

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560864

研究課題名(和文)高延性を有する高強度電縫鋼管のロール成形法

研究課題名(英文)Roll forming of electric resistance welded pipes with high ductility

研究代表者

宅田 裕彦(Takuda, Hirohiko)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：20135528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：近年様々の産業界で需要が高まっている高強度電縫鋼管は、高強度鋼板が難加工材であることから適切な成形工程設計の確立が困難なことで知られている。一方筆者らは、この問題を克服するロール成形法を提案した。そこで本研究では、高強度電縫鋼管の成形メカニズムの解明と提案したロール成形法の有効性検証を目的として研究を行った。実験および数値解析により詳細に検討した結果、基本的なロール成形メカニズムを詳細に明らかにした。また、提案したロール成形法を用いることで、従来よりも二次加工に適した鋼管が製造できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Recently electric resistance welded pipes made of high strength steel are increasingly needed to decrease weight of cars and to develop deep wells of gas and oil. On the other hand, spring back and work-hardening are emphasized in high strength steels, which yield the manufacturing of the pipes much more difficult than conventional steels. In this study, the influence of roll type, roll diameter and sheet strength on the roll forming of the pipes was examined in detail. The following two kinds of rolls were used: The one (Type A) was the roll stand that pinched the sheet entirely in circumferential direction by top and bottom rolls, and the other one (Type B) was the roll stand that pinched the sheet only in the edge. From the experimental and numerical investigations, a basic deformation mechanism of roll forming of the pipe could be clarified, and moreover, it was found that Type B roll gave better formability in terms of work-hardening that arose during the roll forming process.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：ロール成形 高張力鋼板 電縫鋼管 高延性 環境材料

1. 研究開始当初の背景

近年の自動車分野における軽量化、衝突安全性向上やエネルギー分野における深海の油田、ガス田開発への要求から、高強度電縫鋼管への需要が高まっている。一方で高強度鋼板では、従来に比べて大きなスプリングバックが生じることやそもそも延性が低いなどの特徴から、適切な製造指針の確立が困難になっており、その解決が急務となっている。その一方で、これらの課題はいずれも従来の材料では問題にならなかったため、実験的および解析的ノウハウが極めて不足している。

このような問題に対して筆者らは、高強度鋼管のロール成形に関する最適製造指針を確立することを最終目的として当該研究に着手した。まずは適切な数値解析技術の確立を目的として研究を行い、その結果有限要素法による高精度な電縫鋼管ロール成形解析手法の確立に成功した。続いて上記課題の抜本的解決方法を詳細に検討した。電縫鋼管のロール成形工程では円断面を形成するための幅方向曲げ変形に加えて、通板方向に曲げ曲げ戻し変形が発生する。真直ぐな円管を成形する上でこの通板方向変形は不要な変形である。したがってこれを可能な限り低減することで「ロール成形時の塑性変形量」を低減させることができ、その結果成形時のスプリングバック量を減少させ(すなわち工程設計を容易にし)かつ十分な延性を有する鋼管が製造できると考えた。またこの成形は、通常用いられるロール(図1のTypeA)ではなく、例えばTypeBロール(図1)のようにロール直下での拘束領域を小さくしたロールを用いることで実現できると考えた。しかしこれらは全て仮説の段階であるため、その検証が不可欠である。

以上の観点から、数値解析を援用した高強度電縫鋼管の成形メカニズムの解明とTypeBロールによる成形法の検証という本研究課題に着想するに至った。

2. 研究の目的

交付期間内ではまず、モデル実験および数値解析により、従来ロール(TypeAロール)

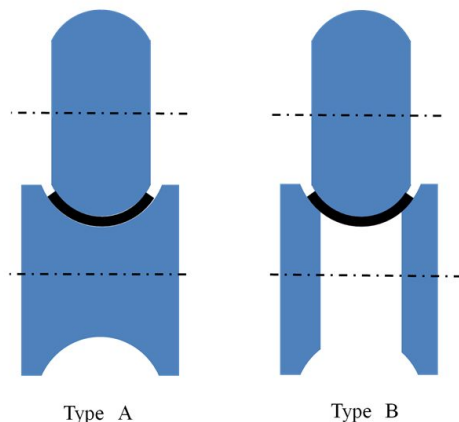


図1 本研究で検討する2種のロール形状

による高強度電縫鋼管のロール成形メカニズムの解明を目指す。その上で高強度電縫鋼管のロール成形におけるTypeBロールの有効性を、上記仮説の検証と多角的な視点からの考察を通して明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では主として、ロール成形工程中で最も塑性変形量が多い粗成形工程に注目して検討を進めた。製造現場で使用されるラインを用いた実験は非常に困難であるため、本研究では実際よりもスタンド数や成形速度を低減させたモデル実験により検討を行った。また有限要素法解析も併せて行い、応力やひずみの推移、分布など実験だけでは検証が困難な変形メカニズムの検討を行った。なお筆者らのこれまでの研究から、ロール成形プロセスの解析には静的陰解法有限要素法が最も高精度であることが明らかにされている。そこで本研究においても、商用プログラムMSC.Marcを用いて静的陰解法有限要素法解析を行った。またやはりこれまでの研究から、実際に現場で用いられる成形速度は十分静的な変形過程と近似できることが有限要素法解析により明らかにされている。したがって、本研究におけるモデル実験は実成形よりも成形速度が低いものの、その違いは結果には影響しないと考えられる。なお、パウシンガー効果が解析結果に与える影響についても検討を行ったが、本研究で行った範囲内ではほとんど影響が見られなかった。そこで本研究では、簡単のためパウシンガー効果は無視した。

供試材には、高強度材および低強度材として800MPa級および400MPa級鋼板を用いた。板厚はいずれも2mmである。また板寸法は幅40mm、長さ900mmとした。

4. 研究成果

(1) TypeAロールを用いた単スタンド成形性

まず、TypeAロールを用いた成形プロセスについて検討を行った。成形は単スタンドのみで行うが、入側には板の直進を補助するガイドロールを設けている。ロール径の影響を調査するため、実用的に用いられる種々のサイズの組み合わせで検討を行った。以下では、上ロール径を D_t 、下ロール径を D_b と表記する。

板端部の通板方向膜ひずみと板幅中央部の通板方向曲げひずみの履歴の一例を図2に示す。 $D_t=150\text{mm}$ 、 $D_b=250\text{mm}$ の結果である。解析と実験の結果は定性的に良い一致を示している。また結果は省略するが、その他の成形条件においても両者は良好な一致を示し、解析結果の妥当性が示された。

続いて、板端部の変形を検討する。図3に各種条件における板端部の通板方向膜ひずみの最大値を整理した結果を示す。なおここでは、解析結果のみを示している。実験と解析ともに、高強度材の方が板端部の通板方向膜ひずみが小さくなる傾向を示した。また高

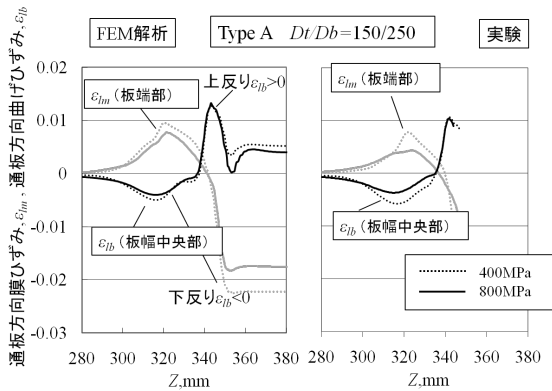


図 2 板端部の通板方向膜ひずみおよび板幅中央部の通板方向曲げひずみの推移

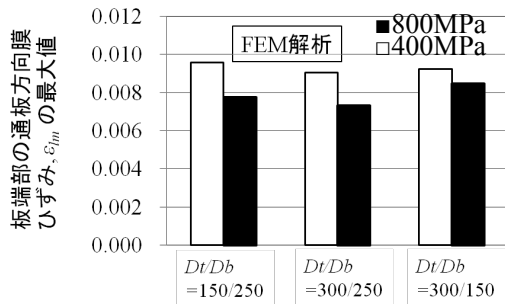


図 3 板端部の通板方向膜ひずみの最大値

強度材では、低強度材に比べて変形の進行が緩やかであった(図 2)。これは、低強度材では降伏応力が低いことに起因して、高強度材よりも広範囲で塑性変形が進行した結果であると推察された。以上のように、板端部の変形は低強度材の方がより顕著であることが明らかとなった。一方ロール径の影響については、材料強度の影響に比べると小さい結果となった。

次に、解析結果を用いてロール成形時の加工硬化挙動を検討した。図 4 に各種条件における板幅方向での相当塑性ひずみの平均値を示す。高強度材の方が低強度材に比べて幅方向でもひずみが小さい傾向であった。これは図 3 で示した結果と整合する。一方ロール径の影響をみると、上ロール径が小さい方がよりひずみが増加する傾向が見られた。詳細な結果は省略するが、その原因は以下のように考えられる。すなわち、ロール直下近傍で板は通板方向にロールに密着するような挙動を示し、さらにロール直下では通板方向と幅方向に引張られることで 2 軸応力状態になる。またその傾向は上ロール径が小さいほど顕著であり、そのため上ロール径が小さいほどひずみが増加したと考えられた。以上の結果から、上ロール径を小さくすると加工硬化が増加する傾向を示すことが明らかとなった。一方下ロール径の影響は小さかった。

(2) ロール成形時のスプリングバック特性

本節では、鋼板のロール成形におけるスプリングバック特性について検討を行った。用

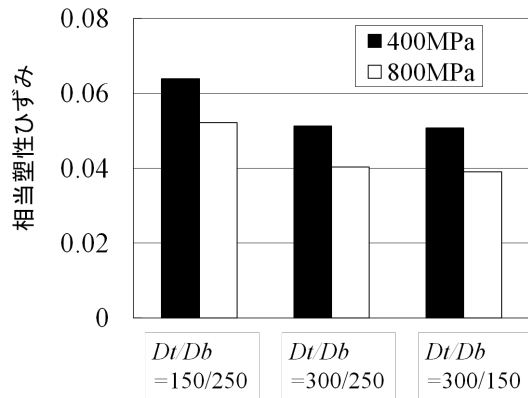


図 4 板幅方向に平均した相当塑性ひずみ

いたロール形式やロール配列などは前節と同様である。

実験および解析で得られたスプリングバック後形状の一例を図 5 に示す。素材には 800MPa 級鋼板を用い、また $D_r=150\text{mm}$ 、 $D_b=250\text{mm}$ の条件で成形した結果である。なおここでは、従来良く用いられてきた平面ひずみ曲げを仮定した場合の初等理論解も併せて示す。実験および解析ともに、ほとんどスプリングバックが見られず、成形品の曲げ半径はロール径とほぼ一致している。一方初等理論解では、顕著なスプリングバックを示していることがわかる。

この結果を詳細に検討するため、各種条件で得られた成形後の曲げ外側表面における幅方向曲率を図 6 に示す。解析結果は実験と良好に一致している一方で、初等理論解は実験値に比べて顕著に小さい。また、上ロール径が小さい方がより曲率が大きくなる傾向を示した。以上の結果より、ロール成形では平面ひずみ曲げから予測されるよりも高い形状凍結性を示すことが明らかとなった。

そこで続いて、ロール成形では高い形状凍結性が得られるメカニズムについて解析結果から考察する。成形中の板幅中央における幅方向および通板方向の曲率、幅方向曲げモーメント、そして相当塑性ひずみの推移を図 7 に示す。ただし 800MPa 級鋼板を用いて $D_r=150\text{mm}$ 、 $D_b=250\text{mm}$ の条件で成形した場合の結果である。幅方向曲げモーメントの推移に基づいて、変形過程を図 7 のように A~D の 4 つの領域に分けてそれぞれ考察する。ロール直下手前で徐々に幅方向へ曲げられる領域 A では、幅方向曲げモーメントが単調に増加している。その後領域 B では上ロールと接触しはじめ、そのため幅方向の曲げはさらに進行する。しかしながらこのとき、幅方向の曲げモーメントは徐々に低下している。そしてロール直下ごく近傍の領域 C では、板は既にロール曲率まで成形されているため幅方向の変形は小さい。一方で曲げモーメントはさらに低下を続ける。ロール直下を通過後の領域 D では、塑性変形は生じずに弾性回復が発生している。以上の結果から、上ロールとの接触が生じる領域 B と上下ロールによる板の狭

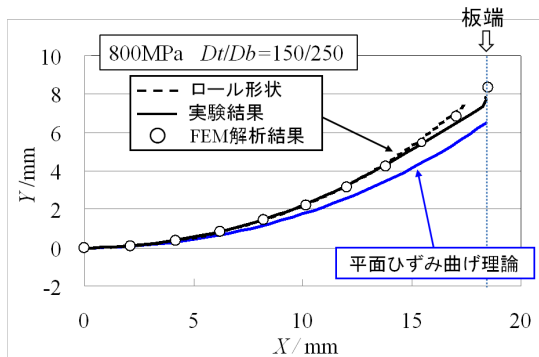


図5 ロール成形された板の断面形状

■ 実験 ■ 平面ひずみ曲げ理論
○ FEM解析 — 工具曲率

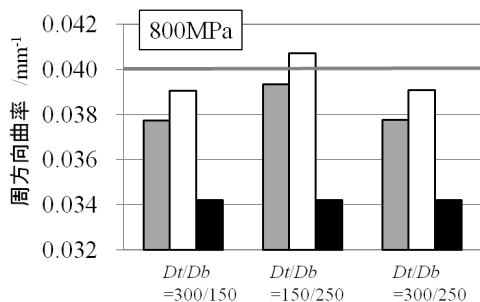


図6 ロール成形後の幅方向曲率分布

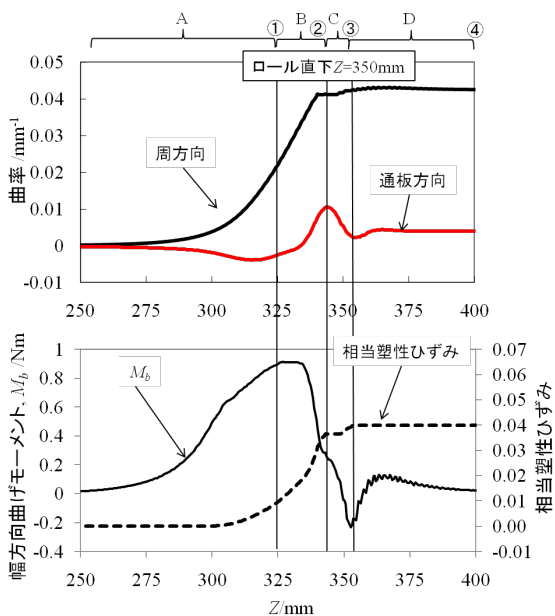


図7 曲率, 幅方向曲げモーメントおよび相当塑性ひずみの推移

み込みと拘束が発生する領域Cで曲げモーメントが大きく低下することが、形状凍結性が高い原因と推察される。

そこで続いて、成形中にもかかわらず領域B、Cにおいて曲げモーメントが低下する原因を検討する。4つの各領域終了時における板幅中央断面での幅方向応力の板厚方向分布を図8に示す。領域A()では単純曲げに相当する応力分布を呈している。一方領域B

()では曲げ内側の圧縮応力が引張側へ移動している。そして領域C()では板厚方向全域で圧縮応力が生じている。これより、応力が圧縮側へ移動したことで板厚方向での応力差が小さくなり、結果として曲げモーメントが低下したと考えられる。またこのような応力推移は、板が曲げられた後に板厚方向全体に幅方向引張が加えられ、さらにその後幅方向へ圧縮されたために生じたと考えられる。

そこで、上記の応力推移が生じたメカニズムをひずみ推移を用いて検証した。その結果、上下ロールとの接触による2軸張り出し変形と板幅方向圧縮変形が曲げモーメントの低下を引き起こしていることが示唆された。

(3) TypeB ロールを用いた単スタンド成形性

TypeB ロール(図1)はその汎用性の高さから近年広く活用されている。一方研究の背景でも述べたように、筆者らはTypeB ロールを用いることで高強度電鍮鋼管成形における問題点の解決につながると考えた。そこで本節では、TypeB ロールを用いた単スタンド成形性を検討した。またその結果をTypeA ロールの結果と比較することで、ロール形式の違いが成形性に与える影響を考察した。

まず、スプリングバック特性について調査した。図9に一例として、400MPa級鋼板を用いて $D_1=150\text{mm}$ 、 $D_2=250\text{mm}$ の条件で成形した際の板幅方向形状を示す。いずれの場合も上ロ

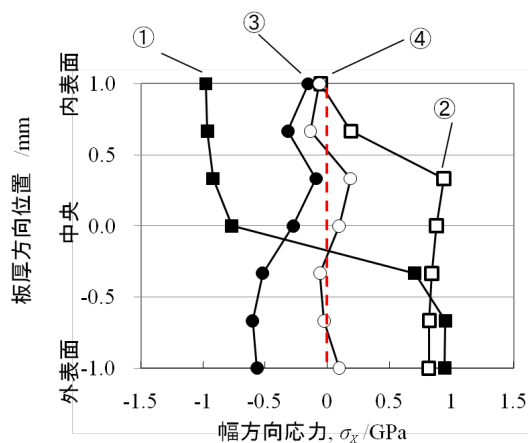


図8 板幅中央断面での幅方向応力の板厚方向分布

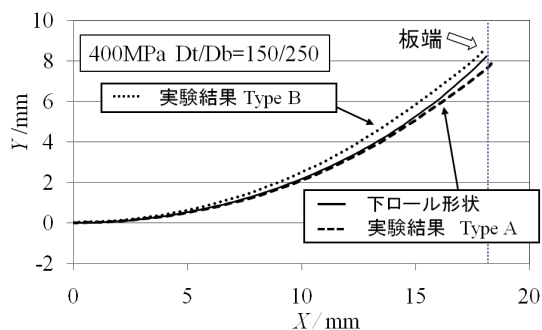


図9 ロール成形された板の断面形状

ールと同程度の曲率が得られた。

そこで、以上の結果が得られた原因を検討する。図 10 に 800MPa 級鋼板で $D_r=150\text{mm}$ 、 $D_b=250\text{mm}$ の条件で成形した場合の、板幅中央における幅方向曲率と相当塑性ひずみの推移を示す。TypeA ロールでは前述のようにスプリングバックが非常に小さく、形状凍結性が高い。一方 TypeB ロールでは、下ロールによる拘束がないためロール直下通過時に過剰な幅方向曲げを受ける。しかしながらその後比較的大きなスプリングバックが発生するため、結果としてロール曲率と同程度まで曲率が減少する。このことから TypeB ロールでは、ロール直下で生じる過剰な曲げの見込みが最終成形品形状を予測する上で重要なことが示唆された。なお結果は省略するが、ロール直下での過剰な曲げは高強度材に比べて低強度材の方が顕著であった。

TypeB ロールにおいて TypeA ロールに比べてスプリングバックが増加したのは、ロール直下手前の領域において TypeA ロールでは曲げモーメントは減少しつつづけている一方で、TypeB ロールでは曲げモーメントの減少が止まり増加に転じているためと考えられた。詳細な結果は省略する。

続いて、ロール成形時の加工硬化について検討を行った。図 11 に各種条件における曲げ外側表面での相当塑性ひずみの平均値を示す。当初の予測どおり、TypeA ロールに比べて TypeB ロールを用いた場合の方が相当塑性ひずみは小さく、またその傾向は上ロール径が小さい場合において顕著であった。

そこでこのような結果が得られたメカニズムを検討した。図 12 に、400MPa 級鋼板を用いた場合の板幅中央における通板方向曲げひずみの推移を示す。また、通板方向および幅方向の膜ひずみの推移を図 13 に示す。これらの結果から、当初の予測どおり、TypeB ロールを用いた場合は TypeA ロールに比べて板の上ロールへの押しつけが弱いため、ロール形状の転写による通板方向曲げと上ロールへの押し込みによる 2 軸引張が小さくなり、結果として相当塑性ひずみが減少したと考えられる。

最後に、板端部の伸び変形について検討を行った。詳細な結果は省略するが、TypeB ロールを用いた結果は TypeA ロールの結果と概ね同様の傾向を示した。

以上の結果から、TypeB ロールを用いることで TypeA ロールに比べて板全体の加工硬化を抑制できることが明らかとなった。

(4)次スタンド拘束の影響

以上の研究では、単スタンドでの変形メカニズムを詳細に検討してきた。一方で実際のロール成形工程では、板材は多段スタンドによって逐次円形断面に成形されていく。したがって、単スタンド成形の場合と異なり次スタンドによる拘束の影響が無視できない。そこで種々の成形条件で 2 段スタンドによる成

形を行い、次スタンド拘束の影響を調査した。詳細な結果は省略するが、検討の結果、TypeB ロールでは次スタンド拘束の影響は非常に小さい一方で、TypeA ロールでは次スタンド拘束の影響により相当塑性ひずみが増大することが明らかとなった。またこのひずみの増大は、一段目のロール通過後に生じる通板方向の反りが次スタンド拘束により曲げ戻されるために生じることが明らかとなった。

一方スプリングバックについては、ロール形式によらず次スタンド拘束の影響は小さかった。

(5)まとめ

本研究では、まず高強度電線鋼管の基本的なロール成形メカニズムを詳細に明らかに

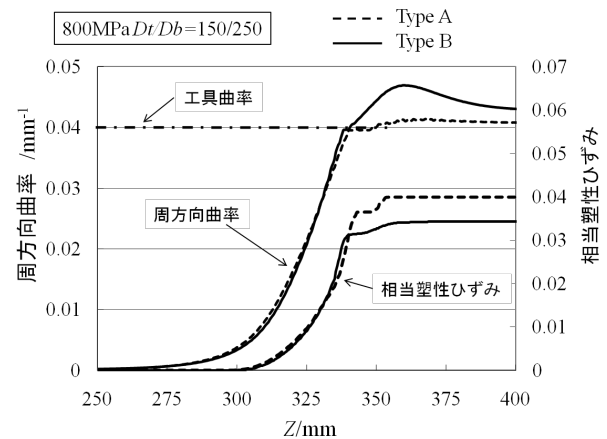


図 10 板幅中央での幅方向曲率と相当塑性ひずみの推移

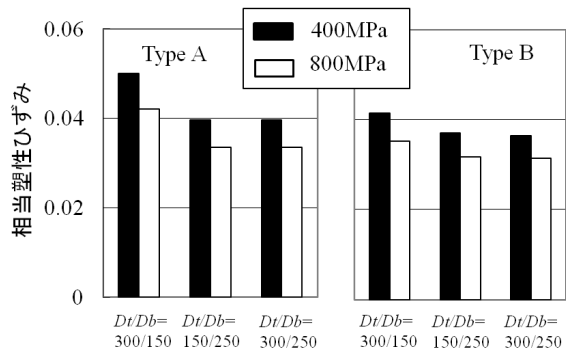


図 11 板幅方向に平均した相当塑性ひずみ

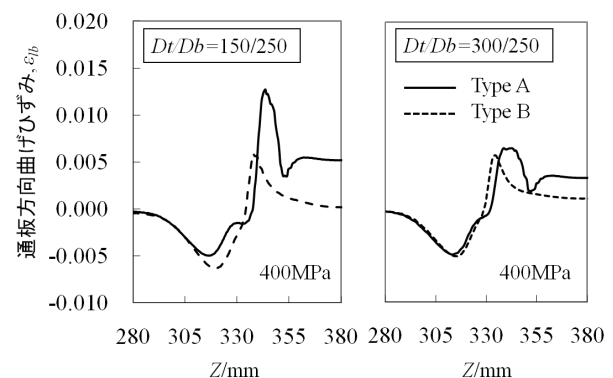


図 12 通板方向曲げひずみの推移

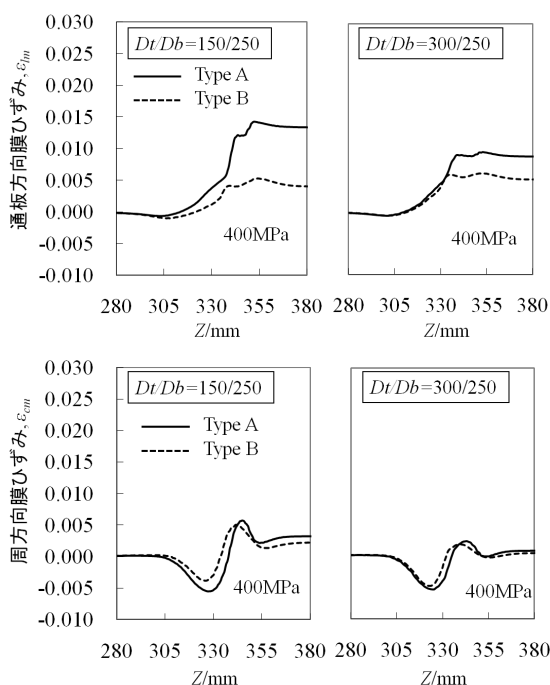


図 13 通板方向および周方向膜ひずみの推移

した。また本研究で提案した TypeB ロールを活用したロール成形メカニズムを検討した結果、当初の仮説どおり、ロール径の組み合わせ、また材料強度によらず TypeB ロールを用いることで成形中に生じる相当塑性ひずみ量を TypeA ロールに比べて低減できることを明らかにした。一方 TypeB ロールは、下ロール拘束のない中央部で生じる過剰な曲げが最終形状に影響を及ぼすため、その見込みが重要なことが示唆された。以上のように本研究課題を通じて、高強度電縫鋼管のロール成形技術の向上に向けた有効な指針を得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

井口敬之助, 栗山幸久, 師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦: 高強度鋼板の曲げ成形におけるロール形式の影響 - 電縫鋼管のロール成形シミュレーション 第 2 報 -, 塑性と加工, 54-628(2013), 436-440. 査読有。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/sosei/-char/ja>

/ja

井口敬之助, 栗山幸久, 師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦: 高張力鋼板のロール成形におけるスプリングバックの検討 - 電縫鋼管のロール成形シミュレーション 第 1 報 -, 塑性と加工, 53-622(2012), 1003-1007. 査読有。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/sosei/-char/ja>

Iguchi, K., Kuriyama, Y., Moroi, N., Hama, T., and Takuda, H.: Deformation behavior of high

strength steel sheet during roll forming of electric resistance welded pipe, Steel Research International, Special Edition, 927-930. 査読有。

<http://www.materialsviews.com/metal-forming-2012/>

〔学会発表〕(計 7 件)

井口敬之助, 松井洋介, 浜孝之, 宅田裕彦, 栗山幸久: ロール成形プロセスにおける次スタンド拘束の影響 - 電縫鋼管のロール成形シミュレーション (第 10 報), 平成 25 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2013-6), 233-234.

井口敬之助, 松井洋介, 浜孝之, 宅田裕彦, 栗山幸久: ロール間隙が板変形挙動に与える影響 - 電縫鋼管のロール成形シミュレーション (第 9 報) -, 第 63 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2012-11), 129-130.

井口敬之助, 栗山幸久, 師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦: ロール成形における板強度の影響 - 電縫鋼管のロール成形シミュレーション (第 8 報) -, 平成 24 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2012-6), 235-236. 師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦, 井口敬之助, 栗山幸久: 多段のロール成形におけるパスラインの影響 - 電縫鋼管のロール成形シミュレーション (第 7 報) -, 第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2011-10), 459-460.

井口敬之助, 栗山幸久, 師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦: ロール形式が形状凍結性に与える影響 - 電縫鋼管のロール成形シミュレーション (第 6 報) -, 第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2011-10), 457-458.

井口敬之助, 中村英幸, 栗山幸久, 師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦: ロール成形における形状凍結メカニズム - 電縫鋼管のロール成形シミュレーション (第 4 報) -, 平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2011-5), 77-78.

師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦, 井口敬之助, 中村英幸, 栗山幸久, ロール成形におけるパスラインの影響 - 電縫鋼管のロール成形シミュレーション (第 5 報) -, 平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2011-5), 79-80.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宅田 裕彦 (TAKUDA, Hirohiko)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号: 20135528

(2) 研究分担者

浜 孝之 (HAMA, Takayuki)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号: 10386633