

可視化らせん積層複合材料の曲げひび割れ挙動の観察

Study on the flexural cracking behaviors of helicoidal laminate composites with transparent visualization

北海道大学工学部 学生員 ○木村雄太 (Yuta Kimura)
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. 研究背景

積層繊維補強材料とは、一般的に高強度、高弾性、耐熱性に優れた繊維で樹脂などの母材を強化した複合材料である。積層繊維補強材料の特徴としては、一般に軽量かつ高強度で疲労特性や耐食性に優れることであり、土木や航空など幅広い分野で使用されている。しかしながら、これらの材料は、線形弾性的な挙動の後に、損傷や層間剥離を伴いながら脆性的に破壊する場合があります、破壊の予兆を得ることが難しいこともある。

上述の問題を改善する基礎的な試みとして、本研究では生体構造の模倣を検討する。一方向に整列した繊維の層がらせん状に積層された構造は自然界ではよく見られる構造であり、例えばシャコの前足の外殻に見られる。捕食の際に相手に対して自分の前足で打撃を加える際に、その衝撃が自分の体重の 1000 倍に達すると考えられている。しかし、積層繊維構造をらせん状に配置することにより、脆性的な破壊を生じずに衝撃を吸収する能力を備えていると考えられている。

本研究では、まず、生体にみられるらせん状に積層された繊維構造を透明な母材中に繊維をらせん状に積層することにより巨視的に可視化した模擬複合材料を作成した。この可視化模擬複合材料の曲げ実験を行うことで、ひび割れの発生と進展過程を詳細に観察するとともに、曲げ特性に及ぼす影響を検討している。本論文では、6 種類の積層構成がひび割れの発生と進展過程に及ぼす影響について報告している。

2. 実験手法

2.1. 概要

本研究では母材にエポキシ樹脂を使用する。また、通常の積層繊維複合材料は繊維含有率が高く、繊維直径も 10μm 程度と小さいため、ひび割れの微視的な観察には走査型電子顕微鏡などが不可欠であり、破壊におけるひび割れ挙動を観察することが困難である。ここでは、透

明かつ巨視化した模擬複合材料を作製し曲げ実験を行う。具体的には、母材を透明なエポキシ樹脂とし、繊維にはステンレスばね線を用いて作成した模擬複合材料に対して、3 点曲げ載荷を行い破壊まで荷重を加える。ビデオと顕微鏡による観察を行い、6 種類の積層構成のひび割れの発生と進展過程に及ぼす影響を検討する。

2.2. 模擬複合材料

模擬複合材料(以後、供試体)の寸法は、長さ 200mm、幅 40mm であり、高さは 5-7mm と供試体ごとに異なる(表-1)。また、供試体はエポキシ樹脂と繊維からなる複合部分と、エポキシ樹脂のみの部分によって構成されている。供試体は 6 体作成した。積層構成の違いによる比較を行うため直交積層、疑似等方積層がそれぞれ 1 種類、らせん積層が 4 種類である。表-1 に曲げ載荷実験に用いた供試体の積層構成を示す。繊維含有率は、複合部分のみについての繊維含有率と、供試体全体における繊維体積含有率の両方を示している。供試体をそれぞれ CP、QI、HL36-18、HL36-36、HL54-18、HL54-36 と呼ぶ。CP は cross-ply、QI は quasi-isotropic、HL は helicoidal laminate をそれぞれ表している。らせん積層供試体 HL の表記は、底面(引張側)の繊維配向角と刻み角の組み合わせで表記している。(以降、底面角 36°、積層の刻み角 18° のものは HL36-18 と表している。繊維配向角は、図-1 に示す単層板座標系 1-2 の積層板座標系 x-y に対する角度として定義される。)供試体作製に用いた母材と繊維の材料特性を表-2 に示す。

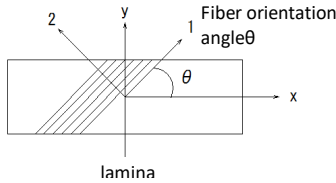


図-1 単層版座標系

表-1 供試体積層構成

供試体名	積層構成	高さ(mm)	繊維含有率 (全体)	繊維含有率 (複合部分)
CP	[90/180] ₄	5.7	0.086	0.110
QI	[90/135/180/225] ₂	6.0	0.088	0.107
HL36-18	[36/54/72/90/108/126/144/162]	6.3	0.106	0.167
HL72-18	[72/90/108/126/144/162/180/198]	5.8	0.105	0.152
HL36-36	[36/72/108/144/180/216/252/288]	6.3	0.099	0.156
HL72-36	[72/108/144/180/216/252/288/324]	6.2	0.100	0.156

表-2 材料物性

母材	曲げ強度(MPa)	曲げ弾性率(MPa)	横弾性率(MPa)	ポアソン比	比重
エポキシ樹脂 Z-1 50 分型	77	2193	818	0.34	1.16
エポキシ樹脂 CEP-5	115	3000	1119	0.34	1.15
ステンレスばね線	2200(引張強度)	197000	68500	0.30	8.0

2.3. 作製方法

供試体の作製方法を示す。まず、ステンレスばね線を供試体寸法に合うように切断し、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積層させて、層間を接着剤で固定し繊維部を作製する。シリコン製の型枠に組み立てたステンレスばね線の繊維部を設置し、母材であるエポキシ樹脂を所定の二液混合を行った後に型枠に流しこんで硬化させる。硬化は室温(24℃程度)下で行い、36 時間ほどで脱型した。またシリコン型枠は供試体の出来上がり寸法と同寸法のアルミ板を用いて型枠を作製した。

2.4. 載荷実験

載荷条件は 3 点曲げ載荷とし、変位制御によって載荷を行った。すべての供試体について、支点間距離は 160mm、載荷速度は 2mm/min で行い、最大変位は CP と QI は 30mm、その他の供試体は 40mm として載荷した。模式図を図-2 に示す。

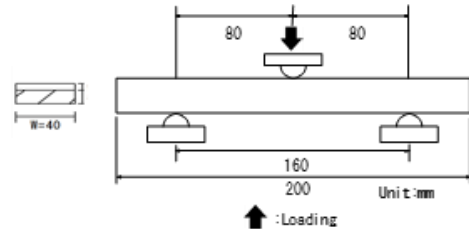


図-2 載荷実験模式図

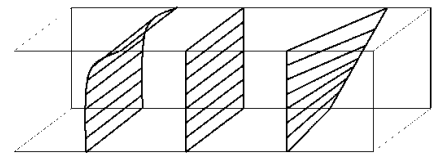


図-3 左から 曲がり進展, 直線進展, ねじり進展

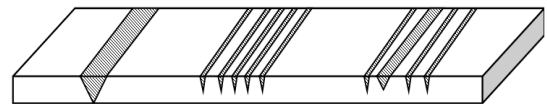


図-4 左から 集中破壊, 均等破壊, 不均等破壊

2.5. 観察方法

観察方法として、載荷中の供試体側面のビデオ観察、および載荷後の顕微鏡(DinoCapture2.0)による観察を行った。載荷後の観察を容易にするために、ひび割れの部分を赤色油性塗料で着色している。

本研究では 2 つの点に着目して供試体のひび割れ性状の分類を行った。

まず、単一のひび割れ見た際に、直線進展、曲がり進展、ねじり進展の三種類のひび割れに分類した。直線進展は曲げモーメントによって起きる梁軸垂直方向に直線的なひび割れを指す(図-3 中央)。曲がり進展は、曲げモーメントに加えてせん断力の影響も受けて曲がりながら進展するひび割れを指す(図-3 左)。また、曲がり進展はコンクリートにおける曲げせん断ひび割れと同義である。ねじり進展(図-3 右)はひび割れ先端の前線が進行方向に対してねじれながら進展するひび割れを指す。ひび割れを側面から観察したときに奥行き方向に同一ではないので、ひび割れ面が見えることになる。供試体には数種類のひび割れ進展がみられるが、最も高い割合を占めたものをその供試体のひび割れ進展として示し居ている。

また、引張面を見た際に、ひび割れの分布と形状により、集中破壊、均等破壊、不均等破壊の 3 種類に分類した。比較的全てのひび割れが一箇所に発生しているものを集中破壊(図-4 左)、同様の形状のひび割れが分散して複数発生しているものを均等破壊(図-4 中央)、複数の異なる形状のひび割れが分散発生しているものを不均等破壊(図-4 右)とした。

なお、側面から撮影したビデオ画像をもとに、発生し

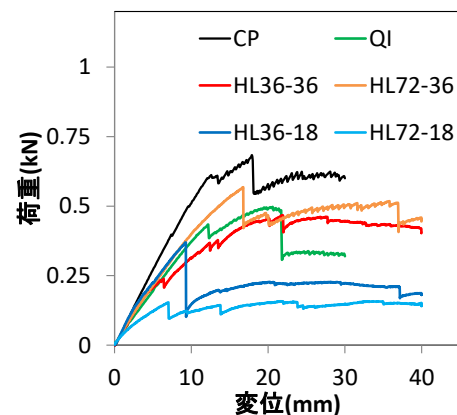


図-5 荷重変位曲線

たひび割れを順に第一ひび割れ, 第二ひび割れ, と呼ぶ。

3. 観察結果

3.1. CP

第一ひび割れは載荷点より右に 22mm の位置に発生し、4 層目まで到達していた。第二ひび割れは載荷点直下の位置で発生し、8 層目を越えて樹脂のみの部分まで到達していた。第三ひび割れは載荷点より左に 22mm の位置で、4 層目まで到達していた。第一、第二ひび割れは共に 1mm 程度開口していたが、第三ひび割れは亀裂のみであった。引張面から観察するとすべてのひび割れが 90° 方向の繊維に沿っており、均等破壊をしていた。

3.2. QI

第一ひび割れが荷点左 2~3mm の位置に発生し、第二ひび割れは荷点右 5~6mm の位置に発生した。さらにその後 3 つの浅いひび割れが発生した。開口したひび割れは第一ひび割れのみで、曲がり進展をしており、その他は直線進展をしていた。引張面から観察すると、不均等破壊をしていた。

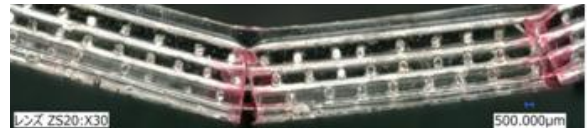


図-6 CP 側面



図-7 CP 引張面



図-8 QI 側面



図-9 QI 引張面

3.3. HL36-18

第一ひび割れが荷点右に 1~2mm の位置に発生し、鉛直方向から左に弧を描きながら 8 層目を超えて樹脂部まで到達した。この第一ひび割れの発生と同時に HL36-18 はおよそ 0.27kN の非常に大きな荷重低下を起こしている(図-5 参照)。続くひび割れは、第一ひび割れと同位置に発生した。第一ひび割れから分岐するように水平方向に 10mm 程度の白い筋が入り、その後、第一ひび割れが開口するとともに引張面の樹脂が落下し、さらに開口が進むと繊維部が抜け出た。ひび割れは平板水平方向に広がっていることからねじり進展と判断した。引張面から観察すると、押しつぶされたように白くなっており、集中破壊をしていた。

3.4. HL36-36

第一ひび割れが荷点左 3mm の位置に発生し、その後は浅いひび割れが 3 本、油性塗料がうすく染み込む程度のさらに浅いひび割れが 3 本発生していた。いずれのひび割れも開口は小さかった。ひび割れは直線進展と曲がり進展の 2 種類がみられ、曲がり進展がより多く発生していた。浅い曲がり進展のひび割れが複数発生しており、均等破壊をしていた。

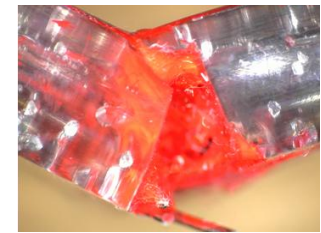


図-10 HL36-18 側面(右：拡大図)

3.5. HL72-18

第一ひび割れが荷点より左に 2~3mm の位置に発生し、1 層目まで到達していた。第二ひび割れが荷点右に 4mm の位置に発生し、第三ひび割れが荷点左 4mm の位置に発生した。いずれのひび割れも引張面が細かく碎けるような形状をしていた。HL72-18 は荷重の低下が小さく複数回に分かれて起きていることが特徴であるが、第一ひび割れの進展が浅かったことが原因だと考えられる。引張面からひび割れを観察すると、平板水平方向に広がっていたため、ねじり進展と判断した。第一ひび割れと第三ひび割れは側面では異なる位置に発生しているが、引張面では同位置に発生していること、第二ひび割れは非常に浅いことから、集中破壊と判断した。

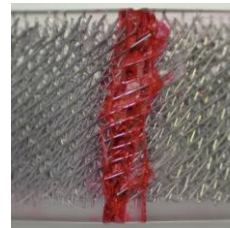


図-11 HL36-18 引張面(右：拡大図)



図-12 HL36-36 側面(右：拡大図)

3.6. HL72-36

第一ひび割れは荷点の左 7mm の位置に発生した。側面から見た形状は直線的であった。第二ひび割れは荷点右 1mm の地点で発生した。1 本のひびではなく、3 本のひび割れが並行していた。その後、第一ひび割れ、第二ひび割れともにひび割れが進展し、開口した。一部曲がり進展も見られたが、直線進展が主だった。引張面から観察すると、不均等破壊をしていた。

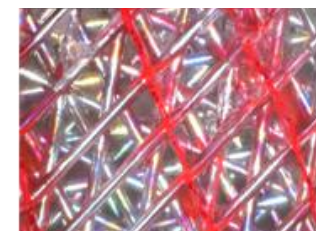


図-13 HL36-36 引張面(右：拡大図)



図-14 HL72-18 側面(右：拡大図)

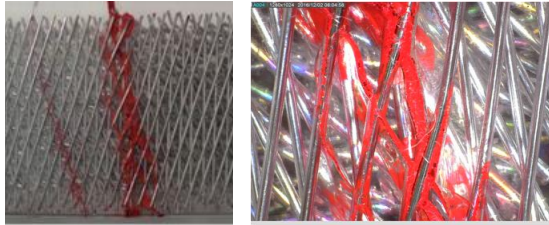


図-15 HL72-18 引張面(右：拡大図)

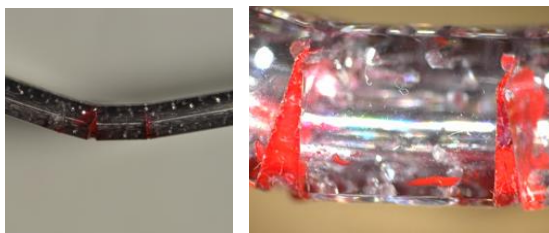


図-16 HL72-36 側面(右：拡大図)

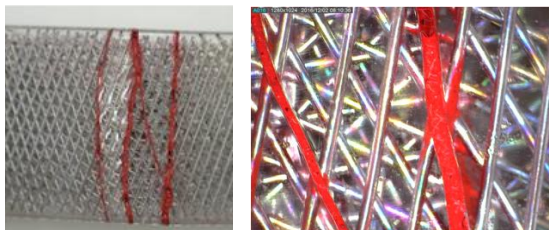


図-17 HL72-36 引張面(右：拡大図)

4. 考察

4.1. ひび割れ進展

刻み角が 36° 以上の供試体では直線進展が最も多く起きていた。一方、刻み角が 18° の供試体のひび割れはねじり進展になった。ひび割れは繊維の間を沿うように進展するが、ひび割れの進展の方向は急に変わることができないため、刻み角が 90° に近いと、繊維の配向角に沿うように進展しにくい。逆に繊維の刻み角が小さくなるほどひび割れが配向角に沿って進展しやすくなるため、ねじり進展を起こしやすくなると考えられる。

4.2. 引張面破壊形態

刻み角が 18° の供試体は集中破壊をした。しかし、HL36-18は開口が大きいのにに対して HL72-18は小さい開口であり、荷重変位曲線も大きく異なる。また、均等破壊をした HL36-36は荷重の低下が最も抑えられていたが、これは複数の浅いひび割れが荷重を分散することにより応力の再分配が起こるためだと考えられる。

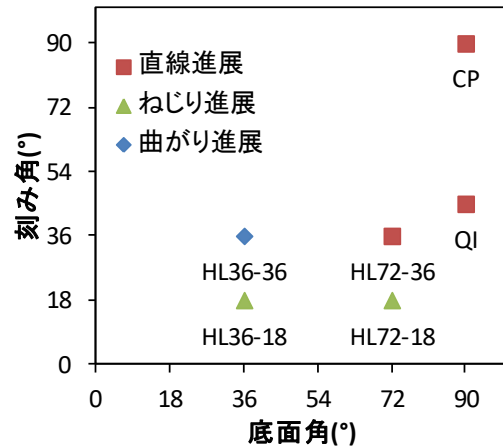


図-18 ひび割れ進展分類図

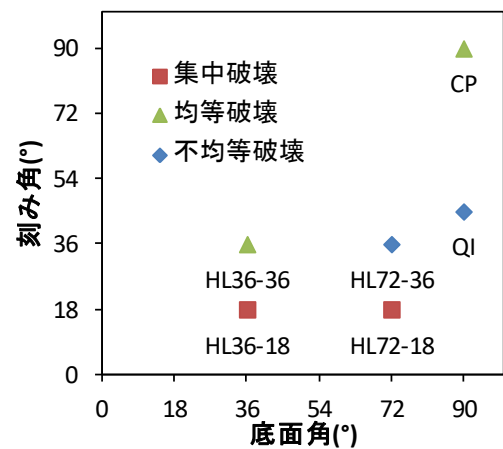


図-19 引張面破壊形態分類図

5. まとめ

本研究では、繊維積層複合材料に着目し、直交積層、疑似等方積層、らせん積層をもつ模擬供試体を作製し、破壊メカニズムを解明することを目的に載荷実験を行った。そして、本研究ではひび割れの進展と引張面の破壊形態に注目して観察を行った。底面角と刻み角をそれぞれ変えることで異なる挙動をすることが明らかになった。

底面角と刻み角がひび割れに与える影響を比較するには、刻み角をさらに細かくした供試体や、底面角と刻み角の組み合わせをさらに検討する必要がある。

参考文献

- 1)技術報告書 (Z-1/50 分型): 日新レジン株式会社技術部, 2015
- 2)D.ハル, T.W.クライン: 複合材料入門, ケンブリッジ大学出版, 1966.
- 3)八尋英恵: らせん積層複合材料の曲げひび割れ挙動の可視化実験, 第72号土木学会北海道支部論文報告集, 土木学会, A-21, 2015.