鋼管の冷間減径加工時の余剰変形とその抑制技術

奥井 達也* 黒田 浩一* 秋山 雅義*

Suppression of Excess Deformation on Top Portion of Steel Tube after Cold-Reducing through Die

Tatsuya OKUI, Kouichi KURODA and Masayoshi AKIYAMA

(Received on June 3, 2005)

Deformation of a steel tube was investigated when its outside diameter was cold-reduced through a die. Numerical analyses by axi-symmetric elastic-plastic finite element analysis (FEA) were carried out. When a conventional die with a single die angle was used, the outside diameter of the top portion of the tube became slightly larger, and the wall thickness became thinner than the middle portion. The influences of the wall thickness of the tube and the die angle were investigated. To check the validity of the result, an experiment was carried out. Then, numerical investigation by FEA was carried out to determine the optimum geometry of a die that would decrease the degree suppress this phenomenon followed by an experiment to check validity. The optimum die geometry happened to have the same geometry as that proposed by the authors for suppressing the undershooting phenomenon and the bending phenomenon. It is able to decrease the different level of deformation between the top and the main portion of the tube.

Key words: cold-extrusion, tube, FEA, S45C, die, mechanism

1. 緒 言

近年、自動車の軽量化要求への対応の一つとして、部品の中空化が推進されている。これらの部品は管軸方向に径変動を有するものがほとんどである。そのような部品を製造するには管をダイスに押込んで径偏差を付与する押込み加工が有効である。これまで棒鋼や管の引抜き加工に関する研究は多く報告されているが、押出し加工、特に管に関する研究はほとんどなされてきた実績が見当たらない。

管の押出し加工では、管を加工した後の外径がダイス出側径よりも小さく変形するアンダーシュート変形が起こる場合がある。アンダーシュート変形が起こると、押抜き後の管の曲がりが大きくなり、寸法精度が悪化する。今回対象としている径偏差を有する管は、実部品としては回転部品に使用されることが多いが、寸法精度が悪いと、振れまわりが起こる問題から、押出し加工時の寸法精度確保の要求は高い。

本報告では管をダイスに押込んだ場合の管軸方向の寸法変動に関して検討を行った。具体的には、管先端の変形に着目して、定常部との比較を行うこととした。その結果、従来の1段テーパダイスにて押出し加工を行う場合、軸対称FEAで先端の内外径は定常部よりもやや大きくなることを確認した。また実験によりこの現象を調査した結果、同様の変形が現れることを確認した。さらにこれら軸方向の径変動を抑制する手段として、ダイスの形状の検討を行った。

それによると、ダイス後半において低加工度で微小角のテーパ部を有する2段テーパダイスを適用することで上記の管端部と定常部の径差が抑制されることを確認した。これらの検討結果について以下に詳細に述べる。

2. 先端非定常部の変形

まず最初に、管の押出し加工による先端非定常部の変形を軸対称弾塑性FEAを用いて解析した。解析には英国Wales大学で開発されたELFEN¹⁾を使用した。ダイスと素管の条件をTable 1に、Table 1中に記載した記号の定義をFig. 1にそれぞれ示す。また、図中a~dは計算結果の観察点である。摩擦についてはクーロン摩擦を想定した。摩擦係数は従来から著者等が棒鋼の冷間引抜き加工の研究にて引抜き荷重測定とFEAにより同定して来た値0.05^{2),3)}として計算した。解析に用いた材料の応力-ひずみ線図をFig. 2に示す。これは後に説明する実験で用いた材料について、実際に引張試験を行って得られた値である。引張速度は0.05mm/sにて実施した。ヤング率とポアソン比についてはFig. 2中に示す。

Table 1 Conditions for single taper die and mother tube

Die geometry	Die angle θ /°	15, 35
	Inside diameter D_d /mm	31.9
	Bearing length B /mm	10.5
Mother tube	Diameter D_0 /mm	38.1
	Wall thickness t_0 /mm	5.7
	Length L_0 /mm	300

*住友金属工業(株)総合技術研究所 〒660-0891尼崎市扶桑町1-8

今回実施した加工は、極めて遅い速度で行っているの、計算には必ず速度依存性を考慮していない。

Fig. 1 Notations of dimensions of tube and die

Fig. 2 Stress-strain diagram of parent material

Fig. 3にダイスのテーパ角 θ が 15° の条件での押し出し後の管先端部の形状を示す。本結果を見ると、最先端部がやや反り上がるように、すなわち、先端部の径が外側に膨らんでいるような変形をしていることがわかる。管先端部分の変形を詳細に見るため、Fig. 4にテーパ角 θ が 15° および 35° のそれぞれで、横軸に管先端からの距離を取り、管の外表面および内面の半径寸法についての計算結果を示す。最管端から軸方向に約10mm範囲で定常部に比べて径が大きくなっている。また最先端部の肉厚は定常部に比べてやや薄肉になっている。このように、押し出し後の管は軸方向に一定とはならず、先端の非定常部では定常部と寸法に差が

Fig. 3 Deformation in top portion of tube ($\theta = 15^\circ$)

Fig. 4 Radius and wall thickness of worked tube

生じることが確認された。

Fig. 5に管の先端位置および軸方向中央位置についてのダイステーパー部から加工終了まで追跡した結果を示す。観察点は、Fig. 1中にa~dで示した点である。縦軸は管の半径である。管先端位置aおよびbでの変形は、まずダイステーパー部に沿って徐々に縮径していく。テーパ部終了位置ではダイスよりも径が若干小さく変形する、いわゆるアンダーシュート変形を起こす。先端部では一旦アンダーシュート変形を起こすが、ベアリング部途中で径が大きくなるよう変形する。一方、軸方向中央位置cおよびdについては、テーパ部を抜けた後にアンダーシュート変形を起こしたままの径である。この差が先端部と定常部との径差として現れ、先端位置では定常部に比べて径が大きく仕上がるのである。内面についても外面と同傾向は同じである。この図で外半径と内半径との差が肉厚ということになるが、この値は先端部の方が小さい、つまり薄肉になっていることがわかる。これは、先端部では軸方向に拘束が無く、軸方向に伸ばされやすいことによるものである。

Fig. 5 Deformation of tube traced in axial direction

この先端部の非定常変形について更に詳細に調査するため、先端部の変形形状と応力分布を確認する。Fig. 6に D_d が31.9mm、テーパ角度 θ が 35° のダイスへの押し込みの例

で、変形形状と軸方向応力 σ_z の分布を示す。軸方向応力は、最初に管外面がダイスに当たる部分では、管の内側方向に曲げが働き、次に材料がダイスベアリング部に到達する時点では、材料がテーパ部に沿って加工されている後部からの拘束を受けるために、外面がベアリング部に触れることなく、アンダーシュート変形を起こす。(a)を見ると、先端部がダイステーパー部終了からベアリング部に移行するときに曲げ戻しがかからず、ダイステーパーの角度に沿うようにアンダーシュート変形している状態が伺える。(b)では管の外側方向への曲げ戻しが発生し、最先端部が外側に広げられるように変形する。(c)を見ると、先端部の径が大きくなっている状態が伺える。つまり、最端部エッジの変形は、それに続く本体部のアンダーシュートの変形とは独立した変形をする。

以上の結果から、テーパダイスで不可避免的に発生するアンダーシュート変形のため、定常部はダイス径よりも小さくなるように変形するが、先端部については外面側に広げられるような変形をすることと、管端では拘束がないために軸方向に伸ばされて薄肉になることが影響して定常部とは変形が異なることになるということが判明した。つまり、従来型のテーパダイスによる押出し法では、ダイス寸法通りに管が成形されないだけでなく、先端径が大きく変形するため、軸方向に一定径、および一定肉厚を出すことができないという問題があるといえる。

Fig. 6 Distribution of axial stress σ_z /MPa ($\theta=35^\circ$)

3. 実験

上記計算の検証を行うため、ダイス押出し実験を行った。

素材寸法の条件をTable 2に示す。先端非定常部と定常部との変形差を評価するため、 δ を下記(1)式にて定義する。

$$\delta = R_{top} - R_m \quad (1)$$

ここで、 R_m : 先端から50mm位置での押出し後の管半径、 R_{top} : 最先端位置での押出し後管半径である。素材はS45Cを用いた。押出し加工の際に偏荷重が極力かからないようにするため機械加工により素材の端面を軸方向に垂直となる様にした。また、素材内外面については、機械加工にて金属新生面を出した。

Table 2 Geometrical conditions of die and mother tube

Die geometry	Die angle θ / $^\circ$	15
	Inside diameter D_d /mm	31.9
	Bearing length B /mm	10.5
Mother tube	Diameter D_0 /mm	38.1
	Wall thickness t_0 /mm	1.905~9.525
	Length L_0 /mm	300

押出し実験は、Fig. 7のような堅型プレスにて実施した。試験機上部ラムの作用面は、管軸方向に垂直となる様に設定しており、試験機側の問題に起因する偏荷重が試験片に極力かからない形としている。ダイスは下クロスヘッドに固定しており、そのダイス下部には、押出された管の外径より十分に大きな孔が空けられており、加工後の管が設備の壁に接触しないようになっている。ダイス軸芯の方向は、ラムの移動方向、および試験片の軸芯の方向と一致させている。

今回の実験の押出し速度については、極力遅い速度とした。速度が高速になると異なる変形になる可能性があるが、まずは肉眼にて観察が可能な低速($=2.5\text{mm/s}$)での実験を行って、試験片の変形特性を確認することに重点をおくこととした。実験に使用した潤滑剤は鋼管の冷間引抜き加工で一般的に使用されている鉱物油を用いた。これを各ピース実験開始前に、ダイス表面と試験片外面に塗布した。

プレスの動作は、上部ラムにて所定ストロークだけ下方に圧下させたところで停止、その後上部ラムを上昇させて元の位置に戻した。試験片上面に十分な空間を作った後、加工後の管をダイスと一体の形で試験機から外して、材料をダイスから抜き取った。

抜き取った材料は、材料の先端60mm長さ分を縦方向に半分に切断し、先端から軸方向に50mm分について形状測定機により外面および内面について軸方向に測定した。

$t_0=5.7\text{mm}$ ($t_0/D_0=15\%$) について、実験結果およびFEA計算結果をFig. 8に示す。内面、外面とも δ の値は正であり、先端部の径が定常部に比べて大きい。前記数値計算結果で示したように δ は内面の方が外面よりも大きい。本実験結果はFEA計算結果と定量的によく合っている。

Fig. 9には素管の肉厚と外径の比 t_0/D_0 を変更して実験を行った結果を示す。外面について見ると、 δ は t_0/D_0 による影響はほとんど無い。これに対して内面は t_0/D_0 が15%を超えると、 δ が大きくなっている。上記で述べたように、先端部では軸方向に伸ばされて定常部よりも薄肉になるが、その傾向が t_0/D_0 が大きいほど強くなるためである。すなわち、

素管肉厚が厚肉になるほど定常部との変形差が大きくなるということである。

Fig. 7 View of equipment for cold press

Fig. 8 Comparison of calculated and measured δ ($t_0/D_0=15\%$)

Fig. 9 Relationship between t_0/D_0 and δ

4. 工具設計について

押出しによる加工で上記のような軸方向径変動が生じると、先端の非定常変形部は、最終的に切断されることとなり、歩留が悪くなる。そこで、軸方向の径変動を抑制する方法として工具設計の面から対策はないか検討を行った。

軸方向の径変動低減には、アンダーシュート変形を抑制し、管外面がダイスベアリング部に接触することが必要である。このためにダイステーパー部とベアリング部との間に、極めて小さい減径率を有する緩い傾きを有する第二ゾーン

を採用することで、これを実現させることを検討した。

2段テーパダイスについて従来の1段テーパダイスと共に Fig. 10に示す。2段テーパダイスでは、ダイスのテーパ部とベアリング部との間に、加工度が小さく、傾き角が緩い部分（第二ゾーン）を有しているというのが特徴である。この部分の形状についてはテーパ形状に限ったものではなく、円弧等でも構わない。今回はテーパ形状として検討を行った。解析に使用した2段テーパダイス、および素管条件を Table 3に示す。

Fig. 10 Comparison of geometry of old and new dies

Table 3 Geometrical conditions for double taper die and mother tube

Die geometry	Die angle θ_1 /°	15
	Die angle θ_2 /°	2
	Inside diameter $D_{d'}$ /mm	32.55
	Inside diameter D_d /mm	31.90
	No2 zone length A /mm	18.6
	Bearing length B /mm	10.5
Mother tube	Diameter D_0 /mm	38.1
	Wall thickness t_0 /mm	5.7
	Length L_0 /mm	300

Fig. 11に2段テーパダイスでの管先端部分の内外半径についてのFEAによる計算結果を示す。前記で説明した段テーパダイスでは、外面、内面とも先端部と定常部との寸法に差があったのに対し、2段テーパダイスでは内面側で若干定常部よりも先端部の方が内径が大きくなって

Fig. 11 Radius and wall thickness by new die

はいるが、外面側についてはほとんど差が無いという結果である。肉厚については、1段テーパダイスと同様に先端部が定常部に比べて薄肉になっている。

2段テーパダイスについて、内外面の変形を追跡した結果をFig. 12に示す。外面aおよびcは第一テーパゾーン終了後、僅かにアンダーシュート変形するが、第二テーパゾーンに接触し、最終的にはベアリング径通りに仕上がっている。この変形は先端位置aおよび定常部位置cともほとんど同じようになっている。内面bおよびdについては先端部bの内径が大きいが、これは先にも述べたように、先端部では軸方向に拘束が無く、伸ばされやすいためである。つまり、2段テーパダイスでは先端部が定常部に比べて薄肉に仕上がることは避けられないが、外径を軸方向一定に仕上げることは可能であるといえる。

Fig. 13に2段テーパダイスによる押し出し過程での変形状態と軸方向応力分布について示す。(a)では先端が僅か

Fig. 12 Deformation of tube traced in axial direction

Fig. 13 Distribution of axial stress σ_z /MPa (New die)

にアンダーシュート変形するが、(b)までいくと第二テーパゾーンに管外面が接触する。(c)を見ると、管外面はベアリング部に沿ってアンダーシュートすること無く、ダイス径通りに変形することがわかる。このため外面については先端部と定常部とで径に差がつかない。

2段テーパダイスの効果を実験により確認した。1段テーパダイスの条件はTable 1のテーパ角 $\theta = 15^\circ$ の条件、2段テーパダイスの条件と素管の条件は、Table 3である。Fig. 14に結果を示す。 δ の値は、外面、内面とも2段テーパダイスの方が小さくなっており、先端部の非定常変形が抑制されていることがわかる。但し、上述のように、先端部が軸方向に伸ばされて薄肉となる変形については避けられないため、内面の δ の改善は大きくは見込めない。とは言うものの、2段テーパダイスでは先端部の非定常変形がある程度抑制され、有効な工具プロフィールであることが示せた。

Fig. 14 Comparison of deformation on tubes worked by single and double taper dies

5. 結論

テーパダイスを用いた管の押し出し加工に伴う、管先端部の非定常変形についてFEAを用いた定量的予測を行い、その発生メカニズムを考察した上で、実験的にその妥当性を検証した。従来の1段テーパダイスでは、先端部は定常部に比べて径が大きくなるように変形する。特に t_0/D_0 が15%を超えると先端部の軸方向伸びが顕著となるので定常部と差が大きくなることを確認した。2段テーパダイスを用いると上記問題は抑制されることをFEAと実験により明らかにした。

参考文献

- 1) Rockfield Software limited: Technium, King's Road, Prince of Wales Dock, Swansea, SA1 8PH, UK. www.rockfield.co.uk
- 2) T. Kuboki, M. Akiyama, Y. Neishi, K. Kuroda: Proc. Instn. Mech. Engrs., **214**(2000), 1389.
- 3) T. Kuboki, M. Akiyama, Y. Neishi, K. Kuroda: Ironmaking and Steelmaking, **28-1**(2001), 65.