ピッチ系一方向 CFRP 積層板の曲げ疲労挙動の 負荷速度および温度依存性[†]

宮 野 靖* 森 杉 莊 司**
鈴 木 恵* 毛 利 三知宏***

Loading Rate and Temperature Dependences of Flexural Fatigue Behavior of Pitch Based Carbon Fiber Unidirectional FRP Laminates

by

Yasushi MIYANO*, Soshi MORISUGI**, Megumu SUZUKI*
and Michihiro MOHRI***

The flexural fatigue behavior of unidirectional CFRP laminates using two kinds of pitch based carbon fibers was investigated by three point bending fatigue test at several levels of temperature and two levels of loading rate.

By comparing the flexural fatigue behavior of the two types of CFRP laminates, the characteristics of pitch based CFRPs was clarified as follows:

(1) The flexural fatigue behavior of these CFRPs changed considerably with loading rate, and temperature, as well as the number of loading cycles to failure. The dependence on loading rate, temperature or number of cycles to failure is clearly divided into two regions by the fracture mechanism of the CFRPs. The two fracture mechanisms are the tensile fracture on the tension side of specimen and the compressive fracture on the compression side of specimen.

(2) The flexural fatigue strengths of these CFRPs considerably decrease with loading rate and temperature as well as number of loading cycles to failure in the region of compressive fracture. The fatigue strength does not change with loading rate, temperature or number of loading cycles to failure in the region of tensile fracture unlike the compressive fracture region.

(3) The reciprocity law between time and temperature holds for the flexural fatigue strength as well as the flexural static strength.

(4) In the region of tensile fracture, the fatigue strengths of the two types of CFRP differ, that is, the fatigue strength of CFRP, which includes the high tensile strength fiber, has a higher tensile fatigue strength. On the other hand, in the region of compressive fracture, the fatigue strengths of the two types of CFRP show the same value at the same temperature and loading rate.

Key words: CFRP laminates, Pitch based carbon fiber, Fatigue, Fracture behavior, Time-temperature dependent properties

1 緒 言

ピッチ系炭素繊維の開発が盛んに行われているが、それを用いた CFRP 積層板の機械的性質の特徴についてはまだ十分に把握されているとは言えない。

CFRP のマトリックスに用いられている樹脂の機械的性質は時間や温度により著しく変化する。これより CFRP の機械的性質も時間や温度により大きく変化する事が予測される。

著者らは、これまでにピッチ系炭素繊維を用いた一方向 CFRP 積層板の静的曲げおよび圧縮挙動の時間

や温度依存性を検討してきた。その結果、それらには著しい時間や温度依存性があり、破壊機構もまた時間^{1),2)}や温度によって急激に変化することを見出している。したがって、曲げ疲労挙動においても破断繰返し数のみならず時間や温度によって破壊機構は変化し、特徴的な S-N 曲線を描くことが十分に予測される。

本報は、2 種類のピッチ系炭素繊維の一方向 CFRP 積層板を取り上げ、上述の結果を踏まえてその繊維方向の曲げ疲労挙動の負荷速度および温度依存性を繊維の種類および破壊機構と関連させながら検討

† 原稿受理 平成 4 年 3 月 5 日 Received Mar. 5, 1992

* 正 会 員 金沢工業大学材料システム研究所 〒921 金沢南局区内野々市町, Mat. System Res. Lab., Kanazawa Inst. of Tech., Nonouchi-machi, Kanazawa, 921

** 金沢工業大学大学院 〒921 金沢南局区内野々市町, Graduate Student, Kanazawa Inst. of Tech., Nonouchi-machi, Kanazawa, 921

*** 日本石油(株)中央技術研究所 〒231 横浜市中区, Central Tech. Res. Lab., Nippon Oil Co. Ltd., Naka-ku, Yokohama, 231

するものである。

2 実 験

2・1 供試材料

本報で取り上げた2種類のピッチ系炭素繊維は、XN40（日本石油製）とP55S（Amoco製）であり、その仕様および機械的性質をTable Iに示す。CFRP

Table I. Specifications and mechanical properties of fibers.

	XN40	P55S
Diameter of mono filament (μm)	10.0	10.0
Filament number in 1 yarn	2000	2000
Elastic modulus (GPa)	402	380
Tensile strength (GPa)	3.43	2.10
Ultimate strain (%)	0.85	0.50
Specific gravity	2.10	2.10

積層板はこれらの炭素繊維を一方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0.12 mm、幅220 mm、長さ270 mm）を25枚積み重ね、圧縮成形機を用いて厚さ3 mmの一方向積層板に成形した。繊維の体積含有率は53～60%である。なお、XN40を用いたCFRP積層板をX-CFRP、P55Sを用いたものをP-CFRPと略称する。

2・2 実験方法

試験片の形状、寸法および負荷方法は、Fig. 1に示すようなJIS K 7074および7111に準じ、荷重の選定はJSME S 002-1981によった。試験機としてはその性能上恒温槽付サーボパルサーと低温槽付オートグラフ（島津製作所製）の2種類を用い、後述の負荷速度の正弦波あるいは三角波による荷重振幅一定の片振り3点曲げ負荷を加えた。応力比（＝最小荷重/最大荷重）は0.05とした。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、

Test conditions.

5Hz	0.05Hz	Indicator on Fig. 2
	-30°C	Triangle
R. T.	Sinusoid	-15°C
	Triangle	B
80°C	Sinusoid	R. T.
	Sinusoid	Triangle
		C
120°C	Sinusoid	
		D

Fig. 1. Configuration of specimen and test conditions.

破断に至るまで荷重-たわみ曲線を求めると同時に試験中および試験後の試験片の破壊状況を詳細に観察した。

2・3 試験条件の選定

Fig. 2に2種類のCFRP積層板の繊維方向の静的曲げ強度のマスター曲線を、またこのマスター曲線の時間-温度移動因子をFig. 3に示す³⁾。Fig. 1に示す試験条件A, B, C, Dの周期と温度はそれぞれFig. 2の垂線A, B, C, Dに位置する破壊時間と温度に相当する。試験条件としては、まず室温における負荷速度 $f=5\text{ Hz}$ （周期 $T=0.2\text{ sec}$ ）と $f=0.05\text{ Hz}$ （周期 $T=20\text{ sec}$ ）を選択した。これらの条件はそれぞれFig. 2の2本の垂線B, Cで示す破壊時間および温度に相当する。また、疲労における時間-温度換算則^{4), 5)}の成立を確認するために、垂線Cに相当する $T=80^\circ\text{C}$ 、 $f=5\text{ Hz}$ と垂線Bに相当する $T=-15^\circ\text{C}$ 、 $f=0.05\text{ Hz}$ を試験条件として選択した。さらに、S-

Fig. 2. Master curves of flexural strength for CFRPs.

Fig. 3. Time-temperature shift factors of flexural strength for CFRPs.

N 曲線と破壊様式を明確に対応づけるために垂線 A に相当する $T = -30^{\circ}\text{C}$, $f = 0.05\text{ Hz}$ と垂線 D に相当する $T = 120^{\circ}\text{C}$, $f = 5\text{ Hz}$ を試験条件に加えた。

なお, Fig. 1 に示す試験条件の表には荷重波形である正弦波と三角波を示してある。X-CFRP について室温, $f = 0.05\text{ Hz}$ の試験条件のみ両方の波形で疲労試験を行い, 得られた $S-N$ 曲線が Fig. 8 に示すようによく一致することより, 波形の違いによる疲労挙動に及ぼす影響が無いことを確認した。

3 結果および考察

3・1 荷重-たわみ曲線

繰返し負荷時の荷重-たわみ曲線は, 後述する 2 つの破壊様式, すなわち圧縮破壊と引張破壊により明確に区別することができる。

Fig. 4 に圧縮破壊を生じた X-CFRP と P-CFRP の室温における $f = 0.05\text{ Hz}$ の下での静的曲げおよび曲げ疲労試験の荷重-たわみ曲線 ($P-\delta$ 曲線) の代表例を示す。図に示すようにいずれの CFRP 積層板も繰返し負荷時の荷重-たわみ曲線は破断の直前まで静的負荷時の荷重-たわみ曲線上をたどるが, 破断繰返し数のごく近傍で急にその傾きが小さくなりヒステリシスを描き破断に至る。一方, 引張破壊を生じた場合の荷重-たわみ曲線は破断に至るまで静的な荷重-たわみ曲線上をたどる。

3・2 破壊機構と破面観察

Fig. 5 に X-CFRP と P-CFRP の圧縮破壊の様相を示す。図に示す負荷条件の下では, 図 (a) に示すように破断繰返し数のごく近傍で試験片の圧子直下の圧縮側の表面層にクラックが観察され, 進展し破断に至る。またその破断面は, 圧縮側と引張側の両方からクラックが進展した様子が認められ, 図 (b) の矢印で示

Fig. 4. Load-deflection diagrams on static and cycle loads for CFRPs.

すように繊維の引抜きが全く観察されない滑らかな圧縮破壊領域と, 繊維の引抜きが観察される引張破壊領域に明確に区別することができる。さらに圧縮破壊領域の繊維 1 本を観察すると, 図 (c) に示すようにいずれの CFRP 積層板も凹凸の激しい繊維自身の圧縮破壊の様相が観察される。

また, Fig. 6 に X-CFRP と P-CFRP の引張破壊の様相を示す。左から順に側面, 破面, 繊維と示したものである。図に示すようにいずれの CFRP 積層板も側面は圧子直下の引張側にクラックが入り, 進展し, 層間破壊を起こす。そして, その破面を観察すると全面に繊維の引抜きのみ観察される引張破壊領域となる。さらに繊維 1 本を観察すると, 凹凸の全くみられない引張破断特有の破面を呈している^{6),7)}。

このように, X-CFRP および P-CFRP には 2 種類の破壊様式が観察されるが, 試験条件によってこれ

Fig. 5. Observations of compressive fracture behavior for CFRPs on 0.05 Hz at R. T.

Fig. 6. Observations of tensile fracture behavior for CFRPs on 0.05 Hz at -30°C .

ら2種類の破壊様式のいずれか一方が明確に現われ、試験条件による破壊様式の区別は容易にできる。これらの疲労破壊の様相は静的試験における破壊の様相とまったく同じである。²⁾

3.3 S-N 曲線

Fig. 7 と Fig. 8 に $f=5\text{ Hz}$ および $f=0.05\text{ Hz}$ における X-CFRP と P-CFRP の種々の温度での S-N 曲線を示す。Fig. 7 と Fig. 8 に示すようにいずれの CFRP 積層板も負荷速度、温度および破断繰返し数の領域により破壊様式が明確に異なる。すなわち、低

温で負荷速度が大きく、低い破断繰返し数の領域では引張破壊を生ずる。この引張破壊を生じる領域では、曲げ疲労強度は温度や負荷速度および破断繰返し数によってほとんど変化せず、ほぼ一定値となる。一方、高温で負荷速度が小さく、高い破断繰返し数の領域では圧縮破壊を生ずる。この圧縮破壊を生じる領域では、曲げ疲労強度は破断繰返し数ばかりでなく温度や負荷速度によっても大きく変化する。ただし、いずれの試験条件においても繰返し数 $N=10^4$ 近傍を境にしてそれ以上の繰返し数では曲げ疲労強度はほとんど変化し

Fig. 7. S-N curves for CFRPs at various temperatures on 5 Hz.

Fig. 8. S-N curves for CFRPs at various temperatures on 0.05 Hz.

Fig. 9. S-N curves for CFRP at various conditions.

Fig. 10. Comparison of X and P-CFRP on S-N curves.

なくなる現象も観察された。

Fig. 7 と Fig. 8 を 1 つにまとめると Fig. 9 となる。静的曲げ強度において成立した時間-温度換算則から予測した、室温、 $f=5$ Hz の S-N 曲線が $T=-15^{\circ}\text{C}$ 、 $f=0.05$ Hz の S-N 曲線と、また室温、 $f=0.05$ Hz の S-N 曲線が $T=80^{\circ}\text{C}$ 、 $f=5$ Hz の S-N 曲線とはほぼ一致することから、明らかに曲げ疲労強度にも静的曲げ強度と同一の時間-温度換算則が成立することが確認できる。曲げ疲労強度にみられる温度、負荷速度および破断繰返し数の増加に伴う引張破壊から圧縮破壊への破壊様式の変化およびそれぞれの破壊様式における曲げ疲労強度の温度、負荷速度および繰返し数に対する依存性は Fig. 2 に示す静的曲げ挙動とよく対応する。すなわち、繊維方向の静的曲げ挙動において比較的長い時間領域あるいは高い温度領域まで引張破壊を起こす P-CFRP は、S-N 曲

線上においても比較的高い繰返し数まで引張破壊を起こす。

Fig. 10 に X-CFRP と P-CFRP の S-N 曲線をまとめて示す。この図より、引張破壊を示す場合の疲労強度は静的強度と同じ程度に X-CFRP と P-CFRP に差異があるが、圧縮破壊領域では同じ強度、負荷速度で両者はほとんど同じ S-N 曲線となる。すなわち、繊維の引張強度には Table I に示す差異はあっても、CFRP としての圧縮破壊にかかわる両者の繊維の機械的性質がほとんど同じであることを示している。

4 結 言

2 種類のピッチ系炭素繊維を用いた一方向 CFRP 積層板を取り上げ、その繊維方向の曲げ疲労挙動の負荷速度および温度依存性を求め、その破壊機構と関連させながら検討したところ、次の結論を得た。

- (1) 曲げ疲労破壊の様式は、繊維の種類、負荷速度、温度および破断繰返し数により異なる。すなわち、低温あるいは破断繰返し数の低い領域では引張側表面層の繊維の引張破壊を起こし、その他の領域では圧縮側表面層の繊維の圧縮破壊を起こす。
- (2) 引張破壊と圧縮破壊の領域は明確に区別することができ、それぞれの領域で特徴的な S-N 曲線を描く。すなわち、引張破壊を生じる領域では、曲げ疲労強度は温度や負荷速度および破断繰返し数によってほとんど変化せず、ほぼ一定値となる。一方、圧縮破壊を生じる領域では、曲げ疲労強度は破断繰返し数ばかりでなく温度や負荷速度によっても大きく変化する。

(3) 曲げ疲労強度にみられる温度、負荷速度および破断繰返し数の増加に伴う引張破壊から圧縮破壊への破壊様式の変化およびそれぞれの破壊様式における曲げ疲労強度の温度、負荷速度および繰返し数に対する依存性は静的曲げ挙動とよく対応する。すなわち、繊維方向の静的曲げ挙動において比較的長い時間領域あるいは高い温度領域まで引張破壊を起こす P-CFRP は、S-N 曲線上においても比較的高い繰返し数まで引張破壊を起こす。

(4) 曲げ疲労強度にも静的曲げ強度と同一の時間-温度換算則が成立する。

(5) 引張破壊領域では、2 種類の CFRP の疲労強度は明らかに異なり、繊維の引張強度の高い CFRP の疲労強度の方が大きい。一方、圧縮破壊領域では、2 種類の CFRP の疲労強度は同じ時間および温度においてまったく同一の値を示す。

参 考 文 献

- 1) 中田政之、宮野 靖、鈴木 恵、服部陽一、材料、40、199 (1991)。

- 2) 宮野 靖, 高村幸夫, 鈴木 恵, 毛利三知宏, 材料, 40, 194 (1991). 会材料力学講演会, Vol. B, p. 230 (1991).
 3) 文献2) の pp. 196-198. 6) 文献2) の pp. 202-204.
 4) 文献1) の pp. 202-204. 7) M. Mohri, Y. Miyano and M. Suzuki, ICCM8, pp. 33B1-33B9 (July 1991).
 5) 大塚 猛, 笠森正人, 宮野 靖, 新保 實, 日本機械学 8) 文献2) の pp. 196-198.

書 評

“材料強度の統計的性質”

材料強度確率モデル研究会 (編)

(1992年, 養賢堂(株)発行, A 5 版, 433ページ, 5150円)

あらゆる材料において, 強度や寿命は決定論的に言及できない. それらは様々な因子, 例えば製造方法や使用環境などによって左右されることが知られている. しかしながら, まだすべての因子が解明されたわけではなく, ばらつきとして表現されている. 現在までに, 種々な材料の強度や疲労寿命のデータについて膨大な実験結果が報告されている.

本書は, これらの研究報告を体系的にまとめるため, 10年余の歳月を費やして「材料強度確率モデル研究会」がデータの分類・整理をしたものである. 本書では, 材料を金属材料・複合材料・セラミックスに, また構造関係としては要素および実機器に分類されている. 各材料ごとに各種強度, 疲労寿命の支配因子および統計的性質が, 豊富な実験データをもとに記されている. これらのデータは, 実際に構造物の安全設計や信頼性解析を行うときに, 部材強度に関する基礎データとして利用できる. また, 破壊確率を考える上で必要な統計的手法についても簡単に記されている.

設計に携わる者であれば, 是非とも読んでおくべき本であると思われる.

(大阪大学工学部 座古 勝)