エンドミルによるコーナ部加工に関する研究*

—コーナ部における切削機構の解析と新しい加工法—

岩部洋育** 藤井義也** 斎藤勝政*** 岸浪建史***

Study on Corner Cut by End Mill

—Analysis of Cutting Mechanism and New Cutting Method at Inside Corner—

Hiroyasu IWABE, Yoshiya FUJII, Katsumasa SAITO, and Takeshi KISHINAMI

This paper deals with cutting mechanism at inside corner by a square end mill. The results are as follows. (1) Cutting mechanism of corner cut by end mill is analysed geometrically. And calculating procedures of actual radial depth of cut and cutting area are shown at inside corner. (2) New cutting method is presented that commands a looped cutter path during corner cut. The method suppresses rapid increase of radial depth of cut and cutting area. (3) Optimum diameter of end mill and loop radius of cutter path are calculated. Under the cutting condition, these values are 17 mm and 1.5 mm respectively. (4) It is shown by cutting tests that working accuracy is improved remarkably by the new method at inside corner.

Key words: end mill, corner cut, looped cutter path, actual radial depth of cut, cutting mechanism, cutting area

1. 緒 言

エンドミルはコーナ部をもつ内面加工に便利な工具であり、コーナ部の各種曲率半径に合わせて用意されている市販の工具直径の種類は非常に多い¹⁾。内面加工を行う場合、使用する工具の半径は工具剛性を高くするため、一般にコーナ部の曲率半径に等しい値または少し小さい値が選択される。しかし凹曲面の加工は直線および凸曲面の加工と異なり、仕上代を微小な値に設定しても、コーナ部では幾何学的に半径方向切込みおよび切削面積の急激な増加による過渡現象は避けられない。その結果切削力が急増し、加工精度の低下および工具損傷の原因となっている。

そこで本研究はスクエアエンドミルによるコーナ部加工の切削機構を幾何学的に解析するとともに、上記の過渡現象に基づく悪影響の軽減および加工精度の向上を実現できる新しい加工法を提案し、その有効性について検討する。

2. コーナ部における切削機構の解析

2.1 コーナ部における切削状態と座標系

図1はスクエアエンドミルによるコーナ部加工の切削機構を軸直角断面に投影したもので、同時に解析に用いた座標系および記号を示している。図中点PC(XC, YC)は工具中心、 R_c は工具半径、YW0は設定半径方向切込み、 S_z は1刃当たりの送り、 R_0 および R_f はコーナ部における仕上面および前加工面の曲率半径であり、その中心は点 $O_0(X_0, Y_0)$ および点 O_f

Fig. 1 Cutting mechanism of corner cut

* 原稿受付 昭和63年7月9日、昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和63年3月18日)にて発表

** 正 会 員 新潟大学工学部(新潟市五十嵐2の町8050)

*** 正 会 員 北海道大学工学部(札幌市北区北13条西8丁目)

Fig. 2 Cutting process by helical end mill

(X_r, Y_r)である。工具中心は点 Q_a より二点鎖線に沿って点 Q_b, Q_c を経て点 Q_d に達する。点 Q_b より点 Q_c の間は点 O_0 を中心とする半径 R_i の円弧、その他の区間は x 軸または y 軸と平行な直線である。このような工具の動きによって、破線で示す直線および円弧部を仕上げることになるが、図より点 P_2, P_1, P_0 および PS で囲まれる切りくず形状(斜線部)は工具中心の位置によって大きく異なる。ここではType IおよびType IIと呼ぶが、Type Iは半径方向切込みが変化しない定常状態の加工である。一方Type IIは工具中心の移動により切れ刃の工作物に接触する角度 θ が変化する過渡状態における加工であり、実際の半径方向切込み YW が設定値 YW_0 に比べて大きくなる。Type IIの切削状態は、工具半径 R_c に比べて送り S_z が十分小さいことより切れ刃の軌跡を半径 R_c の円弧と仮定すると、円弧 PSP_2 が前加工面の円弧 P_bP_c と交差するときに始まる。その後工具中心が点 Q_b を経て点 Q_c に達するまでType IIの切削状態となる。

2.2 切りくずの座標、切削面積および実半径方向切込み

図2は切削に伴って変化する切れ刃と切削面積の関係をType IIについて示したもので、工具は中心軸 OO' および切れ刃の切削に参与している部分($B'E, BI$ 等)のみを透視して示している。なお工作物上面で用いている記号は図1と対応しており、上向き切削の場合である。ねじれ刃は点 C より切削を開始し、工具の回転により $B'E, BI$ 等で示す位置を経て点 P_2 に達し、切削を終了する。斜線部は各切れ刃位置における切削面積であり、切削の進行につれて切削面積が

大きく変化する。この面積を求めるためには一度軸直角断面に投影し、投影面積を $A_p(t)$ とすると $A_p(t)/\sin \eta$ により求められる。ここで η はねじれ角、 t は図2の点 C を切削する時刻を基準とした時間である。Type Iの場合、半径方向の切込みが YW_0 となるため、投影されるコマ形状の面積は容易に計算でき、その説明は割愛する。一方Type IIの場合は切れ刃ごとにコマ形状は変化するため、後述する数値計算法により投影面積の計算を行った。そのためにまず切りくずの4点、すなわち点 P_2, P_1, P_0 および PS の座標を求める必要がある。これらの座標は、切れ刃の軌跡を示す円の方程式、前加工面の円弧部を示す方程式および点 PC_i と点 O_0 を通る直線の方程式により求められ、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} XP2_i &= \frac{C - \sqrt{C^2 - (1+A^2) + D}}{1+A^2} \\ YP2_i &= YC_i - \sqrt{R_c^2 - (XP2_i - XC_i)^2} \\ A &= -(X_r - XC_i)/(Y_r - YC_i) \\ B &= \frac{(R_c^2 - R_r^2) + (X_r^2 - XC_i^2) + (Y_r^2 - YC_i^2)}{2(Y_r - YC_i)} \\ C &= XC_i - A(B - YC_i) \\ D &= XC_i^2 + (B - YC_i)^2 + R_c^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} XP1_i &= XP2_{i-1} \\ YP1_i &= YP2_{i-1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} XP0_i &= \frac{C' - \sqrt{C'^2 - (1+A'^2) + D'}}{1+A'^2} \\ YP0_i &= YC_i - \sqrt{R_c^2 - (XP0_i - XC_i)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} XPS_i &= XC_i - \frac{R_c^2(XC_i - X_0)^2}{(XC_i - X_0)^2 + (YC_i - Y_0)^2} \\ YPS_i &= \frac{YC_i - Y_0}{XC_i - X_0}(XPS_i - XC_i) + YC_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

なお $PC_i(XC_i, YC_i)$ は i 番目の工具中心座標であり、式(3)中の A' ないし D' の値は $i-1$ 番目の切れ刃について求められる式(1)の A ないし D の値である。面積 $A_p(t)$ の値は、まず式(1)ないし式(4)の4点により囲まれる部分を、工具中心を原点とする中心角 $d\theta$ 間隔の直線により微小要素に分割し、その後各要素の面積の計算を行って、それらの総和により求めている。

なお i 番目の切削による実半径方向切込み YW_i は式(1)および(4)を用いて次式で与えられる。

$$YW_i = \frac{(XP2_i - XPS_i)^2 + (YP2_i - YPS_i)^2}{2R_c} \quad (5)$$

Fig. 3 Work and cutter path

3. 実験方法

実験に使用した工作機械，エンドミル，工作物および切削条件は次のとおりである。

工作機械：アマダ BM-104, NC フライス盤

制御装置：FANUC 10 M (1 μ m/pulse)

エンドミル：直径 20, 17 mm, 4 枚刃, ねじれ角 30°, 高速度鋼

工作物：炭素鋼 S 45 C (図 3 参照)

切削条件：切削速度 20.5 m/min, 軸方向切込み 20 mm, 半径方向切込み 1 mm, 送り：0.1 mm/刃, 切削方式：上向き切削, 下向き切削

切削剤：マシンオイル 2.3 l/min

図 3 は工作物形状および工具通路を示しており，工作物の 4 つの象限でコーナ部加工を行った。第 1 象限ではコーナ部の曲率半径と等しい工具を用いた上向き切削，第 2 象限では同条件による下向き切削による実験である。また第 3 および第 4 象限ではコーナ部の曲率半径より小さい工具径による場合であり，特に第 3 象限では後述するループを用いた加工であることを示す。なお工作物はジグを用いてテーブルに固定し，各実験とも仕上条件により工作物の凸部に基準面を作成した。加工精度の測定はこの基準面に基づいて，電気マイクロメータを用い，取付状態のまま行った。

Fig. 4 Behaviour of radial depth of cut

4. 計算結果および実験結果と考察

4.1 コーナ部における過渡現象

図 4 はコーナ部加工における実半径方向切込みの変化を示したものである。工具は一点鎖線または二点鎖線に沿って x 軸と平行に移動するが，図より工具半径がコーナ部の曲率半径と一致する直径 20 mm の場合，工具中心が $XC=12.5$ mm 付近より実半径方向切込みは急激に増加する。その後 $XC=10$ mm で最大値を示し，その値は設定値の約 14 倍である。半径方向切込みを半減させて $YW0=0.5$ mm とすると，破線で示す結果となって過渡現象の範囲および最大値はわずかに減少する。しかし半径方向切込みにより過渡現象を軽減させる効果は小さい。一方直径を 18 mm および 16 mm へ減少させると実半径方向切込みは大幅に減少し，最大値も直径 20 mm の 70% および 44% となり，過渡現象が軽減されている。

図 5 は工具径による効果を切削面積により比較したもので，実線は直径 20 mm，破線は 18 mm の場合である。それぞれ 4 枚刃によるほぼ 1 回転中の変化を 3 か所の工具中心位置で比較している。図より Type I の切削状態 ($XC=-16.0$) では切削面積の切れ刃による差および工具径による最大値の差はみられない。しかし Type II の切削状態 ($XC=-12.0, -11.0$) では工具中心が 1 刃当たりの送り移動するたびに切削面積は増加し，切れ刃ごとの増分量は直径 20 mm において大きい。工具中心 $XC=-11.0$ における最大値を Type I の場合と比較すると，直径 20 mm および 18 mm ではそれぞれ 10.4 倍および 6.4 倍である。すなわち図 4 と同様にコーナ部における過渡現象の軽減に工具径を小さくすることが有効であることを示している。

Fig. 5 Influence of diameter on cutting area

4.2 新しい加工法と最適工具径

図4および図5に示した過渡現象を軽減させる効果は工具径をさらに小さくすることにより増大する。しかし工具の曲げ剛性は切れ刃部の相当丸棒の直径 D_{eq} の4乗に比例するため²⁾、工具径を小さくすると急激に曲げ剛性は減少し、加工精度低下の原因となる。

そこで著者らはコーナ部において図6に示すように工具通路を一度ループさせ、その後通常の通路に戻して仕上加工する方法を提案する。すなわち図6の場合工具中心が点 Q_1 に達したとき、点 O_1 を中心とする半径 R_1 の円上を移動させて再び点 Q_1 に戻し、コー

Fig. 6 Influence of looped cutter path on radial depth of cut

Fig. 7 Influence of looped cutter path on maximum cutting area

ナ部の前加工を行った後に点 Q_b より点 Q_c までの間でコーナ部の仕上加工を行う方法である。この方法により実半径方向切込みは一点鎖線で示す値となり、実線で示すループを用いない場合と比較すると大幅に減少する。またその最大値も半減している。破線の値はループによる前加工時の実半径方向切込みの変化であり、一点鎖線の結果と比較すると最大値の差は小さい。すなわち図中に示した条件によってコーナ部は最大切込みをほぼ2分する形で加工されることを示している。

一方、最大切削面積の変化をループの有無により比較すると図7となる。図中の破線はループを用いない $R_c=10$ mm の場合を示しているが、図より $R_c=8.5$ mm の工具を用いてループによる加工を行うと、コーナ部における最大切削面積は大幅に減少する。したがって図6と同様に、提案した加工法が過渡現象の抑制に有効であることが明らかである。なお本報ではループによる前加工は1回に限定している。そのため図8に示す方法でループ半径の計算を行った。すなわち通常は工具中心が点 Q_b に達したときに最大値を示す実半径方向切込みの値を、仕上加工時に半減させる半径として定め、次の計算手順により求めた。

- (1) 点 $Q_b(X_b, Y_b)$ を中心、 R_c を半径とする円と、直線 $Y=YP_2/2(=YW_{max}/2)$ との交点により点 $P_3(XP_3, YP_3)$ の座標を求める。
- (2) $dX=dY=S_z k$ とし、直線 $Y=$

Fig. 8 Calculating method of loop radius

Fig. 9 Relationship between radial depth of cut and loop radius

X 上に点 $O_1(X_1, Y_1) = (X_0 + dX, Y_0 + dY)$ を定める。

- (3) 点 P_3 より点 O_1 までの距離 L_1 を求める。
- (4) $k=1, 2, \dots$ とし, $L_1 \geq Y_1$ まで手順 (2) および (3) を繰り返す。
- (5) ループ半径 $R_1 (= Y_1 - R_c)$ を求める。

図9は横軸に工具径をとり、実半径方向切込みの最大値とループ半径の関係を示している。図より実線で示す最大値を破線のように半減させるループ半径は、工具径が大きくなるにつれて小さくなり、図中の条件では $R_1 = 0.2 \sim 3.4$ mm である。コーナ部の曲率半径および設定切込みが一定の場合ループ半径は工具径に依存するため、次に最適工具径について検討する。

Fig. 10 Ratio of flexural rigidity, cutting area and evaluation values with diameter

工具径を選択する場合、その工具により最大切削面積の減少と曲げ剛性の低下の抑制を同時に実現するような切削条件となることが必要である。また前加工時と仕上加工時における最大値の差を小さくすることが望ましい。そこで曲げ剛性比 R_1 および最大値による切削面積比 R_2 および R_3 を用いた次式により切削条件の評価を行う。式(6)より評価値 EVR を最大とする工具によって、曲げ剛性の低下に比べて切削面積に比例する切削力を最も大きく減少させる切削条件が実現するため、高い加工精度を期待できる。この工具径を本報では最適値と定めた。なお R_2 および R_3 は前加工および仕上加工時の比率であり、それぞれ工具中心が図8の点 Q_1 および点 Q_6 に達したときの値である。

$$EVR = \frac{R_1}{\sqrt{R_2 R_3}} \quad (6)$$

図10は横軸に工具径をとり、直径20 mmを基準とした各比率および評価値を示す。図より工具径が減少すると、曲げ剛性比 R_1 および切削面積比 R_3 はともに大きく減少する。後者の変化は直径18 mm以下でゆるやかになり、切削面積比 R_2 とともに直径15 mmで最小値を示した後増加する。また直径19 mm以上では2つの面積比の差が大きい。そのため評価値は図10のような変化を示し、本実験条件の範囲では17 mmが最適工具径である。この結果を用いてループ半径を求めると、図9より1.5 mmとなる。

4.3 コーナ部加工における加工精度の改善

図11はコーナ部における加工精度をループ加工の

Fig. 11 Improvement of working accuracy by looped cutter path

有無により比較したもので、図3に示す点 P_b , P_d , P_d' および P_d'' における値である。(a)図は上向き切削、(b)図は下向き切削の場合であり、それぞれ縦軸に板厚位置、横軸に加工誤差を示す。上向き切削の場合直径20 mmの工具では削り過ぎによる負の大きな誤差となる。直径を17 mmに減少させると加工誤差は各板厚位置ではほぼ半減するが、誤差の平均値は $-124 \mu\text{m}$ と大きい。しかしループによる加工を行うと加工誤差は大幅に改善され、平均値は $-11.6 \mu\text{m}$ となる。なお図中の●印は基準面であり、比較のために定常状態における加工誤差も併記した。一方、下向き切削の場合、直径20 mmの工具では削り残しによる正の大きな誤差を生じる。また直径を17 mmに減少させると加工誤差は全体に減少するが、その減少量は上向き切削と比較して小さい。この理由は切削中にエンドミルが指令位置より進む方向に変形し³⁾、切削面積を

減少させる効果が低下することによる。しかしループによる加工を行うと加工誤差は大きく減少し、ループを用いない場合のほぼ40%になる。その平均値($79.5 \mu\text{m}$)は定常状態の誤差より大きい。さらに加工精度を向上させるためにはループによる前加工を2回以上行うことが必要である。

5. 結 論

- (1) エンドミルによるコーナ部加工の切削機構を幾何学的に解析し、過渡区間における切削面積および実半径方向切込みの計算方法を示した。
- (2) 工具通路をループさせてコーナ部を加工する方法を提案した。この加工法はコーナ部における切削面積の急激な増加を抑制する。
- (3) 新しい加工法における最適工具径およびループ半径を求めた。実験条件の場合、最適工具径は17 mm、ループ半径は1.5 mmである。
- (4) 切削実験を行い、新しい

加工法によりコーナ部における加工精度が大幅に改善されることを示した。

最後に本研究の遂行にあたり、エンドミルは(株)不二越および(株)オー・エス・ジー、工作物は大同製鋼(株)の御好意によった。また実験には今井純一技官に協力いただいた。付記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 精機学会・精密加工及び周辺技術に関する懇話会編：国内において利用できるエンドミルの現状とその選択方法に関する資料 (1983)。
- 2) 藤井義也、岩部洋育：ねじれ刃エンドミルの断面形状と曲げ剛性、精密機械、49, 6 (1983) 735。
- 3) 藤井義也、岩部洋育、鈴木雅晴：切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係、精密機械、43, 7 (1977) 807。