

脱塩，再アルカリ化ならびに電着工法の新しい施工方法

安藤ハザマ 正会員 ○齋藤 淳 正会員 林 俊斉
九州電力（株） 山本 周
港湾空港技術研究所 正会員 西田 孝弘
東京工業大学 フェロー会員 大即 信明

1. はじめに

高度経済成長期に集中的に整備された社会資本が急速に老朽化してきている。今後 20 年間で、建設後 50 年以上経過する施設が加速度的に増える見込みである。社会資本を長寿命化するためには、劣化前の予防保全や劣化後の機能回復を適切に行う必要がある¹⁾。

鉄筋コンクリート構造物に対する予防保全あるいは機能回復技術として、電気化学的な補修方法に分類される脱塩工法，再アルカリ化工法ならびに電着工法がある。この 3 種類の工法は、数週間の通電を行えば、その後の継続通電は不要である。ただし、通電期間中は、コンクリート外部に仮設した陽極と陰極として用いる内部鉄筋に電流を流すために、コンクリート面と仮設陽極の間に電解質溶液を供給する必要がある。そのため、陸上構造物に適用する場合には、電解質溶液の供給方法が課題となる。これまで「ファイバー方式」や「パネル方式」などの電解質溶液の供給方法²⁾が開発されてきたが、施工性のさらなる向上が求められている。

近年、著者らは、壁や柱などの鉛直面やトンネル覆工などのアーチ面のコンクリートに対する給水養生方法を実用化した³⁾。この給水養生方法の最大の特長は、入手や取り扱いが容易で軽量の資機材からなる給水養生装置を用いて、コンクリート面に水膜を形成できることである。この給水養生装置を活用することで、電気化学的な補修方法の課題である電解質溶液供給の施工性を向上すべく検討を行っている⁴⁾。

本稿では、給水養生装置を用いた電解質溶液の供給方法（以下、簡易給水方式）が、脱塩，再アルカリ化ならびに電着工法の補修効果に及ぼす影響と、実構造物に対する適用事例を報告する。

2. 簡易給水方式の概要

簡易給水方式の構成を図-1 に、補修部の断面図を図-2 に示す。コンクリート面に仮設した陽極材を気泡緩衝シートで覆い、周囲をテープ等で密閉（気密部）する。この際、必要に応じてコンクリート面と陽極材の間に親水性の不織布を挟む。気泡緩衝シートとコンクリートとの間に給水管から電解質溶液を供給するとともに、吸引口から空気と溶液を吸い出すことにより、負圧によって気泡緩衝シートをコンクリート面に均一に貼り付ける。また、吸引部に除水除塵機を設けることで、溶液の常時供給および循環利用が可能となる。これらにより、コンクリート面全体に電解質溶液膜を形成し、陽極と陰極（内部鉄筋）間の通電を実現している。

3. 簡易給水方式による施工が補修効果に及ぼす影響

(1) 実験概要

本稿で対象とする電気化学的な補修方法のうち、脱塩工法および再アルカリ化工法は、その原理から考えると、陰極となるコンクリート内部の鉄筋とコンクリート外部に仮設した陽極材との間に、電解質溶液を介して直流電流を通ずることができれば、その補修効果が得られると考えられる。一方、電着工法はこれに加えて、電解質溶液に含まれる陽イオンをひび割れ部に析出させなければならない。そのため、ここでは電着工法を適用した実験を行い、簡易給水方式が補修効果に及ぼす影響を評価した。

キーワード 予防保全，長寿命化，電気化学的，簡易給水方式，給水養生装置

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 5 1 5-1 安藤ハザマ 技術研究所 土木研究部 TEL029-858-8813

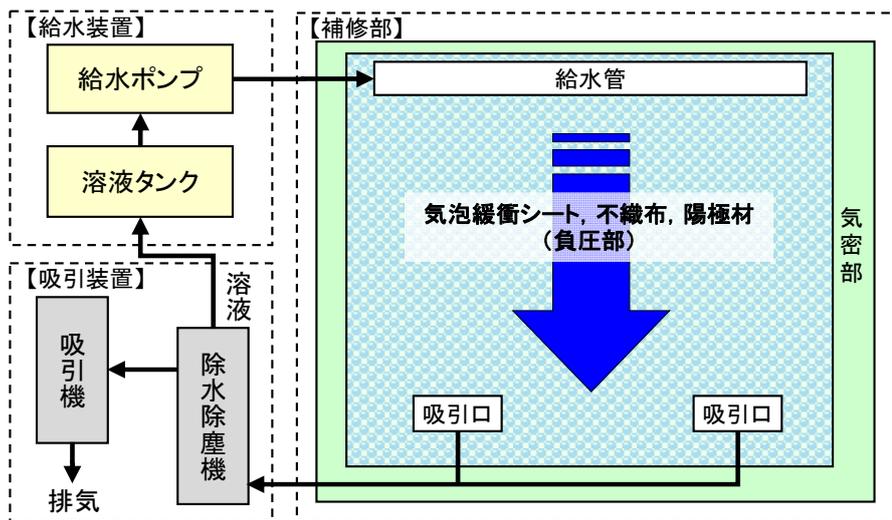


図-1 簡易給水方式の仕組み

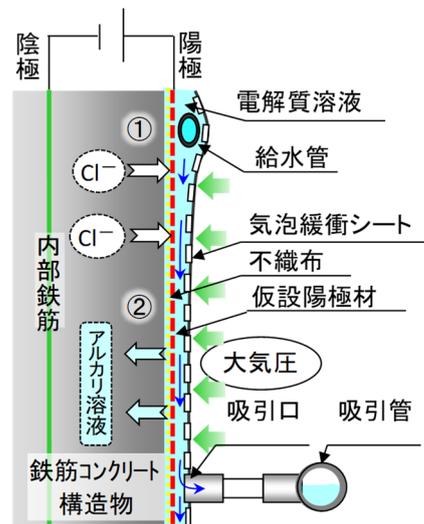


図-2 補修部の断面
(①脱塩, ②再アルカリ化の例)

(2) 供試体

塩害環境に約40年間曝露された鉄筋コンクリート梁供試体（以下、40年曝露供試体）を使用した。供試体の寸法は幅150mm、高さ300mm、長さ1800mmであった。水セメント比は70%であり、主鉄筋に沿ったひび割れが発生しており錆び汁も認められた。

(3) 実験ケース

供試体を電解質溶液に浸漬した場合（以下、浸漬方式）を比較対象とし、簡易給水方式が補修効果に及ぼす影響を評価した。

浸漬方式では、補修面以外の5面をエポキシ樹脂で被覆した供試体を電解質溶液中に浸漬した。陽極材はチタンメッシュとし、コンクリート面と陽極の距離（以下、陽極距離）は20mmとした。

一方、簡易給水方式では、写真-1に示すように簡便な装置を用いて電解質溶液を供給し、陽極距離は不織布の厚さを変えることで制御した。簡易給水方式に適した陽極材を検討するため、チタンメッシュに加え、炭素繊維シートならびに導電性シートを検討した。なお、簡易給水方式においては、陽極距離0mmの場合でも陽極材とコンクリート面の間に不織布を設置している。

また、電着条件は陸上の鉄筋コンクリート構造物に対する最適な条件⁵⁾とした。すなわち、電解質溶液として、0.1mol/lの酢酸マグネシウム水溶液を用い、補修面積に対する電流密度を1.0A/m²とし、2週間の通電を行った。



写真-1 実験状況（簡易給水方式）

表-1 実験ケースと評価項目の組合せ

溶液供給方法		簡易給水方式			浸漬方式
陽極材種類		チタンメッシュ	炭素繊維シート	導電性シート	チタンメッシュ
陽極距離		0mm	0mm	10mm	20mm
評価項目	ひび割れ閉塞効果	○	○	○	○
	塩化物イオン除去効果	—	○	—	○
	鉄筋防食効果	○	○	—	○

(4) 評価方法

ひび割れ閉塞効果，塩化物イオンの除去効果および鉄筋の防食効果の3種類の評価を行った．実験ケースと評価項目の組合せを表-1に示す．

ひび割れ閉塞効果は，ひび割れ閉塞残り率にて評価した．ひび割れ閉塞残り率は，通電前の供試体に生じているひび割れの全長に対する，電着物により閉塞されていない長さの割合である．供試体に生じているひび割れの外観調査を電着工法の適用前後に実施し，ひび割れ全長および電着物によるひび割れ閉塞長さを測定し，式(1)にてひび割れ閉塞残り率を算出した．

$$\text{ひび割れ閉塞残り率 (\%)} = \left(1 - \frac{\text{ひび割れ閉塞長さ}}{\text{ひび割れ全長}} \right) \times 100 \quad (1)$$

塩化物イオンの除去効果は，単位補修面積当たりのコンクリートから除去された塩化物イオン量にて評価した．通電日数4日，7日，9日，12日および14日に電解質溶液を採取して塩化物イオン濃度を測定し，式(2)を用いて，単位補修面積当たりの塩化物イオン除去量を算出した．

$$\text{塩化物イオン除去量 (g/cm}^2\text{)} = \left(\frac{\text{電解質溶液量} \times \text{塩化物イオン濃度}}{\text{補修面積}} \right) \quad (2)$$

鉄筋の防食効果は，表-2に示すヨーロッパコンクリート委員会(CEB)の腐食電流密度を用いた腐食速度の判定基準⁶⁾で評価した．腐食電流密度は，交流インピーダンス法によって測定した分極抵抗から式(3)を用いて算出した．

$$I_{corr} = \frac{K}{R_p} \quad (3)$$

ここに， I_{corr} ：腐食電流密度($\mu\text{A/cm}^2$)， K ：Stearrn-Geary定数(=0.0209V)， R_p ：分極抵抗(Ωcm^2)である．

(5) 実験結果

a) ひび割れ閉塞効果

ひび割れ閉塞残り率の測定結果を図-3に示す．簡易給水方式においては，陽極材としてチタンメッシュを用いた場合と，炭素繊維シートを用いて陽極距離を10mmとした場合に，浸漬方式と同程度のひび割れ閉塞効果が得られた．

b) 塩化物イオン除去効果

単位補修面積当たりの塩化物イオン除去量を図-4に示す．ここでは，簡易給水方式のうち，ひび割れ閉塞効果が最も低かった陽極距離0mmの炭素繊維シートにおける実験結果を，浸漬方式と比較した．どちらの場合も同程度の塩化物イオンの除去効果が得られた．

この理由を以下に示す．コンクリート中から除去される塩化物イオン量は，流れた電気量と塩化物イオンの輸率によってのみ変化する．溶液の供給方法，陽極材種類および陽極距離という条件を変えても，流れた電気量や塩化物イオンの輸率は変化しないことから，コンクリート中から除去される塩化物イオン量に差が生じなかったと考えられた．

c) 鉄筋防食効果

通電前後における鉄筋の腐食電流密度を図-5に示す．いずれの場合も通電後の腐食電流密度は $0.2 \mu\text{A/cm}^2$ を下

表-2 CEBによる腐食速度の判定基準⁶⁾

腐食電流密度 $I_{corr}(\mu\text{A/cm}^2)$	腐食速度の判定
$I_{corr} < 0.1-0.2$	不動態状態 (腐食なし)
$0.2 \leq I_{corr} < 0.5$	低～中程度の腐食速度
$0.5 \leq I_{corr} < 1.0$	中～高程度の腐食速度
$1.0 \leq I_{corr}$	激しい，高い腐食速度

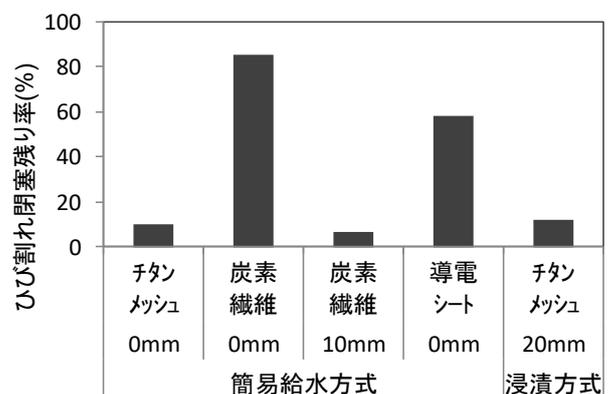


図-3 ひび割れ閉塞残り率

回る水準まで低下しており、CEB 基準⁶⁾によって、不動態状態であると判定された。これは、鉄筋周囲の腐食環境が改善し、鉄筋の防食効果が回復したことを示す結果であると考えられた。

(6) 本章のまとめ

本章の検討で得られた知見を以下に示す。

ひび割れ閉塞効果は、陽極材にチタンメッシュを用いた場合は、陽極距離が短い0mmであっても、浸漬方式（陽極距離20mm）とほぼ同等であった。一方、炭素繊維シートや導電性シートでは、陽極距離0mmの場合は浸漬方式よりもひび割れ閉塞効果が低下したが、陽極距離を10mmとすれば浸漬方式と同等の効果が得られた。この原因として、体積抵抗率がチタンメッシュ ($4.9 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) < 炭素繊維シート ($1.9 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$) < 導電性シート ($9.5 \Omega \cdot \text{cm}$) の順に大きいことや、陽極材の形状が異なることなどがあげられるので、今後の検討課題としたい。

また、塩化物イオンの除去効果および鉄筋の防食効果については、陽極材種類や陽極距離に関わらず、所定の通電を行うことで、浸漬方式と同等の効果が得られた。

4. 簡易給水方式の実構造物への適用事例

(1) 海上栈橋に対する電着工法の適用事例

a) 概要

竣工後約40年経過した海上栈橋の桁を対象とした。主に塩害が原因と推定されるひび割れが生じていたため、電着物によるひび割れ閉塞およびコンクリートの脱塩を目的として、簡易給水方式による電着工法を適用した。陽極材にチタンメッシュを用いて、陽極距離を約2mm（保水マット挿入）とした。電解質溶液には海水を使用し、補修面に対する電流密度 2.0 A/m^2 で2ヶ月間の通電を実施した。

b) 適用結果

適用状況を写真-2に示す。通電後、ひび割れが電着物で閉塞されるとともに、保水マットを取り込むようにして硬い電着物がコンクリート面に付着した。通電前後のコンクリート中の塩化物イオン濃度を図-6に示す。深さ20~40cmの位置に着目すると、通電前 16.9 kg/m^3 から通電後 2.3 kg/m^3 と、通電期間2ヶ月の施工結果として 14.6 kg/m^3 の脱塩効果が得られた。また、鉄筋が位置する深さ100mm付近の塩化物イオン濃度は通電後に約 0.9 kg/m^3 となり、鋼材腐食発生限界濃度以下まで脱塩された。

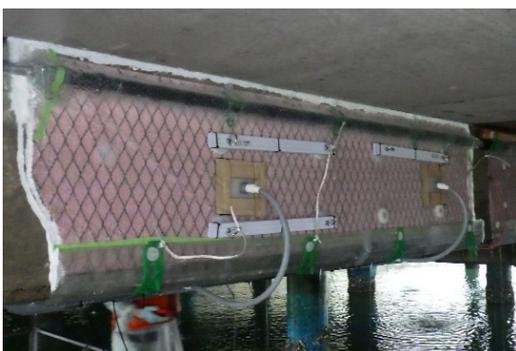


写真-2 栈橋への簡易給水方式の適用状況

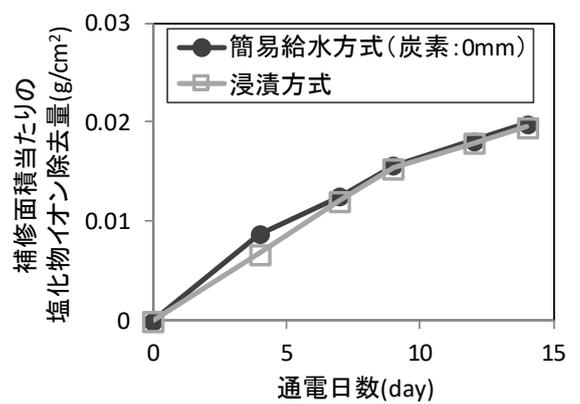


図-4 塩化物イオンの除去量

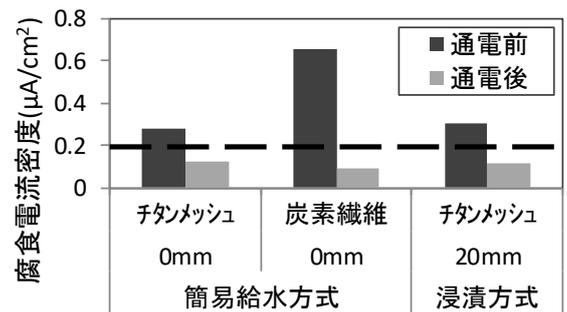


図-5 鉄筋の腐食電流密度

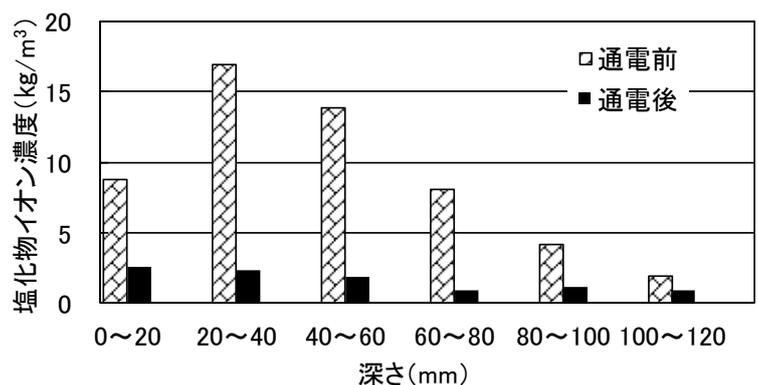


図-6 塩化物イオン濃度

(2) 建築物に対する再アルカリ化工法の適用事例

a) 概要

竣工後 27 年経過した建築物の屋内壁面を対象とした。通電前の中性化深さは約 30mm であった (写真-3 参照)。高さ 1.7m、長さ 18.5m の範囲 (31.5m²) に対して、再アルカリ化工法を簡易給水方式にて施工した。陽極材はチタンメッシュ、陽極距離は 0mm (不織布挿入)、電解質溶液は 1.2mol/l の炭酸カリウム水溶液とし、補修面に対する電流密度 1.0A/m² で 2 週間の通電を実施した。

b) 適用結果

適用状況を写真-4 に示す。簡易給水方式の施工、すなわち、給水・吸引装置や気泡緩衝シートなどの設置や撤去作業は、特殊な技能を必要としないことから、一般作業員 4 名で、設置作業は 2 日、撤去作業は 1 日で実施できた。通電期間中は、新しい電解質溶液を 3 日に 1 回の頻度で溶液水槽に補充しており、1 回の作業時間は約 30 分と軽微なものであった。シートの脱落などの不具合もなく、2 週間連続して通電できた。その結果、通電後の中性化深さは 0mm となり (写真-3 参照)、再アルカリ化工法で期待される十分な補修効果が得られた。

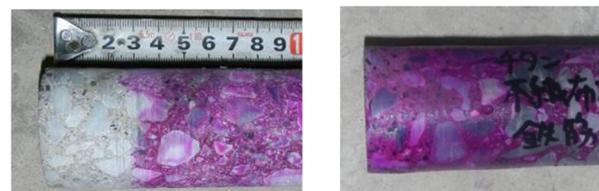
5. おわりに

本稿で得られた知見を以下に示す。

- ・脱塩ならびに再アルカリ化工法を簡易給水方式で施工した場合は、浸漬方式と同様の補修効果が得られることがわかった。また、簡易給水方式は、作業環境が良く安全性が高い施工方法であることも確認できた。
- ・電着工法の施工実績の大半は海水中の構造物⁷⁾であるが、簡易給水方式を用いることで、陸上構造物にも電着工法を適用できると考えられた。

参考文献

- 1) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：インフラ長寿命化基本計画，2013。
- 2) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー107，2001.11
- 3) 古川幸則，庄野昭，齋藤淳：型枠取りはずし後のコンクリート浸水養生工法（アクアカーテン）の開発ー鉛直壁面やトンネル覆工での給水養生ー，土木学会建設技術発表会 2011，pp.17-24，2011.11
- 4) 山本周，大即信明，西田孝弘，齋藤淳：給水養生方法の電気化学的補修への適用に関する実験的研究，第 14 回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.14，pp.1-6，2014.10。
- 5) Nishida, T. Otsuki, N. and Saito, A.: Development of Improved Electrodeposition Method for Repair of Reinforced Concrete Structures, 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, pp.393-402, Jul. 2014
- 6) CEB Working Party, Commission5: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion, CEB Bulletin No.243, 1998.
- 7) 山田満，深沢恵志，佐々木晴敏，藤澤泰之：電着工法による RC 製棧橋の漏水防止施工試験，三井造船技報，No.184，pp.17-23，2005.2



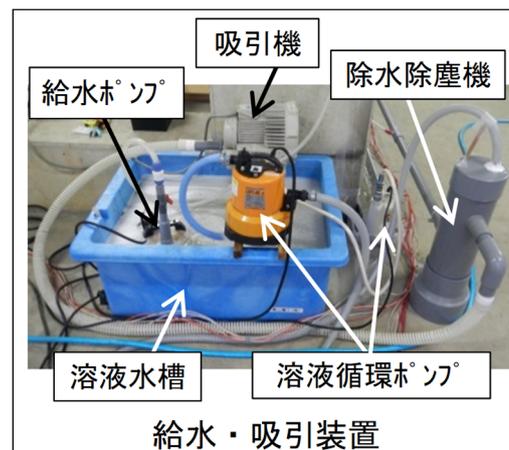
通電前 (30mm)

通電後 (0mm)

写真-3 中性化深さ



補修部の外観



給水・吸引装置

写真-4 壁面への簡易給水方式の適用状況