一方向 GFRP 材を切削加工した場合の 加工表面品位への繊維方向の影響†

井上 久 弘* 弓 削 毅** 川 口 格***

Effect of Fiber Direction on the Cut Surface Finish of Unidirectional Glass Fiber Reinforced Plastics

by

Hisahiro INOUE*, Takeshi YUGE** and Itaru KAWAGUCHI***

In order to clarify the cutting mechanism of FRP, the quality of cut surface finish of unidirectional glass fiber reinforced plastics was investigated by changing the direction of glass yarn against the cutting direction. Cutting was operated under two-dimensional dry cutting conditions. The cut surface finish state of glass yarn end was discussed by taking the cut plastic surface state without any glass fiber as a standard surface. The following results were obtained by changing the both rake angle and depth of cut:

- (1) The cut end states of glass yarn near the cut surface were classified into two modes with changing the direction of glass yarn, such as the hollow pit and the swollen protuberance (uncut glass-fibers).
- (2) The maximum hollow pit depth was almost twenty times of the maximum swollen protuberance height on changing the direction of glass yarn.
- (3) The change in rake angle of cutting tool did not affect the surface finish state.
- (4) The surface finish state became worse with increasing the depth of cut.

Key words: Cutting, GFRP, Direction of yarn, Roughness of surface

1 緒 言

繊維強化プラスチック (FRP) 材は、比強度、比弾性の優れた材料として種々の分野で幅広く使用されている。しかし FRP 材を二次加工する立場から眺めた場合、この材料はその構成材料の特異性から工具摩耗が激しく、二次加工の困難な材料であることも良く知られている。さらに FRP 材を切削加工した場合、試料中の繊維方向が加工後の表面粗さに大きな影響を与えることも報告されている^{1)~4)}。ここでは試料中の繊維方向と切削方向との相対的な関係の変化によってどのような加工表面が得られるかを明らかにするためにモデル一方向ガラス繊維強化プラスチック材を使用して二次元切削加工を行い、得られた加工表面の詳細な検討を行った結果について報告する。

2 試料の作製方法

試料は、幅の中央にガラスヤーンを一行、1 mm 等間隔に保持した型に不飽和ポリエステル樹脂を流し込んで成形し、室温で 24 時間放置した後更に 353 K で約 1 時間のアフターキュアを行った。その後試料を研

磨、バフ仕上げし、20×30 mm、厚さ 4 mm の形状に切りだして試験片とした。なお試験片の切削加工を行う面の前加工に関しては加工後のガラス繊維束(ガラスヤーンのこと)端部の表面状態ができるだけ繊維方向に影響されないような加工状態を得るために切断用砥石を用いて横方向からの切断加工を行った。試料中の繊維角度(θ)は切削方向に対して反時計方向に $\pi/12$ から $11\pi/12$ まで $\pi/12$ ごとに变化させた。

3 実験方法

切削加工は上記の試料を Fig. 1 に示す円板型の治具に取り付け、さらにその円板型の治具を旋盤(ワシノ機械, LPT-35C 型)の主軸に取り付けて乾式二次元切削を行った。今回の切削は試料中の繊維方向が切削後のガラス繊維束端部の加工状態にどのような影響を与えるかを明確にするために初期表面状態一定の試料を一度切削することによって繊維角の相違による加工面の違いの比較を行った。切削条件を Table I に示す。切込み量の影響を調べる実験以外の実験では切込み量を 30 μm 一定として切削を行った。

† 原稿受理 平成 3 年 6 月 3 日 Received June 3, 1991

* 正 会 員 大阪府立大学工学部機械工学科 〒593 堺市学園町, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Osaka Pref., Gakuen-cho, Sakai, 593

** 大阪府立大学大学院 〒593 堺市学園町, Graduate Student, Univ. of Osaka Pref., Gakuen-cho, Sakai, 593

*** 大阪府立大学工学部機械工学科 〒593 堺市学園町, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Osaka Pref., Gakuen-cho, Sakai, 593

Fig. 1. Schematic diagram of specimen holder.

Table I. Experimental conditions.

Resin*	Unsaturated polyester resin Polymal; 6301:6320F=1:1
Reinforcement**	Glass yarn, ECG-75-1/2 3.3S, NA
Direction of glass yarn (θ)	$\pi/12, \pi/16, \pi/4, \pi/3, 5\pi/12, \pi/2, 7\pi/12,$ $2\pi/3, 3\pi/4, 5\pi/6, 11\pi/12$ (rad.)
Tool material	Cemented carbide bit; K10
Rake angle (α)	-5, 0, 5, 10 (deg.)
Clearance angle (γ)	6 (deg.)
Cutting speed (V)	45.7 (m/min.)
Depth of cut (t)	20, 30, 40, 60 (μm)

*: Takeda Chemical Industries LTD, **: Nitto Boseki Co.

切削加工後の試料表面状態は万能表面形状測定機（小坂製作所，SE-3 型）を用いて，Fig. 2 のように 1 つの試料に対して 3 本のガラス繊維束部分を選び，切削方向とこれに対して垂直方向との二方向からの測定を行った。この場合，加工表面状態の測定方法としてはガラス繊維束の両側（幅方向）に存在する樹脂部のみの加工表面粗さの中心線を基準面と仮定し，この基準面より盛り上がっている部分を切り残し量，またへ

Fig. 2. Measuring direction of specimen surface.

こんでいる部分をくぼみ量と定義して測定した。またガラス繊維束周りの樹脂部に生じたくぼみをクラックと定義してくぼみとは別に表示した。

加工面下のガラス繊維束部に発生する内部損傷の広がりについては，損傷部に透過光と反射光とを照射することによってその損傷域をとらえ，加工表面からの最大垂直深さとして測定した。ここで透過光で観察される損傷はガラス繊維の折れや樹脂中の開口型のき裂等であり，反射光で観察される損傷は上記以外にガラス繊維と樹脂との界面はく離（閉口型）も含んでいる。

4. 実験結果および考察

4.1 切削前の試料初期表面状態について

繊維方向を種々変えた試料の初期表面状態の測定結果を Fig. 3 に，内部損傷の測定結果を Fig. 4 に示す。Fig. 3 の縦軸の正の値はガラス繊維束部におけるガラス繊維の切り残し量（・印，破線）を示し，負の値はガラス繊維束部に生じるくぼみ量（+印，実線）とその周りに生じるクラック深さ（*印，点線）とを示す。また横軸は試料中の繊維角（ θ ）の変化を示す。Fig.

Fig. 3. Relation between the roughness of surface and the direction of yarn (initial specimen).

Fig. 4. Relation between the internal damage of glass yarn and the direction of yarn (initial specimen).

4の縦軸は内部損傷深さで負で示す。横軸はFig. 3と同じく繊維角の変化を示す。Fig. 3より切削加工前の試料の初期表面の凹凸に関しては繊維角の変化に対してほぼ一様と見なせる。すなわち、繊維部の切り残し量は $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度、くぼみ量は $5 \mu\text{m}$ 程度そしてクラック深さは $2 \mu\text{m}$ 程度である。これに対して内部損傷はFig. 4より明らかなように、繊維角の増加に伴って増加し $\theta = \pi/2$ の時に最大となる。ここで繊維角が $\theta = \pi/2$ で最大となるのは試料の切断においてちょうど $\theta = \pi/2$ で繊維角が対称となるためである。この損傷の最大値は透過光の観察(・印, 点線)では約 $10 \mu\text{m}$, 反射光の観察(+印, 実線)では約 $45 \mu\text{m}$ となる。この値は切込み $30 \mu\text{m}$ 一定で行う実験に関して厳密に考えると影響すると思われるが、ガラス繊維と樹脂とが大きく破壊していると考えられる透過光による観察では損傷部の深さが最大 $10 \mu\text{m}$ 程度であるので繊維角による内部損傷の差を無視して以後の実験を行うことにした。

4・2 加工後の表面状態への繊維角の影響

切削加工後のガラス繊維束端部を中心とした加工表面の凹凸と繊維角との関係をFig. 5に示す。縦軸はFig. 3と同様にガラス繊維束部の切り残し量(・印, 破線), くぼみ量(+印, 実線)およびクラック深さ(*印, 点線)を示す。横軸は繊維角の変化を示す。切削条件はすくい角 $\alpha = 5^\circ$, 切込み $t = 30 \mu\text{m}$ 一定として行った。図より明らかなようにくぼみ量は繊維角の増加に伴って繊維角が $\theta = \pi/6$ 付近で最大(約 $100 \mu\text{m}$)となり, その後急激に減少し, $\theta = 5\pi/12$ で約 $5 \mu\text{m}$ となる。それ以降は繊維角の増加に伴って僅かに減少し, $\theta = 7\pi/12$ 付近で最小となる。これに対してガラス繊維の切り残し量は繊維角が $\theta = \pi/3$ で発生し(約 $5 \mu\text{m}$)それ以後は繊維角の増加に対してほぼ一定である。ガラスヤーン周りに発生するクラックも繊維角が $\theta = \pi/3$ で発生し(約 $10 \mu\text{m}$)その後繊維角

Fig. 5. Relation between the roughness of surface and the direction of yarn (after cutting).

Fig. 6. Relation between the internal damage of glass yarn and the direction of yarn (after cutting).

が増加するにつれて減少していく。さらに加工面下の内部損傷への繊維角の影響について示したのがFig. 6である。この場合、繊維角が $\theta = \pi/4$ 付近で内部損傷が最大(約 $550 \mu\text{m}$)となる。その後は繊維角の増加に伴ってほぼ直線的に減少していく。さらに加工表面下に生じる透過光と反射光による観察結果の一例をFig. 7に示す。透過光と反射光とはその損傷部の形

Fig. 7. Experimental result of failure pattern of glass yarn.

状が大きく異なる。すなわち、先に述べた反射光による観察で見られる閉口型のガラス繊維と樹脂との界面はく離は必ずしも透過光で観察された損傷の延長上に生じるとは限らないということである ($\pi/6 \leq \theta \leq \pi/2$ の写真参照)。ここでみられる閉口型の界面はく離は切削の際、工具によってガラス繊維方向に大きく圧縮力が作用して生じたものと思われる。これは以前に述べた一方向ガラス繊維強化プラスチック材へのくさびの押し込みで観察された損傷とよく似ている^{5),6)}。この結果、透過光と反射光との観察方法の相違によって $30\ \mu\text{m}$ 程度の差が生じるものと思われる。このことより切削時にガラス繊維束部に生じる内部損傷としてはガラス繊維と樹脂との界面はく離が約 $30\ \mu\text{m}$ ほど先攻しているものと考えられる。

以上の結果より加工表面の凹凸を重視した場合繊維角の変化によって生じる最大のくぼみ深さは最大切り残し量の約 20 倍になることから、繊維角が $\theta \geq \pi/2$ の試料の切削加工においては良好な加工表面が得られ

Fig. 8. Relation between the uncut fiber length and the direction of yarn (changed the depth of cut).

Fig. 9. Relation between the crack length and the direction of yarn (changed the depth of cut).

Fig. 10. Relation between the hollow pit depth and the direction of yarn (changed the depth of cut).

るが、繊維角が $\theta < \pi/2$ の試料の加工においては加工表面はオーバーカットの状態になりくぼみが大きく生じると共に加工面下の内部損傷域の広がりも大きくなる。繊維角の変化によって生じるこれらの大きな相違は試料中のガラス繊維が工具刃先によって試料表面に押し付けられてガラス繊維の切り残しが生じるかまたは、ガラス繊維が掘り起こされて試料内部に大きなガラス繊維と樹脂との界面はく離が伝ばするものとの相違によって生じるものと考えられる。今回観察されたクラックはガラス繊維束が樹脂中に独立して存在するため、切削力が作用した際のガラス繊維束部と樹脂部の弾性率等の差によって生じたものと考えられる。このため一般の FRP 材の加工においては発生しないものと考えられる。

4・3 切り込み量、工具形状の影響

切り込み量を変化させた場合の加工表面品位の変化としての切り残し量、クラックおよびくぼみ量の変化を Fig. 8, 9, 10 に示す。図から明らかなように切り残

Fig. 11. Relation between the internal damage of glass yarn and the direction of yarn (changed the depth of cut).

Fig. 12. Relation between the roughness of surface and the direction of yarn (changed the rake angle).

し量, クラックおよびくぼみ量のいずれも切込み量が増加するにつれてそれぞれ増加する傾向にある。その増加割合は切込み量が $20 \mu\text{m}$ の時の値が大きいものほど大きくなる。

Fig. 11 に内部損傷と繊維角との関係を示す。内部損傷の変化も切込み量の増加に伴って増加する。これらのことより切削加工面としては切込み量が増加するほど加工表面が悪くなる。

つぎに工具形状の影響として工具すくい角を変化させた場合の加工表面の凹凸と繊維角との関係を Fig. 12 に示す。この場合、繊維角の変化に対する切り残し量, クラックおよびくぼみ量の全体的な変化の傾向に対してすくい角はほとんど影響しないようである。ただ、くぼみ量の一番大きくなる繊維角はすくい角が $\alpha = -5^\circ$ から $\alpha = 10^\circ$ まで大きくなるにつれて小さくなる傾向を示す。この場合のすくい面とくぼみ量が最大となる繊維角との相対的な角度 ϕ の関係を求めてみると $\phi = 115^\circ \sim 120^\circ$ となる。一方, Fig. 13 にすくい角を変化させた場合の内部損傷と繊維角との関係を示す。この場合、内部損傷の大きさと繊維角との関係はすくい角が変化してもほとんど変わらない。ただ内部損傷が最大となる繊維角はすくい角の増加に伴って小さい方へ移動する。このことから内部損傷が最大と

なるすくい面と試料中の繊維方向との相対的な角度を求めるとその角度 ϕ は $\phi = 135^\circ$ となり、繊維角とすくい面との関係はくぼみ発生と内部損傷発生とで異なるものと思われる。

5 結 言

試料内にガラスヤーンが一列等間隔に入った一方向 GFRP 材を繊維角および切削条件を変化させて切削加工し、ガラス繊維を含まない樹脂のみの部分の加工表面を基準として、ガラス繊維束端部の切削加工状態を詳しく観察した結果以下のようなことが分かった。

(1) 試料中の繊維方向とガラス繊維方向との相対的な関係から切削加工表面品位を見てみるとガラス繊維が切り残されて加工表面に残る繊維角の領域とガラス繊維が掘り起こされてくぼみを生ずる繊維角の領域とがある。また加工面の凹凸に関して、繊維束端部に生じるくぼみ量の方がガラス繊維の切り残し量よりずっと大きいことが分かった。

(2) 加工表面下のガラス繊維束部に発生する繊維や樹脂の破壊および両者の界面はく離などの内部損傷の広がりとしては繊維角が $\theta = \pi/4$ 付近で最大となる。

(3) 切込み量の変化に対しては切込み量が増加すればそれにとまって表面状態が悪くなるだけで、繊維角の変化には影響しない。

Fig. 13. Relation between the internal damage of glass yarn and the direction of yarn (changed the rake angle).

(4) すくい角の変化はくぼみ量が最大となる繊維角と内部損傷が最大となる繊維角にのみ影響してそれ以外の繊維角にはほとんど影響しない。これらの影響する繊維角とすくい面とのなす相対角度 ϕ は $\phi=120^\circ$ 付近でくぼみ量が最大となり、 $\phi=135^\circ$ で内部損傷が最大となる。

(平成 3 年 3 月 20 日 第 20 回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 井上久弘, 井戸 守, 精密機械, **39**, 280 (1973).
- 2) 井上久弘, 井戸 守, 精密機械, **40**, 1035 (1973).
- 3) 王 曉渡, 中山一雄, 新井 実, 精密工学会誌, **55**, 704 (1989).
- 4) 飯島 昇, 竹山秀彦, 成形加工, **3**, 81 (1991).
- 5) H. Inoue and M. Ido, Composite Materials-II (Proc. Jap.-USSR Symp. Comp. Mater.) p. 116 (1980).
- 6) 井上久弘, 井戸 守, 日本複合材料学会誌, **4**, 69 (1978).