

大容量テンドンを用いた全外ケーブルのEMセンサによる張力測定について — 第二東名高速道路 上和会高架橋 —

八千代エンジニアリング株式会社 橋梁部	○ 正会員 上杉 泰右
日本道路公団 東京管理局 (東局) 市原管理事務所	正会員 酒井 秀昭
ドーピー・日本高圧共同企業体	正会員 上野 修
ドーピー・日本高圧共同企業体	正会員 安森 浩

1. はじめに

上和会高架橋は、現東名高速道路と第二東名高速道路とが交差する豊田 JCT から名古屋方面に約 2km、愛知県豊田市和会町に位置する橋梁である。本橋は、プレキャストセグメント工法を採用した PC17 径間連続 2 主箱桁橋であり、主方向は大容量の PC 鋼材 (19S15.2B) を使用した全外ケーブル構造となっている。我が国では、近年数多くの外ケーブル PC 橋が架設されており、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極めて重要な課題である。本橋では、**写真-1** に示す PC 鋼材の磁歪を応用して応力を非破壊・非接触で測定できる EM センサ (Elasto-Magnetic sensor) を使用し、我が国で初めて外ケーブルの応力測定を行った。本論文は、EM センサを用いた新設橋並びに既設橋の外ケーブル応力測定手法について記述するものである。

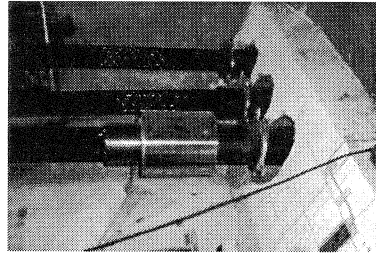


写真-1 EM センサの設置状況

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 μ を直接測定した例は少なく、AASHTO 規定の裸鋼材と鋼管の場合 0.30 (1/rad)、裸鋼材とポリエチレン管の場合 0.23 (1/rad) を参考に摩擦係数を設定しているケースが多い。特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 μ を測定した例は無く、全外ケーブル構造ではその摩擦係数 μ 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言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謳われ、特に外ケーブル構造を採用した PC 橋における PC 鋼材の維持管理は、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、下記項目を把握することを目的とし、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。

- a) EM センサの精度確認
- b) エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材とポリエチレン管の摩擦係数 μ の測定
- c) 将来の維持管理への適用性確認 (長期モニタリング)

3. EM センサの概要

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 鋼材応力を測定することが可能な装置である。外ケーブルの応力測定概要図を **図-1** に、EM センサの構造を **図-2** に示す。EM センサは、1 次コイル、2 次コイルと温度センサを含んだ円筒型コイルである。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。

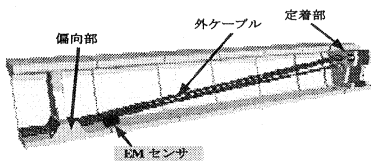


図-1 外ケーブルの応力測定概要図

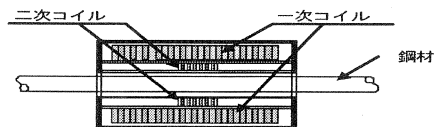


図-2 EM センサの構造

4. 摩擦係数 μ の測定

4.1 試験概要

摩擦係数 μ は、定着部・偏向部安全性確認試験用の実物大供試体を使用して測定した。試験体は、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、偏向角が最大で同形状のC3L、C4Lケーブルに対して行った。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擦係数 μ を算出することとした。

4.2 測定結果

図-3にEMセンサ計測値から算出した摩擦係数 μ と荷重計示度（緊張ポンプの荷重計示度をPC鋼材応力度に換算した値）の相関図を示す。摩擦係数 μ は、荷重計示度の増加に伴う変動も少なく、C3Lケーブルにおける5段階の荷重レベルの平均で0.098、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。ここで、一般的に設計上の摩擦係数 μ は、既往の緊張管理による実績等から0.25程度を採用している例が多い。

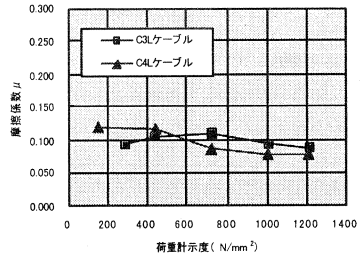


図-3 摩擦係数 (μ 値)

5. 長期モニタリング

5.1 試験概要

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行い、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応力測定に適用することができない。そこで本橋では、将来の維持管理への適用性も踏まえ、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国内で始めて採用することとした。本論文中では、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。表-1にプレインスト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。また、実橋測定試験時におけるEMセンサの配置を図-4に示す。

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

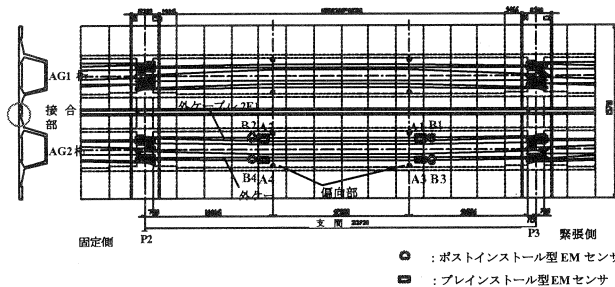


図-4 EMセンサの平面配置(実橋測定試験)

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-5に示す。最終の荷重レベルにおける計測誤差は、2E1ケーブルは緊張側(A1/B1)4.0%と固定側(A2/B2)0.7%、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。

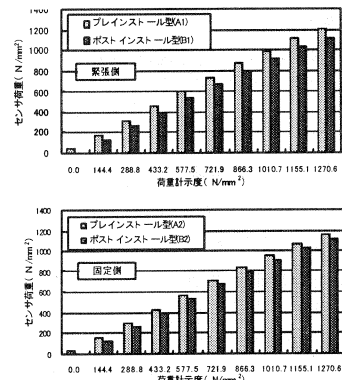


図-5 2E1ケーブルのEMセンサ値

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月から2003年1月にかけて、約240日間の計測を行った。図-6にP2~P3径間における外ケーブル応力の経時変化を示す。各緊張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40.9~41.6N/mm²、2E6ケーブルが42.6~43.6N/mm²と40N/mm²程度減少している。

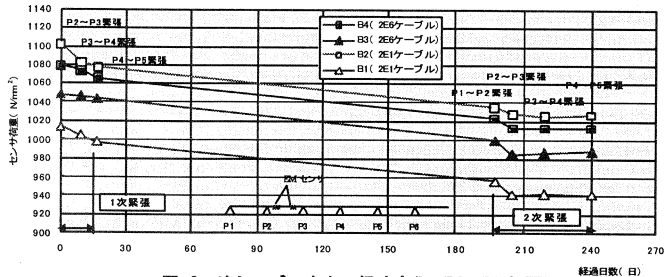


図-6 外ケーブル応力の経時変化 (P2~P3径間)

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-7は、実物大試験時のEMセンサ測定値と設計値の比較を行ったものである。各荷重レベルを平均したEMセンサ値と設計値の誤差は、C3Lケーブル緊張側6.3%、固定側5.0%、C4Lケーブル緊張側0.2%、固定側1.3%であった。C3Lケーブルにおいては、平均で5.0%を超える誤差となったが、C4Lケーブルにおいては良好な精度が確認できた。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センサに関する誤差が含まれると考えられる。

- a) 外ケーブルの初期応力 b) PC鋼材の温度特性 c) PC鋼材の磁気特性
- したがって、プレインストール型EMセンサの測定は、本試験の測定結果と特性から総合的に判断して、5.0%前後の誤差が含まれると考えられる。

2) ポストインストール型 EM センサの精度

本橋において採用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。図-5の測定結果からは、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計測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、以下の改善が必要である。

- a) ヒューマン誤差の除去 b) キャリブレーションの精度向上

6.2 摩擦係数 μ

図-3の結果から摩擦係数 μ 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 μ は、角変化の極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センサが持つ誤差の影響等を受けやすいことから、本橋の設計においては、ポリエチレン管とエポキシ樹脂塗装鋼材の摩擦係数 μ 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。

実橋における外ケーブルの緊張管理結果から、採用した摩擦係数 μ に対する妥当性の検証を行った。外ケーブルの緊張は、荷重計度を一定として、伸び量範囲を $\pm 5.0\%$ で管理している。EMセンサを設置した2E1、2E6ケーブルの伸び量は、237.0mmであり、摩擦係数 μ を0.15とした設計値237.1mmとほぼ完全に一致した結果となった。

さらに、2E1及び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-8に示す。各ケーブル伸び量の差は、多少ばらつきがあるものの、設計値に対して平均で2.0mm

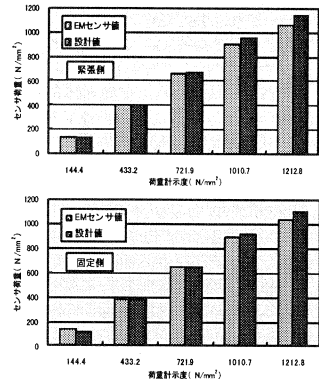


図-7 EMセンサ値と設計値の比較 (C4L)

程度不足している結果となった。一方、伸び量235.0mmと荷重計示度から、摩擦係数 μ 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、ポリエチレン管と裸鋼材(10T15.5)の組合せの場合の摩擦係数 μ は0.131~0.154¹⁾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、0.07の差が生ずる結果となった。外ケーブル平面角変化の影響等の誤差要因が摩擦係数 μ に及ぼす影響は比較的少なく、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。

6.3 長期モニタリング

図-6に示す240日間におよぶ測定期間中のポストインストール型

EMセンサ計測値は、極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(20.0N/mm²)、クリープ・乾燥収縮(20.0N/mm²)を合計した減少量とほぼ一致した結果となった。

また、長期モニタリングを行う場合には、EMセンサの耐久性が重要な要素となる。チェコ人民共和国のタボル斜張橋では、1987年に斜材ケーブルに設置されたEMセンサが現在に至る16年間継続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、耐久性にも優れ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

実物大試験並びに実橋における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センサの計測精度

ブレインストール型EMセンサは、5.0%程度の誤差が生ずる可能性があるものの、従来では計測のできなかった大容量外ケーブルのユニットとしての張力を測定することが可能であることが確認できた。

また、ポストインストール型EMセンサは、計測精度向上を図るための改善が必要であるが、既設外ケーブル等にも後付で設置することが可能となり、既設橋の維持管理へ充分適用性があることが確認できた。

2) 摩擦係数 μ 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計測精度を有しているとは言えない。しかしながら、今回の計測結果並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 μ は、0.15~0.17程度であると言える。

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、現段階では計測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計測値は安定しており、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並びに将来のPC橋の長期モニタリングへの適用性拡大に繋がれば幸いである。最後に、本橋においてEMセンサによる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 教授)」の委員の皆様にも多大なご指導、ご助言をいただきましたことに感謝申し上げます。

【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

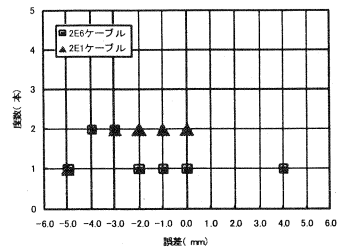


図-8 伸び量の誤差