

報告 EM センサによる PC 梁緊張材の実応力モニタリング実験

黒川 章二*

要旨：鋼材の透磁率が応力および温度に敏感な性質を利用した EM(Elastic-Magnetic)センサを用いることにより鋼材の実応力計測が可能である。そのセンサの長期モニタリングへの適用性を検証するためにアウトケーブル方式の PC 梁について、鋼より線の引張試験における引張力計測、プレストレス導入時の緊張材引張力計測、緊張材のリラクセーションやコンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるプレストレス力経時変化の計測、繰返し荷重履歴後の緊張材引張力の計測を実施した。EM センサによる応力計測は、信頼性が高いことが実証された。

キーワード：EM センサ、実応力モニタリング、PC 梁、緊張材、プレストレス力

1. はじめに

コンクリート構造物の診断用データとして鉄筋の応力を把握することが望まれる。鋼材の応力および温度と透磁率の関係を原理とする EM(Elastic-Magnetic)センサを用いた計測方法により、鋼材に現在発生中の応力（実応力という）の計測が可能である¹⁾。著者らは、各種の鋼材について EM センサを用いた実応力計測方法の実証実験を行った。その結果、鋼材の応力を精度よく計測することが実証された²⁾。

そこで、著者は、長期モニタリングに対するその計測方法の実用性を検証するために、外ケーブル方式の PC 梁について、ライフサイクルにおいて予想される場面での実応力計測実験を行った。EM センサによる計測結果をロードセルおよびひずみゲージによる計測結果と比較した。EM センサの利用により、信頼できる計測精度で PC 梁緊張材の応力モニタリングが可能であることが実証された。

2. 実応力計測システム

鋼材の透磁率と温度を測定できる EM センサを用いて、生地の鋼材について、実験により透磁率を応力および温度の関数で表式化（キャ

リブレーションという）、計測対象の鋼材の透磁率および温度を測定し、キャリブレーション結果にあてはめて実応力を算定する。

EM センサは、図-1 に示すようにボビンに巻きつけた 1 次コイルと 2 次コイル及び温度センサを含んだ円筒型コイル(ルノイド[®])で構成される。被測定体にセットして 1 次コイルに変動電

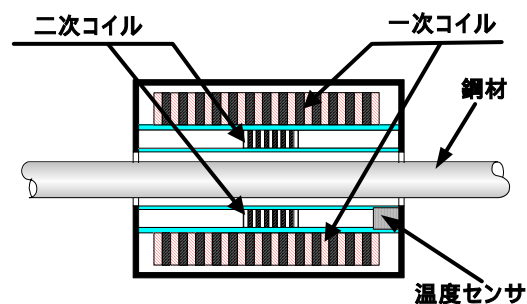


図-1 EM センサ

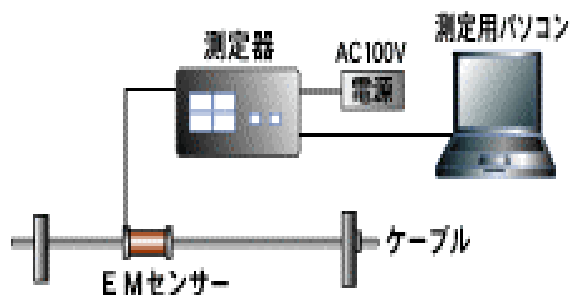


図-2 計測システム

* 木更津高専 名誉教授 (正会員)

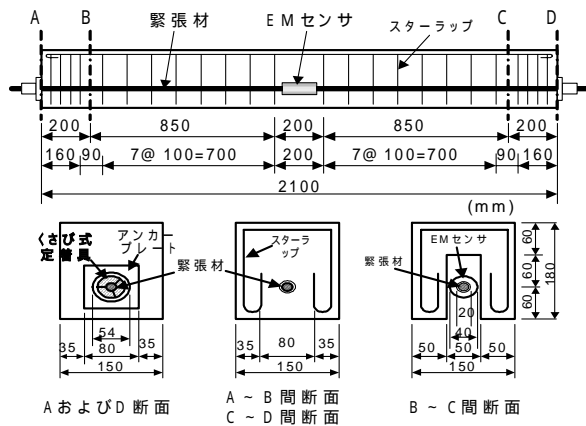


図-3 実験に用いたPC梁

流を流すとソレノイドの中の鋼材に磁束密度の変化が生じ、2次コイルに誘導電流が発生する。その電圧を検出して透磁率を計測する。鋼材の外周に隙間があるため外部からの拘束を受けない非接触型センサである。

計測システムは、図-2のような電源装置、計測器、ノートパソコン、EMセンサから成る。小型軽量により容易に持ち運びができる。

3. 供試体

供試体は図-3のようなアウトケーブル方式のPC梁である。端部は緊張材を定着できるように長方形断面とし、内部は緊張材およびEMセンサを設置できるような溝形断面とした。用いたPC鋼材は表-1に示す鋼より線である。供試体記号と材令28日のコンクリートの性質を表-2に示す。PCS1およびPCS2は材齢71日、PCS3およびPCS4は材齢57日にプレストレスを導入した。鋼より線の引張強さの70%まで緊張した後くさびにより定着した。

4. 荷重方法およびセンサ装着状況

荷重には最大荷重200kNのパルセータ型疲労試験機を用いた。疲労試験においては4.2Hzの正弦波荷重を載荷した。図-4に荷重方法およびセンサ装着位置を示した。すべての梁のスパン中央の緊張材にEMセンサおよびひずみゲ

表-1 PC鋼材の性質

種類	断面積 (mm ²)	降伏荷重 (kN)	引張荷重 (kN)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SWPR7BN φ15.17mm	138.41	235	264	191

表-2 コンクリートの性質

供試体の記号	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
PCS1, PCS2	35.4	2.96	28900
PCS3, PCS4	37.1	3.08	32500

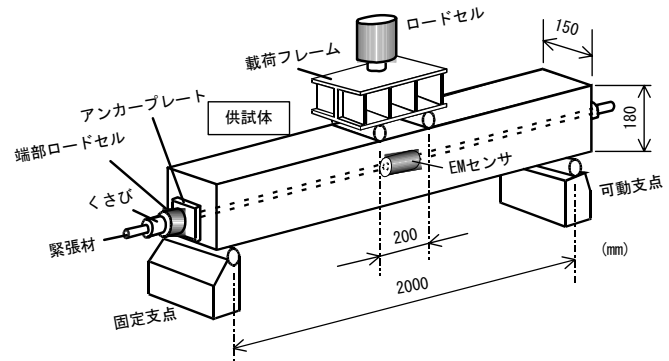


図-4 荷重方法およびセンサ装着状況

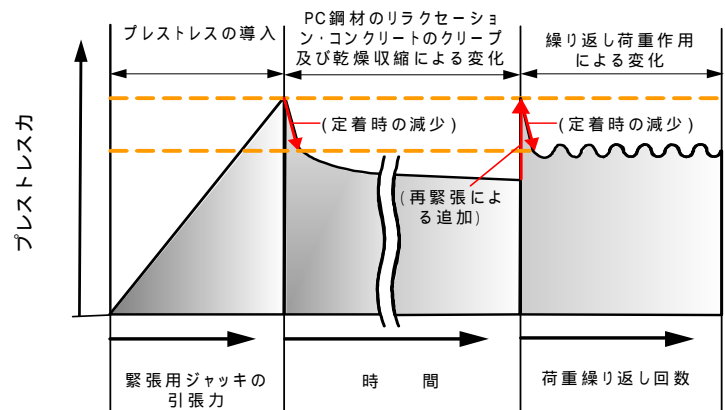


図-5 モニタリングにおける履歴場面

ジを装着した。圧縮縁コンクリートにひずみゲージを貼付した。PCS1およびPCS4において、定着部にロードセルを装着した。スパン中央に変位計を装着した。

5. 実験内容

図-5に示す場面において、プレストレスの

導入 ,プレストレス力経時変化測定 疲労試験 , 静的載荷試験を実施した。計測項目は , 緊張材にセットしたセンサによる応力計測であり , 引張試験での引張力計測 , プレストレス導入時の引張力計測 , 緊張材のリラクゼーションやコンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるプレストレス力経時変化の計測 , 再緊張時の計測 , 繰返し荷重履歴後の引張力の計測 , 静的載荷試験時の計測である。計測用センサは , EM センサ , ロードセル , ひずみゲージである。

PCS1 の場合 : プレストレスの導入 , プレストレス力の経時変化計測 , 再緊張 , 疲労試験を実施した。

PCS2 の場合 : プレストレスの導入 , プレストレス力の経時変化測定 , 再緊張 , 静的載荷試験を実施した。

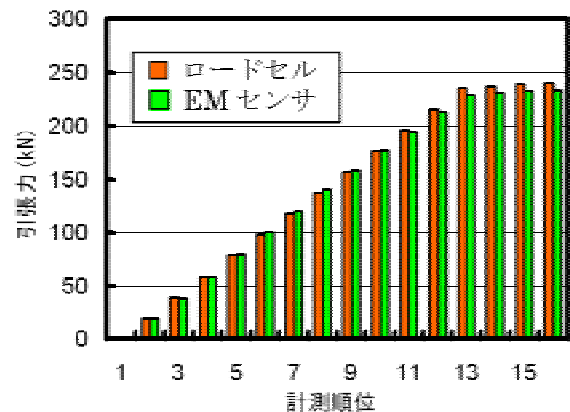
PCS3 の場合 : プレストレスの導入 , プレストレス力の経時変化測定 , 再緊張 , 疲労試験を実施した。

PCS4 の場合 : プレストレスの導入 , その直後に静的載荷試験を実施した。

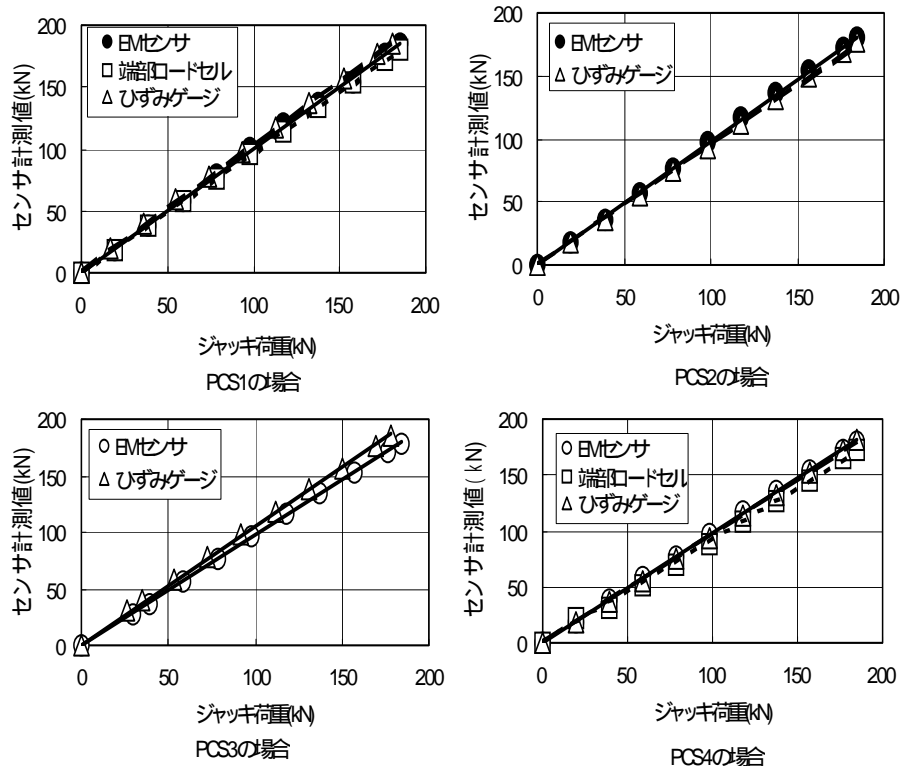
6. 鋼より線の引張試験における応力計測

鋼より線の引張試験において , 試験機荷重計(ロードセル)および EM センサによる計測結果を図

一6に示す。EM センサによる計測値 Y と試験機荷重 X との間に $Y = 1.013 X$ の関係式が相関係数 0.9997 で得られた。試験機荷重に対する EM センサ計測値の誤差が 1.3% で , 全荷重範囲にわたり両計測値はほぼ一致している。このことから鋼材応力の全範囲にわたり EM センサによる計測が可能であるといえる。



図一6 引張試験における応力計測値の比較



図一7 各種センサによるプレストレス力の計測結果

7. プレストレス導入時の応力計測

ロードセル(PCS1 , PCS4 のみ) , EM センサおよびひずみゲージによるプレストレス力計測結果を図一7に示した。ジャッキによる荷重はジャッキに付属のロードセルにより測定した。鋼より線の引張強さの 70% に達した時点でジャッキを開放し , くさびにより定着した。

EM センサ , 端部ロードセル , ひずみゲージ

による計測値を評価するために、センサによる計測値Yとジャッキ荷重Xとの関係について原点を通る直線により近似させた。図-7にその近似直線を描いた。その直線の傾きはジャッキ荷重に対するセンサ計測緊張材引張力の倍率である。実験直前にジャッキに装着したまま検定したロードセルの指示値を基準にして各センサの計測値を評価する。表-3にセンサ計測値とジャッキ荷重との近似直線および相関係数を示した。

表-3 センサ計測値Yとジャッキ計測値Xとの関係

供試体	EM センサ		端部ロードセル		ひずみゲージ	
	関係式	相関係数	関係式	相関係数	関係式	相関係数
PCS1	$Y=1.002X$	0.9993	$Y=0.977X$	1.0000	$Y=1.036X$	0.9993
PCS2	$Y=0.982X$	0.9997			$Y=0.955X$	0.9998
PCS3	$Y=0.971X$	0.9996			$Y=1.048X$	0.9991
PCS4	$Y=0.983X$	0.9998	$Y=0.925X$	0.9979	$Y=0.970X$	0.9996
平均	$Y=0.984X$		$Y=0.951X$		$Y=1.002X$	

EM センサの場合、倍率は0.971~1.002の範囲で平均値が0.984、標準偏差が0.013である。平均的にはジャッキ荷重とくらべて1.6%だけ小さく、計測毎のバラツキがきわめて小さい。

表-4 緊張材定着前後のプレストレス力

供試体	ジャッキ 定着前 (kN)	EMセンサ		端部ロードセル		ひずみゲージ	
		定着前 (kN)	定着後 (kN)	定着前 (kN)	定着後 (kN)	定着前 (kN)	定着後 (kN)
PCS1	185	185	139	180	128	180	130
PCS2	184	180	134	—	—	177	127
PCS3	185	178	130	—	—	179	125
PCS4	185	180	140	173	124	181	135

端部ロードセルの場合、倍率は0.925~0.977の範囲で平均値が0.951、標準偏差が0.037である。平均的にはジャッキ荷重とくらべて4.9%だけ小さく、計測毎のバラツキが大きい。

ひずみゲージの場合、倍率は0.955~1.048の範囲で平均値が1.002、標準偏差が0.047である。平均的にはジャッキ荷重とくらべて0.2%だけ大きいが、バラツキが大きい。

計測値の95%が信頼できる倍率は、EM センサが0.984~1.009、端部ロードセルが0.878~1.024、ひずみゲージが0.910~1.094である。

すなわち、EM センサの信頼度は、ロードセルおよびひずみゲージよりも高いと言える。

定着前後の計測結果を表-4に示した。両定着間距離が短いことから、大きなセットロスが現れた。セットロスの平均値は、端部ロードセルの場合に28.6%、ひずみゲージの場合に27.9%、EM センサの場合に24.9%である。非接触型のEM センサ計測値が最も小さい。センサによるセットロス平均値の最大差は3.7%であり、応力モニタリングにおいて無視できない値である。センサ選びが大切である。

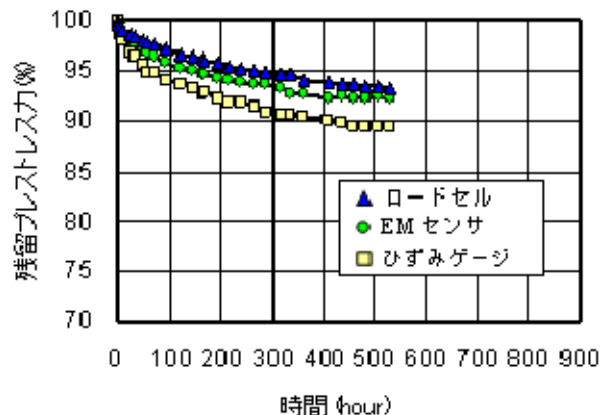


図-8 プレストレス力の経時変化 (PCS1)

とした計測結果をそれぞれ図-8および図-9に示した。図-8によれば、残留プレストレス力は全般にわたり端部ロードセル、EM センサ、ひずみゲージの順に大きい。端部ロードセル、EM センサ、ひずみゲージの計測値は、200時間においてそれぞれ95.5、94.1、92.1%、400時間においてそれぞれ93.8、92.4、90.1%、500時間においてそれぞれ93.4、92.3、89.5%である。EM センサによるプレストレス力は、端部ロードセルに比べて、1.0~1.4%小さく、ほぼ一定の差が保たれている。ひずみゲージによるプ

8. プレストレス力経時変化の計測

20 の室内に放置した PCS1 および PCS 2 について、試験開始時のプレストレス力を 100%

レストレス力は、EM センサに比べて、2%以上小さく、時間経過につれてその差が拡大している。図-9によれば、EM センサおよびひずみゲージの計測値は、200 時間においてそれぞれ 94.3、88.8%、400 時間においてそれぞれ 92.4、85.9%、500 時間においてそれぞれ、92.2、85.2%である。ひずみゲージによるプレストレス力は、EM センサに比べて、200 時間において 5.5%小さく、時間経過につれてその差が拡大している。PCS3 の場合に、ここに図示していないが、200 時間における残留プレストレス力は、EM センサにより 94.5%、ひずみゲージにより 91.2%が計測された。

EM センサによる計測値は 200 時間で 3 体の供試体でほとんど同じ値を示し、それ以後もほとんど同じ値を示している。ひずみゲージによる計測値は供試体ごとに大差が生じた。

長時間プレストレス力モニタリングで、EM センサは、ロードセルの場合に近い値で、安定した計測結果をもたらした。

9. 疲労試験

PCS1 の場合、下限荷重を 10kN とし、上限荷重は、圧縮縁コンクリートひずみが 0.001 となる荷重 28.4kN を 180 万回まで、その後、圧縮縁コンクリートひずみが 0.0014 となる荷重 29.4kN を 450 万回まで载荷した。適時、試験機を止めて、除荷時、下限荷重時、上限荷重時の緊張材引張力を計測した。450 万回で疲労試験を打ち切って静的载荷試験を行った。33.4kN の荷重でコンクリートの曲げ圧縮破壊により PC 梁が破壊した。

PCS3 の場合、载荷直前に緊張材を引張強さの 70%まで再緊張して定着させた。下限荷重を 10kN とし、上限荷重は、圧縮縁コンクリートひずみが 0.001 となる荷重である 28.8kN とした。125 万回で再緊張した。さらに、300 万回で再緊張し、上限荷重は 32.2kN に増やした。314.5 万回でコンクリートの圧縮破壊が生じた。

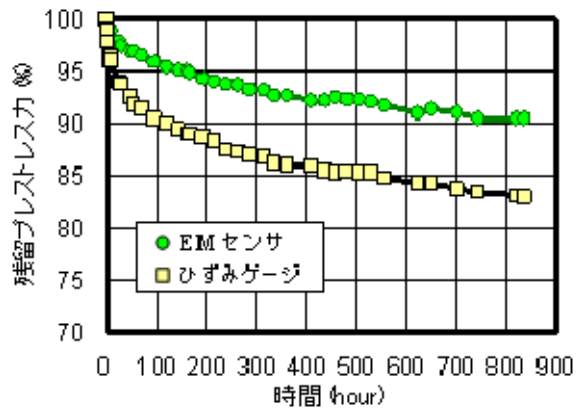


図-9 プレストレス力の経時変化 (PCS2)

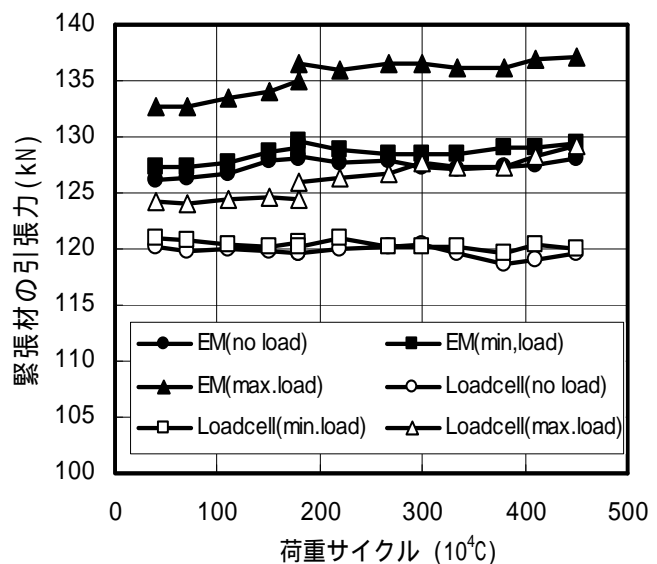


図-10 繰返し荷重履歴後の緊張材引張力

10. 繰返し荷重履歴後の緊張材引張力の計測

PCS1 の疲労試験において、適時に試験機を止めて、EM センサと端部ロードセルにより、無荷重、下限荷重、上限荷重のときの緊張材引張力を計測した。図-10に繰返し荷重履歴に伴う緊張材引張力の変動を表した。出だしの値に、EM センサとロードセルとの間に大差が見られる。これは、EM センサとロードセルによる緊張時応力計測値の差、セットロス計測値の差、プレストレス力経時変化計測値の差が累計されたものである。EM センサおよびロードセルは、上限荷重を増やした 180 万回において荷重増加の影響をほぼ同じように計測し、荷重履歴回数

表一五 プレストレス力計測による終局荷重と実験値との比較

供試体	静的載荷試験までの履歴	終局荷重 (kN)						
		実験値	EM センサ計測のプレストレス力による場合		ロードセル計測のプレストレス力による場合		ひずみゲージ計測のプレストレス力による場合	
			計算値	計算値/実験値	計算値	計算値/実験値	計算値	計算値/実験値
PCS4	プレストレス導入	36.3	34.5	0.950	32.0	0.882	34.9	0.961
PCS2	プレストレス導入, レラクセーション・クリープ・乾燥収縮, 再緊張	36.5	34.0	0.932			31.0	0.849
PCS1	プレストレス導入, レラクセーション・クリープ・乾燥収縮, 繰返し荷重	33.3	30.3	0.910	31.7	0.870	28.9	0.868

に伴う緊張材引張力の変化量についてもほぼ同じように計測している。

11. 終局荷重

静的載荷試験を行った PC 梁について、試験時の緊張材引張力の計測値を用いて、終局荷重を計算した。用いたコンクリートの応力 ひずみ関係を図-11 に示した。終局荷重の計算値と実験値を表-5 に示した。EM センサによる計測値を用いた計算値が最も実験値に近い。

終局時の緊張材引張力には、プレストレスの導入、緊張材のセットロス、プレストレス力の経時変化、荷重履歴、再緊張などの影響が集積されている。この計算結果によれば、PC 梁緊張材の応力モニタリングについては EM センサがロードセルやひずみゲージよりも優れていると考察される。

12. まとめ

本実験の結果をまとめると

- (1) 鋼より線の引張試験およびプレストレス導入において、EM センサにより精度の高い応力計測をすることができた。
- (2) EM センサによる緊張材のセットロス計測値はロードセルおよびひずみゲージ計測値よりも小さい。
- (3) 長時間プレストレス力モニタリングで、EM センサは、ロードセルの場合に近い値で、安定した計測結果をもたらした。

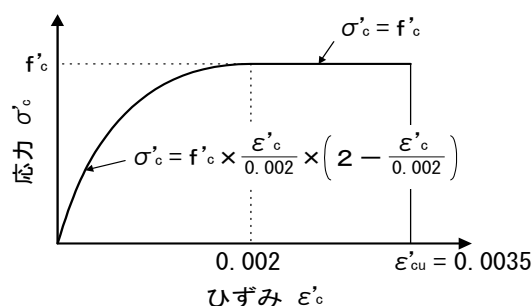


図-11 コンクリートの応力-ひずみ曲線

- (4) 繰返し荷重履歴後の緊張材引張力の計測において EM センサ計測値はロードセルとほぼ同じような傾向にある。
- (5) 計算した PC 梁の終局荷重計算値は、EM センサの場合がロードセルおよびひずみゲージの場合に比べて実験値に最も近い。すなわち、各場面における計測で EM センサは信頼性が高いと言える。それは EM センサが拘束のない非接触型であることに起因すると考えられる。

参考文献

- 1) 黒川章二：磁歪型センサを用いた鋼材の実応力計測，コンクリート工学，Vol.44, No.5, PP.50~55.2006,5
- 2) 黒川章二、羅黄順、Ming L. Wang, 嶋野慶次：磁歪センサによる各種鋼材の応力計測，プレストレストコンクリート技術協会第11回シンポジウム論文集，pp.101-106, 2001. 11