

らせん積層 CFRP の曲げ特性に関する実験

Experiment on the flexural characteristics of a helicoidally laminated CFRP

北海道大学工学部

○学生員

在家頌一(Shoichi Zaike)

北海道大学大学院工学院

学生員

細目貴之(Takayuki Hosome)

北海道大学大学院工学研究院

正会員

松本高志(Takashi Matsumoto)

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー (CFRP) は、炭素繊維と樹脂の複合材料であり、金属材料と比較して軽く、強度や剛性が高いという性質をもつため、様々な用途に用いられている。軽量化のために航空機や自動車などにも構造材料として用いられ、建築分野や橋梁の耐震補強など土木分野にも使われ始めている。しかしながら、CFRP の破壊挙動は脆性的であるため、主部材として用いる際には注意が必要であり、安全係数を低く設定せざるを得ない。

一方で、繊維補強および積層複合は、生体の構造においても観察される。シャコは前足で打撃を加えることで貝殻を叩き割り捕食をするが、この前足の表面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知られている。自ら打撃の反力を受けながら強靱で壊れにくい前足はらせん構造により実現されていると考えられている。図-1 にシャコのキチン繊維の様子を示す。

本研究は生体の構造に倣う生体模倣に着目し、らせん積層 CFRP を製作して、CFRP の欠点である脆性的挙動の改善が可能かどうかを、曲げ特性において検討することを目的としている。

2. 脆性的挙動の力学的考察

一般的に、応力集中のある鋼材などが低温で衝撃的な荷重を受けると、塑性変形を伴わず突然破壊に至ることを脆性破壊という。脆性破壊の力学的メカニズムは、Griffith の破壊理論²⁾によって説明される。

ひび割れがない場合、厚さ t の板に蓄えられる単位体積当たりの弾性ひずみエネルギーは、板内の応力場が一樣とすると、

$$u_e = \frac{\sigma^2}{2E}$$

で表される。ここで σ は応力、 E はヤング率である。

長さ $2C$ のひび割れがある場合、ひび割れ先端に応力が集中し、ひび割れ面の上下では応力の伝達が行われず、弾性エネルギーが減少している領域が生じる。この領域の面積 S は $S=\alpha C^2$ とできる (α は係数)。これから、ひび割れを形成したことによる弾性エネルギーの減少は、

$$U_e = -u_e S t = -\alpha \frac{\sigma^2}{2E} C^2 t$$

とできる。

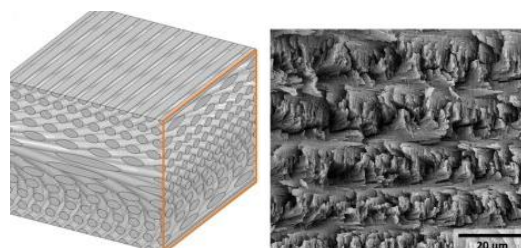
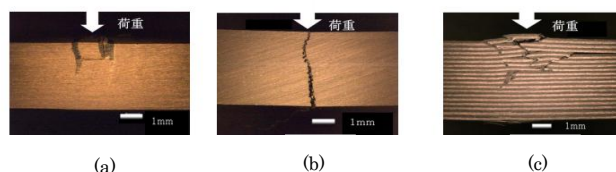
図-1 キチン繊維¹⁾図-2 破壊後の様子³⁾

表-1 積層構成

名称	積層構成
C1	$[0/90]_{20}$
C2	$[0/45/90/135]_{10}$
C3	$[0/18/36/\cdots/162]_4$

一方で、ひび割れ形成にはひび割れ面積 A にわたり 2 表面の形成が必要であるため、このために外力がなす仕事は、

$$W_s = 2A\gamma_s = 4Ct\gamma_s$$

ここで γ_s は単位面積当たりの表面エネルギーである。

以上より、ひび割れがある場合の系全体のポテンシャルエネルギーは、

$$U = U_e + W_s = -\alpha \frac{\sigma^2}{2E} C^2 t + 4Ct\gamma_s$$

となり、ポテンシャルエネルギー U だけ、ひび割れが存在しない場合よりも変化する。ポテンシャルエネルギーは低いほうが安定化するため、 $U_{\max}$ に至るとひび割れは自然に成長する。そのときの破壊応力 σ_c に達したとき、ひび割れは急速に成長し、ひび割れ伝搬し、脆性破壊に至る。

3. 既往の研究

愛媛県産業技術研究所において、CFRP の 3 点曲げ載荷試験が行われている。供試材は UD・プリプレグ(東

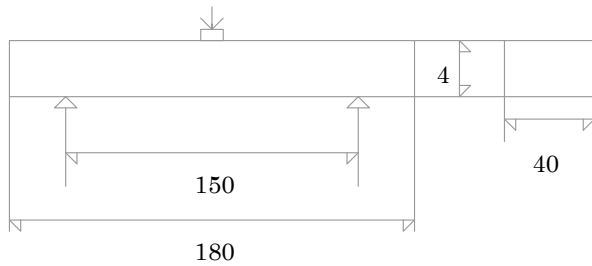


図-3 供試体寸法

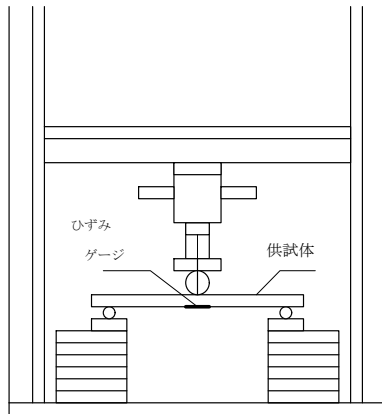


図-4 実験装置の概要

レ製)を用い、オートクレーブによる3種類のCFRPが加熱成形された。積層配向は(a)0°のみ、(b)90°のみ、(c)0°と90°の交互積層である。これら供試体の破壊後の様子を図-2³⁾に示す。

この実験結果からわかることは、CFRPの曲げ圧縮荷重においては、荷重点の圧縮側から破断し、積層構成によって破断モードが異なるということである。また、(c)においてのみ層間剥離が観察された。これは、繊維方向の異なる層が積層され、相対的に強度の弱い層が生じ、ひび割れが進展するためだと考えられる。

4. 実験概要

4.1 プリプレグ

本研究では、材料に弾性率 24t/mm^2 、総目付 167.1g/m^2 、繊維目付 124.3g/m^2 、樹脂含有率 25.6%、厚さ 0.103 mm 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。積層枚数 40 枚からなり、厚さは約 5 mm とした。積層構成は3種類とし、それぞれの名称を C1、C2、C3 とし、表-1 に示す。

4.2 CFRP 成形方法

CFRP はオートクレーブ製法において加熱成形し、実験室内において自主製作を行った。

まず、大きさが縦 1000 mm、横 1000 mm、高さ 600 mm の炉を製作後、炉内にニクロム線を配線して、変圧器につないだ、炉壁に小口径の穴を設けて温度計を差し込み、炉内の温度が計測できるようにした。

カッターで指定した大きさに UD プリプレグを切断する。C1 の場合、プリプレグは $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ に切



写真-1 実験状況

り出し、C2、C3 においては、プリプレグを $290\text{mm} \times 290\text{mm}$ に切り出す。

次にビニール手袋を用いてプリプレグを積層していく。プリプレグには裏面に紙、表面にはプラスチックフィルムがついているが、最初の一枚はビニール面を積層する。気泡が入らないように少しずつ接着させるように積層し、その際、繊維方向にかけて気泡を除去する。積層後、種類の区別ができるように、プリプレグに繊維方向と積層構成を記入する。

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をよれないようにしながら覆い、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、万力を用いて圧力をかけ、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 で炉内の温度を変圧器によって調整した。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る。冷却後、炉内から取り出す。

4.3 供試体

製作した CFRP は、3 種の積層構成それぞれについて、3 体ずつに切断し、寸法が幅 180 mm、厚さ約 4 mm、奥行 40 mm の供試体を得た。図 3 に供試体寸法を示す。

4.4 荷重実験

荷重試験装置には、オートグラフ(SHIMADZU AG-1 250kN)を用い、支間長を 150 mm、荷重速度 2.0mm/min で 3 点曲げ圧縮試験を実施した。荷重の計測にはロードセル(SHIMADZU SFL-250kNAG)を使用した。荷重は変位制御により行われ、最大変位量は 30 mm とし、供試体の破断状況に応じて荷重を止めた。変位と荷重はオートグラフにより計測された。一軸ひずみゲージは曲げモーメントが最大となる、供試体の下面支間中央のみに貼付した。本実験の載荷荷重は 0 kN から開始し、軸方向変位が 0.5 mm ごとに荷重およびひずみの計測を行った。図-4 に実験装置の概要、写真-1 に実験状況を示す。

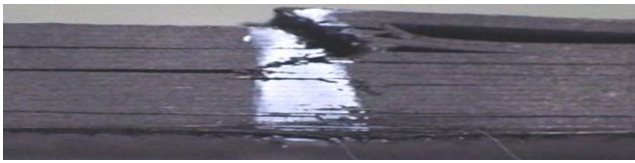


写真-2 C1の破断状況

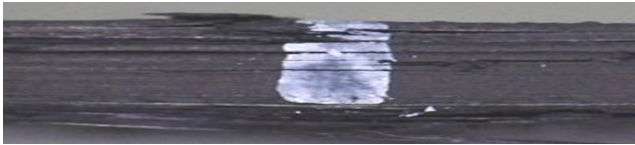


写真-3 C2の破断状況

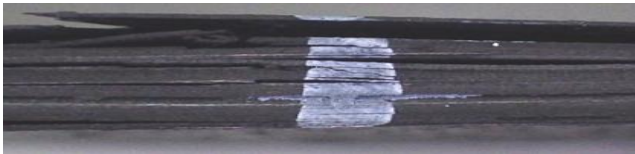


写真-4 C3の破断状況

5. 実験結果

5.1 破断の様子

載荷実験終了後、供試体の破断の様子を観察した。その結果を写真-2、3、4に示す。

既往の研究で述べたように、C1、C2、C3において供試体はすべて荷重点圧縮側から破断していることがわかる。すなわち、供試体は圧縮によって破断している。これは、荷重点付近の繊維が最も圧縮応力を受けることにより変形し、許容応力を超えて破壊が始まり、繊維が折損していると考えられる。また、層間剥離が破断の進展の際に起きていると考えられる。C1、C2、C3すべて引張縁にも繊維の折損が見られ、ひび割れが入っていた。

C1において、ひび割れは荷重点圧縮側から引張側に進展しながら、途中で強度の弱い層間に伸びていた。

C2においても、荷重点圧縮側から発生したひび割れが引張側に進展しながら、途中で強度の弱い層間に伸びていたが、C1と比べてひび割れが浅い段階で層間剥離が進行しているように見える。引張縁の繊維折損が起きていたが、C1よりも大きく折損が確認できた。

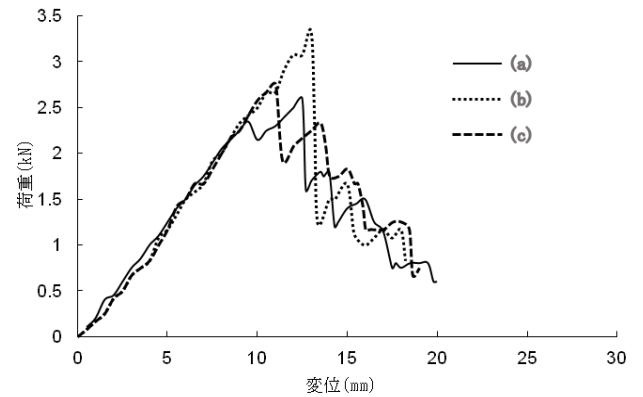
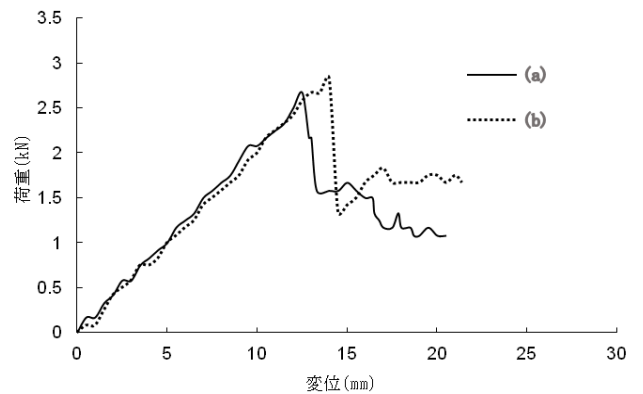
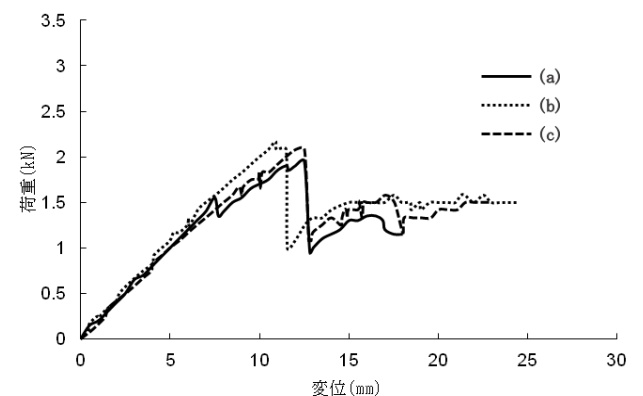
C3においては、C1、C2に比べて層間剥離が顕著にみられた。これはラセン構造にすることにより、強度の弱い層が増えたことによるものと推察される。引張縁における繊維折損はC2よりも大きなものであった。

すべての供試体ではなかったが、9体の供試体のうち6体が上半分20層ほどまでしかひび割れが入っていなかった。

5.2 荷重－変位関係

図-5、6、7に載荷点の荷重－変位関係を示す。図には、試体が完全に破断する前段階の荷重－変位関係が示されている。C2(a)においては、計測器の不具合により、計測値が得られなかったため、荷重－変位曲線の結果には含めていない。

C1の最大荷重値は、C1(a)2.60kN、C1(b)3.33kN、

図-5 C1 ; [0/90]₂₀ 荷重－変位関係図-6 C2 ; [0/45/90/135]₁₀ 荷重－変位関係図-7 C3 ; [0/18/32/.../162]₄ 荷重－変位関係

C1(c)2.75kN、C2の最大荷重値は、C2(b)2.67kN、C1(c)2.75kN、C2の最大荷重値は、C2(b)2.67kN、C2(c)2.83kN、C3の最大荷重値は、C3(a)1.95kN、C3(b)2.17kN、C3(c)2.08kNであった。最大荷重値は異なるが、同積層構成において同じような挙動を示した。

C1(a)は変位 12.7mm、C1(b)は変位 13.19mm、C1(c)は 11.38mm で脆性破壊に至るまで、荷重の減少はあまり見られなかったが、小さなひび割れ音が数回確認できた。C1(a)は変位 10mm で荷重が 2.35kN から 2.15kN にまで下がったが、大きな破壊音ではなく、小さなひび割れ音であった。C1(a)、C1(b)、C1(c)は第 1 の脆性破壊で、大きな破壊音を生じ、荷重がそれぞれ 2.60kN から 1.60kN、3.33kN から 2.33kN、2.75kN から 1.92kN まで急激に降下した。その後荷重は多少の上がりを見せたが、すぐに繊維折損による破断が生じ、荷重が減少する挙動を繰り返した。弾性域を超えた後、勾配は負の値をとり、準脆性的挙動を示した。

C2(b)は変位 13.30mm、C2(c)は変位 14.50mm で脆性破壊に至った。C2(b)は連続して大きな破壊音が生じた。C1 と同様に、脆性破壊に至るまで小さなひび割れ音が数回確認できたが、C1 よりもその数は多かった。荷重は連続したひび割れ音に応じて C2(b)において 2.67kN から 2.17kN そして 1.58kN と 2 段階にわたって降下した。C2(c)は 2.83kN から 1.33kN に荷重が落ちた。その後両方とも比較的大きな破壊音が数回生じたが、大きな荷重の落ち込みはなく、勾配は水平に近かった。

C3(a)は変位 12.81mm、C3(b)は変位 11.57mm、C3(c)は変位 12.77mm で脆性破壊に至った。荷重はそれぞれ 1.95kN から 0.95kN、2.08kN から 1.00kN、2.08kN から 1.08kN に落ちた。第 1 破壊に至るまでは、C1、C2 と同様に数回ひび割れ音が生じたが、大きな荷重の落ち込みはなかった。第 1 破壊後は、比較的大きな破壊音を確認されたが、荷重の顕著な落ち込みはなく、荷重は右肩上がりに推移した後、水平に近い挙動を示した。

6. 考察

本研究における載荷実験において、積層構成が異なる CFRP は明確に異なる挙動を示した。本章では、各積層構成の挙動について考察する。

C1 においては、典型的な脆性的挙動を起こした。破断後は軟化勾配が右肩下がりの挙動を示したが、これはひび割れ進展に伴う準脆性破壊挙動であった。図-5 における挙動は、引張縁に鉄筋補強がなされていないコンクリートの荷重—変位関係と似ている。鉄筋補強のないコンクリートはひび割れが発生した途端に破壊するが、これはひび割れによる応力集中が起き、ひび割れにより解放される弾性ひずみエネルギーがより大きくなり、表面エネルギーに変換されるためだと考えられる。同様に C1 においては、最も荷重に対する抵抗が大きい繊維方向 0° が多いため、弾性ひずみエネルギーが大きくなり、大きな表面エネルギーとして変換され、ひび割れの不安定成長につながると考えられる。そのため、準脆性的挙動を示すと推察される。

C2 において、C1 と明確に異なるのは、第 1 破壊後の荷重推移と層間剥離の数であった。荷重は水平に近く推移したが、C1 でみられた応力低下する軟化現象が起きなかったことを示していると考えられる。また、層間剥離の増加は強度の弱い層（繊維方向 45° および繊維方

向 135° ）が増え、ひび割れが進展したためである。

C3 は、C2 と同様に軟化現象の改善がなされており、層間剥離の数はさらに増えていたが、平均的に C2 よりも荷重の水平推移が長かった。これは破壊に至る前に弾性ひずみエネルギーが表面エネルギーに変換され、ひび割れが比較的強度の弱い層に進展し、脆性的挙動をみせていないと考えられる。

以上より、角度を小さくせん積層した CFRP は脆性的挙動の改善がみられ、本研究の目標は達成された。

7. おわりに

3 種類の積層構成をもつ CFRP の矩形平板供試体を用いて、3 点曲げ載荷実験を行い、曲げ特性による CFRP の脆性的挙動の改善について検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) すべての供試体において圧縮による破断が起きた。
- (2) 角度を細かく積層するほど層間剥離が顕著になり、強度の弱い層にひび割れが成長していた。
- (3) 角度を細かく積層するほど荷重が一定値を示す領域が広がった。
- (4) 荷重点圧縮側からおよそ 20 層目までにひび割れが確認できた。
- (5) 荷重—変位関係から、角度を細かく積層した CFRP は脆性的挙動が一定の改善が見られた。

参考文献

- 1) 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, pp3997-4008, 2014
- 2) 金丸競：材料強度論—亀裂と破断—、Griffith の亀裂破断理論、pp55-56、1977
- 3) 藤本俊二、中村仁、藤田雅彦、友近宏、平岡芳信：CFRP 板の曲げ特性（第 1 報）、愛媛県産業技術研究所研究報告、No.52、2014