

# らせん積層 CFRP の 4 点曲げ挙動に関する実験

## Four-point flexural behaviors of helicoidally laminated CFRPs

北海道大学大学院工学院  
北海道大学工学系技術センター技術部  
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 石澤郁馬(Ikuma Ishizawa)  
正会員 近藤健太(Kenta Kondo)  
正会員 松本高志(Takashi Matsumoto)

### 1. 研究背景

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るとともに、比強度と比剛性、耐腐食性に優れる、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点に注意が必要である。

一方で、近年注目が高まっている分野の一つに生体模倣技術がある。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。本研究では生物界の中で最も強固な構造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、捕食の際に貝殻を叩き割る。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る強靱な捕脚を持っている。図 1 に示す通り、シャコの捕脚は、繊維積層複合材料と似た構造をしており、表層部で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<sup>1)</sup>。シャコの捕脚は、このらせん構造によって自らの打撃の反力に耐える強靱な性質を有していると考えられている。

以上の背景から、これまでに、生体構造の模倣により 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、らせん積層構成の CFRP を自主製作して 3 点曲げ載荷実験を行っている<sup>2)3)4)</sup>。本研究では、同様のらせん積層構成の CFRP に対して 4 点曲げ載荷実験を行った。そして荷重-変位曲線における曲げ載荷条件の影響について比較検討を行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 プリプレグ

CFRP の成形にはプリプレグによるオートクレーブ法を用いた。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。使用したプリプレグは三菱レイヨン製の UD(Uni-Directional)プリプレグで一方向に繊維が整列されたものである。プリプレグ目付は 187.3(g/m<sup>2</sup>)、繊維目付は 124.3(g/m<sup>2</sup>)、繊維含有率は 66.4(wt%)となっている。

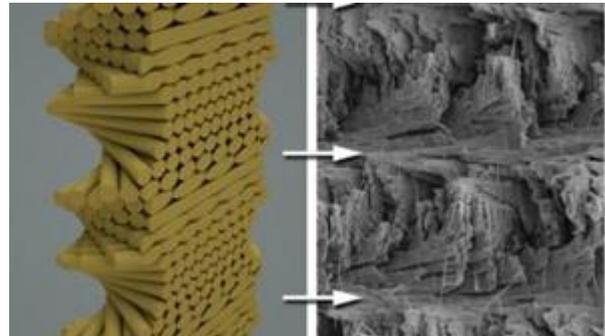


図 1 シャコのキチン繊維<sup>1)</sup>

表 1 供試体積層構成

名称	枚数	積層構成
CP	40	[0/90] <sub>20</sub>
SH36	40	[0/36/72/108/144] <sub>8</sub>
SH18	40	[0/18/36/54/72/90/108/126/144/162] <sub>4</sub>
SH9	40	[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90/99/108/117/126/135/144/153/162/171] <sub>2</sub>

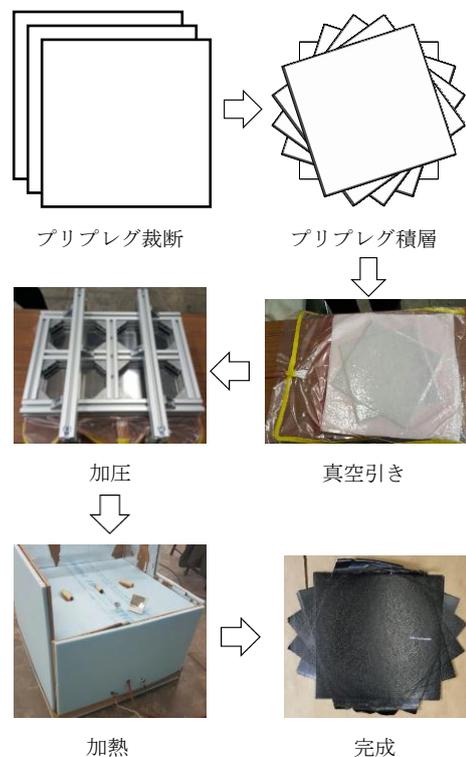


図 2 供試体製作手順

## 2.2 供試体

供試体はプリプレグを積層して製作する。供試体長軸方向を配向角  $0^\circ$  とし、角度を変えて積層していく。製作する供試体の積層構成は圧縮面を1層目とし、反時計回りを正方向として配向角を増やしながら積層していく。表1の[ ]内の配向角を順番に積層していき、繰り返し回数を下付きで表した。積層構成によって名称をCP, SH36, SH18, SH9とする。供試体の寸法は長辺180mm, 短辺, 40mm, 厚さ4mmである。

供試体は図2のようにオートクレーブ法を用いて製作した。積層構成CPの場合はプリプレグを200mm四方、それ以外の積層構成の場合は290mm四方に裁断し、積層構成に合わせて積層していく。その際に、層間に気泡が入らないよう、丁寧に圧力をかけながら貼り合わせていき、積層したプリプレグを穴あきリリースフィルム、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。その真空パックを上下2枚ずつ厚さ2mmのステンレス板で挟み、用意した加圧器具で全体を加圧する。加圧したプリプレグを電気炉に入れて室温から80度まで毎分1度ずつ温度を上げ、80度を1時間維持、さらに130度まで毎分1度ずつ温度を上げ、130度を2時間維持することでCFRPを成形する。完成したCFRPを供試体の寸法に合わせてカットすることで4本の供試体が完成する。それぞれにCP-1, CP-2, CP-3, CP-4のように名前を付ける。

## 2.3 荷重条件

荷重実験装置には、オートグラフ(SHIMADZU AG-125 0kN)を使い、荷重方法は4点曲げ荷重で、図3に示すように、支点間距離を150mm, せん断スパンは50mmとし、荷重速度2.0mm/minの変位制御で実験を実施した。一軸ひずみゲージは供試体の下面スパン中央に貼付してひずみの計測を行い、荷重実験中の供試体側面のビデオ撮影も行った。圧縮面長軸方向を配向角  $0^\circ$  とすることで、供試体の荷重条件を統一した。最大変位は30mmとし、荷重降下が3回起きるまで荷重を行い、3回目の荷重降下後に荷重を止めることで条件を統一した。

## 3. 実験結果

実験結果を横軸が変位(mm), 縦軸が荷重(kN)の荷重-変位曲線で示す。また、以下では最大荷重を計測した点を(最大荷重, 変位)で表す。供試体4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。

### 3.1 CP

図4に荷重時の荷重-変位曲線を示す。最大荷重時は各供試体で、(5.06, 12.05), (5.47, 12.05), (5.65, 13.02), (5.05, 12.27)となり、平均は(5.31, 12.35)であった。いずれの供試体も最大荷重を計測した後に残存荷重の保持は見られず、荷重が低下し終局を迎えた。

### 3.2 SH36

図5に荷重時の荷重-変位曲線を示す。最大荷重時は各供試体で、(3.84, 11.2), (4.35, 12.75), (4.20, 12.24), (4.10, 12.39)となり、平均は(4.12, 12.15)であった。最大

荷重は小さくなっており、曲線の形状はCPと同様に最大荷重を計測した後の残存荷重保持が見られず、荷重低下を繰り返して終局を迎えた。SH36-4のみで大きな荷重低下後に残存荷重保持の継続が見られたが、最終的にはほかの供試体と同程度のレベルに収まっている。

### 3.3 SH18

図6に荷重時の荷重-変位曲線を示す。この積層構成では一度荷重のピークを計測した後それと同等以上の第二の荷重ピークが見られた。初めのピークはそれぞれ(3.62, 10.27), (3.58, 10.11), (3.41, 9.91), (3.43, 10.11)となり、平均は(3.51, 10.10)であった。2回目のピークはそれぞれ(3.81, 14.83), (4.03, 15.12), (3.52, 12.98), (3.79, 14.96)となり、平均は(3.79, 14.47)であった。いずれの供試体も2回目の荷重降下後は継続した荷重保持が見られた。

### 3.4 SH9

図7に荷重時の荷重-変位曲線を示す。最大荷重時は各供試体で、(2.85, 9.46), (3.25, 9.38), (3.24, 9.28), (2.96, 9.36)となり、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。

## 4. 考察

CFRPのらせん構造が最大荷重と荷重-変位曲線に与える影響に着目して以下では述べる。

最大荷重においては、CPの最大荷重の平均は5.31kN, SH36は4.12kN, SH18の最初のピーク荷重の平均は3.51kN, 2回目のピーク荷重の平均は3.79kN, SH9の最大荷重の平均は3.07kNとなっており、らせん構造の刻み角を小さくしていくほど最大荷重が小さくなる傾向にあることがわかった。これは、最も強度特性に貢献する供試体長軸方向と一致する  $0^\circ$  の層が、CPでは20枚, SH36では8枚, SH18では4枚, SH9では2枚と、刻み角が小さくなるにつれ少なくなっているためと考えられる。

次に荷重-変位曲線について、らせん構造の繊維配向角が小さくなるにつれて最大荷重後の荷重降下が小さくなること、荷重の保持が長く継続することが確認された。これは圧縮方向に弱いとされる配向角  $90^\circ$  の層が刻み角を小さくするほど少なくなり、最大荷重後の荷重降下の際に破壊する層の数が少なくなるためと考えられる。

これらの詳しいメカニズムや、SH18のみで2度の荷重のピークが見られたメカニズムについては、ビデオ観察の分析などを通してさらなる検討が必要である。

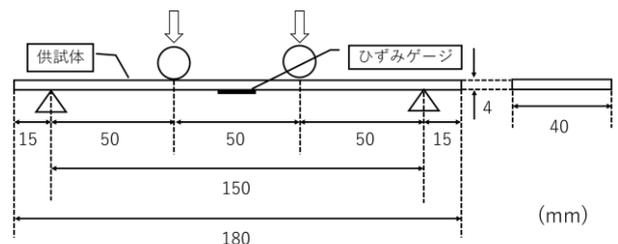


図3 荷重条件

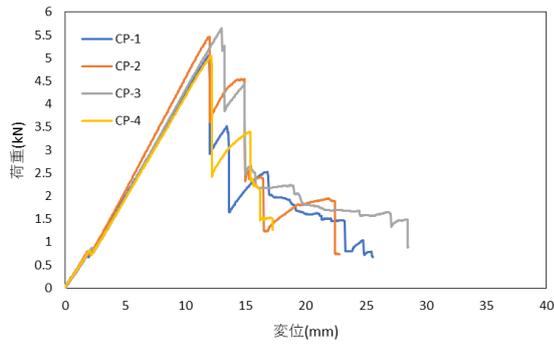


図4 4点曲げ載荷 CP 荷重 - 変位曲線

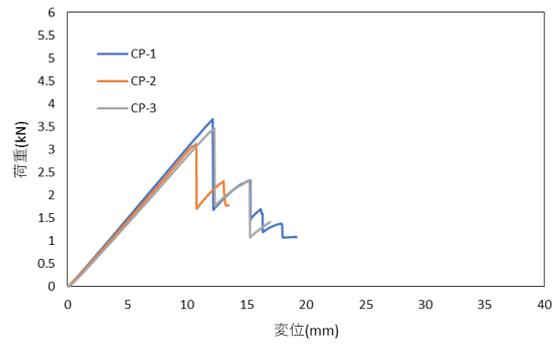


図8 3点曲げ載荷 CP 荷重 - 変位曲線

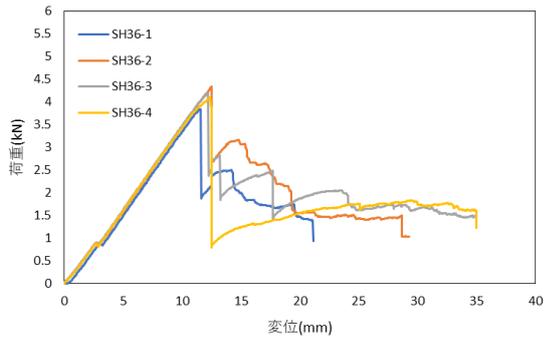


図5 4点曲げ載荷 SH36 荷重 - 変位曲線

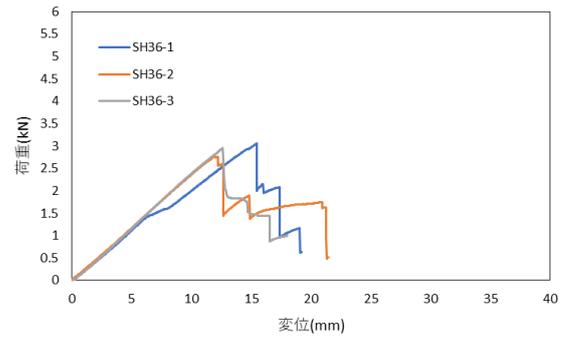


図9 3点曲げ載荷 SH36 荷重 - 変位曲線

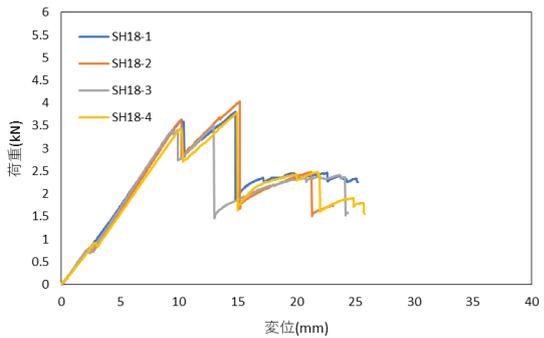


図6 4点曲げ載荷 SH18 荷重 - 変位曲線

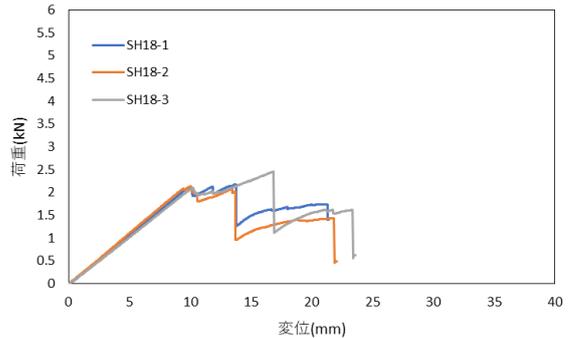


図10 3点曲げ載荷 SH18 荷重 - 変位曲線

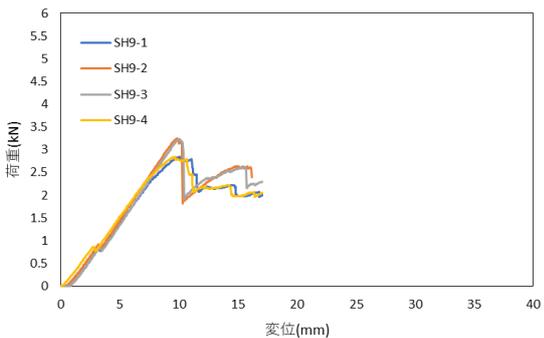


図7 4点曲げ載荷 SH9 荷重 - 変位曲線

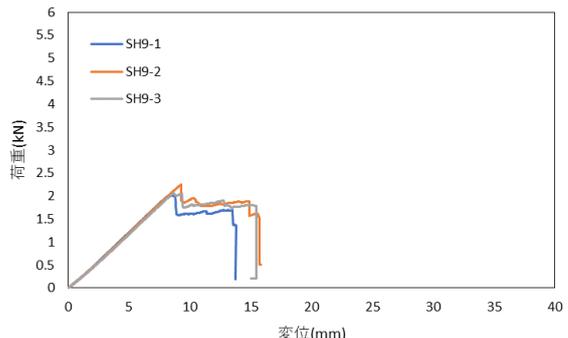


図11 3点曲げ載荷 SH9 荷重 - 変位曲線

## 5. 3点曲げ載荷実験との比較

図8から図11に、既往の研究で得られた3点曲げ載荷実験の荷重-変位曲線を示す<sup>3)</sup>。荷重条件と後述するプリプレグの違いはあるものの、同じ積層構成ではほぼ同様の傾向が見られる。

プリプレグの目付は  $178.3\text{g/m}^2$ 、繊維目付は  $125.3\text{g/m}^2$ 、繊維含有率は  $70.3\text{wt}\%$ である。4点曲げ載荷に使用したプリプレグと比べ、繊維含有率が大きいものであった。

### 5.1 CP

図8に示す通り、各供試体の最大荷重、最大荷重時変位は  $(3.66, 12.15)$ 、 $(3.13, 10.74)$ 、 $(3.45, 12.31)$ となり、平均は  $(3.42, 11.73)$ であった。最大荷重後は荷重の保持がほとんど見られず大きな荷重降下を繰り返して実験終了に至った。

### 5.2 SH36

図9に示す通り、各供試体の最大荷重、最大荷重時変位は  $(3.06, 15.46)$ 、 $(2.76, 12.14)$ 、 $(2.69, 12.70)$ となり、

平均は(2.92, 13.47)となった。CP に比べて最大荷重後の荷重降下の階段状の傾きは緩和されている。

### 5.3 SH18

図 10 に示す通り、各供試体の最大荷重、最大荷重時の変位は(2.18, 13.78), (2.02, 13.71), (2.46, 16.85)となり、平均は(2.26, 13.55)となった。この積層構成では荷重の第一ピークを迎えた後にもう一度荷重の上昇があり、最大荷重を迎えたものがあつた。そのため大きな荷重降下が起こる前のピークを最大荷重とした。最大荷重後は50%程度の荷重の保持が確認された。

### 5.4 SH9

図 11 に示す通り、各供試体の最大荷重、最大荷重時の変位は(2.02, 8.49), (2.23, 9.22), (2.05, 9.39)となり、平均は(2.11, 8.82)であつた。最大荷重後の荷重降下は小さく、荷重の保持も確認される。

### 5.5 考察

4点曲げ載荷と3点曲げ載荷の違いとして、4点曲げ載荷においては、中央曲げスパンにせん断応力が発生しないことが挙げられる。この違いに着目して、以上2つの実験結果について、最大荷重、最大荷重時変位、最大荷重後の挙動の3点において荷重-変位曲線をもとに比較検討を行っていく。

まずは最大荷重、最大荷重時変位について、平均値をもとに比べていく。4点曲げ載荷と3点曲げ載荷の最大荷重、最大荷重時変位をそれぞれ(a, b), (c, d)とし、その違いを(a-c, b-d)と表すことにする。まずCPについて(1.89, 0.61), SH36は(1.20, -1.33), SH18は(1.52, 0.92), SH9は(0.96, 0.55)となった。供試体の刻み角が大きくなるほど最大荷重が大きくなる傾向にあることが分かった。ここで、プリプレグの違いについて着目すると、3点曲げ載荷実験に用いたプリプレグの繊維含有率は70.3wt%、4点曲げ載荷実験に用いたプリプレグの繊維含有率は66.4wt%となっており、同じ条件で強度を比べた際には3点曲げに用いたプリプレグの方が強度は大きくなる。しかし実際には4点曲げ載荷実験の最大荷重が大きくなる結果となった。これは強度特性に貢献する層が配向角 $0^\circ$ の層であること、3点曲げ載荷実験ではせん断力によって破壊されていた層が4点曲げ載荷実験では破壊されないため、CFRPの曲げ応力に強い特性が大きく影響したためと考えられる。また、刻み角が大きくなるほど最大荷重の上り幅が大きくなるのは刻み角が大きくなるほど配向角 $0^\circ$ の層が多くなるためだと考えられる。最大荷重時変位に影響する要因については今後の検討が必要である。

次に最大荷重後の挙動の違いについて、全体的に最大荷重後の挙動に大きな変化は見られなかったが、実験終了に至るまでの変位が4点曲げ載荷実験の際は大きくなっていることが挙げられる。平均値をとって比較するとCPでは6.72mm, SH36では11.16mm, SH18では2.52mm, SH9では2.03mm大きくなっていた。これもせん断応力の影響がなくなったことにより配向角 $0^\circ$ の層が破壊されずに強度の保持に貢献したためと考えられる。詳細についてはビデオ画像による損傷・破壊形態の観察により今後検証する必要がある。

## 6. まとめ

本研究では、繊維積層複合材料であるCFRPの積層構成をらせん状にすることによるCFRPの脆性的挙動の改善可能性を4点曲げ載荷実験により検討した。直交積層と3種類のらせん積層の計4種類の刻み角について検討を行った。また、既往の研究で得られた3点曲げ載荷実験の結果との比較検討も行った。

刻み角を小さくしていくことによって、最大荷重後の荷重降下が小さくなることと荷重の保持が見られるようになったことから、らせん構造による脆性挙動の改善を確認することができた。一方で、刻み角を小さくしたとき、最大荷重は減少し最大荷重時変位も減少した。

3点曲げ載荷実験との比較により、4点曲げ載荷実験で使用しているプリプレグの強度の方が小さいにもかかわらず最大荷重は上回る結果となった。曲げスパンではせん断応力が発生しないがこれによる影響については今後ビデオ画像の分析により検証する必要がある。

## 参考文献

- 1)L. K. Grunenfelder, N. Suksangpanya, C. Salinas, GMilliron, N. Yaraghi, S. Herrera, K. Evans-Lutterrodt, S. R. Nutt, P. Zavattieri & D. Kisailus: Bio-inspired impact-resistant composites, *Acta Biomaterialia*, Vol. 10, No. 9, pp. 3997-4008, 2014.
- 2)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.
- 3)細目貴之, 石澤郁馬, 松本高志: らせん積層CFRPの曲げ特性, 第73号土木学会北海道支部論文報告集.
- 4)近藤健太, 松本高志: UDプリプレグを用いたらせん積層構成CFRPの作製精度と材料特性の考察, 第73号土木学会北海道支部論文報告集.