

FW 成形中の張力が CFRP リングの機械的性質に及ぼす影響

日大生産工（院） ○高橋 蒼 日大生産工 坂田 憲泰
 日産自動車 水金 貴裕 塚本 翔也

1. 緒言

電気自動車等に用いられている高効率モーターは一般的にロータシャフト表面に磁石を貼り付け、遠心力による磁石の飛散を防止するために外側にロータスリーブを被せる構造となっている。現在、高効率モーターの性能向上のためにロータスリーブに比強度、比剛性に優れる炭素繊維強化プラスチック（CFRP）リングを使用する検討が進められている。CFRPリングはフィラメントワインディング（FW）法で成形されるが、成形時の繊維に負荷する張力や巻き角度、繊維、樹脂の種類などがCFRPリングの機械的特性に与える影響に関する体系的な研究報告は見当たらない。本研究ではFW成形中の張力がCFRPリングの繊維体積含有率や強度に及ぼす影響について調査した。

2. 使用材料

強化材には炭素繊維ロービング T700SC-12K-50C（東レ㈱）、マトリックス樹脂にはエポキシ樹脂 XNR/H/A6805（ナガセケムテックス㈱）を用いた。

3. ひずみ計測実験

3.1 実験方法

成形条件がマンドレルのひずみに与える影響を調査するために、Table 1の条件でFig.1に示すマンドレル内側の周方向ひずみの計測実験を行った。マンドレルには外径130mm、厚さ2mm、長さ120mmで、材質S45C製のものを使用した。FW成形時に炭素繊維ロービングに負荷する張力は5N、15N、30N、45N、60Nの5種類とした。樹脂の影響を調査するために、炭素繊維ロービングには樹脂含浸をしていないDry、樹脂含浸をさせたWetを用い、厚さが2mmとなるようにマンドレルに6層フープ巻きした。そして、巻き付け完了後、炭素繊維を切断した際の周方向ひずみの計測を行った。また、Wetについては85℃×4hで硬化後、脱型した際の周方向ひずみ（After curing）についても計測を行った。

Table 1 FW conditions and hoop strain

Tension[N]	5	15	30	45	60
Dry[μ]	7	17	57	157	221
Wet[μ]	3	4	32	73	157
After curing[μ]	-	-	21	51	84

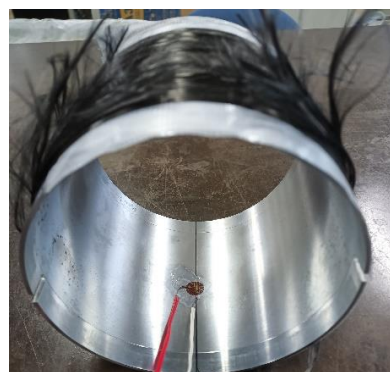


Fig.1 Mandrel after winding dry roving

3.2 実験結果及び考察

各条件でのマンドレルの周方向ひずみをTable 1とFig.2に示す。After curingの5Nと15Nについては硬化工程後のCFRP円筒とマンドレルにクリアランスがあり、ひずみを計測することができなかった。いずれの条件においても張力が大きくなるにつれてひずみは大きくなることが確認できた。また、ひずみはDryよりWetの方が小さくなっているが、これは炭素繊維ロービングに樹脂を含浸させることで摩擦力が低下したことが原因と考えられる。After curingではWetよりもひずみは小さくなっているが、これは硬化時のマンドレルの熱ひずみの影響と考えられる。After curingの中央付近から試験片を5個切り出して、燃焼法による繊維体積含有率（Vf）の計測を行った結果をFig.3に示す。炭素繊維ロービングに負荷する張力が大きくなるにつれてVfは高くなっているが、これは繊維一本に掛かる張力が大きくなることで、繊維束内の樹脂を押し出す力が大きくなったためと考えられる¹⁾。

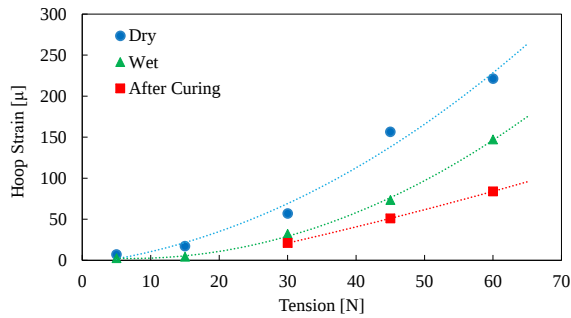


Fig.2 Relationship between hoop strain and winding tension

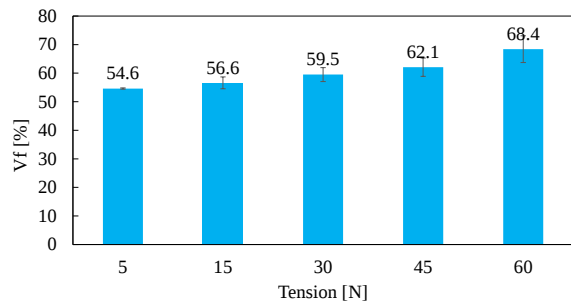


Fig.3 Relationship between Vf and winding tension

4. リングバースト実験

4.1 実験方法

炭素繊維ロービングに負荷する張力とCFRPリングの強度の関係を調べるためにFig.4の実験装置を用いてリングバースト試験を行った。CFRPリングの成形には外径60mmのマンドレルを用い、成形時に炭素繊維ロービングに負荷する張力は5N, 30N, 45Nの3種類とした。炭素繊維ロービングはマンドレルに3層フープ巻きし、85°C×4hで硬化後脱型、幅10mmに切断した。試験片の寸法と燃焼法で測定したVfをTable 2に示す。リングバースト実験には精密万能引張試験機 (AG-25TB, 株式会社島津製作所) を使用し、試験速度は2mm/s, 試験片本数は各1本とした。CFRPリングには一軸のひずみゲージを周方向に貼り、破断ひずみの計測を行った。

4.2 試験結果及び考察

実験結果をTable 3に示す。CFRPリングの強度は炭素繊維ロービングの引張弾性率 E_f の公称値 (230GPa) ²⁾とTable 2の V_f , 破断時の周方向ひずみ ϵ_θ の計測結果を用いて、式 (1)から算出した。

$$F = E_f V_f \times \epsilon_\theta \quad (1)$$

炭素繊維ロービングに負荷する張力が大きくなるにつれて破断ひずみは大きくなったが、これは張力が大きくなることで繊維束内のモ

ノフィラメントの真直性, 繊維分布の均一性が高くなったことが影響していると考えられる¹⁾。

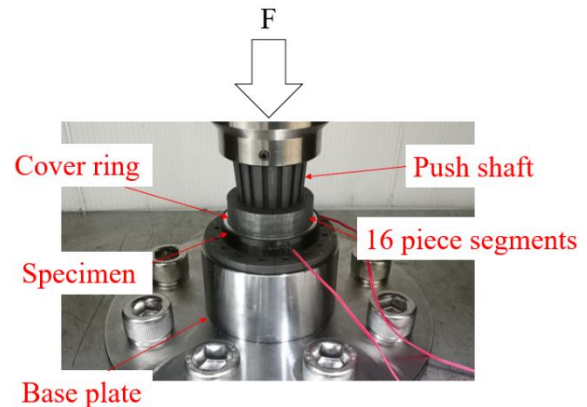


Fig.4 Ring burst test equipment

Table 2 Specimens for ring burst test

Tension [N]	5	30	45
Thickness [mm]	1.45	1.08	1.01
Vf [%]	44.7	53.7	58.5

Table 3 Ring burst test results

Tension [N]	5	30	45
Failure strain [%]	1.92	2.06	2.06
Strength [MPa]	1968	2539	2772

5. 結言

- (1) FW成形時にマンドレルに負荷されるひずみは、樹脂の摩擦の影響でDryよりWetの方が小さくなった。
- (2) FW成形時の張力を大きくすることでCFRPリングのVfが高くなることが確認できた。
- (3) FW成形時の張力を大きくすることで繊維束内のモノフィラメントの真直度と均一性が向上し、リングバースト実験における破断ひずみと強度は高くなることがわかった。

参考文献

- 1) 坂田憲泰, 富田晋, 平山紀夫, 佐野一教, 日本複合材料学会誌, 46, 6, 2020, 240-246.
- 2) 東レ, トレカ炭素繊維, https://www.cf-composites.toray/ja/resources/data_sheets/pdf/ds_torayca_yarn.pdf (2024年10月12日最終アクセス)