

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：50102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18103

研究課題名(和文) 分割鉄筋供試体を使用した凍結防止剤含有漏水による鉄筋腐食機構の解明

研究課題名(英文) Experiments on Corrosion of Steel Reinforcement in the Concrete by Water Leakage of Deicing Salt

研究代表者

渡辺 暁央 (Watanabe, Akio)

苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号：00422650

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)：橋脚あるいは橋台に凍結防止剤を含む漏水が発生するケースを想定した塩害劣化による鉄筋腐食の進行について検討することを目的とした実験的検討である。漏水部と非漏水部の境界に着目して、その部分で想定される塩分濃度に調整したコンクリート供試体を作製した。このとき、境界部分に分割鉄筋を配置し、漏水部に相当する範囲に塩水を流下する実験を行い、鉄筋腐食の進行を評価した。その結果、漏水境界部では、湿潤側より乾燥側の内部組織が粗くなり、毛細管浸透現象により塩分が浸透する。境界部でマクロセル腐食による劣化が顕著化するというより、境界部分の高濃度塩分による劣化が顕著化していることを示唆するデータが得られた。

研究成果の概要(英文)：Assuming leakage of road drainage water containing an anti-freezing agent, an experiment in which salt water was made to flow down one half of an exposed specimen surface was conducted. A high concentration of chloride ions was found to accumulate at the boundary between the section with downward flow of salt water and the section without salt water flow. To examine the cause of this, the internal structure was evaluated using scanning electron microscopy backscattered electron imaging (SEM-BEI). The structure of coarse capillary pores was found to be coarser in the non-flow section compared to the flow section, and it was inferred that fluid moves easily from the flow section to the non-flow section. This is considered to be one reason for the accumulation of a locally high concentration of salt at the boundary of the water leakage range.

研究分野：コンクリート

キーワード：凍結防止剤 塩害 漏水境界 鉄筋腐食 毛細管浸透現象

1. 研究開始当初の背景

従来、塩害は海岸付近での飛来塩分や除塩不足の海砂を使用した内在塩分によるものが主流であったといえる。これらの劣化は構造物全体に発生するため、劣化が進行した場合は大規模な補修や更新が必要となる。そのため、劣化対策の費用は非常に大きいものになり、発注者にとっては予算の確保が問題になるものの、補修を請負う業者にとっては比較的採算に合う工事が可能となる。一方、高速道路等で冬季に散布される凍結防止剤は、コンクリート構造物に対して局所的な塩害劣化を発生させている。この場合、1つの構造物の劣化箇所が限られており、補修を実施するにも工事規模が非常に小さく、請負業者にとっては全く採算に合わない工事になりやすい。したがって、凍結防止剤の塩害を受ける構造物は、予防・保全をしっかり行ない、劣化が致命的に進行しないように維持管理を行うことが重要である。そのためには、凍結防止剤による塩害の劣化機構を把握し、維持管理計画に反映させることが必要と考える。

凍結防止剤による塩害の特徴は、塩化物イオンの供給が冬期に限られること、劣化が路面排水の流れる箇所および飛散箇所付近に限定されること、ならびに、雨水(冬季は塩化物イオンを含む)が無い場合は乾燥するため、乾湿繰返し作用を受けることなどが挙げられる。そのため、定常的に塩化物イオンが供給され、環境条件の変化が少ない海岸部の飛来塩分による塩害と比較して、構造物の劣化予測は非常に難しい。本研究が想定している劣化は、凍結防止剤を含む路面水が橋脚などに漏水するケースである。現場では漏水している範囲の境界部分において劣化が深刻化している状況が多く認められ、一般にこの原因はマクロセル腐食に起因すると考えられている。

その一方で、このような劣化が深刻化している箇所では、塩化物イオン濃度が異常に高い場合も多く認められる。そこで、漏水している範囲の境界部を実験的に再現し、微視的構造と関係づけながら、境界部に塩分がどのように蓄積していくのかを検討した。その結果、漏水範囲の境界部には、毛管現象による非常に高い塩分浸透が確認された。このことは、漏水範囲の境界において、最も厳しい鉄筋の塩害環境が形成されていると考えられる。すなわち、漏水範囲の境界が鉄筋の腐食劣化の開始位置であり、そこから劣化が拡大していく劣化シナリオが仮定できるのではないかと推察する。

2. 研究の目的

本研究では、漏水範囲と非漏水範囲の境界を模擬した塩水流下実験に対して、コンクリ

ート供試体に分割鉄筋を設置して、鉄筋腐食の進行を検討することを目的とした。実際の構造物を模擬して初期に塩分を混入させない供試体による実験、および促進実験のために漏水境界部で想定される塩分濃度に調整して作製した供試体による実験を行い、腐食状況について検討を行った。

3. 研究の方法

3.1 標準実験用の塩分を無混入供試体概要

普通ポルトランドセメント、陸砂、川砂利を使用して W/C=55%のコンクリート供試体を打設した。供試体の寸法は高さ 600mm×幅 400mm×厚さ 120mm である。このとき、塩水流下の境界付近に図-1に示すように5要素の分割鉄筋(10mm間隔で長さ10mmの分割鉄筋、要素-3が流下境界)をかぶり深さ10mmで配置した。分割鉄筋が電氣的に一体になるように配線して、打設後1週間の湿潤養生を行った後、3か月間、野外にシートを覆って放置した。その後、供試体の型枠脱型面(600mm×400mmの面)の半分に塩水を流下させる装置を作製した。供試体型枠は、メタルフォームを使用し、塩水の流下面は600mm×200mmのメタルフォームを連結させて、塩水流下境界を型枠継目と一致させた。これにより、流下境界に1mm程度の突起が形成され、試験水流下時に流下範囲が広がることを防止し、表面を通じた水分の移動が発生しないようにした。

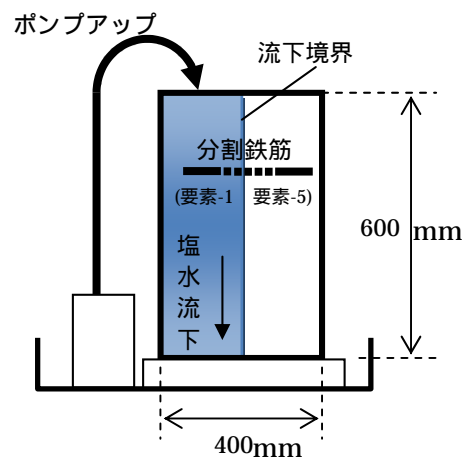


図-1 実験装置概要

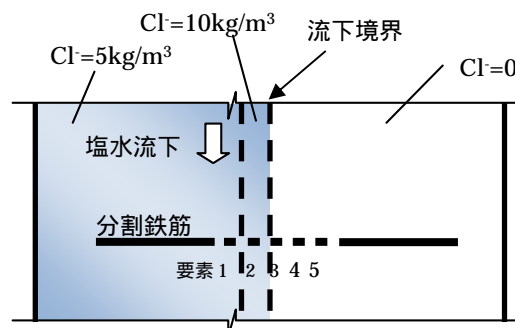


図-2 促進実験用の塩分混入供試体

3.2 促進実験用の供試体概要

図-2 に示すように塩水流下範囲の塩分濃度を $5\text{kg}/\text{m}^3$ 、境界外側の 20mm の範囲の塩分濃度を $10\text{kg}/\text{m}^3$ 、それより外側の範囲の塩分濃度を $0\text{kg}/\text{m}^3$ とした促進用供試体を作製した。

3.3 塩水流下試験

塩水はポンプを用いて循環させ、 1.0 ± 0.1 リットル/min の流量を流下させた。流下頻度は、1 日塩水流下と 6 日間の放置（室内での自然乾燥）を 1 サイクルとした。10 回の塩水流下実験を実施した後、3 ヶ月の実験中断期間があり、その後再び塩水流下実験を実施した。なお、流下させる塩水の濃度は 3.5% と設定した。

3.4 腐食電流の測定

鉄筋の腐食速度の推定のため、分割鉄筋内を流れるマクロセル電流およびミクロセル電流を無抵抗電流計により測定した。それぞれの要素の表面積で除すことで電流密度を求めた。マクロセル電流密度とミクロセル電流密度を合計して、総腐食電流密度を算出し、鉄筋の腐食状況を評価した。

3.5 塩化物イオン濃度試験

促進実験用供試体について、塩水流下試験終了後に、実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法 (JSCE-G 573-2003) に従い 20mm のドリルを使用して、深さ $0\text{-}20\text{mm}$ 、 $20\text{-}40\text{mm}$ 、 $40\text{-}60\text{mm}$ 、 $60\text{-}80\text{mm}$ で粉末試料を採取し、硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法 (JIS A 1154) に従い塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法による塩分濃度試験を実施した。

3.6 SEM-BEI による内部組織観察

塩水流下試験終了後の供試体において、塩水流下部および非流下部から供試体表面部の試料を切り出した。切り出した試料は、エタノールに浸漬した後、真空樹脂含浸装置にてエポキシ樹脂を含浸させた。表面を耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを使用して注意深く研磨し、カーボン蒸着を行った。反射電子検出器を備えた走査型電子顕微鏡を使用し、倍率 500 倍で観察を行った（加速電圧： 20kV ）。セメントペースト部の画像解析を行うため、なるべく骨材を避けるようにして、10 枚の反射電子像を取得し、画像から骨材を除去して粗大毛細管空隙を抽出する画像解析を実施した。1 画像は 1280×1024 画素からなり、1 画素は約 $0.2\ \mu\text{m}$ に相当する。

4. 研究成果

4.1 標準実験

図-3 に標準実験（初期に塩分を混入しない供試体）の総腐食電流密度の推移を示す。か

ぶり深さ 10mm 程度であっても、数ヶ月程度の実験では腐食電流を確認することができなかった。

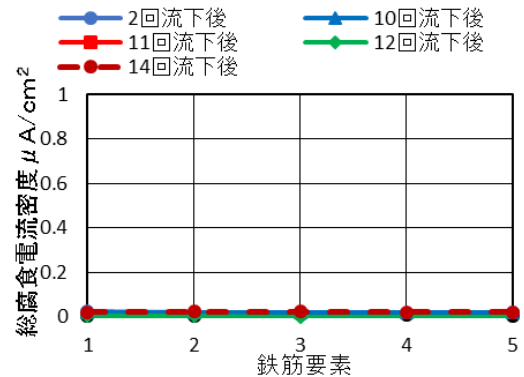


図-3 標準実験の総腐食電流密度の推移

4.2 促進実験

図-4 に促進実験用供試体の総腐食電流密度の推移を示す。初期の塩分濃度を $10\text{kg}/\text{m}^3$ に設定した要素 2 において、実験開始直後から高い腐食電流密度が測定されている。要素 2 から離れるに従い、腐食電流密度が小さくなり、乾燥側の要素 4 および要素 5 はほとんどゼロを示している。塩水流下回数を繰り返すことにより、腐食電流密度が増加している。

3 ヶ月間の塩水流下実験後、3 ヶ月の実験中断期間を経て、再び 3 ヶ月間の塩水流下実験を実施すると、中断期間に鉄筋の腐食が進行しており、流下側の要素 1 あるいは要素-2 の腐食電流密度が大きくなっており、乾燥側の要素-5 に向かって、腐食電流密度が低くなっている。塩分のほとんど浸透していない要素-5 においても腐食電流が流れていることが確認される。

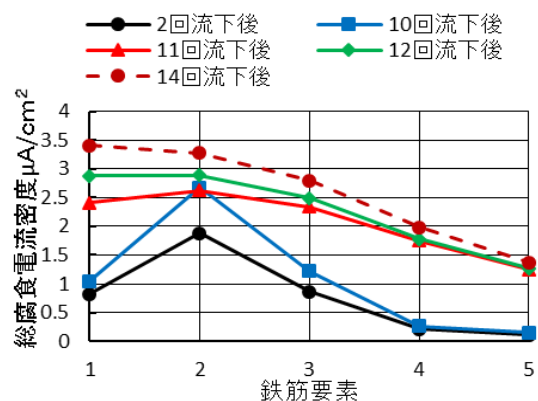


図-4 促進実験の総腐食電流密度の推移

4.3 促進実験後の塩化物イオン濃度

促進実験終了後の供試体に対して、塩水流下中央部、要素-1~2、要素-3~4、要素-5 および乾燥側中央部の直上付近で分割鉄筋から上側 10cm 程度の位置において、ドリル法によりコンクリート粉末試料を採取して、塩

化物イオン濃度試験を実施した。図-5に塩化物イオン濃度の結果を示す。要素-3~4程度までは、初期に混入した塩分の影響により深さ40mmより奥は初期に混入した塩分量を反映した濃度となっている。要素-5付近では表面の深さ0-20mmで7kg/m³程度で奥になるにしたがい塩分濃度が低くなっており、塩水流下による毛細管浸透現象により塩分が拡散したものと考えられる。図-4で示した腐食電流密度との対応を見ると、要素-5における腐食電流は、塩分濃度差によるマクロセル電流ではなく、塩分浸透による影響が大きいように推察される。

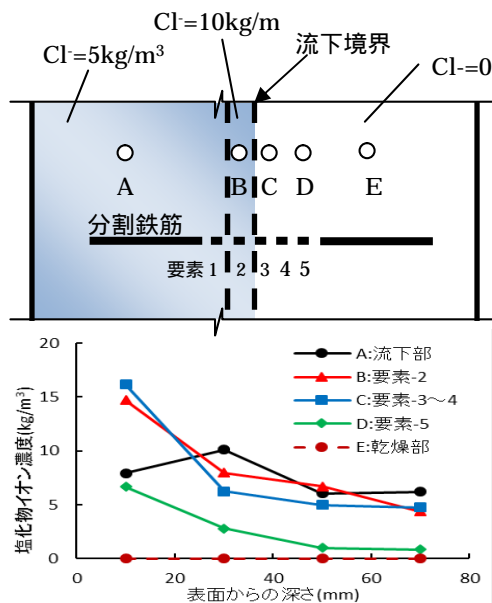


図-5 促進実験後の塩化物イオン濃度

4.4 促進実験後の解体調査

促進実験終了後の供試体から分割鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食状況を調査した。写真-1に分割鉄筋の状況を示す。分割鉄筋は要素-4まで腐食が確認されており、高濃度の塩分が確認される範囲で腐食していることがわかる。すなわち、鉄筋腐食の最大要因としては高濃度の塩分であり、マクロセル腐食の進行より早期に腐食が進行すると考えられる。ただし、この結果は、短期間の促進実験のものであり、本研究が対象とする漏水境界部における鉄筋腐食の要因が、高濃度の塩分蓄積とマクロセル腐食のどちらが卓越するかは、標準実験用供試体による長期間の調査により検討する必要がある。

4.5 SEM-BEIによる内部組織観察

写真-2は、塩水流下試験後の供試体において、流下部および非流下部からコアを採取して、試験面から深さ5mm程度の位置において観察した反射電子像の例である。流下部においては、定期的な水分供給があるため、水和反応が進行しており、黒色の相で示される粗大な毛細管空隙が少なくなっている。一方、

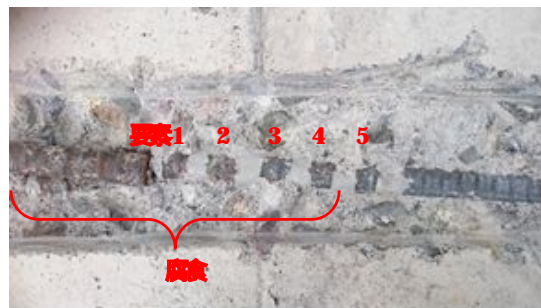


写真-1 促進実験後の分割鉄筋の状況

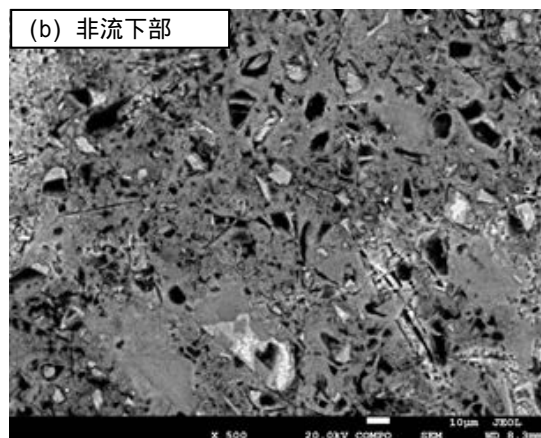
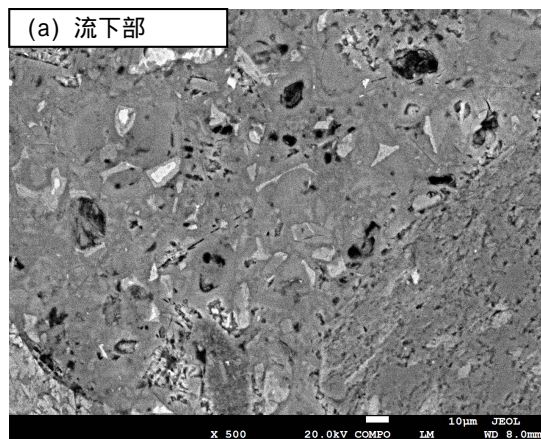


写真-2 流下試験後のコンクリート表面付近における反射電子像の例

非流下部では水の供給がないため、養生終了後からの水和進行が少なかったと考えられ、粗大な毛細管空隙が多く残存している様子が観察される。

図-6は、得られた反射電子像からセメントペーストマトリックスを抽出して、粗大毛細管空隙を抽出する画像処理を行って得られた細孔径分布である。粗大毛細管空隙量は、流下部では0.18cm³/cm³程度であるのに対して、非流下部では約0.30cm³/cm³に達しており、非常に空隙の多い組織となっている。また、細孔径分布の立ち上がりの値(最大細孔径)は、流下部で20~30μm、非流下部で約40μmであり、非流下部では物質移動が容易

であると推察される。

毛細管空隙の構造が粗になると物質移動が容易になる。流下部は水の供給により徐々に密な組織へと変化しているが、非流下部は水の供給が限られており、組織が粗い状態が維持されているといえる。そのため、塩水流下試験を実施すると、流下部より非流下部の組織が粗であるため、容易に塩分を含んだ水が浸透することが予測される。また、流下部から非流下部へと浸透した塩水は、蒸発しやすい環境にあると考えられ、流下境界から数 cm 程度の距離で蒸発して NaCl の析出物が生成されるものと推察される。

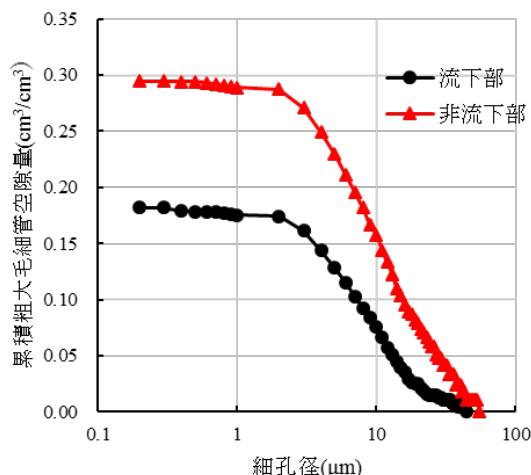


図-6 表層部の細孔径分布

4.6 まとめ

本研究では、凍結防止剤を含む漏水がコンクリート構造物に漏水して発生する塩害を模擬した供試体による塩水流下試験を実施した。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 初期に塩分を混入していない標準実験では、分割鉄筋に腐食電流密度の増大を確認できなかった。
- (2) 促進実験として実施した漏水境界部を模擬した塩分濃度に調整した供試体の実験では、高濃度の塩分を混入した部分で腐食電流密度が大きくなった。
- (3) 促進実験では、塩水流下を繰り返すと、腐食電流密度が徐々に大きくなった。
- (4) 促進実験終了後の供試体から分割鉄筋をはつり出し腐食状況を確認したところ、高濃度の塩分が確認された範囲で腐食が発生していた。
- (5) 流下試験後の供試体表面から試料を採取してSEM-BEIによるセメントペーストマトリックスの内部組織観察を行うと、流下部は定期的な水分供給が行われているため比較的緻密な組織になっているが、非流下部は粗な組織であり、塩水が浸透しやすい状況にあるといえる。

以上の結果から、凍結防止剤を含む漏水が発生することによる塩害劣化では、漏水境界

付近で毛細管吸水現象および乾燥側での水分蒸発により高濃度の塩分が蓄積する。これにより境界付近では腐食電流密度が大きくなり、急速な劣化進行が生じる。

当初想定していた漏水部と非漏水部間におけるマクロセル腐食というよりは、局所的な高濃度塩分による局所的ミクロセル腐食が卓越し、その後腐食が広がるものと考えられ、マクロセル腐食とミクロセル腐食が段階的に重複しながら腐食が進行するものと推察される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- 渡辺暁央, 石川裕一: 凍結防止剤を含む漏水の境界付近における塩分蓄積に関する一考察, 第16回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文集, pp.511-516, 2016 (査読有り)
- 梶原碧, 渡辺暁央, 近藤崇, 石川裕一: 凍結防止剤を含む漏水を想定した供試体中の塩化物イオンの蓄積に関する検討, 第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.475-478, 2015 (査読有り)

〔学会発表〕(計3件)

- 鈴木健太, 渡辺暁央, 廣川一巳: 橋脚を模擬した鉄筋コンクリート供試体の鉄筋腐食状況に関する研究, 土木学会北海道支部平成29年度年次技術研究発表会, E-17, 2018
- 附柳天馬, 渡辺暁央, 廣川一巳: 凍結防止剤を含む漏水を想定したコンクリート供試体内の鉄筋の腐食進行に関する研究, 土木学会北海道支部平成28年度年次技術研究発表会, E-24, 2017
- 平勇太, 渡辺暁央, 廣川一巳: 凍結防止剤の塩害を想定した塩水吸水実験, 土木学会北海道支部平成27年度年次技術研究発表会, E-32, 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 暁央 (WATANABE, Akio)
苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・准教授
研究者番号: 00422650