229

一方向強化CFRP積層板の繰返し荷重下における層間はく離進展に及ぼす試験温度および荷重繰返し速度の影響

神戸大学工学部	ΤĒ	中井	善一	川崎重工(株)	学	〇山守	博文
ヤマハ発動機		中村	政晴	大阪大学工学部	Æ	大路	清嗣

1. 緒 言

繊維強化樹脂複合材料(FRP)は、強度の非常に大き い繊維状の材料を母材としての樹脂に埋め込み、構造 部材として使用できるようにしたものである、このよ うな材料は一般に比強度(=引張強度/密度)が大き いが、異方性でかつ非均質材であるため、金属とは全 く異なった破壊様式を示す、したがって、FRPにはそ の特徴を踏まえた適切な強度評価方法が必要である. しかし、いままでの先進FRPの研究開発は材料開発と 実用化が主であったため、破壊力学的強度評価法につ いては十分な検討がなされていない.先進FRPの需要 が拡大し、さまざまな構造物で用いられるようになっ た昨今では, FRPの破壊力学的強度評価法の確立は急 務となっている、そこで、本研究では熱硬化性樹脂を 母材とする炭素繊維強化樹脂複合材料(CFRP)積層板に おける層間はく離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を調べた.

2. 実験方法

試験材料は、CFRPプリプレグP3060E-15(東レ)を59 枚一方向に積層して板厚8mmとした積層板である.こ のプリプレグの繊維は、トレカT300B(東レ)で、樹脂 は180℃硬化型エポキシ樹脂#3601(東レ)である.線形 複合則によって計算した成形板の弾性定数を表1に示 した.添え字の1は繊維配向方向、2は板厚方向、3 は板幅方向である.E₁およびν₂₃は実測も行った が、その値は表1の計算値とほぼ一致していた.

試験片は、図1に示すような形状のDCB型試験片で

表1 複合則によって計算した弾性定数(GPa).

縦弾性定数	$E_1 = 143$	$E_2 = 8.43$
横弾性定数	$G_1 = 4.77$	$G_2 = 3.35$
ポアソン比	$\nu_{12} = 0.3$	$\nu_{23} = 0.256$



図1 試験片の形状.

あり、成形板から機械加工によって切り出した、疲労 き裂の導入を容易にするために、試験片にマイクロ カッターで、幅0.5mm、深さ15mmの切欠きを初期欠陥 として導入した.さらに、ピン穴付きのアルミブロッ クをエポキシ系接着剤により試験片に接着することに よって荷重を負荷した.

負荷および変位計測装置の概観を図2に示した.ア ルミブロック,ピン,およびグリップの変形は微小で あると考え,差動トランスによって計測した上下グ リップ間の変位をき裂開口変位とした.また,荷重負 荷には,電気油圧サーボ式疲労試験機を用い,荷重制 御あるいは変位制御下で試験を行った.

本研究では、き裂長さをコンプライアンス法によっ て計測した.き裂長さとコンプライアンスCの関係







図3 有限要素メッシュ.

は、材料を直交異方性材料として有限要素法によって 解析した.その要素分割を図3に示す.また,解析結 果を図4に中実印◆で示した.ただし,Cは荷重点変 位と荷重関係の勾配,aはき裂長さである.図中の中 空印は、実測したき裂長さとコンプライアンスの関係 である.〇印は、試験片表面におけるき裂長さとの関 係、□印は、破面より実測した板幅方向の平均き裂長 さとの関係である.図5に示したように、き裂先端は 大きく湾曲しており、試験片内部では試験片側面より もき裂が進展しているが、有限要素法による解析結果 は、平均的なき裂長さにほぼ対応している.そのた め、実際のき裂長さの算定に当っては、有限要素解析 結果を近似した次式を用いた.

 $BE_1C = 27.87 \cdot (a / H)^{2.679}$ (1) ここで、Bは板幅、2Hは板厚である、上式で与えら れるコンプライアンスをき裂長さで微分することによ りエネルギ解放率を求め、それより応力拡大係数を評 価した、

疲労試験は荷重一定および ΔK 漸減条件で行った. ΔK 漸減試験においては、次式を満足するように、き 裂が0.05mm伸びるごとに、応力比R (=0.5)を一定 として荷重を減少させた。

 $\Delta K = \Delta K_{\circ} \cdot \exp \{-0.08(a-a_{\circ})\}$ ………(2) ここで、 ΔK_{\circ} および a_{\circ} は、それぞれ実験開始時にお ける応力拡大係数範囲およびき裂長さである.なお、 荷重周波数 f は2Hzおよび20Hzとした.

本研究では空気中における試験温度の影響を調べた.室温の場合,試験温度を制御しなかったが、50℃ および80℃の場合には,バンドヒータおよびマイク



図4 コンプライアンスとき裂長さの関係.



図5 き裂先端の形状

ロ・プロセッサ内蔵の温度調節器を用いて,50℃± 0.2℃あるいは80℃±0.5℃に試験温度を制御した.

3. 実験結果および考察

室温における、1サイクル当りのき裂伝ば速度da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を図6に示した.き裂伝 ば速度da/dN>5×10⁻⁹m/cycleの領域ではda/dNと応力 拡大係数幅 ΔK の間にべき乗則が成立している.その べき指数mは約25であり、金属材料と比べてきわめて 大きい値になっている.da/dN<5×10⁻⁹m/cycleの領 域においては、da/dNはべき乗則で与えられる値より 小さくなっており、 ΔK =0.45MPam^{1/2}付近において き裂伝ばの下限界が存在する.なお荷重繰返し周波数



の影響に関しては、実験結果のバラツキが大きく、明 確な結論は得られていない.ただし、図7に示した単 位時間当りのき裂伝ば速度da/dtと1サイクル中の最大 応力拡大係数 K_{max} の関係よりも図6のda/dN – ΔK 関 係のバラツキのほうが小さく、き裂伝ばは、時間依存 型よりも繰返し数依存型に近いようである.

50℃および80℃におけるda/dNと△Kの関係を図8 に示した.なお、図中にハッチングした領域は、室温 における実験データの範囲である.50℃および80℃に おけるき裂伝ば速度は、室温における上限値よりもさ らに大きくなっており、試験温度が高いほど、き裂伝 ば速度が大きいようである.また、同一温度に対して



図8 50°Cおよび80°Cにおけるda/dN- ΔK 関係.



図9 50℃および80℃におけるda/dt-Kmax関係.

は、荷重緑返し周波数が小さいほどき裂伝ば速度が大 きくなっている、50℃および80℃の場合も、da/dN>5 ×10^{-1 1}m/cycleの領域でda/dNと Δ Kの間にべき乗則 が成立している、そのべき数mは約35で、室温の結果 よりさらに大きい値になっている、また、da/dN<5× 10^{-1 1}m/cycleの領域において、da/dNはべき乗則で与 えられる値よりも低くなっている。

50℃および80℃における,単位時間当りのき裂伝ば 速度da/dtと1サイクル中の最大応力拡大係数 K_{max} の 関係を図9に示した.室温における実験データの範囲 を図中にハッチング領域で示した.50℃および80℃で は、da/dt – K_{max} 関係に周波数依存性はほとんどな く、時間依存型のき裂伝ば挙動を示している.また, 図9ではわかりにくいが、図8を考慮すると、試験温 度が高いほうがき裂伝ば速度がわずかに大きいようで ある.なお、da/dt – K_{max} 関係にも下限界が存在し、 約0.8MPam^{1/2}である.

室温および50℃における破面の走査型電子顕微鏡写 真を図10に示した.室温においては、炭素繊維が所々 破断し浮上がっているが、50℃においてはそのような 形態は観察されない.80℃においても同様であった. これは、温度が高くなると樹脂と繊維の間の界面強度 が低下するために、繊維が容易に引き抜け、破断する ことがないためであると考えられる.繊維がき裂上下 面を架橋した場合、その荷重分担の程度によってき裂 先端の応力拡大係数範囲の低下の割合が異なるものと 考えられるが、ΔKの評価にその影響を評価していな いことが室温におけるda/dN-ΔK関係にパラツキが 大きかった原因であると考えられる.

謝辞 本研究に対して、平成2年度および平成3年度文 部省科学研究費補助金・奨励研究(A)の援助を得た.ま た,供試材は東レ㈱ACM技術部・野村晋氏より提供いた だいた.さらに、長岡技術科学大学・武藤睦治助教授 および工業技術院製品科学研究所・北條正樹氏には、 有意義なご助言をいただいた.記して謝意を表する.



図10 破面の走査型電子顕微鏡写真.