

ロールフォーミングに関する解析的研究 第1報

— 板の1次元塑性曲げとそれに種々のひずみが重なった場合の応力分布 —

Analytical Study on Cold Roll Forming 1
— Stress Distribution in Deformed Plate under (the Combined Action of) One-dimensional Plastic Bending Strain and other Various Strains. —

木内学
Manabu KIUCHI

1. ま え が き

ロールフォーミングはフープ材に幅方向の曲げ変形を加えて所定の断面形状をうることを本来の目的としているが、単純曲げ加工ではなくその加工法上の特質から、素材に長手方向・幅方向・板厚方向の曲げ・圧縮・伸びの付加的ひずみが必然的に加わり複雑な3次元の変形が起こる。さらに変形時の境界条件が不確定であるため、成形過程にある素材の変形状態を全体的に把握することが非常に困難である。一方、成形条件・変形過程と製品形状の関係をj知るためには素材の変形状態とそれに対応する応力状態を知ることが不可欠の条件となる。そのため本研究では成形過程にある素材の実際にロールに噛み込まれている比較的狭い領域に注目し、そこで素材が受けている変形の諸形態を簡別的にとりあげ、対応する応力状態を検討することにより、付加的ひずみ成分が目的とする幅方向曲げ変形に与える影響を解析的に明らかにした。本報では y (幅) 方向1次元曲げに x (長手)・ y ・ z (板厚) 方向から圧縮ひずみ、伸びひずみが加わる場合の応力分布について述べる。

2. 仮定および基礎関係式

解析を進めるに際して次の仮定を用いる。(1): 曲げ・圧縮・伸びのひずみ径路を指定し各変形段階では常に平面ひずみの条件が満たされる。(2): z 方向圧縮変形過程では y 方向の変形は拘束される。(3): せん断力成分は考慮しない。(4): 曲げ変形に伴う中立面の移動は無視する。(5): ひずみは常に体積一定の条件を満たす。(6): 素材の単純引張り・圧縮の応力-ひずみ曲線は相等しい。

用いる基礎関係式は次のとおりである。

$$(1) \text{ 曲げひずみ; } e_{xb} = 0 \cdot e_{yb} = \log(1 + \eta/\rho_y) \cdot e_{xb} \\ = -\log(1 + \eta/\rho_y)$$

(2) 応力-ひずみ関係; 全ひずみ理論

$$e_{ij} = \frac{3}{2} \sigma_{ij}' \cdot f$$

$$\text{ひずみ増分論 } de_{ij} = \frac{3}{2} \sigma_{ij}' \cdot df$$

$$(3) \text{ 相当応力 } \sigma_{eq} \text{ の定義式; } \sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{ii} - \sigma_{jj})^2}$$

(4) 塑性係数 f の定義式;

$$f = (\sigma_{eq} - \sigma_e)^n F^{-n} \sigma_{eq}^{-1}$$

$$df = n(\sigma_{eq} - \sigma_e)^{n-1} F^{-n} \sigma_{eq}^{-1} d\sigma_{eq}^{-1}$$

(5) 素材の応力-ひずみ関係;

$$\sigma = F(e)^n + \sigma_e \text{ or } e = (\sigma - \sigma_e)^{1/n} F^{-1/n}$$

以上の仮定ならびに基礎関係式を用いて各種の変形形態に関する全ひずみ理論およびひずみ増分論を適用した場合の解析結果の概略を示す。

3. 解析結果

解析は変形の各過程に対し全ひずみ理論とひずみ増分論を適用して行ない、変形の各段階は図2に示すベクトル図上の状態点 $B_{ij} \cdot C_i \cdot D_i$ によって示す。

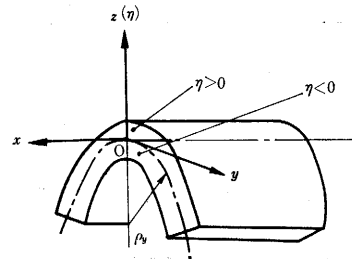


図1 座標軸のとり方

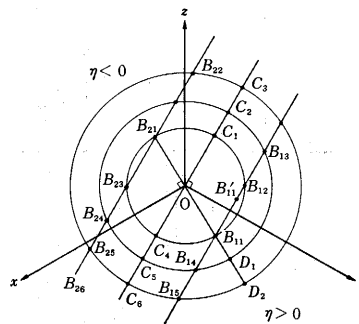


図2 ベクトル図

解析の結果、1次元塑性曲げに種々のひずみ加わる変形過程の応力成分を示す式が得られるが、それらを整理すると、応力式は一般に次の2種の基本形で示されるか、またはこれらの式を含む。

$$\text{全ひずみ理論: } \Phi_1 = C_1 \left[F(C_2)^{\frac{1}{2n}} + \sigma_e \right] / \frac{3}{4} \sqrt{C_2}$$

$$\text{ひずみ増分論: } \Phi_2 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{\frac{n+1}{n}} F \cdot (C_4)^{\frac{1}{n}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$$

ただし $C_1 \cdot C_2 \cdot C_4$ は各変形過程でひずみの成分により規定され、 $C_2 = \frac{4}{3} C_1^2 + (e_{yb})^2$ である。得られた応力式のうち全ひずみ理論によるものの一覧を図3に示す。 $e_{xx} \cdot e_{yy} \cdot e_{zz}$ は各方向の様な伸び・圧縮ひずみを示し、 $e_{xx} \cdot e_{yy} \cdot e_{zz}$ はそれらのひずみの弾性変形過程に

研 究 报 告

图 3 解析結果応力方式一覽

変形過程 (形態)	応力		σ_x		σ_y		σ_z	
	領域	弾性変形過程	塑性変形過程	弾性変形過程	塑性変形過程	弾性変形過程	塑性変形過程	
y 方向 1 次曲げ	$\eta > 0$	$\sigma_x = \sigma_{yb} + \frac{1}{2} \sigma_{yb}$	$\sigma_x = \sigma_{yb}$	$\sigma_y = \sigma_{yb} + \frac{1}{2} \sigma_{yb}$	$\sigma_y = \sigma_{yb}$ $c_1 = -\sigma_{yb}$	$\sigma_z = 0$	$\sigma_z = 0$	
	$\eta < 0$	$\sigma_x = \sigma_{yb} + \frac{1}{2} \sigma_{yb}$	$\sigma_x = \sigma_{yb}$	$\sigma_y = \sigma_{yb} + \frac{1}{2} \sigma_{yb}$	$\sigma_y = -\sigma_{yb}$ $c_1 = -\sigma_{yb}$	$\sigma_z = 0$	$\sigma_z = 0$	
(y 方向曲げ) + x 方向一様圧縮	$\eta > 0$	$\sigma_x = \sigma_{xb} + \frac{4}{3} E \epsilon_{xx}$ $(\epsilon_{xx})_{B12} = -\frac{3}{4E} \sigma_{yb}$	$\sigma_x = \sigma_1$ $c_1 = -\frac{1}{2} \epsilon_{yb} + \epsilon_{xx} - (\epsilon_{xx})_{B12}$	$\sigma_y = \sigma_{yb} + \frac{2}{3} E \epsilon_{xx}$	$\sigma_y = \frac{c_3}{c_1} \sigma_x$ $c_3 = -\epsilon_{yb} + \frac{1}{2} \{ \epsilon_{xx} - (\epsilon_{xx})_{B12} \}$	$\sigma_z = 0$	$\sigma_z = 0$	
	$\eta < 0$	$\sigma_x = \sigma_{xb} + \frac{4}{3} E \epsilon_{xx}$	$\sigma_x = \sigma_1$ $c_1 = \frac{1}{2} \epsilon_{yb} + \epsilon_{xx}$	$\sigma_y = \sigma_{yb} + \frac{2}{3} E \epsilon_{xx}$	$\sigma_y = \frac{c_3}{c_1} \sigma_x$ $c_3 = \epsilon_{yb} + \frac{1}{2} \epsilon_{xx}$	$\sigma_z = 0$	$\sigma_z = 0$	
(y 方向曲げ) + x 方向一様引張り	$\eta > 0$	$\sigma_x = \sigma_{xb} + \frac{4}{3} E \epsilon_{xx}$ $(\epsilon_{xx})_{B12} = \frac{3}{4E} \sigma_{yb}$	$\sigma_x = \sigma_1$ $c_1 = -\frac{1}{2} \epsilon_{yb} + \epsilon_{xx} - (\epsilon_{xx})_{B12}$	$\sigma_y = \sigma_{yb} + \frac{2}{3} E \epsilon_{xx}$	$\sigma_y = \frac{c_3}{c_1} \sigma_x$ $c_3 = -\epsilon_{yb} + \frac{1}{2} \{ \epsilon_{xx} - (\epsilon_{xx})_{B12} \}$	$\sigma_z = 0$	$\sigma_z = 0$	
	$\eta < 0$	$\sigma_x = \sigma_{xb} + \frac{4}{3} E \epsilon_{xx}$	$\sigma_x = \sigma_1$ $c_1 = \frac{1}{2} \epsilon_{yb} + \epsilon_{xx}$	$\sigma_y = \sigma_{yb} + \frac{2}{3} E \epsilon_{xx}$	$\sigma_y = \frac{c_3}{c_1} \sigma_x$ $c_3 = \epsilon_{yb} + \frac{1}{2} \epsilon_{xx}$	$\sigma_z = 0$	$\sigma_z = 0$	
(y 方向曲げ) + y 方向一様引張り	$\eta > 0$	$\sigma_x = \frac{1}{2} \sigma_y$	$\sigma_x = \frac{1}{2} \sigma_y$	$\sigma_y = \sigma_{yb} + \frac{4}{3} E \epsilon_{yy}$ $(\epsilon_{yy})_{B11} = -\frac{3}{2E} \sigma_{yb}$	$\sigma_y = \sigma_2$ $c_1 = \epsilon_{yb} + \epsilon_{yy}$	$\sigma_z = 0$	$\sigma_z = 0$	
	$\eta < 0$	$\sigma_x = \frac{1}{2} \sigma_y$	$\sigma_x = \frac{1}{2} \sigma_y$	$\sigma_y = \sigma_{yb} + \frac{4}{3} E \epsilon_{yy}$ $(\epsilon_{yy})_{B11} = -\frac{3}{2E} \sigma_{yb}$	$\sigma_y = \sigma_2$ $c_1 = \epsilon_{yb} - (\epsilon_{yy})_{B11} - \epsilon_{yb}$	$\sigma_z = 0$	$\sigma_z = 0$	
(y 方向曲げ + x 方向一様圧縮) + z 方向一様圧縮	$\eta > 0$	$\sigma_x = (\sigma_x)_{B13}$	$\sigma_x = (\sigma_x)_{B13}$	$\sigma_y = (\sigma_y)_{B13} + \frac{2}{3} E \epsilon_{zz}$	$\sigma_y = \frac{c_3}{c_1} \sigma_1 + \sigma_z$ $c_3 = \frac{1}{2} \{ 2\epsilon_{yb} - \epsilon_{zz} + (\epsilon_{xx})_{B11} \}$	$\sigma_z = \sigma_1 + (\sigma_x)_{B13}$ $c_1 = -\frac{1}{2} \epsilon_{yb} + \epsilon_{zz} - (\epsilon_{xx})_{B11}$	$\sigma_z = \sigma_1 + (\sigma_x)_{B13}$ $c_1 = -\frac{1}{2} \epsilon_{yb} + \epsilon_{zz} - (\epsilon_{xx})_{B11}$	
	$\eta < 0$	$\sigma_x = (\sigma_x)_{B22}$	$\sigma_x = (\sigma_x)_{B22}$	$\sigma_y = (\sigma_y)_{B22} + \frac{2}{3} E \epsilon_{zz}$	$\sigma_y = \frac{c_3}{c_1} \sigma_1 + \sigma_z$ $c_3 = \frac{1}{2} \{ -2\epsilon_{yb} - \epsilon_{zz} - \epsilon_{zz} + (\epsilon_{xx})_{B22} \}$	$\sigma_z = \sigma_1 + (\sigma_x)_{B22}$ $c_1 = \epsilon_{zz} - (\epsilon_{xx})_{B22} + \frac{1}{2} \epsilon_{yb} + \epsilon_{zz}$	$\sigma_z = \sigma_1 + (\sigma_x)_{B22}$ $c_1 = \epsilon_{zz} - (\epsilon_{xx})_{B22} + \frac{1}{2} \epsilon_{yb} + \epsilon_{zz}$	

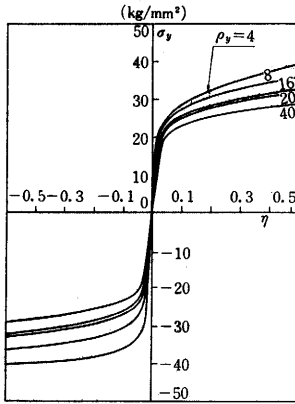


図 4 y 方向単純曲げの応力分布

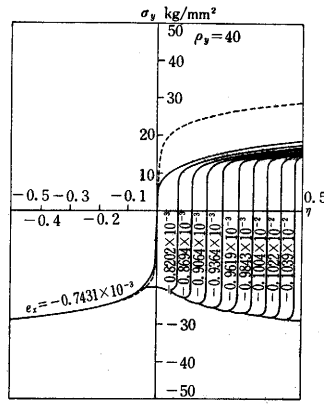


図 5 y 方向曲げ+ x 方向圧縮の応力分布

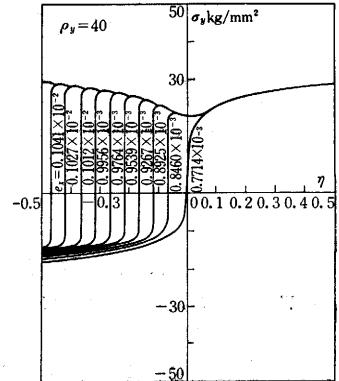


図 6 y 方向曲げ+ x 方向引張りの応力分布

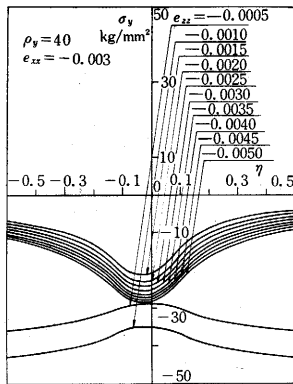


図 7 y 方向曲げ+ x 方向圧縮+ x 方向圧縮の応力分布

おける値を示し、 $(e_{xz})_{Bij}$ 等は弾性変形限界のひずみを示す。

4. 数値計算結果およびまとめ

解析結果の数値計算例を以下に示す。素材の材料定数は $F=45.2 \text{ kg/mm}^2$, $n=7.26$, $\sigma_e=0$ としてある。

数値計算によりおのおのの變形形態の各變形過程での応力成分の分布と、その推移および弾性變形限界等を知ることができるが、ここでは y (幅) 方向の応力成分 σ_y の分布のみをとりあげて検討する。図 4~7 に計算例を示す。

y 方向 1 次元曲げの場合には $\eta \geq 0$ に対応して $\sigma_y \geq 0$ の一般によく知られた応力分布が得られる。この状態に x (長手) 方向の圧縮ひずみを加えると $\eta < 0$ の領域の σ_y の分布はほとんど変化しないが $\eta > 0$ の領域では σ_y が次第に (+) から (-) へ変化し、圧縮ひずみが十分大きくなると σ_y の分布は板の中央面に対してほぼ対称になる。 x 方向の伸びひずみがかかる場合は逆に $\eta < 0$ の領域の σ_y が (-) から (+) へ変化し中央面に対して対称

な応力分布になる。 y 方向の伸びひずみ・圧縮ひずみ・さらに x 方向の圧縮ひずみがこれらの變形形態に重なった場合も、 σ_y の分布とその推移に関しては同様な結果が得られて、加わるひずみが大きくなるに従い σ_y の分布は中央面に対して対称な分布に近づく。

ロールフォーミングは素材板を y 方向に曲げて所定の断面形状を得ることを目的としているが、実際に得られる製品の断面形状は、上に示した σ_y の分布に基づく曲げ戻しのモーメント M_y によって定まるスプリングバックの量によって左右される。 σ_y の分布が板の中央面に対称に近くなれば M_y は 0 に近づき弾性回復は減少し製品の断面形状はロールプロフィールに近づく。

以上の解析結果からロールフォーミングの成形過程において素材に加えられるロールプロフィールに沿う y 方向 1 次元曲げに、 $x \cdot y \cdot z$ の 3 方向から伸び・圧縮の付加的ひずみ $e_{xx} \cdot e_{yy} \cdot e_{zz}$ が加わると、これらのひずみ成分は成形後の弾性回復を減少させる方向に作用し、その絶対値が大きくなるほど製品の断面形状が良好となることが期待できる。実際には $e_{xx} \cdot e_{yy} \cdot e_{zz}$ は素材幅方向に成形条件によって定まる分布をするので断面形状は局部的に良・不良を示す。

本研究では成形過程にある素材の局部的な變形形態を簡別的に解析し、その結果得られた応力分布とその推移から製品形状を定性的に検討した。これらの解析の妥当性に関しては別に平行して行なった実験的研究を通じて明らかになった。(1968年4月24日受理)

