

# 熱間サイジングミルにおける小断面極厚肉角形 鋼管成形の有限要素解析

長浜 拓也\*・剣持 一仁\*・坂田 敬\*

Finite Elemental Analyses of Forming Ultra Heavy Gauge Square Tube Using Hot Sizing Mill

Takuya NAGAHAMA, Kazuhito KENMOCHI and Kei SAKATA

**Synopsis :** Ultra heavy gauge steel square tubes have been required as columns to promote the beautiful design of such as glass-faced buildings and shopping arcades. There have been some methods of manufacturing square columns, but manufacturing heavy gauge tubes was difficult in either method. Then hot forming was suggested as a method of manufacturing heavy gauge tubes by reshaping round cross-sectional mother pipe into square shape. Sharpness of the corners and flatness of the sides are both essentially required. Rigid plastic finite elemental method was applied to simulate the deformation of the material during the hot forming, and influence of forming condition on the both requirements was discussed. 2-roll-type hot sizing mill was applied as the instrument of the hot forming. The simulations were carried out in 4 cases with difference of total reduction or distribution of reduction at each stand. The square tube was experimentally formed under one of the above 4 cases.

The calculated result was in a good accordance with the experimental result. The shapes of corners become sharper as growth of the total reduction. The sides become flatter as the reduction at the final stand is smaller. Large total reduction with small reduction at the final stand is recommendable to satisfy the both of sharp corners and flat sides.

**Key words:** steel square tube; seamless steel tube; hot sizing mill; finite elemental method.

## 1. 緒言

従来、建築鉄骨で使用される角形断面部材は、4枚の厚鋼板を溶接にて組み立てる方法、2枚の厚鋼板をプレス機にてコの字型あるいは角形に成型した後に溶接する方法、熱延鋼板を円筒に成形した後に電気抵抗溶接し角形断面に成形する方法などにより製造され、それぞれ溶接四面ボックス、冷間プレスコラム、冷間ロールコラムと呼ばれる。辺長400mm以上の大断面角形鋼管のうち、肉厚/辺長比が約6%以上の厚肉鋼管は溶接四面ボックスとして製造され、これより薄肉の角形鋼管は冷間プレスコラムとして製造される。また辺長によらず肉厚20mm以下の角形鋼管は冷間ロールコラムとして製造される。

一方、建築物の納まりや意匠性・美観上の要求から、断面外径を小さく抑えて肉厚を厚くする新たな角形鋼管の需要が高まっている。柱の占有面積を減少させれば、壁面のガラス張り面積が増加し、建物が昼間は外面の輝きを増し、夜間は建物内部の照明により照らし出される<sup>1)</sup>。また、建物内部においても、柱を薄い壁の中に埋め込んで一体化することによって意匠性が向上する<sup>2)</sup>。また、アーケードの柱を小断面化することにより、混雑する商店街で買い物客が通りやすくて、各商店の陳列の見映えが良くなる<sup>3)</sup>など、

さまざまな場面で建築物の意匠性向上に寄与することが期待される。

一方、柱材の小断面化は剛性の低下につながるため、剛性を保持するには従来にない厚肉の角形鋼管が必要とされる。また、柱材として使用するためには、優れた靱性が要求されるとともに、角部形状が急峻でかつ辺部が平坦である必要がある。

極厚肉柱を製造するには、溶接四面ボックスの製造方法の適用が考えられるが、小断面の場合、内面の空間が小さくて自動溶接が困難である上、角部は溶接熱影響部であるため靱性が劣化して、実用化には至っていない。また、冷間ロールコラムの製造方法では、角部は溶接がなく靱性劣化は生じないものの、小断面であるため辺部よりも著しく変形が大きくて加工硬化して割れが生じたり、急峻な角部の形成が難しい。

そこで本研究では、全く新しい発想の下で、熱間でのロール成形<sup>4,5)</sup>という製造方法に着目した。熱間では角部の加工硬化が抑制されるが、極厚肉小断面の加工にあって急峻な角部と平坦な辺部を両立させる必要がある。

そこで、熱間ロール成形中の管の変形挙動を解析するため、剛塑性有限要素法を用いた計算モデルを開発した。本論文では、計算モデルの概要と解析結果を述べるとともに、

平成18年8月22日受付 平成18年10月30日受理 (Received on Aug. 22, 2006; Accepted on Oct. 30, 2006)

\* JFEスチール(株)スチール研究所鋼管・鋳物研究部(Tubular Products and Casting Research Dept., Steel Research Laboratory, JFE Steel Corp., 1-1 Kawasaki-cho Handa 475-8611)

管の角部および辺部の変形挙動に及ぼす成形条件の影響について考察する。

## 2. 角形鋼管成形解析

### 2.1 本モデルの概要

本モデルで取り扱うロール成形の概要を Fig. 1 に示す。本研究では2ロール式サイジングミルを最大4スタンド用いて、円形断面を呈した鋼管を角形断面へ成形する際の変形挙動を解析した。通常、角形鋼管を冷間でのロール成形により製造する場合、辺部をロール面で圧下する4ロール式サイジングミルが用いられるが、本研究では熱間でのロール成形に Fig. 1 に示す2ロール式サイジングミルを適用して、角部を圧下して角形鋼管を製造する方法を解析対象とした。

角形断面への圧延に用いられるスタンドのロール孔型の概要を Fig. 2 に示す。ロールの孔型底部および端部において鋼管の角部を成形し、各スタンドごとに隣接する角部を交互に圧下する。辺部の曲率半径を後段スタンドほど大きくして、最終スタンドでは直線とする。

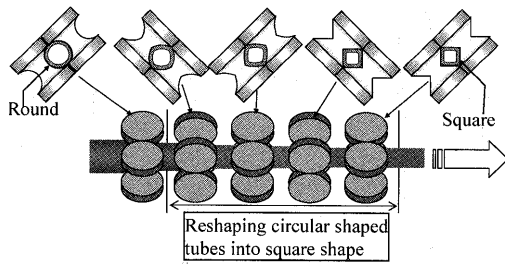


Fig. 1. Schematic drawing of reshaping circular tubes to square cross-sectional ones using hot sizing mill.

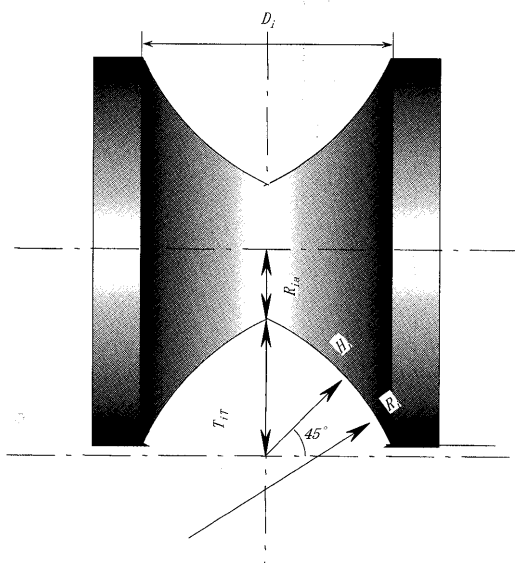


Fig. 2. Roll groove used for forming square cross-sectional tubes in the sizing mill.

### 2.2 解析モデルの概要

小野田ら<sup>5)</sup>は、エクストロールフォーミング法と称する冷間成形について、圧縮性材料の塑性力学を応用した剛塑性有限要素法<sup>6)</sup>による解析モデルを開発し、円形断面の鋼管を角形に成形する際の鋼管の変形解析を行っている。

本研究では熱間のロール成形にこのモデルを適用した。適用にあたり、速度場の算出は森らの方法<sup>7)</sup>にしたがった。使用した要素は8節点6面体アイソパラメトリック要素である。熱間変形における変形抵抗としては、美坂の式<sup>8)</sup>を用いた。

計算は各スタンドごとに、被加工材を要素分割し、定常変形状態を解析した。被成形材とロールの接触開始点は、ロールと接触する直前の節点の速度ベクトルがロール表面を横切る位置とした。また、ロール面上の節点の法線方向力が引張りとなり計算された場合にロール面と被圧延材が離脱したと判定した。

圧延スタンドにおける縮径の程度を示す指標として、 $i$  番目のスタンドまでの総縮径率  $r_i$  の定義を Fig. 3 に示す。これを用いて、各スタンドにおける縮径率  $\Delta r_i$  を以下の式にて定義する。

$$\Delta r_i = r_i - r_{i-1}$$

また、各スタンドの孔型周長を  $l_i$  として、周長減少率  $\Delta r l_i$  を以下の式にて定義する。

$$\Delta r l_i = l_i - l_{i-1}$$

角形鋼管の寸法特性を示す指標を Fig. 4 に示す。 $S$  は角部の大きさを示し、一般に  $S$  値と呼ばれる。角部の寸法特性はこの  $S$  値と角部半径  $R$  で表わされ、いずれも値が小さいほど角部が急峻である。辺部の平坦度は、辺部のくぼみ

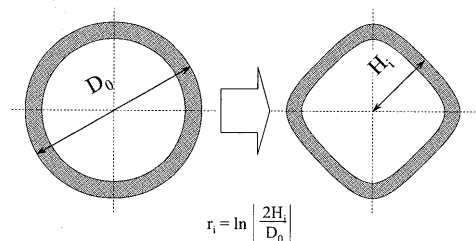


Fig. 3. Definition of reduction  $r_i$ .

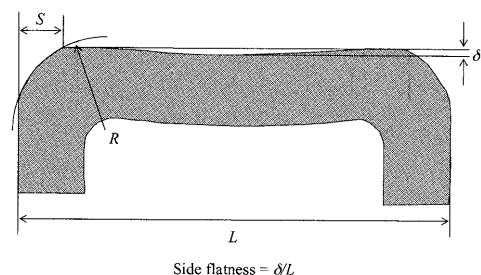


Fig. 4. Indicators of the cross-sectional shape of square tubes.

Table 1. Dimensions of rolls used for the analyses.

Case		1	2	3	4
Outside diameter of material at inlet /mm		346.1	309.7	323.3	344.4
$R_i$ /mm	No.1 stand	375	509	509	509
	No.2 stand	523	1247	1247	1247
	No.3 stand	16257	∞	∞	7961
	No.4 stand	---	---	---	∞
$R_{ia}$ /mm	No.1 stand	191.8	193.3	193.3	193.3
	No.2 stand	192.5	192.2	192.2	192.2
	No.3 stand	193.4	192.8	192.8	192.8
	No.4 stand	---	---	---	192.8
$H_i$ /mm	No.1 stand	147.4	143.4	143.4	141.7
	No.2 stand	140.4	133.2	133.2	131.4
	No.3 stand	125.0	125.0	125.0	126.4
	No.4 stand	---	---	---	125.2
$\Delta r_i$ /%	No.1 stand	5.9	-5.6	-1.3	6.1
	No.2 stand	1.4	1.3	1.3	1.5
	No.3 stand	1.5	1.6	1.6	-0.1
	No.4 stand	---	---	---	0.2
$\Delta r_i$ /%	No.1 stand	16.0	10.0	11.9	19.5
	No.2 stand	4.9	6.1	7.5	7.5
	No.3 stand	11.6	5.3	6.3	3.9
	No.4 stand	---	---	---	1.0
Total reduction $r_{fin}$ /%		32.5	21.4	25.7	31.9
Temperature of material /°C	No.1 stand	885	885	885	885
	No.2 stand	875	875	875	875
	No.3 stand	865	865	865	865
	No.4 stand	---	---	---	855

Table 2. Forming conditions in the analyses.

Longitudinal	No.1 stand	33
	No.2-4 stand	24
Circumferential		56
Radial		2

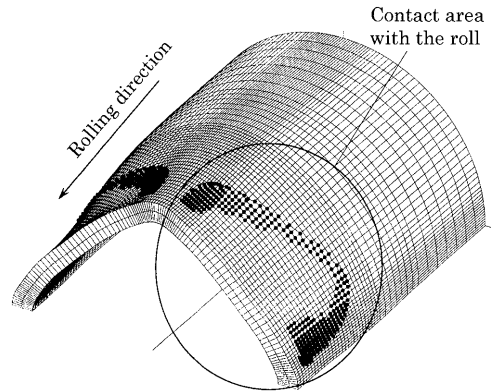


Fig. 5. Finite element meshes deformed in the No. 1 stand, as a result of the calculation under the condition of Case 1.

量  $\delta$  を辺長  $L$  で除したもので定義され、値が小さいほど辺部が平坦である。本研究では、 $S$  値が肉厚の 1.5 倍以下、角部半径が肉厚の 2.0 倍以下、辺部平坦度が 0.5% 以下という目標を同時に満たす角形鋼管の成形を検討した。

2.3 解析条件

圧延に使用したロールの寸法および解析に用いた成形条件を Table 1 に示す。表中に示した  $R_i$ ,  $R_{ia}$ ,  $H_i$  は Fig. 2 に示した通り、それぞれロールの孔型辺部の曲率半径、ロール中央部の半径および孔型中心から辺部までの距離である。これらと周長減少率  $\Delta r_i$  および縮径率  $\Delta r_i$  の各スタンドにおける値とともに、円形断面を呈した素管の外径と総縮径率  $r_{fin}$  を併せて示した。Case 1 から Case 3 は 3 スタンド成形である。Case 1 は実際の冷間ロールコラムの成形プロセスを参考とし、周長減少率  $\Delta r_i$  が No. 2 および No. 3 スタンドでほぼ同じとなるように設定した条件である。Case 2 および Case 3 は、No. 2 および No. 3 スタンドの縮径率  $\Delta r_i$  がほぼ等しくなるように設定した条件であり、素管の外径を変更することにより総縮径率を変更し、Case 3 は Case 2 より総縮径率を大きくしている。一方 Case 4 は素管外径および総縮径率を Case 1 と同等に大きくするとともに、4 段スタンドを用い、縮径率の配分が漸減型となる条件とした。いずれの条件においても、ロール寸法  $R_i$  の値は後段スタンドほど大きくし、最終スタンドのロールの辺部は直線とした。また、スタンド間張力は、いずれの条件においても 0 とした。

解析に用いたモデルの要素数を Table 2 に示す。変形の対称性を考慮し、断面 1/4 の領域を解析領域とした。管周方向の要素分割は、より大きい変形が予想される角部の角部付近で細くなるようにした。入側の鋼管断面が円形である No. 1 スタンドでは、スタンド入側における変形が大きくなるため、No. 2 以降のスタンドより長手方向の要素数を大きくした。

2.4 解析結果

分割された要素の変形状況を示す一例として、Case 1 の No. 1 スタンドの計算結果を Fig. 5 に示す。図中、ロールと接触している節点を黒点で示した。ロールと材料が接触する箇所が、スタンドの入側から出側に向かうにつれて辺部中央から角部近傍に移動している。角部には一部ロールと接触しない箇所があり、孔型に完全には充満していないことがわかる。

Case 1 の各スタンド出側における 1/4 断面形状を Fig. 6 に示す。No. 1 スタンドおよび No. 2 スタンド出側において、辺部は外面側に凸形状を呈しその曲率は No. 2 スタンド出側のほうが小さくなる。一方 No. 3 スタンド出側における辺部は凹み形状を呈している。角部に関しても、No. 1 スタンドから No. 3 スタンドに進むにつれ、より急峻な形状に変化している。

Case 1 の各スタンド出側における、素管に対する肉厚ひずみの管周方向分布を Fig. 7 に示す。尚、Fig. 7 の横軸は、角部頂点から外表面に沿った各位置までの距離を、隣接した角部頂点間の距離で除したものであり、0 が No. 1 および No. 3 スタンドのロール端部、1 が No. 2 スタンドのロール端部であり、それぞれの近傍が角部となる。また、0.5 が辺部中央である。辺部の肉厚ひずみは、その中央におい

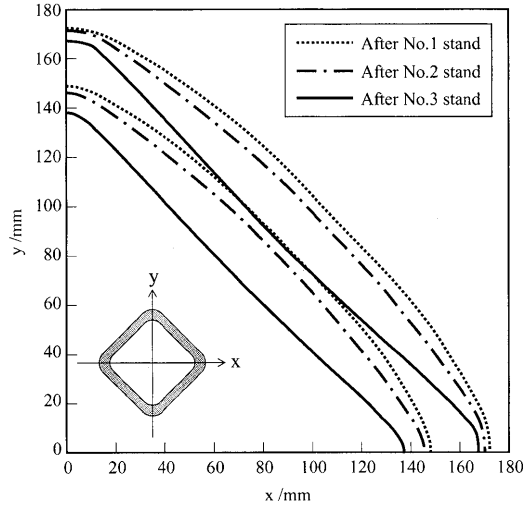


Fig. 6. Calculated cross-sectional shapes of the square tube between each stand under the condition of Case 1.

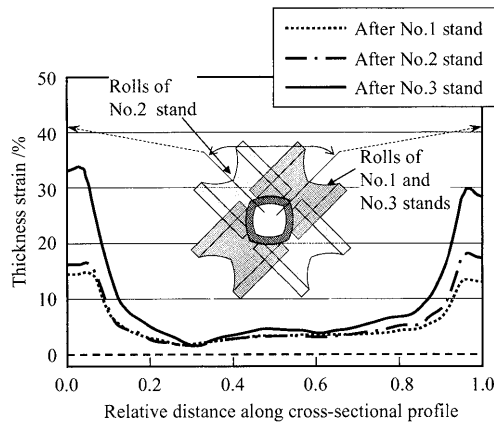


Fig. 7. Distribution of thickness strain in the circumferential direction of the square tube calculated under the condition of Case 1.

てNo. 1スタンドで約5%であり、以降No. 2, No. 3スタンドにおいて大きく変化していない。これに対し角部における肉厚ひずみは、No. 1スタンドで既に15%から18%と大きく、さらに成形が進むにつれ増大し、No. 3スタンド出側では最大34%にも達する。辺部をロールで成形する4ロール式スタンドを用いた冷間成形の場合<sup>9)</sup>と同様、角部をロール成形する2ロールスタンドの本モデルの場合も、後段スタンドほど辺部に比べて角部にひずみが集中することがわかった。

### 3. 角形鋼管の熱間ロール成形実験

#### 3.1 実験方法

解析と比較するため、実際の2ロール式熱間サイジングミルを用いた成形実験を行った。用いたサイジングミルは8スタンドから成る。本実験において、No. 1からNo. 4スタンドでは素管の断面形状が円形のままその外径を縮小

Table 3. Forming conditions in the experiment.

Outside diameter of mother pipe /mm		360.0
Outside diameter of roll grooves /mm	No.1 stand	358.9
	No.2 stand	355.5
	No.3 stand	352.1
	No.4 stand	348.8

Table 4. Components of the material formed in the experiment.

unit: mass %									
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Al	V	
0.16	0.25	1.35	≤0.020	≤0.005	0.2	0.2	0.01	0.0	

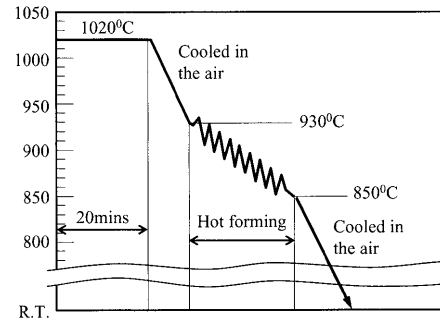


Fig. 8. Temperature of the material in the experiment.

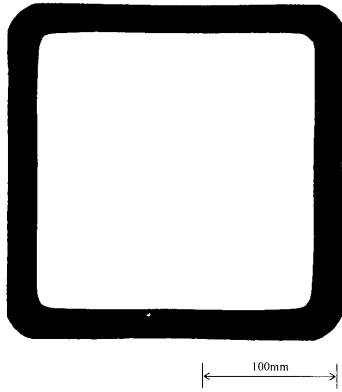
し、続くNo. 5からNo. 7スタンドにおいて鋼管を角形に成形した。

素管およびサイジングミルNo. 1からNo. 4スタンドのロール孔型の径をTable 3に示す。No. 1からNo. 4スタンドでは、外径を4%程度縮小した。また、No. 5からNo. 7スタンドでは、Table 1のCase 1に示す孔型ロールを用いて、角形に成形した。ロール回転速度は、各スタンドともに、それぞれの孔型内における周速度の平均を1.4 m/sとし、各スタンド間における張力がほぼ0となるように設定した。

使用したSTK490相当の材料の成分をTable 4に、実験中の材料の温度履歴をFig. 8に示す。炭素含有量0.16%の素材を用い、これを1020°Cで20分間保持した後、仕上げ温度850°Cで成形し空冷した。

#### 3.2 実験結果

実験後の角形鋼管の断面形状をFig. 9に示す。本図は成形した角形鋼管から長手方向10 mm程度の試料を切り出し、感光紙に試料を置いて上から光を照射させることにより、断面形状の投影を得たものである。この投影形状から、角部のS値、曲率半径および辺部の平坦度を測定した。角部の大きさを示すS値は肉厚の1.5倍、角部曲率半径は肉厚の0.8倍であり、いずれも2.1節に示した寸法目標より小さいが、平坦度は1.5%であり、上記寸法目標より大きかった。従来の冷間ロール成形に従ったCase 1の条件で行った本実験では、急峻な角部形状が得られたが平坦な辺部を得ることはできず、双方を両立できていない。



Corner R : 1.50 x wall thickness  
 S : 0.80 x wall thickness  
 Side flatness : 1.2%

Fig. 9. Cross sectional shape of the experimentally formed square tube.

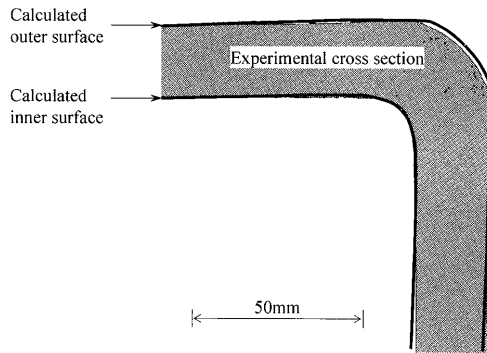


Fig. 10. Comparison of cross sectional shape at corner between calculated and experimental results.

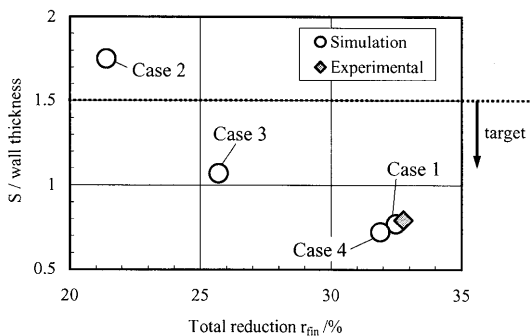


Fig. 11. Effect of the total reduction on the S of the square cross-sectional tubes.

### 3.3 解析と実験結果の対応

角部の断面形状について、解析結果と実験結果を比較して Fig.10 に示す。解析結果についても成形後の断面形状を描画し、実験結果同様、角部の S 値、曲率半径および辺部の平坦度を測定した。

角形鋼管の S 値に及ぼす総縮径率の影響について、解析結果と実験結果を併せて Fig.11 に示す。Case 1 から Case 4 の各スタンドの縮径率配分によらず、総縮径率が大きいほど S 値が小さい。角部曲率半径についても、同様に総縮径

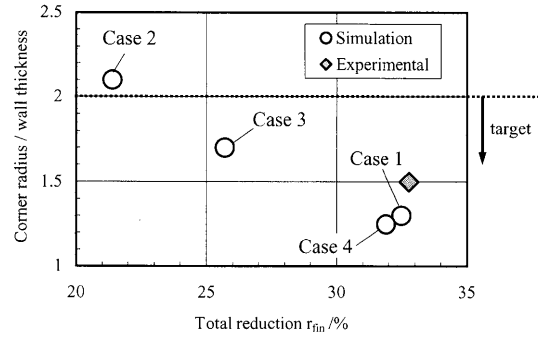


Fig. 12. Effect of the total reduction on the corner radius of the square cross-sectional tubes.

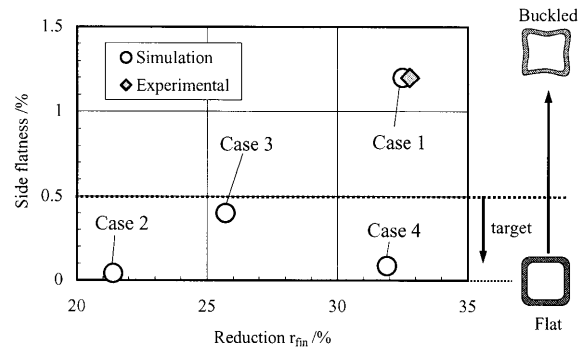


Fig. 13. Effect of the total reduction on the flatness of the sides of the square cross-sectional tubes.

率の影響を Fig.12 に示す。曲率半径も S 値同様、総縮径率の増大に伴い小さくなる傾向を示している。従って、角部形状は、総縮径率の影響を大きく受けることがわかる。一方、スタンドごとの縮径率配分の影響は、本研究の範囲では認められなかった。

辺部平坦度に及ぼす総縮径率の影響を Fig.13 に示す。なお、Case 1 から Case 4 までのいずれの条件においても、辺部形状は凹形を呈しており、平坦度が大きいことは辺部がより著しい凹形状を呈していることを示している。従来の冷間ロール成形条件に類似する3スタンド成形の Case 1 から Case 3 では、総縮径率が大きいほど平坦度が大きい。一方、素管外径を大きくして4スタンド成形とした Case 4 だけは、総縮径率が31.9%と大きいにもかかわらず、平坦度は0.09%と小さくて、辺部形状は総縮径率だけでは整理できていない。

実験結果を、同一の条件で行った Case 1 の解析結果と比較すると、角部の曲率半径については解析結果が実験結果より小さくなったが、角部の S 値および辺部の平坦度はいずれも解析結果と実験結果がほぼ一致している。

## 4. 考察

### 4.1 角部形状に及ぼす縮径率の影響

Case 1 と Case 4 はいずれも縮径率が大きく、角部の形状の差は小さかった。そこで、角部の形状に及ぼす縮径率の

影響について考察するため、縮径率の異なる Case 1 および Case 2 の No. 1 スタンド成形後における材料の管周方向の相当ひずみ分布を Fig.14 に示す。本図の横軸は、Fig. 7 同様、角部頂点から外表面に沿った各位置までの距離を、隣接した角部頂点間の距離で除したものであり、0 がロール端部側、1 がロール底部側の角部頂点である。

縮径率が 16% と大きい Case 1 の No. 1 スタンドにおいて、破線で示した内面側の相当ひずみは辺部中央で 12% 程度であるが、角部に近くなるにつれその値は急激に上昇し、角部頂点では 35% に達する。一方、実線で示した外面側の相当ひずみは、辺部中央では 11% 程度で内面側との差が小さく、その値は角部に近づくにつれ上昇するものの途中から急激に下降し、頂点での値は 10% 未満である。

これに対し、縮径率が 10% と小さい Case 2 の場合、点線で示した内面側の相当ひずみは辺の全長にわたって大きい変化がなく、その値は 5% ないし 10% の範囲にある。一点鎖線で示した外面側の相当ひずみは、辺部中央では約 10% であるが、角部近傍では 2% 程度と小さい。

Case 1, Case 2 とともに、角部における内外面の相当ひずみの差が辺部より大きく、角部の形成に伴う曲げ変形が進行している。曲げ変形は Case 1 のほうが Case 2 より大きく、かつ集中している。縮径率の小さい Case 2 では材料が充分ロール孔型に充填せず、曲げ変形が比較的広い範囲に分散した結果、角部が急峻な形状にならなかった。これに対して縮径率の大きい Case 1 では材料がロール孔型により充填し、大きい変形が角部の狭い範囲に集中したため、急峻な角部が形成されたものと考えられる。

また、辺部中央において、Case 1 では内面側と外面側の相当ひずみがほぼ等しかったのに対し、Case 2 では外面側の相当ひずみが内面側より大きかった。これは Case 2 ではロールの孔型辺部の曲率半径  $R_1$  が 509 mm と大きく、材料が管周方向に曲げ戻されたためである。一方 Case 1 では  $R_1$

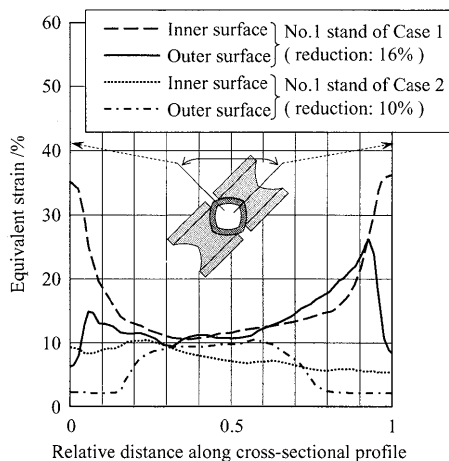


Fig. 14. Distribution of equivalent strain in the outer and the inner surfaces of the material formed in the No. 1 stand, as results of the calculations under the conditions of Case 1 and Case 2.

が 375 mm と比較的小さく、曲げ戻しの影響は顕著には見られなかった。

#### 4.2 辺部形状に及ぼす縮径率配分の影響

総縮径率が比較的類似する Case 1 と Case 4 について、各スタンドにおける辺部の曲率を Fig.15 に示す。本図縦軸の曲率の符号は、辺部中央が外面に張り出す方向を正とした。平坦度の大きかった Case 1 は最終スタンドである No. 3 スタンドにおいて、曲率が正から負に転じている。一方平坦度が良好であった Case 4 の場合は、No. 3 スタンドまでに曲率が小さくなっており、最終 No. 4 スタンドではその変化が小さい。

Case 1 および Case 4 による成形中の材料の変形形状およびロールとの接触状況について、有限要素法解析の結果を Fig.16 に示す。本図より、Case 1 および Case 4 とともに、特に No. 1 スタンドにおいて縮径率が大きいため角部近傍におけるロール孔型との接触面積は比較的大きく、スタンドを経るごとに角部が急峻に成形されることがわかる。また、最終スタンドの圧延について、双方の条件におけるロール

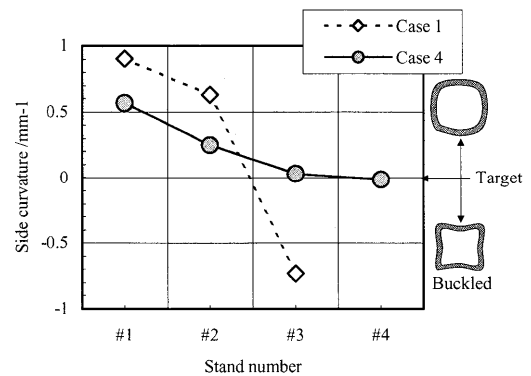


Fig. 15. Effect of the distribution of the reduction on the side flatness of the square cross-sectional tubes.

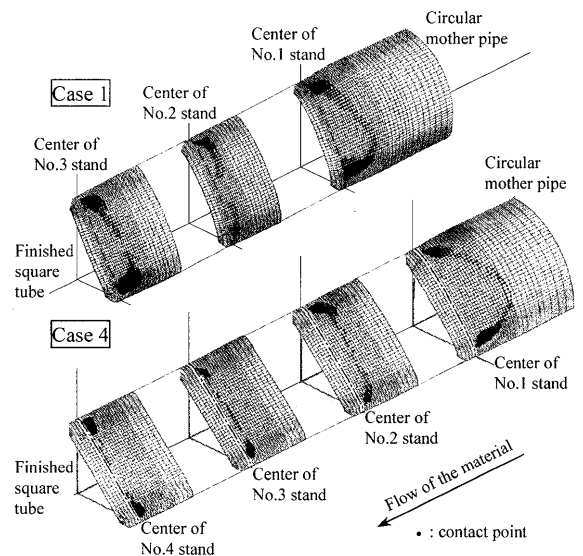


Fig. 16. Shapes of materials during forming at each stand and contact with rolls, as results of the calculations under the conditions of Case 1 and Case 4.

と材料の接触状況を比較すると、Case 1の最終No. 3スタンドの圧延では、ロール中央位置において被圧延材の辺部中央部とロールが接触していないが、Case 4では、最終No. 4スタンドのロール中央位置において被圧延材の周方向ほぼ全域でロールと接触している。

最終スタンドのロール孔型はその辺部がほぼ完全に平坦である。Case 1ではこのスタンドで11.6%と大きい縮径を施したため、被圧延材の辺部が内面側に座屈し、平坦度を悪化させたと考えられる。これに対してCase 4では、最終スタンドに至るまでに辺部の曲率を十分小さくするとともに、最終スタンドの縮径率を1%と小さくしたため、座屈が発生せず平坦な辺部が保たれたものと考えられる。

以上より、急峻な角部と平坦な辺部を両立するためには、大きい縮径を施して角部を作り込みつつ辺部は座屈させない程度に曲率を極力小さくし、最終スタンドで辺部平坦化に最適な縮径を施すと良いことがわかった。

## 5. 結言

熱間サイジングミルを用いて小断面極厚肉角形鋼管を製造するにおいて、剛塑性有限要素法を用いた熱間ロール成形変形解析モデルを作成し、角部および辺部の形状に及ぼす成形条件の影響を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 本モデルによる解析結果と実験結果はほぼ一致する。
- (2) 角部の大きさを表わす $S$ 値および曲率半径は、総

縮径率が大きいほど小さくなる。

(3) 辺部の平坦度は、総縮径率が大きいほど小さくなる傾向がある。

(4) 最終スタンドの縮径率を小さくすると、変部が内側に座屈変形して平坦度が大きくなる現象を抑制できる。

(5) 急峻な角部と平坦な辺部を両立するためには、大きい縮径を施して角部を作り込みつつ辺部は座屈しない程度に曲率を小さくし、最終スタンドで辺部平坦化に最適な縮径を施すと良い。

なお、本研究の成果を活用して辺長150 mm以上250 mm以下、肉厚15 mm以上35 mm以下の極厚肉継目無角形鋼管が開発され、著名な高級衣料品店、高度技術研究施設、商店街のアーケードなどの柱に適用されている。

## 文 献

- 1) 日経アーキテクチュア, 日経BP社, 東京, (2004.2.23), 10.
- 2) 日経アーキテクチュア, 日経BP社, 東京, (2003.12.5), 10.
- 3) 鉄鋼新聞, 鉄鋼新聞社, 東京, (2003.10.24), 4.
- 4) T.Nagahama, T.Toyooka, K.Yamamoto, M.Kita, Y.Onoda and T.Nagamachi: Proc. of the 1999 Japanese Spring Conf. for the Tec. of Plast, 410, (1999), 181.
- 5) Y.Onoda, T.Nagamachi, T.Toyooka, T.Nagahama and T.Nagamachi: Proc. of The 1999 Japanese Spring Conf. for the Tec. of Plast, 104, (1999), 7.
- 6) Y.Onoda and T.Nagamachi: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **30** (1989), 1441.
- 7) K.Mori and K.Osakada: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 2337.
- 8) Y.Misaka and T.Yoshimoto: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **8** (1967), 414.
- 9) M.Itadani and T.Toyooka: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 1025.