論文

2 工程の円錐台張出し成形の成形性に及ぼす 1 工程目形状の影響

中川 欣哉* 山崎 雄司*

玉井 良清** 平本 治郎**

Influence of 1st Step Shape on the Formability of Circular Truncated Cone Stretch Forming in Two-Step Forming

Kinya NAKAGAWA*, Yuji YAMASAKI*,

Yoshikiyo TAMAI** and Jiro HIRAMOTO**

(Received on March 27, 2019)

The formability of steel sheets must be improved to form complicated car parts. Multistep forming is one way of improving the formability. The shape after preforming could influence the formability in the main step of multistep forming. However, no relationship has been reported between the shape after preforming and the final shape in the case of stretch forming. In this study, circular truncated cones were formed by two-step forming consisting of preforming and main forming, with combinations of various shapes after preforming and final shapes in order to investigate the effect of the shape after preforming on the forming limit in final forming. The results show that the forming limit height in main forming is affected by the preforming shape. In addition, the forming limit height in main forming is determined by the central cross sectional line length of the shape after preforming.

Key words: sheet metal forming, forming property, finite element method, multistage stretch forming.

1. 緒言

近年自動車骨格部品への超ハイテン材適用のニーズ、外板部品の高意匠化のニーズが高まっている。そのため鋼板のプレス成形性を向上させる技術の開発が求められている。

プレス成形において課題となる成形不良として代表的なものは割れ、しわ、形状不良、面ひずみ等があり、中でも割れはもっとも重大な不良である¹⁾。さらに、割れはその成形様式から絞り割れ、張出し割れ、伸びフランジ割れ、曲げ割れ等に分類され²⁾、特に絞り割れ、張出し割れは最終製品形状内で発生する場合が多くその発生を防ぐことは重要である。これらの割れを防ぐ方法として、材料、成形技術の研究開発が行われている。材料については各成形様式の成形性に及ぼす材料の機械的特性が明らかとなっており、それら特性値がプレス成形性に及ぼす影響についての整理、報告及び材料開発が行われている³⁾。

成形性を向上させる成形技術の一つとして、従来よりブ

レス工程を増やし、割れを防ぐ方法が行われている。このような多工程の成形では、各工程の形状の適正化が重要である。深絞り成形ではこれまでに多工程の成形での各工程の形状設計に関して、あらかじめ逆張出し加工を行うことによる成形性向上効果³⁾、四角筒絞り成形についてすべり線場による初期ブランク形状と金型の設計⁴⁾、円筒深絞り成形における逆絞りによる加工限界の向上⁵⁾などが報告されているが、適用できる工法が極めて限定的である。また、多工程の張出し成形について各工程の形状が最終的な成形性に及ぼす影響や、各工程の最適な形状の設計方法に関する報告は見られない。張出し成形はフランジ部から材料が供給される深絞り成形と異なり、フランジ部からの材料供給がなく金型内部の材料で成形が行なわれる。成形中に材料と金型が接触する領域では摩擦力により材料の移動が拘束されるため、局所的にひずみが集中し割れが発生する。このように発生する割れを回避するためには、ひずみを分散させる必要があり⁶⁾、複数工程でひずみを分散させるためには各工程の形状の最適化が重要である。

本報告では2工程での円錐台張出し成形において各工程で形状の異なるパンチの組み合わせの成形についてFEM解析と実験を行い2工程目(以後、本成形)の成形性に及ぼす1工程目(以後、予成形)の形状の影響を調査した。

* JFE スチール(株) 〒721-8510 福山市鋼管町1番地
JFE Steel corporation
1 Kokan-cho, Fukuyama-shi, Hiroshima 721-8510, Japan.
E-mail: kin-nakagawa@jfe-steel.co.jp

** JFE スチール(株) 〒260-0835 千葉市中央区川崎町1番地
JFE Steel corporation
1 Kawasaki-cho, Chuo-ku, Chiba 260-0835, Japan.

2. 実験, 解析方法

予成形の形状が本成形の成形性に与える影響を調査するため, 各工程でパンチ径およびパンチ肩 R を変えた円錐台張出し成形の FEM 解析(以下, 解析)を行うとともに, 一部の条件について, 解析の精度検証のための実験を行った。

解析は LSDYNA Ver9.7.1R5 を用い, 動的陽解法で行った。金型は全て剛体とした。ダイ径 153 mm, ダイ肩 R_5 mm, ブランクホルダ径 153 mm のダイとブランクホルダを全条件で使用し, 各工程のパンチ径, パンチ肩 R を変化させた。以降予成形のパンチ径を D_P , 予成形のパンチ肩 R を R_P , 本成形のパンチ径を D_M , 本成形でのパンチ肩 R を R_M とする。試験を行った D_P , R_P の組み合わせを後述する予成形限界高さとは合わせ Table 1 にまとめる。また D_M は 50 mm, 100 mm, 150 mm の 3 水準, R_M は 5 mm とし, ブランク形状は直径 170 mm の円形とした。解析の材料モデルは多直線近似等方弾塑性体モデルを用い, 応力-ひずみ曲線は実験から得られた値を n 乗硬化則で近似した値を入力した。ブランクのメッシュサイズを 1.0 mm, 金型との摩擦係数を 0.15 とし, 外周を半径方向に拘束し張出し試験を模擬した。金型構成を Fig. 1 に示す。解析と実験には Table 2 に示す機械的特性の JAC270D 材を用いた。破断の判定は解析後の主ひずみ分布と Keeler-Goodwin 線図^{7), 8)}からおこなった。成形限界は予成形, 本成形ともに破断が生じる高さの 99% の高さとし本成形は予成形の成形限界の成形品を用いて行った。予成形高さを Table 1 に示す。解析により, 成形限界高さ, 成形限界での中央断面形状, 中央断面線長, パンチ底の板厚減少率を求めた。なお, パンチ底の板厚減少率はパンチ底中央から外側に 5 mm の位置の値とした。これはパンチ底中央に約半径 5 mm の大きさで特異的に板厚減少が小さくなる領域が存在し, それを避けるためである。

解析精度の検証実験を Table 2 の材料を用いて行った。予成形を $D_P = 100$ mm, $R_P = 5$ mm, 10 mm, 20 mm の 3 条件, 本成形を $D_M = 50$ mm, 100 mm, 150 mm, $R_M = 5$ mm の 3 条件の組み合わせの 9 条件で試験を行った。試験はまず予成形の金型を使用し, 目視でくびれが確認された高さを破断高さとし, その 99% の高さのサンプルを予成形成品とした。予成形高さを Table 1 に示す。実験結果は解析結果よりも予成形高さが低くなっているが, これは潤滑条件, 拘束条件の差, 及び割れ判定を目視で行ったことから生じた差と考えられる。本成形においても目視でくびれが確認される高さまで成形しその高さの 99% を成形限界高さとした。成形は予成形, 本成形ともに直径 170 mm のロックビードにより流入を拘束し完全張出し状態とし, 潤滑条件は鋼板に最初から付着していた防錆油ままで試験をおこなった。

Table 1 Shapes of preforming tools and forming limit heights at preforming

D_P [mm]	50			100			150		
	R_P [mm]			R_P [mm]			R_P [mm]		
Forming height in preforming (FEA) [mm]	30.8	32.7	35.7	28.1	30.8	37.9	10.4	14.7	21.7
Forming height in preforming (Exp) [mm]	-	-	-	26.8	29.2	36.3	-	-	-

Fig. 1 Tool models for FEM

Table 2 Mechanical properties of material

Thickness [mm]	Young's modulus [GPa]	YP [MPa]	TS [MPa]	u-EL [%]	t-EL [%]	n-value	r-value
0.75	210	160	290	28	50	0.26	1.6

3. 結果

3.1 解析精度の検証

解析精度の検証のため, 実験と解析の結果の比較を行った。実験は 2 章で述べた計 9 条件で行った。また, 実験と同条件のパンチの組み合わせで解析を行い本成形の成形高さの比較を行った, 結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 から実験, 解析共に全ての条件で成形限界高さは R_P の拡大に伴い上昇し, 実験と解析で同じ傾向を示した。また, 実験, 解析共にすべての条件で割れはパンチ肩から発生した。これら結果より解析で実試験の傾向を模擬可能と考え, 以降は解析結果を用いて検討を進める。解析結果は, D_P と D_M の大小関係で 3 通りに分類し, 破断限界高さと予成形形状の関係を示す。

Fig. 2 Dependence of forming limit height in main forming on punch shoulder radius

3.2 $D_M < D_P$ の場合の破断限界高さと予成形形状の関係

例として $D_M = 50$ mm, $R_M = 5$ mm で D_P , R_P を変化させた場合の成形限界高さを Fig. 3 に示す。ここで, 白抜きのプロットはパンチ径 50 mm, パンチ肩 R_5 mm で予成形を行わずに一回で成形(以降, 一回成形)した結果である。予成形を行うことで全ての条件で一回成形より成形限界高さが向上した。また, R_P が大きくなるに伴い成形限界高さは高くなるが, D_P の影響は認められない。Fig. 4 に本成形後のパンチ底の板厚減少率を示す。予成形を行った場合の板厚減少率は R_P が 20 mm の条件を除き一回成形と同等以下であった。また, $D_M < D_P$ の全ての条件で本成形時に Fig. 5 に示すようなボディシワが発生した。これは予成形時にパンチ肩近傍で周方向に伸ばされた材料が本成形時に余り座屈したためである。このように一度伸ばされた材料を縦壁, 斜壁部で座屈させずにプレス成形することは困難であるため, 実用上 $D_M < D_P$ の条件は予成形には適さない。

Fig. 3 Dependence of forming limit height on punch shoulder radius of preforming ($D_M < D_P$)

Fig. 4 Effect of punch shoulder radius of preforming on thickness reduction at punch top in final shape ($D_M < D_P$)

Fig. 5 Wrinkles in main forming ($D_M < D_P$)

3.3 $D_M = D_P$ の場合の破断限界高さと呼成形形状の関係

例として Fig. 6 に $R_M = 5$ mm とし R_P を変化させた場合のそれぞれのパンチ径での成形限界高さを示す。ここで、白抜きのプロットは一回成形の結果である。全ての D_P の条件で R_P の拡大に伴い成形限界高さが向上した。Fig. 7 にパンチ底の板厚減少率を示す。 $D_M = D_P$ の条件では、予成形を行ったすべての D_P , R_P の条件で本成形後のパンチ底板厚減少率は一回成形の板厚減少率よりも大きくなった。

Fig. 6 Dependence of forming limit height on punch shoulder radius of preforming ($D_M = D_P$)

Fig. 7 Effect of punch shoulder radius of preforming on thickness reduction at punch top in final shape ($D_M = D_P$)

3.4 $D_M > D_P$ の場合の破断限界高さと呼成形形状の関係

例として $D_M = 150$ mm, $R_M = 5$ mm とし, D_P , R_P を変化させた場合の成形限界高さを Fig. 8 に示す。白抜きのプロットは一回成形の結果である。予成形を行なった全ての条件で本成形の成形限界高さが向上した。 D_P が同じ場合は R_P が大きい方が成形限界高さは高く, R_P が同じ場合は $D_P = 50$ mm よりも $D_P = 100$ mm の方が成形高さは高くなった。Fig. 9 に本成形後のパンチ底の板厚減少率を示す。 $D_M > D_P$ の条件においても $D_M = D_P$ の場合と同様にすべての条件でパンチ底の板厚減少率は一回成形の板厚減少率よりも大きくなった。また、本条件においては予成形を行った場合本成形の成形限界高さは $D_P = 100$ mm の条件が最も高かったが、パンチ底の板厚減少率は $D_P = 50$ mm の条件が最も高かった。また $D_M > D_P$ の条件では本成形後のパンチ底部で予成形時のパンチ肩の曲げ癖が残留した (Fig. 10)。これは本検討では成形限界高さを得るためダイ側成形, 下死点での加圧等を行わなかったため予成形の形状が残留したためであり、下死点での加圧により緩和可能と考えられる。

Fig. 8 Dependence of forming limit height on punch shoulder radius of preforming ($D_M > D_P$)

Fig. 9 Effect of punch shoulder radius of preforming on thickness reduction at punch top in final shape ($D_M > D_P$)

Fig. 10 Bend mark in final shape caused by punch shoulder in preforming

3.5 予成形の成形高さ和本成形の成形限界高さの関係

Fig. 11 に例として $D_M = 150$ mm で固定し D_P と R_P を変化した場合の予成形での成形高さ和本成形での成形限界高さの関係を示す。各 D_P において R_P が大きくなるほど予成形、本成形ともに成形高さが上昇するが、 D_P により層別されるため本成形の成形限界高さを R_P , D_P , 予成形の成形限界高さで一律に整理することはできない。

Fig. 11 Relationship between forming limit height in main forming and preforming

4. 考 察

3 章で、予成形を行うことで円錐台張出しの成形限界高さが向上することが示されたが、その向上量は予成形と本成形のパンチ形状の組み合わせによりさまざまであった。どのような因子が成形限界高さに影響を与えているのかについて、本章で考察を行う。

4.1 予成形の断面線長と本成形の断面線長の関係

予成形、本成形での成形性を表すパラメータとして各工程での断面線長に着目する。断面線長は予成形、本成形ともに Fig. 12 に示す中央断面の線長と定義した。

$D_M \geq D_P$ の条件での予成形後の中央断面線長と本成形後の中央断面線長を Fig. 13 に示す。ここで白抜きのプロットは 1 回成形の結果を示す。予成形後の中央断面線長と本成形後の中央断面線長はほぼ等しい事がわかる。この結果から $D_M \geq D_P$ の条件では予成形から本成形への成形の際に断面線長が増加するような変形は小さい事がわかる。

Fig. 12 Definition of central cross section

Fig. 13 Relationship between central cross-sectional length after preforming and main forming ($D_M \geq D_P$)

Fig. 14 に $(D_P, R_P) = (100$ mm, 20 mm) の条件 (Fig. 14(a)), $(D_P, R_P) = (50$ mm, 20 mm) の条件 (Fig. 14(b)) で予成形した後に $(D_M, R_M) = (150$ mm, 5 mm) の条件で本成形をおこなった際の両工程の中央断面形状と板厚減少率を、横軸をパンチ底中央からのプレス方向投影距離 x として示す。

いずれの条件でも、予成形時にパンチ底であった部分の板厚減少は本成形では進まず、予成形時に縦壁であった部位の板厚減少のみが進んでいる。

Fig. 14 Central cross-sectional shapes and distributions of thickness reduction after preforming and main forming

Fig. 15 に $D_M \geq D_P$ の条件での予成形後と本成形後のパンチ底の板厚減少率を示す。ここで白抜きの点は一回成形の結果である。 D_P , R_P にかかわらず、本成形ではパンチ底の板厚減少は進行しないことがわかる。

Fig. 15 Relationship between thickness reduction at punch top after preforming and after main forming

4.2 本成形で断面線長が増加しない理由

Fig. 16 に $D_M = 150$ mm, $R_M = 5$ mm の一回成形 (Fig. 16(a)) と, $D_P = 100$ mm, $R_P = 20$ mm の後に $D_M = 150$ mm, $R_M = 5$ mm の成形をした場合 (Fig. 16(b)) の, 本成形開始から破断直前までの径方向への材料移動量を示す. また, Fig. 17 に, Fig. 16 の条件と同様の一回成形 (Fig. 17(a)), および予成形後に本成形を行った場合 (Fig. 17(b)) の, パンチ肩 R 部近傍の破断直前の最大主ひずみの方向と大きさをベクトル表示した図を示す. Fig. 16 から予成形をした方が材料の径方向への移動が大きい事, Fig. 17 から一回成形では径方向が最大主ひずみ方向であるのに対し, 予成形をした場合は周方向が最大主ひずみ方向であることがわかる. これらの結果から, 予成形をおこなった場合は成形中に径方向には予成形で予め伸ばされていた材料がパンチ底から移動するため大きい張力は発生しないのに対し, 周方向には材料が不足するため張力が発生したと考えられる. その後 Fig. 15 で示されたように予成形と本成形でパンチ底の板厚減少率が同じ事から, パンチ底から移動できる材料がなくなった時点でそれ以上パンチ底の材料は伸びず破断に至る. 結果として本成形において材料は周方向には伸びるが径方向の伸びは小さく, 予成形と本成形で断面線長が変わらないまま板厚減少が進んだと考えられる.

予成形と本成形の断面線長がほぼ等しいこと, 本成形の断面線長が長いほど幾何学的に成形高さは高くなることから本成形での成形高さを最大とするためには予成形の断面線長を最大にすることが有効であると考えられる.

Fig. 16 Material displacement until just before fracture

Fig. 17 First principal strain distributions and their directions just before fracture

4.3 予成形の断面線長が最大になる条件

Fig. 14 に示されたように, 予成形での断面線長が長い程, 本成形での成形限界高さは向上する. Fig. 18 に D_P と予成形での断面線長の関係を R_P ごとに示す. Fig. 18 に示されるように予成形での断面線長は極値を持ち, 本試験条件では予成形の断面線長は $D_P = 100$ mm, $R_P = 20$ mm で最大となった.

Fig. 18 Dependence of central cross sectional length after preforming on punch radius after preforming

予成形の断面線長が極値をもった理由を考察する.

Fig. 19 に予成形のパンチ径とパンチ底板厚減少率の関係を示す. パンチ肩 R が同じ場合はパンチ径が大きくなるほど, また, パンチ径が同じ場合はパンチ肩 R が小さくなるほど予成形でのパンチ底板厚減少率は小さくなる. Fig. 20 に $D_P = 100$ mm, 150 mm で $R_P = 5$ mm の場合の, 予成形の成形限界高さでの断面形状と最大主応力分布を示す. 破断発生部位であるパンチ肩 R 近傍, 縦壁側の最大主応力は破断直前の状態であるためパンチ径の大小によらずほぼ等しい. しかしパンチ底ではパンチ径が大きいほうが低い. これは, Fig. 21 に模式的に示すようにパンチ径が大きくなるほど縦壁の角度が急峻となり, パンチ肩 R 部にブランクが接触する長さが長くなることに加え, 角度が急峻になるほどパンチ肩部に材料を押し付ける力の成分が大きくなり, 摩擦力が増大する. また, パンチ肩 R が小さい程パンチ肩部での曲げ抵抗が増大する⁹⁾ことでパンチ底から縦壁への材料移動が阻害され, 成形高さが低くなりパンチ底の応力, ひずみが小さくなったと考えられる.

パンチ底の材料の伸び量はパンチ径とパンチ底のひずみの積によって表され, パンチ底のひずみはパンチ径が大きくなるに従い低下することから, 予成形でのパンチ底の

Fig. 19 Dependence of thickness reduction after preforming on punch diameter after preforming

Fig. 20 Central cross-sectional shapes and distributions of first principal stress after preforming

Fig. 21 Pattern diagrams of punch shoulder cross section

伸び量はパンチ径に対して極値を持つ。これにより、Fig. 18 に示されたように全体の断面線長もパンチ径に対し極値を持ったと考えられる。このように、パンチ底の伸び量が最大となる最適なパンチ径が存在し、その最適パンチ径で予成形を行うことで断面線長が最大となり本成形の成形限界高さを最も高くできると考えられる。

例として Fig. 22 に $(D_M, R_M) = (150 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$ の本成形を行う前に $(D_P, R_P) = (150 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$ (Fig. 22(a)), $(D_P, R_P) = (100 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$ (Fig. 22(b)) の予成形をおこなった場合、および比較として $(D_M, R_M) = (150 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$ で一回成形を行った場合の予成形、本成形の断面形状を示す。Fig. 22(a) のように予成形と本成形の R のみ変化させた場合では 1 回成形と比較して成形高さは 55% 向上したが、Fig. 22(b) のように予成形のパンチ径を適正化することにより 1 回成形と比較して成形高さは 80% 程度向上した。

Fig. 22 Central cross-sectional shapes after preforming and main forming $((D_M, R_M) = (150 \text{ mm}, 5 \text{ mm}))$

通常の型設計の考え方では Fig. 22(a) のように $D_M = D_P$, $R_M < R_P$ としてリストライク工程で R を叩くような工程をとる場合が多いが、Fig. 22(b) のように D_P を最適径として予成形を行うことにより、予成形での断面線長を最大化でき、本成形の成形高さを最大にすることができる。

5. 結 言

2 工程の円錐台張出し成形において、各工程の径と肩 R が異なるパンチを用い成形性について調査を行い、以下の結論を得た。

- 1) 予成形により、一回成形と比較して成形限界高さが向上した。
- 2) 予成形のパンチ径が本成形より大きい場合は、本成形でボディしわが発生した。また、予成形のパンチ径が本成形よりも小さい場合は、本成形後にパンチ底に予成形パンチ肩 R の曲げ癖が残留した。
- 3) 2 工程の円錐台張出し成形で成形限界高さを向上させるためには、予成形での断面線長を長くすることが有効である。
- 4) 予成形の断面線長はパンチ底発生ひずみとパンチ径の積と関係しており最大となる最適なパンチ径が存在する。
- 5) 予成形形状の最適化により、本報告の条件内では本成形の成形高さを最大 80% 程度向上させることが可能となった。

参 考 文 献

- 1) Usuda, M. : J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **33**-383 (1992), 1329-1334.
- 2) Japan Sheet Metal Forming Research Group : Handbook of Ease or Difficulty in Press Forming Third Edition, (2007), 72-73, Nikkan Kogyo Shimbun.
- 3) Yoshiharu, M. & Takeuchi, Y. : J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **17**-19 (1976), 1003-1004.
- 4) Kuwabara, T., Jinma, T. & Miyazaki, K. : J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **31**-357 (1990), 1222-1228.
- 5) Tsutsumi, N., Hashimoto, K. & Horisawa, S. : J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **8**-77 (1967), 289-296.
- 6) Japan Sheet Metal Forming Research Group : Handbook of Ease or Difficulty in Press Forming Third Edition, (2007), 71-71, Nikkan Kogyo Shimbun.
- 7) Keeler, S. P. : SAE Technical Paper 650535, (1965), DOI: 10.4271/650535.
- 8) Goodwin, G. M. : SAE Technical Paper 680093, (1968), DOI: 10.4271/680093.
- 9) Japan Sheet Metal Forming Research Group : Handbook of Ease or Difficulty in Press Forming Third Edition, (2007), 83-83, Nikkan Kogyo Shimbun.