

脱塩工法の実用化

古賀裕久* 渡辺博志** 竹内祐樹***

1. はじめに

コンクリート構造物中の鋼材は、通常は、コンクリートによって腐食から守られているが、海からの飛来塩分の影響などをうけてコンクリート中の塩化物イオン量が多くなると、その影響で腐食が生じる場合がある。この劣化現象を塩害と呼ぶ。塩害は比較的短期間で深刻な損傷を生じさせる場合があり、コンクリート構造物の劣化現象の中でも、特に注意すべきものの一つである。

電気化学的脱塩（以下、脱塩工法）は、塩害を受ける構造物の補修方法の一つで、コンクリート構造物の表面に電解質溶液と陽極材からなる陽極電極を仮設し、コンクリート中に埋設されている鋼材との間に直流電流を一定期間のみ流し、電気泳動の原理でコンクリート中の塩化物イオンをコンクリート外に抽出するものである（図-1）。

塩害に対する補修方法には、脱塩工法の他にも、断面修復工法や電気防食工法などがある。これらに対し、脱塩工法には、基本的にはつりを行う必要が無くはつり作業によって構造物を傷つけるおそれが少ないこと、補修後の維持管理に特別なノウハウを必要としないことなどの利点がある。

一方、脱塩工法は比較的新しい技術であり、実施方法の詳細には十分に確立されていない点もある。そこで、土木研究所では、電気化学工業（株）、（株）富士ピー・エス、東北大学、長岡技術科学大学、徳島大学、九州工業大学と共同研究を行い、脱塩工法に関する種々の課題について検討し、補修の設計、施工時の注意点をまとめた電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）¹⁾としてとりまとめた。

本報では、このガイドライン（案）をまとめるにあたっての検討について、その概要を紹介する。なお、脱塩工法では、耐荷性状を回復することはできないので、塩害による著しい劣化が生じた構造物に対しては、他の補修・補強工法と組み合わせ

せて適用する必要がある。

2. 脱塩工法の実用化に向けた検討課題

脱塩工法については、土木学会によるマニュアル²⁾があり、既存の補修事例では、これを参考に試行的に実施されつつある状況である。その結果、表-1に示す検討課題などが明らかになっており、これらを解消することで本格的な実用化につながることが期待される。そこで、実験による検討を行うとともに、最近の研究をレビューすることなどによって、ガイドライン（案）をとりまとめた。

3. 検討結果

3.1 脱塩可能な塩化物イオン量に関する検討

脱塩を開始する前のコンクリートに著しく多量の塩化物イオンが含まれている場合には、これを脱塩することが困難となるような場合もあると考

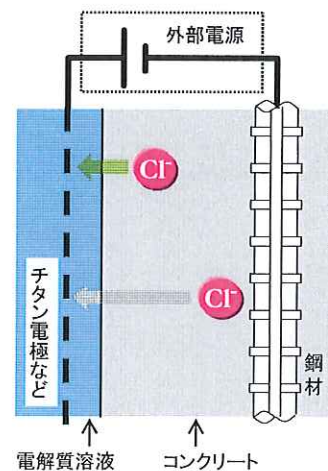


図-1 脱塩工法の模式図

表-1 主な検討課題

検討項目	疑問点
1) 脱塩可能な塩化物イオン量	多量に塩分が含まれるコンクリートでも十分脱塩できるか。
2) 通電条件	電流量はコンクリート表面で 1A/m^2 、通電期間は8週間とするのが一般的だが、この条件は常に適用できるか。
3) 脱塩目標	塩分をどれだけ除去すれば、補修効果が得られるか。

えられた。そこで、多量の塩化物イオンを混入した円柱供試体（図-2）を作製し脱塩を行った。コンクリートの配合等の条件を表-2に示す。なお、通電条件は、電流密度をコンクリート表面で $1\text{A}/\text{m}^2$ とし、通電期間は、これを短縮する可能性も念頭に置いて6週間とした。

図-3に脱塩前後の供試体中の塩化物イオン量の推移を示す。初期に $3.73\text{wt}\% \text{ vsC}$ （コンクリート体積あたりに換算すると、 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 以上）と多量の塩化物イオンを含む供試体でも、それより当初の塩化物イオン量が少ない供試体と同程度まで脱塩できた。この結果から、脱塩前のコンクリート中にかなり多量の塩化物イオンが含まれる場合でも、これを脱塩することが可能であると考えられる。また、本報では詳細を省略するが、コンクリートの硬化後に塩水浸せきによって塩分を導入した場合も同様な結果が得られた³⁾。

ただし、十分な電流を流すことが困難な部位（例えば、かぶり部よりも深い位置）に多量の塩分が含まれる場合には、これを脱塩することが困難なので、注意が必要である。

3.2 通電条件に関する検討

(1) 積算電流量に基づく脱塩量予測

脱塩は、電気エネルギーを用いて塩化物イオンを抽出する補修方法なので、その脱塩量 (W_{Cl}) は式(1)のように補修部材に与えた電気エネルギーの関数として表現できると考えられる。既往の研究事例でも、式(1)の考え方にに基づき脱塩量を推定したり、脱塩の効率を求めたりしている事例が多く見られる。

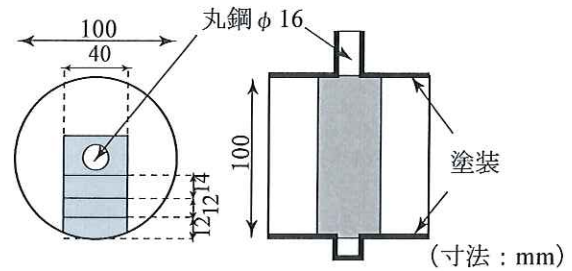
$$W_{Cl} = E_{Cl} \cdot a \cdot Q \quad (1)$$

ここに、 E_{Cl} ：塩化物イオンの輸率（電気泳動による移動の効率）

a ：1クーロンの電荷の移動により理論的に取り除ける塩化物イオンの量で $3.67 \times 10^{-4} \text{ (g/C)}$

Q ：通電期間中に供給した電荷量 (C)

式(1)から、通電中の電流量を大きくしたり、通電期間を長くしたりして、通電中の電荷移動量を多くすると脱塩量が大きくなると予想される。なお、式(1)では電気エネルギー量を電荷量として表したが、単位面積あたりの電流量に通電時間を乗じた積算電流密度として表現されている場合もある。



※着色部は、塩化物イオン量測定位置

図-2 脱塩を行った円柱供試体の形状

表-2 コンクリートの配合等

単位量(kg/m^3)				空気量 (%)	塩化物イオン量 (wt% vsC)
W	C	S	G		
165	275	828	1036	4.5	2.02, 3.73

※セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。
※空気量は配合上の目標値を示した。塩化物イオン量は、脱塩を実施していない供試体で測定し、単位セメント量に対する質量パーセントとして表示した。

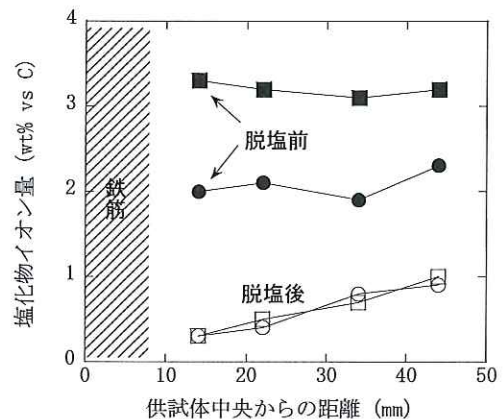


図-3 当初の塩化物イオン量が異なる供試体の脱塩前後の塩化物イオン量の比較

しかし、土木研究所で行った実験結果等を用いて検討したところ、積算電流密度と脱塩量の関係が不明確な場合が少なくなかった。これは、種々の条件によって塩化物イオンの輸率が著しく増減するためと考えられる。したがって、当初からこの手法で脱塩量を予測し、通電条件を定めるのは容易ではない。そこで、ガイドライン（案）では、通電中の脱塩量のモニタリング結果などを利用して、通電条件を随時見直す場合の手法として紹介した。

(2) 電流量に着目した簡易な計画手法

一方、脱塩終了時の塩化物イオン分布に着目すると、通電時の電流量が多いと予測される部位は

報文

ど残留する塩化物イオンが減少していることがわかった。例えば、図-2に示した供試体では、コンクリート表面に対して鉄筋近傍では電流密度が大きくなるが、図-3に示したように、脱塩後の残留塩化物イオン量は、鉄筋近傍で小さく、コンクリート表面付近では大きい。

そこで、 $300 \times 300 \times 100\text{mm}$ の版状供試体に複数の鉄筋を配置し、脱塩を行って、各部位の脱塩後の残留塩化物イオン量を測定した⁴⁾。また、その結果を解析から求まる各部位の電流密度と比較した。本報ではその詳細については省略するが、電流密度分布の解析は線形の二次元ラプラス方程式に対して差分法を用いて行っており、その数値解析結果は、脱塩中の供試体の電流密度と概ね一致していた。

図-4に脱塩を行った版状供試体の配筋の例を示す。なお、供試体作製に使用したコンクリートの配合は、基本的には表-2と同じであるが、脱塩前の塩化物イオン量は、 $0.99\text{wt\% vsC}$ であった。なお、通電条件は、電流密度がコンクリート表面で 1A/m^2 、通電期間は8週間とした。

図-5に例として、供試体Aの残留塩化物イオン量測定結果と電流密度分布の解析結果を示す。残留塩化物イオン量は、電流密度が比較的小さい部位、すなわち鋼材間に位置する部位やコンクリート表面付近で大きくなることを確認できた。

また、図-6に、図-5と同様の検討を複数の版状供試体で行って得られた結果を示す。脱塩後に供試体各部に残留する塩化物イオン量は、その部位を流れる電流密度が大きくなるほど低下した。また、腐食限界塩化物イオン量として $0.4\text{wt\% vsC}$ を目標に脱塩する場合には、その部位の電流密度が 2A/m^2 程度となるように計画するのが有効と考えられる。

このような通電条件の検討手法については、ガイドライン（案）の附属資料として紹介した。なお、鋼材近傍の電流密度が著しく大きい場合にはコンクリートにひび割れが生じるおそれがあることが知られており、 5A/m^2 以下となるように計画する必要がある。

3.3 脱塩目標に関する検討

脱塩工法を適用した場合にも、コンクリート中の塩化物イオンを全て除去することはできない。しかし、現状では、脱塩後に残留する塩化物イオ

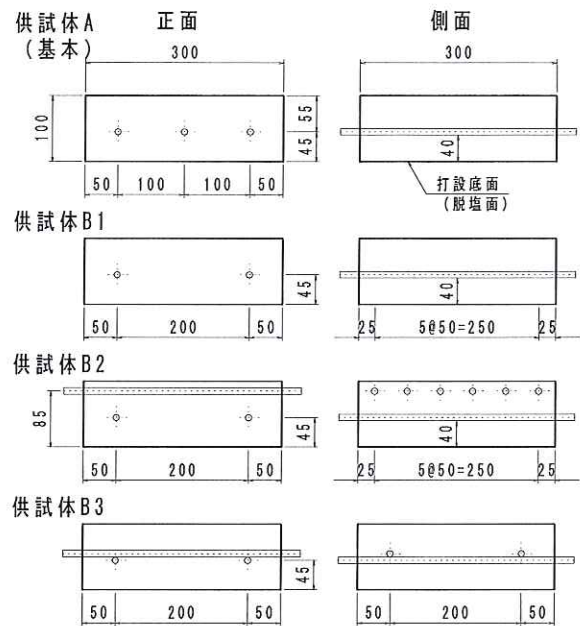
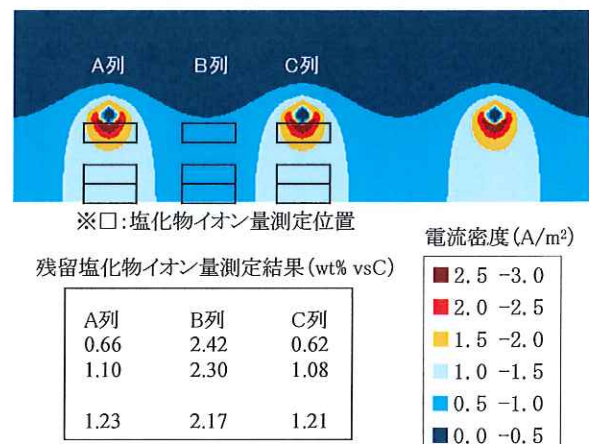


図-4 脱塩を行った版状供試体の配筋例



※着色によって供試体内部の電流密度分布を示した。また、残留塩化物イオン量を測定した部位については、測定結果の数値を示した（左下）。

図-5 版状供試体の脱塩後の残留塩化物イオン量と解析によって求められた電流密度分布の関係

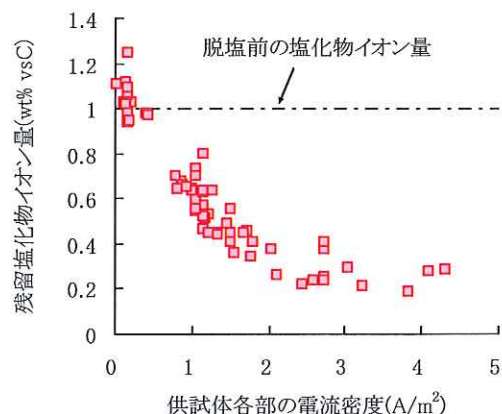


図-6 電流密度と残留塩化物イオン量の関係

ン量として許容される量の大きさについて明確な知見が得られていない。そこで、脱塩が不十分な供試体を故意に作製し、自然電位法で脱塩後の腐食可能性を調べた。

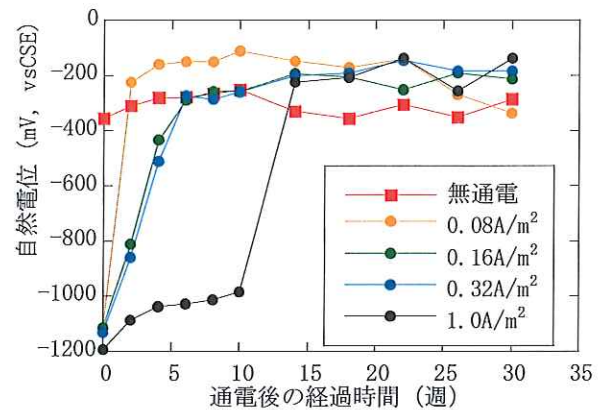
供試体は図-2及び表-2で示したもの（脱塩前の塩化物イオン量は、2.02wt% vsC）で、通電期間は6週間とした。ここで電流量を1.0A/m²から、0.32、0.16、0.08A/m²と減少させ、脱塩が不十分な事例を模擬した。また、比較のため、脱塩を行わない（無通電の）供試体も用意した。

自然電位（飽和硫酸銅電極換算）のモニタリング結果を図-7に示す。無通電の供試体の鉄筋の電位は、モニタリング期間を通して-350mV以下かそれに近い電位となっており、腐食している可能性が高い。これに対して、電流量0.32A/m²で脱塩した供試体は、鉄筋近傍に0.74wt% vsCの塩化物イオンが残留しているにもかかわらず、通電後14週以降、比較的貴な（プラス側の）電位となっており腐食している可能性は低い。

一般に腐食限界塩化物イオン量は、0.4wt% vsC程度と考えられている。ここまでのモニタリング結果では、これよりも若干多い塩化物イオンが残留した場合でも腐食が生じておらず、脱塩の効果が得られているものと期待される。ただし、長期にわたる耐久性を検証するには、観察を継続する必要がある。

4. まとめ

脱塩工法の実用化に向けて検討した結果の概要を紹介した。共同研究報告書には、これらの検討に基づいて整理したマニュアル（案）の他に、電流密度分布の推定方法、実構造物における脱塩工法の適用事例などを紹介しているので、脱塩工法の適用を検討する際には、参考にされたい。



※通電後10週間程度の間は、鉄筋の電気的状態が安定していないものと考えられる。この間、通電を行った供試体で、一時的に無通電の供試体と同程度の電位となっている場合があるが、腐食しているとは考えにくい。

図-7 通電条件と脱塩の効果（鋼材の自然電位）の関係

謝 辞

この報文は、電気化学工業（株）、（株）富士ピー・エス、東北大学、長岡技術科学大学、徳島大学、九州工業大学と共同研究を行った結果の一部を紹介したものです。ここに記して関係各位のご努力、ご協力に感謝します。

参考文献

- 1) 土木研究所ほか：「塩害を受けたコンクリート構造物の脱塩工法に関する共同研究報告書」、共同研究報告書、第382号、2008
- 2) 土木学会：脱塩工法設計施工マニュアル、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、pp.117-147、2001.
- 3) 古賀裕久、渡辺博志、竹内祐樹、北野勇一：電気化学的脱塩を行う際の脱塩量の推定手法についての検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.1161-1166、2008
- 4) 北野勇一、渡辺博志、古賀裕久：補修条件を変えたRC版状供試体の脱塩実験、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol.7、pp.253-258、2007

古賀裕久*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地
盤研究グループ基礎材料
チーム 主任研究員
Hirohisa KOGA

渡辺博志**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地
盤研究グループ基礎材料
チーム 上席研究員、工博
Dr. Hiroshi WATANABE

竹内祐樹***



独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究
センター橋梁構造研究グ
ループ 交流研究員
Yuuki TAKEUCHI