

交差穴のバリ取りに関する研究 (第2報)

— 快削鋼のバリ生成状況とボールバニッシングによるバリ除去 —

大島 郁也*, 前川 克廣*, 村田 良司**

(平成3年8月31日受理)

Removal of Machining Burrs at Cross Holes (2nd Report)

— Burr Formation and Deburring by Ball Burnishing

in the Drilling of Free Cutting Steels —

Ikuya OHSHIMA*, Katsuhiko MAEKAWA* and Ryoji MURATA**

ABSTRACT — When cross holes are drilled in free cutting steels, characteristics of the machining burrs generated inside the main hole at the intersection have been investigated. Then the ball burnishing method has been employed to remove the machining burrs. Among the steels including plain carbon steels, the leaded resulfurized steel generates the least burrs, and shows the best efficiency in removing the burrs. Since Pb acts as a lubricant on tool face, less plastic deformation occurs in the workpiece underneath the cutting edge, which results in the generation of smaller burrs. The deburring characteristics depend on the rolling direction of the work materials: the removal rate becomes high when the cross hole is drilled parallel to the rolling direction, since the embrittlement action of MnS inclusions has been enhanced in the plastic burrs.

1. ま え が き

機械加工に伴って発生するバリに関しては、種々のバリ取り方法が提案され¹⁾, またバリ生成機構の検討^{2) 3)}も行われている。なかでも金属の切削加工において、被削材の外部平面に発生するバリについての研究例は多い^{3) 4)}。しかしバリが被削材の曲面部あるいは内部に発生する場合は、その形態や生成機構に関する研究は少なく、また有効な除去方法も見当たらない。たとえば流体機器等では交差した穴を利用する機会が多く、この穴加

* 茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

** 東京理科大学理工学部機械工学科 (野田市山崎)

Department of Mechanical Engineering, Science University of Tokyo, Noda 278, Japan

工時に内部の曲面部に発生するバリは、形状的な制約のために、除去作業を著しく困難にしている。

前報⁵⁾では、仕上げ加工したアルミニウム材 (A5056BD) および軟鋼 (SS41) の主穴 (直径が12.7 mm 前後の丸穴) に、直交または傾斜した交差穴 (直径が6, 8, 10, 12mm) をドリル加工したときに発生するバリの形態を調べた。さらに簡易なバリの除去方法としてボールバニッシングを提案した。その結果, SS41材では鋼球と主穴の直径差が小さい場合にバリの除去効率が高いこと, アルミニウム材ではバニッシング効果によって主穴に発生する交差穴のバリがほぼ完全に除去できることを明らかにした。

本報告では、比較的バリの発生も少なく、その除去も容易と考えられる硫黄快削鋼と鉛複合快削鋼および比較のために標準鋼について、直径が10mmの主穴に直交交差穴を加工する場合に生成するバリの形態と除去機構を検討する。特に、材料の圧延方向と交差穴の加工方向との関連に着目し、バリの発生状況、およびボールバニッシングによるバリの除去効果に関して述べる。

2. 実験方法

穴加工に用いた材料は硫黄快削鋼 (AISI 1213), 鉛複合快削鋼 (AISI 12L14), およびS10C (JIS G4051) の3種類である。その化学成分をTable 1に示す。いずれも $\phi 118\text{mm}$ ピレットを $\phi 80\text{mm}$ に熱間圧延後、 900°C で2hの焼きならしを行ったものである。これを切断し、フライス仕上げを行って $24\text{mm} \times 24\text{mm} \times 48\text{mm}$ の角柱状の試験片とした。

試験片の穴加工には立フライス盤を使用し、市販のねじれ角 30° 、先端角 118° のストレートシャンクツイストドリルをシェルミル軸にそう入して用いた。主穴はFig. 1に示すように、試験片の中央に、材料の圧延方向と直角に加工した。用いたドリル径は9.8mm, 加工条件は回転数225rpm, 送り $0.05\text{mm}/\text{rev}$ である。さらに後

Table 1 Chemical composition of work materials (wt %)

	C	Mn	P	S	Pb
Leaded resulfurized steel (LRS)	0.080	1.300	0.070	0.323	0.250
Resulfurized steel (RS)	0.070	0.910	0.087	0.321	—
Carbon steel (S10C)	0.100	0.400	0.025	0.019	—

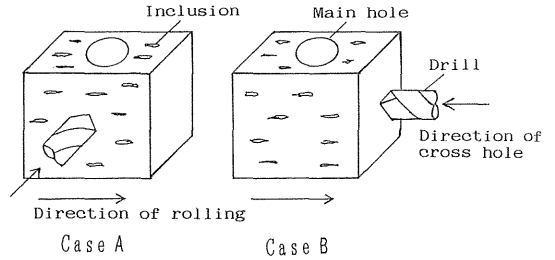


Fig. 1 Relationship between rolling direction and cross holes

述の式 (1) に基づくボールバニッシングによるバリ除去を行うために、アジャスタブルリーマによる加工を行って、直径をわずかに変化させた。交差穴は主穴と直角方向に、主穴加工と同一条件で加工した。ただしドリル径は4, 6, 8, 10mmの4種類とした。ここで、Fig. 1に示すように試験片の圧延方向と垂直に交差穴を加工した場合をCase A (60例), 平行な場合をCase B (57例) とする。なお主穴と交差穴の中心位置は試験片端面からとも12mmとした。主穴直径の測定は三点マイクロメータで行い、発生した一次バリの寸法と形状は投影機で測定した。バリ除去にはFig. 2に示すように、主穴に鋼球を通過させるボールバニッシング法⁵⁾ (以下BBと略記) によった。鋼球の押込みには、ジグを介して油圧式圧縮試験機を利用した。この方法では主穴と鋼球の直径差 Δ に次の条件が必要である。

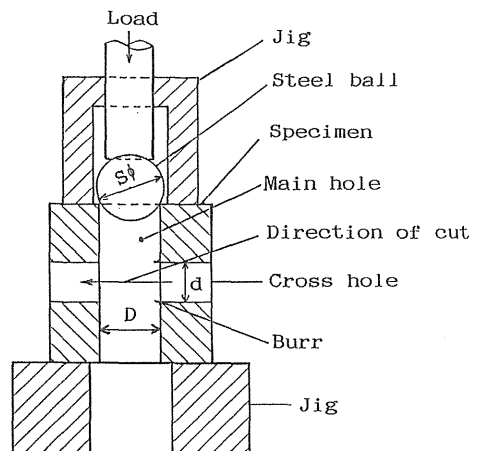


Fig. 2 Set-up for deburring at cross holes by ball burnishing

$$\Delta = S\phi - D \geq 0 \quad (1)$$

使用した鋼球(呼び径 $S\phi = 10.0\text{mm}$, $\text{HRC} = 60$)の直径は一定なために, Δ は主穴加工時に上述のリーマ加工を行って調整した。BB時の鋼球の押込み荷重, 終了後の二次バリ寸法, 主穴の拡大代, 鋼球の損傷幅等を測定し, BBの有効性を検討した。さらに試験片を主穴軸方向に切断し, バリ発生部周辺の観察や形状の測定を行った。

3. 穴の交差部に発生するバリ

まず交差穴加工におけるバリの発生状況について, ドリルで主穴まで加工した場合(末貫通)とさらに主穴を横切って加工した場合(貫通)を調べた。Fig. 3は主穴

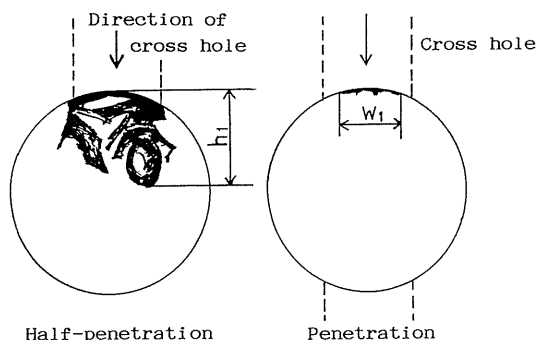


Fig. 3 Burr morphology generated inside main hole

上部より観察した, 代表的なバリ形状のスケッチの一例を示す。主穴加工によって発生したバ리를一次バリと呼び, そのバリの最大高さを h_1 , バリの最大幅を w_1 とする。同図より末貫通の場合の h_1 はかなり大きい, 貫通加工になると h_1 が比較的小さくなるのがわかる。本研究では交差穴貫通加工により発生するバ리를主に扱う。

Fig. 4は快削鋼, およびS10Cに直径 d のドリルで交差穴を加工した場合の h_1 と d の関係を示す。バリが発生しなかった場合は, 図から除外した。快削鋼では, h_1 はほとんど 1mm 以下である。特に鉛複合快削鋼では $d = 6, 8\text{mm}$ でバリが発生しない場合もあり, 他の二種類の材料に比べてバリの発生が少ない。また硫黄快削鋼とS10Cでは, CaseAとCaseBを比較すると, CaseAの場合には h_1 は全体的にやや大きく, バリの発生割合も幾

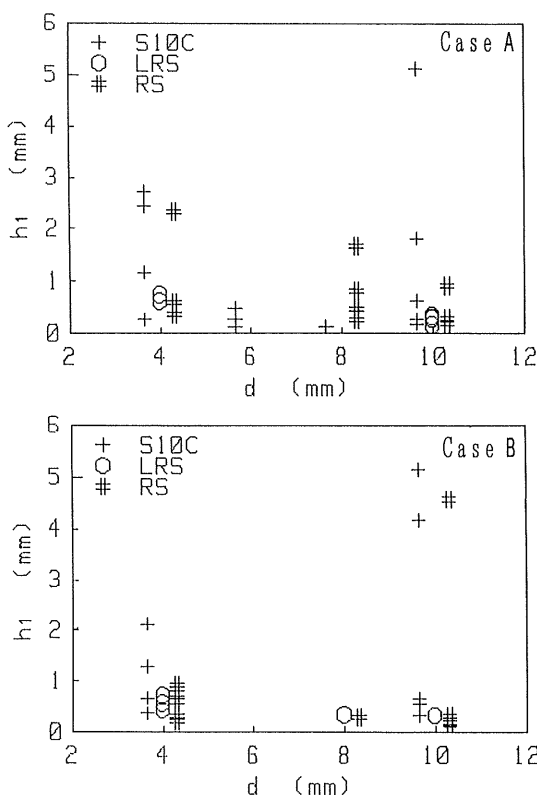


Fig. 4 Relationship between height of first burr and diameter of cross holes

分多い。

4. ボールバニッシングによるバリ取り

4.1 交差穴周辺部の様子

Fig. 5は, BB後の試験片を切断し, バリの行方を観察した写真の一例を示す。S10Cに $d = 4\text{mm}$ の交差穴をあけた場合である。一般に, BBによって交差穴円周に生じたバリはかなりの割合で除去されるが, この例のように完璧にバリの除去が出来ていない場合もある。すなわち, 円周の一部分にバリ除去時の二次的な影響が残る。ここではこのような欠陥を二次バリと呼ぶ。この形態としては, 大別すれば交差穴へのバリの押し延ばしや折り曲げ, あるいは主穴面へのバリの巻き込みや押し潰しによる付着がある。それらを評価する量として, 前者は二次バリ高さ h_2 , 後者は二次バリ厚さ t_2 を用いる。その他にわずかであるが, 穴周辺の欠けやダレ, かじり等が認められる場合もある。

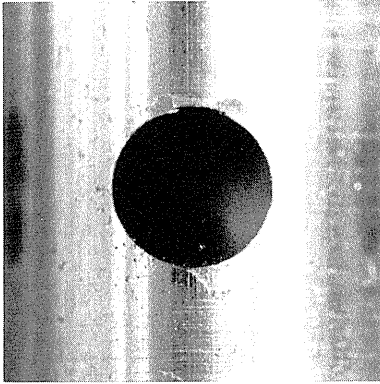


Fig. 5 Burr after ball burnishing

4.2 二次バリ

Fig. 6は、一次バリ高さ h_1 をもつ試験片がBB後に二次バリ高さ h_2 を生じたときの関係を示す。図中の直線は $h_1=h_2$ を示す。快削鋼ではCaseA, CaseBいずれの場合も h_2 が0.5mm以下となっている。このように h_2 は h_1 よりかなり小さくなる傾向にあるが、 $h_2 > h_1$ となる場合も数例ある。

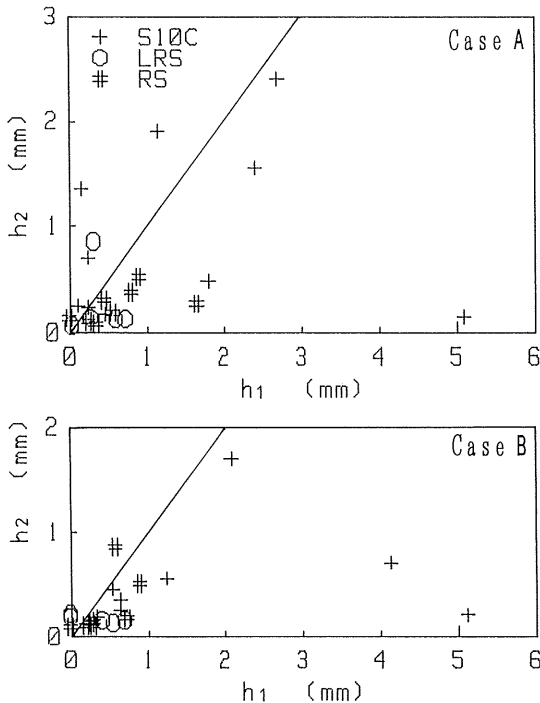


Fig. 6 Relationship between height of first burr and that of second burr

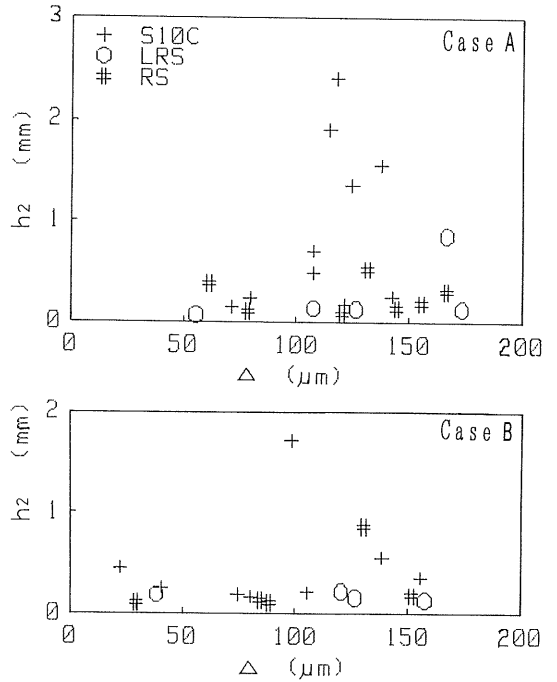


Fig. 7 Relationship between difference in diameter and height of second burr

Fig. 7は、直径差 Δ と h_2 の関係を示す。 Δ が大きくなれば h_2 も増大する傾向にあるが、快削鋼の場合には Δ により h_2 は大きく変化していない。

Fig. 8は、 h_1 と二次バリ厚さ t_2 の関係を示す。 t_2 は試験片を主穴軸方向に切断し、粗さ計で測定した。CaseBの場合は、いずれの材料もBB後の t_2 は50 μ m以下となり、CaseAに比べてバリの巻き込みや押し潰しによる付着の少ないことがわかる。鉛複合快削鋼ではCaseA, CaseBいずれの場合も t_2 は25 μ m以下である。

4.3 BBにおける最大荷重および主穴拡大代

Fig. 9はBB時に要した最大荷重 P_{max} と直径差 Δ との関係を、 h_1 が存在しなかった試験片の場合も含めて示す。数例を除いて、鋼球がFig. 1の交差穴の上部または下部を通過するときに押し込み荷重は最大となった。同図よりCaseBでは Δ と P_{max} はほぼ比例関係にあるが、CaseAの場合には測定値に大きなバラツキが見られる。

Δ とBB後の主穴拡大代 ϵ の関係は図示しないが、材

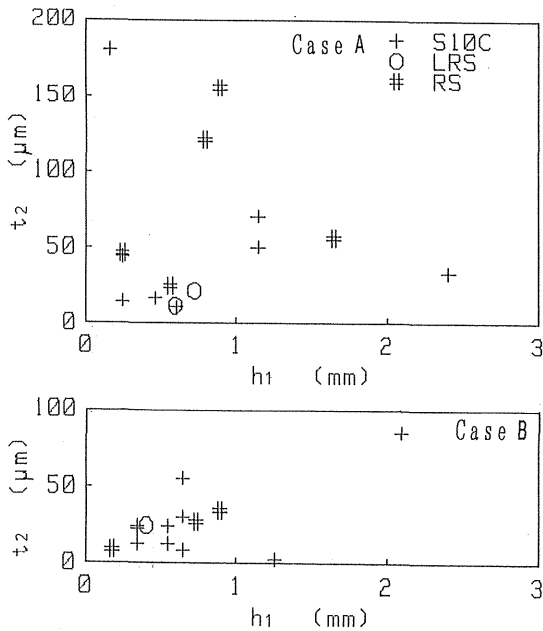


Fig. 8 Relationship between height of first burr and thickness of residual burr

質によらず, また, CaseA, CaseBいずれの場合にも測定値にバラツキも少なく, Δ の増加に比例して ϵ も増加した。両者の関係は $0 < \Delta < 200 \mu\text{m}$ の範囲で次式の実験式で表される。

$$\epsilon = 0.88 \Delta - 7.0 \quad \mu\text{m} \quad (2)$$

4.4 鋼球の損傷幅

BBに使用した鋼球には帯状の傷が残る。この幅を損傷幅 dw と呼び, Δ と dw の関係を Fig. 10に示す。Fig. 9 とほぼ同様な関係を示し, CaseAではバラツキが大きく相関は認められないが, CaseBの場合には, Δ にほぼ比例して dw も増加する傾向を示している。

5. 考 察

5.1 交差穴バリの形成と除去機構

Fig. 3 に見るように, 交差穴加工時にドリルが主穴を貫通するか未貫通かにより h_1 に大きな差が生じた。一般にドリル加工における抜けぎわ部のバリは, 主にスラスト力によって塑性変形した被削材と, 完全に排除さ

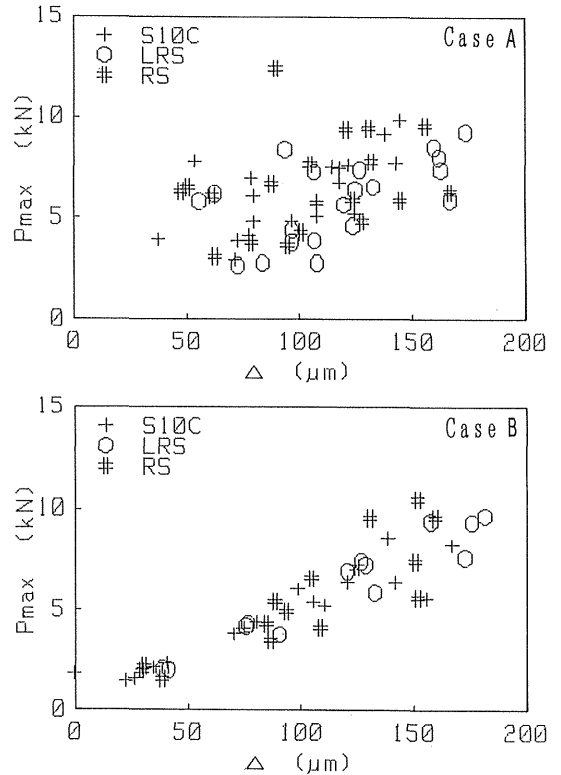


Fig. 9 Relationship between maximum burr-removal load and difference in diameter between ball and main hole

れずに付着した切屑によって形成される³⁾。未貫通時には通常のドリル加工と同様な機構でバリが生成される。しかし主穴を交差して貫通穴を加工した場合には, 主穴内部に排出される切屑が主穴内のバリと接触し, このバリの先端部を取り去ることによって h_1 を小さくしていると考えられる。これを確認するために, 材質は異なるがSS41材についてそれぞれ7例づつ追実験してみた。

Fig. 11は交差穴加工におけるドリル径を $d = 4, 6, 8 \text{ mm}$ と変更した場合の未貫通(H), 貫通(P)時の h_1 , および w_1 を示す。バリの最大最小寸法の範囲を示しているが, O印はその平均値である。同図(a)の h_1 は貫通加工により明らかに小さくなっている。同図(b)の w_1 は6Pを除き, 貫通の場合と未貫通加工とでは大きな差は認められない。バリ先端に付着した切屑は, 引き続き発生する切屑によって容易に除去されたものの, 被削材が塑性変形を受けて, 主穴壁面に押し出されて生成し

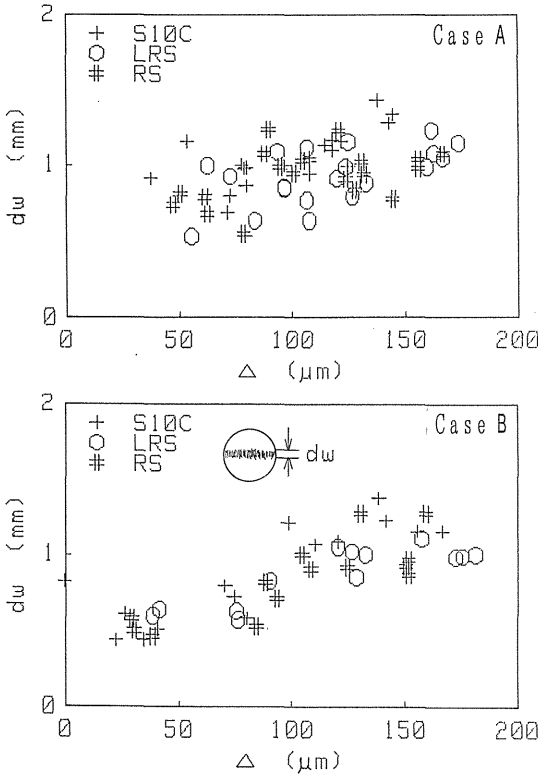


Fig. 10 Damage width on steel ball vs. difference in diameter between ball and main hole

た塑性バリは取り除くのが難しいことがわかる。

交差穴加工でバリ発生を少なくするには、主穴にドリル先端が抜ける時のスラストを小さくして塑性バリの発生を抑え、さらに主穴を交差して貫通加工する時の切屑を多くして、その切屑によるバリ除去作用を利用することが有効と考えられる。このような観点から、常に切れ味の良いドリルを使用するのが望ましい。

一方、Fig. 4 に見るように交差穴加工で発生したバリは、ドリル直径 $d=4\text{ mm}$ の場合に大きく、 $d=6, 8\text{ mm}$ では小さいか、発生しない場合もあった。主穴の直径は $D=10\text{ mm}$ であるから、 $d/D=0.7$ 前後で一次バリ高さ h_1 が小さくなっている。前報⁵⁾ のAl材の場合にも $D=12.7\text{ mm}$ に対して $d=8\text{ mm}$ のときに h_1 は小さかった。この現象をFig. 12の交差穴抜け際の概略図で考えてみる。

交差穴が主穴に到達する際には、まず主穴壁をドリルのチゼル部が抜け、切れ刃は断続切削となる。切れ刃と被削材の接触長さ(切削幅)は中心から外周に向かって

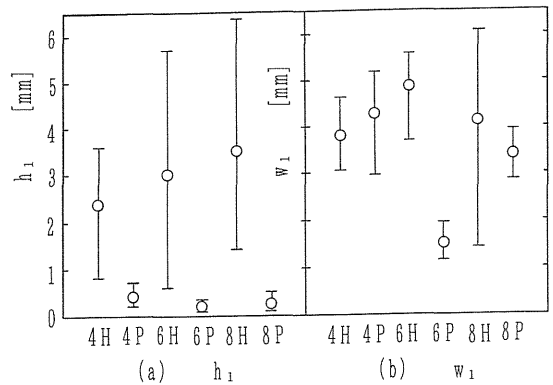


Fig. 11 Relationship between height h_1 and width w_1 of first burr and diameter of cross holes

徐々に短くなるが、切れ刃の外周部は最後まで切削に関与し、一刃当たりの実質切削体積がゼロとなって、穴あけは完了する。バリはこの最終状態における切れ刃の外周部と被削材との相互作用の結果として生じる。Fig. 12から明らかのように、平板の穴あけと異なるのは、主穴壁面が凹状の円筒曲面であることである。図示のドリル位置①の状態ではチゼル部がすでに主穴壁を貫通しているためにチゼル部の押し出し作用³⁾によって未切削部が送り方向に押し曲げられ、大きなバリとなるようなことはない。除去体積が最大となる図示の状態を経て、ドリル位置②で交差穴加工は終了するので、一次バリは最終の送り量で切削に関与した図示の位置に生ずることになり、実験でもこの位置に大多数のバリが発生した。

交差穴の直径 d が主穴の直径 D に比較して小さい場合には貫通穴出口の主穴壁は平面に近づき、したがって上述のチゼル部の影響を受けて大きなバリが発生する。一方 $d=D$ の場合には、数例ではあるが、大きなバリが残った。これは交差穴加工時のわずかな芯ずれが原因として、主穴壁の側面を削ったためと考えられる。芯合せさえ正確に行えれば、バリの抑制の観点からは主穴径に近い交差穴をあけるのが望ましいことになる。

5.2 バリ除去率

交差穴加工でバリが発生した試験片について、BBによるバリの除去効率を調べてみる。交差穴側から観測して二次バリ高さ h_2 が $h_2 \leq 0.2\text{ mm}$ である場合にバリは除去できたものとし、その全体数に対する割合をバリ除去率

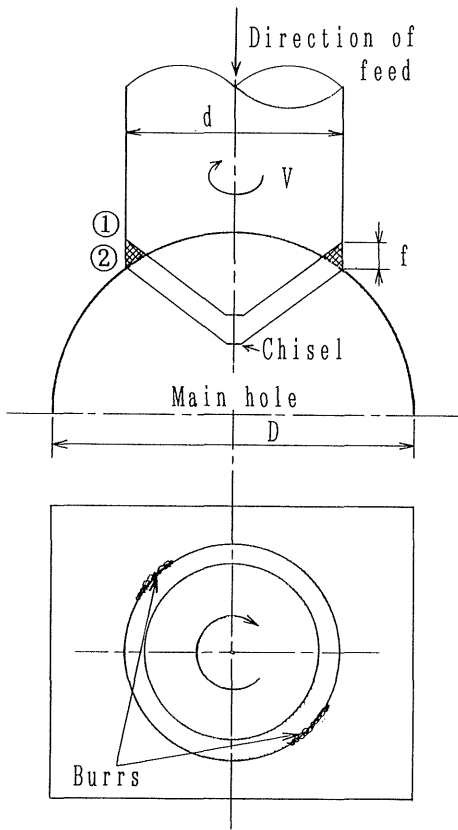


Fig. 12 Schematic of drilling cross holes at final stage

R (%) とする。

Fig. 13 はバリ除去率を示す。同図 (a) は材種による R の比較を SS41 材も含めて示している。鉛複合快削鋼では $R=89\%$ と大部分のバリが除去されるのに対して, S10C では $R=40\%$ と BB によるバリの除去効率が低いことがわかる。同図 (b) は鋼球と主穴の直径差 Δ と R の関係を, 材種に関係なく比較した。 $0 \leq \Delta \leq 0.1$ で $R=67\%$ と除去効率高く, 適度な直径差が必要であることがわかる。 $0.1 < \Delta$ では鋼球による主穴壁の圧延効果により, かえって h_2 が増加したものと考えられる。数例ではあるが, $\Delta < 0$ の場合についても調べた。 $R=50\%$ と, 半数で h_2 は認められなかったが, 二次バリ厚さ t_2 が増加する場合もあり, 推奨できない。同図 (c) は Fig. 1 の Case A と Case B に示す交差穴の方向が R に及ぼす影響を, 材種に関係なく比較している。 Case A の場合より Case B の方が明らかにバリ除去効率高い。すなわち, 圧延方向に垂直にあけた主穴に対して交差穴の加工は材料の圧延方向と平行に行うのが, バリ除去の観点から有効なことがわかる。

5.3 快削鋼の交差穴バリの特徴

Fig. 13 (c) の傾向は快削鋼の場合にはさらに顕著に現れた。 Case B の場合には, 交差穴加工によって被削材が圧延方向に押し出されることによって塑性バリが生じたものと考えられる。これに伴い一次バリ中の快削添加物も圧延方向に押し延ばされ, 添加物のぜい性付与

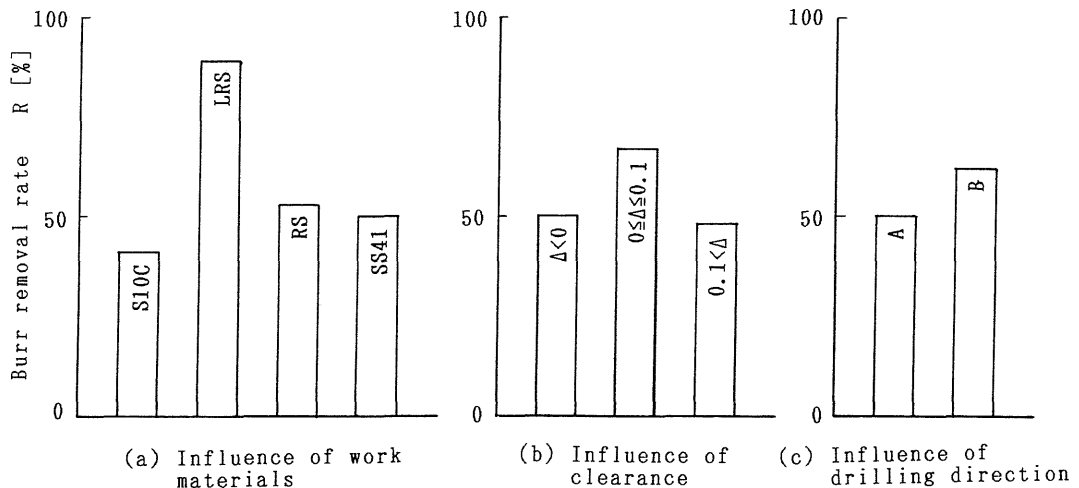


Fig. 13 Burr removal rate by the ball burnishing method

効果⁶⁾がさらに増長される。したがってこれと直角方向にボールバニッシングを行った場合には、一次バリは容易にぜい性破壊を起こして、除去されうる。一方、Case Aでは、交差穴加工によって生じた塑性バリ中の快削添加物は楕円体の短軸方向に押し延ばされるので、とくにぜい性付与効果が促進されることにはなっていない。

快削鋼の中でも鉛複合快削鋼のバリ発生が少なく、かつバリの除去も容易に行えた。鉛を添加することによって、すくい面の潤滑作用が増すために摩擦係数が減少⁷⁾する。このために Fig. 14の急停止写真に見るように、鉛複合快削鋼では切屑厚さが減少し、かつ切削抵抗も減少する⁷⁾。さらに注目すべき点は、S10Cと比較すると刃先点より下方に塑性変形がほとんど生じていない。この塑性変形域は、切削終了時には負のせん断域となって終端バリの生成に寄与することになる⁸⁾。したがって鉛複合快削鋼の場合には生ずる塑性バリは小さく、かつ加工硬化も大きくないので、Fig. 13に見るようにその除去率は高かったものと考えられる。

6. まとめ

被削材に快削鋼と標準鋼を選び、交差穴加工により発生するバリに関して、その観察と、バリの簡易な除去方法としてボールバニッシングを試みた。快削鋼ではバリの発生自体が少ないこと、発生したバリも除去効率が50%以上となることを確かめた。鉛複合快削鋼の場合には

89%に達した。また材料の圧延方向を考慮した交差穴加工により、バリ発生やバリ除去効率が変化することがわかった。すなわち、圧延方向に垂直にあけた主穴に対しては、交差穴を圧延方向に平行にあける方が除去効率が低い。さらに主穴径に対する交差穴径の比が0.7前後のときに一次バリ高さが最小となることも見出した。

以上をまとめれば、ボールバニッシングによるバリ取りが100%有効でない以上、バリ発生をできるだけ少なくするような材料やドリル径を選択し、また加工条件も、快削鋼の場合には穴のあける方向も考慮し、抜け際の送り量を小さく設定するのが肝要である。

謝 辞

快削鋼ならびに急停止写真を提供していただいた北見工業大学 北川武揚教授に厚くお礼申し上げる。本実験に協力した卒業研究生の上原英一氏(現、富士電機(株))に、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 高沢孝哉：バリテクノロジー，朝倉書店，(1980) 73
- 2) 大島郁也，前川克廣，村田良司：バリテクノロジーの研究(第6報)，日本機械学会・精密工学会共催 日立地方講演会論文集(1990.9) 129
- 3) 三宅輝明，山本章裕，北嶋弘一，田中行雄，高沢孝哉：ドリル加工におけるバリ生成に関する研究，精密工

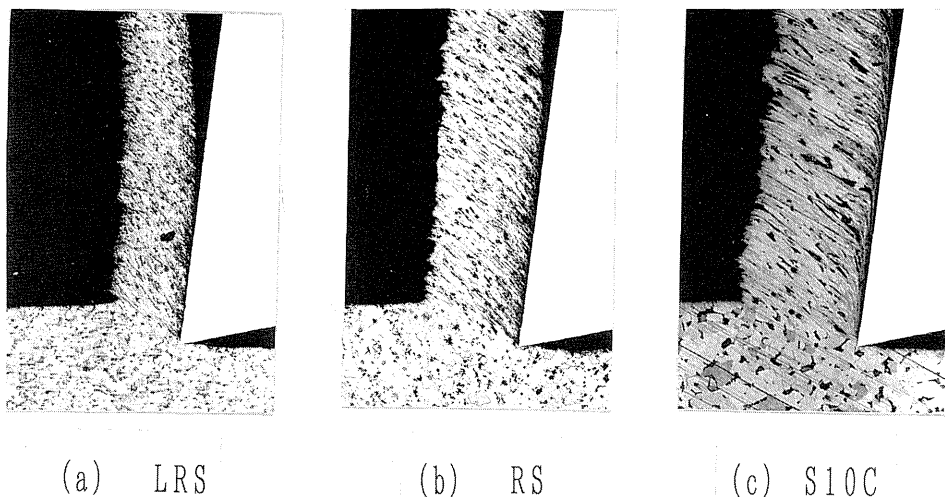


Fig. 14 Quick-stop for various steels : cutting speed $V=100\text{m}/\text{min}$, feed rate $f=0.2\text{mm}/\text{rev}$, rake angle $\alpha=10^\circ$, width of cut $w=2\text{mm}$, dry cutting

学会誌, 57, 3 (1991) 485

- 4) L. K. Gillespie and P. T. Blotter: The Formation and Properties of Machining Burrs, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 98, February, (1976) 66
- 5) 大島郁也, 村田良司, 前川克廣: 交差穴のバリ取りに関する研究 (第1報), 茨城大学工学部研究集報, 38 (1990) 61
- 6) 帯川利之, 白樫高洋, 臼井英治: 快削添加物粒子の
ぜい性効果 (その2), 精密工学会誌, 53, 7 (1987) 1057
- 7) 前川克廣, 久保明彦, 北川武揚: 快削鋼の被削性解析 (第1報), 精密工学会誌, 57, 5 (1991) 875
- 8) Sung - Lim Ko and D.A. Dornfeld: A Study on Burr Formation Mechanism, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 113, January, (1991) 75