切欠きをもつ FRP の疲労破損の条件*

百 武 秀^{*1}, 萩 尾 照 俊^{*1}, 山 本 俊 浩^{*1}

A Fatigue Failure Criterion for Notched FRP Plates

Hiizu HYAKUTAKE, Terutoshi HAGIO and Toshihiro YAMAMOTO

Plane bending fatigue tests were carried out on the notched specimens of fiber glass/epoxy laminates for a wide range of notch-root radii and stress amplitudes. Our attention was focussed on the damaged zone near the notch root of specimens. The process of fatigue damage was studied by measuring the luminance at the limited spot near the notch root. Closer observation by means of a scanning electron microscope revealed that the initiation of microcracks at the notch root was accompanied with the decrease of luminance near the notch root. The experiment shows that the number of cycles to failure is determined by both the maximum elastic stress at the notch root and the notch-root radius. On the basis of the concept of severity at the notch root, the experimental results can be clearly elucidated. Applying the fatigue failure criterion derived here, we can make an accurate estimate of the life for notched specimens of FRP.

Key Words: Fatigue, Reinforced Plastics, Notch, Stress Concentration, Life Prediction, Damage, Fatigue Failure Criterion, Luminance

1. 結 言

切欠きをもつ FRP の疲労強度の評価は実用上からも重要と思われる。この問題に関しては既にいくつかの報告があり、そこでは主として切欠底付近における疲労損傷機構の解明が種々の観点からなされている^{(1)~(4)}。しかしこれらの研究において、切欠半径が疲労強度に及ぼす影響についてはいまだ十分な説明がなされていないように思われる。

著者らは、切欠材の強度を評価する際に、切欠底付近の力学的状態の厳しさを考慮して導いた一つの破壊基準が有用であることを実証してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。切欠底付近の力学的状態の厳しさは、切欠底の最大弾性応力と切欠半径によって一意的に決まると考えられる。このことは切欠底付近の弾塑性応力解析の結果に基づくものである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。したがって、上記の考えより導かれた切欠材の破壊基準には切欠半径の影響が考慮されている。この破壊基準は、等方性材のみならず、異方性が顕著な FRP 切欠試験片の引張りによる破壊の場合にもよく適用できることを既に示してきた^{(7)~(9)}。

本報は、上述した、切欠半径の影響を考慮した静荷重のもとでの破壊基準をさらに拡張して、一つの疲労破損の基準を導き、これを FRP 切欠平板の平面曲げにおける疲労破損の場合に適用し、この基準の妥当性を実験結果と合わせて検討したものである。

2. 材料、試験片および実験方法

使用した FRP は市販の長繊維ガラス布基材エポキシ樹脂積層板 (JIS: EL-GEM) で、厚さ 2 mm のものである。板断面の顕微鏡写真を図 1 に示す。直径が約 0.01 mm のガラス繊維からなる布 8 層で厚さ 2 mm の板が構成されている。

この材料の平滑試験片で求めた引張応力-ひずみ線図を図 2 に示す。ここで試験片の横断面は図 1 と一致している。図中の B 点は破断点で、この点の応力 σ_B とひずみ ε_B は図中に示すとおりである。

疲労試験片の横断面も、すべて図 1 と一致するように切り出した。図 3 に疲労試験片の形状と寸法を示す。両側に U 形切欠きをつけた平板状である。切欠深さは一定 (=1.5 mm) にして、切欠半径 ρ を 0.15, 0.25, 0.5, 1 および 2 mm の 5 通りとした。疲労試験は平面曲げである。したがってこの場合、切欠底における応力集中係数 K_t の値は 1.33~2.67 である⁽¹⁰⁾。

* 平成 2 年 9 月 24 日 第 68 期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成 3 年 2 月 18 日。

^{*1} 正員、福岡大学工学部 (〒814-01 福岡市城南区七隈 8-19-1)。

平面曲げ疲労試験機には回転偏心重りの遠心力を利用したものを使用した。繰返し速度は1000 cycle/minである。平均室温20℃のもとで試験した。FRPに対して上記の繰返し速度(約17 Hz)では、S-N曲線でばらつきの度合いが高いことが予想される⁽¹¹⁾。

切欠底付近に生ずる疲労破壊の程度を定量的に表すために、本報では切欠底付近の輝度を測定した。これは、万能投影機のスクリーンに映る試験片について、切欠底から0.4 mmの位置を中心に直径0.78 mmの円内の明るさを測定するもので、市販の輝度計を使用した。輝度測定システムを図4に示す。なお、上述し

た輝度測定範囲の直径0.78 mmは使用した輝度計で決まった値である。

3. 実験結果および考察

図5に平面曲げ疲労試験のS-N曲線を示す。縦軸 σ_n は最小断面の公称応力、横軸 N_f は破断までの繰返し数である。図に示すように、切欠半径 ρ が0.15 mmの鋭い切欠きから $\rho=2$ mmの鈍い切欠きをもつ試験

図3 切欠疲労試験片の形状と寸法

図1 FRPの断面写真

図4 輝度測定システム

図2 FRP平滑試験片の引張応力-ひずみ線図

図5 FRP切欠試験片のS-N曲線

片までの間で、 $S-N$ 曲線に大きな差異はない。図には参考として平滑試験片の結果も合わせて示している。このように切欠きをつけた複合材料の疲労試験で、破断までの繰返し数(寿命) N_f に及ぼす切欠半径の影響が小さいことは Maier ら⁽¹²⁾ も報告している。

図6に、FRP切欠試験片の表面で観察される疲労損傷の発生と成長過程の一例を示す。応力および切欠半径が種々異なる場合でも、疲労損傷の発生と成長の過程はすべて図6と類似している。すなわち、疲労損傷(図6で試験片表面の白色部分)は寿命 N_f のかなり初期に切欠底付近に集中して現れ[図6(a)], この損傷部分は繰返し数とともに広がる[図6(b)~(d)]。切欠底付近が白色化した時期に切欠底に疲労き裂が発生し、それが成長して破断に至ると考えれば、FRP切欠材では寿命 N_f の大部分はき裂の進展過程であり、したがってこの場合、応力が同じであれば寿命 N_f に及ぼす切欠半径の影響は小さいと考えられる。この考えが妥当なことは図5の実験結果によって示されている。これに対して、切欠底に疲労損傷が集中して生ずるまでの繰返し数 N_d は、応力が同じであっても切欠半径 ρ の影響を受けると考えられる。ここで N_d の値は寿命 N_f に比べかなり小さいことは前述したとおりであるが、その詳細については後で検討する。

切欠半径 ρ と N_d の関係を検討するためには、切欠底付近の疲労損傷の程度を定量的に表すことが必要で

図6 試験片表面の疲労損傷
($\rho=1\text{ mm}$, $\sigma_n=118\text{ MPa}$, $N_f=3.73\times 10^6$)

ある。従来の研究では曲げ剛性の低下率⁽¹⁾、切欠底付近の白化部の面積比⁽³⁾、X線透過度⁽⁴⁾などによって疲労損傷の程度を表している。本報では、前述したように、切欠底付近における疲労損傷の程度を輝度で評価する。図7に、切欠半径 $\rho=1\text{ mm}$ の試験片について公称応力 σ_n が種々異なる場合の輝度測定の結果を示す。この図で、 $\sigma_n=118\text{ MPa}$ の曲線上の a, b, c, および d における試験片の表面状態はそれぞれ図6の(a)~(d)に示されている。

図7に示すように、どの応力の場合も繰返し数とともに相対輝度は低下している。ここで、繰返し数 N における輝度と試験前の状態における輝度の比を相対輝度と呼ぶ。図7に示した応力が種々異なる各試験片について、相対輝度が一定値(=90%)における試験片表面の損傷状態を図8に示す。図8(a)~(d)の各試験片で、応力 σ_n の値はそれぞれ異なり、したがって相対輝度90%における繰返し数 N も異なる。しかし、切欠底付近の損傷の程度は互いによく似ている。なお、図8に示した各試験片の繰返し数 N は寿命 N_f の10~20%の範囲にある。切欠半径 ρ が1 mm 以外の場合も、図7および8と類似した結果が得られた。

本報では、上述したように、相対輝度が90%に低下した点を疲労損傷発生点と決める。この時点で切欠底付近に微小なき裂が発生していることがSEMの観察で認められた。その例を図9に示す。この図の各試験片は、図8に示した試験片と同様にすべて切欠半径 $\rho=1\text{ mm}$ である。これらの各試験片には、それぞれ図8(a)~(d)と同じ応力 σ_n のもとで相対輝度が90%に低下するまでの繰返し数 N が与えられた。その後、切欠底付近を観察したもので、いずれも試験片表面上で長さ約0.1 mm程度のき裂が認められた。同じような処置を切欠半径 ρ が1 mm と異なる試験片についても行い、図9と同様な観察結果が得られた。

図7 切欠底付近における輝度の低下

前述したように本報では疲労損傷の発生点として相対輝度が90%に達したときとしているが、上述したSEM観察の結果はそれが妥当であることを示すと考えられる。疲労損傷発生点までの繰返し数が N_d である。前述したように、 N_d は破断までの繰返し数 N_f の10~20%である。図7~9に示すように、 N_d は切欠半径と応力の影響を受ける。次にこれらの関係を検討する。

緒言で述べたように、切欠底付近の力学的状態の厳しさは切欠底の最大弾性応力 $\sigma_{\max}$ と切欠半径 ρ によって一意的に決まる。したがって、切欠試験片の静荷重

による破壊に対して次の破壊基準が成り立つ⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max,c}(\rho) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで $\sigma_{\max,c}$ は材料に固有な値、すなわち試験方法、切欠きの形状および試験片の形状、寸法等と無関係な値であり、それは切欠半径 ρ のみの関数である。 $\sigma_{\max}$ は応力集中係数 K_t と公称応力 σ_n の積である。

繰返し荷重のもとで切欠底付近に損傷が生ずる条件は、切欠底付近における力学的状態の厳しさとそれが繰返される回数によって決まることを考慮して、次の式が成り立つと考えられる。

$$\sigma_{\max} \cdot (N_d)^m = c(\rho) \quad \cdots \cdots (2)$$

図8 相対輝度90%における疲労損傷(切欠半径 $\rho=1$ mm)

図9 切欠底付近における微小き裂(切欠半径 $\rho=1$ mm)

ここで N_d は疲労損傷発生点までの繰返し数, すなわち相対輝度が90%に減少するまでの繰返し数である。指数 m および右辺の c は, 式(1)の場合と同様に材料に固有な値と考えられる。特に c は切欠半径 ρ の関数である。静荷重による破壊の場合は $N_d=1$ であり, この場合, 式(2)の c は式(1)の $\sigma_{\max,c}$ と一致する。

式(2)の妥当性は, 切欠半径 ρ ごとにプロットされた $\sigma_{\max}(=K_t \cdot \sigma_n) \sim N_d$ の関係が互いに平行な線図となることによって実証される。

切欠半径 ρ および $\sigma_{\max}$ が種々異なるすべての試験片について相対輝度の値が90%まで低下したときの繰返し数 N_d を求め, ρ ごとに $\sigma_{\max} \sim N_d$ の関係をプロットした。その結果は図10に示すように, 切欠半径 ρ が0.15 mm から2 mm まで, それぞれの $\sigma_{\max} \sim N_d$ 線図は互いに平行な直線で表されている。このことは式(2)で表した疲労破壊の基準が妥当なものであることを示している。

疲労損傷発生点 N_d の決定は, 前述したように輝度測定によるが, この方法は簡単で容易であり, それに再現性がよいことは図10の $\rho=1$ および0.5 mm の場合に示すとおりである。

図10より, 試験片の切欠半径 ρ と最大弾性応力 $\sigma_{\max}(=K_t \cdot \sigma_n)$ が与えられれば, 破壊(疲労損傷の発生)までの繰返し数 N_d を知ることができる。なお, 破断までの繰返し数 N_f は, 前述したように, N_d の約5~10倍である。また, 指数 m の値は約0.1である。

4. 結 言

切欠きをつけたFRP板の平面曲げ疲労試験を切欠半径および応力振幅の広い範囲にわたって行い, 疲労強度に及ぼす切欠半径の影響について検討した。切欠底付近の疲労損傷の程度は, その部分の輝度測定およびSEM観察に基づいて評価した。切欠底付近の相対輝度が90%に低下したとき, その部分に微小なき裂の発生が認められた。この状態までの繰返し数 N_d は破断までの繰返し数の10~20%の範囲である。上記の N_d と切欠半径および切欠底における最大弾性応力(それは応力集中係数と公称応力の積に等しい)の関係

図10 切欠底における最大弾性応力 $\sigma_{\max}$ と N_d との関係に及ぼす切欠半径 ρ の影響

式を, 切欠底付近の力学的状態の厳しさの観点から導いた。この関係式は疲労破壊の一つの基準となるもので, その有効性は本報で行った疲労試験の結果によって実証された。

本研究に対し平成2年度文部省科学研究費補助金・一般研究(C)No. 02650081を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 下河・浜口, 材料, 32-360 (1983), 1050.
- (2) 五辻・ほか2名, 機論, 51-469, A (1985), 2198.
- (3) 前川・ほか2名, 材料, 35-393 (1986), 636.
- (4) Bakis, C.E. and Stinchcomb, W.W., ASTM STP, 907 (1986), 314.
- (5) 百武・西谷, 機論, 52-479, A (1986), 1683.
- (6) Hyakutake, H. and Nisitani, H., JSME Int. J., 30-259 (1987), 29.
- (7) 百武・ほか2名, 機論, 54-498, A (1988), 326.
- (8) 百武・ほか2名, 機論, 55-509, A (1989), 112.
- (9) Hyakutake, H., ほか2名, Int. J. Pres. Ves. & Piping, 44 (1990), 277.
- (10) 野田・ほか2名, 機論, 54-499, A (1988), 518.
- (11) 網島・ほか2名, 材料, 31-351 (1982), 1156.
- (12) Maier, G., ほか3名, Composites, 18-5 (1987), 375.