

鉄道PCI形桁の外ケーブル張力モニタリング方式の管理方法に関する検討

西日本旅客鉄道(株) 正会員 工修 ○湯浅 康史
 神戸大学大学院 正会員 博(工) 森川 英典
 住友電工スチールワイヤー(株) 正会員 工修 中上 晋志

Abstract : The Authors et al. developed a PC external cables tension monitoring system. In the monitoring system, performance degradation due to the fracture of internal cables is detected by monitoring the changes in the external cables tension. This paper describes verifying the monitoring method based on the data measured at the actual railway bridge. The tension of the external cables were also estimated by using three-dimensional nonlinear lattice analysis. Then, the monitoring method was verified by comparing the estimated values at performance degradation with the measured values. The results confirm that the monitoring system can be applied well to actual railway bridges.

Key words : health monitoring, railway PC-I girders, external cable method, tensile force sensor

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下、PC)桁において、防食機能を有するPCグラウトが適切に充填されていない事例が確認されており¹⁾、主方向PC鋼材(以下、内ケーブル)の腐食や破断が懸念されている。グラウトの不適切な充填状態が確認された場合、一般に、グラウトの再充填や橋面防水工などにより補修されるが、鉄道橋では橋面防水工の施工が困難で、十分な耐久性の確保が難しい場合がある。また、内ケーブルの腐食の影響は外観変状に現れにくく、目視検査で変状を確認した時には、内ケーブルが多数破断している事例²⁾が報告されている。このような場合、安全性が著しく低下し、修繕に伴う長期の供用停止の可能性も示唆される。これらの状況を踏まえると、内ケーブルの腐食や破断が懸念される鉄道PC桁に対して、安全性を監視し、性能低下を確認した場合に早急に対策できる維持管理方式の構築が必要であると考えられる。

そこで、著者らはPC桁にあらかじめ補強用PC鋼材(以下、外ケーブル)を設置し、その張力変化をモニタリングすることによって内ケーブル破断に伴う性能の低下を検知するとともに、性能の低下時には外ケーブルの再緊張によって速やかに補強する維持管理方式(外ケーブル張力モニタリング方式)の開発を行っている。これまでに、実橋梁を模擬した1/2スケールの大型供試体を用いた実験により内ケーブルの破断による性能低下が検知可能であることを確認し、また、ファイバーモデルを用いた解析により外ケーブル張力モニタリング方式の有効性について検証を重ねてきた。これら検証を踏まえて、実橋梁における適用性およびモニタリング方法の検証を目的として、既設鉄道PCI形桁を対象に試験施工を実施している³⁾。

本論文は、試験施工された橋梁において計測された外ケーブル張力に基づいて、モニタリングの管理方法について検討を行ったものである。

2. モニタリングの概要および計測結果

2.1 対象橋梁の概要³⁾

対象橋梁は、昭和40年代に施工されたPCI形複線4主桁である。橋梁一般図および橋梁諸元を図-1、表-1にそれぞれ示す。対象橋梁は1主桁あたり上縁定着2本、端部定着4本の計6本の内ケーブルが配置されている。対象橋梁では下フランジ下面やシースに沿ったひび割れや削孔目視調査からグラウト充填が不適切な箇所が確認されており、これら変状に対する補修を行ったうえで、平成25年3月に外ケーブル張力モニタリン

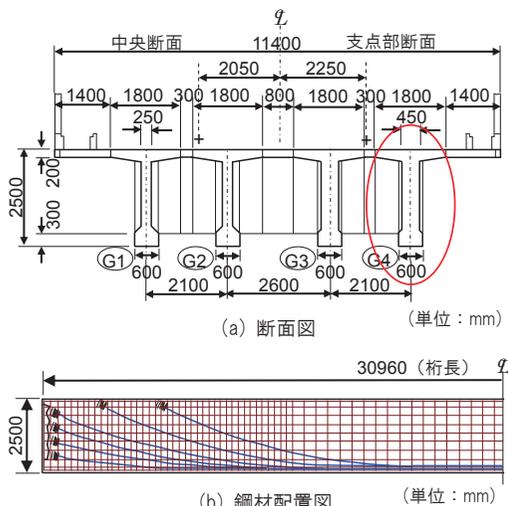


図-1 橋梁一般図

表-1 橋梁諸元

項目		緒元
スパン		30.2m
曲線半径		∞ (直線)
コンクリート	設計基準強度	400kgf/cm ²
	主ケーブル	12-φ12.4mm, SWPR7A
PC鋼材	横締めPC鋼棒	SBPR95/110, φ24mm, φ30mm



写真-1 外ケーブルの設置状況

グ方式の適用を行った。外ケーブルの設置状況を写真-1に示す。外ケーブルは各主桁の左右に、9本のポリエチレン被覆内部充填型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線から構成されるマルチストランドケーブル(9S15.2B)を配置した。また、現段階ではプレストレスの低下が生じておらず、外ケーブルの緊張は不要と考えられるが、モニタリングにおいてたわみなどの桁の変形により、外ケーブル張力を変化させる必要があるため、外ケーブルの有効緊張力は $0.1P_u$ (P_u : PC鋼材の引張強度の規格値)とした。本論文ではG4桁を対象として検証を行った。

2. 2 モニタリング方法

外ケーブル張力のモニタリング方法には、死荷重載荷状態での外ケーブル張力をモニタリングする方法と列車通過時の外ケーブル張力増分をモニタリングする方法が考えられる。死荷重載荷状態でのモニタリング方法は、温度変化に起因して桁が伸縮し、外ケーブル張力も変動するなかで、内ケーブルの破断を評価することが困難と考え、列車通過時の外ケーブル張力増分をモニタリングする方法を検討する。

本モニタリングの基本概念は、内ケーブルの破断本数が増加する過程において、一定本数以上の内ケーブルが破断すると主桁に曲げひび割れが発生し、たわみや外ケーブル張力が増加するため、列車通過時の外ケーブル張力増分を継続的に監視して、この変化を検知しようとするものである。したがって、管理指標は列車通過時の外ケーブル張力増分 ΔT とし、モニタリングは計測値 ΔT_M と閾値 ΔT_A とを比較することにより評価することとした。モニタリング方法の概要を表-2に示す。計測列車は乗車率などにより計測値にばらつきを生じる可能性があるが、計測・監視が継続的に可能な営業列車を対象とした。また、曲げひび割れが生じた主桁の直上に列車が通過した時に、その主桁の外ケーブル張力増分が最も大きくなると考えられるため、各主桁の性能低下の評価は各主桁に設置した外ケーブルの張力増分によって行うこととしている。

2. 3 計測システム

外ケーブル張力の計測は、動的計測が可能である図-2に示す磁歪式の張力センサーを、図-3に示す位置に配置して、列車通過予定時刻に自動的に計測する方法で行った。このセンサーは計測対象の強磁性体の応力が増加すると、強磁性体内の磁界が減少するという応力磁気効果を原理としており、図-2に示す永久磁石により一定磁界を発生させ、PC鋼材の応力によって変化する磁界を磁界検出センサーにて計測し、張力を算出するものである⁴⁾。なお、本センサーは単一のPC鋼材のみを計測対象とするため、マルチストランドケーブルの9本のうち1本を代表値として計測している。張力センサーを含む本橋における計測システムの

表-2 モニタリング概要

項目	概要
検出目標	主桁の曲げひび割れ
管理指標	列車通過時の外ケーブル張力増分 ΔT
評価方法	$\Delta T_M < \Delta T_A$: 健全
対象列車	営業列車
各主桁の評価	各主桁の外ケーブル張力増分

ここに、 ΔT_M : 計測値, ΔT_A : 閾値

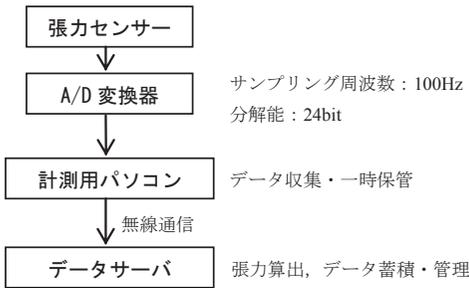


図-4 計測システム構成

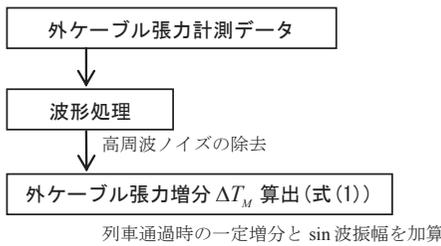


図-5 管理指標の算出手順

構成を図-4に示す。なお、分析の対象はG4支間中央部に設置したセンサーとした。これは、支点部に設置した張力センサーは、偏向部における摩擦の影響により列車通過時の外ケーブル張力変動が微小で計測が困難であったためである。

2. 4 列車通過時の外ケーブル張力増分 ΔT_M の算出方法

列車通過時の外ケーブル張力 $T_M (T_{M1}, T_{M2}, \dots, T_{Mn})$ の計測データから管理指標である外ケーブル張力増分 ΔT_M (以下、張力増分) を抽出する必要がある。張力増分 ΔT_M の算出手順を図-5に、列車通過時の計測結果の一例を図-6に示す。列車通過時には外ケーブル張力が増加する挙動が認められ、外ケーブル張力の波は周波数分析の結果から0.5Hz以下の波と3.0~3.5Hzの波で構成されることを確認している。一方、列車通過がない状態においても、ノイズの影響と考えられる張力変化が生じていることが認められた。そこで、張力増分 ΔT_M の算出にあたって、はじめに列車通過時の外ケーブル張力に、図-7に示す特性のローパスフィルタを用いた波形処理を行った。なお、この波形処理が計測値に影響を及ぼさないように、カットオフ周波数を4Hzとして高周波帯域のみの波を低減している。さらに、計測データから張力増分 ΔT_M を抽出する処理においてもノイズの低減を目的に、以下の式(1)を用いた。

$$\Delta T_M = \mu_{TM} + \sigma_{TM} \cdot \sqrt{2} \tag{1}$$

μ_{TM}, σ_{TM} は、それぞれ $T_M (T_{M1}, T_{M2}, \dots, T_{Mn})$ の平均値と標準偏差を表す。列車通過時の外ケーブル張力波

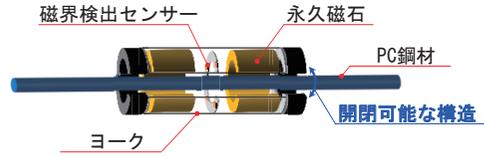


図-2 張力センサーの構造概要

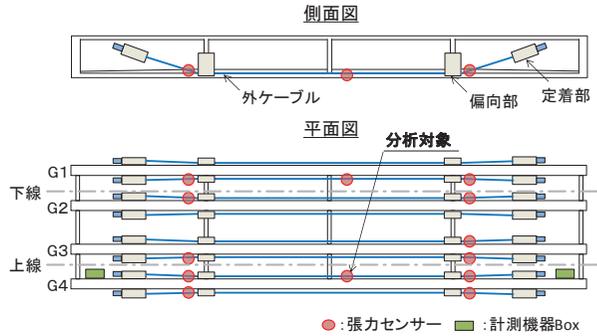


図-3 張力センサー配置図

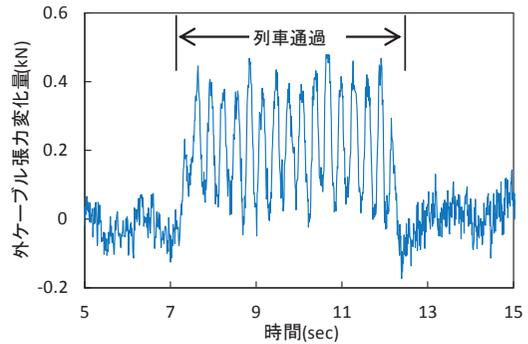


図-6 列車通過時の外ケーブル張力変化量

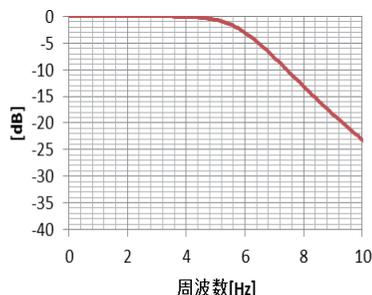


図-7 ローパスフィルタ特性

表-3 計測データ諸元

項目	諸元
張力センサー	G4桁 支間中央位置
計測期間	2014.12.19~2015.2.13(54日)
計測対象列車	上り列車 車両種別①(16両編成) : 6本/1日 車両種別②(8両編成) : 1本/1日

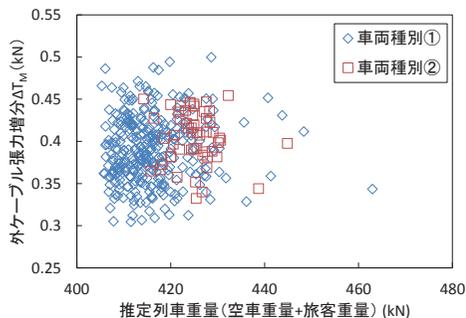


図-10 推定列車重量と外ケーブル張力増分の関係

形は、列車通過時刻内で一様に張力が増加する成分と3.0~3.5Hzの周期的に変動するsin波成分から構成されるものとして、一様な張力増分は式(1)の第1項で、sin波の振幅は標準偏差の $\sqrt{2}$ 倍となることを利用して式(1)の第2項で算出して、おのおのを加算した。本処理を適用した場合の一例を図-8に示す。

2. 5 計測結果

計測データの諸元および上り線列車通過時のG4桁の張力増分 ΔT_M の頻度分布を表-3、図-9にそれぞれ示す。張力増分 ΔT_M の計測値は概ね正規分布に従い、平均値は0.393kN(応力: 2.8N/mm²)と非常に小さく、標準偏差0.038kNのばらつきが発生する結果となった。モニタリング管理においては、健全状態でのばらつきが管理上重要となることから、ばらつきの要因となりうる列車重量およびノイズとの関係について、検証を行った。図-10に推定列車重量と張力増分 ΔT_M の関係を示す。なお、推定列車重量は車両種別ごとの空車重量と乗車率から推定した旅客重量を加算して推定した。列車重量と張力増分 ΔT_M とは比例関係になると考えられるが、図-10を確認すると、明確な正の相関が認められなかった。これは、列車重量の変動が小さく、別のばらつきの要因が支配的であるためと推察される。次に、ノイズの影響について検討する。列車通過時間(約5秒)に発生しうるノイズを評価するため、列車が通過していない状態の5秒間の外ケーブル張力データを無作為に100波形抽出した。その後、図-7のフィルタ処理後の張力の頻度分布を図-11に示す。ノイズは正規分布の性状を示しており、その標準偏差は0.055kNであった。列車通過時の張力増分の標準偏差(0.038kN)より大きい値となっているが、張力増分 ΔT_M は式(1)の適用により、ばらつきが幾分か低減されているためと考えられる。これらから、張力増分 ΔT_M のばらつきの主要因はノイズであると推察される。

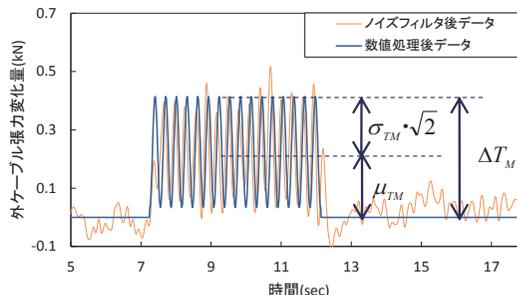


図-8 データ処理の一例

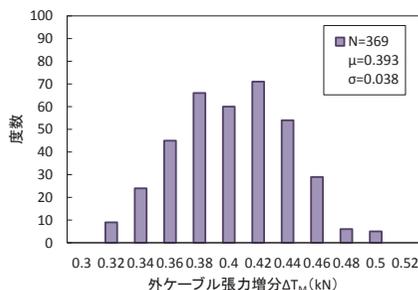


図-9 外ケーブル張力増分の頻度分布

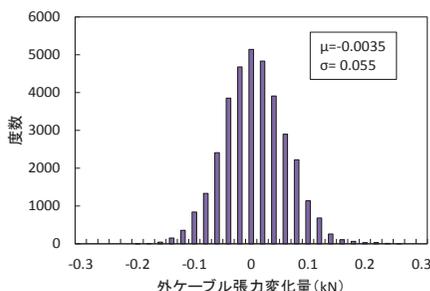


図-11 ノイズによる外ケーブル張力変化の頻度分布

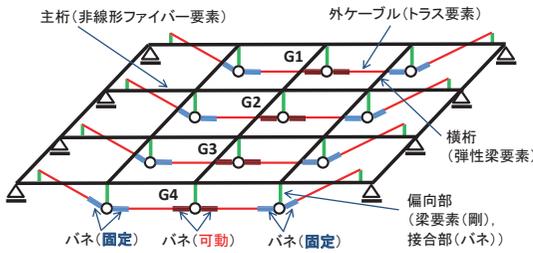


図-12 解析モデルの概要

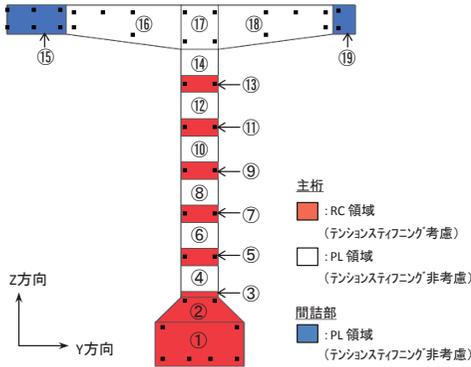


図-13 主桁ファイバー要素分割図

3. 閾値の設定に関する解析的検討

閾値 ΔT_A の設定にあたって、これまでの開発過程で検討した解析方法⁵⁾を用いて、内ケーブルの破断による外ケーブル張力の変化を推定する。解析は、ひび割れ発生に伴う剛性低下を表現するため、主桁にファイバー要素を用い、図-12に示す3次元非線形格子解析により行った。主桁のファイバー要素の方向は橋軸方向とし、1つの線要素の断面は図-13に示すように、部位や材料特性が異なる19の領域に区分したあと、さらに各領域をY方向、Z方向にそれぞれ3分割、7分割した範囲とした。外ケーブルは主桁との平面保持が成り立たないことから、主桁とは独立したトラス要素でモデル化した。また、2.3計測システムで示したように、外ケーブルの偏向部で摩擦が生じていたため、偏向部と外ケーブル間のバネ要素を固定とした。内ケーブルの破断については、図-14に示すモデルで表現した。これは、破断に伴うプレストレスの減少を 65ϕ (ϕ : PC鋼材の換算直径) の区間において2次放物線で与え、ファイバー要素への適用にあたり、面積Aと面積Bとが同等となる 30ϕ の位置に節点を設けて、この区間のプレストレスをゼロとしてモデル化したものである。解析では、内ケーブルの破断位置をG4桁の支間中央とし、内ケーブルを4,5,6本と破断させた場合の解析を行い、死荷重時と列車荷重載荷後の外ケーブル張力変化量を出力した。

解析の結果、内ケーブルの破断本数が5本の段階で、G4主桁下面の引張応力が曲げ引張強度を超過し、ひび割れが発生する結果となった。内ケーブルの破断本数と外ケーブル張力変化量の関係を図-15に示す。列車通過時の中央部の外ケーブル張力増分は、曲げひび割れ発生前は1.10kNで、曲げひび割れ発生後、内ケーブルが5, 6本と破断した時にそれぞれ1.37kN, 1.51kNに増加すると評価された。

閾値は曲げひび割れ発生時(内ケーブルの破断本数5本)の外ケーブル張力増分を基準に設定することとした。なお、解析における外ケーブルの張力増分は、軌道剛性や地覆や高欄などの付帯物の剛性、支承状況が実構造物と異なるため、計測値と差異が生じている。このため、閾値 ΔT_A は、曲げひび割れ発生時の外ケーブル張力増分の変化率 $(1.25=1.37/1.10)$ に計測値の平均値 (0.393kN) を乗じて 0.491kN と設定した。

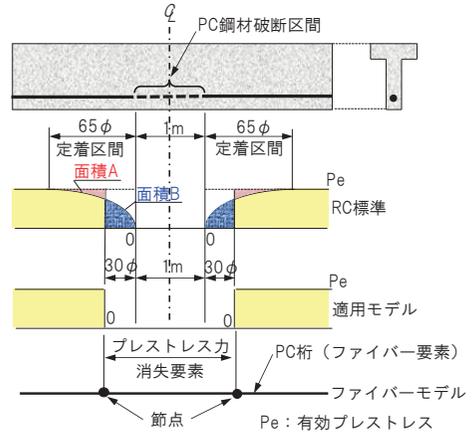


図-14 内ケーブル破断モデル⁵⁾

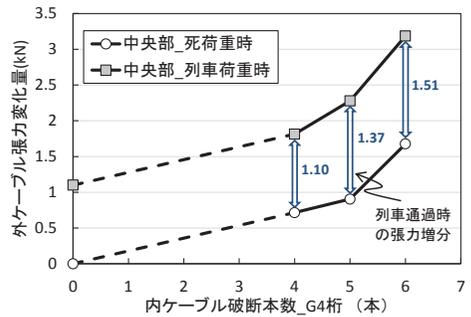


図-15 内ケーブル破断本数と外ケーブル張力

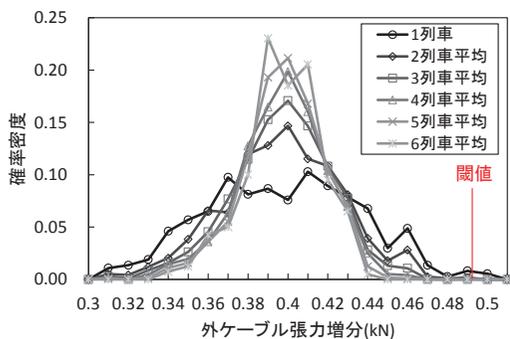


図-16 平均化した張力増分の頻度分布

表-4 計測値の閾値超過に関する検討結果

平均化数 m	組合せ数 C	張力増分 ΔT_p (kN)			閾値の 超過確率 P(x) (%)	再現 期間 t (年)
		デー タ数 n	平均値 μ	標準 偏差 σ		
1	7	369	0.393	0.038	0.60	0.5
2	21	1171	0.392	0.030	0.053	5.2
3	35	1979	0.392	0.025	0.0059	46
4	35	1989	0.392	0.022	6.7×10^{-6}	408
5	21	1196	0.392	0.020	7.6×10^{-7}	3604
6	7	399	0.392	0.018	8.8×10^{-8}	30990

m: 平均化する張力増分の数, C: 同日に計測した7つの張力増分のmに応じた組合せ数 (ex. m=2の場合 $C_2 = 21$), P(x): 正規分布と仮定して算出した閾値の超過確率, t: 1日1回モニタリング評価する場合の、閾値超過が再び生じる平均期間

4. 管理方法の検討

計測値のばらつきにより、閾値を超過する確率が高いと、管理上の問題となるため検証を行った。

2. 5計測結果で示したように、計測値はノイズによると考えられるばらつきを有しており、閾値の超過確率が大きくなるのが想定されたため、計測値を平均化してばらつきを低減する方法も併せて検討した。なお、平均化には同日に計測した7列車のうち2~6列車分の張力増分を平均するケースについて検討した。外ケーブル張力増分の確率分布を図-16に、計測値の閾値超過に関する検討結果を表-4に示す。1列車ごとに張力増分と閾値を比較する方法では、閾値の超過確率は0.6%、再現期間は0.5年となり、誤判定が比較的多くなる。一方、平均化する数を増やすごとに、計測値のばらつき、閾値の超過確率が小さくなり、管理として5年に1回程度の誤判定を許容するものと考え、2列車以上を平均化することで実用可能となる結果となった。

5. 結論

実橋で計測された列車通過時の外ケーブル張力増分に基づいて、PC桁の性能低下をモニタリングする管理方法について検討を行った。以下に、得られた主な知見を示す。

- ・外ケーブル張力増分の計測値は小さく、ノイズの影響により一定のばらつきを有していることを確認した。
 - ・解析の結果から、曲げひび割れ発生時の外ケーブル張力増分の変化量は小さいと評価された。
 - ・1列車ごとの外ケーブル張力増分を管理する方法は、閾値を超過する確率が高く運用困難と推察された。
- また、数列車を平均化することにより、閾値の超過確率を低下させることができ、十分実用可能であると考えられる。

本論文をまとめるにあたり、「持続可能な鉄道コンクリート構造物に関する検討委員会」((公社)日本材料学会)の委員各位より多数のご助言を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、睦好宏史：PCグラウトの現状と問題点、プレストレストコンクリート、Vol.48, No.2, 2006.3
- 2) 小林憲一ほか：妙高大橋のPCケーブル破断調査と対策、橋梁と基礎、vol.45, No.9, pp.32-39, 2011.9
- 3) 村田一郎ほか：鉄道PCI形桁のケーブル破断を想定した維持管理、プレストレストコンクリート、Vol.55, No.6, 2013.11
- 4) 木戸俊郎ほか：応力磁気効果を利用したPC鋼材の緊張力測定装置の開発、資源・素材学会2008、pp207-208、2008.10
- 5) 村田一郎ほか：PCI形桁の有効プレストレス変動に対する外ケーブルモニタリングシステムの有効性に関する解析的研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文集、vol.11, pp.177-184、2011.10