ガラスマット強化プラスチックの疲労 き裂伝ば挙動に関する研究*

鈴木 恵** 中西 博** 岩本 正治**
山本 泰裕*** 近藤 昌樹****

A Study of Fatigue Crack Growth Behavior in Glass Mat Reinforced Plastics

by

Megumu SUZUKI, Hiroshi NAKANISHI, Masaharu IWAMOTO,
Yasuhiro YAMAMOTO and Masaki KONDOH
(Kyoto Institute of Technology, Kyoto)

The fatigue crack growth behavior in glass mat reinforced polyester laminate was investigated by macroscopic observations and discussed from the view point of fracture mechanics.

The main fatigue crack was found to propagate after the debonding between fibers and resin took place and the damage zone increased at the fatigue crack tip. The fatigue crack length was determined by the compliance method, since the fatigue crack tip was not clear. The fatigue crack growth law was easily determined by ΔK -controlled tests of the materials. It was found that the crack growth rate of the specimen containing thick fibers was lower than that of the specimen containing fine fibers at the same stress intensity factor range and the same fiber content in weight.

(Received May 18, 1982)

キー・ワード：ガラスマット強化プラスチック，疲労き裂伝ば，TDCB 試験片，コンプライアンス法

1 緒 言

複合材料が構造材料として注目されるようになって、その疲労に関する研究が活発に行われているが、疲労破壊に関する破壊力学的研究は、疲労き裂長さ¹⁾に比べて繊維長が大きい場合には、き裂長さの評価および均質体として取扱えるかどうかという問題も生じ、少ないようである。

それゆえ、本研究では疲労き裂長さ¹⁾に比べて繊維長が大きいガラス繊維で強化したプラスチックでも均質体とみなし、疲労き裂伝ば挙動の巨視的観察を行い、それより得た情報をもとにして疲労き裂長さの評価方法を検討し、その検討より作製した試験片を使用して、疲労き裂伝ば速度と応力拡大係数範囲との関係を示す疲労き裂伝ば則²⁾を調べる。また、強化材としてのガラス繊維の直径を太くしようとする試みが行われている

が、試料中の繊維の直径が疲労き裂伝ば挙動および疲労き裂伝ば則にどのように影響するか検討する。

2 実験試料および実験方法

実験試料は、チョップドストランドマットに不飽和ポリエステル樹脂を含浸させた厚さ 1 mm のものを 6 枚ハンドレイアップ法により積層させた厚さ約 6 mm の平板である。この試料のガラス繊維は直径 13 μ m、長さ 50 mm のもので、ガラス繊維重量含有率は約 30 % である。また、繊維直径の影響を調べるために、直径 15 μ m、長さ 50 mm の試料も使用した。ここで、繊維直径 13 μ m を使用した試料を A 材、15 μ m を使用した試料を B 材と名付け、以後この名称を使用する。両試料の機械的性質を Table I に示す。疲労き裂伝ばの巨視的様相および疲労き裂長さの評価には、Fig. 1 (a)に示す CT 試験片を使用した。また、この結果を検討して疲労き裂伝ば則をあてはめるためには、Fig. 1 (b)に示す TDCB 試験片を使用した。ここに、テーパー部は後述する(1)式で示される破線を、加工を容易にするため実線で近似した。側溝は 45° で深さ 1 mm に

* 原稿受理 昭和57年 5 月 18 日

** 正 会 員 京都工芸繊維大学工学部

京都市左京区松ヶ崎御所海道町

*** 京都工芸繊維大学大学院 (現在、シャープ(株))

**** 京都工芸繊維大学 (現在、京都太学大学院)

Table I. Mechanical properties of specimens.

Material	Fiber diameter (μm)	Elastic modulus $E(\text{kg/mm}^2)$	Proof stress $\sigma_{0.2}(\text{kg/mm}^2)$	Tensile strength $\sigma_B(\text{kg/mm}^2)$	Elongation (%)
A	13	9.9×10^3	5.4	11.0	2.7
B	15	9.3×10^3	6.5	13.7	3.1

Strain rate: 8.3%/min, Temp: $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 5\%$ RH

Fig. 1. Shapes and dimensions of test specimens.

機械加工し、その正確な深さは疲労試験後破面を万能投影機で観測して求めた。初期切欠きの始めはテクニカッタにより、それから先の2mmはかみそり刃で注意深く加工した。

疲労試験は、電気油圧式疲労試験機（島津サーボベット Lab 5）を用い、応力比0の片振り引張疲労、応力波形は三角波で繰返し速度は毎分30回とした。実験はすべて恒温恒湿室（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 5\%$ RH）で行った。

3 実験結果および考察

3・1 疲労き裂伝ばの巨視的様相

CT 試験片表面の疲労き裂伝ばの巨視的様相を Fig. 2 に示す。これは試験片背後から光をあてて、その透過光を利用し試験機をとめて平均荷重のかかったもとで撮影したものである。(1)は繰返し荷重を与えないで平均荷重を負荷した切欠き先端の状態、切欠き先端の細線は切欠きをつけるための鉛筆によるガイドラインである。(2)はき裂成長の初期段階で、荷重方向に対し直角か斜め方向に存在する繊維と母材との界面に、はく離が観察される。繰返しに伴うエネルギーはき裂の進展よりはく離に多く使用されるようである。(3)はき裂成長の最終段階でき裂先端ではく離はあまり観察されない。この状態では実断面応力の増大のためにき裂伝ば速度が大きくなり、主にき裂進展にエネルギーが費されるため、界面はく離に費されるエネルギーが減少するためと考えられる。(4)は破壊時瞬間の様相である。

Fig. 2. Macroscopic damage patterns at notch tip during fatigue crack propagation of A material ($\sigma = 0.54 \text{ kg/mm}^2$, $N_f = 716$ cycles).

繊維の引抜きが観察され、その範囲は破壊前の被害域先端を少し含んでいる。このことより、(3)においては被害域先端では繊維が完全に切断されていないことがわかる。

このような疲労き裂成長の様相から、き裂伝ば段階においてはき裂先端の様相が異なることがわかる。したがって、長繊維で強化した複合材料の疲労き裂長さを評価することは多くの困難を伴うことがわかる。そこで、試みた疲労き裂長さの評価方法を次に述べる。

3・2 疲労き裂長さの評価およびき裂伝ば速度と応力拡大係数範囲との関係

読取望遠鏡を用いて、荷重制御試験により CT 試験片表面の被害域先端を直接測定すると、被害域先端が不明りょうであるため疲労き裂長さ a_0 は、測定者により異なることが考えられる。また、疲労試験により試験片に疲労き裂を進展させ、そのき裂部に着色液を注入し、乾燥させた後に静的引張りにより破断させ、着色部の面積を測り、その面積を板厚で除したき裂長さを a_i とし、種々の疲労き裂長さで求めた a_i と表面き裂長さ a_0 との比を求めると、 a_0 がおよそ 20 mm より小さい範囲では約 0.9、それより大きい範囲では約 0.95 となった。それゆえ、 a_0 の測定範囲内で、およそ $a_0 < 20 \text{ mm}$ では a_0 の 0.9 倍、 $a_0 > 20 \text{ mm}$ では a_0 の 0.95 倍を便宜上修正き裂長さ a_m とした。なお、これらの係数値の決定方法に対しては説得力に乏しい点もあるが、 a_m の値が a_0 よりも真のき裂長さに近い値を示していると考えerことは妥当と思われる。

しかし、上述したように a_0 の測定には若干の問題点もあり、そのためにき裂長さ測定が破壊寸前まで試験機を止めずに行え、比較的客観性もあると考えられるき裂長さを試験片コンプライアンスに関係付ける方法

の使用を試みた³⁾。このコンプライアンス法により $a-N$ 曲線を求めるには、最初に静的引張試験によりコンプライアンス c とき裂長さ a の較正曲線を作成し、つぎに疲労試験によりコンプライアンス c と繰返し数 N との関係曲線を求め、この $c-a$ 曲線と $c-N$ 曲線より求められる。この方法で問題となるのは、 $c-a$ 曲線をどのような方法で作成するかである。それで $c-a$ 曲線は次の方法で行う。

まず、かみそり刃で注意深く入れた種々のき裂長さを有する試験片を、疲労試験と同程度の引張速度で静的に引張り、得られた荷重-変位曲線よりコンプライアンス c とき裂の長さ a の関係を求めた。(この方法により求めた $c-a$ 関係をかみそり法による関係と呼ぶ。) この結果を Fig. 3 の一点鎖線で示し、この較正曲線より求めた $a-N$ 曲線を Fig. 4 の一点鎖線で示す。

Fig. 3. Relation between compliance and crack length at cyclic stress of 0.56 kg/mm² of A material.

Fig. 4. $a-N$ curves by compliance method at cyclic stress of 0.56 kg/mm² of A material.

しかし、かみそり刃により入れたき裂は、疲労き裂とはき裂先端の様相が異なるため、同一のき裂長さにおいてもコンプライアンスが同じになるかは疑わしい。したがって、各繰返し数ごとの荷重-変位曲線からコンプライアンスを求め、ある繰返し数で着色液をき裂面に注入してから静的に破断させる。そのときの染色部より疲労き裂長さを求める。さらに疲労き裂長さの異なる試料で $c-a$ 関係を求める。(この方法により求めた $c-a$ 関係を疲労試験法による関係と呼ぶ。) この関係

を Fig. 3 の実線で、この較正曲線より求めた $a-N$ 曲線を Fig. 4 の実線で示す。この図には参考のために表面き裂長さ a_0 を○印、修正き裂長さ a_m を△印で示した。これより疲労き裂長さの較正曲線から求めた $a-N$ 曲線は修正き裂長さ a_m による $a-N$ 曲線に近いことがわかる。このことは、CT 試験片を用いた荷重制御試験では疲労試験法で作成した $c-a$ 曲線を用いる方がより良いことを示している。

そこで、この $c-a$ 曲線を用いて、CT 試験片の荷重制御試験で、繰返し応力を 2 種類変化させて求めた Fig. 5 の $a-N$ 曲線を見ると、同じ繰返し応力でも破断繰返し数にかなりのばらつきが見られた。さらに、応力範囲を 0.46~0.56 kgf/mm² に変化させたときの疲労き裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との関係を示したのが Fig. 6 の Δ 印である。この結果、ばらつきが見られるが da/dN と ΔK との間には相関関係のあることがうかがわれた。もし、相関があるならば、たとえば ΔK 制御試験で da/dN を求めたデータのばらつきが荷重制御試験の場合より軽減されるで

Fig. 5. $a-N$ curves of A material.

Fig. 6. Relation between cyclic crack growth rate and stress intensity factor range of A material.

あろうことは十分予想できることである。比較のために、次節で述べる試験片形状による $4K$ 制御試験で求めた実験値を●印で、これらを結んで実線で示した。

この結果から、両者はよい相関関係があり、本供試材 A の疲労き裂は $4K$ 支配で伝ばすることがわかり、この疲労き裂伝ば則の係数を求めるには、CT 試験片の荷重制御試験より次節の試験片形状による $4K$ 制御試験の方がよいこともわかった。

3・3 $4K$ 制御試験片の初期き裂の入れ方

$4K$ 制御試験⁴⁾には、(1)き裂長さの増加とともに応力を下げて $4K$ を一定にする方法、(2)特殊な形状の試験片を使用する方法があるが、本報では(2)の方法を採用する。Fig. 1 (b)に示す $4K$ 制御 (TDCB) 試験片を 2 本の片持はりと考えると、荷重 P 、はりの幅 B 、試験片の側溝部での幅 B_n 、荷重点から距離 a だけ離れた位置でのはりの高さ $H(a)$ とすると、応力拡大係数 K は

$$K = \frac{2P}{\sqrt{BB_n}} \left[\frac{3a^2}{H^3(a)} + \frac{1}{H(a)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

で示される。ここで、き裂の長さに対する K 値の独立性は、試験片の形状に関係する [] 内の値が一定のとき達成される。[] 内の値は試験片のテーパ部のこう配を表す。

以上述べた $4K$ 制御試験片の設計方法は、実際の試験片の正確な解析ではなく、片持はりで近似した解析である。また、側溝が付けられているため、その影響などを考慮する必要性も考えられ⁵⁾、[] の値に代り実際の試験片を使った実験による n' 値が使用され、応力拡大係数 K も

$$K = \frac{2P}{\sqrt{BB_n}} [n']^{1/2} \quad (2)$$

を使用の方がよいとされている。このとき、 n' 値が一定すなわち dc/da が一定の範囲において、 K 値はき裂長さに無関係で荷重に比例する。この条件は実験により $c-a$ 曲線により決定される。

Fig. 7. $c-a$ curves of A and B materials.

Fig. 7 は種々のき裂長さを有する A, B 材をクロスヘッド速度 30 mm/min で静的に引張ったときの荷重-変位曲線より求めた $c-a$ 曲線である。この図よりき裂長さ a が 25~45 mm の範囲では線形に増加している。したがって、この範囲では K 値はき裂長さに無関係である。この試験片に対する n' 値は、Fig. 7 の直線部の傾きから求められ、両材料とも $n'=0.29 \text{ mm}^{-1}$ となる。それゆえ、(2)式による応力拡大係数 K_E は

$$K_E = \frac{1.08P}{\sqrt{BB_n}} \quad (3)$$

で示される。また、Fig. 1 (b)の試験片形状で側溝のない応力拡大係数 K_A は

$$K_A = \frac{P}{B\sqrt{H(a)}} \left[\frac{a}{H(a)} + 0.7 \right] f(v) \quad (4)$$

ここに、 v はテーパ部のこう配で $f(v)$ 値は文献で与えられている。 (4)式に Fig. 1 (b)の数値を代入すると

$$K_A = \frac{1.06P}{B} \quad (5)$$

となる。ここで、側溝のある場合は $B \approx \sqrt{BB_n}$ としても差支えないという報告⁷⁾を使用すると

$$K_A = \frac{1.06P}{\sqrt{BB_n}} \quad (6)$$

となる。(3)式、(6)式を比較して平均値をとると

$$K = \frac{1.07P}{\sqrt{BB_n}} \quad (7)$$

となる。

前述のように、疲労試験により入れたき裂とかみそりて入れたき裂では様相が異なるから、両者のコンプライアンスも異なることがわかった。しかし、かみそり法により、疲労と同じ荷重まで静的に引張り、そのときの荷重-変位曲線よりコンプライアンスを求め、さらに切欠き長さを変えて $c-a$ 関係を求めた。この方法に

Fig. 8. $c-a$ curves of saw-cut crack and fatigue crack specimens of A material.

Fig. 9. a - N curves of A material, (a), and B material, (b).

よる c - a 関係と疲労試験法による c - a 関係は Fig. 8 に示すように異なるが、 dc/da はある範囲で平行で一定となる。したがって、疲労き裂伝ば則の係数 C 、 m を求めるには、簡便なみそり法を用いた。

3・4 疲労き裂伝ば則への繊維直径の影響

ΔK 制御試験片で ΔK をパラメータとして求めた a - N 曲線の一部を A、B 材に対し Fig. 9 (a), (b) に示す。き裂長さが長くなると試験片端部の影響があらわれて、もはや ΔK 制御ではなくなりき裂は急速に進展する。したがって、その影響があらわれてくるまでの a - N 曲線を最小自乗法により、図中の実線で示されるように直線近似した。

このき裂伝ば曲線をもとに、疲労き裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との関係を対数表示すると、Fig. 10 のように直線で示される。ここに、 r は相関係数である。これらの直線をき裂伝ば則すなわち

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (8)$$

にあてはめると、係数 C 、 m は Table II のようになる。この表より、B 材の m 値は A 材の値より大きく、 C 値は逆となる。また、低、中程度の同じ応力拡大係数範囲では B 材のき裂伝ば速度は A 材のそれより小さい。この理由を説明するためのき裂先端の様相を Fig. 11 に示す。この図より、同じ応力拡大係数、き裂長さに対し、A 材の繰返し数は 3020 回、B 材では 17000 回を要し、しかもき裂先端の被害域は A 材の方が B 材よりはるかに小さいことから理解できる。すなわち、

Fig. 10. Relation between cyclic crack growth rate and stress intensity factor range of A and B materials.

Table II. Values of m and C .

Material	(kg, mm unit)	
	m	C
A	15.5	1.91×10^{-25}
B	18.3	7.59×10^{-30}

低、中程度の応力拡大係数範囲では、繊維重量含有率が同一であるから、繊維直径の太い B 材は A 材より繊維間隔が広く、そのため切欠き先端で多くの樹脂領域に微小き裂が入り、主き裂を進展させるため、よりその近傍の繊維とはく離に多くのエネルギーが費される。⁸⁾

Fig. 11. Macroscopic damage patterns at fatigue crack tip of A and B materials.

しかし、高応力拡大係数範囲になると、応力が高くなるため主き裂の進展に多くのエネルギーが費される。したがって、 $40 \text{ kg/mm}^{3/2}$ に近くなると、A、B材ともき裂長さ、主き裂先端の被害域、繰返し数が同程度となり、両者のき裂伝ば速度が近づく傾向を示したものと考えられる。

4 結 論

ガラスマット強化ポリエステル積層板で片振り引張試験を行い、き裂伝ば過程の巨視的観察および破壊力学的観点から研究し、次の結論を得た。

(1) 疲労き裂伝ばはき裂先端部にある負荷方向に直角か斜め方向の繊維が樹脂とはく離し、き裂先端のかかなりの領域が白化してから主き裂は進展するが、最終破壊近くまで繊維がき裂面の上下を橋わたししていることが観察された。

(2) 疲労き裂先端の被害域が明りょうでないので、き裂長さをコンプライアンス法で求めることは有効である。また、荷重制御試験でなく、 ΔK 制御試験で疲労き裂伝ば則をあてはめ、係数 C 、 m を求めることが

できた。

(3) 同じ繊維重量含有率で、繊維直径の大きい試料と小さい試料のき裂伝ば速度を比較すると、低、中程度の応力拡大係数範囲では、繊維直径の大きい試料の方が小さい試料より遅く、高応力拡大係数範囲では両材ともほぼ等しいき裂伝ば速度になることがわかった。

終りに、本研究を行うに当たり、試料提供会社および実験に協力してくれた本学学生田中茂樹、安井増人両君に感謝します。なお、本報の主な部分は第11回FRPシンポジウムで講演したが、一部は日本機械学会第58期全国大会（昭和55年8月）で講演した。そのまとめの機会を与えて下さった同志社大学工学部平井恒夫教授に感謝します。

（昭和57年3月25日 第11回 FRP シンポジウムにて講演）

参 考 文 献

- 1) 北川英夫, 渡辺勝彦, 日本複合材料学会誌, **5-4**, 136 (1979).
- 2) Paris, P., and F. Erdogan, Trans. ASME, Ser. D., **85**, 531 (1963).
- 3) Barnby, J. T., and B. Spencer, J. Mat. Sci., **11**, 78 (1976).
- 4) Owen, M. J., and P. T. Bishop, J. Phys., D; British J. Appl. Phys., **7**, 1214 (1974).
- 5) 高野太刀雄, 岡村弘之, 材料試験技術, 52-839, 22 (1977).
- 6) 岡村弘之, “線形破壊力学入門”, p. 220 (1976) 培風館
- 7) Johnson, F. A., and R. C. Radon, Eng. Fract. Mech., **4**, 559 (1972).
- 8) Suzuki, M., M. Iwamoto, and K. Kirimura, Proc. Japan-U.S. Conf. on Composite Materials, 163 (1981) Tokyo