

残留応力測定

大型構造物から小型電子部品にいたるまで、その製造時や使用時に発生する残留応力に関わる課題は数多くあり、その現象を把握するためにも残留応力測定は大きな役割を担っている。測定はX線回折法、中性子線回折法、穿孔法、開放法、逐次除去法などさまざまな方法があり、金属材料をはじめセラミックスや樹脂に適用されている。ここでは、代表例であるX線回折法、穿孔法、開放法、逐次除去法の原理と適用範囲などを紹介する。



X線法

A-1

原理

X線を結晶体に入射するとブラッグの条件

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

ここで

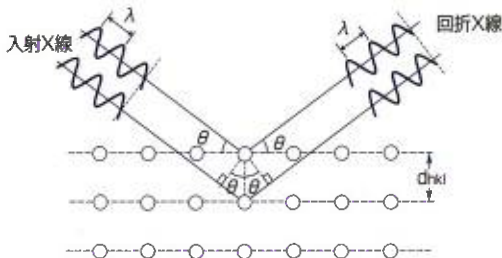
$$n=1,2,3\cdots$$

λ = 特性X線の波長

d = 回折面の格子面間隔

θ = 回折角

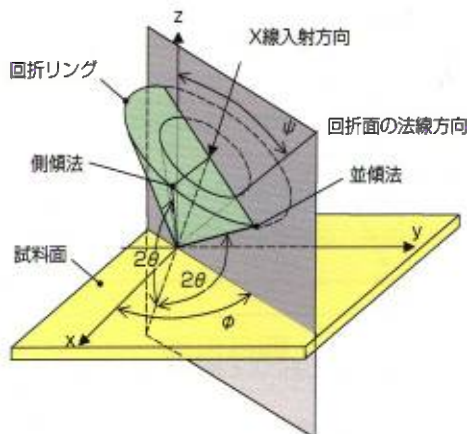
を満足する場合、回折が起こる(第1図参照)。



第1図 X線回折の模式図

回折X線が出現する面は面心立方格子ではブラッグ角の小さいほうから(111)、(200)、(220)、(113)・・・、体心立方格子では(110)、(200)、(112)、(220)・・・などである。

また、試験体の結晶方位がランダムである多結晶体の場合、回折したX線はリング状となる。X線到達深さは通常10数 μm であることから、深さ方向の応力勾配は無視できるとして残留応力を求める。このとき、プサイ角 ψ (= 試料面法線と回折格子面法線が作る角度：第2図参照)を変化させると回折X線のピーク位置が変化する。



第2図 X線回折による残留応力測定の模式図

このピーク位置と入射角の関係から内部応力を推定するのが一般的である($2\theta \cdot \sin^2\psi$ 法)。X線が回折面を作ることから、 ψ を θ と同じ方向にとる並傾法、交差する方向にとる側傾法があり、測定する部材の形状などにより使い分ける。

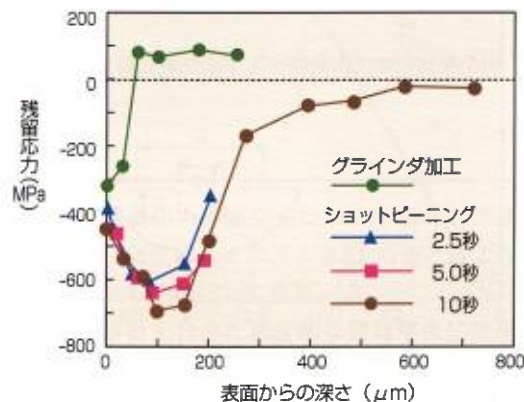
適用範囲

広範囲の金属やセラミックス製部材の表面近傍の残留応力測定に適用されている。結晶そのもののひずみを測定することから、以下の点に注意が必要である。

- ①六方晶合金では格子定数としてa軸方向とc軸方向がある。チタン合金などのように合金成分によって、これらに変化することがあり、測定には注意が必要である。
- ②結晶粒径の影響を受けるため適切な照射径を選ぶ必要がある。当社では $\phi 0.15\text{mm} \sim \phi 8\text{mm}$ の広範な照射径を選択して測定することが可能である。
- ③深さ方向の残留応力分布もエッチングで掘り下げ、その都度測定することにより可能であるが、特に小型の材料ではエッチングにより残留応力が開放されることに留意する必要がある。

適用例

構造部材から小型電子部材まで適用範囲は広い。一例としてショットピーニングを施した鋼材の表面近傍の測定例を第3図に示す。

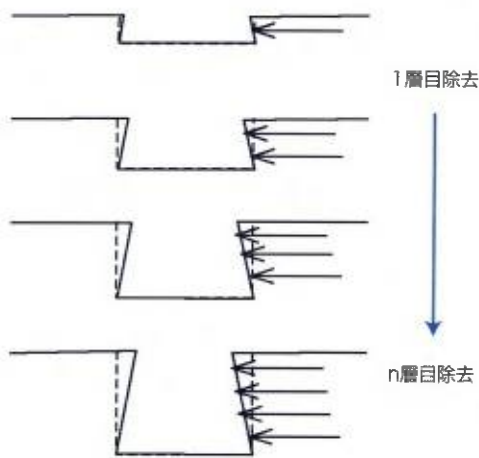


第3図 鋼におけるグラインダー加工およびショットピーニング加工による残留応力の深さ方向の分布 (X線回折法)

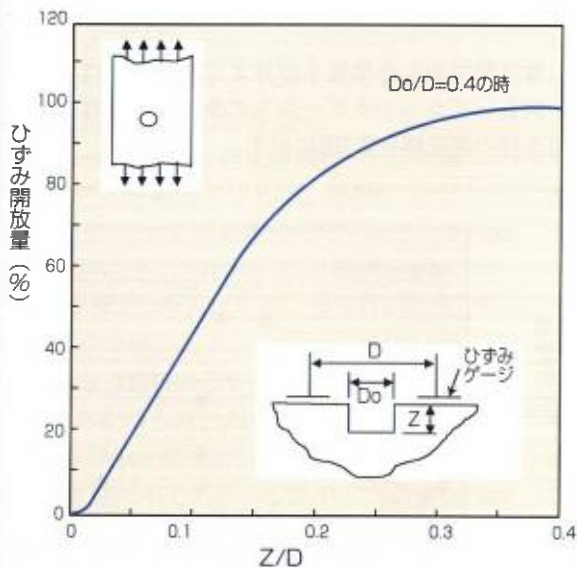
原理

金属に孔をあけると、孔の近傍の残留応力が開放される。この開放量は孔の直径(Do)と深さ(Z)の関係で表現されることから、これを用いて残留応力を測定する方法である。

測定の原理を第4図に、穿孔による応力の開放量とZ/D(Dはひずみゲージ径)の関係を第5図に示す。具体的には、第6図に示すように専用のひずみゲージ(ひずみゲージ中心部の直径φ5mm~φ7.5mm)を測定する試料表面に貼付し、その中心にφ1.5mm~φ3mmの孔をドリルなどであけて、開放されたひずみの量の変化を測定する方法が一般的である。



第4図 穿孔時の残留応力の開放と深さの関係(模式図)



第5図 穿孔深さと表面ひずみの開放量の関係¹⁾



第6図 穿孔法による測定中の外観

ひずみは穿孔深さ(Z)/ひずみゲージ径(D)=0.4ではほぼ開放されることから、測定できる深さは約3mm程度までである。ひずみ開放量の推定は以前は実験により求めたが、現在では有限要素法により求められる(ASTM E837)。

また、残留応力が深さ方向に一様分布でない場合、応力の開放率を考慮して残留応力分布を推定する方法(インクリメンタル法:Incremental Method⁵⁾やインテグラル法:Integral Method²⁾)が提唱されている。

適用範囲

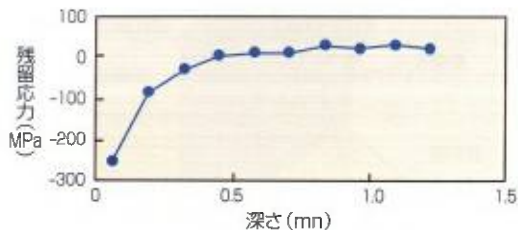
金属や樹脂などの残留応力測定に適用される。孔あけはドリルや電解研磨、エアアブレーションによる方法などがある。

ドリル法は孔の形状が正確であるが、加工硬化層を作りやすい、エアアブレーション法は加工硬化層を作りにくい孔形状が若干不正確であるなど、一長一短がある⁵⁾。

適用例

ステンレス鋼のショットピーニング材のひずみ分布測定の例を第7図に示す。

なお、ショットピーニングではX線回折法との比較もされており、インクリメンタル法やインテグラル法では、X線回折法と同等の結果が得られることが報告されている^{3),4)}。



第7図 穿孔法による残留応力分布測定例

1) Kelsey R.A., "Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole-drilling Method," Pro., SESA XIV, No. 1: 181-194(1956)

2) Schajer, G.S., "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method", J. Eng. Materials and Technology, Vol. 10 No. 4, 1988, Part I:338-343, Part II:344-349

3) J.P.Nobre, M.Kommeyer et al., "Use of the Hole-drilling Method for Measuring Residual Stresses in Highly Stressed Shot-peened Surface", Experimental Mechanics, Vol. 40, No. 3, Sept. 2000, 289-297

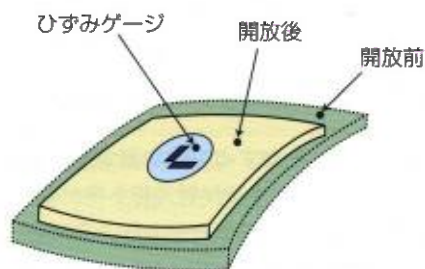
4) X. Soudan, J. Lu, D. Gilreueau and J.F. Favenot, "Comparison of the X-ray diffraction method and the hole drilling method for the measurement of residual stress on the aeronautical materials", Pro. 1990 SEM Spring Conf. Experimental Mechanics, Albuquerque, June 1990, 263-270

5) P. V. Grant et al., "The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique", Measurement Good Practice Guide No. 53, NPL, 2002

開放法（ゲージ法）

原理

測定部にひずみゲージを貼り、周りを切断して開放することにより残留ひずみを測定する（第8図参照）。各方向の応力は厚み方向に均一と仮定したり、板材の場合には表裏面のひずみ変化量を測定し、板厚内の各方向応力を直線分布と仮定して残留応力を求める。



第8図 開放法による残留応力の測定法

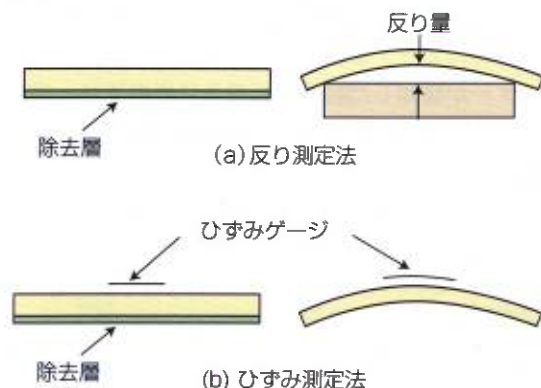
適用範囲

ヤング率やポアソン比が得られる材料であれば

逐次除去法

原理

残留応力が板厚方向に分布する板材を片面から除去すると、残留応力が開放されて再分布するため、反り量（曲率）あるいは表面ひずみが増加する（第10図参照）。この反り量あるいは表面ひずみの変化量を測定することにより残留応力の厚さ方向分布を推定する。



第10図 逐次除去法による残留応力測定法

適用範囲

金属材料や樹脂材など広範囲な板材の残留応力の測定に適用できる。板材の片面からの除去は、

残留応力を得ることができる。パイプや板材、鍛鋼品、樹脂製品などに適用される。薄板に適用する場合は、ゲージ貼り付け後にゲージの回りを切断開放し、ひずみの変化量を求める。

厚板や大型鋼材の場合は、ゲージを貼った後、コアドリルによりゲージの回りに溝を加工して残留応力を開放し、その際のひずみ変化量を測定する。

適用例

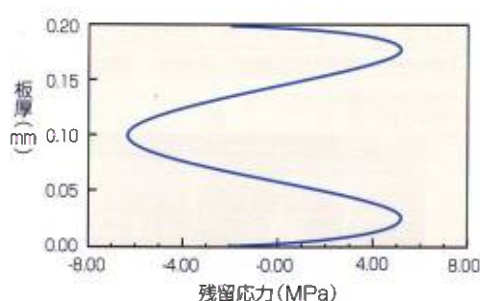
角材の表面の残留応力をコアドリルによる開放法で測定した例を第9図に示す。



第9図 コア溝加工による開放法の例

金属材料でエッチング、樹脂ではフライングカッターにより行うのが一般的である。

適用例



第11図 逐次除去法による残留応力測定結果の例

以上、残留応力の測定法について紹介してきた。最近では、発生メカニズムをFEMなどにより推定することも一般化してきている。

今後、解析を含めた総合的な課題解決に活用していきたい。

[エンジニアリングメカニクス事業部応用技術部 佐藤隆夫]