# 直交積層 CFRP 長方形板の曲げ変形挙動の画像解析

Image analysis on the deformation behaviors of cross-ply CFRP rectangular plates

北海道大学工学部	○学生員	遠藤	祐希	(Yuki Endo)
北海道大学大学院工学研究院	正員	鄧	朋儒	(Pengru Deng)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	松本	高志	(Takashi Matsumoto)

# 1. まえがき

近年、軽さと強さを併せ持つ新素材として、炭素繊維 強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics,以下 CFRP)が注目されている。CFRP とは炭素繊維と熱硬化 性樹脂から成る複合材料であり、アルミや鉄などの他の 金属に比べて低密度ながら高強度かつ高剛性を有すると いった特性がある。この特性から CFRP はスポーツ・レ ジャー用品から宇宙や医療産業まで幅広い分野で利用さ れている。土木分野においても、軽量性や耐久性の向上 のために CFRP の活用が期待されており、その変形挙動 と耐荷特性を把握することは重要である。

これまでに石澤ら<sup>1),2</sup>は直交積層構造とらせん積層構 造の CFRP を製作して曲げ載荷実験を行い、載荷中の損 傷・破壊挙動を観察している。載荷中の直交積層 CFRP は、圧縮側での層間剥離や中央付近での圧壊による破断 が生じ、その後、さらなる層間剥離や破断の進行による ひび割れから生じる層間剥離が発生して全体の破断に至 る挙動が観察された。

本研究では、荷重低下が生じる前の直交積層 CFRP の 変形挙動とその後に発生する層間剝離、ひび割れ、破断 との関係を、画像解析を用いて検討することを目的とす る。既往の研究でも観察された直交積層構造の CFRP 長 方形板を製作し、三点曲げ載荷実験を行った。載荷中に、 積層断面である長方形板の側面を一定間隔で写真撮影を 行い、載荷前後の写真によりデジタル画像相関法による 画像解析を行った。これにより変位分布とひずみ分布を 算出し変形挙動を検討した。

### 2. 三点曲げ載荷実験

### 2.1 プリプレグ

供試体に用いられているプリプレグとは、炭素繊維基 材に、着色剤や充填材等を適正な割合で混合した樹脂を 含侵させた、硬化させる前のシート状の強化プラスチッ ク成形材料である。本研究では、一方向に繊維が並んで いる三菱レイヨン製の UD プリプレグを使用した。プリ プレグ目付は 187.3 (g/m<sup>2</sup>)、繊維目付は 124.3 (g/m<sup>2</sup>)、 繊維含有率は 33.6 (wt%)である。

# 2.2 供試体

供試体はオートクレーブ法を用いて制作した。プリプ レグを 200mm 四方に裁断し、合計 41 層積層した。軸 方向を配向角 0°とし、最下層から 0°、90°、0°、 90°…とそれぞれのプリプレグが直交するように 40 回 繰り返し積層されており、最上層である 41 層目が 0° となっている。積層は層間に気泡が入らないよう圧力を かけながら行われ、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 ックの順に覆ったのち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。次にその真空パッ 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、加圧したプリプレグを電気炉に 入れ室温から 80 度まで毎分 1 度ずつ温度を上げて 1 時 間維持、その後さらに 130 度まで毎分 1 度ずつ温度を上 げて 2 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 に裁断す ることで 3 つの長方形供試体として、それぞれの供試体 の名称を CP-L、CP-C、CP-R とする。

### 2.3 載荷条件

載荷機は、オートグラフ(SHIMADZU AG-1240kN)を 用いた。載荷方法は3点曲げ載荷である。図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 の変位制御で載荷を行い、 載荷中に変位1mm 毎に載荷を停止して側面の画像撮影 を行った。これは、いつ荷重低下が生じるかは予測でき ないので、一定間隔で撮影することで荷重低下が生じる 直前の画像を撮影するためである。また同時に一軸ひず みゲージを曲げモーメントが最大となる供試体のスパン 中央下面に貼りひずみの計測を行った。

#### 3.画像解析手法

#### 3.1 画像撮影

画像撮影には、Nikon のデジタルカメラ D3100 を使用 した。画素数は 4608×3072 ピクセル(約 1400 万画素)で ある。表 1 で示した範囲において、変位 1mm 毎に載荷 を停止させて画像撮影を行った。なお、供試体の表面に 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。

# 3.2 画像相関

撮影した画像は二値化画像に変換している。二値化画 像において、40 ピクセル間隔で格子状に計測点を定め た。計測点はそれぞれ軸方向に32点、高さ方向に9点





の合計288点である。

#### 4. 載荷実験結果

図2は、各CPの荷重変位曲線である。いずれの供試体も、載荷開始からしばらくは比例的に荷重が増加した。 その後、9.5mm~11mm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。

図 3、図 4 は載荷下 CP-R の変位 10.0mm 時、変位 11.0mm 時の状況である。図 2 より CP-R は 10.65mm 時 に最大荷重をむかえるが、その直前である 10mm 時に は、目視では側面に損傷は見られなかった。一方、荷重 低下が生じた直後である 11mm 時の側面には、載荷点 付近での圧壊と、局所的な層間剝離が見られた。いずれ の損傷も圧縮側で生じており、引張側での損傷は見られ ていない。

#### 5. 画像解析結果

画像解析は、各 CP の変位が 0mm 時における画像と、 最大荷重時の変位に最も近い変位での画像、すなわち CP-L と CP-R は 10.0mm 時、CP-C は 9.00mm 時の画像 を用いて行った。これら載荷前後の画像により、x 方向 変位、y 方向変位、x 方向直ひずみ、y 方向直ひずみ、 xy 面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おり、x 方向は右 向きが正の値、y 方向は上向きが正の値を示す。また、 引張ひずみが正、圧縮ひずみが負の値としている。

#### 5.1 x 方向変位分布

図5より、x方向変位はいずれの供試体でも正の値を 示している。これは載荷中において供試体全体が右に移 動したことが原因である。等高線の分布を見ると、x方 向変位はいずれの供試体においても同様な分布を示した。 載荷点付近では等高線の間隔は広く、載荷点から遠ざか るほど狭い。つまり、載荷点付近ではx方向の変位は一 様であるが、左右両端では高さによって段階的にx方向 の変位量が変化している。このようなx方向変位の分布 は一般的な梁曲げの軸方向変位分布と同様である。

### 5.2 y 方向変位分布

図6に示すy方向変位は、載荷点付近の変化量が最大 であり、そこを中心として左右両側の変化量は段階的に 小さくなっている。この中心位置はいずれの供試体でも 載荷点の右側である。これも供試体全体が右に移動した ことが原因であり、実際は載荷点が中心となっていると 考えられる。したがって、y方向変位もx方向変位同様 に一般的な梁曲げの鉛直方向変位と同様である。

### 5.3 x 方向直ひずみ

一般に梁の曲げ変形では、x 方向直ひずみは鉛直方向 に線形であり等高線が y 方向に平行となる。図 7 はいず れの供試体においても中央でこうした分布を示している。 しかしながら、すべての供試体において左右両側ではひ ずみ分布に乱れが生じており、等高線の間隔が中央に比 べ密であった。また、引張側における x 方向の引張ひず みに比べて、圧縮側に生じる圧縮ひずみの大きさの方が 大きく、ひずみが0となる中立軸は供試体中心軸より引 張側であった。



図2 直交積層 CFRP の荷重変位曲線



図 3 CP-R 変位 10.0mm 時 側面状況



図 4 CP-R 変位 11.0mm 時 側面状況



図5 x 方向変位分布

## 5.4 y 方向直ひずみ分布

ー般的な梁の曲げ変形において、y方向の直ひずみは ほとんど生じない。しかし、CPの載荷実験では図8に 示すように、全体で圧縮方向のひずみが観察された。ま た、いずれの供試体でも引張面、特に側面左側で局所的 な大きな圧縮ひずみが生じていた。これらの圧縮ひずみ の周辺は、他のひずみ分布に比べ、等高線の間隔が密に なっている。側面左側の引張面で生じている圧縮ひずみ は、いずれの供試体でも今回の解析範囲に収まっていな い。そのため、これらのy方向圧縮ひずみを検討するた めには、解析範囲を広げる必要がある。

# 5.5 xy 方向せん断ひずみ分布

図9より、各供試体の載荷点周辺でのせん断ひずみの 値はほぼ0であり、載荷点より右側ではおおよそ正の値、 左側ではおおよそ負の値を示しており、これは通常の梁 の三点曲げによるせん断ひずみ分布の符号と同様である。 しかしながら、一般に梁の曲げ変形では、せん断ひずみ の分布は中心軸で最大値、梁の上下面では0となるよう な放物線を描く。一方で、CPのせん断ひずみの分布は 上下面で最も大きくなっており、一般的な分布とは反対 の分布を示した。また、いずれの供試体でも側面右側に 生じている局所的な大きな正のひずみの間には0ないし は負の値のひずみが生じている。さらに、大きなひずみ が生じている左右両側の上下面は、せん断ひずみの分布 間隔が非常に狭くなっている。

### 6.考察

すべての CP において、x 方向変位分布と y 方向変位 分布は同じような分布を示し、これらは一般的な梁の曲 げ変形でみられる挙動と同様であった。一方で、ひずみ 分布は x 方向直ひずみ、y 方向直ひずみ、xy 方向せん断 ひずみいずれにおいても特徴的な挙動が観察された。一 般的な梁の曲げ変形では、上下面で生じる水平方向の圧 縮ひずみと引張ひずみの大きさは等しいが、CP は水平 方向において、下面に生じる引張ひずみに比べ、上面に 生じる圧縮ひずみのほうが大きかった。また、一般的な 梁の曲げ変形では鉛直方向のひずみはほとんど生じない が、CPでは全体で圧縮ひずみが生じた。これらのこと から直交積層 CFRP は曲げ実験において、上面の水平方 向の圧縮変形と板厚が減少するような変形が生じると考 えられる。さらに、CPでは上下面で最大のせん断ひず みが生じ、中心軸に近づくにつれせん断ひずみは小さく なった。このことから、直交積層 CFRP は内側の層に比 べ、外側の層のほうが大きくせん断方向に変形すると考 えられる。図 10 は各 CP の損傷状況を示している。上 面での水平方向の圧縮変形により載荷点では圧壊が生じ、 さらに、せん断方向の変形量が内側の層と外側の層で異 なるため、載荷点の両側で層間剝離が生じたのではない かと考えられる。また、分布図の左右両側で特徴的なひ ずみやひずみの乱れが観察された。しかしながら、今

回の解析範囲では損傷の生じた範囲をカバーできていな かったため、今後の研究では本研究で解析を行った範囲 の外側でのひずみ分布も観察する必要がある。



図 6 y 方向変位分布



図7x方向直ひずみ分布



図8y方向直ひずみ分布



図9xy方向せん断ひずみ



図 10 損傷状況

# 7.まとめ

本研究では、直交積層構造の CFRP 長方形板を作成し て三点曲げの載荷実験を行い、実験で得られた画像を用 いて解析を行うことで、直交積層 CFRP における曲げ変 形挙動を検討した。

画像解析の結果、変位分布は一般的な梁の曲げ変形と 同じような挙動を示した一方で、ひずみ分布は梁の曲げ 変形とは異なる特徴的な挙動が観察された。得られた解 析結果より直交積層 CFRP の変形挙動の考察を行ったが、 解析を行った範囲が狭かったため、損傷の原因を検討す るためには解析の範囲を広げる必要があることがわかっ た。

今後の研究では、測定点を水平方向に増やし画像解析 を行うことで、最大荷重時における直交積層 CFRP のひ ずみ分布を観察し、損傷までの過程を検討する必要があ る。

# 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.

2) 松本高志、石澤郁馬、近藤健太: CFRP のらせん積 層化による曲げ挙動と破壊形態の検討、土木学会論文集、 74 巻 2 号、p. I\_639-I\_647、2018.