

報告 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

鈴木 世二^{*1}・浅野 康寛^{*2}・戸高 英二^{*3}

要旨：コンクリート構造物の長寿命化および美観性維持を目的として、コンクリート内部への水の浸透を抑制することが重要であるとされている。コンクリート内部の水分浸透抑制として、吸水防止材が開発・適用されて 10 年以上経過しており、実構造物への適用が増加している。本報告は、海岸に近い陸上部の鉄筋コンクリート構造物への試験施工を行い、市販されている 7 種類のシラン系表面含浸材を対象として、表面撥水性、透水量、塩化物イオン濃度等の吸水防止効果に関する長期経過について報告する。また、海洋環境下での暴露供試体に関する塩分浸透抑制効果、および微細ひび割れへの透水抑制効果を検証した。

キーワード：シラン系表面含浸材、表面撥水性、透水量、塩分浸透抑制、ひび割れ補修

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化要因は、中性化、塩害、凍害、アルカリ骨材反応、化学的腐食等があり、これにより内部鉄筋の腐食膨張あるいはコンクリートの損傷や侵食によりひび割れや剥離が生じ、これら劣化が進展すると構造物の機能が低下し、要求性能や安全性、環境に与える影響が懸念される。

近年、社会資本の適切な維持管理の重要性に対する認識が構造物の安定性の他、使用性、安全性および美観性、補修後の経過観察の観点から高まっており、コンクリート構造物の耐久性向上、劣化因子の抑制を目的として、表面保護に関する新しい表面保護材が開発、提案されている。表面保護工法¹⁾として、表面被覆工法および表面含浸工法があり、含浸工法においてはけい酸塩系やシラン系が一般的である。その中においてシラン系表面含浸材の効果が期待されており、既設および新設への適用が拡大している。本報告は実構造物への試験施工によって得られた長期経過後の撥水性および透水性等の性能について、市販されているシラン系表面含浸材の比較を実施した。また、暴露供試体を用いた塩分浸透抑制効果の検証、微細ひび割れへの透水抑制効果を確認した。

2. 試験施工概要

2.1 試験施工場所

試験施工場所は写真-1 に示すように、海岸から 100m 程度の陸地に設置されている鋼製タンクの基礎コンクリート（円形：直径 19.6m 鉄筋コンクリート）で、塗布面は海岸向き（南面）であり、他の面より日射を受ける。

基礎コンクリートの配合仕様は、最大骨材寸法が 40mm、水セメント比が 50%、スランプが 10～15cm、細骨材率が 42%、単位セメント量が 340kg/m³、セメント種

類はフライアッシュ C 種（置換率 25%）である。



写真-1 試験施工構造物

2.2 施工方法

施工方法は下記の手順とした。なお、コンクリート塗布面は表面含水率が 5%以下であることをケット水分計（高周波容量式）を用いて確認した。

- ① 塗布面の清掃（ワイヤーブラシ等）
- ② 塗布材料の計量（メーカー標準塗布量）
- ③ 塗布範囲のマーキング（1m²程度）
- ④ ローラーあるいは刷毛による塗布（写真-2）

試験施工は材料入手の関係により、1 期、2 期の 2 回に分けて塗布した。



写真-2 塗布状況

*1 (株)シーテック 代表取締役 (正会員)

*2 (株)ジェイペック 保守グループ

*3 (株)ジェイペック 施設グループ

2.3 塗布材料

試験塗布に用いた材料は表－1 に示すように、シラン系の 7 種類とした。塗布量は材料により異なり、0.1～0.6kg/m²である。

表－1 塗布材料種別

記号	塗布量 (g/m ²)	主成分	形態
PB	250	アルキルアルコキシシラン	液体
PS	100	水性シラン	液体
PC	600	アルキルアルコキシシラン	液体
MR	200	シラン・シロキサン	ペースト状
MRH	200	シラン・シロキサン	ペースト状
AS	200	シラン・シロキサン	ジェル状
UF	200	シラン	液体

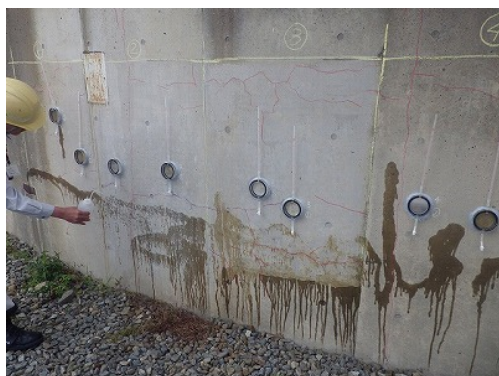
3. 試験施工結果

3.1 表面撥水性

表面撥水性試験²⁾は写真－3 に示すように、コンクリート表面に鶴口びんを用いて散水し、表面の撥水状況あるいは浸透程度を観察した。また、雨天の日には、塗布面と無塗布面の差を比較観察した。

表面撥水性評価の判断基準は下記の 4 段階とした。

- ・◎：疎水性、水球状にはじく、濡れ角³⁾が大きい。
- ・○：疎水性であるが、水滴とはならない。
- ・△：撥水は見られないが、吸水抵抗がある。
- ・×：撥水はなく、吸水する。



写真－3 表面散水状況

表面撥水性は塗布材料により異なり、表－2 および写真－4、写真－5 に示すように、長期的に撥水性が確保されている材料は、PS あるいは AS、MR である。また、表面撥水性は低下するが、無塗布面と比較してコンクリートへの吸水抵抗があり、やや濡れ色となる材料は PC である。なお、比較的早い段階で表面撥水性が低下する材料は UF や PB であった。

PS においては散水によりコンクリート表面に水滴すら付着しない程の撥水性があり、長期的な持続も確認された。写真－4 の白色部分は PS(左側)と MR(右側)で、写真－5 の左の 2 箇所が PS および AS である。何れも無塗布面と比較して撥水しているため、白色となっている。

表－2 表面撥水性の変化

1期塗布（2008年6月塗布）					
材料 (記号)	撥水性能（経過年）				
	1年	4年	6年	8年	11年
PB	○	△	△	×	×
PS	◎	◎	◎	◎	◎
PC	○	△	△	△	△
MR	◎	◎	◎	◎	○

2期塗布（2010年6月塗布）					
材料 (記号)	撥水性能（経過年）				
	0.5年	2.5年	4年	8.5年	9.5年
UF	△	×	×	×	×
AS	◎	◎	◎	◎	◎
PB	○	△	△	×	×
PS	◎	◎	◎	◎	◎
PC	○	○	△	△	△
MRH	◎	◎	◎	○	○



写真－4 雨天時の表面撥水状況（1期塗布）



写真－5 雨天時の表面撥水状況（2期塗布）

3.2 透水試験

透水試験は「表面含浸工を適用したコンクリートの現地吸水試験方法(試案)」²⁾に準拠して、写真-6 に示すように以下の手順で実施し、塗布後経過 11 年あるいは 9 年時点とした。

- ① コンクリート試験面をナイロンたわしで清掃した後、透水試験器とブチルゴムテープを貼り付け、周囲にウレタンシーリング材を塗り付けて固定した。(1 塗布材料あたり 2 箇所とした。)
- ② 翌日、透水試験器に水を注入し、5 分毎に 30 分間の透水量を測定した。透水量は試験器に取り付けたメスピペットの目盛を読み測定した。



写真-6 透水試験状況

試験結果は表-3 および図-1 に示すように、透水量が少ないのは、AS および MR、MRH であり、無塗布面と比較して、AS が 39%、MR が 43%、MRH が 45%であった。一方、表面撥水性が低下している UF、PB、PC の 3 種は、透水量も大きく、無塗布面と比較して、77~96%であるため、表面撥水性の低下により浸透抑制効果も同様に低下することがわかる。なお、表面撥水性が著しく良好である PS については、無塗布面と同等以上の透水量であり、水頭による透水では浸透抑制効果が小さいと判断される。これは薄膜がコンクリートに形成されているが、塗布直後に撥水するため塗布剤が不均一になっている可能性があり、局所的な吸水があるためと推察される。

表-3 透水試験結果

塗布 記号	コンクリートへの透水量 (ml)			無塗布に対する 比率 (%)
	No. 1	No. 2	平均	
無塗布	1.35	1.45	1.40	100
UF	0.80	1.35	1.08	77
PS	2.10	0.90	1.50	107
AS	0.50	0.60	0.55	39
PB	0.90	1.50	1.20	86
MRH	0.75	0.50	0.63	45
PC	1.65	1.05	1.35	96
MR	0.55	0.65	0.60	43

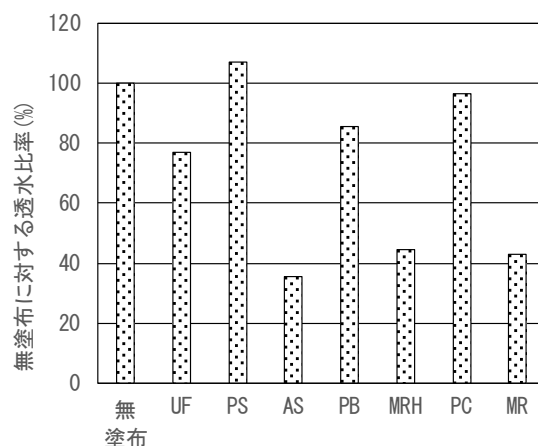


図-1 無塗布面に対する透水比率

3.3 透水試験後の表面水分率変化

この試験は土木研究所資料第 4186 号の付属資料-3 を参考とした。⁴⁾

塗布後初期における表面保護材の塗布の有無を判別することを目的としており、5 分後の測定値が測定限界値 (1%) 未満の場合に保護材が塗布されていると判別する方法である。そのため、長期間暴露され、表面撥水性が低下すると表面の吸水量が増加し、表面の乾燥が遅くなると予想されることから、表面撥水性の指標とした。なお、使用した水分計は表面抵抗式(コンクリガード・チェッカーCGC-01)とした。

表面水分率の経時変化を表-4 および図-2 に示す。

これより、コンクリートの表面水分率が最も早く低下するのは、MR と AS であり、透水試験器取り外し直後の水分率が小さく、1~2 分後には測定下限値以下となった。一方、その他の材料は無塗布とほぼ同様であり、5 分後の測定値が測定限界値以下とならなかった。そのため、表面水分率の低下は表面から水分が蒸発することによるため、表面撥水性があり、透水量が少ないほど速く低下することから、AS と MR、MRH の 3 種はシラン系表面含浸材の効果を持続していると評価できる。

表-4 表面水分率変化

経過 時間 (分)	表面水分率 (%)							
	無 塗 布	UF	PS	AS	PB	MRH	PC	MR
0	3.60	3.95	4.25	1.35	3.80	2.85	2.95	1.95
1	3.25	3.85	4.20	LLL	3.50	2.40	2.50	1.30
2	3.25	3.45	4.05		3.20	1.95	2.25	LLL
3	3.05	3.15	3.50		3.05	1.75	2.00	
4	2.85	3.00	2.90		2.85	1.40	1.80	
5	2.55	2.90	2.55		2.60	LLL	1.55	

注)LLL とは、測定限界値以下である。

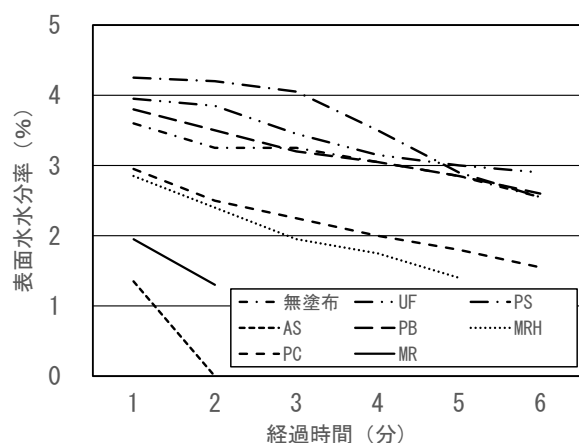


図-2 透水試験後の表面水分率の変化

写真-7 は、透水試験器の中の状況であり、吸水の差によりコンクリートの色が異なり、吸水がある面は濡れ色となっており、無塗布と AS あるいは MR では明らかな差がある。

3.4 塩分浸透抑制効果

シラン系表面含浸材の効果として塩分浸透抑制があり、各塗布材の塩分浸透抑制効果を評価するために、コンクリートからドリル削孔粉末を採取し(JSCE-G573-2018), JIS A 1154 に準拠し塩化物イオン濃度を測定した。

コンクリート中の塩化物イオン濃度は、表-5 および図-3 に示すように、無塗布面と比較して、明らかな差は見られず、特に 2~3cm あるいは 3~4cm 部位は無塗布と同等の値であり、外部からの塩分浸透抑制効果を確認することは困難であった。なお、1 期の MR については、1~2cm で半分程度の抑制効果が確認できる。一方、2 期においては、無塗布と比較して、1~2cm で塩分浸透が多い面が 5 箇所もあるため、抑制効果の判断が困難であった。これは試料採取部位のコンクリート品質の差によるばらつきであると推察できる。当該試験補修箇所

コンクリートは、水セメント比が 50% で、フライアッシュ C 種セメントを使用しているため、塩化物イオンの浸透・拡散が極めて小さく、塗布材による塩分浸透抑制効果の有無を評価することが困難であった。

表-5 塩化物イオン濃度変化

塗布時期	経過年数	塗布材	塩化物イオン濃度 $\text{Cl}^- (\text{kg}/\text{m}^3)$			
			0-1cm	1-2cm	2-3cm	3-4cm
1期	11年	無塗布	0.39	0.37	0.21	0.15
		MR	0.37	0.17	0.14	0.13
2期	9年	無塗布	0.49	0.25	0.15	0.13
		UF	0.31	0.34	0.17	0.15
		PS	0.36	0.33	0.17	0.15
		AS	0.44	0.19	0.15	0.12
		PB	0.38	0.29	0.15	0.13
		MRH	0.52	0.36	0.16	0.15
		PC	0.66	0.31	0.18	0.16

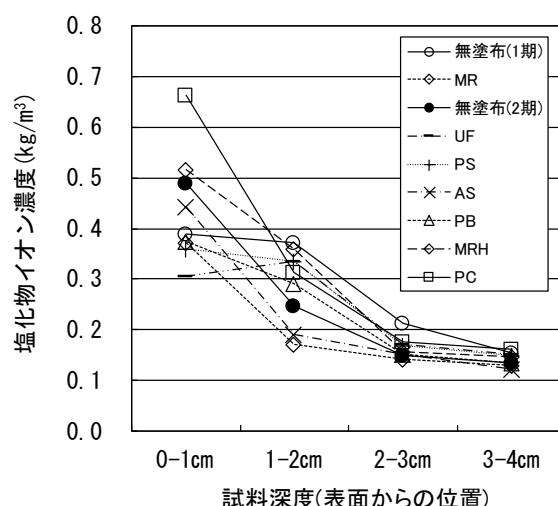


図-3 塩化物イオン濃度

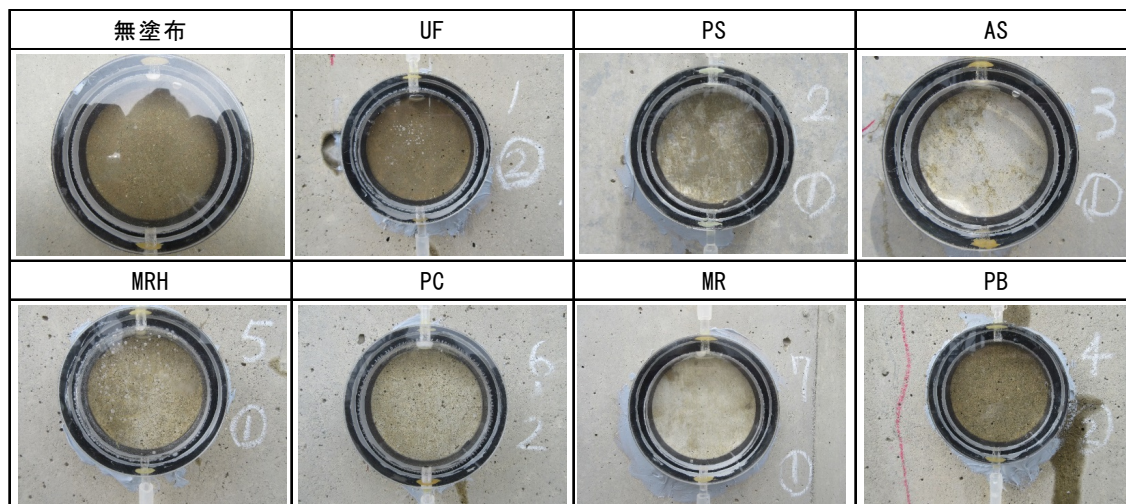


写真-7 透水試験器の中の吸水状況

4. 塩分浸透抑制および透水抑制効果の検証

4.1 暴露供試体の塩分浸透抑制効果

陸上コンクリート構造物ではシラン系表面含浸材の塩分浸透抑制効果を評価することが飛来塩分での影響下だけでは困難であった。そこで、写真-8 に示すように、10×10×40cm 角柱供試体の1面に試験試料(2 試料, PC および MR)を塗布し、栈橋上部工の下梁上部に設置し、塩分浸透抑制効果確認試験を実施した。塗布材の選定は液体とクリーム状タイプの2種とした。なお、塗布面以外からの海水浸透を防止するために、アルミテープおよびエポキシ樹脂によりコーティングし、塗布面は海水が接触するように設置した。供試体は潮位変動により海水に浸漬される環境ではあるが、栈橋構造上、直接日射による紫外線を受ける場所ではない。基板供試体は W:C:S=0.5:1:3 のモルタル(JSCE-F 505)とした。



写真-8 暴露供試体の塗布および設置状況

コンクリート中の塩化物イオン濃度測定は、暴露開始より5ヶ月と15ヶ月の2回とし、ドリル削孔により1cm毎に採取し、JIS A 1154(電位差滴定法)に準拠した。供試体による塩分浸透環境下ではコンクリート中に浸透した塩化物イオン濃度に明らかな差が生じており、表-6 および図-4 に示すように表層部では無塗布と比較して、塗布材は3~6kg/m³減、4~5cm部でも2kg/m³程度の減が確認できる。暴露材齢15ヶ月においては無塗布では深部(4~5cm)濃度が2.5kg/m³を超える値であったが、試験塗布した供試体は0.7kg/m³以下であり塩分浸透が抑制されている。図-5 に示すように、無塗布に対する

塩分浸透の抑制率は37~95%であり、表層部での抑制効果は小さいが、1~2cm 部位で60%以上、2cm より深部では80%程度の高抑制率であった。2種の塗布材においてはPCが90%程度以上であった。

試験施工でのPCは表面撥水性および透水抑制は必ずしも良好ではないため、紫外線による影響があると考えられるが、表面撥水性と透水抑制、塩分浸透抑制効果の関係は明確ではない。

表-6 供試体の塩化物イオン濃度

No.	塗布材	経過材齢	塩化物イオン濃度 Cl ⁻ (kg/m ³)				
			0-1cm	1-2cm	2-3cm	3-4cm	4-5cm
1	無塗布	5ヶ月	8.51	4.82	2.18	2.00	-
		15ヶ月	8.76	7.49	5.38	3.91	2.65
2	PC	5ヶ月	2.91	0.89	0.94	-	-
		15ヶ月	5.53	1.99	0.73	0.21	0.10
3	MR	5ヶ月	5.09	1.53	0.52	0.25	-
		15ヶ月	5.08	2.81	1.52	0.83	0.70

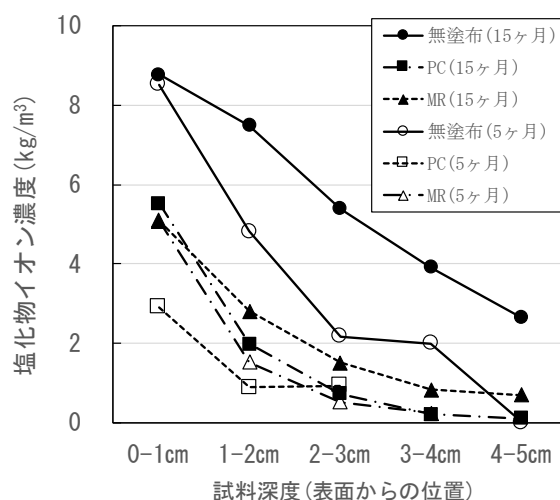


図-4 供試体の塩化物イオン濃度

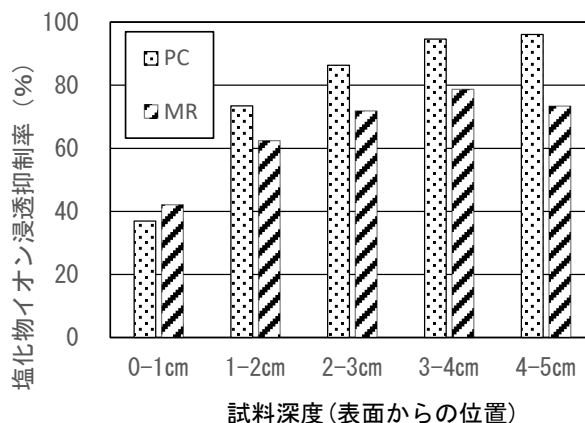


図-5 供試体の塩化物イオン濃度

4.2 微細ひび割れでの透水量試験

シラン系表面含浸材はコンクリート表面保護材であり、ひび割れが発生した部位における遮水性の評価報告は少ない。ひび割れ補修は被覆、注入、カット充填が一般的であるが 0.2mm 以下程度のひび割れでは注入補修が困難であり、また、被覆補修あるいはカット補修は経済的な負担が大きく、美観性を損なう結果となることが多い。そこで、微細ひび割れ(0.2mm 程度)を対象とし、吸水防止材塗布による遮水効果を検証した。検証方法は写真-9 に示すように、壁コンクリート(北面)を対象に透水量試験を実施し、無塗布(ひび割れ有)、塗布(ひび割れ有、無)の3ケースで、塗布材は表面撥水性および透水抵抗性が大きい「AS」とした。壁コンクリートは海岸から 50m 程度の位置で、石炭サイロ設備の防護壁であり、ひび割れは初期の乾燥収縮が要因である。

透水試験はカップを設置した後、ロートおよびピペットに注水し、60 分間まで 10 分間隔にて透水量を測定した。



写真-9 透水量試験箇所

透水量試験結果は図-6 に示すように、無塗布でひび割れが発生している部は透水が一定量の増加傾向にあり、60 分経過において 3ml の透水量で、以降の注水によって更に透水することが予想される。

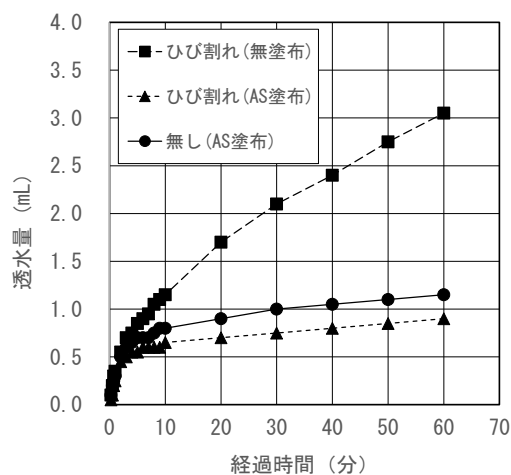


図-6 供試体の塩化物イオン濃度

一方、AS 塗布では、ひび割れの有無に関わらず、1ml 程度の透水があるが透水量は横配となり、吸水抑制が確認できる。そのため、微細ひび割れが発生しているコンクリート面に対しても、ひび割れ間隙に撥水層が形成され、水分浸透を抑制できる可能性がある。

5. まとめ

シラン系表面含浸材の長期経過による性能評価および塩分浸透抑制効果、微細ひび割れ補修への適用について検証を行った。

- (1) 9年あるいは11年の長期経過において、表面撥水効果を持続する材料はPS、ASあるいはMRであり、紫外線による塗布材料劣化の影響は少ないと考えられる。一方、撥水性が低下する材料はUFおよびPB、PCである。
- (2) 透水試験および表面水分率の変化により、透水抑制効果がある材料はAS、MRあるいはMRHであり、表面撥水性が優れるPSは吸水抑制が小さく、表面撥水性と透水抑制が必ずしも一致しない。PSはメーカー資料では含浸するタイプではなく、浸透による撥水層の形成はなく、薄膜形成タイプである。
- (3) 塩分浸透環境下での塩分浸透抑制効果は表層部で40%程度であるが、鉄筋かぶり厚(4~5cm)と想定される部位では、80~90%程度の浸透抑制率である。ただし、暴露15ヶ月の結果であり、それ以上の長期経過は未確認である。
- (4) 微細ひび割れを対象とした場合、ASの塗布により無塗布と比較して透水量が30%程度となる。これは、ひび割れ間隙に撥水層が形成され、透水を抑制する効果発揮されたと推察される。
- (5) 10年程度長期経過において、表面撥水性および透水抑制が持続し、シラン系表面含浸材としての機能を満足する材料があり、長期耐久性確保への期待が高まる。

最後に、本報告にあたり試験材料の提供ならびに試験指導を頂きました各メーカー担当者の方には深謝します。

参考文献

- 1) 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) 土木学会
- 2) 土木学会コンクリート技術シリーズ 68 P201
- 3) 伊藤従司郎: 顔料の事典, 2010
- 4) 土木研究所資料第 4186 号「コンクリート表面保護工の施工環境と耐久性に関する研究—浸透性コンクリート保護材の性能持続性の検証と性能評価方法の提案—」, 付属資料-3「浸透性コンクリート保護材の塗布判別方法(案)」