HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	限定らせん積層 CFRP の四点曲げ変形・耐荷挙動の実験的検討
Author(s)	松本, 高志; Matsumoto, Takashi; 浜山, 千佳 他
Citation	土木学会論文集A2（応用力学）, 77(2), I_275-I_283 https://doi.org/10.2208/jscejam.77.2_I_275
Issue Date	2021
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/86186
Type	journal article
File Information	77_I_275.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

土木学会論文集 A2（応用力学），Vol. 77, No. 2（応用力学論文集 Vol. 24），I_275-I_283, 2021.

限定らせん積層 CFRP の四点曲げ変形・耐荷挙動の実験的検討

松本　高志[1]・浜山　千佳[2]・近藤　健太[3]

[1]正会員　北海道大学教授　大学院工学研究院土木工学部門（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: takashim@eng.hokudai.ac.jp (Corresponding Author)
[2]学生員　北海道大学　大学院工学院北方圏環境政策工学専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
[3]正会員　北海道大学　工学系技術センター技術部（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）

既往研究の全方向全厚のらせん積層に対して，らせん積層を部分方向または部分厚で成した限定らせん積層 CFRP の四点曲げ変形・耐荷挙動を実験的に検討した．部分方向らせん積層は，最大荷重後に脆性的な挙動を示したが，その後荷重増加と降下を経て最大荷重の半分弱にまで緩やかに回復した．回復中の小さな荷重降下時にはらせん積層の階段状ひび割れが発生した．部分厚らせん積層は，2 つの荷重ピークを示して荷重も半分以下に降下したが，らせん積層部分から広範囲に損傷が始まり，直交積層部分の脆性的な破壊挙動が抑制される損傷・破壊挙動が観察された．

Key Words: *CFRP, plate, flexure, fracture, helicoidal laminate*

1.　はじめに

CFRP（Carbon Fiber Reinforced Polymer: 炭素繊維強化ポリマー）は，炭素繊維と熱硬化性樹脂からなる繊維補強かつ積層複合材料である．低密度ながら，比強度，比剛性，耐腐食性に優れており，航空宇宙分野や自動車分野などで適用が進んでいる．CFRP の挙動は，線形的な応力ーひずみ関係を示した後に破壊が局所的に起こり，終局は急激な応力降下を示し脆性的である．

一方で，節足動物の外骨格のような生体構造の中には，繊維が基質材料を補強し，かつ積層を成す FRP のような構造が見られる．その積層構成は，繊維方向が一定の配向角度差を保ちつつ積層されており，らせん積層と呼ばれている．例えばシャコの捕脚はその打撃力が強大であることが知られているが，その外殻はキチン繊維がらせん積層されていることが知られており，これが打撃の反力に耐えうる強靭性を付与していると考えられて研究がなされている[1)-4)]．

これまでに CFRP をらせん積層で作製してその曲げ挙動を実験的に確認してきたところ，脆性的挙動が緩和されることが明らかになった．CFRP 細板（40 mm×180 mm×4 mm）の三点と四点曲げ載荷実験において，らせん積層では破壊が段階的・広範囲に生じ，配向角度差が小さくなるにつれて脆性的な挙動が顕著に緩和されることが確認され，複数の層間を階段状に進展する特徴的なひび割れと層間剥離が観察された[5), 6)]．配向角度差を小さくすると最大荷重やエネルギー吸収に向上が見られる結果は他でも報告されている[7),8)]．また，CFRP 正方形板（200 mm×200 mm×5 mm）を支間長 150 mm の円周上で支持して，中央点集中荷重と中央部分布荷重を載荷した曲げにおいては，最大荷重後の荷重降下はみられるものの，中央部分布荷重下においては荷重の増減を繰り返しながら最大荷重に迫るレベルまで荷重回復が見られた．X 線断層撮影では，破壊が供試体全体に広がり，層間剥離がねじれ面状に発生していることが明らかになった[11)]．既往研究でも，正方形板の低速衝撃試験でらせん積層はエネルギー吸収に優れ，貫通破壊を抑制することが報告されており[9)]，また，切り欠き梁の三点曲げ実験及び解析によりねじれ面状に進展するひび割れが主な機構であることが見出されている[10)]．

上記の既往報告の検討は全方向全厚でらせん積層を成すように CFRP を作製して実施してきたが，部材軸直交方向の繊維は曲げに対する寄与が小さいこと，階段状に進展する特徴的なひび割れと層間剥離は表層付近で起こること，を踏まえて，本研究では寄与の小さい部分の繊維量を別方向に振り向けることを考えた．部分方向または部分厚で限定的にらせん積層を成す CFRP を作製して，その基本的特性として四点曲げ載荷時の変形・耐荷挙動を実験的に検討することを本研究の目的としている．部分方向らせん積層，部分厚らせん積層，直交積層，全方向全厚らせん積

層，の 4 種類の CFRP を作製し，四点曲げ載荷を行った．荷重－変位曲線，最大荷重，最大応力，初期剛性，曲げ弾性率について，比較検討を行っている．損傷過程・破壊状況については，ビデオ撮影と顕微鏡撮影により検討を行っている．なお，三点曲げ載荷時の変形・耐荷挙動の実験的検討については報告済みである[12]．

2. 曲げ載荷実験

(1) 供試体

表-1に本実験で検討した 4 種類の積層構成を示す．表中の積層構成の数字は，各層の繊維の配向角度であり，供試体部材軸方向を 0°とした反時計回りの角度である．[ ]内の配向角度となるように順に積層していき，[ ]右の下付きの数字の回数だけ[ ]内の積層を繰り返している．積層構成名称は，CP（直交積層），PSH9（部分方向：配向角度限定らせん積層），SH9/CP（部分厚：らせん積層スキン／直交積層コア），SH9（全方向全厚：らせん積層）とした．各積層構成のイメージを**図-1**に示している．

これらの CFRP 積層板供試体は JIS 規格に基づいたオートクレーブ成形方法によって加熱成形した[13]．まず，裁断した UD（Uni-Directional）プリプレグ 41 枚（CP 200mm 四方，他 290mm 四方）を構成に従って積層する．これを外側からバキュームバッグ，ブリーザーファブリック，ピールプライクロスで覆い，シーラントテープで上下面と真空引き口の真空ホースとを密着させた．真空ホースの先にドライ真空ポンプを接続して吸引を行った．バッグ内の気密性を確認後，2mm 厚のステンレス板を上下に 2 枚ずつ設置し，作製した加圧器を用いて真空バック全体を加圧した．積層物および副資材は真空引きした状態のまま炉に設置して，加熱成形の硬化スケジュールは 2 段昇温とした．硬化過程の 1 段階目は80℃で1時間定常，2 段階目は130℃で 2 時間定常である．昇温速度はいずれの段階も 1℃/min である．

成形した CFRP 積層板は寸法 40 mm×180 mm（×5 mm 厚）に切断し，積層構成ごとに 1 バッチから 3 供試体を作製した．すべての供試体において，圧縮縁は 0°（供試体長軸方向）の層として統一しており，引張縁も 0°の層である．ただし，SH9 については比較のために既往の実験結果を引用しており，プリプレグ 40 枚より作製したため，圧縮縁を 0°の層，引張縁を 171°の層としている[6]．プリプレグの材料特性値は**表-2**に示している．SH9 は別時期に作製されたものであり，プリプレグのバッチが他の積層構成とは異なる．

表-3は作成された供試体の計測寸法を示している．標準寸法は，長辺 180 mm，短辺 40 mm，厚さ 5 mm である．各積層構成で 3 体作製しており，供試体名称は，（4:荷重条件）-（積層構成）-（L, C, R:切断位置）とする．ただし，SH9 は 4 供試体を作製・載荷したため，（4:荷重条件）-（積層構成）-（1, 2, 3, 4）とする．

(2) 限定らせん積層

全方向全厚らせん積層（SH9）に対し，本研究では寄与の小さい部分の繊維量を別方向に振り向けた，部分方向または部分厚の限定的ならせん積層とした CFRP 積層板の四点曲げ挙動を検討している．

まず，**図-2**に PSH9（配向角度限定らせん積層）のイメージを示している．供試体短軸方向繊維は曲げに対する寄与が小さいことから，部材軸に対して 0°から±45°の範囲

表-1 供試体の積層構成

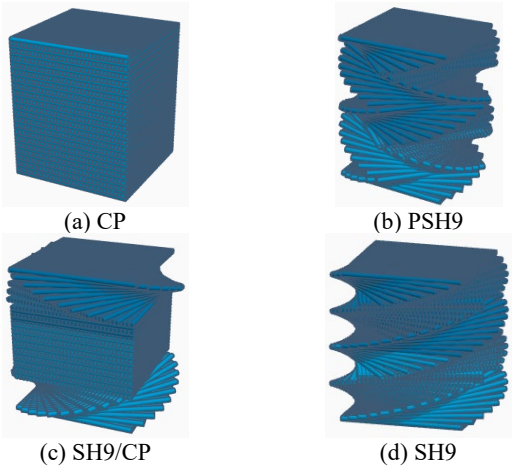
名称	枚数	積層構成
CP	41	$[0/90]_{20}/0$
PSH9	41	[0/9/18/27/36/45/36/27/18/9/0 /-9/-18/-27/-36/-45/-36/-27/-18/-9]$_2$/0
SH9 /CP	41	[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90]/$[0/90]_9$ /0/[90/81/72/63/54/45/36/27/18/9/0]
SH9	40	[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90 /99/108/117/126/135/144/153/162/171]$_2$

表-2 プリプレグ材料特性値

名称	CP	PSH9, SH9/CP	SH9
製造者	MITSUBISHI CHEMICAL		MITSUBISHI RAYON
品名	CS テープ		
品番	TR 350 G125SB4ZFWS		TR 350 E125SB4ZRWS
プリプレグ目付（g/m^2）	187.3	188.9	178.3
繊維目付（g/m^2）	124.3	124.8	125.3
樹脂含有率（wt%）	33.6	33.9	29.7

表-3 供試体寸法

名称	長さ（mm）	幅（mm）	厚さ（mm）				
			L/1	C/2	R/3	4	平均
CP	180	40	4.71	4.54	4.55	-	4.60
PSH9			4.89	4.74	4.72	-	4.79
SH9/CP			4.84	4.93	4.99	-	4.92
SH9			5.15	5.03	5.05	5.18	5.10



(a) CP　(b) PSH9　(c) SH9/CP　(d) SH9

図-1 積層構成のイメージ

内でのみ配向角度を変化させる積層構成（部分方向）としている．**図-1**(b)と(d)の比較と**図-3**の積層過程で分かるように，0°を中心として振り子のように配向角度を変化させている積層構成である．部分方向として配向角度0°から±45°以内の範囲で9°刻みのらせん積層を2回繰り返した．全方向全厚のらせん積層SH9は，脆性的な破壊を緩和し，圧縮面と引張面から段階的・広範囲に損傷が発生する．配向角度を特定範囲の方向に限定したらせん積層PSH9においても同様の曲げ変形・耐荷挙動を期待した積層構成である．

もう一つは，**図-4**にイメージを示しているSH9/CP（らせん積層スキン／直交積層コア）である．これは，階段状に進展する特徴的な損傷が表層付近で起こることを考慮して，下面および上面からの部分的な層（11層）でのみらせん積層とする積層構成（部分厚）としている．**図-1**(c)と(d)の比較と**図-5**の積層過程に示されている通り，下面もしくは上面を0°から90°まで変化させたらせん積層とし，コア部分を直交積層としている．直交積層CPは圧縮縁表面から局所的・脆性的に損傷が発生する．SH9/CPは，らせん積層によるスキンから段階的・広範囲に損傷が起こり，コアの局所的・脆性的な曲げ変形・耐荷挙動の抑制を期待した積層構成である．

いずれのらせん積層においても，配向角度差は9°としている．これは既往の研究において，36°，18°，9°のらせん積層を比較して，9°のケースが最も脆性挙動の緩和が見られたからである[5),6)]．

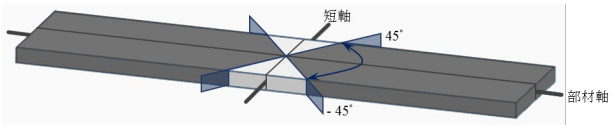


図-2　PSH9供試体イメージ

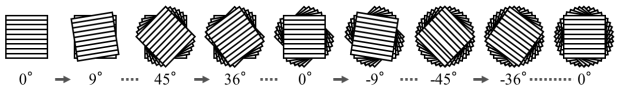


図-3　PSH9　積層過程

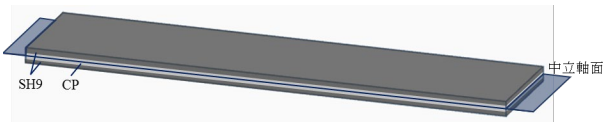


図-4　SH9/CP供試体イメージ

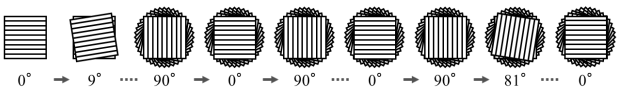


図-5　SH9/CP　積層過程

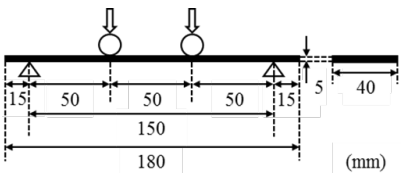


図-6　供試体寸法と四点曲げ載荷条件

(3)　作製手順

JIS規格に基づいたオートクレーブ成形方法を用いて，CFRP積層板を製作した[13)]．

UDプリプレグの裁断は，プリプレグをカッターで290×290 mm（CPのみ200×200 mm）の寸法で，積層構成に従い切り出した．切り出したプリプレグの繊維方向に対して所定の配向角度をつけた上で貼り合わせて，これを切り出したプリプレグの枚数分繰り返すことで積層を完了した．

次に，オートクレーブ成形方法に基づき積層したプリプレグを成形する．これは積層したプリプレグをシートで覆い，バッグ内で内包された空気や揮発物を真空除去し，加圧，加熱して硬化させる成形方法である．ここでは，積層したプリプレグを外側からバキュームバッグ，ブリーザーファブリック，ピールプライクロスで覆い，シーラントテープで上下面と真空引き口の真空ホースとを密着させた．真空ホースの先にドライ真空ポンプを接続し，吸引を行った．バッグ内の気密性を確認後，2 mm厚のステンレス板を上下に2枚ずつ設置し，作製した加圧器を用いて真空バック全体を加圧した．

加熱での成形のため，積層物および副資材は真空引きした状態のまま電気炉内に設置した．加熱の硬化スケジュールは2段昇温である．硬化過程の1段階目は80℃で1時間定常，2段階目は130℃で2時間定常である．昇温速度はいずれの段階も1℃/minである．

加熱終了後は半日間放置後に炉から取り出して，精密タレット形立フライス盤にて180 mm×40 mmの寸法に切断した．1つのCFRP積層板から3つの供試体を切り出した．

(4)　載荷条件

載荷実験装置にはオートグラフ（SHIMADZU AG-1 250 kN）を使い，四点曲げ載荷実験を行った．載荷条件を**図-6**に示す．載荷速度は2.0 mm/minの変位制御とした．大きな荷重降下後，載荷をこれ以上続けると供試体が破断すると判断したとき実験終了とした．載荷中には供試体側面をビデオ撮影した．なお，CFRPの曲げ試験にはJIS規格があるが，本実験は参考にしているものの，供試体寸法や，圧子・支点の径等において異なることを記しておく．

3. 実験結果

(1) 荷重－変位曲線

実験より得られた荷重（kN）と変位（mm）の関係を荷重－変位曲線で示す．各積層構成3つの供試体の挙動においてばらつきはあるが，同じ積層構成ではほぼ同様の挙動を示した．また，積層構成間では荷重－変位曲線の挙動は大きく異なった．

CPの荷重－変位曲線を図-7に示す．CPは最大荷重まで線形挙動を示し，最大荷重後にほぼ半減するまで荷重が降下した．その後の顕著な荷重保持は見られなかった．供試体の破断が近いと判断して，変位が約20~25 mmの時点で載荷を打ち切った．

PSH9の荷重－変位曲線を図-8に示す．PSH9は最大荷重まで線形挙動を示し，最大荷重後に半分以下にまで大きく荷重が降下して，その後荷重が増加した．この荷重増加は傾きが大きくないものの，次の降下まで変位増分5~10 mmの比較的長い間継続した．荷重増加と降下を数回繰り返し，実験終了時の変位は約32~35 mmと大きかった．

SH9/CPの荷重－変位曲線を図-9に示す．荷重のピークが2つ見られ，第2ピークは第1ピークに近いレベルであったものの，最大荷重は第1ピーク時であった．2つのピークまで線形挙動を示したのち，半分以下にまで大きく荷重が降下した．その後は，荷重降下と増加を繰り返して，変位約20~30 mmの時点で載荷を打ち切った．

図-10は既往の研究によるSH9の荷重－変位曲線である．前述の通り積層枚数40枚で作製し，4体の実験を行った．4-SH9-1を除き，最大荷重後に荷重降下を示し，その後漸増による荷重保持を示している．4-SH9-1は最大荷重から漸減しつつ荷重を保持している．載荷は最後に大きな荷重降下により終了とした．SH9の供試体は全て0.8kN付近で小さな荷重降下が起きているが，損傷は見られていない．載荷点か支持点かですべりが生じている可能性があるが詳細は不明である．

(2) 最大荷重と最大応力

各積層構成の最大荷重を図-11に，最大応力を図-12に示す．各積層構成3つの供試体でばらつきはあるが，同じ積層構成ではほぼ同様の値を示した．最大荷重の平均値は，大きい順にCP 5.595kN，PSH9 4.220kN，SH9/CP 3.212kN，SH9(40) 3.071kNであり，最大応力の平均値は，CP 992MPa，PSH9 692MPa，SH9/CP 498MPa，SH9(40) 443MPaであった．2種類の限定らせん積層PSH9とSH9/CPは，CPより小さいが全方向全厚のらせん積層SH9よりも大きい最大荷重と最大応力を示した．特に，限定したらせん積層のなかでも部分方向に限定的ならせん積層PSH9のほうが大きい値を示した．

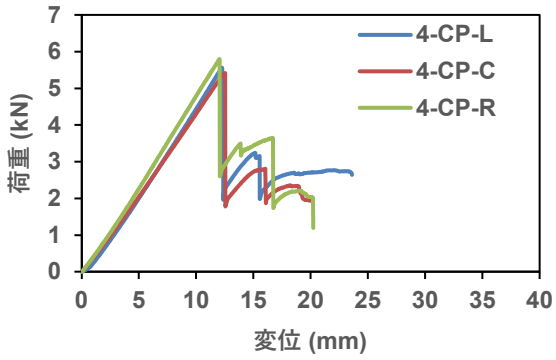


図-7 荷重－変位曲線（CP）

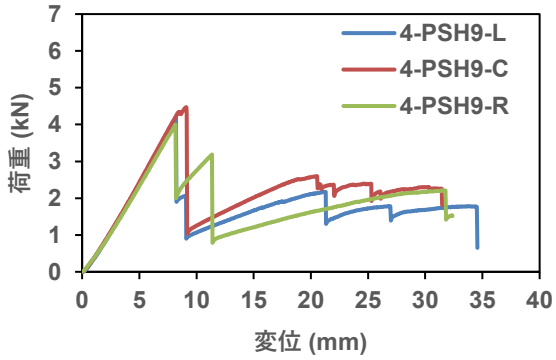


図-8 荷重－変位曲線（PSH9）

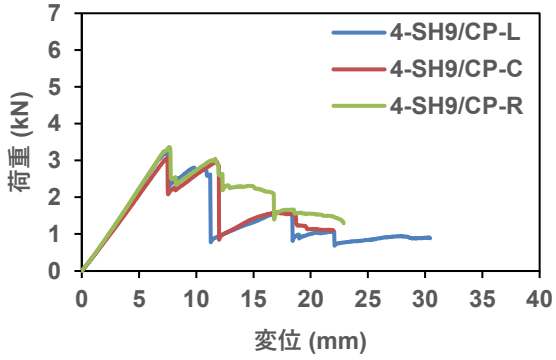


図-9 荷重－変位曲線（SH9/CP）

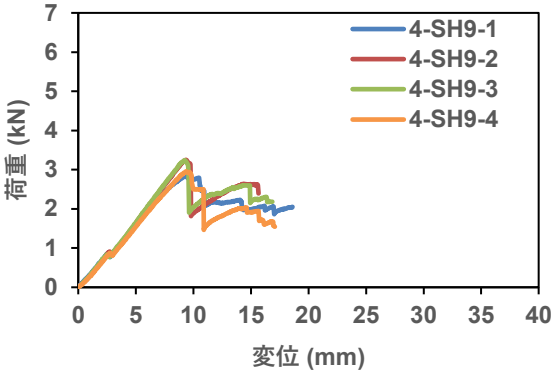


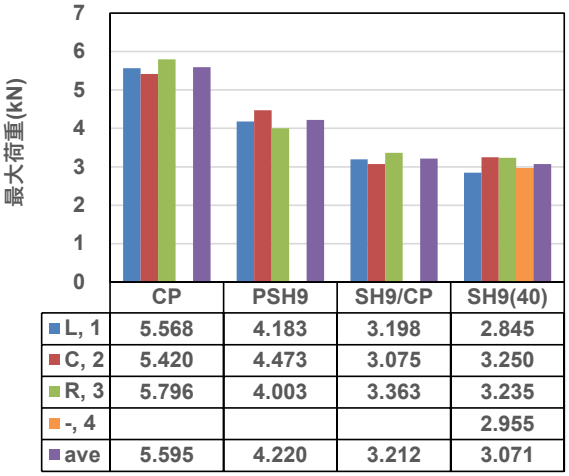
図-10 荷重－変位曲線（SH9）

(3)　初期剛性と曲げ弾性率

各積層構成の初期剛性を図-13に，曲げ弾性率を図-14に示す．初期剛性は，荷重－変位曲線の線形挙動部分の傾きであり，荷重－変位曲線の原点と最初のピーク時を繋いだ傾きから，初期剛性を算出した．曲げ弾性率は荷重点変位の式と初期剛性より算出した．各積層構成 3 つの供試体の値にばらつきはあるが，同じ積層構成ではほぼ同様の値を示した．初期剛性の平均値は，大きい順に PSH9 0.498kN/mm, CP 0.456kN/mm, SH9/CP 0.426kN/mm, SH9(40) 0.328kN/mm であり，曲げ弾性率の平均値は，CP 73.3GPa, PSH9 71.1GPa, SH9/CP 55.9GPa, SH9(40) 38.7GPa であった．2 種類の限定したらせん積層 PSH9 と SH9/CP は，全方向全厚のらせん積層 SH9 よりも大きい初期剛性を示した．これは，供試体軸方向の 0°に近い方向の繊維が PSH9 と SH9/CP においては SH9 よりも多く，曲げ剛性に寄与したものと考えられる．

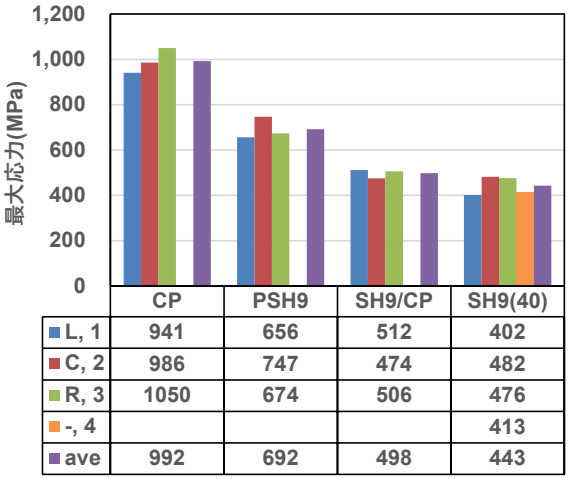
4.　損傷過程・破壊状況

載荷中の供試体側面のビデオ撮影と実験後の顕微鏡観察の結果を示す．図-15から図-17では，荷重変位曲線が降下した時点の損傷過程をビデオ画像により上から順に時系列に並べている．図-18は顕微鏡画像を合成した画像であり，破壊状況を示している．顕微鏡は Dino-Lite Edge Digital Microscope（最大倍率 230 倍）を使用した．いずれの図においても色付きのマーキング線は新しい損傷，白いマーキング線は今までの損傷を表している．色付きの線は，赤い線がらせん積層（SH9）部分，黄色い線が直交積層（CP）部分の損傷を表す．各積層構成 3 つの供試体の挙動においてばらつきはあるが，同じ積層構成，載荷条件ではほぼ同様の破壊挙動を示した．また，積層構成間で破壊挙動は大きく異なった．



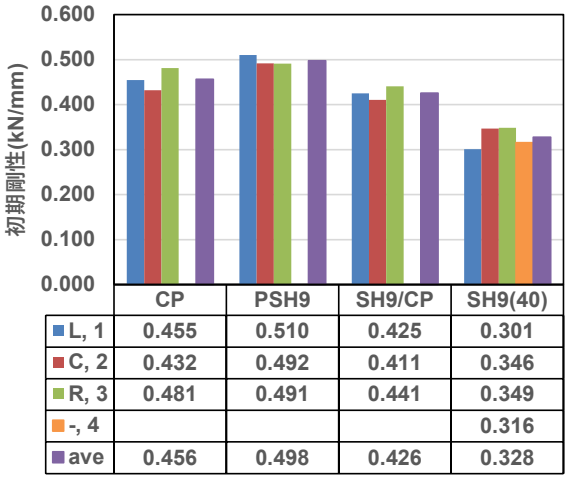
	CP	PSH9	SH9/CP	SH9(40)
L, 1	5.568	4.183	3.198	2.845
C, 2	5.420	4.473	3.075	3.250
R, 3	5.796	4.003	3.363	3.235
-, 4				2.955
ave	5.595	4.220	3.212	3.071

図-11　最大荷重



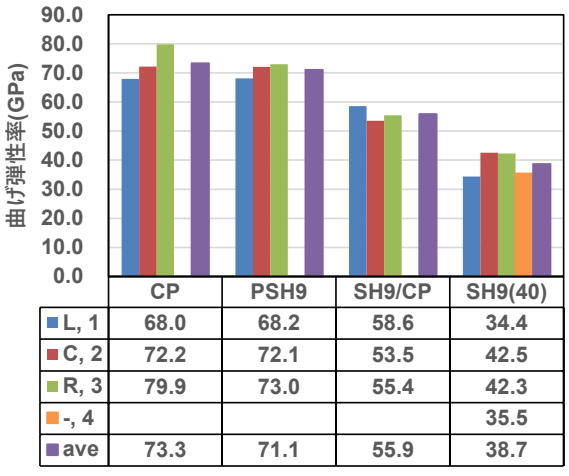
	CP	PSH9	SH9/CP	SH9(40)
L, 1	941	656	512	402
C, 2	986	747	474	482
R, 3	1050	674	506	476
-, 4				413
ave	992	692	498	443

図-12　最大応力



	CP	PSH9	SH9/CP	SH9(40)
L, 1	0.455	0.510	0.425	0.301
C, 2	0.432	0.492	0.411	0.346
R, 3	0.481	0.491	0.441	0.349
-, 4				0.316
ave	0.456	0.498	0.426	0.328

図-13　初期剛性



	CP	PSH9	SH9/CP	SH9(40)
L, 1	68.0	68.2	58.6	34.4
C, 2	72.2	72.1	53.5	42.5
R, 3	79.9	73.0	55.4	42.3
-, 4				35.5
ave	73.3	71.1	55.9	38.7

図-14　曲げ弾性率

(1)　CP

CP は，圧縮側から縦方向のひび割れとそれに伴う層間剥離が発生した．引張側からの損傷は見られなかった．典型的な CFRP の脆性的・局所的な破壊挙動が観察された．

四点曲げ載荷実験による損傷過程として 4-CP-R を例として図−15に示す．

4-CP-R は，まず変位 12.06 mm のとき（図−15(a)），圧縮側表面で層間剥離が発生した．そして変位 13.90 mm のとき（図−15(b)），圧縮側で新しい層間剥離が発生した．その後変位 16.73 mm のとき（図−15(c)），層間剥離を結ぶひび割れと中立軸面より引張側へ縦方向のひび割れが発生した．載荷終了時の変位 20.22 mm のとき（図−15(d)），圧縮側で新しい層間剥離が発生し，これまでのひび割れと層間剥離も進展していた．顕微鏡画像（図−18(a)）から，角度の大きい縦方向のひび割れと，それに伴う層間剥離が生じていることがわかる．

(2)　PSH9

PSH9 は，圧縮側の 0°層付近で急に大きく層間剥離が発生，その後は斜めびび割れの発生と層間剥離の進展があった．層間において斜めに進むひび割れは観察されたが，脆性的な破壊があり，期待した SH9 のような段階的・広範囲である破壊挙動は見られなかった．

四点曲げ載荷実験による損傷過程として，4-PSH9-L を例として図−16に示す．

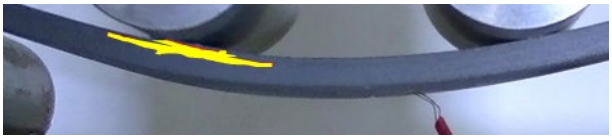
4-PSH9-L は，まず変位 8.25 mm のとき（図−16 (a)），圧縮側から 2 番目の 0°層付近で大きく層間剥離が急に発生した．そして変位 9.10 mm のとき（図−16 (b)）,中立軸面の 0°層付近で大きく層間剥離が発生した．その後変位 21.32 mm（図−16 (c)），26.99 mm（図−16 (d)）のとき，層間剥離が進展した．顕微鏡画像（図−18(b)）から，圧縮側から 2 番目の 0°層付近と中立軸面の 0°層付近で広範囲に層間剥離，圧縮側から 2 番目の 0°層と中立軸面の間に 2 つの斜めひび割れが生じていることがわかる．

(3)　SH9/CP

SH9/CP は，CP と SH9 の層間に層間剥離，SH9 部分は層間剥離が 1 層に留まらず層間に移りながら進展していき，緩い階段状で広範囲の損傷が発生，その後は CP と SH9 の層間で急に大きく層間剥離，そして CP 部分の圧縮側に縦方向のひび割れとそれに伴う層間剥離が発生した．破壊が脆性的であったが，期待通り SH9 部分から広範囲に損傷が始まり，CP 部分の脆性的な破壊挙動が抑制された．

四点曲げ載荷実験による損傷過程として，4-SH9/CP-L を例として図−17に示す．

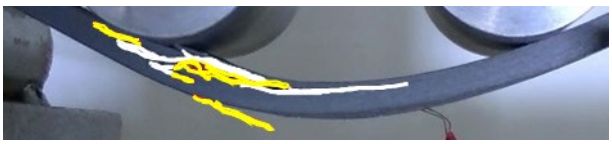
4-SH9/CP –L は，まず変位 7.61 mm のとき（図−17 (a)），CP と SH9 の層間（圧縮側と引張側）と圧縮側表面に層間剥離が発生した．そして変位 9.94 mm のとき（図−17 (b)），CP と SH9 の層間（引張側）の層間剥離が進展した．その後変位 11.27 mm のとき（図−17 (c)），CP と SH9 の層間（圧



(a) 変位 12.06 mm 時点

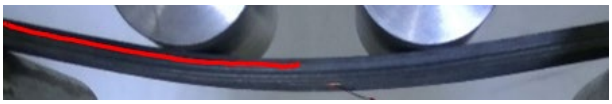
(b) 変位 13.90 mm 時点

(c) 変位 16.73 mm 時点



(d) 変位 20.22 mm 時点

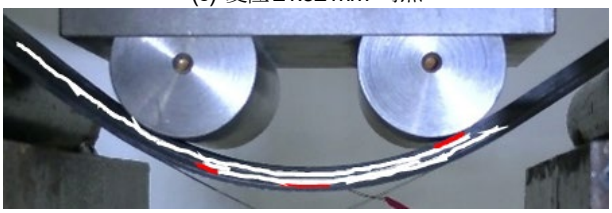
図-15　4-CP-R 損傷過程



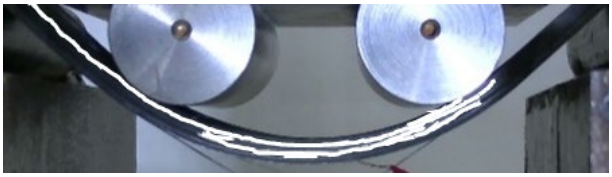
(a) 変位 8.25 mm 時点

(b) 変位 9.10 mm 時点

(c) 変位 21.32 mm 時点



(d) 変位 26.99 mm 時点



(e) 変位 34.55 mm 時点

図-16　4-PSH9-L 損傷過程

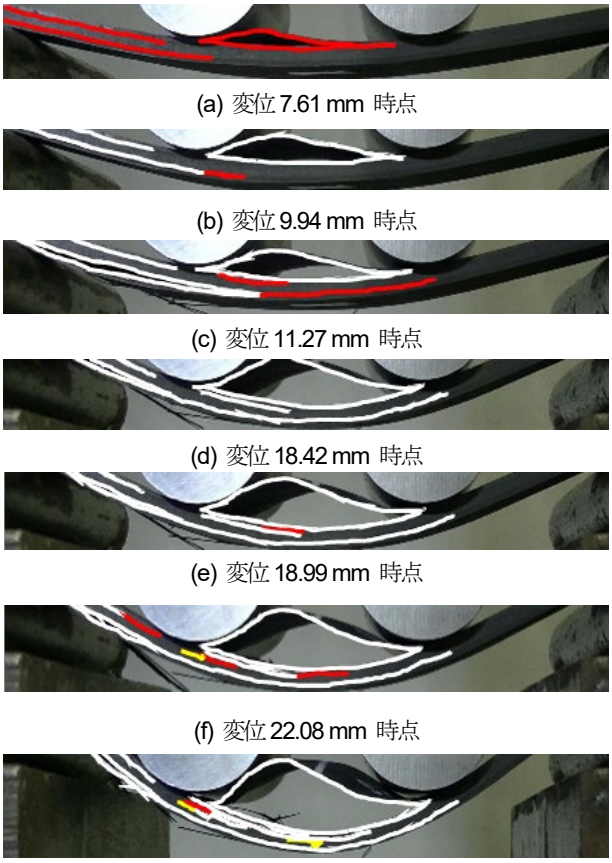
縮側）で新しい層間剥離が発生，CP と SH9 の層間（引張側）の層間剥離が進展した．次に変位 18.99 mm のとき（図−17 (e)），CP と SH9 の層間（圧縮側）で新しい層間剥離が発生した．変位 22.08 mm（図−17 (f)），30.43 mm（図−17 (g)）のとき，CP 部分の圧縮側で縦方向のひび割れとそれに伴う層間剥離が発生，これまでに発生していた層間剥離も進展した．顕微鏡画像（図−18(c)）から，CP と SH9 の層間（圧縮側と引張側）に層間剥離，引張側の SH9 部分に層間を階段状に伸びる損傷，CP 部分に縦方向のひび割れと，それに伴う層間剥離が生じていることがわかる．

変位 7.61 mm のときには第 1 ピークの後に荷重降下が生じており（図−9），これは，CP と SH9 の層間（圧縮側と引張側）と曲げ支間内圧縮側表面での層間剥離の発生によるものである（図−17 (a)）．圧縮側表面の層は座屈して上方向にはらみ出している．この層を除いた断面で抵抗して第 2 ピークの変位 9.94mm までは荷重の回復が見られたが，前述したように，変位 9.94mm での層間剥離の進展（図−17 (b)）により小さい荷重降下が起こり，変位 11.27mm では曲げ支間長にわたる層間剥離の進展（図−17 (c)）による有効断面の大幅な減少で抵抗を失い，大きく荷重降下が起きている．

5. 限定的ならせん積層構成の影響の考察

本章では，荷重−変位曲線と損傷過程・破壊状況の観察結果から，積層構成が曲げ変形・耐荷挙動に与える影響を考察する．つまり，限定的ならせん積層構成の影響として，CP を踏まえ PSH9 と SH9/CP についてそれぞれ考察する．

荷重−変位曲線と損傷過程・破壊状況は，同じ積層構成ではほぼ同様の挙動を示した．また，積層構成間で破壊挙動は大きく異なった．荷重−変位曲線と損傷過程・破壊状況から，各積層構成の曲げ変形・耐荷挙動を考察する．



(a) 変位 7.61 mm 時点

(b) 変位 9.94 mm 時点

(c) 変位 11.27 mm 時点

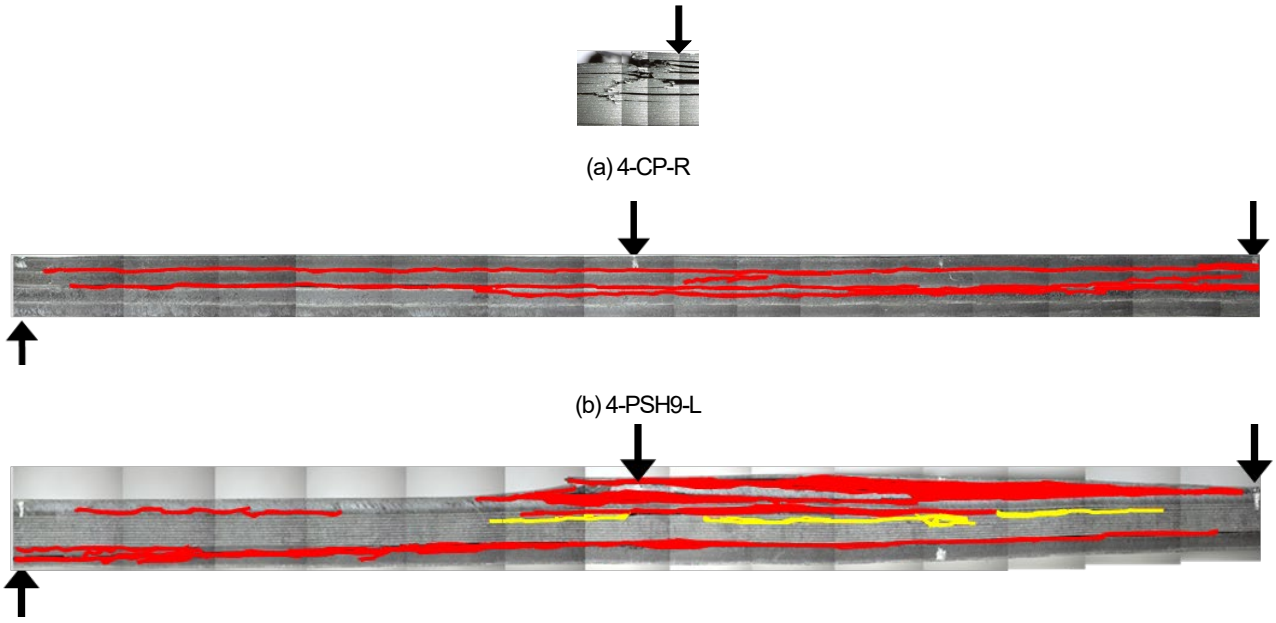
(d) 変位 18.42 mm 時点

(e) 変位 18.99 mm 時点

(f) 変位 22.08 mm 時点

(g) 変位 30.43 mm 時点

図-17　4-SH9/CP-L 損傷過程



(a) 4-CP-R

(b) 4-PSH9-L

(c) 4-SH9/CP-L

図-18　破壊状況（顕微鏡画像）

(1) CP

最大荷重後に大きく荷重降下し，そのとき圧縮側にひび割れと層間剥離が発生した．実験後の供試体は，圧縮側に縦方向のひび割れが確認できたが，引張側に損傷は見られなかった．一般的にCFRPの圧縮強度は引張強度より小さいため，このような挙動になったと言える．

(2) PSH9

最大荷重後に最大荷重の約20%まで大きく荷重降下し，そのとき圧縮側から 2 番目の 0°層付近で層間剥離が発生した．荷重保持と増加が長く見られ，小さい荷重降下時には，中立軸面の 0°層付近に層間剥離，中立軸面の 0°層からひとつ圧縮側の 0°層へ階段状に斜めにひび割れが発生した．引張側に目立った損傷は見られなかった．最終的には最大荷重の半分弱にまで荷重回復が見られた．ちなみに，0°層の数は，PSH9 が 5 層，SH9 は 2 層である．0°層は圧縮に弱いため，0°層が SH9 より多い PSH9 は，そこから損傷が始まると考えられる．また，らせん積層によって局所的ではない階段状のひび割れが発生し，荷重保持に貢献したと考えられる．

(3) SH9/CP

最大荷重後に小さく荷重降下し，そのときに圧縮側表面と，圧縮側と引張側の両方の SH9 と CP の層間に，層間剥離が発生した．そして第 2 ピーク後に大きく荷重降下し，層間剥離が進展した．その後は，CP 部分の圧縮側に縦方向のひび割れが発生していた．

実験終了後の供試体から，圧縮側と引張側の SH9 部分のそれぞれに緩い階段状に斜めのひび割れと層間剥離，CP 部分の圧縮側に縦方向のひび割れが確認できた．SH9/CP の最大荷重後の小さな荷重降下は，既往研究での SH9 単体の挙動と似ており，そのときの SH9 は圧縮側表面に層間剥離，引張側より剥離が階段状に複数の層間をまたいで発生していた．

以上より，SH9 部分は圧縮側と引張側で階段状斜めひび割れと層間剥離により始めの損傷が進展したが，最大荷重時に CP 部分に損傷が進展できず，SH9 と CP の層間で大きく層間剥離が発生したと考えられる．第 2 ピーク後にはこれらの層間剥離は進展した．その後の荷重降下は CP 部分の圧縮側の縦方向へのひび割れの影響と考える．

既往研究の SH9 単体では中立軸面までひび割れは深く進展していたが，ここでは CP 部分により抑えられと考えられる．一方，CP 単体では供試体の圧縮側表面から局所的・脆性的なひび割れが発生するが，ここでは SH9 部分によって広範囲に損傷が広がったと考えられる．これらは，SH9 と CP それぞれの特徴的な挙動が影響したと考えられる．

6. まとめ

本研究では，部分方向らせん積層，部分厚らせん積層，直交積層，全方向全厚らせん積層，の 4 種類の CFRP を作製し，四点曲げ載荷を行った．部分方向または部分厚で限定的にらせん積層を成す CFRP の基本的特性として変形・耐荷挙動を実験的に検討することを目的とした．

PSH9 は，最大荷重まで線形挙動を示し，最大荷重後に約 20%にまで大きく荷重が降下した．その後の荷重増加は傾きが大きくないものの，荷重増加と降下を数回繰り返し，最大荷重の半分弱までの回復を示した．実験終了時の変位は約 32~35 mm と大きかった．0°層付近の層間剥離に伴う階段状のひび割れが発生し，荷重保持に貢献したと考えられる．

SH9/CP では，最大荷重時の第 1 ピークに近いレベルの第 2 ピークが見られた．2 つのピークまで線形挙動を示したのち，半分以下にまで大きく荷重が降下した．その後は，荷重降下と増加を繰り返して，変位約 20~30 mm の時点で載荷を打ち切った．SH9 部分から広範囲に損傷が始まり，CP 部分の脆性的な破壊挙動が抑制されたと考えられる．

最大応力は，CP より小さいが全方向全厚のらせん積層 SH9 よりも限定的ならせん積層である PSH9 と SH9/CP が大きい値を示した．特に，限定したらせん積層のなかでも部分方向に限定的ならせん積層 PSH9 のほうが，最大応力は大きい値を示した．

曲げ弾性率は，2 種類の限定したらせん積層 PSH9 と SH9/CP が，全方向全厚のらせん積層 SH9 よりも大きい値を示した．特に，部分方向に限定的ならせん積層 PSH9 は CP に近い曲げ弾性率を示した．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 18H01515（基盤研究（B），粘り強さを達成するらせん積層 CFRP の変形・耐荷挙動の研究）の助成を受けて実施された．ここに謝意を示す．

参考文献

1) Grunenfelder, L. K., Suksangpanya, N., Salinas, C., Milliron, G., Yaraghi, N., Herrera, S., Evans-Lutterodt, K., Nutt, S. R., Zavattieri, P., and Kisailus, D.: Bio-inspired impact-resistant composites, *Acta Biomaterialia,* Vol. 10, pp. 3997-4008, 2014.
2) Cheng, L., Thomas, A., Glancey, J. L., and Karlsson, A. M.: Mechanical behavior of bio-inspired laminated composites, *Composites: Part A*, Vol. 42, pp. 211-220, 2011.
3) Raabe, D., Sachs, C., and Romano, P.: The crustacean exoskeleton as an example of a structurally and mechanically graded biological nanocomposite material, *Acta Materialia*, Vol. 53, pp. 4281-4292, 2005.
4) Yang, R., Zaheri, A., Gao, W., Hayashi, C., and Espinosa, H. D.: AFM identification of beetle exocuticle: Bouligand structure and nanofiber anisotropic elastic properties, *Advanced Functional Materials*, 1603993, 2017.
5) 松本高志，細目貴之，石澤郁馬，近藤健太：らせん積層 CFRP の曲げ挙動と破壊形態，第 12 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，日本建築学会，pp. 21-1-21-7, 2017.
6) 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）応用力学論文集 Vol. 21（特集），土木学会，Vol. 74, No. 2，pp. I_639-I_647，2018.
7) Liu, J. L., Lee, H. P., Tan, V. B. C.: Effects of inter-ply angles on the failure mechanisms in bioinspired helicoidal laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. 165, pp. 282-289, 2018.
8) Mencattelli, L. and Pinho, S. T.: Ultra-thin-ply CFRP Bouligand bio-inspired structures with enhanced loadbearing capacity, delayed catastrophic failure and high energy dissipation capability, *Composites Part A*, Vol. 129, p. 105655, 2020.
9) Ginzburg, D., Pinto, F., Iervolino, O., and Meo, M.: Damage tolerance of bio-inspired helicoidal composites under low velocity impact, *Composite Structures*, Vol. 161, pp. 187-203, 2017.
10) Suksangpanya, N., Yaraghi, N. A., Pipes, R. B., Kisailus, D., and Zavattieri, P.: Crack twisting and toughening strategies in Bouligand architectures, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 150, pp. 83-106, 2018.
11) 松本高志，石澤郁馬，近藤健太：らせん積層 CFRP 板の曲げ破壊挙動の検討，土木学会論文集 A2（応用力学）応用力学論文集 Vol. 22（特集），土木学会, Vol. 75, No. 2, pp. I_581-I_588, 2019.
12) 松本高志，浜山千佳，近藤健太：限定らせん積層 CFRP の曲げ変形・耐荷挙動の検討，第 8 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集，pp. 10-17，2020.
13) 日本規格協会：炭素繊維強化プラスチック試料の作製方法 JIS K 7072-1991　平成 3 年 11 月 1 日制定，日本規格協会, 1991.

(Received June 18, 2021)
(Accepted November 30, 2021)

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DEFORMATION AND LOAD BEARING BEHAVIORS OF PARTIAL HELICOIDALLY LAMINATED CFRP UNDER FOUR-POINT FLEXURE

Takashi MATSUMOTO, Chika HAMAYAMA, and Kenta KONDO

This paper investigates on the four-point flexural deformation and load bearing behaviors of partial helicoidally laminated CFRPs. Two partial helicoidal laminates are examined. The helicoidal laminate with limited fiber direction shows a brittle behavior. On the other hand, although the helicoidal laminate skin with cross ply core also shows a brittle behavior, the preceding wide skin damage leads to the mitigation of the brittle core fracture. In comparison with helicoidally laminated CFRP of full thickness and all fiber direction, the two partial helicoidal laminates show higher load capacity and initial stiffness.