成形研削加工に関する基礎的研究 (第2報)*

——V形溝の生成機構——

中島利勝** 宇野義幸** 吉延英俊*** 安原伸二†

Fundamental Study on Form Grinding (2nd Report)
—Grinding Process of V-Profile Groove—

Toshikatsu NAKAJIMA, Yoshiyuki UNO, Hidetoshi YOSHINOBU and Shinji YASUHARA

Grinding process of V-profile groove with a formed wheel is experimentally investigated, analyzing initial profile of formed wheel, wheel wear, stock removal, number of cutting edges on working wheel surface, bonding strength of a cutting edge and so on. Main results obtained in this paper are as follows: (1) Initial profile of formed wheel is different from ideal one at tip zone of V-profile. (2) The number of cutting edges increases with increasing depth from wheel surface, increasing distance from the center of wheel width and larger formed angle of wheel. (3) The bonding strength of a cutting edge increases with an increase of formed angle of wheel. (4) The ratio of wheel wear to grinding length is decided only by real cutting depth and is not affected by grinding length and different positions along wheel width. (5) The generated groove angle as compared with formed angle of wheel becomes larger with an increase of grinding length because of wheel wear.

Key words: form grinding, V-profile groove, wheel wear, stock removal, number of cutting edges, bonding strength of a cutting edge, initial profile, ratio of wheel wear to grinding length, formed angle

1. 緒 言

総形砥石を用いる成形研削加工においては、適当な手段によって砥石の断面を目的とする形状に成形してから加工を行うために、砥石幅方向の各位置において研削現象が同一とはならず、砥粒に加わる力、砥石摩耗量、切残し量などが各位置で異なった値となる。このために最初に成形した砥石の輪郭形状がそのまま工作物には転写されず、また研削距離によっても砥石摩耗のために工作物に生成される形状は変化する。

本研究は上記のような観点から総形砥石による成形研削機構を解明しようとするものである。前報¹⁾では、円弧溝の生成機構を明らかにしたが、本報告ではシャープエッジを有するV形溝の成形研削に焦点を絞り、砥石の初期形状、砥石摩耗量、切残し量、寸法生成量、砥粒数および砥粒結合強度などを解析することによって、その生成機構を明らかにし、従来経験的に行われているV形溝の成形研削を理論的に取り扱

うための基礎資料を得ようとしたものである。

2. 実験方法

研削加工実験は、精密成形研削盤を用いて平面研削方式で行った。砥粒数は極低速(0.35 mm/s)で回転させた砥石の表面を触針式表面検査機で走査することにより求めた。砥粒結合強度は、三次元水晶式圧電動力計上に取り付けたダイヤモンド圧子を、光学顕微鏡下で個々の砥粒に一定速度で押し付けることによって測定した。その他の実験装置および測定方法は前報と同じである。

図1は、V形溝研削の概念および解析に用いた座標系を示すものであり、V形ドレッシング装置によって先端角 2θ に成形された砥石を用いて、工作物上にV形溝を生成する状態を示している。解析に用いる座標系はV形溝の中心線と工作物表面の交点をOとし、砥石幅方向に y 、切込み深さ方向に Z とする。研削距離は、工作物上に生成された溝の長さ L で、またある研削距離 L におけるO点から砥石幅方向に y の点の切込み深さを $Z(y, L)$ で表示する。なお $y=0$ すなわち砥石幅中央位置の設定切込み深さを Δ としている。主な研削条件は以下のようである。

* 原稿受付 昭和62年5月26日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和62年3月29日)にて発表

** 正 会 員 岡山大学工学部(岡山市津島中3-1-1)

*** 正 会 員 (株)吉延鐵工所(備前市三石1200)

† 学生会員 岡山大学大学院

Fig. 1 Coordinate system in analysis of V-profile grinding

研削方式：平面研削（上向き研削）

研削砥石：WA 60 H 7 V ($\phi 180 \times 25$)

工作物：SKD 11 (100×40 mm, HRC=63.5)

ドレッシング条件：

送り速度：0.01 mm/rev of G. W.

切込み：10 $\mu\text{m} \times 5$ pass, 5 $\mu\text{m} \times 4$ pass,
0 $\mu\text{m} \times 10$ pass

砥石成形先端角： $2\theta = 60 \sim 150^\circ$

設定切込み深さ： $L = 50 \sim 300 \mu\text{m}$

砥石周速度： $V_s = 2.035$ m/min

工作物速度： $V_w = 0.3$ m/min

研削系剛性： $k_{sy} = 12.8$ MN/m

研削液：ソリュブル型

3. 砥石先端部の初期形状

V 形溝の総形研削にあたってはまず砥石を V 形に成形しなければならない。しかし V 形の理想的なシャープエッジは完全には成形することができない。そこで、まず V 形に成形された砥石先端部の初期形状について検討する。

図 2 は、V 形ドレッシング装置により成形された砥石先端部の初期作用面形状を転写した場合の測定例を示すものである。図に示すように砥石先端部の初期形状は理想的 V 形形状とはならず、砥石の先端部には初期砥石摩耗量 $(d_0)_i$ が存在し、成形先端角 2θ に接する円弧状となっている。この円弧の半径を初期先端円弧半径 r_0 と定義する。

図 3 は、ドレッシング直後の砥石幅方向の各位置 y における単位長さ当たりの砥粒数 n を示すものである。ここで、 Z_s は砥石最外表面からの深さである。砥石幅中央位置 ($y=0$) より離れるほど n は増加するが、中央から 200 μm ほど離れるとほぼ一定値に収束する。砥石幅中央位置、すなわち砥石先端付近 ($y=0$ 付

Fig. 2 A measured example of tip area of V-formed wheel

Fig. 3 Variations of the number of cutting edges with distance from center of wheel width

近)ではそれ以外の場所に比べて砥粒の支持力が弱く、ドレッシング時の衝撃によって脱落するために前述のような初期砥石摩耗量 $(d_0)_i$ が存在すると考えられる。また 2θ が大きくなるほど砥石幅中央部の砥粒を周囲から支える砥粒の数が多くなり、ドレッシング時の砥粒の脱落数が減少するため²⁾、 n が多くなることが確認されている。

図 4 は、ドレッシング直後の成形先端角 $2\theta = 90^\circ$ の砥石幅中央部付近の砥粒にダイヤモンドの圧子を、一定速度 $\dot{d}_p = 5 \mu\text{m/s}$ で押し込んだ場合の各分力の測定例を示すものである。なお角度 α は研削主分力 Q と背分力 P の比 Q/P で 0.5 となる位置に設定した。図中矢印で示す位置は、光学顕微鏡での観察により砥粒の破碎、脱落が確認された位置を示す。図に示すように砥粒の結合強度（破碎および脱落が起こる場合の力）は、かなりばらつきがある。ここでは X, Y, Z 方向に発生したそれぞれの分力 F_x, F_y, F_z の合力 F の平均値を、平均砥粒結合強度 $\bar{F}$ とする。

図 5 は、砥石幅中央部付近における平均砥粒結合強度 $\bar{F}$ に及ぼす成形先端角 2θ の影響を示すものである。図より明らかなように、 $\bar{F}$ は 2θ の増加とともに

Fig. 4 Measured example of force components in indentation test to a cutting edge on wheel surface

Fig. 5 Relation between mean bonding strength of a cutting edge and formed angle

増加しており、 2θ が 120° 付近までは急激に増加するが、その後は増加割合が減少する。すなわち砥粒の破碎または脱落に要する平均力は 2θ の増加とともに増加するが、 2θ がある角度以上になると増加割合は減少することを示している。

図6は、初期砥石摩耗量 $(d_0)_i$ および初期先端円弧半径 r_0 と成形先端角 2θ の関係を示すものである。図より明らかなように、 2θ が小さくなると $(d_0)_i$ は大きくなり、ばらつきも大きくなる。これは、前述のように 2θ が小さくなると砥石先端近傍では砥粒数が少なくなり砥粒の支持力が小さくなるためと考えられる。ここで $(d_0)_i$ と r_0 の間には、図2より明らかなように

$$r_0 = \frac{\sin \theta}{1 - \sin \theta} \cdot (d_0)_i \quad (1)$$

の幾何学的関係がある。図より明らかなように、式(1)を用いて求められた計算値と実測値はよく一致している。また r_0 は 2θ が 90° 付近で極小値を持っている。これは 2θ が大きくなると式(1)右辺の $(d_0)_i$ 項は前図に示すように小さくなる一方、 $\sin \theta / (1 - \sin \theta)$ 項は大きくなる相乗効果によるものである。理想的なV

Fig. 6 Variations of initial wheel wear and initial tip radius with formed angle

Fig. 7 Schematic diagram of generation mechanism of V-profile groove

形溝生成の観点から考えると r_0 は小さい方が望ましい。この図は、 2θ の設定にあたっては、 r_0 の限界値に注意を払う必要があることを示している。

4. V形溝生成機構

V形溝の成形研削においては、前述のように砥石幅方向の各位置によって切込み深さが異なる。

図7は、ある距離 L だけ研削した時のV形溝の生成機構を模式的に示すものである。図中直線 ADA' は設定切込み深さ Δ で研削を行うときの理想的V形溝形状を示している。しかし成形後の砥石には前述のように初期砥石摩耗量 $(d_0)_i$ が存在するために研削開始前の理論的干渉曲線は曲線 AHA' となる。いま、ある距離 L まで研削した場合、研削の進行とともに砥石は摩耗するので作用面形状は徐々に変化し、この時点では曲線 AEA' となっている。曲線 AHA' と曲線 AEA'

の各位置における Z 方向の差は、砥石摩耗に起因する切残し量 $d_0(y, L)$ を表している。この砥石摩耗量 $d_0(y, L)$ は、砥石幅方向に様ではなく、切込み深さの大小に従って砥石幅中央部において大きく、中央から離れるほど小さくなっている。また研削抵抗によって研削系が弾性変形することによる切残し量 $d_1(L)$ が存在するために、実際に砥石と工作物が干渉する表面は破線で示す曲線 BFB' となる。この弾性変形量 $d_1(L)$ は研削背分力 P を研削系剛性 k_s で除して求められるもので砥石幅方向全体にわたって一定である。さらに、砥石と工作物の接触剛性および表面粗さに起因する切残し量 $d_r(y, L)$ が存在するために、実際に工作物上に生成される溝形状は曲線 CGC' のようになる。

このように、工作物表面に生成される溝の深さは、理論的干渉深さから砥石摩耗量、研削系の弾性変形量および切残し量を差し引いたものとなるから、V形溝の生成機構を解明するためには、砥石幅方向の各位置における諸量の大きさと研削距離 L に対するそれらの特性値の変化過程を明らかにすることが必要である。

図8は、V形溝成形研削における溝形状の変化過程の一例を示すものである。成形先端角 $2\theta=120^\circ$ 、設定切込み深さ $\Delta=200\ \mu\text{m}$ の条件で上からそれぞれ研削距離 L が100, 500, 900 mm付近に対応する。図より明らかなように、砥石摩耗量 $d_0(y, L)$ は、切込み深さの最も大きい砥石幅中央位置で最大となり、中央から離れるに従って小さくなっている。また弾性変形量 $d_1(L)$ は全幅にわたり一定であり、切残し量 $d_r(y, L)$ も幅方向の変化量は少ない。

図9は、前図に対応して、砥石幅中央位置 $y=0$ における各特性値の研削距離 L に対する変化を示したものである。図中、上から順に砥石摩耗量 $d_0(0, L)$ 、弾性変形量と切残し量の和 $d_1(L) + d_r(0, L)$ および生成される溝の深さ $R(0, L)$ の変化過程を示している。図より明らかなように、 $d_0(0, L)$ は研削距離 L の増加とともに増加しているが、 $d_1(L) + d_r(0, L)$ はほとんど変化していない。したがって、寸法生成量 $R(0, L)$ の変化過程に大きな影響を与えているのは、 $d_0(0, L)$ の変化であることがわかる。

以上述べたように、工作物上に生成されるV形溝の形状は概略的には砥石作用面形状、換言すれば砥石摩耗量 $d_0(0, L)$ に大きく影響されていることがわかる。

5. 砥石の作用面形状の変化過程

ここでは溝の形状に大きな影響を及ぼす砥石作用面

Fig. 8 Variations of generated profile with grinding length

Fig. 9 Variations of characteristic values with grinding length

形状の変化過程、すなわち砥石摩耗量の変化過程について検討する。

図10は、成形先端角 $2\theta=120^\circ$ 、設定切込み深さ $\Delta=206\ \mu\text{m}$ の場合の砥石幅方向の各位置における砥石摩耗量 $d_0(y, L)$ と研削距離 L との関係を示すものであ

Fig. 10 Variations of wheel wear with grinding length in different positions along wheel width

Fig. 11 Relations between the ratio of wheel wear to grinding length and the cutting depth

る。図より明らかなように、 $d_0(y, L)$ は L の増加とともに増加しているが、その増加割合は L の増加とともに減少している。また $d_0(y, L)$ は砥石幅方向の各位置によって異なり、砥石幅中央位置 $y=0$ に近付くほど大きくなっている。ここで、砥石幅方向の各位置におけるある研削距離 L での砥石摩耗量の変化割合、すなわち砥石摩耗量 $d_0(y, L)$ の単位研削距離当たりの増加量を砥石摩耗率 $d(d_0)/dL$ と定義し、以下の解析に用いる。

図 11 は、前図より求めた砥石摩耗率 $d(d_0)/dL$ と切込み深さ $Z(y, L)$ の関係を示すものである。図より明らかなように、 $d(d_0)/dL$ は研削距離 L および砥石幅方向の位置 y がそれぞれ異なっても、その瞬間の $Z(y, L)$ のみにより決定され、傾き C の直線とそれに接する曲線とによって表される。このことは、その位置での $Z(y, L)$ が定まれば、 $d(d_0)/dL$ も一義的に決定されることを示している。

図 12 は、設定切込み深さ Δ を変化させた場合の砥石摩耗率 $d(d_0)/dL$ と切込み深さ $Z(y, L)$ の関係を示したものである。図より明らかなように、 Δ が異な

Fig. 12 Relations between the ratio of wheel wear to grinding length and cutting depth for various setting depths of cut

ると研削距離 L の増加とともに $d(d_0)/dL$ は別々の曲線に沿って増加するが、 Δ が異なっても直線部の傾き C は一定であることがわかる。また $d(d_0)/dL$ の大きいところは砥石幅中央付近であり、その傾きは Δ にかかわらずほぼ等しい。ここで直線部の傾き C は V 形溝の設定成形先端角 2θ からのずれと直接関係する値である。砥石の設定成形先端角 2θ と傾き C が定まれば先端角 2ϕ は以下のように理論的に計算することができる。すなわち

$$\frac{d\{d_0(y, L)\}}{dL} = CZ(y, L) \quad (2)$$

一方、

$$Z(y, L) = \frac{-y}{\tan \theta} + \Delta - d_0(y, L) \quad (3)$$

$$\tan \phi = \frac{\Delta \tan \theta - y}{Z(y, L)} \quad (4)$$

これを解くと、

$$2\phi = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta}{e^{-\alpha}} \right) \quad (5)$$

となり、 L の増加とともに増加していく。

図 13 は、設定切込み深さ Δ を変化させた場合の砥石の先端角 2ϕ と研削距離 L の関係を示すものである。図において、実線は式 (5) で表される理論曲線を示している。図より明らかなように、 L の増加とともに 2ϕ は増加しており、直線に沿う部分の少ない $\Delta = 46 \mu\text{m}$ の場合を除いて理論曲線とよく一致している。すなわち研削の進行とともに設定した角度よりも大きな角度を有する V 形溝が生成されるようになる。

6. 砥石の作用面形状に及ぼす成形先端角の影響

ここでは砥石の成形先端角 2θ が砥石作用面形状に

Fig. 13 Variations of generated angle of wheel with grinding length

Fig. 14 Relations between the ratio of wheel wear to grinding length and cutting depth for three different formed angles

及ぼす影響について検討する。

図14は、成形先端角 2θ を変化させた場合の砥石摩耗率 $d(d_0)/dL$ と切込み深さ $Z(y, L)$ の関係を示すものである。図より明らかなように、成形先端角 2θ が小さくなるほど砥石摩耗率 $d(d_0)/dL$ は大きくなり、またその変化割合が急になっている。一方、研削距離 L の増加とともに単位長さ当たりの砥粒数 n は増加し、また成形先端角 2θ が小さくなるほど n は少なくなることが確認されている。したがって、 2θ が小さくなるほど砥石先端部の砥粒数 n が少なくなり砥粒の保持力が弱くなるとともに、連続切れ刃間隔が長くなり、その結果研削時に砥粒1個当たりに加わる力が大きくなって砥石摩耗が激しくなると考えられる。

図15は、設定切込み深さ Δ を種々に変化させた場合の砥石摩耗率の直線部の傾き C と砥石の成形先端角 2θ の関係を示すものである。図より明らかなように、 2θ が同じであれば傾き C は Δ に影響されずほぼ一定である。また 2θ が小さくなるほど傾き C は大きくなっているのがわかる。これは 2θ が小さいほど研

Fig. 15 Relation between the slope C and formed angle

削の進行に伴って変化していく砥石の先端角 2ϕ と設定値 2θ のずれが大きくなることを示している。

7. 結 論

先端をV形に成形した総形砥石を用いてV形溝研削を行い、その生成機構を、砥石の初期形状、砥石摩耗量、切残し量、寸法生成量、砥粒数および砥粒結合強度などを解析することによって、実験的に検討した。本研究で得られた主な結論は以下のようである。

- (1) V形に成形された砥石の先端部の初期形状は成形先端角に接する円弧状となり、この先端円弧半径はある成形先端角で極小値をとる。
- (2) 砥粒数は砥石表面から深くなるほど増加し、砥石幅中央位置より離れるほど増加するが、中央からある距離以上に離れるとほぼ一定値に収束する。また成形先端角が大きいほど砥粒数は多くなる。
- (3) 砥粒結合強度は、成形先端角が増加するほど大きくなり、成形先端角がある角度以上になると増加割合は減少する。
- (4) 砥石摩耗率は、設定切込み深さと成形先端角が定まれば、研削距離および砥石幅方向の位置に影響されずその瞬間の切込み深さのみによって決定される。
- (5) 生成される溝の角度は砥石摩耗のために研削距離が長くなるほど大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 中島利勝, 宇野義幸, 吉延英俊, 駒井泰隆: 成形研削加工に関する基礎的研究(第1報)——円弧溝の生成機構, 精密工学会誌, **52**, 11 (1986) 1896.
- 2) 小野浩二, 星野 将: 総型研削における砥石摩耗——V溝研削における研削条件の影響, 精密機械, **44**, 4 (1978) 495.