
電縫鋼管のチャンスフリー張出しロール成形法の開発

Development of Chance-Free Bulge Roll (CBR) Forming Process for Manufacturing ERW Pipe

豊岡 高明(Takaaki Toyooka) 橋本 裕二(Yuji Hashimoto) 小林 邦彦(Kunihiko Kobayashi) 板谷 進(Susumu Itadani) 井手 勉(Tsutomu Ide) 西田 保夫(Yasuo Nishida)

要旨：

電縫鋼管のニーズの多様化に対応すべく、ケージロール成形方式を用いた電縫鋼管の新しい成形プロセス、チャンスフリー張出しロール成形法（CBR成形法）を発想し、実験室規模からパイロット規模にわたる研究開発の末、CBR成形法&ミルを開発した。本成形法は、新しい張出し成形曲げ方式と、ロール兼用構造を含む新しいハード技術による高精度成形ミルを特徴とする。実験開発結果をもとに、1990年6月に自社設計によるステンレス電縫鋼管用CBR成形ミルを知多製造所に導入した。本CBR成形ミルは、順調な稼働を示すとともに、ロールの兼用化をはじめとし、それと二律背反的關係にある帯板の成形性、溶接性の面でも優れたいくつかの特徴を示し、ほぼ当初の期待効果をもたらしている。これにより、高生産性を有する高品質、高グレートのステンレス電縫鋼管の安定製造が可能になった。

Synopsis：

In response to the increased demand for greater product variety of ERW pipe, Kawasaki Steel Corp. has developed a new forming process for manufacturing ERW pipe named the chance-free bulge roll forming process, that is, CBR forming process & mill. This process is characterized by the new forming flower and new mechanism of the mill, and has been researched and developed using an experimental model mill and a CBR forming pilot mill. On the basis of the results of the above-mentioned efforts, the actual CBR mill designed by Kawasaki Steel was installed in June 1990 at Chita Works and has been operating more than satisfactorily. This process has achieved not only high flexibility of forming rolls but also high productivity, excellent formability, and high quality of welded seams and pipe. ERW high-grade, high quality stainless steel pipe has been satisfactorily produced in the CBR forming mill.

本文は次のページから閲覧できます。

Development of Chance-Free Bulge Roll (CBR) Forming Process for Manufacturing ERW Pipe



豊岡 高明
Takaaki Toyooka
鉄鋼研究所 鋼材研究部
鋼管研究室 主任 研究員(課長補)



橋本 裕二
Yuji Hashimoto
鉄鋼研究所 鋼材研究部
鋼管研究室



小林 邦彦
Kunihiko Kobayashi
鉄鋼研究所 研究企画部
企画開発室 主査(部長)



板谷 進
Susumu Itadani
知多製造所 設備部
設備技術室 主査(掛長)



井手 勉
Tsutomu Ide
知多製造所 設備部
設備技術室



西田 保夫
Yasuo Nishida
知多製造所 製造部
管技術室 主査(掛長)

1 結 言

近年、電縫鋼管のニーズの多様化は著しく、製造側では、小ロット多品種化、高付加価値・高品質化、造管サイズの拡大および短納期化等への対応が要求されるとともに、国際競争力を強化するためにも、大幅なコストダウンを図ることが急務となっている。これに対し、これまでに数多くの研究¹⁻⁶⁾と技術開発^{7,9-20)}が行われてきているが、上記課題の中には、二律背反的關係を有するものもあり、一度にいくつかの課題を大幅に改善するには至っていない。

当社は、1978年に国内では最初の26"ERWフルケージロール成形ミル(IHI-Yoder)を導入し¹⁾、生産を行うとともに、本ケージロール成形技術の確立を目指し、実際ミルによる実験調査^{7,9)}ならびにモデルミルを用いた一連の基礎研究⁸⁾を行い、従来ケージロール成形ミルの長所・短所を把握するとともに、いくつかの技術開発を進めてきた。

そして筆者らは、これらのケージロール成形に関する研究データ

要旨

電縫鋼管のニーズの多様化に対応すべく、ケージロール成形方式を用いた電縫鋼管の新しい成形プロセス、チャンスフリー張出しロール成形法(CBR成形法)を発想し、実験室規模からパイロット規模にわたる研究開発の末、CBR成形法&ミルを開発した。本成形法は、新しい張出し成形曲げ方式と、ロール兼用構造を含む新しいハード技術による高精度成形ミルとを特徴とする。実験開発結果をもとに、1990年6月に自社設計によるステンレス電縫鋼管用CBR成形ミルを知多製造所に導入した。本CBR成形ミルは、順調な稼働を示すとともに、ロールの兼用化をはじめとし、それと二律背反的關係にある帯板の成形性、溶接性の面でも優れたいくつかの特徴を示し、ほぼ当初の期待効果をもたらしている。これにより、高生産性を有する高品質、高グレードのステンレス電縫鋼管の安定製造が可能となった。

Synopsis:

In response to the increased demand for greater product variety of ERW pipe, Kawasaki Steel Corp. has developed a new forming process for manufacturing ERW pipe named the chance-free bulge roll forming process, that is, CBR forming process & mill. This process is characterized by the new forming flower and new mechanism of the mill, and has been researched and developed using an experimental model mill and a CBR forming pilot mill.

On the basis of the results of the above-mentioned efforts, the actual CBR mill designed by Kawasaki Steel was installed in June 1990 at Chita Works and has been operating more than satisfactorily. This process has achieved not only high flexibility of forming rolls but also high productivity, excellent formability, and high quality of welded seams and pipe. ERW high-grade, high quality stainless steel pipe has been satisfactorily produced in the CBR forming mill.

をもとに、上記課題を達成可能な電縫鋼管の新成形プロセスを思考してきたところ、従来の成形プロセスに比べ、ロール兼用性、帯板成形性および溶接性等の面でいくつかの優れた特徴を有する新しい電縫鋼管の成形プロセス、チャンスフリー張出しロール成形法(Chance-free bulge roll forming—CBR成形法)を発想した。

7年間余りにわたる実験室規模からパイロット規模に至る研究開発実験を進め、実機ステンレス電縫鋼管ミルへの適用を目的とした当初の目標をほぼ達成した。そして、この研究開発結果をもとに、1990年6月に自社設計によるステンレス電縫鋼管用実機ミルを知多製造所小径電縫鋼管工場に導入した。本ミルは、順調な立ち上がりを示すと同時に当初の期待効果をもたらしており、ステンレス電縫鋼管の品質向上に大きく寄与している。

* 平成2年8月28日原稿受付

本報告は、CBR 成形法の概要とその特徴を従来成形法と比較して述べるとともに、実機への適用成果について述べる。

2 CBR 成形法の概要とその特徴

電縫鋼管のロール成形技術は、(1)帯板をどのように曲げていくかを定める成形フラワー(ソフト的技術)と(2)その成形フラワーどおりに帯板を成形する成形設備(ハード的技術)の二つの技術よりなる。

近年、ロール兼用化を主目的としたフレキシブル成形ミル¹⁰⁻¹³⁾が開発されてきているが、これらは主として後者の開発を主としたものであり、前者の開発には至っていない。これに対し、CBR 成形法は、両面における技術開発を指向しており、ロール兼用化と二律背反の関係にある帯板の成形性および溶接性の向上も図り、高品質電縫鋼管の製造を可能にしたものである。その特徴を以下に述べる。

2.1 成形フラワー

Fig. 1 に、CBR 成形法の成形フラワーを従来成形法のそれと比較して示す。従来成形法は、ブレイクダウンロール、あるいはケージロール成形の上流成形で、帯板全体の曲げ成形(主としてサーキュラーベンド)を行い、下流(フィンパス)成形にて素管レデュース型の管全周曲げ・絞り成形の繰り返し加工を行う。これに対し、CBR 成形法は、上流成形では、エッジ曲げと帯中央部の曲げ成形を行い、小判型の素管を成形し、フィンパス成形では、素管バルジ型の横径張出し成形を行うとともに、各スタンドでの素管円周方向の分担化成形を行う。特に、第1フィンパスロール(1F)では、素管円周の4箇所を製品半径より小さい半径にオーバーベンド成形することを特徴としている。

Fig. 2 には、前述の CBR 成形法のフィンパスロール成形の特徴を従来成形法のそれと比較して示す。Fig. 2(a)は、両者のフィ

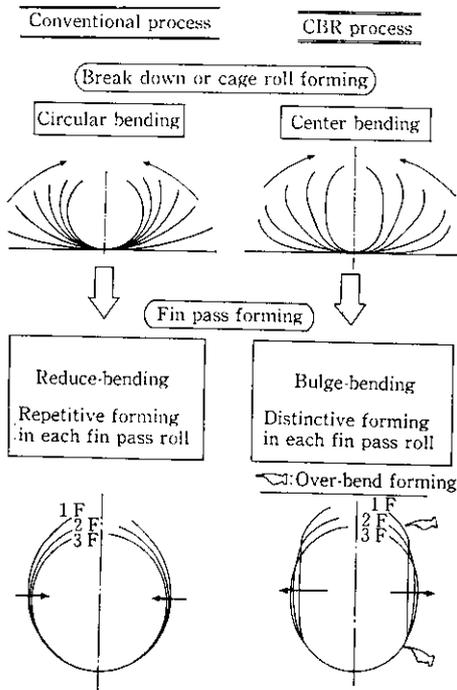


Fig. 1 Comparison of the forming flowers between conventional forming process and CBR forming process

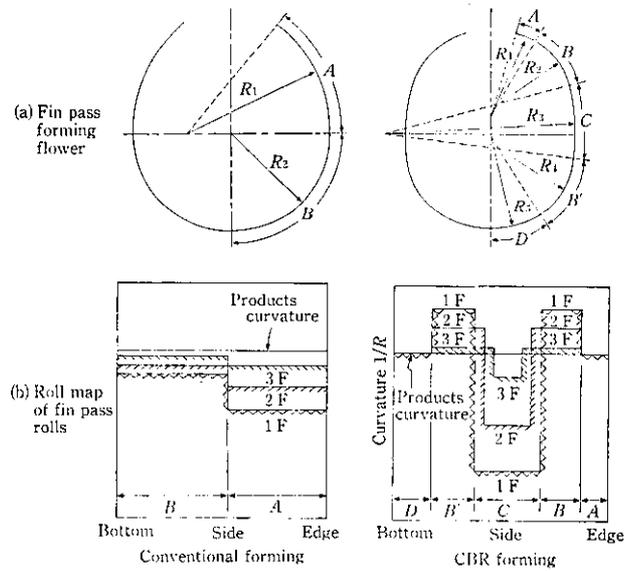


Fig. 2 Comparison of fin pass forming flower between conventional forming process and CBR forming process

ンパス成形フラワーを示すが、CBR 成形法は、従来の2ラディアスに対し5ラディアスの設計となっている。第1フィンパス(1F)で、素管サイド部相当のC部の曲げ成形を抑制して、BおよびB'部に製品半径より小さい曲げ半径となるオーバーベンド成形を加える。第2および第3フィンパス(2F, 3F)では、C部を徐々に張出し曲げ成形するとともに、BおよびB'部の曲げ戻し成形を行い、全体を製品曲率に近づけていく。なお、A, D部は、上流成形にてほぼ所定の曲率まで成形される。Fig. 2(b)には、上述の成形フラワーの特徴をロールマップにより従来法のそれと比較して示すが、各フィンパスロールでの素管円周方向の成形が分担化されていることがわかる。CBR 成形法は、この特徴あるフィンパス成形フラワーにより、後述するVシェイプ角度の拡大、ロール疵の抑制、ならびに残留応力の低減等のいくつかの優れた特性をもたらす。

2.2 成形設備

Fig. 3 に、CBR 成形フラワーを実施する成形設備(ミル)構成

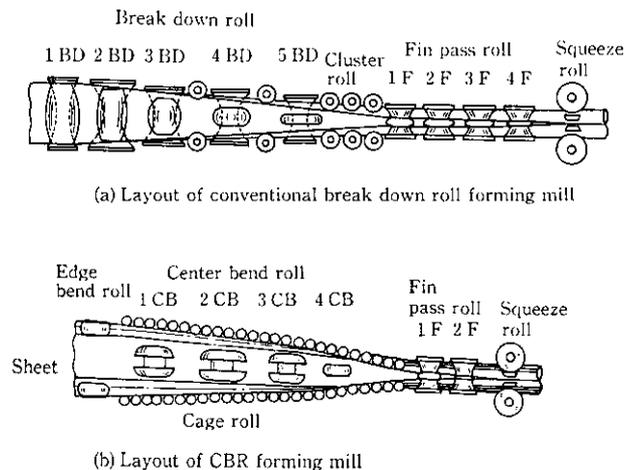


Fig. 3 Comparison of layout of forming mill between conventional forming process and CBR forming process

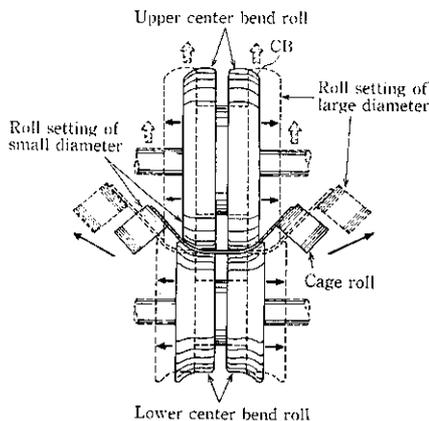


Fig. 4 Conception of common use of forming rolls in wide diameter and thickness range

を従来のブレイクダウンロール成形ミルと比較して示す。従来成形ミル(a)では、帯板は、ブレイクダウンロール(BD)にてステップ的に成形されるため、各BD間での帯板のスプリングバックも大きく、各BDでの曲げ加工量も大きくなるとともにロール周速の問題よりロール疵の発生もある。また、BDロールは、ロール兼用性に劣り、外径サイズに応じてロール替えを必要とする。

一方、CBR成形ミルは、従来BD成形ミルおよびケージロール成形ミルの欠点を改善するためFig. 3(b)に示すライン構成を取り、上流成形でまずエッジ曲げを実施し、その後、帯板中央部に配設したセンターベンドロール(CB)と帯板のエッジ部を連続的に拘束支承するケージロール(CR)とにより帯板中央部の曲げ成形を行う。後続のフィンパスロールは、フィンパスでの素管変形挙動調査⁹⁾および本CBR成形の開発実験結果より高 t/D 材を除けば、2スタンドで成形が可能であり、かつ作業性の面でもスタンド数の最小化が望まれたため、実機ミルでは2スタンドのフィンパスロール構成とし、その後段にロータリーシームガイドスタンド(RSG)を配設した。さらに、CBR成形ミルの上流成形ロールは、ロール兼用を図るため、Fig. 4に示すような構想とし、帯板中央部を曲げる1CB~3CBロールは、分割されたツイン型ロール構造であり、板厚ならびに外径サイズ変更に対し、ロールを幅方向に移動調整するとともに板厚方向の圧下調整を行う。また、この時、CRも図に示す矢印の方向に位置調整を行いロール兼用を行う。

2.3 特長

CBR成形法の特長を以下に挙げる。

- (1) ロール兼用化
外径および板厚変更時間の短縮。
- (2) 高精度 roll setting とミルのコンパクト化
ミルの完全セットアップによるロール設定調整時間の短縮。
- (3) 成形の安定化
エッジウエーブの抑制、帯のローリング抑制、ドライ成形におけるロール疵防止とエッジ増肉抑制等によるロスタイムの減少および歩留まり、パイプ寸法精度の向上。
- (4) 溶接の安定化と品質向上
Vシェイプ角度の増大、エッジのI型突き合わせ化とエッジ成形変動の減少等による適正溶接条件範囲の拡大および溶接部品質の向上。

Fig. 5にフィン幅比($W_F/2R_0$)とエッジ突き合わせ角度(θ_w)

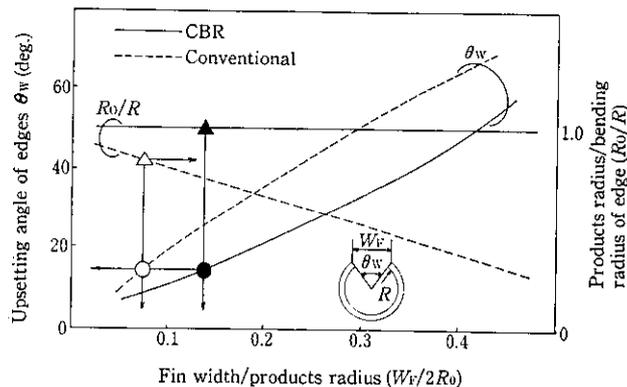


Fig. 5 Relation between fin width, upsetting angle of edges and bending radius of edge

ならびにフィン幅比とエッジ部曲げ半径比(R_0/R)との関係を示す。両成形法において同じ θ_w とした場合、CBR成形法では、約2倍のフィン幅となり、当然これにより溶接時のVシェイプ角度も大きくなる。そして、 θ_w と($W_F/2R_0$)を目的に応じて選定すれば、Vシェイプ角度の増大とエッジ突き合わせのI型化が従来成形法に比べて達成されやすい。また、エッジの曲げは、上流のエッジベンドおよび第1フィンパスロールにて行い、後続のフィンパスロールで積極的な成形は行わない。

- (5) 高品質、高加工性能を有する高グレード電縫鋼管の製造
管周方向の残留応力低減、材料加工硬化の抑制と溶接品質の向上による高グレード電縫鋼管の製造。

3 2次元プレス成形実験による調査

CBR成形法の開発の1st stepとして、2次元プレスシミュレーション実験により、フィンパスロール成形での素管の変形挙動ならびに張出し成形性を調査した。2次元プレス成形と3次元ロール成形とは、材料変形にかなりの相違があり必ずしも妥当なシミュレーションとは言いがたいが、本成形法の特性を簡便に評価する目的で実施した。

実験は、50t万能試験機を用い、U成形ロッカー台とU型ポンチにより上流成形に相当するU字形素管(エッジベンドなし)を成形し、次にこれをFig. 6に示すフィン付きの穴形ダイスに供し、同一成形素管を1F→2F→3F(RSG)→SQダイスの順にプレス成形してフィンパス成形のシミュレートを行った。

Fig. 7には、上記プレス成形実験の結果の一例として、フィン

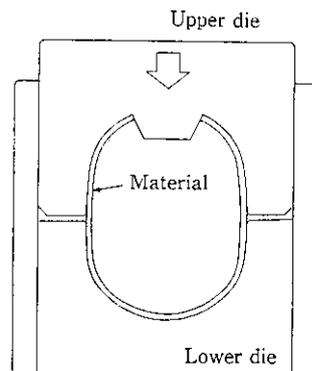


Fig. 6 Press forming simulation of fin pass forming

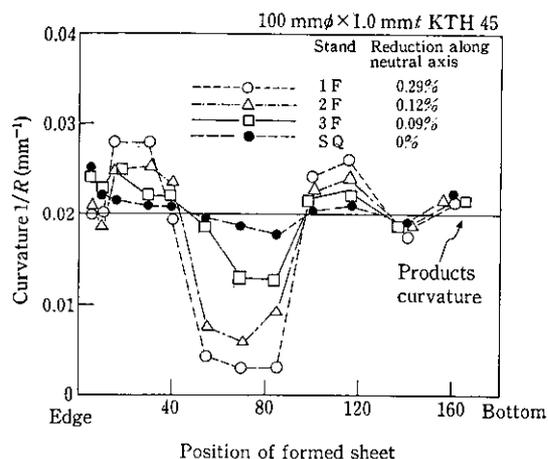


Fig. 7 Change of curvature distribution of formed sheet in peripheral direction passing through fin pass and squeeze roll stands

パス、スクイズ成形過程における素管円周方向の成形曲率分布の推移を示す。1Fにおいて、エッジから約30mmと約110mmの位置が製品曲率以上にオーバーベンドされ、エッジから約70mmの管サイド部の曲げが抑制されている。2F、3Fにおいては、1Fでのオーバーベンド部が順次曲げ戻されるとともに、管サイド部が徐々に張出し曲げ成形されており、SQ成形において、円周方向の各部がほぼ製品曲率に成形されることがわかる。このように、プレス実験により、CBR成形法の大きな特徴であるフィンパス成形での素管の曲げ戻し成形およびサイド部の張出し成形がほぼ実現可能であることが明らかとなった。

4 4''モデルミルによる薄肉材成形実験

4.1 実験方法

CBR成形法の開発の2nd stepとして、4''モデルミルを用い、実際のロール成形による開発実験を行った。

Fig. 8に、実験に用いた4'' CBR成形モデルミルのライン構成を示す。本ミルは、IHI-Yoder型のケージロール成形ミル(従来成形ミル)を改造したものであり、上流成形域でセンターベンドロール(1CB~4CB)とケージロールとにより帯板を略U字形に成形した後、フィンパスロール(FP)にて、そのU字素管を張出し成形して円形に仕上げる。そして、1CB~3CBは、ロール兼用を考え、上下ロールが幅方向に2分割されたFig. 4に示す構造のロールとなっているが、本実験ではロール兼用実験は実施していない。また、エッジベンドも本実験ではなしを基準とした。

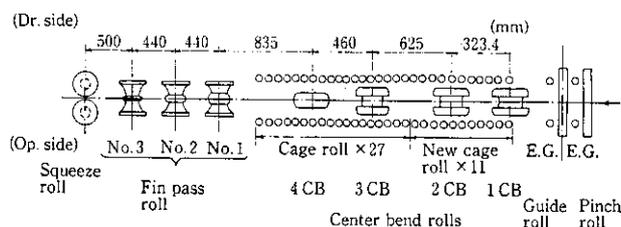
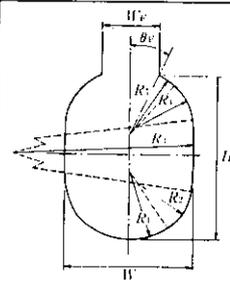


Fig. 8 Schematic diagram of the 4'' CBR forming model mill

Table 1 Dimensions of fin pass roll caliber

	1F	2F	3F
R_1 (mm)	50.00	50.00	50.00
R_2 (mm)	40.00	44.00	49.00
R_3 (mm)	250.00	152.12	79.88
R_4 (mm)	37.39	42.00	49.00
R_5 (mm)	50.00	50.00	50.00
W (mm)	93.06	96.54	100.46
H (mm)	120.57	114.21	107.10
W_F (mm)	41.42	28.20	15.00
θ_F (deg)	25.00	15.54	8.10



実験サイズは、100mmφ×1.0mmt×4000mm l、 $t/D=1\%$ 、 $\sigma_y=337$ MPaの冷延材を使用した。ダウンヒル量は、 $0.8 \times OD$ を基準とし、成形速度は、約7.5m/minとした。

Table 1に、実験に供したフィンパスロールの穴形状寸法を示す。 R_2 と R_4 部はオーバーベンドおよび曲げ戻し成形を、 R_3 部はサイド部の曲げ抑制部で、2F、3Fにて張出し曲げ成形を受ける。従来成形法のフィンパスロール穴形に比べ、1Fのフィン角度(θ_F)を72%程度に小さくし、3Fのフィン幅(W_F)を174%程度に大きくして溶接時のVシェイプ角度の増大を図っている。フィンパスリダクションは、帯板中立軸周長リダクション(r_n)を採用し、負荷時のロールギャップ値より算出した。また、エッジウェーブ発生のない適正フィンパスリダクション範囲の調査においては、そのトータルリダクションおよびリダクション配分を変化させて実験を行った。

4.2 実験結果

本モデルミル成形実験では、まず上流ケージロール成形でのU字形状素管の成形調査ならびに成形安定化を行い、続いてフィンパスロール成形開発実験を、1F単スタンド実験から、順次スタンド数を増やしたタンデム成形実験を行った²²⁾。

Fig. 9には、1F後および3F後における素管の曲げ曲率分布を設計値と比較して示す。各FPロール後の素管とも、ほぼ設計値に近い曲率に成形されており、実際のロール成形においても、本CBR成形法が実現可能であることが実証された。

Fig. 10には、SQ成形後における未溶接素管の曲げ曲率分布を従来のそれと比較して示す。CBR成形法では、サイド部の曲げ不足がやや認められるが、ほぼ全周が製品曲率に近く曲げられており、特に、エッジの曲げは、エッジベンドを行っていないにもかかわらず、エッジベンドを実施した従来成形法に比べ、よく曲がっており、CBR成形法は、エッジの曲げ性にも優れることがわかる。

Fig. 11に、フィンパスロール成形でのエッジウェーブ発生のない適正フィンパスリダクション範囲の両成形法における比較を示す。CBR成形法は、適正フィンパスリダクション範囲が広く、かつ1Fおよびトータルのリダクションを低減することができる。さらに、最終FPロールである3Fで素管を絞ることができるため、素管拘束力の強化による溶接の安定化が期待される。適正フィンパスリダクション範囲が広いことは、ロールのセットアップにおいて非常に有利となる。

CBR成形法では、上述のようなフィンパスリダクションの低減ならびに上流FPのフィン角度の低減により、素管エッジ部の増肉を抑制することが可能であり、従来の50%程度の増肉率となる²²⁾。

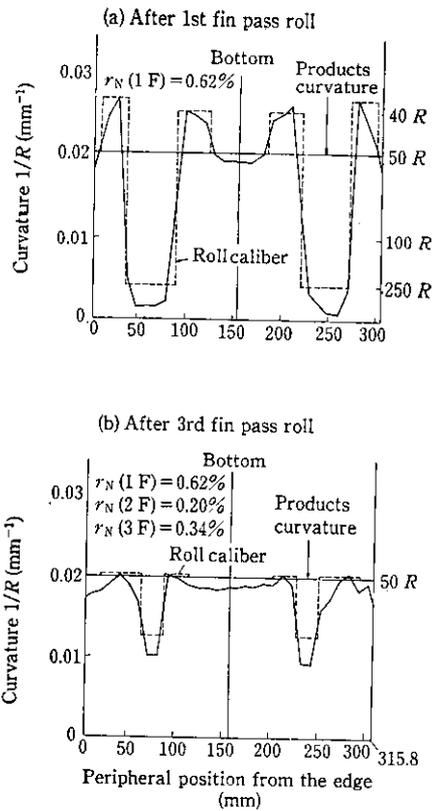


Fig. 9 Change of curvature distribution of formed sheet in peripheral direction passing through fin pass roll stands

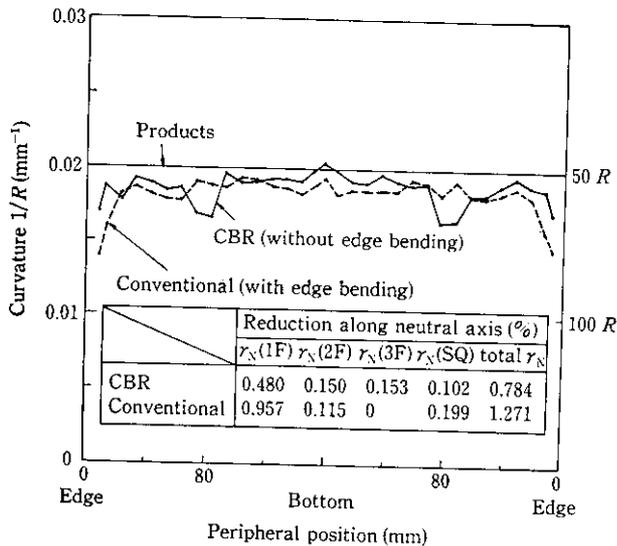


Fig. 10 Comparison of curvature distribution of formed sheet in peripheral direction after SQ roll forming

Fig. 12 は、1F における素管とロールとの接触状態を感圧紙を用いて測定した結果を示す。CBR 成形法では、2 ロール型 FP のロールフランジ (ロールギャップ) 部相当での材料とロールとの接触が弱いため、従来成形法においてこの部分で発生していたロール疵を抑制することが可能である。

Table 2 には、SQ 成形における溶接エッジのなす V シェイプ角度 (θ_v) と SQ 成形後のオープン管のエッジ開口幅 (W_E) の両成形法での比較を示す。SQ 前エッジ開口幅が 0.03 mm となる位置の SQ

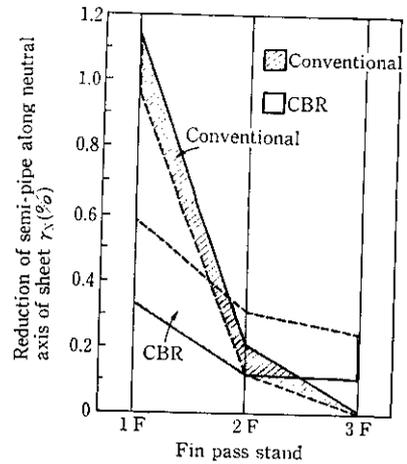


Fig. 11 Comparison of suitable reduction range without edge wave in fin pass roll forming

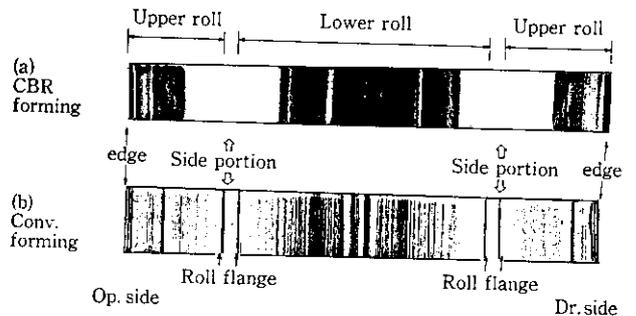


Fig. 12 Comparison of contacting state of formed sheet with 1st fin pass roll

Table 2 Comparison of V-convergence angle and opening width of semi-pipe after squeeze roll

	V-convergence angle		Opening width of semi-pipe after squeeze roll		
	l^* (mm)	θ_v (deg.)	Fin width of 3F, W_{3F} (mm)	After SQ W_E (mm)	Comparative ratio
Conventional	12.87	0.13	8.6	26.7	1
CBR	6.00	0.29	15.6	20.7	0.775

* l is the distance from squeeze roll center, where opening width of edges is 0.03 mm

中心からの距離 l を測定し、幾何学的関係より θ_v を求めた。この θ_v は、SQ 中心直前での値のため、一般に言われている $l=50\sim 100$ mm における θ_v に比べて、値が小さいが、表に示すように CBR 成形法では、 θ_v が従来の 2 倍強と大きくなっており、当初の期待効果が達成されていることがわかる。ところで、 θ_v の大きさと溶接欠陥の発生に関しては、芳賀²³⁾により、 θ_v が大きい方が第 3 種溶接現象 (エッジの短絡発生) が発生しにくく、ペネトレータ欠陥が減少すると報告されている。これによれば、適正溶接範囲も θ_v が大きくなれば広がるものと考えられ、CBR 成形法では、従来成形法に比べ溶接の安定化が図られやすいことが期待される。

CBR 成形法の特徴の一つとして、FP 成形での素管円周 4 箇所のオーバーバンド・曲げ戻し成形を行うことによる管円周方向残留応力 (モーメント) の低減があるが、その評価の一つとして、SQ 成形後のオープン管のエッジ開口幅 (W_E) を測定し比較した。Table 2

に示すように、CBR 成形法では、3F のフィン幅 (W_{3F}) が従来成形法のそれらに比べて広いにもかかわらず、SQ 後のオープン管の W_E は、狭い値になっている。従来成形法の W_E を 1 とした場合、CBR 成形法は、0.775 となっている。このことにより、溶接された管の円周方向残留応力は、CBR 成形法の方が小さいと推定される。この残留応力の低減は、サイザー成形負荷の軽減、溶接部フッククラック発生の抑制および耐コラプス特性の面でも必要と考えられる。

5 パイロットミルによる開発実験

5.1 実験設備と方法

Fig. 13 に CBR 成形パイロットミルのライン構成を示す。パイロットミルは、ミルの入側にアンコイラーとピンチ・レベラーを擁し、連続造管が可能である。ケージロールは、片側 12 個配設し、幅・高さ方向位置およびロール角度の調整が 1 台ごとに可能となっている。1CB~3CB は、上下ロールとも分割型の幅可変ロールである。ロール駆動は、EB, 1CB, 1F, 2F を駆動としている。成形速度は、最大 22 m/min で、高周波誘導溶接 (300 kW, 350 kHz) が可能である。また、ロールのセットアップを目的にして、スタンドのプリロードと、ロードセルおよびロール位置測定センサーの装備を行い、ミル精度の向上を図っている。

Fig. 14 には、汎用エッジベンドロールのロール兼用の構想を模式的に示す。下ロールは、二つのロール穴形を有し、上段は外径サイズの大きい場合に、下段は外径サイズの小さい場合に使用し、帯

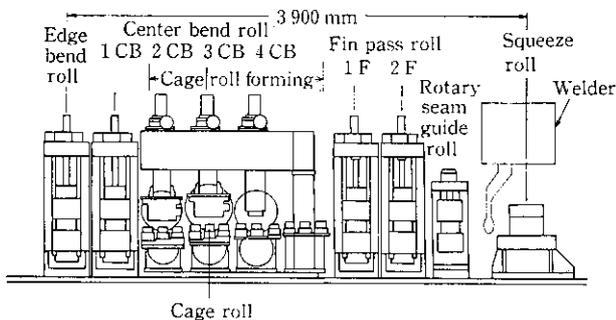


Fig. 13 Layout of CBR forming pilot mill

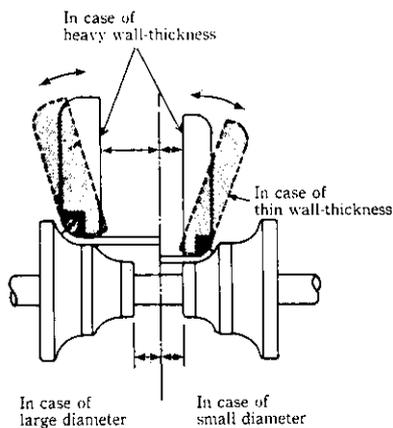


Fig. 14 Conception of common use of edge bend rolls in wide diameter and wall-thickness range

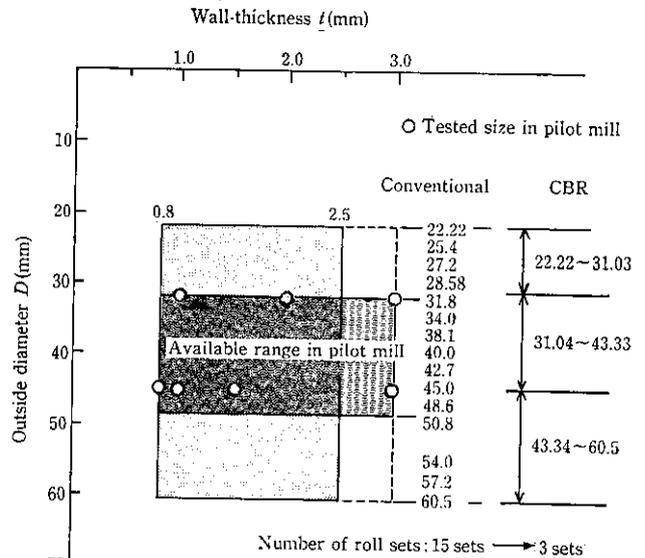


Fig. 15 Available size of ERW stainless steel pipes and range of common use of forming rolls in CBR forming mill

幅に合わせて下ロールは幅方向に位置調整が可能となっている。下ロールの位置固定は、センターベンドロール (CB) と同様に新しく開発したロール内の油圧拡張スリーブに油圧を作用させ、ロール軸に固定する方式である。

また、上ロールは、外径大用と外径小用の二つのロールを持ち、各ロールは、ロール穴形曲面に関し、二つの曲げ半径 (内側が板厚大用、外側が板厚小用) を持っている。このため、上ロールも、外径サイズによりロールの幅方向位置が可変であり、板厚によりロール図に示すごとく傾斜し、板厚の大小に応じてロール穴形曲面の使用を変えている。このように、当社開発の汎用エッジベンドロールは、ロールの兼用性とエッジの曲げ性の二律背反的關係を有する両面の特性を同時に満足できるよう考慮して設計している。

Fig. 15 は、計画しているステンレス電縫鋼管の製造可能範囲と上流成形ロール (EB~4CB) のロール兼用範囲およびパイロットミルでの実験サイズを示す。今回の開発は、ステンレス材を対象としているため、ロール疵、パイプ形状ならびに溶接品質の面にも重点を置き、ケージロール (CR) を除く上流成形ロールのロール兼用範囲は外径比 (=最大外径/最小外径) で 1.4 とし、保有ロールを従来の 15 セットから 3 セットに減少させ、かつ、高品質のステンレス電縫鋼管の成形・溶接を達成することを目標とした。

なお、ケージロールは、図中の製造可能範囲内では全サイズ兼用としている。

パイロットミルでの開発実験は、図中に示す○印の外径 31.8 mm と 42.7 mm の板厚 0.8 mm~3.0 mm のサイズにて行い、ロールの兼用性、帯板の成形性、溶接性、溶接品質および材料特性の変化等について調査した。

ところで、CBR 成形法の開発においては、前述したように成形フラワーが従来に比べ多数の曲げ半径を有しているため、成形フラワーの設計が極めて重要であり、かつ、設計も煩雑である。そこで、CBR 成形フラワーの設計の効率化とフラワーの事前評価を行うことを目的に、CARD (computer aided roll design) system の開発を行った。その一例を Photo 1 に示す。(a) は、3次元立体成形モデルを示し、(b) は、その立体成形モデルにおける幅方向線素の長手方向膜ひずみの推移を示したものである。このようなマクロ的ならびに定量的な検討によって成形フラワーの事前評価を可能と

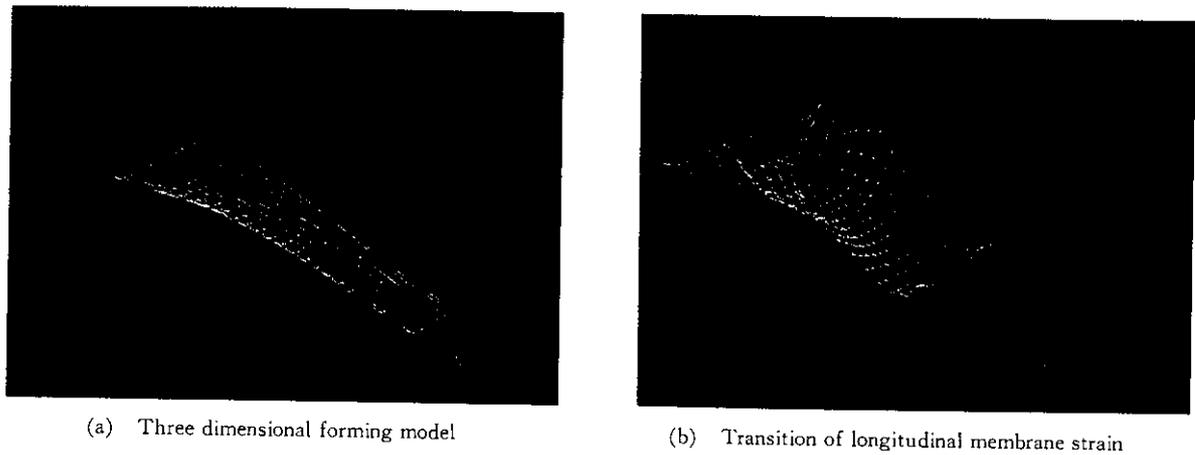


Photo 1 Example of design of CBR forming flower by CARD system

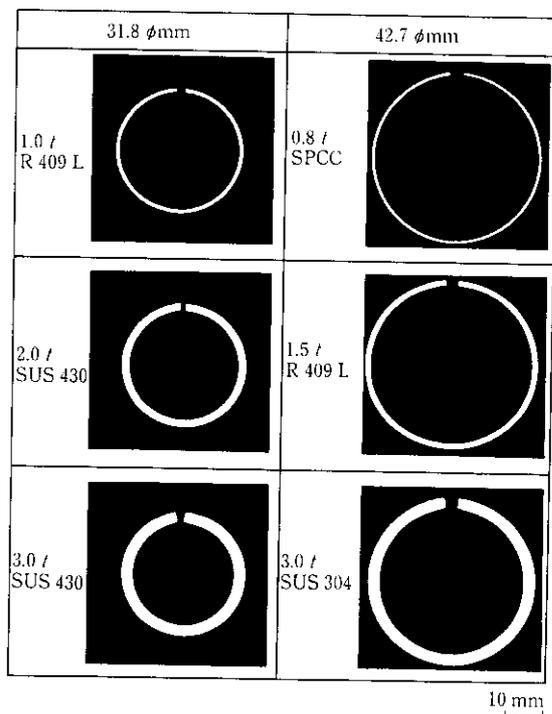


Photo 2 Shape of cross section of formed sheet passing through squeeze roll without welding

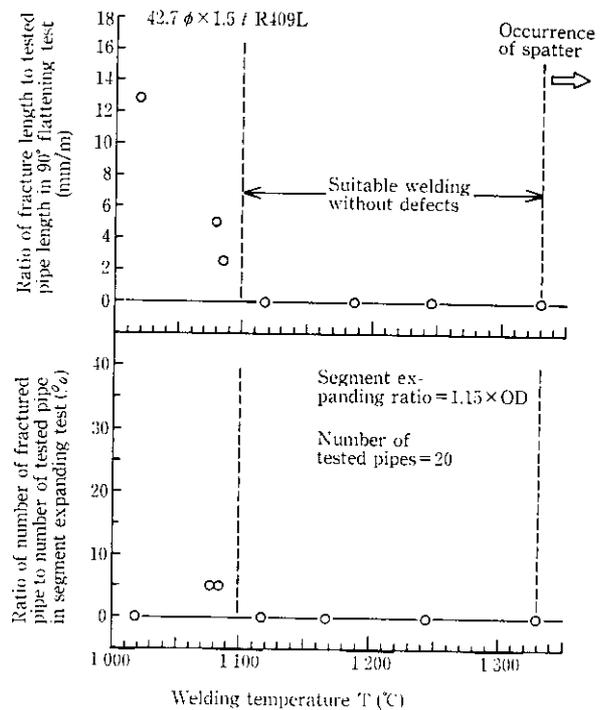


Fig. 16 Relation between welding temperature and results of welding toughness test in CBR forming pilot mill

した。CARD system の開発は、CBR 成形法開発の効率化に大きく寄与した。

5.2 実験結果

パイロットミルにおける主な開発実験結果について報告する。

Photo 2 には、パイロットミル開発実験において、上流成形ロール兼用によって成形された未溶接素管の断面形状を示す。42.7 mm φ×0.8 mm t の薄肉材から 31.8 mm φ×3.0 mm t の厚肉材まで成形性（ドライ成形でのロール疵防止、帯板のローリング抑制、曲げ形状の向上、エッジウェーブ防止等）に優れ、かつ、良好な形状を有するステンレス鋼管の安定成形を達成した。

また、ミルのロールセッティング精度の向上を図ったことにより、溶接前の帯板エッジの変動も高々±0.08 mm と極めて小さく、溶接時のVシェイプ角度も約 4.5° と従来に比べて拡大した。これ

らにより素管の高周波溶接は、従来に比べ大幅に安定した。その結果の一例として、Fig. 16 に本パイロットミルにおける溶接温度と実用試験成績との関係を示す。シーム 90° 偏平試験およびセグメント拡管試験結果より、溶接欠陥の発生しない適正溶接温度範囲が約 200°C と極めて広く、安定した高品質のステンレス電縫鋼管の製造が可能となることがわかった。

6 ステンレス電縫鋼管用 CBR 成形ミルの導入

6.1 実機 CBR 成形ミル

Photo 3 に、知多製造所小径電縫鋼管工場内に設置したステンレ

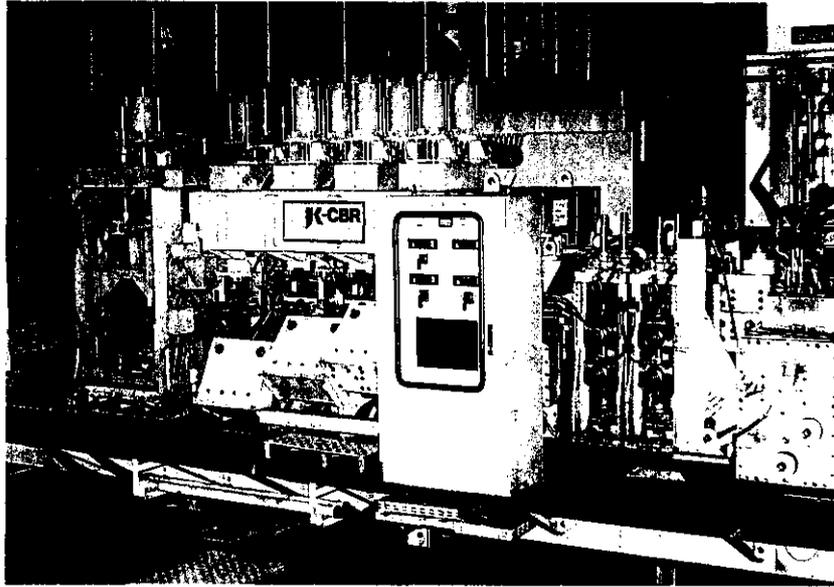


Photo 3 Appearance of the actual CBR forming mill for manufacturing ERW stainless steel pipe

ス電縫鋼管用 CBR 成形ミルの外観を示す。本ミルは、既存のミルライン内に設置し、普通鋼成形ミルとのライン共用を図る方式としているため、ミルを親台車に載せ、ミル全体を造管チャンス時にライン内に入れ替える方式としている。ミルのスタンド構成は、ほぼパイロットミルと同様であり成形ミルの全長は約 4.2m とコンパクト化を達成した。

6.2 造管結果

実機 CBR 成形ミルは、導入後順調な立ち上がりを示すとともに、当初の期待効果をもたらしている。ここでは、溶接品質ならびにパイプの品質を中心に造管結果について報告する。

Table 3 に、従来成形ミルと CBR 成形ミルにおける帯板の中立軸周長および外周長リダクションとスクイズロール (SQ) における V シェイプ角度の比較を示す。CBR 成形ミルでは、従来の約半分弱のリダクションで帯板をパイプに成形することができ、過大な絞りひずみを付加することなく、板を曲げて円形にすることができる。これは、上流ケージロールでの連続拘束曲げ成形と本成形法の最大の特徴である張出し成形フラワーによる曲げ成形によって達成されている。この造管時のリダクションの低減は、造管歩留まりの向上のみならずロールの摩耗の減少、パイプ材質の劣化(加工硬化)抑制につながり大きなメリットをもたらす。また、SQ における V シェイプ角度は、パイロットミルでの結果と同様に、従来の約 1.5 倍の 4.6° に拡大し、かつ、エッジの I 型突き合わせも同時に達成されており、安定した溶接品質を有するステンレス電縫鋼管の製造

Table 3 Comparison of reduction of formed sheet and V-convergence angle in squeeze roll

	Reduction of semi-pipe along neutral axis of sheet, γ_R (%)			V-convergence angle θ_v^{*2} (deg)
	Fin pass rolls	Sizing rolls ^{*1}	Total reduction	
Conventional ^{*3}	2.20	1.50	4.39	3.2
CBR	0.30	0.99	2.00	4.6

^{*1} Reduction of welded pipe along outside surface of pipe

^{*2} Measured value in distance of 40~80 mm from squeeze roll center

^{*3} Pipe size: 38.1 mm ϕ \times 2.0 mm ℓ R409L

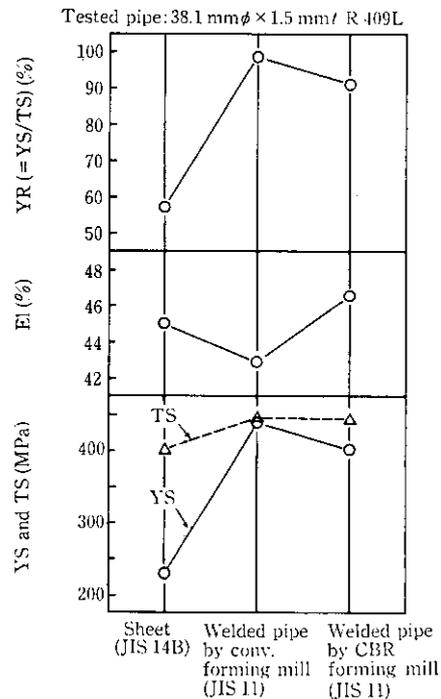


Fig. 17 Improvement of mechanical properties of ERW stainless steel pipes by CBR forming mill

が可能となった。

Fig. 17 には、両成形ミルにおける溶接された製品パイプの機械的性質の比較を示す。図より、CBR 成形材は、従来成形材に比べ EI が高く、YR(YS/TS) が小さく、材料の加工硬化が抑制されていることがわかる。従来成形法では、帯板の幅方向の曲げ成形の際に、帯板のスタンド間でのスプリングバックが大きいこともあって、ブレイクダウンロール等により長手方向およびせん断方向に、曲げ成形には不要な比較的大きな付加的ひずみが加えられる。しかし、CBR 成形法では、ケージロール成形において、主に幅方向の曲げひずみの付加のみで、余分な付加的ひずみの作用が少なく帯板が十分小判形に成形されること、後続のフィンパスロールでの張出し成形によりフィンパスリダクションが低減されること、およびスクイズ後の素管の真円度向上によりサイザーでのリダクションが低減

されたこと等により、帯板に付加される加工ひずみ量が軽減され、材料の加工硬化が減少したものと考える。

以上、CBR 成形ミルの開発、導入により、ロールのサイズ兼用のみならず、帯板の成形性、溶接性およびパイプ特性の面でも優れた成果が得られており、ほぼ当初の目的を達成することができた。

7 結 言

電縫鋼管の新成形プロセスであるチャンスフリー張出しロール成形法 (CBR 成形法) を発想し、その成形実証のため実験室的規模からパイロット規模にわたる開発実験を行った。そして、その実験結果をもとに自社設計開発による実機 CBR 成形ミルの導入を行い以下の結果を得た。

- (1) 素管のオーバーバンド・曲げ戻し成形および素管サイド部の張出し成形からなる CBR 成形法を確立した。
- (2) 上流成形ロールのロール兼用によって、保有ロールセット数を従来成形法のその 1/5 に減少するとともに、従来、ロールを保有していなかった中間サイズの成形を可能にした。
- (3) ロールの兼用化のみならず、それと二律背反の関係にある帯板の成形性ならびに溶接性の面でも優れたいくつかの成果が得られ、高品質高グレードのステンレス電縫鋼管の製造が可能になった。

- (4) CBR 成形法では、適正フィンパスリダクション範囲が広く、かつ FP および SZ のリダクションを減少することが可能となった。また、ドライ成形におけるロール疵発生抑制、エッジ増肉の抑制および帯板のローリング抑制も達成された。
- (5) 管円周方向残留応力の低減が可能であるとともに、材料の加工硬化が抑制され、優れた材料特性を有するパイプの製造が可能になった。
- (6) SQ ロールの V シェイプ角度の拡大、エッジの I 型突き合わせ化とエッジ成形変動の減少が達成され、これにより、適正溶接条件範囲の拡大および溶接品質の向上が図られた。
- (7) 高精度のロールセッティングを実現可能とすべく、新しいハード開発を実施し、これによりロールの完全プリセット造管が可能となった。

以上のような種々の優れた特徴を有する CBR 成形法を開発したが、今後は、普通鋼への本成形法の適用ならびにロール兼用範囲の拡大等を検討すべく、さらに開発研究を続けていきたいと考えている。

終わりに、モデルミル実験を遂行するにあたり、山梨大学工学部機械システム工学科小野田義富教授より、モデルミルケーシングロール成形の観点から有益な御教示を賜りましたことに対し深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木 弘, 木内 学, 中島 聡, 赤堀明夫: 塑性と加工, **10** (1969) 97, 102
- 2) 中島浩衛, 水谷 渉, 笹平誠一, 白石正彦, 思田啓卓: 製鉄研究, (1979) 299, 108
- 3) 馬場善祿: 住友金属, **15** (1963) 2, 19
- 4) 木内 学, 新谷 賢, 江藤文夫, 高田橋俊夫: 塑性と加工, **27** (1986) 301, 280
- 5) 栗山幸久, 阿高松男, 長尾武尚, 松田栄一郎, 水谷 渉: 第34回塑性加工連合講演論文集, (1983), 365
- 6) 神馬 敬, 春日幸生: 塑性と加工, **26** (1985) 289, 182
- 7) 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
- 8) 小野田義富, 豊岡高明: 塑性と加工, **30** (1989) 347, 1653
- 9) T. Toyooka, S. Minamiya, T. Enami, M. Saito, S. Watanabe, H. Tominaga, and Y. Onoda: "Recent Techniques of Roll Forming in the Medium Diameter ERW Mill", The 3rd International Conference on Steel Rollings, ISIJ, Tokyo (Japan), September (1985)
- 10) F. Nicolai: "New Solutions for Forming and Sizing in ERW Tube and Pipe Mills", ITA International Conference & Exposition, International Tube Association, Philadelphia (USA), September (1987)
- 11) T. Nakata: "F. F. Mill, A New Generation of ERW Mill", ITA International Conference & Exposition, International Tube Association, Philadelphia (USA), September (1987)
- 12) H. Dumig and B. Enkner: "CTA-A New Concept in Pipe and Tube Forming", ITA International Conference & Exposition, International Tube Association, Philadelphia (USA), September (1987)
- 13) 山田将之, 山田建夫: 平成2年度塑性加工春季講演論文集, (1990), 151
- 14) 本城 恒, 中村雅行, 磯部和男: 石川島播磨技報, **19** (1979) 1, 1
- 15) 居城三郎, 菅昌徹朗, 大脇錠治, 稲垣慎太郎, 藤堂邦夫, 江崎和朋: 日本鋼管技報, 121 (1988), 17
- 16) 杉江善典, 渡辺修三, 南谷昭次郎, 豊岡高明, 星 清政, 井手 武: 川崎製鉄技報, **18** (1986) 3, 263
- 17) 仲子武文, 竹添明信: 第39回塑性加工連合講演論文集, (1988), 459
- 18) 西村三好, 広木 豊, 種部 茂: 鉄と鋼, **65** (1979) 5, 75
- 19) 富永博友, 豊岡高明, 渡辺修三, 南谷昭次郎: 鉄と鋼, **70** (1984) 13, S 1161
- 20) 山本 満, 豊岡高明, 杉江善典, 渡辺修正, 富沢良信: 材料とプロセス, **1** (1988) 5, 1564
- 21) 高 紀夫, 門田浩次, 松井繁朋, 松村裕之, 長谷川寿男, 野間徹郎: 第37回塑性加工連合講演論文集, (1986), 143
- 22) 豊岡高明, 志賀 厚, 橋本裕二, 小林邦彦, 小林 章, 小野田義富: 第40回塑性加工連合講演論文集, (1989) 357
- 23) 芳賀博世, 田中徳雄, 鶴田秀雄: 鉄と鋼, **71** (1985) 2, A 53