

導電塗料を用いた PC 桁の曲げひび割れ検知システム

永坂 亮介* 仁平 達也* 岡本 大*

The Detection System for Bending Cracks of Railway Prestressed Concrete Beams
by Electro-conductive Paint

Ryosuke NAGASAKA Tatsuya NIHEI Masaru OKAMOTO

The prestressed concrete beams has a possibility of bending cracks on the bottom surface of the girder due to the breakage or deterioration of PC steel material caused by poor grout filling, etc. We are investigating a crack detection method using conductive paint for the purpose of detecting the bending cracks and specifying the location where they occur. In this paper, we report that confirmed the crack detection performance of the conductive circuit by the load test. In addition, we performed design calculations that reproduced the stress state at the time of application for the existing PC girder, grasped the residual strength of the PC girder when bending cracks occurred, and then constructed a monitoring system using conductive paint to the actual structure.

キーワード：導電塗料，ひび割れ検知，モニタリング，プレストレストコンクリート桁

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート（以下、PC）桁では、施工時においてシース管内にグラウト充填不良が発生した場合、経年により PC 鋼材が腐食・劣化し破断に至る事例が報告されている¹⁾（図 1）。このグラウト充填不良は、鉄道構造物において、約 20% のシース管に発生しているという報告²⁾もある。

PC 桁は、ひび割れを許容しない構造であるが、PC 鋼材の破断により曲げひび割れ耐力が低下すると、桁下面において列車通過時に開閉を伴うひび割れが瞬間的に発生する可能性がある（図 2）。このひび割れは、列車通過後にひび割れが閉じるため、目視で発見することが難しい。また、河川橋りょう等では、ひび割れ点検に足場設置が必要となり手間と費用を要する。さらに、ひび割れ発生位置を予め推定することも、グラウト充填不良の発生位置が特定できないため、困難である。

以上の背景から、PC 桁において、変状の初期症状であるひび割れとその位置を遠隔地から早期に検知することができれば、桁の耐力が著しく低下する前の段階で、変状状態や供用環境を踏まえた補修・補強を講じることができ、維持管理上有益である。これらのことから、PC 桁のひび割れ発生位置を特定できるモニタリングシステムの開発が望まれている。

これまで著者らは、導電性を有する塗料（以下、導電塗料）を用いて、鉄道維持管理標準³⁾に示される、健全度判定の目安となる 0.2mm 程度のひび割れを検知す

* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

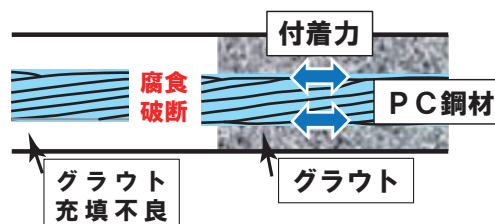


図1 シース管内のグラウト充填不良

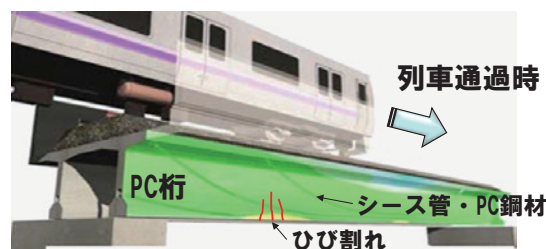


図2 列車通過時に PC 桁に生じるひび割れ

る手法を提案している⁴⁾。

そこで本稿では、導電塗料を用いて PC 桁のひび割れを遠隔地から検知できるモニタリングシステムの開発・実用化を目的とし、ひび割れ発生位置の検知手法および動的なひび割れの検知精度について検討したうえで、システムを実構造物へ構築し、施工性の把握や計測機器の動作確認等を行った。以下にその内容を報告する。

特集：構造物技術

2. ひび割れ検知手法の概要

2.1 導電塗料の構成とひび割れ検知の原理

導電塗料の構成は、既往の研究⁴⁾より、図3に示すような、塗布幅が5mmの3層構造とした。下塗り材は、コンクリートと導電塗料を絶縁し、表面の不陸を調整する役割がある。中塗り材は、銀を含有した導電塗料で、通電させることで、電気回路を構築できる。上塗り材は、紫外線等の劣化要因から中塗り材を防護する役割がある。

ひび割れは、導電性回路の抵抗値を計測し、①ひび割れの発生→②塗料断面積の減少→③回路抵抗値の増大→④ひび割れの検知、という原理で検知する。

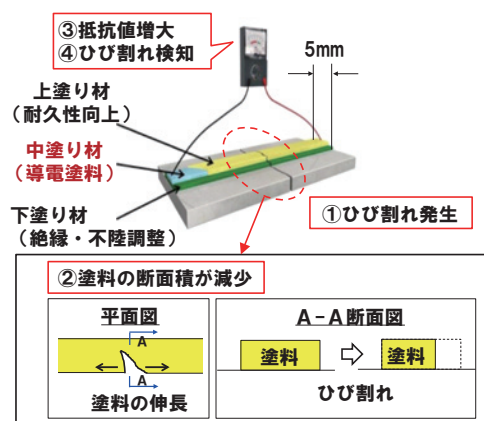


図3 導電性回路の構成とひび割れ検知の原理

2.2 ひび割れ位置を特定する導電性回路

ひび割れ発生位置は、図4に示すような、2種類のひび割れ検知性能をもつ導電性回路を組み合わせ、コの字に構築することで特定することとした。なお、図の「検知部：赤色」は、ひび割れを検知する性能を有し、「通電部：緑色」は、ある程度のひび割れ開口に対しても、導電性を損なうことなくひび割れを検知しない性能を有することとした。

たとえば、図4の桃色の位置にひび割れが発生した場合、回路③ではひび割れを検知せず、回路②でひび割れを検知することになる。ここでは、回路②でひび割れを検知した場合、検知部を塗布した範囲（桃色）にひび割れが生じたと判定する。すなわち、各回路にひび割れ検知範囲を設定し、その抵抗値を計測することで、ひび割れの発生範囲を特定する手法である。

導電性回路の抵抗値を計測・記録するためには、回路を計測機器へ接続する必要がある。接続は、コンクリート表面の塗料と金属ピズを介し、計測機器側のリード線と接続する方法とした（図5）。

なお、塗料との接続箇所はシステム上の弱点箇所となる可能性があり、不具合が発生した場合、迅速に現状を把握し修復する必要がある。仮に、通電部にリード線を用いて塗料との接続箇所を支間中央付近に設けた場合、足場の設置が必要になる等、確認が困難になると想定されることから、通電部には導電塗料を用いた。

3. 導電性回路のひび割れ検知精度

3.1 検討の概要

前節で考案した導電性回路における検知部には、既往の研究で開発した塗料A⁴⁾を用いることとした。一方、通電部は、容易に破断しない性能が必要となる。そのため、伸び性能の向上を目的とし、主材料をウレタン樹脂とした塗料Cと伸縮性の高いウレタンテープ上に塗料Cを塗布した回路（以下、塗料C+T）について検討した。

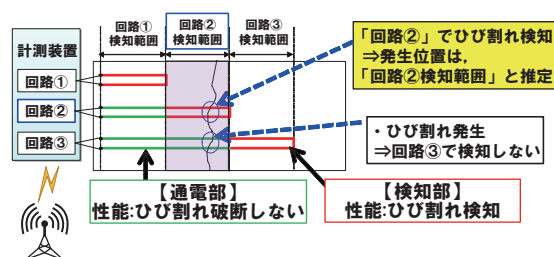


図4 ひび割れ位置を特定する導電性回路の構成

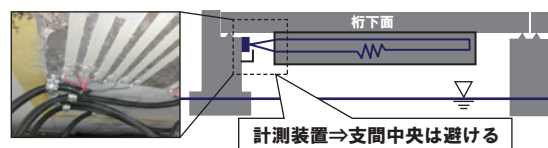


図5 塗料と回路の接合部

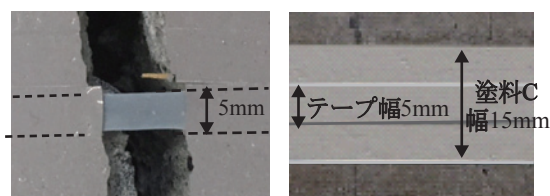


図6 導電塗料Cとウレタンテープ

なお、塗料AおよびCの塗布幅は5mmとしたが、塗料C+Tは図6に示すように、より強い伸び性能を期待して、幅5mmのウレタンテープの両側に塗料Cを塗布し、全幅15mmの導電性回路とした。

2章で考案したひび割れ位置の推定手法の有効性を確認するため、静的荷重試験（3.2節）、動的荷重試験（3.3節）を実施し、統計的な分析を行い、検知部と通電部のひび割れ検知精度を評価した。また、列車通過時の開閉を伴うひび割れを想定し、導電性回路の抵抗値の変動について考察した。

3.2 静的一軸引張試験によるひび割れ検知精度

3.2.1 試験概要

図7に、静的一軸引張試験の概要を示す。試験体は、

外形 100 × 100 × 300mm の角柱コンクリート（圧縮強度：40N/mm² 程度）の中心に鉄筋（D16, SD345）を配置したものである。図 7 (a) に示すように、1 試験体あたり 4 面中、3 面に対して検知ひび割れ幅を測定できるような π ゲージを設置し、各面に 3 ライン（合計 9 ライン）の導電性回路を構築した。本試験では、ひび割れにより導電塗料が通電しなくなった時点の π ゲージの値を検知ひび割れ幅とした。表 1 に検討に用いた導電塗料の目的、材質、想定する検知ひび割れ幅を示す。なお、塗布方法はスプレーガンによる吹付けとした。

3.2.2 試験結果および考察

表 2 に各導電性回路における検知ひび割れ幅の平均値 μ および標準偏差 σ を、図 8 に検知ひび割れ幅の度数分布を示す。塗料 C は、塗料 A に比べ検知ひび割れ幅の平均値と標準偏差が増加した。これは、塗料 C の靱性が高いことから、図 7 (b) に示すように、ひび割れに対してある程度伸長しながら破断したことが考えられる。塗料 C+T は、検知ひび割れ幅が最も大きくなった。これは、ひび割れ開口に対してテープが伸長し、テープ上に塗布した塗料 C が導電性を保持したためと考える。図 8 より検知ひび割れ幅は、概ね平均値を中心とした対称の分布であることから正規分布と仮定し、以下の検討を進めた。

図 9 に各回路の検知ひび割れ幅を正規分布として示す。塗料 C の $\mu - \sigma$ (Δ 0.26mm) は塗料 A の $\mu + \sigma$ (\square 0.31mm) の値より小さくなった。よって、0.2mm 程度のひび割れが発生した場合、塗料 C のみを塗布した回路は、破断する可能性があると考えられる。その発生確率（斜線部の面積）は、16%程度であった。一方、塗料 C+T における $\mu - 2\sigma$ (\diamond 0.40mm) の発生確率は、2%程度と推定できる。以上のことから、塗料 C+T は、平均幅 2mm 程度のひび割れに対しても、導電性を損なうことなく、通電部として有効に機能すると考えられる。

3.3 動的载荷試験によるひび割れ検知精度

3.3.1 試験概要

PC 桁における列車通過時の開閉を伴う、動的なひび割れを想定した場合、導電塗料は通電と一時的な破断を繰り返し、ある回数を越えた時点で破断すると考えられる。そこで、導電性回路がひび割れ開閉の繰返しに抵抗できるかを確認するため、RC 梁試験体の下面に導電性回路を構築し、動的载荷試験を行った。

図 10 に動的载荷試験の状況を示す。試験体は、支点間距離が 1900mm で、純曲げ区間は 650mm である。コンクリートの圧縮強度は 45N/mm² であった。繰返し周期は、列車の軸距と走行速度を想定して 1.5Hz とし、総繰返し回数を 200 万回とした。载荷は荷重制御で、最大荷重を列車通過時の設計応力程度である 200N/mm² に

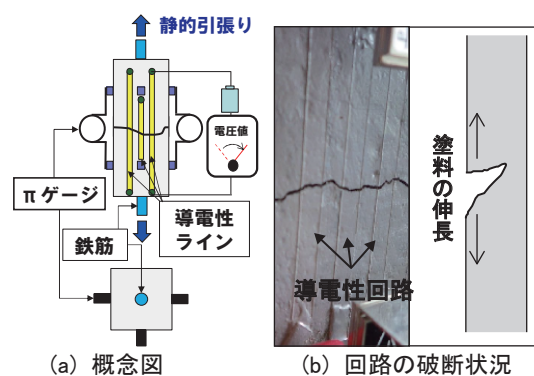


図 7 静的一軸引張試験の概要

表 1 導電塗料の目的、材質、想定検知ひび割れ幅

導電塗料	目的	材質	検知ひび割れ幅
塗料 A ¹⁾	・検知部に適用	銀、 ポリエステル樹脂	0.2mm 程度
塗料 C	・通電部に適用 ・塗料のみで抵抗	銀、ウレタン樹脂	0.2mm 以上 (想定)
塗料 C+T	・通電部に適用	銀、ウレタン樹脂 ウレタン樹脂テープ	0.2mm 以上 (想定)

表 2 検知ひび割れ幅の計測値

導電塗料	検知ひび割れ幅 (mm)					
	σ	$\mu - 2\sigma$	$\mu - \sigma$	μ	$\mu + \sigma$	$\mu + 2\sigma$
塗料 A	0.10	-	-	0.21	0.31	0.42
塗料 C	0.43	-	0.26	0.69	-	-
塗料 C+T	0.87	0.40	-	2.13	-	-

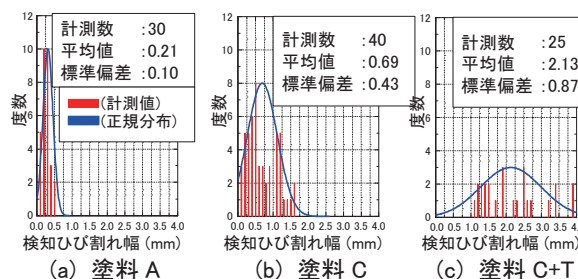


図 8 検知ひび割れ幅の度数分布

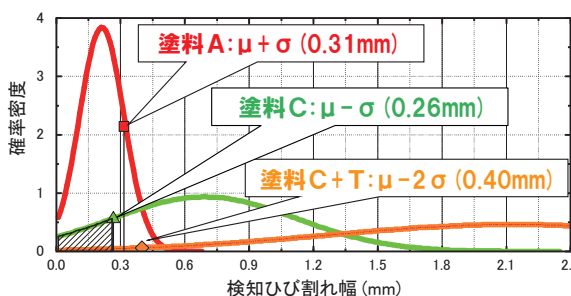


図 9 検知ひび割れ幅の正規分布

設定し、試験体下面にひび割れの開閉を発生させる繰返し载荷とした。

図 11 および図 12 に試験体下面の導電性回路の塗布状況と π ゲージの設置状況を示す。前節を踏まえ、検知部に塗料 A、通電部に塗料 C+T を用いて、コの字形に回路を構成し、同一検知範囲に 3 ライン構築した。

特集：構造物技術

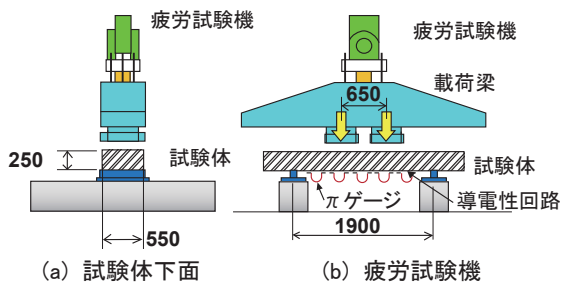


図 10 繰返し疲労試験の状況

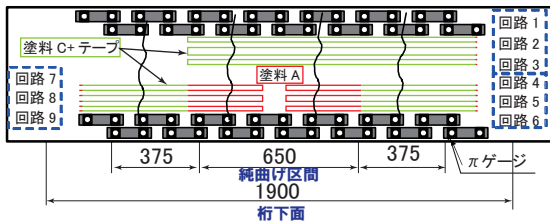


図 11 試験体下面の導電性回路とπゲージの位置

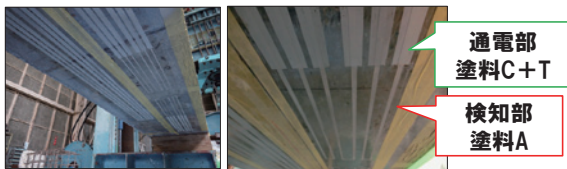


図 12 導電性回路の構築状況

回路 1～3 は通電部のみで回路を構成した。また、回路 4～9 は純曲げ区間を検知部とし、それ以外を通電部とした。これは、純曲げ区間に最初にひび割れが発生することを想定したためである。

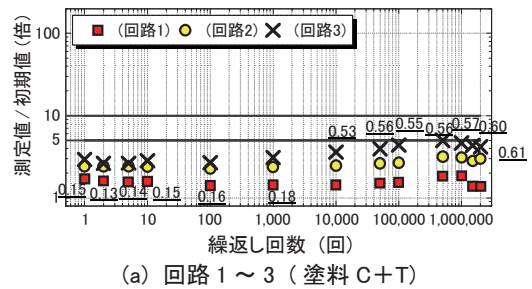
3.2.2 試験結果および考察

図 13 に導電性回路の抵抗値の増加倍数（＝測定値 / 初期値）と繰返し回数の関係を示す。図中の数値は、試験体下面のπゲージにより計測した、最大ひび割れ幅である。初期値は未載荷時に計測した抵抗値を指す。なお、繰返し載荷 1 回目の時点で、抵抗値の増加倍数が 1 以上となるのは、処女載荷により試験体下面にひび割れが発生し、抵抗値が増加したためである。

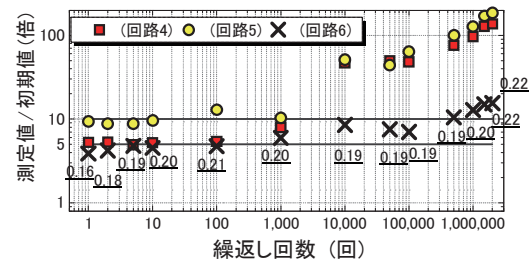
図 13 (a) より、回路 1～3（塗料 C+T のみ）に発生したひび割れ幅は、200 万回時点において 0.6mm 程度となった。また、抵抗値の増加倍率は 5 倍以下となり急激な増加は見られなかった。

このことから、塗料 C+T は 200 万回繰返し載荷において、0.6mm 程度のひび割れが開口した場合でも、導電性を保持できるものとする。

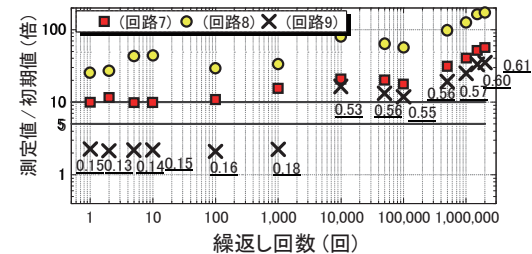
図 13 (b) および (c) より、回路 4～9（塗料 A と塗料 C+T の組合せ）に発生したひび割れは、繰返し回数 200 万回時点において、0.2mm 程度となった。また、抵抗値の増加倍数は、各回路で 5 倍以上となり、繰返し回数 1 万回を超えた時点で、大きく増加する傾向が見ら



(a) 回路 1～3（塗料 C+T）



(b) 回路 4～6（塗料 A と塗料 C+T の組合せ）



(c) 回路 7～9（塗料 A と塗料 C+T の組合せ）

※下線値：ひび割れ幅の最大値

図 13 各回路抵抗の測定値 / 初期値と繰返し回数

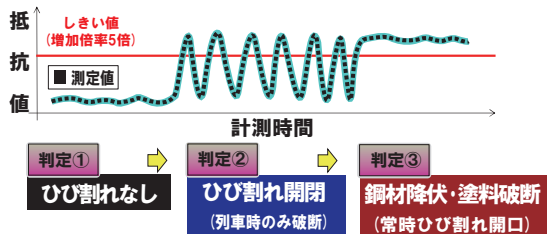


図 14 抵抗値の経時挙動と推定ひび割れ判定例

れた。また、同様な回路構成であっても、抵抗値の変化がばらつく傾向がみられた。

これらのことから、導電性回路の抵抗値が初期値の 5 倍となる時点をしきい値とすることで、動的なひび割れを精度良く検知できることを確認した。

4. モニタリングシステムの概要

4.1 モニタリングによるひび割れ性状の判定

モニタリングシステムにおけるひび割れ判定のしきい値は、3 章の結果より導電性回路の抵抗値の増加倍率とし、その値を 5 倍とした。また、計測機器の不具合によるひび割れの誤検知に対応するため、同一範囲に 3 ライン構築することとした。これにより、1 ラインがひび割

れ判定となった場合でも、残りの2ラインの抵抗値を確認することで、ひび割れの誤検知を判断できる。

図14に測定した抵抗値の経時挙動のイメージとひび割れ性状の判定例を示す。判定①は、抵抗値がしきい値を下回る値を推移しているため、ひび割れなしの状態と推定する。判定②は、抵抗値がしきい値の超過を繰り返すため、ひび割れが開閉している状態と推定する。判定③は、抵抗値がしきい値を超過した値を推移しているため、ひび割れが常時開口している状態または何らかの理由により回路の導電性が大きく低下した状態であると推定できる。このように抵抗値の推移をモニタリングすることで、ひび割れの性状を判定することができる。

4.2 再現設計によるPC桁の性能評価

4.2.1 検討の概要

本検討では、PC桁におけるひび割れ発生時の性能を定量的に示すことを目的に、以降に示す再現計算と前節のひび割れ検知手法を関連付けた評価方法を検討した。

再現設計とは、財産図からPC桁の諸元を読み取り、構造計算から求めた応答値が、各断面における曲げひび割れ耐力(Mc)と曲げ降伏耐力(My)を超過しないことを照査するものである。なお、本検討におけるPC桁断面の耐力算定は、鉄道コンクリート標準⁵⁾に準拠した。

対象構造物は、図15に示すPC単純箱桁で、スパン37.2mの橋りょうである。表3に再現設計の検討条件を示す。検討断面は、図15に示す5断面とした。また、PC桁において耐力低下の支配的な要因となるPC鋼材の破断本数をパラメータとし、1本ずつ破断させた条件で検討断面の照査値をまとめた。これにより、ひび割れを検知した時点を、再現設計におけるMc到達時と仮定することで、ひび割れ検知位置における、PC鋼材の破断本数を推定することができる。

4.2.2 検討結果

表4に、検討断面におけるPC鋼材の破断本数に応じた照査結果(応答値/耐力)を示す。たとえば、断面③でひび割れを検知した場合、曲げひび割れの照査を最初に満足しなくなるのは、PC鋼材が2本破断した時と推定でき、Myに至るまでには余耐力があると言える。

表5に、表4から得られた、曲げひび割れおよび曲げ降伏の照査を満足しなくなる時点におけるPC鋼材の破断本数を示す。曲げひび割れの照査は、支間中央に近い断面ほど少ない破断本数で、照査を満足しなくなる結果となった。

これらのことから、既設PC桁について、予め再現設計を実施しておくことで、ひび割れを検知した時点における、各断面の残存耐力を把握することができ、補修・補強計画の検討に有用であると考えられる。

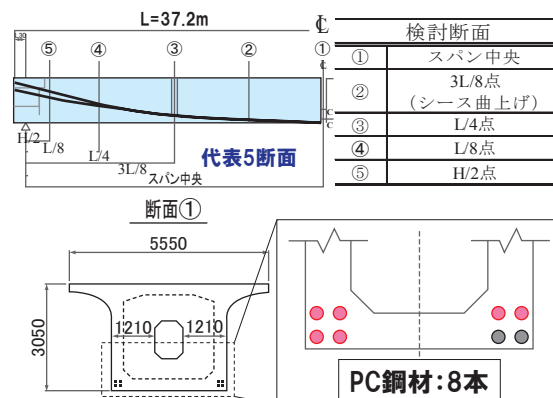


図15 対象構造物(既設PC桁)

表3 再現設計における検討条件

構造形式	単線PC単純箱形桁
橋長	38.5m (スパン37.2m)
列車荷重	EA-17
設計速度	V = 110km/h
軌道種別	スラブ軌道
施工基面幅	5.55m
桁高	3.05m (1ボックス)
PC鋼材の本数	12T15.2 (SWPR-7A) × 8本

表4 PC鋼材の破断本数に応じた照査結果

断面	PC鋼材	一本ずつ破断させる									
		破断本数	0	1	2	3	4	5	6	7	8
①	残存本数	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0
	Mc	0.64	1.60	2.58	3.60	4.65	5.69	6.75	7.84	8.97	9.7
	判定	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	My	0.75	0.85	0.98	1.15	1.39	1.77	2.46	4.03	11.24	
②	Mc	0.00	0.48	1.45	2.48	3.52	4.57	5.63	6.70	7.78	8.87
	判定	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
	My	0.65	0.74	0.84	0.95	1.20	1.52	2.10	3.42	9.27	
	判定	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×
③	Mc	0.00	0.35	1.25	2.18	3.13	4.02	4.93	5.86	6.81	7.78
	判定	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
	My	0.59	0.67	0.77	0.91	1.12	1.42	1.93	3.05	7.59	
	判定	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×
④	Mc	0.00	0.00	0.48	1.06	1.65	2.24	2.83	3.42	4.02	4.63
	判定	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
	My	0.49	0.55	0.64	0.75	0.91	1.12	1.42	1.93	3.05	7.59
	判定	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×
⑤	Mc	0.00	0.00	0.00	0.19	0.49	0.68	0.87	1.07	1.26	1.46
	判定	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×
	My	0.28	0.32	0.36	0.42	0.51	0.60	0.73	0.96	1.44	
	判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×

※Mc=0.00は、縁応力度が圧縮となる場合を示す。

表5 耐力到達時のPC鋼材の推定破断本数

断面	⑤	④	③	②	①
Mc	7	3	2	2	1
My	8	5	4	4	3

5. 実構造物へのモニタリングシステムの構築

モニタリングシステムの施工性や耐久性を含む実環境での適用性と計測機器の動作確認を目的とし、4章で再現設計を実施した既設PC桁にシステムを構築した。

特集：構造物技術

導電性回路の構成は、3章で有効性を確認した、塗料 A および塗料 C+T を組み合わせた回路とし、塗布パターンは、4章の検討断面を踏まえ、図 16 に示す通りとした。図 17 に導電塗料の塗布状況を示す。消費電力を抑えるため、列車通過時の振動を加速度センサーにより検知し、抵抗値の測定を開始する仕様とした。計測間隔は 50Hz とし、計測時間を 5 秒間とした。図 18 にデータ(抵抗値)の伝送状況を示す。得られたデータは、SD カードに保存されるとともに、FOMA 回線により基地局に伝送され、インターネット上で確認できる仕様とした。

表 6 に施工手順と施工時間を示す。システムの構築には、導電性回路の構築に 3 日、計測機器の設置および動作確認などに 2 日を要することを確認した。

システム設置(2017年4月)より8ヶ月程度経過しているが、ひび割れ判定となったデータを取得していないこと、目視点検により実際にひび割れが発生していないことを確認した。

6. まとめ

本稿では、導電塗料を用いて PC 桁のひび割れを検知するモニタリングシステムについて、開発・実用化に向けた検討を行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) 導電塗料により、ひび割れを検知する検知部と検知しない通電部を組み合わせ回路を構築することで、ひび割れ位置を特定できる手法を考案した。
- (2) 静的・動的載荷試験より、導電性回路の抵抗値が初期値の 5 倍となる時点をしきい値とすることで、動的なひび割れを精度良く検知できることを確認した。
- (3) 導電性回路の抵抗値の推移から、ひび割れ性状を判定する手法を考案した。また、ひび割れ検知位置における PC 鋼材の破断本数を推定する手法を示した。
- (4) 実構造物へモニタリングシステムを構築し、施工性を把握したうえで、システムが正常に動作していることを確認した。

今後は、季節変動による、抵抗値の変化と伝送に要する消費電力を把握するため、モニタリングを継続する予定である。

なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 小林崇, 北野勇一, 花井拓, 木村嘉富: プレストレストコンクリート工学会, 第 21 回シンポジウム論文集(2010年10月), pp.443-448, 既設 PC 桁のグラウト充填状況が PC 鋼材の腐食に与える影響
- 2) 湯浅康史, 近藤拓也, 松田好史: プレストレストコンクリー

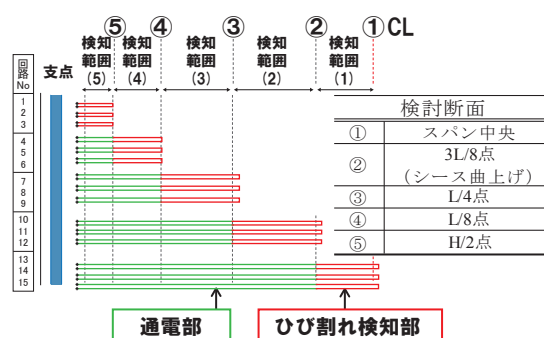


図 16 PC 桁下面の導電塗料の塗布パターン

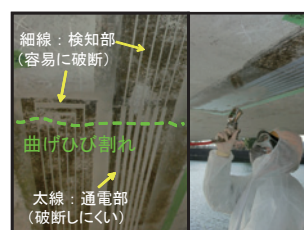


図 17 導電塗料の塗布状況

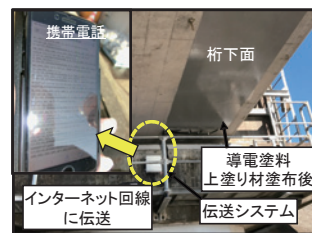


図 18 データの伝送状況

表 6 施工手順と施工時間

Step	施工手順		施工時間 (h)
	塗料の塗布作業	計測装置の設置	
1	PC 桁下面の不陸調整		2
2	下塗り材塗布		2
3	下塗り材の硬化時間		2
4	ライン取りテープの施工		2
合計 (1 日目終了)			8
5	中塗り材塗布		3
6	中塗り材の硬化時間		2
7	中塗り材の導電性確認 回路抵抗値の計測 (しきい値の設定)	導電性回路との配線接続	3
合計 (2 日目終了)			8
8	上塗り材塗布	配線の養生	2
9		列車通過時の加速度計測 (しきい値の設定)	2
10		計測装置の養生	2
11		データ伝送確認	2
合計 (3 日目終了)			8

ト工学会 Vol.58 No.1,2016年1月, 開業 40 周年を迎えた山陽新幹線 PC 桁の維持管理

- 3) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(コンクリート構造物)平成 19 年 1 月
- 4) 田中寿志, 仁平達也, 曾我部正道, 岡本大: スプレーガンを用いた導電塗料による鉄筋コンクリート表面のひび割れ検知手法, 第 14 回アップグレードシンポジウム, pp.581-586, 2014
- 5) 鉄道構造物等標準・同解説(コンクリート構造物)平成 16 年 4 月