背圧絞り加工における中実ボスの成形限界

王 志剛* 柄澤 正直** 加藤 渉***

Boss Forming Limit by Bottom Compression Drawing

Zhigang WANG*, Masanao KARASAWA ** and Wataru KATOH ***

(Received on March 31, 2011)

Backward extrusion is the most common method of forming bosses within product cases. However, backward extrusion requires a very large forming load. To overcome this disadvantage, we developed bottom compression drawing to replace backward extrusion in our previous study. In this study, the formability and boss forming limit in bottom compression drawing are investigated by a series of experiments and finite element analysis. The results showed that the failure at the punch shoulder occurs when the radial tensile stress at the punch shoulder reaches the tensile strength of the sheet metal. With increasing surface roughness of the counterpunch, the formable zone of a solid boss expands. Adhesion on the counterpunch surface can be observed with repeated forming cycles under a dry condition, but the irregularity in the product configuration converges to a befitting level after a few forming cycles.

Keywords: forging, sheet metal forming, deep drawing, formability, solid boss, sheet forging.

1. 緒 言

前報¹⁾において、薄板管体の支持部を成形する加工法として、底部圧縮を付加した背圧絞り加工法を提案し、多用されている後方押し出し加工法^{2)~4)}と比べて、約半分の荷重で成形可能であることを明らかにした。背圧絞り加工においては、底部圧縮荷重の増加に伴い、支持部の中実ボスの高さが大きくなるが、底部板厚が初期板厚よりかなり薄くなり、絞り加工の引張応力による容器の破断がボス高さの成形限界を支配すると予想される。

本報では、背圧絞り加工法におけるボスの成形性に及ぼす金型表面粗さの影響および成形限界について検討を加える。なお、もう一つの成形欠陥であるひけについては、前報¹⁾で述べたように有限要素法解析によりその発生の有無が確認できるので、本論文ではひけを検討対象から外した。

2. 実験および解析の方法

2.1 実験方法

Fig. 1 に背圧絞り加工法の原理および成形品を示す。背圧絞り加工法は、対向する 2 つのパンチによってブランクをはさみ、所定のパンチ荷重 P をブランクに負荷し、ダイを速度 V で上方に駆動させることにより、底部圧縮、ボス成形、管体側面成形を同時に行う。加工中のパンチ肩部に

おいて、絞りによって生じる張力 T による影響で底面材料の降伏圧力が低減し、ボス成形に必要なパンチ荷重が減少する。

試験機は、最大荷重が 1000kN の 4 柱油圧式マルチアクションプレスを使用した。上下パンチ間の圧縮荷重はプレス機の油圧調整により設定し、パンチ荷重はプレス機に搭載されている荷重計により測定した。

Table 1 に工具形状を示す。背圧パンチ、パンチ、ダイの材質は SKD11 とした。背圧パンチの表面粗さはサンドペーパーとダイヤモンドペーストを用いて調整し、 $0.005 \sim 0.40 \mu\text{m}Ra$ の範囲内で変更した。パンチおよびダイの表面粗さは $0.005 \mu\text{m}Ra$ 一定とした。ブランク材料は A1050-O (板厚 $t = 2\text{mm}$)、SPCE ($t = 2.3\text{mm}$) の圧延板とした。金型とブランクの接触面については、パンチ側は潤滑油による潤滑、背圧パンチ側は無潤滑とした。潤滑油は動粘度 $10 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ (at 40°C) のパラフィン系鉱油 P10 を用いた。ダイ速度 V は 10mm/s 一定とした。

Fig. 1 Bottom compression drawing

* 岐阜大学工学部機械システム工学科 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1
Department of Mechanical Systems Engineering,
Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.

** 岐阜大学大学院工学研究科 同上
Graduate Student, Department of Mechanical Systems Engineering,
Gifu University, ibid.

*** 岐阜大学工学部機械システム工学科 同上
Under Graduate Student, Department of Mechanical Systems Engineering,
Gifu University, ibid.

Table 1 Tool dimension

Tool shape	Size /mm
Punch diameter D_p	40.0
Punch profile radius R_p	4.5
Boss diameter D_b	2.5
Boss profile radius R_b	1.0
Die inner diameter D_d	45.2
Die profile radius R_d	2.5

2.2 解析方法

FEM 解析に商用解析コード (DEFORMTM-2D ver. 9.0) を用いた。解析に用いた被加工材の変形抵抗は、パンチ荷重を変えて得られた底面板厚の異なる数個の成形品の底面にビッカース硬さ試験を行い、FEM 解析で求めた成形による相当塑性ひずみと硬さ試験によるひずみの和に対応させて求めた。A1050-O は $\bar{\sigma}=186(\bar{\varepsilon}+0.02)^{0.12}$ MPa, SPCE は $\bar{\sigma}=682\bar{\varepsilon}^{0.28}$ MPa とした。

3. 実験および解析の結果

3.1 成形品破断の発生条件

Fig. 2 に絞り比 DR が 1.5 の実験で得られた成形品の例を示す。成形条件が適正でない場合には、**Fig. 2(b)**に示すように、絞り加工の途中において底面とパンチ肩 R 部との境界付近で破断が発生している。

(a) Punch load 410kN (b) Punch load 670kN

Fig. 2 Product sample for A1050-O

(DR = 1.5, Surface roughness of counter punch : 0.07 μ mRa)

Fig. 3, **Fig. 4** に A1050-O, 絞り比 1.5 におけるボス高さとパンチ荷重との関係, 底面板厚とパンチ荷重との関係をそれぞれ示す。パンチ荷重の増加に伴いボス高さは大きくなり, 底面板厚は減少していく。図中のハッチングは実験で破断が生じた最小のパンチ荷重を示し, パンチ荷重 650kN 付近で材料破断が発生している。図中, FEM 解析の結果を併記しているが, 解析において成形品形状が実験に合うように摩擦条件を設定した。成形品破断の発生条件を明らかにするためにパンチ荷重を 500, 600, 700kN とし, ダイに作用する垂直方向の力からしわ押さえ力を引いて算出される絞り荷重が最大となるストロークにおける底面半径方向応力分布を確認した。**Fig. 5** に示すように, 半径方向は軸中心から 13~17mm の間, 板厚方向は残り板厚の半分の位置で計測点を設定した。**Fig. 6** に各パンチ荷重における半径方向応力分布を示す。パンチ荷重が 600kN においてパンチ肩 R 端点 15.5mm で半径方向応力が 120MPa となり, 被加工材 A1050-O の引張強さと同程度となっている。**Fig. 4** にみられるように, 同一条件の実験では約 650kN で成形品が破断しており, 破断発生条件の目安として被加工材の引張強さを用いることができると考えられる。これは,

Fig. 4 に示したように底面の材料が圧縮されて薄くなりながら, パンチ肩 R 部にそって容器側面へ流出するため, この底面の板厚の減少により破断部の応力状態がほぼ限界深絞り加工時の応力状態になったと思われる。

この考え方を検証するために, A1050-O, 絞り比 1.6 の場合の筐体底面半径方向応力分布を調べた。パンチ荷重を 400, 500, 600kN とし, 絞り荷重が最大となるストロークでの半径方向応力分布を **Fig. 7** に示す。パンチ荷重 600kN において, パンチ肩 R 部で半径方向応力が引張強さと同程度となっている。パンチ荷重が 600kN 付近で成形品破断の可能性が高いと予測される。

A1050-O, 絞り比 1.6 における実験および解析の結果を **Fig. 8**, **Fig. 9** に示す。図中のハッチングは実験における成形限界を示す。実験では, パンチ荷重が約 620kN で破断した。被加工材の引張強さを用いた予測とほぼ一致している。

Fig. 3 Experimental and FEM analytical results of boss height for A1050-O (DR = 1.5, Surface roughness of counter punch : 0.07 μ mRa)

Fig. 4 Experimental and FEM analytical results of bottom thickness for A1050-O (DR = 1.5, Surface roughness of counter punch : 0.07 μ mRa)

Fig. 5 Measurement point of radial stress in FEM analysis

Fig. 6 Radial stress distribution for A1050-O under DR1.5

Fig. 7 Radial stress distribution for A1050-O under DR1.6

Fig. 8 Experimental and FEM analytical results of boss height for A1050-O under DR1.6

Fig. 9 Experimental and FEM analytical results of bottom thickness for A1050-O under DR1.6

さらに被加工材を SPCE, 絞り比を 1.5 として同様の確認を行った。試験機の限界荷重の制約で, A1050-O と同一条件の実験では, 破断が確認できなかったため, 背圧パンチに DLC 処理を施し, 摩擦条件を調整した。初期板厚 2.3mm, パンチ荷重 550, 650, 700kN における底面半径方向応力分布を確認した。Fig. 10 に各パンチ荷重における半径方向応力を示す。パンチ荷重 650kN において, パンチ肩 R 端点 15.5mm で半径方向応力が被加工材の引張強さとほぼ同程度となっており, 成形品破断の可能性が高いと予測される。実験および FEM 解析の結果を Fig. 11, Fig. 12 に示す。図中のハッチングは実験における成形限界を示す。実験ではパンチ荷重が 720kN 付近でパンチ肩 R 部において材料が破断し, 予測とほぼ一致している。

このように, 本加工法において, 成形品破断の有無を判断するやや安全側の設計指標として被加工材の引張強さをを用いることができる。

Fig. 10 Radial stress distribution for SPCE under DR1.5

Fig. 11 Experimental and FEM analytical results of boss height for SPCE under DR1.5

Fig. 12 Experimental and FEM analytical results of bottom thickness for SPCE under DR1.5

3.2 背圧パンチ表面粗さの影響

これまでの実験および解析の結果、背圧パンチ側の摩擦条件がボスの成形性に大きな影響を与えることがわかった。そこで、背圧パンチの表面粗さを変更して、その影響を詳しく調べることにした。

背圧パンチ表面粗さと成形可能なパンチ荷重との関係を Fig. 13 に示す。表面粗さ Ra の増加に伴い成形可能領域が拡大されている。成形中、底面材料はパンチの圧縮と絞りの張力によってボス部および外周方向へ流れるが、背圧パンチ表面粗さの増大は材料の外周への流出抵抗の増加を引き起こし、底面板厚が確保され、成形限界が拡大されると考えられる。

Fig. 14, Fig. 15 に背圧パンチ表面粗さに対応するパンチ荷重の限界成形可能限界における成形品のボス高さと底面板厚と背圧パンチの表面粗さの関係をそれぞれ示す。背圧パンチ表面粗さの増加に伴い成形されるボス高さは大きくなるが、 $0.10\mu\text{m}Ra$ 付近で飽和している。

4. 繰返し加工による背圧パンチ表面凝着の変化

Fig. 16 に A1050-O、絞り比 1.5、パンチ荷重 500kN、背圧パンチ初期表面粗さ $0.14\mu\text{m}Ra$ の場合、繰返し加工における背圧パンチに発生した凝着の様子を示す。中心部直径 8mm の領域 A において凝着は見られず、その外側の直径 31.58mm までの領域 B には黒色の凝着、さらに外周部の内径 31.58mm、外径 34.54mm のリング状領域 C には白く見える凝着が観察される。Fig. 17 に Fig. 16 の A、B、C の箇所における表面性状を示す。A 点においては、加工の進行に伴う表面変化は見られないが、B、C 点においては、加工回数が 4 回程度で初期表面上の工作模様を覆うほどの薄い凝着層が形成されている。

Fig. 13 Relationship between limit of punch load and surface roughness of counter punch for A1050-O under DR1.5

Fig. 14 Relationship between limit of boss height and surface roughness of counter punch for A1050-O under DR1.5

Fig. 15 Relationship between limit of bottom thickness and surface roughness of counter punch for A1050-O under DR1.5

Fig. 16 Adhesion zone on counter punch for A1050-O under punch load 500kN (DR = 1.5, Surface roughness of counter punch : $0.07\mu\text{m}Ra$)

		Forming cycles		
		Before experiment	1st	4th
Observed position	A			
	B			
	C			

Fig. 17 Appearance of adhesion on counter punch for A1050-O under punch load 500kN (DR = 1.5, Surface roughness of counter punch : $0.07\mu\text{m}Ra$)

背圧パンチ表面上の凝着痕の分布形態を理解するために底面表層部の材料流れを解析した。Fig. 18 に示すように成形前のブランクに中心軸から 18mm の間、表面から 5mm の位置に複数の点を配置し、成形中の点の動きを追跡した。結果を Fig. 19 に示す。成形中の各点の履歴を線で結んで示している。中心軸から 1.25mm まではパンチ中央のボス穴

と一致し、材料は上方向へ流れる。1.25mm より外側は材料がパンチにより圧縮されるため下方向へ流れる。およそ 4mm までの材料はボス穴に向かって内側に少し移動し、4mm より外側の材料は外側へ流れる。すなわち、半径位置約 4mm の地点が分流点となっている。このことから、背圧パンチ表面上の領域 A と B の境界は成形時の分流点に対応し、領域 A は内側流れに対応する。領域 B の材料は外へ流出し、半径方向の移動量が大きいいため凝着が発生したと思われる。パンチ肩 R 部にあたる領域 C は接触面の終端で凝着がより顕著になったと考えられる。

Fig. 20 に A1050-O、絞り比 1.5、パンチ荷重 500kN の場合、繰返し加工における底面板厚の変動を示す。加工の繰返しによる背圧パンチ表面の変化に伴い、底面板厚は変化するが、その変化量は徐々に小さくなる傾向にある。これは Fig. 17 にみられるように数回の加工により背圧パンチ表面の凝着が安定し、表面状態が変化しなくなったことによるものと考えられる。

Fig. 18 Location of measurement point

Fig. 19 Metal flow at bottom surface for A1050-O under DR1.5

Fig. 20 Relationship between bottom thickness and forming cycles for A1050-O under DR1.5

5. 結 言

背圧絞り加工法による中実ボスの成形限界を調べた結果、以下のことがわかった。

- 1) 成形限界を支配する成形品の破断は、パンチ肩 R 部における半径方向応力が被加工材の引張強さに達すると発生する。
- 2) 成形可能なパンチ荷重の限界は背圧パンチの表面粗さに比例し、背圧パンチの表面粗さを大きくすることによってボス高さの成形限界が向上する。
- 3) 背圧パンチ表面上の凝着の分布形態は被加工材の表面層流れに対応する。繰返し加工における凝着の成長による成形品の寸法変動は十数回の連続加工後に小さくなる。

参 考 文 献

- 1) 王志剛・森下圭一・安藤透：塑性と加工，**53**-616(2012)，429-433.
- 2) 小坂田宏造・花見眞司・荒井直人：塑性と加工，**41**-477(2000)，1026-1030.
- 3) 村上碩哉・佐々木文吾・米岡進・大竹尚登・安原鋭幸：塑性と加工，**48**-555(2007)，293-297.
- 4) 古閑伸裕・管之揚・柚木伸公・R.Paisarn：第 55 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2004)，53-54.