

# 論文 コンクリート製壁高欄の塩化物イオンの吸い上げ特性に関する研究

岩館 佑樹\*1・武田 三弘\*2・皆川 翔平\*3

**要旨:** 本研究は、コンクリート製壁高欄やパラペットなどの薄壁 RC 構造物が、冬期に散布される凍結防止剤の吸い上げによる塩化物イオンの移動に着目し、その吸い上げの影響についてコンクリート製壁高欄を想定した中型供試体を用いた吸い上げ実験を行った。実験の結果、凍結防止剤の吸い上げを助長する要因および吸い上げによる塩化物イオンの浸透特性を明らかにすることができた。また、吸い上げを抑制する方法について検討を行い、効果的な方法を提案することができた。

**キーワード:** コンクリート壁高欄, 塩化物イオン, 吸い上げ, 結晶化, 塩害

## 1. はじめに

本研究では、これまでコンクリート製壁高欄（以下 RC 壁高欄）やパラペットなどの薄壁 RC 構造物の塩水吸い上げが引き起こす塩害について研究を行ってきた。一般的に、道路橋に設置された RC 壁高欄においては、冬期において散布された凍結防止剤が、雪と混ざって塩水になり、それが自動車の走行時に巻き上がり、RC 壁高欄の表面に付着・浸透<sup>1)2)</sup>することにより、内部の鋼材を腐食させ、また塩水が含まれた条件における凍結融解作用による複合劣化により、異常なスケーリングが生じると考えられている。

しかし、RC 壁高欄を例にとった場合、冬期においてはアスファルト舗装と縁石との境界、RC 壁高欄の水平打継目などから、RC 壁高欄基部に凍結防止剤による塩水が浸透し、その空間で滞留し続ける可能性がある。その際、写真-1 に示すように、RC 壁高欄は、土木構造物の中では部材厚が薄く、また日射や風(特に車両通行による風圧)を受けやすい環境であることから、基部に塩水が滞留している条件では、その塩水を吸い上げる傾向も大きく、その影響が塩害や凍害の促進に繋がっている可能性



写真-1 コンクリート製壁高欄

が考えられた<sup>3)</sup>。

その為、これまで本研究では、モルタル供試体を用いて各種要因の塩水吸い上げ実験を行い、塩水吸い上げに影響を与える要因について調べた。その結果、水セメント比が大きいほど、乾燥温度が高いほど、塩分濃度が高いほど、湿度が低いほど、塩水の吸い上げを促進させる効果があり、特に塩水濃度が高く、乾燥温度が高く湿度が低い条件で最も塩水を吸い上げることが分かった<sup>4)</sup>。しかし、実際の RC 壁高欄における塩水吸い上げ状況や部材内部の浸透性状が不明なため、詳細な実験を行う必要が出てきた。

そこで本研究では、実際のコンクリート製壁高欄の塩水の吸い上げ状況を想定した中型供試体を作製し、これまでに得られた知見から、特に吸い上げを促進させる条件で各種吸い上げ実験を行い、吸い上げ性状の観察と、供試体内部の塩化物イオン濃度分布の確認を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

供試体に使用したコンクリートは、レディーミクストコンクリート工場から購入した普通 30-18-20N を使用した。打込み時は、練り上がり温度 23℃、空気量 4.0%、スランプ 20cm であった。

供試体は、断面が矩形 (①200×400×100mm, ②400×500×100mm) および L 形をした鉄筋コンクリートを用いた。L 形供試体の形状寸法および配筋状況を図-1 に示す。L 形供試体の作製は、水平部と鉛直部を続けて打ち込んだ場合（目地無し）と、水平部を先に打込み 3 日後に鉛直部を打ち込んだ場合（目地あり）の 2 種類を設けた。また、コンクリート打ち込み後は、室内（室温 20℃、湿度 90%）にて 1 日養生を行い、翌日脱型し、1 ヶ月間の標準水中養生を行った。その後、L 形供試体の左右の

\*1 東北学院大学 工学部 環境建設工学科 (学生会員)

\*2 東北学院大学 工学部 環境建設工学科教授 工博 (正会員)

\*3 株式会社 ネクスコ・エンジニアリング東北 (正会員)

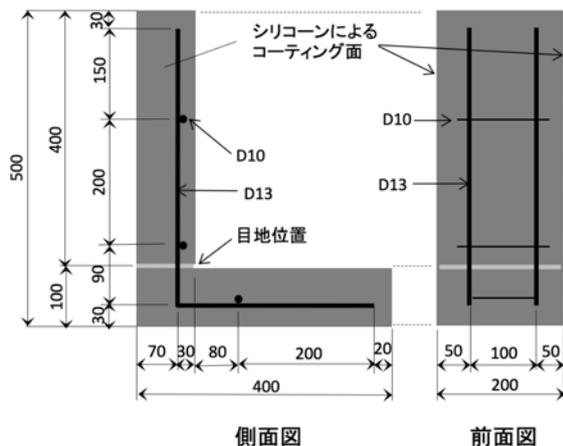


図-1 供試体形状寸法

表-1 供試体一覧

供試体名	塩水濃度	目地の有無	供試体形状	吸い上げ抑制対策
No. 1	3%	無し	L形	
No. 2				
No. 3				
No. 4		有り		エポキシ樹脂防水
No. 5				高機能止水材
No. 6	24%	無し	矩形①	
No. 7				シラン系表面含浸材
No. 8				矩形②

鉛直面には水分の移動を生じさせないため、シリコンでコーティングを行った。また水平部には、塩水を溜めるためのプールをシリコンで作製した。

表-1 は供試体一覧を示したものである。L 形供試体では、実際の現場の状況を想定した吸い上げ実験となっている。比較条件は、塩水濃度の違いによる影響を確認するため、3%および 24%の濃度の塩水を用いた。なお、塩水濃度 3%は現場における濃度を想定したものであり、塩水濃度 24%は、既往の研究<sup>4)</sup>で最も吸い上げが生じる濃度であり、塩水の飽和濃度でもある。また、実際の現場では、RC 壁高欄施工時には、地覆部との打ち継ぎ(目地)が存在するが、この目地の有無による影響についても調べた。さらに、塩水の吸い上げ抑制対策として、目地部よりも鉛直方向に 50mm の位置まで、表面にエポキシ樹脂を塗布した条件や、スポンジとブチルゴム粘着層を複合した高機能止水材(断面 10×20mm)を目地部より鉛直方向に 35mm の位置に水平方向に U カット工法で 10mm の溝を設け、その溝にプライマーを塗布後、止水材をはめ込んだ条件で実験を行った(写真-2 参照)。



写真-2 止水材の取り付け状況



写真-3 吸い上げ実験開始状況

一方、矩形供試体では、200×400×100mm の形状のうち、400×100mm の 2 面には水分の移動を生じさせないためシリコンでコーティングを行い、このコーティング面と塩水が接する底面以外の面に対してシラン系表面含浸材塗布の取扱説明書通りに塗布し、塗布の有無による吸い上げの影響を確認した。

## 2.2 実験概要

塩水吸い上げの実験は、高温室(室温 30.0~33.1℃、湿度 54~60%)にて行った。No.1~No.5 の L 形供試体は、水平部のプールを設けた箇所に、各濃度の塩水を詰めたペットボトルを供試体と呑口の間を 10mm の隙間を開けて固定し、常に水位を 10mm に保つようにした。No.6 および No.7 の矩形の供試体は、トロ船の中に設置し、同様にペットボトルにより 50mm の水位を保つようにして実験を行った。吸い上げ期間は、140 日まで行った。実験開始状況を写真-3 に示す。

吸い上げ実験終了後、L 形供試体の水平部より 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350mm の各高さから、奥行き方向に 10mm 間隔で最大 50mm の深さまで、ドリル法による粉末を採取し、蛍光 X 線分析装置を用いて塩化物イオン濃度の測定を行った。

表-2 塩水吸い上げ状況一覧

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
目地条件	目地無し		目地あり		
塩水濃度	塩水3%	塩水24%			
防水遮蔽	表面防水なし			表面防水層	高機能止水材
0日					
15日後					
34日後					
80日後					

### 3. 実験結果

#### 3.1 塩水吸い上げ状況

供試体毎の塩水吸い上げ状況を表-2に示す。この表より、塩分濃度の違いによる比較 (No.1 と No.2) では、塩分濃度が高い条件の方が、吸い上げ高さも2倍近く高く、また、塩の結晶化も多くなる傾向が見られた。

目地がある場合と無い場合の比較 (No.2 と No.3) では、目地がある条件の方が、吸い上げ高さも2倍以上高くなる結果となった。目地部に関しては、ワイヤーブラシで表面処理を行い、湿らせた状態で打ち継ぎを行ったが、目地部がある条件では吸い上げに与える影響は大きくことが分かった。

吸い上げ面付近の表層に防水層を設けた条件 (No.4) では、目地部からの鉛直面にエポキシ樹脂による50mmの高さの防水層を設けることによって、表面の塩水の吸い上げや結晶化を抑える効果があると考えていたが、実際にはエポキシ樹脂面に塩分の結晶化が生じ、最終的には防水層自体を覆い隠すまでに成長した。この結晶化は、

15日後の写真からも分かるように、エポキシ樹脂内から結晶化が生じているようにも見られるが、最終的に表面の結晶化した塩分を取り除いた際、エポキシ樹脂自体は破壊されておらず、このメカニズムについては今後の検討課題と考えている。しかし、防水層を設けることによって、無いものに比較して2/3程度に吸い上げ高さや塩分の結晶化を抑える効果は確認することが出来た。

Uカット工法により表層に10mmの深さの溝を設け、そこに高機能止水材をはめ込んだ条件では、塩水の吸い上げや結晶化は、止水材下面までしか生じず、吸い上げや結晶化を最も抑制する結果となった。この結果は、吸い上げ機構が、コンクリートの表層から深さ方向10mm程度に大きく影響しているものと考えられた。

写真-4は、シラン系表面含浸材を全面に塗布したもの (No.7) と無塗布のもの (No.6) の吸い上げ開始後80日経過した吸い上げ状況である。この写真より、無塗布のものに対して、シラン系表面含浸材を塗布したものの塩水の吸い上げおよび塩水の結晶化はごくわずかで有り、



No.7 (塗布)      No.6 (無塗布)

写真-4 シラン系表面含浸材の影響

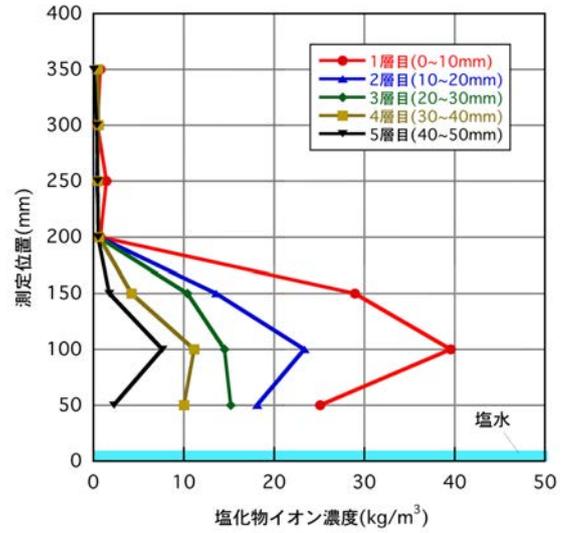


図-4 塩化物イオン濃度分布 (No. 3)

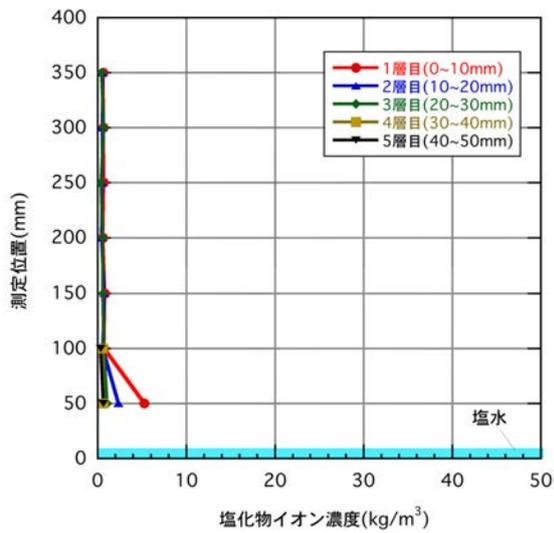


図-2 塩化物イオン濃度分布 (No. 1)

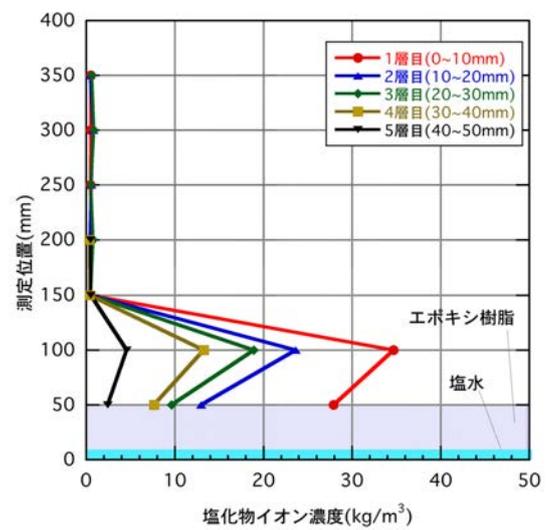


図-5 塩化物イオン濃度分布 (No. 4)

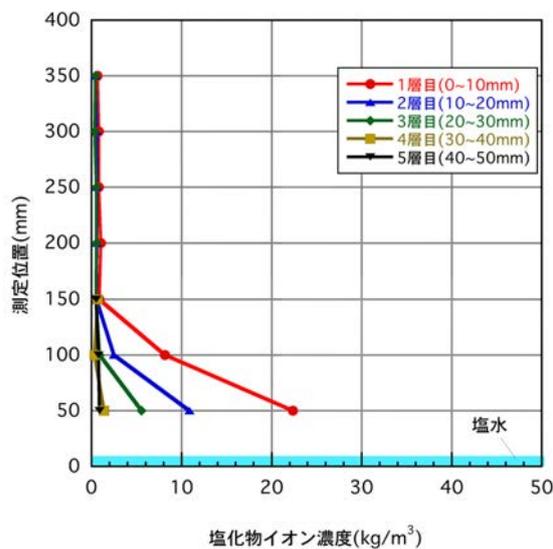


図-3 塩化物イオン濃度分布 (No. 2)

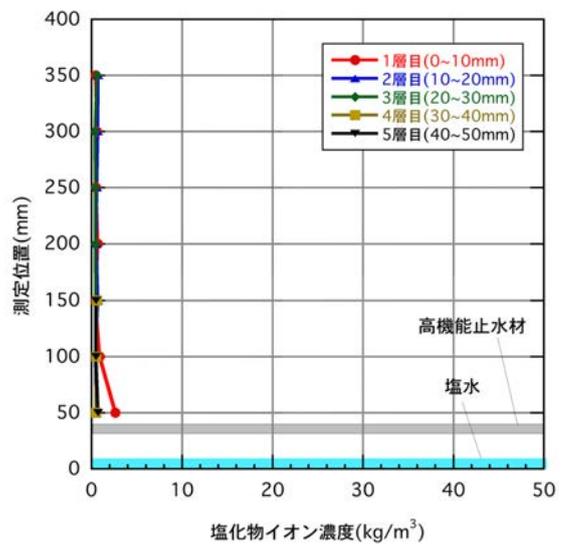


図-6 塩化物イオン濃度分布 (No. 5)

吸い上げを抑制できていることが分かった。この含浸材の特徴は、コンクリート表面に塗布するだけで深く浸透し、外観を変えることなく塩化物イオンの浸入を阻止する吸水防水層を形成する性能を有することから、吸い上げによる塩水の結晶化を抑制したものと考えられる。

### 3.2 塩化物イオン濃度分布

図-2～図-6 は、No.1～No.5 の供試体の塩化物イオン濃度分布を測定した結果（吸い上げ後 140 日）である。共通して言えることは、いずれの供試体においても表層部（0～10mm）の塩化物イオン濃度が最も高いことである。

塩化物イオン濃度分布の傾向としては、目地が無い供試体（No.2）では、直線的な濃度分布を示すが、目地がある供試体（No.3）では山なりの傾向となった。その理由として、塩水面付近では塩水の結晶化が生じにくいため塩化物イオン濃度が高くなりづらかったものと思われる。

塩化物イオン濃度で比較すると、塩分濃度 3%（No.1）に対して、24%（No.2）の場合は、表層部の塩化物イオン濃度は、約 4.2 倍に、目地がある場合（No.3）は無の場合（No.2）に比較して約 1.8 倍大きくなる結果となった。

エポキシ樹脂防水を行った供試体（No.4）では、無塗布の供試体（No.3）に対して、塩化物イオン量の最大値を 87%まで減少させ、塩化物イオンの浸透高さや全体的な量を減少させる効果は見られた。しかしながら、圧倒的に塩化物イオンの浸入を抑えたのは、高機能止水材を使用した供試体（No.5）であり、何も対策を取らなかった供試体（No.3）に対して、約 6.6%まで減少させる効果があった。

これらの結果より、塩水の吸い上げの特徴としては、深さ 10mm 程度までのコンクリート表層部において吸い上げが生じているものと思われる。その為、その深さまでを遮蔽する事によって、大幅に塩水の吸い上げを抑制することが可能になったものと思われる。明確なメカニズムは解明できていないが、本研究で吸い上げの状況を観察した結果、以下の通りとなる。

- ①毛細管張力により、塩水が吸い上げられコンクリート表面に色むらが生じる。
- ②色むら箇所の表面に塩が析出する。
- ③析出した塩よりも更に上方向に色むらが進展する。
- ④色むらが生じた箇所に塩が析出し、同時に既に塩が析出した箇所にも更に塩が析出し厚さを増していく。

初期の段階で、この様なサイクルが、コンクリート表層部から約 10mm の範囲で生じており、その後、濃度勾配により、内部へと塩化物イオンが拡散していくのではないかと考えられる。その為、高機能止水材を用いた方法では、初期の吸い上げを防止することから、塩化物イオンの浸透・拡散が殆ど生じなかったものと思われる。

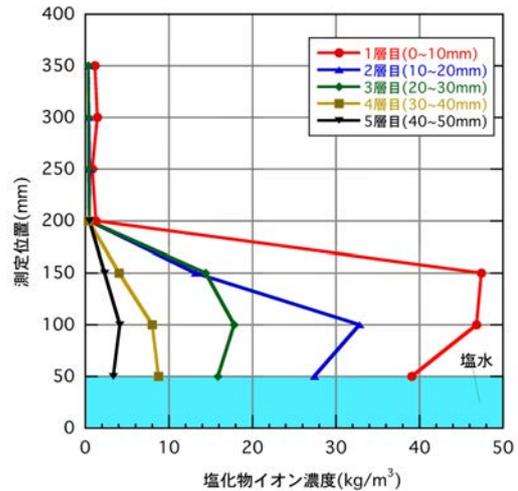


図-7 塩化物イオン濃度分布 (No. 6)

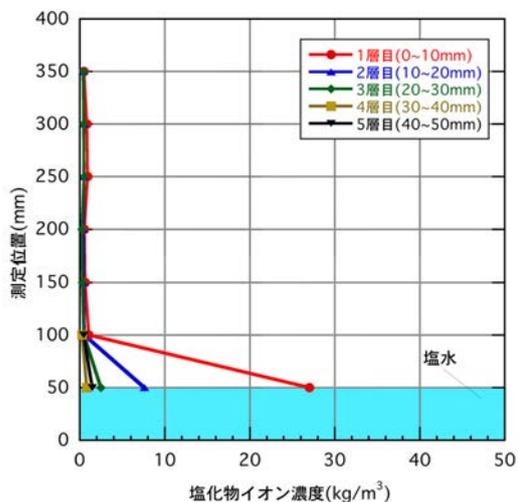
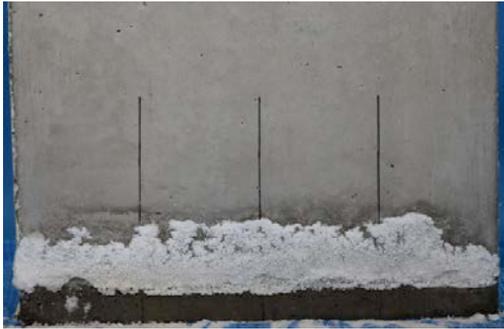


図-8 塩化物イオン濃度分布 (No. 7)

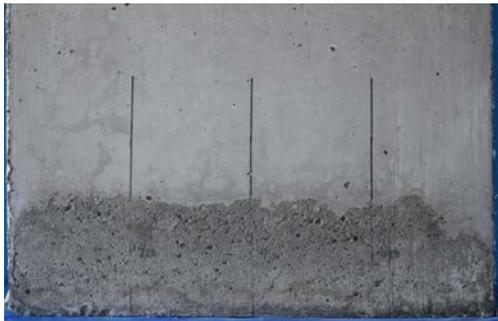
図-7 は、矩形供試体①（シラン系表面含浸材無塗布）による塩化物イオン濃度分布を示したものである。この図より、目地が設けられていないにもかかわらず、山なりの形状となっている。この事から、コンクリート中の塩化物イオン濃度が次第に高くなると、ある程度までは直線的に濃度が高くなるが、塩水面付近では常に液体の状態を保つことから、濃度自体が濃縮されず、この様な山なりの傾向へと変化していくものと思われる。

図-8 は、矩形供試体①（シラン系表面含浸材塗布）による塩化物イオン濃度分布を示したものである。この図より、シラン系表面含浸材を塗布した条件では、最大塩化物イオン濃度を約 57%に、吸い上げ高さを半分減少させる効果が認められた。この塗布材は、塩化物イオンの侵入を阻止する吸水防止層を形成する特徴があるため、大幅な塩化物イオンの侵入を抑制できたものと思われる。

写真-5 は、矩形供試体②（No.8）において、吸い上げ実験を 1.5 年継続した時点での表層の(a)析出物除去前、



(a)析出物除去前



(b)析出物除去後



実際の壁高欄の劣化状況

写真-5 塩水吸い上げ後の供試体表面状況  
(No. 7) と実際の壁高欄劣化状況

(b)析出物除去後、(c)実際の壁高欄の劣化状況を示したものである。この写真からも分かるように、塩を取り除いた後の表面においては、スケーリングが生じる結果となった。一般にスケーリングは、凍害の一つで、凍結防止剤を散布する環境において凍結融解が作用した際に生じる現象であるが、今回の実験のような乾燥のみの条件においても、見た目が似たような現象が生じることを明らかにした。これは、塩類の析出圧だけではなく、高濃度塩類による水和物の分解や乾燥収縮等の要因も考えられるが、今後このメカニズムについては検討が必要と思われる。また、合わせて実際の壁高欄の表層の写真も載せているが、下面側のスケーリングの状況は実験結果で得られた表層と類似しており、これらの劣化の要因の一つとして、塩水の吸い上げによる影響もあるものと考えている。

#### 4. まとめ

本研究は、コンクリート製壁高欄やパラペットなどの薄壁 RC 構造物が、冬期に散布される凍結防止剤の吸い上げによる塩化物イオンの移動に着目し、その吸い上げの影響についてモルタル供試体およびコンクリート製壁高欄を想定した中型供試体を用いた吸い上げ実験を行った。実験の範囲において、以下のことが言える。

- (1) 塩水の吸い上げは、塩分濃度が高く目地がある条件の方がより顕著に生じる結果となった。
- (2) 塩水吸い上げによる塩化物イオン濃度は、表層部分において最も高く、奥行き方向に次第に小さくなり、その形状は、吸い上げ初期は塩水面側が最も大きい直線の形状をしているが、塩分濃度が高くなるとその形状は山なりになる結果となった。
- (3) 塩水の吸い上げを抑制する方法として、抑制対策をしなかった条件に対して、エポキシ樹脂防水を行った条件では約 87%まで、シラン系表面含浸材を塗布した条件では 57%まで、高性能止水材を配置した条件では 6.6%まで塩化物イオン濃度を低減させる効果があることが分かった。
- (4) 塩水の吸い上げは、コンクリート表層部から約 10mm の深さの範囲で生じており、その後、濃度勾配により、内部へと塩化物イオンが拡散していくのではないかと考えられる。
- (5) 1.5 年間吸い上げを継続した供試体において、吸い上げによって塩が析出した箇所の表層部では、スケーリングが生じることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 石川裕一, 青山實伸, 倉戸伸浩, 西尾守広: 劣化した道路鋼橋 RC 床版の凍結防止剤による塩分浸透特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 1393-1398, 2010
- 2) 池田伊輝, 加藤佳孝, 直町聡子, 江口康平: 水分移動に伴う塩化物イオンの浸透性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 1, pp. 763-768, 2017
- 3) 小林稔, 武田三弘, 早坂洋平, 羽柴俊明: コンクリート製壁高欄の塩害に関する基礎研究, 平成 28 年度土木学会全国大会 第 71 回年次学術講演会講演概要集, V-432, pp. 863-864, 2017. 9
- 4) 小林稔, 武田三弘, 皆川翔平: モルタル供試体を用いた塩化物イオンの吸い上げ特性に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 567-572, 2018