



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	CFRPのらせん積層化による曲げ挙動と破壊形態の検討
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), 74(2), I_639-I_647 https://doi.org/10.2208/jscejam.74.I_639
Issue Date	2018
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/80823
Type	journal article
File Information	74_I_639.pdf



CFRP のらせん積層化による曲げ挙動と破壊形態の検討

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学生会員 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)

CFRP は軽量にして高剛性・高強度を有する複合材料であるが、その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。本研究では生体に見られるらせん積層構造を模倣することで脆性挙動の改善を検討した。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た。三点および四点曲げ載荷実験を行い、直交積層と比較して、曲げ挙動と損傷・破壊挙動を詳細に観察した。曲げ挙動においては、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、前後のエネルギー吸収量の比が大きくなることを確認した。特徴的な損傷・破壊挙動により、総じて局所的な損傷・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。

Key Words: CFRP, flexure, fracture, helicoidal laminate

1. はじめに

CFRP (炭素繊維強化ポリマー) は、軽量にして高剛性・高強度を有する複合材料であるが、その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。曲げにおいては、座屈もしくは圧壊と見られる圧縮縁における破壊や、積層板の層間において剥離などを生じる。いずれにせよその損傷領域は限られており、局所的に不安定に破壊する形態とあいまって挙動は脆性的となる。

本研究では、こうしたFRPの脆性挙動の改善について、生体構造を模倣することにより検討している。FRPのように、繊維が基質材料を補強し、かつ積層を成す構造は生体構造においてもよく見られる構造である。

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)}。興味深いことに、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³⁾。他にも、甲殻類(アメリカンロブスター、ブルークラブ)や

昆虫類(マメコガネ)などの外骨格にらせん積層構造が見られる。配向方向が180度回転する1周期はアメリカンロブスターの外角皮で6~8 μm 、内角皮で25~35 μm であり、ブルークラブでそれぞれ3 μm と11~12 μm 、マメコガネでそれぞれ0.5 μm と2 μm である。またモンハナシャコにおいては75 μm と報告されている^{1,2,3,4)}。

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、例えばChengらはガラス繊維プリプレグを用いて3種類のらせん積層GFRPを作製している¹⁾。曲げ載荷実験を行い、剛性、強度、残存強度を擬似等方積層と比較した結果、向上することを確認しており、特に残存強度の向上が著しいとしている。また、Grunenfelderらは3種類のCFRPらせん積層板の衝撃特性について、一方向積層板と擬似等方積層板との比較を行い、損傷は深さが減

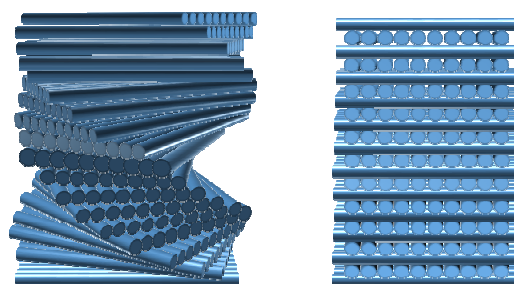


図-1 らせん積層(左)と直交積層(右)

少して面内に大きく広がることと、ある種類の積層板では残存強度が向上することを確認している³⁾。しかしながら、既往の研究では载荷中の FRP の損傷と破壊の形態に関して詳しく調べられておらず、らせん積層の特徴的な挙動が発現する機構の推定についてはあまり明らかに示されていない。

本研究では CFRP を対象として、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供試体を作製した。三点及び四点曲げ载荷実験を行い、通常製作される直交積層と比較して、曲げ挙動と損傷・破壊挙動を詳細に観察することを目的としている。

2. 曲げ载荷実験

(1) 供試体作製

CFRP 積層板は一方向性炭素繊維プリプレグを用いて作製した。プリプレグとは、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。含浸された樹脂は 130℃硬化型のものである。三点曲げ供試体において、プリプレグの目付は 178.3g/m²、繊維目付は 125.3g/m²、樹脂含有率は 29.7wt% であり、四点曲げ供試体においてそれぞれ 187.3g/m²、繊維目付は 124.3g/m²、樹脂含有率は 33.6wt% である。用いられた CF トウのタイプは TR (MITSUBISHI CHEMICAL) であり、引張弾性率は ~235GPa である。

作製した CFRP 積層板は表-1に示す 4 種類である。全ての種類において 40 枚の UD プリプレグを積層している。UD プリプレグは一方向に繊維が整列したシートであり、供試体の長辺方向を 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長辺方向の 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。

らせん積層板として SH36, SH18, SH9 の 3 種類を今回は作製した。SH36 は層間の配向角間隔を 36 度とし、0 度、36 度、72 度、108 度、144 度の積層を 8 回繰り返している。同様に、SH18 は 18 度として [] 内の積層を 4 回、SH9 は 9 度として [] 内の積層を 2 回繰り返している。以上 4 種類の CFRP 積層板において、CP が最も間隔の大きく、SH9 が最も小さいらせん積層であるとみることができる。

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、290×290mm (CP のみ 200×200mm) の寸法で 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。加圧は 0.1~1kPa が望ましいとあるが、今回は管理をしていない。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℃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。

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(SHIZUOKA VHR-SD)にて 180×40mm の寸法に切断した。目視において断面に切断による損傷は見られなかった。三点曲げ供試体の平均厚さは 4.69mm、四点曲げは 4.97mm であった。三点曲げ供試体は 3 体、四点曲げ供試体は 4 体作製され、それぞれ a~c、a~d と名付けた。以上の手順により積層構成毎に 3 もしくは 4 体の供試体を作製した。なお今回は、積層時ないし硬化後において設計積層構成との差異等の管理は明示的には行っていない。

(2) 载荷方法と計測項目

载荷は JIS 規格⁹⁾を参考にして行い、供試体長 180mm に対して支間長 150mm とした (図-3)。三点曲げにおいては支間中央に载荷を行った。四点曲げにおいては三等分点

表-1 供試体の積層構成

名称	積層構成
CP	[0/90] ₂₀
SH36	[0/36/72/108/144] ₈
SH18	[0/18/36/54/72/90/108/126/144/162] ₄
SH9	[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90/99/108/117/126/135/144/153/162/171] ₂

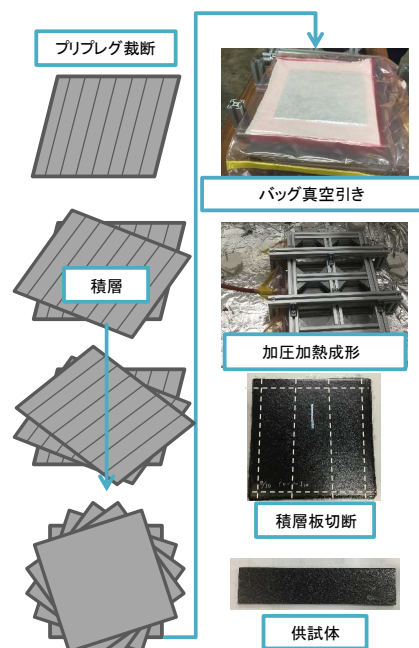
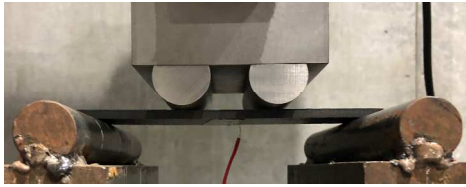


図-2 供試体作製手順



(a) 三点曲げ



(b) 四点曲げ

図-3 載荷状況

曲げとして、せん断支間 50mm、曲げ支間 50mm として載荷を行った。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。載荷点と支点には丸鋼を用いた。載荷点の片当たりを防ぐ回転機構や、支点にローラーは備えていない。載荷は載荷速度 2.0mm/min のクロスヘッド変位制御とした。載荷は目安として大きな荷重降下が 3 回程度起きるまで行い、その後の荷重降下で 1kN 程度まで低下した時点で終了することとした。試験機からの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、載荷中には供試体側面に生じる亀裂・剥離などの損傷過程をビデオ撮影により観察し、実験後にはデジタル顕微鏡により供試体側面の破壊状況を観察した。

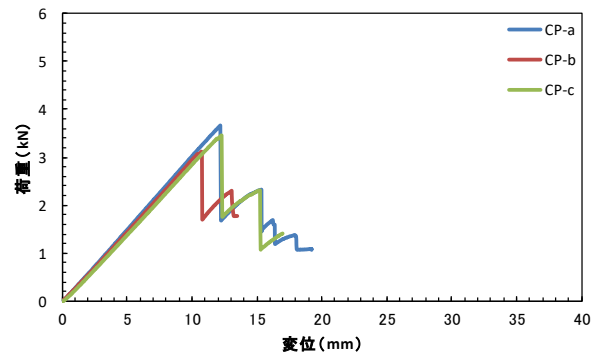
3. 実験結果

(1) 荷重－変位関係

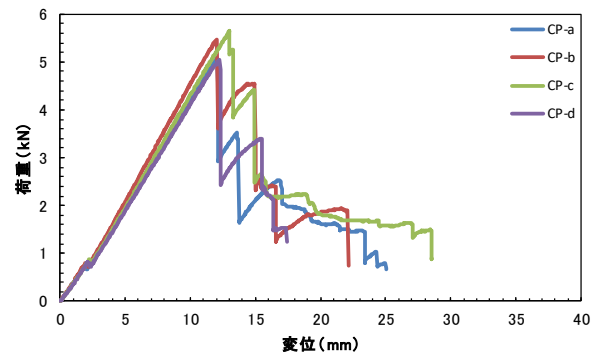
図-4から図-7において、各積層構成の供試体について(a)三点曲げおよび(b)四点曲げの荷重－変位関係を示す。複数の供試体の挙動においてバラツキによる差異はあるものの、同じ積層構成・載荷条件ではほぼ同様の挙動を示した。

CP は最大荷重点まで線形に荷重が上昇した後、3~4 回程度の大きな荷重降下を示して載荷終了となった(図-4)。CP-b のみ 3 回目の荷重降下とともに完全に二つに割れる結果となった。四点曲げの CP-a, b, c は 3 回の荷重降下を経て荷重が漸減した後、載荷終了とした。CP-d は 4 回目の荷重降下とともに完全に二つに割れた。

SH36 も CP と同様にピーク後に荷重降下を繰り返す挙動を示している(図-5)。三点曲げにおいては CP と大きく変わらないが、四点曲げにおいて荷重降下は大きくて、その回数は少なく、階段状ではない漸減的な荷重降下が観察された。三点曲げの SH36-a は約 1.5kN で剛性が変化している。初期不良か支持条件の不良が考えられるが詳細は不明である。四点曲げの SH36-d は大きな荷重降下を示しているが、これは 1 箇所に集中的に界面剥離が生じて、水

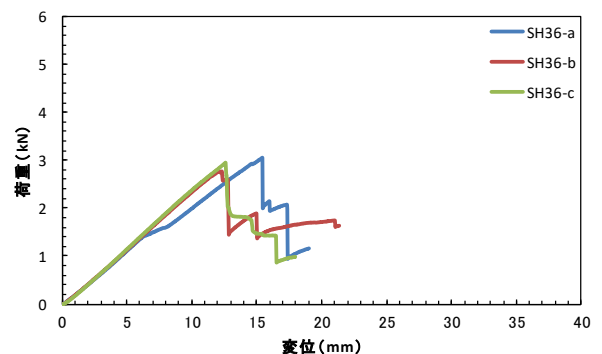


(a) 三点曲げ

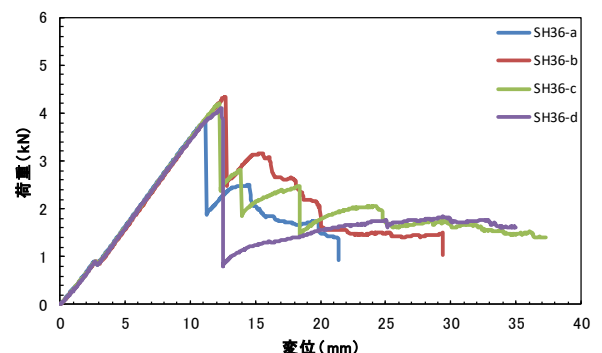


(b) 四点曲げ

図-4 荷重－変位関係 (CP)

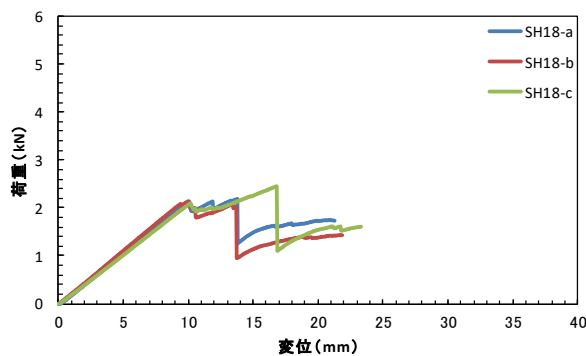


(a) 三点曲げ

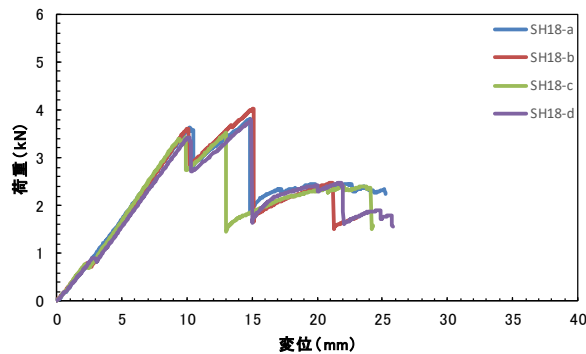


(b) 四点曲げ

図-5 荷重－変位関係 (SH36)

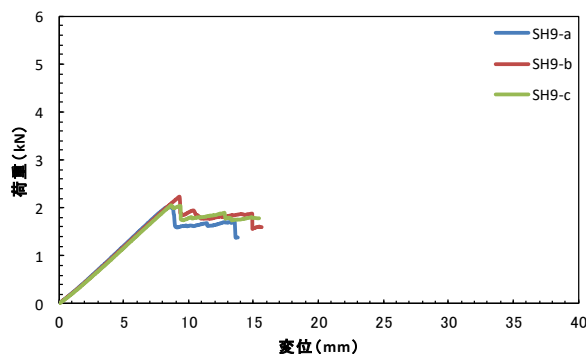


(a) 三点曲げ

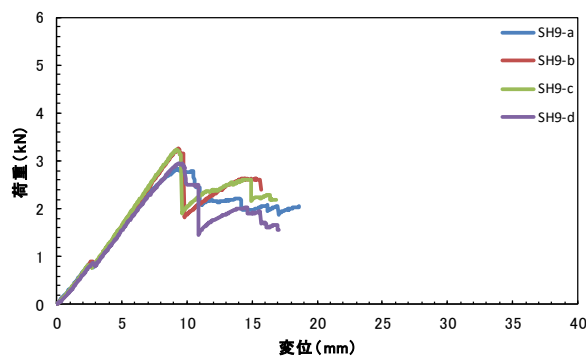


(b) 四点曲げ

図-6 荷重－変位関係 (SH18)



(a) 三点曲げ



(b) 四点曲げ

図-7 荷重－変位関係 (SH9)

平方方向に二つに割るような破壊が起きたためである。

三点曲げの SH18 は線形に荷重が上昇した後に、小さな荷重降下と上昇を数回繰返して、変位が数 mm 増加する間も荷重保持が見られた (図-6(a))。最大荷重点についてはこの荷重保持の間に見られている。その後大きな荷重降下があるものの、最大荷重の半分強の荷重保持を示し、最終的には大きく荷重降下し、載荷を終了した。四点曲げの SH18 は 4 体ともほぼ同様の挙動を示した (図-6(b))。約 3.5kN で最初のピーク荷重を迎えて荷重降下を示した後、同様の剛性で 3 体は約 4kN まで荷重上昇して最大荷重を示した。その後大きく荷重降下した後に、三点曲げと同様に最大荷重の半分程度の荷重保持を示した。最終的には大きく荷重降下して載荷を終了した。

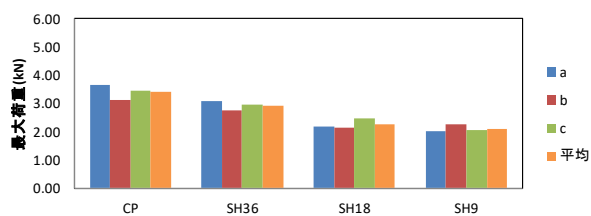
最後に SH9 は三点曲げにおいて最大荷重点まで線形的に荷重が上昇した後に小さい荷重降下があり、変位が数 mm 増加する間の安定的な荷重保持が見られた (図-7(a))。四点曲げにおいては、SH9-a を除き、最大荷重後に荷重降下を示し、その後漸増による荷重保持を示している。SH9-a は最大荷重から漸減しつつ荷重を保持している。三点曲げと四点曲げのいずれも、載荷はこの後の大きな荷重降下により終了とした。

4 種類の積層構成のいずれの曲げ載荷においても、第一ピーク荷重後にたわみ変位の増大とともに大局的には荷重が減少するたわみ軟化挙動が見られた。CP と SH36 が曲げ載荷において顕著なたわみ軟化の挙動を示しているのに対して、SH18 と SH9 はたわみ軟化の挙動が大きく緩和されている結果となった。配向角間隔が小さくなるにつれて、第一ピーク後の荷重保持が明瞭に確認できる。

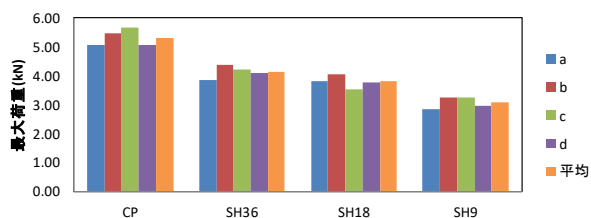
最大荷重の平均値は、三点曲げと四点曲げにおいて CP がそれぞれ 3.42kN、5.31kN、SH36 が 2.92kN、4.12kN、SH18 が 2.26kN、3.79kN、SH9 が 2.11kN、3.07kN であった (図-8 と表-2)。直交積層である CP から層間の配向角間隔が小さくなり SH9 に向かうにつれて最大荷重は減少した。また、曲げ強度の平均値としては CP が 875MPa、806MPa、SH36 が 747MPa、625MPa、SH18 が 578MPa、575MPa、SH9 が 540MPa、466MPa であった。

一方で、最大荷重時の変位の平均値は CP が 11.73mm、12.35mm、SH36 が 13.47mm、12.15mm、SH18 が 13.55mm、14.47mm、SH9 が 8.82mm、9.35mm となり、SH18 が最大で、SH36、CP のグループと続き、SH9 が最小の値を示した (図-9 と表-3)。供試体の数は 3 体と 4 体であり少ないものの、標準偏差は層間の配向角間隔が小さくなるにつれて概ね小さくなり、SH9 で最小の値を示した。

線形挙動後の第一ピーク荷重は必ずしも最大荷重と同じではなかった。第一ピーク荷重と最大荷重が異なるのは SH18 であり、第一ピーク荷重の平均値が 2.11kN、3.52kN であるのに対して、1、2 回の荷重降下を果たした後に最大荷重の平均値 2.26kN、3.79kN を示した。初期剛性については原点と第一ピーク荷重点を結んだ直線の傾きを算出してまとめた (図-10)。ただし三点曲げの SH36-a は途中で剛性が変化しているため、原点と荷重約 1.5kN 時点と

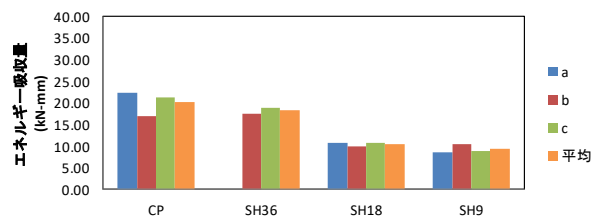


(a) 三点曲げ

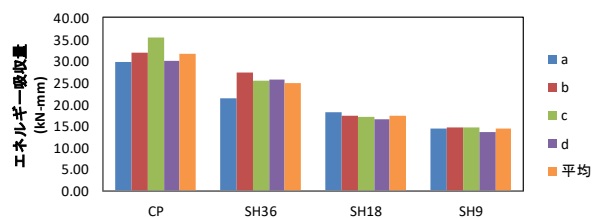


(b) 四点曲げ

図-8 最大荷重

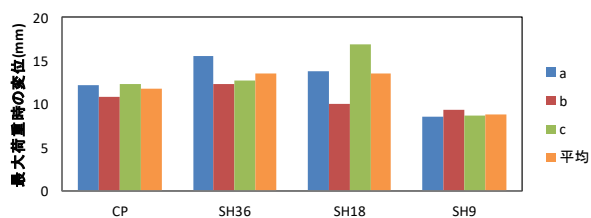


(a) 三点曲げ

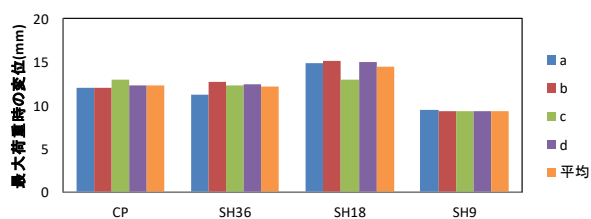


(b) 四点曲げ

図-11 エネルギー吸収量 (第一ピーク荷重前)

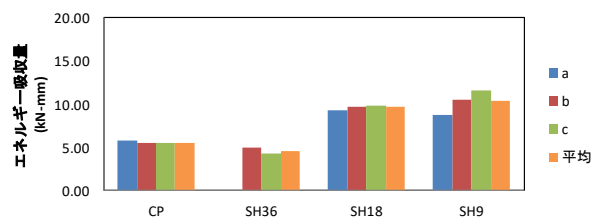


(a) 三点曲げ

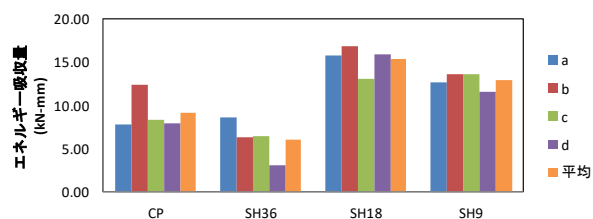


(b) 四点曲げ

図-9 最大荷重時変位

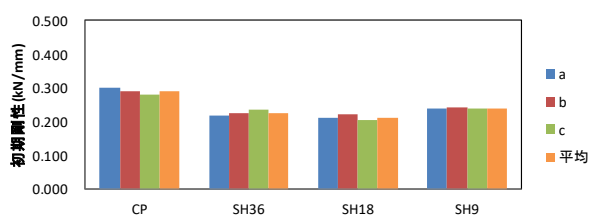


(a) 三点曲げ

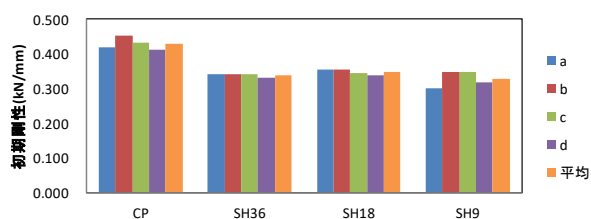


(b) 四点曲げ

図-12 エネルギー吸収量 (第一ピーク荷重後で変位 15mm まで)

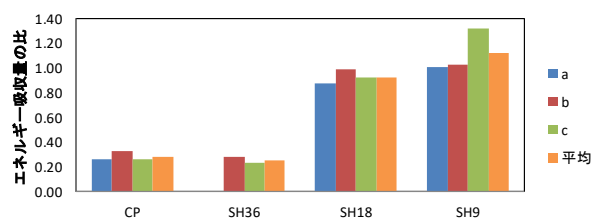


(a) 三点曲げ

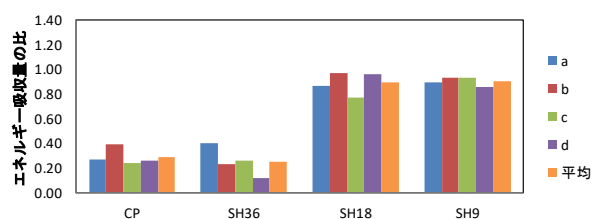


(b) 四点曲げ

図-10 初期剛性



(a) 三点曲げ



(b) 四点曲げ

図-13 エネルギー吸収量の比

表-2 平均最大荷重 (kN) 括弧内は標準偏差

	CP	SH36	SH18	SH9
三点曲げ	3.42(0.22)	2.92(0.12)	2.26(0.14)	2.11(0.10)
四点曲げ	5.31(0.26)	4.12(0.19)	3.79(0.18)	3.07(0.18)

表-3 最大荷重時の平均変位 (mm) 括弧内は標準偏差

	CP	SH36	SH18	SH9
三点曲げ	11.73(0.71)	13.47(1.41)	13.55(2.80)	8.82(0.34)
四点曲げ	12.35(0.40)	12.15(0.58)	14.47(0.87)	9.35(0.07)

を用いている。また、四点曲げの供試体は全て 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。初期剛性の平均値は、CP が 0.291kN/mm、0.430kN/mm、SH36 が 0.225kN/mm、0.339kN/mm、SH18 が 0.213kN/mm、0.349kN/mm、SH9 が 0.239kN/mm、0.329kN/mm となり、CP が最大で、三点曲げでは SH9、SH36 と続き、SH18 が最小、四点曲げでは SH18、SH36 と続き、SH9 が最小の値を示した。

三点曲げと四点曲げの比較においては、四点曲げの方が最大荷重と初期剛性が大きくなっている。今回の載荷条件で弾性梁を考えると、四点曲げの最大荷重は 1.5 倍、剛性は 1.35 倍大きくなる。実験では最大荷重が 1.55, 1.41, 1.68, 1.45 倍、初期剛性が 1.48, 1.51, 1.64, 1.38 倍であり、概ね同様の値となっている。詳細には積層構成を考慮する必要がある。また、四点曲げ供試体作製に用いたプリプレグは、繊維目付はほぼ同じであるが、樹脂含有率が大きく、結果として供試体板厚も少し大きくなっている。以上により最大荷重と初期剛性が大きくなったものと考えられる。

最大荷重と初期剛性は、供試体長辺方向となる積層板中の 0 度とそれに近い配向角度の層数と中立軸からの位置の影響が大きいものと考えられる。0 度層数が最も多い CP の最大荷重と初期剛性が 4 種類の中で最も大きい。詳細な理論的な考察については積層理論等を用いて検討する必要がある。

(2) エネルギー吸収量

各供試体の第一ピーク荷重前のエネルギー吸収量 (図-11)、第一ピーク荷重後のエネルギー吸収量 (図-12)、及びそれらの比 (図-13) について示す。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、第一ピーク荷重後で変位 15mm までのエネルギー吸収量を第一ピーク荷重前のエネルギー吸収量で割ったものである。今回は最も最終変位の小さい SH36 に揃えて変位 15mm までとしている。三点曲げの SH36-a については線形域の剛性が変化していること、第一ピーク荷重時の変位が 15.46mm と 15mm を超えていることから、以下の考察からは除外した。

第一ピーク荷重前の各供試体のエネルギー吸収量について、三点曲げと四点曲げの CP の平均値は 20.13kN-mm、

31.75kN-mm、SH36 は 18.17kN-mm、24.91kN-mm、SH18 は 10.41kN-mm、17.35kN-mm、SH9 は 9.27kN-mm、14.31kN-mm となっており、CP、SH36 の値の高いグループと SH18、SH9 の値の低いグループに分けられる。これは図-10の初期剛性と第一ピーク荷重の違いを反映した傾向となっている。

第一ピーク荷重後で変位 15mm までのエネルギー吸収量はそれぞれ、CP が 5.58kN-mm、9.12kN-mm、SH36 が 4.60kN-mm、6.13kN-mm、SH18 が 9.63kN-mm、15.38kN-mm、SH9 が 10.31kN-mm、12.88kN-mm となっている。こ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。これらの値は荷重-変位曲線に見られる通り、配向角間隔が小さくなるにつれて第一ピーク荷重後の軟化挙動が抑制され、残存荷重の保持が大きくなることにより得られている。

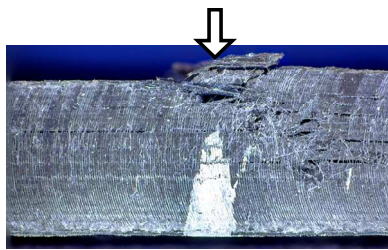
最後に、エネルギー吸収量の比を示す。この値も対象範囲とする変位の値に依存するため、あくまで一つの指標である。三点曲げと四点曲げのそれぞれで、SH18 が 0.93, 0.89, SH9 が 1.12, 0.90 と、CP の 0.28, 0.29, SH36 の 0.26, 0.25 の値を大きく上回る結果となった。SH9 は、最大荷重と第一ピーク荷重では劣るものの、SH18 よりも刻み角の小さならせん構造にすることにより、エネルギー吸収量の比において、SH18 を上回る結果となった。

4. 損傷・破壊形態

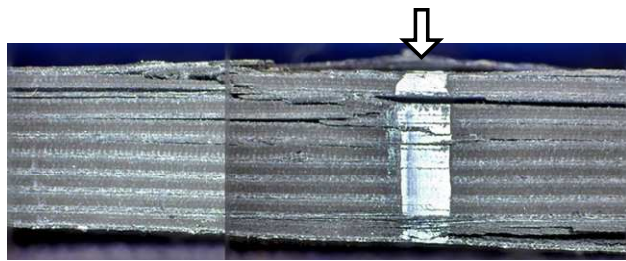
図-14と図-15に、各積層構成の代表的供試体について載荷後の破壊状況 (顕微鏡画像) を示す。

図-14(a)に示す三点曲げ載荷の CP-a では、載荷点より右下斜め方向に座屈状に破断するのと合わせて中立軸より圧縮側で層間剥離が数箇所起きている様子が見られる。供試体 3 体全体として、破壊は全て圧縮側より発生し、他の積層構成よりも破断と剥離は少な目であり、引張側での損傷が起こることはなかった。一方で、図-15(a)に示す四点曲げ載荷の CP-b の破壊状況は大きく異なる。載荷点で曲げ支間側に斜め下方向に破断が生じており、曲げ支間内では中立軸より圧縮側で数箇所の層間剥離が曲げ支間全長に渡って発生している。また、引張側も載荷点位置で鉛直方向に破断しており、曲げ支間内に同様の層間剥離が 2 箇所発生している。供試体 4 体全体として、程度の差はあるものの同様に、載荷点位置の破断と曲げ支間内の圧縮側と引張側の層間剥離が発生した。CP-d においては載荷点位置において完全に二つに割れている。

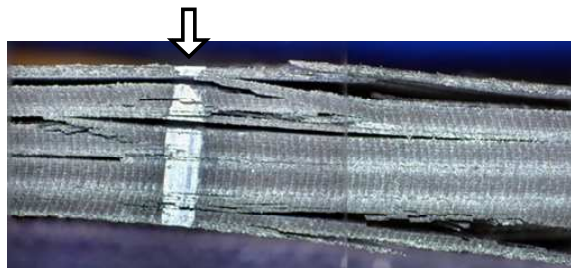
図-14(b)は三点曲げ載荷後の SH36-a の破壊状況を示しているが、CP と異なる点は圧縮側での層が供試体軸方向でつぶれて全体として破断となることはなく、5 箇所ほどの層間剥離が階段状につながっている形態が見られることである。また、最下層の引張側で層間剥離が発生したことである。特徴としては、圧縮側で多くの層間剥離がみられ、引張側での剥離発生後は、圧縮側の剥離はあまり進展



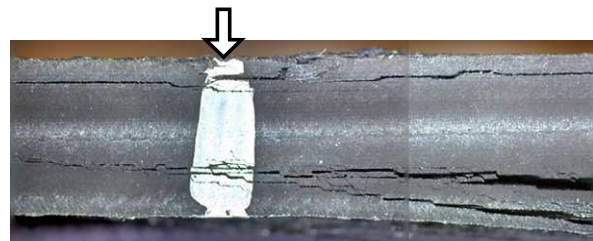
(a) CP-a



(b) SH36-a



(c) SH18-c

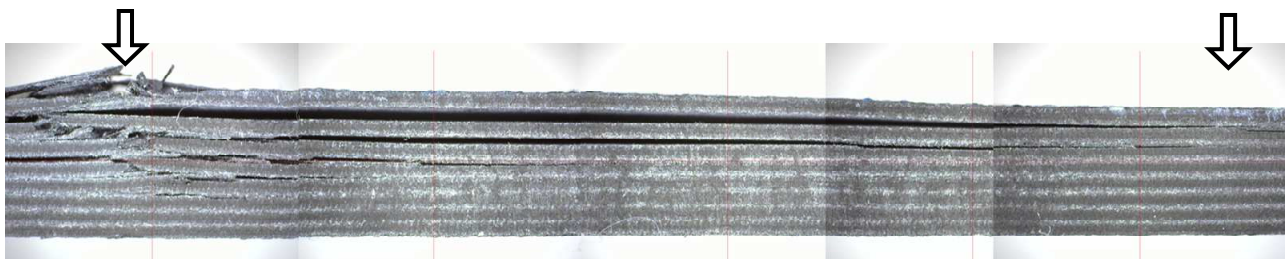


(d) SH9-a

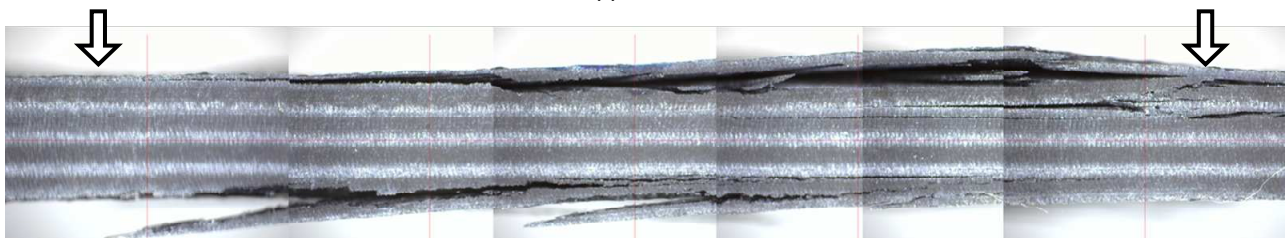
図-14 三点曲げ供試体の破壊状況 (矢印は載荷点)



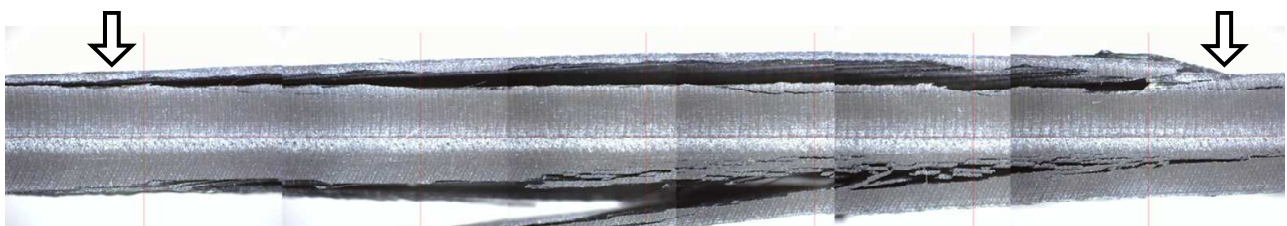
(a) CP-b



(b) SH36-b



(c) SH18-c



(d) SH9-c

図-15 四点曲げ供試体の破壊状況 (矢印は載荷点)

しなかった。引張側の剥離は少なく、寸法も大きくはなかった。一方で図-15(b)に示す四点曲げ供試体 SH36-b でも載荷点位置において圧縮側で多くの層間剥離が生じて階段状につながっている形態が見られる。しかしながらこれらの層間剥離の一部は曲げ支間全長に渡り進展しており、三点曲げ供試体よりも長い。SH36-a も概ね同様に、載荷点位置で階段状につながる層間剥離が複数と曲げ支間全長に進展した層間剥離が一部観察されたが、SH36-c では加えて引張側にも層間剥離が1箇所発生した。SH36-d では圧縮側に大きな層間剥離が1箇所だけ発生した。このため図-5(b)の荷重-変位挙動に現れた大きな荷重降下が生じた。

図-14(c)に示す三点曲げの SH18-a の顕微鏡画像を見ると、SH36 と同様に圧縮側に数箇所の層間剥離があり、それらが一部斜めに進展している様子が見られる。また、SH36 と同様に、載荷の進展に伴い引張側での層間剥離も確認されている。ここで、引張側の層間剥離は同一の層間に留まらず上の層間へと階段状に進展している特徴的な形態が見られる。図-15(c)に示す四点曲げ供試体においてもこの特徴的な形態が明瞭に見られ、2箇所の層間剥離が階段状に複数層間をまたいで進展している様子が観察される。一方圧縮側では載荷点位置から斜め下方向に破断もしくは層間剥離がつながっており、曲げ支間内において長い層間剥離が発生している。三点曲げと四点曲げは共に、他の供試体も概ね同様の破壊状況を示している。

最後に SH9 を示す。図-14(d)の三点曲げ供試体 SH9-a を見ると、圧縮側での破断はなく、剥離は大きいものの数は少ない。一方で、引張側で階段状につながる多くの界面剥離が観察されたことは SH18 と同様に他の積層構成と大きく異なる点である。この引張側での界面剥離は非常に特徴的であり、SH18 よりも顕著に層間剥離が複数の層間を階段状に上がるように発生したことが分かる。図-15(d)の四点曲げ供試体 SH9-c においてもこの特徴的な破壊形態が明瞭に見られる。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。三点曲げと四点曲げは共に、他の供試体も概ね同様の破壊状況を示している。

以上より、らせん積層において層間の配向角度差が小さくなるにつれて、圧縮側では載荷点を起点とする破断・層間剥離が少なくなるとともに層間剥離が大きく広がり、引張側では層間剥離が多く発生する傾向が確認された。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。これはらせん積層により層間剥離が発生した層間を進展するのではなく、破壊規準を満たした方向に向きを変えて進展していることを示している。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。一方で、板厚方向の損傷深さは小さくなっており、顕微鏡による側面画像によると中立軸を挟んだ部分は健全に見える。このことが第一ピーク荷重後の荷重降下を抑えたとともに、残存荷重に貢献していると

考えられる。

三点曲げと四点曲げでは断面力分布が異なるため、三点曲げにおいては載荷点周辺で見られた損傷・破壊形態が四点曲げでは曲げ支間内に広がる傾向が確認された。ただ、いずれの載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、3種類のらせん積層のCFRPを作製し、直交積層のCFRPと、三点曲げおよび四点曲げの載荷条件下で、曲げ挙動と損傷・破壊挙動を比較した。3種類のらせん積層は40層の積層板において、層間の配向角度差を36度、18度、9度としたものである。

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。これに伴い第一ピーク荷重前後のエネルギー吸収量の比はSH18とSH9において大きく向上した。四点曲げ載荷の供試体は三点曲げと比較して大きい最大荷重と初期剛性を示した理由は、プリプレグの樹脂含有率が大きく製作板厚が大きくなったためと考えられる。

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、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が大きく広がり、引張側では層間剥離が多く発生する傾向を確認した。総じて、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、三点曲げと四点曲げのいずれの載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。

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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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) Cheng, L., Wang, L., and Karlsson, A. M. : Image analysis of two crustacean exoskeletons and implications of the exoskeletal microstructure on the mechanical behavior, *Journal of Materials Research*, Vol. 23, No. 11, pp. 2854-2872, 2008.
- 6) Cheng, L., Wang, L., and Karlsson, A. M. : Mechanics-based analysis of selected features of the exoskeletal microstructure of *Popillia japonica*, *Journal of Materials Research*, Vol. 24, No. 11, pp. 3253-3267, 2009.
- 7) Weaver, J. C., Milliron, G. W., Miserez, A., Evans-Lutterodt, K., Herrera, S., Gallana, I., Mershon, W. J., Swanson, B., Zavattieri, P., DiMasi, E., and Kisailus, D. : The stomatopod dactyl club: a formidable damage-tolerant biological hammer, *Science*, Vol. 336, pp. 1275-1280, 2012.
- 8) 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.
- 9) 日本規格協会：繊維強化プラスチック-曲げ特性の求め方 JIS K 7017-1999 平成 11 年 10 月 20 日制定, 日本規格協会, 1999.

(2018. 6. 22 受付)

INVESTIGATION ON FLEXURAL BEHAVIORS AND FAILURE MODES OF HELICOIDALLY LAMINATED CFRP

Takashi MATSUMOTO, Ikuma ISHIZAWA, and Kenta KONDO

CFRP is a composite with lightweight, high stiffness, and high strength, however it behaves in a brittle manner with localized fracture. In the current study, helicoidally laminated CFRP specimens replicated after a biological body are examined in flexure for the purpose of mitigating a brittle behavior. Four kinds of CFRP specimens were fabricated by stacking unidirectional prepregs with constant fiber angle difference between adjacent laminas. Three-point and four-point flexural tests were conducted, and damage and fracture processes were observed closely. Compared to a cross-ply laminate CFRP specimen, helicoidally laminated CFRP specimens show the increased residual strength after the first peak, and their postpeak energy absorption ratio to prepeak is highly improved. Due to the unique damage processes of helicoidally laminated CFRP specimens, it is found that localized fracture is mitigated with reduced damage depth.