

論文 シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性

久保 善司*1・玉井譲*2・栗原慎介*3・宮川豊章*2

要旨: コンクリート構造物の劣化原因の主なものとして鉄筋腐食およびアルカリ骨材反応などが挙げられる。これらの劣化機構において水分は重要な要因となっており、コンクリート中の水分逸散が要求される場合の補修対策としてシラン含浸処理は有効である。しかし、シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性については十分に明らかにされていないのが現状である。本研究では、シランの分子構造、適用されるコンクリートの含水状態および水セメント比などがシラン含浸コンクリートの発水効果の持続に与える影響を明らかにした。

キーワード: シラン, 分子構造, 含水状態, 水セメント比, 発水性能, 耐久性

1. はじめに

コンクリート構造物の早期劣化問題をはじめ補修・補強を含めた維持管理対策の重要性が高まってきた。コンクリート構造物の劣化原因の主なものとしてアルカリ骨材反応および鉄筋腐食などが挙げられる。これらの劣化機構において水分は重要な要因となっており、コンクリート中の水分逸散が要求される場合の補修対策としてシラン含浸処理は有効である。シラン含浸コンクリートの発水性に関してはこれまで多くの検討が行われてきた^{1)~7)}。しかし、シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性については十分に明らかにされていないのが現状である。本研究では、シランの分子構造、適用されるコンクリートの含水状態および水セメント比などがシラン含浸されたコンクリートの発水効果の耐久性に与える影響について検討を行った。

もに非反応性骨材を用いた。細骨材として野洲川産の骨材を使用し、粗骨材として土山産の骨材を使用した。セメントとしては普通ポルトランドセメントを用いた。コンクリートの練混ぜには強制練りミキサを用いた。コンクリートの配合を表-1に示す。

2.2 シランの分子構造

シランの疎水基(アルキル基)と親水基(アルコキシ基)の種類および個数を変化させ、表-2に示すように、一般に製造または市販されているアルキル基がメトキシのものを3種類と、アルコキシ基がエトキシであるものを2種類の計5種類のシランを用意した。

表-1 コンクリートの配合

W/C	s/a	空気量	スランプ	単用量 (kg/m ³)				減水剤
				W	C	S	G	
(%)	(%)	(%)	(cm)					(ml/m ³)
60	50	2±0.5	9±1	195	325	854	937	3250
50	50	2±0.5	9±1	195	390	827	937	3900
40	50	2±0.5	9±1	196	490	784	937	4900

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

骨材は細骨材および粗骨材と

- * 1 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 工博(正会員)
- * 2 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻
- * 3 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 調査診断研究室室長 工修
- * 4 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博(正会員)

2.3 シランの適用量

シランの分子構造により、コンクリートへの含浸性が異なるとされ、シランの適用可能な量は変化する。高い含水状態での適用や多量のシランを適用した

場合、濡れ色を示したままとなり、表面の性状に問題が生じる場合や適用期間が長期間におよぶ場合がある。予備実験によって含浸性および施工性に問題の生じないシランの最大適用量を決定し、表-3に示すように適用量を定めた^{6),7)}。

2.3 コンクリートの含水状態

含浸処理時のコンクリートの含水状態が高い場合、シラン含浸が困難となり、施工性に問題が生じる場合があるとされている⁷⁾。コンクリートの含水状態がシランの含浸性およびその後の発水効果の耐久性に与える影響を検討するため、含浸処理時の含水状態として、脱枠時のようなきわめて高い含水状態を想定した90%、若干乾燥した85%、および大きな含浸量が期待できる70%の3種類を設定した。なお、含水率は、供試体の飽水状態を100%とし、絶乾状態を0%とした含水率で表した。

2.5 水セメント比

コンクリートの密実性がシランの含浸性およびその後の発水効果の耐久性に与える影響を検討するため、水セメント比として大きな含浸量が期待できる60%、きわめて密実な場合を想定した40%、およびその中間の50%の3種類を設定した。

2.6 環境条件

自然環境下におけるシラン含浸処理の発水効果の耐久性を把握するため、日光・風雨の影響を直接受けるように室外環境下に静置した。なお、室内環境下に静置するものも一部用意した。

2.7 供試体

4×4×16cmのコンクリート供試体とした。打設1日後に脱型し、1週間密封養生後、サンダー

表-2 シランの種類

名称	分子式	分子量
イソブチルトリメトキシシラン	$C_4H_9Si(OCH_3)_3$	178
イソブチルトリエトキシシラン	$C_4H_9Si(OC_2H_5)_3$	220
ヘキシルトリメトキシシラン	$C_6H_{13}Si(OCH_3)_3$	206
ヘキシルトリエトキシシラン	$C_6H_{13}Si(OC_2H_5)_3$	248
デシルトリメトキシシラン	$C_{10}H_{21}Si(OCH_3)_3$	262

表-3 シランの適用量 (単位: g/m²)

	含水率	90%	85%	70%		
	W/C	60%		50%	40%	
分子量	178	-	-	400	-	-
	220	400	600	800	600	400
	206	-	-	150	-	-
	248	-	-	200	-	-
	262	50	70	100	70	50

表-4 実験要因

シラン (分子量)	178,220,206,248,262
適用量	表3に示す値
コンクリートの含水状態	90,85,70%
水セメント比	40,50,60%
環境	室外環境 (一部 室内環境)

による下地処理を行った。所定の含水状態となるまで供試体を室内 (平均気温20℃, 湿度50%) で乾燥させた。各要因に対して質量測定用に2本と含浸層測定用に1本の計3本ずつ用意した。なお、シランによって適用量が異なるため、刷毛塗り回数が異なるが、質量管理を行い、一回あたりの塗布量は一定となるように刷毛塗りを行った。含浸終了後、65%の含水率となった時点で暴露を行った。暴露開始から質量測定を行い、発水効果の耐久性を評価した (表-4に実験要因をまとめて示す)。

2.8 測定項目

質量減少率: 供試体質量を感量0.01gのはかりにより測定した。暴露開始時からの変化量を開始時質量で除したものを質量減少率として求めた。質量減少を正とした。質量減少率が大きいほど発水性に優れる。

発水層^{6),7)}: 含浸終了後および暴露2年後、供試体をカッタを用いて5mm程度の薄片状に切断し

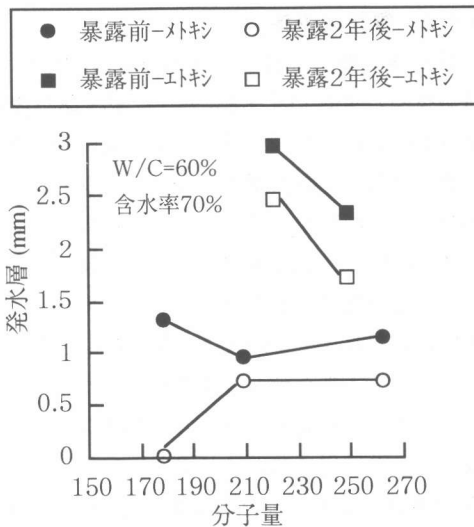


図-1 分子構造が発水層の変化に与える影響

たものを、発水層が明瞭となるように100℃で約1日炉乾燥を行った後、水中に静置させ、吸水の抑制によって濡れ色を示さなかった部分を発水層としてノギスを用いて測定した。供試体一体につき24箇所測定し、その平均値を求めた。

なお、含浸層は、上記の測定で発水性を示さない部分をも含み、供試体内部にシランが含浸した部分とする。

3. 結果および考察

3.1 分子構造の影響

シランの分子構造が与える影響は、処理時の含水率70%、W/C=60%のコンクリートに対して検討を行った。

3.1.1 発水層

シランの分子構造が室外環境下における発水層の変化に与える影響を図-1に示す。親水基および分子量にかかわらず、いずれのものも暴露2年後の発水層は小さくなっている。分子量178のもの発水層がほぼ0mmとなった。その原因としては、含浸処理時の含浸層がきわめて薄く(含浸濃度が低い)、十分な含浸層を形成していなかったため、含浸層の大部分の発水性が失われたためと考えられる。

同一量のシランを適用した既往の研究⁷⁾におい

ては、同程度の含浸性状の場合、室外での発水効果の持続には大きな分子量のものが優れていると報告されている。最大適用量で検討を行った本研究においては、分子量にかかわらず、発水層は小さくなっていた。しかも、含浸層の薄い(含浸濃度の低い)部分は分子量にかかわらず、発水効果が失われ易いものと考えられる。したがって、ある程度大きな含浸量で含浸層が形成されなければ、分子量にかかわらず発水層が消失してしまう可能性は高い。

発水層の変化は、供試体の表面から発水層が消失するのではなく、内部の比較的薄く(含浸濃度が低い)含浸していたと考えられる部分の発水作用が失われ、結果として発水層が小さくなったものと考えられる。既往の研究では紫外線による発水層の破壊は表面のみに生じるとされる。本研究では、表面的な発水性は暴露1年程度で認めれなくなったものの、紫外線による劣化は内部に進行せず、ごく表面に留まっていることが確認された。したがって、室外環境下における発水層の減少の原因としては乾湿作用や酸化によるシランの再分解などによるものと考えられる。

室外環境での発水層の劣化の原因を把握するため、室内環境に静置した一部の供試体の暴露2年後の発水層の測定を行った。測定結果を表-5に示す。室内環境のものでは最大で0.2mm程度発水層が小さくなっているものの、全体として室外環境のものより発水層の変化が小さい。また、発水層の減少は表面からではなく、内部から消失していた。室内環境においては乾湿作用を受けないため、内部の発水層の減少が小さく

表-5 発水層の変化(室内環境)

シラン		発水層 (mm)	
分子量	適用量(g/m ²)	暴露前	暴露2年後
262	50	0.73	0.62
208	150	0.82	0.74
248	150	1.61	1.44
178	400	1.13	0.97
220	400	2.25	2.11

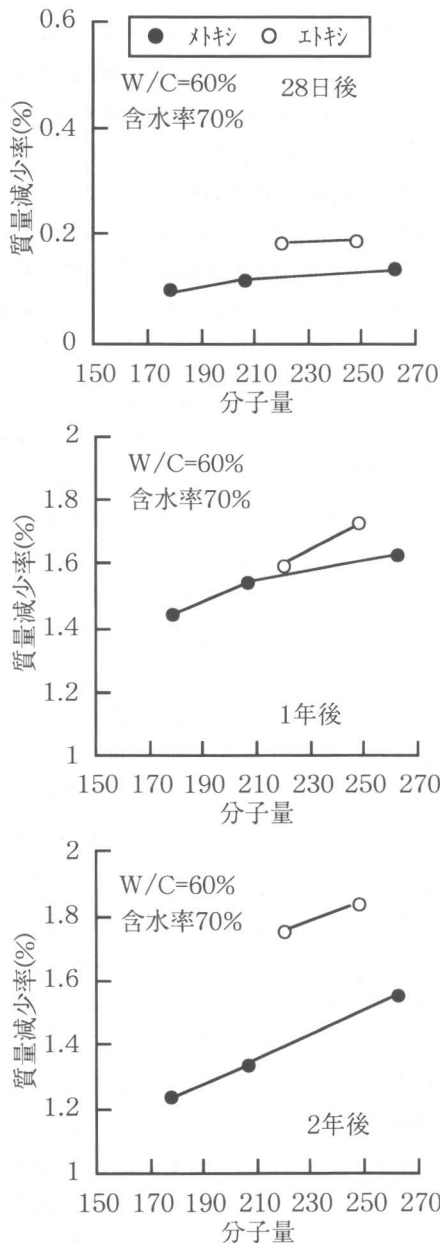


図-2 分子量と質量減少率の関係

なったものと考えられる。さらに、室外環境のものでは、表面的な発水性はほとんどなくなっていたが、室内環境においては表面的な発水性は維持されていた。したがって、シランの室外環境下での発水層の劣化は、紫外線による表面的発水性の低下と乾湿および酸化作用による内部の発水層の減少の2つにより生じると考えられる。

3.1.2 質量減少率

暴露28日後、1年後および2年後の分子量と質量減少率の関係を図-2に示す。暴露28日後および1年後を比べると、分子構造と質量減少率の関係には同じ傾向が認められ、初期の発水性能が暴露1年間程度は持続しているものと考えられる。しかし、暴露2年後においては親水基の違いによる影響が顕著となり、親水基がエトキシのもの質量減少率が大きくなった。その原因として、エトキシのものは含浸時に大きな含浸量で大きな発水層を形成していたため、メトキシのものと同様に発水層が減少しても、十分な発水層が残存し、発水性能が大きく低下しなかったことによるものと考えられる。

さらに長期の測定により、発水効果の耐久性に与える影響を明らかにする必要があるものの、大きな含浸量と発水層が、シランの発水効果の持続には必要であると考えられ、優れた含浸性が得られるシランを選択することが重要であると考えられる。

本研究の範囲内においては、発水層は220のものより若干小さいものの、発水効果が大きく、その効果も長期にわたり持続している親水基がエトキシである分子量248のシランには、優れた発水性とその発水効果の持続が期待できる。

3.2 含水状態の影響

処理時の含水状態が与える影響は、W/C=60%のコンクリートに対して検討を行った。処理時の含水状態の影響については発水層のみ検討を行った。

処理時の含水状態が発水層の変化に与える影響を図-3に示す。分子量262の含水率70%のものと分子量220の含水率85%以下のものの発水層の変化は大きい。含水状態の高いものは、暴露前(処理直後)の発水層が小さく、内部の含浸層の薄い(含浸濃度の低い)部分は、含水状態の低いものに比べて小さく、発水層の変化が小さくなったものと考えられる。

処理時の含水状態が異なる場合にも、親水基が発水層の変化に与える影響は顕著でなく、親

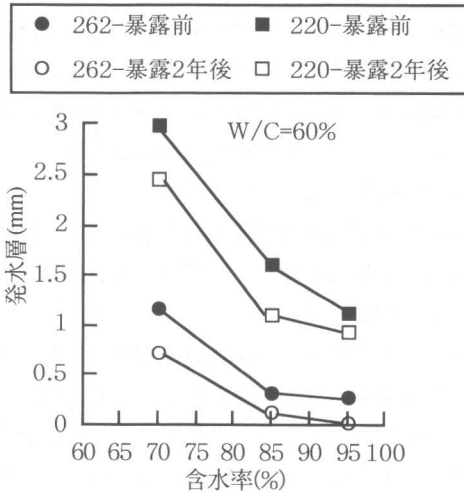


図-3 含水状態が発水層の変化に与える影響

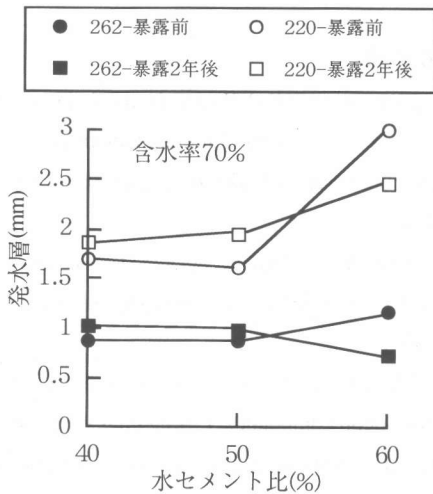


図-4 水セメント比が発水層の変化に与える影響

水基にかかわらず、発水層は小さくなった。また、含水状態にかかわらず発水層の変化は内部の発水層の減少によるものであった。

親水基がメトキシのものとエトキシのものを比較した場合、含水状態が高いものでも暴露2年後の発水層は小さくなるものの、分子量262に比べて大きな発水層が維持されている。したがって、処理時の含水状態が高い場合には、親水基がエトキシであるシランの使用が望ましいものと考えられる。

3.3 水セメント比の影響

水セメント比が与える影響は、処理時の含水率70%のコンクリートに対して検討を行った。

3.3.1 発水層

水セメント比が室外環境下における発水層の変化に与える影響を図-4に示す。親水基にかかわらず、水セメント比が大きい60%のものは他の水セメントより発水層の減少が大きく、50%以下のものでは、発水層にほとんど変化がなく暴露2年後においても暴露前のものと同程度の発水層であった。コンクリートが密実な場合には、シランがコンクリート中へ含浸しにくくなり、薄い(含浸濃度の低い)含浸層の部分が形成されないため、発水性が失われる部分が小さくなったためと考えられる。これに対して、水セメント比が大きな60%のものでは、含浸が容易である反面、薄い含浸層の部分が存在したため、発水層が減少したものと考えられる。水セメント比にかかわらず発水層の変化は、内部の発水層の減少によるものであった。コンクリートの密実性が発水層の劣化の進行に与える影響は認められなかった。

3.3.2 質量減少率

暴露半年後、1年後および2年後の水セメント比と質量減少率の関係を図-5に示す。暴露半年後と1年後では、ほぼ同様の傾向が認められ、水セメント比が大きいものほど質量減少率が大きく、分子量262のものが同一の水セメント比であれば、若干大きな質量減少率を示した。しかし、暴露2年後においては、親水基がエトキシである分子量220のものが、水セメント比40%のものを除いて、大きな質量減少率となった。

分子量220のものは分子構造の影響で述べたように、大きな含浸量と発水層を形成していたため、発水層の一部が消失しても十分な発水性を發揮できたのに対して、分子量262のものは、分子量220に比べて含浸量および発水層が小さいため、表面的な発水性と内部の発水層の減少により発水性が低下し、暴露2年後においては分子量220のものの方が大きな質量減少率となったもの

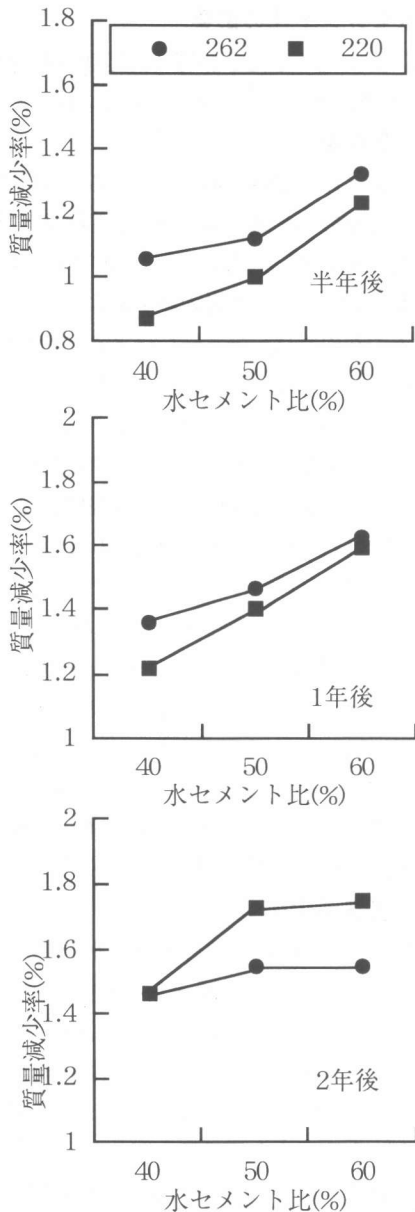


図-5 水セメント比と質量減少率の関係

と考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を述べる。

(1) シランの分子量および親水基の構造にかかわらず、暴露2年後の発水層は小さくなった。しかも、含浸層の薄い(含浸濃度の低い)部分は分子量にかかわらず、発水効果が失われやすいもの

と考えられる。

(2) 室外環境における紫外線による劣化は表面的な発水性を低下させるものの、ごく表面近傍に留まっており、内部の発水層の劣化原因としては乾湿作用および酸化によるシランの再分解などが原因と考えられる。

(3) 処理時の含水状態および水セメント比によらず発水層の変化は、内部の発水層の減少によるものであった。

(4) シランの発水効果の持続のためには、大きな含浸量および発水層が必要であり、優れた含浸性が得られるシランを選択することが重要である。本研究で検討したシランにおいては、親水基がエトキシである分子量248のシランには優れた発水性と発水効果の持続を期待できる。

参考文献

- 1) Ing J de vries and R.B. Polder : Hydrophobic treatment of concrete, Proceedings of the sixth international conference on structural faults and repair, Vol.2, pp.289-295(1995)
- 2) J.D.N. Shaw: Concrete decays : Causes and remedies, Construction repair January/February, pp.24-33(1993)
- 3) Ch. Flidner : Concrete protection with organosilicon compounds, Proceedings of the 8th international congress on polymer in concrete, pp.603-610(1995)
- 4) 田中博一他: シラン系はっ水剤の分子構造がコンクリートのはっ水性に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.25-30 (1995)
- 5) 田中博一他: シラン含浸コンクリートの発水性能評価, 材料, Vol.47, No.7, pp.699-705(1998)
- 6) 久保善司他: シラン含浸された各種コンクリートの発水性能評価, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.469-476(1999)
- 7) 久保善司他: 100%シランがコンクリートの発水性に与える影響, 材料, Vol.49, No.7, pp779-805(2000)