フライス加工による残留応力*

村上裕則** 井淵弘昭***

Residual Stresses due to the Milling Operation

by

Yasunori MURAKAMI and Hiroaki IBUCHI

(Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kyoto)

Residual stresses of considerable magnitude are generally introduced near the surface layers of machine components by the machining operation. These residual stresses are deleterious from the standpoint of precise finishing, and also have some effects on the fatigue strength. Therefore, the measurement of these stresses is an important subject for machine manufacturers. Several studies have been reported concerning the residual stresses produced by the machining operation, such as turning, shapering, milling and grinding *etc.*^{1)~3)}

In this study, the surface residual stresses due to the milling operation were measured with X-rays under several conditions such as the cutting speed, the feeding and the depth of cut. Flat plate specimens of a low carbon steel and a high tensile strength steel were used, and one surface of the specimen was cut with a plain milling cutter of 25° spiral angle under the cooling action of oil lubricant. The X-ray apparatus used was of parallel beam type with GM counter, and CoK α beams were used throughout this experiment. The residual stresses were measured by the $\sin^2\psi$ -method in the cutting direction as well as in the transverse direction. The distribution of residual stress near the surface was examined by etching off a thin layer successively from the machined surface and by utilizing the correction formula.⁴⁾ The changes in the half-value breadth due to successive removal of surface layers and in hardness were also investigated.

The conclusions obtained in this study may be summarized as follows. The increase in the cutting speed has the effect of decreasing the tensile residual stress, on the contrary, the increase in the feeding exerts such influence as to raise the residual stress toward the tension side. On the other hand, the residual stress tends to maintain nearly a constant value despite of the increase in the depth of cut. The region of monotonous decrease in the half-value breadth and hardness which may be considered to represent the domain of deteriorated surface layers⁵⁾, was in approximate coincidence with the range in which the residual stress distribution showed a remarkable change.

(Received Aug. 16, 1967)

1 緒 言

切削加工によって一般に加工面に残留応力を生ずるが、これは精密仕上の観点からは有害無益である。また、切削加工された機械部品が繰返し応力を受ける場合には、残留応力の符号によって疲労強度にさまざまな影響を及ぼすことが報告されている。したがって、切削加工後の残留応力を測定することは、仕上精度および疲労強度を向上させる点から重要なことである。

従来、旋盤加工、シェーパー加工、フライス加工、研削加工などの各種の切削加工による残留応力の測定結果はかなり報告されており、いずれも表面層にかなり高い引張りまたは圧縮の残留応力が見いだされている。しかし、切削諸条件すなわち切削速度、送りおよび切

込みなどを系統的に変えて残留応力を測定した例は少ない。シェーパー加工については、これら諸条件を変えて残留応力をX線的に測定した報告があり、また、フライス加工においても送りのみを変化させて機械的方法によって残留応力を測定した例が見られる。

本実験においては、フライス加工について、上記の切削三条件を変えてX線的に残留応力を測定した。

2 実験方法

2.1 試験片

用いた試験片の形状はFig. 1に示すとおりで、150×30mmの面を片面切削した。試験片の材質はSS41お

Fig. 1. Shape of specimen.

* 原稿受理 昭和42年8月16日

** 正会員 立命館大学理工学部 京都市北区等持院北町

*** 学生会員 立命館大学理工学部 京都市北区等持院北町

Table I. Chemical compositions and mechanical properties of high tensile strength steel.

C	Si	Mn	P	S
0.1	0.35	1.04	0.016	0.029
Yield point (kg/mm ²)		Tensile strength (kg/mm ²)		Elongation (%)
43.4		59.0		30.2

よび高張力鋼(中部鋼板の提供による)で、高張力鋼の化学成分および機械的性質を Table I に示す。

試験片は無応力状態にするために、650℃の低温焼なまし(真空炉中)を2回行った。その結果の残留応力は±1 kg/mm²程度であった。なお、焼なまし後の結晶粒度を調べたが、両材質とも ASTM No. 8 の大きさであった。

2.2 フライスの形状

使用したフライスは材質 SKH2 で外径 80mm、長さ 80mm のねじれ刃平フライスで、ねじれ角 25°、逃げ角 8°または 12°、すくい角約 2°、刃数 18 枚である。

2.3 切削条件

使用したフライス盤は横フライス盤(遠州機械製)で、選択した切削条件の範囲は Table II のようである。

Table II. Cutting conditions.

Cutting speed (m/min)	22.9	34.7	53.0	80.4	—
Feed (mm/min)	78	117	168	227	326
Depth of cut (mm)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

このうち切削速度の影響に関しては、送り 117mm/min、切込み 0.4mm を一定とし、送りの影響については切削速度 22.9m/min、切込み 0.4mm を一定に保ち、また切込みの影響については、切削速度 22.9m/min、送り 117mm/min を一定に保って実験した。なお、切削は上向き削りで行ない、切削中は鉱油を一定量(1.5l/min)注ぎながら湿切削を行なった。

2.4 表面あらさの測定

切削加工面のあらさを調べるために、触針式表面あらさ測定機を用いて各切削条件のもとにおける表面あらさを測定した。その中の二例を Fig. 2 に示す。

図に見られるように、送りが増すほど切削方向のウェーブは大きくなっているが、切削直角方向のあらさにはほとんど差は見られない。

2.5 X線応力測定条件

Fig. 2. Surface roughness.

X線応力測定には、理学電機製の GM カウンタをもつ自動記録式平行ビーム型ひずみ測定装置を用いた。測定は $\sin^2\psi$ 法を用い、ピーク位置の決定法には半価また幅法を用いた。測定条件は Table III にまとめて示してある。

なお、試験片の切削方向および切削直角方向における各点の残留応力の相違を調べるために、Fig. 3 に示すように、切削方向に 5 点を取り、直角方向に 3 点をとって、ともに切削方向の残留応力を測定した。図に見るように、いずれの方向においてもかなりのばらつきを示した。したがって、照射面積 $10 \times 2.7 \text{ mm}^2$ の中心を試験片中心に合せて(10mm を長手方向にとった)、長手方向に左右 15mm ずつ、30mm のストロークで試験片を往復運動させて、この間の平均残留応力を測定したが、その値は図に示した平均値とほぼ一致した。

Fig. 3. Residual stresses at several points.

Table III. Measuring conditions.

X-ray	Tube voltage and current	Soller slit and measuring area	Time constant	Goniometer and chart speed
CoK α	30 kVP 9.5 mA	0.35° 10×2.7mm ²	16 s	1°/min 10mm/min

したがって、以後の測定はすべてこの方法で行なった。ただし、実際に採用した往復運動の速度はやや小さかったの、測定結果としては満足すべき値が得られたが、真の平均的な残留応力を測定しえたかは疑問である。また、切削加工後の残留応力を安定させるために、測定はすべて切削2日後に行なった。

2・6 深さ方向の残留応力の計算式

深さ方向の残留応力は、15%硝酸溶液を用いて切削面から逐次薄層を腐食し去り、そのつど切削面および裏面の応力をX線で測定して、次式を用いて計算した。

Fig. 4 に示すように、 a 層まで腐食し去ると、モー

Fig. 4. Residual stress distribution due to etching.

メントのつりあいが破れて、 M なる曲げモーメントを生じ、 σ_{b1} なる曲げ応力が付加される。 a 層腐食後の表面の応力 σ_{x1} は

$$\sigma_{x1} = \sigma_s + \sigma'_s + \sigma_{b1} \quad (1)$$

ここで、 σ_s : 腐食前の a 層の応力

σ'_s : a 層腐食による解放応力

σ'_s は次のように近似してよい。

$$\sigma'_s = \frac{1}{h-a} \int_0^a \sigma da = \frac{1}{h-a} \cdot \frac{a}{2} (\sigma_s + \sigma_a) \quad (2)$$

ここで、 σ_s : 腐食前の表面の応力

a 層腐食後の裏面の応力 σ_{bs} は

$$\sigma_{bs} = \sigma_{bs} + \sigma'_s - \sigma_{b1} \quad (3)$$

ここで、 σ_{bs} : 腐食前の裏面の応力

(3)式から $\sigma_{b1} = \sigma'_s + (\sigma_{bs} - \sigma_{bs})$

これを(1)式へ代入して

$$\begin{aligned} \sigma_{x1} &= \sigma_s + \sigma'_s + \sigma'_s + (\sigma_{bs} - \sigma_{bs}) \\ &= \sigma_s + \frac{a}{h-a} (\sigma_s + \sigma_a) + (\sigma_{bs} - \sigma_{bs}) \end{aligned}$$

上式から σ_a を求めると、最終的に次式が得られる。

$$\sigma_a = \frac{h-a}{h} (\sigma_{x1} - \frac{a}{h-a} \sigma_s - (\sigma_{bs} - \sigma_{bs})) \quad (4)$$

第2回腐食以後の計算式も同様に導くことができる。

3 実験結果および考察

3・1 切削速度の影響

切削速度による表面残留応力の変化をFig. 5 に示す。

Fig. 5. Effect of cutting speed on residual stresses.

図において残留応力は炭素鋼、高張力鋼ともに切削方向では、切削速度の小さい範囲で引張りとして現われており、切削速度が増すと引張りの値が減少して、圧縮側に増大する傾向がある。また、切削直角方向では、すべて圧縮の値を示し、切削速度の増加とともに上と同じ圧縮側に増大する傾向を表わしている。

一般に、切削による残留応力発生機構としては大別して、切削作用による機械的效果と熱的效果が考えられる。前者をさらに詳しく考察すると、切削点前方の被削材は表面で最大で深さ方向に漸次減少するかなり大きな圧縮応力を受けて、表面からある深さまで圧縮塑性変形を生ずる。この点は工具の通過後には引張応力を受けるが、一般には圧縮応力のほうがかなり大きいために切削加工後の表面に圧縮塑性変形が残る。この結果、最後に引張残留応力を生ずるものとされている。次に、後者の熱的效果については、切削の摩擦作用による温度上昇によって表面層が圧縮塑性変形を受け、したがって加工後には引張残留応力を生ずる。

Fig. 5 で、切削速度が小さい範囲において、切削方向の残留応力が引張りとして現われていることは、上に述べた一般の傾向と一致している。また、一般に切削速度が増すと切削抵抗は減少するが、被削材内に生ずる応力を考える場合には、比切削抵抗で考察するのが合理的である。いまの場合には送り、切込みは一定であるため、比切削抵抗は切削抵抗に正比例する。したがって、切削速度が増加すると比切削抵抗は減少して、工具前方の被削材が受ける圧縮応力が小さくなり、逆に、工具通過後の引張応力が打ち勝つことが考えられる。この結果、引張残留応力は、切削速度が増すに従って漸次減少し、ついに圧縮側に移行することがありうる。一方、切削面の温度は切削速度が増すほど増加するが、この影響によっては残留応力は逆に引

張側に増すはずである。しかし、実験結果は切削速度の増加とともに引張残留応力が減少し、ある切削速度以上では圧縮残留応力が現われているので、前者の影響が後者に比べて打ち勝ったものと思われる。本実験の傾向は文献2)のシェーパ加工の傾向と逆であるが、この場合には、乾切削を行なっているため、熱効果のほうが大きく影響したものと思われる。次に、切削直角方向の残留応力がすべて圧縮値を示したことについては、次のように考えられる。すなわち、フライスのねじれ角が 25° であるため、ねじれ刃に垂直方向の切削抵抗の切削直角方向への分力が小さく、したがって、切削点前方の被削材の受ける圧縮応力が小さくなり、前に述べたのと同様の理由によって圧縮の値を示したものと思われる。切削速度の増加に伴ってこの圧縮応力はますます小さくなり、圧縮残留応力の増加をもたらしたものと考えられる。切削抵抗の背分力も圧縮残留応力を生ずる原因となるが、背分力は主分力に比べてきわめて小さく、その影響は小さいものと思われる。また、残留応力は高張力鋼よりも炭素鋼のほうが引張側に小さく現われているが、これは切削抵抗がかたさに正比例して減少することによるものと思われる。

3・2 送りの影響

Fig. 6は送りの影響を示すもので、残留応力はすべ

Fig. 6. Effect of feed on residual stresses.

て送りの増加に伴って引張側に増す傾向を示している。この原因は次のように考えられる。すなわち送りを増すと切削抵抗はほぼ比例的に増加するが、比切削抵抗はほとんど一定(やや右下がりの傾向を示す)であるから、この影響は考えられない。一方送りを増すと切削面の温度は上昇するので、湿切削ではあるが、この場合にはこの温度上昇が残留応力を引張側に増加させた主要な原因と考えられる。

なお、鋼種および測定方向の相違による残留応力の傾向はFig. 5と同様である。

3・3 切込みの影響

Fig. 7は切込みの影響を示すもので、残留応力は切込みの増加とともにやや減少する傾向も見られるが、

総体的に言ってほぼ一定とみなしてもよい。これは比切削抵抗が切込みが変化してもほとんど一定(やや右下がりの傾向を示す)であり、また温度も切込みによってほとんど変化しないことによって説明される。

なお、送りおよび切込みの影響に関しては、本実験結果はシェーパの乾切削の実験結果と同一の傾向を示している。

Fig. 7. Effect of the depth of cut on residual stresses.

3・4 残留応力分布

高張力鋼について厚さ方向の残留応力分布を測定した結果の一例をFig. 8に示す。図に見られるように、切削方向の残留応力は、表面のすぐ内部で引張りのピークを示し、次いで圧縮に変化している。これに対し、切削直角方向では、表面ではほぼ零(これはたまたまこのような結果になったもので、Fig. 5の切削速度 22.9 m/min の点に相当する)で、そのすぐ内部で圧縮の最大値を示し、その後漸次減少している。切削方向、切削直角方向ともに残留応力が大きな変化を示す範囲は、表面から約 100μ の深さである。他の測定を通じてこの範囲はほぼ $70\sim 100\mu$ であった。

Fig. 8. Residual stress distribution near the surface.

3・5 逃げ角の影響

本実験は付随的に行なったもので、フライス購入初期の逃げ角は約 8° で、これを用いて炭素鋼の切削を行ない、その後高張力鋼を切削する際これをとき直して

逃げ角 12° とした。そしてこの逃げ角 12° の状態でふたたび炭素鋼の切削を行なった。したがって、炭素鋼について逃げ角が残留応力に及ぼす影響を調べてみた。Fig. 9, 10はこの結果を示すもので、それぞれ切削速度および送りの影響において、逃げ角をパラメータとして示したものである。両図に見られるように、残留応力の変化の傾向は、前に示したFig. 5, 6と同様であるが、逃げ角の小さい初期のフライスで加工したほうが残留応力は圧縮側に大きく現われている。これは逃げ角が小さいために（おそらく刃先の鋭さも多少影響したものと思われる）、切削加工面のむしれかきはなはだしく、したがって面の凹凸が大きくなり、切削点後方の引張りの塑性変形が残留応力を圧縮側に増大させたものと思われる。

Fig. 9. Difference in residual stresses due to the angle of relief.

Fig. 10. Difference in residual stresses due to the angle of relief.

3・6 加工変質層の半価幅増加率および硬化率
一般に、切削加工面には切削作用の機械的効果によって、きわめて薄層の加工変質層を生ずる。この変質層の厚さはX線の半価幅またはかたさの変化を測定して、ほぼ推定することができる。³⁾⁴⁾本実験においてもこの両者を測定してみた。半価幅は表面から逐次薄層を

15%硝酸溶液で腐食し、そのつど垂直入射によって測定した。半価幅としては回折強度分布曲線の $1/2 \cdot H$ における幅をとった。かたさは微小硬度計で荷重 200 g のもとで測定した。この測定は試験片の横断面上で行なったもので、表面から 50μ の深さの点から測定を開始した。Fig. 11, 12はこの結果を示すもので、縦軸

Fig. 11. Changes in half-value breadth near the surface.

Fig. 12. Changes in hardness near the surface.

にはそれぞれ半価幅増加率 $(B - B_0/B_0) \times 100\%$ 、硬化率 $(H_V - H_{V0}/H_{V0}) \times 100\%$ (B_0 , H_{V0} は初期値を示す)をとった。Fig. 11から、測定誤差も影響して正確には断定できないが、傾向としては加工変質層の厚さは、切削速度が増すと減少し、送りまたは切込みを増すと増加する様子が見られる。同様にFig. 12からも、切込みが増すと加工変質層の厚さは増加することがわかる。両図を通じて本実験の範囲内では、加工変質層の厚さはほぼ $60 \sim 90\mu$ である。

またこの範囲は、3・4項で述べた残留応力分布が大きく変化する範囲ともほぼ一致している。

4 結 論

以上の実験結果をまとめて、次のような結論が得られる。

(1) 切削速度の影響については、これが増加するほど引張残留応力を減少させ、圧縮側に増加させる傾向がある。ただし、切削直角方向の残留応力はすべて圧縮として現われた。送りの影響については、これが増すほど残留応力を引張側に増加させる。切込みの影響については、これが増加してもほとんど残留応力に影響を及ぼさない。

(2) 炭素鋼と高張力鋼とを比較すると、残留応力は、高張力鋼のほうが引張側に高く現われる。

(3) 逃げ角が小さく、かつ刃先の摩耗したフライスで削る場合、加工面のむしれが著しく、残留応力は圧縮側に増加する傾向がある。

(4) 半価幅増加率および硬化率で測定した加工変質層の推定厚さと残留応力分布が大きな変化を示す範囲とはほぼ一致するものと言える。

(昭和42年7月11日 第6回X線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Henriksen, E.K., Trans. ASME, **73**, 69 (1951);
Letner, H.R., Trans. ASME, **77**, 1 089 (1955);
古元隆生, 沖中進, 日本金属学会誌, **25**, 365 (1961).
- 2) 石井勇五郎, 日本機械学会論文集, **16**, 15(1950).
- 3) 浅枝敏夫, 西本康, 精密機械, **20**, 381 (1954).
- 4) 平修二, 吉岡靖夫, 材料, **11**, 675 (1962).
- 5) 佐田登志夫, 日本機械学会論文集, **25**, 464(1959).
- 6) 荒木田豊, 日本機械学会論文集, **28**, 1 361(1992).