<正 誤 表>

「塑性と加工」2012 年 7 月号 (通巻 618 号) P56 ~ P60

塑性と加工 (日本塑性加工学会誌) 第 53 巻 618 号に掲載された原著「超音波振動プラグによる管の引き曲げ加工に関する研究」に誤りがありましたので、訂正した論文を P83 より掲載します。

超音波振動プラグによる管の引き曲げ加工に関する研究

▷ 60 ページ (通年 650 ページ), 左段 Fig.11

【誤】

Fig. 11 Relationship between amplitude and axial load on mandrel (f : 20 kHz, ϕ 12.7mm, t : 1mm)

【正】

Fig. 11 Relationship between amplitude and axial load on mandrel (f : 20 kHz, ϕ 12.7mm, t : 1mm)

<訂正論文>

646 塑性と加工 (日本塑性加工学会誌) 第 53 巻 第 618 号 (2012-7)

論文

超音波振動プラグによる管の引き曲げ加工に関する研究

湯原 正籍* 星野 誠* 和田 修*

磯 幸男* 神 雅彦**

Draw Bending of Tube Using Ultrasonic-Vibration Plug

Masabumi YUHARA*, Makoto HOSHINO*, Osamu WADA*,

Yukio ISO* and Masahiko JIN**

(Received on October 12, 2011)

Presently, high accuracy is required to fabricate several automotive parts, such as engine parts, manufactured by tube bending processes. In an effort to achieve this requirement, we investigated a new tube-draw bending method using an ultrasonic-vibration plug. Firstly, we developed a new bending machine using an axial-ultrasonic-vibration plug at a frequency of 20 kHz and a maximum amplitude of $8\mu\text{m}$ ($0-p$). Secondly, we experimented on the tube-draw bending of carbon steel, stainless steel and titanium tubes. From the result of this study, we clarified that there are several advantages of the proposed ultrasonic-vibration tube-draw bending method, such as reduction in bending force and improvement in accuracy in terms of bending dimensions.

Key words: draw bending, ultrasonic vibration, carbon steel tube, stainless steel tube, titanium tube, plug load, bending accuracy.

1. まえがき

例えば、輸送機械における燃料などの液体や気体の流路となる管の曲げ加工品は、Fig. 1 に示すように、複雑に曲げ加工が施される。近年では、機械の小型化や軽量化に伴い、同曲げ加工品には、さらに小径化、薄肉化、曲げ形状の複雑化や曲率の極小化、ステンレス鋼やチタン合金などの難加工材の利用、曲げ精度の向上など、加工に対する要求が高度化してきている。

現状、管の曲げ加工法には、引き曲げや押し曲げ加工法が多用される¹⁾。しかしながら、前述の曲げ加工の高度化の要求に対して、曲げ位置精度、曲げ角度や曲率の極小化限界、あるいは薄肉や扁平など、加工精度のばらつきや加工限界の問題点があり、有効な対応法が模索されている。

その問題点に対し、本研究では、通常の引き曲げ加工に超音波振動エネルギーを導入することにより、前記問題点を解決する曲げ加工法を検討した。すなわち、従来研究により、伸線や伸管において引抜き抵抗が低減する効果^{2),3)}や、コイルばねのコイリングにおいて加工精度が向上する効果⁴⁾などが明らかにされている。これらの効果に着目すると、管の曲げ加工においても、超音波振動エネルギーの利用が、問題点解決に役立つものと期待できる。

Fig. 1 Examples of products manufactured by tube-bending

本研究では、はじめに、プラグに強力な軸方向の超音波振動を付加することができる超音波振動引き曲げ加工システムを開発した。次に、炭素鋼管、ステンレス鋼管および純チタン管に対して加工実験を実施し、その結果、曲げ加工抵抗低減、曲げ位置精度向上などの基本的な曲げ加工特性におよぼす効果を明らかにすることができた。

2. 超音波振動プラグによる管引き曲げ加工の効果の解析

本研究において検討した管材の引き曲げ加工方法を Fig. 2 に示す。管の一端をチャックで支持し、それにマンドレルに固定されたプラグを挿入する。管の他端をダイとクランプで把持し、プラグを軸方向に振動数 f および振幅 a で超音波振動させ、軸引張り力 P を作用させながら曲げ加工

* (株) 湯原製作所 〒329-1311 栃木県さくら市氏家 1256

Yuhara Mfg. Co., Ltd., 1256 Ujiie, Sakura-shi, Tochigi 329-1311, Japan.

** 日本工業大学機械工学科 〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1

Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology.

4-1 Gakuendai, Miyashiro-machi, Minamisaitamagun, Saitama 345-8501, Japan.

f : frequency, a : amplitude, T : bending torque, P : plug axial load

Fig. 2 Tube-draw bending method with ultrasonic-vibration plug

Fig. 3 Elastic vibration modes of plug and mandrel system

Fig. 4 Relationship between circular frequency of forced vibration ω/ω_n and displacement z/z_0 (x/x_0) in the ultrasonic-vibration tube-draw bending method

T を行う。

プラグの超音波振動が、管引き曲げ加工に与える効果を解析する。プラグを用いる引き曲げ加工においては、プラグとそれを支持するマンドレルが、加工する管の内径以下となるため、一般的に、プラグの支持剛性が工具系の中で最も低くなると考えられる。そのため、プラグとマンドレルは、管の弾塑性変形と管内面とプラグ間の摩擦とにより動的に変動する引き曲げ加工抵抗を受け、軸方向とたわみ方向に動的変位を生じるものと考えられる。この動的変位

が、管の曲げ位置精度や曲げ角度におよぼす影響を以下に考察する。

2.1 マンドレルの周波数特性上の剛性化効果

プラグおよびマンドレルの動的挙動を弾性体の振動モデルとして仮定する。すなわち、Fig. 3 に示すように、マンドレルの後端を固定端、プラグ先端を自由端の境界条件とし、(a)の軸方向および(b)のたわみ方向の振動に対する波動方程式をそれぞれ解くことにより、各方向の振動挙動における固有角振動数 ω_{nl} , ω_{nb} および変位 z , x を求めることができる。

最も振動変位が大きく、加工精度に与える影響が大きい 1 次モードの縦振動の固有角振動数 ω_{nl} およびたわみ振動の固有角振動数 ω_{nb} は、それぞれ式 (1) のようになる。このとき、 λ は振動数次数であり、1 次モードの場合、 $\lambda_l = \pi/2$ および $\lambda_b = 1.875$ となる。 l はプラグを含むマンドレル長、 E は縦弾性係数、 ρ は密度、 I は断面 2 次モーメント、および A は断面積とする。

$$\omega_{nl} = \frac{\lambda_l}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \omega_{nb} = \frac{\lambda_b^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

このマンドレルおよびプラグ振動系に対し、強制振動を作用させた場合の挙動について解析する。1 次モードにおける強制角振動数と動的変位との関係を Fig. 4 に示す。なお、各軸は、固有角振動数 ω_n および静的変位 z_0 , x_0 を基準として無次元化しており、減衰比を 0.1 と見込んでいる。この曲線より、強制振動数 $\omega/\omega_n = 0$ のときの静的変位 z/z_0 , $x/x_0 = 1$ を基準として、 $\omega/\omega_n = 1$ のときに z/z_0 , $x/x_0 = 5$ となり、動的変位が最大の共振状態となり、 $\omega/\omega_n > 1$ において、 z/z_0 , $x/x_0 \rightarrow 0$ となる傾向となることがわかる。

慣用の管引き曲げ加工においては、一般的に $\omega/\omega_n \leq 1$ の条件になるものと考えられる。すなわち、弾塑性変形抵抗や摩擦抵抗の動的変動成分が共振状態の $\omega/\omega_n = 1$ に達しない領域で加工がなされる。いわゆる、びびり振動が生じない領域に加工条件が設定される。

それに対して本研究では、利用した超音波振動の周波数が $f = 20 \text{ kHz}$ ($\omega = 2\pi f = 125.6 \text{ krad/s}$) であり、実験装置におけるマンドレル+プラグ長 $l = 1880 \text{ mm}$ 、マンドレル直径 $d_o = 10.0 \text{ mm}$ 、同内径 $d_i = 4.0 \text{ mm}$ 、マンドレル材質 (SUS304) の縦弾性係数 $E = 206 \text{ GPa}$ 、断面係数 (中空棒) $I = 478.3 \text{ mm}^4$ である。この場合、縦振動モードにおいて角固有振動数は $\omega_n = 4.331 \text{ krad/s}$ となり、 $\omega/\omega_n = 29.0$ となる。一方、たわみ振動モードにおいては $\omega_{nb} = 13.76 \text{ rad/s}$ となり、 $\omega/\omega_{nb} = 9129.9$ となる。すなわち、マンドレルおよびプラグにおいて、軸方向およびたわみ方向ともに $\omega/\omega_n > 1$ の条件が十分に満足され、動的変位がゼロに近づくものと解析できる。

2.2 摩擦抵抗の安定化効果

ボールオンディスク型のトライボロジー試験に関する従来研究において、超音波振動を付加した場合、摩擦係数が低減する効果が明らかにされている⁵⁾。一方、著者らの一人の研究において、コイルばねのコイリングにおける線の曲げ加工において、Fig. 5 に示すように、加工開始時の静止摩擦による摩擦抵抗が低減し、加工時の動摩擦による摩擦抵抗の変動が低減する現象をとらえている⁴⁾。

すなわち、曲げ加工に対して、工具を超音波振動させることにより、摩擦抵抗の低減および動的変動の安定化の効

Fig. 5 Changes of coiling resistance on the 1st coiling pin in coiling of springs (SWOSC-V, $d=1.0\text{mm}$, $D=8.0\text{mm}$, $v=37.7\text{cpm}$, $f=19.5\text{kHz}$, $a=2\mu\text{m}$)⁴⁾

果が得られるものと考えられる。この効果は、管の引き曲げ加工においても発揮され、曲げ加工精度向上に寄与するものと考えられる。

3. 実験装置および方法

3.1 プラグ超音波振動系の開発

開発した超音波振動プラグ振動系を Fig. 6 に示す。周波数は、比較的高い振動エネルギーおよび最大 $a=10\mu\text{m}$ (0-p) 程度の振幅を得ることを目的として $f=20\text{kHz}$ とした。振動駆動源には、市販の BLT (Bolt-clamped Langevin-type Transducer) 型電圧振動子を利用し、それぞれ半波長 $\lambda/2$ の長さの振幅拡大用のステップホーンと中間の直線ホーン、および 6.5λ の長さのマンドレル、およびプラグをねじで連結して構成した。振動テストを行った結果、ほぼ設計通りの周波数と最大振幅で、振動系全体が 7.5λ で共振することを確認できた。

3.2 超音波振動引き曲げ加工装置

超音波振動プラグによる引き曲げ加工装置を Fig. 7 に示す。開発したプラグ超音波振動系は、既存の NC パイプベンダーに設置した。マンドレルを支持し、それを前後に駆動させる油圧シリンダ(1)に超音波振動子ケース(9)を連結させた。加工油材のオイルミストは、中間ホーン(3)からマンドレル(4)内部を通して、プラグ(5)前方から管内面に供給している。装置構成は、基本的にプラグ超音波振動系以外は従来のパイプベンダーとほぼ同様である。

3.3 実験条件および方法

曲げ加工条件を Table 1 に示す。パイプ材質には、炭素鋼管 STKM11, ステンレス鋼管 SUS304TK および純チタン管 TTP340C を用いた。寸法は、外径 12.7mm および肉厚 1.0mm とした。曲げ加工は、はじめに管をチャックに把持させ、その後、NC ベンダーにプログラムされた 2 箇所の曲げを行った。超音波振動の振幅は、片振幅 0 (慣用), 5

Fig. 6 Developed ultrasonic-vibration plug system

(a) Schematic illustration of tube bending machine

(b) Appearance of tube bending machine

1. Oil-pressure cylinder, 2. BLT, 3. Straight horn, 4. Mandrel, 5. Plug, 6. Die, 7. Tube, 8. Linear guide, 9. BLT case, 10. NC Bending machine, 11. Chuck, 12. Ultrasonic generator/AC200V, 13. Oil mist pump

Fig. 7 Developed tube-draw bending machine with ultrasonic-vibration plug

Table 1 Tube-draw bending conditions

Tube materials (Y: Yield stress σ_B : Tensile strength λ : Elongation)	Carbon steel/STKM11 (Y: 392MPa, σ_B : 430MPa, λ : 19.2%) Stainless steel/SUS304TK (Y: 248MPa, σ_B : 700MPa, λ : 61.0%) Pure titanium/TTP340C (Y: 307MPa, σ_B : 387MPa, λ : 52.0%)
Dimensions $d-t$	$d \phi 12.7 \times t 1.0\text{mm}$
Bending portions	2 points in 1 tube
Frequency f	20.0kHz
Amplitude $a(0-p)$	0, 5, $7\mu\text{m}$
Working fluid	Mist oil

および $7\mu\text{m}$ の 3 水準とした。

管の曲げ加工後形状と寸法精度測定位置を Fig. 8 に示す。第 1 曲げにおける軸引張り荷重と曲げ位置寸法 $L1$, および第 2 曲げにおける同様の $L2$ 寸法のばらつきとかたよりを測定し評価した。

実験に使用したプラグおよびダイ形状を Fig. 9 に示す。プラグには、先端が半球形状の基本的なものを、ダイ

Fig. 8 Bent shape and measured dimensions of $L1$ and $L2$ on the testing tube

Fig. 9 Plug and die shapes used in the experiments

Fig. 10 Changes of amplitude of ultrasonic-vibration and axial load on mandrel (f : 20 kHz, SUS304TK, ϕ 12.7mm, t : 1mm)

には、中心線曲げ R17mm の基本的な形状のものをを用いた。図のようにダイとクランプにより管を固定して 90° 曲げを行う。両者の材質は SKD11 (62HRC) とした。

4. 実験結果および考察

4.1 超音波振動振幅とプラグ軸荷重との関係

曲げ工程における超音波振動の振幅およびプラグ軸引張り荷重の変化を測定した結果を Fig. 10 に示す。なお、超音波振動の振幅は、非加工時のプラグ先端での振幅と駆動電流との関係を校正しておき、加工時の駆動電流で測定した。

振幅の校正には、静電容量式非接触変位センサー（ナノ技研、ナノメトリックセンサー、応答周波数 300kHz）を用いた。一方、軸引張り荷重は、振動子ケースと油圧シリンダの間に設置したロードセルにより計測した。

測定の結果、振幅は、加工中安定して設定した振幅となっていることを確認した。一方、軸引張り荷重は、超音波振動曲げ加工において、慣用の引き曲げ加工の場合に比べて、測定荷重が低減すること、その低減の程度は振幅に依存すること、および加工抵抗の変動幅が、慣用加工の場合に比べて小さいことなどが明らかになった。

マンドレルにかかる荷重が低減することは、マンドレルの伸びが低減していることであり、荷重の変動の減少は、曲げ加工時の管材の拘束によって発生する不用な振動が低減することを示している。すなわち、超音波振動付加により、マンドレルの動的挙動が低減され、曲げ加工が安定する傾向にあることがわかり、先に解析した超音波振動曲げ加工の効果を基本的に確認することができたといえる。

4.2 超音波振動振幅とプラグ軸荷重との関係

炭素鋼管、ステンレス鋼管および純チタン管について超音波振動振幅とプラグ軸荷重との関係をまとめた結果を Fig. 11 に示す。炭素鋼管 STKM11 に対しては、実験の結果、プラグに振幅 $a=7\mu\text{m}$ の超音波振動を付加することにより、軸荷重が慣用の場合から 50~70% 低減するという結果となった。

ステンレス鋼管 SUS304TK に対しては、軸荷重が炭素鋼の場合に比べ 20 倍ほど高い値となっているが、超音波振動による荷重低減効果が同様に発現された。振幅との傾向では、振幅を高めるほどプラグ軸荷重低減効果が高まることがわかった。荷重低減のレベルは、超音波振動を付加することにより、軸荷重が慣用の場合から振幅 $a=7\mu\text{m}$ で 80% 程度低減している。

純チタン管 TTP340C に対しては、軸荷重が炭素鋼の場合に比べ 7 倍ほど高い値となった。荷重低減のレベルは、超音波振動を付加することにより、振幅 $a=7\mu\text{m}$ で軸荷重が慣用の場合から 65% 程度低減している。

すなわち、各種の管に対して、プラグに超音波振動を付加することにより、プラグ軸荷重が、振動を大きくするほど低減するという結果になった。

4.3 超音波振動振幅と曲げ位置精度との関係

炭素鋼管、ステンレス鋼管および純チタン管について超音波振動振幅と曲げ位置精度との関係をまとめた結果を Fig. 12 に示す。それぞれの管について、超音波振動の振幅を変化させた場合の曲げ寸法 ($L2$) の設定値からのかたよりとばらつき誤差を評価した。評価本数は $n=20$ 本とした。

炭素鋼管 STKM11 に対しては、実験の結果、プラグに振幅 $a=7\mu\text{m}$ の超音波振動を付加することにより、ばらつきが慣用の場合から 30% 程度低減し、かたよりがマイナス寄りからほぼ中心にシフトした。

ステンレス鋼管 SUS304TK に対しては、プラグ超音波振動を付加することにより、ばらつきの幅は、最大で 90% 程度低減した。一方、かたよりもプラス側から中心に近づくという結果が得られた。

純チタン管 TTP340C の場合は、曲げ精度のばらつきとかたよりの傾向は、振幅 $a=5\mu\text{m}$ と $7\mu\text{m}$ の場合とで、精度の

Fig. 11 Relationship between amplitude and axial load on mandrel (f : 20 kHz, ϕ 12.7mm, t : 1mm)

大小が逆転しているものの、中心値に近づく傾向であるようにみとれる。なお、誤差のレベルがステンレス鋼管では、他に比べて 10 倍ほど異なっているが、これは、加工抵抗や加工条件の違いによるものと考えられる。

5. ま と め

本研究では、管材の引き曲げ加工法において、プラグに超音波振動を作用させる方法を検討した。その結果、以下の項目が明らかになった。

- (1) 管材の引き曲げ加工法に対し、プラグを超音波振動させることの有効性を解析することができた。
- (2) プラグ超音波振動系を開発し、同振動系を組み込んだ管引き曲げ装置を試作した。
- (3) プラグ超音波振動により、プラグ軸荷重が低減すること、および振幅と同荷重との関係を明らかにした。
- (4) プラグ超音波振動により管曲げ位置精度が向上すること、および振幅と同精度との関係を明らかにした。

Fig. 12 Relationship between amplitude and trueness and precision on bent dimension L_2 (f : 20 kHz, ϕ 12.7mm, t : 1mm)

今後、プラグ超音波振動と管の破断や座屈などの加工限界、偏平精度、あるいはプラグ寿命などに関して明らかにしていきたい。最後に本研究の一部は、平成 20 および 21 年度とちぎ未来チャレンジファンド活用助成事業により実施されたことを記す。

参 考 文 献

- 1) Kalpakjian, S. & Schmid, S.R.: Manufacturing Engineering and Technology, (2001), 414-415, Prentice Hall.
- 2) 神雅彦: 塑性と加工, **52**-600 (2011), 138-140.
- 3) 森栄司・井上昌夫: 塑性と加工, **11**-111 (1970), 247-255.
- 4) 長久保眞一・阿部正美・大木哲也・神雅彦: ばね論文集, **56** (2011), 19-24.
- 5) 野口裕之・村川正夫・片岡征二・基昭夫: 塑性と加工, **45**-524 (2004), 731-736.