

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

金沢大学 ○亀田 浩昭

(株)ピーエス三菱 正会員 博士(工学) 青山 敏幸

(株)ピーエス三菱 正会員 工博 石井 浩司

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 正会員 工博 鳥居 和之

Abstract : A number of cathodic protection methods are adopted as a measure for salt damage deterioration. Although the corrosion suppression effect is high because it is a measure based on the principle of steel corrosion, construction costs are high compared to the cross-section repair method and surface protection method, and problems such as difficulty in maintenance after construction remain. Therefore, the authors have developed a corrosion mitigation method using a galvanic anode material to solve the problem. Although the steel corrosion inhibition effect is inferior compared with cathodic protection, the construction method is simple and construction cost also becomes cheap. The corrosion mitigation method is installed on a pretensioned PC girder built along the Sea of Japan, and the potential of steel materials etc. is regularly measured. This paper discusses the working conditions of the corrosion mitigation method and the environmental factors that affect it.

Key words : Galvanic anode , Corrosion mitigation , Salt damage , Pretensioned PC girder

1. はじめに

塩害劣化したコンクリート構造物の補修対策として電気防食工法が数多く採用されている。電気防食工法は、鋼材腐食の原理に基づく対策であるために腐食抑制効果は高いが、一般的に施工費用が高く、施工後の維持管理が困難などの課題が残っている。とくに市町村などの小規模な自治体では、事業費や専門技術者の不足により適切な維持管理が困難な状況にある。

そこで、著者らはそれらの課題を解決すべく表面設置型の流電陽極材を用いた腐食緩和工法を開発した。外部電源方式の電気防食工法と比較すると、流電陽極材の設置間隔が鋼材腐食抑制効果に影響を与えるものの、その施工方法は簡単であり施工費用も安価となる。しかも、設置した流電陽極材は容易に取替えることができる構造としているため、維持管理が容易となる。本腐食緩和工法による腐食抑制効果は、すでに実験室レベルならびに撤去床版でその有効性を報告している¹⁾²⁾。

本論文は、本腐食緩和工法を日本海沿いに建設されたプレテンション方式PC桁に設置し、定期的に鋼材電位などを計測し、腐食緩和工法の作動状況とそれに影響を及ぼす環境因子について考察を加えたものである。

2. プレテンション方式PC桁への流電陽極材を用いた腐食緩和工法

2.1 工法概要

プレテンション方式PC桁に適用する腐食緩和工法の概要を図-1に示す。流電陽極材として直径110mm×厚さ5mmの亜鉛を使用する。流電陽極材と収納ケースは取替えが容易となるようにあと施工アンカーとボルトを用いてコンクリート表面に取り付ける。さらに、ベントナイト系バックフィル材を用いて収納ケースと流電陽極材との隙間を充填している。

2. 2 腐食緩和工法の補修効果

電気防食による防食基準として「100mV以上の復極量」³⁾が広く採用されている。本工法を電気防食工法とした場合には、同じ防食基準を採用する必要がある。しかし、構造物のLCCを考慮して、電気防食工法の防食効果と比較し腐食緩和工法の防食効果を低下させることで施工コストや維持管理コストの縮減が可能となる。

復極量 100mV を確保した時の防食効果に対する各復極量における防食効果の比率を防食率と定義し、過去の研究成果⁴⁾⁵⁾⁶⁾を表-1に示す。なお、防食効果は腐食速度の低減率や鉄筋の腐食減少率で評価している。試験条件で相違するものの復極量 25mV で防食率は 0.9 程度、復極量 50mV のそれは 0.9 以上と復極量 100mV を確保しなくとも十分な防食率を有していると考えられる。吉田らは穏やかな環境下で流電陽極工法を適用する場合、構造物の LCC を勘案し、復極量 50mV を確保すれば良いと提案している⁷⁾。そこで本論文においては大谷らの研究より復極量 25~50mV を目安に PC 鋼材や鉄筋（以降、鋼材と表現する）の腐食が緩和されていると判定することにした。

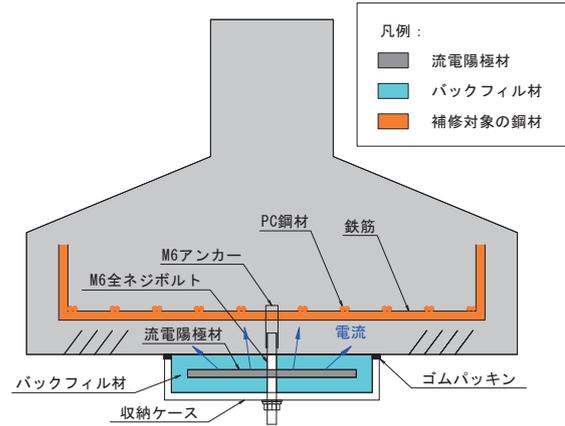


図-1 腐食緩和工法の概要

試験条件で相違するものの復極量 25mV で防食率は 0.9 程度、復極量 50mV のそれは 0.9 以上と復極量 100mV を確保しなくとも十分な防食率を有していると考えられる。吉田らは穏やかな環境下で流電陽極工法を適用する場合、構造物の LCC を勘案し、復極量 50mV を確保すれば良いと提案している⁷⁾。そこで本論文においては大谷らの研究より復極量 25~50mV を目安に PC 鋼材や鉄筋（以降、鋼材と表現する）の腐食が緩和されていると判定することにした。

表-1 防食率の研究成果

研究者	試験条件			防食率※)	
	C1-(kg/m ³)	環境	試験期間(日)	復極量25mV	復極量50mV
千葉ら ⁴⁾	—	乾湿繰返	534	—	0.99
大谷ら ⁵⁾	2, 5, 10	恒温恒湿	250	0.86-0.92	0.92-0.97
JCI ⁶⁾	7.5	乾湿繰返、乾燥、湿潤	400	—	乾湿繰返: 0.84、乾燥・湿潤: 0.88

※) 防食率: 復極量100mVを確保した時の防食効果に対する各復極量における防食効果の比率

3. 実構造物への適用

3. 1 構造物の概要

対象構造物は、写真-1および図-2に示す橋長 10m の小規模プレテンション方式 PC 桁橋であり、日本海の海岸線沿いに 1986 年に建設され自転車道として利用されている橋梁である。対象の PC 桁は、昭和 50 年代ごろまでに数多く建設された I 桁橋であり、小規模橋梁でよく見られる形式である。



写真-1 対象橋梁の状況 (海側)

3. 2 PC 桁の劣化状況

PC 桁の下面には写真-2に示すような飛来塩分の影響による塩害劣化が見られ、PC 鋼線に沿ったひび割れや鋼材腐食に起因する浮きや剥離が生じていた。PC 鋼線に沿ったひび割れは雨水がかかる外側の桁に集中しており、浮きや剥離は全面に散在していた。今回、流電陽極材を設置する桁の付近でドリル法を用いて塩化物イオン量を分析した。その結果を図-3に示す。塩化物イオン量は桁下面付近の濃度をもっとも高く、PC 鋼線付近の深さ 30mm の濃度でも腐食発生限界である 1.2kg/m³ を上回る塩分量が確認された。また、

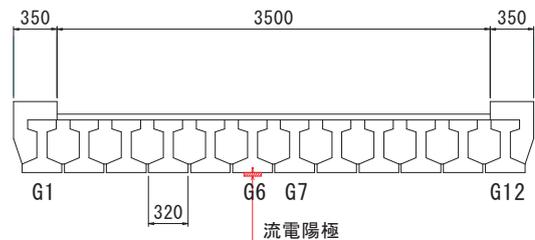


図-2 対象橋梁の断面図

鋼線付近の深さ 30mm の濃度でも腐食発生限界である 1.2kg/m³ を上回る塩分量が確認された。また、

劣化の特徴として、端部の桁付近は劣化が著しいが、幅員中心部の桁は比較的軽微な劣化であった。



写真-2 劣化状況

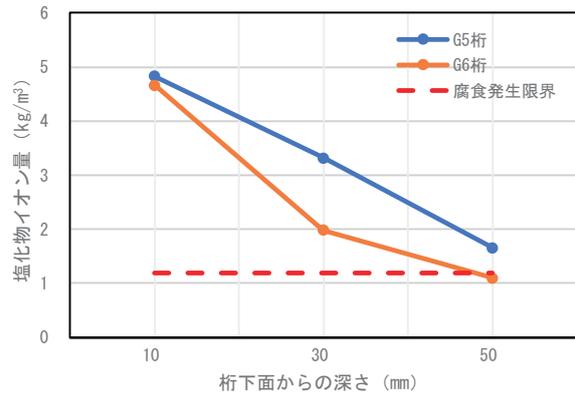


図-3 塩化物イオン量分析結果

3. 3 鋼材の自然電位分布

今回対象とした G6 桁における流電陽極材設置前の鋼材の自然電位分布を図-4 に示す。なお、本論文における鋼材電位は可搬式の飽和銀塩化銀照合電極（以下 SSE と称す）で計測した値である。自然電位の判定は、ASTM C876 の鉄筋腐食判定基準に準拠し、鋼材の自然電位が $E > -80\text{mV}$ (90%以上の確率で腐食なし)、 $-80\text{mV} \geq E > -230\text{mV}$ (不確定)、 $-230\text{mV} \geq E$ (90%以上の確率で腐食あり) のカテゴリに分類し、それぞれ青色、黄色、赤色で区別し整理した。計測箇所は陽極から約 100mm 間隔とした。

図-4 より、金沢側の鋼材の自然電位が -390mV と卑な値を示し、90%以上の確率で腐食ありと判定された。腐食ありと判定された箇所付近では、写真-3 に示すように PC 鋼線に腐食が認められた。

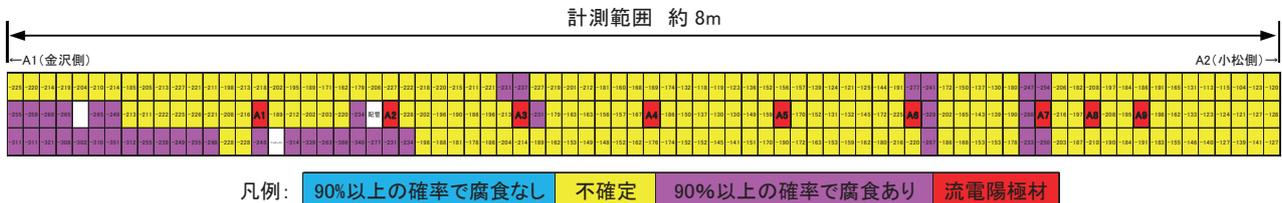


図-4 G6 桁下面の鋼材の自然電位分布

3. 4 流電陽極材の施工方法

図-5 に G6 桁下面に設置した流電陽極材の配置を示す。全部で 9 個 (A1~A9) の流電陽極材を 700~800mm 間隔で設置した。図中の斜線部は、事前調査で浮きや剥離があった箇所であり、本施工にあたり断面修復を行っている。同時に PC 鋼線およびスターラップの導通処理も合わせて行っている。また、鋼材の電位をモニタリングするためのチタン製の腐食モニタリングセンター⁸⁾も図中の青色の位置 (WR1, WR2) に設置した。

流電陽極材はスターラップと直接導通させることで、配線にかかる手間やコストを省略できるように配慮している。このため、図中の破線で示すスターラップの位置あたりに流電陽極材を設置した。

なお、今回行った施工フローを図-6、設置後の状況および電位計測位置を写真-4 に示す。



写真-3 PC 鋼線の腐食状況 (G6 桁金沢側)



図-5 G6 桁下面の流電陽極材配置図



図-6 施工フロー

3. 5 計測項目と評価

復極量は、通電遮断直後の鋼材電位と遮断から 24 時間後の自然電位との差であり、復極量 25~50mV 以上を腐食緩和の目安としている。鋼材の電位計測は、G6 桁下面に陽極位置から約 100mm 間隔に設けた計測点 (写真-4 の×印) で自然電位計測と同様に行った。また、陽極 A1 と A2 は通電のオンオフの切り替えができる構造とし、陽極 A1 と A2 付近の復極量を計測した。陽極 A3~A9 は、常時通電している。図-5 に示すワイヤーセンサー WR1 と WR2 では、センサー埋込み部付近における前者は鋼材の自然電位を、後者は鋼材の通電時電位の鋼材電位を 1 日に 4 回自動計測している。合わせて、陽極 A1 と A2 の発生電流量と外気温も自動計測している。

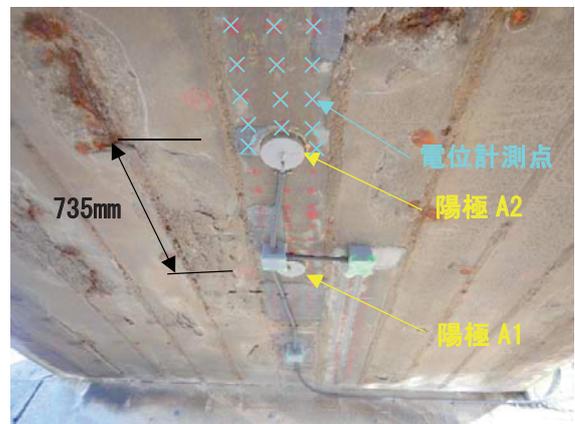


写真-4 陽極と電位計測点

3. 6 腐食緩和効果の傾向

図-7に陽極 A1 と A2 位置近傍で通電開始から5日後, 60日後, 249日後, 396日後に計測した復極量の結果を示す。復極量は, 陽極からの距離ごとに桁中心, 海側, 山側で計測した3点の平均値をプロットした。腐食緩和効果の目安である復極量 25~50mV を確保できる範囲は, 通電開始から 249 日後までは陽極中心から 200mm 程度までの距離であり, 既往の試験体での研究結果¹⁾²⁾よりも若干小さくなった。これは陽極と鋼材との接続状態が不安定であったと考えられたため, 通電開始 396 日の計測前に陽極を一旦取り外し, 鉄筋とボルトをリード線で接続するように変更した結果, 陽極から 300mm 程度の範囲まで復極量 25~50mV が確保された。一方, 復極量を計測することができない陽極 A3~A9 付近では, 通電中の電位と自然電位との差(電位変化量)を参考値として, 陽極 A1 と A2 のそれと比較した。図-8には, 陽極 A1 の位置を基準とした通電 396 日後の鋼材の電位変化量の計測結果を示す。これより, 電位変化量は陽極 A6 と A7 位置で若干小さくなるものの概ね同じ傾向を示していることから, すべての陽極設置位置近傍で鋼材の腐食緩和効果があるものと推定された。

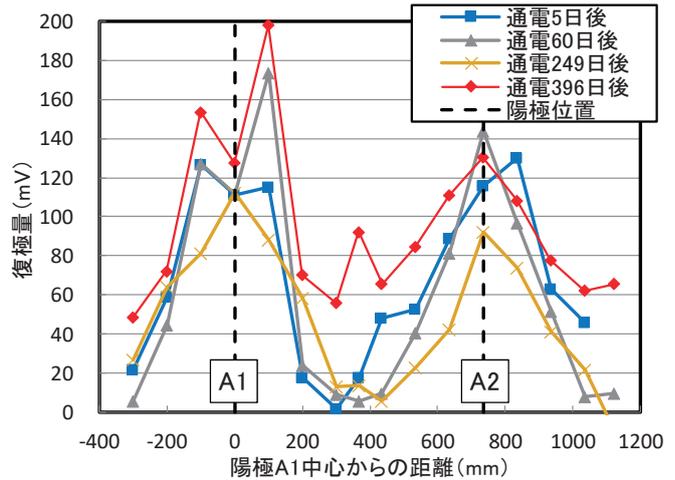


図-7 陽極付近の復極量の推移

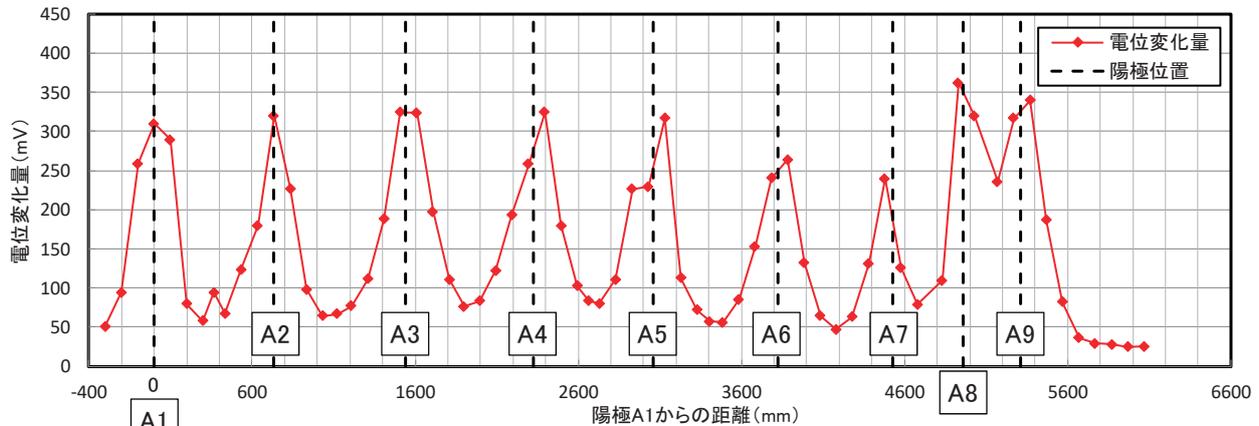


図-8 通電開始 396 日後の電位変化量

図-9には, 陽極 A1 近傍に設置したワイヤーセンサーで計測した鋼材のオン電位の経時変化を示す。陽極近傍の鋼材は防食電流が供給され電位が卑化し, 約 400 日間の計測データから腐食緩和の効果が確認された。一方, 陽極を設置していない箇所の鋼材の自然電位は時間とともに電位が卑化し腐食傾向を示した。

また, 陽極からの発生電流量と外気温の経時変化を図-10に示す。通電初期は, 流電陽極材の特徴で多くの電流量が発生するが, 徐々に低下し約 50 日後から外気温の変化と同様な変化を

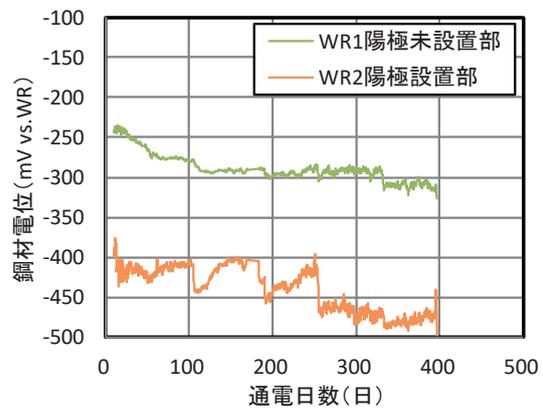


図-9 ワイヤーセンサーの鋼材電位の経時変化

している。これは、外気温が高いほど鋼材の腐食反応が進むため、陽極の発生電流量も大きくなる流電陽極の特徴が表れている。現在のところ約400日経過し電流量は低下しているものの図-9に示すG6桁の陽極設置部の鋼材電位(WR2)は概ね一定を保っているため、腐食緩和の効果が持続していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、日本海の厳しい塩害環境に建設され、塩害劣化したプレテンション方式PC桁に流電陽極材を用いた腐食緩和工法の補修を試験施工し、本工法の実用性と腐食緩和効果に影響を及ぼす環境因子を検証した。以下に試験施工で得られた成果を示す。

- 1) 海岸線に建設され飛来塩分の影響を受けたPC桁では、腐食緩和効果の目安である25~50mV以上の復極量が得られたのは、陽材から300mm程度の範囲であり、概ね既往の研究結果と一致した。
- 2) コンクリート表面の塩化物イオン量5kg/m³程度の塩害劣化PC橋では、今回の陽極設置間隔でも腐食緩和効果が確認されたが、より塩害環境が厳しい場合や鋼材量が多いRC構造では陽極の設置間隔と腐食緩和効果の関係の検討が必要である。
- 3) 長期的なモニタリングの実施により、信頼性の高い補修工法を目指すことが課題のひとつに挙げられる。

謝辞 SIP 戦略的イノベーション創造プログラム「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発(研究開発責任者:鳥居和之 金沢大学)」の一環の研究成果である。また、社会実装にあたり石川県のご協力を頂いた。ここに関係各位に感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 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劣化RC床版の電気化学的補修工法の適用性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第18巻, No. 1, pp. 453-458, 2018. 10
- 2) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: 塩害が生じた撤去RC床版への流電陽極工法を用いた鋼材の腐食緩和対策に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 753-757, 2018. 7
- 3) 土木学会: 電気化学的防食工法設計施工指針(案), 2001
- 4) 千葉丈夫, 関 博, 阿部正美, 石井浩司: コンクリート中鉄筋の防食基準の検証, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, pp. 33-38, 1994. 10
- 5) 大谷俊介, Muhammad Akbar Caronge, 山本大介, 濱田秀則: 電気防食下におけるコンクリート中鉄筋の復極量と防食効果に関する基礎的検討, コンクリート工学論文集, Vol. 28, pp. 25-33, 2017
- 6) 社団法人日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の電気防食法 研究委員会報告書, pp. 140-159, 1994. 10
- 7) 吉田隆浩: 流電陽極法を用いた鉄筋コンクリート構造物の維持管理に関する研究, 京都大学博士論文, 2015
- 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

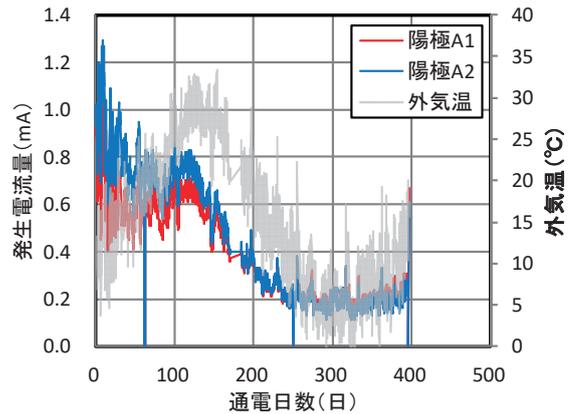


図-10 陽極発生電流と外気温の経時変化