

PC 桁における導電塗料モニタリングの適用性

西日本旅客鉄道株式会社
鉄道総合技術研究所

正会員
正会員

○前田 友章
仁平 達也

1. はじめに

PC 桁は、内部にある橋軸方向の PC 鋼材（以下、「内ケーブル」という）の破断が外観変状に現れにくい特徴がある。ここでは、内ケーブルの破断によって PC 桁の耐荷性能が大幅に低下する前に、導電塗料モニタリングによるひび割れの検知を解析的に評価するとともに、実橋での試験施工結果から適用性を検討する。

2. 導電塗料モニタリングの概要

導電塗料の構成は、図 1 に示すように 3 層構造となっている。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电させることで電気回路を構成できる。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。

モニタリングは電気回路の抵抗値を計測し、①ひび割れの発生後、②塗料断面積が減少し、③回路抵抗値が増大、④ひび割れを検知する。列車荷重の載荷を模した RC 梁の室内疲労試験¹⁾では、ひび割れ検知の閾値（＝計測した回路抵抗値の最大値／初期の回路抵抗値の平均値）を 5 とすることで、0.2mm 以上の動的なひび割れを検知することが確認できた。

3. 導電塗料モニタリングの解析的評価

導電塗料モニタリングが適用できる条件として、桁の耐荷性能が大きく低下する前にひび割れを検知し、さらに内ケーブルがシース 1 本分（以下、「内ケーブル 1 本」という）破断しても桁が終局限界に至らないこととした。写真 1、表 1 に示す対象橋りょうに対して、汎用構造解析プログラム DIANA（Ver. 9.3）を用いて 3 次元非線形格子解析により、解析的評価を行った。

解析における内ケーブルの破断進行は、最も変状の進展が早いパターンである、全主桁で同時に内ケーブルの破断（破断位置スパン中央）が進行するパターンを想定した。解析モデル（図 2）では、主桁には終局時近傍までの PC 部材の挙動を表現できることが確認²⁾されている非線形を考慮したファイバー要素を用い、また床版、高らんなどの非構造部材には、内ケーブル破断時の PC 桁の挙動を精度良く評価するため、弾性はり要素および弾性ファイバー要素を用いた。内ケーブルの破断が生じた場合には、一定区間のプレストレスがゼロ

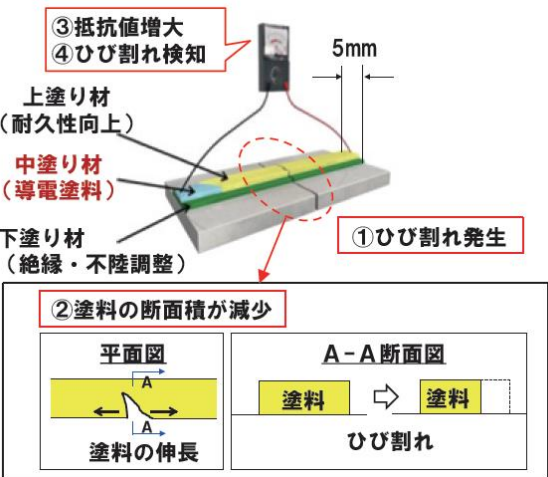


図 1 導電性回路の構成とひび割れ検知



写真 1 対象橋りょうの外観

表 1 対象橋りょうの諸元	
構造形式	PC 単純 I 形桁 単線 4 主桁
桁長（支間長）	47.67m（46.77m）
コンクリートの設計基準強度(主桁)	600kgf/cm ²
PC 鋼材（内ケーブル）	SWPR7A 12φ12.4 1 主桁あたり 11 本
PC 鋼材（横締め）	SBPR95/110 φ26

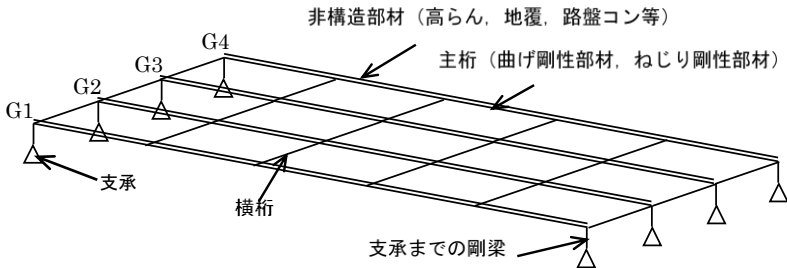


図 2 解析モデル

キーワード PC 桁，モニタリング，導電塗料，3 次元非線形格子解析，試験施工

連絡先 〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-4-20 中央ビル 2F 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室 TEL 06-6305-6957

となるものとして、それ以外の区間に再定着によりプレストレスが生じている現象を表現した。

照査する安全性や使用性の照査指標を表2に示す。ひび割れ幅は、鉄道RC標準³⁾に基づき、主桁スパン中央部の下縁のコンクリートの引張応力度、および最下段の鉄筋引張応力度の増加量から算定した。

表2 照査指標

要求性能	性能項目	応答値 I_{rd}	限界値 I_{ld}
安全性	破壊（曲げ）	コンクリートの圧縮ひずみ ϵ'_d	コンクリートの終局圧縮ひずみ ϵ'_{cu}
	走行安全性	変位・変形量 δ_d	変位・変形量 $\delta_{ld}(=L_d/1500)$
使用性	ひび割れ	コンクリートの引張ひずみ	コンクリートの曲げひび割れ強度相当の引張ひずみ
	乗り心地	変位・変形量 δ_d	変位・変形量 $\delta_{ld}(=L_d/2000)$

※ L_b ：支間長

4. 解析による照査結果

使用性（ひび割れ）の照査結果を表3、G1桁の内ケーブル破断と主桁上縁ひずみの関係を図3に示す。内ケーブル6本破断時に0.2mmの曲げひび割れが発生し、導電塗料モニタリングによって検知可能となる。主桁上縁のひずみは内ケーブル8本破断時に終局圧縮ひずみを超過し、曲げ破壊に至ることを確認した。また、内ケーブル8本破断時のたわみは22.9mmであり、安全性（走行安全性）の限界値31.2mm、使用性（乗り心地）の限界値23.4mmのいずれも超過していなかった。以上のことから、導電塗料モニタリングを設置した対象橋について、曲げひび割れ検知後、対策を施しながら桁の耐荷性能を回復させることが可能であると考えられる。

表3 ひび割れ照査結果

内ケーブルの 破断本数				上段：○ひび割れなし、×ひび割れあり 下段：ひび割れ幅(mm)， ■ ひび割れ検知							
				列車荷重非作用時				列車荷重作用時			
				G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
0				○	○	○	○	○	○	○	○
3				○	○	○	○	○	○	○	○
4				○	○	○	○	○	○	×	×
5				○	○	×	×	×	×	0.01	0.01
6				×	×	×	×	×	×	×	×
7				×	×	×	×	×	×	×	×
8				×	×	×	×	×	×	×	×

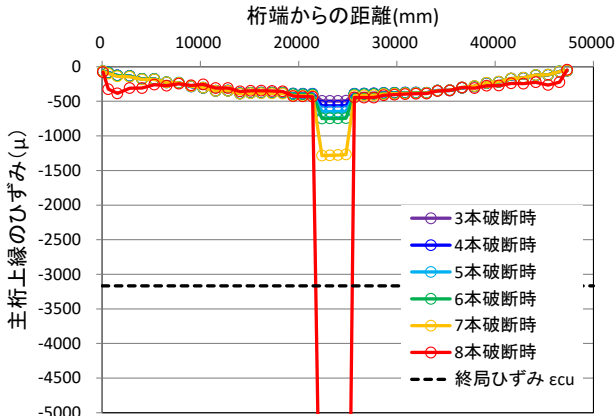


図3 主桁(G1)上縁ひずみの分布

5. 導電塗料モニタリングの試験施工

対象橋りょうに導電塗料モニタリングを試験施工し、一部の回路（G1-2、G4-1）に刃先0.1～0.15mmのカッターでスリットを設け（写真2）、疑似的にひび割れの発生を再現した。試験施工後の初期段階とスリット施工後の列車通過前後の回路抵抗値を計測し、室内疲労試験で確認された閾値¹⁾と比較した。計測の結果（表4）、①試験施工後の回路抵抗値の平均値と②スリット施工後、列車通過時に計測した回路抵抗値の最大値との倍率は閾値の5倍を超過し、実橋でもひび割れを検知できると考えられる。



写真2 スリット施工

表4 回路抵抗値

回路	①試験施工後の平均値 (kΩ)	②列車通過時の最大値 (kΩ)	②/①
G1-1	3.2	4.1	1.28
G1-2	2.1	12.6	6.00
G4-1	2.1	14.5	6.90
G4-2	2.3	3.0	1.30
G4-3	2.9	4.3	1.48

6. まとめ

解析的評価および試験施工により、導電塗料モニタリングのPC桁への適用可能性が確認できた。試験施工した導電塗料モニタリングは、今後も回路抵抗値を計測し、ノイズの影響や耐久性を確認していく予定である。

参考文献

1) 永坂亮介ら：導電塗料を用いたPC桁の曲げひび割れ検知システム，鉄道総研報告，Vol. 32，No. 2，2018. 2
2) 村田一郎，大坪正行ら：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，コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告集，pp. 177-184，第11巻，2011. 10
3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・解説（コンクリート構造物），丸善，2004. 4