論文

ロール成形された正方形角形鋼管に生じる 切口変形の発生機構

長町 拓夫* 仲子 武文** 中村 大輔**

Mechanism of Pipe End Deformation after Cutting of Square Steel Pipe Formed by Roll Forming

Takuo NAGAMACHI*, Takefumi NAKAKO** and Daisuke NAKAMURA**

(Received on February 22, 2011)

A square steel pipe is reshaped from a welded round pipe by roll forming. The pipe end deformation after cutting the square steel pipe was investigated by experiment and three-dimensional finite element simulation. Each direction of the residual stresses composed of longitudinal stress and in-plane shear stress becomes reverse with respect to the outer and inner surfaces, respectively. A large opening deformation arises at the back end of the product by the release of those residual stresses. The side part receives bending deformation in the surrounding area of the contact zone with a roll. The residual stresses composed of longitudinal stress and in-plane shear stress arise as a result of the reverse bending deformation downstream of the roll center position. The absolute value of residual stress decreases as the initial wall thickness decreases.

Key words: roll forming, square steel pipe, pipe end deformation, residual stress, FE simulation.

1. 緒言

冷間ロール成形された製品を定尺に切断すると残留応力の開放によって切断口近傍が変形する。この変形を一般的に切口変形と呼ぶ。製品に大きな切口変形が生じると切断口の幅寸法および高さ寸法が規格外となる。また、切断口どうしあるいは切断口と他の部材を接合する場合、寸法にずれが生じるため接合不良となる。そのため切口変形が生じた先端および後端の寸法を修正する工程が必要になり、後処理工程として製品を1本ずつ矯正を行うと生産効率が著しく低下する。以上のことから切口変形が生じないロール成形方法の開発が望まれている。

これまでにいくつかの切口変形に関する研究が行われている。加藤ら¹⁾は角鋼の切断口寸法を測定し、先端は閉じて後端は開く変形が生じることを明らかにし、素板の機械的性質と切口変形の関係を調査した。三原ら²⁾はU形鋼の成形実験を行い、最終段に小径インナーロールを用いて成形することは切口変形の抑制に効果があることを示した。小奈ら³⁾はチャンネル、ハットおよびC形鋼の一連の成形実験を行い、切口変形は残留曲げモーメントと残留ねじりモーメントが原因であると述べた。円管については、伊丹ら⁴⁾はサイジング工程の有限要素シミュレーションを行い、周方向に不均一な長手方向残留応力が切口変形の要因であると考察した。角管については、板谷ら⁵⁾は角鋼管の切断口寸法を測定し、先端および後端ともに開口変形することを示した。このようにいくつかの研究が行われているが、ロール成形される被加工材の曲げ変形と残留応力の関

係には不明な点が多い。さらに残留応力の開放が切口変形を引き起こす機構は十分に明らかになっていない。

筆者らはこれまでにロール成形される角鋼管のコーナー部の断面形状と成形条件との関係について調査している⁶⁾。本報告では角鋼管の切口変形に着目し、切断口の形状測定を行うことによりその変形を調査した。そして、成形プロセスおよび切断プロセスの有限要素シミュレーションを行い、パイプに生じる残留応力を算出するとともに切口変形の発生機構について考察を行った。

2. 実験および解析方法

Fig. 1 に本研究の成形プロセスの模式図を示す。円管は油圧シリンダーのラムの押し込みにより順次 No. 1, No. 2, No. 3 穴型無駆動ロールの穴型内に押し込まれていき、正方形角鋼管へと成形される。**Fig. 2** に成形ロールの記号・寸法をそれぞれ示す。**Table 1** に円管の引張試験から求められた機械的性質を示す。円管の材料はフェライト系ステンレスである。切口変形は製品の角鋼管について問題となるが、現象を詳細に調査するため、No. 1 ロールのみにより成形されたパイプ、No. 1 ロールと No. 2 ロールにより成形されたパイプについてもそれぞれ切断し切断口の形状測定を行った。切断はワイヤーカット放電で行い、管端から 1mm の位置の断面輪郭を三次元座標測定機で測定した。

シミュレーションは静的陰解法による弾塑性非定常解析で行う。まず角鋼管の成形工程のシミュレーションを No. 1 ~ No. 3 の各プロセスごとに計算を行う。その計算手順は既報⁶⁾に示した方法と同様である。つぎに切断工程のシミュレーションを行う。その手順を**Fig. 3**に示す。まずパス工程で算出された定常変形領域内の断面を選び、その断面に関わる要素を抽出する。つぎに抽出した断面の座標および応力・ひずみデータを長手方向に転写し、長手方向に断面

* 徳島大学ソシオテクノサイエンス研究部 〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1
Institute of Technology and Science, The University of Tokushima
2-1 Minami-josanjima, Tokushima, 770-8506, Japan.

** 日新製鋼(株)技術研究所 〒592-8332 堺市西区石津西町 5 番地
Steel & Technology Development Laboratories, Nisshin Steel Co., Ltd.
5 Ishizu-Nishimachi Nishi-ku, Sakai, 592-8332, Japan.

Fig. 1 Schematic illustration of forming processes

Process No. i	H_i /mm	r_i /%
No.1	23.61	12.6
No.2	22.13	18.0
No.3	21.25	21.3

Process No. i	D_T /mm	D_S /mm	R /mm	W /mm
No.1	161.5	101.9	97.50	40.70
No.2	161.5	104.5	236.86	40.98
No.3	162.1	106.9	531.46	41.02

Fig. 2 Notations and dimensions of rolls

Table 1 Mechanical properties of round pipe

Wall thickness / mm	0.79	1.18	1.98
Young's modulus / GPa	193.2		
Poisson's ratio	0.3		
Yield stress / MPa	395.0	428.0	465.0
n value	0.226	0.204	0.179
Tensile strength / MPa	477.3	481.4	505.2

Fig. 3 Procedure of calculation for cutting process

形状が一樣なモデルを作成する。このモデルに対し切断口が自由に變形できるように両端面の拘束を無しとし、力のつり合いが0になるような節点変位を計算して切口變形を算出する。弾性回復變形を精度よく算出するには肉厚方向に多くの要素が必要となる。そこで Fig. 4 に示すように肉厚方向3層 (Type-A) と6層 (Type-B) の2種類について計算し比較を行った。要素は8節点6面体要素を使用し、計算は汎用解析コード DEFORM-3D Ver. 10.1 を用いた。

Fig. 4 Schematic illustration of elements in thickness direction

Fig. 5 Notations of representing shape of cut pipe

Fig. 6 Increasing rate of height and width in cutting section of pipe, $r_1=12.6\%$: pipe formed by No. 1 rolls, $r_2=18.0\%$: pipe formed by No. 1 and No. 2 rolls, $r_3=21.3\%$: product, $t_0/d_0=3.67\%$

3. 結果および考察

3.1 切口變形とその発生機構

切口變形を表す記号の定義を Fig. 5 に示す。 $t_0/d_0=3.67\%$ のパイプに生じる残留応力と切口變形について考察する。

Fig. 6 (a) および (b) に切断口の長さ寸法および幅寸法の定常寸法に対する増加率をそれぞれ示す。白抜き記号が先端 (下流側の切断口) の寸法増加率を表し、塗りつぶしの記号が後端 (上流側の切断口) のそれを表す。横軸は成形率 r_i (Fig. 2 参照) を表し、 $r_1=12.6\%$, $r_2=18.0\%$ および $r_3=21.3\%$ はそれぞれ No. 1 ロールのみにより成形されたパイプ, No. 1 ロールと No. 2 ロールにより成形されたパイプおよび製品を表す。実測された値はすべて正の値であり、切断口は開口變形する。 $r_1=12.6\%$ および $r_3=21.3\%$ の寸法増加率は、高さ寸法および幅寸法のいずれの値も後端の方が先端よりも大きい値になっており、後端で大きく開口變形する。シミュレーションによって算出された寸法増加率は実測値と同様な傾向である。肉厚方向6層 (Type-B) の算出値は3層 (Type-A) の算出値とほぼ同じ値となった。ロール成形品の切口變形は面内・板厚内のせん断變形の影響によると言われている⁷⁾。しかし、面内せん断變形の発生

Fig. 7 Peripheral distribution of residual stress (σ_l : longitudinal stress, τ_{tl} : shear stress in thickness-longitudinal direction, τ_{lp} : shear stress in longitudinal-peripheral direction) of pipe, (a) $r_1=12.6\%$: pipe formed by No. 1 rolls, (b) $r_2=18.0\%$: pipe formed by No. 1 and No. 2 rolls, (c) $r_3=21.3\%$: product, $\square \sim \square$: Type-A, $\bigcirc \sim \bigcirc$: Type-B, $t_0/d_0=3.67\%$, simulation results

Fig. 8 Illustration of residual stress (σ_l : longitudinal stress, τ_{lp} : shear stress in longitudinal-peripheral direction) in outer and inner layer of pipe formed by No. 1 rolls and displacement vector at pipe end, $t_0/d_0=3.67\%$, simulation results, Type-B

機構および面内せん断変形が切口変形を引き起こす機構について詳細に記述されたものは見あたらない。そこで、面内・板厚内のせん断残留応力および長手方向の残留応力から切口変形の考察を行う。本研究では、Fig. 5 に示すように周方向を p 方向、肉厚方向を t 方向、長手方向を l 方向と定義し、Fig. 7 (a) ~ (c) にそれぞれ $r_1=12.6\%$, $r_2=18.0\%$ および $r_3=21.3\%$ のパイプの定常部に残留する長手方向応力 σ_l 、板厚内せん断応力 τ_{tl} 、面内せん断応力 τ_{lp} の算出値の周方向分布を示す。横軸の c/c_0 は周方向位置 (Fig. 4 参照) を表し、 $c/c_0=0$ は側辺部中央、 $c/c_0=1$ は上辺部中央、 $c/c_0=0.5$ 近傍はコーナー部を示す。図中の口および口で囲まれた数字はそれぞれ Type-A および Type-B の肉厚方向要素番号 (Fig. 4 参照) を示し、①および口が最外層、⑥および口が

Fig. 9 Illustration of pipe end deformation occurred by relief of residual stress

最内層を表す。本研究で使用した円管は t_0/d_0 が 3.67% 以下で比較的薄肉材であるため、辺部の τ_{tl} の値は Fig. 7 (a) ~ (c) のいずれもほぼ 0 であり、 τ_{tl} は切口変形に関与しない。そこで σ_l および τ_{lp} の残留応力について、まず No. 1 ロールのみにより成形された $r_1=12.6\%$ のパイプについて考察する。Fig. 7 (a) の σ_l では辺部の最外層で引張、最内層で圧縮の大きな応力が残留している。定常部における最外層の $\sigma_l > 0$ および最内層の $\sigma_l < 0$ を模式図で示すと Fig. 8 (a) のようになる。 σ_l が残留しているパイプを切断すると切断口の辺部中央では σ_l が開放され、最外層では長手に縮む方向に変位し最内層では長手に伸びる方向に変位する。それらの変位ベクトルを Fig. 8 (a) 中の切断口に矢印で示す。したがって σ_l の開放により Fig. 9 (a) の模式図に示すように、先端および後端ともに開く変形となる。一方、Fig. 7 (a) の τ_{lp} ではコーナー部に近い辺部の最外層と最内層で方向が逆となる面内せん断応力が残留している。定常部における最外層および最内層の $\tau_{lp} > 0$ ならびに $\tau_{lp} < 0$ を模式図で示すと Fig. 8 (b) のようになる。 τ_{lp} が残留しているパイプを切断すると切断口では τ_{lp} が開放され、コーナー部は剛性があるので変位しないと仮定すると、最外層の辺部中央では後端から先端の方向に変位し、最内層の辺部中央では先端から後端の方向に変位する。それらの変位ベクトルを Fig. 8 (b) 中の切断口に矢印で示す。したがって τ_{lp} の開放により Fig. 9 (b)

の模式図に示すように、先端では閉じて後端では開く変形となる。以上のことから、切断口の後端では σ_l の開放による開口変形と τ_{lp} の開放による開口変形とが重なり、後端で大きく開口変形すると考えられる。Fig. 7 (c)に示す $r_3 = 21.3\%$ の製品における σ_l および τ_{lp} の残留応力と切口変形の関係も、No. 1 ロールのみにより成形された $r_1 = 12.6\%$ のパイプのそれらの関係と同様である。

つぎに No. 1 ロールと No. 2 ロールにより成形された $r_2 = 18.0\%$ のパイプについて考察する。Fig. 7 (b)の τ_{lp} について Type-B の最外層①と最内層⑥に注目すると、 $c/c_0 = 0.2$ 近傍で①は $\tau_{lp} > 0$ 、⑥は $\tau_{lp} < 0$ となり、 $c/c_0 = 0.4$ 近傍で①は $\tau_{lp} < 0$ 、⑥は $\tau_{lp} > 0$ となっている。最外層と最内層で方向が逆となる面内せん断応力の残留は Fig. 9 (b)に示す切口変形の発生原因となる。しかし、切断口の同一辺部内に開く変形と閉じる変形の両者が存在することからそれらが相殺し合い、変形が小さく抑えられ、 τ_{lp} が及ぼす影響は小さくなると考えられる。したがって、主に σ_l の影響により、Fig. 6 の $r_2 = 18.0\%$ の値が示すように先端および後端ともに同程度の開口変形となると考えられる。

3.2 残留応力の発生機構

内外面の σ_l および τ_{lp} の残留応力は成形時におけるロールとの接触状態とそれによる変形状態に大きく依存すると考えられる。 $t_0/d_0 = 3.67\%$ のパイプについて、まず No. 1 ロールとの接触領域とパイプに生じるひずみ速度分布から残留応力の発生機構を考察する。Fig. 10 (a)および(b)に No. 1 ロールによって成形中のパイプの内外層に生じる長手方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_l$ および面内せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{lp}$ のそれぞれの塑性ひずみ速度成分の分布を示す。図中の●はロールとの接触点を示し、一点鎖線はロール中心の長手方向位置 $z = 0$ の位置の輪郭線を示す。 $\dot{\epsilon}_l$ および $\dot{\gamma}_{lp}$ は、当然ながらパイプとロールとの接触領域近傍の変形が大となる領域で絶対値の大きい値となる。しかし $z = 10\text{mm}$ 近傍の領域において

も絶対値の小さい $|\dot{\epsilon}_l| > 0$ 、 $|\dot{\gamma}_{lp}| > 0$ となる領域が見られる。つまりパイプはロール中心位置から下流側の領域においてもわずかながら塑性変形する。Fig. 10 (a)の $z > 0$ の辺部中央($c/c_0 = 0$, $c/c_0 = 1$)では、最外層で $\dot{\epsilon}_l > 0$ 、最内層で $\dot{\epsilon}_l < 0$ となっている。また Fig. 10 (b)の $z > 10\text{mm}$ の $c/c_0 < 0.5$ の辺部では最外層で $\dot{\gamma}_{lp} < 0$ で最内層で $\dot{\gamma}_{lp} > 0$ となり、 $c/c_0 > 0.5$ の辺部では最外層で $\dot{\gamma}_{lp} > 0$ で最内層で $\dot{\gamma}_{lp} < 0$ となっている。これらの $\dot{\epsilon}_l$ および $\dot{\gamma}_{lp}$ の周方向に見た正と負の分布形態はそれぞれ Fig. 7 (a)の σ_l および τ_{lp} の周方向分布の正と負の分布形態と一致する。すなわち、長手方向および面内せん断について、ロール中心位置から下流側の最後に受ける塑性変形と同じ方向の残留応力が生じている。

Fig. 10 の $\dot{\epsilon}_l$ および $\dot{\gamma}_{lp}$ の符号から No. 1 ロールによって成形中のパイプの曲げ変形を推測し、その模式図を Fig. 11 に示す。図中の A-B-C で示す上辺部中央についてパイプの流れとともに曲げ変形を説明すると以下ようになる。パイプはまず A の上流域で長手方向に外側に凸に曲げられる。つぎにロールとの接触により B の領域で内側に凸に曲げられる。このことは既報の Fig. 7⁶⁾に示された長手方向に沿った曲率分布からも明らかである。C のロール中心位置より下流域では長手方向に沿った曲率は 0 となるため、B の領域で内側に凸に曲げられた辺部中央は C の下流域で真っ直ぐに曲げ戻される。このとき外側で引張、内側で圧縮の $\dot{\epsilon}_l$ が生じ、同時に長手方向応力が発生し、外側で引張、内側で圧縮の σ_l が残留する。

Fig. 11 中の D で示すコーナーに近い辺部には、さらに外側と内側で方向が異なる $\dot{\gamma}_{lp}$ が生じる。その理由を以下のように推察する。C の領域では長手方向に外側で引張、内側で圧縮の曲げ戻し変形が生じる。E で示すコーナー部は周方向に外側で引張、内側で圧縮の曲げ変形が生じる。これらのことから接触領域を囲むように接触領域の中心から放射方向に外側で引張、内側で圧縮の変形が生じる。D の領域の放射方向は長手方向にも周方向にも一致しない。したがって、D の領域の外側および内側の引張および圧縮の変形は面内せん断ひずみとなって現れ、外側で $\dot{\gamma}_{lp} > 0$ 、内側で $\dot{\gamma}_{lp} < 0$ となる。同時に面内せん断応力が現れ、外側で $\tau_{lp} > 0$ 、内側で $\tau_{lp} < 0$ のせん断応力が残留する。これらの変形状態は、No. 3 ロールによって成形中のパイプについても同様な傾向となる結果が得られている⁸⁾。

つぎに No. 2 ロールとの接触領域とパイ

Fig. 10 Distribution of strain rate ($\dot{\epsilon}_l$: longitudinal strain rate, $\dot{\gamma}_{lp}$: shear strain rate in longitudinal-peripheral direction) in outer and inner layer of pipe being formed by No. 1 rolls, $t_0/d_0 = 3.67\%$, simulation results, Type-B

Fig. 11 Illustration of deformation of pipe being formed by No. 1 rolls and residual stress

Fig. 12 Distribution of strain rate ($\dot{\epsilon}_l$: longitudinal strain rate, $\dot{\gamma}_{lp}$: shear strain rate in longitudinal-peripheral direction) in outer and inner layer of pipe being formed by No. 2 rolls, $t_0/d_0=3.67\%$, simulation results, Type-B

プに生じるひずみ速度分布から残留応力の発生機構を考察する。Fig. 12 (a) に示すように $z > 0$ の辺部は最外層で $\dot{\epsilon}_l > 0$ 、最内層で $\dot{\epsilon}_l < 0$ となる。また Fig. 12 (b) に示すように $z > 10\text{mm}$ の $c/c_0=0.2$ 近傍で最外層は $\dot{\gamma}_{lp} > 0$ 、最内層は $\dot{\gamma}_{lp} < 0$ となり、 $c/c_0=0.4$ 近傍で最外層は $\dot{\gamma}_{lp} < 0$ 、最内層は $\dot{\gamma}_{lp} > 0$ となる。これらの $\dot{\epsilon}_l$ および $\dot{\gamma}_{lp}$ の周方向に見た正と負の分布形態はそれぞれ Fig. 7 (b) の σ_l および τ_{lp} の周方向分布の正と負の分布形態と一致する。No. 1 ロールとの接触領域はほぼ半円形を示したのに対し、No. 2 ロールとの接触領域はコーナーに近い領域に集中して存在する。Fig. 11 と同様に接触領域を囲むように接触領域の中心から放射方向に外側で引張、内側で圧縮の変形が行われると推測すると、変形の模式図は Fig. 13 のようになり、図中の A 点の最外層で $\tau_{lp} < 0$ 、B 点の最外層で $\tau_{lp} > 0$ となる。つまり、同一辺部内に方向が逆となる面内せん断応力の残留は、コーナーに近い領域に接触領域が存在するためである。

3.3 初期肉厚と切口変形との関係

Fig. 14 に製品の最外層および最内層に生じる長手方向残留応力 σ_l の分布に及ぼす初期肉厚の影響を示す。初期肉厚が小さいほど辺部に残留する σ_l の絶対値は小さい。しかし弾性回復変形は薄肉材ほど大きく現れる。本研究範囲では初期肉厚が切口面の寸法増加率に及ぼす影響は、Fig. 15 に示すように、はっきりと見られなかった。

4. 結 言

- (1) パイプの辺部には最外層と最内層で方向が逆となる長手方向応力および面内せん断応力が残留する。それらの残留応力の開放により、製品の後端（上流側）の切口面で大きな開口変形が生じる。
- (2) パイプの辺部はロール中心位置より下流側で接触領域を囲むように接触領域の中心から放射方向に外側で引張、内側で圧縮の変形が生じ、その変形時に生じる長手方向応力および面内せん断応力が残留応力となると推察される。
- (3) 初期肉厚が薄いほど最外層および最内層の残留応力の

Fig. 13 Illustration of deformation of pipe being formed by No. 2 rolls and residual stress

Fig. 14 Peripheral distribution of residual stress (σ_l : longitudinal stress) of product, simulation results

Fig. 15 Increasing rate of height and width in cutting section of product

絶対値は小さくなるが、本研究範囲では初期肉厚が切口面の寸法増加率に及ぼす影響ははっきりと見られなかった。

参 考 文 献

- 1) 加藤健三・斉藤好弘・中脇康則・簡野豊治：第 28 回塑性加工連合講演会講演論文集，(1977)，357-359。
- 2) 三原豊・鈴木孝司・鎌田崇史・山野辺勇：日本鋼管技報，86 (1980)，287-293。
- 3) 小奈弘・神馬敬・中山淳・松田正一：塑性と加工，24-268 (1983)，434-441。
- 4) 伊丹美昭・阿高松男・柴田充蔵：塑性と加工，36-419 (1995)，1379-1384。
- 5) 板谷元晶・豊岡高明：材料とプロセス，10-5 (1997)，1121。
- 6) 長町拓夫・仲子武文・中村大輔：塑性と加工，52-603 (2011)，495-499。
- 7) 日本塑性加工学会編：ロール成形，(1990)，20，コロナ社。
- 8) 長町拓夫・仲子武文・中村大輔：第 61 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2010)，241-242。