PAN 系炭素繊維の疲労強度特性†

堀川 教世* 中山 英明**
境田 彰芳*** 田中 道七****

Fatigue Strength of PAN-Based Carbon Fiber under Cyclic Loading

by

Noriyo HORIKAWA*, Hideaki NAKAYAMA**, Akiyoshi SAKAIDA***
and Tsuneshichi TANAKA****

Load-controlled fatigue tests were carried out on PAN-based monofilament carbon fibers under cyclic tensile load conditions at a frequency of 10Hz. Fatigue strength data are obtained under pre-determined maximum load $P_{\max}$ with three different stress ratios of $R (= P_{\min}/P_{\max}) = 0.1, 0.5$ and 0.7 . The maximum load $P_{\max}$ is not an appropriate parameter to evaluate the fatigue strength behavior because the cross-sectional area of monofilament carbon fiber is not constant and varies along the longitudinal direction. This fact results in a large scatter of fatigue lives when the data are plotted on $P_{\max}-N_f$ diagram. In order to evaluate the fatigue strength behavior more precisely, the fatigue strength data must be plotted on $S-N$ diagram by using the maximum tensile stress $\sigma_{\max}$ determined from the cross-sectional area of the fracture surface. It is found that $S-N$ properties of monofilament carbon fibers clearly show the fatigue behavior, depending on the stress ratio R . It is also found that the fatigue strength of monofilament carbon fiber is governed by two parameters such as the maximum stress $\sigma_{\max}$ and the stress amplitude σ_a , and that the combined stress parameter $\sigma_{\max}^{(1-\alpha)} \times \sigma_a^{\alpha}$ is useful to describe the fatigue strength behaviors of the different stress ratios.

Key words: PAN-based carbon fiber, Monofilament carbon fiber, Fatigue test, Fatigue strength, $S-N$ properties

1 緒 言

炭素繊維は金属材料と比べて、比強度、比弾性率に優れた材料であり、特に、部材の軽量化が要求される航空・宇宙・自動車分野では、炭素繊維と樹脂とを組み合わせた複合材料は従来の金属に代わる材料として盛んに用いられていることから、今後、炭素繊維は最も有望な材料の一つであるといえる。^{1)~3)}

炭素繊維を用いた複合材料の機械的特性に及ぼす因子としては繊維および樹脂単体の機械的特性、繊維と樹脂間の界面特性、繊維の含有率および配向状態などが挙げられるが、⁴⁾特に、繊維の機械的特性については、複合材料の機械的特性を直接左右するため、非常に重要である。しかしながら、この点に着目した研究は、他の因子のそれに比べて非常に少ないのが現状である。

この様なことから著者らは、現在までに、炭素繊維単体の力学的特性の把握を行ってきた。まず、前々報⁵⁾では6種類のゲージ長さの炭素繊維を用いて、炭素繊維単体の引張試験を行い、有効体積の概念より炭素繊維単体の引張強度の評価を試みたが、ゲージ長さが長い場合にはこの評価法は有効でなく、この原因が繊維軸方向に沿う直径変化にあることを見いだした。そこで、得られた

実験データを統計的に解析し、上述の直径変動を考慮した引張強度分布を表す式を導き、これがゲージ長さに関係なく統一的に適用できることを示した。次に、前報⁶⁾では前々報⁵⁾で得た実験データから炭素繊維の引張弾性率を求めたが、前々報⁵⁾と同様に繊維軸方向に沿う直径変化のため、引張弾性率がゲージ長さで異なった値をとるという結果を得た。そこで、再度、実験データから炭素繊維の引張弾性率について統計的解析を行い、繊維直径の代表値として定義した等価直径を使えば、繊維直径が繊維軸方向に沿って変化する場合においても炭素繊維単体の引張弾性率を第一近似の値として求めることができることを示した。

ところで、炭素繊維を用いた複合材料は機械・構造用部材として盛んに用いられている。こうした場合には、時間依存型破壊の中心的課題である疲労強度特性の把握が重要であり、このことは複合材料中の強化繊維についても同様である。しかしながら、炭素繊維単体の疲労強度特性に関する研究は従来から非常に少なく、まだ十分な研究が行われていないように見受けられる。最近の研究の一例を見ると、A. R. Bunsellら⁷⁾は22本の炭素繊維について、荷重制御下で応力比 $R = 0$ のみの繊維単体

† 原稿受理 平成 11 年 5 月 10 日 Received May 10, 1999

* 学生会員 立命館大学大学院 〒 525-8577 草津市野路東, Graduate Student, Ritsumeikan Univ., Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577

** 正会員 大阪産業大学法人本部 〒 574-8530 大東市中垣内, School Juridical Person, Osaka Sangyo Univ., Nakagaito, Daito, 574-8530

*** 正会員 明石工業高等専門学校機械工学科 〒 674-8501 明石市魚住町西岡, Dept. of Mech. Eng., Akashi College of Tech., Uozumi-cho, Akashi, 674-8501

**** 正会員 立命館大学理工学部 〒 525-8577 草津市野路東, Dept. of Mech. Eng., Ritsumeikan Univ., Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577

の引張疲労試験を行っており、その結果、19本の繊維が繰返し数 1.05×10^2 回から 5×10^6 回で破断し、残りの3本は 3×10^7 回を越えても破断しなかったと報告している。さらに、この3本の繊維について引張試験を行い、その内の1本は疲労試験の繰返し荷重が引張破断荷重の98%であったことから、炭素繊維は疲労過程を示さないと結論づけている。また、炭素繊維は引張疲労の初期の段階で引張弾性率が増加することも報告している。しかしながら、繊維の断面積を繊維束の線度、密度、フィラメント数から算出した平均断面積としているため、個々の繊維にかかる正確な応力は得られておらず、荷重のみによる疲労強度の評価にとどまっており、疲労強度特性を正確に論じるには不十分といえる。

このようなことから本研究では、まず、炭素繊維単体の引張疲労試験機を自作し、3種類の応力比のもとで繊維単体の疲労試験を行い、個々の繊維の破断面での応力を求め、得られたS-N特性について検討を加えた。さらに、A. R. Bunsellら⁷⁾の報告する引張疲労の初期段階での引張弾性率の増加についても検討を加えるとともに、SEMによる疲労破面の観察を行った。

2 供試材料および実験方法

本実験で使用した炭素繊維は前報^{5), 6)}と同様にフィラメント数6000本の繊維束の連続長繊維から取り出したPAN系炭素繊維(トレカT300, ㈱東レ)である。炭素繊維は非常に細いため、JIS R7601-1986を参考にして紙製の試験片タブを作製し、Fig. 1に示すように試験片タブ中央の部分に炭素繊維をエポキシ系樹脂で固定した。

Fig. 2に本実験で使用した炭素繊維の疲労試験機を示す。炭素繊維に負荷される正弦波荷重は次のように与えられる。まず、関数発生器から図中の駆動装置に正弦波を入力し、それにより駆動されるレバーがワイヤーを介して繰返し曲げ荷重を片持ち梁に与え、この梁が正弦波形の往復運動をする。この往復運動により図の試験片に繰返し引張荷重が負荷される。炭素繊維に与える平均荷重はマイクロメータのついた可動テーブルを移動させることにより、また、荷重振幅は関数発生器の出力電圧を調整することにより与えられる。炭素繊維に負荷された荷重は可動テーブルに取り付けられた片持ち梁に貼付したひずみゲージにより検出される。

実験条件はゲージ長さ12.5mmの炭素繊維について、周波数 $f = 10\text{Hz}$ の正弦波荷重下において、応力比 $R = 0.1, 0.5, 0.7$ の3種類で行い、 10^7 回で実験を打ち切った。なお、本実験で用いた炭素繊維は前報^{5), 6)}で明らか

にしたように繊維軸方向に沿って直径が一定でないため、実験前に最大応力 $\sigma_{\max}$ を決定して疲労試験を行うことができない。そこで、疲労試験は最大荷重 $P_{\max}$ と応力比 R を決めて行った。また、すべての疲労試験は繊維に平均荷重を負荷した後、周波数 $f = 1\text{Hz}$ 程度で実験条件の応力比になるよう荷重振幅を調節し、その後、徐々に10Hzまで周波数を上げて実験を行った。

疲労試験中は繊維の疲労破面を確保するために、Fig. 1中のハッチング部分に粘性の低い油を塗った薄いフィルムを置き、疲労試験を行った。なお、周波数 $f = 10\text{Hz}$ 以下では、油の粘性抵抗による荷重の誤差は無視できることを確認している。本実験で用いた炭素繊維は、前報^{5), 6)}で明らかにしたように、繊維軸方向に断面形状が変化し、細い部分では真円で近似できるが、太い部分は楕円に近い形状となっており、また、後に示すFig. 11(a), (b), (c), (d)に見るように、繊維表面にしわのような凹凸^{3), 8)}が観察される。そこで、厳密な断面積を求めるために繊維の破断面のSEM写真を撮った後、ネガから読みとった破断面輪郭の形状を画像データとしてパソコンに取り込み、断面積を求めた。なお、試験片の破断がゲージ間内ではなくエポキシ樹脂との接着界面もしくは接着部内で生じたものについてはデータとして採用しなかった。

次に、繰返し疲労過程における引張弾性率の変化を調べるために、最大荷重 $P_{\max} = 88\text{mN}$ (9.0gf)、応力比 $R = 0.1$ のもとで、繰返し数が 10^3 回以下では $f = 0.1\text{Hz}$ で、それ以上の繰返し数では $f = 10\text{Hz}$ で疲労試験を行い、繰返し数が所定回数に達したとき疲労試験を一時中断して、引張試験を行った。その際の荷重の上限は70mN (7.1gf)程度として荷重-伸びデータを取り込み、除荷した後は再び疲労試験を行った。引張弾性率はこうして得た荷重-伸びデータをもとに求めた。なお、炭素繊維の伸びはFig. 2中に示すように、2枚の遮蔽板をゲージ間の長さになるように設置し、レーザーラインゲージ(株式会社キーエンス社製、VG-300)を用いて図面に垂直な方向から破線の幅の平行レーザー光を照射し、遮蔽板を通過

Fig. 1. Single fiber testing tab for fatigue test.

Fig. 2. Structure of fatigue testing machine.

した通過光の幅を測定することにより伸びを連続的に測定した。このレーザーラインゲージの分解能は $10\mu\text{m}$ である。

3 実験結果および考察

3・1 炭素繊維の疲労試験結果

3・1・1 最大荷重 $P_{\max}$ と破断繰返し数 N_f との関係

Fig. 3 に周波数 $f=10\text{Hz}$, 応力比 $R=0.1, 0.5, 0.7$ の条件下で行った疲労試験結果を示す。図の縦軸は最大荷重 $P_{\max}$ であり、横軸の破断繰返し数 N_f は破断時間と周波数との積から求めたものである。なお、前章でも述べたが疲労試験は繊維に平均荷重を負荷した後、 $f=1\text{Hz}$ 程度で実験条件の応力比になるように荷重振幅を調節し、その後、徐々に $f=10\text{Hz}$ まで周波数を上げて実験を行っており、繊維の破断はこれら一連の操作中にも生じているが、この段階で破断したデータについては破断繰返し数は明確でない。しかしながら、静的あるいは非常に低寿命での破断データの分布する範囲を見ることも重要であるため、これらのデータについては次のように取り扱った。まず、繊維に加える第1回目の引張荷重の増加過程で最大荷重 $P_{\max}$ に達するまでに破断したデータについては、破断時の荷重を縦軸にとって $N_f=1$ 上にプロットした。また、設定した荷重振幅に到達後、 $f=10\text{Hz}$ になるまでに破断したデータについては実際には $N_f=1$ から 10^2 回の範囲に分布すると思われるが、ここでは $N_f=50$ 上にまとめてプロットした。プロットに付した数字はデータ数を示している。なお、図中の破線は前々報⁵⁾で求めたゲージ長さ 12.5mm の炭素繊維の平均破断荷重 $\bar{P}_b$ である。

図より、各応力比における最大荷重 $P_{\max}$ と破断繰返し数 N_f の関係は、破断繰返し数に大きなばらつきはあるものの、それぞれ直線で示されるように右下がりの傾向にある。但し、図の直線は目視で引いたものである。また、応力比が $0.1, 0.5, 0.7$ と大きくなるに従い、直線は約 17mN の幅で高荷重側に移動しており、疲労強度の明確な応力比依存性が見られる。

次に、同一荷重レベルにおける破断繰返し数のばらつきを見ると、各応力比によって差はあるが、最大では R

$=0.5$, $P_{\max}=113\text{mN}$ (11.5gf) の荷重レベルにおいて $N_f=50$ から 10^7 回を越えてばらつきが観察され、ぜい性材料であるセラミックスの疲労特性と同様に破断繰返し数に大きなばらつきが見られる。また、このような破断繰返し数の大きなばらつきは A. R. Bunsell ら⁷⁾ の報告でも観察されている。しかしながら、本実験で用いた炭素繊維は前報^{5), 6)}で明らかにしたように繊維軸方向に直径もしくは断面形状が変化しており、同一荷重レベルの破断データであっても、個々の繊維で破断面積が異なるため繊維にかかる応力は同じではない。Fig. 3 に見る破断繰返し数の大きなばらつきはこのことが主要因であると考えられ、 $P_{\max}$ による疲労特性の評価は有効でないと言える。なお、緒言でも述べたが、A. R. Bunsell ら⁷⁾ の用いた炭素繊維についても、本実験と同様、繊維軸方向における直径もしくは断面形状の変化が報告されているが、上述のような個々の繊維にかかる応力については考慮されておらず、この点で厳密でないと言える。以上のことから、厳密に疲労特性を議論するためには繊維に負荷した荷重ではなく応力でもって評価する必要があると考えられ、次項ではこのことについて考察する。

3・1・2 最大応力 $\sigma_{\max}$ および応力振幅 σ_a で整理したときの $S-N$ 特性 Fig. 4 に最大応力 $\sigma_{\max}$ と破断繰返し数 N_f の関係を示す。縦軸の最大応力 $\sigma_{\max}$ は Fig. 3 中の最大荷重 $P_{\max}$ を個々の繊維の破断面積で除したものである。なお、 $N_f=50$ 上におけるプロットは Fig. 3 中の $P_{\max}=137\text{mN}$ (14.0gf) に相当するデータのみであり、 $P_{\max}=118\text{mN}$ (12.0gf), 113mN (11.5gf) のデータについては、繊維の破断面の確保を行っていなかったため示していない。また、図中の破線は前々報⁵⁾において、長さ 2mm から 50mm の炭素繊維について推定した引張強度の平均値 $\bar{\sigma}_0$ であり、破線から両側の一点鎖線までの距離は推定した標準偏差の平均値 $\bar{S}_{\sigma 0}$ である。

図より各応力比における最大応力 $\sigma_{\max}$ と破断繰返し数 N_f の関係をみると、ややばらつきはあるもののそれぞれ右下がりの直線で近似でき、応力比が小さいほどその直線は低強度側に位置していることから、炭素繊維の $S-N$ 特性は応力比 R に依存することが観察される。また、各

Fig. 3. $P_{\max}$ - N_f diagram for carbon fiber.

Fig. 4. $\sigma_{\max}$ - N_f curves for carbon fiber.

直線の勾配について見ると、応力比が小さくなるに従いその勾配は大きくなっており、短寿命側では応力比の違いによる疲労強度の差は小さくなるが、長寿命側ではその差は顕著に現れる傾向が観察される。特に $R = 0.1$ における $N_f = 10^5$ 回以上の破断データは2本の一点鎖線で挟まれる範囲よりも低強度側に位置しており、 10^7 回時間強度は破線で示す引張強度の平均値 $\bar{\sigma}_0$ の約57% (約2500MPa) となっていることから、炭素繊維が明確な疲労挙動を示すことは明らかである。さらに、非常に短寿命の破断データ ($N_f = 50$ における●印) について見ると、これらのデータは2本の一点鎖線で挟まれる範囲に分布しており、前々報⁵⁾で推定した静的な引張強度と殆ど変わらないことが分かる。なお、耐久限度の存在については現時点では、実験繰返し数範囲の制約およびデータ数が足りないため明らかでない。

次に、応力振幅 σ_a と破断繰返し数 N_f との関係を示したものが Fig. 5 である。図より、応力振幅 σ_a で整理した場合においても、Fig. 4 と同様に各応力比における応力振幅と破断繰返し数の関係はそれぞれ右下がりの直線で近似できることが観察される。また、応力比 R が 0.7, 0.5, 0.1 と小さくなるに従い、Fig. 4 の場合とは逆に直線は高強度側に位置している。

Fig. 5. σ_a - N_f curves for carbon fiber.

Fig. 6. Relationship between stress amplitude and mean stress at finite life.

Fig. 6 は各繰返し数での時間強度について、応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の関係を示したもので、図中の実線は同一時間強度のプロットを、破線は同一応力比のプロットをそれぞれ直線近似したものである。図中の実線の勾配に見るように、繰返し数の増加とともに、その勾配は小さくなっており、長寿命ほど平均応力 σ_m よりも応力振幅 σ_a への依存性が大きくなっていることが分かる。このことから炭素繊維の S-N 特性を統制するには $\sigma_{\max}$ と σ_a または σ_a と σ_m のような2つの応力パラメータが必要であり、このことは金属材料の疲労特性とほぼ同様である。

ところで、Fig. 4 では応力を求めるために破断面の面積を用いているが、本実験で用いたような繊維軸方向の断面積または断面形状が一定でない繊維に対する断面積を求める場合には、繊維束の線度、密度、フィラメント数から算出した平均断面積を用いることがある。^{3), 7)} しかし、Fig. 3 の結果から予想されるように、この様な平均断面積を用いた場合、同一応力レベルにおける破断繰返し数のばらつきの程度は Fig. 3 の場合と変わらず、疲労特性を論じる上で有効でない。このことから、炭素繊維の S-N 特性を調べるには破断箇所を保存して、破断部の断面積を用いることが重要である。

3・1・3 $\sigma_{\max}^{(1-\alpha)} \times \sigma_a^\alpha$ で整理したときの S-N 特性
前項では炭素繊維の S-N 特性は2つの応力パラメータに依存することが明らかとなったが、K.Walker⁹⁾ はアルミニウム合金について、 $\sigma_{\max}^{(1-\alpha)} \times \Delta\sigma^\alpha$ ($\sigma_{\max}$; 最大応力, $\Delta\sigma$; $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, $\sigma_{\min}$; 最小応力, α ; $0 < \alpha < 1$ の定数) を疲労強度のパラメータとして用いれば、S-N 特性は応力比に依存せず一義的に整理できることを報告している。そこで、このパラメータが炭素繊維の S-N 特性を統制するのに有効かどうかを次に検討する。

まず、Fig. 7 は各応力比において、Fig. 4 より得られた同一の破断繰返し数を与える時間強度の最大応力 $\sigma_{\max}$ と応力振幅 σ_a を両対数紙にプロットしたものである。な

Fig. 7. Relationship between σ_a and $\sigma_{\max}$.

お、図中の破線は同一の応力比におけるプロットを結んだものであり、実線は各繰返し数におけるプロットを最小2乗法で直線近似したものである。図より、各繰返し数における $\sigma_{\max}$ と σ_a の関係はそれぞれ実線で示すように直線で近似でき、これら実線の勾配の平均値は -2.81 である。この最大応力 $\sigma_{\max}$ と応力振幅 σ_a の直線関係を式で表せば次のように書ける。

$$\sigma_a = A \times \sigma_{\max}^{-\beta} \quad (1)$$

ここで、 A は定数であり、この値は Fig. 7 中の実線上の最大応力 $\sigma_{\max}$ と応力振幅 σ_a に対して破断繰返し数を決定するものである。また、 β は Fig. 7 中における実線の勾配である。

次に、疲労強度を表すパラメータとして $\sigma_{\max}^{(1-\alpha)} \times \sigma_a^\alpha$ を考える。ここに α は $0 < \alpha < 1$ なる定数である。このパラメータは式 (1) を使って $A^\alpha \times \sigma_{\max}^{(1-\alpha)-\alpha\beta}$ のように書き換えることができ、これによって疲労寿命が一義的に決まるためには $\sigma_{\max}$ の指数は 0 でなければならない。従って、次式が得られる。

$$\beta = (1 - \alpha) / \alpha \quad (2)$$

式 (2) の β の値として Fig. 7 中で求めた勾配の平均値を用いると、 α の値は 0.26 となる。Fig. 8 はこの値を用いて計算した $\sigma_{\max}^{(1-\alpha)} \times \sigma_a^\alpha$ を縦軸にとり、炭素繊維の S-N 特性を表したものである。なお、図中の直線は $N_f = 50$ と 10^7 回を越えたデータを除き、最小2乗法で直線近似したものである。図より、各応力比における炭素繊維の S-N 特性は多少のばらつきはあるものの 1 本の直線で表すことができ、ほぼ一義的に統制できることが分かる。また、 $\sigma_{\max}^{(1-\alpha)} \times \sigma_a^\alpha$ で表したパラメータの最大応力 $\sigma_{\max}$ と応力振幅 σ_a の指数部の値を比較すると、それぞれ 0.74, 0.26 であることから、炭素繊維の S-N 特性は応力振幅 σ_a よりも最大応力 $\sigma_{\max}$ 依存性の方が大きいことが分かる。

なお、Fig. 7 中における実線の勾配は各寿命において異なっており、傾きの寿命依存性が観察されているため、式 (1) を用いるにあたっては、厳密には各時間強度における回帰直線の勾配 β の値を求め、 β の寿命依存性を考慮する必要がある。本研究では、 β の値として各時間強度における勾配の平均値を用いているが、各時間強度における勾配 β の最大値と最小値はそれぞれ 4.44 (○印； 10^3 時間強度を最小二乗法で近似した直線の勾配) と 1.54 (▽印； 10^6 時間強度を最小二乗法で近似した直線の勾配) であり、これらの値を用いて各場合の α を求め、Fig. 8 と同様に応力パラメータ $\sigma_{\max}^{(1-\alpha)} \times \sigma_a^\alpha$ を縦軸として炭素繊維の S-N 特性を表しても、 β の値によって時間強度を表す直線は上下にシフトするものの、Fig. 8 と同様、炭素繊維の S-N 特性は一義的に統制できており、ここではさほど傾き β の寿命依存性を考慮しなくても問題は無いと考えられる。

3・2 正弦波荷重下における炭素繊維の引張弾性率の変化について

前節では炭素繊維の S-N 特性について調べたが、繰返し疲労中の炭素繊維の引張弾性率について、A. R. Bunsell ら⁷⁾ は繰返し引張疲労の初期段階で炭素繊維の

引張弾性率が増加することを報告しており、本節ではこのような現象が本実験で用いた炭素繊維にも見られるかどうかについて調査を行った。

Fig. 9 は一例として、周波数 $f = 10\text{Hz}$ 、最大荷重 $P_{\max} = 88\text{mN}$ (9.0gf) で疲労試験を行い、図中の各繰返し数に到達した後、疲労試験を中断し、引張試験を行って得られた荷重 P - 伸び δ 曲線を示したものである。なお、引張試験は繊維の破断までは行わず、荷重の上限を Fig. 3 中に破線で示した平均破断荷重 $\bar{P}_b$ の 60% (70mN) 程度とし、除荷した後は再び疲労試験を行った。図より、炭素繊維の荷重 P - 伸び δ 線図の勾配は疲労試験前と疲労試験中とで殆ど変化しないことが観察される。

Fig. 10 は疲労過程における引張弾性率の変化を示したもので、縦軸の引張弾性率は Fig. 9 で得られた荷重 P - 伸び δ 曲線の勾配より求めたものである。なお、炭素繊維の引張弾性率にはひずみ依存性があるため、JIS-R7601-1986 では破断荷重の 20 ~ 60% の範囲の勾配より引張弾性率を求めるように規定しているが、ここでは破断荷重は分からないため Fig. 3 中に破線で示した平均破

Fig. 8. Relationship between $\sigma_{\max}^{(1-\alpha)} \times \sigma_a^\alpha$ and number of cycles to failure ($\alpha = 0.26$).

Fig. 9. P - δ curves for carbon fibers after given numbers of fatigue cycles.

断荷重 $\bar{P}_0$ を代用した。また、引張弾性率を求める場合の繊維の直径については、前報⁶⁾において等価直径 d_{eq} が有効であることを示しているため、Fig. 10 で使用した炭素繊維については、実験前に繊維軸方向に 0.5mm 間隔で直径変化を測定し、これを用いて等価直径 d_{eq} を計算した。図より、引張弾性率は繰返し数 $N = 1$ から 2×10^5 にわたって殆ど変化しないことが観察される。また、各繰返し数における引張弾性率の値は前報⁶⁾で推定した値 (図中破線; 195.5 GPa) とほぼ一致していることが分かる。

3・3 破面観察

一例として、炭素繊維の疲労破壊および引張破壊破面

Fig. 10. Variation of tensile modulus against number of cycles.

(a) Fatigue fracture surface. (b) Fatigue fracture surface.
($\sigma_{\max} = 4161 \text{ MPa}$, $R = 0.5$, $N_f = 3.00 \times 10^3$) ($\sigma_{\max} = 3578 \text{ MPa}$, $R = 0.5$, $N_f = 9.99 \times 10^5$)

(c) Fatigue fracture surface. (d) Tensile fracture surface.
($\sigma_{\max} = 2957 \text{ MPa}$, $R = 0.1$, $N_f = 2.54 \times 10^6$) ($\sigma_t = 5200 \text{ MPa}$)

Fig. 11. SEM micrographs of fatigue and tensile fracture surfaces.

の SEM 写真を Fig. 11 に示す。Fig. 11(a) は低寿命、Fig. 11(b), (c) は高寿命での破面であり、Fig. 11(d) は引張試験での破面を示している。Fig. 11(a), (b), (c) に見るように、いずれの破面でも各図中の矢印で示す部分を中心として放射状に広がる凹凸の模様が観察される。こうした様相は Fig. 11(d) の引張試験での破面でも同様に観察される。このような破面様相から推察すると、破壊起点は繊維表面もしくは表面近傍であると考えられる。特に Fig. 11(c) では矢印部において表面にくぼみが観察され、この部分に応力集中が生じ破壊起点になったと考えられる。なお、本実験で得られたすべての疲労破面上では巨大な欠陥^{10), 11)}は観察されなかった。本実験で得られた疲労破面は殆どが Fig. 11(a), (b) に見るような破面様相となっているが、Fig. 11(c) に見るような特徴的な破面も得られている。Fig. 11(c) では破壊起点と想定される矢印の部分を中心にミラー、ミストおよびハックルというようにセラミックス材料の破面¹²⁾と同様に3つの領域に分けることができる。Fig. 11(a), (b) の破面に対してもこのことが当てはまるかどうかについては検討が必要であるが、このことは炭素繊維の場合もセラミックス材料と同様に破面形態と疲労強度の関連が議論できる可能性を示唆している。なお、破面形態と疲労強度の関連や静的および疲労破面の違い、また破面観察に基づく疲労破壊機構の考察については、より多数の破面の観察結果を蓄積し、繊維構造との関係^{11), 13)}を含めて明らかにしていく必要がある。現在、この点についての研究を継続して遂行しており、いずれ機会を得て報告したい。

4 結 言

本研究では PAN 系炭素繊維を用いて繊維単体の繰返し引張疲労試験を行い、 $S-N$ 特性について検討を加えた。得られた主な結論は次のとおりである。

(1) 最大荷重 $P_{\max}$ と破断繰返し数 N_f の関係では、同一荷重レベルにおいて破断繰返し数に大きなばらつきを生じる。これは本実験で用いた炭素繊維は繊維軸方向で断面形状が変化しており、同一荷重レベルの破断データであっても、個々の繊維で破断箇所の断面積が異なるため、繊維にかかる応力は同じではないことが原因である。このように断面形状の変化を有する炭素繊維の場合には $P_{\max}$ による疲労特性の評価は有効でない。

(2) 炭素繊維の $S-N$ 特性を最大応力 $\sigma_{\max}$ および応力振幅 σ_a をパラメータとして整理した場合、共に $S-N$ 曲線は右下がりの直線で近似でき明確な疲労挙動を示す。しかし、最大応力 $\sigma_{\max}$ を用いた場合は、応力比が小さくなるに従ってその直線は低強度側に位置し、応力振幅 σ_a を用いた場合には、逆に高強度側に位置することから、その $S-N$ 特性は応力比 R に依存する。また、各繰返し数での時間強度について、応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の関係から、炭素繊維の $S-N$ 特性を統制するには $\sigma_{\max}$ と σ_a または σ_a と σ_m のような2つの応力パラメータが必要である。

(3) 疲労強度のパラメータとして $\sigma_{\max}^{(1-\alpha)} \times \sigma_a^\alpha$ を用いた場合、各応力比における炭素繊維の $S-N$ 曲線は多少

のばらつきはあるものの1本の直線で表すことができ、炭素繊維のS-N特性を一義的に統制できる。また、 α ($=0.26$) の値からS-N特性は応力振幅 σ_a よりも最大応力 $\sigma_{\max}$ 依存性の方が大きい。

(4) 炭素繊維に繰返し引張荷重を加えても、本実験での繰返し数範囲内では引張弾性率は殆ど変化しない。

(5) SEMによる疲労破面の観察の結果、破壊起点が表面もしくはその近傍に存在することを示すような凹凸の様子が観察された。また、一部の疲労破面についてはセラミックスと同様にミラー部、ミスト部、ハックル部の3つの領域に分けることができる。

(平成11年5月8日 日本材料学会第48期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 島村昭治, “カーボンファイバ”, p.150 (1984) オーム社.
- 2) 奥田謙介, “炭素繊維と複合材料”, p.14 (1988) 共立出版.
- 3) 松井醇一, “炭素繊維の展開と評価方法”, p.52, p.108, p.176 (1989) リアライズ社.
- 4) 澤田吉裕, 濱田泰以, 材料, **46**, 204 (1997).
- 5) 田中道七, 中山英明, 境田彰芳, 堀川教世, 材料, **47**, 719 (1998).
- 6) 堀川教世, 中山英明, 境田彰芳, 田中道七, 材料, **48**, 956 (1999).
- 7) A. R. Bunsell and A. Somer, Plast. Rubber Compos. Process. Appl., **18**, 263 (1992).
- 8) 炭素材料学会編, “新・炭素材料入門”, p. 94 (1996) リアライズ社.
- 9) K. Walker, ASTM STP, **462**, 1 (1970).
- 10) J. B. Jones, J. B. Barr and R. E. Smith, J. Mater. Science, **15**, 2455 (1980).
- 11) 富岡紀夫, 鉄と鋼, **9**, 1418 (1989).
- 12) 田中道七, 境田彰芳, 日本機械学会論文集, A-**53**, 1566 (1986).