一方向炭素繊維強化複合材料の混合モード 層内疲労き裂進展に及ぼすき裂架橋効果*

田中啓介^{*1}, 田中 拓^{*1}, 北條正樹^{*2}

Crack-Bridging Effect on Mixed-Mode Propagation of Intralaminar Fatigue Cracks in Unidirectional CFRP

Keisuke TANAKA, Hiroshi TANAKA and Masaki HOJO

The growth behavior of intralaminar fatigue cracks in a unidirectional carbon/epoxy laminate, Toray T300/#2500, was studied under mixed-mode loading with a ratio of mode II stress intensity factor (SIF) to mode I SIF equal to 2.50. Under a constant value of the applied SIF range, ΔK_{Iap} , the crack propagation rate decreased with the crack extension because of crack-tip shielding by crack bridging. For each value of ΔK_{Iap} , the relationship between the crack propagation rate, da/dN , and the crack extension, Δa , was expressed by the following equation: $\log(da/dN) = \log V_0 - \Delta a \log V_1$, where V_0 and V_1 are functions of the applied SIF value. The value of V_0 which is the crack propagation rate without crack bridging was approximated by a power law function of the crack-tip value of the SIF range, ΔK_{Iip} . On the basis of the power law relationship, a method for evaluating the shielding SIF range, $\Delta K_{Ibridge}$, was proposed. $\Delta K_{Ibridge}$ monotonically increased with the crack extension. Furthermore, $\Delta K_{Ibridge}$ for a small ΔK_{Iap} value was higher than that for a large ΔK_{Iap} value when compared to the same amount of crack extension.

Key Words: Composite Material, Fatigue, Crack Propagation, Fracture Mechanics, CFRP, Intralaminar Crack, Mixed-Mode, Crack Bridging

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック(CFRP: Carbon fiberreinforced plastics)は卓越した比剛性および比強度を有し、大型旅客機などの軽量化が要求される機器の構造部材として用いられ、現在では一次構造部材にも適用されている。この動向に伴い、これらの機器の信頼性を確保するために、繰返し応力下でのき裂発生および進展特性に基づく寿命評価法の確立が強く望まれている。CFRPは著しい異方性を有するため、繊維に沿った層間はく離き裂(Interlaminar crack)もしくは層内き裂(Intralaminar crack)の進展が最弱破壊モードとなる。このうち層間はく離に対しては破壊力学による靱性および疲労特性の評価が成果をあげつつあるが^{(1)~(4)}、層内き裂に関する破壊力学的観点からの研究は少なく^{(5)~(7)}、特に繰返し応力下における層内き裂進展特性の評価はほとんど行われていない⁽⁷⁾。また、この繊維に沿ったき裂は一般に混合モード変形をうけるため、混合モード下での疲労き裂進展特性が重要となる⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

多くのCFRPの層間および層内き裂において、き裂進展とともにその進展抵抗が増加することが報告されている⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。これは強化繊維がき裂面を橋渡しする、いわゆるき裂架橋(Crack bridging)の形成が主因と考えられており^{(12)~(14)}、疲労き裂に対してもその影響が指摘されているが⁽¹⁰⁾、架橋による疲労き裂進展抵抗の定量的検討は行われていない。疲労寿命評価のためにはき裂架橋のない材料抵抗が最小のときのき裂進展則を確立し、さらに架橋抵抗を定量化することが重要となる。

本研究では、一方向カーボン/エポキシ積層板に対しモードI, IIの混合モード下での層内疲労き裂伝ば試験を実施し、破壊力学的観点から検討を行った。応力拡大係数範囲(ΔK)一定条件下での試験を行い、き裂進展にともなうき裂架橋の形成によりき裂進展抵抗が増加することを明らかにした。さらに、試験結果からき裂架橋抵抗を定量的に評価し、その影響因子について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片 供試材は東レP3052-15 プリプレグを16 プライ積層した、長炭素繊維/エポキシ(T300/#2500)の一方向強化板である。本供試材

* 原稿受付 平成4年4月13日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部(〒464-01 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 正員, 工業技術院製品科学研究所(〒305 つくば市東1-1-4)。

の弾性特性は表 1 に示すとおりである。

試験片は板幅 $W = 10$ mm, 板厚 2.4 mm, ゲージ長 130 mm の, 長手方向に繊維が配向された短冊形試験片である(図 1)。この試験片に片側切欠きを導入し繰返し負荷を与えると繊維に沿ったき裂が生じ, モード I(開口形)およびモード II(面内せん断形)の混合モード状態で進展する。初期切欠きは図中に示す 2 種類のものを用いた。Type A は通常のモード I 片側切欠きより疲労予き裂を進展させたものである。疲労き裂は両長手方向に生じる。一方, Type B はモード I 片側切欠きを荷重軸方向に延長した L 字形切欠きである。Type B 切欠きでは疲労予き裂の導入は行わず, 角部を滑らかに切り落とすことによりき裂を片側のみに進展させた。切欠きの導入には幅 0.3 mm の糸のこを使用し, さらに刃やすりによって先端半径 15~20 μm の鋭い切欠きに仕上げた。Type A, B ともに切欠きの板幅方向の深さ t/W は 0.18 とした。また, Type A の

疲労予き裂の長さおよび Type B の荷重軸方向の切欠き長さ a/t は 3 以上とした。

2.2 有限要素法による応力拡大係数の計算

図 1 に示した混合モードき裂の応力拡大係数を有限要素法により計算した。計算では線形弾性, 平面応力状態を仮定し, 弾性定数として表 1 の値を用いた。要素分割には 2 次のアイソパラメトリック要素を使用し, 要素数 1 034~1 146 の細分割モデルを用いた。ただし, 切欠きの幅は無視し, Type B 切欠きの場合は図 1 中に破線で示した L 形切欠きを解析対象とした。疲労試験ではピンを介して負荷を与えるため, 計算ではこのピン位置に集中荷重を与えた。また, 試験片のつかみ部の変形が治具により拘束されるのを考慮し, つかみ部には治具と同等の剛性を与えた。

き裂先端部には Barsoum⁽¹⁵⁾ の 6 節点特異要素を使用した。応力拡大係数の計算には J 積分を用い, 石川⁽¹⁶⁾ が提案した方法によりエネルギー解放率のモード I 成分 G_I およびモード II 成分 G_{II} を分離した。 G_I , G_{II} より次式を用いて各モードの応力拡大係数 K_I および K_{II} が求められる⁽¹⁷⁾。

$$G_i = H_i K_i^2 \quad (i = I, II) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで H_i は弾性定数から決まる定数で, 本材では $H_I = 9.16 \times 10^{-2} \text{ GPa}^{-1}$, $H_{II} = 2.41 \times 10^{-2} \text{ GPa}^{-1}$ である。

図 2 に $t/W = 0.18$ の場合の応力拡大係数とき裂長

表 1 材料構成および機械的性質

Prepreg	TORAY P3052-15	
Carbon fiber	TORAY T300	
Epoxy resin	TORAY #2500	
Cure temperature	120 °C	
Fiber volume fraction, V_f	56.8 %	
Constitution of laminate	$(0)_{16}$	
Elastic constants	E_1 (GPa)	124
	E_2 (GPa)	8.6
	G_{12} (GPa)	4.3
	ν_{12}	0.29

図 1 混合モード疲労試験片

図 2 応力拡大係数の計算結果($t/W = 0.18$)

さの関係を示す。図中の σ は軸方向全断面応力である。Type A, B どちらの切欠きの場合も、疲労試験に供した領域、 $a/t \geq 3$ 、ではモード比 K_{II}/K_I が 2.50 でほぼ一定となる。さらにこの領域において、 K_I および K_{II} はき裂長さに依存せず σ の値のみで決まる。なお、この傾向は切欠き深さ t/W の値によらない。図 3 は十分長いき裂における K_I , K_{II} および K_{II}/K_I の切欠き深さに対する変化である。 K_I , K_{II} の値と比べて混合モード比は切欠き深さに鈍感であり、図 1 の試験片を用いて広い混合モード範囲の試験を行うことはできないことがわかる。なお、 $t/W = 0.5$ でき裂が十分長く半無限長き裂と見なせる場合については応力拡大係数の解析解が得られているが⁽¹⁸⁾、本計算で求めた K_I , K_{II} はともに解析解から誤差 0.1% 以内の高精度であった。

2.3 疲労試験 疲労試験には電気油圧サーボ式疲労試験機を使用した。試験環境は室温大気中である。荷重制御で応力比 R を 0.5 に保ち、繰返し速度は 10 Hz とした。試験片に対する曲げ・ねじり等の作用を防ぐため、ユニバーサル・ジョイントおよびピンを介して一軸負荷を与えた。応力拡大係数範囲 (ΔK) 漸減試験における K 値減少量は、き裂進展速度 10^{-9} m/cycle 以上の領域では最大 K 値の 10% 以内、それ以下では 5% 以内とした。また、 ΔK 漸増試験の K 値増加量は最大 K 値の 10% 以内とした。き裂長さは、試験を適宜中断し光学顕微鏡 (200 もしくは 400 倍) で表裏両面から測定し、平均値をもってき裂長さとした。

図 3 応力拡大係数と切欠き長さの関係

3. 実験結果および考察

3.1 疲労き裂進展挙動 Type A の試験片を用いて ΔK 漸減試験を行い、き裂停留後に引き続き ΔK 漸増試験を実施した。得られたき裂進展速度とモード I 応力拡大係数範囲 ΔK_I の関係を図 4 に示す。き裂進展下限界の存在が明りょうであり、下限界近傍では ΔK 漸減および漸増試験の結果に差は認められない。しかしながら、き裂進展速度が 10^{-9} m/cycle 以上の領域では、後から行った ΔK 漸増試験の結果は漸減試験よりも低速側であり、き裂進展に伴い進展抵抗が増加していることがわかる。CFRP におけるき裂進展抵抗増加の機構として、炭素繊維によるき裂架橋の効果が挙げられている^{(6)~(14)}。本研究の疲労き裂にも、図 5 の光学顕微鏡写真に見られるようなき裂架橋が観察された。

図 6 は、き裂架橋によるき裂進展抵抗増加の機構を模式化したものである。き裂上下面を橋渡しした繊維により、き裂開口を抑制する架橋力 σ_{bridge} がき裂面に作用する。このとき、き裂先端の応力場を支配する真の応力拡大係数 K_{tip} は、外力による寄与 K_{ap} から架橋力による遮へい応力拡大係数 K_{bridge} を差し引いたものとして次式で表される。

$$K_{tip} = K_{ap} - K_{bridge} \quad \cdots \cdots (2)$$

き裂進展に伴い架橋による抵抗 K_{bridge} が増加するため、き裂進展の真の駆動力 K_{tip} が減少し、き裂進展速

図 4 き裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係

度が低下すると考えられる。

3・2 き裂進展に及ぼすき裂進展量の影響 き裂進展速度のき裂進展量依存性を評価するために、負荷による応力拡大係数範囲 ΔK_{Iap} を一定に保った状態で疲労試験(以下では ΔK 一定試験と称する)を行った。2・2 節で述べたように、本研究で用いた試験片の場合、最大荷重と応力比を一定とすることにより容易に ΔK_{Iap} を一定に保つことができる。疲労予き裂導入時の架橋形成を防ぐため、 ΔK 一定試験では Type B の切欠きを用いた。なお、応力拡大係数の混合モード比は $K_{II}/K_I=2.50$ で、 ΔK 漸減・漸増試験と同じ条件である。

図 7 に ΔK 一定試験におけるき裂伝ば曲線の例を示す。 ΔK_{Iap} の値によらず伝ば曲線は上に凸の形状を描き、き裂進展速度の低下が明りょうである。図 8 にき裂進展速度のき裂進展量 Δa に対する変化を示す。進展速度の低下は著しく数オーダーにわたっている。どの ΔK_{Iap} の場合も、き裂進展速度と進展量の関係は片対数グラフ上でほぼ直線となり次式で近似できる。

図 5 き裂架橋の光学顕微鏡写真(き裂進展量 6.7 mm)

図 6 架橋によるき裂進展抵抗増加機構

$$\log(da/dN) = \log V_0 - \Delta a \log V_1 \dots\dots\dots (3)$$

き裂進展速度が低下するとき、 $\log V_1$ は正、すなわち V_1 は 1 以上の値をとる。最小二乗法により決定された式(3)の直線を図中に実線で示した。式(3)中の V_0 は $\Delta a=0$ 、つまり架橋のない状態でのき裂進展速度に相当し、 ΔK_{Iap} が大きいほど値が大きくなる。また、直線の傾き $\log V_1$ は ΔK_{Iap} に強く依存し、き裂進展速度の低下は ΔK_{Iap} が小さい場合ほど顕著である。 $\Delta K_{Iap}=0.642 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の試験は 2 種類の繊維方向切欠き長さ a_0 について行ったが、両者の結果はよく一致している。このことは、長いき裂の K 値がき裂長さに依存しない有限要素解析の結果を保証しているとともに、き裂進展速度が ΔK_{Iap} と Δa のみから決まるとする式(3)の表現を裏付けている。

図 9 は ΔK 一定試験におけるき裂進展速度と ΔK_{Iap} の関係である。また同図には、 ΔK 漸減および漸増試験の結果もそれぞれ一点鎖線と破線で示した。 ΔK 一定試験の結果の多くは ΔK 漸減および漸増試験と比べて高速側であり、漸減・漸増試験でのき裂進展下限界以下の ΔK_{Iap} においてもき裂が進展する。 ΔK 漸減・漸増試験では、Type A 切欠きからの疲労き裂進展初期より架橋が生じ、き裂進展抵抗が増大していったと考えられる。

3・3 き裂架橋によるき裂進展抵抗の評価 き裂進展速度とき裂先端の真の応力拡大係数範囲 ΔK_{Iup} との間に次式のべき乗関係を仮定する。

$$da/dN = C(\Delta K_{Iup})^n \dots\dots\dots (4)$$

ここで、き裂進展にはモード II 成分 ΔK_{IIup} も寄与する可能性はあるが、疲労試験中 K_{II}/K_I が一定であることから、以下ではモード I 成分をパラメータとした

図 7 ΔK 一定試験におけるき裂伝ば曲線

上式に基づき議論する。式(4)中の C および n は、 Δa や ΔK_{Iap} に依存しない材料定数である。これらの

定数は、式(3)の $da/dN - \Delta a$ 関係を用いて決定できる。すなわち、き裂架橋のない $\Delta a = 0$ のとき $da/dN = V_0$ 、 $\Delta K_{Itip} = \Delta K_{Iap}$ であることから、上式は次のように書き換えられる。

$$\log V_0 = \log C + n \log(\Delta K_{Iap}) \quad \cdots \cdots (5)$$

各 $\Delta K_{Iap}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ に対する $V_0(\text{m/cycle})$ の値から、最小2乗法により $C = 3.1 \times 10^{-4}$ 、 $n = 11.6$ と定数を決定した。図9に、決定された式(4)のき裂進展則を示した。実験点が少ないためばらつくが、大略式(4)の近似が成り立つ。

式(4)のき裂進展則に基づき、 ΔK 一定試験におけるき裂架橋抵抗 $\Delta K_{Ibridge}$ を評価することができる。図10にその手法を模式化して示す。き裂架橋のない状態では、 ΔK_{Iap} に対するき裂進展速度が式(4)の曲線上の点Aで与えられる。 ΔK_{Iap} 一定条件において、き裂進展速度はき裂進展に伴い点Bまで低下する。この間、 da/dN と K_{Itip} の関係式(4)の曲線に沿い点Dまで移動することから、き裂架橋抵抗 $\Delta K_{Ibridge}$ がBDの長さとして得られる。 $\Delta K_{Ibridge}$ は、式(4)に式(2)を代入し整理することにより次式で表される。

$$\Delta K_{Ibridge} = \Delta K_{Iap} - \left(\frac{da/dN}{C} \right)^{1/n} \quad \cdots \cdots (6)$$

すなわち、 ΔK_{Iap} の値とそのときのき裂進展速度から

(a) $\Delta K_{Iap} = 0.447 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

(b) $\Delta K_{Iap} = 0.642 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

(c) $\Delta K_{Iap} = 0.755 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

図8 き裂進展速度とき裂進展量の関係

図9 ΔK 一定試験におけるき裂進展速度と負荷応力拡大係数範囲の関係

架橋抵抗を求めることができる。さらに式(3), (5)を用いて式から da/dN の V_0 を消去すると, ΔK 一定条件下での架橋抵抗が次式で与えられる。

$$\Delta K_{I\text{bridge}}/\Delta K_{Iap} = 1 - V_1^{-da/n} \dots\dots\dots (7)$$

図 11 に, 式(7)から得られるき裂架橋抵抗のき裂進展量に対する変化を示す。 ΔK_{Iap} の値によらずき裂架橋抵抗はき裂進展に伴い単調に増加し, 特に進展初期における増加が著しい。また, 架橋抵抗は外力 ΔK_{Iap} の大きさに強く依存し, ΔK_{Iap} が小さい場合ほど架橋抵抗の顕著な増加が見られる。この架橋抵抗の ΔK_{Iap} に対する依存は V_1 の ΔK_{Iap} に対する依存から生じている。図 12 に $\log V_1$ と ΔK_{Iap} の関係を示す。両者の間にはべき乗関係が認められる。図中に示したべき指数は大きく, き裂進展速度の低下の程度, ひいてはき裂架橋形成の度合が ΔK_{Iap} の値に強く依存することに対応している。このように V_1 と ΔK_{Iap} の関係を定式化することにより, 任意の ΔK_{Iap} に対して式(7)から架橋抵抗を予測することが可能となる。

本手法は層内き裂のみならず層間はく離き裂に対しても適用可能で, 実験から簡便にき裂架橋抵抗を定量化できる。き裂架橋を生じる材料の疲労試験においては疲労予き裂の導入を避けねばならないため, 層間はく離試験の予き裂としてインサートフィルムを用いる場合^{(1)(2)(4)(8)~(11)}を含め, 有限半径をもつ切欠きからき裂を進展させざる負えない。この点, 本手法では $da/dN - \Delta a$ の関係の外挿により無架橋状態 ($\Delta a = 0$) のき裂進展抵抗を評価しており, 有限切欠き半径の影響

を最小にすることができる。

本研究では混合モードき裂のモード I 成分に注目し, 架橋応力拡大係数範囲 $\Delta K_{I\text{bridge}}$ の評価を行った。しかしながら厳密には架橋力はモード II 成分にも影響される可能性がある。架橋を生じる CFRP の疲労寿命を精度よく予測するためには, 本手法によりモード I およびモード II の単一モードにおける架橋の影響を定量化し, さらに混合モード下でのき裂進展則の検討を加えることにより, 架橋抵抗の各モード成分を分離できる評価法へと発展させることが必要である。

図 11 ΔK 一定試験におけるき裂架橋抵抗の変化

図 10 き裂架橋抵抗の評価法

図 12 $\log V_1$ と負荷応力拡大係数範囲の関係

4. 結 言

一方向CFRPの混合モード(モードI, II)下における層内疲労き裂伝ば試験を行い、き裂進展に及ぼすき裂架橋の影響を検討した。以下に主な結果を示す。

(1) 片側切欠きから繊維に沿った荷重軸方向に進展するき裂は混合モード変形をうけ、応力拡大係数の混合モード比 K_{III}/K_I はき裂が長い領域で一定値をとる。また、この領域では K_I および K_{II} の値もき裂長さに依存せず、荷重のみを制御することにより K 値を制御することが可能である。

(2) ΔK 漸減後、 ΔK を漸増させた試験では、漸増試験におけるき裂進展速度は漸減試験の結果より低速側となった。顕微鏡観察により繊維がき裂面を橋渡しするき裂架橋現象が観察され、架橋のき裂開口抑制効果によるき裂進展抵抗の増加がき裂進展速度の低下をもたらす。

(3) 負荷による応力拡大係数範囲 ΔK_{Iap} 一定の疲労試験において、き裂進展速度の低下はき裂進展量 Δa の関数として次式で表された。

$$\log(da/dN) = \log V_0 - \Delta a \log V_1$$

V_0 と V_1 の値は ΔK_{Iap} に依存する。上式から評価されるき裂進展速度とき裂先端応力拡大係数範囲 ΔK_{Iup} の間には、ほぼべき乗関係が成立した。

(4) 架橋によるき裂進展抵抗 $\Delta K_{Ibridge}$ の評価法を提案した。架橋抵抗はき裂進展に伴い単調な増加を示した。また、架橋抵抗の増加は外力 ΔK_{Iap} に強く依

存し、 ΔK_{Iap} が小さい場合ほど顕著に増加した。

最後に、試験片を提供して頂いた東レ(株)複合材料研究所長、松井醇一氏に心から感謝いたします。

文 献

- (1) 北條・Gustafson, C. -G.・田中・林, 材料, **36**-402(1987), 222.
- (2) 影山・金原・大沢・北條, 日本造船学会論文集, **168**(1990), 499.
- (3) O'Brien, T. K., Murri, G. B. and Salpekar, S. A., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, **1012**(1989), 222.
- (4) Trethewey, B. R. Jr., Gillespie, J. W. Jr. and Carlsson, L. A., *J. Comp. Mater.*, **22**(1988), 459.
- (5) Wang, A. S. D., Kishore, N. N. and Feng, W. W., *Proc. ICCM-IV*, (1982), 599.
- (6) 岩本・藤原, 第19回FRPシンポジウム前刷, (1990), 205.
- (7) Newaz, G. M. and Yung, J. -Y., *Eng. Frac. Mech.*, **29**(1988), 483.
- (8) Gustafson, C. -G., Jilkèn, L. and Gardin, P. A., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, **876**(1985), 200.
- (9) Russell, A. J. and Street, K. N., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, **1012**(1989), 162.
- (10) Russell, A. J. and Street, K. N., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, **972**(1988), 259.
- (11) Hojo, M. and Aoki, T., To be published in *ASTM Spec. Tech. Publ.*
- (12) 関根・神谷, 機論, **54**-500, A(1988), 723.
- (13) 関根・神谷, 材料, **37**-416(1988), 505.
- (14) 関根・神谷, 機論, **55**-513, A(1989), 1203.
- (15) Barsoum, R. S., *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **11**(1977), 85.
- (16) 石川, 機論, **46**-401, A(1980), 67.
- (17) Sih, G. C., Paris, P. C. and Irwin, G. R., *Int. J. Frac. Mech.*, **1**(1965), 189.
- (18) 関根・神谷, 機論, **52**-480, A(1986), 2001.