

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04028

研究課題名(和文) 材料と構造の統合的アプローチによるCFRP部材の変形・耐荷性能の向上

研究課題名(英文) Improvement of deformation and load bearing performance of CFRP members through integrated approach of material and structure

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) 6,200,000円

研究成果の概要(和文)：積層材料であるCFRPの材料設計の自由度は大きく、積層構成に応じて構造部材の変形・耐荷挙動も大きく変化する。ゆえにCFRPの部材設計手法の確立においては、積層複合材料の特性と部材中での負荷状態と損傷形態の双方を把握する必要がある。本研究では、材料要素実験、構造部材実験、画像計測、複合材料理論、有限要素解析を用いた統合的なアプローチを深化させて、変形・耐荷挙動の力学的メカニズムの解明をより詳細にし、CFRP構造部材の変形・耐荷性能の向上を行った。

研究成果の概要(英文)：Freedom of CFRP material design as a laminate composite is wide, and deformation and strength characteristics of structural members change widely according to its laminate structure. Therefore, in order to establish the design method of a CFRP structural member, it is necessary to understand loading effects and damage states of a structural member. Through the integrated approach of material and structure with material element experiment, structural member experiment, image analysis, composite theory, and finite element analysis, this research clarified the mechanisms of deformation and load bearing behavior and improved the deformation and load bearing performance of a CFRP structural member.

研究分野：工学

キーワード：CFRP 曲げ部材 積層構成 画像計測 変形機構 耐荷機構

1. 研究開始当初の背景

CFRPは高強度性、軽量性、高耐食性を利点として、航空宇宙や自動車等の分野において用いられており、社会基盤用途においても安全性と耐久性を確保できる構造材料として有望であるが、構造部材の設計方法は十分に合理的に確立されてるとは言えない。CFRPの任意の材料設計に対して、変位や耐荷力を算定する手法が確立されているとはいえず、異方性を踏まえた変位の算定や、破壊や座屈により決まる耐荷力の算定が合理的になされていない。また、終局限界状態の理解が二義的になっている面もある。CFRP構造部材はモデル化においては、非線形性、支配的単層板の破壊、積層板の層間分離などを踏まえて行う必要があり、さらには、終局限界状態への損傷・破壊形態を踏まえ、破壊に対して粘り強い材料・部材設計を行うことが考えらえる。

2. 研究の目的

本研究では、材料と構造の統合的アプローチにより、CFRP(炭素繊維補強プラスチック)構造部材の変形・耐荷性能の向上を行うことを目的とする。積層材料であるCFRPの材料設計の自由度は大きく、積層構成に応じて構造部材の変形・耐荷挙動も大きく変化する。ゆえにCFRPの部材設計手法の確立においては、積層複合材料の特性と部材中での負荷状態と損傷形態の双方を把握する必要がある。本研究では、材料要素実験、構造部材実験、画像計測、複合材料理論、有限要素解析を用いた統合的なアプローチを深化させて、変形・耐荷挙動の力学的メカニズムの解明をより詳細にし、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項目に沿って実施する。
- (1) 離散的な材料構造を考慮した解析手法の構築
 - (2) 画像解析による負荷状態・破壊規準値の可視化精度向上
 - (3) 破壊に対してねばり強い材料・部材の検討

4. 研究成果

- (1) 離散的な材料構造を考慮した解析手法の構築
CFRP構造部材は線形・破壊でモデル化されることが多いが、実際には非線形性を呈する。これは、樹脂によるせん断ひずみの非線形性と、単層板破壊の漸増による直ひずみの非線形性のためである。積層理論によりCFRP積層板の各層の構成則を足し合わせて積層板の構成則を設定するとともに、各層の破損をTsai-Wuの破壊規準により判定した。また、せん断ひずみの非線形性を部材からの推定と材料試験からの測定との2通りで設定して検討した。図1と図2に擬似等方積層と直交積層の箱形断面梁の実験と解析による荷重-

変位関係を示す。妥当な結果が得られている。

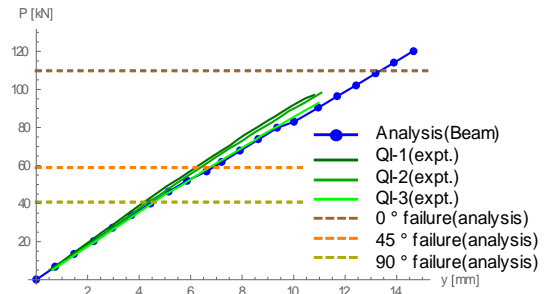


図1 擬似等方積層梁の荷重 - 変位関係

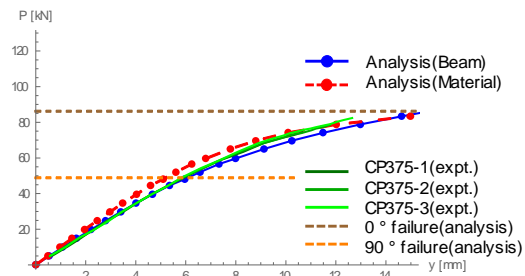


図2 直交積層梁の荷重 - 変位関係

(2) 画像解析による負荷状態・破壊規準値の可視化精度向上

デジタル画像相関法による変位・ひずみ・破壊指標値の算出において、精度向上を試みた。測定点間隔を密にするとともに、フィルター処理による誤差低減を行った。図3は擬似等方積層箱形断面梁のせん断ひずみ分布を示し、図4は同じ梁の破壊指標値を示している。いずれも載荷板(灰色で表示)端部で値が大きくなり、破壊指標値は実際の破壊位置と一致する結果を得た。

また、開発したデジタル画像相関法は人工的な損傷を加えたRC梁の複雑な曲げ変形・ひび割れを対象とした解析にも用いた。さらに、深層学習を用いたひび割れを含む各種損傷状態の物体認識を可能とする手法を構築した。

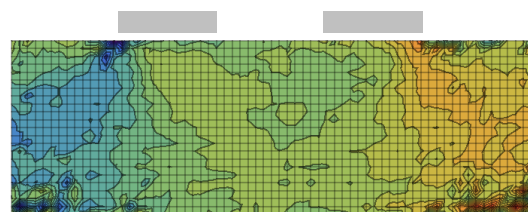


図3 せん断ひずみ分布

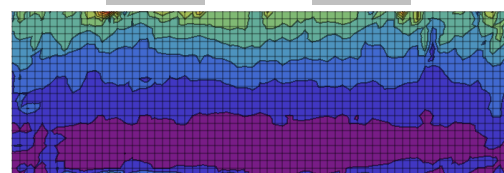


図4 破壊指標値

- (3) 破壊に対してねばり強い材料・部材の検討

生体の外殻に見られるキチン繊維のらせん積層に着想を得て、CFRPの積層をらせん積層とすることで損傷・破壊に及ぼす影響を検討した。らせん積層(図6)は直交積層(図5)と比較して、荷重-変位関係が異なり、耐荷力は減少するものの、残存荷重が改善する挙動が見られた。脆性挙動の低減で一定の効果があった。

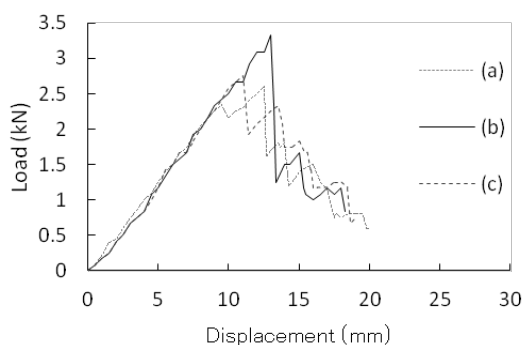


図5 直交積層板の荷重-変位関係

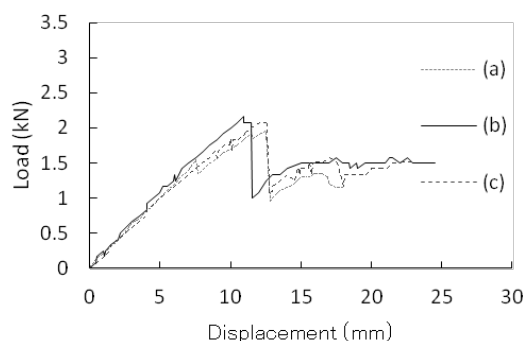


図6 らせん積層板の荷重-変位関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8件)

横山傑、松本高志：Deep Learningによるコンクリートの変状自動検出器の開発とWebシステムの実装，土木学会論文集A2(応用力学)，査読有，Vol. 73，2017，I_781-I_789

Suguru Yokoyama and Takashi Matsumoto：Development of an Automatic Detector of Cracks in Concrete Using Machine Learning，Procedia Engineering，査読有，2017，Vol. 171，1250-1255

Tomohiro Yokoyama and Takashi Matsumoto：Development of Stereo Image Analysis for Measuring Small Deformation，Procedia Engineering，査読有，2017，Vol. 171，1256-1262

Kenta Kondo and Takashi Matsumoto：Fabrication Accuracy and Material Properties of Spiral-laminated CFRP Specimens Made of UD Prepreg，Procedia Engineering，査読有，2017，Vol. 171，1287-1293

Kazusa Morikawa, Hanae Yahiro, and Takashi Matsumoto：Visual Examination of Flexural Cracking Behaviors in a Helicoidally Laminated Composite，Procedia Engineering，査読有，2017，Vol. 171，1301-1307

Takayuki Hosome, Shoichi Zaike, and Takashi Matsumoto：Bending Characteristics of Helicoidal Laminated CFRP，Procedia Engineering，査読有，2017，Vol. 171，1325-1331

Momoka Nasu and Takashi Matsumoto：Analysis on Nonlinear Bending Behaviors of CFRP Beams by Section Partition Method，Procedia Engineering，査読有，2017，Vol. 171，882-889

松本高志，三重野嵩之，櫻庭浩樹：せん断スパン長の異なる箱形断面CFRP梁の単層板破壊に基づく解析，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，査読有，Vol. 71，2015，II_1-II_11

〔学会発表〕(計 30件)

松江晃太・角間恒・松本高志：模擬劣化RC梁の曲げ挙動と補修の効果に関する画像解析，土木学会北海道支部論文報告集，2018

石澤郁馬・近藤健太・松本高志：らせん積層CFRPの4点曲げ挙動に関する実験，土木学会北海道支部論文報告集，2018

Kota Matsue and Takashi Matsumoto：Image analysis on the bending tests of RC beams with repaired artificial damages，6th International Doctoral Symposium(国際学会)，2017

松本高志・細目貴之・石澤郁馬・近藤健太：らせん積層CFRPの曲げ挙動と破壊形態，第12回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，2017

横山傑・松本高志：SNSを用いたDeep Learningによるコンクリートの変状自動検出器の開発，土木情報学シンポジウム講演集，2017

横山傑・松本高志：Deep Learningによるコンクリートの変状自動検出器の開発とWebシステムの実装，第20回応用力学シンポジウム講演概要集，2017

横山傑，松本高志：ディープラーニングを用いたコンクリートのひび割れ自動検出器の開発，第19回応用力学シンポジウム講演概要集，2016

松本高志，中村知美：GFRP箱形断面梁の有限要素解析，第6回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集，2016

Ahmed Attia Mahmoud Drar, Takashi Matsumoto, and Toshiro Hayashikawa: Numerical Simulation of FRP Strengthening for RC Slabs Reinforced with Plain Bars under Moving Load Fatigue, The 11th German-Japanese Bridge Symposium (GJBS)

(国際学会), 2016

Suguru Yokoyama and Takashi Matsumoto: Development of an Automatic Detector of Cracks in Concrete Using Machine Learning, The 3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) (国際学会), 2016

Tomohiro Yokoyama and Takashi Matsumoto: Development of Stereo Image Analysis for Measuring Small Deformation, The 3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) (国際学会), 2016

Kenta Kondo and Takashi Matsumoto: Fabrication Accuracy and Material Properties of Spiral-laminated CFRP Specimens Made of UD Prepreg, The 3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) (国際学会), 2016

Kazusa Morikawa, Hanae Yahiro, and Takashi Matsumoto: Visual Examination of Flexural Cracking Behaviors in a Helicoidally Laminated Composite, The 3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) (国際学会), 2016

Takayuki Hosome, Shoichi Zaïke, and Takashi Matsumoto: Bending Characteristics of Helicoidal Laminated CFRP, The 3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) (国際学会), 2016

Momoka Nasu and Takashi Matsumoto: Analysis on Nonlinear Bending Behaviors of CFRP Beams by Section Partition Method, The 3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) (国際学会), 2016

横山傑, 松本高志: Deep Learning によるコンクリートのひび割れ自動検出器の開発と SNS を用いたシステムの実装, 土木学会北海道支部論文報告集, 2017

近藤健太, 松本高志: UD プリプレグを用いたらせん積層構成 CFRP の作製精度と材料特性の考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 2017

森川和将, 木村雄太, 松本高志: 可視化らせん積層複合材料の曲げ荷重-変位関係の考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 2017

木村雄太, 森川和将, 松本高志: 可視化らせん積層複合材料の曲げひび割れ挙動の観察, 土木学会北海道支部論文報告集, 2017

石澤郁馬, 細目貴之, 松本高志: らせん積

層 CFRP の曲げ破壊形態, 土木学会北海道支部論文報告集, 2017

②松江晃太, 角間恒, 松本高志: 水平模擬ひび割れを導入した RC 梁の変形挙動の画像解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 2017

②那須桃香, 松本高志: せん断変形を考慮した断面分割法による CFRP 梁の非線形曲げ挙動の解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 2017

③細目貴之, 石澤郁馬, 松本高志: らせん積層 CFRP の曲げ荷重-変位関係, 土木学会北海道支部論文報告集, 2017

④横山傑, 松本高志: 機械学習を用いたコンクリートのひび割れの自動検出器の開発, 土木学会北海道支部論文報告集, 2016

⑤八尋英恵, 森川和将, 松本高志: らせん積層複合材料の曲げひび割れ挙動の可視化実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 2016

⑥在家頌一, 細目貴之, 松本高志: らせん積層 CFRP の曲げ特性に関する実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 2016

⑦近藤健太, 松本高志: UD プリプレグを用いたらせん積層構成 CFRP の作製精度と材料特性の考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 2016

⑧中村知美, 松本高志: 有限要素解析による GFRP 梁の変形挙動の解明, 土木学会北海道支部論文報告集, 2016

⑨Takashi Matsumoto and Xingwen He: Image Analysis of Damage and Fracture of CFRP Box Beams, The Fourteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-14) (国際学会), 2016

⑩松本高志, 小林周史: GFRP 製箱断面梁における変形・損傷の画像解析, 第 11 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 高志 (MATSUMOTO, Takashi)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 40301121