繊維不連続層を有する CFRP 積層板の力学挙動

Mechanical Properties in CFRP Laminates with Discontinuous Plies

中谷隼人(阪市大), 中谷健志(東理大・院), 永田優(同), 小柳興瑤(東理大)
松葉朗(広島県総研東工技セ), 河野洋輔(広島県総研西工技セ), 荻原慎二(東理大)

Hayato NAKATANI, Okasa City University

Kenji NAKAYA, Yu Nagata, Kogo Koyanagi, Shinji OGIHARA, Tokyo University of Science

Akira MATSUBA, Yousuke KOUNO, Hiroshima Prefectural Technology Research Institute

This paper investigates the effect of the fiber discontinuity, caused by the prepreg cut in fabricating laminated structures, on the mechanical properties in CFRP laminates. The damage initiation and progress around the fiber discontinuity are also discussed. It has been found that stresses required to initiate debonding between the resin rich region and the fiber discontinuous plies, and interlaminar delamination between the continuous and discontinuous plies, decrease with the increase in thickness of the fiber discontinuous plies. Specimens type B, C and D contain 3, 5 and 7 discontinuous spots respectively and these spots form staggered geometries. Fracture stress varied with the different distribution of fiber discontinuity. If interval d is longer than 10mm in type B and type C, fracture stress did not change. Also, if interval d is longer than 20mm in type D, fracture stress did not change.

Key Words: Fiber Discontinuity, Composite Material, Mechanical properties, Delamination

1. 緒言

プリプレグを使用して複合材料積層板構造物を成形する場合、形状が複雑な構造物では無駄になるプリプレグが発生する。材料コストを考慮すると、できる限りプリプレグの廃棄を少なくする必要がある。そのためには、構造内部において繊維不連続部を有するような設計が求められると考えられる。本研究では複合材料積層板内に繊維不連続部がある場合、この繊維不連続部が構造物としての力学的特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 試験片及び引張試験

CFRP プリプレグは T700SC/2592(東レ製)を用い、積層構成は一方向積層板 $[0_8]$ とした。繊維不連続部はプリプレグを切断し、なるべく隙間が生じないように突き合わせて積層することにより導入した。作製した積層板は Fig.1 に示すように 4 タイプ用意した。Type A は不連続層を積層板中央に配列し、繊維不連続層数を 0,2,4,6,8(すべて切断)の 5 種類を用意した。Type B, C, D は不連続部を互い違いに配列し、不連続部と不連続部との分散距離 d を 5,10,20,50mm とし 4 種類ずつ用意した。引張試験片の形状は長さ 200mm, 幅 10mm, 厚さ 1.2mm の短冊形であり、両端の 50mm をチャック部分とした。引張試験には万能試験機(TENSILON RTF-1350, (株)A&D)を使用し、引張速度は 1.0mm/min で行った。ひずみの測定にはひずみゲージを使用した。また、光学顕微鏡を用いて負荷中の試験片端面の観察を行った。

3. 実験結果

Fig.2 に Type A の 6 層不連続試験片について得られた応力-ひずみ曲線を示す。

Fig.1 Schematic of CFRP Laminates with fiber discontinuity

Fig.2 の凡例はひずみゲージを貼り付けた箇所(不連続部からの距離)を示している。繊維不連続部から 4,10,20mm 離れた点におけるひずみはある程度の応力まではほぼ線形な応力-ひずみ関係を示すが、ある応力に達した瞬間に急激にひずみが増加し、その後再びほぼ線形な挙動を示す。繊維不連続部直上の点のひずみは、低応力で非線形な応力-ひずみ関係を示す。繊維不連続部から離れた点における急激なひずみ増加後、両点の応力-ひずみ関係はほぼ一致している。また、端面観察結果を Fig.3 に示す。100MPa 付近で、繊維不連続部直上(0mm)のひずみゲージの応力-ひずみ曲線が非線形性を示し始めているのが分かる(Fig.2 中の A)。これは Fig.3(a)に示すように、樹脂リッチ層における損傷に対応しているものと考えられる。400MPa 付近では、繊維不連続部から 4mm 離れた点でのひずみが急増加している(Fig.2 中の B)。これは Fig.3(b)に示すように、連続層と不連続層間の層間はく離と対応しているものと考えられる。また、この時層間はく離の進展は繊維不連続部から引張方向に 5mm の箇所までであった。

Fig.4 に Type B ($d=20$ mm)の試験片、Fig.5 に Type C ($d=20$ mm)の試験片について得られた応力-ひずみ曲線を示す。試験片中央の点(0mm)や繊維不連続部から離れた点(20mm)では層間はく離が起きるまではほぼ線形な応力-ひずみ曲線を示す。繊維不連続部直上の点(10mm)のひずみは、ある応力までほとんど線形な応力-ひずみ曲線を示す。

Fig.2 Stress-strain curve of 6-ply discontinuous specimen
ある応力でひずみが急激に増加し、その後応力-ひずみ曲線はやや非線形な応力-ひずみ関係を示す。不連続部間の距離 d が変わっても同じ挙動を示す。

4. 解析

Fig.6 に層間はく離発生応力を予測するための解析モデルを示す。Type A の解析モデルでは層間はく離が起きた時のエネルギー解放率 G を求める。Type B, C, D の解析モデルでは Type A で求めた G を用いて層間はく離が発生する応力を求める。このモデルでははく離がある点線の領域は荷重を持たないものとし、試験片端にかかる応力を σ_0 とすると、モデル全体の変位 $\delta(a)$ は

$$\delta(a) = \left(\frac{t_2}{t_1} a + l \right) \frac{\sigma_0}{E_1} \quad (1)$$

と表せる。 a ははく離長さ、 l はモデル全体の長さ、 E_1 は一方向積層板のヤング率、 t_1 は連続層の厚さ、 t_2 は不連続層の厚さである。よって、エネルギー解放率は

$$G = -\frac{d\Pi}{da} = \frac{\sigma_0^2 t_2 (t_1 + t_2)}{2E_1 t_1} \quad (2)$$

と表される。 $d\Pi$ はポテンシャルエネルギーの変化である。解析から得られた層間はく離が発生する応力を Fig.7 に Type A の結果を示し、Fig.8 に破線で Type B, C, D の結果を示す。Fig.8 の G には Fig.7 で実験結果と良く一致した 1300N/m を用いた。Type B, C の場合 $d=10\text{mm}$ 以上で解析モデルから得られた結果と実験結果が一致した。Type D の場合 $d=20\text{mm}$ 以上で解析結果と実験結果が一致した。この解析モデルを用いれば破断応力を予測出来る事が分かる。つまり、最終破壊は層間はく離によって引き起こされたということになる。

5. 結言

Type A において、繊維不連続部直上でのひずみの非線形挙動開始と繊維不連続部の損傷が対応する。また、繊維不連続部から離れた点での不連続挙動は層間はく離に対応する。繊維不連続層厚が厚いほど、不連続挙動の応力は小さくなった。このことは、解析からも示唆された。Type B, C, D において、分散距離を変えてもある一定以上は破断応力が変わらず、この時の最終破壊は層間はく離によって引き起こされた。

Fig.3 Damage progress around fiber discontinuity in the 6-ply discontinuous specimen

Fig.4 Stress-strain curves of the specimen Type B ($d=20\text{mm}$)

Fig.5 Stress-strain curves of the specimen Type C ($d=20\text{mm}$)

Fig.6 Analysis model to estimate fracture stress

Fig.7 Relation between the delamination onset stress and discontinuous ply

Fig.8 Relation between fracture stress and interval in experiment and analysis model