高弾性率 PBO 繊維のクリープ破断特性

Creep Rupture Property of a High-modulus Type PBO Fiber

○学 中川 和則 (富山県立大学・院) 正 堀川 教世 (富山県立大学)
 正 春山 義夫 (富山県立大学) 正 境田 彰芳 (明石工業高等専門学校)
 正 今道 高志 (滋賀県東北部工業技術センター)

Kazunori NAKAGAWA, Toyama Prefectural University, Kurokawa, Imizu-shi, Toyama
 Noriyo HORIKAWA, Toyama Prefectural University, Kurokawa, Imizu-shi, Toyama
 Yoshio HARUYAMA, Toyama Prefectural University, Kurokawa, Imizu-shi, Toyama
 Akiyoshi SAKAIDA, Akashi National College of Technology, Nishioka, Uozumi-cho, Akashi-shi, Hyogo
 Takashi IMAMICHI, North Eastern Industrial Research Center of Shiga Prefecture, Okamachi, Hikone-shi, Shiga

Key Words: High Polymer Materials, PBO Fiber, Creep, Size Effect

1. 緒言

近年実用化された PBO (Poly-*p*-Phenylene Benzobisoxazole) 繊維は炭素繊維の約 1.6 倍, アラミド繊維の約 2 倍の強度を有し, さらに, 耐熱性, 難燃性に優れることから既存の繊維材料に代わるものとして期待されている。現在のところ実用化されて間もないため, 十分に明らかにされていない特性もあり, 様々な研究が行なわれている。

著者らは従来から高性能繊維の開発に必要な知見を得るために, PBO 繊維 (単繊維) の繰返し荷重下における疲労強度特性に関する研究を行なって来ており, 現在までに, PBO 繊維の疲労強度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⁾。本研究では PBO 繊維の疲労挙動をより詳細に明らかにするために, 単繊維のクリープ試験を行い, クリープ強度を明らかにするとともに, 繰返し荷重下における疲労強度データと比較することにより, 上述のばらつきの原因について検討を行った。

2. 実験方法

2-1 試験片

供試材料は市販の高弾性率タイプの PBO 繊維 (ザイロン® HM, 東洋紡製) を用いた。繊維は繊維束の状態で供給されているため, 試験片の準備の際には, そこから繊維を 1 本ずつ取り出した。図 1 に試験片形状を示す。タブの両端には重りを吊り下げるための穴が開けられており, 繊維はくり抜かれた紙製タブ中央の両側にエポキシ系の接着剤で固定した。ゲージ長さは著者らが今までに行った疲労試験¹⁾と同様に 12.5 mm とした。また, 試験片作製後は暗所に保管した。

2-2 クリープ試験機

図 2 に自作したクリープ試験機を示す。この試験機は両側の柱に試験片を吊るすための梁が取り付けられており, 手前と奥で 2 本の梁がある。各梁には試験片を吊るすためのピンが 9 個取り付けられており, 同時に 18 個の試験が可能とな

っている。繊維に負荷する荷重は, 試験片をピンに吊るした後, タブの両側を切断し, その後, 重りを吊るして荷重負荷を行うようになっている。繊維が破断すると金属製の重りが直下の近接センサーに接触し, 破断時間を計測するためのタイムカウンターが止まる仕組みとなっている。なお, PBO 繊維は紫外線により強度低下を引き起こすことが報告されているため²⁾, クリープ試験中は試験機全体を黒いシートで覆うようになっている。

2-3 クリープ試験方法

クリープ試験の荷重レベルを決めるために, 準備試験としてゲージ長さ 12.5 mm で引張試験 (試験片本数 40 本) を行った。その結果, 破断荷重の平均値は 699 mN (標準偏差 59 mN) であった。このため, クリープ試験の荷重レベルはこの平均値を基準とし, 平均値の 85, 80, 75 % の 3 レベルで負荷を行った。試験片の本数は 85, 80, 75 % の荷重レベルに対してそれぞれ 9, 19, 17 本とした。

クリープ試験開始の際は, 試験片作製時における繊維の振れを取るためにピンに吊るした後タブの両側を切断し, 10 分間無負荷の状態にした。荷重負荷の際, 破断時間が 2 s 以内のデータは, 荷重負荷中に破断したと考えられ破断荷重が明確ではないためデータとして採用しなかった。また, 接着端部で破壊した試験片については, 破壊メカニズムがゲージ間内のものであるためデータとして採用しなかった。直径の測定については, 準備試験 (引張試験) およびクリープ試験のいずれにおいても SEM を用いたが, 電子線の熱による繊維表面への損傷を避けるため観察は実験後に行った。

3. 実験結果および考察

図 3 にクリープ試験の結果を示す。図の縦軸は負荷応力, 横軸は破断時間であり, 図中の実線はデータを最小 2 乗法により直線近似したものである。図より, 直線は右下がりの傾

Fig. 1 Paper tab for creep test.

Fig. 2 Creep testing machine for single fiber.

Fig. 3 Creep rupture curve of high-modulus type PBO fiber.

Fig. 4 Effect of the fiber diameter on the tensile strength of high-modulus type PBO fiber.

向を示すものの、寿命のばらつきは非常に大きいことが見受けられる。このばらつきの原因については次のようなことが考えられる。炭素繊維や高強度高分子繊維では、繊維の直径にはばらつきがあり、その引張強度は繊維長さ（ゲージ長さ）と繊維直径の双方に依存性を示すことが多いが、強度評価の際には、実用性を考えて一定の繊維長さ（ゲージ長さ）で評価される場合が多い。しかしながら、繊維長さが同じでも直径が異なる場合には、得られる強度には直径方向の寸法効果が含まれるために厳密な強度評価を行ったことにならない。

図4にクリープ試験の荷重レベルを決めるために準備試験として行ったゲージ長さ 12.5 mm で引張試験の結果を示す。直径方向の寸法効果を見るために、縦軸は引張強度、横軸は繊維直径としている。図より、引張強度は繊維直径が小さくなるに従い増加傾向にあり、直径方向に明確な寸法効果が見受けられる。図3におけるクリープ寿命のばらつきは、直径の違いにより生じた強度の寸法効果によるものと推察され、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、本研究では直径方向の寸法効果を考慮するために、まず、クリープ試験に用いた繊維の直径を図4の回帰直線に代入して、その直径における引張強度を求めた。次に、求めた引張強度でクリープ試験時の負荷応力を除し、実際の繊維に与えた負荷の割合を求めた。

図5にクリープ試験の負荷応力を個々の繊維の直径相当の引張強度で除した値と破断時間の関係を示す。図中の太線はデータを直線近似したものである。図より、直径方向の寸法効果を考慮し、実際に繊維に与えた負荷率で整理することで、データ（○）のばらつきは幾分小さくなっていることが分かる。また、比較のため、図6に繰返し荷重下における疲労試験結果¹⁾、図5にクリープ結果と同様の方法で繊維の直径を図4の直線に代入し、その直径における引張強度を求め、引

Fig. 5 Creep rupture curve with size effect in fiber diameter.

Fig. 6 S-N curves of high-modulus type PBO fiber.

張強度で負荷応力（最大応力）を除し、実際の繊維に与えた負荷の割合を求めたものを示す。なお、疲労試験は周波数 10 Hz の正弦波荷重下において、応力比 $R=0.1, 0.5, 0.7$ で行ったものであり、破断時間は破断繰返し数を周波数で除して求めている。図6より応力比 0.1 において若干のばらつきが見られるものの、疲労強度は応力比によらず最大応力により一義的に統制できている。なお、このデータは生産時における直径のばらつきを含んだデータであるため、繊維束にした場合のデータを推定する際の基礎データとして優れている。しかしながら、図5ではクリープ試験結果は応力比 0.5, 0.7 の結果と変わらないが、応力比 0.1 のデータは明確に低強度側に位置していることが見受けられる。このことから、PBO 繊維の疲労挙動は比較的高い応力比では主として最大応力支配型の破壊挙動を示すが、低応力比条件下では厳密には疲労強度は最大応力支配型の破壊から外れる。

4. 結言

- 1) 直径方向の寸法効果を考慮するために実際に繊維に与えた負荷率で整理することで、クリープ強度のデータのばらつきは小さくなる。
- 2) 直径方向の寸法効果を考慮した疲労試験データと比較した結果、クリープ試験結果は応力比 0.5, 0.7 のデータと変わらないが、応力比 0.1 のデータは明確に低強度側に位置しており、高応力振幅下では最大応力支配型の破壊から外れる。

謝辞

実験に使用した PBO 繊維は野村幸弘氏、北河享氏を通じて東洋紡績（株）からご提供いただいたものである。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 堀川教世 他 7 名, 材料, 投稿中。
- 2) “Technical information (Revised 2005.6)”, p. 12 (2005) TOYOBOKO CO., LTD.