

論文 シラン系及びけい酸塩系表面含浸材の併用による劣化抑制効果

鶴田 浩章*1・原川 卓真*2

要旨: 最近, コンクリート構造物の劣化対策として表面含浸材が使用されているが, シラン系は遮水性に優れており, けい酸塩系は中性化抵抗性が特に優れている。そこで, 今回は両方の良い特徴を有効に活用するために, シラン系とけい酸塩系を重ねて塗布する方法を用い劣化抑制効果を検証した。けい酸塩系を先に塗布する場合と, シラン系を先に塗布する場合の2種類の方法を用いて透水量試験と中性化に対する抵抗性試験を行った。その結果, けい酸塩系を先に塗布し, シラン系を後から重ね塗りする方法が, 透水に対しても中性化に対しても最も良い結果を得ることができ, 表面含浸材の併用による効果が確認できた。

キーワード: 表面含浸材, けい酸塩系, シラン系, 併用系, 透水量, 中性化抵抗性

1. はじめに

今後, 高度経済成長期に建設された土木構造物が老朽化し, 劣化によって安全性が低下することが問題となっており, 既存のコンクリート構造物の劣化を抑制することが出来る, 表面含浸材がさらに必要になると考えられる。また, 今後新設するコンクリート構造物の劣化の予防保全対策としても, さらに表面含浸材の必要性は増してくると考えられる。

そのような状況のもとで, これまでに表面含浸材の劣化抑制効果に関する研究が多く行われており, その効果や課題も明らかになってきている(例えば 1)~4)。表面含浸材には大きく分けてシラン系とけい酸塩系の2種類があるが, これまで行われた研究結果から, シラン系表面含浸材(以下, シラン系と略す)は遮水性が高いが, 中性化抵抗性は低いという結果が得られている⁵⁾。また, けい酸塩系表面含浸材(以下, けい酸塩系と略す)は中性化抵抗性が高いが, 遮水性は低いことが分かっている⁵⁾。さらに, シラン系とけい酸塩系を混合させた材料(以下, 混合系と略す)も検討されているが, 現状あまり良い効果は得られていない⁵⁾。また, シラン系とけい酸塩系を重ねて塗布するタイプを「併用系」と呼ぶとすれば, 市販されている併用系表面含浸材を用いた試験では, シラン系単体より良い透水抑制効果が得られている²⁾が, 併用系の劣化抑制効果はまだ使用例が少なく, よくわかっていない。

そこで, 今回は混合せずに重ね塗りした(以下, 併用系と略す)場合の検討を行った。重ね塗りの方法としてシラン系を先に塗布し, その後けい酸塩系を塗布した場合(以下, SKと略す)と, けい酸塩系を先に塗布し, その後シラン系を塗布した場合(以下, KSと略す)の劣化抑制効果を検証した。

今回は W/C60%のコンクリートを用いて, けい酸塩系

単体, シラン系単体, SK シリーズのシラン系とけい酸塩系の塗布量を標準塗布量に対する質量比で 2:8, 5:5, 8:2 に変化させた場合, さらに, KS シリーズのけい酸塩系とシラン系の塗布量を標準塗布量に対する質量比で 2:8, 5:5, 8:2 に変化させた場合の劣化抑制効果を検証した。ここで, シラン系とけい酸塩系の塗布量は, 各含浸材の標準塗布量の質量割合に対し, 例えばシラン:けい酸塩=2:8の場合, シランがシラン系の標準塗布量の2割, けい酸塩がけい酸塩系の標準塗布量の8割の量

表-1 使用した表面含浸材

表面含浸材の種類	主成分	主要成分濃度 (%)	標準塗布量 (ml/m ²)
けい酸塩系	けい酸ナトリウム・けい酸カリウム	30以上	240
シラン系	アルキルアルコキシシラン	98~100	300

表-2 使用した表面含浸材と実験条件

含浸材の種類	シラン系の塗布量 (ml/m ²)	けい酸塩系の塗布量 (ml/m ²)	略語
けい酸塩系	0	240	けい酸塩
シラン系	300	0	シラン
シラン:けい酸塩=2:8	60	192	SK28
シラン:けい酸塩=5:5	150	120	SK55
シラン:けい酸塩=8:2	240	48	SK82
けい酸塩:シラン=2:8	240	48	KS28
けい酸塩:シラン=5:5	150	120	KS55
けい酸塩:シラン=8:2	60	192	KS82

※ シラン:けい酸塩, けい酸塩:シランは質量比

*1 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 関西大学 大学院理工学研究科ソーシャルデザイン専攻博士課程前期課程

表-3 示方配合

	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント 比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
SK用コンク リート	20	10	60	5	46	167	278	824	1009	1.148
KS用コンク リート					43			771	1065	0.835

をシラン系、けい酸塩系の順に塗布したことを示す。

2. 実験概要

2.1 使用した含浸材及びコンクリートの配合

今回使用した表面含浸材の詳細を表-1、表-2に示す。表-2中の略語を一例を用いて説明すると、「SK28」とはシラン系をその標準塗布量に対して2割の量で塗布し、その後、けい酸塩系をその標準塗布量に対して8割の量で塗布したことを意味する。今回は、けい酸ナトリウム系1種類とアルキルアルコキシシランを主成分としたシラン系1種類を用い、それぞれを単体で用いた場合と、併用した場合の試験を行った。コンクリートの配合はW/C60%、目標スランブ10±1cm、目標空気量を5.0±0.5%とした。試験練りの結果、決定した配合を表-3に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂、粗骨材は硬質砂岩系砕石、混和剤はリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とするAE減水剤を使用した。使用した骨材の産地や種類は同じであるが、採取時期により物性が若干異なっていたため、試験練り結果が異なり配合が若干変化している。

2.2 試験体の作製方法

コンクリート試験体の作製は、表面含浸材の試験方法(案)(JSCCE-K571-2010)に基づき、100mm×100mm×400mmのコンクリート供試体を打設後、温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室で1日静置した後脱型し、6日間水中養生した。その後、試験で使用するサイズに切断し、恒温恒湿室で28日間気中養生した。気中養生終了3日前に合成樹脂で必要な箇所をシールし、気中養生終了後に表面含浸材の塗布を表-2の条件で行った。けい酸塩系の場合は塗布面をブラシで洗浄後、1時間後に塗布量の半分の量を刷毛で塗布し、1時間散水養生を行い、その後1時間気中養生を行った。そしてさらに残りの半分の量を塗布し、1時間散水養生を行い、その後1時間気中養生を行った。シラン系の場合は塗布面を圧縮空気洗浄し、塗布量の半分の量を塗料塗布用ローラーで塗布して1時間気中養生を行い、その後、残りの半分の量を塗布して1時間気中養生を行った。併用系(KS)の場合は、初めにけい酸塩系を上記の方法で塗布し、その24時間後にシ

ラン系を重ねて塗布した。また併用系(SK)の場合は、上記の方法でシラン系を塗布し、その後24時間後にけい酸塩系を重ねて塗布した。その後、それぞれ14日間恒温恒湿室に静置して試験体とした。

2.3 試験方法

すべての試験を、表面含浸材の試験方法(案)(JSCCE-K571-2010)に基づき行った。また、各含浸材につき3個の試験体を用いて試験を行い、3個の試験体の平均値を求めてそれぞれの測定値とした。

(1) 含浸深さ試験

本試験でシラン系の材料の含浸深さを測定した。2分割した試験体を、1分間水に浸せきして取り出し、撥水している部分の深さを表面含浸材の含浸深さとして測定した。含浸深さの測定位置は、試験体の割裂面の中心、及びその中心から25mmの位置の片面3か所とし、対面する割裂面で合計6か所の含浸深さを、0.1mmの単位でノギスを用いて測定し、その平均値を算出して、小数点以下1桁の値に丸めて1試験体の含浸深さとした。また、式(1)によって、重ね塗りをを行った試験体及びシラン系単体の試験体の含浸深さから、含浸深さ比を算出し、四捨五入によって整数に丸めて示した。

$$\text{含浸深さ比(\%)} = \frac{\text{重ね塗り試験体の含浸深さ}}{\text{シラン系試験体の含浸深さ}} \times 100 \quad (1)$$

(2) 透水量試験

JIS A 6909の7.12(透水試験B法)に準拠して、試験

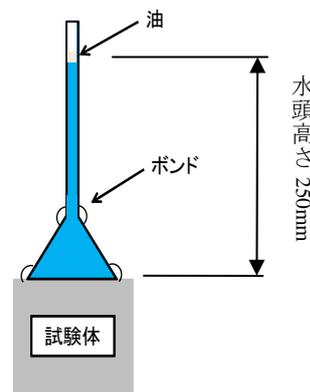


図-1 透水量試験装置

体の含浸面及び原状試験体(無処理)の試験面に漏斗とメスピペットを隙間がないように取り付け、その中に蒸留水を入れて、恒温恒湿室(温度 20℃, 湿度 60%)に7日間静置して試験した(図-1)。

試験開始時から7日後の水頭の高さ(W_{pi})を読み取り、試験開始時の高さ(W_{p0})との差から、式(2)によって透水量(W_p)を算出した。

$$W_p = W_{pi} - W_{p0} \quad (2)$$

ここに、 W_p :透水量(ml), W_{p0} :試験開始時のメスピペットの読み(ml), W_{pi} :試験開始時から7日後のメスピペットの読み(ml)

また、式(3)によって、重ね塗りをを行った試験体及びシラン系単体の試験体の透水量から、透水量比を算出し、四捨五入によって整数に丸めて示した。

$$\text{透水量比(\%)} = \frac{\text{重ね塗り試験体の透水量}}{\text{シラン系試験体の透水量}} \times 100 \quad (3)$$

(3) 中性化に対する抵抗性試験

試験体の作製方法は、JSCE-K571-2010に準拠し、打設の翌日に脱型を行い、その後6日間水中養生し、試験で使用するサイズに切断してから恒温恒湿室で28日間気中養生した。そして、含浸材を塗布してからさらに14日間恒温恒湿室で気中養生した後に、JIS A 1153に準拠して温度 20℃, 相対湿度 60%, 二酸化炭素濃度 5%の条件下で28日間促進中性化試験を行った。中性化深さの測定はJIS A 1152に準拠し、割裂面の含浸面及びそれに対向する面(原状試験体の試験面)からの10か所の中性化深さを、ノギスを用いて0.1mmまで測定し、平均値をそれぞれ試験体及び原状試験体の中性化深さとした。

また、式(4)によって、重ね塗りをを行った試験体及びけい酸塩系単体の試験体の中性化深さから、中性化深さ比を算出し、四捨五入によって整数に丸めて示した。

$$\text{中性化深さ比(\%)} = \frac{\text{重ね塗り試験体の中性化深さ}}{\text{けい酸塩系試験体の中性化深さ}} \times 100 \quad (4)$$

表-4 コンクリートの諸性状

	SK に用いた コンクリート	KS に用いた コンクリート
スランプ (cm)	9.0	9.0
空気量 (%)	4.5	4.6
7日圧縮強度 (N/mm ²)	24.3	25.8
28日圧縮強度 (N/mm ²)	31.2	33.2
91日圧縮強度 (N/mm ²)	40.1	41.0

3. 試験結果及び考察

3.1 コンクリートの諸性状

SK シリーズのコンクリートの諸性状の試験結果及びKSシリーズのコンクリートの諸性状の試験結果を表-4にまとめて示す。いずれのケースにおいても、ほぼ同等の性状のコンクリートであったことがわかる。

3.2 各種試験結果

(1) 含浸深さ試験

試験結果を図-2, 図-3に示す。試験結果からシラン系単体のものから、シラン系の割合が少なくなっていくにつれて、含浸深さが小さくなっていることがわかる。含浸深さを表す撥水層を形成するのはシランのみの特徴であるため、シランの割合が少なくなるにつれて含浸深さが小さくなった結果は予想通りの結果だったといえる。また、後から重ねて塗布したけい酸塩系の含浸深さについては測定方法がまだ確立されていないため、今回の含浸深さ試験では含浸深さの確認をとることが出来ていない。

KSとSKの含浸深さを比較した含浸深さ比のデータを表-5に示す。この表のシランは、シラン系を単体で使用した場合を意味し、SKシリーズのシラン系単体の場合を100としてSK, KSの含浸深さを比較したものである。SKは無処理のコンクリートにシラン系含浸材を塗布した場合のデータであり、KSはけい酸塩系が塗布さ

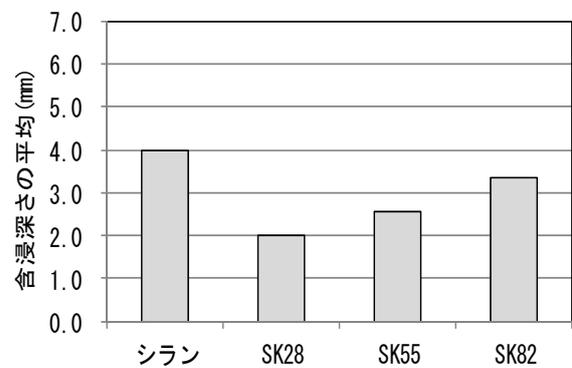


図-2 含浸深さ試験結果(SKシリーズ)

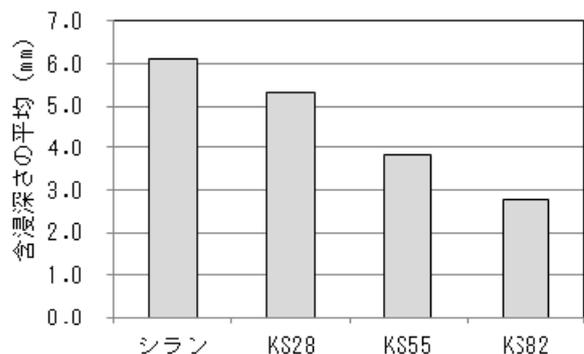


図-3 含浸深さ試験結果(KSシリーズ)

れているコンクリートにシラン系含浸材を塗布した場合のデータである。このデータを見るとけい酸塩系を塗布したコンクリートにシラン系の塗布を行っても、けい酸塩系の塗布量が少ない状況ではシラン系の含浸深さは若干小さくなる程度で、シラン系の含浸性状にはそれほど大きな影響を及ぼさないことがわかった。これは、まずけい酸塩系をコンクリートに塗布した場合、コンクリート中の水酸化カルシウムと反応してC-S-Hの結晶を形成するが、その結晶の大きさは1~10nmであり、セメントの水和反応で生成されるC-S-Hと同程度の大きさである。一方、後から塗布するシラン系のアルキルアルコキシシランの大きさはC-S-Hの結晶よりも小さいため、C-S-H系の結晶を通過してコンクリート内部に浸透し、含浸したのだと考えられる。しかし、けい酸塩系の塗布量が増えるとシラン系の含浸深さが低減していることから、けい酸塩系の量によってはシラン系の含浸が阻害されていることがわかる。

表-5の下段に示した()内の数値は、KSシリーズのシラン単体の場合の含浸深さを100としたときの各々の含浸深さ比である。これからもけい酸塩系の量によってSKシリーズと同様の含浸深さ比になっていることがわかり、けい酸塩系の量によってシラン系の含浸深さが影響を受けていることがわかる。

表-5 含浸深さ比

SKシリーズ	シラン	SK28	SK55	SK82
含浸深さ比(%)	100	51	64	84
KSシリーズ	シラン	KS28	KS55	KS82
含浸深さ比(%)	153 (100)	134 (88)	96 (63)	70 (46)

(2) 透水量試験

試験結果を図-4、図-5に示す。既往の研究³⁾と同様にシラン系は無処理やけい酸塩系と比較して透水量を大きく低減するという効果を確認できた。これはシラン系の材料の特徴である撥水層がコンクリート表層に形成されたからだと考えられる。また、SKの場合でもSK82やSK55では、シラン系単体よりも透水を抑制できる結果となったが、これは両方の良い効果が得られたためだと考えられる。

さらに、KSと比較した場合のデータを表-6に示す。この表のシランは、シラン系単体を意味し、SKの試験のシラン系単体を100としてSK、KSの透水量を比較したものである。この試験結果を見るとわかるように、重ね塗りを行うことで遮水性が高いシラン系よりも、透水を抑制していることが分かる。さらに、SKとKSを比較するとけい酸塩系を先に塗布したKSの方が透水を抑制

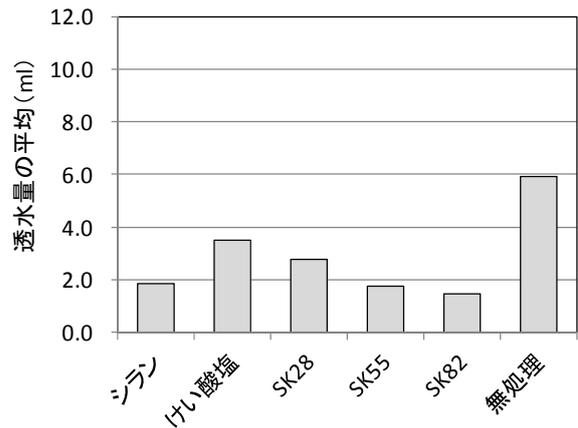


図-4 透水量試験結果 (SK シリーズ)

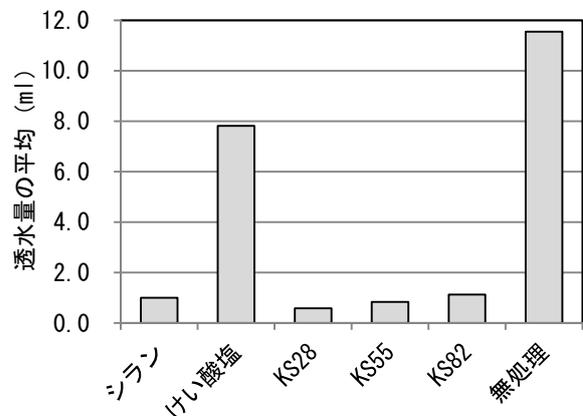


図-5 透水量試験結果 (KS シリーズ)

表-6 透水量比

SKシリーズ	シラン	けい酸塩	SK28	SK55	SK82
透水量比(%)	100	187	149	93	78
KSシリーズ	シラン	けい酸塩	KS28	KS55	KS82
透水量比(%)	54 (100)	419 (776)	31 (57)	45 (83)	60 (111)

する結果となった。これは、シラン系を先に塗布したSKは、後から塗布したけい酸塩系含浸材がシラン系の撥水層によって含浸を多少妨げられたため、少し透水抑制効果が小さくなったのだと考えられる。表-6の下段の()内の数値はKSシリーズのシラン単体の場合を100としたときの各々の透水量比である。含浸深さ比の場合ほど明確ではないが、シラン系の量が少ないほど透水量が多くなっていることがわかる。

(3) 中性化に対する抵抗性試験

SKシリーズの中性化試験の結果を図-6に示す。この結果を見るとわかるように、けい酸塩系が最も中性化を抑制する結果となった。しかし、SK28はけい酸塩系に

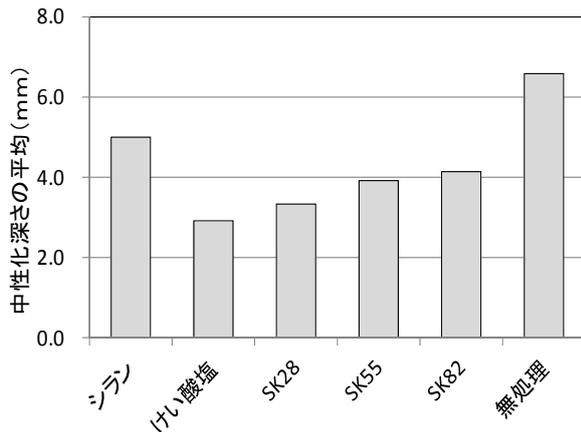


図-6 中性化に対する抵抗性試験結果(SK シリーズ)

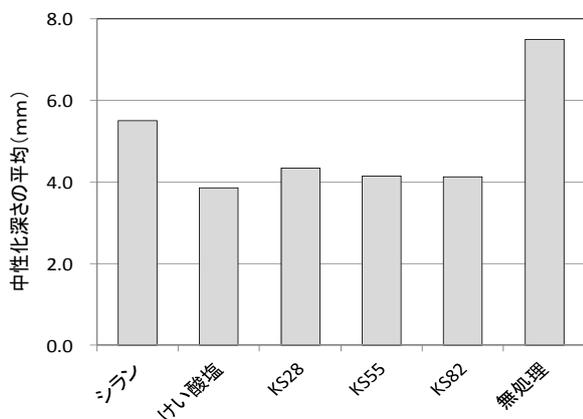


図-7 中性化に対する抵抗性試験結果(KS シリーズ)

表-7 中性化深さ比

SKシリーズ	シラン	けい酸塩	SK28	SK55	SK82
中性化深さ比(%)	171	100	114	134	142
KSシリーズ	シラン	けい酸塩	KS28	KS55	KS82
中性化深さ比(%)	189 (142)	133 (100)	149 (112)	142 (107)	142 (107)

近い中性化抵抗性を示し、シラン系と比較すると、どのSKも中性化を抑制できることが分かった。またKSシリーズの中性化に対する抵抗性試験の結果を図-7に示す。図-6と図-7において、同一のシラン単体、けい酸塩単体、無処理のデータに違いがあるのは、試験に用いたコンクリートが3.1に示すように同一のものではないため若干の誤差が生じているからである。両図より、KS、SK両方ともに、けい酸塩系の塗布割合が増えても中性化抵抗性に影響がないことがわかった。

さらに、KSと比較した場合のデータを表-7に示す。この表のけい酸塩は、けい酸塩系単体を意味し、SKの試験のけい酸塩系単体を100としてSK、KSの中性化深さを比較したものである。SKはけい酸塩系の塗布割合が大きいほど、けい酸塩系に近い効果を示すことが分か

った。しかし、KSと比較すると中性化に対してはあまり良い効果を得ることができないことが分かった。これは透水量試験の時と同様に、シラン系を塗布した後にけい酸塩系を塗布してもあまり含浸することができなかったからだと考えられる。表-7の下段の()内の数値はKSシリーズのけい酸塩系の中性化深さ比を100としたときの各々の中性化深さ比を示したものである。これらよりけい酸塩系の量が多いほど、中性化深さ比が小さくなっており、KSシリーズの()内の中性化深さ比とSKシリーズの中性化深さ比を比較することで、KSシリーズの方が中性化深さの抑制効果が高いことがわかる。

3.3 考察

今回の試験結果から、けい酸塩系とシラン系の表面含浸材を併用(重ね塗り)することで、単体で用いる場合より良い遮水効果を得ることができ、特にKSシリーズは良い遮水性を得ることができた。一方、中性化に対する抵抗性はけい酸塩系を単体で用いた場合が、最も良い結果を得たが、重ね塗りを行った場合はKSシリーズの方が、中性化に対する抵抗性を得ることができた。さらに、遮水性と中性化抵抗性を総合して考えると、KS28は遮水性に特に優れ、また中性化に対してもけい酸塩系と同等程度の抵抗性が得られたため、重ね塗りを行う場合はKS28程度の割合で併用するのが最も良いと考えられる。

今回の試験結果より、KSシリーズの方がSKシリーズより良い劣化抑制効果が得られたのは、SKシリーズは先にシラン系を塗布することで、コンクリート表面に撥水層を形成するため、後から重ね塗りのけい酸塩系の含浸を若干阻害したためだと考えられる。しかし、後から重ね塗りのけい酸塩系がどの程度含浸したかは、試験方法が確立されていないため確認できていない。今後、重ね塗りの場合に、どの程度含浸したかを検証する必要があると考えられる。

4. 結論

(1) けい酸塩系とシラン系をそれぞれの標準塗布量に対する質量比2:8の割合で、けい酸塩系、シラン系の順で併用(重ね塗り)する方法が、最も透水を抑制させることができた。

(2) 中性化抵抗性に対しては、けい酸塩系を単体で用いる場合が最も抑制することができたが、けい酸塩系を塗布した後にシラン系を塗布する併用系も、けい酸塩系に近い中性化抵抗性を得ることができた。

今回の試験では、けい酸塩系、シラン系それぞれ1種類だけを併用した場合の劣化抑制効果を検証したが、試験結果からけい酸塩系、シラン系を単体で用いるより併

用した方が高い劣化抑制効果を得ることができると考えられる。また、含浸材の種類や組み合わせによっても異なると思われるが、本検討からは併用の割合としてはKS28のように少量のけい酸塩系にシランを重ね塗りすることの有効性が明らかとなった。

謝辞

本研究において表面含浸材を提供して下さった、メーカーの方々には大変お世話になりました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 水谷真也, 守屋 進, 金井浩一: 浸透性コンクリート保護材の性能持続性と性能評価方法: 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.11, pp.373-378, 2011.10
- 2) 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
- 3) 井上雄太, 福手 勤, 藤田起也, 澤田 巧: コンクリート用各種表面含浸材の性能比較に関する実験的研究, 第64回土木学会年次学術講演会講演概要集, Disk2, pp.401-402, 2009.8
- 4) 武若耕司: けい酸塩系表面含浸材の性能評価および設計施工指針(案)の策定について, 防水ジャーナル, No.472, pp.21-27, 2011.3
- 5) 原川卓真, 鶴田浩章: コンクリート用表面含浸材料の諸性質と劣化抑制効果, 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.405-412, 2010.10