

切削及び研削加工材の残留応力に関する研究

楊 宗霄*・細川 智生・金谷 輝人

岡山理科大学工学部機械工学科

*現在, 中国洛陽工学院機械設計行程系

(1992年9月30日 受理)

1 緒 言

工業界においては構造物や機械部品の多くは切削や研削などの機械加工を施されたものであるが、その形状や寸法、表面状態あるいは残留応力等によって材料の強度が影響され、材料本来の強度を十分に発揮されない場合がある。形状や表面状態については応力集中として力学的に検討され設計段階で十分考慮されているが、残留応力については、引張り残留応力がき裂の発生や伝播を促進する悪影響があり、また、反対に圧縮残留応力は疲労強度を上昇させることなどは知られているものの、どのような加工法でどの程度の残留応力が発生するか等についてはほとんど知られていない。したがって、材料を有効に利用するためには種々な加工法によって発生する残留応力について検討する必要がある。

このような目的のためには非破壊的で材料のごく表面層の応力の測定が可能なX線応力測定法¹⁾が残留応力の測定法として適している。この方法はX線の侵入深さが非常に浅くごく表面層の測定であるとして、平面応力状態を仮定し、材料を等方等質であるとして解析方法が確立されている。しかし、材料の切削や研削のように表面層のみが強加工された材料ではX線の侵入深さの範囲で平面応力状態の仮定が成立しなくなる可能性があり²⁾、また、加工によって著しく集合組織が形成されるような場合には等方等質^{3),4),5)}についても考慮する必要がある。

したがって、本研究では、切削および研削した材料にX線応力測定法を適用して残留応力を測定した場合の解析法の妥当性を検討し、この方法で得られた残留応力値から、一般によく用いられている加工条件に残留応力の観点から検討を加えることを目的としている。

2 実験方法

2.1 応力解析法

従来、X線応力測定法における基礎式として

$$\varepsilon = [(1+\nu)/E]\sigma_x \sin^2\psi - [\nu/E](\sigma_x + \sigma_y) \quad (1)$$

が用いられている¹⁾。ここでEはヤング率、 ν はポアソン比である。この式から解るように、

σ_x を求めるには、種々な入射角でX線を入射してひずみ ε を測定し、 ε と $\sin^2\psi$ の直線関係から、その傾きより次式を用いて求めることができる。

$$\sigma_x = [E/(1+\nu)]M \quad (2)$$

$$M = \partial\varepsilon/\partial \sin^2\psi \quad (3)$$

しかし、この(1)式には材料が等方、等質であり、応力が平面応力状態である事が仮定されている。しかし、一般に集合組織を有する金属材料などは等方、等質であるとはかぎらず、また、切削や研削のように表面層のみが強加工された材料ではX線の侵入深さの範囲で平面応力状態の仮定が成立しなくなる可能性がある²⁾。したがって、このような材料における応力測定法を再検討する必要がある。

図1に示すように、切削または研削した試料表面層の測定点を原点Oとして、切削または研削方向をX軸、その直角方向をY軸、試料面法線方向をZ軸として、それぞれX、Y、Z座標系のひずみ成分を ε_x 、 ε_y 、 ε_z 、 γ_{xy} 、 γ_{yz} および γ_{zx} 、応力成分を σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} および τ_{zx} とする。また、測定方向をP（方向余弦 l 、 m 、 n ）として、この方向の垂直ひずみを $\varepsilon_{\phi,\psi}$ とし、P方向とZ軸のなす角を ψ 、Pをxy平面に投影した方向とX軸のなす角を ϕ とすると、このときの垂直ひずみ $\varepsilon_{\phi,\psi}$ は

$$\varepsilon_{\phi,\psi} = l^2\varepsilon_x + m^2\varepsilon_y + n^2\varepsilon_z + lm\gamma_{xy} + mn\gamma_{yz} + nl\gamma_{zx} \quad (4)$$

で表される。ここで、方向余弦は

$$\begin{aligned} l &= \cos \phi \sin \psi \\ m &= \sin \phi \sin \psi \\ n &= \cos \psi \end{aligned} \quad (5)$$

である。材料のヤング率をE、剛性率をG、ポアソン比を ν として、応力とひずみの関係

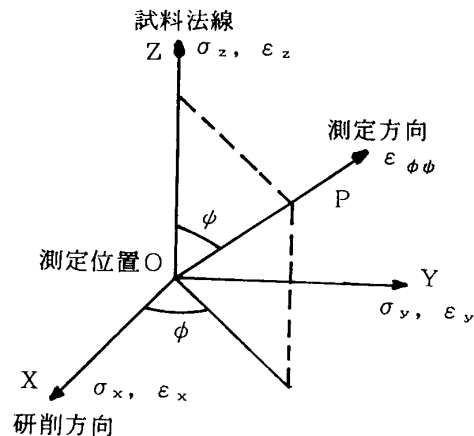


図1 応力とひずみの方向

は

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \{\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\}/E & \gamma_{xy} &= \tau_{xy}/G \\
 \varepsilon_y &= \{\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)\}/E & \gamma_{yz} &= \tau_{yz}/G \\
 \varepsilon_z &= \{\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)\}/E & \gamma_{zx} &= \tau_{zx}/G
 \end{aligned} \tag{6}$$

であるから、式(5)、式(6)を式(4)に代入し、整理すると

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{\phi, \psi} &= [(1+\nu)/E](\sigma_x \cos^2 \phi + \sigma_y \sin^2 \phi - \sigma_z) \sin^2 \psi \\
 &\quad - [1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z] + [1/G](\tau_{xy} \cos \phi \sin \phi \sin^2 \psi \\
 &\quad + \tau_{yz} \sin \phi \cos \psi \sin \psi + \tau_{zx} \cos \phi \cos \psi \sin \psi)
 \end{aligned} \tag{7}$$

となり、これが三軸応力状態のX線応力測定法の基礎式である。

式(7)から解るように、従来のように $\varepsilon - \sin^2 \psi$ 線図を描けば曲線になる。そこで、 ϕ の値として 0° , 45° , 90° , 180° , 225° , 270° の六方向について種々な ψ について垂直ひずみを測定し、それらの値を $\varepsilon_{0, \psi}$, $\varepsilon_{45, \psi}$, $\varepsilon_{90, \psi}$, $\varepsilon_{180, \psi}$, $\varepsilon_{225, \psi}$, $\varepsilon_{270, \psi}$ とすると

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{0, \psi} &= [(1+\nu)/E](\sigma_x - \sigma_z) \sin^2 \psi \\
 &\quad - [1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z] + [1/G]\tau_{zx} \cos \phi \sin \psi
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{45, \psi} &= [(1+\nu)/E][(\sigma_x + \sigma_y)/2 - \sigma_z] \sin^2 \psi - [1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z] \\
 &\quad + [1/(2G)][\tau_{xy} \sin^2 \psi + \sqrt{2}(\tau_{yz} + \tau_{zx}) \cos \psi \sin \psi]
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{90, \psi} &= [(1+\nu)/E](\sigma_y - \sigma_z) \sin^2 \psi \\
 &\quad - [1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z] + [1/G]\tau_{yz} \cos \phi \sin \psi
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{180, \psi} &= [(1+\nu)/E](\sigma_x - \sigma_z) \sin^2 \psi \\
 &\quad - [1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z] - [1/G]\tau_{zx} \cos \phi \sin \psi
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{225, \psi} &= [(1+\nu)/E][(\sigma_x + \sigma_y)/2 - \sigma_z] \sin^2 \psi - [1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z] \\
 &\quad + [1/(2G)][\tau_{xy} \sin^2 \psi - \sqrt{2}(\tau_{yz} + \tau_{zx}) \cos \psi \sin \psi]
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{270, \psi} &= [(1+\nu)/E](\sigma_y - \sigma_z) \sin^2 \psi \\
 &\quad - [1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z] - [1/G]\tau_{yz} \cos \phi \sin \psi
 \end{aligned} \tag{13}$$

となり、式(8)と(11)、(9)と(12)および(10)と(13)を組み合わせることによって、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 (\varepsilon_{0, \psi} + \varepsilon_{180, \psi})/2 &= [(1+\nu)/E][(\sigma_x - \sigma_z) \sin^2 \psi] \\
 &\quad - [1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z]
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$(\varepsilon_{90, \psi} + \varepsilon_{270, \psi})/2 = [(1+\nu)/E][(\sigma_y - \sigma_z) \sin^2 \psi]$$

$$-[1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z] \quad (15)$$

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{45,\psi} + \varepsilon_{225,\psi})/2 &= [(1+\nu)/E][(\sigma_x + \sigma_y)/2 - \sigma_z + \tau_{xy}]\sin^2\psi \\ &\quad - [1/E][(\sigma_x + \sigma_y)\nu - \sigma_z] \end{aligned} \quad (16)$$

$$(\varepsilon_{0,\psi} - \varepsilon_{180,\psi})/2 = [1/G]\tau_{zx} \cos \psi \sin \psi \quad (17)$$

$$(\varepsilon_{90,\psi} - \varepsilon_{270,\psi})/2 = [1/G]\tau_{yz} \cos \psi \sin \psi \quad (18)$$

これらの式より、縦軸に測定されたひずみの和または差をとり、横軸に $\sin^2\psi$ または $\cos \psi \sin \psi$ をとって、グラフを描くことによりその勾配から応力成分 $\sigma_x - \sigma_z$, $\sigma_y - \sigma_z$, τ_{xy} , τ_{zx} , τ_{yz} を算出することができる。

σ_x , σ_y , σ_z を個々に求めるにはこれらの線図の勾配からのみでは不可能であって、線図の切片を利用する必要があるが、切片の測定には X 線応力測定装置の特徴から誤差が非常に大きくなる。しかし、 σ_z は試料表面では 0 であり、X 線の侵入深さが表面から $30\mu\text{m}$ 程度と小さいため、 σ_x や σ_y に比較してそれほど大きくないと考えられるので、実用的には重要ではないと考えられる。

2.2 試験片

試料は SS41 の軟鋼板を図 2 に示すような形状に仕上げた後、富士電波製 FVPHP-R-10 型ホットプレス用炉を用いて、 823°K で 1 時間真空中で焼きなましを施した。これらの試料が完全に残留応力が除去されたことを確認したのち、表 1、表 2 に示す切削および研削条件で加工した。

2.3 X 線応力測定

切削および研削方向を X 軸として、測定方向 ϕ は反時計方向に 0° , 45° , 90° , 180° , 225° , 270° の 6 種、また、 ψ は式(14)~式(16)に対応するデータでは 0° , 18.5° , 26.5° , 33° , 39° , 45° の 6 種、式(17)および式(18)に対応するデータでは 0° , 2.5° , 15.5° , 18.5° , 26.5° , 33° , 45° の 7 種とした。X 線の回折角は島津製 DX-10 型 X 線応力測定装置を用いて表 3 の条件で測定

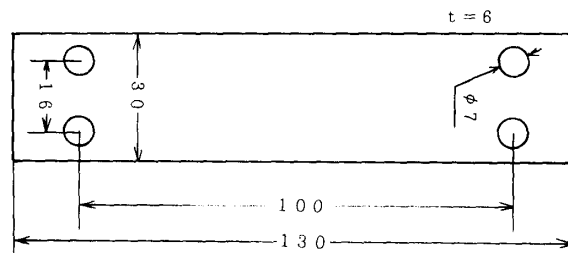


図 2 試料の形状および寸法

表1 切削条件

工作機械		形削り盤	
バイト	荒削り	すくい角 26°	前逃げ角 6°
	仕上げ	すくい角 25°	前逃げ角 10°
切り込み量	荒削り	0.75mm (送り 0.65m/min)	
	仕上げ	0.1mm	
潤滑油		不水溶性切削油 SC20	
切削速度	荒削り	S 1*	20.8m/min
		S 2	13.7m/min
	仕上げ	S 3	13.7m/min
		S 4	5.7m/min
		S 5	4.28m/min

* 切削加工試験片番号

表2 研削条件

工作機械	平面研削盤	
研削方法	湿表面研削, ダウンカット	
といし車	WA46J7V	
といし週速度, VS	1,600m/min	
ドレッシング	20μm×0.2mm/rev	
テーブル送り, VW	G 1*, G 2, G 3	V _w = 10m/min
	G 4	V _w = 5m/min
	G 5	V _w = 15m/min
切り込み量, Δ	G 1, G 4, G 5	Δ = 5μm
	G 2	Δ = 10μm
	G 3	Δ = 15μm

* 研削加工試験片番号

表3 測定条件

被測定材料	S S 41
弾性常数, E	2.06×10 ⁵ MPa
ポアソン比, ν	0.28
特性X線	Co-Kα 線
フィルター	Fe
回折面	(310) 面
X線照射面積	4 × 4 mm ²
検出器ステップ幅	0.2°
積分時間	MED (2°/min)
2θ 走査角範囲	157°-169°
測定方法	側傾法
ピーク位置決定法	半価幅法 (1/2H法)

した。また、各測定値は2ないし3回の平均値を用いた。ひずみは相対値のみ必要になるため回折角 θ から

$$\varepsilon = \cot(\theta_0)(\theta - \theta_0) \quad (19)$$

を用いて算出し、 θ_0 は $\psi = 0^\circ$ の回折角を用いた。

3 結果及び考察

図3は研削材の $\phi = 0^\circ$ および 180° の場合の一例である。 $\varepsilon - \sin^2\psi$ 線図は明らかに曲線となり、大きく分離²⁾して τ_{zx} が存在していることを示している。したがって、従来のX線応力測定法が適用出来ない。また、図4は $\phi = 90^\circ$ および 270° の場合であって、線図は比較的直線的であって ϕ による分離も小さく、 τ_{yz} の影響がほとんどない事を示している。これらのデータを式(14)~式(18)にしたがって整理すると図5~図9となり、比較的よい直線性を示している。集合組織が強い場合にはこれらの線図がわん曲することが知られているが⁵⁾、図から解る様に比較的直線性がよく集合組織によるわん曲性が認められない事から切削および研削によって著しい集合組織の発達がないものと思われる。この様にして、得られた種々な加工法によって発生した残留応力成分を表4および表5に示す。

切削加工による残留応力は切削方向の応力すなわち $\sigma_x - \sigma_z$ は切り込み量や切削速度に関係なく約285MPa程度でほぼ一定である。しかし、それと直角方向の応力 $\sigma_y - \sigma_z$ は切り込み量によって異なり、0.1mmと切り込み量が小さくなると約550MPaに増加している。

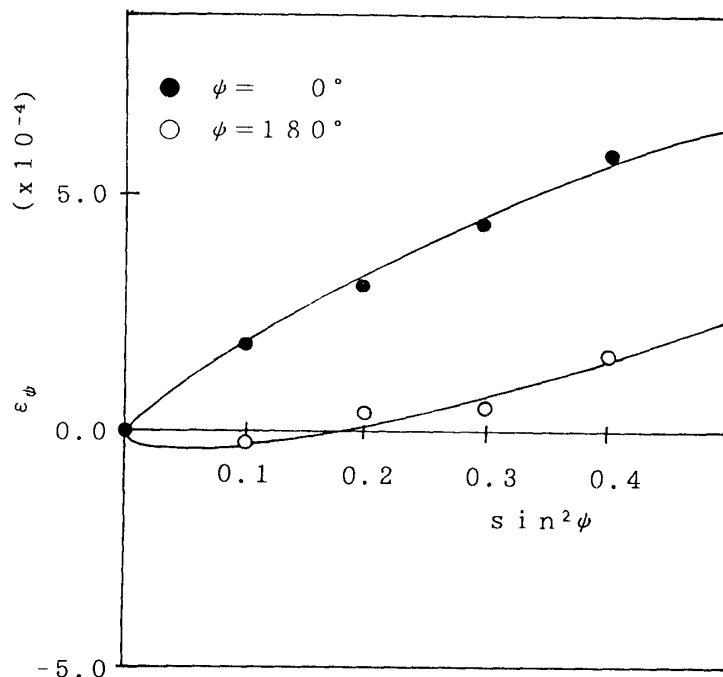


図3 研削材(切り込み量 $5\mu\text{m}$, テーブル送り速度 5m/min) の研削方向における $\varepsilon - \sin^2\psi$ 線図

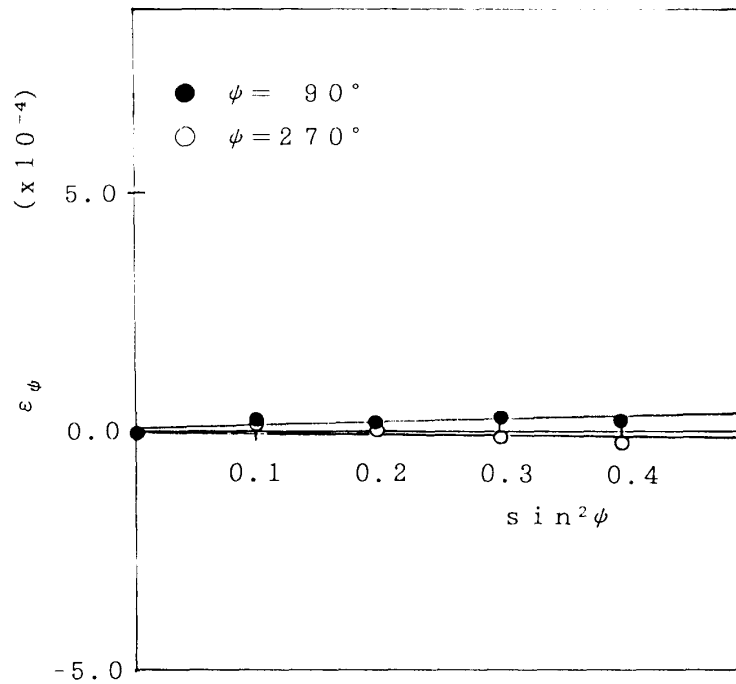


図4 研削材（切り込み量 $5 \mu\text{m}$ ，テーブル送り速度 5 m/min ）の研削方向直角方向の $\epsilon - \sin^2 \psi$ 線図

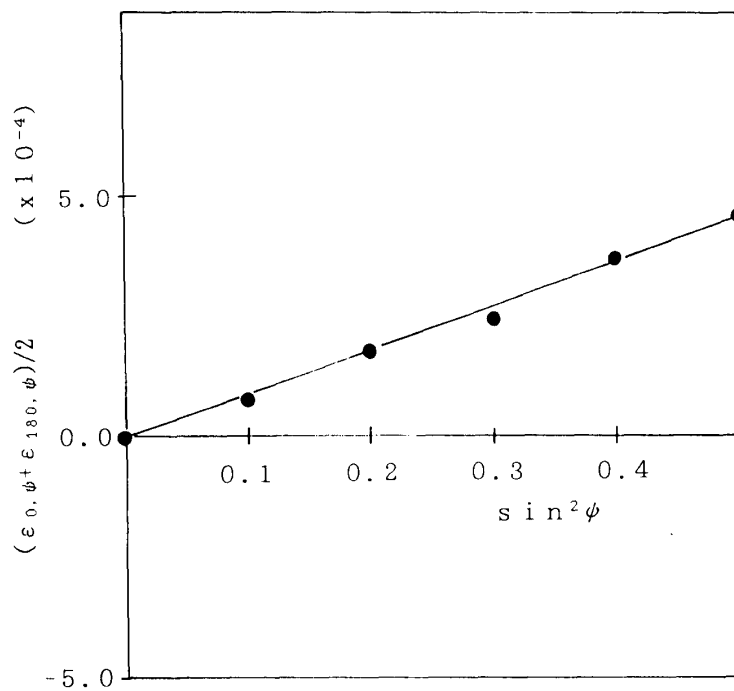


図5 研削材（切り込み量 $5 \mu\text{m}$ ，テーブル送り速度 5 m/min ）の $(\epsilon_{0,\psi} + \epsilon_{180,\psi})/2 - \sin^2 \psi$ 線図

一方，研削加工では切り込み量が大きくなるに伴って，また，テーブル送り速度が早くなるに伴って，研削方向およびその直角方向の残留応力が共に増加している。研削の場合，研削方向を軸として負荷が対称であるため，残留応力の τ_{xy} および τ_{yz} 成分に発生しない

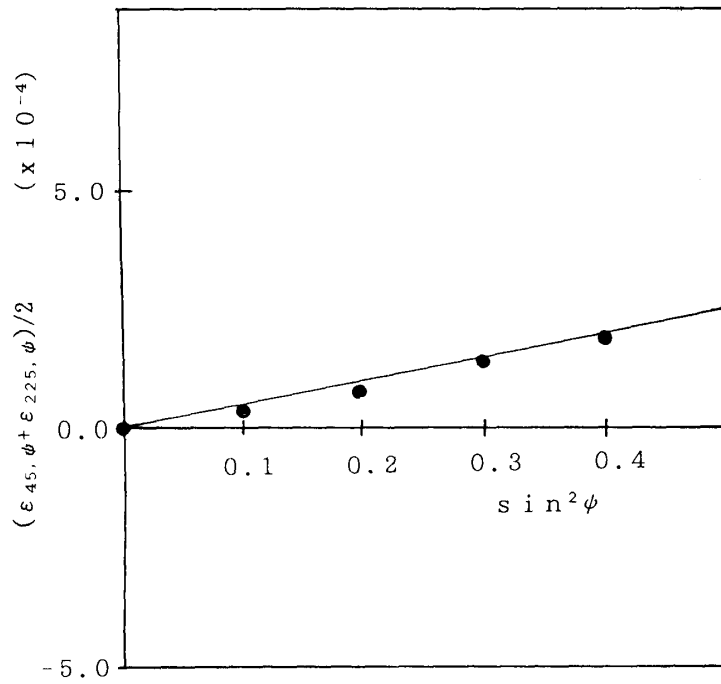


図6 研削材 (切り込み量 $5 \mu\text{m}$, テーブル送り速度 5 m/min) の $(\epsilon_{90,\phi} + \epsilon_{270,\phi})/2 - \sin^2 \phi$ 線図

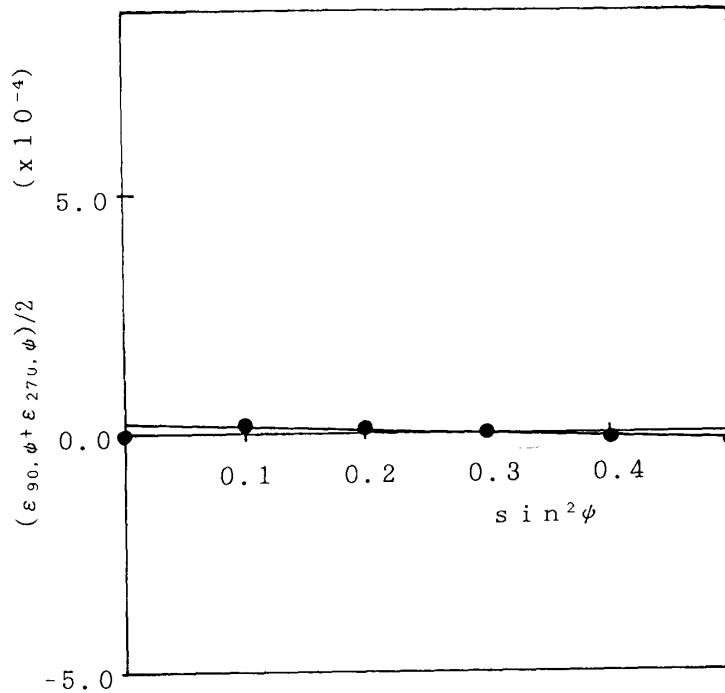


図7 研削材 (切り込み量 $5 \mu\text{m}$, テーブル送り速度 5 m/min) の $(\epsilon_{45,\phi} + \epsilon_{225,\phi})/2 - \sin^2 \phi$ 線図

ものと考えられ、これらの応力成分が $\pm 12 \text{ MPa}$ の範囲で測定されている。X線応力測定法における測定精度の限度が約 10 MPa 程度であることや試料のセッティングミス等から考えて、これらは測定誤差範囲内と考えられる。しかし、切削では切削方向と直角方向に刃物

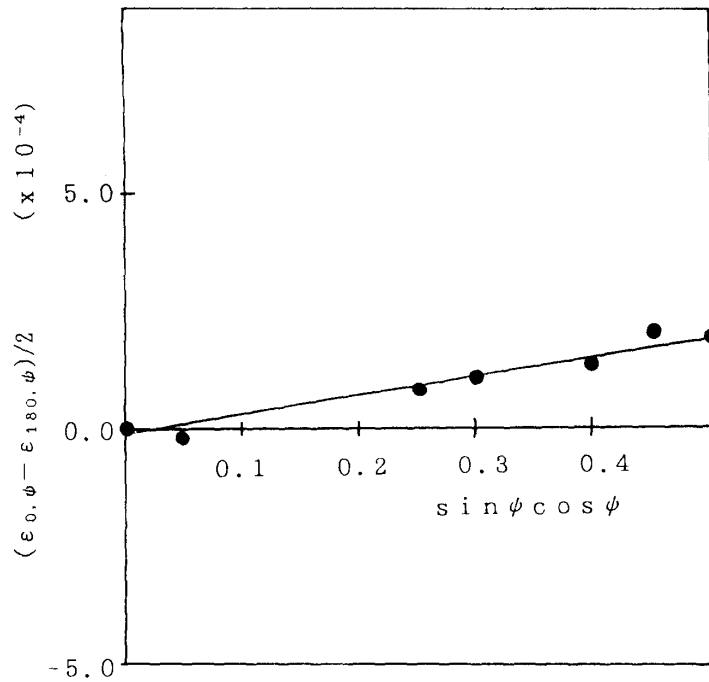


図8 研削材 (切り込み量 $5 \mu\text{m}$, テーブル送り速度 5 m/min) の $(\epsilon_{0,\phi} + \epsilon_{180,\phi})/2 - \cos \phi \sin \phi$ 線図

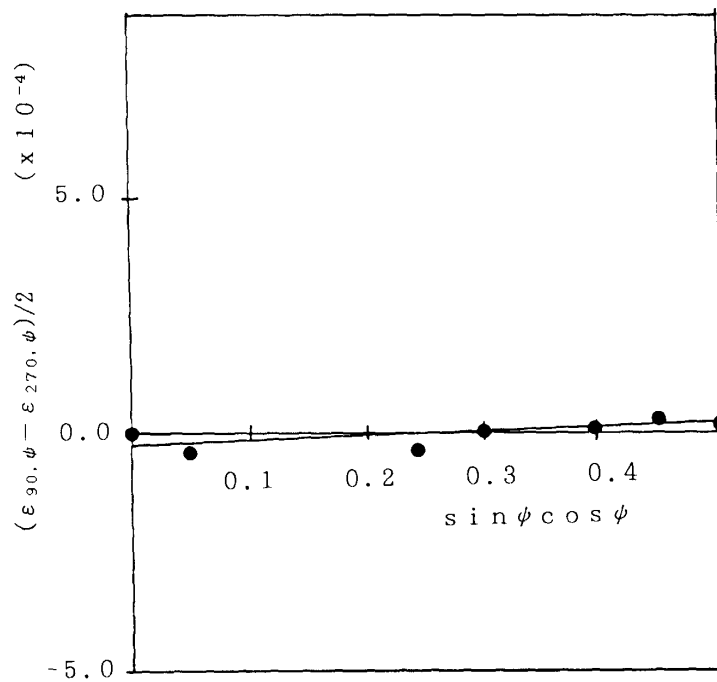


図9 研削材 (切り込み量 $5 \mu\text{m}$, テーブル送り速度 5 m/min) の $(\epsilon_{90,\phi} + \epsilon_{270,\phi})/2 - \cos \phi \sin \phi$ 線図

を送りながら繰り返し切削している事から対象性はなく、特に切り込み量が大い場合に大きな τ_{xy} および τ_{yz} が発生している。また、 τ_{zx} は切削と研削では正負反対になっている。その値は加工条件によって異なるが最大 60 MPa 程度の応力が発生している。

表4 切削加工された材料の残留応力

切り込み量	切削速度	$\sigma_x - \sigma_z$	$\sigma_y - \sigma_z$	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
0.75mm	20.8m/min	290	370	120	35	-5
0.75mm	13.7m/min	272	242	81	23	-20
0.10mm	13.7m/min	273	549	20	14	-53
0.10mm	5.7m/min	293	562	3	-13	-55
0.10mm	4.3m/min	282	524	-4	-4	-60

応力の単位は MPa

表5 研削加工された材料の残留応力

切り込み量	テーブル送り	$\sigma_x - \sigma_z$	$\sigma_y - \sigma_z$	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
5 μ m	5m/min	148	-7	12	7	35
5 μ m	10m/min	201	16	7	8	34
5 μ m	15m/min	303	146	-5	-8	35
10 μ m	10m/min	506	370	9	-12	26
15 μ m	10m/min	608	550	-12	-0	9

応力の単位は MPa

このような残留応力の発生原因として、切削や研削による表面層の大きな塑性変化に起因するものと、表面層の温度上昇による熱応力が考えられる。主原因が塑性変形によるとすれば、切り込み量の変化によって変形様式が大きく変わるとは考えられず、測定結果のような σ_x と σ_y の比の変化が説明出来ない。また、熱応力が主原因であるとするならば、 σ_x と σ_y がほぼ同程度の大きさとなり、これも実測値を説明できない。したがって、切削や研削による残留応力の発生にはこれらの因子が互いに関連し、複雑に変化するものと考えられる。そのため、加工条件から残留応力値を推定する事が困難である。

本研究で採用した加工条件は一般によく用いられている条件であって、いずれの場合も引っ張りの残留応力が発生しており、その値は切削における仕上げ加工および研削における切り込み量15 μ m テーブル送り速度10m/min で特に大きく、相当応力に換算するとそれぞれ約500MPa および約580MPa となり、CoK α を用いたX線応力測定法でやや大き目の応力値が測定されている^{3),4)}ことを考慮にいれても、これらの値は材料の強度限界の値であって、表面に応力が集中する曲げやねじりの荷重が負荷される部品に用いることは非常に危険であると思われる。したがって、バイトの種類、すくい角、逃げ角、砥石の種類等を変え被加工材に対してより適切な加工法を検討する必要がある。

4 結 論

以上述べてきた結果より本研究においては次のように結論される。

① 加工材の応力測定についての三軸応力状態から導かれる基礎式に基づいて実験を行い、この方法で切削及び研削加工材の妥当な残留応力値が得られた。

② 切削において、切り込み量が加工材の残留応力に大きく影響する。特に、仕上げ加工によってより大きな引っ張り残留応力を発生し、材料強度的に見ると適切な加工法とはいえない。

③ 研削の場合、切り込み量とテーブル送り速度が共に小さくなるに従って、残留応力は小さくなった。したがって、仕上げ段階で、出来るだけ小さな切り込み量とテーブル送り速度を選ぶことが望ましい。

④ せん断応力については定性的には妥当な値が得られたが、その値はそれほど大きくない。

⑤ 残留応力の発生原因としては、強加工によるもの、熱応力等考えられるがこれらの原因が複雑に絡み合い加工条件から残留応力を推定することが困難である。したがって、バイトの種類、すくい角、逃げ角、砥石の種類、被加工材料などを変え適切な加工法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本材料学会編, X線応力測定法, 養賢堂 (1969).
- 2) 英, 藤原, 材料, 32, 245 (1983).
- 3) 本田, 細川, 有間, 常永, 材料, 18, 195 (1969).
- 4) 有間, 細川, 本田, 材料, 18, 195 (1969).
- 5) 本田, 細川, 皿井, 非破壊検査, 26, 8 (1977).

The study of residual stress on cutted or grinded steel

Zongxiao YANG*, Norio HOSOKAWA and Teruto KANADANI

Faculty of Engineering,

Okayama University of Science

1-1 Ridai-cho, Okayama 700, Japan

**Present ; Department of Machine Design Engineering*

Luoyang Institute of Technology, China

(Received September 30, 1992)

The residual stress on cutted and grinded steel was measured by using X-ray stress measurement method. The results were obtained as follows ;

- 1 . The residual stress components were obtained by using the general form for stress analysis under triaxial stress state in X-ray stress nesyerment.
- 2 . In cutting, depth of cut influence on residual stress. In finish cutting, tensile residual stress become very large.
- 3 . In glainding, the residual stress become smoll as depth of cut and feed soead of table is smoller.
- 4 . Searing stress components are not so large as other components.