

第V部門

外ケーブル張力モニタリング手法を導入した既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価

ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 正会員 ○福田 圭祐

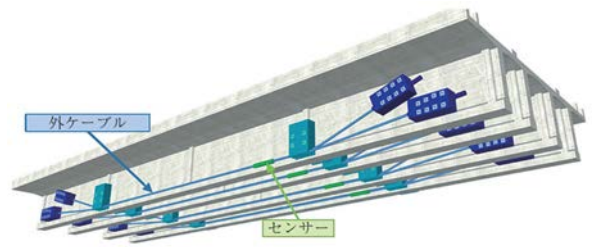
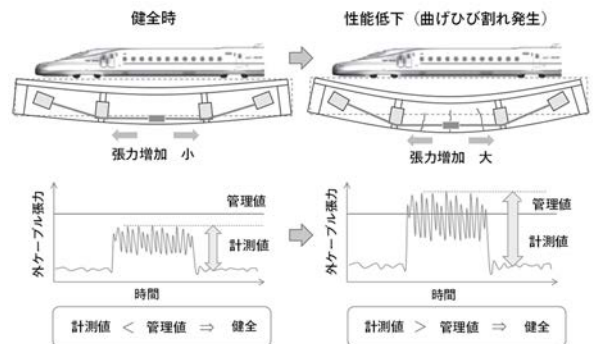
神戸大学大学院 正会員 森川 英典

1. はじめに： 既設高速鉄道 PC 桁橋の PC グラウト充填不足部において、PC 鋼材の腐食が確認されており、PC 鋼材の腐食や破断による構造安全性の低下が懸念されている。既設高速鉄道 PC 桁橋の内ケーブルの腐食や破断を想定した維持管理対策として、外ケーブル張力モニタリング方式が提案されている¹⁾。本稿では、既設高速鉄道 PC 桁橋の外ケーブル張力モニタリング方式による構造信頼性評価手法について検討した。

2. 外ケーブル張力モニタリング方式¹⁾： 外ケーブル張力モニタリング方式は、図-1 に示すように、PC 桁に補強兼モニタリング用の外ケーブルを設置し、センサにてその外ケーブルの張力変動をモニタリングすることにより、内ケーブルの破断を検知するとともに、内ケーブルの破断を検知した場合には、外ケーブルを再緊張し直ちに性能を回復する方法である。モニタリングの原理は、図-2 に示すように、PC 桁の内ケーブルの破断が進行してプレストレスが減少し、主桁に曲げひび割れが発生する段階になると主桁の剛性が低下して列車通過時のたわみおよび外ケーブル張力増分が増加する。モニタリングでは、列車通過時の外ケーブル張力増分を管理指標として、計測値と解析結果に基づきあらかじめ設定した管理値を比較することで、耐荷性能の低下を検知しようとするものである。また、外ケーブル張力モニタリング方式は、写真-1 に示すように山陽新幹線の PC 桁に導入されている。

3. 外ケーブル張力モニタリング方式による信頼性評価： 外ケーブル張力モニタリング方式の適用後から、列車通過時の外ケーブル張力増分をモニタリングすることにより、日常的に列車通過時の曲げひび割れ発生の有無について評価が行われる。外ケーブル張力モニタリング方式適用後からの曲げひび割れ発生の有無の評価回数をもとに、列車通過時の曲げひび割れ発生確率を評価できると考えられる。

曲げひび割れ発生が検知されないモニタリング期間と曲げひび割れ発生確率の関係の試算結果を図-3 に示す。湯浅²⁾は、外ケーブル張力増分の計測値はノイズの影響により一定のばらつきを有しており、1 列車ごとに外ケーブル張力増分の計測値と管理値を比較すると、曲げひび割れ発生誤判定の頻度が多くなることから、同日の2 列車以上の計測結果を平均化することで誤判定の頻度を低減することができると報告している。それらを踏まえ、モニタリングにおける1 日あたりの曲げひび割れ発生の有無の評価回数は、1 回、2 回、5 回と仮定し、試算した。図-3 より、1 日あたりの曲げひび割れ発生の有無の評価回数を1 回とした場合、モニタリング適用後1 年間曲げひび割れの発生が検知されなければ、曲げひび割れ発生確率は0.003 以下となり、3 年間曲げひび割れが検知されなければ、0.001 以下となり、曲げひび割れの発生が検知されない期間が長くなるにつれて、曲げひび割れ発生確率は経時的に低下していく。また、一日あたりの曲げひび割れ発生の有無の評価回数が増えるにつれて、曲げひび割れ発生確率が低く評価されている。つまり、

図-1 外ケーブルモニタリング方式¹⁾図-2 モニタリングの原理¹⁾写真-1 外ケーブル張力モニタリング設置状況¹⁾

モニタリングにより曲げひび割れが生じていないという評価結果が蓄積されていくにつれて、曲げひび割れ発生確率が低下していくことが確認できる。

曲げひび割れに対する安全余裕 M (=曲げひび割れ強度－合成応力度) が正規分布に従う場合には、式 (1) ³⁾ の関係が成り立つ。

$$p_c = \varphi(-\beta_c) \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここに、 p_c : 曲げひび割れ発生確率、 φ : 標準正規分布の確率分布関数、 β_c : 曲げひび割れに対する信頼性指標
よって、モニタリング結果に基づく曲げひび割れ発生確率より曲げひび割れ発生に対する信頼性指標 β_c を推定することが可能と考えられる。

安全余裕 M の分布形状が正規分布に従うと仮定し、曲げひび割れ発生が検知されないモニタリング期間と曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c の関係の試算結果を図-4 に示す。
1 日あたりの曲げひび割れ発生の有無の評価回数を 1 回とした場合、モニタリング適用後 1 年間曲げひび割れの発生が検知されなければ、曲げひび割れに対する信頼性指標 $\beta_c \approx 2.7$ に相当する。さらに、2 年間曲げひび割れが検知されなければ、曲げひび割れに対する信頼性指標 $\beta_c \approx 3.0$ に相当すると考えられ、曲げひび割れが検知されない期間が長くなるにつれて、曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c が増加していく。つまり、モニタリングにより曲げひび割れが生じていないという評価結果が蓄積されていくにつれて、曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c が向上していくことが確認できる。

また、モニタリングが導入されている山陽新幹線 PC 桁を対象に、現況の実働列車荷重およびグラウト充填不足部の PC 鋼材の腐食劣化を考慮したモンテカルロシミュレーションにより曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c を算出するとともに、図-5 に示すように桁下縁の合成応力度 95%特性下限値と曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c の関係を整理した。その結果、曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c が 2.0 以上の領域では、桁下縁の合成応力度は曲げひび割れ強度を上回っている。この結果および図-4 より、モニタリングを少なくとも 1 年間継続し、その期間曲げひび割れの発生が検知されない場合には、モニタリング対象橋梁は、曲げひび割れが非常に生じやすい状況にはないと考えられる。

4. まとめ： 外ケーブル張力モニタリング方式を適用し、モニタリングにより曲げひび割れが生じていないという評価結果が蓄積されていくにつれて、曲げひび割れ発生確率が低下するとともに、曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c が向上していくと考えられ、モニタリングの効果を示すことができた。

参考文献： 1) 前田，湯浅，坂岡，野村：山陽新幹線における PC 桁の維持管理の取組み，プレストレストコンクリート，Vol.60，No.6，pp.25-28，2018 2) 湯浅，森川，中上：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，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，Vol.24，pp.431-436，2015 3) 鈴木基行：構造物信頼性設計法の基礎，森北出版，2010

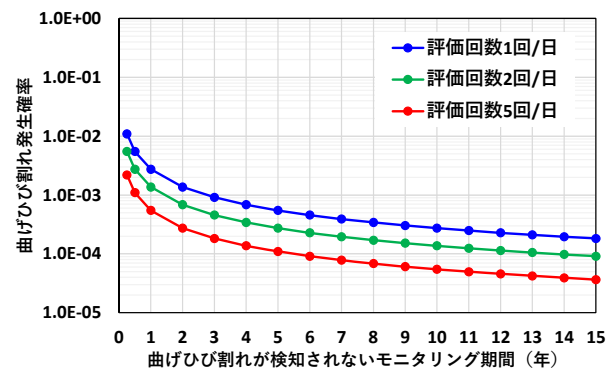


図-3 モニタリング期間と曲げひび割れ発生確率の関係

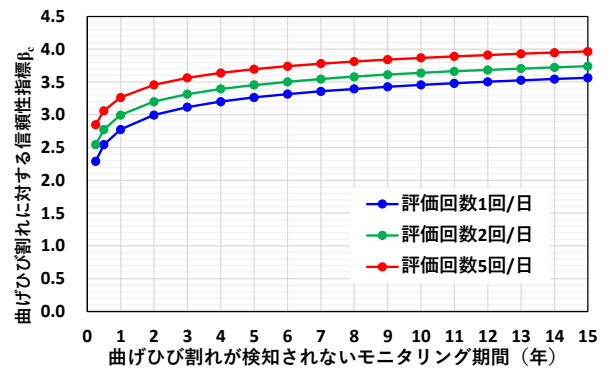


図-4 モニタリング期間と曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c の関係

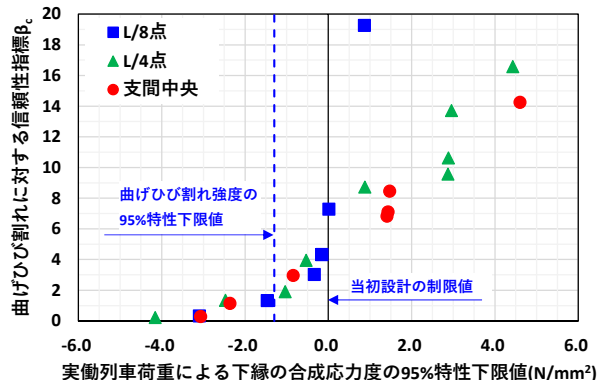


図-5 桁下縁の合成応力度と曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c の関係