小穴抜き加工特性に及ぼす工具形状の影響*

笹田 昌弘^{*1}, 小林 仁^{*2}, 青木 勇^{*1}

Influence of Punch Geometry on Small Hole Piercing Characteristics

Masahiro SASADA^{*3}, Hitoshi KOBAYASHI and Isamu AOKI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kanagawa University,
3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 221-8686 Japan

Experiments and FEM analysis on small hole piercing were carried out. In this paper, small hole piercing is defined as piercing performed using punches that have smaller diameter than the material thickness. The results of this study clarified the followings; 1) Shearing force, stripping force and pushing force are considerably affected by the friction between the punch flank and inner surface of pierced hole, 2) The use of tapered punch is effective for reducing frictional force, and 3) Increasing the linear portion at the punch tip increases the shearing force. The experimental and analytical results were also found to agree for these findings.

Key Words: Shearing, Small Hole Piercing, Finite Element Method, Elastic-Plastic Deformation, Taper Angle

1. 結 論

せん断加工は高い生産性と加工の安定性に優れることから、各種機械・電気電子部品の製造技術として広く用いられている。近年は製品の小型化・精密化が著しく、特に電子機器部品や精密機器部品の分野では、微細機構製品が増加している。これに伴い、板厚あるいはそれ以下の穴あけ、打抜きなどの微細加工が増加している。

板厚とパンチ直径の比(相対パンチ直径)が1以下の穴あけは小穴抜きと呼ばれ、加工初期が押し込み加工に類似することや、押し込み力及び引き取り力が大きくなることなど通常のせん断加工とは異なる¹⁰⁾。著者が先に行った研究からも、相対パンチ直径が小さくなるほどせん断力、押し込み力及び引抜き力が大きくなることが確認されている³⁾。さらに小穴抜き加工では細長いパンチを用いることから、パンチの損傷及び座屈が問題となることや、今後一層の加工の微細化が進むことと、それらの工業的価値を考えれば、小穴抜き加工についてその問題点を明らかにし、微細化に向けた対策を講じることは意義あることと考えられる。

これらの観点から先行研究を振り返ると、村川らは、厚板部品の小穴抜き加工におけるだれ及び盛り上がり を低減し、停留クラックの発生を防止する精密小穴抜き法を提案している⁴⁾。また結城らは、小穴打抜きにおけるかえりの発生機構と、かえりに及ぼす介在物の影響を検討している⁵⁾。また、せん断加工に関する有限要素解析については、湯川らが、せん断加工に伴うひずみ・応力分布について検討し、バリ及びだれ量の予測を行っている⁶⁾。また、畑中らが、き裂進展モデルを提案し、クリアランスを変化させた場合の計算を行い実験結果と比較検討している⁷⁾。さらに、Suzukiらは二工程上下抜き法に関する有限要素解析を行い、打抜き加工条件と打抜き品形状との関係について検討している⁸⁾。

以上のように、数多くの優れた研究成果が報告されているが、冒頭で述べた小穴抜き加工の微細化に向けた対策を論じたものは著者の調べた限りでは殆ど見あたらない。

パンチの損傷及び座屈を防止し、穴あけ可能な相対パンチ直径を小さくする方法の一つは、小穴抜きの問題点であるせん断力、押し込み力及び引抜き力を低減させることにある。こうした趣旨に基づき、本研究では小穴抜き加工における加工諸力に及ぼす工具形状の影響を、弾塑性有限要素法と実験により検討した。相対パンチ直径が1以下で実用に供され、しかも安定的に

* 原稿受付 2003年5月30日。

^{*1} 正員, 神奈川大学工学部(☎221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1)。^{*2} 神奈川大学大学院工学研究科。

E-mail: sasadm01@kanagawa-u.ac.jp

実験が可能な値 0.5 を検討対象とした。この条件では、小穴抜き加工特有の変形形態と加工特性が表れていることは、これまでの研究で明らかになっている。

2. テーパ付きパンチの有効性

従来の研究より、小穴抜き加工では、せん断力、押込み力及び引抜き力が通常のせん断加工に比べ、格段に大きく、これが工具の異常摩耗や刃先欠損の主原因となることが確認されている²⁾。この理由として、小穴抜き加工では加工初期が押込み加工に類似すること¹⁾からパンチ側面に作用する圧力が高く、パンチ側面と被加工材との間の摩擦力成分の増加が著しくなることが考えられる。さらにこの摩擦力は、パンチ側面とダイス穴内面がせん断で創成された材料の新生面との接触に依存することが実験と理論より考察されている³⁾。

こうした考察に基づけば、摩擦力を低減する手段としては、新生面との接触面積を減ずることが効果的と考えられる。従来からパンチ側面やダイス穴内面にテーパを設けることは実務的に行われてきたが、小穴抜き加工を容易にする観点に特化し、その効果を学術的に調べた研究は殆どない。そこで、本研究では側面にテーパを設けたパンチについて、その効果を解析と実験から明らかにすることとした。

3. せん断力に及ぼすパンチ形状の影響

3.1 弾塑性有限要素法 二次元有限要素法解析ソフト DEFORM 2D (Ver.7.2) を用い、小穴抜き加工の弾塑性有限要素解析を行った。周知のように、せん断加工は破壊を伴う加工であり、本来解析においても破壊を考慮する必要がある。しかし、せん断力に及ぼすパンチ形状の影響は破壊発生以前までのせん断力の推移に依存すると考えられる。そこで本章では、き裂発生直前（具体的にはパンチストローク 3.8mm まで）の解析結果を中心に述べる。

解析では、対象を軸対称問題として扱うこととし、そのモデルを図 1 に示す。被加工材は弾塑性体で、パンチ、ダイス及び板押さえは剛体、工具刃先は半径 $r=5\mu\text{m}$ の円弧とした。クリアランス c はパンチ直径 $D_p=2\text{mm}$ 一定とし、ダイス穴内径 D_d を変更することで板厚の 2%、8%、15% に設定した。摩擦はクーロン摩擦とした。パンチ・ダイス両側面は材料の新生面に接すること、さらに僅少クリアランスでは刃先圧力が高く界面で凝着現象が生じやすいこと、さらに先行研究の検討結果³⁾などを考慮し、摩擦係

数が 0.3 と 0.4 の場合の 2 種類の解析を行った。また、新生面以外の接触面は 0.1 とした。板押さえ力は 2243N と一定とした。パンチの移動量は 1step あたり $1\mu\text{m}$ とした。

せん断加工の有限要素解析では計算途中で要素を再分割する必要がある。本研究では次の 2 種類の条件の一方を満たした時点で再分割を行った。一つは、パンチが 0.02mm 移動した場合である。他方は、パンチ刃先に接する要素の形状に関係する条件である。パンチ刃先が鋭利な形状であるため、図 2 に示すようなパンチ刃に接する要素の一边が刃先に重なる場合がある。このような問題の解析結果への影響を低減させるため、図 2 に示される要素とパンチ刃先の重なり量 a がある値以上になった時点で再分割を行う。本解析では、重なり量 a が 0.01mm に達した時点で要素分割を再度行うこととした。これら条件設定の妥当性は、材料の変形形態及びせん断抵抗を解析結果と実験結果で比較し確認した。

対象とした被加工材の形状は、直径 $D_s=35\text{mm}$ 、板厚 $t=4\text{mm}$ であり、材質はアルミ押出し丸棒 (JIS A1050BE H112) である。材料特性は引張試験より求めた応力-ひずみ曲線を用いることとした。引張試験は、被加工材と同一な材料より切削加工した JIS4 号試験片を用い、引張速度 0.25mm/min で行っ

Fig. 1 Analyzed condition

Fig. 2 Finite element meshes at punch corner

た。引張試験においては、くびれ発生以降、応力状態が一様とならないため、大ひずみ領域の応力-ひずみ関係を正しく得ることができない。そこで、くびれの三軸応力状態を Bridgman による補正により求め、応力-ひずみ関係を導いた。Bridgman の補正の式⁹⁾を式(1)に示す。

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{A_n \left[\left(1 + \frac{2R}{a} \right) \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \right]} \quad (1)$$

ここで、 A_n はくびれの最小断面積、 a はくびれ部の最小断面半径、 R はくびれ部の曲率半径である。これらくびれ部の最小断面半径と曲率半径は、試験中に撮影した試験片の画像から求めた。Bridgman による補正により求められた応力-ひずみ関係より、塑性領域の応力-ひずみ関係の近似式を求め解析で用いた。解析に用いた塑性域での応力-ひずみ関係を式(2)に示す。

$$\bar{\sigma} = 43.1 + 119 \bar{\varepsilon}_p^{0.46} \quad (2)$$

実験により得られた応力-ひずみ関係と式(2)により表される応力-ひずみ関係を図 3 に示す。なお、解析における材料の弾性域を、縦弾性係数 69GPa、ポアソン比 0.33 とし考慮した。

3・2 テーパー角の影響 テーパー角の影響を広範囲に調べるため、テーパー角 θ を 0° , 0.15° , 0.3° 及び 0.45° の 4 種類とした。図 4 にテーパー角 0° 及び 0.3° のパンチ形状を示す。

3・3 平行部長さの影響 周知のようにテーパー付きパンチは再研磨によりクリアランスが変化する欠点を持つ。これは刃先に平行部を設けることで解決できるため、図 5 に示す平行部長さ L の影響を併せ検討した。平行部長さは 0.5mm, 1mm 及び 2mm の 3 種類とした。

Fig. 3 Stress-strain curves

3・4 検証実験方法 解析の検証を行うため、テーパー角 $\theta = 0^\circ$ 及び 0.3° の 2 種類のパンチを用いて実験を行った。パンチ・ダイスともに材質は SKD11、硬さ 60HRC である。クリアランス c はパンチ直径 $D_p = 2\text{mm}$ を一定とし、ダイス穴内径 D_d を変更することで板厚の 2%, 8%, 15% に設定した。実験装置主要部を図 6 に示す。板押さえはバネ式とし、押さえ力は 2243N である。潤滑はパラフィン系基油（動粘度 $90 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ）を加工開始前に被加工材の表面に塗布する方法をとった。解析条件と同じアルミニウム押し丸棒（JIS A1050BE H112）より直径 35mm 厚さ 4mm の円板を旋削加工し、これを試験片として用いた。

Fig. 4 Punch geometry used at experiments

Fig. 5 Punch geometry used at FEM analysis

Fig. 6 Main part of shearing tool

4. 解析結果の検討

4.1 加工力に及ぼすテーパ角の影響 テーパ角を設けることの効果はパンチ損傷等を防止し、さらには小穴抜き限界の向上に寄与するなど重要な意味を持っており、クリアランスの影響も含め、解析結果と実験結果の対応を確認する必要がある。

図 7 にテーパ角 0° , 0.3° の場合についての解析と実験結果の比較をせん断線図で示す。クリアランス 15% の場合、新生面とパンチ・ダイス間の摩擦係数 μ が 0.3 及び 0.4 のどちらにおいても解析結果は、実験結果と定量的にわずかな差がみられるものの定性的に良い一致を示す。このことから、どちらの摩擦係数を用いた解析でもテーパ角の加工特性への影響を検討できると考えられる。そこで、新生面とパンチ・ダイス間の摩擦係数の取り扱いには詳細な検討が必要であると思われるが、以下のクリアランス 15% の場合の考察では、解析結果が実験結果と定量的に良い一致を示した摩擦係数 μ を 0.3 とした場合の解析結果を用いることとした。クリアランス 15% の実験結果より、テーパ角 0.3° の場合は、 0° の場合に比べせん断抵抗は約 76% に、引抜き抵抗は実に 26% に低減していることがわかる。

一方、クリアランス 2% の場合では、新生面とパンチ・ダイス間の摩擦係数 μ を 0.3 もしくは 0.4 とした場合の解析結果は実験結果に定性的に良い一致を示している。また、摩擦係数 μ が 0.3 の場合よりも 0.4 の場合の方が、解析結果は実験結果に定量的に良い一致を示す。そこで、以下のクリアランス 2% の場合の考察では、新生面とパンチ・ダイス間の摩擦係数 μ を 0.4 とした場合の解析結果を用いることとした。クリアランス 2% の場合の実験結果でも、せん断抵抗は 72% に、引抜き抵抗は 53% に減少していることがわかる。

パンチストロークに伴う変化に注目すると、1mm 付近まではテーパ角の差異の影響（クリアランス 15%）は殆どない。しかし、これ以降では差が明瞭となり、テーパ角 0° のせん断抵抗が増加し続けるのに対し、 0.3° では明らかに減少しており、これは摩擦成分の低減に依存していると解釈できる。実験結果から見ると、引抜き抵抗に及ぼすテーパ角の影響は顕著であり、この効果はいうまでもなく摩擦力の低減によるものである。

クリアランス 15% の場合のテーパ角のせん断抵抗への影響を図 8 に示す。クリアランス 2%, 15% の場合について、テーパ角とせん断抵抗の関係を図 9

に示す。ここでは実験と解析結果を比較し、クリアランスの影響を併せて示す。せん断線図から明らかに、僅かなテーパ角の付与がせん断抵抗を大きく低減させるが、ある値以上にテーパ角を大きくしても、さほど効果がないことがわかる。パンチストローク 3mm における材料とパンチ側面の間に発

(a) Clearance 15%

(b) Clearance 2%

Fig. 7 Comparison of shearing diagrams between analytically and experimentally obtained ($L=0\text{mm}$)

Fig. 8 Influence of taper angle on shearing diagrams analytically obtained (Clearance 15%, $L=0\text{mm}$, $\mu=0.3$)

Fig. 9 Relation between shearing resistance and taper angle

Fig. 10 Pressure distributions on punch flank
(Clearance 15%, $L=0\text{mm}$, $\mu=0.3$,
Punch penetration depth 3mm)

生する圧力分布を図 10 に示す。テーパ角を 0° から 0.15° もしくは 0.3° に変化させることにより、材料とパンチ側面の接触する領域が大きく減少し、圧力も全体的に減少していることがわかる。一方、テーパ角を 0.15° から 0.3° へ変化させた場合には、テーパ角を 0° から 0.15° に変化させた場合に比べ、材料とパンチ側面の接触する領域及び圧力があまり減少しないことがわかる。このような材料とパンチ側面の接触する領域及び圧力の違いがせん断抵抗へ影響し、ある値以上にテーパ角を大きくしても、さほどせん断抵抗が減少しないと考えられる。

以上のとおり、解析・実験両結果の総合的検討から、わずかなテーパ角の付与が加工時の摩擦力成分を低減させ得ることが明らかになった。また、弾塑性有限要素法の適用により、せん断抵抗に及ぼすテーパ角の影響を正しく評価できることが分かった。

4.2 加工力に及ぼすパンチ刃先平行部長さの影響

テーパ角を一定とした場合について、刃先からの平行部長さの影響を解析的に検討した。クリアランス 15% の場合のせん断線図を図 11 に示す。予測さ

れるように平行部長さが 0mm の場合が最もせん断抵抗が小さく、長くなるにつれて増加することがわかる。また平行部長さが増すにつれてせん断抵抗が最大となるパンチストロークが後半にずれることもわかる。

平行部長さ 0mm , 0.5mm , 2mm 及び 10mm のパンチを用いた場合における、パンチストローク 3mm の時点での材料とパンチ側面の間に発生する圧力分布を図 12 に示す。平行部長さ L の増加にともない材料とパンチ側面の接触している領域も増加していることがわかる。この結果から、平行部長さの増加に伴うせん断抵抗の増加は、パンチ側面と被加工材との間の摩擦力の増加によるものと解釈され、さらに著者らの先行研究結果³⁾を踏まえれば、特に小穴抜きにおいては摩擦力の影響が大きいと言える。摩擦力低減の観点からは平行部長さの短いことが望ましいが、他方、再研磨回数も重要であり、設計に際してはこれらを総合し決定すべきと考えられる。

Fig. 11 Influence of straight length L near punch tip on shearing resistance
(Clearance 15%, $\theta=0.3^\circ$, $\mu=0.3$)

Fig. 12 Pressure distributions on punch flank
(Clearance 15%, $\theta=0.3^\circ$, $\mu=0.3$,
Punch penetration depth 3mm)

Fig.13 Comparison of hole and slug pierced at 0° and 0.3° (Clearance 15%)

なお、テーパを設けることによりパンチの根本付近が若干細くなることから、座屈荷重の低下が危惧される。テーパを持つ場合、危険側を考えると、最も細くなる根本直径に等しい直円柱パンチで座屈荷重を確認すればよいことになる。座屈に関しては詳細な検討が必要であるが、長さ 10mm のパンチと単純化し、当該分野の多くの前例¹⁰⁾にならい、一端は固定、他方は移動自由・非回転と考えオイラーの座屈荷重を計算する。テーパ角 0°、0.3° のパンチの座屈荷重はそれぞれ 16.27kN、13.24kN となり、テーパを設けることにより 81% に低下した。他方、実験結果よりせん断力は 76% (クリアランス 15%)、72% (クリアランス 2%) に低下することから、総合的には小穴抜きに有利といえる。さらに詳細な検討が必要ではあるが、テーパを付与したパンチの座屈荷重低下については、テーパ角が微小であれば、加工力の低下でこれを補い得ると言える。

4.3 製品性状の比較 製品性状に及ぼすテーパの影響を調べた。方法は加工後の被加工材をエポキシ樹脂で固め、切断面を観察するものである。テーパ角 0° 及び 0.3°、クリアランス 15% の場合につい

ての結果を図 13 に示す。だれ、せん断面、破断面及びバリには、テーパによる顕著な違いは見られない。このことから、今回の実験範囲内においてテーパ角の影響は、その値が微小であれば特に問題ないといえる。

5. 結論

本研究は、小穴抜き加工の微細化を目指し、せん断抵抗、押込み力及び引抜き力の低減を目的とし、テーパ付きパンチの効果を数値解析と実験から検討し、以下の結論を得た。

- 1) パンチ側面に微小なテーパを付すことで加工力が低減することを実験的に確認した。
- 2) 小穴抜き加工における弾塑性有限要素解析を行い、せん断抵抗に及ぼすパンチ形状の影響を調べた。この結果、テーパ角の影響については、解析結果と実験結果は良く一致し、せん断特性に及ぼすテーパ付与の影響を解析的に検討できることを明らかにした。
- 3) テーパを付与したパンチについて刃先平行部長さの影響を解析し、これはせん断抵抗に大きく影響し、平行部長さが短いほどせん断抵抗が小さくなることを確認した。

参考文献

- 1) 尾崎龍夫・吉海照直, 塑性と加工, 13-140(1972), 683-688.
- 2) 青木勇, 塑性と加工, 33-379(1992), 943-948.
- 3) 笹田昌弘・青木勇, 機論, 69-678C (2003), 496-501.
- 4) 村川正夫・古閑伸裕・莫健華, 平 6 塑加春講論集, (1994), 61-64.
- 5) 結城典夫・古閑伸裕・村川正夫・東比呂嗣, 塑性と加工, 40-4756(1999), 30-34.
- 6) 湯川伸樹・犬飼佳彦・吉田佳典・石川孝司・神馬敬, 塑性と加工, 39-454(1998), 1129-1133.
- 7) 畑中伸夫・関根文太郎・山口克彦, 機論, 67-659, C(2001), 2352-2359.
- 8) Sutasn Thipprakmas・神雅彦・村川正夫, 塑性と加工, 43-494(2002), 209-213.
- 9) P.W.Bridgman, Trans.Am.Soc.Met., 32(1944), 553-574
- 10) 例えば, 日本塑性加工学会編: プレス加工便覧, 丸善, (1975), 123-125.