

論文 鉄筋コンクリート構造物の電気化学的補修による環境負荷低減

山本賢司*¹・宇田川秀行*²・芦田公伸*³・坂井悦郎*⁴

要旨: 電気化学的補修工法としてデサリネーションを取り上げ, 鉄筋コンクリート構造物の補修に適用したときの環境負荷低減の効果について検討した。従来工法である断面修復と比較して, 劣化部分のはつりや断面修復材の使用がほとんどないため, 通電に伴う消費電力を加味しても環境負荷を低減できる。また, 補修後の劣化予測を考慮すると, デサリネーション処理後に表面被覆処理を行った場合に環境負荷を最も低減できることを示した。

キーワード: デサリネーション, 塩化物イオン量, 再劣化予測, 環境負荷, CO₂ 原単位

1. はじめに

従来の高度経済成長に合わせた社会資本の充実を目指した建設事業も, 社会資本の整備へと転換し始めている。このような観点より, 新設構造物の建設から既存構造物の維持・管理へと重点が移りつつあり, 耐久性を向上させる効率的な技術の導入が求められている。このような背景の中で, コンクリート構造物の電気化学的補修工法は, 塩害などの鉄筋腐食が顕在化する劣化現象に対する有効的な補修工法としてその効果が期待され, 実用化されている。

鋼材腐食を伴ったコンクリート構造物の劣化に対する補修としては, 従来から表面処理工法や断面修復工法などが適用されてきた。これらの工法は利点と問題点を併せ持っており, 特に後者では劣化部分のコンクリートをはつり取った後, モルタルなどの断面修復材を用いるため, 補修に伴うセメントの使用量が多くなり, 環境負荷の大きい補修工法といえる。

一方, 近年, 環境問題が広く取り上げられる

ようになり, 建設業界においても CO₂ 削減に対して様々な取組みがなされている。これに対して筆者らも, 高強度コンクリートの製造にエトリンナイト生成系高強度混和材の使用が環境負荷低減に有効であり, 要求性能を満足できる範囲で環境負荷の小さい材料を用いたり養生方法を工夫することが重要であることを報告している¹⁾。また, 超早強混和材の使用により, コンクリート製品の製造効率を向上させることが可能となり, 環境負荷を低減できることも報告している²⁾。

本研究では, 鉄筋コンクリート構造物に電気化学的補修としてデサリネーションを取り上げ, 構造物の供用期間と補修後の再劣化予測を考慮して環境負荷評価を行い, 従来工法である断面修復工法を行った場合と比較・検討した。

2. 実験概要³⁾

2.1 デサリネーション処理

日本海側に面している一般国道の鉄筋コンクリート製橋脚にデサリネーションを適用した。橋脚は岩場の海岸線から陸側に約 50m の位置に

* 1 電気化学工業㈱ 青海工場 セメント・特混研究所 工修 (正会員)

* 2 電気化学工業㈱ 特殊混和材事業部 施工開発課 課長 (正会員)

* 3 電気化学工業㈱ 特殊混和材事業部 特混技術課 大阪技術駐在 課長 工博 (正会員)

* 4 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科 材料工学専攻 工博 (正会員)

あり、塩分の飛来による被害を被っていた。デサリネーション処理には、陽極電極としてチタンメッシュ、電解質溶液として飽和水酸化カルシウム水溶液、電解質溶液の保持材として古新聞や古雑誌から再生したセルローズファイバーを用いた。チタンメッシュをコンクリートに仮付けした角材に固定し、セルローズファイバーを飽和水酸化カルシウム水溶液とともに吹付けによりコンクリート表面に付着させた。次に定電流直流電源を用いて、電流密度 $1\text{A}/\text{m}^2$ 、通電電圧約 25V で直流電流を供給し、8週間の通電処理を行った。その間、セルローズファイバーに1日あたり $15\text{l}/\text{m}^2$ の電解質溶液を噴霧し続けた。

2.2 測定項目

デサリネーション処理前後における状態、および処理後の耐久性を検証するために、コンクリート中の含有塩化物イオン量（全 Cl^- 量）、自然電位、分極抵抗を測定した。なお、処理後の追跡調査はデサリネーション完了1年後、3年後、5年後に実施した。

(1) 含有塩化物イオン量

橋脚の東西南北の各面について、 $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ のコアを採取し、コンクリート表面から 2cm 間隔で輪切りにし、 $\text{JCI-SC4}^4)$ に準拠して全 Cl^- 量を測定した。

(2) 自然電位

銅 - 硫酸銅電極を用いて橋脚各面の自然電位を測定した。測定は各面100点ずつとし、腐食度合いの判定^{5), 6)}を

区分1:「自然電位 -200mV 」で「90%以上の確率で腐食なし」と判定

区分2:「 $-200\text{mV} >$ 自然電位 -350mV 」で「不確定」と判定

区分3:「 $-350\text{mV} >$ 自然電位」で「90%以上の確率で腐食発生」と判定

とし、各区分の頻度を百分率で示した。

(3) 分極抵抗

分極抵抗は、鉄筋を中心に含んだ状態で 10cm のコアを採取し、全自動分極曲線測定装

置でアノード分極曲線を測定することにより求めた。測定は掃引速度 $1\text{mV}/\text{s}$ で電位を自然電位から $+1000\text{mV}$ まで変化させ、電位と電流の関係を測定した。鉄筋の分極抵抗値は、自然電位からアノード側に $+50\text{mV}$ の大きさで分極させ、自然電位における勾配⁷⁾から求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 含有塩化物イオン量の変化

図-1にデサリネーション処理前後における、コンクリートの深さ方向に対する含有 Cl^- 量を示す。なお、デサリネーション処理前に最も含有 Cl^- 量が高かった橋脚の東面の結果のみを示した。デサリネーション処理により、 Cl^- をコンクリート内部から表面外へ電気泳動させ、鉄筋付近の Cl^- 量を大幅に低減できることが判った。また、処理後の5年間において、コンクリート表面部では、時間の経過に伴って Cl^- 量が少しずつ増加している。これはコンクリートの表面被覆処理を施しておらず、デサリネーション処理後も引き続き飛来塩分が供給されていることにより、新たにコンクリート中への Cl^- の浸透があるためである。一方、鉄筋位置における Cl^- 量は、デサリネーション処理前後と比較してほぼ変わらなかった。なお、橋脚の西面、南面、北面においてもほぼ同様な傾向を示した。

3.2 自然電位

図-2にデサリネーション処理前後の自然電位の測定から腐食度合いの判定を基に分類した結果を示す。処理前には、「90%以上の確率で腐食なし」と判定される区分1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3が約40%存在した。一方、処理3ヶ月後では区分1が現れ、区分3が25.5%に減少している。さらに6ヶ月後以降も区分1が増え続け、1年後には区分3が存在しなくなった。以上より、デサリネーション処理により、処理後の鉄筋の自然電位が貴な方向に回復し、鉄筋表面の化学的な状態が鉄筋を防食する良

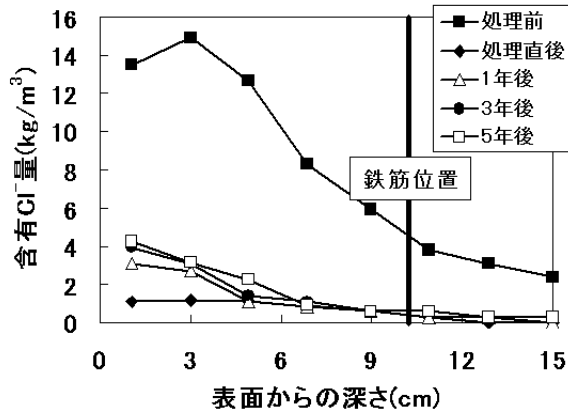


図 - 1 デサリネーション処理前後の含有Cl⁻量(全Cl⁻量)の変化

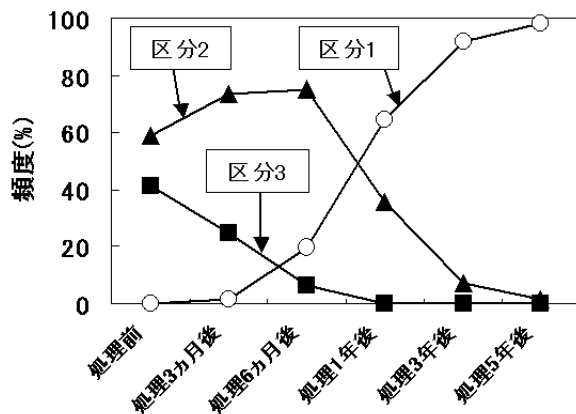


図 - 2 処理後の時間経過と判定区分の頻度

好な方向に変化していることが示唆された。

3.3 分極抵抗

表 - 1 に分極抵抗値を示す。デサリネーション処理前の分極抵抗値は 8.6 ~ 19.4k · cm² であるのに対し、処理1年後以降、分極抵抗値が増加しており、分極抵抗値からも鉄筋を防食する健全な状態に移行していることが示された。

3.4 再劣化の予測

3.4.1 平均腐食深さからの予測

CEB-FIP⁶⁾では、鉄筋の腐食電流密度の大きさをを用いて腐食速度の判定基準を定めている。また、腐食電流密度から Faraday の第二法則より、1年間あたりの平均腐食深さPDYが求められる。PDYは表 - 1 の分極抵抗値 R_p を用いて、比例定数 $K=0.026(V)$ とすると、式(1)により計算される⁸⁾。

$$PDY=K \times (1/R_p) \times 11.6 \quad (1)$$

表 - 1 分極抵抗値 (k · cm²)

	処理前	処理1年後	処理3年後	処理5年後
東面	8.6	56.7	-	76.9
西面	18.5	56.9	-	75.8
南面	13.4	33.3	-	156.3
北面	19.4	47.1	52.6	100.0

表 - 2 1年間あたりの平均腐食深さPDY (× 10⁻³ mm/year)

	処理前	処理1年後	処理3年後	処理5年後
東面	34.8	5.3	-	3.9
西面	16.2	5.5	-	3.9
南面	22.0	9.0	-	2.0
北面	15.1	6.4	5.7	3.0
平均値	22.0	6.6	5.7	3.2

表 - 2 にデサリネーション処理前後のPDYを示す。処理前におけるPDYは0.0151 ~ 0.0348mm/yearであるのに対し、処理1年後で処理前の約1/3に、処理5年後で約1/7に減少している。

鉄筋表面に均一な腐食が発生する場合、コンクリートのひび割れ発生時における鉄筋の腐食限界量は10mg/cm²であるとされている⁹⁾。一方、屋外暴露試験や実構造物の調査結果より、鉄筋表面に孔食等の不均一な腐食が発生する腐食限界量は80 ~ 100mg/cm²であると言われている¹⁰⁾。この値を鉄の密度(7.8g/cm³)で除して腐食深さに換算すると0.12mm(平均値)となる。従って、鉄筋表面の腐食深さが約0.12mmに達すると、コンクリートにひび割れや浮きが発生する可能性がある。

表 - 2 よりデサリネーション処理前におけるPDYが 2.2×10^{-2} mm(平均値)であるので、腐食深さが0.12mmに達するまでの期間は約5年となる。一方、処理5年後におけるPDYは 3.2×10^{-3} mm(平均値)であるので、腐食深さが0.12mmに達するまでの期間は約38年となる。すなわち、デサリネーション処理前には鉄筋が腐食を開始して約5年後にはコンクリートに変状が現れる可能性があるのに対し、処

理後には約38年かかると予想される。なお、この予測は処理5年後におけるPDYに基づいたものであり、デサリネーション処理後、塩分の再浸透がなければPDYは低下し続けるため、耐用年数はさらに長くなると考えられる。

3.4.2 拡散方程式からの予測

コンクリート中へのCl⁻の浸透は、コンクリート硬化体の細孔溶液中の濃度拡散によると考えられているため、Fickの第二法則で表現することができる¹¹⁾。これを初期条件C(x,0)=0、境界条件C(0,t)=C₀(一定)として解くと、式(2)のようになる。

$$C(x,t)=C_0(1-\text{erf}(x/(2(D \cdot t)^{1/2}))) \quad (2)$$

ここでC₀: 表面Cl⁻量, erf: 誤差関数,

D: Cl⁻の見かけの拡散係数, t: 時間,

x: 表面からの深さ

対象とした橋脚の東面において、デサリネーション後の供用期間を5年とした場合、回帰分析よりC₀は5.28kg/m³、Dは8.68 × 10⁻⁸cm²/sとなる。また、実構造物におけるC₀は時間の経過とともに増加する傾向にあり、式(3)のように時間の平方根に比例する¹²⁾とみなすことができる。

$$C_0=S \times t^{1/2} \quad (3)$$

デサリネーション処理5年後の表面Cl⁻量C₀、Cl⁻の見かけの拡散係数Dを基準とすると、式(3)よりS=4.2 × 10⁻⁴kg/(m³・s^{1/2})となる。これを基にして式(2)よりデサリネーション処理後5～20年経過後の含有Cl⁻量を予測した。図-3にその結果を示す。図中には土木学会基準(案)⁹⁾の鉄筋位置における許容塩分量の目安である1.2kg/m³を点線で表記した。対象とした橋脚の東面では、鉄筋が再度発錆する量のCl⁻が浸透するまでの期間はデサリネーション処理後ほぼ10年と予測される。従って、飛来塩分が供給され続ける条件下では、供用期間を10年以上とするためにはデサリネーション処理後に塗装等の表面被覆処理を行うことが好ましいと考えられる。その場合、Cl⁻の再浸透を考慮する必要はないため、再劣化によりひ

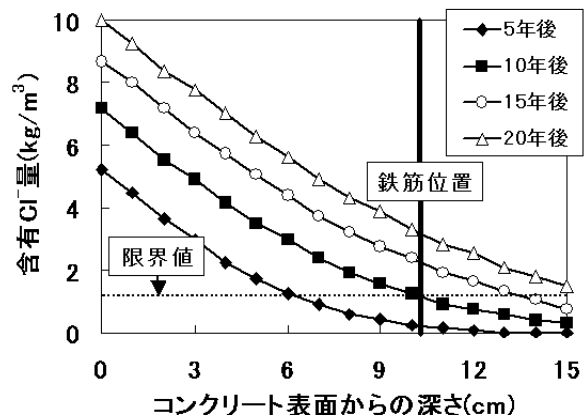


図-3 デサリネーション処理後の含有Cl⁻量の予測

び割れが発生するまでの期間は前述したように約38年と推定される。

3.5 環境負荷評価

デサリネーション処理による補修と従来工法である断面修復工法の環境負荷評価を行うために、以下のような設定をした。実験の対象とした橋脚に対して、200m²の面積分の補修を行う。デサリネーション処理の場合、電流密度1A/m²、通電電圧25Vとして8週間通電を行い、消費した積算電力を求めた。整流ロス等を考慮して消費電力を上記の1.5倍かかるとした。また、デサリネーション処理後に表面被覆を行う場合には、その耐用年数を10年とした。用いたセルローズファイバーは古新聞や古雑誌から再生しており、また、表面被覆を行う場合にはそのCO₂原単位が明らかとなっていないため、これらを環境負荷に含めていない。一方、断面修復の場合、全断面の2/3にわたって鉄筋の裏側(表面から深さ12cm)まで劣化部分をはつり取り、モルタルで補修するものとした。これは図-1のように補修前の鉄筋近傍におけるCl⁻量が1.2kg/m³を超えていたためである。モルタルの配合をW/C=35%、C/S=1/3とし、断面修復に用いるモルタルにかかる環境負荷を算出した。なお、環境負荷評価の対象としたのは、通電に伴う電力消費や断面修復に用いる材料にかかるCO₂排出量であり、作業機械の操業や材料運搬などで発生するCO₂排出

表 - 3 CO₂ 排出量の原単位

原材料	CO ₂ 原単位
普通セメント	0.228 [kgC/kg]
砂	0.00154
電力	0.129 [kgC/kWh]

量については考慮していない。

表 - 3 に土木学会地球環境委員会 LCA 研究小委員会が推奨する CO₂ 原単位を示す¹³⁾。ここでいう CO₂ 原単位は原材料製造時における単位数あたりの CO₂ 排出量(電力の場合は使用単位数あたりの CO₂ 排出量)を炭素換算で示したものであり、使用量を乗じることで環境負荷を定量的に把握できる。

なお、断面修復ではつり取ったコンクリートを埋立て処分する場合には、利用できない土地を増やすことになり、今後、こうした観点からの評価も必要と思われる。

図 - 4 に断面修復，デサリネーション処理による補修を 1 回行ったときの環境負荷を示す。デサリネーション処理にかかる環境負荷は、断面修復の場合と比較して約 30% 低減となった。これは通電による消費電力を加味しても、劣化したコンクリートのはつり量を低減し、断面修復に用いるモルタルを低減できる効果のほうが大きいためである。

次に、構造物の供用期間と再劣化の予測を考慮して環境負荷評価を行った。図 - 5 に断面修復，デサリネーション処理のみ，およびデサリネーション処理後に表面被覆処理を行った場合における劣化予測の模式図を示す。構造物の性能が必要とされる性能にまで低下した時点で補修を行い，その後，引き続き供用するものとする。デサリネーション処理のみを行った場合，前述したように再劣化が起こるまで約 10 年かかる。断面修復の場合，マクロセル腐食により再劣化が短期間に生じることが知られている¹⁴⁾ が，これを評価することは難しいため，デサリネーション処理のみを行った場合と同様に約 10 年で再劣化が起こるものとした。また，2 回目以降の補修でも 1 回

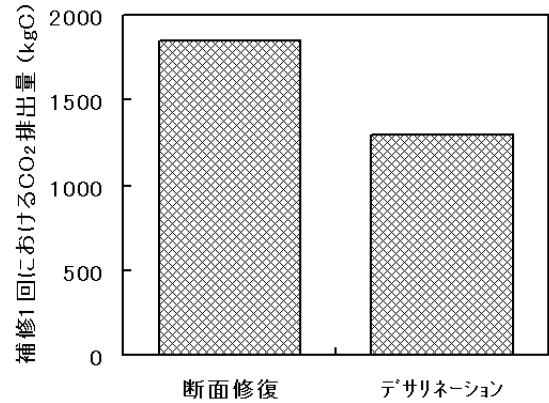


図 - 4 断面修復，デサリネーション処理にかかる環境負荷

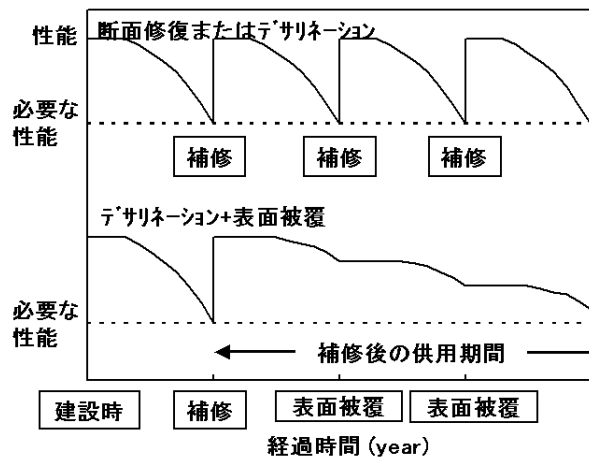


図 - 5 各補修後の劣化予測

目と同様の補修効果が得られるものとした。一方，デサリネーション処理後に表面被覆処理を行った場合(10年に1回，表面被覆処理を行う)には，前述したように再劣化が起こるまでに約 38 年かかるため，補修の回数を減らすことができる。なお，表面被覆処理を行っても，内部で含有 Cl⁻ の拡散が起こると考えられるが，濃度差が小さいため，無視しうるものとみなした。

図 - 6 に 1 回補修を行った後，供用年数 50 年までにかかる環境負荷を示す。断面修復の場合と比較してデサリネーション処理の場合には，再補修が必要になる期間を同一としているため，約 30% の環境負荷低減となる。また，デサリネーション処理後に表面被覆処理を行った場合には，約 38 年間再補修が必要ないため，さらに環境負荷が低減され，供用年数 50

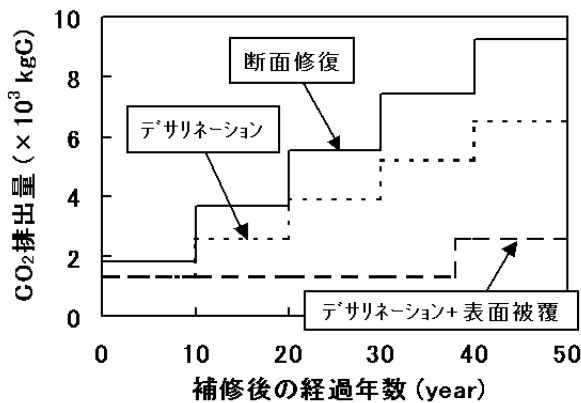


図 - 6 劣化予測を考慮した経過年数と環境負荷の関係

年の時点で比較すると、断面修復の場合より約 72% 環境負荷が低減される。

4. まとめ

本研究で対象とした構造物の場合、デサリネーション処理により回復した鉄筋の防食性能は、飛来塩分の供給が続く場合には約 10 年間、供給がない場合には約 38 年間と推測される。構造物の供用期間と再劣化の予測を考慮して環境負荷評価を行ったところ、従来工法である断面修復と比較してデサリネーション処理が環境負荷低減に有効であることを示すことができた。

謝辞

本研究を行うにあたり、電気化学工業株式会社盛岡実氏にご指導を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松永嘉久ほか：環境負荷低減に対する高強度混和材を用いたコンクリートの有効性，材料，Vol. 50，No. 4，pp. 440-446，2001
- 2) 松永嘉久ほか：超早強混和材によるコンクリート製品の製造効率の向上と環境負荷低減，Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan，8，pp. 339-343，2001
- 3) 芦田公伸：電気化学的な手法によるコンク

リートの脱塩処理技術に関する研究，京都大学，学位論文，1999

4) 日本コンクリート工学協会，硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法，JCI-SC4，1987

5) American Society for Testing and Materials: ASTM C 876，1980

6) Comite Euro-International du Beton (CEB-FIP) : Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures，Bulletin d' Information No. 243，pp. 53，1998

7) 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，Vol. 1，No. 2，1990

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

9) 社団法人 土木学会：コンクリート構造物の維持管理指針（案），コンクリートライブラリー，第 81 号，1995

10) 横田優：電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 12，No. 1，pp. 545-550，1990

11) 横田優，浮田和明，重松俊一，藤枝正夫：拡散理論に基づいた海岸部塩分汚染環境評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 9，No. 1，pp. 443-446，1987

12) 丸屋剛，宇治公隆，内藤隆史：塩分のコンクリートへの拡散浸透に関する表面塩分量の定式化，大成建設技術研究所報，第 21 号，pp. 107-112，1988

13) 土木学会地球環境委員会環境負荷評価（LCA）研究小委員会，土木建設業における環境負荷評価（LCA）研究小委員会講演要旨集，1997

14) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書（ ），1996