

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15061

研究課題名（和文）イオンバランスに基づく脱塩後コンクリート構造物の鉄筋発錆限界評価と長寿命化

研究課題名（英文）Evaluation of the threshold limit of steel corrosion in concrete structure after desalination based on ion balance and extending the service life

研究代表者

中山 一秀（Nakayama, Kazuhide）

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：10835408

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]並びに種々の電気化学的腐食指標による脱塩工法適用後のコンクリート中の鉄筋腐食発生限界について検討した。水溶液を用いた実験の結果より、塩化物イオン濃度が一定の場合、pH12.5付近を境に不動態皮膜の腐食抵抗性が大きく異なる可能性が示唆された。また、鉄筋の電位も不動態皮膜の腐食抵抗性に大きく影響を及ぼすことが分かった。また、水溶液中とモルタル中の腐食挙動の傾向はおおむね同じ結果を示した。鉄筋電位が同じであれば、一般的なコンクリートと比較して、脱塩工法適用後のコンクリート中の鉄筋腐食抵抗性は向上する可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脱塩後コンクリート中の鉄筋腐食発生限界について、[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]ならびに電気化学的指標を用いて評価、検討した点に学術的意義がある。本研究で得られた結果は、脱塩後コンクリートのみならず高アルカリ環境下にあるコンクリート中の鉄筋の腐食抵抗性について理解を深めることに繋がり、ひいては、塩害環境下にあるコンクリート構造物の長寿命化に資する。

研究成果の概要（英文）：The threshold limit of steel corrosion in concrete after desalination was evaluated using [Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] and various electrochemical corrosion indexes. The results of the experiments using aqueous solutions suggest that the corrosion resistance of the passive film may differ significantly around pH 12.5 for a constant chloride ion concentration. It was also found that the potential of the rebar also greatly affected the corrosion resistance of the passive film. The trends of corrosion behavior in aqueous solution and in mortar were generally the same. The steel corrosion resistance in concrete after desalination may be improved compared to that in ordinary concrete if the steel potential is the same.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：脱塩工法 塩害 発錆限界塩化物イオン濃度 鉄筋防食効果 イオン分布

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電気化学的防食工法の一つである脱塩工法は、[1]通電範囲においてコンクリート中の  $\text{Cl}^-$  を非破壊で除去できる、[2]補修後のマクロセル腐食による再劣化のリスクが小さい、[3]通電期間は施工期間内のみであり永久的な通電が不要、[4]既往の報告を勘案すると適切に補修された場合には少なくとも 20 年程度の補修効果持続性が期待できることから、塩害に対して極めて有効な補修工法と言える。一方で、有効な補修工法であるにも関わらず、我が国において脱塩工法が施工されるケースは多くはない。この理由として、脱塩後コンクリート内部では通電時のカソード分極の影響により鉄筋近傍での  $\text{OH}^-$  濃度が一般的なコンクリートに比べ高く、一般的なコンクリートとは鉄筋の発錆限界が異なると考えられるものの、脱塩後の発錆限界は未だ明らかにされていないことが挙げられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、塩害環境にあるコンクリート構造物の戦略的な維持管理に資するべく、脱塩工法適用後のコンクリート中の鉄筋防食効果を定量的に評価することを目的とした。脱塩後コンクリート内部では通電時のカソード分極の影響により鉄筋近傍に高濃度の  $\text{OH}^-$  が存在するため、一般的なコンクリートと比較して、鉄筋腐食発生限界は大きくなると考えられる。そこで、本研究では、 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  並びに種々の電気化学的腐食指標を用いて脱塩工法適用後のコンクリート中の鉄筋腐食発生限界について検討した。

### 3. 研究の方法

$[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  を調整した水溶液、ゲル、モルタル中に鉄筋を配置し、室温 20℃、相対湿度 60% 環境下で保管した。保管中、電気化学的モニタリングと目視により、腐食発生までに要した時間を計測した。また、水溶液およびモルタル中の鉄筋腐食挙動については、不動態保持電流と孔食電位、交流インピーダンスを測定することで  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  の変化に伴う、不動態皮膜の腐食抵抗性を評価した。

#### 水溶液中の鉄筋の不動態保持電流の測定および定電位試験

鉄筋は SGD400D16 を用い、表面を研磨紙 (#1000, 1500, 2000 の 3 段階) で研磨し、端部を絶縁テープおよびエポキシ樹脂で覆ったものを使用した。水溶液は、コンクリート中の細孔溶液を模擬するため、飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液に  $\text{NaOH}$  を加えて  $\text{pH} = (12.5, 13.0, 13.5)$ 、 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-] = (0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0)$  となるように調整した。なお、 $\text{pH}13$  の溶液を通した空気中で、常にバブリングをして実験を行うことで、溶液の中性化を防止した。水溶液中に鉄筋を浸漬させ、鉄筋の電位が安定するまで静置した後、ポテンシオスタットを用いて鉄筋を 10mV/min の掃引速度で自然電位から +2V 分極させ、この間の電位-電流の関係を測定した。対極にはチタンメッシュ、照合電極には塩塩化銀照合電極を用いた。なお、水溶液中の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  粉が鉄筋表面に付着し腐食を抑制している可能性が考えられたため、 $\text{pH}12.5$  の溶液にて飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  をろ過した溶液と、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  を使用せず  $\text{NaOH}$  のみで  $\text{pH}12.5$  に調整した水溶液を用いて、実験を行った。

また、上述の鉄筋を同様の手順で作製した水溶液中に静置した後、ポテンシオスタットを用いて鉄筋の電位を -50mV または、-200mV に分極させた状態で、鉄筋が腐食するまでの時間を計測した。

#### モルタル試験体中の鉄筋の腐食抵抗性評価

W/C=40, 50, 60% の  $50 \times 100\text{mm}$  のモルタル円柱試験体を作製した (図-1)。鉄筋には SGD400D30 を用い、端部を絶縁テープとエポキシ系樹脂で処理をした。かぶり高が 10mm となるように鉄筋をモールド中央に設置し、モルタルを打設した。2 週間の封緘養生後、3 日間 20℃ の室内で乾燥させ、モルタルの上面と下面をエポキシ系樹脂で絶縁処理した。その後、電解液 (0.1mol/L ホウ酸、飽和炭酸リチウム溶液) に浸漬し、チタンメッシュを陽極として、モルタル表面あたり  $1\text{A}/\text{m}^2$  の電流を流して脱塩を 2 週間行った。脱塩処理後のモルタル中に残存する自由塩化物イオン量を極力低減させるため、モルタル中に混入した塩化物イオン量は  $1.5\text{kg}/\text{m}^3$  とした。塩化物イオンは、練り混ぜ水に塩化ナトリウムを添加することで混入した。脱塩処理後、 $\text{pH} = (13.0, 13.5)$ 、 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-] = (1.0, 1.5, 2.0)$  となるように調整した水溶液中に浸漬し、定期的に電気化学的モニタリングを実施することで、脱塩後の鉄筋の腐食抵抗性の変化を評価した。

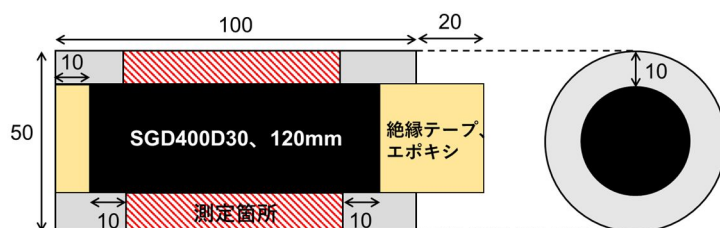


図-1 モルタル試験体

#### 4. 研究成果

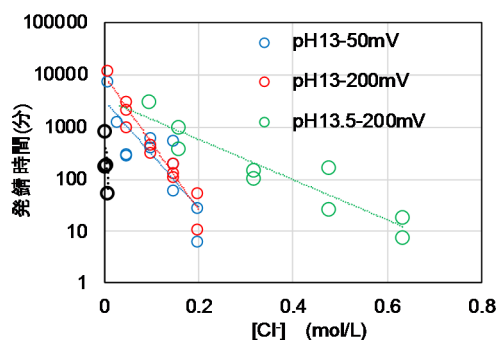


図-2 水溶液中の鉄筋の発錆時間と塩化物イオンおよびpHの関係

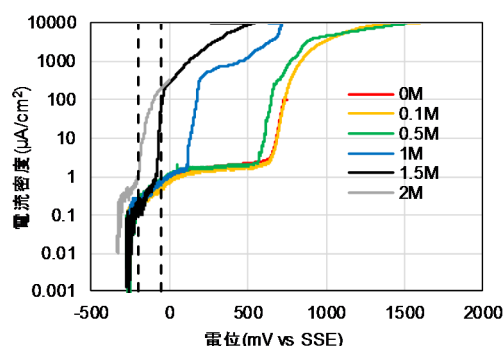


図-3 塩化物イオン濃度と不動態保持電流密度の関係 (pH=13)

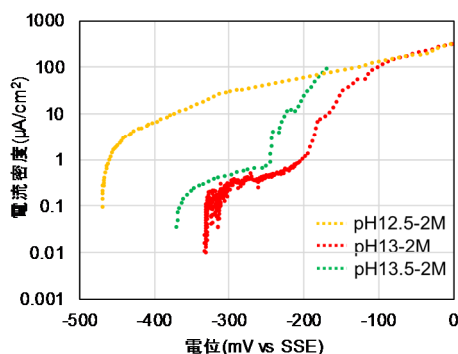


図-4 pHと不動態保持電流密度の関係 (Cl⁻=2.0 mol/L)

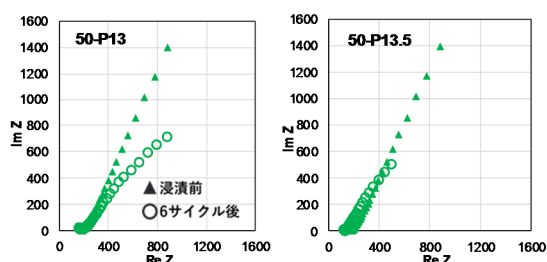


図-5 交流インピーダンスの経時変化

- 1) 水溶液を用いた実験結果より、鉄筋の電位および水溶液中の塩化物イオン濃度が同じ値の場合、pH 値が大きくなるほど (pH12.5 ~ 13.5 の範囲内)、腐食発生までの時間は長くなることが分かった。また、細孔溶液を模擬した水溶液中の鉄筋の分極試験結果より、pH が一定の場合、塩化物イオン濃度の増加に伴い、孔食電位が小さくなり、ある閾値を超える塩化物イオン濃度が溶液中に存在すると不動態皮膜は安定性を失うことが確認できた。ただし、水溶液中の pH 値が大きくなると、不動態皮膜が安定できなくなる塩化物イオン濃度も大きくなることが分かった。
- 2) モルタル試験体の結果から、pH12.5 のモルタル中の鉄筋の腐食抵抗性は pH13 のモルタル中と比較して小さく、pH13.5 のモルタル中で最も高い腐食抵抗性を示すことが分かった。これは、水溶液中で得られた結果と同様の傾向であった。一方で、モルタル試験体中の鉄筋に孔食が発生するために必要な塩化物イオン濃度は、水溶液中の濃度と比較して大きくなった。これは、セメント由来の水酸化カルシウム結晶から供給される水酸化物イオンが、孔食に伴う局所的な pH の低下を抑制することが一因と考えられる。
- 3) 脱塩後のコンクリート中のように鉄筋近傍に多量の OH⁻ が生成され pH 値が 13 ~ 13.5 程度の高アルカリ雰囲気形成された環境における鉄筋の腐食抵抗性は、pH=12.5 程度の通常のコンクリート中と比較して、高くなる可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高橋実花, 中山一秀, 岩波光保, 上田隆雄	4. 巻 21
2. 論文標題 脱塩適用前のコンクリート中の鉄筋腐食程度が脱塩工法の補修効果に与える影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 179-184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------