

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14606

研究課題名（和文）その場観察に基づくCFRPの界面特性同定とマルチスケール損傷解析手法の構築

研究課題名（英文）Interface property identification based on in-situ observation and multiscale damage analysis of CFRP

研究代表者

後藤 圭太 (Goto, Keita)

名古屋大学・ナショナルコンポジットセンター・准教授

研究者番号：00760935

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、炭素繊維強化複合材料（CFRP）の炭素繊維/マトリクス界面特性について評価することを目的とする。引張試験中のその場観察によって界面損傷の発生・進展挙動を観察するとともに、デジタル画像相関法によりひずみ分布を測定した。観察結果を基に、結合力要素を導入したマルチスケール弾粘塑性解析によって界面強度を同定した。さらに、同定されたパラメータを用いてCFRPの解析を実施し、有効性の検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素繊維/マトリクス界面損傷はCFRPに発生する最初期の損傷であり、これを起点としてトランスバースクラックや層間はく離が誘発されることから、その特性を詳細に把握することが重要となっている。本研究では界面損傷の発生・進展を観察し、数値解析によって特性の同定を試みた。このように、界面損傷の有無やその際の応力/ひずみ分布を直接計測した例は少なく、本研究の学術的意義である。また、界面特性を把握することはCFRPの特性向上にも繋がることから、社会的意義も大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：In this study, carbon fiber/matrix interface property of carbon fiber-reinforced plastics was evaluated. Initiation and propagation of interface damage were observed by an in-situ observation during a tensile test, and strain distribution was measured by a digital image correlation method. Then, interface strength was identified using a multiscale analysis with a cohesive model. An analysis of CFRP with the identified parameters was performed and the validity of the method was confirmed.

研究分野：材料力学，計算力学

キーワード：複合材料 CFRP 非弾性特性 界面特性 その場観察

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 低炭素社会の実現のため、構造重量の軽量化による CO₂ 排出削減が求められており、従来の金属系材料から高い比剛性・比強度を有する炭素繊維強化プラスチック（CFRP）などの複合材料への置換が進んでいる。

(2) CFRP は炭素繊維とマトリクス樹脂から構成される複合材料であり、複雑な力学的特性を示すことが知られている。特に、CFRP の損傷・破壊に関しては、炭素繊維／マトリクス界面損傷が最初期に発生し、これを起点としてトランスバースクラックや層間はく離が誘発されることから、その特性について詳細に把握することが重要となっている。

(3) 炭素繊維／マトリクス界面特性を実験的に測定する方法は存在するものの、マトリクスの塑性特性などにより測定精度に影響を及ぼす可能性がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、その場観察に基づき CFRP の炭素繊維／マトリクス界面特性を高精度に評価可能な手法を構築することを目的とする。

(2) 引張試験中のその場観察によって界面損傷の発生・進展挙動を観察するとともに、デジタル画像相関（DIC）法により界面近傍のひずみ分布を取得する。

(3) 炭素繊維／マトリクス界面の応力を数値シミュレーションにより算出することで、界面特性の同定を実施する。また、同定された界面特性を用いて CFRP のマルチスケール弾粘塑性解析を行い、その力学的特性を評価する。

(4) 以上から、炭素繊維／マトリクス界面特性について評価を行い、界面特性や CFRP の力学的特性の向上に資することを目標とする。

3. 研究の方法

(1) 界面損傷の発生・進展挙動を観察するため、幅方向に 1 本の炭素繊維を配置したエポキシ樹脂単繊維試験片を作製し、引張試験を実施した。

(2) 試験片側面をデジタルマイクロスコープでその場観察することで界面はく離の発生・進展を観察するとともに（図 1）、DIC 法により周囲のひずみ分布を測定した（図 2）。試験片側面を鏡面研磨することで観察を容易にするとともに、アルミナ粉末を塗布することで DIC 法のマーカーとして使用した。

(3) 数値シミュレーションに基づき界面特性を評価するため、炭素繊維／マトリクス界面を双線型結合力モデルでモデル化するとともに、マトリクスであるエポキシ樹脂には弾粘塑性構成式を適用し、非線形特性を考慮した。その場観察によって界面はく離の発生が確認された際の応力分布を数値シミュレーションにより算出し、その結果より界面強度を同定した。

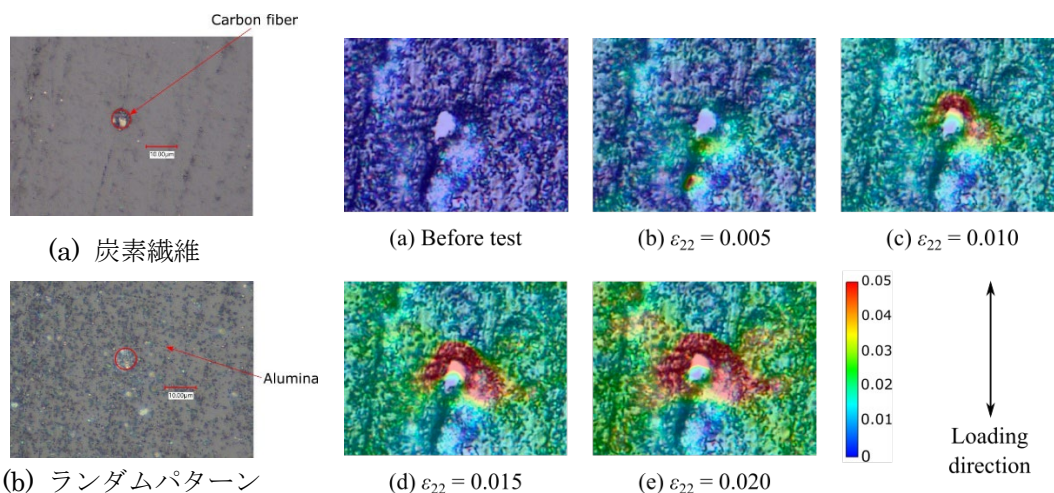


図 1 試験片端面観察画像

図 2 引張方向垂直ひずみ ε_{22} 分布

(4) 得られた材料パラメータを用いてマルチスケール弾粘塑性解析を実施し、CFRP の力学的特性を評価した。

4. 研究成果

(1) 炭素繊維 (T700SC) / エポキシ樹脂 (XNR6815) からなる単繊維試験片の引張試験を行うとともに、デジタルマイクロスコープを用いてその場観察を実施した。その場観察の結果より、ひずみ約1%から引張方向の繊維/マトリクス界面において界面はく離とみられる損傷が観察され、ひずみの増加とともにその領域が拡大する様子が確認された。

(2) 試験片に塗布したランダムパターンにより、DIC 法を用いて炭素繊維/マトリクス界面近傍のひずみ分布を測定した。図 2 は DIC 法による引張方向垂直ひずみ ϵ_{22} の分布である。これらの結果より、引張ひずみの増加とともに DIC 法で測定されるひずみの値も増加しており、引張ひずみが 1%を超えたあたりから、界面損傷の発生・進展によって炭素繊維上部で局所的にひずみが高い値を示している様子が確認できる。

(3) DIC 法で測定されたひずみ分布を基に、数値シミュレーションにより炭素繊維/マトリクス界面特性を評価した。界面特性のモデル化には、双線型の結合モデルを採用した。また、マトリクスの力学的特性に関しては、弾粘塑性構成式を用いてモデル化するとともに、マトリクスであるエポキシ樹脂単体の引張試験結果を基に構成式を同定した。DIC 法では試験片表面のひずみ分布を測定することから、平面応力状態を仮定した 2 次元問題として、引張試験と同様に炭素繊維を 1 本含む有限要素モデルを作製し、数値シミュレーションを実施した。

(4) 実験および解析により得られた炭素繊維/マトリクス樹脂界面近傍のひずみ分布を図 3 に示す。DIC 法の結果には観察時の誤差によるひずみ分布の乱れがやや見られるものの、ひずみ 0.003~0.004 の範囲では、概ね解析結果と同程度のひずみが生じていることがわかる。一方で、ひずみ 0.005 における結果に着目すると、実験結果では界面近傍で局所的に高いひずみが生じており、解析結果との差が大きくなっている。これは、前述のように実験では界面損傷が発生したためであり、その際の界面垂直応力を解析結果から算出したところ 21.8MPa であった。この値を本研究で使用した材料系における界面引張強度と決定した。さらに、同定された界面引張強度を基に結合モデルの初期剛性についても検討したところ、この材料系では $5.0 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^7$ MPa/mm の範囲が適切であった。

(5) 上記において同定された界面特性を使用して、繊維直交方向負荷を受ける一方向 CFRP のマルチスケール弾粘塑性解析を実施した。繊維配置のランダム性を考慮した有限要素モデルを用いて解析を実施したところ、負荷方向に沿って炭素繊維が配置されている箇所において界面垂直応力が高くなる傾向が観察され、一方向 CFRP に作用するマクロ引張応力が 10~15MPa の範囲において初期界面損傷が発生する様子が確認された。

(6) 以上のように、その場観察による実験結果から数値シミュレーションにより炭素繊維/マトリクス界面特性を評価可能であり、本手法の有効性が示された。

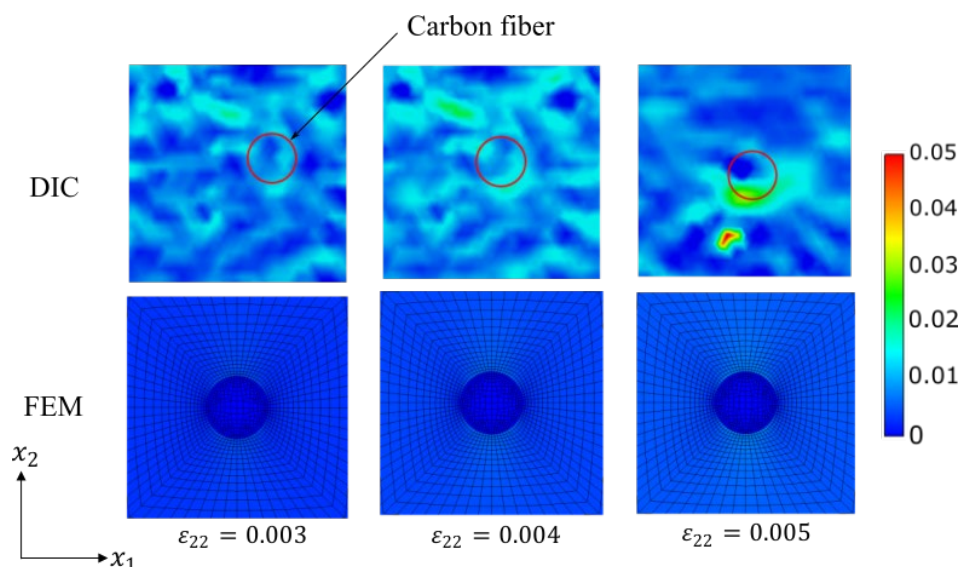


図 3 引張方向垂直ひずみ ϵ_{22} の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 後藤圭太, 野々山康介, 荒井政大, 吉村彰記
2. 発表標題 織物CFRP積層板のマルチスケール損傷特性解析
3. 学会等名 第46回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋大学構造力学研究グループwebページ http://str.nuae.nagoya-u.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
---------	---------