繊維強化ポリカーボネート切欠平板の疲労破損の条件†

山 本 俊 浩* 百 武 秀*

Fatigue Failure Criterion for Notched Plates of a Glass Fiber-Reinforced Polycarbonate

by

Toshihiro YAMAMOTO* and Hiizu HYAKUTAKE*

Failure of notched FRP plates under static or fatigue loading is governed predominantly by the severity near the notch root. The severity is determined by both stress concentration and similarity of stress distribution near the notch root. In the present paper, a fatigue failure criterion based on the concept of severity near the notch root mentioned above is subjected to further experimental scrutiny. The investigation is accomplished by obtaining experimental data on intermediate notch-root radii specimens of a glass fiber-reinforced polycarbonate in pulsating tension. The process of initiation and growth of fatigue damage near the notch root was measured by means of the luminance-measuring technique using a CCD camera. Closer observation of the microfracture in the fatigue-damage zone revealed the process of the luminance decline along with the increase of loading cycles. The experimental result shows that the number of cycles at the fatigue damage initiation, N_d was governed predominantly by both notch-root radius ρ and the maximum elastic stress σ_{max} at the notch root, while it was independent of notch depth. Furthermore, the σ_{max} has a one-to-one correspondence with the N_d when the size of fatigue-damage zone reached the half value of the notch-root radius ρ . On the basis of the concept of severity near the notch root mentioned above, the experimental results can be explained.

Key words: Fatigue, Notch, Stress concentration, Short fiber-polymer composites, Fatigue damage, Luminance

1 緒 言

FRPを構造材料として使用する際に、設計上やむなく切欠きをつけることがある。FRPにおいても、これらの切欠きはしばしば疲労破壊の起点となる。したがって切欠きをもつFRPの疲労破損の限界条件を明らかにすることは実用上重要と考えられる。

著者らは、切欠きが比較的鋭い場合、すなわち切欠半径 $\rho = 0.2 \sim$ 数 mm の範囲の切欠材の疲労破損について、切欠底付近の力学的状態の厳しさ、すなわち切欠底における応力集中と切欠底付近における応力分布の類似性、を考慮した一つの基準を提示し^{1), 2)} この基準がある種のFRP切欠平板の疲労破損によく適用できることを示した。^{1) ~ 4)}

上述した疲労破損の基準は次の考えに基づいている。異方性をもつFRP切欠平板が静荷重を受けるとき、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 σ_{max} と切欠半径 ρ が同じであれば同じである。⁵⁾ したがって、FRP切欠材が静荷重のもとで破壊する場合、破壊時の最大弾性応力と切欠半径 ρ は一対一に対応すると考えられる。この考えが妥当であることを、著者らは各種のFRPについて実証している。^{5) ~ 9)}

一方、繰返し荷重のもとでは、切欠底付近に一定量の

疲労損傷が生ずるまでの荷重繰返し数 N_d は切欠底付近における力学的状態の厳しさによって決まると考えられる。力学的状態の厳しさは、前述したように、異方性材であっても σ_{max} と ρ によって決まる。したがってFRP切欠材の疲労破損の条件は σ_{max} , ρ および N_d の三つのパラメータで表されることになる。例えば σ_{max} と N_d の関係を求めれば、切欠半径 ρ ごとに σ_{max} - N_d 線図が得られる。このことは既に報告^{1) ~ 4)} したとおりである。

また、一定量の疲労損傷として切欠半径 ρ に比例した値をとれば、この場合の σ_{max} - N_d 線図は、 ρ と無関係に一本の曲線で表すことができると考えられる。本報はこの考えを実験的に確かめたものである。試験材には異方性が顕著な短いガラス繊維で強化したポリカーボネート射出成形板を用いた。

切欠底付近に生じた疲労損傷を定量的に評価するために、試験片を透過する光の輝度の低下率を測定した。これはCCDカメラと画像解析装置による輝度測定システムを用いて行った。さらに、損傷域内における微小な破壊を顕微鏡で観察した。

2 材料、試験片および実験方法

使用した試験材は短いガラス繊維で強化したポリカーボネート射出成形板（出光石油化学製）で、板の寸法は

† 原稿受理 平成 11 年 9 月 20 日 Received Sep. 20, 1999

* 正 会 員 福岡大学工学部機械工学科 〒814-0180 福岡市城南区七隈, Dept. of Mech. Eng., Fukuoka Univ., Jonan-ku, Fukuoka 814-0180

長さ 270mm, 幅 70mm, 厚さ 3mm である。Fig. 1 に板の長手方向に垂直な断面の写真を示す。ガラス繊維の大部分は、板の長手方向に沿って並んでいるが、板厚の中央付近ではガラス繊維の一部が板の幅方向に並ぶ層がみられる。この層の厚さは 0.1mm 程度である。ガラス繊維の直径は 0.013mm で長さは 1mm 以下、重量含有率は 30% である。

Fig. 2 に、試験材から切り出した平滑試験片について引張試験で求めた応力-ひずみ線図を示す。板の長手方向と幅方向とで異方性は顕著である。いずれの場合も荷重増加の過程でぜい性的に破断した。図中に破断点の応力 σ_B 、ひずみ ε_B およびひずみが小さい範囲での縦弾性係数 E の値を示す。

Fig. 3 に疲労試験片の形状と寸法を示す。平行部中央

Fig. 1. Photomicrograph showing a transverse section of the FRP plate.

Fig. 2. Tensile stress-strain curves of smooth specimens of the FRP plate.

Fig. 3. Notched specimen dimensions (mm).

の両縁に U 形の切欠きをつけた。切欠底の最小断面幅は一定 ($= 12\text{mm}$) とし、切欠半径 ρ を 0.2, 0.5, 1 および 2 mm の 4 とおとした。切欠深さ a は 4 および 8 mm の 2 とおりである。これらすべての試験片で切欠底の応力集中係数の値は、引張りの場合、2.21 ~ 6.41 である。

片振り引張疲労試験を繰返し速度 2Hz, 最小荷重/最大荷重 $= 0.1$ で行った。試験温度は平均 22°C である。試験機にはサーボ油圧式疲労試験機を用いた。

切欠底付近の疲労損傷を定量的に評価するために、所定の荷重繰返し数ごとに、試験片を透過する光の輝度分布を測定した。損傷と輝度との関係については後述する。用いた輝度測定システムを Fig. 4 に示す。前報^{3), 4)}と同じものである。

後で示すように、荷重の繰返しとともに切欠底付近における透過光の輝度は低下する。それは、試験片の表面および内部に生じた不可逆的な微小破壊によるものと考えられる。このような微小破壊、本報ではこれを疲労損傷の実体と考えているが、その詳細を知るために、疲労損傷の各段階ごとに切欠底付近の損傷域から薄い試料を採取し、光学顕微鏡で観察した。

3 実験結果および考察

Fig. 5 に切欠材の疲労試験で得られた S-N 曲線を示す。縦軸 σ_n は最小断面の公称応力の最大値、横軸 N_f は破断までの繰返し数で、切欠深さ a が一定 ($= 4\text{mm}$) の場合である。図に示すように、 N_f に及ぼす切欠半径 ρ の影響は小さい。ここには示していないが、切欠深さ $a = 8\text{mm}$ の場合も同じ傾向がみられた。この場合、同じ

Fig. 4. Luminance-measuring system.

Fig. 5. S-N curve for notched specimens.

応力 σ_n に対する破断までの繰返し数 N_f は $a = 4\text{mm}$ の場合よりも小さかった。

Fig. 6 に試験片表面で観察した疲労損傷の発生と成長の過程を示す。寿命のかなり初期に切欠底付近に疲労損傷（白色部分）が現れる。この損傷域は荷重の繰返しとともに広がる。すなわち、寿命 N_f の大部分は疲労損傷の成長過程である。このことが寿命 N_f に及ぼす切欠半径 ρ の影響が小さいこと (Fig. 5), また切欠深さ a は N_f に影響することの理由と考えられる。

切欠底付近の損傷域を詳細に観察すれば、後に示すように (Fig. 7 および 14), 試験片表面だけでなく内部にも多数の微小き裂が発生している。このような FRP にお

Fig. 6. Fatigue damage on the surface of specimen near the notch root (notch-root radius $\rho = 1\text{ mm}$, $\sigma_{max} = 114\text{ MPa}$, $N_f = 1.34 \times 10^4$).

Fig. 7. Fatigue damage near the notch root at $N/N_f = 6\%$ ($\rho = 0.5\text{mm}$, $a = 4\text{mm}$, $\sigma_n = 23.5\text{MPa}$).

る疲労損傷の程度を定量的に表す試みは、これまでも種々試みられている。例えば網島ら¹⁰⁾は GFRP に生じた疲労き裂長さを透過光の影の長さで評価している。CFRP の場合は、AE 法^{11), 12)} X 線^{13), 14)} さらに超音波^{15), 16)} 等が用いられている。

これに対して、本報で使用した半透明の GFRP では、試験片の表面や内部に生じた微小破壊の領域、すなわち損傷域を透過する光の輝度は低下する。損傷域における試験前と試験時の輝度の比をとることによって損傷の程度を定量的に評価できると考えられる。^{1), 2)}

切欠底付近に生じた損傷域を透過光で観察しても、Fig. 7 (a) に示すように、黒い影だけでその詳細は不明である。この部分の表面を少し削ってみると、Fig. 7 (c) に示すように、微小なき裂が多数発生していることがわかる。損傷域における内部を観察したものが Fig. 7 (d) である。微小なき裂がガラス繊維を切断している。試験片内部における微小き裂についてはまた後で述べる (Fig. 14)。

このように切欠底付近の損傷領域には不可逆的な微小破壊が起こっており、したがってこの部分を透過する光の輝度は低下する。この輝度の分布によって損傷の程度を定量的に評価することができると考えられる。

Fig. 7 (a) の黒い影の部分の輝度分布を Fig. 7 (b) に示す。ここでは損傷の程度を相対輝度 (R. L.) = 75, 70, 65 および 60% の 4 段階で表している。前述したように R. L. とは前述したように試験前の輝度に対する測定時の輝度の比である。R. L. の値が小さいほど損傷の程度は高い。Fig. 4 に示した輝度測定システムでは、損傷域の輝度の分布だけでなく、輝度の値が一定値である領域の面積を測定することができる。

Fig. 8 に、輝度測定で求めた切欠底付近の損傷域の成長過程の一例を示す。この図から R. L. の値が一定領域の面積を測定し、荷重繰返し数との関係で表せば、一定量の疲労損傷を受けた領域の成長曲線が得られる。その例を Fig. 9 に示す。この図では損傷域として相対輝度の最も小さい、 $R. L. \leq 60\%$ の面積をとった。図に示すように、損傷域の成長曲線は最大応力 σ_{max} と切欠半径 ρ

Fig. 8. Luminance distributions near the notch root ($\rho = 0.5\text{mm}$, $\sigma_{max} = 115\text{MPa}$, $N_f = 6.57 \times 10^4$).

(a) Notch-root radius $\rho = 0.5$ mm. (b) Notch-root radius $\rho = 1$ mm.Fig. 9. Growth of the area of the fatigue-damage zone where R. L. $\leq 60\%$.

の影響を受ける。どの成長曲線についても、損傷域の面積がほぼ一定値 ($=0.1\text{mm}^2$) に達したときに、損傷域の面積の急増がみられる。そこでまず、このときの荷重繰返し数を疲労損傷点 N_d とした。ここには示していないが、 N_d に達するまでは成長曲線に及ぼす切欠深さの影響はほとんどみられなかった。

切欠底付近に一定量の疲労損傷、すなわち R. L. $\leq 60\%$ の損傷域の面積が 0.1mm^2 に達したときの繰返し数 N_d は、切欠底付近における力学的状態の厳しさによって決まると考えられる。前述したように、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 によって決まる。したがって、一定の ρ に対して $\sigma_{\max}$ と N_d は一対一の関係があると考えられる。

Fig. 10 に $\sigma_{\max}$ と N_d との関係を示す。図に示すように ρ が 0.2mm から 2mm まで、 ρ ごとに $\sigma_{\max}$ と N_d の関係を両対数のグラフ上にプロットすれば、互いに平行な直線で表される。また、 ρ が 0.5mm および 1mm の場合、切欠深さ a は 4mm と 8mm の 2 とおりあるが、どちらの場合も a と無関係に一本の直線上にプロットされている。同様な結果が種類の異なる FRP 切欠平板についても得られている。このことは既に報告^{1), 2)} したとおりである。

上述したように、Fig. 10 では一定量の疲労損傷とし

Fig. 10. Effect of the notch-root radius ρ on the relation between the maximum elastic stress $\sigma_{\max}$ and the number of cycles to fatigue damage N_d . (a) Notch-root radius $\rho = 0.5$ mm. (b) Notch-root radius $\rho = 1$ mm.Fig. 11. Growth of the size of the fatigue-damage zone where R. L. $\leq 60\%$.

て切欠半径 ρ と無関係な値をとっている。次に、一定量の疲労損傷として、切欠半径 ρ と関係した値をとってみる。このため疲労損傷 (R. L. $\leq 60\%$) の成長曲線として、切欠底から最小断面に沿って計った損傷域の長さ l と荷

重繰返し数との関係を求める。そのような成長曲線の例を Fig. 11 に示す。どの成長曲線も最大応力 σ_{max} および切欠半径 ρ によって異なる。ここには示していないが、寿命の約 60% 以下の範囲で、成長曲線に及ぼす切欠深さの影響はほとんどみられなかった。

Fig. 11 に示した疲労損傷域の成長曲線で、疲労損傷点として、損傷域の長さ l が切欠半径 ρ の半分に達したときとする。このときの荷重繰返し数 N_d^* と σ_{max} との関係は ρ と無関係な一本の線図で表されると考えられる。何故なら、切欠半径 ρ が異なる試験片で切欠底の最大応力 σ_{max} と荷重繰返し数 N が同じであれば、切欠底付近に生ずる疲労損傷域の形態は互いに相似であるはずである。そのような実例を Fig. 12 に示す。

Fig. 13 に σ_{max} と N_d^* との関係を示す。この図には切欠半径 ρ および切欠深さ a の異なるすべてのデータをプロットしている。図に示すように σ_{max} - N_d^* 線図は ρ や a と無関係にほぼ一本の曲線で表されている。図に示すように、応力が低い範囲でデータのばらつきがみられる。

Fig. 12. Fatigue damage at N_d^* when the size of fatigue-damage zone is about half of ρ .

Fig. 13. The relation between the maximum elastic stress σ_{max} and the number of cycles to fatigue damage N_d^* .

Fig. 14. Initiation and propagation of fatigue crack.

上述したように、この場合 N_d^* は損傷域 (R. L. $\leq 60\%$) の寸法が切欠半径の半分の大きさに成長するまでの荷重繰返し数である。 N_d^* と寿命 N_f の比は、Fig. 12 に示すように、 ρ および σ_{max} によって異なる。

最後に、切欠底付近における疲労損傷内に生じた微小破壊過程の一例を Fig. 14 に示す。疲労損傷域から薄い試料を採取して透過光で観察したものである。損傷発生初期の段階で、Fig. 14 (a) に示すように、ガラス繊維端から微小なき裂が発生している。これらのき裂は、Fig. 14 (b) に示すように互いに連結する。その後は、Fig. 14 (c) に示すように試験片表面からも観察可能な一本の疲労き裂となる。

4 結 言

短いガラス繊維で強化したポリカーボネート射出成形板の切欠平板 (切欠半径 $\rho = 0.2 \sim 2 \text{ mm}$ の範囲) について片振り引張疲労試験を行い、切欠底付近の力学的状態の厳しさの概念に基づく疲労損傷の限界条件を実験的に検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 一定量の疲労損傷が生ずるまでの繰返し数 N_d は、切欠底の最大弾性応力 σ_{max} および切欠半径 ρ によって決まる。

(2) 一定量の疲労損傷を切欠半径 ρ と無関係にとれば、 N_d と σ_{max} の関係は ρ ごとに異なった線図で表され、切欠深さとは無関係である。

(3) 一定量の疲労損傷として切欠半径 ρ に比例した値をとれば、 N_d と σ_{max} の関係は一本の曲線で表され、 ρ および切欠深さとは無関係である。

(4) 上記の実験結果は、切欠底付近の力学的状態の厳しさの概念でよく説明できる。

使用した FRP 板は出光石油化学(株)の竹田英俊氏から提供されたものである。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 百武 秀, 萩尾照俊, 山本俊浩, 日本機械学会論文集, A-**57**, 2300 (1991).
- 2) H. Hyakutake, T. Hagio and T. Yamamoto, JSME International Journal, A-**36**, 215 (1993).
- 3) 百武 秀, 山本俊浩, 材料, **42**, 676 (1993).
- 4) 百武 秀, 山本俊浩, 日本機械学会論文集, A-**60**, 2182 (1994).
- 5) 百武 秀, 西谷弘信, 萩尾照俊, 日本機械学会論文集, A-**54**, 326 (1988).
- 6) 百武 秀, 萩尾照俊, 西谷弘信, 日本機械学会論文集, A-**55**, 112 (1989).
- 7) 百武 秀, 萩尾照俊, 山本俊浩, 材料, **43**, 647 (1994).
- 8) 百武 秀, 山本俊浩, 材料, **43**, 679 (1994).
- 9) 百武 秀, 山本俊浩, 材料, **44**, 401 (1995).
- 10) 網島貞男, 谷本敏夫, 松岡 敬, 森 雅明, 材料, **34**, 286 (1985).
- 11) 志波光晴, 岸 輝雄, 日本複合材料学会誌, **20**, 99 (1994).
- 12) 若松正俊, 鈴木 恵, 木田外明, 宮野 靖, 森脇 毅, 阪口俊春, 材料, **47**, 478 (1998).
- 13) A. Poursartip and N. Chinatambi, ASTM STP 1012, 45 (1989).
- 14) C. E. Bakis, H. R. Yih, W. W. Stinchcomb and K. L. Reifsnider, ASTM STP 1012, 66 (1989).
- 15) Z. Tian and S.R. Swanson, J. Compos. Mater., **25**, 1427 (1991).
- 16) 田中行平, 金川 靖, 村上澄男, 材料, **47**, 440 (1998).