FRPC の射出成形法とホプキンソン棒法 による衝撃引張破壊強度の評価* (スクリー形状と回転数の影響)

木田 外明^{*1}, 鈴木 恵^{*1}, 正木 康嗣^{*2}
竹本 信幸^{*3}, 宮木 毅^{*4}, 小山 洋典^{*4}

Injection Mold Method of FRPC and Evaluation of Its Tensile Impact Strength by Hopkinson Pressure Bar System (Effects of Screw Design and Number of Screw Rotations)

Sotoaki KIDA, Megumu SUZUKI, Yasushi MASAKI,
Nobuyuki TAKEMOTO, Tsuyoshi MIYAKI and Yohsuke OYAMA

The tensile impact tests of short-glass-fiber-reinforced polycarbonate (FRPC) specimens with fiber content of 30 wt%, which are molded under different conditions of screw design and number of screw rotations, are conducted using a tensile impact tester of the Hopkinson pressure bar system. The specific impact strength and the specific impact absorbed energy can be determined, and the significance probability of the tensile impact strength is evaluated.

Key Words: Reinforced Plastic, Impact Strength, Mold Methods, Hopkinson Pressure Bar System, Screw Design, Number of Screw Rotations

1. 緒 言

射出成形機で成形した FRP 製品は大量生産できるため安価に生産でき、その用途を広げつつある。それに伴い、温度や負荷速度などの厳しい環境や、段付きや切欠きなど複雑な形状での使用が増えてきている。しかし、FRP 製品の母材に使われる高分子材料の力学的性質は温度や負荷速度に大きく依存する⁽¹⁾。したがって、FRP 製品を広範囲に使用するときには、それらの製品の使用状況下での破壊強度を十分に検討しておく必要がある。

また、射出成形機による成形品の力学的性質はシリンダ温度、金型温度、スクリー回転数、スクリー背圧、射出速度、射出圧力、サイクルタイムなどの成形条件に依存する⁽²⁾。繊維強化成形品の場合には、繊維を成形品中に均一に分散させることができ、さらに繊維破断が少ないスクリー形状が要求され、可塑化能力(1 時間当たりの最大可塑化重量 N/h)が混練効

果(可塑化の均一性)かに注目してスクリーデザインが行われている⁽³⁾。

そこで、本研究は射出成形機のスクリー形状とスクリー回転数は変え、他の成形条件は一定にして成形したガラス繊維強化ポリカーボネート(FRPC)にホプキンソン棒法の原理⁽⁴⁾を応用した衝撃試験機⁽⁵⁾で、衝撃引張を与えたときの衝撃引張強度(以後、衝撃強度という)、吸収エネルギー、動的破壊靱性への試験片の相対切欠長さ、衝撃速度の影響を調べる。次に、衝撃強度の有意性の判定を行い、最大衝撃強度を与えるスクリー形状とスクリー回転数を求めることにする。

2. 実 験

2・1 射出成形機のスクリー形状とスクリー回転数 実験に使用した射出成形機は名機製作所 M 100 B-DM で、その概略を図 1 に示す。この機械はスクリーインライン式の射出成形機でスクリーピッチ P を一定、スクリー直径を D とするとき $P/D = 1$ の場合、圧縮比はフィードゾーン L_f のスクリー溝の深さ H_f とメタリングゾーン L_m の溝の深さ H_m の比 H_f/H_m で表され、通常 $H_f/H_m = 2 \sim 3$ にとられている。圧縮比を小さくすると可塑化能力は大きく

* 原稿受付 平成 5 年 10 月 22 日。

^{*1} 正員、金沢工業大学 (〒921 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)。

^{*2} 准員、カシオ計算機(株) (〒163 東京都新宿区西新宿 2-6-1)。

^{*3} 学生員 金沢工業大学大学院。

^{*4} (株)名機製作所 (〒474 大府市北崎町大根 2)。

なるが、混練効果は低下する。圧縮比を大きくすると逆の効果があり混練効果は向上する。すなわち、スクリー溝を深くすると可塑化能力は増大するが、混練能力は低下するため可塑化の均一性からは好ましくない⁽⁵⁾。

一方、可塑化時間を短縮するにはスクリー回転数を増せばよいが、回転数を上げすぎると、スクリーによる材料の混練が激しくなり、発熱のためプラスチックの熱分解が始まるので回転数には上限があるといわれている⁽⁶⁾。

表 1 スクリューの種類と寸法

	Metering zone	Compression zone	Feed zone
A screw	$H_m = 1.4\text{mm}$ $L_m = 135\text{mm}$	$L_c = 225\text{mm}$	$H_f = 6.0\text{mm}$ $L_f = 550\text{mm}$
B screw	$H_m = 2.8\text{mm}$ $L_m = 135\text{mm}$	$L_c = 225\text{mm}$	$H_f = 6.0\text{mm}$ $L_f = 550\text{mm}$

表 2 射出成形条件

Raw plastic	Drying 120°C, 4hours
Back pressure	1MPa
Temp. of metal mold	75°C
Temp. of heat cylinder	Nozzle 280°C Head 280°C Front 280°C Middle 265°C Back 250°C
Injection speed	60% (58mm/sec)
Pressure of holding injection	8MPa
Cycle time	60sec
Cooling time	38sec

(a) A スクリュー

(b) B スクリュー

図 1 射出成形機の概略図

したがって、本研究は表 1 に示すような 2 種類のスクリー形状、すなわち混練能力に重点をおいた圧縮比の大きな A スクリュー、可塑化能力に重点をおいた圧縮比の小さい B スクリューの 2 種類を使用し、スクリー回転数は 100, 200, 300 r.p.m. の 3 種類に変えた。しかし、表 2 に示すように成形時の樹脂温度、金型温度、射出速度、射出圧力、射出時間などは同一とした。

2・2 実験試料 実験試料はガラス繊維強化ポリカーボネート(三菱瓦斯化学, ユーピロン GS-2030 M ガラス繊維重量含有率 30%, FRPC と略す)である。B スクリューで 100, 200, 300 r.p.m. で成形した試料をそれぞれ①, ②, ③材, A スクリューで 100, 200, 300 r.p.m. で成形した試料をそれぞれ④, ⑤, ⑥材と呼ぶこととし、それらの機械的性質を表 3 に示す。また、衝撃試験片の形状と寸法を図 2 に示す。切欠きは片切欠きで、切欠長さ a は 2.5, 3.75, 5.0, 5.63, 6.25 mm, 切欠長さ a と板幅 W ($=12.5\text{mm}$) との比、すなわち相対切欠長さ a/W は 0.2, 0.3, 0.4, 0.45, 0.5 の 5 種類とした。切欠きの始めの長さ a_0 は糸のこぎり、残りの長さ a_1 ($=0.5\text{mm}$) はファインカットで注意深く入れた。また、比較のために非強化のポリカーボネート(三菱瓦斯化学, ユーピロン NF-2000 U, PC と略す)も使用した。ここに、各衝撃試験には 5 本以上の試験片を準備した。

表 3 試料の機械的性質

	Elastic modulus E GPa	Tensile strength σ_b MPa	Poisson's ratio ν	Percentage elongation %
①	6.5	100	0.39	4.0
②	6.4	99	0.39	3.8
③	6.4	96	0.39	3.6
④	6.4	99	0.39	3.8
⑤	6.3	98	0.40	3.9
⑥	6.3	97	0.39	3.8

Tensile speed 0.5mm/min and room temperature

図 2 試験片の形状と寸法

2.3 実験方法

2.3.1 衝撃引張試験機の概要

衝撃引張試験機の概要を図3に示す。試験片の一端を出力棒に固定させ、他端を移動可能なクロスヘッドに固定し、コンプレッサからエアタンク内に所定量の空気を供給し、電磁弁を開くことによりエアタンク内の空気が放出される。この空気圧によりパイプ内の所定位置に入れた鋼製衝突棒(直径19 mm、長さ100 mm)が加速され、クロスヘッドに衝突すると、ベアリングをつけたクロスヘッドはレールを滑って試験片を引張って破断させる。また、鋼製衝突棒の速度はエアタンク内の圧力、鋼製衝突棒のパイプ内での助走距離を変えることにより変えられる。ここに、2 mの出力棒を試験機の荷重検出に使用したことにより、検出波形に応力波の多重反射が重畳されないことと、この衝撃試験機では荷重点と試験片の板厚の中心までの距離があるため、曲げモーメントによる曲げ荷重が試験片に加わらないことを確かめている。

次に、衝撃荷重は出力棒(SS 41 材、直径20 mm、長さ2 m)の試験片のつかみ部から120 mm離れた位置にはったひずみゲージ(共和電業、KFG-5-120-C 1-11)により求め、ひずみ電圧をブリッジボックス(共和電業、Model DB-120 P)に入れた後、直流増幅器(共和電業、Model CVD-230 B)で増幅し、デジタルストレージオシロスコープ(日立電子、CVD-6041 Z)にひずみ信号として記録する。その信号を GPIB インタフェース(日本電気、PC-9801, 29 n)に取り入れた。そのひずみは荷重に変換され、荷重-時間関係として求められた。

また、クロスヘッドの速度をホトトランジスタによりスタート位置から10 mm 間隔で求められた値の平均値を衝撃速度 v とし、破断時間 t までの伸び $\delta(t)$ は

$$\delta(t) = \int_0^t v dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

で求めた。また、得られた荷重-伸び曲線下の面積を吸収エネルギー $w(t)$ として

図3 衝撃引張試験機の概略図

$$w(t) = \int_0^t P(t) v dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

より求めた。ここに、衝撃速度は5, 10, 15, 20 m/sに設定したが、相対切欠長さを変える実験では衝撃速度を15 m/sと一定とし、衝撃速度を変える実験では相対切欠長さを0.5と一定とした。

2.3.2 動的破壊靱性 K_{Id} 衝撃下での動的破壊靱性 K_{Id} は衝撃波形の最大荷重 P_{max} と試験片の板厚 B 、板幅 W 、切欠長さ a 、試験片の板幅の補正係数を $F(a/W)$ とすると、Brown ら⁽⁷⁾ の関係式より

$$K_{Id} = \frac{P_{max}}{BW} \sqrt{\pi a} \cdot F(a/W) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに

$$F(a/W) = 1.12 - 0.231(a/W) + 10.55(a/W)^2 - 21.72(a/W)^3 + 30.39(a/W)^4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

を使用した。

2.3.3 試験片の繊維長と繊維配向の測定 繊維長分布を調べるには、試験片のほぼ中央部を切り取り、バーナで樹脂を焼いてからガラス繊維を取り出して光学顕微鏡(Nikon Measurescope 10)により、200本の繊維の繊維長を測定した。繊維の配向状態を調べるには、試験片のほぼ中央部の表面をアセトンで溶解し、角度目盛をつけた光学顕微鏡で100本の繊維の配向角を測定した。

2.3.4 有意性の検定 射出成形機のスクリー形状と回転数を変えて成形した試料の衝撃強度が、この条件によるかどうか有意性の検定⁽⁸⁾を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 比最大荷重と比吸収エネルギーへの相対切欠長さの影響

これらの試験片で得た衝撃波形の一例を図4に示す。衝撃速度 v を10 m/sと一定とし、最大

図4 ②材の衝撃荷重-時間曲線の一例
($a/W=0.5$, $v=10$ m/s)

衝撃荷重 $P_{\max}$ を試験片の切欠部の実断面積 A で割った $P_{\max}/A$ (以後、比最大荷重と称す) と相対切欠長さとの関係を①, ②, ③材について図5に示す。ここに、④, ⑤, ⑥材は①, ②, ③材とそれぞれ同じか近い実験点を示したので、実線は①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥材の傾向線を示す。また、破線はPCの傾向線を示す。PCの $P_{\max}/A$ は相対切欠長さにより著しく減少するが、FRPCの $P_{\max}/A$ は相対切欠長さによりわずかに減少する程度である。

次に、比吸収エネルギー w/A と相対切欠長さとの関係を図6に示す。FRPCは相対切欠長さが大きくなると w/A は減少し、PCは著しく減少する。ここに、FRPCとPCの $P_{\max}/A$ と w/A の減少の割合が相対切欠長さにより異なるのは、繊維の樹脂からの引抜き、

図5 $P_{\max}/A$ と a/W の関係

図6 w/A と a/W の関係

図7 $P_{\max}/A$ と衝撃速度の関係

繊維破断が寄与するためと思われる。

3.2 比最大荷重と比吸収エネルギーへの衝撃速度の影響 相対切欠長さ $a/W=0.5$ と一定とし、衝撃速度 v を変化したときの $P_{\max}/A$ と衝撃速度の関係および w/A と衝撃速度との関係を図7, 8にそれぞれ示す。両図にはPCの値も示してある。FRPCの $P_{\max}/A$ はPCに比べ大きい。衝撃速度を増加させると、母材樹脂とガラス繊維の荷重はひずみ速度の影響により増加する⁽⁹⁾。吸収エネルギーは荷重と伸びの積で表されるから、衝撃速度を増加させると荷重は増加するが、ひずみを測定するとひずみはわずかに減少するから、伸びも同様と考えると、衝撃速度を増加させると比吸収エネルギー w/A はわずかに増加する。PC試験片でも $P_{\max}/A$ と w/A の増加がみられるが、衝撃速度によるそれらの増加割合は小さい。これは衝撃速度の増加により荷重はわずかに増加するが、伸びが減少するため w/A はあまり増加しないと考えられる。

3.3 動的破壊靱性の相対切欠長さとの衝撃速度による影響 最大衝撃荷重より求めた動的破壊靱性 K_{Ia} と相対切欠長さ a/W の関係を図9に示す。FRPCの K_{Ia} は相対切欠長さを大きくすると増加する傾向を示す。FRPの動的破壊靱性への相対切欠長さの影響については、影響を受けるという報告⁽¹⁰⁾、影響を受けないという報告⁽¹¹⁾⁽¹²⁾がある。これらの報告が異なるのは、

図8 w/A と衝撃速度の関係

図9 K_{Ia} と a/W の関係

動的破壊靱性 K_{Ia} は負荷形式, 衝撃速度, 温度, 板厚などの影響を強く受けたためと考えられる。しかし, 同図に示すように PC の K_{Ia} は a/W によりほぼ一定である。このことから, FRPC の K_{Ia} が a/W の影響を受けるのは試験片内の繊維の分散と配向による効果が現れたものと思われる。

次に, 図 10 に示すように FRPC の K_{Ia} は衝撃速度の影響を受ける。これは前述のように樹脂とガラス繊維の強度, 繊維と樹脂の界面の降伏せん断強度がひずみ速度の影響⁽¹³⁾を受け, K_{Ia} は衝撃速度の上昇により増加する。しかし, PC の場合は, 樹脂の K_{Ia} のみが衝撃速度の影響を受けるので, K_{Ia} の増加は FRPC の

場合より少なくなったものと考えられる。

3・4 スクリュー形状と回転数の変化による最大衝撃荷重の有意性について 衝撃では吸収エネルギーで材料の耐衝撃性を比較するが, ここでは比最大荷重に注目する。

実験では, B スクリューで成形した試料の比最大荷重は A スクリューで成形した試料より高く, スクリュー回転数は低い回転数で成形した試料のほうが高いようである。この結論が正しいかどうか有意性の検討をしてみる。スクリュー形状を比較するときには, ①+②+③=B 材, ④+⑤+⑥=A 材として, それらの比最大荷重の比較と有意性の結果を表 4 に示す。有意性があることから, スクリュー形状では $A < B$ となり圧縮比の小さいスクリューが圧縮比の大きいスクリューより優れている。スクリュー回転数を比較するときは, A, B スクリューの同回転数の比最大荷重を加えた ①+④=C 材, ②+⑤=D 材, ③+⑥=E 材として, それらの比最大荷重の比較と有意性の結果を表 5 に示す。C と E, D と E では有意性があり, C と D では有意性が疑わしいことから, $C \approx D > E$ となり, スクリュー回転数は低いほうがよいようである。このことは, また繊維長分布にも現れたので, 繊維長分布と繊維配向分布を図 11(a), (b) に示す。ここに繊維配向角は試験片の長手方向を 0° , 板幅方向を 90° にしてある。B スクリューによる試料の繊維長は A スクリュー

表 4 スクリュー形状の変化による P_{max}/A の有意性の検定

Impact velocity v (m/s)	Relative notch length a/W	Comparison	Significance probability α (%)
15	0.2	$A < B$	—
	0.3	$A < B$	2.4
	0.4	$A \geq B$	—
	0.45	$A < B$	1.6
	0.5	$A > B$	—

表 5 スクリュー回転数の変化による P_{max}/A の有意性の検定

Impact velocity v (m/s)	Relative notch length a/W	Comparison	Significance probability α (%)	Comparison	Significance probability α (%)
15	0.2	$C > D$	—	$C > E$	—
	0.3	$C < D$	9.3	$C > E$	2.0
	0.4	$C < D$	—	$C > E$	—
	0.45	$C \geq D$	—	$C > E$	3.2
	0.5	$C < D$	7.2	$C > E$	—
	0.2	$D > E$	—		
	0.3	$D > E$	0.05		
	0.4	$D > E$	—		
	0.45	$D > E$	3.3		
	0.5	$D > E$	5.7

図 10 K_{Ia} と衝撃速度の関係

(a) 繊維長

(b) 繊維配向

図 11 繊維長と繊維配向の分布図

による試料より長い。これは圧縮比が小さく繊維破断が少ないためと考えられる。A スクリューによる試料の繊維配向は B スクリューによる試料より良いが、測定した繊維配向は試料の表面のみであるから、その影響はわからなかった。

さらに、スクリュー回転数を大きくしても、繊維長、繊維配向の違いはわからなかったが、スクリュー回転数が大きくなると樹脂の色調が濃くなり熱分解が起きているように思われた。

また、FRPC の低ひずみ速度での引張試験中の AE の詳細な研究⁽¹⁴⁾でも、圧縮比が小さいスクリューで成形した試料が良い結果を得ている。

4. 結 言

2 種類のスクリュー形状と 3 種類のスクリュー回転数で成形した FRPC(30 wt%) を、ホプキンソン棒法の原理を応用した衝撃引張試験機で衝撃引張試験を行い、比最大荷重、比吸収エネルギー、動的破壊靱性への試験片の相対切欠長さや衝撃速度の影響について調べ、比最大荷重の有意性の検定から、次の結論を得た。

(1) 相対切欠長さを大きくすると、比最大荷重 $P_{\max}/A$ はわずかに減少し、比吸収エネルギー w/A も減少する。衝撃速度が大きくなると、 $P_{\max}/A$ は増加し、 w/A はわずかに増加する。これらの傾向はスクリュー形状、スクリュー回転数を変えて成形しても同じ傾向を示す。

(2) 動的破壊靱性 K_{Ia} は、相対切欠長さや衝撃速

度を大きくすると、ともに増加する。この傾向はスクリュー形状、スクリュー回転数を変えて成形しても同じ傾向を示す。

(3) $P_{\max}/A$ の有意性の検定や比較から、スクリュー形状は圧縮比が小さく、スクリュー回転数を低くして成形した試料のほうが $P_{\max}/A$ は高い値を示すことがわかった。

本研究を進めるに当たり、実験試料をご送付くださった名機製作所技術研究所、および実験に熱心に協力してくれた本学学生・安部、石川、加藤、雄谷君に感謝する。

文 献

- (1) 例えば、日本材料学会編、機械材料学、(1991)、309、日本材料学会。
- (2) プラスチック加工技術便覧編集委員会編、プラスチック加工技術便覧(新版)、(1990)、173、日刊工業新聞社。
- (3) 文献(2)の138ページ。
- (4) 林・田中編著、衝撃工学、(1988)、161、日刊工業新聞社。
- (5) 木田・ほか4名、機講論、No. 920-17, A(1992-4)、159。
- (6) 千坂、射出成形技術入門、(1992)、31、シグマ出版。
- (7) 例えば、岡村、線形破壊力学入門、(1976)、217、培風館。
- (8) 国松、推計学ノート、(1948)、49、オーム社。
- (9) Chiao, T. T. and Moore, R. L., *J. Comp. Mat.*, 5-1 (1971), 124。
- (10) Agarwal, B. D. and Giare, G. S., *Mater. Sci. Eng.*, 52-2(1982), 139。
- (11) 岩本・ほか2名、材料、25-272(1976)、57。
- (12) 藤井・ほか4名、材料、41-470(1992)、1675。
- (13) 三輪・ほか2名、高分子論文集、41-6(1984)、353。
- (14) 木田・ほか5名、機講論(IV), No. 930-9(1993-3)、171。