C/A ハイブリッド一方向 FRP 積層板の疲労挙動の 時間および温度依存性†

中 田 政 之* 宮 野 靖**
鈴 木 恵** 服 部 陽 一***

Time and Temperature Dependences of Fatigue Behavior of C/A Hybrid Unidirectional FRP Laminates

by

Masayuki NAKADA*, Yasushi MIYANO**, Megumu SUZUKI**
and Yoichi HATTORI***

To investigate the time and temperature dependences of the fatigue behavior of carbon/aramid hybrid unidirectional FRP laminates (C/A hybrid FRP) in which CFRP layer was sandwiched between two AFRP layers, three point bending fatigue tests for CFRP, AFRP and C/A hybrid FRP were conducted at several levels of temperature and frequency. The flexural fatigue strengths of CFRP, AFRP and C/A hybrid FRP depended on temperature and frequency, and the reciprocity law between time and temperature held for these strengths. The flexural fatigue fracture of C/A hybrid FRP was classified into two modes by temperature, frequency and number of cycles to failure N_f . One is triggered by the tensile fracture of AFRP layer in the range of low temperature, high frequency and low N_f , where the fatigue strength changes scarcely with temperature, frequency and N_f . The other is triggered by the compressive fracture of CFRP layer in the range of high temperature, low frequency and high N_f , where the fatigue strength decreases remarkably with temperature, frequency and N_f .

Key words : Fiber reinforced plastics, Hybrid, Laminates, Fatigue, Time-temperature dependent properties

1 緒 言

異なる特徴を持つ2種類以上の強化繊維を用いたハイブリッドFRPは、個々の繊維単独のFRPでは得られないハイブリッド効果を期待することができ、さらには要求特性を満足させることのできる繊維の組み合わせの設計が可能となることから、ハイブリッド効果の機構の解明が急がれている。

FRPのマトリックスである樹脂の機械的性質は時間や温度により著しく変化し、いわゆる粘弾性挙動を示すことから、FRPの機械的性質も時間や温度により変化することが予測される。^{1)~4)}

著者らは、すでにカーボン/アラミドハイブリッド一方向FRP積層板(以下、C/AハイブリッドFRPと略称する)について、広い温度およびひずみ速度範囲で静的曲げ挙動をとらえ、温度やひずみ速度の領域により破壊機構が明確に異なり、またこの領域により曲げ強度もそれぞれ特徴的な温度およびひずみ速度依

存性を示すことを見い出している。⁷⁾

本報はC/AハイブリッドFRPおよびCFRP、AFRPの3種類の一方向強化積層板を取り上げ、種々の一定温度および繰返し負荷速度の下で曲げ疲労試験を行ない、C/AハイブリッドFRPの疲労破壊挙動の時間および温度依存性を破壊機構の関連において検討するものである。

2 実 験

2・1 供試材料

用いた強化繊維はカーボン繊維(東邦レーヨン社製ベスファイト6000)とアラミド繊維(デュポン社製ケブラー49)である。その仕様および機械的性質をTable Iに示す。FRP積層板は、これらの繊維を一方向に引きそろえたプリプレグシート(マトリックス:エポキシ樹脂、厚さ0.2mm)の繊維方向をそろえて積み重ね、圧縮成形機を用いて130°Cの下で1.7MPaの圧力を30min加え、その後130°Cで120min

† 原稿受理 平成2年3月27日 Received Mar. 27, 1990

* 金沢工業大学大学院 金沢南局区内野々市町, Graduate Student, Kanazawa Institute of Technology, Nonoichi, Kanazawa

** 正 会 員 金沢工業大学材料システム研究所 金沢南局区内野々市町, Materials System Research Laboratory, Kanazawa Institute of Technology, Nonoichi, Kanazawa

*** 金沢工業大学材料システム研究所 金沢南局区内野々市町, Materials System Research Laboratory, Kanazawa Institute of Technology, Nonoichi, Kanazawa

Table I. Formations and properties of fibers.

	Carbon	Aramid
Diameter of mono filament (μm)	7	13
Filament number in 1 yarn	6000	1520
Elastic modulus (GPa)	235	127
Tensile strength (GPa)	3.04	2.94
Ultimate strain (%)	1.3	2.3
Specific gravity	1.77	1.45

Type	C	A	A-C-A
Illustration of lamination
Number of layers CFRP/AFRP	15/0	0/15	7/8

CFRP layer AFRP layer

Fig. 1. Laminate constitutions of FRP.

の後硬化を行なったものである。積層板の仕上り寸法は $250 \times 225 \times 3.0 \text{ mm}$ である。

積層板の積層構成は Fig. 1 に示す 3 種類である。C 材, A 材はそれぞれ CFRP, AFRP 単独の積層板であり, A-C-A 材は CFRP 層と AFRP 層の体積比をほぼ 1:1 とし, CFRP 層を AFRP 層でサンドイッチしたハイブリッド積層板である。これらの積層板の繊維の体積含有率はすべて 52~55% であった。

2.2 実験方法

試験片の形状および寸法は Fig. 2 に示す曲げ試験片とした。疲労試験には恒温槽付電気油圧サーボ式材料試験機を用い, 試験片に荷重振幅一定の正弦波形の片振り 3 点曲げ負荷を加えた。応力比 (= 最小荷重/最大荷重) は 0.05 とし, 繰返し荷重速度 $f=2 \text{ Hz}$ では室温 (R. T.), $60, 80^\circ\text{C}$, $f=0.02 \text{ Hz}$ では $40, 60^\circ\text{C}$ の各一定温度の下で試験を行なった。そして, 試験片が最大荷重を保持できなくなり破壊する繰返し数を破断繰返し数 N_f とし, これまでの荷重-たわみ曲線を求めると同時に試験中の試験片の破損状況を詳細に観察した。

3 結果および考察

3.1 荷重-たわみ曲線

CFRP, AFRP それぞれ単独の積層板である C 材, A 材の各温度下での静的試験および繰返し負

Fig. 2. Dimension and geometry of specimens.

荷速度 $f=2 \text{ Hz}$ の疲労試験の繰返し数 N における荷重-たわみ曲線を Fig. 3, Fig. 4 にそれぞれ示す。また C 材, A 材の疲労破壊直前の繰返し数 N での破損状況を Fig. 5 に示す。C 材の静的負荷における荷重-たわみ曲線は Fig. 3 の破線で示すようにいずれの温度条件においても最大荷重に達するまではほぼ直線であり, この最大荷重は温度の上昇とともに低下する。また, C 材の繰返し負荷における荷重-たわみ曲線は図中の実線で示すようにいずれの温度条件においても破壊直前の繰返し数まで静的負荷時の荷重-たわみ曲線上をたどり, 試験片には外観上の破損は何ら観察されない。破壊は, Fig. 5 に示すように繰返し数 N において荷重点圧縮側表面から試験片の厚さ方向にき裂が突然に発生し, その後わずかな繰返し数を経て最大荷重を保持できなくなることによって生ずる。

一方, A 材の静的負荷における荷重-たわみ曲線は Fig. 4 の破線のようにいずれの温度においてもたわみ量が約 1 mm を越えると線形領域をはずれる。この A 材の $f=2 \text{ Hz}$ の繰返し負荷における荷重-たわみ曲線は図中の実線のように各サイクルでヒステリシスを描き, 最大荷重の 5% である最小荷重にもどしてもたわみは元にもどらず残存たわみが生じ, 繰返し数の増加とともにたわみは増大する。上述の荷重-たわみ曲線上的非線形挙動は, 負荷中に試験片の荷重点圧縮側に白化現象が観察されることから, この領域における塑性変形によるものである。この塑性変形は負荷繰返

Fig. 3. Load-deflection diagrams of CFRP laminates on static and cyclic loads.

Fig. 4. Load-deflection diagrams of AFRP laminates on static and cyclic loads.

Fig. 5. Fracture appearances of CFRP and AFRP laminates.

し数の初期から試験片の圧縮側で生ずるが、破壊は Fig. 5 に示すように繰返し数 N において荷重点の引張り側表面の引張り破壊が生じると同時に最大荷重を保持できなくなることによって生ずる。

ハイブリッド FRP である A-C-A 材の静的曲げ試験における荷重-たわみ曲線は Fig. 6 に示すように A

材と同様にたわみ量が約 1 mm を越えると線形領域はずれるが、たわみの増加に対して荷重は増大し続ける。この A-C-A 材の $f=2 \text{ Hz}$ の繰返し負荷における荷重-たわみ曲線は A 材と同様に各サイクルでヒステリシスを描き、また残存たわみも生じる。そして、この非線形挙動は A 材と同様に荷重点の圧縮側 AFRP 層の塑性変形によるものである。Fig. 7 に破壊直前の繰返し数 N における試験片の破損状況を示す。A-C-A 材の破壊様式は破断繰返し数 N_f と温度により二つに大別される。一つはこの図の上段に示すように A 材と同様引張り側 AFRP 層の引張り破壊が起点となる破壊であり、もう一つはこの図の中、下段に示すように C 材と同様内層 CFRP 層の圧縮側の圧縮破壊が起点となる破壊である。

3・2 曲げ疲労強度の温度依存性

CFRP, AFRP それぞれ単独の積層板である C 材, A 材の繰返し負荷速度 $f=2 \text{ Hz}$ における各温度での S-N 曲線を Fig. 8 に示す。C 材の疲労強度は破断繰返し数 N_f の増加に伴いかなり大きな低下を示し、 $N_f=10^5$ での疲労強度は静的強度の約 70% に低下する。また、温度の上昇によっても疲労強度は大きく低下し、 80°C での S-N 曲線は室温のそれの約 80% に低下する。一方、A 材は C 材に比べて静的および疲労強度ともかなり低い、室温において N_f の増加に伴う疲労強度の低下は少なく、 $N_f=10^5$ でも静的強度の 90% 以上を保持している。ところが、温度が上昇すると

Fig. 6. Load-deflection diagrams of C/A hybrid FRP laminates on static and cyclic loads.

Fig. 7. Fracture appearances of C/A hybrid FRP laminates.

N_f の増加に伴う疲労強度の低下が生じ, 80°CのS-N曲線において $N_f=10^5$ における疲労強度は静的強度の約65%に低下する. この温度の上昇によるS-N曲線の低下は, Fig. 4の荷重-たわみ曲線と試験片の白化現象から推して, 圧縮側の塑性変形が温度の上昇によって顕著となり, 中立軸が引張側に大きく移動する

Fig. 8. Flexural fatigue stress of CFRP and AFRP laminates versus number of cycles to failure.

Fig. 9. Flexural fatigue stress of C/A hybrid FRP laminates versus number of cycles to failure.

がゆえに疲労破壊の起点である引張側により大きな負荷が加わるためと推測される.

ハイブリッドFRPであるA-C-A材の $f=2$ Hzにおける各温度でのS-N曲線をFig. 9に示す. 図中の白抜きの印はAFRP層の引張破壊を, 黒塗りの印はCFRP層の圧縮破壊をそれぞれ示す. この図より, まず室温および60°Cの温度条件ではそれぞれ $N_f=10^4$ および 10^3 近傍を境として N_f の領域により破壊の様相が明確に異なる. また, 破壊様式がAFRP層の引張破壊となる領域においては疲労強度は N_f の増加に対してさほど低下しないが, CFRP層の圧縮破壊となる領域においては疲労強度は急激に低下し, A-C-A材のS-N曲線は大きく屈曲するという特徴的なものとなる. 一方, 80°CにおけるA-C-A材の破壊は N_f の全領域でCFRP層の圧縮破壊であり, S-N曲線も単調に低下するものとなる.

C材, A材およびA-C-A材の $f=0.02$ HzにおけるS-N曲線をFig. 13, Fig. 14に示すが, 上述の $f=2$ Hzでのそれらと同じような温度依存性を示す.

3.3 曲げ疲労強度における時間-温度換算則の成立

C材, A材およびA-C-A材の繰返し負荷速度 $f=2$ Hzにおける各温度でのS-N曲線より, 時間-温度換算則を用いて $f=0.02$ HzでのS-N曲線を予測し, 実験結果と比較する.

時間-温度換算則とは, 高温・短時間で観察されるものと同じ現象が低温・長時間で観察されることを言い, 温度の上昇, 降下は時間スケールの縮小, 拡大と対応するいわゆる熱レオロジー的に単純な性質を言う. この法則によれば, 温度 T において物理時間 t で観察された現象は基準温度 T_0 においては換算時間 t' において観察される. これらの間には次式の関係がある.

$$\frac{t}{t'} = a_{T_0}(T) \quad (1)$$

ここで, $a_{T_0}(T)$ は時間-温度移動因子であり, 温度の

Fig. 10. Time-temperature shift factor for relaxation modulus of matrix resin.

みの関数となる。

熱硬化性樹脂の力学挙動には時間-温度換算則が成立し、これが次式に示すアレニウス式で表現されることがすでに見出されている⁵⁾。

$$\log a_{T_0}(T) = \frac{\Delta H}{2.303G} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (2)$$

ここで、 ΔH は活性化エネルギー (kJ/mol)、 G は一般ガス定数 ($=8.31 \times 10^{-3}$ kJ/(mol·K)) である。

本報で用いた FRP のマトリックス樹脂であるエポキシ樹脂の緩和弾性係数 $E_r(t, T)$ にも時間-温度換算則が成立し、 $a_{T_0}(T)$ は Fig. 10 に示すように異なる活性化エネルギー ΔH_1 , ΔH_2 を持つ二つのアレニウス式で表現される。

熱硬化性樹脂の力学的挙動に認められる時間および温度依存性は、それをマトリックスとする FRP の力

Fig. 11. Temperature dependences of flexural fatigue strengths of CFRP and AFRP laminates.

Fig. 12. Temperature dependence of flexural fatigue strength of C/A hybrid FRP laminates.

学挙動のみならず破壊の時間および温度依存性をも支配していると考えられる。ここで取り上げたエポキシ樹脂をマトリックスとする一方向の CFRP, AFRP および C/A ハイブリッド FRP の静的な三点曲げ試験における破壊挙動には、明らかにマトリックス樹脂の力学挙動と同じ時間-温度換算則が成立したが⁷⁾、この事実が上に述べた FRP の破壊挙動に対するマトリックス樹脂の役割を裏付けたものとなっている。

上述のマトリックス樹脂の FRP に対する役割が疲労破壊においても成立するものとする、繰返し負荷速度 $f=0.02$ Hz の 40°C と 60°C は $f=2$ Hz ではそれぞれ 58.1°C と 80.6°C に相当することになる。

Fig. 11 および Fig. 12 はそれぞれ C 材、A 材および A-C-A 材の $f=2$ Hz における S-N 曲線の各破断繰返し数 N_f における疲労強度と温度の関係を示したものである。図中の A, B の垂線で示した温度は、上述の $f=0.02$ Hz における 40°C と 60°C に相当する $f=2$ Hz での 58.1°C と 80.6°C である。

上述の垂線 A, B で示した温度における $f=2$ Hz

Fig. 13. Flexural fatigue stress of CFRP and AFRP laminates versus number of cycles to failure.

Fig. 14. Flexural fatigue stress of C/A hybrid FRP laminates versus number of cycles to failure.

での疲労強度と破断繰返し数の関係を $f=0.02$ Hz での 40°C および 60°C における S-N 曲線の予測値として Fig. 13, Fig. 14 に実線および一点鎖線として示す。C 材, A 材および A-C-A 材のいずれの予測値も 0.02 Hz における 40°C および 60°C の実験値とよく一致している。

なお, ここでは 2 Hz の疲労強度より繰返し負荷速度の低い 0.02 Hz の疲労強度を予測したが, この逆の繰返し負荷速度の高い場合の疲労強度の予測も同様の手法において可能であることは言うまでもない。

4 結 言

C/A ハイブリッド FRP および CFRP, AFRP の 3 種類の一方向強化積層板について片振りの 3 点曲げ疲労試験を種々の温度および繰返し負荷速度の下で行ない, 疲労挙動の時間および温度依存性について検討した結果, 次の結論を得た。

(1) C/A ハイブリッド FRP の疲労強度は, CFRP, AFRP と同様に著しい温度および繰返し負

荷速度依存性を示す。

(2) C/A ハイブリッド FRP の疲労強度の温度依存性と繰返し負荷速度依存性の間には, CFRP および AFRP と同様に, マトリックス樹脂の力学挙動に成立するものと同一の時間-温度換算則が成立する。

(3) C/A ハイブリッド FRP の疲労挙動は温度と繰返し負荷速度および破断繰返し数の領域により明らかに異なる二つの種類に大別できる。すなわち, 低温, 高繰返し負荷速度で破断繰返し数の小さい領域では引張り側 AFRP 層の引張破壊が起点となる破線であり, この領域では疲労強度の温度および繰返し負荷速度依存性は小さく, 破断繰返し数に対する低下の割合も小さい。一方, 高温, 低繰返し負荷速度で破断繰返し数の大きい領域では内層 CFRP 層の圧縮破壊が起点となる破線であり, この領域では疲労強度の温度および繰返し負荷速度依存性は大きく, 破断繰返し数に対する低下の割合も大きい。

(平成 2 年 3 月 14 日 第 19 回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) F. Schwarzl and A. J. Starverman, J. Applied Physics, **23**, 8, 838 (1952).
- 2) J. Bischoff, E. Catsiff and A. V. Tobolsky, J. American Chemical Society, **74**, 3378 (1952).
- 3) M. L. Williams, R. F. Landel and J. D. Ferry, J. American Chemical Society, **77**, 3701 (1955).
- 4) 牟岐鹿楼, 日本機械学会論文集, **64**, 513, 34 (1961).
- 5) 宮野 靖, 金 光 学, 国尾 武, 材料システム, **3**, 143 (1984).
- 6) Y. Miyano, M. Kanemitsu, T. Kunio and H. A. Kuhn, J. Composite Materials, **20**, 520 (1986).
- 7) 中田政之, 宮野 靖, 鈴木 恵, 服部陽一, 日本複合材料学会誌, **16**, 22 (1990).
- 8) 天城滋夫, 和嶋元世, 宮野 靖, 日本複合材料学会誌, **12**, 171 (1986).