

線材のX線残留応力測定

キーワード：X線応力測定、sin 2 法、線材、湾曲面、残留応力

概要

残留応力は、製品の疲労強度や摩耗特性などの機械的特性に大きな影響を与えることが知られています。したがって、製品の品質向上を図る上で、残留応力を適切に評価し、管理することはきわめて重要です。

残留応力の測定手段として一般的に用いられるX線応力測定法は、X線回折角が格子ひずみによって変化すること（Bragg回折）を利用した方法で、表面層（鉄鋼材料の場合で10 μm程度）の応力を非破壊的に測定できるという特徴を持っています。ただし、この方法を適用するためには、その測定原理から、X線侵入深さ内で、深さ方向に応力勾配のない平面応力状態であることが条件となっています。さらに、結晶粒が小さく、強い優先方位がないこと、測定表面は平坦でしかも滑らかであることが必要です。

しかし、実際の測定ではこのような理想的な状態にあることは少なく、特に対象物が製品の場合は、測定表面が湾曲している場合が少なくありません。当研究所の微小部X線応力測定装置では、X線ビーム径を0.15mmまで小さくでき、かなり小さな湾曲面でも測定することができますが、結晶粒の大きさとの関係や回折強度との関係から、十分に小さいX線照射領域を設定できないことがあり、この場合には、測定さ

れた応力値に平坦でない試料形状に基づく誤差が生じると予想されます。

ここでは、X線応力測定法により円柱形状試料（例えば線材）の円周方向ならびに軸方向の残留応力を評価する際の、形状誤差の補正方法について紹介します。

照射領域の大きさの影響

線材表面の円周方向および軸方向残留応力を測定する際に、X線照射領域の大きさが残留応力値に及ぼす影響について説明します。図1に示すように、周囲を十分に遮蔽効果のあるテープで覆うことによりX線照射領域を定めます。その大きさは、軸方向長さを一定とし、円周方向長さ（弦長さ 2ζ ）を変化させます。試料は、照射領域の中心P点がゴニオメータ中心となるようにセットし、並傾法により測定します。回折強度曲線のピーク位置は半価幅法により定め、 \sin^2 法により応力値を算出します。

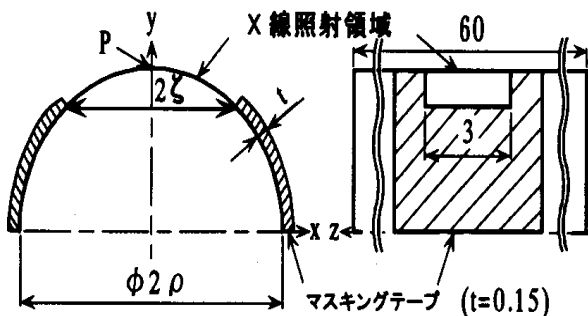


図1 マスキングテープを用いたX線照射領域の定め方

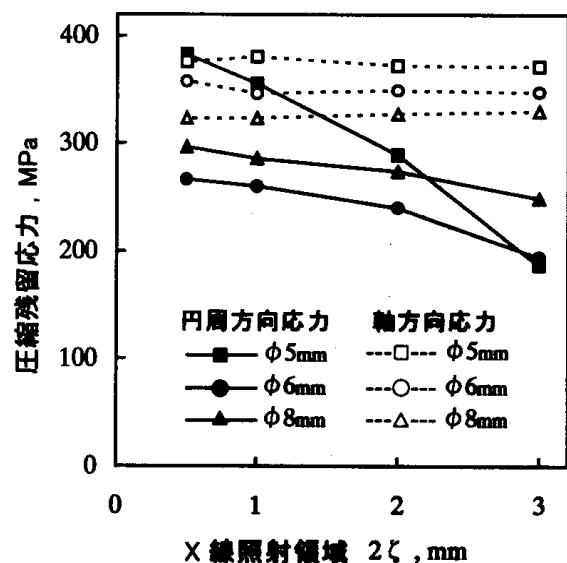


図2 測定された残留応力値とX線照射領域の大きさとの関係

図2に実験による 5mm、6mm、8mm 線材表面における円周方向および軸方向残留応力と X線照射領域 2ζ の関係を示します。なお、本実験では、試料に球状化焼きなまし処理した炭素工具鋼の丸棒を用いました。特性 X線は CrK 線を用い、Fe211 回折を測定しました。

図によると、円周方向残留応力は、X線照射領域を大きくするといずれの径の場合も残留応力は減少し、その減少傾向は小径のものほど大きくなります。一方、軸方向残留応力は X線照射領域の大きさや丸棒径に関係なく、ほとんど変化しません。

形状誤差推定式

実験を模擬した解析を行い、形状誤差の推定式を求めました。ここでは形状の影響が顕著な円周方向応力について説明します。

図3に実験に対応する円周方向残留応力測定時の X線照射状況を模式的に示します。

図に示すように円周方向に一樣な応力 σ_ω が作用するものとして、微小体積 dV からの X線回折を考えます。方向 ψ の結晶面からの回折を観測する場合、 dV は ψ だけ傾いているため、その回折角は見かけ上 ψ' 方向の結晶面による回折角となります。さらに、X線経路も dV の位置によって異なるため吸収効果の大きさに不均一が生じ、これも回折角に影響を及ぼします。

これらの効果を考慮した解析の結果を図4に示します。縦軸は評価応力 σ/σ_0 と真の応力 σ_ω の比 σ/σ_0 、横軸は X線照射領域 2ζ と線径 2ρ

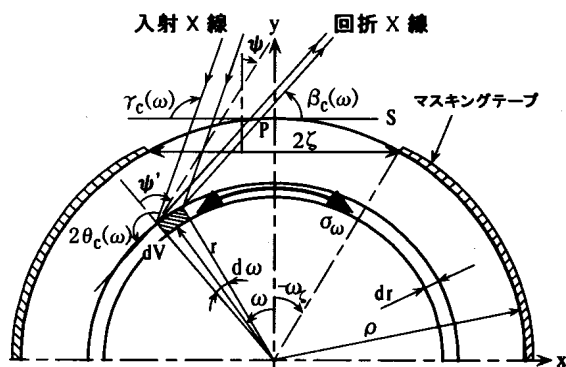


図3 円周方向応力測定時における X線照射状況の模式図

の比 ζ/ρ であり、X線照射領域の大きさおよび残留応力を無次元化して表しています。図中の曲線は解析結果を滑らかに結んだ近似曲線であり、式(1)で表わされます。

$$\sigma/\sigma_0 = \cos\{p(\zeta/\rho)\}, p=1.89\sim 1.94 \quad (1)$$

材料や特性 X線の種類による曲線の差異は、パラメーター p によって整理でき、その差異はわずかです。実用上は、 p の中間値を用いれば、材料などによらず形状のみにより、実在する円周方向応力 σ_ω を概略で推定できる式にできます。また、式(2)により誤差 $\Delta\sigma$ も求めることができます。

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma = [\sec\{p(\zeta/\rho)\} - 1] \sigma_0 \quad (2)$$

なお、解析結果に重ねてプロットした実験結果は、それぞれの線径ごとに最小の X線照射領域での測定値を σ_0 として算出したものです。

まとめ

円周方向応力の形状誤差は、照射領域が線径の 1/10 以下であれば、ほとんど無視することができます。やむを得ず照射領域を大きく設定しなければならない場合は、形状誤差推定式により実在する円周方向応力を推定することができます。測定可能な最小線径は結晶粒径などによりますが、鉄鋼材料では、1mm 程度と考えられます。

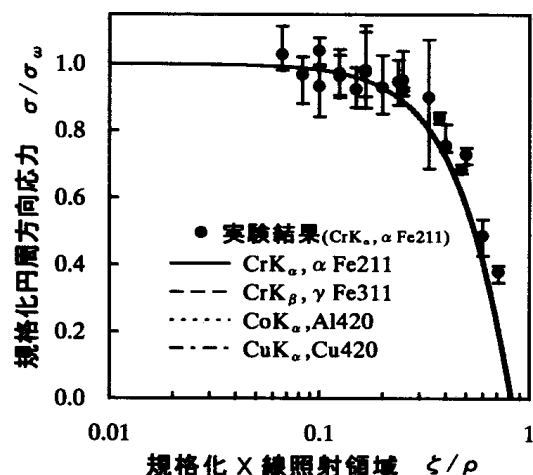


図4 種々の材料・特性 X線における規格化円周方向応力 σ/σ_0 と規格化 X線照射領域 ζ/ρ の関係