

報告 面状陽極方式による電気防食工法の防食性と耐久性の評価

高山 充直*¹・松尾 賢*²・池田 泰博*¹・松田 芳範*¹

要旨：鉄道 PC 桁に施された電気防食工法（面状陽極方式：チタン溶射）について、20 年経過後の防食効果と陽極システムの耐久性について調査を行った。長期間にわたる電流密度や各電位のモニタリングから、現在も防食効果を維持していることが確認された。また、電気防食工法の導入によって、副次的効果として得られる鉄筋近傍の環境改善効果も期待できる結果が得られた。一方、復極量とオフ電位について面状分布で評価した結果、面状陽極ではあるが部位毎に電位のバラツキがあることがわかった。また、チタン溶射の溶射被膜には剥離が生じていたことから、この影響について評価するとともに、発生原因について考察した。

キーワード：面状陽極方式、チタン溶射、塩害、復極量、防食効果、耐久性

1. はじめに

厳しい塩害環境に曝された経年 25 年の鉄道橋 PC 桁に対し、塩害対策として電気防食工法を導入してから 20 年が経過した。陽極システムには面状陽極（チタン溶射）方式（以下、チタン溶射方式）が採用されている。一般に、外部電源方式のチタン系材料を用いた陽極材では、NACE（National Associations of Corrosion Engineers）から提案されている促進試験¹⁾を実施し、陽極材の電位変化量の基準を満足することで、40 年以上の耐用年数が期待できる。しかし、これは陽極材の耐久性を確認する試験であり、陽極システム（陽極材、通電点など）や電気防食工法の長期耐久性や防食効果を直接的に保証できるものではない。本 PC 桁は、電気防食工法導入以前に塩害による鉄筋の腐食やひび割れ、剥離などの損傷を受けている²⁾。導入時には、それらの既存変状に対する補修がおこなわれ、その時点の PC 桁のコンクリート品質の状態や補修箇所の耐久性および、補修材料の電気抵抗などが防食効果や陽極システムの耐久性に影響すると考える。そのため、導入以降、電流密度や各種電位について継続したモニタリングをおこなっている。また、導入から 21 年目には陽極システムの長期耐久性及び電気防食の防食効果を確認することを目的とした詳細調査を実施した。

本稿では、各種電位に関する長期間のモニタリングと PC 桁に近接した詳細調査より、電気防食工法の防食効果と陽極システムの耐久性を評価するとともに、チタン溶射方式の溶射被膜に生じた剥離の影響とその原因について考察する。

2. 調査概要

2.1 電気防食工法の概要

(1) 橋梁概要

調査を行った橋梁は、1974 年に建設されたポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋（支間 19.0m、3 主桁）である。日本海沿岸から約 150m の位置にあり、海岸線と本橋梁の間には、道路橋と単線の鋼鉄道橋があるのみである。電気防食工法が導入されたのは 1998 年（経年 25 年）であり、図-1 に示すとおり、電気防食範囲は、主桁下フランジ部 85.5m²で施されている。

図-2 に電気防食工法導入前の変状の状況を示す。主桁コンクリートの下フランジの隅部のかぶりコンクリートに剥離・剥落が生じ、橋軸方向鉄筋の一部に断面欠損が認められたが、PC 鋼材の腐食は生じていなかった²⁾。変状程度は、加速期初期から後期であったと考えられる。

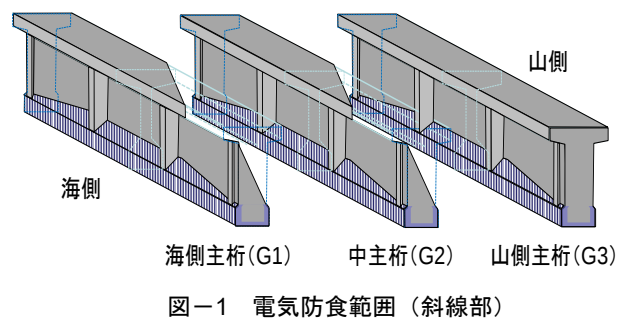


図-1 電気防食範囲（斜線部）



図-2 電気防食導入前の主桁劣化状況（1998年）

*1 東日本旅客鉄道（株）構造技術センター（正会員）

*2 東日本旅客鉄道（株）長野土木設備技術センター（正会員）

図-3 に 1998 年の電気防食工の導入前に測定されたコンクリート中の塩化物イオン濃度(以下、塩化物濃度)の分布状況を示す。測定試料は、海側主桁(G1)と山側主桁(G3)のウェブの海側面と山側面からコンクリートコアを採取して分析を行った。最も塩化物濃度が高いのは、海側の G1 桁海側面であり、表面から深さ 10 mm の位置で 6.21kg/m^3 の塩化物濃度が測定されている。軸方向鉄筋かぶり厚は表面から 40 mm の深さであるが、鉄筋以深の 50 mm の位置で 2.12kg/m^3 が測定されている。2018 年制定コンクリート標準示方書(維持管理編)³⁾によると、コンクリート中の鉄筋の腐食発生塩化物濃度(C_{lim}) (以下、発錆限界)は、コンクリートの水セメント比とセメント種類から推定される。設計図書から、水セメント比(W/C)は 34% とし、PC 桁であることから早強セメントを使用していると仮定すると、式(1)³⁾から発錆限界 1.85kg/m^3 が算出される。この結果から、1998 年の調査時点で G1 桁の海側面では内部鉄筋の発錆限界を上回る塩化物が浸透・拡散していたことが推定される。G3 桁についても同様に海側面では、鉄筋かぶり 30 mm の位置で 3.06kg/m^3 の高い塩化物濃度が測定されていることから、鉄筋位置でも発錆限界以上の塩分濃度であったことが推測される。一方、山側面は G1 桁、G3 桁ともに深さ 10 mm の位置で発錆限界よりも高い塩化物濃度は測定されていない。

$$C_{lim} = -2.2(W/C) + 2.6 \quad (1)$$

ここに、

C_{lim} : 鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

W/C : 水セメント比 ($0.30 \leq W/C \leq 0.55$)

また、G1 桁の海側面について、初期含有塩化物濃度を測定値最深部の測定値である 0.046kg/m^3 とし、式(2)³⁾に示す Fick の拡散方程式からコンクリート表面の塩化物濃度、塩化物イオンの見かけの拡散係数(以下、拡散係数)を推定した。図-3 に結果を示す。表面の塩化物濃度と拡散係数は、それぞれ 7.51kg/m^3 、 $0.51\text{cm}^2/\text{year}$ であった。2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料⁴⁾には、実構造物から得られた拡散係数と W/C の回帰式(3)が示されている。これより、普通ポルトランドセメントを使用する場合の拡散係数は、 W/C が 34% の場合、 $0.31\text{cm}^2/\text{year}$ と算出される。早強ポルトランドセメントの回帰式では無く、かつ、回帰式の元となるデータには大きなばらつきがあるため、この値に対して今回得られた拡散係数を比較することは必ずしも適当ではないと考えるが、回帰式の値に比べて拡散係数が大きいことは、本 PC 桁が置かれた塩害環境の厳しさを示していると考えられる。

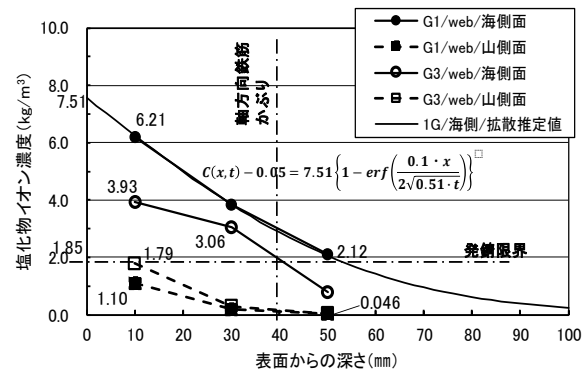


図-3 電気防食導入前(1998年)のCl⁻分布

$$C(x, t) - C_i = C_{0s} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{aps} \cdot t}} \right) \right\} \quad (2)$$

ここに、

$C(x, t)$: 深さ x (mm)、供用期間 t (年) における

塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_{0s} : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

D_{aps} : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm^2/year)

C_i : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

$$\log_{10} D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (3)$$

ここに、

D : 普通ポルトランドセメントを使用する場合の

コンクリートの拡散係数 (cm^2/year)

W/C : 水セメント比

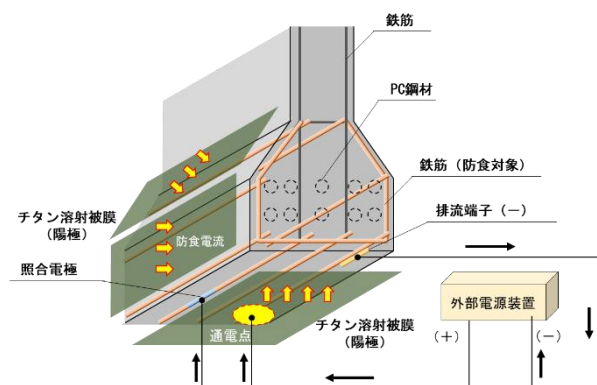


図-4 チタン溶射方式概要図

(2) 電気防食工法(チタン溶射方式)の概要

素地調整として、既存の剥離箇所を除去し、断面修復を行う。断面修復に使用したモルタル材料は、電気抵抗

が小さく、付着性に優れた無機系モルタルを使用している。図-4 にチタン溶射方式の概要図を示す。チタン溶射方式は、構造物の表面を素地調整し、チタン線材をアーク溶射により吹き付け面状の陽極被膜を形成する方式である。塗装のように被膜を形成できるため、複雑な形状の構造物にも対応ができ、自重の増加が極めて少ないため、橋桁への負担が少ない。面状陽極であるため、電流分布が良い外部電源方式である。

2.2 調査概要

(1) 外観目視と打音調査

溶射被膜の剥がれやひび割れを目視確認したほか、打音により、主桁コンクリートの剥離状態を調査した。主桁コンクリートの剥離が生じている箇所では部分的なはつり調査を行い、鉄筋の腐食状況を目視で確認した。

(2) 測定電位の推移と復極量の分布状況の調査

本 PC 桁では、年 2 回程度の定期点検を実施し、各測定値を継続して蓄積してきた。約 23 年間蓄積した電流密度と測定電位（オフ電位（Eof）、インスタントオフ電位（Eio）および復極量（ ΔEd ）から各電気防食方式の防食効果を評価した。各電気防食方式の電流密度は、3 主桁の総防食面積 85.5 m² で電流量を除して算出している。直流電源装置は定電流制御を用いており、モニタリング用の埋設照合電極は、二酸化マンガン照合電極である。防食基準と比較して評価する必要があるため、測定電位は飽和硫酸銅電極基準（mV vs. CSE）で換算した。また、防食基準は ΔEd が 100mV 以上であるほか過防食電流による PC 鋼材の水素脆性化の観点から、Eio が -1000mV より貴であることとした⁵⁾。また、電気防食工の評価には、鉄筋表面近傍の OH⁻イオンの生成による pH の上昇と塩化物濃度の減少などの副次的な効果が期待されることから、電位の分極による環境改善効果（以下、環境改善効果）にも着目することとした⁵⁾。さらに、環境改善効果

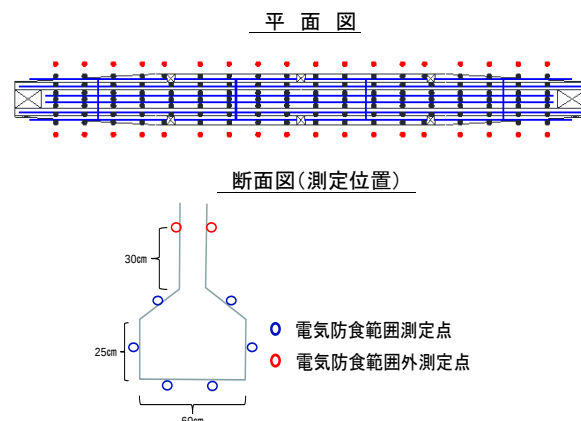


図-5 電位分布測定位置

は、コンクリート内部の鉄筋の Eof の経時変化により評価することができる。すなわち、電気防食工法における鉄筋の Eof は、自然電位と等価とされており、鉄筋の Eof が経時的に貴側（プラス）へ変化していることは、その鉄筋の耐食性が向上していることを示していると考ええる。特に、鉄筋の Eof が -200mV よりも貴側に推移すると、ASTM の防食判定基準により、「90%以上の確率で腐食なし」と判定することができる⁵⁾。次に、 ΔEd と Eof は、電位の推移のほか、海側主桁（G1）において、分布図を作成し、防食範囲における濃淡差・均一性から面状の分布状況を確認した。図-5 に電位の測定位置を示す。主桁下面は橋軸方向に 2 測線、フランジ側面やハンチ部、ウェブ側面は各 1 測線を 1m 間隔で電位を測定した。ウェブでの測定は防食範囲から 30cm 外側における電位影響を確認するために実施した。

(3) 溶射被膜の剥離と防食効果への影響

溶射被膜の導通状態と溶射被膜の剥離部における復極量を調査し、溶射被膜の剥離による防食効果への影響を調査した。

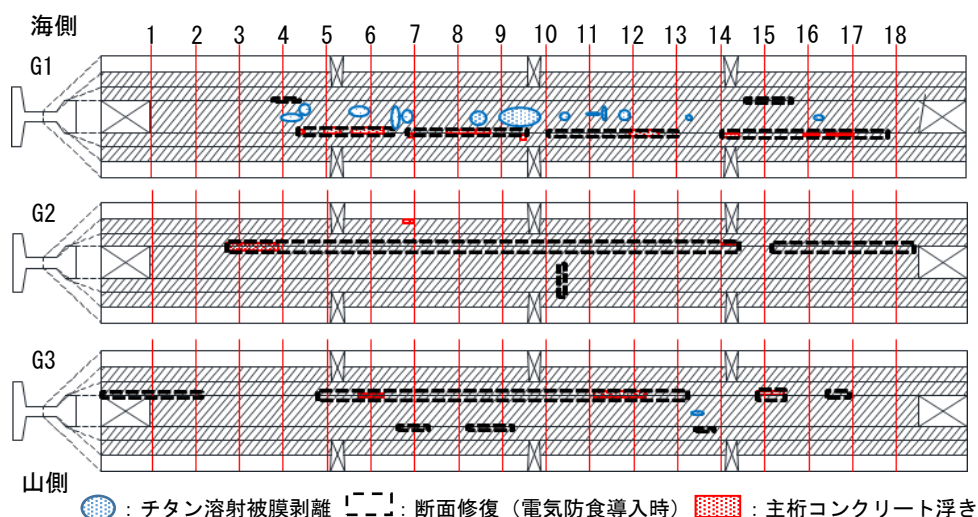


図-6 チタン被膜の剥離位置及び主桁コンクリートの浮き位置、断面修復位置



チタン被膜剥離状況



断面修復部の境界

3. 調査結果

3.1 外観目視と打音調査

(1) チタン溶射被膜の変状

図-6 に外観目視の結果を示す。図のように、主桁下面にチタン溶射被膜（以下、溶射被膜）の剥離が生じていることが確認された。剥離面積は合計 0.61m² であり、防食面積 85.5m² の 0.7% 程度であった。中桁の G2 では剥離は確認されず、主に海側の G1 桁で溶射被膜の剥離が生じていた。溶射被膜の剥離は、コンクリート表面に残存していた番線などの金属異物が原因で溶射被膜がアノード溶解したことが一般的な原因として挙げられる。しかしながら、剥離の範囲が海側の桁に集中していることから、海洋から供給される塩類などの付着物の影響によって剥離が拡大していることも考えられた。詳細については 4. 考察で後述する。

(2) 主桁コンクリートの浮き

調査より、防食範囲内に合計 1.27m²(1.5%)の浮きを確認した。浮きの発生は、3 主桁ともにほぼ主桁下フランジの隅部で生じている。この部位は塩害による主桁コンクリートのひび割れなどの変状が生じやすいことから、電気防食工法導入前に断面修復工による補修が行われていた箇所と推察された。しかしながら、断面修復位置を記録した資料が残されていないため、表面の色や状態の違いを目視で区分し、図-6 のように断面修復部を特定した。この結果、主桁下フランジの隅部の浮きは、全て断面修復部で生じており、断面修復部のうちの、約 2 割に浮きが生じていることがわかった。

3.2 測定電位の推移と復極量の分布状況の調査

(1) 電流密度と各電位

図-7 にチタン溶射方式の電流密度と各電位の測定値を示す。初回の Eof の平均値は -166mV であった。電流密度は 10mA/m² で運用を開始した。△Ed は、経過 8000 日（約 21 年）頃（図中破線枠）に防食基準を満たしていなかったが、通電電流を調整し、電流密度を 1.6mA/m² として基準復極量を満足させている。Eio についても過防食ではなく、現状では防食効果を維持していると判断される。Eio と Eof は、経過 3000 日（約 10 年）頃に卑化傾向であったが、それ以降は貴化傾向に転じている。特に Eof は -400mV 程度まで低下したが、近年は、鉄筋近傍の腐食環境の改善効果が期待される -200mV 前後で推移している。通常、電気防食工法の電流密度は 1mA/m² から 30mA/m² の範囲で運用されるが、本 PC 桁においては、1.6mA/m² 程度の電流密度で基準復極量を満足し、かつ、Eof の推移から、鉄筋近傍が不動態領域に近付いている様子がうかがえた。低電流でありながら防食効果と鉄筋近傍の環境改善効果が期待できる結果が得られた。

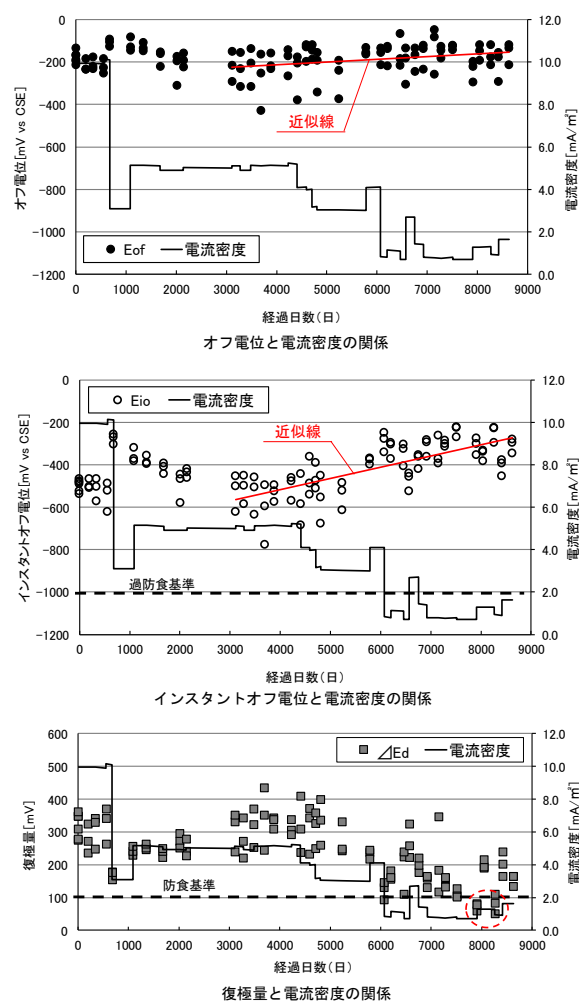


図-7 チタン溶射方式の電流密度と各電位

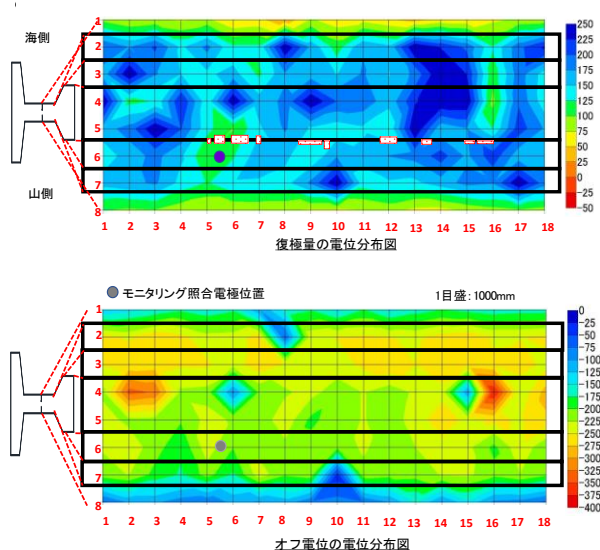
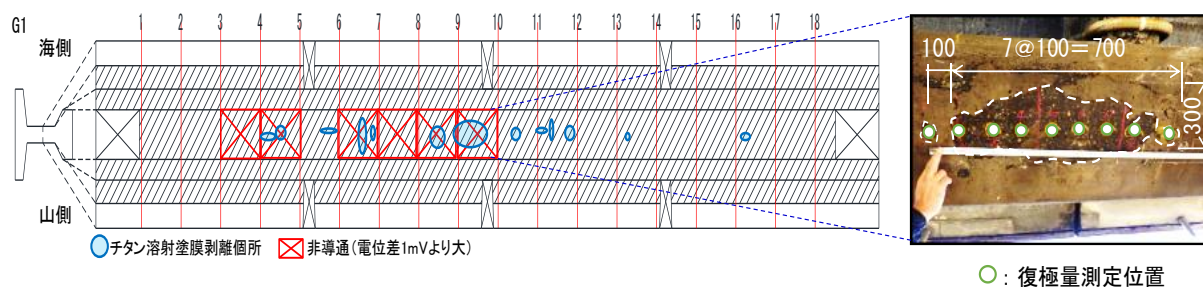


図-8 チタン溶射方式の電位分布図

(2) 復極量とオフ電位の面状分布

図-8 に G1 桁における、△Ed と Eof の面状分布図を示す。△Ed の面状分布図には、打音調査で確認された主桁コンクリートの浮きを併せて示す。面状分布から、全



図－9 非導通区間とチタンの剥離位置および復極量の測定状況

体的に ΔE_d は基準復極量の100mVを満足しており、防食効果は得られている。主桁コンクリートの浮きは、下フランジの山側隅部で生じているが、復極量との関係は図からは認められない。また、Eofの面状分布は、主桁の左右で電位の差がみられ、部分的には卑な電位の箇所がみられた。電流分布が良いとされる面状陽極であるが、面的な評価を行うことで違いが生じていることが確認された。

3.3 溶射被膜の剥離と防食効果への影響

(1) 導通試験

G1 から G3 の3主桁それぞれにおいて、下フランジの下面、側面、ハンチ部の計5面について、橋軸方向に1m間隔で電位差を測定し、被膜の導通の有無を確認した。図－9にG1桁で行った導通試験で明らかとなった非導通区間と被膜の剥離位置を示した。図に示す橋軸方向の通番は1m間隔の測定区間である。導通試験はマルチテスターを使用し、導通判断は、電位差計で1mV以下であれば双方は導通状態、1mVより大きければ非導通と判断した。非導通区間は下フランジ下面など、比較的大きな被膜の剥離部を測定区間に含む箇所に多く確認されたが、剥離部を含まない区間(図中の3-4および7-8)でも非導通であった。これらの区間のチタン被膜は陽極材として機能していない状態であると考えられる。なお、G2とG3では非導通区間は確認されなかった。

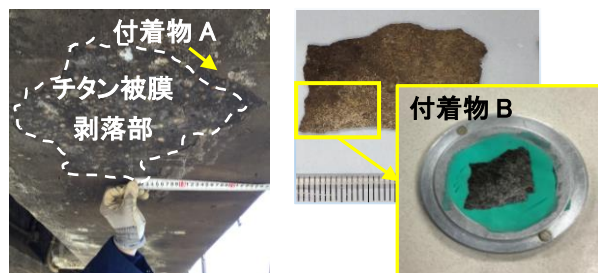
(2) チタン溶射被膜剥離部の復極量

被膜の剥離箇所における復極量を測定し、剥離による防食効果への影響を確認した。剥離は、図－9に示す9-10区間に生じたものが最も大きく、約30cm×70cmの範囲であった。この箇所において10cm間隔で復極量を測定した。図－9に測定位置を示す。復極量は109mVから189mVであり、全点で基準復極量を満たし、防食効果があると判断できる。被膜の一部が剥離しても、周囲に健全な被膜があることで、防食機能を補っているためと考えられる。なお、線状陽極材の設計設置間隔は30cmとされていることから、これと同様にチタン溶射などの面状陽極材でも30cm程度の剥離であれば、防食機能は保持されるものと考えられる。

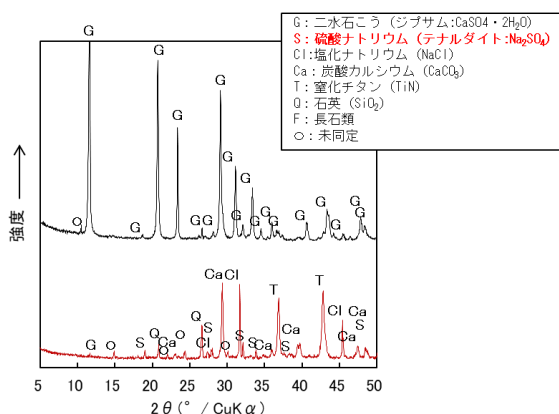
4. 考察

4.1 チタン溶射被膜の剥離と拡大のメカニズム

前述のとおり、溶射被膜の剥離の起点は、コンクリート表面に残置された金属などの異物によるアノード溶解による可能性がある。しかし、溶射された金属皮膜の剥離が拡大することについては、原因が明らかとなっていない。特に、G1桁(海側桁)に剥離が集中していることから、環境による作用が影響している可能性があると考えた。また、剥離が生じている主桁下面には、図－10に示す白色の付着物があることが目視調査から明らかとなっており、この付着物と剥離面の詳細な調査を行い、剥離の発生と拡大のメカニズムを考察することとした。



図－10 劣化部のチタン被膜状況と表面付着物



図－11 付着物A・BのX線回析図

(1) 付着物の分析

主桁下面の付着物は、溶射被膜表面で大気に曝されている付着物Aと剥離した溶射被膜のコンクリート面側にある付着物Bがある。これらを採取し、粉末X線回析(以下、XRD)により付着している白色の結晶性物質(化

合物)を同定した。図-11にX線回析図を示す。付着物Aからは二水石膏(ジブサム: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)が、付着物Bからは塩化ナトリウムや炭酸カルシウムのほか、硫酸ナトリウム(テナルダイト: Na_2SO_4)が検出された。いずれも硫酸塩(SO_4)を含む化合物である。確認のため、被膜が健全な部分においてXRDにより被膜とコンクリート面の観察を行ったが、硫酸塩は検出されなかった。これより、硫酸塩は海洋から供給された可能性がある⁶⁾。

(2) チタン溶射被膜の剥離拡大のメカニズム推定

調査より、付着物の主成分は、いずれも硫酸塩との化合物であることがわかった。主桁コンクリートの表面に付着した海洋由来の塩化物や硫酸塩は水溶性であることから、降雨等で流されてしまうが、雨垂れ付近では溶出したコンクリート中のカルシウムと反応し、付着物Aのように二水石膏として結晶化したと考えられる。また、付着物Bは雨水に触れないため溶解はせず、コンクリートと被膜の層間に滞留していたと考えられる。アノード溶解により劣化した被膜に硫酸塩が侵入し、コンクリートと被膜の層間で硫酸ナトリウムが生成され結晶化することで圧力を生じ、剥離を拡大させている可能性がある。

4.2 チタン溶射方式の長期防食効果

電気防食工法の導入から10年経過時点で行われた、布田らの調査報告⁷⁾によると、本PC桁では少なくとも前半(2000日以前)は、EioやEofの貴化が効率的な電気防食の必要条件であった。後半(2000日以降)は、EioやEofは卑化傾向に転じており、カソード分極抵抗が経時的に増大して効率的な電気防食が行われている。これは、鉄筋表面に生成された水酸化カルシウムなどの付着物による溶存酸素の拡散障害層が形成されたことによって酸欠状態が維持されたことを指摘している。本調査においても同様に評価を行った。図-12に通電期間毎の各電位と電流密度の関係を示す。図より、Eio、Eofともに一度卑化した後(図中矢印)、電位は貴化傾向となっている。電流密度を低下させるだけでは、必要な $\angle E_d$ が確保できないことから、カソード分極抵抗の増大は維持しながら、鉄筋のpH上昇や不働態化など環境改善に必要な酸素が供給されていることが推測される。

5. まとめ

本調査で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 電気防食工法導入後に生じた主桁コンクリートの浮きは、素地調整時に行われた断面修復箇所が生じている。この要因には、復極量の変化などの影響は確認されていない。
- (2) 復極量と各電位の調査から、基準復極量は概ね満足しており、防食効果は維持されていると評価できる。また、基準復極量の保持や各電位の貴化に必要な防

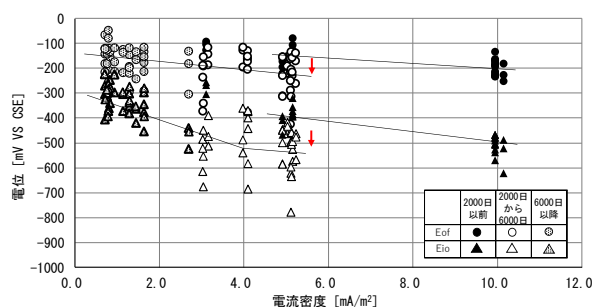


図-12 各電位と電流密度の関係

食電流は経年とともに低減できており、効率的な電気防食が行われている。

- (3) オフ電位の推移から、鉄筋近傍の環境改善効果が得られていると評価できるが、面状分布では電位に部位的なバラツキがあることがわかった。照合電極以外にも面的な評価を行うことが重要である。
- (4) チタン溶射方式の溶射被膜の剥離は、30cm程度の剥離であれば復極量は満足できると考えられる。
- (5) チタン溶射被膜の剥離は、劣化した溶射被膜の表面に海洋から供給された硫酸塩が付着し、ナトリウムなどの物質と反応することで生成される硫酸ナトリウム(テナルダイト)の結晶圧により溶射被膜の剥離が拡大している可能性がある。
- (6) カソード分極抵抗の増大は維持し、電流密度を低下させて長期間通電することで酸素が供給され、電位が貴化傾向で推移していることが推測される。

参考文献

- 1) NACE Standard: Testing of Embeddable Anodes for Use in Cathodic Protection of Atmospherically Exposed Steel Reinforced Concrete, TM0294-94, Item No.21225, Mar.1994
- 2) 吉田 昭二ほか：電気防食工法を採用したPC桁の補修について、SED, No.12, pp.48-57, 1999.5
- 3) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書(維持管理編), pp.140-145, 2018.10
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー108, 2002年版コンクリート標準示方書改訂資料, pp.83-88, 2002.3
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー157, 電気化学的防食工法指針, pp.51-54, 2020
- 6) 田中 茂ほか：海洋大気中における硫黄化合物の濃度分布と海洋からの生物起源硫黄の放出量の推定, 日本化学会誌, 1991.No5, pp.442-447, 1991
- 7) 布田 仁美ほか：コンクリート鉄道橋に適用した電気防食工法の長期検証結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1037-1042, 2010