

ロールフォーミング加工の理論と実際

——電縫管・形材を中心として——

Theory and Practice of Roll-Forming Process

木 内 学*

Manabu KIUCHI

ロールフォーミング加工に関する諸問題を整理して総括的に示し、次いで成形過程にある素材の変形挙動・変形量・成形荷重・成形トルクなどの推定あるいは評価について、従来試みられてきた幾つかの解析方法の概要を示す。

1. まえがき

ロールフォーミング加工は、所要の形状・寸法を満足する横断面と長手方向に真直または所要の形状を有する管材・形材・プレート材・サッシ材などを連続的に成形する加工法で、その製品の用途は、建築・土木構造用部材、プラント配管用部材、船舶・航空機・自動車・家電製品・住宅用部材、などきわめて多岐にわたっている。板材成形加工の分野においてその役割は大きく、近年、ますます量的ならびに質的拡大を続けているが、それとともに製品品質の高度化や成形プロセスの合理化・最適化等の要求も高まり、これらの工業的・技術的要求に応えるための学問的基盤の確立が急がれているのが現状である。

これまでにも、ロールフォーミング加工の体系化を目指して、様々の角度から研究が行なわれてきたが、問題の広がりが大きいため、その全体像を正確に把握することは容易ではなく、未だ十分その目的が達せられたとは言いがたい。したがって、現時点においても検討すべき課題は多いが、本報では、まずロールフォーミング加工に関する諸問題を整理して総括的に示し、次いで成形過程にある素材の変形挙動や成形荷重・成形トルク等について従来試みられてきたいくつかの解析手法に関連する問題に限定してその概要を紹介し、この分野における今後の研究の発展の一助としたい。

2. 問題の分析と整理

ロールフォーミング加工に関する諸問題を実際生産の面から整理すれば、大略次のようになる。(1)ロールプロフィールの設計すなわち各ロールの形状・寸法とそのシーケンスの決定法およびその最適化に関する問題、(2)ロールフラワー・圧下設定・ロールの空間的配置などを含むパススケジュールの決定法とその最適化に関する問

* 東京大学生産技術研究所 第2部

題、(3)ロールの位置制御・圧下制御等成形プロセスにかかわる要因の制御による製品の形状・寸法の制御に関する問題、(4)成形荷重・成形トルク及び消費動力などの算定方法、各スタンドへの配分方式等に関する問題、(5)所要の機能と精度を満足する成形ロールの構成・製作・配置・管理などに関する問題、(6)成形機の構造・剛性・精度・その他駆動方式・ロール組替方式など、成形機全体の設計・製造・管理に関する問題、(7)生産ラインの構成とライン全体の制御・管理、更に切断機、レベラーなどラインを構成する附属設備に関する問題。

これらの実際生産の場における諸問題の根底には、ロールフォーミング加工における材料の変形挙動、すなわち成形過程において材料が受ける変形の形態とその挙動や特性などにかかわる基礎的な問題が幾つかある。たとえば、(1)成形過程において材料の各部分がたどる変形径路、変形形態とその決定のメカニズムに関する問題、(2)各種成形条件因子の影響下での材料各部の変形形態・変形径路と製品の形状・寸法との関係に関する問題、(3)各成形ロールが材料に加える拘束の形態とその決定のメカニズムに関する問題、更にこれらの要因と材料の変形形態との関係に関する問題、(4)成形荷重・成形トルクおよび材料の実成形速度の決定のメカニズムに関する問題、更に各種成形条件因子がこれらに与える影響に関する問題、(5)材料の機械的特性が上記諸問題に与える影響に関する問題、(6)所要の成形断面の形状・寸法が上記諸問題に与える影響に関する問題、などが主たるものである。

3. 変形挙動の解析と問題点

これまで行われてきた種々の実験的研究を通して、ロールフォーミング加工の成形過程において発生する多くの問題またはその要因は次の3点に集約されると言える。すなわち、(1)ロールフォーミング加工での材料の変形の特徴は、本来の目的である断面成形のための幅方向曲げ

変形に対して各種の付加変形が単独あるいは復合して加わり、成形域における幅方向曲げ変形ならびに非成形域の挙動に本質的な影響を与えることにある。したがって成形の過程において加わるこの付加的ひずみ成分を的確に把握し、その値の大小・分布形態・加わる径路などを明らかにすることがきわめて重要となる。具体的に言えば、成形過程にある材料の変形曲面すなわち材料のロールへの流入ならびに流出径路を正しく知り、材料各部のひずみ径路を明らかにすることが、第1の問題となる。(2) ロールが材料に与える束縛の形態、すなわちロールと材料の接触領域および接触圧力の状態を正しく把握しロールの形状、寸法とその空間的配置の効果を含めてこの束縛の形態ならびに強弱が材料の変形径路をも含めて所要断面の成形に与える影響を明らかにすることが第2の問題となる。(3) (1),(2)をふまえて製品の形状や寸法精度あるいは成形荷重・成形トルクが定まるメカニズムを定量的に明らかにすることが第3の問題である。

ところで成形中の材料はきわめて複雑な三次元的な変形曲面を呈しており、上述の(1)~(3)の問題を含めてこの材料の変形の問題を全体的・統一的に扱うことは非常に難しく、厳密な意味では事実上その解析は不可能に近い。また、材料の変形に対する境界条件の不明確さなどが問題を一層複雑化している。特に成形中の材料の変形に関する理論的解析を進めていくうえで多くの問題のうち主なものを列挙すると概略次のようになる。(1) 三次元的な大たわみの変形問題であり、かつ一般的に軸対象その他の特別の幾何学的条件の適用ができない。(2) 材料の弾性的挙動が無視できず、弾塑性問題としての扱いが必要不可欠である。(3) 境界条件が不確定でロールによる種々の拘束状態が局部的に混在しており、かつまた自由境界が大半を占めている。したがって厳密な意味で外部的に変位または力を明確に規定することが可能な境界が非常に少ない。(4) 材料の流れを考慮した定常変形問題として扱う必要がある。(5) 成形の本来の目的が曲げ加工であるため、曲げ理論に基づく解析が必要であり、単なる膜理論の適用はできない。(6) ひずみの方向がひんばんに逆転するため、その際弾性回復過程を考慮する必要がある。更に解析の目的から考えて次の点も考慮されなくてはならない。(7) 材料の各要素ごとに異なる複雑な変形径路・変形様式を把握できなければならない。(8) ロールの直前・直下における急激な変形を把握できなくてはならない。(9) 製品またはロールの形状の多様性に伴って扱う材料の変形挙動が異なるので、その多様性に対応できる一般性のある解析手法が要求される。(10) 材料内に発生するひずみの量は、折り曲げ部の幅方向曲げひずみを除いてたかだか数%以内と小さいが、それらのひずみが製品形状等に与える効果は大きいので相応の解析精度が要求される。

一方、従来行なわれてきた材料の変形挙動に関する研究は大別して、(1) 実験的に変形曲面の形状やひずみの測定を積み重ねて材料各部の変形の形態や推移を系統的に把握しその特質を解明する。(2) 成形中の材料の変形曲面の形状を適当な関数を用いて近似的に表示し、それをもとにひずみ成分・応力成分の発生状況とそれらの挙動をも含めて、上述の問題点の解明を図る。(3) 材料の各要素の変形挙動を個別的に抽出し、対応する応力状態の解析を通して付加的ひずみ成分の製品形状等に与える影響について検討する。(4) 測定されたひずみ成分の挙動に対応する応力成分の挙動を忠実に解析し、その結果から変形の特質や製品形状の決定のメカニズム等の解明を図る、などである。いずれも純理論的なものではなく、実験的な測定データをふまえて行われた近似的手法に基づくものであり、いわゆる加工理論として体系づけられているものではない。しかしながら、現在までの研究状況の概要を把握し、上述の問題の特質を再認識し、かつそれらに関する研究の進展を期する意味から以下に主な研究内容あるいは結果を紹介する。

4. 変形曲面形状の関数近似による解析 (1)^{4) 5) 6)}

益田・室田らは、電鍍管のブレイクダウン成形に相当する円弧形半開断面の単スタンド成形に関して、次のような変形曲面形状の関数近似を行ない、それに基づいてひずみ成分の挙動や消費動力などについて種々検討を行った。以下にその概要を示す。座標軸・記号等については図1を参照されたい。

まず変形曲面形状を数式化する際に次の仮定を用いる。(1) ここでいう変形曲面とは板の中央面のなす曲面である。(2) 材料の z 断面は半径 $R(z)$ の円弧で、円弧の長さは板幅 $2b$ に等しい。(3) 板幅の中心線の y 座標 $Q(z)$ は、 $1/R(z)$ に比例する。(4) 各流線は $z = \infty$ で z 軸に平行である。

仮定(2)(3)より変形曲面の方程式は

$$f(x, y, z) = x^2 + \{y - Q(z) - R(z)\}^2 = \{R(z)\}^2, \quad 1/R(z) = \kappa Q(z) \cdots (1)$$

次に板幅の中心線($P/b = 0$)の流線を表わす函数 Q

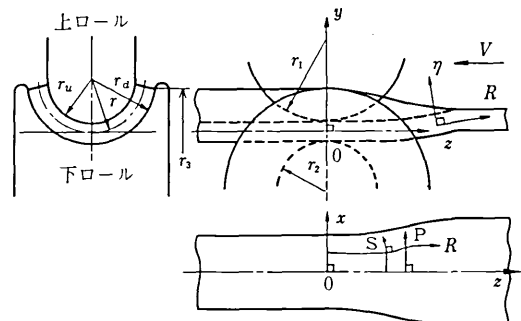


図1 ブレイクダウン成形の変形曲面の近似

(z)として仮定(4)を考慮して次式を仮定する。

$$Q(z) = \mu(1 + \nu z) \exp(-\nu z) \dots\dots\dots (2)$$

ただし $\kappa \cdot \mu \cdot \nu$ は変形曲面形状を規定する係数
曲面の方程式(1)を斜交曲線座標 (R, P) で表すと

$$x = R \sin(P/R), \quad y = R\{1 - \cos(P/R)\} \\ + Q\{u(R)\}, \quad z = u(R) \dots\dots\dots (3)$$

ただし $u(R)$ は(1)の後段の式の逆関数である。

(3)式に関していわゆる曲面の1次の規格量 E, F, G ,
2次の規格量 L, M, N を導入すると、次の結果が得ら
れる。まず、変形曲面の法曲率 $1/\rho$ は

$$1/\rho = (L + 2Mn + Nn^2)/(E + 2Fn + Gn^2),$$

ここで n は法曲率の方向を示し、 $n = dP/dR \dots\dots (4)$

R 曲線と P 曲線の交角を w , n 方向と R 曲線のなす角を
 α とすると、

$$\tan \alpha = (n \sin w) / \{(ds/dR) + n \cos w\},$$

$$\left. \begin{aligned} w &= \sin^{-1} \sqrt{(EG - F^2)/EG}, \\ ds/dR &= \sqrt{E} \\ \therefore \tan \alpha &= \{n \sqrt{EG - F^2}\} / \{E \sqrt{G + nF}\} \end{aligned} \right\} (5)$$

更に $\partial(1/\rho)/\partial n = 0$ を解いて主曲率の方向 n_1, n_2 , 主
曲率 $1/\rho_1, 1/\rho_2$ は次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} n_i &= g \pm \sqrt{g^2 - h}, \\ \text{ただし, } g &= (GL - EN)/2(FN - GM), \\ h &= (EM - FL)/(FN - GM) \\ 1/\rho_i &= (L + 2Mn_i + Nn_i^2)/(E + 2Fn_i + Gn_i^2), (i=1, 2) \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

また(1)(2)式の係数 $\kappa \cdot \mu \cdot \nu$ についてはロール出口
($z = 0$)における次の境界条件より決定される。(1) z
断面は半径 r の円弧である。(2) 板幅の中心線($P=0$)の
曲率 $1/\rho_R$ は上ロールの曲率 $-1/(r_1+t)$ に等しい。(3) 板
縁($P=b$)の曲率 $1/\rho_R$ は下ロールの曲率 $\cos(b/r)/\{r_3$
 $+ t \cos(b/r)\}$ に等しい。ただし r_3 は下ロールと板縁の
接触点の半径を表す。 $(r_3 = r_2 + r_d(1 - \cos(b/r)))$, 以上
の条件から $\kappa \cdot \mu \cdot \nu$ は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= -\{r_1 + r_3 + t(1 + \cos(b/r))\} / \\ & r^2 \{r_3 + t \cos(b/r)\} \{ \sec(b/r) - 1 \} \\ \mu &= 1/\kappa r, \quad \nu = \sqrt{-\kappa r / (r_1 + t)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

上記の諸関係から材料内に発生するひずみ成分・ひず
み速度成分を求めると次のようになる。

$$\text{曲げの主ひずみ: } \epsilon_1 = \eta/\rho_1, \quad \epsilon_2 = \eta/\rho_2 \dots\dots (8)$$

$$\text{直交曲線座標 } R, S \text{ 方向の曲げひずみ成分は} \\ \epsilon_R = \eta/\rho_R, \quad \epsilon_s = \eta/\rho_s, \quad \gamma_{Rs} = \eta/\rho_{Rs} \dots\dots (9)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} 1/\rho_R &= (1/\rho_1) \cos^2 \alpha_1 + (1/\rho_2) \sin^2 \alpha_1 \\ 1/\rho_s &= (1/\rho_1) \sin^2 \alpha_1 + (1/\rho_2) \cos^2 \alpha_1 \\ 1/\rho_{Rs} &= -(1/\rho_1 - 1/\rho_2) \sin 2\alpha_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots (10)$$

であり、 α_1, α_2 は(5)式に n_1, n_2 の値を代入して求め
る。

材料の流入速度 V を近似的に $V = -dz/dt$, ただし
 $t =$ 時間, で表すと、曲げひずみ速度成分は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_R &= -(dR/dz) \{ \partial(1/\rho_R) / \partial R \} \cdot \eta \cdot V, \\ \dot{\epsilon}_s &= -(dR/dz) \{ \partial(1/\rho_s) / \partial R \} \cdot \eta \cdot V, \\ \dot{\gamma}_{Rs} &= -(dR/dz) \{ \partial(1/\rho_{Rs}) / \partial R \} \cdot \eta \cdot V \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

更に次の仮定、(1) 膜ひずみは曲げひずみに対して小
さく、成形仕事の面からは無視できる。(2) 材料の上下
表面が二軸曲げによって、降伏したのちは、(11)式から
求まる曲げひずみ速度は塑性成分のみからなる。(3) η
に推直な断面上の応力成分 $\sigma_\eta \cdot \tau_\eta \cdot \tau_{\eta s}$ は零である。

(4) ミーゼスの降伏条件が成立する。(5) 降伏後の応力
-ひずみ関係はミーゼスの方程式に従う、(6) ポアソン
数 m は弾性域・塑性域ともに2である、を用いて成形作
事の計算式を求める。

まず弾性域においてはフックの法則、 $\epsilon_R = (\sigma_R - \sigma_s)/2$
 $/E$, $\epsilon_s = (\sigma_s - \sigma_R)/2/E$, $\gamma_{Rs} = \tau_{Rs}/G = 3\tau_{Rs}/E$ が成立し、
この関係より降伏条件 $\sigma_R^2 + \sigma_s^2 - \sigma_R \sigma_s + 3\tau_{Rs}^2 = \sigma_e^2 = 3k^2$
は次式で表される。

$$\epsilon_R^2 + \epsilon_R \epsilon_s + \epsilon_s^2 + \gamma_{Rs}^2/4 = (3/4) \epsilon_e^2,$$

ただし ϵ_e は材料の弾性限界ひずみ、 $\dots (12)$

また(12)式より材料各点における相当ひずみと相当曲
率 $\epsilon_{e,q}$ が次式で与えられる。

$$\epsilon_{e,q} = (2/\sqrt{3}) \sqrt{\epsilon_R^2 + \epsilon_R \epsilon_s + \epsilon_s^2 + \gamma_{Rs}^2/4},$$

$$1/\rho_{e,q} = (2/\sqrt{3}) \sqrt{(1/\rho_R)^2 + (1/\rho_R)(1/\rho_s) + (1/\rho_s)^2 + \\ + (1/\rho_{Rs})^2/4} \dots\dots\dots (13)$$

材料の成形に消費される仕事率を、弾塑性境界よりロ
ール出口に至る領域内の塑性ひずみ仕事率 \dot{W}_1 , ロール出
口での曲げ戻し仕事率 \dot{W}_2 , ロールと材料間の摩擦仕事
率 \dot{W}_3 にかけて考えると、それぞれ以下の式で示される。

$$\begin{aligned} \dot{W}_1 &= \int_0^z \int_{-b}^b \int_{-t}^t \dot{w}_1 d\eta dP dz = \dots\dots (14) \\ &= \sqrt{3} k t^2 V \int_{-b}^b \int_{-t}^t (1/\rho_{e,q}) dP dz \end{aligned}$$

ただし、 $z = z_p$ は弾性境界線を表し、

$$\dot{w}_1 = 2k \sqrt{\dot{\epsilon}_R^2 + \dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_s + \dot{\epsilon}_s^2 + \dot{\gamma}_{Rs}^2/4}$$

$$\dot{W}_2 = \int_0^V \int_{-b}^b \int_{-t}^t \dot{w}_2 d\eta dP dz = 2kt^2 V \int_{-b}^b (1/\rho_R)_{z=0} dP \\ \dots\dots\dots (15)$$

ただし、曲げ戻し過程で応力主軸は (R, S, η) 座標に一
致し、 $\dot{\epsilon}_R : \dot{\epsilon}_s : \dot{\epsilon}_\eta = 1 : 0 : -1$ の関係が満足されるものと
仮定すると、曲げ戻しひずみ速度は $\dot{\epsilon}_R = (\eta/\rho_R)_{z=0}$, $\dot{\epsilon}_s = 0$,
 $\dot{\epsilon}_\eta = -\dot{\epsilon}_R$ となり降伏条件が $\sigma_R = \pm 2k$ となることから、
材料の単位体積当りの曲げ戻し仕事率は、 $\dot{w}_2 = \sigma_R \cdot \dot{\epsilon}_R = 2$
 $k(\eta/\rho_R)_{z=0}$ となる。

$$\dot{W}_3 = 2\mu_d P_d (V_d - V) = (\dot{W}_1 + \dot{W}_2)(r_3/r_2 - 1) \dots (16)$$

ただしロールより材料に作用する力としては、ロール出口に作用する3点支持モデルの集中力を仮定し、凸ロールより板中心点に作用する力を P_u 、凹ロールより板縁に作用する力を P_d とすると $P_u = 2P_d \cos(b/r)$ の関係が成立する。また凸ロールと材料間の摩擦力を零と仮定し、成形に消費される有効な仕事率 $(\dot{W}_1 + \dot{W}_2)$ は凹ロールのみから与えられるものと考え、 $\dot{W}_1 + \dot{W}_2 = 2\mu_d \cdot P_d \cdot V$ 、 V = 材料の流入速度、 μ_d = 材料と凹ロール間の摩擦係数、が成立し、凹ロールと板縁の接触点の周速を V_d とおくと $V_d = V \cdot r_3/r_2$ が成立する。

けつきよく、全成形仕事率 $\dot{W} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2 + \dot{W}_3 = (\dot{W}_1 + \dot{W}_2)r_3/r_2$ となり、下(凹)ロールのトルク T_d と圧下力 P_u は上記の関係より次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} T_d &= 2\mu_d P_d r_3 = (\dot{W}_1 + \dot{W}_2)r_3/V \approx \Pi_0 r_3^2 k b t^2 \\ P_u &= T_d \cos(b/r) / \mu_d r_3 \\ &\approx \Pi_0 \cos(b/r) (1/\mu_d) r_3 k b t^2 \end{aligned} \right\} (17)$$

ただし、 Π_0 はロール寸法によりきまる定数であり、後の改良された解析結果により $\Pi_0 = \frac{1}{r_3} \{ (4/r) + (1/r_1) + \cos(b/r)/r_3 \}$ 、 k は材料の剪断降伏応力である(図2参照)。

5. 変形曲面形状の関数近似による解析(1)⁷⁾

木内は、変形曲面形状を近似的に表示する手法として形状関数 $S(X)$ を導入し、これを用いた解析を行った。以下その概要を示すが、変形曲面は材料(板材)の中央面のなす曲面を意味するものとし、表示に際しては図3に示すように空間固定の座標軸 (X, Y, Z) と中央面に固定の座標軸 (x, y, z) を用いる。形状関数 $S(X)$ とは、材料の要素またはその一点が、 $\#i$ スタンドのロール上(ロール直下)で占める空間的位置 $P_i(X_1, Y_1, Z_1)$ から $\#i+1$ スタンドのロール上(ロール直下)に占める位置

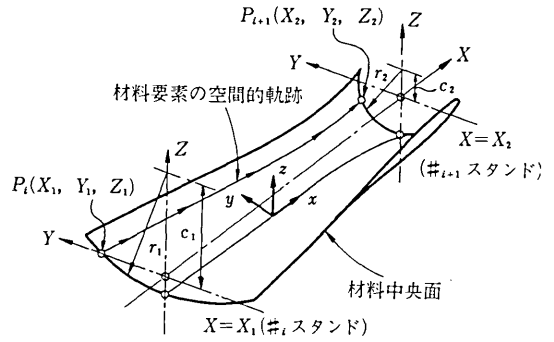


図3 スタンド間の変形曲面の近似

$P_{i+1}(X_2, Y_2, Z_2)$ へと移行する際に描く空間的軌跡の形状を規定する関数である(図3参照)。すなわち、材料内の一点は成形方向に X_1 から X_2 へ移動すると同時に水平方向・垂直方向にそれぞれ $(Y_2 - Y_1) \cdot (Z_2 - Z_1)$ の変位を起こすが、これらの変位が $X_1 \sim X_2$ の過程でどのように起こるかを規定する関数と考える。ただし、実際の成形時には、材料の各要素はそれぞれ異なる空間的軌跡に沿ってロールからロールへと移行し、 $\#i+1$ ロールの直前で急激に変位を起こす要素もあれば、比較的ゆるやかに変位しながら $\#i+1$ ロールへ進入する要素もあり $S(X)$ としてはこのような空間的軌跡の多様性を表示しうることが要求される。逆にそのような多様性を満足できるものであれば、 $S(X)$ の関数形はどのようなものであってもよい。ここで用いている $S(X)$ は次式で示される

$$\left. \begin{aligned} S(X) &= \left[\frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{X_2 - X_1} \left\{ X - \frac{X_2 + X_1}{2} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} + \nu(X_2 - X)(X - X_1) \right] \\ &\quad \cdot \exp \{ -\nu(X_2 - X_1 + A/\nu)(X_2 - X) \} \end{aligned} \right\} \dots (18)$$

上式のパラメータ A は材料の各点が $\#i+1$ ロールへ進

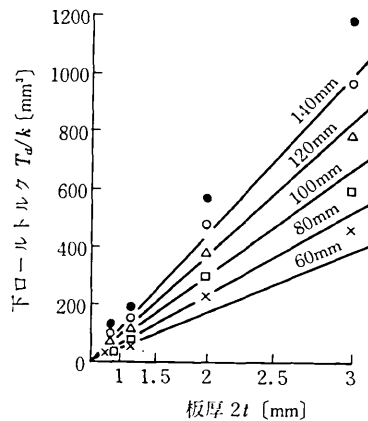
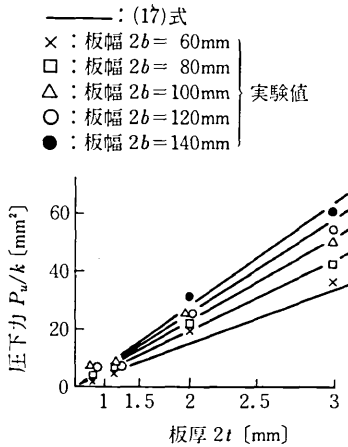


図2 上記モデルによる計算例

入する角度も規定し、 ν は水平変位・垂直変位が起こる際の X に対する偏りの程度を規定する。一般的には $A \cdot \nu$ は材料の幅方向の各点で異なる値をとり y の関数と考えるべき性質のものである。同様の意味で # i ロールの出側の軌跡の形状についても考慮する必要があるが、(18)式はこの点について省略してある。けっきょく、(18)式の $S(X)$ は $X = X_1, X_2$ において次の関係を満足する。

$$\begin{aligned} (X = X_1) : S(X) = 0, \quad \partial S(X) / \partial X = 0, \quad \text{および} \\ (X = X_2) : S(X) = 1.0, \quad \partial S(X) / \partial X = A \quad \dots (19) \end{aligned}$$

変形曲面の境界 $X = X_1, X_2$ における条件は複雑でかつ必ずしも明確でないが、解析を進めるうえで単純化して考え、次の仮定をおく、(1) ロール直下においては材料の横断面の形状はロールプロフィールに対応して既知であり一義的に定まる。(2) 成形前に幅方向の一直線上にあった各点は、各スタンドのロール直下を同時に通過すると境界値は、材料の中央面固定の座標 (x, y) を用いて次式のように示される。

$$\left. \begin{aligned} (X = X_1) : X_1 = F_1^*(x_1, y), \quad Y_1 = F_2^*(x_1, y), \\ Z_1 = F_3^*(x_1, y) \\ (X = X_2) : X_2 = F_1^{**}(x_2, y), \quad Y_2 = F_2^{**}(x_2, y), \\ Z_2 = F_3^{**}(x_2, y) \end{aligned} \right\} (20)$$

関数 $F_i^*(x_1, y), F_i^{**}(x_2, y)$ はロールプロフィールの形状寸法により定まり、任意の形状を表すものであってよい。形状関数 $S(X)$ と上記の境界値を用いて、# $i \sim i+1$ スタンド間の材料の変形曲面形状を次式で近似する。

$$\left. \begin{aligned} X = F_1(x, y) \\ Y = F_2(x, y) = F_2^*(x_1, y) + \{F_2^{**}(x_2, y) - F_2^*(x_1, y)\} S(X) \\ Z = F_3(x, y) = F_3^*(x_1, y) + \{F_3^{**}(x_2, y) - F_3^*(x_1, y)\} S(X) \end{aligned} \right\} \dots (21)$$

パラメータ $A \cdot \nu$ の決定法についてはエネルギー法の適用などが考えられるが未だ有効な解析的手法が確立されていない。実際的には実成形時の変形曲面形状の測定値を参考にしてある程度までは推定が可能である。ここでは $A \cdot \nu$ の決定に関する細かい議論は省略し、変形曲面形状の測定結果よりそれらの値を仮定して解析を進める。

成形前の材料に長手 (x) 方向に dl の長さを有し幅方向に帯状をなす材料要素を考え、成形過程において、この材料要素が(21)式で表される変形曲面(以下基準曲面と呼ぶ)に沿って漸進的に成形されていく過程を考える。その場合、変形の過程を規定する拘束条件を導入し、実際の成形時の状況にできるだけ近いシミュレーションが実現するように配慮する必要があるが、ここでは一例として比較的単純な次の仮定を用いる。(1) 材料要素の横断面上の各点は成形中に常に同一平面内にある。(2) 材料要素の横断面を含む平面は、 X 軸に垂直 (case 1) または $X = X_1, X_2$ における境界断面の長手方向曲げ中心軸

と $X-Z$ 面と交点を $S(X)$ を用いて結んだ曲線 S^* に垂直 (case 2) な状態を保つ (図 4 参照)。(3) 材料要素に生じる内部応力の X 方向の合力は成形の過程で一定または零である。その他、材料の幅方向の変形、さらに縁部における力学的条件などが考えられるが、ここでは考慮していない。上記の拘束条件を満足する材料要素の変形を段階を追って決定し、ひずみ増分・応力増分を次々と求め加算していくことにより材料全域にわたる応力とひずみの分布形態と推移を求める。

実際の計算に際しては、材料要素をさらに $y = \text{const}$ の線に沿って幅 (y) 方向に分割し、再分割された微小領域内では応力とひずみが一様であるとみなしてある。計算の手順を簡単に示すと、まず長手方向に第 i 段階までの計算が終了し、材料要素の前端の横断面と曲線 S^* との交点の X 座標が X_i^0 であるとする。そこで第 $i+1$ 段階に上述の X 座標が X_{i+1}^0 にきたと仮定して、その場合の幅方向の各分割領域におけるひずみ増分・応力増分を求める。その結果得られた応力の X 方向の合力が零または一定値にならないければ、仮定した X_{i+1}^0 の値を修正して計算をやりなおし、 X 方向の合力が所定の値に収束するまで計算を続ける。このような手段を $X = X_1$ から $X = X_2$ まで繰返す。

ひずみ増分の定義は次式による。すなわち、 $y = \text{Const}$ なる曲線に沿う x 方向の膜ひずみの第 i 段階・幅方向第 j 分割領域における増分 $(\Delta e_{xx})_{ij}$ 、同じく $x = \text{const}$ なる曲線に沿う y 方向の膜ひずみの同分割域における増分 $(\Delta e_{yy})_{ij}$ は、第 i 段階までに材料要素が進む基準曲面に沿う x 座標を x_i 、幅方向 j 番目の分割点における y 座標を y_j として

$$\left. \begin{aligned} (\Delta e_{xx})_{ij} &= (dl_{ij} - dl_{i-1,j}) / dl_{ij} \\ (\Delta e_{yy})_{ij} &= (db_{ij} - db_{i-1,j}) / db_{ij} \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} dl_{ij} &= (\Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2 + \Delta Z_{ij}^2)^{1/2} \\ db_{ij} &= (\bar{\Delta} X_{ij}^2 + \bar{\Delta} Y_{ij}^2 + \bar{\Delta} Z_{ij}^2)^{1/2} \\ \Delta X_{ij} &= X(x_i, y_j) - X(x_{i-1}, y_j) \\ \bar{\Delta} X_{ij} &= X(x_i, y_j) - X(x_i, y_{j-1}) \\ \Delta Y_{ij} &= Y(x_i, y_j) - Y(x_{i-1}, y_j) \\ \bar{\Delta} Y_{ij} &= Y(x_i, y_j) - Y(x_i, y_{j-1}) \\ \Delta Z_{ij} &= Z(x_i, y_j) - Z(x_{i-1}, y_j) \\ \bar{\Delta} Z_{ij} &= Z(x_i, y_j) - Z(x_i, y_{j-1}) \end{aligned} \right\} \dots (23)$$

また、 x 方向、 y 方向の曲げひずみ増分 $(\Delta e_{xb})_{ij}, (\Delta e_{yb})_{ij}$ は、材料の板厚方向 (Z 方向) の座標を η で表し、

$$\left. \begin{aligned} (\Delta e_{xb})_{ij} &= \eta \{1/(\rho_x)_{ij} - 1/(\rho_x)_{i-1,j}\} \\ (\Delta e_{yb})_{ij} &= \eta \{1/(\rho_y)_{ij} - 1/(\rho_y)_{i-1,j}\} \end{aligned} \right\} \dots (24)$$

となる。ただし、 x 方向・ y 方向の曲率は(21)式の基準曲面の一次・二次の規格量 $E \cdot G \cdot L \cdot N$ を用いて $1/\rho_x = L/E, 1/\rho_y = N/G$ で与えられる。

応力増分の計算にはひずみ増分理論を用いるが、計算

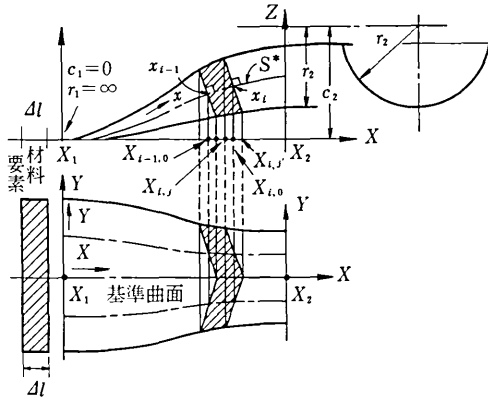


図4 基準曲面上での要素の変形

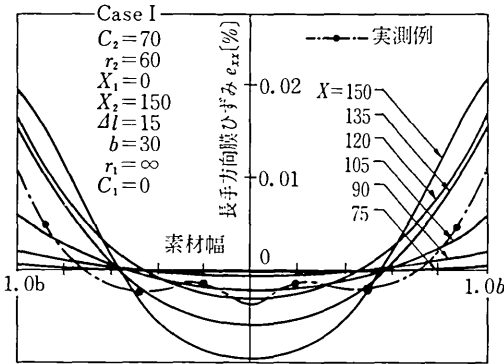


図5 上記モデルによる計算例

の簡略化のために次の仮定を用いる。(1) 基準曲面上の $x \cdot y$ 方向を主方向と考え、剪断ひずみ・剪断応用力成分を無視する。(2) 板厚方向の応力 σ_z は小と考え $\sigma_z = 0$ とする。(3) 曲げ変形に伴う中立面の移動を無視する(4) 曲げひずみと膜ひずみは重ね合わせが可能である。以上の仮定より次の諸式を用いる。

$$de_x = \Delta e_{xx} + \Delta e_{xy}, \quad de_y = \Delta e_{yy} + \Delta e_{yx}, \dots (25)$$

$$\text{(弾性式)}: \begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1, \nu \\ \nu, 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} de_x \\ de_y \end{bmatrix} \dots (26)$$

$$\text{(塑性式)}: \begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \end{bmatrix} = \frac{E}{Q} \begin{bmatrix} \sigma_y' + 2P, & -\sigma_x' \sigma_y' + 2\nu P \\ -\sigma_x' \sigma_y' + 2\nu P, & \sigma_x' + 2P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} de_x \\ de_y \end{bmatrix} \dots (27)$$

ただし、 $P = (2H/9E) \cdot \bar{\sigma}^2$; $Q = R + 2(1-\nu^2)P$,
 $R = \sigma_x'^2 + 2\nu\sigma_x'\sigma_y' + \sigma_y'^2$, $\bar{\sigma} = \sqrt{3(\sigma_x'^2 + \sigma_x'\sigma_y' + \sigma_y'^2)}$
 $E \cdot \nu$ は弾性係数, H は加工硬化係数

以上の解析手法に基づく長手方向膜ひずみ e_{xx} の分布形態とその推移の計算例を図5に示す。

6. 縁部の長手方向伸び変形とその量的評価に関する問題

前節までに示した手法は、成形中の材料の変形挙動を全体的にとらえて解析しようとするものであり、電縫管

の成形に関して言えば、上記の例以外にも、生田目⁽⁸⁾やY. A. Mednikov⁽⁹⁾等によって同様の試みがなされている。これらの解析手法が十分に改善され一般化されて実成形に適用可能となれば、ロールフォーミング加工に関する問題の大部分これらの手法の範囲内で解明されることになるが、現状では未だその域に達していない。そこで問題をもう少し細分化して抽出し、実成形の際の材料の局部的な変形挙動に注目して検討してみる。

成形中に材料の縁部に発生する長手方向の伸び変形とそれに起因する縁波の発生は、電縫管をはじめ各種製品の成形に際して、最も基本的かつ重要な問題である。そこでこの縁伸び変形量を予め推定し、それを一定量以下に抑制し縁波の発生を防止すべく、ロールフラワーやパスラインの設計を行ない成形のプロセスを構成していく試みが数多くなされてきた。従来種々の形で提案されている成形に要するスタンド数の決定法も、基本的には、各々の評価法に基づいてこの縁伸び量を一定範囲内に抑えるためにスタンドピッチとスタンド数をどのように組み合わせるかという考え方を示していると言える。

縁伸び量を評価する場合、最も単純な考え方は、成形過程において材料要素のたどる軌跡流線が直線的であると仮定し、各々の軌跡長の相対的な大小関係を求める方法である。例えば、G. Schulze⁽¹⁰⁾は図6において縁部の伸び量 Δl を次式で求めることを提案しているが、

$$\Delta l = \sqrt{x^2 + y^2 + l^2} - l \div (x^2 + y^2)/2l \dots (28)$$

この方法はあくまで直線で仮定された変形曲面に基づくものであり、しかも既に指摘したロール直前における材料の急激な変形などを考慮していないという意味から、実成形に Δl の値を直接的に適用することには問題があり、あくまで一応の目安を得る手法として考えておくべきである。同様の意味で加藤⁽¹³⁾は $\Delta l \propto y^2/l$ なる特性を有するものであることを指摘している。

生田目⁽⁸⁾⁽⁹⁾は電縫管のブレイクタウン成形に対応する円弧形断面の単スタンド成形に関し、成形時の変形曲面形状を近似的に関数表示し、それをもとに縁部に発生する長手方向伸びひずみ ϵ_0 のロール出口における値を求める次のような式を導いている。(使用記号は図7参照)

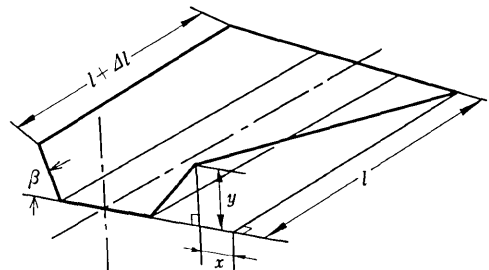


図6 流線の直線近似モデル

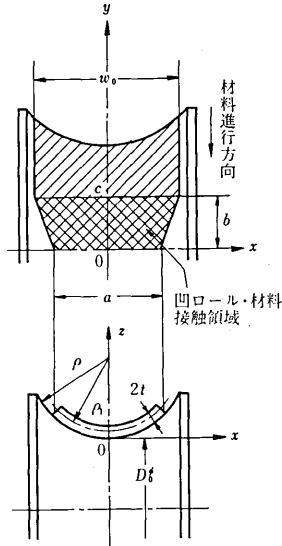


図7 ロールギャップ内での材料の変形モデル

$$\varepsilon_0 \doteq \frac{1}{2}(A^2 + B^2)$$

$$A = \{a(c-a)\} / 4b\sqrt{\rho_1^2 + (a/2)^2}, \dots\dots\dots (29)$$

$$B = (c-a)/2b$$

ただし、 $a = x-z$ 断面 ($y=0$)における板中央面の成形幅 $= 2\rho_1 \sin(w_0/2\rho_1)$, $b =$ ロールセンター($y=0$)から凹ロールへの板の接触開始点までの距離 $= 0.25 w_0^{0.4} D_0^{0.55} (2t)^{0.05} / \rho_1$, $c =$ 接触開始点における板中央面の成形幅 $= w_0(1 - 1.5 \times 10^{-2} \delta^{1.0, 0.25+0.18})$, $2t =$ 板厚, $w_0 =$ 板幅, $D_0 =$ 下ロールボルトムダイヤ, $\delta = 4\sqrt{w_0/D_0} \times (w_0/\rho_1)$, $1/\rho_1 =$ 板の成形曲率, $1/\rho =$ 凹ロールの成形曲率

更に馬場⁽¹¹⁾は Circular Forming 方式によるブレードダウン成形の縁部の伸びひずみ ε_0 について次の評価式を与えている。

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \ln \{ (X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2 + (kz)^2 \} / -\ln(kz) \quad (30)$$

ただし、 $X =$ ロール中心における両エッジ間の水平距離, $Y =$ ロール中心におけるエッジ高さ (材料中央部からの鉛直距離), $Z =$ 縁部と凹ロールとの接触投影長さ, $k = Z$ の補正係数 (1.2~1.4) であり、

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{\phi^2 - (\phi_i + 2Y_0)^2}$$

$$\phi = \phi_i + 2R - \sqrt{4R^2 - X_0^2} \quad (31)$$

$\phi_i =$ 凹ロールボルトムダイヤ, $R =$ 凹ロールカリバーの曲げ半径, $2X_0 =$ ロールに入る前の材料の両エッジ間の水平距離 (No.1 ロールでは $2X_0 =$ 材料幅 $2b$), $\phi =$ 凹ロールと材料の接触開始点の径, $Y_0 =$ ロールに入る前の縁部と中央部の鉛直距離 (No.1 ロールでは $Y_0 = 0$), である。

式(30) から明らかなように、この場合も縁部の軌跡

は直線であると仮定している。いま所要の製管外径を D , 使用スタンド数を n , フラワー上の縁部の座標を (x, y) とすると、縁部の軌跡長さが各スタンド間で一定と仮定して、 $x^2 + y^2 = (\alpha D/n)^2$ の関係が成立する。ただし、係数 α は Circular Forming では 2.2, Edge Forming では 2.0, Center Forming では 2.47 となる。Circular Forming の場合、曲げ角 θ を用いて x, y を示すと、 $x = (\pi D/2\theta) \sin \theta$, $y = (\pi D/2\theta)(1 - \cos \theta)$ であり、これより上述の関係は $\theta = 2\sqrt{3} \cdot \alpha / \pi n$ と書き改められ、かつ $2R\theta = \pi D$ より $R = \pi^2 \cdot n D / (4\sqrt{3} \cdot \alpha)$ なる関係が得られる。これらの諸式を用いて Circular Forming における縁部の伸びひずみ ε_0 を求めた計算例を図8に示す。

他方、縁部の長手方向伸び変形量を評価する問題は、見方を変えれば、ロールへの進入過程にある材料が、どの段階から実質的な変形を開始するかという問題を検討することと結びついている。Yu. A. Mednikov⁹⁾ は、成形時の材料の変形曲面形状を簡単な関数近似で表し、変形仕事 A を変形領域の長さ l の関数として求め、 A の極小条件 $\partial A/\partial l = 0$ より l を定めた。すなわち図9で l を変

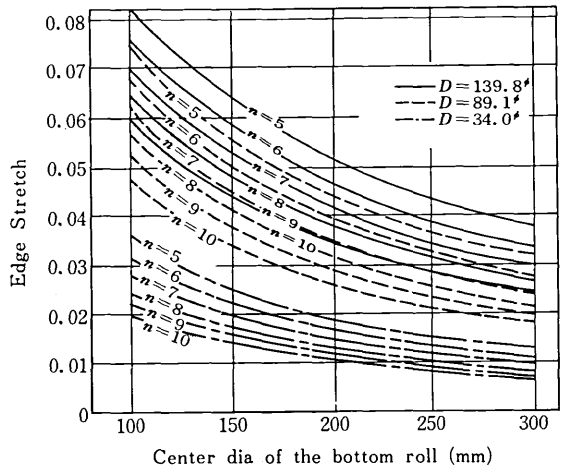


図8 式(30)による縁伸びの計算例

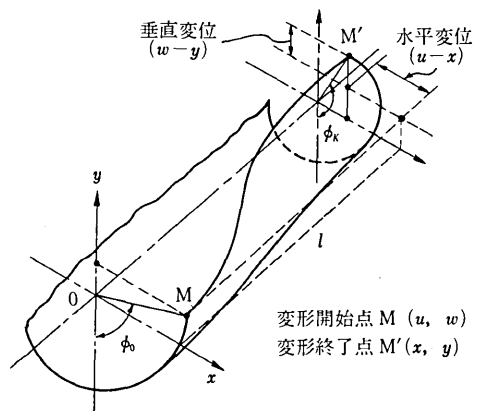


図9 スタンド間の変形曲面の近似

形領域長さとして、

$$l = \frac{kb\sqrt{b}}{\sqrt{t(1-\frac{8}{3}\frac{R}{t}\frac{\sigma_y}{E})}} \cdot \sqrt{\phi_k - \phi_0} \dots\dots\dots (32)$$

ただし、 $2b$ = 板幅、 ϕ_0 = 成形前曲げ角度、 ϕ_k = 成形終了時の曲げ角度、 R = 成形曲げ半径、 σ_y = 材料の降伏応力、 E = 材料の弾性係数、 k = 補正係数 で(32)式は理論式でなく実験的に補正して簡略化してある。

更にこの l を用いて縁部の伸びひずみ ϵ_0 を次式で求めている。

$$\epsilon_0 = \sqrt{(S/S_0)^2(1/l^2)[(u-x)^2 + (w-y)^2] + 1} - 1$$

ただし、 S_0 、 S は成形前後の材料の局部的な幅寸法を表し、特別の場合を除けば、 $(S/S_0) \div 1.0$ と考えることができる。

長手方向の縁伸び変形に関するもう一つの重要な問題は、伸び変形がどの程度まで大きくなった場合に縁波の発生をまねくかという点にあるが、この問題に関しては研究された例がほとんどない。わずかに室田²⁾が鋼板・アルミ板の単スタンドによる円弧形断面の成形について次の縁波発生限界の判定条件を示している。

$$t/b \leq 0.01b/r \dots\dots\dots (33)$$

ただし、 b = 板幅、 t = 板厚、 r = 成形半径である。

他方、従来、成形段数の決定法としては用いられてきた T. Angel の方法も、見方を変えればこの縁波の発生限界を示す条件式と考えることができる。すなわち、 H = 成形断面高さ(縁部の中央部に対する立上り高さ)、 L = 成形に必要な長さ、 P = スタンドピッチ、として次の式が満足されるように成形段数 N を決定することを提案している。

$$\left. \begin{aligned} H/L &\leq \tan 1^\circ 25' = 0.0247, \\ N &\geq L/P = 40.436H/P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (34)$$

以上の各手法は縁部の軌跡長さを求め、それより長手方向の伸びひずみを求めようとする考え方が主体となっているが、当然のことながら、縁部の変形はあくまで材料全体の変形挙動の中の一部であり、そのような見地からの解析を通して初めて正確な把握が可能になる。その意味でこの問題に関するこれまでの検討は便宜的な手法の域に留まっており、最終的には前節までの問題の解析に帰せざるを得ない性質のものであると言える。

7. 幅方向伸び変形量の評価に関する問題

成形中に材料は幅方向の伸び変形を起し、製品の展開幅が素材幅よりも大となることはよく知られており、この問題は成形時の通板の安定化と製品の仕上り寸法精度の向上を図るための適切な素材幅の選択の面から重要である。この種の問題はプレスブレーキ等による板材の一次元曲げ成形の場合にも発生するため、様々な角度か

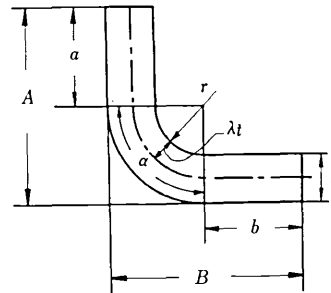


図10 折り曲げ成形部

ら検討されており、これまでも伸び変形量を評価する簡便な式が幾つか提案されている。例えば図10に示す折り曲げ成形部の仕上り長さ L に対して次のような式が示されている。ただし、記号は図を参照されたい。

$$\left. \begin{aligned} L &= a + b + (0.01743r + 0.0078t)\alpha && \text{(R. E. Engel)} \\ L &= a + b + 0.0174(r/t + \lambda)t\alpha && \text{(プレス便覧)} \\ L &= A + B - (0.43r + 1.37t) && \text{(塚本・中山)} \\ L &= a + b + (r + 0.38t)\alpha && \text{(E. Griffin)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (35)$$

上式で λ は曲げ部の中立面の位置係数であり、成形条件(t, r , 材料特性など)により $0.1 \sim 0.5$ の範囲で変化する。また円弧曲げに関しても同様の式が提案されており、 r = 曲げ半径、 θ = 曲げ角度(rad)、 t = 板厚、 λ = 中立面の位置係数として同形の次式が導かれている。

$$L = (r + \lambda t)\theta, \quad (\lambda : r/t, \text{断面の形状・寸法により異なり } 0.1 \sim 0.5 \text{ の範囲}) \dots\dots (36)$$

これらの式を適用するに当たって λ の値の選択が問題となるが、これについては未だ統一的な値は示されていない。その理由は上記のように λ の値は種々の成形条件因子の影響を受けることにある。これは、成形時に幅方向の伸び変形と同時に種々の付加の変形が発生し、それらが相互に影響し合うため、プレスブレーキによる一次元の曲げ成形の様に変形形態が単一でないことと対応している。したがって、当面、上記の伸び変形量の評価式も、成形時の変形形態の多様性に対応して適用し分けることを検討する必要がある。

8. 成形荷重の評価式に関する問題

所要の製品の成形に要する成形荷重を適確に評価することは、パススケジュールの設計や成形機の仕様の決定に際して極めて重要である。このため、この問題に関して従来幾つかの試みがなされてきたが、以下その主な考え方について概要を示す。

最も基本的な考え方の一つは、ロールギャップ内における材料の変形状態を、成形ロールと同一の形状を有す

るポンチ・ダイスを用いた板材の一次元曲げの場合に擬して考える方法である。すなわち、材料の変形状態を3点支持曲げモデル等を用いて近似し、良く知られている解析法を用いて荷重と押し込みストロークとの関係を求め、その結果より成形荷重の評価式を得ようとするもので、この方法により提案されている最も簡便な一般式は次のようなものである。

$$P = \alpha \sigma_y t^2, (P = \text{成形荷重}, \sigma_y = \text{材料の変形抵抗}, t = \text{板厚}, \alpha = \text{成形荷重係数}) \quad (37)$$

この式の場合には、ポンチ・ダイスによる曲げと成形ロールによる曲げとの相違、あるいはロールフォーミング加工の特性等の影響は全て係数 α の中に含ませる形をとっているため、式自体は簡明な形をしているが、 α の値の選択には種々問題がある。そのうち最も大きな問題は、ロールフォーミング加工の場合には、ロールギャップ内の材料ばかりでなく、上流側の材料が同時に変形を受けるため、材料の実質的変形領域をどのように見積り、その結果を α の値にどのように反映させるかという点にある。この問題に関連して加藤¹³⁾は、全成形荷重 P をロール接触部荷重 P_1 とロール外変形部荷重 P_2 に分けて考え、V形ポンチ・ダイスによる曲げ成形で工具長さに対して材料長さを変えた場合の荷重の測定結果などから、次の関係が成立することを指摘している。

$$P = P_1 + P_2, P \approx 1.5 \sim 1.7 P_1 \quad (38)$$

また、中島・水谷¹⁴⁾¹⁵⁾らは電縫管のブレークダウン成形に関する実験を積み重ねて、荷重の測定値より、Circular Forming の場合にロール径・板厚・板幅によらず(37)式がほぼ成立すること、その際 $\alpha \approx 2$ となることを示し、更に、復曲率 Edge Forming の隙間成形(RC :ロールクリアランス)/(t :板厚) $\times 1.15$ の場合にはロール孔形状により $\alpha = 1.0 \sim 3.0$ の範囲で変化することなどを示している。

中島・水谷¹⁴⁾¹⁵⁾らは上述の考え方を更におし進めて、ロールと材料の接触開始点からロール中心(直下)に至る材料を長手方向に分割して考え、各要素が噛み込まれている位置でのロールギャップとポンチ・ダイス間のギャップとを対応させて考慮しつつ、個々の要素の変形をポンチ・ダイスによる曲げ成形の各段階に擬して取扱い、その各段階の曲げ成形荷重に関する理論解析結果を用いてロールギャップ内の各々の材料要素の変形に要する荷重を個別的に求め、それらの総和として全成形荷重 P を求める方法を提案し、いわゆる隙間成形の範囲で実成形荷重をよくシミュレートできることを示した。既に示したように、益田・室田⁴⁾らは成形時の材料の変形曲面形状の関数近似による解析を通して、円弧形断面の単スタンド成形(ブレークダウン成形)について次の荷重式を導いた。

$$P = kt^2b(\cos(b/r)/\mu)\{4/r + 1/r_1$$

$$+ \cos(b/r)/r_3\} \quad (39)$$

ただし、 $k = \text{材料の剪断降伏応力}(= \sigma_y/\sqrt{3})$,

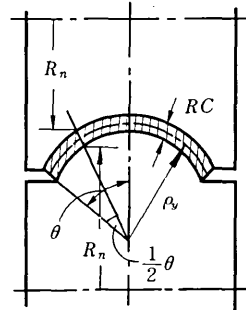
$2b = \text{板幅}, 2t = \text{板厚}, \mu = \text{材料・ロール間の摩擦係数}, r = \text{板中央面の成形曲げ半径},$

$r_1 = \text{凸ロール最大回転半径}, r_3 = \text{材料縁部のロール回転半径}.$

鈴木・木内¹⁶⁾等は、ブレークダウン成形に相当する円弧形断面の1~3スタンド成形の成形荷重に関する多くの測定値を整理し、その過程で全成形荷重 P を、(1)断面成形のための幅方向曲げ変形に要する荷重 P_1 , (2)材料全体をパスラインに沿って長手方向に曲げ・曲げ戻すのに要する荷重 P_2 , (3)設定ロールクリアランスが板厚より小なる場合にロールが材料を噛み込むのに要する荷重 P_3 に分けて考える方法を提案し、これらの各荷重成分について解析を進めてその評価式を求め、それらの総和として#_iスタンドの全成形荷重 P を求める次式を求めた。

$$P = \left. \begin{aligned} & \frac{8 \cdot C^* \cdot F}{(n+1)(n+2)2^{n+2}} \cdot \\ & D_n^{\frac{1}{2}} (b^2/t) \frac{(t/\rho_{yi})^{n+2}}{1 - \cos(b/\rho_{yi})} \\ & + \frac{F}{(n+1)2^{n+1} k^{n+1} SD_i^{2n+1}} \times \\ & t \{ \rho_{yi} (1 - \cos(b/\rho_{yi})) \}^{n+1} [RH_i]^{n+1} \\ & + C \cdot K_i (1 - A_i) \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

ただし、 $t = \text{板厚}, 2b = \text{板幅}, \text{材料の応力} \cdot \text{ひずみ特性}: \sigma = F \cdot e^n, \rho_{yi} = \#_i \text{スタンドの成形曲げ半径}, RH_i = \text{スタンドのロール高さ(凸ロール先端が水平直線にある場合を基準パスラインとし、基準パスラインより垂直方向への移動距離)}, SD_i = \#_i \text{スタンドと}\#(i-1)\text{スタンド間の距離}, K_i = \#_i \text{スタンドの剛性}, A_i = \#_i \text{スタンドの圧下係数}(= RC_i/t), RC_i = \#_i \text{スタンドの設定ロールクリアランス}, D_n = \text{設計等周半径}(= 2 \cdot R_n), C^* = 0.18,$



$k = 0.25, C = 0.75.$ (図11参照)。

上式で第1項は P_1 , 第2項は P_2 , 第3項は P_3 を表し、 $A_i \geq 1.0$ の場合には第3項=0, また水平パスラインの場合には第2項=0として考える。

図11 円弧形成形のモデル

中島・水谷¹⁷⁾らはフィンパス成形に関する成形荷重 P の評価式についても検討を進め、板厚が薄くて曲げ成形に要する力が、周方向にリグダクションを加えるのに要する力、に比して小さくこれをほとんど無視できる場合につき次式を導いている。(図12参照)。

$$P = 2t\sigma_y \cdot l + 8\sigma_f l^2 \quad \dots\dots\dots (41)$$

ただし、 t = 板厚、 σ_y = 材料の変形抵抗、 l = (成形(Z)方向に垂直な面で切ったロールの孔形の周長 \leq 成形の前の周長) が成立する境界までのロール中心からの距離であり次式で与えられる。 $l = 2R_0\sqrt{(a/R_0 - 1)} \cdot r$ 、 r = フィンパスリグダクション

鈴木・木内らはV形断面の成形についても円弧形同様、成形荷重に関する多くの測定値をもとに、荷重を3成分に分けて解析を進め、成形荷重 P の第1成分 P_1 (折り曲げ成形に要する荷重) の評価式として次式を導いた。(図13参照)

$$P_1 = 2Ewl/S(V形), P_1 = (2Ewl \cos \frac{\theta}{2})/S(台形), (42)$$

$$E = \text{折り曲げ部の単位幅単位長さ当りの変形エネルギー} = 2 \int_0^{l/2} \int_0^{\eta} \sigma \cdot d\epsilon \cdot d\eta$$

$$w = \text{折り曲げ変形域の実質的な幅(片側)} = 2\theta(R+t/2) \cdot t_0 / (t_0 + t)$$

$$l = \text{折り曲げ変形域の実質的な長さ} = C^* \cdot D_0^{0.5} \cdot b^{1.2} \{1 + \alpha(r+t)\} \theta^{0.5}$$

$$S = \text{折り曲げ変形時の有効押込み変位} = S_0 \{ D_n^{0.4} / (D_n^{0.4} + D_0^{0.4}) \} \{ (1+2\theta) / (1+4\theta) \} \cdot \{ 1 + \alpha(r+t) \} \quad \dots\dots\dots (43)$$

ただし、 t = 板厚、 θ = 折り曲げ角度、 b = フランジ幅、 r = 凸ロール先端曲げ半径、 R = 折り曲げ部の実質曲げ半径(内径) $= r + t(21-r)/27$ 、 α = 補正係数 $= 1/7(r+r_0)$ 、 C^* = 係数 $= 0.017$ 、 D_n = ロールの等周速径 (= フランジ中心のロール回転径)、 t_0 、 r_0 、 D_0 は各々補正值で $t_0 = 4.0$ 、 $r_0 = 3.0$ 、 $D_0 = 6.0$ さらに、 $L = b \cos \theta$ 、 $Y_0/L = \tan \theta$ 、 $Y_c/L = \Phi_n(\theta)/\Phi_1(\theta)$ 、 $\Phi_n(\theta) = \int_0^\theta \{ \sin(\theta-\varphi) + \sin \nu \}^{\frac{1}{1-n}} \sin \varphi d\varphi$ 、 $\Phi_1(\theta) = \int_0^\theta \{ \sin(\theta-\varphi) + \sin \nu \}^{\frac{1}{1-n}} \cos \varphi d\varphi$ として、 $S_0 = (Y_0/L - Y_c/L)L$ 、 n = 材料の加工

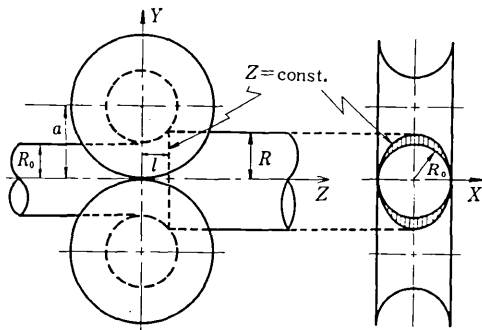


図12 フィンパス成形のモデル

硬化指数、材料とロール間の摩擦係数を μ として $\mu = \tan \nu$ 。

またパスラインに沿う曲げ・曲げ戻しに要する荷重成分 P_2 の評価式として次式を導いた。

$$P_2 = (A \cdot F) \{ 2^n k^{n+1} (n+1) \cdot SD^{2n+1} \}^{-1} \cdot t(b \sin \theta \cdot \Delta RH)^{n+1}$$

ただし、 SD = スタンドピッチ、 ΔRH = 上流側スタンドとのロール高さの差、 k = 長手方向の曲りの形状を表す係数 $= 1/4$ 、材料の応力-ひずみ関係 $\sigma = F \cdot \epsilon^n$ 、 A は断面の形状より定まる係数 $= 1/3$ (V形)、 $1/2$ (台形)。

このほか E. Kretschmar¹⁹⁾、H. Mäkelt²⁰⁾、G. Schulze²¹⁾ 等が種々の観点から検討を行いV形断面の成形荷重の評価式を提案しているが、いずれも基本的にはポンチ・ダイスによるV形曲げの荷重式を前提としており、次式で表されるものである。

$$P = l \cdot t^2 \cdot \sigma_f / (2b), \quad t = \text{板厚}, \sigma_f = \text{材料の変形抵抗}, 2b = \text{板幅}(2b \leq \text{凹ロール肩間隔とする}) \quad \dots\dots\dots (45)$$

l は材料の実質的な変形領域長さであり、 l をどのように評価するかが最終的な問題となる。逆に言えば、種々の成形条件因子の影響をはじめ成形上の特質にかかわる問題を全て l に含ませて処理しようとする考え方であり、その意味では(37)式と同様に便宜的に考えられた式とも言える。一例として、G. Schulzeは、凸ロール先端の回転径を有する円を成形断面深さで切断した場合の弦の長さを l とするとしているが、いずれにしても上式全体を含めて l の選択には種々の議論があり得ることと思われる。

H. Mäkeltは、²⁰⁾²¹⁾ 溝形鋼(台形断面)・ハット形鋼の成形荷重の評価に関しても同様の式を提案しており、溝形鋼では上式の b をフランジ幅(寸法)とした際の荷重、ハット形鋼は b をリップ幅(寸法)として得られる荷重にリップ部がない場合(溝形鋼に相当)の荷重を加えた荷重として求めるとしている。ただし、その場合の l としては、凹・凸ロールの投影噛み合い長さを基準とし、入側の予変形部の長さを一定の方式に従って加味して考える方式を採用している。

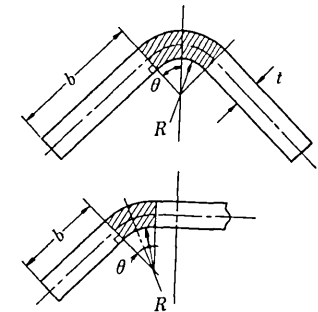


図13 V形・台形断面の成形

