

論文 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

大原 涼平*1・木船 琢馬*2・下村 匠*3

要旨：ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布した場合の吸水抑制効果およびその持続性について検討した。ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布後、日射および降雨の影響が異なる屋外環境に1年以上暴露した試験体を用いて吸水実験を行った。その結果、ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布することで無塗布のひび割れの無いコンクリートと比べて吸水が抑制されること、シラン系表面含浸材塗布後に屋外に1年以上暴露された試験体の吸水抑制効果は塗布直後と同等に維持されていることが確認された。

キーワード：ひび割れ, シラン系表面含浸材, 吸水, 持続性

1. はじめに

コンクリート表面を保護し、水分浸透を抑制する工法として、コンクリート表面に撥水性や緻密化を施す表面含浸工法がある¹⁾。低粘度の表面含浸材は含浸性が高く、補修材によるひび割れ空間の閉塞が困難なひび割れ幅0.2mm以下の微細なひび割れへの適用も期待されている²⁾。実構造物のひび割れ補修と表面保護の両立を目的に表面含浸材を使用する場合、表面含浸材の水分浸透抑制効果に及ぼすひび割れの影響と水分浸透抑制効果の持続性について検討する必要がある。

含浸部に撥水性を付与するシラン系表面含浸材に注目すると、ひび割れの無いコンクリートに関する屋外環境や耐候性試験機での暴露試験より表面含浸材の種類に応じた水分浸透や塩分浸透の抑制効果に関して多くの知見が蓄積されている^(例えば3-9)。ひび割れ補修を目的とした研究報告では、透水・吸水に関する実験¹⁰⁻¹²⁾や沿岸部での暴露を想定した塩分浸透抑制に関する実験¹³⁾がある。しかし、ひび割れを有するコンクリートの屋外暴露後の吸水抑制効果に関する検討は少なく、ひび割れ補修および表面保護にシラン系表面含浸材を使用した場合の水分

浸透抑制効果およびその効果の持続性は不明確である。

本研究では、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による吸水抑制効果およびその効果の持続性の把握を目的に、ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布後、屋外環境に1年以上暴露した試験体を用いて吸水実験を行った。

2. 吸水実験の概要

2.1 吸水試験体の作製

吸水試験体作製の状況を図-1に、吸水試験体の水準を表-1に、示方配合を表-2に示す。

1本の丸鋼(φ6)を埋め込んだ10×10×40cmの角柱供試体を打設し、材齢1日で脱型、28日間封緘養生を行った。養生終了後、3点曲げ載荷により1本の曲げひび割れを導入した。デジタルマイクロスコープを用いて除荷後のひび割れ幅を等間隔に3か所測定し、ひび割れ幅の平均値が0.1mm, 0.5mm, 1.5mm前後になるまで除荷と載荷を繰り返した。各水準のひび割れ幅およびひび割れ深さはひび割れ導入後の除荷された状態での測定値である。ひび割れ導入後、ひび割れ導入面を開放面とし、開

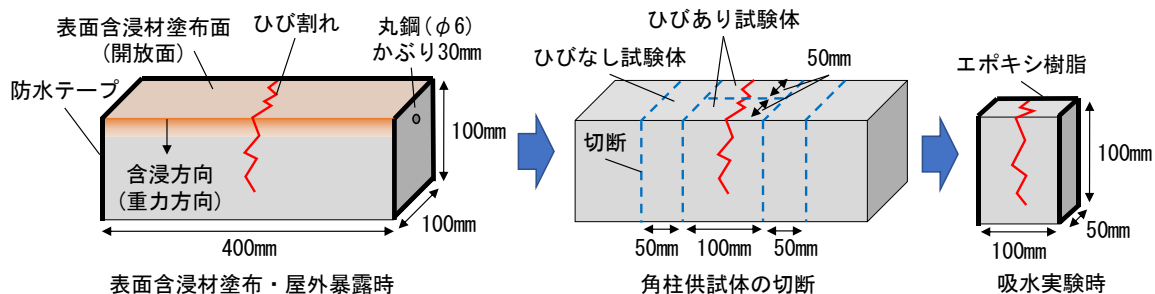


図-1 吸水試験体の作製状況

*1 長野工業高等専門学校 工学科都市デザイン系 助教 修士(工学) (正会員)

*2 長野工業高等専門学校 環境都市工学科

*3 長岡技術科学大学 環境社会基盤系 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 実験水準

試験体名	暴露環境 暴露期間	表面含浸材	平均ひび割れ幅 [mm]	平均ひび割れ深さ [mm]	試験体個数
1-N-w0	屋外屋根あり (温湿度変化) 1年10か月間	無塗布	0	0	2
1-N-w0.1			0.22	63	2
1-N-w0.5			欠測	欠測	欠測
1-N-w1.5			2.01	100	1
1-I-w0		含浸材塗布	0	0	3
1-I-w0.1			0.19	62	2
1-I-w0.5			0.56	77	2
1-I-w1.5			1.62	99	2
2-N-w0	屋外屋根なし (温湿度変化・ 日射・降雨) 1年間	無塗布	0	0	2
2-N-w0.1			0.12	72	2
2-N-w0.5			0.54	87	2
2-I-w0		含浸材塗布	0	0	4
2-I-w0.1			0.13	71	4
2-I-w0.5			0.47	87	4

表-2 示方配合

W/C [%]	s/a [%]	Air [%]	単位量 [kg/m ³]				
			W	C	S	G	Ad [g/m ³]
50	43.8	5.0	168	336	775	990	3.36

セメント：普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)
 細骨材：千曲川産川砂(表乾密度 2.61g/cm³・吸水率 1.63%)
 粗骨材：千曲川産川砂利(最大寸法 25mm・表乾密度 2.62g/cm³・吸水率 1.39%)
 混和剤：AE 減水剤・標準形(I種)

放面以外(側面と底面の5面)は水の出入りが生じないように防水テープによる防水処理を施した。

曲げひび割れの導入および防水処理後、表面含浸材を塗布するために7日間室内に静置して開放面を事前に乾燥させた。開放面を上向きにした状態で市販のアルキルアルコキシシランを主成分としたシラン系表面含浸材をメーカー指定の手順に沿って塗布した。塗布は刷毛を用いてメーカー指定の塗布量(600ml/m²)に達するまで塗布を繰り返した。塗布後、7日間室内に静置して角柱供試体を屋外に暴露した。表面含浸材を塗布しない供試体は、屋外暴露開始まで塗布した試験体と同様の環境に静置し、塗布時は開放面をビニール袋で覆うことで乾燥を防いだ。

シラン系表面含浸材を塗布後、角柱供試体を日射および降雨の影響が異なる屋外環境に暴露した。暴露状況を図-2に示す。屋外暴露環境は、温湿度変化が作用する屋外屋根あり環境と温湿度変化に加えて日射と降雨が作用する屋外屋根なし環境とした。屋外屋根あり環境は日射と降雨の影響を受けない屋外に2020年9月23日より1年10か月間、屋外屋根なし環境は日射と降雨の影響を



(a) 屋外屋根あり環境



(b) 屋外屋根なし環境

図-2 屋外暴露の状況

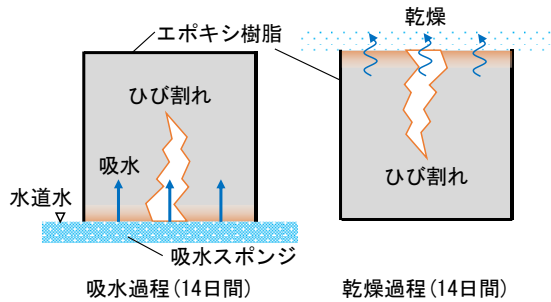


図-3 吸水過程と乾燥過程の概略図

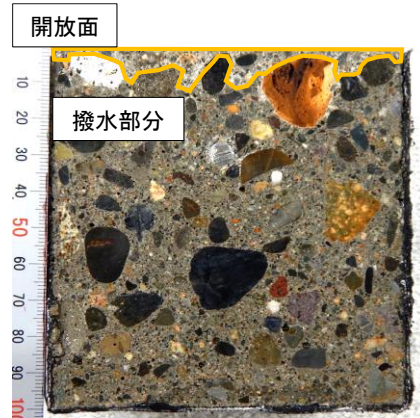
受ける屋外に2021年7月14日より1年間、暴露した。暴露場所は長野工業高等専門学校構内である。暴露環境と同じ地域の長野地方気象台の2021年の気象は、平均温度13℃、平均相対湿度75%、年降水量1075mm、年日照時間2080hrであった。屋外屋根あり環境において供試体と同位置で温湿度を1年間測定し、長野気象台が公開している温湿度とほとんど一致していることを確認している。

屋外暴露終了後、10×10×5cmになるようにコンクリートカッターで切断した。屋外暴露された角柱供試体1体につき、ひび割れを有する区間からひびあり試験体を2体、ひび割れの無い区間からひびなし試験体を1体取得した。切断後の試験体を室内で1週間程度乾燥後、水中に1分間浸漬し、シラン系表面含浸材の含浸状況を確認した。含浸状況を確認後、試験体の水分量を調整するために約2か月間室内で乾燥させ、吸水面以外にエポキシ樹脂による防水処理を施した。

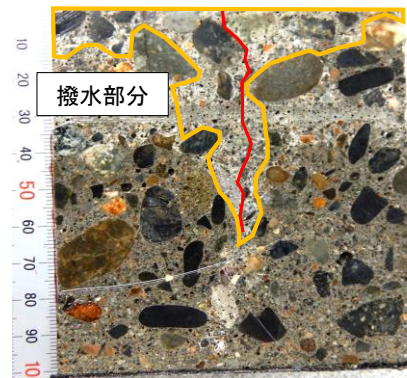
2.2 実験方法

吸水実験では、吸水過程と乾燥過程を複数サイクル実施し、吸水過程での質量増加量よりシラン系表面含浸材の吸水抑制効果を検討する。吸水過程および乾燥過程の概略図を図-3に示す。吸水過程では、試験体はひび割れが開口している吸水面を下にし、吸水クロスを通して水道水を吸水させ、質量増加量を測定した。乾燥過程では、吸水面を上にして乾燥させ、質量減少量を測定した。吸水14日と乾燥14日を1サイクルとした。吸水過程・乾燥過程ともに温湿度が比較的安定した室内で実施した。実験期間中は30分間隔で温湿度を記録して温度 $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $36 \pm 10\%$ で概ね安定していたことを確認した。

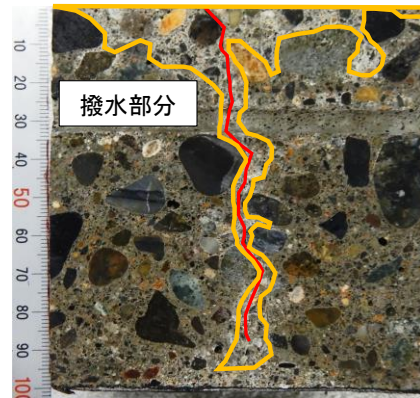
また、屋外の環境作用を受けない場合のシラン系表面含浸材の吸水抑制効果を確認するために、2サイクル目の乾燥7日目で屋外屋根あり環境の各水準の試験体1体ずつにシラン系表面含浸材を塗布し、3サイクル目の測定を行った。



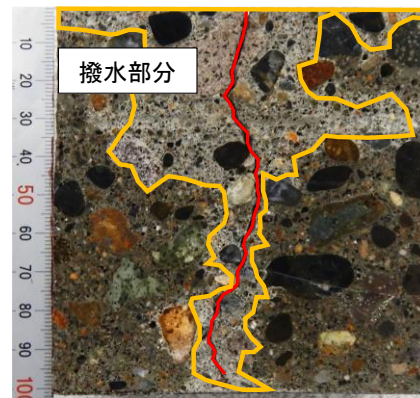
(a) ひびなし



(b) ひび割れ幅0.11mm・深さ70mm



(c) ひび割れ幅0.44mm・深さ90mm

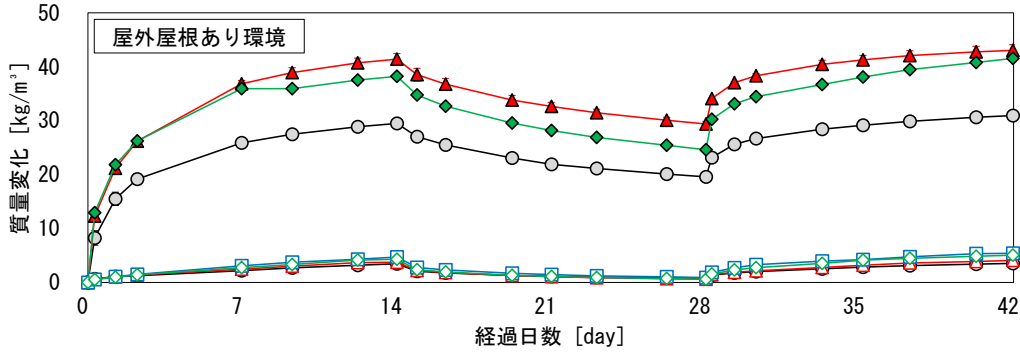


(d) ひび割れ幅1.62mm・深さ93mm

図-4 代表的な試験体断面の撥水状況

無塗布	ひび割れ幅 [mm]	試験体個数	実験値	含浸材塗布	ひび割れ幅 [mm]	試験体個数	実験値
1-N-w0	-	2	○	1-I-w0	-	3	○
1-N-w0.1	0.22	2	▲	1-I-w0.1	0.19	2	▲
1-N-w0.5	欠測	欠測		1-I-w0.5	0.56	2	□
1-N-w1.5	2.01	1	◇	1-I-w1.5	1.62	2	◇

試験体個数が複数ある場合の実験値は平均・最大・最小を示す



無塗布	ひび割れ幅 [mm]	試験体個数	実験値	含浸材塗布	ひび割れ幅 [mm]	試験体個数	実験値
2-N-w0	-	2	○	2-I-w0	-	4	○
2-N-w0.1	0.12	2	▲	2-I-w0.1	0.13	4	▲
2-N-w0.5	0.54	2	□	2-I-w0.5	0.47	4	□

試験体個数が複数ある場合の実験値は平均・最大・最小を示す

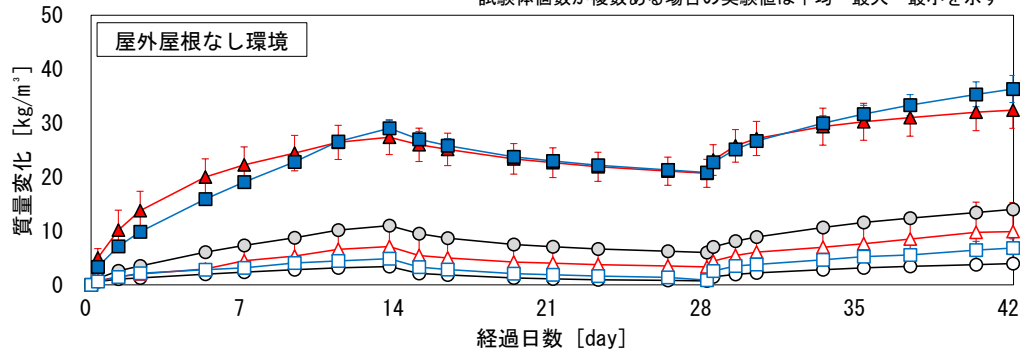


図-5 2 サイクル目の吸水過程までの質量変化

3. 実験結果および考察

3.1 シラン系表面含浸材の含浸状況の確認

屋外暴露終了後に角柱供試体を切断し、水中に1分間浸漬した試験体断面の撥水状況を図-4に示す。目視で確認できた撥水部の境界を黄色に、ひび割れ部を赤色に着色している。ひび割れの有無にかかわらずコンクリート表面からの含浸深さは10mm程度であった。ひび割れを有する試験体では、ひび割れ内部への含浸材の浸透が確認され、ほとんどの試験体でひび割れ先端部分まで表面含浸材が到達していた。また、図-4(d)に示すように曲げひび割れを導入した試験体では、ひび割れから丸鋼に沿って含浸材が浸透している試験体も確認された。

3.2 ひび割れと吸水特性の検討

屋外屋根あり環境および屋外屋根なし環境の2サイクル目の吸水終了までの質量変化を図-5に示す。屋外屋根あり環境および屋外屋根なし環境の1サイクル目の吸

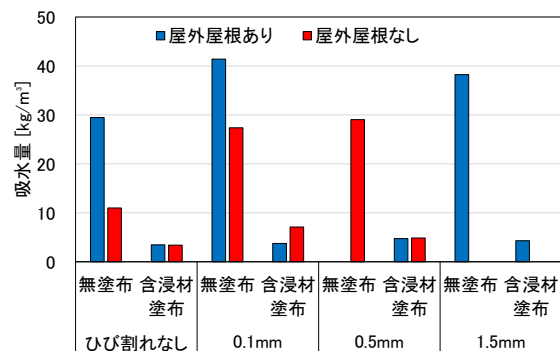


図-6 1 サイクル目の吸水量(平均値)

水量を図-6に示す。質量変化は1サイクル目の吸水開始時点からの質量差、吸水量は1サイクル目の吸水過程での質量増加量である。w0シリーズは各ひび割れ幅の角柱供試体から1体ずつ取得した試験体であるが、図-5より、最大値と最小値の差はほとんどなく、各水準のコ

無塗布	ひび割れ幅 [mm]	試験体 個数	実験値		含浸材 塗布後 屋外暴露	ひび割れ幅 [mm]	試験体 個数	実験値
			無塗布	塗布後 吸水実験				
1-N-w0	-	1	○	×	1-I-w0	-	2	⊕
1-N-w0.1	0.12	1	▲	×	1-I-w0.1	0.19	1	△

試験体個数が複数ある場合の実験値は平均・最大・最小を示す

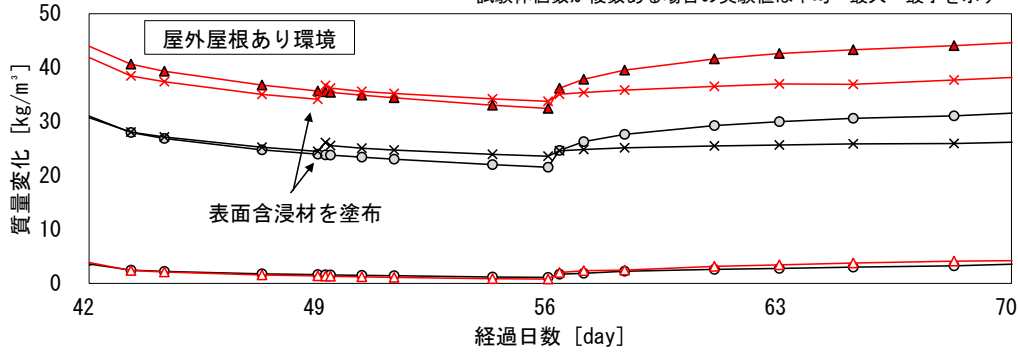


図-7 3 サイクル目の吸水過程の質量変化(屋外屋根あり環境)

ンクリート部の吸水特性のばらつきは小さい。

(1) シラン系表面含浸材を塗布していない場合

各環境のひび割れの無い試験体の吸水過程を比較すると、屋外屋根なし環境の吸水による質量増加は屋外屋根あり環境よりも少ない。屋外屋根なし環境での吸水速度の低下は、降雨により定期的に水分が供給されたことで暴露期間中もコンクリート表面付近で水和が進行し、緻密化したことが原因であると推察される。

ひび割れを有する試験体に注目すると、いずれの環境もひび割れの無い試験体と比べて吸水による質量増加が大きくなり、ひび割れにより吸水が促進された。また、ひび割れの無い試験体と同様に屋外屋根なし環境の吸水速度は屋外屋根あり環境と比べて低下する傾向を示した。

(2) シラン系表面含浸材を塗布した場合

ひび割れの無い試験体では、屋外暴露環境に関係なくシラン系表面含浸材により吸水が抑制され、屋外屋根あり環境と屋外屋根なし環境の吸水量はほぼ同じであった。また、吸水過程での質量増加量と乾燥過程での質量減少量はほとんど等しく、含浸材を塗布していない場合の吸水と乾燥による質量増加の傾向と異なる。これは、シラン系表面含浸材の撥水作用によりコンクリート内部への吸水浸透がほとんど抑制されたこと、吸水浸透した水分が乾燥過程でコンクリート表面から逸散したことを示している。

ひび割れを有する試験体では、いずれの環境も表面含浸材を塗布していない試験体と比較して吸水による質量増加は小さく、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による吸水抑制効果が確認された。

3.3 表面含浸材塗布後の屋外暴露の有無の検討

2 サイクル目の乾燥過程で無塗布の屋外屋根あり試験

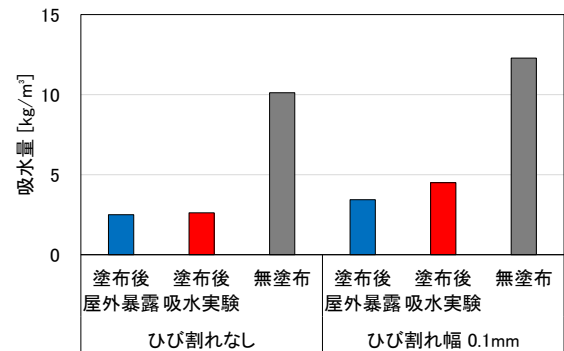


図-8 3 サイクル目の吸水量(平均値)

体にシラン系表面含浸材を塗布することで1年以上の屋外暴露がシラン系表面含浸材に及ぼす影響について検討した。屋外屋根あり試験体の2サイクル目の乾燥開始から3サイクル目の吸水終了までの質量変化を図-7に、3サイクル目の吸水量を図-8に示す。質量変化は1サイクル目の吸水開始時点からの質量差、吸水量は3サイクル目の吸水過程での質量増加量である。シラン系表面含浸材を塗布したひび割れの無い試験体では、塗布するタイミングに関わらず吸水量はほぼ同じであり、無塗布の試験体と比べて吸水が抑制された。ひび割れ幅0.1mmの試験体においても塗布するタイミングに関わらず吸水が抑制されることが確認された。表面含浸材を塗布したタイミングが異なる試験体では3サイクル目の吸水開始時点での試験体内の水分量が異なることに注意する必要があるが、屋外環境に1年以上暴露した場合でもシラン系表面含浸材の吸水抑制効果は維持されることが確認された。

4. まとめ

本研究では、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による吸水抑制効果およびその効果の持続性の把握を目的に屋外暴露された試験体を用いて吸水実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布した場合、試験体断面の撥水状況からひび割れ内部にシラン系表面含浸材が浸透することを確認した。
- 2) ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布することでコンクリート表面およびひび割れからの吸水を抑制し、無塗布のひび割れの無いコンクリートよりも吸水を抑制することを確認した。
- 3) シラン系表面含浸材を塗布したコンクリートの吸水抑制効果は、ひび割れの有無にかかわらず屋外環境に1年以上暴露後も維持されることを確認した。

謝辞

本実験を行うにあたり、ポゾリスソリューションズ株式会社表面含浸材を提供いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー119, 2005.4
- 2) 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
- 3) 叶健児, 守屋進, 石川一郎, 林大介：表面含浸材による土木構造物の耐久性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1897-1902, 2005
- 4) 古賀裕久, 青山尚, 渡辺博志, 木村嘉富：表面含浸材のコンクリート含水率抑制効果に関する屋外暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1939-1944, 2009
- 5) Hosoda, A., Matsuda, Y. and Kobayashi, K.: Optimum

Surface Protection System with Silane Type Water Repellents, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.3, pp.291-302, Oct.2010

- 6) 本馬幸治, Thynn.T.H., 下村匠：乾湿を受ける実環境下におけるコンクリート中の水分量に及ぼす表面含浸材の効果とそのモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1631-1636, 2011
- 7) 緑川猛彦, 武田三弘, 小山田哲也, 阿波稔：長期暴露試験による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性状, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.3, pp.451-461, 2011
- 8) 遠藤裕丈, 田口史雄, 宮本修司, 村中智幸, 後藤浩之, 林大介, 坂田昇, 名和豊春：シラン系表面含浸材による寒地コンクリート構造物の耐久性向上効果, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.1, pp.69-88, 2011
- 9) 鈴木世二, 浅野康寛, 戸高英二：シラン系表面含浸材塗布後の長期経過観察による吸水抑制評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1709-1714, 2019
- 10) 安田和弘, 渡邊賢三, 横関康祐, 坂田昇：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
- 11) 澤田巧, 福手勤, 内藤英晴, 小笠原哲也, 酒井貴洋：表面含浸材のひび割れ改質効果に関する検討, 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, Vol.10, pp.413-418, 2010.10
- 12) 久保善司, 阿部花香, 菊池創太：ひび割れ部におけるシラン系含浸材の適用性に関する研究, 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, Vol.16, pp.545-550, 2016.10
- 13) Jian-Guo Dai, Y.Akira, F.H.Wittmann, H.Yokota, Peng Zhang : Water repellent surface impregnation for extension of service life of reinforced concrete structures in marine environments The role of cracks, Cement & Concrete Composites, Vol.32, pp.101-109, 2010