

## 論文 長期塩水吸い上げによるコンクリートの劣化に関する研究

岩館 佑樹\*1・武田 三弘\*2・大久保 佑哉\*3・東海林 裕喜\*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が溶けた塩水の吸い上げによる塩化物イオンの移動に着目し、長期塩水吸い上げによって生じるコンクリートの劣化について実験を行った。実験の結果、塩水吸い上げ後の結晶化によって、コンクリート表層部はスケーリングを生じ劣化することが分かった。また、この吸い上げの現象は、コンクリート表層部の密実性に影響を受け、緻密な条件ではより吸い上げが促進される傾向になることが分かった。

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

### 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、写真-1 参照）やパラペットなどの薄壁 RC 構造物において、塩水吸い上げが引き起こす塩害について研究<sup>1)2)</sup>を行ってきた。この塩害は、一般的に飛来塩分や凍結防止剤がコンクリート表層に付着し、内部へと拡散・浸透することによって生じる塩害では無く、冬期に散布される凍結防止剤が雪に溶けて塩水となり、RC 壁高欄基部に滞留した後、RC 壁高欄の乾燥により吸い上げられることによって引き起こす塩害である。

過去の実験ではモルタル供試体や壁状コンクリート供試体を用いた各種塩水吸い上げ実験を行い、吸い上げ特性やコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布の測定を行った。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ることが分かった。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。また、吸い上げのメカニズムとして、初期の吸い上げはコンクリート表層から約 10mm の深さの範囲で生じており、その後の濃度勾配により、内部へ塩化物イオンが拡散していくことが分かったが、これまで長期的な吸い上げによる劣化状況の調査は行っていなかった。

そこで本研究では、2 年間という長期的な吸い上げが行われた条件におけるコンクリートの劣化について調べることが目的としている。実験では、梁型供試体による表層部のコンクリートの劣化状況や塩化物イオン濃度分布の測定、コア採取によるコンクリート内部の空隙性状の評価を、X 線造影撮影法<sup>3)</sup>を用いて行った。また、同時に暴露試験を行ったテストピースによる圧縮強度試験とコンクリート内部の空隙性状の測定を行った。さらに、



写真-1 コンクリート製壁高欄

これまでの研究結果から、吸い上げ現象は、コンクリートの表層部約 10mm で生じていることが分かっていることから、簡易透気試験を用いた表層評価の違いにより、吸い上げ現象にどのような影響を与えるのか、透気係数と吸い上げ状況との関係を求めた。

### 2. 梁型供試体を用いた長期間の吸い上げ実験

#### 2.1 供試体概要

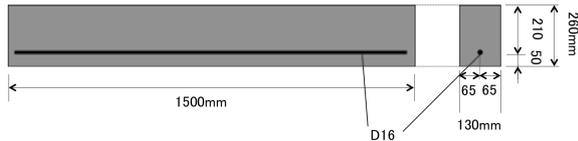
供試体に使用したコンクリートは、レディーミクストコンクリート工場から購入した普 30-18-20N を使用した。打込み時は、練り上がり温度 23℃、空気量 4.0%、スランプ 20cm であった。

供試体は、寸法が 130×260×1500mm、有効高さ 210mm に D16 の異形鉄筋を配置した鉄筋コンクリート梁を用いた。これは、当初、コンクリート製壁高欄の断面を想定して 5 体作製されたもので、耐力試験用に用いるものであったもののうち 2 体を、長期塩水吸い上げ用に転用したものである。作製された梁型供試体の形状寸法および

\*1 東北学院大学 工学研究科 環境建設工学専攻 (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 東北学院大学 工学部 環境建設工学科 (非会員)



図一 供試体形状寸法



写真一 吸い上げ実験設置状況

配筋状況を図一に示す。コンクリートは脱型後、1ヶ月間の標準水中養生を行った。その後、塩水の吸い上げを開始したが、1体はそのまま使用したが、もう1体は載荷試験を行い、中央部に0.6mmのひび割れを発生させ、ひび割れの有無の差による塩水吸い上げの観察を行った（ひび割れ無しをNo.1、ひび割れ有りをNo.2とする）。また、残りの3体については、降伏荷重まで載荷後、1年間のみ吸い上げ実験を行い、ひび割れが入った状況の経時観察用に使用した。

## 2.2 実験概要

塩水吸い上げの実験は、屋外にて暴露状態で行った。設置状況を写真一に示す。供試体は、防水加工を施した木製プールに栈木を敷き、その上に梁型供試体を載せ、供試体底面より20mm程度まで24%の塩水を注ぎ、その後は底面より10~20mmの水面を維持するよう管理した。24%の塩水を使用したのは、既往の研究で、この濃度が最も吸い上げが生じる濃度のためである。また降雨による影響を無くすため、ビニールの屋根を設けた。このビニールの屋根は、直射日光を受けると保温効果が高くなるため、供試体をより乾燥させ、塩水吸い上げを促進させる目的も兼ねておりこの状態で2年間塩水吸い上げ実験を継続させた。

2年間の塩水吸い上げ実験終了後、コンクリート表面の状況に違いが見られる箇所（塩水面・劣化部・境界部・健全部）ごとにハンマードリルを用いて粉末を採取した。二体の供試体の吸い上げ高さは違ったため、No.1は30,100,200,230mmの位置から、No.2は30,100,150,230mmの位置から粉末を採取した。その後、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。

また、No.1では劣化部・健全部の箇所から、No.2では



(a) 3ヶ月後



(b) 4ヶ月後

写真一 吸い上げ状況（ひび割れあり）

ひび割れ劣化部・健全部の箇所からφ100のコアドリルをもちいてコア抜きを行い、空隙性状を求めた。空隙性状の測定のため、抜いたコアを1cm毎にスライスし、コンクリート用造影剤を用いてX線造影撮影法によりその空隙量の定量化と空隙状況の可視化を行った。

また、吸い上げによってコンクリートの強度低下が見られるかの確認実験を行った。215日間塩水吸い上げを行った場合と行わない条件の圧縮強度を求めた。なお、塩水吸い上げを行わなかったテストピースは、恒温恒湿室（気温20℃、湿度60%）に保管しておいたものを比較材として使用した。

## 2.3 実験結果

### 2.3.1 塩水吸い上げ状況

写真一は、吸い上げ後3ヶ月と4ヶ月が経過した時のひび割れが入った供試体表面の状況を示したものである。この写真より、ひび割れが入った箇所から吸い上げが顕著に生じており、次第にその周囲が引っ張られるように吸い上げが進んでいく傾向が見られた。また、これらの傾向は、ひび割れが多く発生しているものほど顕著であったが、供試体の設置位置によっても吸い上げの進行に差が出る傾向も見られた。これは、日射の影響や風の通り方によって、吸い上げの伸展に差が出たものと考えられる。

写真一は、ひび割れ無しの供試体における9ヶ月後の塩水面付近の劣化状況を示したものである。塩が結晶化して表層に析出しているだけではなく、コンクリート表面のモルタルが浮いて剥がれてきているのがわかる。

塩水吸い上げによる劣化の特徴は、この様な吸い上げによる結晶化が進んだ箇所において、スケールリングを生じさせることである。



写真一4 表層の劣化状況



(a) No. 1 内側



(b) No. 1 外側



(c) No. 2 内側



(d) No. 2 外側

写真一5 供試体中央部の劣化状況

写真一5は、塩水吸い上げ後2年が経過した供試体(No.1, No.2)において、表層の析出した塩を洗い流した後の供試体中央部の両側面の状況を示したものである。ここで表記している「内側」の意味は、塩水吸い上げ実施時の供試体設置状態において、二体の供試体が向かい合っている面を意味しており、「外側」が屋外を向いている状態を意味している。

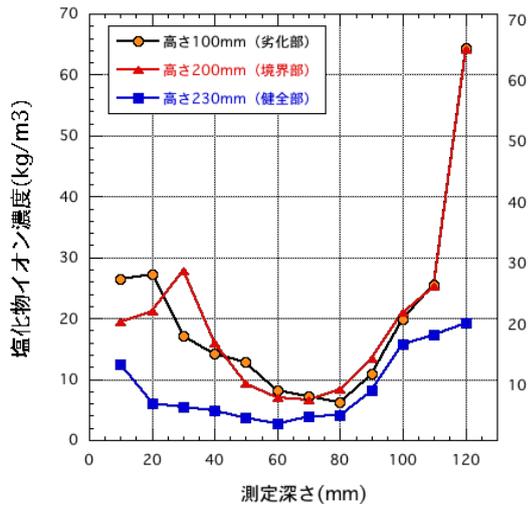
これらの写真より、No.1, No.2 いずれも内側と外側で表面の劣化に違いが見られた。特に内側の劣化は、外側に比べ顕著であった。これは、外側に比べ内側の方が、日射や風の影響を受けづらく、順調に吸い上げが進行したためと考えられる。また、表層から剥がれた浮きについて、蛍光X線分析装置でコンクリート分析にかけた結果、Clが約 $100 \text{ kg/m}^3$ 含まれている値となった。この結果より、写真一4のような劣化は、主に塩類の析出圧がコンクリート表面のモルタル部を膨張破壊させたと考えられるが、高濃度塩類による水和物の分解や溶脱も影響している可能性が考えられた。

### 2.3.2 供試体内部の塩化物イオン濃度分布

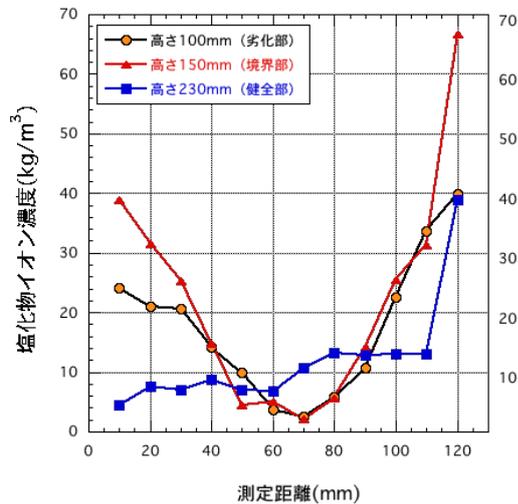
コンクリート表面の状況に違いが見られる箇所ごとにハンマードリルを用いて側面方向の粉末を採取し、蛍光X線分析装置を用いて塩化物イオン濃度の測定を行った。No.1の測定結果を図一2に、No.2の測定結果を図一3に示す。図中の劣化部はスケーリングによって内部の骨材が露出した箇所、健全部は変状が見られなかった箇所であり、境界部は健全部と劣化部の境界部分を意味している。また、図中の測定位置において、0mmの位置が内側(供試体が向かい合っている面)であり、130mmの位置が外側(屋外側)となっている。

図一2より、いずれの測定位置に置いても、両側面の塩化物イオン濃度が高く、供試体中心部が一番低くなる濃度分布となった。この理由は、乾燥によって最初に側面から塩水を吸い上げ、その後、濃度勾配により中心部の塩水が吸い上がるためであると思われる。また、この濃度分布において、内側よりも外側の方が、塩化物イオン濃度が大きい傾向となった。しかしながら、写真一5では、表層の劣化は内側の方が激しくなっており、表層の劣化は、塩化物イオン濃度が高いだけの理由でないようにも思われる。この理由については、今後も検討していく予定である。

図一3においても、図一2同様の傾向が見られたが、全体的に塩化物イオン濃度は、ひび割れが入っていないNo.1に比べると、若干高い傾向となった。これは、ひび割れの存在によって、塩水の吸い上げがより顕著に生じたためと考えられる。なお、No.1もNo.2も劣化部の塩化物イオン濃度がそれほど高くない値となっているが、これは、表層部分が既に塩の結晶圧で破壊した際に、ス



図一 2 塩化物イオン濃度分布 (No. 1)



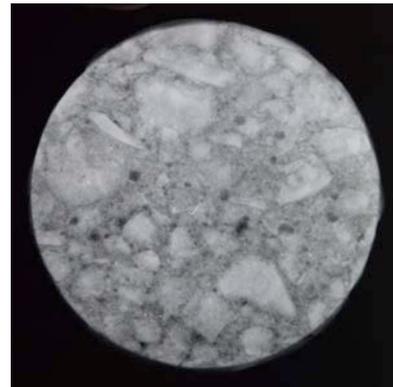
図一 3 塩化物イオン濃度分布 (No. 2)

ケーリングと一緒に塩化物の結晶も落ちてしまったためであり、境界部が一番高い値となっているのは、結晶圧による破壊前であり、結晶が蓄積されつつある状態のためであると思われる。

### 2.3.3 X線造影撮影による空隙性状の評価

2年間塩水吸い上げを行った梁型供試体のコンクリート内部の空隙性状を評価するため、No.1の供試体側面の劣化部とNo.2の健全部からΦ100mmのコアを採取し、10mm毎に円盤状にスライスし、X線造影撮影法を用いてコンクリート内部のひび割れ・空隙の検出とその定量化をおこなった。

写真一6は、劣化部の表層面のX線撮影結果であり、(a)が造影剤浸透前、(b)が造影剤浸透後のX線フィルム画像である。この写真より、造影剤浸透前では、骨材と一部空隙が検出できているだけであるが、造影剤浸透後は、

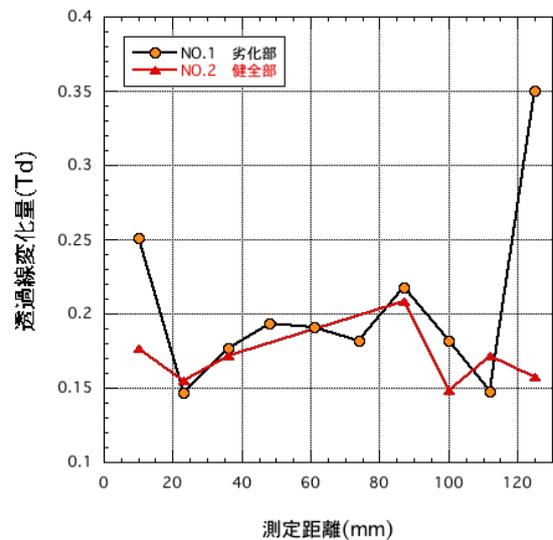


(a) 造影剤浸透前



(b) 造影剤浸透後

写真一 6 X線撮影結果 (No. 1)



図一 4 透過線変化量分布  
(No. 1 劣化部, No. 2 健全部)

全体的に白い雲のようなものが検出されている。この白く見えているものが、造影剤が浸透した領域であり、塩水の結晶化によってコンクリート中に発生したひび割れ・空隙となる。そして、造影剤浸透前後の画像濃度の

差を透過線変化量と定義し、コンクリートの空隙量を意味している。

図-4は、No.1の劣化部およびNo.2の健全部の箇所のコンクリートの空隙量を定量化した値(透過線変化量)の分布を示したものである。縦軸の透過線変化量は、値が大きくなるほどひび割れや空隙量が増加していることを意味している。この図より、ばらつきはあるものの、健全部の分布はほぼ一定の値であるが、劣化部の分布は、両側面部が急激に高い値となっている。これは、スケーリングによる劣化の影響であり、写真-6(b)に見られるひび割れの発生の影響と思われる。

### 2.3.4 テストピースを用いた塩水吸い上げによる空隙性状の影響

図-5は、塩水吸い上げを215日間行ったものを行わなかったテストピースを用いて吸い上げ高さ方向の空隙分布を、X線造影撮影法を用いて求めた結果を示したものである。図中の高さは、0mmの位置が、塩水面側となっている。この図より、塩水吸い上げを行わなかったテストピースの透過線変化量は、ほぼ一定であり、空隙分布にばらつきが少ないことがわかる。一方、塩水吸い上げを長期間行ったテストピースでは、高さ方向に進むにつれ透過線変化量が大きくなり、空隙が増加していく傾向がみられた。しかし、増加している箇所は、吸い上げが行った箇所より高い位置であるため、乾燥による空隙量の増加が考えられた。写真-7は、吸い上げ終了直後および表面の結晶除去後の供試体を示したものである。

なお、各テストピースについて、圧縮試験を実施したが、水中養生28日強度は、33N/mm<sup>2</sup>、高温室(平均室温26.5°C、平均湿度34.8%)にて塩水吸い上げを215日間行った供試体の条件では38N/mm<sup>2</sup>となり、塩水吸い上げを行った供試体の強度は上がっていた。これは、高温室にて吸い上げを実施していた間、塩水吸い上げによる水分供給で強度の増進があった可能性が考えられる。なお塩水吸い上げを行っていた供試体と同期間水中養生を行った供試体は現在も実験を継続中のため圧縮強度は不明である。また、図-5の空隙分布から、一番弱い箇所は



(a) 吸い上げ終了直後 (b) 表面の結晶除去後  
写真-7 塩水吸い上げ状況

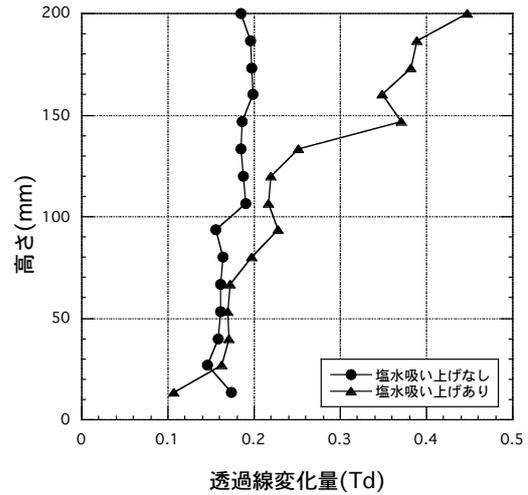


図-5 透過線変化量分布

上面であるが、圧縮試験時には載荷版による拘束の影響で、強度低下の影響が出にくかったことが考えられた。いずれにせよ、このような空隙性状を示す理由について、今後も検討が必要と考えている。

## 3. 表面の密実さの違いが塩水吸い上げに及ぼす影響

### 3.1 供試体概要

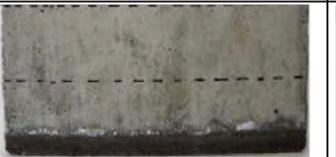
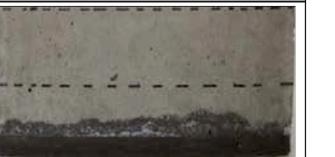
実験に使用したコンクリートは、早強ポルトランドセメントを使用した目標強度30N/mm<sup>2</sup>、スランプ8cmのものである。供試体の寸法は200×300×100mmの矩形供試体3体である。供試体作製時には、型枠にコンパネ、木製合板(剥離剤の有無)を用いてコンクリート表層の密実性を変えて作製した。供試体は、脱型後1週間の水中養生を行い、その後は24時間恒温恒湿室で保管後、本研究室が開発した簡易透気試験機<sup>4)</sup>を用い供試体の透気係数を調べ、透気試験の評価が3段階(良、一般、劣)になることを確認した。その後、水上げ面以外の両側面をシリコンでコーティングし乾燥の影響を防いだ。

### 3.2 実験概要

本研究は、コンクリート表面の密実さによって塩水の吸い上げにどのような影響があるのかを調べるため、簡易透気試験において3段階(良、一般、劣)の評価の異なるコンクリートの塩水吸い上げを行った。塩水吸い上げは、高温室(平均室温26.5°C、平均湿度34.8%)において、トロ舟に供試体を設置後、浸漬深さが10mmの24%の塩水により吸い上げ実験を行った。

### 3.3 実験結果

写真-8は、2日、7日および14日目における塩水吸い上げ状況を示したものである。この写真より、塩水吸い上げ2日目において、透気試験の結果が「良」と評価された供試体が、一番吸い上げが進行する結果となった。次に進行が早いのは「一般」の評価の供試体であり、もっとも進行が遅かったのは「劣」の評価の供試体となっ

No	3	4	5
透気係数評価	良	一般	劣
吸い上げ条件	常時吸い上げ	常時吸い上げ	常時吸い上げ
2日目			
7日目			
14日目			

写真一 8 矩形供試体の塩水吸い上げ状況

た。吸い上げ日数が経つに連れ、その差はより明確となった。また、塩水吸い上げによる結晶化は、透気係数の評価が良いものほど、細かい結晶となり、「劣」の供試体に析出する結晶は、大変粗いことが分かった。これは表面が粗悪な場合、細孔の径が大きいため、毛細管現象による高さ方向の塩水の吸い上がりが起きづらく、結晶化される塩の形状も大きくなったものと考えられる。

#### 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梁型供試体および矩形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) 長期間の塩水の吸い上げ実験を行ったところ、供試体表面では、塩水の吸い上げ及び結晶化が起り、スケールが発生することが分かった。このスケールは、高い濃度の塩化物の結晶圧および水和物の溶脱・分解が原因と考えられる。
- (2) 塩水の水上がり、ひび割れが入っていない箇所と比べ入っている箇所の方が、水上がり高さは高くなる傾向がみられ、日射の影響や風の強弱で吸い上げ高さは大きく変わる特徴があった。
- (3) 供試体内部の塩化物イオン濃度を調べてみたところ、表層部付近が最も高く、供試体中心部が最も小さい濃度分布となる傾向が見られた。これは、塩水の吸

い上げは、表層部から進行していき、濃度勾配により次第に内部に拡散していくためと考えられる。

- (4) 簡易透気試験によって 3 段階に評価されたコンクリート供試体について塩水吸い上げ実験を行ったところ、塩水の吸い上げは表面の密実さによって差が生じ、表層評価が悪いものほど吸い上げ高さは小さく、析出する結晶の粒径は大きくなる傾向となった。これは表面が粗悪な場合、毛細管現象による塩水の吸い上がりが起きづらく、また空隙自体が大きいため、結晶化される塩の形状も大きくなったものと考えられる。

#### 参考文献

- (1) 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
- (2) 岩館佑樹, 武田三弘, 皆川翔平: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.749-754, 2019
- (3) 武田三弘, 大塚浩司: X線造影撮影法によるコンクリートの性状評価手法の開発と応用, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.68, No.3, pp146-156, 2012
- (4) 築田 亮, 大友 累, 武田三弘: 簡易透気試験による沈みひび割れの貫通確認手法, 平成 29 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-21, 2018