せん断加工における工具摩耗に及ぼす被加工材質の影響

石黒 太浩*・中村 圭佑*・早川 暢祥*・吉田 佳典*²・湯川 伸樹*³
石川 孝司*³・村瀬 道德*⁴・中野 奨*⁴・吉田 浩二*⁴

Influence of Product Material Property on Tool Wear in Shearing Process

Takahiro ISHIGURO, Keisuke NAKAMURA, Nobuyoshi HAYAKAWA, Yoshinori YOSHIDA, Nobuki YUKAWA,
Takashi ISHIKAWA, Michinori MURASE, Susumu NAKANO and Koji YOSHIDA

Synopsis : In shearing process, tool wear is important to provide constant quality of product. The influence of flow stress of product material on tool wear is investigated. Piercing process experiment is carried out 50,000 strokes under the different conditions of sheared material and the clearance between punch and die. The punch edge radius and the amount of tool side wear are measured to evaluate the variation of tool wear. Additionally, the shape of sheared surface is measured to investigate the influence of tool wear on the product shape. Furthermore finite element analysis of shearing process is carried out under the same condition to confirm the influential factor on tool wear. In the experimental result, punch and die edge radius similarly increase with increasing of stroke number. Tool side wear causes increasing of clearance. However, these tendencies are different for sheared material. The shape of sheared surface is affected by tool edge wear than tool side wear. From analytical result, tool wear is predicted qualitatively by using friction energy, which is calculated from relative slip velocity between tool and material and surface pressure. These values are affected by material flow stress. Friction energy increases with increasing of flow stress and it causes increasing of tool wear.

Key words: tool wear; piercing process; friction energy; sheared surface; burr; FE analysis.

1. 緒言

せん断加工はパンチおよびダイスからなる一対の工具を用いて材料を挟み切る加工法である。せん断加工は歩留りがよく生産性も高いため塑性加工の現場において広く用いられる。精密電子部品の生産をはじめ、ビレットの切断といった前工程や、プレスおよび鍛造品のばり除去、穴あけ加工などの後工程に利用される。せん断加工部断面はFig. 1に示すような切口面を呈し、切口面の形状はその後の工程の加工性にも影響を及ぼすため最適な形状であることが望ましい^{1,2)}。せん断面、破断面、ばりおよびだれといったせん断加工部性状は工具の刃先形状や、パンチ・ダイス間クリアランスなどの工具条件に影響を受ける。そのため大量かつ高速に生産されるせん断加工製品の切口面性状を加工初期から一定に保つためには、工具形状やクリアランスなどの幾何学的因子を一定に保つことが重要である。しかしながら加工数の増加にともなう工具の摩耗や欠損、凝着といった現象は避けられない。そのため、加工条件が工具摩耗にどのような影響を及ぼし、さらに摩耗した工具によって加工される製品の切口面性状がどう変化する

Fig. 1. The shape of sheared surface.

かを把握することが必要である。Maedaら³⁾は工具刃先および側面を意図的に削り取った種々の形状を有する打抜き工具を用いてせん断実験を行った。せん断切口面の中でも特にばりに着目し、工具の摩耗がばりに及ぼす影響を調査している。ばりの形状を支配するのは刃先の形状であり、側面の形状、パンチ底部の形状および加工速度はばりへの

平成22年10月6日受付 平成22年12月13日受理 (Received on Oct. 6, 2010; Accepted on Dec. 13, 2010)

* 名古屋大学大学院工学研究科大学院生 (Graduate Student, Department of Materials Science and Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-8603)

* 2 岐阜大学工学部 (Faculty of Mechanical and Systems Engineering, Gifu University)

* 3 名古屋大学大学院工学研究科 (Department of Materials Science and Engineering, Nagoya University)

* 4 (株) 東郷製作所 (TOGO SEISAKUSYO CORPORATION)

影響が小さいと述べている。Aoki⁴⁾はせん断工具の摩耗機構を系統的な打抜き実験から考察している。工具および被加工材質の違い、クリアランスおよび潤滑条件などの加工条件が摩耗機構に及ぼす影響を詳細に述べている。被加工材と工具の組み合わせ、ないし被加工材の表面仕上げにより凝着またはひっかき主体の摩耗が進行し、それらは工具の刃先、端部、側面部で大きく違っていることを示した。このようにせん断工具の摩耗には多くの因子が関わっているが、それらをパラメータとして解析的に摩耗量を予測した事例にTakaishiによる報告⁵⁾がある。Takaishiは統計的解析手法の一つであるGMDH (Group Method of Data Handling) をせん断工具の摩耗量予測に適用した。入力変数としてクリアランス、抜き径、抜き回数、伸びおよび引張強度などを設定しモデル式を得て、これが実験値と精度よく一致することを示している。せん断加工の工具摩耗は材料と工具の相対的なすべり現象であるため⁶⁾、工具刃先面圧と相対すべり速度から論ずることがほとんどである。しかし、数万から数十万回の加工プロセスにおいて、面圧と相対すべり速度を実験から得ることは困難であり、解析的な考察に頼らざるを得ない。有限要素解析を用いれば応力状態やすべり速度などは比較的簡単に得られるが、せん断加工の工具摩耗と有限要素解析を組み合わせた事例は少ない。これは有限要素法を用いたせん断加工解析の難しさも原因として挙げられる。有限要素法をせん断加工解析に適用する場合、き裂の表現方法、要素配置の仕方などさまざまな問題をクリアしなくてはならない。著者らはせん断加工解析に適した有限要素解析プログラムを開発し、せん断面長さやばり高さといった加工部性状の解析的な予測を可能にしてきた⁷⁻¹⁰⁾。そこで本研究ではこの解析コードを用いて被加工材の材料特性が工具摩耗にどのような影響を及ぼすかを実験的かつ解析的に調査した。

材質の異なる3種の鋼板を対象に50000ストロークまで穴あけ加工を実施し、加工数の増加にともなう工具形状の変化およびせん断切口面性状の変化を調査した。またせん断加工の有限要素解析を行い、被加工材の変形抵抗の違いが工具の摩耗機構に及ぼす影響を調査した。工具刃先周辺の応力状態および材料-工具間の相対的なすべり速度から加工中における摩擦仕事を算出し、実験結果との比較を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材

板材穴あけ加工の被加工材として冷間圧延鋼板SPCC、構造用中炭素鋼S60Cおよびオーステナイト系ステンレス鋼板SUS301の3鋼種を用いた。各帯板の素材寸法は板厚 $t=0.6\text{ mm}$ および板幅 $w=25\text{ mm}$ とした。

Fig. 2. The schematic of product layout.

2.2 加工条件

穴あけ条件はパンチ直径 $\phi 5.0\text{ mm}$ を一定とし、ダイス穴直径は $\phi 5.04$, $\phi 5.08$ および $\phi 5.12\text{ mm}$ (それぞれクリアランスが板厚に対して3, 6および10% t) の3水準とし、1ストロークでこれら3水準の加工を同時に行った。ダイス穴間距離はFig. 2に示すように10mmとした。パンチおよびダイスにはSKH51を使用し、表面処理などは特に施さない。パンチ押込み時の板押さえ力は350 kgfで一定とし、加工速度を100 spm、潤滑条件は無潤滑として行った。

2.3 測定方法

各条件について加工開始時から10000ストロークごとに製品のせん断切口面性状すなわちせん断面長さおよびばり高さをKEYENCE社製超深度レーザー顕微鏡VK8500により測定した。測定箇所は圧延方向 0° の位置を基準とし円周方向に 90° ずつ4カ所で試行回数 $N=2$ とし、それらの平均値をその条件における寸法とした。同様にパンチおよびダイスの形状をミットヨ社製コントレーサCV500を用いて10000ストロークごとに測定した。ストローク数の増加にともなう工具の摩耗は、工具の刃先が丸みを帯びる刃先摩耗、底面が削り取られる端面摩耗、工具側面が削り取られる側面摩耗に分類される。せん断加工が施された製品の切口面性状は工具刃先半径やクリアランスといった幾何学的因子に大きく影響を受けるので、本研究では特に刃先摩耗および側面摩耗に着目した。Fig. 3(a)に示すように、コントレーサから得られた工具形状をもとにパンチ刃先を円弧近似することにより、パンチ刃先半径 R_p およびダイス刃先半径 R_d をそれぞれ定義した。側面摩耗についてはFig. 3(b)に示すように初期のパンチ底面およびダイス上面から0.03, 0.06および0.09 mmの位置におけるパンチ直径変化量およびダイス内径変化量を測定し、それらの平均値をその条件における側面摩耗量 S_p および S_d とした (添字の p および d はそれぞれパンチおよびダイスを表す)。

3. せん断加工解析

工具摩耗機構を考察するために有限要素法による変形解析を行った。解析ソフトには著者らが開発した剛塑性有限要素コードRIPAD-2Dを用いた⁷⁻¹⁰⁾。せん断加工解析を行う際は、例えば要素が工具に侵入しないように刃先付近で

(a) Definition of tool edge wear.

(b) Definition of tool side surface wear.

Fig. 3. Definition of tool wear, (a) tool edge, (b) tool side surface.

微細な要素を配置する必要がある。本解析コードは工具形状に適した要素の配置や、変形の進行にともなう要素の再配置などを自動的に行うことが可能である⁷⁾。

3・1 解析条件

解析は二次元軸対称問題として取り扱った。Fig. 4に解析における工具および材料寸法を示す。各寸法は実験と同一でパンチ直径 $x=\phi 5.0\text{ mm}$ および板厚 $t=0.6\text{ mm}$ とし、材料直径 $a=10.0\text{ mm}$ の円盤を仮定した。板押さえ力は実験と同条件に設定し、被加工材の変形抵抗、クリアランス C 、パンチおよびダイス刃先半径 r を変化させて解析を行った。その他の解析条件をTable 1に示す。摩擦モデルはクーロン則を用い、塑性変形にともなう発熱は考慮していない。せん断加工において工具摩耗が進行する要因として被加工材への押込み以外にも打抜かれた円盤がダイス内部を降下するときにダイス側面を摩耗させたり、パンチを引抜くときに穴あけされた板材との接触によりパンチ側面が摩耗したりすることが考えられる。しかし本研究では剛塑性解析を行っているため、材料の分離後は工具にかかる面圧が摩耗を考えるうえで無視できるほど小さい。そのため本研究では実験においてき裂が発生したと思われる時点まで、すなわち、実験におけるだれ高さとしせん断面長さの合計とパンチ降下量が一致した時点まで解析を行った。SPCC, S60CおよびSUS301のき裂発生時のパンチ降下量はそれぞれ $70\%t$, $65\%t$ および $40\%t$ である。材料の変形抵抗曲線はJIS引張試験から得られたものを n 乗硬化則により近似した(Fig. 5)

3・2 摩擦仕事の算出

塑性加工においてさまざまな摩耗予測モデルが提案され

Fig. 4. Schematic diagram of analysis model.

Table 1. Analysis condition.

Workpiece	Rigid plastic
Punch, Die, B.H.	Rigid
Friction coefficient	$\mu = 0.2$
Mesh type	Quadratic triangle element
Punch speed	$5\mu\text{m} / \text{STEP}$

Fig. 5. Stress-Strain curve

ている¹¹⁾。またせん断加工における工具寿命は被加工材の板厚、材質、クリアランスおよび加工速度などに影響を受けるとされている¹²⁾。工具摩耗は、工具-材料間のすべり接触現象によるものであり、摩耗の機構として凝着摩耗およびアブレイブ摩耗があるが、それらを分離して実験結果を評価することは困難である。そこで本研究では相対すべり速度と面圧の積によって定義される摩擦仕事を算出することで、包括的に解析における摩耗評価を行った。解析結果よりパンチ刃先およびパンチ側面に生じる面圧 P および材料-パンチ間の相対すべり速度 v を算出し、摩擦係数 μ を用いて次式により摩擦仕事率 W を求めた。

$$W = \mu \times P \times v \dots \dots \dots (1)$$

さらに次式に示すように摩擦仕事率 W をパンチ降下量 $0\%t$ から、き裂発生時まで積分することで1ストロークにおける摩擦仕事 E を求めた。

$$E = \int W dt \dots \dots \dots (2)$$

摩擦仕事は工具刃先から側面部まで形状に沿って算出し、それらの差異から摩耗後の形状予測につなげることが理想であると考えられる。しかし本研究では工具刃先摩耗の実験結果を刃先半径というひとつのパラメータで整理しているため解析では特定点の摩擦仕事から評価した。Fig.

Fig. 6. Punch edge slip velocity at each angle.

Fig. 7. Punch edge surface pressure at each angle.

Fig. 8. Measurement point of friction energy.

6に示すように相対すべり速度はパンチ底部から刃先半径に沿って側面に移動するにつれて大きくなる。一方で刃先面圧はFig. 7に示すようにその逆の傾向を示す。この結果はKogaらによって報告されているViscoplasticityによって実験的に得られた結果¹³⁾と定性的に一致している。本研究では面圧とすべり速度が平均的に影響を及ぼすと考えられる刃先底部から側面方向に45°の位置を代表点として刃先の摩擦仕事を算出した。またパンチ側面の算出箇所はパン

チ底部から0.06 mmの部分である。以上の摩擦仕事算出箇所をFig. 8に示す。

4. 結果および考察

4.1 実験結果

Fig. 9に加工開始時、25000ストローク後および50000ストローク後にコントレーサーで測定した被加工材ごとのクリアランス10% t における工具形状の変化を示す。Fig. 9ではパンチの中央部や各工具の被加工材と接触しない箇所、すなわち非摩擦部位を原点として工具形状を重ねている。被加工材がSPCCおよびS60Cの場合は加工数の増加にともない工具の刃先および側面摩耗の進展が確認できる。一方SUS301の場合は加工開始から工具刃先半径はあまり変化せず、側面摩耗のみが顕著である。Fig.10, 11にパンチ刃先半径およびダイス刃先半径推移を加工開始時から50000ストロークまで10000ストロークごとにプロットしたものをそれぞれ示す。Fig.10よりいずれの被加工材においても加工初期からパンチ刃先半径は増加している。この過程で特に急激に刃先半径が増加する様子は見られず、すなわちチッピングなどの工具欠損は起きていないと考えられる⁶⁾。しかしストローク数の増加にともなう刃先半径の増加量は材料によって異なる。被加工材がSUS301の場合、刃先摩耗量は小さくおよそ10 μ mで一定である。しかしS60Cの場合は加工開始から摩耗速度が大きく、50000ストローク後には20~35 μ mまで刃先半径が増加した。SPCCの場合は、摩耗速度が両者の中間程度であり50000ストローク後の刃先半径が10~20 μ mである。すなわち被加工材がS60C, SPCC, SUS301の順にパンチ刃先は摩耗しやすいといえる。Fig.11よりダイス側もパンチ側と同様に、いずれの材料においてもストローク数の増加にともない工具刃先半径は増加する傾向にある。SPCCは加工初期に20 μ m程度まで急激に増加した後ほぼ一定となり、SUS301も同様に加工初期に10 μ m程度で一定となる。S60Cは加工数増加にともない刃先半径が増加し50000ストローク後にはおよそ30~40 μ mまで増加する。これらの結果より被加工材がS60C, SPCC, SUS301の順にダイス刃先摩耗が起きやすいといえる。次に各被加工材ごとの側面摩耗とストローク数の関係をFig.12に示す。パンチおよびダイスの側面摩耗は両工具間のクリアランス増加につながるため、側面摩耗量をクリアランスの増加量として被加工材の初期板厚に対する比率で表す。いずれの被加工材の場合でも、側面摩耗によるクリアランスの増加が確認された。SPCCのクリアランス変化は50000ストローク後に平均で0.7% t 程度の増加であるのに対し、S60CおよびSUS301は加工回数の増加にともなってクリアランスが2% t ほど増加している。S60CとSUS301では50000ストローク後のクリアランス増加量は同程度だが、加工初期の段階においてはSUS301の

Fig. 9. Geometry variation of tool in each material, in the case of Clearance=10% t .

(a) SPCC

(b) S60C

(c) SUS301

Fig. 10. Comparison of effect of material on punch edge wear, (a) SPCC, (b) S60C, (c) SUS301.

側面摩耗量がS60Cに比べて大きな値を示している。すなわち被加工材がSUS301, S60C, SPCCの順に側面摩耗へ及ぼす影響が大きいといえる。

(a) SPCC

(b) S60C

(c) SUS301

Fig. 11. Comparison of effect of material on die edge wear, (a) SPCC, (b) S60C, (c) SUS301.

4・2 被加工材の変形抵抗が摩擦仕事に及ぼす影響

実験結果より工具刃先の摩耗速度に及ぼす材料種の影響はパンチ、ダイスとも同様な傾向を示していた。今後は特にパンチ側について詳細な考察を述べる。Fig.13に工具刃先半径 $r=30\mu\text{m}$ 、クリアランス $C=6\%t$ としたときの、1ストロークにおけるパンチ刃先摩擦仕事を示す。刃先における摩擦仕事はS60Cが最も高く、次いでSPCC, SUS301であった。すなわち工具表面において相対摩擦仕事は摩耗によって消費されると仮定すると1ストロークにおける刃先摩耗の進行速度はS60C, SPCC, SUS301の順であると考えられる。つまりせん断加工において変形解析により相対摩擦仕事を求めることで工具刃先摩耗を定性的に考察することが可能であると考えられる。またFig.14にクリアランスを10% t としたSUS301における工具刃先半径と摩擦仕事の関係を示す。これより、摩擦仕事は刃先半径が大きくなるほど増加する傾向にある。そのため1ストロークにおいて最も摩耗しやすいS60Cはストロークが増えるにしたがい刃先半径が増加し、これによりさらに摩擦仕事が大きくな

(a) SPCC

(b) S60C

(c) SUS301

Fig. 12. Comparison of effect of material on wear of punch and die side surface, (a) SPCC, (b) S60C, (c) SUS301.

Fig. 13. Punch edge friction energy in each material, in the case of Clearance=6%t, Punch edge radius=30 μ m.

る。これらの相乗的な効果によって刃先半径の増加が最も顕著であったといえる。一方SPCCやSUS301は1ストロークにおける摩擦仕事小さい、つまり摩擦量が小さいため、加工数が増加してもパンチ刃先における摩擦仕事大きくならない。その結果、刃先半径の増加が抑制されたと考えられる。Fig.15およびFig.16に解析から得られた1ストローク中のパンチ刃先面圧と相対すべり速度の推移をそれ

Fig. 14. Influence of punch edge radius on friction energy during 1 stroke, in the case of material=SUS301, Clearance=10%t.

Fig. 15. Variation of punch edge surface pressure, in the case of Clearance=6%t, Punch edge radius=30 μ m.

Fig. 16. Variation of punch edge slip velocity, in the case of Clearance=6%t, Punch edge radius=30 μ m.

ぞれ示す。解析結果のグラフにおいて横軸の Punch penetration/%tはパンチの降下量であり、材料とパンチ底部が接触している状態を0とし、降下量は板厚に対する比率で示している。Fig.15より、面圧はSUS301が最も高く、次いでS60C, SPCCの順に低くなる。面圧は被加工材の加工硬化にともなう変形抵抗の増加に依存すると考えられるため、Fig. 5で示した変形抵抗曲線の差異が面圧に反映されたといえる。Fig.16の相対すべり速度については、1ストロークにおいてパンチ降下量がおおよそ20%t程度までは被加工材質による違いは見られない。しかし、20%tを超えたあたりからSUS301の相対すべり速度は低下し、次いで30%t付近からS60Cが低下し始める。SPCCの相対すべり速度は50%t程度まで速い速度を維持し続けその後低下する。パンチ降下量が20%tを超えるまではいずれの被加工材の場合でも、パンチ刃先45°付近の材料はパンチの押込

Fig. 17. Punch lateral friction energy in each material, in the case of Clearance=6% t , Punch edge radius=30 μm

みにともない材料が側方へ流動するために相対的な速度が速くなっていく。その後SUS301はパンチが降下しても、刃先付近の材料は側方へあまり流れず、パンチ底部とともにダイス内部へと下がっていく。一方SPCCはこのダイス内部へと流動し始める時期が遅いため、パンチ降下量が50% t 近くまで相対すべり速度は高い値を示すと考えられる。この違いも変形抵抗に依存すると考えられる。SPCCは変形抵抗が小さく変形しやすいがSUS301は変形抵抗が大きく変形しにくいいため、このような材料流動の差異が生じたと考えられる。SPCCは面圧は低い相対すべり速度が速く延性も高いため、面圧が高く相対すべり速度が小さいSUS301と結果的に同程度の摩擦仕事を示したと考えられる。S60Cは面圧、相対すべり速度ともにSPCC、SUS301の中間程度の値を示し、それらの相乗効果により摩擦仕事が大きくなったといえる。

続いてパンチ側面の摩擦仕事に及ぼす鋼種の影響をFig.17に示す。1ストロークにおける側面の摩擦仕事はSUS301が最も高い値を示しているため、Fig.12においてSUS301のクリアランスの増加が最も大きかったと考えられる。パンチ側面における面圧および相対すべり速度をFig.18およびFig.19にそれぞれ示す。側面の最大面圧はSUS301が他鋼種のおよそ4倍以上の値を示している。これも被加工材の変形抵抗の大小によるものと考えられる。側面での相対すべり速度は材料により違いが見られないため、摩擦仕事は面圧の大きさが原因であるといえる。すなわち、工具の刃先摩耗および側面摩耗は(2)式を用いて摩擦仕事を算出することである程度の予測が可能であり、摩擦仕事は工具面圧および材料と工具の相対的なすべり速度に依存しそれらは被加工材の変形抵抗の大きさに依存する。刃先周辺において変形抵抗が高い被加工材の場合は面圧が高く相対すべり速度は小さい。一方変形抵抗の小さなものはその逆の傾向を示す。工具側面に関して、面圧は同様に変形抵抗に依存するが、相対すべり速度は材質によらず一定の値を示すということが解析結果より確認された。

4・3 工具摩耗が切口面性状に及ぼす影響

4・3・1 せん断面長さ

4・1節で述べた工具形状の変化が製品のせん断切口面性

Fig. 18. Variation of punch lateral surface pressure, in the case of Clearance=6% t , Punch edge radius=30 μm .

Fig. 19. Variation of punch lateral slip velocity, in the case of Clearance=6% t , Punch edge radius=30 μm .

状におよぼす影響について考察した。Fig.20に各材料ごとの加工回数の増加にともなうせん断面長さの変化を示す。SPCCおよびSUS301は加工回数が増加してもせん断面長さはほぼ一定である。せん断面長さはき裂の発生時期に依存するため、この2鋼種は加工回数が増加しても1ストロークの中でき裂が生成するタイミングがほとんど変わらないことを意味している。一方のS60Cはせん断面長さが加工回数増加にともない加工初期と比べておよそ40-50%近く増加している。つまりS60Cはき裂の生じるタイミングが加工回数の増加とともに遅くなっていくといえる。Fig.20に示したせん断面長さは穴あけされた鋼板側の結果であるため、このせん断面長さはパンチ側からのき裂発生時期に依存する。一般的に同一材料のせん断面長さは、パンチ-ダイス間のクリアランスおよび工具刃先半径に依存し、クリアランスの増加にともない減少する傾向にある。Fig.12よりいずれの材料もパンチおよびダイスの側面摩耗によるクリアランスの増加が見てとれるため、せん断面長さは減少すると考えられるが、測定結果では一定あるいは増加している。これはパンチ刃先半径の増加によるところが大きい。Fig.21に解析において、工具刃先半径が刃先近傍の平均応力分布に及ぼす影響を示す。Fig.21の左図は刃先半径10 μm のものであり、右図の20 μm と比較すると、刃先半径が小さいときの方が刃先近傍の平均応力が大きな値を示す。加工初期の工具刃先が鋭敏な状態では、刃先近

(a) SPCC

(b) S60C

(c) SUS301

Fig. 20. Variation of sheared surface length, (a) SPCC, (b) S60C, (c) SUS301.

(a) SPCC

(b) S60C

(c) SUS301

Fig. 22. Variation of burr height, (a) SPCC, (b) S60C, (c) SUS301.

Fig. 21. Influence of punch edge radius on distribution of mean stress around punch edge, in the case of Clearance=10%, Material=SUS301.

傍に応力が集中し、き裂が早期に生成するためせん断面は小さい。しかしながら加工回数の増加とともに刃先が鈍化し応力集中が緩和されると平均応力が小さくなり、き裂の生成時期が遅くなりせん断面長さは増加する。すなわちSPCCはクリアランスが増加することでせん断面長さの減少が起きうるが、同時にパンチ刃先半径の増加にともないせん断面長さが増加する。そのため見かけ上ほぼ一定の値を推移したと考えられる。S60Cも同様にクリアランス増加によるせん断面長さの減少が起きうるが、パンチ刃先半径がSPCCに比べてより顕著に増加しているため、クリアランス増加によるせん断面減少よりもパンチ刃先半径増加によるせん断面長さ増加の影響が大きいため加工数の増加にともないせん断面長さが増加したと考えられる。SUS301はパンチ刃先半径が増加していないためクリアランス増加によりせん断面長さは減少すると考えられるが、2%程度のクリアランス増加ではせん断面長さに影響を及ぼさないといえる。

4・3・2 ばり高さ

続いてFig.22に加工回数の増加にともなうばり高さの変化を示す。一般的にクリアランスの増加にともないばり高さは増加することが知られている。本研究で観察対象とした穴あけされた銅板のばり高さはダイス側のき裂発生箇所依存し、き裂の発生箇所が刃先の先端から離れるほどばりは大きくなる。いずれの被加工材も加工数の増加にともないクリアランスが増加することから、全てのばり高さは増加すると考えられるが、SUS301はそのような傾向を示していない。Fig.21のダイス刃先周辺の応力分布拡大図を見ると、刃先半径が増加するほど刃先近傍における最大平均応力の位置はパンチ刃先から離れる傾向にあるため、刃先半径が大きくなるとばり高さも大きくなるといえる。つまり、加工数の増加にともなうばり高さの増加は、クリアランスの増加による影響と刃先半径の増加による影響が挙げられるが、クリアランスの増加による影響は小さく刃先半径の増加がばり高さの増加に大きく影響を及ぼすということがいえる。これはMaedaらの報告³⁾と一致する。SPCCのクリアランス増加は微増であるにもかかわらず、ばり高さの増加が著しいのはダイス刃先半径の増加が著しいためであり、SUS301のクリアランス増加が顕著であるにもかかわらずばり高さに変化が見られないのは刃先半径の増加が小さいためであるといえる。

5. 結言

異なる3つの被加工材を対象に打抜き加工を50000ストローク実施し、加工数の増加にともなう工具形状の変化およびせん断切口面の変化を測定した。さらに有限要素解析を行うことで、被加工材質の違いが工具摩耗に及ぼす影響について調査した結果以下の知見を得た。

(1) 加工数の増加にともなう工具摩耗は面圧および相対すべり速度から求まる摩擦仕事を考えることで、有限要素解析から定性的に予測することが可能である。

(2) 工具刃先摩耗は面圧および相対すべり速度の双方に依存する。面圧は変形抵抗の大きさに比例し、相対すべり速度は反比例する。また、相対すべり速度は側方への材料流動に依存すると考えられる。

(3) 工具側面摩耗は面圧の大きさに依存するが、相対すべり速度は材料に依存しない。

(4) 工具摩耗にともなうせん断面長さおよびばり高さの変化は、側面摩耗によるクリアランス増加よりも刃先摩耗による工具刃先半径の増加に大きな影響を受ける。これは過去の報告と一致する結果となった。

文 献

- 1) K.Mori, Y.Abe and Y.Suzuki: *J. Mater. Proc. Technol.*, **210** (2010), 653.
- 2) Y.Ishihara, Y.Yoshida, N.Yukawa and T. Ishikawa: Proc. of 59th Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2008), 389.
- 3) T.Maeda, I.Aoki and T.Higuchi: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **18** (1977), 210.
- 4) I.Aoki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **27** (1986), 140.
- 5) K.Takaishi: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **31** (1990), 111.
- 6) せん断加工, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (1992), 1.
- 7) N.Yukawa, Y.Inukai, Y.Yoshida, T.Ishikawa and T.Jinma: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **39** (1998), 1129.
- 8) Y.Yoshida, Y.Murase, N.Yukawa and T.Ishikawa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **46** (2005), 392.
- 9) Y.Yoshida, N.Yukawa, T.Ishikawa, S.Hosono and M.Murase: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **44** (2003), 735.
- 10) T.Ishiguro, Y.Yoshida, N.Yukawa and T.Ishikawa: *Mater. Trans.*, **50** (2009), 1671.
- 11) K.Kitamura: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **47** (2006), 36.
- 12) M.Miyakawa: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **14** (1960), 25.
- 13) N.Koga, N.Yukawa, K.Oikawa, M.Murakawa and T.Jimma: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **37** (1996), 957.