熱可塑性 CFRTP の疲労強度に及ぼす炭素繊維 含有率, 試験温度および切欠半径の影響*

村上 理一^{*1}, 柘田 右文^{*2}, 野々村 俊夫^{*3}

The Effects of Content of Carbon Fiber, Test Temperature and Notch Radius on Fatigue Strength of CFRTP

Ri-ichi MURAKAMI, Migifumi MASUDA and Toshio NONOMURA

For CFRTP of short carbon fibers in a resin matrix of polyacetal, the effects of carbon fiber content, temperature and notch radius on fatigue behavior have been investigated. Fatigue strength increases with increasing carbon fiber content and decreases with increasing test temperature. Logarithm of fatigue strength for CFRTP with 30% fiber content is proportional to the reciprocal of temperature, $1/T$. However, the fatigue strength of CFRTP depends little on the notch radius.

Key Words: Fatigue Strength, CFRTP, Fiber Content, Temperature, Notch Effect

1. 緒 言

炭素繊維強化複合材料は、エポキシ樹脂に PAN 系の炭素繊維を配合し、一体成形によって部材に仕上げられることが多い。この炭素繊維を PAN 系およびピッチ系に変えた CFRP について、引張破壊挙動および疲労挙動に及ぼす硬化剤、試験温度および切欠半径 ρ の影響が著者ら⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾によって調べられた。ピッチ系 CFRP の切欠引張強度は破壊形態を反映して試験温度 T に大きく影響され⁽¹⁾, その破壊形態は切欠半径 ρ の逆数 $1/\rho-T$ の関係によって規定される⁽²⁾。この材料の疲労強度は繊維の配合によって強化され、繰返し応力による強度低下はエポキシほど大きくない⁽³⁾。一方、PAN 系 CFRP の疲労強度は繰返し応力によってあまり低下せず、ピッチ系 CFRP のそれよりもかなり高い⁽⁴⁾。このように熱硬化性 CFRP は多くの優れた機能を持つが、成形に要する設備や経費がかさむことなどに成形に多くの経験が必要であることなどのため

に、構造部材として使用するには費用の面からの制約がある。

これを克服するため、熱可塑性プラスチックに炭素繊維を配合した CFRTP が開発されている。これには従来の射出成形技術が使用でき、安価で品質の良い部品を製造できる可能性がある。この熱可塑性樹脂を母相とした複合材料の耐熱性を研究した松井⁽⁵⁾はガラス遷移温度が破壊形態を支配することを明らかにした。また村上⁽⁶⁾はポリカーボネートにガラス繊維を配向した材料の疲労き裂成長挙動を調べ、試験温度が上がると強化繊維の効果が変化することを示した。しかし、熱可塑性プラスチックに繊維を配合した複合材料を対象にした研究は GFRP がほとんどで⁽⁷⁾, CFRTP についてあまりなされていないのが現状である。

そこで、本研究では、ポリアセタールに PAN 系短炭素繊維を 0, 15 および 30 重量 % 配合して射出成形した CFRTP の基本的な疲労挙動を明らかにするために応力振幅、試験温度および切欠半径を変えて疲労試験を行い、その疲労強度に及ぼす炭素繊維含有率試験温度および切欠半径の影響を検討した。

* 原稿受付 平成 3 年 5 月 24 日。

^{*1} 正員、徳島大学工業短期大学部 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)。

^{*2} 正員、ファコム・ハイタック(株) (〒102 東京都千代田区九段南 2-3-1)。

^{*3} 正員、徳島県立工業技術センター (〒770 徳島市雑賀町西開 1-2)。

2. 材料および実験方法

実験に供した材料は、PAN 系短炭素繊維（東邦レーヨン製、ベスファイト）を強化材として、それを 15 および 30 重量 % に変えてポリアセタールにランダムに配合して射出成形した CFRTP（以下これらを CF 15 および CF 30 と呼ぶ）である。また実験にはポリアセタール単体（以下 CF 0 と呼ぶ）も用いた。

引張試験はインストロン引張試験機を用いて行い、約 20°C の大気中において引張強度および引張弾性率を炭素繊維含有率 0, 15 および 30% について求めた。また、CF 30 について、試験温度を 40, 60, 100 および 120°C に変えて引張強度および引張弾性率を求めた。

平面曲げ疲労試験は図 1 に示す 2 種類の疲労試験片について、島津万能疲労試験機 UF-15 を用いて繰返し速度を 30 Hz と一定に保った両振り荷重下で、応力振幅を変えて行った。CF 30 の平滑疲労試験片について、試験温度が 30~250°C の範囲にわたって $\pm 3^\circ\text{C}$ の精度で制御できる熱風吹付け方式の雰囲気炉の中で試験温度を 20, 30, 40, 60, 80 および 100°C の 6 種類に変えて疲労試験した。さらに、この材料について、約 20°C の大気中において切欠半径 ρ を 0.4, 1.2 および 2.0 mm に変えた両側切欠試験片の疲労試験も行った。これらの切欠きに対する応力集中係数は、それぞれ 2.61, 1.78 および 1.54 である⁽⁹⁾。

疲労破面観察は SEM を用いて行った。

図 1 CFRTP の疲労試験片

3. 引張試験結果

試験温度が約 20°C の場合、炭素繊維含有率を変えたときの引張強度および引張弾性率の変化を図 2 に示した。引張強度および引張弾性率のいずれも炭素繊維含有率の増加に伴って大きくなるが、前者はほぼ複合則にしたがって直線的に増加するのに対して後者はわずかに複合則からずれている。これは CF 15 の引張弾性率が所定の値よりわずかに小さいことによる。図 3 は CF 30 の引張強度および引張弾性率に及ぼす試験温度の影響を示す。試験温度の増加に伴う引張強度および引張弾性率の低下はほぼ直線的である。ポリアセタールの引張強さは温度に対してほぼ直線的に低下することが知られている⁽⁹⁾。このようなポリアセタールの温度に対する性質の変化が図 3 の結果に大きく反映していると考えられる。

4. 実験結果および考察

4.1 炭素繊維含有率の影響 炭素繊維含有率を 0, 15 および 30% に変えた CFRTP について、約

図 2 引張強度および引張弾性率と炭素含有率の関係

図 3 引張強度および引張弾性率と試験温度の関係

20°Cの大気中における疲労強度に対する破断までの繰返し数の関係を図4に示す。CF 30 はいずれの応力レベルでも疲労破壊したのに対し、CF 0 および CF 15 は、応力振幅がかなり低い場合を除いて疲労破壊しなかった。この場合、応力の繰返しに伴って変形量が増大し、試験機の許容範囲 $\pm 8 \text{ mm}$ を超えるので、この変位に達したときの繰返し数を試験片の破断とみなした。図中の白抜き印は試験片の変位が $\pm 8 \text{ mm}$ に達したときの繰返し数を示す。疲労強度は、炭素繊維の

図4 CFRTFのS-N曲線

図5 疲労強度と炭素繊維含有率の関係

図6 強度比 σ_a/σ_B と繰返し数の関係

配合によって直線的に増加する。このことは、繰返し数が 10^4 , 10^5 および 10^6 回での疲労強度を炭素含有率に対して表示した図5からよくわかる。次に、引張強度に対する応力振幅の比をもとにして図4を整理し直すと、図6のようになる。ポリアセタールを除いて、炭素繊維含有率による疲労強度の変化は引張強度によってほぼ一つの曲線にまとめられる。これはポリエステルをガラス繊維で強化したGFRPの結果⁽¹⁰⁾とも同じである。

ところで、CF 0 および CF 15 のほとんどは剛性低下を示して疲労破壊しなかった。そこで、この試験片について引張試験を行い、疲労後の引張強度 σ_{res} を求めた。この値を静的引張強度 σ_B で割り、繰返し数に対して表示したものが図7である。CF 0 では、繰返し数が約 4×10^5 回以下では σ_{res} の値は σ_B の約96%であり、一方、CF 15 では、約 5×10^4 回以下において多少のばらつきであるが、 σ_{res}/σ_B の値は約0.94とほぼ一定である。このことは低サイクル域での応力の繰返しは試験片の変位の増加、すなわち剛性を低下させるが、引張強度の低下にほとんど影響しないことを示している。一方、応力振幅が低下して高サイクル域になれば、 σ_{res}/σ_B の値が次第に減少し、この材料にも疲労劣化が生じる。事実、CF 0 では、応力振幅が $\sigma_a = 27.9 \text{ MPa}$ 、CF 15 では、 $\sigma_a = 34.9 \text{ MPa}$ 以下の応力振幅において、

図7 残留強度比 σ_{res}/σ_B と繰返し数の関係

図8 疲労強度に及ぼす試験温度の影響

それぞれ疲労破壊した。

4・2 疲労強度に及ぼす試験温度の影響 CF 30 について試験温度を 20, 30, 40, 60, 80 および 100°C に変えたときの $S-N$ 曲線を図 8 に示す。疲労強度は試験温度 T が高いほど著しく低下した。このとき、繰返し数の増加に伴う変位の増大もみられた。これは $N_f=10^4$ 回および 5×10^4 回における疲労強度の対数を $1/T$ に対して表示した図 9 からよくわかる。すなわち、疲労強度は繰返し数に関係なく、試験温度の逆数に比例して大きくなる。ここでの試験温度の範囲において、炭素繊維の機械的性質はほとんど温度に影響されない⁽¹¹⁾ ので、CF 30 の疲労強度の低下は、図 3 に示したように試験温度の上昇に伴うポリアセタールの粘性流動の増大に起因したものと考えられる。

4・3 疲労強度に及ぼす切欠半径の影響 CF 30 について、切欠半径を 0.4, 1.2, 2.0 および 40 mm の 4 種類に変えたときの $S-N$ 曲線を図 10 に示す。 $\rho=40$ mm の $S-N$ 曲線に比べて、切欠半径を小さいときの $S-N$ 曲線はわずかに低い。しかし切欠試験片の応力集中係数は 1.54 から 2.61 まで変わっているにもかかわらず、それらの $S-N$ 曲線の間に大きな差異はなく、疲労強度は機械加工による切欠きに対して不敏感であると言える。同様な結果は、著者ら⁽³⁾ によってエポキシにピッチ系短炭素繊維を配合した CFRP について報告されている。このようにプラスチックの中に

図 9 疲労強度と試験温度の逆数 ($1/T$) の関係

図 10 疲労強度に及ぼす切欠半径の影響

短繊維をランダムに配合した場合、配合した炭素繊維が母相中において変形を拘束するために繊維の不連続部である繊維端および繊維が互いに交差した個所が微視的な応力集中源となる。これらの応力集中源は局所的な応力の不均一をもたらすであろう。この材料に固有な微視的な応力集中が機械加工で導入した切欠きによる巨視的な応力集中に加わるために切欠先端前方において繊維の引き抜きまたは繊維のはく離が優先的に起こり、このような疲労損傷領域がある程度の大きさになると、炭素繊維が破断して巨視的な疲労き裂に発達する。このように考えると、この材料の疲労強度が機械加工による切欠きに対してあまり敏感でないことが説明できる。

5. フラクトグラフィの結果と考察

室温・大気中で試験したときの CF 0, CF 15 および CF 30 の疲労破面の一例を図 11 に示す。いずれも疲労

(a) The fracture appearance of CF0, $\sigma_a=27.9$ MPa.

(b) The fracture appearance of CF15, $\sigma_a=34.5$ MPa.

(c) The fracture appearance of CF30, $\sigma_a=52.3$ MPa.

図 11 CF RTP の疲労破面様相

破壊を起こした試験片の疲労破面を観察した結果である。CF 0 では、破面は比較的滑らかで、一部にストライエーション状模様も認められた。CF 15 の疲労破面では、炭素繊維の引き抜きが生じた痕跡である穴や繊維の切断が認められた。CF 30 では、この傾向がさらに顕著になった。このことは図 12 に示した CF 30 の引張破面の様子と比べればよくわかる。引張破面には疲労破面に認められた繊維の引き抜き跡の穴はほとんど見られず、繊維が破面に横たわった様相になっていることが大きな特徴である。次に疲労破壊を起こした CF 30 について、応力振幅が破面様相に与える影響を見ると、図 13 のように応力振幅の増加に伴い、破面の粗さは増加して繊維の引き抜きが顕著になり、破面に見られる繊維長は長く、その痕跡である引き抜け穴の大きさは繊維のそれにほぼ等しい。しかし低応力振幅領域では引き抜け穴の直径は繊維径よりも大きくなる傾向にある。

図 14 は破面様相に及ぼす試験温度の影響を示したものである。試験温度が 40°C までは基本的な破面様相は図 11 および図 13 とほとんど同じである。しかし試験温度が 60°C 以上になると母相のポリアセタールの粘度が増加するので、母相が大きく変形したことを示す痕跡が認められるとともに繊維の引き抜きも顕著になっている。図 15 は切欠試験片の破面様相を示したものである。図から明らかなように、切欠先端近傍においても繊維の引き抜きや繊維の破断が生じており、破

面様相は切欠きの有無とほとんど無関係である。

以上の結果から、CFRTP において応力繰返しによって、まず疲労損傷が材料固有の微視的な応力集中源である炭素繊維端、複数の繊維が交差している個所および繊維-母相界面の結合の弱い個所に集中し、繰返し数の増加につれてそれが母相に拡大する。このような疲労損傷がある領域にわたって生じると、炭素繊維が破断して明りょうな疲労き裂に発達する。応力振幅が大きい場合、炭素繊維は母相から容易に引き抜かれ、そのとき生じた引き抜け穴は繊維径とほとんど同じである。しかし応力振幅が低いと繊維は容易に引き抜けないので、繊維-母相界面に微小変形が繰返されることになる。この結果、繊維の界面結合が低下して少しずつ繊維が引き抜かれるようになる。このことは低応力振幅の場合に見られる繊維の引き抜け穴が大きいことから支持される。このような疲労損傷の過程は炭素繊維含有率の大小にかかわらずほとんど同じである。しかし試験温度が 20°C から 100°C まで上昇すると、母相のポリアセタールの引張強度は約 75% も減少するうえに粘度の増加も著しい⁽⁹⁾ ために、母相の繰返し変形は起こりやすくなり、その変形量も大きくなる。したがって、図 14 に示したように、試験温度の増加につれて、繊維と母相の界面結合は低下して炭素繊維は容易に引き抜けると同時に母相は著しく引き延ばされることになる。このような破壊様相の変化を反映して

図 12 CF 30 の引張破面様相

図 13 高応力振幅での CF 30 の疲労破面様相
($\sigma_a = 69.7$ MPa)

図 14 CF 30 の疲労破壊様相に及ぼす試験温度の影響
($\sigma_a = 34.7$ MPa, $T = 100^\circ\text{C}$)

図 15 CF 30 の疲労破壊様相に及ぼす切欠半径の影響
($\sigma_a = 50.2$ MPa, $\rho = 0.4$ mm.)

疲労強度が試験温度の増加とともに低下し, 変位の増大, すなわち剛性の低下を引き起こしたものと言える。

する不感受性は, 材料固有の微視的応力集中源である炭素繊維端や複数の炭素繊維の交差個所に, 優先的に疲労損傷が生じることと密接に関連している。

6. 結 言

- (1) 熱可塑性樹脂であるポリアセタールに短炭素繊維をランダムに配合することによって引張強度, 引張弾性率および疲労強度を高めることができた。
- (2) 低応力振幅領域を除いて, ポリアセタールおよび CF 15 は繰返し数の増加につれて繰返し変形量が増大し, 剛性率の低下を引き起こした。CF 30 はいずれの応力振幅でも疲労破壊を起こした。
- (3) CF 30 の疲労強度は試験温度の上昇につれて低下した。試験温度の増加に伴う疲労強度の低下は, 温度の上昇に伴うポリアセタルの粘度の増加および引張強さの低下を反映して母相の大きな変形と繊維の著しい引き抜きに起因していた。
- (4) CF 30 の疲労強度は切欠半径が小さくなってもほとんど低下しなかった。この疲労強度の切欠きに対

文 献

- (1) 金・ほか 4 名, 機論, 56-531, A(1991), 2248.
- (2) Kim, Y. H., ほか 2 名, *Proc. of KSME/JSME Joint Conf. Fract. & Str.*, '90, (1990), 170.
- (3) Murakami, R., ほか 4 名, *Proc. of Pacific/Asia Offshore Mech. Symp., PACOMS'90*, 3(1990), 149.
- (4) 村上・ほか 3 名, 日本材料学会第 39 期学術講演会前刷, (1990-5), 311.
- (5) 松井, 強化プラスチック, 34-10(1988), 428.
- (6) Murakami, R., ほか 3 名, *Fatigue & Fract. of Eng. Mat. & Struct.*, 10-6(1987), 461.
- (7) Karbhari, V. M. and Dolgoposky, A., *Proc. of 7th Int. Conf. on Composite Mat.*, 2(1989), 529.
- (8) Peterson, R. E., *Stress Concentration Design Factors*, (1965), 46, John Wiley & Sons, Inc.
- (9) 大柳, エンジニアリングプラスチック, (1985), 133, 森北出版.
- (10) 藤井・座古, 複合材料の破壊と力学, (1985), 154, 実教出版.
- (11) 大谷・ほか 2 名, 炭素繊維, (1986), 181, 近代編集社.