研究論文

ガラス繊維の衝撃引張り特性に関する実験的検討

谷口 憲彦^{*1}, 荒尾与史彦^{*2}, 西脇 剛史^{*1}, 平山 紀夫^{*3},
中村 幸一^{*3}, 川田 宏之^{*4}

(2011年9月7日受付)

Experimental Study on Impact Tensile Property of Glass Fiber

Norihiko TANIGUCHI,^{*1} Yoshihiko ARAO,^{*2} Tsuyoshi NISHIWAKI,^{*1}
Norio HIRAYAMA,^{*3} Koichi NAKAMURA^{*3} and Hiroyuki KAWADA^{*4}

(Received September 7, 2011)

Abstract: The tensile properties of E-glass were determined from the experimental results of fiber bundle testing under a high strain rate. The tests were performed using two types of experimental method. One is the tension-type split Hopkinson bar system, and the other is the universal high-speed tensile-testing machine. As the results, it was demonstrated that the tensile strength and fracture strain of E-glass fiber increased with the strain rate. The absorbed strain energy, therefore, significantly increased. It was also shown that the strain rate dependency of E-glass fiber tensile-strength was strongly affected by fiber diameter. In other words, the smaller diameter of E-glass fiber has the stronger strain rate dependency. Finally, the impact tensile strengths of high-strength glass and carbon fibers were investigated. It was confirmed that the tensile strength of the high-strength glass fiber also increased with the strain rate, but the tensile properties of carbon fiber were almost independent of the strain rate.

Key words: Glass fiber, Impact property, Strain rate effect, Tensile strength, Energy absorption

1. 緒 言

繊維強化プラスチック (fiber reinforced plastics : 以下 FRP) の応用分野は拡大傾向にあり, 近年の自動車・スポーツ用品における導入推進率は他の産業分野に比べ非常に高い¹⁾. これらの産業分野における構造部材の設計を行う場合, 衝撃負荷に対する機能性・安全性が

重要な因子となりうる. そのため, 構造部材の FRP 化に際して, 衝撃負荷下における特性を十分に把握することが重要となってくる. FRP はその種類によって異なるひずみ速度依存性を有することが数多くの研究者によって報告されているため²⁻⁵⁾, 実設計に適用するには材料ごとのひずみ速度依存性を含めた議論が必要となる. 著者らは熱可塑エポキシをマトリクスとする FRP の引張り強度特性に及ぼすひずみ速度の影響についての検討を行い, カーボン繊維を強化材とした一方向材においては, 引張り強度に及ぼすひずみ速度の依存性は極めて小さいものの, ガラス繊維を強化材とした場合においてはそのひずみ速度依存性が十分に大きいことを実験的に示している⁶⁾. この要因として, マトリクスのひずみ速度依存性よりもガラス繊維自身の影響が大きいとしている. Staab ら⁷⁾においても繊維配向角が $[\pm 15^\circ]$ の GFRP 対称積層板と $[\pm 60^\circ]$, $[\pm 75^\circ]$ のそのの衝撃引張り強度を比較し, 前者の方がひずみ依存性が大きいことから同様の報告がなされている. これらの報告によれば, FRP の衝撃特性は炭素繊維よりもガラス繊維を強

^{*1} (株)アシックス スポーツ工学研究所 (651-2271 神戸市西区高塚台 6-2-1)
Institute of Sports Science, ASICS Corporation, 6-2-1 Takatsukada, Nishi-ku, Kobe 651-2271, Japan

^{*2} 同志社大学
Department of Mechanical and Systems Engineering, Doshisha University

^{*3} 日東紡績(株)
Research and Development Head Office, NITTO BOSEKI CO., LTD

^{*4} 早稲田大学
Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering, Waseda University

化材とした場合の方が優れる結果となり、上記産業分野における構造部材設計の有益な知見となる可能性がある。しかしながら、そのためにはガラス繊維自身のひずみ速度依存性を含めた衝撃特性についてより詳細な議論を行う必要がある。

ガラス繊維の衝撃特性については Xia らの研究^{8,9)} が代表的である。ガラス繊維束の衝撃引張り試験よりひずみ速度依存性に対する統計的モデルを確立し、ガラス繊維の構成方程式を決定している。提案したモデルは実験結果と良い一致を示すものの、ガラス繊維構成基材や繊維径の影響といった材料設計を行うために必要な実験データを十分に示しているとは言い難い。

本研究では、ガラス繊維の衝撃引張り特性に関する実験的な検討を行い、材料設計、ならびに、構造設計を行うための有益な知見を得ることを目的とする。はじめに、一般的な E ガラス繊維束の衝撃引張り試験を行い、材料特性に及ぼすひずみ速度依存性について明らかにする。さらに、繊維径の異なるガラス繊維のひずみ速度依存性を明らかにすることで衝撃特性に及ぼす繊維径の影響についての考察を行う。最後に、炭素繊維、ならびに、高強度ガラス繊維についても同様の実験を行い、強化繊維の種類が衝撃引張り特性に及ぼす影響について検討を加える。

2. 実験

実験に用いた供試体形状をそれぞれ Fig. 1 に示す。標点間距離が 20 mm の E ガラス繊維束 (平均繊維径 17

Fig. 1 Geometry of specimen used in this study.

μm , 繊維本数 1,000 本) を用い、繊維束の両端にはアルミニウム製タブを接着剤で貼り付けたものを供試体とした。本研究ではホプキンソン棒法式衝撃引張り試験機、ならびに、油圧制御型高速引張り試験機 (島津ハイドロショット HITS-T10) の 2 種類の試験機を用いて実験を行った。ホプキンソン棒法式衝撃引張り試験機の構成を Fig. 2 に示す。同試験機はストライカー、入力棒、ならびに、出力棒により構成される⁶⁾。ストライカーを入力棒端部に設けたヨーク部に衝突させ、励起された入射波、反射波、透過波を貼り付けたひずみゲージ (入力棒: 箔ゲージ, 出力棒: 半導体ゲージ, 共和電業(株)製) によりサンプリング 1.0 MHz で測定した。供試体の応力、ひずみ、ならびに、ひずみ速度は一次元弾性波理論に基づき以下の式で算出できる¹⁰⁾。

$$\sigma = \frac{AE\epsilon_t}{NA_s} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \epsilon_r d\tau \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{2c_0}{l_0} \epsilon_r \quad (3)$$

ここで、 E : 入出力棒の弾性係数、 A : 入出力棒の断面積、 A_s : ガラス繊維断面積、 N : 繊維本数、 ϵ_r : 反射波ひずみ、 ϵ_t : 透過波ひずみ、 c_0 : 応力棒の弾性波速度、 l_0 : 供試体の標点間距離である。

油圧制御型高速引張り試験機は既述のホプキンソン棒法式衝撃引張り試験機に比べ引張り速度領域が大きく、且つ、測定変位領域も 300 mm と非常に大きいため、標点間距離が十分に長い供試体に対しても衝撃試験を実施できる利点がある。しかしながら、本供試体の破断時に予想される最大変位量は 1.0 mm 程度と小さいため、出力される変位量に含まれる誤差の影響が無視できない可能性が生じてくることが試験機の仕様から推察される。そこで、高速引張り試験機においては代表的な引張り速度に対しサンプリング 1.0 MHz で荷重履歴を測定した。尚、ひずみ速度は引張り速度を供試体の標点間距離で除

Fig. 2 Tension-type SHB apparatus used in this study.

することで算出した。

3. 実験結果

3.1 応力-ひずみ曲線

ホプキンソン棒法により測定されたひずみ履歴と式(1)-(3)を用いて算出された平均ひずみ速度 250 s^{-1} における応力-ひずみ曲線を Fig. 3 に示す。尚、供試体の断面積 A_0 は平均繊維径と繊維本数より算出された値を用いている。比較として汎用万能試験機を用いて測定された準静的負荷下における結果も同図中に示す。Fig. 3 によれば、ガラス繊維の初期ヤング率に相当する応力-ひずみ曲線の初期の傾きに関しては、両者に違いは殆ど見られないことが分かる。しかしながら、平均ひずみ速度 250 s^{-1} における最大応力と最大応力発現時のひずみの両者とも準静的負荷下のそれに比べ大幅に増加していることが確認できる。

3.2 材料特性に及ぼすひずみ速度の影響

2種類の衝撃引張り試験と準静的引張り試験により得られた材料特性とひずみ速度の関係を Fig. 4(a)-(c) に示す。ここで、Fig. 3 における最大応力値を引張り強度とし、最大応力発現時のひずみを破断ひずみと定義した。尚、既述のように油圧制御型高速引張り試験機を用いた実験においては荷重履歴のみ測定しているため、材料特性のうち初期ヤング率、および、破断ひずみのひずみ速度依存性に関してはホプキンソン棒法による結果のみで検討を行っている。Fig. 4(a) にひずみ速度と初期ヤング率の関係を示す。ひずみ速度の影響は非常に小さいことが確認できる。本結果についてはEガラス繊維自身が粘弾性特性を殆ど有さないことに起因していると思われる

Fig. 3 Comparison of stress-strain curves between quasi-static and strain rate of 250 s^{-1} from E-glass bundle test.

る。Fig. 4(b) にひずみ速度とEガラス繊維の引張り強度との関係を、また Fig. 4(c) にひずみ速度と破断ひずみとの関係を示す。Fig. 4(b) によれば、Eガラス繊維の引張

Fig. 4(a) Dependence of strain rate on Young's modulus of E-glass fiber.

Fig. 4(b) Dependence of strain rate on tensile strength of E-glass fiber.

Fig. 4(c) Dependence of strain rate on fracture strain of E-glass fiber.

Fig. 5 Comparisons of fracture behavior in E-glass bundle.

Fig. 6 Successive photographs of fracture in $\phi 100 \mu\text{m}$ E-glass specimen at the rate of 500 s^{-1} .

り強度はひずみ速度の向上に伴い増加する結果となる。また、その増加挙動はひずみ速度 50 s^{-1} 付近より大きくなると緩やかになることが両衝撃試験結果から確認でき、ひずみ速度 250 s^{-1} では約 60% 程度の増加となった。これは Xia らの報告⁹⁾と同様の傾向を示す。本結果より、既論文⁶⁾において報告された一方向 GFRP 積層板のひずみ速度向上に伴う引張り強度の大幅な増加は、主としてガラス繊維強度のひずみ速度依存性によるものであるといえる。

ひずみ速度向上により引張り強度が増加する要因としては、衝撃引張り負荷中での発熱の影響、ガラス繊維成形時に発生する残留応力の影響、分子構造による影響等が考えられるが、ガラス破壊の特徴的な現象である亜臨界き裂進展が主原因の 1 つに挙げられる。一般的に、ガラスの強度 σ_f は線形破壊力学の取り扱いにより以下の式で表される。

$$\sigma_f = \frac{K_c}{Y(a) \cdot \sqrt{\pi a(t)}} \quad (4)$$

ここで、 K_c : ガラス繊維の破壊じん性値、 $a(t)$: クラック長さ、 $Y(a)$: 形状因子となる。

Suratwala ら¹¹⁾、および、Freiman ら¹²⁾の研究では、破壊じん性値到達前に亜臨界き裂進展と呼ばれる領域が

存在し、応力拡大係数に依存した速度でクラックが徐々に進展することを述べている。式(4)より、クラック長さは時間の関数であるため、準静的負荷下と高ひずみ速度下においてはガラス繊維の破壊じん性値到達までのクラック長さが異なる可能性が生じる。そのため、高ひずみ速度下でのガラス繊維強度が増加することとなるが本考察に関しては更なる検討が必要であると思われる。

破断ひずみにおいても引張り強度に比べばらつきが大きいもののほぼ同傾向のひずみ速度依存性が確認された。一般的に、実験データのばらつきが大きい要因としては、材料そのものによる影響と試験方法による影響が挙げられるが、本結果においては準静的試験においても同様のばらつきが見られることもあり試験方法による可能性は低いと考えられる。

3.3 破壊の様子

E ガラス繊維のひずみ速度依存性に関して詳細な知見を得るため引張り負荷中の様子を高速ビデオカメラ(島津 HyperVision HPV-2)で撮影した。ひずみ速度 10 s^{-1} , 100 s^{-1} , 250 s^{-1} , 500 s^{-1} における最大応力到達後の様子を Fig. 5 にまとめる。また、比較のため準静的引張り試験における結果も同図中に示す。Fig. 5 によれば、ひずみ速度が増加に伴いするにつれ E ガラス繊維は非常

に短い状態で飛散しており巨視的な破壊形態の変化が確認できる。この点についてより詳細に検討を行うため、直径 $100\text{ }\mu\text{m}$ のガラス繊維 3 本を供試体とした場合の衝撃引張り試験をひずみ速度 500 s^{-1} で行いその破壊の様子を撮影した。Fig. 6(a)–(e) に破壊の連続写真を示す。Fig. 6(b), (c) において E ガラス繊維の一箇所で破断が生じた後、Fig. 6(d), (e) において粉々になっていく様子が確認できた。これは破断時に発生した応力波が E ガラス繊維中を伝播したことが原因であると考えられる。以上の結果より、Fig. 5 で示したような巨視的な破壊形態の変化は E ガラス繊維破断後に生じる二次的な現象であるといえる。そのため、ひずみ速度増加に伴い E ガラス繊維強度が増加する既述の現象との関連性は極めて低いと考えられる。

4. 考 察

4.1 ひずみ速度依存性及び繊維径の影響

E ガラス繊維の引張り強度は明確なひずみ速度依存性を示すことが実験的に確認できた。一般的にガラス繊維の破断強度は繊維表面に存在する微細な傷に支配される。ガラス繊維の繊維径を変化させた場合、繊維表面の機械的性状が変化する可能性があるため、付随して引張り強度が大きく変化することが考えられる。また、関連してそのひずみ速度依存性にも違いが現れる可能性もある。そこで、繊維径の異なる 5 種類の E ガラス繊維束供試体を作製し、引張り強度のひずみ速度依存性についてホプキンソン棒法による評価を行った。用いた供試体の仕様を Table 1 にまとめる。既存の平均繊維径 $17\text{ }\mu\text{m}$ に $13.8\text{ }\mu\text{m}$, $9.2\text{ }\mu\text{m}$, $7.2\text{ }\mu\text{m}$, $5.3\text{ }\mu\text{m}$, $3.2\text{ }\mu\text{m}$ の 5 種類を加えた合計 6 種類の E ガラス繊維束に対し引張り強度のひずみ速度依存性を検討した。この時、繊維径は溶融後のガラス繊維の巻き取り速度を調整することのみで変化させている。各供試体に対し得られたひずみ速度と引張り強度の関係を Fig. 7 に示す。いずれの供試体に対してもひずみ速度増加に伴う引張り強度の増加が確認された。また、繊維径の小さいものほど高強度になる傾向も得られた。この結果より、径の小さい E ガラス繊維ほど繊維表面に存在する微細な傷の影響が小さくなることが推察できる。さらに、比較として E ガラス繊維と内部構

成基材が同じであるガラス平板（標点間距離 20 mm ，幅 5.0 mm ，厚さ 0.5 mm ，平板六面を研磨した後チャック部にアルミ製タブを接着）の衝撃引張り試験結果を Fig. 7 に加えるが、強度のひずみ速度依存性は確認できるものの繊維形状に比べ非常に低い値となる。

準静的負荷下と平均ひずみ速度 250 s^{-1} 近傍における引張り強度との比較を各繊維径に対して行った。Fig. 8 に繊維径と引張り強度との関係を示す。いずれのひずみ速度においても繊維径が小さいものほど高強度となることが確認できる。また、ひずみ速度 250 s^{-1} の方が高強度

Fig. 7 Dependence of strain rate on tensile strength of E-glass fibers and plate.

Fig. 8 Comparison of tensile strength between quasi-static and strain rate of 250 s^{-1} for representative fiber diameters.

Table 1 Specification of E-glass bundle specimens used in this study

Specimen	EG17	EG13.8	EG9.2	EG7.5	EG5.3	EG3.2
Average diameter (μm)	17.0	13.8	9.2	7.5	5.3	3.2
Number of fiber	1,000	906	200	200	200	1,600

となることはいずれの繊維径においても確認できる。この時、ひずみ速度増加における引張り強度の増加量に着目すると、繊維径の小さいものほど増加量が大きくなる傾向が得られた。以上の結果をまとめると、E ガラス繊維径の大きさは引張り強度のひずみ速度依存性に影響を及ぼす因子であると結論付けられる。加えて、本研究で用いた供試体においては、繊維径の大きさと繊維表面の機械的性状との間には関連性があると考えられるため、繊維表面の機械的性状も引張り強度のひずみ速度依存性に影響を及ぼす因子であると推察できる。

4.2 強化繊維の種類がひずみ速度依存性に及ぼす影響

異なる強化繊維の材料特性に対するひずみ速度の影響を検討することができれば、E ガラス繊維のひずみ速度依存性についてより統一的な議論を行うことができるだけでなく、既述の産業分野において FRP 構造部材を設計する際の有益な知見となりうる。そこで、高強度ガラ

Fig. 9 Comparison of stress-strain curves between quasi-static and strain rate of 250 s^{-1} from (a) High-strength glass, and (b) Carbon fiber bundle test.

ス繊維 (T ガラス, 日東紡(株)) と炭素繊維 (トレカ T300, 東レ(株)) を供試体とした場合の材料特性に及ぼすひずみ速度の影響について検討を行った。用いた供試体の仕様を Table 2 にまとめる。これらの供試体に対し、準静的負荷、ならびに、ひずみ速度 250 s^{-1} において得られた応力-ひずみ曲線の比較を Fig. 9(a), (b) にそれぞれ示す。高強度ガラス繊維においては E ガラス繊維と同様に初期ヤング率に対するひずみ速度依存性は極めて低いものの、ひずみ速度の増加に伴う引張り強度と破断ひずみの増加が確認できる。一方、炭素繊維はガラス繊維に比べ二つのひずみ速度に対する応力-ひずみ曲線に殆ど差が見られない。実験より得られた両強化繊維のひずみ速度と引張り強度の関係を、E ガラス繊維に対する結果の再掲とともに Fig. 10 に示す。Fig. 10 によれば、炭素繊維の引張り強度はひずみ速度の影響を受けにくいに対し、ガラス繊維のそれは E ガラス繊維、高強度ガラス繊維共にひずみ速度の変化に非常に敏感であることが分かる。さらに、平均ひずみ速度 250 s^{-1} における引張り強度の増加量を比較すると高強度ガラス繊維の方が大きい。引張り強度や破断ひずみがひずみ速度と共に増加すれば、結果として強化繊維自身のエネルギー吸収量も向上す

Fig. 10 Dependence of strain rate on tensile strength of E-glass, high-strength glass, and carbon fibers.

Table 2 Specification of E-glass bundle specimens used in this study

	E-glass	High-strength glass (T-glass)	Carbon (Torayca T300)
Density (g/cm^3)	2.58	2.49	1.76
Average diameter (μm)	17.0	13.0	6.0
Number of fiber	1,000	400	1,000

Fig. 11 Dependence of strain rate on specific absorbed strain energy of E-glass, high-strength glass, and carbon fibers.

る。Fig. 11 は最大応力発現までの比ひずみエネルギー吸収量とひずみ速度との関係を示したものである。Fig. 11 によれば、炭素繊維のひずみエネルギー吸収量はひずみ速度が増加してもその値はほぼ一定となるが、ガラス繊維においては、ひずみエネルギー吸収量に大幅な増加が確認できる。準静的負荷下における比ひずみエネルギー量の平均値は 8.54 J/g (E ガラス繊維), 19.8 J/g (高強度ガラス繊維), 10.7 J/g (炭素繊維), 平均ひずみ速度 250 s^{-1} においては 17.9 J/g (E ガラス繊維), 32.2 J/g (高強度ガラス繊維), 11.6 J/g (炭素繊維) となり、高ひずみ速度域におけるガラス繊維のエネルギー吸収特性は炭素繊維の 1.5–2.8 倍程度となる。本結果は、引張り荷重を受けるガラス繊維の衝撃特性がエネルギー吸収特性の面で炭素繊維よりも優れていると結論付けられるものであり、FRP 構造部材設計の際の有益な知見になるといえる。

5. 結 論

引張り荷重を受ける E ガラス繊維のひずみ速度依存性に対する実験的検討を行った。実験結果から、ひずみ速度の増加に伴う引張り強度、ならびに、破断ひずみの増加を確認し、付随してひずみエネルギー吸収量が大幅に増加することが明らかとなった。また、引張り強度のひずみ速度依存性は E ガラス繊維の直径によって異なる

ことを実験的に示し、直径の小さい繊維ほどその速度依存性が大きくなることを明らかにした。FRP 構造部材を設計するために必要な知見を得るべく、高強度ガラス繊維、および、炭素繊維に対しても同様の実験を行った。その結果、高強度ガラス繊維については E ガラス繊維と同様のひずみ速度依存性が確認できるものの、炭素繊維は両ガラス繊維に比べ力学的性質のひずみ速度依存性は極めて小さいことが実験的に明らかとなった。また、ガラス繊維の衝撃特性がエネルギー吸収特性の面で炭素繊維よりも優れていることが実験的に結論付けられた。

本研究を遂行するにあたり、(株)島津製作所三田裕也氏には多大なるご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 野間口兼政：日本複合材料学会誌，**32**, 3 (2006), 100–112.
- 2) J. Harding & L.M. Welsh : *J. Mater. Sci.*, **18** (1983), 1810–1826.
- 3) J. Harding : *Composites*, **24**, 4 (1993), 323–332.
- 4) 東田文子, 小川欽也：材料，**39**, 445 (1990), 1462–1468.
- 5) M.M. Shokrieh & M.J. Omid : *Compos. Struct.*, **88** (2009), 595–601.
- 6) 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.
- 7) G.H. Staab & A. Gilat : *J. Compos. Mater.*, **29**, 10 (1995), 1308–1320.
- 8) Y. Xia, J. Yuan & B. Yang : *Compos. Sci. Technol.*, **52** (1994), 499–504.
- 9) Z. Wang & Y. Xia : *Compos. Sci. Technol.*, **57** (1998), 1599–1607.
- 10) K.F. Graff : *Wave Motion in Elastic Solids*, DOVER PUBLICATIONS, INC., ISBN 0-486-66745-6.
- 11) T.I. Suratwala & R.A. Steele : *J. Non-Crystalline Solids*, **316** (2003), 174–182.
- 12) S.W. Freiman, S.M. Wiederhorn & J.J. Mecholsky, Jr. : *J. Am. Ceram. Soc.*, **92**, 7 (2009), 1371–1382.