

論文

CFRP製環状ばねの製作と基本特性評価

西川 康博^{*1)} 佐野 宏靖^{*1)} 小船 諭史^{*2)}

Fabrication and evaluation of CFRP loop-springs

Yasuhiro Nishikawa^{*1)}, Hiroyasu Sano^{*1)}, Satoshi Kobune^{*2)}

In this study, unidirectional carbon/epoxy composite (CFRP) loop-springs were fabricated using a mass-production method. The loop-springs consists of circular arc sections, straight-line sections and flat attachment surfaces. Two types of CFRP loop-springs with different straight line section lengths were tested to evaluate the spring constant, ultimate load and fatigue lives. CFRP loop-springs were approximately 9 times lighter than metallic coil springs with the same spring constant. A comparison of the experimental spring constant with the calculated spring constant, based on the cantilever model, showed good agreement. CFRP loop springs had fatigue lives beyond two million cycles under a maximum cyclic load of approximately 60% of the ultimate load.

キーワード : CFRP, 環状, ばね, ばね定数, 片持ち梁モデル, 疲労

Keywords : CFRP, Loop, Spring, Spring constant, Cantilever model, Fatigue

1. はじめに

ばねはあらゆる機械, 装置あるいは機構に用いられており, 産業分野や工業分野をはじめ幅広い分野で必要不可欠な機械要素である。ばねは金属製のものが一般的である。しかし, 最近では構造物を軽量化する目的から, ばねの軽量化も求められている。単位重量当たりの弾性変形エネルギーで比較すると, 高い比強度・比剛性を有する炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が軽量化効果の高いばね材料である事が知られている¹⁾。

これまでにCFRPを素材とした様々な形態のばねが考案されている。例えば, CFRP製コイルスプリング²⁾がある。これは, 熱可塑性樹脂の芯にCFRPを角度をつけて巻き付けて素線を作る。この素線をらせん状の溝を持った金型に巻き付けて加熱・硬化する事で, 高いせん断強度を持つコイルスプリングが得られる事が示されている。また, CFRP製リーフスプリング³⁾も考案されている。曲げ変形による圧縮破壊を防止・低減するために, リーフスプリングの積層構造を中立軸に対して非対称にして, 圧縮側の弾性率を低くする事が提案されている。

しかし, ばねの製作工程は複雑であり, また, 費用対効果の面からCFRP製ばねの実用化事例は見られない。そこで本研究では, 簡易な製作工程によりコストを抑え, 他部品との接続, 及び, 変形中の接触防止を考慮した円弧部と直線部, 接続平面部で構成されるCFRP製環状ばねを製作する。

また, 基本特性であるばね定数と最大荷重 (破壊荷重), 疲労寿命について評価する。

2. 試験方法

2.1 環状ばねの製作 材料には炭素繊維とエポキシ樹脂からなるCFRP-UDプリプレグシート (PYROFIL TR380G250 : 三菱レイヨン製) を用いた。繊維方向と周方向が一致する様にプリプレグシート (厚み0.25 mm) を離型処理した金型に4周巻き付けた。電気炉内で80℃×1.5時間, 更に, 135℃×2.5時間加熱する事でCFRPパイプを成形した。図1に成形手順を示す。また, 同様の成形条件により一方強化CFRP積層板を製作し, JIS K 7165及びJIS K 7017に準じた引張試験及び曲げ試験を行った。表1に引張特性及び曲げ特性を示す。

ダイヤモンド工具を用いてCFRPパイプを幅20 mmごとに切り出した。図2に製作した環状ばねの形状及び寸法を示す。以後, 直線部の長さが40 mmである環状ばねをType-L40, 直線部の長さが20 mmである環状ばねをType-L20と呼ぶ。この様に, CFRPパイプを成形した後に, 一定幅で切断するという一連の工程により, 環状ばねを簡易かつ量産的に製作する事が可能となる。

2.2 試験方法 試験では, 環状ばねの円弧部及び直線部のみが変形する様に, 環状ばねの上下平面部を挟む様にして, 厚さ5 mmのアルミ合金板をボルトで取り付けた。また, 全ての試験は実験室環境下 (23±2℃, 50±5%RH) で行った。

ばね定数及び最大荷重の測定には万能材料試験機 (AG-100kNX; 島津製作所製) を用いた。試験は変位制御で行い,

事業名 平成24年度 基盤研究

*1) 電子・機械グループ

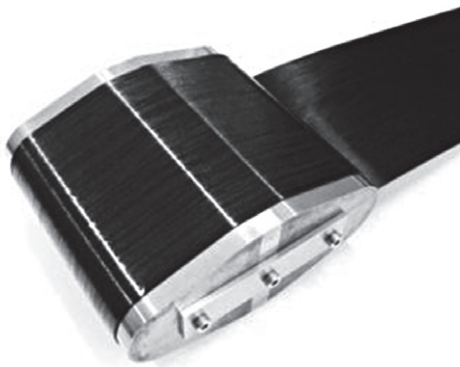
*2) 実証試験セクター

表1. 一方向強化CFRPの引張・曲げ特性

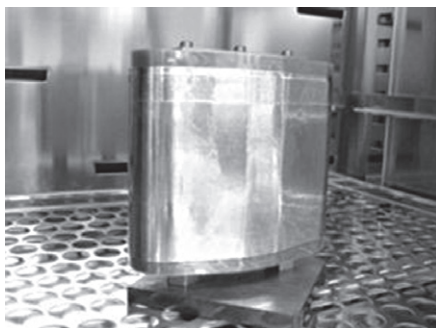
	弾性率 [GPa]	強度 [GPa]	破断ひずみ [%]
引張	124	2.12	1.59
曲げ	123	1.60	1.36



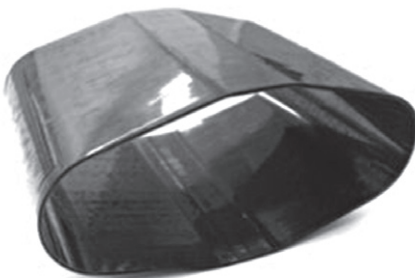
① 金型に離型処理



② プリプレグシートの巻き付け



③ 電気炉内で加熱・硬化



④ 型抜き

図1. CFRPパイプの成形手順

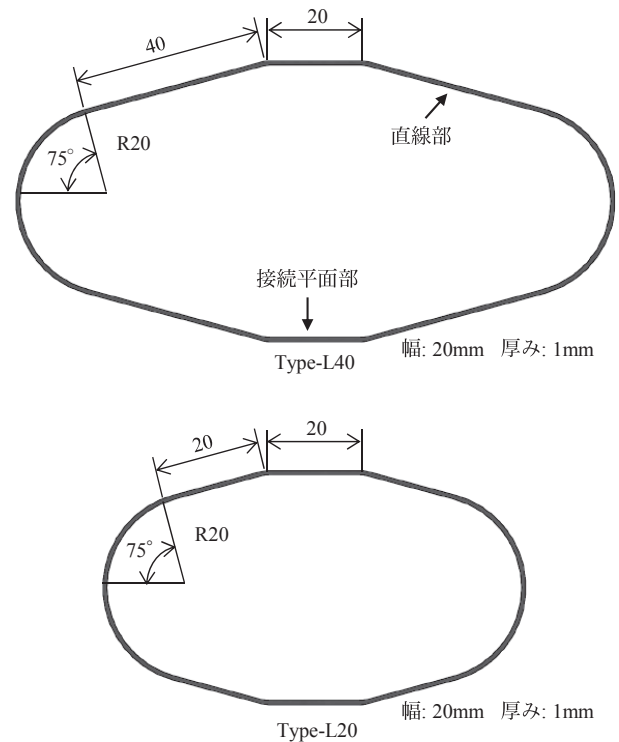


図2. 環状ばねの形状及び寸法

変位速度は5 mm/minとした。

繰り返し荷重に対する耐久性評価には、リニアモータ式疲労試験機 (ElectroPuls E1000 ; INSTRON製) を用いた。試験は荷重制御で行い、波形を正弦波、周波数を3 Hz、荷重比を0.1とした。

3. 試験結果及び考察

3. 1 ばね定数と最大荷重 図3に Type-L40 と Type-L20, 更に、比較のために金属製コイルばね (ばね定数 : 6.95 N/mm, 材質 : SWP-A, 線径 : 4 mm, ばね径 : 40 mm, 巻数 : 5.5, 高さ : 60 mm) の荷重-変位線図を示す。また、表2に各環状ばねのばね定数及び最大荷重を示す。図3に示す様に、Type-L40 と金属製コイルばねのばね定数は同じであった。一方、質量について比較すると、Type-L40 が9.34 g, 金属製コイルばねが89.1 g となり、Type-L40 の方が約9倍軽量である事がわかった。

3. 2 環状ばねのモデル化 図4にType-L40の変形挙動を示す。図に示す様に，円弧部は押しつぶれる様に変形し，直線部はばね内側に凸型になる様に変形した。この変形挙動を基に，環状ばねを片持ち梁として表したモデルを図5に示す。微小変形範囲において，片持ち梁のばね定数 k は，

$$k = P / \delta = E W t^3 / 12 (\Delta R + \Delta L) \dots\dots\dots (1)$$

と表す事ができる。ここで， P は荷重， δ は変位， E は引張弾性率， W は幅， t は厚みである。また， ΔR 及び ΔL は，それぞれ，円弧部及び直線部の形状係数を表し，

$$\Delta R = R^3 (\sin 2\theta / 4 - 2\sin\theta + 3\theta / 2) \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta L = L (a_1^2 + a_1 a_2 + a_2^2) / 3 \dots\dots\dots (3)$$

となる。環状ばねは片持ち梁モデルを直列・並列に並べた形であるため，そのばね定数も式(1)として表される。

図6に環状ばねのばね定数の実測値と式(1)を用いた計算値を示す。図には，厚みを0.75 mm，1.25 mmとしたType-L40及びType-L20のばね定数の実測値も示した。図に示す様に，ばね定数の実測値と計算値は概ね一致した。

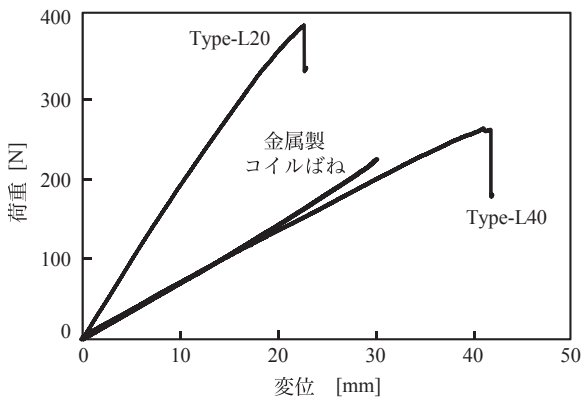
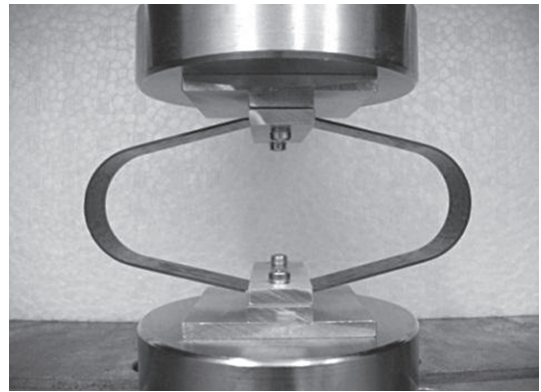


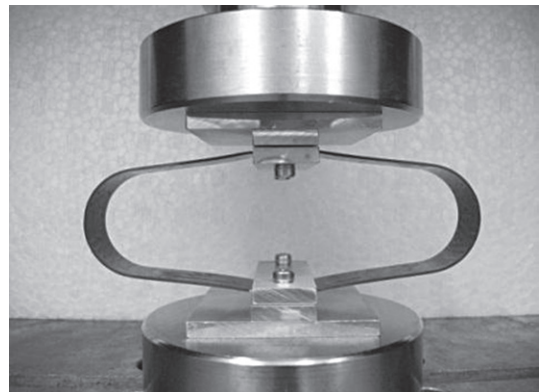
図3. 荷重-変位線図

表2. 環状ばねのばね定数と最大荷重

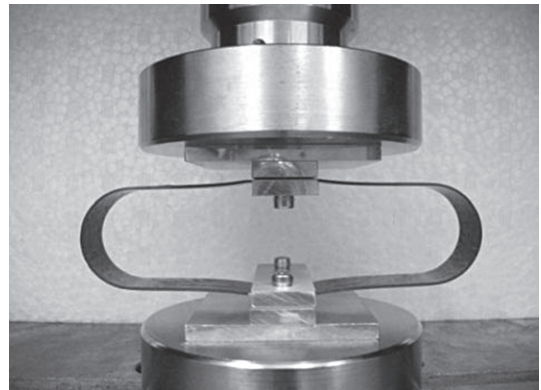
名前	ばね定数 [N/mm]	最大荷重 [N]
Type-L40	6.84	246
Type-L20	18.6	370



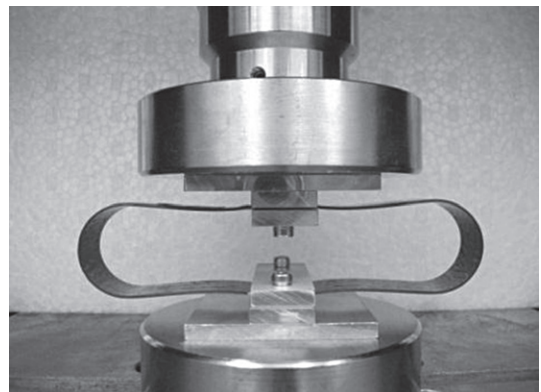
① 変位：0 mm



② 変位：10 mm



③ 変位：20 mm



④ 変位：30 mm

図4. Type-L40の変形挙動

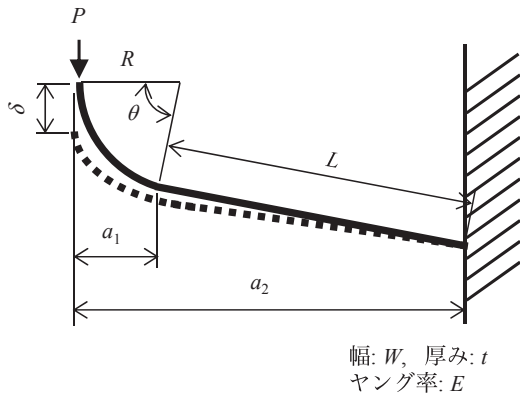


図5. 片持ち梁モデル

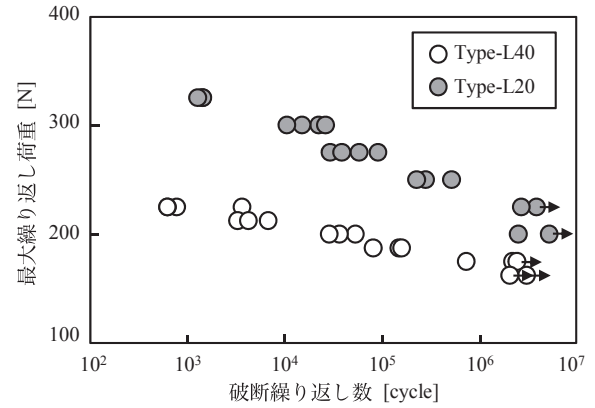


図7. 最大繰り返し荷重と破断繰り返し数の関係

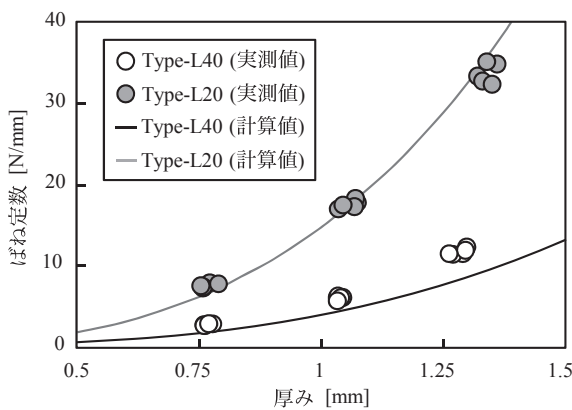


図6. ばね定数の実測値と計算値の比較

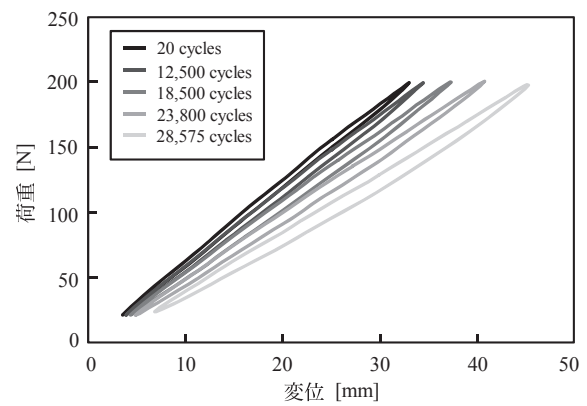


図8. 繰り返し荷重下における荷重-変位関係
(最大繰り返し荷重: 200 N, 破断繰り返し数: 28,575 cycles)

3. 3 疲労寿命と動的ばね定数 図7に最大繰り返し荷重と破断繰り返し数(疲労寿命)の関係を示す。図に示す様に、各環状ばねともに最大荷重の約60%の荷重条件であれば、疲労寿命は200万回以上となった。

図8にType-L40における任意の繰り返し数での荷重と変位の関係を示す。図に示す様に、荷重-変位線図はヒステリシスを描く。荷重-変位線図の傾き、いわゆる動的ばね定数は、繰り返し数が増加するに伴い、低下する事がわかる。動的ばね定数の低下は、環状ばね内部における微小損傷の発生及び進展に起因すると考えられる。初期損傷は、円弧部内側の表層において発生した。この初期損傷が、繰り返し負荷により連続的に進展し、最終的に円弧部において疲労破壊が生じた。

4. まとめ

本研究では、簡易かつ量産可能な方法により、円弧部と直線部、接続平面部で構成されるCFRP製環状ばねを製作した。また、環状ばねの基本的な性能を評価した。以下に、得られた結果を示す。

(1) 同じばね定数を持つ金属製コイルばねの質量と比較すると、製作した環状ばねの質量は約1/9となった。

- (2) 環状ばねのばね定数に関して、片持ち梁モデルから導出した計算値と実測値は概ね一致する。
- (3) 最大荷重(破壊荷重)の約60%の荷重条件であれば、環状ばねの寿命は200万回以上となる。

本研究で製作したCFRP製環状ばねは実用新案(登録第3183939号)を取得した。今後は、初期損傷が生じる円弧部内側の表層を改善し、疲労寿命を更に向上させる。また、制振材料を組み込み、減衰特性を向上させたCFRP製環状ばねを用いた除振・防振テーブルの製作、軽量性を生かした車いすや動作補助具などの福祉・介護分野への適応を目指す予定である。

(平成25年7月18日受付, 平成25年8月7日再受付)

文 献

- (1)植村益次ら:「FRP構造設計便覧」, 培風館, pp.237-238 (1994)
- (2)特開平7-42778:「炭素繊維強化樹脂製コイルスプリング」
- (3)特開2011241845:「繊維強化プラスチック製ばね」