コンクリート構造物の電気化学的防食工法[†]

牛 島 栄* 大 即 信 明** 宮 川 豊 章***

Electrochemical Corrosion Control Method of Concrete Structures

by

Sakae USHIJIMA*, Nobuaki OTSUKI** and Toyoaki MIYAGAWA***

Key words: Electrochemical corrosion control, Cathodic protection, Desalination, Realkalisation, Electrodeposition

1 緒 言

社会基盤が早急に整備されていった前世紀である 20 世紀は、まさにコンクリート構造物を造りさえすれば良い、建設の世紀であった。しかし、21 世紀は、従来の建設はもちろんのこと、コンクリート構造物を如何にうまく使いこなすかが問われる維持管理の世紀である。すなわち、我が国に蓄えられてきた、また、これから建設される膨大なコンクリート構造物群を適切に維持管理することが要求される。したがって、コンクリート構造物における適切なシナリオの提案、シナリオに基づいたライフサイクルコストの把握が必要となる。そのためには、コンクリート構造物に対する適切な維持管理対策方法が確立されなければならない。

このような中で、電気化学的防食工法は、コンクリート構造物の劣化機構のうちで最もよく見受けられる、塩害、中性化に対して、きわめて有効な補修工法である。また、劣化したコンクリート構造物に対する対策工法としてばかりではなく、近年では新設構造物に対する予防保全的な対策としても用いられている。現在は、北欧やアメリカを中心として普及してきており、日本国内においても研究・開発が進み、近年、施工実績も徐々に増加する傾向である。

また、電気化学的防食工法に関する規準の制定等の動向として、土木学会コンクリート委員会では、1999 年 7 月に「電気化学的補修工法研究小委員会」を設置した。電気防食工法、脱塩工法、再アルカリ化工法、電着工法の 4 種類の工法を包括する、性能照査設計に対応可能な設計・施工指針（案）を作成するための調査、研究を行い、2001 年 11 月に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）」¹⁾が発刊された。

指針（案）に関しては、指針（案）、電気化学的防食工法の設計施工マニュアル、更に、各方面の構造物管理者の方々にご協力を頂き、維持管理の現状と問題点、今

後のこの分野に望まれる技術的課題についてもアンケート結果として付属資料に取りまとめている。

本稿では、これらの資料をもとに、電気化学的防食工法の概要、適用の現状および前述のアンケート結果から得られた電気化学的防食工法適用の問題点について述べる。

2 電気化学的補修工法の種類および特徴

電気化学的反応を利用して構造物等の耐久性を向上させる技術としては、古くから船舶や海水中の鋼構造物の防食対策として電気防食工法が適用されている。本稿で述べる電気化学的防食工法は、コンクリート構造物の耐久性を向上させるために電気化学的な技術を適用することを目的とするものであるが、コンクリート構造物に対する電気化学的な防食技術の適用は比較的新しい技術である。電気防食工法は、米国で塩害によるコンクリート中の鋼材の腐食が問題となり始めた 1960 年代に、脱塩工法と再アルカリ化工法は北欧で 1970 年代に、電着工法は日本で 1980 年代にそれぞれ開発された技術である。

コンクリート中の鋼材はセメントの高アルカリ環境下で、鋼材の表面に不動態被膜が形成されており鋼材腐食から保護されている。しかし、塩化物イオンの侵入やコンクリートの中性化（炭酸化）および、ひび割れの発生等によりコンクリート中の鋼材の不動態被膜が破壊され、鋼材腐食が進行する。鋼材の腐食は電気化学的反応で進行するため、電気化学的防食工法をコンクリート構造物に適用することは非常に効果的である。電気化学的防食工法の適切な設計・施工とその後の維持管理によって確実にコンクリート構造物の耐久性を向上させることができる。

対象構造物は主として、既設コンクリート構造物において既に劣化が顕在化して、構造物の耐久性能が建設当初よりも低下している場合に行う「補修」であるが、将来の構造物の劣化に対して予防保全的措置として実施する「予防的補修」としても適用できる。また、新設コン

[†] 原稿受理 平成 14 年 6 月 7 日 Received June 7, 2002

* 正 会 員 (株)青木建設研究所 〒300-2622 つくば市要, Res. Inst., Aoki Corporation, Kaname, Tsukuba, 300-2622

** 正 会 員 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻 〒152-8552 東京都目黒区大岡山, Dept. of International Development Eng., Tokyo Inst. of Tech., Meguro-ku, Tokyo, 152-8552

*** 正 会 員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Dept. of Civil Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

クリート構造物の「予防的補修」としても適用できる。

従って、土木学会「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」²⁾における鋼材腐食を伴うコンクリート構造物の補修工法の一つとして、また、「コンクリート標準示方書〔施工編〕」³⁾における新設コンクリート構造物の所要の耐久性を確保する工法の一つとして適用することができる。

〔維持管理編〕²⁾では、塩害や中性化によって生じる鋼材腐食への対策として施される補修や補強に期待する効果として、①鋼材の腐食因子の供給低減、②鋼材の腐食因子の除去、③鋼材の腐食進行の抑制、④耐荷力の向上を挙げているが、電気化学的防食工法はこれらの内、①～③に関して特に期待される効果が大きい。

電気化学的防食工法の適用にあたっては、それぞれの工法に期待される効果を、その実績や適切な実験によって把握し、電気化学的防食工法の効果が持続していることを確認する事が大切である。また、適用した構造物の所定の維持管理区分に応じて、それぞれの工法のシステムに関して、その作動状況などの維持管理を行うことが極めて重要である。

電気化学的防食工法は、表Ⅰに示すように、通電期間や通電量、効果の確認方法などにそれぞれ特徴を有している。それぞれの電気化学的防食工法の特徴について、以下に説明する。

2・1 電気防食工法

電気防食工法は、鋼材の腐食が電気化学的反応によって進行することに着目し、鋼材に直流電流を継続的に流して鋼材電位を制御し、鋼材腐食反応を電気化学的に抑制することで、コンクリート構造物の耐久性を向上させる工法である。

そのために、電気防食工法では、コンクリート表面もしくは表面近傍のコンクリート中に陽極材を設置し、この陽極材からコンクリート中の鋼材（陰極）に向かって継続的に電流を流し、適切な防食電流が流れている限り、鋼材腐食を抑制することができる。

鋼材の防食に必要な電流量（防食電流）は、 $0.001 \sim 0.03\text{A/m}^2$ 程度が一般的で、継続して通電することが基本であるが、防食効果確認のための試験や停電等による短期間の通電の停止は可能である。防食電流や防食効果の確認、防食電流の供給システム（陽極材など）の性能とその耐久性等を把握し、適切なシステム全体の維持管理

を行うことが極めて重要である。主として、塩害環境下の既設コンクリート構造物に適用するが、予防保全を前提とした新設コンクリート構造物への適用も実施されており、既設コンクリート構造物と新設構造物の双方に適用できる。なお、中性化により鋼材腐食を受けたコンクリート構造物にも適用できる。

電気防食工法を大別すると、外部の電源から強制的に防食電流を流す外部電源方式と、内部鋼材と陽極材（例えば亜鉛など）の電池作用により防食電流を流す流電陽極方式がある。

外部電源方式および流電陽極方式の概要図を図1および図2に示す。

外部電源方式では、直流電源装置の(+)極にコンクリート表面またはその近傍に設置した陽極システムを、(-)極に防食対象鋼材を接続し、直流電源装置により両者間に防食電流を流し、電気防食を行う。直流電源装置によって防食電流の調整ができることが特徴である。

流電陽極方式は、コンクリート内部の鋼材よりも電気

図1 電気防食工法（外部電源方式）のシステム概要図

図2 電気防食工法（流電陽極方式）のシステム概要図

表Ⅰ 電気化学的防食工法の主な特徴

	電気防食工法	脱塩工法	再アルカリ化工法	電着工法
通電期間	防食期間中継続	約8週間	約1～2週間	約6ヶ月間
電流密度	$0.001 \sim 0.03\text{A/m}^2$	1A/m^2	1A/m^2	$0.5 \sim 1\text{A/m}^2$
通電電圧	1～5V	5～50V	5～50V	10～30V
電解液	—	Ca(OH)_2 水溶液等	Na_2CO_3 水溶液等	海水
効果確認の方法	電位または電位変化量の測定	コンクリートの塩化物イオン量の測定	コンクリートの中 性化深さの測定	コンクリートの 透水係数の測定
効果確認の頻度	数回/年	通電終了後	通電終了後	通電終了後

的に卑な金属の陽極システムをコンクリート表面あるいはその近傍に設置し、鋼材と接続させることで両者間の電位差を利用して防食電流を流し、電気防食を行う。電源設備が不要であることが特徴である。

また、陽極材の形状により、面状陽極方式、線状陽極方式、点状陽極方式に分類できる。面状陽極方式ではコンクリート表面全体に配置された陽極から、線状陽極方式では所定の間隔で線状に配置された陽極から、点状陽極方式では点状にコンクリート内部に配置された陽極から、それぞれコンクリート中の鋼材に防食電流を流す。それぞれの概念図を図3～5に示す。

このように電気防食の方式は、陽極材の種類の違いにより、数種類の方式に区別することができる。表Ⅱにこれらの特徴を示す。

2・2 脱塩工法

脱塩工法は、コンクリート中に存在する塩化物イオン

図3 面状陽極方式概念図

図4 線状陽極方式概念図

図5 点状陽極方式概念図

表Ⅱ 各種電気防食方式の特徴

陽極材の形状	陽極材の設置方法	陽極材の種類	電源方式
面状陽極方式	防食対象面全体に面状陽極を設置する	チタンメッシュ 導電性塗料 導電性モルタル チタン溶射 など	外部電源
		亜鉛板 亜鉛溶射 など	流電陽極
線状陽極方式	防食対象面に一定間隔で線状陽極を設置する	チタングリッド チタンリボンメッシュ など	外部電源
点状陽極方式	防食対象面に棒状陽極を点状に挿入し、設置する	チタンロッド など	外部電源

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できることに着目し、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工法である。

図6に示すように、コンクリート表面もしくは表面近傍のコンクリート外部に陽極材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鋼材（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（陰イオン）を仮設陽極側に移動させる。腐食因子である塩化物イオンを仮設陽極に取り込ませることにより除去もしくは低減させ、コンクリート中の塩化物イオン濃度を鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度以下とすることで、腐食環境下にある鋼材を再不動態化させる。

通常、 $1\text{A}/\text{m}^2$ 程度で、約8週間の通電が一般的である。また、脱塩処理後には、仮設陽極材は撤去する。

電解質溶液をコンクリート表面に供給し、保持する方法の一例として、表Ⅲに示す3種類の方式が実用化されている。また、仮設陽極に用いる陽極材や電解質溶液の一例を表Ⅳに示す。

適用後の塩化物イオンの再浸入や脱塩終了後に残存する塩化物イオンの再拡散等を考慮した塩化物の再浸透予測等を行うことや、脱塩処理後に塩化物イオンの外部か

図6 脱塩工法のシステム概念図

表Ⅲ 脱塩工法における実用化されている方式

方 式	仮設陽極の保持方法	保持材	特 徴	
			長 所	短 所
ファイバー方式	金属製陽極周辺へのセルローズファイバーの吹付け	セルローズファイバー	1) コンクリートの表面形状が複雑な場合でも、施工可能 2) 水平面、垂直面、ともに施工可能	1) 電解質溶液の蒸発や漏れが多い
パネルの取付方式	コンクリート表面にプラスチック製平板を固定し、その間に金属製陽極と電解質溶液を充填	プラスチック製平板	1) 電解質溶液の蒸発や漏れが少ない 2) 水平面、垂直面、ともに施工可能	1) コンクリートの表面形状が複雑な場合、施工が難しい
ボンディング方式	コンクリート表面に電解質溶液を溜め、その中に金属製陽極を仮設	なし	1) 施工が容易 2) 電解質溶液の漏れは少ない	1) 施工面が水平面（床面のみ）に限られる 2) 電解質溶液の蒸発が多い

表Ⅳ 脱塩工法の陽極材や電解質溶液の例

陽極材	チタン，チタン合金，貴金属メッキ合金 など
電解質溶液	Ca(OH) ₂ ，LiOH，Li ₂ CO ₃ の各水溶液 など

らの再浸入を防止するために、表面処理工法を併用することも含めて、適切な維持管理を行うことが重要である。

脱塩工法は、主として、鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度を超えている既設コンクリート構造物に適用されているが、予防保全を目的として鋼材腐食の劣化が顕在化する前の既設コンクリート構造物への適用も可能である。

2・3 再アルカリ化工法

再アルカリ化工法は、空気中の二酸化炭素によって中性化したコンクリート中に電気化学的反応（電気浸透）によって、アルカリ性溶液をコンクリート中に浸透させ、アルカリ性を再付与できることに着目した工法である。中性化したコンクリートを本来のコンクリートの有するpH 値程度にまで回復させ、鋼材を再不動態化することで、コンクリート構造物の耐久性を向上させることができる。

図7に示すように、コンクリート表面もしくは表面近傍のコンクリート外部に陽極材とアルカリ性溶液からなる仮設陽極を設置し、陽極から鋼材（陰極）へ直流電流を流して、コンクリート中にアルカリ性溶液を電気浸透させる。

電流量は、通常、1A/m²程度で、約1～2週間の通電が一般的である。また、脱塩工法と同様に、再アルカリ化処理終了後に仮設陽極を撤去する。

図7 再アルカリ化工法のシステム概要図

再アルカリ化工法は、コンクリート表面に仮設した陽極材とコンクリート表面との間に、十分な量の電解質溶液を供給することが大切である。電解質溶液がコンクリート中に電気浸透することにより、コンクリートが再アルカリ化する。したがって、設計に当たっては、電解質溶液の供給および保持方法を十分に検討することが望まれる。現在、再アルカリ化工法においては、表Vに示す3種類の方式が実用化されている。また、陽極材の例を表Ⅵに示す。

適用後の構造物の中性化予測等を行うことや、再アルカリ化処理後に二酸化炭素の外部からの再浸入を防止するために表面処理工法を併用することも含めて、適切な

表Ⅴ 再アルカリ化工法における実用化されている方式

方 式	溶液の保持方法	特 徴	
		長 所	短 所
ファイバー方式	ファイバーによる保水	1) コンクリートの表面形状が複雑な場合でも、施工可能 2) 水平面、垂直面、ともに施工可能	1) 電解質溶液の蒸発や漏れが多い
パネル方式	パネルによる液溜め	1) 電解質溶液の蒸発や漏れが少ない 2) 水平面、垂直面、ともに施工可能	1) コンクリートの表面形状が複雑な場合、施工が難しい
シート方式	シートによる保水	1) 施工が容易	1) 施工面が水平面(床面のみ)、垂直面（壁）に限られる 2) コンクリートの表面形状が複雑な場合、施工が難しい

表Ⅵ 再アルカリ化工法の陽極材や電解質溶液の例

陽極材	溶接金網、チタン、貴金属メッキ合金 など
電解質溶液	Na ₂ CO ₃ 、K ₂ CO ₃ の各水溶液 など

維持管理を行うことが重要である。

再アルカリ化工法は、主として、かぶりコンクリートが中性化している既設コンクリート構造物に適用されており、予防保全を目的とした鋼材腐食劣化が顕在化する前の構造物への適用も可能である。

2・4 電着工法

電着工法は、水中に存在する電解質イオンが電気化学的反応（電気泳動）によって、鋼材（陰極）側に移動し、ひび割れ部やコンクリート表面に無機系物質の電着物を析出することに着目した工法である。コンクリートに発生したひび割れの閉塞やコンクリート表面のち密化を図ることで、鋼材腐食の進行を抑制し、構造物の耐久性を向上させる。

図8に示すように、仮設陽極材をコンクリート表面から離して設置し、コンクリート中の鋼材を陰極として直流電流を流すことにより、水中の電解質イオンをコンクリート側に引き寄せることができる。コンクリートに発生しているひび割れ部等の陰極に近い位置から電解質イオンが電着物として析出し、コンクリート表面全体に無機系物質の電着物が広がり、コンクリートのち密化を図る。

電流量は、通常、海水中で0.5A/m²程度で、約6ヶ月の通電が一般的である。また、淡水中や干満帯では、析出速度が低下するので前述した以上の通電期間が必要となる。なお、電着工法では脱塩工法や再アルカリ化工法と同様に、電着処理後に仮設陽極材を撤去する。

図8 電着工法のシステム概要図

仮設陽極の方式には、コンクリート構造物の設置環境や施工範囲などによる仮設陽極の配置方法に応じて、水中施工方式と給水施工方式に大別される。水中施工方式と給水施工方式の2種類についての特徴を表Ⅶに示す。また、仮設陽極に用いる陽極材や電解質溶液の一例を表Ⅷに示す。

一般に、水中施工方式は海中構造物や地下構造物のように海水などの電解質溶液中に設置されている場合に適用され、コンクリート構造物に対向して電解質溶液中に仮設陽極を分散して設置することになる。

一方、給水施工方式は、干満帯部、気中部、陸上部などの構造物のように、海水が自然に供給されにくい施工環境の場合に適用される。海水もしくは人工の電解質溶液の給水によって通電することになるため、仮設陽極はコンクリート構造物の表面に絶縁性の保水材を介して一体的に取り付けられるような構造となる。

適用後の供用期間中の劣化進行予測等を析出した電着物の耐久性等に基づいて実施し、適切な維持管理を行うことが重要である。

電着工法は、主として海水中のコンクリート構造物の防食工法として適用されているが、新設時に発生したひび割れ対策としても適用可能であるので、新設コンクリート構造物と既設コンクリート構造物の双方への適用が可能な工法である。なお、海水および水中以外での適用も可能である。

2・5 工法適用の基本的な考え方

電気化学的防食工法は、表Ⅸに示すよう、それぞれの工法に期待される効果によって、構造物が保有すべき要

表Ⅶ 電着工法の陽極材および電解質溶液の例

陽極材	チタン電極、黒鉛電極、シリコン铸铁 など
電解質溶液	・海水、地下水、河川湖沼水などの自然水 ・塩化マグネシウム、硫酸亜鉛などの人工水溶液

表Ⅸ 防食対策の目的と期待される主な効果

電気化学的防食工法名	防 食 対 策	期待される主な効果
電気防食工法	腐食反応の抑制	腐食電池の抑制
脱塩工法	鋼材の腐食環境の改善	塩化物イオン濃度の低減
再アルカリ化工法		アルカリ性の回復
電着工法	腐食因子の供給低減	ひび割れの閉塞とち密化

表Ⅷ 電着工法における実用化されている方式

方式	施工対象	陽極材の保持方法	特 徴
水中施工方式	・海中部 ・干満帯部(平均水面以下) ・地下土中部	・ロープによる海中係留 ・シンカーによる海底設置 ・その他	・施工が簡単で大規模補修が可能 ・構造物の形状に左右されない ・仮設陽極の配置に留意が必要
給水施工方式	・干満帯部(平均水面以上) ・飛沫帯部 ・気中部および陸上部	・保水材、陽極材、防水材を一体的にプラスチック製の紙などで施工壁面に固定	・劣化部の集中的な補修が可能 ・構造物の部分的な補修が可能 ・給水設備などの点検が必要

求性能を確保するための方法の一つとして適用される。

コンクリート構造物は予定供用期間内に要求される性能, すなわち, 安全性能, 使用性能, 第三者影響度に関する性能, 美観・景観をあらかじめ明確にしておくことが, その後のコンクリート構造物の維持管理や補修を行うにあたって必須要件である。

電気化学的防食工法を〔維持管理編〕²⁾に準じてコンクリート構造物に適用する場合には, 〔維持管理編〕に示された維持管理区分に基づいて用いることが基本である。対象となるコンクリート構造物の維持管理区分は, 既設, 新設に関わらず, 維持管理区分 A と維持管理区分 B の二つがある。

これらの維持管理区分は, それぞれコンクリート構造物の重要度に応じて任意に構造物管理者が決める必要がある。電気化学的防食工法 設計施工指針 (案)¹⁾では, 維持管理区分 A は, コンクリート構造物に鋼材腐食に起因する有害なひび割れや欠損を新たに生じさせないことを原則としている。そのために維持管理水準を, ① 鋼材の腐食を進行させない, あるいは, ② 鋼材腐食が進行しても, 予定供用期間 (または, 残存の予定供用期間) 内において鋼材の腐食による有害なひび割れなどが, 新たに発生しないこととした。

一方, 維持管理区分 B は, 「劣化が顕在化されたと判断された場合であっても, 残存の予定供用期間中に構造物の要求性能を満足するように対策を講じる」ことである。この場合には安全性能, 使用性能, 第三者影響度に関する性能, 美観・景観などの要求される性能に対して, 構造物が残存の予定供用期間中においてそれらの要求性能を下回らないこととしている。

電気化学的防食工法は, 鋼材の防食を行うことで構造物の性能低下を防止することを目的とする工法であることから, 構造物の腐食劣化過程の中で, 潜伏期や進展期では主にそれぞれ単独で適用することができる。さらに, 加速期以降でも従来の補修工法 (表面処理工法, 断面修復工法, ひび割れ補修工法など) や場合によっては補強工法と組み合わせて, 適用することができる。

2・6 工法の選定

電気化学的防食工法の選定に際しては, コンクリート構造物の劣化機構から, それぞれの工法に期待される効果を考慮して, 図 9 に示す選定のフローに従って選定される。その選定に際しては, 電気化学的防食工法の施工にかかるコストや継続的な通電の可否, 塩化物イオンの再浸透や再中性化の有無なども考慮するのが一般的である。

適用するコンクリート構造物に劣化が顕在化している場合には, これら劣化部の補修を行うための補助工法を併用しなければならない。併用する補助工法は, 主にひび割れ補修工法や断面修復工法などであるが, これらの補修方法や補修程度については, 各電気化学的防食工法により異なる。

適用するコンクリート構造物が複合的な原因により劣化している場合, 例えば床版疲労と塩害の複合的な原因

図 9 電気化学的防食工法選定のフロー

などでは, 電気化学的防食工法と他の耐荷性向上のための補強工法を併用してもよい。

選定の際の留意事項を (1)～(3) に示す。

(1) 電気防食工法または脱塩工法を塩害対策に適用する場合は, 点検, 評価, 判定の結果あるいは耐久性照査の結果を考慮して選定する。

既設コンクリート構造物の事後保全に対しては電気防食工法または脱塩工法を適用し, 新設コンクリート構造物の予防保全に対しては電気防食工法を適用することができる。

塩害対策として電気化学的防食工法を適用する場合には, ① 構造物の竣工後の経過年数, ② 構造物の周囲の環境, ③ 構造物の種類, ④ 適用する構造物の部位, ⑤ 構造物に要求される耐久性能, ⑥ 使用状況 (作用荷重, 交通量), ⑦ 補修コストなどを総合的に考慮して選定することが基本である。その適用例を表 X に示した。

電気防食工法は, ほぼすべてのコンクリート構造物に適用できるが, 海洋環境の干満帯部や海中部に対して適用する場合は, 特に陽極装置の施工性, 耐久性を検討する。なお, これらの部位へ電気防食を適用する場合には, コンクリートの含水状態が大気中部と異なることから, 防食回路は大気中部と分離させることが必要である。また, 劣化度が加速期から劣化期にある既設構造物に適用する場合には, 適用する構造物にひび割れや断面欠損などが生じている場合が多い。このような場合には, 他の補修工法および補強工法との併用を検討する必要がある。

脱塩工法を飛来塩化物イオンの影響を受けるコンクリート構造物に適用する場合は, 従来からの表面処理工法

表 X 塩害対策における電気化学的防食工法の適用例

適用対象		補修工法	電気化学的防食工法	
			電気防食工法	脱塩工法
環 境	陸上部・内陸部	大気中部	○	○
		飛沫帯部	○	○
	海洋環境	干満帯部	△	△
		海中部	△	—
		RC	○	○
構造物材	PC		○	△
			○	△
	既設構造物	潜伏期	○	○
		進展期	○	○
		加速期	○	○
新 設 構 造 物	劣化度	劣化期	△	△
			○	—

注) 表中の○は適用対象, △は適用する場合検討が必要, —は適用対象外を示す。

などの遮塩工法と組み合わせることを基本とする。

すなわち、脱塩処理を適切に行っても、従来の経験から塩化物イオンを 100% 除去することはできず、コンクリート中に多少なりとも塩化物イオンは残存する場合が一般的である。したがって、維持管理区分 B の事後補修において脱塩工法を適用する場合には、適用する構造物の鋼材近傍での塩化物イオン濃度の調査と塩化物イオンの拡散予測を行い、塩化物イオン濃度が管理限界塩化物イオン濃度値以下となることを事前に予測する必要がある。特に、適用する構造物の腐食劣化過程が進展期から劣化期にある場合には、脱塩工法を適用するにはこれら塩化物イオン濃度の調査・確認が極めて重要である。また、このような場合には、適用する構造物にひび割れや断面欠損などが生じている場合が多いので、他の補修工法および補強工法との併用を検討する必要がある。

干満帯部において、既設コンクリート構造物の補修に脱塩工法を用いることは可能であるが、絶えず酸素や塩化物イオンが供給される環境であるので、脱塩工法を適用した後に表面処理工法などの遮塩工法との組み合わせを行わなければならない。

(2) 中性化対策においては、点検、評価、判定の結果あるいは耐久性照査の結果を考慮して、電気防食工法または再アルカリ化工法を適用することができる。

その適用例を、表 XI に示す。中性化による鋼材の腐食反応を抑制させる場合には、電気防食工法が適用される。電気防食工法は、ほぼすべてのコンクリート構造物を対象として適用でき、中性化の進行が予測されるコンクリート構造物に予防保全としても適用できる。

中性化したコンクリートのアルカリ性を回復させ、コンクリート自体の防食性能を回復する場合には、再アルカリ化工法を適用する。再アルカリ化工法は、既設コンクリート構造物のほぼすべての対象に適用できる。

また、適用する構造物の腐食劣化過程が進展期から劣化期にある構造物に対して、再アルカリ化工法を適用するには予めコンクリート構造物の中性化深さの調査・確認を行うことが重要である。このような場合には、適用する構造物にひび割れや断面欠損などが生じている場合が多いので、他の補修工法および補強工法との併用を検討する必要がある。

(3) 海中にあるコンクリート構造物のひび割れ補修お

表 XI 中性化対策における電気化学的防食工法の適用例

適用対象		補修工法	電気化学的防食工法	
			電気防食工法	再アルカリ化工法
環 境	陸上部・内陸部		○	○
	海洋環境		○	○
構造部材	RC		○	○
	PC		○	△
既設構造物	劣化度	潜伏期	○	○
		進展期	○	○
		加速期	○	○
		劣化期	△	△
新 設 構 造 物			○	—

注) 表中の○は適用対象、△は適用する場合検討が必要、—は適用対象外を示す。

よびコンクリート表層部のち密化に対しては、点検、評価、判定の結果を考慮して、電着工法を適用することができる。

海洋環境に設置されるコンクリート構造物のひび割れ補修工法およびコンクリート表層部のち密化工法として、その適用例を表 XII に示す。

電着工法によるひび割れ補修後においても、鋼材の腐食が予測される場合には、他の適切な防食対策工法を選定し適用しなければならない。

また、適用する構造物の腐食劣化過程が進展期から劣化期にある構造物に対して、電着工法を適用する場合には、構造物のひび割れ深さやコンクリートの密実性の調査・確認が重要である。このような場合には、適用する構造物にひび割れや断面欠損などが生じている場合が多

表 XII 電着工法の適用例

適用対象		補修工法	電着工法
環 境	陸上部・内陸部 海洋環境	大気中部	△
		飛沫帯部	△
		干満帯部	△
		海中部	○
構造部材	RC	○	
	PC	△	
既設構造物	劣化度	潜伏期	○
		進展期	○
		加速期	○
		劣化期	△
新 設 構 造 物			○

注) 表中の○は適用対象、△は適用する場合検討が必要を示す。

図 10 年度別施工実績

いので、他の補修工法および補強工法との併用を検討する必要がある。

現在、仮設陽極材を使用することにより、海中部のみではなく、干満帯部から大気中部および陸上部への適用についての検討が行われている。

3 電気化学的防食工法の現状

3・1 施工実績

電気化学的防食工法別の施工実績を図10に示す。2001年11月末までの累計施工面積は98602m²、累計施工件数は235件となっている。施工面積の56%を電気防食工法が占め、再アルカリ化工法の32%がこれに続く。工法別の施工件数では電気防食工法147件に対して、再アルカリ化工法41件、脱塩工法37件と続く。

電気防食工法は、全世界での累計施工実績が150万m²を超える。国内では94年度から徐々に使われ始めたが、東京・大井埠頭(14000m²)などの大型工事でも寄与して98年に入って施工件数、施工面積とも急速に拡大し、現在までに約55100m²を施工している。

脱塩工法、再アルカリ化工法は、国内では96年度頃から本格的に使用されるようになってきた。脱塩工法は北欧などを中心に実用化が進み、全世界での累計施工実績は約10万m²である。国内においては約6600m²を施工している。再アルカリ化工法は、世界中で50万m²を超える実績がある。国内ではこれまでに約31100m²が施工されている。

電着工法は海中構造物の劣化補修工事に適しており、累計施工実績は約5700m²となっている。また、今後は瀬戸大橋の海中ケーソン工事等の大規模工事が予定されている。

3・2 施工地域および対象構造物

都道府県別施工実績および構造物の立地条件を図11、12にそれぞれ示す。首都圏や関西などの大都市圏を中心に北海道・北陸などの寒冷地、あるいは飛来塩分の影響

を受けやすい海岸部や周囲を海に囲まれた沖縄での適用が目立つ。都道府県別では、大井埠頭などの大型工事への適用もあり、東京都では施工件数35件、施工面積28700m²と最も多い。

適用構造物の種別および施工対象構造物別の施工実績を図13、14にそれぞれ示す。適用構造物の種別については、土木構造物の88%に対して、建築構造物は12%の割合となっている。施工対象構造物は橋梁、栈橋、建築物などへの適用が多く、トンネル、岸壁、基礎、ケーソン等への実績もある。

3・3 近年の動向

例えば、電気防食工法においては陽極材の耐久性向上、国産化や陽極を埋め込んだプレキャスト化による作業の効率化、電話回線などのオンラインを利用した遠隔地監視・制御システムを開発し、モニタリングの自動化などが図られている。さらに、太陽電池により防食電流を供給するソーラーシステムの実用化も行われている。以下に遠隔監視システムについて述べる。

● 遠隔監視システム

電気防食工法では、維持管理として防食効果を確認するためにモニタリング装置として照合電極を利用して鋼材電位などを各点検時に測定している。通常は、所定の点検時に技術者が現場に出向き、モニタリング回路を利用して、鋼材の防食電位、防食電流、電源電圧などのデータを採取している。最近では、これらのモニタリングを現地のパソコンで自動的に制御を行うとともに、モニターされたデータを電話回線によって管理室に送り、通電防食電流量の調整や防食効果の確認などを行う遠隔監視制御システムが導入され始めている。

このように、今後遠隔監視システムが導入された場合には、管理室内で通常点検および定期点検時における電源装置の作動状況や防食効果の確認ができるとともに、管理室内のパソコンによる電流・電圧の調整ができるた

図11 県別施工実績

図12 構造物の立地条件

図13 適用構造物の種別

図 14 施工対象構造物別施工実績

め、簡単で確実な維持管理手法となる。また、装置の異常などを瞬時に知ることができることなど、多くのメリットがある。

遠隔監視装置システムの例を図 15 に示す。基本構成として、親局装置はパーソナルコンピューター、モデム、プリンタおよび遠隔測定用ソフトより構成され、一般電話回線を介して子局に接続される。親局装置はパーソナルコンピューターを利用した遠隔測定用ソフトで稼動し、子局により直流電源装置の通電電圧・電流・鉄筋電位を測定する。外部電源方式の電気防食工法では、通電電流の設定や自動通報を受信する。

4 維持管理の必要性

電気化学的防食工法 設計施工指針 (案)¹⁾には、電気化学的防食工法とコンクリート構造物の維持管理に関するアンケート調査結果が添付資料として取りまとめている。

我が国においてはコンクリート構造物に対する維持管理の重要性が、どのように位置付けられているのか、電気化学的防食工法が維持管理において、どのように採用されていくのか、電気化学的防食工法が定着していくためにはどのような方策が必要なのか等を検討する目的でアンケートを実施した。

アンケート調査は、① 電気化学的防食工法現状調査、② 電気化学的防食工法事例調査、③ コンクリート構造物の維持管理に関する調査の 3 種類に分けて行った。調査対象は、国土交通省関連が 69 箇所、都道府県・政令指定都市の道路、港湾関連課 107 箇所、電力事業者 15 箇所、鉄道事業者 37 箇所、下水道事業箇所 10 箇所、道路・空港関連の公団およびその他 16 箇所、の合計 254 箇所です。いずれも事業所が対象になっている。なお、94 年にコンクリート工学協会の委員会が電気防食工法に限った同種の調査を行っている。⁴⁾

回収率は全体の 58.7% (149 件) で、電気化学的補修工法の施工実績のない事業者 193 箇所では、アンケート①と③を送付して 51.3% の回答を得た。施工実績のある事業者 61 箇所には、①～③すべてを送付して 82.0% の回答を得た。

4・1 コンクリート構造物の維持管理に関する調査

「③ コンクリート構造物の維持管理に関する調査」で

図 15 遠隔監視装置システム例

は、コンクリート構造物の維持管理に関する重要性、維持管理対策、コストなどに関する事業者の意識調査を実施した。

この結果によると、「維持管理の重要性について、どのように考えるか。」との質問に対し、図 16 に示すように、160 の事業者の回答のうち、109 の事業者 (68%) が維持管理の重要性を「高い」と回答しており、「低い」や「やや低い」という回答は合わせて 4 事業者 (3%) となっており、全般にコンクリート構造物の重要性については認識が高いと評価できる。

また、「『コンクリート構造物の調査』および『維持管理』に関する独自の基準類を持っているか。」との質問に対しては、図 16 に示すように、「ある」という回答は 48 事業者であり、「ない」という回答は 96 事業者であった。無回答 16 事業者を加えて総数 160 のうち 30% が何らかの独自の基準をもっていることになる。この結果より、回答者自身の維持管理に対する認識は高いことが判明しているものの、維持管理を実施していくシステムは必ずしも完成している訳ではなく、事業者側の維持管理を実施する体制は未だ十分に完備されていないことが分かる。

4・2 電気化学的防食工法適用の問題点

「① 電気化学的防食工法現状調査」では、電気化学的防食工法が、社会的に耐久性能の向上を目的とした維持管理の手段の 1 つとしてどのように認知されているかを調査した。

調査分析に当たり、回答者の維持管理の重要性に関する認識と、回答した事業者の維持管理に関する取り組み

図 16 維持管理に関する回答

体制の設問より、その回答の組み合わせから、回答者をA～Cの3グループに分類した。

Aグループ：回答者個人および事業者ともに維持管理に関心が高い。

Bグループ：維持管理に対して、回答者は意識が高いが、事業者の体制が不十分（基準類が「無」）。

Cグループ：回答者個人および事業者ともに維持管理にそれほど関心が高くない。

この結果によると、「コンクリート構造物の劣化対策として、電気化学的防食工法をどう思うか。」との質問に対し、図17に示すように、施工実績の有無や回答者の意識レベルに係わらず、「条件により適用する」が最も多い回答であり、「必要性はない」とする回答は少なかった。

Aグループでは「新設構造物に対する適用」に取り組もうとしている事業者は1機関だけと他のグループより少ない結果であった。これは維持管理体制の整っている事業者では電気化学的防食工法を予防保全的な対策として位置付けていない場合が多いためではないかと思われる。また、「電気化学的防食工法の必要性がない」という回答が4機関からあり、他のグループよりも多かった。これは現行の設計・施工・維持管理に対する信頼性が高いか、鋼材腐食に関連する劣化が顕在化している場合が少ないか、劣化現象を十分に制御できている場合があるためではないかと考えられる。

Bグループについては、「電気化学的防食工法の必要性を認める」回答や「新設構造物への適用を認める」回答がA、Cグループに比べて多いという傾向が見られる。これは、Aグループとは逆に維持管理手法が確立されていないために補修工法を模索している段階にあるか、従

図17 劣化対策としての電気化学的防食工法

図18 電気化学的防食工法を普及させる方策

来工法では制御できない鋼材腐食の劣化現象に悩まされている事業者もいるためではないかと考えられる。

また、「電気化学的防食工法を普及させる対策として何をすべきか」との質問に対しては、図18に示すように、A、Bグループの回答者は「コストパフォーマンスの明確化」、「適用箇所の判断基準の明確化」、「防食効果の明確化」等を重要視しており、「定期的な管理の簡略化」はあまり重要視していない。Cグループの回答者は「防食効果の明確化」、「適用箇所の判断基準の明確化」、「技術基準の明確化」、「コストパフォーマンスの明確化」等を挙げていたが、「定期的な管理の簡略化」には関心がないという結果になっていた。

5 結 言

コンクリート構造物に対する電気化学的防食工法が初めて日本に導入されてから、約10年が経過した。施工実績の増加に伴って各種指針やマニュアルが整備され、電気化学的防食工法も新しい段階に入ったと言える。なお、著者らは、指針案の作成に携わった委員長、幹事長、副幹事長である。指針（案）の作成には、多くの委員の方々の献身的なご協力があったことに、甚大なる感謝を致したい。また、さらなる電気化学的防食工法の普及発展、またコンクリート構造物の適切なシナリオデザインが可能となることを願うものである。

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）。
- 2) 土木学会，“2001年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕”（2001）。
- 3) 土木学会，“2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕”（2002）。
- 4) 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）。