エンドミルによるトリミング加工における GFRP の切削特性*

朝比奈 奎一** 鈴木 節男***

Characteristics on Trimming of GFRP

Keiichi ASAHINA and Setsuo SUZUKI

GFRP, because of their superior strength-to-weight and stiffness-to-weight ratio, are used increasingly in high-performance applications. But the users of this material have faced a difficulty to machine them. The major trouble in cutting GFRP is the decreased tool life, the inferior surface quality and others. The purpose of this study is to clarify the wear characteristic of the tool, to find the suitable cutting condition in trimming GFRP with endmill. The main results obtained are as follows: (1) The shape of cutting tool caused by wear has some variation with type of GFRP. And the tool life is affected considerably by fiber structure in each layer rather than the whole fiber content (2) Machined surface in cutting GFRP depend on engage angle to fiber direction mainly (3) Oscillate cutting in which endmill is moved up and down has some effects on improving tool life

Key words: GFRP, trimming, endmill, milling

1. 緒 言

繊維強化プラスチック (FRP) は比強度・比弾性率が高く、さらに減衰性や耐食性に優れているなど他の材料にはない特性を有しているために、従来材料の代替えも含めて広範囲に使用されてきている。FRP はその本来の特性を生かすためには、繊維に損傷を与えないように成形のままで最終製品となることが望ましい。しかし現状では切断、穴加工など幾多の機械加工を中心とした2次加工が施される。しかし、FRP の加工性は極めて悪く、工具損耗が大きく生産能率が上がらない、バリ・毛羽立ち・層間剝離・白化など加工精度や製品品位の確保が難しい等の問題点を有している。

FRP の機械加工に関しては、その切削機構の解明と仕上面の相関^{1)~3)}や工具摩耗に関する研究^{4)~6)}がなされてきている。これらの実験は連続切削で行われているケースが多い。成形工場における加工内容に関して調査すると、成形後の周囲に発生したバリを取るとともに形を整えるためにトリミング加工を実施してい

るというところが多い。さらにこれらの加工に当たっては、木工加工の延長線上の加工工具や加工方法を採用しているところが多い。

そこで本研究では各種の GFRP 積層板を試験材料として取り上げ、エンドミルによって端面加工を行ったときの基本的な加工特性を検討した。特に FRP は繊維の構成要素や構造が異なる場合に加工性能が大きく左右されることが予測されるため、成形した5種類の GFRP について、繊維構造と加工精度・工具摩耗の関連を検討した。

2. 実験方法

加工実験に供する GFRP は、熱硬化性樹脂である不飽和ポリエステルをマトリクスとして、3 mm の厚さにハンドレイアップ法により成形したものである。材料特性に大きな影響を与えられとされるガラス繊維に関しては、含有率 (体積含有率 V_f 値) を 30~55 %、基材構成をマット、ロービングクロス、一方向材の3種類、さらに積層数は3~8に選定した。材料の仕様を表1に示す。以下材料を指示するときは表1の材料番号を用いる。

切削試験に使用したエンドミルは、超硬スローアウェイエンドミル (K 10) を主にして、一部高速度工具鋼 (SKH 57) エンドミルである。各エンドミル

* 原稿受付 平成3年6月7日

** 正会員 東京都立工業高等専門学校 (東京都品川区東大井 1-10-40)

*** 正会員 東京都立工業技術センター (東京都北区西が丘 3-13-10)

Table 1 Specimen of GFRP

No.	Fiber type	Structure	Matrix material	Volume contents of fibers %	Thickness mm
1	MAT (450 g/m ²)	M-M-M	Polyester	30	3
2	MAT (450 g/m ²) Roving cloth (815 g/m ²)	M-R-M	Polyester	40	3
3	Roving cloth (815 g/m ²)	R-R-R	Polyester	50	3
4	Roving cloth (380 g/m ²)	R-8 PLY	Polyester	55	3
5	Roving	Unidirectional	Polyester	50	3

Table 2 Experimental conditions

Diameter mm	20	50
Number of flute	1	1
Geometry deg		
Radial rake angle	6	2
Axial rake angle	30	15
Approach angle	0	0
Materials	SKH, MicroCT	K 10
Cutting speed rpm	300	600
m/min	(18.8)	(94.2)
Feed rate mm/tooth	0.1	
Depth of cut mm	1.0	
Cutting fluid	not used	

の諸角と各エンドミルごとの切削条件を表2に示す。

切削実験はGFRPの板をNC立てフライス盤テーブル上に切削動力計を介して取り付け、エンドミルによってその端面を切削することで行う。切削中にエンドミルに作用する切削抵抗は、背分力 F_x と送り分力 F_y を電荷増幅器を介していったんデータレコーダに記録した後、FFTで解析した。

工具摩耗の評価は、エンドミル側刃の逃げ面摩耗幅 V_B を測定することで行った。測定は顕微鏡による直接計測と写真記録による方法を併用し、未切削時の切れ刃稜からの距離を摩耗幅とした。なお、積層板においては摩耗幅が不均一となる可能性があるが、この場合には最大幅を測定値として採用した。

3. 実験結果および考察

3.1 繊維構造と工具摩耗

繊維含有率が工具摩耗に与える影響を調べるために、材料1（繊維含有率30%）、材料2（同40%）、材料3（同50%）、材料4（同55%）について切削実験を行った結果を図1に示す。切削工具は超硬K10チップである。これを見るとガラス含有率が30%、55%、50%、40%の順で摩耗幅が大きくなっており、従来旋削では繊維の含有率が工具摩耗に大きな影響を与えるといわれていた⁷⁾が、その通りにはなっていない。

Fig. 1 Influence of the volume contents of fibers on the flank wear development of K10 tool

い。そこで絶対値だけでなく摩耗パターンをも評価に加えた。それぞれの材料の逃げ面摩耗の形態を図2に示す。材料1のガラスマット材を入れたGFRPに関しては、切れ刃に対して平行に逃げ面摩耗が進行しているが、他の材料についてはこの歯状に摩耗が発生している。図1の摩耗幅はそれらの最大幅をプロットしたものである。それぞれ同じ距離だけ切削したときの摩耗であるため、摩耗の大きさも比較が可能である。

材料2は切削に関与する刃の中央部が大きく摩耗している。材料2は真ん中にロービングクロス(815 g/m²)を配し、これを挟むように上下に材料1で使ったマット材を配したGFRPである。マット材のような単繊維に近い状態で複合化されているときには、摩耗は小さく、一様に摩耗が進行していくが、ロービングのようにガラス繊維が集束しているところは摩耗の進行が急激であることがわかる。材料2において、上下のマット部分の摩耗幅が材料1と同じ程度になっているのは、上下層に材料1と同じガラス繊維を配しているためである。

材料3は材料2で使われているロービングクロスを3層に配したGFRPである。したがって摩耗の3つ

Fig. 2 Flank wear pattern of the tested endmill

Fig. 3 Influence of the volume contents of fibers on the cutting force

の山が整然と発生している。摩耗の最大幅は材料2とはほぼ同じとなっている。材料4は繊維密度が材料2や3に対し半分程度のロービングクロスを8層に配したGFRPである。各層の繊維密度が小さいと摩耗が小さく、また層数が多いと局部的摩耗が目立たないことがわかる。

3.2 繊維構造と切削抵抗

前項の材料に関して、ガラス含有量が切削抵抗に与える影響を調べたものが図3である。30%、40%、50%、55%の含有率の順に切削抵抗は増大していることがわかる。この結果から早急に、全体のガラス含有率が切削抵抗に影響を与えたと考えることは、誤りである。エンドミルによる切削抵抗は、切れ刃が各層を下から上に切削する（ダウンカット）時に発生する切削抵抗を単純に総計することによって求められるはずである。この時一層を切れ刃が削り終わらないうちに次の層を切削し始める状態となり、この干渉部分で

Fig. 4 Influence of the volume contents of fibers on the flank wear development in drilling with the SKH-drill

は当然抵抗も大きくなることになる。材料1のマット層での抵抗は、材料2の中間層や材料3のロービング層に比べて小さくなるが、それぞれの層を加工するに要する時間は同じである。材料4の各層単独の抵抗は材料3より小さくなるが、抵抗の重なり数が多くなるために総計として出力される抵抗は大きくなってくると考えられる。

以上3.1節と3.2節の結果からエンドミルによるトリミング加工においては、繊維の全体含有率よりも繊維層の積層構造と各層の繊維含有率が工具寿命に最も影響を与えることを留意すべきであることがわかる。ちなみに、材料1,2,3,4について直径6mmのハイスドリルによって穴加工実験を行ってみた。摩耗特性を調べた結果を図4に示す。ここでは切れ刃中央部の逃げ面摩耗幅を測定しているが、エンドミル加工と異なる

Fig. 5 Influence of the angle on the cutting force and the machined surface roughness

り、繊維の全体含有率が工具摩耗に影響を与えている。

エンドミル加工は複合材料の積層方向に平行に切込みを入れて行くような加工形態であり、エッジワイズ加工と呼ぶことにする。これに対してドリル加工は積層方向に垂直に切込みを入れて行くような加工形態であり、これをフラットワイズ加工と呼ぶことにする。フラットワイズ加工にはドリル加工のほかに、すり割りフライスや薄型砥石による切断加工などが含まれてくる。FRPのうち積層板の被削性の評価においてはエッジワイズかフラットワイズかを明確に分離して議論する必要があることを以上の実験結果は示している。

3.3 繊維方向と被削性

鉄鋼材料のような等方性の材料に対して、FRPは含有される繊維によって異方性を有している。そこで繊維の方向性が切削加工性に与える影響を調べるために、ガラスロービングを一方に引きそろえた材料(表1の材料5)を傾けて端面切削を行い、切削抵抗と仕上面粗さの評価をした。その結果を図5に示す。ここで繊維の角度を図6のように定義している。つまりエンドミルの送り方向を基準としてこれと繊維方向がなす角を繊維角 θ とした。また切れ刃が材料に当たる角度を材料に対するエンゲージ角 E 、繊維に当

Fig. 6 Cutting model of GFRP

Fig. 7 Typical surface roughness pattern

たる角度を繊維に対するエンゲージ角 E' とした。

繊維角 θ が変わると、切削抵抗成分の比率が変わってくる。0°, 45°で背分力が大きく、90°で送り分力が大きく、135°では両者とも小さくなり、結局合力は45°付近が大きく、135°が極端に小さくなる。仕上面を肉眼で観察した状態では、45°, 90°は加工面全体が樹脂の色を呈しているのに対して、135°では白い点が随所に分布していた。中心線平均粗さ R_a で測定した結果でも明らかに45°と90°が小さく、135°は大きな値を示した。さらに加工面の断面曲線を比較してみたのが、図7である。明らかに0°と135°では粗さパターンが異なることがわかる。0°においては先

Fig. 8 SEM photographs of machined surface

鋭度の高い山と谷が交互に繰り返されているが、 135° では平坦面から発生した深い谷が生成されており、これが仕上面粗さを悪化させていることがわかる。さらに 135° の場合について加工面の SEM による観察結果を図 8 に示すが、これによると繊維が引き抜かれたような穴があいていることがわかる。一般的に切削抵抗が大きいときには仕上面粗さは良好となり、逆に抵抗が小さいときには粗さが粗くなると言うて良い。

繊維角は繊維の破壊機構に大きな影響を与えている¹¹²⁾。本実験のようなエンドミルでは実質的に影響を持つ角度は、 θ ではなく繊維に対するエンゲージ角 E' であることが予測される。仕上面が良くなる条件である $\theta=45^\circ, 90^\circ$ では、 E' はそれぞれ $-28.7^\circ, 16.3^\circ$ となり小さな値となる。この場合には切れ刃が繊維に直角に近く当たるために、繊維はせん断破壊される可能性が高い。それ故繊維とマトリクスである樹脂の加工面が一致するために、仕上面粗さは小さくなるが、切削抵抗の合力は大きな値となると考えられる。

繊維角 0° の時はエンゲージ角 E' は -73.7° となり、繊維には引張荷重が作用するとともに、繊維が逃げやすい状態となる。繊維の切残しが発生すると、当然仕上面粗さは大きくなるし、切残しの繊維が工具逃げ面を擦りあげることで切削抵抗のうち特に背分力が大きくなることになる。繊維角 135° のときはエンゲージ角 E' は逆にプラス側に大きくなり 61.3° となる。この時には材料を掘り起こす方向に切れ刃が進行し、繊維を支える樹脂の変形によって、繊維の曲げ破壊を誘発することになる。ガラス繊維は曲げに弱いために切削抵抗は小さな値になる。

さらに繊維が曲げによって切込み位置以下の部分で破断すれば、繊維が抜け落ちて仕上面にピンホールを形成することになり、粗さは悪化する。切削方向を選択できるとすれば、繊維に対して切れ刃が直角かややマイナスに当たるような条件を設定することが加工精度の上からは望ましいことがわかる。

Fig. 9 Oscillate cutting model

3.4 揺動切削の適用

トリミング加工に代表されるエッジワイズ加工における工具寿命は、主に切れ刃の局部摩耗に影響を受けることはすでに述べた。これらを極力防ぎ、より長時間安定切削を行うため、図 9 に示すようにエンドミルを上下に動かしながら送る揺動切削の適用の可否を検討した。

3.4.1 有効すくい角の検討

揺動させることで切削性能が低下しては意味がない。そこでまず切りくず流出方向すくい角（有効すくい角）の送り方向に対する変化を理論的に求めてみた。垂直すくい角を α_n 、速度すくい角を α_v 、有効すくい角を α_e 、切りくず流出角を η_c 、傾斜角を δ とすれば次の関係が成り立つ。

$$\sin \alpha_e = \cos \eta_c \sin \alpha_n \cos \delta + \sin \eta_c \sin \delta$$

Stabler の実験⁹⁾ によれば次のように変形できる。

$$\eta_c = \delta$$

$$\sin \alpha_e = \cos^2 \delta \sin \alpha_n + \sin^2 \delta$$

エンドミル切れ刃のねじれ角を β 、切削方向を λ 、送り方向角を γ とすれば最終的に次の式となる。

$$\delta = \beta + \lambda$$

Table 3 Influence of cutting direction on effective rake-angle

γ°	λ°	α_e°
-60	0.156 9	22.470
-30	0.052 3	22.389
0	0	22.352
30	-0.052 3	22.307
60	-0.156 9	22.227

Fig. 10 Flank wear development in oscillate cutting

$$\sin \alpha_e = \cos^2(\beta + \lambda) \sin \alpha_n + \sin^2(\beta + \lambda)$$

今回使用したエンドミルの諸角 $\beta=30^\circ$, $\alpha_n=10^\circ$ を上式に代入し, 上方に $30^\circ, 60^\circ$, 下方に $-30^\circ, -60^\circ$ 動かしたときの切削方向角 λ と有効すくい角 α_e の値を表 3 に示す。

3.4.2 揺動切削実験結果

前項の計算に使用した条件で, 実際にハイスエンドミルで加工実験を行い加工特性を調べてみた。切削抵抗は $\pm 30^\circ, \pm 60^\circ$ とともに通常切削の時とほとんど差は生じなかった。これからも通常切削に対する揺動切削の不利な点は見いだせない。もちろんこれは有効すくい角の変動が小さいためであると考えられる。また, 逃げ面摩耗への影響を図 10 に示す。 $\pm 60^\circ$ の揺動の

方が $\pm 30^\circ$ の揺動より多少摩耗は小さくなっているが, いずれも通常摩耗よりは $1/2 \sim 1/3$ 程度の摩耗であり, 長時間加工の効果が期待できることを示している。さらに今日工作機械は NC 機が普及しており, 工具を揺動させることは何ら問題なく実施できる。

4. 結 言

積層された GFRP の加工性を評価する場合には, スラットワイズ加工とエッジワイズ加工を分離して考える必要がある。今回実施したエンドミルによるトリミング加工はエッジワイズ加工の代表であり, これに關しては次のことが明らかになった。

- (1) 工具摩耗に影響を与える主な材料側の因子は, 全体の繊維含有量ではなく各層の繊維構造である。
- (2) 異方性を有する複合材料に対しては, 出来得れば繊維方向に対する切れ刃の当たり角度を考慮して条件を決めることが, 加工精度の上から望ましい。
- (3) 工具を揺動させて切削を行う加工法は, エッジワイズ加工において適している。

参 考 文 献

- 1) 王 曉渡: 繊維強化複合材料の切削加工に関する研究, 精密工学会誌, 55, 4 (1989) 708.
- 2) 帯川利之: FRP 切削の有限要素法シミュレーション, 昭和 63 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1988) 765.
- 3) 佐久間敬三: 強化プラスチック切削における工具摩耗, 日本機械学会論文集 (C 編), 48, 436 (1982) 1938.
- 4) 長谷川嘉雄: GFRP 切削における工具の摩耗機構, 精密機械, 50, 11 (1984) 1747.
- 5) 竹山秀彦: ガラス繊維複合材料の切削機構に関する研究, 精密工学会誌, 53, 9 (1987) 1447.
- 6) 竹山秀彦: GFRP の切削加工における工具寿命に関する研究, 昭和 60 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1985) 617.
- 7) 佐久間敬三: FRP の切削における工具材種と摩耗特性, 機械と工具, 29, 7 (1985) 113.
- 8) G. V. Stabler: The Fundamental Geometry of Cutting Tools, Proc. Inst. Mech. Engrs., 165, (1951) 14.