

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

Study on the deformation and load bearing behaviors of CFRP with partial use of helicoidal laminate

北海道大学工学部
北海道大学大学院工学研究院
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 浜山千佳 (Chika Hamayama)
正会員 鄧 朋儒 (Pengru Deng)
正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

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、破壊挙動が脆性的である。

これまでに石澤ら¹⁾²⁾³⁾より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確認された。さらに、らせん積層の層間の配向角度差が数種類検討され、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。

上記のらせん積層は全方向全厚に積層したのに対し、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。

本研究の限定的にらせん積層は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 $\pm 45^\circ$ 以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変化させる積層構成(全厚)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。部分方向と部分厚の供試体については、全方向全厚で検討された粘り強さに最も効果のあるらせん積層に基づき材料設計を行う。この2種類の限定的にらせん積層に直交積層を加えた計3種類について CFRP 積層板を作製し、四点載荷試験を行った。計測した荷重と変位による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観察によって、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・耐荷挙動の考察を行う。

2. 実験方法

2.1 プリプレグ

CFRP 積層板は、UD(Uni-Directional) プリプレグ(三菱レイヨン社製)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、充填材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。直交積層、部分厚に限定的にらせん積層、全方向全厚のらせん積層の供試体において、プリプレグ目付は 187.3

g/m^2 、繊維目付は 124.3 g/m^2 、樹脂含有率は $33.6 \text{ wt\%}$ であり、部分方向に限定的にらせん積層の供試体においてプリプレグ目付は 188.9 g/m^2 、繊維目付は 124.8 g/m^2 、樹脂含有率は $33.9 \text{ wt\%}$ である。

2.2 供試体

供試体はプリプレグを積層して作製した。プリプレグの配向角は、供試体の長辺方向の 0° より反時計回りを正として繊維方向がなす角度と定義した。表-1の[]内の配向角を順に積層していき、繰り返し回数は下付きで表されている。積層構成によって名称を CP、PSH9、SH9/CP、SH9とした。すべての供試体において、圧縮面は 0° であり、CP、PSH9、SH9/CP の3種類は引張面においても 0° である。本研究で作製した CFRP 積層板は、表-1に示す CP、PSH9、SH9/CP の3種類である。

(1)CP

直交積層である CP(Cross-Ply)では、配向角 0° と 90° を交互に41枚積層した。

(2)PSH9 配向角度限定らせん積層

供試体の短軸方向の負荷が小さいため、部材軸方向にらせん積層を部分的に限定して設計した。部分方向として、 0° から $\pm 45^\circ$ で配向角度を変化させた。PSH9(Partial Single Helicoidal 9)では、配向角 0° から $\pm 45^\circ$ 以内で配向角 9° 刻みのらせんを2回繰り返し、圧縮面と引張面が 0° になるよう積層した。

(3)SH9/CP らせん積層スキン/クロスプライコア

供試体の中立軸面の負荷が小さいため、表面を限定的にらせん積層として設計した。CPでは表面から局所的に損傷が発生し、らせん積層 SH9では圧縮面と引張面から段階的・広範囲に損傷が発生した。CPをより段階的・広範囲に損傷を発生させるために、表面のみらせん積層とした。SH9/CP(Single Helicoidal 9/Cross-Ply)では部分厚として、引張面から配向角 0° から 90° まで配向角 9° 刻みで11層、中央に CP を19層、圧縮面まで配向角 90° から 0° まで配向角 9° 刻みで11層積層した。

供試体の成形は、JIS 規格に基づいたオートクレーブ成形方法を用いた。積層構成 CP の場合は、プリプレグを 200 mm 四方、積層構成 PSH9 と SH9/CP の場合は、プリプレグを 290 mm 四方にそれぞれ41枚ずつ裁断し、積層構成に合わせて積層した。積層したプリプレグをピールプライクロス、ブリーザーファブリック、バキュームバックの順に覆い、シーラントテープで上下面と真空引き口の真空ホースを密着した。ポンプにより真空引き

を行い、上下を厚さ 2 mm のステンレス板 2 枚で挟み、加圧器具で全体を加圧した。真空引きをした状態のまま電気炉に設置し、2 段階で加熱した。1 段階目は 80℃ で 1 時間定常、2 段階目は 130℃ で 2 時間定常とした。昇温速度はいずれの段階も 1℃/min とした。成形した CFRP 積層板を供試体の寸法に切断し、供試体とした。供試体は積層構成ごとに 3 枚ずつ作製し、それぞれ L、C、R と名付けた。なお、既往研究の SH9 は、CFRP 積層板から供試体を 4 枚作製し、それぞれ 1、2、3、4 と名付けた。

2.3 載荷条件

載荷実験装置にはオートグラフ (SHIMADZU AG 1250kN) を使い、四点載荷試験を行った。図-1 に示すように、支点間隔は 150 mm、せん断スパンは 50 mm とした。全ての供試体において圧縮面と引張面の最外層が配向角 0° となるように統一した。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。また、載荷中は供試体側面をビデオ撮影した。

3. 実験結果

3.1 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。また、荷重と荷重計測時の変位について、以下では(荷重, 変位)として表す。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、同じ積層構成ではほぼ同様の挙動を示した。

(1)CP

図-2 に荷重変位曲線を示す。最大荷重と最大荷重時変位は供試体 L、C、R の順に、(5.568, 12.25)、(5.420, 12.54)、(5.796, 12.04)となり、平均は(5.595, 12.28)であった。いずれの供試体も最大荷重後、大きく荷重降下し、荷重保持は見られなかった。

(2)PSH9 配向角度限定らせん積層

図-3 に荷重変位曲線を示す。最大荷重と最大荷重時変位は供試体 L、C、R の順に、(4.183, 8.20)、(4.473, 9.10)、(4.003, 8.15)となり、平均は(4.220, 8.48)であった。いずれの供試体も最大荷重後、大きく荷重降下し、のちに徐々に荷重が増加した。その後、小さな荷重降下と増加を繰り返し、荷重保持が見られたのち、荷重が低下した。

(3)SH9/CP らせん積層スキン／クロスプライコア

図-4 に荷重変位曲線を示す。最大荷重後、最大荷重に近い荷重が計測され、荷重のピークが 2 つ見られた。初めのピークである最大荷重と最大荷重時変位は供試体 L、C、R の順に、(3.198, 7.52)、(3.075, 7.49)、(3.363, 7.63)となり、平均は(3.212, 7.55)であった。2 回目のピークは、それぞれ(2.803, 9.84)、(2.965, 3.043)、(3.043, 11.69)となり、平均は(2.937, 11.09)であった。いずれの供試体も最大荷重後、CP や PSH9 と比べて小さく荷重降下し、最大荷重近くまで荷重が増加した。2 回目のピーク後、大きく荷重降下した。その後、小さな荷重降下

と増加を繰り返し、徐々に荷重が低下した。

3.2 損傷・破壊形態の観察

載荷中の損傷・破壊過程をビデオ観察し、実験終了後の供試体を顕微鏡で調べた。顕微鏡は Dino-Lite Edge Digital Microscope (最大倍率 230 倍) を使用した。各積層構成で代表してそれぞれ 1 つの供試体について取り上げる。図-5 から図-7 では、荷重変位曲線で荷重が低下

表-1 供試体積層構成

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

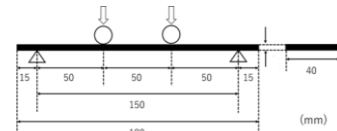


図-1 載荷条件

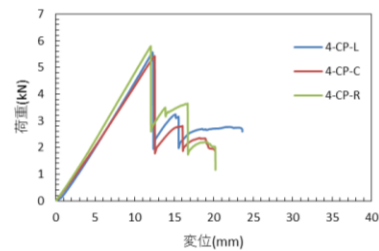


図-2 CP 荷重変位曲線

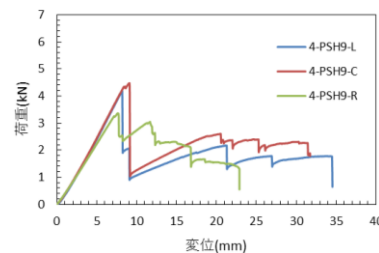


図-3 PSH9 配向角度限定らせん積層 荷重変位曲線

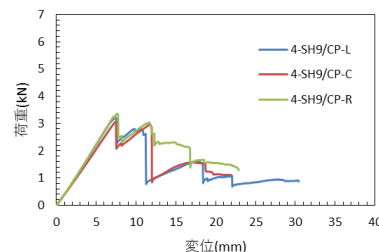


図-4 SH9/CP らせん積層スキン／クロスプライコア 荷重変位曲線

した箇所の損傷画像を上から順に時系列に並べている。赤い線は新しい損傷、白い線は今までの損傷を表す。また、図の一番下に顕微鏡で撮影した画像を示す。赤い線は損傷を表す。

(1)CP

図-5 に CP-L の損傷・破壊状況を示す。まず変位 12.37 mm のとき、圧縮側表面に層間剥離が発生した。そして変位 15.56 mm のとき、左側の載荷点下にひび割れ、そのひび割れから中立軸面より圧縮側に層間剥離が発生した。変位 23.62 mm のとき、ひび割れと層間剥離が進展していた。顕微鏡より、左側の載荷点下に縦方向に進む斜めのひび割れが確認できた。引張側に損傷は見られなかった。

(2)PSH9 配向角度限定らせん積層

図-6 に PSH9-L の損傷・破壊状況を示す。まず変位 8.25 mm 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。次に変位 9.10 mm のとき、中立軸面の 0° 層付近で層間剥離が発生した。そして変位 21.32 mm のとき、中立軸面の 0° 層からひとつ圧縮側の 0° 層へ斜めにひび割れが発生、他の層間剥離が進展した。変位 26.99 mm のとき、中立軸面の 0° 層付近で新しく層間剥離が発生、他の層間剥離が進展した。顕微鏡より、圧縮側から 2 番目の 0° 層と中立軸面の 0° 層付近で横方向に供試体全体に層間剥離が確認できた。また、曲げ支間の中立軸面の 0° 層から圧縮側から 2 番目の 0° 層へ右肩上がり階段状のひび割れが 2 つ見られた。引張側には繊維の剥離があったが、層間剥離とひび割れは見られなかった。

(3)SH9/CP らせん積層スキン／クロスプライコア

図-7 に SH9/CP-L の損傷・破壊状況を示す。まず、変位 7.61 mm のとき、圧縮側表面と、圧縮側と引張側それぞれの SH9 と CP の層間に層間剥離が発生した。次に変位 9.94 mm、11.27 mm、18.99 mm のとき層間剥離が進展した。そして変位 22.08 mm のとき、CP 部分の圧縮側に縦方向のひび割れと層間剥離が発生した。変位 30.43 mm のとき、CP 部分の圧縮側に新しく縦方向のひび割れが発生、層間剥離が進展していた。顕微鏡より、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が確認できた。CP 部分には左載荷点下と曲げ支間に層間剥離と縦方向にひび割れが見られた。CP と SH9 の層間の圧縮側と引張側の両方と、曲げ支間の圧縮側表面に層間剥離があった。

4. 考察

直交積層 CP と従来の全方向全厚のらせん積層 SH9 の結果を踏まえ、部分方向または部分厚の限定的ならせん積層 PSH9、SH9/CP との 4 種類を比較し、積層構成が荷重変位曲線と損傷・破壊形態に与える影響について考察する。

従来の全方向全厚のらせん積層として、SH9 の荷重変位曲線を図-8 に示す。平均は(3.07, 9.37)であった。最大荷重後の荷重降下は小さく、その後の荷重保持の継続も長く見られた。また、図-9 に SH9-3 の損傷・破壊状況を示す。曲げ支間中央引張側より剥離が階段状に複数

の層間をまたいで中立軸面へ深く進展している様子を見ることができる。圧縮側においては層間剥離が 1 箇所、曲げ支間内を大きく進展している。³⁾

4.1 最大荷重の比較

最大荷重の平均は小さい順に、SH9 3.07kN、SH9/CP 3.212kN、PSH9 4.220kN、CP 5.595kN であった。このことから、全方向全厚のらせん積層よりも、負荷の少ない部分の繊維量を減らし、負荷の多い部分の繊維量を増やした方が、最大荷重が大きくなると考えられる。特に、らせん積層を部材軸方向にする方が、直交積層には達しないが最大荷重向上に効果があると考えられる。

4.2 荷重変位曲線と破壊形態

(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

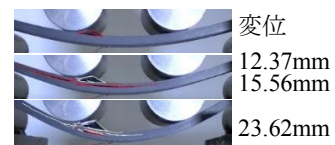


図-5 CP-L 損傷過程・破壊状況

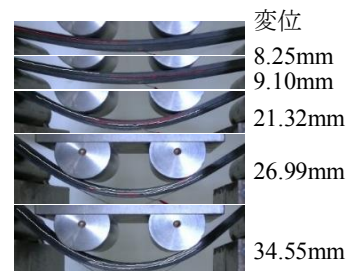


図-6 PSH9-L 損傷過程・破壊状況

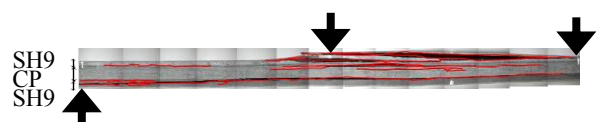
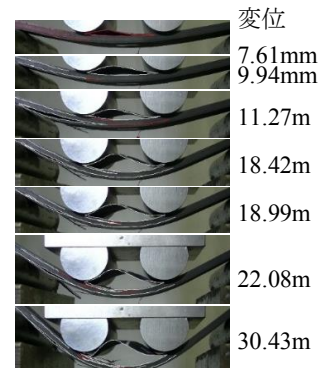


図-7 SH9/CP-L 損傷過程・破壊状況

割れと層間剥離が発生した。実験後の供試体は、載荷点下に縦方向に進む斜め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、直交積層は圧縮力に弱く引張力に強いこと、破壊が脆性的・局所的であることを確認できた。

(2)PSH9 配向角度限定らせん積層

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。

(3)SH9/CP らせん積層スキン／クロスプライコア

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2回目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部分は圧縮と引張に弱く始めに損傷が進展したが、CP部分は引張に強く圧縮に弱いため、2回目のピーク時、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単体は中立軸面まで深く進展していたがCP部分により抑えられ、CP単体は供試体の圧縮側表面から局所的・脆的なひび割れが発生するが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。

5.まとめ

本研究では、新しい2種類の限定的ならせん積層と直交積層のCFRPを作製し、四点載荷試験を行った。この新しい2種類の限定的ならせん積層は、部材軸方向（部分方向）または表面（部分厚）においてのみ繊維の配向角度を変化させる積層構成である。これら4種類の荷重変位曲線と破壊形態より、CFRPの積層構成による曲げ変形・耐荷挙動を観察、検討した。

CP直交積層は圧縮力に弱く引張力に強いこと、破壊が脆性的・局所的であることを確認できた。

2種類の限定的ならせん積層は、最大荷重が全方向全厚のらせん積層SH9よりも大きいことを確認した。負荷の多い部分の繊維量を増やした方が、最大荷重が大き

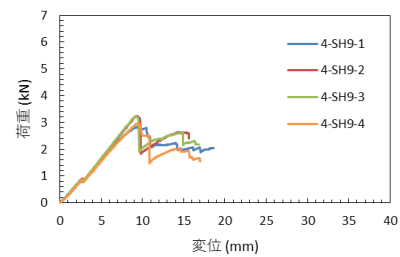


図-8 SH9 荷重変位曲線

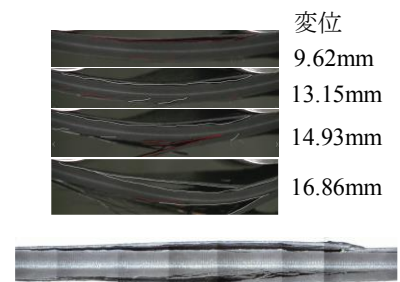


図-9 SH9-3 損傷過程・破壊状況

くなると考えられる。

PSH9 配向角度限定らせん積層は、全方向全厚のらせん積層より最大荷重が大きく、長い荷重保持をすること、圧縮側の 0° 層から層間剥離、圧縮側 0° 層間に階段状のひび割れが発生することが確認できた。部材軸方向のみをらせん積層にすると、最大荷重が大きくなり、 0° 層は圧縮に弱くそこから損傷が始まるが、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したと考えられる。

SH9/CP らせん積層スキン／クロスプライコアは、まず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、2回目のピーク後、大きく荷重降下し、層間剥離が進展、CP部分の圧縮側に縦方向のひび割れが発生していた。SH9部分は圧縮と引張に弱く始めに損傷が進展したが、CP部分は引張に強く圧縮に弱いため、2回目のピーク時、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。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。

今後は、三点載荷試験と比較し、限定したらせん積層CFRPの曲げ変形・耐荷挙動を詳しく検討する。

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、2017。
- 2) 石澤郁馬、近藤健太、松本高志：らせん積層CFRPの4点曲げ挙動に関する実験、第74号土木学会北海道支部論文報告集、2018。
- 3) 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。