

卒業論文要旨

繰返し曲げ負荷を受けた CFRP 切欠き材の曲げ破壊特性

Bending fracture behavior of notched CFRP subjected to alternative bending

システム工学群

材料強度学研究室 1220127 野地 俊成

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、比強度・比剛性が大きいので、航空機器や自動車等の輸送機器から身近なスポーツ用品などに幅広く用いられている。CFRP の成形方法として代表的なものに、プリプレグを積層し成形する方法がある。この方法で成形した CFRP 板は積層構造板となり、その破壊形態はプラスチック樹脂 (母材) の割れや炭素繊維と母材界面のはく離や炭素繊維の破断など非常に複雑である。

構造材として優れた性質を持つ CFRP は近年、多くの分野で用いられるようになった。その結果、従来よりも厚板で使用される場合や、ボルトなどを用いた部材同士の機械的な締結ため、有孔板として使用される場合が増加している。厚さの増加と共に面外荷重 (曲げ) が負荷される状況も見受けられ、特に、有孔板では応力集中にも注意しなければならない。また、CFRP 積層板は異方性材料であり、炭素繊維方向には強度、剛性ともに大きい、これに垂直な方向では小さい。特に、積層方向の層間強度が相対的に極めて小さい。これらの特性から、曲げ荷重を受けた際の挙動も、金属などの均質等方性材料とは異なる特徴を示すことが予想される。また、機器の長期稼働に対する強度信頼性の観点から、繰返し荷重が材料の静的強度に及ぼす影響についても十分把握しておくことが重要である。

以上のことから本研究では、切欠きを有する CFRP 積層板が繰返し曲げ負荷を受けた後、静的な曲げ強度がどのようにその影響を受けるのか調査した。

2. 試験片及び試験方法

2.1. 試験片

本研究では、CFRP プリプレグ TR350C100S (三菱ケミカル) を、 $[0_7/90_3]_5$ の積層構成で 20 枚積層し 130 °C で加熱成形をした、厚さ 1.5 mm の CFRP 積層板を用いた。ダイヤモンドカッターを用いてこの CFRP 積層板を 90 × 10 mm の寸法に切り出した後、切断面を 1000 番の耐水ペーパーで研磨した。続いて治具と電動工具 (ダイヤモンドバー) を用いて試験片の長手方向中央の側面に、直径 4 mm の 1/2 円弧状片側切欠きを導入した。切欠き部分は、フェルトバフと 1.0 μm のアルミナを用いてバフ研磨により仕上げた。

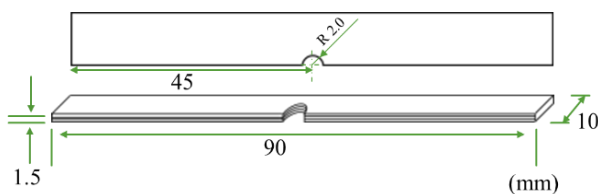


Fig.1 Dimensions of specimen

2.2. 実験方法

2.2.1. 繰返し曲げ負荷

シェンク式負荷機構を持つ曲げ疲労試験機 (容量 30 Nm) に試験片を取り付け、20 Hz の完全両振りの条件で最大曲げモーメントを 1.2 Nm から 1.7 Nm の間で変化させて負荷した。

2.2.2. 静的曲げ試験

万能引張試験機 (容量 100 kN) を用いて 4 点曲げ試験を行った。4 点曲げ寸法は外側スパン 81mm, 内側スパン 27 mm とし、負荷速度は 5 mm/min とした。

3. 実験結果

3.1. 繰返し曲げ負荷

繰返し曲げ負荷に伴う曲げモーメントの変化を図 2 に示す。曲げモーメントは初期の値 M_{ini} により無次元化し、繰返し数との関係として示す。図 2 より、曲げモーメントは負荷直後から急激に減少し、繰返し数 2×10^5 回付近で飽和することが分かる。また、 M_{ini} が大きいほど飽和後の曲げモーメントの M_{ini} に対する割合が小さくなることが分かった。

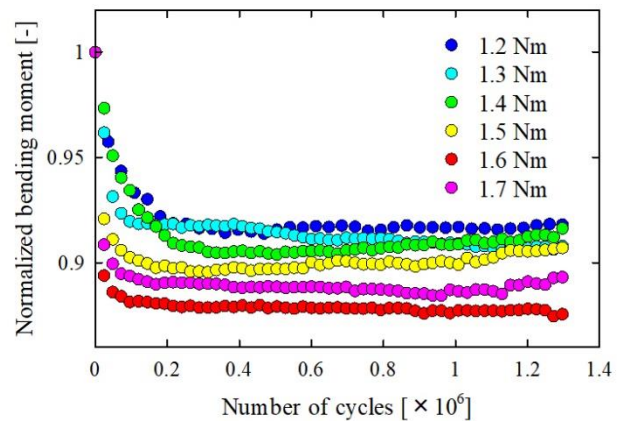


Fig.2 Change in bending moment with cyclic loading

図 2 に示した結果では、いずれの M_{ini} についても、繰返し数 $N = 50 \times 10^3$ までの曲げモーメントの変化が急激であった。 $M_{ini} = 1.5$ Nm で試験した 3 本の試験片について、その詳細な変化を図 3 に示す。図 3 から、曲げモーメントは繰返し負荷直後から減少を開始するが、 5.0×10^3 回付近から、その減少の割合が急激になる事が分かる。また、 15×10^3 回以後は減少の割合は緩やかになり、その後、飽和に至ることが分かった。

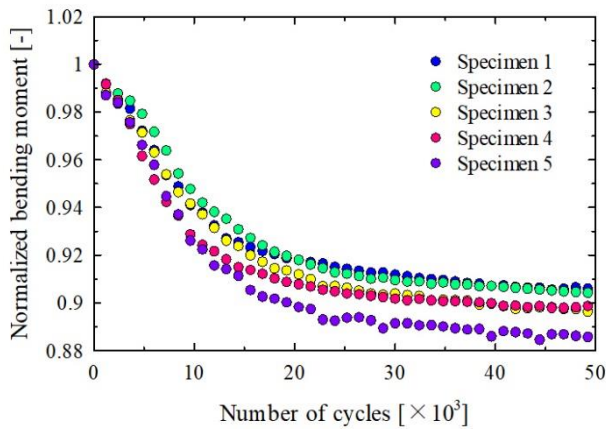


Fig.3 Change in bending moment up to $N = 50 \times 10^3$

3.2. 光学顕微鏡による切欠き底の観察

$M_{ini} = 1.5 \text{ Nm}$ で負荷した試験片の切欠き底を光学顕微鏡で観察した結果を図4に示す. 図4(a)は繰返し負荷を 5.0×10^3 回, 図4(b)は 1.4×10^6 回負荷したものである.

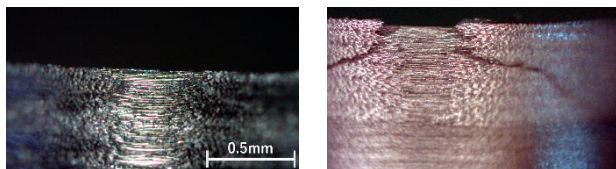


Fig.4 Observation of notch root

図4(a)より, 急激な曲げモーメントの減少が生じる $N = 5 \times 10^3$ において, すでに 0° 層表面から 0.2 mm 程度の部分で繊維方向のき裂が観察される. 図4(b)の曲げモーメントの低下が飽和した後は, 試験片中央部に向かって斜め方向にき裂が進展している様子が明瞭に観察される. この段階では, 図5に模式的に示すように 0° 層と 90° 層の界面がはく離するまでき裂が進展している.

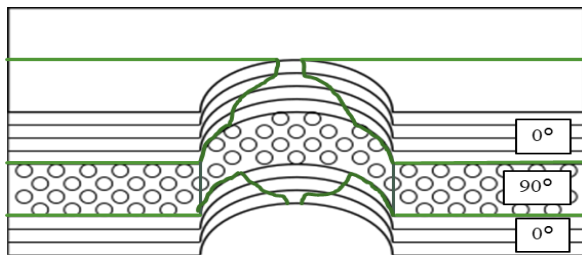


Fig.5 Schematic illustration of cracking

3.3. 静的曲げ試験

繰返し曲げ負荷を受けた試験片と, 負荷を受けていない試験片に対して4点曲げ試験を行った. 曲げモーメントとクロスヘッド変位の関係を図6に示す. 図6より, 繰返し負荷を受けていない試験片は, 試験中に複数回負荷が低下する挙動を示した. これは, 繰返し負荷を受けた試験片と同様な 0° 層と 90° 層の層間割れが, 静荷重下で生じたためである. 一方, 繰返し曲げを負荷された試験片は, いずれの M_{ini} についても最終破断までモーメントは単調に増加した. この曲げ強さの値を図7に示す. $M_{ini} = 1.4 \text{ Nm}$ の試験片以外は6~7%程度の曲げ強さの低下が生じた. ただし, この低下の大きさは M_{ini} には依存していないことが分かった.

繰返し曲げ負荷の有無や負荷の大きさによらず曲げ試験での破断の様子は図8に示すように 0° 層と 90° 層の界面割れによるものであった.

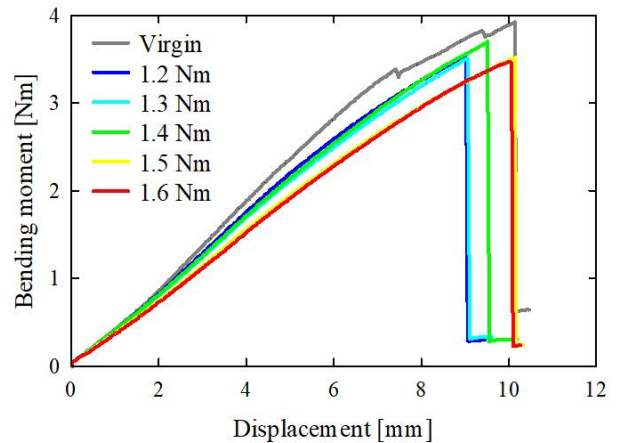


Fig.6 Bending moment v.s. displacement curves
 $M_{ini} [1 \sim 1.6 \text{ Nm}]$

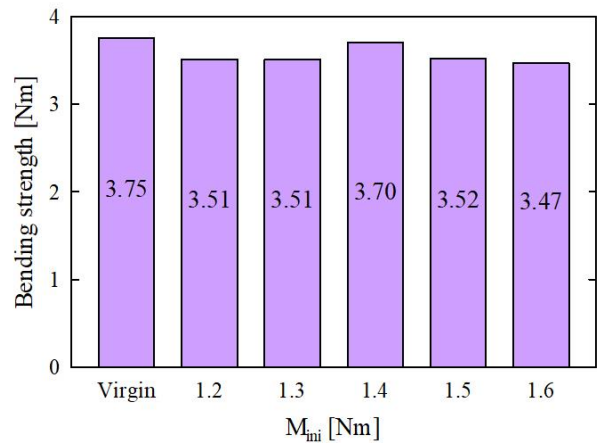


Fig.7 Bending strength

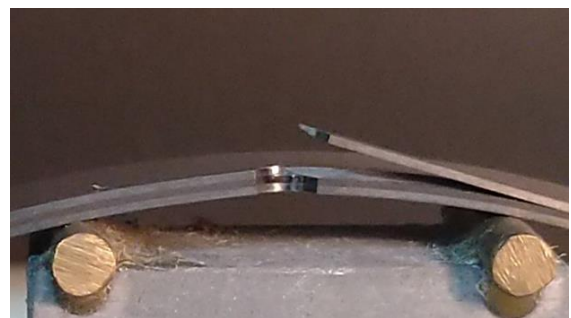


Fig.8 Bending scene

4. 結言

- (1) 積層構造のCFRPに定変位で繰返し曲げ負荷を加えると曲げモーメントは急激に減少し, その後飽和する.
- (2) 繰返し曲げ負荷を受けると, 表面の 0° 層内をき裂が伝播し, 90° 層との層間き裂へと進展する.
- (3) 繰返し曲げ負荷により発生するき裂と, 4点曲げ試験において静荷重で試験片に発生するき裂は, ほぼ同様の形態であった.
- (4) 繰返し曲げ負荷を受けた試験片は曲げ強度が小さくなった. しかし, M_{ini} との関係性は見られなかった.
(参考文献省略)