

報告 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

曾我部 正道*1・ 蘆谷 譲*2・ 谷村 幸裕*3・ 宮本 則幸*4

要旨：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して報告する。本報告では、RC 鉄道高架橋の狭隘な配筋状況を想定した 2 種類の磁歪センサーを開発し、既設 RC 鉄道高架橋の鉄筋の使用状況を想定した 12 本の試験体に対して、センサーの温度特性及び応力特性に関する確認試験を行い、応力測定に必要な各種実験定数を算出した。その結果、鉄筋の製造ロット、製造会社、地域の違いが応力測定値に及ぼす影響は概ね 15N/mm^2 以内であること、鉄筋の節形状の違いが応力測定値に及ぼす影響は 50N/mm^2 を超え場合があるため、節形状に合わせてキャリブレーションが必要であることなどを明らかにした。

キーワード：非破壊検査, 鉄筋応力, 磁歪センサー, EM センサー, 透磁率

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 センサーと称す)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)}。また EM センサーを鉄筋に利用する方法についても既に基礎的な検討が試みられている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ことができる。

RC 鉄道高架橋の実鉄筋応力は、通常設計で想定する応力の 1/2~1/5 程度に留まり、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。従って EM センサー等により、非破壊で鉄筋の応力状態の程度を知ることができれば、既設 RC 鉄道高架橋の安全性評価の精度を高めることができると考えられる。

以上のような背景から、本報告では、RC 鉄道高架橋の死荷重応力を含む鉄筋応力を測定するために、EM センサーの適用性について検討を行

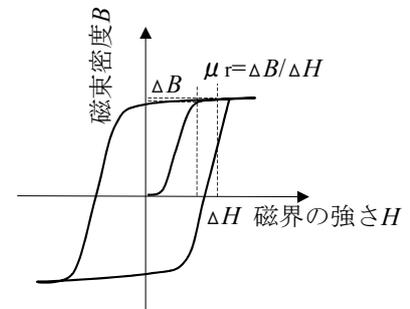


図-1 強磁性体の磁気特性

なうこととした。具体的には、RC 鉄道高架橋の狭隘な配筋状況を想定した 2 種類の磁歪センサーを開発し、既設 RC 鉄道高架橋の鉄筋の使用状況を想定した 12 本の試験体に対して、センサーの温度特性及び応力特性に関する確認試験を行い、測定に必要な各種実験定数を算出した。

2. RC 鉄道高架橋用 EM センサーの開発

2.1 測定原理

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

*1 (財)鉄道総合技術研究所 構造力学 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 主任研究員 博(工) (正会員)

*4 (株)計測リサーチコンサルタント 企画開発室

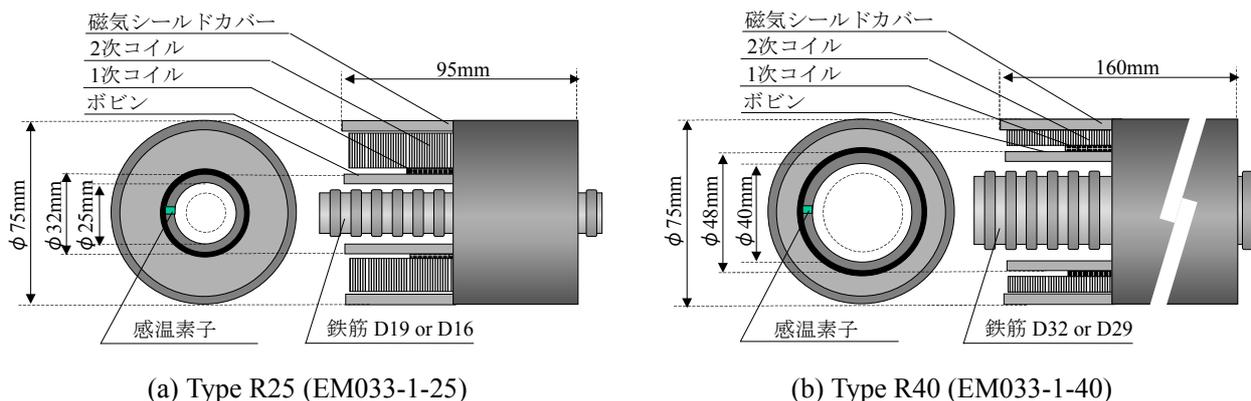


図-2 RC 鉄道高架橋用 EM センサーの形状寸法

表-1 RC 鉄道高架橋の配筋の例

		主筋		帯筋・スターラップ・直行鉄筋		かぶり (mm)
		径	間隔(mm)	径	間隔(mm)	
ラーメン 高架橋	柱	D32	200 (中央)	D19	125	50
	中間スラブ	D13,16	125,150	D13,16	125,150	40
	縦梁, 横梁	D32	124 (中央)	D13	125 (端部) 250 (中央)	40
T 形桁		D32	65.5	D13	200 (端部) 250 (中央)	40
スラブ桁		D32	76.6	D13	250 (端部) 400 (中央)	40

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 μ_r 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。

2.2 RC 鉄道高架橋用 EM センサー

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 次コイルに誘導電流が発生する。誘導電流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。

表-1 に RC 鉄道高架橋における配筋の例を示す。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、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となる。このため、センサー形状は、最も狭隘となる近年の配筋事例を参考に定めることとした。

図-2(a) に示す D19、D16 用の Type R25 (EM033-1-25) は、スラブの短辺方向の主鉄筋に用いることを想定している。設置条件としては、鉄筋間隔は 125mm とセンサー径には余裕があるが、交差する長辺方向の鉄筋間隔は 125mm とセンサー長は制約を受ける。また、鉄筋径も小さいためセンサー径は比較的確保しやすい。このため、Type R25 は、所要コイル巻数を、センサー径により確保する設計とした。1 次コイルは絶縁軟銅線 $\phi 0.7\text{mm}$ 、総巻数 1500、2 次コイルは絶縁軟銅線 $\phi 0.14\text{mm}$ 、総巻数 400 となっている。

図-2(b) に示す D32、D29 用の Type R40

表-2 鉄道 RC 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
昭和 40 年代～	異形	電炉	斜め	劣化構造物多数
昭和 50 年代～	異形	電炉	竹	

(EM033-1-40)は、RC ラーメン高架橋の縦梁及び横梁、T 形桁、スラブ桁等のスパン中央付近の軸方向主鉄筋に用いることを想定している。設置条件としては、鉄筋間隔は 65mm とセンサー径は厳しいが、スパン中央付近のスターラップの配置間隔は 250mm とセンサー長には余裕がある。このため、Type R40 は、所要コイル巻数を、センサー長により確保する設計とした。1 次コイルは絶縁軟銅線 φ 0.6mm、総巻数 1900、2 次コイルは絶縁軟銅線 φ 0.14mm、総巻数 550 となっている。

新設構造物では、予め製作した 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を改良した巻きつけ機で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、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. 検証試験方法

3.1 試験体

EM センサーを用いて測定を行なう場合には、微分透磁率と応力および温度の関係を事前に求めておくためのキャリブレーションが必要となるが、鉄道 RC 高架橋には様々な鉄筋が使用されているため、その使用実態を整理するとともに、

各種パラメータの影響を明かにしておく必要がある。

PC 鋼材で実績のある EM センサーを、鉄筋に使用する場合の問題点としては、材質が不均一であること、節が存在すること、直行鉄筋が存在することなどが考えられる。このうち、直行鉄筋の影響については磁気シールドにより遮蔽可能であると考えられることから³⁾、実際には鉄筋の材質と形状について検討を行なっておく必要がある。

表-2 に鉄道 RC 高架橋における使用鉄筋の変遷の概略を示す。

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、従って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。

また昭和 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-3 試験体一覧

試験体番号	鉄筋径	製造会社	地域	製造方法	節形状	備考
101	19	A	関東	電炉	竹	基準1 (D19-電炉-竹)
102	19	A	関東	電炉	竹	上記ロット違い
103	19	A	関東	電炉	竹	101 と同一ロット
104	19	B	中国	電炉	竹	地域の違い (中国)
105	19	C	九州	電炉	竹	地域の違い (九州)
106	19	D	北海道	電炉	竹	地域の違い (北海道)
107	19	A	関東	電炉	ねじ	節形状の違い
108	19	E	九州	電炉	斜めダイヤ	地域・節形状の違い
201	32	A	関東	電炉	竹	基準2 (D32-電炉-竹)
202	32	A	関東	電炉	ねじ	節形状の違い
203	32	E	九州	電炉	斜めダイヤ	地域・節形状の違い
204	32	F	北海道	高炉	斜め節	製造方法、成分の違い

表-3 に試験体一覧を示す。前述の使用鉄筋の変遷を踏まえ、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にばらつき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。

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。

3.2 温度特性試験の方法

写真-1 に温度特性試験の状況を示す。温度特性試験は、試験体の鉄筋及び 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 RC 高架橋で通常想定される $-20\sim 40^{\circ}\text{C}$ の範囲とし、 20°C 毎に測定を実施した。

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。これらの値を平均して、各試験体毎に、式(1)における $\mu_r(0,0)$ 、 α を最小二乗法によりそれぞれ算出した。

3.3 応力特性試験の方法

写真-2 に応力特性試験の状況を示す。試験体の鉄筋に EM センサーをセットし、アムスラー試験機を用いて载荷試験を実施した。载荷は、通常使用される応力範囲を想定して、D19 では $0\sim 180\text{kN}$ の範囲で 20kN 毎に、D32 では $0\sim 50\text{kN}$



写真-1 恒温槽内での温度特性試験状況



写真-2 アムスラー試験機による
応力特性試験状況

の範囲で 10kN 毎に、それぞれ静的に実施し、測定を行なった。

各载荷ステップでは、測定を3回づつ実施し、これらの値を平均して、試験体毎に、式(1)における温度が一定状態にある場合の実験定数 m_1 、 m_2 を最小二乗法によりそれぞれ算出した。

表-4 温度及び応力特性試験の結果

試験体番号	鉄筋径	製造会社	地域	製造方法	節形状	温度特性試験			応力特性試験		
						$\mu_r(0,0)$	α	R^2	m_1	m_2	R^2
101	19	A	関東	電炉	竹	7.007	-0.0037	0.996	2.586	7.244	1.000
102	19	A	関東	電炉	竹	6.941	-0.0027	0.972	3.067	4.883	1.000
103	19	A	関東	電炉	竹	6.862	-0.0035	0.978	3.090	5.646	1.000
104	19	B	中国	電炉	竹	6.946	-0.0048	0.995	3.131	7.066	1.000
105	19	C	九州	電炉	竹	6.891	-0.0046	0.997	2.939	6.809	1.000
106	19	D	北海道	電炉	竹	6.882	-0.0045	0.997	2.989	6.350	1.000
107	19	A	関東	電炉	ねじ	7.106	-0.0046	0.993	3.294	6.423	1.000
108	19	E	九州	電炉	斜めダイヤ	6.813	-0.0063	0.999	4.366	6.006	1.000
201	32	A	関東	電炉	竹	6.208	-0.0018	0.996	3.061	6.339	1.000
202	32	A	関東	電炉	ねじ	6.213	-0.0011	0.978	3.251	5.636	1.000
202	32	E	九州	電炉	斜めダイヤ	5.995	-0.0049	0.998	4.744	7.353	1.000
203	32	F	北海道	高炉	斜め節	6.188	-0.0031	0.998	4.235	7.871	1.000

4. 検証試験結果

表-4 に温度及び応力特性試験の結果を示す。

4.1 温度特性試験の結果

図-3 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。

図-3(a) は、製造ロット及び節形状に着目して整理したものである。試験体 101 (D19, A 社, 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。

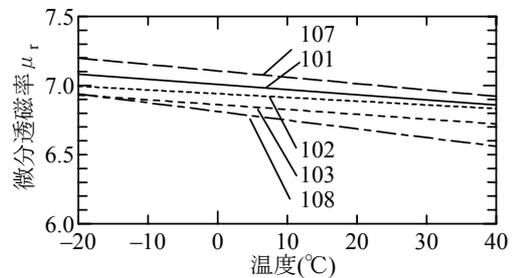
試験体 107 (D19, A 社, ねじ節)、試験体 108 (D19, E 社, 斜め節) は、節形状の違いについて検討したものである。節形状により、更に微分透磁率のばらつきは大きくなっている。

図-3(b) は、製造会社、地域に着目して整理したものである。図から地域により微分透磁率は 0.1 程度ばらつくことが分かる。

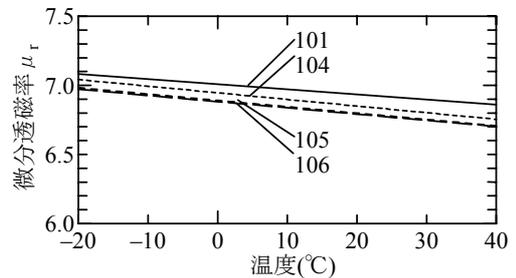
4.2 応力特性試験の結果

図-4 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。試験結果は、表-4 に示した α を用いて 15°C に換算して示した。試験中の鉄筋の温度変化は、図-2 に示した感温素子により測定した。

図-4(a) は、製造ロット及び節形状に着目して整理したものである。試験体 101 (D19, A 社,



(a) D19 製造ロット, 節形状の影響



(b) D19 製造会社, 地域の影響

図-3 温度と微分透磁率の関係

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応力差は 15N/mm² 以内であり、本研究の目的である応力状態の程度を確認するレベルの精度は得られていると考えられる³⁾。

試験体 107 (D19, A 社, ねじ節)、試験体 108 (D19, E 社, 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差も 70N/mm^2 前後となる場合もあり，RC 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-4(b)は，地域，製造会社に着目して整理したものである。図から地域により微分透磁率は 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応力差は 15N/mm^2 以内であり，一定の精度は得られていると考えられる。また，これらの鉄筋の竹節の形状は，実際には製造会社によりそれぞれ異なるが，その影響は小さいと判断される。

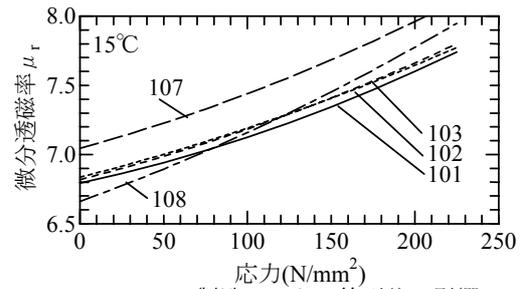
図-4(c)は，D32 について節形状，製造方法の影響を検討したものである。同一の微分透磁率における応力差は 50N/mm^2 を超えている。D19 における検討結果から類推して，これらの応力差は，節形状により生じていると推察されるが，D19 よりも応力差が若干少ないのは，もともとの鉄筋径が大きいために，節形状の違いの影響が相対的に薄れたためと考えられる。

5. 結論

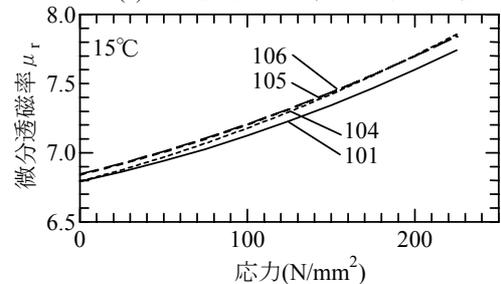
本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉄道 RC 高架橋の配筋に基づき，2 種類の EM センサーを開発した。
- (2) 鉄筋の製造ロット，製造会社，地域の影響が，微分透磁率と応力及び温度との関係に及ぼす影響は小さいと考えられ，同一の微分透磁率に対する応力差は 15N/mm^2 以内となると考えられる。
- (3) 鉄筋の節形状が，微分透磁率と応力及び温度との関係に及ぼす影響は大きく，同一の微分透磁率に対する応力差は 50N/mm^2 以上となる場合がある。
- (4) 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。

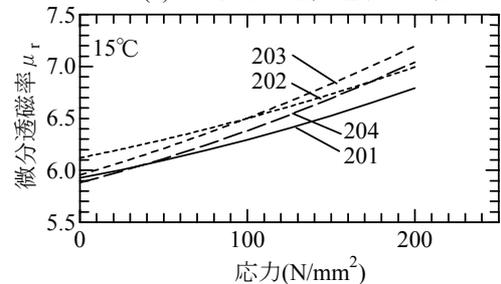
今後，更に試験体を追加するとともに，実構造物への埋め込み試験等を実施する予定である。



(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，製造方法の影響

図-4 応力と微分透磁率の関係

参考文献

- 1) Chen, Z. L. Wang, M. L. Okamoto, T. and Sumitro, S. : A new magneto-elastic stress/corrosion sensor for cable-stayed bridge using measurement of anhysteretic curve, 2nd Workshop on ATUEDM, Kyoto, Jly. 2000.
- 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) 眞岸徹ほか : 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