深穴加工における穴の曲がり*

— 工具形状の影響 (案内形状) —

甲木 昭雄*¹, 鬼鞍 宏猷*¹
佐久間敏三*², 田口 絃一*³The Influence of Tool Geometry on Axial Hole Deviation
in Deep Hole Drilling: Shape of the Guide PadAkio KATSUKI Hiromichi ONIKURA
Keizo SAKUMA Koichi TAGUCHI

The setup (in the rotating workpiece and stationary tool system or in the rotating tool and stationary workpiece system), misalignment of machining system, shape of the workpiece and tool geometry (single or multiedged tool) have been examined in terms of the hole deviation.

In the present paper, the influence of a guide pad on hole deviation is mainly examined on chamfer angle, back taper and tool wear using BTA tools. The following points are clarified. The hole deviation decreases with an increase in the chamfer angle of the guide pad; chamfer angles vary between 12° and 45°. The hole deviation decreases less with an increase in the back taper; the back taper varies between 0 μm/mm and 8.8 μm/mm. The hole deviation increases suddenly at the hole depth between 4 m and 5 m where the wear of the margin begins to advance over the chip breaker.

Key Words: Cutting, Tool, Axial Hole Deviation, BTA Boring Tool, Guide Pad, Back Taper, Chamfer Angle, Margin, Wear

1. 緒 言

Q/d (Q : 穴深さ, d : 工具径) の大きな深穴加工で問題となる穴の曲がりに関して, これまで, 加工法 (工作物回転, 工具回転), アライメント誤差の影響, 工作物形状の影響, 工具形状の影響などについて明らかにしてきた^{(1)~(5)}.

工具形状と穴の曲がりの関係では, はじめに, 切れ刃の工具ヘッド部での配置 (一枚刃 BTA 方式工具, 一枚刃ガンドリル, 複切れ刃 BTA 方式工具, 二枚刃ガンドリル) について⁽¹⁾, 次に, 一枚刃ガンドリルの切れ刃角やすくい面上の凸部について調べた⁽⁵⁾.

本研究では, さらに, 標準 BTA 方式工具の案内形状 (面取り角, バックテーパ), 案内部やマージンの摩耗, 工具材種 (超硬 P10, K10) について吟味する.

2. 実験方法

実験は, 深穴加工機を用い, 工具回転, 工作物送り方式で行った. 切削油: 不水溶性硫化塩素化油 (ユシロンカット DS50, JIS2種13号), 油圧 2.3MPa, 油量 75 L/min. 工具: 直径 20mm, 超硬 P10 (材種の比較では, K10も使用). 被削材は S35C (HB175) を用いた.

穴の曲がり, 機械主軸に, 工具の代わりに測定用治具を取り付け, その先端に貼ったストレングージにより, 工作物を送って測定した⁽²⁾. 測定長は 200mm.

3. 結果および考察

3.1 切削条件の影響

3.1.1 回転数の影響 送り量を $f=0.06\text{mm/rev}$ とし, 回転数 N を 800, 1600, 2400rpm と変化させて行ったときの穴の曲がり R を図 1 に示す. R は穴の入口の中心を原点としたときの出口の中心の半径方向偏差である. また, 図 1 における○印は, おおのこの工作物における測定結果を示す.

穴の曲がり, 回転数が増加するにつれて大きくなる傾向にある. これは, 工具回転速度の増加につれて,

* 平成元年 11 月 21 日 九州支部・中国四国支部合同長崎地方講演会において講演, 原稿受付 平成元年 2 月 6 日.

¹ 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1).

² 正員, (〒813 福岡市東区八田 3-4-5).

³ 正員, 有明工業高等専門学校 (〒836 大牟田市東萩尾町 150).

遠心力によるボーリングバーのふれまわりが大きくなるため、工具ヘッド部の傾きが大きくなるものと考えられる（図2（a））。なんらかの原因で工具の振れ回りがなくなり、工具が傾いたまま加工が進めば、穴は、その傾きの方向へ曲がっていくものと考えられる

図1 回転数と穴の曲がりの関係

図2 工具の状態

図3 回転数と真円度の関係

（図2（b））⁽⁶⁾。ただし、この縄跳び運動が加工中継続されれば、穴は拡大し、曲がりが減るものと考えられる。

真円度は、回転数が増えるにつれて、いくぶん悪くなる傾向にある（図3）。これは、回転数が増えるに

図4 送りと穴の曲がりの関係

図5 食いつき時における工具の姿勢

図6 穴深さ方向における穴拡大量の推移

つれて、工具ヘッドの安定性がいくらか減少するためと考えられる。穴拡大量、表面粗さ R_a は、回転数が変化してもほとんど変わらず、それぞれ $-15 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 程度であった。

3.1.2 送りの影響 回転数を $N=1600\text{rpm}$ ($V=100\text{m/min}$) とし、送り量 f を 0.06 、 0.08 、 0.12 mm/rev と変化させた場合の穴の曲がりを図4に示す。穴の曲がり、送りが増加するにつれて増加する傾向にある。この原因として、送りの増加にともない、スラスト P_T が増加しボーリングバーがたわむことによる工具ヘッドの傾きの増加および主分力 P_H が増加し、曲げモーメント M_f が増加することによる工具ヘッドの傾きの増加が考えられる(図5)。食い付き時に工具が大きく傾き、縄跳び運動を維持できず、その傾きの方向に穴があげば、穴の曲がりも大きくなる。図6に示されるように送りが大きい程食い付き時における穴拡大は顕

著になり、工具もより大きく傾いていることがわかる。

真円度、表面粗さ R_a はそれぞれ約 $1.8 \mu\text{m}$ 、 $0.7 \mu\text{m}$ で、送りの影響をほとんど受けず、ほぼ、同じ大きさであった。

3.2 面取り角 λ_G の影響 実験は、案内部長を $\lambda_G=16.5\text{mm}$ で一定とし、同一工具の面取り部を $\lambda_G=12.3$ 、 25.7 、 44.8° に削ぎ落としながら行った(後述の図16(a))。図7、図8で、 $\lambda_G=4^\circ$ と 10.6° の場合は、次の理由により別の工具を用いて行った。

標準工具 A、B を $\lambda_G=4^\circ$ に削いで実験を行ったところ、穴拡大量が大きくなる傾向にあり、多角形状

(a) X-Y座標における穴の曲がり

図7 面取り角 λ_G と穴の曲がりの関係

図8 面取り角 λ_G が穴拡大量と真円度に及ぼす影響

図9 バックテーパと穴の曲がりの関係(むく材)

図10 バックテーパと穴拡大量の関係(むく材)

誤差（5角形）が発生した。B工具の面取り部をさらに $\lambda_g = 10.6^\circ$ に削いで実験を行っても、拡大量の大きな多角形穴（5角形）が生じた。このように λ_g が小さい範囲で切削状態が不安定になるので、同一工具で $\lambda_g = 4^\circ$ の実験を行うことを避け、標準工具Cを用い、 $\lambda_g \geq 12.3^\circ$ の場合について調べた。

面取り角 λ_g と穴の曲がりの関係を図7に示す。図7で、○●□■などの各印はおのこの工作物における測定結果を示す。白抜きはむく材を、黒塗は、加工後穴壁の一部（ここでは、+X方向）が薄肉になる工作物を示す。図7（a）は、穴の入口を原点とした場合の出口の座標である。図7（b）は、X方向（薄肉の方向）のみを考え、むく材のX方向の平均値を0にとり、そこから、偏肉材の穴の曲がりをとったものである。

X-Y座標で、加工穴は、+Y方向へ曲がり、むく材の場合 $X=0$ （Y軸）近傍に集まり、偏肉材になると、+X方向（薄肉の方向）へ曲がる傾向にある（図7（a））。

図7（b）、（c）より、面取り角 λ_g による影響

図11 バックテーパが穴の曲がりおよび湾曲量に及ぼす影響（偏肉材）

図12 バックテーパが穴拡大量および真円度に及ぼす影響（偏肉材）

は、C工具（ $\lambda_g \geq 12.3^\circ$ ）に着目すると、 λ_g が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。 λ_g が小さくなれば、穴壁からの拘束力が増し、工具の案内作用も増加すると考えられるが、一方、材料に薄肉や、硬さに不均一性があり、工具が、薄肉や軟らかい材料の方向へ曲がると工具はその方向へ大きく曲がっていくものと推定される。 λ_g がある程度大きいと、工具の傾きに幅ができ、薄肉や軟らかい材料の方向への工具の移動量がそのまま工具の傾きの増加にならずいくぶん緩和されるものと考えられる。

λ_g が 12.3° より小さくなると、穴拡大量や真円度が悪化する傾向にある。これは、穴壁からの工具の拘束力が増すために、工具が不安定になり、振動が発生しやすくなるためと考えられる。

3.3 バックテーパの影響 工具ヘッドのバックテーパは、ヘッドの傾きの範囲を決定し、穴の曲がりに直接影響するものと考えられる。ここでは、バックテーパを0から $8.8 \mu\text{m}/\text{mm}$ まで変化させて穴加工を行い、曲がりを調べる。工具はバックテーパが変わるごとに交換した。回転数 $N = 1600 \text{rpm}$ 、送り量 $f = 0.06 \text{mm}/\text{rev}$ 。

3.3.1 むく材の加工 図9、図10にバックテーパを変えた時の穴の曲がりおよび穴拡大量を示す。穴の曲がりは、バックテーパが大きくなるにつれて小さくなる傾向にあり、穴径は工具径に近い。真円度は、ほぼ $5 \mu\text{m}$ 以内であった。

図13 動力計

(a) 工具材種 P10 (b) 工具材種 K10

図14 穴深さ ℓ とトルクの関係

3・3・2 偏肉材の加工 図11, 図12に実験結果を示す。穴の曲がりはバックテーパーが大きくなるにつれて小さくなる傾向にある。また、同時に、穴の湾曲量Eも減少している。

バックテーパーが大きいほど穴の曲がりが小さくなるのは、次のように考えられる。穴壁からの拘束は、バックテーパーが小さいほど大きい。したがって、いったん工具が材料の不均一性や偏肉などで、材料の軟らかい方向または、薄肉の方向へ移動するとその偏差は、修正することが困難である。一方、バックテーパーが大きければ、穴壁からの拘束も少なく、偏差が生じても、工具の傾きは、いくぶん緩和される。したがって、バックテーパーが大きいほど、穴の曲がりも減るものと考えられる。

真円度は、バックテーパーの影響が少なく、 $0\mu\text{m}/\text{mm}$ の場合と $8.8\mu\text{m}/\text{mm}$ の場合にのみいくぶん悪くなる。このとき、加工穴は、多角形(5角形または3角形)になっていた。

3・4 工具摩耗および工具材種の影響

3・4・1 切削力の測定 図13に示すような動力計を製作し、トルクおよびスラストを試験片固定部近くの円筒に貼ったストレングージにより測定した。動力計の検定を、トルクで25Nm, スラストで2kNまで行ったが、トルクおよびスラストの相互干渉はほとんど認められずリニアリティも良好であった。動力計は工作物と全く同じように取り付けた⁽⁴⁾。

試験片は、工作物と同じ材料(S35C)で $35\text{mm}\times 70\text{mm}\times 13\text{mm}$ の大きさとした。加工も実験と同じ条件($N=1600\text{rpm}$, $f=0.06\text{mm}/\text{rev}$)で行い、深さ13mmの通り穴をあけた。

実験は次のように行った。試験片を4個穴あけし、その後215mm(測定長200mm)の穴をむく材と偏肉材交互に4本穴加工する。この後同じ順序で繰り返し全穴深さ l が9.4mmになるまで穴加工を行う。

工具は直径20mmで、二種の材種P10, K10について実験を行った。工具のバックテーパーは、それぞれ $4.7\mu\text{m}/\text{mm}$, $5.4\mu\text{m}/\text{mm}$ であった。この場合の全トルク(バニシトルクを含む)および切削トルクを図14に示す。ここで、○印は各深さにおける全トルク、●印は切削トルクを示す。またおのおのの印は4個の試験片に対するトルクの平均値である。両トルクともに切削距離が長くなり、摩耗が進行するにつれて増大している(図16(b), (c)および図18)。

3・4・2 工具摩耗が穴の曲がりに及ぼす影響

穴深さ l と穴の曲がりの関係を図15に示す。図15(a)および(b)は、穴の入口中心を原点にとった場合の出口中心をX-Y座標で示す。○□△●■

▲等の印は一定の深さ範囲における各工作物での穴の曲がりであり、白抜きはむく材、黒塗は偏肉材の場合を示す。図15(c)および(d)は、穴深さ l とX方向(薄肉の方向)の穴の曲がりの関係を示す。○●印は各穴深さにおけるむく材と偏肉材のX方向の穴の曲がりを示す。

全体的に、加工穴は+Y方向へそしてむく材より偏肉材でより大きく+X方向へ曲がっている(図15

(a) X-Y座標における穴の曲がり(工具材種P10)

(b) X-Y座標における穴の曲がり(工具材種K10)

(c) X方向穴の曲がり(P10)

(d) K10

図15 穴深さ l と穴の曲がりの関係

(a), (b)), 薄肉による影響は, Q が増加するにつれて減少し, $Q=4\sim 5\text{mm}$ でいったん増加するが, さらに Q が増加すると減少していく傾向にある(図15(c)). $Q=4\sim 5\text{mm}$ で穴の曲がりが増大する時期は, マージンの摩耗がチップブレイカとマージンの交点(図16(a), A部)を越えようとする時であった(図16(c), $Q=5.4\text{mm}$). なお, A部は, P10工具で第二案内部の肩部(図16(a), B部)より 0.15mm , K10工具で 0.51mm 先行していた.

マージンの摩耗がチップブレイカを越えてから(図16(c), $Q=5.4\text{mm}$)穴の曲がりが大きくなるのは, 次のように考えられる. 切れ刃外周部は, マージンより上部で, すくい面に対して 45° の傾斜を持つので(図16(a)), この部分での切削は負のすくい角で行われることになり切れ味が悪く, 厚肉側を切削するとき工具は薄肉側へ大きく移動する. すなわち薄肉部の弾性変形が増大し, 切り残し量が大きくなる. 次の切削で, 第二案内部が切り残し部に乗り上げ, マージン部で薄肉部を過切削し(または弾性変形させ), 穴は大きな切り残し厚みだけ薄肉方向へ曲がる.

図17に, $Q=9.4\text{mm}$ 加工後のマージン, 第一, 第二案内部の形状を示す. 小坂式表面形状測定器(SE-3C)を用い, マージンは, すくい面から約 0.2mm の所, 第一, 第二案内部は幅方向で中心の所を軸方向にトレースしたものである. トレースは, バックテーパの $1/2$ だけ傾け, マージンと案内部の工具先端からの位置関係も実際の工具と同じようにした. マージンが先端より 1.1mm まで平均深さで $43\mu\text{m}$ 摩耗し, $1.1\sim 2.2\text{mm}$ まで, $20\mu\text{m}$ の深さの段がついている. この部分は, バックテーパがとれ, 工具中心線と平行になっている. この部分に対応する第一案内部は, θ よりやや大きめの角度で傾斜し, 第二案内部は段がつき, 段は第一案内部とほぼ同じ角度で傾いている. この摩耗の状態から推定すると, Q の増加に伴い穴の曲がりが減少する範囲は, 図17で二つの案内部の先端部が摩耗し始め, 角がとれていく時期に対応している.

図18に第二案内部の摩耗を示す. 摩耗は切削長さが大きくなるにつれて幅広くまた深くなっていることがわかる. $Q=9.4\text{mm}$ では, 面取り部の中央右寄りにクラックが長手方向に生じている.

3.4.3 工具摩耗の穴拡大量, 真円度, 表面粗さへの影響 穴深さ Q と穴拡大量の関係を図19に示す. 偏肉材, むく材いずれも, $Q=4\sim 5\text{mm}$ の間で, 穴の縮小量が増加している. この位置は, 切れ刃のマージンの摩耗がチップブレイカに達し, それを越えるときにほぼ対応している(図16(c), $Q=5.4\text{mm}$).

穴深さ Q と真円度の関係を図20に示す. 真円度が悪化する傾向は, 穴縮小の傾向とほぼ同じである. これは, 摩耗により切れ刃が鈍化し薄肉部の戻り量が大きくなったためと考えられる.

(a) 工具形状 (工具径 20mm)

(b) 逃げ面 (c) マージン
図16 逃げ面とマージンにおける摩耗の進行状況 (工具材種P10)

図17 加工後($Q=9.4\text{mm}$)のマージンおよび案内部断面形状 (一点鎖線は加工前におけるマージンおよび案内部の形状)

図18 第二案内部の摩耗(工具材種P10)

表面粗さは、穴深さが大きくなっても変わらず、ほぼ $0.3\mu\text{mRa}$ であった(P10とK10の差もなかった)。

3・4・4 工具材種と加工穴精度との関係 工具材種の穴の曲がり、穴拡大量、真円度への影響を、それぞれ図15、図19、図20に示す。各図において、二種類の工具材に対して同じ様な傾向を示す。

この実験では、P10工具とK10工具の刃先は同様に摩耗した。したがって、穴精度に差が生じなかったものと考えられる。熱伝導率の高いK10工具の切れ刃に構成刃先が付着していたら、穴が拡大し、穴の曲がりが異なっていたと推定される⁽¹⁾。

4. 結論

以上の実験結果および考察より次のことが明らかになった。

(1) 工具の回転数または送りを増すにつれて、穴の曲がりも増加する。

(2) 面取り角 λ_G が、 12° から 45° の範囲で穴の曲がりは、 λ_G が大きくなるにつれて小さくなる傾向にある。一方、 λ_G が 12° より小さくなると、工具の安定性が悪くなり穴が拡大し、真円度も悪くなり、多角形状誤差(5角形)が発生した。

(3) $0\mu\text{m}/\text{mm}$ から $8.8\mu\text{m}/\text{mm}$ の範囲で、バックテーパーが増加するにつれ、穴の曲がりは減少する。

(4) BTA工具のマージンの摩耗がチップブレイカの位置からさらに進むうとするとき、穴の曲がり、穴拡大量、真円度が急に悪くなる。

(5) P10工具とK10工具で鋼材(S35C)の切削の際、穴の曲がりに差異は認められなかった。

終わりに、工具を提供していただいた日本ピーターエー会社ならびに実験に協力された西村知樹氏(日本航空会社)、当時学生であった明石忠雄氏(大学院生)、井浦嗣彦氏(京セラ会社)にお礼申し上げます。

文献

- (1) Sakuma, K., Taguchi, K. and Katsuki, A., Annals

図19 穴深さ l と穴拡大量の関係 図20 穴深さ l と真円度の関係

of the CIRP, 30, 1(1981), 311.

- (2) 佐久間・田口・甲木, 精密機械, 49-10 (昭58), 1379.

- (3) 田口・甲木・佐久間, 精密機械, 50-10 (昭59), 1634.

- (4) 甲木・佐久間・田口・鬼鞍, ほか2名, 機論, 53-486, C (昭62), 471.

- (5) 甲木・佐久間・鬼鞍, 機論, 54-502, C (昭63), 1350.

- (6) Stürenburg, H.O., tz für Metalarbeitung, 7, 6(1983), 34.

- (7) 佐久間・田口・金城, 機論, 43-371 (昭52), 2973.