

非対称断面を持つ軽量型材の実用回転引曲げ加工法の開発

東京都立科学技術大学 機械システム工学科

教授 坂木修次

(平成11年度研究開発助成 AF-1999019)

キーワード：軽量型材，回転引曲げ加工，非対称断面

1. 研究の目的と背景

省エネルギーを目的とした軽量化，また，福祉機器のように軽量を条件とした構造物に，アルミニウム押出型材はじめ鋼角管等の軽量構造物材の利用が進められている．角管を含む各種の型材を構造物に適用するためには，曲げ加工等の二次成形加工が不可欠となる．しかし，型材を曲げ加工した場合の変形は複雑で，未だに合理的な加工法が明かにされていない．アルミニウム押出型材の曲げ加工は，軽金属学会押出型材の成形法部会にて共同研究が実施され，角管はじめ，対称断面を持つ開断面型材の曲げ変形特性が明らかにされた^{1, 2)}．筆者は，当研究部会の一委員として，型材の曲げ加工で発生する基本的変形を明かにしてきた．これらの結果によって，従来不可能とされていた肉厚の薄い角管の曲げ加工を可能にした．

ここでは，非対称断面型材の曲げ加工法の開発を試みている．はじめに，基本的に発生するへん平変形について検討した³⁾．へん平変形を抑制するために，曲げ剛性の小さい積層弾性心材を用いた．非対称断面型材の曲げ加工では，対称断面材で発生する不整変形に加えて，ねじり変形が発生する．ねじり変形を抑制するために曲げ点付近の面外変形の拘束を試みた．さらに，圧縮側のしわ変形を抑制するために軸引張りを負荷することによって，ゆがみのない曲げ加工を可能にした^{4, 5)}．非対称型材の曲げ加工は，福祉関連施設はじめ流通部門の搬送設備装置の部品加工として需要が多い．この加工法の開発は産業界からの要望も多く，今後の発展が期待されている．

2. 実験方法

2.1 供試材

曲げ実験用の供試材は，アルミニウム押出型材 A6061S-O, T6 及び A6063S-O, T5 の 4 種類とした．その機械的性質を表 1 に示す．供試材の断面形状は，正方形の A 型 [□] 及び正方形の 1 辺を取除いた開断面の C 型 [□・] の 2 種類とした．供試材の形状・寸法を図 1 に示す．断面の高さ H_0 ，幅 W_0 はともに 40mm

としている．供試材の全長 L は曲げ半径によって異なり， $L=625\sim 1221$ mm，肉厚 t_0 は 1.0, 1.5, 2.0 及び 3.0mm の 4 種類としている．ここで図中の [・] は，各断面形状の曲げの中心方向を示し，例えば，C1 型 [□・] は片方のウエブを持たない形状を示している．

表 1 供試材の機械的性質

Material		TS (MPa)	YS (MPa)	EI (%)	n	C*
A6063S	T5	206-235	116-196	13-23	0.08-0.10	238-291
	O	91-99	31-33	29-37	0.20-0.21	160-167
A6061S	T6	304-333	247-303	10-20	0.09-0.13	346-433
	O	118-147	59-88	33-43	0.21-0.22	182-204

* $\sigma = C \varepsilon^n$ (Workpiece: JIS14A)

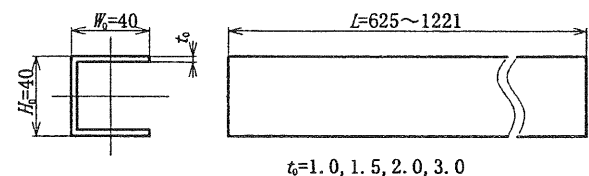


図 1 供試材の形状・寸法

2.2 回転引曲げ加工装置

回転引曲げ加工装置の概略を図 2 に示す．供試材を巻付けるドラム半径 R は 200, 150, 100, 75 及び 50mm と交換作業にて選択可能とする．巻付けドラムの後方には最適な曲げモーメント分布を設定可能な曲げ荷重負荷部，供試材の中心軸回りにねじりモーメントを負荷する

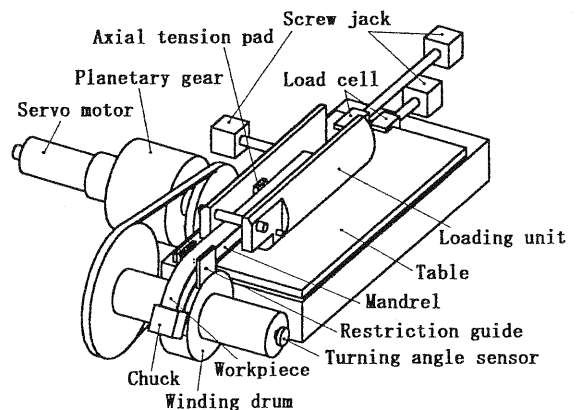


図 2 加工装置概略図

ためのねじり荷重負荷部及び曲げの圧縮側のしわ変形を抑制するための軸引張り負荷部がある。さらに必要に応じてワイパーダイスを使用することも可能な構造になっている。

3. 型材の曲げにおけるへん平変形の発生

断面の一部に空間をもつ型材に曲げ変形を与えると、加工素材の形状・寸法及び加工度に応じてへん平変形が発生する。角管を曲げた場合のへん平変形の典型例を図3に示す。へん平変形は、断面に中空部分がある場合、曲げ過程で引張りフランジ及び圧縮フランジが曲げ応力による半径方向分力を受けて断面の中立面へ向かって変位する変形である。このとき、引張り・圧縮フランジがウェブに接続している場合は、引張り・圧縮フランジから曲げモーメントが伝えられ、ウェブは断面の外側へ向かって曲げられるため膨らみ変形を発生することになる。総合すると、へん平変形は断面二次モーメントが減少する変形と言える。

へん平変形分力の大きさは図4のように表すことができる。角管の中立面の曲率半径を ρ とし、中立軸位置が断面の中央軸位置に一致するものと仮定すると、引張り・圧縮フランジ最外層の曲げひずみ ϵ_T, ϵ_C は、それぞれ、

$$\epsilon_T = (H_0/2)/\rho, \epsilon_C = -(H_0/2)/\rho \quad (1)$$

と表される。

引張りフランジを代表として、引張りフランジ最外層の曲げ応力 σ_T を求めると、弾性変形域では、縦弾性係数を E として、

$$\sigma_{TE} = E \epsilon_T = E (H_0/2)/\rho \quad (2)$$

塑性変形域では、応力-ひずみ構成式を $\sigma = C \epsilon^n$ とすると、塑性域の最大曲げ応力 σ_{TP} は次のようになる。

$$\sigma_{TP} = C \{ (H_0/2)/\rho \}^n \quad (3)$$

図4-1に示すように、曲率半径 ρ の角管を曲げ、曲率の中心から微小な挟み角 $d\theta$ を持つ二つの面

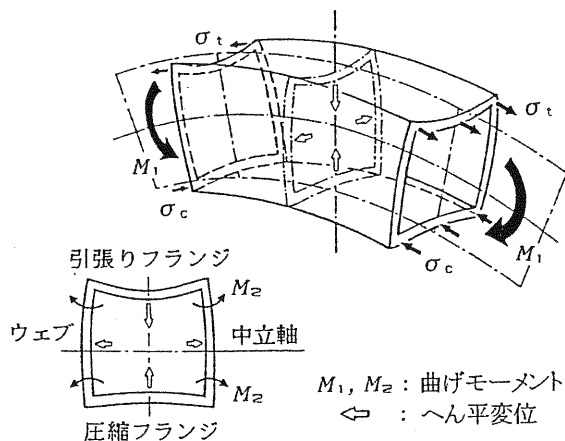
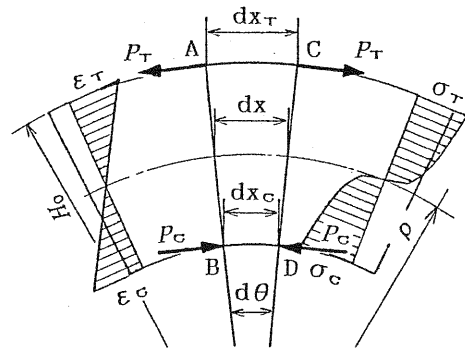
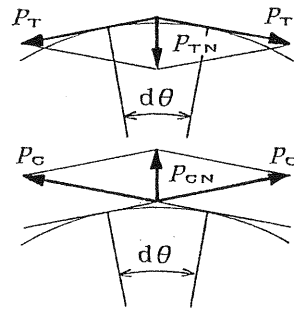


図3 正方形角管のへん平変形



(1) 曲げ変形と曲げ応力



(2) へん平変形分力

図4 へん平変形分力の発生機構

AB及びCDによって切り取るものとし、これら2面間の微小距離を、中立軸位置で dx 、引張りフランジ位置で dx_T 、圧縮フランジ位置で dx_C とする。このとき、引張りフランジの点A及びCに作用する円周方向力 P_T は角度 $d\theta$ を持つため、図4-2に示すように、中立軸方向の分力 P_{TN} を持つことになる。分力の大きさは、角度をラジアン表示とすると、 $\sin(d\theta/2) \approx d\theta/2$ となり、

$$P_{TN} = 2P_T \sin(d\theta/2) \approx P_T d\theta \quad (4)$$

となり、圧縮フランジ分力 P_{CN} も同様に、

$$P_{CN} \approx P_C d\theta \quad (5)$$

となる。

いま、変形が弾性域にあるものと仮定すると、引張りフランジの肉厚を t 、幅を W とすると、引張りフランジの微小長さ dx_T に作用するへん平変形分力 P_{TN} は、曲げ応力 σ_{TE} を用いて表現すると、次のように表される。

$$\begin{aligned} P_{TN} &= 2\sigma_{TE} t W \cdot \sin(d\theta/2) \\ &\approx \sigma_{TE} t W \cdot d\theta \\ &= t W E H_0 \cdot d\theta / (2\rho) \end{aligned} \quad (6)$$

引張りフランジの単位面積に作用するへん平変形分布荷重は $w_{TN} = P_{TN} / (dx_T \cdot W)$ となり、曲率半径 ρ が角管の高さ H_0 に対して十分に大きいものとする、 dx_T は次のように表される。

$$dx_T = (\rho + H_0/2) \cdot d\theta \approx \rho \cdot d\theta \quad (7)$$

へん平変形分布荷重 w_{TN} は次のようになる。

$$w_{TN} = E H_0 t / (2 \rho^2) \quad (8)$$

式(8)は曲げ変形が弾性域にある場合のへん平変形分布荷重を求めたものである。へん平変形分布荷重は肉厚 t に比例し、曲げ曲率半径 ρ の自乗に反比例することがわかる。同様の方法で塑性変形域の場合の分布荷重を求めることが可能である。

へん平変形分布荷重の作動状況を 図 5 に示す。心材を用いないため、へん平変形が大きく、また、軸引張りの負荷等によって、中立軸が断面の中央軸から圧縮側へ移動した場合の状況を示している。

へん平変形分布荷重比を 図 6 に示す。横軸には加工度 ρ / H_0 をとっている。加工度の増加に従ってへん平変形分布荷重が著しく大きくなっていることが解る。実際のへん平変位はフランジの曲げ剛性によって決定されるので、肉厚の薄いものほど顕著になることが推定される。

各種断面形状のへん平変形を 図 7 に示す。断面の形状によって、へん平変形の状態は大きく異なるようにみえるが、変形の原理はすべての断面に共通しており、* 図 4 に示したへん平変形分力によって断面の構成要素が中立軸に向う力を受けて変形することになる。非対称断面材の内、片側のウエブを持たない形式の場合は 図 7 に示すように引張り・圧縮フ

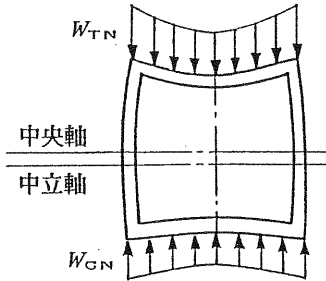


図 5 へん平変形分布荷重の作用 (塑性変形域)

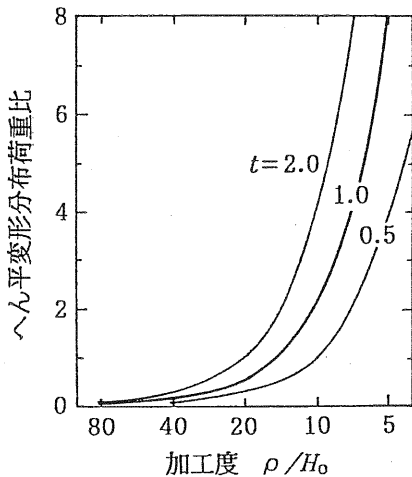


図 6 へん平変形分布荷重比と曲げ加工度

Cross section	Flattening

* Result of FEM, ** Result of experiment

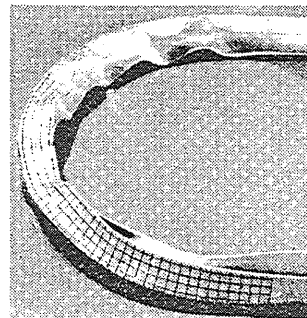
図 7 各種断面形状のへん平変形の例

ランジともほぼ直線を保ったまま開口部が閉じる変形を示すことが FEM 解析及び準均等曲げ実験によって確認されている。

4. 回転引曲げ加工の変形モード図

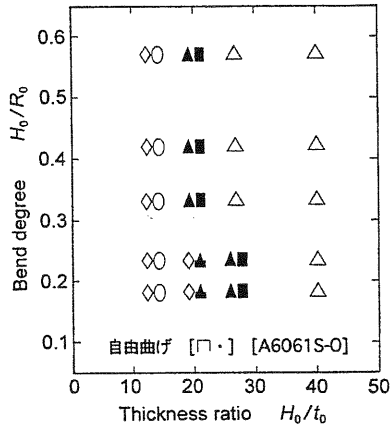
非対称断面形状の一つであるコの字型断面(C1)形状材を回転引曲げ加工すると、へん平変形のほかに、圧縮側のひずみが限界を超える場合はしわ変形が発生し、さらに非対称断面特有の不良現象としてねじれ変形が発生する。

一例として、A6061S-O、肉厚 $t_0=3.0$ を $R=200$ mm で心材及び軸引張り力負荷を適用することなく、自由曲げ加工を行なった結果を 図 8 に示す。図によれば、図 7 に示したとおり、へん平変形によって、引張り及び圧縮フランジが接近していることが分かる。また、加工の始めに圧縮側のフランジにはしわが発生し、さらに、加工の初期からねじれ変形が発生し、巻付け角が 60° ほど進行したところではほぼ 90° ねじれ、ウエブの解放面が圧縮側に移動している。その後は、断面形状が対称になるため、ねじれた状態で安定していることがわかる。A6061S-O

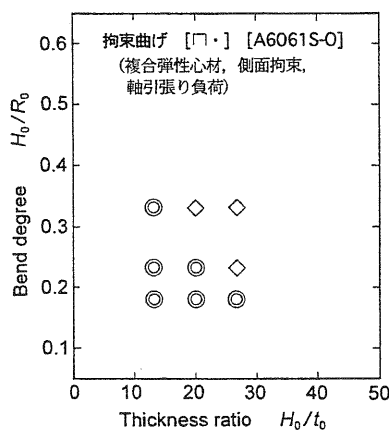


断面形状：□・
材質：A6061S-O
肉厚 t_0 ：3.0
曲げ半径 R ：200

図 8 非対称断面形状の自由曲げの例



(1) 自由曲げ



(2) 拘束曲げ

◎：成功，○：へん平変形，◇：ねじれ変形
 ■：フランジしわ，▲：ウェブしわ，△：屈服

図9 変形モード図

について、各肉厚の供試材を5種類の半径を持つ巻付けドラムによって自由曲げ加工した結果を変形モード図として図9に示す。図9-1によれば、自由曲げの場合、すべての加工条件で成功例はない。肉厚が厚い場合はねじれを伴うへん平変形が発生し、肉厚が薄くなるにつれてしわ変形が目立ち、さらに薄くなると屈服変形がほとんどとなる。したがって、コの字断面形材を自由曲げしたとき成功例は期待できないことがわかる。

非対称形材の曲げ加工では、へん平変形、しわ変形及びねじれ変形を抑制するためには、それぞれ個別の対策が必要である。ただし、へん平変形及びしわ変形を抑制した場合には屈服変形が発生することはない。

5 不整形変形の抑制法

5.1 複合弾性心材

形材の曲げ加工では、全ての加工条件で、へん平変形の発生を抑制することが必須となる。へん平変形の抑制にはへん平変形の成因を直接的に打ち消す

方法として、積層板で構成する弾性心材の適用が合理的である。心材に求められる特性は、①素材の変形に抵抗とならないような柔軟性を持つこと、すなわち、曲げ剛性が低いこと、②心材自体に潰れを生じることなく、③脱着に要する時間が少なく、しかも、④心材自体のコストが低いことが重要である。

ここでは図10に示すような複合弾性心材を使用した。この心材はプラスチック板を重ねた積層弾性部と剛体部から構成され、それらを2本のピンで結合した構造になっている。

積層弾性心材を曲げ加工部のみに作用させた部分作動型の場合の心材作動状況を図11に示す。図中には、曲げモーメント荷重のための主及び副曲げ負荷点位置を示している。副曲げ負荷点は曲げモーメントの分布調整の機能を持っている。コの字断面の特性として、引張り

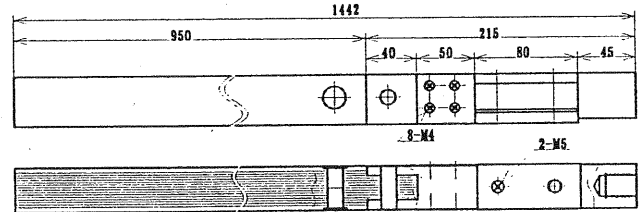


図10 複合心材の形状・寸法

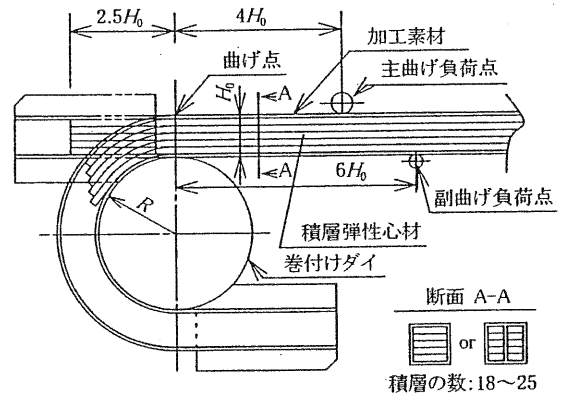


図11 部分作動型積層弾性心材の作動状況

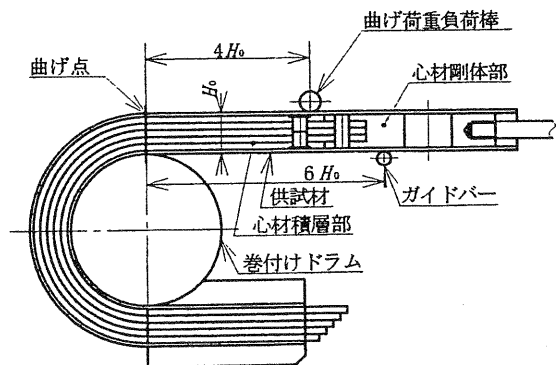
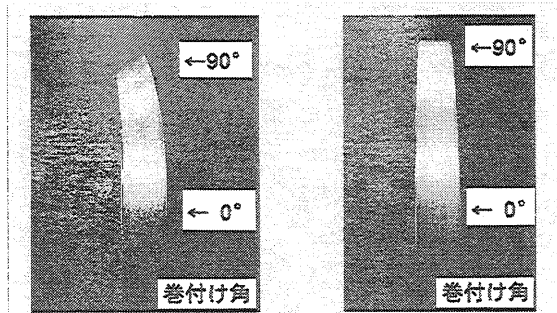


図12 全面作動型複合心材の作動状況

フランジの剛性が低いため、心材反力の影響が無視できない場合は、図 12 に示すような全面作動型の積層弾性心材が有効である。積層弾性心材の曲げ剛性は供試材の弾性曲げ剛性の $1/10000 \sim 1/7000$ に調整している。

図 11 に示すように、部分作動する積層弾性心材の曲げ点後方の長さを $2.5H_0$ とすると、圧縮側のしわを抑制するために軸引張りを負荷した場合、心材の先端で、引張りフランジの落込みが発生する。このような加工例を 図 13(a) に示す。開断面コの字型の場合は、ウェブの片側を持たないため引張りフランジの変形度が大きく、心材反力の影響を受けやすいことが解る。

したがって、コの字型断面の場合は、図 12 に示すような、曲げ加工部の全面にわたって積層部が作用する全面作動型の心材が有効である。全面型心材を用い、さらに軸引張り力を負荷した場合の加工結果を 図 13(b) に



(a)心材位置 $2.5H_0$ (b) 全面作動型心材
[A6061S-O, $t_0=2.0\text{mm}$, $R=200\text{mm}$]
図 13 複合弾性心材の効果

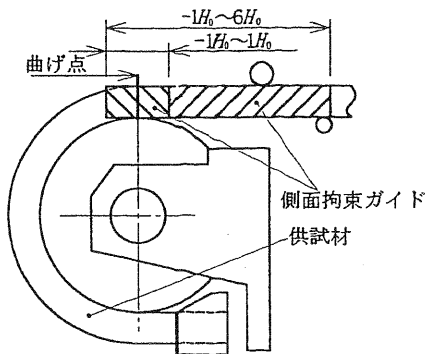


図 14 側面拘束ガイド

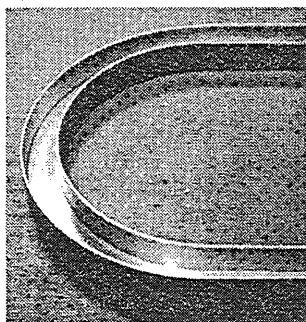


図 15 不整形抑制曲げ加工例

A6061S-O
 $t_0=3\text{mm}$
 $R=100\text{mm}$

複合弾性心材
側面拘束治具
軸引張り力負荷

示す。この条件で、心材反力を避けることができるものの、供試材の非対称性によって心材排出の力を受けることになる。したがって、積層弾性心材の排出を防ぐために、以下に述べるような治具が必要になる。

5.2 側面拘束ガイド

図 14 に側面拘束ガイドの取付け位置を示す。側面拘束ガイドは2つの効果をもっている。一つは、曲げ半径が小さい場合、心材が側方へ押出されることを防ぐ効果を持ち、他は、非対称断面材の曲げ加工において、曲げ負荷棒によって曲げ荷重を負荷するとき、断面のせん断中心から外れて負荷されることによって生じるねじれ変形を防ぐことである。拘束の位置は曲げ点後方 $1H_0$ から副曲げ負荷点($6H_0$)まで必要になる。これは、曲げモーメント負荷の際、集中荷重をウェブ位置に負荷することになるため、ねじれ変形を誘発し、曲げモーメントが増加する位置、すなわち、曲げ加工が進む範囲のすべてのねじれ変形を拘束する必要がある。結果としてねじれ変形は弾性域内で許容することになる。

5.3 軸引張り力負荷装置

薄肉形材の曲げ加工では圧縮側のしわ変形防止のためには軸引張り力負荷が効果的である。軸引張り力は、曲げ部分近傍で負荷する必要はなく、図 2 に示したとおり、供試材の適当な部分に軸引張り力を負荷することで、曲げ変形部の圧縮側のひずみを軽減し、しわを防ぐことができる。これらの拘束治具を用いた拘束曲げの結果を 図 9-2 に示す。多くの条件で成功例となっている。

6. まとめ

非対称断面形材の曲げ加工では、へん平変形を防ぐための心材、ねじれ拘束治具及びしわ抑制のための軸引張り力負荷によって、図 15 に示すような、ほぼゆがみのない加工が可能になる。

終わりに、本研究の一部は 天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成によってなされたものであることを記し、深く謝意を表します。また、本研究は軽金属学会押出形材成形法部会の共同研究の一部として行なわれたもので、曲げ加工用試料を御提供戴いた研究会構成各社に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 6061, 6063 アルミニウム合金押出形材の曲げ加工(研究部会報告書 No.32), 軽金属学会, 1996.
- 2) 6061, 6063 アルミニウム合金押出形材の曲げ加工における精度と限界(研究部会報告書 No.36), 軽金属学会, 1999.
- 3) 坂本: 都立科技大学紀要, No.15 (2001), 67-72.
- 4) 新井ほか: 平成 11 年度塑性加工春季講演会 (1999.5), 27-28.
- 5) 侯ほか: 平成 14 年度塑性加工春季講演会 (2002.5), 363-364.