

論文 シラン系表面処理がコンクリート中の水分に与える影響

久保善司*1 堀耕次*2 服部篤史*3 宮川豊章*4

要旨：コンクリート構造物の補修工法の1つとして、シラン系発水剤を用いた表面処理による水分制御がある。本研究では、シランの重合度、溶媒、および上塗りモルタルの併用による発水性および水分制御に与える影響を種々の環境、および供試体スケールを変えて検討を行った。特に実構造物を想定した供試体においては、コンクリートの相対湿度の長期的な測定によりシラン処理による水分制御が明らかとなった。

キーワード：シラン、水溶媒、上塗りモルタル、水分分布、発水系水分制御

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化原因の代表的なものとしてアルカリ骨材反応や鉄筋腐食があり、これらの劣化機構においてはコンクリート中の水分が重要な要因となっている。シラン系表面処理は、コンクリート内部への水分の侵入をある程度許すが、内部の水分の逸散が可能な発水系の水分制御であり、コンクリート内部の水分逸散が重要な場合に、シラン系発水剤を用いた表面処理が注目されている。本研究では、材料の安定性を考えて行われるシランのオリゴマー化や作業の安全性の観点からのシランの溶媒としての水の使用について、さらに、中性化防止やシランの耐久性を高めるために併用される上塗りモルタル処理[1]について発水性の検討を行った。また、これらの処理がコンクリートに適用された場合のコンクリート中の水分分布に与える影響は未解明なところが多く、コンクリートの相対湿度を測定しこれらを検討することとした。

2. 実験概要

本研究では、筆者らのシランの分子構造に関する検討結果の中で最も発水性に優れていた分子量262のシラン(デシルトリメトキシシラン、アルキル基 C_{10})[2]を中心として用い、重合度、溶媒および上塗りモルタルの併用を要因とした実験を行った。シリーズ1では種々のシランを用いた発水性の検討を行い、シリーズ2ではシラン系表面処理がコンクリート中の水分に与える影響の検討を行った。

2.1 コンクリートの水セメント比

シリーズ1については、シランの含浸量を大きくするため $W/C=60\%$ とした。シリーズ2では実構造物を想定し、 $W/C=51\%$ のレディーミクストコンクリートを用いた。

2.2 シランの重合度、溶媒、および上塗りモルタル

従来のシランモノマーでは揮発性が大きいため、重合することにより揮発性を小さくし、安定性を高めることが検討されているが、分子量が大きくなると含浸性に問題が生じる[3]。そこで、重合度については、モノマーに近い重合度2と重合度の若干高いものとして重合度9の2種類のオリ

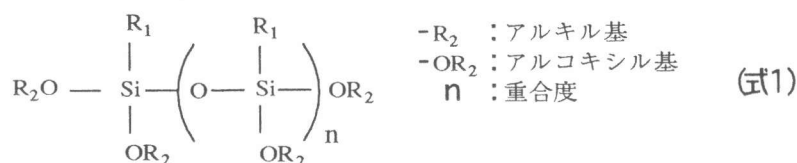
*1 京都大学大学院 工学部土木工学科 (正会員)

*2 ショーボンド建設 (株)

*3 京都大学助手 工学部土木工学科、工修 (正会員)

*4 京都大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

ゴマーを用意した。なお、重合反応は加水分解で生成したシランの縮合を繰り返すことで行われる。重合されたシランの分子構造は(式1)で示されると考えられる。



水溶媒シランは、水への分散性からアルコール溶媒の場合よりも分子量は小さくする必要があり、アルキル基をC₆としたうえで、分散時の安定性のためアルコキシ基をエトキシとしたシランの実績が高い。そこで、今回の実験においては、アルキル基としてはC₁₀、C₆の2種類について検討することとした。溶媒、重合度をまとめて表1に示す。

表1 シランの種類

名称	分子式	アルキル基	重合度	溶媒
デシルトリメトキシシラン	C ₁₀ H ₂₁ Si(OCH ₃) ₃	C ₁₀	0	イソプロピルアルコール
			2	
			9	
			0	水
ヘキシルトリメトキシシラン	C ₆ H ₁₃ Si(OCH ₃) ₃	C ₆	0	イソプロピルアルコール
ヘキシルトリエトキシシラン	C ₆ H ₁₃ Si(OC ₂ H ₅) ₃		0	水

表2 上塗りモルタルの種類

モルタルの種類	発水性	透湿性	伸び能力(伸度)
発水型	有する	非常に大きい(170g/m ² day)	小さい(0~5%)
透湿型	無	大きい(12g/m ² day)	比較的大きい(75%)
遮水型	無	小さい(2g/m ² day)	大きい(116%)

シランの発水効果の持続のため、シラン系発水剤で処理したコンクリート表面に上塗りモルタルを併用したり、さらに、細骨材を発水処理し、モルタル自身に発水性を付与することなどが検討されている。アルカリ骨材膨張の補修を行う場合、

水分の逸散能力が重要であり、上塗りモルタルには透湿性が重要とされている。これに対し、塩害に対しては一般に大きな遮水性が要求されている。そこで、水分の逸散能力の観点から透湿性を重視したアルカリ骨材膨張仕様、遮水性を重視した塩害仕様、および細骨材を発水処理した発水仕様の計3種類を表2に示すように用意した。

2.3 シリーズ1 発水性の確認

シランの重合度、溶媒、上塗りモルタルなど、異なるシランや仕様に対する発水性を比較検討するため、小型供試体(4×4×16cm)をコンクリート打設1日後脱型し、約2カ月間水中養生した後、約10日間の乾燥を行った。表1に示した6種類のシランを用いて、シラン含浸のみの供試体を6種類とシラン含浸(C₁₀イソプロピルアルコール溶媒モノマー)と上塗りモルタル(3種類)を併用する供試体を3種類、無処理の計10種類の表面処理仕様を用意し、各表面処理仕様に対して、水中環境(室内において水道水中に供試体を静置：吸水性の検討)と室内環境(室内に供試体を静置：水分逸散性の検討)の2環境条件を設定した。同一の要因に対し2本ずつの供試体を作製した。シラン含浸前には下地処理(ワイヤーブラシ仕上げ)を行い、シランの濃度を1mol/lとしてシランの含浸量は300g/m²を目安とし2回の刷毛塗りを行った。モルタル塗布量は2.0kg/m²を目安とし2回の刷毛塗りを行った。シラン処理、無処理の供試体は、シラン含浸1日後、9日間室内で養生した。上塗りモルタル処理の供試体は、シラン含浸1日後、モルタル塗布を2日にわたり行い、モルタル塗布後1週間室内で養生した。各供試体は養生後、各環境下に静置した。

2.4 シリーズ2 シラン系表面処理がコンクリート中の水分分布に与える影響

大型供試体(1×1×0.15m)を3体用意し、屋外に静置した(図1参照)。供試体はC₁₀アルコール溶媒のシラン含浸のみのものと透湿型モルタルの上塗りを併用したもの、そして無処理のもの計3種類である。供試体は打設3日後に脱型し、2週間湿布養生後、乾燥を行い、防水工を行った。供試

体は鋼板の上に打設され下面からの水分の逸散、供給はほほないものと考えられる。またアスファルトシート防水工をコンクリート上面(1×1m)に施工したため、防水工後は供試体の上面からの水分の逸散、供給もほほない。したがって、供試体の水分の移動は側面(1×0.15mの4つの面)のみを通して行われるものと考えられる。供試体には、表面から所定の深さ(図1,表3参照)の相対湿度を測定するための塩化ビニールパイプを埋設した。塩化ビニールパイプは二重構造(図2)になっており、各供試体の所定の深さでの相対湿度を経時的に測定し、シラン系表面処理がコンクリート中の水分に与える影響を検討した。

また、大型供試体と同一の表面処理仕様の中型供試体(10×10×40cm)を同じ環境下におき、その重量変化を経時的に測定し、供試体レベルの発水効果を確認し、大型供試体の結果と比較検討を行うものとした。

3. 結果および考察

本研究では、重量変化率、透湿度、透湿度および発水度を参考文献[2]をもととして、次のように定義する。これらは供試体2本の平均値を用いる。

重量変化率：暴露開始時の重量からの変化量を供試体重量で除したものを重量パーセントで表したものを重量変化率とする。

透湿度：水中環境における吸水による重量変化率を透湿度とし、増加を正とする。この値が小さいほど水分遮断性が大きいと考えられる。

透湿度：室内環境における水分逸散による重量変化率を透湿度とし、減少を正とする。この値が大きいほど水分逸散能力が高いと考えられる。

発水度：透湿度を透湿度で除した比を発水度とする。透湿度が小さく、透湿度が大きいほど発水度は大きくなる。つまり、水分遮断性が大きく、水分逸散性の大きいものほど発水度は大きくなる。

3. 1 シリーズ1 -発水性の確認-

(1) シランの重合度 シランの重合度が0、2、9と異なるシランを含浸させた供試体の発水度を図3に示す。透湿度はオリゴマー化されたシランはモノマーに比べて大きいか同じ程度となり、透湿度については重合度が高いものほど大きくなった。シランモノマーでは、一般に分子量が大きいほどその透湿度、透湿度は小さくなるとされている[2]。オリゴマー化されたものについては重合度が高いほど分子量が大きくなるが、その傾向は認められない。これは、重合したものにあっては、分子量は大きくなるもののコンクリート細孔の内側を覆う疎

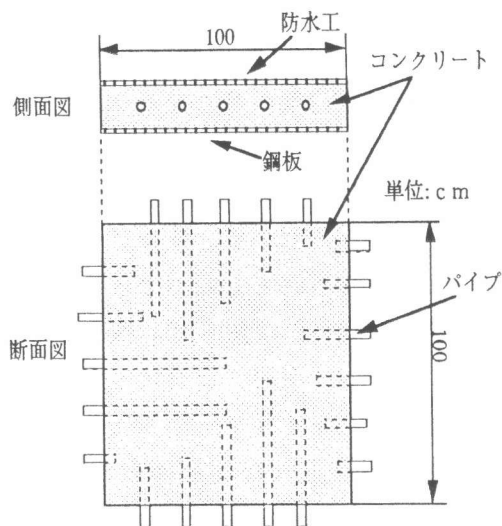


図1 大型供試体外観図

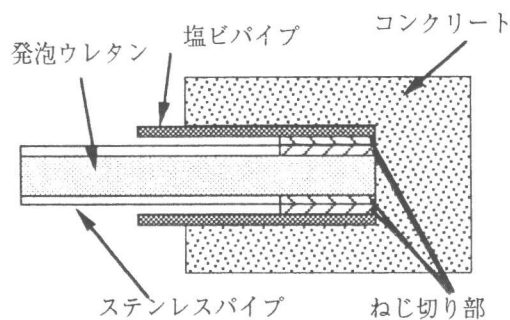


図2 供試体に埋設されたパイプの構造

表3 表面からの深さ

深さ(cm)	測点数
2.5	3
5.0	3
7.5	3
10.0	4
20.0	2
30.0	2
40.0	2
50.0	2

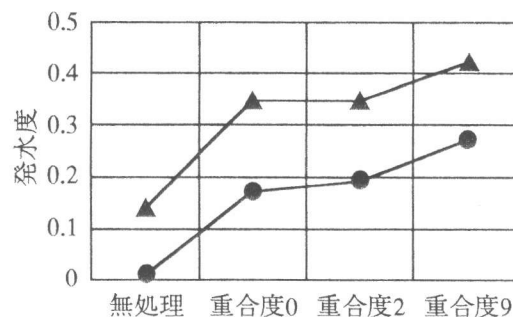


図3 重合度の影響

水基の構造が C_{10} のシランモノマーと同一であるためと推定される。これらを受けて、発水度については、短期では重合度が高くなるほど大きくなっている。長期でも、重合度2のシランとシランモノマーが同じ発水度となっているが、重合度9のシランでは発水度は大きくなっている。重合したシランは、すべてが均一に重合されているのではなく、すべての分子の分子量が高いとは限らず、種々の分子量が混在した形で存在し、不均一な膜状のものが形成された可能性が高く、オリゴマー化されたシランでは表面がやや濡れ色を示したことはその証左と考えられる。透湿や透水はこの膜の欠陥から行われていると推定され、オリゴマー化されたシランの検討課題と考えられる。

(2) 溶媒 溶媒の影響については、溶媒2種類(アルコール、水)、アルキル基2種類(C_{10} 、 C_6)合計4種類のシランについて、発水度を図4に示す。なお、シランはすべてモノマーである。 C_{10} のシランについてはアルコール溶媒に比べ水溶媒のシランの透湿度が若干高く、透湿度は逆に低くなった、また C_6 のシランについては、アルコール溶媒に比べ水溶媒のシランの透湿度が低く、透湿度はほぼ同程度となり、 C_{10} のシランではアルコール溶媒の方が発水度が高く、 C_6 のシランでは逆に水溶媒の方が発水度が高い。また、全体としては、 C_{10} のアルコール溶媒のシランが最も発水度が高く、 C_6 のアルコール溶媒のシランが最も低くなっている。なお、溶媒に関わらずアルキル基の大きい C_{10} のシランのほうが C_6 のシランより発水度は高い。

C_6 では水溶媒のシランがアルコール溶媒より発水度が高くなった。この理由としては、アルコールに比べ水は蒸発速度が小さいため、コンクリートへの含浸が深くなったことが考えられる。しかし、 C_{10} についてはアルコール溶媒の方が発水度は大きくなった。これは C_{10} は C_6 より分子量が大きいため、水溶媒の場合には多量の界面活性剤が必要であること、また、アルコキシ基がメトキシであり、水溶媒として用いる場合の安定性に問題があったためと考えられる。これらのことから、大きな発水性が期待できるアルキル基の大きなシランモノマーについて溶媒に水を使用することは、その発水性が十分得られない可能性が高いものと考えられる。

(3) 上塗りモルタル 上塗りモルタルを併用した仕様については、シラン処理に比べて透湿度はきわめて小さいものの、透湿度も小さくなっている。しかし、発水系の水分制御の観点からは、ある程度の水分遮断性と高い水分逸散性を持ち、発水度が高いものほど優れた発水性をもつものと考えられている[2]。シラン処理に比べて上塗りモルタル処理の小さい透湿度には問題があるものと考えられ、極端に透湿度が異なるものに対して、発水度を用いて評価することには問題

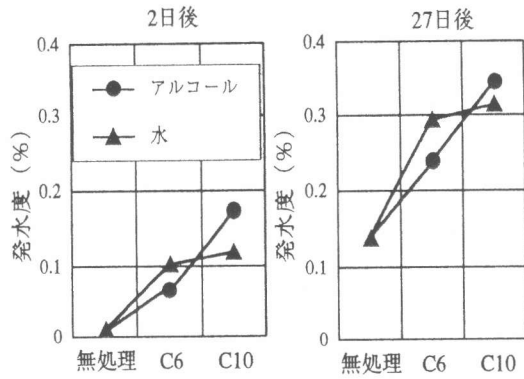


図4 溶媒の影響

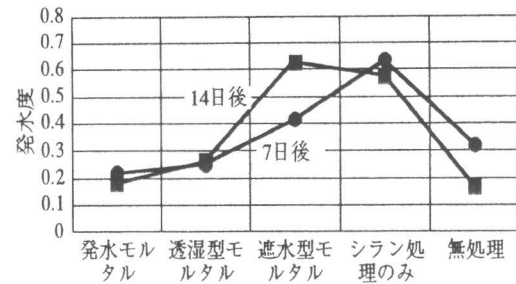


図5 上塗りモルタルの影響

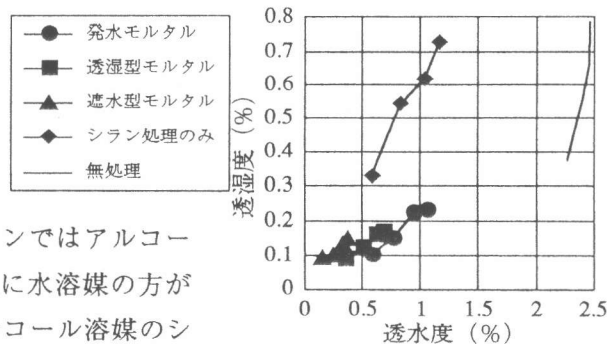


図6 透湿度と透湿度の関係

がある。そこで、図6のように透湿度と透湿度の関係を示したものを用意し、発水性を評価することとした。

上塗りモルタル処理のものはシラン処理のみのものに比べて透湿度はかなり低いが、これに対して透湿度がきわめて低いため透湿度/透湿度である発水度が大きくなっていることがわかり、上塗りモルタル処理のものは発水系の水分制御ではあるものの、遮水系的な要素を持っているものと考えられる。したがって、その発水効果は小さい可能性が高い。本来上塗りモルタルは、中性化や塩害防止の付加的な効果もあるものの、シランの発水効果の持続を目的とするものであるが、この結果からは発水系ではあるが、シランの水分逸散能力を低下させ、遮水系の要素を持つ水分制御となっているものと考えられる。

上塗りモルタルについては、どの仕様もシラン処理のみに比べて半分以下の透湿度となった。発水モルタルに関しては期待していた程の発水効果は現れておらず、発水モルタルのシラン処理した骨材がポリマーに包み込まれてしまい、その発水性をあまり有効には発揮しなかったものと考えられる。これらの結果から、シランの発水効果持続のための上塗りモルタル処理については、さらに仕様の改良を検討すべきであろう。

3. 2 シリーズ2 —シラン系表面処理がコンクリート中の水分分布に与える影響—

(1) 中型供試体による検討 大型供試体と同一環境に暴露された中型供試体の重量変化率(図7参照)から、シラン処理では降雨による若干の吸水もみられるが、全体としては乾燥に向かっている。上塗りモルタル処理については降雨による吸水はほとんどみられず、徐々に乾燥している。また、夏期における乾燥が顕著であり、この原因としては高温下では水分の逸散が活発となること、上塗りモルタルを構成するポリマーが弛緩され透湿度が増すことが考えられる。これらとは対照的に、無処理では降雨による水分の吸水、逸散を繰り返している。

(2) 大型供試体による検討 大型供試体の暴露後10日後の水分分布を図8に示す。阪田らは、飽水状態から乾燥する過程において、水分分布はコンクリート表面から内部へと高くなるとしている[4]。また、マッシュなコンクリートにおいては表面付近が高く内部は乾燥しているとする水分分布の報告がある[5]。今回の実験で得られた初期の水分分布は養生条件と供試体寸法からこれらの中間的な水分分布となったものと考えられる。

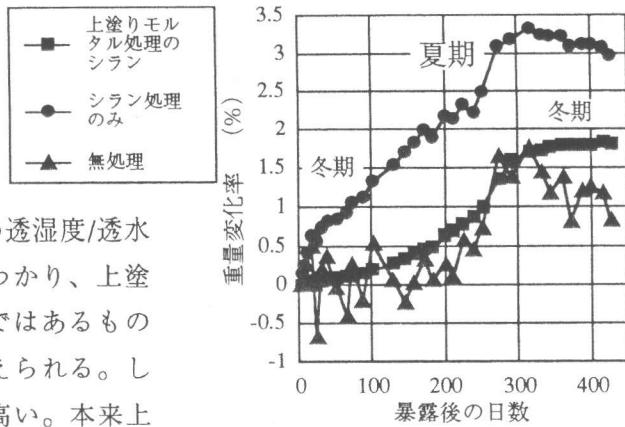


図7 中型供試体の重量変化率経時変化

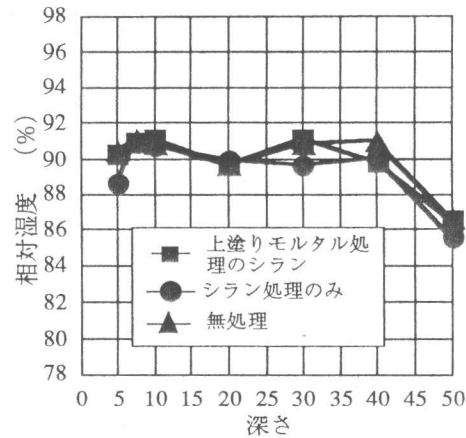


図8 水分分布(暴露後10日後)

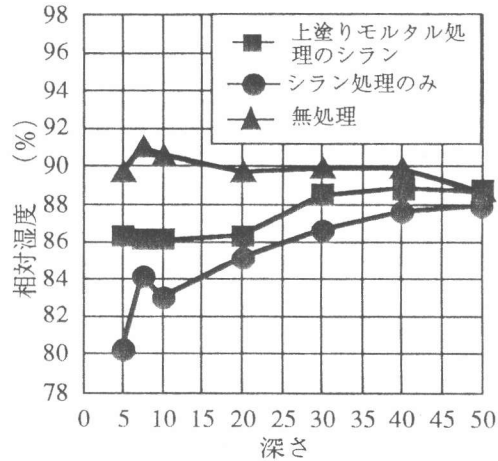


図9 水分分布(暴露後416日後)

暴露後416日後の結果を図9に示す。無処理においては、降雨による吸水の影響がみられる。また、表面近傍10cm内では、処理による差が明確となっている。内部の20~30cmでもシラン処理のみとその他の処理との差が認められる。上塗りモルタルでは内部と表面近傍との湿度差が生じており、処理による効果

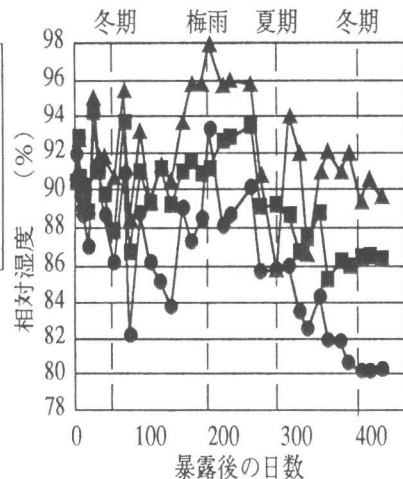
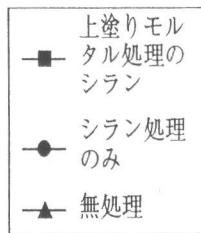


図10 深さ5cmの相対湿度経時変化

効果が深さ20cm程度でも現れている。深さ40~50cmにおいては現時点ではその効果・影響は明らかとなっていない。処理による違いが最も顕著な深さ5cmの相対湿度経時変化を図10に示す。シラン処理のものは梅雨時期には、降雨による吸水によって一時的に湿度が高くなっているが、全体としては乾燥

へと向かい、湿度は低くなってきている。これに対し、上塗りモルタル処理では、シラン処理のみに比べゆっくりではあるが徐々に乾燥している。無処理では、降雨による水分の吸水、逸散を繰り返している。図9に示すような水分分布は、このような水分制御の結果と考えられる。

(3) 表面処理処理仕様の評価 以上よりシラン処理のみのものがもっと乾燥が速く、水分逸散能力に優れた発水性の表面処理であることが認められる。上塗りモルタル処理では、遮水的な要素はもつものの、長期的には透湿性が発揮されており、シラン処理には劣るが内部の水分を逸散しているものと考えられる。無処理については降雨の影響を受け吸水、逸散を繰り返している。シラン処理、上塗りモルタル処理はコンクリートの水分制御に効果的であると考えられる。

4. 結論

本研究の範囲で得られた結果について主な結論を以下に述べる

1. シランのオリゴマー化、溶媒としての水の使用には検討の余地があると考えられる。上塗りモルタルについては、発水系の水分制御ではあるものの、遮水的な要素をもつ。
2. シラン処理では水分制御の効果が深さ30cm程度まで認められ、表面近傍ではより明確となっている。上塗りモルタル処理では表面近傍10cmに効果がみられ、深さ20cmにおいても効果の可能性が考えられる。

参考文献

- 1) S.C.Edwards : Surface coatings, The repair of concrete structures, Blackie A&P, pp.122~148, 1987
- 2) 田中博一、堀耕次、服部篤史、宮川豊章 : シラン系はっ水剤の分子構造がコンクリートの発水性に与える影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.1, pp.789~794, 1995.6
- 3) J.G.Keer : Surface treatments, Durability of concrete structures, E&FN SPON, pp.146~165, 1992
- 4) 阪田憲次 : 硬化コンクリート中の水分の移動、コンクリート工学、Vol.32, No.9, pp.16~19, 1994.9
- 5) 土木学会 : マスコンクリートの現状と動向、コンクリート技術シリーズ、No.8, pp.38~39, 1995