

# 異形管のロール成形に関する実験的研究 — 第9報 —

## — 成形荷重に関する総合的検討(1) —

Experimental Study on Roll Forming Process of Non-Circular Pipe • 9th Report

— Overall Discussion on Forming Load (1) —

木内 学\*・新谷 賢\*・戸沢 正孝\*

Manabu KIUCHI, Ken SHINTANI and Masataka TOZAWA

### 1. ま え が き

近年、製品寸法の大形化や精度向上の問題を含めて、構造用角管の成形技術の体系化が要求されているが、この分野の研究は少なく、成形荷重の評価法についてもほとんど知られていないのが実状である。そこで本報では円管から角管を再成形するプロセスに関する一連の基礎的研究の一部として、3種の上下2・ロール、すなわち(1)円弧形(リップ形)ロール、(2)溝形ロール、(3)ボックス形ロールによる成形実験を通して、成形荷重について総合的に検討した結果を報告する。<sup>1)~3)</sup>

### 2. 実験方法・実験条件

実験装置・実験方法は既報と同一であるため詳細は省略するが、基本的には水平パスラインによる単スタンド成形でパス回数を積み重ねてゆく方式を採用している。

使用した成形ロールの形状・寸法を図1に、実験条件をまとめて表1に示す。成形の度合を示すパラメーターとして圧下率 $r$ および圧下率比 $r^*$ を用いているが、その定義は図1に示す通りである。ここで $r_{max}$ は素管の周長の伸縮がないとした場合の理論最大圧下率である。なお、使用記号は図1、表1を参照されたい。

### 3. 成形荷重( $F$ )の測定結果および考察

図2~4には成形荷重 $F$ に対する各種成形条件因子の影響を見るために、円弧形、溝形、ボックス形の各実験について測定値を整理した例を示す。これらの結果より成形ロールの種別によらず、圧下率 $r$ (または圧下率比 $r^*$ )が増すほど、および同一圧下率では素管半径 $D/2$ とロール孔形の曲率半径 $R$ の比( $D/2/R$ )が増す程、成形荷重 $F$ が増大することが判る。ここで注意すべき点は、 $D/2/R$ が大の場合には、ロール孔形内で素管が受ける周方向の曲げ変形の量は少なくなるにもかかわらず、ロールからの拘束をうける領域が周(左右)方向に拡がり、変形が単純な曲げ変形でなく、付加的な周方向の圧縮力が作用するため成形荷重の増大を招くという事実である。さらに、ロールの種別による拘束の違いの影響も明らかで、溝形の場合は成形の初期から直交する2方向の拘束を受けるため、圧下率の小さい範囲で他の場合に比して成形荷重大となり、他方、ボックス形では成形の後半において、フランジロールによる左右方向の拘束が効いて成形荷重が急に増大することが判る。

圧下率 $r$ は、その定義の性格上、種別が異なるロール間で直接的に値を比較することには多少問題がある。そのために本研究では圧下率比 $r^*$ の概念を導入して、ロ

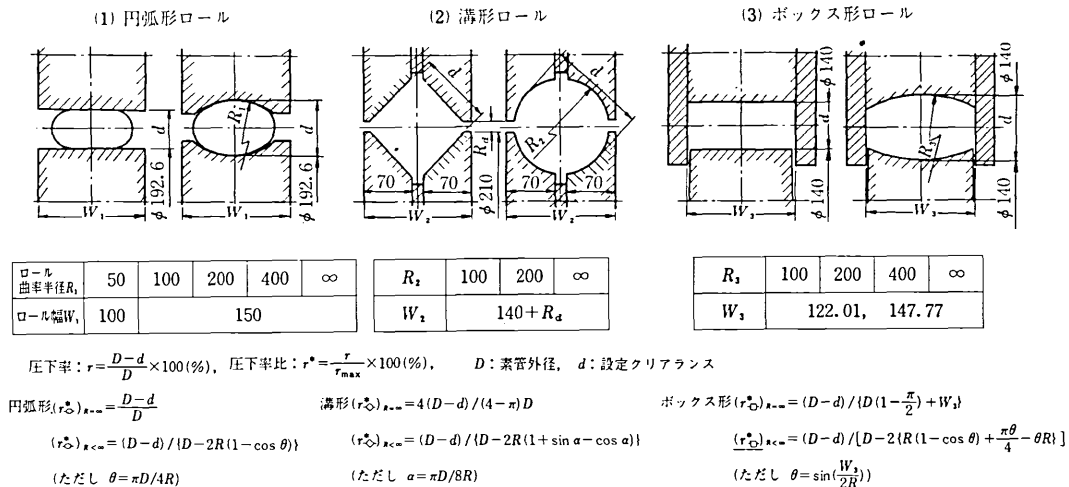


図1 成形ロールの形状および寸法

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

表1 実験条件

	1. 円弧形ロール		2. 溝形ロール		3. ボックス形ロール
素管材質	STK-41 (焼鈍材)	STK-41 (未焼鈍材)	STK-41 (未焼鈍材)	STPG38相当 (焼鈍材)	STK-41 (未焼鈍材)
	一般構造用炭素鋼鋼管		一般構造用炭素鋼鋼管	圧力配管用炭素鋼鋼管	一般構造用炭素鋼鋼管
素管外径 (D)	101.6 φ	48.6 φ, 114.3 φ	114.3 φ	114.3 φ	114.3 φ
素管肉厚 (t)	3.2 t	2.4 t, 3.2 t, 4.5 t	4.5 t	3.2, 4.0, 5.6, 8.6 t	4.5 t
素管長さ	1,000~1,500 mm		1,500 mm	1,500 mm	1,500 mm
圧下	r = 0 → 10 → 20 → 30 %		r* = 0 → 25 → 50 → 75 %		r = 0 → (5) → 10 → 12 → 成形限界
駆動方法	上下軸直結駆動方式				
圧下調整	定クリアランス方式 (厚みゲージにより設定)				
成形速度	約 3 m/min				
潤滑	なし				

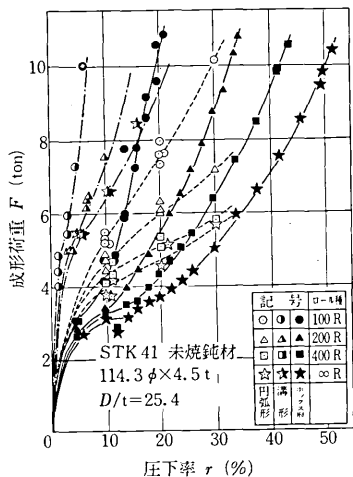


図2 圧下率 (r) が成形荷重 (F) に与える影響

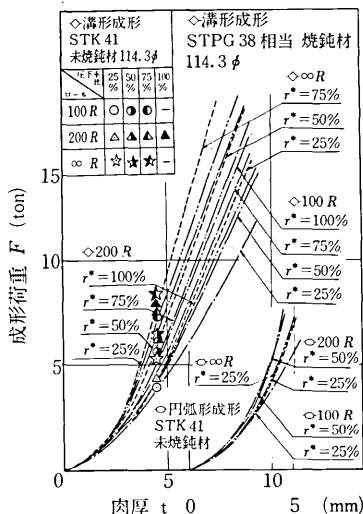


図3 肉厚 (t) が成形荷重 (F) に与える影響

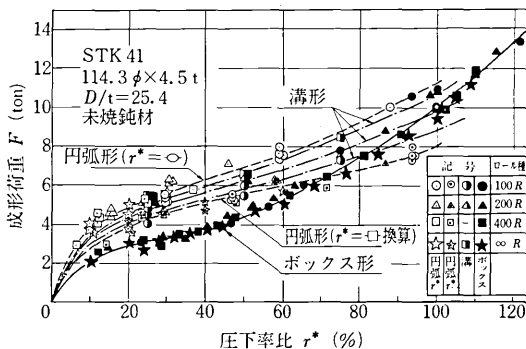


図4 圧下率比 (r\*) が成形荷重 (F) に与える影響

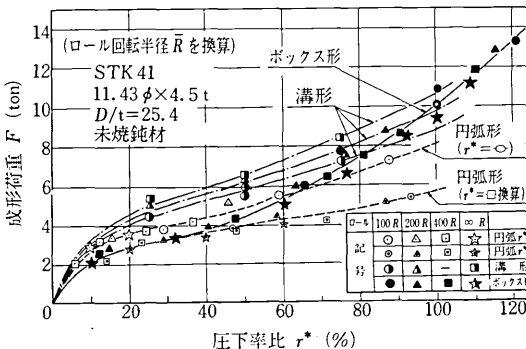


図5 圧下率比 (r\*) が成形荷重 (F) に与える影響

ールの種別間での相対的比較を試みている。たとえば、同一圧下率比  $r^*$  でみると、溝形では  $D/2R$  の小なる方が成形荷重はやや大となる傾向がある。また、円弧形、ボックス形では  $D/2R$  の違いによる影響は少ない。

ところでこの場合、円弧形はボックス形より成形荷重がやや高くなっているが、これにはロールの回転半径  $R$  の影響が含まれているものと考えられる。図1より明らかなように、円弧形の  $\bar{R}$  はボックス形、溝形の  $\bar{R}$  に比して約 1.38 倍である。そこで成形荷重  $F$  と  $\bar{R}$  はほぼ比例関係にあるものと仮定して、円弧形の荷重をボックス形、溝形の  $\bar{R}$  に相当する値に変換した結果を図5に示す。すると圧下率比  $r^* = 100$  % においてボックス形の成形荷重が円弧形の場合に比して2割程度高いという結果を得る。円弧形の圧下率比をボックス形基準の圧下率比  $r_{max}^*$  (=円弧形  $r$  / ボックス形  $r_{max}$ ) に換算して考えると、円弧形の成形荷重はさらに小さいものとして評価されるが、この相違はボックス形の場合に加わる左右方向の拘束の効果によるものと考えてよい。

$r^* = 100$  % では溝形の成形荷重は、ボックス形の場合とはほぼ同程度である。この結果から、素管条件が同じ場合には、辺長比 (製品の縦横比) があまり大きく変らない限り、あるいはまたロールの種別が異なっても、直交する2方向からの拘束が加わるならば、 $r^* = 100$  % で成形荷重がほぼ同程度となることが推定される。一方、圧下率比  $r^*$  の低い範囲で円弧形の方がボックス形より成形荷重が高くなる傾向を示しているが、これは実験手法

の制約から、ボックス形では円弧形に比較して圧下を小さくするために成形したため、ロール入側の未成形部からの拘束が少なくなったことなどによるものと考えられる。

4. 成形荷重(F)の評価式に関する検討

筆者らはすでに成形荷重の評価式について2, 3の試みを報告した。すなわち、溝形成形について、第6報ではエネルギー法を適用した結果を、第7報では実験結果を詳細に分析して得た実験式を示した。いずれの場合にも実測値の範囲をよくカバーしているが、式の汎用性の問題、あるいは計算の手続きや式が複雑であることなどがあり、必ずしも満足できる結果とは言えない。たとえば、第7報では以下の式を得ている。

$$F \propto \sigma_y \cdot t^2 \cdot l^* = \sigma_y \cdot t^2 \left\{ \frac{t}{[l]} \right\}^{-0.5} \frac{D}{2R} \left\{ \frac{l_0}{[l]} \right\} \cdot \left\{ 0.4 + \frac{D}{2R} (1 - 0.5 r^*) \right\} (0.5 \Delta r^* + 0.9) \dots (1)$$

ただし

- $\sigma_y$  = 素管の平均変形抵抗 (kg/mm<sup>2</sup>),
- $t$  = 素管の肉厚 (mm),
- $D$  = 素管の直径 (mm),  $R$  = ロールの曲率半径 (mm)
- $r^*$  = 圧下率比,  $\Delta r^*$  = 圧下率比  $r^*$  の増分,
- $l_0$  = 最大接触投影長さ (mm),  $[l]$  = 単位肉厚 (mm),
- $[l]$  = 単位成形長さ (mm)

言うまでもなく上式を直接円弧形・ボックス形の場合に適用することには問題がある。なぜならば素管に対するロールの拘束の形態が基本的に異なり、その結果  $l_0$ 、その他の条件因子の数値的な等価性 (または互換性) が不明なためである。そこで本報ではより簡略かつ汎用形を有する成形荷重  $F$  の評価式について実測値をもとに検討する。

4.1 成形荷重  $F$  - 圧下率比  $r^*$  曲線の近似式

すでに示した実測値より、円弧形・溝形・ボックス形いずれの場合も成形荷重  $F$  と圧下率比  $r^*$  の関係は一般に次式で近似することが可能である。

$$F \propto \sigma_y \cdot t^2 [\bar{R}] \left( A r^{*m} + B r^{*n} \right) \left( 1 + C \frac{D}{2R} \right) \dots (2)$$

各場合とも  $\frac{D}{2R}$  の影響の度合は小さいので、まず  $R = \infty$  すなわち  $\frac{D}{2R} = 0$  の場合を基準にとり、 $A, B, m, n$  の値を円弧形・溝形・ボックス形についてそれぞれ求め、それらの結果をもとに  $\frac{D}{2R}$  に関する補正を行い、 $C$  の値を求めた結果を下式に示し、それらを用いて得た  $F - r^*$  曲線および実験値を図6~8に示す。ここで  $\sigma_y$  は素管の平均変形抵抗、 $[\bar{R}]$  は成形断面の辺の中央部のロール回転半径  $\bar{R}$  を単位長さで無次元化した値である。

円弧形

$$F \propto \sigma_y \cdot t^2 [\bar{R}] \left( 0.021 r^{*2.4} + 0.151 r^{*0.4} \right) \left( 1 + 0.1 \frac{D}{2R} \right) \dots (3)$$

溝形

$$F \propto \sigma_y \cdot t^2 [\bar{R}] \left( 0.086 r^{*2.25} + 0.157 r^{*0.25} \right) \left( 1 - 0.25 \frac{D}{2R} \right) \dots (4)$$

ボックス形

$$F \propto \sigma_y \cdot t^2 [\bar{R}] \left( 0.114 r^{*2.4} + 0.10 r^{*0.4} \right) \left( 1 + 0.25 \frac{D}{2R} \right) \dots (5)$$

実成形の場合は、通常  $r^* = 100\%$  またはそれ以上(絞り

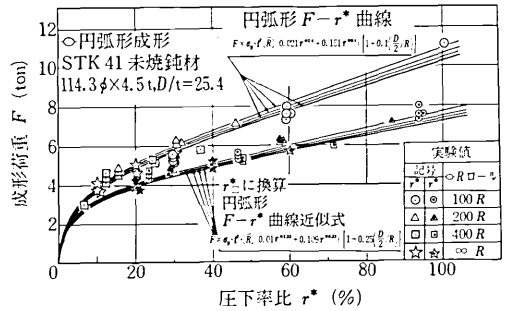


図6 圧下率比 ( $r^*$ ) が成形荷重 ( $F$ ) に与える影響

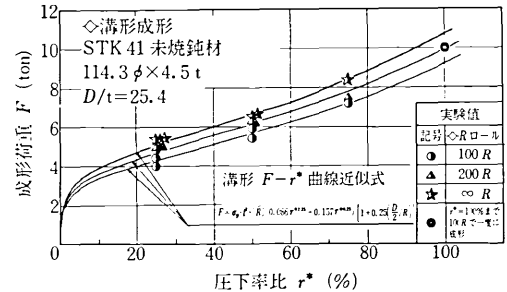


図7 圧下率比 ( $r^*$ ) が成形荷重 ( $F$ ) に与える影響

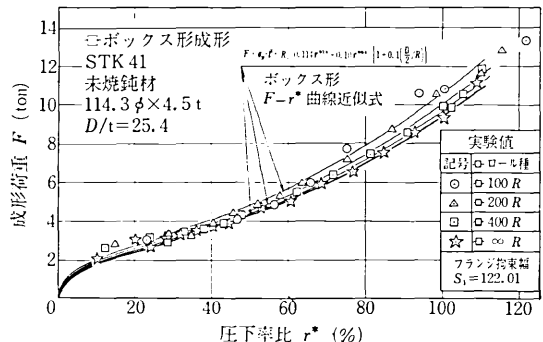


図8 圧下率比 ( $r^*$ ) が成形荷重 ( $F$ ) に与える影響

加工を含む)の範囲で作業を行っているので、その範囲での荷重の評価が問題とされるが、 $F - r^*$  曲線は素管の変形挙動と成形荷重の特性を理解するうえで有用であると考えられる。なお、上式より、 $r^* = 1.0 (= 100\%)$  の場合の式を求めると、次式となる。

円弧形 :  $F \propto 0.172 \sigma_y \cdot t^2 [\bar{R}] \left( 1 + 0.1 \frac{D}{2R} \right) \dots (6)$

溝形 :  $F \propto 0.243 \sigma_y \cdot t^2 [\bar{R}] \left( 1 - 0.25 \frac{D}{2R} \right) \dots (7)$

ボックス形 :  $F \propto 0.214 \sigma_y \cdot t^2 [\bar{R}] \left( 1 + 0.25 \frac{D}{2R} \right) \dots (8)$

本報で示すボックス形の実測値は、辺長比 (製品断面の縦横比)  $\approx 1.2 \sim 2.3$  の場合である。これに対し、溝形の辺長比は1.0、また円弧形の辺長比は最大  $\infty$  (ただし左右方向の拘束なし) に相当する。その意味で、 $r^* = 100\%$  近傍での矩形管の成形荷重に対し、溝形・円弧形の成形荷重はその上限と下限に相当すること、さらに、ボックス形の荷重がほぼその範囲内にあることに注意された

研究速報

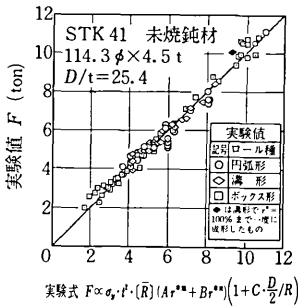


図9 実験値と実験式の対応関係

い。したがって、辺長比が異なる場合の  $F-r^*$  曲線についても上記の結果よりおおよその推定ができる。図9には3種のロールについて上記の評価式と実測値の対応関係を示す。

なお、上式で基本的なパラメータとして用いている  $r^*$  は、素管・ロール・圧下量等の形状・寸法の幾何学的関係より定まる無次元量であり、円弧形・溝形・ボックス形各々について求めると次のようになる。

(1) 円弧形

$$\left. \begin{aligned} (r^*)_{R=\infty} &= D-d/D \\ (r^*)_{R<\infty} &= (D-d)/(D-2R(1-\cos\theta)) \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

(ただし、 $\theta = \pi D/4R$ )

(2) 溝形

$$\left. \begin{aligned} (r^*)_{R=\infty} &= \{4(D-d)\}/\{(4-\pi)D\} \\ (r^*)_{R<\infty} &= (D-d)/(D-2R(+\sin\alpha-\cos\alpha)) \end{aligned} \right\} (10)$$

(ただし、 $\alpha = \pi D/8R$ )

(3) ボックス形

$$\left. \begin{aligned} (r^*)_{R=\infty} &= (D-d)/\left\{D\left(1-\frac{\pi}{2}\right)+S\right\} \\ (r^*)_{R<\infty} &= (D-d)/\left[D-2\left\{R(1-\cos\theta)+\frac{\pi D}{4}-\theta R\right\}\right] \end{aligned} \right\} (11)$$

(ただし、 $\theta = \sin\left(\frac{S}{2R}\right)$ ,  $S = \text{フランジ拘束幅}$ )

4.2 素管寸法(管径  $D$ ・肉厚  $t$ )の影響に関する検討

前項で示した実験式は、素管寸法(114.3φ×4.5t)を固定した場合の実測値をもとに構成したものである。したがって、 $D$  および  $t$  の異なる場合には、その影響を評価するためのなんらかの補正が必要となる。

まず、素管径  $D$  の影響については、圧下率比  $r^*$ ・素管ロール径比  $D/2R$  が一定であれば、 $D$  そのものの値が変化しても実測値はほとんど変化しない。それ故、 $D$  については、上式で  $r^* \cdot D/2R$  の影響として考慮した以上に補正する必要はないと思われる。

一方、 $t$  の影響については次のことが言える。円弧形のように周方向の曲げ変形が主体となる成形では、(3)式で示したように  $F$  が  $t^2$  に比例するとした考え方で十分であり特に補正の必要はない。ところが溝形のように周方向からの圧縮力の効果があらわれる成形では、前報で示したようにほぼ  $t^2 [t]^{-0.5} \frac{D}{2R}$  に比例する結果が得られる(図10参照)。ただし  $[t]$  は肉厚  $t$  を単位肉厚で無次元化した値とする。このことは、一般に成形荷重は曲げ変形では  $t^2$  に比例し、絞り成形では  $t^1$  に比例、両者が共

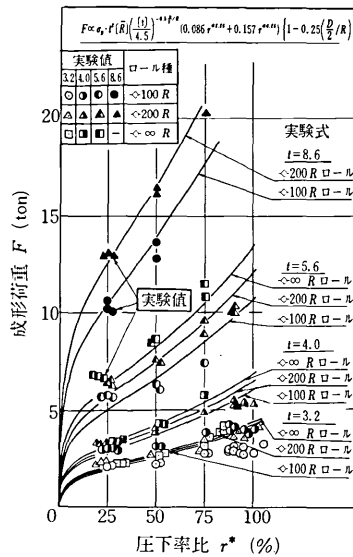


図10 圧下率比 ( $r^*$ ) が成形荷重 ( $F$ ) に与える影響

存する変形では  $t^x (1 < x < 2)$  に比例すると予想されることと対応している。これらの結果から、溝形については(4)式に次の様な  $t$  の補正項を導入することが好ましい。

$$F \propto \sigma_y \cdot t^2 \cdot [\bar{R}] \left(\frac{[t]}{4.5}\right)^{-0.5} \frac{D}{2R} \cdot \left(0.086r^{*2.25} + 0.157r^{*0.25}\right) \cdot \left(1 - 0.25 \frac{D}{2R}\right) \dots (12)$$

ボックス形については、円弧形と溝形の間位置するものと理解されるので、 $t$  に関する補正は、

$$F \propto \sigma_y t^2 [\bar{R}] \left(\frac{[t]}{4.5}\right)^\beta (0.114r^{*2.4} + 0.10r^{*0.4}) \cdot \left(1 + 0.25 \frac{D}{2R}\right) \dots\dots\dots (13)$$

ただし  $-0.5 \frac{D}{2R} < \beta < 0$  とすることが考えられるが、実測値が不足しているため、 $\beta$  の具体的な数値については確定できていない。

5. まとめ

本報では、円弧形・溝形・ボックス形の3種のロールを用いて、円管から角管を再成形する場合の成形荷重について、各成形条件因子が与える影響の度合およびその特性を近似式(成形荷重  $F$ -圧下率比  $r^*$  曲線)を用いて検討した。その結果成形荷重は、概略  $\sigma_y, t, [\bar{R}], r^*, \frac{D}{2R}$  の関数として示され、また溝形(辺長比  $P_f = 1.0$ )、円弧形( $P_f = \infty$ )の場合の成形荷重が、一般の矩形管の成形荷重の上・下限に相当すると考えられることを示した。(1978年9月18日受理)

参考文献

- 1) 木内・新谷・三浦・岩崎; 第25 塑加連講論集(133)
- 2) 木内・新谷・岩崎 ; 昭50 塑加春講論集(377)
- 3) 木内・新谷・岩崎 ; 第26 塑加連講論集(9)
- 4) 木内・新谷・岩崎 ; 昭51 塑加春講論集(277)
- 5) 木内・新谷・岩崎・戸沢; 第27 塑加連講論集(169)
- 6) 木内・新谷・岩崎 ; 第27 塑加連講論集(172)
- 7) 木内・新谷・戸沢 ; 昭52 塑加春講論集(369)
- 8) 木内・新谷・戸沢 ; 第29 塑加連講論集(366)