

論文 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

小林 稔*1・武田 三弘*2・皆川 翔平*3

要旨: 本研究は、コンクリート壁高欄やパラペットなどの薄壁 RC 構造物の塩害劣化に関して、冬期に散布される凍結防止剤のコンクリートへの浸透手段が、表層からの浸透だけではなく、吸い上げによる塩化物イオンの移動も影響している点に着目し、その吸い上げの影響がどの程度あるのかを明らかにするため、各種モルタル供試体を用いた吸い上げ実験を行った。実験の結果、モルタルが密実なほど、乾燥温度・塩分濃度が高いほど吸い上げ高さは大きくなる傾向が見られ、塩水の吸い上げによってモルタル内部に多くの塩化物が移動することが分かった。

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

1. はじめに

橋梁の両端や高速道路の中央分離帯等に設置される鉄筋コンクリート製壁高欄(以下 RC 壁高欄)では、車両の安全性を確保するための橋梁付属品であり、耐荷力・耐久性および美観が要求されるが、積雪寒冷地においては、冬期に散布される凍結防止剤(NaCl)により、塩害や凍害、又はこれらの複合劣化が原因とした劣化が進行している。

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、自動車の走行時に巻き上がり、それが RC 壁高欄の表面に付着・浸透¹⁾²⁾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、異常なスケールが生じると考えられる。

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

際、**図-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小さく、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が考えられた³⁾。

そこで本研究では、RC 壁高欄基部に塩水が滞留している条件における「塩水吸い上げ」の影響を調べるため、モルタル供試体を用いた塩水吸い上げによる基礎的な実験を行い、吸い上げ特性を明らかにすることを目的としている。

2. 塩水吸い上げ実験方法

2.1 供試体概要

実験に使用した供試体は、**表-1**に示す配合で作製したモルタル角柱供試体(40×40×160mm)を用いた。材料には早強ポルトランドセメントと細骨材(表乾密度 2.62g/cm³, 粗粒率 2.57, 吸水率 1.89%)を用いた。供試体は、湿気箱養生(室温 20℃, 湿度 60%)とし、打設後 2 日目に脱型、7 日間の標準水中養生(20℃)とした。なお、AE 剤は使用しておらず、空気量の測定は行っていない。

実験条件を**表-2**に示す。水セメント比を変えた供試

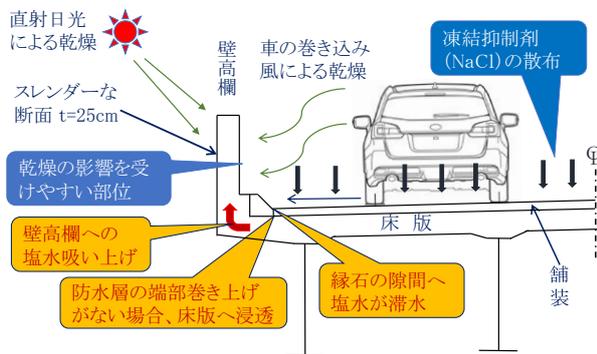


図-1 コンクリート壁高欄への塩水吸い上げ状況

が浸透し、その空間で滞留し続ける可能性がある。その

表-1 配合表

W/C(%)	単位量 (kg/m ³)		
	水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>
55	366	666	1061
60	378	630	1061
65	388	597	1061

*1 東北学院大学 大学院工学研究科 環境建設工学専攻 (学生会員)

*2 東北学院大学 大学院工学研究科 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)

表—2 供試体組み合わせ一覧

供試体名	水セメント比			供試体乾燥温度(℃)	含浸性塗布材の使用	暴露環境		遮蔽材の使用	塩分濃度(%)		
	55%	60%	65%			温度(℃)	湿度(%)				
A		○		20	無	30	43	無	9		
B		○		40							
C	○	○	○	60							
D		○									
E		○									
F		○									
G		○									
H		○		20		90	60		0		
I		○									
J		○								30	43
K		○									
L		○									
M		○									
N		○		無			エポキシ系				
							ゴム系				

体 C (55%, 60%, 65%) では、モルタルの密実性の違いによる塩水吸い上げの影響について調べた。

供試体の乾燥温度を 20℃, 40℃, 60℃ と変えた供試体 A, B, C では、直射日光によって供試体自体が乾燥を受けることによる塩水吸い上げの影響について調べた。その為、供試体は、標準養生後、各温度の乾燥炉の中に入れて乾燥させ、高周波容量式水分計を用いて水分量を測定し、その平均測定値(平均)に差が出てくる期間(2週間以上)乾燥させたものを使用した。なお、比較を行う供試体の材齢は同じものを使用しており、実験前の表面含水率は、20℃で 4.8~6.3% (平均 5.7%)、40℃で 1.2~3.0% (平均 2.3%)、60℃で 1.4~2.5% (平均 2.1) となったものを使用した。

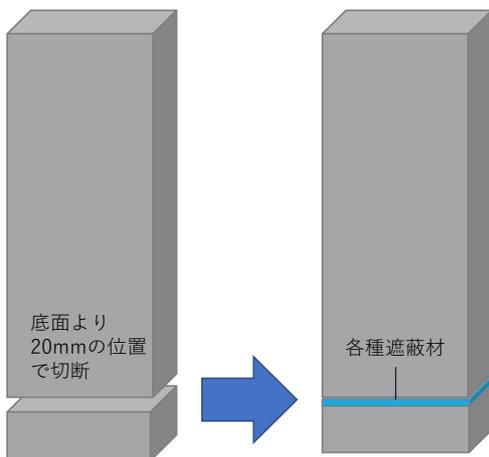
塗布型含浸剤を使用した供試体 J では、塗布材として

シラン・シロキサン系のものを使用した。この塗布材の特徴は、塗布面の水分は撥水させ、外部への水蒸気の逸散を阻害しないので、内部は乾燥しやすい傾向にある。この傾向が、塩水の吸い上げを助長させる可能性がないか調べた。

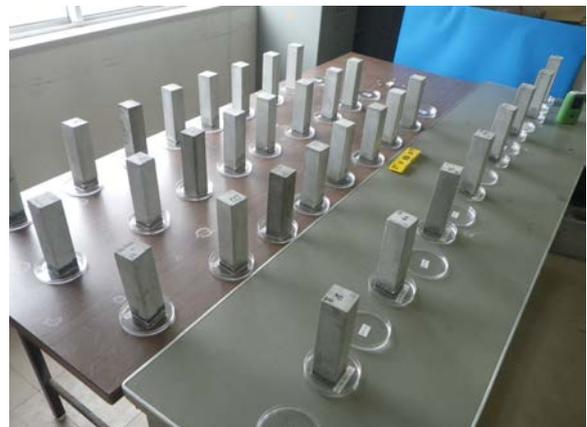
暴露環境を変えた供試体 C, H, I (乾燥環境(室温 30 ± 1℃, 湿度 30~43%), 一般環境(室温 20℃, 湿度 60%), 湿潤環境(室温 20℃, 湿度 90%)) では、気候的な温度・湿度の違いによる塩水吸い上げの影響について調べた。

塩分濃度を変えた供試体 D, E (NaCl 0~24% の 11 種類) では、塩分濃度の違いによる塩水吸い上げの影響について調べた。

また、吸い上げを抑制する目的で、モルタル供試体の端部を 20mm 程度切断し、切断面に各種遮蔽材(セメン



図—2 遮蔽材を設けた供試体



写真—1 吸い上げ実験状況

ト系，ポリマー系，エポキシ系，ゴム系）を塗布又は設けた塩水吸い上げ実験も行った（供試体 K～N）。なお，供試体は A～C および J～N は 3 体ずつ，E は 2 体ずつ，D および F～I は 1 体ずつ作製してあり，複数の供試体の場合は，平均値から吸い上げ高さを求めた。

2.2 塩水吸い上げ試験方法と吸い上げ高さの測定方法

塩水吸い上げ実験は，各暴露環境下において，シャーレ（φ100mm）の中に供試体を垂直に立て，水位が 5mm 程度の高さになるように各濃度の塩水を注いだ条件で行った。写真一1は，容器にシャーレを用いて吸い上げ実験を行った時の一例である。シャーレの中の塩水は，時間とともに吸い上げや乾燥によって減少していくが，蒸発による塩水濃度の上昇は少ないと考え，今回の実験では定期的に同濃度の塩水を注ぎ足し，5mm の水位を維持することを実験条件として行った。

吸い上げ高さの測定は，吸い上げ 1 日目，3 日目，7 日目，10 日目に行った。測定箇所は，供試体の 4 側面である。目視で明確に判断できる吸い上げ高さもあるが，判断が難しい場合には，各面の吸い上げ状況を写真撮影し，吸い上げ実験を行う前に撮影した画像から吸い上げ後の画像を差し引く画像処理（差の絶対値）を行って求めた。

測定高さは 4 面の平均値とした。

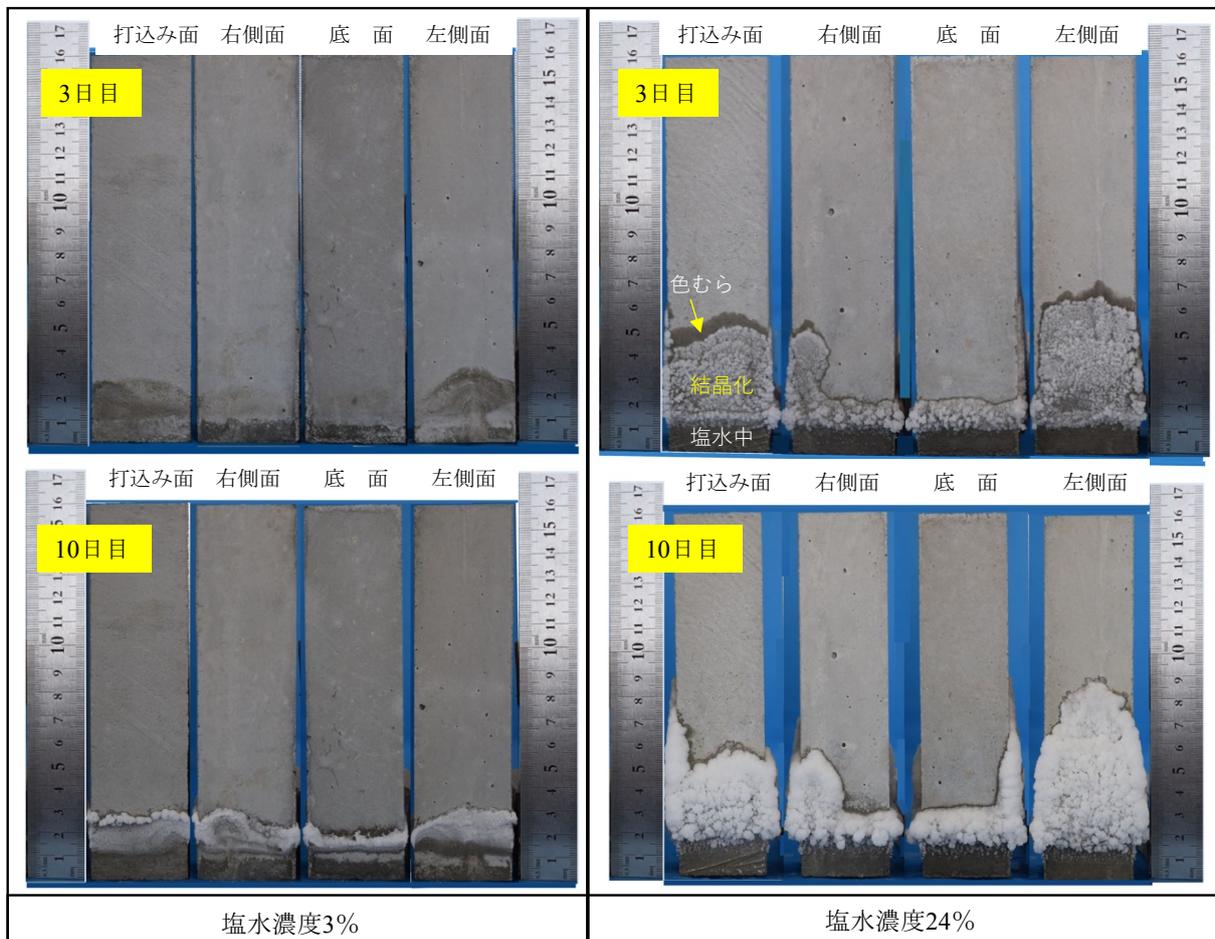
2.3 塩化物イオン濃度の測定

吸い上げ実験によって，塩化物がどのように移動したかを確認するため，実験終了後，モルタル供試体表面の塩化物イオン濃度の測定を行った。測定には非破壊で測定が可能な蛍光 X 線分析装置を用いた。なお，測定箇所は，水中部（塩水 5mm の吸い上げ箇所）および吸い上げ部とそれより上部の箇所とで行った。

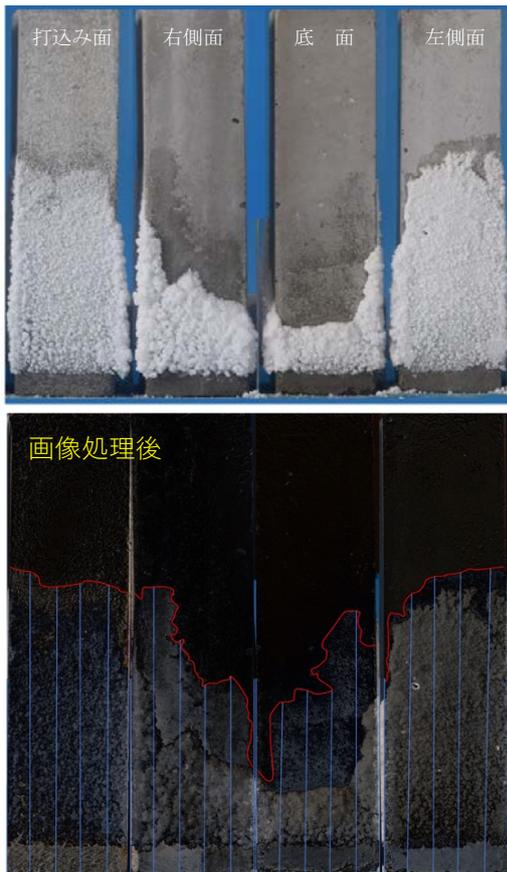
3. 実験結果

3.1 塩水の吸い上げ状況

写真一2は，吸い上げ期間 3 日および 10 日の塩水濃度 3% および 24% の吸い上げ状況の一例（供試体 E の暴露環境条件）を示したものである。吸い上げの傾向としては，全体的には供試体作製時の打ち込み面の箇所の吸い上げ高さが大きい傾向が見られ，次いで両側面，打ち込み底面の順となった。これは密実性の違いによる影響と思われる。また，吸い上げ開始時は吸い上げによる色むらだけが確認できたが，その後は塩水が結晶化により表面に析出する傾向となった。その結果，吸い上げ箇所は，塩水中，結晶化部分および色むら部分（写真一2 中参照）



写真一2 塩水吸い上げ状況（3 日目と 10 日目，供試体 E）



写真一3 画像処理前と処理後の吸い上げ高さ

の3つに分類された。

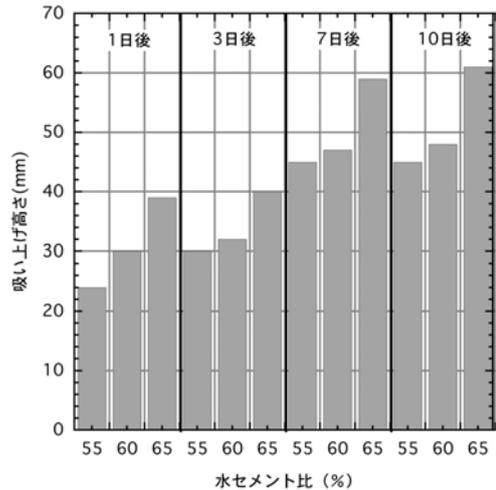
色むら箇所とそうでない箇所の境界が分かりづらい場合は、2.2節で説明したように画像処理を用いて境界を決めた。写真一3は、同一供試体の4面の塩水吸い上げ状況(上)と画像処理後(下)の塩水吸い上げ高さを示したものである。赤いラインが最終的な吸い上げ高さとなり、その線を5等分となる位置の高さの平均値を吸い上げ高さとした。なお、画像処理を用いて求めた境界値に対して、目視により求めた境界値の差を求めたところ、その誤差は±2.5%であることが分かったため、境界が分かりづらいもの以外はすべて目視による吸い上げ高さの測定とした。

3.2 水セメント比の相違による影響

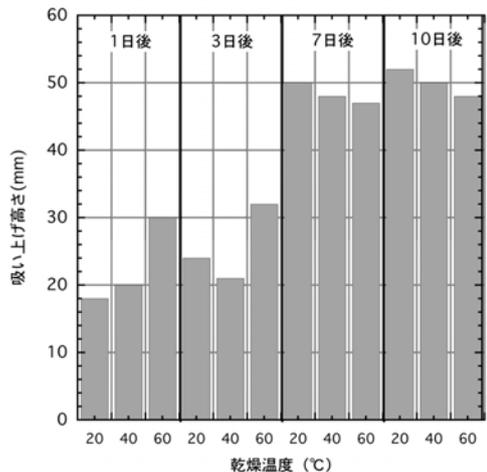
水セメント比を変えた供試体(供試体C)を用いて、モルタルの密実性の違いが塩水吸い上げに与える影響を調べた結果(平均値)を図一3に示す。この図は吸い上げ1日後から10日後の結果を載せているが、いずれも水セメント比が小さい方が、吸い上げ高さが小さい傾向が見られた。この結果より、空隙量が大きい条件ほど、吸い上げを促進させる傾向となった。

3.3 乾燥温度の相違による影響

20℃、40℃、60℃と乾燥温度を変えた供試体A,B,Cを



図一3 水セメント比の相違による吸い上げの影響

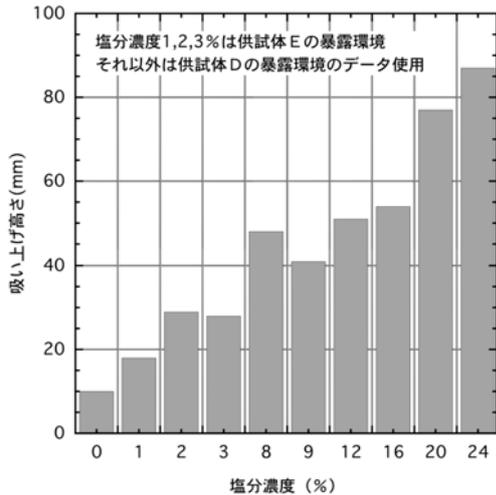


図一4 乾燥温度の相違による吸い上げの影響

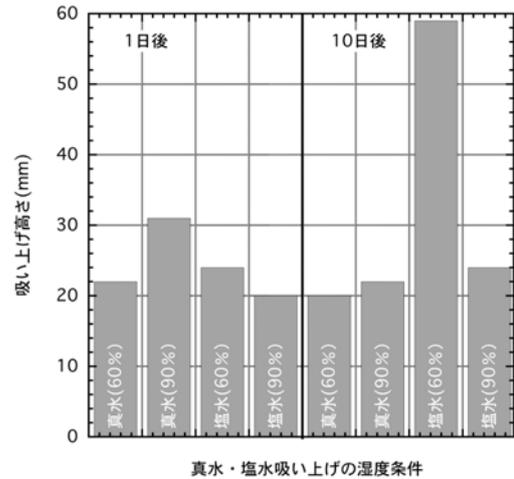
用いて供試体自体の乾燥が、塩水吸い上げに与える影響を調べた結果(平均値)を図一4に示す。これらの供試体は、いずれも7日間の水中標準養生を終えた後に、各条件下で乾燥させたものであるが、吸い上げ3日後までは、乾燥温度が高いものほど、塩水の吸い上げ高さは大きくなる傾向が見られた。しかし、7日以後には、初期乾燥による差は無くなる傾向となった。これは、初期乾燥による一時的な空隙の拡大により、吸い上げ当初は差が見られたが、その後の暴露環境の気温・湿度の影響で、同等の空隙性状になったためと考えられたが、供試体寸法が小さいこともこの様な結果になった要因と思われる。なお、図一3および図一4のグラフは3体の平均値であるが、そのばらつきは、最大で6mmであった。

3.4 塩水濃度の相違による影響

10種類の塩分濃度(0%, 1%, 2%, 3%, 8%, 9%, 12%, 16%, 20%, 24%)による供試体D,E用いて、塩分濃度の違いが塩水吸い上げに与える影響を調べた結果を図一5に示す。なお、塩分濃度0%では、蒸留水を用いている。



図一五 塩水濃度の相違による吸い上げの影響



図一六 湿度の相違による吸い上げの影響

この図は10日後の吸い上げ高さを示したものであるが、多少、凹凸はあるものの、塩分濃度が高くなるにつれて、吸い上げ高さも大きくなる傾向が見られた。これはFickの拡散則から考えると、塩分の濃度が高くなると濃度勾配が大きくなるため、吸い上げ高さも大きくなったものと考えられる。この結果より、塩分を含まない水分よりも、多くの塩分を含む条件の方が、より塩水を吸い上げる傾向が強くなることが分かった。

3.5 湿度の相違による影響

供試体が設置された環境の湿度の違いが吸い上げに与える影響を調べた結果を図一六に示す。この図は、室温20℃の一定条件で、湿度のみを60%と90%で塩水濃度0%および9%の吸い上げ実験を行った結果である。吸い上げ1日目の吸い上げ高さを見ると、塩水濃度0%では湿度が高めの方が若干大きい傾向にも見られるが、塩水濃度9%も含めて顕著な差は見られなかった。しかしながら、吸い上げ10日目の吸い上げ高さを見ると、塩水濃度9%、湿度60%の条件が、他のものと比較して格段に大きくなった。この結果より、湿度が高い環境の方が、吸い上げを抑制する傾向となることが分かった。これは、湿度が高い条件の方が、乾燥の影響を受けにくくなり、また、モルタル中の空隙が小さくなる影響と考えられる。上記における3.2, 3.3, 3.5の各種要因による影響については、この様な傾向がでた理由を知るためにも、今後は定量的な空隙性状を評価する必要があると思われる。

3.6 遮蔽材による塩水吸い上げ遮蔽効果の検証

モルタル供試体が塩水を吸い上げ、結晶化していく状況は、実構造物で同様の状況を想定した場合、鋼材腐食が顕著になることが想定できる。この様な塩水吸い上げを抑制するために、モルタル供試体に遮蔽の層を設け、吸い上げを抑制することを検討してみた。

遮蔽層は、40×40×160mmの角柱供試体(W/C=60%)



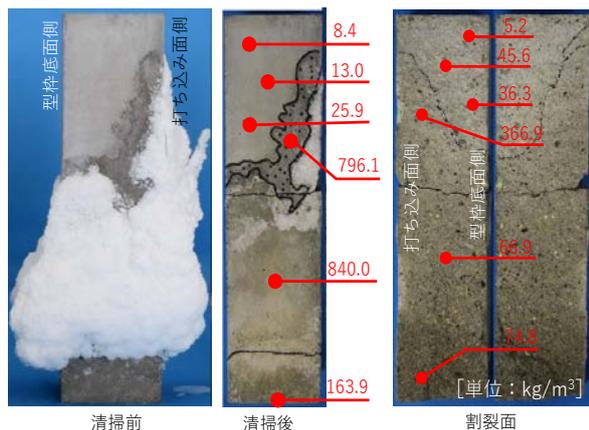
写真一四 遮蔽材を設けた条件の比較

の端部20mmを切断し、そこにゴム系樹脂(供試体N)、エポキシ樹脂(供試体M)、高強度モルタル(供試体K)およびポリマーセメントモルタル(供試体L)を塗布又は5mm程度の厚さで遮蔽層を設け、もう一方の切断面を再び圧着し、一体化したものを使用した。塩水濃度は9%を使用した。また、遮蔽材のない同条件のモルタル角柱との比較も行った。

写真一四は、塩水吸い上げ前(写真上)および塩水吸い上げ31日後(写真下)の実験結果の一例(打ち込み底面)を示したものである。この写真より、遮蔽材が無い条件では、塩水吸い上げ高さも、結晶化も最も大きい結果となるが、遮蔽材を設けたものは、基本、それ以下の吸い上げ高さとなり、遮蔽材の効果を確認することが出来た。一部、遮蔽材よりも上に結晶化が見られるものがあるが、これは遮蔽材境界部の表面に塩の結晶が発生し、結晶を介して上方に塩水を吸い上げることにより、生じたものであり、遮蔽材の塗布方法を適切に行うことによって、この様な現象は防げると考えている。

3.7 モルタル角柱内部の塩化物イオン濃度

吸い上げ後のモルタル供試体表面および内部の塩化物



写真一5 塩分析出状況と塩化物イオン濃度測定結果

イオン濃度がどの程度になっているか調べるために、蛍光X線装置を用いて、表面および割裂した破断面の塩化物イオン濃度の測定を行った。試験に使用したものは、供試体 C の条件のものであるが、吸い上げ実験 10 日後以降、結晶部と色むら部を早期に発生させるため、塩水濃度 24% の条件に変更し、継続して 3 ヶ月間吸い上げ実験を行ったものである。

写真一5 は吸い上げ実験 3 ヶ月後の供試体に析出した塩分の状況と、その塩分を清掃した状態のもの、および割裂面に対して塩化物イオン濃度 (kg/m³) を測定した箇所毎に結果を記入したものである。清掃前の状況では、塩水に浸している箇所では、塩分の結晶化は生じないが、それより上方では、結晶化が進み 3 ヶ月後には樹氷のような状態になった。表層を清掃後、塩化物イオン濃度を測定したが、塩が析出している箇所および色むら箇所は高い塩化物イオン濃度となっており、それに次いで塩水部が高く、色むらのない上面箇所は、その位置が塩水面より高くなるほど低い値となった。塩化物イオン濃度の値が高すぎて、結晶化によるモルタルの劣化も懸念される結果となった。割裂面をみると、上方部にマジックで線が書かれているが、これは割裂時に吸い上げ痕が見られた箇所をトレースしたものであり、内部においても打ち込み後の乾燥の影響で吸い上げに勾配がみられた。この面に対して塩化物イオン濃度を測定した結果、内部は湿潤状態を維持しているため、表面に比べ塩化物イオン濃度は小さい傾向となったが、いずれにせよ、鋼材腐食には十分な濃度まで高くなる結果となった。

4. まとめ

本研究では、RC壁高欄基部に塩水が滞留している条件における「塩水吸い上げ」の影響を調べるため、モルタル供試体を用いた塩水吸い上げによる基礎的な実験を行った結果、実験の範囲内において以下のことが言える。

- 1) 水セメント比が塩水吸い上げに及ぼす影響を調べた結果、水セメント比が大きいほど、吸い上げ高さも大きくなる傾向がみられた。
- 2) 水中標準養生後の乾燥条件が塩水吸い上げに及ぼす影響を調べたところ、吸い上げ初期では、乾燥温度が高いほど吸い上げ高さも大きくなる傾向がみられたが、吸い上げ 7 日後以降になると、乾燥温度による吸い上げ高さの差はほとんど観られなかった。
- 3) 塩分濃度の違い (0%, 1%, 2%, 3%, 8%, 9%, 12%, 16%, 20%, 24%) が、吸い上げ高さに及ぼす影響を調べたところ、濃度 0% に対して、塩水はいずれも吸い上げ高さが大きくなり、塩分濃度が高いほど、その傾向は強くなる結果となった。
- 4) 湿度の相違が吸い上げ高さに及ぼす影響を調べたところ、湿度が高い条件 (90%) では、塩水濃度 0% も 9% も吸い上げ高さに差は見られなかったが、湿度 60% の条件では、塩水濃度 9% の吸い上げ高さが大きい結果となった。この結果より、乾燥状態の方が、塩水の吸い上げ高さは大きくなることが分かった。
- 5) 遮蔽材を設けることによって、塩水の吸い上げを抑制した結果、いずれの材料にもその効果は見られた。
- 6) 吸い上げ後のモルタル供試体内部の塩化物イオン濃度を確認したところ、結晶化した箇所が最も高く、次いで色むら箇所、吸い上げ箇所の順となった。いずれも高濃度になっており、鋼材腐食への影響や結晶化によるコンクリートの劣化の可能性があると思われる。

最後に、今回は小型供試体による確認実験を行いました。今後は実構造物との整合性を視野に入れた大型実験を行っていく予定である。

謝辞：本研究を行うにあたって、平成 29 年度東北学院大学工学部環境建設工学科 4 年 佐藤保志人氏、栗石望海氏には多大な協力を受けた。ここに謝意を表す。

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