

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420055

研究課題名(和文) 厚肉小径管の鞍反りと連続シュー成形を併用した新加工法の確立

研究課題名(英文) Establishment of new forming method of heavy gauge small pipe used continuous shoe forming with saddle-curvature preforming

研究代表者

長町 拓夫 (Nagamachi, Takuo)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：60208048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：安価で簡単に小径管を製造するために、鞍反り予成形を利用した連続シュー成形の利用を提案した。鞍反り曲面を成形するためには、長手方向に沿った素板が必要である。そのために非対称圧延による反った素板の成形が試みられた。非対称圧延の圧下率が反り曲率に及ぼす影響が調査された。長手方向曲率は圧下率の増加とともに周期的に変動する。この現象は、小径ロールとの接触開始位置で起こる大きな塑性変形が、すべり線に沿って伝播するという仮説により説明された。長手方向に大きく反った素板を真っ直ぐに伸ばすと、幅方向に大きな反りが生じた。この幅方向の大きな反りは、連続シュー成形に有効である。

研究成果の概要(英文)：To manufacture small diameter steel pipes cheaply and simply, it was suggested that continuous shoe forming with saddle-curvature preforming. In order to form saddle-curvature surface, sheet metal warped longitudinally is required. Therefore, forming of the curved sheet by asymmetrical rolling was tried. Effects of rolling reduction of asymmetric rolling on warped curvature were investigated. The longitudinal curvature of formed sheet was periodically fluctuated with the increase in the rolling reduction. This phenomenon was explained based on the assumption that large plastic deformation which occurred at contact starting position with smaller roll propagates along slip line. When making straight the sheet which caused large longitudinal curve, a large curve occurs in width direction. This large curve in width direction is effective in continuous shoe forming.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：成形加工 塑性加工 圧延 鞍反り パイプ

1. 研究開始当初の背景

熱交換器関連の分野では、配管に小径の銅管が多く使用されている。近年、銅の価格は大きく変動しており、それは機器の価格の高騰の要因になっている。そこで、銅管の代替として鋼管の使用を考える。使用する鋼管は4MPa程度の内圧に耐えることを考慮し、肉厚/直径比(t/D)は3%~5%程度とする。一般的に鋼管はロール成形によって成形されるが、ロール段数は十数組必要であり、設備が大がかりとなる。小径管製造のための安価な加工法が要望されている。

2. 研究の目的

小径の鋼管を安価かつ簡便に製造することを目的として、鞍反りを利用した予成形を用いたテーパ穴金型のシュー成形法を提案する。その予成形方法を図1に示す。長手方向に上反りした素板を平らにすると、上面では長手方向に引張ひずみ、幅方向に圧縮ひずみが生じ、下面では逆のひずみがそれぞれ生じ、幅方向に反りが生じる。幅方向の反りの曲率半径が小さいほど管成形におけるエッジの曲げがし易くなり、製品の真円度は向上する。平板を丸棒などに押し当てて素板を長手方向にカールさせた場合、その時点で鞍反りが生じると、その素板を平らにしても幅方向の反りはほとんど生じない。そこで、上下ロールの径が異なる非対称冷間圧延によって反りを与える方法を試みる。圧延によって長手方向に反った板の断面は矩形となるため、幅方向に大きな反りが発生することが期待できる。本研究の目的は、まず、異径圧延の圧下率と長手方向の反りとの関係を明らかにし、反りの発生メカニズムについて考察する。そして、鞍反りを予成形がシュー成形された小径管の曲率に及ぼす影響について明らかにすることである。

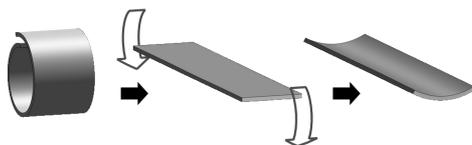


図1 幅方向に生じる鞍反りの模式図

3. 研究の方法

図2に試作した上下ロールが異径ロールを用いた非対称冷間圧延の実験機を示す。図3に圧延条件を示す。トップロール径 D_T に対するボトムロール径 D_B の比 D_B/D_T は3である。Case-1は同周速圧延の条件である。Case-2は異周速圧延の条件であり、トップロールに対するボトムロールの周速比は3である。予成形されて長手方向に反った素板を真っ直ぐにすると幅方向に反りが発生する。その素板をシューに挿入し、出口側から引き抜いた後端面をレーザー溶接し小径管を成形する。図4および図5にシュー成形に用いられる金型およびシュー成形の外観を示す。製品の小径管の直径は3.0mm、肉厚は0.1mmとする。

素板は初期板厚 t_0 が0.1mmのSPCDおよびSUS304の2条件であり、機械的性質を表1に示す。

非対称冷間圧延についてはシミュレーションも行う。シミュレーションは静的陰解法による平面ひずみ弾塑性非定常解析で行い、計算は汎用解析コード DEFORM-2D を用いる。要素は板厚方向に9分割とする。摩擦はクーロン摩擦とし、摩擦係数は0.1とする。

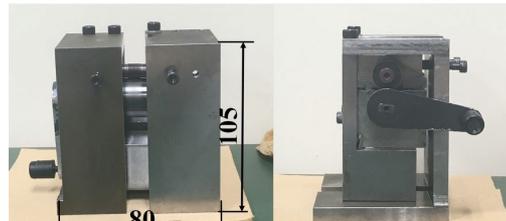


図2 試作した非対称ロール圧延機

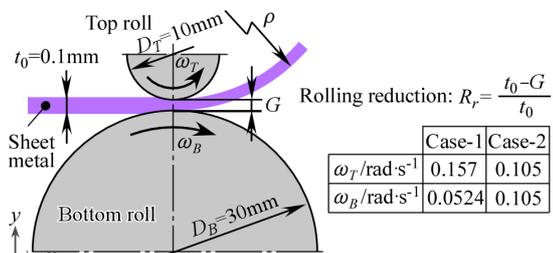


図3 非対称圧延条件

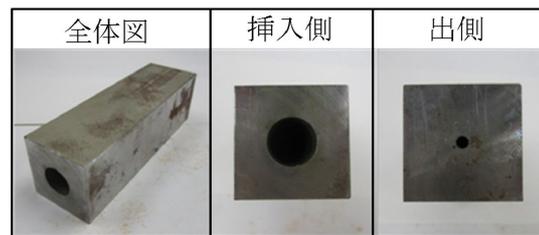


図4 シュー成形に用いられる金型

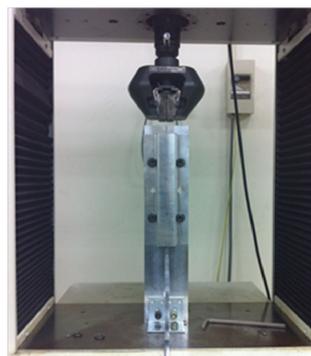


図5 シュー成形の外観図

表1 素板の機械的性質

Material	SPCD	SUS304
Young's modulus E / GPa	206.8	197.0
Yield stress σ_Y / MPa	250.8	245.5
n value	0.250	0.497
Tensile strength σ_B / MPa	388.8	676.3

4. 研究成果

(1) 異径圧延条件が薄板の上反り・下反りに及ぼす影響とその発生メカニズム

図6に圧延された板の長手方向曲率 ρ^{-1} と圧下率 R_r の関係を示す。曲率の値はトップロール(小径ロール)側に反った場合を正, ボトムロール(大径ロール)側に反った場合を負とする。いずれの条件の場合も, 圧下率 R_r の増加とともに曲率は急激に増加し, $R_r=2\%$ 付近で最大値を示す。しかし, $R_r>3\%$ で急激に減少し, $R_r=6\%$ で曲率がほぼ0の極小値を示す。 $R_r>7\%$ では再び急激に増加し, $R_r=12\%$ で極大値を示し, $R_r>12\%$ では再び減少する。これらの条件を汎用解析コード Marc を用いても計算を行ったが, 同様な結果が得られた。また, 図6(b)に示す SUS304, Case-2 の実験結果もほぼ同様な傾向となっている。鈴木は, 板厚が薄く圧下率が小さい異径ロール圧延の場合, 必ずしも特定の方向に反りが発生すると断定はできないと述べている。

圧下率の増加とともに長手方向反りの曲率が増減する理由について, SPCD の素板に生じるひずみ速度から考察を行う。

異径ロール圧延の考察に先立ち, 同径ロール同周速圧延で $R_r=3\%$ の条件の計算を行った。算出された相当塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^p_E$ の分布を図7(a)に示す。板厚中央面のP点およびQ点付近で非変形成域が見られ, 変形の大きい領域はX形状に分布している。この分布は G. J. Liら の剛塑性FEMによって算出された

形態と同様である。変形の大きい領域の主ひずみ速度の方向は, 図8に示すように, 当然ながらほぼ長手方向および板厚方向に向く。また, その値は $\dot{\epsilon}^p_E$ が大きい領域で大きい。これらのことから, 素板は長手方向から 45° 傾いた方向の主せん断方向のすべり線に沿って, せん断変形すると考えることができる。成形を追って考察すると, まず素板は図7(a)のA点とB点で圧延ロールと接触を開始する。接触開始位置はロールの傾きが大きいので, 素板はこの位置で急激に圧縮・せん断され, 大きなひずみ速度が生じる。A点とB点を起点とするすべり線(図中の破線)を考えると, そのすべり線に沿った領域も, 起点につられて大きいひずみ速度が生じている。素板はロールに噛み込まれ, 圧延中もすべり線に沿ってせん断変形するが, ロールの回転中心に近づくほどロールの傾きが水平に近くなるので, ひずみ速度は小さくなる。つまり, A点とB点を起点とするすべり線に沿った大きなせん断変形が際立ち, 変形領域がX形状に分布すると考えられる。ただし, ここでは摩擦の影響は無視して考察している。

つぎに, 大きな長手方向の反りが発生した異径ロール圧延の $R_r=3\%$ の条件について考察する。図7(b)に示すように, トップロールの径がボトムロールに比べて小さいので, トップロールとの接触開始位置A点のロールの傾きは大きい。したがって, A点の $\dot{\epsilon}^p_E$ はB点よりもかなり大きく, A点を起点とするすべり線に沿った領域で $\dot{\epsilon}^p_E$ は大きい値となる。 $x=-0.05\text{mm}$ のロール回転中心位置近傍では, すべり線の終点のD点の $\dot{\epsilon}^p_E$ はC点よりも大きくなる。つまり, D点(下側層)はC点(上側層)に比べ板厚方向に大きく縮み, 長手方向に大きく伸びる。ロール回転中心位置より下流側の $x>0$ では, 素板とロールとの間にすきまがあり, ロールによる拘束がないので, ロールから排出されると同時に曲げが生じ, 素板は上側に反ることになる。

つぎに, 長手方向の反りがほとんど発生しない $R_r=6\%$ の異径ロール圧延について考察する。図7(c)に示すように, D点の $\dot{\epsilon}^p_E$ はC点よりも大きい。これは $R_r=3\%$ と同様である。しかし, $R_r=6\%$ では接触領域が長く, この位置ではロールによる拘束を受けているので, この位置で曲がることはできない。ここで, D点が起点のすべり線(図中の破線)を考える。そのすべり線に沿った領域も, D点の大きいひずみ速度につられて比較的大きいひずみ速度が生じており, ロール回転中心位置近傍では, E点(上側層)の $\dot{\epsilon}^p_E$ はF点(下側層)よりも大きい。したがって素板は下側に反ることになるが, ボトムロールの径が大きいため下側に大きく反ることは難しく, ほとんど反りの無い状態でロールから排出されると考えられる。

さらに, 圧下率が大きい $R_r=12\%$, $R_r=18\%$ の異径ロール圧延について考察する。図7(d)および(e)に示すように, A点を起点とする

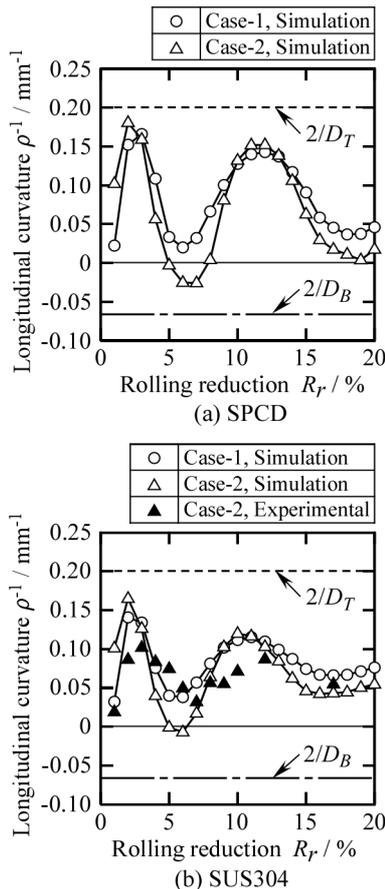


図6 圧下率と長手方向反り曲率との関係

すべり線に沿った領域で $\dot{\epsilon}_E^p$ は大きい値となり、D点、E点、H点、I点に伝播していく。それらの点は、上面および下面で $\dot{\epsilon}_E^p$ が極大値を示す位置とだいたい一致する。ロール回転中心位置近傍では、図7(d)の $R_r=12\%$ では、H点の $\dot{\epsilon}_E^p$ はG点よりも大きいので素板は上側に反る。図7(e)の $R_r=18\%$ では、I点の $\dot{\epsilon}_E^p$ はJ点よりも大きいので素板は上側に反らない。

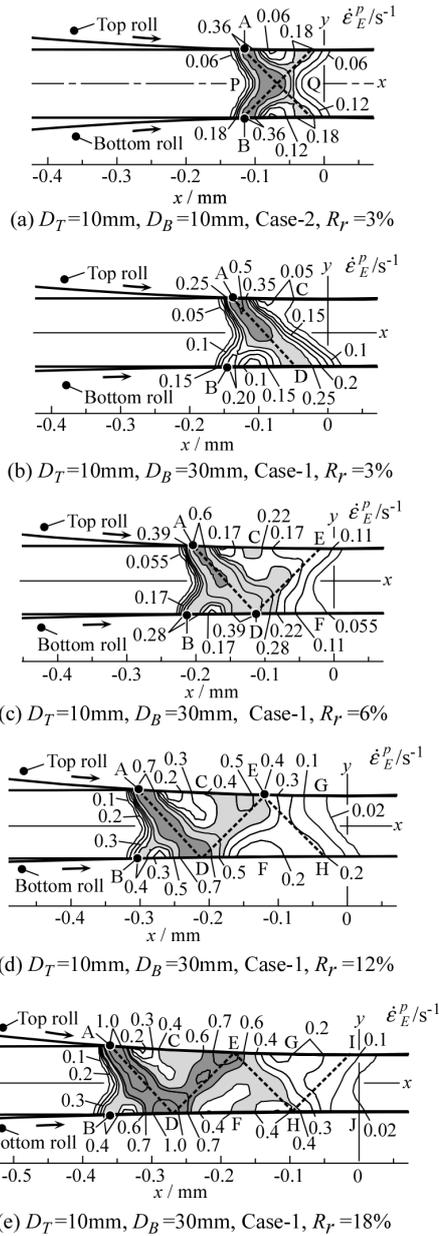


図7 相当ひずみ速度の塑性成分の分布

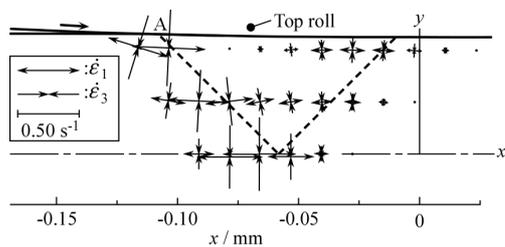


図8 主ひずみ速度の塑性成分の分布 ($\dot{\epsilon}_1$: 最大主ひずみ速度, $\dot{\epsilon}_3$: 最小主ひずみ速度, $D_T=10\text{mm}$, $D_B=10\text{mm}$, Case-2, $R_r=3\%$)

以上より、長手方向の反りの挙動は、接触長さとロール間ギャップの比によって幾何学的に説明することができる。

(2) シュー成形品の曲率に及ぼす鞍反り予成形の影響

長手方向反り曲率が最も大きい結果が得られた SPCD, Case-2, $R_r=2\%$ の素板を真っ直ぐにし、幅方向に反りを生じさせた後、連続シュー成形を行った。その外観を図9に示す。エッジの縁波などの形状不良は確認されず、良好な形状となっている。シュー成形され溶接前の素板の周方向曲率分布を測定し、鞍反り予成形が曲率に及ぼす影響を図10に示す。シュー出口穴の曲率は 0.80mm^{-1} であるのに対し、測定された曲率は小さい。これは素板のスプリングバックによるものである。しかし、鞍反り予成形を行った素板の曲率は、予成形を行わなかったそれよりも大きく、スプリングバックが小さいことがわかる。これにより、鞍反り予成形を行うことは、シューによる曲げ成形を有利に行えることがわかる。

以上のことから、考案した鞍反り予成形と連続シュー成形により、簡単な設備により低コストで小径管の製造が可能であることが確認された。

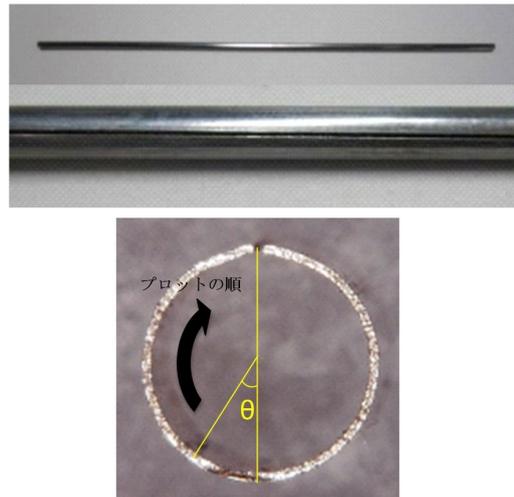


図9 シュー成形され溶接前の素板 (SPCD, Case-2, $R_r=2\%$)

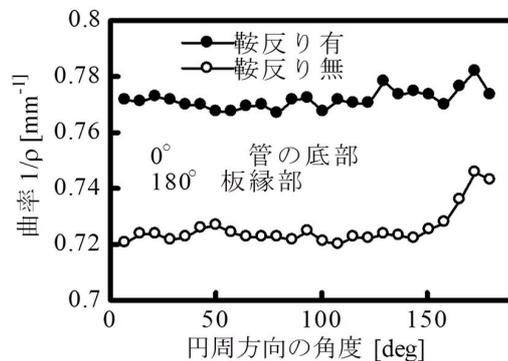


図10 シュー成形され溶接前の素板の曲率分布 (SPCD)

<引用文献>

鈴木弘, 圧延百話, 養賢堂, 2000, 303
G. J. Li, S. Kobayashi, Rigid-Plastic
Finite-Element Analysis of Plane Strain Rolling,
Journal of Engineering for Industry, Vol. 104,
February, 1982, 55-64

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)

[学会発表](計2件)

中川 慎一, 長町 拓夫, 吉村 英徳, 吉木
秀和, 異周速圧延による鞍反りと簡易シュー
成形による小径管の製造方法 -第3報 異径
圧延による反りの発生メカニズム-, 平成 27
年度塑性加工春季講演会, 2015年5月30日,
pp. 149-150, 慶應義塾大学矢上キャンパス
(神奈川県横浜市).

吉村 英徳, 三原 豊, 山本 康介, 長町 拓
夫, 異周速圧延による鞍反りと簡易シュー成
形による小径管の製造方法 -第2報 シュー
金型への材料挿入位置の影響-, 平成 25年度
塑性加工春季講演会, 2013年6月8日, pp.
227-228, 大同大学(愛知県名古屋市).

6. 研究組織

(1)研究代表者

長町 拓夫 (NAGAMACHI, Takuo)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・准教授
研究者番号: 60208048

(2)研究分担者

吉村 英徳 (YOSHIMURA, Hidenori)
香川大学・工学部・准教授
研究者番号: 30314412