

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

Fabrication accuracy and material properties of spiral-laminated CFRP specimens made of UD Prepreg

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○正会員 近藤健太 (Kenta Kondo)
正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. まえがき

土木・建築の分野において、構造物の耐久性、維持管理性を向上させることは重大な課題である。このような背景の下、炭素繊維強化ポリマー(Carbon Fiber Reinforced Polymer、以下、CFRP と称す)は近年高耐久性を有する構造材料の一つとして着目されている。CFRP は炭素繊維を樹脂で固めたものであり、炭素繊維複合材料として様々な分野において使用されている。その特性として、高強度・高剛性、軽量、耐腐食性に優れる、等が挙げられる。これらは従来の構造材料である鋼材およびコンクリートにはない材料特性であり、CFRP は構造物の更なる耐久化を達成できる構造材料として研究されている。

また一方で、バイオミメティクスの応用も近年注目が高まっている技術分野の一つである。生物たち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新た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前足に着目した。シャコは捕食のために貝類をたたき割る際、自重の 1,000 倍以上もの打撃の反力に耐えうる強靱な性質の前足を持っている。この強靱さを実現している組織は、シャコの前足の表面が持つらせん状のキチン繊維であることが米カリフォルニア大学教授らのチームによって発見された¹⁾。キチン繊維とは、甲殻類の外骨格によく見られる平行に並んだ繊維であるが、シャコの場合ではその繊維がらせん状に回転しながら積層されており、その独特な構造が甲殻のひび割れ防止の要因と考えられている。図-1 に電子顕微鏡を用いて観察されたシャコ前足部の繊維構造¹⁾を示す。

以上の背景より、本論文はらせん積層構成及び比較の積層構成について CFRP 試料を作製し、その工程を示すとともに、3 点曲げ载荷実験結果について報告するものである。曲げ载荷実験結果においては、作製精度である板厚のばらつきが試料の材料特性に与える影響について考察し、既往の研究から得られた材料実験結果と本研究で得られた結果とを梁理論に基づいて比較し、板厚の違いが試料の特性に与える影響を検討することを目的とする。

2. CFRP 試料の作製工程

らせん積層構成 CFRP 試料の作製にあたり、三菱レイヨン社製のプリプレグを使用した。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。含浸してある樹脂の硬化を防ぐため、未使用時は冷凍庫にてロールを保管する。試料作成時、解凍のため冷凍庫からプリプレグを取り出し、常温で半日から一日静置

してから使用する。プリプレグには繊維の織り方や材料によっていくつかの種類に分けられるが、本論文ではシャコのキチン繊維構造を再現するため、カーボン UD(UniDirectional)プリプレグを採用した。これは炭素繊維を一方方向にのみ揃えたもので、適当な寸法に裁断したプリプレグを各積層構成に応じた配向角度に積層して使用する。表 1 に使用したプリプレグ及び炭素繊維の物性値を示す。含浸された樹脂には 130℃硬化型のマトリックス樹脂が使用されている。

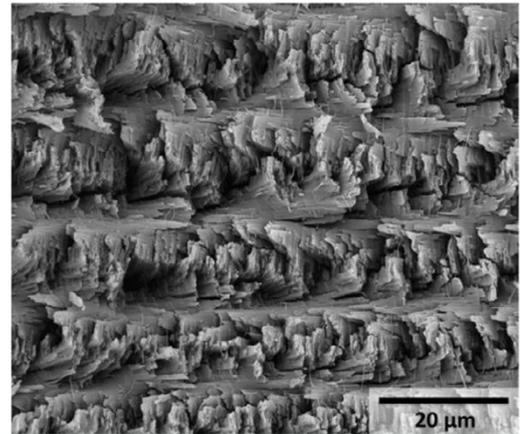


図-1 シャコ前足部の繊維構造

本研究では、繊維方向による積層パターンを 3 種類 ($[0/90]_{20}$ 、 $[0/45/90/135]_{10}$ 、 $[0/18/36 \cdots 162]_4$) とし、それぞれプリプレグを合計 40 枚積層して試料を作製した。まず、解凍後のプリプレグをカッターで $290 \times 290 \text{mm}$ ($[0/90]_{20}$ のみ $200 \times 200 \text{mm}$) の寸法で積層パターンごとに 40 枚ずつ切り出す。切り出したプリプレグにははく離紙およびはく離フィルムがそれぞれ上下面に貼ってある。そのため積層前に片面のはく離フィルムをはがし取り、切り出したプリプレグの繊維方向に対して所定の配向角度をつけた上で貼り合わせる。これを切り出したプリプレグの枚数分繰り返し、積層完了とした。

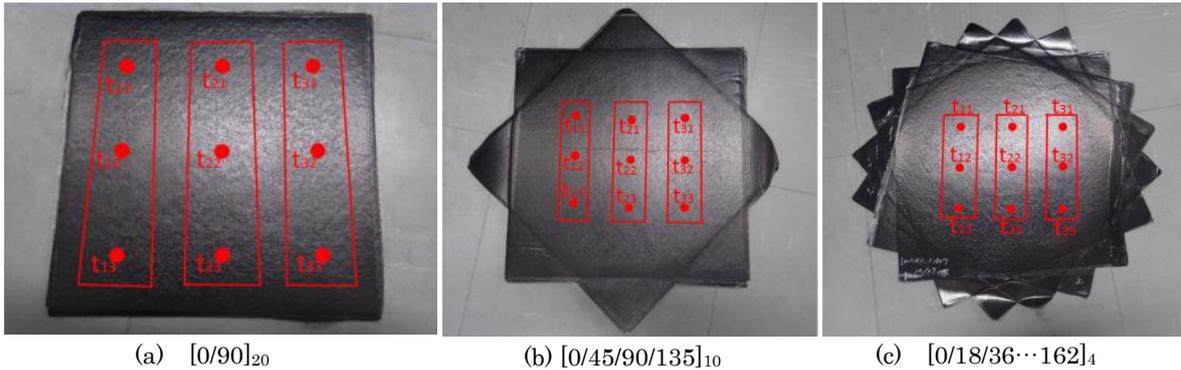
積層したプリプレグの成形には JIS 規格²⁾に基づいたオートクレーブ成形法を用いた。これは積層したプリプレグをシート(バッグ)で覆い、バッグ内で内包された空気や揮発物を真空除去し、加圧、加熱して硬化させる成形方法である。本研究では、積層したプリプレグを外側からバキュームバッグ、ブリーザーファブリック、穴あきリリースフィルムで覆い、シーラントテープで上下面と真空引口の真空ホースとを密着させた。上記の副資材は全て 150℃以上の耐熱性のものを用いた。真空ホースの先にドライ真空ポンプ(アルバック、DA-15D)を接続し、吸引を行った。バック内の気密性を確認後、2mm 厚のステンレス板を上下

表-1 プリプレグと炭素繊維の物性値

プリプレグ	
総目付(g/m ²)	167.1
繊維目付(g/m ²)	124.3
樹脂含有率(wt%)	25.6
弾性率(tf/mm ²)	24
厚さ(mm)	0.103
CFトウ(炭素繊維)	
引張強度(kgf/mm ²)	500
弾性率(tf/mm ²)	24.5
密度(g/cm ³)	1.82

表-2 試料寸法

試料名	積層構成	積層枚数	幅(mm)	長さ(mm)	厚さt ₂ (mm)
C1-a	[0/90] ₂₀	40	40.00	180.10	4.02
C1-b	[0/90] ₂₀	40	40.00	180.05	4.27
C1-c	[0/90] ₂₀	40	40.15	180.10	4.06
C2-a	[0/45/90/135] ₁₀	40	40.00	180.15	4.46
C2-b	[0/45/90/135] ₁₀	40	40.00	180.05	4.39
C2-c	[0/45/90/135] ₁₀	40	40.05	180.10	4.41
C3-a	[0/18/36...162] ₄	40	40.00	180.20	4.36
C3-b	[0/18/36...162] ₄	40	40.00	180.25	4.33
C3-c	[0/18/36...162] ₄	40	40.05	180.20	4.42



(a) [0/90]₂₀

(b) [0/45/90/135]₁₀

(c) [0/18/36...162]₄

図-2 プリプレグ積層物における試料位置

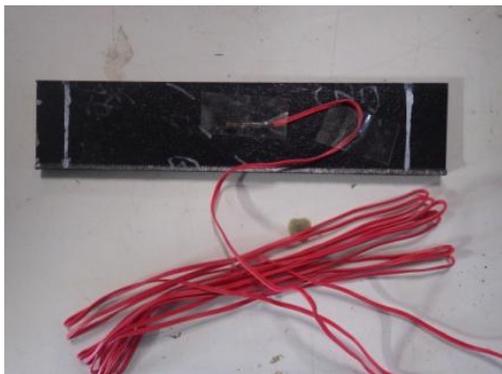


図-3 完成した CFRP 試料

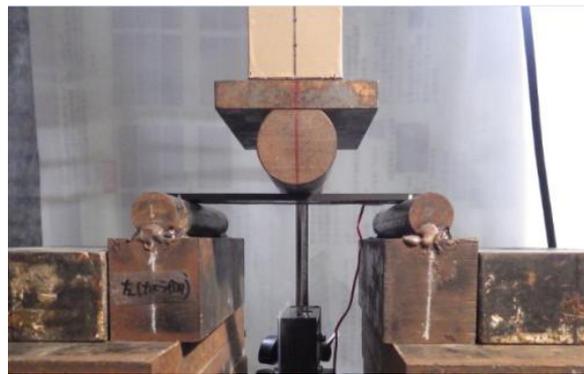


図-4 3点曲げ載荷試験の様子

に 2 枚ずつ設置し、万力 8 つで荷重を付加し、バッグ全体を加圧した。

加熱での成形のため、積層物および副資材は真空引きした状態のまま炉に設置する。加熱時、炉の温度設定は 2 段昇温とする。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。

加熱後の積層物は半日間放置後炉から取り出し、試料作製のため 180*40mm の寸法に裁断した。このとき積層板の周囲はトリミングした後、中央付近から試料を作製した。裁断、切削には精密タレット形立フライス盤(VHR-SD)を用いた。

本研究では先述した各積層構成あたり 3 体ずつ作製し、合計 9 体とした。図-2 に作製した試料の 3 点曲げ載荷試験時の載荷点、支点、積層物内での位置を示す。また、表-2 にマイクロメータ、ノギスを用いて実測した各試料の寸法を示す。ここでの幅、厚さ t₂ は試料中央の値である。

3. 3点曲げ載荷実験

3.1 3点曲げ載荷実験方法

載荷実験時、各試料下面の載荷点付近にゲージ長 5mm の単軸ひずみゲージを長軸方向に貼り付けた。各試料の長軸方向を繊維方向 0° とし、載荷実験時は引張面での最外層を繊維方向 0° で統一した。図-3 に完成後の試料を示す。載荷実験装置にはオートグラフ精密万能試験機 (SHIMADZU AG-I 250kN)、荷重の計測にはロードセル (SHIMADZU SFL-250kNAG) を使用した。試料はそれぞれ両短辺側の単純支持とし、支間長 150mm となるように設置した。載荷実験時の様子を図-4 に示す。本実験装置の載荷荷重は 0kN から実験開始とし、軸方向変位が 0.5mm ごとに荷重、ひずみの計測、記録を行った。変位速度は 2mm/min とし、終局状態をもって実験終了とした。なお一部の実験では試料下部にダイヤルゲージまたはレーザー変位系を設置し、たわみの計測も行った。

3.2 CFRP 試料材料特性の理論値算定方法

作成した試料の3点曲げ載荷実験における、JIS規格³⁾を基に梁理論を用いた圧縮・引張縁での曲げ破壊強さ又は曲げ強さの算定方法を述べる。曲げ破壊における最大応力は載荷点における中立軸から最も遠い縁において生じる。これを縁端応力といい、 σ_b と表したとき、下記の(1)式で表わされる。

$$\sigma_b = \frac{3P_b L}{2bh^2} \quad (1)$$

ここに、 σ_b : 曲げ破壊強さ又は曲げ強さ(MPa)、 P_b : 破壊時荷重又は最大荷重(N)、 L : 支点間距離(mm)、 b : 試験片の幅(mm)、 h : 試験片の厚さ(mm)である。

表-3 3点曲げ載荷試験結果

試料名	厚さ t (mm)	耐荷重(kN)	最大応力(MPa)	弾性率(GPa)
C1-a	4.02	2.83	985.05	69.89
C1-b	4.27	2.67	862.30	62.09
C1-c	4.06	2.75	924.56	96.98
C2-a	4.46	2.67	755.03	53.93
C2-b	4.39	2.83	826.00	58.65
C2-c	4.41	-	-	-
C3-a	4.36	1.95	577.01	56.04
C3-b	4.33	2.17	651.04	62.50
C3-c	4.42	2.08	598.88	52.80

4. 実験結果

表-3に材料実験の結果を示す。表中の最大応力は全て試料圧縮面での圧縮強度を示している。表中の弾性率は、載荷実験時の応力-ひずみ関係における弾性領域内より、最小二乗法を用いて評価した値を示している。また、各載荷実験における応力-ひずみ曲線を図-5に示す。図は積層構成ごとのグラフとなっている。なお試料の破壊は、全て試料区間内で生じており、支点での滑り等は観察されていない。また、試料C2-(c)について、計測器の不具合により、計測値が得られなかった。

実験終了後試料の載荷点付近の様子を図-6に示す。いずれも図上側が圧縮面である。破壊形態として、全ての試料で載荷点付近での圧縮破壊の後、再び応力上昇が確認された。圧縮面最外層において最大応力時に圧縮破壊が起こり、順に引張側の層に向かっての曲げ破壊の進行が観察された。また全ての試料において圧縮破壊の亀裂から派生した層間せん断破壊が見られた。引張面において、一部の試料のみ圧縮面での圧縮破壊の後、繊維引張破壊が観察され、試料C3-(c)については引張面最外層の剥離が見られた。

全体的な実験結果として、層間の配向角度差が細くなるにつれ、最大応力が低下する傾向が見られた。耐荷重については、試料C1と試料C2との間に大きな差は見られなかったが、C3試料では比較的低い値を示した。対して弾性率はC2試料とC3試料との間に大きな差は見られなかったが、C1試料では比較的高い値を示した。

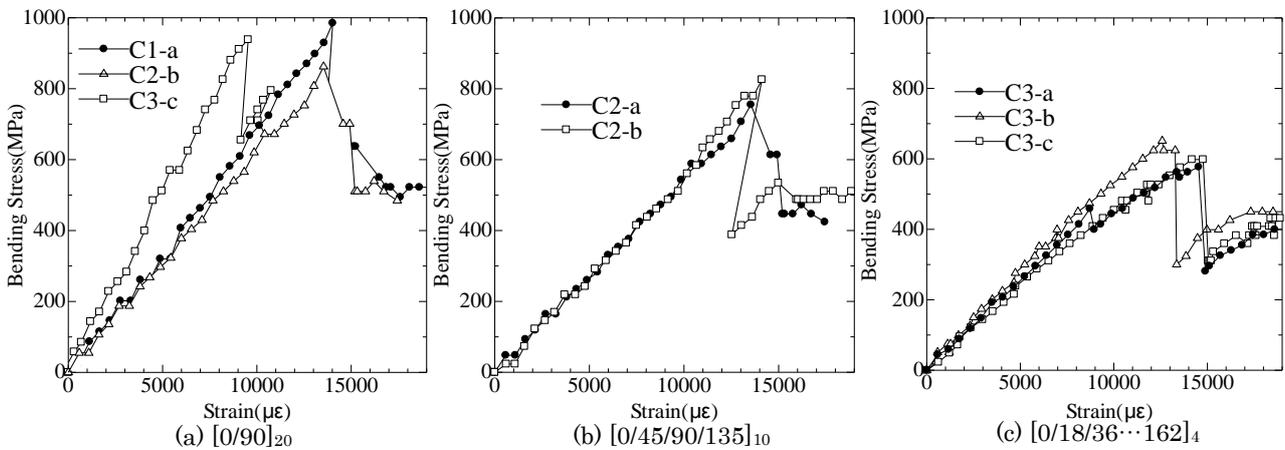
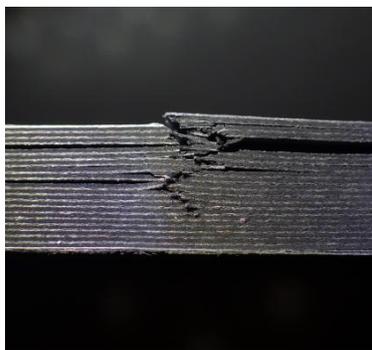
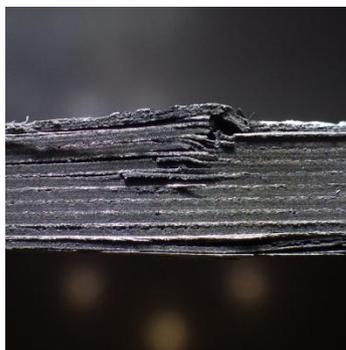


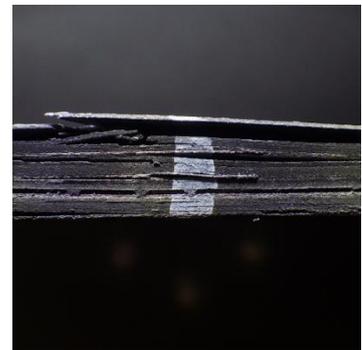
図-5 応力-ひずみ線図



(a) C1-b



(b) C2-b



(c) C3-a

図-6 破壊後試料の様子

5. 考察

5.1 試料の破壊形態と積層構成

載荷実験時に全ての試料において繊維の引張破壊ではなく圧縮面での圧縮破壊が見られた点について、これは炭素繊維が圧縮強度よりも引張強度が高い材料特性を有していることが原因として考えられる。また、層間配が細かくなるにつれ耐荷重、最大応力が減少する傾向が見られたことについて、曲げ実験における試料内の長軸方向に対して強度をもつ繊維方向を有した層が、層間の配向角度差を細かくすると少なくとも、曲げ方向に対する応力が小さくなったためと考えられる。

5.2 板厚の違いが材料特性に与える影響

表-4 に作成した試料の載荷実験時の両支点、載荷点付近の厚さと、同一試料内での板厚の平均、標準偏差を示す。試料両端の支点付近での板厚をそれぞれ t_1 、 t_3 とした。各試料の板厚には標準偏差 0.01~0.19 のばらつきが見られた。試料の厚さに差が生じた原因として、以下のものが考えられる。①積層物への加圧作業の際、万力を用いたことによりバッグ内部にかかる荷重が完全には均一とならなかったため。②加熱の際に樹脂の硬化課程が繊維方向や積層板内の位置関係により異なり、完成時にムラとなったため。③フライス盤による積層板切削の際、アーム固定時のブレードと試料との摩擦により試料内部で変形が起こったため。

載荷実験結果による最大応力値と載荷点付近の板厚 t_2 を参照すると、板厚が比較的薄い試料について、最大応力がより高い値を示す傾向が見られた。これについて、同一積層枚数で板厚に差が生まれるということは、すなわちプリプレグに含浸された樹脂による層間の接着力に差が生じていると考えられる。よって板厚が薄くなるのに伴い繊維組織の強度が高まり、材料実験結果に影響が及んだと推察される。また、試料内での板厚のばらつきについて、支点と載荷点での板厚の差が大きくなった C1-(a)及び C1-(c)試料について、材料実験の結果前者は後者よりも高い弾性率が得られた。前者は両支点での板厚に差がほとんど無いが、後者は両端の板厚に 0.28mm の差が生じている。すなわち C1-(c)試料については、先述した通り載荷点付近において層間の接着が強固であることに加え、両端での均斉が取れていることから、結果として高い弾性率を示したと考えられる。

表-4 試料の板厚、平均値と標準偏差

試料名	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	平均(mm)	標準偏差
C1-a	4.39	4.02	4.11	4.17	0.16
C1-b	4.37	4.27	4.37	4.34	0.05
C1-c	4.47	4.06	4.47	4.33	0.19
C2-a	4.61	4.46	4.47	4.51	0.07
C2-b	4.48	4.39	4.51	4.46	0.05
C2-c	4.49	4.41	4.48	4.46	0.04
C3-a	4.39	4.36	4.34	4.36	0.02
C3-b	4.39	4.33	4.31	4.34	0.03
C3-c	4.42	4.42	4.39	4.41	0.01

5.3 既往の研究結果との比較

表-5 に既往の研究⁴⁾によって得られた箱形断面 CFRP 梁の材料実験結果を示す。本研究で得られた CFRP 試料の材料実験値と比較すると、圧縮強度、弾性率ともに本研究での結果の方が高い値を示した。既往の研究では、成形作業の際に、真空ポンプによる減圧の上成形する VaRTM 成形法と呼ばれる工法が用いられている。それに対し、本研究で用いたオートクレーブ法は成形の際に荷重を付加している。この作製工程の違いから、本研究で作製した試料はより層間の接着力が高まった事により、比較的弾性率、最大応力ともに高い値を示したと考えられる。

表-5 箱型断面 CFRP 梁の材料試験結果

梁軸方向圧縮試験		
試験体名	CP'	QI'
積層構成	[0/90]	[0/45/-45/90]
圧縮強度 σ_{1c} (MPa)	352	272
弾性率 E_1 (GPa)	59.8	36.3

あとがき

本研究では、らせん積層構成を有した CFRP 試料を作成し、それを用いた 3 点曲げ載荷実験を行うとともに、板厚の違いが試料の材料特性に与える影響を検討したものである。得られた知見を以下に示す。

- 作製した試料には、板厚に標準偏差 0.01~0.19 のばらつきが見られた。これは成形の過程で生じたものと考えられる。しかし、試料両端の均斉が取れている場合と試料両端で板厚の差が大きき場合とを比較したところ、最大応力について前者がより高い値を示す傾向が見られた。このことから、試料作製の際には試料全体の板厚が均一となるように配慮することで、より材料特性に優れた CFRP 試料を作製できると考えられる。
- らせん積層構成について、本研究で得られた材料実験結果として耐荷力、曲げ強度に関しては他の積層構成のものよりも低い値を示す結果となった。一方でらせん積層構成は CFRP が有する脆性挙動が改善される等の利点があり、今後の研究においてはより多くの試料を作製し、曲げ載荷実験や耐衝撃実験等により、詳細な材料特性の解明が期待される。

参考文献

- L.K.Grunenfelder, N.Suksangpanya, C.Salinas, G.Milliron, N.Yaraghi, S.Herrera, K.Evans-Lutter-odt, S.R.Nutt, P.Zavattieri & D.Kisailus: Bio-inspired impact-resistant composites, Acta Biomaterialia,
- 日本工業標準調査会審議 日本規格協会発行 炭素繊維強化プラスチック試料の作製方法 JIS K 7072 平成 3 年 11 月 1 日制定
- 日本工業標準調査会審議 日本規格協会発行繊維強化プラスチック・曲げ特性の求め方 JIS K 7017 平成 11 年 10 月 20 日制定
- 櫻庭浩樹・松本高志・堀本歴・林川俊郎 VaRTM 成形による箱型断面 CFRP 梁の曲げ挙動に及ぼす積層構成の影響、土木学会構造工学論文集 Vol.58A(2012 年 3 月)