

ステンレス鋼電縫管の成形シミュレーション

Simulation of Roll Forming Process for ERW Stainless Steel Pipes

木内 学*・花 江*・新谷 賢*

Manabu KIUCHI, Jiang HUA and Ken SHINTANI

1. ま え が き

筆者らは、ロールフォーミング汎用シミュレータを開発し、これを用いて軟鋼電縫管の一連の成形方式について、さまざまな角度から検討を加え、ロールフラワーの設計やパススケジュールの決定に有用な数々の指針を示してきた^{1)~6)}。ところで、ステンレス鋼電縫管は近年急激に生産量が増大しつつあるが、その成形時の素板の変形特性に関しては未だほとんど検討が行われていない。そこで、本研究では、上記汎用シミュレータにより、一連のステンレス鋼電縫管の成形過程の数値解析を行い、ロール段数・スタンド間距離・曲げ角度配分・管外径および肉厚が主として素板の縁伸びに与える影響について検討したので、以下にその結果を報告する。

2. 解析モデルおよび計算手順

2.1 解析モデル

成形中に各スタンド間で素板の板厚方向中央面が呈する三次元変形曲面を形状関数 $S(X^*)$ を用いて数式表示する。以下、座標および記号は図1を参照されたい。この形状関数 $S(X^*)$ は、素板上の各点が #i スタンド ($X = X_1 = X_1$) のロールプロフィール上の点 $P_i(X_1, Y_1, Z_1)$ から、#i+1 スタンド ($X = X_{i+1} = X_2$) のロールプロフィール上の点 $P_{i+1}(X_2, Y_2, Z_2)$ へ移行する際に描く空間的軌跡の形状を決定する関数である。この $S(X^*)$ を用いて、 $X = X_1 \sim X_2$ にある素板の変形曲面形状を一般に次式で表示するものとする。

$$\left. \begin{aligned} X &= X \\ Y &= Y_1 + (Y_2 - Y_1) \cdot S(X^*) \\ Z &= Z_1 + (Z_2 - Z_1) \cdot S(X^*) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、当面、 $S(X^*) = \sin\{(\pi/2) \cdot (X^*)^n\}$ 、 $X^* = (X - X_1)/(X_2 - X_1)$ とし、点 $P(X, Y, Z)$ は素板の変形曲面上の座標である。形状関数 $S(X^*)$ に含まれるパ

*東京大学生産技術研究所 第2部

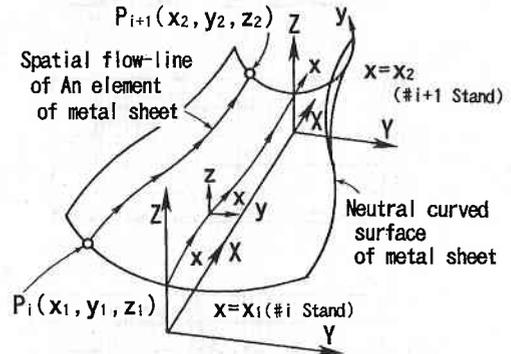


図1 形状関数 $S(X^*)$ の定義

ラメータ n が大きい場合、素板各部は #i+1 スタンド直前で急激な変位を起こし、 n が小さい場合にはその変位はゆるやかになる。なお n の値の決定には、エネルギー法を適用し、素板の全変形仕事率が最小となるように決める。なお、解析モデルの詳細は既報⁴⁾を参照されたい。

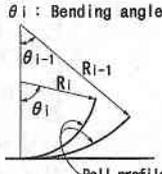
2.2 計算手順

図2に計算手順の概略を示す。与えられた各スタンドのロールプロフィールに対して、まず最適化パラメータ n の初期値を与え、変形曲面形状を構成し、次にスタンド間の各成形段階において発生するひずみ成分、応力成分を、長手方向合力の釣合条件を満足しつつ決定してゆき、#i スタンドから #i+1 スタンドまでの計算が終了すると、求めたひずみおよび応力増分よりスタンド間での素板の全変形仕事率 W を求め、 n の値を変化させつつ同様の計算を繰り返して W を最小ならしめるパラメータの最適値 n_{opt} を決定し、その際の変形曲面形状、ひずみ分布、応力分布を実際の成形時の近似値とする。

3. 計算条件と製品断面寸法

本研究では、ステンレス鋼管 (SUS304) の成形時の縁伸びの発生量を系統的に把握することを目的としてい

表 1 計算条件

Mechanical Properties of metal sheet (SUS304)	E=205800N/mm ² , H=1244.6N/mm ² ν=0.3 , σ=362.6N/mm ²	
Method for bending	Circular bending	θ _i : Bending angle 
Number of roll-stands	6 , 8st	
Inter-stand distance	Changeable	
Forming speed	40m/min.	
Pass-line	Bottom-line const.	
Shape-function	S(X*)=sin(π/2 · (X*) ⁿ)	

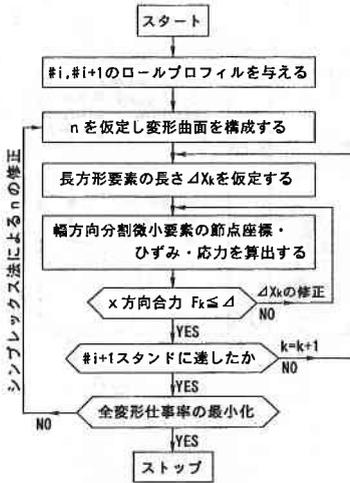


図 2 全体的な計算の流れ

る。表 1 および図 3 に計算条件および対象とした製品断面寸法を示す。検討対象とした 4 種類のパススケジュール (Case-1~Case-4) は電縫管成形用として最も基本的な Circular bending 法によるものであり (図 4, 5 参照), 各スタンドへの曲げ角度配分は図 4 に示すように最も基本的な 3 種類のパターンを採用した。Case-1 (8 スタンド) と Case-4 (6 スタンド) は, スタンド数は異なるが各スタンドに対する曲げ角度配分が均一である。Case-2 (8 スタンド) は後段になるほど曲げ角度配分が増加するパススケジュールであり, 逆に, Case-3 (8 スタンド) は後段になるほど曲げ角度配分が減少するパススケジュールである。なお, パスラインは, いずれの場合もボトムラインが水平 (一直線) となるように選んである。

4. 計算結果と考察

以下, 主として, 各スタンド間で素板縁部に発生する長手方向伸びひずみの最大値 ($E_{X0}^{(i)}$)_{max.}, および全スタンド間を通じてのその平均値 (E_{X0})_{max.} を算出し検討した結果を示す。

4.1 スタンド間距離 SL が (E_{X0})_{max.} に与える影響

図 6 は, スタンド間距離 SL と (E_{X0})_{max.} との関係について, 軟鋼 (SS41 相当) 電縫管とステンレス鋼電縫管の成形の際の結果を比較して示す。この結果より以下のことがわかる。(1) 発生する (E_{X0})_{max.} の水準は軟鋼電縫管とステンレス鋼電縫管とで基本的に変わらない。(2) 軟鋼・ステンレス鋼電縫管とも, スタンド間距離 SL が增大すると (E_{X0})_{max.} は減少する。(3) 軟鋼の場合, 肉厚 t が変化しても (E_{X0})_{max.} の値はほとんど変

Stand No.		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Case 1	φ D	25°	45°	65°	85°	105°	125°	145°	165°
	φ 25.4 R	91.7	50.9	35.3	27.0	21.8	18.3	15.8	13.9
	φ 101.6 R	366.7	203.7	141.0	107.8	87.3	73.3	63.2	55.6
	φ 216.3 R	779.2	432.9	299.7	229.2	185.5	155.8	134.3	118.1
Case 2	φ D	25°	32°	43°	58°	78°	103°	132°	165°
	φ 25.4 R	91.7	71.6	53.3	39.5	29.4	22.3	17.4	13.9
	φ 101.6 R	366.7	286.5	213.4	158.1	117.5	89.0	69.5	55.6
	φ 216.3 R	779.2	608.8	453.0	335.9	249.8	189.1	147.6	118.1
Case 3	φ D	25°	64°	90°	110°	127°	141°	154°	165°
	φ 25.4 R	91.7	35.8	25.5	20.8	18.1	16.3	14.9	13.9
	φ 101.6 R	366.7	143.2	101.9	83.3	72.2	65.0	59.5	55.6
	φ 216.3 R	779.2	304.4	216.5	177.1	153.4	138.2	126.5	118.1
Case 4	φ D	25°	53°	81°	109°	137°	165°		
	φ 25.4 R	91.7	43.2	28.3	21.0	16.7	13.9		
	φ 101.6 R	366.7	173.0	113.2	84.1	66.9	55.6		
	φ 216.3 R	779.2	367.6	240.5	178.7	142.2	118.1		

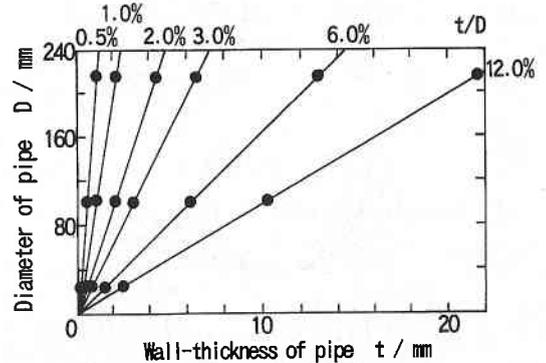


図 3 製品断面寸法

化しないが, ステンレス鋼の場合は t が増すと (E_{X0})_{max.} も若干増大する。(4) 軟鋼の場合には, t/D の変化が (E_{X0})_{max.} の変化に与える影響は顕著ではないが, ステンレス鋼の場合には, t/D が大きい場合に (E_{X0})_{max.} が大きくなる。

図 7 には, ロール段数と各スタンドへの曲げ角度配分が異なる場合の, スタンド間距離 SL に対する (E_{X0})_{max.} の変化を示す。これより, (1) 同一サイズのパイプについては, 当然のことながらロール段数が増大すると (E_{X0})_{max.} の値は減少する, (2) 曲げ角度配分が異なる

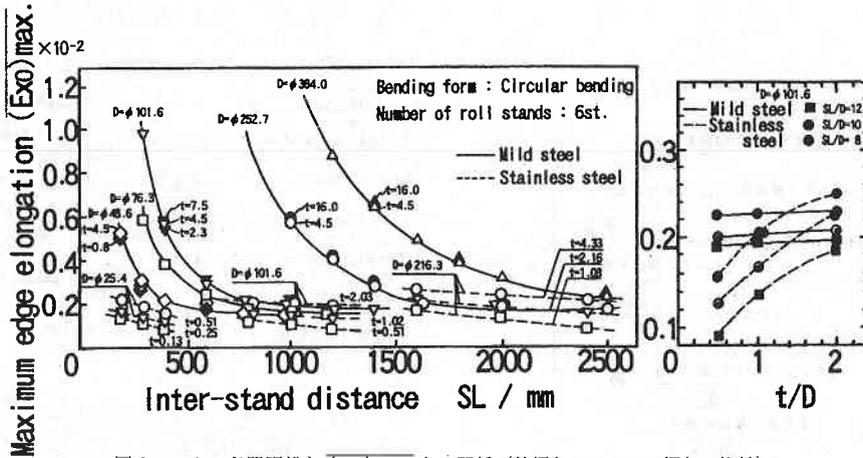


図6 スタンド間距離と $(E_{X0})_{max.}$ との関係 (軟鋼とステンレス鋼との比較)

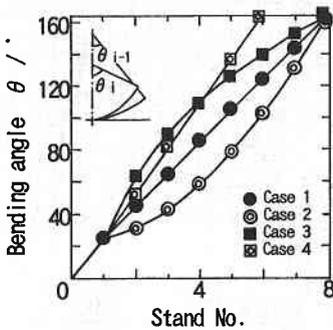


図4 各スタンドへの曲げ角度配分

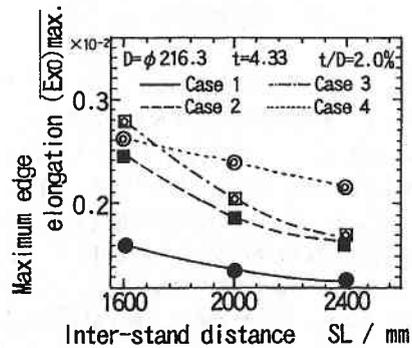


図7 スタンド間距離と $(E_{X0})_{max.}$ との関係 (ロール段数・曲げ角度配分変更時)

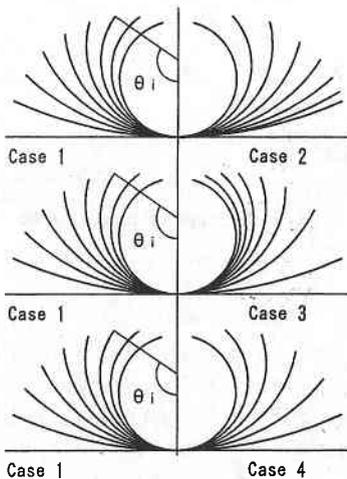


図5 ロールフラワー

と、SLが増大する場合の $(E_{X0})_{max.}$ の減少の程度が異なり、Case-2とCase-3の $(E_{X0})_{max.}$ はSLの増大

に伴って急激に減少し、減少の幅がCase-1とCase-4の結果より大きい、ことなどがわかる。

4.2 エッジの移動量 Δle が $(E_{X0})_{max.}$ に与える影響

図8には、X軸に垂直な面に投影した素板縁部の各スタンド間におけるエッジの移動量 Δle と $(E_{X0})_{max.}$ との関係をサイズ別に計算した結果を示す。これより、(1) Δle が増大すると、 $(E_{X0})_{max.}$ が急激に増大する、(2) SLが増大すると Δle は同一であっても $(E_{X0})_{max.}$ が大幅に減少する、(3) t/D が増大すると、 Δle は同一であっても $(E_{X0})_{max.}$ が若干増加する、ことなどがわかる。

4.3 管外径 D が $(E_{X0})_{max.}$ に与える影響

図9は、スタンド間距離・管外径比 $SL/D=8, 10, 12$ の場合について、曲げ角度配分とロール段数が違う場合に、管外径 D が $(E_{X0})_{max.}$ に与える影響を示す。これより、(1) Dが増大すると、各場合とも、 $(E_{X0})_{max.}$ が増大する、(2) 増大の幅は条件により異なる、(3) 一般に t/D が大きい程 $(E_{X0})_{max.}$ が大きくなる、(4) ロー

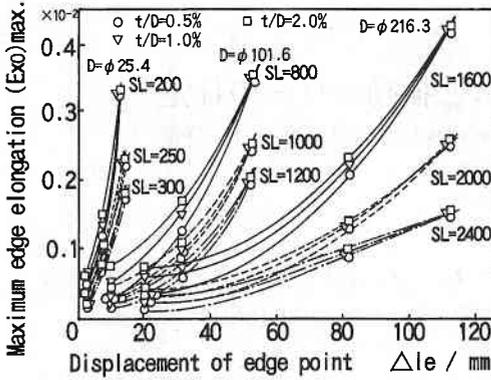


図8 エッジの移動量と $(E_{X0})_{max}$ との関係

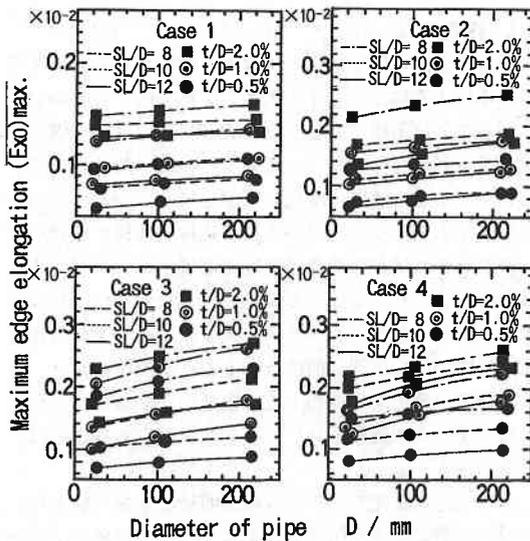


図9 管外径と $(E_{X0})_{max}$ との関係

ル段数を多くするか、曲げ角度配分を均一化することにより $(E_{X0})_{max}$ の増大を抑制することができる、ことなどがわかる。

4.4 管外径 D とスタンド間距離 SL・肉厚 t の組み合わせ

図10は、 $(E_{X0})_{max} = 0.2\%$ とするために要する管外径 D とスタンド間距離 SL との関係を整理した結果である。これより、(1) $(E_{X0})_{max}$ を一定に維持するためには、SL は D に対して比例的に増大させる必要があること、(2) 同一の D に対して、 t/D が増大する場合にも、SL を増大させる必要があること、などがわかる。

図11には、 $SL = 500mm, 1000mm$ の場合に、 $(E_{X0})_{max} = 0.15\%, 0.2\%$ とするために必要な管外径 D と肉厚 t との関係を示す。同一の SL の下で $(E_{X0})_{max}$

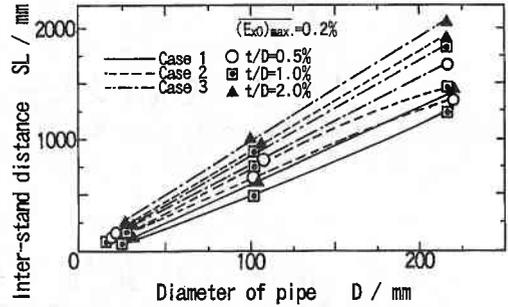


図10 管外径とスタンド間距離の組み合わせ

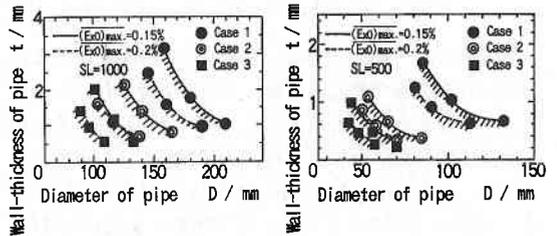


図11 管外径と肉厚の組み合わせ

が一定となる組み合わせとしては、Dが増大すると t は減少し、逆に、tが増大すると D は減少する関係にあることがわかる。図11の斜線部は、縁伸びを一定水準以下に抑制しようとする際に許容され得る製品寸法範囲、すなわち管外径 D と肉厚 t の組み合わせを示す。

5. ま と め

本研究では、ロールフォーミング汎用シミュレータにより、ステンレス鋼電線管の成形過程について一連の解析を進め、素板縁部に発生する長手方向膜ひずみ(縁伸び)の最大値に及ぼすロール段数・スタンド間距離・曲げ角度配分・管外径および肉厚の影響について、系統的に検討し、ロール設計や工程設計に有用な資料を得ることができた。これらは、今後のステンレス鋼電線管の製造技術の向上のために有用な指針となるものと考えられる。

(1993年 5月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内 学・高田橋俊夫：昭58年春塑加講論，(1993)，30.
- 2) 木内 学・佐藤忠之：昭59年春塑加講論，(1984)，45.
- 3) 木内 学・佐藤忠之：生産研究，37-1(1985)，11.
- 4) 木内 学・高田橋俊夫：塑性と加工，27-306(1986)，874.
- 5) 木内 学・高田橋俊夫：塑性と加工，27-308(1986)，1091.
- 6) 木内 学・高田橋俊夫：塑性と加工，28-312(1987)，49.