

高精度ハイテンプロペラ用鋼管の開発

Development of Pipe with High Precision and High Strength
for Automotive Propeller Shaft伊 丹 美 昭⁽¹⁾ 三 浦 孝 雄⁽²⁾ 穴 井 功⁽³⁾
Yoshiaki ITAMI Takao MIURA Isao ANAI

抄 録

サイジング工程における電縫管の変形挙動について弾塑性 3 次元有限要素法並びに実験により詳細に検討した。この解析の目的はパイプ切断後に管端部の真円度を劣化させる電縫部の強度の影響を明らかにすることである。パイプ円周における強度不均一により発生する管端変形は 4 ロールサイザーの上下ロールとサイドロールのロール底径比を変えることで制御できる。電縫溶接部の強度が母材に比べて高い場合には、上下ロール径を小さくすることで管端真円度を向上できることを確認した。この技術を用いることにより廉価で高精度の高強度プロペラ鋼管の製造が可能となった。

Abstract

The deformation behavior of electric resistance welded (ERW) pipes in the sizing process was investigated in detail by both three dimensional elasto-plastic finite element analysis and experiments. The purpose of this investigation was to clarify the effect of yield strength at the welded seam on the pipe end deformation, which deteriorated a pipe end roundness after the pipe was cut. It was found that the pipe end deformation caused by a non-uniform distribution of the seam strength in a circumferential direction could be controlled by changing the ratio of the radius of top-bottom rolls to the radius of side rolls on the 4-roll sizer. It was also confirmed through calculations and experiments that, in case of the seam strength being greater than the other portion, decreasing the radius of top-bottom rolls in size rather than that of side rolls resulted in improving the pipe end roundness. It has been attained by applying this technology that the high precision and high strength pipes for automotive propeller shaft can be manufactured at low cost.

1. 緒 言

自動車用鋼管においては地球環境問題への対応として、燃費向上のための軽量化、あるいはエンジン高出力化に伴い、高強度薄肉の高精度鋼管に移行している。特にプロペラシャフト等鋼管は疲労強度を向上させるため従来のアーク溶接による周溶接から摩擦圧接による溶接工程へ変わりつつある。摩擦圧接法による溶接は管端での寸法精度も要求され¹⁾、更に、高速域での高速回転での安定走行から、ふれ回りの精度厳格化が進んでいる。薄肉・高強度(690~780MPa)²⁾な製品が要求されているなかで、曲りと真円度を含めた評価法にて0.2~0.1mm以内のふれ精度をもった寸法精度の高い鋼管が要求されている。

これらの寸法精度向上に対応するには残留応力の低減を目的として、最終工程として熱処理工程をいれることが考えられる。しかしながら、熱処理時に発生する曲りや管真円度の劣化、及び、精整工程における曲り取りや管端部切断など歩留りを低下させる問題があるため、本開発では溶接ままにて安価に高真円度の製品を製造する

ことを目的とした。

本報告では、サイザー成形を厳密にシミュレーションし、溶接ままの鋼管の電縫部の強度が管端変形に及ぼす影響を定量的に捕えた解析について解説するとともに、その防止対策として、サイジング工程を従来の 2 ロールから 4 ロールサイザーを導入することにより高精度な高強度プロペラシャフト鋼管を製造可能としたので、結果について述べる。

2. 管端変形の解析

2.1 解析の方法

プロペラシャフトを始めとする薄肉の機械用構造鋼管においては、真円度などの寸法精度に対する残留応力の問題が顕著になっている。特に $t/D=3\%$ 以下の薄肉・高強度の電縫管において、造管後パイプを定尺に切断したときに管端がパイプ中央部(管体)と全く異なる形状を示す“管端変形(切断変形)”を起こすことが問題となる(図 1 参照)。

⁽¹⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主任研究員

⁽²⁾ 日鉄鋼管(株) 名古屋事業所 課長

⁽³⁾ 名古屋製鐵所 鋼管工場 掛長

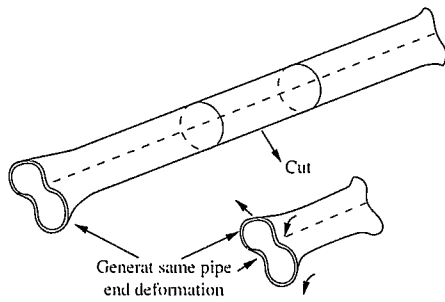


図1 管端変形

図2にパイプを切断したときの管端部を真円度測定機にて管端10mmから230mmまで20mm間隔で測定した形状をワイヤーフレーム図で変位を拡大して表現した。 $t/D=2.1\%$ の薄肉材では大きな変形が生ずるが、 $t/D=5\%$ の場合にはほとんど変形は発生しない。2ロールサイザーにて外径絞り率 ε_D を変えた場合の初期半径からの切断後の最大変形量 $\Delta r_{\max}$ を示すが、絞り率に依存せず薄肉材で発生する現象であることが分かる^{3,4)}。これらの現象を明らかにするために汎用有限要素法コードMARCの曲げの変形を表現できる8節点のアイソパラメトリック要素を用いて、2、4ロール型のサイザーの計算を行なった。発生する管端変形を求める解析はサイザー成形後管端部分を切断して管端変形の発生をシミュレートするモデルを用いた(図3参照)。パイプの外径を D 、肉厚 t 、ロール底径を R_d 、孔型径を D_R とした。パイプは固定してロールに相当する剛体パッチ面を回転しながら移動させ、パイプとロールの摩擦並びにパイプの初期残留応力は無視した。ロールの軸方向速度 u_x 、ロールの軸回転角速度 ω_1 、 ω_2 として、パイプ本体は対称性を考慮して、1/4のパイプ円周方向 90° を18分割、軸方向の400mmを80分割、肉厚方向に1層とし要素数1440とした。ロール出側のパイプ端面は x 方向に拘束する境界条件を与えた。解析モデルは図3に示すように、外径75.0mm、長さ400mmのパイプを成形後、ロール噛込みの影響を受ける非定常部の管端部分の影響を除去するために、外径1D部の長さの要素を削除した後に応力釣合計算を行ない管端変形を求めることにした。

2、4ロールについての解析条件を表1、2に示す。4ロールについては上下ロール R_{dt} 、左右ロール R_{ds} の比(R_{ds}/R_{dt})を変えて、管端変形に及ぼす影響を調べた。パイプの管端変形はロール圧下量(絞り量)により変化するので、図4のように初期径から最大径への変位 Δr_1 と最小径への変位 Δr_2 とし、管端変形量 $\Delta r_p = \Delta r_1 - \Delta r_2$ として定義した。 $\Delta r_p > 0$ を縦楕円、 $\Delta r_p < 0$ は横楕円の変形を示す。

2.2 解析結果

噛込み部分の影響を受けている管端まま、及び切断したときの管端変形の解析結果を図5に示す。噛込み時の非定常部分である管端ままのほうが、切断後の管端に比べ変形が大きいことが分かる。また、上下ロールとサイドロールのロール径比が1に近づくにしたがって2ロールで問題となる横長の管端変形が低減していくことがわかる。上下・左右のロール底径比と管端変形量絶対値の関係を図6に示す。ロール径を異径化した4ロールにおいては2ロールに比べて発生する管端変形量($|\Delta r|$)は小さいが、ロール底径の大きい部分での成形により径大化する管端変形が発生する。これはロール曲率半径の大きいロールフランジ部で径大、ロール曲率半径の小さいロール直下で径小化する2ロールの場合に発生するメカニズムと

同じで、この現象は軸方向ロール大径部の延伸されないことによる残留応力の不均一分布に起因する⁴⁾。

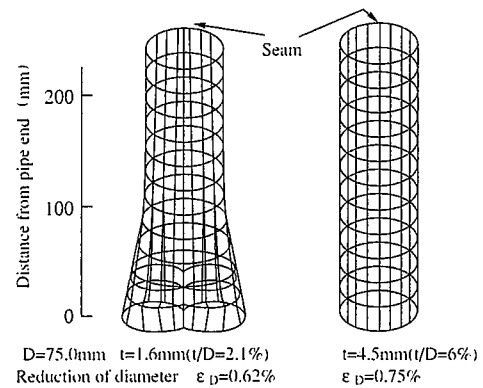


図2 管端変形状(拡大率20倍)

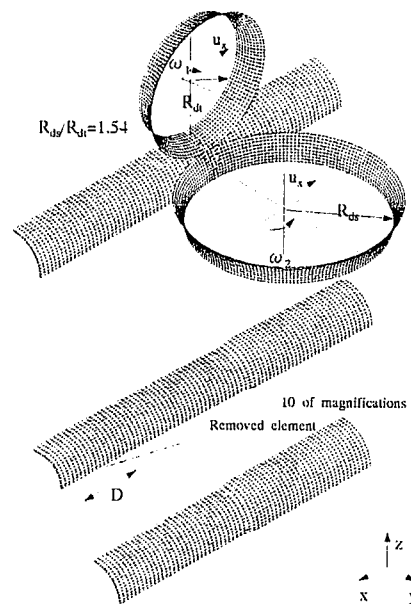


図3 解析に用いた有限要素法モデル

表1 材料特性

Mechanical property	MPa
Yield Stress σ_Y	500
Coefficient of work hardening H	800
Young's modulus E	210 000

表2 計算に用いた寸法

Diameter D (mm)	Thickness t (mm)	Top roll radius R_{dt} (mm)	Side roll radius R_{ds} (mm)	Caliber diameter D_R (mm)
75.0	1.6	100	100	74.26
		65		74.64
		25		

3. 電縫部強度の管端変形への影響

3.1 解析の方法

電縫鋼管では電気抵抗溶接を行なうことにより、溶接部近傍の強

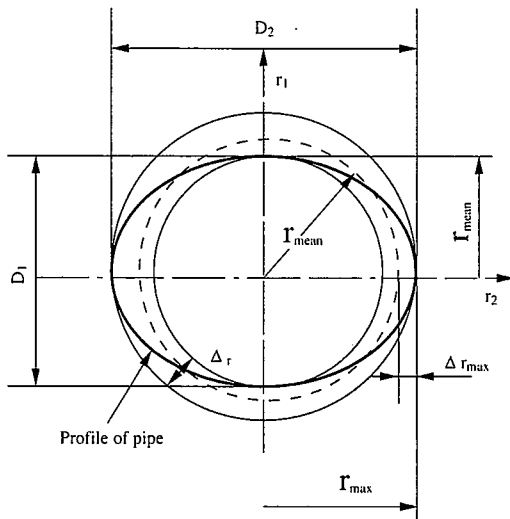


図4 管端変形の定義

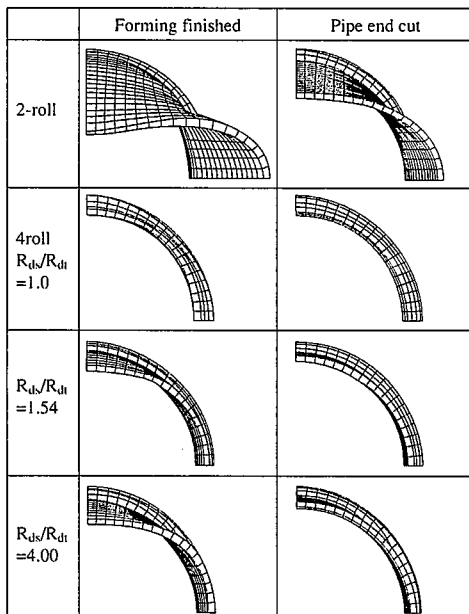


図5 解析による管端形状(拡大率10倍)

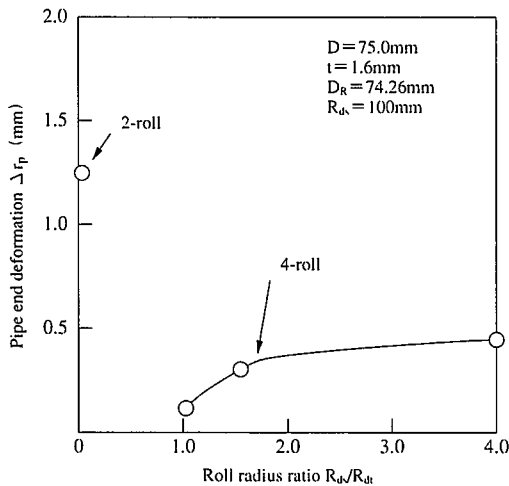


図6 管端変形と4ロールのロール径比の関係

度は熱履歴を受け母材と異なる強度を有することになる。そのために、軸対称成形であるダイス成形や4ロールの成形を行なった場合でも、材料強度にとっては電縫部は特異点となり、管端変形に対する影響がでる。そこで、電縫部の強度の影響について、シーム強度が他の部分に比べ強度が100MPa高いパイプに対し、等径の4ロールにて絞り成形を行なった場合について検討した。図7に示すような応力-歪関係を用いて、シーム部分の強度分布を実験条件と合わせて図8のモデルを用いて計算した。

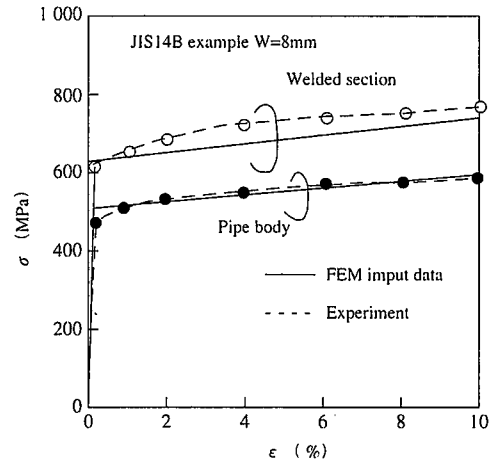


図7 溶接部及び母材の応力-歪曲線

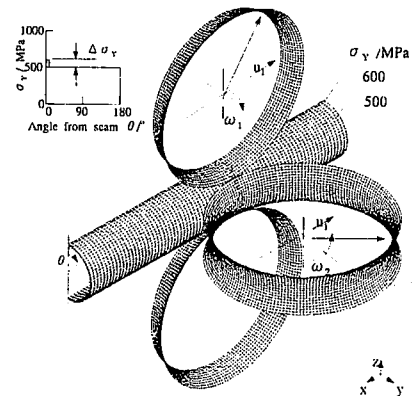


図8 電縫部を考慮した有限要素法モデル

3.2 解析結果及び考察

シーム部が硬い場合には図9上段(1)の図に示すように管端変形は強度の高いシーム部を長径とする縦長の管端変形が発生する。これはシーム部が軸方向に塑性変形しないことにより延ばされず、シーム部分には相対的に軸方向に引張り応力が発生することに起因する。

絞り量の影響について実験と比較した結果を図10に示す。計算においても実験と同様であり、絞り量の増大により管端変形はやや大きくなる傾向を示した。

これらのことから、溶接部強度差による管端変形を防止する方法として、ロール底径比 R_{ds}/R_{dt} による検討を行なうことにした。図7から等径 $R_{ds}/R_{dt}=1.0$ の4ロールに対して、ロールの底径比 $R_{ds}/R_{dt}=1.54$ とするとほぼ0.25mm程度のシーム強度の影響による縦長の管端

変形が発生することが予測できるので、変形防止効果を計算により検討した(図9下参照)。

等径ロールの場合はシーム部のみが径大化したが、上下ロールを対称にして径小($R_{dl}/R_{dt}=1.54$)とすることで、管端変形を除去することができた。シーム部強度分布によって発生する管端変形はロール底径比を変えることにより抑えることが可能である。

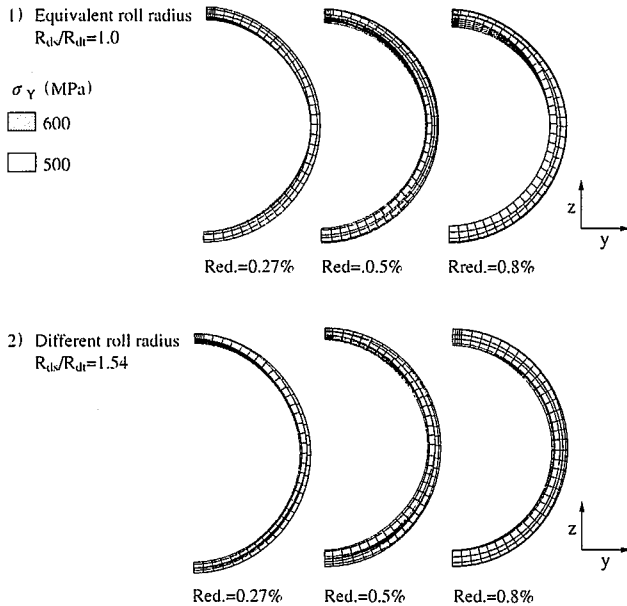


図9 解析による管端変形状態(変位拡大率10倍)

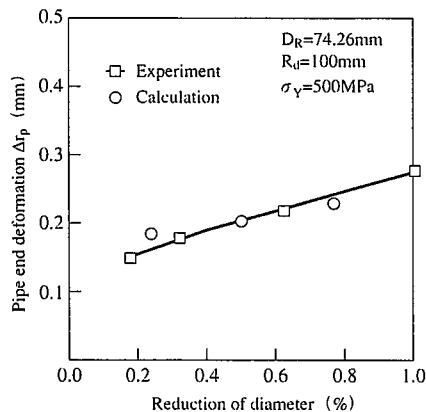


図10 電縫部が100MPa硬い場合の管端変形と絞り量との関係

4. 異径4ロールによる改善効果

4.1 実験方法

4ロールサイザーに異径ロールを用いて電縫部強度差から発生する管端変形を相殺させる確認の実験を行なうこととした。実験は図11に示すような2種類のロール孔型を用いた4ロールサイザーの一段成形を行なった。この4ロールサイザーはサイドロール径が上下ロール径に比べて小さい配置の構造である、絞り率の変化はロール圧下量を変えることによって調整した。管体部の形状は孔型の適正絞り率から離れると悪化するが、0.1, 0.9, 1%程度の外径絞り率を目標として成形した。管端部の形状は成形後1mに切断し、最小自乗中心法により絶対半径で測定できる真円度測定器を用いて管端

10mmから230mmまで20mm間隔で管端部の形状を測定した。ロール底径と電縫部の位置関係の管端変形に及ぼす影響を調べるために、シーム部は上下ロール(径大)とサイドロール底径(径小)の位置に合わせる条件とした。

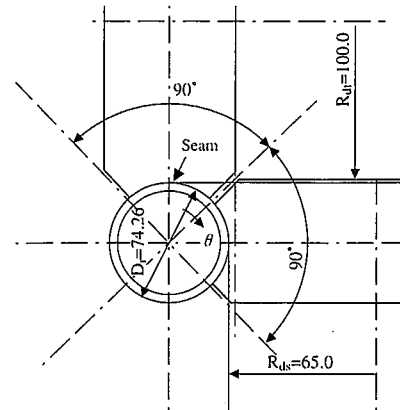


図11 実験に用いた4ロールの孔型寸法

4.2 実験結果及び考察

成形後のパイプ端面の形状測定結果をワイヤフレームで表示した図を図12に示す。

シーム部をサイドロール位置に合わせたロール径小の場合($\theta=90^\circ$: $R_{dl}/R_{ds}=1.54$ の場合)は管端変形が低減している。ロール径が大きい部分に電縫部を合わせた場合($\theta=0^\circ$: $R_{dl}/R_{ds}=0.66$)は逆にロール径差により発生する管端変形が重量し増大している。

図13に絞り率の影響を含めて整理した。孔型の設計絞り量に近い

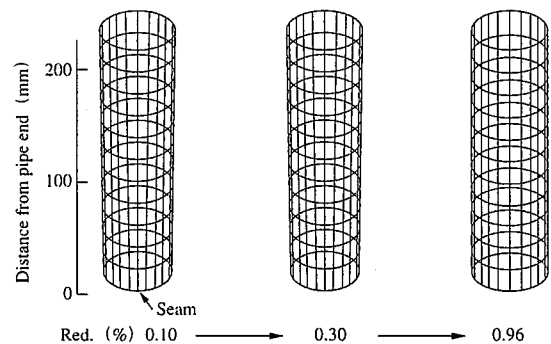


図12 異径4ロールを用いた場合の管端変形状態(拡大率20倍)

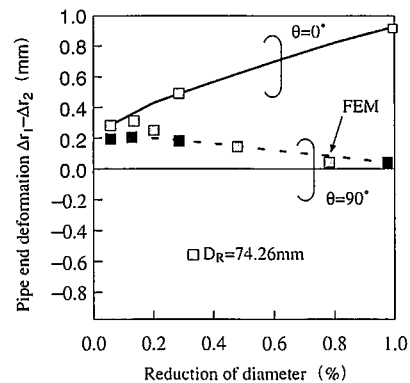


図13 異径4ロールを用いた場合の管端変形と絞り率の関係

ところ($Dr=74.26\text{mm}$ では1.0%の絞り)で管端変形が防止されていることが分かる。以上の実験の結果から、シーム強度が100MPa程度高い場合において、ロール底径比 $R_{di}/R_{dk}=1.54$ を用いればよく、更に設計孔型の絞り量に近いところで管端変形を相殺できることが明らかとなった。この技術から電縫部と母材の強度差がある場合でもロール径を変え、各鋼種に適用することにより、溶接ままにて高精度な製品を製造を可能にすることができる。現在、690~780MPa程度までの製品の製造が可能である。

5. パイプ形状測定技術

5.1 外径、真円度計

以上のように、管端変形については、高寸法精度が可能になったことを述べたが、管体についても寸法精度を確保する必要があるため、パイプの外径寸法並びに形状(真円度)を高精度に非接触で測定できるオンライン外径真円度計を開発してロール調整時間の短縮と高精度化を行った。特に、4ロールサイザーによる成形ではロールフランジ部によるロールマークの調整が難しく、従来の直径法による測定では困難で、定量的なロール位置調整に反映できる装置が必要である。

そこで、半径法で測定可能な装置を開発し実機導入した。図14に本装置の概略を示すが、高精度のデジタル信号処理を行う応答性に優れた非接触のレーザー変位計を用いて、半径を測定できる構造とした(写真1、2参照)。測定処理はEWS(エンジニアリングワークステーション)を用いて、UNIX上でX11ウィンドウで動作する。円周方向の測定点は1024点で、最高60rpmにて測定が可能な仕様となっている。

4ロール成形の測定例を図15に示すが従来の測定法では検出がで

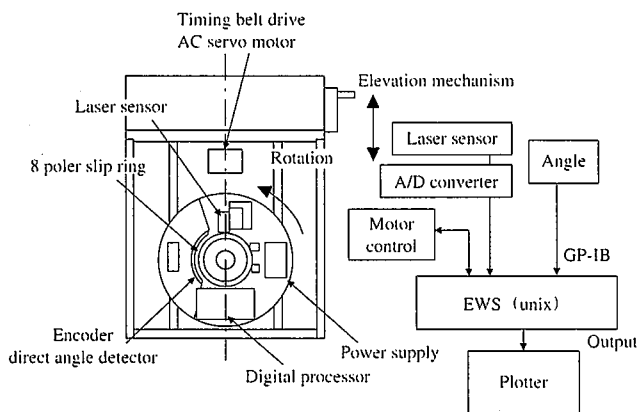


図14 オンライン外径真円度測定システム

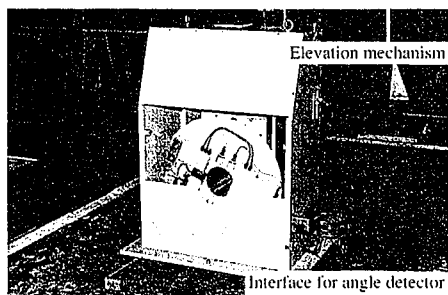


写真1 オンライン外径真円度計外観

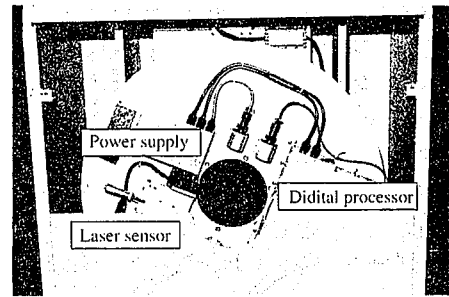


写真2 センサー部分の拡大

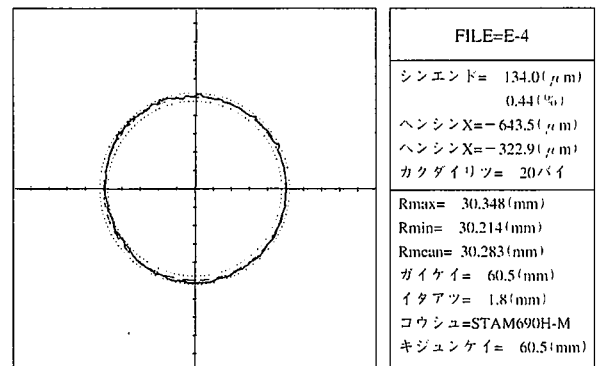


図15 外径真円度計による4ロール成形の測定例

きなかった測定が可能になり、パイプ形状からロール調整を行なうことで、管体の真円度は $\Delta r=35\mu\text{m}$ の高真円度となっており、パイプ高寸法精度化が可能になった。

また、この外径・真円度計の適用により、同時にロールセット精度向上並びに調整時間の大幅な短縮によるミルの稼働率向上が図れた。

6. 結 言

薄肉電縫鋼管の電縫溶接部の強度差に起因するサイザーにおける管端変形の防止法の検討を実験並びに3次元有限要素法を用いて行った。電縫溶接部の強度が母材と異なる場合には、4ロールでは強度に応じ底径比を変えることにより管端変形を抑えることが可能である。更に、パイプ管体の寸法精度向上のため、外径・真円度測定装置を開発し、操業に適用した。本装置の導入により、ロール調整調整時間の短縮による稼働率の向上を図ることができた。

以上の技術を適用することにより、溶接ままにて管端・管体とも高強度・高精度化が可能なることにより製造コストを低廉にすることができた。

参考文献

- 1) 小林克之 (ほか): トヨタ技術, (39), 126 (1989)
- 2) 田辺弘人 (ほか): 新日鉄技報, (354), 54 (1994)
- 3) 伊丹美昭, 阿高松男, 柴田充蔵: 塑性と加工, 36 (419), 1373 (1995)
- 4) 伊丹美昭, 阿高松男, 柴田充蔵: 塑性と加工, 36 (419), 1379 (1995)