工事報告

電気化学的脱塩工法および流電被覆工法の施工

― 小余綾(こゆるぎ)高架橋の塩害補修 ―

澤　健男 *1・末吉　史郎 *2・亀井　孝行 *3・毛利　忠弘 *4

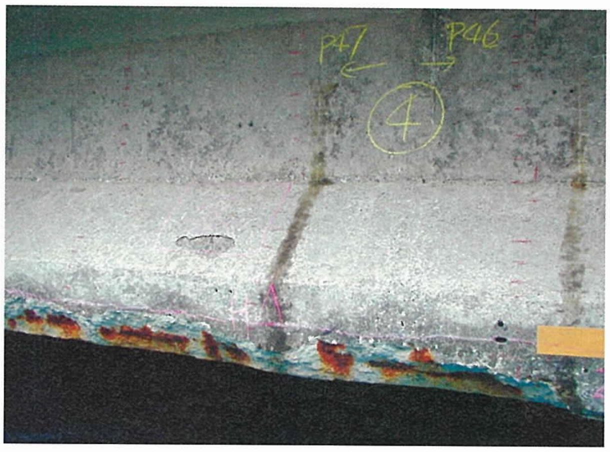
1. はじめに

近年，塩害により劣化したコンクリート構造物の補修工法として，電気化学的防食工法が採用されつつある。その中で，一定期間，直流電流を流すことでコンクリート中の塩化物イオンをコンクリート外に抽出する電気化学的脱塩工法[1]（以下，脱塩工法という）が注目されている。

小余綾高架橋は，国道1号西湘バイパスの海岸近くで約40年間供用されているPCポストテンションT桁橋である（写真‐1参照：脱塩工法完了後）。本橋は過去2回，塩害劣化により断面修復と表面被覆が実施されている。過去の補修では劣化部分を除去し断面修復を行ったが，塩分が桁内に残っていたために鉄筋腐食による体積膨張が起こり，剥離・剥落などの再劣化が起きている（写真‐2参照）。このため，劣化原因である塩分を除き腐食環境を改善することが必要と判断し，脱塩工法を実施した。さらに，小余綾高架橋の付帯工事として海岸近くのRCボックスカルバートも塩害環境下による劣化が顕在化しているため，内部鋼材と陽極材（アルミニウム·亜鉛・インジウム合金の溶射被膜）の電池作用により防食電流を流すアルミニウム合金系流電被覆工法（以下，流電被覆工法という）を実施した。

本稿では，前年度に脱塩工法を完了した小余綾高架橋P43－P45径間の工事結果[2]を踏まえ，脱塩工法という工事の特殊性に配慮した施工管理手法に関して，新しい脱塩中のモニタリング手法の提案および検証結果と流電被覆工法による塩害補修を行ったRCボックスカルバートの補修工事について報告する。

写真‐1　小余綾高架橋（P 45 - P 47）

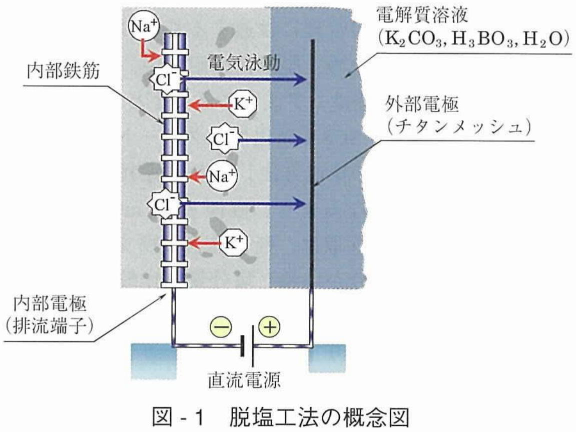


写真‐2　主桁の塩害劣化状況

2. 脱塩工法による塩害補修

2.1 概　　要

脱塩工法とは，コンクリート中に存在する塩化物イオンを電気化学的反応（電気泳動）によってコンクリート外部に移動させ，塩化物イオンを除去もしくは低減することで構造物の耐久性を向上させることを目的とした工法である（図‐1参照）。小余綾高架橋における脱塩工法は，表面被覆材を除去した後，コンクリート外部に陽極材としてチタ



図‐1　脱塩工法の概念図

*1 *Takeo SAWA*：国土交通省横浜国道事務所 厚木出張所 所長
*2 *Shiro SUEYOSHI*：国土交通省横浜国道事務所 小田原出張所
*3 *Takayuki KAMEI*：ドーピー建設工業㈱ 東京支店 工事部
*4 *Tadahiro MOHRI*：ドーピー建設工業㈱ 東京支店 技術部 課長

ンメッシュと電解質溶液からなる仮設陽極を設置し，陽極からコンクリート中の鉄筋（陰極）へ直流電流を流し，コンクリート中に存在する塩化物イオンを除去もしくは低減することを目的に実施した。

また，脱塩工法実施後の品質検査における判定基準は，構造物の耐久性の観点[3]から脱塩率が 70 %以上かつ塩化物イオン濃度 2.5 kg/m^3 以下とした。

2.2 品質管理手法

2.2.1 脱塩中の管理に対する要求性能

脱塩中の管理に対して要求される項目は以下のとおりである。

① 着目位置の塩化物含有量を適切に把握することができ，それを評価できること
② 管理値は構造物全体を代表していること
③ 脱塩の効果・傾向が定量的に評価できること
④ 簡易的な方法であること

2.2.2 ドリル法による塩化物含有量の簡易測定

脱塩中の管理に対する要求性能を満足する方法として，ドリル法による塩化物含有量の簡易測定[4), 5)]を採用した。その時の塩化物含有量の測定は，JCI－SC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析」[4), 5)]に準拠し実施した。本方法の長所・短所をまとめると以下のとおりである。

【長所】① ドリル法は微破壊検査であり，構造物の損傷を最小限に留めることができる
② 採取手間が比較的少なく採取箇所を増やすことができるので，構造物全体のモニタリングが可能である
③ 測定結果を得るまでの時間が短く，電流量の調整や脱塩終了の判断がすばやく行えるため，現場の手待ち時間がない

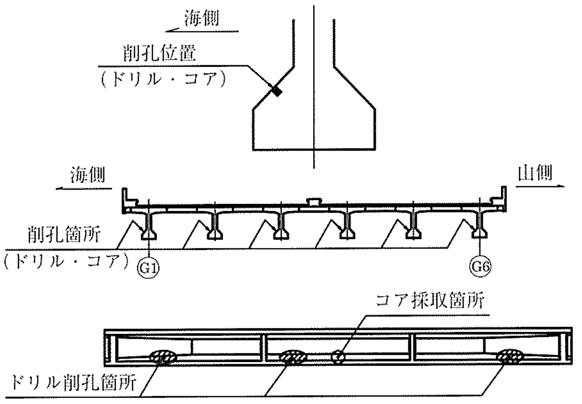
【短所】① ドリルの刃が骨材を避け，よりセメントペースト部分を削る傾向があり，コンクリート粉への粗骨材の混入割合の違いによって，ばらつきが出る
② 深さ方向の測定値精度がコア採取のものより劣る

ドリル法は脱塩中の管理には適するもののコア法よりも測定値の精度が劣るため，脱塩前，脱塩中，脱塩後に行う保証のための品質検査はコア法によることとした。

コア寸法は，JCI－SC8「硬化コンクリート中に含まれる塩分分析用コア試料の採取方法」[4), 5)]に準拠し，粗骨材最大寸法の 3 倍程度となるように直径 ϕ 75 mm 深さ 75 mm とした。コア試料の採取は，断面修復箇所を避けて図－2 に示すように飛来塩分が堆積し塩分量が比較的多いと考えられる主桁下フランジ海側ハンチ部とし，橋軸方向は支間中央付近の 1 主桁あたり 1 箇所とした。コア法の塩化物含有量の測定は，JCI－SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」[4), 5)]に準拠した。

（1）ドリル法による試料採取

ドリル径は直径 ϕ 25 mm とし，表面から深さ方向に 20 mm ～ 40 mm の部分を採取範囲とした。試料採取箇所は，図－2 に示すようにコア採取と同様に主桁下フランジ海側ハンチ部とし，橋軸方向は端部 2 箇所と中間横桁付近 1 箇所の 1 主桁あたり 3 箇所とした。試料は，ばらつきを考慮して 1 主桁 3 箇所分を混ぜて当該主桁の代表値とした。採取は 2 週間に 1 回の間隔で週末の通電停止時に実施し，1 週間ごとに P 45－P 46 径間 18 試料，P 46－P 47 径間 18 試料の採取を交互に繰り返した。



図－2 試料採取箇所

（2）塩化物含有量の簡易測定

塩化物含有量の測定は，鋼材腐食に関係しない硬化コンクリート中の固定化された塩化物は溶出させず，施工時および供用中に混入した全塩化物を完全溶解させる。方法は，前処理時間の短い JCI－SC5 に準拠した硝酸溶解法[4), 5)]とした。測定器で得られる塩化物イオン濃度は，溶液濃度 F [mg/l] で表示される。したがって，コンクリート単位体積あたりの塩化物イオン濃度 C [kg/m^3] で表すため以下の式で計算する。

$$C = \frac{2\,300 \times F \times V \times 10^{-6}}{W}$$

ここに，

C ：塩化物イオン濃度（kg/m^3）
F ：測定器の塩化物イオン濃度（mg/l）
V ：試料溶液の重量（g）
W ：試料（コンクリート粉）のはかり取り重量（g）
2300 ：コンクリートの単位体積質量（kg/m^3）

塩化物含有量の測定状況を写真－3 に示す。

写真－3 塩化物含有量の測定

当初は現場事務所内での即日短時間での測定を計画したが，試料数が多く担当職員の確保が難しいとともに，試験値の信頼性を確保するため，第三者機関である専門測定会社に委託した。採取は金曜日に行い翌週月曜日の午前中に測定結果を得て評価・判断した。

2.3 施工フローと施工管理

脱塩工法の施工フローと各塩分量モニタリング手法の測定頻度を図 - 3 に示す。

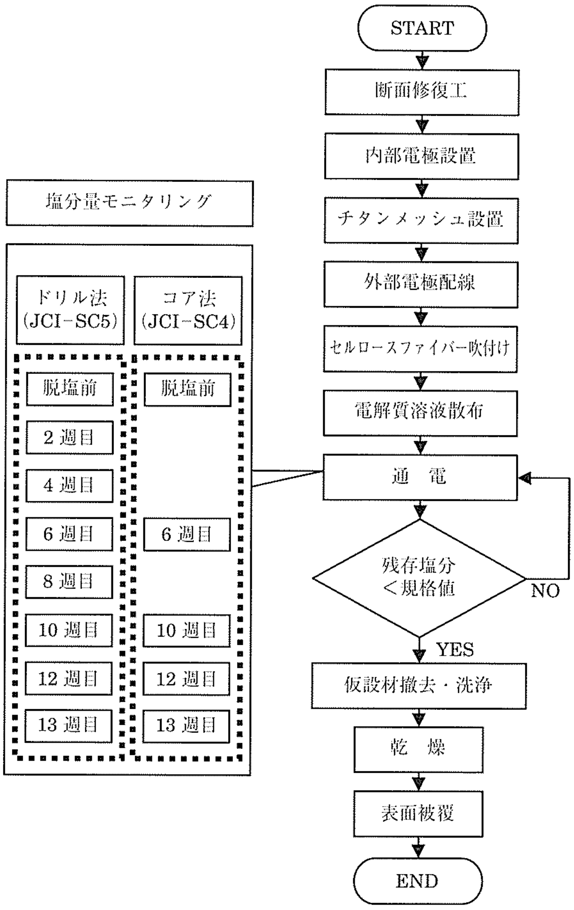


図 - 3 脱塩工法の施工フローと塩分量モニタリング

コア法は品質保証のための検査という位置づけとして，簡易測定法であるドリル法は電流量調整と脱塩進捗状況の目標との乖離を迅速に把握するために行う施工管理手法という位置づけとして塩分量モニタリングを実施した。

2.4 脱塩工法の工夫と脱塩効果

2.4.1 脱塩工法の工夫

脱塩の実施では，主桁かぶりの薄い箇所において，局部的に過度な電流が流れることによる鉄筋の付着劣化が懸念された。そこで，写真 - 4 に示すように抵抗体としてセロハンをシール材で貼り付け，電流が鉄筋に迂回して流れるように工夫し，表面全体に均一な電流が流れるように配慮した。また，散布した電解質溶液は，写真 - 5 に示すように主桁下フランジの下にプラスチック製の排水路を設け，所定の溶液集積設備に回収し，循環散布できるように工夫した。

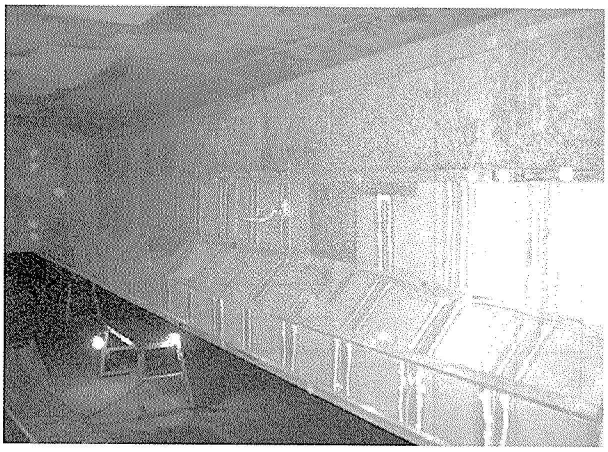


写真 - 4 電気の短絡防止

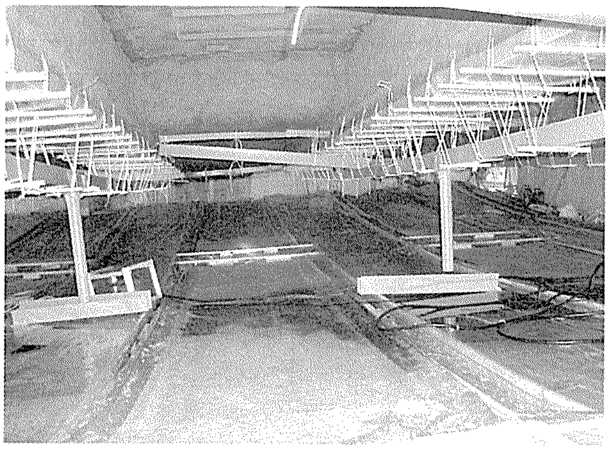


写真 - 5 電解質溶液の循環設備

2.4.2 通電の実施と塩分モニタリング

通電サイクルは月曜日から金曜日まで連続して通電し，土曜日，日曜日は通電を休止する間欠通電を行った。図 - 4 に通電と塩分量モニタリングのタイムスケジュールを示す。塩分測定の試料は金曜日に採取し，土曜日から測定を行う。その判定においてコア法は翌々週となるが，ドリル法は翌週の月曜日に判明するため，迅速に電流量の調整を行うことができた。また，ドリル法とコア法の併用は，2 週間ごとにコア法で行うよりも経済的であった。

電流量は前年度実績の P 43 − P 45 径間の工事結果[2] を踏まえ，脱塩率と塩化物イオン濃度が目標値を満足するように，コンクリート表面積あたりの電流密度として，1.5 A/m^2 で計画した。実施結果としては，脱塩率の推移を観察しながら，通電開始～第 7 週間 1.5 A/m^2，第 8 ～ 9 週間 1.7 A / m^2，第 10 ～ 13 週間 2.0 A/m^2 とした。このとき，第 10 ～ 13 週間の電流密度が 2.0 A/m^2 であったため，PC 鋼材の水素脆化の懸念が考えられたが，以下の①～④の理由により問題がないと判断した。

① 本橋の鋼材表面積あたりの電流密度は 4.2 A/m^2 であり，既往の知見[6] における鋼材表面積あたりの電流密度 5.0 A/m^2 で 8 週間の連続通電を実施しても拡散性水素吸蔵量は水素脆化を引き起こすとされている吸蔵量

	電流稼動状況	評価判断	塩分量モニタリング ドリル法 JCI-SC5	塩分量モニタリング コア法 JCI-SC4	電流量計測
月	通電				○
火	↓				○
水	↓				○
木	↓				○
金	↓		採取	採取	○
土	休止		測定	測定	
日			↓	↓	
月	通電 ←	電流調整	判定	↓	○
火	↓			↓	○
水	↓			↓	○
木	↓			↓	○
金	↓			判定	○
土	休止	目標値以下→通電を継続			
日					
月	↓				

図 - 4　脱塩工法の施工管理タイムスケジュール

に比べて非常に低い結果であったこと

② PC 鋼材の回りには鋼製シースがあり，実際には計算以上の鋼材表面積となっていること

③ 鋼材中の電位は一定と思われるが，電流はかぶりが大きい（抵抗が大きい）PC 鋼材と表面の鉄筋では同量の電流は流れず，PC 鋼材への電流密度は計算値よりも低くなること

④ 間欠通電を実施すること

2.4.3　脱 塩 効 果

コア法およびドリル法による P 46 – P 47 径間の残留塩分量の推移を図 - 5 および図 - 6 に示す。図 - 5 と図 - 6 をそれぞれ比較すると，ドリル法の測定結果に多少のばらつきはあるが，残留塩分量の推移は，両者ともほぼ同様の傾向を示した。また，脱塩率においても同様な結果であったことから，ドリル法は，脱塩中のモニタリング手法として十分に信頼できる結果であったと判断できる。

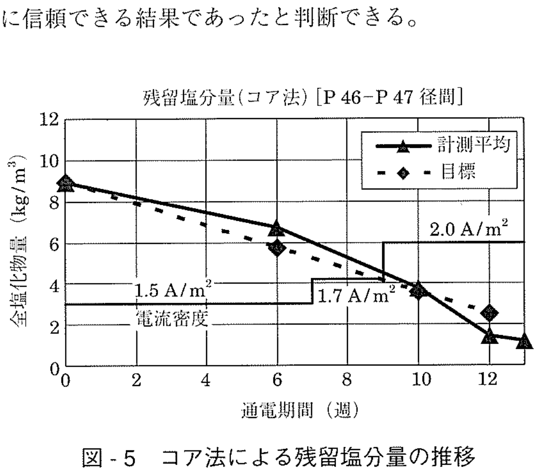


図 - 5　コア法による残留塩分量の推移

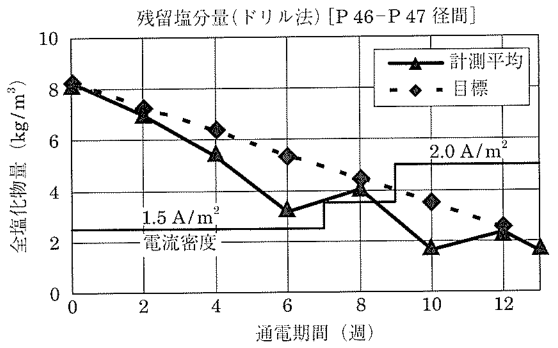


図 - 6　ドリル法による残留塩分量の推移

3.　流電被覆工法による塩害補修

3.1　概　　要

西湘バイパス直下の地下道 RC ボックスカルバートの塩害補修（写真 - 6 参照）として，新しく開発された流電被覆方式による電気防食工法を実施した。電気防食工法は，コンクリート表面に設置した陽極システムから鋼材へ電流を流し，鋼材の電位をマイナス方向へ変化させ，鋼材表面に生じる電位差をなくすことで，鋼材の腐食を電気化学的に抑制する工法である。その種類は，防食電流の供給方法により，外部電源方式と流電陽極方式に分かれる。

流電被覆工法の模式図を図 - 7 に示す。本工法の防食方

写真 - 6　ボックスカルバートの施工前状況

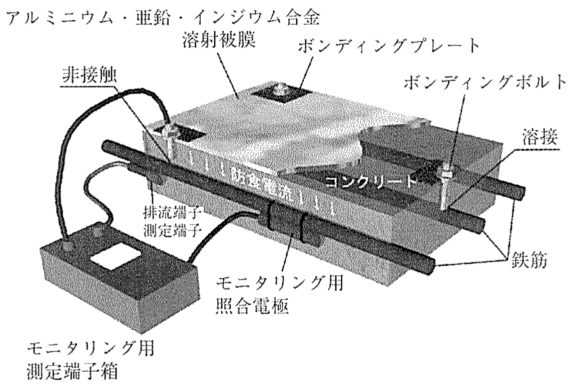


図 - 7　流電被覆工法の模式図

式は，流電陽極方式であり，犠牲陽極として鉄筋より電位の低いアルミニウム・亜鉛・インジウム合金（Al・Zn・In 合金）の溶射被膜により，電位差による電池作用を利用して防食電流を供給する。アルミニウム合金溶射被膜は，亜鉛単体の溶射被膜に比べ電流密度が 9 倍と高く，かつその効果が長く持続できることが特長である。

長所は，塗装感覚で施工ができること，防食電流を供給するための直流電源装置・配管・配線・電力が不要でありメンテナンスが軽減されること，陽極材の加工や設置の必要がなく，内部鋼材との短絡も心配がないこと等があげられる。しかし，陽極の消耗により補充溶射が必要なこと，電流調整ができないこと，海水飛沫が直接あたる海上構造物や漏水箇所には適用できない等の短所もある。

3.2 施工フローと施工管理

3.2.1 施工フロー

流電被覆工法の施工フローを図 - 8 に示す。

アルミニウム合金流電被覆材の溶射状況を写真 - 7 に示す。その施工は，コンクリート表面をブラスト処理した後に，写真 - 8 に示す専用溶射機を用いてアルミニウム合金線材を溶射する。溶射被覆厚は，被覆材の寿命予測を基に平均目標で 300 μm に設定した。本工法は，電気回路を形成するために電極を結ぶ「ボンディング」という作業を行う。具体的には，コンクリート内の鉄筋にボンディングボルトを溶接し，断面修復を行った後にコンクリート表面にボンディングプレートを取り付ける。ボンディングボルトは、歩行者の障害とならないように側壁の天井付近に 5 m ～ 8 m の間隔で設置した。

写真 - 7 流電被覆材の溶射状況

写真 - 8 専用溶射機

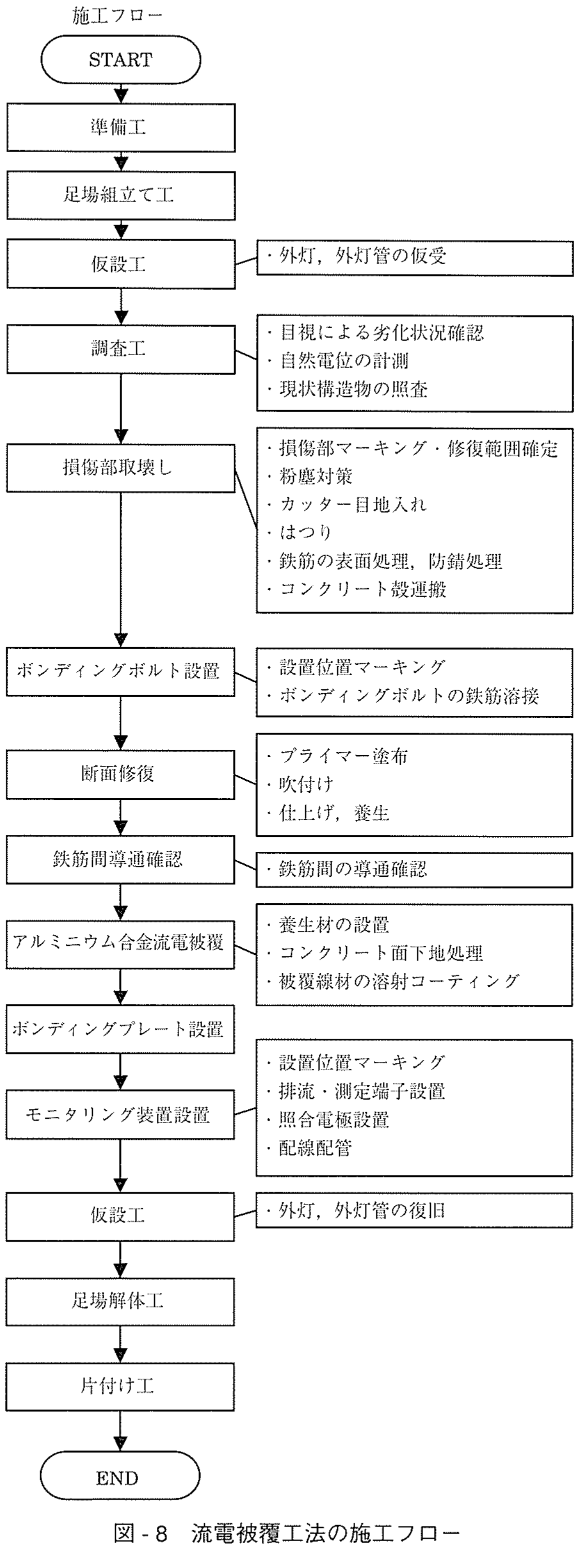


図 - 8 流電被覆工法の施工フロー

流電被覆の仕上り状況を写真 - 9 に示す。溶射被覆はハケ塗りの表面被覆と異なり，小さな凹凸やひび割れ等の表面状態が仕上り後も残るため，断面修復部と未修復部の違

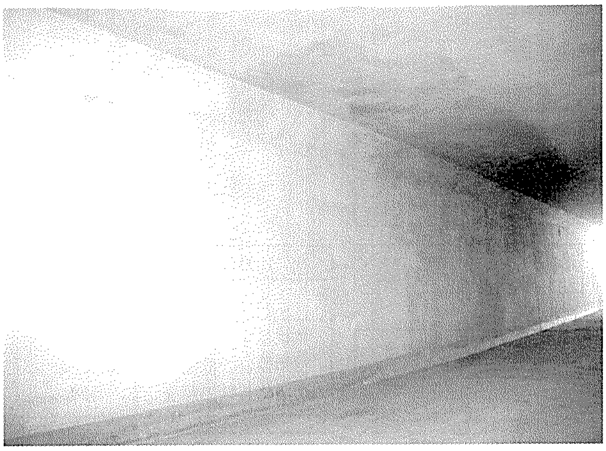


写真 - 9　流電被覆の仕上り状況

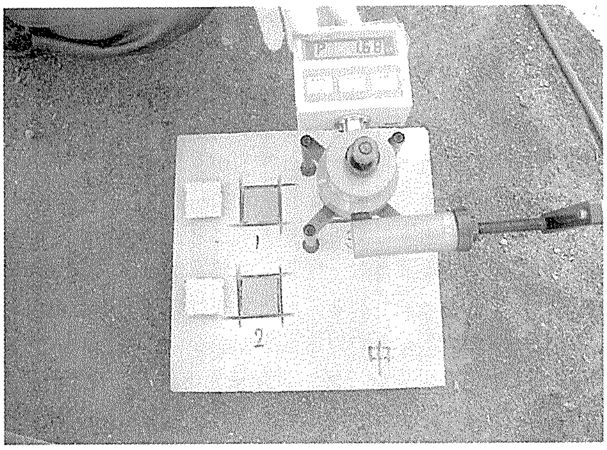


写真 - 11　流電被覆の付着試験

いが目立たないよう配慮した。また，美観を損ねる被覆ムラが生じないように横方向に往復溶射した後，縦方向に往復し入念な塗り重ねを実施した。

3.2.2　施工管理

施工時の品質管理項目は以下のとおりである。

① 鉄筋間導通確認試験（鉄筋の導通確認）

直流電圧計によりボンディングボルト相互の電位差が 1 mV 以下であることを確認する（一般的に電位差 1 mV 程度以下であれば、電気的導通は確保されている[1)]）。

② 陽極導通確認試験（被覆材の導通確認）

流電被覆完了後に直流電圧計により表面の流電陽極とボンディングボルト間の電位差が 1mV 以下であることを確認する（鉄筋間導通確認試験に準拠）。

③ 膜厚確認試験

既設コンクリート面にテストピース（鉄板）を貼り溶射を行い**写真 - 10** に示す膜厚測定器により測定する。

目標値：300 μm（下限値：270 μm（目標値の 90 %））

④ 付着強度試験

写真 - 11 に示すようにテストピース（コンクリート）に溶射し付着強度を測定する。

3.2.3　モニタリング

電気防食工法を適用した後の維持管理においては，電気防食装置の機能が保たれていることと，鋼材の防食効果が発揮されていることを確認し，その性能の水準を維持しなければならない。そこで，電流量を計測するためのボンディングプレートと排流端子、鋼材の電気的状態（電位）を計測するための照合電極・計測端子で構成されるモニタリング装置をボックスカルバート側壁の中央付近に 1 箇所設置した。

モニタリングは，電流計を用いて陽極と鉄筋間の電流を

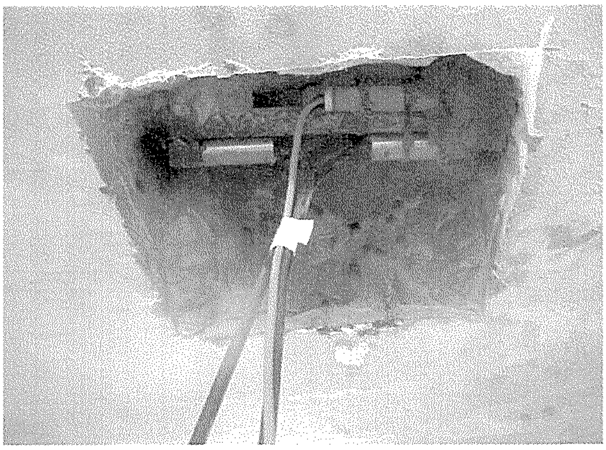


写真 - 12　モニタリング用照合電極の設置

写真 - 10　流電被覆の膜厚測定試験

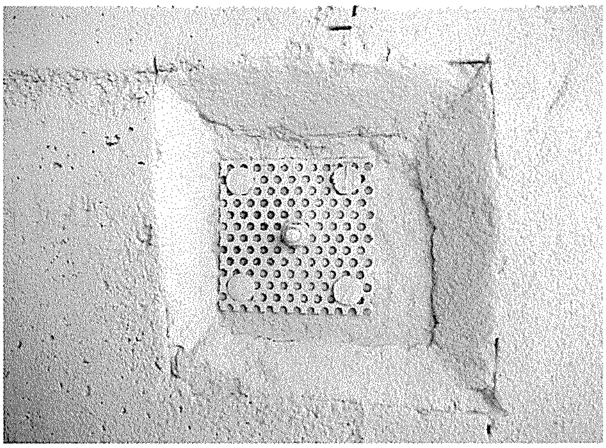


写真 - 13　ボンディングプレートの設置

定期的に記録し，積算電流量の経年変化から流電被覆の残存耐用年数を予測する。また，照合電極から鋼材電位を測定し，防食効果のレベルを推定する。

4. まとめ

脱塩工法の成功には，プロセス管理が重要と考える。すなわち，決められた期間内で塩化物含有量を目標値（規格値）以下とするために，施工中の電流量管理と脱塩進捗管理が決め手となる。脱塩工法の施工管理には，目的に合致した適切な試験方法が必要である。

今回の脱塩工事では，ドリル法を併用することにより，脱塩中の電流量調整と脱塩進捗状況の把握を適切に実施することができたと思われる。この管理手法が，今後の脱塩工事の参考になれば幸いである。

流電被覆工法による塩害補修工事においては，自然条件，現場条件により適不適が決まるが，PC－T桁橋やPCコンポ橋など断面に凹凸がある構造物に対して陽極の形状加工と配置の手間が省けるため、形状の複雑な構造物に対して適用性が高い。今後は、電源不要の簡易電気防食工法として経済性・施工性の面から適用事例が増えるものと思われる。

参考文献

1) 土木学会，コンクリートライブラリー 107　電気化学的防食工法設計施工指針（案），2001年11月。
2) 猪川　充，澤　健男，徳光　卓，古賀　敬之：小余綾高架橋への電気化学的脱塩の適用とその施工，土木学会第60回年次学術講演会，V部門，平成17年9月。
3) （財）土木研究センター，建設省総合技術開発プロジェクト　コンクリート耐久性技術の開発，塩害を受けた土木構造物の補修指針（案），平成元年5月。
4) （社）日本コンクリート工学協会，コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準（案），1987年4月。
5) （社）日本コンクリート工学協会，JCI規準集（1977～2002年度），2004年4月。
6) 田中　秀治，河野　広隆，渡辺　博志，久田　真：ポストテンション方式PCT桁への脱塩工法の適用に関する基礎的検討，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3巻，2003年10月。

【2006年7月7日受付】

新刊図書案内

PC技術規準シリーズ

外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法
設計施工規準

頒布価格：会員特価 4 000 円（送料 500 円）
：非会員価格 4 725 円（送料 500 円）
社団法人　プレストレストコンクリート技術協会　編
技報堂出版