MOS 曲げ加工におけるダイス傾き角と円管材質の影響*

村 田 眞^{*1}Effects of Inclination of Die and Material of Circular Tube
in MOS Bending Method

Makoto MURATA

A new flexible CNC bending machine which is based on the penetration bending method (called the MOS bending method), was invented and developed by the author. The machine can bend a circular tube to the required bending radius, using only one penetration die rather than many bending dies for the corresponding bending radii. The distortion of the tube cross section, the bending force and bending limit are experimentally investigated for different die inclination angle and tube materials. Using an inclination angle of 25° , the bending limit is maximized, and the bending force, bending radius and distortion of tube cross section are minimized. The tube material does not affect the bending limit, bending radius or distortion of cross section. Bending radii and bending forces are affected by the tube material. The characteristics of circular tube bending are clearly explained, using the MOS bending method.

Key Words: Plastic Forming, Tube forming, Circular Tube Bending, MOS Bending, Bending Radius, Bending Force, Inclination of Die, Experimental Analysis

1. 緒 言

管材はその重量と比較して、剛性が高いために、部材の軽量化のために自動車のみならず、多くの工業品の構造用部材として用いられている⁽¹⁾。構造用部材として用いられる場合には、管材は曲げ加工を伴うことが多く見られる。そのために今日では管材用のCNC曲げ加工機が、工業界の方面で多用されている⁽²⁾。しかし、この既存の管材用CNC曲げ加工機は所定の曲げ半径を有する曲げ形を用いた引き曲げを利用している。そのため、得ようとする製品を製造するためには複数個の曲げ形を用意する必要がある。このことはコスト低減への障害となるとともに、多品種少量生産への対応も困難にさせている。さらに既存のCNC曲げ加工機では、曲げ半径が連続的に変化する曲げや、らせん形状等の複雑な曲げ加工に対応することは困難である。

そこで、円管の外径に対して一つのダイスのみを用いて、そのダイスに円管を押通しながら、ダイスを移動させて曲げ加工を行うことにより、任意の曲げ半径に加工することができ、同時に横断面の変形を防止す

ることが可能な曲げ加工法を著者は考案した。この新しい加工法(MOS曲げ⁽³⁾と名づけている)について、本報は管材の材質が曲げ加工結果にどのように影響を与えるかについて、実験的に検討を加える。このMOS曲げ加工法は円管をダイスに押通すだけで、曲げ加工を行っているため、材質が曲げ結果に与える影響は、曲げ形を使用した既存の曲げ加工法と比較して大きいものと考えられる。

ここでは、このMOS曲げ加工法を、CNC化した曲げ加工機を用い、円管の曲げ加工実験を行い、曲げ加工条件が、加工精度や加工力等にどのような影響を与えるかについて、加工特性を調べ、このMOS曲げ加工法の特徴について記述する。

2. 曲げ加工機および試料円管

2・1 曲げ加工原理とCNC曲げ加工機 図1はこの曲げ加工法の主要な加工部を示しており、そのメカニズムは単純である。以下にこのMOS曲げ加工の原理を記述する。

同図に示すようにガイドシリンダ③の中心部と押通し曲げ加工用ダイス②のベアリング部中心よりずれた距離(オフセット u)にあるダイスに、試料円管①を、軸方向に押通し荷重 P_L で矢印の方向に押通す。この

* 原稿受付 1995年11月10日。

*¹ 正員、電気通信大学(〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。

場合ダイスは上方向に移動しているために、円管は上方に曲げられることになる。一方、ダイスが下方方向に移動していれば下方方向に曲げられるため、曲げを行いたい方向にダイスを移動すれば、任意の方向への曲げ加工が可能となる。なお、同図に示すダイス回転角 ϕ はダイス②が曲げ加工を行う時に、それに付随してダイスが傾く角度であり、この角度はダイス回転ジグ⑤によって制御されている。つまり、この ϕ はオフセット u の関数となるようになっている。

この曲げにおける加工力は、ダイスベアリング部において、オフセット u の大小に対応して、円管はダイ

① Tubular workpiece
② Bending die
③ Guide cylinder
④ Spherical bearing
⑤ Jig for control of die

Fig. 1 Bending part

① Tubular workpiece, ② Bending die
③ Guide cylinder
④ AC servomotors for control X axis
⑤ AC servomotors for control Y axis
⑥ Rotary encoder for measurement of forward tube length
⑦ Approach switch, ⑧ Motor for forming of tube
⑨ Chain for tube forwarding of tube
⑩ Plate for forwarding of tube
⑪ Load cell for Z axis
⑫ Load cell for Y axis

Fig. 2 Main Components of CNC bending machine

ス側面より曲げ加工力 P_u で図1に示される矢印の方向に押されるとともに、押し加工力 P_v によっても曲げモーメントが生ずるため、円管には式(1)のような曲げモーメント M が作用することとなり、その結果として円管は矢印の方向に曲げ加工がなされる。

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

前述の MOS 曲げ機構に基づき、CNC 曲げ加工機を開発した。その概略図を図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との相対位置(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制御し、ダイス位置を連続的に変化させることにより加工を行う。曲げ加工の手順は以下のようである。(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し用板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する。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る。さらに、X 軸と Y 軸を同時に制御するとともに、管の押し通す長さを調節することで曲げ角を制御するために、任意の三次元の立体的な曲げ加工製品を製造することが可能となる。つまり、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固定して加工を行う。なお、この曲げ加工機においては、管材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。

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径の異なる円管の曲げ加工に対応させることが容易である。

2・2 試料円管および形状評価法 実験に使用した円管は、外径 $d_0=20.0$ mm、肉厚 $t_0=1.0$ mm となっており、アルミニウム(A 1050 TD)、銅(C 1220 T)お

Table 1 Mechanical property of aluminum (A 1050 TD)

Material	Ultimate Strength	Elongation	Elastic modulus	Plasticity coefficient	Work hardening exponent
	σ_u /MPa	δ 1/%	E/GPa	F/MPa	n
A1050TD	106.2	5.7	69.0	158.8	0.295
C1220T	270.0	35.1	118.5	1205.3	0.203
C2700T	534.8	14.5	116.6	1498.9	0.247

よび黄銅(2700 T)の3種類のものを用いた。その機械的性質を表1に示す。

管材とガイドシリンダ、ダイスとの潤滑にはユシロ化学工業製の引抜き油を使用した。加工力の測定は、管材押し用板と試料円管の間に設置した押通し加工力測定用ロードセル⑩と、ダイスとACサーボモータの間にローラベアリングを介して取付けられた曲げ加工力測定用ロードセル⑫を用いて行う。曲げ加工時にロードセルから動ひずみ計を通すことにより図3のような出力がX-Yプロッタから得られるので、そこから押し長さ1に対応して押通し加工力 P_L (一点鎖線)および曲げ加工力 P_u (破線)をそれぞれ測定する。曲げが開始されると加工力 P_L と P_u は急激に増加し、その後ダイスが停止して固定され、設定されたオフセットになると、加工力はほぼ一定値となり定常的な曲げ加工が行われる。円管は設定された押し長さ1に押出された後に、ダイスがもとの位置に移動し始めると、加工力 P_L と P_u は急激に減少し、 $u=0$ となるとこれらの加工力はほぼ零となる。この場合、後に記述

するように、加工力 P_L と P_u を検討する場合には、設定された位置となり加工力が一定となった箇所を検討の対象とする。

また曲げ加工形状は、実験後に三次元測定機により曲げ内側の半径 R を測定する。断面変形については、真円の円管(破線)は曲げ加工を受けると図4に示すようなだ円に近い形状に変形するため、ブレードマイクロメータにより曲げ加工部の最大直径 d_1 および最小直径 d_2 を測定する。

加工力および加工形状の評価は以下の諸量を定義し、それを用いて実験結果の検討を行う。

加工力について

押し加工力 : P_L kN

曲げ加工力 : P_u kN

加工形状について

曲げ半径比 : R/d_0

横断面の偏平率

幅 方向 : $\alpha_1 = (d_1 - d_0)/d_0 \times 100$

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

Fig. 3 Example for penetration and bending force

Fig. 4 Diagram of deformation on tube cross section

3. 実験結果とその検討

3.1 ダイス傾き角による曲げ加工形状への影響

アルミニウム(A 1050 TD)で、肉厚1.0 mmの円管を用いて曲げ加工実験を行った。図5にダイス傾き角 ϕ をパラメータとしオフセット u と曲げ半径 R の関係を示す。このダイス傾き角 ϕ とはオフセット u が15 mmのとき図1のダイス回転角 ϕ が生ずる角度のことで、この実験においては、ダイス傾き角 ϕ は $0 \sim 30^\circ$ で 5° ごとに変えられるようにダイス回転ジクを作製した。なお、ダイス回転角 ϕ とはダイスが移動しているとき、ダイスが傾いた角度でオフセット u の関数

Fig. 5 Relationship between offsets and bending radii

となっている。同図に示すように、オフセットが増加すると曲げが厳しくなるため曲げ半径は小さくなっている。また同じオフセットにおいてはオフセットの小さいところで、ダイス傾き角 ψ の小さいほうが曲げ半径が小となる傾向が見られる。これはオフセットが小さい場合、円管はダイスとダイスベアリング部のみで接して曲げられるが、ダイスが傾くことによってその傾き角が大きいほど実際のアプローチ v が長くなるためである。一方、オフセットが大きくなると円管はダイスベアリング部の手前の導入部でダイスと接して曲げられるようになるため、曲げ半径はダイス傾き角に関係なくほぼ同じになる。

曲げ半径比 R/d_0 が 2.5 程度になるとオフセットをそれ以上大きくしても曲げ半径はあまり減少なくなる。また、ダイス傾き角 ψ の比較的小さいジクを用いた場合、オフセットの増加に対して曲げ半径が逆に大きくなる現象が見られる。つまり、ダイス傾き角 $\psi = 0^\circ$ のとき $u/d_0 = 0.5$ で曲げ半径を示す曲線から実験点がずれ、それ以後曲げ半径が急に大となる傾向が認められる。これはダイスの傾きが不十分な場合、導入部でダイスと接して曲げられた円管の曲げ内側がダイスベアリング部出口と干渉し、曲げが戻されるためである。同様の理由から $\psi = 5^\circ$ では $u/d_0 = 0.6$ のとき、 $\psi = 10^\circ$ のとき、 $u/d_0 = 0.8$ 以上のオフセットでの曲げ加工が困難となった。

ダイス傾き角 ψ に対する幅方向の偏平率 α_1 への影響について検討を加えたものが図 6 である。 α_1 は曲げ半径が大きい場合には、わずかであるが、正の値をとっている。しかし、曲げが厳しくなり曲げ半径が小さくなると、 α_1 は負の値をとるように変化する。さらに、曲げ半径が小さくなると α_1 の値は急激に小さくなる。

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

曲げ半径が同じ時は、ダイス傾き角 ψ が大きくなるにつれて α_1 の変化の抑制が可能となっている。

図 7 にダイス傾き角 ψ をパラメータとして半径方向の偏平率 α_2 への影響を示す。オフセットの増加につれて曲げ半径は小さくなり、それとともに断面変形も大きくなる。曲げ半径比 R/d_0 が 2.5 程度になるとオフセットをそれ以上大きくしても曲げ半径はあまり減少せず、偏平率だけが急激に増加しているという状況が見られる。同じ曲げ半径で比較すると、ダイス傾き角 ψ の大きいもののほうが偏平率は小さくなる傾向を示しており、特に $\psi = 25^\circ$ や 30° のダイス傾き角の場合に偏平率は最小となっており、 $R/d_0 = 2.5$ で α_2 は -6% となっている。これはダイスを適切な角度に傾けることによって円管がダイスベアリング部にスムーズに押通されて曲げられるためである。図 6 と 7 において $\psi = 25^\circ$ における実験点を破線で示すと、 α_1 においてはほぼ零となっており、 α_2 においても、この破線はどの曲げ半径の実験点の α_2 の値より絶対値で小となっている。つまり、幅方向の偏平率 α_1 はダイスベアリング部が円管の変形を拘束するため小さく、 $\psi = 25^\circ$ の回転ジクを用いた場合は 0.3% 以下となる。以上のことにより、ダイス傾き角 ψ を適切に選択して曲げ加工を行えば、円管の横断面の変形をかなり抑制して真円に近い曲げ加工が可能である。

3.2 ダイス傾き角による加工力への影響 図 8 と 9 にダイス傾き角 ψ をパラメータとし MOS 曲げにおけるオフセット u が加工力へ与える影響についての検討を行う。この両図においても $\psi = 25^\circ$ の場合の実験点を破線で示している。図 8 にダイス傾き角 ψ による曲げ加工力 P_u への影響を示す。ダイスの傾き角による影響はあまり見られないが、 $\psi = 10^\circ, 20^\circ, 25^\circ$

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

Fig. 8 Relationship between offsets and bending forces

Fig. 10 Relationship between offsets and bending radii for three materials

Fig. 9 Relationship between offsets and penetration forces

Fig. 11 Relationship offsets and distortion of cross section on major axis direction for three materials

では P_u は小さくなっており、オフセットの増加につれて、押通し加工力とは対照的に小さくなっている。これは横断面が偏平するために、横断面の曲げ剛性が低下するためと考えられる。

オフセットの増加に伴って円管を無理にダイスベアリング部から押し出す状態になるため図9に見られるように押通し加工力 P_L は大きくなっている。またオフセットの増加に対する押通し加工力の増加率を比べると、ダイス傾き角の大きいほうが加工力の増加に対する抑制効果が高い傾向があり、破線に見られるように、ダイス傾き角 $\psi=25^\circ$ の回転ジクを用いた場合に最も小さい値をとっている。これはそのダイス回転ジクにより与えられるダイス傾き角が適切であるため、円管がダイスベアリング部にスムーズに押通されて曲げられるためである。

以上のようにダイス傾き角 ψ は曲げ加工後の円管の断面形状や加工力に影響を与えている。このダイス傾き角を適切に設定することにより円管がダイスにス

Fig. 12 Relationship offsets and distortion for three materials

ムズに押通されるようになり、このとき曲げ半径を小さくすることに伴う断面の変形や加工力の増加が抑制されることとなる。また適切なダイス傾き角を与えるジクを用いた場合、オフセットを大きくすると偏平を抑制しながら効率的に曲げ半径を減少させることが

Fig. 13 Relationship between offsets and bending forces for three materials

Fig. 14 Relationship between bending forces and penetration forces for three materials

できる。

3.3 円管の材質の差による曲げ加工形状への影響

前述の検討より得られた結果から、円管の横断面の形状変化の防止および加工力の抑制に最適であると考えられるダイス傾き角 $\phi = 25^\circ$ を用いて、銅(C 1220 T)および黄銅(C 2700 T)の円管に同様の曲げ加工を試みた。

図 10 に円管の材質をパラメータとしたオフセットと曲げ半径の関係を示す。オフセットが大きくなると曲げが厳しくなるため曲げ半径は小さくなっていく。また、同じオフセットにおいては材質により曲げ半径に差が生じている。これは同じひずみを与えるようにオフセットを設定しても、材質の縦弾性係数とその曲げ半径における応力分布の違いによって、生じるスプリングバック量に差があるため、同じオフセットにおいても黄銅・銅・アルミの順で曲げ半径は小さくなる。

円管の材質による曲げ半径と偏平率の関係を図 11 と 12 に示す。曲げ半径が小さくなると幅方向偏平率 α_1 、半径方向偏平率 α_2 はともに大きくなる傾向があるが、材質による差は小さい。図 11 に幅方向偏平率 α_1 の関係を示しており、曲げ半径が大きく曲げが厳しくない場合には、材質の差にかかわらず α_1 はわずかながら正の値をとっている。しかし、曲げが厳しくなり、曲げ半径が小さくなると α_1 の差は大きくなり、アルミニウム・黄銅・銅の順に偏平率は大きくなる。半径方向偏平率 α_2 と曲げ半径の関係を示したものが図 12 である。 α_2 は曲げ半径の大小にかかわらず、材質の差による相違はあまり見られないが、曲げ半径が小さくなると偏平の割合は大きくなり、曲げ半径比 $R/d_o = 2.5$ で、どの材料においても $\alpha_2 \approx -6\%$ となっている。

3.4 円管の材質による加工力への影響 材質の違いによる曲げ加工力 P_u と P_L への影響を図 13 と

14 に示す。図 13 は曲げ加工力 P_u について検討を加えたものであり、アルミニウムよりも銅、黄銅の順に大きな値をとっている。オフセット u が増加し、曲げ半径が小さくなるにつれて、加工力が減少に転じるという傾向は共通して見られる。これは管材の曲げ加工を行うとき、管は塑性変形されてある程度曲げ加工が行われると、それ以上曲げ加工を行っても曲げモーメント M は増加しない⁽⁴⁾。さらに前述した曲げモーメント M の式(1)において、オフセット u が増加すると $P_L \cdot u$ の値が大となるが、一方オフセットが変化しても V の値はほぼ一定のため、同図に示すように、オフセット u が大きくなると P_u の値は曲げ半径の減少につれて減少する。

図 14 に材質の違いによる押通し加工力 P_L への影響を示す。オフセットを大きくしていくと、どの材質においても押通し加工力は増加していく。また、同じオフセットにおいては機械的強度の大なるほうが押通し加工力が大きくなっている。

以上のように円管の材質により同じオフセットを与えたときの曲げ半径および加工力には差が生じるが、オフセットの増加や曲げ半径の減少に対して現れる傾向は共通している。また偏平は材質によらずアルミニウムとほぼ同等に抑制することが可能で、アルミニウムの場合とほぼ同等の最小曲げ半径を得ることが可能となった。

4. 結 言

曲げ形を必要とせず、円管の外径に対応した押通しダイス 1 個のみを用いて任意の曲げ半径に加工することが可能で、同時に加工後の横断面の形状変化を抑制することができる押通し曲げ加工法(MOS 曲げ加工法)に基づく CNC 曲げ加工機において、ダイスの傾き

角, 材質等の加工条件が, 円管の曲げ半径, 横断面の形状変化および加工力に及ぼす影響について実験的に検討を加え, 本曲げ加工法の特性を明らかにした。

円管の曲げ加工において, ダイス傾き角を適切に設定するダイス回転ジクを用いることにより, 曲げ半径の小なる場合においても断面形状変化をかなり防止することが可能となり, 加工限界を高め, 同時に加工力の増加を抑制することができた。さらに, 最小曲げ半径比 $R/d_0=2.5$ の曲げ加工が可能となった。円管の材料が変わっても加工限界や断面形状の変化はあまり差は生じなかった。しかし, 材質の差はオフセットと曲

げ半径の関係や加工力に差を生じさせる結果となった。

文 献

- (1) 中村正信, パイプ加工法, (1972), 194-198, 日本工業新聞社.
- (2) 村田眞, アルトピア, 23-8(1993), 41-47.
- (3) 村田眞・山本理・鈴木秀雄, 塑性と加工, 35-398(1994), 262-267.
- (4) 横内康人・宗吉敬夫, 平成7年塑性加工春季講演会論文集, (1995), 265-266.