

# 凍結防止剤散布により塩害劣化した橋梁端部の補修 — 流電陽極材による腐食緩和とその補修効果 —

井口 直道\*1・山田 俊一\*2・松本 隼人\*3・竹内 信\*4

わが国において1990年代のスパイクタイヤ禁止令を発端に、積雪寒冷地では道路上に塩化物を含む凍結防止剤の散布量が増大し、その結果、凍結防止剤を含む路面水の漏水に起因した塩害が顕在化している。本稿は凍結防止剤に起因し塩害劣化を生じた橋梁端部の調査、施工、維持管理について報告するものである。対象となる橋梁は滋賀県長浜市高月町に位置し、一級河川である高時川に架かる阿弥陀橋で、1974年に建設され現在まで46年を経過している。冬季には凍結防止剤が散布されており、事前調査の結果、凍結防止剤による塩害劣化は主桁端部等、局所的に生じていること、さらに特筆すべきは端部横桁においては目視観察が可能な桁内側より遊間側の劣化が著しいことが確認された。その補修工法として補修効果、経済性、施工性、維持管理性を考慮した結果、流電陽極材を使用した腐食緩和工法を主桁端部ならびに端部横桁に適用することにした。流電陽極材は内部挿入タイプと表面設置タイプに大別され、目的に応じて適用した。加えて流電陽極材の設置と同時に腐食緩和効果を把握する目的でモニタリングセンサーも設置した。その結果、十分な腐食緩和効果が発揮されていることが明確となった。

キーワード：凍結防止剤、塩害劣化、流電陽極材、腐食緩和

## 1. はじめに

1990年代のスパイクタイヤ禁止の法令化を受け、わが国の積雪寒冷地の道路には安全な交通確保を目的として凍結防止剤の散布量が急増し、多量の散布を必要とするケースにおいては、深刻な塩害劣化を生じた構造物が報告されている。

凍結防止剤が原因で生じる塩害は、それを含む路面水の影響を受けるかぎられた部位に発生する特徴を有している。橋梁においては凍結防止剤を含む路面水が伸縮装置周辺部から漏水し、桁端部のコンクリート部材に塩分が浸透することによる塩害劣化が多くみられる。特に作業空間が狭い桁端部で劣化が生じると、補修工事は困難となり高額な補修工事や最悪の場合には橋梁の架け替えが必要な場合も想定される。

本稿で対象とした橋梁は写真-1および図-1に示す阿弥陀橋（滋賀県長浜市高月町落川～馬上地先）で、一級河川である高時川に架かる橋長175m、幅員10.3mのポストテンション方式T桁橋である。本橋は1974年に建設されて以来、46年の年月が経過しており、冬季に凍結防止剤を散布するため端部横桁を含む桁端部に塩害劣化が生じている。

本稿は補修工事全体のなかで、桁端部に対する補修工法の選定とその工事概要ならびに補修効果を確認するためのモニタリングについて報告するものである。



写真-1 全景写真



図-1 橋梁位置図（出典：国土地理院ウェブサイト）

\*1 Naomichi IGUCHI：(株)ニューテック康和 メンテナンス本部 工務部

\*2 Syunichi YAMADA：(株)ニューテック康和 メンテナンス本部 技術部

\*3 Hayato MATSUMOTO：(株)アズマ 工事部

\*4 Makoto TAKEUCHI：滋賀県長浜土木事務所木之本支所 道路計画課

## 2. 劣化状況と補修工法の選定

### 2.1 劣化状況

代表的な桁端部の劣化状況を写真 - 2 に示す。事前調査の結果、端部横桁において鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度以上の塩化物イオンが確認されると同時に卑な鋼材電位も確認された。外部環境や劣化状況を考慮すると劣化は凍結防止剤が原因の塩害劣化であり、構造物の力学的性能低下は顕著ではないが、コンクリートに浮きや剥離が認められることから劣化期は加速期前期と推定された。留意すべきは、漏水状況を考慮すると端部横桁に関しては桁内側より遊間側の方が劣化が著しいと推定されることである。

### 2.2 補修工法の選定条件

補修工法として、路面からの漏水防止のため伸縮装置の交換を行うことはもとより、桁端部コンクリート中に塩化物イオンが浸透し鉄筋腐食が進行している状態であることから断面修復工法<sup>1)</sup>、電気化学的補修工法<sup>2,3,4)</sup>など、桁本体への補修工法も実施することとした。

補修工法の選定においては、

- ① 補修効果
- ② 経済性
- ③ 狭隘部での施工性
- ④ 交通規制面での施工性
- ⑤ 施工後の簡易な維持管理

などを考慮する必要がある。本橋梁において上記①～⑤を満足する工法として、狭隘部の施工は通常の断面修復工法では困難であること等を考慮して電気化学的補修工法の一つである流電陽極を用いた腐食緩和工法<sup>5,6)</sup>を採用した。



写真 - 2 桁端部の代表的な劣化状況

### 2.3 流電陽極を用いた腐食緩和工法

流電陽極材を用いた腐食緩和工法の概要図を図 - 2<sup>6)</sup>に示す。本工法は、流電陽極材としての防食亜鉛、ベントナイト系バックフィル材、収納ケース等で構成される。設置方法として表面設置タイプ、内部挿入タイプの2種類があり、それらは使用目的で使い分けられる。表面設置タイプは主としてコンクリート表面の鋼材の腐食緩和を、内部挿入タイプはコンクリート表面および深部の鉄筋の腐食緩和を目的としている。本工法は設置が簡単であり、防食亜鉛の消耗後の更新も容易であることに特徴を有している。

### 2.4 流電陽極材の配置

本工事において、流電陽極材は路面水の影響を受ける端部横桁、耳桁端部の上フランジおよびウエブに設置することにし、端部横桁には桁内側と遊間側の鉄筋腐食緩和を目的とし内部挿入タイプを、耳桁端部の上フランジおよびウエブには表面の鉄筋腐食緩和を目的とし表面設置タイプの流電陽極材をそれぞれ使用した。なお、設置間隔は400 mmとしている。

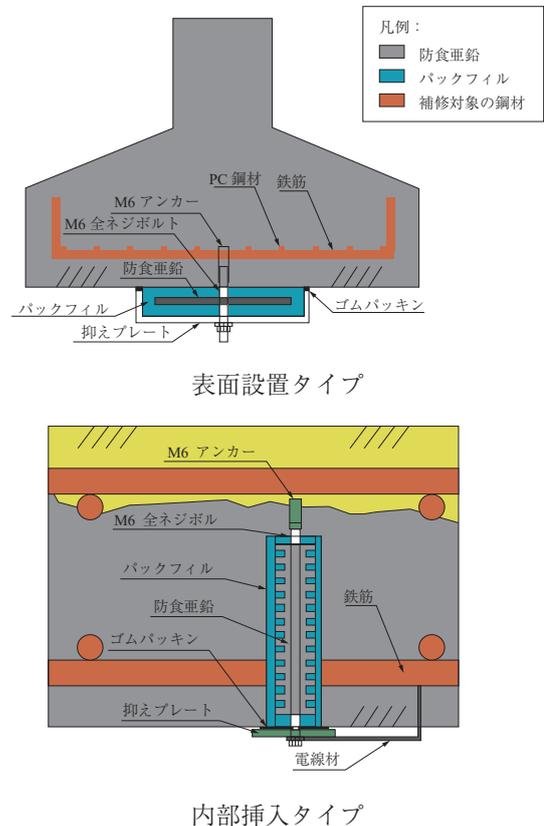


図 - 2 流電陽極材を用いた腐食緩和工法の概要図<sup>6)</sup>

## 3. 補修工事

### 3.1 事前調査

流電陽極材の施工にあたり、劣化状況の確認を目的とし鋼材の自然電位を計測した。

自然電位の計測はコンクリート表面および削孔したコア孔底面からとし、端部横桁において桁内側鉄筋はコンクリート表面から、遊間側鉄筋はコア孔底面から測定を行い、

桁端部においてはコンクリート表面から自然電位を計測した。写真 - 3 に計測状況を示す。



写真 - 3 自然電位の計測状況

事前調査として計測した自然電位を図 - 3 に示す。端部横桁の桁内側の自然電位は卑な電位を示しているが大抵が不確定の領域であった。それに対して遊間側の自然電位は桁内側の自然電位より卑な電位を示し 90% 以上の確率で腐食が発生している領域であった。

一方、耳桁端部においては自然電位が卑な電位を示しており不明確または 90% 以上の確率で腐食が発生している領域であった。しかし、桁端部から離れば貴な電位を示すようになり 90% 以上の確率で腐食が発生していない領域にあった。この自然電位の計測結果から凍結防止剤を散布する地域においては塩害劣化が局部的に生じること、端部横桁の遊間側は目視観察できる桁内側より劣化が進んでいるものと推定される。

【端部横桁 - 桁内側表面】

-290	-270	-256	-255	-253
-231	-253	-186	-221	-229
-178			-204	-219
-221				-266
-195	-226	-273	-245	-262
-206	-249	-294		

【端部横桁 - 遊間側表面】

-253	-280	-279	-255
-248	-282	-270	-253
-276			-277
-322	-346	-336	-303

← 桁端	【桁端部】				桁内 →		
	-154	-151	-195	-52	} 上フランジ		
	-344	-295	-132	-118		-81	
	-188	-255	-122	-73	} ウェブ		
	-293	-134	-33	-3		4	
	-156	32	7	-5		21	

色別	自然電位 (mV,SCE)	判定
	$-125 < E$	90%以上の確率で腐食なし
	$-275 < E \leq -125$	不確定
	$E \leq -275$	90%以上の確率で腐食あり

(表は文献<sup>7)</sup>による)

図 - 3 自然電位の計測結果

### 3.2 流電陽極材の設置

#### (1) 内部挿入タイプ流電陽極材の設置

端部横桁への内部挿入タイプ流電陽極材の配置の一例を図 - 4 に示す。内部挿入タイプ流電陽極材の設置間隔は設計上 400 mm であるが、部材によって添加物の有無、配筋状況が相違するために部材ごとに干渉を避け設置した。施工フローを図 - 5 に、写真 - 4 に流電陽極材の設置状況を示す。

コンクリート内部の鉄筋などが施工に干渉しないよう非破壊探査したあとに、φ 40 mm のコアを削孔する。その後、バックフィル材と流電陽極材を挿入する。本工事では端部横桁の厚さを考慮し、写真 - 4 で示す流電陽極材を 2 本接続して、コア削孔内に挿入した。流電陽極材間を電線で結線したあとに、排流端子と結線し通電した。

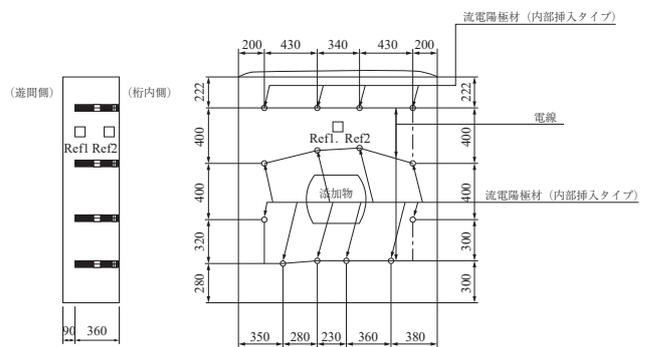


図 - 4 内部挿入タイプ流電陽極材の設置事例

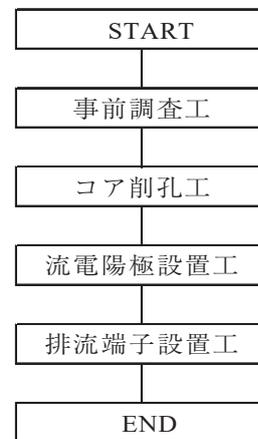


図 - 5 内部挿入タイプ流電陽極材の施工フロー

#### (2) 表面設置タイプ流電陽極材の設置

桁端部への表面設置タイプ流電陽極材の配置の一例を図 - 6 に示す。表面設置タイプ流電陽極材の設計上の設置間隔は内部挿入タイプのそれと同じ 400 mm である。

施工フローを図 - 7 に、写真 - 5 に流電陽極材の設置状況を示す。所定の設置位置に流電陽極材を固定するあと、施工アンカーをコンクリート表面に設置したあと、バックフィル材で覆った流電陽極材と排流端子を結線し収納ケースにそれらを収納し、コンクリート表面に固定する。

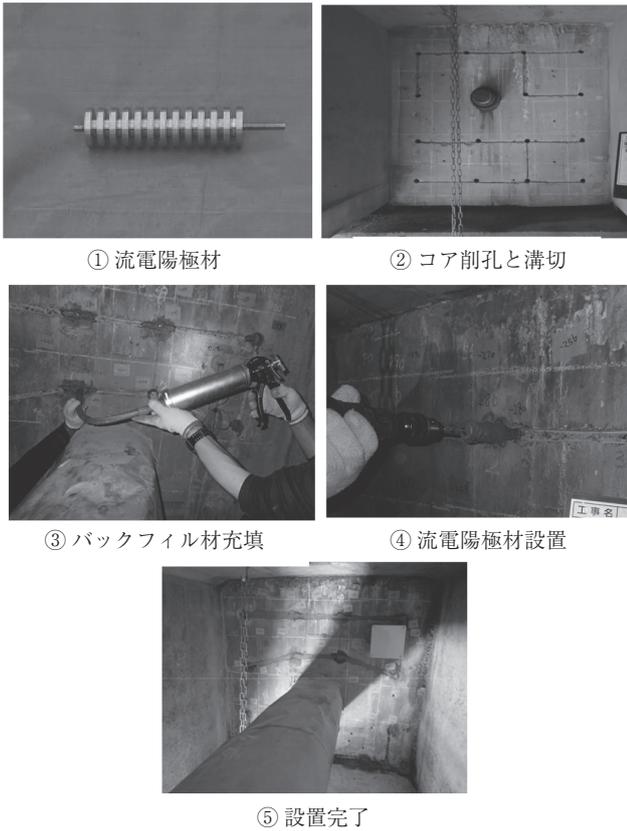


写真 - 4 内部挿入タイプ流電陽極材の設置状況



写真 - 5 表面設置タイプ流電陽極材の設置状況

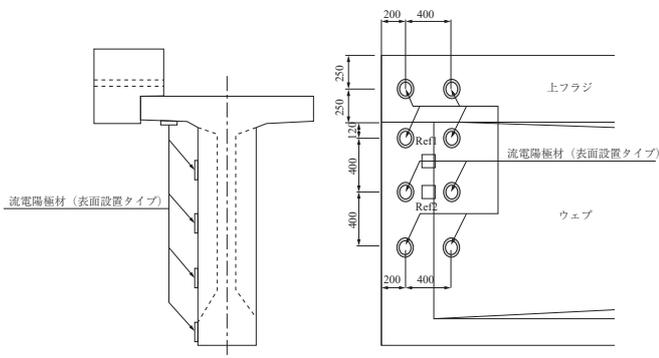


図 - 6 表面設置タイプ流電陽極材の設置事例



図 - 7 表面設置タイプ流電陽極材の施工フロー

#### 4. 定期的モニタリング

##### 4.1 モニタリング装置の設置と計測項目

施工直後の補修効果の確認および今後の継続的な補修効果のモニタリングを目的としてチタン製ワイヤーセンサー<sup>8)</sup>を端部横桁、桁端部ウエブにそれぞれ2箇所(Ref1, Ref2)を設置し、流電陽極とコンクリート中鉄筋との接続を「ON」「OFF」できるスイッチを内蔵した計測ボックスに接続し定期的な計測に供した。計測は流電陽極材からの発生電流と鉄筋の通電時電位 ( $E_{on}$ )、通電遮断時電位 ( $E_{io}$ ) および通電遮断24時間後電位 ( $E_{24}$ ) とした。

写真 - 6、写真 - 7 にチタン製ワイヤーセンサーの設置状況ならびに計測状況を示す。なおチタン製ワイヤーセンサーは短くして設置している。



写真 - 6 チタン製ワイヤーセンサー<sup>8)</sup>の設置状況



写真 - 7 計測状況

#### 4.2 流電陽極材による腐食緩和効果と寿命

本工法は電気化学的補修工法の一つで腐食緩和工法である。「100 mV 以上の復極量 (E<sub>io</sub> と E<sub>24</sub> との差)」を一般的な防食規準<sup>9)</sup>として採用した電気防食に対して LCC を考慮し防食効果を低下させた腐食緩和工法の防食効果は、復極量 25 mV で電気防食の防食効果の 90% 程度、50 mV で 90% 以上と復極量 100 mV を確保しなくとも十分な防食効果を有していると報告されている<sup>5)</sup>。それを受けて本工法では 25 mV 以上復極量を確保した場合に良好な腐食緩和効果があるとしている。

外部電源方式の電気防食工法と相違し、流電陽極材による腐食緩和工法は流電陽極の消耗と引き換えに鋼材の腐食緩和効果を発揮させている。すなわち流電陽極材の消耗が進むと更新が必要となる。本工法では流電陽極材の残存率が 50% を下回れば更新が必要としており、発生電流量からそれぞれのタイプの流電陽極材の寿命を試算することにする。

##### (1) 腐食緩和効果の確認

それぞれのタイプの流電陽極材設置位置にチタン製ワイヤーセンサー (Ref1, Ref2) を設置し、腐食緩和効果の確認を行った。Ref1, Ref2 の設置要因を表 - 1 に、また、通電 1 週までの復極量の経時変化を図 - 8 に示す。

端部横桁においては遊間側鉄筋 (Ref1) の復極量は 200 ~ 250 mV、桁内側鉄筋 (Ref2) のそれは 150 ~ 200 mV と大きく電気防食と同等の効果が得られていた。とくに遊間側においては桁内側より大きな復極量を示しており、遊間側鉄筋の腐食が桁内側のそれより著しいことに起因しているものと推定される。表面設置側においても最遠位置の鉄筋 (Ref1)、平均的位置の鉄筋 (Ref2) の復極量は 70 ~ 100 mV と計測位置に関わらず大きな復極量を示しており、端部横桁と同様に電気防食と同等の効果が得られていた。

##### (2) 寿命の推定

図 - 9 に各流電陽極材からの発生電流量の経時変化を示す。内部挿入タイプの流電陽極材からは 2.0 ~ 3.0 mA、表面設置タイプの流電陽極材からは 0.5 ~ 1.0 mA の電流が発生しており、それらは一般的に経時変化的に減少するものと推定される。各流電陽極材の寿命を推定するにあたり、その残存率を算出する。流電陽極材の残存率  $S_r$  は (1) 式で算出される。

表 - 1 モニタリングセンサー設置要因

流電陽極材タイプ	Ref1	Ref2
内部挿入	遊間側鉄筋位置	桁内側鉄筋位置
表面設置	流電陽極材から最遠位置 : 280 mm	流電陽極材から平均的距離 : 200 mm

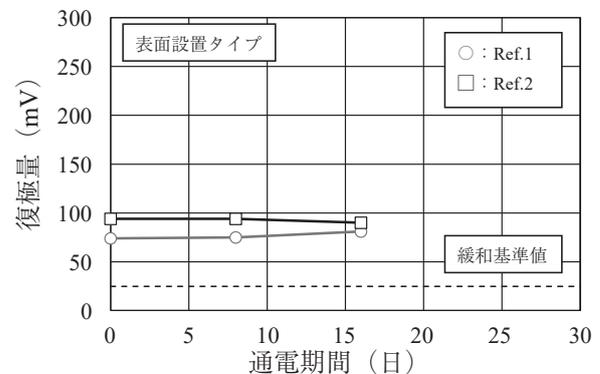
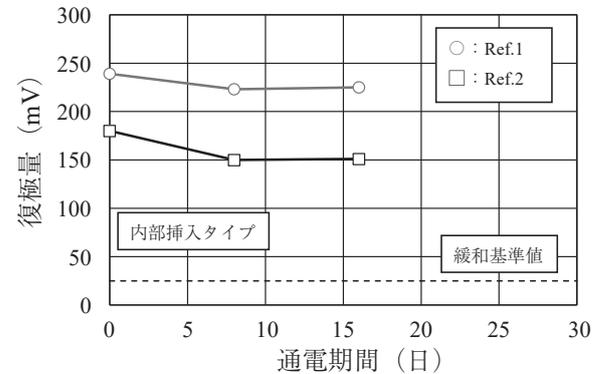


図 - 8 各流電陽極タイプの復極量の経時変化

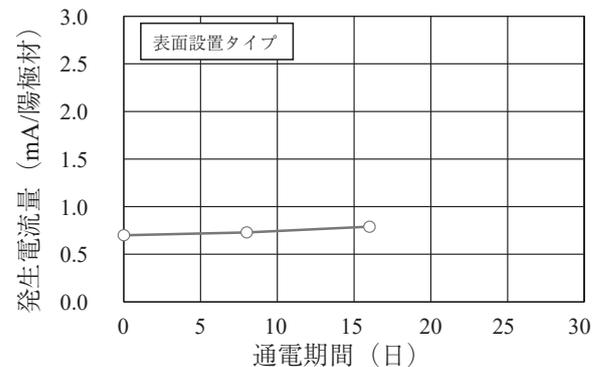
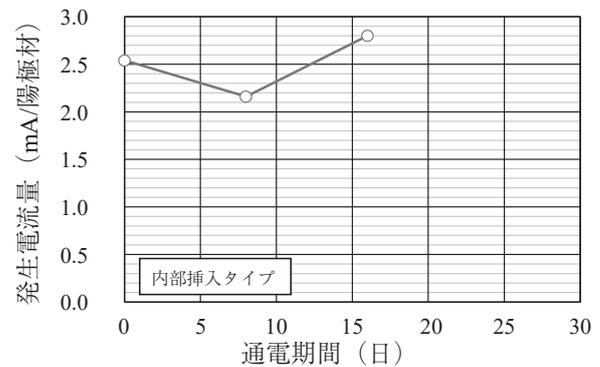


図 - 9 各流電陽極タイプの発生電流量の経時変化

$$Sr = (1 - Wd / Wi) \times 100 \quad (1)$$

Sr : 残存率 (%)

Wd : 流電陽極材の消耗量 (g)

$$Wd = 0.03 \times I \times T$$

I : 流電陽極材からの発生電流量 (mA)

T : 腐食緩和時間 (日)

Wi : 流電陽極材の初期質量

表面設置型: 307 g

内部挿入型:  $373 \text{ g} \times 2 = 746 \text{ g}$

本工法では残存率 50% で流電陽極材の更新を推奨している。更新となる日数を算出するにあたり、残存率を 50% とし、電流量として通電 2 週までの平均値を採用すると、端部横桁の内部挿入タイプ流電陽極材の更新時期は約 14 年 (発生電流量: 2.50 mA)、桁端部の表面設置タイプ流電陽極材の更新時期は約 19 年 (発生電流量: 0.74 mA) と算出された。

鉄筋に防食電流が流入した結果、鉄筋周囲および鉄筋腐食状況が改善されることにより、今後発生電流量は減少していくと考えられるため、実際の寿命は更に長くなるものと推定される。

## 5. おわりに

本稿は、凍結防止剤を含んだ路面水の漏水による橋梁の局所的な桁端部の塩害劣化に対する調査、施工、モニタリングについて紹介したものである。

本工事では補修工法の選定に際して、補修効果、経済性、施工性、維持管理性を考慮し電気化学的な補修工法の一つである流電陽極を用いた腐食緩和工法を採用した。その結果、施工後間もないが良好な補修効果を確保していることを把握した。今後は、定期的にモニタリングを継続することにより補修効果の持続性についても検証を行いたい。

最後に、工事遂行にあたり多大なる協力をいただいた関係各位に紙面をもって感謝の意を表す。また、同様な塩害劣化の補修工事の参考になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 増田信雄, 武田弘次, 佐藤信雄, 大林敦裕: PC 橋の桁端狭陰部の調査・補修工法, 橋梁と基礎, pp.25-29, 2012.12
- 2) 松久保博敬, 松井隆行, 野島昭二, 斎藤 豪, 大即信明: ポストテンション PCT 桁端部の脱塩工法による補修効果, 土木学会第 66 回年次学術講演会, V-006, 2011
- 3) 佐々木 亘, 藤原保久, 樋口正典, 山本 誠, 鹿島篤志, 本田和也: 桁端狭陰部の電気防食工法に適用する陽極材に関する検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-078, 2012
- 4) 鴨谷知繁, 青山敏幸, 石井浩司: 凍結防止剤により劣化した PC 橋への流電陽極方式電気防食の適用に関する検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-079, 2012
- 5) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: 積雪寒冷地に建設された塩害 RC 床版に対する流電陽極材を用いた腐食緩和の試み, 第 10 回道路床版シンポジウム論文報告集, pp.189-194, 2018.11
- 6) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: 流電陽極材を用いた腐食緩和工法のプレテンション方式 PC 橋への適用, プレストレストコンクリート工学会第 28 回シンポジウム論文集, pp.593-598, 2019.11
- 7) ASTM C 876-91 (Reapproved 1999): Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, 1999
- 8) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: チタン製のワイヤーセンサーを用いた鉄筋電位計測に関する実験的検討, プレストレストコンクリート工学会第 27 回シンポジウム論文集, pp.271-276, 2018.11
- 9) 土木学会: 電気化学的防食工法 設計施工指針 (案) コンクリートライブラリー 107 号, 2001.11

【2020 年 10 月 13 日受付】



刊行物案内

# 既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査 および補修・補強指針

平成 28 年 9 月

本工学会「既設ポストテンション橋の PC グラウト問題対応委員会」において、ポストテンション方式の既設 PC 橋の実態把握 (健全性・損傷事例の把握や規準等の整理), PC グラウトの充填性調査手法の把握, PC 鋼材の健全性調査手法の把握, ポストテンション橋の健全性診断の方法検討, PC グラウト充填不足・PC 鋼材損傷の補修・補強の提案等の検討が行われ, その成果を指針としてまとめたものです。

定 価 4,888 円 (税込) / 送料 300 円

会員特価 4,000 円 (税込) / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会