

らせん積層 CFRP 箱形断面梁の曲げ変形挙動の三次元 DIC 解析

北海道大学 学生員 ○佐藤有輝
北海道大学 正会員 松本高志

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。軽量でありながら高強度、高剛性、耐腐食性に優れているという特徴を有する反面、破壊時の挙動が脆性的であり、最大荷重後の急激な荷重降下と局所的な破壊が生じる。一方で、生体を模倣したらせん積層 CFRP の曲げ挙動や破壊形態の把握が行われてきており、らせん積層 CFRP 箱形断面梁は特徴的な破壊形態を示し、最大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ている¹⁾。

しかしながら、既往の研究ではウェブ表面のねじれや座屈といった面外方向に生じる変形(以下、面外変形)が特徴的に生じているようであるものの、これらを検討することができなかった。そこで、本研究ではCFRP箱形断面梁を用いた四点曲げ載荷実験において、三次元 DIC 解析により面外変形を含めた曲げ挙動を検討することを目的とする。

2. 四点曲げ載荷実験

2.1 供試体

CFRP 箱形断面梁は、UD(Uni-Directional)プリプレグ (三菱ケミカル社製)を用いて作製した。CFRP 箱形断面梁はプリプレグをステンレス製の芯材に巻き付けた上で、JIS 規格に基づいたオートクレーブ法を用いて作製した。CFRP 箱形断面梁の寸法は、長さ 320mm、内寸高さ 42mm、内寸幅 42mm、板厚 3mm、無補剛とした。

表-1 に供試体の積層構成と寸法を示す。積層構成の[]内の数字は梁軸方向に対する配向角度、下付き文字は[]内の積層を繰り返した回数を示す。構成によって、名称を CP(Cross Ply), SH9(Single Helicoidal 9)とする。

また、ウェブ表面には画像解析のために白と黒のストレーによりランダムパターンを付与する。

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た。載

荷条件を図-1 に示す。支間長 270mm、せん断支間長 90mm、曲げ支間長 90mm で供試体を設置し、1mm/min の変位制御の下、荷重及び変位の計測を行った。

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。載荷前に撮影を行い、載荷開始後に荷重約 5kN ごと及び荷重増加の鈍化時に画像撮影を行った。

2.3 荷重変位曲線

図-2 に四点曲げ載荷実験で得た荷重(kN)-支間中央変位(mm)曲線を示す。最大荷重は CP で 21.78kN, SH9 で 22.84kN となった。

表-1 積層構成

略称	積層名称	枚数
	積層構成	
CP	Cross Ply	21
	[0/90] ₁₀ /0	
SH9	Single Helicoidal 9	21
	[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90/99/108/117/126/135/144/153/162/171]/0	

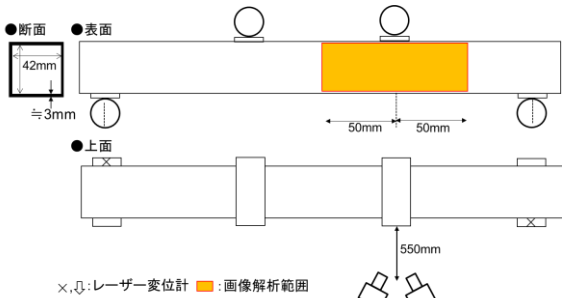


図-1 載荷条件

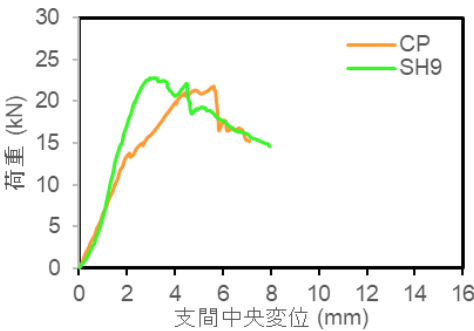


図-2 荷重変位曲線

3. 画像解析結果

解析画像には、最大荷重の直前に撮影したものとして、CP は 21.0kN 時、SH9 は 22.81kN 時を使用した。

3.1 X 軸方向直ひずみ分布

図-3 に X 軸方向直ひずみ分布を示す。CP では圧縮の領域が大きく、載荷板周辺に大きな局所ひずみが生じている。最大圧縮ひずみは曲げ支間中央で約 -9000μ 、載荷板端部で約 -14000μ 、最大引張ひずみは曲げ支間中央で約 2000μ 、載荷板直下で約 8000μ となった。一方、SH9 では圧縮と引張の領域が同程度の高さでみられる。また、載荷板周辺に大きな局所ひずみは発生していない。せん断支間では、ウェブ上側に約 2000μ の引張、ウェブ下側に約 -2000μ の圧縮ひずみがみられた。ひずみの最大値について、曲げ支間中央で、それぞれ約 -5000μ と約 4000μ であった。中立軸の位置に関して、CP では梁高さ中央より下方にみられるのに対し、SH9 は中央付近にある。

3.2 最大主ひずみ・ベクトル分布

図-4 に最大主ひずみ・ベクトル分布図を示す。CP ではせん断支間の中央に最大で約 11000μ ほどの大きい最大主ひずみが発生している。大きなベクトルが一様に発生しており、曲げ支間とせん断支間の境界を境にベクトルの向きが明瞭に変化している。SH9 ではせん断支間に大きなひずみが確認でき、 10000μ 以上の最大主ひずみが発生している。ベクトルはせん断支間から曲げ支間へ徐々に向きが変化しているものの、せん断支間下側で向きが変化している領域も見られた。また、曲げ支間上側においても最大で約 7000μ の主ひずみが発生しており、梁周方向のベクトルだけでなく斜めに向いたものも確認できる。

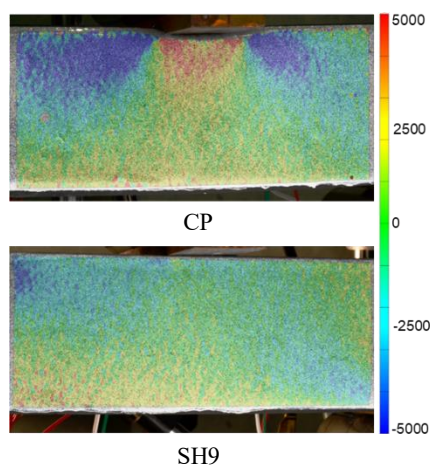


図-3 X 軸方向直ひずみ分布

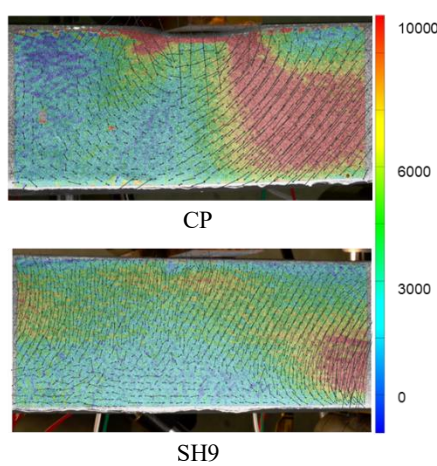


図-4 最大主ひずみ・ベクトル分布

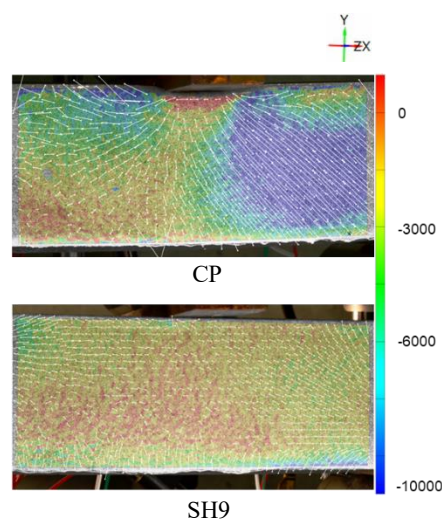


図-5 最小主ひずみ・ベクトル分布

3.3 最小主ひずみ・ベクトル分布

図-5 に最小主ひずみ・ベクトル分布を示す。CP ではせん断支間の中央に最大で約 -13000μ ほどの最小主ひずみが発生している。SH9 ではせん断支間中央での値は -3000μ と小さい。しかし、下縁において約 -10000μ の大きな最小主ひずみが生じている。

4. まとめ

本研究では、CP と SH9 の 2 種類の箱形断面梁に対して、四点曲げ載荷実験と三次元 DIC 解析を行った結果より以下のことが確認できた。

荷重変位曲線より、SH9 は CP と比較して安定的な挙動を示すことが確認できた。X 軸方向直ひずみ分布より、CP と SH9 の間でひずみの最大値及び中立軸の位置が大きく異なることが確認できる。

最大主ひずみ及び最小主ひずみの分布から、SH9 は梁の曲げ変形に伴う断面潰れが抑制されており、CP に対して最大荷重まで変形が比較的に一様に生じていくことが確認できた。

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) 森下傑彦, 松本高志: らせん積層 CFRP 箱形断面梁の曲げ挙動と破壊形態の検討, 第 79 号土木学会北海道支部論文報告集, A-08, 2023.