5083 アルミニウム合金厚板の V 曲げによる変形状

ハムタ・ナランバートル*・村田 眞**・久保木 孝**
柴田 隆浩***・金 英俊***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 60, No. 6 (2010), pp. 264-268

Deformation in V-bending of aluminum alloy 5083 plate

Khamt NARANBAATAR*, Makoto MURATA**, Takashi KUBOKI**
Takahiro SHIBATA*** and Yingjun JIN***

Bending is a fundamental common process, which has been applied in industry for hundreds of years. There are many research works on bending process for thin sheet metal with thickness of 3 mm or less, which is used as components for various products. On the other hand, bending process for plate has also been applied according to the diversity of market needs, but only for special usage. Therefore, only a few research works have been presented and the expertise is still limited. Ogawa shows some examination results, those are able to control deformation of sheet by changing die open width and punch radius of sheet metal bending up to 6 mm thickness. In the present research, experimental examination is carried out with emphasis on the effect of the die open width on the bending behavior of thick plate with 10 mm thickness: deformation in the ridge line direction, spring-back and deduction of total length. As a result, it is quantitatively clarified that the die open width has some amount of effect on the unique phenomena in plate bending such as saddle type deformation, reduction of bending curvature from the punch radius and the deduction discrepancy from theoretical value.

(Received September 1, 2009 Accepted January 28, 2010)

Keywords: V-bending, deformation, plate, 5083 aluminum alloy

1. 緒 言

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。これらの多くの研究^{1)~5)}は、板厚が3mm以下の薄板に関するものである。厚板に関する研究は、小川ら⁶⁾によるものがほとんどである。小川らの研究では、板厚6mmの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。薄板の曲げ加工においては、曲げ加工された稜線部がほぼ直線であるが、厚板では鞍形になる。そのほかにも、曲げの内側半径とパンチ先端の半径の差、板の斜面の平面度などが厚板の場合に無視できなくなる。薄板の曲げ加工においてほとんど無視されていた現象が、厚板の場合には無視できなくなる。そこで本研究は、アルミニウム厚板のV曲げ加工において生じる現象について、実験的に検討を加え、厚板のV曲げ加工の特徴を明らかにする。

2. 実験装置および被加工材

曲げ加工時のダイス、パンチと被加工材(厚板)の位置を示す模式図をFig. 1に示す。厚板は5083アルミニウム合金圧延板で、熱間圧延上がりの状態で熱処理が施されていない。

い。圧延方向は厚板のダイス溝幅方向と一致する。厚板の機械的性質は以下に示す通りである。圧延方向の引張強さは $\sigma_B=315\text{MPa}$ 、全伸びは $\phi=27.4\%$ で、厚板の稜線方向の引張強さは $\sigma_B=334\text{MPa}$ 、全伸びは $\phi=24.7\%$ である。厚板の寸法は以下に示す。板厚は $t=10.0\text{mm}$ 、板長は $a=200.0\text{mm}$ 、板幅は $b=100.0\text{mm}$ とした。曲げ加工においては、先端部が $R_p=10.0\text{mm}$ のV形のパンチと、肩部が $R_d=10.0\text{mm}$ のダイス

Fig. 1 Schematic illustration of die and punch in plate bending.

*電気通信大学大学院知能機械工学専攻 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)。Graduate Student, Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications (1-5-1 Chofu Gaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585).

E-mail: namba@mt.mce.uec.ac.jp

**電気通信大学知能機械工学科 (東京都)。Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications (Chofu-shi, Tokyo).

*** (株)アマダ AMADA Co., Ltd

を用いた。曲げ角は、同図に示すように 90° である。パンチとダイスの材質は S45C で、先端部と肩部には、半径 $R_d=10.0\text{mm}$ で、焼入れ処理を施した SKD11 のシャフトが挿入されている。ダイス溝幅は $V_d=40.0\text{mm}$ ($4t$) から 100.0mm ($10t$) まで 10.0mm ごとに変えて、7 種類のダイスで曲げ加工を行った。なお、1 試験当たりの試験片の数は 1 である。この曲げ加工では、同図に示すように板端面からシャフト側面までの距離 $L=50.0\text{mm}$ で一定とした。また曲げ加工実験には、万能引張試験機を用いた。厚板の内外の曲げ半径や形状を測定するには、 $\pm 1\mu\text{m}$ の高精度の変位変換器を使用した。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。

Fig. 1 に示す曲げ加工部の断面 A を表した図が Fig. 2 である。厚板は曲げ加工されると、Fig. 2 に示すように、鞍形の形状になる。それは Fig. 2 (a) に示すように、曲げモーメント M によって曲げ加工がされると、それに伴って、厚板の稜線方向では曲げの内側は伸び、外側は縮むため、断面は Fig. 2 (b) に示すような形状になる。本研究ではダイス溝幅 V_d の変化が、曲げ加工された厚板の変形形状やスプリングバックに及ぼす影響について検討を加えた。

3. 実験結果

3.1 曲げ加工中の荷重変化

実際の曲げ加工が終了したときの写真を Fig. 3 に示す。厚板の曲げにおいては、パンチと厚板の間に隙間 g が生じ、パ

Fig. 2 Cross section of bent plate.

Fig. 3 Photograph of bending view.

ンチの形状どおりには曲げが生じないことが示される。

Fig. 4 にダイス溝幅 V_d をパラメータとし、パンチストローク S とパンチの荷重 P の関係を示す。このとき、パンチの最終荷重を 150kN としている。ここでの S 点は、厚板の端部がパンチ斜面に接触した状態を示している。一方、T 点は、Fig. 3 に示すように、パンチ斜面とダイス肩部との距離 c が厚板の厚さ t と同じ値になった状態を示している。同図の S 点に達するまでのストロークの増加とともに、荷重は増加している。加工硬化によって単調増加しているが、その後、減少している場合もある。それは、ダイスの肩部で生じる力の縦方向の成分が曲げ角度が大きくなるにつれ減少しているためである。これは厚板の曲げにおいて、ある程度曲げが進むまで曲げモーメントが増加するが、それ以上の曲げにおいては、ほとんど曲げモーメントの増加なしに曲げが進むためである。ダイス溝幅が小さいほど、荷重は大きくなっている。しかし、パンチ肩部との接触点において、厚板が受ける力によって生じる曲げ部の曲げモーメントに換算すると、どのダイス溝幅 V_d においても、ほぼ等しくなる。同じ材料および同じパンチで曲げ加工を行う場合には、曲げ部の応力分布は同じになるため、ダイス溝幅を変化させても、S 点の曲げ加工部の曲げモーメントの値はほぼ同値となる。

同図に示すように S 点から T 点まで、厚板とパンチ斜面との間に隙間が存在しているが、その隙間が小さくなる過程を示す。その後、T 点に達すると曲げ加工は進行が止まり、ストロークはほとんど増加せず、急激にパンチ荷重のみが増加する。

3.2 厚板の曲げ加工による変形形状

次に、曲げ半径、斜面の平面度、スプリングバック、直線部の長さ、端部反りの高さ、伸び代について調べる。厚板の曲げ加工の変形プロセスを Fig. 5 示す。ダイスの上に置かれた平らな厚板は、ダイスの肩に支えられてパンチ先端で曲げられ、同図 (a) のようになる。さらにパンチにより曲げ加工が進み、同図 (b) に示すように、厚板はダイスの肩とパンチの斜面に挟まれる。その後は、厚板とダイスの接触面積が増加し、若干厚板とダイスの隙間が小さくなり、曲げ加工は終了する。パンチ荷重を 150kN としても、厚板とパンチが接触しない部分が残る、同図 (c) に示すようになる。

Fig. 4 Load change during bending.

Fig. 5 Process of bending ($V_d=100$ mm).
(a) $P=20$ kN, (b) $P=40$ kN, (c) $P=150$ kN

— end of bending
- - - after spring-back

Fig. 6 Bending situation at the end of bending ($P=150$ kN).

曲げ加工終了後、厚板の形状は Fig. 6 に示す実線形状となるが、厚板をダイスから取出すと、変形履歴に対応して同図に示す破線の形状に変化する。パンチ先端近傍では塑性変形がより大きく生じるため、パンチ R_p に近い曲げ半径となるが、その他の部分では弾性変形になり、このような形状となる。

Fig. 7 にダイス溝幅 V_d に対する、厚板の外側の曲げ半径 ρ_o と、内側の曲げ半径 ρ_i の関係を示す。曲げ加工中、パンチ先端部において厚板の内側曲げ半径 ρ_i は、パンチ半径 R_p より小さい。除荷後もダイス溝幅 V_d が 70 mm 以下の場合、スプリングバック後も ρ_i は、パンチ半径 R_p よりも小さくなる。これは、V 曲げの曲げ角が加圧時よりも小さくなる、スプリングゴー現象⁷⁾ によるものと考えられる。一方、ダイス溝幅 V_d が 70 mm 以上では、厚板の曲げ加工される部分が大

Fig. 7 Relationship between die open width and bending radius of plate.

Fig. 8 Relationship between die open width and dent of plate.

きくなり、加工硬化によるスプリングバックが強く現れ、曲げ半径 ρ_i は 10 mm 以上となっている。曲率半径が小さい場合には、曲げ加工中のダイス肩部と厚板の接触点の移動量の、ダイス溝幅に対して占める量が大きいためである。外側の曲げ半径 ρ_o は、25 mm 前後の値を取っている。厚板の変形がなければ、幾何学的な計算によれば曲げ半径 ρ_o は、20 mm の値を取るが、この曲げでは、曲げの頂点部で板が薄くなるため、このような結果となる。

ダイス溝幅 V_d に対する、斜面の平面度 Δd_o の関係を Fig. 8 に示す。ダイス溝幅 V_d が大きくなると、 Δd_o が、それに比例して大きくなる。これは、ダイス溝幅 V_d が大きくなると、変形する厚板の長さが長くなるためである。

4. 実験結果の検討

厚板の曲げにおいて、板の両端部で曲げ変形を受けない平らな部分 (Fig. 6) がなす角度を ϕ とする。この見かけの曲げ角 ϕ とパンチの角度 90° の差を、見かけのスプリングバック ϕ_b とする。

$$\phi - 90^\circ = \phi_b$$

ダイス溝幅 V_d に対する, ϕ_b の関係を Fig. 9 に示す。ダイス溝幅 V_d が大きくなるにつれ, スプリングバック ϕ_b は大きくなっている。これは Fig. 7 における曲げ半径 ρ_i と同じように増加している。

曲げ加工部の厚板の稜線方向の形状について検討を加える。以下の変形は, 薄板でも生じるが, 全幅に対して変形が生じる領域が狭く, ほぼ無視できる。厚板では, 曲げ加工が行われると, 曲げの稜線部は, Fig. 2 に示すような形状となり, 無視できない。厚板は, 曲げ加工が行われると, Fig. 2 に示すように, 曲げの稜線部で真直となった長さを, 曲げの外側は l_{fo} , 内側は l_{fi} で表す。この場合, 直線部を定める基準値 f の値は, 0.02mm としている。なお, 測定精度 $1\mu\text{m}$ の変位変換器を用いて, 稜線部を 0.02mm 間隔で測定を行った。

稜線部の直線部長さとダイス溝幅 V_d の関係を Fig. 10 に示す。同じ形状に曲げ加工されるため, ダイス溝幅が変わっても, 外側直線部と内側直線部の長さはほぼ一定の値となっている。 l_{fi} は 80mm 強, l_{fo} は 70mm 強の値を取り, ダイス溝幅が真直部の長さに影響を与えることはなかった。内側の

直線部の長さ l_{fi} が, 外側の直線部の長さ l_{fo} より大きくなっている。これは曲げの内側はダイスが厚板の曲げ加工部に当たり, パンチ先端によって矯正されるためである。厚板の曲げの内側は, パンチの先端部の R_p の圧痕が残る状態となり, 曲げ加工が行われるためである。

板が曲げモーメントを加えて曲げ加工されると, 曲げの外側では伸び, 内側では縮みが生じる。それに対し, ダイス溝幅方向の断面では, 内側では伸び, 外側では縮みが生じ, その断面形状の両端は反りを生じ, Fig. 2 に示すような形状となる。この曲げの場合, 反りが生じる長さは, 曲げの内側では約 10mm, 外側では約 15mm である。反りの高さ h_s とダイス溝幅 V_d の関係を Fig. 11 に示す。反りの高さはダイス溝幅 V_d に対して, 曲げの外側では単調増加するが, 曲げの内側では $h_{si} \approx 1.2\text{mm}$ 程度であり, 影響を受けない。それは, パンチ先端によって矯正されるためである。 h_{si} が h_{so} より大きな値を取っているのは, 曲げ内側の曲げ加工部分は縮みが生じるため, それと直角の稜線方向に伸びひずみが生じ, Fig. 2 の C の部分に突出部ができるためである。さらにその曲げの範囲が曲げ内側は外側に比べて小さいため, C の部分での突出部がさらに大きくなるためである。

Fig. 9 Relationship between die open width and spring-back angle.

Fig. 11 Relationship between die open width and camber.

Fig. 10 Relationship between die open width and flat length of plate.

Fig. 12 Relationship between die open width and bend deduction.

厚板を曲げるときに、ブランクの長さを決定することが、工業的に重要である。そのために伸び値 δ を設定することが必要となってくる。伸び値 δ の値は次の式で定義する。

$$\delta = l_1 + l_2 - l_0$$

ダイス溝幅 V_d と伸び値の関係を **Fig. 12** に示す。ここでの l_1 , l_2 は同図に示す値である。同図の破線は薄板の伸び値の理論式⁸⁾によって求められた値を示す。この理論式は薄板の曲げに対応しており、曲げにおける幾何学的な関係より導いた式であるため、厚板の曲げ加工の伸び値に対応できない。ダイス溝幅が増加するにつれ、伸び値 δ は増加している。ダイス溝幅 V_d が増加すると、**Fig. 6** に示す引張力 T_t によって、伸ばされる部分が長くなり、伸び値 δ は長くなる。

5. 結 言

ダイス溝幅を 40 mm から 100 mm まで変化させて、5083 アルミニウム合金の厚板 ($t=10$ mm) の V 曲げ加工実験を行った。この厚板の曲げ加工で生じた結果を以下に記す。

(1) 曲率半径は、ダイス溝幅 40~70 mm ではパンチ先端半径より小さくなり、スプリングゴースの状態になった。それ以上のダイス溝幅ではスプリングバックの状態となった。

(2) 斜面の平面度はダイス溝幅に比例して大きくなった。

(3) 見かけのスプリングバックは、溝幅が増加するとともに増加した。その最大値は 4° となった。

(4) 稜線部の直線部長さは、曲げの内側外側ともにダイス溝幅の影響を受けなかった。

(5) 端部反りの高さは、曲げの外側ではダイス溝幅に比例して増加し、最大で板厚比 7% に達した。一方、曲げの内側ではパンチ先端部によって矯正されるため、ダイス溝幅の影響を受けることなく、板厚比 11% となった。

(6) 伸び値はダイス溝幅が増加するとともに増加した。

謝辞

本研究で使用した 5083 アルミニウム合金の厚板は、古河スカイ株式会社 浅見重則様に御提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 守時 一：日本機械学会論文集, **38** (1972), 2514-2524.
- 2) 風間宏一：塑性と加工, **45** (2004), 269-276.
- 3) 小川秀夫：塑性と加工, **25** (1984), 238-244.
- 4) 永井康友：塑性と加工, **29** (1988), 69-74.
- 5) 矢村 隆：塑性と加工, **22** (1981), 968-974.
- 6) 小川秀夫：塑性と加工, **43** (2002), 145-149.
- 7) 前田禎三：塑性加工, (1972), 329-330.
- 8) 益田森治, 室田忠治：機械の研究, **8**, (1956), 427-430.
- 9) 精機学会編：精密工作便覧 (第3巻), (1953), 63.