

表面処理の影響を受けにくい磁氣的残留応力の測定方法

長岡技術科学大学 学生会員

○佐藤悠樹

長岡技術科学大学 正会員

宮下 剛 長井正嗣

埼玉大学 正会員

奥井義昭

元岡山大学

安福精一

中電技術コンサルタント株式会社 正会員 松岡 敬 池田 誠

1. はじめに

鋼材の残留応力を非破壊で測定する手法として、応力によって誘起される磁気異方性を利用する磁氣的応力測定法（以下、磁歪法）がある¹⁾。従来の方法では表面処理の影響を受けやすいという欠点を有していた。

本研究では、励磁電流の周波数を通常の 1kHz から 14Hz まで下げて、磁場の浸透深さを大きくし、インピーダンスを規格化した校正曲線を利用して、表面処理の影響を受けにくい測定法の確立を目指した。検証として、ショットピーニングおよびグラインダー研磨の表面処理を施した試験片を用いて室内実験を行った。

2. 磁歪法の測定原理

鋼板に引張応力が作用すると、磁気ひずみ効果のため引張応力の方向には磁化しやすく、引張方向に垂直方向では磁化しにくくなる。圧縮応力の場合にはこの関係が逆になる。すなわち応力により磁気異方性が生ずる²⁾。磁歪法の測定にはこの関係を利用する。

応力が未知の鋼板上の 1 点で、プローブを回転させたとき、出力電圧が最大になる方向が主応力 σ_1 の方向である。同じ試験片を使って主応力方向に取り付けたプローブの出力電圧と加えた応力との関係（校正曲線）を求めておけば、出力電圧から主応力差を知ることができる。

3. 磁場の浸透深さ

時間的に変化する磁場は渦電流の発生で磁性体への浸透が妨げられる。表面の磁場の強さに対しての浸透深さ δ は、周波数 800Hz の場合、 $\delta=0.26$ (mm) となり、14Hz の場合は $\delta=1.94$ (mm) となる。表面から 0.2mm 程度まで影響を受けるショットピーニングやグラインダー研磨などの表面処理は、800Hz の測定では致命的な影響を与え、14Hz の測定では影響が少ないことが予想される。

4. 校正曲線とインピーダンスの規格化

測定されるデータは、応力に対応した出力電圧 V と、リフトオフに関係したプローブのインピーダンス Z および主応力方向である。ここで、リフトオフとはプローブと被測定物の距離である。厚さ 9 mm の SM400A 鋼材から幅 50mm、長さ 300mm の試験片を切り出し、4 点曲げ試験で表面に引張応力を作用させ、種々のリフトオフの下で、応力と出力電圧のとの関係（校正曲線）を求めた例を図 1 に示す。励磁電流は 14Hz とした。

図 1 のデータの出力電圧 V 、応力 σ 、インピーダンス Z を次のように規格化し、1 本の曲線で表すことを考える。出力電圧を、最大応力 $\sigma_m=180\text{MPa}$ における出力電圧 V_m との比で表し、相対出力電圧 $V_r (=V/V_m)$ とする。応力は σ_m との比で表し、相対応力 $\sigma_r (= \sigma / \sigma_m)$ で表す。インピーダンスはリフトオフ無限大時すなわちプローブを被測定物から十分離れた位置でのインピーダンス Z_0 との比で表し、相対インピーダンス $Z_r (=Z/Z_0)$ で表す。

図 1 を相対出力 V_r と相対応力 σ_r との関係に置き換えたグラフを図 2 に示す。これはリフトオフに依らない 1 本の曲線となる。次に、図 1 の各リフトオフにおける、相対インピーダンス Z_r と応力 180MPa 時の出力電圧 V_m の関係を表したグラフを図 3 に示す。図 2、図 3 の曲線はプローブの大きさ、コイルの巻き数に依存するが、リフトオフに依存せず、1 つの曲線で表される。

以下に本研究の手法を用いた応力算出の具体的な手順を示す。プローブのインピーダンス Z_0 は既知である。

- ① 測定されたインピーダンス Z から、相対インピーダンス $Z_r=Z/Z_0$ を求める。
- ② 図 3 より応力 180MPa 時の出力電圧 V_m を求める。
- ③ V_m と測定された出力電圧 V から相対出力電圧 V_r を求め、図 2 より相対応力 $\sigma_r=\sigma/\sigma_m$ を求める。

キーワード：磁歪法、残留応力、校正曲線、インピーダンス、表面処理

連絡先：〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 環境-建設系 TEL 0258-47-9617

④ 相対応力 σ_r に $\sigma_m (=180\text{MPa})$ を掛けて、応力 σ を求める。

5. 屋内実験による検証

表面処理が施された鋼材に対して、提案手法の有効性を検証するため屋内実験を行った。黒皮付き鋼板 (SS41) (146×146×6) において、残留応力の影響を調べるため、鋼板の中心部を溶接した後、ショットピーニングを施した試験片 (W 試験片) と、表面処理後に作用する応力の影響を調べるため、ショットピーニングを施した後にその裏面中央部に溶接をした試験片 (N 試験片) で測定を行った。ショットピーニングはショットの粒径および速度を変えて、ショットの運動エネルギーを4種類に設定した。

また、グラインダー研磨の影響について調べるため、点溶接した試験片の1点について応力とその方向を測定した。測定点はディスクグラインダーで研磨方向、研磨荒さ等を変えて研磨した。

6. 実験結果

図4はショットのエネルギーと電圧比の関係を示したものである。ここで電圧比とは、ショットピーニングを施した面と、処理を施さない面の出力電圧の比である。応力算出にはインピーダンスを規格化した校正曲線を利用した。

W 試験片では、表面処理を施した面での出力電圧は小さく測定され、800Hzでの測定では電圧比が30%~数%以下になり測定がかなり難しくなる。14Hzでの測定では電圧比が100%~60%までで測定は十分可能である。N 試験片では影響は小さく、800Hzでは40~20%に14HzではW 試験片と同様な結果が得られた。

グラインダー研磨の影響については、800Hzの測定では研磨の影響が大きく、正しく測れない場合が多かった。14Hzの測定ではほとんど影響を受けず、応力値に関しては大きい場合でも10%減程度の影響であった。応力方向に関しては影響が認められなかった。

7. まとめ

本研究では、表面処理の影響を受けにくい磁歪法計測手法の確立を目指した。励磁電流の周波数を14Hzとし、応力算出にはインピーダンスを規格化した校正曲線を利用した。検証としてショットピーニングおよびグラインダー研磨の表面処理を施した試験片で室内実験を行った。その結果、表面処理の影響を受けにくい磁歪法の測定が可能となった。

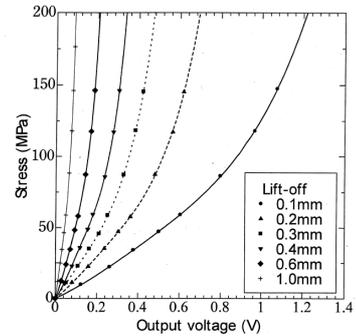


図1 リフトオフごとの応力と出力電圧の関係

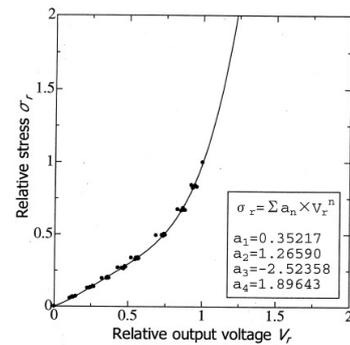


図2 相対出力と相対応力の関係

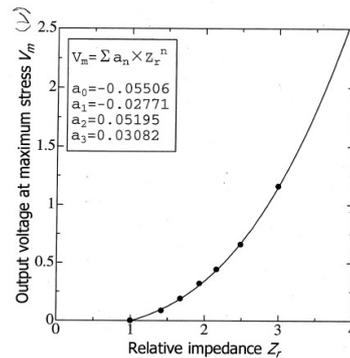


図3 相対インピーダンスと最大出力電圧の関係

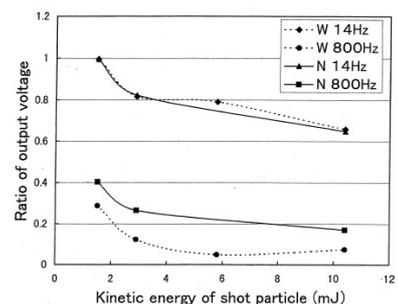


図4 ショットエネルギーと電圧比の関係

参考文献

1) 安福精一, 藤井堅, 末宗仁吉, 境慎明, 村井亮介, 池田誠, 黒瀬義幸: 磁気を用いた鋼構造物の応力測定, 橋梁と基礎, 6月号, pp.33-38, 2001
 2) 柏谷賢治, 坂本博, 井上靖雄: 磁気異法性センサを用いたリフトオフの影響を受けない残留応力測定装置の開発, 非破壊検査, 35(8), pp.519-523, 1986