平織 CFRP 積層板の切欠き疲労強度とその予測モデルの開発

河井昌道^{*1}, 内沼 侑^{*2}

Notched Fatigue Strength of Plain Weave Roving Fabric CFRP Laminate and Its Modeling

Masamichi KAWAI^{*3} and Atsumu UCHINUMA

^{*3} University of Tsukuba, Dept. of Engineering Mechanics & Energy
Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

Notched fatigue behavior of woven fabric CFRP laminates is examined, and an analytical model is developed for prediction of notched fatigue life at room temperature. Fatigue tests are first performed at room temperature on unnotched and center-holed coupon specimens of a plain woven CFRP laminate for different stress ratios. The experimental results show that tension-dominated fatigue behavior turns insensitive to notch in a high cycle range due to matrix cracking that occurs predominantly at the edges of a hole along loading direction. By contrast, the compressive fatigue behavior remains notch sensitivity partly because of a different damage mode of transverse cracking. Then, a new engineering fatigue model is developed that explicitly takes into account the change in notch sensitivity due to fatigue loading and facilitates fatigue life analysis of notched CFRP laminates for any notch size, and it is shown to be valid for the notched fatigue behavior of the woven fabric CFRP laminate at room temperature.

Key Words : Fatigue, Notch, Variable Notch Sensitivity, Analytical Model, S-N Curve, Fatigue Life Prediction, CFRP

1. 緒 言

航空・宇宙機器などの軽量化が求められる分野において、高い比強度と比剛性を有する炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の利用が年々拡大している。機器・構造要素には疲労荷重が作用するため、CFRP を用いた機器・構造要素の耐久性を保証する上で、疲労寿命の適切な評価が重要となる。実用環境下では疲労荷重の波形が複雑に変動する変動疲労荷重が作用することを想定しなければならない。このため、CFRP 要素の実用下の疲労寿命を精度良く予測するためには変動疲労荷重に含まれる定常疲労波形成分について疲労寿命を予測できることが基礎的要件となる。

一方、機器・構造の設計においては、切欠きを有する部材の使用を避けることができない場合が多い。このため、応力集中を伴う切欠き部材の疲労寿命を評価することが重要となる。CFRP の疲労損傷過程は金属

材料のそれとは大きく異なり、CFRP の材料異方性と材料不均質性がそれを一層複雑なものにしている。このことは、金属材料における切欠き材の疲労強度解析法を CFRP の切欠き材に単純に適用することは適切ではなく、CFRP に適した切欠き疲労強度評価法の確立が必要となることを示唆している。

本研究では、平織り CFRP 積層板の主軸疲労強度の切欠き寸法依存性と応力比依存性を実験的に明らかにし、それらの工学的な予測方法を確立することを目的とする。まず、平滑試験片および切欠き寸法の異なる切欠き試験片を用いて、静的試験と定常疲労試験を室温で行う。これらの結果に基づいて、平織り CFRP 積層板の室温における切欠き S-N 関係の特徴を明らかにする。次に、室温において観察された切欠き疲労挙動に基づいて工学的な切欠き疲労モデルを定式化する。さらに、この切欠き疲労モデルを用いて室温における切欠き疲労強度を予測し、予測結果と実験結果を比較することによって提案する疲労モデルの妥当性ならびに切欠き疲労寿命の予測精度を評価する。

^{*1} 正員、筑波大学 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

^{*2} 筑波大学 大学院

E-mail: mkawai@kz.tsukuba.ac.jp

2. 試験片および試験方法

2・1 試験片 供試材は、炭素繊維 (T300, 東レ) と熱硬化性 Epoxy 樹脂 (#2500, 130°C 硬化型) を組み合わせたプリプレグ T300/Epoxy#2500 を 12 枚積層した平織り材である。積層様式は $[(0/90)]_{12}$ で、その厚さは約 3mm である。試験片 (100×10×3 mm) は短冊形状であり、標線間の寸法を距離 $L=10$ mm, 幅 $W=10$ mm とする。試験片両端には、つかみ部保護用のアルミニウム製タブ (45×10×2 mm) を貼付する。試験片は、中央円孔の直径 D を試験片幅 W で無次元化した相対切欠き寸法 $D/W = 0, 0.1, 0.2, 0.4$ の 4 種類を用いた。

2・2 試験方法 静的試験と疲労試験には油圧サーボ材料試験機を用いた。試験温度は室温 (RT) とする。静的試験は変位制御で行い、ひずみ速度を一定値 1.0%/min とした。疲労試験は荷重制御で行った。JIS K7083 に準じ、繰返し速度は $f=10$ Hz, 荷重波形は正弦波とした。また、繰返し数が $N_f = 10^6$ 回に達したところで試験を打ち切った。応力比依存性を調べるため、応力比 $R=0.1$ (T-T), -0.5 (T-C 引張側), χ (T-C), -2 (T-C 圧縮側), 10 (C-C) について定常疲労試験を行った。ここで、応力比 χ は、圧縮-引張強度比 $\sigma_{ucs}/\sigma_{uts}$ で与えられ、臨界応力比と呼ばれる。

3. 試験結果及び考察

3・1 静的挙動 静的試験から得られた引張強度と圧縮強度を Fig.1 に示す。Fig.1 に示した値は、試験結果の平均値であり、圧縮強度は絶対値で表示している。引張強度と圧縮強度はいずれも円孔直径が増大するほど低下しており、通常の切欠き効果を呈することが確認できる。

切欠きの影響を考察するため、切欠き材の強度 σ_N を平滑材の強度 σ_0 で無次元化した切欠き強度比 σ_N/σ_0 と相対切欠き寸法 D/W の関係 (切欠き感度図) を Fig.2 に示す。Fig.2 の二つの破線のうち、上は応力集中が発生していない場合 (切欠き不敏感線)、また下は応力集中が発生している場合 (切欠き敏感線) に対応する切欠き強度比を表わす。Fig.2 より、実験点が切欠き不敏感線と切欠き敏感線の間に分布することがわかる。したがって、引張と圧縮のいずれについても切欠きに対して感度を示している。このことは、応力集中の影響が含まれていることを示唆する。圧縮による切欠き強度が引張によるそれよりも切欠き不敏感線に近い値を示したことは、静的圧縮荷重下において切欠き感度

Fig. 1 Comparison of notched strengths in tension and compression

Fig. 2 Comparison of notch sensitivities

が相対的に低くなることを示唆している。

3・2 主軸疲労挙動 異なる応力比の定常疲労試験から得られた S-N 関係をそれぞれ Fig.3 (a)-(c) に示す。縦軸のプロット点は静的強度 (平滑材については平滑強度 σ_0 , 切欠き材については切欠き強度 σ_N) を示している。図中の矢印は、繰返し数 $N_f=10^6$ 回までに破断しなかった試験データを示す。破線は平滑材の S-N 関係を示しており、次の式を用いて近似した。

$$2N_f = \frac{2}{(1+k)K} \frac{1}{\psi_1^n} \frac{(1-\psi_2)^a}{(\psi_2 - \psi_L)^b} \quad (1)$$

ここで、 k , K , n , a は材料定数を示す。式(1)の ψ_1 , ψ_2 は疲労強度パラメータであり、この研究においては疲労強度比 $\sigma_{\max}/\sigma_T$ (引張支配疲労) または $\sigma_{\min}/\sigma_C$ (圧縮支配疲労) と同一視される。

$R=0.1$ の場合 (Fig.3(a)), 平滑材の S-N 関係が一定の勾配を示すのに対して、切欠き材 ($D/W=0.1, 0.4$) の S-N 関係はおおむね水平になっている。試験した寿命範囲においては長寿命域になるほど平滑材と切欠き材の疲労強度の差が減

(a) $R=0.1$

(b) $R=-0.5$

(c) $R=10$

Fig. 3 Comparison of the S-N relationships for unnotched and notched specimens

少する傾向を示した。 $R = -0.5$ の場合 (Fig. 3 (b)) , 切欠き材の S-N 関係が長寿命域において平滑材に漸近し、ほぼ平行に推移する傾向を示した。この特徴は、引張荷重の影響が大きい (引張支配領域) 応力比においては疲労損傷が進展し、切欠き感度が低減するために、長寿命域で切欠き不敏感になることを示唆している。この結果とは対照的に、圧縮荷重のみが作用する $R = 10$ の場合 (Fig. 3(c)) は、切欠

き材の S-N 関係が平滑材 S-N 関係にほぼ平行に推移し、疲労過程において切欠き感度を保持する傾向を呈した。この違いは、室温における引張支配疲労と圧縮支配疲労で切欠き疲労を支配する損傷機構が異なることを示唆している。

4. 切欠き疲労寿命予測モデル

この研究において提案する疲労モデルは、平滑材の S-N 関係の近似に用いた式(1)を基礎とするもので、切欠きの影響を考慮するために疲労強度パラメータを以下のように置換することによって定義される。

$$\psi_1 = \begin{cases} \psi_T (\chi \leq R < 1) \\ \psi_C (1 < R < \chi) \end{cases} \quad (2)$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{NT}} (\chi \leq R < 1) \\ \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{NC}} (1 < R < \chi) \end{cases} \quad (3)$$

引張支配領域の場合、疲労過程で切欠き感度が低減して長寿命域で切欠き不敏感になることを表現するため、強度パラメータ ψ_T を次のように設定する。

$$\psi_T = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0 (1 - D/W)} \quad (4)$$

圧縮支配領域の場合、切欠き感度を保持することを表現するため、強度パラメータ ψ_C を次のように設定する。

$$\psi_C = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{NC}} \quad (5)$$

定式化した切欠き疲労モデルを用いて予測した S-N 関係を Fig. 3 (a)-(c) に実線で示す。全体的に精度の良い予測が得られている。

5. 結 言

本研究では、平織り CFRP 積層板の主軸疲労強度の切欠き寸法依存性と応力比依存性を実験的に明らかにするため、平滑試験片および切欠き寸法の異なる切欠き試験片を用いて静的試験と定常疲労試験を行った。平滑材と切欠き材の疲労試験結果を比較し、切欠き S-N 関係の特徴を調べた。また、切欠き疲労モデルを定式化し、実験結果と比較することによって切欠き疲労寿命予測に対する妥当性を評価した。開発した切欠き疲労モデルは平織り CFRP 積層板の主軸疲労強度を応力比および切欠き寸法に拘わらず精度良く予測することができる。

文献 (省略)