マトリックスハイブリッド積層板の力学的特性†

大仁田 孝 史* 西 脇 剛 史**
前 川 善一郎*** 濱 田 泰 以****

Mechanical Property of Matrix Hybrid Laminates

by

Takafumi ONITA*, Tsuyoshi NISHIWAKI**, Zen-ichiro MAEKAWA***
and Hiroyuki HAMADA****

Matrix hybrid laminates are defined to be materials fabricated by the combination of two or more kinds of matrices. The wide ranges of stiffness and damping property may be produced by changing various designing parameters, the resin ratio and/or the stacking sequence. In this study, two kinds of resins are used as matrices. One is a vinyl ester resin with high stiffness and the other is unsaturated polyester resin with low stiffness. As a reinforcement, plain woven glass cloth is used. Matrix hybrid laminates with various flexible resin ratios and stacking sequences are fabricated. The static and dynamic bending properties are investigated by the three-point bending and the vibration tests, respectively. In addition, antisymmetric matrix hybrid laminates are also investigated by the above tests. For the above all experimental results, the influences of designing parameters on both static and dynamic bending properties are discussed in detail. It is confirmed that matrix hybrid laminates can have the wide ranges of stiffness and damping properties by changing the flexible resin ratio and the stacking sequence.

Key words: Matrix hybrid laminates, Flexible resin ratio, Stacking sequence, Bending property, Damping property

1 緒 言

一般の実構造物は、それぞれの用途に応じて複数の特性が要求される場合が多い。例えば、近年の環境悪化により代替材の開発が望まれている楽器用木材においては、高比弾性、低減衰といった特性が要求されている。¹⁾また、工業的に用いられている構造部材では、従来の高剛性、高強度に加えて、近年では、振動を抑制する設計が望まれている。しかしながら、単一材料による設計では、これらの構造部材に要求される複数の特性を併せ持たせることは困難である場合が多い。そのため、異なる特性を有する材料の組み合わせにより、それらの要求特性を満たすことができる材料設計が必要である。この設計において、ハイブリッド複合材料は有用なものとなり得ると考えられる。

ハイブリッド複合材料とは、2種類以上の強化材および母材の組み合わせにより作製された材料と定義されている。²⁾そのため、実構造物への適用に際し、要求される複数の特性を併せ持たせた材料の設計が可能であり、数多くの研究がなされてきた。宮入ら^{3), 4)}は、炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRPと称す）とガラス繊維強化プラスチック（以下、GFRPと称す）を用いたサンドイッチおよびカナッペ構造のハイブリッド複合材料の曲げ特性についての研究を行い、ハイブリッド化によりGFRP単体よりも曲げ特性が向上することを示した。天

城ら^{5), 6)}は、CFRPとアラミド繊維強化プラスチック（以下、AFRPと称す）を組み合わせたハイブリッド複合材料を対象とし、CFRP層とAFRP層の体積比率および積層順序が引張および曲げ特性に及ぼす影響について検討している。また、Kretsis⁷⁾は、強化材に炭素繊維とガラス繊維を用いた繊維ハイブリッド複合材料の引張、圧縮、曲げ、せん断といった力学的特性に関する研究報告例をまとめている。しかしながら、これらの研究は、強化材のハイブリッド化に関する報告例であり、母材に着目したハイブリッド化に関する報告例はほとんどみられない。^{8), 9)}

また、実構造物に要求される特性の一つである剛性は理論計算により容易に求めることが可能であるが、¹⁰⁾動的特性である減衰特性は、材料自身の内部減衰や、空気抵抗などの外部減衰、境界条件の影響など考慮すべき点が多い。^{11)~16)}そのため、実際に測定を行うことより、その材料や構造が有している減衰特性を求める必要がある。

そこで、本研究では、強化材にガラスクロス、母材に高剛性、高強度を有する汎用性樹脂およびそれと化学的構造の主骨格が同一である柔軟性樹脂を用い、これらを様々な積層順序で組み合わせたマトリックスハイブリッド積層板を対象とし、曲げ試験および振動試験を行い、積層順序が曲げおよび振動特性に及ぼす影響について体系的に検討した。

† 原稿受理 平成12年9月7日 Received Sep. 7, 2000

* 京都工芸繊維大学大学院 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Graduate Student, Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

** (株)アシックス 〒651-2271 神戸市西区高塚台, Asics Corp., Nishi-ku, Kobe, 651-2271

*** 正 会 員 京都工芸繊維大学先端ファイブ科学専攻 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Graduate Program of Advanced Fibro Sci. in Graduate School Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

**** 京都工芸繊維大学先端ファイブ科学専攻 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Graduate Program of Advanced Fibro Sci. in Graduate School Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

2 実験方法

2・1 供試材料

強化材に平織ガラスクロス (WE18W, 日東紡績(株)), 母材に汎用性樹脂としてビニルエステル樹脂 (R806, 昭和高分子(株)製), 柔軟性樹脂として不飽和ポリエステル樹脂 (FK2000, 昭和高分子(株)) を用いた. これらの樹脂の引張および減衰特性を Table I に示す. Table I によれば, 汎用性樹脂は柔軟性樹脂に比べ高剛性, 高強度を有しており, それに対し, 柔軟性樹脂は汎用性樹脂に比べ高減衰を有していることがわかる. これらの特性を有する樹脂を母材としてマトリックスハイブリッド積層板を作製した. 成形は, ハンドレイアップ法で行い, 積層数を 16, 公称板厚を 3.0mm とした. 対象とした積層順序は, Fig. 1 に示すような 4 層毎にマトリックスを変化させた $[H_{16}]$, $[F_{16}]$, $[H_4F_4]_s$, $[F_4H_4]_s$ の 4 種類とした. ここで, H および F はそれぞれ母材として汎用性および柔軟性樹脂を用いた層を表しており, Fig. 1 では 2 層を 1 単位として積層板を描いている. なお, 繊維体積含有率を直接測定した結果, 母材の種類に依存せず, 43% 一定であることが確認できた.

2・2 曲げ試験

曲げ試験は, 3 点曲げ試験とした. 試験片形状は, 長さ 60mm, 幅 15mm とし, Warp 方向を長手方向として切り出した. 試験には, インストロン万能試験機 (4206 型) を用い, 試験速度を 1.0mm/min, 支点間距離を 48mm として行った.

2・3 振動試験

試験は長さ 250mm, 幅 150mm, 長手方向を Warp とした試験体を糸に吊した状態において, インパルスハンマーで板中央を加振し, 試験体に取り付けたセンサから加速度応答を測定した. 測定には, AD3542FFT アナライザー (エー・アンド・ディ社(株)製) を用いた. 得られた加振による入力情報および応答情報に高速フーリエ変換を施し, 後者を前者で除することにより伝達関数を算出した. 本研究では, 3 点曲げ試験と同一の主曲率を有する Fig. 2 に示すような 1 次曲げ固有振動モードに着目し, このモードに対応する伝達関数のピーク値から固有振動数を求めた. さらに, 最も振幅の大きいコーナー部での伝達関数における 1 次曲げ固有振動数近傍に逆フーリエ変換を施すことにより, そのモードに対応した減衰曲線を算出し, 次式より対数減衰率を求めた.¹⁷⁾

$$\delta = \frac{1}{j} \ln \frac{X_{mi}}{X_{m(i+j)}} \quad (b)$$

ここで, δ は対数減衰率, X_{mi} , $X_{m(i+j)}$ は, それぞれ減衰曲線中における任意の点の振幅 X_{mi} , X_{mi} を決めた点から数えて j 番目の振幅である.

Fig. 1. Stacking sequence.

Fig. 2. Eigenvibration mode corresponded to the 1st bending frequency.

3 実験結果

3・1 曲げ試験結果

曲げ試験より得られた各タイプの典型的な応力-たわみ曲線を Fig. 3 に, 試験後の試験片断面を金属顕微鏡により観察した断面観察写真を Fig. 4 に示す. Fig. 3, 4 によれば, $[H_{16}]$ における応力-たわみ曲線は, たわみの増加と共に曲げ応力も線形的に増加していくが, 最大応力に達する直前においてわずかな曲げ応力の低下が数回確認され, 最大応力直後, 急激な曲げ応力の低下が確認

Fig. 3. Bending stress-deflection curves of matrix hybrid laminates subjected to the bending load.

Table I. Tensile and damping properties of matrix resins.

Material	Density (g/cm ³)	Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Logarithmic decrement
Common resin	1.20	4.01	73.0	0.242
Flexible resin	1.10	0.37	0.72	1.002

Fig. 4. Metallurgical microscope photographs of fracture surface in matrix hybrid laminates.

された。これを Fig. 4 の断面観察写真と対応づけた場合、初期の応力低下では圧縮側で座屈が起り、その後の低下では、引張側で繊維破断が生じたことが確認され、破壊挙動はぜい性的であると観察された。それに対し、 $[F_{16}]$ は、他の 3 タイプと比べ、線形的な荷重の増加はほとんど見られず、実験開始直後に圧縮側で座屈が発生したが、実験後においても繊維破断は生じず、延性的な破壊挙動を示し、最大応力が 110MPa を超えることはなかった。さらに、マトリックスハイブリッド積層板としての $[H_4F_4]_s$ 、 $[F_4H_4]_s$ は、 $[H_{16}]$ 、 $[F_{16}]$ 両者の中間の曲げ特性を有していると考えられ、 $[H_4F_4]_s$ では、圧子点直下の汎用性樹脂層の座屈および繊維破断が確認された。 $[F_4H_4]_s$ は、圧縮側柔軟性樹脂層のずれにより白化し、その後座屈が汎用性樹脂層に進展し、引張側柔軟性樹脂層の繊維が破断した。また、いずれのタイプも非線形的な破壊挙動を示すことが観察された。次に、応力-たわみ曲線から得られた曲げ弾性率および曲げ強度を Table II に示す。Table II によれば、曲げ弾性率、曲げ強度共に、

$[F_{16}]$ 、 $[F_4H_4]_s$ 、 $[H_4F_4]_s$ 、 $[H_{16}]$ の順に高くなることがわかる。これは、最も大きな応力を受ける最外層に剛性の高い汎用性樹脂層を配したことに起因している。また、 $[H_4F_4]_s$ を $[H_{16}]$ と比較した場合、曲げ弾性率、曲げ強度は低下し、破断たわみは増加する。逆に、 $[F_4H_4]_s$ を $[F_{16}]$ と比較した場合、曲げ弾性率、曲げ強度は増加するが、破断たわみは低下することが確認された。さらに、 $[H_{16}]$ および $[F_{16}]$ の曲げ弾性率をもとに、古典積層理論^{18), 19)}により $[H_4F_4]_s$ の曲げ弾性率予測を行なった。その結果、 $[H_4F_4]_s$ の等価曲げ弾性率は 20.1GPa であり、実験値との間に差が見られた。これは、積層板中に樹脂層間が存在することによって、理論と比較した場合、実験で得られた曲げ弾性率が低下したのと考えられる。このことから、均質材をもとにした古典積層理論の適用は困難であると思われる。

3・2 振動試験結果

振動試験から得られた 1 次曲げ固有振動数および対数減衰率を Table III に示す。Table III によれば、1 次曲げ

Table II. Bending modulus and strength obtained by bending test.

Type	Bending modulus (GPa)	Bending strength (MPa)
$[H_{16}]$	22.0	460
$[F_{16}]$	6.96	110
$[H_4F_4]_s$	17.3	423
$[F_4H_4]_s$	15.2	331

Table III. 1st bending frequency and logarithmic decrement obtained by vibration test.

Type	1st bending frequency (Hz)	Logarithmic decrement
[H ₁₆]	181.1	0.077
[F ₁₆]	163.4	0.199
[H ₄ F ₄] _s	169.9	0.095
[F ₄ H ₄] _s	164.9	0.143

固有振動数は、曲げ試験結果と同様、[F₁₆]、[F₄H₄]_s、[H₄F₄]_s、[H₁₆]の順に高くなることがわかる。これは、曲げ剛性が大きくなるに従い、長手方向に主曲率を有する1次曲げ固有振動モードが励起されにくくなったためである。一方、対数減衰率においては、[H₁₆]、[H₄F₄]_s、[F₄H₄]_s、[F₁₆]の順に大きくなることがわかった。これは、最も変形の大きくなる最外層に変形の起こりやすい柔軟性樹脂層を配したことに起因している。さらに、[H₄F₄]_sと[F₄H₄]_sの比較より、通常、曲げモードが励起された場合においては、中立軸近傍での面外せん断変形の影響により対数減衰率が増加するが、²⁰⁾マトリックスハイブリッド積層板の場合、最外層に柔軟性樹脂層を配した方がより対数減衰率の増加において効果的であることが明らかとなった。以上の結果より、積層順序を変化させることにより、幅広い剛性と減衰特性を有する材料の設計が可能であることが示された。

4 考 察

4・1 非対称積層板

先に述べた中立面に対して対称である対称積層板では、引張、曲げなどのカップリングが生じない。しかしながら、実構造物においては、しばしば要求される特性によって、故意にカップリングを生じる非対称積層板による設計も望まれている。¹⁰⁾そこで、さらに積層順序がマトリックスハイブリッド積層板の曲げおよび振動特性に及ぼ

す影響についてより詳細に検討するため、Fig. 5に示す非対称積層板を作製し、同様の試験を行った。

4・1・1 非対称積層板の曲げ特性 曲げ試験から得られた曲げ弾性率および曲げ強度をTable IVに示す。柔軟性樹脂の割合が同じタイプで比較した場合、曲げ弾性率、曲げ強度共に、[H₈F₄H₄]の方が[H₁₂F₄]より、[H₄F₄H₄F₄]の方が[H₈F₈]より、[H₄F₁₂]の方が[F₄H₄F₈]より高くなっていることがわかる。これは、最も大きな応力を受ける最外層に剛性の高い汎用性樹脂層を配した、もしくは、汎用性樹脂層の割合が大きいためであると考えられる。

4・1・2 非対称積層板の振動特性 振動試験から得られた1次曲げ固有振動数および対数減衰率をTable Vに示す。柔軟性樹脂の割合が同じタイプで比較した場合、1次曲げ固有振動数は、曲げ試験結果と同様、[H₈F₄H₄]の方が[H₁₂F₄]より、[H₄F₁₂]の方が[F₄H₄F₈]より高い値を示している。これは、最外層に剛性の高い汎用性樹脂層を配したことにより構造物全体の曲げ剛性が増加したためである。一方、対数減衰率は、[H₁₂F₄]の方が[H₈F₄H₄]より、[F₄H₄F₈]の方が[H₄F₁₂]より大きくなっている。これは、最も変形の大きくなる最外層に、高減衰な柔軟性樹脂を母材とした層を配したことに起因していると考えられる。[H₈F₈]と[H₄F₄H₄F₄]においては、1次曲げ固有振動数、対数減衰率共に差は見られなかった。

Fig. 5. Stacking sequences of antisymmetric matrix hybrid laminates.

Table IV. Bending modulus and strength of antisymmetric laminates.

Type	[H ₁₂ F ₄]	[H ₈ F ₄ H ₄]	[H ₈ F ₈]	[H ₄ F ₄ H ₄ F ₄]	[H ₄ F ₁₂]	[F ₄ H ₄ F ₈]
Bending modulus (GPa)	15.4	20.7	9.75	13.5	6.81	6.48
Bending strength (MPa)	391	461	288	390	160	143

Table V. 1st bending frequency and logarithmic decrement of antisymmetric laminates.

Type	[H ₁₂ F ₄]	[H ₈ F ₄ H ₄]	[H ₈ F ₈]	[H ₄ F ₄ H ₄ F ₄]	[H ₄ F ₁₂]	[F ₄ H ₄ F ₈]
1st bending frequency (Hz)	160.8	172.2	154.6	154.9	155.1	149.6
Logarithmic decrement	0.121	0.087	0.142	0.143	0.170	0.180

4・2 曲げ特性と減衰特性の関係

マトリックスハイブリッド積層板の積層順序が静的曲げ特性と減衰特性に及ぼす影響を議論するため、横軸に3点曲げ試験より得られた曲げ剛性、縦軸に振動試験から得られた減衰特性の指標となる対数減衰率をとったグラフをFig. 6に示す。図中の結果は、先の対称積層板および非対称積層板に加え、柔軟性樹脂比率を25%一定とし積層順序を変化させた積層板の曲げおよび振動試験結果も併せて示している。また、図中のa-iは、柔軟性樹脂比率25%の積層板、[H₆F₂]_s, [H₆F₂H₂F₂H₄], [H₆F₂H₄F₂H₂], [H₆F₂H₆F₂], [H₈F₄H₄], [H₈F₂H₂F₂H₂], [H₈F₂H₄F₂], [H₁₂F₄], [F₂H₆]_s, j-mは、柔軟性樹脂比率50%の積層板、[H₄H₄]_s, [F₄H₄]_s, [H₈F₈], [H₄F₄H₄F₄], nおよびoは、柔軟性樹脂比率75%の積層板、[H₄F₁₂], [F₄H₄F₈]をそれぞれ示している。Fig. 6によれば、柔軟性樹脂比率25%におけるi, g, hと、50%におけるk, m, lにおいて、同等の対数減衰率を有しつつ、曲げ剛性の増加が確認された。また、柔軟性樹脂比率25%のf, c, a, eを比較した場合、同等の曲げ剛性を有しつつ、対数減衰率のみ増加させ得ることが確認された。さらに、柔軟性樹脂比率25%のf, c, bにおいて、同一の樹脂比率

でありながら、曲げ剛性、対数減衰率共に増加し得ることが確認できた。通常、均質材において曲げ剛性と対数減衰率は負の相関を有していることが多いが、本研究で提案したマトリックスハイブリッド積層板では、相反するといえる2つの特性のうち1つを維持したまま他方を変化させ得るような設計が可能である。

先と同様に、横軸に曲げ強度、縦軸に対数減衰率をとったグラフをFig. 7に示す。Fig. 7によれば、柔軟性樹脂比率25%のgをhと、50%のm, kをlと比較した場合、同等の対数減衰率を有しつつ、曲げ強度が増加する。また、柔軟性樹脂比率25%のd, f, cをeと比較した場合、曲げ強度だけでなく、対数減衰率も増加する。さらに、柔軟性樹脂比率25%のb, cを全て汎用性樹脂である△と比較した場合、柔軟性樹脂層を挿入することによって、対数減衰率だけでなく曲げ強度も増加することが確認された。以上の結果から、同じ柔軟性樹脂比率の積層板において、柔軟性樹脂層の位置を変化させることにより、様々な曲げ強度、対数減衰率の設計が可能であり、さらに、柔軟性樹脂層を挿入することにより、対数減衰率だけでなく、曲げ強度も向上させることが可能であることが確認できた。

Fig. 6. Logarithmic decrement plotted against bending stiffness for matrix hybrid laminates.

Fig. 7. Logarithmic decrement plotted against bending strength for matrix hybrid laminates.

5 結 言

本研究では、高剛性、高強度を有する汎用性樹脂と高減衰を有する柔軟性樹脂を母材としたマトリックスハイブリッド積層板を作製し、曲げ試験および振動試験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 柔軟性樹脂比率、積層順序を変化させることにより、幅広い静的曲げ特性と減衰特性の設計が可能である。
- (2) マトリックスハイブリッド積層板の樹脂比率、積層順序を変化させることによって、様々な静的曲げ特性および減衰特性を併せ持ち、実構造物に要求される特性に応じた材料の設計が可能であることが示された。

参 考 文 献

- 1) 片岡明雄, 小野晃明, 木材学会誌, **22**, 436 (1976).
- 2) 植村益次, 福田 博, “ハイブリッド繊維強化複合材料”, p.1 (1986) シーエムシー.
- 3) 宮入裕夫, 永井正洋, 村松篤良, 日本複合材料学会誌, **2**, 88 (1976).
- 4) 永井正洋, 宮入裕夫, 村松篤良, 日本複合材料学会誌, **3**, 104 (1977).
- 5) 天城滋夫, 宮野 靖, 日本複合材料学会誌, **11**, 62 (1985).

- 6) 天城滋夫, 和嶋元世, 宮野 靖, 日本複合材料学会誌, **12**, 171 (1986).
- 7) G. Kretsis, Composites, **18**, 13 (1987).
- 8) T. A. Collings, Composites, **22**, 369 (1991).
- 9) C. J. Wang, B. Z. Jang, J. Panus and B. T. Valaire, Journal of Reinforced Plastics and Composites, **10**, 356 (1991).
- 10) R. M. Jones, “Mechanics of Composite Materials”, p.147, (1975) Hemisphere Publishing Corporation.
- 11) R. Chandra, S. P. Singh and K. Gupta, Composite Structures, **46**, 41 (1999).
- 12) M. Coni, B. Benckechu and R. G. White, Composite Structures, **35**, 207 (1996).
- 13) 岩壺卓三, 日本機械学会論文集, C-59, 2921 (1993).
- 14) R. M. Crane and J. W. Gillespie, Jr, Composite Science and Technology, **40**, 355 (1991).
- 15) A. A. El-hamid Hamada, Composite Structures, **32**, 33 (1995).
- 16) R. Rikards, Composite Structures, **24**, 193 (1993).
- 17) S. Timoshenko, “新版工業振動学”, p.56 (1977) コロナ出版.
- 18) 宮入裕夫, 村松篤良, 永井正洋, 材料, **24**, 144 (1975).
- 19) 宮入裕夫, 永井正洋, 村松篤良, 材料, **28**, 1187 (1979).
- 20) 丸岡邦明, 工業材料, **42**, 10, 24 (1994).