

熱可塑性 FRP の疲労評価・推定・診断に関する研究（第2報）

鈴木貴行*、千原健司*、山田孝弘*

Study on long-term durability in fatigue of fiber reinforced thermoplastics (II)

SUZUKI Takayuki*, CHIHARA Kenji* and YAMADA Takahiro*

熱可塑性 FRP は、マトリックス樹脂の物性が環境要因に応じて変化するため、疲労特性のデータベース化が困難である。第1報¹⁾では、熱可塑性 CFRP の基本的な疲労特性の評価方法を確認するために、PA6 と連続炭素繊維の織物からなる熱可塑性 FRP の引張疲労試験、及び両振り平面曲げ疲労試験を行い、引張疲労試験における課題、及び両振り平面曲げ疲労試験における結果のバラツキの改善方法について報告した。本報では、引き続き、引張疲労試験における試験片形状、及び両振り平面曲げ疲労試験における試験片の切断面の影響を検討した結果を報告する。

1. はじめに

樹脂に繊維を複合化させた繊維強化プラスチック（FRP : Fiber Reinforced Plastics）は、軽量かつ高強度なため、航空宇宙や自動車産業、スポーツ用途など様々な製品で活用されている。特に熱可塑性 FRP は加熱・冷却による短時間成形が可能のため、自動車部品などの生産性が重視される分野で、利用技術の研究開発が盛んに行われている。しかし、熱可塑性 FRP の利用にあたり重要となる疲労特性を把握することは困難であり、効率的な評価方法も確立されていない。これは、環境要因（温度、湿度、成形条件、試験条件など）に応じて熱可塑性 FRP の物性が変化するためである。このことを踏まえ、熱可塑性 FRP の効率的な疲労評価方法を確立することを目的に本研究を開始した。第1報¹⁾では、熱可塑性 FRP の基本的な評価方法を確認するために、PA6 と連続炭素繊維の織物からなる熱可塑性 FRP の引張疲労試験、及び両振り平面曲げ疲労試験を行った。その結果、引張疲労試験では、固定するチャック部付近で試験片が破断する課題（図1）が判明した。また、両振り平面曲げ疲労試験では、ダイヤフラム成形機を使用して試験片を加圧成形することで、疲労耐久性が改善することがわかった。本報では、引張疲労試験においてダンベル形状の試験片を用いることによるチャック部付近での破断防止効果の検討、及び両振り平面曲げ疲労試験において試験片作製時に発生する細かな傷の疲労耐久性への影響を検討した。

2. 実験

2.1 試験材料の加工方法

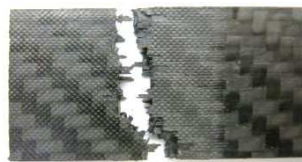
試験材料は、炭素繊維の 3K 綾織クロス材とマトリックス樹脂 PA6 を複合化した厚み 2mm の熱可塑性 CFRP（Bond-Laminate 製、TEPEX 202-C200(9)/50%）を用いた。試験寸法への切断は、ウォータージェット加工機（Flow International Corporation 製、FlowMach3 1313b-

XD）を使用し、#80 のガーネットを用いたアブレジブウォータージェット加工で全長方向が 0° 方向となるように切断した。また、両振り平面曲げ疲労試験で使用する試験片においては、傷の有無による試験結果への影響を確認するため、ウォータージェット加工機で切り出したままの状態の試験片と、研磨紙を用いて切断面を研磨した試験片を作製した。なお、研磨で使用した研磨紙は #320 から順に使用し、#2400 を仕上げとして用いた。また、研磨前後の断面をデジタルマイクロスコープ（キーエンス社製、VHX-1000）を用いて、撮影倍率 100 倍で撮影した。作製した試験片は十分に乾燥させた後、試験前に標準状態（温度 23℃、湿度 50%）で 48 時間以上静置した。

2.2 引張試験

引張試験は、JIS K 7164²⁾を基に行った。試験機は油圧チャック式の疲労試験機（Instron Corporation 製、8802 型、図2）を使用し、試験片寸法はタイプ 1B 系 A 型試験片（図3）とした。また、試験条件は、試験速度 10mm/min で n=3 の試験とし、標準状態（温度 23℃、湿度 50%）で試験を行った。

(a)



(b)



図1 チャック部付近での破断
(a) タブ無しでの試験時
(b) タブ有りでの試験時



図2 8802 型疲労試験機

*次世代技術部

2. 3 引張疲労試験

JIS K 7083³⁾を基に、引張疲労試験を行った。ただし、JIS K 7083 では、短冊状の試験片Ⅱ-A 形試験片を推奨しているが、本報ではチャック割れを防ぐために JIS K 7164 のタイプ 1B 系 A 型試験片 (図3) を用いた。試験機は、疲労試験機 (図2) を使用し、標準状態 (温度 23℃、湿度 50%) で $n=1$ の試験を行った。引張疲労試験は荷重制御で行い、試験荷重は 6.4kN、7kN、7.5kN、8kN とした。また、応力比は 0.1 とし、周波数 10Hz の正弦波で試験機を制御した。

2. 4 両振り平面曲げ疲労試験

JIS K 7082⁴⁾を基に、両振り平面曲げ疲労試験を行った。試験は疲労試験機 (図2) を使用し、標準状態 (温度 23℃、湿度 50%) で $n=1$ の試験を行った。試験片の形状は図4に示す寸法とした。制御は試験機のロードセル容量が大きく、繊細な荷重制御が困難であったため、位置制御の正弦波で行い、周波数は 0.9Hz とした。疲労試験後にロードセルで測定された繰り返し最大荷重を下記の式に代入することで応力振幅を計算した。

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot l}{b \cdot h^2}$$

σ : 応力振幅(MPa)

P : 荷重(N)

b : 試験片の破断幅(mm)

h : 試験片の厚み(mm)

l : つかみ部の支持点間長さ(mm)

位置制御で試験を行っており、試験荷重 (P) が変動するため、応力振幅の計算で用いる荷重は、繰り返し数が 1 サイクルから 10 サイクルまでの最大荷重の平均とした。計算により得られた応力振幅と破断までの繰り返し数をプロットし、グラフ (S-N 図) を作成した。S-N 図の X 軸は繰り返し数を対数で表記し、Y 軸は応力振幅とした。

2. 5 超音波探傷試験

超音波探傷装置 (日本クラウトクレマー製、SDS-Win6600R AM、図5) を使用し、両振り平面曲げ疲労試験前後の試験片を評価した。試験片は、応力振幅が 800MPa で繰り返し数が 223 回の時に破断したものと、最小幅での応力振幅が 636MPa で繰り返し回数が 1.7×10^6 回経過後に破断していないものを用いた。測定で使用した探触子は、径 0.25inch、周波数 10MHz、焦点距離 1.5inch とし、走査条件は 0.1mm ピッチで、走査速度は 100mm/sec とした。また、測定方法は水浸式内部監視法を用いた。評価ゲートは表面反射と底面反射の影響を避けるため、表面から 0.45mm から 1.75mm の範囲に設定した。結果は、反射の深さを表示する B スコープ図と反射の範囲を表示する C スコープ図で表示した。図中の色が濃いほど超音波の反射が強いことを表す。

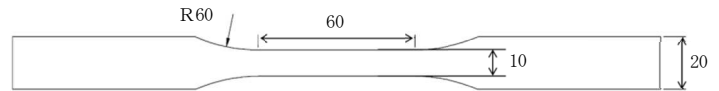


図3 タイプ1B系A型試験片

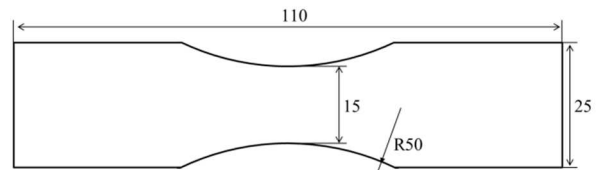


図4 両振り平面曲げ疲労試験の試験寸法



図5 超音波探傷装置

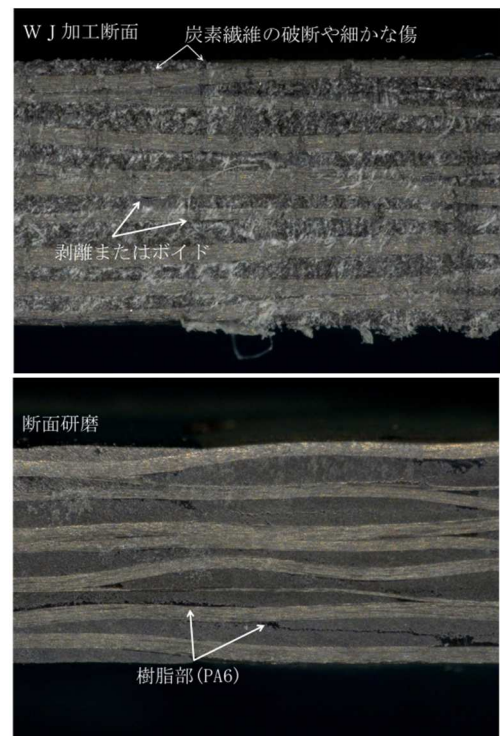


図6 上：WJ加工機で切り出した試験片の切断面
下：研磨後の試験片の切断面

3. 結果及び考察

3. 1 切断面観察

図6に WJ 加工機で切断した試験片の切断面写真と研磨後の切断面写真を示す。研磨前の試験片では、切断時に生じる細かな傷や炭素繊維の破断が生じているが、研磨品ではそれらが取り除かれていることがわかる。

3. 2 引張試験

引張試験の結果を表1に示す。応力は、試験荷重を試験前の断面積で除して計算した。引張破断応力は $n=3$ の平均値で 432MPa となり、標準偏差は 21.6 であった。また、図7に示す様に試験片の破断位置は、R 部と平行部の境目で起こっていた。これは、試験時に R 部と平行部の境目で応力が集中することによると推察できる。

3. 3 引張疲労試験

試験結果を表2に示す。応力は、繰返し最大荷重を試験前の断面積で除して計算し、これを用いて S-N 図を作成した(図8)。矢印が表記された試験に関しては、その繰返し数で破断が起らなかったことを示す。繰返し最大荷重を 8kN に設定した試験では試験荷重が 8kN に達する直前(7.8kN)に試験片が破断した(図9)ため、繰返し数を1回として図中に記載した。また、繰返し最大荷重が 7.5kN の試験では繰返し数が 5.7×10^4 回の時に試験片の破断が起こった。繰返し最大荷重が 6.4kN、及び 7kN の試験では、繰返し回数が時間の都合上で設定した回数に達しても破断が起らなかった。破断した試験片の破断位置は、引張試験と同様で、試験片の R 部と平行部の境目であり、チャック割れを起こすことはなかった。ダンベル形状の試験片を用いることで、チャック割れを起こすことなく引張疲労試験が行えることがわかった。

3. 4 両振り平面曲げ疲労試験

切断面を研磨した試験片での試験結果を図10に示す。なお、図10には第1報¹⁾で報告したウォータージェット加工機で切り出したままの状態の試験片(WJ 切り出し品)の試験結果とダイヤモンド成形機を用いて加圧成形を行った試験片(ダイヤモンド成形品)の試験結果を加えて記載している。切断面を研磨した試験片では、加圧成形を加えていないにも関わらず、応力振幅に対する繰返し数が最も多くなっていることがわかる。つまり、試験片の切断面に存在する細かな傷が疲労耐久性に大きく影響していることがわかった。

表1 引張試験結果

	破断荷重(kN)	応力(MPa)
試験片1	8.38	441.4
試験片2	8.55	447.5
試験片3	7.81	407.5
平均	8.25	432.1
標準偏差	0.39	21.6



図7 引張試験後の写真

表2 引張疲労試験の結果

設定荷重(kN)	8	7.5	7	6.4
最大荷重(kN)	7.8	7.5	7.0	6.4
繰返し回数	1	5.7×10^4	3.2×10^6 (破断せず)	1.0×10^7 (破断せず)
応力(MPa)	413	375	350	336

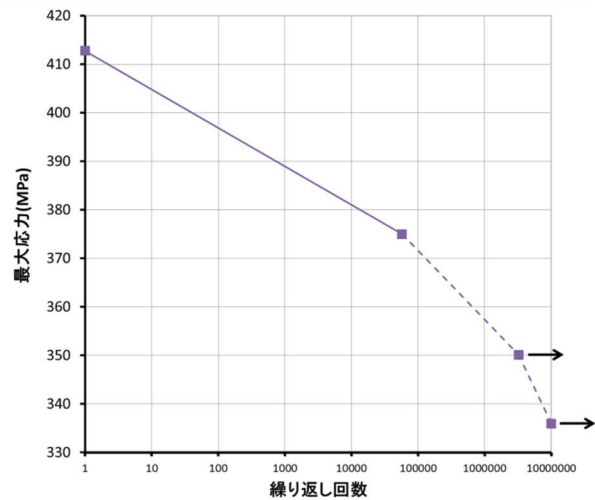


図8 引張疲労試験の S-N 図

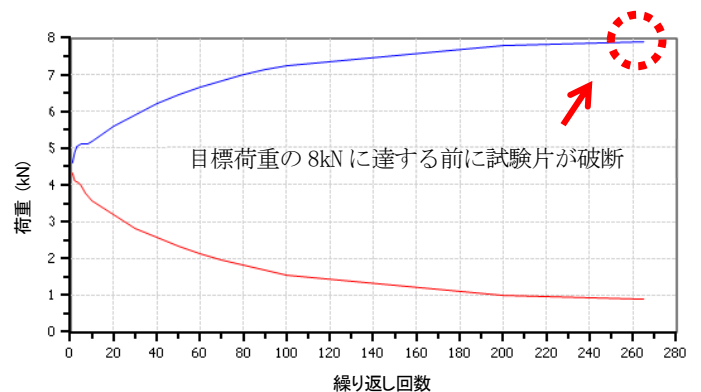


図9 最大荷重を 8kN に設定した際の荷重変化

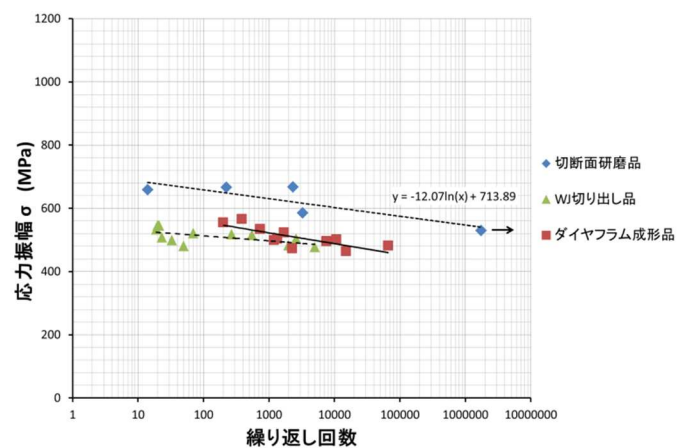


図10 両振り平面曲げ疲労試験の S-N 図

3. 5 超音波探傷試験

超音波探傷試験の結果を図11に示す。Cスコープ図に注目すると、両振り平面曲げ疲労試験前の試験片（図11(a)）では、試験片内部にある炭素繊維層の界面による弱い反射が確認できる。また、応力振幅が高い条件で試験を行い、繰り返し数が223回で破断した試験片（図11(b)）においても、強い反射は確認できず、疲労試験前の試験片と同様に試験片の内部にある炭素繊維層の界面による弱い反射のみを確認した。一方、応力振幅が低い条件で試験を行い、繰り返し数が 1.7×10^6 回でも破断が起らなかった試験片（図11(c)）では、試験片の中央部で強い反射が確認された。これは、層間剥離による反射と考えられる。この層間剥離は広範囲かつ局所的に発生しており、疲労試験時に曲げ荷重が掛かる範囲と一致している。曲げ荷重は、試験片中央部に均一に掛かり続けているが、試験片内部のボイドや炭素繊維の織目などの欠陥部分が局所的に存在するため（図12）、これを起点として層間剥離が進展し、局所的かつ広範囲で層間剥離が起こったと考えられる。また、応力振幅が800MPaと大きい条件では破断のみが起こり、応力振幅が636MPaと小さい条件では剥離のみが進展している。このことから、破断や亀裂が進展しないほどの小

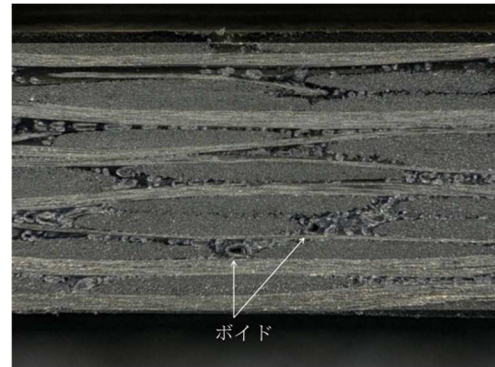


図12 ボイドが多くある試験片の断面図

さい応力振幅で疲労試験を行ったときに層間剥離が進展すると推察できる。一方、図11(c)のBスコープ図に注目すると応力の集中する表層付近に剥離が集中していることがわかる。表層に近い程、繰り返し時の引張、及び圧縮応力は大きくなるため、表層付近で層間剥離が多く発生したと考えられる。

4. まとめ

熱可塑性CFRPの引張疲労試験では、引張試験の規格JIS K 7083に記載のダンベル形状のタイプ1B系A型試験片を用いることで、チャック部付近の影響がない引張疲労試験を行うことができた。今後、試験片のR部や試験片寸法などの調整を行うことで試験片平行部の中央付近で破断が起こる試験条件を検討していく予定である。

熱可塑性CFRPの両振り平面曲げ疲労試験に関しては、以下のことがわかった。

1. 切断面の細かな傷が疲労耐久性に大きく影響する。
2. 応力振幅が大きい条件では、破断が起こる。
3. 応力振幅が小さい条件では、内部で層間剥離が進展する。

今後は、内部に存在するボイドの影響や様々な温度等による環境要因の違いによる疲労耐久性の比較等を行っていく予定である。

【参考文献】

- 1) 鈴木ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp59-62,2019
- 2) JIS K 7164 「プラスチック - 引張特性の試験方法 - 第4部：等方性及び異方性繊維強化プラスチックの試験条件」
- 3) JIS K 7083 「炭素繊維強化プラスチックの定荷重引張-引張疲れ試験」
- 4) JIS K 7082 「炭素繊維強化プラスチックの両振り平面曲げ疲れ試験方法」

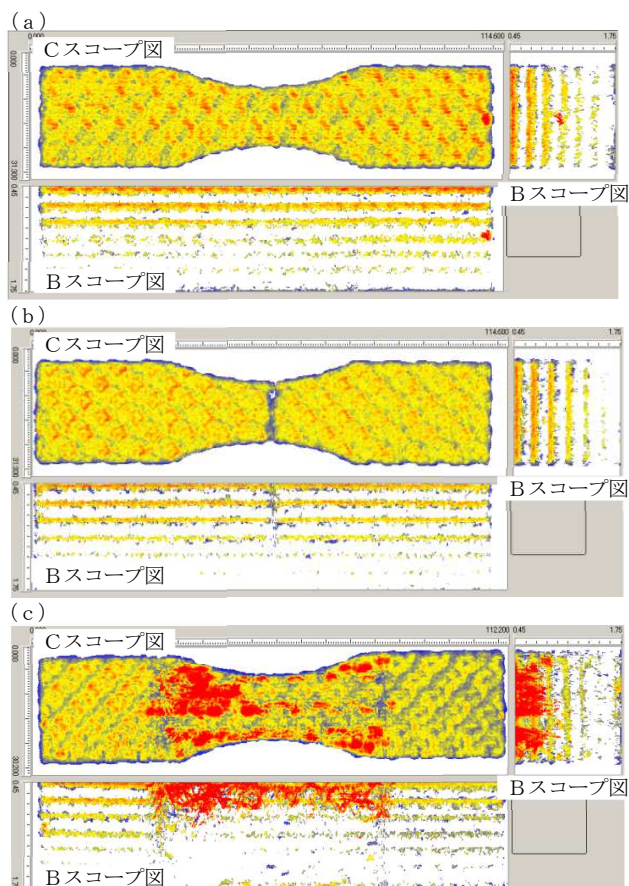


図11 超音波探傷によるBスコープ図とCスコープ図

- (a) : 疲労試験前の試験片
 (b) : 800MPa-223回の疲労試験後の試験片
 (c) : 636MPa- 1.7×10^6 回の疲労試験後の試験片