

EMセンサーによるPC鋼材の実応力測定

すなりよ すみトロ
羅 黄順*

1. はじめに

21世紀初頭における日本の社会基盤整備の重要な課題は、現存する既設構造物をいかに効率よく維持管理してそのライフサイクルコスト (LCC) を低減するかにある。高信頼性を有する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実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の変化に敏感なことを利用した Elasto-Magnetic (EM) センサーによる応力計測は、その要求に適合する有力な計測方法である。EM センサーは、磁束印加コイル (入力) と磁束検知コイル (出力) で構成されている。PC 鋼材においては応力に対応して透磁率が敏感に変化する。EM センサーはこの透磁率を検出する。したがって、あらかじめ生地でのPC鋼材について加力試験を行い、透磁率を応力と温度の関数で表現 (キャリブレーションと言う) しておけば、被測定体であるPC鋼材の透磁率および温度とを測定することによりその応力を算定することができる。この方法は、プレストレスコンクリート (PC) における緊張管理、経年後の健全度モニタリング、既設 PC 構造の現有引張応力の測定などに最適であると考えられる。筆者らは、PC 鋼より線、PC 鋼棒、37φ7mm鋼ストランドについて、-20℃~40℃の温度範囲で降伏応力ま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。これにより、EMセンサーにより鋼材の応力を精度よく計測できることが実証された。本文ではEMセンサーによる応力計測の基礎原理、キャリブレーションおよびPC構造ヘルスマニタリングの実施例について報告する。

2. 計測原理と計測方法

強磁性体の主な磁気特性は外部印加磁界強さ H と内部誘導磁束密度 B の関係であり、ヒステリシス環線で示される。実験的に断面積 A の磁束 $\Theta = A \cdot B$ を測定することが

できる¹⁾。この場合、測定磁束は測定対象磁性体の磁気特性、センサー特性、および周辺の磁気の混合磁束に依存する。主な磁気特性を図-1に示す。

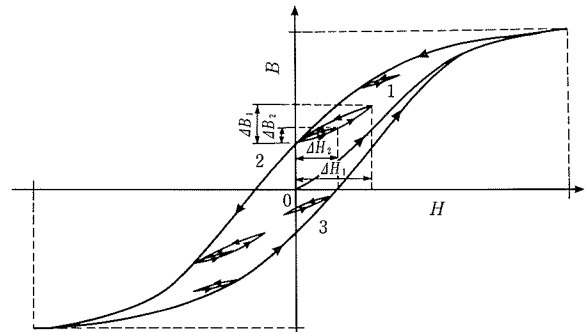


図-1 磁気特性

ここで、透磁率 μ は、

$$\mu = B/H \dots\dots\dots(1)$$

であり、また微分透磁率 $\Delta\mu$ は、

$$\Delta\mu = \Delta B/\Delta H \dots\dots\dots(2)$$

で定義される。これらの透磁率の値は 3.1 に示すように、鋼材の“ワーキングポイント” (測定のために選択された測定磁場領域) を適切に選択することによって応力および温度の簡単な関数で表される。

2.1 計測方法

巻き数 n 、有効面積 A_t のコイルに断面積 A_f の強磁性体 (被測定体) を通し、磁界強さ $H(t)$ の磁場に置く場合、ファラデーの法則によると、コイルに誘導される起電力はコイルをよぎるトータル磁束の時間的変化で示される。

$$\begin{aligned} V_{ind}(t) &= - \frac{\partial \Theta(t)}{\partial t} \\ &= - \left[nA_s \frac{\partial B(t)}{\partial t} + n(A_t - A_s) \mu_0 \frac{\partial H(t)}{\partial t} \right] \end{aligned} \dots\dots\dots(3)$$

また、直流抵抗 R 、誘導抵抗 C のとき、誘導起電力を微小時間 t_1 から t_2 まで積分したときの出力電圧は、

$$V_{out} = \frac{1}{RC} nA_s \left[\Delta B + \left(\frac{A_t}{A_s} - 1 \right) \mu_0 \Delta H \right] \dots\dots\dots(4)$$

である。ここに、

$$\Delta B = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial B}{\partial t} \partial t \quad \Delta H = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial H}{\partial t} \partial t \quad \dots\dots(5)$$

で示される。

一方、磁性体がない場合の出力電圧は次式で示される。

$$V_0 = \frac{1}{RC} nA_t \mu_0 \Delta H \quad \dots\dots\dots(6)$$



* Sunaryo SUMITRO

(株)計測リサーチコンサルタント
管理部企画開発室

式(4), (6)より, 出力電圧比 V_{out}/V_0 は,

$$\frac{V_{out}}{V_0} = \mu_r \frac{A_s}{A_t} + \left(1 - \frac{A_s}{A_t}\right) \dots\dots\dots(7)$$

である。

したがって, 測定対象物の相対的な透磁率は次のようにまとめられる。

$$\mu_r = 1 + \frac{A_t}{A_s} \left(\frac{V_{out}}{V_0} - 1\right) \dots\dots\dots(8)$$

2.2 EM センサー

EMセンサーは, 一次コイルおよび二次コイルと温度センサー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(写真-1)。一次コイルに変動電流を流すと, ソレノイドの中の被測定体(鋼材)に磁束密度の変化が生じて, 二次コイルに誘導電圧が発生する。この誘導電圧の測定から透磁率を知り, さらに3.1に示すように鋼材の実応力を測定することができる²⁾。

(1) 既製 EM センサー

既製EMセンサーの構造は図-2に示すようにシンプルな円筒型コイルで対象測定構造物に直接取り付けるのではなく, 任意の位置にセットできるあらかじめ製作されたコイルである³⁾。

(2) 現場 EM センサー

既設PC構造物の現有緊張力を測定するときは, 測定対象構造物の周囲に写真-2に示すように巻付け装置を用いてコイルを設置し, ポリウレタン系樹脂を含浸させて固め耐久性を確保する。

3. 計測手法, 精度および信頼性

3.1 応力推定

すでに述べたように, 透磁率または微分透磁率は応力および温度に依存する。この現象を用いて応力を測定することができる。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定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は近似的に次式で示される。

$$\mu_r(\sigma, T) = \mu_r(0, 0) + m_1\sigma + m_2\sigma^2 + \alpha T \dots\dots(9)$$

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

また, 温度 T , 応力 0 における鋼材の透磁率は,

$$\mu_r(0, T) = \mu_r(0, 0) + \alpha T \dots\dots\dots(10)$$

で示される。

これより,

$$\mu_r(\sigma, T) = \mu_r(0, T) + m_1\sigma + m_2\sigma^2 \dots\dots\dots(11)$$

となる。

式(10)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。また, 式(11)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。

各種鋼材のキャリブレーションをあらかじめ行っておけば, 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(9)を用いて算定することができる。図-3は, 25±1.5℃で行ったφ7mm鋼線の引張試験における透磁

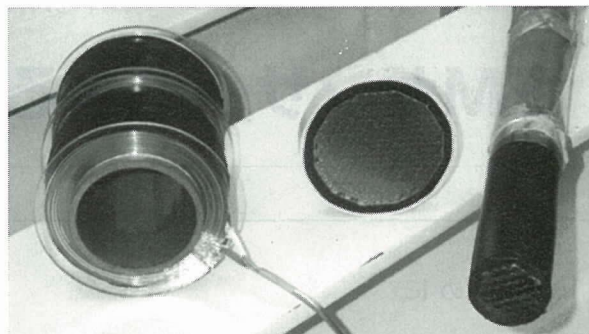


写真-1 EMセンサーとPC鋼材

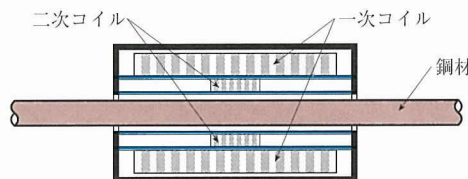


図-2 EMセンサー構造図

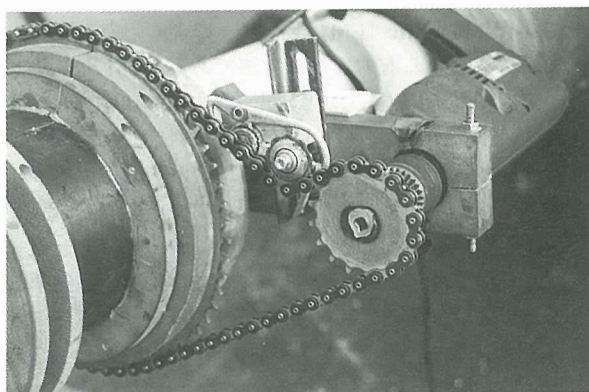


写真-2 現場EMセンサーのセット

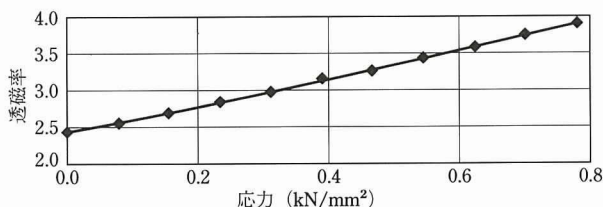


図-3 透磁率-応力関係図

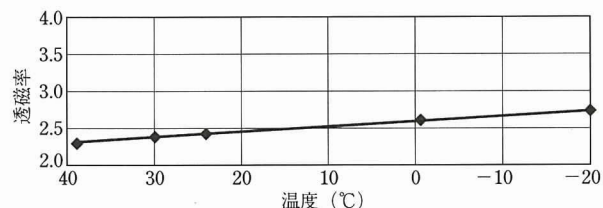


図-4 透磁率-温度関係図

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-4は恒温槽の中にφ7mm鋼線を入れて, 無応力状態で温度を-20℃~40℃の範囲で変化させたときの鋼材の透磁率と温度の関係である。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。

なお以上の検討で明らかのように、透磁率が応力と温度のそれぞれの独立変数であること、さらに透磁率がコイル内に置かれた鋼材の平均応力の関数であることから、本文で述べるキャリブレーションをすませた鋼材であれば、断面積や温度の異なる任意の現場状況において、その鋼材の応力・引張力を知ることができる。

3.2 精度および信頼性

EMセンサー技術を現場で普及できるように、各種の引張用鋼材を用いて検証を行った。ここでは、PC鋼棒、PC鋼より線およびPCストランドの検証実験の結果を示す。

各供試体の応力測定は実験室で万能試験機を用いて実施した。以下に、ロードセルの指示値とEMセンサーの測定値とを比較する。

(1) φ13 mm PC鋼棒

図-5にφ13 mm PC鋼棒の検証実験結果を示す。実験開始時の室温は24.1℃である。EMセンサーの値は、載荷前に2.51 kNであり、荷重計の最大荷重28.84 kNのときに30.50 kNである。最大荷重に対する誤差は2.9%である。

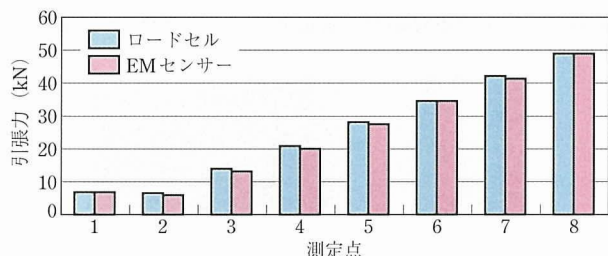


図-5 φ13 mm PC鋼棒

(2) φ7 mm 鋼より線

図-6にφ7 mm 鋼より線の検証実験結果を示す。実験開始時の室温は24.8℃である。EMセンサーの指示値は、載荷前に-0.08 kNであり、最大荷重30.00 kNのときに29.03 kNである。最大荷重に対する誤差は3.0%である。

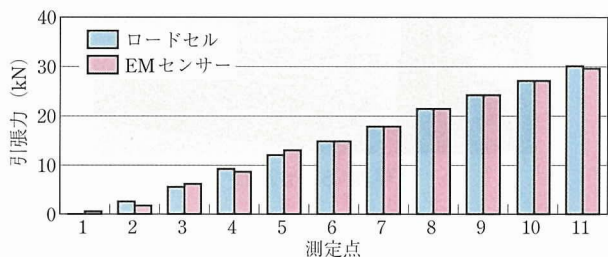


図-6 φ7 mm 鋼より線

(3) 37 φ7 mm 鋼ストランド

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⁴⁾。

図-7は、供試体および荷重装置の展開図である。供試体は、φ7 mm 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。鋼線の一本一本がなるべく均等に力を受け持つように、ストランド

の両端を開いて直方体の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した2つのジャッキにより加えた。

前述のφ7 mm 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センサーによる引張力を計測した。図-8はEMセンサーによる引張力推定値と荷重との関係を示す。EMセンサーによる計測値は10%未満の誤差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できることが判明した。

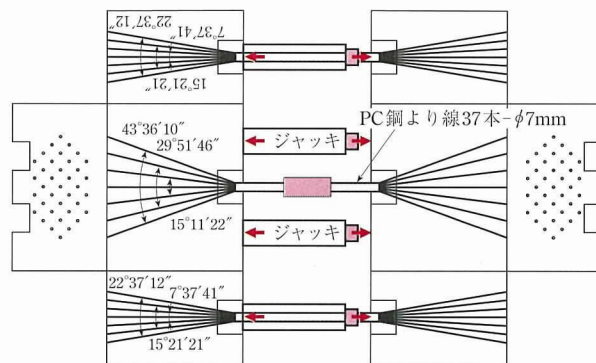


図-7 ストランド試験装置

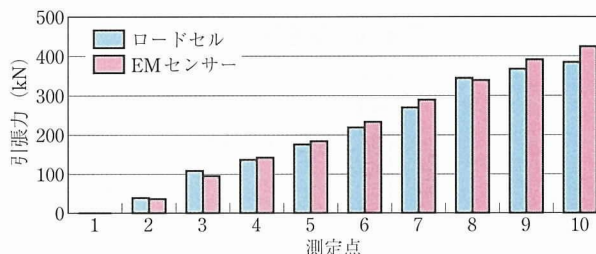


図-8 試験結果

4. 実施例

4.1 新設 PC 構造のヘルスマonitoring

EMセンサーによる新設PC構造のヘルスマonitoringの実施例として、米国SD橋のPCストランドの応力測定を紹介する(写真-3, 4)。

図-9に桁断面のケーブルの配置と測定対象ケーブルを示す。桁の長さは60.96 m、プレテンションI形PC桁である(図-10)。図-11に4つのセンサーの設置位置を示す。センサーの耐久性を確保するためプラスチック保護材で被覆し、センサーとストランドの間にシリコンシールが充填された。

各施工段階に測定された実応力を表-1に示す。測定結果は次のように評価された。

- ① 施工段階1は温度22℃でコンクリート打設前のストランドを137.8 kNまで緊張した直後の状態である。4測定点での張力はほぼ同等に分布している。ロードセルの値137.8 kNと比べて、測定点4では5%の差がある。これは緊張側から48.77 m離れていることが原因と考えられる。

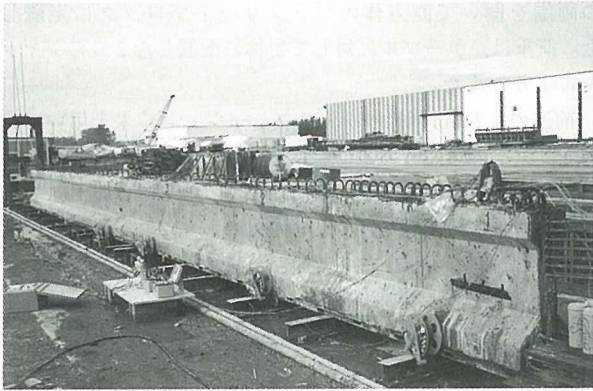


写真-3 PC 桁

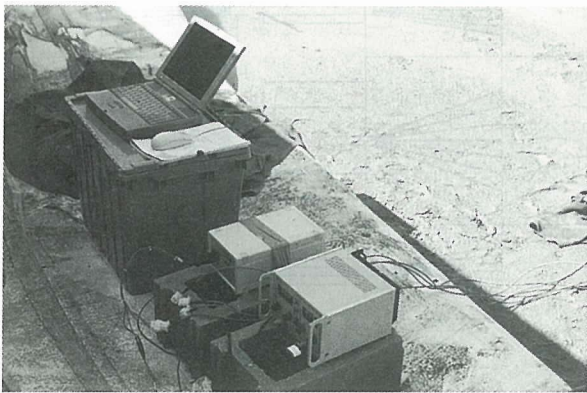


写真-4 測定システム

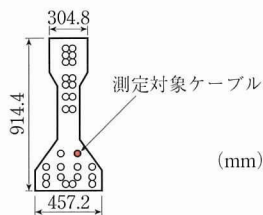


図-9 ケーブルの配置

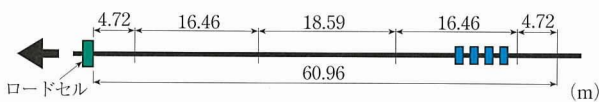


図-10 プレテンション I 形PC桁

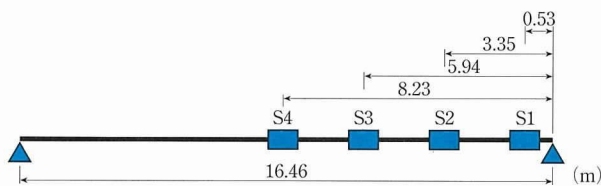


図-11 EMセンサー設置位置

表-1 各施工段階の測定結果

施工段階	センサー	ロードセル kN	S4 kN	S3 kN	S2 kN	S1 kN
1. PC緊張直後, コンクリート打設前, $T=22^{\circ}\text{C}$		137.8	131.8	131.7	130.6	130.2
2. PC緊張2時間後, コンクリート打設前, $T=22^{\circ}\text{C}$		—	130.9	131.3	130.6	130.1
3. PC緊張6日後, コンクリート打設4日後, $T=27.3^{\circ}\text{C}$		—	128.1	127.3	126.9	128.6
4. PC導入, コンクリート打設28日後, $T=15.2^{\circ}\text{C}$		—	129.3	127.8	127.6	66.4

- ② 施工段階2は施工段階1から2時間後の状態である。0.7%程度の応力低下が検知された。
- ③ 施工段階3はPC緊張から6日後, またコンクリート打設から4日後の状態を示す。ここでは1%~2%の応力低下が確認された。
- ④ 施工段階4はコンクリート設計強度が発現した状態で, 桁を延長方向に切断した状態である。センサー1(S1)の測定値は66.4 kN(施工段階3の大体半分)になった。この位置は桁端部の無応力点から0.53 mであり, 付着長さの差が原因と考えられる。そのほかの測定点では施工段階3と比べ0.5%~1%の応力増加が検知された。これはPC鋼材とコンクリートの膨張率差によるものと考えられる。

4.2 既設PC構造の健全度診断

現存する既設PC構造物の健全度診断では, 現有応力をどのようにして把握するかが課題である。しかしPC鋼材の素材の特性値(規格)さえ分かれば, 2.2(2)に示すような現場製EMセンサーを用いて, 既設PC構造の現有応力を検知することが可能である。実施例として, 中国YZ既設斜張橋のケーブルの現有応力の測定を挙げる。写真-5に示すよ

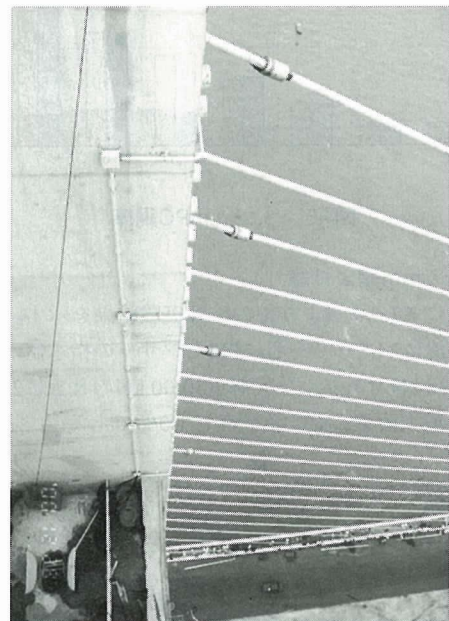


写真-5 YZ橋

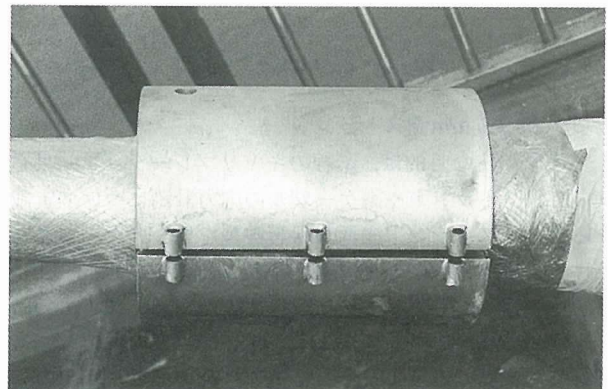


写真-6 YZ橋センサー

うに7つのEMセンサーを設置した。この現場で製作したセンサーを写真-6に示す。

5. ま と め

EMセンサーによる応力測定は、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と考えられる。以下に、これまでに得られたEMセンサー技術に関する主な知見をまとめて示す。

- ① EMセンサーは従来の応力測定センサーのような、「応力—電気信号変換器」ではなく、一組の磁束印加コイル（入力）と磁束検知コイル（出力）で構成されている。電気量（磁気特性量）が変化しているのは対象測定物、すなわち鋼材そのものである。PC鋼材は強磁性体として、その透磁率が応力に比例して敏感に変化する。EMセンサーはこの透磁率の変化をセンサーコイルによって検出する。
- ② あらかじめいく種類かのPC鋼材をキャリブレーションしておけば、蓄積されたデータを同規格の鋼材の応力測定のために運用できる。
- ③ PC鋼材の磁気特性のばらつきは、鋼材のメカニカル特性とは関係ない。EM測定の精度を高めるためには、鋼材の磁気特性とそのばらつきに関する知見が大切である。PC鋼材における磁気特性（透磁率）のばらつきは蓄積されたデータによると、海外製（スロヴァキア、スペイン、英国、米国、カナダなど）は5%以内であり、日本製は3%以内である。
- ④ 磁気特性は温度に依存する。日本製PC鋼材の温度特性は応力換算でおよそ±5 MPa/℃である。

- ⑤ EMセンサー技術では、応力や温度に依存するPC鋼材の透磁率変化を、検知コイルに生じる誘導起電力として検知するので、測定結果にはコイル周辺の磁場強度や磁束密度分布が関与する。非磁性体でできた鋼材の被覆は問題ないが、センサーの周辺に強磁性体がある場合、周辺の磁束分布に影響を及ぼす。この場合、不安定な磁場変化を防ぐために、センサー周辺の十分な磁気保護を考慮する必要がある。

EMセンサーに関する技術を日本の筆者らのグループで紹介したのは、イリノイ大学 M. L. Wang（ウォン）教授である。ウォン教授には、その後、継続して筆者らの実用化研究を指導していただいております。本技術ノートに米国SD橋や中国上海のYZ橋の実例を掲載することを快諾していただいた。また日本国内の研究の成果は、木更津高等専門学校の黒川章二教授の指導と、(株)計測リサーチコンサルタント開発企画室の諸氏の献身的な努力に負うところが大きい。記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Chen, Wang, Okamoto, Sumitro : A New Magnetoelastic Stress/Corrosion Sensor for Cables in Cable-Stayed Bridges Using Measurement of Anhyseretic Curve, 2nd Workshop on ATUEDM, Kyoto, July 11~13, 2000
- 2) Sumitro, Okamoto, Matsui, Fujii : Long Span Bridge Health Monitoring System in Japan, Proc. SPIE, 4337-67, pp. 517~524, 2001
- 3) Sumitro : Current and Future Trends in Long Span Bridge Health Monitoring System in Japan, International Workshop on Health Monitoring of Long Span Bridges, UCI, California, March 9-10, pp.78~87, 2001
- 4) 黒川, 羅, Wang, 嶋野 : 磁歪センサによる各種鋼材の応力計測, 第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.101~106, 2001

【2001年9月14日受付】