

令和元年6月12日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14113

研究課題名(和文)高比圧縮と引張強度を兼備する最新型FRP構造材料の創製

研究課題名(英文) Development of new FRP structural material which combines high specific compression strength and high specific tensile strength.

研究代表者

鮑力民(BAO, Limin)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号：10262700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：繊維強化複合材料(FRP)は高強度・高弾性率で、広い分野に普及し発展している。FRPの圧縮強度は、その引張強度よりも大きく低くなっている。機械構造では引張応力だけでなく、圧縮応力も多く受けているため、FRP圧縮強度の向上は必須である。本研究では(a)FRP用の強化繊維の周りにフィラメントを巻き付けるフィラメントカバー方法を提案する、(b)フィラメントカバーした強化繊維束を使用し、FRPを成形し、その力学特性を評価した。試作結果は、フィラメント被覆炭素繊維束に成形したCFRPが従来のCFRPよりも著しく優れた圧縮特性と高い曲げ強度を示し、方法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案したフィラメント被覆炭素繊維束を利用した高比圧縮強度をもつFRP構造体を実現することにより、FRP構造材料の圧縮部位にある材料の3割以上が節約可能になり、飛行機や車の機体はさらに軽くなり、材料使用量が大幅に削減でき、省資源、省エネルギーをもたらす。本研究で扱う繊維工学技術は世界で初めての試みである。FRP圧縮問題の解決法では、学術的に新研究方向と新解析法を提示した。

研究成果の概要(英文)：The compressive strength of unidirectionally fiber reinforced FRP is lower than the material's tensile strength. Application of a bending load to a mechanical structure's FRP shell results in a tension side and a compression side. Because FRP has low compressive strength, the shell's compression side fails first, making it necessary to sacrifice the material's tension characteristics and to use more material that would otherwise be necessary when designing structures. We (a) propose the filament cover method for wrapping filament around the reinforcing fibers in unidirectionally fiber reinforced FRP, (b) mold FRP using prototype reinforcing fiber bundles, and (c) evaluate the material's compression and bending characteristics. Results indicate that FRP molded into filament-covered carbon fiber bundles exhibits significantly better compression characteristics than conventional CFRP as well as high bending strength, indicating the effectiveness of the proposed method.

研究分野：複合材料工学、繊維応用力学

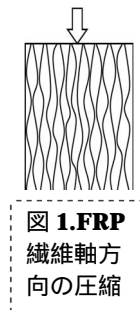
キーワード：FRP 圧縮強度 カバーリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

繊維強化複合材料(FRP)は異なる材料(高強度繊維・母材)を組み合わせで作られたもので、単一材料にはない優れた強度特性を持つ。FRP は比弾性率と比強度が金属材料に比べて極めて大きいため、小型化・軽量化の時代的要求に合致し、宇宙機器、航空機、船舶、自動車、スポーツ用品など広い分野で用いられている。

FRP は強化繊維軸方向には大きな引張り強度が得られるが、圧縮荷重に対しては 繊維が細いため座屈し易く圧縮には弱い(図1)。Roelof らの研究によると圧縮/引張強度の比は、カーボン繊維複合材(CFRP)が 0.61、ガラス繊維(GFRP)が 0.49、ケブラー繊維(AFRP)が 0.15、ダイニーマ繊維(UFRP)が 0.1 であった。構造物の多くは曲げや圧縮状態で使用されるため、それらを設計する際にはやむを得ず材料の引張り特性を犠牲にして、材料を多く(30%以上増量)使用しており、省エネ時代の要請と逆行している。このことから高圧縮特性も兼備する革新的 FRP 構造体の開発は現代社会において重要な技術的要請といえる。

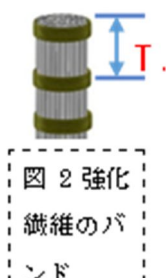


## 2. 研究の目的

高強度・高弾性率の繊維強化複合材料(FRP)は、航空宇宙など幅広い分野に普及し使用されているが、FRP は、繊維軸方向の圧縮強度と引張強度の比は低い。飛行機などの構造材では曲げ荷重に耐えるために圧縮変形部に繊維を多用して補強しているが、引張り強度の低下を招く。このトレードオフの関係の改善が求められている。本研究では、FRP の繊維軸方向の圧縮特性を向上するために、座屈長さを実効的に短くするよう強化繊維束(フィラメントヤーン)をカバリング補強して、FRP の圧縮特性を格段に向上させる手法を提案する。本研究により、曲げ荷重を受ける構造材料の更なる軽量化が可能となることは繊維構造材料分野では画期的なことで、省エネルギー社会に一層の貢献ができるものと考えている。

## 3. 研究の方法

FRP の圧縮強度を向上させるために、繊維束(ヤーン)の座屈荷重の向上が重要である。そこで繊維束に結束バンドを付与して座屈長さ(L)を実効的に短くし、座屈荷重を向上させることを提案する(図2)。繊維工学では、布の手触りをよくするために、伸びやすい繊維を固い繊維の表面に巻き付ける技術が知られている(カバリングヤーン法)。しかし本研究開発では逆の組み合わせとなり、伸びにくい繊維(CF, PF など)をそれより弾性率の小さい繊維の表面に巻き付ける。そのための技術は未確立である。本研究では、伸びにくい繊維に弾性率が小さい繊維束をカバリングできる新型の機構を設計し、大量に連続的にバンド付ヤーンを試作できる機械を試作する。圧縮と曲げテストなどの評価と、圧縮強度が増加するメカニズムを解明し、最適なパラメータを見つけることで、引張のみならず圧縮でも高比強度が可能な FRP 構造体(圧縮/引張強度の比が 0.90 以上)を目指して、さらなる軽量構造を代表する省エネルギー構造設計の実現に努める。



## 4. 研究成果

### 4.1 フィラメントカバリング法とその一方向繊維強化 FRP 作成の提案

FRP の圧縮強度を向上させるために、強化材とした繊維束の座屈荷重の向上が重要である。連続・大量生産できると考慮して 結束バンドを付与方法として、繊維工学におけるカバリング法を採用し、図3のようなフィラメントカバリング強化繊維束を取り入れる。

フィラメントカバリング強化繊維束を並べて、一方向シートを作成し、曲げサンプルの圧縮側にセットし、普通の強化繊維束でできた一方向シートを引張り側にセットする。樹脂を繊維束に含浸し、硬化して、図4のように一方向繊維強化FRPを完成する。

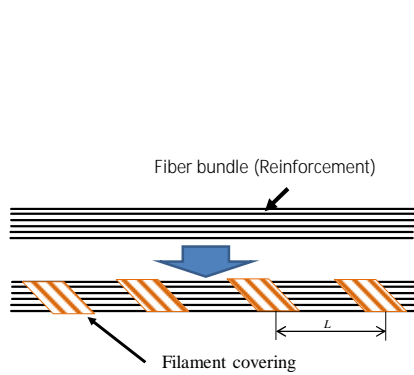


図3 Schematic diagram of a filament cover carbon fiber bundle.

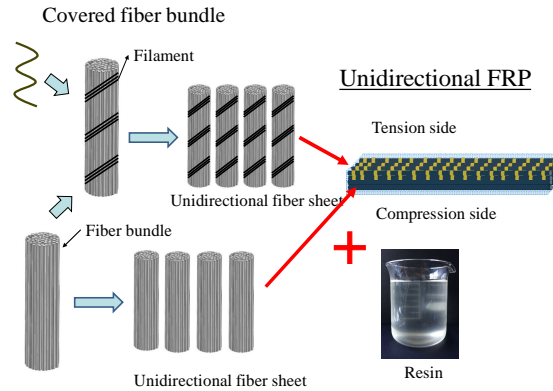


図4 Outline of the FRP structure for bending test

今まで繊維工学に使用されている繊維のカバリング法と機械では、柔らかいフィラメントで芯材の繊維をカバリングしている。その機械をそのまま使用すると、弾性率が大きく、摩耗に弱いフィラメントには毛羽が大量に生じ、破断してしまい、カバリング強化繊維束の作成が不可能である。ここで、図5(a)のような機械を制作した。ウイングの先端に、繊維との摩擦を低減するために表面にテフロンでコーティングしたセラミックガイドを採用した。ガイドでは繊維を折れないように小曲率曲面を設けた。それで作成したPBOフィラメントカバリングカーボン繊維束(SCCF)の拡大写真を図6に示す。毛羽なく、フィラメントが綺麗にカバーしていることを示している。

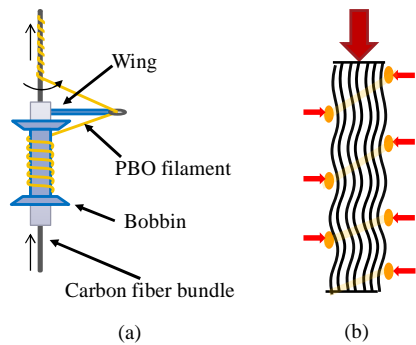


図5 Outline of a filament covering machine



図6 An example of PBO filament covered carbon fiber bundle (SCCF)

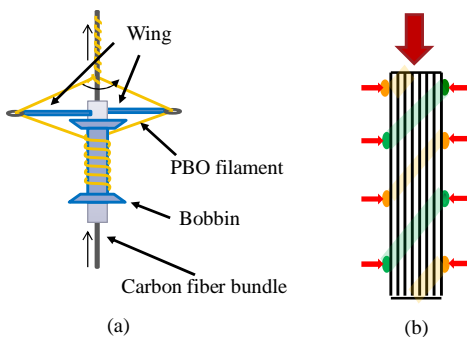


図7 Outline of a double filament covering machine



図8 An example of double PBO filament covered carbon fiber bundle (DCCF)

図 5(b)の拘束メカニズムを考えると、もっと拘束効果がよいと考えられるダブル方式も試みた。図 7(a)はその作成機械で、ポピンに 2 本 PBO フィラメントを同時に巻き付け、2 本ウィングで、カーボン繊維束に巻き付け、ダブル PBO フィラメントカバリングカーボン繊維束(DCCF)になる。図 8 は作成した DCCF の拡大写真で、カーボン繊維束の露出は SCCF より少なく、更に締め付けられていることが分かる。

#### 4.2 提案方法で作製した CFRP の力学特性

JIS K 7074 に基づき 3 点曲げ試験法を用いて、サンプルの曲げ特性を評価する。測定した曲げ弾性率のまとめは図 9 に示す。強化繊維束をフィラメントでカバーすると、わずかながら大きくなった。シングルとダブルカバリングの差は認められなかった。これは、曲げ弾性率は、負荷初期の特性で、カバリングとの影響が少なかったと考えている。

図 10 は、各サンプルの曲げ強度である。普通の CFRP より、PBO フィラメントカバリングカーボン繊維束で作成したサンプルの曲げ強度は大幅に向上した。SCCF/CFRP と DCCF/CFRP は CFRP より、それぞれ 20%と 36%向上した。

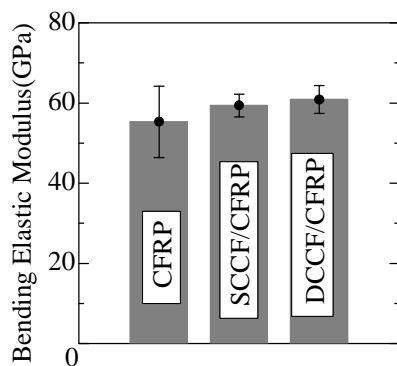


図 9 The bending elastic modulus (FRP, SCCF/CFRP, DCCF/CFRP).

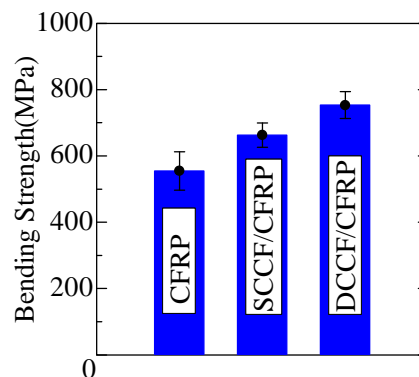


図 10 The bending strength (FRP, SCCF/CFRP, DCCF/CFRP).

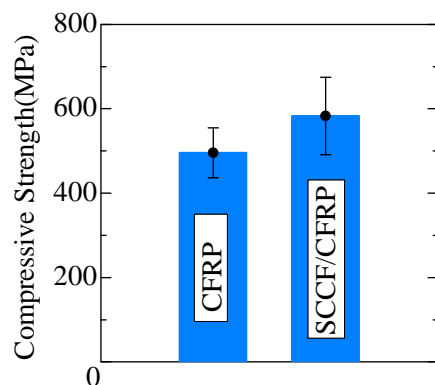


図 11 The in-plane compressive strength

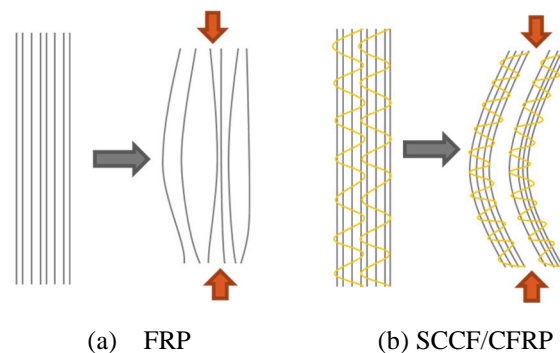


図 12 Schematic for improving compressive strength of FRP (CFRP, SCCF/CFRP).

JIS K 7076 炭素繊維強化プラスチックの面内圧縮試験方法に基づき圧縮試験を行い、フィラメントカバリング法を用いた FRP の圧縮特性の向上を確認する。FRP の面内圧縮試験の結果は図 11 に示す。PBO フィラメントカバリングカーボン繊維束を用いた SCCF/CFRP の圧縮強度は

普通のCFRPより大きくなった。SCCF/CFRPのサンプルが高曲げ強度になったのは、フィラメントカバリングによりサンプルの圧縮強度が向上された効果である。

破断面のSEM観察によると、FRPの圧縮側で座屈破壊を起こしている炭素繊維一本一本が独立して座屈を引き起こして破壊が起こっている。この概要図は図12(a)に示す。対して、SCCF/CFRPは圧縮側で座屈破壊が起きているが、CFRPのように繊維が独立して座屈せずカバリング法を用いたことによりカバリングしている何本かの繊維を束にして全体で破壊を起こしている様子が分かった(図12(b))。それでカバーにより座屈荷重を向上して、圧縮強度の向上に繋がった。特に、FRP板の圧縮側の破壊ではなく、引張り側が破壊していることから、提案したフィラメントカバリング強化繊維束法は、一方向繊維強化FRPの圧縮強度の大幅な向上に有効であると証明した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計22件)5件のみ記載する

1. Limin BAO, Kentarou SUZUKI, Jian SHI, Development of a Simple Molding Method for Continuous Fiber Reinforcement FRP in Shapes with Highly Curved Corners, Journal of Textile Engineering, 65, 2, 19-24(2019)査読あり DIO:10.4188/jte.65.19
2. Limin BAO, Takuya OKAZAWA, Anchang XU, Jiang SHI, A simple repair method for GFRP delamination using ultraviolet curable resin, Advanced Composite Materials, 27, 3, 349-259(2018) 査読あり <https://doi.org/10.1080/09243046.2017.1381897>
3. Fangtao Ruan and Limin Bao, Effect of covering filaments on the compression performance and failure mechanism of unidirectional fiber-reinforced plastic, Polymer Composites, 39(1), 247-253(2018) 査読あり <https://doi.org/10.1002/pc.23924>
4. Limin BAO, Yanling WANG1, Takeichiro BABA, Yasuhiro FUKUDA, Kaoru WAKATSUKI, Hideaki MORIKAWA, Development of a high-density nonwoven structure to improve the stab resistance of protective clothing material, Industrial Health, 55, 513-520 (2017) 査読あり <https://doi.org/10.2486/indhealth.2017-0123>
5. Fangtao Ruan, Limin Bao. Improved longitudinal compression performance of a unidirectional fiber reinforced composite with a filament covering. Polymer Composites, 37(11), 3127-3133(2016). 査読あり DOI: 10.1002/pc.23510

〔学会発表〕(計15件)1件のみ記載する

1. Limin Bao, Ryo Sakurada, Fangtao Ruan, Improvement of compressive performance of fiber reinforced plastic by the textile technology, Cross-straits Conference on Textiles, 27 May, 2017, Taizhong, TAIWAN, Oral & Invited

〔図書〕(計2件)1件のみ記載する

1. 技術情報協会, 次世代のポリマー・高分子開発,新しい用途展開と将来展望, 技術情報協会,(2019) 鮑力民執筆 P559-564

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 施建 ローマ字氏名: SHI Jian 所属研究機関名: 秋田県立大学

部局名: システム科学技術学部 職名: 助教 研究者番号(8桁): 40735867