LCP パイプ射出成形品のエネルギー吸収特性

尾 本 正 明^{*1}・森 直 樹^{*1}・井 上 敏 夫^{*2}

1. はじめに

近年、金属材料として軽量でありかつ強度的に優れた繊維強化プラスチック（FRP）が金属材料に代わる材料として様々な分野で注目され用途開発が進んできている。自動車産業分野においても搭乗者を衝突時の衝撃から保護するための衝突安全性部材であるエネルギー吸収部材への適用が検討されている¹⁾。一方、エネルギー吸収部材の特性や破壊挙動に関する報告もされている^{2)~5)}。

しかしながら、これらに用いられているエネルギー吸収部材は熱硬化性樹脂と平織ガラスクロスを幾重にも積層させた構造体であるため成形加工に手間を要し、コスト高であるという問題がある。

そこで、本開発では、FRP 製では成形加工に手間を要し、コスト高であるという問題を解決したエネルギー吸収部材を熱可塑性樹脂の射出成形に配向を制御する技術を付加させることで実現させたので報告する。

2. 材料および成形

熱可塑性樹脂として液晶ポリマー（LCP）を選定し使用した。これは、LCP の特長である異方性と自己補強特性を活用するためである。詳しくは、日本石油化学⁶⁾より提供頂いた“Xydar[®]”（BP Amoco Polymers, Inc., part of the BP Amoco Group.）を用いた。試作品はパイプ形状とし、大小 2 種類の成形品を成形した。LCP 大パイプ（L-tube）は外径 32 mm、肉厚 3.5 mm、配向角を 15° に制御した成形品である。LCP 小パイプ（S-tube）は外径 19 mm、肉厚 1.0 mm、配向角を 30° に制御した成形品である。

成形するにあたり、パイプの中空部を回転配向させる回転コアを内蔵する金型と配向制御装置を使用した^{6), 7)}。

試作品の形状を図 1 に示す。

3. 圧壊試験

配向制御した試作品（配向制御品）と配向制御していない試作品（通常成形品）の L-tube, S-tube それぞれについて静的圧壊試験と動的圧壊試験を実施した。

3.1 圧壊圧子

圧壊試験の実施では、圧壊挙動を安定させるための圧壊圧子（Trigger）を使用した。Trigger を図 2 に示す。

3.2 L-tube および S-tube の静的圧壊試験

静的圧壊試験は万能圧縮試験機を用いた。試作品の上面に、図 2 にて示した Trigger をセットし、5 mm/min の速度にて圧壊させた。試験概略図を図 3 に示す。

図 1 LCP パイプの配向概要

図 2 Trigger の形状

^{*1} Omoto, Masaaki/Mori, Naoki
 ㈱メイホー 新規事業推進開発部 R&D センター
 直方市感田 811-1 (〒822-0001)

^{*2} Inoue, Toshio
 日本石油化学㈱ 知的財産室
 東京都千代田区内幸町 1-3-1 (〒100-8530)
 2001.4.19 受理

3.3 L-tube の動的圧壊試験

L-tube の動的圧壊試験は 118.5 kg の錐体を 2.8 m/s の速度で自由落下させて圧壊させる方法を用いた。L-tube の試験概略図を図 4 に示す。

3.4 S-tube の動的圧壊試験

S-tube の動的圧壊試験は独自に製作した試験治具を用いた。S-tube の試験概要図を図 5 に示す。

試験は、透明パイプの右片側に Trigger をセットした S-tube を挿入し、圧力調整された窒素ガスにて対面の破壊壁に向けて衝突させる。飛翔する Trigger と S-tube は破

図 3 L-tube および S-tube の静的圧壊試験概要図

図 4 L-tube の動的圧壊試験概要図

図 5 S-tube の動的圧壊試験治具の概要図

壊壁に激突し、Trigger の運動エネルギーで S-tube を圧壊する。S-tube が破壊壁に激突し衝撃圧壊する際の速度を光ファイバセンサーを用いて測定させ、また、破壊壁に埋め込んでいるロードセルにて応力-時間特性曲線を計測した。Trigger の重量 (M_T) と衝撃速度 (R_c) を変化させた場合のエネルギー吸収特性を測定し検討を行った。

4. 結果および考察

4.1 静的圧壊試験

L-tube および S-tube の通常成形品は、LCP の射出流動方向に発生する樹脂の融合部（ウエルドライン）に亀裂が発生し、竹を割ったような状態にてぜい性的に全体が圧壊した（図 6(b), 図 8(b)）。

一方、L-tube および S-tube の配向制御品は、全圧壊しないため全長の約半分位の位置で試験を中止した。圧壊状態は 7~8 のクラックにより分割されて花が咲いたように生じ、各片では剥離が生じている。また、クラックの表面と剥離している表面に分裂した繊維物が見られる（図 7(b), 図 9(b)）。

L-tube 通常成形品の荷重-変位曲線を見ると初期応力上昇後、急降下している（図 6(a)）。

一方、配向制御された L-tube の荷重-変位曲線を見ると初期応力上昇後、2.2 kN あたりで平坦な曲線を示している（図 7(a)）。また、配向制御された S-tube の荷重-変位曲線も同様に 1.1 kN あたりで細かな振動曲線が平坦に続

図 6 静的圧壊試験における L-tube 通常成形品のエネルギー吸収特性(a)と試験後の状態(b)

いている (図 9(a)).

このように、通常成形品と配向制御品の強度相違は試作品外面の配向角と内面の配向角が螺旋状に交差していることに起因していると考えられる。すなわち、L-tube の場合は外面が +15° に螺旋配向し、内面は -15° に螺旋配向して分子配列が交差している。同様に、S-tube の場合は外面が +30° に螺旋配向し、内面は -30° に螺旋配向して分子配列が交差している。この螺旋配向の交差が軸方向のクラック伝播の抵抗として作用しエネルギーを吸収しているものであると考える。配向制御品の配向状態図を図 10 に示す。

配向品の圧壊状態において見られた剥離現象は配向制御成形の過程において形成された幾層もの薄層状構造によるものであると考える。これらの圧壊様式は、熱硬化性樹脂にて製作されたエネルギー吸収部材で観察されている “progressive crushing” (連続的な破壊進行) と同等なものであると考えられる。

4.2 動的圧壊試験

L-tube の動的圧壊試験後の状態を図 11 に示す。また、S-tube の動的圧壊試験における荷重-時間曲線と Trigger 重量 (M_T) と衝撃速度 (R_c) を変化させた場合の圧壊変化状態を図 12 に示す。

L-tube および S-tube の動的圧壊試験での結果は、荷重-変位曲線のピークに多少の相違はあるものの圧壊形態は前項の静的圧壊試験と同様な結果を示した。L-tube および S-tube の静的圧壊試験と動的圧壊試験の圧壊形態を見比べた場合 (図 7(b) と図 11(b) および図 9(b) と図 12(b)), 配向された LCP パイプは類似した圧壊形態を示していることより速度依存性はないと考える。

また、S-tube の動的圧壊試験より Trigger 重量 (M_T) と衝撃速度 (R_c) を組み合わせた場合、Trigger が衝撃力により S-tube へ食い込んだ変位 (D_L) と衝撃エネルギー (G_I) についてまとめた。結果を図 13 に示す。

図 13 内のプロットは M_T (g)/ R_c (m/s) を示す。例えば、●=310/6 は Trigger 重量 310 g と衝撃速度 6 m/s の組み合わせによる試験結果である。ここで衝撃エネルギー (G_I : kJ) は次式より算出した。また、 D_L (mm) は実測値である。

$$\text{衝撃エネルギー } (G_I) = \frac{M_T \times (R_c)^2}{2}$$

S-tube が衝撃圧壊する際の熱変換エネルギーと弾性要素を無視するならば、Trigger 変位 D_L は単位圧壊長さあた

図 7 静的圧壊試験における L-tube 配向制御成形品のエネルギー吸収特性(a)と試験後の状態(b)

図 9 静的圧壊試験における S-tube 配向制御成形品のエネルギー吸収特性(a)と試験後の状態(b)

図 8 静的圧壊試験における S-tube 通常成形品のエネルギー吸収特性(a)と試験後の状態(b)

図 10 配向制御された成形品の配向状態図

りのエネルギー消費に相当すると考える。

図 13 より、衝撃エネルギー (G_I) と Trigger 変位 D_L は比例関係にあることが明白である。そして、単位破壊長さ当りのエネルギー消費は衝撃エネルギーによって左右されることもわかる。また、Trigger 重量と衝撃速度による影響は小さいと考える。

一般に、エネルギー吸収能力を評価する手段として比エネルギー吸収量 E_s が用いられている。

E_s は次式より算出される。

$$\text{比エネルギー吸収量 } (E_s) = \frac{P}{A\rho} \text{ (kJ/kg)}$$

P : 平均荷重 (N)

A : 断面積 (cm^2)

ρ : LCP の密度 (g/cm^3)

上式より算出した L-tube および S-tube の比エネルギー吸

収量 (E_s) を表 1 に示す。

熱硬化性樹脂を使用した樹脂パイプの E_s は $9 \text{ kJ/kg} \sim 180 \text{ kJ/kg}$ であるのに対し²⁾、本 LCP パイプ (熱可塑性樹脂) の E_s は $5.3 \text{ kJ/kg} \sim 14.8 \text{ kJ/kg}$ と低い値を示した。熱硬化性樹脂製の樹脂パイプの E_s が高いのは、樹脂自体の剛性と内部に含有されている平織ガラスクロス強化繊維のためパイプの剛性が向上しているためと考える。ちなみに、本 LCP パイプには強化繊維等の充填材は含有していない。

また、自動車が実際に衝突する速度 ($20 \text{ km/hr} \sim 80 \text{ km/hr}$) の間に良好なエネルギー吸収特性を示した。これは、配向制御技術を用いることで熱可塑性樹脂にて容易にかつ

(a) 通常成形品

(b) 配向制御成形品

図 11 動的圧壊試験における L-tube の試験後の状態

図 12 動的圧壊試験における S-tube 配向制御成形品のエネルギー吸収特性(a)と試験後の状態(b)

表 1 比エネルギー吸収量

試作品	平均荷重 (kN)	ES 値 (kJ/kg)
L-tube	2.2	5.3
S-tube	1.1	14.8

図 13 配向制御された S-tube の動的圧壊試験における衝撃エネルギー (G_I) と Trigger 変位 (D_L) との関係

安価にエネルギー吸収部材が製造できることを意味する。

なお、総ての動的圧壊試験において、その圧壊様式が“progressive crushing”であることが確認された。

5. ま と め

- 1) LCP に配向技術を適切に制御させることにより、図9や図12に示したような信頼のあるエネルギー吸収部材を射出成形にて生産することが可能である。
- 2) 螺旋状に配向されたLCPパイプの圧壊挙動やエネルギー吸収特性には速度依存性がない。
- 3) 射出成形に配向制御技術を付加させて製造した螺旋状配向LCPパイプは、軸方向にかかる圧縮力に対して優れたエネルギー吸収特性を示した。
- 4) 螺旋状に配向されたLCPパイプの圧壊様式は、“progressive crushing”を示した。
これは、ガラス繊維や炭素繊維等で補強した薄層構造の熱硬化性の樹脂エネルギー吸収部材で見られるもの

と同等である。

- 5) 螺旋状に配向されたLCPパイプのエネルギー吸収部材は熱可塑性樹脂であるためリサイクルが可能であり環境に優しい部材である。

参 考 文 献

- 1) 伴, 岩本: 三菱自動車テクニカルレビュー No.10 (1998)
- 2) 濱田, 中谷ら: 第26回FRPシンポジウム論文集Ⅱ-25 A 265~266
- 3) 川田, 本多ら: 材料, 47, No.5, 458~463 (1998)
- 4) 濱田, 斎藤ら: 第28回FRPシンポジウム論文集Ⅲ-24 B 387~390
- 5) 井上: 6th Japan International SAMPE Symposium 697 (1999)
- 6) 特許第2537131号 (株式会社メイホー)
- 7) 特許第3185093号 (株式会社メイホー)

■ 文 献 抄 録 ③

Polymer

• Vol.41 (2000), No.16

Yamashita, T., and Nabeshima, Y. : Study of the microscopic plastic deformation process in poly(methylmethacrylate)/acrylic impact modifier compounds by means of small angle X-ray scattering (p.6067)

Wang, W. J., Perng, L. H., Hsiue, G. H. and Chang, F. C. : Characterization and properties of new silicone-containing epoxy resin (p.6113)

Hobbs, T., and Lesser, A. J. : Preparation of high performance poly(ethylene terephthalate) fibers: Two-stage drawing using high pressure CO₂ (p.6223)

Li, C. K-Y., Xia, Z-Y. and Sue, H-J. : Simple shear plastic deformation behavior of polycarbonate plate. II. Mechanical property characterization (p.6285)

• Vol.41 (2000), No.17

Yan, S. and Petermann, J. : Oriented recrystallization of pre-oriented thin polymer films (p.6679)

• Vol.41 (2000), No.18

Jenkins, M. J. : Relaxation behaviour in blends of PEEK and PEI (p.6803)

Martins, J. A. Cruz Pinto, J J C. : Non-isothermal crystallisation kinetics with instantaneous nucleation: (p.6875)

Nishino, T., Kotera, M., Inayoshi, N., Miki, N. and Nakamae, K. : Residual stress and microstructures of aromatic polyimide with different imidization processes (p.6913)

• Vol.41 (2000), No.19

Charoensirisomboon, P., Inoue, T., Solomko, S. I., Sigalov, G. M. and Weber, M. : Morphology of compatibilized polymer blends in terms of particle size-asphericity map (p.7033)