

超音波振動によるFRP切削の基礎研究
(樹脂の切削抵抗および仕上げ面粗さ)

中 津 正 志*・池 田 慎 一**・田 頭 孝 介***

Basic Research of the Cutting of FRP Using Ultrasonic Vibration
- Cutting Resistance and Surface Roughness of the resin -

Masashi NAKATSU, Shin-ichi IKEDA, Kohsuke TAGASHIRA

要 旨

FRPの超音波振動切削の基礎研究として繊維を含まない不飽和ポリエステル樹脂の切削実験を行い、次の結果が得られた。(1)超音波振動切削は、切削抵抗及び仕上げ面粗さが減少し効果的な切削方法である。(2)ピッチング角による抵抗値や粗さの変化は少なかった(3)オルソフタル酸系樹脂はイソフタル酸系樹脂よりも切削抵抗が低い。(4)切削厚さによる切削抵抗については寸法効果がみられた。

Abstract

For the basic research of the cutting of FRP (Fiber Reinforced Plastic) under the ultrasonic vibration, as a first step, cutting experiment were made to the resin of the unsaturated polyester without fiber. The following results were observed (1) Ultrasonic vibration cutting is effective to cut the resin, since the resistance is decrease and surface roughness is reduced. (2) There is not much change of the cutting resistance and surface roughness when the pitching angle change. (3) Cutting resistance of the resin of the olsophthalic acid is lower than that of the isophthalic acid. (4) With regard to the cutting resistance of the cutting-thickness change, it was recognized that there was the size-effect.

Key Words: Unsaturated polyester resin , Ultrasonic Vibration, Cutting Resistance, Surface roughness , Pitching angle

1. 緒 言

近年、FRPの需要がますます多くなり¹⁾、二次加工として切削加工を必要とすることが多くなってきた。しかし、FRPは、物性の異なる素材からなるために、工具磨耗、バリ、ケバ立ち、層間剥離が発生しやすく、被削性が非常に悪い²⁾。筆者等は工具を超音波振動させ、その衝撃による微少破壊による切削特性について研究を進めている³⁾⁴⁾⁵⁾。

本報では、FRP超音波振動切削の基礎研究として、繊維を含まないマトリクス単体（樹脂）の超音波振動切削を、種々の加工条件下で行い、切削抵抗、仕上げ面粗さについて調べたので報告する。

2. 実験方法

Table.1に加工条件を示す。被削材の樹脂 (Table.2)はJIS K6919 オルソフタル酸系 (UP-G 相当品)とイソフタル酸系 (UP-CE 相当品)である。試験片の大きさは50×50×15tで、硬化時、内部蓄熱によるクラックの発生を避けるため、3回にわけて積層して作成した。硬化剤はパーメック(N)日本油脂製を使用した。超音波振動発生装置 (多賀電気製 SB-150)は最大出力120W、発振周波数19.5±1.5KHz、両振幅30μm、臨界切削速度⁶⁾1.84m/s (110.2m/min)である。

振動子は、製作したジグによってマシニングセンターに取り付け、テーブルの送りによる準二次元切削をおこなった。振動数は切削痕から逆算したが、樹脂の場合、仕上げ面に振動痕が残らないためアルミを用いた。計算した結果、約18.9KHzであり正常発振範囲内にあることがわかった。

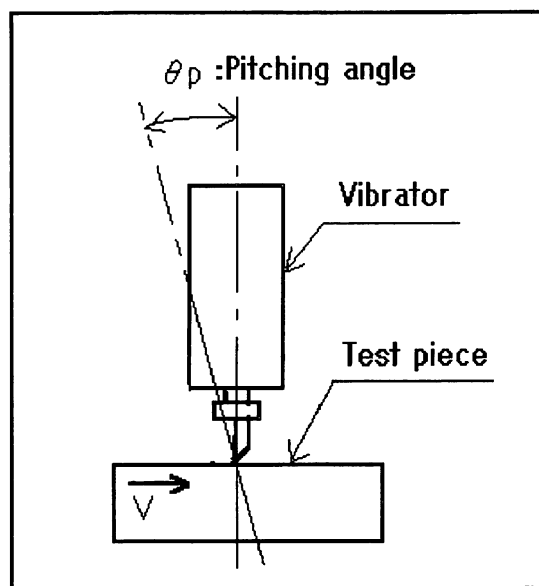
* 助教授 機械工学科
** 助 手 機械工学科
*** 教 授 室蘭工業大学

Table. 1 Cutting Conditions of Polyester resin

Material	JIS K 6919 UP-G JIS K 6919 UP-CE
Tool material	Tungsten carbide K10
Rake angle	0 (deg)
Relief angle	8 (deg)
Cutting speed	500~4000, mm/min
Cutting thickness	0.05, 0.1, 0.15 mm
Cutting width	2 (mm)
Coolant	dry
Fiber angle	90 (deg)
Frequency	19.5 + 1.5 (KHz)
Pitching angle	-12, -8, -4, 0, (deg)
Amplitude	30 ^{P-P} (μm)

Table. 2 Characteristics of Unsaturated polyester resin

contents	UP-G	UP-CE
Relative density	1.19~1.23	1.17~1.19
Percentage of contraction	6.0~9.0	7.0~9.0
Temperature of heat deformation	65~120	90~130
Rockwell hardness	95~110	100~110
Bacal hardness	40~50	45~50
Bending strength MPa	100~160	110~150
Tensile strength MPa	55~80	65~75
Elongation percentage %	1.5~2.5	1.5~2.5
Compression strength MPa	55~80	65~75
Impact strength	0.15~0.30	0.16~0.30
Heat conductivity	16.7	16.7

Fig. 1 Pitching angle θ_p

ピッチング角 (θ_p) は工具シャンク中心線の前後方向の傾きである。Fig.1の θ_p がピッチング角で、既報⁴⁾の論文ではプラスの角度表示を採用していたが、実すくい角との関係から逆符号となってしまうのでマイナス表示に変更した。従ってすくい角0度、ピッチング角-8度の場合、実すくい角は-8度となる。切削抵抗は佐藤マシンナリー製AST式フライス工具動力計 (AST-ZMM)、粗さは小坂製万能形状測定器により中心線平均粗さ (JIS B 0601 Ra) を測定した。

3. 相対切削速度

工具と工作物の相対速度は以下の方法で計算される。

工具は式(1)から(3)に従って振動していると考えられる。ここで t は時間、 f は振動数 (19.5KHz)、 A は片振幅 (15 μm) である。

$$\text{角速度 } \omega = 2\pi f \quad (1)$$

$$\text{変位 } Y = A \sin \omega t \quad (2)$$

$$\text{速度 } V = A \omega \cos \omega t \quad (3)$$

実験条件の切削速度を v とすると $v < V$ の時、工具が工作物から離脱する。この時の時間 t_0 は、

$$t_0 = (1/\omega) \cos^{-1}(v/A\omega) \quad (4)$$

再び工作物と工具が接触し切削し始める時間を t_1 とすると、工作物と工具の位置は同一であるから Y_1 とすると、各々次式で表される。

$$Y_1 = Y_0 - v(t_1 - t_0) \quad (5)$$

$$Y_1 = A \sin \omega t_1 \quad (6)$$

(5)、(6)式を使って収束計算をし、 t_1 を求める。

この時の工具の速度 V_1 は

$$V_1 = A \omega \cos \omega t_1 \quad (7)$$

よって、相対切削速度 V_r は

$$V_r = V_1 - v \quad (8)$$

4. 実験結果及び考察

4. 1 切削速度

Fig.2は切削速度による切削抵抗の変化を示したものである。FHは切削方向分力（主分力）、

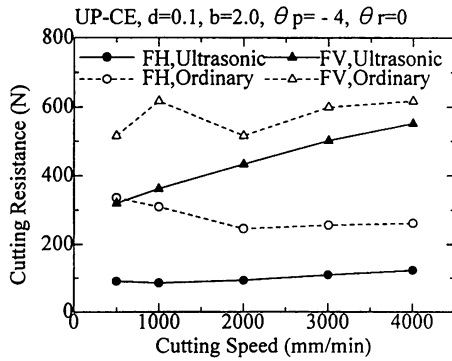


Fig. 2 Effect of Cutting speed
(Cutting resistance)

F Vは切削方向に垂直な分力（背分力）である。主分力は振動切削の場合、この切削速度範囲では若干増加気味であるが大きな変化はなかった。通常切削の主分力は2000mm/min まで減少しているがあとは振動の場合と同じように若干上昇している。全体として速度変化による主分力は大きな変化がなかった。背分力は速度増加により上昇している。特に振動有りの場合は、320N から551N まで直線的に増加している。これは速度の増加にしたがって工具逃げ面でのパニシングがより大きく発生するためと思われる。背分力の振動なしで、低速（1000mm/min 以下）では不規則な変化を示していた。

通常の二次元切削の場合F Hの方が抵抗値が高いが、実験では逆にF Vが非常に大きな値を示していた。本実験の場合、振動有りの場合F vはF Hの3.58～4.64倍、振動なしで1.54～2.36倍であった。これは切削厚さが小さいために切削と言うより刃先や逃げ面ですりつぶすような状態（パニシング）となるため背分力が大きくなったと思われる。振動有りの場合その差がさらに大きいのは振動によって、主分力は衝撃力でより少ない力で材料を破壊するのに対し、背分力は振動による材料からの反力が加わるためと考えられる。

Fig.3は切削速度と仕上げ面粗さの関係を示す。速度の増加によって粗さは向上しているが、これは速度効果により材料が破壊されやすくなり、スムーズな切削状態に移行するためと思われる。

4. 2 超音波振動の有無

超音波振動による切削抵抗は通常切削よりも、はっきりと低い値 (Fig.2) を示し、主分力 (F H) の場合、振動無しの切削抵抗値 (100%) に比べ、

平均で36.7 %、最小で27.6 %にまで減少していた。同じく背分力 (F V) は平均75.7%、最小58.7%であり、振動による切削力の低下効果が認められた。これは他の研究報告²⁾⁷⁾⁸⁾とも符合する。主分力の方が低下が著しいのは、切削方向に一致する超音波振動の衝撃力で工具すくい面前方の材料が微少破壊されるため切削抵抗が減少したと考えられる。(8)式で相対切削速度を計算したところ、本実験での最低の切削速度条件 $v = 500\text{mm/min}$ (0.5m/min) の場合26.1m/min であった。つまり振動無しの場合の52倍もの速度で断続切削していることがわかる。この衝撃効果が切削力を低下させていると思われる。

超音波振動下の切削の場合、切削速度変化による抵抗値は一樣な変化をし、バラツキが少なく安定している。これは衝撃破壊による切削現象がその加工条件下で安定して再現されていることを示している。相対切削速度は26.1m/min から70.4m/min ($v = 4000\text{mm/min}$ 時) に変化している。主分力の場合、衝撃力の増加による抵抗の低下と、実験速度増加による切削量の増加による抵抗の増加が打ち消し合ってほぼ一定の値となっていた。振動無しの場合の主分力は速度の増加にしたがって抵抗値は下がっていた。これは切削速度の増加率（8倍）が振動切削の相対切削速度の増加率（2.7倍）より大きいので速度効果がより大きく出たためと思われる。

仕上げ面粗さ (Fig.3) も、UP-CE で振動無しの粗さ値の平均 50.9%、最小33.3 %、UP-G で同平均 52.6%、最小 46.2%にまで減少していた。これは超音波振動による材料の微少破壊による仕上げ面の向上と、振動による工具逃げ面の仕上げ面へのパニシングによる粗さの向上と考えられる。

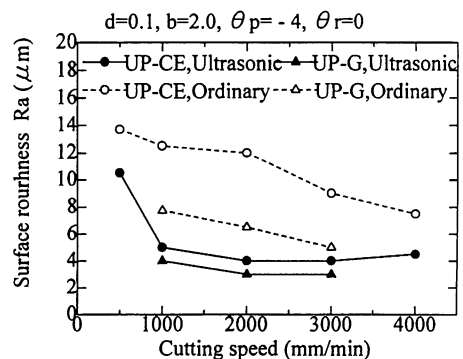


Fig. 3 Effect of Cutting speed
(Surface roughness)

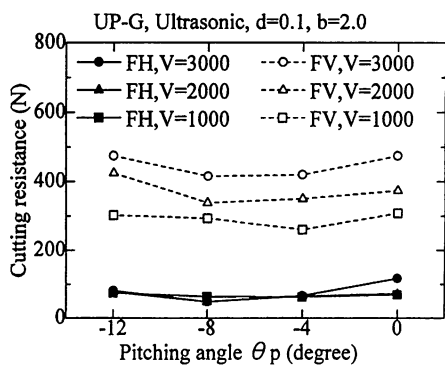


Fig. 4 Effect of Pitching angle
(Cutting resistance)

4. 3 ピッチング角

Fig.1に示すピッチング角 (θ_p) を変化させた時の切削抵抗値を Fig.4に示す。全体として大きな変化はないが、 -8° から -4° 付近の切削抵抗値が若干低いことが認められる。これは -12° の時工具のすくい面の振動方向が材料内部に向かうため抵抗値が上がり、 0° の場合は逆に工具逃げ面が材料の内部に向かい、結果的に抵抗値が増し、振動方向が切削方向と一致する -4° 付近が低くなったものと考えられる。

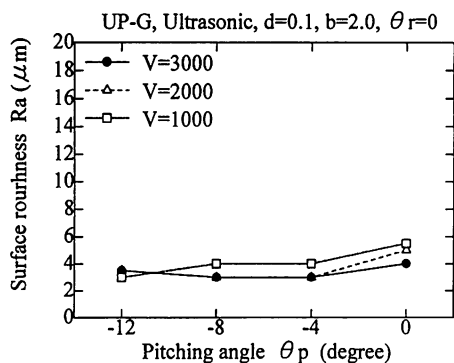


Fig. 5 Effect of Pitching angle
(Surface roughness)

粗さ (Fig.5) は別報⁴⁾の場合と大きく異なりピッチング角による粗さの変化は少なく、 0° に近づくにつれわずかに増加している程度である。別報の場合、工具、切削速度が異なる上に粗さは最大高さで表しており、計測値のばらつきが大きかったが、本報の場合、中心線平均粗さを用いているので変動が少ない ($3.0 \sim 5.5 \mu\text{m}$) 上に、切削速度の設定条件が低いために大きな違いが現れなかったものと思われる。

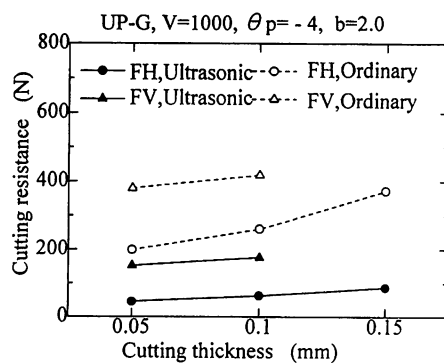


Fig. 6 Effect of Cutting thickness
(Cutting resistance)

4. 4 切削厚さ

切削厚さによる抵抗値の変化を Fig.6に示す。切削厚さの増加により抵抗値は上昇しており通常の金属切削の場合と同様な変化を示している。しかしその増加はあまり大きくない、主分力の比切削抵抗を調べてみると、超音波振動の場合、 $453, 312, 289 \text{ N/mm}^2$, 振動無しの場合, $1515, 875 \text{ N/mm}^2$ と急激に低下している。これは工具刃先の寸法効果により、切削厚さの増加がそのまま切削抵抗の増加に繋がらなかったものと考えられる。

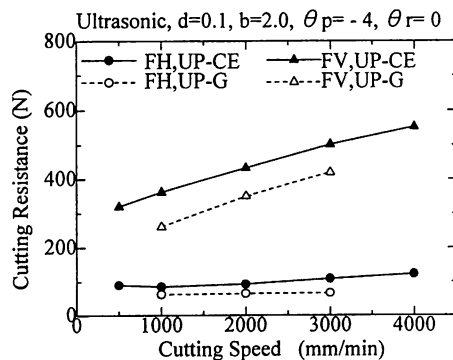


Fig.7 Effect of Resin material
(Cutting resistance)

4. 5 樹脂材料

2つ樹脂材料についての切削抵抗を、一部 Fig.2と重複するが Fig.7に示す。両材種とも切削速度による変化の傾向はよく一致しており、直線的に増加している。樹脂の特性は Table.2⁹⁾ に示すとうり、機械的性質について、オルソ系 (UP-G) とイソ系 (UP-CE) との明瞭な違いは見あたらない。しかし、一般にオルソ系はクラックがはいりやすいこと、イソ系は強度 (伸び) がオルソ系より優れること、実際の硬度を測定した

ところ⁴⁾、オルソ系、平均Hv 26.2、イソ系Hv 19.3でありオルソ系の硬度が高かったことから考察すると、オルソ系は硬度が高くて脆いので超音波による衝撃で破壊されやすく、それがイソ系樹脂の切削抵抗より低い値を示している原因と思われる。

5. 結 言

不飽和ポリエステル樹脂を超音波振動切削し、実験の範囲内において次の結果が得られた。

- (1) 超音波振動により切削抵抗は大幅に低減され、主分力の場合、振動無しの切削抵抗値に比べ、平均で36.7%、背分力では平均75.7%、であった。
- (2) 切削抵抗は通常の金属切削と異なり主分力より背分力が大きく、超音波切削時で平均4.3倍、通常切削で約2.1倍となった。
- (3) ピッチング角による切削抵抗の変化は少ないが、 -8° から -4° 付近で最小となった。
- (4) 切削厚さによって抵抗値は上昇するが、切削面積の増加率より低く、比切削抵抗は減少し、寸法効果が見られた。
- (5) オルソフタル酸系樹脂はイソフタル酸系樹脂に比べ切削抵抗は低い。
- (6) 超音波振動切削下での仕上げ面粗さは低く、イソフタル酸系樹脂で振動無しの粗さ値の平均50.9%、オルソフタル酸系樹脂UP-Gで同平均52.9%に減り、仕上げ面の改善が認められた。
- (7) ピッチング角による仕上げ面粗さの変化は少なかった。

本研究は（財）道央テクノポリス開発機構の高度技術開発委託事業の援助によるところが大であり、ここに記して感謝申し上げます。

また研究にあたり試料を提供して頂いた興和工業株式会社の関係各位に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 福田博，複合材料の開発動向と課題，J S M E，Vol.96，NO.893
- 2) 飯島昇，FRPの振動切削加工，機械と工具，VOL39，NO1，P26（1988）
- 3) 池田慎一，中津正志，田頭孝介，難削材の超音波振動切削，日本機械学会北海道支部講演概要集，NO952-1，P87（1995）
- 4) 中津正志，池田慎一，田頭孝介，不飽和ポリエステル樹脂の超音波振動切削，苫小牧高専紀要，第31号，P25（1996）
- 5) 池田慎一，中津正志，田頭孝介，GFRPの超音波振動切削，苫小牧高専紀要，第31号，P31（1996）
- 6) 隈部淳一郎，精密加工振動切削－基礎と応用－，実教出版，1979
- 7) 竹山，飯島他，FRPの超音波振動切削機構に関する研究，精密工学会秋季大会学術講演会論文集，P599（1986）
- 8) 飯島，竹山，GFRPの振動切削加工，合成樹脂，VOL.37，No.10，47（1991）
- 9) 植村益次，FRP構造設計便覧，強化プラスチック協会編，技法堂（1994）

（平成8年11月29日受理）

