論文

薄肉角管の突切り切断用工具の設計

——薄肉角鋼管の突切り切断に関する研究 (2 報)——

春日 幸生* 村上 匡寛** 川森 重弘*

Tool and Tool Guide Design for Shear Cutting of Tubes

——Research on Shear Cutting of Thin-walled Square Tubes (2nd report)——

Yukio KASUGA*, Masahiro MURAKAMI** and Shigehiro KAWAMORI*

(Received on September 19, 2012)

A cutting tool is designed for the shear cutting of thin-walled tubes. Cutting force is evaluated by changing cutting parameters such as shear strength, wall thickness, punch top angle and side length, and is found to be similar to that used in the shearing of flat sheets with a shear angle. Surface strain is observed during cutting and is found to vary depending with cutting conditions, which affects punch distortion. To prevent this deformation, the gap between the punch and the guide should be zero, which cannot be easily achieved using a conventional punch guide. To achieve zero clearance easily, a new guide using rollers is developed. This roller guide is always in contact with the punch, which is also available for cutting rectangular tubes. When designing the punch guide without distortion of the punch, a punch with a thickness of 2mm for a wall thickness of 2.3mm and another punch with a thickness of 1mm for a wall thickness of 1.6mm are available. This leads to a reduction in the amount of cut scraps.

Key words: shearing, thin-walled tube, double-cut, punch distortion, roller guide, shear force.

1. 緒言

管材のプレス切断は造管工程における定尺切断として必要なか、自動車部品など部材加工の初期段階においても必要不可欠な工程である。円管を中心とした切断¹⁾および形材に言及したシヤリング²⁾などに技術の全貌を把握することができる。レーザー切断に見られるように三次元断面の切断が可能になったこともあり、プレス切断としての技術的な展開はその後内外においてほとんどなされていない³⁾。しかし、加工速度においてプレス切断は効率が良く、熱付加にともなう切断面形状の変化もないことから、有効な手段としてより詳細なデータの蓄積が求められている。

筆者らはダブルカット方式による角管の切断について、工具クリアランス、管断面形状、パンチ先端形状などが、切断面におけるつぶれや垂直度、切断荷重に及ぼす影響について調査し、切断面性状の向上法についても論じた⁴⁾。本切断では、パンチ厚さに相当する切断くずが発生する。廃棄物減量化のためにはパンチ厚さをできる限り薄くしたい。その場合、パンチの面外変形が生じ、塑性変形や先端の割れにつながるとともにパンチ前後面における切断面性

状が不均一になるなどの問題も生じる。

本研究では、ダブルカット方式による角鋼管の突切り切断においてプレス機械容量適正化のため切断荷重の評価を先ず行う。次に、切断にともなうパンチの変形とその影響について検討する。さらには、パンチ厚さが薄くても面外変形の少ない型構造を提案する。

2. 実験方法

2.1 供試材

市販の機械構造用炭素鋼角形溶接鋼管(STKM11A)を供試材とする。断面外形寸法は□25で板厚は $t=1.6$ を中心に、 $t=1.2$ ならびに $t=2.3$ を用いる。また $t=1.6$ については外形寸法□16と□40、ならびに長方形25×40も用いる。切断荷重式を算出するため、機械的性質の異なる非鉄引抜き管(A6063, Brass, Copper)も用いる。断面外形寸法は□25で板厚は $t=1.5$ である。機械的性質をTable 1に示す。

Table 1 Mechanical properties of the tube adopted

Material	Tensile strength σ_B /MPa	Shear strength k_B /MPa	Elongation δ /%	Hardness H_v (20)
STKM11A	355	319	24	141
A6063	199	161	12	81
C2700	451	293	23	131
C1220	357	255	4.7	118

* 玉川大学工学部 〒194-8610 町田市玉川学園 6-1-1
Department of Engineering, Tamagawa University, 6-1-1 Tamagawa-gakuen,
Machida 194-8610, Japan.

** 三友機工(株) 〒332-0004 川口市領家 4-1-18
Sanyu Machine Tools Co., Ltd, 4-1-18 Ryohke, Kawaguchi 332-0004, Japan.

2.2 実験装置および切断方法

実験装置を Fig.1 に示す. シングルカット方式と異なり, ダブルカット方式では前後一對の V 型ダイス(固定刃)とパンチ(可動刃)で切断を行う. ただし, パンチは薄いためパンチガイドによる案内が必要である.

切断状況の概略を Fig.2 に示す. 切断条件を Table 2 に示す. パンチ材質は SKH9 で, 先端角は 4 種類であるが, 同一先端角であってもシヤー角は加工前後半で変化する. これらをパンチ先端角 θ_p (前半シヤー角 ω_f /後半シヤー角 ω_l) として表記すると, $60^\circ(75^\circ/15^\circ)$, $90^\circ(90^\circ/0^\circ)$, $120^\circ(75^\circ/15^\circ)$, $180^\circ(45^\circ/45^\circ)$ となる. パンチとダイスのクリアランス c (片側)は, 管厚さの 8% とする. 管は切断工程後半で上下辺が重なるため, 管厚さ 2 枚分に対して定義している.

Fig.1 Experimental apparatus for cutting a tube

Fig.2 Tool geometry and strain gauge positioning

Table 2 Cutting conditions for a tube

Punch top angle $\theta_p / ^\circ$	60, 90, 120, 180
Punch thickness t_p / mm	1 ~ 4
Punch width w_p / mm	70
Punch length L_p / mm	125
Clearance $c / \%$	8.0
Shearing speed $V_s / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.52

2.3 工具変形の測定

ダイセット上部のロードセルにより切断荷重を, またひずみゲージ式変位計によりパンチストロークを測定する手法は前報⁴⁾と同一である. パンチの変形を測定するために,

新たにパンチの表裏(前後)にひずみゲージを貼る. 切断時のパンチのひずみをデータロガーによりパソコンに取込む. ゲージ貼付け位置は Fig.2 に示されている. 測定した両ひずみから式(1), (2)により圧縮ひずみ ε_c と曲げひずみ ε_b を算出する.

$$\varepsilon_b = \frac{|\varepsilon_F - \varepsilon_B|}{2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_F + \varepsilon_B}{2} \quad (2)$$

3. 実験結果および考察

3.1 切断荷重の推定

切断荷重に及ぼすパラメーターとしてはパンチ先端角の他に, 管断面サイズ, 板厚, 材質などが考えられる. これらを考慮した加工荷重の見積もりが可能となれば工業上有用である. ここでは, 平板のシヤーリング加工荷重算出式⁵⁾を基に, 管切断荷重の見積もりが可能か先ず検討する.

シヤー角 ω をもったパンチによる平板切断荷重 F は, 補正係数を C , 素管材料のせん断抵抗を k_B , 板厚を t とすると,

$$F = C k_B t^2 \cot \omega \quad (3)$$

と表すことができる. 板厚 t , 管断面における一辺の長さ A およびせん断抵抗 k_B の異なる材料を用いて最大切断荷重 $F_{\max}$ を測定した. 板厚については, 定式化の精度を上げるため 5 種類の板厚を用いた. この内 $t=1.0\text{mm}$ と 2.0mm についてはそれぞれ $t=1.2\text{mm}$, 2.3mm から削り出して実験に供した. なお, Fig.3 に示す⁴⁾ように, 切断工程における最大荷重の発生は切断後半で発生することから, 切込み開始時($s \approx 2\text{mm}$)における管断面の変形防止に有効な先端角の設定は今回行っていない.

Fig.3 Shear force in cutting a square tube

$\theta_p=120^\circ$ としたときの結果を Fig.4 に示す. この場合切断後半でのシヤー角は 15° である. 最大切断荷重 $F_{\max}$ は板厚の 2 乗に比例し, せん断抵抗に対して比例的に増加している. また一辺の長さ A の影響はこれらに比べるとはるかに小さく, 15, 25, 40mm と変化させた場合, $F_{\max}$ はそれぞれ 18.4, 18.4, 17.0kN であった. したがって切断荷重は辺の長さによらずほぼ一定とみなすことができる. したがって切断荷重算出式は板のせん断と同様に考えてよいことが分かった. Fig.4 の測定結果を式(3)に代入して最小 2 乗法にて定数 C を求めると,

$$F_{\max} = 6.18 k_B t^2 \cot \omega_l \quad (4)$$

が得られる。パンチ先端角 θ_p が 120° すなわち後半シヤール角 ω_l が 15° 以外にも本式が適用可能か検討した。再び Fig.3 においてパンチ先端角が 60° および 180° に対して ω_l を 15° , 45° を用いて計算した結果, 適用可能であることが判明した。パンチ先端角が 90° の場合は ω_l が 0° であるから本式は適用されずに一辺の長さ A を用いて,

$$F_{\max} = C k_B t A \quad (5)$$

となる。Fig.3 における測定値を本式に適用すると $C=3.13$ となる。式(5)は, 切断後半において管の上下辺が完全に重なりその後最大荷重に到達すると仮定して得られる。せん断断面積が $2t \times 2A$ であれば $C=4$ であるが, 厳密には 2 段階の切断となることなどから, 係数は小さくなる。

Fig.4 Effect of cutting parameters on shear force

Fig.5 Distribution of a punch

3.2 パンチの変形

管の突切り切断を繰り返し行い, 切断回数が一定数(本実験では変形が安定的に把握できる 300 回)に達したところでパンチの面外への変形を調べた結果が Fig.5 である。納入直後の段階(New)では面外変形は見られない。切断後は, Fig.3 に示す最大荷重の大小にほぼ符合して変形が生じる。特にパンチ先端角が 90° の場合に変形が大きい。

当初設計した工具周りの型構造を切断前後として模式的に Fig.6 に示す。V ブロック形のダイス上に管が傾斜して配置され, 上方から板状の工具(パンチ)が降下して切断が行われる。その際, 管の固定と工具面外変形防止のためパンチガイドを必要とする。パンチのスムーズな動きのた

めには, 工具クリアランス c に加えてガイドすき間 c_g を与える。加工荷重変動などにより図右側に示すような面外変形を生じることが推定される。 c_g が変化してパンチガイドに接触し, パンチのスムーズな降下が妨げられて摩擦が増加し, 先端での不等クリアランスや傾きによる不具合も考えられる。

Fig.6 Schematic of tube cutting process

Fig.7 Strain transition during cutting

切断中のパンチの変形を確認するため, ひずみ変化を測定した結果を Fig.7 に示す。新品のパンチを組付け後初めて切断を行った場合, ひずみは表裏面ともほぼ等しい値を示す。したがって, 曲げひずみと圧縮ひずみを分離した場合切断荷重が高い場合($\theta_p = 90^\circ$)であっても曲げ変形はほとんど確認されていない。 $\theta_p = 120^\circ$ でも同様であった。ところが, 繰返し使用後切断中にひずみが正の値を示す場合があり, 曲げひずみを調べてみると切断の進行とともに大きくなっていることから, パンチに変形が生じていることがわかった。

以上の結果として工具クリアランス c が不等になっていることが推定され, 切断終了直前のパンチと管の位置を調べた結果が Fig.8 である。観察は矢印の方向から行っている。切断前半において上の二辺を切断したパンチは, 切断

後半においてこの切断した二辺を介して下辺を切断する。ゆえに切断完了直前において、下のコーナー部では管側面の状況が図のようになる。使用を始めたばかりのパンチによる切断では、上辺とパンチの位置ならびに上下辺の位置は中心がそろっている。一方、300回切断後のパンチではすでに Back 側の工具すき間が Front 側に比べて小さくなり、パンチの曲がりが発生していることが理解される。

そこで、パンチガイドすき間を変化させて、工具の変形が切断荷重に及ぼす影響を調べた結果を Fig.9 に示す。パンチ厚さが 3mm の場合、すき間を零から 0.3mm まで変化させても、荷重変化はほとんど見られない。一方、パンチ厚さが Fig.8 と同じ 2mm の場合、すき間が零ないし 0.1mm であれば荷重に変化は見られないものの、よりすき間を大きくすると最大荷重が高くなる。すなわちパンチ曲がりによる荷重が付加されたことを意味する。

以上より、切断回数の累積によりパンチの曲がりが生じること、およびこの面外変形を防止し長寿命化かつ薄肉化のためには、切断中の工具をパンチガイドで拘束することが必要であることの 2 点が判明した。

Fig. 8 Chip in the bottom corner in the final stage of forming

Fig.9 Effect of punch guide gap on shear force

3.3 パンチガイドの設計

パンチガイドとパンチ間のすき間を零になるよう型を設計すればパンチの面外変形は十分防止可能である。しかし、これらの常時接触状態を維持することは困難であり、切断回数を重ねたのちの切断荷重の増加や工具面の摩耗といった課題も新たに発生する。そこで、Fig.6 に示した構造に替えて Fig.10 に示すローラーガイド(Roller guide)方式を考案し、先の一定すき間によるガイド方式との比較を行って、その優位性を確認する。なお、従来のガイド方式を定すき

Fig.10 Roller guides for eliminating tool distortion

Fig.11 Example of roller guide for square tube

Fig.12 Example for rectangular tube (N=2)

間ガイド(Constant gap guide)方式と呼び、それぞれ RG, CGG で示す。

RG では球(ころ)の突出部高さが c_g であり、パンチと球(ころ)とのすき間は加工中常に零である。このため、パンチの面外変形は大幅に軽減されることが期待できる。CGG との比較では、パンチは基本的にガイド間を降下するだけでよく、パンチ曲がりや上下型のずれが c_g 以下であれば直ちにパンチの破損に至らないという副次効果もある。

本報では転がり運動を行う部分に円筒ころを用いることとし、市販の THK ㈱製 LM ローラー(型番 LR1547Z)を使用する。実際のころの動きは Fig.10 に示すような定位置での回転運動ではなくころがり直線運動として組み込まれ、移動と自転を行うように設計されている。具体的な設計例を Fig. 11 および Fig.12 に示す。管断面の対向するコーナー部が鉛直方向になるよう管を 45° 傾けてセットするため、ガイド本体の形状は CGG の場合と同じである。 c_g 、すなわちローラー突出量は 0.2mm となるよう設計した。組込むロー

ラーガイドは1対(N=1)ならびに2対(N=2)とする。N=1の場合、パンチ先端が加工開始直前まで直接ガイドされる。一方N=2の場合、ガイドはパンチ幅に対しほぼ均等にガイドする。Fig.12は長方形管切断用であるが、対向するコーナー部が鉛直方向になるよう管をセットするので、管断面は左右非対称となる。本報では市販のローラーガイドを使用したため、ガイドの鉛直方向取り付け位置は高くならざるを得ず、N=1では取付けが困難であり、N=2にて実験を行った。

3.4 ローラーガイドの効果

ローラーガイド方式を採用した効果の検証結果をFig.13に示す。CGG方式ではすき間 c_g を0.1mmとした。圧縮ひずみはほぼ同様であるが、RG方式の場合切断工程を通じて曲げひずみが少ない。すなわちパンチの曲がりは抑えられており、ローラーガイドの効果が認められる。ところでダブルカット方式による切断では、ほぼパンチ厚さに等しい切断くずが必ず発生する。したがって、パンチ厚さが薄いほど切断くずは少なくなり、コスト、後処理の点から好ましい。Fig.14には、管厚さ t が1.6と2.3mmの管に対して、RG方式における圧縮・曲げひずみの最大値を示す。

Fig.13 Comparison of strain transition during cutting

Fig.14 Effect of punch thickness on maximum strain

$t=1.6\text{mm}$ に対しては、パンチ厚さが薄くなるとともに圧縮ひずみが当然増加する。しかし、パンチ厚さ変化にともなう曲げひずみの変化はほとんど見られず、 $t_p=1\text{mm}$ でも切断が十分可能である。 $t=2.3\text{mm}$ に対しては、 $t_p=1\text{mm}$ の場合ひずみが0.2%を越えることになり、この条件での切断は行わなかった。結果より、 $t_p=2\text{mm}$ よりやや薄いパンチでの切断可能性は残されている。これまでパンチの面外変形を生じていたパンチ厚さであっても、問題なく切断が可能であることが示され切断面のかえりも工具前後面で均一となった。一方ローラーガイドの数について調べると、一部に圧縮ひずみの差が生じるものの、曲げひずみについては差

が認められず、ガイドの効果は同一である。

本手法の有効性をより効果的に示すため、Fig.12で示した長方形管切断用RGによる結果をFig.15に示す。管はやはり45°傾斜させてダイスの上に置かれ、対称パンチにて切断される。パンチが管の左右コーナー部通過のストロークが異なるためひずみのピークが複数回生じる。注目すべきは曲げひずみのストロークに対する変化であるが、本結果でもCGGと比較して工程全般にわたり値は低いまま推移する。管断面が対称ではなく、ひずみ変動がより生じる場合であってもローラーガイド方式の効果が確認された。

RG方式で得られた切断可否を正方形管についてまとめるとFig.16のようになる。パンチ厚さが増すと切込み時の荷重増加により管断面がつぶれ、管厚さが増加すると最大切断荷重の増加によりパンチ変形につながる。本図により、板厚が2.3mm程度までの薄肉管切断の条件が判断できる。

Fig.15 Strain transition for a rectangular tube

Fig.16 Possible cutting conditions

4. 結論

- 1) 管切断時の荷重予測式が得られた。基本的には、シヤール角を有する工具による平板のせん断加工と類似の定式化が可能である。
- 2) 切断工程における工具の変形をひずみゲージなどを使用して観察した結果、切断条件によって薄刃パンチの面外変形が大きくなり、永久変形の原因となっている。
- 3) パンチの面外変形を大きく軽減する技術として、ガイドすき間零となるローラーガイド方式を提案した。
- 4) 本手法により面外変形は大幅に軽減され、パンチの薄肉化につながるとともに正方形管以外の異形管にも適用の可能性がある。

実験ならびに数値解析に協力いただいた、当時研究室学生の山田逸平君、矢部達也君、刈田悟郎君、浜村敏亮君、山田隆蔵君、松本翔三郎君、見城暁君に感謝します。

参考文献

- 1) 中川威雄：塑性と加工，23-255(1982)，307-314。
- 2) 山本邦充・赤堀明夫・宮田勉：塑性と加工，20-219(1979)，276-282。
- 3) Lange, K. : Handbook of Metal Forming, (1985), 24.3-24.42, McGraw-Hill.
- 4) 春日幸生・村上匡寛・町田輝史・加藤直人：塑性と加工，48-558(2007)，625-629。
- 5) 日本塑性加工学会編：せん断加工, (1992), 22, コロナ社。