機械式円振動付与スピンドルを用いた振動外周刃切断方式の加工特性に関する研究 Studies on Vibratory OD-Blade Slicing Characteristics using Mechanical Circular Vibration Spindle

正 畝田 道雄 (金沢工大) ○学 塚田 広昌 (金沢工大院)

正 石川 憲一 (金沢工大) 正 諏訪部 仁 (金沢工大)

Michio UNEDA, Kanazawa Institute of Technology, 7-1, Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa, 921-8501, Japan

Hiromasa TSUKADA, Graduate school of Kanazawa Institute of Technology

Ken-ichi ISHIKAWA, Kanazawa Institute of Technology

Hitoshi SUWABE, Kanazawa Institute of Technology

Key Words: Brittle Materials, OD-Blade, Vibratory Slicing

1. 緒 言

セラミックスをはじめとした硬脆材料の切断加工技術において、加工原理や装置が簡便であるという理由から、外周刃を用いた切断方式が一般的に用いられている。特に、現在においては切断長さがメートル単位長となる液晶ガラスなどに対する高効率・高精度切断技術が必要とされている¹⁾。外周刃方式の特徴として、薄刃を用いる加工であることからカーブロスが少ないことを利点とする反面、横剛性の低さによって、加工中に弾性変形を生じて加工精度や工具寿命が低下するという欠点がある。しかしながら、材料のスループットを向上させる観点から、より薄刃の外周刃を使用する必要があり、外周刃の弾性変形による切断効率・精度の低下を抑制することが課題である。

上記のような背景から、図1に示すような振動外周刃切断方式が、著者らによってこれまで検討されてきている²⁾³⁾。本方式は、外周刃側あるいは工作物側に振動を付与することによって外周刃の弾性変形を抑制するとともに、切断抵抗が減少するという利点を有している。それに伴って、加工精度が向上するのみならず、工具寿命が延長するといった顕著な効果も得られることが明らかにされている。本報告では、工作物の大きさに制約を受けず、理論的に最も効果が高い³⁾外周刃側に円振動を付与した場合について実験的に検討した結果について述べる。

2. 振動切断における切断抵抗

無振動切断並びに、鉛直方向振動や円振動を用いた各々の振動切断においては、八角リング式動力計を用いて切断抵抗を計測した。切断抵抗は、外周刃と工作物が接触する面積が最大となる範囲で得られる切断抵抗の平均値として定義する。主な実験条件を表1に示すとともに、実験結果を図2に示す。この結果から、切断送り速度の増加に伴って切断抵抗が直線的に増加し、無振動切断に対して、円振動及び鉛直方向振動を付与した場合には、切断抵抗が減少することが分かる。

振動切断における切断抵抗の減少効果は、無振動切断での工具と工作物間の接触による抵抗を接触抵抗 F_c として定義することで説明できる。振動切断の場合、外周刃と工作物は接触と分離を繰り返す。この接触、分離の割合を与えるパラメータである接触率 $\eta(\dot{X})$ が接触抵抗 F_c に関係するため、振動切断における平均切断抵抗 $F_m(\dot{X})$ は切断送り速度を $\dot{X}$ 、増加率を ϕ とすると次のように表される。

$$\overline{F_m}(\dot{X}) = \phi \cdot \dot{X} + F_c \cdot \eta(\dot{X}) \quad (1)$$

この式から、振動切断を行うことによって、接触率 $\eta(\dot{X})$ の減少に伴って接触抵抗が減少し、平均切断抵抗 $F_m(\dot{X})$ が減少したと考えられる。また、実験結果から、円振動に対して鉛直方向振動の切断抵抗が若干減少している。このことは図2の実験

条件下においては、図3で示したように円振動の振幅が $100\mu\text{m}$ の場合に接触率が 11.5%であるのに対し、鉛直方向振動の振幅が $170\mu\text{m}$ の場合に 9.15%であることが原因と考えられる。図3に示す振動振幅と接触率の関係から、円振動と鉛直方向振動の場合、ほとんど同様な傾向を示し、振幅の増加に伴って接触率が減少する。すなわち、図2の結果においては、振幅が大きく、接触率の小さい鉛直方向振動の場合の方が、円振動の場合と比

Fig.1 Schematic illustration of vibratory OD-Blade slicing

Table1 Main experimental conditions

OD-Blade size	$\phi 125 \times 1 \text{ mm}^2$
Slicing depth	4 mm
Applied frequency	0, 10 Hz
Workpiece	Soda glass, $50 \times 60 \times 5$
Slicing feed velocity	18, 42, 60, 78, 102, 120 mm/min
Applied amplitude	Circular vibration: $100\mu\text{m}$, Z-axis vibration: $170\mu\text{m}$
Number of OD-blade rotation	5000 rpm
Slicing system	Down-cut

Fig.2 Relationship between slicing force and slicing feed velocity

Fig.3 Relationship between contact ratio and applied vibration amplitude

較して切断抵抗が僅かに減少したと考えられる。

一方、本実験において、接触率は切断送り速度をパラメータとしたものである。そこで、図 2 中に接触率と切断送り速度の関係から求めた振動切断における平均切断抵抗の理論曲線を点線で示した。この結果から、振動切断の切断抵抗(実験値)は、理論曲線に対して、ある程度の傾向の一致が見られるが、傾きに差が生じていることが分かる。この原因として、振動切断の理論曲線は、無振動切断の近似曲線を基に導いているが、外周刃の弾性変形が及ぼす影響については考慮していないことが原因と考えられる。すなわち、無振動切断において、外周刃の弾性変形によって切断抵抗が増加したため、振動切断の理論曲線に影響を及ぼしたと考えられる。しかし、外周刃切断方式の一般的な切断送り速度として用いられる 60mm/min 付近では、理論と一致しているため、本理論解析手法は有効であると考えられる。

3. 振動切断における切断面のうねり形状の変化

振動切断における切断面のうねりについて実験的に検討した。測定には切断片を作成し、触針式表面形状測定器(株式会社東京精密製)を用いて図 4 に示すような方法で測定した。

図 5(a)に無振動切断における切断面のうねり、図 5(b)に振動

Fig.4 Illustration of measurement method of waviness of sliced surface

(a) Non-vibration slicing (b) Vibration slicing
Fig.5 Waviness profiles of sliced surface

Fig.6 Dispersion of maximum waviness of sliced surface

Fig.7 Sound spectrum

切断における切断面のうねりの測定結果を示す。これらの結果から、切断面のうねり形状は、無振動切断、振動切断の双方が途中で湾曲している。これは外周刃が工作物に接触した場合に弾性変形を生じ、その状態を保持したまま加工が進行することによって、切断送り方向に対して切断溝方向が傾斜したことによって生じるものと考えられる。さらに、切断終了付近で外周刃が工作物から離れる過程において弾性変形が元に戻ることによって湾曲した形状になったと考えられる。また、無振動切断と比較して振動切断の場合に切断面のうねりが減少していることがわかる。振動切断において、これまでの理論的・実験的検討から、外周刃と工作物が接触と分離を繰り返すことによって、外周刃の弾性変形が抑制される(原点復帰効果⁴⁾)ことがわかっている。つまり、外周刃に振動を付与したことによって弾性変形が抑制され、切断面のうねりが減少したものと考えられる。次に、図 6 に 1 回の切断で作成される切断面のうねりの最大値を切断面最大うねりとし、その平均値とバラツキを示した。この結果から振動切断は、無振動切断と比較して切断面のうねりの最大値のバラツキが小さいことが分かる。すなわち、振動切断によって、無振動切断と比較して切断面の形状が安定すると考えられる。

4. 切断騒音の評価

外周刃切断を行う場合、高速で回転する外周刃や、加工部から発生される騒音は、作業環境の悪化をもたらす。そこで、無振動切断、並びに振動切断の加工中の騒音を定量化することによって、振動付与の効果を検証した。実験は、普通騒音計を外周刃側面に向けて設置して行った。これを用いて、実験装置から発生した騒音を A 特性音圧レベル L_{pA} として測定した。図 7 に、モータ音、無振動切断中の騒音、振動切断中の騒音について、FFT 解析した A 特性音圧レベル L_{pA} を示す。この結果から、無振動切断と振動切断の L_{pA} を比較した場合、ほとんど波形が一致していることが分かる。また、無振動切断、並びに振動切断の L_{pA} とモータ音の L_{pA} を比較した場合、4000Hz から 8000Hz の範囲においてモータ音の L_{pA} が減少していることが分かる。これらのことから、切断によって発生する騒音は 4000Hz から 8000Hz の範囲に存在し、振動切断の騒音は無振動切断と変わらないレベルであることから、たとえ振動切断を行ったとしても外周刃や加工部から発生する騒音が作業環境に及ぼす影響は無いと考えられる。加えて騒音スペクトルが同一であることから、無振動切断と振動切断で加工機構は変わらないと考えられる。

5. 結 言

本論文で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 円振動を用いた振動切断においても、切断抵抗が減少することを実験的に確認した。
- (2) 振動切断を用いることによって、切断面のうねりを減少させる効果がある。
- (3) 振動切断加工中の騒音は無振動切断と同等である。

参考文献

- 1) 三井鉱山マテリアル株式会社: MATERIALS, (2004).
- 2) 石川憲一, 諏訪部 仁, 榊田一也, 畠田道雄: 振動を利用した外周刃切断の加工特性に関する研究, 精密工学会誌, 62, 3 (1996) 438.
- 3) 石川憲一, 諏訪部 仁, 畠田道雄: 振動外周刃スライシング方式に関する研究 - 切断抵抗に及ぼす加振系の影響 -, 砥粒加工学会誌, 44, 5 (2000) 224.
- 4) 畠田道雄, 石川憲一, 諏訪部 仁: 振動外周刃スライシング方式におけるブレードの原点復帰効果に関する実験的研究, 精密工学会誌, 66, 7 (2000) 1115.
- 5) 畠田道雄, 塚田広昌, 石川憲一, 諏訪部 仁: 機械式円振動スピンドルを用いた振動外周刃切断方式の基本加工特性評価に関する研究, 2005 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2005).