

(討12) ロール成形中に発生する長手方向の曲げモーメントについて

九州工業技術試験所

山川 俊夫
山下 勇

1. はじめに

ロール成形加工の特徴は、材料がロールを通過する際、複雑な変形を受けることであり、もう一つの特徴は、加工が各段のロールで分離して行なわれず、連続してつながった材料が、多くのタンデムに並んだ型ロールによって同時に成形され、そして各段において、当該ロール以外から影響を受けながら成形されていることである。そのため多段の場合は独立した単段成形と比較して、変形状態、成形力、中立線などが異なっており、特に単段のときには生じない長手方向の曲げモーメントが材料内に発生するようになる。このモーメントはロール配列に大きく影響されるが、成形中の材料の縁部の座屈あるいは亀裂の発生の原因の一つとなり、成形力や分担トルクに影響を与える。

筆者らはこの材料内に生ずる長手方向の曲げモーメントに注目し、特にロール配列との関係について検討してきたので報告する。

2. 長手方向の曲げモーメントと材料の通過経路の関係

単段のV形成形では、一般に材料は無伸び変形をしようとしてかなり上からロールに入り、長手方向に弯曲し、わずかに下向きに振れた角度で出てゆく性質がある。図1(a)のように、外部から拘束力を作用させ、材料内に長手方向の曲げモーメントが発生している状態で成形すると(図1(b))、長手方向の残留曲率 $\frac{1}{\rho}$ 、およびロールを通過する経路(入射角 β 、振れ角 δ)は無拘束のときと異なり、外部拘束力によって生ずる長手方向の曲げモーメントと密接に関係している。

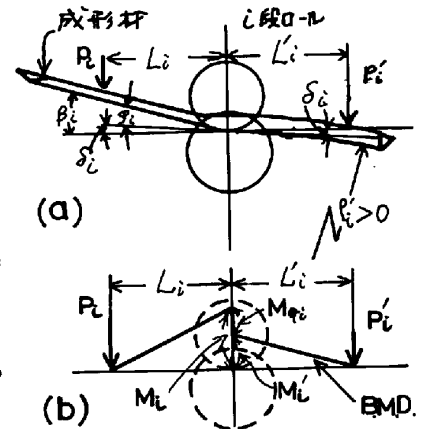


図1 単段拘束成形

図2は板厚 $t=1.0$ 、板巾 $b=80$ の平板を用い、成形角 $\theta=15^\circ$ のV形成形にて、入口側を無拘束、出口側に拘束力 P' を作用させて成形したときの $\frac{1}{\rho}$ とロール直下の出口側のモーメント $M'_i=P'_i L'_i$ との関係を示す。 L'_i を変化させても $\frac{1}{\rho}$ は M'_i と関係のあることがわかり、入口側に拘束力を作用させても同様にロール直下の入口側のモーメント M_i と関係がある。このことから $\frac{1}{\rho}$ はモーメント分布の形態の如何にかかわらず、ロール直下のモーメント M_i 、 M'_i に依存していると考えられる。

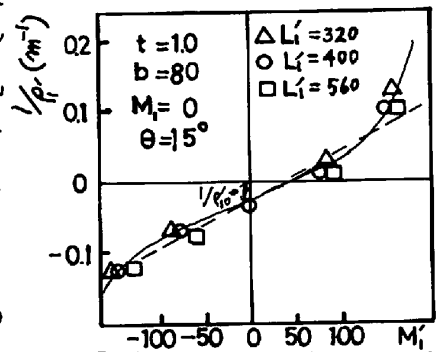


図2 $\frac{1}{\rho}$ と M'_i の関係 (kg-cm)

材料は外部拘束力を受けるとロールのところを中心に、シーソのように回転する。モーメントギャップを $M_Q=M_i-M'_i$ とすると(図1(b)参照)、材料の回転は M_Q の大きさに依存し、 M_i 、 M'_i と直接的にはあまり影響を受けてないようである。図3は δ と M_Q の関係を示したものである。

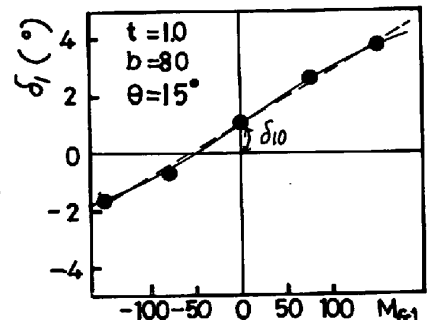


図3 δ と M_Q の関係 (kg-cm)

次に外部拘束力として実際のロールが組込まれる多段成形の場合の曲げモーメントの発生機構について検討する。第1ロールおよび第2ロールの単段無拘束成形において、材料は図4(a)の真線で示したような軌跡となる。材料は第1ロールを出て、第2ロールのところを通らねばならず、相対するロールの制約によって、振れ角、入射角を反時計方向に回転させるようなモーメントおよび反力が相対するロールより作用し、材料は図4(a)の真線の通過経路となり、モーメント分布は図4(b)のように

分布する。このことは材料は図4(b)のような曲げモーメントを受けて、上流ロールの $M_{q1}=M_1'$ による分だけ回転した角 δ_1 で出てゆき、残留曲率はオ1ロール直下の M_{q1} によって、 ρ_0 から新しい曲率 ρ_1 に変化し、段間のモーメントによって弾性的に撓みながら、オ2ロールのモーメントギャップ $M_{q2}=M_2$ による分だけ回転した角 β_2 で入っていると考えられる。

3. 2段成形におけるモーメント分布の解析

曲げモーメント分布はロール配列の影響を受けるが、その関係を定性的に解明する目的で、2.で述べたモーメントと材料の通過経路の関係をもとに、成形中の材料を弾性梁と仮定し、剛性法によって解析する。

図5(a)のような2段成形を考える。図中 M_{q1} はモーメントギャップであり、 Y_1, Y_2 は反力、 v_1, v_2 は変位量、 ψ_1, ψ_2 は撓み角とする。いずれも図の方向に作用したり変位したときを正とする。この材料の剛性方程式は真直な梁のものを用いることにすると、次のようになる;

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ M_{q1} \\ Y_2 \\ M_{q2} \end{Bmatrix} = EI_1 \begin{bmatrix} \frac{12}{L^3} & & & \\ & \text{対称} & & \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & & \\ & & \frac{12}{L^3} & \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & & \\ & & & \frac{12}{L^3} & \\ & & & & \frac{4}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \psi_1 \\ v_2 \\ \psi_2 \end{Bmatrix} \quad \text{--- (1)}$$

ロール成形に(1)式を適用するには次のような仮定を必要とする;

- (i)材料の曲げ剛性 EI_1 は段間で一定である。(ii)段間に渡って、残留曲率 ρ_1 は一様である。(iii) ρ_0 は上流ロール直下のモーメント M_1, M_1' に依存する。図2がこの関係に相当し、単段にて外部拘束力を作用させて成形し、予めこの関係を求めておく。計算を簡単にするため、 M_1' の小さい領域でこれらの関係を線形で近似し、 $\rho_1 = \rho_0 + \gamma_1 M_{q1} \dots (2)$ とする。但し ρ_0 は単段無拘束成形時の残留曲率、 γ_1 は曲率の変化の度合をあらわす係数である(図2参照)。(iv)各段の入射角 β_1 、振れ角 δ_1 はその段の M_{q1} に依存する。図3がこの関係に相当し、同じく β_2 と M_{q2} の関係も求めておく。これらも線形で近似し、 $\delta_1 = \delta_{10} - \alpha_1 M_{q1}, \dots (3), \beta_2 = \beta_{20} - \alpha_2 M_{q2} \dots (4)$ とする。(v)残留曲率半径 ρ_1 はロール間隔 L に比べてはなはだ大きい。(vi)板の自重は無視する。

下流ロール入口付近はロールにかみ込まれる変形域に当たるため、仮定(i), (ii)は正しくないが、ロール間隔 L に比べるとこの領域はそれほど大きくないので省略する。(2), (3), (4)式のような線形表示することはかなり無理であるが、計算が容易になること、モーメントの小さい領域ではそれほど相違が生じないことから、これらの関係式を用いる。

剛性方程式は真直な梁のものを用いているので、残留曲率をもつ材料について、予め考慮しておく必要がある。図5(b)のように、曲率 ρ_0 の材料をオ1ロールのところで水平に置くと、 L へわたったオ2ロールのところを通過する高さ、および傾きを h_0, ω_0 とすると、 $h_0 = -\frac{1}{2}L^2 \frac{1}{\rho_0}, \omega_0 = L \frac{1}{\rho_0} \dots (5)$ となる。図5(a)のロール配列で、オ1ロールを δ_1 で出て、オ2ロールに β_2 で入り、残留曲率 ρ_1 をもつた材料の成形を考えるならば、この材料は図5(a)の節点変位から、(b)の変位を差引いた変位量を各節点で受けることになり、その変位量は次のようになる;

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= 0, & v_2 &= h_2 - h_0 = h_2 + \frac{1}{2}L^2 \left(\frac{1}{\rho_0} + \gamma_1 M_{q1} \right), & \psi_1 &= \delta_1 = \delta_{10} - \alpha_1 M_{q1} \\ \psi_2 &= \beta_2 - \omega_0 = \beta_{20} - \alpha_2 M_{q2} - L \left(\frac{1}{\rho_0} + \gamma_1 M_{q1} \right) \end{aligned} \right\} \text{--- (6)}$$

(6)式を(1)式に入れることによって、 $M_{q1}, M_{q2}, Y_1 = Y_2$ が求まり、モーメント分布線図をえがくことができる。

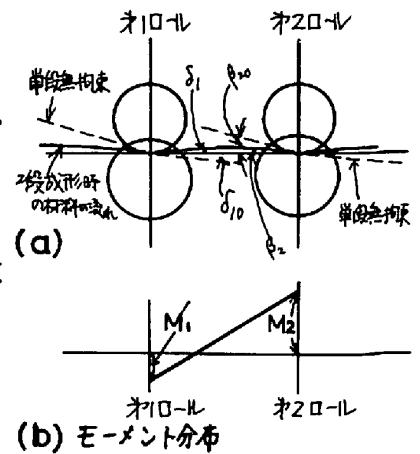


図4. 材料の通過経路

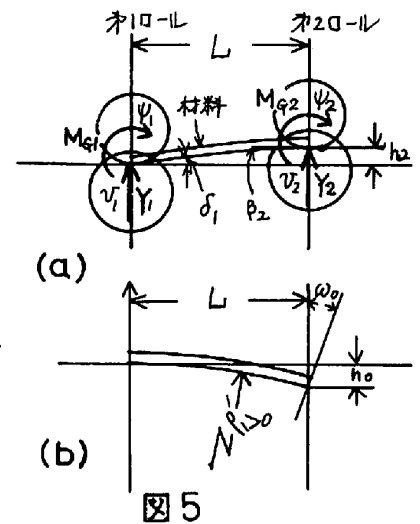


図5

4. 3段成形におけるモーメント分布の解析

3段成形の解析は2段成形の梁要素の集合体として行うことができる。図6(a)は3段の梁要素であり、2段成形の仮定をそのまま用いるが、3段の場合、さらにいくらかの仮定が追加される。

図1(a)に示すように、材料は一般にロールのところで長手方向に折れ曲がりがあり、この値は $\varphi = \beta_2 - \delta_1$ である。折れ曲がり角 φ は M_1, M_1' の影響を多少受けるが、それほど大きくないのでここでは省き、 M_1, M_1' にかかわらず一定とする。

図7は予め $\theta_1 = 15^\circ$ で $\frac{1}{\rho_1} = 0$ に成形した材料を用い、 $\theta_2 = 30^\circ$ の単段成形で、入口側、出口側から拘束力を作用させて成形したとき、 $\frac{1}{\rho_2}$ と M_2, M_2' の関係を示す実験結果である。 $\frac{1}{\rho_2}$ は M_2, M_2' に依存しているけれども複雑である。ここで少々無理ではあるが、 M_2, M_2' が比較的小さい領域において、図7の点線のように、 $\frac{1}{\rho_2}$ と M_2, M_2' の関係を線形で近似する。

3段以上になると前段間の残留曲率が影響し、当該段間の残留曲率に寄与することも考慮する必要がある。予め曲率をもった材料を用いて成形し、材料の断面の高さを増加させると、その材料の長手方向の繊維に伸縮がなくとも、成形後の曲率は小さくなる傾向にあるが、依然として前段間の曲率の影響は残る。このことから2段成形のときの仮定(iii)は次のようにする；各段の残留曲率 $\frac{1}{\rho_i}$ はその上流ロールの M_i, M_i' に依存し、かつ前段間の残留曲率 $\frac{1}{\rho_{i-1}}$ にある係数 η_i を掛けたものが入り込み、次のようになる；

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{\rho_1} + \eta_2 \frac{1}{\rho_1} + \gamma_2 M_2 + \gamma_2' M_2' = \frac{1}{\rho_1} + \eta(\frac{1}{\rho_1} + \delta_1' M_{q1}) + \gamma_2(M_{q1} + Y_1 L) + \gamma_2'(M_{q1} + Y_1 L + M_{q2}) \dots \dots \dots (7)$$

図6(a)の3段の梁要素の剛性方程式は

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ M_{q1} \\ Y_2 \\ M_{q2} \\ Y_3 \\ M_{q3} \end{Bmatrix} = E \begin{Bmatrix} 12I_1/L^3 & & & & & \\ -6I_1/L^2 & 4I_1/L & & & & \\ -12I_1/L^3 & 6I_1/L^2 & 12(I_1+I_2)/L^3 & & & \\ -6I_1/L^2 & 2I_1/L & 6(I_1-I_2)/L^2 & 4(I_1+I_2)/L & & \\ 0 & 0 & -12I_2/L^3 & 6I_2/L^2 & 12I_2/L^3 & \\ 0 & 0 & -6I_2/L^2 & 2I_2/L & 6I_2/L^2 & 4I_2/L \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \psi_1 \\ v_2 \\ \psi_2 \\ v_3 \\ \psi_3 \end{Bmatrix} \dots \dots (8)$$

ここで I_1 は1, 2段間の、 I_2 は2, 3段間の断面二次モーメントである。2段成形同様、上式の剛性方程式は真直な梁のものであるから、予め彎

曲した材料に適用する場合はその分だけ補正しなければならず、その上、オ2ロールのところで折れ曲がっているため、その分も同様に考慮する必要がある。1, 2段間、2, 3段間の残留曲率を $\frac{1}{\rho_1}, \frac{1}{\rho_2}$ 、折れ曲がり角 φ_2 の材料を考える。図6(b)で示すように、オ1ロールのところを水平に保ったとき、この材料がオ2, オ3ロールの存在するところを通過する高さ、および撓み角をそれぞれ h_0, ω_0 および h_0', ω_0' とする。 h_0, ω_0 は(5)式で与えられ、 h_0', ω_0' は図6(b)より次のようになる；

$$h_0' = h_0 - \omega_0 L + \varphi_2 L - \frac{1}{2} L^2 \frac{1}{\rho_2}, \quad \omega_0' = \omega_0 - \varphi_2 + L \frac{1}{\rho_2} \dots \dots \dots (9)$$

次に、図6(a)のようなロール配列で、1, 2段間、2, 3段間の残留曲率が $\frac{1}{\rho_1}, \frac{1}{\rho_2}$ 、オ2ロールのところでの折れ曲がり角 φ_2 をもった材料が、オ1ロールの撓み角 δ_1 、オ2ロールの入射角 β_2 、オ3ロールの入射角 β_3 で流れている場合を考える。2段成形同様、図6(a)の各節点の変位量から図6(b)の各節点変位量を差引いた変位量を材料が受けることになり、それは次のようになる；

$$v_1 = 0, \quad \psi_1 = \delta_1 = \delta_{10} - \alpha_1 M_{q1}, \quad v_2 = h_2 - h_0 = h_2 + \frac{L^2}{2} (\frac{1}{\rho_1} + \gamma_1' M_{q1}), \quad \psi_2 = \beta_2 - \omega_0 = \beta_{20} - \alpha_2 M_{q2} - L (\frac{1}{\rho_1} + \gamma_1' M_{q1})$$

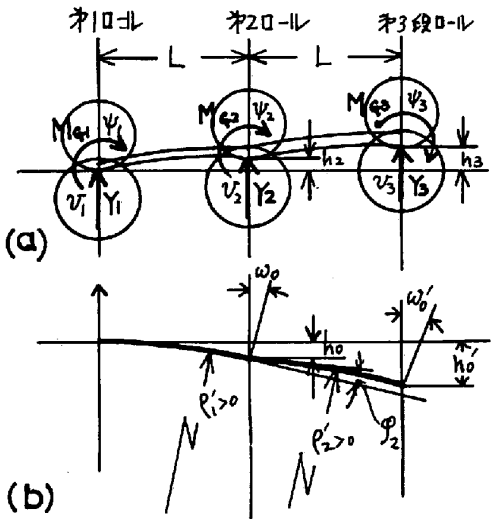


図6

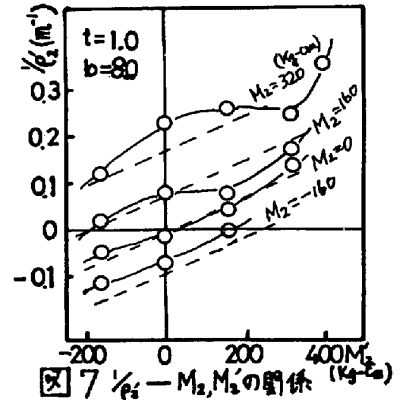


図7 $\frac{1}{\rho_2} - M_2, M_2'$ の関係

$$v_3 = h_3 - h'_0 = h_3 + \frac{3}{2} L \left(\frac{1}{\rho'_0} + \gamma_1' M_{q1} \right) - L \rho_2 + \frac{L^2}{2} \left\{ \frac{1}{\rho'_0} + \gamma_1 \left(\frac{1}{\rho'_0} + \gamma_1' M_{q1} \right) + \gamma_2 (M_{q1} + \gamma_1 L) + \gamma_2' (M_{q1} + \gamma_1 L + M_{q2}) \right\}$$

$$v_3 = \beta_3 - \omega'_0 = \beta_3 - \alpha_3 M_{q3} - L \left(\frac{1}{\rho'_0} + \gamma_1' M_{q1} \right) + \rho_2 - L \left\{ \frac{1}{\rho'_0} + \gamma_1 \left(\frac{1}{\rho'_0} + \gamma_1' M_{q1} \right) + \gamma_2 (M_{q1} + \gamma_1 L) + \gamma_2' (M_{q1} + \gamma_1 L + M_{q2}) \right\} \dots (10)$$

(10)式を先の剛性方程式(8)に入れることにより、 $M_{q1}, M_{q2}, M_{q3}, \gamma_1$ が求まり、曲げモーメント分布をえがくことができる。

5. 計算結果および実験結果

図8は2段成形の曲げモーメントの実験結果および計算結果を示し、図9は3段成形のものである。図中、計算値を実線であらわし、実験値を黒丸で示す。曲げモーメントの測定は次のように行った；成形中ロールの回転を停止させ、その状態のまま各スタンド間の長手方向の曲率 ρ を測定し、次にその状態より機械から材料をとり外し、前に測定したと同じ所の曲率 ρ を測り、その差より曲げモーメントに換算した。スタンド間中央の真線の棒グラフは各段間ごとにほぼ一樣である残留曲率 ρ_r の測定値であり、実線の棒グラフは計算結果の曲率である。

図9の(b),(c)などロール配列のゆるやかな場合は、実験値と計算値とは比較的一致しているが、ロール配列のきびしい、モーメントの大きい(a),(d)などは多少の相違がある。

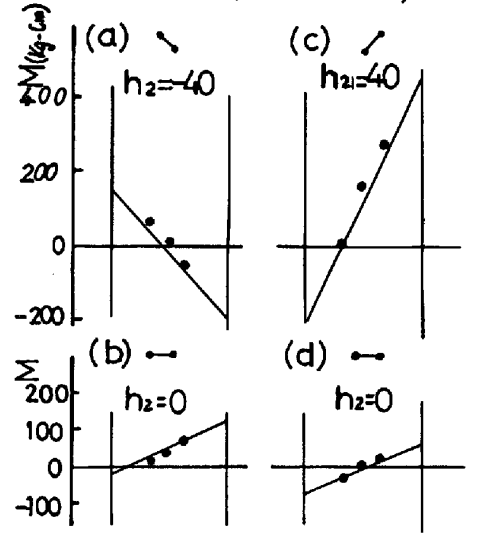
これは解析の仮定において、曲げモーメントと残留曲率、入射角などの関係を線形で近似したが、これらの場合のようにモーメントが大きくなると、少々無理になるからと思われる。

$t=1.6, b=50$ の材料の(i),(j),(k)の例では、1, 2段間では実験値と計算値にそれほど相違はないが、2, 3段間では違った傾向を示している。

しかし全体として、計算の簡単化のために、かなり無理な仮定をもうけたが、実験値と計算値のモーメント分布の傾向はある程度出ているといえよう。

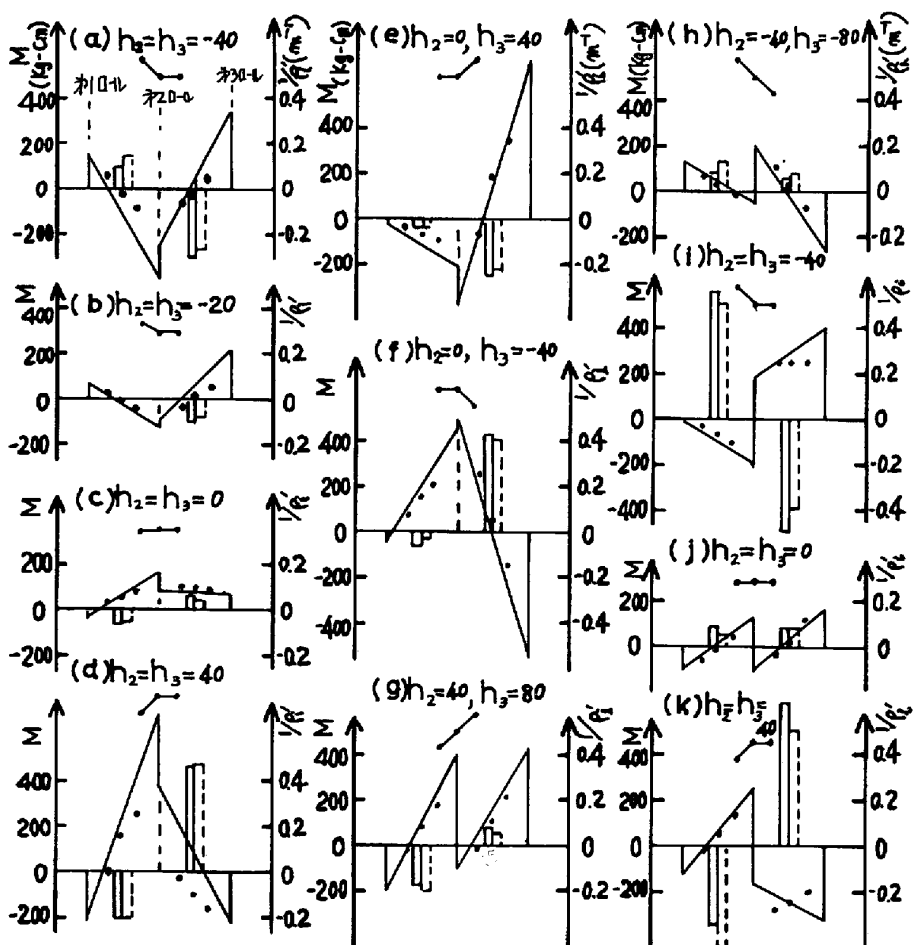
参考文献

- (1). 山川, 山下, 佐藤. 塑性加工春季講演会講演論文集(昭46) p137
- (2). 山川, 山下, 泉, 佐藤. 第22回塑性加工連合講演会講演論文集(昭46)
- (3). 山川, 塑性と加工 Vol. 4, No. 35 (1963-12) p783



(a)(b)(c)は $t=1.0, b=80$ (d)は $t=1.6, b=50$

図8. 2段成形の実験値と計算値



$\theta_1=15^\circ, \theta_2=30^\circ, \theta_3=45^\circ$ 成形, 板材質: SPC-2, (a)~(h); $t=1.0, b=80$ (i)~(k); $t=1.6, b=50$

図9. 3段成形における曲げモーメントの実験値と計算値