

限定らせん積層 CFRP の 曲げ変形・耐荷挙動の検討

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十三条西8丁目)

E-mail:takashim@eng.hokudai.ac.jp

²学生会員 北海道大学 工学部環境社会工学科(研究当時)
(〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西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十三条西8丁目)

既往の研究の全方向全厚のらせん積層に対し、本研究では部分方向または部分厚の限定らせん積層を設計、作製、三点曲げ載荷実験を行い、曲げ変形・耐荷挙動の観察と検討を行った。部分方向らせん積層は長い残留荷重保持が見られたが脆性的な破壊があり、期待した全方向全厚らせん積層のような段階的・広範囲になる破壊挙動は見られなかった。部分厚らせん積層は、破壊が脆性的であったが、スキンのらせん積層部分から広範囲に損傷が始まり、コアの直交積層部分の脆性的な破壊挙動が抑制された。一方で、比較対象とした直交積層は破壊が脆性的・局所的であった。最大荷重と初期剛性は、全方向全厚らせん積層よりも二種類の限定らせん積層の方が大きい値を示した。

Key Words : CFRP, helicoidal laminate, flexure

1. はじめに

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer: 炭素繊維強化ポリマー) とは、炭素繊維と熱硬化性樹脂の複合材料である。低密度でありながら、比強度と比剛性、耐腐食性に優れているが、破壊が局所的に起こることとあいまって脆性的な挙動を示す。一方で、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、なかでも節足動物の外骨格では繊維方向が一定の配向角度差を保ちつつ積層されるらせん積層をなしていることが見出されており、これにより強靱な性質が付与されていると考えられている¹⁾⁴⁾。

これまでに、らせん積層にすることで CFRP の脆性的な挙動が緩和されることが実験的にも確認されてきた。CFRP 細板 (40mm×180mm×4mm) の三点と四点曲げ載荷実験では、直交積層と3種類のらせん積層の検討を行った⁵⁾⁶⁾。らせん積層にすることにより、破壊が段階的・広範囲に生じ、配向角度差の小さならせん積層では脆性的な挙動が緩和されることが確認された。また、直交積層とらせん積層の CFRP 板 (200mm×200mm×5mm) を支間長 150mm で円周支持して、中央点集中荷

重と中央部分分布荷重の条件下での曲げ挙動も検討した。らせん積層の面載荷では大きな荷重降下後にも増減を繰り返しながら最大荷重に迫るレベルまで荷重増加が見られた。破壊は供試体全体に広がり、層間剥離はねじれるように発生することが確認されている⁷⁾。

既往検討の全方向全厚のらせん積層に対し、本研究では負荷の少ない部分の繊維量を減らし、部分方向または部分厚の限定的にらせん積層を用いた CFRP について、曲げ変形・耐荷挙動を観察、検討することを目的とする。この2種類の限定らせん積層に全方向全厚らせん積層と直交積層を加えた計4種類について CFRP 積層板を作製し、三点曲げ載荷実験を行った。なお四点曲げ載荷については一部既報である⁸⁾。計測した荷重と変位より荷重-変位曲線を作成し、載荷中のビデオ撮影と実験後の供試体の顕微鏡撮影によって、損傷・破壊状況を観察した。これらの結果より、直交積層や従来のらせん積層の結果を踏まえて、限定的にらせん積層を用いた CFRP の曲げ変形・耐荷挙動を観察、検討することを目的とする。

2. 曲げ载荷実験

(1) 供試体

本研究で検討した4種類の積層構成を表-1に示す。表中の数字は、供試体内長軸方向を0°とした反時計回りのプリプレグ繊維の配向角度の値を表している。[]内の配向角度となるように順に積層していき、[]右の下付きの値だけ繰り返して積層している。積層構成名称をCP（直交積層）、PSH9（配向角度限定らせん積層）、SH9/CP（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。すべての供試体において、圧縮縁は0°の層として統一しており、引張縁も0°の層である。各積層構成のイメージを図-1に示す。

CFRP積層板は、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、炭素繊維を一方方向に配列させ、炭素繊維基材に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。供試体作成に用いたプリプレグの材料特性値を表-2に示す。なお、SH9は別時期に作製・载荷された供試体であり、プリプレグが他の積層構成と異なる。ここでは全方向全厚のらせん積層として比較に加えている。

曲げ载荷実験に用いた供試体の寸法を表-3に示す。標準寸法は長辺180mm、短辺40mm、厚さ5mmである。各積層構成の供試体数は3体であり、供試体番号“1, 2, 3”とする。供試体の名称は、(3:荷重条件) - (積層構成) - (供試体番号) とする。

表-1 供試体積層構成

名称	枚数	積層構成
CP	41	[090] ₂₀ 0
PSH9	41	[09/18/27/36/45/36/27/18/90/-9/-18/-27/-36/-45/-36/-27/-18/-9] ₂ 0
SH9/CP	41	[09/18/27/36/45/54/63/72/81/90] ₉ 0[90/81/72/63/54/45/36/27/18/90]
SH9	41	[09/18/27/36/45/54/63/72/81/90/99/108/117/126/135/144/153/162/171] ₂ 0

表-2 プリプレグ材料特性値

名称	CP, PSH9, SH9/CP	SH9
プリプレグ目付 (g/m ²)	187.3	178.3
繊維目付 (g/m ²)	124.3	125.3
樹脂含有率 (wt%)	33.6	29.7

表-3 供試体寸法

名称	長さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)			
			L	C	R	平均
CP	180	40	4.62	4.58	4.60	4.60
PSH9			4.80	4.75	4.91	4.82
SH9/CP			4.71	4.71	4.77	4.75
SH9			4.86	4.85	4.90	4.87

(2) 限定らせん積層

以前の全方向全厚のらせん積層（SH9）に対し、本研究では負荷の少ない部分の繊維量を減らし、部分方向または部分厚の限定的にらせん積層を用いたCFRP積層板を検討する。本研究の限定的ならせん積層は2種類である。まず、梁供試体短軸方向について負荷が少ないことから繊維量を減らせると考えて、従来の0°から180°まで配向角度を変化させる積層構成（全方向）に対して、0°から±45°の範囲内で配向角度を変化させる積層構成（部分方向）を検討する。さらに、板厚方向において負荷が少ない中立軸面を考慮して、従来の下面から上面まで配向角度をらせん的に変化させる積層構成（全厚）

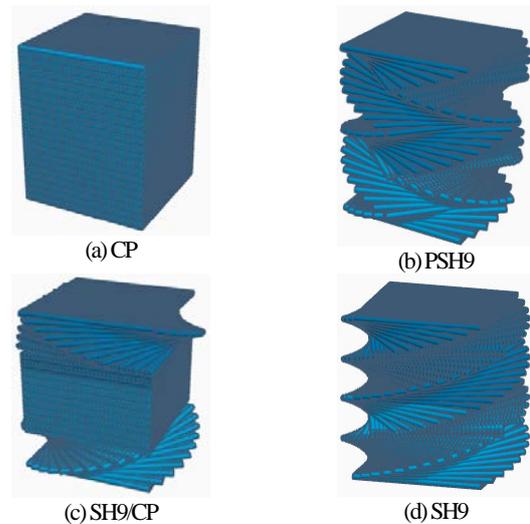


図-1 各積層構成のイメージ

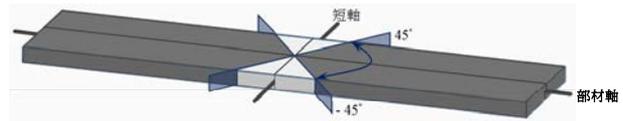


図-2 PSH9 供試体イメージ

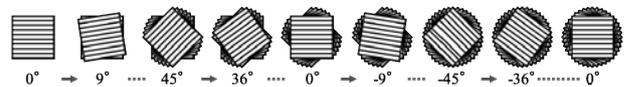


図-3 PSH9 積層過程

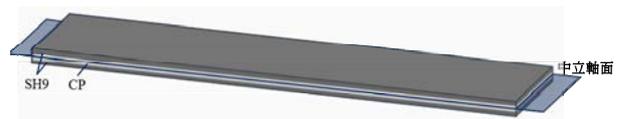


図-4 SH9/CP 供試体イメージ

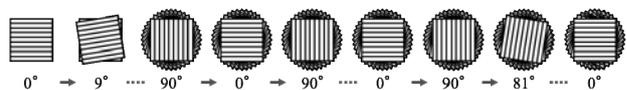


図-5 SH9/CP 積層過程

に対して、下面および上面からの一部分で変化させる積層構成（部分厚）について検討する。また、既往の研究では、らせん積層の層間の配向角度差として 36° 、 18° 、 9° の 3 種類が検討され、配向角度差の小さいらせん積層構成のほうが CFRP の脆性的な挙動がより緩和されることが確認された。そのため、本研究で作製するらせん積層部分は配向角度差 9° とする。

PSH9 の供試体イメージを図-2に示す。梁供試体においては短軸方向の負荷が小さいことを考慮して、長軸（部材軸）方向 $\pm 45^\circ$ 以内に配向角度を限定して積層した設計とした。既往の研究にある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。PSH9 の積層過程を図-3に示す。部分方向として配向角度 0° から $\pm 45^\circ$ 以内の範囲で 9° 刻みのらせんを 2 回繰り返した。

SH9/CP の供試体イメージを図-4に示す。梁供試体の中立軸面の負荷が小さいことを考慮して、表面側 11 層を限定的にらせん積層として設計した。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のから段階的・広範囲に損傷が起こり、脆性的・局所的な曲げ変形・耐荷挙動の抑制を期待した積層構成である。SH9/CP の積層過程を図-5に示す。部分厚として、引張面から配向角度 0° から 90° まで 9° 刻みで 11 層、中央に CP を 19 層、圧縮面まで配向角度 90° から 0° まで 9° 刻みで 11 層積層した。

(3) 作製手順

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⁵⁾⁶⁾⁹⁾。成形した CFRP 積層板を寸法 $40\text{mm} \times 180\text{mm}$ に切断し、供試体とした。供試体は積層構成ごとに 3 枚ずつ作製した。

(4) 載荷条件

載荷実験装置にはオートグラフ（SHIMADZU AG 1250kN）を使い、三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 $2.0\text{mm}/\text{min}$ 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。また、載荷中は供試体側面をビデオ撮影した。

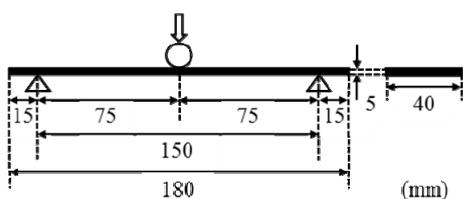


図-6 三点曲げ載荷条件

3. 実験結果

(1) 荷重－変位曲線

実験で計測した荷重 (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、各積層構成で荷重－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、最大荷重後に大きく荷重が降下、その後の荷重保持は見られなかった。3-CP-1 の実験終了時の荷重がマイナスを示したのは、供試体が破断したためである。

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、最大荷重後に大きく荷重が降下、その後は徐々に荷重が増加した。そして、荷重降下と増加を繰り返し、長い荷重保持が見られた。

SH9/CP の荷重－変位曲線を図-9に示す。複数の荷重のピークが見られた。最大荷重は第 2 ピーク時または第 3 ピーク時であった。第 3 ピークを示したのち、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た。

(2) 最大荷重

各積層構成の最大荷重を図-11に示す。各積層構成 3 体の供試体の最大荷重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。最大荷重の平均値は、大きい順に CP 3.497kN 、PSH9 2.739kN 、SH9/CP 2.305kN 、SH9 2.290kN であった。2 種類の限定したらせん積層 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、最大荷重が大きい値であった。

(3) 初期剛性

初期剛性は、荷重－変位曲線の線形挙動部分の傾きであり、変形のしにくさを示す値である。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。各積層構成の初期剛性を図-12に示す。各積層構成 3 つの供試体の初期剛性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 $0.371\text{kN}/\text{mm}$ 、CP $0.342\text{kN}/\text{mm}$ 、SH9/CP $0.302\text{kN}/\text{mm}$ 、SH9 $0.289\text{kN}/\text{mm}$ 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。特に、部分方向に限定らせん積層 PSH9 は CP よりも初期剛性が大きい値であった。

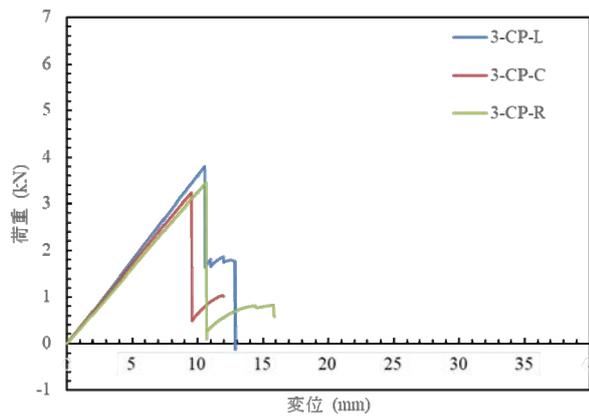


図-7 CPの荷重-変位曲線

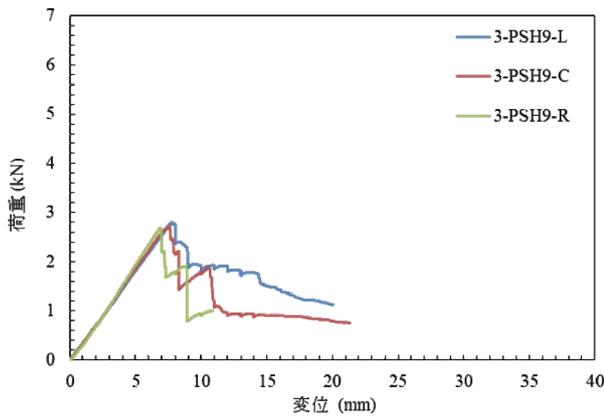


図-8 PSH9の荷重-変位曲線

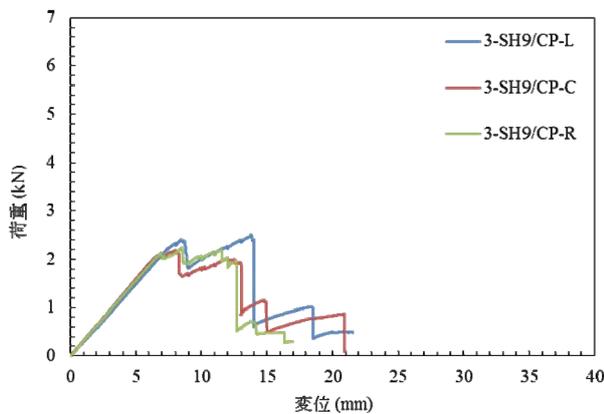


図-9 SH9/CPの荷重-変位曲線

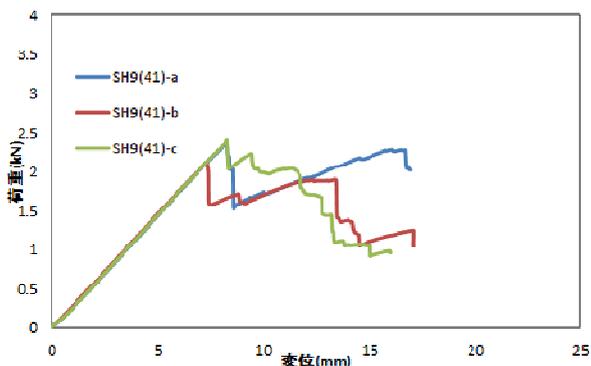


図-10 SH9の荷重-変位曲線

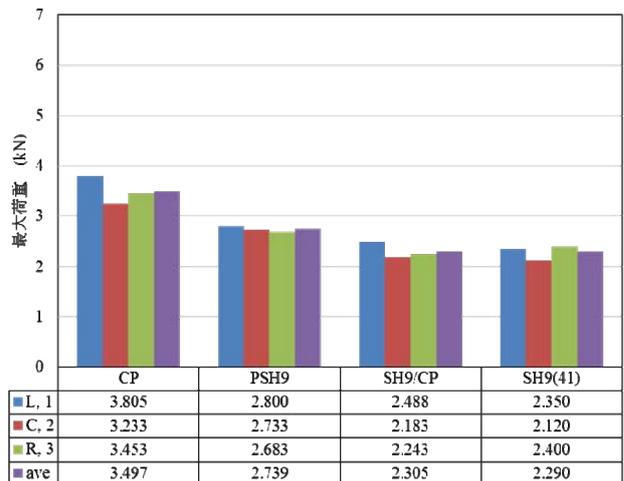


図-11 最大荷重

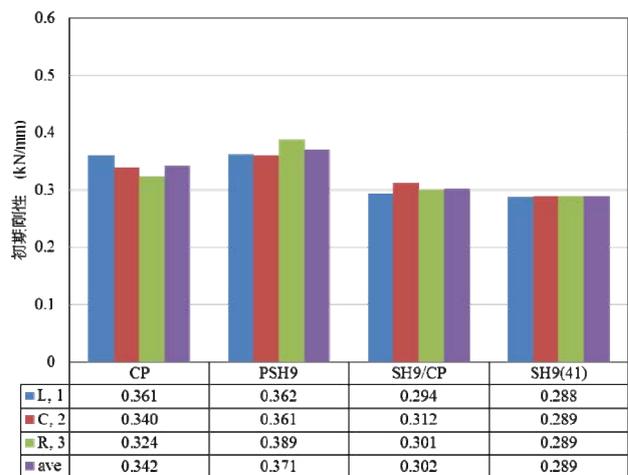


図-12 初期剛性

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撮影の観察結果を示す。デジタル顕微鏡は Dino-Lite Edge Digital Microscope (最大倍率 230 倍) を使用した。図-13 から図-16では、荷重-変位曲線において荷重降下した時点の損傷画像を上から順に時系列で並べている。また、図の一番下に顕微鏡で撮影した破壊画像を示す。色付きの線は新しい損傷、白い線は今までの損傷を表す。色付きの線は、赤い線がらせん積層部分、黄色い線が直交積層部分の損傷を表している。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損傷・破壊挙動を示した。また、各積層構成で挙動は大きく異なった。なお、支間中央の載荷点と縦方向のひび割れが一致していないのは、載荷途中に供試体がずれたためである。また、SH9は別時期に作製・載荷された供試体であり、他の積層構成と同程度の損傷過程・破壊状況の観察ができていないためここでは説明していない。本論文のSH9は積層枚数41枚であるが、積層枚

数 40 枚の SH9 のについては既往の文献にて報告されている⁶⁾。

(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。典型的な直交積層 CFRP の脆性的・局所的な破壊挙動が観察された。

損傷過程・破壊状況の代表例として、3-CP-1 を図-13 と図-16(a)に示す。3-CP-1 は、まず変位 10.59mm のとき、圧縮側表面と中立軸面より上の圧縮側で縦方向のひび割れとそれに伴う層間剥離が急に発生した。そして変位 11.02mm, 12.00mm のとき、中立軸面付近で新しい縦方向のひび割れが発生した。破断直前の変位 12.80mm のとき、中立軸面より下の引張側に縦方向のひび割れ、中立軸面付近で層間剥離が発生した。その後、供試体が破断し、顕微鏡画像から縦方向に局所的に破壊し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、その後は斜めひび割れの発生と層間剥離が進展した。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。

損傷過程・破壊状況の代表例として、3-PSH9-2 を



(a) 変位 10.59 mm 時点



(b) 変位 11.02 mm 時点



(c) 変位 12.00 mm 時点



(d) 変位 12.80 mm 時点

図-13 3-CP-1 損傷過程

図-14 と図-16(b)に示す。3-PSH9-2 は、まず変位 8.25mm のとき、圧縮側から 2 番目の 0° 層付近で大きな層間剥離が急に発生した。そして変位 11.00mm のとき、圧縮側から 2 番目の 0° 層付近で新しい層間剥離が発生した。载荷終了時の変位 21.11mm のとき、圧縮側から 2 番目の 0° 層付近で新しい層間剥離、圧縮側から 2 番目の 0° 層から中立軸面の 0° 層にかけて縦方向のひび割れが発生していた。顕微鏡画像から、圧縮側から 2 番目の 0° 層付近で広範囲に層間剥離、圧縮側から 1 番目と 2 番目の 0° 層間に層間剥離、圧縮側から 2 番目の 0° 層から中立軸面の 0° 層にかけて縦方向の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く、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。

損傷過程・破壊状況の代表例として、3-SH9/CP-2 を



(a) 変位 7.85 mm 時点



(b) 変位 8.00 mm 時点



(c) 変位 8.25mm 時点



(d) 変位 11.00mm 時点



(e) 変位 21.11 mm 時点

図-14 3-PSH9-2 損傷過程

図-15と図-16(c)に示す。3-SH9/CP-2は、まず変位 8.50mm のとき、CP と SH9 の層間（圧縮側と引張側）に層間剥離が発生した。そして変位 13.00mm, 14.98mm のとき、層間剥離が進展した。載荷終了時の変位 20.93mm のとき、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ていた。顕微鏡画像から、CP と SH9 の層間（圧縮側と引張側）に広範囲の層間剥離、圧縮側の SH9 部分に層間を階段状に伸びる損傷、引張側の SH9 部分には繊維の剥離、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生じていることがわかる。

5. 考察

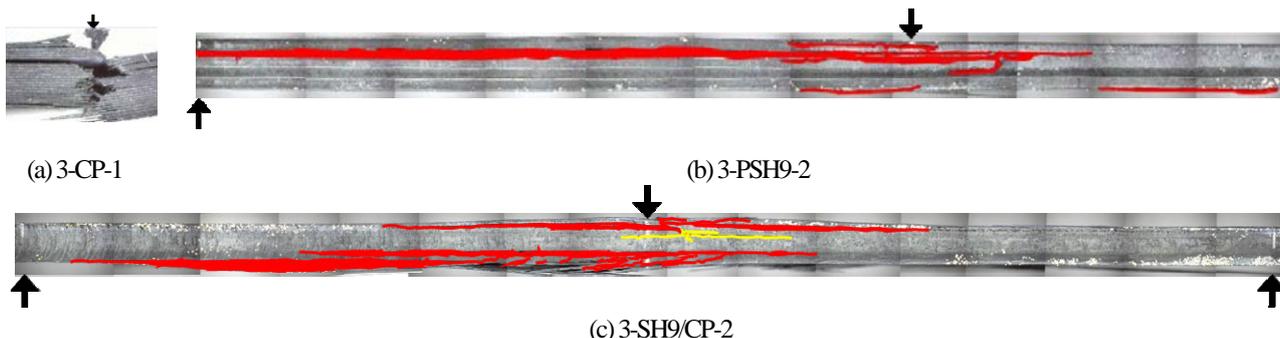
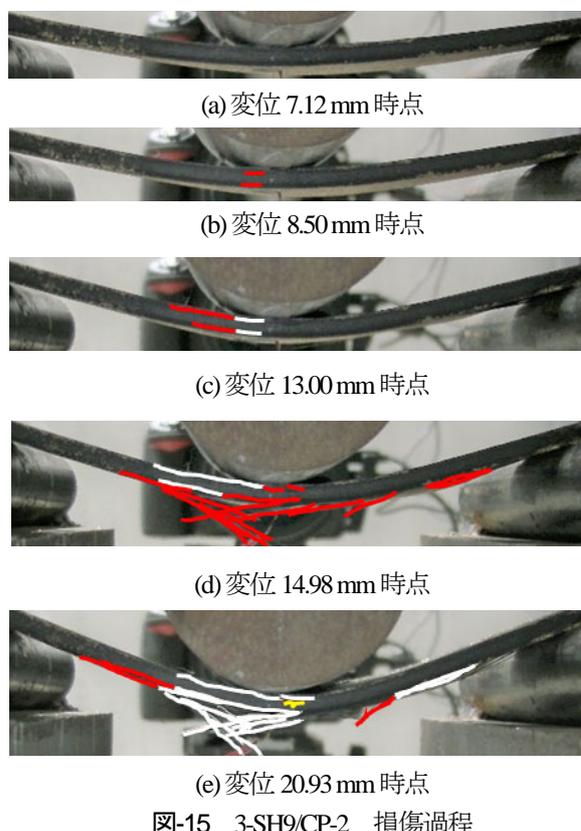
限定らせん積層構成の影響について以下に考察する。

CPは、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。実験後の供試体では、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。以上より、直交積層は一般に認識されている通り圧縮側が相対的に弱いことが確認された。

PSH9は、最大荷重後に大きく荷重降下し、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。0°層は、PSH9が5層、SH9は2層である。以上より、0°層は圧縮に弱く、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。

SH9/CPでは、最大荷重後に小さく荷重降下し、そのとき圧縮側表面と、SH9とCPの層間の圧縮側と引張側の両方に層間剥離が発生した。そして最後のピーク後に大きく荷重降下し、層間剥離が進展、その後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の両方において損傷が進展したが、CP部分は圧縮に相対的に弱いため、最後のピーク時、CP部分の引張側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。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。SH9単体では中立軸面まで深く進展していたがここではCP部分により抑えられ、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

全方向全厚のらせん積層に対し、本研究では部分方向または部分厚の限定らせん積層を設計、作製、三点曲げ載荷実験を行い、荷重-変位曲線、載荷中のビデオ撮影と実験後の顕微鏡による損傷過程・破壊状況の観察によって、限定的にらせん積層を用いた CFRP の曲げ変形・耐荷挙動の検討をした。

各積層構成の曲げ変形・耐荷挙動は、まず直交積層 CP は破壊が脆性的・局所的であった。部分方向にらせん積層を限定した配向角度限定らせん積層 PSH9 は長い荷重保持が見られたが大きな荷重降下があり脆性的な破壊が見られ、期待したらせん積層 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。

また、部分厚にらせん積層を限定したらせん積層スキンクロスプライコア SH9/CP は、大きな荷重降下があり破壊が脆性的であったが、期待通りらせん積層 SH9 部分から広範囲に損傷が始まり、直交積層 CP 部分の脆性的な破壊挙動が抑制された。

負荷の小さい部分の繊維を減らし、負荷の大きい部分の繊維を増やした方が、最大荷重と初期剛性の向上に効果があることが確認された。

部分方向にらせん積層を限定した配向角度限定らせん積層 PSH9 は、0°層は圧縮に弱く脆性的な破壊になること、らせん積層によって階段状のひび割れが発生し荷重保持に貢献することが考えられる。部分厚にらせん積層を限定したらせん積層スキンクロスプライコア SH9/CP 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。

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）の助成で実施された。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) 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.
- 8) 浜山千佳・鄧朋儒・松本高志：限定的にらせん積層を用いた CFRP の曲げ変形・耐荷挙動に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 76, No. A-37, 2020.
- 9) 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 August 28, 2020)

INVESTIGATION ON FLEXURAL DEFORMATION AND LOAD BEARING BEHAVIORS OF PARTIAL HELICOIDALLY LAMINATED CFRP

Takashi MATSUMOTO, Chika HAMAYAMA, and Kenta KONDO

This paper investigates on the flexural deformation and load bearing behaviors of partial helicoidally laminated CFRPs. Two partial helicoidal laminates are examined: helicoidal laminate with limited fiber direction and helicoidal laminate skin with cross ply core. These laminates are fabricated and tested under three-point bending. The helicoidal laminate with limited fiber direction shows a brittle behavior, even though it has some residual strength. On the other hand, although the helicoidal laminate skin with cross ply core

shows a brittle behavior, the preceding wide skin damage mitigates a brittle fracture of the core. 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.