

論文 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

審良 善和^{*1}・戴 建国^{*2}・加藤 絵万^{*2}・横田 弘^{*3}

要旨:表面含浸材の港湾 RC 構造物への適用を目的に, タイプの異なる吸水防止材を小型 RC 供試体に塗布し, 実海水を利用した海水シャワー散布と乾燥の乾湿繰り返しによる屋外暴露試験を実施した。その結果, いずれの吸水防止材も塗布なしのものに比べ補修効果は認められた。ただし, ひび割れの発生時期(塗布の前後)によってひび割れ中への塩化物イオンの浸透性は異なり, 吸水防止材の種類によっての防水効果が異なる傾向を示した。また, 鉄筋の防食効果も異なることが明らかとなった。以上のことから, 吸水防止材を塗布することで構造物の延命化効果は得られるが, その効果は吸水防止材の種類によって異なることが予想された。

キーワード: 吸水防止材, 塩害, 防水効果, 遮塩効果, 鉄筋腐食, ひび割れ, 吸水防止層

1. はじめに

港湾施設は, 通常長期間(50年もしくはそれ以上)にわたって, 要求される性能を保持しつつ供用されなければならない。構造物の当初設計における配慮のみならず, 供用開始後の適切な維持管理が不可欠である。港湾施設は, 海水の影響を受ける厳しい環境下であるため, 性能を十分に確保することは容易ではない。したがって, 効率的な維持管理を行うために, 維持管理レベルを定め, 見合うような施設の当初性能の付与および維持管理計画を作成する必要がある¹⁾。RC 構造物の設計・施工時(新規建設時)の塩害に対する耐久性の付与を考える場合, エポキシ鉄筋等の使用による鉄筋の防食や表面保護工による潜伏期の期間延長が RC 構造物の延命化につながる一手法であると考えられる。

ここで, 吸水防止材や表面改質材は, コンクリート表面に塗布, 含浸させることでコンクリート表層部に吸水防止層または改質層などの保護層を形成し, 水や塩化物イオンなどの劣化因子の侵入を抑制する材料である¹⁾。また, 施工性に優れ, 比較的安価に RC 構造物の耐久性向上が望める材料である²⁾。ただし, 吸水防止材は塗布材の改良が進み, 材料の種類によって含浸深さ(保護層の厚さ)などの性能が大きく異なる。また, 表面含浸材による保護層の厚さは, 塗布量や母材コンクリートの塗布時の含水率および劣化の状態などによって異なる³⁾。したがって, 吸水防止材による RC 構造物の補修効果は, ばらつきが生じやすく, 本材料を適用するためには適切な材料選定と適切な施工が必要であると考えられる。

港湾 RC 構造物に性能付与または補修材料として吸水防止材の適用を考えた場合, 塩害に対する抵抗性の高い材料を使用しなければならない。そこで, 本研究では, 塩害環境下に暴露された RC 部材の吸水防止材による補

修効果を評価することを目的にコンクリートに吸水防止材を塗布した場合の水分や塩化物イオンの浸透抑制効果および鉄筋腐食に対する防食効果について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

実験に用いた母材コンクリートは図-1に示す 100×100×150mm の小型 RC 供試体である。供試体中には D10 鉄筋をかぶり 17.5mm および 45mm として内部に 2 本埋設した。また, 試験面となる側面 2 面を残し, 周囲をエポキシで被覆した。母材コンクリートの配合を表-1に示す。W/C は 0.68 である。使用材料は, セメントとして普通ポルトランドセメント(密度 3.14g/cm³)を, 細骨材として静岡県大井川水系陸砂(表乾密度 2.59g/cm³, 吸水率 2.04%)を, 粗骨材として東京都青梅産砂岩碎石(G_{max}20mm, 表乾密度 2.65g/cm³)を用いた。なお, 母材コンクリートは, 型枠脱型後, 材齢 28 日まで水中養生

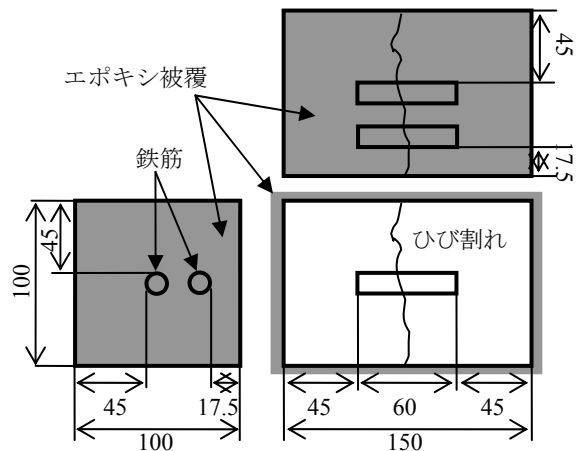


図-1 供試体の概要図

*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 材料研究室 博士(工学) (正会員)
 *2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター 博士(工学) (正会員)
 *3 独立行政法人 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター長 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	AE 減水剤
20	12	68.0	4.0	49.0	165	243	912	970	0.608

表-2 実験に使用した表面含浸材

種類		成分		塗布量
A	シラン系	液体	変性シラン樹脂 35-45% イソプロピルアルコール 45-50% メタノール 5-10%	0.115 kg/m ² × 3回
B	シラン・シロキサン系	液体	シラン・シロキサン系蒸留液 60-100%	0.050 kg/m ² × 2回
C	シラン・シロキサン系	クリーム	トリエトキシシラン 98.7%	0.500 kg/m ² × 1回
D	シラン・シロキサン系	ジェル	アルキルアルコキシシラン 90% エタノール 5% 鋳物系増粘剤 5%	1.000 kg/m ² × 1回
E	珪酸塩系	液体	超微粒子珪酸触媒 30-60% 1-5%	0.140 kg/m ² × 2回

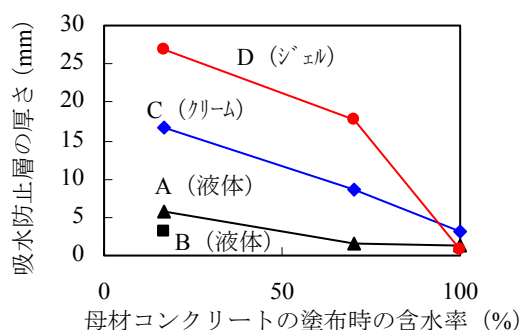


図-2 吸水防止層に及ぼす塗布時
コンクリート含水率の影響

を行い、その後3年程度実験室内にて保管したものである。ただし、中性化深さは約2mm程度と殆ど進行していなかった。この母材コンクリートに表-2に示す吸水防止材および表面改質材を塗布し供試体とした。なお、塗布量は各メーカーの推奨値を規定量として、それぞれの試験面に塗布した。いずれの場合も塗布後は、20℃恒温室内にて2週間養生した。なお、別途、塩化物イオンの浸透を確認するため、ひびわれのない場合のみ試験面以外の側面および底面をエポキシ被覆したφ100×150mmの円柱供試体も同様の方法で作製した。

表面含浸材の種類としては、吸水防止材4種類と表面改質材1種類である。吸水防止材は、液体状のAおよびB、クリーム状のCおよびジェル状のDの4種類である。なお、Eは珪酸塩系の表面改質材である。クリームおよびジェル状の吸水防止材は、液垂れおよび乾燥に強く、薬剤のコンクリート内部への浸透性が高い材料である。図-2に表-2に示した吸水防止材を塗布した場合の吸水防止層の厚さと塗布時のコンクリートの含水率の関係を示す。なお、供試体は真空飽和処理を行った後に80℃室内で乾燥させて目標となる含水率に調整した。また、吸水防止層の深さの測定は、供試体割裂後水を噴霧し、撥水部の深さをノギスで測定した。よって、表面改質材

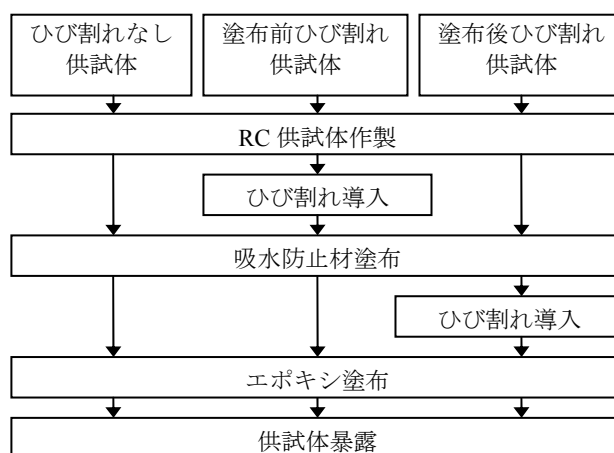


図-3 供試体の種類

(E)の改質深さは、撥水しないため不明である。材料により保護層の深さは大きく異なり、母材コンクリートが乾燥している場合、ジェル系の吸水防止材の浸透深さは約25mm程度となるが、液体状のものは約5mm程度となる。なお、塗布時のコンクリート含水率が大きくなると、吸水防止層は薄くなる傾向を示す。

供試体の作製方法を図-3に示す。供試体は、ひび割れのない場合、塗布前にひび割れが発生している場合および塗布後にひび割れが発生する場合の3種類とした。なお、今回の検討では、吸水防止効果が最大となると考えられる乾燥状態での評価とした。ひび割れは鉄筋と直角方向に目標ひび割れ幅0.15mmとして割裂載荷によって導入した。図-4に各供試体に導入したひび割れ幅を示す。

2.2 暴露試験の概要

暴露試験は図-5に示す海水シャワー暴露試験施設を利用し約1年間実施した。飛沫帯を模擬した屋外暴露試験施設で、シャワー散布を約4時間+乾燥を約8時間(計12時間)を1回として1日2回行う施設である。また、角柱供試体は写真に示すように側面が試験面となるよう

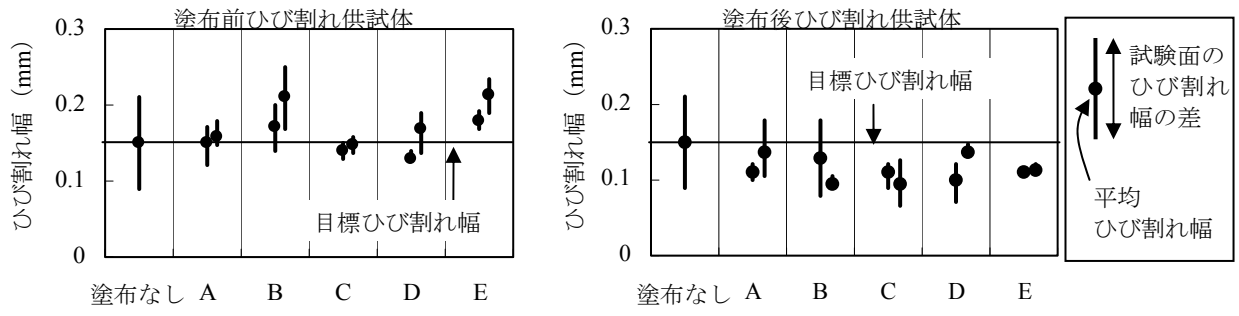


図-4 供試体のひび割れ幅

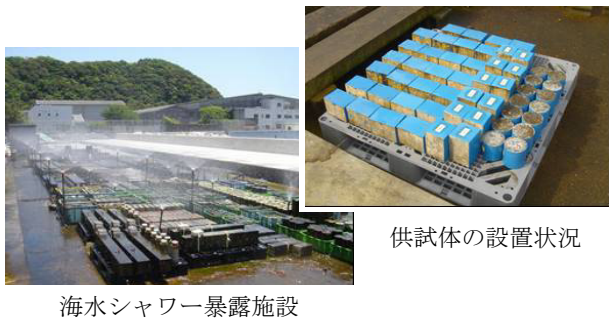


図-5 暴露試験施設

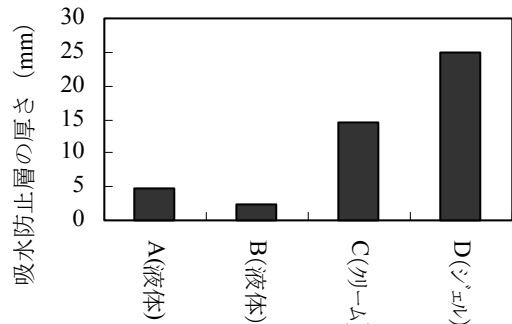


図-6 吸水防止材の撥水層の厚さ

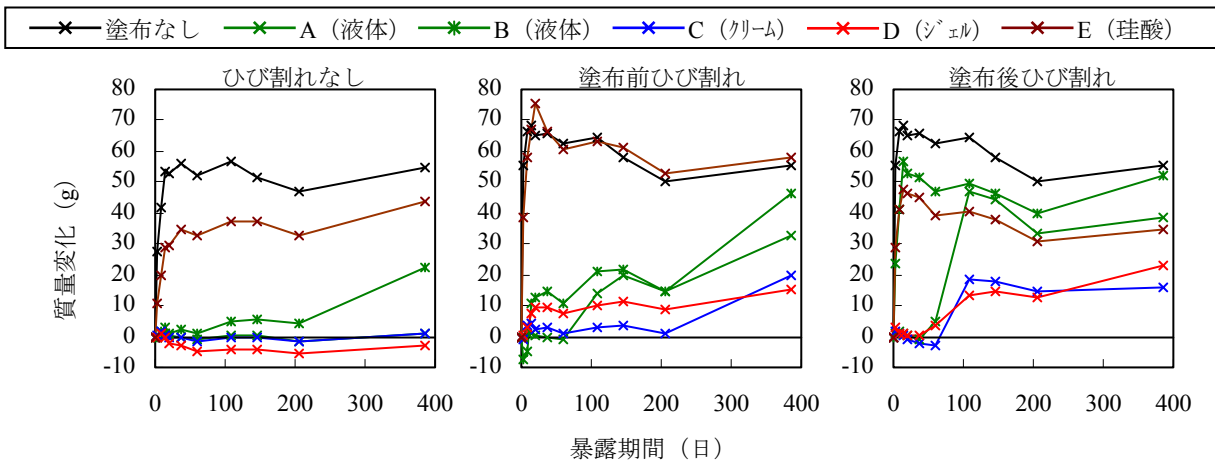


図-7 吸水量の経時変化

に、また、円柱供試体は試験面が上面になるように設置した。なお、海水中の塩化物イオン量は年間を通して2000ppm程度ばらつくが、平均16450ppmの海水である。

3. 結果および考察

3.1 吸水防止材の含浸深さ

暴露387日経過後の吸水防止材の吸水防止層の厚さを図-6に示す。吸水防止層は図-2に示す結果と同様な傾向を示した。また、目視の結果であるが、いずれの吸水防止材の吸水防止層も高い疎水性を示し撥水効果に低下は見られなかった。

3.1 吸水量の変化

暴露開始からの供試体質量の経時変化を図-7に示す。塗布なしおよび表面改質材(E)を塗布した場合において

は、ひび割れの有無に関わらず、暴露初期に吸水に伴う質量増加がみられ、その後、ほぼ定常状態になったと考えられる。ひび割れのある供試体の質量は、若干低下傾向にあったが、これは降雨や暴露温度等が影響したものと思われる。吸水防止材を塗布した供試体においては、ひび割れのないコンクリートの場合、吸水防止材B(液体系)を塗布したものは暴露初期から徐々に吸水する傾向にあった。吸水防止材A(液体)およびC(クリーム)の供試体はほとんど質量が変わらず、また、吸水防止材D(ジェル)の場合は暴露初期で乾燥傾向となった。これは、既往の研究で、供試体を海水中に浸漬した場合においては、徐々に質量増加が見られたことから⁴⁾、海水散布中のコンクリート内部への水分の浸透と乾燥中の水分の蒸発が等しい状態となったためと考えられる。一方、

ひび割れのある場合の吸水量は、塗布の前後に関わらず、ひび割れのない場合より大きくなる傾向を示した。

吸水防止材 A (液体) および B (液体) を使用した場合、塗布前のひび割れに対しては徐々に質量が増加し、塗布後のひび割れでは塗布なしの場合とほぼ同程度となった。よって、ひび割れ幅 0.15mm 程度のひび割れが生じる場合の防水効果は期待できないと思われる。また、吸水防止材 C (クリーム) および D (ジェル) を使用した場合、急激に質量が増加する箇所があり、吸水に関して明確な結果が得られなかったが、質量増加の傾向はつかめるため、ひび割れに対する抵抗性は低いと思われる。

3.2 塩化物イオンの浸透

円柱供試体を用いてコンクリート中の塩化物イオン量の測定を行った。図-8 に全塩化物イオン量分布を示す。吸水防止材 A (液体)、C (クリーム)、D (ジェル) を塗布した場合には、コンクリート内部への拡散は抑制されていた。しかしながら、暴露中に吸水傾向にあった吸水防止材 B (液体) については、塩化物イオンの浸透が認められた。表-3 に得られた結果から求めた見かけの拡散係数 (D_{ap}) および表面塩化物イオン量 (C_0) を示す。なお、吸水防止層の深さが 15mm 以上である吸水防止材 C (クリーム) および D (ジェル) については、改質部 (吸水防止層) の見かけの拡散係数を示し、その他の供試体については、コンクリート中への見かけの拡散係数として算出した。吸水防止材 B (液体) に関しては、塗布なしの供試体の D_{ap} および C_0 に比べ半分程度の値となっている。これは、暴露開始時から吸水傾向にあったため、若干塩化物イオンの移動を抑制しているものの、水分の移動と共に内部に拡散したためであると考えられる。その他の吸水防止材については防水効果も高く、含浸処理された吸水防止層が水分の移動を遮断したため、塩化物イオンの浸透も抑制させたと考えられる。なお、表面改質材 (E) に関しては、塗布なしと同程度であった。

図-9 にひび割れなし供試体の塗布なしの場合および吸水防止材 D (ジェル) を用いたコンクリートの EPMA マッピング像を示す。なお、面分析は供試体中央付近を暴露面を含む約 40mm 角の大きさに切り出し測定した。吸水防止材 D (ジェル) を塗布したコンクリートは、塗布なしの供試体と比べて明らかに塩素の浸透を抑制していることが分かる。また、炭素 (C) のマッピング像からコンクリート表面部に炭素の高濃度領域が確認できる。ただし、骨材中に見られるものはカルサイト脈であると思われる。高濃度領域のフロント部において、塩素や硫黄の濃縮層が確認されなかったことから、これは中性化によるものでなく、吸水防止材が多く含浸した箇所であると推定される。吸水防止材の撥水効果をもたらす疎水性のアルキル基は炭素および水素から構成されているため、特に多く含浸または残留した個所において炭素の高

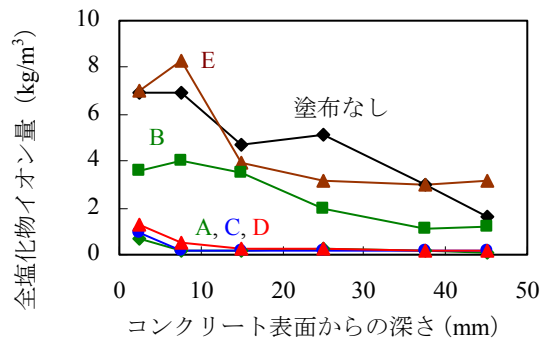


図-8 コンクリート中の全塩化物イオン量分布

表-3 円柱供試体の見かけの拡散係数 (D_{ap}) および表面塩化物イオン量 (C_0)

	D_{ap} (cm ² /y)	C_0 (kg/m ³)
塗布なし	10.24	7.34
A	0.20	0.98
B	6.59	4.31
C	0.09	1.58
D	0.33	1.61
E	7.94	7.59

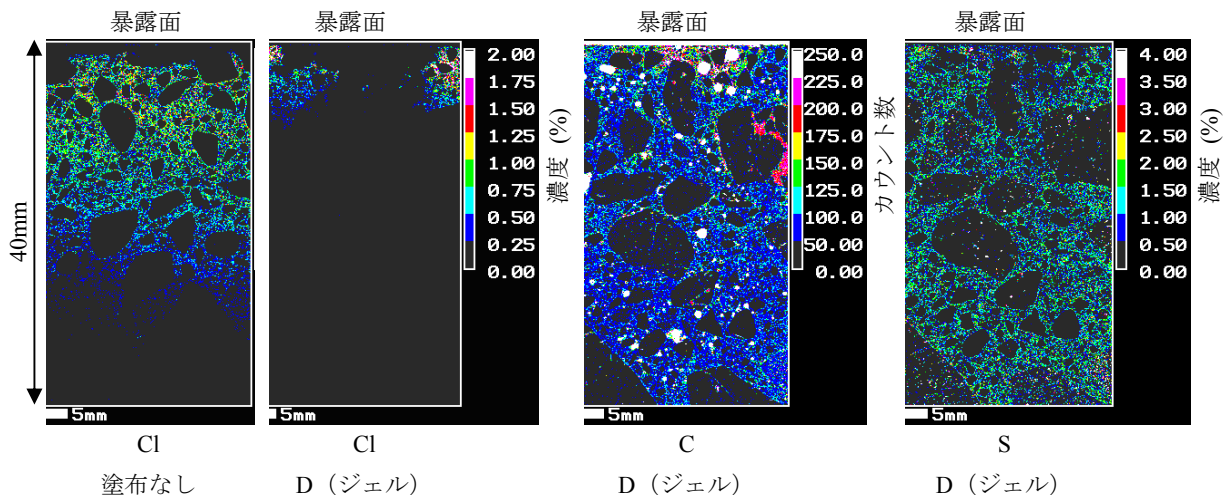


図-9 ひび割れなし供試体の EPMA 像 (Cl)

濃度領域が現れたと考えられる。また、この高濃度領域においては塩化物イオンが確認されず、暴露1年までの結果であるが浸透を完全に遮断していることが確認された。ただし、高濃度領域以外の箇所では塩化物イオンの浸透が認められ、散水によるコンクリート内部の撥水状態の確認では、吸水防止層は均一に見られたが、微視的に見ればばらつきがあり、吸水防止材の含浸状態が塩化物イオンの浸透に影響を及ぼすことが考えられる。図-10にEPMAで得られたコンクリート中の塩素の平均濃度分布を示す。なお、塗布なしの見かけの拡散係数が表-3で示した値と比べ約1/8程度小さくなった。これは、供試体の設置方向の違いによる影響が考えられるが、現時点では不明である。いずれにしても、同一方法で暴露した吸水防止材D(ジェル)と比較すると、 $0.1\text{cm}^2/\text{yr}$ となり、塗布なしのもの比べて1/10程度に低減した。ただし、コンクリート表面から塩化物イオンが拡散し10mm程度まで達していることが分かる。この見かけの拡散係数の減少は、吸水防止層の撥水被膜の影響により母材コンクリートよりも乾燥状態にあるため、塩化物イオンの浸透を抑制したものと考えられる。また、表面塩化物イオン量も小さくなった。これは、EPMA像からも確認できるように、塩分の浸透を完全に遮断している箇所が存在するため、見かけ上表面塩化物イオン量が小さくなったものと思われる。

図-11にひび割れあり供試体の塩素のEPMAマッピング像を示す。塗布なしの場合には、塩化物イオンの浸透が大きく、全面にわたり塩化物イオンが分布している。しかしながら、ひび割れ発生後に吸水防止材D(ジェル)を塗布した供試体においては、ひび割れなしの場合と同様にコンクリート表面から10mm程度まで浸透しているだけで、ひび割れ内部からの塩化物イオンの浸透は認められなかった。この結果から、吸水防止材Dは塗布前のひび割れであれば、ひび割れ幅0.13mmまでのひび割れに対して遮塩効果が高いと考えられる。しかしながら、

塗布後に発生したひび割れに関しては、吸水防止層の範囲には塩化物イオンの浸透が認められないが、その内部に塩化物イオンが確認できる。これは、ひび割れ面を通った塩化物イオンがコンクリート内部に浸透し、内部でイオンの移動が起こったためであると考えられる。また、今回の供試体は側面2面を暴露面としており、図-11より分析された暴露面からの塩化物イオンの浸透は殆ど認められず、他方の暴露面から塩化物イオンが浸透したものであると思われる。今回の結果から、コンクリート表面のひび割れ幅0.075mm程度であれば塩化物イオンの浸透は遮断し、0.125mm程度となると塩化物イオンは浸透する。少なくとも塗布後のひび割れ幅0.075mm程度までは吸水防止材による遮塩効果が得られると考えられる。

3.3 鉄筋腐食

図-12に鉄筋の腐食面積率を示す。ひび割れなし供試体の場合は、かぶり17.5mmにおいて塩化物イオンの浸透が認められた塗布なし、吸水防止材B(液体)および表面改質材E(液体)において鉄筋腐食が認められた。塗布前のひび割れの場合、吸水防止材C(クリーム)およびD(ジェル)を塗布した供試体は、腐食が認められず防食効果は高いと思われる。しかしながら、これら以外の供試体には腐食が認められたことから、吸水防止層の薄い吸水防止材を用いた場合には、ひび割れに対する

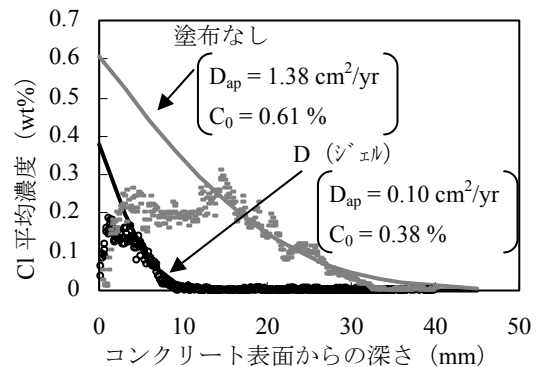


図-10 コンクリート中の塩素の平均濃度分布

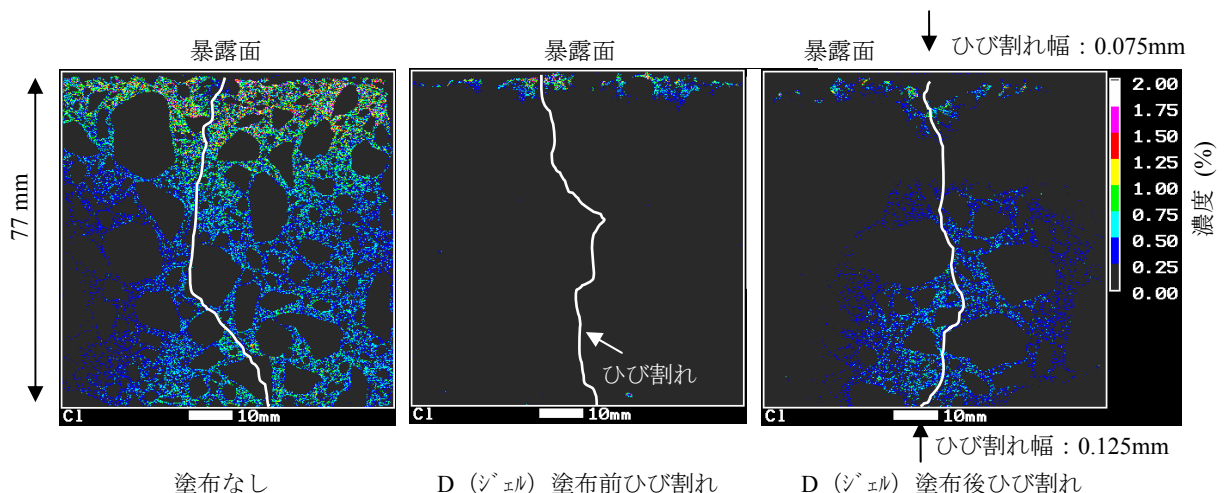


図-11 ひび割れあり供試体のEPMA像 (Cl)

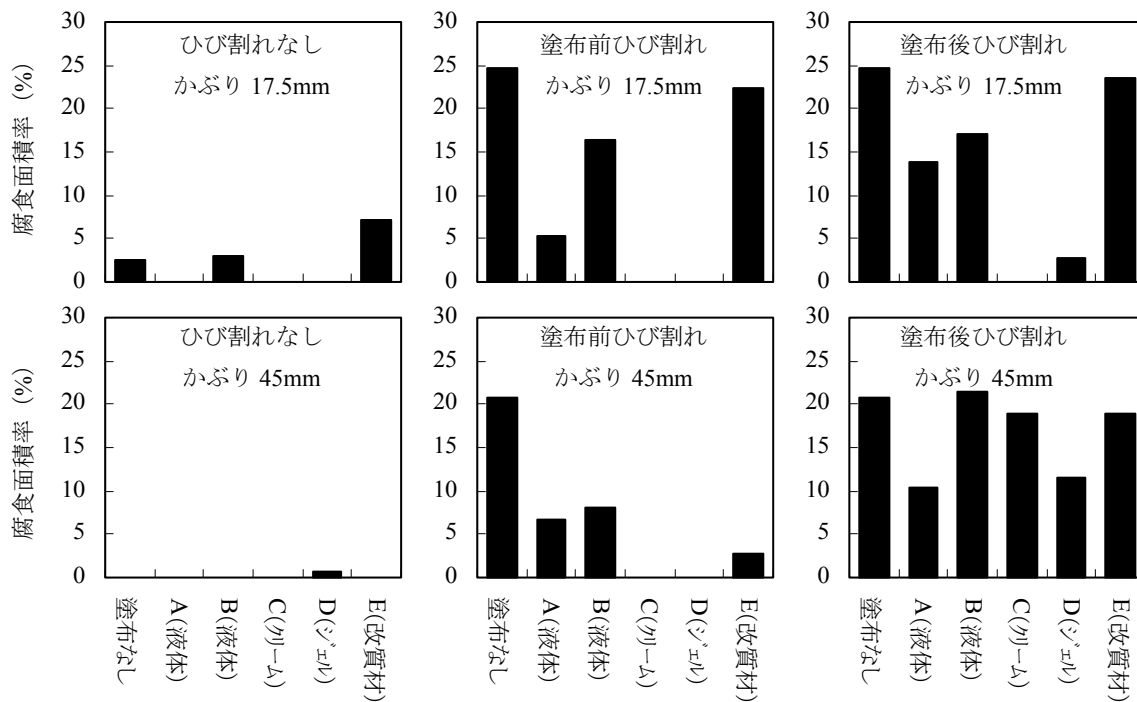


図-12 鉄筋腐食面積率

抵抗性は低いと考えられる。塗布後のひび割れに関しては、いずれの供試体も腐食が認められ、ひび割れを許容する構造物への吸水防止材の適用は難しいと考えられる。なお、塗布後ひび割れ供試体、かぶり 17.5mm において、吸水防止材 C (クリーム) および D (ジェル) を用いたものは腐食が認められなかった。これは、鉄筋が吸水防止層内に位置し、塩化物イオンの浸透を遮断していたためであると思われる。

4. まとめ

本研究は、港湾 RC 部材に吸水防止材を塗布した場合の塩害に対する補修効果を把握することを目的に実験的検討を行った。得られた結果について以下に示す。

- ひび割れのないコンクリートに吸水防止材を塗布した場合、吸水防止材 B (液体) を除いて、防水性および遮塩性は高く、吸水防止材 D (ジェル) を塗布した場合には、見かけの拡散係数が $0.1\text{cm}^2/\text{yr}$ まで低減した。このことから、塩害に対しての構造物の補修効果は高いと考えられる。
- 塗布前のひび割れ内部に関しては、吸水防止材 D (ジェル) を用いた場合、塩化物イオンの侵入は遮断される。また、吸水防止材 C (クリーム) および D (ジェル) を使用した場合には、鉄筋は腐食しなかった。このことから、高含浸タイプの吸水防止材を使用した場合には、塗布前のひび割れについても補修効果は認められる。しかしながら、吸水防止層の薄い液体系の吸水防止材を用いた場合は、その効果は低いと考えられる。

- 塗布後にひび割れが生じる場合には、ひび割れ部から侵入する塩化物イオンの影響で、いずれの吸水防止材を使用した場合も鉄筋は腐食した。したがって、塩害に対する補修効果は低いと考えられる。
- 表面改質材を使用した場合には、ひび割れの有無に関わらず、塗布なしのコンクリートと同様な結果となり、補修効果はあまり認められなかった。

謝辞

本研究の遂行にあたり材料提供を頂いた関係各社に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (財) 沿岸技術研究センター：港湾施設の維持管理技術マニュアル，沿岸技術ライブラリー，No.26，2007.10
- 安田和弘ほか：シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材によるコンクリートの耐久性向上に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.705-710，2002.6
- 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告，2006.4
- 審良善和ほか：コンクリートの含水状態が表面含浸材の補修性能に与える影響について，コンクリート工学年次論文集，
- 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002.