

らせん積層 CFRP 箱形断面梁の曲げ挙動と破壊形態の検討

Examination on the bending behaviors and fracture modes of helicoidally laminated CFRP box-section beams

北海道大学大学院工学院 ○ 学生員 森下 傑彦 (Takahiko MORISHITA)
北海道大学大学院工学研究院 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。しかしながら、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共に局所的な破壊が生じるため、梁部材などの主要部材として用いる際には注意が必要である。

一方で、生体模倣技術は近年注目されている技術分野の一つである。例えば、シャコの捕脚の外殻はキチン繊維がらせん状に角度を変えながら積層されていることが明らかにされている。このらせん構造により、貝を叩き割って捕食する際にも、自らの打撃の反力に耐えうる、強靱な性質を有するとされている¹⁾。

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)による長方形板、正方形板を作製し破壊挙動を検討した^{2,3)}。破壊挙動は炭素繊維の配向角度が影響し、らせん積層 CFRP によって破壊時の脆性的な挙動が緩和された。さらなるらせん積層 CFRP による構造部材の基礎的検討として、梁の実験に基づいた曲げ挙動や破壊形態の把握が必要である。そのため、本研究ではらせん積層 CFRP 箱形断面梁を用いて四点曲げ荷重実験を行い、曲げ挙動・破壊形態を観察、検討することを目的とする。

2. 四点曲げ荷重実験

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。UD プリプレグとは、炭素繊維を一方向に配列させ、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、かつ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 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 箱形断面梁の断面は、FRP 引抜成形、角パイプ(正方形)の SP50 の規格に基づいて作製した。SP50 の場合、内周は 42mm×42mm である。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 とした。

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梁軸方向に平行な層を 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。積層構成によって、名称を CP(Cross Ply)、SH18(Single Helicoidal 18)、SH9(Single Helicoidal 9)とする。本研究では、CP を 4 体、SH18 と SH9 を 3 体ずつ作製した。供試体の識別は A、B、C、D とし、供試体の名称は、(積層略称)-(識別)で表す。

2.2 荷重方法と計測項目

オートグラフ(SHIMADZU AG-1240kN)を使用し、四点曲げ荷重実験を行った。荷重条件を図-1、図-2 に示す。識別 A、B では支点・荷重点がローラー構造に加え梁軸周りに回転が可能なねじれ自由な構造となっている(以下、ねじれ自由治具)。識別 C、D では支点・荷重点は全てローラー構造である(以下、ローラー治具)。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。また、荷重の局所的集中を避けるため荷重点および支点に幅 23.5mm、板厚 5mm、奥行き 120.5mm の鋼製板を設置した。供試体と鋼製板の隙間は石膏で埋め、不陸調整を行った。

変位とひずみの計測位置を図-3 に示す。ひずみゲージ貼り付け面を表面と呼び、一方の側面を裏面と呼ぶ。識別 A、B では、変位計 3 点(図中 1~3)、識別 C、D では変位計 6 点(図中 1~6)を配置した。また、全供試体に一軸ひずみゲージ 5 点(図中 1s、2s~4s、5s)、三軸ひずみゲージ 3 点(図中 6s、7s、8s)を配置した。荷重、変位、ひずみは 1Hz 間隔で計測した。三軸ひずみゲージ 7s は破壊が予測される荷重板下に配置した。本稿では、支間中央変位(1)、上下フランジひずみ(1s、5s)、せん断支間中央(6s、8s)及び荷重板下(7s)のひずみについて述べる。表面では、荷重中にビデオ撮影をした。裏面では、識別 A、B で 2 次元、識別 C、D で 3 次元デジタル画像相関法による解析を実施した。そのため、荷重開始から最大荷重まで 5kN 毎に荷重を停止し、裏面の画像撮影を行った。

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	
SH18	Single Helicoidal 18	21
	[0/18/36/54/72/90/108/126/144/162] ₂ /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	

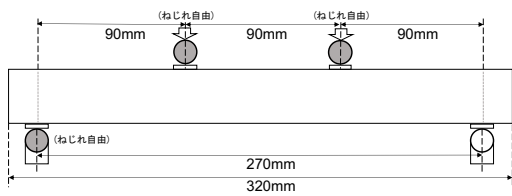


図-1 ねじれ自由治具 (識別 A と B 時)

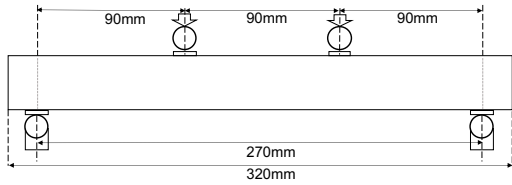


図-2 ローラー治具 (識別 C と D 時)

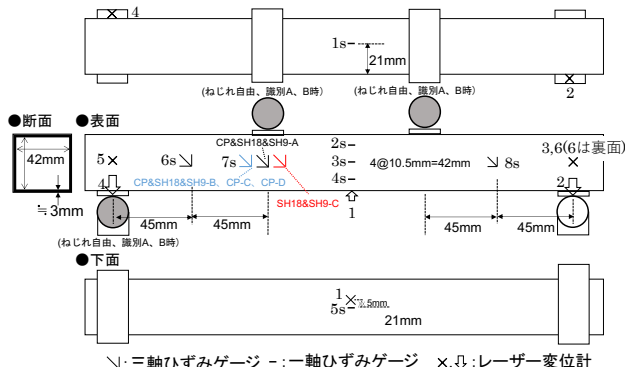


図-3 変位とひずみの計測位置

3. 実験結果 (支間中央変位)

3.1 荷重-支間中央変位曲線

四点曲げ載荷実験で得た荷重(kN)-支間中央変位(mm)曲線を CP, SH18, SH9 の順に図-4 に示す。原点から最大荷重の間で、線形に変化をした範囲の傾きから初期剛性を算出した。また、表面動画よりウェブでひび割れが確認できた点とひび割れがウェブ下部まで進行した点を図-4 中に黒丸で示す。以下では、最大荷重(kN)と最大荷重時支間中央変位(mm)を(荷重、変位)で示す。

(1) CP

CP-A は約 19kN、CP-B は 9kN、CP-C、D は約 16kN まで線形に荷重が上昇した。初期剛性は、識別 A、B、C、D の順に、9.47kN/mm、6.21kN/mm、6.68kN/mm、6.59kN/mm であった。平均は 7.45kN/mm である。その後、非線形に荷重が上昇し最大荷重に達した。最大荷重と最大荷重時支間中央変位は、識別 A、B、C、D の順に、(27.10、3.515)、(24.33、4.272)、(24.95、4.350)、(23.47、4.351)となり、平均は(24.96、4.122)であった。最大荷重後は、それぞれ 13.05kN、11.72kN、7.93kN、2.88kN の荷重降下を示した。平均は 8.99kN である。荷重降下後、CP-A、B は荷重が残存し、CP-C、D は漸増による荷重保持を示した後、荷重降下を経て荷重が残存し載荷を終了した。

(2) SH18

SH18-A は約 23kN、SH18-B は約 13kN、SH18-C は約 8kN まで線形に荷重が上昇した。初期剛性は、識別 A、B、C の順に、14.99kN/mm、9.20kN/mm、8.56kN/mm で

あった。平均は 10.92kN/mm である。その後、SH18-B、C は剛性が変化した後、再び線形に上昇した。剛性の変化は、SH18-B では梁断面が綺麗な矩形でなく、断面が平行四辺形になるように載荷が進行したことが影響したと考える。SH18-C は、梁の外観に目立った問題点は確認出来なかったため、内部での不良が考えられる。その後は CP 同様、非線形に荷重が上昇し最大荷重に達した。最大荷重と最大荷重時中央変位は、識別 A、B、C の順に、(27.75、2.173)、(25.02、3.553)、(26.96、3.664)、となり平均は(26.58、3.130)であった。最大荷重後、識別 A、B、C の順に 4.94kN、2.25kN、5.28kN の荷重降下を示した。平均は 4.16kN である。荷重降下後、SH18-A は漸増による荷重保持を示し、軟化勾配を有する荷重降下を経て、荷重が残存し、SH18-B、C は、軟化勾配を有する荷重降下を経て、荷重が残存し載荷を終了した。

(3) SH9

SH9-A は約 19kN、SH9-B は約 16kN、SH9-C は約 20kN まで荷重が線形に上昇した。初期剛性は、識別 A、B、C の順に、13.15kN/mm、10.28kN/mm、12.40kN/mm であった。平均は 11.94kN/mm である。その後、非線形に荷重が上昇し最大荷重に達した。最大荷重と最大荷重時中央変位は、識別 A、B、C の順に、(25.28、2.794)、(24.36、3.496)、(22.84、3.114)、となり平均は(24.16、3.134)であった。最大荷重後、識別 A、B、C の順に 5.67kN、4.01kN、2.17kN の荷重降下を示した。平均は 3.95kN である。荷重降下後、SH9-B は軟化勾配を有する荷重降下を経て荷重が残存し、SH9-A、C は漸増による荷重保持を示した後、軟化勾配を有する荷重降下を経て、荷重が残存し載荷を終了した。

3.2 初期剛性の比較

初期剛性の平均は小さい順に、CP 7.45kN/mm、SH18 10.92kN/mm、SH9 11.94kN/mm である。これより、配向角度差が小さくなるに従って初期剛性が増加した。これはウェブの積層板が複数の配向角で斜め方向の繊維を有しているため、ウェブのせん断剛性が増加し支間中央変位の抑制に一定の寄与があったと考える。しかしながら、それがどの程度初期剛性へ支配的な要因となるかは不明であり、定量的な検討には数値解析が必要である。

3.3 最大荷重後の荷重降下量

最大荷重後の荷重降下量の平均は大きい順に、CP 8.99kN、SH18 4.16kN、SH9 3.95kN である。これより、配向角度差が小さくなるに従って、最大荷重後の荷重降下量が減少し破壊時の脆性的挙動は緩和されたと考える。

3.4 軟化勾配の比較

表面動画よりウェブでひび割れもしくは隆起が確認できた点とそれらがウェブ下部まで進行した点の荷重降下量を支間中央変位量で除し軟化勾配(kN/mm)を算出した。軟化勾配の平均は大きい順に、CP 17.64kN/mm、SH18 5.85kN/mm、SH9 3.61kN/mm となり、らせん積層時に軟化勾配が緩やかになった。これより、らせん積層時の破壊は荷重を再配分しながら進行すると推測する。

4. 実験結果 (ひずみ)

4.1 荷重-上下フランジ梁軸方向直ひずみ曲線

上フランジ(1s)と下フランジ(5s)における最大荷重時までの荷重-梁軸方向直ひずみ曲線を図-5に示す。

上フランジ(1s)より、各供試体で概ね圧縮ひずみが線形に上昇した。また、載荷初期に発生した微小な引張ひずみは、載荷時の遊びが影響したと考える。CP-Cはひずみゲージの接着不良により、最大荷重まで引張ひずみが生じた。線形挙動後は各供試体で、接線勾配が変化し圧縮ひずみの増加が鈍化した。既往の研究⁴⁾では、隅角部にひび割れが生じており、上フランジにおける荷重-梁軸方向直ひずみ曲線における接線勾配変化点の荷重をせん断耐力に換算した値は、隅角部の面外方向せん断応力に起因した材料破壊によるせん断耐力の算定値と概ね一致した。本研究でも、隅角部にひび割れが生じたため、隅角部のひび割れに起因して圧縮ひずみの増加が鈍化したと考える。加えて、荷重-支間中央変位曲線の荷重が非線形に上昇する点と圧縮ひずみの接線勾配変化点の荷重は概ね一致する。SH18-B、Cのみ供試体不良による初期剛性の変化点と圧縮ひずみの増加が鈍化した点と一致したため検討外とした。荷重-支間中央変位曲線の非線形点において表面動画から微小なひび割れ音が確認できたため隅角部でひび割れが発生したものとする。

下フランジ(5s)より、全供試体で線形に引張ひずみが上昇した。初期勾配の平均は大きい順に、CP 13.03N/ μ 、SH18 9.01N/ μ 、SH9 8.13N/ μ であり、らせん積層では小さくなった。配向角度差が小さくなる時、積層板の梁軸方向引張弾性係数が小さくなる事が影響したと考える。

4.2 荷重-面内せん断ひずみ曲線

せん断スパン中央での面内せん断ひずみを図-6に示す(左側6sと右側8s)。CP-A、B、Cは約15kN、CP-Dは約8kNまで線形に上昇した後、非線形挙動を示した。CPは斜め方向の繊維層を有してなく、せん断変形における積層板の荷重-面内せん断ひずみ曲線が非線形になるためと考える。SH18とSH9は最大荷重まで概ね線形に面内せん断ひずみが上昇した。SH18とSH9は斜め方向の繊維層を有していることから、せん断変形における積層板の荷重-面内せん断ひずみ曲線が線形になるためと考える。初期勾配は、CPよりSH18とSH9が大きくなっている。SH18とSH9の初期勾配は全て右側せん断スパン(8s)の方が大きくなり、その平均値はそれぞれ13.77N/ μ 、26.99N/ μ であった。これより、複数の配向角度で斜め方向繊維を有することは、せん断剛性の増加に寄与している事が分かる。

5. 破壊形態

各供試体の破壊位置を図-7に示す。破壊した供試体の写真を図-8に示す。全供試体で隅角部にひび割れが生じた。図-8(d)には載荷板下の主ひずみとその方向を示す。

CP-Bは左側、CP-A、C、Dは右側載荷板せん断支間側に梁周方向の一直線ひび割れが生じた。

SH18-Aは右側、SH18-Bは左側載荷板曲げ支間側で、それぞれ斜め方向のひび割れと隆起が生じた。SH18-A

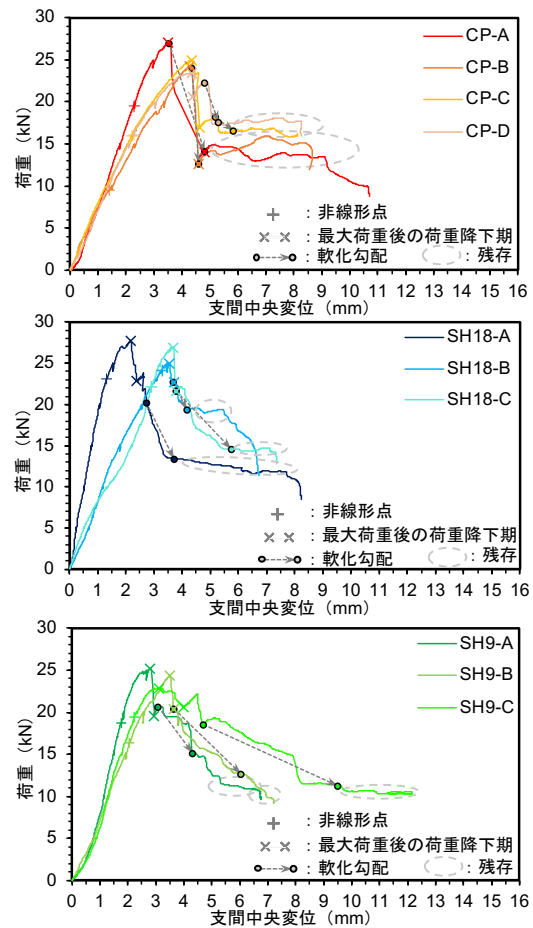


図-4 荷重-支間中央変位曲線(上から CP, SH18, SH9)

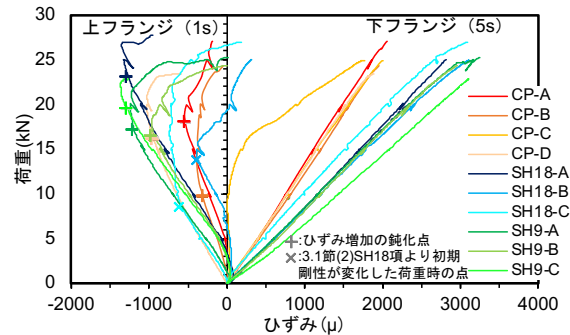


図-5 上下フランジ梁軸方向直ひずみ曲線

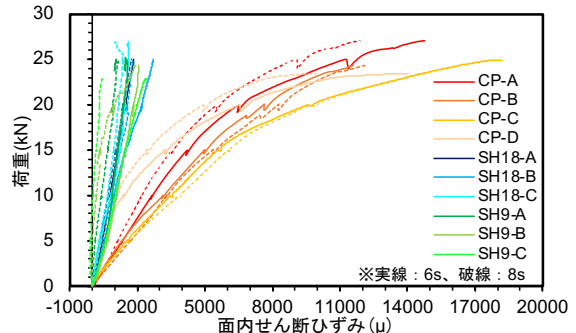


図-6 面内せん断ひずみ (せん断スパン中央)

のひび割れは、面外への尾根を形成しながらジグザク状に進行した。SH18-Cは右側載荷板せん断支間側で斜め方向に隆起が生じた。上フランジでは載荷板に沿ったひび割れ以外に隆起に伴う折れ目を確認した。

SH9-A、B は左側荷板端部曲げ支間側で、梁周方向のひび割れと隆起が生じた。ひび割れは SH18-A と同様の形態である。SH9-C は、表面でせん断支間側に斜め方向の隆起、裏面で曲げ支間側に梁周方向の隆起が生じ、表面と裏面で破壊位置が異なった。また図-8(d)より、左側荷板端部曲げ支間側直下の最大・最小主ひずみがプラス値を示した。隆起が現出していないスパンでもウェブ中央が隆起しようとした挙動であると考えられる。上フランジの破壊形態は SH18 と概ね同様である。

これらの破壊形態の違いは、斜め方向の繊維層の有無によって説明できる。CP は斜め方向の繊維層が無いため、せん断抵抗が低く梁周方向にひび割れが進んだものと推測する。一方で、SH18 と SH9 は斜め方向に繊維層を有するためせん断抵抗が高く CP と異なる破壊形態を示した。また、面外への尾根を形成したひび割れや隆起より、面外方向への変形に起因したと考えられるらせん積層時の特徴的な破壊形態を確認した。

6. まとめ

本研究では、3種類の積層構成の CFRP 箱形断面梁を作製し、四点曲げ荷重実験を行った。3種類の CFRP 箱形断面梁より曲げ挙動と破壊形態を観察、検討した。

- 1) 曲げ挙動について配向角度差が小さくなるに従って最大荷重後の荷重降下量の減少や破壊進行時の軟化勾配が緩やかになることを確認した。脆性的な破壊挙動の緩和を示した点を確認できた。
- 2) 上フランジの梁軸方向直ひずみについて、隅角部のひび割れにより圧縮ひずみの増加が鈍化したと考えられる。また、荷重-支間中央変位曲線においては非線形形で隅角部のひび割れが発生したと考えられる。
- 3) ウェブのせん断抵抗は、配向角度差が小さくなる時増加したが、複数の配向角度で斜め方向繊維を有することに起因するものと推測する。
- 4) らせん積層箱形断面梁のウェブは、面外方向への変形に起因したと考えられる特徴的な破壊形態を示した。

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) L.K. Grunenfelder, N. Suksangpanya, C. Salinas, G. Milliron, Yaraghi, S. Herrera, K. Evans-Lutterodt, S. R. Nutt, P. Zavattieri & D. Kisailus : Bio-inspired impact-resistant composites, Acta Biomaterialia, pp3997-4008, 2014.
- 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 A2(応用力学), Vol.74, No.2(応用力学論文集 Vol.21), I_639-I_647, 2018.
- 3) 松本 高志, 石澤 郁馬, 近藤 健太 : らせん積層 CFRP 板曲げ破壊挙動の検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.75, No.2(応用力学論文集 Vol.22), I_581-I_588, 2019.

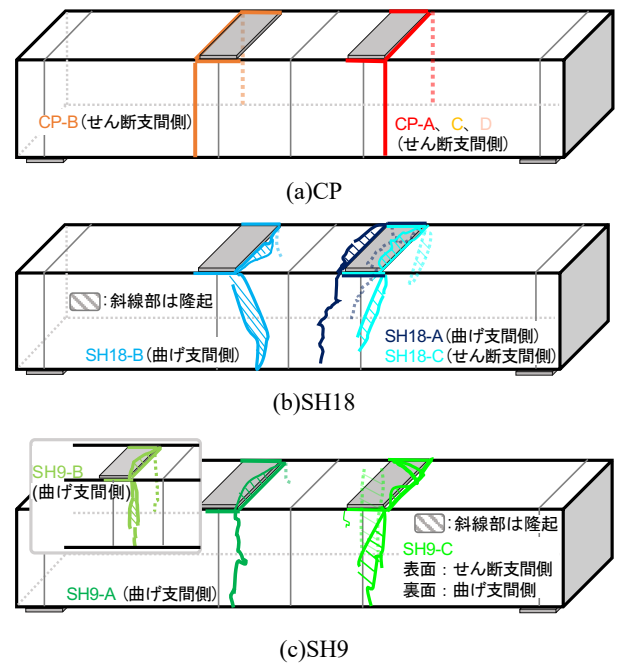
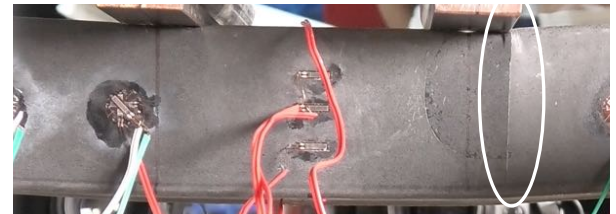
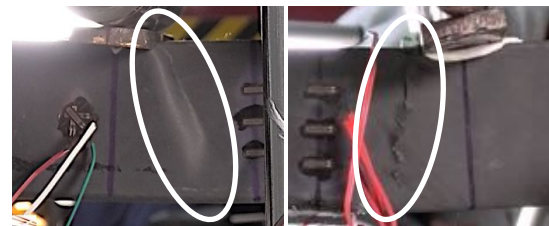


図-7 破壊位置(破線は裏面)



(a)CP-C のひび割れ



(b)左: SH18-B の隆起、右: SH18-A のひび割れ



(c)左: SH9-A のひび割れ、右: SH9-B の隆起



(d)左: SH9-C の隆起(表面)、右: SH9-C の隆起(裏面)

図-8 破壊形態 (楕円内が破壊部)

- 4) 櫻庭 浩樹 : 積層構成が異なる CFRP 梁の変形挙動と断面耐力に関する研究, 北海道大学博士論文, 2013.