

磁歪センサーを用いた高架橋の鉄筋応力モニタリング

鉄道力学研究部 構造力学
主任研究員 曾我部正道

1. はじめに

Elastic-Magnetic 現象を利用して鋼材の応力を計測する磁歪センサー(以下 EM センサーという)は、PC 鋼材の張力管理などの分野で近年適用事例が増加しつつある^{1), 2), 3)}。EM センサーは、予め実験的に求めておいた微分透磁率と温度及び鋼材応力との関係式から、死荷重応力も含む、つまり鋼材の応力が 0 の状態からの応力を測定するセンサーである。

一方、RC 鉄道高架橋の実鉄筋応力は、通常設計で想定する応力 100~200N/mm² 前後の値に対して 1/2 以下に留まり、その値は軌道構造や高欄などの非構造部材の影響により大きくばらつくことが知られている。よって、EM センサー等により、非・微破壊で鉄筋の応力状態の概略値を知ることができれば、既設 RC 鉄道高架橋の安全性評価、とりわけ既変状構造物の応力モニタリング等に有効であると考えられる。

以上のような背景から、本研究では、①鉄道高架橋の狭隘な配筋状況を想定した EM センサーの開発、②鉄道高架橋に使用されている鉄筋の材質、形状、配筋状態に応じた、その温度特性及び応力特性の解明、③実際の鉄道高架橋に対する埋設試験と実用性を確認、の 3 点を研究の目的とした。

2. 鉄道高架橋用 EM センサーの開発

図-1 に、強磁性体の磁界と磁束密度に関する鋼材のヒステリシス環線を示す²⁾。強磁性体である鋼材は、磁界を強くするにつれて磁束密度が高くなり、さらに大きな磁界を与えると飽和状態に至る。その後、磁界を弱めると減少率が安定した下降経路が現れる。図中に示した安定した経路における微分透磁率 $\mu_r (= \Delta B / \Delta H)$ は、応力および温度の関数として高い精度で表すことができるため、予め実験的に関係式を求めておくことにより、鋼材の応力を推定することができる。微分透磁率 μ_r は、式(1)で近似的に表すことができる。

$$\mu_r(\sigma, T) = \mu_r(0, 0) + m_1 \cdot \sigma + m_2 \cdot \sigma^2 + \alpha \cdot T \quad (1)$$

ここに、 σ は応力、 T は温度、 m_1 、 m_2 は温度が一定状態にある場合の実験定数、 α は応力が一定状態にある場合の実験定数である。

図-2 に RC 鉄道高架橋用 EM センサーの形状寸法を示す。24VDC/100VAC 電源から電気をコンデンサーに蓄えて、200~300V のパルス電圧を 1 次コイルに印加して鋼材の磁束密度を変化させると、2 次コイルに誘導電圧が発生する。この電圧を測定して鋼材の微分透磁率を算定し鉄筋の応力度を推定する。また、同時に EM センサーに内蔵した感温素子により鉄筋の温度を推定する。

既設高架橋の配筋状況は建設年代により異なるが、RC 鉄道高架橋への適用を検討する場合、その特徴的な高密度の配筋に対応して、EM センサーの所要コイル巻数を確保し、測定精度を確保できるか否かが重要

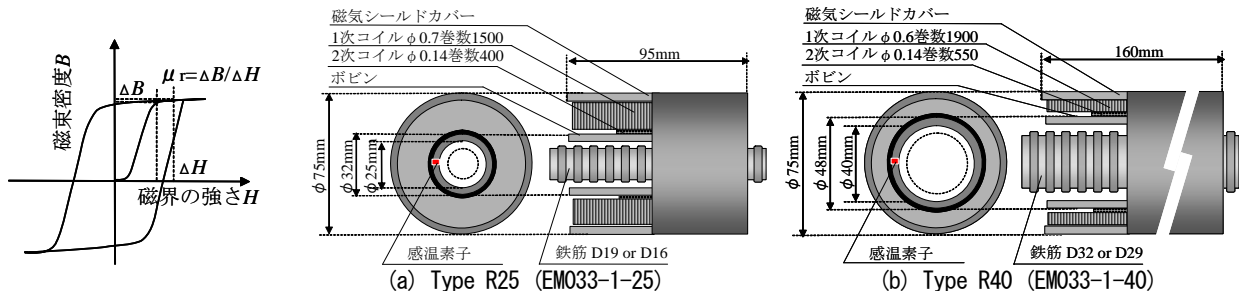


図-1 鋼材のヒステリシス環線

図-2 RC 鉄道高架橋用 EM センサーの形状寸法

となる。このため、センサー形状は、最も狭隘となる配筋事例を参考に定めた。

新設構造物では、あらかじめ製作したEMセンサーをコンクリート打設前に設置する。既設構造物では、鉄筋をはつり出し、分割したボビンを鉄筋に被せ、歯車装置と電動ドリルで構成される巻付け機で絶縁軟銅線のコイルを所要回数巻きつけ、磁気シールドで覆い、現地にてEMセンサーを製作・設置する。

既設構造物の鉄筋の死荷重応力は、通常はひずみゲージを添付した後、当該鉄筋を切断して開放されるひずみを測定することにより算定されるが、本手法は、鉄筋を切断せずに微分透磁率から絶対的な応力度を測定することができる利点を有する。また、センサー自体は、安価で耐久性が高く（PC鋼材の測定については2008年2月現在国内8年、海外11年の実証データを有する）、モニタリングセンサーとして長期間使用することができる。

3. 鉄道高架橋用EMセンサーの試験方法

前述のようにEMセンサーを用いた測定には、式(1)に示す応力と微分透磁率及び温度の関係が用いられる。従って式(1)に示した各定数の値を事前に実験的に求めておく必要があるが、鉄筋に固有の技術的課題としては、材質が不均一であること、様々な節があり形状が不均一であること、周囲に鉄筋が存在し磁束が乱されやすいことなどが挙げられる。特にPC鋼材に比べて鉄筋は使用する応力レベルが低いためにこうした影響を受けやすいと考えられる。

表-1に鉄道高架橋における使用鉄筋の変遷を示す。丸鋼は、使用時期が古く、鉄道では戦前の高架橋において多く使用されていたと考えられる。電炉鉄筋は、昭和40年代より広く使用されるようになり、現在では市場全体の97~98%を占めている。電炉鉄筋の原料は、自動車、ビルの解体屑、家電製品など様々だが、地域により入手される原料が異なり、JISに定められる5成分以外の銅、錫、クロム、亜鉛、ニッケル、アルミ等の不純物の含有率が異なる。例えば、関東周辺では自動車のスクラップが多く、モーターに使用される銅の含有率が高い。電炉製造会社の数は30社前後存在するが、特別にシェアの大きな製造会社は存在せず、材質も様々であると推定される。電炉鉄筋の節形状は、当初疲労に対して有利との理由から斜め節が採用されていたが、現在では竹節が主流となっている。ただし、竹節でもその形状は製造会社により様々である。昭和40年代は、山陽新幹線をはじめ、国鉄・私鉄で多くの高架橋建設が行なわれた年代であるが、コンクリート材料の入手困難から現在劣化構造物も最も多い建設年代となっている。

表-2に試験体一覧を示す。上記使用鉄筋の変遷を踏まえ、鉄筋単体での試験用として鉄筋径、製造会社、地域、製造方法、節形状をパラメータとして12体の試験体を製作した。一般的に細径の鉄筋の方が材質や形状の影響が生じやすいと考えられるためD19を主体として検討を進めた。また、測定原理からして近接鉄筋が形成する磁束もまた測定精度に影響を及ぼすと考えられる。そこで実際の配筋状態を考慮した検討についても実施した。なお斜め節鉄筋は、現在では入手困難であるため、ねじ節で代用することとし、同一製造会社の竹節との比較を試みた。

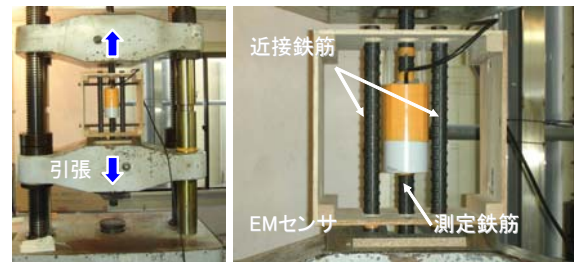
温度特性試験は、試験体の鉄筋およびEMセンサーを恒温槽内に設置して実施した。設定温度は、鉄道高架橋で通常想定される-20~40℃の範囲とし、20℃毎に測定を実施して式(1)の α を推定した。各温度ステップでは、センサーの温度と恒温槽の温度が均一になるまで1~2時間静置し、均一状態で、各温度ステップ毎に測定を3回づつ実施した。

表-1 鉄道高架橋における使用鉄筋の変遷

使用時期	形状	製造方法	節形状	注記
戦前~	丸	高炉	—	東京、大阪地区の古い高架橋
昭和30年代中頃~	異形	高炉	斜め	東海道新幹線等
昭和40年代~	異形	電炉	斜め	山陽新幹線等
昭和50年代~	異形	電炉	竹	

表-2 試験体数一覧

種別	パラメータ
鉄筋単体	径(D19、32)、製造会社、地域、節形状、製造方法 計12本
近接鉄筋考慮	単一、平行鉄筋、平行+直行鉄筋 6本に対して上記配筋 計21パターン



(a)単体試験 (b)近接鉄筋考慮
図-3 アムスラー試験機による応力特性試験

図-3に応力特性試験の状況を示す。試験体にEMセンサーをセットし、アムスラー試験機を用いて1本当たり3回の载荷を行い式(1)の m_1 、 m_2 を推定した。近接鉄筋の影響を考慮する場合には、図中に示すように実際に即した鉄筋を周囲に配置して試験を行った。

4. 鉄道高架橋用EMセンサーの試験結果

図-4に温度特性試験により得られた温度と微分透磁率の関係を示す⁴⁾。試験体101(D19、A社関東、竹節)は基準鉄筋であり、103は101と同一製造ロット、102は101とロット違いである。同一と考えられる鉄筋においても、微分透磁率は0.1程度ばらつくことが分かる。試験体107(D19、A社関東、ねじ節)、試験体108(D19、E社九州、斜め節)は、節形状の違いについて検討したものである。節形状により、更に微分透磁率のばらつきは大きくなっている。この他、製造会社、地域に着目すると地域により微分透磁率は0.1程度ばらつくことが分かった。

図-5に応力特性試験により得られた応力と微分透磁率の関係を示す⁴⁾。なお図中の曲線は3回の载荷試験結果の近似式であり、決定係数 R^2 は0.999~1.000である。また試験結果は15°Cに換算して示している。

図-5(a)の試験体101(D19、A社関東、竹節)は基準鉄筋であり、103は101と同一製造ロット、102は101とロット違いである。同一と考えられる鉄筋においても、微分透磁率は0.1程度ばらつくことが分かる。同一の微分透磁率における誤差は 10N/mm^2 以内で、比較的誤差は小さかった。試験体107(D19、A社関東、ねじ節)、試験体108(D19、E社九州、斜め節)は、節形状の違いについて検討したものである。節形状により、微分透磁率のばらつきはかなり大きくなっている。同一の微分透磁率における応力の差も 70N/mm^2 前後となる場合もあり、鉄道高架橋に対して適用する場合には節形状毎にキャリブレーションを実施する必要があると考えられる。

図-5(b)は、製造会社、地域に着目したものであるが、地域により微分透磁率は0.1程度ばらつくことが分かった。これは同一の微分透磁率における差に換算すると 20N/mm^2 以内であった。これらの鉄筋の竹節の形状は、実際には製造会社により異なるが、その影響は比較的小さいと判断される。

図-5(c)はD32について検討したものである。試験体201(D32、A社関東、竹節)は基準鉄筋であり、202(D32、A社関東、ねじ節)は節形状を比較したものである。同一の微分透磁率における応力の差は 50N/mm^2 を超えた。D19よりも誤差が若干少ないのは、もとの鉄筋径が大きいため、節形状の違いの影響が相対的に薄れたためと考えられる。

次に近接鉄筋の影響を考慮した試験を実施した。温度特性については参考文献を参照されたい⁵⁾。

図-6に、D19鉄筋の応力特性試験により得られた応力と微分透磁率の関係を示す⁵⁾。101-1と101-2を比較

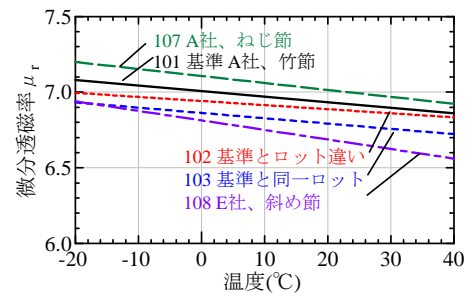
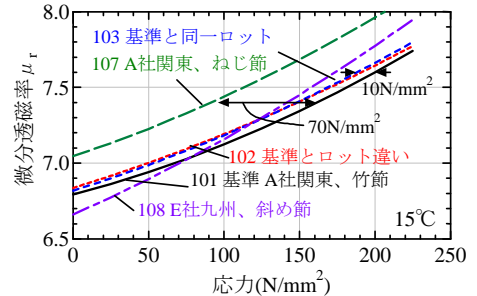
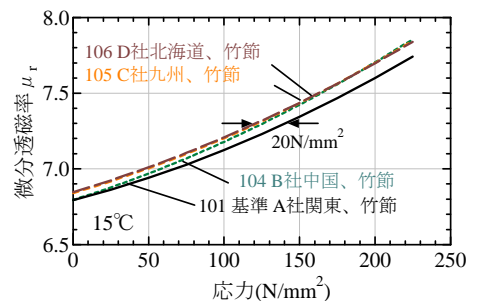


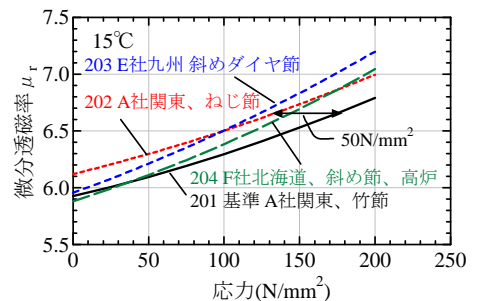
図-4 温度と微分透磁率の関係(鉄筋単体D19)



(a)D19 製造ロット、節形状の影響



(b)D19 製造会社、地域の影響



(c)D32 節形状、製造方法

図-5 応力と微分透磁率の関係(鉄筋単体)

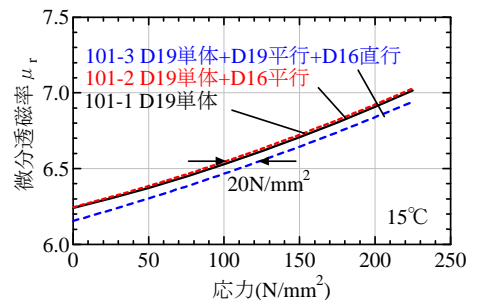


図-6 応力と微分透磁率の関係(近接鉄筋考慮D19)

すると、測定鉄筋に平行に配置された鉄筋は、微分透磁率-応力関係に与える影響は小さいと考えられる。また 10I-2 と 10I-3 を比較すると、直交鉄筋は、微分透磁率-応力関係において曲線の傾きはほぼ変わらないが、切片の値が 0.08 程度小さくなっており、測定鉄筋の周囲に鉄筋がない場合と配筋された場合の同一の微分透磁率における応力の差は最大で 20N/mm^2 程度となった。一方 D32 鉄筋では、試験結果の図は省略するが⁵⁾、測定鉄筋の周囲に鉄筋がない場合と配筋された場合の同一の微分透磁率における応力の差は最大で 10N/mm^2 程度とであった。

5. 鉄道高架橋用EMセンサーの耐久試験

以上のような基礎実験を実施して誤差の発生要因を分離し、個々にキャリブレーション試験の方法を定めた。これらを踏まえて、実鉄道ラーメン高架橋への埋め込み試験を実施した。

図-7に実構造物における耐久試験状況を示す。RC ビームスラブ式ラーメン高架橋の縦梁に対して、同一スパンの 6 箇所の軸方向鉄筋に EM センサーを設置した。

図-8に耐久試験結果を示す。いずれも同時に設置したひずみゲージと概ね等しい挙動を示しており、 5N/mm^2 程度の比較的良好な試験結果が得られている。なお、A と C は経過日数 50 日でひずみゲージが測定不能となった。

6. 結論

本研究では、鉄道 RC 高架橋の配筋に基づき 2 種類の EM センサーを開発し、以下の知見を得た。

- (1) 製造ロット、製造会社、地域の影響は、同一の微分透磁率に対する応力の差で 20N/mm^2 以内であると考えられる。
- (2) 鉄筋の節形状の影響は大きく、同一の微分透磁率に対する応力の差は 50N/mm^2 以上となると考えられる。実 RC 鉄道高架橋に EM センサーを適用するためには鉄筋の節形状によりキャリブレーションを行なう必要があると考えられる。
- (3) EM センサーの周囲に配置された鉄筋の影響は、同一の微分透磁率に対する応力の差で 20N/mm^2 程度と考えられる。実 RC 鉄道ラーメン高架橋に EM センサーを適用する際は、測定する鉄筋の配筋状況を模したキャリブレーションを行なうのがよいと考えられる。

参考文献

- 1) Chen, Z. L., Wang, M. L., Okamoto, T. and Sumitro, S.: A new magnetron-elastic stress/ corrosion sensor for cable-stayed bridge using measurement of an hysteretic curve, 2nd Workshop on ATUEDM, Kyoto, 2000.7
- 2) 黒川章二、羅黄順、Wang, M. L., 嶋野慶次: EM センサーを用いた PC 梁緊張材の応力モニタリング実験、応用力学論文集、Vol.1, 2002.8
- 3) 眞岸徹、本間政幸、大川尚哉、三島徹也、羅黄順、宮本則幸: EM (Elasto-Magnetic) センサーによる鉄筋現有応力測定技術の開発(その 1) 鉄筋単体試験による基礎的検討、第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM)、VI-218, 2002.9
- 4) 曾我部正道、蘆谷讓、谷村幸裕、宮本則幸: 磁歪センサーを用いた RC 鉄道高架橋の鉄筋応力測定に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.28, No.1, pp.1997-2002, 2006.7
- 5) 蘆谷讓、曾我部正道、谷村幸裕、濱田弘志: EM センサーを用いた RC 鉄道高架橋の鉄筋応力測定、コンクリート工学年次論文集、Vol.29, No.2, pp.733~738, 2007.7

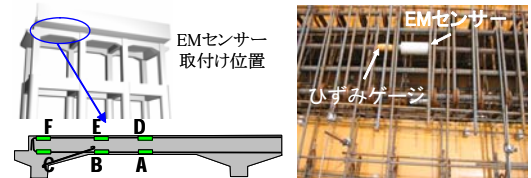


図-7 実構造物における耐久試験方法

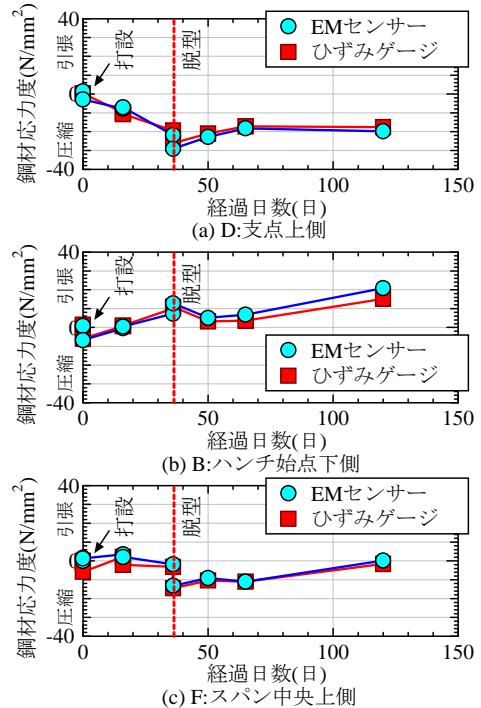


図-8 実構造物における耐久試験結果