高ダンピングサンドイッチ積層板の開発と振動減衰温度依存性の評価*

倪慶清^{*1}, 程飛^{*2}, 岩本正治^{*3}Development and Temperature Dependency of
High Damping Sandwich LaminatesQing-Qing NI^{*4}, Fei CHENG and Masaharu IWAMOTO^{*4} Department of Functional Machinery and Mechanics, Shinshu University,
3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano, 386-8567 Japan

Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) have been well developed for many engineering structural components in the aircraft, automotive and modern space industries with high specific rigidity and high specific strength. But it is poor in vibration and noise reduction as same as many metal materials. In this research, in order to improve the damping properties of CFRP, the innovative CFRP/SDR sandwich composite materials with damping rubber sheet were developed, and the mechanical and damping behaviors were investigated by three-point bending test, center vibration method and dynamic mechanical analysis (DMA), respectively. As a result, it is shown that the mechanical and damping properties of the developed 8 types of CFRP/SDR sandwich laminates depend deeply on the fiber orientation of lamina, the property of rubber sheet and its layer number and sequence. Among these materials, the optimal sequence for the CFRP and SDR sheet was obtained, which showed excellent both mechanical and damping properties.

Key Words: CFRP/SDR Sandwich Laminates, Damping Property, Three-point Bending Test, Dynamic Mechanical Analysis, Center Vibration, Temperature Dependency

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、高比剛性・高比強度等の優れた特性を有するため、宇宙、航空分野から一般産業用の構造材まで幅広く用いられるようになった。このような用途拡大に伴い、問題となったのは CFRP 構造物が示す大きな振動応答倍率である。CFRP 材の振動減衰は損失係数で 0.001~0.005 程度であるため従来の金属構造材と比較しても必ずしも大きいとは言えない。そのため、CFRP の振動減衰特性の改善は重要な研究課題となっており、多くの研究が報告されている。その中で、CFRP と制振材料の積層構成により振動減衰特性と剛性のバランス良い高ダンピング特性を有する CFRP ハイブリッド材の開発が注目される^{(1)~(3)}。しかし、これらの材料は十分な減衰特性を有するとは言い難い。また、幅広い用途に応じて材料の剛性、減衰特性に及ぼす温度の影響に関する検討は少ない。

制振材料の振動減衰特性評価には、一般的に (1) 片持ばり法、(2) ノード支持法 (2 箇所の節点を支持する)、(3) 中央支持・中央加振法などが用いられる。その中で、中央支持・中央加振法ではたわみ角、面内変位を全く拘束せず、インピーダンスヘッドの接触点でもななら拘束もされていないので、高い周波数帯までの測定が可能である。特に、1 つの試験片に対して伝達関数は多数の共振ピークと対になって反共振点が存在することから高次モードまでの損失係数を測定することができる⁽⁴⁾。

一方、粘弾性材料の減衰特性は温度、振動周波数に強く依存していることが知られている。そのため粘弾性理論に基づく、動的粘弾性測定 (DMA) は有効な測定手段の 1 つである⁽⁵⁾。CFRP 複合材料の応用拡大に伴い、温度、振動周波数による同材料の振動減衰特性を明らかにするには DMA による評価が不可欠となる。

そこで、本研究では、高減衰特性を有するポリウレタン系制振ゴムシート SDR (Super Damping Rubber) を用い、さまざまな構造を有する 8 種類の CFRP/SDR サンドイッチ積層板を試作し、剛性や振動減衰特性ともに優れた積層構造を見出すことを研究の目的とする。特に、開発した材料に対して、各温度下での静的 3 点

* 原稿受付 2005 年 2 月 2 日。

^{*1} 正員、信州大学機能機械学科 (☎ 386-8567 上田市常田 3-15-1)。^{*2} 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 (☎ 606-8585 京都市左京区松ヶ崎)。^{*3} 正員、京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科。

E-mail: niqq@shinshu-u.ac.jp

曲げ試験と動的振動試験（中央加振法と曲げモードでの DMA 測定）を行い、優れた曲げ剛性と振動減衰特性をともに有することが可能であるかを検討する。粘弾性制振ゴムシートの温度依存性とせん断変形を考慮し、修正はり理論 (Modified beam theory)⁽⁶⁾に基づき、広い温度範囲で供試材の曲げ剛性を予測し、実験結果との比較検討により予測式の妥当性を明らかにする。また、上記 2 つの振動減衰特性試験から得られた損失係数を比較し、両者の関連性を検討する。

2. 供試材の作製

供試材は制振ゴムと CFRP プリプレグを真空バッグ法を用いて積層・作製した。制振ゴムはスーパーダンピングゴム (SDR、ハマダンパー-R-3、横浜ゴム(株)) であり、厚さ 1mm、密度 1.62g/cm^3 のウレタンゴムである。プリプレグにはエポキシ樹脂含浸カーボン繊維 (トレカプリプレグ P 3051F-12、密度 1.80g/cm^3 、東レ(株)) を用いた。サンドイッチ積層板は 100t 圧縮成形機を用いて、真空バッグ法で 80°C 1 時間予熱し、 140°C 圧力 $15 \pm 5\text{MPa}$ の高温高压下で 2 時間かけて成形した。制振ゴムの位置や枚数及び CFRP の繊維配向角の影響を考慮し、図 1 に示すような方向材 (A1, B1), 直交積層材 (C1, A2, B2) および擬似等方性材 (D1, C2, D2) 8 種類の CFRP/SDR サンドイッチ積層板を作製した。試料は制振ゴム 1 層を有する CFRP/SDR サンドイッチ積層板 4 種類 (厚み約 1.9mm, それぞれを A1, B1, C1, D1 と記す) および C1 と D1 材をベースに展開した制振ゴム 2 層の 4 種類 (厚み約 2.8mm, それぞれ A2, B2, C2, D2 を記す) の計 8 種類である。

Fig. 1 Construction of CFRP sandwich laminates.

3. 試験方法

3・1 三点曲げ試験 温度制御装置を備えた恒温槽を取り付けたインストロン万能試験機 (4466 型) を用

いた。治具全体を恒温槽内に置き、試験温度 20°C , 50°C , 70°C で、30 分間保持し、試験速度 5mm/min の条件下で三点曲げ試験を行った。試験中の荷重と荷重点変位は試験機からの出力で測定した。試験片の寸法は長さ 100mm、幅 10mm であり、支点間距離は 65mm である。実験に用いた同一試験片の数は各種とも 5 本とした。

3・2 中央支持・中央加振法 実験は前述したようにサンプルを中央部にインピーダンスヘッドを介して加振器で加振する中央支持・中央加振法 (以降中央加振法と略記) を用い、そのシステム構成を図 2 に示す。加振力の振幅一定の条件下で、伝達アドミッタンスの周波数応答関数を測定し、それらのピーク値から半値幅法を用い、供試材の損失係数 η を求めた。なお、マスキャンセルアンプによりインピーダンスヘッドの質量補正を行った。

芯材粘弾性ゴムは強い温度依存性があるため、本試験では、恒温槽を用意した。サーモグラフィを用い、試験片の表面温度を計測し、それぞれ 20°C , 50°C , 70°C の試験温度で、供試材 CFRP/SDR サンドイッチ積層板の振動減衰特性の評価を行った。試験片は幅 20mm、長さ 250mm の短冊状であり、中央に瞬間接着剤でナットと接着し、インピーダンスヘッドと固定した。

Fig. 2 Schematic of mechanical impedance method.

3・3 動的粘弾性測定 (DMA) 試験は作製した 8 種類の CFRP/SDR サンドイッチ積層板に対し、曲げ加振モード下で DMA (UBM Rheogel-E4000 装置) 測定を行った。各供試材の貯蔵弾性率、損失弾性率、及び損失正接 $\tan \delta$ 等のデータを求めた。また、曲げ剛性の予測に必要なせん断貯蔵弾性率を測定するため、芯材 SDR のせん断貯蔵弾性率の測定には、せん断モード下で DMA 測定を行った。

試験片の形状は、曲げの場合、長さ 40mm、幅 6mm；せん断の場合、長さ 8mm、幅 6mm である。測定温度は $-25 \sim 120^\circ\text{C}$ 、昇温速度 2°C/min 、 2°C 毎に計測を行い、データを得た。試験は 10, 20, 40, 80Hz の 4 つの周波

数が合成された振幅 0.1mm の変位波形で行った。図 3 に曲げ及びせん断モードの試験様子を示す。実験に用いた試験片は各々 3 本であり、各試験片間のばらつきは非常に少ないことが確認された。

Fig. 3 Schematics of bending and shear mode in the Rheogel-E4000 device.

4. 実験結果及び考察

4・1 三点曲げ特性

4・1・1 曲げ荷重—たわみ曲線 図 4 に 8 種類の供試材の常温下での単位幅の曲げ荷重—たわみ曲線を示す。図から負荷初期においては線形的に荷重増加が見られるが、荷重の増加に伴って線形領域を離脱し、非線形的な挙動を示す。制振ゴムシート 1 層を有する供試材 A1, B1, C1, D1 では、表面層 CFRP の配向角によって、曲げ特性に大きな差異が示された。A1 材では、表面層に縦弾性率の大きい 0° CFRP 層が配置されているため、試料全体の曲げ荷重は明確に増大した。表面層に CFRP が直交配置された C1 材の曲げ荷重は表面層に CFRP が擬似等方性配置された D1 材より高く、A1 材よりは低い値を示した。また、B1 材は表面層に縦弾性率の一番小さい 90° CFRP 層が配置されているため、トランスバースクラックが生じ易く、曲げ荷重も小さい値が現れた。

制振ゴムシート 2 層の場合、CFRP の構成が異なる A2 と B2 の結果を比較すると、B2 材は表面層に 90° 層があるため、曲げ変形に対する抵抗が小さく、ひずみ約 1% で表面層にトランスバースクラックが生じる。その後曲げ変形に対する抵抗は主に中央部 0° 層が負担し、曲げ荷重は増大し続けるが、表面層に 0° 層が配置された A2 材よりかなり小さい。擬似等方性の C2, D2 材は曲げ荷重が A2 材より小さい値を示し、供試材 C2 の曲げ荷重は D2 材より高い値を示す。

4・1・2 曲げ特性の温度依存性 一般に、曲げモーメントのみを受けるはりに関しては、引張側または圧縮側の表面において破壊が生じる。サンドイッチ材は初等はり理論の仮定を満たすような変形状態にあると

Fig. 4 Bending load-deflection curves at 20°C of 8 types of CFRP/SDR sandwich laminates.

き（ひずみが厚さ方向に線形的に変化する）、その曲げによる破壊が引張側（下側）あるいは圧縮側（上側）のいずれかの表面材にて起こる。曲げ応力の絶対値は、引張側、圧縮側表面に等しく生じるため、芯材密度、さらには芯材の剛性が少々異なっても曲げ剛性は殆ど変わらない。しかし、試験結果を見ると芯材の剛性の変化は曲げ剛性及び曲げたわみに大きな影響を及ぼしている。したがって、ここで生じている破壊は上述のような単純曲げ破壊ではなく、表面材と芯材間の層間にはく離や芯材のせん断破壊なども寄与していると考えられる。

図 5 にそれぞれ 8 種類の供試材の温度 20°C , 50°C および 70°C における負荷初期の曲げ剛性と最大荷重時の曲げたわみの結果を示す。結果から、温度の増加につれ、曲げ剛性は、8 種類の供試材ともに著しい低下が示され、曲げたわみは増加することが示された。これは図 6 に示すように温度 20°C から 50°C および 70°C までに上昇すると芯材 SDR のせん断弾性率は 62.3MPa から 32.8MPa , 13.9MPa まで急激に下がり、芯材 SDR のせん断抵抗は弱くなったため芯材のせん断破壊が生じ易くなったことが起因している。また、高温領域では芯材と表面層 CFRP の接着界面の力学特性が低下する傾向もあって、接着面の破壊も主要因の 1 つと考えられる。

Fig. 5 Bending rigidity and bending deflection of 8 types of CFRP/SDR sandwich laminates at various temperatures.

Fig. 6 Temperature dependency of storage shear modulus G' and $\tan \delta$ for SDR core material.

表面層に引張弾性率の大きい 0° CFRP 材が配置されている A1 ($[0_4/\text{SDR}/0_4]$) 材では、試験温度が 20°C から 50°C に上昇すると曲げ剛性 EI ($\text{N}\cdot\text{m}^2$) は、0.21 から 0.14 までに約 70% 低下し、 70°C の曲げ剛性は 0.08 であり、 20°C の値より約 30% まで低下した。一方、表面層に直交材が配置されている C1 ($[0_2/90_2/\text{SDR}/90_2/0_2]$) 材と表面層に擬似等方性 CFRP が配置されている D1 ($[90/45/-45/0/\text{SDR}/0/-45/45/90]$) 材では、高温領域での曲げ剛性は 20°C の値より 50% 以上低下する傾向を示した。また、制振ゴム 2 層を有する供試材 A2, B2, C2, D2 でも、B2 材を除く、高温領域での曲げ剛性が低温領域の値より大幅に低下した。B1 と B2 材は、表面層に 90° CFRP 材が配置されているため、トランスバースクラックが生じるので曲げ剛性が常温でも低くかったが、それにしても温度の変化による低下が大き

かった。

4・1・3 曲げ剛性の予測 3 点曲げ試験におけるサンドイッチばりの等価曲げ剛性は、図 7(a) のように板厚 t 、板幅を b とする中実はりとして、次の式から求められる。

$$\overline{EI}_{\text{exp}} = \frac{Pl^3}{48\delta_{\text{exp}}} \quad (1)$$

ここで、 P 、 δ_{exp} は実験から測定した曲げ荷重と曲げたわみであり、 l は 3 点曲げの支点間距離である。

サンドイッチ梁では、芯材の縦弾性率は表面材より非常に小さいので、図 7(b) のように芯材の E を無視したはりとして、断面 2 次モーメントが芯材の板厚 t_c 部分を除いて求められ、曲げ剛性は次のように求められる。

Fig. 7 Model of solid beam and sandwich beam.

$$\begin{aligned} \overline{EI}_{cb} &= \frac{E_f b}{12} [(t_c + 2t_f)^3 - t_c^3] \\ &= \frac{E_f b t_f}{6} (3t_c^2 + 6t_f t_c + 4t_f^2) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 E_b 、 t_f はそれぞれ表面材の縦弾性率と厚さであり、 t_c は芯材の厚さである。また、この式も複合梁理論と呼ばれ、下添え字 cb は Composite Beam Theory の略である。

本研究のようにせん断弾性率の低い芯材を使用する場合、せん断変形によって芯材のせん断たわみが発生する。中央集中荷重を受けるサンドイッチ梁のたわみ δ_{total} は、はりの曲げ変形によるたわみ δ_b とせん断変形によるたわみ δ_s との和として、

$$\delta_{\text{total}} = \delta_b + \delta_s \quad (3)$$

と与えられ、曲げ変形に対しては表面材が、せん断変形に対しては芯材が働くものとして、両端単純支持されたサンドイッチ梁の最大たわみ δ_{total} は次のように求められる。

$$\delta_{\text{total}} = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{Pl}{4bG_c t_c} \quad (4)$$

したがって、中央集中荷重を受けるサンドイッチ梁の等価曲げ剛性は、

$$\overline{EI}_{cal} = \frac{Pl^3}{48\delta_{total}} = \frac{Pl^3}{48(\delta_b + \delta_s)} = \frac{\overline{EI}_0}{1+\alpha} \quad (5)$$

となり、ここで、 α は、

$$\alpha = \frac{12E_f t_f (3t_c^2 + 6t_c t_f + 4t_f^2)}{t_c G_c l^2} \quad (6)$$

である。

α は芯材のせん断変形のパラメータである。サンドイッチ梁の芯材と表面材の寸法から、芯材のせん断弾性率 G_c と表面材の縦弾性率 E_f により梁の曲げ剛性を予測することができ、式(5)は曲げ剛性の修正はり理論(Modified Beam Theory)と呼ばれる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

前述より CFRP/SDR サンドイッチ積層板の曲げ剛性の予測は、サンドイッチ構造の構成基材の特性定数を用いて式(5)より可能である。0°と90°の一方向 CFRP の縦弾性率 E_f はそれぞれ 114GPa、7.39GPa であり、ポアソン比、せん断弾性率は $\nu_{xy}=0.326$ 、 $G_{xy}=7.58$ GPa である。これらの材料定数から積層板理論を用い、直交及び擬似等方性 CFRP が配置された C1 と D1 材の表面層の縦弾性率を求めそれぞれ 61.11GPa、37.96GPa であった。また、芯材の各温度におけるせん断弾性率は、DMA 試験より測定した。なお、表面材 CFRP の弾性率の温度依存性は小さいため、無視した。

Fig. 8 Comparison of bending rigidity between experimental and calculated values.

(Specimens A1 and B1 are the sandwich laminates with 0° C and 90° C unidirectional CFRP surface.)

図8と図9に供試材 A1, B1, C1 と D1 のそれぞれの実験値 $\overline{EI}_{exp}$ と予測値 $\overline{EI}_{cal}$ を示す。図から温度の増加につれ、芯材のせん断弾性率が低下し、曲げ剛性に大きな影響を及ぼしていることが分かる。温度 10~80°Cの間では芯材のガラス転移領域が反映され、CFRP/SDR サンドイッチ積層板の曲げ剛性も急激に低下する。各供試材の曲げ剛性の試験値と予測値を比較すると、両者の差はあるものの、その差は小さく、良い一致性を有することと言える。このことから曲げ剛性修正はり理論に基づき幅広い温度範囲で CFRP/SDR サンドイッチ積層板の曲げ剛性の予測が可能であることが分かった。

Fig. 9 Comparison of bending rigidity between experimental and calculated values.

(Specimens C1 and D1 are the sandwich laminates with cross-ply and quasi-isotropic CFRP surface.)

4・2 振動減衰特性

4・2・1 中央加振法 表1に創製した8種類の供試材の各温度における損失係数を示す。制振ゴムシート1層を有する CFRP/SDR サンドイッチ積層板 A1, B1, C1 と D1 では、温度条件 20°C の場合、芯材制振ゴムはガラス状態であり、振動によるせん断変形はしにくく、各供試材も低い損失係数を示した。表面層に 0° CFRP が配置されている A1 ([0/SDR/0₄]) 材は最小損失係数 0.072 を示し、表面層に直交材が配置されている C1 ([0₂/90₂/SDR/90₂/0₂]) 材と表面層に擬似等方性 CFRP が配置されている D1 ([90/45/-45/0/SDR/0/-45/45/90])

Table 1 Loss factor η of 8 types of specimens measured from 1st resonance mode at 20, 50 and 70°C.

Tem. (°C)	A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2
20	0.072	0.081	0.073	0.077	0.084	0.110	0.104	0.119
50	0.266	0.094	0.230	0.189	0.254	0.105	0.232	0.258
70	0.123	0.087	0.141	0.147	0.166	0.094	0.134	0.110

Table 2 Loss factor η of 8 types of specimens at various resonance mode.

Mode	A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2
1st	0.072	0.081	0.073	0.077	0.110	0.084	0.104	0.119
2nd	0.041	0.056	0.047	0.074	0.088	0.076	0.057	0.092
3rd	0.030	0.040	0.040	0.054	0.081	0.037	0.047	0.097

材の損失係数はそれぞれ 0.073, 0.077 であり, 表面層に長手方向で低い弾性率の 90° CFRP 層が配置されている B1 ([90/SDR/90]₁) 材は A1, C1, D1 材に比べ, 損失係数が大きく, 高い減衰特性を示した. これは, CFRP/SDR サンドイッチ積層板の表面層の曲げ剛性の増加に応じ, 1 次曲げ固有振動モードが励起されにくくなったため, 制振ゴムシート層のせん断変形も起こりにくくなり, エネルギー吸収が低下したのが主な原因である.

制振ゴムシートのガラス転移温度近傍 50°C の損失係数を見ると, A1, C1 と D1 各材の損失係数が共に高くなり, 0.2 以上に達する. 芯材制振ゴムの高い減衰特性が発現した. 逆に, B1 材の損失係数は約 0.094 であり, A1, C1, D1 材と比べ小さくなった. また, 70°C の場合, 各供試材の損失係数は 50°C での値と比べ, 共に低下する傾向にある. これは, 制振ゴムがガラス転移温度で最大の減衰特性を有していることから, CFRP/SDR サンドイッチ積層板も 50°C 近傍で最大の損失係数を示している. これらのことから, 開発した材料は曲げ剛性の大きいものでも高い減衰係数を有していることがわかり, 制振ゴムの利用により曲げ剛性と損失係数ともに向上することが可能であることが示された.

一方, 制振ゴムシート 2 層を有する CFRP/SDR サンドイッチ積層板の結果から B2 材を除き, 制振ゴム 1 層より減衰特性がさらに改善されたことが分かる. 特に A2 材は制振ゴム 1 層の C1 材と同様な CFRP 積層構造であるが, 制振ゴム 2 層とその配置が変化したことで, 50°C での損失係数は C1 材より約 10% アップした. 制振ゴム 2 層を有する 4 種類の CFRP/SDR サンドイッチ積層板における損失係数は表面層 0° CFRP を有する直交積層板 A2 材が一番大きいことが分かる. また, 同じ制振ゴム層数の場合, CFRP の構成が異なる A2 と B2 の結果を比較すると, B2 材の損失係数 η は A2 材に比べ, かなり小さい. また B2 材の表面層は 90° 層であるため, 曲げ変形に対する抵抗が小さく, 表面層に

トランスバースクラックが生じやすいことから, 曲げモード下では試料表面層に繊維配向角 90° を用いることは振動減衰と曲げ剛性の両面から得策ではないことが確認された.

また, 中央加振法による 20°C での各共振モードにおける損失係数の結果を表 2 に示す. 共振モード次数の増加につれ, 各供試材の損失係数はともに小さくなることが分かる. これは, 高次モード励起時の振幅が 1 次モードの時より小さくなり, 芯材の制振ゴムのせん断変形が起りにくく, 変形過程でエネルギー吸収能が小さくなったためと考えられる.

4・2・2 動的粘弾性特性 中央加振法では, 温度影響に関して測定したデータはわずか 20, 50, 70°C の三点であり, 振動減衰特性の温度依存性を十分に評価できなかったとはいえない.

図 10 に制振ゴムシート 1 層を有する 4 種類の CFRP/SDR サンドイッチ積層板の曲げモードにおける DMA 測定の結果を示す. 図から制振ゴムシートを中央層に用いた場合, いずれの供試材において温度領域 10°C~80°C に大きな応力緩和が生じ, 貯蔵弾性率 E' の転移現象が見られる. また損失弾性率 E'' と損失正接 $\tan \delta$ にピークが明確に観察された. 各材における貯蔵弾性率 E' は $A1 > C1 > D1 > B1$ の順序にあり, 曲げ変形の特徴から表面層 CFRP の繊維配向や積層構造の差異が明確に現れた. すなわち, A1, C1 材に対して表面層に縦弾性率の大きい 0° CFRP 層が配置されているため, 試料全体の貯蔵弾性率 E' は明確に増大した. また, 制振ゴムシートと CFRP 層における縦弾性率の差が非常に大きいので, 各層間の曲げ変形の連続性から各層に大きい応力の不連続性が生じると考えられる. その結果, 異なる積層構造による CFRP 層と制振ゴムシートの剛性差により層間界面にも複雑な変形挙動を引起し, そのため各材の損失正接に差異が観察された. また, A1 材と C1 材を比較すると, 制振ゴムシートと 0° 層の間の 2 層を 90° 層で置き換えた C1 材は, A1 材より比較

的低い温度領域で貯蔵弾性率がやや小さくなったが、高い温度領域ではその低下度合いがかなり大きい。これは C1 材では曲げ変形過程において特に高温領域では 90° 層に繊維/母材界面の力学特性の低下が起因していると考えられる。一方、損失弾性率 E'' は両材においてほぼ類似している。その結果、両材の損失係数に大きな差異が生じた。表面層の繊維配向角が 90° の場合 (B1, D1)、貯蔵弾性率と損失弾性率とも A1, C1 材より小さくなるが、損失正接のピーク値は C1 材より約 30% 小さいものの、約 0.30 の値を有している。このことから、最適な減衰特性を見出すには剛性と粘弾性の両方をともに考慮することが重要である。なお、制振ゴムシート 1 層を中央にサンドイッチしたこの 4 種類の供試材の曲げモード下での最大損失係数はいずれも 0.25 以上あり、優れた制振減衰特性を有していることが分かる。

Fig. 10 Temperature dependency of E' , E'' and $\tan \delta$ for CFRP/SDR laminates A1, B1, C1 and D1 at bending mode.

一方、図 11 に制振ゴムシート 2 層を有する CFRP/SDR サンドイッチ積層板の DMA 測定結果を示す。B2 材を除き、制振ゴム 1 層より減衰特性が改善された。特に A2 材は制振ゴム 1 層の中で損失正接が一番よい C1 材と同様な CFRP 積層構造を持ち、ただし制振ゴムシート 2 層とその配置が変化したことで、最大損失正接は C1 材より約 15% アップし、減衰特性がさらに改善されたことがわかる。

以上の DMA 測定結果から、8 種類の供試材の中で A1 材は最大の貯蔵弾性率を有し、損失正接 $\tan \delta$ のピーク値は 0.30 である。C1 材は制振ゴム 1 層であるのに、高い損失正接は 0.39 と大きく、貯蔵弾性率も大きい。制振ゴム 2 層を有する A2 材は最大の損失正接 0.45 を示し、貯蔵弾性率も大きい。CFRP クロス材のみの損失正接がほぼゼロに近いことから⁽¹⁾、CFRP/SDR サンドイッチ積層板の中に制振ゴムシート含有率の増加は減衰特性の改善の手段であることがわかる。なお、擬似等方性 C2, D2 材は最大損失正接 $\tan \delta$ がそれぞれ 0.418 と 0.330 であり、A2 材より小さいが、優れた減衰特性を有していることが明確である。

Fig. 11 Temperature dependency of $\tan \delta$ for CFRP/SDR laminates A2, B2, C2 and D2 at bending mode.

4・2・3 損失係数 η と $\tan \delta$ の比較 中央加振法での損失係数 η は 1 自由度の力学共振系モデル理論で共振角振動数 ω_0 における 1 周期のエネルギー損失と系全体の平均エネルギーの比を 2π で割ったものと定義されている。複素弾性率理論での損失正接 $\tan \delta$ は、弾性率の損失角に関係して定義されている。これらの 2 つパラメータには共振系のエネルギー損失に基づくものと、粘弾性体の弾性と損失に基づくものと、基本的に異なった 2 通りの定義であるが、共振点での損失係数が同じ値となる⁽⁶⁾。ここで、両者の比較も検討してみる。

図 12 に供試材 A1 と C1 に対して中央加振法と DMA 試験より測定した損失係数 η と損失正接 $\tan \delta$ の関係を示す。損失係数 η は表 1 から各共振モード下で 20°C

の損失係数であり、損失正接 $\tan \delta$ 曲線は時間-温度重ね原理⁽¹⁰⁾に基づき、基準温度 20°Cでのマスターカーブである。図から、損失係数 η と損失正接 $\tan \delta$ の間に約 20-30%の差があるものの、周波数変化に対してほぼ同様の傾向が観察された。

Fig. 12 Comparing of loss factor measured by Center support-Center vibration and DMA.

5. 結 論

本研究では、高減衰特性を有する制振ゴムシートを用い、CFRP/SDR サンドイッチ積層板を開発し、適切な構成に積層することにより、軽くて強いというCFRPの特性に制振減衰特性を付与し、高付加値、多機能複合材料を得ることができた。その上、開発したCFRP/SDR サンドイッチ積層板に対して、静的力学特性と振動減衰特性の両面から性能評価を行い、その結果、次の知見を得た。

1) 曲げ修正はり理論から求めた予測値は、実験結果と良い一致を示していることから、DMA 測定結果を用いた幅広い温度範囲での曲げ剛性の予測式は材料の設計において有効であることが明らかとなった。

2) 中央加振法とDMA測定を用い、開発した材料の振動減衰特性を評価した。中央加振法により高次共振モードまでの損失係数 η を測定し、共振モードが高いほど損失係数 η が低くなることが分かった。また、異

なる温度条件下の測定結果から8種類の供試材の中で5種類は0.2以上の損失係数を有していることを明らかにした。

3) 動的粘弾性測定では、幅広い温度範囲で供試材の貯蔵弾性率、損失弾性率及び損失正接 $\tan \delta$ を測定でき、各供試材におけるDMAパラメータの温度、周波数依存性を明確にした。特に各供試材の損失正接 $\tan \delta$ の最大値は0.2以上であり、中にはA2材が0.45の高い値に達した。また、損失係数 η と $\tan \delta$ の間は絶対値における差があるものの、周波数変化に対してほぼ同様の傾向が観察され、両パラメータ間の関係の一端が示された。

以上の諸点から、表面層CFRPの配向角と制振ゴムシートの枚数・位置を考慮した本研究の制振材料は優れた曲げ剛性と振動減衰特性を兼備しており、今後の応用展開に大いに期待される。

謝辞：本研究は文部科学省、信州大学21世紀COEプログラム「先進ファイバー工学研究教育拠点」の助成を受けた。

文 献

- (1) 足立 廣正, 長谷川 照夫, 複合材料, Vol. 24, 6, (1998), 230-235.
- (2) 藤本 淳, 田村 徹也, 金原 勲, 谷本 敏夫, 複合材料, Vol. 20, 4, (1994) 144-149.
- (3) 藤本 淳, 田村 徹也, 金原 勲, 谷本 敏夫, 複合材料, Vol. 20, 4, (1994), 154-159.
- (4) JIS K 6394, JIS G 0602
- (5) David I. G Jones 著, 鈴木 浩平, 監訳, 粘弾性ダンピング技術ハンドブック, (2003), 41-50, 丸善社,
- (6) H. Fukuda, G. Itohiya, A. Kataoka, S. Tashiro, J. Sandwich Structures and Materials, Vol. 6, Jan. (2004), 75-91.
- (7) H. Fukuda, M. Itabashi, Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 30, (1999), 249-256.
- (8) 西澤 仁, 監修, 高分子制振材料と応用製品, CMC 社, (2004), 260-272.
- (9) 村上 謙吉, レオロジー基礎論, 産業図書 (株), (1991), 115-150.
- (10) 林 毅 編, 複合材料工学, 日科技連出版社 (株), (1971), pp 638.
- (11) 程 飛 倪 慶清, 岩本 正治, 材料, Vol. 54, 5, (2005), 487-493.