炭素繊維強化プラスチックの機械的性質について*

網 島 貞 男** 谷 本 敏 夫**

Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastics

by

Sadao AMIJIMA and Toshio TANIMOTO

(Faculty of Engineering, Doshisha University, Kyoto)

An investigation was conducted on the static and fatigue properties of carbon fiber reinforced plastics, especially on the effects of environmental test temperature and the volume content of carbon fiber in the specimen.

The material used for preparation of the unidirectional laminates was P301 prepreg sheet supplied by Toray Industries Inc.. This is a high strength prepreg tape made with epoxy resin and carbon fibers.

The tension test, bending test and interlaminar-shear test by short-beam method were conducted as the static tests, while the repeated bending test and rotating bending test were carried out as the fatigue tests.

(Received June 11, 1973)

1 緒 論

最近、工業材料として脚光をあびてきた炭素繊維強化プラスチック (C.F.R.P.) は、比弾性率、比強度が高く、さらには耐薬品性、耐疲労性、耐摩耗性、耐熱性が良い等、すぐれた多くの性質を示し、宇宙開発、航空機部品、スポーツ用品、輸送機器関係等の分野で実用され始めている。しかしながら、いまだこの複合材料の機械的性質についての実験的データ、特に温度、炭素繊維含有率による影響、および疲労特性に関する研究成果は数少ない。

本研究は、一方向強化 C.F.R.P. について静的引き張り、曲げ、層間せん断試験、および繰返し曲げ、回転曲げ疲労試験を行ない、試験温度および炭素繊維含有率が、強度特性に及ぼす影響について調べたものである。

2 試験片および試験方法

2・1 供試材料

本研究では、東レ株式会社の一方向プリプレグシート P 301 を用いた。このプリプレグシートの素材を Table I に示す。

2・2 試験片

試験片は、2・1 に述べた供試材料からなる積層板

Table I. Composition of the specimen.

Matrix	Epoxy resin (EPIKOTE 828)
Reinforcement	TORAY carbon fiber (T 300)
Catalyst	BF ₃ MEA

Fig. 1. Schematic view to show the procedure to make laminated composites test specimen from prepreg sheets.

Table II. Cure conditions for each specimens.

Test conditions		Pre-heat		Press-cure		After-cure	
Static	Tension	min. 130°C, 3		min. 170°C, 60		min. 200°C, 60	
	Bending	130	3	170	60	200	60
	Interlaminar-shear	130	3	170	60	200	60
		130	3	170	60	200	60
Fatigue	Repeated bending	130	3	170	60	200	60
		130	3	170	60	None	
	Rotating bending	130	5	170	60	200	60

* 原稿受理 昭和49年6月11日

** 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川

(a) Static tension test specimen.
 (b) Static bending test specimen.
 (c) Interlaminar-shear test specimen.
 (d) Repeated bending fatigue test specimen.
 (e) Rotating bending fatigue test specimen.

Fig. 2. Sketch of specimens.

より採取するため、まず積層板を成形した。積層板の成形にはFig. 1に示すごとくプリプレグを必要形状に切断し、必要枚数積層したものをシリコン処理されたペーパーで包み、繊維および樹脂が横方向に流れないように注意しながら、ホットプレスにより加圧、加熱硬化させることにより製作した。なお成形条件は試験片の形状により種々変化した。各試験片に対する成形条件をTable IIに示す。炭素繊維含有率は、同一厚さの試料中に積層するプリプレグシートの枚数を変えることにより変化した。できあがった積層板からFig. 2に示すような試験片形状に加工した。

2・3 炭素繊維含有率の測定

炭素繊維重量含有率の測定法には、硫酸分解法¹⁾、燃焼法²⁾、真空（不活性ガス）中加熱法³⁾などがあるが、本試験では、植村が推奨するガスバーナによる焼却法を用いた。これは試料片をニクロム線で結び、ブンゼンバーナの還元炎の少し上部で空気に触れて酸化することのないようにして樹脂分を燃焼させ、焼却前後の重量差より炭素繊維含有率を求める方法である。重量含有率 W_f 、体積含有率 V_f の換算式を下に示す。

$$V_f = \frac{r_m W_f}{r_f - (r_f - r_m) W_f} \quad (1)$$

ここで、本実験で使用了炭素繊維およびエポキシ樹

脂の比重は、 $r_f = 1.73 \pm 0.03$ および $r_m = 1.19$ である。

2・4 試験方法

試験片は、温度 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $65 \pm 5\%$ の恒温恒湿槽内に48時間以上保持した後、取り出して実験に使用した。使用試験機は、静的試験に島津オートグラフIS-2000型（最大容量 $2t$ ）、繰返し曲げ疲労試験に島津万能疲れ試験機UF-20型（最大容量 20 kg ）、回転曲げ疲労試験には小野式回転曲げ疲労試験機（最大曲げモーメント $1.5\text{ kg}\cdot\text{m}$ ）をそれぞれ用いた。

静的、動的各曲げ試験は、4点曲げ方式を用いた。

3 実験結果および考察

3・1 静的試験結果

McDanel, Weeton⁵⁾ らや Kelly-Tyson⁶⁾ の W-Cu 複合材のモデルによれば長繊維（フィラメント）を用いた場合、引張強度（ σ_c ）と繊維体積含有率（ V_f ）との間に次のような複合則が成り立つことが確かめられ、一般に広く用いられている。

$$\sigma_c = \sigma_{ft} V_f + \sigma_m^* (1 - V_f) \quad (2)$$

ここで σ_{ft} ：繊維の引張強度

σ_m^* ：繊維破断ひずみに対するマトリックスの応力

上記のことより、繊維体積含有率 V_f を増加させ繊維引張強度 σ_{ft} の大きい繊維を用いることにより、複合材の強度 σ_c は増大する。しかしながら C.F.R.P. の場合、 σ_{ft} は確かに大きい、マトリックスが樹脂であるため環境温度依存性が大きいことが予想され、したがって引張強度 σ_c と炭素繊維含有率 V_f の関係をみる場合、その環境温度について充分考慮する必要がある。

静的引張試験の結果をFig. 3に示す。C.F.R.P. の引張強度に及ぼす炭素繊維体積含有率の影響を室温、 50°C 、 100°C について調べたものである。室温および 50°C では炭素繊維含有率 V_f の増加とともに引張強度は直線的に大きくなる。しかも試験温度が高くなるとその傾きが小さくなり、試験温度が 100°C では V_f の増加とともに強度は低下の傾向にある。また、低含有率のものほど温度による影響は小さく複合則に近い値が得られ、高含有率になるにつれ温度による影響が顕著になる。つまり、室温から 100°C になると引張強度は $V_f = 58.5\%$ で約16%、 $V_f = 70.2\%$ で約26%の低下がみられる。図中、破線は室温における複合則による計算値であるが、実験値と計算値との差は V_f が大きいほど大きい。たとえば、 $V_f = 58.8\%$ の時、計算値に対して約9%、 $V_f = 70.2\%$ の時は約21%の低下がみられる。この理論値と実験値は、 $V_f = 55\%$ 付近で一致しそうな傾向にある。使用したプリプレグの含有率が約55%であることから、この V_f 付近が最も強化

Fig. 3. Static tensile strength of unidirectional CFRP versus volume content of carbon fiber. Hence, calculated value is obtained from law of mixture.

Fig. 4. Static flexural strength of unidirectional CFRP versus volume content of carbon fiber.

効率がよいといえる。

Fig. 4に曲げ強度と炭素繊維含有率の関係を示す。この場合も引張試験でみられた結果と同様の傾向を示し、室温、50℃では V_f の増加とともに直線的に強度も大きくなり、100℃では逆に V_f の増加とともに低下する。試験温度が80℃では、 V_f に関係なくほぼ一定値を示す。

以上の引張り、曲げ両試験の結果より、C.F.R.P.の強度は繊維強度 σ_{ft} 、繊維含有率 V_f の他に層間の接着力にも大きく支配され、その影響は高温、高含有率になるに従って大きくなることが予想される。そこでC.F.R.P.の層間せん断強度の V_f 依存性を、室温、50℃、100℃について調べたのが、Fig. 5である。層間せん断試験は、ショート・ビーム法を用い、

Fig. 5. Interlaminar-shear stress of unidirectional CFRP versus volume content of carbon fiber.

span/depth $L/d=6$ にとっている。図より明らかごとく層間せん断強度も前述の引張り、曲げ強度と同様の傾向を示した。このことは、C.F.R.P.の強度は、高温、高含有率になるほど層間接着力が低下することを示唆しており、引張り、曲げ両試験でみられた傾向は、ある程度理解できる。

Fig. 6は、C.F.R.P.の比強度（引張強度／比重）を他の材料と比較したものである。重さを考慮に入れた強度を考えると、その優秀性はさらに顕著になり、C.F.R.P.がいかに軽量でかつ高強度を有するかがよくわかる。

Fig. 6. Comparison of specific tensile strength of CFRP materials to other materials at room temperature.

3・2 疲労試験結果

繰返し曲げ疲労試験結果をFig. 7に示す。平均応力はゼロ（両振り繰返し）で V_f は40.7%、56.1%および64%の3種類の試料を用いた。繰返し曲げ疲労強度は、 $V_f=56.1\%$ の試料が最も高く、つぎに40.7%そして64%が一番低くなった。図中 $V_f=60\%$ の試料については200℃、60分のアフタキュアを施してお

Fig. 7. S-N curves of repeated bending fatigue test for CFRP. Test conditions: $V_f=40.7, 56.1, 60.0, 64.0\%$. $t=\text{room}, 50^\circ\text{C}$

ず、ほぼ同含有率のアフタキュアを施した $V_f=64\%$ の試料と比較して、アフタキュアの影響が顕著に現われており、 10^7 回での疲労強度(いわゆる疲労限度)はアフタキュアをした $V_f=64\%$ の 36 kg/mm^2 に対して、キュアをしていない $V_f=60\%$ では 23 kg/mm^2 であり、その差はきわめて大きい。いずれにせよ炭素繊維強化プラスチックの両振り疲労強度は、ガラス繊維系 F.R.P. のそれがせいぜい 10 kg/mm^2 位であることからみると非常にすぐれた疲労強度特性をもっているといえよう。また疲労強度の温度依存性について検討すると、前述の静的試験(引張り、曲げ、層間せん断)では試験温度が 50°C になると、かなりの強度低下がみられたが、繰返し曲げ疲労試験の場合、試験温度 50°C では温度の影響が認められず、室温における試験結果と同一曲線上にのっている。

試験片の破断面を観察した結果、低含有率の C.F.R.P. の繰返し曲げ破壊は引張りまたは圧縮によるものであり (Fig.11-(3))、一方、高含有率では繊維間が引き裂かれるような破断形状 (Brush-Like Shape) を示し (Fig.11-(1))、試験片の破断は、まず層間にはく離から始まり、全体破断が起こっていることが観察される。

Fig. 8 に $V_f=62.2\%$ の C.F.R.P. についての回転曲げ疲労試験結果を示す。比較のため $V_f=64\%$ の

Fig. 8. S-N curves of rotating and repeated bending fatigue tests for CFRP. Test conditions: $V_f=62.2, 64.0\%$, $t=\text{room}, 50, 100^\circ\text{C}$.

試料の繰返し曲げ疲労試験結果を破線で示す。炭素繊維含有率 V_f は、ほぼ同程度のものを用いているが、回転曲げ疲労強度は繰返し曲げ強度よりもはるかに高い値を示した。試験温度が室温から 50°C , 100°C に上昇すると、回転曲げ疲労強度は低下する。

つぎに $V_f=56.0\%$ および 52.4% についての結果を Fig. 9, 10 に示す。それぞれの含有率についても回転曲げ疲労強度は、繰返し曲げ強度に比べてかなりの高い値を示した。

破断面の観察によると、回転曲げ試験においては、ほとんどが中央で分離破断しており (Fig. 12)、これ

Fig. 9. S-N curves of rotating and repeated bending fatigue tests for CFRP. Test conditions: $V_f=56.0, 56.1\%$, $t=\text{room}, 50, 100^\circ\text{C}$.

Fig. 10. S-N curves of rotating and repeated bending fatigue tests for CFRP. Test conditions: $V_f=52.4, 56.1\%$, $t=\text{room}, 50, 100^\circ\text{C}$.

は引張りあるいは圧縮による破断である。一方、繰返し曲げ試験については、先に述べたごとく、破断面の形状は、(1)層間にはく離による (Fig.11-(1))、(2)層間にはく離+引張りによる (Fig. 11-(2))、(3)引張りによる (Fig.11-(3)) の3種類に分類される。低含有率の C.F.R.P. は(3)の引張りによる破断である。したがって、Fig. 13 が示すように低含有率の試料については回転曲げ、繰返し曲げ両疲労強度は、ほぼ等しい値を示した。一方、高含有率の場合、破断はほとんどが(1)あるは(2)によるものである。したがって Fig. 13 において高含有率になると回転曲げ疲労強度は、繰返し曲げ疲労強度に比べてかなり高い値を示すことは理解できる。このように繰返し曲げ疲労試験においては、試料の破壊に対し層間にはく離の作用が少なからず寄与しているものと考えられ、したがって回転曲げ疲労強度より小

Fig. 11. Repeated bending fatigue test specimens after failure.

さい値を示したものと推論される。

Owen は, C.F.R.P. に対して疲労試験を行ない, 静的強度の70%以下の応力では疲労による破壊がみられないと報告しているが, 著者らの行った回転曲げ疲労試験における疲労限度応力は, Fig. 13 よりわかるように静的強度の約50%であり, Owen の結果よりは幾分低い, 一般金属材料やガラス繊維強化プラスチックに比べ非常にすぐれた耐疲労性を有している。

著者らは, ガラス繊維強化プラスチックについて引張圧縮疲労試験を行ない, 疲労強度に及ぼす試験温度およびガラス含有率の影響について報告した。それによると疲労強度と温度は直接関係にあり, 次のように表わした。

Fig. 12. Rotating bending fatigue test specimens after failure.

Fig. 13. Comparison of fatigue limit of rotating bending with that of repeated bending and static flexural strength for CFRP.

$$\sigma_w = k_1 - k_2 \cdot t \quad (3)$$

ただし k_1, k_2 ; 定数

t ; 温度

σ_w ; 疲労強度

また, k_1 の値のガラス含有率の影響については

$$k_1 = k_3 V_f + k_4 \quad (4)$$

ただし, k_3, k_4 ; 定数

V_f ; ガラス体積含有率

(3)(4)より

$$\sigma_w = k_3 V_f - k_2 t + k_4 \quad (5)$$

朱子織ガラス布強化 F.R.P. に対して $k_3=0.01$, $k_3=6.38$, $k_4=3.54$ であった。

(5)式は、F.R.P. の疲労強度はガラス含有率が高いほど大きい値を示し、温度上昇につれ直線的に低下することを示している。

Fig. 14 は、 $V_f=62.2\%$ の C.F.R.P. について回転曲げ疲労強度に及ぼす試験温度の影響を調べたものである。C.F.R.P. の場合も σ_w と t とは直線関係にある。

Fig. 14. The effects of test temperature on the stress amplitude of CFRP for various cycles. ($V_f=62.2\%$)

Table III. The values of constants in eq. (3) at various glass contents.

V_f	k_1	k_2
50	65.61	0.19
55	75.89	0.19
60	86.18	0.19
65	96.46	0.19
70	106.75	0.19

また、各含有率の試料についてそれらの関係を調べ、(3)式における定数 k_1 および k_2 の値を Table III に示す。ここで k_1 の値は $t=0^\circ\text{C}$ の時の σ_w の値を意味する。さらに(5)式における定数 k_2 , k_3 および k_4 の値は、最小二乗法によりそれぞれ 0.19, 2.06 および -37.22 となった。これを朱子織ガラス布強化 F.R.P. の値と比較すると、 k_2 は大きく、 k_3 は小さい。つま

り、強化材の含有率上昇に対する疲労強度の上昇割合は若干小さく、また温度上昇による強度低下率は大きいことを示しており、静的試験結果にみられた傾向が反映されている。

4 結 言

(1) 静的試験の結果より、引張り、曲げ両強度はきわめて高い値を示した。しかしながら高温、高含有率になると層間接着力が低下することが明らかになった。したがって設計にあたっては、これらの傾向を充分考慮すべきだと思われる。

(2) 疲労試験の結果、炭素繊維強化プラスチックは非常に高い疲労強度を示した。また回転曲げ疲労試験により、疲労強度と炭素繊維含有率および試験温度の関係が実験式に表われ、これは C.F.R.P. の疲労強度を知る上の目安になると思う。

最後に、本研究を実施するにあたり多大のご援助を賜った、松永記念科学振興財団、ならびに資料をご提供いただきました東レ(株)に対し、紙上で感謝申し上げます。

(昭和49年3月27日 第3回FRPシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- Haynes, W.M., and T.L. Tolbert, JCM., 3, No. 10, 709 (1969).
- 動力炉, 核燃料開発事業団, 遠心分離機回転胴用炭素繊維強化複合材料特性の標準試験法, 5 (1972).
- 松井醇一, 西岡 建, 第15回材料研究連合講演会, 9 (1971).
- 植村益次, 阿部慎蔵, 日科技連第15回複合材料シンポジウム.
- McDanel, D.L., R. W. Jech, and J. W. Weeton, Metal Progress, 78, 118 (1960).
- Kelly, A., and W. R. Tyson, High Strength Materials 2nd International Materials Conference, 578 (1965).
- Owen, M. J., et al., 25th Annual Technical Conference SPI, February (1970).
- Amijima, S., and T. Tanimoto, 29th Annual Technical Conference SPI, February (1974).