研究論文

高速引張試験によるカーボンおよびガラス繊維織物を用いた FRTP と FRP の 45° 方向の特性

杉本 直*¹, 邊 吾一*², 平山 紀夫*³

(2016 年 4 月 27 日受付)

45 Degree Directional Properties of FRTP and FRP Composed of Carbon and Glass Fibers Woven Fabrics under High Speed Tensile Test

Nao SUGIMOTO,*¹ Goichi BEN*² and Norio HIRAYAMA*³

(Received April 27, 2016)

Abstract: In this paper, static and dynamic tensile tests of woven fabric reinforced plastic composites were carried out and strain rates from 1×10^{-3} [1/s] to 1×10^2 [1/s] were loaded under two tensile directions of 45-degree and 0-degree to the fabric directions with a servo hydraulic testing machine. The specimens of CFRTP, CFRP, GFRTP and GFRP were composed of respective fibers fabrics of carbon and glass and two different matrix resin of PA6 and epoxy. All of the specimens were fabricated with VaRTM process. The experimental results for the strength of 45-degrees specimens depended on the strain rates. Fracture strain of GFRTP and GFRP 45-degrees specimens were not showed strain rates dependency. However, the fracture strain of CFRTP and CFRP declined with increasing strain rate. Absorbed energy of CFRTP and GFRTP 45-degrees specimen showed twice the value compared to the CFRP and GFRP in strain rate 10[1/s]. From the above results, strain rate dependency of strength, fracture strain and absorbed energy of FRTP and FRP by using woven fabric 45-degrees specimen were affected by reinforced fiber and matrix resin.

Key words: FRTP, FRP, Woven fabric composite, 45-degree dynamic tensile property, Strain rate dependency

1. 緒 言

近年、自動車の省エネルギー化、走行抵抗の低減の観点から自動車の車体の軽量化ニーズが高まっている。そのため、特に強化繊維としては炭素繊維あるいはガラス繊維、マトリクス樹脂としては熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂を用いた FRTP と FRP が軽量素材として注目されており、自動車への適用研究が実施されている¹⁻⁵⁾。自動車は衝突時に高速で大変形をするため、FRTP および FRP を自動車構造体へ適用する場合には、静的だけでなく動的な強度と破壊特性を明確にすることが重要とな

る。FRTP および FRP の動的引張特性に関する研究は多くの研究者により実施されているが⁶⁻¹⁵⁾、マトリクス樹脂の違いと強化繊維の違いが動的引張特性へ及ぼす影響、さらに、それらを含めた織物強化複合材における織り方向に対する 45 度方向の動的引張の評価はほとんど見られない。

本研究では、自動車衝突時の吸収エネルギー部材への FRTP と FRP の適用に際し、基本的な知見を得ることを目的とする。そのため、従来の研究で検討されていない樹脂の違い、強化繊維の違い、織物の引張負荷方向の違いによる静的および動的な引張試験を実施し、静的お

*¹ 日本大学大学院生産工学研究科機械工学専攻 大学院生 (275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University

*² 名古屋大学 客員教授

Visiting Professor, Nagoya University

*³ 日本大学生産工学部機械工学科 教授

Professor, Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University

Fig. 1 Schematic view of VaRTM.

Table 1 Density and V_f of specimens.

	Specimen density $\rho \times 10^3 [\text{kg/m}^3]$	V_f %
CFRTP	1.4	38.5
CFRP	1.4	37.7
GFRTTP	1.7	44.9
GFRP	1.6	37.2

よび動的引張特性を明らかにする。具体的には、織物強化材として炭素繊維およびガラス繊維にマトリクス樹脂として熱可塑性樹脂を用いた CFRTP と GFRTTP, 熱硬化性樹脂を用いた CFRP と GFRP を成形し、織り方向に対して 45 度の負荷方向 (以後、45° 材) に対し、静的と動的の破断特性を評価した結果について報告する。また、織り方向 (以後、0° 材) の実験¹⁶⁾ も行い、45° 材の衝撃特性との比較検討も行う。なお、本文では CFRTP と GFRTTP, CFRP と GFRP をそれぞれまとめて言及する場合は、FRTP, FRP と称する。

2. 試 験

2.1 FRTP 板と FRP 板の成形

本研究では、マトリクス樹脂が強度と破断特性に与える影響を調査するために、熱可塑性樹脂をマトリクスとした FRTP の平板と熱硬化性樹脂をマトリクスとした FRP の平板を成形した。熱可塑性樹脂には ϵ -カプロラクタムのアニオン重合を利用した現場重合型 PA6 (以下、PA6) を用い、熱硬化性樹脂には速硬化型エポキシ樹脂 (以下、EP) を用いた^{17,18)}。強化繊維には綾織炭素繊維 (東レ (株) 製 CO6347B) と平織ガラス繊維 (日東紡績 (株) 製 WEA22F) を用いた。繊維体積含有率 (以後、 V_f) は 40% を目標値とし、積層数は CFRTP と CFRP では綾織炭素繊維を 4 ply, GFRTTP と GFRP では平織ガラス繊維を 5 ply とした。また、樹脂単体の特性を評価するために、PA6 と EP の樹脂板についても成形を行った。試験片を採取するための FRTP と FRP は、金型内を真空にし、樹脂を繊維へ含浸させる VaRTM 法 (Fig. 1) にて成形を行った。樹脂板も同様の方法で繊維

Fig. 2 Dimensions of FRTP and FRP specimen for tensile test.

Fig. 3 Dimensions of resin specimen for tensile test.

を入れずに成形した。FRTP 板および PA6 板の成形では、110°C の樹脂を 140°C の金型に注入し、FRP 板および EP 板の成形では 50°C の樹脂を 80°C の金型に注入した。成形後の FRP と FRTP の板厚は 1 mm で、樹脂板の板厚は 3 mm とした。Table 1 に成形した FRTP 板と FRP 板の V_f を燃焼法で求めた値と密度を示す。

2.2 試験片の作製

静的引張試験と動的引張試験に用いる FRTP と FRP の試験片の形状は、動的引張試験機に装着可能な試験片の幅と長さの制約条件より決定した。試験片寸法を Fig. 2 に示す。試験片は、2.1 節で成形した FRTP 板と FRP 板から織り方向に対して 0°, 45° 方向に精密切断機により切り出し作製した。試験片のつかみ部には、GFRP 製の板厚 1 mm のタブを 2 液混合型のエポキシ接着剤を用いて試験片の両面に接着させた。一方、樹脂単体の引張試験片は、JIS K7139 を参考に Fig. 3 の形状に切削加工した。

2.3 試験方法

静的引張試験には、インストロン社製の静的引張試験機を用い、引張速度は 1 mm/min (ひずみ速度 0.0004 [1/s]) とした。荷重は試験機のロードセルより検出し、ひずみの計測はビデオ伸び計を用い、ゲージ長さは試験片評価部内の最大長さ 40 mm で計測した。後述する動的試験のひずみ計測に合わせてチャック変位から換算したひずみデータも用意した。

動的引張試験には、(株) 驚宮製作所社製検力ブロック

Fig. 4 Schematic view of dynamic tensile test.

式高速引張試験機を用いた。高速引張試験機の概要を Fig. 4 に示す。試験片は上下それぞれのチャックに挟まれ、チャックのプレートの上から 4 本のボルトにより締結することで固定される。荷重は、油圧力により加速されたハンマーが上部チャック部をすり抜け、下部チャック部に衝突し、押し下げることで動的引張力が負荷される。そして、負荷された荷重は上部チャック部に内蔵されるロードセルにより検出される。検力ブロックの特徴として、ロードセル内での歪ゲージ部通過後の反射波が衝撃力波形に影響を及ぼさないことが挙げられる¹⁹⁾。ひずみの計測はひずみゲージで行ったが、ひずみゲージでは 5% 以上のひずみ計測が困難なため、ひずみが 5% 以上となる樹脂単体と FRTP および FRP の 45° 方向の試験片については、チャック間変位からひずみを算出した。引張速度の設定値は、ひずみ速度の目標値を 0.1 [1/s], 1 [1/s], 10 [1/s], 100 [1/s] とし、上部チャック速度をそれぞれ 5 mm/s, 50 mm/s, 500 mm/s, 5,000 mm/s に設定した。ただし、高速引張の速度にはばらつきがあるため、ひずみ速度の実測値は、各試験片の平均値でそれぞれ、0.09 [1/s], 0.92 [1/s], 7.71 [1/s], 136.18 [1/s] となった。試験片本数は各引張速度に対し 3 本以上とし、試験はいずれも室温環境下で実施した。

3. 試験結果と考察

3.1 静的引張試験結果

Fig. 5 に EP と PA6 の樹脂板の静的引張試験の応力-ひずみ線図を示す。EP の強度は 110 MPa、破断ひずみは 5.2% となった。一方で、PA6 の強度は 66 MPa で、破断ひずみは 23.7% となり、EP と比べて強度は 4 割程度低くなったが、破断ひずみは約 4 倍大きくなった。この結果より、PA6 は EP と比較して高延性な樹脂であることが確認できた。

Fig. 5 Static S-S curves of resin plates.

Table 2 Representative tensile strength and fracture strain of 0° specimens.

	Tensile strength [MPa]	Calculated value [MPa]	Difference [%]
CFRTP	565	680	16.9
CFRP	602	708	15.0
GFRTTP	256	353	27.5
GFRP	268	335	20.0

(a) CFRTP and CFRP

(b) GFRTTP and GFRP

Fig. 6 0° specimens of FRP and FRTP after tensile test.

次に強化繊維の違いが FRTP および FRP の破断特性へ及ぼす影響を調査するために、FRTP および FRP の静的引張を行った。Table 2 に 0° 材の静的引張試験における強度の実験値と一方向性の強度複合則による計算値およびその差を示す。計算値との比較では強化繊維による違いの傾向は見られるものの、いずれも実験値は 20% 前後低い値である。これは、繊維のよれや織物繊維が引張られる際に生じる織り目部での曲げ応力の影響²⁰⁾と考えられる。また、Fig. 6 に FRTP および FRP の 0° 材の破断後の試験片の様相を示すが、すべての試験片の破壊様相は繊維破断である。

Fig. 7 Static S-S curves of 45° specimens.

Fig. 8 45° specimens of FRTP and FRP after tensile test.

Fig. 7 に CFRTTP と CFRP, GFRTTP と GFRP の 45° 材における代表的な応力-ひずみ線図を示す。45°方向の引張においては、すべての試験片で異なる S-S 線図を示し、強化繊維とマトリクス樹脂の両方が耐力、強度、破断ひずみに影響を及ぼしていることが示された。

Fig. 8 に 45° 試験片の FRTP および FRP の破断後の試験片の様相を示し、Fig. 9 には、試験片が比較的透明な GFRP の 0° 材と 45° 材の破断前後の試験片を比較して示す。Fig. 8 から明らかなように、すべての試験片で繊維破断を起こしていることが確認できる。一方 Fig. 9 (a)からは、GFRP の 0° 材の破断部位近傍が白化しているのに対し、Fig. 9 (b)の GFRP の 45° 材は評点間内全域が白化している。これは繊維に沿う剪断応力により樹脂が損傷することで白化したと考えられる。このように、織物材の 45° 方向に引張荷重が作用する場合、大ひずみ領域で損傷を受けるマトリクス樹脂の S-S 特性と最終的に破断する織物繊維自体の強度の両方の影響を受けると考えられる。

(a) GFRP (0°)

(b) GFRP (45°)

Fig. 9 Specimens of before tensile test and after tensile test.

3.2 樹脂単体の動的引張試験結果

Fig. 10 に PA6 と EP の樹脂板の強度とひずみ速度の関係、Fig. 11 に破断ひずみとひずみ速度の関係を示す。これらの図から明らかなように、PA6 においては強度にひずみ速度依存性があり、PA6, EP とともに、ひずみ速度が上昇するにつれ、破断ひずみは低下していく傾向が見られる。

3.3 FRTP45° 材と FRP45° 材の動的引張試験

3.3.1 各ひずみ速度における応力-ひずみ関係

Fig. 12(a)~(d)に FRTP の 45° 材と FRP の 45° 材の各ひずみ速度における S-S 線図を示す。4 種の 45° 材の試験片の強度はすべてひずみ速度依存性を示し、GFRTTP と GFRP のひずみ速度 100 [1/s] における動的強度は CFRTTP, CFRP とほぼ同等の値を示した。破断ひずみについては、CFRP と GFRP よりも CFRTTP と GFRTTP の方が各ひずみ速度において約 10% 程度高い値となった。また、各ひずみ速度で FRTP の破断ひずみは FRP よりも大きな値になった。

3.3.2 強度のひずみ速度依存性の比較

樹脂単体、FRTP・FRP の 0° 材、45° 材の 3 者の各ひ

Fig. 10 Relationship between tensile strength and strain rate of PA6 and EP.

Fig. 11 Relationship between fracture strain and strain rate of PA6 and EP.

(a) CFRTP (45°)

(b) CFRP (45°)

(c) GFRTTP (45°)

(d) GFRP (45°)

Fig. 12 S-S curve of specimens under each strain rate.

ずみ速度における静的強度と動的強度の比を Fig. 13 (a)～(d)に示す。これらの図より、(a)のCFRTPの45°材と(b)のCFRPの45°材のひずみ速度100[1/s]における強度比がともに約1.2倍に留まるのに対し、(c)のGFRTTPの45°材の強度比は約2倍、(d)のGFRPの45°材の強度比は1.5倍と高い値を示した。この理由としては、過去の研究^{12～14)}で指摘されているように、ガラス繊維には強度のひずみ速度依存性があり、炭素繊維にはほとんどない点が挙げられる。

3.3.3 破断ひずみのひずみ速度依存性の比較

樹脂単体、FRTP・FRPの0°材、45°材の3者の各ひずみ速度における静的破断ひずみと動的破断ひずみの比を Fig. 14(a)～(d)に示す、(a)、(b)より、CFRTPとCFRPともに、45°材はひずみ速度上昇とともに破断ひずみが低下する傾向がある。これは、炭素繊維は破断ひずみにひずみ速度依存性を持たないため、CFRTPとCFRPともに、樹脂の破断ひずみの速度依存性(負の相関)の影響を受けて、ひずみ速度上昇に伴い破断ひずみ

(a) CFRTP and PA6

(b) CFRP and EP

(c) GFRTP and PA6

(d) GFRP and EP

Fig. 13 Strength ratio of specimens under each strain rate.

(a) CFRTP and PA6

(b) CFRP and EP

(c) GFRTP and PA6

(d) GFRP and EP

Fig. 14 Fracture strain ratio of specimens under each strain rate.

(a) CFRTWP and CFRP

(b) GFRTWP and GFRP

Fig. 15 Absorbed energy of 45° specimens under each strain rate.

が低下したと考えられる。(c), (d)の GFRTWP 0° 材と GFRP 0° 材はガラス繊維に破断ひずみが大きな正のひずみ速度依存性を有しているため、樹脂の破断ひずみがひずみ速度の増加とともに減少しても GFRTWP の 0° 材と GFRP の 0° 材の破断ひずみはひずみ速度に対して増加する。一方で、GFRTWP の 45° 材と GFRP の 45° 材の破断ひずみは、それぞれの 0° 材の破断ひずみの正の相関と樹脂の破断ひずみの負の相関の影響を受け、結果としてひずみ速度の増加に対してはほぼ一定となったと考えられる。

3.3.4 吸収エネルギーのひずみ速度依存性の比較

Fig. 15(a), (b)に FRTP と FRP の 45° 材の荷重-変位線図より算出した吸収エネルギーとひずみ速度の関係を示す。ひずみ速度の上昇に伴い、CFRTWP の吸収エネルギーは大きな変化が無く、CFRP は吸収エネルギーが低下する傾向となる。また、GFRTWP と GFRP の吸収エネルギーはともに上昇する傾向となる。これは、樹脂と強化繊維のそれぞれの強度と破断ひずみのひずみ速度依存性の影響を受けているためである。特にガラス繊維と PA6 を用いた GFRTWP の吸収エネルギーはひずみ速度の上昇に伴い顕著に上昇し、ひずみ速度 100[1/s] では静的に比

(a) CFRTWP (0°)

(b) CFRP (0°)

Fig. 16 Specimen of CFRTWP (0°) and CFRP (0°) after dynamic tensile test under strain rate 100[1/s].

(a) CFRTWP (45°)

(b) CFRP (45°)

Fig. 17 Specimen of CFRTWP (45°) and CFRP (45°) after dynamic tensile test under strain rate 100[1/s].

べ、2 倍以上の約 30 J を示し、CFRTWP とほぼ同等となった。また、ひずみ速度 10[1/s] 以降では、PA6 をマトリクスとした CFRTWP と GFRTWP は CFRP と GFRP と比較して、約 2 倍の吸収エネルギーを示した。

3.4 マトリクス樹脂が静的および動的引張特性に及ぼす影響について

動的試験 (ひずみ速度 100[1/s]) 後の CFRTWP と CFRP

の破断部位を光学顕微鏡 50 倍にて観察した結果を 0° 材について Fig. 16(a), (b) に示し, 45° 材について Fig. 17(a), (b) に示す. Fig. 16(a) と (b) の比較から, 0° 材の破断部位に差異が認められなかった. 一方で, 45° 材に関しては Fig. 17(a) と Fig. 17(b) の比較から破断後のマトリクス樹脂のクラックは CFRTP の 45° 材にはあまり見られず, それに対して CFRP の 45° 材に顕著に見られた. これは, Fig. 5 に示したように, PA6 は EP と比較すると延性的で破断ひずみも大きいと考えられる. そして, この樹脂の延性の違いが, 45° 材において CFRTP と GFRTP が CFRP と GFRP と比べてひずみ速度 10 [1/s] 以上において吸収エネルギーが約 2 倍の値を示した理由として挙げられる.

4. 結 言

炭素繊維およびガラス繊維織物を強化材とする CFRTP, CFRP, GFRTP, GFRP の織り方向に対して 45° 方向の静的・動的引張試験を実施し, 以下の知見を得た.

(1) 45° 材の動的な強度はすべての試験片においてひずみ速度依存性を示した. 特に, GFRTP と GFRP のひずみ速度 100 [1/s] では, 炭素繊維を用いた CFRTP, CFRP とほぼ同じ強度となった. そして, PA6 をマトリクスとした GFRTP のひずみ速度 100 [1/s] における動的強度は静的に比べ, 2 倍以上の値を示した.

(2) 45° 材の GFRTP と GFRP の破断ひずみは, ひずみ速度が増加しても, 大きく変化しなかった. その一方で, CFRTP と CFRP は, ひずみ速度上昇に伴い破断ひずみが低下した.

(3) 45° 材の吸収エネルギーに関しては, ひずみ速度 10 [1/s] 以降では, CFRTP と GFRTP は CFRP と GFRP と比較して, 約 2 倍の値を示した. また, CFRP の吸収エネルギーだけがひずみ速度の増加に伴い減少した.

上記より, 織物 FRTP および FRP の 45° 方向の高速引張変形における強度, 破断ひずみ, 吸収エネルギーのひずみ速度依存性は, 強化繊維とマトリクス樹脂の両方のひずみ速度依存性の影響を受ける.

本研究は日本大学坂田憲泰氏にご協力を頂いたことと, 日本大学大学院生産工学研究科平成 27 年度研究科特別経費 (学生分) の補助を受けたものであり, ここに記して謝意を表します.

参 考 文 献

- 1) 金 炯秀, 邊 吾一, 青木義男: 日本複合材料学会誌, **34**, 2 (2008), 51-59.
- 2) 邊 吾一, 杉本 直, 青木義男, 金 炯秀, 飯塚由佳: 日本複合材料学会誌, **34**, 6 (2008), 211-218.
- 3) 石川隆司: 自動車技術, **68**, 11 (2014), 4-11.
- 4) 山根 健: オートデスク主催「自動車軽量化のための複合材料の活用と未来」セミナー, April 21, 2015.
- 5) M. Bitterlich et al.: *Kunststoffe*, **3** (2014), 80-84.
- 6) J. Rodriguez, I.S. Chocron, M.A. Martinez & V. Sánchez-Gálvez: *Composites Part B*, **27B** (1996), 147-154.
- 7) G.H. Staab & A. Gilat: *J. Compos. Mater.*, **29**, 10 (1995), 1308-1320.
- 8) M. Todo, K. Takahashi, P. Béguélin & H.H. Kausch: *Compos. Sci. Technol.*, **60** (2000), 763-771.
- 9) M.M. Shokrieh & M.J. Omid: *Compos. Struct.*, **88** (2009), 595-601.
- 10) K.A. Brown, R. Brooks & N.A. Warrior: *Compos. Sci. Technol.*, **70** (2010), 272-283.
- 11) N.K. Naik, P. Yernamma, N.M. Thoram, R. Gadipatri & V.R. Kavala: *Polymer Testing*, **29** (2010), 14-22.
- 12) 谷口憲彦, 西脇剛史, 平山紀夫, 西田裕文, 川田宏之: 日本機械学会論文集 (A 編), **75**, 758 (2009), 1284-1289.
- 13) 谷口憲彦, 荒尾与史彦, 西脇剛史, 平山紀夫, 中村幸一, 川田宏之: 日本複合材料学会誌, **38**, 4 (2012), 137-143.
- 14) N. Taniguchi, T. Nishiwaki, N. Hirayama, K. Nakamura & H. Kawada: *Adv. Compos. Mater.*, **21**, 2 (2012), 165-175.
- 15) A. Martin, R. Othman & P. Rozyki: EPJ Web of Conferences **26**, 01038 (2012).
- 16) 杉本 直, 邊 吾一, 平山紀夫, 坂田憲泰, 日下部智史: 第 7 回日本複合材料会議 (JCCM-7), 1A-21 (2016).
- 17) 邊 吾一, 大関 輝, 中村幸一, 平山紀夫, 生井沢正樹, 小林正俊, 東 弘英: 日本複合材料学会誌, **39**, 4 (2013), 127-134.
- 18) 邊 吾一, 坂田憲泰, 石田 亘: 日本複合材料学会誌, **41**, 4 (2015), 112-121.
- 19) 中馬義孝, 古藤和彦, 海津浩一, 谷村真治: 日本機械学会論文集 (A 編), **59**, 568 (1993), 2947-2952.
- 20) 植村益次, 山脇弘一: 日本航空学会誌, **15** (1967), 381-393.