実用講座

磁気ひずみ法による鋼構造物の全応力測定を試み

鋼橋応力測定への磁気ひずみ法の応用について*

村井 亮介^{**}, 柳沢 栄一^{**}, 岡 俊蔵^{***}, 中谷 眞二^{***}

村井 亮介

柳沢 栄一

岡 俊蔵

中谷 眞二

Experimental Study on Applicability of Magneto-Strictive Effect to Stress Measurement of Steel Bridges*

by MURAI Ryosuke^{**}, YANAGISAWA Eiichi^{**}, OKA Shunzo^{***} and NAKAYA Shinji^{***}

キーワード 応力測定, 磁気ひずみ効果, 鋼構造物, 鋼橋, 残留応力, 応力変化, 全応力

1. はじめに

橋梁など溶接鋼構造物の維持管理においては、既設物の応力状態を知りたい場合がある。知りたい応力には残留応力、動的応力、死荷重応力、などがあり、できれば塗膜を除去すること無く簡単に測定したい。このようなニーズを解決する可能性のある方法として、著者らは岡山大学理学部の安福教授（当時、現名誉教授）が開発された磁気ひずみ効果を利用した応力測定技術¹⁾に着目し、実構造物へ応用するための検討を進めている。本報では、鋼橋に作用する各種応力に対して磁気ひずみ法による測定を試みた例を紹介する。

2. 測定装置ならびに測定方法

測定方法の詳細は安福名誉教授の記事を参照頂くとして、ここでは具体的な測定手順を簡単に説明する。装置は図1に示す小型のもので重量は数kg、プローブも外径16mm程度で片手で摘める程度である。100V電源あるいはバッテリーがあれば、現地でもこれだけで測定可能である。磁氣的測定法のため、厚さ0.6mm程度までなら塗装上から測定できることも大きな魅力である。測定点1点について、0°、45°、90°、135°の4角度を測定し、フー

リエ解析で角度と出力の関係（ $\cos 2\theta$ カーブ）を求め、主応力方向と主応力差を算出している。これらの処理はパソコン内で行われるため、現地で測定した応力値を知ることができる。なお、測定電圧からの応力換算やリフトオフ補正に用いる磁気ひずみ感度キャリブレーションカーブはSS材、SM材ではほぼ似通っていることから、

(a) 測定装置全体

(b) プローブ

図1 磁気ひずみ法の応力測定装置

*原稿受付 平成14年12月9日

**正 員 三菱重工業広島研究所 Member, Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Hiroshima R&D Center

*** 三菱重工業鉄道事業本部 Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Steel Structure & Construction Headquarters

以下では特に触れない限り、SM 材で取得した標準カーブを用いている。

3. 鋼橋での測定試験例

著者らは、この装置を現地に持ち込み、鋼橋が受ける各種応力の測定を試みた。以下にその例を紹介する。

3.1 溶接残留応力の測定例

製作中の鋼橋主桁に生じている残留応力の測定試験を行った例²⁾を紹介する。図2に示すように、工場内で多点支持されはば外力0状態の主桁を、約0.2mm厚の塗装上から測定した。測定に要する工数は、準備・片付けも含めて2人×半日程度である。図3に測定結果をまとめてベクトル図で示す。矢印の方向が主応力方向、矢印の長さが主応力差の大きさを示している。溶接線近傍に100～200 MPaの応力値、溶接が無い箇所は小さな応力値が得られており、溶接残留応力状態に良く対応した結果が得られた。このように、磁気ひずみ法では塗装上から比較的簡単に多数点の応力を測定できる。ひずみゲージで

は測定できない残留応力に対応した値も得られることが大きな魅力である。なお、この主桁は製品であるため、ひずみゲージを用いた応力開放法による残留応力確認等は実施できなかった。

3.2 橋梁架設各段階の応力変化の測定例

新橋の製作・架設時を利用し、各段階における応力変化量の測定を行った^{3,4)}。図4に示す単純2主桁の鋼橋で、図5に示すように下フランジ下面の支間中央を2箇所、3/8位置、1/4位置、を1箇所の合計4箇所を測定した。また本橋では、客先の了承を得て工場内の無荷重状態で磁気ひずみ測定位置近傍にひずみゲージを貼付し、その変化量も測定している。本橋は無塗装耐候性鋼板であるため端材で磁気ひずみ感度キャリブレーションカーブを取得して測定に用いたが、通常のSM材と磁気ひずみ感度に大きな違いは見られず、耐候性鋼材でも通常の標準カーブが利用できそうである。測定は、①工場内の無荷重状態、②現地で鋼桁のみが架設された段階（鋼桁の自重のみの状態）、③コンクリート床版を打設した後、の3回測定した。発錆面上から前処理無しで測定した。現地での測定状況を図6に示す。足場と100V電源さえあれば、これら4箇所を段取り・片付けを含めて2人×1日程度で測定できる。測定結果の例を図7に示す。①工場内、②鋼桁のみ架設時、③コンクリート床版打設後、で応力分布形状を保ったまま応力値が上昇しているのが分る。ここで、応力分布形状を見てみると端部の応力値が高くなっているが、これはガスカット熱による残留応力である。中央部の応力値が圧縮側にながっているが、これはウェブ溶接前に溶接変形を考慮して逆曲げ加工したことによる残留応力と思われる。通常は下フランジ上面のウェブ溶接により下面のこの箇所の残留応力は引張になるが、本橋の下フランジは38mmと厚く、ウェブのすみ肉溶接程度の入熱では裏面まで溶接残留応力は影響し

図2 残留応力を測定した桁

図3 残留応力の測定結果

図4 測定した橋梁

図5 測定位置

図6 現地での磁気ひずみ法測定状況

図7 測定結果の例 (GI 桁支間中央)

ない。このため、逆曲げ時の圧縮残留応力がそのまま残っているものと考えられる。幅方向中央と端部の高応力部を除いた部分に平坦な応力状態の箇所が見られ、ここには特に熱影響等も無いことから安定した応力状態の箇所と思われるが、無荷重状態においてこの平坦部の応力値は0 MPa 近傍では無く、-50 MPa 程度と圧縮応力を示している。これは、他にもいくつかの鋼橋を測定した結果も含めて考えると、鋼板製造時の板表面の残留応力と考えられる。そこで、②鋼桁のみ架設、③コンクリート床版打設後、の応力値から①無荷重状態の応力値を引いた差分について、ひずみゲージと比較したところ、図8に示すように良い対応を示した。橋のスパン方向について、設計計算値、ひずみゲージ値、磁気ひずみ法の差分、を表示したものを図9に示す。磁気ひずみ法の差分は設計計算値と同様の傾向を示し、ひずみゲージ値とも良く合っている。このように、磁気ひずみ法で構造物の応力状態変化に対応した応力変化が得られることが分った。ひずみゲージでは塗膜の除去、配線、ゲージ保護、などが必要となり、保護をしても屋外では数ヶ月程度の寿命の場合がある。これに対して、磁気ひずみ法では測定位置をマーキングしておき、ある期間ごとに塗膜上から磁気プローブを当てて測定するだけで良いため、長期変化量の監視に適していると考えられる。なお、上記測定例でも分るように、磁気ひずみ法では鋼材が受けた製造・

図8 磁気ひずみ法の差分とひずみゲージ値の比較

図9 測定結果と設計計算値の関係

加工の履歴をも反映した値が測定される。ひずみゲージでは測定できないこのような応力値まで測定できることは磁気ひずみ法の大きな魅力のひとつであるが、通常の強度評価では外力による応力のみを知りたい場合も多く、鋼材と“知恵比べ”しながら外力に対する応力分を分離しなければならないケースもある。

3.3 動的応力の測定例

鋼橋では、車両等の路面交通荷重により動的な応力変動が生じる。疲労評価や最大応力状態の推定にはこれら動的応力変動も必要となる。そこで、供用中の実橋で応力変動を測定した例⁹⁾を以下に示す。対象となる鋼橋は図10に示すもので、これのスパン中央付近にひずみゲージと磁気ひずみプローブを並べて取付け、応力測定を行った。本測定では応力変化が速く磁気プローブを回転させている時間が無いため、最も支配的な応力方向である橋軸方向にプローブ方向を向けて固定し、出力電圧をそのままチャートに書き出して測定した。測定した波形をひずみゲージ波形と比較して図11に示す。磁気ひずみ応力測定装置からの出力電圧波形はひずみゲージ出力波形と良く合っており、磁気ひずみ法で鋼橋の交通荷重による応力変動に対応した値が測定できることが分る。なお、動的測定の場合は磁気プローブを回転させている時間が無いこと、磁気プローブの接触状態を一定に保つ必要性、から、マグネットベース等を利用して磁気プローブを安定的に固定させておくことが重要である。

3.4 死荷重応力の推定例

鋼構造物の耐荷力評価のためには、死荷重応力が必要

図10 測定した橋梁

図13 支間中央の測定結果から端部近傍の測定結果を引いたもの

図11 磁気ひずみ法とひずみゲージの測定結果の比較

表 1 磁気ひずみ法測定結果からの死荷重応力推定結果と詳細 FEM 解析結果の比較

桁	測定位置	死荷重応力推定値	死荷重応力 FEM 解析値
		MPa	MPa
G1	支間中央	ウェブ	88
		フランジ	
	支間 1/4	ウェブ	
		フランジ	
G2	支間中央	ウェブ	88
		フランジ	

定結果を見比べると、死荷重による曲げ応力が小さい桁端部近傍ではウェブの上下ではほぼ対称の分布となっているのに対し、曲げ応力が大きい中央部ではウェブ上半分の応力が多少圧縮側に、ウェブ下半分の応力が多少引張側にずれているように見えるが、このままでは分かり難い。本主桁は全スパンが1本のH型鋼であることより、製造時の残留応力は全長にわたって似通っていることが期待される。そこで、中央部の測定結果から端部近傍の測定結果を差し引いた結果を図13に示す。製造時の残留応力分が除かれて橋の死荷重による曲げ応力のみが現れている。この曲げ応力を死荷重による曲げ応力の両測定箇所間の差として、スパン中央位置での死荷重による曲げ応力を推定した結果を表1に示す。同表中には、別途実施された詳細FEMによる死荷重解析結果も示してある。両者は良く対応しており、磁気ひずみ法による測定結果の特徴を注意深く検討することで、死荷重応力などが推定できる可能性がある。

4. おわりに

鋼橋等の既設溶接鋼構造物に作用する各種の応力を塗膜上から比較的簡単に測定したい、という思いを実現できる可能性のある応力測定法として、磁気ひずみ法の鋼

図12 G2 桁における支間中央と端部近傍の測定結果

になる場合がある。死荷重応力は解析的にも推定できるが、実構造物では解析でモデル化されない部材の影響や地盤の移動等があり、実物の応力値を確認したいところである。測定した鋼橋は先に図10に示したもので、主桁の3箇所（桁スパン中央部、端部近傍、スパン1/4点）についてウェブと下フランジの応力を磁気ひずみ法で測定した^{6,7)}。得られた結果を図12に示す。本橋の主桁はH型鋼であり、ウェブ上下端の高応力部はH鋼製造時のローラ加工による残留応力と考えられる。中央部の測定値は圧縮側にシフトしているが、これは製造時の表面残留応力と思われる。桁端部近傍の測定結果と桁中央部の測

橋への応用について検討した例を紹介した。磁気ひずみ法の特性を生かすことで、

- ・塗装上からの応力測定
- ・溶接残留応力の測定
- ・動的応力変化の測定
- ・死荷重応力等の推定

に应用できる可能性がある。また同時に、鋼板製造・加工時の残留応力などの影響を受けることも明らかとなった。我々の現状は、“磁気ひずみプローブを持って鋼橋を撫で回してみた”段階である。これまでの感触では、溶接鋼構造物の応力測定へ応用する場合、

- ・同一箇所の長期変化量測定
- ・塗膜上からの多点測定による広い面の応力分布情報取得

が他の応力測定法に無い特長であると考えている。磁気ひずみ法はひずみゲージに比べて応力測定法としての完成度が低いため、測定結果が意味するところを良く考えなければならない場合があり、誰でも簡単に測定できる段階には至っていないが、ひずみゲージには無い魅力も沢山持っている。今後、ひずみゲージなど他の応力測定法との組合せや、多くの方々のお知恵も借りながら、鋼構造物の応力測定法として磁気ひずみ法を実用化させて行きたいと考えている。

これらの測定を実施するに当たり、国土交通省九州整備局竜門ダム工事事務所、福岡北九州高速道路公社、中電技術コンサルタント(株)の皆様のご協力を得ましたことを

感謝いたします。また、岡山大学・安福名誉教授には、磁気ひずみ法による応力測定について多大なる御指導を頂きました。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 安福, 磯野; 磁気プローブによる溶接残留応力分布の測定, 非破壊検査, Vol. 35, No. 11, pp. 805-810, (1986)
- 2) 村井, 柳沢, 岡, 勝野, 安福; 磁歪式応力測定法の鋼橋への適用に関する研究 (第3報: 工場で製作中の桁の応力分布), 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM) CS-69, (2000)
- 3) 村井, 池田, 勝野, 田島, 安福; 磁歪式応力測定法の鋼橋への適用に関する研究 (第1報: 製作・据付各段階における応力変化の測定), 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集 VI, pp. 306-307, (1999)
- 4) 村井, 池田, 勝野, 田島, 安福; 磁歪式応力測定法の鋼橋への適用に関する研究 (第2報: 測定値と設計計算値の対応), 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集 VI, pp. 308-309, (1999)
- 5) 村井, 柳沢, 中谷, 池田, 安福; 磁歪式応力測定法の鋼橋への適用に関する研究 (第4報: 動的応力測定と実橋鋼材の磁歪感度検証法の検討), 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), CS6-050, (2001)
- 6) 田中, 中谷, 永谷, 村井, 柳沢; 磁歪式応力測定法の鋼橋への適用に関する研究 (第5報: 鉸桁橋の測定結果からの死荷重応力の推定), 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), CS6-051, (2001)
- 7) 田中, 中谷, 永谷, 村井, 柳沢; 既設鉸桁橋の耐荷力評価法に関する検討, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), CS6-025, (2001)