研究ノート

表面近傍に CVD 繊維を配した Al 合金
複合材料の疲労特性

塩田 一路*, 渡辺 治**

(1985年3月2日受付)

Bending Fatigue Properties of Aluminum Base Composites with CVD-fibre
Embedded Near the Surfaces

I. SHIOTA* and O. WATANABE**

(Received March 2, 1985)

Aluminum base composites with CVD-fibre embedded near the surfaces were fabricated by flame fusion spraying and hot pressing. The composite with 0.163 V_f and 1 mm in thickness had the bending strength of more than 1.0 GPa. Cyclic bending stress was applied on the composite. The composite endured to 10^7 cycles, even though the applied stress was as high as 80% of its bending strength, and decreasing of the applied stress was hardly observed during the fatigue test.

1. はじめに

繊維強化型複合材料の特徴は、その弾性率、強度などが強化繊維とマトリックスのそれぞれの値から複合則によって予測しうる点にある。従来の FRM の研究においては、可能な限り複合則値に近い特性をもったものを製造することが主流であった。そして現在では FRM の成形技術の発達によってその可能性に見通しがつくようになり、最近では応用面に関心が高まりつつある。一方、実際に FRM を応用するには弾性率、強度などの値のみではなく、複合則で予測することの困難な疲労特性などについての資料が必要となることが多い。しかしこの面の研究はまだ十分には遂行されていない。

本研究では FRM 用の強化繊維のもつ高弾性率、高強度、低密度という特性を有効に利用するため、軽合金をマトリックスとした板材を作り、その疲労特性を中心に検討することを目的とした。

2. 実験方法

現在 FRM 用強化繊維として、CVD で作られる太径

のものには B 繊維、 B_4C または SiC を被覆した B 繊維、SiC 繊維などがある。本実験ではこれらのうち B_4C 被覆 B 繊維を用いた。FRM を作製するのに先立ち、繊維の力学的特性を測定した。その値を Table 1 に示す。

マトリックス金属としては、軽量 FRM を目的とすることから軽量構造材料として汎用される 6061 Al 合金を用いた。その力学的特性の値を同じく Table 1 に示す¹⁾。また同合金の化学組成を Table 2 に示す¹⁾。

FRM の作製方法は、まず直径 30cm のステンレス製円筒上に、上記繊維を 53 μm の間隔で巻く。それに不活性な Ar 雰囲気中で Al 合金を酸素-アセチレン炎と高圧 Ar によってガス溶射し、繊維含有率が約 0.5 のプレシートを作った。このプレシートおよび別に用意した 6061 Al 合金箔を Fig. 1 のような FRM となるように積層した。それを黒鉛ダイスに入れ、 2.3×10^{-3} Pa の真空中で 853K, 30 MPa, 900 sec で加圧成形した。得られた試料の寸法および繊維の方向は Fig. 1 (a) に示すとおりであり、また繊維含有率は同図(b)の場合 0.163, 同図(c)では 0.33 であった。

得られた試料を、その長手方向に幅 5mm および 10mm に切り出した。幅 5mm の試料はさらに長さ 55mm に半截し、それを一対として一方を曲げ破断試験に、他方を疲労試験に供した。それらの値はつねに一対として、曲げ破断応力に対する疲労試験時の応力の割合を求めた。曲げ試験は片持ちで行なった。この場合、次の疲労試験を 4mm の定振幅で行なうゆえ、4mm の撓

*,** 金属材料技術研究所 (153 東京都目黒区中目黒 2-3-12)

National Research Institute for Metals, 2-3-12, Naka-Meguro, Meguro-ku, Tokyo 153, Japan

* 主任研究官 Senior Researcher, ** 機能材料研究部第6室長 Head of 6th Lab., Spec. Funct. Mater. Div.

Table 1 Mechanical properties of B₄C coated B fibre and 6061 Al alloy.

Material	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Diameter (μm)	Yield point (MPa)	Fatigue strength (MPa)	Shear strength (MPa)
B ₄ C/B	2.27	3,280	370	142	—	—	—
6061*	2.70	315	70	—	280	100**	210

* Heat treatment : T 6

** Rotating bending fatigue strength at 5×10^8 cycles, 167 r.p.s.

Table 2 Chemical composition of 6061 Al alloy (%).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	B	Al
0.40~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.25	0.04~0.35	0.15	0.06	balance

Fig.1 Dimension of the composites and distribution modes of reinforcements.

みを与える応力を変える目的で試料の支持点から荷重点までの距離（スパン）を試料ごとに変えて曲げ試験を行なった。疲労試験は、曲げ試験に用いたものの対の試片に対し、曲げ試験と同じスパンで、4 mm の定振幅、片振りで行なった。また疲労試験の間に試料内部に欠陥が発生・拡大することによる応力低下を検出するため、疲労試験の途中および終了後の 10^3 , 10^5 , 10^7 回のときに疲労試験機より一時取り外し、曲げ試験により疲労試験と同じスパンで 4 mm の撓みを与えるのに必要な応力の測定を行なった。さらに疲労試験終了後の試片について曲げ破断試験を行ない、疲労試験開始前の曲げ破断応力と比較した。なお強化繊維を付与しない 6061 Al 合金のみの試料を複合材料と同工程で作製し、同様の曲げ破断試験および疲労試験を行なった。

幅 10 mm の複合材料試験片については、片持ちで振動を与えて共振周波数を求めた。そしてその共振周波数および試料形状、密度から曲げに対する弾性率を求めた。

Fig.2 Relationship between number of cycles and bending stress (composites and 6061 Al alloy).

3. 結果と考察

一方向に強化繊維を配した複合材料の繊維方向における弾性率は周知の複合則で与えられる。しかし本実験のように表面近傍にのみ繊維を分布させた複合材料では複合則による弾性率値を曲げに対して適用することはできない。すなわち曲げに対しては変形量の大きい表面部が最も大きな効果をもつゆえ、表面近傍のみに繊維が分布している複合材料では全体の体積に対する繊維含有率は意味をもたない。そこでここでは 110 mm × 10 mm × 1 mm の試片についてリード (reed) 法により振動させたときの共振周波数および試料寸法、密度から曲げに対する弾性率を求めた。その結果、Fig.1 (b) の試料では

180 GPa, (c) の試料では 200 GPa 程度の値が得られた。

この値を基礎として、つぎの曲げ試験のスパンと応力を決定した。曲げ破断強度は Fig.1 (b) の試料の場合約 1.0 GPa, (c) の試料では約 1.1 GPa であった。また破断強度の測定値のばらつきは (b) の試料より (c) の試料のほうが大きかった。つぎに試料 (b) と (c) では曲げに対する弾性率に大きな差がなかったことから、いずれの試料についても 4 mm の撓みを与えるのに必要な応力は、試料の支持点から荷重点までの距離 (スパン) を 28 mm から 45 mm まで変化させることにより曲げ破断応力の 20% から 100% まで変化させることができた。

以上の結果を用い、初期荷重を変えて疲労試験を行った。Fig.1 (b) の試料についての疲労試験結果を Fig. 2 に示す。また同図の最下段はマトリックスである 6061 Al 合金のみの場合を示す。同図中○印はそれぞれの繰返し数のときの 4 mm の撓みを与えるのに必要な応力の測定値であり、×印はそこで試料の破断が起こった繰返しの回数を示している。

この結果に見られるように、6061 Al 合金のみでは若干の塑性撓みを含めて 0.1 GPa を越える程度の小さな曲げ応力によってさえ 10^6 回の繰返しに至る以前に破断が起こった。これに対し本実験で作った FRM では、その曲げ破断応力 (1.0 GPa) の 80% にも至る大きな曲げ応力を与えた場合でも 10^7 回の繰返しに耐え、しかもその間の 4 mm の撓みを与える応力の低下も小さい。曲げ応力が 70% 以下の場合には、その応力の低下さえまったく認められなかった。また初期荷重が曲げ破断応力の 90% 以上の高応力の場合には、破断までの寿命に 4 桁程度のばらつきが見られ、ほとんどの試料は 10^7 回の疲労試験終了前に破断した。それらのうち比較的長寿命であったものについても、 10^3 回、 10^6 回と繰返し数が増加するのに伴い 4 mm の撓みを与えるのに必要な応力は逐次低下し、その低下は初期応力が 80% 以下の場合に比較して大きかった。また疲労試験によって破断した試料について破断部近傍を実体顕微鏡で観察したところ、いずれも繊維に直角な面で破断していた。

Fig.1 (c) の FRM についての試験結果はここでは示していないが、結果を要約すると次のようになる。この試料では繊維含有率が (b) の試料の 2 倍であるが、曲げ破断応力は約 1.1 GPa で (b) に対し 10% 程度しか向上していない。また疲労試験については Fig.2 の応力を 10% 大きくしただけで、繰返し回数と応力の関係はほぼ Fig.2 と同様の傾向が見られた。しかし曲げ破断応力に

対し約 80% の初期応力を与えた場合、(b) の試料では 10^7 回の繰返し後の 4 mm の撓みを与える応力は 6% 程度しか減少しないが、(c) の試料では 10% 程度減少した。90% 以上の初期応力を与えた場合の破断までの寿命は、(c) の試料では 6 桁程度のばらつきであり、(b) の場合よりも大きかった。破断した (c) の試料を実体顕微鏡観察したところ、(b) の場合と異なり繊維に直角の亀裂のみでなく、中立面に近いほうの繊維の界面に沿って試料の長手方向への剥離が認められた。また疲労試験で同じ程度の応力を与えた場合でも、長寿命であった試料に対し短寿命の試料では繊維の界面に沿っての剥離が長いという傾向が見られた。

以上の結果は次のように考えられる。曲げにおいては試料の表面に近いところほど引張りと圧縮が大きく働き、試料の厚さ方向中心すなわち曲げの中立面においては伸びまたは圧縮変形はない。また試料の厚さ方向における剪断応力の分布については、中立面において最大となり、上下の表面において 0 となる。以上のことと、(c) の試料の中立面に近い繊維の界面に沿っての剥離が見られたことから、この試料の破断には剪断応力が大きく寄与していると考えられる。またいずれの試料も同一条件で作製したにもかかわらず (c) の試料では同応力下における疲労試験後の界面剥離長さに差異が認められたことから、Fig.1 (a) の大きさの試料から切り出した試験片相互の間で比較してさえも繊維とマトリックスの界面の接合の程度に相対的な差異があり、それが原因で曲げ強度および疲労寿命のばらつきが大きくなったと考えられる。

一方、(b) の試料においても (c) の試料について述べたと同様の試験片相互の間の界面の接合の程度の差異が存在すると考えられる。しかしこの試料では、中立面から遠く、剪断応力の小さい表面近傍のみに繊維が配されているゆえ、曲げにおいてはその破断は主として繊維の引張り破断に起因する。複合材料のなかには多くの繊維が含まれ、それらが同時に変形を受けるゆえ繊維の力学的特性は平均化される。それゆえ曲げ試験においてもまた疲労試験においても (b) の試料は (c) の場合よりも測定値のばらつきが小さかったと考えられる。また (b) の試料の破断には剪断の寄与は小さいゆえ、疲労試験片の破断面に界面の剪断が認められなかった。

一般に疲労が大きな問題とされるパネ鋼などの場合、応力の低下に伴い寿命が長くなり、疲労限度は引張り強度の約 40% の曲げ応力であることが多い。しかし本実験の試料では、前述のように引張り強度は複合則で表わ

すことができるのに対し、曲げ強度は繊維の分布状態に依存するという特徴があるゆえ従来の疲労の考え方を単純に適用するのは困難である。それゆえここでは曲げ破断応力に対する疲労試験応力をとった。一般に均一物質では引張り破断応力よりも曲げ破断応力のほうが若干高いが、それを考慮に入れても本実験の複合材料の疲労限界が曲げ破断応力の 80% 程度であるのは十分高い値といえよう。

4. お わ り に

本実験の結果をまとめると、表層近傍にのみ繊維を配した複合材料では、曲げに対して鋼と同程度の弾性率が得られた。また同試料については疲労限界が曲げ破断強

度の 80% 程度であった。この値はバネ鋼の疲労限界よりもかなり高いといえる。繊維を表層近傍のみでなく、さらに内側に配した試料では、内側の繊維の界面における剪断の寄与が大きく、試料相互間の相対的な界面接合の程度の差異が疲労寿命に大きな影響を与えた。本実験のような複合材料は、従来の鋼製のバネ材料と同程度の曲げ特性をもつにもかかわらず、見掛け密度が 1/3 程度しかないことから、バネの自重が問題となるような高速で駆動する部品への応用が期待される。

参 考 文 献

- 1) 軽金属協会編：アルミニウムハンドブック(1981)。