CFRP 積層板のモード II 層間はく離疲労き裂伝ばに及ぼす
荷重繰返し速度及び環境の影響*中井 善一^{*1}, 門脇 武利^{*2}, 日和 千秋^{*3}Effects of Frequency and Environment on Mode II Delamination
Fatigue Crack Growth in CFRP LaminatesYoshikazu NAKAI^{**}, Taketoshi KADOWAKI and Chiaki HIWA^{**} Kobe University, Dept. of Mechanical Engineering,
1-1, Rokkodai, Nada, Kobe, Hyogo, 657-8501 Japan

Mode II fatigue crack growth behaviors were investigated with two kinds of unidirectional carbon/epoxy laminates, M 40 J/2500 and T 300/3601, under constant ΔK_{II} conditions. The crack growth tests were conducted with end notched flexure (ENF) specimens. Tests were carried out from 1 to 20 Hz at a load ratio of 0.5 either in air or in water. In M 40 J/2500 laminates, either in air or in water, the crack propagation rate was almost constant with crack extension, and the crack growth was cycle-dependent. The crack propagation rate in air was almost identical to that in water. In T 300/3601 laminates, either in air or in water, the crack propagation rate was also constant with crack extension, and the crack growth was time-dependent. The crack propagation rate in water was faster than that in air, and it increased with prior-immersion period in water. The crack propagation rate at 70°C was slightly higher than that at 25°C.

Key Words: Delamination, Fatigue Crack Growth, CFRP Laminates, Mode II, Frequency Effect

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を代表とする複合材料は、比強度および比剛性が優れているため、特に軽量化が必要とされる航空宇宙分野で注目され、従来のアルミニウム合金に代わって使用されることが多くなっている。この CFRP 積層板においては、層間はく離が最も重要な破壊モードとして活発にその研究が行われてきたが、これまでの研究の多くは開口形のモード I き裂を対象としている^{(1)~(10)}。一方、せん断形のモード II き裂伝ばは、実用部材の重要な破壊モードであるにもかかわらず、その特性に関する研究は多くない^{(11)~(15)}。特に、実用上最も重要な、繰返し荷重下におけるモード II き裂の伝ば特性に関しては、研究が開始されてはいるが⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾、そのメカニズム及び影響因子は、十分には明らかになっていない。

そこで本研究では、端面切欠き曲げ(ENF: End notched flexure)試験片を用いて、CFRP 積層板の繰

返し荷重下でのモード II 層間はく離き裂伝ば試験を、大気中及び水中において行い、き裂伝ば挙動に及ぼす試験環境、試験温度、荷重繰返し速度の影響を明らかにした。

2. 実験方法

本研究に用いた材料は東レ製プリプレグ P9052-20(繊維含有率: 51 mass%, 繊維: M40J, 樹脂: #2500(130°C硬化型))を 46 枚積層, 成形したものと P3060-15(繊維含有率: 58 mass%, 繊維: T300, 樹脂: #3601(180°C硬化型))を 54 枚積層, 成型し, 板厚を 8 mm としたものである。積層板の弾性定数は、M40J/2500 積層板では、 $E_1 = 191$ GPa, $E_2 = 5.97$

Fig.1 Test specimen. (Dimensions in mm).

* 原稿受付 2000 年 2 月 1 日。

^{*1} 正員, 神戸大学工学部 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)。^{*2} 元: 神戸大学大学院自然科学研究科 [現: ダイハツ工業(株)]。^{*3} 正員, 神戸大学大学院自然科学研究科。

E-mail: nakai@mech.kobe-u.ac.jp

Fig. 2 Calibration curves.

GPa, $G_{12} = 3.63$ GPa, $\nu_{12} = 0.341$, T300/3601 積層板では, $E_1 = 135$ GPa, $E_2 = 8.16$ GPa, $G_{12} = 4.40$ GPa, $\nu_{12} = 0.30$ である。ここで, 添字の1は繊維方向, 2は板厚方向である。

試験片は, 図1に示した ENF 型であり, 支点間距離 145 mm, 板幅 20 mm である。成型時に厚さ 12 μm のテフロンフィルムを板厚中央の層間に挟み込み初期き裂とした。なお, き裂長さはき裂側の支点からき裂先端までの距離とした。初期き裂長さは 40~45 mm である。

本研究では ΔK_{II} 一定の疲労試験を行ったが, そのためには, き裂長さを自動的に測定する必要がある。そこで, 試験片のコンプライアンスよりき裂長さを測定した。き裂長さとコンプライアンスの関係を実験的に求めたところ, 図2に示したように, 次式で近似できた。

$$BE_1C = \alpha + \beta \left(\frac{a}{2H} \right)^3 \quad (1)$$

M40J/2500 積層板では, $\alpha = 2145$, $\beta = 3.69$, T300

Fig. 3 Effect of environment on crack growth of M40J/2500 laminates.

/3601 積層板では, $\alpha = 2298$, $\beta = 4.22$ であった。応力拡大係数は, 次式によって計算した⁽¹⁶⁾。

$$K_{II} = (G/\eta)^{1/2} \quad (2)$$

ここで,

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{\partial C}{\partial a} = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{3\beta}{2E_1 H} \left(\frac{a}{2H} \right)^2 \quad (3)$$

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{2E_1}} \left(\sqrt{\frac{E_1}{E_2}} - \nu_{12} + \frac{E_1}{2G_{12}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

疲労き裂伝ば試験は, コンピュータ制御の電気油圧サーボ式試験機(驚宮製作所製, Dynamic Servo FT-2)を用いて, 応力拡大係数範囲 ΔK_{II} および応力比 R が一定(0.5)となるように荷重を制御して行った。そのためき裂が 0.05 mm 伸びるごとに設定荷重を漸減した。なお, 荷重繰返し速度は, 1~20 Hz とし, 試験温度 25°C で, 大気中および水中で試験を行った。なお, 一部の試験は 70°C で行った。水中試験は, 試験片を無負荷状態で約 8.6×10^4 s (1 日)間水中に浸漬した後開始した。この場合, 脱脂綿をき裂周りに巻いて乾燥しないように常に水を補充しながら実験を行った。これ以外にも, 試験前に 2.6×10^6 s または 5.2×10^6 s 水中に浸漬し, 吸水の影響を調べるための実験も行った。

3. 実験結果

3.1 M40J/2500 積層板

3.1.1 試験環境の影響 試験環境の影響を調べるため, 水中および大気中において, 試験温度 25°C, $\Delta K_{II} = 1.6$ MPam^{1/2}, 荷重繰返し速度 $f = 10$ Hz で実験を行った結果を図3に示した。図中の+印は大気中, その他の記号は水中における結果である。なお, 樹脂が吸水することによる影響を調べるため, 試験前に水中に 8.6×10^4 s 浸漬した材料以外に,

Fig. 4 Effect of loading frequency on Mode II fatigue crack growth of M40J/2500 laminate in air.

2.6×10^6 s (30 日) 間 25℃ 水中に浸漬した試験片を用いて疲労き裂伝ば試験を行った結果についても同図中に示した。本材料では、いずれの環境中においても、き裂伝ば速度はき裂進展量に依存せずほぼ一定となっている。また、大気中と水中におけるき裂伝ば速度はほぼ同一である。さらに、 2.6×10^6 s 間水中に浸漬した材料におけるき裂伝ば速度も、大気中試験のき裂伝ば速度とほぼ同一である。

3.1.2 荷重繰返し速度の影響 試験温度 25℃、大気中および水中において荷重繰返し速度の影響を調べた。実験は一本の試験片において、き裂が約 5 mm 進展するごとに荷重繰返し速度を変化させることにより行った。この場合も、試験温度 25℃、 $\Delta K_{II} = 1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とした。大気中における繰返し数基準のき裂伝ば速度 da/dN (m/cycle) に及ぼす荷重繰返し速度の影響を図 4(a) に、時間基準のき裂伝ば速度 da/dt (m/s) に及ぼす荷重繰返し速度の影響を図 4(b) に示した。同様に水中の結果を図 5(a) および (b) に示した。大気中において、図 4(a) に示した繰返し数基準のき裂伝ば速度 da/dN は、荷重繰返し速度によらずほぼ同一である。一方、図 4(b) に示した、時間基準のき裂伝ば速度 da/dt は、荷重繰返し速度が速いほど大きい。

Fig. 5 Effect of loading frequency on Mode II fatigue crack growth of M40J/2500 laminate in water.

図 5(a) に示したように、水中においても、大気中と同様に繰返し数基準のき裂伝ば速度 da/dN は、荷重繰返し速度によらずほぼ一定となっているが、図 5(b) に示したように、時間基準のき裂伝ば速度 da/dt は、荷重繰返し速度が速いほど大きい。

以上のことより、M40J/2500 において、繰返し荷重下でのモード II き裂伝ばは、大気中および水中いずれの環境下においても繰返し数依存であると考えられる。

3.2 T300/3601 積層板

3.2.1 試験環境の影響 試験環境の影響を調べるため試験温度 25℃、 $\Delta K_{II} = 1.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、荷重繰

Fig. 6 Effect of environment on mode II fatigue crack growth of T300/3601 laminates.

(a) Cycle-based crack growth rate, da/dN . (b) Time-based crack growth rate, da/dt .

Fig. 7 Effect of loading frequency on Mode II fatigue crack growth of T300/3601 laminate in air.

返し速度 $f=10$ Hz で実験を行った。その結果を図6に示した。図中の+印は大気中、その他の記号は水中における結果である。この場合も、材料が吸水することによる影響を調べるため、 2.6×10^6 sあるいは 5.2×10^6 s 間無負荷の状態 で 25°C の水中に浸漬した試験片を用いて、疲労き裂伝ば試験を行ったが、その結果も同図中に示した。本材料の場合も、大気中、水中の両環境ともに、き裂進展量によらず、き裂伝ば速度はほぼ一定となっている。なお、本材料の場合、図6に示したように、M40J/2500 積層板とは異なり、水中におけるき裂伝ば速度は、大気中よりも大きく、また、水中に浸漬した時間が長い材料ほど、き裂伝ば速度が大きくなっている。

3.2.2 荷重繰返し速度の影響 本材料においても、一本の試験片において、き裂が約5 mm 進展するごとに荷重繰返し速度を変化させることにより、その影響を調べた。試験温度は 25°C であり、大気中および水中において実験を行った。大気中では、 $\Delta K_{II} = 1.7 \text{ MPam}^{1/2}$ 、水中では $\Delta K_{II} = 1.5 \text{ MPam}^{1/2}$ とした。大気中における繰返し数基準のき裂伝ば速度 da/dN (m/cycle) に及ぶ荷重繰返し速度の影響を図7(a)に、時間基準のき裂伝ば速度 da/dt (m/s) を図7(b)に示した。同様に水中の結果を図8(a)および(b)に示した。

(a) Cycle-based crack growth rate, da/dN . (b) Time-based crack growth rate, da/dt .

Fig. 8 Effect of loading frequency on mode II fatigue crack growth of T300/3601 laminate in water.

T300/3601 のモードII疲労き裂伝ばにおいては、大気中と水中いずれにおいても図7(a)および図8(a)に示した da/dN (m/cycle) は、荷重繰返し数によって異なっているが、図7(b)および図8(b)に示した da/dt (m/s) は、荷重繰返し数によらずほぼ一定となっている。

以上より、T300/3601 においては、繰返し荷重下でのモードIIき裂伝ばは、大気中および水中いずれの環境下においても時間依存であると考えられる。

3.2.3 試験温度の影響 モードII層間はく離疲労き裂伝ば速度に及ぶ試験温度の影響を調べるために、大気中 25°C と 70°C において疲労き裂伝ば

Fig. 9 Effect of temperature on Mode II fatigue crack growth of T300/3601 laminate in air.

Fig. 10 Effect of temperature change on Mode II fatigue crack growth of T300/3601 laminate in air.

試験を行った結果を図 9 に示した。この場合も、 $\Delta K_{II} = 1.7 \text{ MPam}^{1/2}$ 、 $f = 10 \text{ Hz}$ とした。いずれの試験温度においても、き裂伝ば速度はき裂長さによらず一定となっているが、き裂伝ば速度は、70°C のほうが大きい。

次に、一本の試験片を用いて試験温度を変動させる試験を行った。この実験においても $\Delta K_{II} = 1.7 \text{ MPam}^{1/2}$ 、 $f = 10 \text{ Hz}$ とした。その結果を図 10 に示した。各温度におけるき裂伝ば速度は、図 9 に示した一定温度におけるき裂伝ば速度とほぼ一致してい

る。

3.3 破面観察 試験後、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて破面観察を行った。まず M40J/2500 積層板の試験後の破面を図 11 および図 12 に示した。大気中および水中ともに各荷重繰返し速度における破面に顕著な相違はみられない。また、大気中と水中の破面に大きな差異はみられず、破壊機構に相違はないものと考えられる。

いずれの試験片においても破面上に露出した炭素繊維および繊維の抜け痕が多数みられ、破壊が主として炭素繊維とエポキシ樹脂の界面で起こっていたことが分かる。また、破面は凹凸が激しく、最大主応力方向に垂直な面に発生した微視き裂の結合で起こる階段状のハックルが見られる⁽¹⁾。なお繊維が破面から浮き上がったような部分はなく、繊維架橋が生じていなかったことを示している。

T300/3601 積層板の破面を図 13 および図 14 に示した。この材料の場合も、大気中および水中ともに各荷重繰返し速度における破面に顕著な相違はみられない。また、大気中と水中の破面に大きな差異はみられず、図 15 に示した $5.2 \times 10^6 \text{ s}$ 間水中に浸漬した材料の破面もほぼ同様である。したがって、いず

Fig. 11 Fracture surface of M40J/2500 laminate in air.

Fig. 12 Fracture surface of M40J/2500 laminate in water.

Fig. 13 Fracture surface of T300/3601 laminate in air.

Fig. 14 Fracture surface of T300/3601 laminate in water.

れの試験条件，試験環境においても，破壊機構に大きな相違はないものと考えられる。ただし，本材料の場合，いずれの破面においても，繊維に多くの樹脂が付着していることが観察され，母材であるエポキシ樹脂の特性がき裂の伝ばに大きく影響しているものと考えられる。そのためにき裂伝ば速度は時間依存になったのであろう。

4. 考 察

4.1 繊維架橋の影響 前述のように，M40J/2500 積層板，T300/3601 積層板いずれの材料にお

Fig. 15 Fracture surface of T300/3601 laminate in water (Prior-immersion: 5.2×10^6 s).

いても，大気中，水中ともに，モードⅡのき裂伝ば速度は，き裂進展量に依存せずほぼ一定となっていた。田中ら⁽¹¹⁾も，T800/3631 を用いてモードⅡき裂伝ば試験を行い，き裂伝ば速度がき裂進展量に依存せずほぼ一定となることを報告している。一方，モードⅠき裂伝ばの場合，M40J/2500 積層板では，いずれの環境中においても，き裂伝ば速度は，き裂の進展とともに低下した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。また，T300/3601 積層板の場合，大気中においては，き裂伝ば速度は，き裂進展量によらずほぼ一定であったが，水中においては，き裂伝ば速度は，き裂進展に従い大きく低下した⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾。これはモードⅠにおいては，繊維がき裂

Fig. 16 Side surface of T300/3601 laminate.

上下面を架橋することによってき裂先端の真の応力拡大係数範囲 ΔK_{IIP} が負荷された応力拡大係数範囲 ΔK_I よりも小さくなることもあるが、モードIIの場合、図16に一例を示したように、いずれの環境中、いずれの材料においても繊維架橋が発生しなかったために、き裂の進展量によらずき裂伝ば速度は一定となったものと考えられる。

さらに、M40J/2500 積層板の場合、モードI疲労き裂伝ば速度は、20℃の場合、大気中と水中で、ほぼ同一であったが、70℃の場合、試験開始直後には、両者は同一であったが、き裂の進展とともに、水中のき裂伝ば速度のほうが遅くなった⁽⁹⁾。モードIIの場合も、図3に示したように、25℃においては、両環境中におけるき裂伝ば速度は試験条件によらずほぼ同一である。さらに、 2.6×10^6 s 間水中に浸漬した材料におけるき裂伝ば速度も、大気中試験のき裂伝ば速度とほぼ同一である。ただし、M40J/2500 積層板のモードI層間はく離き裂伝ば試験では、20℃では大気中と水中におけるき裂伝ば速度はほぼ同一であったが、70℃では、水中の伝ば速度のほうが低かった。

一方、T300/3601 積層板の場合、図6に示したように、水中に浸漬した時間が長い材料ほど、き裂伝ば速度が大きくなっていった。前述のM40J/2500 積層板との相違の原因として、本材料の樹脂のほう吸水しやすいことが考えられる。T300/3601 積層板の場合、モードI層間はく離き裂伝ば試験でも、水中に浸漬した時間が長い材料ほど、き裂伝ば速度が大きいたことが明らかになっている⁽¹⁰⁾。また、北條ら⁽¹¹⁾も、914Cを用いてモードI疲労き裂伝ば試験を行った結果、未吸水材に比べて吸水飽和状態試験片では、き裂伝ば速度が30倍加速することを報告しており、本材料と同様の結果を得ている。

以上のように、大気中と水中のいずれの環境下でのき裂伝ば速度が大きいかということに関しては、樹脂の種類、試験条件によって異っている。一般に、樹脂は吸水することによって延性化するものと考えられる。この延性化は樹脂内でのき裂進展抵抗を変化させるだけでなく、界面強度にも影響を及ぼさるう。いずれの効果がより大きいかによって、前述のような相違が出てくるものと考えられる。

4.2 荷重繰返し速度の影響 M40J/2500 積層板において、繰返し荷重下でのモードIIき裂伝ばは、大気中および水中いずれの環境下においても繰返し数依存であった。なお、この材料の場合、モードI層間はく離疲労き裂伝ばも、大気中および水中いずれの環境下においても繰返し数依存であった。一方、

T300/3601 積層板の場合、繰返し荷重下でのモードIIき裂伝ばは、大気中および水中いずれの環境下においても時間依存であったが、モードI層間はく離疲労き裂伝ばは、大気中では荷重繰返し数依存、水中では時間依存であった⁽¹⁰⁾。

前章で述べたように、M40J/2500 積層板では、繊維/樹脂界面での破壊が主であり、T300/3601 積層板では、樹脂内での破壊が主であったことを考えると、界面で破壊する場合、繰返し数依存となり、樹脂内での破壊が主となる場合、時間依存のき裂伝ば特性を示すようである。なお、植松ら⁽⁹⁾は、AS4/PEEK 積層板を用いてモードIの疲労き裂伝ば試験を行った結果、き裂伝ばが繰返し数依存の場合、樹脂過多な破面であることを報告しており、本研究とは逆の傾向である。植松らの研究と本研究では、樹脂の特性がかなり異なっているが、どのような特性の違いによってこのような相違が現れるのかは明らかではない。今後の研究課題としたい。

4.3 温度変動の影響 T300/3601 積層板の場合、モードII層間はく離疲労き裂伝ば速度は、20℃よりも70℃のほうが速かった。一方、モードI疲労き裂伝ばの場合、試験温度の影響はほとんどなかった⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、モードIIの場合、試験温度を変動させた場合、各温度におけるき裂伝ば速度は、一定温度におけるき裂伝ば速度とほぼ一致していたが、モードIでは、50℃付近を境に高温から低温に温度を変動させた場合に、き裂伝ば速度が大きく低下した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかしながら、モードIIにおいては、そのような特異な現象は起きていない。モードIき裂伝ばにおける特異な現象は、繊維架橋に起因するものであると考えられているが、モードIIでは繊維架橋が生じないために、温度変動に伴う特異な現象が起きなかったものと考えられる。

5. 結 論

本研究では、2種類の一方向CFRP積層板(M40J/2500, T300/3601)を用いて ΔK_{II} 一定の繰返し荷重下で、モードIIの層間はく離疲労き裂伝ば試験を行い、以下の結果を得た。

M40J/2500 積層板

(1) 大気中と水中両試験条件において、層間はく離き裂伝ば速度は、き裂進展量によらずほぼ一定であった。

(2) 層間はく離き裂伝ば速度に、試験環境の影響はなく、また、水中浸漬時間の影響もなかった。

(3) 層間はく離き裂伝ばは、大気中、水中いずれの環境下においても繰返し数依存であり、 $da/dN-\Delta K_{II}$ 関係には、荷重繰返し速度依存性はみられなかった。

T300/3601 積層板

(1) 大気中と水中いずれの環境下においても、層間はく離き裂伝ば速度は、き裂進展量によらずほぼ一定であった。

(2) 大気中よりも水中のほうが、層間はく離き裂伝ば速度が大きかった。また、試験前に水中に浸漬した時間の長い材料ほど、き裂伝ば速度が大きかった。

(3) 層間はく離き裂伝ばは、大気中、水中いずれの環境下においても時間依存であり、 $da/dt-\Delta K_{II}$ 関係に荷重繰返し速度依存性は認められなかった。

(4) 70°Cにおける層間はく離き裂伝ば速度は 25°C よりも大きかった。

文 献

- (1) 北條正樹, 田中啓介, Gustafson, C. G., 林龍一, 機論, A, **54**-499 (1987), 455.
- (2) 中井善一, 山守博文, 中村政晴, 大路清嗣, 材料, **42**-475 (1993), 384.
- (3) 植松美彦, 北村隆行, 大谷隆一, 大塚裕之, 材料, **42**-472 (1993), 59.
- (4) Nakai, Y. and Ohji, K., "Fatigue 93", edited by J. P. Bailon and I. J. Dickson, Vol. III (1993), 1379.
- (5) 中井善一, 山下雅英, 材料, **43**-493 (1994), 1258.
- (6) Nakai, Y., "Fatigue under Thermal and Mechanical Loading, Mechanism, Mechanics and Modeling, Edited by J. Bressers and L. Rémy (1996), 279.
- (7) 中井善一, 藤原宗吉, 韓 基一, 材料, **46**-10 (1997), 1210.
- (8) Nakai, Y., Sakata, N., Kadowaki, T. and Hiwa, C., Proc. Int. Conf. Mat. and Mech. 97 (1997), 653.
- (9) 中井善一, 坂田直也, 日和千秋, 機論, A, **64**-619 (1998), 584.
- (10) 中井善一, 坂田直也, 門脇武利, 日和 千秋, 機論, A, **65**-630 (1999), 312.
- (11) 田中 拓, 田中啓介, 猪飼良博, 機論, **61**-583, A (1995), 530.
- (12) 松田 聡, 北條正樹, 落合庄治郎, 機論, **63**-605, A (1997), 39.
- (13) 田中啓介, 田中拓, 來海博央, 機論, A, **63**-613 (1997), 1902.
- (14) 松田 聡, 北條正樹, 落合庄治郎, 機論, A, **64**-622 (1998), 1639.
- (15) 日下貴之, 北條正樹, 黒川知明, 落合庄治郎, 機論, A, **64**-621 (1998), 1152.
- (16) Sih, G.C., Paris, P. C., Irwin, G. R., Int. J. Fract. Mech., **1** (1965), 189.