論文

ダイス形状が引抜き棒材表層部の残留応力に与える影響

梶野 智史* 畠山 知浩** 田村 容子***

大澤 優樹** 宍戸 俊介** 佐々木 渉**

濱本 義郎*** 美崎 悟*** 浅川 基男****

Effect of Die Geometry on Residual Stress at Surface of Drawn Bar

Satoshi KAJINO*, Tomohiro HATAKEYAMA**, Youko TAMURA***,

Yuki OHSAWA**, Syunsuke SHISHIDO**, Wataru SASAKI**,

Yoshiro HAMAMOTO***, Satoru MISAKI*** and Motoo ASAKAWA****

(Received on January 23, 2013)

Recently, bars for office automation and automobile industry have been required to achieve high fatigue strength. Generally, tensile residual stress is generated at the surface layer of a drawn bar after the drawing process. The tensile residual stress at the surface layer reduces fatigue strength. Therefore, decreasing in tensile residual stress is required. In this study, the effects of approach geometry and bearing length on the residual stress were investigated. Next, the residual stress of the bar drawn using a new die, which had a protrusion in the bearing area, was investigated. Consequently, the effective approach geometry for decreasing tensile residual stress was determined. Tensile residual stress decreased with increasing bearing length. Additionally, it was clarified that the compressive residual stress is generated during drawing with a protrusion die.

Key words: drawing, protrusion die, residual stress.

1. 緒言

精密 O.A. 機器や自動車のシャフトなどに用いられる棒線材は、主に引抜き加工により生産されている。引抜き加工では、加工中の変形が不均一であることから、表層部に引張、中心部に圧縮の残留応力が発生することが知られている^{1),2)}。残留応力は、2 次加工や熱処理の際に曲がり発生の原因となるほか、表層部の引張残留応力は疲労強度を低減させると考えられている³⁾。そのため、特に表層部の引張残留応力を低減することが求められている。

過去の研究において、減面率やダイス半角が表層部引張残留応力に与える影響や、極低減面率引抜であるスキンプラス伸線における引張残留応力の低減などが報告されている⁴⁾。そこで、本研究では、まだ詳細に検討されていないアプローチ形状や、ベアリング長さが残留応力に与える影響について検討した。加えて、スキンプラス効果を応用し、ベアリング部に微小段付き部を設けた特殊なダイスによる

表層部引張残留応力を低減させる引抜き加工について研究した結果を報告する。

2. ダイス形状

本研究で用いたダイスのアプローチ形状を Fig. 1 に示す。用意したダイスはアプローチの断面が直線である角度型と、曲線である円弧型、およびアプローチ前半は直線で、ベアリング部との境界を円弧にした組合わせ型の 3 種類である。

Fig. 1 Die geometry

角度型のダイスは主に鋼材などに用いられる一般的な形状のダイスである。円弧型は、アルミなど延性が高い材料に用いられることが多い形状である。角度型ダイスではダイス半角 α を 4° から 13° の間で、円弧型ダイスではダイス半径 R を 8 mm から 50 mm の間で変化させた。また、角度型ダイスにおいて、ベアリング長さを引抜き後の線径(ダイス径)の 0, 0.5, 1 倍と変化させた。0.5 倍の長さが一般

* 独立行政法人 産業技術総合研究所 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1
National Institute of AIST, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan.

** 早稲田大学大学院 理工学研究科 〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1
Graduate student, Fundamental Science and Engineering, Waseda University,
3-4-1 Ohkubo, Shinjuku 169-8555, Japan.

*** 早稲田大学 基幹理工学部 同上
Undergraduate student, Ibid.

**** 早稲田大学 基幹理工学部 同上
Ibid.

的な長さである。組合わせダイスは、角度型と円弧型の結果で、最も残留応力が低減した条件を組合わせた形状（ダイス半角 4° ，ダイス半径 50 mm）とした。以後、微小段付き部がないダイスをノーマルダイスと呼ぶことにする。

つづいて、本研究で用いた微小段付きダイスを Fig. 2 に示す。微小段付きダイスはアプローチ部から段付き部までのフロントダイスと段付き部からバックリリースまでのバックダイスの 2 枚で構成されている⁵⁾。2 枚のダイスをダイスホルダーに設置して使用する。アプローチ形状は角度型であり、ダイス半角は 7° である。ベアリング長さは 5 mm とした。微小段付きは、ベアリング部において、アプローチ部との境界から 2 mm の位置に設けられている。段付き高さ Δh と段付き角度 β は可変とした。バックダイスを交換することによって、段付き高さや段付き角度を変化させる構造となっている。セパレートタイプのダイスでは、段付き形状を高精度で製作できる利点がある。

Fig. 2 Geometry of protrusion die

3. 実験方法

3.1 引抜き加工

供試材には低炭素鋼 S20C を用いた。化学組成を Table 1 に示す。線径を 14 mm とし、焼鈍を施した後、先付けのため、旋盤を用いて Fig. 3 に示す形状に仕上げた。

供試材の表面性状によって棒材の潤滑剤の保持状態が異なることを避けるため、 $\phi 14$ mm から $\phi 11$ mm までノーマルダイスを用いて 15% 付近の減面率で数パス引抜き、表面性状を整えた棒材を用意した。その後、 $\phi 11$ mm から $\phi 10$ mm への引抜きにおいて、アプローチ形状やベアリング長を変化させたノーマルダイスおよび段付きダイスで引抜き、残留応力を測定する。

Table 1 Chemical compositions of low carbon steel mass %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.19	0.18	0.35	0.17	0.18	0.17	0.06	0.13

Fig. 3 Dimensions of specimen

引抜き加工には伸線速度 0.1 m/s のドローベンチを用いた。動粘度が 40°C で 840 cST の潤滑剤を用いて、引抜き加工前に線材の表面に塗布した。伸線後の棒材から、先付け部近辺と後端部を除いて、引抜き加工が安定している箇所からスリット法、および、Hyne-Bauer 法用の試験片を切り出した。スリット法の試験片は長さ 300 mm、Hyne-Bauer 法の試験片は長さ 100 mm とした。

除く範囲は、先付け部から 100 mm、後端部から 100 mm とした。それぞれ線径の 10 倍であり、サン・ブナンの定理より非定常変形部分の影響を受けていないと考えた。

段付きダイスによる引抜きでは、段付き高さや段付き角度を変化させた。段付き高さを 20 ~ 60 μm の範囲で変化させる場合は、段付き角度を 15° で一定とした。20 μm は精度が保証できる最小の段付き高さであり、60 μm は棒材の表面が焼付く限界の高さである。段付き角度を $7^\circ \sim 20^\circ$ で変化させる時は、段付き高さを 40 μm で一定とした。段付き角度は一般的なダイス半角の範囲を参照している。

3.2 残留応力の測定方法

(1) スリット法 Fig. 4 に示すように棒材の中心に切込みを入れると、残留応力が開放されるため、棒材が変形してスリットの幅が変化する。スリット法は、変形後のスリット幅を測定して、式(1)を用いて残留応力 σ_L を計算する方法である⁶⁾。式中の E は弾性係数、 D は棒材の直径、 Δh はスリット幅、 δ は変形後のスリット幅、 l はスリット長さを示す。スリット法による残留応力の測定は、開放した箇所の全残留応力となるため、残留応力の分布を把握することは不可能である。しかし、簡便な方法であり、定性的に残留応力の発生状態を検討する場合には十分な結果と考えられる。スリットの幅が大きいほど、表層に発生した引張残留応力が大きいことを示している。本研究では、弓のこ盤を用いて棒材の中心部に長さ 250 mm の切込みを入れた。

Fig. 4 Schematic figure of slit method

$$\sigma_L = \frac{1}{2} E (D - \Delta h) \frac{\delta}{l^2} \quad (1)$$

(2) Hyne-Bauer 法 棒材の表層部を徐々に除去し、棒材の長さ変化から残留応力を測定する方法が Hyne-Bauer 法である⁶⁾。棒材の長さ変化は、除去した表層部の残留応力が開放されることにより発生するため、式(2)に示す棒材の残った断面積 A 、残留応力 σ_L 、残留応力開放による蓄積ひずみ ϵ の関係式が得られる。その他、式中の E は弾性係数、 $d\epsilon$ は表層除去によって新たに生じるひずみ、 dA は除去した断面積を示す。

本研究では、Fig. 5 に示すように旋盤を用いて、表層を 0.1 mm 程度除去しつつ測定を繰り返した。表層除去後の棒材の直径と長さを、マイクロメータを用いて測定した。また、分布形状が放物線であると仮定して、表層部の残留応力を求めた後、線材断面全面の残留応力を積分した値が 0 となるように中心部の残留応力分布を補間して求めている。

Fig. 5 Schematic figure of Hyne-Bauer method

$$\sigma_L = -E \left(A \frac{d\varepsilon}{dA} + \varepsilon \right) \quad (2)$$

4. 実験結果

4.1 アプローチ形状の影響

(1) スリット法の結果 Fig. 6 に角度型ダイスで引抜いた棒材のスリット法による残留応力測定結果を示す. 結果から明らかなように, ダイス角度を大きくするほど, スリット幅が広くなることが確認できる. したがって, 表層部の引張残留応力が大きくなっていることがわかる. つづいて, Fig. 7 に円弧型ダイスで引抜いた棒材のスリット法の結果を示す. 円弧型ダイスでは, ダイス半径を大きくするほど, スリット幅が狭くなっていることが確認できる. ダイス半径が大きいほど, 表層部の引張残留応力が小さいといえる.

Fig. 6 Experimental results of slit method for bar drawn with angle type die

Fig. 7 Experimental results of slit method for bar drawn with circle type die

また, 角度型と円弧型を比較すると, 全体的に円弧型による引抜き材のスリット幅が狭くなっている. したがって, 円弧型ダイスは角度型ダイスと比較して, 棒材表層部の引張残留応力の発生が少ないダイス形状であると考えられる.

(2) Hyne-Bauer 法の結果 つぎに, Hyne-Bauer 法による残留応力の測定結果を Fig. 8, Fig. 9 に示す. 角度型, 円弧型共に表層部に引張, 中心部に圧縮の残留応力が発生していることが確認できる. しかし, 表層部の残留応力分布に着目すると, ダイス形状で分布の様相が異なる結果となった. 角度型ダイスでは表層に近づくほど, 大きな引張残留応力が発生する分布である. 一方, 円弧型ダイスでは, 表層からある深さで引張残留応力が最大となり, 表面に近づくほど引張残留応力が減少する分布となった. 角度型ダイスと比較すると, 円弧型ダイスの方が, 表層部の引張残留応力が小さいことが確認される. この結果は, スリット法の結果と一致している.

以上のように, 残留応力低減に関しては, 円弧型ダイスの方が効果的であるという結果を得た. ここで, 角度型ダイスと円弧型ダイスの引抜き力を比較する. 測定した引抜き

Fig. 8 Distribution of residual stress of bar drawn with angle type die

Fig. 9 Distribution of residual stress of bar drawn with circle type die

Table 2 Drawing force in drawing with angle and circle type die

	Angle type	Circle type
Drawing force /kN	24.06 ($\alpha 14$)	26.43 (R17)
	25.17 ($\alpha 11$)	25.90 (R27)
	24.58 ($\alpha 8$)	26.29 (R50)

き力を Table 2 に示す.

角度型と円弧型において, 同じ行に並んでいるダイス角度とダイス半径の大きさが, ダイスと棒材の接触長さが等しいアプローチ形状である. 表から明らかなように, 同じ接触長さで比較した場合, 円弧型ダイスによる引抜き力の方が, 角度型ダイスの引抜き力に比べて大きい. したがって, 円弧型ダイスは残留応力低減には有効であるが, 引抜き力が増大する形状であるといえる.

つづいて、組合わせ型ダイスによる引抜き棒材のスリット法の結果と残留応力分布を角度型、円弧型の結果と併せて Fig. 10, Fig. 11 に示す。組合わせ型ダイスは、以上の結果を参考にして、アプローチ部の前半をダイス半角 5° の角度型、ベアリング部との境界を、ダイス半径 50 mm で接続した形状とした。組合わせ型ダイスでは、円弧型よりも残留応力が低減していることが確認できる。

Fig. 10 Experimental results of slit method of bar drawn with several type dies

Fig. 11 Distribution of residual stress of bar drawn with several type dies

4.2 ベアリング長さの影響

ベアリング長さを変化させた場合のスリット法による残留応力測定結果を Fig. 12 に示す。結果からベアリング長さを長くするほど、スリット幅が狭くなり、残留応力の発生が低減していることが確認できる。

Fig. 12 Experimental results of slit method of bar drawn with several bearing lengths

Fig. 13 にベアリング長さを変化させた場合の Hyne-Bauer 法による残留応力測定結果を示す。ベアリング長さが増加するほど、表層部の引張残留応力が低減していることが確認できる。スリット法と一致する結果となった。

Fig. 13 Distribution of residual stress of bar drawn with several bearing lengths

4.3 段付き形状が表層部残留応力に与える影響

Fig. 14 に段付き高さを変化させた場合のスリット法による残留応力測定結果を示す。

段付きダイスによる引抜きでは、ノーマルダイスによる引抜きと比較して、発生する残留応力が大幅に減少していることが確認できる。段付き高さを変化させた場合、 $40\ \mu\text{m}$ の高さで残留応力が最小となった。 $30\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$ の段付き高さでは、残留応力がわずかに大きい。

つぎに、Fig. 15 に段付き角度を変化させた場合のスリット法による残留応力測定結果を示す。段付き角度を小さくするほど、残留応力も小さくなっていることが確認できる。特に、段付き角度 7° ではスリット幅が 0 であり、完全に閉じてしまう結果となった。この結果は、表層部で圧縮残留応力が発生したことを示している。

Fig. 14 Residual stress of bar drawn with protrusion die in several protrusion height

Fig. 15 Residual stress of bar drawn with protrusion die in several protrusion angle

5. 考 察

5.1 アプローチ形状に関して

角度型ダイスではダイス半角が小さくなるほど、円弧型ダイスではダイス半径が大きくなるほど、ダイス内での材料流動の方向変化が小さくなる。以上のことから、引抜き加工で生じる余剰仕事⁹⁾が小さくなり、表層部と中心部の不均一変形が緩和され、棒材全体が均一変形に近くなり、残留応力が低下したと考えられる。

また、角度型ダイスでは、アプローチ部分とベアリング部の入りの2箇所できく材料流動方向が変化する。それに対して、円弧型ダイスでは、アプローチ部分できく材料流動方向が変化するが、その後は徐々に方向が変化し続けてベアリング部へと移行する。角度型ダイスと比較すると余剰変形が小さく、緩やかな減面変形であるため、より均一な変形となり、残留応力の発生も緩和したと考えられる。しかし、円弧型ダイスでは引抜き力が、角度型ダイスと比較して大きくなってしまいう欠点がある。アプローチ部分の前半を角度型にし、ベアリング部との境界付近を円弧型にすることによって、残留応力を抑制しつつ、引抜き力も抑えることが可能となる。

5.2 ベアリング長さに関して

一般的な15%程度の引抜き加工の場合では、引抜き後に線径が増加する引太りが発生している。したがって、ベアリング部では、引太りする棒材の線径を抑えるため、材料に圧縮応力が加わっており、極低減面率の引抜きに相当すると考えられ、表層部の残留応力も低減したと考えられる。また、ベアリング長さを長くするほど、摩擦を受ける距離が長くなるため、表層のみ発生する変形も大きくなり、表層部の引張残留応力をより低減させたと考えられる。

5.3 段付き形状に関して

(1) 段付き高さについて 段付き部の変形は、減面率において1から2%程度の減面率に相当するため、スキンプラス効果と同じように表層の残留応力を低減させる効果があることが確認された。段付き高さを変化させた場合、圧縮残留応力は段付き高さ40 μm で最小となった。段付き部の変

形に関して、段付き高さは塑性変形が入る深さに影響を与えることが実験で示されている。段付き高さが30 μm の場合は、スキンプラス効果を得るには十分な深さまで塑性変形が導入されず、逆に50 μm , 60 μm では、導入される塑性ひずみの深さが深くなりすぎ、スキンプラス効果が薄れたと考えられる。しかし、段付きダイスによる残留応力低減は非常に効果的であるといえる。

(2) 段付き角度について 段付き角度を小さくするほど、残留応力が小さくなっている。ダイス半角の結果においても、ダイス半角を小さくするほど、残留応力が低減しており、段付き角度の結果は、この結果と同じ傾向を示している。段付き部の変形において、段付き角度は導入される塑性ひずみ量に影響を与えることが実験によって示されている⁹⁾。したがって、段付き高さを一定とした場合、段付き角度が小さいほど、表層部のひずみも小さくなり、均一変形に近づくため、残留応力は低減すると考えられる。

以上より、スキンプラス効果が効率的に得られる段付き高さとし、段付き角度は小さく急激な塑性流動を生じない段付き形状が、残留応力低減に適しているといえる。本研究では、段付き高さ40 μm 、段付き角度7°の形状において、最も残留応力が低減した。

6. 結 言

低炭素鋼棒材を対象として、ダイスのアプローチ形状、ベアリング長さ、および微小段付き形状が、残留応力に与える影響を検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 小さいダイス半角、大きいダイス半径のように、ダイス内の材料流動が緩やかに変化する形状では、不均一変形が緩和され、表層部の残留応力が低減する。アプローチ部の前半を角度型とし、ベアリング部との境界を円弧型にすることで大幅に残留応力を低減することが可能である。
- (2) ベアリング部が長いほど、表層のみの塑性変形が大きくなり、表層部の残留応力が低減する。
- (3) ベアリング部に微小段付きを設けたダイスによる引抜きでは、表層の引張残留応力が大幅に低減できる。段付き高さ40 μm 、段付き角度7°の条件では、表層の残留応力が圧縮となった。

参 考 文 献

- 1) 須藤一：残留応力とゆがみ, (1988), 1-18, 内田老鶴圃。
- 2) 訓谷法仁・浅川基男：塑性と加工, **38**-433, (1997), 147-152。
- 3) 鈴木暁男・浅川基男：基礎機械材料, (2005), 21-28, 培風館。
- 4) 日本塑性加工学会編：引抜き加工, (1990), 43-45, コロナ社。
- 5) Asakawa, M., Hatakeyama, T., Tamura, Y., Kajino, S., Shishido, S. & Shimizu, S.: Wire J. Int., (2004), 144 -151。
- 6) 米谷茂：残留応力の発生と対策, (1975), 17-47, 養賢堂。