

深さ方向の残留応力分布の測定

荻野直彦・矢澤歩*

The measurement of residual stress distribution in depth direction

Naohiko OGINO, Ayumu YAZAWA

構造材料の内部には、外見できない形で残留応力が存在しており、機器の損傷では、しばしばこの残留応力が損傷要因になっている。そのため、いくつかの方法で残留応力の測定が試みられている。

本研究では、より汎用的な深さ方向の残留応力の測定手法の確立を目的として、鋼材の深さ方向の残留応力の測定を行い、測定精度についても評価を行った。

キーワード：残留応力測定、穿孔法、ロゼットひずみゲージ、穿孔装置

Residual stress exists inside a structural material as an invisible form, and in the case of equipment damage, this residual stress often becomes a damage factor. Therefore, the measurement of the residual stress has been attempted in several ways.

In this study, we measured the residual stress in the depth direction of steel material for the purpose of establishing more general residual stress measurement method in the depth direction, and also evaluated the measurement accuracy.

Keywords: residual stress measurement, CHD, rosette strain gauge, perforator

1 まえがき

残留応力は、外観からは見えず、認識されることも少ないが、機器の損傷では、度々この残留応力が損傷要因になっていることがある。一般的に、引張の残留応力は悪影響を与え、圧縮の残留応力は疲労強度の向上に良い影響を与えることが多い。そのため、残留応力の正確な測定は、部材の損傷防止の上で重要な課題であり、また、表面のみならず、部材内部に閉じ込められた残留応力を計測することが部材の評価のために求められている。産業技術センターでも、この残留応力の測定に深くかかわっており、非破壊で残留応力を測定することができる X 線応力測定装置を使用し、実績を上げている。

ただし、産業技術センターの保有する X 線残留応力測定装置では、最大で十数 μm の厚さ方向の平均値しか測定できず、

内部の深さ方向の測定をすることができていない。そこで、部材内部の深さ方向の残留応力測定について、より汎用的な手法により実用に耐えうる測定精度を持った測定手法の確立を目指した。

構造材料内の残留応力を測定する方法にはいくつかの種類があり、測定サンプルの破壊の程度によって、非破壊法 (non-invasive)、部分破壊法 (semi-invasive)、完全破壊法 (totally destructive) に分類されている。

非破壊法は、X 線回折法 (X-ray)、中性子回折法 (Neutrons)、超音波法 (Ultrasonic) などがあるが、いずれも表面近傍の測定のみに適応され、深さ方向を測定するためには、電解研磨などにより部分的な破壊を用いなければならない。また、通常の X 線では、測定深さは鋼材の数十 μm 程度である。

部分破壊法と完全破壊法は、部材の切断破壊により解放されるひずみを測定することで応力に換算するものである。部分破壊法の中に、部材をドリルで穿孔する穿孔法がある。穿孔法は 2 ～ 4mm の深さまで測定可能とされている。

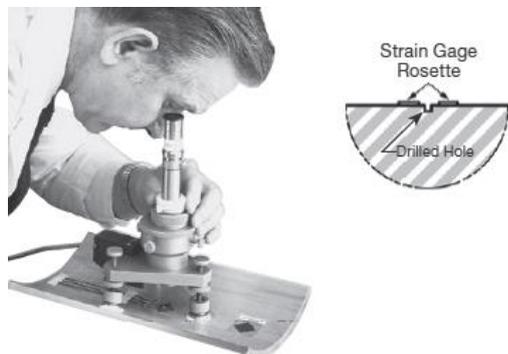


図 1 穿孔法¹⁾

穿孔法の測定手順は、ASTM 規格 E837-08²⁾ に規定されている。

ASTM 規格によると穿孔装置は、測定対象に応力影響を与えない手法によることとされている。関連文献に多く用いられている手法は、エアタービンドリルを用いて穿孔しているものが多い。^{3) 4)} そもそもこのような装置自体の入手が難しく本測定手法が敬遠されている原因となっている。

本研究では、より汎用的な測定を目指して、ASTM 規格とその他の穿孔法関連文献を参照して、部分破壊法に属する穿孔法について汎用フライスを用いて応力測定を行い、精度についての検証を行う。さらに電解研磨法により表面を研磨し、X線残留応力測定装置で残留応力を測定し、穿孔法による測定値との比較評価を行うこととする。

2 実験方法

2.1 使用機器

今回の測定では、ASTM 規格などによるエアタービンドリルなどの穿孔装置ではなく、より一般的な装置である必要がる。そのため、より一般的な汎用フライス(図2)を用いての測定を行うこととした。Z軸方向の分解能は、3 μ mである。



図 2 穿孔装置(汎用フライス)

実際の測定は、図3に示すように穴の周囲に配置された特殊なロゼットひずみゲージにより、穿孔にともなう半径方向の部分解放ひずみを3箇所で測定した。

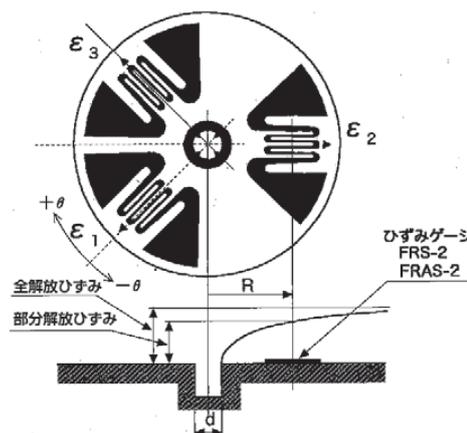


図 3 ロゼットひずみゲージ⁵⁾

X線残留応力測定は、リガク MSF-2M を使用した。

2.2 残留応力の負荷

今回の測定の目的は、測定した残留応力値の正しさを検証することにある。そのため、部材の深さ方向に対して既知の応力を負荷する必要がある。部材内部に均一勾配の応力値を負荷するため、今回の測定では、4点曲げ冶具(図4)を用いて、仮定の残留応力を負荷した。負荷された深さ方向の応力分布を穿孔法及び電解研磨+X線応力測定により測定した。4点曲げでの応力分布は、図5のように上下一関数のような分布となる。そのため、負荷した曲

げ応力を裏面にある歪みゲージにより測定することで表面からの深さ方向の残留応力を予測できる。予測した応力値を正として、実際にそれぞれの手法により測定した残留応力値と予測値を比較して測定精度の検証を行った。



図4 4点曲げ装置

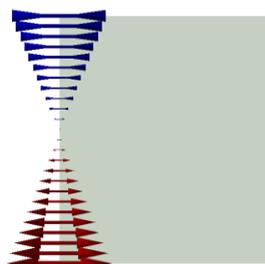


図5 断面応力分布

2.3 測定サンプル

今回測定したサンプル(図6)は、材質SS400として、サンプル形状は、サンプル:幅32.1mm、厚さ4.3mmとした。

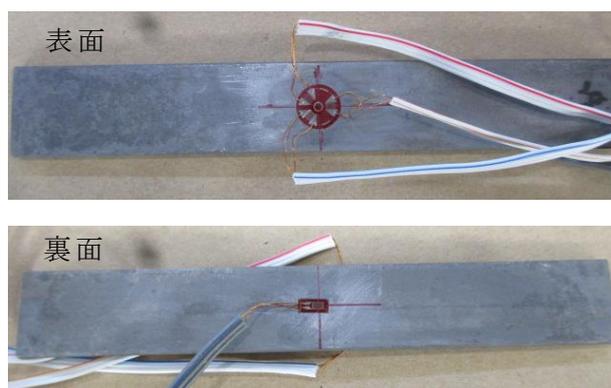


図6 サンプル

2.4 穿孔法による残留応力の解析

今回の測定では、破壊する穿孔の大きさは $\phi 2\text{mm}$ 、穿孔深さはサンプル板厚の1/2までとした(圧縮残留応力と引張残留応力が逆転する点まで穿孔した)。残留応力測定専用の歪みゲージを測定部位に接着し、その中心に穿孔し、それにより発生する部分開放ひずみ、穿孔直径寸法、試験体の弾性係数、ポアソン比などを用いて残留応力を解析した。

穿孔法の基礎となる原理は、Matharが最初に提案したものである。⁶⁾ 残留応力を有する物体に穴をあけると、その位置で応力が解放されて穴近傍の応力分布が変化する。G.Kirschは、均一残留応力を受けている薄板に、小さな貫通穴をあけた状態のケースにおける解を得ている。⁷⁾

穿孔法は、均一な平面応力を受ける薄肉の幅広平板を貫通して穿孔された小孔を前提として開発されたが、通常の機械部品や構造部材は、大きさ、形状とも様々であり、実際の使用条件からは、かけ離れたものであった。多くのケースでは、測定対象物は厚肉であり、穿孔穴は、浅い“ブラインド”穴を用いることが必要となる。

平面応力場にブラインド穴を穿孔すると、非常に複雑な局所応力状態を生じ、正確な解を弾性理論から求めることは大変困難になってしまう。しかし、RendlerとVigness⁸⁾によって、ブラインド穴の応力分布の性質が貫通穴の場合と非常に類似することが実証されている。ブラインド穴を穿孔することによって解放されるひずみを測定することで、開放された応力を解析することができる。ブラインド穴を穿孔することによる解放ひずみ ϵ_r は、穴と同心の円弧に沿って \sin 関数的に変化し、穿孔深さに対応する開放された応力の和となる。

実験的な検証から得られた適切なブラインド穴係数を用いれば、より高い精度でブラインド穴にも適用できるが、今回の研究では、穴係数は、G.Kirschによって与えられた式から得られた式(1)を用いて、解析された応力値の検証を行った。⁵⁾

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{4B \cos 2\theta} \quad \dots(1)$$

$$4A = \frac{(1+\nu)d^2}{2ER^2}, 4B = \frac{2d^2}{ER^2} + \frac{3(1+\nu)d^4}{8ER^4}$$

ν:ポアソン比 R:ゲージ中心半径
d:穿孔径 E:ヤング率

3. 結果および考察

3. 1 穿孔法による測定

サンプル裏面に貼付けした歪みゲージの値から計算した最表面の応力値を負荷応力値とし、そこから厚さ中心点がゼロとなる勾配で予測値とした。

①負荷応力 120MPa

表面負荷応力 120MPa 時の応力分布測定結果を図 7 に示す。測定値の線形性は 0.7564 となり、ばらつきが多い。1mm 過ぎから、予測値と乖離が大きくなっていることが原因と考えられる。

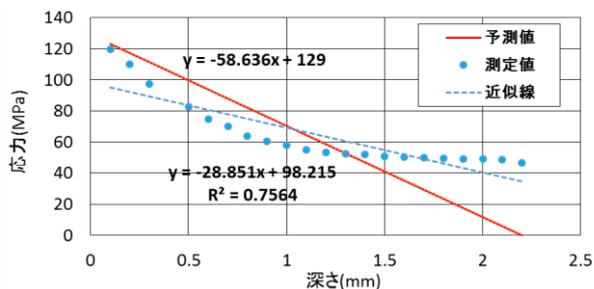


図 7 応力-深さ (120MPa, 穿孔法)

そこで、図 7 を 1mm までの測定にして再度解析したものを図 8 に示す。線形性は、0.9651 となり、バラツキも抑えられ、予測値との傾きも近いと考えられる。

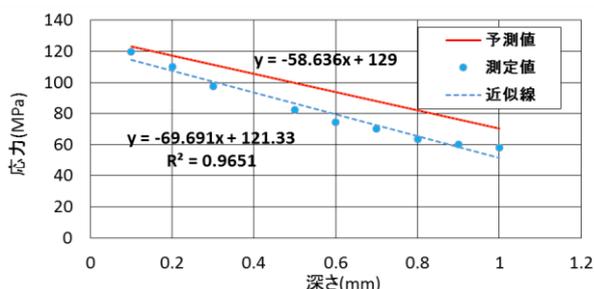


図 8 応力-深さ~1mm (120MPa, 穿孔法)

②負荷応力 300MPa

表面負荷応力 300MPa 時の応力分布測定結果を図 9 に示す。①の結果と同様な傾向がある。1mm を超えると応力が平準化してしまっている。つまり、解放されるひずみの測定ができていないか、穿孔により応力分布が変化し、解放される歪みが極端に減少している恐れがある。

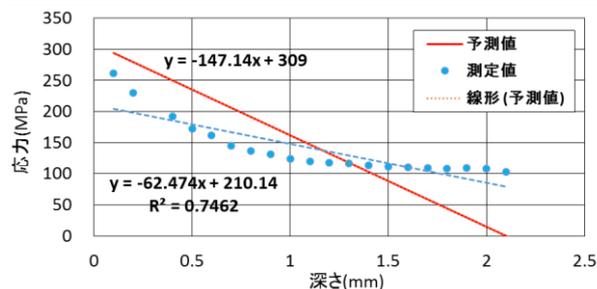


図 9 応力-深さ (300MPa, 穿孔法)

そこで、図 9 を 1mm までの測定にして再度解析したものを図 10 に示す。1mm までの測定に限定すると、線形性は 0.9496 となり、バラツキも抑えられ、予測値との傾きも近いと考えられる。

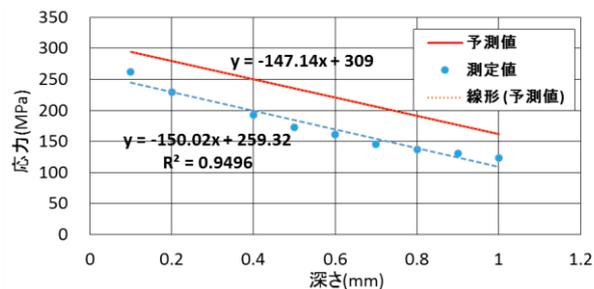


図 10 応力-深さ~1mm (300MPa, 穿孔法)

3. 2 電解研磨法+X線測定

①負荷応力 124MPa

表面負荷応力 124MPa 時の応力分布測定結果を図 11 に示す。電解研磨面積は、15mm×15mm とした。穿孔法の穿孔径に比べ、研磨面積が大きいいため、表面応力への影響を考慮してごく表層のみの測定とした。予測値に対して近い測定ができています。

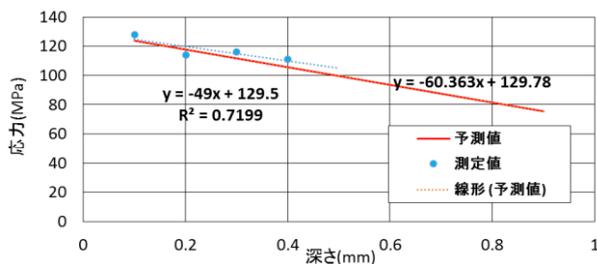


図 11 応力-深さ
(124MPa, 電解研磨法)

3.3 測定値と予測値の差異について
穿孔法における測定値と予測値との差異は、ASTM 規格 E837-08 では、最大深さを $Z/D = 0.4$ (Z ; 深さ、 D ; 穿孔径) と規定しており、今回の穿孔径 2mm では、深さが 1mm 以上となると、感度が低下したと考えられる。

1mm までの測定精度に関しても、今回解析に用いた係数は、薄板と同じものであったが、より測定精度あげるためには見直す必要がある。物性データについても、一般的な数値を用いたが、実験により物性値を取得していく必要がある。そのため、今後データ数を増やし再現性をあげて行くことで実用レベルに近づける必要がある。

電解研磨法+X線測定における測定値と予測値との差異は、測定精度を上げるため、研磨面積を確保する必要があり、応力分布に与える影響が大きく、測定値精度が低下する要因になると考えられる。電解研磨法は、表面影響を除去する目的での利用に適しているといえる。

4. まとめ

- ①汎用フライスを使用した穿孔法では、1mm 程度の深さまでは、予測値に対してフィッティングのよい測定を行えた。ただし、より測定精度を上げるためには、係数等の見直しが必要といえる。
- ②穿孔法は、部分破壊を伴うため、穿孔による応力の変動があり、穿孔後の相対的な断面積の減少影響が大きい薄物や、応力が過剰に大きいもの場合には注意が必要となる。
- ③今回使用した X 線残留応力測定装置では、電解研磨すると応力分布に与える影響が大

きく、深さ方向の分布を測定するには適していない。

文献

- 1) Technical Note TN-503-6, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method", Vishay Measurement Group, 2010
- 2) ASTM E 837-08, "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method", 2008
- 3) 三上隆男: "穿孔法による残留応力測定について (その 1)" IIC REVIEW No.48
- 4) Kabiri, M., "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method: Influences of Transverse Sensitivity of the Gage and Relieved Strain Coefficients", Experimental Mechanics 25, 1984
- 5) 株式会社東京測器研究所 2015-2016 「製品総合カタログ」 P87
- 6) Mathar, J., "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes", Trans., ASME 56, No.4, 1934
- 7) Timoshenko, S. and J. M. Goodier, "Theory of Elasticity", New York: McGraw-Hill, 1951
- 8) Rendler, N. J. and I. Vigness, "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses", Proc., SESA, XXIII, No.2, 1966