

## § 4. 磁歪法の適用性検討

### 4-1. 計測の目的

磁性体に内在する全応力を非破壊で計測することが可能な技術として磁歪法がある。磁歪法の実橋梁に対する適用性を検討するために、屋内での精度検証試験とある橋梁を対象として工場製作の段階から現地架設までの各段階で磁歪法による応力計測を実施した。

### 4-2. 磁歪法の概要

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計測法である<sup>3)</sup>。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 ( $3 \times 10^{-6}$  程度)。この磁気ひずみ効果の逆の効果が、Villari 効果と呼ばれ、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、応力を計測する。

磁歪法では、その計測原理から既に作用している応力状態下にある磁場が検出される。このため、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計測されることとなる。これは、ひずみゲージによる応力計測が、貼り付けた後からの応力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。

具体的な計測方法は、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プローブを鋼材表面に接触させることで行う (図 4-1)。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である。

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

ここで、 $V$ ：プローブの出力電圧 (V)

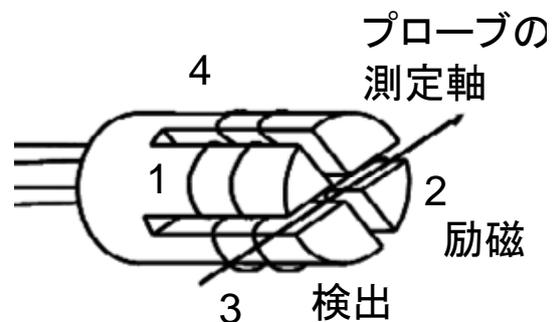
$k$ ：材料とリフトオフ量から決まる係数 (V/MPa)

$\sigma_1$  および  $\sigma_2$ ：主応力 (MPa)

$\theta$ ：主応力方向 (radian)



(a) 写真



(b) 模式図

図 4-1 磁歪法プローブ

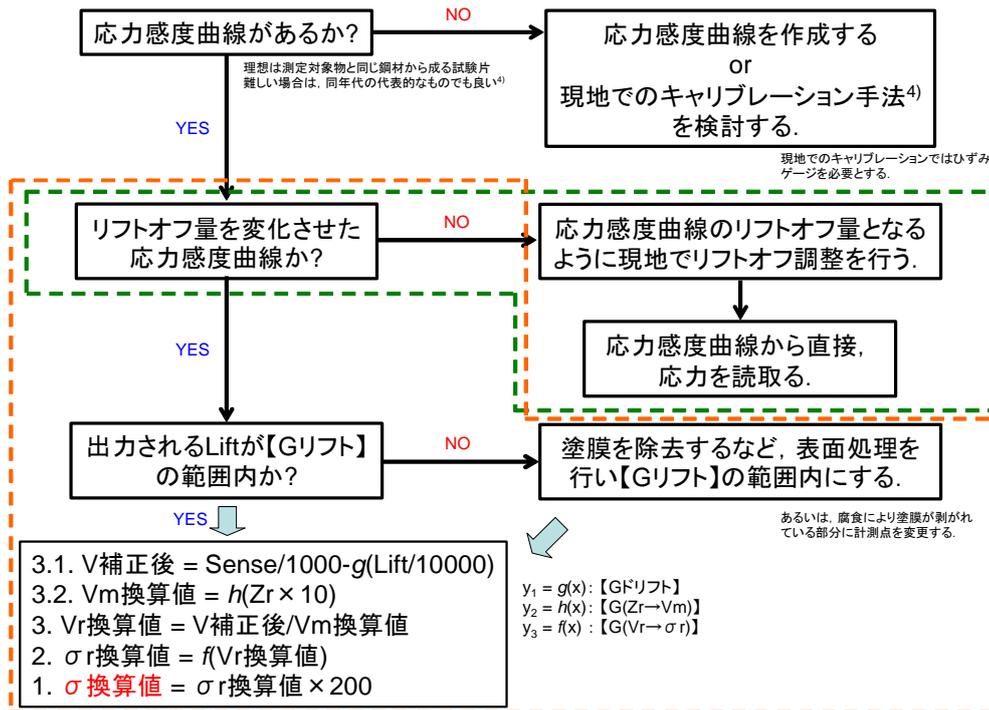


図 4-2 磁歪法の実橋梁への適用に向けたフローチャート

リフトオフ量とは、塗膜を除いた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、予め計測対象において引張・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（校正曲線、キャリブレーションカーブとも呼ぶ）を作成する必要がある。ただし、鋼材の種類、板厚、年代などがわかれば、既往の応力感度曲線を用いて、応力を概算することが可能である。

また、計測対象で主応力方向が明確でない場合は、式(1)において  $\sigma$  が確定しない。このため、各計測点でプローブを  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  の4方向に回転させて、その度に計測を行い、 $\sigma$  を確定する必要がある（4方向計測）。さらに、主応力差に関する情報が得られないことから、これらを分離するために主に光弾性分野で使用されているせん断応力差積分法<sup>4)</sup>を利用する。ただし、トラス橋の斜材などは軸力部材であり、主応力方向が明確であるため、プローブの計測軸を主応力方向に一致させて計測すれば、主応力に比例した電圧が得られることとなる（1方向計測）。参考までに、磁歪法による応力計測精度は既往の研究から 10～20 MPa とされており、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<sup>4)、5)</sup>。

#### 4-3. 実橋梁への磁歪法の適用方法

磁歪法による応力計測では、応力感度曲線（校正曲線、キャリブレーションカーブ）の有無、リフトオフ量が重要となる。磁歪法を実橋梁へ適用する際のフローチャートを図 4-2 に示す。図 4-2 からは、応力感度曲線がある場合でも、リフトオフ量の取り扱い方から、二種類の応力計測方法があることがわかる。以下では、本計測で採用した応力感度曲線、リフトオフ量の取り扱い方について説明する。

##### 4-3-1. 応力感度曲線（校正曲線、キャリブレーションカーブ）

図 4-3 に、応力感度曲線の一例を示す。鋼種は SM400A である。図 4-3 は、プローブの先端に薄膜テ

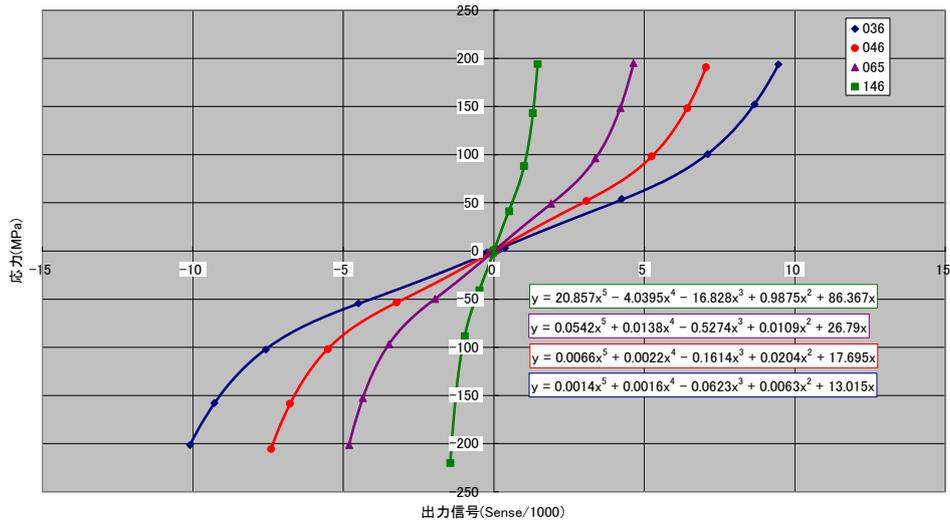


図 4-3 応力感度曲線の例 (SM400A)

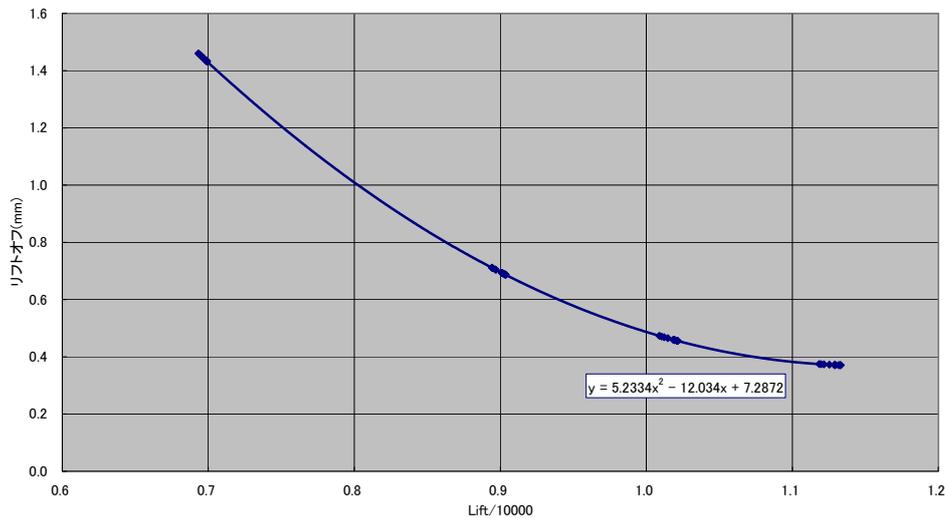


図 4-4 磁歪法から出力されるリフトオフ量と実際のリフトオフ量の関係

ープ (0.05mm 厚) を貼り付けて鋼材表面とプローブ間距離を調整し、リフトオフ量を 0.36mm, 0.46mm, 0.65mm, 1.46mm として実施した引張・圧縮試験から得られた出力電圧と応力の関係である。これらの応力感度曲線から、図 4-2 の手順にもとづいて、リフトオフ量に依存しない応力感度曲線を作成することが可能である<sup>7)</sup>。

#### 4-3-2. リフトオフ量

磁歪法計測システムからは、検出される磁場の強度にもとづいてリフトオフ量に関する情報 (以下、Lift と呼ぶ) が出力される。図 4-3 の応力感度曲線に対して、Lift と実際のリフトオフ量の関係を図 4-4 に示す。横軸が Lift、縦軸が実際のリフトオフ量である。実計測では、まず、Lift が図 4-4 のグラフの範囲内 (0.4~1.4mm) であるかを確認する。ここで、塗膜上からプローブを当て、グラフの範囲内であれば、塗膜上からでも応力計測が可能である。グラフの範囲外となる場合は、計測精度が著しく悪化するため、塗膜のグラインダーによる除去、薄膜テープによるリフトオフ量の調整が必要となる。ま



図 4-5 磁歪法計測システム

た、チェックされたリフトオフ量が、図 4-3 における実際のリフトオフ量 (0.36mm, 0.46mm, 0.65mm, 1.46mm) に非常に近い場合は、図 4-3 の応力感度曲線を直接利用して応力を算出することが可能である。実際のリフトオフ量に近くない場合は、リフトオフ量の調整を行うか、あるいは、リフトオフ量に依存しない応力感度曲線を利用することとなる。

#### 4-3-3. 計測システム

本研究で使用した磁歪法応力計測システムを図 4-5 に示す。システムは、コントローラー、ノート PC、プローブから構成される。本計測システムでは、静的計測のみならず、動的計測も行うことが可能であるが、本研究では静的計測のみを行うことから、プローブとして、直径 20mm、励磁電流 14Hz のタイプのものを用いた。このとき、磁場の浸透深さは、理論式から 1.94mm となる。

#### 4-4. 磁歪法の適用性検証試験

磁歪法を実橋梁の応力計測に適用するのに先立って、磁歪法の計測精度、適用範囲を検証するための屋内試験を実施した。一つめは、ビード溶接を施した薄板の残留応力を磁歪法と応力解放法により測定し、比較を行った。二つめは、第 3 章で実施する光ファイバ検証試験の鋼桁 4 点曲げ試験時に、支間中央部下フランジ下面に磁歪法プローブを設置して、比較を行った。試験の詳細については、第 3 章を参照されたい。

##### 4-4-1. 薄板の溶接残留応力

厚さ 10mm の SS400 鋼材から幅 40mm、長さ 400mm の試験片を切り出し、引張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 4-6 に示す。励磁電流は 14Hz であり、磁場の浸透深さは 1.94mm である。

図 4-6 のデータの出力電圧  $V$ 、応力  $\sigma$ 、インピーダンス  $Z$  を以下のように規格化する。

- ・ 出力電圧は、最大応力  $\sigma_m = 200\text{MPa}$  加えたときの出力電圧  $V_m$  との比で表し、相対出力電圧  $V_r (= V/V_m)$  で表す。
- ・ 応力は  $\sigma_m$  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 4-6 を相対出力  $V_r$  と相対応力  $\sigma_r$  との関係に置き換えたグラフを図 4-7 に示す。これはリフトオフ

に依らない1本の曲線で表されることがわかる。次に相対インピーダンス  $Z_r$  と応力 200MPa 時の出力電圧  $V_m$  との関係に置き換えたグラフを図 4-8 に示す。こ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、1本の曲線で校正曲線を表す。すなわち、これらの曲線により、利用するプローブに対してリフトオフに依存せず、出力電圧を用いて応力を求めることが可能となる。

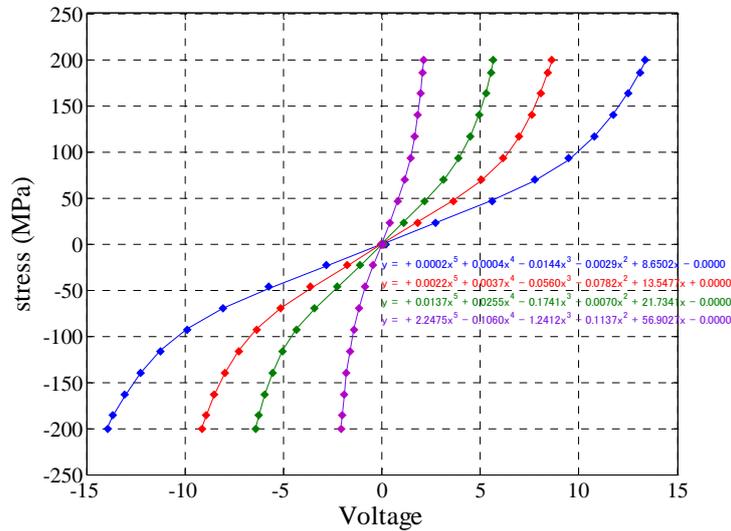


図 4-6 リフトオフごとの応力と出力電圧の関係

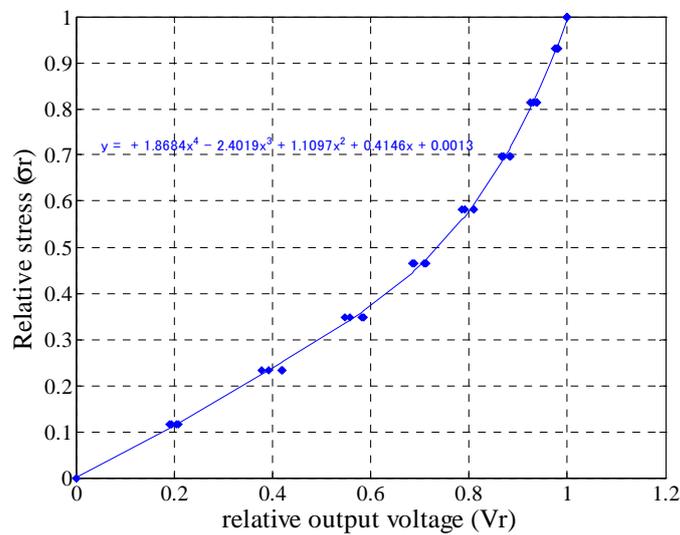


図 4-7 相対出力電圧と相対応力の関係

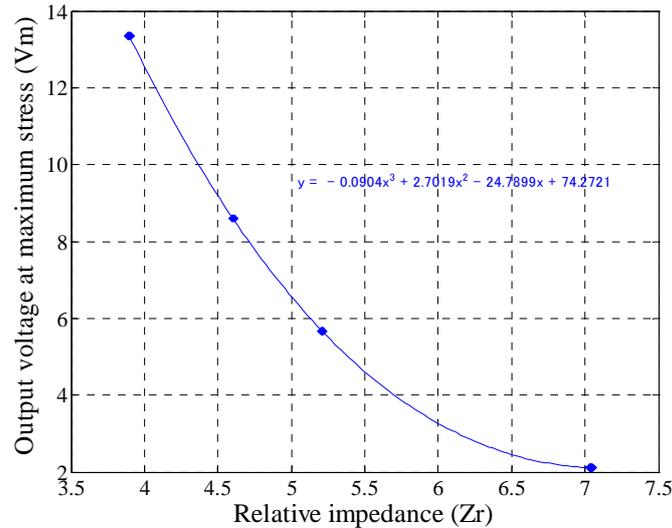


図 4-8 相対インピーダンスと最大出力電圧の関係

測定物から得られる生のデータは、応力に関係した出力電圧  $V$  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。プローブのインピーダンス  $Z_0$  は使用するプローブにより決まるため既知である。以下に本研究の手法に沿った応力算出の具体的な手順を示す。

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。

図 4-8 より応力 200MPa 時の出力電圧  $V_m$  を求める。

$V_m$  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 4-7 より相対応力  $\sigma_r = \sigma / \sigma_m$  を求める。

相対応力  $\sigma_r$  に  $\sigma_m (=200\text{MPa})$  を掛けて、求める応力  $\sigma$  が得られる。

リフトオフに依らない校正曲線の検討と磁歪法の精度を検証するため、室内実験を行った。SS400 材の鋼板 ( $400 \times 250 \times 10$ ) において、残留応力の影響を調べるため、中央にビード溶接を施した。計測は溶接線に直角な方向を磁歪法により計測し、溶接線に平行な方向の残留応力を算出した。試験片ならびに計測位置を図 4-9 に示す。その後、磁歪法計測位置にひずみゲージを貼り付け、帯鋸切断機を使用した応力解放法により残留応力を計測し、磁歪法との比較を行った。

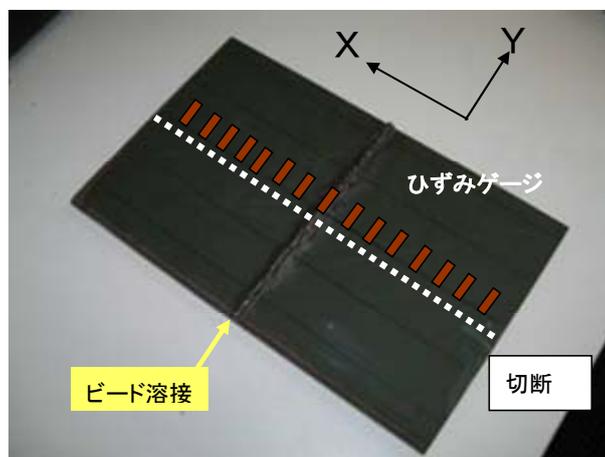


図 4-9 試験片形状および計測位置

切断後の試験片を図 4-10 に、残留応力の比較を行ったグラフを図 4-11 に示す。磁歪法の応力算出にはリフトオフに依らない校正曲線を使用した。磁歪法の精度は $\pm 20\text{MPa}$ とされているが、ひずみゲージとの良好な一致が見られる。また、鋼板の全域を磁歪法で計測し、溶接線方向の残留応力分布を図 4-12 に示す。図中の赤丸の部分では、図 4-13 に示す溶接欠陥に起因して溶接残留応力が小さくなっている。

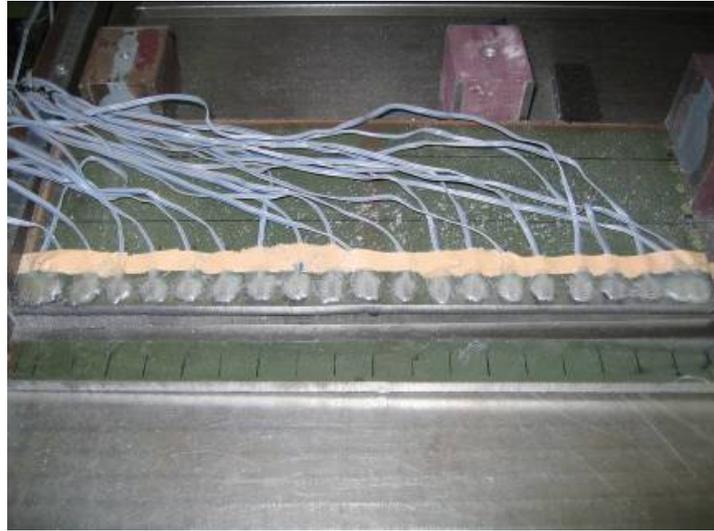


図 4-10 切断後の試験片

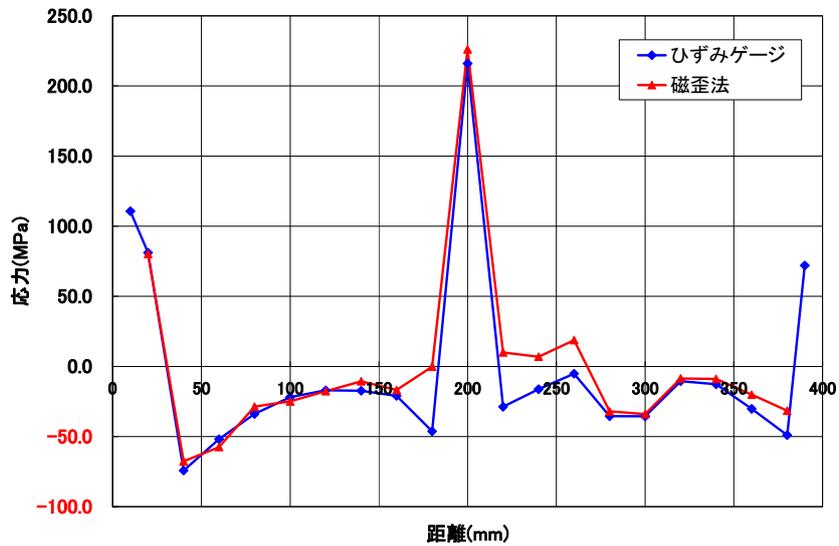


図 4-11 磁歪法と応力解放法の比較

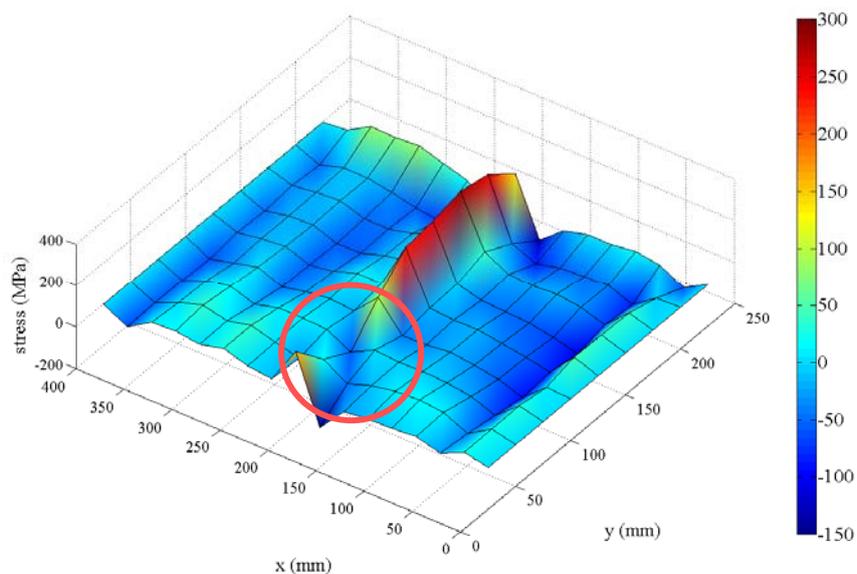


図 4-12 溶接残留応力の分布

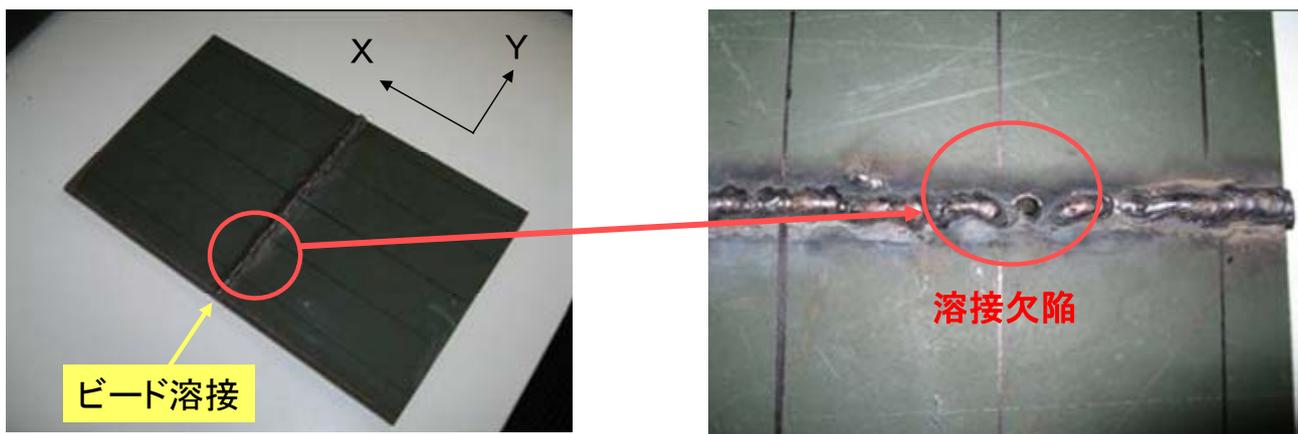


図 4-13 溶接欠陥

ここでは、磁歪法における校正曲線の規格化と精度検証を行った。精度検証には室内実験を行い、ひずみゲージによる応力解放法との比較を行った。また、応力算出にはリフトオフに依らない校正曲線を利用した。その結果、リフトオフに依らず、磁歪法の計測が可能となった。

#### 4-4-2. 鋼桁の4点曲げ試験

図 4-14 に本試験で使用した応力感度曲線を示す。これは、試験を実施した鋼桁と類似した鋼板（鋼種：SM400A、板厚 14 mm）を引張・圧縮試験した結果である。また、リフトオフ量は4点曲げ試験時のものと合わせているため、応力感度曲線は1本しか作成していない。

図 4-15 に、磁歪法による応力計測結果と磁歪法プローブの近傍に添付されたひずみゲージによる応力計測結果の比較を示す。図中の点線は、磁歪法の計測精度と一般に言われる  $\pm 20$  MPa の範囲を示している。180 MPa 付近まで、磁歪法の計測結果は、ひずみゲージの計測結果に対して  $\pm 20$  MPa の範囲に入っていることが分かる。磁歪法の適用範囲は弾性範囲内とされており、今回の結果は公称の降伏応力よ

りも低い範囲で  $\pm 20$  MPa の範囲を超えている。これは、応力感度曲線の精度やリフトオフ量に依るものと思われる。

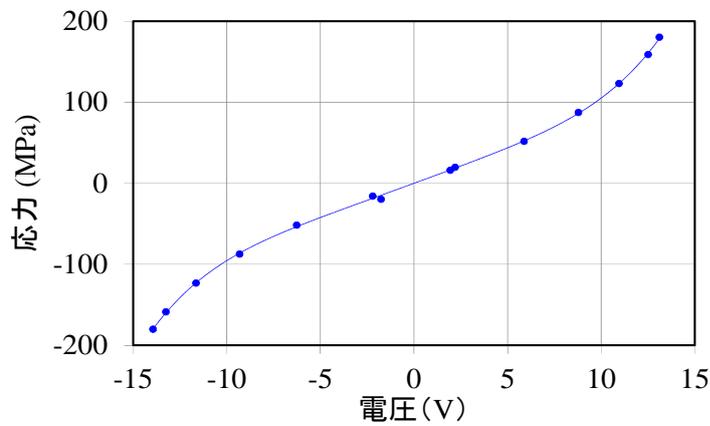


図 4-14 応力感度曲線

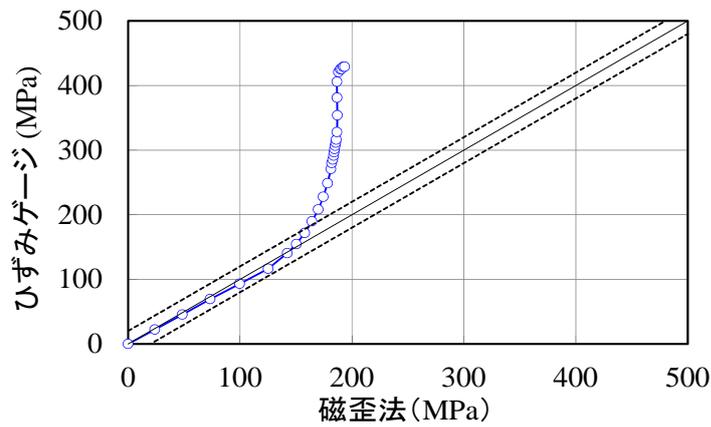


図 4-15 計測曲線の比較

#### 4-5. 計測概要

##### 4-5-1. 対象橋梁

磁歪法の実橋梁への適用性を検討するために対象とした橋梁は、図 4-16 に示す橋長 50.0m の鋼単純合成 2 主鈹桁橋である。



(a) 仮組時



(b) 架設時

図 4-16 対象橋梁

##### 4-5-2. 計測ステップ

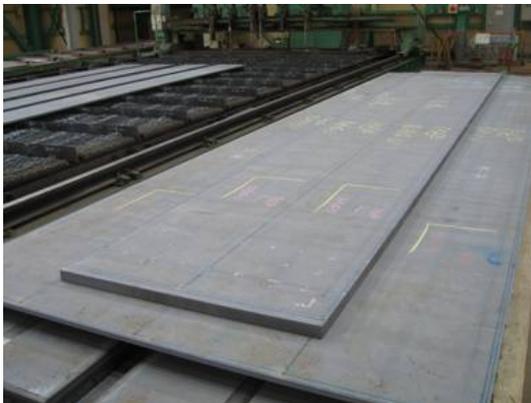
磁歪法による応力計測は、工場製作の段階から現地架設までの各段階で実施した。表 4-1 に計測ステップを示す。計測対象とする部材は、鋼桁の上下フランジとするが、製作工程や作業性の観点から、計測部材を適宜選定することとした。上下フランジの鋼種は SM520C-H である。応力計測では、橋軸直角方向を計測軸とする 4 方向計測を行い、各計測点で主応力差と主応力方向を求め、さらに、せん断応力差積分法から主応力差を分離して橋軸方向の応力を算出することとした。以下に、各計測ステップについて説明する。

表 4-1 計測ステップ

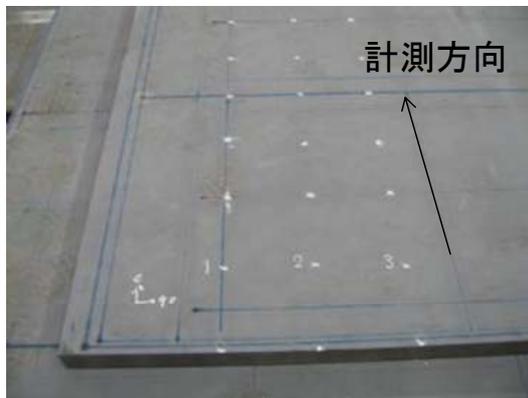
計測ステップ		計測実施日	計測部材
1	鋼板切断前	2009年4月20日	上フランジ(板厚:45mm)
2	鋼板切断後	2009年4月21日	上フランジ(板厚:45mm)
3	仮溶接, 塑性加工	2009年4月30日	上フランジ(板厚:45mm)
4	本溶接	2009年5月8日	上フランジ(板厚:45mm)
5	工場仮組み	2009年10月13日	上フランジ(板厚:45mm) 下フランジ(板厚:75mm)
6	現地桁架設	2010年11月15日	下フランジ(板厚:75mm)

a) 計測ステップ1 (鋼板切断前)

計測対象とした鋼板を図 4-17 に示す。鋼板の寸法は  $1120 \times 7090 \times 45$  mm である。この鋼板は、計測対象とする鋼桁の上フランジとなる。磁歪法の計測方向、計測グリッドサイズ、グリッド間隔、計測方法はそれぞれ部材軸直角方向 (圧延直角方向)、 $3 \times 9$ , 140 mm, 4 方向計測である。



(a) 計測対象とした鋼板

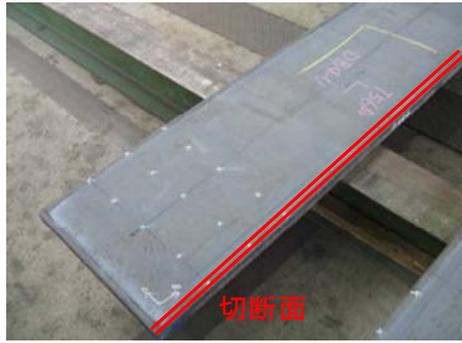


(b) 計測グリッドと計測方向

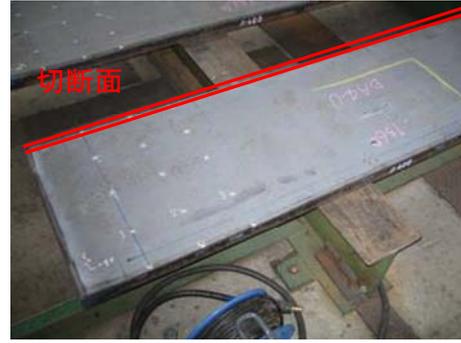
図 4-17 計測ステップ 1

b) 計測ステップ2 (鋼板切断後)

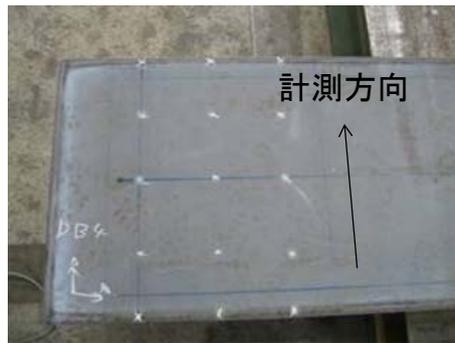
計測ステップ2では、計測ステップ1の鋼板をガス切断して、鋼板寸法を  $550 \times 7000 \times 45$  mm とした後、磁歪法による応力計測を実施した。磁歪法の計測方向、計測グリッドサイズ、グリッド間隔、計測方法はそれぞれ部材軸直角方向 (圧延直角方向)、 $3 \times 5$ , 140 mm, 4 方向計測である。切断した鋼板は、それぞれ G1 桁の上フランジ、G2 桁の上フランジに用いられる (図 4-18)。



(a) G1 桁の上フランジ



(b) G2 桁の上フランジ



(c) 計測グリッドと計測方向

図 4-18 計測ステップ 2

c) 計測ステップ 3 (仮溶接, 塑性加工)

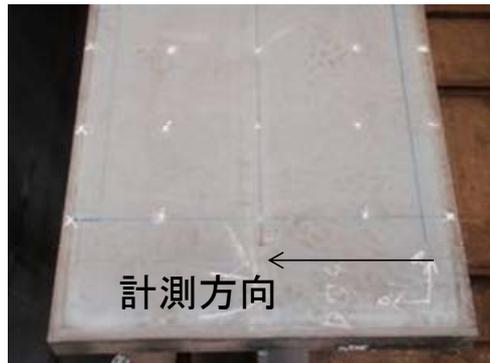
本計測ステップでは、計測ステップ 2 で切断した鋼板に、高さ 2855 mm、厚さ 14 mm、鋼種 SM490Y のウェブを仮溶接して、歪除去のため塑性加工を施した後、磁歪法による応力計測を実施した。計測対象は、計測ステップ 2 で計測した寸法 550×7000×45 mm の鋼板である。磁歪法の計測方向、計測グリッドサイズ、グリッド間隔、計測方法はそれぞれ部材軸直角方向（圧延直角方向）、3×5、140 mm、4 方向計測である。



(a) G1 桁



(b) G2 桁

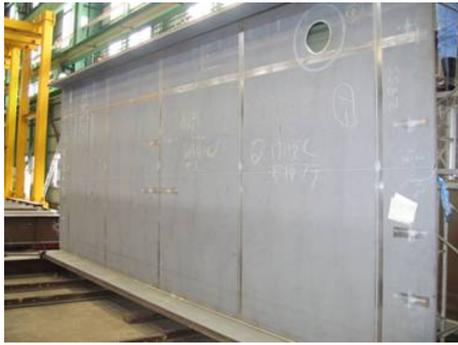


(c) 計測グリッドと計測方向

図 4-19 計測ステップ 3

d) 計測ステップ 4 (本溶接)

本計測ステップでは、計測ステップ 3 の仮溶接部を本溶接した後に、磁歪法による応力計測を実施した。計測対象は、計測ステップ 3 と同様である。磁歪法の計測方向、計測グリッドサイズ、グリッド間隔、計測方法はそれぞれ部材軸直角方向（圧延直角方向）、 $3 \times 5$ 、140 mm、4 方向計測である。



(a) G1 桁



(b) G2 桁



(c) 計測グリッドと計測方向

図 4-20 計測ステップ 4

e) 計測ステップ 5 (工場仮組み)

本計測ステップの計測位置は、図 4-21 に示すように支間中央部付近とした。計測部材は、G1 桁の下フランジ、G2 桁の上下フランジである。上下フランジの寸法は、それぞれ、上フランジが幅 550 mm、板厚 45 mm、下フランジが幅 740 mm、板厚 75 mm である。磁歪法の計測方向、計測グリッドサイズ、グリッド間隔、計測方法は、それぞれ部材軸直角方向（圧延直角方向、桁内側から桁外側）、 $3 \times 12$ （上フランジ）、 $3 \times 16$ （下フランジ）、50 mm、4 方向計測である。

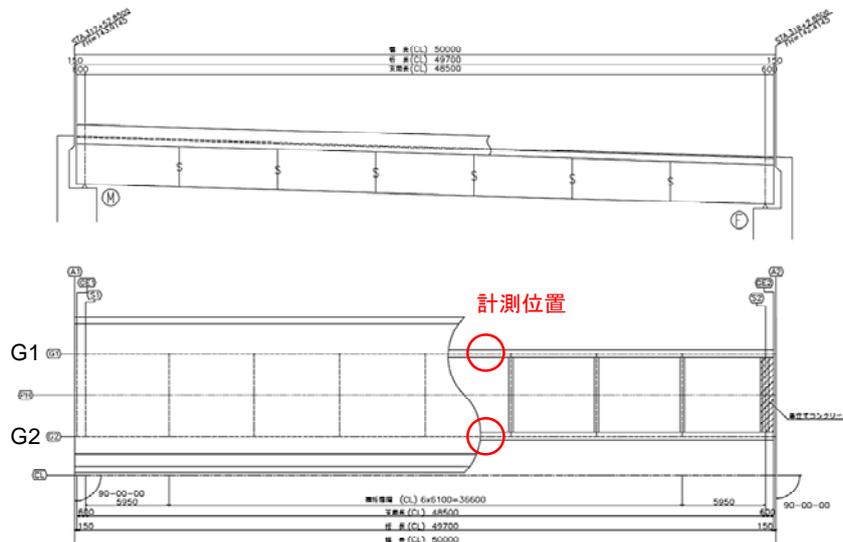


図 4-21 計測位置



(a) 上フランジの計測



(b) 下フランジの計測

図 4-22 計測ステップ 5

#### f) 計測ステップ 6 (現地桁架設)

本計測ステップでは、現地で桁を架設した後、計測ステップ 5 と同じ計測位置で、G1 桁の下フランジと G2 桁の下フランジの応力計測を磁歪法により行った。下フランジの寸法は幅 740 mm、板厚 75 mm であり、磁歪法の計測方向、計測グリッドサイズ、グリッド間隔、計測方法は、それぞれ部材軸直角方向（圧延直角方向、桁内側から桁外側）、 $3 \times 16$ 、50 mm、4 方向計測である。図 4-23 に、計測ステップ 6 の計測状況を示す。



図 4-23 計測ステップ 6

### 4-6. 計測結果

#### 4-6-1. 上フランジ

計測ステップ 1~5 で、計測対象とする橋梁の上フランジの応力計測を磁歪法により行った。ただし、計測ステップ 5 (工場仮組み) では、計測作業に対する制約から G2 桁でのみ計測を実施した。図 4-24 に、各計測ステップの電圧値を示す。この電圧変化を応力に換算するために、図 4-25 に示す応力感度曲線を使用した。本計測では、計測対象から鋼材を切り出してキャリブレーション用の試験片を作成することができなかつたため、上フランジの板厚 45 mm に近い、板厚 46 mm の試験片を代用して応力感度曲線を作成した。また、図 4-25 には、リフトオフ量に応じた感度曲線が示されているが、文献 7) の手法を用いて、リフトオフ量に依存しない感度曲線を作成して磁歪法の出力電圧を応力に換算した。図 4-26 に、図 4-25 の応力感度曲線を用いて、図 4-24 の電圧値を応力に換算した結果を示す。図 4-26 か

ら分かることを以下に記す。

- ・計測ステップ 2 (切断後) では, 1120 mm 幅の鋼板の中央部をガスで切断した。このため, 計測ステップ 1 (切断前) と比較して計測ステップ 2 では, 各鋼板の 560 mm の位置に熱応力の導入と冷却に起因した引張応力が導入されるはずであるが, 計測結果ではこれが確認されない。
- ・計測ステップ 3 (仮溶接) では, 計測ステップ 2 と比較して, 各鋼板の応力分布が引張側に大きく移動している。これは, 歪除去のための塑性加工に起因するものと思われる。
- ・計測ステップ 4 (本溶接) では, 計測ステップ 3 と比較して, 各鋼板の応力分布が圧縮側に移動している。これは, 溶接熱の導入による残留応力の再分配ならびに応力の自己釣合いに起因するものと思われる。応力の分布形状は, 溶接部の直上で圧縮応力となっており, これは既往の残留応力分布の結果<sup>8), 9)</sup>と一致する。
- ・計測ステップ 5 (工場仮組み) では, 計測ステップ 4 と比較して, 計測点数の相違にもとづいて応力度に違いが確認されるものの, 死荷重を支保工で支えているため, 応力の分布形状は計測ステップ 4 と 5 とで大きな違いはないと言える。

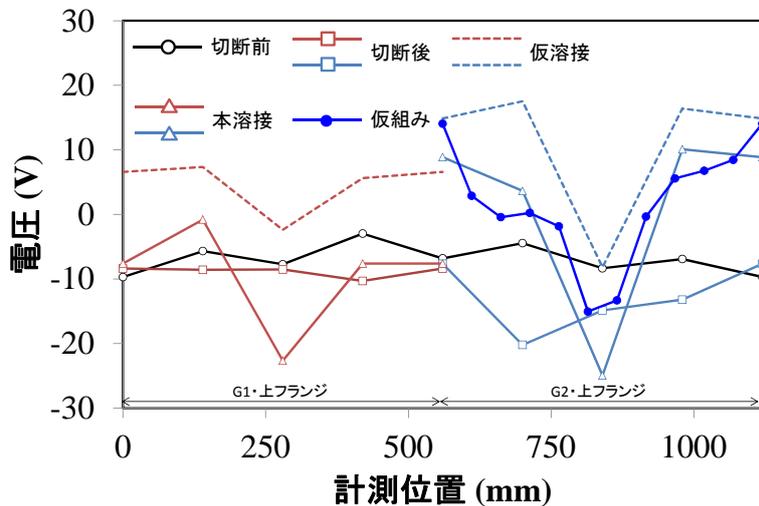


図 4-24 各計測ステップの電圧値 (上フランジ)

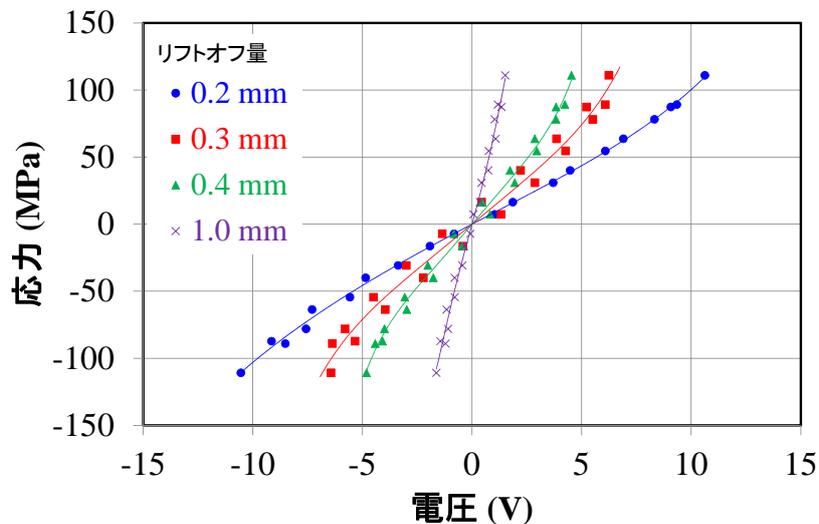


図 4-25 応力感度曲線

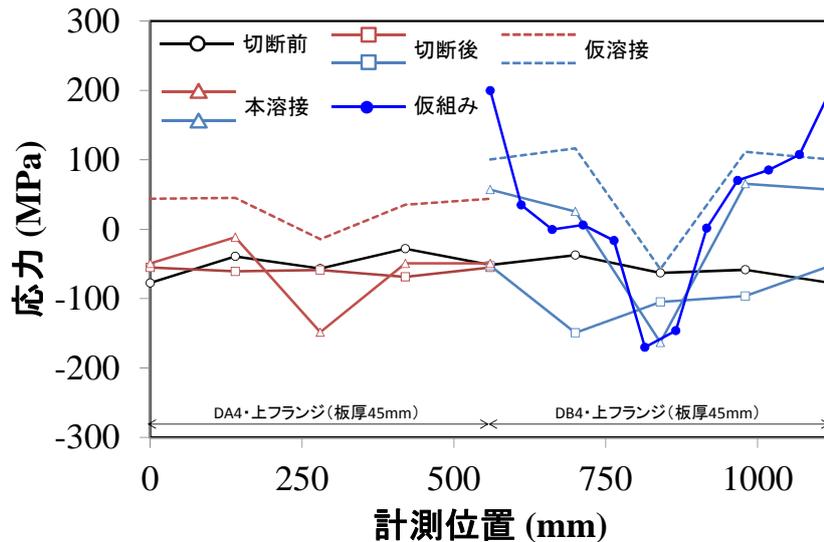


図 4-26 各計測ステップの応力度 (上フランジ)

#### 4-6-2. 下フランジ

計測ステップ 5 (工場仮組み) と計測ステップ 6 (現地桁架設) で, G1 桁, G2 桁の下フランジを計測した結果を図 4-27, 図 4-28 に示す。計測対象とした下フランジの板厚は 75 mm であるが, 計測対象橋梁と同種の応力感度曲線用の鋼材を入手できず, また同種同厚の鋼材も手元がないことから, ここでは, 磁歪法の出力電圧のまま図を示している。

計測ステップ 5 と計測ステップ 6 の差が, 鋼桁の自重による死荷重分の応力変化量となる。応力変化の傾向を評価するために, 各桁の各ステップで, 下フランジの幅方向に平均化した出力電圧を求める。この結果, G1 桁では, 計測ステップ 5 では -4.3162 V, 計測ステップ 6 では -2.5962 V となる。また, G2 桁では, 計測ステップ 5 では -2.7017 V, 計測ステップ 6 では -2.0266 V となる。各桁における電圧の平均値の変化量は, +1.7200 V, +0.67510 V となる。電圧の変化量が正となることから, 応力の変化量も正となり, これは死荷重による応力増加の傾向と一致している。同橋を対象とした三次元立体 FEA からは, 下フランジの死荷重による応力増加量はフランジ幅方向で平均すると, 17.5 MPa となっている。ただし, 両者の桁の変化量は本来, 一致するはずであるが, 相違が見られる。この原因については, 主応力差を分離する際に実施するせん断応力差積分法の精度などが考えられるが, いまのところは明確ではなく, 今後の課題としたい。

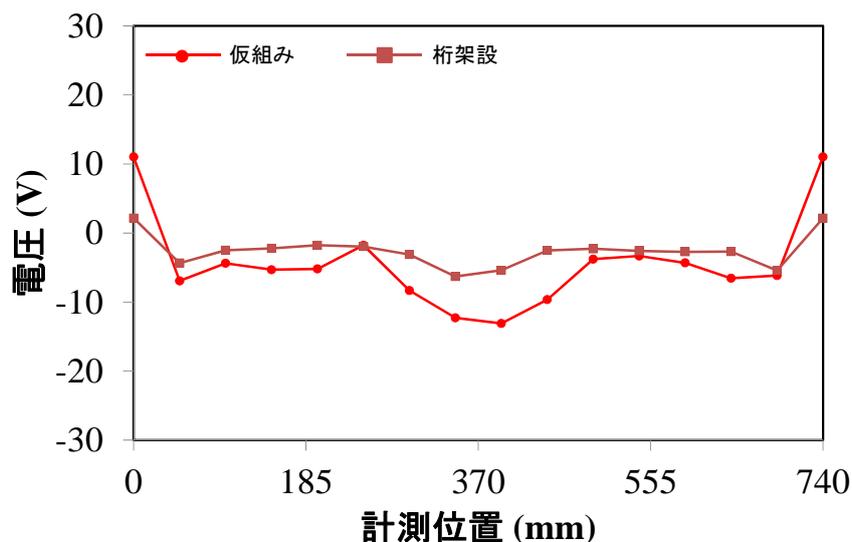


図 4-27 各計測ステップの電圧値 (G1 桁・下フランジ)

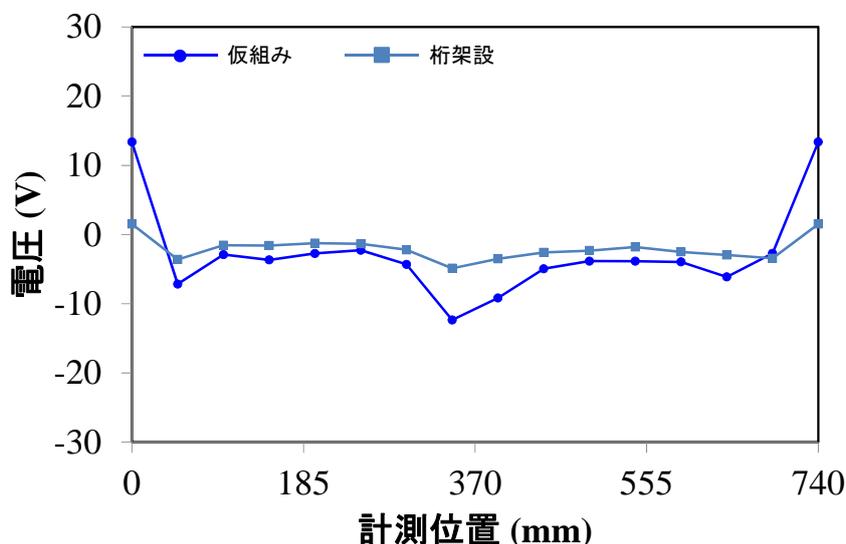


図 4-28 各計測ステップの電圧値 (G2 桁・下フランジ)

#### 4-7.まとめ

本章では、残留応力や死荷重を含む、橋梁に作用する全応力を非破壊で計測することが可能な磁歪法の実橋梁に対する適用性に関して調査した。まず、薄板にビード溶接を施した試験体を対象として機械式切断による応力解放法との比較を行い、次いで、光ファイバ試験への適用を通じて精度検証、適用範囲の把握を行うこととした。さらに、ある橋梁を対象として、工場製作の段階から現地架設までの各段階で実施した磁歪法による応力計測を実施して実橋への適用性について検討した。

一つめの薄板の試験では、磁歪法の適用で問題となる、センサプローブと計測対象との距離であるリフトオフ量の把握を、リフトオフ量に依存しない校正曲線を作成することで解決した。磁歪法で計測された溶接残留応力分布は、機械式切断による応力解放法でひずみゲージによって計測された分布と非常に良い一致を示した。本試験で使用した鋼板の板厚は 10 mm であるが、磁場の浸透深さ、残留応力の板厚方向分布を考えても、この程度の薄板に対する磁歪法の適用性は問題がないといえる。

二つ目の検証試験として、第3章で実施した光ファイバ検証試験の鋼桁の4点曲げ試験に磁歪法も適用することとした。磁歪法プローブの取付位置は、等曲げスパンの中央、板厚16mmの下フランジである。この結果、応力レベル180MPa付近まで、磁歪法の計測結果は、ひずみゲージの計測結果に対して $\pm 20$ MPa以内の誤差であった。ここで、 $\pm 20$ MPaというのは、一般に言われている磁歪法の計測精度である。もともと、磁歪法は、塑性域では鋼材の磁性変化からその適用ができない。しかし、今回の試験体に用いた下フランジ鋼板の降伏応力は、317MPaであることから、降伏応力の約5割までが、適用可能範囲となった。この理由として、試験体と同じ鋼材でキャリブレーションを行うことができなかった点、今回の実験では別の実験で降伏させた試験体を使用している点といった試験条件に起因する原因が挙げられる。前者に対してはキャリブレーションデータの十分な蓄積と適用性に関する検討が課題として挙げられ、後者に対してはモニタリングにおける計測点の適切な設定が課題として挙げられる。

三つめの検証試験から、溶接後の鋼桁の応力分布が既往の残留分布形状と類似している点、電圧値による評価に留まっていたものの、鋼桁架設後の死荷重による応力増加の傾向を捉えられた点から、磁歪法は非破壊で応力分布の傾向を把握することに対しては非常に良いツールと言える。磁歪法による応力計測の結果に誤差をもたらす要因としては、磁場の浸透深さ、応力感度曲線の精度、主応力差を分離するためのせん断積分法の精度など、様々な要因が複雑に影響し合っている。これらの要因を分離することは難しい問題ではあるが、非破壊で残留応力を含む全応力を計測することができる磁歪法のメリットは大きい。今後とも、上記の計測誤差をもたらす要因を明確にしつつ、その対策を進める必要がある。

#### 参考文献

- 1) 飛鳥建設技術研究所ホームページ：<http://www.tobi-tech.com/tech/fbg-fiber.htm>
- 2) ニュープレクス株式会社：<http://www.neubrex.jp/htm/technology/kouseido.htm>
- 3) 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計測，非破壊検査，Vol.35，No.11，pp.805-810，1986.
- 4) 安福精一，村井亮介，藤井堅，池田誠，末宗仁吉，黒瀬義幸，境禎明：磁気を用いた鋼構造物の応力計測，橋梁と基礎，pp.33-38，2001.6.
- 5) 芥川真一，安原幸二，太田道宏，松岡敬，織田卓哉：磁歪法を用いた非破壊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.19-26，2002.11.
- 6) 村井亮介，柳沢栄一，岡俊蔵，廣江哲幸，安福精一：磁歪法による鋼橋の動的応力計測ならびに実橋鋼材感度校正方法に関する検討，溶接学会論文集，Vol.22，No.3，pp.411-416，2004.
- 7) 佐藤悠樹，宮下剛，長井正嗣，奥井義昭，安福精一，松岡敬，池田誠：表面処理の影響を受けにくい磁氣的残留応力の計測方法，第64回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.837-838，2009.9.
- 8) 近藤明雅，日浦隆文，菊池洋一：溶接I型断面部材の残留応力の推定に関する研究，土木学会論文報告集，No.288，pp.1-11，1979.
- 9) 宮下剛，稲葉尚文，平山繁幸，劉翠平，長井正嗣：極厚フランジを有する鋼桁の終局耐力に対する溶接残留応力の影響，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.2，pp.465-480，2012.8.