

磁歪法による既設鋼橋の箱形断面部材の残留応力計測

長岡技術科学大学	正会員	○宮下 剛
長岡技術科学大学	学生会員	永田 賢康
(独)土木研究所	正会員	澤田 守
首都大学東京	正会員	野上 邦栄
長岡技術科学大学	正会員	長井 正嗣

1. はじめに

周知の通り、既設鋼橋の経年劣化が急速に進行している。既設鋼橋を合理的かつ適切に維持管理するためには、これらの残存耐力を精緻に評価する必要がある¹⁾。ここでは、解析において導入する残留応力が終局耐力に影響を与えるため、その分布形状の設定が重要となる。一般に、残留応力の計測は、ひずみゲージを利用した機械式切断法により行われる。しかし、この方法では、バンドソーなどで計測対象物を細断する必要があり、計測断面の数が多くなると、多大な労力が必要とされる。そこで、本研究では、非破壊で残留応力を計測することが可能な磁気ひずみ応力測定法(以下、磁歪法)に着目し、その適用性を検討するために、撤去された鋼トラス橋の斜材に対して、機械式切断法と磁歪法による残留応力計測を実施した。

2. 磁歪法

磁歪法とは、鋼材などの強磁性体における磁気ひずみ効果を利用した応力測定法である²⁾。例えば、鋼材に磁場を加えると、鋼材は磁化され、それに伴い長さが変化する(3×10^{-6} 程度)。この磁気ひずみ効果の逆の効果が、Villari効果であり、鋼材に引張応力を作用させて伸ばせば磁化しやすくなり、また、圧縮応力を作用させて縮ませれば磁化しにくくなる。つまり、応力が加わった鋼材は、主応力方向に磁化しやすく、これに直角となる方向では磁化しにくくなる。磁歪法では、この磁気異方性を検出して、応力を測定する。

以上の測定原理から、磁歪法では既に作用している応力状態下にある磁場が検出される。そのため、供用中の橋梁に適用する場合、残留応力・死荷重・活荷重を全て含む全応力が非破壊で測定されることとなる。これは、ひずみゲージによる応力測定が、貼り付けた後からの相対変化しかわからないことと比較すると、大きなメリットである。ただし、磁歪法の適用範囲は、塑性領域では磁気飽和現象が生じることから、弾性領域内とされている³⁾。

具体的な測定は、対向する電磁石の一方を励磁極とし、これと直角する方向を検出極とする図1に示すプローブを鋼材表面に接触させることで行う。プローブの出力は、主応力方向と主応力差に関係した下式で与えられる電圧となる。

$$V = k(\sigma_1 - \sigma_2) \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 V : プローブの出力電圧[V], k : 材料とリフトオフ量から決まる係数[V/MPa], σ_1 と σ_2 : 主応力[MPa], θ : 主応力方向[度]である。リフトオフ量とは、鋼材表面からプローブまでの距離である。

出力電圧から応力へ換算するためには、予め測定対象において引張・圧縮試験を実施して、出力電圧と応力の関係である応力感度曲線を作成する必要がある。鋼種、板厚、年代別などに応力感度曲線のデータを蓄積することで、応力を概算することも可能と考えられるが、ここでは、撤去部材から採取した引張試験片を利用して応力感度曲線を作成した。また、部材表面が整形されておらず、計測点毎にリフトオフ量の変動することから、リフトオフ量に依らない感度曲線⁴⁾とした。

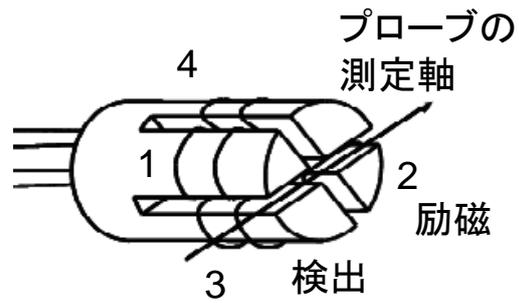
測定対象において、主応力方向が明確でない場合は、式(1)の θ が確定しない。そのため、測定点においてプローブを 0° , 45° , 90° , 135° の4方向に回転させ、 θ を確定する必要がある(4方向測定)。さらに、主応力差に関する情報しか得られないことから、これらを分離するために光弾性分野でも使用されているせん断応力差積分法⁵⁾を利用する。

キーワード 磁歪法, 鋼橋, 残留応力, 計測, 耐力

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 T E L 0258-47-9641 E-mail : mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp



(a) 写真



(b) 模式図

図1 磁歪法プローブ

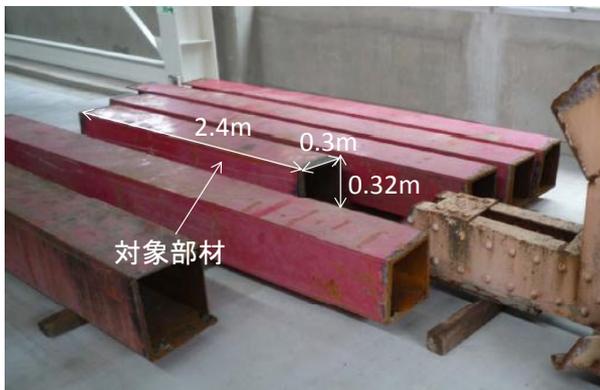


図2 計測対象部材

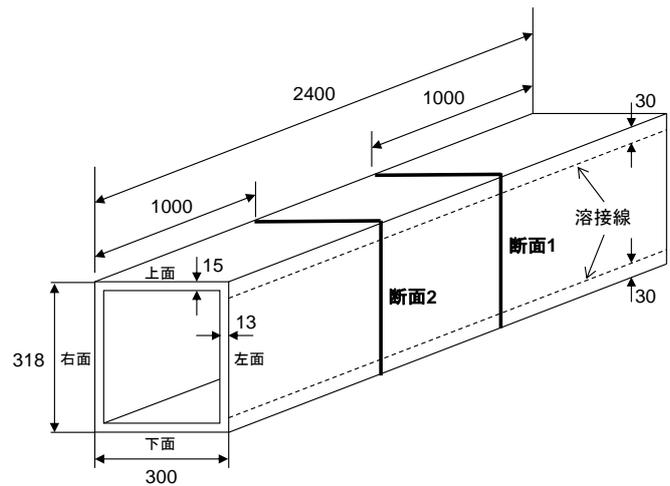


図3 部材の寸法と計測断面 (単位: mm)

3. 計測概要

計測対象とした部材は、供用から約50年が経過して撤去された鋼単純トラス橋の圧縮斜材(図2)である。鋼種はSM400Aである。まず、部材の塗膜を除去した後、図3に示す断面1と断面2で、周方向に全周、磁歪法による計測を実施した。磁歪法の計測ピッチは20mmとした。次に、断面2の上面と左面に、ひずみゲージを部材軸方向に貼付し、機械式切断法を実施した。図4に、ひずみゲージの貼付位置を示す。切断方法は、まず図3に示す断面2を含むように輪切りをし、その後、部材軸方向に約20mmの寸法で小切りに細断した。

4. 計測結果

図5に、機械式切断法と磁歪法により計測された残留応力分布を示す。図5の横軸は、測定位置を示しており、計測方向を図4に示す。また、図5の縦軸は、部材より採取したJIS1A号引張試験片から同定された降伏応力($\sigma_Y = 278\text{MPa}$, 上降伏点)で無次元化した応力である。磁歪法の計測結果において、応力値が σ_Y を超える部分は σ_Y としている。

図5で両者の計測結果を比較すると、残留応力分布の傾向は概ね一致していることが確認される。しかし、応力値の誤差は最大で約80MPaとなっており、磁歪法の誤差として一般的に言われている10~20MPa⁴⁾よりも大きい。誤差の原因として、応力感度曲線の作成精度、せん断応力差積分法の計算精度などが考えられるものの、これらが複合しているため、原因の特定までは至っていない。これに関しては、今後の課題としたい。

応力値の誤差を許容した上で、各断面における磁歪法の計測結果を図6に示す。図中の点線は、応力値が圧縮を示す領域での平均値を示している。これらの値は、計測面に歪みが見られた断面2の右面と下面を除くと、 $0.1\sigma_Y \sim 0.2\sigma_Y$ 程度となっており、一般的に言われている $0.1\sigma_Y \sim 0.4\sigma_Y$ 程度⁵⁾よりも若干小さい値を示している。

5. まとめ

本研究では、既設橋梁において計測事例が極めて少ない部材の残留応力分布を非破壊で把握することを目的とし、撤去された鋼トラス橋の箱形断面斜材に対して、機械式切断法と磁歪法による残留応力計測を実施した。その結果、両者の計測結果の傾向は、概ね一致することが確認され、箱形断面部材の平均圧縮残留応力は、 $0.1\sigma_Y \sim 0.2\sigma_Y$ 程度であった。

参考文献

- 1) 腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル，土木学会，2009.
- 2) 安福精一，磯野敏雄：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.
- 3) 芥川真一，安原幸二，太田道宏，松岡敬，織田卓哉：磁歪法を用いた非接触計測における感度曲線について，建設工学研究所論文報告集，Vol.44, pp.19-26, 2002.
- 4) 佐藤悠樹，宮下剛，長井正嗣：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，第27回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会講演概要集，pp.30-31, 2009.
- 5) 安福精一，藤井堅，末宗仁吉，境禎明，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，Vol.35, No.6, pp.33-38, 2001.
- 6) 座屈設計ガイドライン，土木学会，1987.

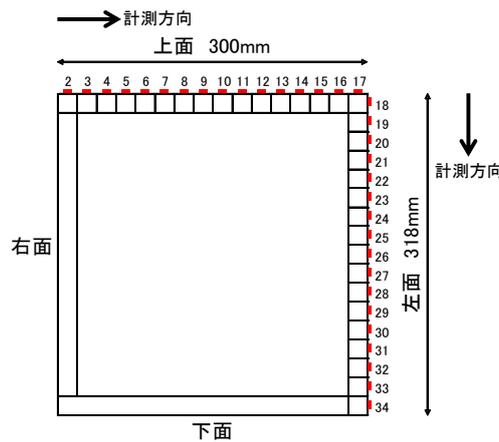


図4 機械式切断法におけるひずみゲージ貼付位置 (断面2)

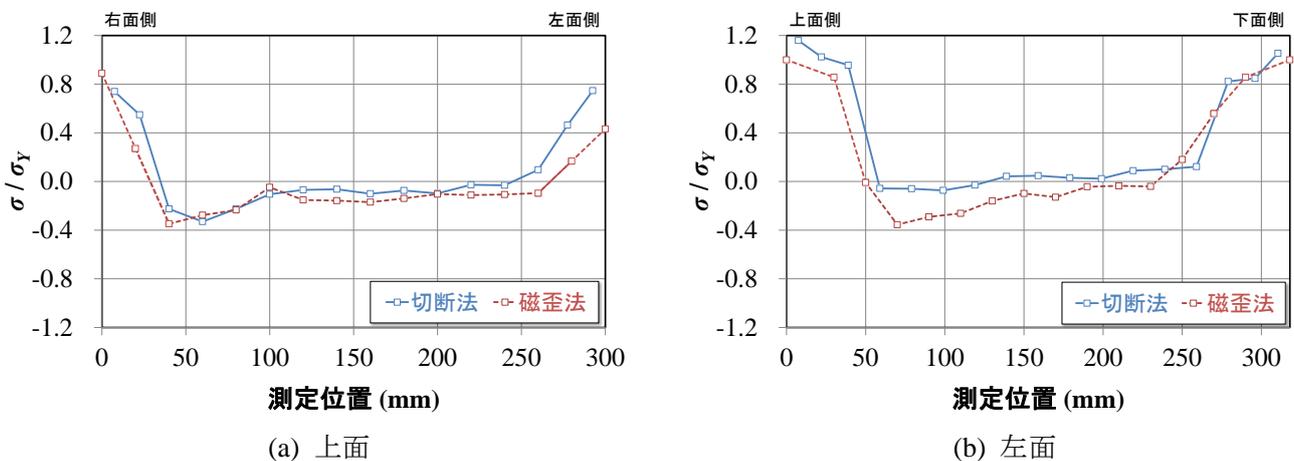
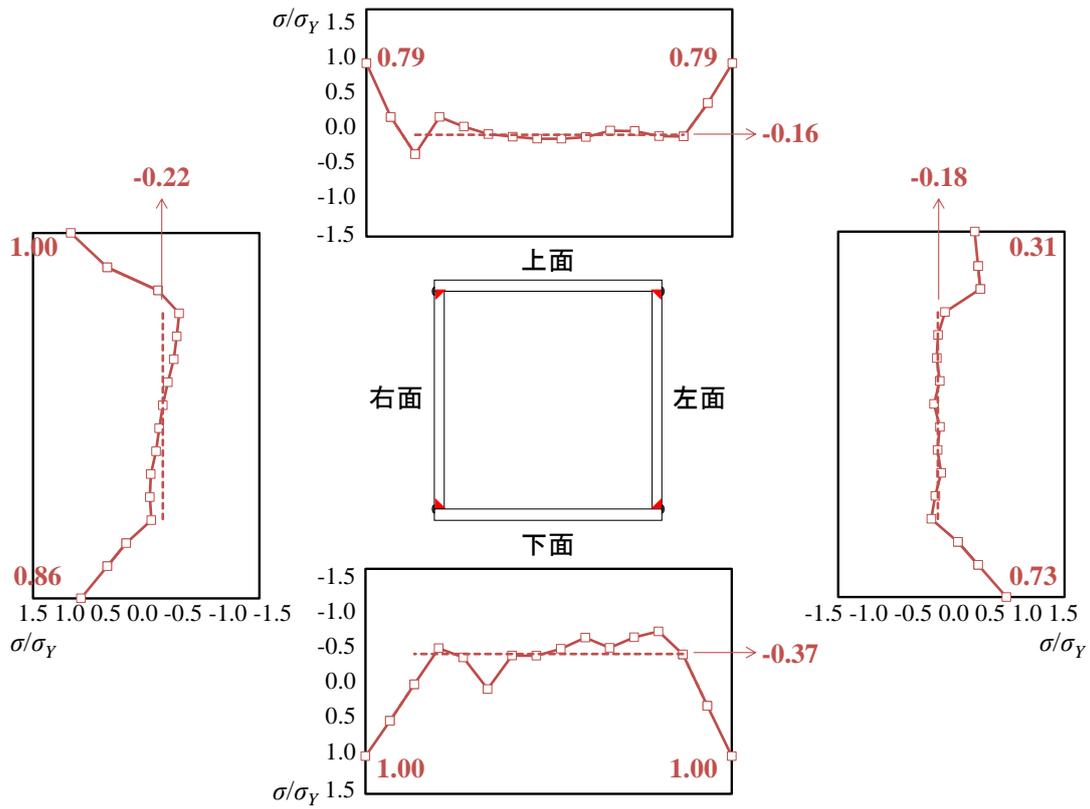
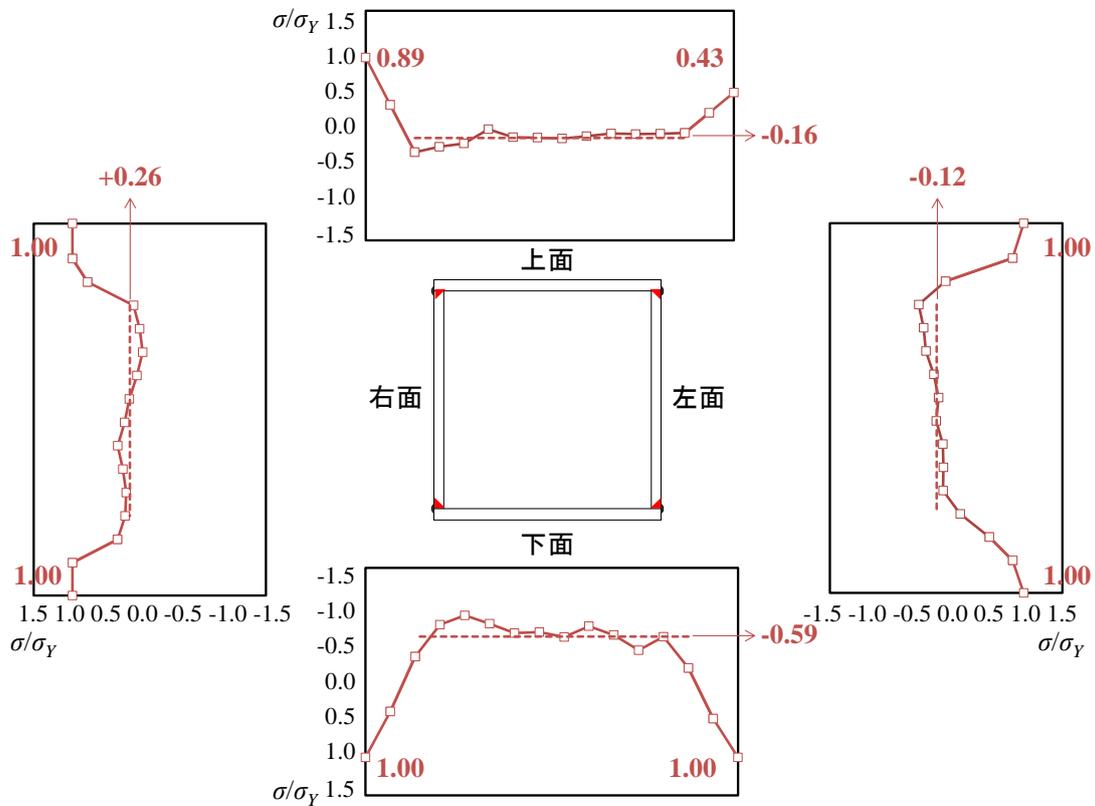


図5 残留応力分布の計測結果



(a) 断面 1



(b) 断面 2

図 6 磁歪法により計測された各断面の残留応力分布