

電縫鋼管成形におけるCRE(Cross Roll Edge-bend)法の開発 — 高精度, 高品質エッジバンド技術の開発 —

Development of CRE (Cross Roll Edge-bend) Method for ERW Pipe Forming

羽 田 憲 治⁽¹⁾
Kenji HADA

大 沢 隆⁽²⁾
Takashi
OHSAWA

住 本 大 吾⁽³⁾
Daigo
SUMIMOTO

菊 間 敏 夫⁽⁴⁾
Toshio KIKUMA

抄 録

薄肉から厚肉までの広範囲の肉厚を製造する電縫鋼管ミルにおいて、外径、肉厚の変化に対するロール共用性とエッジ成形性向上・品質安定化を目的として、上下ロールを鉛直軸を中心として旋回・交差させることによって得られるギャップ形状を所定曲げ曲率、肉厚に適合するよう調整できるCRE(Cross Roll Edge-bend)法を考案した。試作した試験スタンドによる成形試験、数値解析により、所要の曲げ曲率に対応できるロールの共用性、及び曲げモーメントの有効作用によるエッジ成形性向上、圧痕の少ない高精度成形など、その妥当性、優位性を実証した。

Abstract

Authors investigated a method for improving the commonality of rolls in service ability against a variety of the outside diameter and wall thickness of ERW pipes, together with improving their edge formability and also stabilizing their quality in the ERW piping mill, where tubes having a wide wall thickness range from a thin-walled tube to a thick-walled are manufactured. And CRE (Cross Roll Edge-bend) method has been thereby developed, which can regulate the gap profile, obtained by rotating and crossing on the vertical axis of upper and lower rolls, to accommodate to both a required bending curvature and a wall thickness. From the results of formability test using a testing stand made on an experimental basis together with the numerical analysis, it has been proved that the CRE method has a validity and is an advantageous processing method that improves in both the commonality of rolls in service ability to cope with any required bending curvatures and the high precision edge formability with less impression defects through an effective action of bending moment.

1. 緒 言

電縫鋼管ミルは、その冷間製法の優れた特徴を生かし、幅広い分野で活用されている。君津製鐵所の小径電縫鋼管(ERW)ミルにおいても、ボイラーチューブ、ステンレス鋼管など独自の高級管分野を開拓し¹⁾、その品質は需要家の絶大な信頼を得てきた。これに対し、近年の急速な社会構造変化、深刻な経済停滞に伴い、電縫鋼管に対しても低コスト化、品質の厳格化の要求がなされている。これらに対応すべく、高級管を製造する厚薄肉ミル(外径/肉厚比が2~10%程度の薄肉から厚肉までを製造可能範囲とするミル)として、より一層の生産性、及び高品質・高付加価値商品の安定製造技術が望まれており、これらはロール成形技術に負うところが大きい。

厚薄肉ミルのロール成形方式においては、一般に製品の外径ごと専用ロールが使用される。ミルの高生産性化の手段として、ロール組替作業を迅速にするクイックチェンジ方式が採用されている。一方、薄肉材のみを成形対象とするミル(外径/肉厚比が10%程度

以下を製造可能範囲とするミル)においては、ロール共用化と成形性向上の両立を期待し得る新しい成形方式のFF(Flexible Forming)ミル²⁾がある。この方式は、成形上最適と考えられるロール孔型、拘束形態を任意に選択できるという点で画期的であるといえる。しかし、曲げ方式としては従来の方式を脱却しておらず、ロール孔型、構造が後述の形状不良を助長するため、君津ミルのような厚薄肉ミルとしては適用が不可能である。

本報告で紹介するCRE(Cross Roll Edge-bend)法は、従来技術の曲げ方式の発想を転換し、厚薄肉ミルにおけるロールの共用性と品質安定化を両立し得る新しいエッジバンド技術として開発されたものである。

2. CRE(Cross Roll Edge-bend)法の原理と特徴

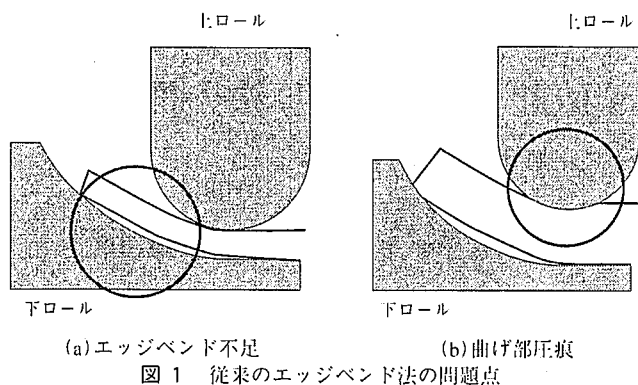
エッジバンドロールは図1に示すような上下一対の孔型ロールによって構成され、板材は4点曲げの原理によって成形される。一般

(1) 君津製鐵所 鋼管部 掛長

(2) 君津製鐵所 鋼管部

(3) 技術開発本部 君津技術研究部 主任研究員

(4) 技術開発本部 プロセス技術研究所 所長 工博



には、ロールは成形される板材の外径に応じて一式組み替えがなされるが、板材の肉厚に対しては稼働率向上の観点からロールは共用であり、上下ロールのギャップのみで調整される。従って、図に示すように薄肉材では曲げ不足、厚肉材では曲げ部圧痕などの問題が生じていた。

CREはこのような問題を解決するために、上下ロールを交差させることによって構成されるギャップ形状を所定の曲げ曲率、肉厚に適合するように調整する方式からなる。

図2に本CRE法の原理について示す。(a)は厚紙などの端部を指で曲げる様子を示したものである。曲げ部の内面側の親指は材料の中央部へ、外面側の人差し指は材料の端部へこするように動かすことによって、より滑らかな曲率に曲げることが可能である。CRE法はこの原理をロール成形に適用したものであり、(b)に示すように上下ロールを交差させることにより、ロール表面軌道を上ロールは内側方向に、下ロールは外側方向に向かせて曲げモーメントを有効に作用させエッジ成形性を向上させようとするものである。

図3にCRE法の概要について示す。エッジベンドの上下ロールを左右分割し、各上下ロールを交差させることによりエッジ成形性を向上させるとともに、各上下ロールの旋回角度を調整することにより幅広い範囲の肉厚、外径に対し、ロールを共用することを実現したものである。

図4(b)~(f)は(a)の孔型を有する上下ロールのそれぞれに旋回角度を与えた場合のロールの履歷を示すワイヤーフレームモデルである。このように、上ロールの旋回角、ロールギャップを調整することにより肉厚の変化に対するロール共用化、更に、下ロールの旋回

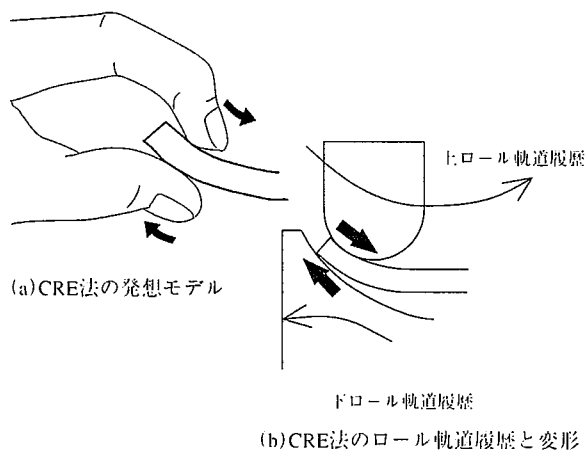


図 2 CRE法の原理

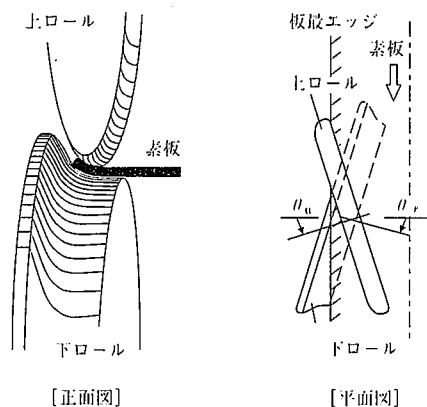


図 3 CRE法の概要

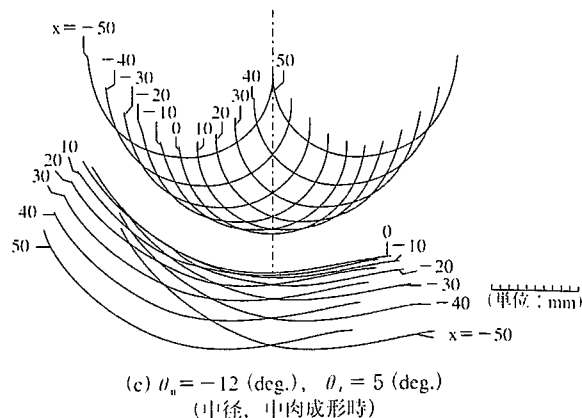
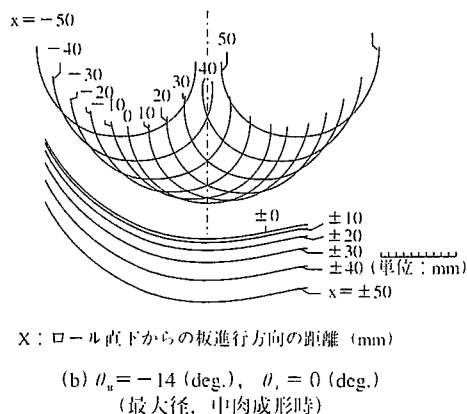
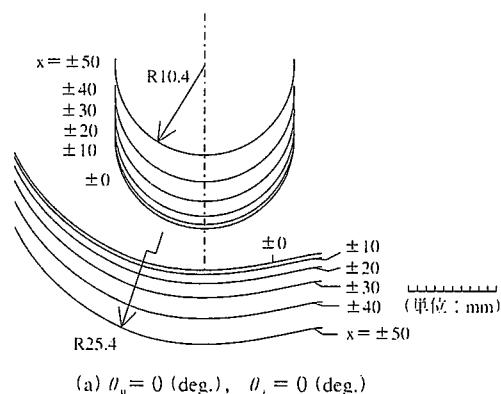


図 4 CRE法のワイヤーフレームモデル

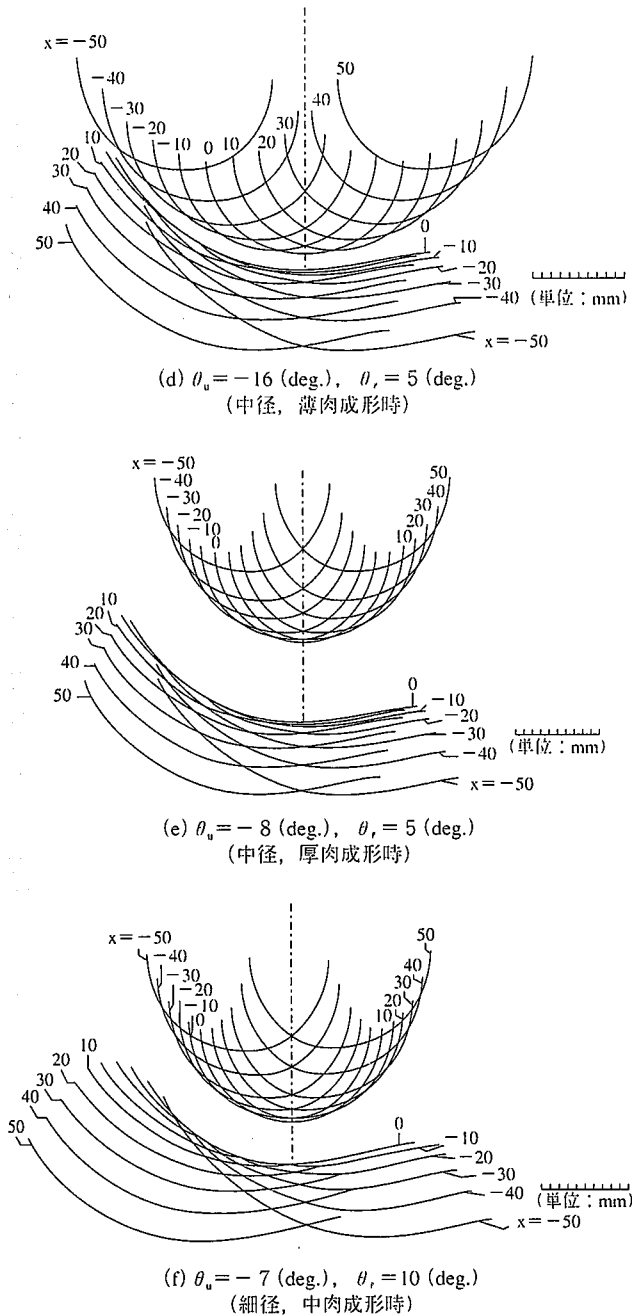


図4 CRE法のワイヤーフレームモデル

角を調整することにより、外径の変化に対してもロールの共用化を図ることができる。更に、上ロールと曲げを受ける材料の内面は連続的に変化するため、上ロールとの局部接触による圧痕が低減されることも期待できる。

3. CRE試験スタンドによる試験結果

3.1 試験方法

写真1に示すCRE試験スタンドを試作し、試験を実施した。試験スタンドの主仕様、被成形材料をそれぞれ、表1、2に示す。上下ロールはそれぞれ幅方向、高さ方向の位置調整及び鉛直方向を旋回軸とする旋回角度を調整可能なスタンド構造となっている。また、スタンド内に組み込まれたロードセルにより、圧下力及び幅方向の

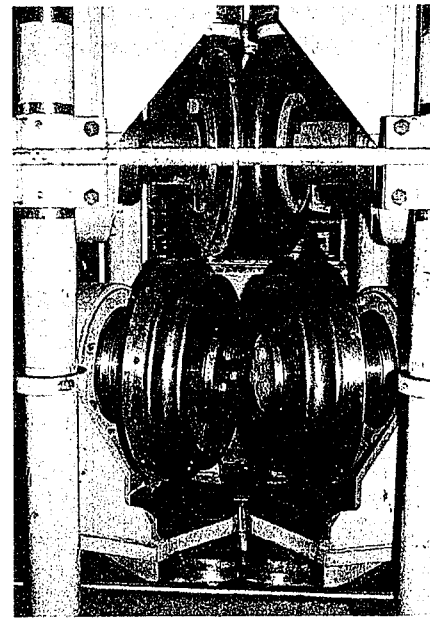


写真1 CRE法試験スタンド

表1 CRE法試験スタンド主仕様

型式	上下ロール可旋回(鉛直軸旋回), 左右分割, 幅可変式水平ロールスタンド
ロール径	上ロール径: 260~350φ, 下ロール径: 350φ (mm)
耐荷重	圧下方向: 最大20(t), ライン方向最大: 10(t), 幅方向: 最大3(t)
ミル剛性	≥15(t/mm)
旋回角	上下ロール: ±30(deg.)
サイズ	板幅: 150~360(mm); 50.8~101.6φ (mm)用

表2 成形材料

鋼種	SS410クラス鋼
板厚	2.2, 4.4, 8.6 (mm)

スラスト荷重を測定することが可能である。

図5に本試験に用いたロールの孔型形状を示す。このロールは、CREにて最終曲率の100%にエッジベンドすることを前提として、外径50.8~76.2mm, 最大肉厚10.5mmまでを成形することを目的として設計したものであり、曲げ長さについては板幅の20%(片側10%×2)を曲げるようにロールの幅方向位置を調整した。なお、旋回中心は、上下ロールの底径部となるようにロールを設計した。

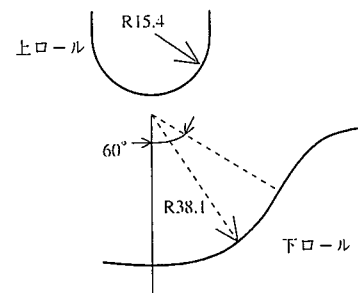
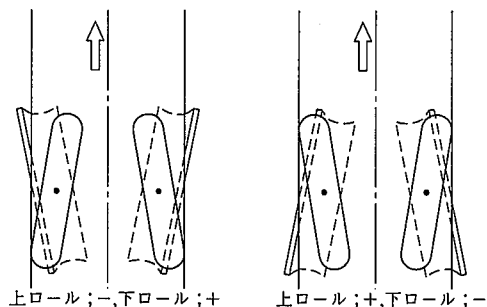


図5 ロール孔型形状

成形された材料は、マイクロメータにより肉厚分布を、3点曲率計(標点間10mmの3点の位置関係を曲率に換算)により曲率分布を測定した。

なお、上下ロールの交差については図6に示すように、上ロールと材料の接触がエッジ部側から材料中央部側へと移行する内向成型型と、中央部側からエッジ部側へ移行する外向成型型の二通りが考えられる。この両者は、旋回角度の絶対値が同じであれば、形成されるワイヤフレームモデルは同一であり(ワイヤフレームの移行向きは反対)、これらの成形性の違いについても調査を行った。



(a) 内向成型型 (b) 外向成型型
図6 ロール孔型形状の定義・旋回方向

3.2 試験結果

図7に従来法(旋回角0)及び内向成型型、外向成型型における成形を受けた材料の断面形状例を示す。内向成型型が最もエッジ成形性が良好となっている。これは、図1に示した本CRE法の発想である厚紙などを指で曲げる場合の指の動きと合致するものであり、曲げ部外面と接触している下ロールは材料端部へ、曲げ部内面と接触している上ロールは材料中央部側へ移行しており、これにより曲げ性が向上しているものと考えられる。このメカニズムについては数値解析により後述するが、以降、試験結果は内向成型型の結果について示す。

図8に上下ロールに旋回角を付与した場合の曲率分布及び肉厚分布を示す。旋回角を付与していない従来法の場合、上ロールと接触部のみの曲率が大きくなっており、最エッジ部近傍は全く曲がっておらず、局部接触部に大きな圧痕が発生している。これは、上ロールの曲率が最大肉厚に合わせて設計されているため、上ロールと材料の接触が局部的になっているためであり、広範囲の肉厚範囲に対してロールを共用している場合に発生する一般的な現象である。一方、上下ロールに旋回角を付与した場合、エッジ成形性、肉厚分布ともに飛躍的に改善されている。上ロールの旋回により、最エッジ近傍部まで成形されており、上ロールと材料の接触点が連続的に変化するため局部接触を回避し圧痕を低減したものと考えられる。更

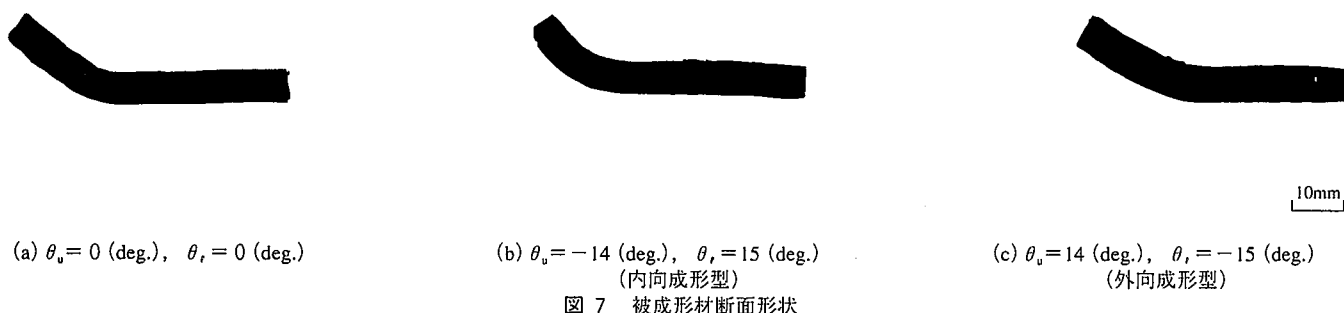


図7 被成形材断面形状

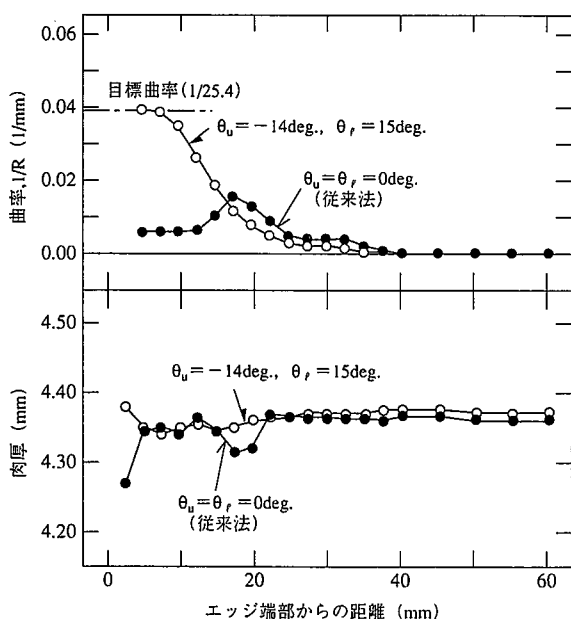


図8 曲率・肉厚分布例(板厚4.4mm)

に、下ロールの旋回により曲率は下ロールの曲率以上に曲げられており、1.5倍程度の外径共用性が実証されている。

図9はエッジ曲率、圧痕減肉代に及ぼす上下ロール旋回角及び上ロール径の影響を示す。ここで、エッジ曲率は想定される曲げ長さ部の平均曲率を示したものである。図9(a)に上ロール旋回によるエッジ成形性向上及び圧痕低減効果、下ロール旋回によりエッジ曲率の制御が可能となり、外径共用効果が得られる。なお、図9(b)に示すように、ロール径の増大により最適旋回角は小さくなり、更に、圧痕が小さくなっていることが分かる。なお、いずれの条件においてもロールの焼付きなどの現象は発生しなかった。

次に、本CRE法の荷重特性について述べる。エッジバンドをモデル化し、曲げ長さ L の領域の剛塑性材料が曲げ角 θ で均一に曲げられているものと仮定すると、曲げ荷重 P はエネルギー法より下記の式で表される。

$$P = 1/4 \cdot L \cdot l_d \cdot (1/R (1 - \cos \theta)) \cdot (1/R) \cdot \sigma_y \cdot t^2 \quad \dots (1)$$

(但し、 l_d : 長手方向接触長さ、 R : 曲げ曲率半径、 σ_y : 降伏応力、 t : 板厚)

そこで、 $P = \alpha \cdot (1/R)^a \cdot \sigma_y^b \cdot t^c$ として試験結果について重回帰分析を行うと、

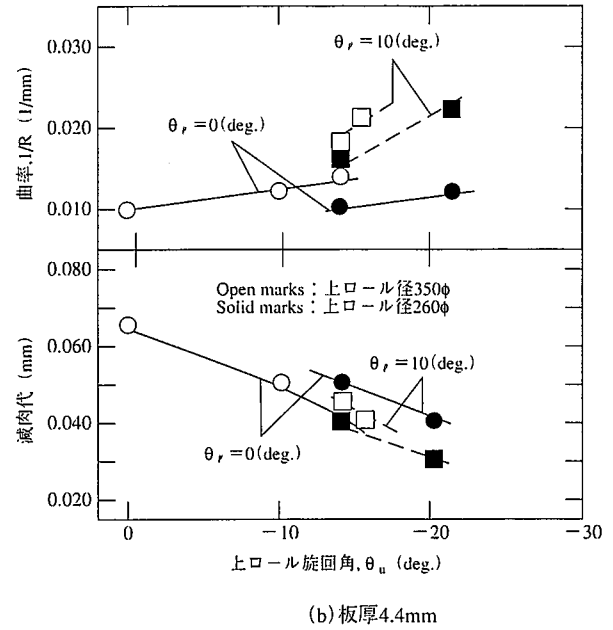
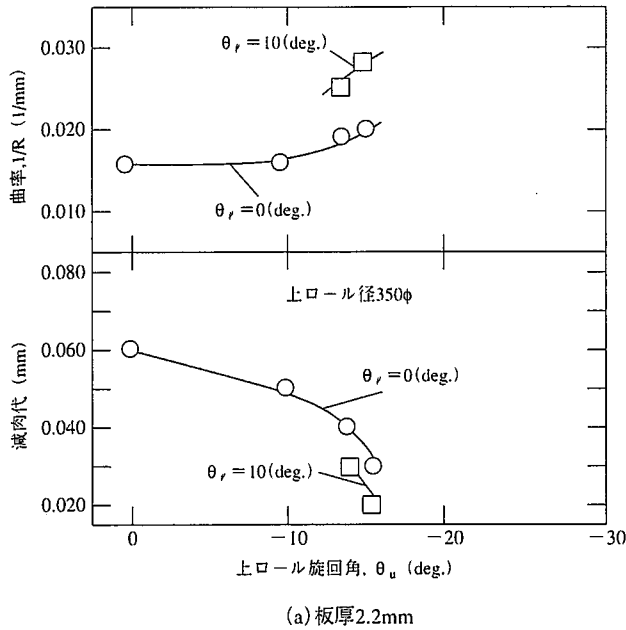


図9 曲率・圧痕減肉代に及ぼす旋回角度の影響

$$P = 59 (1/R)^{0.92} \cdot \sigma_y^{1.14} \cdot t^{2.23} \quad \dots (2)$$

($n=49$, 相関係数: 0.95)

となり, (2)式により圧下荷重を推定することができる。(2)式による圧下荷重推定値と圧下荷重の実績値の対応を図10に示す。

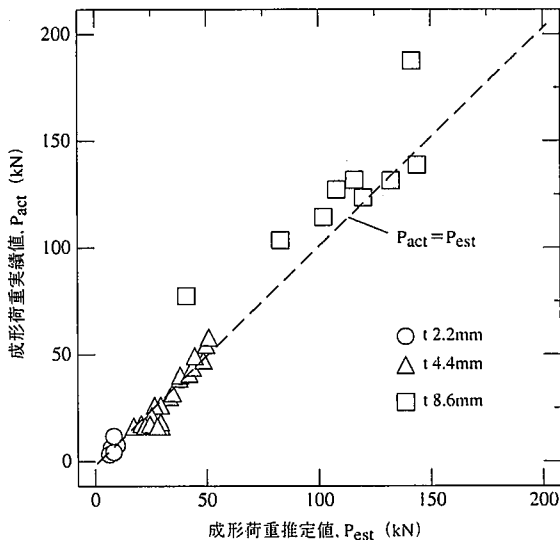


図10 圧下荷重推定式と実績値の対応

4. CRE法の変形解析

4.1 解析方法

汎用有限要素コードMARCにより, 二次元平面ひずみ4接点アイソパラメトリック要素を用いて解析を実施した。計算モデルを図11に示す。板材の成形方向(X)位置によって決定されるロールギャップ履歴が同一平面(Y-Z)面を移動するものとして速度(V_y, V_z)を付与し, ロール孔型の断面形状は成形(X)方向で不変と仮定して二次元モデル化した。計算条件を表3に示す。なお, 本計算においてはモデル簡易化のため, 上ロールのみ旋回とし, 内向成型型と外向成

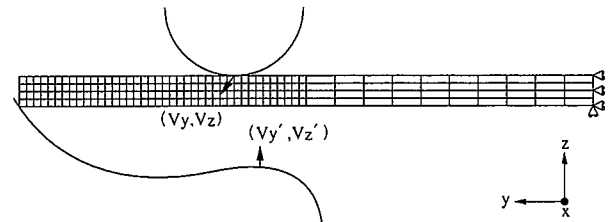


図11 計算モデル

表3 計算条件

項 目		条 件
ロール	孔型曲率半径	上ロールR : 10.4, 下ロールR : 25.4 (mm)
	ロール径	上ロール : 300φ, 下ロール : 300φ (mm)
	旋回角	上ロール θ_u : ± 18 , 下ロール θ_r : 0 (deg.)
被成形材	弾性係数E	206 (kN/mm ²)
	降伏応力 σ_y	350 (N/mm ²)
	加工効果係数H	980 (N/mm ²)
	サイズ要素分割数	板幅170×板厚5.0 (mm) 板厚方向: 4, 曲げ長さ部(幅方向): 20
摩擦係数 μ		0.2

形型の両ケースについて計算し, 内向成型型のエッジ成形性向上メカニズムについて考察を行った。

4.2 解析結果

図12に変形履歴図, 図13に曲率分布をそれぞれ実験結果と比較して示す。最終形状の計算結果と実験結果はほぼ一致しており, 本計算によりエッジ曲率をほぼ予測可能であることが分かる。本計算においても内向成型型のエッジ成形向上効果が示されている。

図14は最エッジ近傍(エッジ端部からの距離5mm)部の内外面要素の幅方向応力の推移を示したものである。内向成型型の場合, 成形初期において最エッジ部近傍まで, 内面: 圧縮, 外面: 引張の幅方向応力が作用しているのに対し, 外向成型型の場合にはほとんど幅方向応力が作用していない。

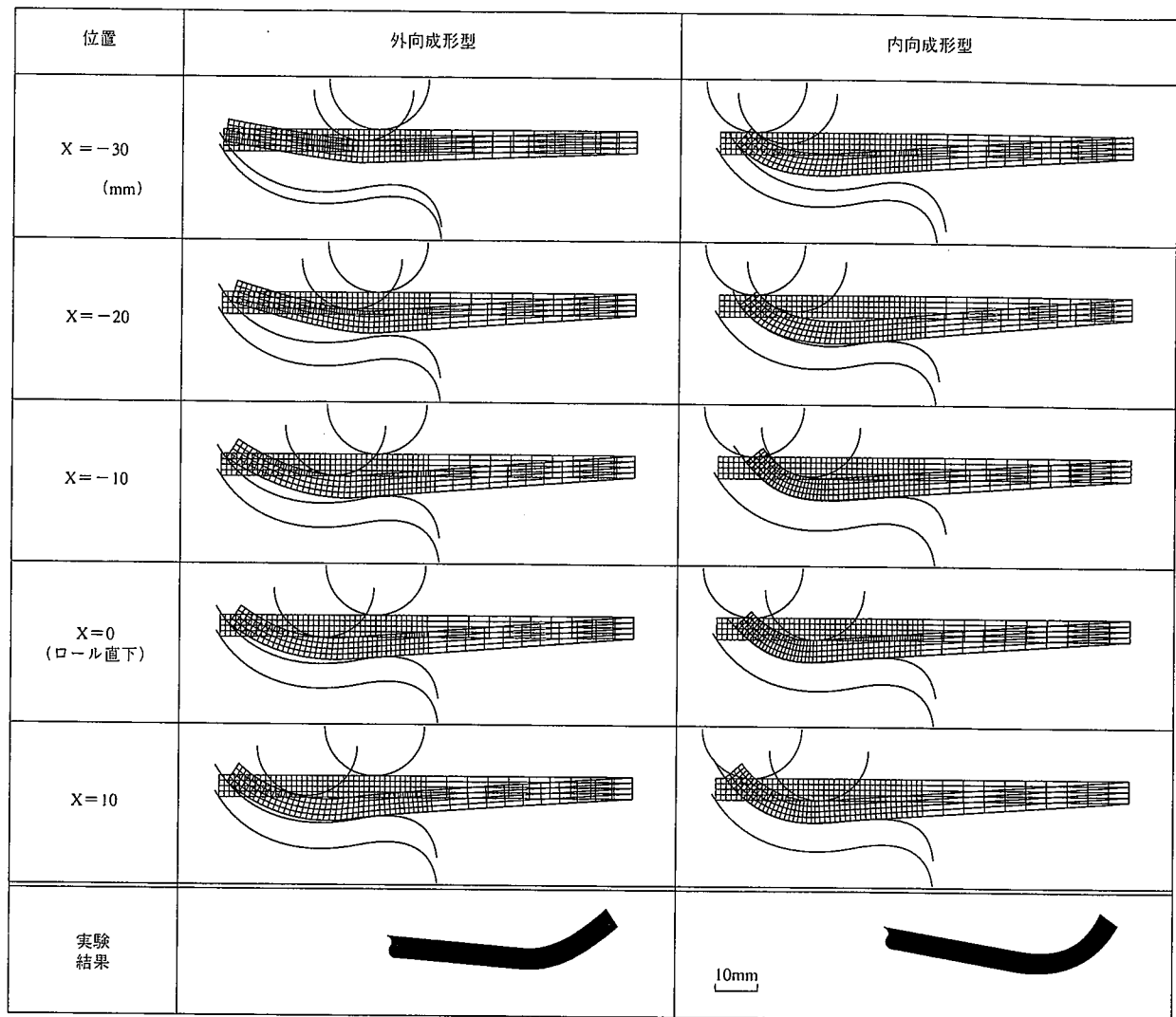
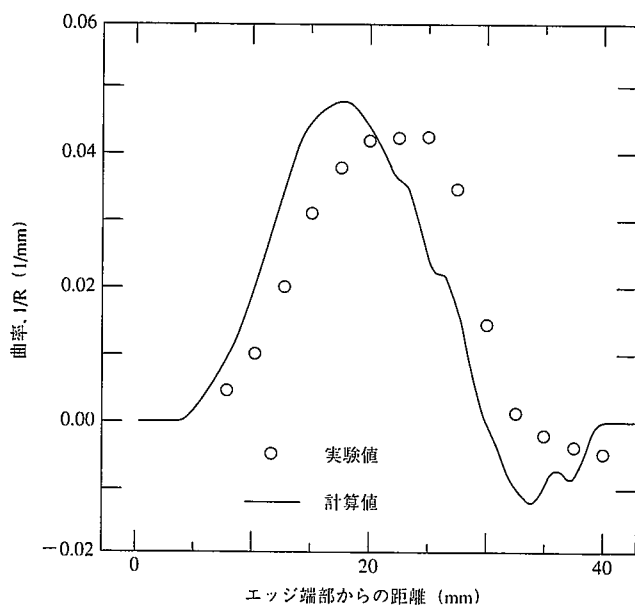
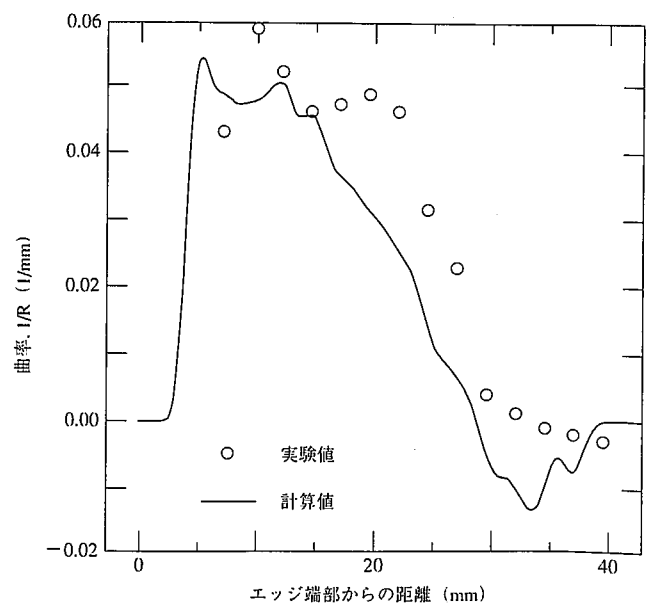


図 12 変形履歴図



(a) 内向成型型



(b) 外向成型型

図 13 曲率分布

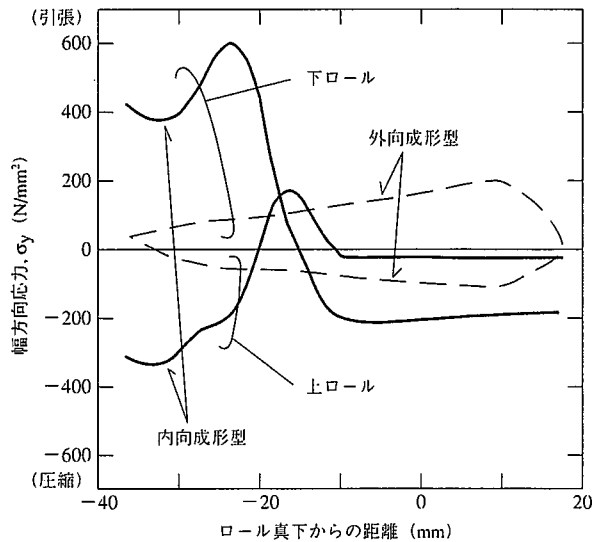


図14 幅方向応力推移(エッジ端部から5 mm位置)

図15は曲げ領域に作用する曲げモーメントの成形方向(X)履歴を示したものである。内向成型型の場合、成形開始直後より大きな曲げモーメントが作用している。このように、内向き成型型の場合、

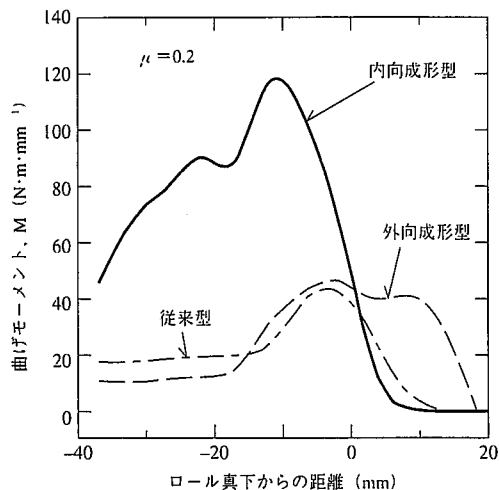


図15 曲げモーメント推移

上ロールと被成形材の最エッジ部付近とが接触している成形初期過程において、エッジ成形性が向上していることが推定できる。一方、図12において外向成型型の場合、 $X=10$ の位置以降においては、ロールは材料のエッジ部と接触しておらず、このため最エッジ部の成形が十分に成されていないものと考えられる。これは、上ロールの旋回によって得られるロール間隙がエッジ部付近で板厚に対して適正状態になっていないことを示しているものであるが、実成形においてはロール設定誤差、スタンド剛性、板厚偏差により、このような状況は推定され得るものである。言い換えると、内向成型型の場合、このような影響を受けにくいことを意味している。つまり、内向成型型の場合、ロールと材料の幾何学的関係が曲げモーメントを有利に作用させ、これがエッジ成形性を向上させている要因となっているものと考えられる。

5. 結 言

広範囲の肉厚を製造可能とする厚薄肉電縫鋼管ミルにおいて外径、肉厚の変化に対応できるロール共用性とエッジ成形性向上・品質安定化を目的として、エッジバンドロールの上下ロールを交差させることによって得られるギャップ形状を所定の曲げ曲率、肉厚に適正になるよう調整できるCRE(Cross Roll Edge-bend)法を考案した。試作した試験スタンドによる成形試験、及び数値解析により、以下の効果を実証した。

- (1) ロールの旋回により1.5倍程度までの曲げ曲率のロール共用が可能である。
- (2) 上ロール表面軌道が被成形材の最エッジ部からセンター部側へ移行する向きに上下ロールを交差させることにより、曲げモーメントが有効に作用し、エッジ成形性が向上する。
- (3) 上ロールの旋回角を板厚に対して適正に付与することで、圧痕の少ない高精度の成形が得られる。

なお、本CRE法は、1995年8月に君津製鐵所小径ERWミルに導入され、現在順調に稼働中であり、特に、薄肉ハイテン材のエッジ成形性向上による溶接安定化、成形フラワーの最適化と併せ偏肉抑制化に大きく寄与している。

参考文献

- 1) 住本大吾 ほか：新日鉄技報。(362), 54(1997)
- 2) 例えば Li, G. F.: TUBETEC 95. Shanghai, 1995-3