C/C コンポジット切欠試験片の疲労強度に関して

藤川 正毅^{*1}, 眞壁 朝敏^{*1}Md. Shafiul FERDOUS^{*2}, Sofyan Arief SETYABUDI^{*2}

Fatigue Strength of Notched Specimen of Machine-able C/C Composites

Masaki FUJIKAWA^{*3}, Chobin MAKABE

Md. Shafiul FERDOUS, Sofyan Arief SETYABUDI

^{*3} University of the Ryukyus, Department of Mechanical Systems Engineering
Senbaru 1, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan

The fatigue and fracture behavior of C/C composites fabricated using fine-woven carbon fiber laminates with $\alpha=0/90^\circ$ direction were investigated. The effect of the slit configuration on crack initiation and growth behavior was observed. Specimens with blunt-notches and center-holes were also used to compare the fatigue strength and crack growth behavior. Non-propagating cracks were observed and fatigue limit was defined as the maximum stress at which specimen did not break for $N=10^7$ cycles stress application. The longest fatigue life was obtained in the case of specimens with shorter slits. The relationships between fatigue strengths and specimen shapes were analyzed by stress concentration, K_t and stress intensity factor, K_I . The effect of slit configuration on fatigue strength was then discussed regarding both the experimental and calculated consequences.

Key Words : Fatigue limit, Crack initiation, Crack growth, Stress concentration, Stress intensity.

1. 結 言

著者らはこれまでに C/C コンポジットのスリット試験片の疲労挙動について実験的に検討してきた¹⁾。そして、スリットを先端が鋭い切欠きとみなし、それを有する試験片の場合と先端半径が比較的大きい鈍い切欠きを有する試験片の場合の疲労挙動を比較した。本報告においては、定性的ではあるが、せん断変形挙動、破壊拘束、応力集中そして応力拡大係数の検討結果に基づいた考察を行ってみた。

2. 実験方法

本研究で用いた材料は東洋炭素(株)製の機械加工が可能な C/C コンポジット CX-31 である。この材料はフェノール樹脂を炭素繊維で編んだ布にしみこませ、布の方向を揃えて何枚も重ね高温圧縮し板に成形したものである。標準の板厚 6.2mm では 26 枚の布が重なっている。素材のカatalog 上の引張強さは 98MPa である。素材から切りだした試験片の基本形状は厚さ 4.2mm、幅 30mm そして長さ 130mm の長方形板である。それを 図 1 に示すように鋭い切欠きを有する試験片

(またはスリット試験片)、鈍い切欠きを有する試験片に加工した。なお、本報告では、主に試験片の軸と繊維の方向 0° が 90° の角度になるように設定した場合について検討した。

引張・圧縮疲労試験を周波数 10Hz、応力比(繰返し最小応力と繰返し最大応力の比) -1 の条件で、電気油圧サーボ方式の材料試験機を用いて行った。き裂の発生や進展はマイクロスコープを用いて試験片表面から直接観察した。その際、き裂の観察を容易にするために、文字の修正等に用いる修正テープ(白くて薄い膜)で試験片表面をペイントした。そのことによって、試験片の凹凸が少なくなり、観察しやすい薄いグレーの色になった。

Fig.1 Shapes of the test sections, (a) slit ($t = 0.5, 1.0, 2.5, 5.0\text{mm}$; $W = 30\text{mm}$; $\rho = 0.5\text{mm}$), (b) blunt notch ($t = 7.5\text{mm}$; $W = 30\text{mm}$; $\rho = 8\text{mm}$)

^{*1} 正員, 琉球大学 工学部 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1)

^{*2} 学生員, 琉球大学大学院 理工学研究科
E-mail: fujikawa@tec.u-ryukyu.ac.jp

3. 実験結果と考察

S-N 曲線（破断繰返し数 N_f と応力振幅 σ_a の関係）を図 2 に示す．図中の矢印は破断せずに実験を中止した場合のデータを示しており，このデータの値を疲労限度 σ_w とした（なお， $t=0.5\text{mm}$ で破断した場合，破面はスリット先端を含んでおらず，スリット加工が強度に影響しない範囲内にあった）．

Fig.2 S-N curves of notched specimens

前報¹⁾においては，スリットを有する切欠試験片の破壊過程においてせん断変形が抑えられる現象を破壊拘束として説明した．すなわち，スリットを加工することによって，破壊が生じるリガメント部の高さが狭くなり，平滑試験片よりも板厚方向での母材のすべりが生じ難くなり，炭素繊維の破壊挙動にもそれが影響を及ぼすということを破壊拘束と表現した．

実験材料の破壊挙動を定性的な応力分布の問題と関係させて検討してみた．図 3 は試験片の応力分布を汎用 2 次元体積力法のプログラム²⁾を用いて解析した結果である．この結果から応力集中係数を求めることができるが，本実験に用いた試験片では単に応力集中係数のみでは疲労強度が決まらないので，応力分布にも注意して定性的に考察してみた．

図 2 と図 3 を比較して考察するため，図 3 には，2 つのスリットの場合（ Δ ， ∇ ）と鈍い切欠きの場合（ ∇ ）の応力の値がそれぞれほぼ同じになる位置に縦線を引いてある．各試験片の σ_w を比べると，スリット長さが $t=5\text{mm}$ の場合は鈍い切欠きの場合の疲労限度に近い値になっている．そこで，仮に破損が生じる範囲 λ が $t=5\text{mm}$ のスリットを有する試験片と鈍い切欠きを有する試験片の場合でほぼ等しいとすると x が λ の位置での応力がほぼ破損が生じる限界の応力に対応するとみなせると考えてみた．なお，鈍い切欠きの場合の応力勾配

はなだらかであるのでスリット長さが $t=2.5\text{mm}$ の場合で同様な操作で限界応力を仮定してもほぼ同じ結果になることが，図 3 の縦線の位置でのデータが読み取れる．

切欠底からの損傷長さを λ として，本実験での切欠形状，応力分布そして λ の関係が図 4 の模式図のように示されると仮定した．なお，鈍い切欠きの場合がより平面応力状態に近いと考えると損傷域の 2 次元的な広がりも鈍い切欠きの場合がより広いと考えられる．

図 5 は破断した試験片の様相を示したものである．スリットの場合と鈍い切欠きの場合でそれぞれの一例を示した．図 5 から明らかなように，板厚が同じであるので，板厚方向のき裂の傾斜は鈍い切欠きの場合が大きいことが分かる．その理由は，板厚方向において母相がせん断変形し易いことに関係していると思われるので，損傷領域と炭素繊維の破壊を図 6 のように関連づけてみた．

図 6 (a), (b) は鈍い切欠きを有する試験片の場合，(c), (d) はスリットを有する試験片の場合の模式図である．図 6 は図 4，図 5 と関連させており，鈍い切欠きの場合には，応力勾配がなだらかなため，き裂が発生すると進展速度は高く，切欠底のき裂の密度は低くなると考えられ，損傷領域は広がる．それに対して，最大応力が高く応力勾配が急なスリット（鋭い切欠き）の場合は，スリット先端に発達する損傷域は図 4 に示すように荷重軸方向に狭くなると考えられる．また，き裂は発生し易いが進展し難いので，スリットの底ではき裂密度は比較的高くなると考えられる．なお，スリットから進展するき裂は初期ではモード I 型である．

図 6 の破面の様相から，き裂が進展していくにつれて，板厚方向での母相のすべり変形の影響を受けて繊

Fig.3 Stress distributions in front of the notch in the cases of specimens used in Fig. 2

維が破壊していくものと思われる。そのため、スリットを有する試験片では、すべり変形との関係で繊維の破壊は生じ難く、鈍い切欠きを有する試験片に比べて切欠底の応力が若干高くても疲労限度が高くなると考察される。それは、前報¹⁾の破壊拘束と称した機構と対応していると考えられる。

き裂進展挙動との関係から疲労強度に関して考察した。疲労限度は発生したき裂が進展開始する限界応力とみなされることもある。

切欠底付近から発生したき裂の挙動を観察した。観察した様相は省略するが、スリット・切欠きの形状によってき裂の発生密度とき裂進展挙動は異なっていた。

Fig.4 Schematic representation of critical stress σ_s , maximum stress σ_{max} and damaged area λ ($\lambda_2 \approx \lambda_1, \lambda_3 < \lambda_1$), (a) $\rho_1=8\text{mm}$ and $t_1=7.5\text{mm}$, (b) $\rho_2=0.5\text{mm}$ and $t_2=5\text{mm}$, (c) $\rho_3=0.5\text{mm}$ and $t_3<5\text{mm}$

Fig.5 Comparison of the shapes of fractured area, (a) Slit specimen ($t=5\text{mm}$, $\sigma_a=31\text{MPa}$), (b) Blunt notched specimen ($t=7.5\text{mm}$, $\sigma_a=29.5\text{MPa}$)

Fig.6 Density of cracks and damaged area; (a) Crack density in $\rho=8\text{mm}$ (blunt notch); (b) damaged area in $\rho=8\text{mm}$; (c) Crack density in $\rho=0.5\text{mm}$ (slit); (d) damaged area in $\rho=0.5\text{mm}$

き裂進展の観察結果によると、スリット試験片でスリットの長さが長い場合には、リガメント部でのき裂発生密度が高くなった。その影響はき裂の進展に現れ、疲労限度に近い応力振幅では、き裂の合体によってき裂進展が遅くなることが観察された。それに対して、鈍い切欠きを有する試験片ではリガメント部でのき裂発生密度が低く、実験応力範囲では、ほぼ単独のき裂が安定的に進展し、試験片を破壊に導いた。

き裂進展と応力拡大係数の関係を定性的に検討してみた。図7は解析モデルであり、図8は応力拡大係数の変化傾向を示したものである。図8に示した結果から、き裂発生密度が低く、単独のき裂が進展する場合に対して、複数のき裂が発生して合体しながら進展する際には応力拡大係数が低下する傾向があることが分かる。応力拡大係数は主き裂のもののみを示している。そして、簡便に検討するために、主き裂のみを進展させ2次き裂は進展させていない。Pattern 2と3では、主き裂と2次き裂が連結した時に応力拡大係数が低下している。このように定性的にはき裂の干涉によって、き裂進展駆動力が低下する場合があることが理解できる。スリット試験片と鈍い切欠きのき裂進展と強度の関係についても図8のような裂の干涉効果のあるなしの影響があるものと考えられる。

(参考文献は省略)

Fig.7 Calculation patterns of cracks

Fig.8 Variation of stress intensity factor K_I