

(163) ロール成形力について

(冷間ロール成形の研究-I)

富士製鉄, 中央研究所

戸田陽一・○玉野敏隆・福島 紀

川崎製鋼所 高橋 正道

On Cold Roll Forming Forces.

(Study on cold roll forming-I)

Yoichi TODA, Toshitaka TAMANO

Osamu FUKUSHIMA and Masamichi TAKAHASHI.

1. 緒 言

冷間ロール成形法は軽量形鋼, 電線管を中心に急速な進歩を遂げ, 高生産性を有する曲げ加工法として, プレス加工, 熱間加工などの一部にかわりつつある。しかし, ロール圧下力および成形トルクの計算式あるいは実験式はまだ確立されていない。その理由はロール成形が三次元の変形であり, 応力および歪速度の主方向が回転する二軸曲げ問題でかつ境界条件が明確でないために塑性力学的解析が困難なためである。

本報はロール圧下力および成形トルクをエネルギー解析法によつて導き, 2, 3 の実験結果と比較検討する。

2. 諸 仮 定

各ロール成形力の計算式を導くにあつて, 冷間ロール成形現象を単純化し, 次のような仮定をする。

i) 全ロール成形エネルギー W を帯板の変形に消費されるエネルギー W_1 (以下, ロール成形エネルギーと呼ぶ) と帯板とロールとの摩擦エネルギー W_2 とに大別する。

$$W = W_1 + W_2 \dots\dots\dots (1)$$

ii) ロール成形エネルギー W_1 は平面歪条件下の帯板の曲げエネルギー W_0 に係数 α を乗じたものである。

$$W_1 = \alpha W_0 \dots\dots\dots (2)$$

iii) 帯板とロールとの摩擦はクーロン摩擦であり, この摩擦力によつて帯板が送られる。

冷間ロール成形における帯板の変形はすでに発表されている文献^{1)~3)}によると曲げ変形と見なすことができる。ロール成形における帯板の塑性変形エネルギーは帯板が剛完全塑性体で von Mises の降伏条件にしたがうものとする, 次式によつて表わされる。

$$W_1 = \sigma_e t^2 / 4 \int_S \frac{\partial}{\partial x} (1/\rho_{eq}) dS \dots\dots\dots (3)$$

ここで, σ_e は材料の降伏応力, t は板厚 S は帯板の中央面上の塑性域, $\partial(1/\rho_{eq})/\partial x$ は相当曲率増分で,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (1/\rho_{eq}) &= (2/\sqrt{3}) \left[\left\{ \frac{\partial}{\partial x} (1/\rho_x) \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial x} (1/\rho_x) \cdot \frac{\partial}{\partial x} (1/\rho_y) \right. \\ &\quad \left. + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (1/\rho_y) \right\}^2 + \frac{1}{4} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (1/\rho_{xy}) \right\}^2 \right]^{1/2} \end{aligned}$$

によつて定義され, x, y はそれぞれ帯板の中央面上の流線方向, 巾方向の座標である。また, 平面歪条件下の帯板の塑性変形エネルギーは次式によつて表わされる。

$$W_0 = (1/2\sqrt{3}) \sigma_e t^2 \int [(1/\rho_y) - (1/\rho_x)] dy \dots (4)$$

したがつて, 仮定 (ii) における係数 α は,

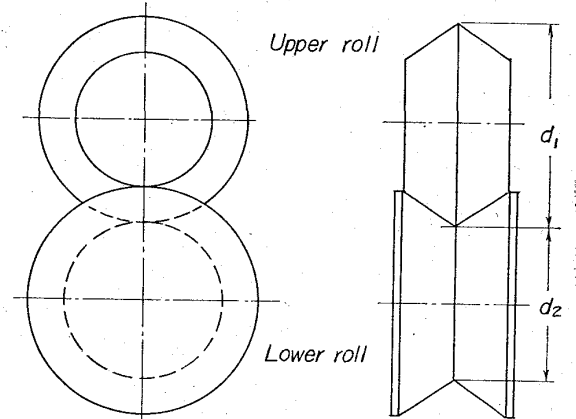
$$\alpha = W_1/W_0 = \left\{ \int_S \frac{\partial}{\partial x} (1/\rho_{eq}) dS \right\} / \left\{ (2/\sqrt{3}) \int [(1/\rho_y) - (1/\rho_x)] dy \right\} \dots\dots (5)$$

この式からわかるように $\alpha > 1$ であるが, この値を解析的に求めることは困難である。しかし, 通常の冷間ロール成形においては $\alpha = 3 \sim 4$ と考えてよい¹⁾⁴⁾。

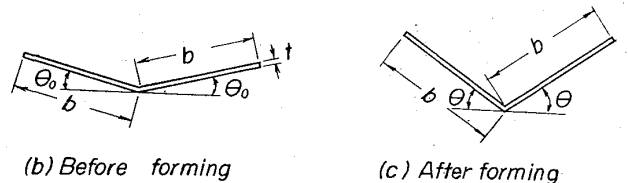
3. ロール圧下力および成形トルクの解析

3.1 V形ロール成形

まず最初に, Fig. 1 (a) に示すV形ロールによつて,



(a) Shape of V type forming rolls



(b) Before forming

(c) After forming

Fig. 1. Shape of rolls and strip for V type roll forming.

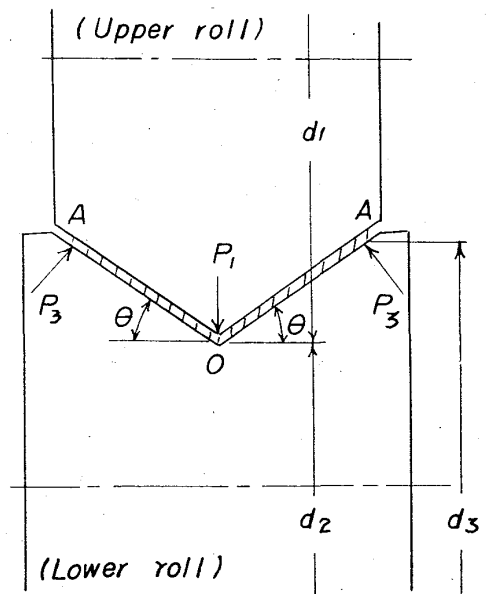


Fig. 2. Contact forces in rolls and strip.

(b) の断面形状の帯板を (c) の断面形状に成形する場合を考える。この場合のロール成形エネルギー W_1 は次式となる。

$$W_1 = (\alpha/\sqrt{3}) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) \dots\dots\dots (6)$$

次に、帯板とロールとの接触圧力分布を簡単にして集中荷重に置き換え、Fig. 2 に示すように上ロールとは O 点のみで接触し、その接触圧力を p_1 とし、また下ロールとは A 点のみで接触し、その圧力を p_3 とすると、これらの力の釣合からロール圧下力 P は次式となる。

$$P = p_1 = 2p_3 \cos \theta \dots\dots\dots (7)$$

また、Fig. 2 において、O 点での上・下ロールの周速が等しい ($V_1 = V_2$) とし、A 点での下ロールの周速を V_3 とすると、これらの周速の間には次の関係がある。

$$V_1 = V_2 = [1/1 + (2b/d_2) \sin \theta] V_3 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、帯板の送り速度 $V = V_1 = V_2$ の場合、A 点における摩擦力 $F_3 = \mu p_3$ (μ : 摩擦係数) のみで成形されることになり、

$$W_1 V = 2F_3 \cdot V = 2\mu p_3 V \dots\dots\dots (9)$$

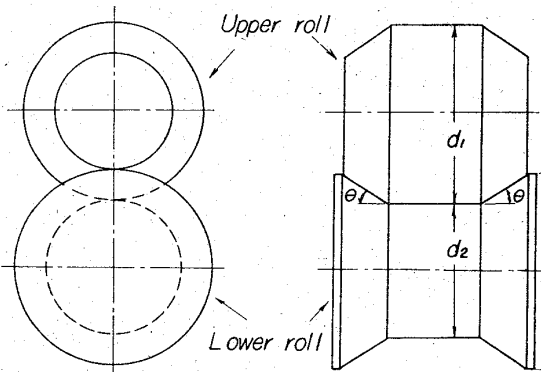
となる。したがって、ロール圧下力 P および上・下ロールトルク T_u, T_d は次式で表わされる。

$$P = (\alpha/\sqrt{3} \mu) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) \cos \theta$$

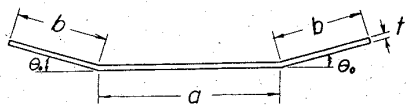
$$T_u = 0$$

$$T_d = (\alpha/2\sqrt{3}) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) (d_2 + 2b \sin \theta) \dots (10)$$

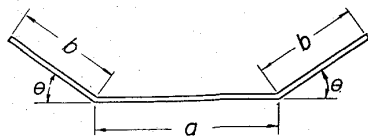
また、帯板の送り速度 $V = V_1 - \Delta V (\Delta V \neq 0)$ の場合、O



(a) Shape of U type forming rolls



(b) Shape of strip before forming



(c) Shape of strip after forming

Fig. 3. Shape of rolls and strip for U type roll forming.

点および A 点における摩擦力 $F_1 = \mu p_1, F_3 = \mu p_3$ によって成形されるから、ロール成形エネルギーは、

$$W_1 V = (F_1 + 2F_3) V = \mu (p_1 + 2p_3) V \dots\dots\dots (11)$$

となる。したがって、ロール圧下力、上・下ロールトルクは次式となる。

$$P = (\alpha/\sqrt{3} \mu) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) \cos \theta / (1 + \cos \theta)$$

$$T_u = (\alpha/2\sqrt{3}) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) d_1 \cos \theta / (1 + \cos \theta)$$

$$T_d = (\alpha/2\sqrt{3}) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) (d_2 + 2b \sin \theta) / (1 + \cos \theta) \dots\dots\dots (12)$$

3.2 U形ロール成形

Fig. 3 (a) に示す成形ロールを用いて、(b) の断面形状の帯板を (c) の断面形状に成形する場合を考える。この場合のロール成形エネルギー W_1 は次式となる。

$$W_1 = (\alpha/\sqrt{3}) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) \dots\dots\dots (13)$$

また、上・下ロールと帯板との接触圧力を Fig. 4 に示すように p_1, p_2, p_3 とすると、ロール圧下力はこれらの垂直成分であるから、次式となる。

$$P = 2p_1 \cos(\theta/2) = p_2 + 2p_3 \cos \theta \dots\dots\dots (14)$$

Fig. 4 において、O 点での上・下ロールの周速が等しい ($V_1 = V_2$) とし、B 点での下ロールの周速を V_3 とすると、これらの周速の関係は幾何学的に求まり、次式となる。

$$V_1 = V_2 = 1 / \{1 + (2b/d_2) \sin \theta\} V_3 \dots\dots\dots (15)$$

ここで、V 形ロール成形と同様に、帯板の送り速度が $V = V_1 = V_2$ である場合。

$$W_1 V = 2F_3 V = 2\mu p_3 V \dots\dots\dots (16)$$

となるから、ロール圧下力 P および上・下ロールトルクは次式となる。

$$P = (\alpha/\sqrt{3} \mu) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) (\cos \theta + \kappa)$$

$$T_u = 0$$

$$T_d = (\alpha/2\sqrt{3}) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) (d_2 + 2b \sin \theta) \dots (17)$$

ただし、

$$\kappa = p_2 / 2p_3$$

また、帯板の送り速度が $V = V_1 - \Delta V$ の場合。

$$W_1 V = (2E_1 + F_2 + 2F_3) V = \mu (2p_1 + p_2 + 2p_3) V \dots\dots\dots (18)$$

となるから、したがって、

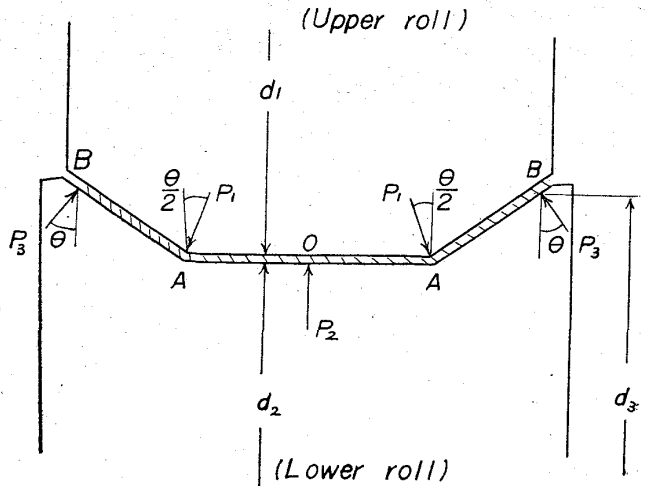
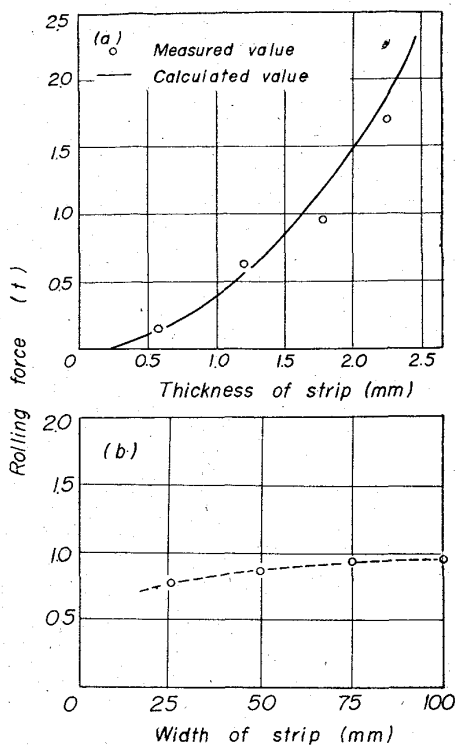


Fig. 4. Contact forces in rolls and strip.



a) Relation between thickness of strip and rolling force.
b) Relation between width of strip and rolling force.

Fig. 5. Rolling force on V type roll forming.

$$\begin{aligned}
 P &= k_1 \cdot (\alpha/\sqrt{3} \mu) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) \\
 T_u &= k_2 \cdot (\alpha/2\sqrt{3}) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) d_1 \\
 T_d &= k_3 \cdot (\alpha/2\sqrt{3}) \sigma_e t^2 (\theta - \theta_0) \\
 &\quad \times \{d_2 + 2b \sin \theta / (1 + \kappa)\} \dots \dots \dots (19)
 \end{aligned}$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 \kappa &= p_2 / 2p_3 \\
 k_1 &= (\cos \theta + \kappa) \cos (\theta/2) / \\
 &\quad \times \{ \cos \theta + (1 + \kappa) \cos (\theta/2) + \kappa \} \\
 k_2 &= (\cos \theta + \kappa) / \{ \cos \theta + (1 + \kappa) \cos (\theta/2) + \kappa \} \\
 k_3 &= (1 + \kappa) \cos (\theta/2) / \\
 &\quad \times \{ \cos \theta + (1 + \kappa) \cos (\theta/2) + \kappa \}
 \end{aligned}$$

4. 計算式の実験結果による検討

以上で導いた計算式を実験結果によつて検討する。一例としてV形ロール成形におけるロール圧下力は文献⁴⁾によると Fig. 5 (a) に示すように変化する。ロール圧下力の計算式 (10) 式による計算結果 ($\sigma_0 = 50 \text{ kg/mm}^2$, $\theta_0 = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\alpha = 4$, $\mu = 0.1$) と比較すると実験結果をよく近似している。また、同文献によると同一条件におけるロール圧下力は Fig. 5 (b) に示すように板巾に対してあまり変化しない。この実験結果は、ロール圧下力の計算式 (10) 式が板巾 $2b$ によつて変化しないこととよく一致している。以上の結果から、V形ロール成形におけるロール圧下力の実験値は計算式 (12) 式で説明できる。

5. 結 言

冷間ロール成形現象を簡単化し、ロール圧下力などの計算式を導き、実験結果と比較検討した結果、計算式は実験結果をよく近似していた。またこの計算式はロール

設計などに適用できる。また、本報に述べた解析法は他の種々の断面形状の成形においても可能である。

文 献

- 1) 益田, 他: 日本機械学会誌, 67 (1954), p. 406
- 2) 益田, 他: 塑性と加工, 5 (1964), p. 519
- 3) 山川: 塑性と加工, 4 (1963), p. 783
- 4) 上野: プレス技術, 2 (1964) 7, p. 10

(164) エンボスシートの試作に関する研究

富士製鉄, 中央研究所

赤松 泰輔・工博 柳本 左門

○田海 幹生・福島 紀

Study on the Fabrication of Embossed Sheet.

Taisuke AKAMATSU, Dr. Samon YANAGIMOTO
Mikio TAUMI and Osamu FUKUSHIMA.

1. 緒 言

エンボスシートを試作するにあたり、フラット圧延の圧延条件との対比でエンボスシートの最適圧延条件を調査する目的で実験を行なつた。すなわち、エンボス圧延とフラット圧延での圧下力および先進の関係について検討した。

2. 試料および実験方法

供試料として $0.81 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ のものを用い、潤滑剤として菜種油を塗付した。Table 1 に供試料の圧延前の機械試験値を示す。また使用圧延機は容量 30kW, 圧延速度 10m/min の二段圧延機で、エンボス圧延の場合はロール径 200mm, 胴長 200mm のフラットロールを下に、また同寸法のフラットロールに凹部が $1.5 \text{ mm}^2 \times 0.3 \text{ mm}$ で 2.5 mm ピッチに腐食加工したロールを上組合せたものを用いた。圧下力の測定は圧下スクリュエの下にロードセル (ストレンゲージ使用) を取り付けて行なつた。エンボス圧延およびフラット圧延とも最高圧下率を 50% 程度に見込んで、これを目標にほぼ 10 等分間隙で圧下率を変化させて 1 パス圧延で試験を行なつた。

3. 実験結果および考察

3.1 フラット圧延とエンボス圧延の圧下力の比較

圧下率と圧下力の関係を Fig. 1 に示す。ここでエンボス圧延の圧下率は枝の伸びより算出した平均圧下率である。一般に圧下率一定で圧延面積が異なる場合 (ただし板厚は一定として) は、面積の小さいものは大きいものに比較して圧下力は小さくなると考えられてよいが、

Table 1. Mechanical properties of test specimen.

Specimen	Y. S. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	Elong. (%)	Hardness (HR 30 t)
FC	22	31	40.0	43.0