

論文 電気化学的脱塩工法を適用した橋脚の10年間の追跡調査

芦田 公伸^{*1}・石橋 孝一^{*2}・七澤 章^{*3}・松久保 博敬^{*4}

要旨:海水飛沫による塩害を受けていたコンクリート橋脚に補修工法として脱塩工法を1993年に適用し、その後定期的に追跡調査を実施した。追跡調査の項目として、コンクリートの塩分量、鉄筋の自然電位、鉄筋のアノード分極曲線、および、ひび割れ観察とした。飛来塩分は脱塩後も供給され続けているので、コンクリートの塩分量は脱塩後増加しているが、10年後でも脱塩前よりはるかに少ない。自然電位は、脱塩1年後に貴の方向へ移行していることを示し、10年経過した時点でも良好な防食状態を示している。また、腐食ひび割れの新たな発生が観察されないことから、脱塩の効果は10年間継続している。

キーワード:電気化学的防食工法, 脱塩工法, 耐久性, 追跡調査, 塩害, 腐食

1. はじめに

塩分を含有したコンクリートの補修工法として電気化学的防食工法の一つである脱塩工法が開発されて、10年以上が経過している¹⁾。脱塩工法は、コンクリート中の鋼材を陰極とし、コンクリート表面に陽極を仮設し、両極間にコンクリート表面積あたり約 $1A/m^2$ の直流電流を短期間(通常8週間程度)流すことにより、コンクリート中の塩化物イオンを電気化学的にコンクリート表面外に取り除く工法であり、脱塩工法の有効性に関する種々の実験結果が報告されている²⁾。それゆえ、塩害劣化の抜本的な補修工法の一つとして、数多くのコンクリート構造物の補修に採用されてきた。しかしながら、実構造物へ適用した場合の脱塩工法の効果、および、補修後の追跡調査に関する報告は必ずしも十分であるとは言い難い。

本論文では、1993年6月に海水飛沫による外的塩害を受けていたコンクリート橋脚に脱塩工法を適用し、その後定期的に追跡調査を実施し、10年が経過したので、脱塩工法適用後の実構造物における補修効果の持続性について報告する。

2. 実験概要

2.1 実構造物の概要

新潟県内にある日本海沿岸の旧国道8号線に架設されている鉄筋コンクリート橋梁(既に廃橋)の橋脚(かぶり=9~10cm)の内、最も海沿いの橋脚1本に脱塩工法を適用した³⁾(写真-1)。なお、残りの橋脚は、塩害劣化の進行度合いを把握するために、未補修とした。



写真-1 脱塩工法適用構造物(1993年)

*1 電気化学工業(株) 青海工場セメント特混研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 電気化学工業(株) 青海工場セメント特混研究所 主任研究員 工修 (正会員)

*3 電気化学工業(株) 青海工場セメント特混研究所

*4 (株) デンカリノテック 技術部

2.2 脱塩工法の施工

陰極は橋脚内部の鉄筋にリード線を接続した。仮設陽極は、コンクリート表面にチタンメッシュを固定し、セルローズファイバーと電解質溶液(飽和水酸化カルシウム水溶液)を吹き付けた(写真-2)。直流電流の供給は、定電流直流電源を用いて、コンクリート表面積当たり $1A/m^2$ の電流を8週間通電した。8週間の通電処理終了後、仮設陽極を取り外し、コンクリート表面を高圧水で洗浄後、普通セメントにて厚さ1mmのしごき仕上げを行った。



写真-2 仮設陽極の設置

2.3 追跡調査項目

脱塩工法適用の前後、および、追跡調査で実施した測定項目は、コンクリートの塩分量、自然電位、アノード分極曲線、ひび割れ観察とした。

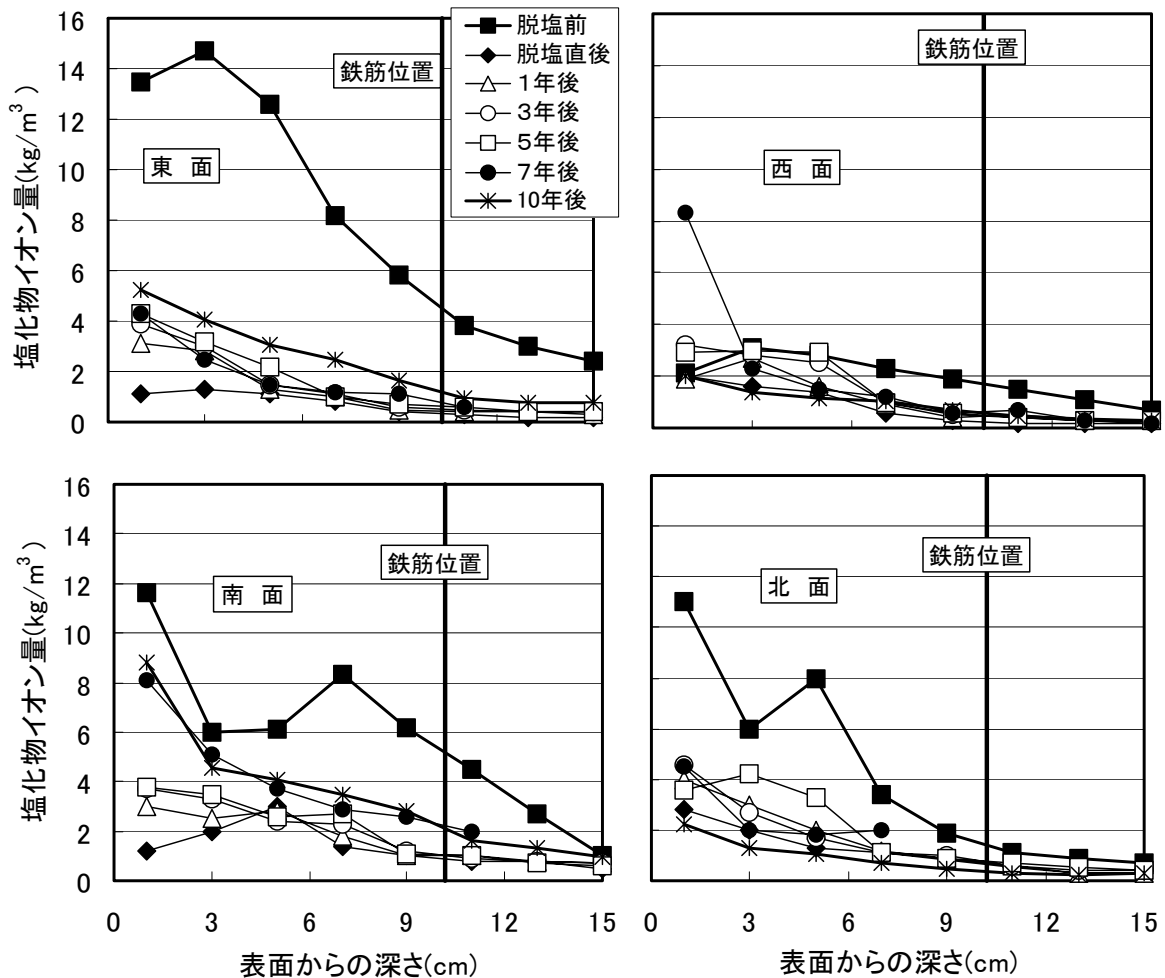


図-1 コンクリートの塩分量(全塩分)

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリートの塩分量

脱塩工法を適用した橋脚の各面(東西南北)から直径 10cm, 長さ 10cm 以上のコアを採取し, このコアをコンクリート表面から 2cm 間隔で切断し, 各切断片を JCI-SC4 に準じて全塩分量として分析した。なお, コアの採取は, 脱塩工法適用前, および, 脱塩終了直後, ならびに, 1 年後, 3 年後, 5 年後, 7 年後, 10 年後とした。各面の測定結果を図-1 に示す。

日本海の季節風, 橋脚背後の地形の影響により, 橋脚各面のコンクリートに付着する飛来塩分量が異なっているため, 各面の塩分量は大きく異なる。脱塩前の塩化物イオン量はコンクリート表面部で 2kg/m^3 (西面)~ 16kg/m^3 (東面), 鉄筋付近で 2kg/m^3 (北面)~ 6kg/m^3 (東面)である。一方, 脱塩直後はコンクリート表面部で 1kg/m^3 (南面)~ 3kg/m^3 (北面), 鉄筋付近で 0.8kg/m^3 (西面)~ 1.0kg/m^3 (南面)となり, 脱塩工法の塩分量低減効果が発揮されている。

脱塩工法を適用した橋脚は, 脱塩後に遮塩処理を実施していないため, 時間の経過と共に飛来塩分が再度コンクリート中に浸透する。その結果として, コンクリートの塩分量が増加する。脱塩後の追跡調査では, 時間の経過と共にコンクリート表面部の塩分量が増加している。また, コンクリート表面部からコンクリート内部へと逐次塩化物イオンが浸透し, 鉄筋付近の塩分量が増加している。脱塩後 10 年の時点において, 鉄筋付近の塩化物イオン量は 0.7kg/m^3 (西面)~ 1.9kg/m^3 (南面)である。

既設構造物に対する補修の可否を判断する塩化物イオン量は $1.0\sim 2.5\text{kg/m}^3$ 程度と考えら

れるが, 一つの目安として土木学会⁴⁾の維持管理指針において 1.2kg/m^3 が示されている。したがって, 飛来塩分が供給され続ける本実験に用いた橋脚では, 鉄筋位置における塩化物イオン量は脱塩後 10 年で目安の値に到達している。それゆえ, 外的塩分の供給が継続する場合, 脱塩工法適用後, コンクリートに遮塩のための表面処理を併用することが好ましい。

3.2 自然電位

脱塩前と脱塩後 3 ヶ月, 6 ヶ月, 1 年, 3 年, 5 年, 7 年, 10 年経過時に自然電位の測定を実施した。なお, 比較のため未補修の橋脚についても, 脱塩前と脱塩後 5 年と 10 年経過時に同様に測定を行った。自然電位の測定は, 銅-硫酸銅電極をコンクリート表面に密着させる方法を用い, 測定点数は橋脚の東西北の各面を 100 点, 南面を 95 点とし, 合計 395 点とした。なお, 測定結果を次の 3 つの判定区分に分類し, 各区分の百分率を脱塩橋脚, 未補修橋脚ともに図-2 に示す。

区分 A : 「自然電位 $\geq -200\text{mV}$ 」で「90%以上の確率で腐食なし」と判定

区分 B : 「 $-200\text{mV} >$ 自然電位 $\geq -350\text{mV}$ 」で「不確定」と判定

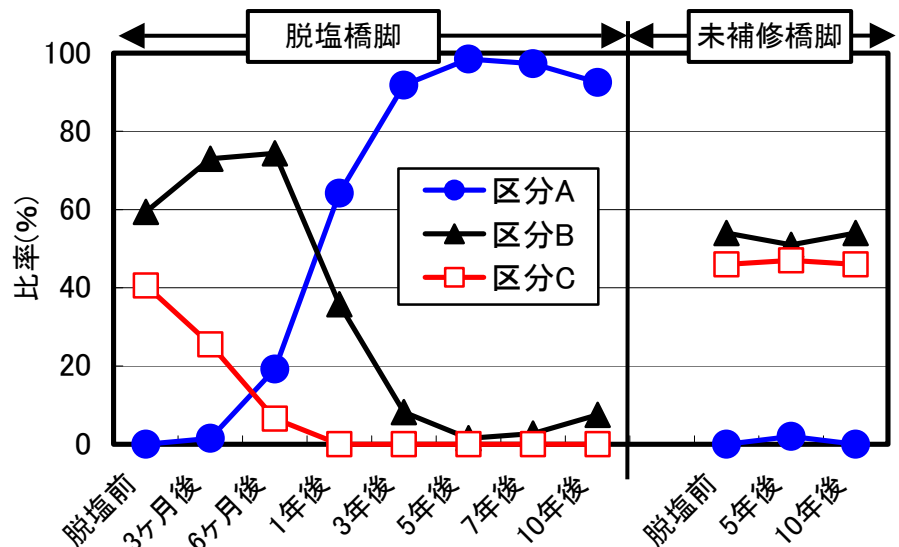


図-2 自然電位測定結果

区分 C : 「 -350mV > 自然電位」で「90%以上の確率で腐食発生」と判定

脱塩橋脚においては、脱塩前には「90%以上の確率で腐食なし」と判定される区分 A が全く存在せず、逆に「90%以上の確率で腐食発生」と判定される区分 C が約 40%存在していた。一方、脱塩 3 ヶ月後では、「90%以上の確率で腐食なし」と判定される区分 A が現れ、「90%以上の確率で腐食発生」と判定される区分 C が 26%に減少している。さらに、6 ヶ月後では、区分 A が 19%と増加するのに対し、区分 C が 7%に減少している。区分 A が増加し、区分 C が減少する傾向は、1 年後から 5 年後まで続き、5 年後以降 10 年後までは、区分 A, B, C はほぼ安定した比率となっている。

一方、未補修橋脚では、脱塩前、5 年後、10 年後のいずれの測定時期においても、区分 A, B,

C の比率に変化はなく、区分 A はほぼ 0%, 区分 B は 55%, 区分 C は 45%である。

本試験に用いた自然電位の測定方法は、銅-硫酸銅電極を橋脚コンクリート表面に密着させる方法のため、自然電位測定時の天候やコンクリート表面の状態(吸水状況など)によって、個々の測定点においては測定誤差やバラツキが生じる可能性がある。しかし、測定点数が 395 点であることを考慮すると、図-2 に示される区分 A, B, C の比率の誤差は小さいと考えられる。

したがって、脱塩橋脚の区分 A, B, C の比率の変化を検討すれば、鉄筋の自然電位は脱塩工法によって、貴の方向へ移行していることは明らかであり、脱塩後 10 年経過しても良好な防食状態である。

なお、脱塩後に自然電位が貴の方向へ移行する理由は次のように考えられる。

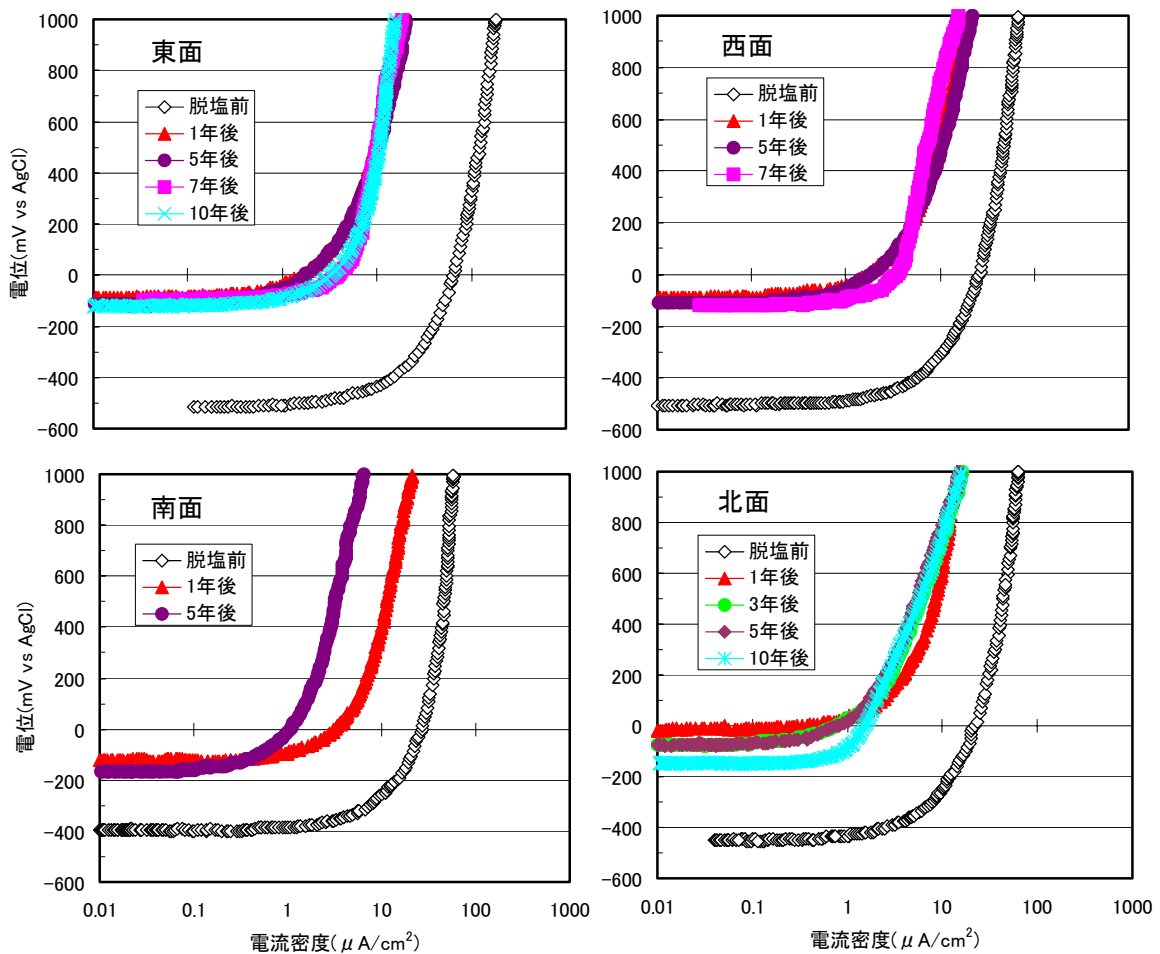


図-3 アノード分極曲線

1)脱塩により，腐食促進因子である塩化物イオン量が鉄筋周辺において大幅に低下したこと
 2)直流電流の通電により水の電気分解が生じて，鉄筋表面で水酸イオン(OH⁻)が発生したこと
 以上の理由により，脱塩工法適用後，実構造物においても自然電位が脱塩後の時間の経過と共に貴の方向に回復し，良好な防食状態が継続することが10年間の追跡調査により確認された。

3.3 アノード分極曲線

鉄筋を中心に含有した直径10cmのコアを橋脚から採取し，ポテンショ／ガルバナスタット，関数発生器，照合電極（銀－塩化銀電極），対極（貴金属酸化チタン）からなる測定装置にてアノード分極曲線を測定した。掃引速度1mV／秒において，電位を自然電位から+1000mVまで変化させ，その間の電位と電流の関係を測定した。測定結果を図－3に示す。また，鉄筋の分極抵抗値は，自然電位からアノード側に+50mVの大きさで分極させ，この曲線の自然電位の位置における勾配⁵⁾として求めた。分極抵抗値を表－1に示す。また，CEB-FIP⁶⁾では，鉄筋の腐食電流密度 I_{corr} ($\mu A/cm^2$)の大きさを用いて，表－2に示す判定基準を定めている。腐食電流密度 I_{corr} は表－1の分極抵抗値 R_{ct} ($k\Omega \cdot cm^2$)から，比例定数 $K=0.0209(V)$ として式(1)により計算される⁷⁾。計算結果とCEB-FIP⁶⁾に基づく判定結果を表－3に示す。

$$I_{corr} = \frac{K}{R_{ct}} \div 1000 \quad (1)$$

腐食電流密度からは，脱塩前には「×」と判定されるが，脱塩1年後以降はおおむね「○」を維持している。10年後の腐食電流密度0.39($\mu A/cm^2$)から鉄筋の年間腐食深さ PDY(mm/年)を式(2)を用いて計算⁸⁾すると，0.0045mm/年となり，極めて小さな値と判断される。なお，脱塩前は腐食電流密度=1.08～2.43($\mu A/cm^2$)より年間腐食深さは0.0125～0.0282mm/年であり，脱塩後10年経過しても年間腐食深さは1オーダー小さい値を維持している。

$$PDY = I_{corr} \times 11.6 \div 1000 \quad (2)$$

表－1 分極抵抗値($k\Omega \cdot cm^2$)

| 位置 | 脱塩前 | 1年後 | 3年後 | 5年後 | 7年後 | 10年後 |
|----|------|------|------|-------|------|------|
| 東 | 8.6 | 56.7 | — | 76.9 | 33.2 | 53.0 |
| 西 | 18.5 | 56.9 | — | 75.8 | 49.8 | — |
| 南 | 13.4 | 33.3 | — | 156.3 | — | — |
| 北 | 19.4 | 47.1 | 52.6 | 100.0 | — | 54.8 |

表－2 CEB-FIPの判定基準⁶⁾

| 腐食電流密度 I_{corr} ($\mu A/cm^2$) | 腐食速度の判定 | |
|---------------------------------------|---------|-------------|
| | 記号 | 判定 |
| 1より大 | × | 激しい腐食速度 |
| 0.5以上1以下 | △ | 中から高程度の腐食速度 |
| 0.2以上0.5以下 | ○ | 低から中程度の腐食速度 |
| 0.1-0.2未満 | ◎ | 不動態状態 |

表－3 腐食電流密度($\mu A/cm^2$)と判定

| 位置 | 脱塩前 | 1年後 | 3年後 | 5年後 | 7年後 | 10年後 |
|----|------|---------|------|---------|---------|------|
| 東 | 2.43 | 0.37 | — | 0.27 | 0.63 | 0.39 |
| 西 | 1.13 | 0.37 | — | 0.28 | 0.42 | — |
| 南 | 1.56 | 0.63 | — | 0.13 | — | — |
| 北 | 1.08 | 0.44 | 0.40 | 0.21 | — | 0.38 |
| 判定 | × | △～ ○ | ○ | ○～ ◎ | △～ ○ | ○ |

3.4 ひび割れ観察

10年後の脱塩橋脚と未補修橋脚を写真－3に示す。脱塩橋脚は，「3.1 コンクリートの塩分量」，「3.2 自然電位」，および，「3.3 アノード分極曲線」で論じたように鉄筋の腐食速度は大幅に低下している。それゆえ，10年後でも腐食によるひび割れはほとんど観察されない。一方，未補修橋脚では，鉄筋の腐食が継続しているために，この10年で写真－3に示すような数mm幅の大きなひび割れが発生した。

4. まとめ

(1) 10年経過した脱塩橋脚は、飛来塩分の供給が継続しているため、コンクリートの塩分量が増加している。しかし、10年後でも脱塩前より塩分量ははるかに少ない。



脱塩橋脚



未補修橋脚

写真－3 10年後(2003年)の劣化状況

- (2) 脱塩橋脚の鉄筋の自然電位は、10年後も良好な防食状態であることが判明した。
- (3) アノード分極曲線から、脱塩後10年経過しても年間腐食深さはきわめて小さい値を維持していることが判明した。
- (4) 脱塩橋脚は10年後でも腐食によるひび割れは観察されないが、未補修橋脚では腐食が継続し、数mm幅のひび割れが発生している。
- (5) 以上から、脱塩橋脚は10年経過しても良好な防食状態であるといえる。

なお、本実験に用いた脱塩橋脚の追跡調査は今後も継続する予定である。

[謝辞] 1993年に当該橋脚に脱塩工法を適用するに当たり御指導下さいました国土交通省北陸技術事務所、追跡調査にご協力頂きました国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所、糸魚川国道維持出張所の関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 芦田公伸, 石橋孝一: 直流電流によるコンクリート中の塩分の移動, コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集, pp.29-34, 1992.10
- 2) 例えば, 上田隆雄: 塩害により劣化したコン

クリート構造物へのデサリネーションの適用に関する研究, 京都大学博士学位論文, 1999.6

- 3) 芦田公伸ほか: 電気化学的処理による鉄筋コンクリート構造物からの塩分除去工法における適用事例, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, pp.63-68, 1994.10
- 4) 土木学会編: 【2001年制定】コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.100, 2001.1
- 5) 大即信明, 池上明夫, 福手 勤, 高木兼士: 種々の材料の鉄筋防食性能についての電気化学的評価, コンクリート工学論文集, 第1巻第2号, pp.1-13, 1990.7
- 6) CEB-FIP: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures, Bulletin d' Information No.243, pp.52-59, May 1998
- 7) 宮里心一: 鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる塩害および中性化によるマクロセル腐食に関する研究, 東京工業大学博士学位論文, pp.27-30, 2001.4
- 8) 横田 優: 建設後36年経過したRC造開水路側壁の腐食モニタリング結果について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.185-190, 1998.6