

平成 22 年 4 月 20 日現在

研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20760289
研究課題名 (和文) 通電時のコンクリート中イオン濃度変化の三次元数値解析手法と脱塩工法設計体系の確立
研究課題名 (英文) Establishment of design system for desalination method and numerical prediction method
研究代表者
皆川 浩 (MINAGAWA HIROSHI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10431537

研究成果の概要 (和文)：

コンクリート構造物の電気化学的防食工法のひとつである脱塩工法について、実験と数値解析的なアプローチにより、脱塩工法の設計時に考慮すべき要因とそれが補修効果に及ぼす影響を定量的に検討した。そして、それらの知見を踏まえ、脱塩工法を適用前に実施される事前調査および設計時において考慮すべき事項を体系的に整理し、これらを網羅する設計フローを提案した。

研究成果の概要 (英文)：

This study evaluated the influences of several factors on repair effects of desalination method which is one of the electrochemical corrosion control method for concrete structures by an experiment and a numerical analysis approach. Moreover, this study organized these evaluated results and systematized items which must be considered in preliminary survey and design for desalination method. Finally, a design flow of desalination method was proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：電気化学的防食工法、脱塩工法、Nernst-Planck 式、電気泳動

補修設計、補修効果予測

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では、供用期間 50 年以上のコンクリート構造物が急激に増加するに至り、社会基盤の適切な維持管理が重要課題になっている。このような中で、電気化学的防食工法のひとつである脱塩工法は、コンクリート構造物の劣化機構のうち最もよく見受けられる塩害に対して有効なコンクリート中鉄筋の防食技術である。脱塩工法では、コンクリート内部の鉄筋と外部に仮設した外部電極を通じて直流電流を流すことで、電気泳動により腐食因子である塩化物イオンをコンクリート中から除去し、構造物の耐久性を向上させる。

脱塩工法はヨーロッパを中心として技術開発、普及がなされ、日本国内においても施工実績が増加している。しかしながら、設計で設定した通電期間内にコンクリート中の塩化物イオン量を目標値まで低減できない事例や、鉄筋のあきの部分に存在する塩化物イオンが除去しきれずに残留する事例が報告されている。これは、脱塩工法の設計において最も重要となる通電条件（通電する電流量、通電期間）が経験的なものであり、コンクリート構造物の諸条件（コンクリート中の塩化物イオン量や配筋、コンクリートの電気化学的特性など）に応じた適切な通電条件の選定方法がなく、脱塩工法の設計体系が十分に確立されていないことに起因している。

このような技術的背景から、通電条件を選定するためのツールとして、通電時のイオン移動性状に関する予測手法の開発が国内外で行われている。例えば、イオン流速を記述する Nernst-Planck 式をもとに、コンクリート中に存在する複数のイオンの影響を考慮した一次元数値解析モデルが提案されている。これは、コンクリートの電気化学的特性を考慮して通電後の塩化物イオン濃度分布を定量的に予測できる長所を持つが、直流電流の流れが一樣と仮定して数値モデルを構築しているため、適用範囲が一次元に限られる。一方、イオン移動による電気化学的特性の変化が無視できる場合、コンクリート中の電位分布は Laplace 方程式を基にしたモデルにより予測できることが示されている。これらのモデルは二次元および三次元の拡張が可能であり、複雑な部材形状および配筋であってもコンクリート中の電位分布を解析できる。しかしながら、イオンの電気泳動によるコンクリートの電気化学的特性の変化を考慮していないこと、および通電後の塩化物イオン濃度分布の算出はできない。

このように、通電後のコンクリート中のイオンの流速や電位分布に関するモデルは各種提案されているものの、拡張性や適用範囲に問題があり、通電後の塩化物イオン分布を適切に予測する手法は未だ開発段階の域を

脱していないのが現状である。また、脱塩工法の補修効果に及ぼす諸要因の影響については、未解明な部分が多く、電流密度や通電時間を設計時において明確にすることが困難なままとなっている。

2. 研究の目的

以上の背景をまとめると、脱塩工法の現状の設計では、適切な電気泳動によるイオン移動予測手法が存在せず、また、補修効果に及ぼす諸要因の影響も明確になっていないため、最も重要な設計項目である通電条件（電流密度および通電期間）を経験則に基づき決定せざるを得ない状況になっていることがわかる。このため、コンクリート構造物の諸条件に応じて適切な通電条件を選定する手法の確立が求められている。

そこで本研究では、以下の項目を研究目的とした。

(1) 脱塩工法の補修効果に及ぼす諸要因を列挙し、それらが補修効果に及ぼす影響を実験的に評価する。そして、設計時に通電条件を決定するために必要となるコンクリートの電気化学的特性値およびその評価方法を整理する。

(2) Nernst-Planck 式と Laplace 方程式の連成解析モデル（マルチフィジックス解析モデル）を基にした、通電後の塩化物イオン分布の三次元数値解析的予測手法を確立する。

(3) 脱塩工法の適用前に実施される事前調査および設計時において考慮すべき事項を体系的に整理し、これらを網羅する設計フローを提案する。

3. 研究の方法

本研究では、実験的アプローチおよび数値解析的アプローチにより脱塩工法の各種要因が補修効果に及ぼす影響を評価し、その結果を用いて効率的な脱塩工法の補修設計フローを提案する。以下に実施した実験および解析の内容を示す。

(1) 補修効果に及ぼす諸要因の実験的評価

本研究では脱塩工法実施後のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を評価する実験と、コンクリート中鉄筋の表面に生じる電流分布を評価する実験を実施した。それぞれの実験において用いる供試体を前者は模擬脱塩試験供試体（図-1）、後者は分割鉄筋供試体（図-2）である。

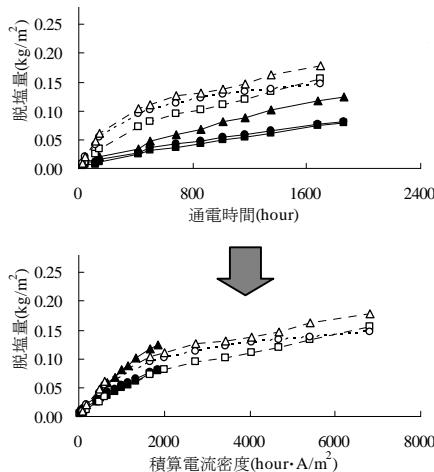
① 模擬脱塩試験供試体

図-1 の模擬脱塩試験は、実構造物から得られる円柱状のコンクリートコア試料に対して適用可能、実施工において生じる電流の流れが再現可能、任意の通電条件における脱塩効果の確認が可能である、ことを想定して考案した。模擬脱塩試験では、円柱状のコンクリートコア試料（以下、コア試料）の上面に

脱塩工法の補修効果に及ぼす諸要因の影響度を評価した。成果の概要を以下に示す。

① 通電条件の影響

一般に同一通電時間で比較すると、電流密度が大きいほど、除去される塩化物イオンの量（以下、脱塩量）は多くなること明らかとなった。しかし、脱塩量を積算電流密度（電流密度と通電時間の積）で整理すると、脱塩量は電流密度によらず同一になることを明らかにした。（結果の一例を図-4に示す。）

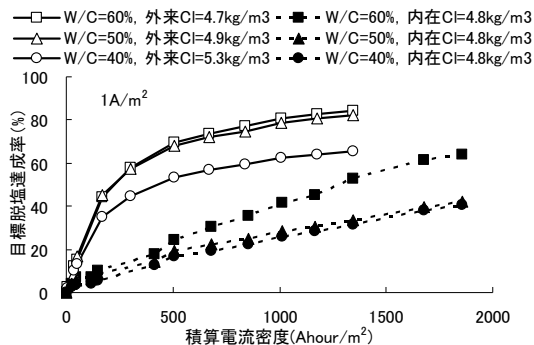


※下図のように積算電流密度で整理すると、脱塩量は電流密度によらず同一値となる。

図-4 脱塩量の積算で電密度による整理

② 塩化物イオンの影響

かぶりに含まれる塩化物イオン量が同一であっても、その塩化物イオンが海洋などからのもの（外来）であるか、または、コンクリート製造中に混入したもの（内在）であるかによって、補修効果に変化が生じることを明らかにした。（結果の一例を図-5に示す。）



※目標とする施工後の塩化物イオン濃度=1.0kg/m³として目標脱塩達成率を計算したケース

図-5 塩化物イオンの由来が補修効果に及ぼす影響

また、塩化物イオンがコンクリート中に高濃度で含有されるほど脱塩量は多くなる。し

かし、補修効果の指標である脱塩達成率は、含有塩化物イオンが高濃度になるほど積算電流密度の増加に伴い小さくなる傾向が得られ、補修効果を適切に予測するには、事前調査によりコンクリート中の塩化物イオン濃度を適切に評価することが重要であることを指摘した。（結果の一例を図-6に示す。）

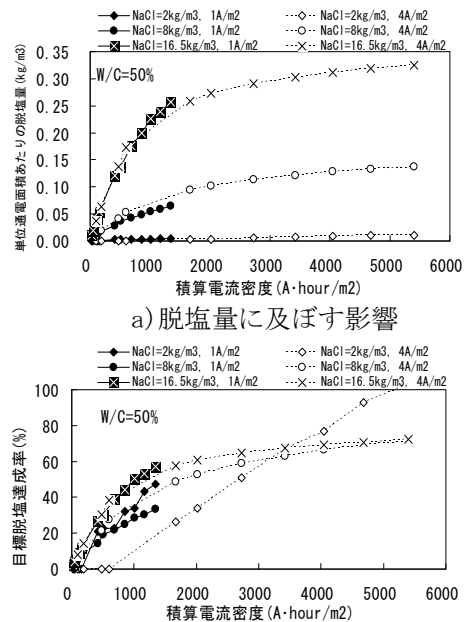


図-6 コンクリート中の塩化物イオン濃度が脱塩工法の補修効果に及ぼす影響

さらに、塩化物イオン濃度が面的に分布を持つ場合を想定した検討も行い、平面方向の塩化物イオン濃度および電気抵抗率の分布が脱塩量に影響を及ぼすことを示し、その影響の程度は、コンクリートおよび断面修復材の電気抵抗率と脱塩量の初期内在Cl-量依存性によって説明可能であることを示した。この結果をさらに拡張した検討は次の③に示される内容である。

③ 断面修復工法の影響

分割鉄筋供試体を用いて断面修復材面積率および断面修復材の電気抵抗率が脱塩工法の補修効果に及ぼす影響を評価した。その結果、i) 同等の断面修復面積率であると、断面修復材の電気抵抗率が高いほど、脱塩量および目標脱塩達成率が大きくなること、ii) 断面修復面積率が小さくなるほど、脱塩量は増加するが、目標脱塩達成率は断面修復面積率が小さくなるほど減少し、断面修復面積率が10%になると、断面修復無しの場合とほぼ同等になること、を明らかにした。

また、断面修復部を有する部材の脱塩量を模擬脱塩試験の結果、母材コンクリートおよび断面修復材の電気抵抗率、および断面修復面積率から予測する手法を検討した。模擬脱

塩試験のみでは、部材中のコンクリートが均質であれば、試験結果をそのまま用いて通電条件を選定することが可能になるが、部材中に断面修復材などによる不均一性が存在すると、その選定結果の信頼性は低くなる。

そこで本研究では、以下に示す方法を考案し、その妥当性を確認した。まず、母材コンクリートと断面修復材を電気抵抗体と見なした並列回路モデルを想定し、母材コンクリート部に流入する積算電流密度 $i_c \times T$ を式(1)のように導出した。

$$i_c \times T = i \cdot \frac{\rho_r (A_c + A_r)}{\rho_r \cdot A_c + \rho_c \cdot A_r} \cdot T \quad (1)$$

ここで、 i_c : 母材コンクリートに流入する電流密度 (A/m^2)、 T : 通電期間 (hour)、 i : 脱塩面に対する電流密度 (A/m^2)、 ρ_c : 母材コンクリートの電気抵抗率 ($\Omega \cdot m$)、 ρ_r : 断面修復材の電気抵抗率 ($\Omega \cdot m$)、 A_c : コンクリート部分の面積 (m^2)、 A_r : 断面修復材の面積 (m^2)、である。そして、式(1)より得られた積算電流密度と、模擬脱塩試験から得られた脱塩量と積算電流密度の関係より、母材コンクリート表面積あたりの脱塩量 Q_c を推定する。そして、式(2)より、全脱塩面積あたりの脱塩量を算出する。

$$Q_{Cl} = Q_c \cdot \frac{A_c}{A_c + A_r} \quad (2)$$

図-7 は予測結果と実験結果の比較である。図-7 より、比較的良好な精度で脱塩量を予測できていることがわかる。

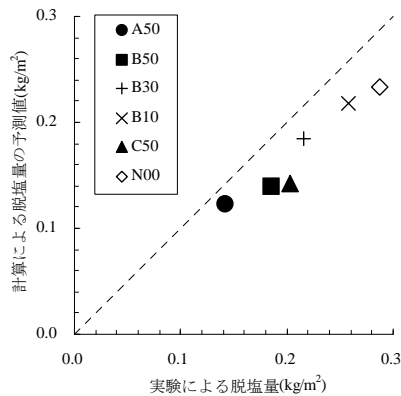
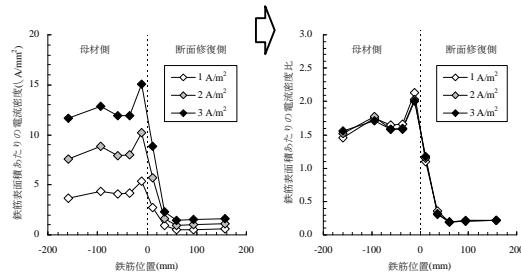


図-7 断面修復面積率を考慮した脱塩量予測手法の妥当性

さらに、分割鉄筋供試体による評価では、任意の鉄筋位置における鉄筋表面積あたりの電流密度とその平均値の比の分布は、脱塩面に通電される電流密度によらず同等になること、断面修復材の電気抵抗率が大きくなるほど、断面修復面積率が大きくなるほど、鉄筋表面の電流分布は母材コンクリート部と断面修復部とで大きく変化し、そのピークは母材側の母材-断面修復部の境界部近傍の

鉄筋に発生することを明らかにした。(結果の一例を図-8 に示す。) この結果、設計時において評価すべき過電流が生じる箇所とその程度に関する基礎データを取得できた。



※電流密度とその平均値の比の分布は、脱塩面に通電される電流密度によらず同等になる。

図-8 鉄筋表面の電流密度分布

(2) 脱塩工法の設計フローの提案

上記の知見を踏まえ、脱塩工法の事前調査および設計時において考慮すべき事項を体系的に整理した上で、これらを網羅する設計フローを提案した(図-9)。また、本研究で得られた知見は、通電条件選定の際の参考値となるようにデータベース化した。

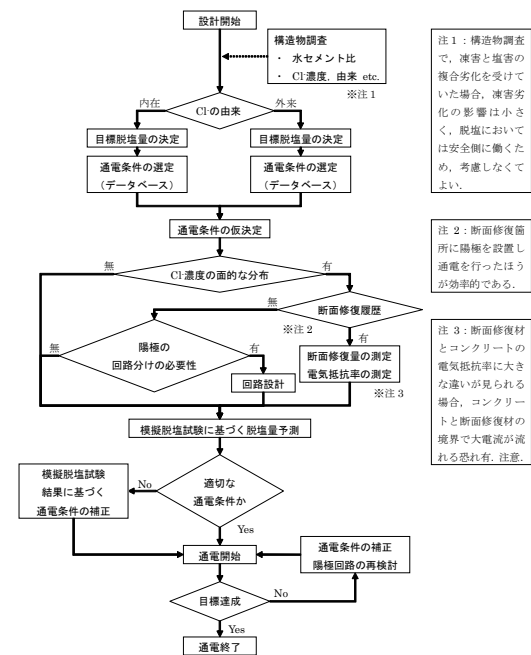


図-9 脱塩工法の設計フロー (案)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. 皆川浩、田上孝樹、久田真、断面修復材の電気抵抗率および断面修復面積が脱塩工法に及ぼす影響、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、査読あり、9巻、2009年、pp. 215-222

〔学会発表〕(計2件)

1. 佐藤唯、鹿島篤志、山本誠、皆川浩、久田真、温度が鉄筋のカソード分極曲線および分極抵抗に及ぼす影響、土木学会東北支部技術研究発表会、2009年3月6日、郡山
2. Hiroshi Minagawa and Makoto Hisada, Influence of content and origin of chloride ion on repairing effect of desalination method, The 3rd ACF INTERNATIONAL CONFERENCE, 2008. Nov. 11, HoChi Minh city, Vietnam

6. 研究組織

(1) 研究代表者

皆川 浩 (MINAGAWA HIROSHI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10431537

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし