

論文 シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修が水分・塩化物イオンの浸透に及ぼす影響

木船 琢馬*1・清水友弥*2・白井朱莉*2・大原 涼平*3

要旨：本研究では、シラン系表面含浸材を用いた補修における養生期間、塗布条件、ひび割れ幅および塗布方向がコンクリートの吸水および塩化物イオン浸透の抑制におよぼす影響について塩水吸水実験により検討した。その結果、ひび割れのない試験体では塗布前の養生期間および乾燥期間にかかわらず吸水および塩化物イオンの浸透が抑制されること、ひび割れ幅 0.1mm 前後では塗布方向にかかわらず吸水および塩化物イオンの浸透を抑制できることが確認された。ひび割れ幅が 0.5mm 前後ではシラン系表面含浸材の吸水および塩化物イオン浸透抑制効果が十分に発揮されない可能性が示唆された。

キーワード：シラン系表面含浸材、補修、塩害、ひび割れ、吸水浸透、塩化物イオン浸透

1. はじめに

コンクリート構造物を劣化させる要因のひとつに塩化物イオンの侵入による塩害があり、海沿いの地域や凍結防止剤が散布される寒冷地では塩害による鉄筋の腐食が懸念される。コンクリート内部への塩化物イオンの浸透メカニズムとして、海水などの塩化物イオンを含む水分の吸水に伴う侵入とコンクリート細孔中の液状水に含まれる塩化物イオンの濃度拡散が想定されている¹⁾。このことからコンクリート構造物の耐久性の維持、向上を図る上でコンクリート内部への水分浸透の抑制は重要であると考えられる。

シラン系表面含浸材を用いた表面含浸工法は、コンクリート表層の含浸部を疎水化することで撥水作用によりコンクリート内部への水分浸透を抑制する。シラン系表面含浸材の透湿度、中性化や塩化物イオンの浸透に対する抵抗性などの基本的な性能評価方法は土木学会 表面保護工法設計施工指針(案)²⁾により定められているが、実際の部材での補修効果は現場でのコンクリートの水分状態や環境条件によって変化すると考えられる。例えば、細田らは、シラン系表面含浸材塗布時の材齢や水分供給条件が吸水抑制効果に及ぼす影響について、若材齢での塗布が吸水抑制効果を高めること、含浸深さは材齢が高い水準の方が大きくなることなどを報告している³⁾。

また、浸透性の高いシラン系表面含浸材はひび割れ内部への浸透も期待できるため、ひび割れ幅が 0.2mm 以下の微細なひび割れへの適用が推奨されている^{2), 4)}。シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修に関して、審良らは高含浸タイプではコンクリート表面およびひび割れ部から部材内部への塩化物イオンの浸透を抑制する効果が得られることを塩害環境を模した暴露実験より報告して

いる⁵⁾。著者らはひび割れ内部までシラン系表面含浸材が含浸している場合では吸水抑制効果が得られることを室内実験、屋外暴露実験および再現計算より報告している^{6), 7)}。これらの既往研究より、ひび割れを有する部材の補修にシラン系表面含浸材を用いることで水分および塩化物イオンの浸透を抑制できることがわかる。しかし、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修時の部材の材齢、塗布前後のコンクリート表面の水分状態、塗布量や塗布方向などが水分および塩化物イオンの浸透抑制に及ぼす影響に関する検討は少なく、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修の最適化およびその補修効果の定量化は難しい。これらの知見の蓄積はシラン系表面含浸材の補修効果の明確化に必要であり、吸水抑制効果や塩化物イオン浸透抑制効果の定量的な評価手法の構築につながると考えられる。

本研究ではシラン系表面含浸材をコンクリートの表面保護およびひび割れ補修に用いた場合の水分および塩化物イオンの浸透抑制効果を把握するとともに、材齢、塗布前後の乾燥の有無や塗布方向が及ぼす影響を実験的に検討した。

2. 実験の概要

2.1 実験水準 シリーズ 1 (養生期間・塗布条件)

(1) 養生・乾燥条件

表-1 に実験シリーズ 1 の水準を示す。また、表-2 にコンクリートの配合を示す。試験体は、無筋の 100mm×100mm×100mm の立方体の供試体を作製し、材齢 5 日で脱型後、7 日間の封緘養生を行った試験体(水準名: 7d)と 28 日間封緘養生を行った試験体(水準名: 28d)を用意した。養生後、塗布面を紙やすりで研磨した後に表面

*1 長野工業高等専門学校 専攻科 生産環境システム専攻 (学生会員)

*2 長野工業高等専門学校 環境都市工学科

*3 長野工業高等専門学校 工学科 都市デザイン系. 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 実験シリーズ1の水準

吸水期間	水準名	養生期間	乾燥期間	塗布量 (ml/m ²)	本数	塗布前水分値 (%)	
14日	7D-N	7日	-	なし	3	-	
	7D d0-12		0日	200	3	4.7	
	7D d0-14		400	3			
	7D d0-16		600	3			
	7D d7-12		7日	200	3	2.0	
	7D d7-14		400	3			
	7D d7-16	600	3				
	28D-N	28日	-	なし	3	-	
	28D d0-12		0日	200	3	3.5	
	28D d0-14		400	3			
	28D d0-16		600	3			
	28D d7-12		7日	200	3	1.8	
	28D d7-14		400	3			
	28D d7-16	600	3				
	63日	7D-N	7日	-	なし	3	-
		7D d0-12		0日	200	3	4.7
		7D d0-14		400	3		
		7D d0-16		600	3		
7D d7-12		7日		200	3	2.0	
7D d7-14		400		3			
7D d7-16		600	3				
28D-N		28日	-	なし	3	-	
28D d0-12			0日	200	3	3.5	
28D d0-14			400	3			
28D d0-16			600	3			
28D d7-12			7日	200	3	1.8	
28D d7-14			400	3			
28D d7-16		600	3				

塗布前水分値は電気抵抗式水分計を用いて測定

表-2 示方配合

W/C [%]	s/a [%]	Air [%]	単位量 [kg/m ³]					Ad [g/m ³]
			W	C	S	G	Ad	
50	43.8	5.0	168	336	769	990	3.36	

セメント：普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm³)
 細骨材：千曲川産砂(表乾密度 2.60g/cm³)
 粗骨材：千曲川産砂(表乾密度 2.61g/cm³)
 混和剤：AE減水剤 標準形1種

の付着物を取り除いた。その後、表面含浸材無塗布の試験体(水準名：N)、表面含浸材塗布前の乾燥期間を設けない試験体(水準名：D0)と養生後室内で7日間乾燥後に塗布した試験体(水準名：D7)の3水準を設けた。

(2) 塗布条件

シラン系表面含浸材はアルキルアルコキシシランが主成分のものを使用した。塗布量はメーカー規定の標準使用量600ml/m²(水準名：I6)、規定量よりも少ない400ml/m²(水準名：I4)、200ml/m²(水準名：I2)とした。塗布面はコンクリート打ち込み時の型枠と接する側面とした。塗布後、試験体寸法が100mm×100mm×50mmとなるよう湿式コンクリートカッターを用いて図-1のように試

表-3 実験シリーズ2の水準

吸水期間	水準名	含浸方向	個数	ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ深さ (mm)
14日	T-w0	上面 (鉛直下)	6	-	-
	T-w0.1		3	0.12	66
	T-w0.5		3	0.52	86
	S-w0	側面 (水平)	6	-	-
	S-w0.1		3	0.12	73
	S-w0.5		3	0.52	88
	B-w0	底面 (鉛直上)	6	-	-
	B-w0.1		3	0.13	74
	B-w0.5		3	0.51	88
	N-w0	無塗布	6	-	-
	N-w0.1		3	0.12	0.7
	N-w0.5		3	0.52	87
63日	T-w0	上面 (鉛直下)	6	-	-
	T-w0.1		3	0.12	66
	T-w0.5		3	0.52	86
	S-w0	側面 (水平)	6	-	-
	S-w0.1		3	0.12	73
	S-w0.5		3	0.52	88
	B-w0	底面 (鉛直上)	6	-	-
	B-w0.1		3	0.13	74
	B-w0.5		3	0.51	88
	N-w0	無塗布	6	-	-
	N-w0.1		3	0.12	70
	N-w0.5		3	0.52	87

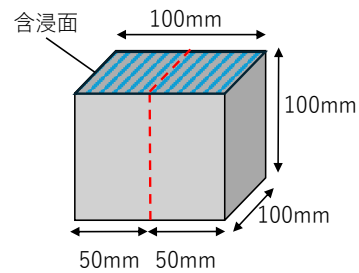


図-1 試験体切断位置(実験シリーズ1)

験体を切断し、切断面での表面含浸材の含浸深さをJSCE-K571-2018の含浸深さ試験に準拠して目視により測定した後、表面含浸材塗布面以外の面を防水テープにより防水処理した。各試験体は吸水実験開始3ヶ月前から屋内(平均温度20℃、相対湿度54%)で乾燥させた。

2.2 実験水準 シリーズ2(ひび割れ・塗布方向)

(1) 打設・養生

実験シリーズ2の水準を表-3に示す。コンクリートの配合は実験シリーズ1と同一である。試験体は、φ6の丸鋼を埋め込んだ100mm×100mm×400mmの角柱供試験体を作製し、材齢8日で脱型後、41日間の封緘養生を行った。養生後、角柱供試験体のコンクリート打ち込み時の型枠と接する側面の中央部分に一本の曲げひび割れを3点曲げ載荷により導入した。ひび割れ幅はデジタルマイクروسコープを用いて測定し、ひび割れが生じた面の3ヶ所の除荷後の平均値が0.1mm、0.5mm前後となるまで載荷と除荷を繰り返した。ひび割れ幅は、ひび割れない試験体(水準名：w0)、0.1mm程度(水準名：w0.1)、0.5mm程度のひび割れを有する試験体(水準名：w0.5)の3水準とした。ひび割れ深さは、角柱供試験体の側面の

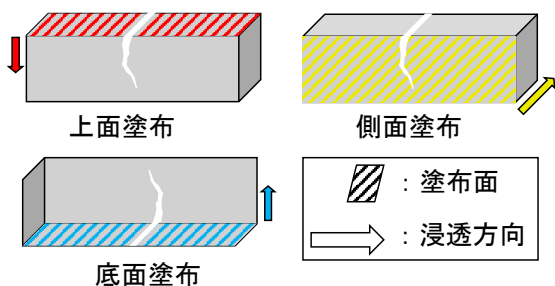


図-2 含浸材塗布方向(実験シリーズ2)

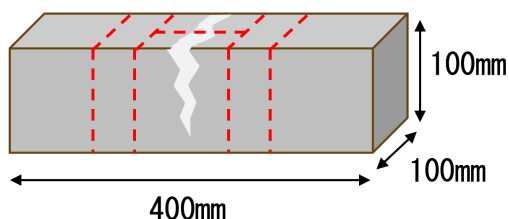


図-3 切断箇所(実験シリーズ2)

2ヶ所の平均値とし、ノギスを用いてひび割れ導入時の除荷後に測定した。表-3に示すひび割れ幅およびひび割れ深さは複数個の試験体の平均値である。

(2) 塗布条件

表面含浸材の塗布は、室内で8日間乾燥後、塗布面を紙やすりで研磨することで表面の付着物を取り除き、実験シリーズ1と同一のシラン系表面含浸材をメーカー規定の標準使用量(600ml/m²)になるまで刷毛で塗布した。表面含浸材の塗布方向を図-2に示す。上面に塗布した試験体(水準名:T)、側面に塗布した試験体(水準名:S)、底面に塗布した試験体(水準名:B)、無塗布の試験体(水準名:N)とした。

表面含浸材塗布後、試験体寸法が100mm×100mm×50mmとなるよう湿式コンクリートカッターを用いて図-3のように切断し、ひび割れを有する試験体(水準名:w0.1,w0.5)とひび割れのない試験体(水準名:w0)を2体ずつ取得した。表面含浸材の塗布面(ひび割れ導入面)以外の5面に防水テープを用いた防水処理を施した。各試験体は吸水実験開始3ヶ月前から屋内(平均温度20℃、相対湿度54%)で乾燥させた。

2.3 塩水吸水実験方法

塩水吸水実験の概略図を図-4に示す。実験時は表面含浸材塗布面を下にし、塗布面から吸水スポンジを通して3%NaCl水溶液を吸水させ、定期的に試験体の質量を測定した。吸水期間の平均温度は27℃、相対湿度68%であった。

2.4 塩化物イオン量分析

(1) 試料の採取

塩水吸水実験後、塩分分析に使用するための試料を採取した。試料の採取位置を図-5に示す。試料の採取はコンクリートハンマードリルを使用し、各地点直径10mm

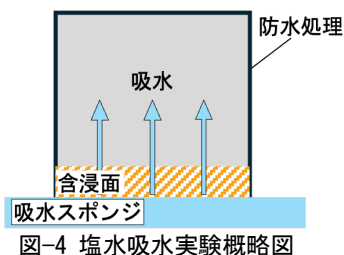


図-4 塩水吸水実験概略図

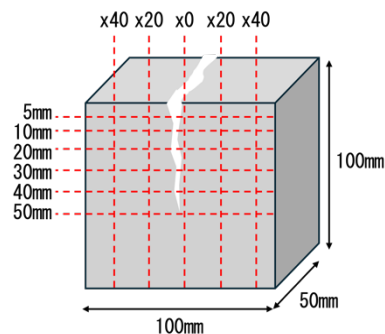


図-5 塩分分析試料採取位置

で、ひび割れを有する試験体はひび割れが位置する試験体中央で1カ所、中央から左右に20mm間隔で2カ所ずつの計5カ所を採取し、深さ方向には試験体表面から5、10、20、30、40、50mmまでの6区間で採取した。ひび割れのない試験体は試験体中央とその左右20mmの計3カ所から採取し、深さ方向はひび割れを有する試験体と同じである。

(2) 試料の分析

採取した試料の塩化物イオン量は全塩分迅速測定法(中研コンサルタント製SALMATE-100/H)により測定し、3回の測定の平均値とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 吸水量の比較

(1) 実験シリーズ1(養生期間・塗布条件)

図-6に吸水期間63日の吸水期間中の単位体積あたりの質量変化を示す。単位体積あたりの質量変化は吸水開始時からの質量の変化量を試験体の体積で除した値である。各水準の質量変化は複数の試験体の平均値を示す。

図-6より、シラン系表面含浸材を塗布した試験体は、塗布前の養生期間の長短および塗布前の乾燥期間の有無にかかわらず無塗布の試験体に比べて吸水量が低下する傾向を全体的に示した。しかし、時間経過とともに質量が漸増していることから、長期間吸水時の撥水作用による吸水抑制は吸水浸透の低減であることが示唆される。また、シラン系表面含浸材の塗布量が少なくなると吸水抑制効果が減少する傾向を示した。

(2) 実験シリーズ2(ひび割れ幅・塗布方向)

図-7に吸水期間63日の含浸方向ごとの吸水期間中の単位体積あたりの質量変化を示す。無塗布のNシリーズ

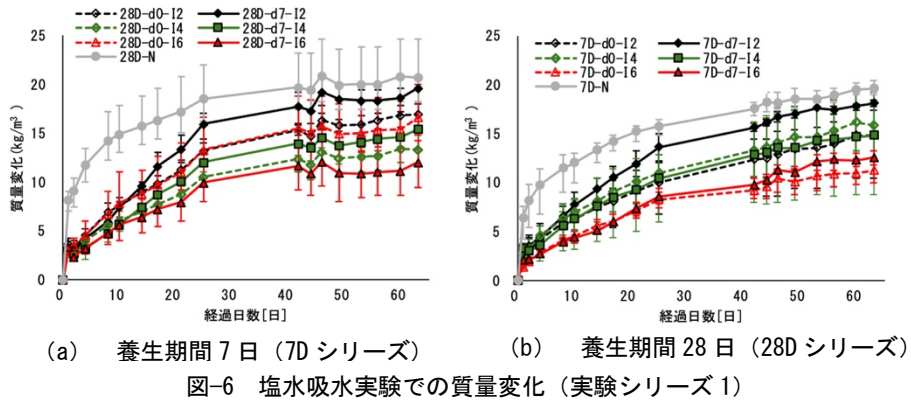


図-6 塩水吸水実験での質量変化 (実験シリーズ 1)

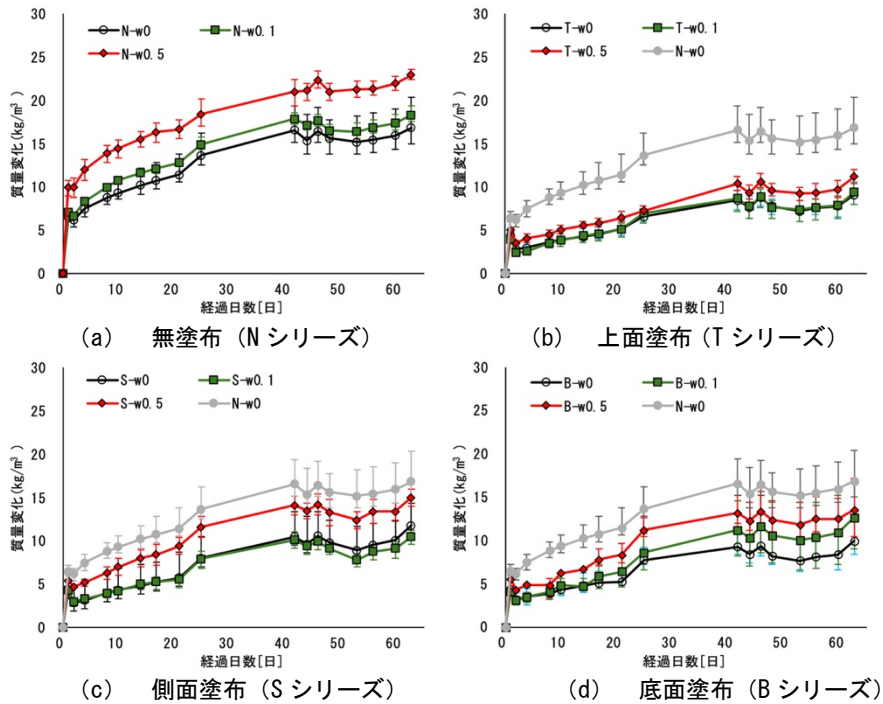


図-7 塩水吸水実験での質量変化 (実験シリーズ 2・吸水期間 63 日)

では、ひび割れ幅が大きくなるほど質量変化量が増加し、ひび割れが吸水を促進していることがわかる。シラン系表面含浸材を塗布した T, S, B シリーズでは、ひび割れの無い w0 において含浸方向に関わらず吸水は抑制されることが確認された。微細なひび割れを有する w0.1 においても同様に吸水は抑制されることが確認された。しかし、底面に塗布した試験体では吸水開始から 20 日経過以降の質量が増加する傾向を示した。これは、塗布面の方向に基づく含浸材の含浸深さの差異による影響が考えられる。より大きなひび割れ幅である w0.5 では側面および底面に塗布した試験体において質量が増加する傾向が確認された。著者らの検討⁸⁾において塗布方向の違いによりひび割れ先端までシラン系表面含浸材が含浸していないことを確認していることから、シラン系表面含浸材をひび割れ補修に用いる場合ではひび割れ幅およびひび割れ内部の含浸状況が吸水抑制効果に影響をおよぼすことが示唆される。

3.2 塩化物イオン量の分布

(1) 実験シリーズ 1 (養生期間・塗布条件)

図-8 に吸水期間および塗布前の養生期間ごとの塩化物イオン量の分布を示す。塩化物イオン量の値は試料採取区間ごとの最深部で示す。また、全ての水準において各水準 1 体の測定結果を示している。

図-8 より、無塗布の試験体は塗布前の養生期間および吸水期間にかかわらずコンクリート表面から 10mm 前後まで塩化物イオンが浸透していることが確認できる。シラン系表面含浸材を塗布した試験体はいずれの塗布前の養生期間および吸水期間においても、塗布前の乾燥期間の有無および塗布量の大小にかかわらず塩化物イオンの浸透を表面から 5mm 程度の表層で抑制していることがわかる。したがって、コンクリート表面にひび割れがない場合では、塗布前の養生期間、乾燥期間や表面含浸材の塗布量が塩化物イオンの浸透抑制効果におよぼす影響

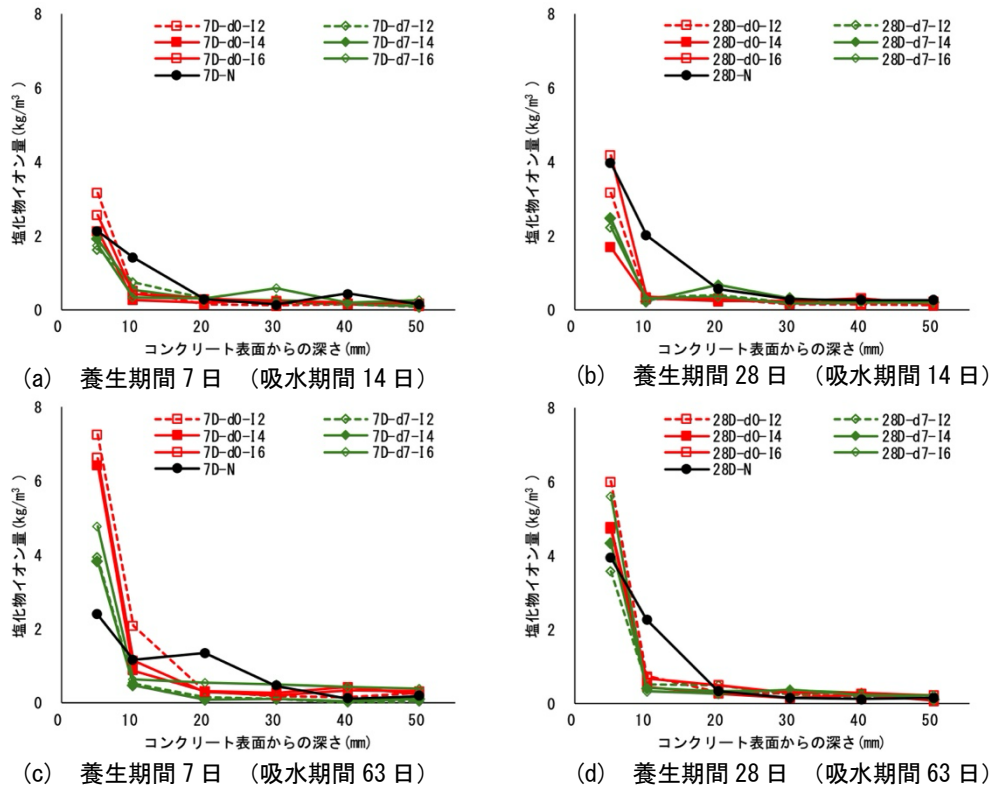


図-8 塩化物イオン量の分布(実験シリーズ1・吸水期間14日・63日)

は小さいと考えられる。また、シラン系表面含浸材を塗布した試験体は吸水期間が長くなると表面から5mmまでの区間での塩化物イオン量が増加したことから、図-6で示された時間経過とともに漸増した質量(水分)は表面付近にとどまることが示唆された。

(2) 実験シリーズ2(ひび割れ幅・塗布方向)

図-9に吸水期間63日の塗布方向ごとの塩化物イオン量の分布を示す。凡例は、ひび割れが位置する試験体中央部をx0、中央部から左右に20mmの点をx20、40mmの点をx40と称し、x20とx40は左右2地点の平均値を示す。また、全ての水準において各水準1体の測定結果を示している。

図-9(a)より、無塗布の水準におけるひび割れを有するw0.1およびw0.5シリーズのx40はひび割れの無いw0の塩化物イオン量の分布と概ね一致する。x20およびひび割れが位置するx0は塩化物イオン量がひび割れの無いw0と比べて増加傾向を示す。これは、塩水が試験体表面からひび割れ内部へ吸水され、ひび割れから試験体内部へ浸透したことを示している。

シラン系表面含浸材の塗布方向が異なるT, S, Bシリーズでは、ひび割れを有するw0.1およびw0.5シリーズのx20, x40の塩化物イオン量の分布は塗布方向にかかわらずひび割れの無いw0と同様の傾向であり、塩化物イオンの浸透が抑制されている。全ての塗布方向のw0.1-x0においてもひび割れの無いw0と同様に塩化物イオン

の浸透が抑制されている。この結果から、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修の塩分浸透抑制効果が確認された。一方、w0.5-x0についてはコンクリート表面から深さ30mm前後の区間まで塩化物イオンの浸透が確認された。図-7に示す吸水期間中の全ての塗布方向のw0.5シリーズの質量増加の傾向は図-9で確認されたひび割れ幅の増加に伴うひび割れ位置での塩化物イオン量の増加を支持するものである。これらの結果から、塗布方向にかかわらずひび割れ幅0.5mm前後の比較的大きなひび割れを有するコンクリート表面に対するシラン系表面含浸材の水分および塩化物イオンの浸透抑制効果は限定的であることが明らかとなった。

4. まとめ

シラン系表面含浸材の塗布条件やひび割れ幅の影響に関する実験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 1) ひび割れの無いコンクリート表面にシラン系表面含浸材を塗布した場合、塗布前の養生期間の長短および塗布前の乾燥期間の有無にかかわらず無塗布の試験体に比べて吸水および塩化物イオンの浸透を抑制できることが確認された。
- 2) シラン系表面含浸材をひび割れ補修に用いた場合、ひび割れ幅0.1mm前後では塗布方向にかかわらず無塗布の試験体に比べて吸水および塩化物イオンの浸透を抑制できることが確認された。

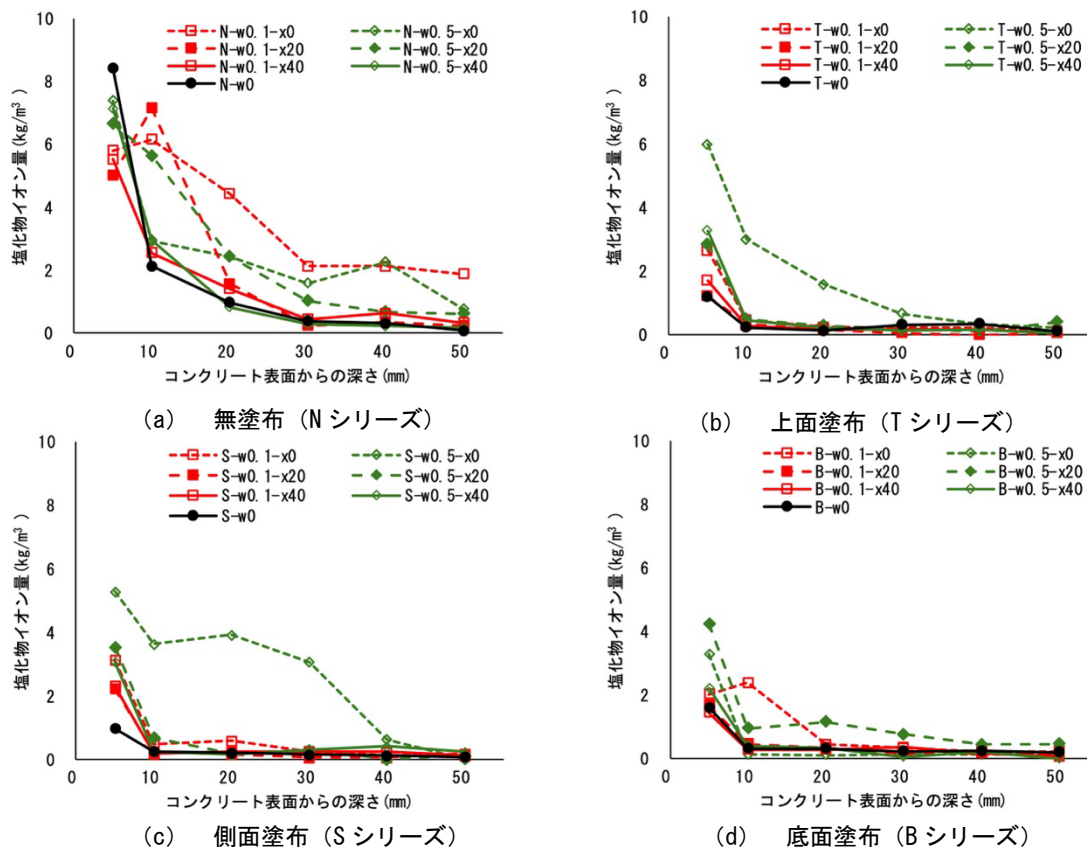


図-9 塩化物イオン量の分布 (実験シリーズ2・吸水期間 63 日)

3) シラン系表面含浸材をひび割れ補修に用いた場合、ひび割れ幅およびひび割れ内部の含浸状況が吸水抑制効果に影響をおよぼすことが明らかとなった。特に、ひび割れ幅が 0.5mm 前後ではシラン系表面含浸材の塩化物イオン浸透抑制効果が十分に発揮されない可能性が示唆された。

謝辞

本研究は、令和 6 年度上田記念財団若手研究者第 15 期社会資本構造の長寿命化に関する研究「水分・塩分移動解析によるシラン系表面含浸材を用いた補修の定量的評価手法の構築」の一環として行ったものである。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 天沼邦一, 榊田佳寛, 吉崎芳郎, 御所窪邦男: コンクリートの乾湿にともなう塩化物の移動について, コンクリート工学年次論文集 vol.14 No.1, pp.787~792, 1992
- 2) 土木学会: コンクリートライブラリー119 表面保護工法設計施工指針 (案), pp.55-67, 2005
- 3) 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

- 4) 日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針 2022, 2022
- 5) 審良 善和, 戴 建国, 加藤 絵万, 横田 弘: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.631-636, 2008
- 6) 大原涼平, 木船琢馬, 下村匠: ひび割れを有するコンクリートに対するシラン系表面含浸材の吸水抑制効果の持続性, コンクリート工学会年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1528-1533, 2023
- 7) 大原涼平, 下村匠: シラン系表面含浸材によりひび割れ補修を行ったコンクリートの長期乾湿挙動, 土木学会論文集, Vol.79, No.11, pp.1-13, 2023
- 8) 廣田龍之介, 大原涼平: シラン系表面含浸材の含浸方向がひび割れを有するコンクリートの吸水に及ぼす影響, 土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, V397, 2024