

打抜きの力学的解析とそれに基づくポンチ部材の最適形状選定

高橋明宏・四元裕史¹・山元直行・豊廣利信

Shape Optimization of Punching Tool Based on Static Analysis

Akihiro TAKAHASHI, Hirofumi YOTSUMOTO¹, Naoyuki YAMAMOTO
and Toshinobu TOYOHIRO

(Accepted October 1, 2014)

Abstract Purpose of this study is to choose optimum shape of stamping punch for metal sheet working. Stamping punch at different tip angles was prepared from stainless steel pipe. In order to determine shape optimization of punch, the initial and durability stamping press test were conducted. It was determined by considering the following two conditions; (1) the stamping process can be performed at low levels of mechanical loading. (2) the punch can be used repeatedly with little deterioration in stamping properties. As a result, the maximum value of stamping press load was increased by consecutive stamping. This finding may occur as the result of sharpness on the punch tip, based on static mechanical analysis. The optimum tip angle of stamping punch tool was the 45 degree angle.

Keywords [Stamping punch, Optimum shape of punch, Mechanical tests, Shearing energy]

1 序論

ポンチやダイと呼ばれる工具を用いて、主としてせん断作用原理によって薄い素材(以下、ワーク)を瞬間的に分離させる加工法をせん断加工という。このせん断加工において、打抜かれたものを製品とする場合は打抜き加工、打抜かれて残ったものがそのまま製品となる場合は穴あけ加工と呼ばれている。広義では、ワークをポンチの型どおりに抜く行為そのものが打抜きと呼ばれている¹⁾ので、本報ではそれにしたがって、これらの加工をまとめて打抜きと称することにする。

打抜きの工業的な利用目的には、所定の寸法および形状の製品を取り出すことや、ごみの処理、解体作業等で対象物に穴を開ける目的等が想定される。この打抜きにおいて、ワークは軟質である紙、硬質金属、セラミックスなどがあり、その種類は様々である。また、打抜き方法でも、道具を使って人の手

を用いる方法や機械装置を用いる方法など、現在では多様化の様相を示している。本研究では、人の手によって穴を開ける目的、およびそこで用いられる簡易的なポンチ形状に着目した。簡易的なポンチ形状については、パイプ軸に対して斜めにカットして先端をとがらせたものとする。このとき、打抜き作業を繰り返す事によって、ポンチ先端形状が徐々に劣化していく事が予想されるが、ポンチ先端の性状に対するワーク打抜き回数について詳しく調査した事例はほとんどない。

そこで本研究では、打抜きに適した耐久性の高いポンチ先端形状を提案する事を目的とした。打抜きに適すると判断するための条件は以下の二項目である。すなわち、低荷重で対象物の打抜きが可能な先端形状であることであり、第二に長期間の使用を想定した場合に、ポンチ先端の劣化が穏やかな形状、つまり打抜きを繰り返しても、比較的容易な打抜きが継続できる形状であることである。本研究では、

これらの二条件を検討するための各種打抜き試験を行った。そして、これらの試験結果に基づき、打抜きによるポンチおよびワークに関する力学的解析も併せて実施し、最終的に最適ポンチ先端形状を提案した。

2 試験方法

2.1 ポンチおよびワーク

ポンチ材質は SUS304 であり、直径 8mm で肉厚 0.8mm のパイプ断面のものを使用した。図 1 に示すように、ポンチ先端の角度 θ が 15°、30°、45°、60°、および 75°になるようにカットしたものを試験サンプルとして準備した。ワークは、市販のエアゾール缶を円形に切り抜いたものを用いた。また、専用の治具でワークを固定し、打抜き試験時にワークがずれないようにした。

2.2 初期打抜き荷重試験方法

初期打抜き荷重試験の手順は以下に示す通りである。

- ①ポンチを試験機のロードセルに取付ける。
- ②ワークを専用の治具で固定する。
- ③ポンチがワークに接触する直前まで接近させる。
- ④ロードセルの変位が 15mm になるまで 5mm/min の負荷速度で圧縮荷重を加える。

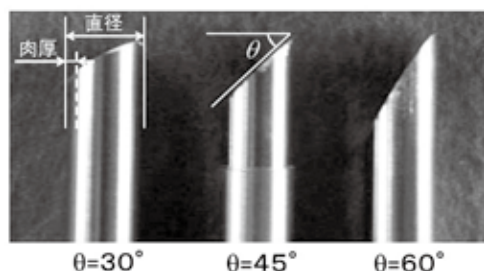


Fig.1 Stamping punch samples used in this study

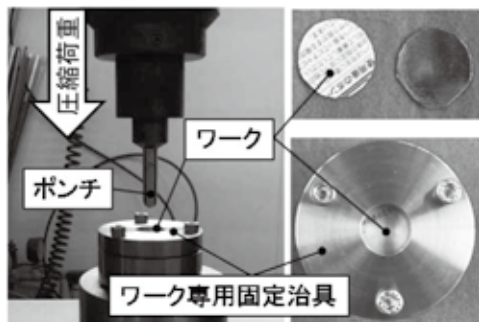


Fig.2 Configuration of the experimental apparatus for the stamping press test

なお、打抜き試験には万能試験機(島津製作所製オートグラフ, AG-1 容量 250kN)を用いた。試験に用いたワークのサンプリング数は、ポンチひと水準につき $n=5$ とした。ワークおよび打抜き試験の概要を図 2 に示す。

2.3 耐久打抜き荷重試験方法

初期打抜き荷重試験後に、その試験結果から打抜きに適していると判断して選んだポンチを用いて、以下に示す手順で耐久打抜き荷重試験を実施した。

- ①エアゾール缶に対し、選んだポンチを用いて手作業で穴を開ける。この時の穴開け回数は、まず 100 回実施し、続いて 100 回ずつ積算して最終的に 1000 回まで行う。
- ②穴開けを 100 回ずつ行った後、その度に 2.2 と同様な方法でポンチの打抜き荷重を測定する。

3 試験結果および考察

3.1 初期打抜き荷重試験結果

図 3 にポンチの先端角度別における初期打抜き荷重変位曲線をおよび図 4 にポンチ角度別の打抜き荷重の最大値、および加工エネルギーを示す。なお、加工エネルギー E とは、ポンチがワークを打抜いてから突き通すために要する仕事量であり、次式に示すような荷重変位曲線における荷重と微小変位との積の総和として定義したものである。

$$E = \sum_{i=1}^n \lim_{dx_i \rightarrow 0} f(x_i) dx_i \quad (1)$$

(1)式において、 dx_i は打抜きにおける微小変位を、 $f(x_i)$ は微小変位に対応した荷重をそれぞれ表す。なお、

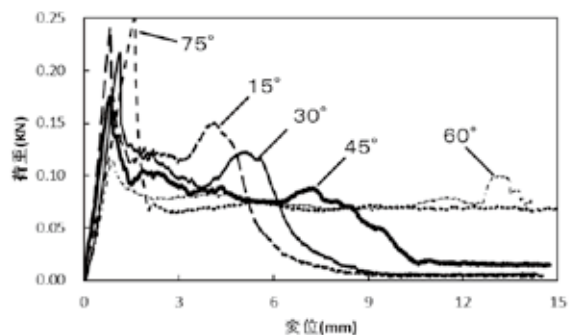


Fig.3 Load-deflection curves of the initial stamping press test in this study

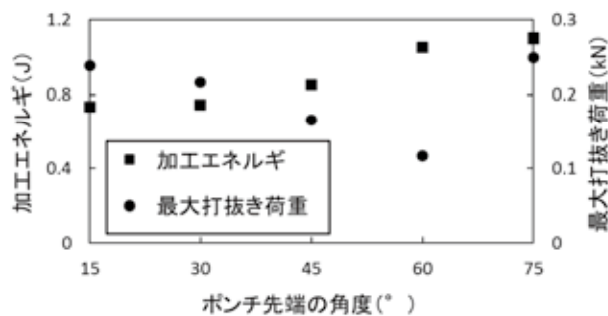


Fig.4 Variations of the work energy and maximum punching load with different edge angles in initial stamping press test

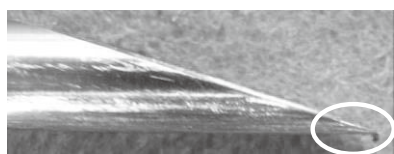


Fig.5 Photograph of the burr deformation at the tip of the punch of a 75 degree angle

図 4 にある 75°のポンチでは、一回目の打抜きの際に、図 5 に示すようにポンチ先端に顕著なカエリが生じてしまい、それ以降の試験ができなかった。そのため、 $n=1$ の結果であることに留意されたい。また、図 4 の各データは初期打抜き荷重試験における平均値を示しており、標準偏差を平均値で除した変動係数は 5%未満であった。

図 3 および図 4 の初期打抜き荷重試験の結果より、最大打抜き荷重が低かった 45°および 60°の二つのポンチが打抜きに適しているものと判断した。とはいえ、ポンチ先端の鋭さにはしきい値が存在し、それを超える事で打抜き荷重の最大値が変化する事が分かった。故に最大値が上昇した 75°のポンチでは、図 5 に示したように、試験後にカエリが生じていた事から、最大値増加の要因がワーク変形中に生じたポンチ先端のカエリによるものと考えられる。

打抜きにおいて、必要な荷重の最大値 $P_{\max}$ は次式で求められる²⁾。

$$P_{\max} = k_s \cdot L \cdot t_0 \quad (2)$$

ここで、 k_s はワークのせん断抵抗、 L はポンチの輪郭長さ、 t_0 は打抜くワークの厚さである。せん断抵抗 k_s はせん断破壊応力を意味しており、材料の引張強度 σ_T と相関を有する。文献³⁾の σ_T - k_s 特性の傾きより、実験的に $k_s = 0.8\sigma_T$ という関係が求められ

ている³⁾。(2)式において、同一のワークを同材質のポンチで打抜く場合、 $P_{\max}$ に影響する変数は輪郭長さ L である。当研究のポンチのように、円筒もしくは円柱を斜めに切断した形状における L の値は、この形状の展開図から推定が可能である。図 6 に示すように、半径 r の円柱をポンチ先端の角度が θ になるように切断した形状において、その展開図は、任意長さの円弧 AQ に対応する、円弧先端の点 Q と切断面状の点 P からなる軸線に平行な線分 PQ の分布と一致する^{4,5)}。図 6 の任意の角度 ϕ における AQ および PQ は次の式により求められる。

$$AQ = r\phi \quad (3)$$

$$PQ = r \tan \theta \sin \phi \quad (4)$$

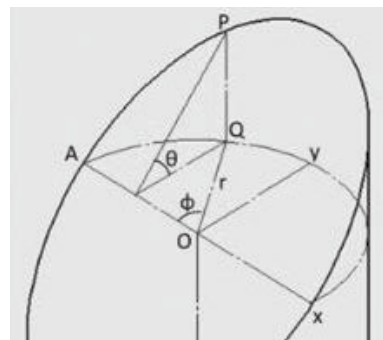


Fig.6 Schematic illustration of the slanting cut end of the cylinder

(3)および(4)式において、径が同一のポンチで先端を鋭くしていった場合、 $0 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲では θ が大きくなるにつれ $\tan \theta$ の値が大きくなるため、 AQ の値は変化せず PQ の値のみが大きくなっていく。また、 θ 、すなわち鋭さが同一のポンチで径を変化させていった場合、 AQ および PQ の値は共に変化していく。図 7 に示した角度および径を変化させたポンチの展開図より、ポンチ先端から一定の押込み量を考えた時、ポンチの径が小さくなるか、先端が鋭くなる事で L が小さくなり、それに伴い $P_{\max}$ は小さくなる事が分かる。カエリが生じた場合はワークへの接触量が増えてしまうために L が増加して $P_{\max}$ は大きくなる。この傾向は、図 4 にて確認する事が可能である。また、図 4 において、各ポンチにおける $P_{\max}$ の変動係数は非常に小さい事から、同一のポンチを用いた場合、ワークでのき裂発生は、ポンチとの接触量がほぼ一定の時に発生するという事

も確認できる。

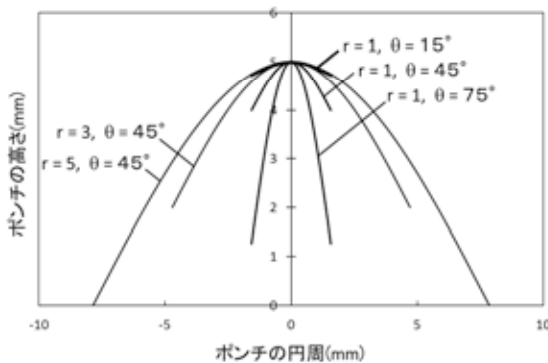


Fig.7 Curved portions on the tip of the punch at different edge angles

3. 2 加工エネルギーとポンチ先端角度との関係

図4より、加工エネルギーは、打抜き荷重の最大値とは異なり、ポンチの先端が鋭くなるにつれ増加していく傾向を示している。ポンチによる打抜き荷重は、図8に示すように斜面に垂直に作用する力 P_c と、斜面に沿って作用する力 P_f とに分けられる。図8において、 P_c は打抜きにおいてワークに発生したき裂を押し広げる力、 P_f は摩擦によってワーク表面を押し伸ばすような力であると考えられる。 P_c および P_f は、次式によって求められる。

$$P_c = P \cos \theta \quad (5)$$

$$P_f = P \sin \theta \quad (6)$$

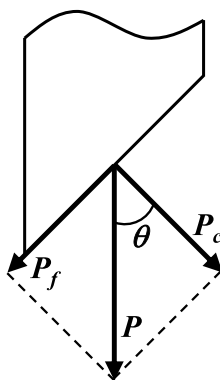


Fig.8 Schematic represent of the force system among P , P_f and P_c on the tip of the punch

(5)および(6)式より、 θ が増加、すなわち先端が鋭くなるにつれて P_c が減少し、 P_f が増加していく事が分かる。また、斜面の長さは先端が鋭くなるにつれ増加していく。したがって、加工エネルギーが増加した理由は、打抜きに不要な摩擦仕事の仕事量が増加

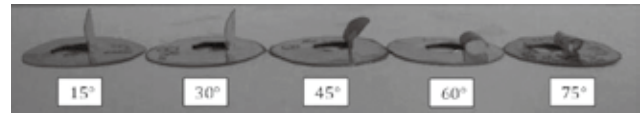


Fig.9 Failure morphologies of the specimens after stamping press test with punch at various edge angles

したためだと考えられる。図9に示されるように、各ポンチにて打抜きを行った後のワークを側面から観察してみると、ポンチの先端が鋭くなるにつれて、打抜かれた部分の反りが大きく、ロール状に巻かれたようになっている事が確認できる。これは、摩擦仕事の増加と加工エネルギーの増加との関係を示唆している。

3. 3 打抜きメカニズムに関する考察

打抜きのメカニズムは次のようになると考えられる。

まず、ポンチから荷重を受けたポンチは、その接触部を中心に変形する。そして、その変形に伴ってポンチとの接触量およびワークに作用する荷重が増加していく。この過程において、ポンチには、その断面が小さい場合に P_c の反力による曲げモーメントを起因とした変形、すなわちカエリが生じる可能性がある。ポンチの先端が鋭いほど断面は小さくなるため、カエリ発生リスクは高くなる。したがって、(2)式を変形した

$$k_s = \frac{P}{L \cdot t_0} \quad (2)'$$

なる関係より、ワークに生じている荷重 P と、接触しているポンチ先端の長さ L とワーク板厚 t_0 の積、との商がワークのせん断抵抗 k_s より大きくなった時にワークにき裂が生じると考えられる。ポンチの先端が鋭いほど接触量は小さくなるので、低荷重でき裂が生じる。また P_c による押し広げによってき裂が進展し、最終的にポンチの突き通しに至る。ポンチの先端が鋭いほど、 P_f による摩擦仕事が大きくなるため、加工エネルギーが大きくなる。

3. 4 耐久打抜き試験結果

図10に、各ポンチにおける穴開け回数増加に伴う打抜き荷重の最大値の推移を、図11に、各ポンチにおける穴開け回数増加に伴う、加工エネルギーの推移をそれぞれ示す。これらの図において、いずれのポンチにおいても、穴開け回数と打抜き荷重の最大値、および加工エネルギーとの間に、非常に高い正の相関

が認められた。これらの近似直線の傾きより、加工エネルギーの増加率は同程度であるが、打抜き荷重の最大値の増加率は 60° のポンチの方が大きく、値の大小が途中で逆転している事が確認できる。このことから、ポンチの劣化の度合いは、先端の鋭いものほど大きいと考えられる。

図 12 に示す各ポンチにおけるカエリ発生、および成長の様子より、いずれのポンチにおいても先端にカエリが生じているが、その成長の度合いは 60° のポンチの方が大きい事が確認できる。この様子から、打抜き荷重の増加は、先端におけるカエリの発生および成長によるものであり、その成長の度合いが大きいほど打抜きは困難になっていくと考えられる。カエリが生じた理由として、ワークに対する荷重のかかり方が考えられる。2.2 で説明した試験機で荷重を負荷する場合は、荷重の方向や負荷速度は一定であるため、ポンチへ作用する反力の大きさも一定である。これに対し、2.3 で説明した手作業で 1000 回繰り返して打抜いた試験において、手作業であるため、ポンチの打込まれ方が一定にはならない。そのため、ポンチへ作用する反力の大きさは都度異なると考えられる。P₀ が大きくなった場合、3.3 で示したように、先端の鋭いポンチの方がカエリ発生のリスクは高い。

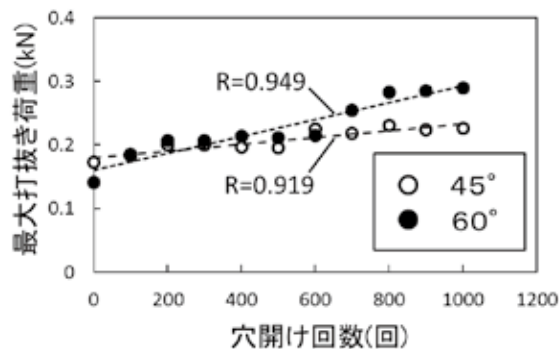


Fig.10 Variation of the maximum punching load with the number of punching

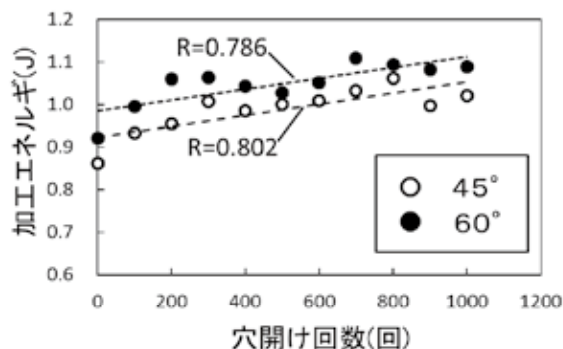


Fig.11 Variation of the work energy with the number of punching

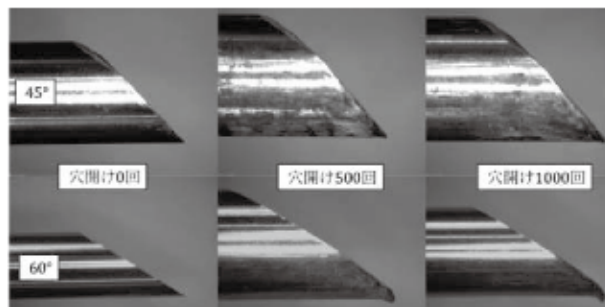


Fig.12 Deformation behavior on the tip of the punch after prescribed number of punching

3. 5 最適形状の選定

以上の結果および考察を踏まえ、実使用を想定すると、カエリの発生や成長リスクがそれほど高くない、 45° のポンチが打抜きに最適であると結論付けた。

4 結論

本研究では、人の手で打抜きを行うことを想定し、パイプ軸に対して斜めにカットして先端をとがらせたポンチの最適形状を選定するための各種試験と、ポンチおよびワークに作用する力学的解析を行った。今回の試験および解析によって明らかになった事を以下に示す。

- (1) ポンチの先端を鋭くしていく、あるいはポンチの径を小さくしていくと、打抜き荷重の最大値は減少していく。ただし、ポンチの先端を鋭くし過ぎると、変形中のワークから、ポンチの斜面に対して垂直に作用する反力による曲げモーメントが起因となるポンチ先端の変形、すなわちカエリが生じる。
- (2) ポンチの斜面に対して平行に作用する摩擦仕事の影響で、先端が鋭いポンチほど打抜きに要する加工エネルギーが大きくなる。
- (3) 繰り返し使用において、先端の鋭いポンチほど打抜き荷重の最大値が増加しやすい。
- (4) 手作業で穴開けを行う際、先端の鋭いポンチほどカエリの発生およびその成長リスクが高い。
- (5) 当研究で用いたポンチにおいて、最も打抜きに適したのは先端角度が 45° のポンチであった。

謝辞

本研究は一山道章氏との共同研究による成果である。ここに付記し、同氏に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川並高雄, 関口秀夫, 斉藤正美: 基礎塑性加工学, 森北出版, 1995
- 2) 長田修次, 柳本潤: 基礎からわかる塑性加工, コロナ社, 1997
- 3) 臼井英治, 白樫高洋: 加工の力学, 朝倉書店, 1979
- 4) H. Yotsumoto, A. Takahashi, N. Yamamoto, T. Toshinobu and M. Ichiyama: Research for Examination on Optimum Shape of Stamping Punch for Metal Sheet, Proceedings of the 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 8th ISEM, 085(CD-ROM), 2013
- 5) H. Yotsumoto, M. Ichiyama, A. Takahashi, N. Yamamoto and T. Toshinobu: A Proposal for Optimum Shape of Stamping Punch for Metal Thin Plate, Proceedings of the 2nd Japan-Thailand-Lao. P.D.R. Joint Friendship International Conference on Applied Electrical and Mechanical Engineering 2013, JTL-AEME2013, Vol.2, pp. 167-170, 2013