

## (58) PC 鉄道橋への電気防食工法の適用

東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務部構造技術センター

○上田 洋

同 上

正会員 松田芳範

### 1. はじめに

海岸近くに位置するコンクリート構造物は、飛来塩分を受けて鋼材腐食を生じることがある。鉄道構造物も例外ではなく、特に日本海側の路線では冬季の季節風により塩分が多く運ばれるため、被害を受けやすい。塩害を受けた構造物の補修には主に断面修復工法が用いられてきたが、再劣化を生じやすく周期的な補修が必要であった。今回補修対象とした PC 鉄道橋についても断面修復工法では再劣化の可能性が高いことから、恒久的手法として期待されている電気防食工法を採用した。電気防食には、使用材料の種類や設置方法の違いなどによりいくつかの工法が実用化されているが、現時点では各工法の優劣を評価することは困難である。そこで、対象橋りょうの各桁ごとに異なる工法(計 5 工法)を採用し、電気防食の効果と工法による違いを検証することとした。今回の補修の大きな特色は、5 工法を一構造物に施工したため各工法の比較が同一の環境条件でできること、過防食による弊害が懸念されるため適用に注意が必要とされてきた PC 構造物に電気防食工法を適用したこと、1 構造物としての施工が国内初となる工法が含まれていることである。本報告では、構造物の調査、補修工法の選定、各工法の概要と施工状況、防食効果の判定および施工直後の防食状態について述べる。

### 2. 対象構造物の概要

対象構造物は日本海沿岸から約 150m に位置し、全長 151.9m、ポストテンション PC 単純桁 7 連で構成される経年 25 年の橋りょうである(図-1)。このうち、1~5 連目は支間 19.00m の PCI 型 3 主桁、6 連目は支間 31.30m の PCI 型 4 主桁、7 連目は支間 19.00m の PC ホロー桁からなり、今回は 1~5 連目を補修した。当該橋りょうと海岸線との間には単線の鉄道橋と道路橋が存在するのみで、海岸からの風を遮るものではなく、冬季には波の華と呼ばれる波しぶきが碎けてできる泡が飛来することもある。



図-1 橋りょう全景

### 3. 構造物の調査結果

#### 3.1 外観観察

構造物の外観を調査した結果は、以下の通りである。

- ・主桁下フランジ側面に橋軸方向へのひび割れが生じている。
- ・主桁下フランジ下端隅角部のコンクリートが剥離・剥落している。
- ・主桁下フランジ下端の鉄筋が腐食し一部断面欠損している。
- ・鉄筋の著しい断面欠損はない。

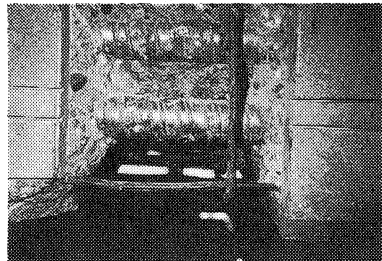


図-2 鉄筋およびシースの状況

- ・ PC 鋼材の腐食はみられない (シースの一部に腐食が認められる)。
- ・ 主桁コンクリートに構造上問題となるような劣化は認められない。
- ・ 主桁下フランジ下面に数多く発生している点状の錆は製作時に使用された鋼製スペーサーの腐食である。

外観調査の結果、劣化損傷は 1~5 連目の 3 主桁に比較的多く生じている。6 連目の 4 主桁では部分的に剥離箇所はあるが多くない。7 連目はホロー桁で外観に凹凸がなく、特に目立った損傷はみられない。この結果、補修は 1~5 連目について行うこととした。

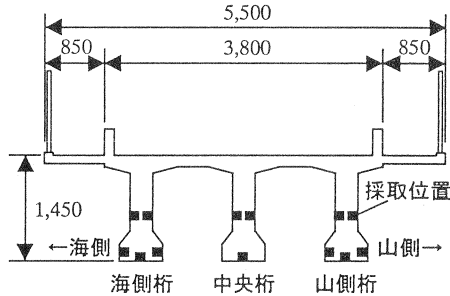


図-3 橋桁断面形状およびコア採取位置

### 3.2 含有塩化物イオン量調査

#### (1) 試料採取および分析方法

含有塩化物イオン量調査は、今回の補修対象である 1~5 連目について行うこととし、各々について海側と山側からコアを採取した。また、このうち 1 連は詳細調査を行うため、図-3 に示す 13 箇所からコアを採取している。コアの大きさはφ50mm、L=60mm で、深さ方向の検討を行うために 20mm ごとに切断し、それぞれの試料を 0.15mm 以下に粉砕したのち、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分分析方法」に準じて全塩分量の分析を実施した。

#### (2) 分析結果

詳細調査を行った桁の塩化物イオン量分析結果を図-4 に示す。コンクリートに浸透した塩化物イオン量は、最外縁の鉄筋位置である深さ 20~40mm で最大 6.4kg/m<sup>3</sup> あり、鉄筋を発錆させるのに十分な量である。桁の位置による違いとしては、海側桁ではウェブ (海側) に多く、山側桁ではフランジ (海側) に多い傾向がみられる。これは、海側桁では海風がウェブに直接当たるのに対して、山側桁では他の桁が海風を遮っているためウェブには当たりにくく、桁の下面を流れる風によってフランジに当たるためと推定される。また、図には示していないが、1~5 連の各桁ごとの違いは少なく、全ての桁が同じ環境条件にあると考えられる。

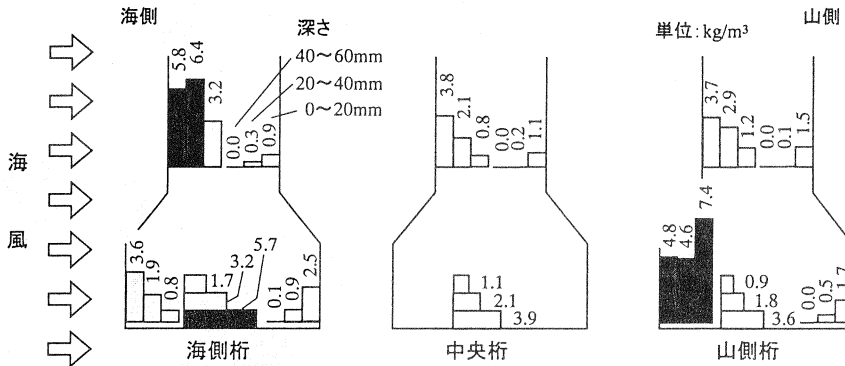


図-4 桁位置ごとの塩化物イオン量測定結果

4. 補修工法の選定

以上の調査結果をもとに、補修工法の検討を行った。その結果、現時点では構造物の劣化が比較的軽微であり断面修復に要する費用がほぼ不要であること、鉄筋近傍の含有塩化物イオン量が腐食発生限界値と目安される  $1.2\text{kg/m}^3$  を超えている<sup>1)</sup> こと、可能な限り繰り返し補修を回避することから、電気防食工法を採用することとした。これらの選定基準として表-1 に示す各種補修工法の適用範囲を参考とした<sup>2)</sup>。

表-1 各種補修工法の適用範囲<sup>2)</sup>

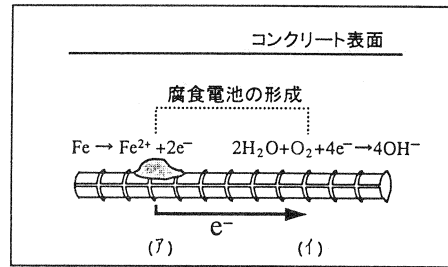
補修工法の種類	適用範囲	備考
表面被覆工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート中のCl<sup>-</sup>量が<math>1.2\text{kg/m}^3</math>以下</li> <li>・コンクリート表面の劣化度が1*を超えない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・飛沫帯、干満帯における施工では施工中に付着するCl<sup>-</sup>に注意</li> </ul>
断面修復工法 (+表面被覆)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・劣化度1*を超える場合 (ただし、腐食発生Cl<sup>-</sup>量の到達位置までコンクリートをはつる)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼材裏側まではつる場合は、構造物としての安全性に注意</li> <li>・飛沫帯、干満帯における施工では施工中に付着するCl<sup>-</sup>に注意</li> </ul>
電気防食工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Cl<sup>-</sup>量の有無、多少にかかわらず</li> <li>・どのような劣化レベルの構造物にも適用可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリートの比抵抗が大きい場合、コスト的に不利なことがある</li> <li>・環境条件が2つ以上にまたがる場合などでは、防食回路を分けて施工する必要があり、手間がかかる</li> </ul>

5. 電気防食工法

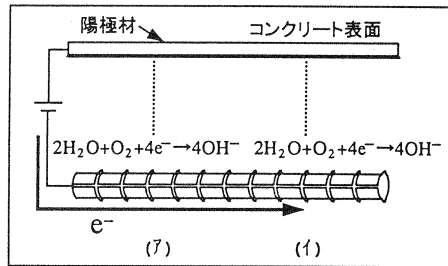
5.1 電気防食工法の概要

電気防食工法は主として塩害の補修方法として用いられ、厳しい環境下でも鋼材腐食を防止できる工法であること、また塩化物イオンを含有するコンクリートの除去が不要であり、鉄筋の防錆処理も不要なこと、さらに防食効果の確認が容易であることなどの特徴を有している。

コンクリート中にある鋼材の腐食は図-5(a)のように、電気的に異なる2種類の状態が鋼材に生じ、腐食電池を形成することによる。この状態では図中(i)の部分は腐食しないが、(7)の部分では鉄が溶解する化学反応 ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ) を生じ、腐食する。一方、電気防食ではコンクリート表面に設けた金属（陽極材）から鋼材へ電流を供給してこの間に電位差を与えることによって、鋼材の全ての部分が図-5(a)の(i)の状態となり、鋼材内での電位差がなくなる。これによって鋼材に腐食電流が流れなくなり防食される（図-5(b)）。



(a) 鋼材の腐食



(b) 電気防食

図-5 腐食反応と電気防食による防食反応

5.2 電気防食工法の種類

電気防食工法には、外部電源から電流を流す外部電源方式と、鋼材よりイオン化傾向の大きい金属を陽極材として鋼材と導通させ防食電流を確保する流電陽極方式とがあり、これらは陽極システムの相違により数種類に区別される。今回は以下の5工法を採用し、表-2の通り施工した。

(1)1 連目：亜鉛シート工法

今回採用した中で唯一の流電陽極方式で、陽極材としてシート状に加工した亜鉛板をコンクリート表面に取付け、内部鋼材との間に防食電流が流れるようにして腐食を抑制する。電源が不要であり過防食の心配がないなどの特徴を有するが、亜鉛板、バックフィル材、保護

表-2 電気防食工法別配置

桁番号	防食方式	工法種別
No.1	流電陽極	亜鉛シート
No.2	外部電源	チタングリッド
No.3	外部電源	チタン溶射
No.4	外部電源	チタンメッシュ
No.5	外部電源	チタンロッド

材などが設置されるため死荷重が増加するほか、材料が工場加工なので現地での寸法確認などに注意を要する。

(2)2 連目：帯状陽極（チタングリッド）工法

コンクリート表面に溝を設け、リボン状のチタン陽極を連続的に配置する方法である。特徴として、死荷重の増加がない、比較的施工が容易であるなどが挙げられる。

(3)3 連目：陽極溶射（チタン溶射）工法

コンクリート表面にチタン陽極を直接溶射する方法である。どのような形状でも容易に陽極材を設けられる点が特徴的であり、死荷重の増加もない。この工法は日本では導入間もないことから、構造物全体に採用するのは今回が最初である。

(4)4 連目：網状陽極（チタンメッシュ）工法

コンクリート表面に網状のチタン線を配置する方法である。鋼材への電流を比較的均一にできることが期待されるが、陽極材保護のためにセメント系などでオーバーレイ材を施すため、死荷重が増加する。

(5)5 連目：陽極内部挿入（チタンロッド）工法

コンクリート部材にφ10mm 程度の孔を設け、棒状陽極材（チタンロッド）を挿入する方法で、コンクリート表面に陽極材を設置しない点が他とは異なる。コンクリート表面の処理が比較的少ないため施工が容易であり、部材内部の鋼材を防食できる点が特徴的であるが、孔をあける際に内部鋼材との接触に注意を要する。

5.3 施工

(1)施工部位および手順

施工部位は主桁下フランジとした。施工手順を図-6に示す。

(2)鉄筋導通確認

防食対象の鋼材は電氣的に繋がっている必要があるため、各桁ごとに鉄筋をはつり出し、導通試験を行った。導通が得られない場合は、導通用の鉄筋を溶接し導通を確認した。

(3)劣化部分のはつり

電気防食を行う補修範囲で、劣化しているコンクリートをはつりとした。

(4)断面修復

はつり箇所や剥落、鉄筋露出箇所を電気抵抗の小さい特殊セメント系補修用モルタルで断面修復した。

(5)照合電極取付

照合電極は、防食対象鋼材の電位を測定するためのもので、露出した鉄筋に照合電極を添わせてケーブルタイにより設置した。

(6)排流・測定端子取付

排流端子は防食対象鋼材と陽極との間で電気回路を構成するための端子であり、測定端子は防食効果を確認するためのモニタリング回路を構成する端子である。これらの端子は、露出させた鉄筋に直接溶接して取り付けた。

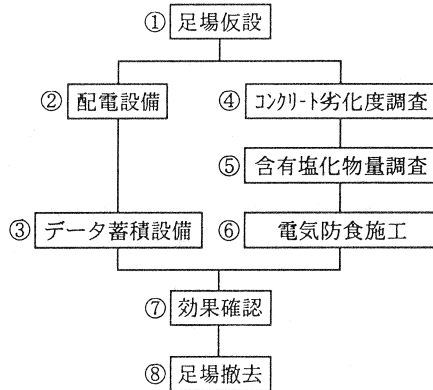


図-6 電気防食工法施工フロー

#### 5.4 施工時の各工法別問題点と対策

##### (1) 亜鉛シート工法

コンクリート表面に、型枠の目地段差や桁のキャンバーによる曲率によって亜鉛板が密着しない部分が発生した。それらの箇所は亜鉛板と同じ構成材料をコンクリート面に塗布し、周囲をエポキシ樹脂でシールした。

##### (2) チタングリッド工法

桁座下面部でチタングリッドの埋め込みに手間がかかった。また、跡埋めモルタルに浮きがみられ、これらの箇所は撤去したのち再施工した。

##### (3) チタン溶射工法

コンクリートとオーバーレイとの密着力を確保するため、下地処理でコンクリート表面の汚れ、レイタンスなど、付着している異物をブラスト処理した。サンドブラスト完了後、コンクリート表面に電気的導通がとれない鋼材（くぎ、結束線など）やスペーサーが多数発見され、撤去または陽極と鋼材が接触しないようエポキシ樹脂を塗布して絶縁した。特に、金属スペーサーがシース下端に二重配置されていたため、シースを損傷しないよう特段の注意を要した。

##### (4) チタンメッシュ工法

チタン溶射方式と同様に下地処理と、シースの損傷防止に注意を要した。

##### (5) チタンロッド工法

コンクリート中に挿入するチタンロッドが鉄筋と接触しないよう、鉄筋探査機を使用しチタンロッド設置箇所を決定した。また、電気的導通のとれていない鋼材（くぎ、結束線など）、スペーサーが多数あり、チタン溶射方式同様に特段の注意を要した。

#### 5.5 通電量の決定

現在、主要機関が制定している指針に示されている防食判定基準<sup>2,3,4)</sup>を大別すると、電位シフト基準による方法と防食電位または所用防食電流を直接測定により決定する方法とに分類することができるが、今回は電位シフト基準による方法を採用し、以下の手順で通電量を決定した。

- ①照合電極位置での自然電位の測定
- ②任意の電流を印加する。
- ③5分後の電位を測定する。このときの鉄筋の電位は通電電流遮断直後の電位（Instant Off 電位）を

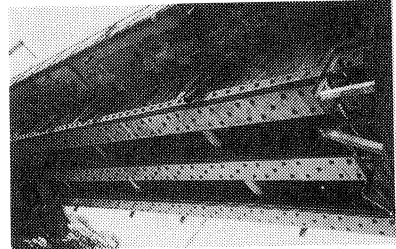


図-7 亜鉛シート工法（1連目）

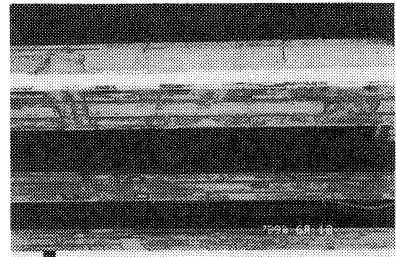


図-8 チタングリッド工法（2連目）

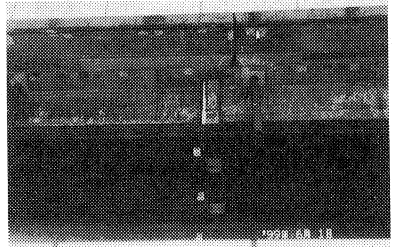


図-9 チタン溶射工法（3連目）

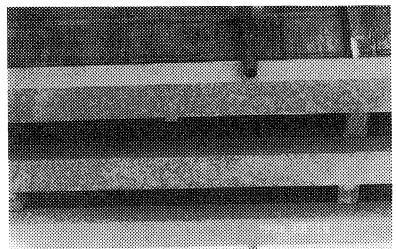


図-10 チタンメッシュ工法（4連目）

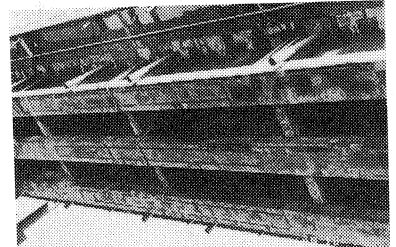


図-11 チタンロッド工法（5連目）

測定している。

④ 暫時電流を増加し、③の作業を繰り返す。

⑤ ①～④の作業で得た電流と電位との関係をグラフにプロットする。

⑥ グラフから鉄筋の自然電位が100mV以上分極するのに必要な電流量を推定し、通電電流を決定する。

以上の試験(E-logI試験)により、コンクリート表面積に対する通電電流量が決定される。

## 5.6 防食効果

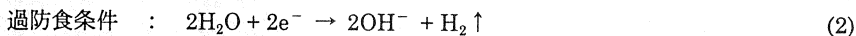
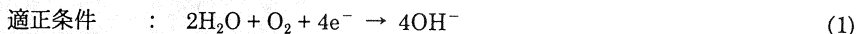
通電電流が少ない場合には防食が不完全になり、多い場合には過防食になる。これらを考慮して、内外の主要機関が制定した指針に示されている判定基準を参考に、以下の通り防食基準を決定した。

### (1) 防食の確保

防食電流遮断直後の電位変化量が100mVの場合、防食電流は腐食電流の少なくとも2倍程度あり、十分に防食されていると考えられる<sup>1)</sup>。したがって、電位変化量が100mV以上あることとした。

### (2) 過防食の防止

適正な条件では鋼材付近で酸化還元反応を生じるが、過防食条件では水素発生反応も生じる<sup>1)</sup>。



鋼材は高強度なほど水素脆化を生じやすいので、PC鋼材は鉄筋よりも水素の影響を大きく受ける。したがって、PC構造物の電気防食では過防食を防ぐことが特に重要である。式(2)の反応は平衡電位よりも卑な場合に生じるので、ここでは防食電流遮断直後の電位を-1.0V(vs.Ag/AgCl電極基準)より貴な電位であることとした。

### (3) 防食状況

通電1週間後および半年後にモニタリング装置を用いて鉄筋の防食状態を確認した。いずれの工法も防食電流遮断直後の電位変化量は100mV以上であったほか、防食電流遮断直後の電位は-1.0Vより貴であり、現時点では各工法とも適切に防食されていることが確認された。今後も適宜測定を行い、維持管理していく予定である。

## 6. おわりに

今回、塩害を受けて劣化した構造物に電気防食による補修を実施した。塩害構造物の補修に電気防食工法を採用した例は当社では最初であり、1個所で5種類もの電気防食工法を採用して効果を検証できるのは他に類をみない。また、チタン溶射工法については、国内では1構造物への採用としては最初である。今後、これらの経過を追跡して効果を検証し、構造物の延命と安全性の向上を目指していきたいと考えている。

## 【参考文献】

- 1) 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,1994.10
- 2) 委員会報告「コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告」：コンクリート工学年次論文報告集,Vol.17,No.1,pp.1～10,1995.6
- 3) 沿岸開発技術研究センター：港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書－劣化防止・補修マニュアル,1987.9
- 4) 建設省土木研究所・土木研究センター：コンクリート構造物中の鋼材の電気防食要領(案),1988.8