

らせん積層複合材料の曲げひび割れ挙動の可視化実験

Visual examination of flexural cracking behaviors in a helicoidal laminate composite

北海道大学工学部 ○学生員 八尋英恵 (Hanae Yahiro)
 北海道大学大学院工学院 学生員 森川和将 (Kazusa Morikawa)
 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

繊維強化ポリマー(Fiber Reinforced polymer、FRP)は繊維と樹脂の複合材料である。FRPは鉄やアルミなどの金属材料よりも軽量でありながら比強度が高いこと、また耐食性に優れていることが特徴として挙げられる。このような材料特性を活かしてFRPはより幅広く利用されるようになってきている。レジャー・スポーツの分野では釣り竿やラケットなど、医療・介護の分野では義肢や義足、電気・電子分野ではパラボナアンテナやノートPC筐体、宇宙分野では衛星やロケット構体、交通分野では新幹線、リアモーターカー、航空機など、様々な分野において近年FRPの利用が広がっている。また土木分野においては、軽量ゆえに大きな重機を必要とせず施工性が高いことやその材料特性の優位さを理由に、橋梁の床版、桁、橋脚等の補修・補強材料として主に用いられている。

FRPを土木構造物の部材として適用する際、合理的な設計を行うためには部材の終局状態について詳細に把握する必要がある。しかしながら、FRPは塑性域がなく破壊まで弾性域であり脆性的に破壊することが知られており、破壊の前兆を知ることが困難であると共に、安全率を高く設定する必要が出てくる。

上述の脆性的特性を改善するために、本研究では生体模倣の技術を試みる。甲殻類のシャコはキチン繊維がらせん状に積層された積層複合材料に似た甲殻組織を持っており、また加速度 104m/s^2 、速度 23m/s に達する打撃を自身の前足で加え、獲物を捕獲する¹⁾。しかしこのような打撃の反力で自身が損傷することはなく、シャコは自身の重量の1000倍もの反力に耐えられるという。これはシャコの甲殻内のキチン繊維がらせん状に配置されていることで衝撃を吸収するためだと考えられている。

本研究はこのシャコの甲殻構造を模倣したらせん積層複合材料を作製し、その曲げひび割れ挙動を可視化観察することを目的としている。ここでは、透明樹脂に対して鋼線補強層をらせん状に配置したFRPの巨視的模擬供試体を作製して、3点曲げ载荷におけるひび割れ挙動を観察する。また、FRPの脆性的特性の改善、もしくはその予測が可能か検討をしている。

2. 実験方法

2.1 供試体

実験に用いた模擬供試体の寸法は長さ200mm、幅40mm、高さ5.5もしくは5.8mmである。用いた材料は、母材部にエポキシ樹脂(日新レジン:低粘度エポキシ樹脂Z-1 50分型)、繊維部にステンレスバネ線(直径0.5mm、SUS304-WPB)である。表-1に各材料の材料特性を表わす。

積層構成が $[90/180]_4$ 、 $[90/135/180/225]_2$ 、 $[54/72/90/108/126/144/162/180]$ のものを一体ずつ作製した(表-2)。供試体1は直交積層、供試体2は疑似等方性積層、供試体3はらせん積層である。それぞれの積層構成を図-1, 2, 3に示す。また $[90/135/180/225]_2$ は繊維の向きが 90° 方向、 135° 方向、 180° 方向、 225° 方向の層を積み重ね1組とし、添え字の2はその組を2組繰り返すことを意味している。繊維配向角の定義を図-4に示す。積層板座標系をx-y座標系、単層板座標系を1-2座標系とし、回転角 θ を繊維配向角とする。

2.2 供試体作製手順

模擬供試体の作製方法は以下のとおりである。まず、ステンレスバネ線を所定の配向角方向に間隔間隔2mmで整列させて単層板を作製する。これを積層構成に従い

表-1 母材と繊維の材料特性

母材	曲げ強さ(MPa)	曲げ弾性率(MPa)	横弾性率(MPa)	ポアソン比	比重
Z-1 50分型	77	2193	818	0.34	1.16

備考 横弾性率は $G_m = E_m / 2(1 + \nu_m)$ で算出。ポアソン比は文献2)の値を仮定。

その他の特性についてはすべて文献3)の値を仮定。

繊維	曲げ強さ(MPa)	曲げ弾性率(MPa)	横弾性率(MPa)	ポアソン比	比重
ステンレスバネ線 直径0.5mm SUS304-WPB	2200	197000	68500	0.3	8.0

備考 横弾性率は $G_f = E_f / 2(1 + \nu_f)$ で算出。ポアソン比、比重、引張強さ、ヤング率は文献2)の値を仮定。

曲げ強さ、弾性率は引張強さ、ヤング率と同一であると仮定。

積層させ繊維部を作製する。シリコン製の枠に組み立てたステンレスバネ線の繊維部を設置する。母材であるエポキシ樹脂は所定の二液混合を行った後に型枠に流しこんで硬化をさせた。硬化は室温(24℃程度)で行い、36時間ほどで脱型した。

2.3 載荷試験

試験には万能試験機(島津製作所：オートグラフ)を用いた。支点間距離を160mmとした3点曲げ載荷とし、載荷速度は2mm/minで行った。たわみが40mmに達した時点で試験を終了した。試験室温度は15℃程度で行った。荷重値と支間中央でのたわみ変位を計測した。

2.4 観察方法

試験中は白色LEDにより照明を行い、供試体の側面もしくは側面と底面をビデオにより撮影した。また試験後にはひび割れに油性塗料を浸透させて赤色に着色しカメラによる写真撮影を行った。

3. 弾性係数と曲げ破壊強度の算定式

単層板の繊維方向および繊維直角方向の弾性係数は複合則と Halpin-Tsai 式より求める。

繊維方向の弾性係数は複合則より次式から得られる。

$$E_1 = E_f V_f' + E_m (1 - V_f')$$

ここで、 E_f は繊維の弾性係数、 E_m は樹脂の弾性係数、 V_f' は繊維体積含有率である。

繊維直角方向の弾性係数は次の Halpin-Tsai 式より求められる。

$$E_2 = \frac{E_m (1 + \xi \eta V_f')}{(1 - \eta V_f')}$$

ここで ξ は一般的に1に近い値となるため $\xi=1$ とする⁴⁾。

非軸方向の弾性係数は慣用的な工学的定数より

$$E_x = \frac{1}{S_{11}}$$

$$E_y = \frac{1}{S_{22}}$$

$$G_{xy} = \frac{1}{S_{66}}$$

$$\bar{S}_{11} = S_{11} C^4 + S_{22} S^4 + (2S_{12} + S_{66}) C^2 S^2$$

$$\bar{S}_{12} = S_{12} (C^4 + S^4) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) C^2 S^2$$

$$\bar{S}_{21} = S_{11} S^4 + S_{22} C^4 + (2S_{12} + S_{66}) C^2 S^2$$

$$\bar{S}_{16} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) C^3 S - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) C S^3$$

$$\bar{S}_{26} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) S^3 C - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) C S^3$$

$$\bar{S}_{66} = (4S_{11} + 4S_{22} - 8S_{12} - 2S_{66}) C^2 S^2 - S_{66} (C^4 + S^4)$$

$$C = \cos \theta, S = \sin \theta$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}, S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

ν_{12} は繊維のポアソン比と母材のポアソン比から複合則を用いて算出した。横弾性係数 G_{12} は表-1の値を用いた。

供試体全体の曲げ弾性係数は以下の式を用いて算出した。

$$M_x = \int_A \sigma y dA$$

表-2 供試体一覧

供試体名	積層構成
1	[90/180] ₄
2	[90/135/180/225] ₂
3	[54/72/90/108/126/144/162/180]

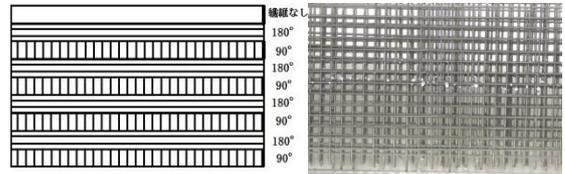


図-1 供試体 1 積層構成模式図と写真

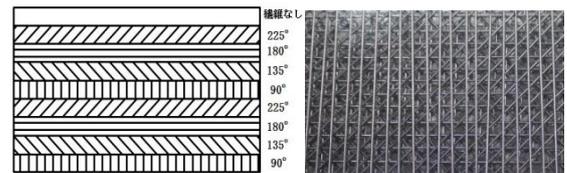


図-2 供試体 2 積層構成模式図と写真

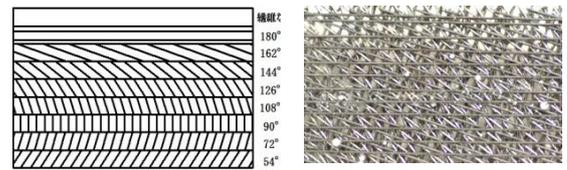


図-3 供試体 3 積層構成模式図と写真

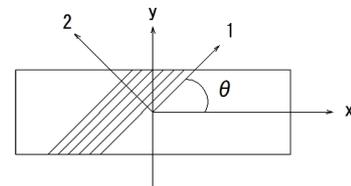


図-4 単層板座標系と積層板座標系



図-5 模擬供試体

$$M_x = \frac{EI}{\rho}$$

ここで A は断面積、 σ は応力、 η は断面における中立軸からの距離、 E は供試体全体の曲げ弾性係数、 I は供試体の断面二次モーメント、 ρ は供試体の密度である。また実験時の曲げ弾性係数は以下のように求めた。

$$E = \frac{L v^3 m}{4 W h^3}$$

ここで、 L_v は支点間距離、 m は荷重たわみ曲線の直線部分の勾配、 W は供試体の幅、 h は供試体の高さである。 m については実験結果の荷重たわみ曲線から、初期直線部分の勾配を用いた。

以上による算定結果を表-3 にまとめた。

4. 実験結果

破壊過程をそれぞれの供試体について示す。供試体側面の状態を表すスケッチは破壊過程を示している(図-6,7,8)。このスケッチにおいて太線はその時観察されたひび割れを示し、点線はそれ以前に観察されたひび割れの履歴を示す。またここではひび割れの中で開口しているものを破断しているものとして扱う。また供試体下部から順に1層目、2層目…8層目と各層を呼ぶ。各供試体の実験結果を表-3にまとめる。

4.1 供試体1 [90/180]₄

梁軸直交方向に引張側から圧縮側に進行している3本のひび割れが観察された。まず、載荷点より右に22mmの位置の2層目の180°層においてステンレス線のスリップが観察された。その後同位置でひび割れ深さ4mmの第一ひび割れが発生した。開口幅は1mmほどであった。第二ひび割れは載荷点直下の位置で発生した。供試体破断時には、ひび割れ深さ4mmで1mm開口していた。

また載荷点より左に22mmの位置に、梁軸直交方向にひび割れ深さが0mmから4mmに増加しているひび割れが発生したが、このひび割れに関してはビデオ観察ではいつ発生したか特定できなかった。

4.2 供試体2 [90/135/180/225]₂

梁軸直交方向に供試体1で観察されたような直線的なひび割れが複数見られた。また複数の分岐したひび割れも観察された。第一ひび割れは載荷点直下に発生し、ひび割れ深さは5mmであった。第二ひび割れは載荷点より右に12mmの位置で発生し、ひび割れ深さは5mm、第三ひび割れは載荷点より右に16mmの位置で観察され、ひび割れ深さは4mmであった。第四ひび割れは載荷点より左に10mmの位置で発生し、ひび割れ深さは5mmであった。またその後第二ひび割れの1mmほど左に深さ4mmほどの第五ひび割れが発生し、直後に第二、第五ひび割れが、開口幅がそれぞれ1mm、0.5mmとなり、供試体は破断した。また破断後、破断点周辺の3層目(180°層)、4層(225°層)のステンレス線にスリップが見られた。この第二、第五ひび割れの周囲1.5mmほどの領域で引張面において梁軸直交方向に複数のひび割れが、両側面において板厚方向に分岐ひび割れが観察された。これらのひび割れは6、7層目の135°、180°層で繊維に沿うように梁軸方向載荷点側に曲がった。また第一、四ひび割れの板厚方向のひび割れは直線的に進行していたが同様に7層目の180°層で梁軸方向載荷点側に曲がっていた。

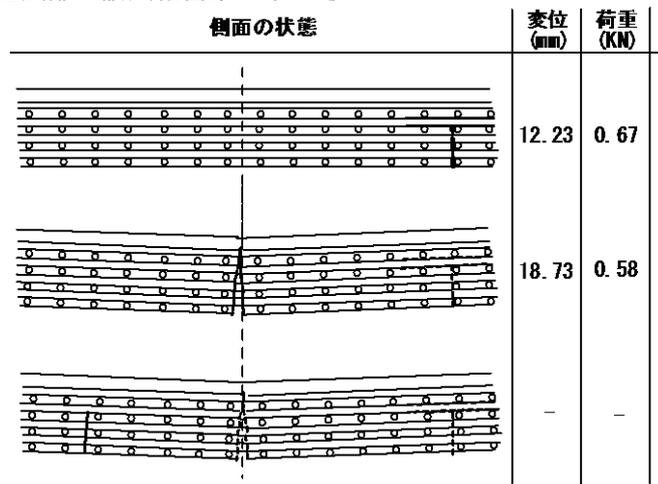


図-6 供試体1の破壊過程

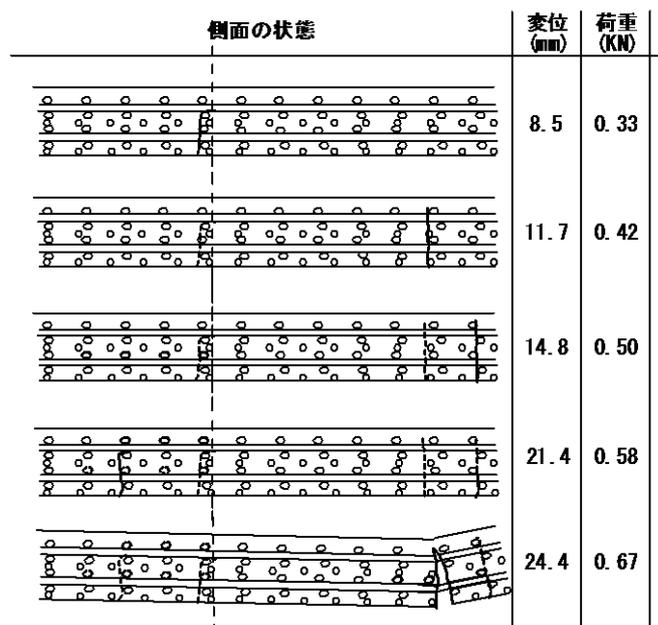


図-7 供試体2の破壊過程

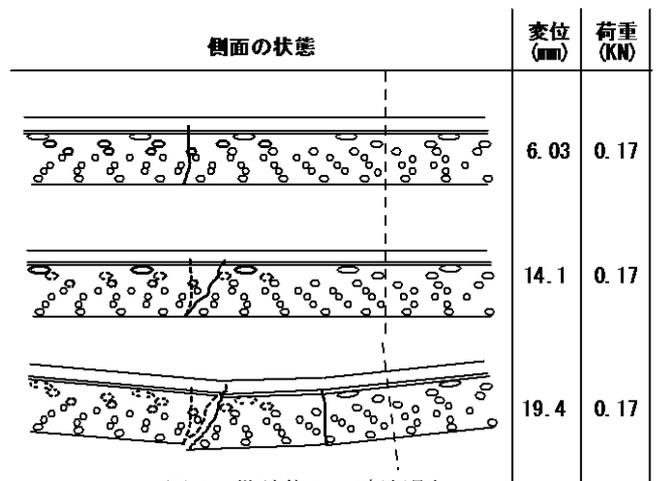


図-8 供試体3の破壊過程

表-3 実験と算定の結果

供試体	高さ(mm)	繊維含有率	E1	E2	弾性係数理論値	弾性係数実験値	永久たわみ(mm)	最大荷重(KN)
1	5.8	0.12	26380	4634	8511	6534	3.0	0.75
2	5.8	0.13	33878	4743	6350	4209	3.0	0.67
3	5.5	0.12	26188	4631	4201	-	1.8	0.25

4.3 供試体 3 [54/72/90/108/136/144/162/180]

載荷点から梁軸方向に左に 5mm から 15mm の領域で 136° から 162° 層にステンレス線まわりのスリップ等、供試体内部でのひび割れが多数観察された。第一ひび割れは載荷点より左に 15mm の位置に発生した。ひび割れ深さは 4mm ほどで、直線的に進行していた。第一ひび割れのあと 162°、144°、136° の層でステンレス線のスリップが観察された。第二ひび割れは載荷点から左に 15mm の位置に発生し、板厚方向において載荷点側に 45° の角度で斜めに進行した。ひび割れ深さは 7mm であった。第三ひび割れは載荷点から左に 5mm の位置にひび割れ深さ 4mm で発生した。第三ひび割れの発生と同時に第二ひび割れが開口幅 1.5mm となり、供試体は破断した。

第二ひび割れが他のひび割れとは異なるモードであったのは供試体 3 がらせん積層構造をしているため、載荷中供試体にねじりが生じ、せん断破をしたためだと考えられる。破断した後、供試体のねじりが解消される様子が観察された。また試験後着色した供試体を見ると第一ひび割れ、第二ひび割れともに梁軸方向に水平に供試体下部から 3 層目である 108° 層から 6 層目である 144° 層の間の領域が着色されていた。

5. 考察

3 つの供試体を比較すると、ひび割れの様相が異なることが分かる(図-9,10)。引張面からひび割れを観察した際、供試体 1、2 では板厚方向において直線的なひび割れが多かった。また供試体 3 では繊維に沿ったひび割れなど、梁軸方向に対し水平方向に広がるひび割れが多く観察された。圧縮面から供試体を観察した際の油性絵具に染色された領域の広さを比較すると供試体 1、供試体 2、供試体 3 の順に大きくなっている(図-10)。これらのことから、供試体 3 は他 2 つの供試体と比べ、ひび割れが板厚方向に進行する際直線的に進行するだけでなく、分岐し、繊維に沿って、もしくは層間を縫って梁軸の水平方向にも生じていることが分かる。供試体に荷重がかかっている際、繊維と母材の境界面の付着が切れ、繊維のスリップが生じることで、応力が分散され急な破断が起こりにくくなるのではないかと考えられる。

さらにらせん構成では各層間の繊維配向角の角度が小さく様々な方向に繊維が配置されている。供試体 1 では各層間の繊維配向角の差が 90°、供試体 3 では 18° で、供試体 1 では 4 方向にしか繊維が配置されていないのに対し、供試体 3 では 8 方向に繊維が配置されている。その為様々な方向に繊維が配置されているためどの場所にひび割れが生じても繊維に沿ってひび割れが進行しやすくなり、供試体を破断させる力が分散し、見かけのエネルギー吸収能力が上昇すると考えられ、脆性挙動の改善の可能性があると考えられる。

また供試体 3 の繊維周りのひび割れが供試体下部層よりも中央 3 層に集中していることより、ひび割れを生じさせるエネルギーが水平方向より垂直方向に大きく、ひび割れは直線的にしか進展出来ず、梁軸方向に対して垂直方向から水平方向に進行方向を変えることができない

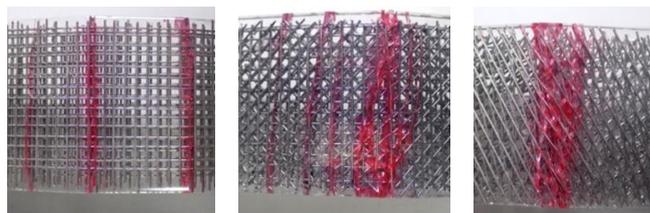


図-9 供試体引張面左から供試体 1,2,3

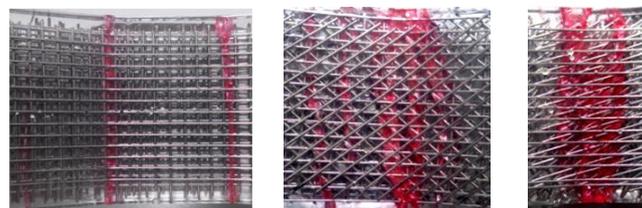


図-10 供試体圧縮面 左から供試体 1,2,3

と思われる。

同様に供試体 2 の 7 層目 180° 層の繊維に沿ってひび割れが曲がった挙動についても 6 層目まではまだひび割れを生じさせるエネルギーが垂直方向に大きく、繊維方向に進行出来なかったと考えられる。

加えて第一ひび割れはすべての供試体において曲げモーメントが最大となる載荷直下で生じると予想していたが、実際の位置は異なっていた。これは繊維の間隔にばらつきがあるなど供試体の製作精度の低さにより最弱部が様々なところに生じてしまったからだろう。同様に曲げ弾性係数についても理論値と実験値に乖離があったことも供試体の精度の低さが原因であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、らせん積層複合材料の曲げひび割れ挙動の可視化を行うため、3 種類の異なる積層構成の透明模擬供試体を作製し 3 点曲げ載荷実験を行った。以下に本研究のまとめを示す。

- (1) 透明樹脂とステンレス線による模擬供試体の曲げ試験において曲げひび割れ挙動の可視化を行った。また積層構成によってひび割れの挙動に差異があることが観察出来た。
- (2) らせん積層構造の模擬供試体において、ひび割れは繊維周りに梁軸方向水平に進行し、破断させる力が分散されていると考えられる。
- (3) ひび割れを生じさせるエネルギーがある程度減少してからでないと、梁軸方向垂直に進行していたひび割れは繊維方向に進行できないと考えられる。

参考文献

- 1) L.K.Grunenfelder 他: Bio-inspired impact-resistant composites, Acta Biomaterialia, 10, 2014
- 2) 機械要素ザ・バイブル: 材料物性表, <http://www.lab.notes.jp/pdf2/physical%20properties.pdf>
- 3) 技術報告書 (Z-1/50 分型): 日新レジン株式会社技術部, 2015
- 4) D.ハル, T.W.クライン: 複合材料入門, 培風館, 2003