X線応力測定法による孔の円周方向残留応力の測定[†]

小栗 泰造* 田中 努*

岡野 俊之** 村田 一夫**

X-ray Stress Measurement of the Circumferential Residual Stress on the Inner Surface of a Hole

by

Taizo OGURI*, Tsutomu TANAKA*,
Toshiyuki OKANO** and Kazuo MURATA**

The circumferential residual stress on the inner surface of a round pipe was measured by using the dual-axis inclining method. The dual-axis inclining method is an X-ray stress measurement technique using the iso-inclination method jointly with the side-inclination method. It is not possible to apply the conventional X-ray stress measurement method based upon the $\sin^2\psi$ method to such measurement even if the irradiated area is at the neighborhood of the open-end of the hole. The dual-axis inclining method was described, and the analysis was made of the relation between the position of the irradiated area, the diameter of hole and the scannable angle range. On the assumption that the ψ angle should be scanned up to 30 deg for the stress measurement, the result of the analysis shows that the distance between the irradiated area and the open-end of the hole should be less than a quarter of the hole diameter. The experiment was conducted for a round pipe of carbon steel. It was found that even when the intensity of background decreased only on the lower side of diffraction peak due to the shielding by the side wall of the pipe, the circumferential stress can be evaluated by directly applying the parabola peak method or the 2/3-value breadth method to the collapsed diffraction profiles without processing the background.

Key words:

X-ray stress measurement, Residual stress, Circumferential stress, Hole, Pipe

1 緒 言

管にその内面側を起点とする軸方向の割れが生じた場合など、孔内における円周方向残留応力の測定が必要になる場合がある。しかし、 $\sin^2\psi$ 法を基礎とするX線応力測定法¹⁾(以下「従来法」という)では、たとえ測定箇所が孔の開口端近傍であっても、これを測定することはできない。測定箇所の周辺に壁があるために、従来法の光学配置では照射X線と回折X線の光軸を確保することがきわめて難しいからである。

このような狭隘部に適用し得る応力測定技術に二軸傾斜法^{2),3)}がある。二軸傾斜法は並傾法と側傾法を併用するX線応力測定技術である。X線光軸の制約が従来法より緩やかなため、孔内の円周方向残留応力の測定にも適用可能である。

しかし、開口端から測定箇所までの距離や孔の大きさによっては適用できない場合があると考えられ、適用範囲は明らかでない。また、どのような角度範囲で走査すればよいかを事前に見積もる方法もない。

そこで、X線光軸を確保できる角度走査範囲を解析的に調べるとともに、適用範囲について検討した。また、

炭素鋼円管内面の円周方向応力の測定を行い、管壁による遮へいで回折プロファイルが一部乱れた場合の対処法について検討した。

2 測定理論

2.1 二軸傾斜法

Fig. 1は、孔の側壁の円周方向応力を二軸傾斜法で測定する状況を表す模式図である。孔内の応力測定位置を原点Oとする。開口端面から原点Oまでの距離を Δz とする。孔の直径を d とする。原点Oを共通にする二つの直角座標系(試料座標系Sおよび実験室座標系L)とQ軸を以下のように定義する。S₂軸は孔の軸方向に平行である。S₁S₂平面は原点Oで孔の壁面に接する平面である。S₃軸は測定面法線を、L₃軸は回折面法線をそれぞれ表す。L₂軸は、S₂軸をS₁軸に関して角度 Ω だけ回転させた方向に平行とする。Q軸は、S₃軸をS₁軸に関して角度 Ω だけ回転させた方向に平行とする。Q軸は、並傾法の走査角度の基準となる軸である。L₃軸は、Q軸をL₂軸に関して角度 ψ だけ回転させた方向に平行とする。角度 Ω が側傾法の回転角を、角度 ψ が並傾法の回転角を表す。

[†] 原稿受理 平成26年12月4日 Received Dec. 4, 2014

©2015 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 (地独)大阪府立産業技術総合研究所 金属材料科 〒594-1157 和泉市あゆみ野

Metallic Materials Section, Technology Research Institute of Osaka Prefecture, Ayumino, Izumi, 594-1157.

** 株式会社オカノブラスト 〒599-8247 堺市中区東山

Okano Blast Co. Ltd., Naka-ku, Sakai, 599-8247.

式 (7) の左辺が 0 になるときの ψ 角の値が, その傾斜角 Ω における ψ 角の限界値 (以下「 ψ_{limit} 」という) である。ただし, 式 (7) の θ に代入すべき値は回折ピークの Bragg 角ではなく, それより低角の値である。そうすることにより, 回折ピークの低角側に拡がるバックグラウンドも, x 方向の障壁によって遮へいされない条件を与える式となる。回折ピークは幅を有しているため, 回折ピーク角を決定するには, ある程度広い範囲で欠けのないプロファイルを取得する必要があるからである。使用する装置の測角範囲を参照して 2θ の走査範囲の下限値に相当する値を代入すれば, バックグラウンド領域を含めて一切の欠けが生じることのない ψ_{limit} を求めることができる。

まず, フェライト系およびマルテンサイト系鉄鋼材料の場合について述べる。X 線応力測定法標準—鉄鋼編—⁴⁾ (以下「測定法標準」という) では, CrK α 線による α Fe211 回折 (回折角約 156 deg) が推奨条件として挙げられている。Fig. 3 は, この推奨条件の下で計算した ψ_{limit} である。計算に使用した 2θ の値は, 後述の実験で使用する X 線装置の検出器が測角範囲 20 deg の PSPC であることを考慮して, 測角下限値である 146 deg (= 156 deg - 20 deg/2) とした。

Fig. 3 に示すように, 傾斜角 Ω が小さくなるとともに, また測定位置が孔の奥になるほどに ($\Delta z/d$ の値が大きいほど), 採り得る ψ 角は急速に小さくなる。応力の測定精度の観点から, ψ 角は少なくとも 30 deg 程度まで走査する必要があると仮定する。この走査条件を満たす孔直径と測定位置との関係は, Fig. 3 によれば $\Delta z/d \lesssim 1/4$ である。すなわち, 測定位置が, 孔の開口端から孔直径の 1/4 以下の距離にあれば, ψ 角を 30 deg 程度まで走査可能である。

次に, オーステナイト系鉄鋼材料の場合について述べ

Fig. 3 Relation between the inclination angle Ω and the limit of the ψ angle calculated for various values of $\Delta z/d$ under the condition of effective angle range $146 \text{ deg} \leq 2\theta \leq 166 \text{ deg}$ for α Fe211 diffraction with CrK α X-rays.

る。測定法標準では, CrK β 線による γ Fe311 回折 (回折角約 148 deg) が推奨条件として挙げられている。しかし, この条件では P/B 比が小さい回折プロファイルしか得られないことも少なくない。そこで, 次善の条件として利用されることのある CrK α 線による γ Fe220 回折 (回折角約 128.6 deg) についても検討した。

Fig. 4 は, これらの回折条件の下で計算した ψ_{limit} であり, (a)CrK β 線による γ Fe311 回折の場合, (b)CrK α 線による γ Fe220 回折の場合をそれぞれ示す。回折ピーク角度が低角になるとともに, 採り得る角度範囲は急速に小さくなっている。 γ Fe220 回折の場合について上述の基準で適用限界を判断すれば, $\Delta z/d \lesssim 1/8$ である。すなわち, 孔の開口端から孔直径の 1/8 以下の距離に測定位置があれば, ψ 角を 30 deg 程度まで走査可能である。

(a) Curves for γ Fe311 diffraction with CrK β X-rays

(b) Curves for γ Fe220 diffraction with CrK α X-rays

Fig. 4 Relation between the inclination angle Ω and the limit of the ψ angle calculated for various values of $\Delta z/d$ under the diffraction condition of stainless steel.

Fig. 3 および Fig. 4 から明らかなように、 Ω 角を大きく採れば ψ 角の走査範囲を大きくすることができる。しかし、 Ω 角を過度に大きくすべきではないと考えられる。なぜなら、 $\sin^2\psi$ 法における高 ψ 角測定には種々の問題が生じると指摘されている⁵⁾。二軸傾斜法は $\sin^2\psi$ 法の下位概念にあたる測定技術であるから、 $\sin^2\psi$ 法における制約（形態に関する制約を除く）は、二軸傾斜法にも当てはまる。よって、二軸傾斜法においても傾斜角の大きさには限度があると考えられる。 Ω 角の上限値は明確に定められるものではないが、 $\sin^2\psi$ 法における制約に倣えば⁵⁾、 $\sin^2\Omega \lesssim 0.8$ が目安になるものと思われる。

なお、これらの図は、X 線照射寸法が無限小であることを前提にしている。X 線照射寸法を有限値とした場合、照射位置 Δz の値が広がりをもつこととなり、また照射位置によって孔壁までの距離が変動するため、図中の各曲線はバンド状になる。

Fig. 5 は、Fig. 3 の計算条件において、X 線ビームが $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の矩形であるとして、 $(\phi d, \Delta z) = (16\text{mm}, 4\text{mm})$, $(32\text{mm}, 4\text{mm})$ の場合について計算した ψ 角限界曲線である。ただし、X 線ビームは xz 平面内で照射位置 O を中心とする $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の矩形とし、その形状寸法は ψ 角および Ω 角の変化によらず一定とする近似を行った。

Fig. 5 によると、X 線ビームサイズ一定の下では、孔径が小さいほどバンドの幅は広くなり、その結果 ψ_{limit} の値は小さくなっている。 ψ_{limit} の値は、X 線照射寸法を無限小とした場合の計算結果（Fig. 5 中の実線）と比較して、 $\Delta z/d = 1/4$ の場合で 5deg 程度、 $\Delta z/d = 1/8$ の場合で約 3deg 程度減少している。よって、孔径が小さくなるとともに、走査条件は Fig. 3 または Fig. 4 で示される条件よりも厳しくなる。

2.3 走査角度範囲の算定

前節の結果から走査角度範囲を算定する手順について

Fig. 5 The ψ -angle limitation curves calculated under the condition of Fig. 3 in consideration of rectangular shaped X-ray beams ($1\text{mm} \times 1\text{mm}$) and $(\phi d, \Delta z) = (16\text{mm}, 4\text{mm})$, $(32\text{mm}, 4\text{mm})$.

述べる。

1. 測定位置を定め、開口端から測定位置までの距離 z と孔の直径 d との比 $\Delta z/d$ の値を求める。
2. Fig. 3 または Fig. 4 を参照して、先に求めた $\Delta z/d$ の値に対応する曲線を探す。対応する曲線がない場合は近いものを探すか、またはその $\Delta z/d$ の値を式 (7) に代入してこれを解き、対応する曲線を求める。近いものを探す場合は、大きいほうの $\Delta z/d$ の値に対応する曲線を採用する。ただし、側角範囲に比べて回折ピークの半価幅が十分に狭い場合は、小さいほうの $\Delta z/d$ の値に対応する曲線を採用することができる。
3. 許容する ψ_{limit} の大きさを設定する。例えば、 ψ 角を少なくとも 0 deg から 30 deg まで走査したい場合は、 $\psi_{\text{limit}} = 30 \text{ deg}$ とする。
4. 採用した曲線と設定した ψ_{limit} の値とから、 Ω 角の値を求めれば、それが Ω 角の下限値である。 Ω 角の上限値は、前節で述べた理由により、 $\sin^2\Omega \lesssim 0.8$ を満たす角度にする。

3 実験

前章の解析結果を利用して走査角度範囲を定め、モデル試料（鋼管）に対する残留応力測定を行った。併せて、管壁による遮へいで回折プロファイルが一部乱れた場合の対処法について検討した。

3.1 実験方法

試料には、フェライト系鋼管である圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG370 (JIS G 3454:2012, 外径 42.7mm, 内径 32.9mm, 長さ 100mm) を用いた。フェライト系材料を選択したのは、高精度測定が比較的容易で、検証実験を容易化できると考えたためである。管内外面はガラスビーズでブラスト処理した。測定位置は開口端から 5mm の位置とした。Table 1 に X 線応力測定条件を示す。X 線応力測定装置には (株) リガクの AutoMATE を使用した。フェライト鋼に対する通常の X 線応力測定条件を適用した。コリメータは $\phi 1 \text{ mm}$ とした。

Table 1 Conditions for the X-ray stress measurement of the dual-axis inclining method.

X-ray tube, filter	Cr, V filter
Tube voltage, current	30 kV, 20 mA
Diffraction	CrK α , αFe211
Detector	Linear PSPC (Span: 100mm, 20deg)
Scanning method	Iso-inclination, fixed ψ_0
Peak determination	Half value breadth method, etc
Correction	Lorentz, polarity, absorption
ψ angle	0, 12.4, 17.6, 21.8, 25.4 , 28.6, 31.7, 34.5, 37.3, 40 deg
Ω angle	25, 27.6, 30, 32.3, 34.5 , 36.7, 38.8, 40.9, 43, 45 deg
Stress constant	-318 MPa/deg
Collimator	1mm in diameter

走査角度範囲は、次のように定めた：測定位置と内半径との比 $\Delta z/d$ は本実験条件では約 0.15 であるから、Fig. 3 において参照すべき曲線は $\Delta z/d = 1/6$ のものである。しかし、ここでは $\Delta z/d = 1/8$ の曲線を参照した。用いた試料の回折線半価幅が 2.3 deg 程度と比較的鋭いことから、バックグラウンドの低角側が多少欠けても後処理で回折角決定精度は確保できると考え、 ψ 角の範囲を広く取ることを優先したものである。傾斜角 Ω は、Fig. 3 の $\Delta z/d = 1/8$ の曲線を参照して、比較的大きい ψ_{limit} の値を採り得る $\Omega = 25 \sim 45 \text{ deg}$ の範囲を採用し、 $\sin^2 \Omega$ の値が等間隔となるような 10 点の角度を選んだ。 ψ 角については、同曲線における $\Omega = 25 \text{ deg}$ での ψ_{limit} 値が約 40 deg であるから、 $\psi = 0 \sim 40 \text{ deg}$ の範囲を採用し、 $\sin^2 \psi$ の値が等間隔となるような 10 点の角度を選んだ。

ブラスト処理の性質を考慮すれば、測定領域はほぼ等二軸応力状態にあると考えられる。よって、 $2\theta_{-\psi}$ の測定は原則として省略した。ただし、確認のため、傾斜角 $\Omega = 45 \text{ deg}$ においてのみ $2\theta_{-\psi}$ の測定を行うとともに、管外面の円周方向残留応力と軸方向残留応力の測定を行った。また、二軸傾斜法で得られた管内面の軸方向応力値と比較する目的で、従来法（側傾法）により同一箇所の軸方向応力を測定した。

3.2 実験結果

傾斜角 $\Omega = 45 \text{ deg}$ における $2\theta_{+\psi}$ と $2\theta_{-\psi}$ の測定結果からは、明瞭な ψ -split²⁾ は認められなかった。また、管外面の円周方向残留応力は $-389 \pm 11 \text{ MPa}$ 、軸方向残留応力は $-379 \pm 9 \text{ MPa}$ であった。よって、管外面の測定領域はほぼ等二軸応力状態にあるものと判断した。側傾法による管内面の軸方向応力測定値は $-344 \pm 16 \text{ MPa}$ であった。

Fig. 6 Diffraction profiles for various values of ψ at the inclination angle $\Omega = 25 \text{ deg}$ in the dual-axis inclining measurement.

以下に二軸傾斜法による管内面の測定結果を示す。Fig. 6 は、傾斜角 $\Omega = 25 \text{ deg}$ 時の回折プロファイルである。 ψ 角が大きくなるとともに、バックグラウンドの低角側の欠けが拡大している。非対称に欠けると、バックグラウンド除去処理に際して不合理なバックグラウンド線を用いることになるため、半価幅法では正しい結果が得られないと考えられる。そこで、解析範囲を $156.4 \text{ deg} \pm 6 \text{ deg}$ に限定するとともに、当該範囲内のプロファイルに欠けがないと認めたプロファイルのみを半

Fig. 7 $\sin^2 \psi$ diagrams obtained by applying the half value breadth method to the profiles with no loss of intensity due to the shielding within the range $156.4 \text{ deg} \pm 6 \text{ deg}$.

Fig. 8 Variations of $\sin^2 \Omega$ diagrams for various peak search methods; (a) half value breadth method for the profiles with no loss of intensity due to the shielding within the range $156.4 \text{ deg} \pm 6 \text{ deg}$, (b) parabola peak top method and (c) 2/3 value breadth method for all the profiles except for the profiles with collapsed peaks.

価幅法によるピーク決定の対象とすることを試みた。Fig. 7 はこのようにして求めた半価幅法による $\sin^2\psi$ 線図である。データ列によってプロット点の数に多少があるのは、解析範囲内に欠けがあると認めたプロファイルを除いたためである。68.3% 信頼区間は、 $\Omega = 45 \text{ deg}$ のデータ（マーカー：◎）で約 19 MPa である。

Fig. 8 (a) は、前記半価幅法による $\sin^2\psi$ 線図を元に作成した $\sin^2\Omega$ 線図である。回帰直線の勾配の符号を反転したものが軸方向応力（-343 MPa）を示し、 y 切片が円周方向応力（-350 MPa）を示す。軸方向応力の値は側傾法による値とよく一致しており、また等二軸応力状態の予想と符合している。

しかし、欠けがあるか否かの判断はやや客観性を欠く上、高 ψ 角のデータを破棄するのは測定精度上不利であることから、解析対象を除外することはできるだけ避けたい。そこで、除外するのはピーク本体に欠けが及んでいるプロファイルのみに限定し、他のピーク決定法を用いることで妥当な結果が得られるか否かを検討した。

Fig. 8 (b) および Fig. 8 (c) は、バックグラウンドにのみ欠けを有する回折プロファイルに対し、バックグラウンド処理を施すことなくその全体に放物線近似法および 2/3 価幅法をそれぞれ適用して得た $\sin^2\Omega$ 線図である。いずれの決定法でも半価幅法による値に近い値が得られており、バックグラウンドにのみ欠けを有するデータを解析対象に加えても妥当な結果が得られることがわかった。

4 結 言

1. 並傾法と側傾法を併用する X 線応力測定技術である「二軸傾斜法」により、孔の側壁の円周方向応力を測定できることを示した。
2. 並傾法と側傾法の走査角度範囲を合理的に算定するための理論式と実用図を導出した。
3. 測定位置の開口端からの距離は、応力測定精度の

観点から ψ 角を 30 deg 程度まで走査する必要があるとした場合、孔の直径の 1/4 以下（CrK α 線による αFe211 回折の場合）、または 1/8 以下（CrK α 線による γFe220 回折の場合）でなければならない。

4. フェライト鋼製円管の端面付近における内径側の円周方向応力および軸方向応力を二軸傾斜法で測定した。理論限界より ψ 角の走査範囲を広げたことに起因してバックグラウンド強度が低角側で減少した場合であっても、バックグラウンド処理なしに放物線近似法または 2/3 価幅法でピークサーチを行えば妥当な結果を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) T. Goto and S. Ohya, "The fundamental principles and techniques of X-ray stress measurement and current developments in the field — I: The fundamental principles and techniques of X-ray stress measurement —", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.47, No.11, pp.1188–1194 (1998).
- 2) T. Oguri and K. Murata, "X-ray stress measurement of three stress components of plane stress state by the dual-axis inclining method", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.60, No.7, pp.636–641 (2011).
- 3) T. Oguri and K. Murata and K. Yamaguchi, "X-Ray stress measuring technique for a side-Wall of deep groove", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.7, pp.641–646 (2007).
- 4) "Standard method for X-ray stress measurement", The Society of Materials Science, Japan, SD-5-02, pp.17–20 (2002).
- 5) S. Ohya and Y. Yoshioka and S. Maeno, "Residual stress analysis on materials with steep stress gradient by using X-ray incidence at higher angles", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.45, No.7, pp.766–771 (1996).