

らせん積層 CFRP の曲げ荷重-変位関係

Bending load-displacement relations of helicoidal laminated CFRPs

北海道大学大学院工学院
北海道大学工学部
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 細目 貴之 (Takayuki Hosome)
学生員 石澤郁馬 (Ikuma Ishizawa)
正員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. はじめに

近年、高耐久性を有する構造材料の一つとして、炭素繊維強化ポリマー(Carbon Fiber Reinforced Polymer, 以下, CFRP)が注目されている。CFRP は炭素繊維と熱硬化性樹脂との複合材料であり、特徴として、鉄やアルミなどの金属材料よりも低密度でありながら、比強度と比剛性、耐腐食性に優れ、軽くて強い材料である。土木分野では、耐久性向上や長寿命化のために CFRP の活用が非常に期待されている。

しかしながら、CFRP は破壊時の挙動が脆性的であるため、主部材として用いる際には注意が必要であり、設計時には、安全係数を大きく設定せざるを得ない。

一方、別の分野では、生体模倣技術が近年注目を集めつつある。生物が持つ優れた機能や構造等を模倣することにより、工学等分野において今日までに多くの技術開発や製品の実用化が進められてきている。

その中でも、本研究では生物界の中でも最も強固な組織の一つであるとされるシャコの捕脚に着目した。シャコは捕脚を用いて、貝殻を叩き割り捕食をする。そのときの衝撃は自重の 1000 倍以上といわれているが、シャコはこの打撃の反力に耐えうる強靱な捕脚を持っている。シャコの捕脚は、繊維積層複合材料素材と似た構造をしており、図 1 に示すように捕脚の表層はキチン繊維がらせん状に角度を変えながら積層されていることが見出されている¹⁾。このらせん構造が、何らかの形で自らの打撃の反力に耐えうる強靱な性質を示していると考えられている。

以上の背景から、本研究では、生体模倣により CFRP の脆性的挙動の改善が可能かどうかを検討するために、4 種類のらせん積層 CFRP を自主製作して曲げ載荷実験を行った²⁾。本論文では、らせん積層が曲げ荷重-変位関係に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。以下では、最大荷重、初期剛性、エネルギー吸収量などの比較を示し、らせん積層が実際に脆性的挙動を改善する結果を得たことを報告する。

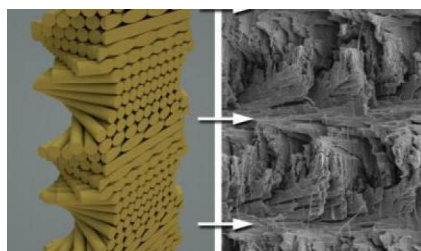


図 1 シャコのキチン繊維積層¹⁾

2. 実験概要

2.1 プリプレグ

本研究では、基材がエポキシ樹脂であるプリプレグを使用し、総目付 178.3g/m^2 、繊維目付 125.3g/m^2 、繊維含有率 29.7wt%である UD 炭素繊維プリプレグ(三菱レイヨン製)を用いた。硬化温度は 130°C である。

2.2 供試体

本研究では、表 1 に示す 4 種類の積層構成の CFRP を自主製作した。プリプレグは繊維が一方方向のシートとなっており、配向角は、図 2 のように繊維方向が長辺方向に平行な層を 0° の層とし、それを基準に、反時計回りに繊維がなす角度と定義する。

SH36 であれば、 0° , 36° , 72° , 108° , 144° と刻み、 $[0/36/72/108/144]_8$ と表記している。下付き文字は[]内のセットを繰り返した回数を示しており、積層枚数は 40 枚、上面は 0° の層として統一している。

曲げ載荷実験に用いた供試体は、製作した CFRP の平板である。表 1 に示す積層構成に対し、名称を CP, SH36, SH18, SH9 とする。標準寸法は長辺 180mm, 短辺 40mm, 厚さ 5mm である。また、それぞれの積層構成において 3 体ずつ供試体があり、それらの名称を以降 CP-a, CP-b, CP-c のように表す。

2.3 CFRP 成形方法

製作方法としては、図 3 に示すように、まず、カッターで指定した大きさ(CP は一辺 200mm, SH は一辺 290mm の正方形)に UD プリプレグを裁断する。次に、ビニール手袋を用いてプリプレグを積層し、繊維方向に圧力をかけて気泡を除去する。

続いて、積層したプリプレグを、外側からバキュームバッグ、ブリーザファブリック、穴あきリリースフィルムで覆い、シーラントテープで空気が入らないようにする。その後空気を抜きながら真空状態にし、加圧装置を用い、積層し真空状態にした CFRP を加圧した状態で炉内に置く。

加熱成形においては、炉内の温度が 80°C に達するまで昇温速度 1°C/min で温度を上げる。なお、炉内の温度は変圧器によって調整する。次に、 80°C を 1 時間維持し、その後 130°C まで昇温速度 1°C/min で温度を上げる。 130°C 到達後、 130°C を 2 時間維持する過程をとり、開始後翌日完成となる。

完成した CFRP 板から 3 体の供試体を切り出し、曲げ載荷に供する。

表 1 積層構成

名称	配向角
CP	$[0/90]_{20}$
SH36	$[0/36/72/108/144]_8$
SH18	$[0/18/36/54/72/90/108/126/144/162]_4$
SH9	$[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90/99/108/117/126/135/144/153/162/171]_2$

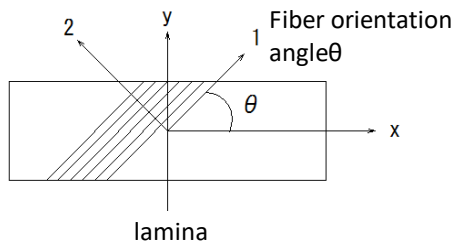


図 2 配向角の定義

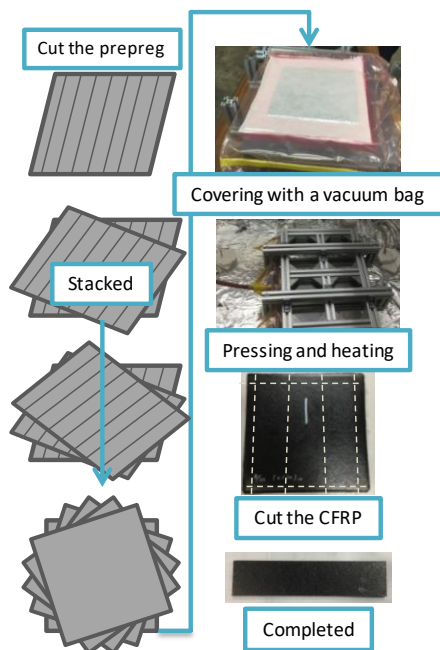


図 3 供試体製作手順

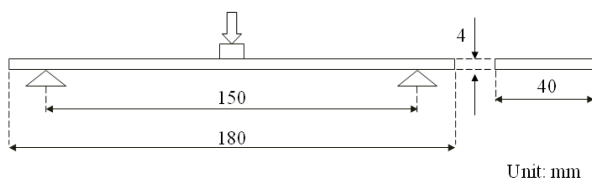


図 4 荷重条件

2.4 荷重条件

図 4 に荷重条件を示す。荷重は 3 点曲げとし、スパン長とせん断スパン長はそれぞれ 150mm と 75mm である。荷重装置にはオートグラフ(SHIMADZU AG-1250kN)を用い、荷重速度を 2.0mm/min とし最大変位 30mm まで変位制御で荷重を行った。荷重は大きな荷重降下が 3 回起きるまで行い、3 回目の荷重降下後すぐに荷重を止めることに統一した。

また、スパン中央下面軸方向にひずみゲージを設置しひずみの計測を行った。また、荷重中は供試体側面の動画撮影も行った。

3. 実験結果

3.1 荷重－変位曲線

図 5, 6, 7, 8 に CP, SH36, SH18, SH9 の荷重－変位曲線を示す。荷重－変位曲線に小さな差異はあるものの、同じ積層構成において、ほぼ同様の挙動を示した。

CP は、大きな層間剥離が見られず、大きなひび割れ音とともに大きな荷重降下が 3 回起き終局を迎えた。また、3 体とも破壊は全て圧縮側から起きた。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 は、CP と同様に大きな破壊音とともに荷重降下が起き、ひび割れが発生していた。CP と大きく異なっていたのは、供試体の最下面にあたる層、すなわち引張面からの剥離が生じていたことである。

SH18 も、CP と同様に圧縮側からの破壊が起こる結果になった。しかし、CP とは一度目の荷重降下後の挙動が大きく異なり、荷重降下後に荷重の保持が見られた。さらに、SH36 と同様に、荷重を進めていくと最下層において引張破壊も確認できた。また、CP に比べて引張に強い配向角が 0°の層が少ないことにより、層間剥離が顕著に確認された。そのため、最大荷重も CP に比べて低くなったものと考えられる。

SH9 は、他の積層構成の結果とは異なり、供試体上面からの圧縮破壊とほぼ同時に下面からの引張破壊も確認された。これは、SH18 以上に引張に強い 0°層が減少したことによるものだと考えられる。また、他の 3 種類の供試体に比べて、変位が小さい段階(約 15mm)で大きな破壊が生じ、実験続行不能になった。

以上から、供試体の積層構成において、刻み角が小さくなるほど、一度目の荷重降下後の荷重の保持が明瞭に確認できた。CP においては大きな荷重降下が数回見られるのに対し、刻み角が小さい SH9 では一度しか見られず、CP と比較して、らせん積層にすることで脆性的挙動の改善が可能であることを確認できた。

しかしながら、SH36 においては、SH18, SH9 と比較すると、最大荷重後の挙動が CP に類似しており、脆性的挙動の改善にまでは至っていないものと考えられる。

SH9 の最大荷重は SH18 とほぼ変わらないものの、前述したように、SH9 は一度目の荷重降下時に圧縮破壊と引張破壊がほぼ同時に起きた。これによる著しい断面の減少が、SH18 に比べて大きな変位にまで耐えることができないという結果に影響したと考えられる。

3.2 最大荷重と初期剛性

図 9, 10, 11 に CP, SH36, SH18, SH9 それぞれの最大荷重と平均値, 最大荷重時の変位と平均値, 初期剛性と平均値を示した。

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 という結果になった。直交積層である CP から, 刻み角が小さくなり, らせん積層に近づくにつれて, 最大荷重は減少していく結果となった。一方で最大荷重時の変位の平均値は, CP が 11.73mm, SH36 が 13.47mm, SH18 が 13.55mm, SH9 が 8.81mm となり, 最大荷重は CP が最大であったが, 変位においては, SH18 が最大という結果になった。これは, 配向角が 0° の層が少なくなり, 引張に強い層が減ったことで耐荷力は減少したが, 载荷を進めていくと複数の層で小さな層間剥離が起きることでエネルギーを吸収し, 大きな荷重降下につながらず, 変位が最大となったものと考えられる。SH9 の最大荷重時の変位が小さくなったのは, 前述した通り, 圧縮破壊と引張破壊が同時に起き, 断面が小さくなってしまったためであると考えられる。

初期剛性の平均値は, CP が 0.29kN/mm , SH36 が 0.22kN/mm , SH18 が 0.17kN/mm , SH9 が 0.24kN/mm となり, CP が最大, SH18 が最小となった。SH9 が CP の次に大きな値となったのは, 0° 層に近い層が増えたことで, 最大荷重には寄与しなかったものの初期剛性には影響を与える結果となったと考えられる。

3.3 エネルギー吸収量

図 12, 13, 14 に, 各供試体の最大荷重前のエネルギー吸収量, 最大荷重後のエネルギー吸収量, 及びそれらの比について示す。ここで, エネルギー吸収量は, 荷重－変位曲線における曲線から台形公式を用い, 求めた面積である。また, エネルギー吸収量の比は, 最大荷重後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。

最大荷重前の各供試体のエネルギー吸収量は, CP, SH36, SH18, SH9 の順に小さくなっている。これは, 刻み角が小さくなり, らせん積層に近づいていくことで, 強度自体が低くなってしまったため, エネルギー吸収量が小さくなってしまったと考えられる。

しかしながら, 最大荷重後のエネルギー吸収量は, SH36 を除き, 刻み角が小さくなるほど大きくなっている。これは前述した荷重－変位曲線からも, 最大荷重後の荷重の保持が大きいことが確認できる。そのために, 最大荷重後もエネルギーを吸収することができたことによるものであると考えられる。

図 14 に示すエネルギー吸収量の比の平均値は, SH18 が $0.85\text{kN}\cdot\text{mm}$, SH9 が $1.01\text{kN}\cdot\text{mm}$ と, CP の $0.28\text{kN}\cdot\text{mm}$, SH36 の $0.25\text{kN}\cdot\text{mm}$ という値を大きく上回る結果となった。SH9 は, 強度には課題があるが, 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。

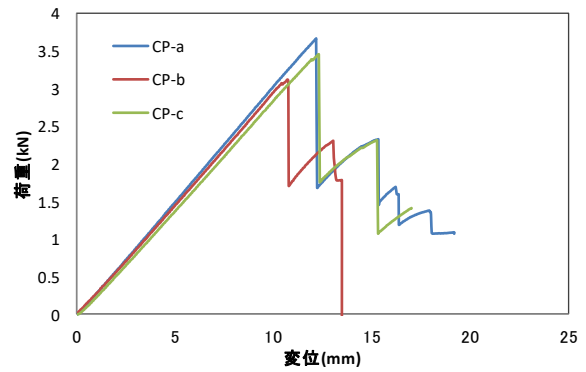


図 5 荷重－変位曲線(CP)

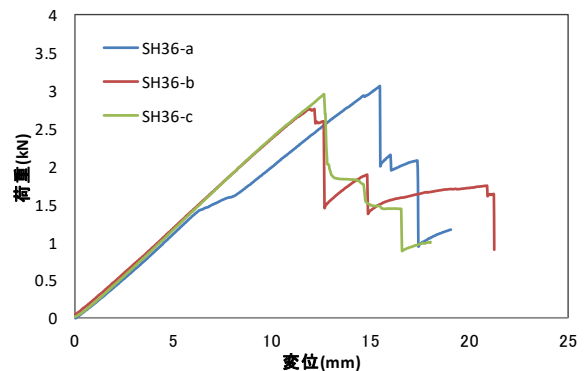


図 6 荷重－変位曲線(SH36)

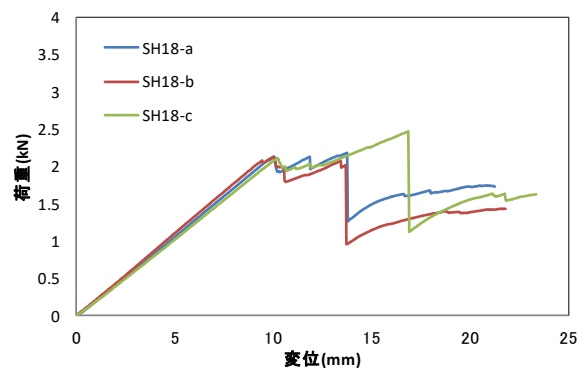


図 7 荷重－変位曲線(SH18)

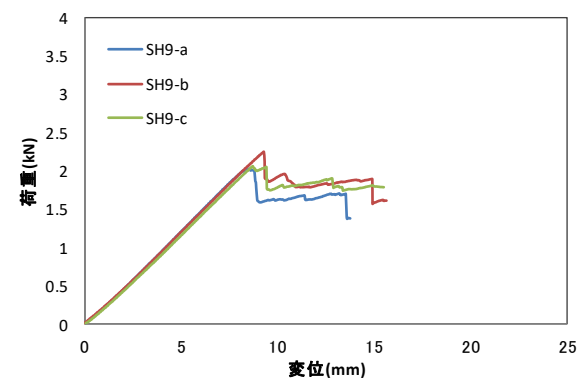


図 8 荷重－変位曲線(SH9)

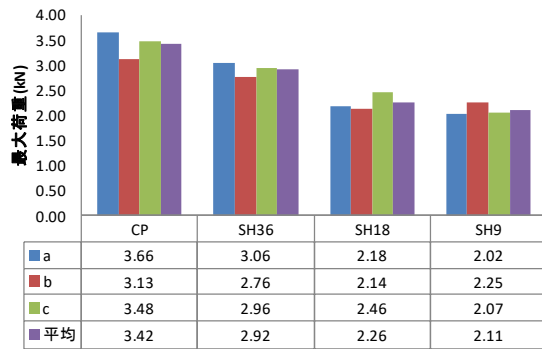


図 9 最大荷重(kN)

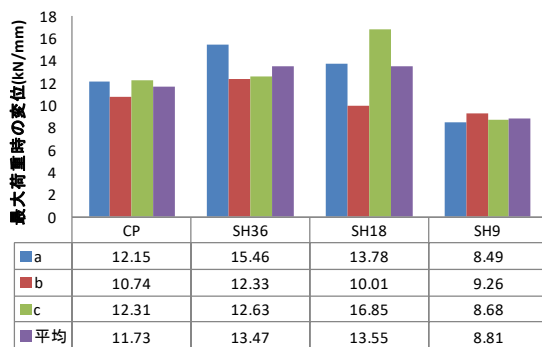


図 10 最大荷重時の変位(mm)

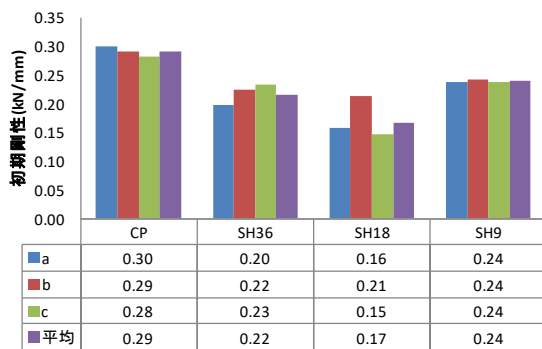


図 11 初期剛性(kN/mm)

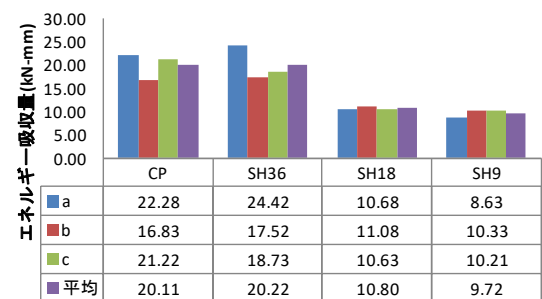


図 12 エネルギー吸収量 (最大荷重前)



図 13 エネルギー吸収量(最大荷重後)

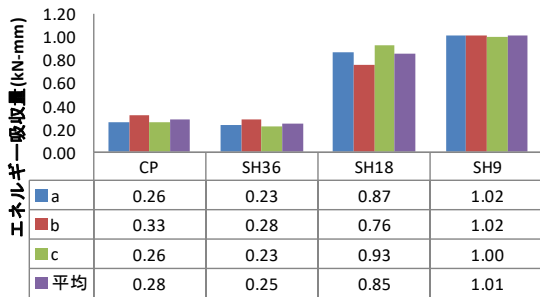


図 14 エネルギー吸収量の比

4. まとめ

本研究では、らせん積層が曲げ荷重－変位関係に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、荷重－変位関係から最大荷重、初期剛性、エネルギー吸収量の比較を行い考察したものである。

らせん積層にすることで最大荷重は低下してしまい、強度には問題点が残る結果となった。SH18, SH9の供試体においては、CP, SH36と比較して最大荷重後のエネルギー吸収量が大きくなるという結果となった。しかしながら、SH9のように刻み角を小さくすると、破壊が圧縮だけでなく、引張からも起きてしまうことで断面が減少し、終局状態に至る変位が小さくなってしまったことを確認することができた。

以上より、らせん積層にすることで、エネルギー吸収量の比は大きなものとなり、最大荷重や最大変位にはまだ問題点があるが、らせん積層が曲げ荷重－変位関係に及ぼす影響が明らかとなり、らせん積層にすることにより脆性的挙動を改善することができるという結果が得られた。

参考文献

- 1) L.K.Grunenfelder, N.Suksangpanya, C.Salinas, G.Milliron, N.Yaraghi, S.Herrera, K.Evans-odt, S.R.Nutt, P.Zavattieri & D.Kisailus: Bio-inspired impact-resistant composites, Acta Biomaterialia, pp3997-4008, 2014
- 2) 在家頌一, 細目貴之, 松本高志: らせん積層 CFRP の曲げ特性に関する実験, 第 72 号土木学会北海道支部論文報告集, A-15, 2015