

(討13) 鋼管のロール成形における負荷特性に及ぼす成形条件の影響

中島 浩 衛

新日本製鉄 八幡技術研究所

○ 水谷 渉

菊間 敏 夫

松本 絃 美

1. 緒 言

ロール成形法は種々の断面形状を有する軽量形鋼および鋼管の製造に多く用いられているが、今まで成形技術に関する研究はきわめて少く¹⁰⁾、2, 3の経験的技術の解説^{1-4,9)}または小規模の実験研究が行われてきた。最近になってローラー成形法に対する学術的体系化をめざした基礎的研究⁵⁻⁸⁾がかなり精力的に行われてきているが、なおローラー成形技術上の未知の分野は多く残されている。また製品の品質に対する仕様は年とともに高度なものとなり歩留、生産性の向上に対する要求はますます厳しくなっている。このような背景の下で鋼管のローラー成形の基本的諸特性を明らかにして技術的裏付けを明らかにするため、8スタンドモデルミルを使用し鋼管のローラー成形法における成形条件と負荷特性に関する実験研究を行ったので荷重、トルク、エッジバックリングと成形条件の関係について述べる。

2. 実験方法

成形実験は3φ8スタンド実験機を用いて行った。実験にはSPC級の軟鋼および50kg/mm²級の高張力鋼の各種板厚の帯鋼を表材として使用した。

3. 成形荷重

3.1 ブレックダウンパス； 良好な成品形状を得るために必要なスタンド強度を決定するためには圧下設定と形状の関係を明らかにする必要がある。図1に設定クリアランスを変えて成形した場合の成形荷重を示す。これより明らかのようにロールクリアランスC_Bが小さくなるとともに成形荷重は大きくなること

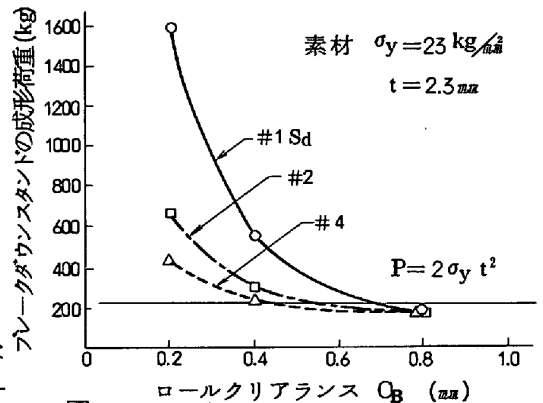


図1 ロールクリアランスと成形荷重の関係

3.2 ファインパス； ファインパスはブレックダウンパスと異なり管周方向に圧下を加えるためスタンドの強度が問題となる。図2はファインパス圧下を変えて成形後の巾方向曲率分布の測定結果を示す。これよりファインパス圧下は0.6%以上としないと管周各位置での曲率の変動が大きく良好な形状を得ることは難しいことは明らかである。

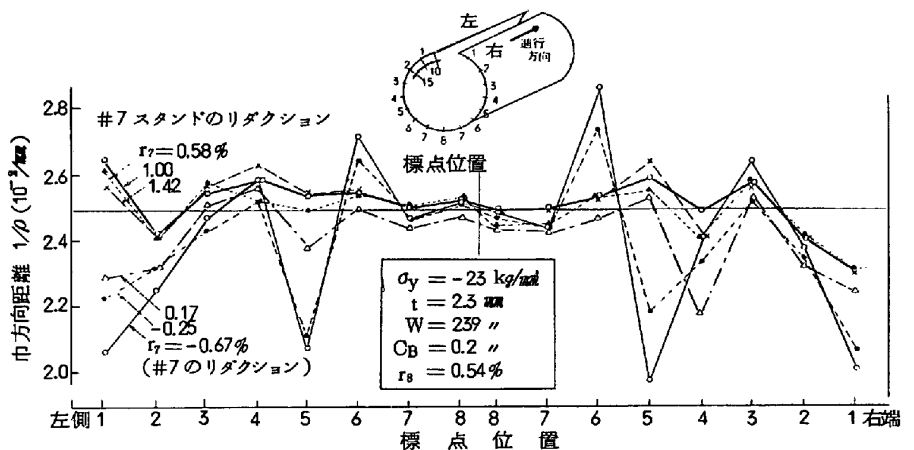


図2 ファインパス圧下と巾方向曲率分布の関係

図3にファインパス圧下を変えて成形した場合の成形荷重を示す。実験結果は後述する荷重式による計算結果とよく合っており、ファインパス圧下が大きいほど成形荷重は大きくなる。またその値は#7, #8スタンドとも同じ値を示しており、孔形状に依存しないことを表わしている。つぎにファインパス圧下に対するファインパスでの成形荷重を求める荷重式の誘導を行なった。

3.3 荷重式； ファインパスにおける成形荷重は板の曲げ成形に必要な力と管周方向に圧下をかけるための力を考えなければならないが、ここでは板厚が薄くて曲げを考慮しなくてよい場合の成形荷重を図4に示す2ロ

一ル型で検討すると、ロール表面の形状は(1)式で表わされる。

$$(Y-a)^2 + Z^2 = (a - \sqrt{R_0^2 - X^2})^2 \dots\dots\dots (1)$$

接触部でのZ方向圧下は小さいとして計算すると

$$a - \sqrt{R_0^2 - X^2} = \sqrt{(Y-a)^2 + Z^2} \approx (a-Y) \left(1 + \frac{Z^2}{2(Y-a)^2}\right) \therefore R_0^2 - X^2 = Y^2 - \frac{Y}{a-Y} Z^2 \dots\dots\dots (2)$$

(2)式の近似式を得る。ここで $Z = \text{const}$ なる曲線の形状は

$$X=0 \text{ のとき } Y \approx \sqrt{R_0^2 + \frac{R_0}{a-R_0} Z^2} \quad Y=0 \text{ のとき } X=R_0$$

となるからこれらの値を長短径とする楕円の形状は(3)式で近似できる。

$$X = R_0 \cos \theta \quad Y = \sqrt{R_0^2 + \frac{R_0}{a-R_0} Z^2} \sin \theta \dots\dots\dots (3)$$

このとき $Z = \text{const}$ なる楕円の周は(4)式で表わされる。

$$\begin{aligned} ds &= \sqrt{dX^2 + dY^2} \approx R_0 \sqrt{\sin^2 \theta + \left(1 + \frac{Z^2}{(a-R_0)R_0}\right) \cos^2 \theta} d\theta \\ &\approx R_0 \left(1 + \frac{Z^2}{2(a-R_0)R_0} \cdot \frac{1 + \cos^2 \theta}{2}\right) d\theta \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

従って周長 $C(Z)$ は(5)式で表わされる。

$$C(Z) = \int_0^{2\pi} R_0 \left(1 + \frac{Z^2}{2(a-R_0)R_0} \cdot \frac{1 + \cos^2 \theta}{2}\right) d\theta = 2\pi R_0 \left(1 + \frac{Z^2}{4(a-R_0)R_0}\right) \dots\dots\dots (5)$$

一方フィンバス圧下を r とする入側管の周長は $2\pi R_0(1+r)$ であるからロール形状の外周が管の外周より小さくなる Z の値は(6)式で表わされる。 $\frac{\ell z}{4(a-R_0)R_0} = r \quad \therefore \ell = 2R_0 \sqrt{\left(\frac{a}{R_0} - 1\right) r} \dots\dots\dots (6)$

フィンバススタンドの荷重は近似的に $P = 2\ell \cdot t \cdot \sigma_y$ で表わせるので(7)式を得る。

$$P = 4t \cdot \sigma_y \cdot R_0 \sqrt{\left(\frac{a}{R_0} - 1\right) r} \dots\dots\dots (7)$$

$$F_b = 8 \sigma_y t^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$P = \sigma_y \left[4t R_0 \sqrt{\left(\frac{a}{R_0} - 1\right) r} + 8t^2\right] \dots\dots\dots (9)$$

4. 成形トルク

成形トルクは駆動モーターの容量の設計上ぜひ必要になる。そこで各ロールを駆動するスピンドルの中央にストレインゲージを貼布し変形を動的歪測定器からフォトコーダーに記録して測定を行った。図5にスタンドの圧下を若干強くしトルクを大きくして成形した場合の実測の1例を示す。これより次のことが明らかになった。

- 1) 板の送りは主に#7, #8のフィンバスで行われ、スタンド間で張力が働いている。
- 2) ブレークダウン水平ロールの上ロールは材料を引き戻す方向に働いておりドライブポイントの設計はこの点を十分考慮に入れて決定されるべきである。
- 3) 成形中にスタンド間張力、荷重変動によるトルクの変動およびトルクの絶対値が断続的に減少することが頻繁に生じている。

図6は圧下を弱めた場合の#2, #4 スタンドの上下

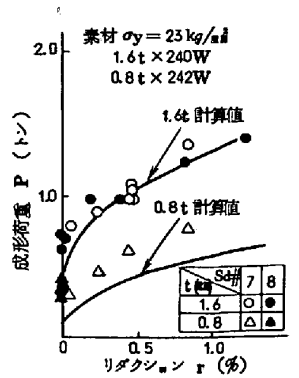


図3 フィンバスの成形荷重

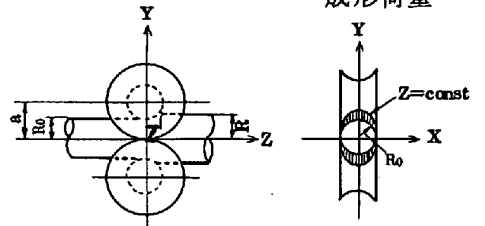


図4 フィンバススタンドでの接触域

曲げ成形に要する力は板厚の2乗に比例するとして実験値と比較すると(8)式のように表わすことが出来る。図3に示した計算値はこの2つの力の和として(9)式を導くことができる。

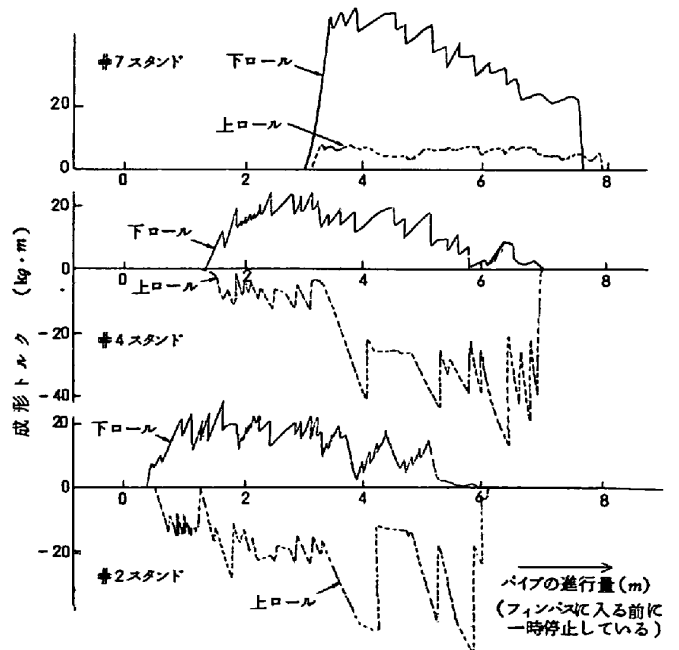


図5 連続スタンドにおけるトルクの実測例(駆動する場合を正とする)(素材板厚1.6t $C_B=0mm$, $r_1=1.5\%$, $r_8=1.0\%$)

ロールのトルクを同時に記録したもので、各スタンドの上下ロールは同時に変化しているが、スタンド間の同期は見られない。また変動の間隔は強圧下（図は省略）より著しく短くなっている。

図7は成形速度の成形トルクへの影響を調べるために成形速度を1~10 m/minの範囲で変えてトルクを実測したものである。成形トルクは図5、図6で示したように成形中に大きく変動するのでここでは平均値を用いた。図から明らかなように成形速度が1~10 m/minの範囲では成形トルクはほとんど成形速度に関係しないことがわかった。

5. ロールのドライブポイント

板の送り速度とロールの周速が一致する点はドライブポイントと呼ばれている。このドライブポイントの設計はスタンド間張力だけでなく板とロールのスリップ発生にも関係するので、ここでは板の送り速度をロール形状との関連で検討する。

表1 各スタンドの固有速度とワーキングダイア

項目 \ スタンド/板	1	2	4	7	8	
固有速度	設計	17.23	17.25	17.28	17.30	17.30
	実測	18.02	18.05	18.20	18.35	18.54
回転数	上	0.02294	0.01722	0.01722	0.03442	0.03442
	下	0.03442	0.03442	0.03442	0.03442	0.03442
ワーキングダイア	上	125.02	166.83	168.21	84.85	85.73
	下	83.32	83.46	84.16	"	"

(注) * a = V/2πn

各スタンド固有の送り速度と設計の送り速度とを比較して示した。また図8はこの実験によって得られた代表的スタンドのドライブポイントの位置を孔形上に示したものである。

図から明らかなようにブレークダウン（#2, #4）では設計のドライブポイント（ロールセンター）よりも回転半径の大きい方にずれている。

同様にフィンパス（#7）でもドライブポイントはロールセンターよりも速い位置にあるが、ドライブする部分の面積が大きく固有速度より遅い速度で板が送られている。

6. エッジバックリング特性

6.1 エッジストレッチ； ローラー成形においては成形機構上かならず成形中に板端に伸び歪を受ける。これが塑性変形に達するとこの伸びが押し戻されてオープンシームパイブになったとき、あるいはそれ以前でも板端に圧縮応力が生じる。この応力の状態が座屈限界を超えた場合座屈が発生し薄肉管の製造が困難な理由となっている。

一般に連続成形スタンドでは図6に示すようにスタンド高さ配列によって伸び歪の発生状況が異なりダウンヒル成形はボトムラインシステム（通常の成形法）に比較して板巾位置別の長手方向の伸び歪が

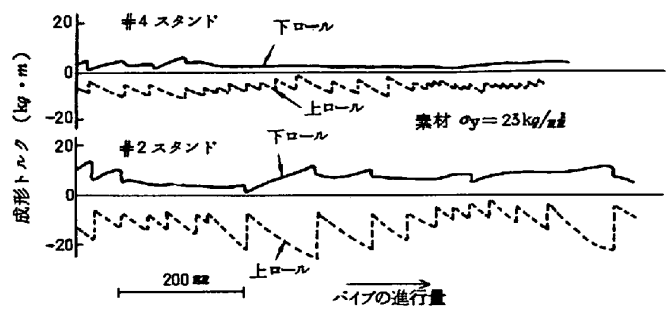


図6 トルク変動の同期（#2, 4スタンドのトルクを同時記録）
（素材 1.6t × 240W, CB = -0.4mm, r1 = 1%, r2 = 0.5%）

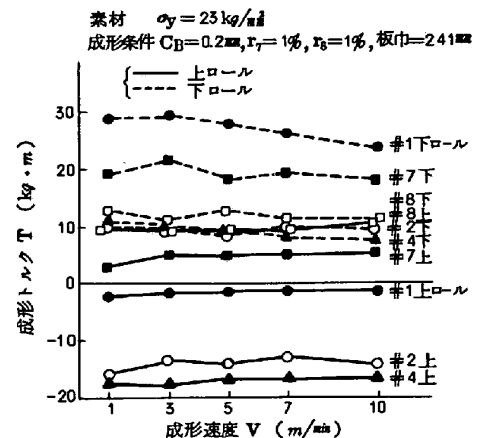


図7 成形トルクと成形速度の関係

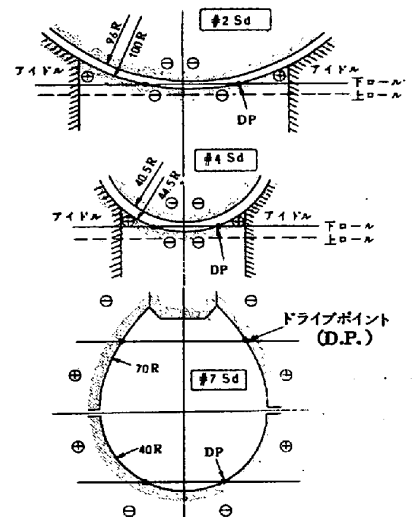


図8 各スタンド固有のドライブポイント
{ ⊕ ロール周速 > 送り速度
⊙ " " < " "
（素材 σy = 22.5 kg/mm² 1.2t × 241W）

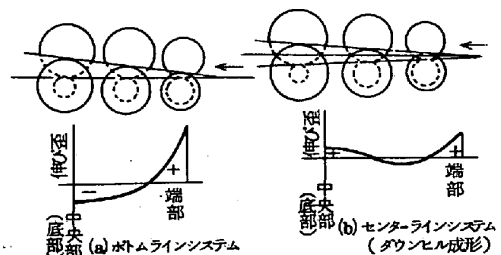


図9 ボトムラインシステムとダウンヒル成形

よく均衡がとれてエッジバックリング防止に対して有効と考えられている。各スタンドで発生するエッジストレッチおよび累積歪を求めてみると 図10, 図11のようになる。図10から#3, 5, 6のサイドロールはほとんど成形されないため歪は小さいがブレークダウン#1, 2, 4とフィンパス#7, 8のスタンドで長手方向のエッジストレッチが大きくなる。

またダウンヒル成形では#2スタンドで歪が一旦小さくなっているが、#4スタンドでは逆に大きくなりダウンヒル成形の効果はほとんど期待できない。

一方各スタンドでの素材の累積歪は 図11に示すようにダウンヒル成形の効果は若干認められるがそれほど大きなものでなく、成形が進み曲げ剛性が大きい形状では歪分布を変えることはかなり困難である。

6.2 成形条件とエッジバックリング； 8スタンドモデル実験機でスタンド高さ配列、試料の材質、板厚、フィンパスリダクションを変えて成形後成品の座屈個数を測定した。図12に実験したスタンド高さ配列の一例を示す。#8スタンドの高さは成形品の上下反りがないように数mm調整した。図13から明らかなようにエッジバックリングに対してフィンパス圧下を大きくとることが最も有効であり、エッジストレッチを少なくする目的でスタンド高さを調整することは余り効果がないことがわかった。

7. 結論

鋼管のローラー成形上最も基本的な成形荷重、成形トルクおよびエッジバックリングの発生に及ぼす各種要因について検討を行った結果つきに示すようないくつかの指針を得た。

- 1) ブレークダウンの圧下を大きくしても成形形状は余り改善されず荷重が大きくなるのみである。
- 2) フィンパス圧下はある程度大きくとらなければ形状は安定しない。また圧下を大きくすると成形荷重は大きくなり、ブレークダウン荷重に比べてかなり大きい。
- 3) 成形トルクは成形中大きく変動し、その上限は成形荷重に比例する。またその変動要因は各ロールの駆動速度の相異による材料とロール間のスリップのためである。
- 4) エッジバックリングの防止にはフィンパス圧下を大きくすることが最も有効である。これにより薄肉管のエッジバックリングを防止できる可能性が大きい。

参考文献

1) 加藤： 金属学会誌 第22巻, 23巻 (1958, 1959)
 2) 山川： 塑性加工 vol 4 №35 (1963)
 3) 益田他： 日本機械学会誌
 4) 生田目他： 八幡鋼管 №4 Jun (1966)
 5) 木内他： 塑性加工 vol 10 №97, 98, 102 (1969)

6) 木内他： 塑性加工 vol 11 №110, 112 (1970)
 7) * : * vol 12 №123, 130 (1971)
 8) * : * vol 13 №133, 138 (1972)
 9) 斉藤他： * vol 13 №143 (1972)
 10) 平世他： 鉄と鋼 №7 vol 50 (1964)
 11) 中島他： 第23回塑性加工連合講演会論文集 (1972)

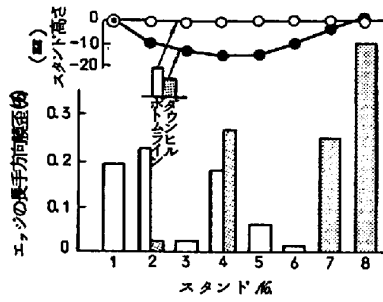


図10 各スタンドでのエッジストレッチ
 素材 $\sigma_y=25\text{kg/mm}^2$, $2.3\text{t}\times 257$,
 $C_B=0.2\%$, $r_1=0.4\%$, $r_2=0.54\%$

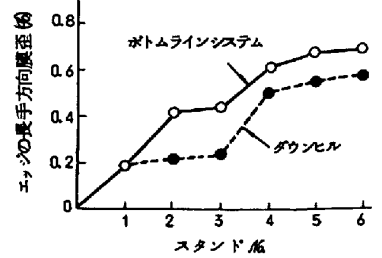


図11 累積されたエッジストレッチ
 素材 $\sigma_y=25\text{kg/mm}^2$, $2.3\text{t}\times 257$

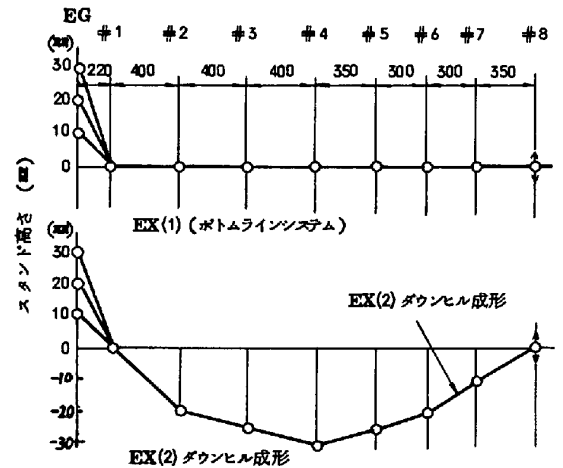


図12 実験したスタンド高さ配列 素材 $\sigma_y=34.5\text{kg/mm}^2$
 $t=1.6\text{mm}$

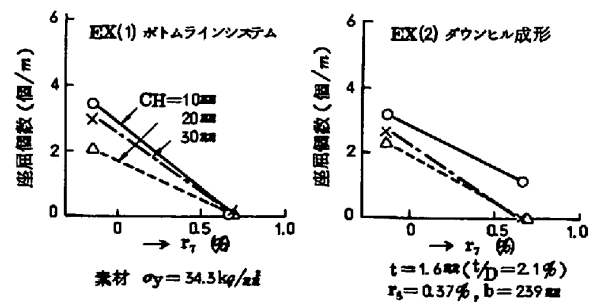


図13 スタンド高さ配列、フィンパス圧下と座屈個数の関係