

サイジング剤が現場重合型アクリル系樹脂を用いた FW 製 GF RTP シャフト のねじり特性に及ぼす影響

日大生産工(院) ○阿部 颯人 日大生産工 坂田 憲泰
日大生産工 平山 紀夫 日東紡績 佐野 一教

1. 緒言

近年地球温暖化を背景にモビリティの省エネルギー化が要求され、自動車の燃費向上のための軽量化が進められている。軽量材料の中でも、繊維と樹脂によって構成される FRP (繊維強化プラスチック) は優れた比強度・比剛性を有するため自動車用材料として注目されている。FW (フィラメントワインディング) 製 CFRP (炭素繊維強化プラスチック) シャフトは軽量で安全性が高いため、1990 年代後半から自動車のプロペラシャフトに採用されている¹⁾。著者らは FW 法で CFRP 及び GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) 製シャフトの評価を行い、FRP シャフトの高強度化には強化繊維と樹脂の接着性、適切な繊維体積含有率が重要であることを明らかにした^{2,3)}。

FRP の樹脂には熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂があるが、これまでは成形性、機械的特性から熱硬化性樹脂が主に使用されてきた。しかし近年、リサイクル性や二次加工性などから熱可塑性樹脂を用いた FRTP (繊維強化熱可塑性プラスチック) の研究開発が盛んになり、その中でも低粘度なモノマーの状態繊維に樹脂を浸漬することができる現場重合型熱可塑性樹脂を用いた FRTP が注目されている。代表的な現場重合型熱可塑性樹脂には、ポリアミド 6 があるが、モノマーの触媒能が空気中の水分によって失活して重合阻害が起きるため、FW 成形のようなオープンモールド成形で使用するができなかった。しかし近年、現場重合型アクリル系樹脂が開発され、現場重合型アクリル系樹脂では水分による重合阻害が起きないため、FW 法による FRTP 円筒の成形が可能となった。

本研究では、高強度で生産性、リサイクル性

に優れた FRTP 製シャフトを開発することを目的に、繊維に価格と機械的特性のバランスに優れたガラス繊維、樹脂に現場重合型アクリル系樹脂を用いた FW 製 GF RTP シャフトの成形と評価を行った。さらに、現場重合型アクリル系樹脂に適したガラス繊維のサイジング剤を明らかにするために、二種類のサイジング処理をされたガラス繊維ロービングで一方向 GF RTP 板と GF RTP シャフトを成形し、従来のエポキシ樹脂を用いた一方向 GFRP 板の引張特性、GFRP シャフトのねじり特性と比較した結果について報告する。

2. 使用材料

繊維にはサイジング剤の異なる二種類の E ガラス繊維ロービング GF1 と GF2 (日東紡績) を用いた。樹脂には現場重合型アクリル系樹脂 (Elium591E, ARKEMA) と熱硬化性エポキシ樹脂 (XNR/H/A6805, ナガセケムテックス) を用いた。それぞれの機械的特性を Table 1 に示す。エポキシ樹脂の強度と弾性率は JIS K7139 に準拠して行った実験値で、その他はカタログ値となっている。一方向板とシャフトの成形は Table 2 に示す繊維と樹脂の組合せで行った。

Table 1 Properties of acrylic and epoxy resin

	Acrylic resin	Epoxy resin
Tensile strength [MPa]	60.0	66.5
Elastic modulus [GPa]	3.1	4.12
Viscosity [mPa · s]	54.1 (25°C)	48.5 (60°C)
Tg [°C]	110	110

Table 2 Glass fiber and resin for specimens

	TypeA	TypeB	TypeEP
Matrices	Acrylic resin	Acrylic resin	Epoxy resin
Reinforcements	GF-1	GF-2	GF-1

Effect of sizing type on torsional properties of FW-GFRTP shaft
using *in-situ* polymerizable acrylic resin

Hayato ABE, Kazuhiro SAKATA, Norio HIRAYAMA and Kazunori SANO

3. 供試体

3.1 一方向板

一方向板の成形にはFW装置と油圧式ホットプレスを用いた。はじめにアセトン洗浄と離型処理を行った厚み4mm、幅400mmのアルミ合金製マンドレルを回転させ、樹脂が付着したガラス繊維ロービングを巻きつけた。成形時の張力は約15Nとし、積層数は繊維方向と平行なL方向材では1層、繊維直交方向のT方材では4層とした。硬化条件はTable 2のTypeAとTypeBの組合せであるUD-AとUD-Bが35°C×1時間+85°C×1時間+140°C×1時間、TypeEPの組合せであるUD-EPが85°C×1時間となっている。

試験片の寸法は、L方向試験片が幅15mm、長さ250mm、T方向試験片が幅25mm、長さ250mmで、両端部にはアルミニウム合金製のタブを接着剤で張り付けた。各試験片の繊維体積含有率をTable 3に示す。

Table 3 Fiber volume fractions

	UD-A	UD-B	UD-EP
L specimens	61	61	63
T specimens	61	62	63

3.2 シャフト

シャフトの成形にはFW装置を用い、樹脂を含浸させたガラス繊維ロービングに約15Nの張力をかけながら、直径20mmのマンドレルに巻いた。繊維配向角はねじりトルク作用時に発生する主応力方向と一致させるために±45°とし、シャフトの両端部には試験装置取付け時にシャフト端部での圧壊を防止するためにタブを設けた。また、GFRTTPシャフトでは、アクリル系樹脂の揮発を防止するために、硬化工程前、全長に離型テープを巻いた。硬化条件は3.1節の一方向板と同様とした。以降、TypeAとTypeBの組合せであるGFRTTPシャフトをShaft-AとShaft-B、TypeEPの組合せであるGFRPシャフトをShaft-EPと呼ぶ。成形後のシャフトをFig.1とFig.2に示す。全長600mm、外径24mm、厚さ2mmで、繊維体積含有率はShaft-Aが55%、Shaft-Bが58%、Shaft-EPが65%となっている。

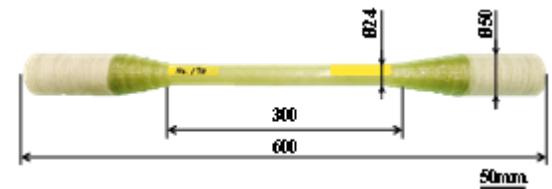
4. 試験方法

4.1 引張試験

試験速度はL方向の引張試験が2mm/min、T方向の引張試験が1mm/minとし、荷重は試験機のロードセル、ひずみは試験片中央部に貼ったひずみゲージで計測した。試験片数は各5本とした。



(a) GFRTTP shaft



(b) GFRP shaft

Fig.1 Dimensions of GFRTTP and GFRP shafts

4.2 ねじり試験

ねじり試験には千葉県産業支援技術研究所のねじり試験機を用いた。試験速度は最も低速な3deg/secで行い、試験片本数は各3本とした。せん断ひずみは供試体中央部に軸方向に対して±45°に張り付けたひずみゲージの出力値の絶対値を足すことで求めた。せん断応力 τ は試験機で計測したトルク T 、試験前に計測した試験片外径 d_{out} と試験片内径 d_{in} を式(1)に代入することで求めた。せん断弾性率 G は応力-ひずみ線図の初期の傾きの平均値から求めた。

$$\tau = \frac{16T}{\pi d_{out}^3 \left\{ 1 - \left(\frac{d_{in}}{d_{out}} \right)^4 \right\}} \quad (2)$$

5. 試験結果及び考察

5.1 一方向板の引張強度

一方向板のL方向の引張強度 F_L とT方向の引張強度 F_T の比較をFig.2に示す。L方向の引張強度は繊維の引張強度が支配的となるため、UD-AとUD-Bの値に明確な差は確認できず、UD-EPとも同等の引張強度であっ

た。

一方、T方向の引張強度はUD-Aが8.64MPa、UD-Bが19.1MPaとなり、UD-Bの方が2.2倍程度高くなった。T方向の引張試験後のUD-AとUD-Bの破面をSEMで観察した結果をFig.3に示す。UD-Bの方がガラス繊維の表面の樹脂の付着量が多くなっており、この結果からもGF-2の方が現場重合型アクリル系樹脂との接着性が良好なサイジング剤であることが確認できる。さらに、UD-BのT方向の引張強度は、エポキシ樹脂を用いて成形したUD-EPと同程度の値となっている。

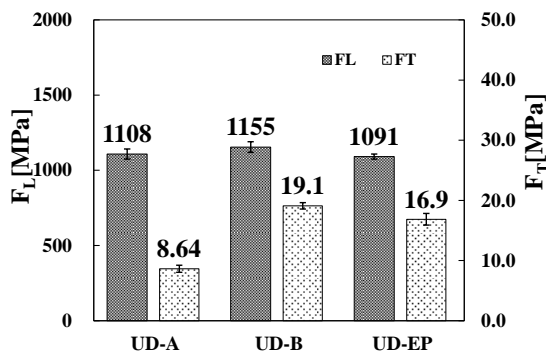
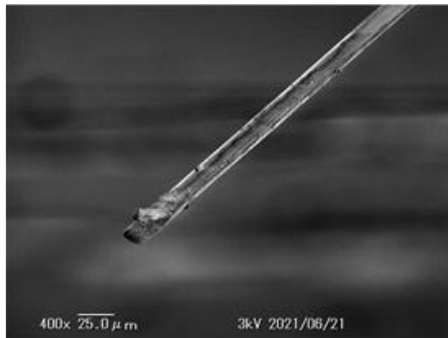
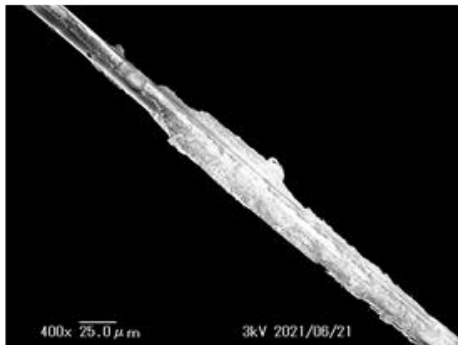


Fig.2 Comparison of longitudinal tensile strength F_L and transverse tensile strength F_T

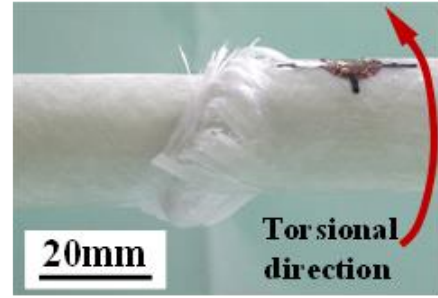


(a) UD-A



(b) UD-B

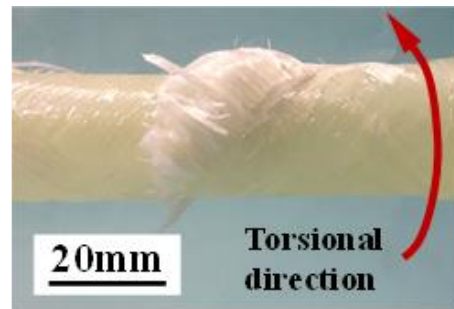
Fig.3 SEM observation results of T direction specimens



(a) Shaft-A



(b) Shaft-B



(c) Shaft-EP

Fig.4 GFRTP and GFRP shafts after torsional test

5.2 ねじり特性

ねじり試験後のGFRTPシャフトとGFRPシャフトをFig.4に示す。いずれのシャフトも、圧縮の応力側で繊維束の局部座屈と考えられる破壊となった。せん断強度とせん断弾性率の比較をFig.5に示す。Shaft-AとShaft-EPでは繊維体積含有率に10%の差があるため、Fig.5のせん断弾性率は繊維体積含有率を60%に換算した値である。Shaft-A、Shaft-B、Shaft-Cのせん断弾性率に差は確認できなかった。

せん断強度はShaft-Aが200MPa、Shaft-Bは289MPaとなり、Shaft-Bの方が1.4倍程度高くなった。これは、FW法で成形したシャフトが繊維束の局部座屈に起因する破壊となるため、FW製シャフトのねじり強度は繊維のサイジング剤の影響を大きく受け、一

方向板のT方向引張強度と同じ傾向となることが明らかとなった。また、Shaft-Bのせん断強度はShaft-EPと同程度となっていることから、GF-2のサイジング剤は現場重合型アクリル系樹脂に適したサイジング剤であることが確認できた。

6. 結言

- (1) 現場重合型アクリル系樹脂に適したガラス繊維のサイジング剤はGF-2となり、GF-2を用いて成形したGFRTPの一方向板の引張強度及びGFRTPシャフトのねじり強度は、従来のエポキシ樹脂を用いて成形したGFRPの一方向板の引張強度及びGFRPシャフトのねじり強度と同程度となった。
- (2) ガラス繊維のサイジング剤の種類により、GFRTPの一方向板の繊維直交方向の引張強度には2.2倍程度の差が生じ、GFRTPシャフトのねじり強度には1.4倍程度の差が生じることが確認できた。

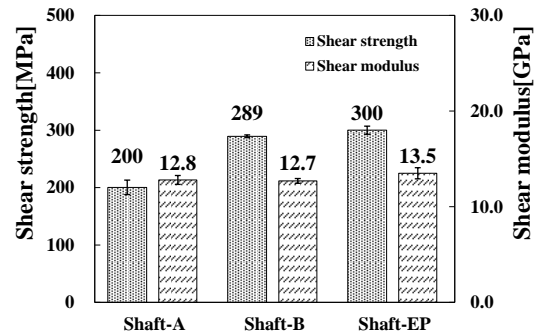


Fig.5 Comparison of Shear strength and shear modulus of GFRTP and GFRP shafts

参考文献

- 1) 福田博, 邊吾一, 末益博志,
- 2) 新版 複合材料・技術総覧, 産業技術サービスセンター, 2011, 195
- 3) 坂田憲泰, 柔軟性界面相を有するFW製CFRP円筒殻のねじり強度, 強化プラスチック, 64-6, 2018, 269-273
- 4) 坂田憲泰, 富田晋, 平山紀夫, 佐野一教, テックスがFW製GFRPシャフトのねじり特性に及ぼす影響, 日本複合材料学会誌, 46-6, 2020, 240-246