ガラス繊維強化シンジオタックチックポリスチレン (GF/SPS) 切欠平板の破壊強度に及ぼす引張速度の影響†

山本 俊浩* 竹田 英俊** 新妻 和幸***

Effect of Tensile Speed on Fracture Strength of Notched Plates for Glass-Fiber-Reinforced Syndiotactic Polystyrene (GF/SPS)

by

Toshihiro YAMAMOTO*, Hidetoshi TAKEDA** and Kazuyuki NIITUMA***

In this study, we investigated the effects of the cross-head speed during tensile testing on the fracture strength of notched plates of glass-fiber-reinforced syndiotactic polystyrene (GF/SPS). GF/SPS is well suited for the manufacture of electronic components for hybrid electric vehicles because of its high heat resistances, electrical properties, and low specific gravity. GF/SPS plates containing 30% e-glass fiber by weight were prepared by injection molding. The notch-root radii were 0.5, 1, and 2 mm, while the notch depth ranged from 2 to 5 mm. The tensile tests were performed at cross-head speeds of 10^4 , 10^3 , 10^2 , 1, 8.33×10^{-3} and 8.33×10^{-5} mm/s at a temperature of 23 °C. It was found that all the notched specimens failed in a brittle manner at the maximum load. The maximum elastic stress at fracture was determined from the notch-root radius and the time to fracture but was independent of notch depth. The obtained results could be explained on the basis of the severity of the stress fields near the notch roots of the specimens. Furthermore, it was verified that a fracture criterion based on the severity of the stress fields near the notch roots is applicable in the case of GF/SPS.

Key words:

Fiber reinforced plastics, Notch, Tensile speed, Fracture criterion, Syndiotactic polystyrene

1 緒 言

繊維強化プラスチック (Fiber reinforced plastics, FRP) は、比強度、比剛性に優れた材料として広い分野で使用されている。ガラス繊維強化シンジオタックチックポリスチレン (GF/SPS) は、結晶性のポリスチレンとして世界ではじめて日本で合成されたプラスチック¹⁾をマトリックス材料とした FRP である。このため、結晶性樹脂の特徴である耐熱性、耐薬品性に優れた特性を有し、ハイブリッド電気自動車の電子構成要素の部品等としても使用されている^{2), 3)}。この材料を広く使用するためには、静的および動的強度に関するデータの蓄積が重要であると考えられるが、その研究例は少ないように思われる。

粘弾性挙動を示すプラスチックをマトリックスに使用する FRP の場合、強度に及ぼすひずみ速度の影響を明らかにすることは重要である。このため、特に FRP 平滑材の引張試験におけるひずみ速度の影響に関する研究^{4)~10)}は数多くなされている。本報で使用したガラス繊維複合材料 (GFRP) の場合、引張速度の違いにより破壊の形態が異なることが報告されている。長繊維複合材料の場合、GFRP は低速ではぜい性破壊、高速では延性破壊を起こす、ぜい性-延性遷移を示す⁴⁾。

一方、短繊維の GFRP では、マトリックス材料の粘弾性挙動および繊維-マトリックス界面の影響が大きく、低速で延性破壊する場合でも、高速ではぜい性破壊を起こす、延性-ぜい性を示すことが報告¹⁰⁾されている。

各種部品に使用する場合、穴や切欠き等の応力集中部が存在し、そこが破壊の起点になることは良く知られている。このため、FRP 切欠材の破壊に関する研究^{11)~14)}も多くなされている。同じ引張速度でも、平滑材では延性的に破損する材料も切欠きをつけることでぜい性的に破断する場合もある。FRP 切欠材のひずみ速度の影響に関する研究^{11), 13)}の多くは円孔に関するものであり、ひずみ速度が異なる場合の破壊強度に及ぼす切欠きの幾何学的形状の影響や切欠形状とひずみ速度との関係については、未だ十分には明らかにされていないように思われる。

著者らは、ぜい性的に破断する FRP 切欠材に対して、切欠底付近の力学的状態の厳しさに基づく破壊基準^{14), 15)}が有効であることを、静荷重試験、引張速度 0.5 mm/min (8.33×10^{-3} mm/s) で実証^{16)~19)}している。さらに、前報²⁰⁾で、ガラス繊維強化ポリプロピレン射出成形板 (GFPP) の切欠平板を用いて、引張速度の広い範囲にわたって引張試験を行い、上記の概念に基づいて引張速度の影響を

† 原稿受理 平成26年 8 月 8 日 Received Aug. 8, 2014

©2015 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 福岡大学 工学部資源循環・環境グループ 〒814-0180 福岡市城南区七隈

Recycling and Eco-technology, Faculty of Eng., Fukuoka Univ., Jonan-ku, Fukuoka 814-0180.

** 正 会 員 出光興産㈱先進技術研究所 〒299-0193 市原市姉ヶ崎海岸

Advanced Tech. Res. Lab., Idemitsu Cosan Co. Ltd., Anesaki-Kaigan, Ichihara, 299-0193.

***福岡大学大学院工学研究科 〒814-0180 福岡市城南区七隈

Graduate School of Eng., Fukuoka Univ., Jonan-ku, Fukuoka 814-0180.

考慮した破壊基準²⁰⁾が有効であることを実証した。また、GFPP 切欠材の破断時における切欠底の最大弾性応力と破断までの時間との間には切欠半径のみで決まるある関係が成り立つことを実験結果より示した²⁰⁾。しかし、この関係が GFPP にのみに成り立つのか、他の GFRP にも適用できるのかについては不明である。

本報は、短いガラス繊維で強化したシンジオタックチックポリスチレン (GF/SPS) 射出成形板を用いて切欠きの幾何学的形状を系統的に変えた切欠試験片を作成し、引張速度の広い範囲にわたって引張試験を行い、強度および破壊挙動の基礎的データを取得するとともに、破壊強度に及ぼす切欠きの幾何学的形状の影響、さらに引張速度の影響を明らかにし、上記の速度の影響を考慮した破壊基準が GF/SPS に対しても有効であるかについて検討したものである。

2 FRP 切欠材の破壊基準

百武らは、切欠底付近の力学的状態の厳しさの概念に基づく破壊基準を提案^{14), 15)}し、その破壊基準が FRP 切欠材の破壊に対して有効であることを実証^{14), 16) ~ 19)}した。この概念は、切欠底付近の力学的状態の厳しさは切欠底の最大弾性応力 $\sigma_{\max}$ と切欠半径 ρ で決まり、切欠深さや他の幾何学的形状とは無関係であるというものである。すなわち $\sigma_{\max}$ と ρ が同じであれば、切欠底付近には同じ現象、例えば破壊や同程度の損傷が起こる。静荷重試験において、ぜい性的に破断する切欠材に対して、破壊基準を式で表すと次のようになる。

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max,c}(\rho) \quad (1)$$

ここで、切欠底の最大弾性応力 $\sigma_{\max}$ は切欠底の最小断面部の公称応力 σ_n と応力集中係数の積で与えられる。右辺の $\sigma_{\max,c}$ は破断時における切欠底の最大弾性応力で、切欠半径 ρ のみの関数である。これは、静荷重あるいは速度一定の場合である。

粘弾性挙動を示すプラスチックをマトリックスとする FRP の場合、破断時の応力は破断までの時間や温度に依存することが報告^{22), 23)}されている。このため、著者らは引張速度が異なる場合、上記の概念に基づく引張速度の影響を考慮した破壊基準が次のように表すことができることを、GFPP 切欠材を用いて実証した^{20), 21)}。

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max,c}(\rho, t) \quad (2)$$

ここで、 t は破断までの時間である。また、 $\sigma_{\max,c}$ と t との関係は次の式で表すことができることを GFPP の実験結果から示した²⁰⁾。

$$\sigma_{\max,c} \cdot t^m = C(\rho) \quad (3)$$

ここで、 m は材料定数であり、GFPP の場合は 0.0362 であった。この関係が他の GFRP である GF/SPS に対しても成り立つかどうかを実験的に確かめる。

3 材料、試験片および試験方法

試験材は、ガラス繊維強化シンジオタックチックポリスチレン (ザレック、出光興産㈱製、GF/SPS) 射出成形板である。射出成形板の寸法は、長さ 150mm、幅 150mm、

厚さ 3mm である。射出成形板の一边にゲートがあり、ゲートに対して垂直な方向を 0° 方向とした。

Fig. 1 に、 0° 方向に対して垂直な断面を示す。図の水平方向が板厚方向で、板厚 (3mm) 全体を示している。板厚中央の約 0.5mm の範囲ではガラス繊維の側面が観察されるが、その他の範囲では、主にガラス繊維の円形断面が観察される。すなわち、多くのガラス繊維は 0° 方向に配向していることがわかる。ガラス繊維の重量含有率は 30%、繊維直径は約 $11 \mu\text{m}$ 、平均繊維長さは約 0.4mm である。

Fig. 2 に、 0° 方向および 90° 方向に切り出して作成した平滑試験片の引張応力-ひずみ線図を示す。室温 23°C 、引張速度 0.5mm/min ($8.33 \times 10^{-3}\text{mm/s}$) での実験結果である。 0° 、 90° 方向いずれの方向に切り出した試験片も荷重増加の過程でぜい性的に破断した。図に示すように、射出成形板には異方性があり、 0° 方向に切り出した試験片の方が、 90° 方向に切り出した試験片よりも引張強度が高いことがわかる。本報では、試験片はすべて 0° 方向に切り出して作成した。

切欠試験片の形状と寸法を Fig. 3 に示す。試験部中央の

Fig. 1 Photomicrograph showing a transverse section of GF/SPS plate.

Fig. 2 Tensile stress-strain curves of unnotched GF/SPS specimens.

Fig. 3 Notched specimen dimensions.(mm)

板の両側にU形の切欠きをつけ、切欠底の切欠半径の中心距離（最小断面の幅）を 10mm 一定とした。切欠半径 ρ は 0.5, 1 および 2mm の 3 とおり、それぞれの切欠半径に対して切欠深さ a は 2, 3, 4 および 5mm の 4 とおりとした。つかみ部は試験機治具の形状に合わせて幅 20mm, チャック間の距離を 80mm とした。

試験機は前報^{20), 21)}と同様、高速材料試験機(株鷺宮製作所製 TS-4000)および精密万能試験機(株島津製作所製 DCS-2000)を用いて、引張試験を室温 23℃のもとで行った。引張速度は 10^4 , 10^3 , 10^2 , 1, 8.33×10^{-3} , および 8.33×10^{-5} mm/s の 6 とおりとし、 $10^4 \sim 1$ mm/s は TS-4000, 8.33×10^{-3} および 8.33×10^{-5} mm/s は DSC-2000 を用いた。

4 実験結果および考察

Fig. 4 に、(a)平滑試験片および(b)切欠試験片の公称応力-ひずみ線図の一例を示す。引張速度はそれぞれ 10^3 , 1 および 8.33×10^{-5} mm/s を示している。ここでのひずみは、チャック間 (80mm) の移動距離から算出したものである。図(a)に示すように、粘弾性挙動を示すプラスチックをマトリックスとする GF/SPS の公称応力-ひずみ線図は、引張速度の違いによる影響があることがわかる。すなわち、破断時の応力は引張速度が速いほど高くなっている。図(b)の切欠試験片は、切欠半径 ρ が 0.5mm, 切欠深さ a が 5mm の場合である。図に示すように、いずれの引張速度の場合も荷重増加の過程でぜい性的に破断した。破断時の応力は平滑試験片の場合と同様に引張速度が速いほど高いことがわかる。本報で利用した切欠試験片では切欠半径、切欠深さが異なる場合も、上記の試験条件のもとでは同様の傾向を示した。ここには示していないが、GF/SPS 切欠試験片の場合も、他の FRP^{18), 19)}と同様に、荷重増加の過程で両方の切欠底付近から損傷域が発生し、破断直前においても小規模な損傷域（切欠半径程度の大きさ）が切欠底付近に観察され、最終的にはどちらか一方の切欠底からぜい性的に破断した。

Fig. 5 に、切欠試験片の破壊の形態を示す。試験片形状は、Fig. 4(b) と同じ $\rho=0.5$ mm, $a=5$ mm である。図には引張速度 10^4 , 10^3 , 1 および 8.33×10^{-5} mm/s の場合を示している。図の上下方向が荷重方向である。いずれの引張速度の場合も巨視的には切欠底から荷重方向に対して垂直方向にぜい性的に破断している。前述したように、最終的にはどちらか一方の切欠底から発生した主き裂が急速

に進展して破断する。このため、その主き裂が反対側の切欠底に達していないものは、切欠底から破断していないように見えるが、破壊の起点はどちらかの切欠底であることは確認している。

Fig. 6 に、破断時における切欠底最小断面部の公称応力 σ_n と切欠半径 ρ との関係を示す。引張速度は、 10^4 mm/s の場合である。図中の●印は平滑試験片、○印は切欠深さ a が 3mm の場合である。切欠半径が小さくなるほど、 σ_n は低下しており、切欠半径の影響があることがわかる。ここには、引張速度 10^4 mm/s の場合を示しているが、他の引張速度の場合も同様の結果を得た。

(a) Unnotched specimen

(b) Notched specimen

(notch-root radius $\rho = 0.5$ mm, notch depth $a = 5$ mm)

Fig. 4 Tensile stress-strain curves of the GF/SPS. (tensile speed $V = 10^3$, 1 and 8.33×10^{-5} mm/s)

Fig. 5 Failed specimens of the GF/SPS. (notch-root radius $\rho = 0.5\text{mm}$, notch depth $a = 5\text{mm}$)

Fig. 6 Nominal stress at fracture, σ_n , versus notch-root radius ρ for a constant notch depth.

このように、切欠底からぜい性的に破断する GF/SPS 切欠試験片に対して、上記の破壊基準が有効であることを検

Fig. 7 The maximum elastic stress at fracture, $\sigma_{\max,c}$, versus notch depth a for the notched specimens.

Fig. 8 The maximum elastic stress at fracture, $\sigma_{\max,c}$, versus notch-root radius ρ for the notched specimens.

討する。本報で行った引張試験では、引張速度が同じ場合、破断までの時間のばらつき(変動係数)は最大約 17% であった。このため引張速度が同じ場合、破断までの時間がほぼ同じとみなして整理した。

Fig. 7 に、破断時における切欠底の最大弾性応力 $\sigma_{\max,c}$ と切欠深さ a との関係を示す。引張速度が 10^3mm/s の場合である。図に示すように、破断時における切欠底の最大弾性応力 $\sigma_{\max,c}$ は切欠深さ a とは無関係に、切欠半径 ρ ごとに一定になっている。すなわち、 $\sigma_{\max,c}$ に切欠深さ a の影響がないことがわかる。

Fig. 8 に、破断時における切欠底の最大弾性応力 $\sigma_{\max,c}$

Fig. 9 The maximum elastic stress at fracture, $\sigma_{\max,c}$, versus time to fracture t for the notched specimens.

と切欠半径 ρ との関係を示す。引張速度 10^2 mm/s で得られた切欠深さ a が $2 \sim 5 \text{ mm}$ のすべてのデータをプロットしている。 $\sigma_{\max,c}$ と ρ は切欠深さ a とは無関係に、一対一に対応している。すなわち、破断までの時間がほぼ同じ場合、 $\sigma_{\max,c}$ は ρ のみで決まり、 a とは無関係であることがわかる。この実験結果は、引張速度が異なる場合にもそれぞれの引張速度で共通していた。

プラスチックをマトリックスとする FRP の破壊強度は時間や温度に依存し、ある一定温度における FRP 平滑試験片の破壊強度が、負荷速度によらず破断までの時間と一対一に対応することが報告^{22), 23)}されている。Fig. 9 は、破断時における切欠底の最大弾性応力 $\sigma_{\max,c}$ と破断までの時間 t との関係を示す。図には温度一定 (23°C) のもとでの、 ρ 、 a すべてのデータをプロットしている。図に示すように、破断時における切欠底の最大弾性応力 $\sigma_{\max,c}$ と破断までの時間 t との関係は、切欠深さ a とは無関係に切欠半径 ρ ごとに平行な直線で表すことができる。すなわち、 $\sigma_{\max,c}$ は破断までの時間 t と切欠半径 ρ で決まり、切欠深さ a とは無関係である。

これらの実験結果より、切欠底からぜい性的に破断する GF/SPS 切欠材の破壊に対して、切欠底付近の力学的状態の厳しさを考慮した破壊基準、式(2)が有効であることを実証した。また、本報で実施した試験条件の範囲では $\sigma_{\max,c}$ と破断までの時間 t 、切欠半径 ρ との間には式(3)で表される関係が成り立つと考えられ、このときの材料定数 m は一定 (0.0301) であった。

5 結 言

短いガラス繊維で強化したシンジオタックチックポリスチレン射出成形板 (ザレック, 出光興産㈱製, GF/SPS) から切欠試験片を作成し、引張速度の広い範囲、 10^4 , 10^3 , 10^2 , 1 , 8.33×10^{-3} , $8.33 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$, で引張試験を行い、

破壊強度に及ぼす切欠きの幾何学的形状の影響および引張速度の影響について検討し、次の結果を得た。

GF/SPS の破壊強度は引張速度の影響を受ける。すなわち、同じ形状の試験片の場合、引張速度が速くなるほど破壊強度は高くなった。この引張速度依存性はマトリックスであるプラスチックの粘弾性に起因するものと考えられる。

本報で実施した試験条件のもとでは、GF/SPS 切欠材は、いずれの引張速度の場合も荷重増加の過程で、切欠底からぜい性的に破断した。

破断時の切欠底の最大弾性応力 $\sigma_{\max,c}$ は切欠半径 ρ と破断までの時間 t で決まり、切欠深さとは無関係である。

引張速度の影響を考慮した切欠底付近の力学的状態の厳しさに基づく破壊基準式(2)が GF/SPS 切欠材の破壊に対して有効であることを実証した。この破壊基準は、FRP 切欠材が切欠底からぜい性的に破断する場合に適用できると考えられる。

参 考 文 献

- 1) N. Ishihara, "Stereospecific catalysts for polymerization of styrene - syndiotactic polystyrene", Catalysts and Catalysis, Vol. 33, No.8, pp.575 - 577 (1991).
- 2) M. Nakamichi, "Syndiotactic polystyrene", Engineering materials, Vol.43, No.9, pp.46 - 52 (1995).
- 3) A. Okada, H. Ase and S. Miura, "Syndiotactic polystyrene (SPS) no kaihatu", Chemical engineering of Japan, Vol.75, No. 8, pp.495 - 497 (2011).
- 4) K. Kawata, "Composite materials", Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 48, No. 9, pp. 1173 - 1178 (1982).
- 5) I. M. Daniel, W. G. Hamilton and R. H. LaBedz, "Strain rate characterization of unidirectional graphite/epoxy composite", ASTM STP 787, pp. 393 - 413 (1982) American Society for Testing and Materials.
- 6) J. Harding and L. M. Welsh, "A tensile testing technique for fibre-reinforced composites at impact rates of stain", Journal of Materials Science, Vol. 18, pp. 1810 - 1826 (1983).
- 7) M. Todo, K. Takahashi, P. Beguelin and H. H. Kausch, "Strain-rate dependence of the tensile fracture behavior of woven-cloth reinforced polyamide composites", Composites Science and Technology, Vol. 60, pp.763 - 771 (2000).
- 8) A. Gilat, R. K. Goldberg and G. D. Roberts, "Experimental study of strain-rate-dependent behavior of carbon/epoxy composite", Composites Science and Technology, Vol. 62, pp. 1469 - 1476 (2002).
- 9) N. Taniguchi, T. Nishiwaki, N. Hirayama, H. Nishida and H. Kawada, "Evaluation the impact tensile properties of unidirectional fibre-reinforced composites with thermoplastic epoxy resin", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, Vol.75, No.758, pp. 1284 - 1289 (2009).
- 10) R. G. Kander and A. Siegmman, "The effect of strain rate on damage mechanisms in a glass/polypropylene

- composite", *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 10, pp. 1455 - 1473 (1992).
- 11) S. Amijima and H. Kominami, "The effect of the direction of the reinforcement, glass content or the number of plies of glass cloth, and strain rate", *Journal of the Society of Materials Science*, Vol. 22, No. 242, pp. 1017 - 1024 (1973).
 - 12) R. J. Nuismer and J. M. Whitney, "Uniaxial failure of composite laminates containing stress concentrations", *ASTM STP 593*, pp. 117 - 142 (1975), American Society for Testing and Materials.
 - 13) S. Kazemahvazi, D. Zenkert and M. Burman, "Notch and strain rate sensitivity of non-crimp fabric composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp. 793 - 800 (2009).
 - 14) H. Hyakutake, H. Nisitani and T. Hagio, "Fracture criterion of notched plates of FRP", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A*, Vol.54, No.498, pp. 326 - 332 (1988).
 - 15) H. Hyakutake and H. Nisitani, "Condition of brittle fracture in bending on notched specimens of rigid plastics", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A*, Vol.51, No.462, pp.478 - 482 (1985).
 - 16) H. Hyakutake and T. Yamamoto, "Fracture criterion for tension loaded FRP plates with open holes", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.43, No.489, pp.679 - 683 (1994).
 - 17) H. Hyakutake and T. Yamamoto, "Effects of notch geometry and fiber orientation on fracture characteristics of notched FRP plates under static load", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.44, No.499, pp.401 - 406 (1995).
 - 18) T. Yamamoto and H. Hyakutake, "Damage of notched FRP plates under static loads - evaluation of damage using luminance measuring system", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.63, No.608, pp.780 - 786 (1997).
 - 19) T. Yamamoto, H. Hyakutake and H. Takeda, "Damage and strength for notched plates of short glass fiber reinforced polypropylene", *Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2003*, CD-ROM, OS09W0202 (2003), The Japan Society of Mechanical Engineers.
 - 20) T. Yamamoto, S. Moriyama and H. Takeda, "Effects of tensile speed on fracture strength of notched plates for GFPP and recycled GFPP", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 63, No. 3, pp. 279 - 284 (2014).
 - 21) T. Yamamoto, H. Takeda, S. Moriyama and T. Hiyoshi, "Fracture of notched GF/PP plates in dynamic tensile strength test", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 62, No. 1, pp. 27 - 32 (2013).
 - 22) M. Nakada and Y. Miyano, "Formulation of time and temperature dependence of static strength for unidirectional CFRP", *Materials System*, Vol. 31, pp. 5 - 10 (2013).
 - 23) Y. Miyano, T. Yamamoto, M. Nakada and T. Ishiguro, "Time and temperature dependence on flexural static, creep and fatigue fracture behaviors of unidirectional CFRP laminates", *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 4, pp.130 - 136 (1998).