

直径方向の寸法効果を考慮した PBO 繊維の疲労強度特性

富山県立大 ○堀川教世

富山県立大

春山義夫

明石高専

境田彰芳

滋賀東北工技セ

今道高志

Fatigue Strength of PBO Fiber Considering Size Effect in the Diameter Direction

Noriyo HORIKAWA, Yoshio HARUYAMA, Akiyoshi SAKAIDA and Takashi IMAMICHI

1 緒 言

PBO (Poly-p-Phenylene Benzobisoxazole) 繊維は液晶紡糸法を用い、直線的な分子構造を持つ PBO の分子鎖を高配向させて得られた高強度・高弾性率繊維であるが、実用化されて間もないため、その特性に関しては十分に明らかにされていない部分もある。こうしたことから著者らは従来より PBO 繊維に着目し、一連の研究を行ってきており、現在までに PBO 繊維の直径にはばらつきがあること、また、引張強度に対して直径方向に寸法効果を示すこと、さらに、疲労寿命は応力比が異なった場合でも、若干のばらつきはあるものの最大応力により一義的に統制できることを示してきた¹⁾。前報¹⁾では直径のばらつきを含めた実用的なデータを得るために、繊維束から繊維を無作為に抽出して実験を行ってきたが、この場合、直径が一定でないため直径方向の寸法効果が疲労強度にばらつきの要因として含まれることになる。そこで、本報では PBO 繊維の疲労挙動をより詳細に明らかにするために、前報¹⁾の結果を用いて、直径方向の寸法効果を考慮した PBO 繊維の疲労強度について検討を行った。

2 実験方法

2.1 供試材料および試験片 実験には高弾性率タイプの PBO 繊維（ザイロン[®]-HM、東洋紡）を用いた。繊維の直径は非常に細いことから、試験片は JIS R7601 を参考にし、Fig. 1 に示す長方形の厚紙にエポキシ系の接着剤を用いて繊維を固定したものを使用した。ゲージ長さは 12.5 mm とした。なお、PBO 繊維は紫外線や可視光により劣化し強度低下を起こすため、試験片の作製は紫外線を遮断した部屋で行い、接着剤が乾燥するまで暗室で保管した。

2.2 単繊維引張試験および疲労試験 単繊維の引張試験には小型引張試験機を用い、引張速度は 0.5 mm/min

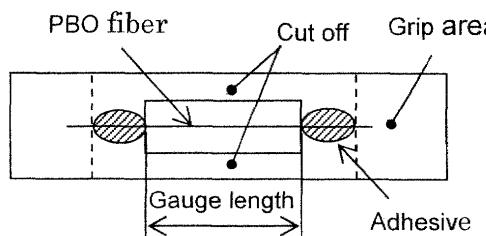


Fig. 1 Single fiber testing tab for tensile and fatigue tests.

とした。なお、破断荷重のばらつきを考慮し、試験片本数は 40 本とした。単繊維の疲労試験には電磁力式疲労試験機（島津製作所製、容量 10 N）を使用した。試験は正弦波荷重下において、荷重制御で行い、周波数 $f = 10$ Hz、応力比 $R = 0.1, 0.5, 0.7$ の 3 条件で行い、 10^7 回で実験を打ち切った。また、試験の際は試験機全体を黒いシートで覆い遮光して行った。

3 実験結果および考察

3.1 引張強度に対する直径方向の寸法効果 Fig. 2 に単繊維の引張試験結果を示す。縦軸は引張強度、横軸は繊維直径であり、実線はデータを最小二乗法で直線回帰したものである。図より、PBO 繊維の直径は約 9~13 μm の範囲でばらつきがあり、繊維直径は一定でないことが分かる。引張強度は繊維直径が小さくなるに従い高くなる傾向にあり、直径方向に明確な寸法効果が見受けられる。紡糸された繊維は表面から急速に凝固するが、こうした直径のばらつきや寸法効果は、その際の微小な外乱による凝固速度や延伸の差により生じると考えられる。

3.2 S-N 特性 Fig. 3 に単繊維の疲労試験結果を示す。図の縦軸は応力振幅 σ_a 、横軸は破断繰返し数 N_f であり、○、△、□はそれぞれ応力比 $R = 0.1, 0.5, 0.7$ のデータを示している。図中の実線、破線、一点鎖線は各応力比のデータに対して最小二乗法を用い直線回帰したものである。図より、各応力比におけるデータはばらつきはあるものの、片対数線図上で右下がりの直線で近似できることが分かる。また、同一寿命における時間強度は応

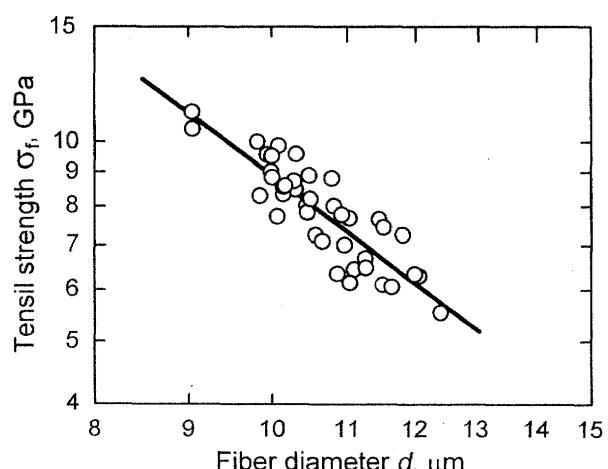


Fig. 2 Effect of the fiber diameter on the tensile strength of high-modulus type PBO fiber.

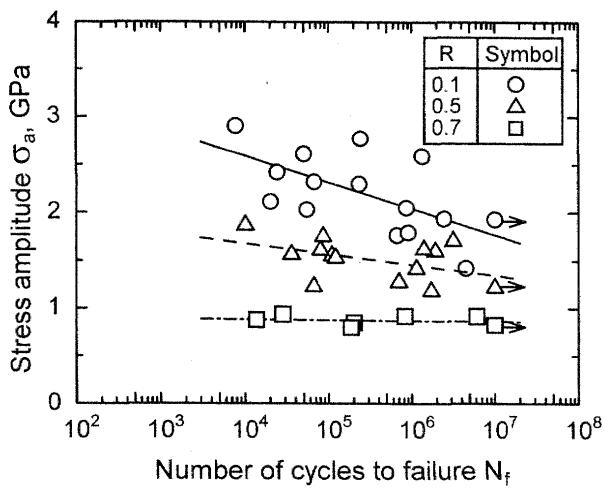


Fig. 3 S-N curves plotted stress amplitude in ordinate for high-modulus type PBO fiber.

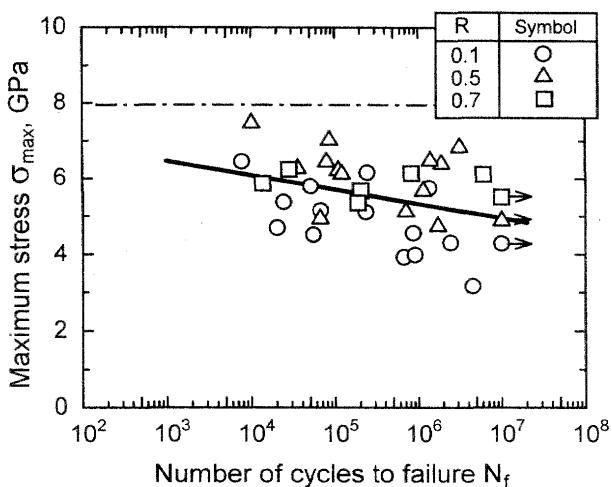


Fig. 4 S-N curves plotted maximum stress in ordinate for high-modulus type PBO fiber.

力比の増加に伴い低くなっていることから、PBO 繊維の疲労寿命は応力振幅 σ_a で整理した場合には明確な応力比依存性を示すことが分かる。

Fig. 4 に最大応力で整理した場合の単纖維の疲労試験結果を示す。図の縦軸は最大応力 σ_{max} 、横軸は破断繰返し数 N_f であり、図中の○、△、□はそれぞれ応力比 $R = 0.1, 0.5, 0.7$ のデータを示している。実線は全データに対して最小二乗法を用い直線回帰したものであり、一点鎖線は単纖維の引張試験より得られた引張強度の平均値 (7.95 GPa) を示している。図より、各応力比におけるデータはばらつきがあるものの、重なるように分布しており、実線で示すように片対数線図上ではほぼ直線関係が成り立っていることが分かる。このことから最大応力は PBO 繊維の疲労寿命を一義に統制できる有効なパラメータであると考えられる。

3.3 直径方向の寸法効果を考慮した S-N 特性

Fig. 4 の結果は纖維生産時における直径のばらつきを含んだデ

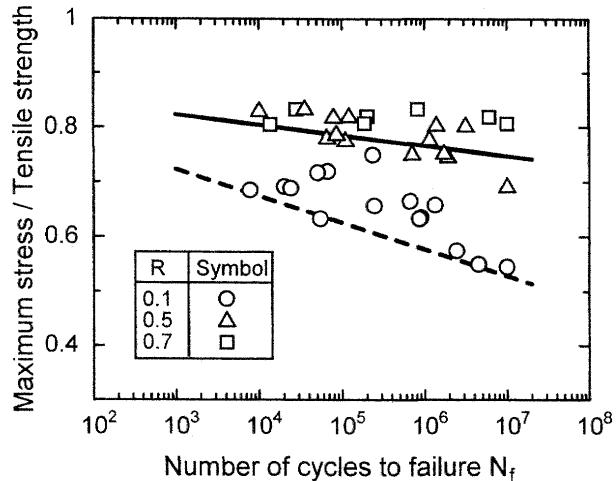


Fig. 5 S-N curves of high-modulus type PBO fiber considering size effect in fiber diameter.

ータであるため、単纖維の特性のばらつきや纖維束以外の形態での使用に際する基礎データとして有益である。しかしながら、纖維束から纖維を無作為に抽出した実験データであるため纖維直径が一定でなく、直径方向の寸法効果がばらつきの要因として含まれている。単纖維としての厳密な評価を行うには、直径方向の寸法効果を考慮する必要がある。そこで、本報では直径方向の寸法効果を考慮するために、まず、疲労試験で使用した個々の纖維の直径を Fig. 2 の直線に代入し、その纖維の引張強度を計算した。次に、個々の纖維に対して、その引張強度で Fig. 4 の最大応力 σ_{max} を除し、疲労試験で実際に与えたと考えられる負荷の割合を求めた。Fig. 5 にその結果を示す。縦軸は疲労試験で纖維に与えた負荷の割合、横軸は破断繰返し数 N_f である。図より、応力比 $R = 0.5, 0.7$ のデータは重なるように分布しているが、応力比 $R = 0.1$ のデータは明確に低強度側に位置していることが受けられる。このことから、PBO 繊維の疲労挙動は高い応力比では主として最大応力支配型の挙動を示すが、低応力比条件下では最大応力支配型から外れる傾向を示すことが分かる。高分子纖維の疲労は、非晶部の損傷、非晶部の分子の引き揃え、タイ分子の切断、マクロな損傷の順に進むといわれており、低応力比では非晶部の分子の引き揃えが比較的早く起こるためこのような疲労挙動を示すと考えられる。

4 結言

- 1) 引張強度は直径方向に対して明確な寸法効果を示す。
- 2) 直径方向の寸法効果を考慮しない場合、最大応力は疲労寿命を一義に統制できる有効なパラメータである。
- 3) 直径方向の寸法効果を考慮した場合、低応力比での疲労挙動は最大応力支配型から外れる。

謝辞

使用した PBO 繊維は野村幸弘氏、北河享氏を通じて東洋紡績（株）から提供頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 堀川教世 他 7 名, 材料, 掲載決定。