

# 厚肉管のロール成形における縁部変形の数値解析

Numerical Analysis of Roll Forming of Pipes with Heavy Gauges

木 内 学\*・柳 本 潤\*・王 飛 舟\*

Manabu KIUCHI, Jun YANAGIMOTO and Feizhou WANG

## 1. は じ め に

ロール成形加工の応用が広範囲に進められているが、近年、シミュレーション技術の開発及び実用化も進展し、成果を挙げつつある。しかしながら、実技術の発展に比して、理論解析技術の応用は必ずしも十分ではなく、ロール成形品の代表的品種である電縫管の成形についても、 $t/D < 5\%$  の管の成形シミュレーションはある程度行われてきたが、 $t/D > 5\%$ 、特に、 $t/D > 10\%$  の厚肉管の成形についての理論解析はほとんど行われていない。このような状況から、本報告は、厚肉管の成形を対象とし、特に問題となる縁部の変形挙動について、有限要素法を用い、系統的に解析し、その特徴を明らかにした結果を示す。

## 2. 解析モデル及び解析条件

以下、管材のブレークダウン成形、特に、その初期のエッジベンディング成形を対象とし、剛塑性有限要素法を用い、変形解析を行った。縁部の変形はもちろん3次元変形であるが、ここでは近似的に図1のように境界条件を設定し、平面変形問題として解析を行った。図において、下(凹)ロールと中央ロールが固定されており、上(凸)ロールが下方への押し込まれてくるものと考えた。

解析条件をまとめて表1に示す(図1参照)。素板の厚さ、下ロールの面角度、上ロールの曲げ半径及び位置などの値を通常行われている成形条件にあわせてそれぞれ数段階選び、その組み合わせを変化させて、45の場合について解析を行った。

## 3. 解析結果及び検討

### 3.1 素板の変形の特徴

図2には、エッジベンディングの際の素板変形の一般的

\*東京大学生産技術研究所 第2部

表1 解析モデル

材料	SS41 $\bar{\sigma}=309.0+780.0\bar{\epsilon}$ (N/mm <sup>2</sup> )		
製品直径 D	100.00 (mm)		
素板長さ L= $\pi D$	314.16 (mm)		
板厚 t	12.0	18.0	25.0 (mm)
下ロール面角度 $\theta$	30.0	45.0	60.0 (°)
WR=d/L	1/7	1/8	1/9
RR=R1/(D/2)	0.8	1.0	1.2
R2	3.0*R1		
R3	R1+t		
計算用 メッシュ	t=12.0mm	要素数=323	節点数=399
	t=18.0mm	要素数=443	節点数=521
	t=25.0mm	要素数=563	節点数=643

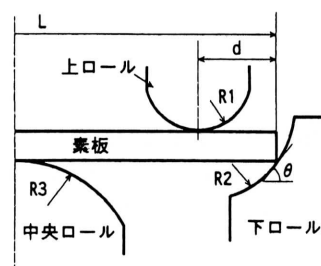


図1 解析モデルと境界条件

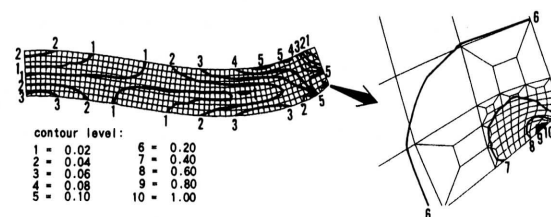


図2 素板内相当ひずみの分布

な特徴を示す。縁部及びその近傍を除いて、素板内部の相当ひずみは中立面から両表面側へ向かって少しずつ増えていく。すなわち、この部分が受ける変形は、主として、目的とする管断面を形成するための幅方向曲げ変形である。

当然のことながら、上ロールの直下で僅かではあるが減肉が発生する部分の素板内側、及び下ロールと強く接触しつぶれが生じる素板の縁部には大きな相当ひずみが発生する。

### 3.2 成形荷重

ロール成形に要する荷重を計算するための統一的な手法はまだ確立されておらず、個別の場合についての式が提案されているにすぎない。本研究においても、未だ一般的な荷重の予測式を提案するには至っていない。ここでは、素板の単位長さ当たりの成形荷重の計算値を示し、成形条件因子の影響について示す。図3から、成形荷重は板厚の増加に伴って急激に増加する一方、板厚以外の条件因子は、下ロール面角度 $\theta$ を除いて、荷重に大きな影響を与えないことがわかる。

### 3.3 素板縁部の変形挙動

素板縁部の変形挙動は、縁角部に集中的に発生し、溶接部の性状に大きな影響を与える。そのため、厚肉管の成形の際には、縁角部のつぶれの発生挙動を明らかにする必要がある。

素板縁角部のつぶれの原因としては、成形力が素板縁部と下ロールとの間の小さな接触面に集中的に加わったためと言える。図2に示すように、素板に加わるひずみのうち、最大相当ひずみは下ロールと接触した縁角部に発生する。その最大相当ひずみあるいは最大つぶれ量に大きく影響を与える因子は、板厚及び下ロール面角度である。図4には、上ロールの各半径及び位置について、発生する最大相当ひずみと板厚との関係を示す。荷重についての検討の通り、板厚が増えると、所要の成形力が大きくなるが、これに応じて、素板縁角部が下ロールから受ける面圧が大きくなり、そのつぶれ量も大きくなる。

縁部の最大相当ひずみが下ロール面角度の増加に伴って大きくなる関係を図5に示す。ところで、図6に示すように、下ロール面角度 $\theta$ によって、縁角部の変形パターンは大きく異なる。 $\theta=30^\circ$ で、素板外表面のみ接触するが、 $\theta=60^\circ$ では、まず素板の縁角部が下ロールと接触し、次に外表面と下ロールとの接触が発生する。この結果、縁角部の変形が非常に大きくなる。 $\theta=45^\circ$ の場合は、縁部の変形挙動は上述の2種類の場合の特徴を併せ持っている。更に、 $\theta$ が大きい場合は素板縁部が下ロール面に沿って滑りやすい傾向が現れる。また、摩擦定数が大きいほど、縁部の変形は大きくなる。図4及び図5より、上ロールの半径及び幅方向位置は縁部の変形に大きな影響をあたえないことがわかる。

実際の加工に際して、素板端面の下角部に発生するダレ

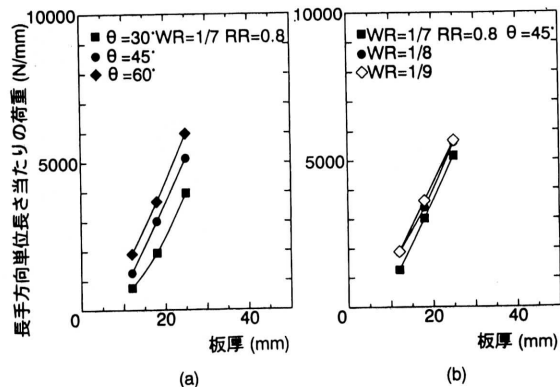


図3 荷重と板厚の関係

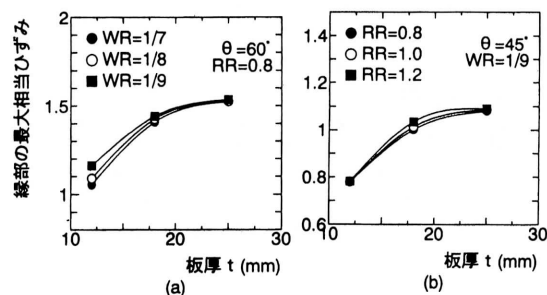


図4 素板縁部の最大相当ひずみと板厚の関係

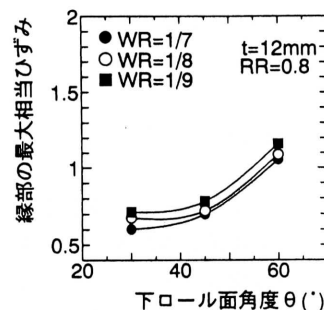


図5 素板縁部の最大相当ひずみと下ロール面角度の関係

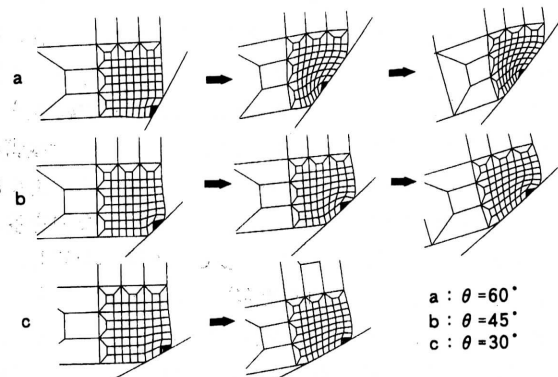


図6 縁部の変形挙動

## 研 究 速 報

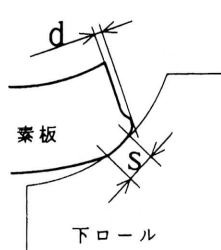


図7 素板縁部のつぶれ

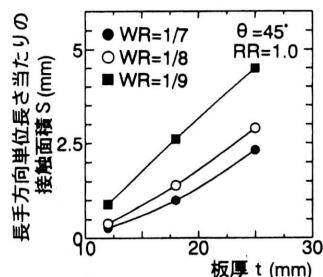


図8 素板縁部と下ロールとの接触面積と板厚の関係

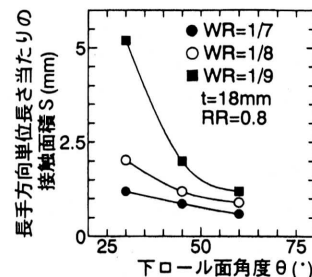


図9 素板縁部と下ロールとの接触面積と下ロール面角度の関係

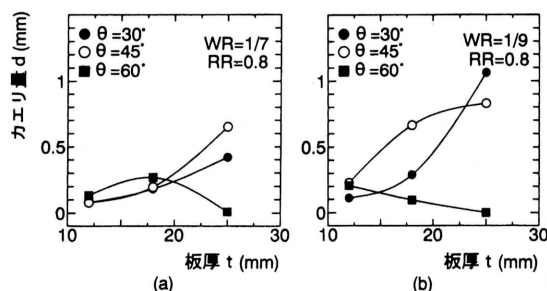


図10 素板縁部のカエリ量と板厚の関係

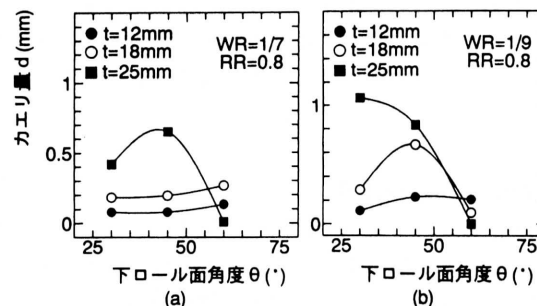


図11 素板縁部のカエリ量と下ロール面角度の関係

及びカエリの量は突き合わせ溶接部の形状に大きな影響を与えるので、その挙動を知ることは重要である (図7参照)。ダレ及びカエリの発生は素板縁部と下ロールとの接触面積と関係がある。図8には、長手方向単位長さ当たりの接触面積  $S$  が板厚の増加に伴って増える関係を、図9には  $S$  が下ロール面角度  $\theta$  の増加にしたがって小さくなる様子を示す。

既述のように、エッジベンディングに際して、端面にカエリが発生すると、溶接部の性状を著しく悪化させ、溶接そのものも難しくなる場合がある。解析結果から見ると、カエリ量には、板厚、下ロール面角度、上ロールの半径及び位置などの要因が複合的に影響を与える。図10に示すように、カエリ量  $d$  は必ずしも板厚の増加に伴って増えるわけではなく、下ロール面角度が大きい場合、素板の厚い方がかえって小さい場合もある。すなわち、下ロール面角度が大きい場合、上下ロール間にある素板縁部は大きな幅方向圧縮力を受ける。具体的に言えば、下ロールは素板端面下角部に幅中心へ向かう力を加え、上ロールは逆に縁部に対して外側へ向かう力を加える。このような力を受けると、素板端面が下角部を中心として、外側へ回転し、カエリ量を消してしまう (図6参照)。素板が厚いとき、この現象の発生は顕著になる。例えば、 $\theta=60^\circ$ 、 $t=25\text{ mm}$  の場合には、カエリ量が零に近い。図11において、この下ロール面角度の影響はもっとはっきり示されている。ま

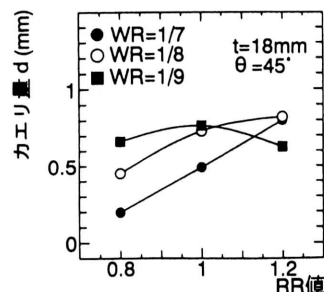


図12 素板縁部のカエリ量と上ロール半径の関係

た、図11は、上ロールの影響も示している。すなわち上ロールから素板へ加わる荷重の作用点が素板端面に近ければ近いほど、素板端面の回転する傾向が強くなる。例えば、図11(a) ( $WR=1/7$ ) においては、 $t=25\text{ mm}$  の場合しかカエリ量が減らないが、図11(b) ( $WR=1/9$ ) においては、 $t=18\text{ mm}$  及び  $t=12\text{ mm}$  の場合も、このような現象が出てくる。これと似ている上ロール半径の影響を図12に示す。

## 3.4 素板の成形度

図13には、素板の成形度を評価するパラメータの一つとして素板外表面曲率分布の一般的な特徴を示す。幅中央部の素板外表面の曲率は、中央ロール面の曲率より大きい。これは素板が中央ロールに完全には巻き付かないためである。縁部近傍の外表面曲率は、上ロール面の曲率及び要求

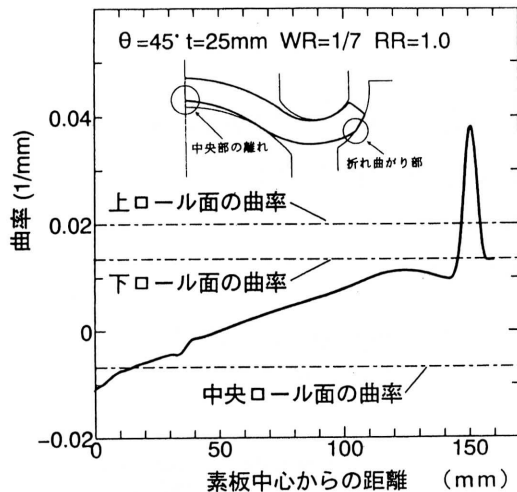


図13 素板外表面曲率分布

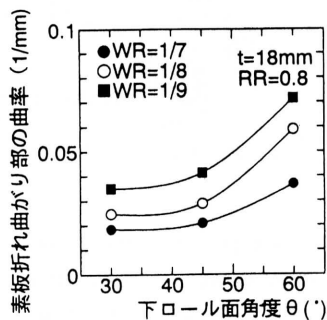


図14 素板折れ曲がり部の曲率と下ロール面角度の関係

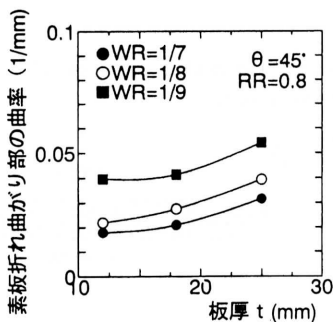


図15 素板折れ曲がり部の曲率と板厚の関係

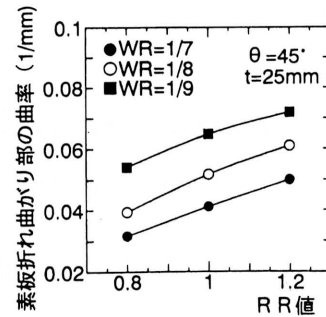


図16 素板折れ曲がり部の曲率と上ロール半径の関係

される製品外表面の曲率を越えてしまう場合がある。特に、素板外表面のうちの自由表面と接触面との境界には、或る種の折れ曲がり又はオーバーベンドの発生が観察できる。このオーバーベンドは、製品形状不良の一種であり、防止する必要がある。この折れ曲がりとは接触面と隣接する自由外表面との傾きの差である。接触面の傾きは下ロール面角度により決められるから、一般に下ロール面角度が増えると、折れ曲がり部の曲率が大きくなる(図14参照)。同じ成形条件では、板厚の増加に伴って自由外表面は変形しにくい。これも大きな折れ曲がり部の曲率を発生させる(図15参照)。さらに、上ロール半径が大きい場合は、成形の後期に、荷重の作用点が接触面の直上に移り、素板の変形が曲げ変形でなく、圧縮変形になってしまう。この場合も曲率の最大値が発生しやすい。(図16参照)。

#### 4. 結 言

本報告では、剛塑性有限要素法を用いて、厚肉管のロール成形時の素板の変形主として縁部の変形挙動について検討した。その結果、厚肉管のロール成形の際に特に問題となる縁部の変形挙動と各種加工条件因子との関係が一部明らかになった。

(1995年5月10日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 木内ほか：ロール成形，日本塑性加工学会編（1990）。
- 2) 小野田義富・長町拓夫・杉山努：44回塑加連講論，（1993），65。