
小径厚肉電縫鋼管の成形技術

Forming Technique of Small-Diameter and Heavy-Wall ERW Tubes

杉江 善典(Yoshinori Sugie) 渡辺 修三(Shuzo Watanabe) 南谷 昭次郎(Shojiro Minamiya) 豊岡 高明(Takaaki Toyooka) 星 清政(Kiyomasa Hoshi) 井手 武 (Takeshi Ide)

要旨：

最近の小径電縫鋼管の厚肉化，高 t/D (肉厚/外径)化の傾向に対応し， t/D が 20%の鋼管の製造を目標として，ロールフラワーと高 t/D 材成形特性との関係を調査し，成形荷重，管外面曲率，成形中の厚さ変化挙動などを明らかにした。また，これに基づき，高 t/D 材の寸法精度の向上を図り，同一ロールで広い肉厚範囲にわたり成形可能なロールカリバーを検討した。これらの成形技術を用いて，60.5mm ϕ $\times$ 12.0mmt の鋼板を精度よく成形し，良好な溶接品質を得ることができた。

Synopsis：

Recently, the demand for small diameter ERW tubes tends to increase in the sphere of heavy-wall and high- t/D (wall thickness/outside diameter) ones. Responding to this tendency, and aiming at the production of tubes which t/D ratio equals to 20%, the authors have investigated and clarified the relation between roll flower and forming characteristics - forming load, outside curvature, change of wall thickness, etc. - of high- t/D tubes. On the basis of this information, improvements have been made in the accuracy of dimensions of high- t/D tubes and in the roll caliber which can give a wide range of wall thickness using the same roll. These forming techniques have realized accurate forming and excellent welding quality.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Forming Technique of Small-Diameter and Heavy-Wall ERW Tubes

杉江 善典
Yoshinori Sugie知多製造所 第1造管
部溶接管技術室 主査
(掛長)渡辺 修三
Shuzo Watanabe知多製造所 第1造管
部溶接管技術室 主査
(課長)南谷 昭次郎
Shojiro Minamiya知多製造所 第1造管
部 部長豊岡 高明
Takaaki Toyooka鉄鋼研究所 知多研究
部 主任研究員(掛長)星 清政
Kiyomasa Hoshi(株)山陽精機 名古屋
工場 主任井手 武
Takeshi Ide(株)山陽精機 名古屋
工場 次長

要旨

最近の小径電縫鋼管の厚肉化, 高 t/D (肉厚/外径) 化の傾向に対応し, t/D が 20% の鋼管の製造を目標として, ロールフラワーと高 t/D 材成形特性との関係を調査し, 成形荷重, 管外面曲率, 成形中の厚さ変化挙動などを明らかにした。

また, これに基づき, 高 t/D 材の寸法精度の向上を図り, 同一ロールで広い肉厚範囲にわたり成形可能なロールカリバーを検討した。

これらの成形技術を用いて, 60.5 mmφ×12.0 mm t の鋼板を精度よく成形し, 良好な溶接品質を得ることができた。

Synopsis:

Recently, the demand for small diameter ERW tubes tends to increase in the sphere of heavy-wall and high- t/D (wall thickness/outside diameter) ones. Responding to this tendency, and aiming at the production of tubes which t/D ratio equals to 20%, the authors have investigated and clarified the relation between roll flower and forming characteristics—forming load, outside curvature, change of wall thickness, etc.—of high- t/D tubes. On the basis of this information, improvements have been made in the accuracy of dimensions of high- t/D tubes and in the roll caliber which can give a wide range of wall thickness using the same roll. These forming techniques have realized accurate forming and excellent welding quality.

1 緒 言

自動入熱制御技術¹⁾, NDI 技術などの進歩による溶接部の信頼性の向上とともに, 電縫鋼管の使用分野は, OCTG, ハイテストラインパイプ, ボイラーチューブ, 機械構造用へと大幅に拡大しつつある。また, 電縫鋼管は寸法精度および表面肌状況が良好である点から, 機械構造用を中心として, シームレスからの切り換えが進行しており, そのため, 厚肉化への要求は強い。とくに, 小径電縫鋼管では, 厚肉化と同時に高 t/D (肉厚/外径) 化傾向が著しい。

この需要動向に対応すべく, 高 t/D 材の成形技術を確立するために $t/D=20\%$ を目標として, 成形特性の調査を行い, それに基づき寸法精度の改善方法および同一ロールで広い肉厚範囲にわたり成形可能なロールカリバーの検討を行ったので, 以下に報告する。

2 成形特性の調査方法

調査には, 小径 ERW 6" ミルを使用した。ミルスタンド配列を

☒ Load cell

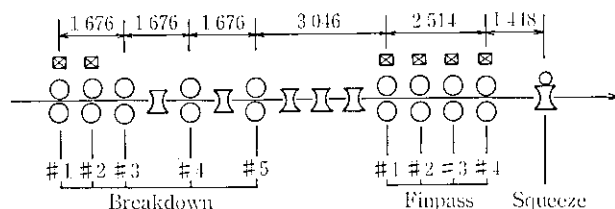


Fig. 1 Layout of ERW 6" mill

Fig. 1 に示す。鋼管はブレイクダウンスタンドで半円状に成形された後, フィンパススタンドで円筒状に成形され, スクイズスタンドで高周波誘導溶接される。

成形特性調査対象のブレイクダウンの成形フラワーを Fig. 2 に示し, この寸法を Table 1 に示す。この特徴は以下のとおりである。

- (1) サーキュラーバンド……………鋼管幅全体に円弧状に曲げ加工を進行させる。

* 昭和60年10月25日原稿受付

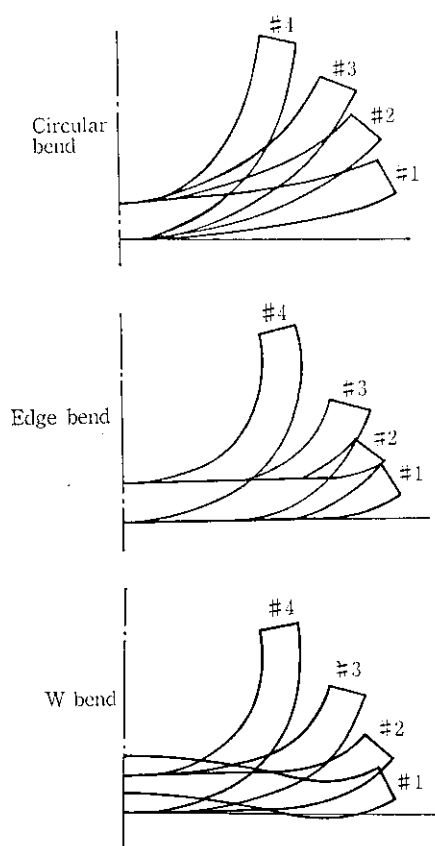


Fig. 2 Comparison of forming flowers between circular bend, edge bend, and W bend

- (2) エッジベンド……………鋼帯両エッジから中央方向へ順に曲げ加工を進行させる。
 (3) Wベンド……………成形初期において、鋼帯エッジ部の成形強化のために中央部を逆曲げする。

調査は、6'' ERW ミル能力範囲内で高 t/D 材を造管するために、Fig. 3 に示すように、外径が 60.5 mm、肉厚が 4.0, 7.0, 10.0 および 12.0 mm の 4 種について行った。

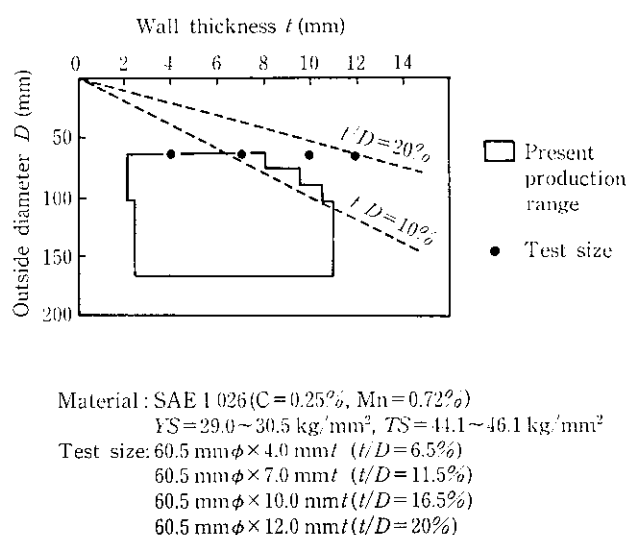


Fig. 3 Present production range at ERW 6'' mill and test size

また、素材は DOM 原管（主としてシリンダー用に用いられる冷間引抜原管）の代表的規格である SAE 1026 とした。

成形性を評価するための調査項目は、成形荷重、成形曲率、成形中の厚さ変化、ロール疵などである。

3 調査結果および考察

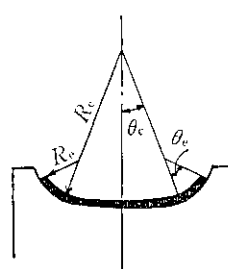
3.1 各フラワーの成形特性

3.1.1 管外面曲率

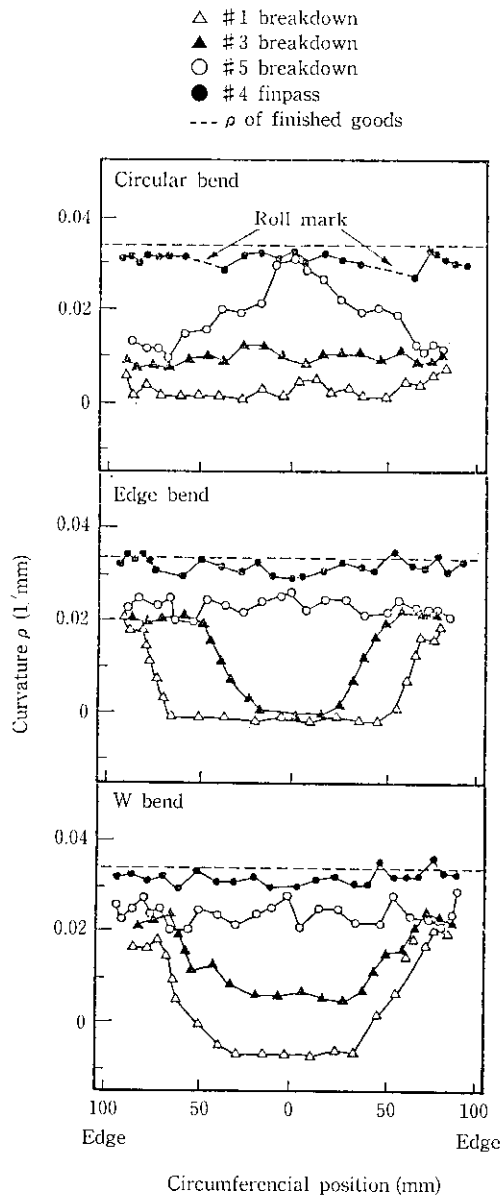
Fig. 4 に 60.5 mmφ×12.0 mm t 材の #1, #3, #5 ブレイクダウン、および #4 フィンパススタンドの出側における管外面曲率を示す。成形フラワーによりブレイクダウンでの成形曲率推移は異なるが、フィンパス出側の管外面曲率は各フラワーともほぼ同様の分布を示している。ただし、サーキュラーベンドでは、後で述べるロール疵のためにフィンパス出側曲率は、2箇所測定が不可能となった。

Table 1 Dimension of forming flower

	Circular bend				Edge bend				W bend			
	R_o (mm)	θ_o (deg)	R_e (mm)	θ_e (deg)	R_o (mm)	θ_o (deg)	R_e (mm)	θ_e (deg)	R_o (mm)	θ_o (deg)	R_e (mm)	θ_e (deg)
#1 BD	—	—	373.1	13.4	46.0	30.0	∞	—	46.0	45.0	(-223.4)	(-14.0)
#2 BD	—	—	144.8	35.5	46.0	52.5	∞	—	46.0	45.0	640.5	5.0
#3 BD	—	—	88.9	59.4	46.0	75.0	∞	—	46.0	60.0	174.5	15.0
#4 BD	—	—	56.3	75.0	46.0	28.5	67.2	31.5	46.0	28.5	67.2	31.5



Material $t=12.0$ mm

Fig. 4 Transition of outside curvature (60.5 mm ϕ × 12.0 mm t)

3.1.2 成形荷重

Fig. 5 に、ブレイクダウンとフィンパスの成形荷重を示す。サーキュラーベンドでは、ブレイクダウンの荷重が低くフィンパスの荷重が高い。エッジベンド、Wベンドでは、両者の荷重が均等化される方向にいく。これは、Fig. 4 に示す各々の成形フラワーの #5 ブレイクダウンと #4 フィンパス出側の曲率分布の差に対応する。すなわち、サーキュラーベンドでは、フィンパス入側における平均成形曲率が他のフラワーに比べて小さい。一方、フィンパス出側の平均成形曲率は全フラワーともほぼ同等であるため、サーキュラーベンドではフィンパスでの成形量が大きく、成形荷重が高くなったものと考えられる。

以上のように、サーキュラーベンドでは、高 t/D 材成形時にはフィンパススタンドに負荷が集中し、12.0 mm 材造管時には、フィンパスでの強加工に起因して、Photo 1 に示すような、フランジ部からのロール疵が発生した。

一方、Wベンドでは、ブレイクダウンの成形荷重が他のフラワーに比べて高い。これは、逆曲げ成形がはいるための強加工に起因す

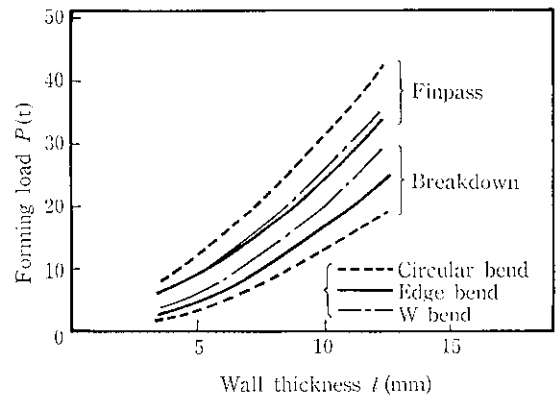
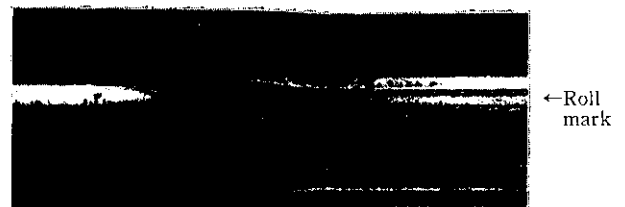


Fig. 5 Comparison of forming load measured in a condition where roll gap at breakdown is equal to wall thickness and total reduction in finpass is 1.2%

Photo 1 Roll mark at finpass (circular bend 60.5 mm ϕ × 12.0 mm t)

るものであるが、後で述べるように高 t/D 材においては成形中の肉厚変化の原因となる。

3.1.3 成形中の肉厚変化

高 t/D 材の成形においては、ブレイクダウンの上下ロールと鋼帯との強接触部で、鋼帯の厚さ変化が発生する。発生箇所を Fig. 6 に示す。図中の A の部分を圧痕、B の部分をエッジダメージと呼ぶことにする。ブレイクダウンでの成形完了後、鋼帯はフィンパスへ進行するが、そこでは、鋼帯は外面だけが拘束されるので、A、B の厚さ変化は管内面曲率の悪化として残ることになる。

Fig. 7 に、60.5 mm ϕ × 12.0 mm t 材造管時の各成形フラワーの圧痕、エッジダメージの発生、およびその進行状況を示す。エッジ

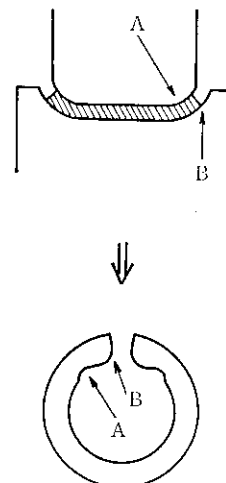


Fig. 6 Position of “decrease in wall thickness” (A) and “edge damage” (B)

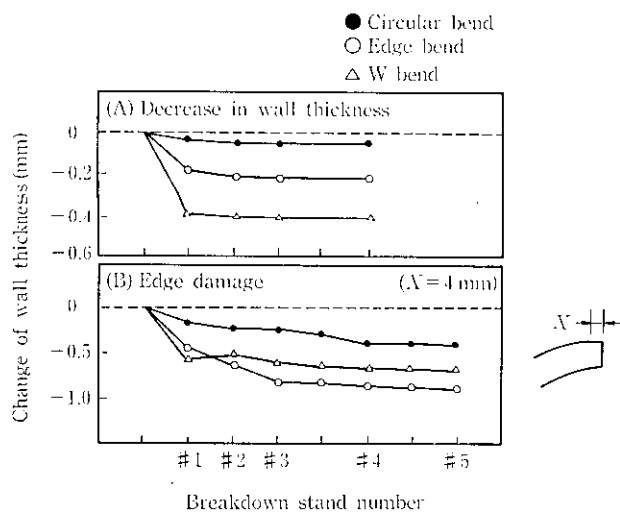


Fig. 7 Change of wall thickness by "decrease in wall thickness" and "edge damage" (60.5 mmφ × 12.0 mm t)

ベンドでは #1~#3 ブレイクダウンでのエッジダメージの進行が著しく、Wベンドでは #1 ブレイクダウンでの圧痕の発生が著しい。

3.1.4 フラワー別成形特性のまとめ

以上の調査結果を、高 t/D 材 (60.5 mmφ × 12.0 mm t, $t/D=20\%$) について定性的にまとめると Table 2 のようになる。

Table 2 Forming characteristics for high- t/D materials

	Forming load		Roll mark at finpass	Change of wall thickness during forming	
	Break-down	Finpass		Decrease in wall thickness	Edge damage
Circular bend	low	high	×	○	○
Edge bend	medium	medium	○	△	×
W bend	medium	medium	○	×	△

Note: (good) ○→△→× (no good)

高 t/D 材造管時のフィンパス成形荷重軽減化、およびフィンパスでの強加工によるロール疵防止のためには、ブレイクダウンでのエッジ部成形強化タイプのフラワー、つまりエッジベンドまたは、Wベンドが有効である。しかしこれらのフラワーでは、ブレイクダウンでの厚さ変化量が大きく、最終的に管内面曲率の悪化を招く。

以下には、ブレイクダウン成形強化タイプのフラワーについて、管内面曲率改善方法を述べる。

3.2 管内面曲率の改善

管内面曲率を良好にするには、成形中に発生する鋼帯の厚さ変化にともなう鋼帯の幅方向の厚さバラツキを減少させる必要がある。ここでは上で述べたブレイクダウンで発生する圧痕、エッジダメージによる厚さ変化の削減方法について述べる。

3.2.1 圧痕の軽減化

圧痕は、鋼帯とブレイクダウンの上ロールとの接触圧力が局部的に高くなることが原因で発生する。高 t/D 材の成形においては、上に述べたようにエッジダメージが発生するため、鋼帯と上ロールの接触幅が減少し、その部分の接触圧力が一層高くなる。

通常、ブレイクダウンにおける上下のロール caliber 半径の関係は、

$$R_U = R_L - t_{\max} \quad (1)$$

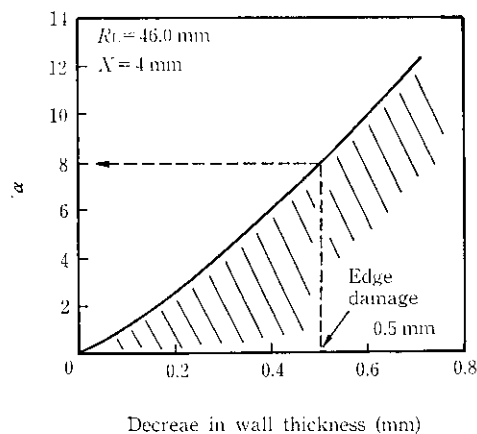
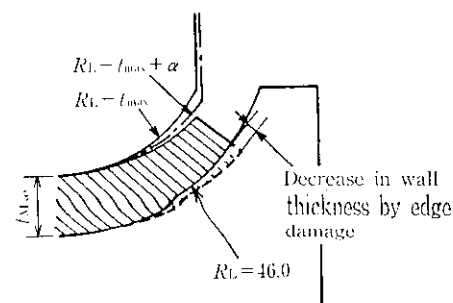


Fig. 8 Relation between available range of α and edge damage

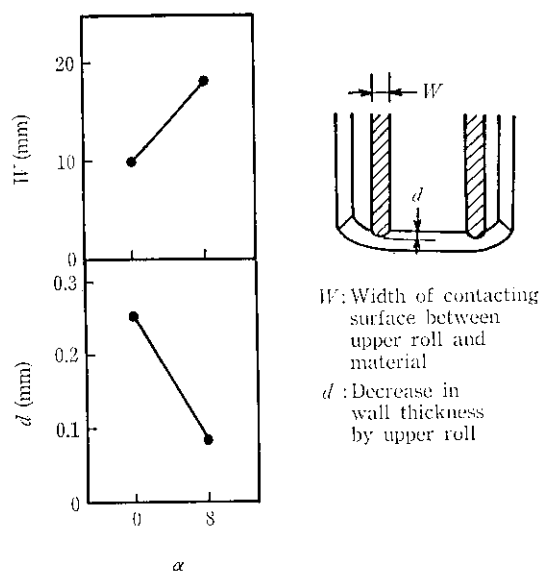


Fig. 9 Improvement of "decrease in wall thickness" (60.5 mmφ × 12.0 mm t)

R_U : 上ロール caliber 半径

R_L : 下ロール caliber 半径

$t_{\max}$: 成形鋼帯最大厚さ

であるが、エッジダメージの分を予め見込んで、上下のロール caliber 半径の関係を定めることにより、鋼帯と上ロールの接触面積の増大を図り、圧痕を軽減することができる。つまり、

$$R_U = R_L - t + \alpha \quad (2)$$

α : 補正值

という形にする。 α は、鋼帯のエッジダメージを助長することのない範囲、すなわち Fig. 8 に示すように、#1 ブレイクダウンでの $\alpha=0$ の場合のエッジダメージ量を caliber 半径に換算した範囲内

の値をとり得る。Fig. 9 に (2) 式による成形での圧痕削減効果を示す。

3.2.2 エッジダメージのフィンパスでの回復

ブレイクダウンで発生したエッジダメージを回復するには、フィンパスでエッジ直近部のみ増肉させる必要がある。ところが、従来のフィンパス形状では、鋼帯の厚さと同程度の寸法だけエッジから幅方向中央部にはいった部分が増肉のピークとなり、エッジ直近部は、フィンとの接触にて拘束されているため増肉量は小さい^{2,3)}。

エッジ直近部を増肉させるには、Fig. 10 のようなフィン形状が適していることが判明した。すなわち、フィンパス前段では、鋼帯厚の 2/3 程度だけを鋼帯外面に対して直角に成形し、フィンパス後段で全厚にわたり直角に成形する方法である。本フィン形状を用いる場合でも、フィンパス出側では全厚にわたり鋼帯エッジ端部が直角にかつ平坦に成形されていないとスクイズスタンドでの溶接に支障が生じる。

そこで、前段フィンパスのフィン形状には、Fig. 11 に示すような適正範囲が存在する。

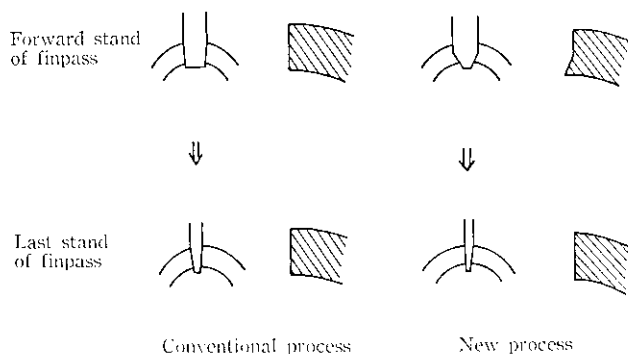


Fig. 10 Change of fin shape

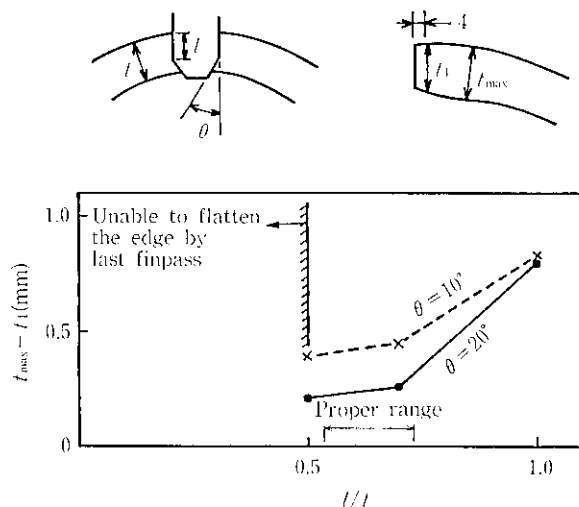


Fig. 11 Relation between fin shape and difference of wall thickness at edge portion

本フィンパスを用いた場合の、12.0 mm 材造管時の増肉状況を Fig. 12 に示す。通常フィンに比べてエッジ直近部が増肉して、ブレイクダウンでのエッジダメージが回復しているのがわかる。Photo 2 は、圧痕の軽減化、エッジダメージの回復を考慮したロールカリバーを用いて成形した 60.5 mmφ×12.0 mm t の断面写真である。管内面曲率は良好である。

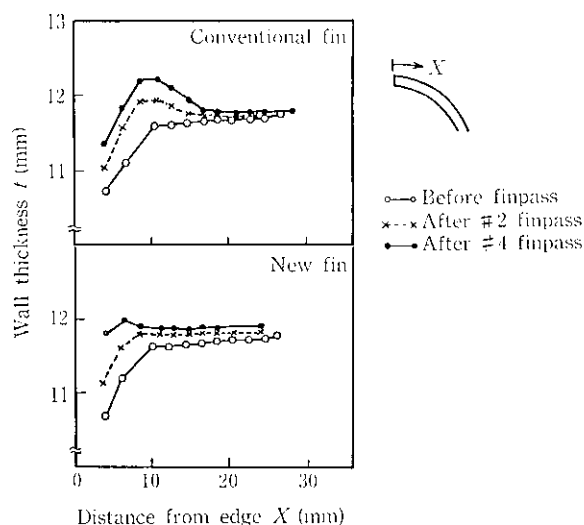


Fig. 12 Effect of fin shape on the distribution of wall thickness at edge portion (60.5 mmφ×12.0 mm t)

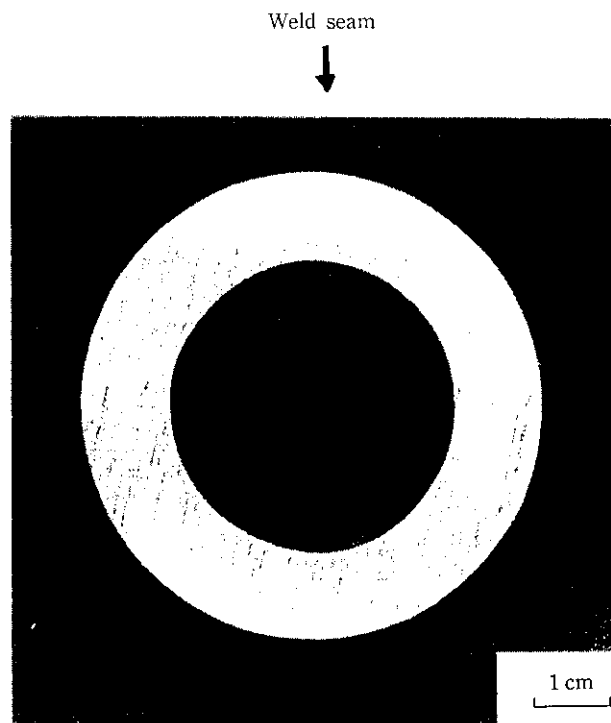


Photo 2 Cross section of product (60.5 mmφ×12.0 mm t)

3.3 同一ロールでの成形可能肉厚範囲の拡大

一般に、電縫鋼管製造用ブレイクダウンは、下ロールは同一外径成形時には鋼管厚が変わっても同一であるが、上ロールについてはある一定の鋼管厚ごとに交換する。これは、同一上下ロールで成形を良好に保つことのできる鋼管厚範囲が存在することを意味する。この範囲を同一ロールでの成形可能肉厚範囲と呼ぶことにする。

電縫鋼管の造管スケジュールは、同一外径内で薄肉から厚肉へと順に並べることが多い。その場合、同一ロールでの成形可能肉厚範囲が狭い程、同一外径チャンス内で、ブレイクダウンの上ロールを交換する回数が増え、生産性を低下させることになる。Fig. 13 は、小径 ERW 6" ミル、2" ミルで使用中のブレイクダウンロー

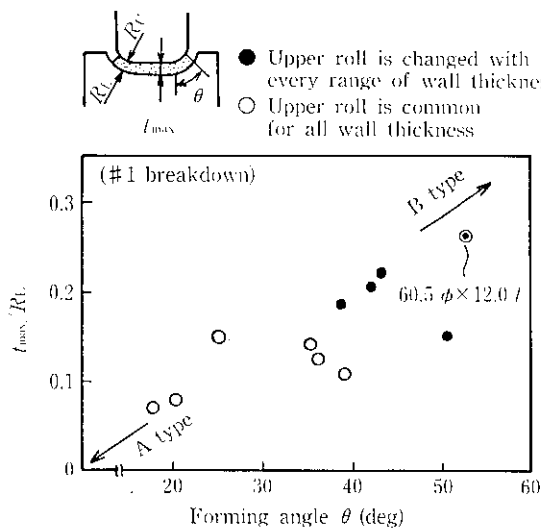


Fig. 13 Relation between forming type of edge portion and available forming range

ルの鋼管エッジ部成形度合と同一ロールでの成形可能肉厚範囲の関係を示す。図より、鋼管エッジ部の成形が強化されるカリバー（Bタイプ）は、ある成形可能肉厚範囲ごとに上ロールを交換していることがわかる。

前に述べたように、 $t/D=20\%$ という高 t/D 材において、フィンパス成形荷重の軽減化を図るためには、ブレイクダウンでの鋼帯エッジ部成形強化タイプであるエッジベンド、またはWベンドが適しているが、この両者は、Fig. 13 に示すように成形可能肉厚範囲という点からは不利である。

以下に、成形可能肉厚範囲目標を本調査対象である 4.0 mm から 12.0 mm としたときの、ブレイクダウンでのエッジ成形強化タイプフラワーでの成形可能肉厚範囲の拡大方法について述べる。

本方法の基本的な考え方は、#1 ブレイクダウンでは主として薄肉を成形し、#2 ブレイクダウンでは主として厚肉を成形するというものである。すなわち、上下のロールカリバー半径に次のような関係を保持するわけである。

#1 ブレイクダウン

$$R_U = R_L - t_{\min} \quad (3)$$

#2 ブレイクダウン

$$R_U = R_L - t_{\max} \quad (4)$$

$t_{\min}$: 最小肉厚

$t_{\max}$: 最大肉厚

(3) 式は、 $t \neq t_{\min}$ の場合、前出の (2) 式と同一の上下ロールカリバー半径の関係を表わす。

本方法で留意すべき点は、次の2点である (Fig. 14 参照)。

- (1) #1 ブレイクダウンロールで、厚肉材の成形時に、鋼帯エッジ近傍部分が圧延状態になって、エッジダメージを助長すること (Fig. 14 の ㊸)
- (2) #2 ブレイクダウンロールで薄肉材成形時に、鋼帯エッジ近傍部分の上下ロール間ギャップが過大になって、エッジ部の成形が不十分になること (Fig. 14 の ㊹)

上述のことについて、60.5 mmφ × 4.0~12.0 mm t 材成形の場合について説明すると、(1) については、12.0 mm 材成形時に最も条件が厳しく、(2) 式における α は 8 となる。一方、Fig. 7 から、ブレイクダウンでの鋼帯エッジ成形強化型フラワーでは、#1 ブレイクダウンでのエッジダメージは約 0.5 mm である。Fig. 8 で α

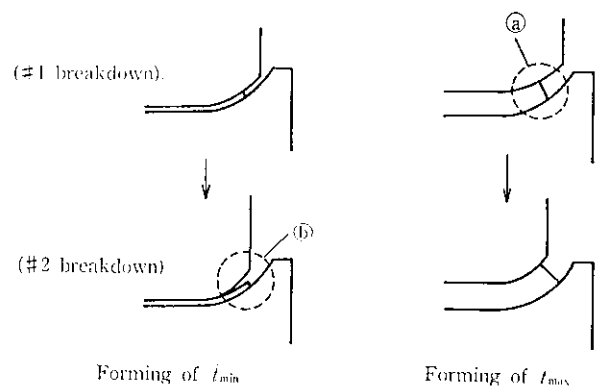


Fig. 14 Method for expansion of available wall thickness range with the common upper roll

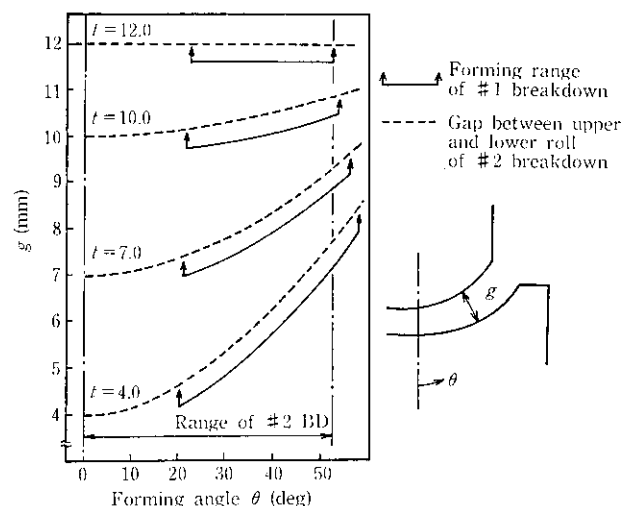


Fig. 15 Roll gap between upper and lower rolls of #2 breakdown

$=8$ は、エッジダメージが 0.5 mm での α のとり得る範囲内であり、エッジダメージ助長の問題は無い。次に、(2) については、Fig. 15 で #2 ブレイクダウンの上下ロール間ギャップが鋼帯厚より大きい領域の大部分は、#1 ブレイクダウンにより成形が完了しており、懸念された鋼帯エッジ部の成形不安は発生しない。

以上のような方法により、ブレイクダウンでの鋼帯エッジ成形強化タイプのフラワーで、60.5 mmφ の 4.0 mm t から 12.0 mm t まで同一ロールでの成形を可能とすることができた。ここでは、60.5 mmφ について述べたが、他サイズにおいても同様の方法を適用することが可能である。

4 まとめ

- (1) 高 t/D 材の成形におけるサーキュラーベンド、エッジベンド、Wベンドの成形特性を調査した結果、以下のことが明らかとなった。
 - (a) フィンパス出側での管外面成形曲率にはほとんど差はない。
 - (b) サーキュラーベンドはフィンパスに成形荷重が集中するのに対し、ブレイクダウンでの鋼帯エッジ成形強化タイプであるエッジベンドおよびWベンドでは、フィンパスとブレイクダウンで成形荷重が均等化される方向にいく。

- (c) エッジベンドでは、ブレイクダウン前段でのエッジダメージ進行が大きい。
- (d) Wベンドでは、#1 ブレイクダウンの成形荷重が他のフラワーに比べて高く、圧痕発生の原因となる。
- (e) 特定のスタンドへの成形負荷の集中を防止するという観点から、高 t/D 材の成形においては、ブレイクダウンでの鋼帯エッジ部成形強化タイプのフラワーが適している。
- (2) ブレイクダウンでの鋼帯エッジ部成形強化タイプのフラワーでは、成形中の厚き変化に伴う管内面曲率の悪化を招く。その改善のためには、ブレイクダウンでの圧痕防止、エッジダメージのフィンバスの回復が必要であるが、前者については、ブレイクダウンの上下ロールカリバー半径の関係の改善、後者については、フィン形状の変更により対処可能となった。
- (3) ブレイクダウンでの鋼帯エッジ強化タイプの成形フラワーにおいて、#1 ブレイクダウンでは主として薄肉材を成形し、#2 ブレイクダウンでは主として厚肉材を成形するというカリバーを用いることにより、同一ロールでの成形可能肉厚範囲の拡大を可能とした。
- (4) これらの成形技術を用いて $60.5\text{ mm}\phi \times 12.0\text{ mm}$ 材 ($t/D=20\%$) を精度よく成形し、健全な溶接品質を得ることができた。今後、他のサイズにも適用を拡大し、高 t/D 材の需要に对应していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 渡辺修三, 嘉納徳彦, 平野 豊, 大出文昭, 横山栄一: 川崎製鉄技報, **13** (1981) 1, 93
- 2) 横山栄一, 豊岡高明, 江島彬夫, 吉本勇三, 河手崇男, 桑田一義: 川崎製鉄技報, **13** (1981) 1, 80
- 3) 木内 学, 新谷 賢, 江藤文夫: 第31回塑性加工連合講演会, (1980), 315