論文

ロールオフセット法によって成形される正方形角形鋼管の
コーナー形状に及ぼす成形条件の影響

長町 拓夫* 仲子 武文** 中村 大輔**

Effect of Forming Conditions of Roll Offset Method on
Sectional Shape at Corner of Square Steel Pipe

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

(Received on October 9, 2010)

A square steel pipe is reshaped from a welded round pipe by roll forming. The effect of roll diameter on the cross-sectional size of the square steel pipe was investigated by experiment and three-dimensional finite element simulation. When the diameter of the top roll is larger than that of the side roll, the width of a corner part of the formed pipe is larger than the height. The square steel pipe was formed by offsetting the small roll to the upstream side in order to make the width and height of a corner part equal. The result of offsetting is affected by the longitudinal contact distance between a roll and a pipe. Geometric contact length and relative offset (= offsetting distance / geometric contact length) were defined. The optimum value of the relative offset was clarified, which increased with the expansion of the contact length of a top roll, the roll gap, and the wall thickness of a round pipe.

Key words: roll forming, square steel pipe, roll diameter, offset, FE simulation.

1. 緒言

正方形角形鋼管は建築物および機械の構造用部材に多く使用され、それらは主にロール成形により製造される。その成形には、上下左右に設置された4つの穴型ロールを一組とし、タンデムに配置された数組の穴型ロール内に円管を通し、円管に対しコーナー部の曲げ成形と辺部の曲げ戻し成形を施す方式が一般的に用いられる。これまでに角形鋼管の研究では、木内らによる一連の実験的研究¹⁾および小野田らによる解析を踏まえた研究²⁾が行われている。

角形鋼管ロール成形機の設計には、上下ロールを電動機により駆動することも考慮される。そのためロール軸の干渉を避けるために上下ロールの径はサイドロールの径よりも大きくする事例が多い。これまでに筆者らは、上下ロールの径がサイドロールの径よりも大きい条件の実験および有限要素シミュレーションを行った³⁾。その結果より以下のことを明らかにした。成形される角形鋼管の断面寸法の幅はその高さよりも小さくなる。製品の断面寸法の幅と高さをそろえるためには、成形の最終段で成形率増分が小さい仕上げ成形を行う必要がある。また、成形された角形鋼管のコーナー部の幅はその高さよりも大きくなる。そこで、上下ロールとサイドロールのロール軸を成形方向にずらす(オフセット)方法を角形鋼管成形プロセスに適用することを検討した。その結果、小径ロールを上流側にオフセットする成形方法は、幅と高さが等しいコーナーを有する製

品を得ることに有効であることを確認した。

既報に示したオフセット成形方式の有効性をさらに詳細に調査するために、成形条件を広げて成形実験および成形シミュレーションを行った。上下ロール径とサイドロール径の比、円管に対する角形鋼管の成形率、円管の初期肉厚の各成形条件が、オフセット量と角形鋼管のコーナーの断面形状の関係に及ぼす影響について検討を行い、良好なコーナー形状が得られるオフセット成形条件を求めた。

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 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、正方形角形鋼管へと成形される。**Fig. 2** および **Table 1** に成形ロールの記号・寸法をそれぞれ示す。成形ロールは4種類の径のものを使用する。既報³⁾では上下ロールとサイドロールの組み合わせはそれぞれ Roll-A と B, Roll-A と C, Roll-A と D の3条件であった。本研究ではさらにそれぞれ Roll-B と C, Roll-B と D, Roll-C と D の組み合わせを追加し、上下ロールとサイドロールのロール径の比がコーナーの断面寸法に及ぼす影響について詳細に考察する。

ロール径とその設定位置を表すパラメータとして **Fig. 3** に示すような幾何学的接触長を定義する。No. i プロセスの上下ロールおよびサイドロールの幾何学的接触長 L_{Ti} および L_{Si} は、それぞれ次式により求められる。

$$L_{Ti} = \sqrt{\left(\frac{D_{Ti}}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_{Ti}}{2} - H_{i-1} + H_i\right)^2} \quad (1)$$

$$L_{Si} = \sqrt{\left(\frac{D_{Si}}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_{Si}}{2} - H_{i-1} + H_i\right)^2} \quad (2)$$

* 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

Fig. 2 Notations of roll dimensions

Table 1 Path schedules

(a) Roll gap

Square pipe	No.1 process		No.2 process		No.3 process	
A/mm	H_1/mm	$r_1/\%$	H_2/mm	$r_2/\%$	H_3/mm	$r_3/\%$
43.5	23.70	12.2	22.38	17.1	21.72	19.6
42.5	23.39	13.4	21.95	18.7	21.22	21.4
41.5	23.08	14.5	21.51	20.3	20.72	23.3

$$\text{Reduction } r_i = (d_0 - 2H_i) / d_0$$

(b) Roll dimension

Process	D_{Ti}, D_{Si} /mm				R /mm	W /mm
	Roll-A	Roll-B	Roll-C	Roll-D		
No.1	161.5	104.5	81.0	54.0	97.50	40.70
No.2	161.5	104.5	81.0	54.0	236.86	40.98
No.3	162.1	106.9	81.0	54.0	-531.46	41.02

Fig. 3 Definition of geometrical contact length (L_{Ti} , L_{Si})

Table 2 Mechanical properties of round pipe

Wall thickness : 2.11mm
Young's modulus : 206.8 GPa
Poisson's ratio : 0.3
Yield stress : 387.9 MPa
n value : 0.215
Flow stress : $\bar{\sigma} = 468.4 \bar{\epsilon}^{0.671} + 387.9$ MPa

ここで、式中の変数記号は Fig. 2 および Table 1 に示すとおりである。ただし、No. 1 プロセス ($i=1$) の場合の $H_{i-1} = H_0$ の値は円管半径 $d_0/2$ の値を代入する。

Table 2 に初期肉厚 t_0 が 2.11mm の円管から切り出された

試験片の引張試験から求められた機械的性質を示す。円管は亜鉛メッキ鋼管で、材料は STK400 と同等である。

本研究の実験機の成形能力は円管の初期肉厚 t_0 が 2.11 mm 以下、円管に対する成形率 r_i が 21.4% 以下、オフセット量 Z_{oi} が 7.5mm 以下である。したがって t_0 が 2.11mm 以外の条件、 r_3 が 23.3 % の条件、上下ロールとサイドロールに Roll-A と Roll-B を用いる場合以外の条件は実験に代えてシミュレーションを行う。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い、No. 1~No. 3 の各プロセスごとに計算を行う。計算手順は既報³⁾に示した方法と同様である。要素は 8 節点 6 面体要素を使用し肉厚方向は 3 要素であり、全要素数はそれぞれ約 15000~20000 要素である。摩擦係数はクーロン摩擦として 0.12 とする。 $t_0 = 1.06$ mm ~ 4.23 mm の円管の機械的性質はいずれも同様とし、Table 1 に示した $t_0 = 2.11$ mm の機械的性質を適用し計算を行う。計算は汎用解析コード DEFORM-3D Ver. 6.1 を用い、各プロセスにおける計算時間は 12 時間~24 時間 (Core2, 3.0GHz のパソコンを使用) であった。

3. 結果および考察

3.1 上下ロールとサイドロールの径の比の影響

断面の寸法精度は製品の角形鋼管についてのみ問題となるが、No.1 ロールにより成形されたパイプ、No.1 と No.2 ロールにより成形されたパイプの断面形状についても調査し、上流の変形が製品の断面寸法に及ぼす影響について検討を行う。成形されたパイプの断面形状を表す寸法記号を Fig. 4 に示す。ロールとの接触領域を辺部、ロールとの非接触領域をコーナー部とし、辺部とコーナー部の境界位置を肩部と定義する。そしてコーナー部 (肩部と肩部の間) の幅寸法および高さ寸法をそれぞれ s_x および s_y とし、それらの平均値を s_a とする。

Fig. 5 (a) および (b) に成形されたパイプの s_x と s_y の平均値 s_a および s_y の s_a に対する偏差 $(s_y - s_a) / s_a$ と上下ロー

Fig. 4 Notation representing corner shape of formed pipe

Fig. 5 Relationship between ratio of roll diameter and corner shape of pipe formed by No.i rolls ($t_0/d_0=3.9\%$, $r_1=12.2\%$, $r_2=17.1\%$, $r_3=19.6\%$)

Fig. 6 Effect of ratio of roll diameter on relationship between offset and deviation of corner shape of pipe formed by No.1 rolls ($t_0/d_0=3.91\%$, $r_1=12.2\%$, simulation results)

ルとサイドロールの径の比 D_{T1}/D_{S1} との関係を示す。円管の肉厚外径比が $t_0/d_0=3.9\%$ 、製品の円管に対する成形率が $r_3=19.6\%$ の成形条件について示す。Fig. 5 (a) に示す s_a の値は No. 1～No. 3 の各プロセスで成形されたいずれのパイプも D_{T1}/D_{S1} の増加とともにほぼ一定である。それに対し Fig. 5 (b) に示す $(s_y-s_a)/s_a$ は D_{T1}/D_{S1} が大きいほど減少し、 $D_{T1}/D_{S1}>1.0$ ではいずれの条件の場合も負の値、すなわち $s_x>s_y$ となる。本研究ではこれを“コーナーのだれ”と呼ぶ。コーナーにだれが発生する理由は既報³⁾で述べたように、上下ロールの長手方向接触長さがサイドロールのそれよりも長い場合、噛み込み領域内でコーナーがトップ側からサイド側へ変位し、トップ側の肩部はコーナー中央から遠ざかり、サイド側の肩部はコーナー中央に近づくためである (既報³⁾ の Fig. 8 参照)。

金堂ら⁴⁾は線材・棒鋼の4ロール圧延において、サイドロールのロール軸を下流側にオフセットすると上下ロールの圧延により被加工材の幅広がりが大きくなると述べている。本研究において噛み込み領域内でのコーナーのトップ側からサイド側の変位を上下ロールによる幅広がり

変形と考えると、サイドロールを上流側にオフセットすれば、噛み込み領域内における幅広がり変形は抑制されることにより、コーナーのだれを抑制することができると考えられる。既報³⁾では上下ロールとサイドロールの組み合わせがそれぞれ Roll-A と B, Roll-A と C, Roll-A と D の3条件の実験とシミュレーションを行い、サイドロールをオフセットする成形方法は、幅と高さが等しいコーナーを有する製品を得ることに有効であることを確認した。本研究ではさらにロールの組み合わせ条件を追加し、シミュレーションを行った。

Fig. 6 に No. 1 プロセスのサイドロールのオフセット量 Z_{o1} と成形されたパイプのコーナーの偏差 $(s_y-s_a)/s_a$ との関係を示す。オフセット量 Z_{oi} は上下ロールとサイドロールの中心位置の長手方向座標の差であり、Fig. 2 中に図示する。Fig. 6 (a) に示すようにオフセット

量 Z_{o1} の増加とともに $(s_y-s_a)/s_a$ は 0 に近づき、コーナーのだれは改善される。また、過度に大きなオフセット量 Z_{o1} で成形を行うと $(s_y-s_a)/s_a>0$ となり $s_x<s_y$ となるような逆側へのコーナーのだれが発生する。Fig. 6 (a) の $D_{T1}/D_{S1}=2.0$ の場合に注目すると、△印で示す Roll-A と C の組み合わせのコーナーのだれが解消 ($(s_y-s_a)/s_a=0$) されるオフセット量 Z_{o1} はおよそ $Z_{o1}=6.2\text{mm}$ である。それに対し、▲印で示す Roll-B と D の組み合わせのそれはおよそ $Z_{o1}=4.0\text{mm}$ となっており、同じ D_{T1}/D_{S1} においても異なる値となる。Roll-B と D のようなロール径が小さいもの同士の組み合わせでは、上下ロールの長手方向接触長さが小さく、幅広がり変形がロール中心位置に近い領域で行われる。そのため、サイドロールのオフセット量が小さくても幅広がり変形の抑制に効果が現れる。

そこで、オフセット量の無次元化を図るために、式 (1) および式 (2) で示したパイプとロールとの幾何学的接触長 L_{T1} と L_{S1} の平均値 L_{a1} に対する相対オフセット Z_{o1}/L_{a1} を考える。Fig. 6 (b) に $(s_y-s_a)/s_a$ と Z_{o1}/L_{a1} の関係を示

Fig. 7 Effect of offset Z_{o1} on relationship between offset Z_{o2} and deviation of corner shape of pipe formed by No.2 rolls ($t_0/d_0=3.91\%$, $r_1=12.2\%$, $r_2=17.1\%$, simulation results)

Fig. 8 Effect of ratio of geometrical contact length on offset of rolls in case of becoming $s_y-s_a=0$ ($t_0/d_0=3.91\%$, $r_1=12.2\%$, $r_2=17.1\%$)

す。ロールの組み合わせを表すパラメータとして L_{T1}/L_{S1} を図中に示す。Fig. 6 (b) により $(s_y - s_a)/s_a = 0$ となる Z_{01}/L_{a1} の値は L_{T1}/L_{S1} が大きいロールの組み合わせほど大きい値となることとわかる。幾何学的接触長を用いることで任意のロールの組み合わせに対してコーナーのだれが解消される最適なオフセット量を一意的に求めることが可能となる。

No. 1 プロセスでオフセット成形したパイプをさらに No. 2 プロセスでオフセット成形を行った場合の $(s_y - s_a)/s_a$ を Fig. 7 に示す。例として上下ロールとサイドロールの組み合わせがそれぞれ Roll-B と C, Roll-C と D, Roll-B と D の場合を示す。本研究の No.3 プロセスは成形率増分が小さい仕上げ成形であるため、Fig. 5 (a) および(b) に示すように、△印の No.2 プロセスで成形されたパイプのコーナー形状と□印の No.3 プロセスのそれとの間にほとんど変化は見られない。したがってだれのない良好なコーナー形状を有する製品を製造するには No.2 プロセスの成形までにだれのないコーナーを成形すればよい。

Fig. 7 に示すように、種々の上下ロールとサイドロールの径の比においてコーナーのだれが解消できる様々な No.1 プロセスと No.2 プロセスのオフセット量の組み合わせが考えられる。7 通りの実験と 127 通りのシミュレーションで得られたその組み合わせを示すと Fig. 8 のようになる。

3.2 成形率の影響

角形鋼管の円管に対する成形率がコーナーの断面寸法に及ぼす影響について、円管の肉厚外径比が $t_0/d_0 = 3.9\%$ で製品の成形率が $r_3 = 19.6\%, 21.4\%, 23.3\%$ の条件について考察する。

Fig. 9 (a)および(b)に No. 1 プロセス成形後のパイプの s_a および $(s_y - s_a)/s_a$ と D_{Ti}/D_{Si} との関係に及ぼす成形率 r_1 の影響をそれぞれ示す。Fig. 9 (a) の s_a の値は D_{Ti}/D_{Si} の増加とともにほぼ一定であるが、 D_{Ti}/D_{Si} が一定の条件下では成形率 r_1 の増加とともに急激に小さくなる。Fig. 9 (b) に示す $(s_y - s_a)/s_a$ は D_{Ti}/D_{Si} が増加とともに減少するが D_{Ti}/D_{Si} が一定の条件下では成形率 r_1 の影響はほとんどない。これらは製品においても同様な傾向となる結果が得られている。 r_1 の増加とともに $(s_y - s_a)/s_a$ はほぼ一定であるが s_a は急激に小さくなるので、コーナーの高さと幅の実質の差 $s_y - s_a (=s_y/2 - s_x/2)$ は r_1 の増加とともに急激に小さくなる。実質の差 $s_y - s_a$ が小さい場合、小さいオフセット量でだれの解消が可能となると考えられる。

Fig. 10 (a)～(c) に No. 1 プロセスにおける Z_{01}/L_{a1} と $(s_y - s_a)/s_a$ の関係に及ぼす成形率 r_1 の影響を示す。Fig. 9 の結果による推察から、Fig. 10 (a)～(c)に示すようにいずれのロールの組み合わせにおいても、成形率 r_1 が大きいほど $(s_y - s_a)/s_a = 0$ となる Z_{01}/L_{a1} の値は小さくなっている。

14 通りの実験と 139 通りのシミュレーションで得られた

Fig. 9 Effect of reduction r_1 on relationship between ratio of roll diameter and corner shape of pipe formed by No.1 rolls ($t_0/d_0=3.91\%$)

Fig. 10 Effect of reduction r_1 on relationship between offset Z_{01} and deviation of corner shape of pipe formed by No.1 rolls ($t_0/d_0=3.91\%$)

Fig. 11 Effect of reduction r_1 on offset of rolls in case of becoming $s_y - s_a = 0$ ($t_0/d_0=3.91\%$)

コーナーのだれが解消できる様々な No.1 プロセスと No.2 プロセスのオフセット量の組み合わせを示すと Fig. 11 のようになる。成形率が大きいほど、 Z_{01} および Z_{02} が小さ

Fig. 12 Effect of wall thickness t_0 on relationship between ratio of roll diameter and corner shape of pipe formed by No.1 rolls ($r_1=12.2\%$)

Fig. 13 Effect of wall thickness t_0 on relationship between offset Z_{o1} and deviation of corner shape of pipe formed by No.1 rolls ($r_1=12.2\%$)

Fig. 14 Effect of wall thickness t_0 on offset of rolls in case of becoming $s_y-s_a=0$ ($r_3=19.6\%$)

いオフセットでコーナーのだれの解消が可能となっている。

3.3 初期肉厚の影響

円管の初期肉厚がコーナーの断面寸法に及ぼす影響について、製品の成形率が $r_3 = 19.6\%$ 、円管の肉厚外径比が $t_0/d_0 = 2.0\%$, 3.9% , 5.9% , 7.8% の条件について考察する。

Fig. 12 (a) および (b) に No. 1 プロセス成形後のパイプの s_a および $(s_y - s_a)/s_a$ と D_{Ti}/D_{Si} との関係に及ぼす肉厚外径比 t_0/d_0 の影響をそれぞれ示す。Fig. 12 (a) に示す s_a の値は D_{Ti}/D_{Si} の増加とともにほぼ一定であるが、 D_{Ti}/D_{Si} が一定の条件下では肉厚外径比 t_0/d_0 の増加とともに急激に大きくなる。Fig. 12 (b) に示す $(s_y - s_a)/s_a$ は D_{Ti}/D_{Si} が増加とともに減少するが D_{Ti}/D_{Si} が一定の条件下では肉厚外径比 t_0/d_0 の影響ははっきりと見られず、ほぼ一定値となっている。 t_0/d_0 の増加とともに $(s_y - s_a)/s_a$ はほぼ一定であるが

s_a は急激に大きくなるので、コーナーの高さと幅の実質の差 $s_y - s_a (=s_y/2 - s_x/2)$ も急激に大きくなる。実質の差 $s_y - s_a$ が大きいほど、だれを解消するために大きいオフセット量が必要となると考えられる。

Fig. 13 (a)~(c) に No. 1 プロセスにおける Z_{o1}/L_{a1} と $(s_y - s_a)/s_a$ の関係に及ぼす肉厚外径比 t_0/d_0 の影響を示す。Fig. 12 の結果による推察から、Fig. 13 (a)~(c) に示すようにいずれのロールの組み合わせにおいても、肉厚外径比 t_0/d_0 が大きいほど $(s_y - s_a)/s_a = 0$ となる Z_{o1}/L_{a1} の値は大きくなっている。しかし、Fig. 13 (c) の上下ロールとサイドロールのロール径の比が最も大きい Roll-A と D の組み合わせ ($L_{Ti}/L_{Si}=1.77$) において、肉厚外径比が最も大きい $t_0/d_0 = 7.8\%$ の条件は、かなり大きいオフセット量で成形しても

$(s_y - s_a)/s_a$ は 0 にならず、コーナーのだれは解消しなかった。

7 通りの実験と 261 通りのシミュレーションで得られたコーナーのだれが解消できる様々な No.1 プロセスと No.2 プロセスのオフセット量の組み合わせを示すと Fig. 14 のようになる。コーナーのだれを解消するには肉厚外径比が大きいほど大きいオフセットが必要となるが、Fig. 14 (c) の $L_{Ti}/L_{Si}=1.77$ の条件では $t_0/d_0 = 2.0\%$ と 3.9% の薄肉材でコーナーのだれを解消するオフセット量を見出したが、厚肉材では見出すことができなかった。

4. 結 言

- (1) サイドロールのオフセットによるコーナーのだれの改善効果は、上下ロールの長手方向接触長さに依存する。幾何学的接触長を定義し、その値によりオフセット量を無次元化することで、種々の条件における最適なオフセット量を一意的に求めることを可能にした。
- (2) 種々の成形条件に対してコーナーのだれを解消するための相対オフセットの値を明らかにした。その値は、上下ロールのサイドロールに対する幾何学的接触長の比が大きいほど大きく、角形鋼管の円管からの成形率が大きいほど小さく、肉厚対外径比が大きいほど大きい。

参 考 文 献

- 1) 木内学・新谷賢・戸沢正孝: 塑性と加工, **21**-231 (1980), 339-346.
- 2) 小野田義富・長町拓夫・杉山努: 塑性と加工, **36**-409 (1995), 149-154.
- 3) 長町拓夫・仲子武文・中村大輔: 塑性と加工, **52**-603 (2011), 495-499.
- 4) 金堂秀範・武田了・大森和郎・国田憲男: 川崎製鉄技報, **28**-2 (1996), 69-75.