

磁歪センサによる各種鋼材の応力計測

木更津工業高等専門学校 正会員 ○黒川章二
 (株)計測リサーチコンサルタント 正会員 羅 黄順
 イリノイ大学先端センサ技術開発センター Ming L. Wang
 木更津工業高等専門学校 嶋野慶次

1. まえがき

日本において、多くの構造物が設計耐用年数に近づいており、その維持管理およびライフサイクルコストの低減が緊急課題となってきた。構造物の健全度モニタリングシステムの開発は、課題解決の第1ステップである。そのシステムに要求される性能として、死荷重やプレストレス力などによる応力を含めた鋼材の实在応力が測定できること、被測定体を傷つけないこと、容易に確実な計測ができることなどが挙げられる。鋼材の透磁率が応力および温度の影響に敏感なことを利用した磁歪センサによる応力計測は、その要求に適合する有力な計測方法である。特にプレストレストコンクリートにおける緊張管理、経年後の健全度モニタリングに最適であると考えられる。その計測方法の要点は、鋼材の処女載荷時に透磁率を応力と温度の関数で表す、いわゆる鋼材のキャリブレーションである。本研究において、鋼線、PC鋼棒、異形棒鋼、PC鋼より線、37φ7mm鋼ストランドについて、-20~40℃の温度範囲で利用できるキャリブレーションを行い、応力計測を実施した。磁歪センサによる応力計測により鋼材の応力を精度よく計測できることが実験で実証された。本文では磁歪センサによる応力計測の基礎原理、キャリブレーションおよび各種鋼材の応力計測結果について報告する。

2. 磁歪センサによる応力計測の基礎原理

強磁性材料である鋼材においては磁歪現象が起こり、それは応力、磁界強さおよび温度の影響を受ける。本システムに用いる基礎理論¹⁾は、安定した状態で鋼材の透磁率を応力および温度の関数として表すことである。処女状態の鋼材について予想される温度範囲において透磁率関数を決めておけば、応力計測が要求される鋼材において、温度と透磁率を測定することにより応力を計測することができる。磁歪センサ(EMセンサ)は、1次コイルおよび2次コイルと温度センサを含んだ円筒型コイルであり、被測定体に接着しないので任意位置にセットすることができる(図1)。1次コイルに変動電流を流すと、ソレノイドの中の鋼材に磁束密度の変化が生じて、2次コイルに誘導電流が発生する。この誘導電流の電圧測定から鋼材の透磁率を計ることができる。

図2は磁束密度 B 、磁界強さ H と電流 I 、電圧 V の関係である。磁界が強くなると磁束密度が大きくなって飽和状態になる。その後、磁界強さを弱めるとaからbへの経路をたどる。ピーク時に飽和状態になるようなパルス型電圧を1次コイルへ印加した場合の電流あるいは電圧と時間との関係は図に示すようになる。透磁率 μ は、一般に $\mu=B/H$ とされているが、本計測システムにおいては、a~b間で、 t_H から t_L までの微小時間にお

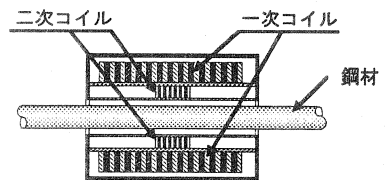


図1 磁歪センサ

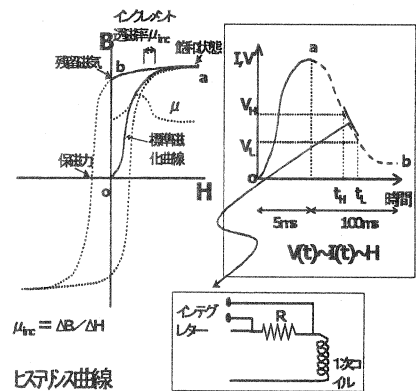


図2 磁束密度 B 、磁界強さ H ~電流 I 、電圧 V の関係

るヒステリシス曲線上の磁界強さ変化量 ΔH に対する磁束密度変化量 ΔB の比である微分透磁率 $\mu_{inc} = \Delta B / \Delta H$ を用い、透磁率として $\mu = \mu_{inc}$ とする。12VDC/100VAC 電源からの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、2次コイルに誘導された電流の電圧から透磁率(比透磁率)を測定し、測定温度と併せて応力を算定する。

図3は各応力のもとで測定した透磁率と磁界強さとの関係である。ある磁界強さにおける透磁率の測定により応力を計測できることがわかる。微分透磁率の性格から、グラフが直線に近くて応力の影響に敏感な磁界強さ領域で透磁率を測定することが必要である。

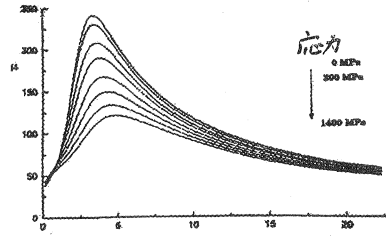


図3 各応力での透磁率 μ と磁界強さ H との関係

3. キャリブレーション

キャリブレーションとは、まだ力を受けたことのない生地の鋼材に対して、透磁率を応力および温度の関数で表式化することである。温度 T 、応力 σ における鋼材の透磁率を次の式で近似する。

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

m_1, m_2 : 温度が一定状態にある場合の実験定数

α : 応力が一定状態にある場合の実験定数

$$\mu(\sigma, T) = \mu(0, T) + m_1\sigma + m_2\sigma^2 \quad (2)$$

$$\mu(0, T) = \mu(0, 0) + \alpha T \quad (3)$$

式(2)における $\mu(0, T)$ 、 m_1, m_2 は一定温度 T における鋼材の引張試験結果により決定する。式(3)における $\mu(0, 0)$ 、 α は、無応力状態において、鋼材の温度に伴う透磁率の測定結果により決定する。

各種鋼材のキャリブレーションを予め行っておけば、構造物部材の実応力は、部材の透磁率と温度を測定することにより、式(1)を用いて算定することができる。

図4は、 $25 \pm 1.5^\circ\text{C}$ で行った $\phi 7\text{mm}$ 鋼線の引張試験における透磁率と応力の関係である。相関係数が0.9996の精度の高いキャリブレーション結果が得られた。図5は、恒温槽の中に $\phi 7\text{mm}$ 鋼線を入れて、無応力状態で温度を $-20 \sim 40^\circ\text{C}$ の範囲で変化させて、それに伴う鋼材の透磁率を測定した透磁率と温度の関係である。

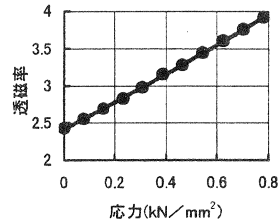


図4 $\phi 7$ 鋼線の透磁率と応力

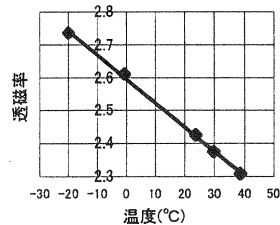


図5 $\phi 7$ 鋼線の透磁率と温度

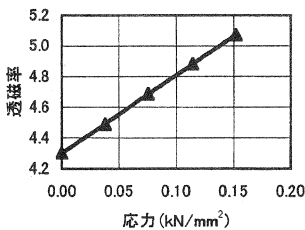


図6 D22异形棒鋼の透磁率と応力

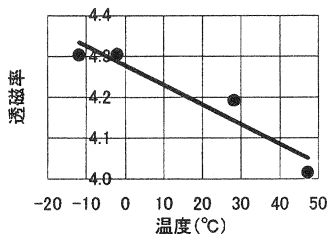


図7 D22异形棒鋼の透磁率と温度

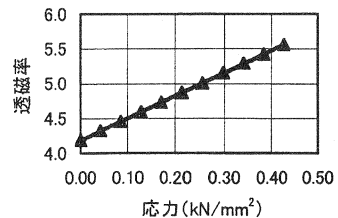


図8 $\phi 15.2\text{PC}$ 鋼より線Aの透磁率と応力

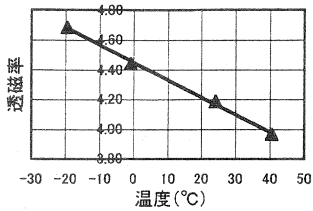


図9 φ15.2PC鋼より線Aの透磁率と温度

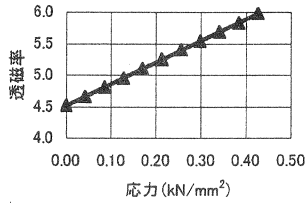


図10 φ15.2PC鋼より線Bの透磁率と応力

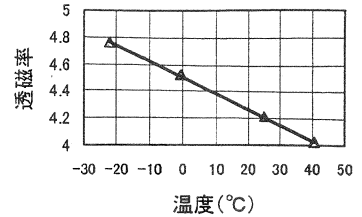


図11 φ15.2PC鋼より線Bの透磁率と温度

透磁率と温度との相関係数は 0.9986 であり、温度に対するキャリブレーションも高い精度が得られた。

応力計測を行うその他の PC 鋼棒, 異形棒鋼, PC 鋼より線についても同様のキャリブレーションを実施した (図6~図13)。異形棒鋼の場合, 磁歪センサ2次コイルの中心を節間中央近傍においてキャリブレーションを行った。PC 鋼より線の場合, 7本の素線をより合わせてつくられることから, 処女状態において各素線にはすでに相当な応力が存在していると予想されるので, キャリブレーションは, 素線ではなく PC 鋼より線そのものについて行った。

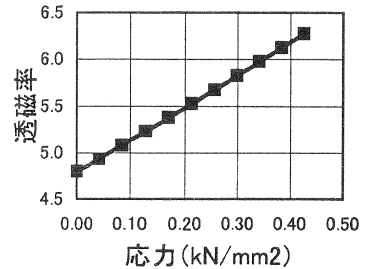


図12 φ15.2PC鋼より線C

4. 鋼線, PC 鋼棒, 異形棒鋼, PC 鋼より線の応力計測

各供試体の応力測定は実験室の万能試験機を用いた引張試験において行った。以下に引張荷重を表す Loadcell (試験機の荷重計) の指示値と EMSensor (磁歪センサ) の指示値とを比較する。

図14はφ7mm鋼線の場合である。実験開始時の室温は24.8°Cである。磁歪センサの指示値は, 載荷前に-0.08kNであり, 最大荷重30.00kNのときに29.03kNである。供試体には載荷前に1N/mm²の圧縮応力が残存していた。荷重による引張力増加量からの最大荷重に対する磁歪センサの誤差率は-3.0%である。

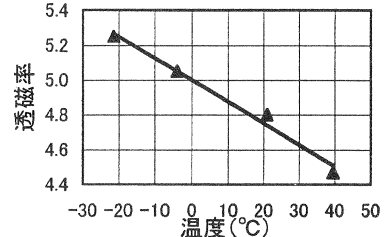


図13 φ15.2PC鋼より線Cの透磁率と温度

図15はφ13mmPC鋼棒の場合である。実験開始時の室温は24.1°Cである。磁歪センサの指示値は, 載荷前に2.51kNであり, 最大荷重28.84kNのときに30.50kNである。

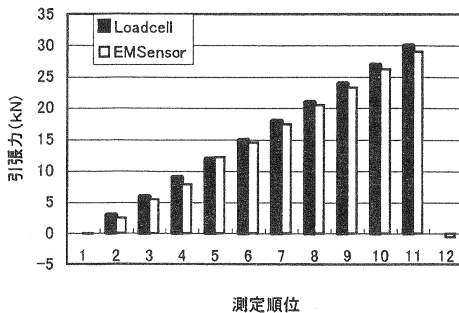


図14 φ7鋼線の応力測定結果

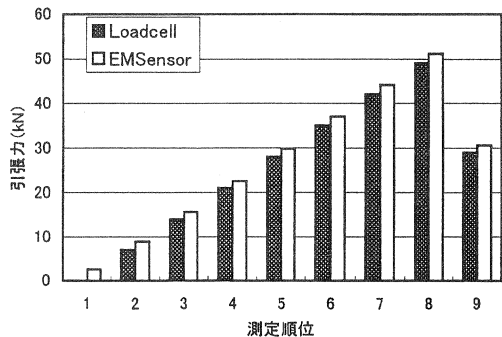


図15 φ13PC鋼棒引張試験結果

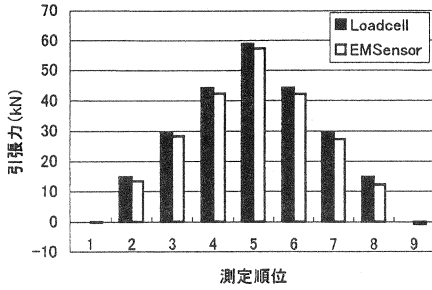


図16 D22异形棒鋼(節間中央付近にセンサセット)の応力測定結果

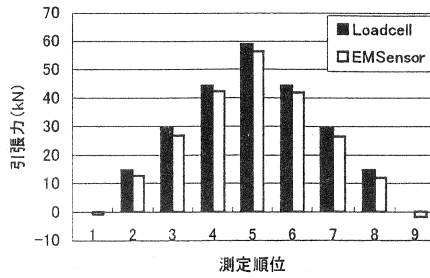


図17 D22(節近傍にセンサセット)応力計測結果

この供試体には荷重前に 19N/mm^2 の引張応力が残存していた。荷重による引張力増加量からの最大荷重に対する磁歪センサの誤差率は -2.9% である。

异形棒鋼において、磁歪センサ2次コイルの中心が節間中央近傍にある場合と節の近傍にある場合とでは磁力線の分布の違いに起因した応力計測値の差異が懸念された。そこで、両方の場合について応力計測を行った。図16はD22mm 异形棒鋼において磁歪センサ2次コイルの中心を節間中央近傍においた場合である。実験開始時の室温は 33.8°C である。磁歪センサの指示値は、荷重前に -0.39kN であり、最大荷重 58.84kN のときに 57.25kN である。この供試体には荷重前に

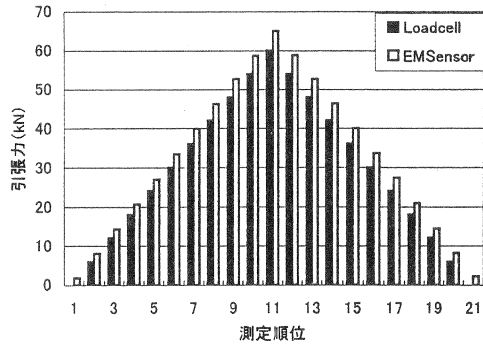


図18 φ15.2PC鋼より線Aの応力測定結果

1N/mm^2 の圧縮応力が残存していた。荷重による引張力増加量からの最大荷重に対する磁歪センサの誤差率は -2.0% である。図17はD22mm 异形棒鋼において磁歪センサ2次コイルの中心を節近傍においた場合である。実験開始時の室温は 36.7°C である。磁歪センサの指示値は、荷重前に -0.79kN であり、最大荷重 58.84kN のときに 56.28kN である。この供試体には荷重前に 2N/mm^2 の圧縮応力が残存していた。荷重による引張力増加量からの最大荷重に対する磁歪センサの誤差率は -3.0% である。実験した2つのケースの間には実用上問題となるような差は現れなかった。

PC鋼より線については、まずロッドが異なるPC鋼より線A、PC鋼より線B、PC鋼より線Cについてキャリブレーションを行い、同じPC鋼より線について応力測定をした。つぎにPC鋼より線Aのキャリブレーション結果を用いてPC鋼より線Bの応力計測を行った。

図18はPC鋼より線Aの場合である。実験開始時の室温は 20.4°C である。磁歪センサの指示値は、荷重前に -0.30kN であり、最大荷重 60.00kN のときに 60.15kN である。この供試体には荷重前に 2N/mm^2 の圧縮応力が残存していた。荷重による引張力増加量からの最大荷重に対する磁歪センサの誤差率は 0.8% である。

図19はPC鋼より線Bの場合である。実験開始時の室温は 25.7°C である。磁歪センサの指示値は、荷重前に 0.02kN であり、最大荷重 60.00kN のときに 59.49kN である。この供試体には荷重前に残存応力がほとんどないことを示している。荷重による引張力増加量からの最大荷重に対する磁歪センサの誤差率は -0.8% である。

図20はPC鋼より線Cの場合である。実験開始時の室温は 21.4°C である。磁歪センサの指示値は、荷重前に -0.31kN であり、最大荷重 60.00kN のときに 59.37kN である。この供試体には荷重前に 2N/mm^2 の圧縮応力が残存していた。荷重による引張力増加量からの最大荷重に対する磁歪センサの誤差率は -0.5% である。

図21はPC鋼より線Aのキャリブレーション結果を用いてPC鋼より線Bの応力計測を行った結果である。

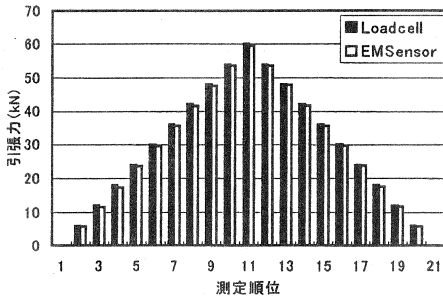


図19 φ15.2PC鋼より線Bの応力測定結果

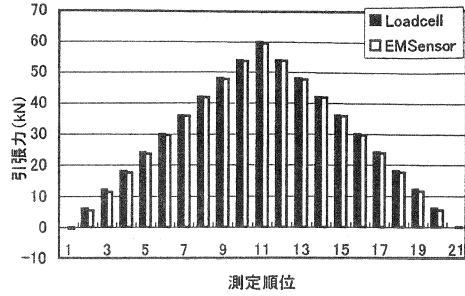


図20 φ15.2mmPC鋼より線Cの応力測定結果

実験開始時の室温は 26.2℃である。磁歪センサの指示値は、載荷前に 2.68kN であり、最大荷重 60.00kN のときに 64.96kN である。この供試体には載荷前に 19.7N/mm² の引張応力が残存していた。荷重による引張力増加量からの最大荷重に対する磁歪センサの誤差率は 3.8% である。キャリブレーションを行ったものとロードセルが異なる PC 鋼より線について、キャリブレーションを同種のもので行った場合に比べて精度は幾分低下するが、かなりの精度で応力計測をすることができた。

以上の実験結果のうちキャリブレーションを同種のもので行った場合の応力測定について、EM センサおよびロードセルによる測定値比較を表 1 に示した。ロードセルはセット以後の応力計測しかできないが、EM センサはセット以前に発生して残存している応力を計測することができる。荷重による被測定体引張力の増加量について、EM センサでの測定値はロードセルによる測定値に対して平均絶対誤差率が 1.7% である。このことから EM センサを用いた場合にロードセルに近い精度で鋼材の応力計測ができることが判明した。

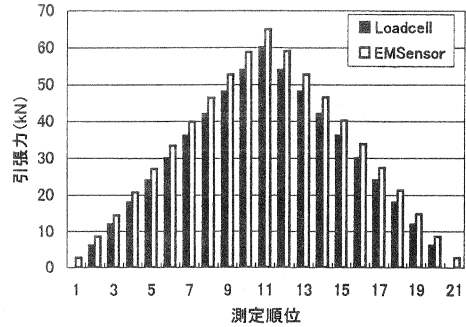


図21 φ15.2鋼より線Bにφ15.2鋼より線Bのキャリブレーションを適用した応力測定

5. 37φ7mm 鋼ストランドの応力測定

本実験の主な目的は、素線のキャリブレーション結果を使って鋼ストランドや鋼ケーブルの応力計測について実証すること、ストランド表面の保護被覆を傷つけないことを条件とする応力計測の可能性を探ることである。

図 22 は、供試体および載荷装置の展開図である。供試体は、φ7mm 鋼線を 37 本束ねた鋼ストランドである。ストランドの表面はポリエチレンで被覆されている。鋼線の本一本が等しく力を受け持つように、両端の鋼線をばらして直方体コンクリートブロックに定着した。荷重は、ケーブルに対して対称に配置

表 1 EM センサとロードセルとの測定値比較

供試体	無載荷時		最大載荷時		EM センサでの荷重による引張力増加量	
	ロードセル	EM センサ指	ロードセル	EM センサ指	引張力(kN)	誤差率(%)
	指示値(kN)	示値(kN)	指示値(kN)	示値(kN)		
φ7mm 鋼線	0	-0.08	30.00	29.03	29.11	-3.0
φ13mmPC 鋼棒	0	2.51	28.84	30.50	27.99	-2.9
D22mm 異形棒鋼	0	-0.39	58.84	57.25	57.64	-2.0
φ15.2mmPC 鋼より線 A	0	-0.30	60.00	60.15	60.45	0.8
φ15.2mmPC 鋼より線 B	0	0.02	60.00	59.49	59.51	-0.8
φ15.2mmPC 鋼より線 C	0	-0.31	60.00	59.37	59.67	-0.5

した2つのジャッキにより加えた。

前述のφ7mm 鋼線のキャリブレーション結果を用い、鋼ストランドの透磁率および温度を測定してEMセンサによる引張力を計測した。図23はEMセンサによる引張力推定値と荷重との関係を示す。EMセンサによる計測値は10%未満の精度で荷重に対応している。素線のキャリブレーションをストランドの応力計測に利用できること、被覆を傷つけることなく応力計測ができることが判明した。

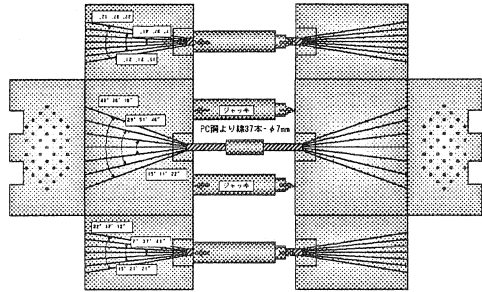


図22 供試体および載荷装置の展開図

6. まとめ

実験により、磁歪センサによる応力計測は、非破壊・非接触で操作が簡単なこと、残存応力を含めた実在応力が容易に測定できることから鋼材の応力モニタリングに適していることがわかった。以下に計測精度および計測方法に関する主な実験結果を示す。

- 1) 鋼線、PC鋼棒、異形棒鋼、PC鋼より線の単体については精度の高い応力計測が実証された。
- 2) 鋼材のキャリブレーションが計測精度の根幹データをもたらすので、十分な温度管理のもとで信頼できる載荷装置、つかみ具を備えてキャリブレーションを行うことが必要である。
- 3) 異形棒鋼の場合、節やリブなど棒鋼表面の複雑な起伏の影響が懸念されたが、測定位置による計測値の差はほとんど見られなかった。
- 4) PC鋼より線の場合、素線をより合わせていることから、製造の段階で各素線に応力が生じている。その素線のキャリブレーションを行って鋼より線の残存応力を測定することもできるが、実用性を優先して鋼より線のキャリブレーションを行った。キャリブレーションしたものでは高精度の応力計測値が得られた。
- 5) キャリブレーションしたものと異なる鋼より線の場合、4)の場合に比べて幾分計測精度が落ちて誤差率が3.8%になった。鋼より線のグループからサンプルを採り出してキャリブレーションをして、その結果を用いた応力計測を行っても実用精度は得られると推察される。
- 6) 素線のキャリブレーション結果を用いて、37本の鋼線からなるポリエチレンで厚く被覆したストランドの応力計測実験での誤差率は10%である。被覆を傷つけることなく、ストランドやケーブルの応力測定ができることが実証された。

7. あとがき

磁歪センサには従来の応力測定用センサにない優れた特長を見出すことができる。今後、その特長を生かした応力モニタリングなどの用途の拡大について研究していきたい。

参考文献

- 1) Z. L. Chen, M. L. Wang, T. Okamoto and S. Sumitro, "A new magneto-elastic stress/corrosion sensor for cable-stayed bridges using measurement of a hysteretic curve", 2nd Workshop on ATUEDM, Kyoto, July 11-13, 2000

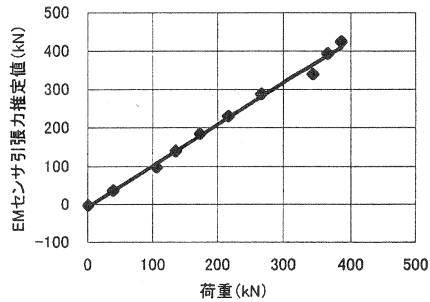


図23 EMセンサによる引張力推定値と荷重との関係