

ロールフォーミング汎用シミュレータの開発に関する研究 (第11報)

—解析モデルの拡張—

Study of Computational Simulation Method of Cold-Roll-Forming Process—11th Report

木内 学*・元木 健一*
Manabu KIUCHI and Ken-ichi MOTOGI

1. はじめに

近年、ロールフォーミング用CADの研究¹⁾、剛塑性FEMによるフィンパス成形時の素板の変形解析²⁾等、ロールフォーミング加工の分野にも数値シミュレーション技術が取り入れられ始めた。このような状況を先取りして、筆者らは、成形過程にある素板の変形形状ならびに各部のひずみ履歴・応力分布等を、解析できるロールフォーミング汎用シミュレータの開発を目指して、一連の研究を進めてきた。開発したシミュレータを用いて、既報^{3),4)}では、スタンドピッチ・ロール段数・成形ロールの大きさ等、各種成形因子の、素板の変形挙動に対する影響を明らかにした。

現在、本シミュレータの拡張を目指し、素板面内せん断ひずみ成分をも考慮した解析モデルについて検討を進めている。本報では、この拡張した解析モデルを、電縫管成形・広幅断面成形に適用した結果について報告する。

2. 使用記号

- $\epsilon_{x0} \cdot \sigma_x$: 長手方向膜ひずみ, 長手方向応力
- $\epsilon_{y0} \cdot \sigma_y$: 幅方向膜ひずみ, 幅方向応力
- $\gamma_{xy} \cdot \tau_{xy}$: 面内せん断ひずみ, せん断応力

3. 拡張モデルの概要

前報まで用いてきた解析モデルには、1) 素板面内のせん断ひずみ・せん断応力成分を考慮していない。2) ϵ_{x0} と ϵ_{y0} について、 $\epsilon_{y0} = \lambda \cdot \epsilon_{x0}$ なるひずみ比一定の関係を保定している。これは、筆者らによるひずみの実測値より、 ϵ_{x0} と ϵ_{y0} との比は、素板の幅方向各位置ごとにほぼ一定となることが判明しており、この結果⁵⁾に基づいた仮定である。

本報は、これらの点について以下のように解析モデルの拡張を行った。すなわち、1) 素板面内のせん断ひずみ γ_{xy} ・せん断応力 τ_{xy} 成分の影響を取り入れる。なお、曲げの曲率半径は、板厚に比べて大であるため、板厚方向(Z方向)を含む面内せん断ひずみ成分 γ_{yz} , γ_{zx} は、0とする。2) 各ひずみ成分・応力成分は、幅方向に帯状をなす微小要素内での力の釣り合いを考慮し、決定する。

*東京大学生産技術研究所 第2部

その他の計算手法は、既報⁶⁾に準ずる。

このような解析モデル拡張の目的は、解析精度の向上、および面内せん断ひずみの影響を無視できない広幅断面の成形等、解析対象範囲の拡大を図るためである。

4. 各応力・ひずみ成分の算出式

4-1 面内せん断ひずみ (γ_{xy}) の定義

図1(a)に示す変形曲面形状について、 $X_{k+1} \sim X_k$ で規定された幅方向に帯状をなす要素を考える。これを図1(b)に示すように、 x - y 面上に展開する。この際、長手方向の分割長さ ΔX は、従来どおり幅方向各位置において一定であるとする。微小要素ABCD内に生じる面内せん断ひずみ $(\gamma_{xy})_{k+1,j}$ は、 x 軸と平行な x^* 軸と線分BCとがなす角度 $(\phi)_{k+1,j}$ により、(1)式にて定義する。

$$(\gamma_{xy})_{k+1,j} = (\phi)_{k+1,j} = \frac{\Delta B_{k+1} - \Delta B_k}{\Delta l_{k,j}} \quad (1)$$

また、 (γ_{xy}) は微小要素内では一様とみなす。

4-2 幅方向応力 (σ_y) の算出

縁部での幅方向応力 $(\sigma_y)_{k,n} = 0$ とすると、図2より、 (k, j) 領域における幅方向応力 $(\sigma_y)_{k,j}$ は、斜線部要素内の力の釣り合いを考慮して、(2)式で与えられるものとする。

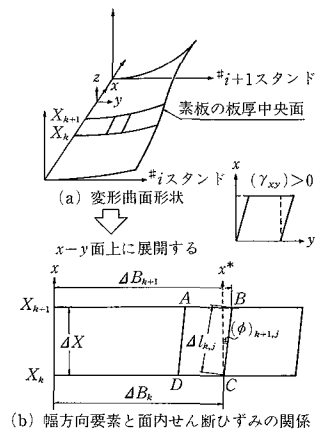


図1 面内せん断ひずみの定義

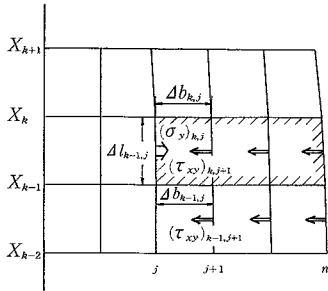


図2 幅方向要素内での力の釣り合い

$$(\sigma_y)_{k,j} = \frac{\sum \{ (\tau_{xy})_{k,j+1} \cdot \Delta b_{k,j} - (\tau_{xy})_{k-1,j+1} \cdot \Delta b_{k-1,j} \}}{\Delta b_{k-1,j}} \quad (2)$$

4-3 応力-ひずみ関係式

応力・ひずみの各成分は、ひずみ増分論より算出した。つまり、弾性式としては(3)式を、弾塑性式としては(4)式を用いた。

$$d\epsilon_{ij}' = \frac{d\sigma_{ij}'}{2G}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$d\epsilon_{ij}' = \frac{3}{2} \cdot \sigma_{ij}' \cdot \frac{d\bar{\epsilon}^p}{\bar{\sigma}} + \frac{d\sigma_{ij}'}{2G} \quad (4)$$

ここで、 E :縦弾性係数、 ν :ポアソン比、 $\bar{\sigma}$:相当応力、 $d\bar{\epsilon}^p$:相当塑性ひずみ増分である。また、 τ_{xy} は、板厚方向に対し一様とした。

5. 計算のフロー

計算のフローを図3に示す。いま、長手方向に k 段階まで成形が進み、 $k+1$ 段階の $j+1$ 要素の座標・応力・ひずみを求めるものとする。応力、ひずみの6成分のうち、 (σ_y) は、(2)式の力の釣り合い式から算出し、 $(d\epsilon_{x0})$ および (γ_{xy}) は、 $(k+1, j)$ の座標から算出する。したがって、これら3成分は既知量となる。未知成分の (σ_x) 、 $(d\epsilon_{y0})$ 、 (τ_{xy}) は、弾性変形過程か、あるいは弾塑性変形過程か、の変形状態を判定しつつ、(3)または(4)式を用いて決定する。

6. 計算結果および考察

6-1 電縫管の解析例

本解析モデルを電縫管成形に適用した。表1に計算条件を示す。成形サイズは、 $4.5^t \times \phi 76.3$ である。

図4に、入口ガイド~#1スタンドまでの距離(SL0)=500mmの場合の (ϵ_{x0}) 、 (γ_{xy}) の推移を示す。これより、 (γ_{xy}) は、ロール直前で符号が逆転するとともに、最大値が生じることがわかる。この理由については後述する。

図5に、(SL0)と変形仕事率(W)、 $(\epsilon_{x0})_{max}$ 、 $(\gamma_{xy})_{max}$ の関係を示す。(SL0)が短くなるにつれ、 W 、 $(\epsilon_{x0})_{max}$ 、 $(\gamma_{xy})_{max}$ の絶対値は、すべて増加している。一般に、(SL0)が減少するほど、(SL0)に対する相対軌跡長差が

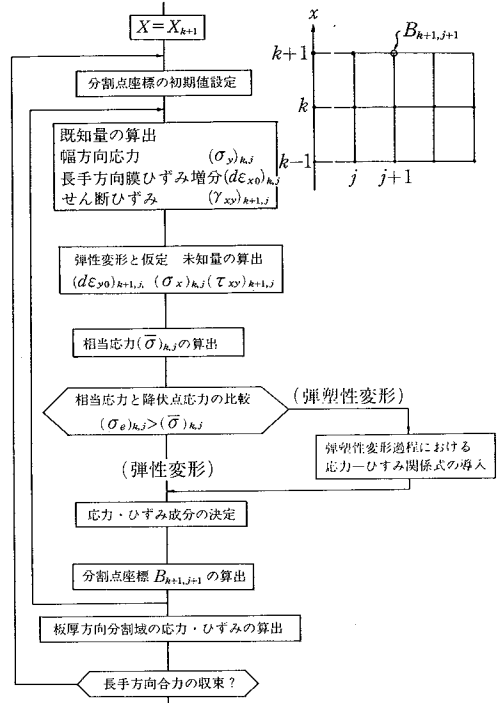


図3 計算のフロー

表1 電縫管の計算条件

1. 成形サイズ	4.5 ^t × φ76.3					
2. 曲げ方式	Circular-Bending					
3. スタンドピッチ	可変					
4. パスライン	Bottomline-Const.					
5. 曲げ角度	#1	#2	#3	#4	#5	#6
	30°	55°	80°	105°	130°	150°
6. 素板特性	$E = 21000 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$					
	$H = 80 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$					
	$\sigma_e = 31.5 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$					
	$\nu = 0.3$					
7. 要素分割数	10長手方向 × 10幅方向 × 10板厚方向					
8. 形状関数	$S(X) = \sin(\frac{\pi}{2} \cdot X^n)$ 形状関数 $S(X)$ とは、スタンド間で素板の変形曲面形状を近似する関数。 n は、パラメータ。					

大きくなり、発生する $(\epsilon_{x0})_{max}$ は増加する。

素板縁部は、他の部分に比較してより多くの素板中央への寄り変形が必要なため、大きな (γ_{xy}) が発生する可能性があるが、ロール直前で流線の方向が成形方向へと矯正される際に、その正負が逆転する。なお、 (γ_{xy}) は、一般にロール近傍で最大となる。ところで、せん断ひずみが生じる要因は、1)素板中央への寄り変形、2)長手方向の曲げ・曲げ戻し変形、に関連して発生すると考

研究速報

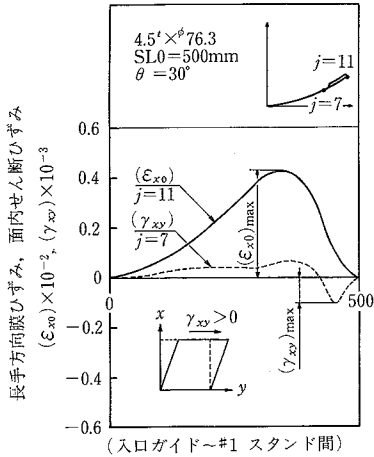


図4 電縫管における (ϵ_{x0}) , (γ_{xy}) の推移

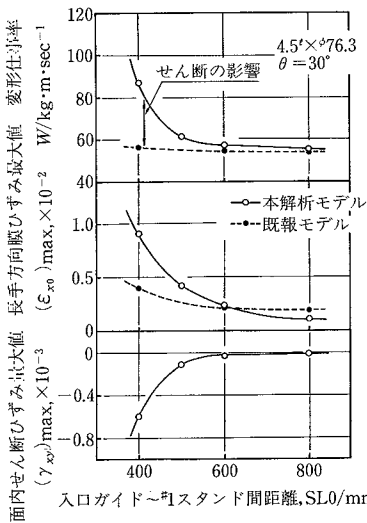


図5 $(SL0)$ と W , $(\epsilon_{x0})_{max}$, $(\gamma_{xy})_{max}$ の関係

えられ、電縫管の円弧成形の場合等では、前者の要因が支配的と考えられる。しかし、 $(\gamma_{xy})_{max}$ の値は、 $(\epsilon_{x0})_{max}$ と比較するとかなり小さいが、円弧成形では、広幅成形等に比べ、素板の幅寄せ量そのものが少ないために、せん断の影響は小さいと考える。図6に4.5' × φ76.3の6段タンデム成形について、スタンドピッチ (SL) が500, 800mmの場合の (ϵ_{x0}) 分布図, (γ_{xy}) 分布図を示す。

6-2 広幅断面の解析例

次に、本解析手法を広幅断面に適用した結果を示す。計算条件を表2に示す。

6-2-1 (ϵ_{x0}) , (γ_{xy}) の分布

図7に、入口ガイド~#1スタンドまでの距離 (SL0) での、 (ϵ_{x0}) および (γ_{xy}) の推移を示す。 (ϵ_{x0}) は、ウェブ

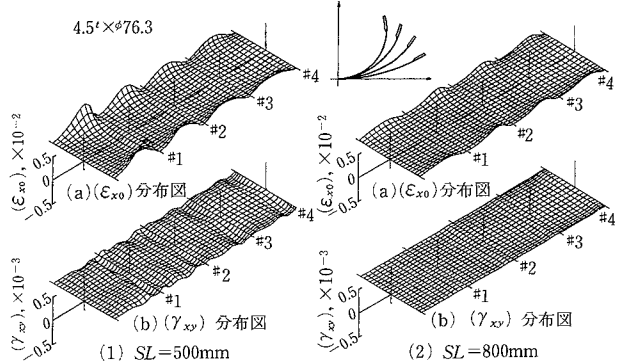


図6 電縫管における (ϵ_{x0}) 分布図, (γ_{xy}) 分布図

表2 広幅断面の計算条件

1. 断面寸法			
	$Li=50, 100, 200, 250, 300$		
2. 素板寸法(2b)	190, 290, 490, 590, 690mm		
3. 曲げ角度(θ)	#1	#2	#3
	30°	55°	75°
4. 曲げ方式	曲げ弧長一定方式		
5. スタンドピッチ	可変		
6. パスライン	Bottomline-Const.		
7. 素板特性	$E = 21000 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$ $H = 80 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$ $\sigma_e = 31.5 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$ $\nu = 0.3$		
8. 要素分割数	10 _{長手方向} × 任意 _{幅方向} × 10 _{板厚方向}		
9. 形状関数	$S(X) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot X^n\right)$		

部に最大値が生じ、 (γ_{xy}) は、縁部で最大値が生じる。実験によると、 (γ_{xy}) は、平坦部・フランジ部間の曲げ部のフランジ側近傍域に集中的に発生する、と報告されているが、本モデルでは、この点についてまだ十分対応できていない。その理由は、フランジ付け根部の折り曲げ変形に伴う、板の幅方向流れに対する抵抗の増大が、この時点では考慮されていないためである。また、図7より、ウェブ部の (ϵ_{x0}) が伸びのときに、素板は中央へ寄せられる力を受けるので、この領域では、 (γ_{xy}) は負になり、ロール直前で、電縫管の成形の場合と同様に (γ_{xy}) の符号が逆転する。図8に、平坦部長さ (Li) = 200mm, $SL=600$ mmの場合の変形曲面図, (ϵ_{x0}) 分布図および (γ_{xy}) 分布図を示す。

6-2-2 (ϵ_{x0}) , (γ_{xy}) に及ぼす平坦部長さの影響

図9に、平坦部長さ (Li) をパラメータとして、 $(SL0)$ と $(\epsilon_{x0})_{max}$, $(\gamma_{xy})_{max}$ の関係を示す。 $(\epsilon_{x0})_{max}$, $(\gamma_{xy})_{max}$ とともに Li が長いほど、また $(SL0)$ が短いほど、増加する。一般に、ウェブ部は、成形過程において目的とする

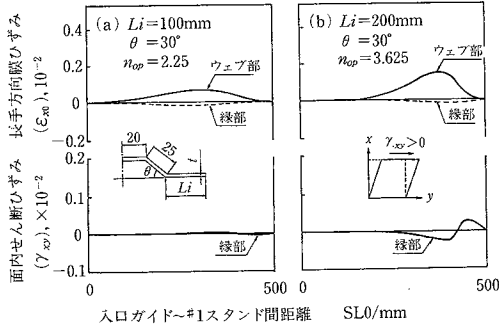


図 7 広幅断面における (ϵ_{x0}) , (γ_{xy}) の推移

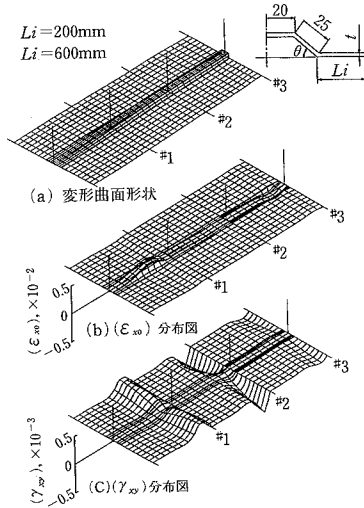


図 8 広幅断面における (ϵ_{x0}) 分布図, (γ_{xy}) 分布図

断面寸法に対応した一定量の立ち上がりを要するが、その際の相対軌跡長は、(SL0)が短いほど平坦部に比べて大きくなる。また、 Li が長くなるほど、中央への寄り変形に対する抵抗が大きくなり、素板は、ロール近傍での変形が大きくなる(図10参照)。これらの要因は、 $(\epsilon_{x0})_{max}$ を増加させるといえる。

前述した (γ_{xy}) の発生要因のうち、広幅断面においても、1)の素板中央への寄り変形が支配的になると考えられる。このため、(SL0)が短いほど、 Li が長いほど中央への寄りの変形抵抗が増加し、 (γ_{xy}) が増加するといえる。

6-2-3 平坦部長さと n_{op} の関係

図10に、(SL0)=500mmの場合の Li と形状関数のパラメータ n の最適値 (n_{op}) の関係を示す。 Li が長いほど n_{op} の値は増加している。これは、素板のロール直前での立ち上がり(または幅寄せ)が大きいことを意味している。

実操業においても、ガイド～#1スタンドまでの距離が

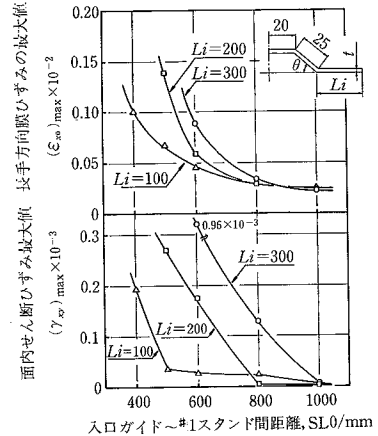


図 9 (SL0) と $(\epsilon_{x0})_{max}$, $(\gamma_{xy})_{max}$ の関係

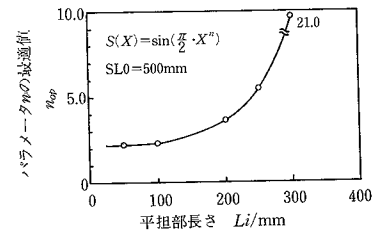


図10 平坦部長さと形状関数のパラメータ n の最適値の関係

短い場合や素板幅の広い場合に、素板は、ロール直前で座屈し、スムーズなロール噛み込みができないことがある。図10は、このような現象を推定することができると思われる。

7. ま と め

ロールフォーミング汎用シミュレータ開発の一環として、素板の面内せん断ひずみ成分をも考慮した解析モデルを、電線管成形・広幅断面成形へ適用し、基礎的な検討を行った。その結果、せん断ひずみを考慮した解析モデルの有効性を示した。

今後の課題は、広幅断面における形状関数の定義である。なお一層の検討を重ね、広幅断面での形状不良の要因を追及していく予定である。(1987年3月27日受理)

参 考 文 献

- 1) 小奈ほか：塑性と加工, 24-270 (1983), 707
- 2) 小野田：37回塑加連講論 (1986-11), 143
- 3) たとえば木内・佐藤：昭59春塑加講論 (1984-5), 501
- 4) 木内・元木：37回塑加連講論 (1986-11), 142
- 5) 鈴木・木内：塑性と加工, 11-112 (1970), 315
- 6) 木内・高田橋：昭58春塑加講論 (1983-5), 124
- 7) 鈴木・木内：塑性と加工, 18-196 (1977), 365