

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01515

研究課題名（和文）粘り強さを達成するらせん積層CFRPの変形・耐荷挙動の研究

研究課題名（英文）Investigation on the deformation and strength characteristics of helicoidally laminated CFRPs towards the achievement of ductility and toughness

研究代表者

松本 高志（Matsumoto, Takashi）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：40301121

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,500,000円

研究成果の概要（和文）：らせん積層を有し粘り強い生体の外殻構造に着想を得て、人工物であるCFRP積層複合材料と部材の脆性挙動の改善と粘り強い特性の獲得が可能かどうかを検討した。CFRPは高強度で軽量であるが、材料および部材挙動が脆性的であり、突然の局所的な破壊を生じて、耐荷能力を急激に失う。現在多く用いられている直交積層や擬似等方積層等のCFRPが示す脆性的な挙動を改善し、粘り強い特性を獲得できるならば構造材料として大きく可能性が広がる。本研究では、CFRP積層複合材料のらせん積層構成について詳細なバリエーションを検討し、材料と部材の損傷・破壊機構を確認・考察し、CFRP構造部材の変形・耐荷性能の向上を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

らせん積層を有し粘り強い生体の外殻構造に着想を得て、人工物であるCFRPでらせん積層複合材料と部材を作製し、曲げ挙動において一定の脆性挙動の改善と粘り強い特性の獲得が可能なることを示した。また、その破壊形態は従来の直交積層CFRPにみられる局所的な破断もしくは同一層間の剥離進展とは異なり、複数の層間を移りながら階段状に広範囲に剥離進展していく非常に特徴的な形態を示すことを明らかにした。本研究ではらせん積層CFRPの曲げ特性の基礎的確認を行ったことになり、今後の材料・構造の研究開発の可能性を示した。

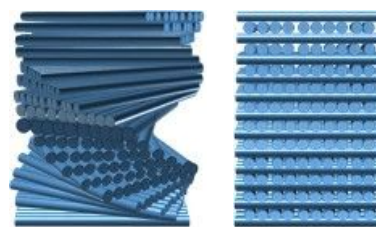
研究成果の概要（英文）：Inspired by the strong and tough exoskeleton of bio-structures, helicoidally laminated CFRP composite material and structural member have been investigated to see whether those helicoidally laminated CFRP shows the mitigation of brittleness and further strengthening and toughening. CFRP has the advantage of low density and high strength for structural usage. However, the material and structural member behavior of commonly used cross ply and quasi-isotropic CFRP laminate are very brittle, and they show a localized fracture, immediately after the peak load. If CFRP acquires strengthening and toughening with the mitigation of brittleness, the possibility as a structural material can be further expanded. The current research examined the various helicoidal laminate structures experimentally, and the damage and fracture mechanisms of material and structural member are observed and analyzed in order to improve the load and deformation capacity of CFRP structural members.

研究分野：構造工学 土木材料

キーワード：構造工学 土木材料 複合材料 FRP 生体模倣 らせん積層

1. 研究開始当初の背景

近年、生体模倣(バイオミメティクス)の研究開発が進んできており、中でも生体構造から着想した人工物の研究開発が進んできている。FRPのように、繊維が基質材料を補強し、かつ積層を成す構造は生体構造においてもよく見られる構造である。FRPでは直交積層(図1右)や擬似等方積層などが一般に用いられるが、生体構造では繊維方向が積層するにつれて一定角度間隔ですれていくらせん積層をしている場合が多く見られる(図1左)。甲殻類の外骨格などはらせん積層を有しており、粘り強い変形・耐荷挙動を示すことで、外力に対して破局的な脆性破壊を防いでいるものと考えられている。



らせん積層 直交積層

図1 模式図

2. 研究の目的

本研究では、らせん積層を有し粘り強い生体の外殻構造に着想を得て、人工物であるCFRP(炭素繊維強化ポリマー)積層複合材料と部材の脆性挙動の改善と粘り強い特性の獲得が可能かどうかを検討することを目的とする。CFRPは高強度で軽量であり、構造材料として望ましい特性を備えているが、材料および部材としての挙動が脆性的であり、線形挙動の後に突然の局所的な破壊を生じて、耐荷能力を急激に失う。現在多く用いられている直交積層や擬似等方積層等のCFRPが示す脆性的な挙動を改善し粘り強い特性を獲得できるならば構造材料として大きく可能性が広がる。本研究では、これまでの予備検討を踏まえて、CFRP積層複合材料のらせん積層構成について詳細なバリエーションを検討し、材料と部材の損傷・破壊機構を確認・考察し、CFRP構造部材の変形・耐荷性能の向上を行う。

3. 研究の方法

本研究では以下の3項目について実施した。

- (1) 長方形板梁供試体曲げ実験におけるらせん積層構造と载荷条件の影響
- (2) 正方形板供試体の板曲げ実験と载荷条件の影響
- (3) 長方形板梁供試体曲げ実験における限定らせん積層の影響

4. 研究成果

- (1) 長方形板梁供試体曲げ実験におけるらせん積層構造と载荷条件の影響

小規模要素実験としての長方形板梁供試体曲げ実験の積層構成は直交積層、らせん積層3種類とした。荷重は3点曲げ载荷と4点曲げ载荷とした。らせん積層にして層間の配向角度差を小さくするにつれて、最大荷重と第一ピーク荷重は減少するが、軟化は抑制され、第一ピーク荷重を経て荷重降下した後の荷重保持が大きくなり、脆性的挙動が改善されることを確認した。これに伴い第一ピーク荷重前後のエネルギー吸収量の比は一部のらせん積層において大きく向上した。損傷・破壊挙動においては、らせん積層の層間配向角度差を小さくすると、圧縮側では破断・層間剥離が少なくなるとともに層間剥離が大きく広がり、引張側では層間剥離が多く発生する傾向を確認した。総じて、局所的な損傷・破壊は起きにくくなり、損傷深さも小さくなっていることを確認した。また、三点曲げと四点曲げのいずれの载荷条件においてもらせん積層の特徴的な損傷・破壊形態が観察されることを確認した。

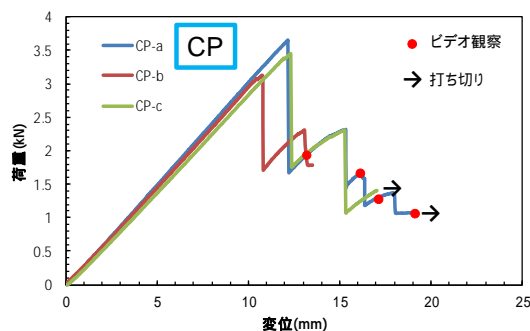


図2 荷重 - 変位関係 (直交積層 CP)

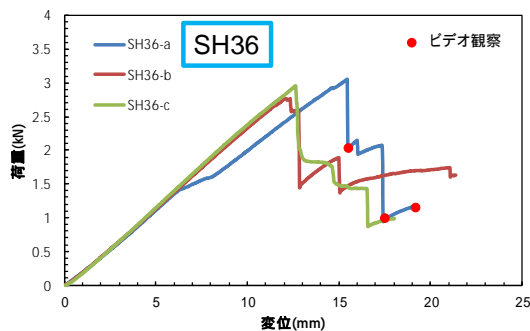


図3 荷重 - 変位関係 (らせん積層
層間配向角度差 36度 SH36)

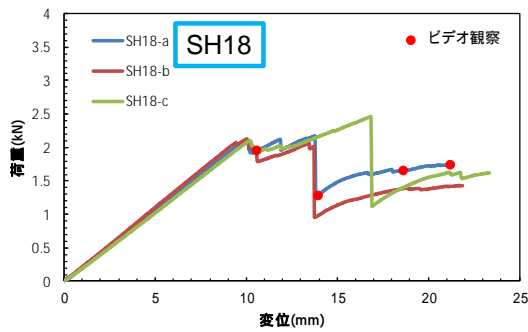


図4 荷重 - 変位関係(らせん積層
層間配向角度差 18度 SH18)

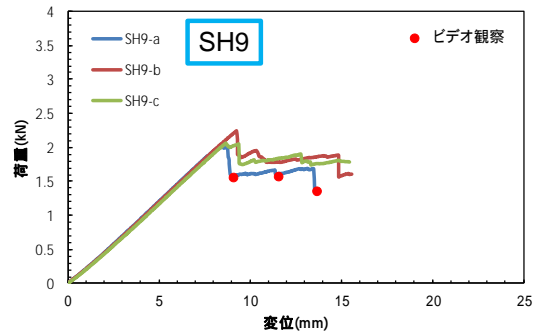


図5 荷重 - 変位関係(らせん積層
層間配向角度差 9度 SH9)

(2) 正方形板供試体の板曲げ実験と載荷条件の影響

CFRP の積層構成をらせん積層とした正方形板を作製し、円周支持の板を中央点集中荷重と中央部分布荷重の条件下で、直交積層の板と荷重 - 変位挙動と破壊挙動を比較した(合計4ケース)。荷重 - 変位曲線において、らせん積層の面載荷では大きな荷重降下後にも増減を繰り返しながら最大荷重に迫るレベルまで荷重増加が見られた(図6)。他3ケースでは最大荷重後に大きな荷重降下とその後の荷重減少がみられた。X線CT断層画像などによる破壊形態の観察では、直交積層の破壊はより局所的であり、一方でらせん積層の破壊は供試体全体に広がり、層間剥離はねじれるように発生することが確認された(図7)。

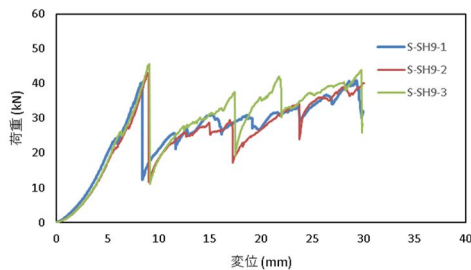


図6 荷重 - 変位関係(らせん積層 SH9)

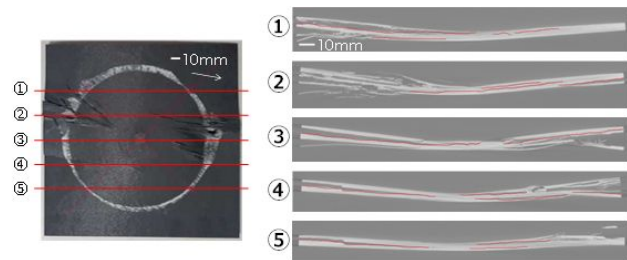


図7 X線CT断層画像

(3) 長方形板梁供試体曲げ実験における限定らせん積層の影響

小規模要素実験としての長方形板梁供試体曲げ実験において、供試体短軸方向については負荷が少ないことより繊維量を減らせる可能性を踏まえて、0度から180度まで配向角度を変化させる積層構成(全方向)に対して、0度から ± 45 度以内で配向角度を変化させる積層構成(部分方向 PSH9)を検討した。さらに、板厚方向においても負荷が少ない中立軸面を考慮して、下面から上面まで配向角度を変化させる積層構成(全厚)と下面および上面からの表層部分でのみ変化させる積層構成(部分厚 SH9/CP)についても検討した。破壊形態と、荷重 - 変位挙動、特性値を観察した結果、部分厚らせん積層においては、最終破壊が脆性的であったが、スキンのらせん積層部分から広範囲に損傷が始まり、コアの直交積層部分の脆性的な破壊挙動が抑制される挙動が見られた(図8)。一方で、比較対象とした直交積層は破壊が脆性的・局所的であった。最大荷重と初期剛性は、全方向全厚らせん積層よりも二種類の限定らせん積層の方が大きい値を示した(図9と10)。

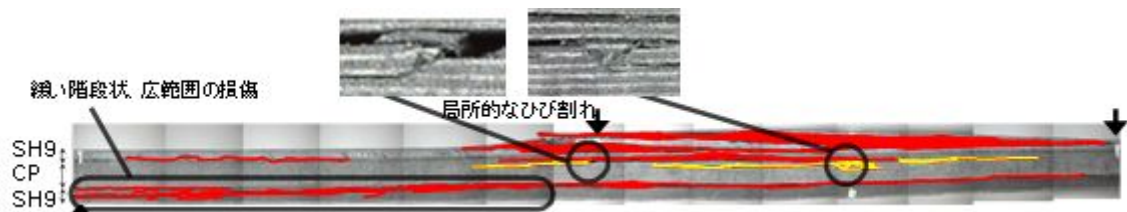


図8 PSH9/CPの破壊形態(黒矢印は載荷点と支点)

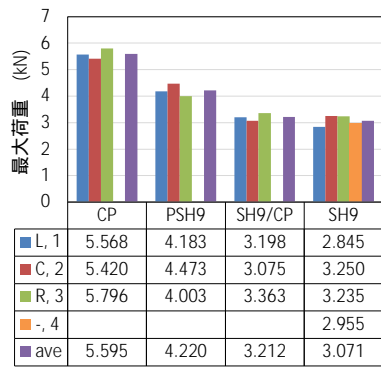


図 9 最大荷重

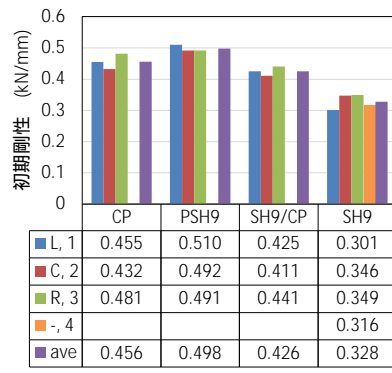


図 10 初期剛性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 松本高志・石澤郁馬・近藤健太	4. 巻 75
2. 論文標題 らせん積層CFRP板の曲げ破壊挙動の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学) 応用力学論文集Vol.22(特集)	6. 最初と最後の頁 I_581-I_588
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_581	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kota Matsue, Takashi Matsumoto, Ko Kakuma, and Hiroaki Nishi	4. 巻 258
2. 論文標題 Image analysis on the flexural behaviors of RC beams with artificial damage and the effects of repair	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 5021
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/mateconf/201925805021	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ikuma Ishizawa, Takashi Matsumoto, and Kenta Kondo	4. 巻 258
2. 論文標題 The experiment of four-point bending behaviours of helicoidally laminated CFRPs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 4012
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/mateconf/201925804012	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 松本高志・石澤郁馬・近藤健太	4. 巻 74
2. 論文標題 CFRP のらせん積層化による曲げ挙動と破壊形態の検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学) 応用力学論文集Vol. 21(特集)	6. 最初と最後の頁 I_639-I_647
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.74.I_639	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 遠藤祐希・鄧朋儒・松本高志
2. 発表標題 直交積層CFRP長方形板の曲げ変形挙動の画像解析
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浜山千佳・鄧朋儒・松本高志
2. 発表標題 限定的にらせん積層を用いたCFRPの曲げ変形・耐荷挙動に関する研究
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本高志・石澤郁馬・近藤健太
2. 発表標題 らせん積層CFRP板の曲げ破壊挙動の検討
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本高志・松江晃太・角間恒・西弘明
2. 発表標題 模擬劣化ひび割れを導入したRC梁の曲げ挙動に関する画像解析
3. 学会等名 第13回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永井崇雅・松江晃太・松本高志・角間恒・西弘明
2. 発表標題 移動荷重下の模擬劣化RC床版の変形挙動に関する画像解析
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松江晃太・角間恒・松本高志・西弘明
2. 発表標題 画像解析を用いた水平模擬ひび割れを有するRC梁の曲げ挙動に関する検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸下達哉・松本高志
2. 発表標題 機械学習によるコンクリート表面変状の自動検出モデルの改善
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石澤郁馬・松本高志・近藤健太
2. 発表標題 らせん積層CFRP平板の点および面載荷時曲げ挙動
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Matsue, Takashi Matsumoto, Ko Kakuma, and Hiroaki Nishi
2. 発表標題 Image analysis on the flexural behaviors of RC beams with artificial damage and the effects of repair
3. 学会等名 The 4th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ikuma Ishizawa, Takashi Matsumoto, and Kenta Kondo
2. 発表標題 The experiment of four-point bending behaviours of helicoidally laminated CFRPs
3. 学会等名 The 4th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Matsumoto and Momoka Nasu
2. 発表標題 Fiber model analysis on the flexural behaviors of CFRP box beams
3. 学会等名 9th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本高志・石澤郁馬・近藤健太
2. 発表標題 CFRP のらせん積層化による曲げ挙動と破壊形態の検討
3. 学会等名 第21回応用力学シンポジウム講演概要集
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

構造デザイン工学研究室
<https://bridge.eng.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------