

## 異なる積層構造を有する CFRP の曲げ変形挙動の画像解析

## Image analysis of bending deformation behaviors of CFRP with different laminate structures

遠藤 祐希 (北海道大・工) 鄧 朋儒 (北海道大・工) 松本 高志 (北海道大・工)

Yuki ENDO, Hokkaido University  
Pengru DENG, Hokkaido University  
Takashi MATSUMOTO, Hokkaido University  
FAX: 011-706-6172, E-mail:yuki\_tu-su\_hm@eis.hokudai.ac.jp

CFRP has high strength and high stiffness in addition to its low density, however CFRP exhibits a brittle behavior at the time of fracture. In this study, cross-ply laminate, helicoidal laminate within limited angle range and cross-ply laminate core with helicoidal laminate skin were tested under three-point bending, and image analysis were performed for deformation behaviors. From the image analysis, it was confirmed that the deformation behaviors did not conform to those of the beam theory. It was observed that the epoxy resin between prepregs affected the deformations and that the out-of-plane deformations of the helicoidal laminate possibly were present.

## 1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, 以下 CFRP) は、炭素繊維と熱硬化性樹脂から成る複合材料である。低密度ながら高強度かつ高剛性を有するという特性があり、土木分野において活用が期待されている。しかし、破壊時の挙動が脆性的であるという短所をもつ。以前の研究<sup>1)</sup>では、脆性的挙動の改善のため、直交積層 CFRP とらせん積層 CFRP の曲げ載荷実験における挙動の比較がなされた。しかし、亀裂や剥離が生じるまでの変形挙動に対する把握は不十分である。

そのため、本研究では積層構成を有する CFRP を 3 種類作製し、三点曲げ載荷実験とともに画像撮影を行った。実験で得られた画像を用いて画像解析を行うことで、荷重低下が生じるまでの曲げ変形挙動について検討する。

## 2. 三点曲げ載荷実験

CFRP は、プリプレグを積層し、オートクレーブ法を用いて成形する。積層構成に関しては、軸方向を配向角  $0^\circ$ 、圧縮面を 1 層目とし、反時計回りを正方向として配向角を大きくしながら積層する。Table.1 の [] 内の配向角を繰り返して積層しており、その回数を下付きで表した。積層構成によって名称を CP, PSH9, SH9/CP とする。供試体の寸法は長辺 180mm、短辺 40mm、厚さ 5mm である。

載荷機は、オートグラフ (SHIMADZU AG-1240kN) を用いた。載荷方法は三点曲げ載荷である。Fig.1 に示すように、支点間距離を 150mm、せん断スパンを 75mm とし、載荷速度を 2.0mm/min の変位制御として載荷を行った。画像解析で用いる供試体側面の画像を撮影するため、載荷中に変位 1mm 毎に載荷を停止させた。

## 3. 画像解析手法

画像撮影には、Nikon のデジタルカメラ D3100 を使用し、画素数は  $4608 \times 3072$  ピクセル (約 1400 万画素) である。なお、供試体の側面にはラメスプレーによるランダムパターンを付与している。また、撮影した画像は二値化画像に変換している。計測点はそれぞれ軸方向に 40 点、高さ方向に 10 点の合計 400 点である。

## 4. 載荷実験結果

Fig.2 は、CP, PSH9, SH9/CP の荷重変位曲線である。いずれの CFRP も、載荷開始からしばらくは比例的に荷重が

増加した。CP は、10mm 付近で最大荷重をとり、直後に大きな荷重低下がみられた。PSH9 は 8mm 付近で二度の荷重低下を生じ、その後長い荷重保持がみられた。SH9/CP は 8mm, 14mm, 18mm 付近でそれぞれ荷重低下がみられた。

## 5. 画像解析結果

画像解析には、変形前として変位 0mm 時における画像と、各供試体における最大荷重時の変位に最も近い変位での画像を用いた。すなわち、CP は 10mm, PSH9 と SH9/CP は 7mm の変位の画像を用いた。これら変形前後の画像により X 方向直ひずみ、Y 方向直ひずみ、XY 面内せん断ひずみの結果を以下に述べる。なお、X 方向は軸方向、Y 方向は鉛直方向を示している。また、引張ひずみを正、圧縮ひずみを負の値としている。

Table.1 Laminate structures

Name	Number of layers	Laminate structures
CP	41	[0/90] <sub>20</sub> /0
PSH9	41	[0/9/18/27/36/45/36/27/18/9/0/-9/-18/-27/-36/-45/-36/-27/-18/-9] <sub>2</sub> /0
SH9/CP	41	[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90]/[0/90] <sub>9</sub> /0/[90/81/72/63/54/45/36/27/18/9/0]

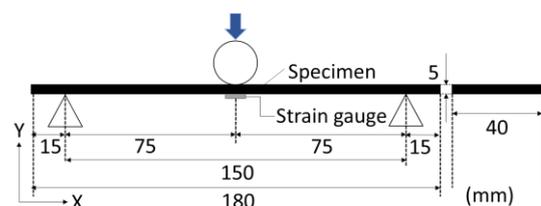


Fig.1 Loading conditions

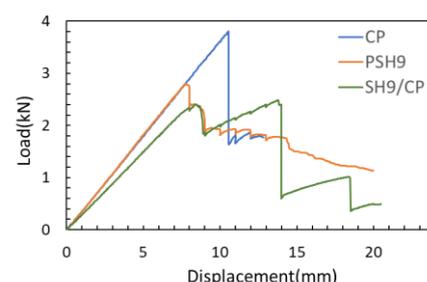


Fig.2 Load-displacement curves

### 5. 1 直交積層 (CP)

CP のひずみ分布を Fig.3 に示す。X 方向直ひずみは、出上側ほど圧縮ひずみ、下側ほど引張ひずみが大きくなるよう平行に分布している。中立面は材軸のやや下であるが、概ねの分布は一般的な曲げ変形と同様である。また、圧縮面側では局所的なひずみが数か所みられる。CFRP は層間が樹脂で接合されているため、層間でズレが生じやすく、局所的に値の大きなひずみが生じると考えられる。Y 方向直ひずみは、全体的に圧縮ひずみを生じ、下面側ほどひずみの大きさは大きくなった。全体として圧縮ひずみが生じるのは、X 方向直ひずみ同様層間の樹脂により厚さ方向につぶれたためと考えられる。XY 面内せん断ひずみは、載荷点で 0、右側で正の値、左側で負の値を示した。一般的な梁の曲げ変形では中立面でせん断ひずみが最大となるが、CP では中立面に比べ、上下面でのほうが大きなせん断ひずみを生じている。これは層間の樹脂がせん断変形しやすく、中立面付近に比べ、上下面側でせん断変形しているものと考えられる。

### 5. 2 配向角度限定らせん積層 (PSH9)

PSH9 のひずみ分布を Fig.4 に示す。PSH9 の X 方向直ひずみは、上側ほど圧縮ひずみ、下側ほど引張ひずみが大きくなるよう分布しているが、CP に比べ等高線が波打っていた。また、CP 同様局所的なひずみが生じている。しかし、CP とは異なり全体の分布に対して不自然に生じており、小片が飛び出すといった面外変形が一部で生じている可能性が考えられる。Y 方向直ひずみは上下面側で引張ひずみ、内側で圧縮ひずみを生じている。XY 面内せん断ひずみは、左上から右下に斜め方向に 0 の値、右上ほど正の値、左下にかけて負の値が大きくなっている。これらの分布は梁理論を基に検討しても、矛盾なく説明するのが難しい。そのため、PSH9 は載荷中に面外変形が生じていることが考えられる。

### 5. 3 らせん積層スキン/クロスプライコア (SH9/CP)

SH9/CP のひずみ分布を Fig.5 に示す。X 方向直ひずみは、CP と同様な平行な分布が生じた。Y 方向直ひずみは全体的に圧縮ひずみを生じていたが、CP や PSH9 のような分布傾向は見られなかった。XY 面内せん断ひずみは、全体では右側で正の値、左側で負の値が生じた。また、中立面付近に比べ上下面でせん断ひずみの大きさは大きくなっており、この分布は CP と似ている。しかし、SH9/CP では右側に数か所大きな負のせん断ひずみが生じている。これらのひずみの多くはらせん積層と直交積層の間に生じており、らせん積層と直交積層の境界層に弱部が生じていることが考えられる。

## 6. まとめ

CP は概ね梁理論による曲げ変形と同様な挙動を示した。しかし、層間の接合が樹脂であるために変形しやすいことで、局所的なひずみや、厚さ方向の圧縮、上下面側でのせん断変形が生じたと考えられる。PSH9 は XY 面内せん断ひずみの分布が CP と大きく異なっており、面外変形が生じた可能性がある。SH9/CP は概ね CP と同様なひずみ分布を示しており、PSH9 のようならせん積層の特徴がほとんど見られなかった。

本研究で用いた画像解析手法は面外変形に対応しておらず、特に PSH9 の挙動の検討には限界があった。そのため、今後の課題としては、PSH9 の面外変形について詳細に把握するため、三次元の有限要素解析による検討などが必要である。

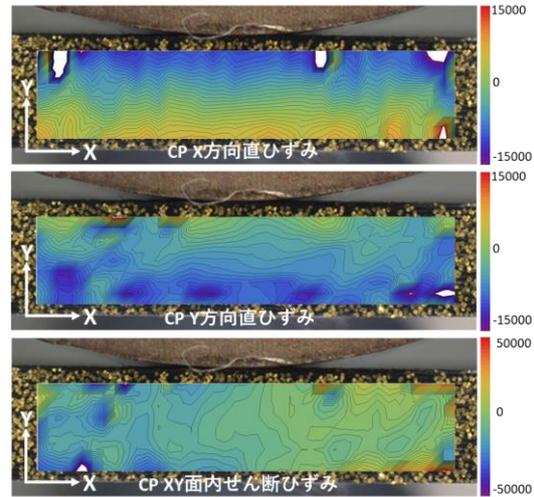


Fig.3 Strain distributions of CP

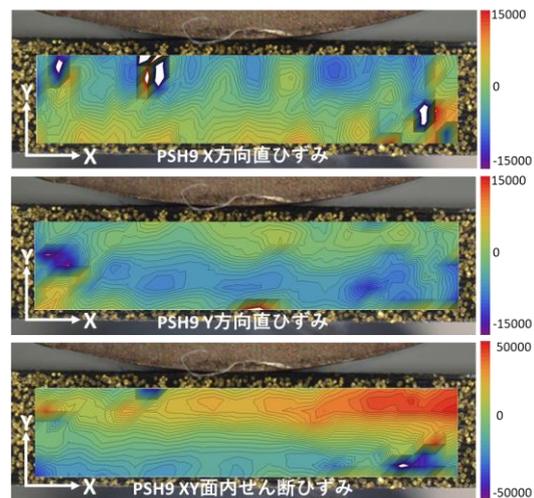


Fig.4 Strain distributions of PSH9

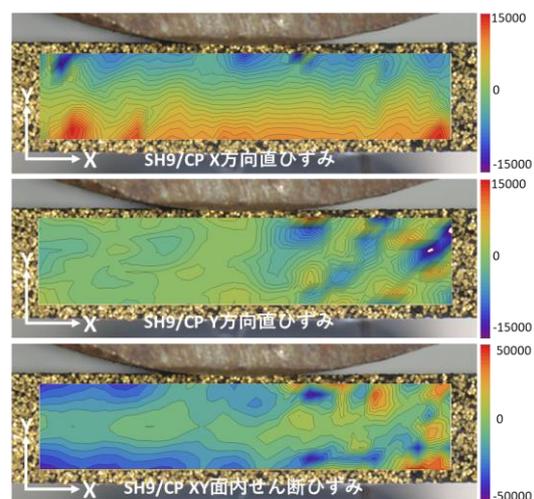


Fig.5 Strain distributions of SH9/CP

## 参考文献

- 1) 石澤郁馬, 細目貴之, 松本高志: らせん積層 CFRP の曲げ破壊形態, 第 73 号土木学会北海道支部論文報告集, A-13, 2017.