強化プラスチックの切削加工に関する研究 (第2報)*

—ガラス繊維強化硬質塩化ビニル樹脂の切削加工—

井 上 久 弘** 井 戸 守**

Study of the Cutting Fiber Reinforced Plastic Materials (2nd Report)

—The Cutting Glass Fiber Reinforced Polyvinyl Chloride—

Hisahiro INOUE, Mamoru IDO

This paper describes the effect of the cutting speed on the tool wear and surface roughness of the glass fiber reinforced polyvinyl chloride comparing with the glass fiber reinforced plastic. The main results obtained are as follows:

(1) In the plastic composite materials, the matrix gives the big effect for the shape of the chip and the surface formation of the composite materials, while the element gives the big effect for the tool wear and the heat generation in cutting.

(2) The tool wear in case of F.R.P.V.C. is nearly same as that in case of F.R.P. except the wear width on rake face. The wear width on rake face is mainly influenced by rake angle in lower cutting speeds (500–1400 m/min), while that is nearly constant in higher cutting speeds (2200–2900 m/min).

(3) The chips are the continuous types and the crack appears at near the elements in high speed range.

(4) The surface roughness is increased rapidly until the 1400 m/min cutting speed, but the rate of increasing decreases in the higher speed range.

1. ま え が き

現在、ガラス繊維強化プラスチックはその優れた性質と軽量さから工業用材料として広く使用され、そして、一般に用いられている成形法でかなり精度の良い製品を作ることができるが、さらに精密部品を作る場合に穴あけや表面仕上などの機械加工を行う必要があるものと思われる。前報には熱硬化性のガラス繊維強化プラスチック (以下 FRP と呼ぶ) を 500~2900 m/min の高速度で切削加工した結果を報告したが¹⁾、今回は、熱可塑性のガラス繊維強化プラスチックを同じ速度範囲で切削加工した場合、複合材の母材であるプラスチックの性質の違いがバイト摩耗や切削後の被削材表面にいかん影響するかについて研究を行った。

2. 実験装置および方法

実験装置は前回と同様に、近藤製作所製の円筒研削盤 GLOSS-450 H 型を使用し、切削用バイトチップとしては超硬の K-20 種を使用した。バイトは工具研摩盤で研削し、その表面あらさは $R_{\max}=0.2\sim0.3\mu\text{m}$ である。バ

イト形状は表 1 に示す。また被削材はガラス繊維強化硬質塩化ビニル樹脂 (FRPVC) を用い、その基材としてはマット (8 ply, 体積含有率 25%) を用いた。切削はすべて二次元乾式断続切削の上向き削りである。切削条件は切込み 0.866 mm, 送り 3 mm/rev で、切削速度を 500 m/min, 1400 m/min, 2200 m/min および 2900 m/min の 4 種に変えた。また、切削方向は積層に垂直に切削した。

次にバイト刃先の摩耗量の測定は前回と同様に、すくい面、逃げ面の刃先後退量および刃先摩耗幅をそれぞれ工具顕微鏡、落射顕微鏡を使用して測定し、これら測定された四つの値は試料を約 10.6 m 切削したときのバイト刃先の摩耗量である。

3. 刃先の摩耗量と切削速度との関係

3.1 刃先後退量と切削速度との関係

図 1, 図 2 にすくい面および逃げ面刃先後退量と切削速度との関係を示す。両図より明らかなように、すくい

表 1 バイト形状

すくい角 α	逃げ角 r
0°	2°, 5°, 15°, 25°
10°	2°, 5°, 15°, 25°

その他の角度はすべて 0° とした

* 原稿受付 昭和 48 年 4 月 1 日。昭和 47 年度精機学会秋季大会学術講演会 (昭和 47 年 10 月 30 日) にて発表。

** 正 会 員 大阪府立大学工学部 (堺市百舌鳥梅町 4 丁 804)

図1 すくい面刃先後退量と切削速度との関係

図2 逃げ面刃先後退量と切削速度との関係

面および逃げ面刃先後退量ともに切削速度の増加につれて増加している。すくい面刃先後退量は、すくい角 α よりも逃げ角 γ の変化による影響の方が大きく、 γ の大きいほど刃先後退量は大きい。また、同じ刃先角の場合($\alpha=0^\circ$, $\gamma=25^\circ$ と $\alpha=10^\circ$, $\gamma=15^\circ$ あるいは $\alpha=0^\circ$, $\gamma=15^\circ$ と $\alpha=10^\circ$, $\gamma=5^\circ$)について考えてみると、すくい角 α の小さい方が刃先後退量は大きい¹⁾。

一方、逃げ面刃先後退量は、すくい面刃先後退量とは異なり、すくい角 α の変化による影響が顕著で、すくい角 $\alpha=10^\circ$ の方が $\alpha=0^\circ$ より刃先後退量は大きい。しかしこの場合、同じ刃先角でもすくい面刃先後退量のような関係は現れてこない。これらを前報のFRPのマト材を切削加工した場合と比較すると、切削速度の変化に対する刃先後退量の関係はほぼ同じであるが、その増加の割合はFRPの場合の方が大きく、刃先後退量はFRPの場合の平均70%ぐらいである。これは切削後の被削材表面における残留ガラス繊維の状態の相違、すなわ

図3 すくい面摩耗幅と切削速度との関係

図4 逃げ面摩耗幅と切削速度との関係

少ないところでは流れ型で、そのあとのき裂型の部分に比べると切りくずは大きくカールしている。このカールの仕方はすくい角により異なり、これによってすくい角 $\alpha=0^\circ$ の方が $\alpha=10^\circ$ より摩耗幅が大きいのである²⁾。一方、逃げ角 γ は、 γ が大きくなると先端角が小さくなり、流れ型の部分が長くなり摩耗幅が大きくなるのである。ところが切削速度が2900 m/minのときは樹脂のみの部分は、すべてき裂型でばらばらで樹脂とガラス繊維とがまざった層によって図7のようにつながっており、その状態は $\alpha=0^\circ$ と $\alpha=10^\circ$ では差はなくなっており、摩耗幅もその差がなくなったのであろう。

他方、逃げ面摩耗幅の場合は、切削速度の増加につれて増加している。この場合、すくい角 α による影響は少ないが、逃げ角 γ の変化に対しては γ の値が小さいほど逃げ面摩耗幅は大きくなり、すくい面摩耗幅や刃先後退量は γ の値が大きいほど摩耗量が大きくなるというまったく逆の傾向を示している。

ち、FRPの方はガラス繊維が単独で残り切削速度が増加するにつれてこの残留ガラス繊維の量が増すのに対し、FRPVCの方はガラス繊維と樹脂とがまざった状態で盛上がるためバイトとの接触の状態が異なりこの傾向が出たと考えられる。

3.2 刃先摩耗幅と切削速度との関係

図3、図4にすくい面および逃げ面刃先摩耗幅と切削速度との関係を示す。図3において、すくい面摩耗幅はすくい角 α の変化によって大きな影響を受ける。すなわち、すくい角 $\alpha=0^\circ$ のときは、切削速度の増加につれてすくい面摩耗幅は減少していくのに対してすくい角 $\alpha=10^\circ$ のときは、切削速度の増加につれてすくい面摩耗幅は増加している。しかし、高速域では両者ともほぼ同じ摩耗幅の値に近付いている。これは切りくずの形状変化によるものと考えられる(4章参照)。すなわち、切削速度が500 m/minのときは樹脂部のみの部分は、切込みの

これらをFRPのマット材の場合と比較すると、切削速度の変化に対してのすくい面摩擦幅の変化は、FRPに比べてFRPVCではすくい角の影響が大きくでている。この相違は、後述する(4章)ように、切削によって生じる切りくず形状の差によるものと考えられる。すなわち、FRPの場合はき裂型で切りくずとバイトすくい面との接触長さは短い。FRPVCの場合は連続型で切りくずがバイトのすくい面で摩擦するためである。逃げ面摩擦幅はFRPの場合と同様に切削速度の増加に対して増加するが、逃げ角 γ に対してはまったく逆の傾向を示している。これは母材の機械的性質の相違、すなわち、FRPVCの方が逃げ角 γ が小さいほど被削材とバイト逃げ面とが接触しやすいところからきているのであろう。

4. 切りくず

図5にFRPとFRPVCとを切削したときに生じた切りくずを示す。図より明らかなようにFRPの切りくずはき裂型でガラス繊維と樹脂とが分離した微細化した切りくずであるが、FRPVCは連続型の切りくずである。この切りくずの形状はバイト形状が一定であれば、切削速度が遅い場合はほぼ長方形の切削始めにカールをした形状をしているが、切削速度が速くなるにつれて切りくず中のガラス繊維の部分でき裂が生じている。また、切りくずの色は低速ではガラス繊維と母材とがはく離して白色を呈しているのに対して、切削速度が速くなるに従って切削熱のため母材が変色して茶色になっていく。特にガラス繊維を含んだ部分では濃い茶かっ色になっている。これは切削によって発生した熱の大部分はバイトに伝達されるが、FRPVCに伝達される熱量は、ガラス繊維(熱伝導率約 $2.5 \times 10^{-3} \text{ cal/s cm}^{\circ}\text{C}$)と母材である硬質塩化ビニル(熱伝導率約 $2.6 \times 10^{-4} \text{ cal/s cm}^{\circ}\text{C}$)との熱伝導率の相違により⁸⁾、ガラス繊維は硬質塩化ビニルの約10倍の熱量を伝導するが、短繊維であるため発生熱はガラス繊維内に蓄積される形となり、樹脂より高温になりガラス繊維に接している樹脂が変色するのである。また切削速度が速くなるにつれて切りくずは繊維方向のき裂を生じているが、これは切削熱の影響による被削材の劣化とガラス繊維と樹脂の熱膨張率の相違によるものと考えられる。またフライス型の切削では切込みが

図5 切りくず形状の相違

変化するために、すくい角の影響は切りくずにそれほど顕著に現れてこない。切りくずもガラス繊維の含まれている部分は樹脂のみを切削したように流れ型とかき裂型というような差はなく、工具と被削材との摩擦によって発生する切削熱の影響の方が大きい。切りくずの焼けに対してはバイトの逃げ角 γ が小さいほど切削後の切りくずは濃い茶かっ色になってくる。これは逃げ角 γ が小さいほどバイト刃先と被削材との接触長さが大きく、ここで発生する摩擦熱が大きいためであらう。これについては図6に示したバイト逃げ面の切削後の付着物の状態から推測することができる。図において、上部の長方形の部分が逃げ面で実際にFRPVCを切削している切れ刃は左半分である。逃げ角 γ が 15° 、 25° の場合は、低速のときガラス繊維と樹脂との混合された白い切粉が付着しており、切削速度が速くなるにつれてこの白い切粉が焼けて濃い茶かっ色に変色して付着しているがこれらは容易にとり除ける。これに対して逃げ角 γ が 2° 、 5° の場合は、低速では付着物がみられないが、切削速度が速くなるにつれてFRPVCの母材である樹脂が溶着しており、その量は切削速度が速くなるにつれて多くなっている。これより逃げ角 γ が小さいときは、逃げ面における摩擦熱が多くなってこのような現象が現れたと考えられる。

図5で示したように、この実験で使用したFRPVCは、図において黒くみえる透明な部分の硬質塩化ビニル樹脂のみの層と白くみえる部分のガラス繊維と硬質塩化ビニル樹脂とのまざった層との2層からなりたっている。また図7(a)に示すように切削方法がフライス型の回転刃による切削で、バイトの被削材に対する切込みは一定ではない。そのため硬質塩化ビニル樹脂のみの部分は、切削開始の所では切込みが少ないため流れ型であるのに対

図6 切削後のバイト逃げ面付着物

図7 切りくずの詳細図

して、切削の終り付近では切込みが大きくなるためせん断型となって白く見える。図7(a)の幾何学的な切りくずをさらに四つの部分にわけて拡大したのが図7(b)である。切りくずは流れ型からせん断型へと変化しており、切削速度が増加するにつれてこのせん断型になる切込み厚さはうすい方へと移行しているのがわかる。一方バイト形状から考えると、すくい角 $\alpha=10^\circ$ の方が $\alpha=0^\circ$ より流れ型からせん断型に変化する切込み厚さは厚い。また逃げ角 γ は大きい方が流れ型からせん断型に変化する切込み厚さは厚い。そして切りくずの形に影響を与えるのは、切削速度、すくい角 α 、そして逃げ角 γ の順である。

5. 試料表面

図8は切削後の試料表面に対して水平方向と約10度の角度をなす上の方から光を当てて写した顕微鏡写真で、試料表面のおうとつが明確

に表されている。図において盛上っている部分がガラス繊維と樹脂とがまざっているところである。これは前報のガラス繊維強化ポリエステル樹脂のときに述べたように、熱硬化性樹脂の場合は、ガラス繊維は完全には切断されず、樹脂とガラス繊維とがはく離して繊維のみが表面上にけぼとして残るが、熱可塑性樹脂の場合は樹脂が切削熱によって溶けて切断されないガラス繊維を包みこむようになり、ガラス繊維と樹脂とがまざりあった部分が樹脂のみの部分より盛上る。この盛上っている部分は切削速度

図10 切削後の試料表面の形状

が 500 m/min ではあまり存在しないが、 1400 m/min 以上になると大きく現れている。それと同時に樹脂のみの部分も切削速度が 500 m/min のときはおうとつの小さい切削条痕を示しているが、切削速度が増加するにつれてこのおうとつが大きくなっている。一方、バイト形状からみると、すくい角 α はあまり切削後の表面形状には影響を与えないのに対して、逃げ角 γ は小さいほど試料表面のおうとつは大きい。

次に図9は図8とは異なり、切削後の試料表面に対して真上から光を当てて表面上の模様を写した顕微鏡写真である。この図において黒くみえるところが前述のガラス繊維と樹脂とがまざって盛上っている部分で、白く見えるところが樹脂のみの部分である。切削速度が 500 m/min のときは樹脂のみの部分にびびり模様が生じており、そのびびりからびびりへの間隔は 3 mm でバイトの送りと一致している。このびびり模様はバイト刃先と被削材との摩擦振動によって発生したと考えられる。すなわち、フライス型の切削であるため、バイトがくいこむさいにラッピングし、そのためこのびびり模様が現れ、くいこむにつれて減衰する。切削速度が 1400 m/min になるとこのびびり模様が小さくなり、バイト刃先で擦過された流れ模様が現れている。そして、さらに切削速度が増すとこのびびり模様はまったく消えて流れ模様が大きくなっていく。これらの観察結果から図9にみられるびびり模様は流れ模様ほど表面上のおうとつは大きくない。また、樹脂のみの部分の流れ模様は切削速度が遅

図11 表面あらさと切削速度との関係

く、逃げ角が大きいときには小さく、切削速度が速く、逃げ角が小さいときに大きいのは、切削時に発生する切削熱によるものと考えられる。すなわち、切削速度が速くなるにつれて切削温度が高くなるが、逃げ角が小さいほどより多くの熱が発生する。このため切削後の被削材表面は軟化し表面の流れ模様が大きくなる。

6. 表面あらさ

図10(a)に表面あらさ計によって測定した試料表面あらさの一例を示す。ここで大きな山となっているのはガラス繊維と樹脂とのまざった部分で、平らな部分は樹脂のみである。このように試料表面のあらさは二つの層からなりたっているのので、あらさを表示する場合、それぞれの部分についてのあらさを考えるのも一つの方法はあるが、ここではFRPの場合と同様に両者を合わせて考えることにする。図10(b)に示すようにFRPの場合は切削方向、すなわちY-Y方向に切削されずに切り残されたガラス繊維束が存在し、Y-Y方向に測定すれば表面上のあらさが完全に把握できたのに対して、FRPVCの場合はY-Y方向に測定するとガラス繊維と樹脂のまざっている層、または樹脂のみの層を測定しているだけになるので、バイトの送りによる幾何学的なあらさを加味するためにX-X方向に対して $\pi/4$ の角度をなす方向に測定して表面あらさとした。図11にこのようにして求めた表面あらさ(最大高さ: R_{max})と切削速度との関係を示す。図のようにFRPVCの表面あらさは切削速度が増加するにつれて表面あらさ R_{max} が増加するが、切削速度が 1400 m/min 以上になるとその増加割合は急激に減少して各バイト形状に対してある定常値に到達

するように思われる。この変化は切削後表面上に盛上がっているガラス繊維と樹脂とのまざった部分によるもので、低速ではガラス繊維の一部がFRPのように樹脂から突出しているが、高速になるにつれて切削熱によって母材の樹脂が軟化してガラス繊維を包みこみ、あらさの変化が少なくなってくる。すくい角 α の影響は比較的少ないが、逃げ角 γ が小さいほど図6に示した刃先への溶着現象によって表面が悪くなっている。また切削速度が1400 m/min以上では、図10に示したように試料表面では変形温度⁴⁾以上になってそれ以後のあらさの変化が少なくなったと思われる。

7. 結 論

今回切削したFRPVCと前回のFRPの切削結果より推察すると、ガラス繊維強化プラスチックを切削した場合、切削によって発生する切りくずの形状や切削後の試料表面の形状などに対しては複合材の母材であるプラスチックの性質による影響が大きく、バイト刃先の摩耗や切削中に発生する切削熱などに対しては複合材の基材であるガラス繊維による影響が大きいことがわかった。次にFRPVCを超硬工具で高速切削(500~2900 m/min)した結果を要約すると次のようになる。

- (1) 刃先後退量は切削速度が増加するにつれて増加し、FRPの場合とほぼ同じ傾向を示し、FRPの場合の約70%の値を示す。

- (2) 刃先摩耗幅は母材の樹脂の影響を受けてFRPとは異なった傾向を示す。すくい面摩耗幅は低速域(500~1400 m/min)ではすくい角 α によって大きく左右されるが、高速域(2200~2900 m/min)ではある一定値に近づく。また逃げ面摩耗幅は切削速度の増加につれて増加し、逃げ角 α の小さい方が摩耗幅は大きい。
- (3) 切りくずの形状は連続型で、切削速度が高くなるにつれてガラス繊維を含んでいる部分に焼けが目立ち、き裂を生じている。
- (4) 切削後の試料表面はFRPの場合のようなガラス繊維束のみが切り残されて存在するということではなく、ガラス繊維は母材の硬質塩化ビニル樹脂に包みこまれた状態で盛上っている。そして、この試料表面のあらさは切削速度が1400 m/minまでは急激に大きくなり、その後は各条件ごとにある定常値に近づいていくように思われる。

参 考 文 献

- 1) 井上久弘, 井戸 守: 強化プラスチックの切削加工に関する研究, 精密機械, 39, 3 (1973) 280.
- 2) 小林 昭: 硬質ビニル樹脂の切削機構, プラスチック, 7, 5 (1956) 18.
- 3) 村橋俊介, 小田良平, 井本 稔: プラスチックハンドブック, 朝倉書店 (1969).
- 4) 小林 昭: プラスチックの機械加工, 日刊工業新聞社 (1966).