

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01411

研究課題名(和文) 生体模倣らせん積層CFRPによる構造部材の変形・耐荷挙動の研究

研究課題名(英文) Investigation on the deformation and strength characteristics of structural members made of bio-inspired helicoidally laminated CFRPs

研究代表者

松本 高志 (MATSUMOTO, Takashi)

北海道大学・公共政策学連携研究部・教授

研究者番号：40301121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：生体構造を模倣したらせん積層CFRP構造部材の挙動と特性を脆性挙動の改善と粘り強い特性の獲得という視点から明らかにし、損傷と破壊の形態と機構を検討することを目的とした。既往研究では「部位」に相当する規模が検討された。本研究では、生体の外骨格に相当して「部材」規模である閉断面のらせん積層CFRP箱形断面梁の曲げ載荷実験を実施して、曲げ荷重下における変形・耐荷の挙動と特性を明らかにし、損傷と破壊の形態と機構を検討した。加えて、過去に検討した「部位」としてのらせん積層CFRP長方形板の曲げ載荷実験に対して、らせん積層構成を反映したモデルを作製した有限要素解析を実施して変形機構の検討を行った。

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骨格構造に着想を得て、人工物であるCFRPを用いて生体の外骨格に相当する箱形断面梁をらせん積層で製作した。曲げ挙動において、脆性挙動の緩和と粘り強い特性の獲得が可能であることを示した。また、その破壊形態は面外への隆起とジグザク状のひび割れを呈する非常に特徴的な形態を示すことを三次元デジタル画像相関法も用いて明らかにした。本研究ではらせん積層CFRPの部材レベルでの曲げ特性の基礎の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)：The objective of this study was to clarify the behaviors and characteristics of helicoidally laminated CFRP members and to investigate the pattern and mechanism of damage and fracture from the viewpoint of improving the brittle behavior and acquiring tough characteristics of the bio-inspired members. In previous studies, the scale corresponding to “a part of a structural member” was considered. In this study, the scale corresponding to “a structural member” was investigated. Bending experiments were conducted on helicoidally laminated CFRP box beams, which correspond to the exoskeleton of a living body, to achieve the above-mentioned objective. Additionally, finite element analysis was conducted to investigate the deformation mechanism of helicoidally laminated CFRP rectangular plates, which had been studied as “a part of a structural member” in the past, with a model reflecting the configuration of the helicoidally laminated CFRP.

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

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

生体模倣 (バイオメティクス) の分野において、様々な研究開発が行われており、その中で生体構造から着想した人工物の研究開発が進められている。シャコの捕脚などの生体構造では、キチン繊維の配向方向が積層するにつれて一定角度差でずれているらせん積層構成が多く見られる (図 1)。甲殻類の外骨格などもらせん積層構成を有しており、耐荷・変形に粘り強い挙動と特性を有することで、外力に対する破局的な脆性破壊を防いでいると考えられる。

一方で、人工物である CFRP (炭素繊維補強ポリマー) は直交積層や擬似等方積層 (図 1) などが一般に用いられるが、生体構造に着想を得たらせん積層 CFRP の外力に対する挙動と特性をこれまでも確認してきた。その結果、層間をまたぐ階段状のひび割れ進展、破局的な脆性破壊と断裂の回避、最大荷重後の荷重降下量の低減と残存耐力の保持、などの特徴が確認されている。しかしながら、これらは比較的小規模で単純な荷重条件である長方形板の一方方向曲げもしくは正方形板の二方向曲げでの確認に留まっていた。

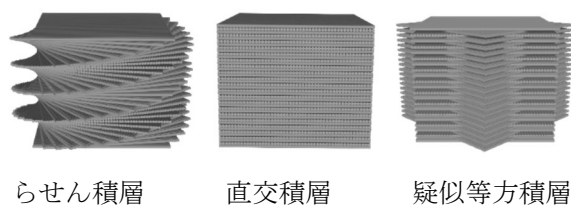


図 1 積層構成のイメージ

2. 研究の目的

本研究の目的は、生体構造を模倣したらせん積層 CFRP を製作し、それを用いた構造部材の脆性挙動の改善と粘り強い特性の獲得という視点から、部材の挙動と特性を明らかにし、損傷と破壊の形態と機構を検討することとする。これまでに小規模の供試体で、「構造部材」に対しては「部位」に相当する規模を検討した。本研究では次の段階に進み、生体の外骨格に相当する「部材」として閉断面の箱形断面梁をらせん積層 CFRP により製作して曲げ載荷実験を実施する。曲げ荷重下における耐荷・変形の挙動と特性を明らかにし、損傷と破壊の形態と機構を検討する。加えて、過去に検討した「部位」としてのらせん積層 CFRP 長方形板の曲げ載荷実験に対して、らせん積層構成を反映したモデルを作製した有限要素解析を実施して、変形機構の検討を行う。

3. 研究の方法

- (1) 箱形断面梁の曲げ挙動と破壊形態の実験的検討
- (2) 箱形断面梁の曲げ変形挙動の三次元デジタル画像相関法による検討
- (3) 長方形板の曲げ載荷実験の有限要素解析による変形機構の検討

4. 研究成果

- (1) 箱形断面梁の曲げ挙動と破壊形態の実験的検討

直交積層 (CP)、らせん積層 2 種類 (SH18, SH9) の CFRP 箱形断面梁を製作して、四点曲げ載荷実験を実施し、曲げ挙動・破壊形態の観察と検討を行った。SH18 は配向角度差 18 度であり、SH9 は 9 度のらせん積層構成である。

荷重-変位関係を図 2 に示す。配向角度差が小さくなると、最大荷重後の荷重降下量が減少し、破壊進行時の軟化勾配が緩やかになった。総じて脆性的な破壊挙動の緩和を確認した。破壊形態については、CP は局所的なひび割れ、SH18 と SH9 は隆起や尾根を伴うジグザグ状のひび割れを示した。らせん積層 CFRP 箱形断面梁 (SH18 と SH9) のウェブは、面外方向への変形に起因したと考えられる特徴的な破壊形態を示した。

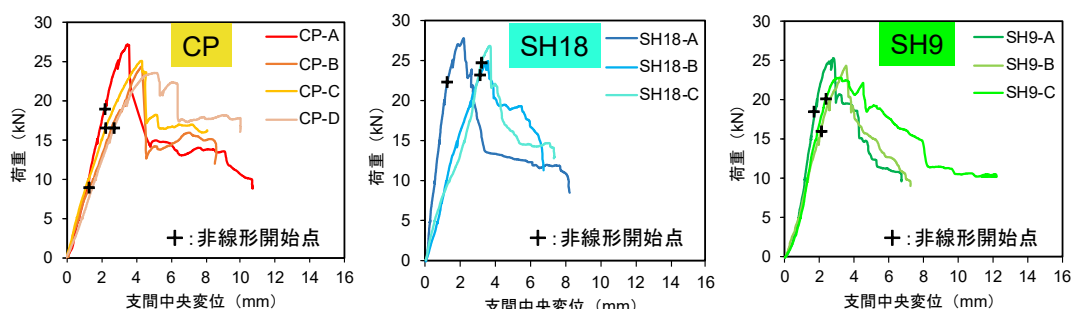


図 2 荷重-変位関係

(2) 箱形断面梁の曲げ変形挙動の三次元デジタル画像相関法による検討

直交積層 (CP) とらせん積層 (SH9) の CFRP 箱形断面梁を製作して四点曲げ载荷実験を行った。载荷実験においては、ステレオカメラにより梁ウェブの曲げおよびせん断支間を撮影し、三次元デジタル画像相関解析 (3D-DIC 解析) を用いて梁ウェブの面内および面外方向への変形を検討した。

载荷実験において、目視での観察では CP と SH9 で異なる破壊形態を確認した。CP では一直線状のひび割れが見られた。一方で SH9 では面外への隆起に伴うジグザク状のひび割れが見られた。

3D-DIC 解析の結果を図 3 および図 4 に示す。CP では、载荷点と支点近傍に局所的な面外方向変位と最大主ひずみが確認でき、せん断支間が大きく一様にせん断変形していることが確認できた。SH9 では、载荷点と支点近傍だけでなく、ウェブの上部と中央を中心に広い範囲で丸くなるような面外変形が発生し、その影響を受けたと考えられる最大主ひずみベクトル分布が形成されていた。

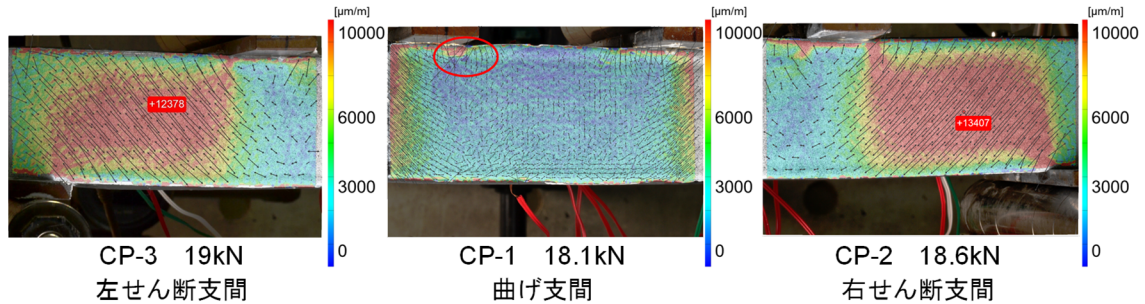


図 3 CP の最大主ひずみベクトル分布

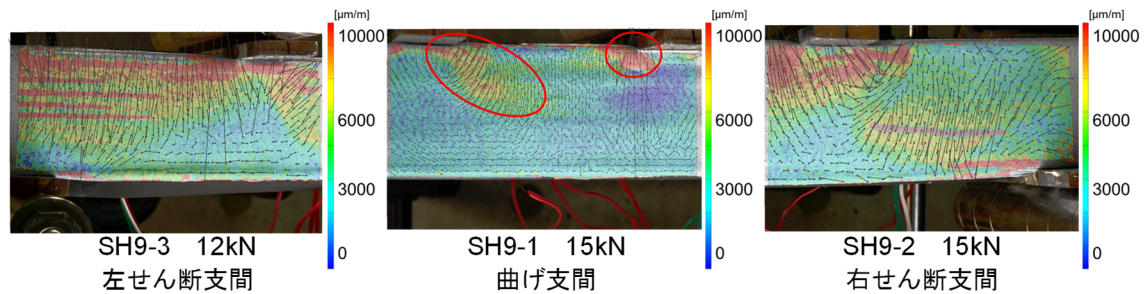


図 4 SH9 の最大主ひずみベクトル分布

(3) 長方形板の曲げ载荷実験の有限要素解析による変形機構の検討

有限要素解析 (FEA) により、らせん積層 CFRP 長方形板の曲げ変形挙動を 3D-DIC 解析と比較し検討することを目的として、CFRP の異方性を考慮した積層板のモデルを作成し、線形弾性解析を行った。対象は、直交積層 (CP)、擬似等方性積層 (QI)、らせん積層 (SH9) の 3 種類の積層構成とした。以下では、長方形板のウェブ面について述べている。

軸方向直ひずみ分布において、3 種の積層構成は上縁で圧縮ひずみが最大、下縁で引張ひずみが最大となる梁理論に従った分布が確認された。また、3D-DIC 解析とも同様な分布が得られた。面外方向変位について図 5 と図 6 に示す。CP はほとんど面外変形が生じていなかったのに対して、QI では上縁と下縁で変位量の異なる面外変形が確認された。SH9 ではねじれと上下縁での圧縮・引張が重なった面外変形が確認された。また、CP と QI では 3D-DIC 解析と同様な分布が得られているが、SH9 では、3D-DIC 解析においてねじれによる面外変形は見られたものの、上下縁での圧縮・引張による面外変形は見られなかった。

最大主ひずみベクトル分布を図 7 に示す。CP と QI では概ね梁理論に従った分布が確認された。一方で SH9 では上縁から下縁にかけて角度が変化する斜め方向の分布となり、最大主ひずみベクトルの直交方向に破壊時のひび割れが生じることが確認された。また、CP、QI では 3D-DIC 解析と同様な分布が得られており、SH9 では圧縮縁を除いて 3D-DIC 解析と同様な分布が得られた。

実験供試体に対して 3D-DIC 解析で観察された変形挙動の有限要素解析による再現には引き続き検討が必要とされている。

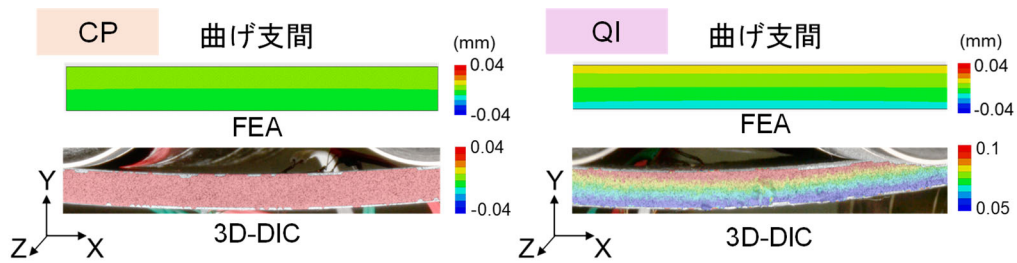


図5 CPとQIの面外方向変位分布 (FEAと3D-DIC)

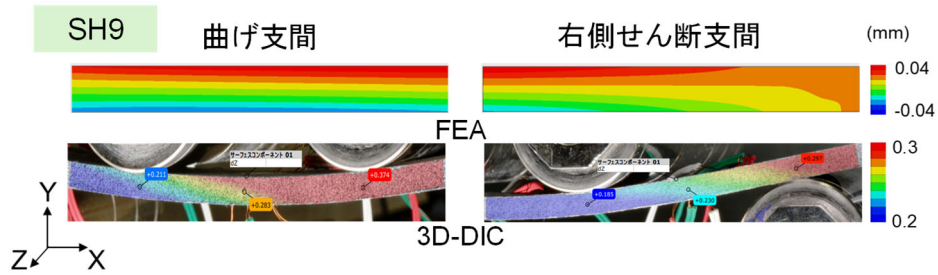


図6 SH9の面外方向変位分布 (FEAと3D-DIC)

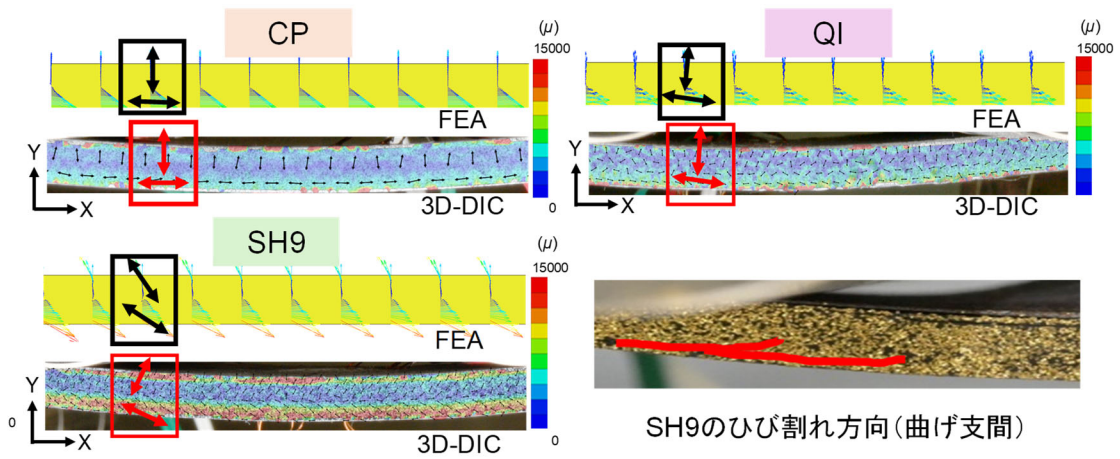


図7 曲げ支間の最大主ひずみ分布 (FEAと3D-DIC)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 松本高志・遠藤祐希・近藤健太	4. 巻 79
2. 論文標題 DIC解析によるらせん積層CFRPの曲げ変形挙動の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 22-15034
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscej.22-15034	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 松本高志・浜山千佳・近藤健太	4. 巻 77
2. 論文標題 限定らせん積層CFRPの四点曲げ変形・耐荷挙動の実験的検討	5. 発行年 2021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. 24）	6. 最初と最後の頁 I_275-I_283
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejam.77.2_I_275	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 Takamasa Nagai, Pengru Deng, and Takashi Matsumoto	4. 巻 20
2. 論文標題 Image analysis for deformation behaviors of RC beams with simulated deteriorations under moving wheel load	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 85-102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3151/jact.20.85	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐野凌希・松本高志
2. 発表標題 有限要素解析によるらせん積層CFRP 長方形板の曲げ変形挙動の検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤有輝・松本高志
2. 発表標題 三次元DIC 解析によるらせん積層CFRP 箱形断面梁の曲げ変形挙動の検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐野凌希・松本高志
2. 発表標題 らせん積層構造を有する CFRP長方形板の曲げ変形挙動の有限要素解析
3. 学会等名 年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤有輝・松本高志
2. 発表標題 らせん積層 CFRP箱形断面梁の曲げ変形挙動の三次元 DIC解析
3. 学会等名 年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関口拓哉・松本高志
2. 発表標題 らせん積層CFRP 長方形板の曲げ挙動の三次元DIC 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 2023年

1. 発表者名 森下傑彦・松本高志
2. 発表標題 らせん積層CFRP箱形断面梁の曲げ挙動と破壊形態の検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本高志・遠藤祐希・近藤健太
2. 発表標題 DIC解析によるらせん積層CFRPの曲げ変形挙動の検討
3. 学会等名 第25回応用力学シンポジウム講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takamasa Nagai, Ko Kakuma, Hiroaki Nishi, Pengru Deng, and Takashi Matsumoto
2. 発表標題 Image analysis on the deformation behaviors of RC beams with simulated deteriorations under moving wheel load fatigue
3. 学会等名 5th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤有輝・鄧朋儒・松本高志
2. 発表標題 らせん積層CFRP箱形断面梁の曲げ挙動の画像解析
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤祐希・鄧朋儒・松本高志
2. 発表標題 DIC解析によるらせん積層構造を有するCFRPの曲げ変形挙動の検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本高志・浜山千佳・近藤健太
2. 発表標題 限定らせん積層CFRPの四点曲げ変形・耐荷挙動の実験的検討
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム講演概要集
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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