論文 EM センサーを用いた RC 鉄道高架橋の鉄筋応力測定

蘆谷 讓^{*1}・曽我部 正道^{*2}・谷村 幸裕^{*3}・濱田 弘志^{*4}

要旨:磁歪センサーを用いて鉄筋応力を測定する場合の問題点として,材質の不均一性,形状の違い,周辺鉄筋の影響などが考えられる。本研究ではこれらのうち,周辺鉄筋の影響について検討した。具体的には,測定対象となる鉄筋の周囲に,RC 鉄道高架橋の配筋状態を 模した鉄筋を配置し,周辺鉄筋が磁歪センサーによる測定値に及ぼす影響を検討した。その 結果,周辺鉄筋の存在により,微分透磁率が最大で一律0.1 程度小さくなることが分かった。 また,新設の橋梁に EM センサーを埋め込み,列車無載荷時及び列車載荷時の鉄筋応力を EM センサーにより計測した。

キーワード:鉄筋応力,磁歪センサー,EM センサー,透磁率,周辺鉄筋

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 を鉄筋に利用し,応力の程度を継続的にモニタ リング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),4),5)}。

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,周辺に鉄筋が存 在することなどが考えられる。このうち,材質 の不均一性,節の存在については,既往の研究 で報告されている^{4),5)}。また,周辺鉄筋の影響に



ついては,磁気シールドによりある程度遮蔽可 能であるが,その影響について研究された事例 は少ない。そこで,本研究では,測定対象とな る鉄筋の周囲に, RC 鉄道ラーメン高架橋の配 筋状態を模した鉄筋を配置し,周辺鉄筋が EM センサーによる測定値に及ぼす影響を検討する こととした。また,あわせて実橋梁への埋込み 試験を実施し,実橋梁の鉄筋応力レベルの把握 を目的として測定を行なった。

2. 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 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 た下降経路における微分透磁率 μ ,は,応力及び 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,死荷重応力も含む鋼材の応力を推定する ことができる。

*1 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 (正会員)
*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造力学 主任研究員 工博 (正会員)
*3 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造研究室長 工博 (正会員)
*4 (株)計測リサーチコンサルタント 広島事業部

		配筋	製造会社 ・地域	測定鉄筋, 平行鉄筋		直交鉄 筋(D16)	温度特性試験		応力特性試験		備考
				径	間隔(mm)	間隔(mm)	$\mu_{r}(0,0)$	(× 10 ⁻³)	m_1	m_2	<u> </u>
101	-1	測定鉄筋単体	A社 (関東)	D19	-	-	6.272	-3.774	2.454	4.885	基準鉄筋 (D19)
	-2	平行鉄筋			125	-	6.273	-4.134	2.650	4.463	
	-3	平行鉄筋・直交鉄筋			125	125	6.208	-4.049	2.559	4.870	
102	-1	測定鉄筋単体			-	-	6.292	-3.451	2.441	4.485	101とロッ ト違い
	-2	平行鉄筋			125	-	6.297	-3.451	2.598	3.957	
	-3	平行鉄筋・直交鉄筋			125	125	6.203	-3.247	2.814	3.052	
103	-1	測定鉄筋単体			-	-	6.200	-3.242	2.521	4.998	101と同一 ロット
	-2	平行鉄筋			125	-	6.193	-3.180	2.632	4.611	
	-3	平行鉄筋・直交鉄筋			125	125	6.112	-2.882	2.853	3.529	
201	-1	測定鉄筋単体		D32	-	-	5.568	-1.334	2.459	5.351	基準鉄筋 (D32)
	-2	平行鉄筋			65.5	-	5.552	-1.436	2.484	5.219	
	-3	平行鉄筋・直交鉄筋			65.5	250	5.525	-1.606	2.568	4.734	
	-4	平行鉄筋2段・直交鉄筋			65.5	250	5.506	-1.624	2.590	4.646	
202	-1	測定鉄筋単体	B社 (関東)		-	-	5.609	-3.200	2.504	6.133	製造会社の 違い
	-2	平行鉄筋			65.5	-	5.566	-3.122	2.794	5.342	
	-3	平行鉄筋・直交鉄筋			65.5	250	5.540	-3.228	2.791	5.161	
	-4	平行鉄筋2段・直交鉄筋			65.5	250	5.526	-3.020	2.741	5.249	
203	-1	測定鉄筋単体	C社 (北海道)		-	-	5.700	-3.058	2.691	5.905	製造地域の 違い
	-2	平行鉄筋			65.5	-	5.701	-3.105	2.707	5.730	
	-3	平行鉄筋・直交鉄筋			65.5	250	5.682	-2.979	2.700	5.454	
	-4	平行鉄筋2段・直交鉄筋			65.5	250	5.663	-3.021	2.619	5.804	

表 - 1 試験体一覧

微分透磁率 μ_r は,式(1)で近似的に表すことができる。

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

ここに, σ は応力(単位: kN/mm2), T は温度(単 位:), m₁, m₂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。

3. 検証試験方法

3.1 試験体

表 - 1 に試験体一覧を示す。鉄筋は D19, D32 鉄筋(いずれも電炉製,竹節)に対してそれぞ れ3種類づつ測定を行なった。本研究では,周 辺鉄筋の影響を把握するため,測定鉄筋単体の 状態,測定鉄筋と平行する鉄筋を配置した状態, 測定鉄筋と平行及び直交する鉄筋を配置した状態 ,D32 鉄筋については,平行鉄筋を2段にし た状態について測定を行なった。測定鉄筋の周 囲に配置する鉄筋間隔及び鉄筋径は,近年の RC 鉄道ラーメン高架橋の配筋例⁴⁾を参考に定めた。



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



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, 各試験ケースに応じた配筋状態で恒温槽内に設 置して実施した。設定温度は,RC 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μ_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。各試験 ケースに応じた配筋状態で測定鉄筋に EM セン サーをセットし,アムスラー試験機を用いて載 荷試験を実施した。載荷は,通常使用される応 力範囲内を想定して,D19 では0~50kNの範囲 で 10 kN 毎に,D32 では0~180kN の範囲で 20kN 毎に、それぞれ静的に実施し、測定を行なった。

各載荷ステップでは、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。

4. 検証試験結果

表 - 1 に,温度特性試験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 - 2 及び図 - 3 に, それぞれ D19, D32 鉄筋 の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。なお図中の直線は試験結果の 近似式であり,決定係数 R²は0.839~1.000 であ る。図 - 2(a)より,D19 鉄筋では,101-1 と101-2 を比較すると,測定鉄筋に平行に配置された鉄 筋は,微分透磁率-温度関係に与える影響は小さ いと考えられる。また101-2 と101-3 を比較する と,直交鉄筋は微分透磁率-温度関係において直 線の傾きはほぼ変わらないが,切片の値が0.06



程度小さくなった。一方 D32 鉄筋では,図-3(a) より 201-1 と 201-2,201-2 と 201-3 をそれぞれ比 較すると,平行に配置された鉄筋ならびに直交 鉄筋ともに,直線の傾きはほぼ変わらないが, 切片の値が0.05 程度ずつ小さくなる結果となっ た。これはD32 鉄筋の平行鉄筋がD19 の場合に 比べてセンサーに近接しているため,より測定 値に影響を与えたものと考えられる。また,201-3 と 201-4 を比較すると,平行に配置された鉄筋の 段数を増やした場合の影響は,他の鉄筋増加の 場合と比べて影響はやや小さく,切片の値は0.02 程度小さくなった。また,これらの傾向は他試 験体でも同様であり,微分透磁率は最大で0.12 程度小さくなった。

4.2応力特性試験の結果

図 - 4 及び図 - 5 に,それぞれ D19, D32 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。なお図中の曲線は試験結果の 近似式であり,決定係数 R²は 0.999~1.000 であ る。また試験結果は 15 に換算して示している。

図 - 4(a)より D19 鉄筋では, 101-1 と 101-2 を

比較すると,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 101-2 と 101-3 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/mm² 程度 となった。一方 D32 鉄筋では,図-5(a)より 201-1 と 201-2, 201-2 と 201-3 をそれぞれ比較す ると, 平行に配置された鉄筋ならびに直交鉄筋 ともに,曲線の傾きはほぼ変わらないが,切片 の値が 0.02~0.03 程度ずつ小さくなった。また, 201-3 と 201-4 を比較すると, 平行に配置された 鉄筋の段数を増やした場合も,切片の値は 0.02 程度小さくなった。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/mm²程度となった。 また,これらの傾向は他試験体でも同様であり, 微分透磁率は最大で 0.1 程度小さくなった。

5.実橋梁埋め込み試験

5.1 試験体

図 - 6 に示す鋼・複合製下路桁の RC 床版のス パン中央下面に EM センサーを埋め込み,列車 無載荷時及び列車載荷時の鉄筋応力の測定を行 なった。また,EM センサー両端にひずみゲー ジを片側 2 枚ずつ計 4 枚貼り付け,応力を測定 した。図 - 7 にセンサー及びひずみゲージの設 置状況を示す。

5.2 試験方法

まず、RC 床版に配筋される鉄筋と同ロットの 鉄筋を対象に,3.と同様の方法で測定鉄筋に対 するキャリブレーションを行なった。室内試験 と実橋梁では,センサーの周囲に存在する鉄筋 量が異なるが,4.の結果より,微分透磁率-応 力関係においては,関係式の傾きは変化せず, 切片の値が変化すると考えた。そこで,コンク リート打設前の無応力状態での測定結果を切片 の値とし,埋込試験における微分透磁率-応力 関係を定め,その後に応力測定を行った。応力 測定は,列車無載荷時,列車載荷時に行なった。 なお,列車無載荷時は RC 床版上にマクラギ・ レールを敷設した状態,列車載荷時は,列車の 輪軸がセンサーの直上にくる場合(列車載荷時 1)と,列車の連結装置が直上に来る場合(列車 載荷時 2) の 2 ケースとし, それぞれ 2 回測定 を行なった。図 - 6(b) に列車を静止させた位置 を示す。

5.3 試験結果

図 - 8 に,それぞれ橋軸方向及び橋軸直角方向 の測定結果を示す。測定結果より,無応力時に 対して列車無載荷時,列車載荷時ともに負側の 応力(圧縮応力)が生じた結果となった。これ は,無応力時はコンクリート打設前であったた め,コンクリート打設後に,収縮作用により測 定鉄筋に圧縮力が生じたためと思われる。列車 無載荷時の橋軸方向鉄筋の圧縮ひずみの値は, 150 μ程度,直角方向鉄筋の圧縮ひずみの値は 120 μ程度であった。

図 - 8(a)より, EM センサーで推定した橋軸方



向の列車無載荷時と列車載荷時の鉄筋応力の差 は,測定一回目,二回目ともに 10N/mm²程度で あった。また図 - 8(b)より,EM センサーで推定 した直角方向の鉄筋応力の差も,測定一回目, 二回目ともに 10N/mm²程度であった。またひず みゲージによる測定結果では,列車荷重による 鉄筋応力の差は橋軸方向,直角方向ともに 3N/mm²程度となった。

また,一回目の測定と二回目の測定では,EM センサーで推定した応力値は,橋軸直角方向列 車無載荷時に4N/mm²程度の差があるものの,概 してほぼ同程度の結果が得られたが,ひずみゲ



図-8 応力と微分透磁率の関係

ージによる応力測定値は総じて 3N/mm² 程度の 差があった。

今回行なった埋込試験では,応力範囲が小さ く,測定値には測定誤差も含まれていると考え られる。しかしながら本研究の目的である実橋 梁の応力レベルの把握について,EMセンサーは 一定の性能を有していると考える。

6. 結論

本検討で得られた知見を以下に示す.

- (1) 温度特性試験の結果より,微分透磁率-温度関係において,EM センサーの周囲 に配置された鉄筋が関係式の傾きに与え る影響は小さい。また,微分透磁率の値 は,センサーに鉄筋が近いほど影響が大 きく,周囲に鉄筋が無い場合に比べて最 大で一律 0.12 程度小さくなった。
- (2) 応力特性試験の結果より,微分透磁率-応力関係において,EM センサーの周囲に配置された鉄筋が関係式の傾きに与える影響は小さい。また,微分透磁率の値は,センサーに鉄筋が近いほど影響が大きく,周囲に鉄筋が無い場合に比べて最大で一律0.1 程度小さくなった。
- (3) 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 ことで,測定精度が向上する。
- (4) 今回行った埋込試験では,列車載荷時の
 鉄筋の応力増分は10N/mm²程度の範囲で
 あり,実橋梁の応力レベルの把握につい

て, EM センサーの性能を示せた。

今後,長大橋梁等,応力レベルが大きい橋梁 について試験を実施していく予定である。

参考文献

- Chen, Z. L, Wang, M. L, Okamoto, T. and Sumitro, S. : A new magnetro-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,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
- 5) 蘆谷讓,曽我部正道,谷村幸裕,宮本則幸: EM(Elastic-Magnetic)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,第

 61 回土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM),V-380,2006.9.