A5083 厚板の曲げ加工における スプリングバックに及ぼす曲げ型形状の影響

ハムタ ナランバートル* 村田 眞** 久保木 孝**

柴田 隆浩*** 金 英俊***

Effects of Punch and Die Parameter on Spring-back at Bending Process of Thick Sheet A5083

Naranbaatar KHAMT*, Makoto MURATA **, Takashi KUBOKI **,

Takahiro SHIBATA *** and Yingjun JIN ***

(Received on February 7, 2011)

Bent sheet metals are now used widely because their welded part that can cause the debasement of product strength can be reduced by a bending process. Bent plates are contained in many products, and their use is rapidly increasing. However, such plates tend to undergo stronger defective deformation than thin sheet metals, and thin and thick sheet metals differ in accuracy and shape of their products in the bending process. As for the accuracy of bending process and defective deformation, we need to rely on the interpretation by technicians to determine the operational conditions. Therefore, it is necessary to clarify defective deformation phenomena in the bending process of a thick plate. In this study, the effects of the sizes of the punch and die on spring-back angle were examined. By reducing die open width it is possible to control spring-back angle however it is also necessary to consider the crack of the plate. Meanwhile, punch radius hardly affects spring-back angle. Note that it is necessary to consider that damage remains on the inside surface of the plate as caused by the punch and the shape of the plate on central portion in the longitudinal direction. As a result, an optimum die open width is proposed for the suppression of defective deformation in the thick plate bending process of A5083.

Key words: V-bending, spring-back, 5083 aluminum alloy, plate, die open width, deformation, crack.

1. 緒 言

曲げ加工された金属板材は、様々な製品の至るところで幅広く使用されている。板材に曲げ加工を施すことによって、製品強度の低下を招き得る溶接部分を少なくできる。板材を単に曲げるというだけであれば、簡単に行うことが可能である。所定の曲げ半径で一定の曲げ角度まで曲げる加工は容易ではない。しかし、近年における少量多品種生産および高精度加工の要求を満たすためには、加工材料や加工形状の変化に応じて適切な加工条件を正確に予測できることが望ましい。

一方、板材の曲げ加工は、塑性加工の中でも古くから行われている典型的な加工法であり、多くの研究がなされている。さらに、金属板材の V 曲げ加工はこれまでに多くの解析的、実験的研究がなされてきた。これらの研究^{1)~14)}は、板厚が 3mm 以下の薄板の曲げ加工におけるスプリングバック、反り等のメカニズムについて述べたものがほとんどである。永井康友¹¹⁾による厚板に関する研究では、板厚 6mm の軟鋼板を対象にしており、それ以上の厚さを有する板の曲げに関する研究は見られない。しかし近年、厚板を曲げ加工した部材が様々な製品に含まれており、使用が増えつつある。また、厚板の曲げ加工では、外表面で生じる引張応力によるひずみが大いいため割れが発生する場合がある。特にアルミニウム合金の厚板の V 曲げ加工において生じる不良変形は知られていない。現在、厚板の曲げ加工における不良現象の対策としては、熟練技術者の経験に頼っているのが現状である。

* 電気通信大学知能機械工学専攻 〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1
Graduate student, Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu City 182-8585, Japan.

** 電気通信大学知能機械工学科 同上
Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems,
The University of Electro-Communications, ibid.

*** (株) アマダ 〒259-1196 伊勢原市石田 200
Amada Co., Ltd. 200 Ishida, Ischara City 259-1196, Japan.

そこで本研究は、アルミニウム合金 A5083 厚板の V 曲げ加工において生ずる現象や不良変形を定量的に示し、実験的に検討を加え、その要因を明らかにすることで、厚板の V 曲げ加工の特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置及び被加工材

曲げ加工の状態を Fig.1 に示す。パンチとダイスの材質は S45C で、パンチ先端部とダイス肩部には、焼入れ処理を施した SKD11 のシャフトが挿入されている。また、曲げ加工中の板材の曲げ角度を測定するため、ダイスの左右の肩部に小型の変位変換器 DTH-A-30 を設置した。パンチ先端部の半径を $R_p=2, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25\text{mm}$ 、ダイス肩部の半径を $R_d=10\text{mm}$ 、溝幅を $V_d=40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150\text{mm}$ として曲げ加工を行った。被加工材は、非熱処理合金の中で最も高い強度をもつ A5083 である。用途としては、低温の各種装置、タンク、車両、船舶、機械部品などに幅広く使用されている。機械的性質については、引張試験により測定した。その結果、圧延方向の引張強さは $\sigma_B=334\text{MPa}$ 、全伸び $\phi=24.7\%$ で、幅方向の引張強さは $\sigma_B=315\text{MPa}$ 、全伸び $\phi=27.4\%$ で、縦弾性係数は $E=67.2\text{GPa}$ であった。ここで、圧延方向が Fig.1 に示す x 方向と一致するように板材をダイの上に設置した。板厚 $t_0=10\text{mm}$ 、板幅 $b=100\text{mm}$ とし、板長 a は、ダイスの溝幅 V_d に対して 100mm 長くした。曲げ加工実験には、万能引張試験機を用いた。曲げ加工中の曲げ角の測定と加工後の厚板の形状測定には、 $\pm 1\mu\text{m}$ の高精度変位変換器を使用した。曲げ加工後の厚板の外表面の割れ観察には、(株) キーエンス製のデジタルマイクロスコープ VHX-1000 を使用した。曲げ加工の最終曲げ角は 90° である。曲げ加工実験は常温で行い、潤滑には、石油系グリスを用いた。

一方、解析には有限要素法のソフト ELFIN を用いた。4 節点四角形ソリッド要素とし、平面ひずみ問題として 2次元数値解析を行った。解析には、引張試験において得られた応力 - ひずみ特性値を Swift の式で近似して用いた。板材の圧延方向と幅方向に引張試験を行った結果、機械的性質に大きな差がなかったため、解析では材料異方性を考慮していない。

3. 実験結果及び考察

Fig.2 にダイス溝幅 V_d に対するスプリングバック角度 $\Delta\theta$ の実験結果と解析結果を示す。ダイス溝幅 V_d の増加に伴い、スプリングバック角度 $\Delta\theta$ は増加している。パンチ荷重を除荷した時に、材料の持っている弾性ひずみのために、スプリングバックは生じる。パンチ解放直前の板材の相当塑性ひずみ分布を Fig.3 に示す。厚板の曲げ変形は、ダイスの左右の肩の間で起こっており、ダイス溝幅の大きさが広くなるにつれ、ひずみが生じる領域も広がっている。相当塑性ひずみが大きい部位やその周辺では大きな弾性ひずみが存在している。その結果、スプリングバック角度も増加する。次に、Fig.2 のスプリングバック角度の解析値と実験値の比較検討を行う。スプリングバックは実験結果と解析結果も共にダイス溝幅 V_d に対して単調に増加している。また、実験値が解析値に比べて全体的に小さくなっている。その一つの要因として、実際に曲げ加工を行う際

Fig. 1 Schematic illustration of devices and plate

Fig. 2 Spring-back angle of plate (V_d)

Fig. 3 Distribution charts of effective plastic strain of thick plate at the end of clamping(V_d)

に厚板の外表面に生じる割れが考えられる。特にダイス溝幅 V_d が狭い場合では、Fig.3 に示すように、パンチ直下でひずみが集中して生じている。したがって、厚板の外表面での割れについて考慮する必要がある。顕微鏡で厚板の割れを観察した。撮影した位置は、Fig.4(a)の模式図に示すように、厚板の外表面の稜線部分で行った。顕微鏡で観察された割れの例を Fig.4(b)(c)に示す。一方、ダイス溝幅 $V_d=40\text{mm}$ 、パンチ先端部の半径 $R_p=2\text{mm}$ では、最も大きく割れが生じた。その時の厚板の稜線部分の写真を Fig.5 に

示す. パンチ先端部の半径 $R_p=10\text{mm}$ とした時は, ダイス溝幅 $V_d=40, 50, 60, 70\text{mm}$ の 4 条件でデジタルマイクロスコープによる割れが観察された. ここでも, ダイス溝幅 V_d が小さくなるにつれ割れの開口部の幅が大きくなり, または細かい割れの個数が多くなる傾向が確認できた. このような割れがスプリングバック角 $\Delta\theta$ の減少する要因となっているが, 同時に製品の強度, 外見などに悪影響を及ぼす可能性がある.

ダイス溝幅 V_d とパンチ先端部の半径 R_p を変えて実験を行った. すべての条件における割れ状態をまとめて, **Table1** に示す. その大きさについては, 目視で確認できる割れ(×), 顕微鏡で観察できる割れ(△)とそれ以外は, 割れなし(○)と3つに区分した. ダイス溝幅 V_d が狭く, パンチ先端部の半径 R_p が小さいほど, 割れの開口部の幅が大きくなり, または細かい割れの個数が多くなる傾向が確認できた. その結果, スプリングバック角 $\Delta\theta$ が減少したと考えられる.

次に, パンチ先端部の半径 R_p の影響について検討する. **Fig.6** に最終曲げ角度を 90° としたときの, 厚板のスプリングバックの実験結果と解析結果を示す. ダイス溝幅 $V_d=150\text{mm}$ のときは, 実験結果と解析結果がほぼ同じ値となった. 一方, ダイス溝幅 $V_d=80\text{mm}$ のときは, 解析結果と実験結果には 2° 前後の差があった. これは, 前述の通り厚板の外表面における割れ発生することが原因だと考えられる.

パンチ先端部の半径がスプリングバックに及ぼす影響は少ない. **Fig.7** に, スプリングバック前後の厚板の外表面の形状の解析結果を示す. スプリングバック角 $\Delta\theta$ は, 厚板のスプリングバック前後の曲率の差分で計算することができる¹⁵⁾. **Fig.7** の形状結果より 1mm 間隔で曲率半径を計算し, スプリングバック前後で曲率半径の差分を求めた. この結果を **Fig.8** に示す. パンチ先端部の半径 R_p が小さいほど, 曲げ中心での曲率の差分が大きくなっており, 曲げ中心から離れた部分では比較的小さくなっている. 一方, パンチ先端部の半径 R_p が大きいほど, 曲げ中心での曲率の差分が比較的小さくなっており, 曲げ中心から離れた部分では比較的大きくなっている. スプリングバック角 $\Delta\theta$ は, 厚板の全長に渡っての曲率の差分を積分した値に等しい. その結果, スプリングバック角 $\Delta\theta$ に, パンチ先端部の半径 R_p の及ぼす影響が少なくなる.

Table 1 Surface situation on ridge line part

R_p/mm	Die open width V_d/mm								
	40	50	60	70	80	90	100	120	150
2.0	×	×	△	△	△	△	○	○	○
5.0	×	×	△	△	○	○	○	○	○
7.5	×	△	△	△	○	○	○	○	○
10.0	△	△	△	△	○	○	○	○	○
12.5	/	△	△	○	○	○	○	○	○
15.0	/	/	○	○	○	○	○	○	○
20.0	/	/	/	○	○	○	○	○	○
25.0	/	/	/	/	○	○	○	○	○

× : visually observed crack

○ : no crack

△ : crack observed by microscope

/ : no sample

ダイス溝幅 $V_d=80\text{mm}$ とした時の厚板の長手方向の応力分布を **Fig.9** に示す. 先端部の半径 R_p が小さいほど応力分布が曲げ中心に集中しており, その結果, スプリングバック時の曲率半径の変化が中央部で比較的大きくなった. また, パンチ先端部との接触面積が少ないため, パンチ直下では面圧が集中しており, 厚板の外表面で割れが発生する. 同時に, 厚板の内側表面にパンチ先端部の痕跡が残し, 不良製品となってしまふ. 一方, ダイス溝幅 V_d を大きく選定した場合は, スプリングバックが大きくなるため, 製品の曲げ半径の製品精度への影響を考慮しなければならなくなる. 曲げ加工後の厚板の外表面の形状は, 厚板を製品として使用する場合にその精度など大きく問われるためである.

(a) Place in which crack was taken a picture

(b) Die open width $V_d=40\text{mm}$ $R_p=10\text{mm}$ 0.4mm

(c) Die open width $V_d=50\text{mm}$ $R_p=10\text{mm}$ 0.4mm

Fig. 4 Crack photographs observed by microscope

Fig. 5 Crack photo on ridge part($V_d=40\text{mm}$, $R_p=2\text{mm}$)

一方、ダイス溝幅 V_d も厚板の中央部での形状に影響を及ぼす。ダイス溝幅 V_d における外表面の形状を Fig.10 に示す。いずれもパンチ先端部の半径 $R_p=10\text{mm}$ として、曲げ角度 $\theta=90^\circ$ まで曲げ加工を行ったが、ダイス溝幅 V_d ごとに曲げ中心での曲げ半径が異なっている。厚板の外表面はダイス溝幅 V_d を広くすると曲げ中心での曲げ半径が増加する。ダイス溝幅に対する厚板のスプリングバック前の曲率を求めた解析結果を Fig.11 に示す。ダイス溝幅 V_d が最小の $V_d=40\text{mm}$ の時に中央部での曲率は最大となった。ダイス溝幅 V_d が小さいほど、厚板の曲げ中心での曲率が大きくなっているが、曲げ中心から X 方向におよそ 20mm ($2R_p$) 離れたところから曲率が比較的小さくなっている。この形状の傾向を Fig.3 のダイス溝幅 V_d における相当塑性ひずみ分布図からも確認できた。ダイス溝幅 V_d が小さい場合には、狭い範囲で曲げ変形が行われるため相当塑性ひずみが厚板の長手方向の中央部 ($\pm 2R_p$) では比較的大きくなっている。また、ダイス溝幅 V_d が大きくなるにつれ、広い範囲で曲げ変形が行われるため、比較的大きい範囲に渡って、比較的大きな相当塑性ひずみが生じている。

ダイス溝幅 V_d における厚板のスプリングバック前後の曲率半径の差分を Fig.12 に示す。ダイス溝幅 $V_d=100\text{mm}$ の場合には、長手方向中央部で大きく、中央部から離れた部分では比較的小さくなっている。一方、ダイス溝幅 $V_d=150\text{mm}$ の場合には、中央部での曲率半径の差分が比較的小さくなっている。Fig.3 の相当塑性ひずみ分布図からダイス溝幅 V_d が大きくなるにつれ、曲げ変形が生じる範囲、つまりひずみが生じる範囲が増加するのでスプリングバックも増加する。よって、スプリングバック角 $\Delta\theta$ は、パンチ先端部の半径 R_p よりもダイス溝幅 V_d の影響を受ける。なお、ダイス溝幅 V_d を小さく選定することでスプリングバック角度 $\Delta\theta$ を抑制できるが、同時に外表面で生じる割れが増加する。したがって、割れが生じることなくスプリングバックを最小限に抑えられるダイス溝幅を選定する必要がある。

一方、パンチ先端部の半径 R_p は、スプリングバックにはほとんど影響を及ぼさないが、パンチ先端部直下の厚板の内側表面に残る痕跡などを考慮する必要がある。

Fig. 6 Spring-back angle of plate (R_p) Fig. 7 Outside shape of bent plate (R_p) Fig. 8 Difference of curvature during spring-back (R_p) Fig. 9 Distribution charts of longitudinal stress of thick plate at the end of clamping (R_p)

4. 結 言

アルミニウム合金 A5083 厚板の V 曲げ加工実験を行い、スプリングバック角度と板材の外表面に生じる割れについて検討を行った。ここでパラメータとして、ダイス溝幅 V_d とパンチ先端部の半径 R_p に着目した。ダイス溝幅 V_d を小さく選定することでスプリングバック角度 $\Delta\theta$ を抑制できるが、板厚 t_0 の 5 倍以下 ($V_d \leq 5t_0$) の場合は、目視で確認できるほどの割れが生じた。また、 $5t_0 \leq V_d \leq 8t_0$ では、小さな割れが顕微鏡で確認された。一方、パンチ先端部の半径 R_p は、スプリングバック量には、ほとんど影響を及ぼさないが、中央部での厚板の形状には影響を与えた。パンチ先端部の半径 R_p を小さく選定するとパンチ先端部直下の厚板の内側表面に残る痕跡と板材の外表面での割れが増加する。また、パンチ先端部の半径 R_p を大きく選定することに伴いダイス溝幅 V_d を大きくすることになり、その結果スプリングバック量が増加する。これらをすべて考慮すると、 $t_0=10\text{mm}$ の A5083 板材を曲げ角度 $\theta=90^\circ$ に曲げ加工を行う際は、パンチ先端部の半径を $R_p=t_0$ に、ダイス溝幅を $V_d=8t_0$ と選定することを推奨する。

謝 辞

本研究で使用した A5083 の厚板は、古河スカイ株式会社浅見重則様にご提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

また、厚板の外表面の割れなどの撮影には、株式会社キーエンスの最新式デジタルマイクロスコップを利用させていただきました。心より、御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 守時一：日本機械学会論文集，**38**-314 (1972)，2514-2524.
- 2) 風間宏一・永井康友：塑性と加工，**45**-516 (2004)，40-44.
- 3) 風間宏一・永井康友：塑性と加工，**45**-519 (2004)，51-55.
- 4) 小川秀夫・田村公男・中川威雄：塑性と加工，**25**-278 (1984)，238-244.
- 5) 小川秀夫：塑性と加工，**43**-493 (2002)，145-149.
- 6) 上田雅信：塑性と加工，**22**-248 (1981)，904-911.
- 7) 益田森治・室田忠治：機械の研究，**8**-4 (1956)，427-430.
- 8) 精機学会編：精密工作便覧 (第3巻)，(1953)，63.
- 9) 畑中伸夫：軽金属，**56**-1 (2006)，45-50.
- 10) 島進：材料，**44**-500 (1995)，578-583.
- 11) 永井康友：塑性と加工，**29**-324 (1988)，69-74.
- 12) 軽金属学会：アルミの組織と性質，(1991)，465-467.
- 13) 益田森治：「薄板の曲げ加工」，(1958)，19-20.
- 14) 前田禎三：塑性加工，(1972)，329-330.
- 15) 日本塑性加工学会：曲げ加工，(1995)，22-23.

Fig. 10 Outside shape of bent plate (V_d)

Fig. 11 Curvature of plate at the end of clamping (V_d)

Fig. 12 Difference of curvature during spring-back (V_d)