

鉄道PC桁における導電塗料を用いた曲げひび割れ検知システムの構築

(公財) 鉄道総合技術研究所 ○永坂 亮介
 (公財) 鉄道総合技術研究所 博 (工) 仁平 達也
 (公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 博 (工) 岡本 大

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

既設の鉄道PC橋においては、施工時のグラウト充填不良などに起因したPC鋼材の腐食などにより、曲げひび割れ耐力が低下し、図-1に示すような、列車通過時の開閉を伴うひび割れの発生が懸念されている。PC桁に発生する曲げひび割れは、グラウト充填不良箇所が不明であることや、PC鋼材の破断箇所から、ある程度離れると有効プレストレスが回復することなどから、発生位置を事前に把握することは困難である。

さて、既設PC桁は、設計計算の再現（以下、再現計算）により、任意断面の曲げひび割れ耐力を把握できる。曲げひび割れ発生位置の把握は、桁の残存耐力を把握するだけでなく、変状原因を調査する非破壊検査や微破壊検査において、有益な情報になると考える。

そこで本稿では、桁下面に、ひび割れ時の通電の有無を測定する導電塗料を用いた回路（以下、導電性回路）を構築し、再現計算と関連付けた、列車通過時の曲げひび割れを検知する、モニタリングシステムを構築したので、以下に報告する。

2. モニタリングシステムの概要

これまでに開発した導電性回路²⁾は、図-2に示すように、エポキシ樹脂を主原料とした下塗り材、幅5mmの銀を含有する導電性を有する中塗り材（以下、塗料A）、および耐紫外線の向上を目的とした、アクリル樹脂を主原料とした上塗り材の3層構造のラインで構築するものである。前述のとおり、PC桁下面の曲げひび割れは、発生位置を事前に把握することは困難である。そのため、図-3に示すように、異なる検知性能を有する塗料などを組み合わせて、ひび割れ範囲が特定可能な、導電性回路を構築することとした。具体的には、ひび割れで容易に破断する範囲（以下、検知部）と、容易に破断しない範囲（以下、非検知部）を設けることで、各回路の検知範囲を設定し、ひび割れ発生範囲を特定することを想定した。また、導電性回路は計測装置を支点部付近に設置するために、コの字型に構築した。非検知部は、図-4a)に示す、じん性に優れた幅5mmのウレタンテープ上に、テープとの付着性が良い塗料Cを図-4b)に示すように、幅15mmで塗布する構成とした。なお、ひび割

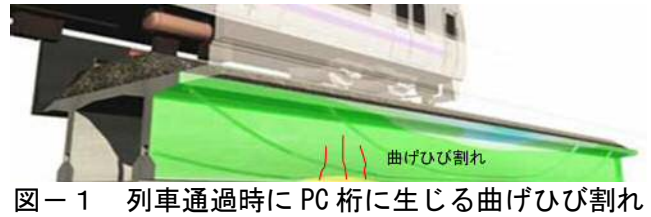


図-1 列車通過時にPC桁に生じる曲げひび割れ

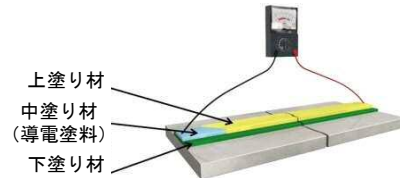


図-2 導電性回路の構成²⁾

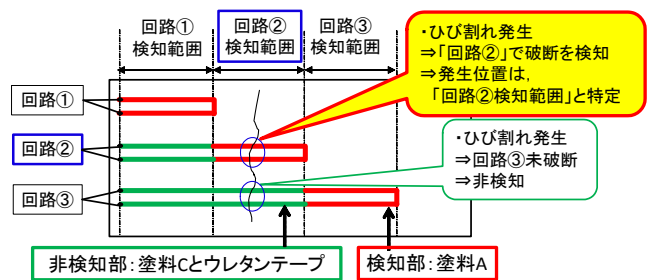
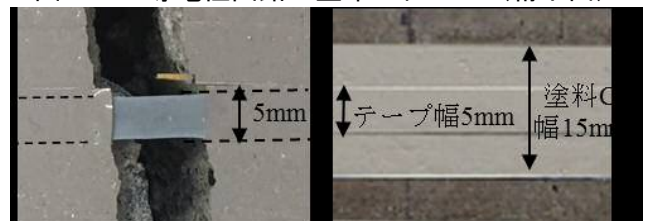


図-3 導電性回路の塗布パターン（桁下面）



a) テープのじん性 b) 回路幅

図-4 非検知部の回路構成

これまで以上に開発した導電性回路²⁾は、図-2に示すように、エポキシ樹脂を主原料とした下塗り材、幅5mmの銀を含有する導電性を有する中塗り材（以下、塗料A）、および耐紫外線の向上を目的とした、アクリル樹脂を主原料とした上塗り材の3層構造のラインで構築するものである。前述のとおり、PC桁下面の曲げひび割れは、発生位置を事前に把握することは困難である。そのため、図-3に示すように、異なる検知性能を有する塗料などを組み合わせて、ひび割れ範囲が特定可能な、導電性回路を構築することとした。具体的には、ひび割れで容易に破断する範囲（以下、検知部）と、容易に破断しない範囲（以下、非検知部）を設けることで、各回路の検知範囲を設定し、ひび割れ発生範囲を特定することを想定した。また、導電性回路は計測装置を支点部付近に設置するために、コの字型に構築した。非検知部は、図-4a)に示す、じん性に優れた幅5mmのウレタンテープ上に、テープとの付着性が良い塗料Cを図-4b)に示すように、幅15mmで塗布する構成とした。なお、ひび割



図-5 対象橋梁 PC 単純箱桁 (支間長 37.2m)

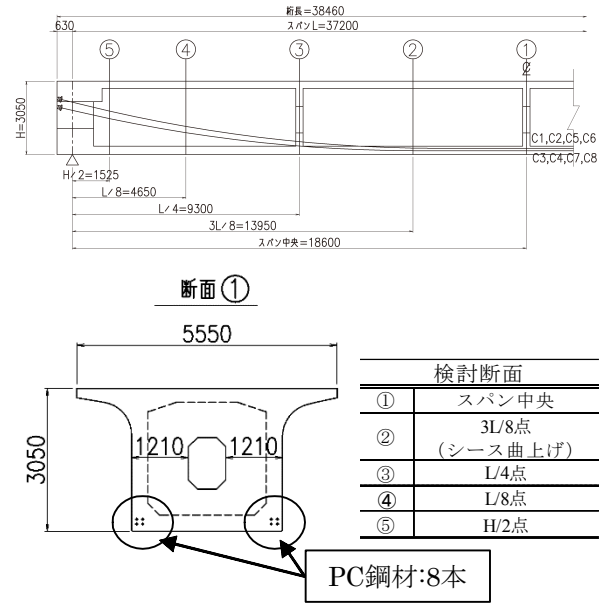


図-6 対象橋梁の検討断面

表-1 再現設計における設計条件

列車荷重	EA-17
設計速度	V = 110km/h
曲線半径	R = 3000m
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 鋼より線	12T15.2 (SWPR-7A) × 8本

れ幅の検知精度に関する、一軸引張試験により、導電性回路が破断した時点でのひび割れ幅は、検知部と非検知部で平均値(Ave)が 0.212mm, 2.13mm, 標準偏差(σ)が, 0.104mm, 0.865mmとなること、および、梁の繰返し載荷試験により、ひび割れ幅が平均値程度の場合、導電性回路の抵抗値が、初期値の5倍以上となることを確認している。また、消費電力の抑制を目的とし、システムの稼働時間を短縮するため、ひび割れの発生が想定される列車通過時にのみ作動し、ひび割れの開閉を動的に計測するシステムとした。

3. 再現計算による対象橋梁の性能把握

対象とした橋梁は、図-5に示す、PC 単純箱桁でスパン 37.2m の橋梁である。なお、再現計算で想定した応力状態が、実情と乖離しないことが望ましいため、防音壁などの付帯構造物が設置されていない橋梁を選定した。また、予め桁下面の近接目視を実施し、ひび割れなどの変状がないことを確認している。

本検討の設計条件は、表-1に示す通りとし、耐力の算定は、コンクリート標準³⁾に準拠した。なお、パラメータを、PC 鋼材の破断本数とし、PC 鋼材を1本ずつ破断させた条件で、図-6に示す各検討断面の曲げひび割れ耐力 (Mc), 曲げ降伏耐力(My), 曲げ耐力(Mu)を算出し、表-2に示すように、照査結果(応答値/耐力)を整理した。表-3に応答値が Mc~Mu に到達した時点における PC 鋼材の破断本数を示す。表-2より例えば、断面③では、ひび割れを検知した段階で、2本の PC 鋼材が破断している可能

表-2 照査結果 (応答値/照査値) 一覧

断面	破断本数 残存本数	破断本数								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
①	Mc	0.64	1.60	2.58	3.60	4.65	5.69	6.75	7.84	8.97
	判定	○	×	×	×	×	×	×	×	×
	My	0.75	0.85	0.98	1.15	1.39	1.77	2.46	4.03	11.24
	判定	○	○	○	×	×	×	×	×	×
	Mu	0.82	0.92	1.06	1.25	1.51	1.92	2.61	4.14	9.97
②	Mc	0.00	0.48	1.45	2.45	3.49	4.51	5.56	6.64	7.75
	判定	○	○	×	×	×	×	×	×	×
	My	0.65	0.74	0.84	0.99	1.20	1.52	2.10	3.42	9.27
	判定	○	○	○	○	×	×	×	×	×
	Mu	0.71	0.80	0.91	1.08	1.31	1.65	2.26	3.57	8.61
③	Mc	0.00	0.35	1.25	2.18	3.13	4.02	4.93	5.86	6.81
	判定	○	○	×	×	×	×	×	×	×
	My	0.59	0.67	0.77	0.91	1.12	1.42	1.93	3.05	7.59
	判定	○	○	○	○	×	×	×	×	×
	Mu	0.67	0.76	0.87	1.03	1.26	1.58	2.14	3.34	7.57
④	Mc	0.00	0.00	0.48	1.06	1.65	2.14	2.63	3.12	3.63
	判定	○	○	○	×	×	×	×	×	×
	My	0.49	0.55	0.64	0.75	0.91	1.12	1.46	2.12	3.96
	判定	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	Mu	0.51	0.58	0.66	0.78	0.95	1.18	1.56	2.32	4.51
⑤	Mc	0.00	0.00	0.00	0.19	0.49	0.68	0.87	1.07	1.26
	判定	○	○	○	○	○	○	○	×	×
	My	0.28	0.32	0.36	0.42	0.51	0.60	0.73	0.96	1.44
	判定	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	Mu	0.27	0.30	0.34	0.40	0.49	0.59	0.75	1.03	1.68
判定	○	○	○	○	○	○	○	×	×	

※Mc=0は、縁応力度が圧縮となる場合を示す。

表-3 各耐力到達時の PC 鋼材の破断本数

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

性が考えられる。また、表-2より端部位置の断面⑤は M_c 到達時において M_u が照査結果を満足しない結果となったが、安全性に関する作用係数 (最大1.2) を考慮したことに起因する。

4. モニタリングシステム構築に関する施工試験

4.1 モニタリングシステムの仕様

図-7にモニタリングシステムの概念図を示す。本システムは、導電性回路に一定の電圧を入力し、ひび割れ発生時の回路破断に伴う抵抗値の変化を測定することで、ひび割れを検知する仕様とした。具体的には、導電性回路の抵抗値が、事前検討により把握したしきい値 (初期抵抗値の5倍) を上回る回数 (以下、カウント値) を測定するものである。なお、計測データは、橋脚前面に設置した計測装置で収録する構成とした。計測装置には、データ収録装置、加速度センサーなどが格納されている。また、測定開始は、列車通過時に加速度センサーが作動するしきい値 (70mgal) を超えた時点とした。計測間隔は、これまでの鉄道橋の計測事例を踏まえ、50Hzとし、計測時間を5秒間とすることで、システム作動から250回動的な計測を行うこととした。得られたデータは、SDカードに保存されると共に、電話

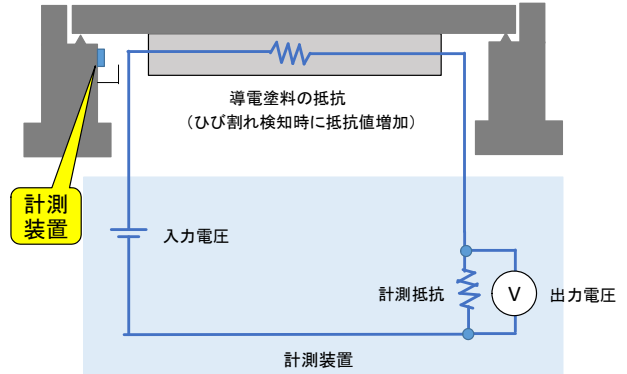


図-7 モニタリングシステムの概念図

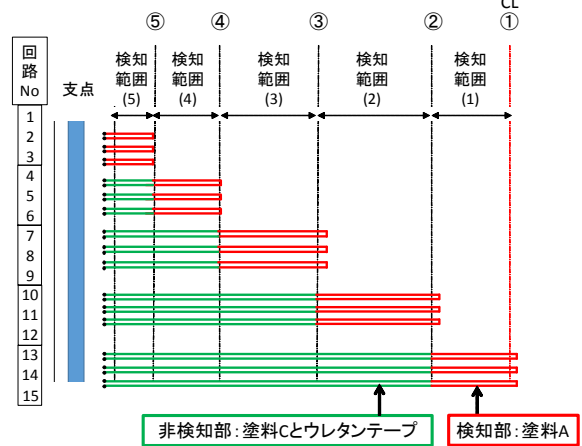


図-8 桁下面に構築した導電性回路

(FOMA) 回線により伝送され、インターネット上で確認出来る構成とした。表-4に計測の評価法を示す。表に示すように、カウント値から桁の損傷状況を推定することを想定している。具体的には、Case1 の場合は変状なし、Case2 の場合は、列車通過時のひび割れ発生、Case3 の場合は、ひび割れの開口状態が継続したことで、軸方向鋼材の塑性化の可能性を想定することが出来る。

表-4 測定結果の評価法

Case	カウント値の経時変化	推定する損傷状況	
		M_c 曲げひび割れ	M_y 軸方向鋼材の塑性化
1	0 → 0 → 0	-	-
2	0 → (1~250) → 0	可能性あり	-
3	0 → 250 → 250	可能性あり	可能性あり

4.2 モニタリングシステムの構築

図-8に対象構造物に構築した桁下面の導電塗料の塗布パターンを示す。ひび割れ検知範囲は再現計算の検討断面を考慮し、5つ設けた。導電性回路は、誤検知を防止する目的で検知範囲につき3回路 (回路 No1~15) を構築した。これにより、検知部の平均値 (Ave) 0.212mm と標準偏差 (σ) 0.104mm を考慮すると、1ラインで幅 0.316mm (Ave + σ に相当) 以下のひび割れが未検知となる確率は16%であるが、3ラインとした場合、0.4% ($=0.16^3$) となる。また、非検知部が破断することも想定されるが、 2σ ($2.13-2 \times 0.865=0.4\text{mm}$) を考慮しても、幅 0.4mm 以下で破断する確率は、2.5%となるため十分な検知精度を有すると考える。なお、導電性回路は、PC 桁下面に加え、RC 橋脚前面にも1回路 (No16) 構築した。これは、当該箇所のコンクリート表面に微細なひび割れを確認しており、列車通過時のひび割れ開閉に対する、システムの稼動確認を目的としたものである。図-9に塗料の塗布状況および図-10にシステム構築状況を示す。表-5に施工手順と施工時間を示す。本システムの構築には、導電性回路の構築に伴う塗布作業などに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。図-11に伝送状況、図-12に伝送された測定データの例を示す。測定データのうち、橋脚前面の導電性回路 (No16) は、昼間の時間帯にカウント値の増加がみられた。



図-9 導電塗料の塗布状況

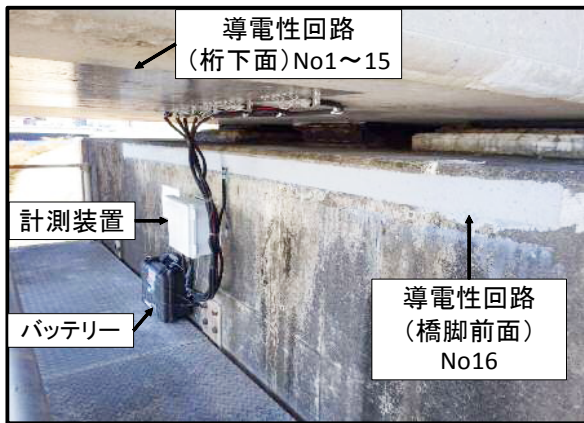


図-10 システム構築状況

これは、列車通過と橋脚前面のコンクリートの温度変化などにより、システム構築時よりもひび割れ幅が拡大したことによるものと考えられる。一方、PC 桁下面に構築した導電性回路 (No1~15) は、カウント値がゼロであることを確認した。これらのことから、本システムが良好に稼動していることを確認した。

5. まとめ

既設 PC 橋梁の桁下面に、導電性回路を用いた、曲げひび割れの検知および位置を把握するモニタリングシステムを構築し、良好に稼動していることを確認した。今後も、引き続きモニタリングシステムを稼働させ、季節変動による抵抗値の変化や、伝送に要する電力消費量を把握する予定である。

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。

参考文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所；ポストテンション式 PC 桁の維持管理マニュアル，2013
- 2) 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 回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム,p.581-586,2014
- 3) 財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等標準・同解説（コンクリート構造物），2004.4

表-5 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

※作業足場の確保が前提

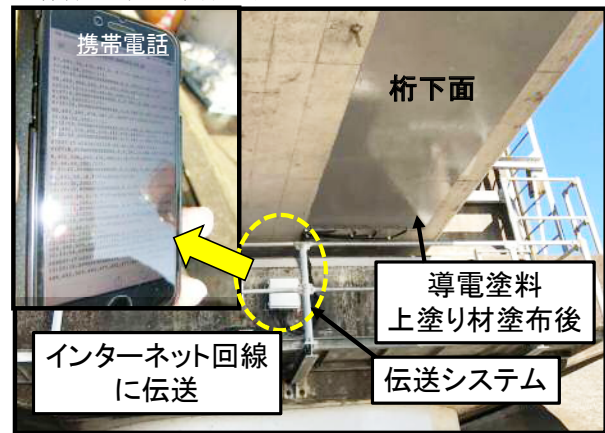


図-11 伝送状況

記録日時	時刻	桁下面														橋脚前面	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2016/12/17	0:12:33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	1:11:08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	2:09:42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	3:13:08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	4:11:42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	5:10:16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	6:13:42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	7:12:16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	8:10:53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2016/12/17	9:14:23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
2016/12/17	10:13:01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
2016/12/17	11:11:39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
2016/12/17	12:15:12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101
2016/12/17	13:13:52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	14:12:32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104
2016/12/17	15:11:13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
2016/12/17	16:14:50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
2016/12/17	17:13:33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	18:12:12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	19:15:44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	20:14:21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	21:12:58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	22:16:26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016/12/17	23:15:02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※カウント値は最大 250 回 (=50Hz×5 秒)

図-12 伝送された測定データの例