

論 文

高張力鋼板の曲げ成形時のそり現象

林 豊*・高木 美智雄*²

Analysis of Side Wall Curl in Draw-bending of High Strength Steel Sheet

Yutaka HAYASHI and Michio TAKAGI

Synopsis:

Geometrical defects observed in applying high strength steel sheet to auto-body structural members with hat-shaped cross-section were studied using a simple experimental draw-bend die. One of the typical troubles in forming of these parts is the side wall curl which appears along side walls from a bottom to a top (or a flange) and deflects walls outward.

It was found that the side wall curl was eliminated by choosing the die profile radius about twice as large as sheet thickness under the optimum die clearance.

A rather small die profile radius was advantageous for producing the reverse bending against bending at the die profile.

This reverse bending contributed to reducing the side wall curl by cancelling the residual bending moment in side walls which had been subjected to bending at the die profile. Such behaviour of material between a die and a punch was an important fact pointed out in this investigation.

The other interesting observation was that the dual phase steel had a larger tendency to the outward side wall curl than the precipitation hardening steel with the similar tensile strength. This difference was also discussed in this paper.

1. 結 言

軽量化のための高張力鋼板の採用に際しては、成形上の問題として破断および形状寸法不良の増大が生じてくる。特にメンバー類などの曲げを主体とした成形では、スプリングバックによる寸法不良が材料強度の上昇と共に著しくなり、高張力鋼板を使いこなす上において何らかの有効な対策が望まれていた。

ハット型断面に曲げる成形において形状不良の要素としては2つあり、1つはポンチ肩相当部でのスプリングバックによる側壁の角度開きであり、もう1つは側壁全体がそることによるフランジ側の開きである。このうち前者の問題に対してはすでに一応の対策が提示されている¹⁾が、後者のそりに関しては、形状で逃げるなどの以外に有効な対策が見出されていなかった。

本論文は、このハット形断面曲げにおけるそり現象の対策とその改善機構について調査検討した結果²⁾を報告するものである。

2. ハット曲げ成形でのそり現象と従来の対策

ハット形断面形状を持つサイドメンバー類の成形にお

いては、多くの場合 Fig. 1 に示すような板押さえつきの成形、すなわち、いわゆるドロウベンド成形が行われている。この成形では材料は連続的にダイス肩で曲げられ、その後曲げもどしを受けて側壁を形成する形を取る。この際ダイス肩での曲げぐせが残り側壁全体が外側にそるといのがここで取り上げている不良現象である。

この具体的対策としては Fig. 2 に示すように側壁の高さ方向の剛性を増すような段付形状にしたり、リップを加えることが行われている。

また、成形技術上の対策としては側壁を強く引張ることによつて残留モーメントを消すことも考えられるが³⁾、それにはビードの取り付けが必要で、メンバー類のような幅の狭い製品ではビード部をもうけることは著しく歩留りを下げることになり適切な対策にはなり得ない。

3. 実 験 方 法

3.1 実験工具と試験条件

実験工具としては Fig. 3 に示す板押さえ付きハット曲げ型が用いられた。

昭和 56 年 10 月 19 日受付 (Received Oct. 19, 1981)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所 工博 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

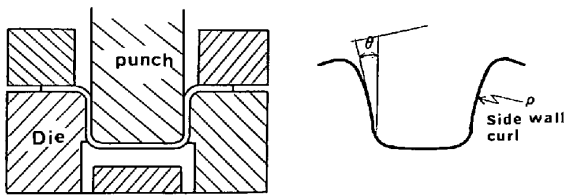


Fig. 1. Draw-bending process and side wall curl of formed parts.

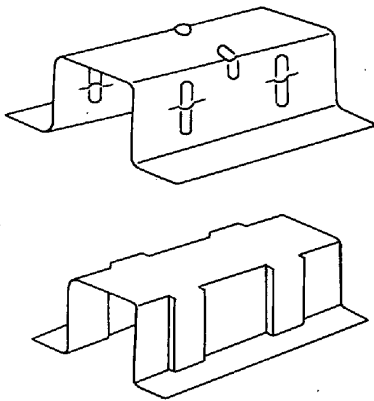


Fig. 2. Practical measures for avoiding side wall curl of parts.

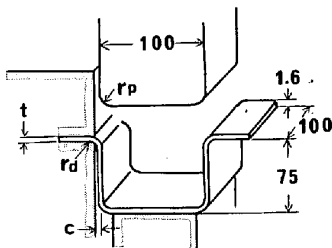


Fig. 3. Experimental draw-bend die.

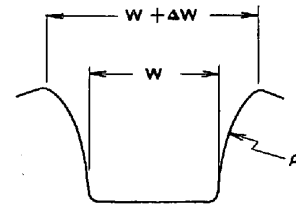
成形条件として、ダイス肩半径、ポンチ肩半径、クリアランス、板押さえ圧を変化させた。これらの設定値は Table 1 に示されている。なお、板押さえ圧については 0 の場合も調査した。この場合、ダイス上に試験片厚より 0.1 mm 厚いスペーサを置いた状態で成形する方法をとった。

一部の実験においては、ポンチ底突き工具を用い、この影響を調べた。

形状の測定に関しては Fig. 4 に示すように、側壁の

Table 1. Testing conditions.

Die profile radius	(r_d)	1~10mm
Punch profile radius	(r_p)	5 and 10mm
Die clearance	(c)	1.2~4.8mm
Blank holding load	(BHL)	0~30 t
Forming height	(H)	75mm
Lubricant		Mill oil



ρ : Side wall curl
 ΔW : Inaccuracy in distance of side walls at the open side

Fig. 4. Indexes of geometrical defect of hat-shaped test pieces.

角度開きはダイス肩直下での口元部の側壁の間隔を測定し、ポンチ幅寸法との差で表した。そりの測定は 3 点式デプスゲージにより側壁中央部のそり高さを測定、それより曲率半径 ρ を求めた。

3.2 供試材

Table 2 に示す 40~60 kgf/mm² 級までの高張力鋼板を中心に実験を行った。また、50~60 kgf/mm² 級については低降伏比の複合組織鋼についても検討した。比較材には通常の冷延軟鋼板を用いた。ここで使用された材料はいずれも板厚 1.6 mm の冷延鋼板である。

4. 実験結果

4.1 不良現象のタイプ

実験において観察された形状不良を区分したものを Fig. 5 に示す。この不良現象の中で、①、④が主流で、②、③はポンチの底突きをしない場合のみ見られる現象である。

4.2 ポンチ底突きのない場合の検討

4.2.1 ダイス肩半径の影響

実際の成形では破断や型かじりのおそれからあまりダイス肩半径の小さいところは用いられないが、ここでは実験として極端に小さいところまで検討を行った。

Table 2. Mechanical properties* of experimental materials**.

Steel	Mark	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation in 50mm (%)	n value	r value
Mild steel	MS30	15.5	28.2	52.5	0.280	1.87
Rephos. 40	RP40	26.5	41.9	38.5	0.202	1.58
HSLA 50	HS50	38.0	52.0	29.5	0.188	0.67
Dual Phase 50	DP50	23.6	46.7	35.0	0.237	1.21
HSLA 60	HS60	47.6	62.6	26.5	0.169	0.80
Dual Phase 60	DP60	36.5	65.0	28.0	0.188	1.07

* values in rolling direction ** sheet thickness; 1.6mm

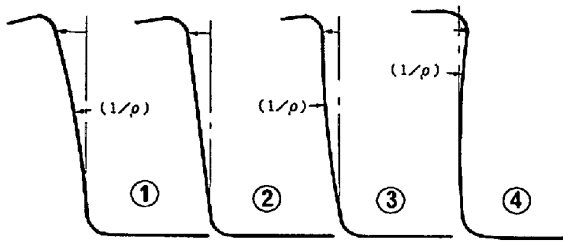


Fig. 5. Patterns of defects in profile of hat-shaped test pieces.

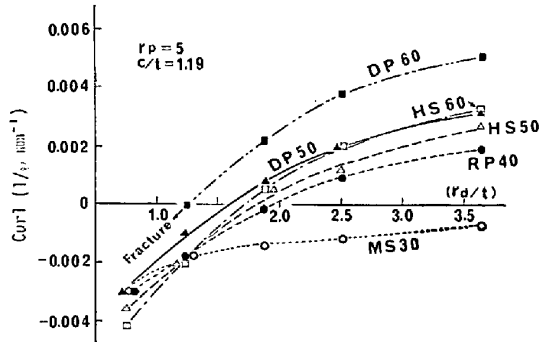


Fig. 6. Effect of die profile radius on side wall curl.

Fig. 6 は各材料につき、ダイス肩半径とその関係を示したものである。通常用いられる $r_d/t > 2.5$ では高張力鋼板においてすべて外そりとなつており経験的事実と一致する。しかも外そり傾向は強度の上昇と共に大きくなつている。

このような外そり傾向の強い高張力鋼板でもダイス肩半径が十分小さいところでは内そり傾向になることが示されている。これは非常に重要な事実である。

過去に、軟鋼板でダイス肩半径の著しく小さいところで内そり傾向が強まるという観察結果が報告⁴⁾されているが、外そり傾向の強い高張力鋼板において十分にダイス肩半径の小さいところで外そりが無くなり、内そり傾向にもなるというのは最近明らかにされたものである²⁾³⁾。

ダイス肩半径がかなり小さいということは成形上の不利さはあるものの高張力鋼板のそり対策としては有効な方法となり得るものである。

Fig. 6 で軟鋼板では、クリアランス $c/t=1.19$ という条件の下では終始内そり傾向を示し、この種の材料ではそり現象があまり問題にならなかつたことが理解できる。

もう 1 点、材料差の観点から注目されることは、一般に形状性に関しては低降伏比の複合組織鋼が優れていると考えられているが外そりに関しては複合組織鋼は他鋼種より顕著で好ましくない状況を示している。

Photo. 1, 2 に材料および成形条件別にそり状態を観

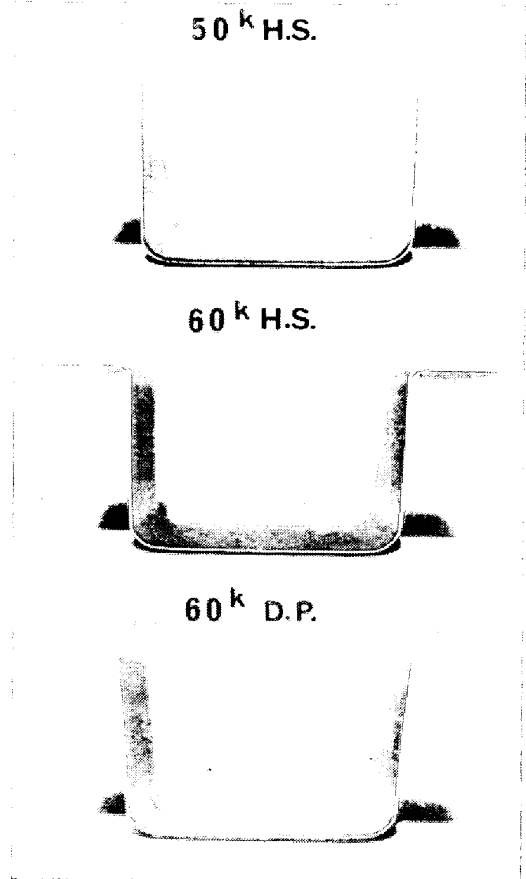


Photo. 1. Difference of side wall curl for different steels.

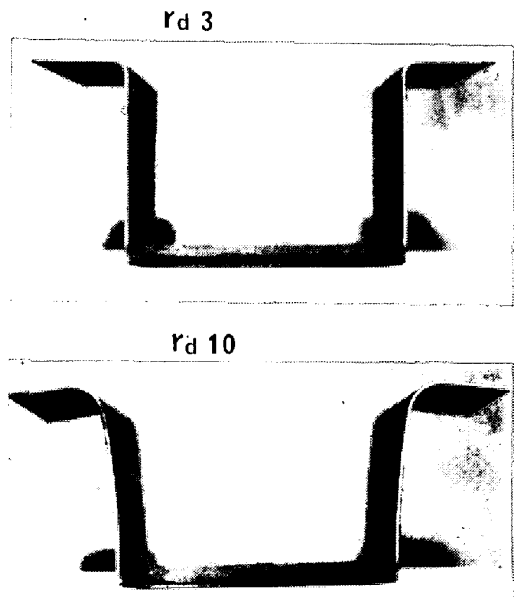


Photo. 2. Difference of side wall curl for different die profile radii.

察した写真をそれぞれ示しておく。

Fig. 7 はダイス肩半径のフランジ側幅精度に与える影響を示したものである。幅寸法差のダイス肩半径に対する傾向は、そりの場合とよく似ている。このことから

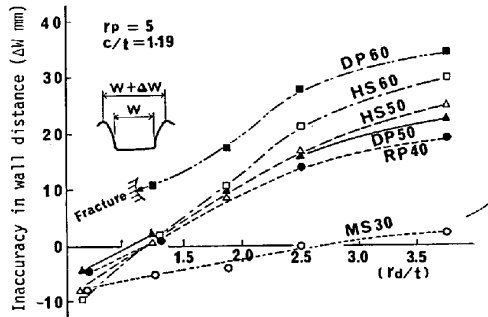


Fig. 7. Effect of die profile radius on wall distance at the open side of hat-shaped test pieces.

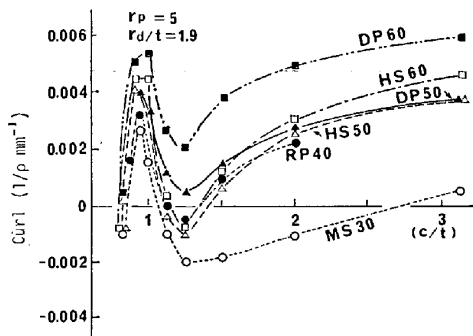


Fig. 8. Effect of die clearance on side wall curl.

幅寸法差はそりに大きく依存していることが明瞭である。ただし、幅寸法差、そりの消える最適ダイス肩半径は異なっており、幅寸法差はそり以外の要因によっても支配されていると考えられる。

4.2.2 クリヤランスの影響

クリヤランスのそりに与える影響は Fig. 8 に示すように複雑である。c/t < 1 で外そりが減少しているのは、このクリヤランスでは材料にしごきがかかり、この効果で残留曲げモーメントが消されているためである。

クリヤランスが板厚よりやや大きい c/t = 1.2 付近で再び外そり傾向は小さくなっている。c/t = 1.19 は、しごきのかかる第一の外そり極小値のクリヤランスに比べ実用的値である。クリヤランスが c/t > 1.19 ではその増加と共に単調に外そり傾向は強まってしまう。

4.2.3 板押しえ圧の効果

そりに与える押しえ圧の影響を示したものが Fig. 9 である。傾向はあまり明瞭でないが押しえ圧の増大と共に全般に外そり傾向に向いているようである。さらに押しえ圧を増大させると低強度の材料ではそりが 0 に近づくと、その他の材料では破断荷重でもそりは取り切れない。

4.3 ポンチ底突きのある場合の検討

ポンチ底突きの無い場合には Fig. 7 に示したようにそりを無くす最適条件でもフランジ側幅寸法差を十分小

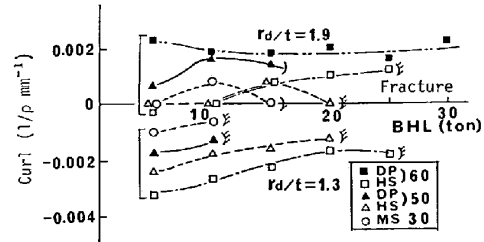


Fig. 9. Effect of blank holding load on side wall curl.

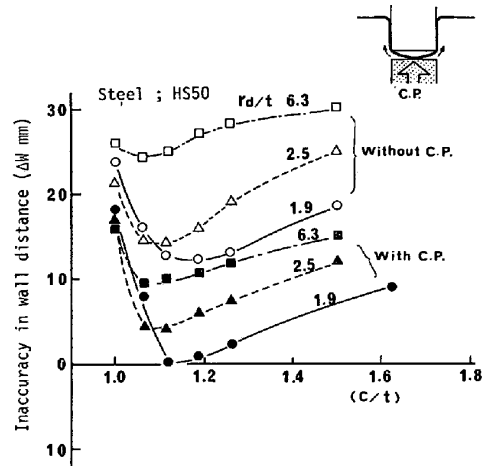


Fig. 10. Improvement of accuracy in wall distance by adding counter pressure (C.P.) against punches at the final forming stage.

くすることはできなかつた。これに対し Fig. 3 に示した底突き工具を使用しきめ押しした場合には Fig. 10 に示すように幅寸法差も著しく改善されることが分かる。この底突きの幅寸法制御効果はすでに明らかにされているものであるが、ここでは、幅寸法差がそりとポンチ肩から底にかけてのスプリングバックとの2つで支配され、この2つの要因に対し、最適成形条件を与えないと幅寸法精度を高めることはできないことを示そうとしたのである。

一方、底突きはそりに対しては Fig. 11 に示すようにほとんど効果がない。底突きにより側壁に押し出された材料が側壁の材料を押し上げ圧縮力を働かせてその残

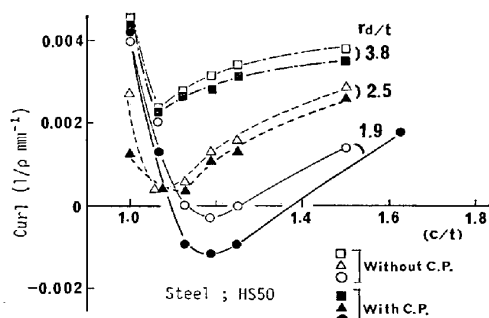


Fig. 11. Effect of counter pressure (C.P.) against punches on side wall curl.

留曲げモーメントを軽減する効果を期待したがそれは無いようである。

5. 考 察

5.1 外そりの制御機構

5.1.1 連続曲げ成形過程の観察

板押さえ付きハット曲げ成形では、ダイス面での拘束によるバックテンションにより材料はポンチとダイスの間で張られ、Fig. 12(A) に示すような形になっていると考えられがちである。確かにダイス面にビードを効かし強く引張ればこのような形態になる。しかし、ダイス面での拘束がそれ程小さくなく、しかも、ダイス肩半径の小さい場合には壁に働く引張力がダイス肩で受けた曲げを肩から離れると同時に直ちに曲げもどしするに十分でなく、いつたんオーバーランしポンチ壁に当たつてもどされるといふ Fig. 12(B) に示すような状況が出てくる。

今回のハット曲げ成形の実験において、成形中のダイス、ポンチのすきまを観察したところ多くの場合 Photo. 3 に例を示すような状況を示していた。

5.1.2 外そり防止の機構

Fig. 12(A), (B) の変形形態を取る成形の工程を分

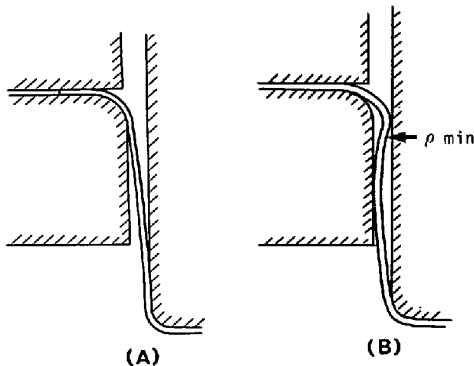


Fig. 12. Profiles of side walls during draw-bending.

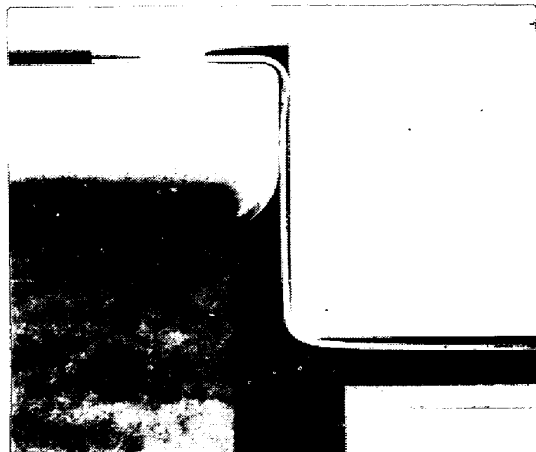


Photo. 3. Profile of side wall during draw-bending.

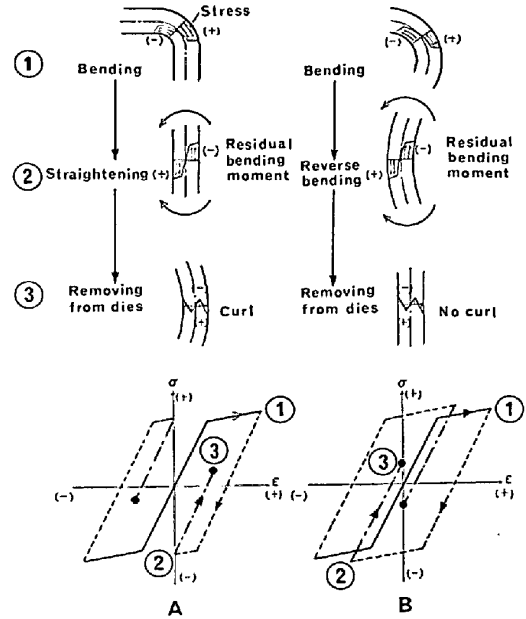


Fig. 13. Stress and strain in each stage of draw-bending.

解し、それぞれの時点での応力分布および表面での応力-ひずみの状況を示したものが Fig. 13 である。ここでは引張力は考慮されていない。

(A) の場合壁での曲げもどして真直ぐに伸ばされた状態で離型解放に入ると②の時点で持つ残留モーメントにより外そりになる。

これに対して、(B) の場合壁で単なる曲げ戻しのみならず、逆曲げを受けるため、離型後②の時点での残留モーメントの解放により矢印方向にもどつても、逆曲げと打消し合えば側壁の真直ぐなもの得られる訳である。

Fig. 13 の下端に示す応力-ひずみ線図で見れば離型解放の際(A) の場合裏表でひずみが異なり、ダイス側が縮みになるため外そりになるのに対し(B) の場合、裏表でひずみが一致し、そりが出ないことが分かる。

もちろん、②の逆曲げが大きすぎれば解放後のひずみはダイス側で伸び、ポンチ側で縮みとなり内そりになる。

5.1.3 逆曲げの効果と成形条件

逆曲げが行われるにはダイス、ポンチの間に板厚以上のすきまがなければならない。一方、あまりすきまが大きいと逆曲げの曲率半径が大きくなりその効果は低減してしまう。!

Fig. 8 ですきまが板厚の 1.2 倍附近に最適値があつたのはそのため、この値より小さい側で急激に外そり傾向が強まるのは逆曲げに必要なすきまが小さくなり、やはり十分な逆曲げが行えなくなり、さらに狭くなるとその余地もなくなるためである。

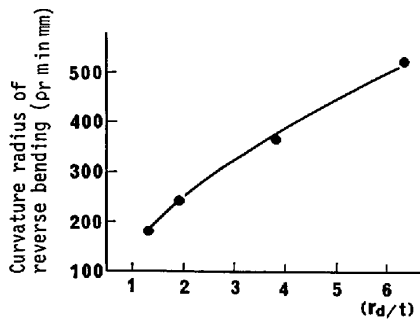


Fig. 14. Effect of die profile radius on reverse bending.

ダイス肩半径も逆曲げに大きく影響する。Fig. 14 はダイス肩半径と逆曲げ部の曲率半径の関係を見たものでダイス肩半径の小さいもの程逆曲げ半径が小さく、逆曲げの効果が大きいことが分かる。逆曲げ部曲率半径は型にはまって成形中の試験片の側面を写真撮影しそのプロフィールより読み取ったものである。

この図に見られる曲率半径の絶対値は、また、重要である。逆曲げが生じていても、それが離型解放時に見られる弾性回復による曲率半径の変化量に相等するレベルのものでなければ効果はない。

側壁部が解放されたときの曲率半径の変化を見ると、弾性限いっぱい解放されたとして、

$$\rho = Et / (2\sigma_e) \dots\dots\dots (1)$$

ρ : 曲率半径の変化量, E : ヤング率, t : 板厚,
 σ_e : 弾性限応力

(1)式より $t=1.6 \text{ mm}$, $\sigma_e=40 \text{ kgf/mm}^2$, $E=2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$ とすると、 ρ はほぼ 400 mm となる。Fig. 14 に示された逆曲げ量はこの解放後のスプリングバックによる曲率変化に十分対応している。

一方、バックテンションは本来それが十分大きければ側壁の残留曲げモーメントを消去し、そりを取るのに有効である。Fig. 9 において1部軟質の材料ではその効果が認められるようであるが、他の材料ではその効果が出る前に破断に至っている。

このバックテンションを逆曲げとの関係で見たとき、逆曲げを減らす方向に働き、この面からは外そり対策に逆行する。Fig. 9 の板押さえ圧の小さい領域で、押さえ圧の増大と共に外そり傾向が増大していたのは、このマイナス効果が現れていたとも考えられる。

5.2 複合組織鋼のそり挙動

5.2.1 複合組織鋼の変形の特徴

複合組織鋼は一般にその低降伏比の特性から優れた形状性を示すと考えられているが⁹⁾、Fig. 6 に示したそりに関しては、同強度の析出強化型の材料より外そり傾向が強く、いわゆる硬い材料としての傾向を示すものであ

つた。また、その外そり傾向の同強度他鋼種との差は、ダイス肩半径が小さい程顕著であるという状況を示している。

同様のハット型断面の成形の実験で複合組織鋼が特に異なる挙動を示さないという報告⁷⁾⁸⁾もあるが、本実験では再度にわたって複合組織鋼のそりにおける特異現象を確認している。

5.2.2 成形各過程における差

形状を決める成形最終状態での応力分布に関連する成形過程での要素として、

- ① ダイス肩での曲げぐせ
- ② ダイス肩曲げにおけるオーバーラン
- ③ 側壁部材の加工硬化度
- ④ 逆曲げ曲率半径

が考えられる。

ダイス肩での曲げぐせとは言い替えば、ダイス肩での曲げに際してのなじみ性である。しかし、今の場合後の工程で曲げ戻しおよび、逆曲げが行われるので、よくなじんでいることはかえって好ましくないと考えられる。この意味からここでは曲げぐせという表現を取つた。

ダイス肩での曲げぐせは、Fig. 15 の右肩に示すように材料をすべらせることなくダイス肩での曲げを与えただけでの離型後の角度変化で調べた。黒塗りつぶしのマークの複合組織鋼はダイス肩半径 (r_d) が大きいところでは他の鋼種との差はなく引張強さに対して1つの線に乗っている。しかし、ダイス肩半径が小さくなると多少ではあるが明らかに複合組織鋼の方が曲げぐせの強い傾向を示してくる。

複合組織鋼のような低降伏比の材料は曲げにおけるなじみ性が良い(曲げぐせが強い)ことは一般にかなり大きい曲げ半径 ($r_d/t > 20$) のところで認められているが⁹⁾、一方、曲げ半径が著しく小さい領域で降伏比の低い材料のなじみ性がよくなる報告¹⁰⁾も見られ、Fig. 15

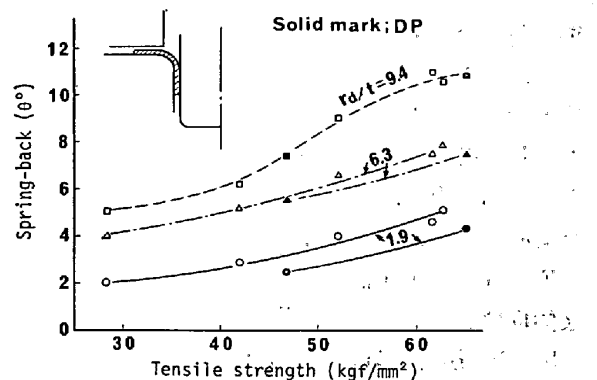


Fig. 15. Spring-back after bending at die profiles.

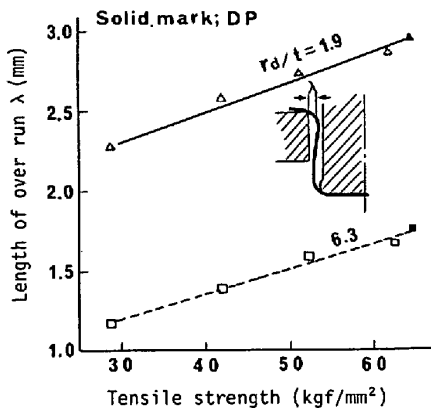


Fig. 16. Over run of material at die profiles.

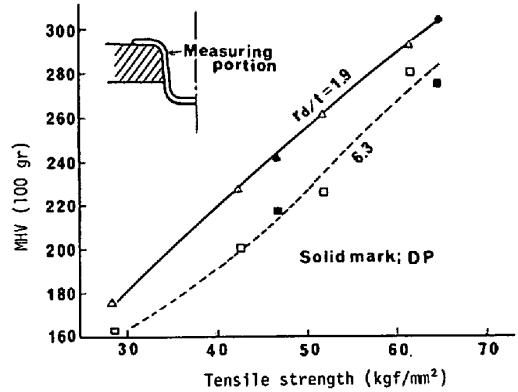


Fig. 18. Hardness of material after bending and straightening.

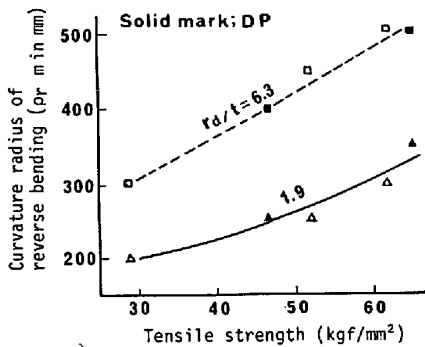


Fig. 17. Magnitude of reverse bending of each steel.

のような傾向も事実と考えられる。

ダイス肩曲げにおける材料のオーバーランに関しては、もしそれが小さければ逆曲げも小さくなり外そり除去性が弱くなると考えた。そこで、ポンチを削りダイス、ポンチのすきまを十分取つてダイス肩曲げ後の材料に自由変形をさせ、オーバーランの度合を測定した。結果は Fig. 16 に示すように引張強さで整理でき、低降伏比の複合組織鋼が特に変わった挙動をすることは認められなかつた。

つぎに逆曲げ部の曲率半径 ρ は曲げぐせの除去性に直接関連する値として調査した。Fig. 17 にその測定結果を示すが、おおむね引張強さによつて整理され複合組織鋼に特異な傾向は見られない。

曲げもどしを受けた後の側壁の硬さは、この部分の降伏力の代わりとして求めた。離型後の弾性回復は変形後の材料の持つ降伏力に左右されるものであり、高加工度のところで複合組織鋼がどのような状況にあるかを調べたものである。硬度は外側表面について測定された。

Fig. 18 に示す結果では、ここでも複合組織鋼に顕著な傾向は見られず、引張強さにより整理された。

5.2.3 複合組織鋼の外そり傾向の強い理由

ハット形曲げ成形過程において複合組織鋼の他鋼種と

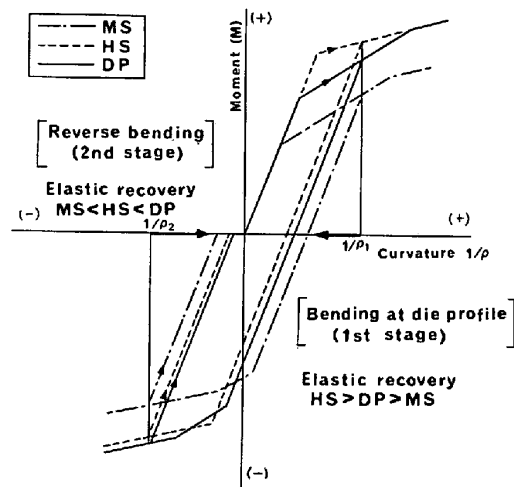


Fig. 19. Schematic stress-strain paths of materials in draw-bending process.

の異なる挙動は、ダイス肩での曲げぐせのみに認められた。

材料のなじみ性はそれが最終状態において良い場合、形状凍結性が良く好ましいことになる。しかしここでの場合、ダイス肩での曲げの時点ではなじみ性に材料差が認められたが、それ以降の変形過程では明確な材料差は認められていない。したがつてダイス肩でのなじみ性、すなわち、曲げぐせの差は定性的にはそのまま最後まで残り曲げぐせが強かつたゆえに、外そり傾向が強くなつたということも考えられる。

この状況を応力-ひずみ線図にモデル化したとすると Fig. 19 のように描ける。この図に示すように低ひずみ域でのみ塑性曲線に複合組織鋼と通常高張力鋼との間で差を与えたとき、一次変形での弾性回復の小さい複合組織鋼は一次変形から二次変形にかけての塑性変形量が大きくなり二次変形でより高い応力のところより弾性回復するためスプリングバック量が大きくなる。

通常軟鋼板は同じく一次変形での弾性回復量は小さい

が、強度レベルが十分低いので二次変形でも低い応力から弾性回復するためスプリングバック量も小さい。

複合組織鋼がダイス肩部での曲げぐせにおいてダイス肩半径の小さい、いわば、大きい曲げ加工度のところで差を与えた点、単純に降伏比の低いことがこの差を与えたとは言い難い。したがって Fig. 19 の説明には矛盾するところがあるが、一次変形での弾性回復の小さいものは逆方向の二次変形を受けた後の弾性回復はむしろ大きくなるという一般的説明用という形では見ることができよう。

6. 結 言

高張力鋼板の使用において著しい、ハット形断面の曲げにおける形状不良、特に、外そりについての検討を行いつぎの点を明らかにした。

1) 外そりは適正なクリヤランスの下でダイス肩半径を小さくして行くと減少し、さらにダイス肩半径の小さいところでは内そりに至る。

高張力鋼板に対しても、ダイス肩半径を常用よりかなり小さいところに取れば外そりが除かれることが分かった。

2) ハット曲げ成形においてはポンチ、ダイスのわずかなすきまで、ダイス肩部で受けた曲げを単に伸ばすのみならず逆方向に曲げる現象が見られる。適正な成形条件下では、この逆曲げが有効に働き外そり傾向を取り除いている。

3) 逆曲げは成形条件としてダイス肩半径の小さい程、フランジ拘束の小さい程強く現れる。また、逆曲げの生じ得る適正なすきまも重要である。

4) 外そりに対して複合組織鋼は同強度の析出強化鋼よりその傾向が著しい。その理由の1つとして、複合組織鋼はダイス肩での曲げにおけるなじみ性がよく、これが曲げもどし後に曲げぐせとなつて悪影響を与えたという考え方ができる。

ハット断面形状の成形をここでは狭い幅に切り取つた部分について検討したが、長さ方向の影響も含めた検討も必要で今後の課題として残されている。

文 献

- 1) C. SUDO, M. KOJIMA, and T. MATSUOKA: Proceedings 8th IDDRG Congress, Gothenburg (1974), p. 190
- 2) 林 豊, 高木美智雄: 昭和 55 年度塑加春季講演会講演論文集 (1980), p. 449
- 3) 吉田清太, 阿部邦雄, 昌谷陽二, 津山義人: 理研報告, 41 (1965), p. 1
- 4) 阿部邦雄: 理研報告, 39 (1963), p. 2
- 5) Y. UMEHARA: Proceedings 11th IDDRG Congress, Metz (1980), p. 247
- 6) 中川吉左衛門, 阿部英夫: 塑性と加工, 21 (1980), p. 116
- 7) 由田征史: 薄鋼板成形技術研究会資料 昭和55年度, 6 (1980)
- 8) 平田基博, 阿部英夫, 中川吉左衛門: 昭和 56 年度塑加春季講演会講演論文集 (1981), p. 477
- 9) 青木 至: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 687
- 10) 塩川昌男, 古林 忠, 納所 宏, 山崎勝二郎, 田中敏夫, 福田水穂: 日産技報, 16 (1980), p. 59