

# 論文 表面含浸材の海洋・港湾コンクリート構造物への適用性に関する研究

澤田 巧<sup>\*1</sup>・福手 勤<sup>\*2</sup>・藤井 雄基<sup>\*3</sup>・内藤 英晴<sup>\*4</sup>

**要旨:** 海洋・港湾環境下におかれる鉄筋コンクリート構造物には効果的、合理的な塩害対策が求められている。筆者らは、一般的な環境では劣化因子の侵入抑制効果が高い表面含浸材を海洋・港湾構造物に適用することを考え、特に干満帯や飛沫帯といった高含水状態となる塗布面や、塗布後の気中養生期間が十分に確保できない環境を模擬した実験を行った。各種条件下で表面含浸材を塗布したモルタル供試体の塩水浸漬試験を実施した結果、条件によっては、表面含浸材の塩化物イオン侵入抑制効果がある程度期待することができることがわかった。また、含浸材の種類によって塩化物イオン侵入抑制効果が異なる可能性が示唆された。

**キーワード:** 表面含浸材, 海洋・港湾構造物, 干満帯, 塩害, 塩化物イオン

## 1. はじめに

四方を海に囲まれる我が国では、様々な場面において沿岸域海洋域への依存度は高く、海洋・港湾構造物は、人流物流拠点として、生活活動空間として、また環境保全・創造に貢献する施設として重要な役割を果たしている。日本社会の持続的発展のためにはこれら海洋・港湾構造物を長期にわたり供用していく必要がある。海洋・港湾環境下にある鉄筋コンクリート構造物は、波浪や飛沫の影響を直接受けるため、塩害を生じやすい環境にあり、海洋・港湾環境下においては、塩害が耐久性を低下させる主要因となっている。

ここで、筆者らは、海洋・港湾環境下における鉄筋コンクリート構造物の塩害に対する耐久性を向上させるために、既往の研究<sup>1)</sup>から施工性も良く、確実な施工を行えば、塩化物イオンや水といった劣化因子の侵入抑制効果が高く塩害に対する耐久性の向上効果を期待できる表面含浸材を適用することを考えた。

海洋・港湾構造物で最も塩害の進行が早いのは、干満帯や飛沫帯といった海水の影響を直接受け、なおかつ酸素が十分に供給される部位である。よって、表面含浸材を適用する場合、干満帯や飛沫帯において十分な劣化因子の侵入抑制効果を発揮しなければならない。しかし、干満帯や飛沫帯といった部位は、海水に触れることが多いため、塗布対象のコンクリートの含水率が高い状態で塗布することや、塗布後十分な乾燥養生期間を確保できないことが想定される。こういった環境では、表面含浸材の劣化因子の侵入抑制効果に悪影響を及ぼすことが考えられる。しかし、表面含浸材に関する既往の研究<sup>2)</sup>では、陸上構造物や常時気中環境下に対する試験がほとんどであり、こういった干満帯や飛沫帯における性能につ

いて言及し、塩化物イオンの侵入抑制効果について検討されている例<sup>3)</sup>は少ない。また、表面保護工法設計施工指針(案)<sup>4)</sup>においても塩化物イオンの侵入抑制を目的に、飛沫帯部または干満帯部に適用する場合は検討が必要である、との記述がなされている状況である。

そこで、著者らは、海洋・港湾環境下に位置する鉄筋コンクリート構造物に対して、表面含浸材を塗布したときに、その性能がどの程度発揮されるか、またより高い性能を発揮させるためにはどのような材料を選択すればよいか、を把握するために(1)干満帯や飛沫帯といったコンクリートの含水率が高い状態で表面含浸材を塗布すること、(2)表面含浸材を塗布した後十分な養生期間を設けずに海水に浸漬すること、および(3)干満帯に位置する部材に対して塗布する場合を想定し、含水率が高い状態で塗布し、十分な養生期間を設けずに海水に浸漬されること、を模擬した計3シリーズにわたる実験を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体および使用材料

本研究では W/C=50%の普通ポルトランドセメント標準砂=1:3 のモルタルで 100×100×400mm の基盤を作製後、厚さ 50mm に切断し、その切断面の片側に各種表面含浸材を塗布したものを供試体とした。含浸材塗布面以外は塗布前にエポキシ樹脂で被覆した。供試体の概要を図-1 に示す。使用した含浸材の種類を表-1 に示す。なお、含浸材 E はけい酸ナトリウム系の含浸材を塗布した翌日にシラン系の含浸材を塗布する 2 液型の含浸材である。含浸材 E を干満帯に塗布する場合、素地調整後、初日の干潮時にけい酸ナトリウム系を塗布し、満潮時に水没した後、翌日の干潮時にシラン系を塗布することが

\*1 五洋建設株式会社 技術研究所 研究員 (正会員)

\*2 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科教授 工博 (正会員)

\*3 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科

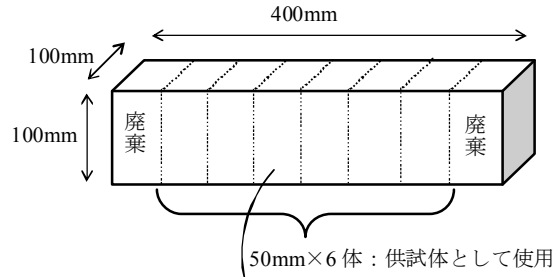
\*4 五洋建設株式会社 技術研究所 部長 工博 (正会員)

考えられる。そのため、含浸材 E に関しては、シリーズ 1, 3 ではけい酸ナトリウム系を塗布した後、一度上水中に浸漬させ、翌日、シラン系を塗布した。シリーズ 2 については、けい酸ナトリウム系を塗布した後、24 時間気中養生とし、シラン系を塗布した後、所定の時間で塩水への浸漬を行った。また各含浸材の標準的な性能を把握するためにそれぞれのシリーズについて、JSCE-K571「表面含浸材の試験方法(案)」に準拠した条件で供試体への塗布、養生を行い、併せて試験を行った。

## 2.2 実験条件

シリーズ 1 は、モルタル供試体が完全に水に飽和されている状態で気中に取り出し、塗布するまでの気中乾燥時間を実験パラメータとした。シリーズ 2 は、気中乾燥状態にあるモルタル供試体に塗布を開始してから、塩水に浸漬するまでの時間を実験パラメータとした。シリーズ 3 は、モルタル供試体が完全に水で飽和されている状態から、気中に取り出し、含浸材を塗布し塩水に浸漬させるまでの時間、いわゆる干満帯における作業可能時間を実験パラメータとした。実験フローを図-2 に示す。なお、シリーズ 1, 3 では、塗布前の水で飽和されている状態を作るために、真空飽和处理を行った。シリーズ 2, 3 においては、浸漬中に塩水に流出した含浸材の成分による影響を除外するために、各条件において浸漬容器を変え、さらに浸漬後数回にわたり塩水の交換を行った。塩水の濃度は 10%、浸漬期間は 2 ヶ月および 1 年とした。供試体を所定期間浸漬した後に割裂し、割裂面で JIS A

・モルタル基盤



・モルタル供試体

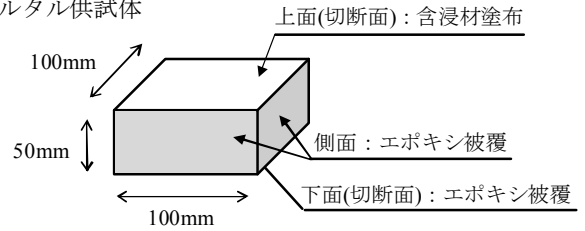
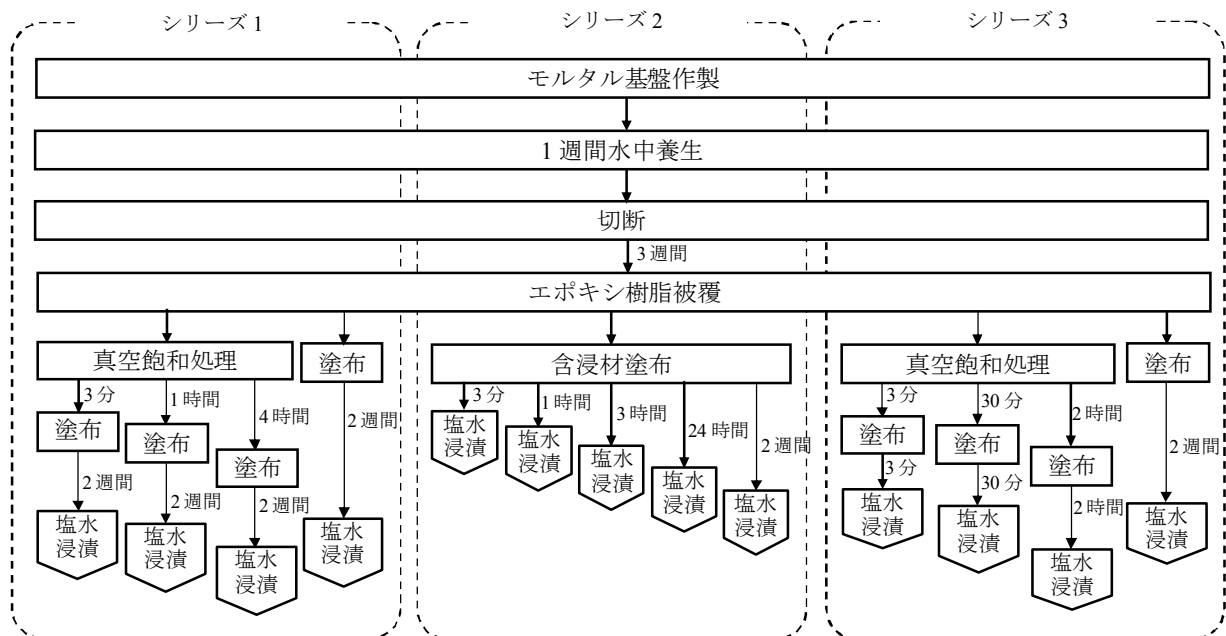


図-1 供試体の概要

表-1 表面含浸材の種類

種類	主成分	主成分濃度	分類	塗布量	塗布回数
A	けい酸ナトリウム	23	水系	200g/m <sup>2</sup>	2
B	アルキルアルコキシシラン・ポリオルガノシロキサン	80	水系	200g/m <sup>2</sup>	1
C	アルキルアルコキシシラン	98%以上	無溶剤系	250g/m <sup>2</sup>	2
D	アルコキシシロキサン	50	溶剤系	200g/m <sup>2</sup>	2
E	けい酸ナトリウム	23	水系	150g/m <sup>2</sup>	2
	+ アルコキシシロキサン	+ 50	+ 溶剤系	+ 100g/m <sup>2</sup>	+ 1



注記 1. 矢印付近に記入している時間は各過程において供試体が気中に曝されている養生時間を示す。

注記 2. 含浸材 E については、2 日間に分けて塗布作業を実施した。

図-2 実験フロー

1171 の 7.8 (塩化物イオン浸透深さ試験) に準拠し塩化物イオン浸透深さを測定した。また、含浸材 B~E を塗布した供試体に関しては、JSCE K 571 の 6.2 (含浸深さ試験) に準拠し、含浸深さも併せて測定した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 シリーズ 1

##### (1) 含浸深さ

シリーズ 1 の含浸深さを図-3 に示す。なお、それぞれの条件における塗布時のモルタル水分を K 社製のコンクリート・モルタル水分計で測定した値は、塗布前の乾燥時間が 3 分の場合で 8.8%、1 時間の場合で 7.9%、4 時間の場合で 7.4%、常時気中の場合で 6.1% であった。

真空飽和処理後、塗布までの乾燥時間が長くなるほど含浸深さが大きくなる傾向が認められた。また、真空飽和処理後、4 時間気中乾燥を行った場合であっても常時気中条件のものより大幅に含浸深さは小さくなった。これらは、含浸材塗布時におけるモルタル内部の水分の存在により、含浸材が内部へ浸透することが妨げられたためと推察される。また、含浸材の種類による差に関しては、3 分、1 時間、4 時間の条件では有意な差があるとは言えず、常時気中の条件においては、シラン系の塗布量が最も少ない含浸材 E で最も小さくなり、塗布量の最も大きい含浸材 C で最大となった。

##### (2) 塩化物イオン浸透深さ

シリーズ 1 の塩化物イオン浸透深さについて、2 ヶ月および 1 年浸漬後の結果を図-4、図-5 に示す。なお、1 年間の浸漬試験では、明確な塩化物イオン浸透抑制効果の認められなかったけい酸ナトリウム系の含浸材 A については試験を行わなかった。

シラン系を含む含浸材 B~E は、いずれの条件においてもブランクに対し、大きな塩化物イオンの浸透抑制効果が認められた。また塗布前に真空飽和処理を行った条件においても、塩化物イオン浸透深さは、常時気中条件の場合とほとんど変わらなかった。よって、含浸深さと塩化物イオン浸透深さの相関性は認められなかった。塗布前に真空飽和処理を行なった条件においても塩化物イオン浸透深さが常時気中条件と変わらなかった原因としては、塗布方向が鉛直下向きであったため、塗布時の内在水分により含浸深さは小さくなったものの、浅い部分に集中してより密度の高い含浸層が形成されたことも考えられるが詳細は不明である。けい酸ナトリウム系の含浸材 A については明確な塩化物イオンの浸透抑制効果は認められなかった。浸漬期間が 2 ヶ月と 1 年の結果を比較すると、浸漬期間が長くなることでブランクは数 mm 程度大きくなった。含浸材 B~E については常時気中条件ではほとんど変わらず、塗布前に真空飽和処理を行っ

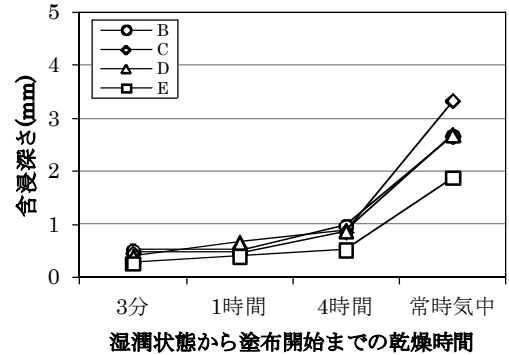


図-3 含浸深さ

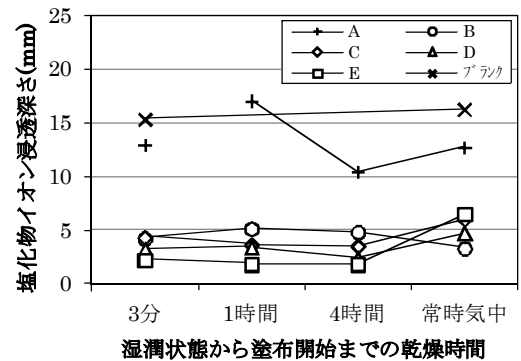


図-4 塩分浸透深さ(浸漬期間 2 ヶ月)

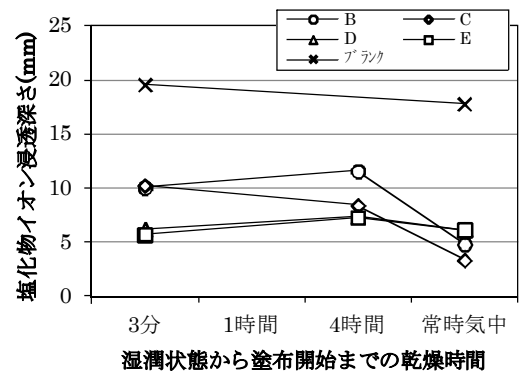


図-5 塩分浸透深さ(浸漬期間 1 年)

たものに関しては 5mm 程度深くなった。これについては、常時気中条件では含浸材の効果が十分に発揮され、1 年浸漬後においても塩化物イオンがほとんど侵入しなかったのに対し、それ以外の条件では塗布時の水分の影響で、含浸材の効果が十分に発揮されず、塩化物イオンが内部に侵入したものと考えられる。

#### 3.2 シリーズ 2

##### (1) 含浸深さ

シリーズ 2 の含浸深さを図-6 に示す。なお、シリーズ 2 における塗布時のモルタル水分率は 6% であった。

塗布開始から浸漬までの時間が 3 分の場合、1 時間以

上の場合よりも含浸深さが小さくなる傾向が認められた。また、1時間以上の場合、常時気中の場合とほぼ同等の含浸深さが確保できた。これは、塗布開始から浸漬までの時間が3分の場合、浸漬時には塗布した含浸材の浸透が完了しておらず、モルタル表面に残っている含浸材が浸漬した塩水に洗い流されたが、塗布開始から浸漬までの時間が1時間の場合、モルタルの表面には含浸材による濡れ色は残っているものの、モルタルの表面に浮いている含浸材はほとんどなく、浸漬した塩水により洗い流されることはなかったことと、モルタル内部に侵入してきた塩水が内部にある含浸材がモルタルに定着することを妨げなかったことなどがその原因として考えられる。また、含浸深さは、シラン系の塗布量が最も少ない含浸材Eで最も小さくなり、塗布量の最も大きい含浸材Cで最大となった。また含浸材Bは水系の含浸材で塗布後乾燥までの時間が最も長かった。よって、その他の含浸材よりも塗布開始から3分の状態ではモルタルの表面に浮いている量が多く、それが洗い流されることで、塗布開始から浸漬までが1時間以上の場合と比べ含浸深さの低下した割合が大きくなったと考えられる。

## (2) 塩化物イオン浸透深さ

シリーズ2の塩化物イオン浸透深さについて、2ヶ月および1年浸漬後の結果を図-7、図-8に示す。なお、1年間の浸漬試験では、シリーズ1と同様に、明確な塩化物イオン浸透抑制効果の認められなかったけい酸ナトリウム系の含浸材Aについては試験を行わなかった。

シラン系を含む含浸材は、いずれの条件においてもブランクに対し、塩化物イオンの浸透抑制効果が認められた。また、含浸深さは塗布開始から浸漬までの時間が1時間以上の場合、ほとんど変わらなかったが、塩化物イオン浸透深さは、浸漬までの時間が長くなるほど塩化物イオン浸透深さは小さくなる傾向が認められた。これについては含浸材の効果が定着する前に浸漬したため、定着していない含浸材がモルタル内部に侵入してきた塩水と混ざり、その一部、またはほとんどが浸漬溶液中に流出したため、モルタル表面に定着した含浸材の成分が少なくなり、含浸材の効果が弱まったことが原因の一つと考えられる。含浸材間の差については、いずれの条件においても含浸材Dが最も塩化物イオン浸透深さが小さかった。これについては、含浸材Dは溶剤系であり、塗布開始後、乾燥までの時間が最も短いため、効果の発現も早かったことが原因の一つとして挙げられる。けい酸ナトリウム系については、シリーズ1と同様に、明確な塩化物イオンの侵入抑制効果は認められなかった。浸漬期間2ヶ月と1年の結果を比較すると、塗布開始から浸漬までの時間が短いほど、浸漬期間が長くなるにつれ塩化物イオン浸透深さも大きくなっている傾向が見受けられた。

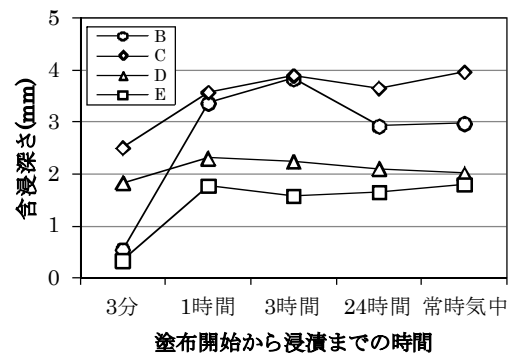


図-6 含浸深さ

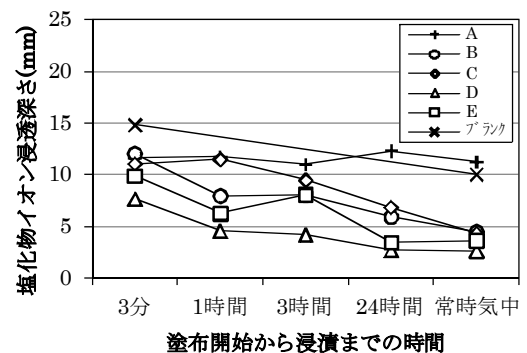


図-7 塩分浸透深さ(浸漬期間2ヶ月)

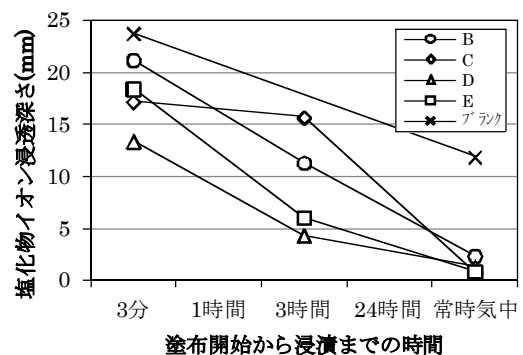


図-8 塩分浸透深さ(浸漬期間1年)

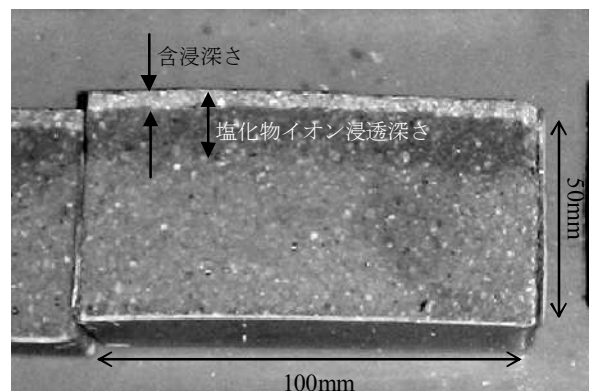


図-9 測定面の一例(浸漬期間1年)

### (3) 割裂面の状況

1年浸漬後の、含浸深さおよび塩化物イオン浸透深さ測定した時の割裂面の一例を図-9に示す。同図より塩化物イオンが含浸層を超えて内部に侵入している様子が確認できる。また、塩化物イオンが一様に浸透していることから、塗布ムラによる弱点部からの局所的な侵入ではないことがわかる。これについては、本実験は常時浸漬条件で塩水と含浸材が塗布されたモルタル表面が常時接触しており、表面の撥水性による効果が十分に見込めない条件であったため塩水が撥水層を越えて内部に進入したと推察されるが、撥水層を越えて塩化物イオンが浸透するメカニズムの詳細については不明である。

#### 3.3 シリーズ3

##### (1) 含浸深さ

シリーズ3の含浸深さを図-10に示す。なお、それぞれの条件における塗布時のモルタル水分は、湿潤状態から含浸材を塗布し塩水に浸漬するまでの時間が6分の場合で8.8%、1時間の場合で7.8%、4時間の場合で7.6%、常時気中の場合で5.9%であった。なお、シリーズ3では含浸材Cについての試験は行っていない。

湿潤状態から含浸材を塗布し塩水に浸漬するまでの時間が長くなるほど、含浸深さは大きくなる傾向が認められた。湿潤状態から塩水に浸漬するまでの時間が6分の場合、撥水部として測定される含浸層は確認できなかった。これについては、シリーズ1、2と同様に、含浸材塗布時のモルタル内部の水分の存在が、含浸材が内部へ浸透することを妨げたこと、塩水浸漬時にモルタルの表面に浮いている含浸材が洗い流されたことがその原因の一つとして考えられる。また、全ての条件において塗布量が最も少ない含浸材Eで含浸深さは最も小さくなった。

##### (2) 塩化物イオン浸透深さ

シリーズ3の塩化物イオン浸透深さについて、2ヶ月および1年浸漬後の結果を図-11、図-12に示す。

湿潤状態で気中に取出し、含浸材を塗布してから塩水に浸漬するまでの時間が短くなるにつれて、塩化物イオンの浸透抑制効果は小さくなる傾向が認められた。シリーズ1、2において、シラン系を含む含浸材は、いずれの条件においてもブランクと比較して、塩化物イオンの浸透抑制効果が認められたものの、ここでは、湿潤状態から塩水浸漬までの時間が6分の場合、いずれの含浸材においても塩化物イオンの浸透抑制効果は認められなかった。また、1時間の場合、一部の含浸材に塩化物イオンの浸入抑制効果が認められ、4時間の場合、すべての含浸材で塩化物イオンの浸透抑制効果が認められた。これについては、シリーズ3は塗布時の内在水分が多く、塗布後の養生時間も短いため、どちらか一方の影響しか受けないシリーズ1、2よりも、含浸材の性能を発揮するための

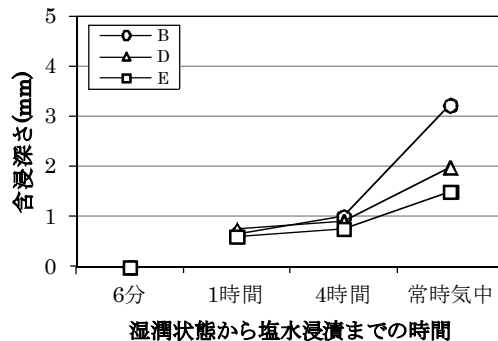


図-10 含浸深さ

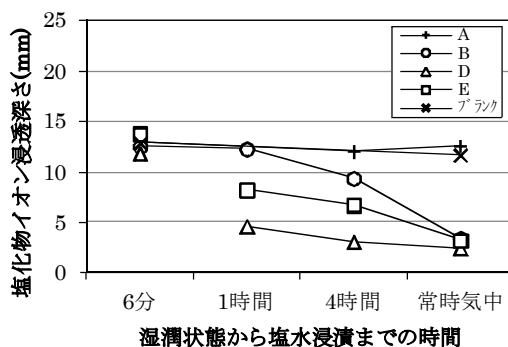


図-11 塩分浸透深さ(浸漬期間 2ヶ月)

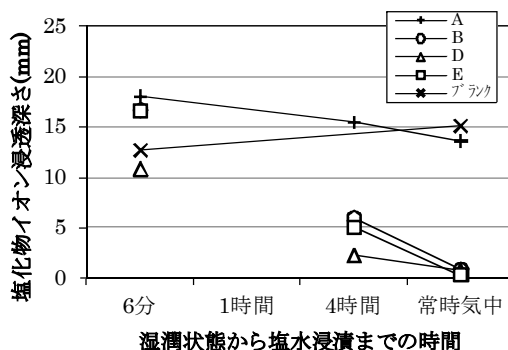


図-12 塩分浸透深さ(浸漬期間 1年)

塗布条件としては厳しい環境であったことが原因と考えられる。つまり湿潤状態から塩水浸漬までの時間が短い場合、モルタルの内在水分により内部への含浸材の浸透が妨げられ、さらに塗布後、表面部に残っている含浸材が浸漬した塩水により洗い流された、または定着していない含浸材がモルタル内部に侵入してきた塩水と混ざり、その一部、またはほとんどが浸漬溶液中に流出したため、モルタル表面に定着した含浸材の成分が少なくなり、含浸材の効果が弱まったことが原因の一つと考えられる。含浸材の種類による差については、シリーズ2と同様に、いずれの条件においても含浸材Dが最も塩化物イオン浸透深さが小さかった。これは、含浸材Dは溶剤系であり、塗布開始後、乾燥までの時間が最も短かったため、効果

の発現も早かったことが原因の一つとして挙げられる。けい酸ナトリウム系については、シリーズ 1, 2 と同様、明確な塩化物イオンの侵入抑制効果は認められなかった。

#### 4. まとめ

本研究では、海洋・港湾環境下におかれるコンクリート構造物への表面含浸材の適用性を把握するために、表面含浸材の塗布時の条件、または塗布後の養生条件、あるいはその両方を変化させ、塩水浸漬による試験を行った。本研究における主な知見を以下にまとめる。

- (1) シラン系含浸材は、塗布対象の含水率が高い状態で塗布した場合、含浸深さが小さくなる。ただし、塗布後の気中養生期間を十分に確保することで、含浸深さは小さくなるものの常時気中条件で塗布を行った場合に近い塩化物イオン浸透抑制効果を期待することができる。
- (2) シラン系含浸材は塗布対象が十分に乾燥している場合、塗布後の養生時間が 1 時間以上確保できれば、塗布後の気中養生期間を十分に確保した場合と同等の深さの含浸層が形成される。一方、塩化物イオン浸透抑制効果については、浸漬期間 2 ヶ月の場合、1 年の場合いずれにおいても塗布後の養生時間が短くなるにつれて小さくなる傾向が認められた。
- (3) 塗布対象の含水率が高い状態で塗布を行い、さらに塗布後、十分な養生を行うための作業時間が確保できない場合には、作業時間が短いほど、含浸深さは小さくなり、塩化物イオン浸透抑制効果も小さくなる。
- (4) 溶剤系のシラン系含浸材は塗布後、乾燥までの時間が短く効果の発現が早いため、本研究のような塗布前や、塗布後短時間で湿潤状態となるような条件下では、その他の含浸材に比べ性能を発揮しやすいという可能性が示唆された。

以上の知見から、干満帯や飛沫帯といった塗布対象の含水率が高く、塗布後の養生期間が確保できない場合であっても、その条件によっては含浸材による塩化物イオン侵入抑制効果のある程度期待できる可能性があることがわかった。また、シラン系の含浸材の中でも溶剤系、

無溶剤系、水系といった種類の違いで塗布後乾燥までの時間は異なる傾向があり、よって効果の発現までの時間も異なり、このような条件下においては、塩化物イオン侵入抑制効果が異なる可能性が示唆された。なお、本実験で言及したモルタル水分については、上水が侵入した場合の水分率である。実際の海洋・港湾環境下では海水が浸入した場合の水分率となるため、上水の場合よりも測定値は高くなる点に注意が必要である。

本研究が海洋・港湾環境下におかれるコンクリート構造物の戦略的維持管理に関する知見の一つとなれば幸いである。

#### 謝辞

本研究において使用した供試体、および実験結果の一部は元東洋大学工学部都市環境デザイン学科ストックマネジメント研究室の井原秀雄氏、土屋貴之氏の尽力によるものである。また、本研究の実施にあたっては、クリスタルコンクリート協会、特に金子洋一氏には多大なる協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 澤田巧, 福手勤, 内藤英晴, 小笠原哲也, 酒井貴洋: 表面含浸材を塗布したコンクリートの塩化物イオン浸透に関する検討, 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, 第 12 巻, pp.459-466, 2012.11
- 2) 細田暁, 今野拓也, 松田芳範, 小林薫: シラン系表面含浸材を用いた最適な表面保護システムのための基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.2, pp.323-334, 2008.5
- 3) 審良善和, 載建国, 加藤絵万, 横田弘: 港湾 RC 構造物に吸水防止材を適用した場合の補修効果について, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.631-636, 2008
- 4) 土木学会: 表面保護工法設計施工指針(案)[工種別マニュアル編], コンクリートライブラリー 119, pp.159-163, 2005.4