円孔を有する平織り GFRP の引張り/ねじり 組合せ荷重下における疲労に関する研究* (第 1 報, 疲労強度と損傷進展過程)

竹村 兼一^{*1}, 椎名 徹^{*2}, 藤井 透^{*3}

Fatigue Damage Evaluation of a Circular Hole-Notched GFRP under Tension-Torsion Biaxial Loading (1st Report, Fatigue Strength and Damage Process)

Kenichi TAKEMURA, Toru SHINA and Toru FUJII

Fatigue strength and the failure process of a hole-notched glass FRP under tension-torsion biaxial cyclic loading were investigated in this paper. Thin cylindrical specimens were used. Fibers of the reinforcement (plain woven glass cloth) were aligned parallel to the longitudinal and circumferential axes of the specimen. The damage state at each biaxial stress ratio (α : the ratio of normal stress to shear stress) was observed macroscopically and microscopically. The experiments reveal the following results. The fatigue damage progression is dependent on the biaxial stress ratio. When $\alpha=1/0$, damage spreads radially from the hole, but only covers an area of $\pi/4$ to either side of the circumferential axis, in both directions along the circumferential axis. When $\alpha=0/1$, damage progresses radially along both longitudinal and circumferential axes. We call each of these a "fatigue band". Under biaxial loading, macroscopic and microscopic damage states have both types of damage at $\alpha=1/0$ and $\alpha=0/1$.

Key Words: Fatigue, GFRP, Circular Hole Notch, Damage, Biaxial Loading

1. 緒言

荷重が単純な場合, 円孔を有する繊維強化複合材料の繰り返し荷重下での疲労特性に関する研究は必ずしも少なくない. 強度について古くはCurtisらの疲労強度に対する報告がある¹⁾. これ以外にも数多くの報告がある²⁾. 円孔などの切り欠きを有する繊維強化複合材料が繰り返し荷重を受けるとき, 切り欠き周辺の材料中にDebondingやクラックなどの損傷が発生し, 荷重の繰り返しとともにそれらは切り欠きから遠くに広がっていく. このことは既によく知られているところである³⁾. 多方向積層板の場合, 単軸に荷重が作用してもその積層方向によっては円孔周辺の広範な領域で疲労損傷が見られる⁴⁾. 一方, 組み合わせ荷重など, 複雑な荷重が作用する場合の繊維強化複合材料の疲労強度, 特性に関する研究は必ずしも多くない. Daniel は Graphite /Epoxy の中央に円孔を有する平板試験片を用い, これを直交二方向に引張る二軸疲労

試験を行い, その強度特性を調べている^{5), 6)}. Francis らも円孔を有する薄肉円筒試験片を用いた二軸疲労試験を行い, その疲労損傷進展過程を調べている⁷⁾. しかし, いずれも破壊に至るまでの試験片内部の疲労損傷の蓄積等に十分な焦点を当ててはいないように思われる.

本研究の目的は平織りガラス布で強化されたポリエステル樹脂積層板(平織り GFRP)の引張り/ねじり組み合わせ荷重下における疲労特性を明らかにすることである. 疲労強度に及ぼす組み合わせ荷重比の影響ならびに円孔周辺での疲労損傷の蓄積と進展に焦点を当てる.

2. 試験片

本研究では, 図 1 に示す形状, 寸法の薄肉円筒試験片を用いた. 母材には不飽和ポリエステル樹脂, 強化材には平織りガラス布を用いた. 強化方向は, 試験片の円筒軸方向および円周方向に一致させた. 試験片は

* 原稿受付 平成 5 年 6 月 3 日.

^{*1} 正員, 同志社大学大学院 (〒602 京都市上京区今出川烏丸東入ル).

^{*2} コマツ(株) (〒107 東京都港区赤坂 2-3-6).

^{*3} 正員, 同志社大学工学部.

図1 円筒試験片の形状、寸法

樹脂を含浸させたガラス繊維布を回転する円柱マンドレルに巻き付ける Wet winding method を用いた。試験片の製作方法、手順は参考文献⁸⁾に詳しく記載されている。試験片標点部中央に直径 5 mm の円孔を一つ設けてある。ただし、ガラス布の巻始めと終わりの継目の影響を防止するため、円孔はガラス布の継目以外の位置に設けた。平均ガラス繊維体積含有率は $35.7 \pm 1.0\%$ である。

3. 試験方法

引張り/ねじり組み合わせ荷重下での疲労試験には、電子油圧制御疲労試験機を用いた。荷重制御下、引張り/ねじりの荷重波形（いずれも完全片振り）の位相が一致する比例荷重による疲労試験を行った。荷重波形は三角波とした。荷重の繰り返し速度は 2 Hz である。円筒軸方向に引張り荷重を負荷させることにより、試験片には円筒軸方向に引張り応力が生じる。また試験片にねじり荷重を負荷させることにより、円筒軸方向および円周方向にせん断応力が生じる。座標系 1 (y), 2 (x), r, θ は図1に従う。x-y および r- θ 座標は円孔中心を原点とし試験片表面に沿った直交

図2 ビデオカメラを用いた撮影装置の外観

図3 試験片及び円孔近傍より切り出した小片
極座標系である。x 軸（または材料主軸 2）は試験片円周方向に、y 軸（または材料主軸 1）は円筒軸方向にそれぞれ一致させた。r は円孔中心からの距離を、 θ は x 座標からの角度を示す。公称平均引張り応力 σ_1 および公称平均せん断応力 σ_6 は次式により与えられる。

$$\sigma_1 = \frac{P}{(\pi D_m - d) t} \quad (1)$$

$$\sigma_6 = \frac{T}{(\pi D_m - d) t r_m} \quad (2)$$

ただし、

P : 軸方向荷重, T : ねじりモーメント

D_i : 試験片内径, D_o : 試験片外径,

D_m : 試験片平均直径 = $(D_i + D_o) / 2$

t : 試験片厚さ, d : 円孔直径

組合せ荷重疲労試験では、 σ_1 と σ_6 との比 α （組合せ応力比）を試験中一定とした。組合せ応力比

図4 典型的な S-N 曲線 ($\alpha=3/1$)

α として, 1/0 (単軸引張り), 7/1, 3/1, 1/1 および 0/1 (純せん断) の5種類について試験を行った. 試験温度は 23 ± 0.5 °C, 湿度は 60 ± 10 % とした.

図5 全ての組み合わせ応力比における S-N 曲線

4. 疲労損傷の観察

(a) $N/N_f = 0$

(b) $N/N_f = 0.1$

4.1 ビデオカメラによる円孔周辺の疲労損傷の観察

試験片後方から光を照射すると, 疲労損傷領域は影として観察される. 本FRPでは, いずれの組み合わせ

(c) $N/N_f = 0.5$

(d) $N/N_f = 0.9$

(e) failure

図6 組み合わせ荷重下 ($\alpha=3/1$) での疲労損傷状態

せ荷重下でも、負荷により繊維束や樹脂リッチ部に debonding やマイクロクラックが発生する。繰り返し数の増加とともにそれらは個々に成長する。また、クラック数も増す。このように疲労損傷が蓄積される⁹⁾。損傷の程度に応じて影の濃淡が変わる。疲労試験中、試験片の円孔周辺の変化の様子を CCD カメラを用いてビデオ撮影記録した。撮影装置の外観を図2に示す。

4. 2 破断直前の円孔近傍の損傷の微視的観察

疲労試験を破断直前(寿命比で95%と思われる繰り返し数)に中断し、試験片の円孔近傍より小片を切り出した(図3参照)。その小片を樹脂で固めた後、図示する面のバフ研磨を行い、光学顕微鏡を用いてそれぞれの面を観察した。また、試験片から円孔を含む約4×4[cm]角の小片を切り出し、電気炉を用いて注意深く母材を焼却させ、ガラス繊維の損傷を光学顕微鏡で調べた。

5. 結果および考察

5. 1 S-N 曲線

引張り/ねじり組み合わせ荷重下($\alpha=3/1$)における典型的な繰り返し最大応力-寿命関係(S-N関係)を図4に示す。比較のため、円孔の設けていない試験片($d=0$)のS-Nデータも併せて示す。図中の直線はいずれも最小自乗法により求めた。引張り荷重、ねじり荷重、引張り/ねじり組み合わせ荷重によるS-N関係を図5に示す。見易くするため、実験データはプロットされていない。最小自乗近似された直線のみ示してある。図4、図5とも縦軸は無次元化された繰り返し最大応力(静的強度に対する強度保持率)、横軸は疲労寿命を表す。縦/横軸とも対数表示されている。図5より、まずS-N関係は組み合わせ応力比 α の影響を受けることがわかる。いずれの繰り返し数においても純せん断荷重下での強度保持率が最も高く、

(a) $N/N_f = 0.9$

単軸引張り荷重下での強度保持率が最も小さい。すなわち引張り荷重成分の増加と共に強度保持率が減少することがわかる。また、引張り荷重成分の増加(α の

(b) failure

図7 単軸引張り荷重下($\alpha=1/0$)での疲労損傷状態
($\sigma_{max}/\sigma_{min}=0.31, N_f=40550$)

(a) $N/N_f = 0.9$

(b) failure

図8 純せん断荷重下($\alpha=0/1$)での疲労損傷状態
($\sigma_{max}/\sigma_{min}=0.53, N_f=37874$)

増加)と共にS-N曲線の傾きすなわち静的強度に対する強度低下の割合は低下する。

5. 2 円孔から伸びる凝クラック

組み合わせ応力比が $\alpha=3/1$ の場合の円孔からの疲労損傷進展の様子を図6に示す。図(a)はバージン材の様子である。照明を試験片の背後に置き、円柱試験片を正面からビデオ撮影しているため、両端の部分は光が通りにくく、バージン材でも影ができる。しかし、本研究では円孔から伸びる疲労損傷に焦点を当てているため、以下の解析に当たって大きな支障はない。以下、図(b), (c), (d), (e)が繰り返し数比(繰り返し数/破断までの繰り返し数)で、0.1, 0.5, 0.9, 1.0(破断)に対応する。また、組み合わせ応力比が $\alpha=1/0$, 0/1の場合の円孔からの疲労損傷進展を図7, 8に示す。双方とも(a),(b)が繰り返し数比で0.9, 1.0(破断)に対応する。

図より組合せ応力比および繰り返し数比に関わらず円孔から遠ざかる程、損傷濃度が低くなっていることがわかる。これは円孔が応力集中源となり、その近傍で遠方よりも激しい損傷を生じさせていることを示している。 $\alpha=1/0$ の場合は繰り返し数比の増加に伴い、 $(r, \theta) = (d/2, 0 \text{ 及び } \pi [\text{rad}])$ 付近から $\theta=0$ 及び π 方向にある幅をもって疲労損傷が広がっていることがわかる。 $\alpha=0/1$ の場合は繰り返し数比 N/N_f の増加に伴い、 $(r, \theta) = (d/2, \pi/4 \text{ 及び } 5\pi/4)$ 付近から $\theta=0, \pi$ および $\pi/2, 3\pi/2$ 方向に損傷が広がっていることがわかる。どちらの場合でも、応力集中が最も顕著な地点¹⁰⁾から疲労損傷が広がり始めていると言える。また、損傷領域は、明かに $\alpha=0/1$ の場合の方が大きい。 $\alpha=3/1$ の疲労損傷の開始地点は、 $\alpha=1/0$ および $\alpha=0/1$ の場合と同様に応力集中が最も顕著な地点である。疲労損傷領域は、 $\alpha=1/0$ および $\alpha=0/1$ の場合のほは中間的な損傷形態であると言える。

図9は、これらの観察結果をもとに、各組み合わせ応力下での疲労損傷の広がりを模式的に示した図である。縦繊維方向と平行に単軸引張り荷重が作用する場合は、軽い疲労損傷は円孔から上下 $\pi/4$ 方向に広がる。大きな疲労損傷(図中、黒く塗られた部分)は円孔淵の応力集中領域から発生し、繰り返し数の増加と共に、疲労初期から中期には相似的に領域が拡大するように成長し、中期から末期にはやや帯状に横繊維束に沿って試験片円周方向にも幾分成長する。中程度の損傷領域(図中の薄墨部分)は、軽い損傷領域中を円孔から扇形に拡大する。一方、純せん断荷重が作用する場合、疲労損傷は当初、円孔淵の応力集中領域から発生するが、繰り返し数の増加と共に、縦、横繊維束

(a) Uniaxial tension ($\alpha=1/0$)

(b) Biaxial tension/torsion ($\alpha=3/1$)

(c) Pure torsion ($\alpha=0/1$)

図9 各組み合わせ応力下での疲労損傷状態の模式図

に沿って円孔から帯状に、円孔をはさんで十文字に疲労損傷が形成される(疲労バンド)。この疲労バンドは比較的疲労初期でも、試験片円周全域にわたるほどに成長する。疲労初期にはこの疲労バンド中の損傷の程度は低いが、繰り返し数の増加と共にその幅と損傷の程度が増す。さらに、繰り返し数が増すと損傷の程

度が一層大きくなる。しかし、疲労損傷が円孔からある程度帯状に成長した段階でも、後述するように円孔近傍の疲労損傷領域内のガラス繊維に大規模な切断は見られず、いわゆるマクロクラックは形成されていない。

5. 3 試験片の微視的観察

$\alpha=1/0$, $0/1$ および $3/1$ での破断直前の円孔近傍での疲労損傷領域の微視的観察写真を図10に示す。写真左端の黒い部分は円孔の一部である。

図10(a)より $\alpha=1/0$ の場合は、試験片表面にはほぼ $\theta=0$ 方向のマикроクラックが多数存在していることがわかる。マイクロクラックは、母材リッチ部にだけでなく横繊維束の割れ(繊維束内での debonding)とつながっているものも観察される。横繊維束の割れとつながっているクラックは、縦繊維束と母材の界面で止まっていて、縦繊維束を切断していない。また、試験片円周方向からの観察によると、母材リッチ部のクラックは、様々な方向に入っていた。応力集中部付近ではマイクロクラックがつながった形状の準巨視的なクラック(メタクラック)が進展している様子がわかる。

図(b)より、 $\alpha=0/1$ の場合は試験片表面にはほぼ $\theta=\pi/4$ 方向、すなわち主応力に垂直な方向のマикроクラックが多数存在していることがわかる。このマイクロクラックは、縦あるいは横繊維束手前で止まっている。また、 $(r, \theta) = (d/2, \pi/4)$ から 0 および $\pi/2$ 方向の部分(写真の右下および左上)に、円孔近傍でのクラック密度と同程度に多くのマイクロクラックが存在していることがわかる。しかし、それ以外の部分、例えば円孔から $\theta=\pi/4$ 方向に離れた部分(図中、矢印で示す領域)では、マイクロクラックはほとんど存在していない。試験片円周方向からの観察によると、母材リッチ部に入る厚み方向のクラックだけでなく繊維束と母材の debonding も観察された。これより 5・2 で考察した損傷領域は、母材リッチ部に入っているマイクロクラック、繊維束と母材の debonding の複合体であると言える。

図(c)では、 $\alpha=1/0$ および $0/1$ と同様、母材リッチ部にマイクロクラックが見られる。マイクロクラックの方向は、主応力に垂直な方向に入っていない。また、試験片円周方向の観察から厚み方向の母材クラック、繊維束の割れ、繊維束と母材との debonding が観察された。すなわち組合せ荷重下の疲労損傷は、微視的にみても、 $\alpha=1/0$ の場合と $\alpha=0/1$ の場合の中間的な損傷であると考えられる。これらの観察結果及び表1を用いて、各組み合わせ応力下の疲労損傷過程を考察する。

(a) ($\alpha=1/0$)

(b) ($\alpha=0/1$)

(c) ($\alpha=3/1$)

図10 微視的疲労損傷状態

表1 疲労損傷及び破壊様相

	Stress concentration	Meta crack	Micro crack	Fracture surface
$\alpha = 1/0$	0	○	0	—○—
$\alpha = 3/1$	$0 \sim \pi/4$	○	$0 \sim \pi/4$	—○—
$\alpha = 0/1$	$\pi/4$	×	$\pi/4$	—○—

まず, $\alpha=1/0$ の場合, 応力集中部は $\theta=0, \pi$ である. また, 繰返し数の増加に伴いこの応力集中部からメタクラックが形成されこれが進展する. マイクロクラックも $\theta=0, \pi$ 方向に数を増して白化が進む. メタクラックは, このマイクロクラックがつながって形成されたとも考えられる. このように, 応力集中部からいったんメタクラックが形成されれば, その先端では円孔縁の場合よりも応力集中が高いためと考えられ, 疲労損傷は比較的速く進展する. 破断面の進展方向は, メタクラックの成長方向である $\theta=0, \pi$ であった.

$\alpha=0/1$ の場合, 応力集中部は $\theta=\pi/4, 5\pi/4$ である. またマイクロクラックは, 主応力方向に垂直に入る. しかし, このマイクロクラックは $\alpha=1/0$ の場合のようにメタクラックへと成長しない. このようにマイクロクラックがメタクラックへと成長しない場合, S-N 関係における強度保持率は比較的高い値となった. $\alpha=0/1$ の場合, 疲労初期の段階で上述の応力集中部でマイクロクラックが発生するにもかかわらず, その後, 繰返し数の増加と共に $\theta=\pi/4$ 及び, $\theta=5\pi/4$ 方向には数を増さない. マイクロクラックや Delamination 等による疲労損傷は $\theta=0, \pi$ 及び $\theta=\pm\pi/2$ の方向に進展し, 白化が帯状に広がった疲労バンドを形成する. 詳細に観察すれば, これらの疲労バンドは, 応力集中部 $(r, \theta) = (d/2, \pi/4), (d/2, 5\pi/4)$ を起点として進展していることがわかる. 荷重の繰返しに伴い, 疲労バンドは進展し, また応力集中部の損傷も蓄積される. 十分成長した疲労バンド中に個々のマイクロクラックが互いにある程度つながったメタクラックは認められない. その後, 試験片は一気に破断する. しかし, ビデオ観察によると, 破断はこの応力集中部を起点として起こり, 図8に示すように最終破断は, 主応力に垂直な面 ($\theta=\pi/4, \theta=5\pi/4$) に進展することが多いようである. また, 比較的寿命の短い場合は, 図11に示すように破断が主応力に垂直な面に進展すると同時に疲労バンド部に方向に進展する現象も確認された. これにより, 破断直前の状態では, 疲労バンドの損傷の程度も大きいことがわかる.

図1.1 比較的寿命の短い場合の, 純せん断荷重下 ($\alpha=0/1$) での疲労破壊形態 ($\sigma_{\max}/\sigma_{\min}=0.67, N_f=5262$)

(a) ($\alpha=1/0$)

(b) ($\alpha=0/1$)

図1.2 破断直前の繊維束の観察

$\alpha=3/1$ の場合, その疲労損傷は $\alpha=1/0$ と $\alpha=0/1$ の損傷の中間的な形態を示す。まず, マイクロクラックは, 主応力面とはほぼ垂直な方向に入り, 白化領域として観察される巨視的損傷も $\theta=0\sim\pi/4$, $\pi\sim5\pi/4$ 付近から進展する。 $\alpha=1/0$ と同様メタクラックの形成は, 認められる。このメタクラックは, 応力集中部から発生し, 一時巨視的損傷領域に沿って進展するが, その後 $\theta=0$ 方向に進展する。また, 破断面形状もこのメタクラックの進展方向と同様である。

5. 4 破断直前の繊維束の観察

$\alpha=1/0$ および $0/1$ における疲労破断直前の円孔近傍の損傷部の写真を, 図11(a)および(b)に示す。

$\alpha=1/0$ の場合, 応力集中が顕著である $(r, \theta) = (d/2, 0)$ 付近においても縦/横繊維束とも明確な繊維系の切断は見られない(図(a))。図(b)では $\alpha=0/1$ の場合, 特に, $(r, \theta) = (d/2, \pi/4)$ から最も近い縦/横繊維束の交錯部において, 繊維系の切断が観察される。また, 本論文では掲載しなかったが, $(r, \theta) = (d/2, \pi/4)$ から, $\theta=0$ および $\pi/2$ 方向の領域においても, 縦/横繊維束の交錯部に繊維系の切断が観察された。せん断応力が負荷された場合, マイクロクラックは母材リッチ部のみにとどまり, 繊維束を越えて進展するクラックは観察されなかった。マイクロクラックがその場で繊維系を直接切断してはいない。本研究と同様な構成素材を用いた平織り GFRP に関して, 縦繊維の破断を説明した報告がある¹¹⁾。そこでは, 縦/横繊維束間の微小はく離により, 縦繊維束の応力が増加し縦繊維が破断すると述べられている。また, 横繊維束に近い繊維の方が破断する割合が高いことも報告されている。そこで本研究の場合も縦/横繊維束の微小はく離は確認してはいないものの, 繊維系の切断が常に交錯部において生じていることから考えて, せん断変形により縦/横繊維束の微小はく離が生じ, 繊維系が切断したものと考えられる。

6. 結論

円孔を有する平織り GFRP に片振り引張り/片振りねじり組み合わせ荷重を加え, その疲労特性を調べた。本研究の結果, 以下のことが明らかになった。

- (1) 無次元化された繰返し最大応力-寿命の関係は組み合わせ応力比 α の影響を受ける。いずれの疲労寿命においても, 純せん断荷重下での強度保持率が最も高い。単軸引張り荷重下で強度保持率が最も小さい。引張り荷重成分の増加と共に強度保持率は減少する。
- (2) 繰返し荷重の負荷により, 円孔淵から発生, 進展した白化領域で示される疲労損傷は, 組み合わせ

応力比に大きく影響される。縦繊維方向と平行な単軸引張り荷重が作用する場合は, 軽い疲労損傷は円孔から $\theta=-\pi/4\sim\pi/4$, $-3\pi/4\sim5\pi/4$ 方向に広がる。大きな疲労損傷領域は応力集中部分から発生し, 繰返し数の増加と共にわずかに成長するが, 円孔淵の限られた領域に限られる。また, メタクラックが形成され, これが成長してある時最終破壊が一気に起こる。

(3) 純せん断荷重が作用する場合は, 白化領域で示される疲労損傷は当初, 円孔淵の応力集中領域から発生する。しかし, 繰返し数の増加と共に, 縦, 横繊維束に沿って円孔から, 円孔をはさんで十文字に帯状の疲労損傷が形成される。また, 個々の互いにある程度つながったメタクラックは存在しない。最終破壊は応力集中部を起点として生じる。

(4) 組み合わせ荷重下での疲労損傷とその進展は単軸引張りと純せん断荷重のみの場合の組合わさった形態となる。

(5) いずれの組み合わせ応力比においても, 疲労損傷が円孔からある程度帯状に成長した段階でも円孔近傍の疲労損傷領域内のガラス繊維に大規模な切断は見られず, いわゆるマクロクラックは形成されていない。

参考文献

- (1) P.T.Curtis and B.B.Moore, Int.J.Fatigue, 9, 2 (1987) 67-78.
- (2) 例えば, 網島貞男他, 材料, 39, 44 (1990) 706-710
- (3) S.W.Tsai, Composite Design (THINK COMPOSITE), Dayton, Ohio (1988) 19.1-19.30
- (4) G.E.Morris and C.M.Hetter, Damage in Composite Materials, ASTM STP 775, (1982) 27-39
- (5) I.M.Daniel, Experimental Mechanics, 20, (1980) 1-8
- (6) I.M.Daniel, Experimental Mechanics, 22, (1982) 185-195
- (7) P.H.Francis, D.E.Walrath, D.F.Sims & D.N.Weed: J.Composite Materials, 11 (1977) 488-501
- (8) S.Amijima, T.Fujii and M.Hamaguchi, Composite, 22, 4, (1991) 281-289
- (9) 網島貞男他, 日本複合材料学会誌, 18, 1, (1992) 10-16
- (10) 森中泰章他, 日本機械学会誌投稿中
- (11) T.Fujii et. al., Composite Science and Technology, in print