複動ポンチを用いたドローベンド成形における 高張力鋼板の形状凍結性

森下 勇樹* 安部 重毅**

坂元 康泰*** 吉田 総仁****

Shape Fixability for High-Strength Steel Sheets in Draw Bending Process Using Double-Action Punch

Yuki MORISHITA*, Shigeki ABE**,

Yasuhiro SAKAMOTO*** and Fusahito YOSHIDA****

(Received on September 28, 2010)

A new draw bending process using a double-action punch, consisting of inner and outer punches, has been developed to control the springback of the formed parts in high-strength steel sheets. In this process, the draw bending by the inner punch is followed by the reverse draw bending by the outer punch. By performing hat-shaped draw bending experiments, it was confirmed that the above-mentioned sequential punch actions, with the application of an appropriate stretching force to the sheets by a controlled blank holding force, allow us to obtain completely flat flange and noncurled side walls of the hat-shaped part in 980MPa high-strength steel sheets. Such a marked decrease in springback is due to the reduction in bending moment by sequential bending and unbending under a large stretching force.

Key words: sheet metal forming, draw bending, reverse bending, high-strength steel sheet, springback, wall curl.

1. 緒言

自動車の軽量化と衝突安全性能の強化を両立する方法として、車体骨格部品やその補強部品などには高張力鋼板の適用が急速に進み、近年、その強度レベルはより高くなる傾向となっている¹⁾。車体骨格部品はハット状の断面形状を有するものが多く、このような部品の生産は一般的にドローベンド成形による工程で行われている。ドローベンド成形では、材料がダイ肩部を通過し側壁部に流入する際、曲げ-曲げ戻し変形を受けるため、板厚方向には応力が不均一に分布する。このため、高張力鋼板では成形後の除荷に伴う弾性回復で壁反りなどが大きく発生し、形状凍結性が

著しく低いことが大きな問題となっている。

林ら²⁾は高張力鋼板のハット曲げにおける壁反り現象について詳細な研究を行い、壁反りに及ぼすダイ肩半径、側壁部のクリアランスおよびしわ押え力の影響を明らかにしている。そして、外向きに広がる壁反りの制御機構として、側壁部のクリアランスを適正に確保し、ダイ肩半径を常用より小さくすることで、オーバーランおよび逆曲げを発生させ、壁反りを低減できることを示している。

さらに、山野ら³⁾はポンチ側壁部に逃げを設けオーバーランを誘発させる手法を検討し、壁反りを低減する成形条件について調査している。この研究では、成形過程でオーバーランした領域を、離型過程で増幅させ逆曲げを与えることにより、壁反りを抑制できることを実証している。

このように曲げ-曲げ戻し変形を伴うドローベンド成形において、逆曲げを利用したプロセスは高張力鋼板の形状凍結性を高める上で非常に有用な方法といえる。本研究では、逆曲げを全く別の機構で発生させる方法として、プレス金型で用いるポンチを複動化し⁴⁾、多段的なアクションを与えて成形を行う手法を提案する。ここでは、板材成形における形状不良問題について体系的にまとめられている対策の中で、曲げ変位成分のバランスを取る⁵⁾という考え方に着目し、側壁部の一部に逆曲げを与えて、異符号(内向きと外向き)の壁反りを共存させることを検討する⁶⁾。さら

*広島県立総合技術研究所 西部工業技術センター 生産技術アカデミー
〒739-0046 広島市鏡山 3-13-26
Academy for Manufacturing Technology, West Region Industrial Research Center,
Hiroshima Prefectural Technology Research Institute
3-13-26 Kagamiyama, Higashihiroshima 739-0046, Japan.

**広島県立総合技術研究所 企画部 〒730-8511 広島市中区基町 10-52
Planning Department, Hiroshima Prefectural Technology Research Institute
10-52 Motomachi, Naka-ku, Hiroshima 730-8511, Japan.

***広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター
〒721-0974 福山市東深津町 3-2-39
East Region Industrial Research Center, Hiroshima Prefectural Technology
Research Institute
3-2-39 Higashifukutsu-cho, Fukuyama 721-0974, Japan.

****広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1
Department of Mechanical Science and Engineering, Hiroshima University
1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima 739-8527, Japan.

に、提案手法による高張力鋼板の形状凍結性を高めるため、しわ押え力制御を併用した形状凍結技術についても検討したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 複動ポンチによる壁反りの反転方法

曲げ変位成分のバランスを取る形態として、異符号の関係となる内向きと外向きの壁反りを発生させる成形プロセス(以下、本手法)を Fig. 1(a)~(d)に示す⁶⁾。

金型の基本構造は中実材のポンチの内側部分をインナーポンチ、外側部分をアウターポンチに分割したものである。インナーポンチはアウターポンチに対して相対的にスライドできる機構とした。成形前のインナーポンチはアウターポンチより突き出した状態にあり、以下ではインナーポンチとアウターポンチの頭部の位置の差を S として、その初期値を S_0 で表すことにする。本研究では、インナーポンチとアウターポンチが成形の第一、第二段階で複動的に動作可能なことから、これらポンチ一式を複動ポンチと呼ぶ。第一段階($S=S_0$)では Fig. 1(a), (b)に示すように、複動ポンチは一定の S_0 を維持し、インナーポンチが下死点に到達するまで進行する。第二段階($S<S_0$)では Fig. 1(c)に示すように、アウターポンチのみが進行する。

次に本手法の成形プロセスについて順次説明する。本手法の特徴は Fig. 1(a)に示すように、インナーポンチによる第一段階の曲げ-曲げ戻し変形で、インナーポンチ肩部からダイ肩部までの傾斜している領域を作り出すところにある。この傾斜領域は Fig. 1(b)に示すように、アウターポンチ頭部がダイ肩部に到達後もそのままダイ穴に押し込まれるが、内向きの壁反りを生み出すための逆曲げの発生に大きく寄与するものとなる。

アウターポンチによる第二段階の曲げ-曲げ戻し変形を Fig. 1(c)に示す。この段階では、アウターポンチ肩部およびダイ肩部において、逆向きの関係となる2つの曲げ-曲げ戻し変形を発生させる。傾斜領域にあった材料要素には、アウターポンチ肩部を通過させ、第一段階とは逆向きの曲げ-曲げ戻し変形を与え、外向きの曲げモーメントを発生させる。一方、フランジ部にあった材料要素には、ダイ肩部を通過させ、第一段階と同じ向きの曲げ-曲げ戻し変形を与え、内向きの曲げモーメントを発生させる。

このように本手法は、複動ポンチにより一行程で多段的に成形を行い、異符号の曲げモーメントを発生させ、除荷後、Fig. 1(d)に示すように側壁部の一部をスプリングバックにより内向きに反転させる方法である。

2.2 張力付与による壁反りの低減方法

さらに本研究では、形状凍結性を高めるため壁反りも同時に対策することを検討する。壁反り対策の典型的な方法は、側壁部に強い張力を付与し、発生応力を板厚全域で引張側に一方化して、曲げモーメントを小さくすることである⁵⁾。Fig. 2(a)~(b')は本手法で発生する壁反りと張力付与による抑制方法を示したものである。Fig. 2(a), (a')は曲げ-曲げ戻し変形に起因する曲げモーメントの分布と、その除荷後のスプリングバック挙動を示している。この場合、壁反りの反転は可能であるが、壁反り自体の発生は避けられず、高強度な高張力鋼板ほどその挙動が顕著になると考えられる。そこで、しわ押え力を増加させ側壁部に強い張力を付与し、応力勾配を小さくする。そして、Fig. 2(b), (b')に示すように曲げモーメントを極力低減し、除荷後の壁反り自体の発生を抑制することを試みる。

2.3 実験装置および成形条件

本手法を検証するためのハット曲げ実験装置の概略図および金型工具の寸法を Fig. 3 に示す。実験装置にはインナーライド出力 784kN、アウターライド出力 490kN の複動油圧プレス(株式会社アミノ製万能塑性加工機 UTM-AI)を使用した。そして、インナーポンチの出力にはガススプリング(Hyson Products 社製 T2SC-4700×50)を使用した。その主な仕様はピストンロッドストローク長さ 50mm、初期荷重 47kN、最大荷重 67kN である。ダイは成形高さが 80mm のものを用いた。インナーポンチによる第一段階の曲げで傾斜領域を作り出す大きさとして、 $S_0=20, 30, 35, 40\text{mm}$ とした。その際、成形に要するストローク長さはそれぞれ 100, 110, 115, 120mm である。しわ押え力 BHF は 60kN を基本条件とした。張力を付与する場合はプレス機械に付属するリリーフバルブを調整して BHF を 60~450kN の間で制御した。実験では、本手法に対する比較として通常のハット曲げ(以下、通常成形)も行っているが、この場合、中実材のポンチを用いた。成形中のインナーライド速度は $5\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ とした。潤滑剤には鉱油とグラファイトグリースを混合したものを使用し、供試材に塗布した。

Fig. 1 Draw bending process using double-action punch consisting of inner and outer punches

2.4 供試材

供試材には、公称板厚 t が 1.2mm の冷間圧延鋼板 (SPCC), 590, 780 および 980MPa 級の高張力鋼板 (SPFC590Y, 780Y, 980Y) を用いた。これらの板材の機械的性質を **Table 1** に示す。ブランク寸法は長さ 320mm×幅 50mm であり、圧延方向を長手方向とした。

3. ハット形状に及ぼす S_0 の影響

3.1 断面形状観察

$BHF=60\text{kN}$ 一定の条件下で、通常成形および本手法により得られた成形パネルの断面形状を **Fig. 4** に示す⁶⁾。通常成形では高強度な材料ほどポンチ肩部でのスプリングバックや壁反りが顕著に発生している。特に SPFC980Y では壁反りの曲率は大きく、ダイ肩部は大きく開いた形状となっている。本手法では高強度な材料ほど壁反りの曲率は大きくなっているが、 S_0 の大きさに応じて断面形状が変化した。

Fig. 2 Method for controlling wall curl

$S_0=20\text{mm}$ では、フランジ部は水平に近づくものの、側壁部の大半は外向きの壁反りとなった。 $S_0=30, 35\text{mm}$ では、側壁部に占める内向きの壁反りの比率は高くなり、フランジ部がほぼ水平な状態となった。そして、 $S_0=40\text{mm}$ では、内向きの壁反りの比率は外向きの壁反りの比率より高くなり、フランジ部が上向きとなった。

ところで、本手法では側壁部が内側に閉じた断面形状となり、特にアウターポンチ肩部ではスプリングゴー⁷⁾が観察された。スプリングゴーの発生機構を説明するため、イ

Fig. 3 Schematic illustration of experimental apparatus for draw bending process using double-action punch

Table 1 Mechanical properties of the test materials

Material	t / mm	YS / MPa	TS / MPa	EI / %	n	$\bar{r}$
SPCC	1.2	157	290	53.3	0.25	1.97
SPFC590Y	1.2	412	637	30.1	0.19	0.89
SPFC780Y	1.2	545	819	18.6	0.16	0.73
SPFC980Y	1.2	783	1094	11.7	0.15	0.70

Material	Conventional draw bending	Draw bending using double-action punch			
		$S_0 = 20\text{mm}$	$S_0 = 30\text{mm}$	$S_0 = 35\text{mm}$	$S_0 = 40\text{mm}$
SPCC					
SPFC590Y					
SPFC780Y					
SPFC980Y					

Fig. 4 Comparison of cross-sectional shapes in hat-shaped panels

ンナーおよびアウターポンチ肩部にある3つの材料要素について変形挙動の模式図を Fig. 5 に示す。AB 間はアウターポンチ肩部を通過し、側壁部に押し出されるとスプリングゴ要素となる。これは Fig. 1(d) に示したように、内向きとなる壁反りの要素の一部である。一方、BC 間は肩部を完全に通過せず、肩部に巻きつけられた状態で終わりスプリングバック要素となる。また、CD 間はインナーポンチ肩部を通過せず、その肩部において曲げ-曲げ戻し変形を受けるためスプリングゴ要素となる。特に AB 間はスプリングゴ要素として強く働いたため、その結果、ABCD 間の除荷後の形状はスプリングゴになったと考えられる。

このように本手法は内向きの壁反りおよびスプリングゴの曲げ成分を得ることができる方法であるが、成形過程では複動ポンチを底突きさせる必要があり、そのため、ダイには底部があるものを用いるか、もしくはカウンターポンチを用いなければならない。なお、通常成形においても底突きの効果によりスプリングゴ要素が含まれていると考えられる。これはポンチ頭部の領域が成形中にたわみ、底突き状態になると、ポンチ肩部の材料要素は側壁部に押し出されるためである。しかし、このたわみ量は本手法の第一段階の曲げで形成される傾斜領域ほど大きくないため、通常成形ではスプリングバック要素が支配的となる。

3.2 材料強度と形状不良の関係

各種成形パネルの形状不良を定量的に評価するため、除荷後の形状不整を Fig. 6(a), (b) に示すように定義する。測定項目は、自動車車体の組み付け精度で重視されるフランジ部の角度変化 θ_f および壁反りの曲率 $1/\rho$ を求めた。 θ_f の符号の向きは上向きを正の方向、下向きを負の方向とした。曲率半径 ρ の算出方法は、通常成形では Fig. 6(a) に示すようにポンチ肩 R 止まり E 点とダイ肩 R 止まり F 点の間を測

Fig. 5 Deformation behavior of springback and spring-go in each element at punch shoulder

E : Point where curve of punch shoulder ends
F : Point where curve of die shoulder ends
G : Point of inflection
 θ_f : Springback angle of flange
 ρ : Radius of curvature in inward or outward curl

Fig. 6 Geometrical imperfection of hat-shaped panel

定した。本手法では Fig. 6(b) に示すように壁反りの向きが変わる変曲点を G 点とし、内向きの壁反りは E 点、G 点およびこれらの中間点を、外向きの壁反りは F 点、G 点およびこれらの中間点を、それぞれ円弧で近似して測定した。

引張強さ TS と θ_f の関係に及ぼす S_0 の影響を Fig. 7 に示す⁶⁾。各条件において TS と θ_f には線形関係が見られる。通常成形では、 TS が増加すると θ_f は負の方向に著しく増加した。本手法では、側壁部の一部を内向きに反転できるため、 S_0 が増加することにより θ_f を 0° に近づけることが可能となった。 $S_0=35\text{mm}$ では、 θ_f は TS に依存せず 0° を維持し、 $S_0=40\text{mm}$ では、 θ_f は正の方向に増加した。ここでの S_0 の増加は、 $d(\theta_f)/d(TS)$ が増加する結果となった。

次に S_0 と $1/\rho$ の関係に及ぼす材料強度の影響を Fig. 8 に示す。Fig. 4 に示した断面形状からも分かるように、 $1/\rho$ は高強度な材料ほど高い値を示した。同一の材料で比較した場合、本手法の $1/\rho$ は通常成形に比べてわずかに減少した。これは Fig. 6(b) に示した壁反りの向きが変わる G 点付近が直線状になったためと考えられる。また、本手法の S_0 が変

Fig. 7 Effect of strength of materials on springback angle of flange for various inner/outer punch configuration

Fig. 8 Influence of inner/outer punch configuration on wall curls for various steel sheets

化した場合や、内向きと外向きの $1/\rho$ の差はほとんど見られなかった。つまり、壁反りは材料強度に依存するが、どちらの成形法においても同程度の壁反りが発生する結果となった。

4. しわ押え力制御を併用した形状凍結技術

前章では、*BHF* 一定の条件下において本手法の形状凍結性を検証した。その結果、インナーポンチによる第一段階の曲げは側壁部の一部を反転させる上で重要な役割を担うものであり、さらに、 S_0 の大きさは側壁部に占める内向きの壁反りの比率や θ_f を制御できることを示した。ただし、壁反りについては材料強度に依存し、第一段階の曲げの効果はあまり認められないことが明らかになった。そこで本章では、 θ_f の制御に加え、Fig. 2(b), (b') に示した方法により壁反りも同時に低減することを検討する。側壁部に強い張力を付与するためには、成形開始から *BHF* を高く設定すれば良いが、材料と金型表面との間には強い摩擦が働くため、型かじりの発生が懸念される。そこで、*BHF* 制御はアウターポンチが下死点に到達する 10mm 手前まで *BHF*=60kN 一定とし、これ以後 *BHF* を増加させる方法とした。

供試材で最も高強度な SPFC980Y について、*BHF* 制御による壁反りの低減効果を Fig. 9 に示す⁶⁾。この図では通常成形と本手法の断面形状を比較する。なお、本手法では Fig. 7 に示したようにフランジ部が $\theta_f=0^\circ$ を満たす $S_0=35\text{mm}$ の条件を選定した。

どちらの成形法においても、壁反りは *BHF* の増加に伴い顕著に減少し、最も強い張力を付与した *BHF*=60→450kN では、 $1/\rho < 0.5\text{m}^{-1}$ であった。ここで、通常成形のポンチ肩部に着目するとスプリングバックが発生し、その影響により側壁部は外向きに開いていることが確認できる。このため、ダイ肩部はポンチ側壁部から 5.3mm 広がり、その結果、フランジ部は下向きになり $\theta_f=-5.0^\circ$ までしか抑制できず、十分な形状凍結はできていない。これに対して本手法では、

フランジ部がわずかに上向きになり $\theta_f=1.1^\circ$ を示したが、ダイ肩部は全く広がることなく、ポンチ頭部、側壁部、フランジ部がほぼ直角な断面形状を得ることができている。特に側壁部は所望とする垂直な状態になっていることが確認できる。これは Fig. 5 に示したようにアウターポンチ肩部において、見掛けのスプリングバックが発生しないように、スプリングバック要素とスプリングゴー要素が変位成分としてバランスを取ったためと考えられる。

ここでは、張力を付与する方法は壁反り対策に非常に有効であることを示すと同時に、逆曲げで得られる曲げ成分はポンチ肩部の角度変化を制御でき、成形パネル全体の形状凍結を図る上で必要不可欠な要素であることを明らかにした。これらの結果は、高張力鋼板のプレス成形における形状不良対策の一例として、異符号の曲げ成分を共存させることができる本手法の優位性を示すものである。

5. 結 言

本研究では、曲げ-曲げ戻し変形を伴うドローベンド成形において、異符号の曲げ成分を共存させる形状凍結技術について検討した。提案手法はプレス金型で用いるポンチを複動化し、一行程で多段的に成形を行う方法であり、第一段階の曲げと第二段階の逆曲げからなる成形プロセスである。ハット曲げ実験を行い、本手法による高張力鋼板の形状凍結性を検証した。得られた結果は次のとおりである。

- (1) インナーポンチによる第一段階の曲げで傾斜した領域を作り出すことにより、側壁部の一部を内向きに反転させることができる。
- (2) 本手法のハット形状は側壁部が内側に閉じた断面形状として観察された。これは内向きの壁反りに加え、下死点付近でアウターポンチ肩部にあった材料要素がスプリングゴーとして強く働いたためである。
- (3) 材料強度と形状不良の関係を整理した結果、しわ押え力一定の条件下では、フランジ部の角度は引張強さと線形関係であり、その勾配は第一段階の曲げで制御できる。しかし、壁反りは材料強度に依存し、第一段階の曲げの効果はあまり認められない。
- (4) 本手法はしわ押え力制御を併用することにより、フランジ部の角度の制御に加え、壁反りも同時に低減できる。その際、内向きの壁反りおよびスプリングゴーの成分が有効に作用し、形状凍結性を飛躍的に高めることができる。

参 考 文 献

- 1) 林央：プレス技術，**44**-7(2006)，18-23。
- 2) 林豊・高木美智雄：鉄と鋼，**68**-9(1982)，1236-1243。
- 3) 山野隆行・岩谷二郎：塑性と加工，**46**-534(2005)，630-635。
- 4) 薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック第2版，(1997)，79，日刊工業新聞社。
- 5) 林豊：塑性と加工，**46**-534(2005)，580-584。
- 6) 森下勇樹・安部重毅・坂元康泰：第58回塑性加工連合講演会講演論文集，(2007)，349-350。
- 7) 小嶋正康：第25回塑性加工連合講演会講演論文集，(1974)，233-236。

Fig. 9 Effect of increase in blank holding force on wall curls (Material: SPFC980Y)