論文

薄肉角管の突切り切断性 (1 報)

——正方形管の切断面精度およびその改善——

春日 幸生* 村上 匡寛** 町田 輝史*** 加藤 直人****

Press Cutting of a Thin-walled Square Pipe (1st Report)

——Accuracy in Cut Section of a Square Pipe and its Improvement——

Yukio KASUGA*, Masahiro MURAKAMI **, Terufumi MACHIDA *** and Naoto KATO ****

(Received on August 30, 2006)

In the press cutting of a square pipe, the effects of cutting parameters such as the top angle of the punch, tool clearance, wall thickness, side length and cut length on the distortion of the cut section and its surface decline towards the axis are discussed. The cutting force is also measured. The horizontal change in diagonal length is kept small, while the vertical one is increased with either decreasing cut length or increasing top angle of the punch. The higher the first peak force, which appears after cutting through the top corner thickness, the larger the distortion. For smaller distortion, the top angle should be smaller, the cut length should be longer and the thickness should be larger. The surface decline is affected by the ratio of the tool clearance to the wall thickness. To decrease the decline, it is suggested that the axial force applied during cutting work should be applied by 3% of the maximum cutting force.

Key words: shearing, cut off, distortion in cut section, surface decline towards pipe axis, cut length, punch angle, application of axial force

1. 緒言

管材に薄肉のパンチを押込んで一工程で切断する方式(以下、突切り切断と呼ぶ)は、生産性の高いプレス切断技術として建築物や管体の構造物部材を得るために広く普及している。パンチ厚分の切屑(切落し)は生じるものの、ノコ切断や二重突切り切断に比べると加工速度が速く、切粉処理などの後作業をあまり必要とせず、多くの場合そのまま組立てに用いることができる。

これまでに円管の突切り切断^{1)~4)}に関する基礎データはあるものの、角管の切断については、未だ現場における試行錯誤によって作業が取扱われており、作業指針となるデータベースが求められている。

そこで本研究では、角鋼管の突切り切断実験⁵⁾を行い、切断の実際を詳細に調べることにした。本報告では、切断条件が正方形管の切断荷重および切口精度に及ぼす影響に

ついて測定した結果をまとめ、精度向上について論じる。

2. 実験方法

2.1 供試材

対象とする管は、市販の機械構造用炭素鋼角形溶接鋼管(STKM11A)である。断面外形寸法と板厚は $\square 25 \times t1.6$ を標準とし、板厚 $t0.5$ から $t2.3\text{mm}$ まで、外形 $\square 16$, $\square 40\text{mm}$ を用意する。比較のため、一部に非鉄引抜き管(A6063)も用いる。本管の断面外形寸法と板厚は $\square 25 \times t1.5$ である。機械的性質を Table 1 に示す。

Table 1 Mechanical properties of the pipe adopted

Material	Tensile strength $\sigma_B(\text{MPa})$	Shear strength $k_S(\text{MPa})$	Elongation $\delta(\%)$	Hardness $H_v(20)$
STKM11A	355	319	24	141
A6063	199	161	12	81

* 玉川大学工学部 〒194-8610 町田市玉川学園 6-1-1

** 三友機工(株) 〒332-0004 川口市領家 4-1-18

*** 日本工業大学 〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1

**** 玉川大学大学院 〒194-8610 町田市玉川学園 6-1-1 現在 ㈱富士テクニカ

Fig.1 Experimental apparatus for cutting thin-walled pipe

2.2 実験装置および切断方法

容量 500kN の油圧プレスに、Fig.1 に示すようなダイセットを組込んだ。素管を V 溝つき分割ダイス(固定刃)および V 溝つき支持台に置き、上部を V 溝つきブランクホルダー(パンチガイド)で押さえ、管断面の対角線を鉛直方向に一致させた状態で切断する。溶接部は管断面下半分になるようにする。前後にストッパーを置いて軸方向の移動を拘束しており、前方ストッパーにより素管の切断長さ L を変えて切断することができる。ダイセット上部のロードセルにより切断荷重 F を、ひずみゲージ式変位計によりパンチストローク s を測定する。

Fig.2 Punch geometry

Table 2 Cutting conditions for a square pipe

Cutting length L (mm)	5,8,10,20,40
Punch material	SKH9
top angle θ_P (°)	60, 90, 120, 180
thickness t_P (mm)	2.0
Clearance c/t (%)	5,8,10,15
Cutting speed V_S (mm/s)	0.52

Fig.3 Measuring points

パンチ形状を Fig. 2 に、切断条件を Table 2 に示す。切断長さ(切断長さ) L を 5~40mm の範囲で変えて切断する。突切り切断パンチ(移動刃)の先端角は 4 種類であるが、同一先端角であってもシヤ角は加工前後半で変化する。刃厚については、薄くすれば曲がりを生じやすく、一方厚くすれば管断面がつぶれやすくなるため、両者を考慮し 2mm とする。切断工程後半で管は上下辺が重なる場合が多いため、パンチとダイスの片側工具クリアランスは、管厚さ 2 枚分に対して定義している。

2.3 つぶれ、切口面の傾きの測定

切断した管の組付け性を考慮し、断面の精度は、Fig.3 に

従って検討する。水平方向、垂直方向対角線長 (L_h ならびに L_v) を切断前後においてダイヤルゲージで測定し、次式によりつぶれを評価する。なお「'」は切断後を示す。

$$\Delta L_h = L_h' - L_h \quad (1)$$

$$\Delta L_v = L_v' - L_v \quad (2)$$

切口面の傾き(直角度) ΔI はダイヤルゲージを用いて測定する。

3. 実験結果および考察

3.1 切断状況と切断された断面形状、切断荷重

パンチ先端角を変化させて切断した時の断面を、パンチストロークとともに Fig.4 に示す。頂角 60° では、最初の切込後に切断屑が左右に分離し、その大半は管外側に排出されるが、一部は内側に巻き込まれる。パンチの降下とともに切断屑はカールし、切断の後半ではパンチと管の幾何学的な関係から管最下部が先に切断され、前半と同様に切断屑は左右に分離する ($s=40\text{mm}$)。切断前半で見られた切断屑の管内側への巻き込み部分は、圧縮されパンチ厚さより厚くなっている。このために、管断面の左右角部のせん断が行われる時はこの厚くなった屑が重なって角部を押し出すために切口面は平滑ではなく、むしり取られた状況を呈する。頂角 60° 以外の切断では切込時の分離は生じない。切断屑はせん断の後半で全て重なり分離される。

Fig.4 Cross sections when cutting (□25×t1.6, $L=40\text{mm}$)

パンチ先端角とともに切断長さを変化させると、明らかな断面の変形が見られる。これを Fig.5 に示す。断面がほぼ変形せずに切断された場合(a)と比較して、(b)は切込部のゆがみが発生した場合、(c)は、切断荷重が大きいため断面上半分が座屈し、(d)は切断長さがさらに短いため断面上半分が完全につぶれた場合である。

突切り切断荷重の推移を Fig.6 に示す。図から、曲線は一般にパンチが管頂部切込み時に一度ピークを示し(s 約 2mm)、その後一定値を示し、再びピーク荷重を示した後急激に降下する。パンチ先端角の影響を見ると、頂角が大きくなる(平坦になる)につれて最初のピーク荷重が大きくな

るが、加工に要するストロークは短くなる。最大切断荷重は頂角 90° の時である。これは、Fig.4 より、加工後半では板厚 2 枚分を管のほぼ下半分にわたって同時にせん断するためである。パンチストロークおよびパンチへの負荷を考慮すると、本実験範囲におけるパンチ先端角の選択は 120° または 180° となる。

3.2 切断面のつぶれと傾き

Fig.5 で示した形状不良について、切断条件の影響を詳細に調べるために ΔL_h , ΔL_v , ΔI を求めた。

Fig.5 Irregularly deformed cut sections

Fig.6 Cutting force

Fig. 7 Accuracy of cut section (a): ΔL_h , (b): ΔL_v (constant thickness)

Fig.8 Accuracy of cut section ΔI (constant thickness) Fig.9 Accuracy of cut section ΔL_v (A and t are changed)

管断面の水平方向対角線長変化 ΔL_h を測定した結果を Fig.7 に示す。切断長さ、パンチ先端角による差はあまりなく、その値も小さい。水平方向は切断時にダイスならびにパンチホルダーで幅広がり拘束されているためである。一方切断方向の対角線長変化 ΔL_v については、全体として加工後断面がつぶれる傾向を示す。パンチ先端角が大きくなるにつれて大きくなり、その傾向は切断長が短くなるにつれて顕著になる。断面がほぼ正方形を保つためには、切断長 20mm 以上、すなわち管の一边の長さ程度必要である。

断面の傾き ΔI に及ぼす切断長さの影響を Fig.8 に示す。断面性状が良好でないために、切断長さに対して明瞭な関係は見られないが、パンチ先端角に対しては、角度が小さいと断面の傾きは小さくなる。本実験におけるパンチ/ダイス間の片側すき間は 0.26mm であるが、例えば $\theta_p=90^\circ$ の場合、およそこのすき間に相当する傾きとなった。 θ_p が 60° の場合、Fig.4 に示したように、切断後半においてもパンチが切断屑を介さずに直接かつ下材のみ切断するため、管断面の上の二辺と下の二辺ではそれぞれにせん断面が生じ段差が比較的小さいと言える。

管断面の変形に関しては、水平方向の対角線長はあまり変化が無く、垂直方向の変化が加工条件に影響することが判明した。そこで管断面サイズと板厚を変化させたときに ΔL_v のみを調べた。結果を Fig.9 に示す。Fig.5 に示したように、辺が面外変形することから、 A/t^2 で整理しパンチ先端角の影響とともに示している。一边の長さ A が長くなると、また板厚が薄くなるとつぶれは大きくなる。 A/t^2 が 80mm^{-1} を超えると、頂角が 180° の場合を除き、 ΔL_v が 0.5mm を超えて断面の変形が大きくなる。

以上の結果より、切断工具に関してまとめると Table 3 のようになる。本実験の結果、パンチ先端角に関して 120° が総合的に判断して好ましい切断条件である。

Table 3 Evaluation in cutting work

θ_p	60°	90°	120°	180°
工具ストローク	×	○	○	◎
切断荷重	○	×	○	◎
管断面精度	◎	○	○	×

Fig. 10 Accuracy of cut section ΔL_h , ΔL_v with thickness and tool clearance changed (black: only thickness changes with constant clearance, white: only clearance changes for each thickness)

次に、 $\theta_p=120^\circ$ 、切断長さ40mmとし、工具クリアランス c/t を変化させたときの断面精度を Fig.10, 11 に示す。 c/t は5%から15%まで変化させる。黒塗りの記号は、工具すき間 c を0.26mm (板厚1.6mm, $c/t=8\%$ の時の工具すき間に該当) に固定したまま板厚のみ変化させた場合の結果で、白抜き記号は逆に、四種類の各板厚に対し工具すき間を変化させた場合の結果である。

工具すき間および板厚をそれぞれ独立に変化させた場合であっても、管断面精度に対しては同一傾向を示しており、管の切断であっても c/t により整理することには意味があることを示している。すなわち、 c/t が大きくなるにつれ ΔL_h , ΔL_v , Δl ともに精度は低下する。板厚単独の変化では、板厚が厚くなると、 ΔL_h , ΔL_v は改善され、 Δl は低下する。板厚が厚くなると、一定 c/t に対して単純に工具すき間が広がる。したがって本切断加工においては、管断面の上半分と下半分では工具すき間に相当する差が生じ、板厚が厚くなると Δl が大きくなる。

Fig. 11 Accuracy of cut section Δl with the same symbol definition as in Fig. 10

Fig. 12 Relationship between normalized stroke and cutting force

Fig. 13 Vertical crash against normalized stroke

Fig. 14 Proposed punch geometry

3.3 管断面精度の向上

水平方向の変形はほぼ見られないものの、管断面の垂直方向つぶれや切断面の傾きが生ずることが判明した。ここでは、つぶれ発生の原因と対策ならびに傾きを軽減させる方法について検討を行う。

Fig. 6 に示した切断荷重のうち、最初に現れるピーク荷重の部分のみを拡大して Fig. 12 に示す。ストロークは、管頂部の切断方向板厚 t を基準として無次元化して表示してある。測定は、荷重がピークを示し、その後定常状態になったところで中止している。ピーク荷重は $\theta_p=180^\circ$ の場合に最も高く、先端角が減少する順に低くなる。またピーク荷重はパンチ先端が管頂部板厚を突切った時またはその直後 ($s/t=1$ から 1.2 の範囲) に発生している。

この結果にあわせて、管のつぶれがどのように変化するか無次元化ストロークに対して Fig. 13 に示した。図中右端のデータは切断終了後の鉛直方向つぶれ ΔL_v である。管のつぶれは、パンチ先端角とともに増加するが管頂部の切断時に発生し、その後の切断工程ではほとんど変化していない。結局切断後のつぶれ発生は、Fig. 12 の最大荷重を示すストロークの時とほぼ同時であることがわかった。

以上の結果から、垂直方向のつぶれを減少させる1方策としては、パンチ先端に鋭利な頂角を有し、切断ストロークを少なくするために全体が 120° 以上 180° 以下であるようなパンチによる切断を行えば良いことになる。提案するパンチ形状の例を Fig. 14 に示す。先端は切断屑が分離するのを防ぐため 90° と設定している。

これらのパンチを作製し(先端部の鉛直方向長さ3.5mm)、管切断後に断面のつぶれと傾きを調べた結果を Fig. 15 に示す。ともにパンチ頂角 120° の時を基準にして示す。パンチ頂角がいずれの場合も精度は向上しているが、 180° の場合、加工中に切断屑がパンチから離れた。これにより管切断の後半においてパンチと切断屑の位置がずれ、ばりが大きくなった。以上のことから、先端が 90° であり全体が 120° のパンチが有効である。

一方管断面の傾きは、Fig. 11 より c/t の増加とともに大きくなり、板厚が厚ければ大きいことがすでに判明している。

Fig. 15 Effect of punch geometry on surface accuracy (results are shown by the ratios to those in the case of $\theta_p=120^\circ$)

Fig.16 Effect of axial force on surface accuracy 1

Fig.17 Effect of axial force on surface accuracy 2

そこで、切断中に管の軸方向に荷重をかけて傾きが減少するか試みた。Fig.1において、back stopperをはずし、代わりに手動式油圧シリンダーを固定して圧力をかける。この状態で上方からパンチが降下し切断を行う。本実験では、STKM11A管に加えて、参考のため変形抵抗の小さいA6063管での効果も確認する。Fig.16にその効果を示す。軸方向荷重 F_a は最大切断荷重 F_{max} で除して無次元化している。軸力が増加し、切断荷重の0.06倍までは ΔL_h , ΔL_v ともに変化はほとんどない。さらに軸力を増加させたときは横に広がり、垂直方向にはつぶれる。これは加工前半においてパンチが管と接触することになるので管頂部板厚を突切り後もパンチにより管上半分を下側へ引き込むことによる。

一方本実験の主目的である Δl の軽減には効果がある。

STKM11A管の場合、 F_a/F_{max} が0.03程度で Δl は軸力を加えないときの結果に対して半減した。 θ_p が 90° 以上の時、幾何学的関係から、加工前半の切断屑の管周方向長さは切断前に比べて短くなり、その結果切断屑の管軸方向厚さは厚くなる。切断の後半では、この切断屑に押されて管断面下半分は工具クリアランス分以上にえぐり落とされる。しかし、軸方向負荷により切断状況が改善され、工具すき間分(0.26mm)に相当する $\Delta l=0.2\text{mm}$ が得られたと考えられる。従って、本結果で得られた Δl を、クリアランスが一定の条件下でさらに軽減することは困難であると思われる。

断面状況を Fig.17 に示す。上段が STKM11A 管、下段が A6063 管である。 F_a/F_{max} が大きくなると管の上半分がつぶれる。右コーナー部を拡大した写真において、下半分の辺においてもせん断面が生じ、あるいは増加している。

4. 結論

薄肉正方形角鋼管の突切り切断実験を試み、切断状況と切断面の精度を調べた。また切断面精度を向上させる方法・考え方について論じた。

- 1) 切断後、管断面幅はほとんど変化しないが、これと直交する切断方向につぶれる。板厚の二乗に対する一辺の長さの比が80を越えるとこのつぶれは大きくなる。また断面が軸線に対して傾く。
- 2) この傾向は、切断長さが長くなり、パンチ先端角が小さくなるほど減少するが、切断効率および切断荷重を考慮するとパンチ先端角は 120° 前後がのぞましい。
- 3) 板厚に対する工具すき間の比は管断面の変形にあまり影響をあたえないが、軸線に対する傾きに影響をあたえる。この比が大きくなり、また板厚が厚くなるほど傾きは大きくなる。
- 4) 管断面の変形は切断時の最初のピーク荷重が発生するとき(管頂部の切断が完了したとき)に生じ、切断終了まで変化しない。断面の変形を軽減するためには、パンチ先端は鋭く全体は 120° 以上とする二段形状が良いが、 180° では加工中切断屑とパンチの分離によりばりが大きくなる。
- 5) 管断面の軸線に対する傾きは、軸方向に荷重を加えながら加工すると減少するが、最大切断荷重の3%程度の荷重を加えることにより傾きはほぼ半減する。

終わりに、装置の製作で便宜を賜った三菱機械(株)中島荘八郎社長、実験遂行に協力された道原義尚君、川瀬孝之君、山田逸平君(当時本学卒研究生)に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 嵯峨卓郎・佐藤金司・近藤秀治・吉川敏彦: 塑性と加工, 6-48(1965), 43-46.
- 2) 中川威雄: 同上, 23-255(1982), 307-314.
- 3) 中川威雄・阿部邦雄・林豊: 薄板のプレス加工, 実教出版, (1977), 48.
- 4) 日本塑性加工学会編: せん断加工, コロナ社, (1992), 223.
- 5) 春日幸生・町田輝史・加藤直人: 50 回塑加連講論, (1999), 387.