(21) らせん積層CFRPの曲げ挙動と破壊形態

松本 高志1・細目 貴之2・石澤 郁馬3・近藤 健太4

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十三条西8丁目) E-mail:takashim@eng.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学 大学院工学研究院北方圈環境政策工学専攻(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 大学院工学研究院北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目)

> 4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)

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.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

FRP(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、圧縮縁において座屈を生じるか、圧縮強 度が引張強度より低いために圧壊を生じる.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靭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^{1,5,0}.

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 ^D. 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、



図-1 らせん積層(左)と直交積層(右)

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,損傷は深さが減少して面内に大きく広がることと, 2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,既往の研究では載荷中の 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(炭素繊維強化ポリマー)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.曲げ載荷実験を行い、通常行われる 直交積層と比較して、曲げ挙動と破壊形態を詳細に観察 することを目的としている.

2. 曲げ載荷実験

(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侵させたシート 状のもので,かつ硬化させる前のものである. 含侵され た樹脂は 130°C硬化型のものである. 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に, 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 ⁷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,180 ×40mmの寸法に切断した.平均厚さは4.69mmである. 供試体は3体作製され,中央から作製した供試体をb, その両隣をa,cと名付けた.以上の手順により積層構 成毎に3体の供試体を作製した.

(2) 載荷方法と計測項目

載荷は JIS 規格⁸を参考にして 3 点曲げ載荷により行 い,供試体長 180mm に対して支間長 150mm とした.全

表-1 供試体の積層構成

名称	積層構成
СР	[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

21 - 2

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.載荷は載荷速度2.0mm/minの変位制御として最大変位を30mmまでとした.載荷は大きな荷重降下が3回起きるまで行い,3回目の荷重降下直後に載荷を終了することとした.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-3から図-6において,各積層構成の供試体3体の荷 重-変位関係を示す.供試体3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回 程度の大きな荷重降下を示して載荷終了となった(図-3). CP-a と-c は 3 回目の荷重降下を経て載荷打ち切り 終了とした. 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. SH36も CP と同様の挙動 を示しているが、荷重降下の階段状の傾きは緩和されて いる(図-4). 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. 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-5).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. こ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. 最後に SH9 は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-6).載荷はこの後の大きな荷 重降下により終了とした.

4種類の積層構成において, CP と SH36 が曲げ載荷に おいて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 ー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 CP が 3.42kN, SH36 が 2.92kN, SH18 が 2.26kN, SH9 が 2.11kN であった(図-7). 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.一方で,最大荷 重時の変位の平均値は CP が 11.73mm, SH36 が 13.47mm,



21 - 3

SH18が13.55mm, SH9が8.82mmとなり, SH18が最大で, SH36, CPと続き, SH9が最小の値を示した(図-8).

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(図-9).第一ピーク荷重と最大荷重 が異なるのは SH18 の 3 体であり,第一ピーク荷重の平 均値が 2.11kN 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 を示した.初期 剛性については原点と第一ピーク荷重点により算出して まとめた(図-10).ただし 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 時点とを用いている. 初期剛性の平均値は,CP が 0.291kN/mm,SH36 が 0.225kN/mm,SH18 が 0.213kN/mm,SH9 が 0.239kN/mm と なり,CP が最大で,SH9,SH36 と続き,SH18 が最小の 値を示した.

最大荷重と初期剛性については、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 最も大きく、0度層の数が次に多いSH36の最大荷重が2 番目に大きくなり、0度に近い層の数が多いSH9の初期 剛性が2番目に大きくなる理由と考えられるが、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台形公式によ 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. 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は, CP, SH36, SH18, SH9 の順で平均値が 20.13kN-mm, 18.17kN-mm, 10.41kN-mm, 9.27kN-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の初期剛性の違いを踏 まえても,図-9の第一ピーク荷重の傾向と概ね同様であ り,第一ピーク荷重前の線形域の面積に他ならない.

第一ピーク荷重後のエネルギー吸収量は、CP, SH36, SH18, SH9 の順で, 5.58kN-mm, 4.60kN-mm, 9.63kN-mm, 10.31kN-mm となっている.これは荷重-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











くなったためである.

最後に, エネルギー吸収量の比は, SH18 が 0.93, SH9 が 1.12 と, CP の 0.28, SH36 の 0.26 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·破壊挙動

図-14から図-17に、各積層構成の代表的供試体につい て側面の載荷中の損傷過程(ビデオ画像)と載荷後の破 壊状況(顕微鏡画像)を示す.写真中の赤い線はその時 点で新たに見られた損傷を表し、白い線は既に発生した 損傷を表している.また、図-3から図-6の荷重-変位曲線においてビデオ観察を行った時点を赤丸で示しており、 観察は概ね荷重降下が起きた後のビデオ画像を用いている.

図-14に示す CP-a では、変位が 13.1mm の時(図-14(a)) に載荷点近くの圧縮側で座屈状に約 2mm の鉛直 方向の破断が生じた.また、圧縮側で水平方向の層間剝 離が 2 箇所確認された.16.2mm 時点(図-14(b))では、 座屈状の破断箇所から層間剥離が 2 箇所生じた. 17.2mm 時点(図-14(c))では、さらに 2 箇所で層間剝離 が発生した.最後まで引張側の層が剥離することはなか った(図-14(d)).顕微鏡画像(図-14(e))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圧縮 側で層間剝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.

図-15に SH36-a を示す. SH36-a では,変位 15.5mm 時 点(図-15(a))で,圧縮側で大きな層間剝離が 1 箇所, 2mm 程の層間剝離が 1 箇所発生した.変位 17.4mm 時点

(図-15(b))で、さらに下側に4箇所の層間剝離が発生した.また、引張側でも3mm程の層間剝離が発生した.変位19.1mm時点(図-15(c))で、引張側で2箇所の層間剝離が発生し、圧縮側での層間剝離の進展は見られなかった.顕微鏡画像(図-15(d))は載荷後の破壊状況を示しているが、CPと異なる点は圧縮側での破断がほとんどなく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.

図-16に SH18-aを示す. SH18-aでは, 10.5mm 時点(図 -16(a))で, 圧縮側で2箇所, 引張側で1箇所層間剥離 が発生した. 13.8mm 時点(図-16(b))で, 圧縮側で4mm 程の層間剥離が2つ, 引張側で2mm 程の層間剥離が4 つ並行に並ぶように発生した. 18.6mm 時点(図-16(c)) で, 引張側にさらに層間剥離が2箇所発生した. 21.3mm 時点(図-16(d))では, すでに発生している層間 剥離が少し進展するだけだった. 顕微鏡画像(図-16(e))を見ると, CPと同様に圧縮側からの破断が見ら れているが, CPとは異なり一度目の荷重降下後も荷重 の保持が見られている. また, SH36と同様に, 載荷の 進展に伴い引張側での層間剝離も確認されている. 引張 側の層間剝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-17に SH9-a を示す. SH9-a では, 9.1mm 時点(図-17(a))で, 圧縮側で層間剥離が2箇所発生した. 11.5mm時点(図-17(b))で, 圧縮側で層間剝離が1つ,



21 - 6

引張側で層間剥離が 5 つ発生した. 13.6mm 時点(図-17(c))で,引張側で大きな層間剥離が発生し,すでに 発生していた層間剥離を巻き混むようにして進展した. 顕微鏡画像(図-17(d))を見ると,積層構成 SH9 では, 圧縮側での破断はなく,剝離は大きいものの数は少ない. 一方で,載荷終了前に引張側で多くの界面剥離が観察さ れたことは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特徴的であり,SH18 よりも顕著 に層間剝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.

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、圧縮側では亀裂・破断が少なくな るとともに層間剝離が大きく広がり、引張側では層間剝 離が多く発生する傾向が確認された.引張側の層間剝離 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剝離が発生し 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、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 全に見えている.このことが第一ピーク荷重後の荷重降 下を抑えるとともに、残存荷重に貢献していると考えら れる.

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、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.

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、圧縮側では亀裂・破断が少なく なるとともに層間剝離が大きく広がり、引張側では層間 剝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.

参考文献

- 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) Grunenfelder, L. K., Suksangpanya, N., Salinas, C., Milliron, G., Yaraghi, N., Henrera, 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.
- Yang, R., Zaheri, A., Gao, W., Hayashi, C., and Espinosa, H. D. : AFM identification of beetle exocuticle: Bouligand structure and nanofiber anisotropic elastic propeties, Advanced Functional Materials, 1603993, 2017.
- 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) 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...
- 8) 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...

FLEXURAL BEHAVIORS AND FAILURE MODES OF HELICOIDALLY LAMINATED CFRP

Takashi MATSUMOTO, Takayuki HOSOME, 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. Those CFRP specimens were fabricated by stacking unidirectional prepregs with constant fiber angle difference between adjacent laminas. Compared to a cross-ply laminate CFRP specimen, the residual strength after the first peak is increased, and the postpeak energy absorption ratio to prepeak is highly improved. Due to unique damage processes, it is found that localized fracture is mitigated with reduced damage depth.