

らせん積層 CFRP 長方形板の曲げ挙動の三次元 DIC 解析

3D-DIC analysis on the bending behaviors of a helicoidal laminate CFRP rectangular plate

北海道大学工学部
北海道大学大学院工学研究院

○ 学生員 関口拓哉 (Takuya Sekiguchi)
正員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

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の複合材料である。CFRP は軽量でありながら、高強度・高剛性、耐腐食性が優れているという特徴を有する。しかし、破壊時の挙動が脆性的であり、局所的な破壊が生じる。

一方で、生体模倣は近年注目されている技術分野の一つである。例えば、シャコの捕脚はキチン繊維がらせん状に一定の配向角度差を保ちながら積層されていることが明らかにされている。この構造により、甲殻類や貝類を叩き割る際の反力に耐えうる強度を持つと考えられている。

既往の研究では、らせん積層を用いた CFRP(以下、らせん積層 CFRP)長方形板を作製し破壊挙動の検討を行ってきた。らせん積層 CFRP は直交積層と比べ特徴的な破壊形態を示し、最大曲げ荷重後の荷重降下が小さく、脆性破壊が軽減されることが確認された¹⁾²⁾。また、らせん積層の損傷、破壊に至るまでの変形機構を明らかにするために、曲げ変位場を面的にとらえることのできるデジタル画像相関法(Digital Image Correlation Method、以下、DIC)による検討も行ってきた。

しかしながら、既往の研究³⁾では、二次元による DIC 解析であったため、ねじりや屈座といった面外方向に生じる変形(以下、面外変形)については考慮することができなかつた。

そこで、本研究では三次元による DIC 解析を新たに用いることで、らせん積層における面外変形の挙動を検討することとした。直交積層、らせん積層の二種類の長方形板の四点曲げ載荷実験を行い、DIC 解析により算出された各積層構造の奥行(以下、Z 軸)方向変位、直ひずみ分布、最大主ひずみ分布を比較、検討することで、面外変形挙動の検討を試みた。

2. 四点曲げ載荷実験

2.1 供試体

CFRP 長方形板は、UD(Uni-Directional)プリプレグ(三菱ケミカル社製)を用いて作製した。UD プリプレグとは、炭素繊維基材に着色剤、充填剤等を適正な割合で混合した樹脂を含浸させたシート状のもので、硬化させる前のものである。プリプレグ目付は 188.9(g/m²)、繊維目付は 124.8(g/m²)、繊維含有率は 33.9(wt.%)である。

CFRP 長方形板は、JIS 規格に基づいたオートクレーブ法を用いて製作した。各供試体の積層構成を表 1 に示す。配向角度は、繊維方向が供試体の長辺方向に平行な層を 0°の層とし、それを基準に、反時計回りに繊維が

なす角度と定義する。積層構成の[]内の数字は配向角度、下付き文字は[]内の積層を繰り返した回数を示す。直交積層及びらせん積層の略称を CP と SH9 とする。積層イメージを図 1 に示す。

積層は層間に気泡が入らないよう圧力をかけながら行い、積層したプリプレグを、穴あきリリースフィルム、ブリーザーファブリック、バキュームバックの順に覆った後に、シーラントテープで上下面と真空引き口の真空ホースを密着させた。次にその真空バックを上下 2 枚ずつ厚さ 2mm のステンレス板で挟み、加圧器具で全体を加圧した。加圧したプリプレグを電気炉に入れ室温約 15 度から 80 度まで毎分 1 度ずつ温度を上げて 1 時間維持、その後 130 度まで毎分 1 度ずつ温度を上げて 1 時間維持することで CFRP を成形した。成形した CFRP を長辺 180mm、短辺 40mm、厚さ 5mm に裁断した。本研究では、各積層で 3 体ずつ製作した。供試体識別は L、C、R とし、供試体の名称は、(積層略称)-(供試体識別)で表す。

2.2 載荷条件・撮影条件

載荷機はオートグラフ SHIMADZU AG-1240kN を使用し、四点曲げ載荷実験を行った。支点・載荷点は四点曲げ試験治具を使用し、すべてローラー支点として実験を行った。載荷条件を図 2 に示す。

支間長 150mm、せん断支間長 50mm、曲げ支間長 50mm で供試体を設置し、2mm/min の変位制御の下、荷重及び変位の計測を行った。

表 1 供試体積層構成

略称	積層名称		枚数
	積層構成		
CP	Cross Ply	直交積層	41
	[0/90] ₂₀ /0		
SH9	Single Helicoidal-9	らせん積層	41
	[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90/99/108/117/126/135/144/153/162/171] ₂₀ /0		

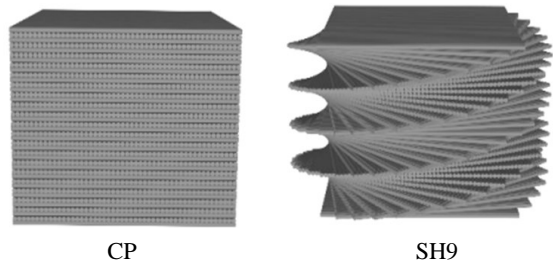


図 1 積層イメージ

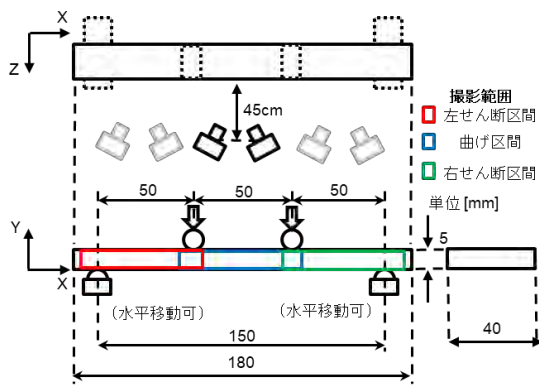
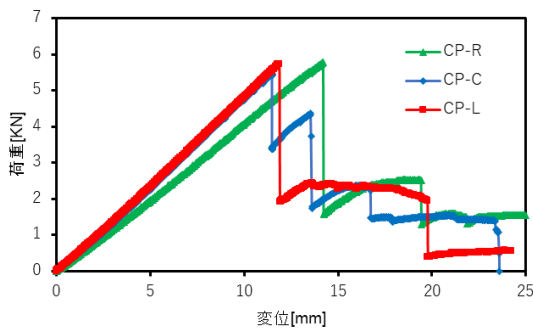
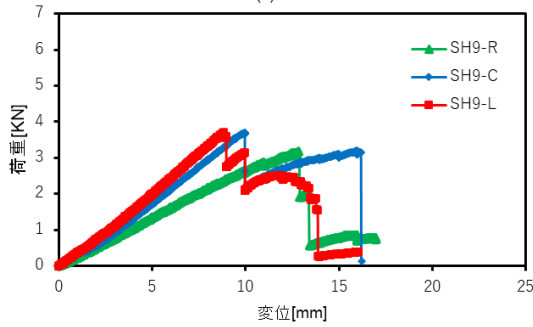


図2 供試体の寸法と荷重条件・撮影条件



(a) CP



(b) SH9

図3 各供試体の荷重変位曲線

2.3 荷重変位曲線

図3に四点曲げ荷重実験で得られた荷重変位曲線を示す。CPの最大荷重はいずれの供試体も変位約12mmから14mmの間であった。SH-9の最大荷重はSH9-Rを除き、変位約8.5mmから10mmの間であった。最大荷重後の平均荷重降下は、CPが約3.4kN、SH9が約1.3kNである。既往の研究と同様にCPに比べてSH9の最大荷重後の荷重降下量は小さくなることが確認された。

3. 三次元DIC解析

3.1 画像撮影

画像撮影にはNikonのデジタルカメラD3100を2台使用した。画素数は4608×3072ピクセル(約1400万画素)である。荷重前に撮影を行い、荷重開始後に変位約1mmごとに荷重を停止し画像撮影を行った。また、供試体カメラ間距離は45cm、左右のカメラ間距離は20cmとした。CP及びSH9は左側せん断支間、曲げ支間、右側のせん断支間のそれぞれで撮影を行った。撮影区間は、

左せん断支間を供試体識別の”L”、曲げ支間を”C”、右せん断支間を”R”とした。また、供試体の撮影表面にはDIC解析のために白色と黒色のスプレーによりランダムパターンを付与している。

3.2 解析手法

解析には、GOM社が提供する3D-DICのソフトウェアであるGOM Correlateを使用した。はじめに、DIC解析を行う前に専用のパネルを用いてキャリブレーションを行う。その後、表面に塗布したランダムパターンを時系列データとして取り込むため、変形前後のステレオ画像を撮影する。ソフトウェアに取り込んだ左右の画像から、ファセットと呼ばれる領域を定義し、変形前後のファセットの中心点を相関追跡することにより変位を算出する。また、ファセットの形状は正方形であり、ポイント間距離は隣接するファセットの中心点との距離のことである。

本研究ではファセットサイズを19ピクセル、ポイント間距離を16ピクセルに設定しDIC解析を行った。

4. DIC解析結果

DIC解析はCP及びSH9の荷重降下前までの撮影画像に対して行った。撮影は変位約1mmごとに行ったので、SH9の最大荷重直前である変位8mm時点での解析結果を述べる。また、SH9との比較するため、CPも同様に変位8mm時点でのDIC解析を行った。

水平方向をX方向、鉛直方向をY方向、奥行方向をZ方向とし定義する(図2)。本章では、Z軸方向変位、X方向直ひずみ分布、Y方向直ひずみ分布、最大主ひずみのDIC解析結果について述べる。

4.1 Z軸方向変位分布

図4に左せん断支間、曲げ支間、右せん断支間におけるZ軸方向変位分布を示す。カラースケールのレンジは0.2~0.3mmに統一した。

曲げ支間では、CPは手前方向に0.8~1.0mm程度変位し、左右の荷重点における変位量の差は0.15mmであった。一方、SH9では、手前方向に0.25~0.43mm程度変位し、左右の荷重点における変位量の差は0.15mmであった。CPでは剛体変位に近い挙動を示しているが、SH9ではねじれを伴うような変形が確認された。

左せん断支間では、CPは支点側で0.2mm、荷重点側で0.4mm手前方向に変位している。SH9では支点と荷重点での変位量の差はほぼなく、0.15mm程度手前方向に変位している。しかし、変位9mm時点ではSH9の曲げ支間で見られたねじれのような変形を伴う挙動を左せん断支間でも確認できた。

右せん断支間では、CPは支点と荷重点での変位量の差はほぼなく、0.35mm程度手前方向に変位している。SH9では、支点側では約0.3mm、荷重点側では約0.2mm手前方向に変位しており、左右の変位量の差は約0.1mmである。また、曲げ支間で見られたねじれを伴うような変形を確認できた。

これより、CPでは剛体変位が生じていると考えられ、

SH9 では右側支点から面外変形が発生し、曲げ支間、左せん断支間へと遷移していることが確認できた。

4.2 X 軸方向直ひずみ分布

図5に左せん断支間、曲げ支間、右せん断支間における X 軸方向ひずみ分布を示す。カラースケールのレンジは±8000μに統一した。

曲げ支間では、CP 及び SH9 ともに上側で圧縮ひずみ、下側で引張ひずみが最大となることが確認でき、X 軸方向に対し平行に分布している。また、中立軸は CP、SH9 ともに中央付近に位置している。CP では最大圧縮ひずみが約-8000μ、最大引張ひずみが約 7000μであることにに対し、SH9 は最大圧縮ひずみが約-8000μ、最大引張ひずみが約 9000μとなった。

せん断支間では、CP 及び SH9 ともに荷点付近では、曲げ支間と同様のひずみ分布を示しており、支点側に近づくにつれ、ひずみは減少し約 1000μの引張ひずみが生じている。また、SH9 では荷点下面において、斜め方向に伸びる引張ひずみが確認された。

4.3 Y 軸方向直ひずみ分布

図6に左せん断支間、曲げ支間、右せん断支間における Y 軸方向ひずみ分布を示す。カラースケールのレンジは±8000μに統一した。

曲げ支間では、CP 及び SH9 ともに上側で引張ひずみ、下側で圧縮ひずみが最大となることが確認でき、X 軸方向に平行に分布している。CP では最大圧縮ひずみが約-8500μ、最大引張ひずみが 9000μであることにに対し、SH9 は最大圧縮ひずみが約-8200μ、最大引張ひずみが約 7500μとなった。SH9 ではCPの分布とは異なり、上

面のみならず、下面付近においても約 6000μの局所的引張ひずみが確認できた。

せん断支間では、CP 及び SH9 ともに荷点付近では、曲げ支間と同様のひずみ分布を示しており、支点側に近づくにつれ、ひずみ量は減少し約-1000μの引張ひずみが生じている。SH9-L では、荷点下面で斜め方向に伸びる局所的な引張ひずみ約 9000~10000μが確認された。

4.4 最大主ひずみ分布

図7に左せん断支間、曲げ支間、右せん断支間における最大主ひずみ分布及び最大主ひずみ方向を示す。カラースケールのレンジは0~15000μに統一した。

曲げ支間における最大主ひずみは、CP では中央から上面では約 400~2000μ、最上面及び下面では約 8000μ以上となった。SH9 では、中央付近で約 2000μ、上面で約 8500μ、下面では斜め方向に伸びる 18000μ以上の主ひずみが確認された。また、変位約 10mm 時点では、上面側で局所的に 20000μを超え、主ひずみ方向にひび割れが開くように生じた。

せん断支間における最大主ひずみは、CP では全体的に約 100~2000μの主ひずみが分布しており、荷点下面においては約 8000μとなった。一方、SH9 の最大主ひずみは、せん断支間中央から支点にかけて約 100~2000μ、荷点下面においては 15000μ以上の主ひずみが分布している。

SH9 下面で見られた斜め方向に伸びる主ひずみは、内部において微細なひび割れが生じていると考えられる。

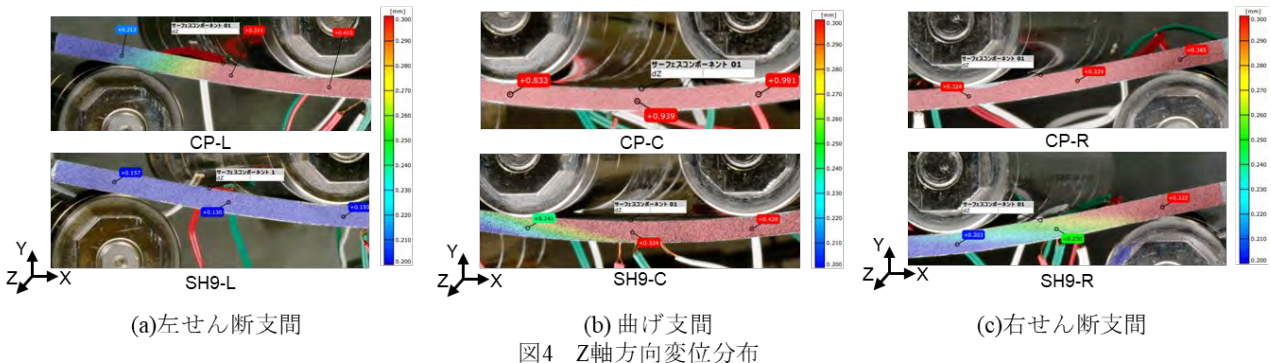


図4 Z軸方向変位分布

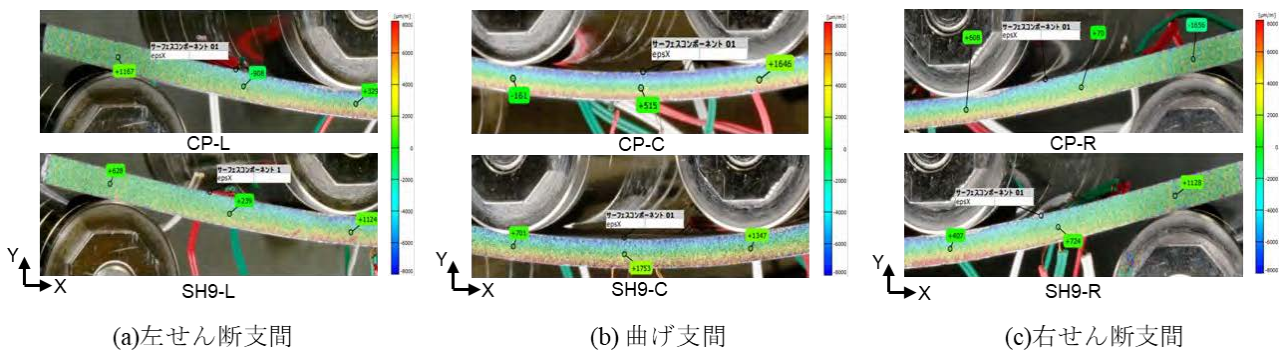


図5 X軸方向直ひずみ分布

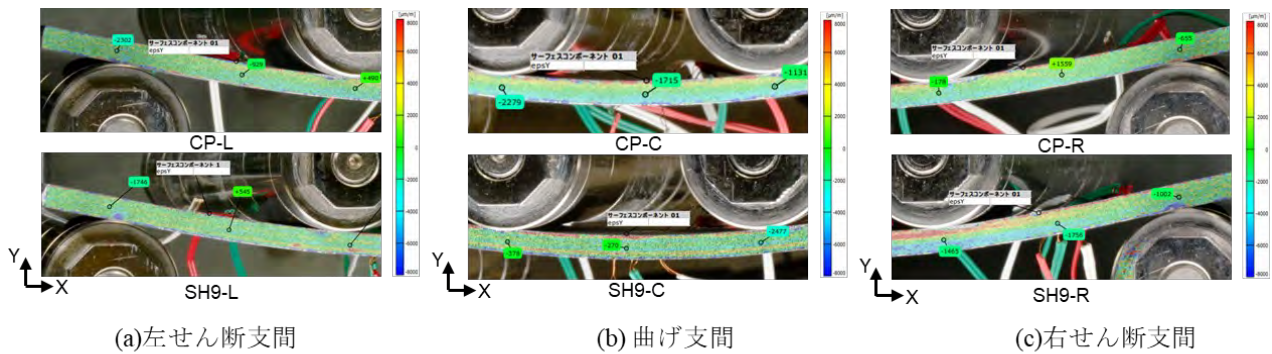


図6 Y軸方向直ひずみ分布

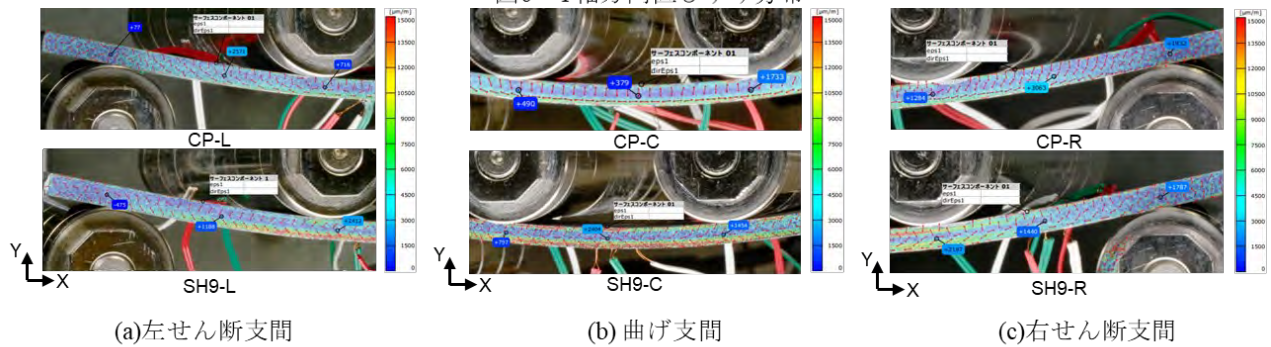


図7 最大主ひずみ分布

5. 考察

本章では、2D-DIC を用いた既往の研究³⁾と X 軸方向直ひずみ分布、Y 軸方向直ひずみ分布、最大主ひずみ分布について比較する。また、Z 軸方向変位について CP と SH9 を比較し面外変形挙動について述べる。ただし、既往の研究の支持条件は、すべてローラー支点でありかつ、片方の支点及び荷重点は長軸周りにねじりが自由であることに留意する必要がある。

X 軸方向直ひずみ分布は、既往の研究と同様の分布が得られたが、CP 及び SH9 の最大圧縮ひずみ、最大引張ひずみの値に違いが生じた。曲げ支間において既往の研究では、CP の最大圧縮ひずみは約 7000μ 、最大引張ひずみは約 3500μ であり、圧縮ひずみでは 1000μ 、引張ひずみでは二倍程度の差が見られた。一方、SH9 の最大圧縮ひずみは約 -5500μ 、最大引張ひずみは約 6500μ であり、圧縮・引張ひずみともに 2500μ の差が生じた。

Y 軸方向直ひずみ分布は、CP は既往の研究と同様の分布が得られたが、曲げ支間において既往の研究では、最大圧縮ひずみは -6800μ 、最大引張ひずみは 5000μ であり、圧縮ひずみで約 2000μ 、引張ひずみでは 4000μ の差が見られた。SH9 は、既往の研究では全体的に -1500μ の圧縮ひずみが生じていたのに対し、本研究では、局所的に 6000μ の引張ひずみが確認できた。これにより、積層間でずれが生じた可能性が考えられる。

X、Y 軸方向直ひずみの差は、支持条件の違いにより、ねじれが拘束され、供試体が水平方向のみに動いて曲げ変形するため、ひずみ量が大きくなったと考えられる。

最大主ひずみ分布は、CP 及び SH9 で同様の分布が得られた。また、SH9 下面において、既往の研究と同様に斜め方向に主ひずみ分布が伸びている。本研究では斜め方向に分布している主ひずみベクトルは面外変形が生じる方向に一致していることが確認された。

Z 軸方向変位において、CP では剛体変位による変形

挙動、SH9 では面外変形挙動が明らかとなった。これは、配向角度差の小さい SH9 では、Z 軸方向変位量が一定の値を超えると、積層間のずれが生じることでねじれのような面外変形挙動が起こると考えられる。

6. まとめ

本研究では CP、SH9 の二種類の長方形板の四点曲げ荷重実験及び三次元 DIC 解析を行った。DIC 解析より CP と SH9 の変形挙動の違いは以下の二点を確認された。

- 1) Z 軸方向変位において CP は剛体変位による変形挙動を示したが、SH9 ではねじれを伴うような面外変形挙動が確認された。
- 2) 最大主ひずみにおいて、CP 下面では X 軸方向に平行に約 8000μ の主ひずみが分布し、SH9 では曲げ支間下面及びせん断支間荷重点下面付近において、斜め方向に伸びる 18000μ 以上の主ひずみが確認された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H01411(基盤研究(B)、生体模倣らせん積層 CFRP による構造部材の変形・耐荷挙動の研究)の助成で実施された。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 在家頌一，細目貴之，松本高志：らせん積層 CFRP の曲げ特性に関する実験，第 72 号土木学会北海道支部論文報告集，A-15，2016。
- 2) 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。
- 3) 遠藤祐希，鄧朋儒，松本高志：DIC 解析によるらせん積層構造を有する CFRP の曲げ変形挙動の検討，第 78 号土木学会北海道支部論文報告集，A-03，2022。