

# 全外ケーブル PC 橋の EM センサによる応力測定と長期モニタリングに関する一考察

酒井 秀昭\*1・上杉 泰右\*2・上平 謙二\*3・安森 浩\*4

## 1. はじめに

昭和 27 年にわが国初の PC 橋が架橋されて以来、近年に至っては多くの外ケーブル PC 橋が架設され、膨大な社会的資産を形成している。既設 PC 橋において、外ケーブルのプレストレス導入量を把握することは、今後 PC 橋を維持管理していく上できわめて重要な課題である。

上和会高架橋は、プレキャストセグメント工法を採用した PC 17 径間連続 2 主箱桁橋であり、主方向は大容量の PC 鋼材（19S15.2 B）を使用した全外ケーブル構造となっている。本橋の架設状況を写真 - 1 に、箱桁内の外ケーブル配置を図 - 1 に示す。

外ケーブルの張力を測定する場合、一般的にロードセルを用いることが多い。ロードセルは、外ケーブル定着部に取り付けるため、端部張力しか測定することができない。また、実橋の外ケーブルについては、緊張ポンプの荷重計示度と伸び量で緊張管理を行っている。したがって、端部以外で外ケーブル張力を測定するには、外ケーブルを構成する各ストランドにひずみゲージを直接接着し測定する方法しかないのが実情である。

しかし、本橋のようにマルチストランドを採用している場合やエポキシ樹脂塗装されたストランドを採用している場合には、PC 鋼より線にひずみゲージを直接接着することにより誤差が発生しやすい状況となる。また、既設橋で直接張力を測定することは困難である。

本橋では、PC 鋼材の磁歪を応用して張力を非破壊・非接



写真 - 1 上和会高架橋の架設状況

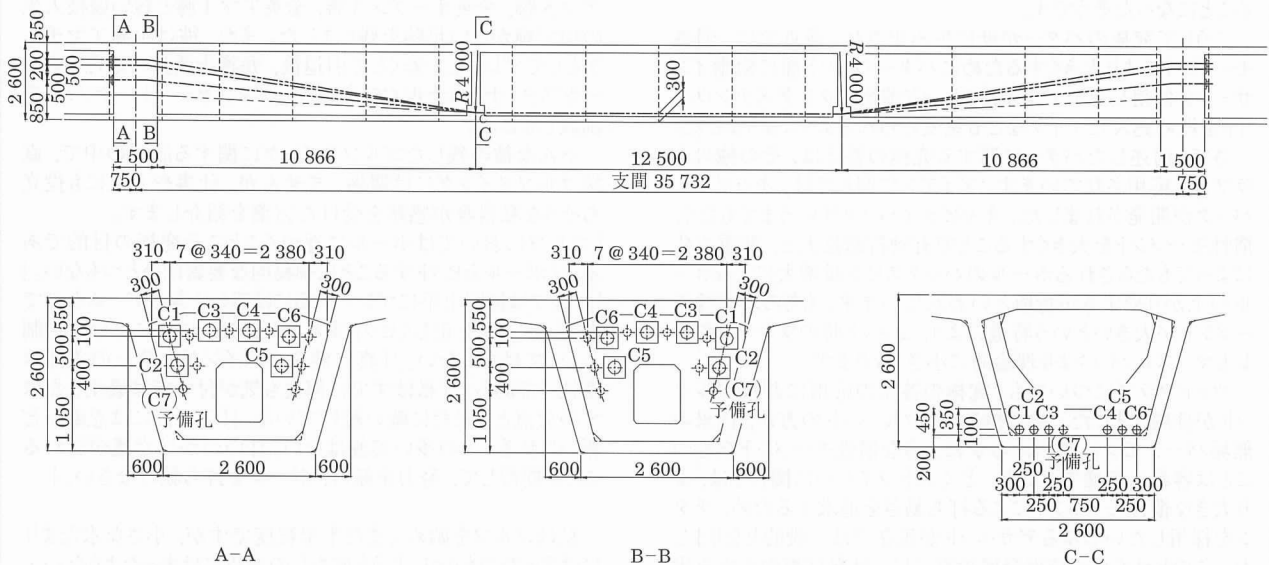


図 - 1 外ケーブルの配置

\*1 Hideaki SAKAI：日本道路公団 東京管理局（東局）市原管理事務所

\*2 Taisuke UESUGI：八千代エンジニアリング(株) 橋梁部

\*3 Kenji UEHIRA：ドービー建設工業(株)

\*4 Hiroshi YASUMORI：ドービー建設工業(株) 設計部

触で測定できる EM センサ (Elasto-Magnetic sensor) を使用し、わが国で初めて外ケーブルの張力測定を行った。本論文は、EM センサを用いた新設橋の外ケーブル張力測定手法ならびに将来の PC 橋の維持管理も視野に入れた測定手法について論ずるものである。

## 2. 目 的

近年外ケーブル構造を採用した橋梁が増加する中で、PC 鋼材と保護管との摩擦係数 ( $\mu$  値) を直接測定した例は少なく、「AASHTO 規定の裸ストランド+鋼管」の場合 0.30 (1/rad)、「裸ストランド+PE 管」の場合 0.23 (1/rad) を採用しているケースが多い。とくに本橋のようにエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材とポリエチレン管の摩擦係数を測定した例はなく、全外ケーブル構造ではその摩擦係数 ( $\mu$  値) が橋梁全体の経済性に影響する可能性がある。

また、昨今ではメンテナンスフリーといわれていたコンクリート構造物においても、維持管理の重要性がうたわれ、とくに外ケーブル構造を採用した PC 橋における外ケーブルの維持管理は、今後重要な位置付けとなるものと思われる。

以上のことから、下記に示す項目を把握することを目的とし、非破壊・非接触で張力測定ができる EM センサを使用し外ケーブル応力の測定を行うこととした。

- ① EM センサの精度確認
  - ② エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材と PE 管の摩擦係数 ( $\mu$  値) の測定
  - ③ 将来の維持管理への適用性確認 (長期モニタリング)
- 外ケーブルの応力測定概要図を図-2に示す。

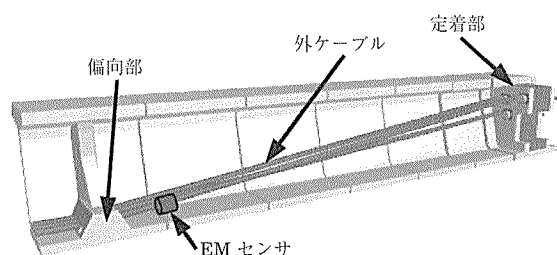


図-2 外ケーブルの応力測定概要図

## 3. EM センサの概要

### 3.1 EM センサの原理

EM センサは、張力を受ける磁性材の結晶変化と磁気特性変化が引張応力に依存することを利用したもので、無張力時の透磁率をあらかじめ測定しておくことにより、磁気特性と張力の関係から、PC 鋼材応力の測定が可能な装置である。図-3に示す 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の位置にセットすることができる。1次コイルに変動電流を流すと、ソレノイドの被測定体(鋼材)に磁束密度の変化が生じて、2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鋼材の透磁率を知るこ

とができる。

EM センサによる応力測定は、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 PC 鋼材の応力モニタリングに適している。

また、EM センサは、張力を直接測定するものではなく、印加された磁束がどの程度 PC 鋼材を通過するか(透磁率)を測定するセンサであり、透磁率および温度と張力の関係を事前のキャリブレーションで別途測定しておく必要がある。写真-2は、外ケーブルに EM センサを取り付けた状態である。

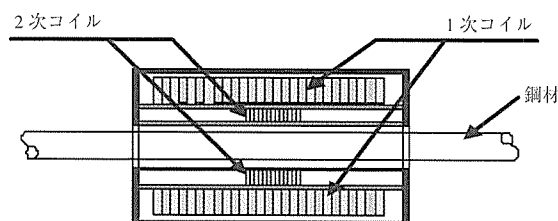


図-3 EM センサの構造

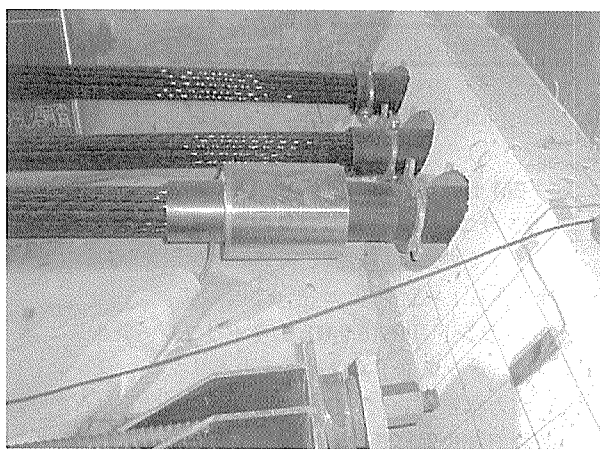


写真-2 EM センサの設置状況

### 3.2 EM センサの特徴

EM センサに関する主な特徴を以下に示す。

- ① EM センサは、従来の応力測定センサのような「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。検知コイルの出力の変化は、PC 鋼材そのものの透磁率変化によるものである。PC 鋼材は、強磁性体として、透磁率が応力に比例して敏感に変化する。EM センサはこの透磁率の変化をセンサコイルによって検出する。
- ② 幾種類の PC 鋼材を事前にキャリブレーションしておけば、応力を測定するために蓄積されたデータを同規格の PC 鋼材に対して運用できる。
- ③ 被覆された PC 鋼材においても、被膜を傷つけることなく、緊張された PC 鋼材の現有応力を直接測定できる。
- ④ ひずみゲージによる方法では、単一の鋼材をおのお

の測定する必要がある。とくに、マルチストランドの場合、ひずみゲージの接着箇所にも制限があり、誤差の生じる可能性が高いが、EM センサは、全体ユニットとして応力を精度良く測定できる。

- ⑤ ひずみゲージは、高張力下でひずみが大きくなった場合、測定不可能になるケースが多々あるが、EM センサは高張力下においても安定した測定ができる。
- ⑥ 既設橋にも取り付け可能であることから、長期的な維持管理に使用できる。

3.3 EM センサによる測定フロー

EM センサによる測定フローを図-4 に示す。

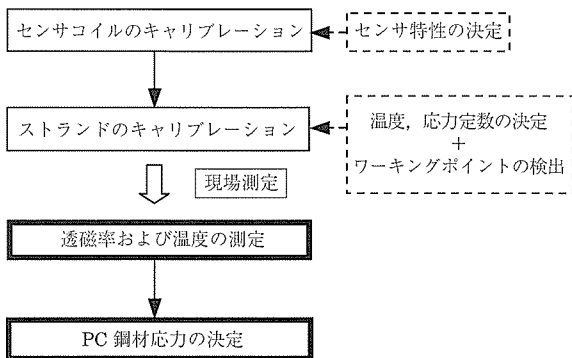


図-4 EM センサによる測定フロー

3.4 EM センサのキャリブレーション

1) センサコイルのキャリブレーション

センサコイルに対してキャリブレーションを行い、センサ特性である1次回帰線の勾配を決定する。

2) ストランド (1S15.2B) のキャリブレーション

続いてストランド1本に対するキャリブレーションを行い、無応力状態のPC鋼材に対する透磁率を応力および温度の関数で表式化して、関数より算出した応力が実応力と差異がないことを検証して、ワーキングポイントの確認を行う。ワーキングポイントとは、透磁率と応力を図化したときに、センサの応答特性が線形であり、精度も良好で測定可能な範囲、すなわち、測定のために選択された測定磁場領域を示す。

温度  $T$ 、応力  $\sigma$  における PC 鋼材の透磁率は、式(1)のよ

うに表される。

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

ここに、

$m_1, m_2$  : 温度が一定状態にある場合の試験定数

$\alpha$  : 応力が一定状態にある場合の試験定数

また、温度  $T$ 、応力  $0$  における鋼材の透磁率は、

$$\mu_r(0, T) = \mu_r(0, 0) + \alpha T \quad (2)$$

これより、

$$\mu_r(\sigma, T) = \mu_r(0, T) + m_1\sigma + m_2\sigma^2 \quad (3)$$

ここで、式(3)における  $\mu_r(0, T)$ 、 $m_1$ 、 $m_2$  は、一定温度  $T$  における PC 鋼材の引張試験結果から決定する。また、式(2)における  $\mu_r(0, 0)$ 、 $\alpha$  は、無応力状態における PC 鋼材の温度にともなう透磁率の測定結果から決定する。

4. 摩擦係数 ( $\mu$  値) の測定

4.1 試験概要

摩擦係数 ( $\mu$  値) の測定は、定着部ならびに偏向部に対する安全性確認試験用の実物大供試体を使用して行うこととした。試験体は、写真-3 に示すように、本橋の1径間分に相当する1主箱桁分を再現したものである。

EM センサによる外ケーブルの応力測定は、偏向角が最大で同種類の C3L ケーブルと C4L ケーブルに対して行うものとした。図-5 に示すとおり、EM センサを各偏向部の定着側に2箇所取り付け、その応力差から外ケーブルの摩

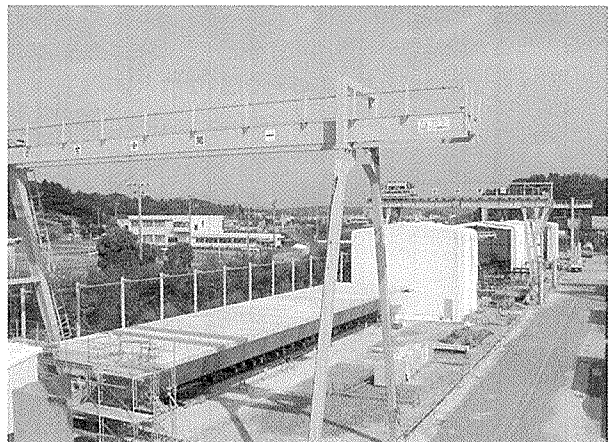


写真-3 実物大試験の試験体

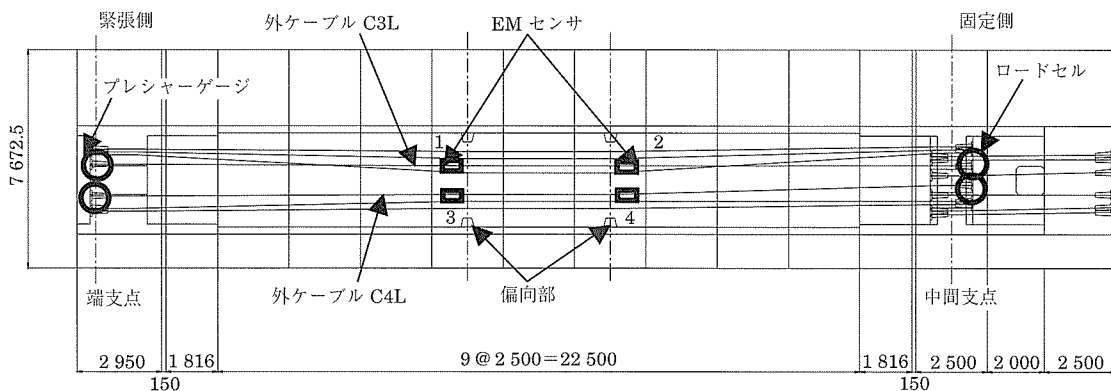


図-5 EM センサの平面配置 (実物大試験)

擦係数 ( $\mu$  値) を算出することとした。

#### 4.2 キャリブレーション結果

本試験では、図 - 6 に示すように PC 鋼材 (19S15.2 mm) を緊張し、応力を与えた状態でユニットのキャリブレーションを実施した。

キャリブレーションの実施状況を写真 - 4 に、透磁率と PC 鋼材応力のキャリブレーション結果から算定したユニットの PC 鋼材応力とロードセルによる測定値の比較結果を図 - 7 に示す。

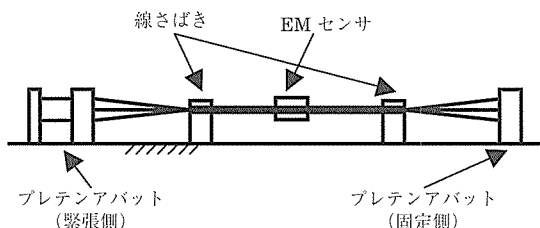


図 - 6 キャリブレーションの概要

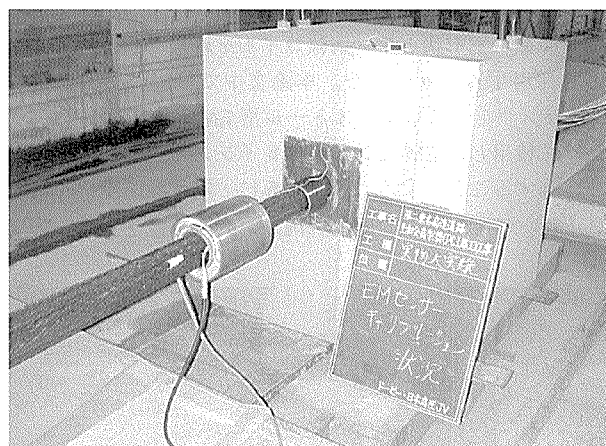


写真-4 キャリブレーションの実施状況

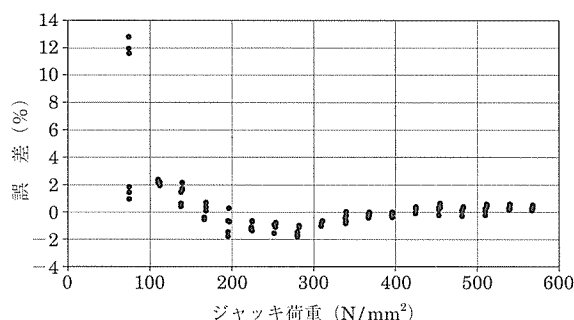


図 - 7 キャリブレーションの結果

その誤差は、PC 鋼材応力の全域に対して  $\pm 2.0\%$  程度であった。また、今回は、高張力下では誤差が小さくなる結果となった。

#### 4.3 外ケーブル応力の決定

ユニットのキャリブレーションから得られる出力電圧と温度の関係を図 - 8 に示す。この関係から温度勾配がわか

り、外ケーブル張力は、式(4)で表される。

$$F = mec \times \{U_{out}(F, T) - U_{out}(0, 0) - TC \times T\} \quad (4)$$

ここに、

- $F$  : 外ケーブル張力 (kN)
- $mec$  : 1260.77 (kN/V)
- $U_{out}(0, 0)$  : 0 °C 時の初期値 (3.8670 V)
- $TC$  : 温度勾配 ( $-8.93E-03$  V/°C)
- $U_{out}(F, T)$  : T °C 時の出力電圧 (V)
- $T$  : 測定時の温度 (°C)

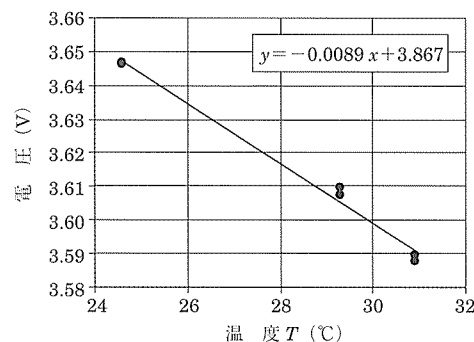


図 - 8 温度のキャリブレーション (実物大試験時)

#### 4.4 摩擦係数 ( $\mu$ 値) の算出

EM センサで測定された外ケーブル応力から、式(5)により摩擦係数 ( $\mu$  値) を算出する。式(5)は、PC 鋼材に対する摩擦減少量の一般式である式(6)と式(7)から誘導された式である。式(5)を整理すると、摩擦係数 ( $\mu$  値) は、式(8)で表される。

$$\sigma_{r2} = \sigma_{r1} \times \exp \{-\mu (\theta_1 + \theta_2)\} \quad (5)$$

$$\sigma_{r1} = \sigma_P \times \exp \{-\mu \theta_1\} \quad (6)$$

$$\sigma_{r2} = \sigma_P \times \exp \{-\mu (2\theta_1 + \theta_2)\} \quad (7)$$

$$\mu = (\ln \sigma_{r1} - \ln \sigma_{r2}) / (\theta_1 + \theta_2) \quad (8)$$

ここに、

- $\sigma_{r1}, \sigma_{r2}$  : EM センサによる外ケーブル応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_P$  : 初期緊張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\theta_1, \theta_2$  : 角変化量 (度)
- $\mu$  : 摩擦係数



図 - 9 PC 鋼材の応力

#### 4.5 測定結果

##### 1) 外ケーブル応力

C3L ケーブルの EM センサによる応力値を図 - 10 に、C4L ケーブルの EM センサによる応力値を図 - 11 に示す。図は、縦軸を EM センサならびにプレシャージによる測定値、横軸を PC 鋼材応力度 (緊張ポンプの荷重計示度を PC 鋼材応力度に換算した値) とし、緊張側のプレシャ

ーゲージ値と各EMセンサ値を図示したものである。実物大試験時のEMセンサ値には、短時間での測定であるため、測定時における温度変化の影響は考慮していない。

2) 摩擦係数 ( $\mu$  値)

本橋の外ケーブルは、偏向部保護管にポリエチレン管、鋼材にエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を用いている。エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材とポリエチレン管の設計上摩擦係数 ( $\mu$  値) は、既往の緊張管理による実績から 0.25 程度を採用している例が多い。

図 - 12 に EM センサ値から算出した摩擦係数 ( $\mu$  値) と荷重計示度 (緊張ポンプの荷重計示度を PC 鋼材応力度に

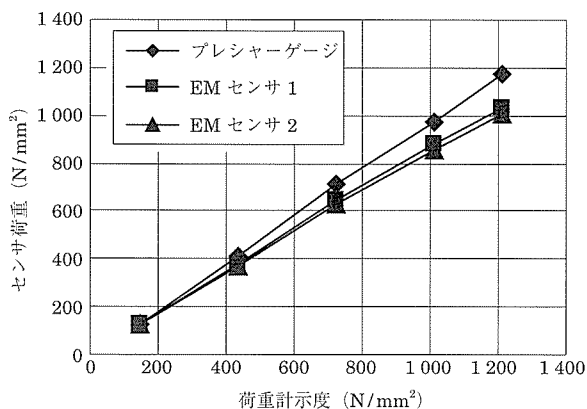


図 - 10 C3L ケーブルの応力値

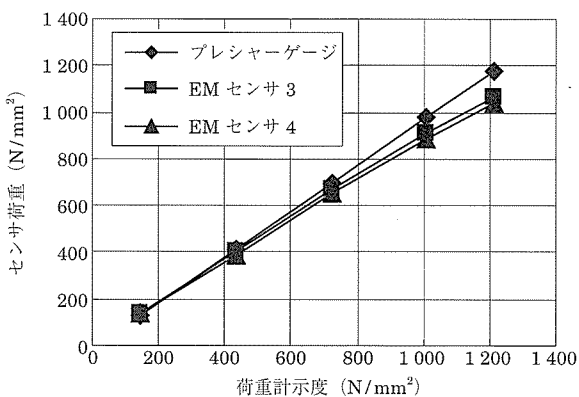


図 - 11 C4L ケーブルの応力値

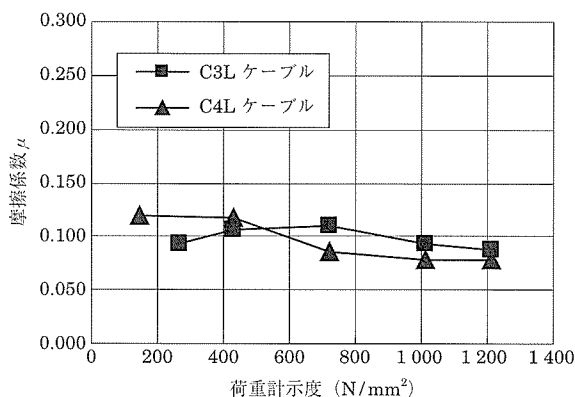


図 - 12 摩擦係数 ( $\mu$  値)

換算した値)の相関図を示す。摩擦係数 ( $\mu$  値) は、C3L ケーブルにおける 5 段階の荷重レベルに対する平均で 0.098、同様に C4L ケーブルで 0.096 であり、ほぼ 0.1 に近似した結果となった。

また、後述する実橋測定試験に対して、摩擦係数 ( $\mu$  値) は、実物大試験で使用した EM センサにおいて、0.005 ~ 0.135 とばらつきが大きい測定結果であった。

5. 長期モニタリング

5.1 試験概要

先の実物大試験において、EM センサの外ケーブル応力の測定に対する精度ならびに使用性はほぼ検証されている。さらに、実橋の P2 ~ P3 径間 (2 径間目) において、外ケーブル応力に対する長期的なモニタリングを実施することにより、既設橋の外ケーブルに対する EM センサの有効性と長期測定の信頼性を検証することとした。

実物大試験で使用した EM センサは、外ケーブル挿入時に先行して設置する構造であるため、既設橋の外ケーブル張力測定に適用することができない。そこで、本橋では、既設橋の外ケーブルにおいても設置が可能なように、EM センサを半割形状とし、鋼線コイルを現場で巻き付ける構造を採用することとした。本論文では、この改良した EM センサをポストインストール型 EM センサ、実物大試験時に使用した EM センサをプレインストール型 EM センサと称することとする。写真 - 5 に、本試験で使用したポストインストール型の設置状況を、表 - 1 にプレインスト

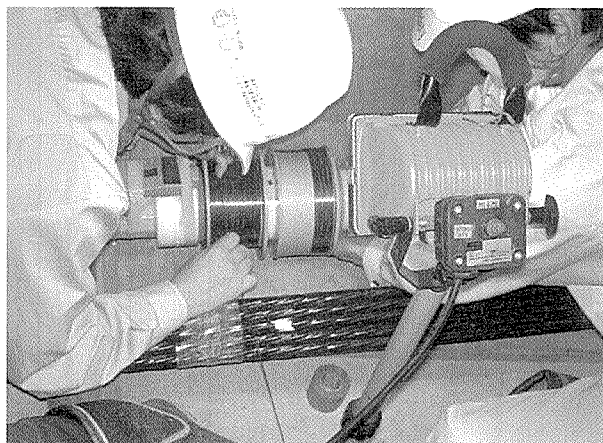
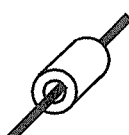
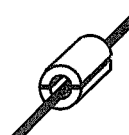


写真 - 5 ポストインストール型 EM センサ

表 - 1 EM センサの構造比較

	プレインストール型 (挿入型)	ポストインストール型 (後巻き型)
	円筒型	半割型
ボビン (芯棒部)		
鋼線コイル	機械巻き付け	現場巻き付け

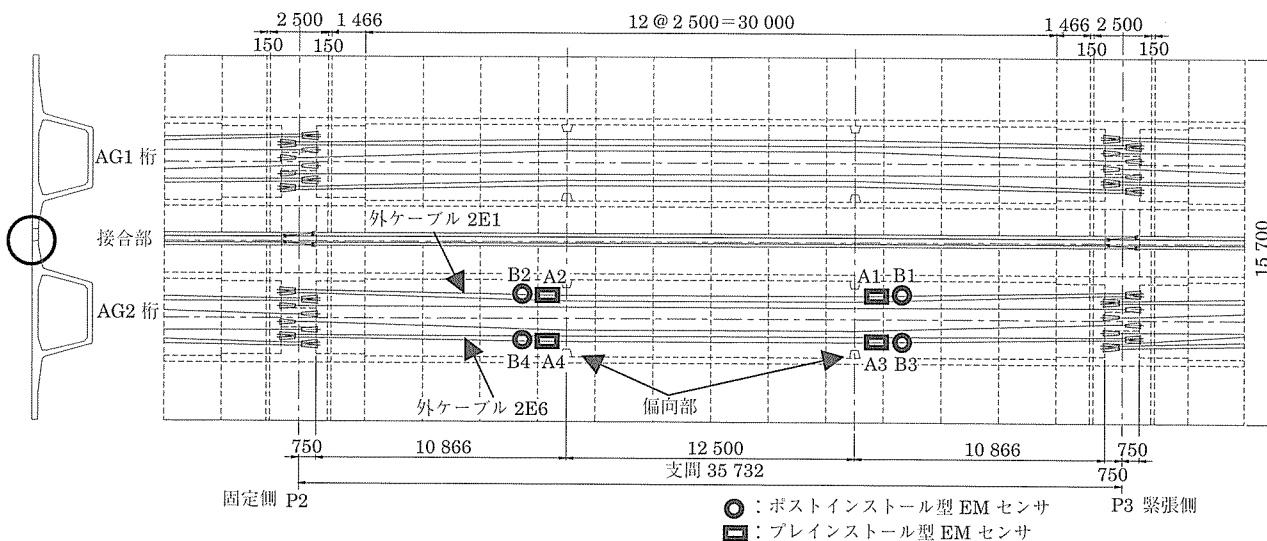


図 - 13 EM センサの平面配置 (実橋測定試験)

ール型とポストインストール型 EM センサの構造比較を示す。

本橋では主桁断面に効率良くプレストレスを導入することができるように、箱桁内に配置した6本の外ケーブルのうち、4本を主桁架設時に先行して緊張し(1次緊張)、接合部床版施工後に残りの2本を緊張する(2次緊張)計画とした。実橋測定試験時におけるEMセンサの配置を図-13に示す。測定する外ケーブルは、緊張時の主桁挙動の影響を避けるため、緊張順序が遅い2E1ケーブルと2E6ケーブルとすることとした。EMセンサの取り付け位置は、実物大試験と同様に各偏向部の定着側に2箇所取り付け、各ポストインストール型EMセンサのキャリブレーション用に実物大試験で使用したプレインストール型EMセンサを隣接して設置した。

5.2 試験結果

1) ポストインストールとプレインストールの比較

2E1ケーブルのEMセンサによる応力測定結果を図-14に、2E6ケーブルのEMセンサによる応力測定結果を図-

15に示す。図は、縦軸をEMセンサによる測定値、横軸を荷重計示度(緊張ポンプの荷重計示度をPC鋼材応力度に換算した値)として、ポストインストール型とプレインストール型のEMセンサ値の比較を行ったものである。なお、実橋測定試験時のEMセンサ値は、長期に渡る測定であり、温度変化の影響を考慮する必要があるため、温度補正を行ったものである。

最終の荷重レベルにおけるプレインストール型EMセンサに対するポストインストール型EMセンサの誤差は、2E1ケーブルは緊張側(A1/B1)4.0%と固定側(A2/B2)0.7%と、同様に2E6ケーブルは緊張側(A3/B3)4.3%と固定側(A4/B4)1.9%であった。いずれの測定においてもポストインストール型EMセンサの測定値がプレインストール型EMセンサの測定値を下まわる結果となった。

2) 外ケーブル応力の経時変化

本試験では、外ケーブル応力の経時変化量を把握し、将来の維持管理への適用性を確認する目的から、2002年5月

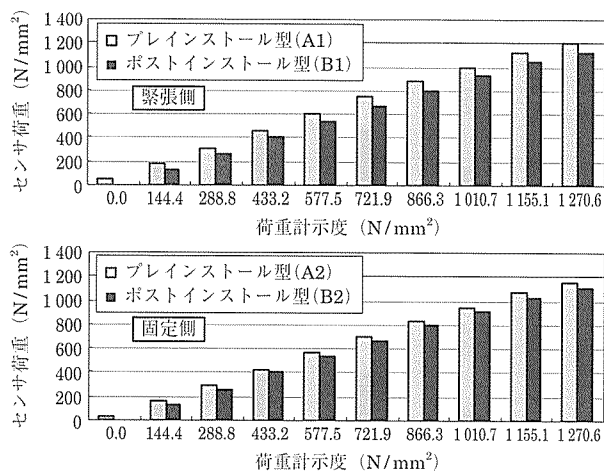


図 - 14 2E1 ケーブルの EM センサ値

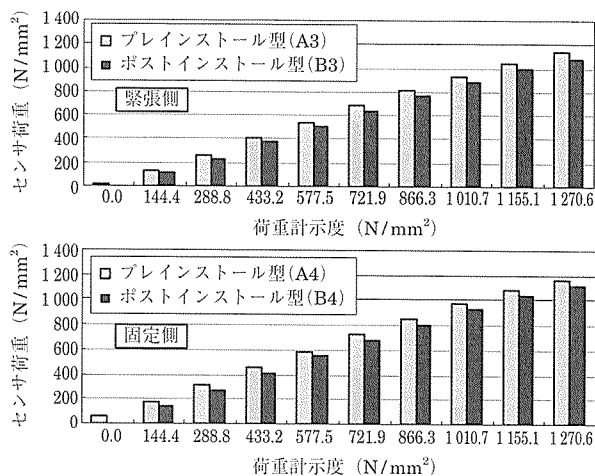


図 - 15 2E6 ケーブルの EM センサ値

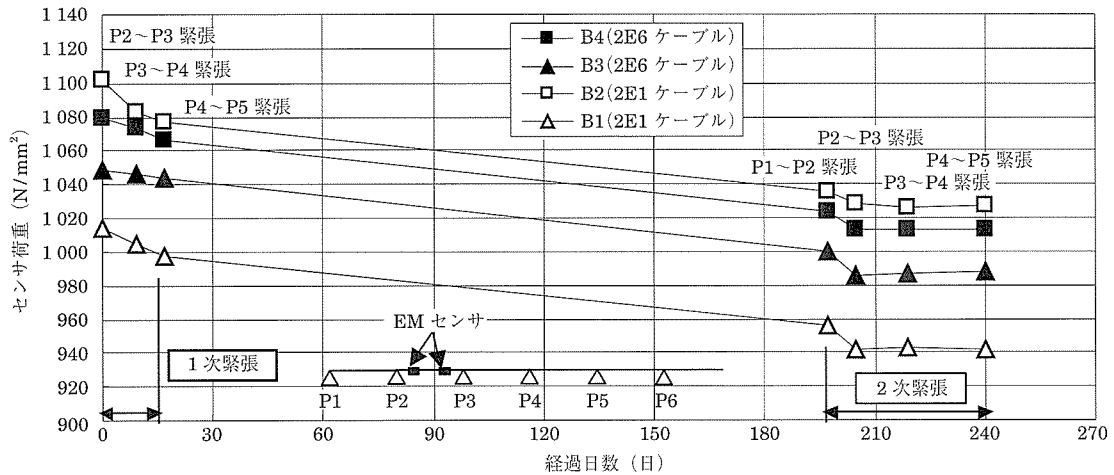


図 - 16 外ケーブル応力の経時変化 (P2 ~ P3 径間)

から 2003 年 1 月にかけて、約 240 日間の計測を行った。図 - 16 に P2 ~ P3 径間における外ケーブル応力の経時変化を示す。図は、縦軸を EM センサによる測定値、横軸を経過日数として、既設橋のモニタリングを想定したポストインストール型 EM センサ値を抽出したものである。

測定時期は、EM センサが設置された P2 ~ P3 径間部と隣接径間部の外ケーブル緊張時であり、1 次緊張と 2 次緊張による 2 つのグループに大別される。

各グループ内における隣接径間部の外ケーブル緊張による応力変化は、微小となっている。一方、1 次緊張と 2 次緊張の間は、180 日間経過しているため、EM センサ値は、2E1 ケーブルが 40.9 ~ 41.6 N/mm<sup>2</sup>、2E6 ケーブルが 42.6 ~ 43.6 N/mm<sup>2</sup> と 40 N/mm<sup>2</sup> 程度減少している。

## 6. 考 察

### 6.1 EM センサの精度確認

#### 1) プレインストール型 EM センサの精度

図 - 17 と図 - 18 は、実物大試験時について、縦軸を EM センサ値 (測定値ならびに設計値)、横軸を荷重計示度 (緊張ポンプの荷重計示度を PC 鋼材応力度に換算した値) と

して、EM センサによる測定値と設計値の比較を行ったものである。

ここで設計値とは、コンクリートの弾性係数を  $3.5 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>、PC 鋼材の弾性係数を  $2.0 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>、ジャッキ内部の損失量を 1.0 % (アンダーソン工法)、摩擦係数を図 - 12 の値として算出したものである。

設計値に対する EM センサ値は、各荷重レベルの値を平均すると、C3L ケーブルで緊張側 6.3 %、固定側 5.0 %、同様に C4L ケーブルで緊張側 0.2 %、固定側 1.3 % の差が生じていた。C3L ケーブルにおいては、5.0 % を超える差が生じたが、C4L ケーブルにおいてはほぼ一致した結果が得られた。

しかしながら、この測定結果には、測定精度に影響を与える要因として、既往の知見から下記のような EM センサに関わる本来の特性が含まれると考えられる。

#### ① 外ケーブルの初期応力

EM センサは、敏感に応力を検知するため、外ケーブルの緊張前であっても、サグ等で発生する微小応力を測定する可能性がある。実橋測定試験でも、最大で 57.1 N/mm<sup>2</sup> の応力を確認している。

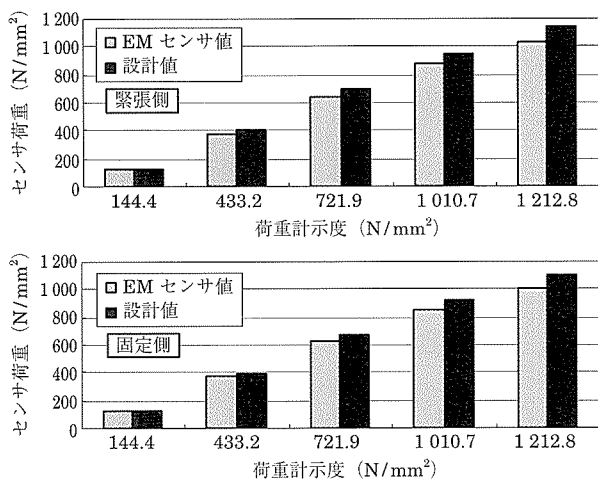


図 - 17 EM センサ値と設計値の比較 (C3L)

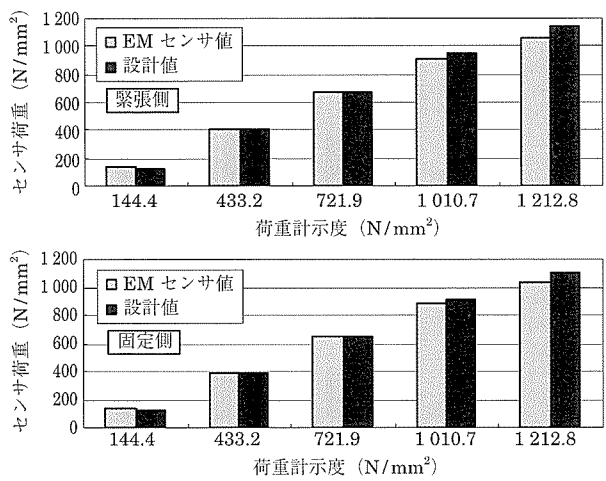


図 - 18 EM センサ値と設計値の比較 (C4L)

② PC 鋼材の温度特性

磁気特性は、温度に依存している。本試験でも、前述の図 - 8 に示す出力電圧と温度の関係から、1℃あたり 4.3 N/mm<sup>2</sup> がキャリブレーション結果である。既往の測定では、日本製 PC 鋼材の温度特性は、1℃あたり 5.0 N/mm<sup>2</sup> 程度となっており、温度特性の誤差が含まれる可能性がある。

③ PC 鋼材の磁気特性

PC 鋼材には、メカニカルな特性とは関係なく、磁気特性(透磁率)にばらつきを有しており、既往の測定では、日本製における磁気特性のばらつきは 3.0 % 程度である。

したがって、プレインストール型 EM センサは、本試験の測定結果とその特性から、5.0 % 前後の精度であると考えられる。

2) ポストインストール型 EM センサの精度

本橋において開発したポストインストール型 EM センサは、理論上はプレインストール型と同等な精度の確保が可能である。しかしながら、コイルの製作が現場での作業となる等、測定誤差が生ずる可能性が高いことが予測された。図 - 14 と図 - 15 の測定結果からも、ポストインストール型は、プレインストール型に対して 4.0 % 程度低い外ケーブル応力が測定されており、外ケーブル緊張前の初期応力の測定状況が影響しているものと思われる。したがって、ポストインストール型に対して、同等な精度を確保するためには、次の改善が必要である。

① ヒューマンエラーの除去

現場でのコイルの巻き付け時に発生する張力差、各段における巻き数の差、巻き方の粗さに対して、機械的に近い簡易巻き付け装置を開発する。

② キャリブレーションの精度向上

既設の外ケーブルに対する PC 鋼材の磁気および温度特性に対するキャリブレーションの精度を向上させる。

6.2 摩擦係数 ( $\mu$  値)

図 - 10 と図 - 11 の測定結果から、C3L, C4L とともに緊張ポンプの荷重計示度が大きくなるほどプレシャージとの差が大きくなる。摩擦係数の影響も考えられたが、図 - 12 の結果から摩擦係数は緊張力によらずほぼ一定の値となっていることが確認できた。

実物大試験時に測定された摩擦係数 ( $\mu$  値) は、角変化のきわめて少ない偏向部間の外ケーブルの微小な応力差から算出したものである。摩擦係数 ( $\mu$  値) が 0.1 の場合、EM センサ間の応力差は 10 N/mm<sup>2</sup> 程度であり、外ケーブル緊張時の最終緊張力と比較すると非常に小さな値である。そのため、EM センサがもつ誤差の影響等を受け易いことから、本橋の設計においては、エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材とポリエチレン管の摩擦係数 ( $\mu$  値) を測定値の 0.1 に安全係数 1.5 を乗じた 0.15 と設定することとした。

この設計で採用した摩擦係数 ( $\mu$  値) に対して、実橋における外ケーブルの緊張管理結果から、その妥当性の検証を行った。図 - 19 に示すように、外ケーブルの緊張は、荷重計示度を一定として、伸び量範囲を ± 5.0 % で管理している。EM センサを設置した 2E1 ケーブルと 2E6 ケーブルの伸び量は、237.0 mm であり、摩擦係数 ( $\mu$  値) を 0.15

とした設計値の 237.1 mm とまったく一致していた。

さらに、2E1 および 2E6 ケーブルと同配置である P2 ~ P11 径間における外ケーブル 18 本に対する伸び量の誤差を集計した結果を図 - 20 に示す。各ケーブル伸び量の誤差は、多少ばらつきがあるものの、全て外ケーブルの緊張管理内に収まっており、設計値に対して平均で 2.0 mm 不足している結果となった。

一方、伸び量 235.0 mm と荷重計示度から、摩擦係数  $\mu$  値を誘導すると 0.17 となり、設計上の 0.15 とほぼ一致した結果となった。なお、参考文献によると、ポリエチレン管と通常の裸鋼材 (10T15.5) との組合せの場合における摩擦係数 ( $\mu$  値) は、0.131 ~ 0.154 りと報告されている。

上述のように、現場における緊張管理結果から想定される摩擦係数  $\mu = 0.17$  と実物大試験で測定された摩擦係数  $\mu = 0.10$  とは、誤差が生ずる結果となった。誤差の要因として、主桁のたわみ変形や外ケーブル平面角変化の影響により、偏向部での外ケーブルの接触長が設計上の設定と異なることが考えられるが、摩擦係数 ( $\mu$  値) に及ぼす影響は比較的少なく、偏向部の摩擦係数測定に最も大きな影響を及ぼした要因は、EM センサの測定精度であるといえる。

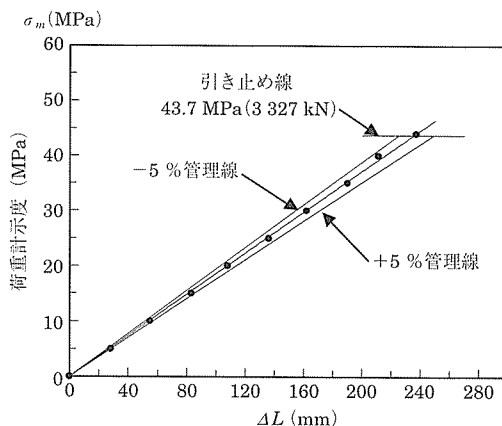


図 - 19 緊張管理例

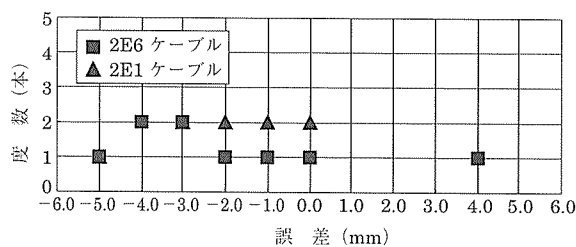


図 - 20 伸び量の誤差

6.3 長期モニタリング

現状でのポストインストール型 EM センサは、プレインストール型 EM センサより、個々の誤差要因があるため、精度が低いと考えられる。しかしながら、図 - 16 に示す 240 日間におよぶ測定期間中の EM センサ値は、きわめて安定している結果となっている。外ケーブルの 1 次緊張と 2 次緊張との間は、180 日間経過しており、測定された外ケ



ケーブル応力の減少量は、設計上で考慮したコンクリートの弾性変形 (20.0 N/mm<sup>2</sup>)、クリープ・乾燥収縮 (20.0 N/mm<sup>2</sup>) を合計した減少量とほぼ一致した結果となった。

EM センサを使用して長期モニタリングを行う場合には、精度の問題の他、その耐久性が重要な要素となる。EM センサは、銅線・溶接剤・銅カバー・接続電線で構成されており、耐久性上もっとも弱い箇所は、接続電線であると考えられるが、厳しい環境下でも 50 年は耐えられるものとされている。

たとえば、チェコ共和国のタボル斜張橋では、斜材ケーブルに 1987 年に設置された EM センサが、現在に至る 16 年間も継続かつ周期的にデータが収録され、安定した測定値が得られている。EM センサは、一度測定に関するパラメータを決定しておけば、その後の測定に対して更新する必要がなく、耐久性にも優れているため、長期モニタリングへの適用性が高いと考えられる。

## 7. ま と め

実物大試験ならびに実橋における EM センサによる外ケーブル応力測定により、以下に示す知見が得られた。

### 1) EM センサの測定精度

#### ①プレインストール型 EM センサの測定精度

外ケーブル初期応力の影響、PC 鋼材温度特性による誤差、PC 鋼材時期特性の影響等により 5.0 % 程度の誤差が生じる可能性があるものの、従来では測定のできなかつた大容量外ケーブル (19S15.2) のユニットとしての張力測定が可能であることが確認できた。

また、本橋のようにエポキシ樹脂塗装されたストランドを採用している場合においても、樹脂の被覆を剥がすことなく応力測定が可能であり、維持管理をする上で耐久性上も非常に有利であると言える。

#### ②ポストインストール型 EM センサの測定精度

今回開発した EM センサは、ヒューマン誤差の除去等、測定精度向上を図るための改善が必要であるものの、既設橋の外ケーブル等にも後付けで設置することが可能であり、既設橋の維持管理を含めた広範囲での適用が可能であることが確認できた。

### 2) 摩擦係数 ( $\mu$ 値) の測定

現段階において、EM センサは、外ケーブルの偏向部間における微小な応力差に対応できるような測定精度を有しているとは言えない。しかしながら、今回の EM センサによる測定結果ならびに緊張管理結果より、エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材と PE 管の摩擦係数 ( $\mu$  値) は、0.15 ~ 0.17 程度であるといえる。近年、エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材とポリエチレン管を採用する事例が増えており、これらの緊張結果を踏まえ、適切な摩擦係数 ( $\mu$  値) を定めていく必要がある。

### 3) 将来の維持管理への適用性確認

ポストインストール型 EM センサは、現段階では測定精度の問題があるものの、約 240 日間におよぶ測定期間中の測定値は安定しており、長期モニタリングに適したシステムであることが確認できた。

## 8. あとがき

本論文が、今後の外ケーブルに対する応力測定手法の開発ならびに将来の PC 橋の長期モニタリングへの適用性拡大につながれば幸いである。

最後に、本橋において EM センサで外ケーブル応力測定試験を行うにあたり、「都市内 PC 高架橋のプレキャスト化に関する技術検討委員会 (委員長: 池田尚治 横浜国立大学大学院 名誉教授)」の委員の皆様にご多大なご指導、ご助言を頂戴いたしました。この場をお借りして感謝申し上げます。

### 【 参 考 文 献 】

- 1) Ladislav Búci :  
Strengthening of Segment Bridge by Means of External Tendons, Journal of Theory, Structures and Elements, Vol. 42, No. 2 - 3, 1994, pp.111 - 115
- 2) Hideaki Sakai, Hiroshi Yasumori, Noriyuki Miyamoto and Junichi Izumo :  
Measurements of Prestressing Forces in Large Capacity External Tendons Using Elasto-Magnetic Sensor in Kamikazue Viaduct, The First fib Congress 2002, Osaka, October 13-19, 2002

[2003 年 7 月 11 日]