

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04184

研究課題名（和文）マイクロスケールの繊維揺らぎに起因する一方向CFRPのキンクバンド破壊起点の解明

研究課題名（英文）Initiation of kink-band failure of a unidirectional CFRP due to microscale fiber undulation

研究代表者

上田 政人（UEDA, Masahito）

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：80434116

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：一方向炭素繊維強化プラスチック（CFRP）において繊維方向圧縮強度が低い原因は、その内部に生じるマイクロスケールの繊維揺らぎに起因している。しかし、この繊維揺らぎのどの箇所から繊維方向圧縮破壊（キンクバンド破壊）が生じるのかは明らかになっていなかった。本研究では、計測可能な繊維初期不整角のばらつきを考慮に入れた解析モデルを構築することによって、初期不整角の大きな繊維群から順次圧縮荷重の分担力が低下し、初期不整角が0.5度程度の繊維群が圧縮荷重を支持できなくなることで、最終破壊を生じることを明らかにした。また、繊維初期不整角のばらつきが圧縮強度に与える影響を定量的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の繊維方向圧縮強度は繊維方向引張強度の50～60%程度であり、曲げを受ける構造部材として使用する場合には圧縮側の補強が必要となる。従って、圧縮強度が向上すれば、CFRP構造の更なる軽量化を実現することができる。本研究では、マイクロスケールの繊維揺らぎを考慮に入れた一方向CFRPの圧縮強度予測方法を確立することによって、圧縮強度を決定している繊維揺らぎを特定した。また、繊維初期不整角のばらつきが圧縮強度に与える影響を評価した。以上により、一方向CFRPの繊維揺らぎを抑制した場合の圧縮強度の向上率を定量的に評価することができるようになった。

研究成果の概要（英文）：The microscale fiber fluctuations in a unidirectional carbon fiber reinforced plastic (UD CFRP) are the main cause of the low compressive strength in the fiber direction. However, the origin of the longitudinal compressive failure i.e., kink band failure in the microscale fiber fluctuations has not been clarified. In this study, the compressive strength was predicted considering the variability of the fiber misalignment angle. All fibers supported a compressive load in the initial loading. The fibers progressively declined their load-bearing capability in descending order of the misalignment angle with an increase in compressive loading. The fibers with a misalignment angle of 0.5 degree or smaller showed a large load drop after their maximum loading, which triggered the ultimate failure. It was shown that the variability of the fiber misalignment angle was indispensable to determining the axial compressive strength of the UD CFRP.

研究分野：材料力学

キーワード：炭素繊維強化プラスチック 圧縮強度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一方炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の材料開発に伴い、繊維方向引張強度は向上しているが、繊維方向圧縮強度は引張強度の 50 ~ 60 % 程度に留まっている[1]。曲げを受ける構造に CFRP を適用する場合には、その圧縮側から先行して破壊が生じ易く、圧縮側の部材補強が必要となる。従って、CFRP の圧縮強度が向上すれば、CFRP 構造の更なる軽量化を実現することができる。

このように一方炭素 CFRP の圧縮強度が引張強度と比較して低い原因は、破壊モードの違いに起因する。繊維方向の引張負荷では繊維破断が生じることで最終破壊に至るため、炭素繊維の引張強度に依存している。一方で繊維方向の圧縮負荷では樹脂中の炭素繊維が共倒れを生じて荷重低下した後、長さが 100 μ m 程度のバンド帯を形成しながら炭素繊維が破断して最終破壊に至る(キックバンド破壊と呼ばれる)[2]。従って、一方炭素 CFRP の圧縮強度は炭素繊維の圧縮強度ではなく、樹脂のせん断特性に大きく依存している。

これまでに一方炭素 CFRP の圧縮強度を予測する研究論文は多数発表されている[例えば 3-5]。これらにおいては一定の繊維初期不整角や一般的な繊維うねりを仮定したモデルが用いられているが、X 線コンピュータ断層撮影装置を用いた実際の一方炭素 CFRP の繊維配列の観察結果から、炭素繊維にはマイクロスケールの繊維揺らぎが生じていることが示されている[6]。すなわち、従来研究においては現実と異なる一般的な繊維うねりが仮定されている。繊維揺らぎが一方炭素 CFRP の圧縮強度にどのように影響を与えているのか、繊維揺らぎのどのような個所が起点となって一方炭素 CFRP の最終破壊を導いているのかを評価することができない。

2. 研究の目的

一方炭素 CFRP の内部におけるマイクロスケールの繊維揺らぎに起因する圧縮破壊の起点を特定することができれば、圧縮強度を向上させる方策を得ることができる。本研究では一方炭素 CFRP の内部におけるマイクロスケールの繊維揺らぎによって圧縮破壊がどのように生じるのかを明らかにして、繊維揺らぎを考慮に入れた圧縮強度の予測手法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

一方炭素 CFRP の繊維方向圧縮応力 σ_x とせん断応力 τ_{12} とには以下の関係がある[3]。

$$\sigma_x = \frac{\tau_{12}}{(\phi_0 + \gamma_{12})} \quad (1)$$

ここで、 γ_{12} はせん断ひずみ、 ϕ_0 は繊維初期不整角である。添え字の x は負荷方向、1, 2 は繊維及び繊維直交方向を示す。式(1)における繊維方向圧縮応力 σ_x の最大値が一方炭素 CFRP の圧縮強度を与えるが、一定の繊維初期不整角 ϕ_0 のみ考慮されており、繊維揺らぎによる繊維初期不整角のばらつきは考慮されていない。

一方炭素 CFRP の内部では、各繊維は巨視的には一列に配列されているが(繊維初期不整角の平均値は 0°)、微視的には各繊維がマイクロスケールの揺らぎを有した状態となっている。プリプレグシートから成形される高性能 CFRP の場合、繊維初期不整角はおおよそ $\pm 3^\circ$ 以下で、正規分布に従うばらつきを有している[7]。繊維初期不整角が平均 $\bar{\phi}_0$ で標準偏差 Σ の正規分布に従う場合、繊維初期不整角の確率密度関数は次式で表される。

$$f(\phi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Sigma} \exp\left(-\frac{(\phi_0 - \bar{\phi}_0)^2}{2\Sigma^2}\right) \quad (2)$$

繊維揺らぎによる繊維初期不整角のばらつきを考慮するために、炭素繊維を複数の代表繊維初期不整角を有する繊維群に分けて、それぞれの繊維群による圧縮荷重の分担を考える。繊維初期不整角が ϕ_0^i から ϕ_0^{i+1} である炭素繊維を代表繊維初期不整角 θ_0^i の繊維群とすれば、繊維群 θ_0^i の存在確率は次式によって求められる。

$$A^i(\theta_0^i) = \int_{-\infty}^{\phi_0^{i+1}} f(\phi_0) d\phi_0 - \int_{-\infty}^{\phi_0^i} f(\phi_0) d\phi_0 \quad (3)$$

ある繊維群の存在確率は、一方炭素 CFRP の繊維方向断面積に対するその繊維群の断面積の比率と等しい。式(1)は繊維群の圧縮応答が繊維初期不整角 ϕ_0 に影響を受けることを示しており、一方炭素 CFRP 内部において圧縮応力は一様ではなく、繊維初期不整角に依存して変動している。従って、一方炭素 CFRP の圧縮応力は、全ての繊維群による圧縮荷重分担の総和により求めることができる。

$$\bar{\sigma}_x = \sum_i \sigma_x^i A^i \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_x^i (= \tau_{12}/(\theta_0^i + \gamma_{12}))$ は繊維群 $\theta_0^i (= (\phi_0^{i+1} + \phi_0^i)/2)$ が分担する圧縮応力である。

一方向 CFRP の圧縮強度を予測するため、斜向積層板を用いて面内せん断試験を実施し、せん断応力 - せん断ひずみ ($\tau_{12} - \gamma_{12}$) 応答を取得した。その結果を Ramberg-Osgood 式を用いて図 1 のように近似した。ある繊維初期不整角を有する繊維群の圧縮応力は、このせん断応答を式(1)に代入することにより求められる。

プリプレグシートから成形した一方向 CFRP を想定して、繊維初期不整角の平均値と標準偏差とをそれぞれ $\bar{\phi}_0=0^\circ$ 及び $\Sigma=0.6^\circ$ とし、面積比を求めた結果を図 2 に示す。また、繊維群 θ_0^i の代表繊維初期不整角を 0.1° ごとに变化させて、式(1)により圧縮応力 - 圧縮ひずみ応答を求めた。これよりそれぞれの圧縮応力 - 圧縮ひずみ応答に各繊維群の面積比を掛けることによって、圧縮荷重の分担応力を求めた。図 3 に、各繊維群 θ_0^i が分担する圧縮応力を色付きの線で示す。これらの分担応力を足し合わせることによって求めた一方向 CFRP 全体としての圧縮応力 - 圧縮ひずみ応答を、黒色の太線で示す。

負荷初期では荷重が線形的に増大している。その後、圧縮荷重の増大に伴い繊維初期不整角の大きな繊維群から順次圧縮荷重の分担応力が低下する。繊維初期不整角が 0.5° 程度の繊維群は最大荷重に到達後の荷重低下が大きく、この繊維群の荷重低下と共に一方向 CFRP 全体としての圧縮応力 - 圧縮ひずみ線図がほぼ水平となり、圧縮荷重を支持できなくなる。この結果、一方向 CFRP 全体として最終破壊を生じると考えられる。すなわち、繊維初期不整角が 0.5° 程度の繊維群が圧縮荷重を十分に支持できなくなることによって、一方向 CFRP 全体としての圧縮破壊を導いている。

繊維初期不整角の平均値と標準偏差とが繊維方向圧縮強度に与える影響を図 4 に示す。図中の破線は、繊維初期不整角が一樣 ($\Sigma=0^\circ$) の場合であり、図 3 の各分担応力の最大値と一致する。また、色付きの線は、標準偏差を $\Sigma=0.6, 0.8, 1.0^\circ$ として求めた繊維方向圧縮強度である。これより、繊維初期不整角の平均値が 1° より大きい場合には、繊維初期不整角のばらつきは圧縮強度にほとんど影響を与えない。一方で、繊維初期不整角の平均値が 1° より小さい場合には、繊維初期不整角のばらつきによって繊維方向圧縮強度が大きく低下する。一方向 CFRP では繊維初期不整角の平均値はほぼ 0° と考えられるため、繊維の揺らぎによる繊維初期不整角のばら

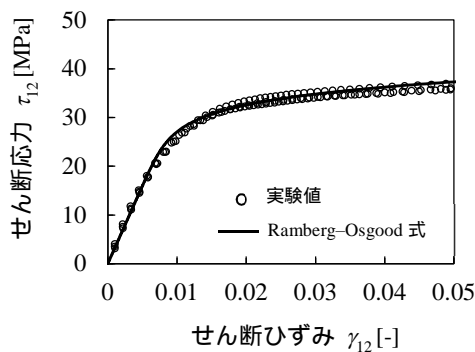


図 1 一方向 CFRP のせん断応力 - せん断ひずみ線図

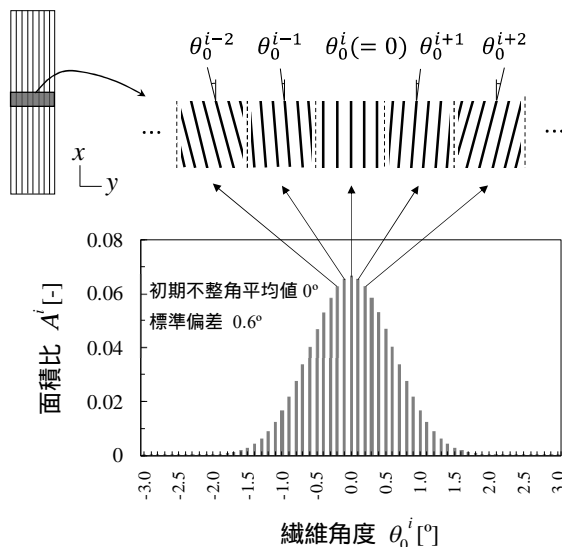


図 2 一方向 CFRP の全断面積に占める各繊維群の面積比

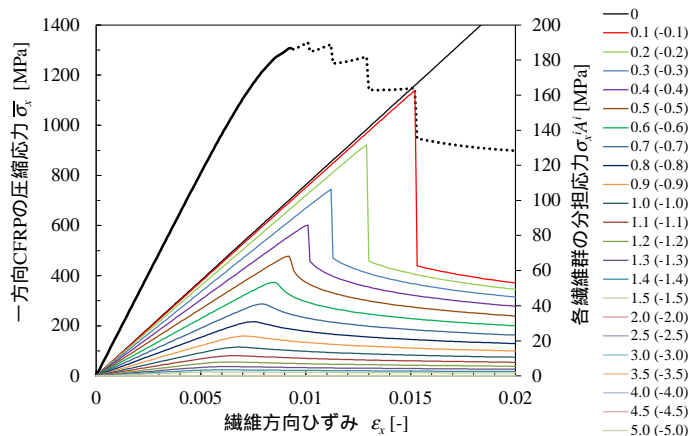


図 3 各繊維群が分担する圧縮応力とそれらの総和による一方向 CFRP の圧縮応力

つきが圧縮強度に大きく影響を与えている。

一方向 CFRP のキंकバンド破壊は繊維方向圧縮負荷による最大荷重（圧縮強度）に到達後、圧縮応力が低下して分岐応力と一致した時点で発生する[8]。キंकバンドが生じる臨界応力曲線においてキंकバンド幅を少しずつ増大させて、繊維方向圧縮応力曲線と接する点を見つけることにより、キंकバンド発生応力とキंकバンド幅とが求められる。繊維初期不整角の平均値を $\bar{\phi}_0 = 0^\circ$ 、標準偏差を $\Sigma = 0.4^\circ$ または 1.0° として得られた圧縮応力 - 圧縮ひずみ線図に、キंकバンド幅を $80\mu\text{m}$ または $95\mu\text{m}$ として算出したキंकバンドの発生応力曲線を記載したものを図5に示す。想定される繊維初期不整角のばらつきの範囲内で、実験にて観察されるキंकバンド幅が得られている[9]。また、繊維初期不整角のばらつきが大きくなると、キंकバンド幅が広くなることが明らかとなった。

4. 研究成果

計測可能な繊維初期不整角のばらつき分布を考慮に入れた解析モデルを構築して、一方向 CFRP の圧縮応力 - 圧縮ひずみ線図を解析的に求める方法を提案した。これより負荷初期では線形的に荷重増大するが、繊維初期不整角の大きな繊維群から順次その圧縮荷重の分担力が低下し、現状の CFRP においては初期不整角が 0.5° 程度の繊維群が圧縮荷重を支持できなくなることで、最終破壊を生じることを明らかにした。また、繊維初期不整角のばらつきが圧縮強度及びキंकバンド幅に与える影響を定量的に明らかにした。

<引用文献>

1. Toray Carbon Fibers America. TORAYCA T1000G, Toray technical data sheet, No. CFA-008. 2021.
2. S. Pimenta, R. Gutkin, S.T. Pinho, and P. Robinson, A micromechanical model for kink-band formation: Part I – Experimental study and numerical modelling, Composite Science and Technology, 69 (7-8) (2009), 948–955.
3. B. Budiansky and N.A. Fleck, Compressive failure of fibre composites, Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 41 (1993), 183–211.
4. S. Pimenta, R. Gutkin, S.T. Pinho, and P. Robinson, A micromechanical model for kink-band formation: Part II—Analytical modelling, Composites Science and Technology. 69 (2009), 956–964.
5. P. Davidson and A.M. Waas, Mechanics of kinking in fiber-reinforced composites under compressive loading, Mathematics and Mechanics of Solids. 21 (2016), 667–684.
6. T. Takahashi, M. Ueda, K. Iizuka, A. Yoshimura, and T. Yokozeki, Simulation on kink-band formation during axial compression of a unidirectional carbon fiber-reinforced plastic constructed by X-ray computed tomography images, Advanced Composite Materials, 28 (4) (2019), 347–363.
7. T. Yokozeki, T. Ogasawara, and T. Ishikawa, Nonlinear behavior and compressive strength of unidirectional and multidirectional carbon fiber composite laminates, Composites Part A, 37 (2006), 2069–2079.
8. M. Ueda, Y. Tasaki, C. Kawamura, K. Nishida, M. Honda, K. Hattori, T. Miyanaga, and T. Sugiyama, Estimation of axial compressive strength of unidirectional carbon fiber reinforced plastic considering local fiber kinking, Composites Part C, 6 (2021), 100180.
9. T-K. Jeong and M. Ueda, Longitudinal compressive failure of multiple-fiber model composites for a unidirectional carbon fiber reinforced plastic, Open Journal of Composite Materials, 6 (1) (2016), 8–17.

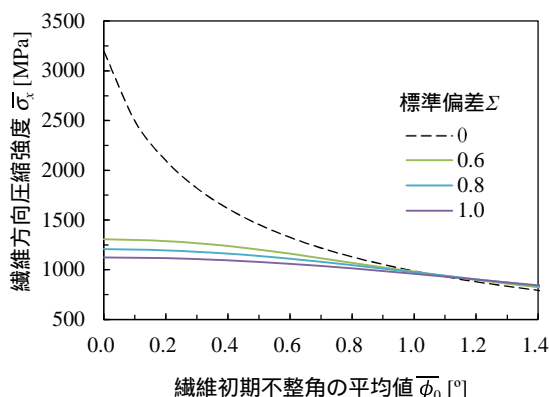


図4 繊維初期不整角の平均値と標準偏差とが一方向 CFRP の繊維方向圧縮強度に与える影響

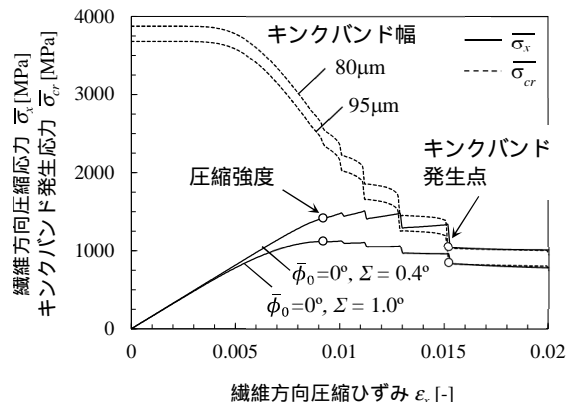


図5 キंकバンド幅の算出

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 1件）

1. 著者名 Takuya Takahashi, Masahito Ueda, Keisuke Miyoshi, Akira Todoroki	4. 巻 3
2. 論文標題 Initiation and propagation of fiber kinking from fiber undulation in a unidirectional carbon fiber reinforced plastic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Composites Part C: Open Access	6. 最初と最後の頁 100056 ~ 100056
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcomc.2020.100056	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 Shiryu Morita, Masahito Ueda, Takuya Takahashi, Kentaro Kajiwara, Akinori Yoshimura, Naoki Sugiura	4. 巻 32
2. 論文標題 Performance assessment for fiber tracking of unidirectional carbon fiber reinforced plastic by digital image correlation of X-ray computed-tomography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Composite Materials	6. 最初と最後の頁 35 ~ 47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/09243046.2022.2071117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shiryu Morita, Masahito Ueda
2. 発表標題 X-ray computed tomography-based automatic fiber tracking of unidirectional carbon fiber reinforced plastic by digital image correlation method
3. 学会等名 17th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Takahashi, Akira Todoroki, Masahito Ueda
2. 発表標題 Fiber kinking of unidirectional CFRP with clustered fiber arrangement
3. 学会等名 17th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森田子竜, 上田政人
2. 発表標題 アップデートデジタル画像相関法を用いた一方向炭素繊維強プラスチック内部の繊維うねりの評価
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術ミニシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田政人
2. 発表標題 繊維方向圧縮強度に与える界面強度の影響
3. 学会等名 日本界面学会 2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahito Ueda, Takuya Takahashi, Chikara Kawamura, Toshiaki Miyanaga
2. 発表標題 Digital twin simulation on axial compression of UD CFRP and key parameters on compressive strength
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Composites Materials (国際学会)
4. 発表年 2023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			
英国	Imperial College London			