

CFRPコイルスプリングの成形とその物性評価

谷 田 幸 宏*
村 山 智 之**
松 本 泰 輔*

炭素繊維フィラメントヤーン及び3Dプリンタで出力した型を用いてCFRP(炭素繊維強化プラスチック)圧縮性コイルスプリングを成形し、圧縮試験を実施した。本試験を実施することにより、力学的な性能評価を行い、CFRPコイルスプリングの特性について知見を得ることを目的とした。

研究の結果、高強度なCFRPコイルスプリングを成形するための知見を得ることができた。

1 はじめに

近年における複合材料は多くの産業分野において1次構造、2次構造、機能部材等に使用されており、レジャー、スポーツ用品等の民生品にまでその需要は拡大している。複合材料の中でも特に CFRP は強度及び軽量特性で大きく注目されており、今でも様々な研究が行われている。¹⁾²⁾

当センターでは、平成25年度から地域企業と共同で複合材料の試作及び研究開発を進めているところである。研究開発を進めるなかで地域企業よりCFRP製自転車用サスペンションを開発したいとの要望があったため、当センターで成形手法の研究開発を行った結果、任意形状でコイルスプリングの成形が可能となった。

今回は成形したCFRPコイルスプリングの耐荷重特性について検証を行った。

2 CFRPコイルスプリングの成形

2.1 使用材料

使用材料である炭素繊維フィラメントヤーン（東邦テナックス（株）製）の物性を表1に示し、低粘度エポキシ樹脂（ナガセケムテックス（株）製）の物性を表2に示す。

表1 炭素繊維フィラメントヤーン物性

品 名	HTS40
フィラメント数	3000
織 度	200 tex
引張強度	4400 MPa
引張弾性率	240 GPa
伸 度	1.8 %
密 度	1.77 g/cm ³

表2 低粘度エポキシ樹脂物性

品 名	XNR6815
粘 度	260 mPa・s
比 重	1.11
引張強度	72 MPa
曲げ強度	110 MPa
ガラス転移点	90 °C

2.2 樹脂硬化条件

使用したエポキシ樹脂の硬化条件については、ナガセケムテックス(株)の硬化条件を参照し、樹脂含侵後、恒温槽を用いて24時間25°Cで保持し、その後80°Cで

2 時間保持して硬化することとした。

2.3 3Dプリンタによる型の成型

使用した3Dプリンタ(3Dシステムズ社製)の仕様を表3に、外観を図1に、3Dプリンタで成型した型を図2に示す。型を成型する際には、32 μm ずつ積層するモードで成型を行った。

表3 3Dプリンタ仕様

型式	ProJet 3510 HD Plus
造形方式	インクジェット方式
造形材料	紫外線硬化型プラスチック
最大造形範囲	298×185×203 mm (X, Y, Z)



図1 3Dプリンタ外観

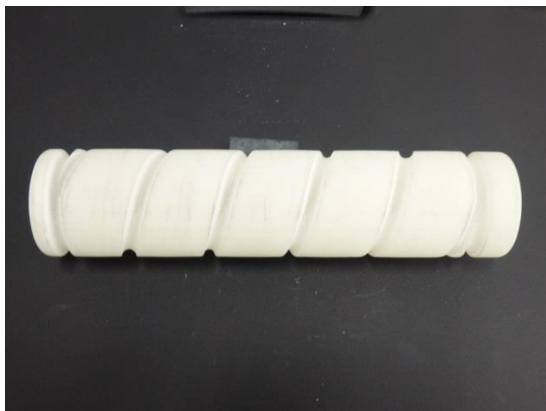


図2 3Dプリンタで作製した型

2.4 成形したCFRPコイルスプリング

圧縮試験に使用するために成形したCFRPコイルスプリング外観を図3に示す。



図3 CFRPコイルスプリング外観

3 コイルスプリング圧縮強度

3.1 コイルスプリングの圧縮³⁾

等方弾性体の円形断面コイルスプリングに圧縮をかけた際に縮む距離 δ を式(1)に、ばね定数 k を式(2)に示す。数式中に使用した各記号については表4のとおり。

$$\delta = \frac{64nPR^3}{Gd^4} \quad (1)$$

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{Gd^4}{64nR^3} \quad (2)$$

表4 数式中の記号

d	線径 [mm]
n	コイル有効巻き数 [回]
P	圧縮力 [N]
R	コイル半径 [mm]
G	横弾性係数 [GPa]

等方弾性体である場合、式(2)及び表4より、ばね定数がより高いコイルスプリングを作製するためには線径、有効巻き数、コイル半径、横弾性係数の値が重要であ

ることが判明しており、今回この式を参考に成形を行った。

3.2 圧縮試験

図4のようにCFRPコイルスプリングを設置し、圧縮試験を行うこととした。3.1節より、ばね定数に影響を与えらる線径及び横弾性係数の値を向上させるため、コイルスプリングに使用する炭素繊維の挿入本数及び繊維配向を変更して試験を行った。試験に用いたCFRPコイルスプリングの仕様を表5に、圧縮試験条件を表6に示す。

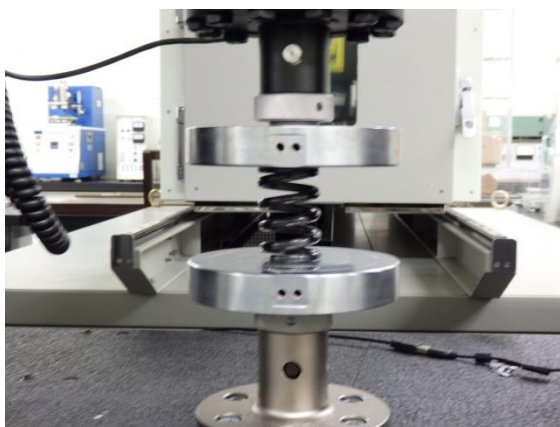


図4 圧縮試験外観

表5 CFRP コイルスプリング仕様

自由高さ	70 [mm]
有効巻き数	5 [回]
繊維挿入本数	100,160,200 [本]
繊維撚り回数	0,10,20 [回/コイル全長]

表6 圧縮試験条件

圧縮速度	20 [mm/min]
圧縮量	30 [mm]

4 結果

4.1 繊維挿入本数

図5に繊維挿入本数を変更して成形したCFRPコイルスプリングの圧縮試験結果を示す。図5より、繊維挿入本数が増えると、ばね定数が向上する結果となった。

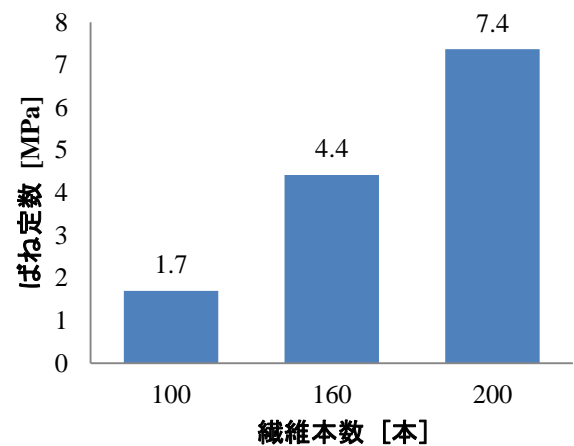


図5 繊維挿入本数変化によるばね定数

4.2 繊維撚り数

図6に繊維撚り数を変更して成形したCFRPコイルスプリングの圧縮試験結果を示す。図6より繊維撚り数を増やすと、ばね定数が向上する結果となった。

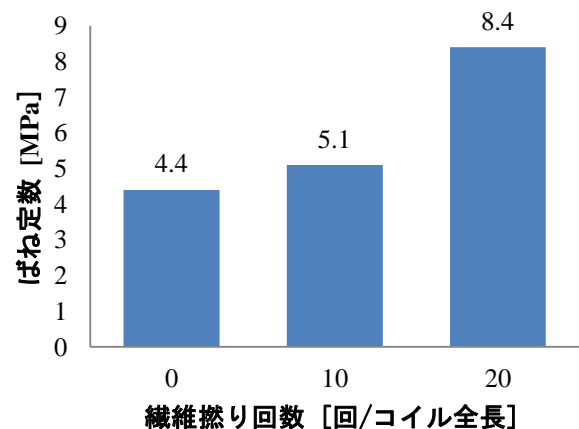


図6 撚り数によるばね定数変化

5 考察

5.1 繊維挿入本数

図5から、繊維挿入本数を増やすことによりばね定数が向上することが判明し、等方弾性体と同様の特徴を示した。円形断面のコイルスプリングの場合、圧縮量 δ には断面二次曲モーメント I_p が関係しており、式(3)で表される。

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} \quad (3)$$

断面二次曲モーメントの値が増加すると、圧縮量が小さくなり、結果としてばね定数の向上に繋がる。したがって、線径を太くした場合には、ばね定数の向上を見込むことが可能であり、炭素繊維等の異方性材料であっても変わらないと考えられる。

5.2 繊維撚り数

コイルスプリングを圧縮する際には、主にねじりモーメントが発生することから、ねじりに対する強度を保つことが重要だと考えられる。繊維に撚りをかけて樹脂を硬化させたことにより、コイルスプリングが圧縮された際にねじる方向には繊維が動きにくい状況になっていたと推測される。

このことから、硬化前に繊維を撚る程、成形した際のねじり剛性が高まると考えられる。

5.3 樹脂の影響

CFRPコイルスプリングの荷重－圧縮量の関係を見ると、数回荷重が落ちる箇所があった。荷重が落ちる原因を考えると、樹脂が各部で破壊されていると考えられる。

また、コイルスプリングに含まれる樹脂量及びその平均を表7に示す。樹脂量については成形前後の質量から求めた。

表7 全体に対する樹脂量

全体に対する樹脂量	12% ~ 40%
平均	24%

表7から、樹脂量にバラツキがあることがわかる。このことから、繊維に十分含浸ができていない箇所は十分な強度を発揮するが、余分な樹脂のみが硬化している箇所については全体の中でも弱い部分となり、先に破壊されていると考えられる。

また、荷重が局所で落ちることにより、最小二乗法で求めたばね定数について金属製コイルスプリング程の線形回帰性が得られないことに繋がっていると考えられる。

6 まとめ

本研究結果より、炭素繊維を用いて成形した際のCFRPコイルスプリングの力学的な特性についてある程度の予測は立てることが可能となった。また、繊維を撚って成形することでねじり剛性が高まると考えられることから、強度については向上の余地があると考えられる。

しかし、現状の成形法の場合、同体積の金属製コイルスプリングと比較した場合、ばね定数で劣ることから、現段階ではサスペンション等の高いばね定数が求められる製品に適用は難しいと考えられる。

また、コイルスプリングとしての機能を調べるため、今後は異方特性、耐熱特性及び疲労特性について検証していく必要があると同時に、樹脂の影響についても検証していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) D.ハル, T. W. クライン, 複合材料入門[改訂版], 培風館(2003)
- 2) 末益博志, 入門複合材料の力学, 培風館(2009)
- 3) 一般社団法人日本機械学会, JSME テキストシリーズ 材料力学, 丸善出版(2007)