



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	らせん積層CFRP板の曲げ破壊挙動の検討
Author(s)	松本, 高志; 石澤, 郁馬; 近藤, 健太
Citation	土木学会論文集A2 (応用力学), 75(2), I_581-I_588 https://doi.org/10.2208/jscejam.75.2_I_581
Issue Date	2019
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/80790
Type	journal article
File Information	75_I_581.pdf



らせん積層 CFRP 板の曲げ破壊挙動の検討

松本 高志¹・石澤 郁馬²・近藤 健太³

¹正会員 北海道大学教授 大学院工学研究院北方圏環境政策工学部門 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: takashim@eng.hokudai.ac.jp

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)

生体構造を模倣したらせん積層 CFRP の板曲げ挙動を実験的に検討した。一方向炭素繊維プリプレグを積層する際に層間の配向角度差を設けることでらせん積層を構成した供試体を作製している。円周支持の平板を中央点集中荷重と中央部分布荷重の条件下で、直交積層の平板と荷重-変位挙動と破壊挙動を比較した。荷重-変位挙動においては、らせん積層は中央部分布荷重下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。破壊形態においては、直交積層が局所的であるのに対して、らせん積層の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た。

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

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー (Carbon Fiber Reinforced Polymer, 以下 CFRP) は炭素繊維と熱硬化性樹脂との複合材料であり、低密度で、比強度、比剛性、耐腐食性に優れる材料であるが、挙動は脆性的であり、線形挙動の後に突然の局所的な破壊を生じる。損傷領域は限られており、局所的に破壊する形態とあいまって挙動は脆性的となる。

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 のような構造がよく見られる。節足動物の外骨格は角皮の多層構造からなり、角皮は一方向に整列したキチン繊維とそれを包むタンパク質の基質材料で作られた層が積層されて形成されていることが観察されている^{1,2,3,4)}。この積層は直交積層や擬似等方積層ではなく、ランダムでもなく、一定の配向角度差を保ちつつ積層されるらせん積層であることが見出されており、様々な荷重に抵抗する強靱な特性を付与していると考えられている (図-1)。例えばシャコの捕脚の外殻においてもキチン繊維がらせん積層されており、貝の殻を打撃により破壊して捕食する際にも、この外殻は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⁾。

こうした生体のらせん積層構造を FRP に適用する試みがなされており、曲げ特性²⁾や衝撃特性¹⁾について報告がされている。また著者らは、一方向炭素繊維プリプレグを 40 層積層する際に一定の配向角度差を設けることでらせ

ん積層を構成した CFRP の長方形板供試体を 3 種類作製して、三点及び四点曲げ載荷実験を行い、直交積層と比較した曲げ挙動と損傷・破壊挙動を詳細に観察している⁵⁾。ここでは、らせん積層にして層間の配向角度差を小さくするにつれて、最大荷重と第一ピーク荷重は減少するが、軟化は抑制され、第一ピーク荷重を経て荷重降下した後の荷重保持が大きくなり、脆性的挙動が改善されることを確認した。また、損傷・破壊挙動においては、らせん積層の層間配向角度差を小さくすると、局所的な損傷・破壊は起きにくくなり、損傷深さも小さくなっていることを確認した。また、いずれの載荷条件においても、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へと進展する特徴的な損傷・破壊形態がらせん積層では観察された。

しかしながら、長方形板供試体においては板の長軸に対して配向角度がある繊維は支間内で途切れて目切れとな

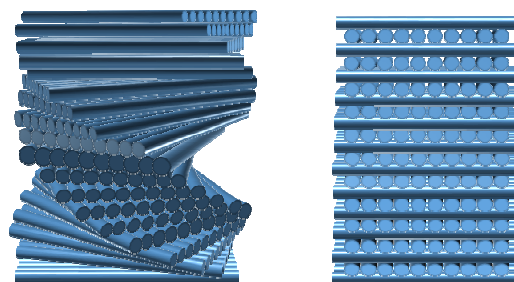


図-1 らせん積層 (左) と直交積層 (右)

っており、これが特徴的な損傷・破壊形態を起こす要因となるとも考えられた。らせん積層が固有に示す挙動を確認するにはこうした要因を排除した条件で実験的観察を行う必要がある。

本研究では、らせん積層 CFRP 板の曲げ破壊挙動を確認することを目的としている。直交積層とらせん積層の2種類の平板を円周支持として、中央点集中荷重と中央部分布荷重の2種類の条件下で載荷を行った。合計4ケースに対して、板曲げの荷重-変位関係を計測し、ビデオ撮影とX線CT断層撮影により曲げ破壊挙動の観察を行った。

2. 曲げ載荷実験

(1) 供試体作製

作製した CFRP 積層板は表-1に示す2種類であり、40枚の一方向性炭素繊維プリプレグを積層している。プリプレグの目付は 187.3g/m^2 、繊維目付は 124.3g/m^2 、樹脂含有率は33.6wt%である。プリプレグは一方向に繊維が整列し熱硬化性樹脂を含浸させたシートであり、供試体の辺方向を0度と定義した場合、この方向に繊維方向が一致するプリプレグを0度層としている。プリプレグの配向角は0度より反時計回りを正として繊維方向がなす角度と定義する。直交積層板である CP (Cross-Ply) では配向角0度と90度で交互に40枚積層する。積層構成は $[0/90]_{20}$ で表され、これは[]内の積層を[]外の下付き文字の回数繰り返すことを意味している(表-1)。らせん積層板として今回は1種類を作製した。SH9 は層間の配向角間隔を9度とし、0度、9度、18度…162度、171度である[]内の積層を2回繰り返している(表-1)。

供試体の作製手順を図-2に示す。まずプリプレグの裁断を行う。冷凍保管されていたプリプレグを常温で半日から一日解凍した後、らせん積層 (SH9) では290mm 四方、直交積層 (CP) では200mm 四方にプリプレグを40枚ずつ切り出し、表-1の積層構成の配向角に従って40枚を積層した。

成形は JIS 規格⁹⁾に基づいたオートクレーブ成形法を用いた。積層を副資材と共に真空バッグに収めてポンプにより真空引きを行い、上下を2mm厚のステンレス板2枚により挟んで加圧器により真空バッグ全体を加圧した。これらは真空引きした状態のまま電気炉内に静置する。炉の温度設定は2段昇温とし、硬化スケジュールの1段階目は 80°C で1時間定常、2段階目は 130°C で2時間定常とした。昇温速度はいずれの段階も 1°C/min とした。加熱終了後は半日間放置後に炉から取り出して、らせん積層については200mm 四方に切断して板供試体とした。

供試体の名称は、載荷条件-積層構成-供試体番号とする。載荷条件は、点載荷を P、面載荷を S で表す。各ケース3体の供試体を作製して、それぞれ1~3と名付けた。

(2) 載荷方法と計測項目

載荷条件を図-3に示す。点載荷と面載荷共に支点間距離を150mmとした。点載荷は支間中央に集中荷重を、面載荷は直径50mmの円柱を介して分布荷重を載荷した(図中黄色部)。これらは既往の三点曲げおよび四点曲げ梁実験を参考にして決めた⁹⁾。全ての供試体において上面(圧縮面)の最外層が配向角0度となるように統一した。載荷は 2.0mm/min の変位制御で行い、荷重が最大値を計測後から半分以下に降下した時点で、供試体が完全に破断する前に載荷を終了した。荷重と変位はサンプリングレート1Hzで計測を行った。

また、載荷中には供試体下面に生じる亀裂などの損傷過程をビデオ撮影により観察し、実験後にはX線CTにより供試体断層面の破壊状況を観察した。

表-1 供試体の積層構成

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

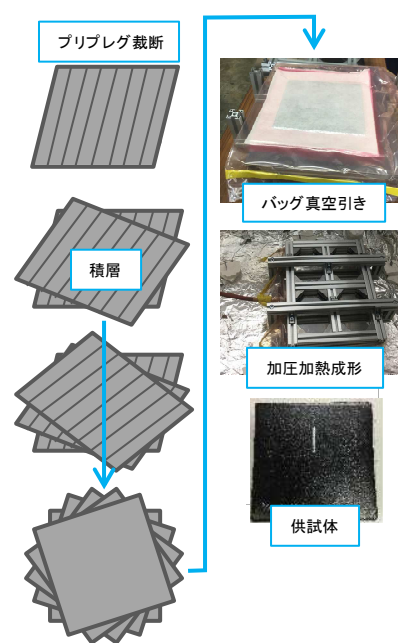


図-2 供試体作製手順

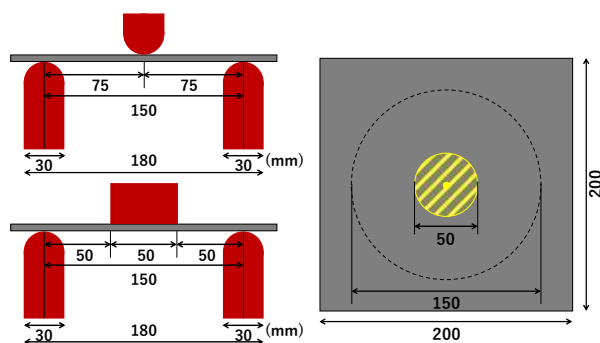
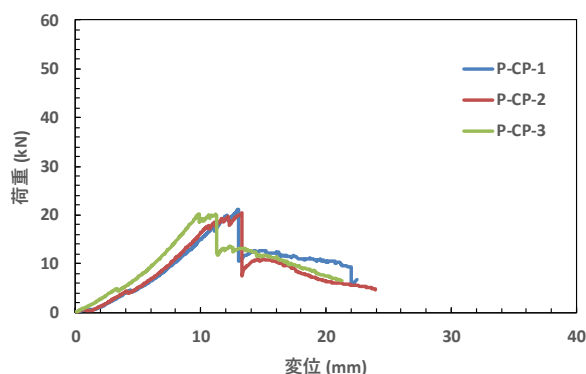
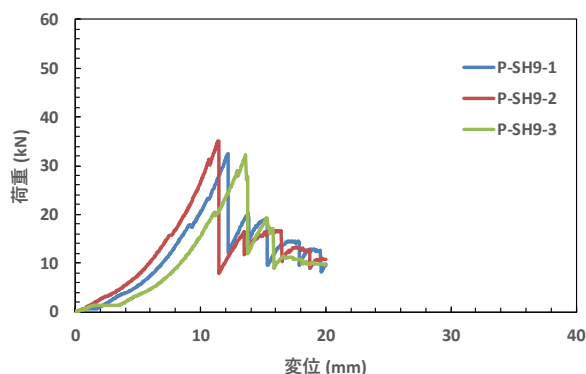


図-3 点載荷 (左上), 面載荷 (左下), 平面図 (右)

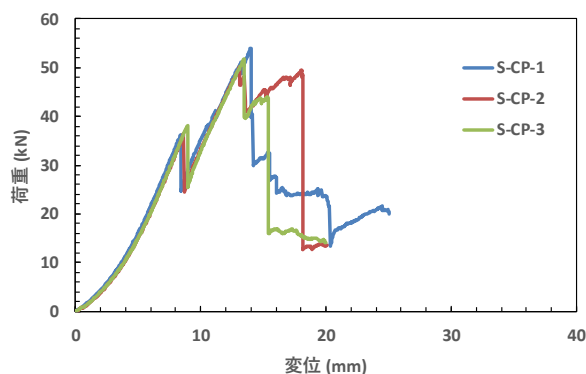


(a) CP

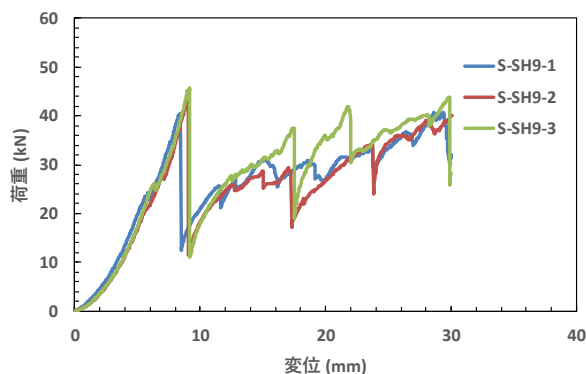


(b) SH9

図-4 荷重－変位関係（点載荷）



(a) CP



(b) SH9

図-5 荷重－変位関係（面載荷）

3. 実験結果

(1) 荷重－変位関係

図-4と図-5に、点載荷と面載荷の荷重－変位関係を示す。それぞれ(a)CP と(b)SH9 の荷重－変位関係を示している。供試体3体の挙動はバラツキによる差異はあるものの、同じ積層構成・載荷条件ではほぼ同様の挙動を示した。また、図-6には既往の研究による長方形板の曲げ載荷の代表的な荷重－変位関係を示している⁵⁾。

点載荷実験では、最大荷重の平均値はCPで20.61kN、SH9で33.32kNであり、SH9が62%上回った（図-7）。最大荷重時変位の平均値はそれぞれ12.02mmと12.40mmでありほぼ同じであった（図-8）。

CPは荷重が上昇した後、最初の破壊後2mm程度の間はあまり上昇せず、その後に大きく荷重降下が見られた。最初の破壊荷重と最大荷重とに大きな差異は生じていない。最大荷重後の挙動においては、CPは荷重降下後に緩やかに低下した。一方で、SH9は最大荷重まではほぼ単調に荷重上昇し、最大荷重後に大きく荷重降下が見られた。その後は増減を繰り返しながら荷重を低下させる結果となった。

面載荷実験では、最大荷重の平均値はCPで52.00kN、SH9で43.07kNであり、CPが21%上回った（図-7）。最大荷重時変位の平均値はCPが13.52mm、SH9が8.84mmでありCPの方が大きかった。なお、CPが最初に荷重降下を示した時の荷重平均値は36.93kNで変位平均値は8.65mmであった（図-8）。

CPでは平均36.93kNにて一度荷重降下が見られた後に最大荷重まで荷重が上昇した。その後、1体は大きく荷重降下を示し、2体は小さな荷重降下と上昇を示した後に大きな荷重降下を示した。最大荷重後の挙動は緩やかな低下を示した。SH9は、最大荷重まではほぼ単調な荷重上昇を示した後に、3体共に大きな荷重降下を示した。この後に、小さな荷重増減にやや大きめの増減を挟みながら、最大荷重に迫るレベルまで増加する結果となった。

点載荷と面載荷の結果においてCPとSH9を比較すると、最大荷重後の挙動においてCPは荷重増減の回数は少なく、SH9はその回数が多くみられることが分かる。

既往の研究による長方形板の曲げ載荷と比較する⁵⁾（

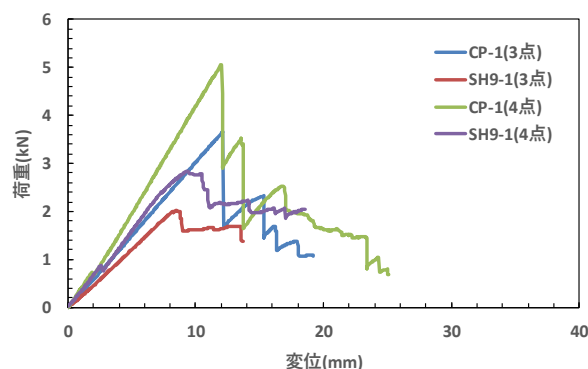


図-6 荷重－変位関係（長方形板三点・四点曲げ載荷）⁵⁾

図-6) . CP は三点曲げと四点曲げのいずれにおいても最大荷重まで線形に荷重が上昇した後に数回の荷重降下を示した. 今回の正方形板の点載荷と面載荷においては荷重－変位関係が異なり最大荷重後の荷重降下の回数が少なかった. SH9 においては, 三点曲げにおいて最大荷重後に変位が数 mm 増加する間の安定的な荷重保持が見られ, 四点曲げにおいて最大荷重後に荷重降下を示した後に漸増による荷重保持を示した. 今回の点載荷と面載荷の荷重－変位関係においては最大荷重直後の荷重保持は見られなかった.

(2) エネルギー吸収量

各供試体の最大荷重前のエネルギー吸収量 (図-9), 最大荷重後で最大荷重時変位の 1.45 倍までのエネルギー吸収量 (図-10), 最大荷重後で実験終了時変位までのエネルギー吸収量 (図-11), 最大荷重前後のエネルギー吸収量の比 (最大荷重時変位の 1.45 倍まで) (図-12) 及び最大荷重前後のエネルギー吸収量の比 (実験終了時変位まで) (図-13) について述べる. エネルギー吸収量は, 荷重－変位曲線下の面積を区分求積により求めた. また, エ

ネルギー吸収量の比は, 最大荷重後で最大荷重時変位の 1.45 倍までのエネルギー吸収量を最大荷重前のエネルギー吸収量で割ったものである. ここで用いた 1.45 倍は, 全ての供試体において最大荷重時変位と最大荷重時変位から実験終了時までの変位を算出して比を算出し, 最も小

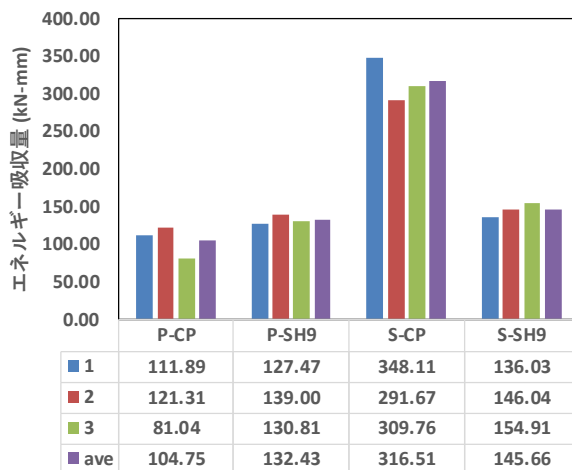


図-9 エネルギー吸収量 (最大荷重前)

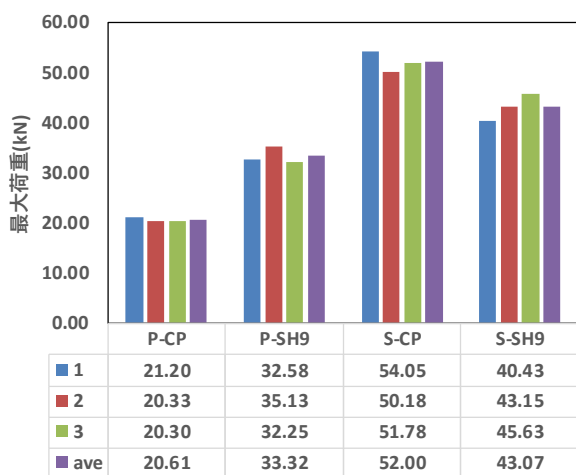


図-7 最大荷重

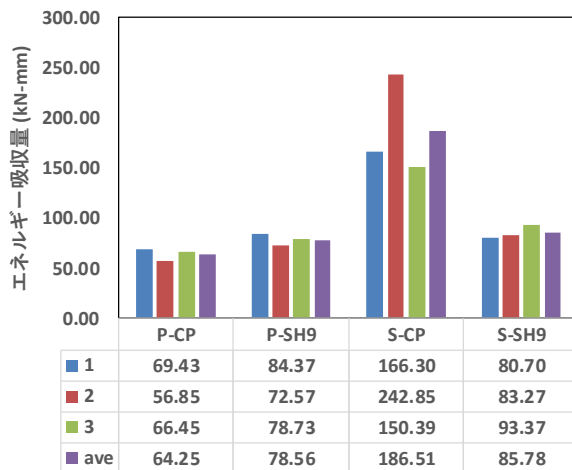


図-10 エネルギー吸収量 (最大荷重時変位の 1.45 倍まで)

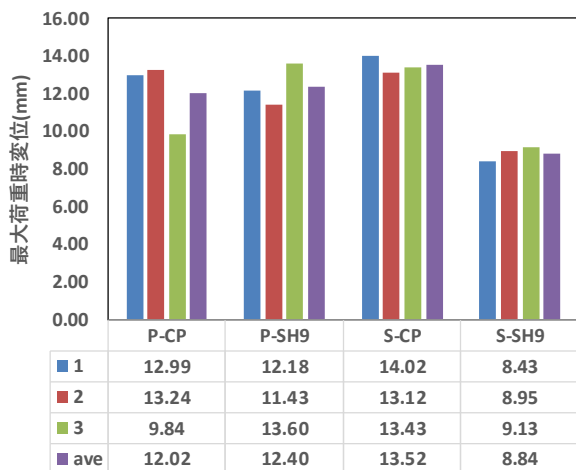


図-8 最大荷重時変位

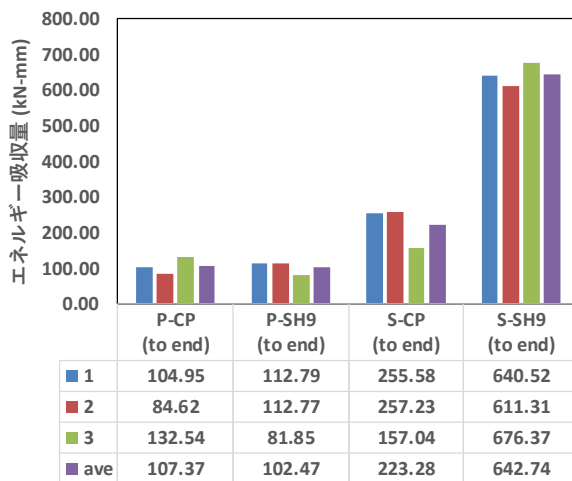


図-11 エネルギー吸収量 (実験終了時変位まで)

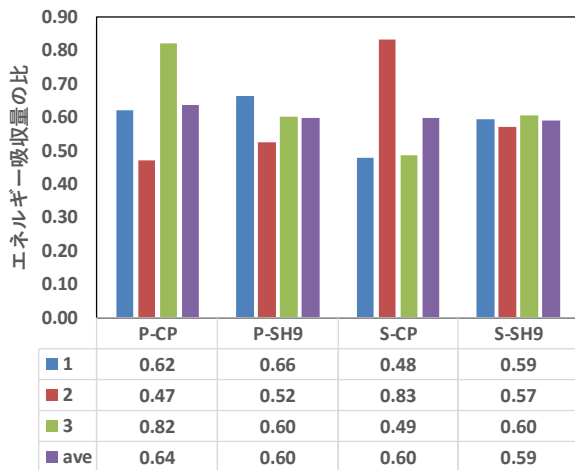


図-12 エネルギー吸収量の比（最大荷重時変位の 1.45 倍まで）

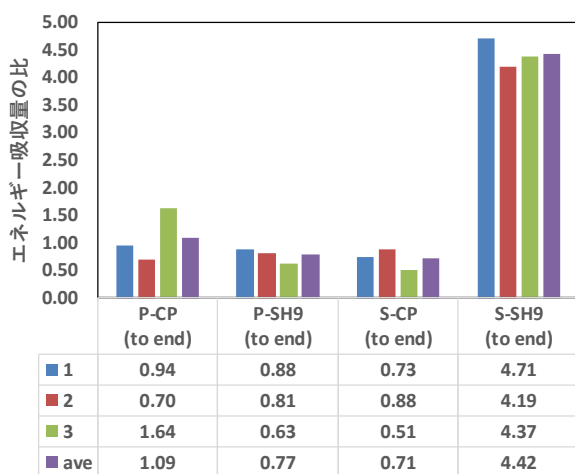


図-13 エネルギー吸収量の比（実験終了時変位まで）

さい比を採用した。これにより、エネルギー吸収量を同条件の下で比較検討している。

最大荷重前の各供試体のエネルギー吸収量について、点荷重と面荷重の CP の平均値は 104.75kN-mm, 316.51kN-mm, SH9 は 132.43kN-mm, 145.66kN-mm となっている（図-9）。面荷重の CP が抜き出た値となっているが、これは平均 36.93kN で第一ピークを現した後に平均 52.00kN の最大荷重を示し、これに基づいてエネルギー吸収量を算出しているためである。

最大荷重後で最大荷重時変位 1.45 倍までのエネルギー吸収量について、点荷重と面荷重の CP の平均値はそれぞれ 64.25kN-mm, 186.51kN-mm, SH9 の平均値はそれぞれ 78.56kN-mm, 85.78kN-mm であった（図-10）。面荷重の CP が抜き出ているが、上記と同様の理由により、最大荷重時の変位が大きいことによる。

最大荷重後で実験終了時変位までのエネルギー吸収量については、点荷重と面荷重の CP の平均値はそれぞれ 107.37kN-mm, 223.28kN-mm, SH9 の平均値はそれぞれ 102.47kN-mm, 642.74kN-mm であった（図-11）。面荷重の SH9 が大きな値を示しているのは、最大荷重後におい

ても、小さな荷重増減にやや大きめの増減を挟みながら、最大荷重に迫るレベルまで増加する挙動による。

以上のエネルギー吸収量の値は対象範囲とする変位の値に依存するので、あくまで一つの指標として示すものである。

次に、エネルギー吸収量の比を示す。この値も対象範囲とする変位の値に依存するため、あくまで一つの指標である。

まず最大荷重時変位の 1.45 倍までと最大荷重前のエネルギー吸収量の比であるが、点荷重と面荷重の CP において、0.64 と 0.60 であり、SH9 において 0.60 と 0.59 であった（図-12）。個々の供試体の比についてはばらつきがあるものの平均値は概ね同様の値となっている。実験終了時変位までと最大荷重前のエネルギー吸収量の比においては、それぞれ 1.09 と 0.71, 0.77 と 4.42 となっており、面荷重の SH9 が抜き出た値となっている（図-13）。これは前述した最大荷重に迫るレベルまで増加する挙動によるものである。

4. 損傷・破壊形態

荷重中の供試体下面をビデオ撮影し、実験後には X 線 CT により断層撮影を行った。各積層構成の代表的供試体について、図-14に P-CP-1, P-SH9-1, S-CP-3, S-SH9-2 の供試体下面画像を、図-15に P-CP-1, P-SH9-3, S-CP-3, S-SH9-2 の供試体中央部の断層画像を示す。ビデオ撮影画像においては、赤線で新たに発生した主なひび割れを強調表示しており、白線でそれ以前に発生したひび割れを表示している。X 線 CT 断層撮影画像においては赤線により主なひび割れを強調表示している。

まず図-14のビデオ画像について説明する。

点荷重の CP では、最大荷重時（変位 12.99mm）に中央に 1 本のひび割れが発生した。これは底面の繊維方向に沿うように発生していた。最終的には十字状にひび割れが発生し、繊維が断裂している様子も確認されたが、比較的短く留まっている。

一方、点荷重の SH9 では最大荷重時（変位 12.18mm）で表面にひび割れが発生し徐々に進展した。またその周囲にも同様のひび割れが発生していた。結果的に一方向に複数のひび割れが発生しており、支点近くまで進展するものもあった。写真下部では供試体表面の盛り上がり確認されることから内部でも破壊が起こっていると推察される。

面荷重の CP では、最大荷重（変位 13.48mm）の後の荷重降下では表面にひび割れは確認されず、15.44mm 時に載荷板の縁に沿って大きなひび割れが確認された。ひび割れ範囲は載荷板の縁の半分以上に達しており、繊維が破断している様子が確認された。

SH9 では、まず最大荷重後（変位 9.08mm）の荷重降下において、支点から載荷板の縁にかけて 1 本のひび割れが発生した。続いて 17.29mm 時にそのひび割れが面外せん

断と面内閉口の組合せで互いの面が食い込むように供試体が歪んでいく様子が見られ、その反対側では2本のひび割れが発生した。27.54mm 時でさらに供試体の歪みが大きくなり、また新たに6本のひび割れが供試体全体に発生した。底面のひび割れが全体に広がるとともに、内部の破壊による表面の盛り上がりが見られたことから、破壊が供試体全体に広がっていると考えられる。

次に図-15のX線CT断層画像について説明する。

P-CP-1の断層画像について、中央部では繊維が完全に断裂している様子が確認された。また、載荷点から半径約5cmを超えた範囲では内部のひび割れが発生していなかったことから破壊が局所的に発生していたことがわかる。

P-SH9-3の断層画像についても、中央部では繊維が完全に断裂している様子が確認された。一方、CPに比べてより広範囲で層間剥離が確認された。層間剥離は①の位置で

は緩やかな右上がりであり、②では水平に、③では緩やかな右下がりであることから、内部でねじれるように層間剥離が発生していると推定できる。

S-CP-3の断層画像では供試体の水平方向に大きな層間剥離が1か所あり、載荷板の縁では繊維が断裂して押し抜かれている様子が確認される。

S-SH9-2の断層画像では、①と②では右上がりの層間剥離が発生しており、③では水平に、④と⑤では右下がりに発生していることから、内部でねじれるように層間剥離が進展していると推定される。また、繊維の断裂には至らず内部の剥離が供試体全体に広がっていることが確認された。

以上より、同一載荷条件においてはらせん積層することで層間剥離の範囲が大きく広がり、内部ではねじれるように進展していることが確認された。これにより供試体は

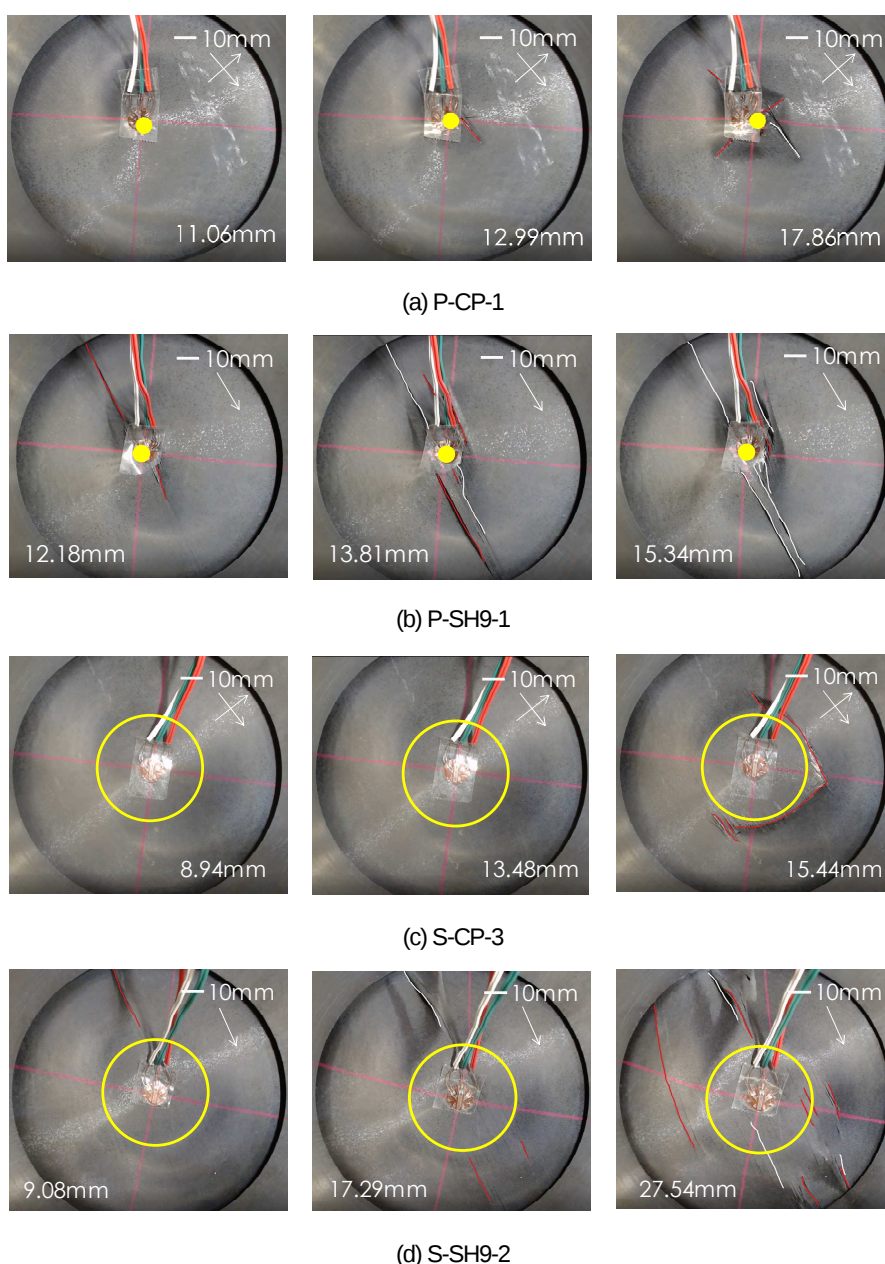


図-14 供試体底面画像 (矢印は繊維方向：CPは0と90度、SH9は171度)

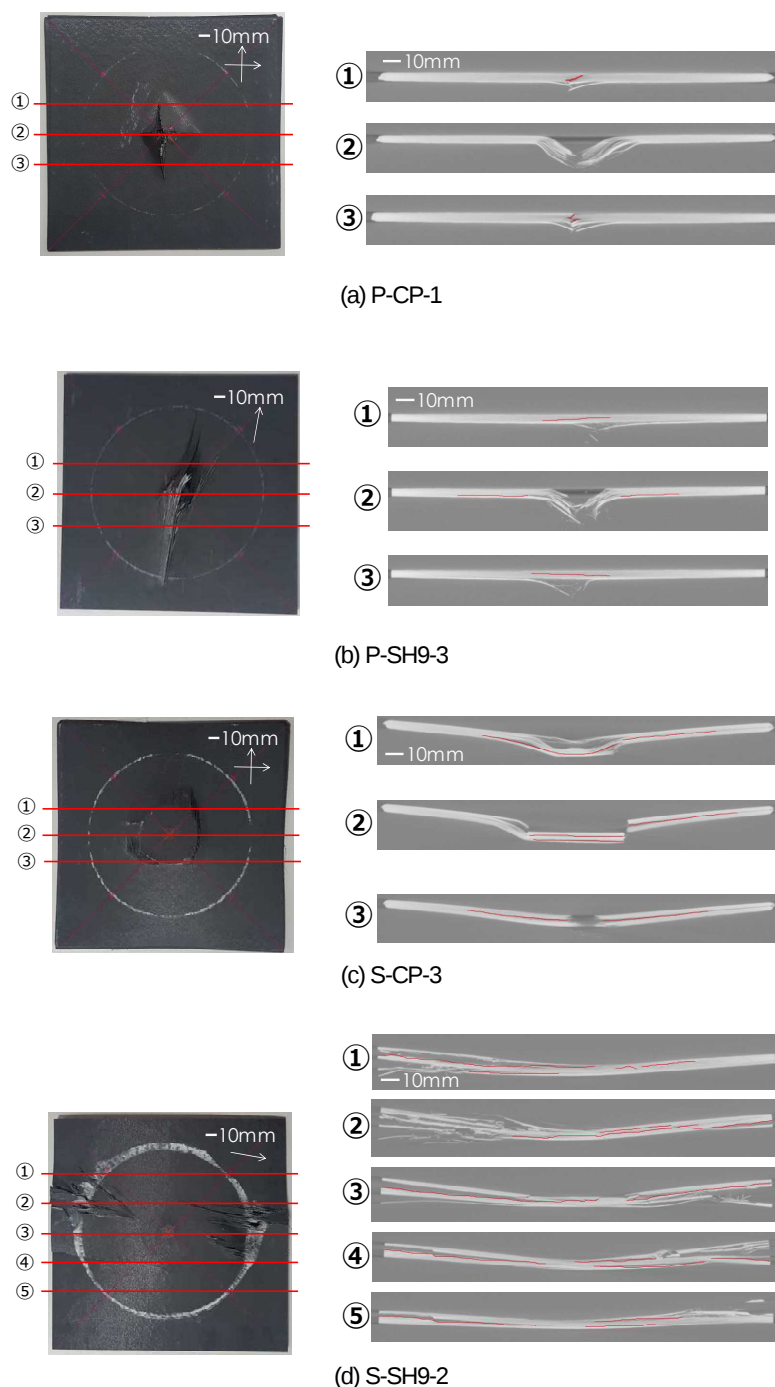


図-15 X線CT断層画像 (矢印は繊維方向：CPは0と90度，SH9は171度)

ねじれるように変形するものと考えられる。既往の研究における長方形板の三点曲げと四点曲げにおいては、層間の配向角度差が小さくなるにつれて、圧縮側では破断・層間剥離が少なくなるとともに層間剥離の領域は大きく広がり、引張側では層間剥離が多く発生する傾向が確認され、引張側の層間剥離は側面から見ると複数の層間を階段状に上がるように発生していることが確認された。長方形板においては板の長軸に対して配向角度がある繊維は目切れとなり、こうした特異な層間剥離を起こす要因となることも考えられたが、今回の実験では目切れが起因となる条件

ではなく、らせん積層により層間剥離がねじれるように進展することが確認された。また、総じて、局所的な損傷・破壊は起きにくくなり、損傷は広がる傾向にあった。いずれの载荷条件においてもらせん積層の特徴的な損傷・破壊形態が観察されることを確認した。

5. まとめ

本研究では、CFRPの積層構成をらせん積層とした平板

を作製し、円周支持の平板を中央点集中荷重と中央部分布荷重の条件下で、直交積層の平板と荷重－変位挙動と破壊挙動を比較した。

荷重－変位曲線において、SH9 の面載荷を除いて、最大荷重後に大きな荷重降下とその後の荷重減少がみられたのに対して、SH9 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。

破壊形態の観察においては、直交積層の破壊はより局所的であり、一方でらせん積層の破壊は供試体全体に広がり、層間剝離はねじれるように発生することが確認された。

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) Grunfelder, 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・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.
- 6) 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 July 19, 2019)
(Accepted December 10, 2019)

STUDY ON THE FLEXURAL FRACTURE BEHAVIORS OF HELICOIDALLY LAMINATED CFRP

Takashi MATSUMOTO, Ikuma ISHIZAWA, and Kenta KONDO

Helicoidally laminated CFRP specimens replicated after a biological body are examined in plate flexure. The specimens were fabricated by stacking unidirectional prepregs with constant fiber angle difference between adjacent laminae. Point loading and distributed loading experiment in plate flexure were conducted, and flexural and fracture behaviors were observed. Compared to cross-ply laminate specimens, helicoidally laminated specimens show widely spread cracks and unique twisted delaminations. Under distributed loading, helicoidally laminated specimens show post-peak load recovery up to the peak load level.