コンクリート構造物の電気化学的防食工法

川 俣 孝 治*

* 住友大阪セメント株式会社

Electrochemical Corrosion Control Method for Concrete Structure

Koji Kawamata*

* Construction Materials Group, Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd

This paper explains the electrochemical corrosion control method. This method is an improvement technology for durability of concrete structure, and attracts attention in recent years. The electrochemical corrosion control method is classified into 4 methods, such as cathodic protection method, desalination method, re-alkalization method and electrodeposition method. This paper also shows the principle of these methods, the sphere of applications and construction illustrations.

Key words : electrochemical corrosion control method, cathodic protection method, desalination method, re-alkalisation method, electrodeposition method.

1. は じ め に

コンクリート構造物は、道路、鉄道、空港などを構成するものとして、我々の身近な存在であり、また重要な社会資本である。これらコンクリート構造物のほとんどは、1960年代から90年代初めまでのわずか30年間に建設されたものである。元来、コンクリート構造物は耐久性に優れ、メンテナンスフリーなものと言われてきたが、1980年代には早期劣化が社会問題となり、維持管理の重要性が注目されてきている。この膨大な量の社会資本であるコンクリート構造物を後世に引き継ぐことが我々、土木技術者の重要な責務である。

コンクリート構造物の耐久性低下の主な原因として、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応、疲労などがある。このうち、鉄筋やプレストレストコンクリート構造物に用いる鋼材(PC鋼材)が腐食する塩害は、コンクリート構造物の骨の癌とも比喻される重大な劣化である。今回は、この塩害対策として近年注目される電気化学的防食工法を紹介する。

2. 電気化学的防食工法

コンクリート構造物の塩害対策として用いられる工法例と、その期待する効果とをとりまとめて表1に示す¹⁾。これまでの塩害対策は、腐食因子である塩化物イオン、酸素、水などを物理的に低減、除去する工法が用いられてきた。例えば、エポキシ樹脂などでコンクリート表面を塗装し、塩化物イオンなどの腐食因子の供給量を低減する表面処理工法や、既にコンクリートに含まれる塩化物イオンを除去するために、コンクリートをはつり取り修復する断面修復工法などである¹⁾。

一方、電気化学的防食工法とは、コンクリート内部にある鉄筋やPC鋼材などに外部に設置した陽極から直流電流を流すことにより、電気化学的反応を利用して、鋼材腐食に関わるコンクリート構造物の劣化を防止する方法である。電気化学的防食工法には、電気防食工法、脱塩工法、再アルカリ化工法、電着工法があり、これら工法の特徴を表2に示す。電気防食は、コンクリート中の鉄筋などの鋼材を陰極として防食電流を供給することにより、腐食反応を抑制する方法である。脱塩工法や再アルカリ化工法、電着工法は、電気防食に比べ数十倍以上大きな電流を数週間から数カ月供給することにより、それぞれ次に示すような効果を期待するものである。脱塩工法では塩化物イオン濃度の低減、再アルカリ化工法では中性化したコンクリートのpH値の回復、電着工法ではコンクリート表層部のち密化により、鋼材腐食の発生と進行を防止する。これら電気化学的防食工法について、以下に解説する。

2.1 電気防食工法²⁾

電気防食工法は、継続的な通電を行うことによってコンクリート中の鋼材の腐食反応を電気化学的に制御し、鋼材腐食による劣化の進行を抑制することで、コンクリート構造物の耐久性を向上させることを目的とした工法である。

電気防食工法の概念図を図1に示す。通電方式には外部電源方式と流電陽極方式があるが、コンクリートの内部環境に応じて通電量の調整が可能である外部電源方式が一般的である。陽極システムは、その形状により、面

表1 補修・補強に期待する効果と工法

期待する効果	工法例
鋼材の腐食因子の供給量を低減	表面処理
鋼材の腐食因子の除去	断面修復、電気化学的脱塩
鋼材の腐食進行を抑制	表面処理、電気防食、断面修復、防錆処理
耐荷力	FRP接着、断面修復、外ケーブル、巻立て、増厚

* 〒102-0085 東京都千代田区六番町6-28 (6-28 Rokubanchō, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0085 Japan)

表2 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	0.001～0.03A/m ²	1A/m ²	1A/m ²	0.5～1A/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 ₂ CO ₃ 水溶液等	海水
効果確認の方法	鋼材電位または 鋼材電位変化量の測定	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

図1 電気防食工法の概念図

図2 新設での適用事例 (チタンリボンメッシュ方式)

状陽極方式，線状陽極方式，点状陽極方式に区別されている。面状陽極は防食電流の均一性に優れるのに対して，線状陽極や点状陽極では電流分布を考慮した陽極配置の検討が重要となる。各種電気防食システムの例を表3に示す。陽極材の材質はチタンを基材としたものが主であり，その他のものとしてカーボンを導電材とした塗料やモルタルなどを用いた方式が提案されている。

防食電流は，鋼材の腐食程度や鋼材量，コンクリート内部の腐食環境により異なるが，コンクリート表面積当りで0.001～0.03 A/m²程度が一般的である。通電制御方式としては，定電流通電方式または定電圧通電方式が採用されている。防食電流密度は，100 mV以上の分極量または復極量を満足する値とし，コンクリートの電圧降下による誤差を除いた電位（インスタントオフ電位）を基準として評価する。防食電位による防食基準は日本国内では採用されていない。これは，コンクリートの内部環境のばらつきが同じ構造物であっても大きいこと，高抵抗環境であるコンクリート中での鋼材の電位測定は電圧降

下が生じることなどが主な理由である。したがって，定電位制御による通電方式も国内においては採用されていない。

電気防食工法の適用される環境は，主に大気中部である。干満帯部や水中部への適用も可能であるが，それぞれの環境ではコンクリートの抵抗率が異なるため，防食回路を環境ごとに独立させる設計上の考慮が必要となる。なお，陽極システムの一部には，水中での耐久性に劣るものもあるので選定に留意しなければならない。プレストレストコンクリート構造（PC），鉄筋コンクリート構造（RC）などのいずれの構造形式にも適用可能である。ただし，PC構造物の場合にはPC鋼材の水素脆化からの安全性確保のため，PC鋼材の電位を飽和硫酸銅電極（CSE）基準で-1000 mVより貴な電位に設定しなければならない。また，本工法は構造物の劣化レベルに関係なく適用することが可能である。ただし，劣化レベルに応じた補修・補強工法との組合せが必要な場合もある。最近では，過酷な塩害環境において予防保全対策として，新設時に電気防食を適用する事例もある。（図2参照）

防食回路の設計の詳細は陽極システムごとに異なる。防食回路の規模は，1回路を最大で500 m²以下とする場合が多い。これは，電位分布の均一性を確保するためには1回路当りの面積を小さくした方が良いものの，小さすぎると施工性や経済性の観点では劣るためである。したがって，設計では，これらを考慮した最適な回路面積の検討が重要となる。

施工は，① コンクリートの前処理，② モニタリング機器の設置，③ 陽極システムの設置，④ 直流電源装置の設置，⑤ 配線配管のフローで実施されている。

① コンクリートの前処理

コンクリートの浮き，剥落部を断面修復する。また，陽極設置面にあるアンカーボルトなどは除去する。鋼材間の導通確認は防食回路形成に重要であり，

表3 各電気防食システムの例

電源方式による分類	陽極材による分類	電気防食方式
外部電源	面状陽極	チタンメッシュ陽極方式
		パネル陽極方式
		導電性塗料方式
		チタン溶射方式
		チタン亜鉛溶射方式
		導電性モルタル方式
	線状陽極	チタンリボンメッシュ方式 チタングリッド方式
流電陽極	点状陽極	チタンロッド方式
	面状陽極	亜鉛シート方式
		亜鉛アルミ擬合金溶射方式

図3 チタンメッシュ陽極方式の概念図

図4 陽極の設置状況(チタンメッシュ方式)

導通不良箇所は鉄筋や結束線で導通を確保する。

② モニタリング機器の設置

照合電極と排流端子を所定の位置に設置する。

③ 陽極システムの設置

各陽極システムの設置仕様に依じて設置する。陽極設置面にある金属は鋼材との短絡事故となるので注意する。

④ 直流電源装置の設置

直流電源装置を所定の位置に設置する。最近では、ソーラー電池を利用した電源装置や遠隔監視制御機能が付随したものもある。

⑤ 配線配管

陽極システムと直流電源装置の間を配線配管する。

施工事例として、図3および図4にチタンメッシュ方式による施工概念図および陽極の設置状況を示す。チタンメッシュ方式は、国内で最も施工実績が多い工法である。施工は、コンクリート表面にチタンメッシュ陽極を貼りつけ、モルタルでこれをオーバーレイする手順で実施する。

2.2 脱塩工法²⁾

脱塩工法は、コンクリート中に存在する塩化物イオンを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。

脱塩工法概念図を図5に示す。脱塩工法は、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てコンクリート中から鋼材の腐食因子である塩化物イオンを除去もしくは低減させるものである。コンクリート中の塩化物イオン濃度を鋼材の腐食発

図5 脱塩工法の概要

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ことを目的とする。

脱塩を行うための電流量は、通常、 1 A/m^2 程度で、約8週間の通電が一般的である。また、コンクリート中の塩化物イオンの脱塩処理後に仮設陽極材は撤去する。

脱塩による効果を確認するため、通電時および通電完了時にコンクリートサンプルを採取し、塩化物イオン濃度の測定を行う。

脱塩工法により腐食因子である塩化物イオンの濃度を低減させることはできるが、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などを行う必要がある。飛来塩化物の影響を受ける塩害環境では、コンクリート表面にエポキシ樹脂塗装などの表面被覆を併用する場合が多い。

脱塩工法の適用される環境は、主に大気中部である。なお、飛沫帯部、干満帯部のいずれの環境でも適用可能である。PC、RCなどのいずれの構造形式のコンクリート構造物にも適用可能であるが、PC構造物ではPC鋼材の水素脆化の危険性があるため、通電を断続的に行う方法を採用しなければならない。塩害とアルカリ骨材反応の複合劣化を受けた構造物への適用に対しては、現時点では未解明な部分があり、慎重な対応が必要である。実際にコンクリート構造物からコンクリートコアを採取し、促進膨張試験により残存膨張量を測定し適用を判断することが賢明である。さらに、リチウムイオンのアルカリ骨材反応の抑制効果を利用し、リチウムイオンの電解質溶液を用いた脱塩工法などもある。

脱塩工法の施工手順は、陽極材が仮設である点を除き、電気防食の施工手順と同様である。陽極材は、チタンメッシュを用いる場合が多い。陽極の仮設方式には、①ファイバー方式、②パネル方式、③ボンディング方式がある。

① ファイバー方式

陽極周辺にセルロースファイバーを吹付ける方式である。複雑な形状に施工可能であるが、電解質溶液の蒸発や漏れが多い。

② パネル方式

陽極を樹脂製パネルで覆い、パネル内部に電解質溶液を充填する方式である。電解質溶液の蒸発や漏れは少ないが、複雑な形状への施工は難しい。

③ ボンディング方式

コンクリート表面に電解質溶液を貯め、その中に陽極を仮設する方式である。施工は容易であるが、

図6 脱塩工法の施工状況（パネル方式）

施工面は水平面（床面）に限定される。

図6にパネル方式による脱塩工法の施工状況を示す。海砂を使用した場合など内在塩分による塩害を受けたコンクリート構造物への適用事例が多い。

2.3 再アルカリ化工法²⁾

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浸透によって、アルカリ性溶液を浸透させ、アルカリ性を再付与できることに着目し、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工法である。

再アルカリ化工法の概念図を図7に示す。再アルカリ化工法は、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、コンクリート中にアルカリ性溶液を電気浸透させて、コンクリートのアルカリ性を回復させる。再アルカリ化工法により、コンクリートのpH値を回復させ、コンクリート中の鋼材を再不動態化させることを目的とする。

再アルカリ化を行う電流量は、通常、 1 A/m^2 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。

再アルカリ化工法の効果は、適用前後でコアリングで採取した円柱コアをフェノールフタレイン法により中性化深さを測定し比較することで確認する。

再アルカリ化工法は、適用後の構造物の中性化予測などを行うことや、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、適切な維持管理を行うことが重要である。

図7 再アルカリ化工法の概要

図8 再アルカリ化工法の施工状況（大阪城）

る。特に雨水などがかかる部位で電解質溶液の流出が懸念される場合には、塗装などの表面処理を用いることも検討する。ただし、再アルカリ化処理後のコンクリート表面は、含水率、pH値がともに高いため、これを考慮した表面処理工法を選定しなければならない。

再アルカリ化工法は、鉄筋、鉄骨、PC鋼材などを含むコンクリート構造物に適用可能である。ただし、PC構造物では、脱塩工法と同様に、通電によるPC鋼材の水素脆化の危険性がある。そのため、通電を断続的に行うなどの対処が必要である。構造物の劣化の程度に関わりなく適用可能であるが、劣化レベルによっては適切な補修・補強工法との組合せも必要となる。

施工手順は、脱塩工法とほぼ同様である。陽極材はチタンメッシュ陽極が主に用いられている。電解質溶液は、アルカリ性溶液で電気浸透が行われやすく、炭酸ガスや水と反応して平衡を維持できるような溶液を使用している。一般に、炭酸ナトリウム、炭酸カリウム、炭酸リチウムなどが挙げられる。

図8に再アルカリ化工法の施工状況を示す。この写真は大阪城への適用事例を示したものであるが、このように中性化した建築コンクリート構造物への適用事例が多い。

2.4 電着工法²⁾

電着工法は、海水中に存在する電解質イオンを電気泳動によって、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て、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工法である。

図9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など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ことを目的とする。

電着工法を行うための電流量は、通常、海水中で 0.5 A/m^2 程度で、約6カ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。

電着工法は、主に海中部にある栈橋やケーソンなどの

図9 電着工法の概要

図10 水中施工方式でのひび割れ閉塞状況

図11 給水施工方式での電着工法の施工状況

コンクリート構造物に適用される。陸上や地下のコンクリート構造物に適用された事例もあるが、電解質溶液の性状、仮設陽極の配置、通電条件などが電着物の析出速度や電着物の物性に及ぼすので、その影響をあらかじめ十分に把握しておく必要がある。

仮設陽極の設置方法には、① 水中施工方式、② 給水施工方式の2種類がある。図10に水中施工方式でのひび割れ閉塞状況を示す。図11に給水施工方式での電着工法の施工状況を示す。

① 水中施工方式

海中中部や土中部に陽極を仮設する方式である。施

図12 施工面積の累計 (m²)

図13 施工件数の累計

工が簡単であり構造物の形状に左右されないが、仮設陽極の配置に留意が必要である。

② 給水施工方式

大気中部で保水材、陽極材、防水材から構成される容器を対象コンクリートに仮設する方式である。部分的な補修に適する。

3. ま と め

電気化学的防食工法は、1990年代初めに日本国内に紹介され、国内適用環境に適応させるための技術開発や試験施工が90年代半ばにかけて実施された。実施工レベルで本格的に適用され始めたのは、1998年以降である。

各電気化学的防食工法の2003年3月末現在の施工面積および施工件数の累計を図12および図13に示す。適用事例は、電気防食および再アルカリ化の各工法が大半を占める。最も実績の多い電気防食で累計約8万m²である。米国でのコンクリート構造物への電気防食適用実績は百数十万m²を超える。コンクリート構造物の総量自体の違いもあるが、四方を海に囲まれた島国日本で塩害が深刻な問題であるのに対して、いまだ適用事例が少ないのが現状である。電気化学的防食工法が土木技術者に馴染みづらい分野であること、従来工法に比べて施工コストが割高であることなどが、電気化学的防食工法の普及に障害となっていると思われる。

一方、構造物の維持管理にアセットマネジメントが導入されるなど、構造物の重要性、ライフサイクルから見たコスト算定が行われ始めた。電気化学的防食工法は、更なるコスト削減に向けた技術開発も重要である。それに加え、ライフサイクルコストでの評価をこれまでの施工実績をもとに整理することも必要である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会, 2001年制定コンクリート標準示方書, 維持管理編
- 2) 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)。

要 旨

コンクリート構造物の耐久性向上技術として、近年注目される電気化学的防食工法について解説する。電気化学的防食工法には、電気防食工法、脱塩工法、再アルカリ化工法、電着工法がある。これら工法の原理、適用範囲、施工事例などについて述べる。

キーワード 電気化学的防食工法, 電気防食法, 脱塩工法, 再アルカリ化工法, 電着工法