

研究論文

多段式円管構造を有する複合材の開発

深谷憲男*1

Development of Composite Material with Nested Multiple Circular Tubes

Norio FUKAYA*1

Mikawa Textile Research Center*1

CFRTP パイプを成形するのにノンクランプ状態に配向させた数十束もの炭素繊維束を同時に巻き付ける多給糸 FW 法がある。一方、中空部材に発泡充填材を注入して強度向上させる技術が注目されている。本研究では、サイズの異なる CFRTP 製の多給糸 FW 法パイプを成形し、発泡充填材により内側と外側のパイプ同士を重ねて接合させた。圧縮強度試験結果から、段階的に破壊を制御することにより、急激な荷重の上昇を抑え、さらに連続的に軸対称圧壊させてエネルギー吸収量を大きくする指針を得た。

1. はじめに

従来、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)は、比強度などが優れていることから航空宇宙分野、スポーツ分野などで利用が進められてきた。特に近年、燃費向上の要求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。CFRP のマトリックスには力学的物性が高いことから熱硬化性樹脂が使用されてきたが、量産性、2次加工性、リサイクル性などの点から CFRTP(炭素繊維強化熱可塑性プラスチック)が注目されている。

これまで著者は、熱可塑性樹脂を用いて、ノンクランプ状態に配向させた数十束もの炭素繊維束を同時に巻き付ける FW 法(多給糸 FW 法)¹⁾を用いて CFRTP パイプを作製し軸圧縮強度比較を行った。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、エネルギー吸収量が優れている傾向が明らかになった²⁾。また、一様に繊維束を巻き付けていくため、配向角(巻き角度)を変えることにより、圧壊の仕方を制御できることが明らかになった。加えて、軽量化と低コスト、安全性の視点で質量効率の向上を目的として多給糸 FW 法パイプに発泡材を充填させて補強することにより、構造部材に求められる強度及びエネルギー吸収特性の向上が確認できた³⁾。また、著者はこの技術を活かし、2本の多給糸 FW 法パイプを発泡材により接合し、二重円管構造にすることにより、炭素繊維の使用量を減らして強度及びエネルギー吸収特性が向上する複合材を得ることができた⁴⁾。

本研究では、2本以上の内径の異なる多給糸 FW 法パイプについて、初期荷重の急激な上昇の制御を目的としてパイプ長を段階的に変えて、クラッシュブルゾーンを

設け、さらにパイプを発泡材により接合することで、初期圧壊後の荷重低下を抑制し、エネルギー吸収効率の高い複合材の開発に取り組むこととした。

2. 実験方法

2.1 多段式円管構造の検討

サイズの異なる3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合した。

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(MFW48-1200CK5 村田機械(株)製)を使用して、表1の成形条件で多給糸 FW 法パイプ成形を行った。

マンドレル(芯材)径は、12mm、18mm、25mm の3種類を使用し、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。また、成形速度は、マンドレルの直径と配向角が異なると同一速度にできないため、本研究では、装置の速度切替比率をマンドレルの直径毎に固定して成形した。積層構成は、著者が以前に報告した結果に基づき³⁾、配向角45°と60°の2種類とした。

なお、本研究では、マンドレルの軸方向を0°としている。表1の配向角は左から第1層、第2層、第3層、第4層である。「+」は反時計回り、「-」は時計回りに巻いていることを意味する。また、成形後のパイプの内径は、マンドレル径と同一となる。

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)⁵⁾を設置し、ヒーター入力電圧値は180Vとした。また、表面温度測定には赤外線サ

*1 三河繊維技術センター 産業資材開発室

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。

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	マンドレル径 12mm: 2% マンドレル径 18mm: 1% マンドレル径 25mm: 1%
原料構成	半含浸コニングルヤーン 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 マンドレル径 25mm: 34 本
積層構成	①+45°,-45°,+45°,-45° ②+60°,-60°,+60°,-60°
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

2.4 寸法・密度測定

試作したパイプの3ヶ所から長さ50mmで切り出し、ノギスにより寸法を測定し、そして、測定した質量から密度を求めた。

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2のとおりとした。また、試料数は各3個とし、荷重-変位線図を取得し、比較的安定して圧壊が進展する試料長の5割までを着目し、圧壊に必要な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 2 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
温湿度	23℃ 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

図1に、多給糸FW法CFRTPパイプ試作時の表面温度を示す。配向角45°、60°共に、マンドレル径が25mmの場合には12、18mmの場合よりも表面温度が高くなった。得られたパイプの単位質量及び、密度と寸法測定結果を表3及び表4に示す。厚さは、配向角45°

では1.2mm程度、配向角60°は1.6mm程度となり、マンドレル径が異なってもほぼ同じ値となった。これは、マンドレル径に合わせて各構成している繊維束本数が調整したためである。また、配向角によって繊維束の重なり具合が変わるため、同様の繊維束本数でもパイプ厚さが変わった。一方、マンドレル径が大きくなるほど、密度も増加する傾向となった。マンドレル径の変化に伴い、繊維束を巻き付けるときの円周方向の張力の変化や、図1に示した通り表面温度が高くなったことによって繊維束が密に巻き付けられたためと考えられる。

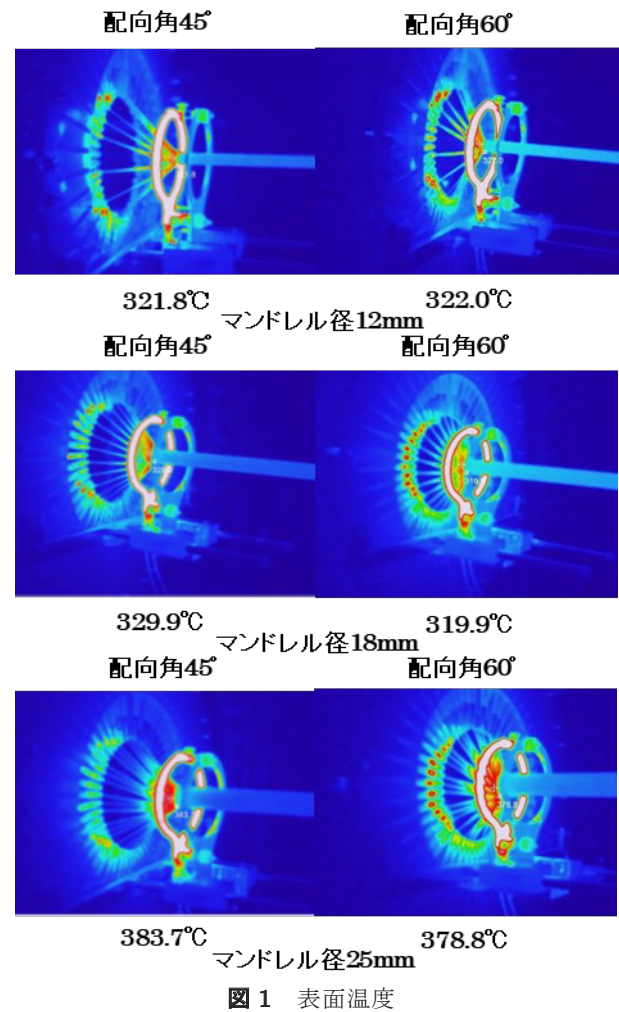


図 1 表面温度

表 3 配向角 45°パイプ試作結果

内径	単位質量(g/m)	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
12mm	62.4	1.21	1.24
18mm	91.5	1.24	1.23
25mm	131	1.25	1.26

表 4 配向角 60°パイプ試作結果

内径	単位質量(g/m)	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
12mm	86.8	1.26	1.61
18mm	130	1.28	1.64
25mm	181	1.31	1.66

3.2 多給糸 FW 法 CFRTP パイプ圧縮強度

図2に試作した各試料の圧縮強度試験により得られた応力-ひずみ曲線の代表例を示す。全ての試料において、ひずみが増加すると急激な圧縮応力の増大が見られ、極大値を経て一旦急激に減少し、その後、緩やかに増加に転じた。

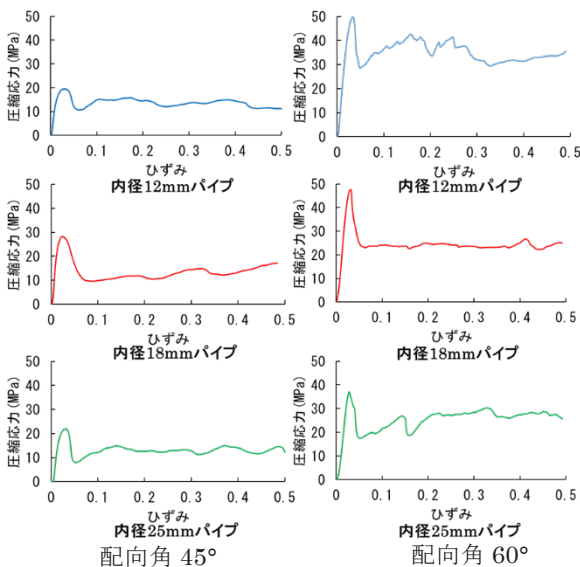


図2 応力-ひずみ線図

また、代表例の初期最大応力に達するまでのひずみ及び変位を表5に示す。どの試料も変位が1mmを超えた位置で初期最大応力に達していた。さらに、初期最大応力に対応する曲線の形状は、図2に示す通り配向角60°パイプは、配向角45°パイプと比較してよりシャープであった。これは、配向角が大きくなると繊維間距離が短くなり、二次圧壊に転ずる間隔が短いためと考えられる。加えて、この初期最大応力を超えた後、応力が低減し再度増加に転じるが、この増加に転じる時の長さは、全ての試料において5mm以内と見積られる。その後は、緩やかに圧縮応力が増加しており、連続的な圧壊が進んだと考えられる。

表5 初期最大応力でのひずみ及び長さ

配向角	内径	ひずみ	変位(mm)
45°	12mm	0.033	1.7
	18mm	0.025	1.3
	25mm	0.031	1.5
60°	12mm	0.033	1.7
	18mm	0.031	1.6
	25mm	0.028	1.4

これらの結果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6及び表7に示す。

同じ内径パイプでも配向角45°より配向角60°が最大

荷重及びエネルギー吸収量が大きくなった。

一方、同一配向角において内径の違いによる最大荷重とエネルギー吸収量を比較すると、配向角45°と配向角60°は同様の傾向となった。

表6 配向角45°パイプ圧縮強度試験結果

内径	最大荷重(N)	エネルギー吸収量(J/g)
12mm	1,020	5.11
18mm	2,230	5.70
25mm	2,280	5.14

表7 配向角60°パイプ圧縮強度試験結果

内径	最大荷重(N)	エネルギー吸収量(J/g)
12mm	2,990	11.1
18mm	4,029	10.2
25mm	4,790	9.84

3.3 多段式円管構造の試作結果

図2の結果から、初期最大応力を超えた後連続的な圧壊に進展するのに5mm程度必要と推定した。そのため、試料長は5mmずつ変えることとし、それぞれのパイプ長は、内径12mmパイプは60mm、内径18mmパイプは55mm、内径25mmパイプは50mmとし、発泡充填材により接合した(図3)。表8に試作した多段式円管構造体の質量と密度を示す。密度が1を下回っており、水に浮く程度まで小さくなった。

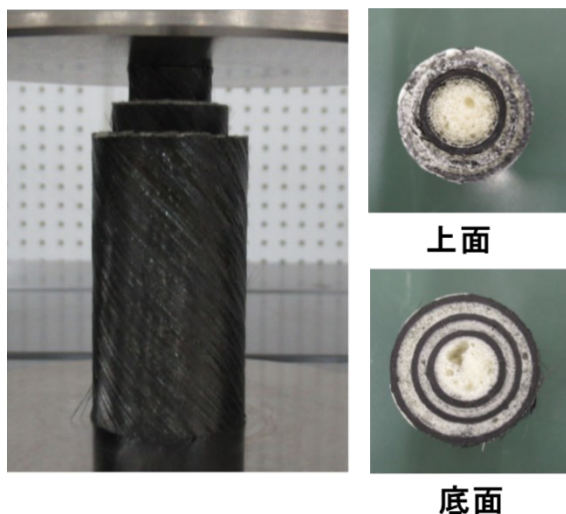


図3 多段式円管構造体試料

表8 多段式円管構造体試料、質量及び密度

多段式円管構造	質量(g)	密度(g/cm³)
配向角45°パイプ使用	18.4	0.570
配向角60°パイプ使用	24.9	0.715

3.4 多段式円管構造の圧縮強度

図4及び図5に試作した各試料の圧縮強度試験により得られた荷重-変位線図を示す。また、比較を目的として、発泡充填材を使用せずに、試料長を調整したのみの試料を同心円状に並べた圧縮強度試験の結果も示す。

どの試料も、変位の増大に伴い3段階のピークの変化を示した後、緩やかな変化に転じた。これらピークの頂点1段目、2段目、3段目は、それぞれ内径12mmパイプの圧壊、内径18mmパイプの圧壊、内径25mmパイプの圧壊に対応する。

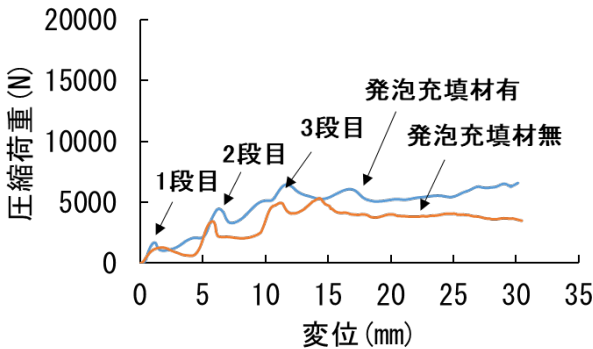


図4 多段式円管構造(配向角 45°パイプ)荷重-変位線図

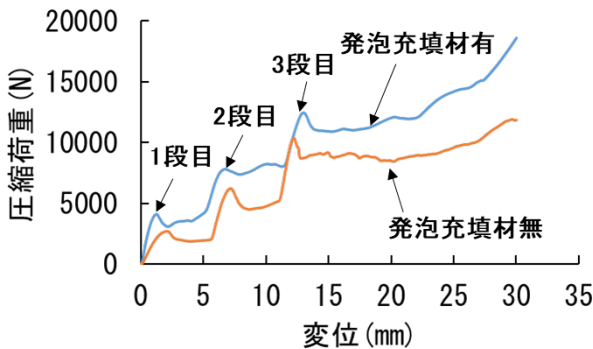


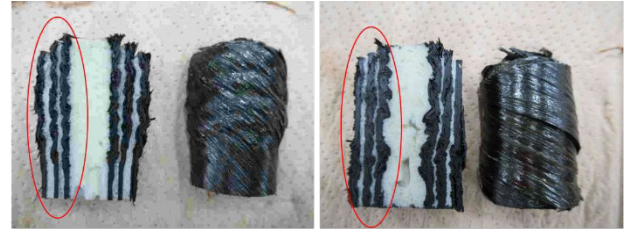
図5 多段式円管構造(配向角 60°パイプ)荷重-変位線図

配向角 45°、配向角 60°ともに、発泡充填材有の方が変位に対しての圧縮荷重が大きかった。また、多段式にすることにより、初期荷重を段階的に制御し急激な荷重の上昇を抑えていることが確認できた。

配向角 45°は、3段目の圧壊の後、荷重の増減を繰り返していたが、配向角 60°は、荷重が上昇していった。

発泡充填材有試料の試験後の試料断面を図6に示す。多段式円管構造(配向角 45°パイプ)は、圧壊に伴い外側に向けて折りたたまれる変形を示し、一方、多段式円管構造(配向角 60°パイプ)は、外側に向けて圧壊が起きずに、長さ方向に圧壊が進展していた。これらの結果から、多段式円管構造(配向角 45°パイプ)は、圧縮に伴い局所的軸対称圧壊を繰り返しているのに対し、多段式円管構造(配向角 60°パイプ)は、配向角が大きく三重に円周方向に拘束力が強いいため、全長にわたって軸対称圧壊が起きたと考えられる。表9及び表10に圧縮強度結果を示

す。発泡充填材を注入することで最大荷重及びエネルギー吸収量が向上した。



多段式円管構造(配向角45°パイプ) 多段式円管構造(配向角60°パイプ)

図6 圧縮強度試験後断面

表9 多段式円管構造(配向角 45°パイプ)圧縮強度結果

	最大荷重 (N)	エネルギー吸収量 (J/g)
発泡充填材無	5,310	6.74
発泡充填材有	6,670	7.74

表10 多段式円管構造(配向角 60°パイプ)圧縮強度結果

	最大荷重 (N)	エネルギー吸収量 (J/g)
発泡充填材無	11,300	9.91
発泡充填材有	18,800	11.6

4. 結び

本研究では、3種類の多給糸FW法CFRTPパイプを発泡充填材により接合し、初期荷重を段階的に制御し急激な荷重の上昇を抑え、かつ連続的に軸対称圧壊させてエネルギー吸収量の増加を図った。その結果、発泡充填材を注入した多段式円管構造は、初期荷重の上昇を抑えつつ、初期圧壊後の荷重低下を防ぎ、加えて荷重上昇に転じているためエネルギー吸収量の向上が認められた。

付記

本研究は、(公財)内藤科学技術振興財団の2023年度研究助成を受けて実施した成果の一部である。

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, **12**, 92(2023)
- 5) 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)