

研究論文

二重円管構造を有する CFRTP の開発

深谷 憲男^{*1}、田中 俊嗣^{*2}、原田 真^{*1}

Development of CFRP with Double Circular Tube Structure

Norio FUKAYA^{*1}, Toshitsugu TANAKA^{*2} and Makoto HARADA^{*1}Mikawa Textile Research Center^{*1*2}

数十束もの繊維束を同時に巻き付ける多給糸 FW 法を用いて、二種類の内径の異なる CFRTP パイプを作製し、発泡充填材を用いることにより、二重円管構造を有する複合材料の開発に取り組んだ。二重円管構造にすることにより、単位質量が同程度の CFRTP パイプと比べて比強度は約 45%以上、エネルギー吸収量は約 60%以上の向上を確認した。

1. はじめに

昨今、地球温暖化問題から CO₂ の削減を目的としてガソリン自動車から電気自動車への普及が進められている。そこで課題となるのが、航続距離である。現状、ガソリン自動車と比較して電気自動車の航続距離は短いため、軽量化により航続距離を延ばすことが考えられている。

一方、近年 CFRP(炭素繊維強化樹脂)は、比強度などが優れていることから軽量化を目的として自動車分野での利用が検討されている。

そして、特に量産性、成形時に化学反応を伴わない、後加工性、耐衝撃・靱性、保存性、リサイクル性などの点から、CFRTP(炭素繊維強化熱可塑性樹脂)が注目されている。

これまで著者らは、この CFRTP について一束の炭素繊維束を巻き付け積層させる従来の Filament Winding 法(FW 法)と、ノンクrimp状態に配向させた数十束もの繊維束を同時に巻き付け積層させる FW 法(多給糸 FW 法)¹⁾の、異なる 2 種の供給法による FW 法を用いて CFRTP パイプを作製し圧縮強度比較を行った²⁾。その結果、従来の FW 法パイプと比較して、多給糸 FW 法パイプは、弾性座屈が起きにくく、エネルギー吸収特性が優れていることがわかった²⁾。さらにこの CFRTP パイプについて、発泡充填材を用いて補強したところ、強度及びエネルギー吸収量が向上した³⁾。すなわちこの CFRTP パイプは発泡材補強により質量効率が向上することがわかり、構造部材として利用した場合に軽量化や低コスト化などの効果が期待される³⁾。

この結果を基に、本研究では発泡充填材を用いることにより、炭素繊維の使用量を抑え、さらに、強度及びエ

ネルギー吸収性の質量効率の向上を目的として、二重円管構造を有する複合材料の開発に取り組んだ。

2. 実験方法

2.1 二重円管構造の検討

内径の異なる二種類の多給糸 FW 法 CFRTP パイプを組み合わせて、発泡充填材(硬質発泡ウレタン U-02-010(株)エポック製)を用いて発泡させて接着させた。今回の実験では、中空構造(図 1)と中実構造(図 2)の二通りの二重円管構造について検討した。

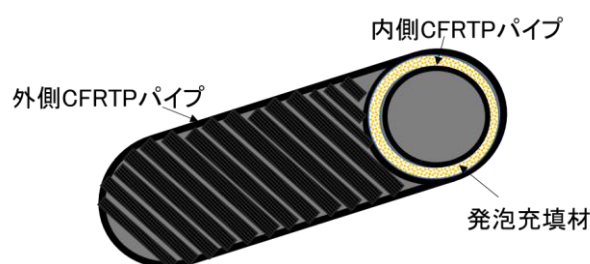


図 1 中空二重円管構造 CFRTP

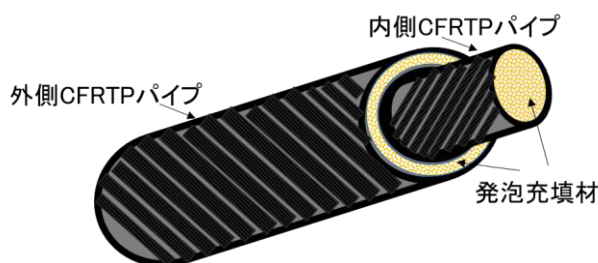


図 2 中実二重円管構造 CFRTP

中空二重円管構造は、内側 CFRTP パイプと外側 CFRTP パイプの間に発泡充填材を注入し、発泡させ接着させた。これは、二つのパイプと発泡充填材をサンド

^{*1} 三河繊維技術センター 産業資材開発室 ^{*2} 三河繊維技術センター 産業資材開発室 (現あいちシンクロトロン光センター)

イッチさせることにより、ハニカムサンドイッチ構造と類似効果の発現を試みた。

中実二重円管構造は、発泡充填材を内側 CFRTP パイプの内面側に発泡充填し、さらに外側 CFRTP パイプの間にも発泡充填材を注入し、発泡させて接着させた。内側 CFRTP パイプの内面側にも発泡充填させることにより、パイプ内面への変形抵抗を改善させて機械物性の向上を試みた。

2.2 多給糸 FW 法 CFRTP パイプ成形

多給糸フィラメントワインダー(MFW48-1200CKS 村田機械(株)製)(図 3)を使用して、表 1 の成形条件で多給糸 FW 法による二重円管構造に使用するパイプ成形を行った。



図 3 多給糸フィラメントワインダー

表 1 多給糸 FW 法 CFRTP パイプ成形条件

装置	多給糸フィラメントワインダー MFW48-1200CKS 村田機械(株)製
速度切替比率	3%
原料構成	半含浸コミングルヤーン カジレーネ(株)製 TR50S-6k/LEXTER8500 667dtex Vf:48.7%
繊維束本数	マンドレル径 12mm:16 本 マンドレル径 18mm:24 本
加熱装置	短波長赤外線ヒーター ヘレウス(株)製
入力電圧	180V

マンドレル(芯材)は、内側 CFRTP パイプには、マンドレル径 12mm を使用し、外側 CFRTP パイプと比較 CFRTP パイプにはマンドレル径 18mm を使用した。また、繊維束本数はマンドレルの円周をカバーできる本数とした。

表 2 に配向角・積層条件を示す。本研究では、マンドレルの軸方向を 0°としている。なお、表 2 の配向角は左から第 1 層、第 2 層、第 3 層、第 4 層である。「+」は半時計回り、「-」は時計回りに巻いていることを意

味する。発泡充填材の効果を検証するため 3 種のパイプ全て配向角 45°とした。

また、比較 CFRTP パイプは、発泡充填材を使用せずに外側 CFRTP パイプからさらに 2 層増やして、厚みを大きくした。炭素繊維の使用量としては、内側 CFRTP パイプと外側 CFRTP パイプを合わせた合計よりも多くなった。

表 2 配向角・積層条件

内側 CFRTP パイプ	+45°,-45°
外側 CFRTP パイプ	+45°,-45°
比較 CFRTP パイプ	+45°,-45°,+45°,-45°

2.3 成形温度

多給糸 FW 法によるパイプ成形時の繊維束がマンドレルに到達する位置(巻き点)⁴⁾にヒーターを設置し、その巻き点の表面温度が約 270°C(図 4)になる 180V をヒーター入力電圧値とした。

なお、表面温度測定には赤外線サーモグラフィカメラ(G120W2-NNU、NECAvio 赤外線テクノロジー(株)製)を使用した。

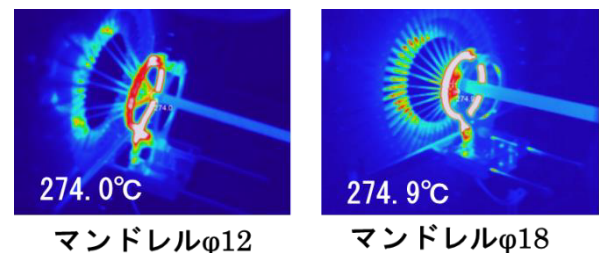


図 4 表面温度

2.4 寸法・密度測定

1 本の試作したパイプの 5 ヶ所から長さ 50mm で切り出した。そして、試料の測定した質量と寸法から単位質量および密度を求めた。

2.5 圧縮強度試験

試作した試料の軸方向圧縮強度測定を行った。試験条件は表 3 のとおりとした。また、試料数は、各 5 個とし、密度あたりの初期最大強度から比強度を求めた。試料長の 5 割までの圧壊に必要なとするエネルギー量から単位質量あたりのエネルギー吸収量を算出した。

表 3 圧縮強度試験条件

装置	精密万能試験機 AG-50kNXPlus (株)島津製作所製
試料長	50mm
温湿度	23°C 50%RH
圧子	水平
試験速度	5mm/min

3. 実験結果及び考察

3.1 多給糸 FW 法 CFRTP パイプ試作結果

試作した3種類の多給糸 FW 法 CFRTP パイプの外観を図5に示す。またこれらの単位質量及び、密度と寸法測定結果を表4~6に示す。外側 CFRTP パイプの単位質量は、内側 CFRTP パイプと比較して約1.5倍となり、構成している繊維束本数どおりとなった。一方、比較 CFRTP パイプの単位質量は、外側 CFRTP パイプと比較して約2倍となっており、積層数どおりとなった。なお外側 CFRTP パイプについては、密度が 1.55g/cm^3 、変動係数が 0.137 となっており、他の二種よりも大きい値となった。これは(内半径/厚さ)の比が大きいためにバラツキが出やすく、その影響が反映された結果だと思われる。

なお、各々の(内半径/厚さ)の比は、内側 CFRTP パイプが 9.61、外側 CFRTP パイプは 17.6、比較 CFRTP パイプは、7.04 であった。



左上: 内側 CFRTP パイプ
右上: 外側 CFRTP パイプ
左下: 比較 CFRTP パイプ

図5 多給糸 FW 法 CFRTP パイプ

表4 内側 CFRTP パイプ試作結果

	単位質量(g/m)	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
平均	31.2	1.25	0.627
標準偏差	0.234	0.0677	0.0350
変動係数	0.00751	0.0541	0.0558

表5 外側 CFRTP パイプ試作結果

	単位質量(g/m)	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
平均	46.6	1.55	0.519
標準偏差	0.143	0.213	0.0690
変動係数	0.00306	0.137	0.133

表6 比較 CFRTP パイプ試作結果

	単位質量(g/m)	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
平均	93.9	1.21	1.28
標準偏差	1.15	0.0203	0.0201
変動係数	0.0123	0.0167	0.0158

3.2 二重円管構造 CFRTP 試作結果

試作した中空二重円管構造 CFRTP と中実二重円管構造 CFRTP の外観を図6~7に示す。また、単位質量と密度測定結果を表7~8に示す。



図6 中空二重円管構造 CFRTP



図7 中実二重円管構造 CFRTP

表7 中空二重円管構造 CFRTP 試作結果

	単位質量(g/m)	密度(g/cm ³)
平均	92.3	0.507
標準偏差	3.27	0.0190
変動係数	0.0354	0.0376

表8 中実二重円管構造 CFRTP 試作結果

	単位質量(g/m)	密度(g/cm ³)
平均	103	0.350
標準偏差	2.83	0.00941
変動係数	0.0276	0.0269

中空二重円管構造 CFRTP の単位質量は、およそ比較 CFRTP パイプと同等程度となった。これは、繊維束の質量と発泡充填材の質量とがほぼ同じであることを示す。中実二重円管構造 CFRTP は、内側 CFRTP パイプの内面側の発泡充填材分だけさらに単位質量が増加した。

一方、発泡充填材の使用量が増えるとこれら CFRTP 試料の密度は低下し、中空二重円管構造 CFRTP は 0.507、中実二重円管構造 CFRTP は 0.350 と 1 を大きく下回った。これらは水に浮くことから、従来の複合材料とは、異なった使用方法も考えられる。

3.3 圧縮強度

測定には、前項で密度と厚さを測定した試料を用いて試料数は各 5 個とした。図 8 に試作した各試料の圧縮強度測定により得られた荷重-変位線図の代表値を示す。

内側 CFRTP パイプと繊維束数の多い外側 CFRTP パイプの初期最大強度は同程度となった。これは(内半径/厚さ)の比が、外側 CFRTP パイプよりも内側 CFRTP パイプが小さいため、値が大きくなる寸法効果が表れたのではないかとと思われる。また、比較 CFRTP パイプは、外側 CFRTP パイプ比べ約 1.8 倍程度の初期最大強度となった。そして、比較 CFRTP パイプと比べて、中空二重円管構造 CFRTP は約 50%、中実二重円管構造 CFRTP は約 60%の初期最大強度の向上が確認された。

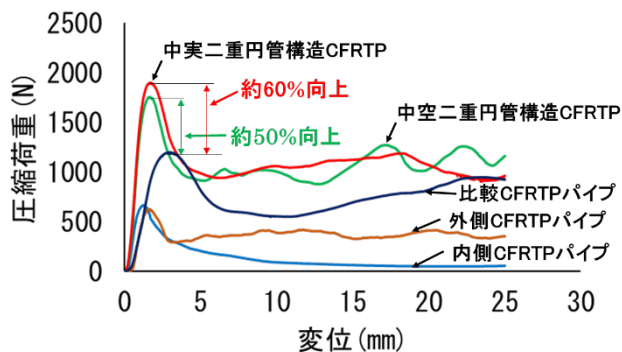


図 8 荷重-変位線図

さらに、密度あたりの初期最大強度から比強度を求め、また、試料長の 5 割までの圧壊に必要なとするエネルギー量(変位・荷重線図における面積)から単位質量あたりのエネルギー吸収量を算出した結果を表 9~13 に示す。

表 9 内側 CFRTP パイプ圧縮強度結果

	比強度 (kN・m/kg)	エネルギー 吸収量(J/g)
平均	21.2	3.08
標準偏差	0.461	1.38
変動係数	0.0218	0.449

表 10 外側 CFRTP パイプ圧縮強度結果

	比強度 (kN・m/kg)	エネルギー 吸収量(J/g)
平均	13.9	3.42
標準偏差	0.413	0.692
変動係数	0.0297	0.202

表 11 比較 CFRTP パイプ圧縮強度結果

	比強度 (kN・m/kg)	エネルギー 吸収量(J/g)
平均	12.5	3.59
標準偏差	0.523	0.498
変動係数	0.0416	0.139

比強度は、内側 CFRTP パイプが最も高くなっているが、寸法効果のため値が大きくなると考えられる。比較 CFRTP パイプと比べて、二重円管構造 CFRTP は、比強度は、約 45%以上、エネルギー吸収量は約 60%以上向上した。一方、中空と中実の構造による違いは、あまりみられなかった。

表 12 中空二重円管構造 CFRTP 圧縮強度結果

	比強度 (kN・m/kg)	エネルギー 吸収量(J/g)
平均	18.3	5.74
標準偏差	0.658	0.433
変動係数	0.0359	0.0754

表 13 中実二重円管構造 CFRTP 圧縮強度結果

	比強度 (kN・m/kg)	エネルギー 吸収量(J/g)
平均	18.6	5.93
標準偏差	1.07	0.778
変動係数	0.0578	0.131

4. 結び

本研究の結果は、以下のとおりである。

- (1) 中空二重円管構造 CFRTP の密度が 0.507、中実二重円管構造 CFRTP の密度が 0.35 と小さくすることができた。
- (2) 初期最大強度は、比較 CFRTP パイプと比べ中空二重円管構造 CFRTP で約 50%程度、中実二重円管構造 CFRTP は、約 60%程度向上した。
- (3) 比較 CFRTP パイプと比べ、二重円管構造にすることにより、比強度は、約 45%以上、エネルギー吸収量は約 60%以上の向上を確認した。
- (4) 比強度とエネルギー吸収量は、中空二重円管構造材と中実二重円管構造材とは差が見られなかった。そのため、中空にすることにより発泡充填材の使用量も減らすことが可能と考える。

文献

- 1) Tadashi Uozumi, Akio Ohtani, Asami Nakai, Motohiro Tanigawa, Tatsuhiko Nishida and Takahiro Miura: *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, **5**,435-439(2015)
- 2) 深谷憲男, 原田真, 茶谷悦司, 松田喜樹: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **9**, 102(2020)
- 3) 深谷憲男, 田中俊嗣, 原田真: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **11**, 162(2022)
- 4) 深谷憲男, 田中俊嗣, 原田真: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **10**, 124(2021)