研究論文

ダイス形状およびアルミニウム円管肉厚の MOS 曲げに及ぼす影響

村田 眞*

Effect of die profile and aluminum circular tube thickness with MOS bending

Makoto MURATA*

A new flexible type of tube bending method, based on the penetration bending, was invented by the author. It has been named the MOS bending method. Using the aforementioned bending method, tubes can be bent to the required bending radii by shifting the relative distance between the die and tube. The bending radius, the flattening of tube cross section and the bending forces are experimentally investigated as functions of the die bearing radius and the tube thickness using the MOS bending method and the results are summarized as follows. (1) The bending radius, flatness and bending forces had no effect on the die bearing radius. (2) The bending limit was extended, as the wall thickness increased. The relationship between the offset and the bending radius had little effect on the thickness. (3) The flatness in the wide direction decreased with increasing wall thickness, whereas the flatness in the radial direction was not affected by the wall thickness. (4) The penetration and bending forces increased, as the wall thickness increased.

Keywords: metal forming, MOS bending method, bending force, die bearing radius, thickness of tube

(Received February 13, 1996)

1. 緒 言

押出加工によって製造されるアルミニウム管材は種々の形状をした形材として自動車部材や建築部材等に多く用いられている¹⁾。一方、その中でも代表的な形状であるアルミニウム円管は工業用部品として多用されており、これらの円管は何らかの曲げ加工がされて使用されることが多い。そのために CNC 曲げ加工機が開発²⁾され実用的に多用されている。しかし、この曲げ加工においてはその曲げ半径に対応した曲げ型を使用するために、三次元的な曲げ加工や曲げ半径が漸次変化するようなスパイラル状等の自由曲面を有する曲げ加工は不可能となり、おのずとその曲げ加工範囲は限定されてくる。そこで、筆者は円管をその円管の外径に対応したダイスに押通しながら、任意の曲げ半径に曲げ加工することが可能な加工法 (MOS 曲げと呼ぶ) を考案し開発をした³⁾。

この MOS 曲げ加工法は、コンピュータで制御することにより CNC 化し、任意の自由曲面を有する三次元曲げ加工が可能となった⁴⁾。このことは、アルミニウム押出形材のさらなる需要の拡大につながるであろうと考えられる。

しかし、この MOS 曲げ加工を利用した加工機は実売されているが20数機にとどまっていることと、実用上のみに用いられているために、この加工法についての特性

が明確にされているとはいいがたい。既報⁵⁾においては、ダイスの傾き角や円管の材質が曲げ加工力や偏平化にどのような影響を与えるかについて検討を行った。そこで本報では、この MOS 曲げ加工法を利用した CNC 曲げ加工機を用いて、押し出しダイスの形状や円管の肉厚等の加工条件をパラメータとしてアルミニウム円管の曲げ加工を行い、この加工法の実験的検討により、加工法の特徴をより明らかにする。

2. 加工法および実験方法

2.1 MOS 曲げ加工と CNC 曲げ加工機

この MOS 曲げ加工法の原理について Fig. 1 によ

Fig. 1 Bending of the MOS bending system.

① Circular tube, ② Bending die, ③ Guide cylinder, ⑪ Spherical bearing, ⑫ Jig for die inclination control

* 電気通信大学 (調布市)。University of Electro-Communications (Chofu-shi, Tokyo).

て以下に説明を加える。同図に示すように円管①を円管中心軸よりオフセット u だけ移動した位置にある押通し用ダイス②に押通し負荷荷重 P_L の矢印の方向に押通すことにより、ダイスが移動した方向に円管は曲げられることとなる。この図においては、曲げ加工力 P_u の矢印の方向である紙面の上方に曲げが行われる。この曲げにおいては、円管をダイスが押上げる力 P_u と円管をダイスに押通すための力 P_L の二つの外力によって、ガイドシリンダ出口において円管に曲げモーメント M が生じることとなり、その曲げモーメントの値は次の式(1)で示される。

$$M = P_u \cdot V + P_L \cdot u \quad (1)$$

なお、この曲げ加工においては円管は軸圧縮力 P_L を受けながら曲げ加工がされていることとなる。ゆえに、この曲げ加工法を用いた場合には、曲げ加工を行ったときに円管の曲げ外側で生じる割れはこの曲げ加工の実験において生じることはなかった。Fig. 1 で示す ϕ とは、ダイスが一定の距離のオフセット u に移動したときのダイスが傾く角度である。このダイス傾き角 ϕ を適切な角度に傾けることによって、円管はダイスにスムーズに押通されることとなり、良好な曲げ加工がなされる⁹⁾。この角度はオフセット u が移動しているときにそれとともに比例的に増加するような構造となっている。ここでの実験では $\phi = 25^\circ$ の場合で曲げ加工を行っている。この MOS 曲げ加工法を用いて、押通しダイスの移動距離を

変えることによって曲げ半径を任意に変えることが可能となる。

この曲げ加工実験に使用した曲げ加工機のシステムについて記述する。その概略図を Fig. 2 に示す。この曲げ加工機ではガイドシリンダ中心線とダイスベアリング部中心線の相対距離（オフセット u ）を、マイクロコンピュータと AC サーボモータを用いて、連続的に変化させて制御し、管の曲げ加工を行う。曲げ加工の手順は以下のとおりである。(1) 試料円管①をガイドシリンダ③に挿入しセットする。(2) Z 軸移動用モータ⑧を駆動させて Z 軸移動用チェーン⑨に取付けた管材押出用板⑩で円管をダイス②に押通す。(3) ダイスは AC サーボモータ④および⑤により X 軸および Y 軸方向に連続的に移動が可能である。以上により、円管の曲げ半径を連続的に変化させることができ、さらに、X 軸と Y 軸を同時に制御することによって三次元の立体的な曲げ加工が達成できる。ただし、本報告においてはダイスの移動方向は Y 軸方向のみとし、曲げ加工を行っている。指定した曲げ角への加工では、管の軸方向移動距離をエンコーダ⑥によって測定し、その曲げ半径における曲げ角に対応した長さの管がダイスから押出される間だけ、AC サーボモータによりダイスを定められた位置に移動して加工を行う。なお、この曲げ加工機においては、管の先端検出用の近接スイッチ⑦に管の先端が感知されると曲げ加工のプログラムが開始されるようになっている。

2.2 押通し型の形状

この実験で用いた円管用ダイスの形状は Fig. 3 に示すようになっている。ダイスベアリング部の寸法は円管の外径に対して 0.05 mm のクリアランスを設けている。またダイスベアリング部には r がつけられており、この半径は $r = 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0$ mm の 5 種類が用意されている。この MOS 曲げ加工においては円管は押通しダイスのベアリング部の狭い範囲で力を受け曲げ加工がなされるために、ベアリング部での形状は、MOS 曲げ

Fig. 2 Main components of CNC bending machine.
① Circular tube, ② Bending die, ③ Guide cylinder, ④ AC servomotors for X axis control, ⑤ AC servomotors for Y axis control, ⑥ Rotary encoder for measurement of forward tube length, ⑦ Approach switch, ⑧ Motor for tube forwarding, ⑨ Chain for tube forwarding, ⑩ Plate for tube forwarding, ⑬ Load cell for penetration load, ⑭ Load cell for bending load

Fig. 3 Profile of penetration die.

加工において、重要な因子となると考えられる。そこで、本報では同図に示されるダイスにおいてベアリング部の頂部の r が MOS 曲げ加工にどのような影響を与えるかについて検討を加える。また、この CNC 曲げ加工機ではガイドシリンダおよびダイスを交換することにより円管のみならず材形の曲げ加工に対応させることが可能である。

2.3 試料円管および測定方法

実験に使用したアルミニウム円管は1050TDのH14の質材であり、外径 $d_0 = 20.0$ mm で一定で、肉厚は $t = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ mm のものを用いた。このアルミニウムの機械的性質は耐力 $\sigma_{0.2} = 97$ MPa, 引張強さ $\sigma_B = 106$ MPa で、伸び $\delta = 5.7\%$, 加工硬化指数 $n = 0.29$ となっており、この値は $t = 1.0$ mm の値を示しており、他の肉厚の円管もこの値の約 5% 以内となっていた。

円管は曲げ加工がなされると、真円の形状をした横断面は扁平化され、Fig. 4 に示されるような形状となるとともに、曲げ内側では肉厚が厚くなり曲げ外側では肉厚は薄くなる。この楕円に近い形状を測定するため、ブレードマイクロメータを用いて、曲げ加工部の最大直径 d_1 および最小直径 d_2 を測定した。この曲げ加工においては、曲げ始めと曲げ終わりである円管の軸方向距離約

Fig. 4 Diagram of deformation on tube cross section.

Fig. 5 Relationship between offsets and bending radii as a function of die bearing radius.

30 mm は設定された曲げ半径に加工されていないため、 d_1 と d_2 の測定においては、設定された曲げ半径に加工された部分の曲げ中間点を測定した。加工力および加工形状の評価である円管の偏平率 α_1 と α_2 を以下のよう

加工力 押通し加工力: P_L (kN)

曲げ加工力: P_u (kN)

横断面の偏平 幅 方向: $\alpha_1 = (d_1 - d_0) / d_0 \times 100$

半径方向: $\alpha_2 = (d_2 - d_0) / d_0 \times 100$

3. 実験結果の検討

3.1 ダイスベアリング部の半径による形状への影響

肉厚 $t = 1.0$ mm においてダイスベアリング部の半径 r をパラメータとし、オフセット u と曲げ半径 R の関係を Fig. 5 に示す。オフセットが増加すると曲げが厳しくなり曲げ半径は小さくなるが、オフセットの小さいところでベアリング部の半径により曲げ半径 R に差が見られる。オフセットが増加するとダイスベアリング部の半径が曲げ半径に及ぼす影響はほとんど見受けられず、曲げ半径はほぼ等しくなっている。また、オフセットが大きくなり u/d_0 が 0.9 以上になると曲げ半径はあまり減少せず u/d_0 を 1.0 以上としても $R/d_0 \approx 2.5$ となっており、この実験においては、 R/d_0 をこれ以下の値に加工するのは不可能であった。なぜなら、 u/d_0 を 1.0 以上にとすると、曲げ半径は減少せずに押通し加工力が増大し、円管が座屈するためである。

ダイスベアリング部の半径 r による幅方向偏平率 α_1 への影響を Fig. 6 に示す。同じベアリング部の半径において曲げ半径が小さくなると偏平は大きくなっている。曲げ半径 R が大きく曲げが厳しくないときは、 α_1 はほぼ零に近い値を取っているが、 R が小さくなり厳しく曲げられるときは、 α_1 は負の値を取るようになりそ

Fig. 6 Relationship between offsets and distortions of cross section (for major axis direction of cross section).

の絶対値は大きくなる傾向が見られる。特にその傾向は $r=10.0\text{ mm}$ のとき顕著に現れ $r=5.0\text{ mm}$ のときこの傾向はあまり見られず、 α_1 はどの曲げ半径 R においてもほぼ零の値を取っている。ベアリング部の半径 r をパラメータとして、曲げ半径 R と半径方向の偏平率 α_2 の関係を示したものが Fig. 7 である。同図に見られるように、どの曲げ半径においても α_2 の値は負を取っており、曲げ半径が小さくなるにつれて偏平の割合は大きくなり、 α_2 の絶対値は大きくなる。 R/d_0 が 5 までは $\alpha_2 = -2\%$ 以内となっているが、 R/d_0 が 5 より小さくなると偏平化の傾向は著しくなり、 $R/d_0 = 2.5$ では $\alpha_2 = -9\%$ となりかなりの偏平化が見られるようになった。しかし、ベアリング部の半径 r が偏平率 α_2 に与える影響はわずかで、一本の曲線上に実験点は存在している。この偏平を遠藤らによる均等曲げの実験結果⁶⁾と比較する。この実験で $R/d_0, l/d_0 = 0.1$ のときには、 $\alpha_1 \approx 6\%$ 、 $\alpha_2 = -5\%$ となっており、本曲げ方法と比較すると、かなり大きな値を取っている。本曲げ加工においては、ダイスによって円管の外周を拘束しているため Fig. 6 および Fig. 7 に見られるようにあまり円管が偏平しないで曲げ

Fig. 7 Relationship between offsets and distortions of cross section (for minor axis direction of cross section).

Fig. 8 Example of penetration and bending forces.

が行われることとなる。

3.2 ダイスベアリング部が加工力に与える影響

円管を押通しながら曲げ加工を行っているときの典型的なストローク l と曲げ加工力 P_L ・押通し加工力 P_u の関係を示したものが Fig. 8 である。ストローク $l/d_0 = 0$ で曲げ加工が開始されると急激に P_L と P_u はその値を増加させ、押通し曲げ加工用ダイスが設定されたオフセット u になるとその加工力は一定となり、設定されたオフセットにダイスが固定されている間は加工力は一定となっている。この場合は $P_L \approx 1.7\text{ kN}$ 、 $P_u \approx 0.8\text{ kN}$ となっている。また、 $l/d_0 = 18$ となり、曲げ加工が終了しダイスが移動を開始すると、加工力 P_L と P_u は急激に減少し、 $l/d_0 = 22$ となると加工力は零となる。以後の加工力 P_L と P_u の実験値の検討においては、押通し曲げ加工用ダイスが設定されたオフセットとなり加工力が一定となっている値を、加工力の指標として図示する。

Fig. 9 にダイスベアリング部の半径 r による押通し加工力 P_L の影響を示す。同じベアリング部の半径ではオフセットの増加につれて曲げが厳しくなり、円管がダイスベアリング部からスムーズに押出されにくくなるため押通し加工力は大きくなっていく。また同じオフセットにおいてはベアリング部の半径の大きいダイスを用いた場合に、押通し加工力が小さくなる傾向がある。これはダイスベアリング部の半径が大きくなると、接触箇所での接触面積が大きくなり潤滑が良好となるため、ダイスベアリング部と円管の間の摩擦が減少すると考えられる。しかし、 $r=5.0\text{ mm}$ と $r=10.0\text{ mm}$ ではその差はわずかである。

ダイスベアリング部の半径 r は横断面形状の変化や加工力にそれほどの影響を与えることはないが、 $r=5.0\text{ mm}$ を使用して実験を行った結果を以下に記述する。

3.3 円管の肉厚による曲げ加工形状への影響

肉厚 $t=0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{ mm}$ のアルミニウム円管につ

Fig. 9 Relationship between offsets and penetration forces.

いて曲げ加工を行いオフセット u と曲げ半径 R の関係を Fig. 10 に示す。オフセットの小さいところでは肉厚により曲げ半径のばらつきが見られるがオフセットの増加につれて肉厚による影響はほとんど見られなくなる。どの肉厚においても曲げ半径比 R/d_0 が 2.5 程度になると、オフセットをさらに大きくしても曲げ半径比はそれ以上減少しなくなる。また、図中の矢印は与えたオフセット u での加工限界を示し、それ以上のオフセットを与えると円管は座屈をし、それ以上の曲げ加工が不可能なことを示している。肉厚 t が薄くなるほど、小さなオフセットで加工限界に達する。肉厚 $t=0.5\text{ mm}$ において $u/d_0 \approx 4.5$ で、 $R/d_0 \approx 5$ 以下の加工の曲げが困難となっている。

Fig. 11 および Fig. 12 に肉厚をパラメータとして曲げ半径 R が偏平率に及ぼす影響を示す。Fig. 11 に示されるように幅方向偏平率 α_1 は肉厚 t が薄くなるにつれ小さくなる傾向が見られ、肉厚 1.0 mm 以上ではその値はほとんど正の値を取っているが、 $t=0.5\text{ mm}$ では負の値を取っている。しかし α_1 は肉厚による差はあるものの、

Fig. 10 Relationship between offsets and bending radii as a function of thickness.

Fig. 11 Effect of tubular thickness and bending radius on flatness

わずかに $\pm 0.6\%$ 以内に抑制されており、幅方向の断面変形は Fig. 6 と同様にあまり生じていない。一方、半径方向の偏平率 α_2 について検討を加えたものが Fig. 12 である。肉厚が 0.5 mm のものは横断面における剛性が低いと偏平が大きくなる。しかし、肉厚が 1.0 mm 以上のものにおいて、 α_2 に関しては肉厚による差は見られないが、 $R/d_0 \approx 2.5$ において $\alpha_2 = -7\%$ にもなっている。この曲げ加工においてはダイスで円管の横断面が拘束されながら曲げ加工がなされるので、 α_1 および α_2 は負の値を取る。またその偏平を主に影響を受けるのは α_2 であると見なされる。

3.4 円管の肉厚による曲げ加工力への影響

円管の肉厚をパラメータとして、押通し曲げにおける加工力を現したものが Fig. 13 および Fig. 14 である。

Fig. 13 は押通し加工力 P_L と曲げ半径 R の関係を示す。どの肉厚においても曲げが厳しく R/d_0 が小さくなると押通し加工力は増大する。特に R/d_0 が 5 以下となるとその増加の割合は大きくなる。同じ曲げ半径において比較すると、肉厚の厚いものほど押通し加工力 P_L が大きくなっている。これは、肉厚が厚くなるのに伴って、管材の変形抵抗が増加するため、肉厚の増加につれて押通し加工力が大きくなる。

Fig. 14 に肉厚による曲げ加工力 P_u への影響を示す。肉厚が厚いほど断面の曲げ剛性が大きいため、曲げ加工力は大きくなる。また、曲げ半径 R が減少するにつれてどの肉厚においても加工力が減少しており、肉厚が厚いほどその傾向が大きくなっている。

このように曲げ半径が小さくなると曲げ加工力が減少するのは以下のようなためと考えられる。管材を曲げ加工すると、ある程度以上の曲げつまり曲げ半径をある程度以下にすると、それ以上曲げモーメントを増加しなくても曲げ加工が行える⁷⁾。この押通し曲げ加工において

Fig. 12 Effect of tubular thickness and bending radius on flatness

Fig. 13 Relationship between penetration forces and bending radii as a function of tubular thickness.

Fig. 14 Relationship between bending forces and bending radii as a function of tubular thickness.

は式(1)に示されるように曲げモーメント M は、 $P_L \cdot u$ と $P_u \cdot v$ の和で求められ Fig. 13に示されるように曲げ加工が進むと P_L は急激に増加する。そのために $P_u \cdot v$ の値は曲げが進むとむしろ減少することになる。ここで v の値はほぼ一定と見なせるため、以上のことより Fig. 14に示されるように曲げ加工力 P_u は曲げ加工が進むと減少することとなる。つまり、 P_u は $R/d_0 \approx 5$ で急激に減少しているが、このことは Fig. 13で P_L が $R/d_0 \approx 5$ で急激に増加しているのに対応している。

このように円管の肉厚により同程度の曲げ半径に加工するために必要な加工力には差があるが、偏平は肉厚によらず抑制することが可能であり、肉厚を変えた場合でも $t=1.0$ mm の場合と同程度の偏平率に抑制しながら、同様の曲げ半径比まで曲げ加工を行える。

4. 結 言

管材の新しい曲げ加工法である MOS 曲げ加工において押通し曲げダイスの形状と円管の肉厚が、曲げ加工力や横断面の形状変化にどのような影響を与えるかについて検討を加え、この曲げ加工法の特徴を明らかにした。

以下に実験で得られた結果について記述する。

(1) ダイスペアリング部の半径 r は管材の曲げ半径や横断面の形状および曲げ加工における加工力に影響を与

えることはなかった。しかし、幅方向の断面形状にはダイスペアリング部が $r=5.0$ mm のとき、最小となったが、幅方向の断面形状の割合はわずかであった。

(2) 円管の肉厚が増加するにつれて、曲げ加工限界は増大するが、オフセットと曲げ半径の関係は肉厚によってほとんど影響を受けることはなかった。

(3) 幅方向の偏平率は肉厚が減少するにつれて小さくなる。半径方向の偏平率は肉厚 $t=0.5$ mm 以外においては、肉厚の変化にかかわらず、同じ傾向を示し、曲げ半径が小さくなると、絶対値は大きくなった。

(4) 曲げにおける加工力は肉厚が増加すると大きくなる傾向が認められた。

参 考 文 献

- 1) 竹島英樹：アルトピア，23 (1993)，16.
- 2) 村田 眞：アルトピア，23 (1993)，41.
- 3) 村田 眞，大橋信仁，鈴木秀雄：日本機械学会論文集 (C 編)，55 (1989)，2488.
- 4) 村田 眞，山本 理，鈴木秀雄：塑性と加工，35 (1994)，262.
- 5) 村田 眞：日本機械学会論文集 (C 編)，62 (1996)，291.
- 6) 室田忠雄，遠藤順一：塑性と加工，23 (1982)，343.
- 7) 横内康人：平成 7 年塑性加工春季講演会論文集，(1995)，265.