切削残留応力に及ぼす切れ刃形状の影響* (切れ刃すくい角および逃げ面接触幅の影響)

水谷 秀行^{*1}, 若林 三記夫^{*2}

Influence of Cutting Edge Shape on Residual Stresses of Cut Surface (Effects of Rake Angle and Contact Width of Flank Face)

Hideyuki MIZUTANI^{*3} and Mikio WAKABAYASHI

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Chubu University,
1200 Matsumoto-cho, Kasugai-shi, Aichi, 487-8501 Japan

In order to obtain basic information on the improvement of the surface integrity of the machined surface, the influence of the rake angle of cutting edge and the contact width of flank face on the residual stress of cut surface was examined. The residual stress of the cut surface was measured by the X-ray diffraction method. The results obtained are as follows. The residual stress distribution of cut surface can be divided into three characteristic patterns roughly due to the change in the cutting edge shape. The residual stress of cut surface shifted to the compressive side due to the increase in the negative rake angle and the contact width of flank face. It found that the relative increase of the radial cutting force was strongly involved in the shifting to the compressive side of the residual stress of cut surface and the increase in the depth of residual stress layer.

Key Words: Cutting Edge Shape, Residual Stress, Cutting Force, Force Ratio, Cutting Phenomenon

1. 緒 言

機械加工面の評価に際しては、製品の機能・性能に影響を及ぼす粗さや形状精度などの幾何学的性状だけでなく、部品の耐久性および疲労寿命の観点から加工による硬さや残留応力状態の変化などを含めた表面特性の重要性が指摘されている⁽¹⁾。また、機械加工における諸現象と表面特性との関係については、研削を中心に多くの報告がみられる⁽²⁾⁽³⁾が、いまだに不明な点も多い。この加工表面特性は、切削速度や切込み量などの加工条件によっても変化するが、表面生成現象に直接関与する基本要因としては切れ刃形状の影響が極めて重要と考えられる。

そこで、本研究では切削工具諸元の決定や工具管理を適切に行うことにより加工面の残留応力状態を改善し、加工部品の品質向上を図ることを目的として、切削面の残留応力状態に及ぼす切れ刃すくい角および逃げ面接触幅の影響について調べた。すくい角については、一般の切削で使用される値から砥粒切れ刃のよ

うに大きな負のすくい角を有するものまでを対象とし、さらに、切込みに対して逃げ面接触幅が相当大きい場合など幅広く切れ刃形状の影響について検討した。

2. 実験装置および実験方法

切削面の残留応力測定に際しては、図1に示すように実験用旋盤の主軸面板に幅 15mm×長さ 65mm×厚さ 13.5mmの板材を回転円直径 D が 180mm となるように取り付け、所定の条件のもとで正面切削を行い試料とした。切削条件は、切削速度 $V=150\text{m/min}$ 、切込み量 $a=0.1\text{mm}$ 、工具送り量 $S=0.12\text{mm/rev}$ の乾式切削とした。

Fig.1 Experimental apparatus

* 原稿受付 2005 年 8 月 3 日。

^{*1} 正員、中部大学工学部(☎ 487-8501 春日井市松本町 1200)。

^{*2} 元：大阪市立大学工学研究科(☎ 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)。

E-mail: mizutani@isc.chubu.ac.jp

Fig. 2 Symbols used in metal cutting

図中の ϕ は加工方向と残留応力測定の際の $2\theta - \sin^2 \phi$ 線図との関係を示すために試料法線まわりに設定した値であり、工具逃げ面側を $\phi = 0^\circ$ とした。

切削工具は、超硬 P20 (先端頂角 90° 、ノーズ半径 0.4 mm) スローアウェーチップを図 2 に示す切れ刃諸元に従いすくい角 α 、逃げ面接触幅 w および逃げ角 γ を次のように研磨整形して用いた。すなわち、 $\alpha = -65^\circ \sim +15^\circ$ 、 $w = 0 \sim 1.0 \text{ mm}$ 、逃げ角 $\gamma = \rho$ である。

切削抵抗は、残留応力測定用試料の切削では 1 回あたりの切削時間が短いため、別途前述と同様の条件のもとで、直径 160 mm の丸棒を連続切削することにより求めた。その際、すくい角変化の影響を調べる実験では丸棒の外周面を、また、逃げ面接触幅の影響を調べる場合には、逃げ面と被削面との接触を確実にするため、端面を連続切削して正確な値を求めるようにした。切削抵抗の測定にはひずみゲージ方式の三分力

工具動力計を用いた。被削材料はいずれの場合も S55C 焼鈍材を使用した。

切削面の残留応力の測定は、X 線法 ($\theta - 2\theta$ 平行ビーム法) に非線形最小二乗法を適用して回折強度曲線をガウス曲線に近似する X 線応力測定法⁽⁴⁾ によって行った。測定データの取り込みおよび各種計算はパーソナルコンピュータを使用して行った。また、切削面深さ方向の残留応力分布は、切削面を順次腐食除去していくことにより求めた。

3. 実験結果およびその検討

3.1 残留応力分布に及ぼす切れ刃形状の影響

図 3 は、切削面の残留応力分布に及ぼす切れ刃すくい角 α の影響を調べるため、切削面を深さ y 方向に順次腐食除去していき、切削方向の残留応力 σ_1 とこ

Fig. 3 Influence of rake angle on residual stress distribution

Fig. 4 Influence of contact width of flank face on residual stress distribution

Fig. 5 Typical forms of residual stress distribution of cut surface

れに直交な方向の残留応力 σ_2 を測定した結果である。図より、 α が $+15^\circ$ から -50° までは同図(a)～(d)にみられるように、 α が負の方向に移行するにつれて表面近傍の σ_1 および σ_2 がともに圧縮（マイナス）側へ移行し、残留応力侵入深さも増大する。これらは σ_1 と σ_2 の値に差異はあるものの、分布形態はいずれも切削表面から深さ y 方向にかけて残留応力の値が一旦減少し、極小値（最大圧縮応力）を示した後に再び増大し、0MPa 付近に収束する典型的な切削型⁽⁵⁾の残留応力分布となった。しかし、すくい角 α が負の方向にさらに増大し、 $\alpha = -60^\circ$ になると、図3(e)に示すように、切削方向に対して直角方向の残留応力 σ_2 の分布形態に大きな変化が現れ、摩擦作用の強いソベニングによる仕上げ面⁽⁵⁾と酷似の残留応力分布となり、切削方向とこれに直交する方向とで分布形態に著しい異方性が生じた。そして、図3(f)の $\alpha = -65^\circ$ では切りくず生成が認められる切削領域でありながら切削面の残留応力 σ_1 および σ_2 はともにパニシ効果が強いと考えられる圧縮型の分布形態となった。

図4は、切削面の残留応力分布に及ぼす逃げ面接触幅 w の影響を示す。図中(a)は、比較を容易にするため前出図3(b)の $\alpha = 0^\circ$, $w = 0\text{mm}$ の結果を横軸スケールを変えて示したものであり、同図(b)および(c)の逃げ面接触幅を有する場合に比べて残留応力侵入深さが極めて浅いことがわかる。また、図4(b)の $w = 0.2\text{mm}$ の場合は、 σ_1 と σ_2 の分布形態に著しい異方性が生じ、前出図3(e)の場合と類似の分布形態となった。そし

て、 w の増加にともない、 σ_1 および σ_2 はさらに圧縮側へ移行し、 $w = 1.0\text{mm}$ では図4(c)に示すように σ_1 , σ_2 がともに強い圧縮型の分布形態となり、切削作用による材料除去のほか最終的な表面生成に際してはパニシ効果が強く作用していることが推察された。

図3および図4のような多くの測定結果を検証したところ、切削面の残留応力分布は、切れ刃すくい角および逃げ面接触幅の大きさによる表面生成現象の違いによって、図5に示す特徴的な3つの形態に分類できることがわかった。すなわち、切削方向の σ_1 とこれに直交する方向の σ_2 のそれぞれについてみると、残留応力分布の基本形態は図5のI型およびIII型の2種類に区分できる。しかし、切れ刃すくい角と逃げ面接触幅が広範囲に変化する過程では、残留応力分布に及ぼす切れ刃形状の影響は、切削方向とこれに直交な方向とで異なって現れるために、切削面の残留応力状態としては、図5のII型のような著しい異方性をもった分布形態を分類の一つに加える必要があると考えられる。

3.2 表面残留応力および侵入深さに及ぼす切れ刃形状の影響 図6および図7は、切削面の表面残留応力 $(\sigma_1)_s$ および $(\sigma_2)_s$ に及ぼす切れ刃形状の影響を調べた結果である。 $(\sigma_1)_s$, $(\sigma_2)_s$ はそれぞれ $y = 0\mu\text{m}$ にお

Fig. 6 Relationship between rake angle and residual stresses of cut surface

Fig. 7 Relationship between contact width of flank face and residual stresses of cut surface

Fig. 8 Relationship between rake angle and depth of residual stress layer

ける σ_1 および σ_2 の値を示す。まず、図6より、すくい角 α が負の方向に増大すると表面残留応力は圧縮側へ移行するが、その傾向は切削方向に対して直角な方向の残留応力 $(\sigma_2)_s$ がより顕著であるため、 $(\sigma_1)_s$ と $(\sigma_2)_s$ との差がより拡大する。

一方、逃げ面接触幅 w の影響としては、図7より、 w の増大によって表面残留応力は圧縮側へ移行するが、その際、 $(\sigma_1)_s$ に比べて $(\sigma_2)_s$ の変化がより大きいため、両者の差異が増大し、 $w = 0.4\text{mm}$ 以上ではその差は約 700MPa にも達する。したがって、一般に切削表面残留応力は $(\sigma_1)_s > (\sigma_2)_s$ の関係にあるが、すくい角および逃げ面接触幅の変化によってこれらが圧縮側に移行すると、これにともなって $(\sigma_1)_s$ と $(\sigma_2)_s$ との差異が著しく増大することがわかった。

図8および図9は、切削面の残留応力分布図からその侵入深さ y_s を求めて切れ刃形状との関係を示したものである。まず図8より、すくい角 α が $+15^\circ$ から -20° 付近までは y_s は $100\mu\text{m}$ 程度であり、その変化は少ないが、すくい角がさらに負の方向に増大すると残留応力侵入深さに急な増加傾向が現れる。

また、 w の影響について示した図9より、 $w = 0.8\text{mm}$

Fig. 9 Relationship between contact width of flank face and depth of residual stress layer

付近までは、 y_s は逃げ面接触幅 w の増加にほぼ比例して増大し、逃げ面接触幅 w と同程度の残留応力層が認められた。そして、逃げ面接触幅 w が 0.8mm を越えると侵入深さの増加率にやや減少傾向がみられるが、残留応力侵入深さに及ぼす逃げ面接触幅の影響は相当大的といえる。

3.3 切削残留応力と切削抵抗との関係

以上のような切削面の残留応力状態の変化に対応する切削抵抗および抵抗比（主分力 Q と背分力 P との比 Q/P ）の変化について調べた結果が図10～図13である。まず、図10は、すくい角 α に対する切削主分力 Q と背分力 P の変化を示す。図より、すくい角 α が正の方向に移行するのにともなって主分力 Q および背分力 P はともに減少する。 α が負の方向に大きい場合は、主分力 Q に比べて背分力 P が2倍以上大きな値を示すが、すくい角の正方向への移行による切削抵抗の減少率は背分力の方が大きいため、 $\alpha = -10^\circ$ 付近で主分力 Q と背分力 P の大小関係に逆転現象が生じる。このような切削抵抗の変化に対応する切削抵抗比 Q/P を求めると図11のようになり、切削抵抗比は1をはさんで広範囲に変化することがわかる。

Fig. 10 Influence of rake angle on cutting forces

Fig. 11 Relationship between rake angle and cutting force ratio

一方、切削抵抗および抵抗比に及ぼす逃げ面接触幅 w の影響を図 12 および図 13 に示す。図 12 より、主分力 Q および背分力 P はともに w の増加によって増大するが、 $w=0\text{mm}$ においてやや $Q>P$ であったものが w の増加とともに $Q<P$ の関係が生じ、その差が次第に拡大する。この関係をもとに切削抵抗比 Q/P を求めた結果が図 13 である。線図は $Q/P=1$ の直線と交差し、 w の増加とともに切削抵抗比は減少傾向を示す。これらの結果を総合すると、切れ刃形状の変化によって切削背分力が主分力に対して相対的に大きくなること、すなわち、切削抵抗比の減少に対応して切削面の残留応力状態は圧縮側へ移行し、残留応力侵入深さも増大することがわかった。

4. 結 言

切削残留応力の支配要因として切れ刃形状に着目し、すくい角および逃げ面接触幅の影響について検討した結果をまとめると以下になる。

- (1) 切削面の残留応力分布は、切れ刃すくい角および逃げ面接触幅の大小によって特徴的な 3 つの形態に分類できる。
- (2) 切れ刃形状が広範囲に変化する過程で、切削面の残留応力の分布形態は切削方向とこれに直角な方向とで著しい異方性を生じる。
- (3) 切削面の残留応力はすくい角が負の方向に、また逃げ面接触幅が増大するにつれて圧縮側へ移行するが、これにともなって切削方向とこれに直角な方向の残留応力の差異が大きくなる。
- (4) 切れ刃すくい角が負の領域でこれが増大すると残留応力侵入深さは急増する。また、逃げ面接触幅の増加にほぼ比例して侵入深さが増大する。
- (5) 切削残留応力の圧縮側への移行と侵入深さの増大には、切れ刃形状の変化によって生じる相対的な切削背分力増大の影響が大きく、これは切

Fig. 12 Influence of contact width of flank face on cutting forces

Fig. 13 Relationship between contact width of flank face and cutting force ratio

削抵抗比の減少に対応していることがわかった。

終わりに、中部大学学生として実験に協力された岩井佳則氏、梶川雅博氏、田口敏史氏、左右田裕大氏、藤谷賢明氏に深謝の意を表する。

文 献

- (1) Takazawa, K., Surface Integrity, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.55, No.10 (1989), pp. 1772-1777.
- (2) Wakabayashi, M. et al., Study on Residual Stresses in Uni-directional Machined Layers -Influences of Machining Methods-, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.49, No.9 (1983), pp. 1202-1208.
- (3) Matsuo, T., Residual Stresses of Ground Surfaces by Super-abrasive Wheel (in Japanese), *Science of Machine*, Vol.39, No.1 (1987), pp.45-50, Yokendo Ltd..
- (4) Wakabayashi, M. et al., X-ray Stress Measurement Approximating Diffraction Profile with Gaussian Curves by Using Method of Nonlinear Least Squares, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.39, No.441 (1990), pp. 620-625..
- (5) Yonetani, S., Occurrence of the Residual Stress and Countermeasure (in Japanese), (1975), p. 166, Yokendo Ltd..