

# シラン系含浸材とシラン・シロキサン系表面塗布材の併用によるコンクリートの表面保護効果に関する研究

# IMPROVEMENT IN CONCRETE SURFACE PROTECTION ABILITY USING BOTH SILANE AND SILANE-SILOXANE LAYERS

大塚秀三 ——\* 1      八木 修 ——\* 2  
中田善久 ——\* 3      荒巻卓見 ——\* 4

Shuzo OTSUKA —— \* 1      Osamu YAGI —— \* 2  
Yoshihisa NAKATA —— \* 3      Takumi ARAMAKI —— \* 4

キーワード：  
シラン, シラン・シロキサン, 含浸材, 表面塗布材

Keywords:  
Silane, Silane-siloxane, Penetrant, Surface coating material

In order to improve in concrete surface protection ability with retaining its low gloss, two types of silane penetrant (silane-1 and silane-2), one type of silane-siloxane surface coating material and the standard commercial penetrant were examined. The silane penetrants having different reaction speeds were individually coated on the concrete surface. The silane-1 deeply penetrated than the silane-2. However, the silane-2 which reacts faster than the silane-1 showed the excellent properties of preventing water permeability, carbonation and chloride-ion penetration. This is supposed that it generated steadier and thicker siloxane-bond network in the inner side of the pores of the treated concrete than the other. Treatment with both silane and silane-siloxane layers showed much better properties than a single treatment of them. The combination of the silane-2 and silane-siloxane layers gave the best durability to the concrete surface among the surface treatment materials. The gloss measurement showed that the specimens coated with the silanes had low glosses as same as the untreated one. On the other hand, the specimens with the silane-siloxane resulted having high glosses because of its own high gloss.

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性向上または劣化の進行を抑制することを目的とした表面保護工法は、表面被覆工法あるいは表面含浸工法に分類でき、目的に応じてそれぞれ単独で使い分けられている。前者は表面塗布材などでコンクリート表面を被覆することによりコンクリート構造物を表面において保護するのに対して、後者は浸透性吸水防止材(以下、表面含浸材とする)を数 mm 程度含浸させ、コンクリートの表層部を保護することにそれぞれ特徴がある。このうち表面含浸材は、市販品のおよそ半数を占めるシラン系が主流<sup>2)</sup>であり、より深く含浸させることで性能保持を担保することが一般的である。

シラン系表面含浸材の含浸を深くするためには、低分子量で反応性を抑制することが必要となる。この結果、コンクリートの表面に近い含浸層が経年変化により劣化し、表面保護効果が比較的早期に低下するとの指摘<sup>3)</sup>もあるが、未だ長期耐久性に関する体系的な整理が必ずしも十分とはいえない。さらには、シランの反応性とこれによる網目構造の強弱に着目した検討は見当たらず、不明な点が残る。

そこで、本研究ではシラン系表面含浸材の反応性を高め、より緻密な含浸層を形成することで従前に比べ表面含浸材の劣化を抑制す

るとともに、これをシラン・シロキサン系表面塗布材により保護する表面保護工法(以下、併用型とする)の有効性を明らかにすることを目的とした。

ここでは、シラン系表面含浸材の反応性の相違に着目し、使用濃度を変化要因とした場合の併用型の表面保護効果を、JSCE-K571-2004<sup>4)</sup>に基づき評価することに加え、コンクリート表面の美観性に寄与する光沢度および表面色へ及ぼす影響についても併せて検討した結果を報告する。以下、シラン系表面含浸材を表面含浸材、シラン・シロキサン系表面塗布材を表面塗布材と称し、両者を合わせて表面処理材と称する。

## 2. 実験概要

実験に使用した原料液材の種類と性質を表 1、使用した表面処理材および供試体名を表 2、コンクリートの使用材料を表 3、コンクリートの調合を表 4、試験項目を表 5 にそれぞれ示す。

供試体は、表 4 に示す調合に基づき練混ぜたコンクリートを用いて、JSCE-K571-2004<sup>4)</sup>に従って作製し、それぞれ所定の前養生が終了した後に表 2 に示す表面処理材を塗工した。含浸材または表面塗布材のみを塗工した場合(供試体 A~D, I, J)は、一度塗りとした。含浸材と表面塗布材を併用した場合(供試体 E~H)には、先行し

本稿の一部は 2010 年度日本建築学会関東支部研究報告集<sup>5)</sup>において発表したものである。

<sup>1)</sup> ものつくり大学技能工芸学部建設学科 専任講師・修士 (工学)  
(日本大学大学院理工学研究科博士後期課程建築学専攻 大学院生)  
(〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)

<sup>2)</sup> ㈱エム&エムトレーディング 工博

<sup>3)</sup> 日本大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)

<sup>4)</sup> ものつくり大学技能工芸学部建設学科 学部生

<sup>1)</sup> Assis. Prof., Dept. of Building Technologists, Monotsukuri Institute of Technologists, M. Eng. (Graduate Student, Doctor Degree Course, Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ.)

<sup>2)</sup> M&M Trading Inc., Dr. Eng.

<sup>3)</sup> Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

<sup>4)</sup> Undergraduate Student, Dept. of Building Technologists, Monotsukuri Institute of Technologists

表1 使用した原料液材の種類と性質

液材	種類	有効成分	触媒の有無	特徴
含浸材 1	シラン系	100%	無し	撥水性は強いが反応性はやや劣る
含浸材 2	シラン系	100%	無し	撥水性はやや劣るが反応性は高い
表面塗布材	シラン・シロキサン系	約 18%	有り	硬化触媒の作用で表面に高分子膜を作る
比較用含浸材(市販品)*	シラン系	約 15%	無し	—

※：比較用含浸材のデータは、製品カタログおよび MSDS シートより推測した。

表2 使用した表面処理材および供試体名

供試体名	含浸材		表面塗布材
	種類	使用濃度※2	
A	シラン 1※1	15%	—
B	シラン 1	無希釈	—
C	シラン 2※1	30%	—
D	シラン 2	無希釈	—
E	シラン 1	15%	シラン・シロキサン
F	シラン 1	無希釈	シラン・シロキサン
G	シラン 2	30%	シラン・シロキサン
H	シラン 2	無希釈	シラン・シロキサン
I	—	—	シラン・シロキサン
J	比較用含浸材(市販品)	無希釈	—
無塗布	—	—	—

※1：シラン1は表1で含浸材1を、シラン2は含浸材2をそれぞれ示す。  
 ※2：希釈にはイソプロピルアルコールを溶剤として用いた。

て含浸材を塗布し、3時間後、表面が乾燥した後に表面塗布材を塗布した。なお、各表面処理材の塗工量は、250g/m<sup>2</sup>とした。また、コンクリートの水セメント比は、W/C=30%、50%および60%の3水準とした。

表5に示すように、含浸深さ、透水量、吸水率、塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験および中性化に対する抵抗性試験は、JSCE-K571-2004<sup>4)</sup>に基づいた。また、光沢度および表面色は、表面処理材の塗工面における測定面の中心および中心から各25mmの3箇所の位置を光沢計および分光測色計にて測定し、3箇所の平均を試験値とした。なお、表面色はL\*a\*b\*表色系による評価とした。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 光沢度および表面色

表面処理材ごとの光沢度を図1に示す。光沢度は、含浸材のみ(供試体A~D、J)では無塗布とほぼ同等であった。一方、表面塗布材のみ(供試体I)では光沢度が高くなり、それを反映して、含浸材と表面塗布材を併用した場合(供試体E~H)でも同様に高くなった。すなわち、表面塗布材は表面に塗膜を作るため、光沢度が高くなることが分かった。

表面処理材ごとの色差(ΔE)を図2に示す。なお、色差(ΔE)は無塗布の供試体との差であり、(1)式により算出した。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad (1)$$

明度(L\*)は、含浸材のみおよび比較用含浸材に比べ表面塗布材のみおよび併用型の方が小さくなり、これに伴って色差が大きくなる傾向を示した。これは、前述したように、表面塗布材がコンクリート

表3 コンクリートの使用材料

使用材料	名称	品質・性状・主成分
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度：3.16 g/cm <sup>3</sup> 比表面積：3.280 cm <sup>2</sup> /g
水(W)	上水道水	—
粗骨材(G)	石灰碎石 2005	表乾密度：2.70g/cm <sup>3</sup> 粗粒率 6.64 吸水率：0.63%
細骨材(S)	陸砂	表乾密度：2.61g/cm <sup>3</sup> 粗粒率 2.75 吸水率：2.30%
化学混和剤(Ad)	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物
	AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩、オキシカルボン酸塩

表4 コンクリートの調査

W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材かさ容積(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				Ad (C×%)	空気量 (%)	スラック*、スラックフロ-** (cm)		
			W	C	S	G					
30	46	0.550	170	567	728	1.1	3.6	21.5 *			
50	51		340	914	863				0.9	3.7	22.0 *
60	53		283	960	—				1.4	3.6	55.0 **

表5 試験項目および方法

試験項目	試験方法
光沢度	光沢計(M社製,CM-508型)にて測定
表面色	分光測色計(M社製,GM-60型)にて測定
外観観察試験	JSCE-K571-2004
含浸深さ試験	
透水量試験	
吸水率試験	
塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験	
中性化に対する抵抗性試験	

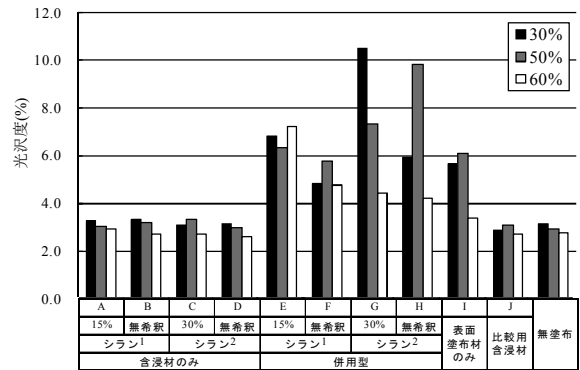


図1 表面処理材ごとの光沢度

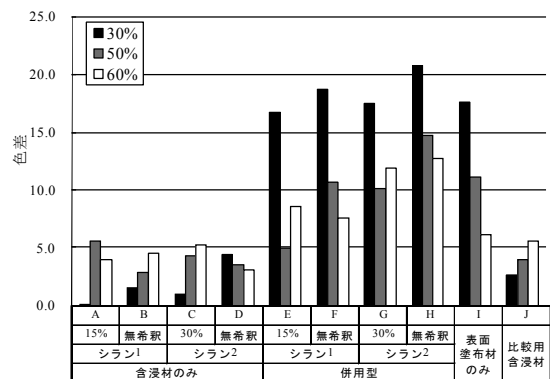


図2 表面処理材ごとの色差(ΔE)

表面に塗膜を形成するため、コンクリートの表面色を変化させたためと考えられる。

### 3.2 含浸深さ

表面処理材ごとの含浸深さを図3に示す。含浸深さは、シラン1の方がシラン2より大きくなった。これは、シラン1の方がシラン2よりもやや反応性が低いため、細孔内部のセメント水和物との反応性が低く、その分大きく含浸したものと思われる。シラン1は濃度差により浸透深さに差が出たが、シラン2は濃度差による浸透深さの差はほとんどなかった。これは、シラン自身の反応性の差によるものと思われる。すなわち、反応性の低いシラン1は長時間に渡り少しずつ細孔内部に浸透するため、濃度差が影響したのに対し、反応性の高いシラン2は早い段階でセメント水和物と反応したため、濃度差による違いが少なかったものと思われる。

コンクリートの細孔内部表面は、多量の水（反応水）が存在し強いアルカリ状態であるため、含浸したシランは直ちに加水分解し、細孔内部表面に固定化される。更にその上にシランが積層し、シロキサン結合（≡Si-O-Si≡）の網目構造を生成・成長させる。その際、細孔内部表面より遠ざかるにつれ、反応水とアルカリ触媒の影響が小さくなる。したがって、このような状態でシランが加水分解及び縮・重合反応を行い、しっかりした網目構造を生成・成長させるには、シラン自身の反応速度が大きく影響すると考えられる。

反応速度の速いシラン2の場合、無希釈（供試体D）とそれの30%液含浸供試体（供試体C）を比較すると、3倍以上の濃度差があるにも関わらず、含浸深さはどの水セメント比においてもほぼ同じとなった。これは、反応速度の速いシラン2同士が、細孔内部表面より比較的遠い場所でも、十分に加水分解及び縮・重合反応を行い網目構造が積み重ねられたため、3倍以上の濃度差にも関わらず、含浸深さがほぼ同じになったものと思われる。

一方、無希釈どうしで比較すると、反応速度の遅いシラン1（供試体B）の方が反応速度の速いシラン2（供試体D）よりも含浸深さが大きくなっている。これは、反応速度の遅いシラン1の方が網目構造の積層する速度が遅いため、十分に積層されないまま更に細孔内部へと含浸したものと思われる。

このような網目構造の積層速度の違いが、以降の各種測定に大きな影響を与えることになる。

併用型の場合（供試体E～H）、含浸深さは処理前の含浸材のみの場合と比較して、全体的に小さかった。これは、使用した表面塗布材に含まれている触媒の影響と思われる。すなわち、後で塗布された触媒が、先に塗布された含浸材層へ浸透し、含浸材の硬化を早めたものと推測できる。

また、水セメント比の比較では、水セメント比が大きい方が大きく含浸している。これは、水セメント比が大きい方がコンクリートの細孔がより大きいため、より大きく含浸したものと思われる。

### 3.3 透水量および透水比

表面処理材ごとの透水量を図4、透水比を図5に示す。透水量および透水比は、含浸材のみの場合、シラン1（供試体A～B）とシラン2（供試体C～D）では大きな差が確認された。すなわち、シラン2の方がシラン1より透水量はるかに少なかった。なお、透水比とは、無塗布の供試体に対する比を表す。

一般的には、撥水性が高くかつ含浸深さが大きいシラン含浸材を

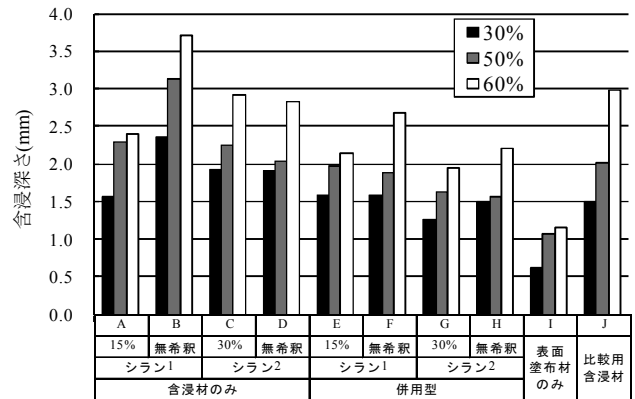


図3 表面処理材ごとの含浸深さ

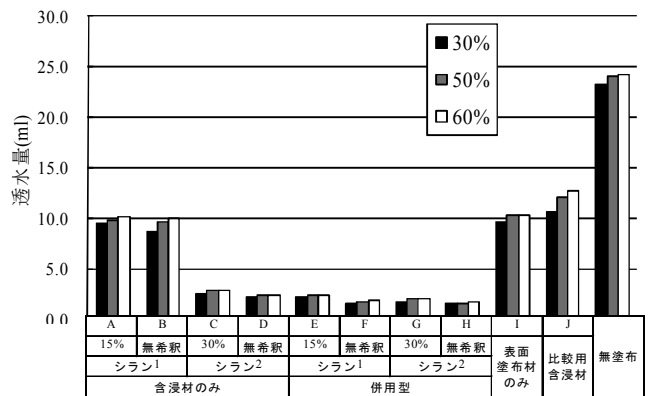


図4 表面処理材ごとの透水量

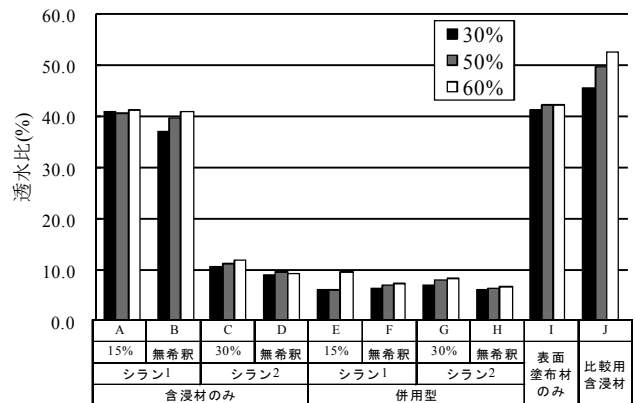


図5 表面処理材ごとの透水比

用いた方が、耐水性が高いと考えられている<sup>6)</sup>。実際、シラン1の方が撥水性は高くかつ含浸深さが大きい。しかし、透水量の測定結果は、含浸深さが大きいシラン1の方が透水量は大きく、含浸深さの小さいシラン2の方が透水量は少なかった。すなわち、含浸深さが大きいシラン含浸材の方が、透水量で示される耐水性が低い結果となった。

この理由について以下のように考察できる。コンクリートの細孔内部において反応し難い、すなわち十分にシロキサン結合の網目構造が発達していないシラン1が、透水量の測定といういわば動的な耐水性に対し、大きな影響を受けたものである。実際には、十分に

発達していない網目構造が、水圧の影響で変形・移動しやすくなるため透水量が大きくなったものと思われる。一方、シラン2では細孔表面と反応している部分が多く、かつ、十分に網目構造が発達しているため、水圧による変形・移動が阻害され、その結果、透水量が小さくなったものと思われる。

反応性の低いシラン1は、供試体Aと供試体Bでは約7倍の濃度差があるにも関わらず、透水量はほぼ同じ値になった。すなわち、供試体Bでは含浸したシラン1の内その6/7は、透水といういわば動的な耐水性に対しては、ほとんど効果がなかったと言える。

併用型供試体E~Hでは、透水量が著しく小さくなった。水圧の影響が表面塗布材の部分で低減されたため、含浸材の種類や含浸量にかかわらず、透水量が抑制されたものと思われる。また、水セメント比での違いはほとんど無かった。

以上より、含浸材と表面塗布材の併用は、特に透水量の低減に大きな効果があるといえる。

### 3.4 吸水率および吸水比

表面処理材ごとの吸水率を図6、吸水比を図7に示す。シラン1の方が撥水性が高く、かつ含浸深さが大きい、透水量同様、吸水率もシラン2の方が小さくなった。ただし、その差は透水量程大きくはなかった。この理由に関し、以下のように考えられる。吸水率の測定は、透水量の測定ほど水圧がかからないため、含浸されたシランのセメント水和物との反応性及び、網目構造の影響は少ないと考えられる。そのため、透水量の測定ほど大きな差が現れなかったものと思われる。

併用型の場合(供試体E~H)、吸水率が著しく小さくなった。これは、透水量の測定と同様に、含浸材と表面塗布材という異質の性質のものを積層しているため、その界面での水の浸透に対する抵抗性が生じた結果と思われる。

水セメント比が大きい程、供試体の吸水率は大きくなるが、一方、吸水比は小さくなる。なお、吸水比とは、無塗布の供試体に対する比を表す。このことより、水セメント比の大きいコンクリート程、その使用効果が高いことが分かった。

### 3.5 中性化深さおよび中性化深さ比

表面処理材ごとの中性化深さを図8、中性化深さ比を図9に示す。中性化試験は、吸水量や透水量と異なり、気体である炭酸ガスの浸透に関するため、シラン自身の撥水性の強弱や、含浸材のコンクリートの細孔内部での反応性の影響は受けないものと推測していた。しかし、含浸材のみの比較(供試体A~D)でも、シラン2の方がシラン1よりも中性化深さが小さかった。なお、中性化深さ比とは、無塗布の供試体に対する比を表す。

この理由に関しても、シラン2の反応性を上げることができる。すなわち、シラン2は細孔内部での反応性が高く、そのため十分な網目構造が生成・成長し、炭酸ガスの透過を阻害したものと思われる。一方、シラン1はそのような十分な網目構造を生成しにくいいため、不完全な網目構造の隙間を通り、より多くの炭酸ガスが透過したものと思われる。

一方、併用型では(供試体E~H)、吸水率と同様に、中性化深さが大幅に小さくなった。これは、含浸材と表面塗布材という異質の性質のものを積層しているため、界面での炭酸ガスの浸透に対する抵抗性が生じたものと思われる。

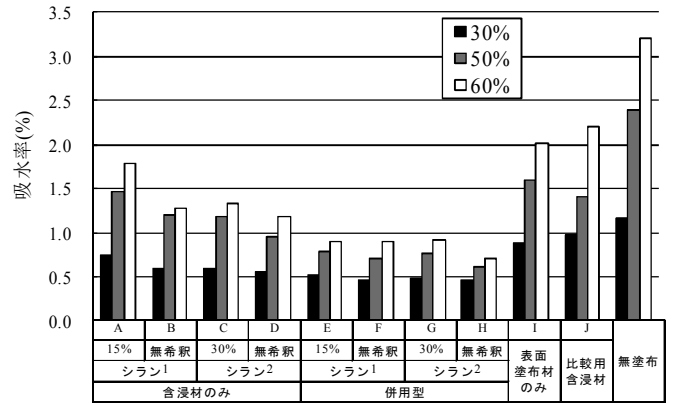


図6 表面処理材ごとの吸水率

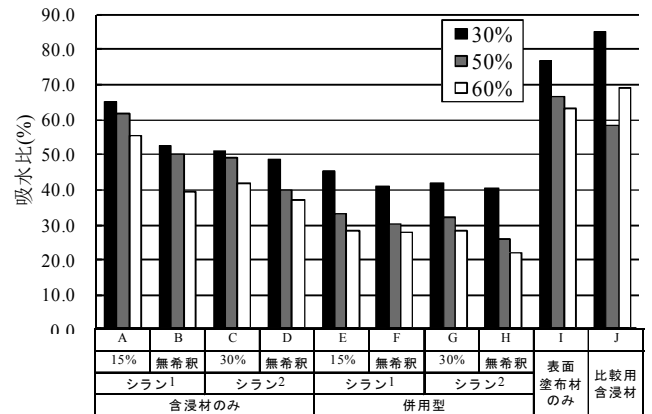


図7 表面処理材ごとの吸水比

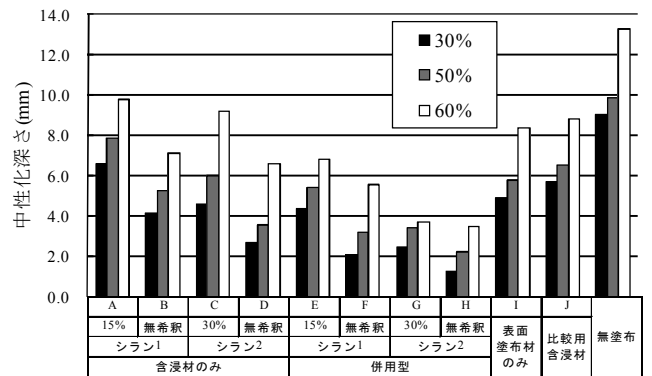


図8 表面処理材ごとの中性化深さ

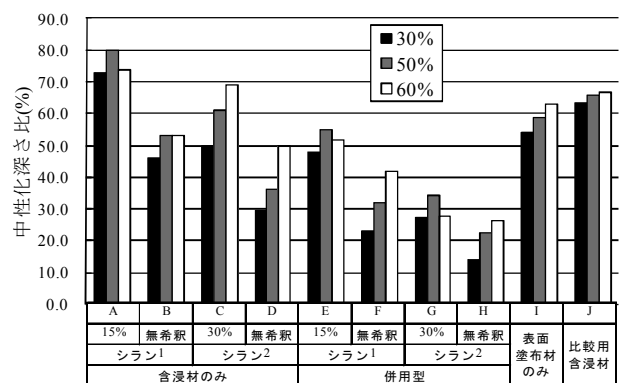


図9 表面処理材ごとの中性化深さ比



### 3.6 塩化物イオン浸透深さおよび塩化物イオン浸透深さ比

表面処理材ごとの塩化物イオン浸透深さを図 10、塩化物イオン浸透深さ比を図 11 に示す。含浸材のみの比較（供試体 A～D）では、シラン 2 の方がシラン 1 よりも塩化物イオン浸透深さが小さかった。なお、塩化物イオン浸透深さ比とは、無塗布の供試体に対する比を表す。

この理由に関しても、シラン 2 の反応性を挙げるができる。すなわち、シラン 2 は細孔内部のセメント水和物とより反応し、かつ、その部分で網目構造が十分に発達しているため、塩化物イオンを含む水の透過が阻害されたものと思われる。一方、シラン 1 は網目構造の発達が不十分なため、より多くの塩化物イオンを含む水が透過したと思われる。

併用型では（供試体 E～H）、吸水率や中性化深さと同様に、塩化物イオン浸透深さが大幅に小さくなった。特に水セメント比が 60% の場合、大きな低減効果が認められた。ここでも、含浸材と表面塗布材という異質の性質のものを積層しているため、界面での塩化物イオンを含む水の浸透に対する抵抗性が生じたものと思われる。

以上より、含浸材と表面塗布材の併用により、コンクリート表面の耐水性、中性化深さおよび塩化物イオンの浸透抵抗性を大幅に改善させることができ、コンクリート表面特性の改善に有効であることが確認できた。

#### 4. まとめ

本研究では、シラン系表面含浸材およびシラン・シロキサン系表面塗布材を併用した場合のコンクリートの表面保護効果について検討した。その結果得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 光沢度および色差は、表面塗布材を塗工した場合には、無塗布および含浸材のみに比べて大きくなる傾向を示す。一方で、含浸材のみを塗工した場合には、無塗布との差は小さくなる。
- (2) 含浸材の性能は、単に含浸深さよりも、その反応性の方がより大きく影響する可能性が示唆された。
- (3) シラン系含浸材とシラン・シロキサン系表面塗布材の併用により、含浸材のみと比較して、コンクリート表面の耐水性、塩化物イオンの浸透抵抗性および中性化抵抗性を著しく改善させることができる。特に、反応性の高いシランの方が顕著である。

以上から、本検討の範囲内ではシラン系表面含浸材をシラン・シロキサン系表面塗布材で保護した併用型の表面保護工法の有効性が予見された一方で、以下に示すいくつかの課題があげられる。

- ① 無塗布および含浸材のみの供試体に比べた、表面塗布材の光沢度および色差の低減
  - ② 屋外暴露による長期耐久性の確認
  - ③ シラン系含浸材の溶脱現象、コンクリートの細孔内部での網目構造の積層状態の確認
- 今後さらに検討していく予定である。

#### 謝辞

実験に際して、(株)エム&エムトレーディング・鈴木和参氏、実験およびデータ整理に際して、綜警ビルサービス・上船慎也氏(当時ものつくり大学大塚研究室)をはじめとした学生諸君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

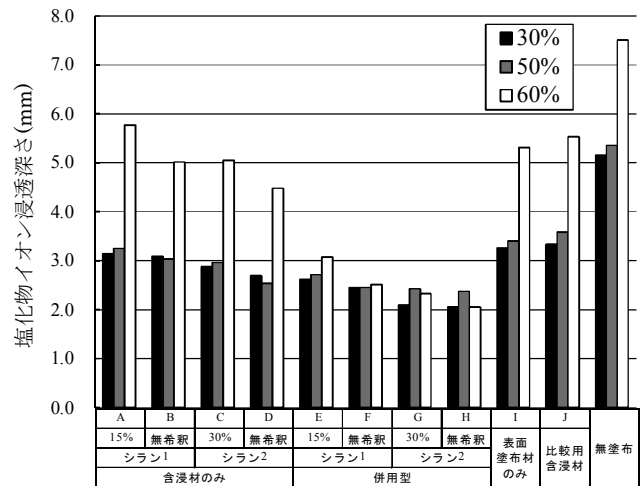


図 10 表面処理材ごとの塩化物イオン浸透深さ

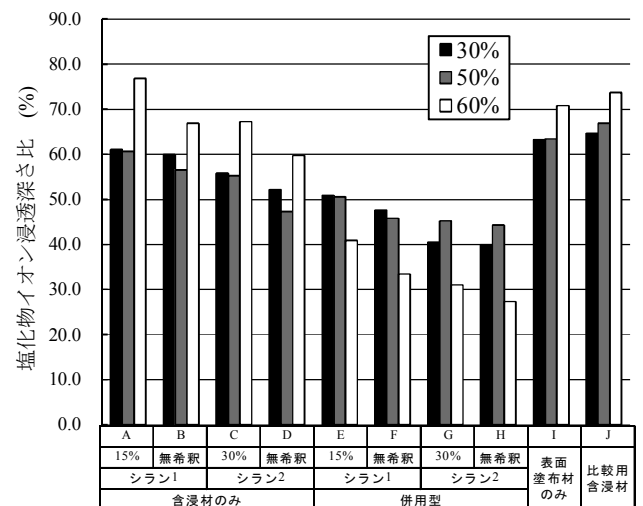


図 11 表面処理材ごとの塩化物イオン浸透深さ比

#### 参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)，pp.1-3，2005.4
- 2) 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，pp.16-17，2006
- 3) 久保善司，玉井譲，栗原慎介，宮川豊章：シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.421-426，2001
- 4) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)，表面含浸材の試験方法(案)，pp.55-67，2005.4
- 5) 八木修，大塚秀三，中田善久：含浸材と表面塗布材の併用によるコンクリート表面特性の改質，2010 年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp.65-68，2011.3
- 6) 遠藤裕丈，田口史雄，谷本俊充：寒冷環境下におけるシラン系表面含浸材によるコンクリートの保護効果に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.2081-2086，2006

[2011 年 6 月 20 日原稿受理 2011 年 8 月 26 日採用決定]