ΔK 一定条件下における一方向 CFRP 積層板のはく離型 疲労き裂伝ばに及ぼす試験温度および 荷重繰返し速度の影響†

中 井 善 一* 山 下 雅 英**

Effects of Frequency and Temperature on Delamination Fatigue Crack Growth of Unidirectional CFRP under Constant ΔK Conditions

by

Yoshikazu NAKAI* and Masahide YAMASHITA**

The effects of loading frequency and test temperature on the delamination crack growth under cyclic loading were investigated with unidirectional CF/epoxy laminates. Tests were conducted in air on double cantilever beam (DCB) specimens. Constant ΔK test were employed for the experiments. The interlaminar crack growth rate was almost constant with crack growth, and the effect of loading frequency was not observed. When the test temperature was changed from lower to higher temperature, the interlaminar crack growth rate was unaltered. On the other hand, the interlaminar crack growth rate drastically decreased after the variation from higher to lower test temperature. The intralaminar crack growth rate decreased with crack growth, and it was higher for higher temperature. In this case also the effect of loading frequency was not observed. The growth rate of an interlaminar fatigue crack was always higher than that of an intralaminar fatigue crack when they were compared at the same value of ΔK .

Key words: Delamination, Fatigue crack propagation, CFRP, High temperature, Frequency effect, Constant ΔK test

1 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 積層板は、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、従来の軽金属合金に代わって使用されることが多くなってきている。また、磁気を帯びないとともに、金属材料のような低温ぜい性がないことから、リニア新幹線や核融合炉などで使用される低温超伝導磁石を保持するための強度部材として使用するための研究開発が行われている。このような CFRP 積層板を用いた構造物の健全性を確保するためには、種々の試験温度ならびに荷重条件下における CFRP 積層板の強度評価法を確立することが必要不可欠である。

さて、CFRP 積層板においては層間のはく離が最も重要な破壊モードであることが現在広く認識されており、活発にその研究が行われている。^{1)~6)} 著者らも、これまでに、荷重振幅一定および ΔK 漸減疲労試験を行い、繰返し荷重下における層間のはく離き裂伝ばが繰返し数依存か、あるいは時間依存か、またその挙

動が試験温度によってどのように異なるかについて研究を行ってきた。^{7), 8)} しかしながら、層間のはく離き裂においては、繊維によるき裂上下面の架橋が存在する場合があり、その影響を考慮しなければ、疲労き裂伝ば速度 da/dN は ΔK のみによっては一義的に規定されず、^{2), 3), 7), 8)} これまで荷重振幅一定または ΔK 漸減試験で得られた da/dN - ΔK 関係はバラツキが大きく、試験条件の影響を詳細に検討する場合に問題となっていた。そこで、本研究では、エポキシ樹脂を母材とする CFRP 積層板の双片持ちはり (DCB) 試験片を用いて ΔK 一定条件下で疲労き裂伝ば試験を行い、き裂伝ば速度に及ぼす荷重繰返し速度および試験温度の影響を明らかにした。また、繊維架橋の程度が異なる層間き裂と層内き裂でその挙動がどのように異なるかを調べた。さらに、試験中に温度が変動した場合、き裂伝ば挙動がどのように変動するかを明らかにした。

2 実験方法

2.1 材料および試験片

試験材料は、前報^{7), 8)}と同一で、CFRP プリプレグ

† 原稿受理 平成 5 年 12 月 28 日 Received Dec. 28, 1993

* 正 会 員 神戸大学工学部機械工学科 〒657 神戸市灘区六甲台町, Dept. of Mech. Eng., Kobe Univ., Nada-ku, Kobe, 657

** 神戸大学大学院 〒657 神戸市灘区六甲台町, Graduate Student, Kobe Univ., Nada-ku, Kobe, 657

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

P3060E-15 (東レ) を 59 枚一方向に積層して板厚 8 mm とした積層板である。このプリプレグの繊維はトレカ T300B で、樹脂は 180° 硬化型エポキシ樹脂 #3601 である。積層板の弾性定数は、 $E_1=143$ GPa, $E_2=8.43$ GPa, $G_{12}=4.77$ GPa, $\nu_{12}=0.30$ である。^{(8),(9)} 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 Fig. 1 に示すような形状の DCB 型である。試験片は、成形板 (300×300 mm) から機械加工によって切り出した幅 20 mm、厚さ 8 mm、長さ 125 mm の帯板に、荷重負荷用のピン穴付きアルミブロックをエポキシ系接着剤により接着することによって作成した。また、疲労き裂の導入を容易にするために以下の 3 種類の方法で初期き裂を導入した。

(1) 成形時に FEP フィルム (厚さ 50 μm) を層間にはさみ込み初期欠陥としたもの (Type A)

(2) ナイフで試験片を割ることによって初期き裂を作成したもの (Type B)

(3) マイクロカッターで、幅 0.5 mm、深さ 15 mm の切欠きを作成し、それをナイフで割ることにより初期き裂を作成したもの (Type C)

Type A では、初期き裂はプリプレグ層間に導入されるが、層間が完全な平面とはなっていないため、Type B および Type C では初期き裂は層内に導入されるものと考えられる。

アルミブロック部を含めた初期き裂長さは、Type A 試験片の場合 34 mm 程度、Type B 試験片の場合 23~37 mm であった。Type C 試験片の場合、アルミブロック部とマイクロカッターによる加工部を含めた切欠き深さは 22.5 mm であるが、この場合も疲労き裂伝ば試験に先立ち切欠き先端にナイフで約 4 mm の予き裂を導入した。

2.2 き裂長さ測定法

ΔK 制御試験を行うためには、き裂長さを自動的に測定する必要がある。本研究では、試験片のコンプライアンスよりき裂長さを測定した。この場合、ピンおよびグリップの変形は微小であると考え、差動トランス (LVDT) によって計測した上下グリップ間の変位を荷重点変位とした。

き裂長さ a とコンプライアンス C の関係は、材料を直交異方性材料として、有限要素法によって平面応力条件で解析した。⁽⁸⁾ その結果は、き裂長さが 28.5 mm

以上、100 mm 以下の範囲で次式で近似できる。

$$BE_1C=\beta(a/H)^\alpha \quad (1)$$

ここで、 $\alpha=2.68$, $\beta=27.9$, B は試験片幅、 $2H$ は積層板の板厚である。き裂先端は thumbnail 状に湾曲していたが、破面より実測した板幅方向の平均き裂長さとコンプライアンスの関係は、有限要素法による解析結果とほぼ一致していた。^{(7),(8)}

2.3 破壊力学パラメータ評価法

次式によってエネルギー解放率を求めた。

$$g=\frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} \\ =\frac{P^2}{2B} \cdot \frac{\alpha\beta}{BE_1H} \cdot \left(\frac{a}{H}\right)^{\alpha-1} \quad (2)$$

また、これより次式によって応力拡大係数 K を計算した。

$$g=\eta K^2 \quad (3)$$

これまで、層間はく離疲労き裂に対する η として平面ひずみ状態に対する評価式が多く用いられてきたが、^{(8),(10)} コンプライアンスとき裂長さの関係が平面応力状態の解析結果とよく一致していること、および等方性材料に対する K の評価との整合性を考え、本論文では、平面応力状態に対する次式より η を計算した。⁽¹¹⁾

$$\eta=\left\{\frac{(E_1/E_2)^{1/2}-\nu_{12}+E_1/2G_{12}}{2E_1E_2}\right\}^{1/2} \quad (4)$$

本材料の場合、平面応力状態に対して、 $1/\eta=11.3$ GPa となる。平面ひずみ状態に対しては、板幅方向と板厚方向の弾性特性が等しいと仮定すると、 $1/\eta=11.8$ GPa となる。これらの値はき裂長さや試験片形状によらないため、いずれかの定義に統一すれば問題はない。なお、本材料の場合、両者より計算される K 値の相違は 2.0% であり、実質的にも差がないと考えてよい。

2.4 疲労き裂伝ば試験

負荷装置としては、加振力 200 N の動電型加振機を用いた。疲労き裂伝ば試験システムの構成を Fig. 2 に示した。関数発生器で発生させた一定振幅の正弦波に、DA 変換器で発生させた 2 チャンネルの一定電圧信号をアナログ的に乗算および加算することにより、試験機の制御に用いる正弦波信号の振幅および平均値をパソコンで制御した。疲労試験は、応力拡大係数範囲 ΔK および応力比 R 一定 ($=0.5$) 条件下で行った。

Fig. 2. Block diagram of fatigue crack growth test system.

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、荷重繰返し周波数 f は主として 20 Hz とした。試験温度は、24~80°C である。なお、初期の一部の実験では、試験温度を制御していないが、この場合の試験温度は 15~20°C 程度であった。試験温度を室温と表示したものは、このような実験の結果である。

3 実験結果および考察

3.1 層間き裂の伝ば挙動

3.1.1 予き裂の影響 成形時に FEP フィルムを挿入することによって初期欠陥を導入した Type A 試験片を用いて、室温において、 ΔK 一定条件下 ($0.44 \text{ MPam}^{1/2}$) における層間はく離の進展挙動を調べた結果が Fig. 3 である。図中○印は、予き裂を導入せず FEP フィルムの先端より疲労き裂を発生・進展させた結果である。また、□印は、静的負荷によって約 15 mm の予き裂を FEP フィルムの先端に導入した後、疲労き裂を進展させた結果である。なお、図の横軸 Δa は FEP フィルム先端または予き裂からの疲労き裂成長量である。予き裂を導入した場合、き裂伝ば速度は、試験開始直後からほぼ一定になっており、金属材料において見られるような、過大荷重によるき裂伝ばの遅延は認められない。一方、予き裂を導入しない場合、き裂が FEP フィルムより 3 mm 程度以上進展するまでは、き裂伝ば速度は定常値よりもかなり低くなっている。この原因として、FEP フィルムを挿入した場合、その先端の近くでは、樹脂リッチとなっていることが指摘されてきた^{(10), (12)}。しかしながら、本試験片の場合、フィルム厚さは 50 μm であり、フィルム先端より 3 mm も樹脂リッチな領域が広がっているとは考えにくい。一方、前述のように疲労き裂先端は湾曲しており、表面と板幅中央におけるき裂長さの相違は 3 mm 程度である。このことから、板幅中央部の FEP フィルム先端に発生したき裂が板幅方向に貫通するまで、き裂伝ば速度は低いものと考えられ

る。厚さ 50 μm の FEP フィルムにより導入した初期欠陥はき裂とは考えられず、疲労き裂が板幅方向に貫通するまでは、貫通き裂としての応力拡大係数評価法が適用できないことがその原因であろう。

以上のような初期遷移期間の後、き裂進展量 Δa が 32 mm 程度となるまで、き裂伝ば速度はき裂長さによらずほぼ一定となっており、 ΔK がき裂伝ば速度を規定する破壊力学パラメータとして有効であることがわかる。 $\Delta a > 32 \text{ mm}$ の領域におけるき裂伝ば速度低下の原因として、繊維によるき裂上下面の架橋が生じたことが考えられる。

3.1.2 荷重繰返し速度の影響 Type A 試験片では、 ΔK 一定試験においては、初期の遷移領域および $\Delta a > 32 \text{ mm}$ の領域を除いて、き裂伝ば速度はき裂長さによらずほぼ一定と考えられるので、一本の試験片でき裂が約 5 mm 伸びるごとに荷重繰返し速度を変化させた。Fig. 4 にその結果を示す。ここで、Fig. 3 とは異なり、Fig. 4 の横軸はピン穴中央からの全き裂長さである。試験温度は 80°C、 $\Delta K = 0.39 \text{ MPam}^{1/2}$ で、荷重繰返し速度 $f = 0.05 \sim 20 \text{ Hz}$ の範囲で実験を行った。き裂伝ば速度は f によらずほぼ一定になっており、荷重繰返し速度が 0.05 Hz 以上の領域では、本材料における繰返し荷重下の層間はく離き裂伝ばは繰返し数依存であると考えられる。植松らは、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) を母材とする CFRP の 200°C における層間はく離き裂伝ばに及ぼす荷重繰返し速度の影響を調べた結果、0.05 Hz 以上の繰返し速度では繰返し依存、0.05 Hz 以下の繰返し速度では時間依存のき裂伝ばを示すことを報告している。本材料についても、さらに低繰返し速度で実験をすれば時間依存性のき裂伝ばを示す可能性は否定できないが、 ΔK 一定試験の場合、試験時間が膨大となると考えられたため、本研究では 0.05 Hz 以下の繰返し速度では実験を行わなかった。

3.1.3 試験温度の影響

この場合も、Type A

Fig. 3. Interlaminar fatigue crack growth under constant ΔK condition.

Fig. 4. Effect of loading frequency on interlaminar fatigue crack growth.

Fig. 5. Effect of test temperature on interlaminar fatigue crack growth (Highest temperature : 80°C).

試験片を用いて、 $\Delta a < 32$ mm 以下の領域で ΔK 一定試験を行い、一本の試験片でき裂が約 5 mm 伸びるごとに試験温度を変化させた。Fig. 5 にその結果を示す。荷重繰返し速度 f は 20 Hz、 $\Delta K = 0.41 \text{ MPam}^{1/2}$ で、24~80°C の試験温度で実験を行った。24°C から 80°C に試験温度を増加させた場合、き裂伝ば速度は試験温度によってほとんど変化せず、ほぼ一定であった。ところが、試験温度を 80°C から 24°C に低下させた場合、き裂伝ば速度はき裂の成長とともに急速に低下していった。その後、試験温度を再び 80°C に増加させると、き裂伝ば速度は元の値に回復した。試験温度を 80°C から 60°C に低下させた場合は、き裂伝ば速度に大きな変動は認められなかったが、試験温度をさらに 40°C に低下した場合、き裂伝ば速度は再び大きく低下した。最高試験温度を 60°C にして、 $\Delta K = 0.41 \text{ MPam}^{1/2}$ で同様の実験を行った結果が Fig. 6 である。この場合も、試験温度を 60°C から 24°C あるいは 40°C に低下させた場合、き裂伝ば速度は大きく低下した。

以上より、約 50°C を挟んで、それより高温から低

Fig. 6. Effect of test temperature on interlaminar fatigue crack growth (Highest temperature : 60°C).

温に試験温度を変動させた場合に、き裂伝ば速度が大きく低下するようである。この原因として、高温試験時に樹脂より引抜かれた繊維が、低温試験時にき裂上下面を架橋し、き裂進展力を低下させることが考えられる。50°C 以下の温度のみで試験を行った場合、樹脂強度が高いため、繊維の引抜けは起こり難く、また、50°C 以上の温度のみで試験を行った場合、繊維は容易に引抜けるが、樹脂の強度が弱いため、引抜けた繊維は大きな荷重を負担できず、き裂進展力を低下させないものと考えられる。なぜ樹脂のガラス転移温度（本材料の場合約 240°C）よりはるかに低い温度でこのような破壊機構の遷移が起こるのかは明らかではないが、き裂先端での発熱などが原因として考えられる。

3・2 層内き裂の伝ば挙動

3・2・1 予き裂の影響 ナイフによって初期き裂を導入した Type B 試験片（初期き裂長さ：34.0 mm）を用いて $\Delta K = 0.49 \text{ MPam}^{1/2}$ で行ったき裂伝ば試験の結果を Fig. 7 に○印で示した。疲労き裂伝ば速度は ΔK 一定試験でも一定とはならず、き裂成長とともに低下している。この試験片ではき裂がプリプレグ層間に導入されなかったために、繊維によるき裂上下面の架橋が生じ、これによってき裂先端の真の応力拡大係数範囲がき裂成長とともに低下したためであると考えられる。

ΔK 一定の繰返し荷重によってき裂を 6.3 mm 成長させた後、静的な負荷によってき裂をさらに 6.3 mm 進展させ、その後再び同一 ΔK で実験を行った。その結果が Fig. 7 の□印である。繰返し荷重によるき裂成長（ $a = 34.0 \sim 40.3$ mm）に伴って低下したき裂伝ば速度は、試験片を静的負荷によって割ることにより、初期値程度まで回復する。このようにしていったん回復したき裂伝ば速度も、再び繰返し荷重によってき裂を成長させる（ $a = 46.6 \sim 51.3$ mm）ことによって、低下している。

Fig. 8 には、き裂伝ば速度を、予き裂からのき裂進

Fig. 7. Intralaminar fatigue crack growth under constant ΔK condition.

Fig. 8. Intralaminar fatigue crack growth rate as a function of crack extension, Δa .

展量あるいは静的破壊後の疲労き裂進展量の関数として示した。○および+印はFig. 7と同一の実験結果である。また△印は予き裂長さの短いType C試験片における実験結果である。これらのき裂では、静的負荷によって導入されたき裂長さがお互いにかなり異なっているにもかかわらず、 ΔK 一定条件下では da/dN はほぼ Δa のみの関数として表されるようである。このことは、疲労き裂に比べて静的負荷によって進展したき裂においては、繊維によるき裂上下面の架橋が顕著ではないことを示している。なお、 $\Delta a=0$ のときのき裂伝ば速度 da/dN は、 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ m/cycleである。層間はく離き裂の伝ば速度が、 $\Delta K=0.44$ MPam $^{1/2}$ のときでも約 10^{-6} m/cycleであることを考えると、層内き裂の進展抵抗は、層間はく離き裂よりも高いものと考えられる。

3・2・2 試験温度の影響 Type B試験片を用いて、疲労き裂伝ば挙動に及ぼす試験温度の影響を調べた結果をFig. 9に示す。 $\Delta K=0.49$ MPam $^{1/2}$ 、荷重繰返し速度 $f=20$ Hzである。図より明かなように、80°Cにおいてもき裂伝ば速度はき裂の成長とともに低下しているが、全般的に試験温度が高いほうがき裂伝ば速度が速くなっている。これは、層間はく離き裂

Fig. 9. Effect of test temperature on intralaminar fatigue crack growth.

Fig. 10. Effect of loading frequency on intralaminar fatigue crack growth.

の伝ば速度が試験温度にほとんど依存しないことと対照的であり、繊維によるき裂上下面の架橋が顕著である場合に試験温度依存性が現れることを示している。

また、き裂伝ば速度は、室温においては減速・加速を繰返ししながら徐々に低下していくが、80°Cにおいてはほぼ連続的に低下し続けている。これは、両者における破壊のメカニズムの相違と関係しているものと考えられる。破面観察の結果、室温における破面上では繊維が所々浮き上がっており、繊維によるき裂上下面の架橋が顕著であったものと考えられる。一方、80°Cにおける破面にはそのような繊維の引抜けは見られなかった。^{7),8)}

3・2・3 荷重繰返し速度の影響 Type B試験片を用いて、80°Cにおいて疲労き裂伝ば挙動に及ぼす荷重繰返し速度の影響を調べた結果をFig. 10に示す。この場合も $\Delta K=0.49$ MPam $^{1/2}$ である。荷重繰返し速度 $f=2.0$ Hzの場合も、き裂の成長とともにき裂伝ば速度は徐々に低下していく。その程度は $f=20$ Hzの場合と全く同一であり、 $da/dN-\Delta a$ 関係に荷重繰返し速度依存性は認められない。したがって、層内き裂伝ばも、繰返し数依存であると考えられる。

4 結 論

本研究では、一方向CFRP積層板のDCB試験片を用いて、 ΔK 一定条件で疲労き裂伝ば試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 層間き裂伝ば速度は、 ΔK 一定条件下で一定となる。また、層間き裂伝ばは、繰返し数依存であり、荷重繰返し速度の影響は認められない。
- (2) 試験温度を低温から高温に変化させても、層間き裂伝ば速度は変化しないが、高温から低温に変化させると、層間き裂伝ば速度は大きく低下する。
- (3) 層内き裂伝ばは、 ΔK 一定条件下でも、き裂の進展とともに低下する。また、層内き裂伝ばも繰返し数依存であり、荷重繰返し速度の影響を受けない。さらに、層間き裂伝ば速度は、試験温度に依存する。

(4) 同一 ΔK に対するき裂伝ば速度は、繊維による架橋がない状態でも、層間き裂のほうが層内き裂よりも大きい。

本研究に対して、平成 4 年度文部省科学研究費補助金・一般研究(C) (課題番号: 04650067) および(財)実吉奨学会・平成 5 年度研究助成金の援助を得た。また、供試材は東レ(株)ACM 技術部より提供していただいた。記して謝意を表する。

(平成 5 年 9 月 22 日 日本材料学会第 7 回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 影山和郎, 材料, **39**, 325 (1990).
- 2) 田中啓介, 田中 拓, 山岸謙二郎, 日本機械学会講演論文集, No. 920-78, p. 139 (1992).
- 3) 北條正樹, 伊東英孝, 青木隆平, 高橋 淳, 日本機械学会講演論文集, No. 920-78, p. 133 (1992).
- 4) 植松美彦, 北村隆行, 大谷隆一, 大塚裕之, 材料, **42**, 59 (1993).
- 5) 轟 章, 小林英男, 足立邦夫, 材料, **42**, 304 (1993).
- 6) 小寺沢良一, 野瀬昌禎, 河井昌道, 北條正樹, 荒巻和喜, 材料, **42**, 46 (1993).
- 7) Y. Nakai and K. Ohji, Proc. Fatigue 93, p. 1379 (1993).
- 8) 中井善一, 山守博文, 中村政晴, 大路清嗣, 材料, **42**, 384 (1993).
- 9) S. W. Tsai, H. T. Hahm, “複合材料の強度解析と設計入門”, 藤井太一監訳, p. 309 (1986) 日刊工業新聞社
- 10) 北條正樹, 京都大学学位論文 (1989).
- 11) G. C. Sih, P. C. Paris and G. R. Irwin, Int. J. Fract. Mech., **1**, 189 (1965).
- 12) 中井善一, 山下雅英, 日本機械学会講演論文集, No. 930-91, p. 590 (1993).