の厚さと鋼板の厚さの影響を、機械的振動条件を考慮して詳細に調査検討を行う必要がある。

3. 実験方法

3・1 コアの樹脂の粘弾性特性の測定

制振鋼板の振動減衰特性に及ぼす粘弾性特性の影響を明らかにするには、コアの樹脂の動的粘弾性特性値の正確な把握が必要となる。樹脂の動的粘弾性特性⁹⁾は、調和振動の場合には、複素弾性率 $G = G' + iG''$ (G' は貯蔵弾性率, G'' は消散弾性率) によって表され、樹脂の損失係数 β は $\beta = \tan \delta = G''/G'$ として定義される。さらに、樹脂の動的粘弾性特性は温度と周波数に依存するので温度と周波数のできるだけ広い範囲で樹脂の粘弾性特性値を求めることが必要となる。

コアの樹脂の動的複素せん断弾性率は、Fig. 2 に示すように、樹脂を鋼板製の中央板の両面に塗布しさらに樹脂層の外側に鋼板を接着し、中心の板を加振装置に取り付けて上下に振動させることによって直接測定した。この測定においては、周波数を一定にし、 -30°C から 200°C の範囲で温度を連続的に変化させて G', G'' および $\tan \delta$ を求め、次に周波数を変えて 999 Hz 以下の周波数範囲で同様の測定を繰り返した。

本実験に用いた樹脂は、制振鋼板に用いられている無定形高分子のポリイソブチレン系樹脂 (HB80) および非相溶ブレンド系樹脂 (EMB) であり、これらの粘弾性率 $G', G'', \tan \delta$ の測定結果の代表例 (500 Hz) を Fig. 3 に示す。図に見

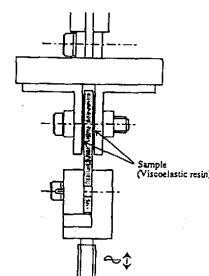


Fig. 2. Measuring method of viscoelastic properties ($G', G'', \tan \delta$) of resin.

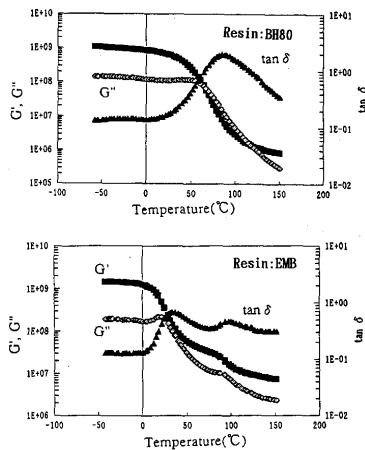


Fig. 3. Viscoelastic properties of each resin.
 G' : Real part of complex shear modulus
 G'' : Imaginary part of complex shear modulus
 $\tan\delta = G''/G'$: Loss factor of resin.

られるように、BH80は80°Cで $\tan\delta$ が極大となり、しかも $\tan\delta$ のピークの値が非常に高いが、 G' 、 G'' の絶対値は小さく、しかも温度の上昇とともにゆるやかに低下する典型的な粘弾性特性を示す。また、EMBでは $\tan\delta$ が2点で極大値となり、その値はBH80より小さいが、 G' 、 G'' の値は高く、温度上昇とともに単調には低下しないなどの特徴を示している。このような粘弾性特性の違いがそれをコアとする制振鋼板の振動減衰特性にどのように反映するかを調べた。

3・2 制振鋼板の損失係数の測定

制振鋼板の損失係数の測定について、既にJISの規格化¹⁰⁾がなされるなど整理されてきてはいるが、測定方法によって損失係数の測定データには誤差やバラツキが多いとされている。これまでの損失係数の測定において、機械的振動条件の影響は考慮されていなかったが、損失係数 η は拘束条件や振動モードの影響を受けるので、それらが明確な測定法を用いる必要がある。通常のはりの拘束条件であるたわみとたわみ角に加えて、三層積層はりでは上下の板の面内相対変位に対する拘束も考慮する必要がある。以下に述べる中央加振—中央支持法では、たわみ角や面内変位を全く拘束せず、支持条件に対する曖昧さがないので本研究ではこの方法を用いた。中央支持—中央加振法は、制振鋼板のはり状試験片を用いて、Fig. 4に示す加振点の伝達関数の共振曲線から半値巾法によって損失係数を得る方法である。また、制振鋼板の損失係数は、温度と周波数および振動モードに依存するために、コアの樹脂の粘弾性特性と、板厚構成の損失係数に及ぼす影響を調べるためには、試験温度

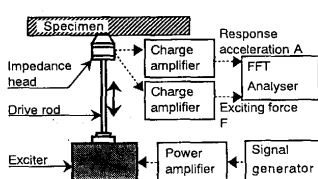


Fig. 4. Measuring method of loss factor of vibration damping steel sheet.

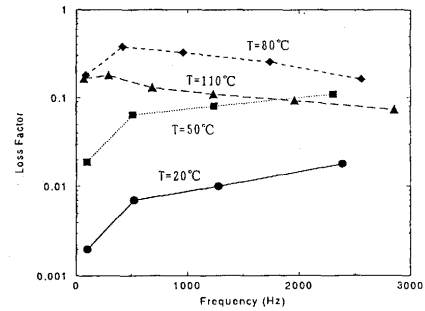


Fig. 5. Frequency dependence of loss factor of vibration damping steel sheet at each temperature. (Sample: The thickness Top and bottom plates was 0.8mm. The thickness of resin layer(BH80) was 0.05mm. The sample length was 300mm.)

と周波数および振動モードを一定にして測定しなければならない。温度については、恒温槽内で20~140°Cの範囲で所定の温度に設定して測定した。しかし、共振周波数と振動モードは、上下の板の厚さと試験片長さによって変化するので、同一周波数と同一振動モードのもとで測定できない。そこで、本実験においてはFig. 5にその測定結果の例を示すように、試験片の長さを300mmと一定にして、1次から6次までの各共振モードについて損失係数を測定した。このように損失係数は見かけ上、共振周波数と振動モードに対して一本の線上に乗る。この曲線より任意の周波数における損失係数の値を内挿して求めた。このときの損失係数を換算損失係数と呼び、任意の周波数における損失係数に及ぼす制振鋼板の板厚構成等の影響を対応する換算損失係数によって評価した。

4. 実験結果

4・1 樹脂の粘弾性特性と制振鋼板の損失係数

制振鋼板の損失係数 η とコアの樹脂(BH80, EMB)の損失係数 β ($=\tan\delta=G''/G'$)とを対比し、樹脂の粘弾性特性と制振鋼板の損失係数との関係を検討する。この場合、制振鋼板は上下の鋼板を0.8mm、樹脂の厚さを0.05mmとした。制振鋼板のこの構成は、コアの樹脂と制振鋼板の損失係数(β と η)が極大となる温度がほぼ一致するので、対比するのに都合がよく便利である。両者の損失係数の温度依存性を比較した結果をFig. 6, Fig. 7に示す。同図から制振鋼板の損失係数と樹脂の損失係数とは2つの樹脂で相似した形を取り、樹脂BH80では1つの極値であり、EMBでは2つの極値を示し、 β の値が高いBH80は制振鋼板とした場合の損失係数 η もEMBより高い。樹脂の損失係数と制振鋼板の損失係数との関係を明らかにするため、制振鋼板の損失係数のコア樹脂のそれに対する比(η/β)の温度依存性を2つの樹脂について調べるとFig. 8のようになる。 η/β が温度によらず一定であるならば、制振鋼板の損失係数の温度依存性はコア樹脂の β の変化そのものであるが、損失係数比

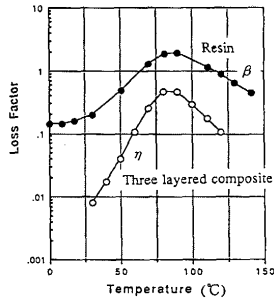


Fig. 6. Temperature dependence of loss factor of vibration damping steel sheet and resin (BH80) at 500Hz. Steel sheet was 0.8mm thick.

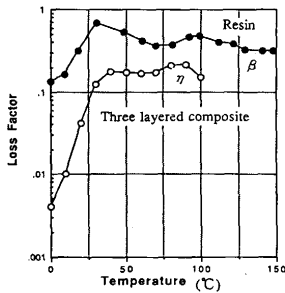


Fig. 7. Temperature dependence of loss factor of vibration damping steel sheet and resin (EMB) at 500Hz. Steel sheet was 0.8mm thick.

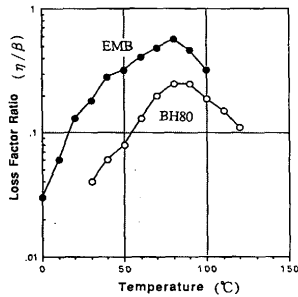


Fig. 8. Ratio of loss factor (η/β) of vibration damping steel sheet including each resin.

η/β はピーク温度を持つ温度変化している。従って、制振鋼板の η の温度に対する変化は樹脂自体のそれより大きい。また、それぞれのコア樹脂に対する損失係数 η/β は、樹脂の損失係数 β が小さいEMBの値がBH80より大きい。このように制振鋼板の損失係数は、樹脂の粘弾性特性が温度依存性を持つことに加え、三層積層化で温度依存性がより顕著になる。さらに損失係数の比が樹脂によって異なることから、制振鋼板の損失係数はコア樹脂の $\beta=G''/G'$ だけで決定されるものではないことが明らかになった。

4・2 構成要素と制振鋼板の損失係数

4・2・1 周波数による影響

樹脂層の厚さと上下の鋼板の厚さが、制振鋼板の損失係数に及ぼす影響を明らかにするため、コアの樹脂をBH80として、樹脂層の厚さを0.05, 0.10, 0.25mm, 上下の鋼板の

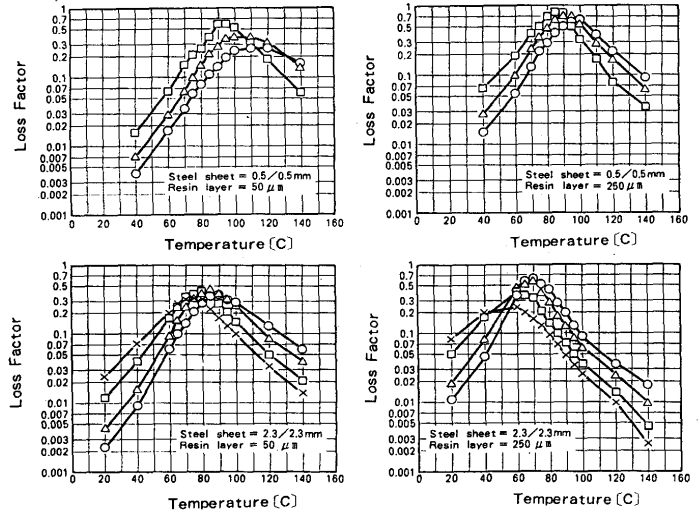


Fig. 9. Dependence of loss factor (η) on temperature for different frequency. Loss factor were calculated for frequency of 200Hz(\circ), 500Hz(Δ), 2000Hz(\square), 5000Hz(\times). The resin used was BH80.

厚さを0.5, 0.8, 1.6, 2.3mmとする各組み合わせの制振鋼板を製作し、長さ300mmの試験片を用いて周波数200Hz～5000Hzにおける換算損失係数の温度依存性を測定した。測定結果の一例をFig. 9に示す。換算損失係数の温度依存曲線において、損失係数が最大となる温度 T_p (以下ではピーク温度とする)と損失係数の最大値 η_{max} (以下ではピーク高さとする)が周波数、樹脂厚さ、鋼板厚さによって変化することがわかる。この場合、全ての樹脂厚さと鋼板厚さの組み合わせに対して周波数の増加とともにピーク温度は低温側へ移行する。ピーク高さは樹脂厚さと鋼板厚さの組み合わせにより異なって変化する。

4・2・2 樹脂厚さと鋼板厚さの影響

Fig. 9に示した結果は、特定の周波数における換算損失係数の値に対する樹脂厚さの影響または鋼板厚さの影響として整理することができる。それらから制振鋼板の損失係数に対する樹脂層の厚さ(h)と鋼板の厚さ(H)による影響をより明確にするため、特定の周波数における損失係数が最大となる温度すなわちピーク温度(T_p)と損失係数の最大値すなわちピーク高さ(η_{max})によってこれまでのデータを整理する。Fig.10はピーク温度に対する鋼板厚さ(H)と樹脂層厚さ(h)の影響を周波数別に示す。各図より明らかのように、鋼板厚さを増加するとほぼ一様にピーク温度は低下することが認められる。また、樹脂厚さの増加によっても同様にピーク温度は低下する。さらに、同じ板厚構成に対しては、高周波数の方が低温側にシフトする。

一方、損失係数の最大値であるピーク高さについてはFig. 11に示すように、周波数によってその傾向が異なり、周波数が200Hzの場合は、樹脂層の厚さが厚いほどピーク高さが高くなるが、この場合鋼板の厚さの影響は認められない。また、500Hzにおいては、200Hzのときと同様の傾向を示す

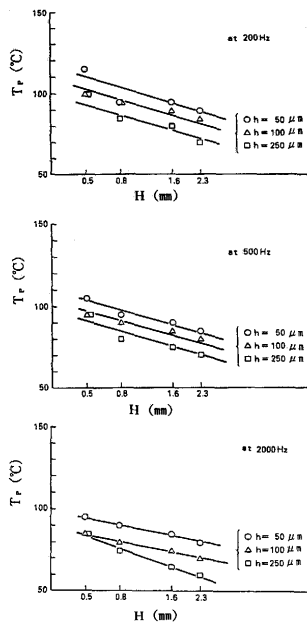


Fig. 10. Dependence of peak temperature(T_p) on steel sheet thickness(H), and resin thickness(h).

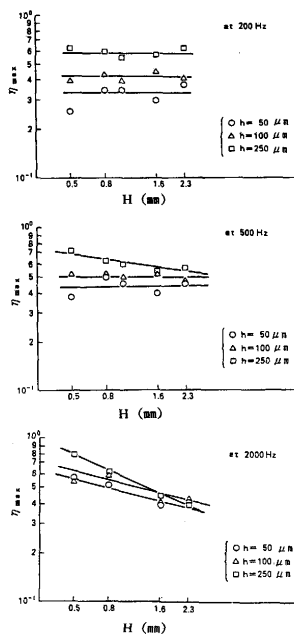


Fig. 11. Dependence of maximum value of loss factor(η_{max}) on steel sheet thickness(H), and resin thickness(h).

が、樹脂層の厚さの増加に対する損失係数の増加は小さくなる。しかし、周波数が2000Hzの場合には、樹脂層の厚さの影響は殆ど認められなくなるが、鋼板厚さの増加によりピーク高さは減少する傾向を示す。

以上のように、制振鋼板の損失係数は、同一の樹脂を用いても、制振鋼板の厚さ構成によって温度依存性や損失係数の最大高さが変化する。制振鋼板の損失係数の温度依存性は、コアの樹脂の粘弾性特性の温度依存性に基づくとともに構成要素によって温度依存性がシフトするということ

ができる。ピーク温度の移行する挙動については三層積層板の理論的解析モデル式²⁾からも予測できるが、損失係数の最大値については、本実験では換算損失係数を用いていることもあり、計算との対比ができない。

5. 考察

材料の損失係数は、1サイクル当たりの材料の回復可能な弾性歪みエネルギーを E_r 、消散されるエネルギーを E_d とすると一般に、

$$\eta = 1/2\pi \cdot E_d/E_r \dots\dots\dots (7)$$

と表せる。制振鋼板では、鋼板の弾性率が樹脂のそれに比べてきわめて大きいので E_r の大部分は鋼板層の歪みエネルギーと考えてよい。

一方、消散エネルギー E_d は鋼板には期待できない。

従って、 E_d =樹脂層の歪みエネルギー

$$= f/2 \cdot G'' \cdot \gamma^2 dV \dots\dots\dots (8)$$

(γ は樹脂層のせん断歪み)

樹脂層の厚さを h とすると上下の鋼板層の樹脂層の界面における相対ズレを δ とすると近似的に

$$\gamma = \delta/h \dots\dots\dots (9)$$

と表されるので、単位巾と単位長さ当たりの E_d は

$$E_d = 1/2 \cdot G'' \cdot \delta^2/h \dots\dots\dots (10)$$

従って、鋼板厚さ H と樹脂層の厚さ h を一定とすると、温度の上昇とともに樹脂の弾性率 G'' は単調に減少するが、 δ は単調に増加するので、 $G'' \cdot \delta^2$ が最大となる温度がピーク温度となる。鋼板厚さ H を一定とし樹脂層の厚さ h を増加させると δ^2 の温度依存性が低温にシフトする。このことが、Fig.10に表れた h の増加によってピーク温度が低下する理由である。とともに E_d は低下し、損失係数 η も小さくなる。さらに、鋼板厚や樹脂層厚を一定とし損失係数 η のレベルを高めるには樹脂の粘弾性 G'' をできるだけ増加させる必要がある。他方、 h を一定とし鋼板厚 H を厚くした場合には、鋼板の曲げ剛性が増加するので、 E_r が増加しその分 η が減少することになる。この減少分を補うためには樹脂層の G'' の値を増加させる必要が生じ、このことが H を増加するとピーク温度が低下する理由であると考えられる。

以上のことから、制振鋼板の損失係数 η は、樹脂の損失係数 β だけでなく、弾性率 G'' の値にも依存することが明らかである。与えられた使用条件のもとで最適化された制振鋼板、例えばある板厚で指定したピーク温度にあるように設計された制振鋼板を基本として、Fig.12に示す各要素のいずれかについて変更し、再び最適設計をするためには、変更された要素による損失係数 η の変化を補填する方向で他の要素を

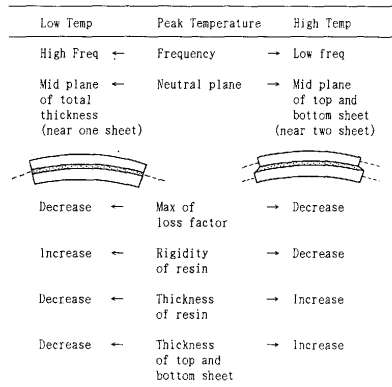


Fig. 12. Method of the best suitability on vibration damping steel sheet.

変更することにより実現できる。従って、例えばピーク温度を高めるためには、 G'' の高い硬質樹脂（ガラス転移温度の高温化）を選択するか、または、樹脂を変えず樹脂層の厚さを増加させればよいことになる。また低温で最適化するためには上記の逆を選定すればよいことになる。さらに、鋼板の厚さを増加する必要がある場合には、樹脂の G'' を増加させるかまたは樹脂の厚さを減少させて最適化すればよい。上下の板を鋼板からアルミ板に変更する場合には、アルミ板の剛性は鋼板の剛性の1/3程度に低下するので、鋼板厚さを薄くする場合と同じにすることにより最適化ができる。従って、アルミ板の損失係数の最適化は樹脂の G'' を減少させるか樹脂の厚さを厚くすればよいことになる。この結果から上下の板は鋼板に限定されるものではないことがわかる。さらに、樹脂層の厚さを薄くしたいという要請に対しては、樹脂の G'' をできるだけ小さくすればよいことになり、原理的に無限に0に近い G'' の樹脂が得られれば、樹脂層の厚さを無限に薄くしても大きい減衰性能が得られる筈であると言える。

以上の結果から、三層積層板の最適設計を行なう場合の各要素（材料スペック）の選定は、Fig.12によって行なうことができ、与えられた温度・周波数に対して制振鋼板の損失係数を最適化するためには、 G''/G' 、 G' 、樹脂層の厚さ h 、鋼板の厚さ H の選定によってなされる。一方制振鋼板の損失係数のピーク値を大きくするためには、樹脂の損失係数が大きいものほど適するのは当然である。しかし、制振鋼板の損失係数がピークとなる温度または周波数だけでいかに高くとも、その温度・周波数からはずれた条件での損失係数の落ち込みが大きいと実用的に有効でない場合が多い。そのため実用的に有効な制振鋼板の損失係数としては、ピーク温度を中心としてより広い温度・周波数範囲で変化が少ないものが望まれる。そのための樹脂としては、粘弾性特性の G'' の温度変化が少ない樹脂、または β が広い温度範囲で高いものがよい。本実験に用いた樹脂EMBは、非相溶の2種類の樹脂をブレンドしたものであり、制振鋼板の損失

係数の有効な温度範囲が広がるように設計されたものである。

これまで述べた現象を解析的にまとめると、温度を低温にすると G'' は増加し、最終的には1枚の鋼板と同様の曲げ変形をするようになり、その場合中立面は制振鋼板の中心面に一致する。また、温度を高温にすると G'' は減少し、最終的には2枚の鋼板を重ねたのと同様になり中立面は上下の鋼板の中心面に一致する。最適化された制振鋼板はこれらの間に位置し、曲げ変形により上下の中立面が近づき、そのときの樹脂層のせん断ひずみによりエネルギー吸収が起こるものと考えられる。

6. 結論

制振鋼板の損失係数に及ぼすコアの樹脂の粘弾性特性と樹脂層および上下の鋼板の厚さすなわち三層積層の構成要素の影響について実験的に調査し、制振鋼板の材料設計の最適化の指針として、次の諸結果が得られた。

(1) 制振鋼板の損失係数に及ぼすコアの樹脂の粘弾性特性としては、樹脂の損失係数 $\beta = G''/G'$ とせん断弾性率 G' とが影響する。

(2) 制振鋼板の損失係数の温度依存性は、樹脂の損失係数 β の温度変化より大きく、広い温度範囲で制振鋼板の損失係数を高めるには樹脂の G'' の温度変化を少なくするとよい。

(3) 制振鋼板の損失係数は、その温度依存性において、コアの樹脂の厚さまたは鋼板の厚さを増すと損失係数が最大となる温度は低温側にシフトする。

以上の実験結果から、制振鋼板の制振性能を最大に発揮させるための材料設計の際の指針としては、与えられた温度、周波数に対して、樹脂の損失係数、樹脂の弾性率、樹脂層の厚さ、上下の板の曲げ剛性を最適化することが挙げられる。

文 献

- 1) 佐々木雄貞, 遠藤 紘, 本田忠史, 座間芳正: 鉄と鋼, **64** (1978), p.1226
- 2) D.Ross, E.E.Ungar and E.M.Kerwin: Structural Damping Part. 3Ed. Ruzicka, ASME, (1959), p.49 [Pergamon Press]
- 3) Di-Tarant: ASME, J.Appl, Mech, **32** (4) (1965), p.881
- 4) D.J.Mead and S.Markus: J.Sound Vib, **10** (1969), p.163
- 5) 出羽宏視: 日本機械学会論文集, **57** (1991) 535c, p.706
- 6) 中村任男, 入江良彦, 本田 巖, 山本一雄: 三菱重工技報, **27** (1990), p.74
- 7) 高津宣夫, 伊藤耿一, 遠藤 紘, 田中 晃, 加藤正名: 日本機械学会論文集, **56** (1990) 526c, p.1381
- 8) 伊藤耿一, 柴田勝久, 高津宣夫, 加藤正名: 日本機械学会論文集, **56** (1990) 523c, p.18
- 9) 水町 浩: 日本接着協会誌, **5** (1969), p.370
- 10) 制振鋼板の振動減衰特性試験方法(日本規格協会編), JIS, G0602, (1993)
- 11) 岩本貞雄, 井上 茂: 自動車技術, **43** (1989) 12, p.72
- 12) 柴田勝久, 伊藤耿一, 遠藤 紘, 門脇伸生, 松岡徹郎: 日本機械学会論文集, **60** (1994) 580c, p.4092