

||||||||||||||||||||
 論 文
 |||

鋼管の液圧曲げ加工における曲げ部の品質特性に及ぼす加工条件の影響

西尾 克秀* 中馬 健一朗

Effects of Forming Conditions on Qualities of Bend in Hydraulic Bending of Tube

Katsuhide Nishio, Kenichiro Chuma

Synopsis:

The effects of forming conditions on the qualities of bend in hydraulic bending of thin-walled stainless steel tubes were examined. Especially, the effects of hydraulic pressure and V_p/V_r (velocity of pressure die - velocity of rotary die ratio) on thickness decreasing on the outside of bend, wrinkling on the inside of bend, and flattening were investigated. Experiments about hydraulic bending and conventional rotary draw bending with the mandrel were carried out. FEM analyses were also performed to calculate the stress and the strain.

The results obtained are as follows: The strain in thickness and longitudinal direction on the outside of bend were remarkably larger than those of inside of bend in hydraulic bending. It was confirmed that increase of hydraulic pressure suppressed flattening and wrinkling on the inside of bend, but promoted thickness decreasing on the outside of bend, and decrease of V_p/V_r , especially in case of $V_p/V_r < 1$, suppressed wrinkling on the inside of bend and promoted thickness decreasing on the outside of bend, and flattening. The reasons why mentioned above were discussed in relation to the analytical results, contact states of tube and dies, and so on. So the change of hydraulic pressure and V_p/V_r showed different effects on thickness decreasing, wrinkling, and flattening, that proper hydraulic pressure and V_p/V_r should be selected in accordance with the requirement for the qualities. Proper ranges of hydraulic pressure and V_p/V_r were obtained for SUS304 stainless steel tubes of 0.6mm and 1.0mm thickness. That would be useful index for successful bending of other different types of tubes. In addition, the strain on the outside of bend in hydraulic bending were half of that in case of rotary draw bending with the mandrel. The reason of this difference was considered due to concentration of tensile stress at the contact point of tube's inner plane and mandrel's edge in the later bending.

1. 緒言

液圧を利用した管材の加工方法は、チューブハイドロフォーミング（以下、THFと称す）と呼ばれ、自動車部品などへの加工技術の一つとして普及してきた¹⁾。THFは、液圧を負荷すると同時に軸圧縮を加えることで所定部分に張り出し形状を設ける加工方法であり、研究報告例は多く実用化も進んでいる^{2)~9)}。一方、管材の代表的な二次加工である曲げにおいては、液圧が適用されている事例は少ない^{10,11)}。

管材の曲げには、回転引曲げ加工が自動車や建材等、幅広い分野で適用されている。回転引曲げ加工設備は

Fig. 1 に示す構造を有しており、マンドレル（芯金）による偏平化抑制、ワイパーダイによるしわ抑制、プレッ

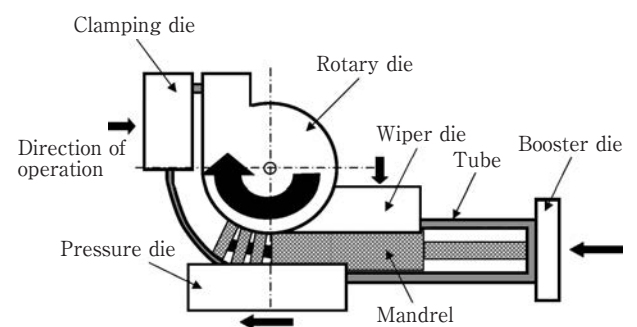


Fig. 1 Schematic of rotary draw bending.

*加工技術研究部 加工第二研究チーム チームリーダー

**加工技術研究部 加工第二研究チーム (現ANS Steel Tubes Ltd)

シャーダイまたはブースターダイによる軸力制御で減肉抑制などができる高精度な曲げ加工方法として一般に知られている¹²⁾。曲げ部の品質特性は多くの場合、板厚変化や偏平が小さいこと、顕著なしわが無いことが要求されるが、例えば部品軽量化といったニーズから素管の薄肉化が進むと、曲げ部に対する品質の確保が困難となる。このような理由から、曲げ部の品質特性に関する報告は、マンドレルを用いた回転引曲げ加工（以下、芯金曲げと称す）で、板厚1.5mmを超える厚肉の素管を対象としたものが多い^{13)~16)}。これに対し、液圧を利用した曲げ加工（以下、液圧曲げと称す）に関しては、加工時の変形挙動や品質特性に及ぼす加工条件の影響を調査した報告例は見当たらない。

そこで本研究では板厚1.0mm以下の薄肉の素管を対象に、実験およびFEM解析により、液圧曲げにおける材料の変形挙動を把握し、曲げ部の品質特性（板厚減少、しわ、偏平化）に及ぼす加工条件の影響を検討した。

2. 実験方法およびFEM解析方法

2.1 実験方法

液圧曲げの実験設備をFig. 2に示す。ロータリーダイとクランピングダイで挟まれる先端側の封止栓に水道水の供給口を設け、後端側の封止栓はエア抜き口を設ける

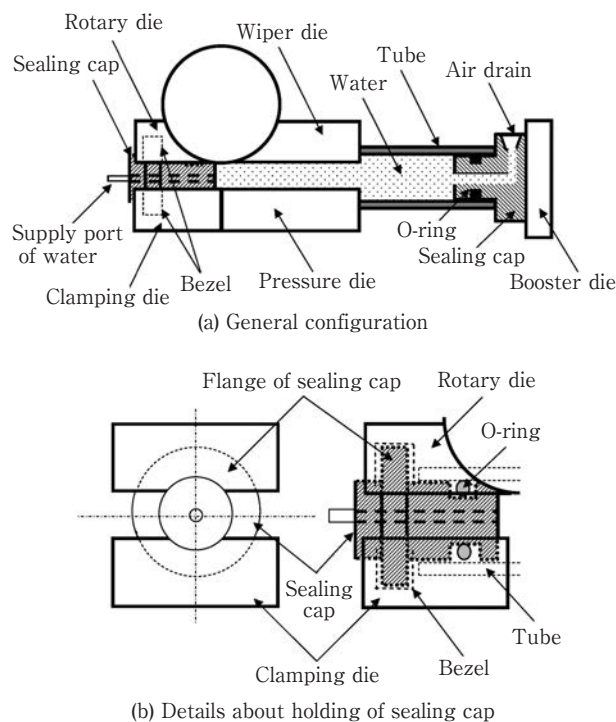


Fig. 2 Schematic of hydraulic bending.

ことで素管内に水道水による液圧を負荷できる構造とした。素管と封止栓との固定のため、後端側はブースターダイを加工の進行方向に同調するよう軸力を負荷させた。先端側の固定はFig. 2 (b) のように、ロータリーダイおよびクランピングダイに設けた溝で封止栓のフランジを挟んで固定する構造とした¹⁷⁾。液圧制御装置には、封止栓の破損や素管破断時に自動停止でき、また曲げ加工時の素管容積の増加に対し圧力を一定に保つことが可能となるようプランジャー方式のポンプを使用した。

Table 1 に、実験に用いたSUS304ステンレス溶接鋼管の機械的性質を示す。素管寸法は、外径 ϕ 38.1mmとし、板厚は0.6mm, 1.0mmとした。

Table 1 Mechanical properties of tube

Thickness (mm)	0.6	1.0
Yield strength (MPa)	360	349
Tensile strength (MPa)	682	667
Elongation (%)	62	64

液圧曲げの主な加工条件をTable 2に示す。曲げ中心半径は1.6D (D: 素管外径) で固定とし、曲げ部の品質特性に影響を及ぼす液圧ならびに速度比（軸力）を変化させた。速度比はプレッシャーダイの作動速度 V_p と、ロータリーダイの作動速度 V_r の比とし V_p/V_r で定義し

Table 2 Bending conditions

Bending radius (mm)	1.6D (D: Diameter of tube)
Bending angle (deg.)	Max90
V_p/V_r	0.1~1.4
Hydraulic pressure (MPa)	2~25
Type of liquid	Tap water (Room temperature)

た。ロータリーダイは定速回転のため、 V_p/V_r は実質的にはプレッシャーダイの作動速度に依存する。また比較として3ボールタイプのマンドレルを使用した芯金曲げも行い、液圧曲げとの加工性を比較した。芯金曲げでは、素管とマンドレルとのクリアランスは0.5mmとし、薄肉材に生じやすい曲げ部内側のしわや未加工部の座屈を回避するため、ブースターダイによる軸力は無負荷とした。なお、液圧曲げおよび芯金曲げにおいては、素管の溶接部が曲げの中立軸上となるよう配置した。

曲げ部の品質特性は、破断や素管板厚を超える高さのしわが無いものについて(1)式と(2)式に示す板厚変

化率と偏平率で評価した。

$$\text{板厚変化率 } \Delta t(\%) = (t_1 - t_0) / t_0 \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{偏平率 } \delta(\%) = (D_{\max} - D_{\min}) / D_0 \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 t_1 は曲げ加工後の板厚、 t_0 は素管の実測板厚であり、 D_{\max} 、 D_{\min} は曲げ加工後の最大および最小外径、 D_0 は素管の実測外径である。

2.2 FEM解析方法

液圧曲げにおける材料の変形挙動を考察するため、FEM解析を行った。

Fig. 3 に液圧曲げおよび芯金曲げのFEM解析モデルを示す。(b) に示すように液圧曲げでは全ての要素面に対し一定圧力が素管内面から外面へ向かうようにモデル化した。また、(c) に示すように芯金曲げでは実験と同様に3ボールタイプのマンドレルをモデル化した。

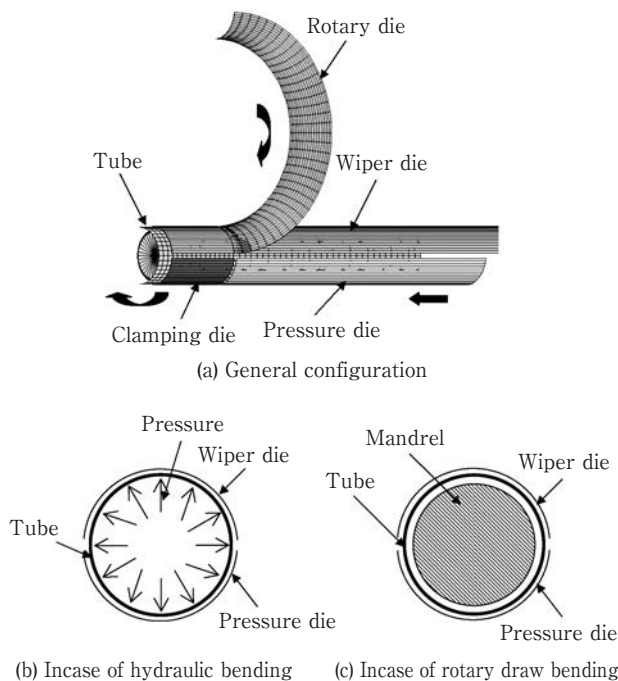


Fig. 3 Model of FEM.

解析ソルバーには汎用の3次元有限要素法ソフトウェアであるMSC.MARCを用いた。要素タイプはシェル要素とし、形状の対称性を利用して円周方向1/2の3次元モデルを作成した。金型はすべて剛体で定義し、ロータリーダイの中心を回転軸としてクランプダイとマンドレルに回転、プレッシャーダイに直進、ワイパーダイに変位固定の条件を与えた。なお液圧曲げでプースターダイを使用する目的は、封止栓を保持することにあるた

め、解析ではプースターダイを省略した。なお金型と材料間の摩擦はクーロン摩擦係数を0.2で設定した。

3. 実験結果および考察

3.1 液圧曲げ部の変形状態

液圧曲げ部の変形状態を把握するため、まず液圧曲げ実験により板厚変化率および偏平率を調査した。その結果とFEM解析結果を比較し解析精度を確認した上で、曲げ部のひずみ分布から材料の変形挙動を確認した。

Fig. 4 および Fig. 5 にそれぞれ素管板厚1.0mm、

	Outside	Inside
Experiment	■	▲
FEM	□	△

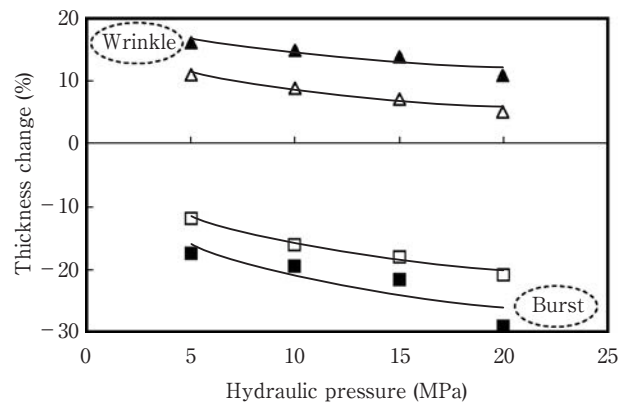


Fig. 4 Effect of hydraulic pressure on thickness change. ($t_0=1.0\text{mm}$, $V_p/V_r=0.6$, Bending angle=90deg.)

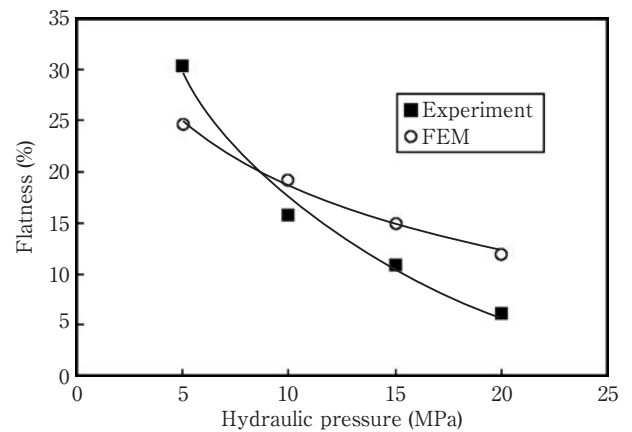


Fig. 5 Effect of hydraulic pressure on flatness. ($t_0=1.0\text{mm}$, $V_p/V_r=0.6$, Bending angle=90deg.)

$V_p/V_r=0.6$ の場合の板厚変化率に及ぼす液圧の影響、偏平率に及ぼす液圧の影響を示す。図中の板厚変化率と偏平率は長手方向の最大値をプロットしており、板厚変化率については曲げ部外側および内側の値をプロットした。

Fig. 4 に示すように、実験では液圧の増加とともに板厚は減少し、20MPaを超える液圧を負荷すると曲げ部外側が破断した。また曲げ部内側では、液圧の減少に伴い板厚が増加し、液圧が約5 MPaより低い場合には曲げ部内側にしわが発生した。

FEM解析結果は、曲げ部の内外面ともに板厚変化量が実験値よりも小さい傾向を示すが、板厚変化に対する液圧の影響度は実験結果とおおよそ一致する傾向を示した。

偏平率は、Fig. 5 に示すように、実験値とFEM解析値のいずれにおいても、液圧の増加とともに小さくなる（断面形状が真円に近づく）傾向を示しており、板厚変化率と同様に両者の傾向はほぼ一致した。

以上の結果から、液圧曲げ部の材料の変形挙動をFEM解析により予測することは可能と考えられる。以降では、液圧曲げ過程における材料の変形挙動をより詳細に把握するため、本解析結果からひずみ分布の状態を確認した。

Fig. 6 にFEM解析による液圧曲げにおいて、各種液圧を負荷した際の曲げ部内側と外側のひずみの推移を示す。比較としてプロットした芯金曲げは、偏平率が液圧20MPaと同等程度となるようにマンドレルの直径を調整したFEM解析結果である。なお円周方向ひずみ、長手方向ひずみ、板厚方向ひずみは前者より、 ε_θ 、 ε_l 、 ε_t と表記し、 ε_θ 、 ε_l はそれぞれ円周方向、長手方向の要素辺の長さ変化から真ひずみに換算した値であり、 ε_t は ε_θ と ε_l をもとに、体積一定条件から算出した値である。

解析の結果、 ε_t は曲げ部内側でプラス（増肉）、曲げ部外側でマイナス（減肉）となる。液圧の増加とともに、曲げ部内側の増肉は緩和し、曲げ部外側の減肉は顕著になる。

ε_θ は曲げ部内側でプラス（縮み）、曲げ部外側でマイナス（伸び）となるが、その値は、 ε_l や ε_t に比べると小さい。 ε_θ に及ぼす液圧の影響は曲げ部内側では明確ではないが、曲げ部外側では液圧の増加とともに ε_θ がプラス側へ移行する傾向が見られる。

ε_l は曲げ部内側でマイナス（縮み）、曲げ部外側でプラス（伸び）となり、特に曲げ部外側の引張りひずみが顕著となる。

液圧曲げと芯金曲げを比較すると、液圧曲げ部外側の

	Inside	Outside
Hydraulic pressure (MPa)	5	■ □
	10	▲ △
	20	● ○
Use mandrel	*	+

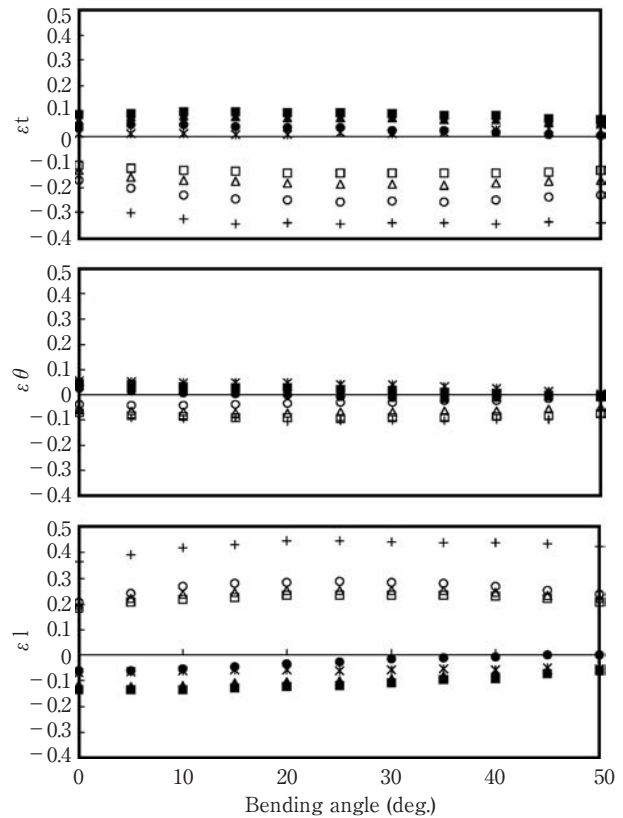


Fig. 6 Effect of hydraulic pressure on strain distributions on the inside and outside of bend. ($t_0=1.0\text{mm}$, $V_p/V_r=0.6$) <FEM>

ε_t 、 ε_l は芯金曲げの1/2程度と小さいことが特徴であるが、この理由については次項で考察する。

ここで、液圧曲げ部表面の変形形態に及ぼす液圧の影響を把握するため、曲げ部内外面のシェル要素について、加工前後の要素辺の長さ変化の比を円周方向および長手方向で求めた。曲げ角度が30度の場合の材料表面の面内変形の一例をFig. 7に示す。

曲げ部外側は長手方向に伸び、円周方向に縮む変形となり、曲げ部内側は長手方向に縮む変形を呈していることが明らかである。液圧の増加に伴い、要素辺は円周方向および長手方向に長くなり、曲げ部内外面のシェル要素が拡大する変形形態を示す。したがって、曲げ部では液圧の増加とともに引張りひずみは助長、圧縮ひずみは緩和する変形形態となる。また変形の程度は二軸で囲まれる面積から判断されるように、曲げ

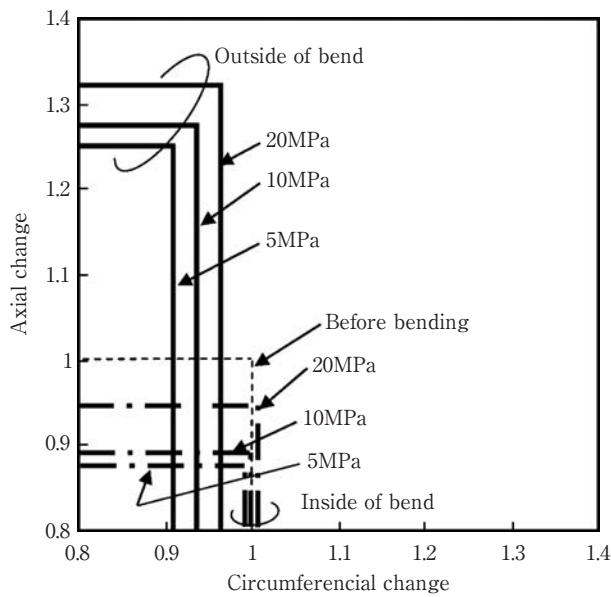


Fig. 7 Effect of hydraulic pressure on the length of finite element edge.
($t_0=1.0\text{mm}$, $V_p/V_r=0.6$, Bending angle=30deg.) <FEM>

部内側よりも外側の方が顕著である。この理由は次のように推察される。

Fig. 8 に、FEM解析における液圧曲げ初期および曲げ角度70度における金型と素管との接触状態を示す。曲げ内側は終始、素管がロータリーダイと接触しているのに対し、曲げ外側は初期の状態を除いてはプレッシャーダイとの接触がなくなり、材料拘束が無い状態が存在する。このことから、Fig. 7で曲げ部外側に比べ内側の面内変形が小さくなるのは、ロータリーダイにより曲げ部内側が拘束されることで面内変形が抑制されたためと推察される。

3.2 品質特性に及ぼす液圧の影響

液圧曲げ部の品質特性に及ぼす液圧の影響をFEM解析で検討した。

Fig. 9 に素管板厚1.0mm, $V_p/V_r=0.6$, 液圧20MPaの条件における液圧曲げと芯金曲げの曲げ角度に対する板厚分布と相当応力分布を示す。

液圧曲げでは曲げ初期に約5%の板厚減少が生じ、曲げ角度の拡大とともに緩やかに板厚減少する。液圧曲げの相当応力は、曲げの開始から曲げ角度の拡大とともに増加し、20度付近でピークを示した後、曲げ角度の拡大とともに減少する。なお、液圧曲げは芯金曲げに比べて相当応力に及ぼす曲げ角度の影響は小さい。

一方、芯金曲げでは曲げ角度が20度付近で17%程度の

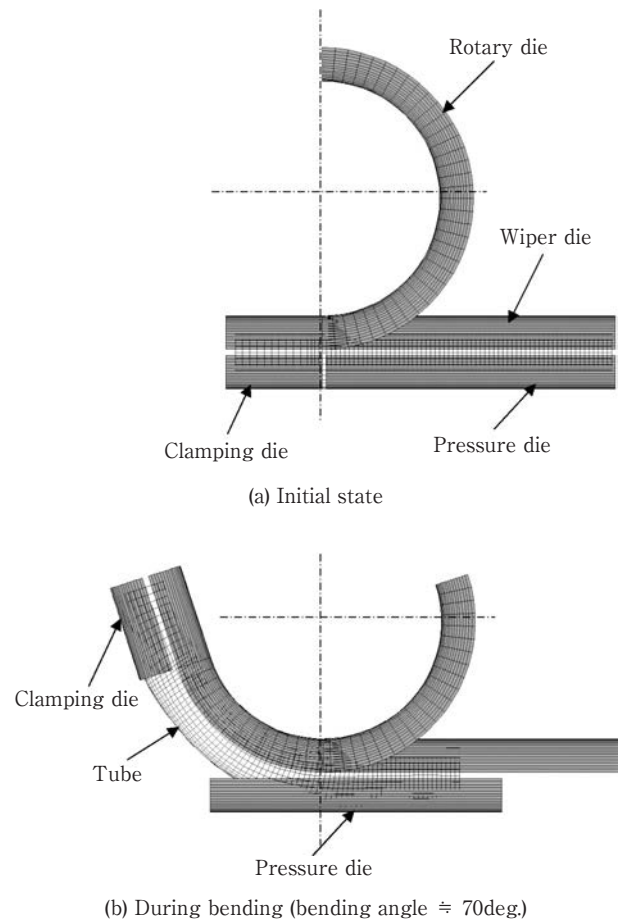


Fig. 8 Relationship of contact between tools and tube.

板厚減少を生じ、その後は曲げ角度の拡大とともに緩やかに板厚減少する。これに対応するように、芯金曲げにおける相当応力は曲げ角度20度までが大きく、それ以降は横ばいとなる。曲げ角度が5~25度において、相当応力が変動するのは、マンドレルとの接触・非接触が繰り返されることによると考えられる。液圧曲げに比べ芯金曲げの板厚減少が大きくなるのは、Fig. 9に示すようにマンドレルのボール肩部と管内壁が接触することで、曲げ部外側に局所的な応力集中が発生し、引張応力が助長されたことによると推察される。

Fig.10に液圧曲げにおいて、素管板厚1.0mm, $V_p/V_r=0.6$ の条件で、中立軸から材料の曲げ部内外表面までの直線距離 L_i , L_o を比較した結果を示す。

L_i は加工前よりごくわずかに小さくなるが、液圧によらずほぼ一定である。一方、 L_o は加工前より著しく小さくなり、液圧の増加とともに大きくなる。そのため、扁平化は曲げ部外側の変形が支配的であることが分かる。

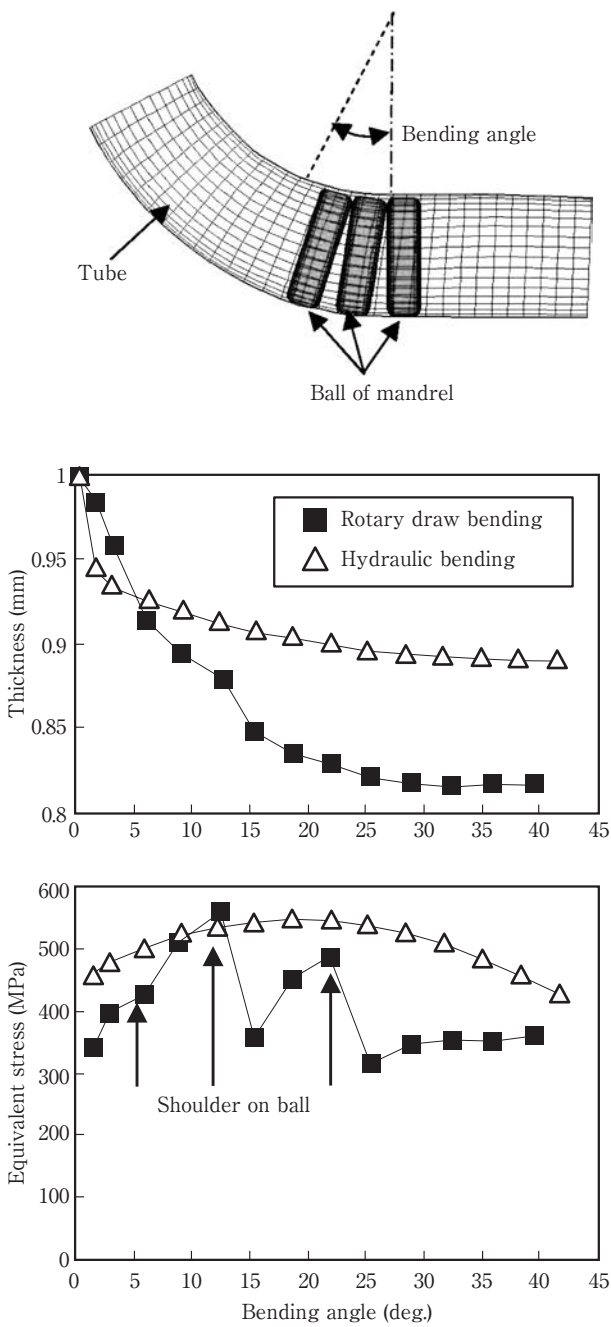


Fig. 9 Thickness and equivalent stress distributions at the bending angle. ($t_0=1.0\text{mm}$, $V_p/V_r=0.6$, Hydraulic pressure=20MPa) <FEM>

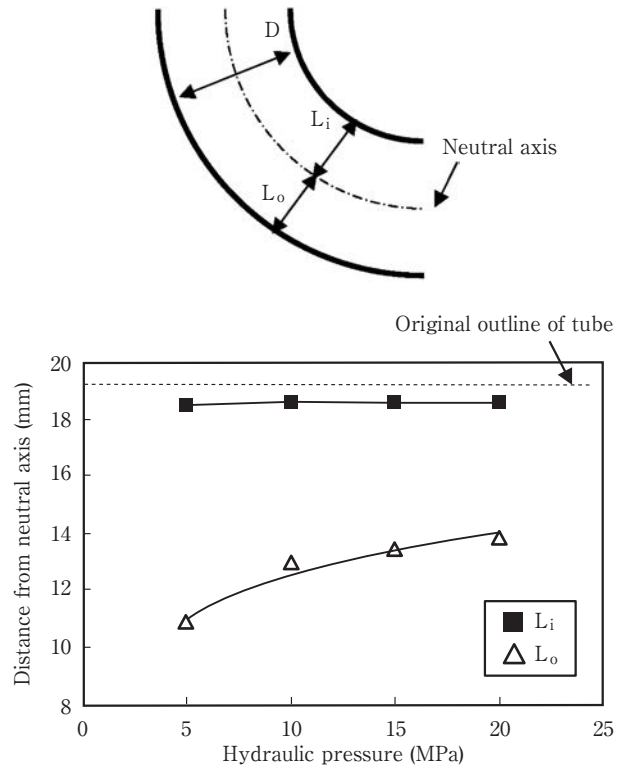


Fig.10 Change of distance from neutral axis to material surface with hydraulic pressure. ($t_0=1.0\text{mm}$, $V_p/V_r=0.6$, Bending angle=90deg) <FEM>

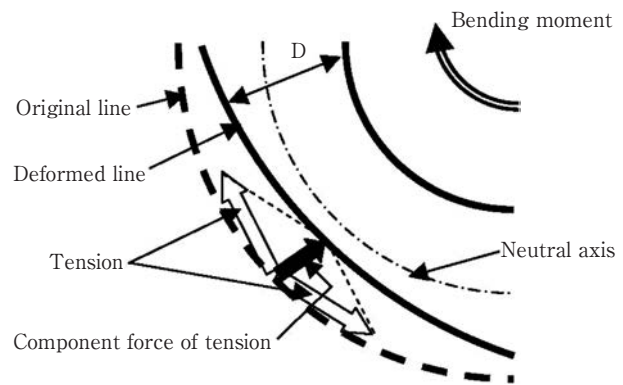


Fig.11 Mechanism of flattening deformation.

Fig.11に偏平化のメカニズムを示す。偏平化は一般的に素管に加わる曲げモーメントによる影響を受けるとされている¹⁸⁾。曲げ部の外側では長手方向の引張応力に伴って素管の断面中心に向かう分力が作用し、これにより外側の材料は曲げの中立軸に近づく変形を生じる。芯金曲げではマンダレルによる拘束力(引張分力への

抵抗力)が偏平化を抑制しているが、液圧曲げでは引張分力への抵抗力として液圧を用いることから、偏平化を抑制するためには液圧を高くする必要がある。また前項より極度な液圧の低下はしわを発生させる可能性があるため、しわの抑制に対しても液圧を高くすることが有効である。反面、先述したように液圧の増加は曲げ部外側の板厚減少を大きくし、破断の可能性を高め

ることとなる。したがって、要求される品質によって液圧の適正化が必要となる。

3.3 品質特性に及ぼす速度比の影響

液圧曲げ部の品質特性に及ぼす V_p/V_r の影響を実験およびFEM解析により検討した。

Fig.12に、液圧が15MPaでの液圧曲げと芯金曲げにおける曲げ部外側の最大板厚変化率および偏平率に及ぼす V_p/V_r の影響を示す。

芯金曲げの実験では、 $V_p/V_r=0.2$ で曲げ部外側で破断し、 $V_p/V_r=0.8$ で曲げ部内側にしわが発生した。液圧曲

	Experiment	FEM
Hydraulic bending	■	□
Rotary draw bending	▲	△

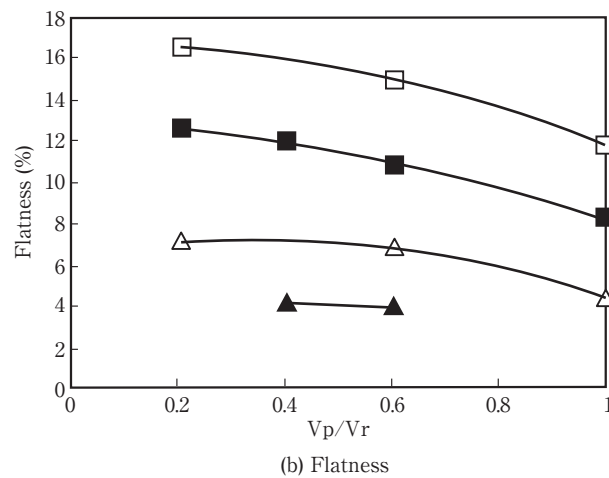
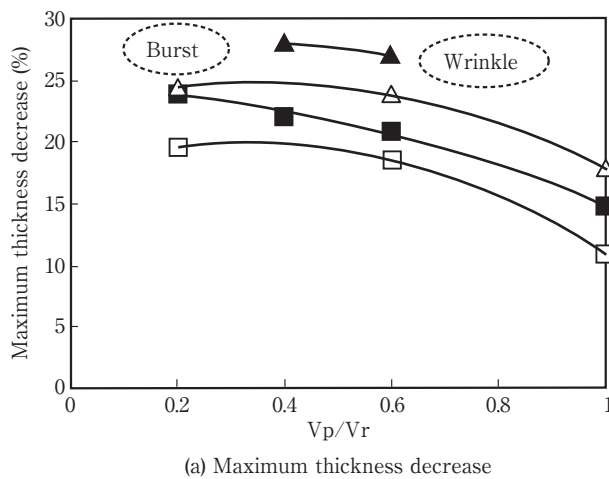


Fig.12 Effect of the ratio of velocity on maximum thickness decrease and on flatness.
($t_0=1.0\text{mm}$, Hydraulic pressure=15Mpa, Bending angle=90deg)

げと芯金曲げのいずれの実験においても V_p/V_r の増大により最大板厚減少率および偏平率はともに小さくなる傾向である。また、実験結果とFEM解析結果は類似した傾向を示した。

Fig.13に、FEM解析において液圧を15MPaとした場合の曲げ部長手方向の主応力分布に及ぼす V_p/V_r の影響を示す。3.1項で述べたひずみ分布からも判断されるように、曲げ部外側の長手方向では引張、曲げ部内側の長手方向は圧縮の応力分布となる。主応力と V_p/V_r の関係は、曲げ部外側の方が曲げ部内側よりも明確な序列を示しており、 V_p/V_r が小さいほど曲げ部外側の引張応力が大きくなり、破断の可能性が高まることを示唆している。一方、 V_p/V_r が1.0のように過度に大きいと曲げ部内側の圧縮応力が過度に大きくなり、しわが発生しやすくなる。

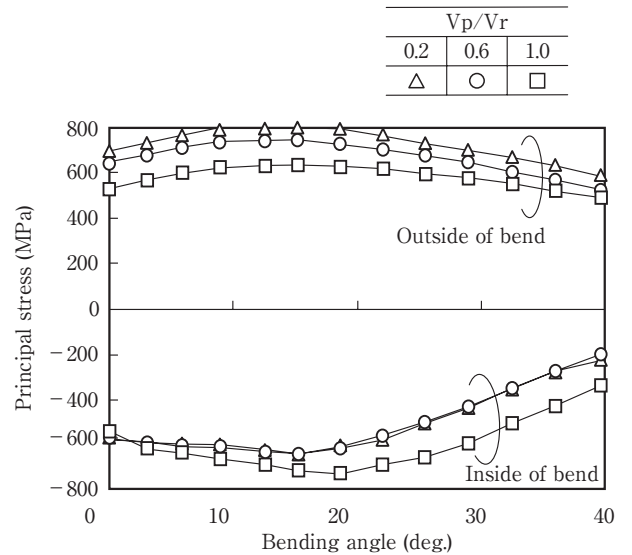


Fig.13 Effect of the ratio of velocity on principal stress distributions at the bending angle.
($t_0=1.0\text{mm}$, Hydraulic pressure=15MPa) <FEM>

このような曲げ部の品質特性に及ぼす V_p/V_r の影響を、プレッシャーダイの動作に対する材料の変形状態から考察した。Fig.14に、FEM解析において曲げ角度が90度に到達するまでの曲げ部外側の素管長手方向の未加工部とプレッシャーダイの直線変位量をそれぞれ dm 、 dp としたときの、 dm/dp に及ぼす V_p/V_r の影響を示す。なお、 dp は V_p に応じた定数のため dm/dp は実質的には dm に依存する。

V_p/V_r が1.0の場合、ロータリーダイとプレッシャーダイが同速で運動し、素管もこれに同調する状態となる

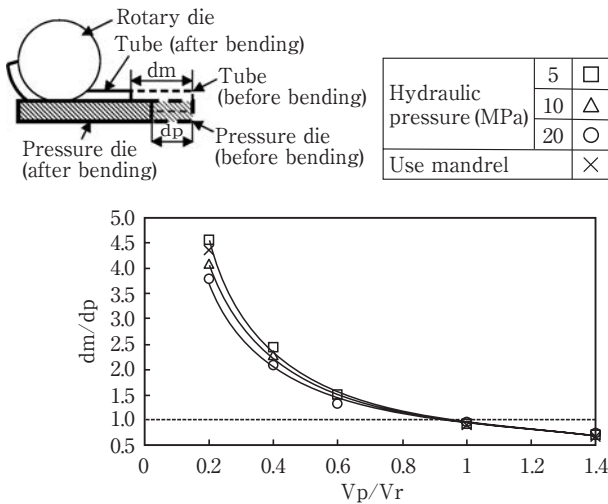


Fig.14 Effect of the ratio of velocity on dm/dp in hydraulic bending and rotary draw bending using mandrel. ($t_0=1.0\text{mm}$, Bending angle=90deg.) <FEM>

ため dm/dp はほぼ 1.0 である。 V_p/V_r が 1.0 を境に、 V_p/V_r がこれより大きい場合は素管に対してプレッシャーダイが先行移動するため $dm/dp < 1.0$ の関係となり、両者の摩擦によって素管を強制的にプレッシャーダイの進行方向に圧縮する力が働き、曲げ部に材料が塑性流動する作用を伴う。一方、 V_p/V_r が 1.0 未満ではプレッシャーダイに対して素管が先行するため $dm/dp > 1.0$ の関係が成立し、素管には曲げの進行方向とは逆向きに引張る力が作用する。このような作用により、例えば $V_p/V_r > 1.0$ の場合には、曲げ部に加わる圧縮力により、曲げ部外側の板厚減少および偏平化は低減する効果が得られるが、曲げ部内側はしわが発生する可能性が高くなる。したがって、要求される品質によって V_p/V_r の適正化が必要となる。

なお、 dm/dp に及ぼす V_p/V_r の影響は、液圧曲げと芯金曲げで同様の傾向を示す。また液圧曲げでは、 V_p/V_r が小さくなるほど dm/dp に及ぼす液圧の影響が顕著に現れ、液圧が高いほど dm/dp は小さくなる。この理由は次のように考えられる。 V_p/V_r が小さいほど偏平化が顕著となるが、その影響が素管未加工部に及ぶことで、素管とプレッシャーダイとの摩擦力が低下しプレッシャーダイが素管を引張る力も低下すると予測される。この状態から液圧を高くしていくと、偏平化は小さくなって摩擦力は増大する。つまり V_p/V_r が小さい場合は、引張り力の低下分を液圧の増大によって補足することとなるため、液圧が高いほどプレッシャーダイによる引張り力が増大して dm が小さくなる（ dp は V_p に応じた定数）と推察される。

3.4 液圧および速度比の選定指標

前項で述べたように、液圧曲げでは液圧および V_p/V_r の組合せが、加工の可否ならびに板厚減少や偏平化などの曲げ部の品質特性に大きく影響を及ぼす。

Fig.15 に、液圧曲げ実験において V_p/V_r および液圧を各々変化させた場合の素管板厚 1.0mm 材および 0.6mm 材の加工可能範囲を示す。破断、しわ、および偏平率:30% 以上の偏平のいずれも発生しなかった状態を加工可能と

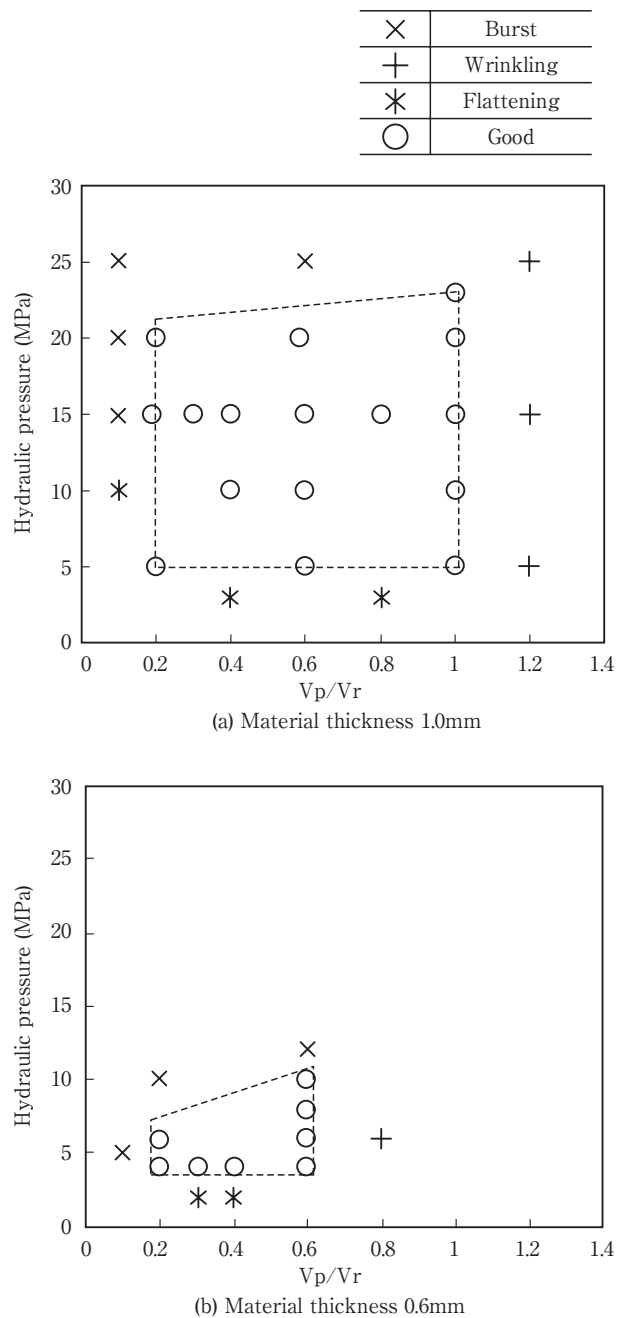


Fig.15 Effect of the ratio of velocity and hydraulic pressure on formability. (Bending angle=90deg.) <Experiment>

判定し、加工可能範囲として破線で示した。

V_p/V_r が小さく液圧が高い条件では、曲げ部外側の長手方向の引張が顕著となるため、破断の有無が加工限界の指標となる。 V_p/V_r が大きい条件では、長手方向の応力が圧縮側へと推移するため、曲げ部内側の圧縮過大によるしわの有無が加工限界の指標となる。 V_p/V_r が小さく液圧が低い条件では、引張分力による曲げ部外側の中立軸方向への変形が顕著となり、偏平過大による真円度不良を誘発する。素管板厚0.6mm材の加工可能範囲は1.0mm材の1/4以下と狭くなる。これは薄肉化により破断およびしわ発生の感受性が高くなるためである。

以上のように加工可能/不可能の境界が決まる理由は、これまでに述べた結果や考察で説明づけられ、破断やしわが無く偏平化が少ない曲げ部を得るための液圧と速度比の選定指標が得られた。

4. 結 言

本研究では管材の代表的な2次加工である曲げに着目し、1.0mm以下の薄肉の素管を対象として回転曲げにおける液圧の適用を検討した。実験およびFEM解析により液圧曲げの変形状態を把握するとともに、曲げ部の品質特性に及ぼす加工条件の影響を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 液圧曲げでは、金型による材料拘束の影響から曲げ部内側よりも曲げ部外側の板厚方向および長手方向のひずみが顕著である。また、液圧曲げの曲げ部外側のこれらひずみは、芯金曲げの場合の約1/2である。これは、液圧曲げ部外側では芯金曲げで生じるマンドレルのボール肩部と管内壁の接触による局所的な応力集中が無いと推察される。
- (2) 液圧の増加とともに、曲げ部内外面は円周方向および長手方向に伸張する作用を伴い、曲げ部外側面の引張りひずみは助長、曲げ部内側面の圧縮ひずみは緩和する変形形態となる。このため液圧の増加は、偏平化や曲げ部内側のしわの抑制には有効に作用するが、曲げ部外側に対しては破断の可能性を高める。したがって、要求される品質特性によって液圧の適正化が必要となる。
- (3) 速度比 V_p/V_r が1.0を境として、 $V_p/V_r > 1$ の場合は素管を圧縮する力が働き、 $V_p/V_r < 1$ の場合は素管を引張る力が作用する。この作用により例えば $V_p/V_r < 1$ の場合には、曲げ部内側の圧縮応力が緩和されるためしわの抑制には有効となるが、偏平化や曲げ部外側の破断の可能性は増大する。したがって、液圧と同様に要求される品質により V_p/V_r の適正化が必要となる。

- (4) 板厚1.0mmおよび0.6mmのSUS304ステンレス溶接鋼管に対し、破断やしわが無く偏平化が少ない曲げ部を得るための液圧と速度比の選定指標を得た。

参考文献

- 1) 淵澤定克：塑性と加工, 41-478 (2000), 1075-1081.
- 2) 森茂樹, 真鍋健一, 西村尚：塑性と加工, 29-325 (1988), 131-138.
- 3) 佐藤浩一, 伊藤耿一：塑性と加工, 44-515 (2003), 45-49.
- 4) 水村正昭, 栗山幸久：塑性と加工, 45-525 (2004), 21-25.
- 5) 富澤淳, 泰山正則, 亀岡徳昌：第56回塑性加工連合講演会, (2005), 197.
- 6) 富澤淳, 亀岡徳昌：第56回塑性加工連合講演会, (2005), 199.
- 7) 桑原利彦, 吉田健吾：第56回塑性加工連合講演会, (2005), 183.
- 8) 吉田健吾, 桑原利彦：第56回塑性加工連合講演会, (2005), 185.
- 9) 浜孝之, 栗栖憲, 大久保武史, 藤本仁, 宅田裕彦：第56回塑性加工連合講演会, (2005), 187.
- 10) K.Tashiro, T.Yoshino : Yamaha Motor Technical Review, 33-3 (2002), 89-98.
- 11) 中馬健一郎, 西尾克秀, 黒部淳：平成23年度塑性加工春季講演会, (2011), 55.
- 12) チューブフォーミング, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (1998), 39.
- 13) 橋本裕二, 園部治, 鈴木孝司, 河端良和, 郡司牧男, 佐藤昭夫：第56回塑性加工連合講演会, (2006), 359.
- 14) 石垣勝士, 坂口尚良, 金田直人, 小嶋正康：第56回塑性加工連合講演会, (2007), 557.
- 15) 高橋和仁, 渡辺孝氏, 久保木孝, 村田眞, 小野数彦, 矢野巧造：第56回塑性加工連合講演会, (2007), 559.
- 16) 園部治, 橋本裕二, 鈴木孝司, 坂田敬, 川井謙一：塑性と加工, 51-589 (2010), 121-125.
- 17) 公開特許公報：特開2009-142846
- 18) 遠藤順一, 室田忠雄:塑性と加工, 27-300 (1986), 201-207.