621.771.26.09: 620.191.38

(討7) 形材のローラー矯正における圧下設定法の理論解析

新日鉄八幡技研　中島浩衛　矢崎陽一
＊松本紘美　笹平誠一

1. はじめに

圧延された形材は冷却過程での種々の原因でかなり曲がっているのが通常であり，このため写真1に示すようなローラー矯正機にかけられる。形材のローラー矯正機は比較的ロール数が少なく，良好な矯正形状を得るためにはロールの位置設定が極めて重要である。本報では定常矯正過程の数値解析を行ない，適正なロール位置設定の考え方を示すと共に，実験によって形材の矯正における実際上の問題点を明らかにする。[4],[5]

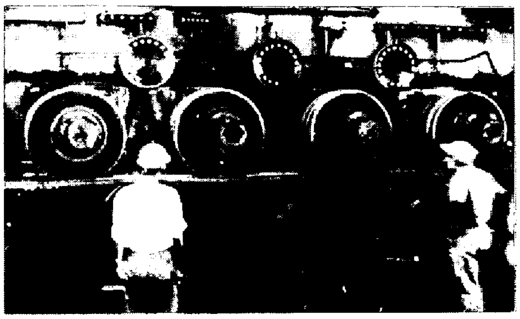

写真1. 形材のローラー矯正機

2. 計算モデル及び近似

適正なロール設定法を示すためには，ロール位置設定と矯正形状あるいは矯正中の曲げ履歴との関係を知らねばならない。この解析法は板材に関して既に曽田等[1][2]，および荒木[3]によって提出されているが，形材に適用する場合若干の差があり，また矯正過程の理解のため，これらのモデルと比較しながら本報で用いた計算方法を説明する。

本報で採用したモデルを列記すると次のようになる。

〔仮定1〕　定常状態とし，材料の断面形状，残留応力，曲がり等は長手方向で均一とする。

〔仮定2〕　材料の軌跡と水平線（x軸方向）とのなす角は小さいとし，次のことを仮定する。

(1) 材料とロールは点（線）接触し，その接点はロール直下（上）である。

(2) 接点間で材料断面の受ける曲げモーメントはxの一次函数である。

(3) 材料の軌跡を　$y = y(x)$　（yは上下方向）で表わした時，各部の曲げ曲率 $n(x)$ は

$$n(x) = \frac{d^2y}{dx^2} \quad \text{----------}(1)$$

〔仮定3〕材料の曲げに関して単純曲げが成立し，かつ断面に張力は働かないとする。即ちη及びbを図1に示す値として

(1) 断面各部の歪は次式で求める。

$$\varepsilon(\eta) = n \cdot \eta + \varepsilon_u \quad \text{-----}(2)$$

（ε_u は張力がないという条件から決める。）

(2) 応力状態は単軸の繰り返し変形下の応力歪関係から求める。

$$\sigma(\eta) = f(\varepsilon(\eta)) \quad \text{------}(3)$$

(3) 断面の曲げモーメントは次式で求める。

$$M = \int \sigma(\eta) \cdot \eta \cdot b(\eta) \cdot d\eta \quad \text{-----------}(4)$$

（積分は一般的に数値積分で求める）

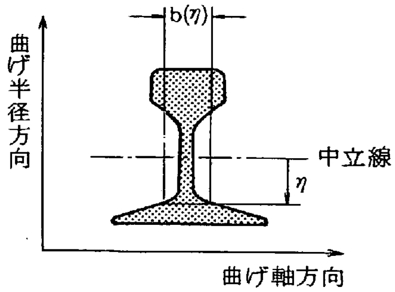

図1. 記号の説明

〔仮定4〕　単軸の繰り返し変形下での応力式（(3)式）としてバウシンガー効果を無視する。

荒木[3]のモデルは上記と同様であるが，出入口で材料の流れ方向を設定するものを考えており，形材のローラー矯正機とは若干異なっている。また曽田等[1]のモデルは仮定2(1)を設けず，材料とロールの接点がロール直下から移動することを考慮しており，最も一般的である。ただモーメントと曲率の関係式（以下 M-n 関係と略す）を与える(4)式を解析的に近似することにより計算上の複雑さ

を避けているが，形材の曲げやバウシンガー効果のある材料に関してはこのような近似が困難であり，(4)式のように比較的忠実に数値計算する必要がある。この場合仮定4は本質的ではなく，バウシンガー効果を取り入れることは計算上は容易であると思われるが，ここでは無視することにする。

さいわい形材の場合は写真1にも見られるように，接点移動は少いが，一方図2のような曲げ以外の変形が生じ，誤差になることは覚悟しなければならない。

(a) ∠ 角度変化　(b) H ウェブそり　(c) ⊔ 全体

図 2.　条鋼曲げにおける曲げ以外の変形モード

3. 計算方法の概要

前項で述べたモデルによって，問題は与えられた自由支持端点 P_i (x_i, y_i) $(i=1\sim N)$ を通るように材料の軌跡を決定することに帰着する。この問題の未知数は各接点 x_i $(i=2\sim N-1)$ における材料の曲がり曲率 n_i^0 $(i=2\sim N-1)$ である。まずこれらを与えると材料の軌跡形状が一義的に決まることを証明しよう。

まず x_1 点でのモーメントは0であり，材料の状態は素材の条件として与えられている。また材料が x_1 から x_2 まで進む間は仮定2(2)よりモーメントが単調に変化するから，M－n 関係が(4)式で求まる。x_2 における曲率 n_2^0 は仮定しているから，このことは x_2 点でのモーメント M_2^0 および応力状態が決まることを意味している。以下同様に順次計算してゆくことによって，すべての接点 x_i における M_i^0 が決まり，仮定2(2)からすべての場所のモーメント $M(x)$ が決まる。一方各接点間で M－n 関係が図3に例示するように得られているから，この逆関係をニュートン法で解けばすべての場所の曲率 $n(x)$ が一義的に決まることになる。したがって材料軌跡形状は(1)式を積分することによって一義的に決まることがわかる。(積分定数は未定。)

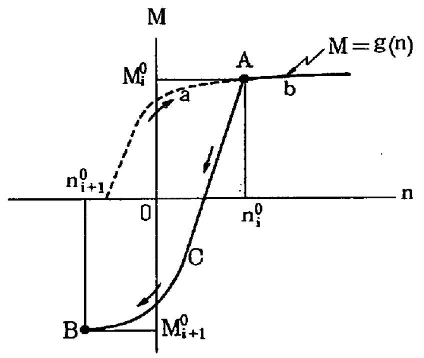

図 3.　繰り返し曲げにおけるモーメントと曲率の関係

以上のように材料の軌跡形状は n_i^0 の函数であることがわかったから，これが与えられた支持端点を通るという方程式

$$\int_{x_1}^{x_i}\int_{x_1}^{\xi} n(\xi')\,d\xi'd\xi + (x_i - x_1)\cdot C = y_i - y_1 \quad \cdots\cdots(5)$$

$(i=2\sim N,\ i=1$ の場合は自動的に満足)

を n_i^0 および積分定数Cを未知数として解けばよい。

この数値計算過程をまとめると図4のようになる。ここで n_i^0 の修正はニュートン法を応用して次のようにする。即ち n_i^0 のある近似値を n_i^{0*}，また n_i^{0*} を仮定して求めた $n(\xi)$ の近似値を $n^*(\xi)$ と書くと，真の $n(\xi)$ はほぼ

$$n(\xi) \doteqdot n^*(\xi) + \sum_{i=2}^{N-1} \frac{\partial n(\xi)}{\partial n_i^{0*}}\cdot(n_i^0 - n_i^{0*}) \quad \cdots\cdots(6)$$

で表わされる。紙面の都合上詳細は省略せざるを得ないが，(6)式中の微分係数として弾性体の場合の値を用い，(5)式に代入すると $\Delta n_i^0 = n_i^0 - n_i^{0*}$ および C に関する連立一次方程式になるから，これを解くことによってより精度の高い近似解が得られ，安定に収束させることができる。

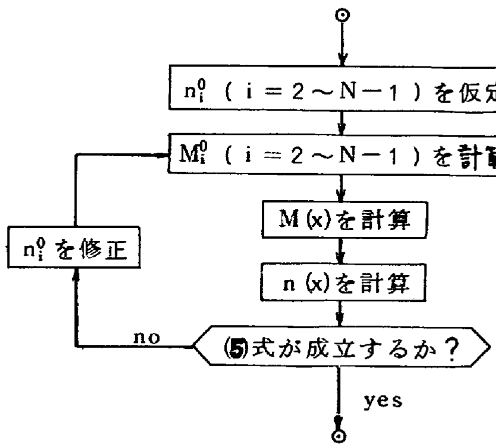

図 4.　定常変形解析のフローチャート

4. 各ロールの入側曲率と出側曲率の関係

以上が定常曲げ過程の解析方法であるが，より直観的に把握するためその本質を議論しよう。

まずモーメントの分布から理解できるように（各ロール直下で極大（小）値をとり正負交互に変化する。），塑性変形は各接点の直前でだけ生じていることから接点間で塑性曲率（全曲率から弾性分を引いたもの）が一定であるとする近似は定性論として認められるであろう。この塑性曲率を図5に示した方向を正として，特定のロールの前後の値を夫々入側曲率および出側曲率と呼ぶことにする。弾性変形を無視すると，図の幾何学的な関係から簡単な計算で次の入側曲率と出側曲率の関係式（以下 n_1-n_0 関係と略す）を得る。

$$n_1 = \frac{X_0}{X_1} n_0 + \left(\frac{1}{X_0}+\frac{1}{X_1}\right)\frac{2h}{X_1} - n_e \quad \cdots\cdots(7)$$

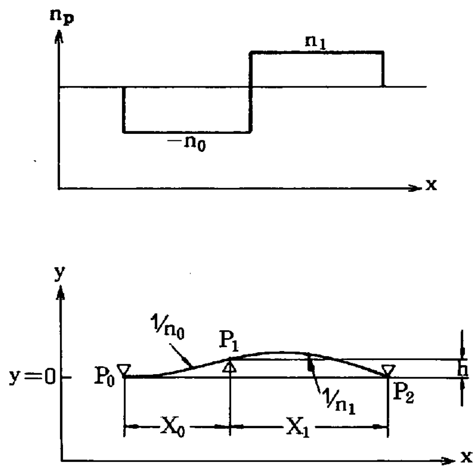

図 5. ロールの入側および出側曲率

ここで n_e は実際には弾性変形があるための補正項である。圧下が十分大きい範囲では，各ロール下でのモーメントはほとんど一定であるため，この補正項は素材の曲がりや圧下設定には無関係に一定になる。また圧下の小さい場合も，材料のM−n関係が歪履歴に依存しないとすれば，モーメントは塑性変形量 n_0+n_1 のある函数になるから，補正項はモーメントにほぼ比例するものとして図6に示すような n_1-n_0 関係が得られると考えられる。即ち上の説明から n_1-n_0 関係はM−n関係の上下を逆にしたような形になることが理解される。

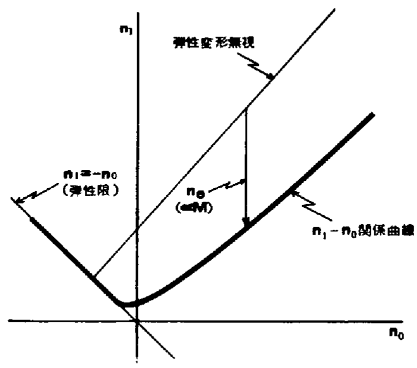

図6. n_1-n_0 関係の定性的な説明

図7は φ460 mm，爪φ70 mm の直線形鋼矢板を7本ロールのローラー矯正機（ロール間隔 700 mm）で矯正する場合を数値計算し，#4ロールの n_1-n_0 関係を求めたものである。種々の曲がり履歴を経てきたにもかかわらず，噛み込み量 h のみによって決まる曲線に乗っており，M−n関係が曲げ履歴にあまり依存しないことが示される。例外的に弾性限近くの点でこの関係からはずれるものがあるが，これは#3ロールで塑性曲げが加わらなかった場合であって，残留応力状態の定性的な相異が生じたためと考えられ，通常は生じない問題である。

5. 矯正原理とロール設定法

従来ローラー矯正で種々の曲がりの素材を同一のロール設定で矯正できる理由として，塑性ヒステリシスの飽和による残留応力の均一化のためであると説明され[6]，圧下の大きい方が有利であるとされているが，(7)式のように曲げ履歴が素材の曲がりによって異ることを考えると若干飛躍があることは曽田等[1]も指摘した所である。形状矯正の主目的は残留応力よりもむしろ材料の形状であり，曲がりに着目した矯正原理に基いたロール設定を行なわねばならない。

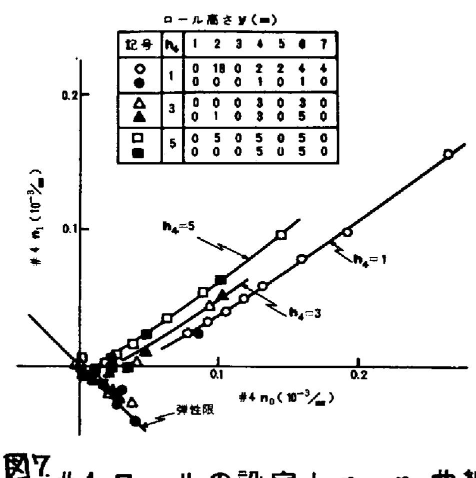

図7. #4ロールの設定と n_1-n_0 曲線

前項で述べたように各ロールの n_1-n_0 関係が存在するから，種々異なった曲がりの素材がどのような曲げ履歴を経るかとい

うことは，各ロールの出側曲率は次のロールの入側曲率であることを考慮して，図8のような作図をすることによって容易に求められる。この作図過程から明らかなように，種々の曲がりの素材に対してほとんど同じ矯正形状が得られる理由は，各ロールの n_1-n_0 関係曲線の勾配が1より小さいためである。この勾配は，前項で述べた n_1-n_0 関係とM-n 関係の対応から理解されるように，圧下の軽い場合に小さいから，多くのロールで大きな圧下を加えることは得策でない。

したがって適正なロール設定とは図の作図が安定に収束するように各ロールの n_1-n_0 関係を設定するものであると言うことができる。

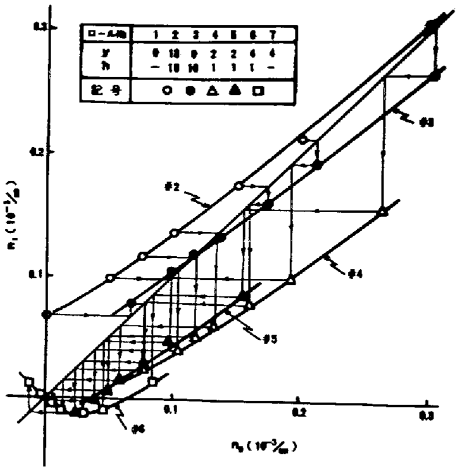

図8. 曲げ履歴の計算例

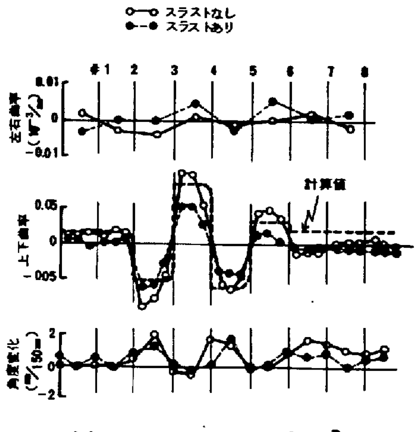

図9. 等辺山形鋼(∠150)の変形

6. 実験との比較

以上の理論を実際に応用する場合の問題点を明らかにするため，生産工場で矯正実験を行なった。図9は，一辺の長さ150 mm，厚さ10 mmの山形鋼を矯正した時，矯正機を途中止めして材料を取り出し，各ロール間の塑性曲率を調べた結果である。矯正中のロール位置はロールスプリングのため設定値とは大きく異るため，噛み止め中にロール位置を実測した値を用いて計算したが，実験精度を考えると比較的よく合っていると言える。

ただ#6ロールの曲げに差があるが，おそらく曲げの小さい所ではバウシンガー効果が無視できないためと考えられる。バウシンガー効果はロールスプリング（ロール位置の弾性的変化）と同様に，各ロールの n_1-n_0 関係の形を変えるから，これらは矯正の安定性にかなり重大な影響を及ぼす可能性がある。（たぶん矯正し易い方向である。）

さらに図9には角度変化や左右曲がりの測定結果も示したが，このようにここで検討した上下方向の曲がりだけでなく，他の変形，特に左右方向曲がりと上下方向曲がりの相互作用に関する知識が望まれている。(7)

7. まとめ

形材のローラー矯正における変形過程を解析し，各ロールの入側曲率と出側曲率の関係式が，モーメントと曲率の関係式から決まることを示した。種々の曲がりの材料の変形履歴はこの入側出側曲率の関係曲線を用いて作図的に求められ，このことによって矯正原理およびロール設定法に対する直観的な理解を可能にした。さらに実験との比較によって理論の検証を行なう一方，形材の矯正においては，バウシンガー効果，断面形状変化，ロールスプリング，スラスト方向の曲がり等の問題を考慮する必要のあることを説明した。また本文では触れなかったが，材料の先端または後端の非定常矯正部分に生じる端曲がりも重要な問題であり，これについては別途報告する予定である。

参考文献

(1) 曽田他：機械試験所報 Vol. 15 (1961) No.4, P.194
(2) 曽田他：昭和46年度塑性加工春季講演会, P.133
(3) 荒木：塑性と加工 Vol. 12, no. 129 (1971) P.768
(4) 中島他：昭和48年度 〃 , P.143
(5) 中島他：第24回塑性加工連合講演会 (1973) P.85
(6) 例えば益田：薄板の曲げ加工（誠文堂，昭和33）232
(7) 荒木他：第24回 〃 (1973) P.89