

ロールフォーミング汎用シミュレータの拡張に関する研究 (第 1 報)

——解析モデルの構成と計算手順——

Advanced Computational Simulation Method for Cold-Roll-Forming Process —1st Report

木 内 学*・阿 部 研 仁*

Manabu KIUCHI and Kenji ABE

1. はじめに

筆者らは、ロールフォーミング加工時の素板の変形挙動、特に素板各部に発生するひずみ分布・応力分布の総合的な解析を可能とするロールフォーミング汎用シミュレータの開発を進め、すでに多くの成果を得てきた。

ところで、広幅断面材の成形では、いわゆる幅寄せに対する素板の抵抗に起因する強い幅方向張力が発生し、このため、横断面の折り曲げ部に顕著な減肉が発生し、しばしば割れが誘発されることがある。そこで本研究では、このような素板の変形挙動をもよりの確にとらえることができる解析手法の構成を目指して研究を進め、面内せん断力の長手方向・幅方向分布を考慮しつつ幅方向の力の釣合いを考慮することによって、この幅寄せに対する抵抗およびそれに伴う幅方向張力や幅方向伸び変形を把握できることを見出した。これにより、折り曲げ部に発生する局所的な幅方向伸びを含め、素板各部に発生する応力・ひずみの挙動について、従来以上に妥当と思われる結果が得られたので報告する。

2. 主な使用記号

- (X, Y, Z) : 空間固定の座標系
- (x, y, z) : 素板の板厚方向中央面に固定の座標系
- ϵ_{xm}, σ_x : 長手方向膜ひずみ, 長手方向応力
- ϵ_{ym}, σ_y : 幅方向膜ひずみ, 幅方向応力
- γ_{xy}, τ_{xy} : 面内せん断ひずみ, 面内せん断応力
- F_x : 長手方向力
- F_y : 幅方向力
- F_{xy} : 面内せん断力

3. 拡張解析モデルの概要

3-1 変形曲面の表示方法

以下、変形曲面とは素板の板厚方向中央面が呈する 3 次元変形曲面を意味するものとする。#i, # (i + 1)

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

スタンドのロールの位置と形状が与えられた場合のスタンド間の素板の変形曲面は、図 1 に示すように、#i, # (i + 1) ロールのプロフィール上の基準点 (たとえば幅方向中央点) より各プロフィールに沿って測った展開長さが等しくなる点 P_1, P_2 の間を、以下に示す形状関数 $S_Y(X), S_Z(X)$ で結んだ曲線の集まりとして構成されるものとする。このとき変形曲面上の任意の点 P_K の座標 (X_K, Y_K, Z_K) は

$$\left. \begin{aligned} X_K &= X_K \\ Y_K &= Y_1 + (Y_2 - Y_1) \cdot S_Y(X_K) \\ Z_K &= Z_1 + (Z_2 - Z_1) \cdot S_Z(X_K) \end{aligned} \right\} (1)$$

と表される。ただし、(Y_1, Z_1), (Y_2, Z_2) はそれぞれ $X = X_1, X_2$ に位置する #i ロール, # (i + 1) ロールのプロフィール上の各点の座標を表す。

形状関数としては、とりあえず次式で示される関数を用いる。

$$S_Y(X) = \sin\{(\pi/2) (\bar{X}/L)^{N_y}\} \quad (2)$$

$$S_Z(X) = \sin\{(\pi/2) (\bar{X}/L)^{N_z}\} \quad (3)$$

$$\bar{X} = X - X_1$$

$$L = X_2 - X_1 : \text{スタンド間距離}$$

$$N_y, N_z : \text{形状関数パラメータ}$$

図 2 に形状関数 $S(X)$ の計算例を示す。

形状関数パラメータ N_y, N_z は成形中の素板内部で消費される変形仕事率が最小になるように定める。

3-2 面内せん断ひずみ (γ_{xy}) の計算方法

図 3(a) に示す変形曲面上で、 $X = X_K \sim X_{K+2}$ の範囲にはさまれた軸方向に帯状をなす要素を考える。これを図 3(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、y 軸方向各位置において同一であるとする。要素 ABCD の境界 AB に生じる面内せん断ひずみ $(\gamma_{xy})_{K,J}$ は、この展開面上において X 軸と平行な x^* 軸と線分 AD とがなす角度 (ϕ) $_{K,J}$ より(4)式を用いて計算できるものとする。

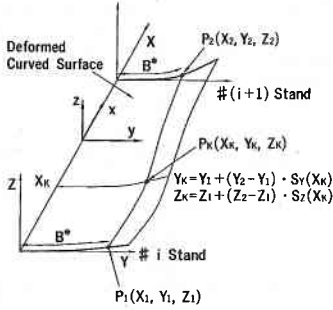


図1 変形曲線

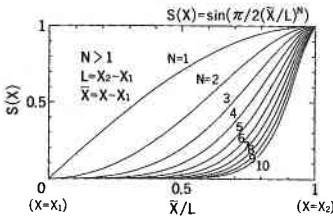


図2 形状関数 S(X) の計算例

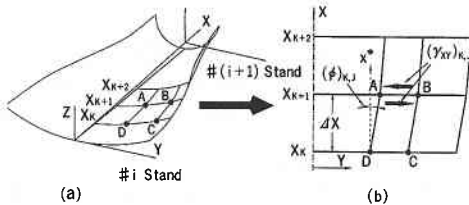


図3 面内せん断ひずみの計算方法

$$(\gamma_{xy})_{K,J} = (\phi)_{K,J} \quad (4)$$

3-3 力の釣合の条件式

図4には、分割後の幅方向帯状要素およびさらにそれを y 軸方向に分割した微小要素についての力の釣り合いを模式的に示す。

図4(b)に示す $X = X_K \sim X_{K+1}$ の範囲内にある幅方向帯状要素に作用する長手方向合力の釣り合い関係式は既報²⁾と同様に考える。

y (幅) 方向の釣り合い条件として、図4(c)に示す斜線部の要素に対して作用する幅方向力 $(F_y)_{K,J}$ は、その要素より板縁側にあるすべての要素に幅寄せを起こさせるのに必要な力、すなわち、それら各要素の上流側・下流側の境界に作用する面内せん断力の差分の総和に等しいと考えることができる。故に、(5)式が成立する。

$$(F_y)_{K,J} = \sum_{j=1}^J \{ (F_{xy})_{K-1,j} - (F_{xy})_{K-1,j} \} \quad (5)$$

解析に際しては、幅方向中央、即ち $J = 1$ の要素から板縁方向へ向かって、各要素につき、上記の幅方向の力

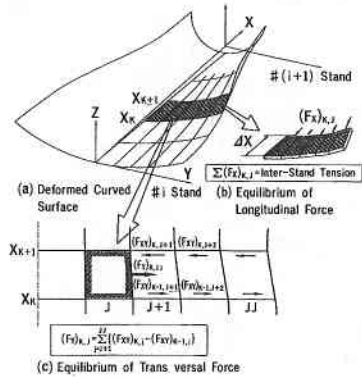


図4 分割要素内の力の釣り合い

の釣り合いを満足する幅方向膜ひずみを求めていく。その際、J 番目の要素について考えると、 $(F_{xy})_{K,J+1}, \dots, (F_{xy})_{K,J}$ は未知量であるので、(5)式を(6)式のように変形する。

$$(F_y)_{K,J} = (F_y)_{K,J-1} - \{ (F_{xy})_{K,J} - (F_{xy})_{K-1,J} \} \quad (6)$$

(6)式を y (幅) 方向の力の釣り合い条件式として用いることにより J 番目の要素の幅方向膜ひずみを決定する。計算の手順としては、まず、 $J = 1$ の要素に作用する幅方向の力 $(F_y)_{K,0}$ を仮定し、板縁方向へ向かって各要素について順次(6)式を満足する幅方向膜ひずみを算出し、それらを用いて各要素の下流側の辺に発生する面内せん断ひずみ $(\gamma_{xy})_{K,J}$ 、面内せん断応力 $(\tau_{xy})_{K,J}$ を求め、それらを順次釣合式に繰り込み、最後に板縁における境界条件 $(F_y)_{K,J} = 0$ が満足されるまで、 $(F_y)_{K,0}$ の値を修正して計算を繰り返す。

3-4 応力・ひずみ関係式

応力・ひずみの各成分は、ひずみ増分論により算出する。その計算方法は既報²⁾に準じる。

4. 計算のフロー

上記以外の計算手法は既報²⁾に準じる。拡張した解析モデル全体の計算の流れを図5に示す。

5. 広幅断面材の成形過程の解析例

デッキプレートの初期成形を例にとり、幅寄せに対する抵抗が素板の変形挙動に与える影響をみるため、異なる平坦部長さをもつ断面形状について計算を行った。表1に計算条件を、図6に解析によって得られた変形曲面形状の例を示す。

一般に平坦部長さが大きくなると、素板の幅寄せに対する抵抗が大きくなる。実成形時の素板の変形曲面形状としては、(1)幅寄せに対する抵抗が小さい場合は、図6

研 究 速 報

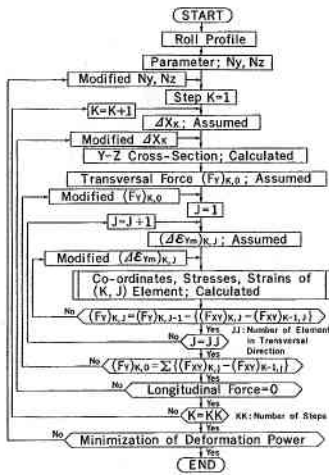


図 5 フローチャート

表 1 計算条件一覧

| | |
|--|--|
| Profile of Formed Sheet (Roll Profile) | |
| | L=40, 140, 215, 240, 540mm |
| Sheet Width | 200, 300, 550, 600, 1200mm |
| No. of Stand | No. 1 Stand |
| Guide-Roll Distance | 300mm |
| Bending Angle | 20° |
| Pass-Line | Horizontal Bottom Line |
| Speed | 40m/min |
| Properties of Sheet | Material : SPCE@ |
| | Young's Modulus : E=206000N/mm ² |
| | Strain Hardning : H= 1370N/mm ² |
| | Yield Stress : σ ₀ = 181N/mm ² |
| | Poisson's Ratio : ν= 0.3 |

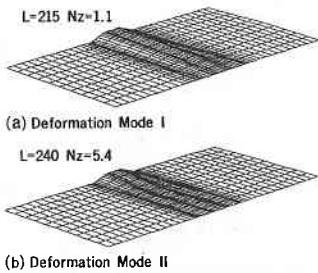


図 6 変形曲面形状

(a)のように、入側ガイドの直後から溝部が緩やかに立ち上がる変形をするが、(2)幅寄せに対する抵抗が大きくなると、素板中央がいったん凹み、その後、ロール直前で溝部が急激に立ち上がる変形挙動を示すことが知られている。本解析モデルでは、この凹みそのものを表現することはできていないが、形状関数パラメータ N_z の最適値が大きくなり、図 6 (b)に示すように、その凹みに近い

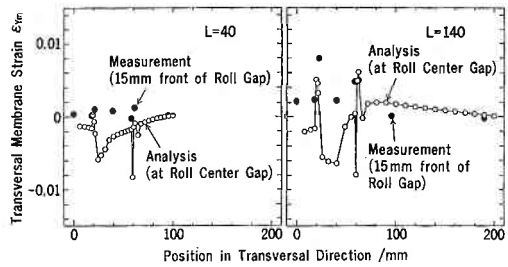


図 7 ロール直下近傍における幅方向膜ひずみ分布の解析値と実測値の比較

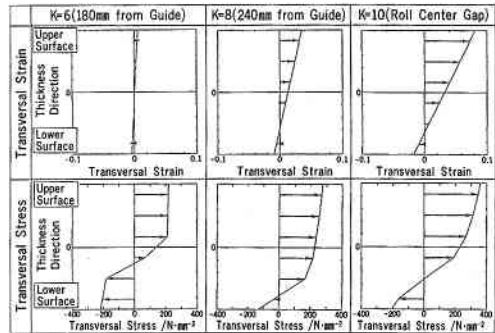


図 8 ウェブ・フランジ間折り曲げ部の幅方向ひずみ・応力の板厚方向分布の推移 (平坦部長さ $L=240\text{mm}$)

変形曲面形状が予測できていることがわかる。

図 7 にロール直下近傍における幅方向膜ひずみ分布の解析値と実測値³⁾との比較を示す。この種の広幅断面材の成形では、平坦部長さが大きくなると、折り曲げ部に大きな局所的な幅方向伸びが発生する。本解析は、この局所伸びの値についてははば妥当な結果を与えていることがわかる。

次に図 8 には、ウェブ-フランジ間の折り曲げ部に発生する幅方向ひずみと幅方向応力の板厚方向分布の推移を示す。K=6 段階では、幅方向の曲げにより上面側で引張、下面側で圧縮の変形をうけ、弾塑性変形を起こしている。K=8, K=10 では、平坦部の幅寄せに対する抵抗が引張力となって効いてくるため、板厚方向の大部分が引張りの弾塑性変形を起こす。とくに K=10 では幅方向の曲げひずみも最大となるため、上表面では 8% もの幅方向伸びを示している。

図 9 には、各平坦部長さの場合のロール直下における幅方向膜ひずみ ϵ_{vm} の幅方向分布、図 10 には、ロール直下における折り曲げ部の幅方向膜ひずみを示す。平坦部長さが増加すると、より大きな幅方向引張力が誘起され、幅方向伸びは大きくなる。L=240mm の場合には、ロール直前でいったんウェブ部が凹んだ後、急激に変形するため、結果として幅方向伸びは急激に大きくなる。

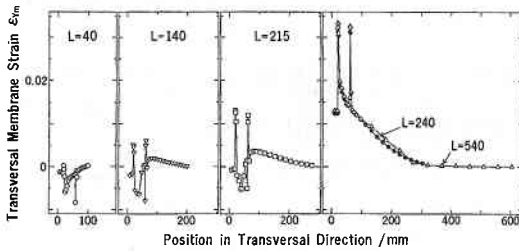


図 9 ロール直下の幅方向膜ひずみの幅方向分布

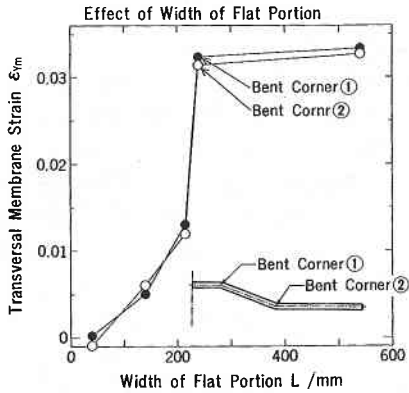


図 10 ロール直下の折り曲げ部の幅方向膜ひずみ

L=240mm と L=540mm の場合の幅方向膜ひずみが、幅方向位置300mm 以内でほとんど一致しているのは、溝部形成に要する展開長の増加がこの範囲の幅方向伸びで相殺され、結果的に、幅方向位置300mm～縁部の範囲は、入側ガイドからロールまで直進する状態となり、その部分に面内せん断力がほとんど発生しないためである。

図11には、ウェブ中央部に発生する長手方向膜ひずみの推移をしめす。平坦部長さが大きくなると、ウェブ部の長手方向の伸びは大きくなる。L≦215mm の範囲では、素板は、入側ガイド直後から緩やかに変形するが、L≧240mm の範囲では変形の挙動がロール直前での急激な変形に遷移するため、長手方向膜ひずみの最大値が大きくなる。L=240mm と L=540mm の場合の長手方向膜ひずみに差が現れないのは、幅方向膜ひずみの傾向と同様に、幅方向位置300mm より外側の範囲がほとんど変形しないためである。

図 14 に変形仕事率と平坦部長さの関係をしめす。L≦240mm の範囲では平坦部長さの増加とともに変形仕事率は増加するが、L≧240mm となると先に述べた理由

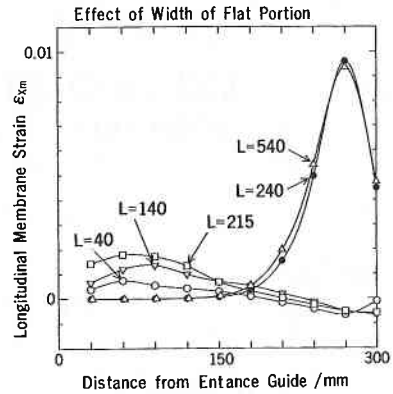


図 11 ウェブ中央部の長手方向膜ひずみの推移

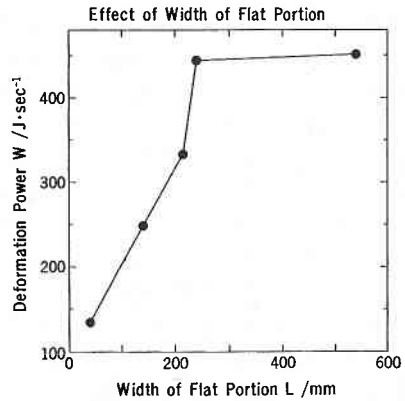


図 12 変形仕事率

により、変形仕事率はほとんど変化しない。

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の再構成を試みた。拡張した解析モデルを用いて広幅断面材の解析を行った結果、幅寄せに対する抵抗がひずみや応力に与える影響について、より妥当な結果を得ることができた。

次報では、本拡張解析モデルにより検討した広幅断面材の成形の際の変形仕事率や膜ひずみに対する各種成形条件の影響について報告する。(1993年3月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内, 千葉: 平成元年春塑加構論, (1989), 87
- 2) 木内, 高田橋: 塑性と加工, 27-306(1986), 874
- 3) 鈴木, 木内ほか: 塑性と加工, 18-196(1977), 365