X線による中空円筒の残留応力の測定法について*

米 谷 茂**

On the Method of Measurement of Residual Stress in a Hollow Cylinder by X-Ray Method

by

Shigeru YONETANI

(Yokohama National University Training Institute for Engineering Teachers, Yokohama)

A method of calculating residual stress distribution in a hollow cylinder during successive removal from its surface residual stress obtained by its X-ray measurement on its outer or inner layer is reported in the present paper, and comparison is made of the result reached by this method with that reached by the conventional method of mechanical measurement. It is reported also how it is possible by adaptation of Schaal's method to measure tangential stress on the inner surface of cylinder directly without cutting off the cylinder in order to set it in longitudinal direction. This procedure may be applied practically to the stress measurement of the specimens of geometrical size where it is difficult to apply normal X-ray method. (Received Aug. 2, 1968)

1 緒 言

円筒の残留応力をX線的方法を用いて測定する方法を説明する。円筒の外層あるいは内層を逐次除去をし、残った試料の表面の軸方向および円周方向の残留応力をX線的方法で測定し、これを用いて中空円筒あるいは中実円筒の残留応力分布を計算するものである。

外層除去をした試料の外表の残留応力については、実験操作上既知のX線のな各種の方法で測定することができるが、内層除去をした試料の内表の円周方向の残留応力については、円筒を切断分離して内表にX線を入射させて測定する方法をとらざるをえない。このようなとき、この操作によって応力は弛緩することになる。本報では、円筒を切断することなく、Schaal法を利用拡張した方法で円周方向の残留応力を簡便に求める方法を説明する。この方法はまた切欠き孔部などの円周方向の応力の測定にも用いるものである。

なお、測定式は応力分布が完全に軸対称であると仮定して求めたものであるが、実際に熱処理したものなどではこの状態よりいくぶんの偏差があり、また、X線的方法自体精度の高い測定であるが、実際の測定では外表の特定の小部分についての測定である。したがってさらに巨視的な、全体としての応力を求める機械的方法による結果との検証を行ないたい場合がある。

ここでは外層あるいは内層除去過程中的の試料の軸ひずみを機械的に測定し簡便に検証する方法を示す。

2 測 定 理 論

2・1 外層除去による方法

円筒の外径を b 、内径を a とする。円筒は軸方向、円周方向および半径方向に ${}_0\sigma_z, {}_0\sigma_t, {}_0\sigma_r$ なる残留応力をもち、これに対応するひずみを ${}_0\varepsilon_z, {}_0\varepsilon_t, {}_0\varepsilon_r$ として、これらはすべて軸対称であって半径 r のみの関数であるとする。また円筒は充分長いとして、外層の除去を行なうと残った円筒の長さは変化するが、これを断面内一様として平面ひずみの問題と考える。円筒を外径 b より任意の半径 r まで除去した場合を考える。半径 r から b までに存在していた軸方向の残留応力の消去によって、残った外径 r 、内径 a の円筒に軸方向に一樣に σ_z なる応力が付加するとする。ここで応力の記号として元の残留応力 ${}_0\sigma_z, {}_0\sigma_t, {}_0\sigma_r$ に対して、外層除去後の残留応力を ${}_0\sigma'_z, {}_0\sigma'_t, {}_0\sigma'_r$ 、除去によって残った部分に加わった応力を $\sigma_z, \sigma_t, \sigma_r$ とする。 σ_z は外層の逐次除去過程において加算的に断面内に一樣に加わったものである。すると次のつりあい式の関係がなりたつ。

$$\pi(r^2 - a^2)\sigma_z = \int_r^b 2\pi r {}_0\sigma_z dr \quad (1)$$

また、除去後の半径 r の試料の外表の軸方向の残留応力 ${}_0\sigma'_z(r)$ は、 ${}_0\sigma'_z(r) = {}_0\sigma_z(r) + \sigma_z$ であるから

$$(r^2 - a^2)({}_0\sigma'_z - {}_0\sigma_z) = \int_r^b 2r {}_0\sigma_z dr \quad (2)$$

* 原稿受理 昭和43年8月2日

** 正 会 員 横浜国立大学工業教員養成所 横浜市区南区大岡町

上式を r で微分し整理すると

$$\frac{d_0\sigma_z}{dr} = \frac{1}{(r^2-a^2)} \frac{d}{dr} \{ (r^2-a^2)_0\sigma_z' \} \quad (3)$$

r より b まで積分し、 $0\sigma_z(b)=0\sigma_z'(b)$ であるから

$$0\sigma_z(r) = 0\sigma_z'(r) - 2 \int_r^b \frac{r}{(r^2-a^2)} 0\sigma_z' dr \quad (4)$$

また、半径 b から r までの除去で、半径 r に存在していた半径方向の残留応力 $0\sigma_r(r)$ が消去するから、これが残った部分に外圧となって加わることになる。したがって半径 r の部分に付加する円周方向の応力 $\sigma_t(r)$ は Lamé' の円筒理論から

$$\sigma_t(r) = -0\sigma_r(r) \frac{r^2+a^2}{r^2-a^2} \quad (5)$$

表面の円周方向の残留応力を $0\sigma_t'(r)$ とすると

$$0\sigma_t'(r) = 0\sigma_t(r) + \sigma_t(r) \quad (6)$$

であり、またつりあい式は

$$\frac{d}{dr} (r_0\sigma_r) = 0\sigma_t \quad (7)$$

の関係があるから、(5), (6), (7)式より

$$0\sigma_t' = r \frac{d_0\sigma_r}{dr} - \frac{2a^2}{r^2-a^2} 0\sigma_r \quad (8)$$

両辺に $r/(r^2-a^2)$ をかけ r から b まで積分し、 $0\sigma_r(b)=0$ より

$$0\sigma_r(r) = -\frac{r^2-a^2}{r^2} \int_r^b \frac{r}{r^2-a^2} 0\sigma_t' dr \quad (9)$$

(9)式をつりあい式(7)に代入すると

$$0\sigma_t(r) = 0\sigma_t'(r) - \frac{r^2+a^2}{r^2} \int_r^b \frac{r}{r^2-a^2} 0\sigma_t' dr \quad (10)$$

中空円筒のときは $a=0$ において、(4), (9), (10)式から

$$0\sigma_z(r) = 0\sigma_z'(r) - 2 \int_r^b \frac{0\sigma_z'}{r} dr \quad (11)$$

$$0\sigma_t(r) = 0\sigma_t'(r) - \int_r^b \frac{0\sigma_t'}{r} dr \quad (12)$$

$$0\sigma_r(r) = - \int_r^b \frac{0\sigma_t'}{r} dr \quad (13)$$

(4), (9), (10)式および(11), (12), (13)式より中空および中空円筒の残留応力分布を計算することができる。

次に外層除去過程における軸方向のひずみを ϵ_z とし、この ϵ_z と表面残留応力 $0\sigma_z'$ 、 $0\sigma_t'$ との関係を求めてみる。半径 r まで除去したとき、半径 $\rho (< r)$ における軸方向のひずみ $\epsilon_z(\rho)$ は、応力とひずみの関係より

$$\epsilon_z(\rho) = \frac{1}{E} \{ \sigma_z(\rho) - \nu(\sigma_t(\rho) + \sigma_r(\rho)) \} \quad (14)$$

E : ヤング率, ν : ポアソン比, このとき円周方向および半径方向の付加応力 $\sigma_t(\rho)$, $\sigma_r(\rho)$ は、Lamé' の円筒理論から

$$\sigma_t(\rho) = -0\sigma_r(r) \frac{r^2}{r^2-a^2} \left(1 + \frac{a^2}{\rho^2} \right) \quad (15)$$

$$\sigma_r(\rho) = -0\sigma_r(r) \frac{r^2}{r^2-a^2} \left(1 - \frac{\rho^2}{a^2} \right) \quad (16)$$

よって

$$\sigma_t(\rho) + \sigma_r(\rho) = -0\sigma_r(r) \frac{2r^2}{r^2-a^2} \quad (17)$$

上式は ρ に無関係に断面内一様である。また軸方向の付加応力 $\sigma_z(\rho)$ も断面内一様である。(17), (1)式より(14)式は

$$\epsilon_z = \frac{2}{E(r^2-a^2)} \left(\int_r^b 0\sigma_z r dr + \nu_0\sigma_r(r)r^2 \right) \quad (18)$$

(4), (9)式を(18)式に代入すると

$$\epsilon_z = \frac{2}{E} \left\{ \int_r^b \frac{r}{(r^2-a^2)} (0\sigma_z' - \nu_0\sigma_t') dr \right\} \quad (19)$$

(19)式を微分すると

$$\frac{d\epsilon_z}{dr} = -\frac{2}{E} \frac{r}{r^2-a^2} (0\sigma_z' - \nu_0\sigma_t') \quad (20)$$

中空円筒のときは

$$\epsilon_z = \frac{2}{E} \left\{ \int_r^b \frac{1}{r} (0\sigma_z' - \nu_0\sigma_t') dr \right\} \quad (21)$$

$$\frac{d\epsilon_z}{dr} = -\frac{2}{E} \frac{1}{r} (0\sigma_z' - \nu_0\sigma_t') \quad (22)$$

(19), (21)式, あるいは(20), (22)式によって機械的に測定した軸ひずみとX線の測定した表面応力との比較検討ができる。

2・2 内層除去による方法

円筒の外表面部分の残留応力の測定はX線的にいろいろな方法で測定ができる。また、円筒の内表面については、その軸方向の応力の測定の際には円筒の端面外から軸方向に 45° 傾いた方向より内表にX線を入射して Schaal 法で測定ができる。しかし、円周方向の応力についてはいずれの方法で求めるにしても円筒を切断分離しなければ求めることができない。ここでは多少精度はおちるが円筒を切断することなく Schaal 法を利用した方法で直接に応力を測定する方法を説明する。

普通用いられる Schaal 法 ($45-45^\circ$ 法) は次の操作による。Fig. 1 において試料Aを試料支持台におきZ軸(試料軸方向とする)の回りに 45° 傾けておく。Z軸はフィルム面上のZ'軸に平行である。図上O軸はO'軸に平行である。試料の円周方向および半径方

Fig. 1. Arrangement of specimen and X-ray film in Schaal method.

向を t , r 軸にとり, r 軸が X 線の入射方向 $A'A$ と 45° 傾いている. Schaal 法でははじめてフィルムの片面をおおい, 次いで 180° 回転して残り半分の写真をとり回折線のずれ Δ を測定する. 回折角を θ , $\eta = 90^\circ - \theta$ とし, r 軸より $45^\circ + \eta$, $45^\circ - \eta$ の方向のひずみを ${}_0\varepsilon_{45+\eta}$, ${}_0\varepsilon_{45-\eta}$ とすると

$${}_0\varepsilon_{45-\eta} - {}_0\varepsilon_{45+\eta} = \frac{\tan \eta \cos^2 2\eta}{2R} \Delta \quad (23)$$

である. R は試料とフィルムの距離. また軸方向, 円周方向および半径方向のひずみを ${}_0\varepsilon_t$, ${}_0\varepsilon_r$, ${}_0\varepsilon_z$ とすると

$${}_0\varepsilon_t - {}_0\varepsilon_r = \frac{1}{\sin 2\eta} ({}_0\varepsilon_{45+\eta} - {}_0\varepsilon_{45-\eta}) \quad (24)$$

の関係がある. (23) 式を代入して

$${}_0\varepsilon_t - {}_0\varepsilon_r = -\frac{\cos^2 2\eta}{4R \cos^2 \eta} \Delta \quad (25)$$

半径方向の応力零の条件と応力とひずみの関係を用いると, 円周方向の応力 ${}_0\sigma_t$ は

$${}_0\sigma_t = -\frac{E}{1+\nu} \frac{\cos^2 2\eta}{4R \cos^2 \eta} \Delta \quad (26)$$

次に, 試料をこの状態からさらに Fig. 1 に示すように O 軸の回りによる角度だけ回転して Schaal 法と同じく写真を撮る場合を考える. このようにすると, はじめ円筒形試料の端面近くの内面に軸方向に直角に, その面に 45° の方向より X 線が入射した状態 (実際には X 線は円筒外層にさざぎられて入射できない) にしておき, 次いで角度 α だけ回転することによって内面に入射することができたとする. そこでこの状態の解析のため, いま試料を動かさずにフィルムを動かした場合に置き換えて考えてみる. これには座標の変換を Euler 角 φ, α, ψ を用いて次のように行なう. Fig. 2 に示すように

(1) まず Z 軸の回りに角度 φ だけ回転する. t 軸は t' 軸に移り, r 軸は r' 軸に移る.

(2) r' 軸の回りに角度 $(-\alpha)$ (逆回転) だけ回転する. t' 軸は t'' 軸に移り, z 軸は z' 軸に移動する.

Fig. 2. Rotation of axis t by Euler's angle, φ, α, ψ .

(3) z' 軸の回りに角度 ψ だけ回転する. t'' 軸は角度 ψ だけ移動する. $\psi = \eta$ とすると, この方向のひずみ ${}_0\varepsilon_\psi$ は Schaal 法における ${}_0\varepsilon_{45-\eta}$ に相当し, $-\psi$ 方向のひずみ ${}_0\varepsilon_{-\psi}$ は ${}_0\varepsilon_{45+\eta}$ に相当する.

角度 ψ だけ回転した t'' 軸の t, z, r 軸に対する方向余弦 l, m, n は

$$\left. \begin{aligned} l &= \{\cos \varphi \cos(-\alpha) \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi\} \\ m &= \{-\sin(-\alpha) \cos \psi\} \\ n &= \{\sin \varphi \cos(-\alpha) \cos \psi + \cos \varphi \sin \psi\} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

また, ${}_0\varepsilon_\psi$ は

$${}_0\varepsilon_\psi = {}_0\varepsilon_t l^2 + {}_0\varepsilon_z m^2 + {}_0\varepsilon_r n^2 \quad (28)$$

である. $\varphi = 45^\circ$, $\psi = \eta$, および $\psi = -\eta$ とすると (27), (28) 式より

$$\begin{aligned} {}_0\varepsilon_\psi &= {}_0\varepsilon_t \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cos \alpha \cos \eta - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \eta \right)^2 + {}_0\varepsilon_z \left(\sin \alpha \cos \eta \right)^2 \\ &\quad + {}_0\varepsilon_r \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cos \alpha \cos \eta + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \eta \right)^2 \\ {}_0\varepsilon_{-\psi} &= {}_0\varepsilon_t \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cos \alpha \cos \eta + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \eta \right)^2 + {}_0\varepsilon_z \left(\sin \alpha \cos \eta \right)^2 \\ &\quad + {}_0\varepsilon_r \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cos \alpha \cos \eta - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \eta \right)^2 \end{aligned}$$

上 2 式より

$${}_0\varepsilon_t - {}_0\varepsilon_r = \frac{1}{\cos \alpha \sin 2\eta} ({}_0\varepsilon_{-\psi} - {}_0\varepsilon_\psi) \quad (29)$$

このときの回折線のずれを Δ' とすると (23) 式が同じく成立し, Schaal 法のときの (24), (25), (26) 式と同様にして

$${}_0\sigma_t = -\frac{E}{1+\nu} \frac{\cos^2 2\eta}{4R \cos^2 \eta} \frac{\Delta'}{\cos \alpha} \quad (30)$$

このとき (26) 式による普通の Schaal 法に比べて精度は, $\alpha = 30^\circ$ のときは $\sqrt{3}/2$, 45° のときは $1/\sqrt{2}$, すなわち約 2 割あるいは 3 割精度はおちることになる. しかし, この方法によって円筒を切断せずに直接に内面の円周応力が測定できる. なお測定する内面は, 円筒の端面近くであるため残留応力の弛緩の影響を考慮して測定はできるだけ内部について行なわねばならない.

次にこのように内表の表面残留応力が得られたとして内層よりの残留応力分布を求める式を説明する. いま半径 a より r まで内層を除去したとする. 半径 a から r までに存在していた軸方向の残留応力の除去で残った部分に軸方向に σ_z なる応力が一様に付加するとすると次のつりあい式が成立する.

$$\pi(b^2 - r^2)\sigma_z = \int_a^r 2\pi r {}_0\sigma_z dr \quad (31)$$

半径 r の部分の内表の軸方向の表面残留応力を ${}_0\sigma_z'(r)$ とすると, ${}_0\sigma_z'(r) = {}_0\sigma_z(r) + \sigma_z$ であるから, (31) 式は

$$(b^2 - r^2)({}_0\sigma_z' - {}_0\sigma_z) = \int_a^r 2r {}_0\sigma_z dr \quad (32)$$

(32) 式を r で微分し整理すると

$$\frac{d{}_0\sigma_z}{dr} = \frac{1}{(b^2 - r^2)} \frac{d}{dr} \{(b^2 - r^2) {}_0\sigma_z'\} \quad (33)$$

上式を a から r まで積分すると、 $\sigma_z(a) = \sigma_z'(a)$ であるから

$$\sigma_z(r) = \sigma_z'(r) - 2 \int_a^r \frac{r}{(b^2 - r^2)} \sigma_z' dr \quad (34)$$

また、半径 a から r までの除去で、半径 r に存在していた半径方向の残留応力 $\sigma_r(r)$ が消去するから、これが残った部分に内圧となって加わる。したがって、半径 r の部分に付加する円周方向の応力 $\sigma_t(r)$ は

$$\sigma_t(r) = \sigma_r(r) \frac{b^2 + r^2}{b^2 - r^2} \quad (35)$$

円径 r の円筒の内表の円周方向の表面残留応力 $\sigma_t'(r)$ は、 $\sigma_t'(r) = \sigma_t(r) + \sigma_t(r)$ であり、(7), (33)式を代入して

$$\sigma_t' = r \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2b^2}{b^2 - r^2} \sigma_r \quad (36)$$

両辺に $r/(b^2 - r^2)$ をかけ、 a から r まで積分すると

$$\sigma_r(r) = \frac{b^2 - r^2}{r^2} \int_a^r \frac{r}{b^2 - r^2} \sigma_t' dr \quad (37)$$

(37)式をつりあい式(7)に代入すると

$$\sigma_t(r) = \sigma_t'(r) - \frac{r^2 + b^2}{r^2} \int_a^r \frac{r}{b^2 - r^2} \sigma_t' dr \quad (38)$$

次に、内層除去過程における軸方向のひずみ ε_z と表面残留応力 σ_z', σ_t' との関係を求める。半径 r まで除去したとき、半径 $\rho (> r)$ における軸方向のひずみ $\varepsilon_z(\rho)$ には応力とひずみの関係(14)式が成立し、このとき(15), (16), (17)式と同様な計算を行なうと、内層除去によって生じた応力は断面内一様であり、 ε_z も断面内一様となる。(31), (14)式より

$$\varepsilon_z = \frac{2}{E(b^2 - r^2)} \left(\int_a^r \sigma_z r dr - \nu \sigma_r(r) r^2 \right) \quad (39)$$

(34), (37)式を代入すると

$$\varepsilon_z = \frac{2}{E} \left\{ \int_a^r \frac{r}{(b^2 - r^2)} (\sigma_z' - \nu \sigma_t') dr \right\} \quad (40)$$

(40)式を微分すると

$$\frac{d\varepsilon_z}{dr} = \frac{2}{E} \frac{r}{b^2 - r^2} (\sigma_z' - \nu \sigma_t') \quad (41)$$

2・3 全応力分布を求める方法

円筒の外層除去を行なって外表よりの残留応力分布を求め、次いで残った円筒について内表よりの残留応力を求めてこれらから全応力分布を求める方法を述べる。2回めの内層よりの除去のとき、始めの外層除去でこの部分の残留応力はすでに変化している。したがって、この外層除去による付加応力を求めてこれを差し引かねばならない。

いま外層より半径 c まで除去したとする。すると外径 c 、内径 a の円筒に軸方向、円周方向、および半径方向に σ_{zd} , σ_{td} , σ_{rd} なる応力が付加したとする。そこでこの円筒の残留応力を軸方向、円周方向および半径方向、それぞれ σ_z'' , σ_t'' , σ_r'' (これは外径 c 、内径 a の円筒の残留応力であり、元の残留応力 σ_z ,

σ_t , σ_r と区別してこのようにおく) とすると

$$\sigma_z'' = \sigma_z + \sigma_{zd}, \quad \sigma_t'' = \sigma_t + \sigma_{td}, \quad \sigma_r'' = \sigma_r + \sigma_{rd} \quad (42)$$

この σ_z'' , σ_t'' , σ_r'' は 2・2 の場合と同様にして、 $b=c$ として(34), (37), (38)式より求められる。

以下付加応力 σ_{zd} , σ_{td} , σ_{rd} を求める。いま外径 b から c までの外層除去で、除去した部分と残った部分の軸方向の力のつりあい式は

$$(c^2 - a^2) \sigma_{zd} = \int_c^b 2r \sigma_z dr \quad (43)$$

である。(43)式に(4)式を代入すると

$$(c^2 - a^2) \sigma_{zd} = \int_c^b \left(\sigma_z' r - 2r \int_r^b \frac{r}{(r^2 - a^2)} \sigma_z' dr \right) dr$$

よって

$$\sigma_{zd} = 2 \int_c^b \frac{r}{(r^2 - a^2)} \sigma_z' dr \quad (44)$$

この σ_{zd} は断面内一様である。

また、半径 c における半径方向の残留応力 $\sigma_r(c)$ が除去されるから、残った円筒にこれに相当する外圧が加わることになる。試料内半径 r ($c \geq r \geq a$) における円周方向および半径方向の付加応力 σ_{td} , σ_{rd} は

$$\sigma_{td}(r) = -\frac{c^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \sigma_r(c) \quad (45)$$

$$\sigma_{rd}(r) = -\frac{c^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \sigma_r(c) \quad (46)$$

となる。また上式の $\sigma_r(c)$ は(9)式より

$$\sigma_r(c) = -\frac{c^2 - a^2}{c^2} \int_c^b \frac{r}{r^2 - a^2} \sigma_t' dr \quad (47)$$

である。(44), (45), (46)式より付加応力は得られる。

3 実験例

まず、Fig. 3 には、外径 55 mm、内径 38 mm の SMn 20 C 材の中空円筒について、これを内外層浸炭後焼入れした試料について、2・1 の外層除去法によって外表よりの残留応力分布を求めた結果を示す。な

Fig. 3. Residual surface stress on successive removal and calculated residual stress distribution in the outer part of carburized and quenched cylinder.

Fig. 4. Residual stress in inner part produced by expanding deformation of the cylinder specimen, inner diameter 24 mm, outer diameter 34 mm, — : stress by Sachs's method, ● : stress by X-ray method.

お図上には外層除去過程の表面残留応力 σ_z' , σ_t' も示してある。測定はカウンター法, 0° – 45° 法で行なった。特性X線は $\text{CrK}\alpha$ 線, 照射面積は $2 \times 5 \text{ mm}^2$ で (211) 面間のひずみによる応力を測定した。なお $E=21\,000 \text{ kg/mm}^2$, $\nu=0.28$ とした。実際の測定は外層を逐次除去しながら外表対照の4点について軸方向と円周方向の表面残留応力を測定し結果はその平均である。応力分布は(4), (10)式より計算したものである。ここでは半径方向の残留応力は示していない。

次に 2・2 で示した Schaal 法を利用した方法で円筒内表の応力を測定した例を述べる。試料は0.0043% C, 0.28% Mn の組成のものである。試料寸法は外径 36 mm, 内径 24 mm, 長さ 15 mm の厚肉円環である。これを内部に水と 6 号工業用雷管を入れて爆発させて衝撃の水圧を 1 回, および繰返し 4 回, 10 回加えたものである。試料は繰返し爆発によって径は大きくなっている。測定は写真法で行ない, はじめ試料軸方向とフィルム面を平行にして, 測定点を試料中央部にとり, 測定内面が試料支持台の回転軸上にあり, またその円周方向がX線の入射方向と 45° 傾いた方向におく。この通常の Schaal 法の状態ではX線は内面に入射できない。ここでフィルムと試料内面との距離を 50 mm になるように調整する。次に試料を支持台上で 45° 回転させる。するとX線は入射でき, ここで回折写真を撮り, d' を測定して, $R=50 \text{ mm}$, $\alpha=45^\circ$ として(8)式より応力を計算した。なお, 測定条件として使用X線 $\text{CrK}\alpha$ 線, 照射面積 $2.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ である。Fig. 4 には爆発後の試料内表の残留応力をこの方法で測定した結果と, さらに, この試料外周中央部に軸方向と円周方向に 4 枚のひずみゲージを張り付け内層除去を切削によっていねいに行ない, 除去によるひずみを読み取って, これより Sachs 法で円周方向の残留応力分布を機械的に求めた結果が示してある。円環であるため Sachs 法を用いることに疑問が残る

が, この察軸方向に最もゲージ長さの短い 3 mm のものを用い, 円周方向の残留応力の測定に際して軸方向のち緩みずみによる誤差を少なくした。結果として内表でX線的に求めた残留応力と機械的測定による結果と一致したが, このような鉄材の爆発加工を行なったものについて両方法による結果が実際にどの程度一致すべきかなどについては現在著者に知見はなく, ここでは一応このような測定の結果として一致をみたということ

にとどめておく。

また, 機械的測定による軸ひずみを用いて, 機械的測定による応力とX線の測定による応力との比較検討を行なった実験としては, 著者らは焼入れおよび焼もどしをした中実円筒について(2), (22)式の関係を用いて詳細な検討を行なったが, ここでは省略する。

4 結 言

外層および内層より逐次除去して円筒の残留応力分布を求める方法を説明した。また, 円筒の内面の円周方向の応力を測定する新しい方法を説明した。

Schaal 法を用いて円筒内表の円周応力を求める方法は, 直接応力を求めようとする方向からX線を入射するものでなく試料をさらに支持台上で適宜回転することによって異なる方向より入射によって求めるため, 方法としてはより間接的であって理論上精度はおちる。

また回転によって入射ビームはさらに試料面に傾き測定精度はおちる。したがって試料の回転はせいぜい 45° 以内にとるべきであろう。また, 実測にあたって, X線はできるだけ円筒内面に奥深く入射できればよいが, これも試料の幾何学的形状による制限があり, 入射点が端面に近いときは残留応力のち緩の影響を考慮しなければならない。この方法はきわめて実用的な方法ともいえるが, この利用として, 従来X線の方法で測定困難な形状の, たとえば, 穿孔した穴の内面の円周応力の応力測定などに利用できると思われる。終わりに本研究にご助力いただいた小松製作所成瀬光芳, 横浜国大指田年生, 小木曾克彦氏に深謝します。

(昭和43年7月18日 第7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) 日本材料学会, “応力測定法”, p.89 (1966) 養賢堂
- 2) 山内恭彦, “一般力学”, p.185 (1941) 岩波書店
- 3) 本山盛太郎, 米谷 茂, 堀沢 寛, 材料, **17**, 1077 (1968).