

論文 種々の発水系材料を含浸したコンクリートの発水性評価

小池 正俊*1・久保 善司*2・鳥居 和之*3・横山 広*4

要旨：水分がコンクリート構造物の劣化因子となることも多く、発水系材料は、構造物の表層部を改質することで、水分などの劣化因子の浸入を抑制をするものとして期待されている。近年では、材料の耐久性の改善および性能の向上を目的とし、異なる分子量のものを複合した材料の検討が進められている。シラン単体の分子構造が異なることによる影響は検討されているものの、それらを組み合わせた場合の発水性能に与える影響は明らかにされていない。そこで、既往の研究によって明らかにされているシラン系材料に加えて、それらを組み合わせて含浸したものの発水性を検討し、発水性能が発揮される機構が明らかとなった。

キーワード：シラン，シロキサン，発水性，耐久性，補修

1. はじめに

アルカリシリカ反応および鉄筋腐食はコンクリート構造物の劣化の代表的な原因として挙げられる。これらの劣化機構において水分はきわめて重要な要因であり、コンクリート中の水分制御(水分浸透抑制・水分逸散)を目的とした種々の表面処理が行われている。発水系材料は、適用後の外観を変えないため、構造物の外観を損ねることがなく、処理後の維持管理を行う上でも有効である。特に水分逸散が重要な場合には発水材系材料は有効であるとされている¹⁾。

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研究が行われてきている。発水材の分子構造により、コンクリートへの含浸性が異なるとされており、分子量が小さいものほど、コンクリート中に浸透しやすいものの、揮発性が大きくなり、優れた耐久性を得るために必要な適用量が多くなるとされている²⁾。また、発水性の持続には、大きな含浸量および発水層が必要とされている³⁾。

近年では、耐久性の改善および性能の向上を

目的とした揮発性の低い高分子量のシロキサンと浸透性に優れたシランを複合したシラン・シロキサン系材料の開発も行なわれている⁴⁾。シラン単体の分子量が異なる影響については検討されているものの、それらを組み合わせた場合の発水性能に与える影響は明らかにされていない。本研究では、2種類の分子量を組み合わせたもの、近年開発された発水性・耐久性に優れているとされるシラン・シロキサンを複合したものを、シラン単体のものと比較することにより、異なる分子量のものを組み合わせた場合および異なる材料を組み合わせた場合の発水性能が発揮される機構を解明することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) コンクリート

セメントとして普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材として手取川産の骨材(密度：2.61g/cm³，吸水率：1.21%)を用い、粗骨材には手取川産の骨材(密度：2.61g/cm³，最大寸法：

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 金沢大学 工学部土木建設工学科助手 工博 (正会員)

*3 金沢大学 工学部土木建設工学科教授 工博 (正会員)

*4 ショーボンド建設(株) 北陸支店工事技術課 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

W/C(%)	s/a(%)	単用量(kg/m ³)				AE減水剤 (cc/m ³)
		W	C	S	G	
60	50	195	325	916	916	1625

表-3 表面水分率(%)

	220	248	220+248	複合
含浸前	4.6	4.4	4.8	4.6
暴露前	4.3	4.4	4.4	4.3

表-2 発水系材料の種類および適用量

発水材	分子量・構成	適用量(g/m ²)	略称
イソブチルトリエトキシシラン	分子量 220	800	220
ヘキシルトリエトキシシラン	分子量 248	200	248
混合タイプ	分子量 220	400	220+248
	分子量 248	100	
シラン-シロキサン複合タイプ	シラン+ポリシロキサン	200	複合

10mm)を用いた。発水系材料のコンクリート中への浸透深さが大きくなるように水セメント比は60%とした。コンクリートの配合を表-1に示す。

(2) 発水材の種類

分子量および適用量に関する既往の研究³⁾から優れた発水性能が期待できる分子量220および248のシランを用意した。シランの分子量が異なれば、含浸性状および発水性が異なるとされている²⁾。異なる分子量を組み合わせることにより、より優れた性能が得られることが予想され、分子量220および248のものを組み合わせることとした(混合タイプ)。さらに、近年開発され発水性および耐久性に優れているとされるシラン・シロキサン複合タイプ⁴⁾のものも用いることとし、計4種類の発水系材料を用いることとした。

(3) 発水材の適用量

シラン単体で用いるものは、既往の研究³⁾を参考にして、含浸性および施工性に問題の生じない最大の適用量で用いることとした。混合タイプのもは、実験的に組み合わせて用いるシランの最大適用量の半分の量とした(分子量220を適用後、分子量248を適用)。市販のシラン・シロキサン複合タイプのもは、実施工の標準適用量で用いることとした。発水系材料の種類および適用量を表-2に示す。

2.2 環境条件

発水系材料による発水性能(透水性・透湿性)および耐久性を検討するため3種類の環境条件を用意した。

水中環境：透水性(水分遮断性)を評価するために水中に静置した。

室内環境：透湿性(水分逸散性)を評価するために室内に静置した。

室外環境：実環境下での耐久性を含めた発水性を評価するために、日光・風雨などの影響を直接受けるように室外に静置した。

2.3 表面水分率

表面水分率：暴露前までの表面の乾燥状態を確認するために、高周波水分計を用いて、表面水分率(絶乾質量)を測定した。含浸前および暴露前の表面水分率を表-3に示す。

2.4 供試体

室内環境の供試体は、φ5×10cmのコンクリート供試体とし、水中・室外環境のものは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、2週間の水中養生後、ディスクサンダによる下地処理を行い、室内で乾燥させた。室内環境のものは、打設上面のみに、その他のものは表面すべてに、1回あたりの塗布量を一定とし、所定の適用量に達するまで刷毛塗りを行った。なお、適用量は質量管理した。含浸後に、水中・室外環境のものは、実環境下における紫外線による表面的な発水性の低下を模

擬するために、ディスクサンダを用いて表層部を切削するものも用意した。2週間の気中養生後に水中・室外環境のものをそれぞれ暴露した。

一方、室内環境のものは、既往の研究²⁾を参考に、供試体が飽水するまで水中に静置した後、処理面以外をアルミテープで密封し、室内に暴露した。暴露開始時より質量測定を行った。

2.5 測定項目

(1)供試体質量：供試体質量を感量 0.01g のはかりで測定した。

(2)発水層：含浸終了後、4×4×16cm の供試体をカッタを用いて厚さ 4mm 程度に切断する。発水層を明瞭にするために、100℃で約 1 日乾燥を行った後、水中に静置させた。水分の遮断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。表面に骨材があるところを避け、供試体 1 体につき打設面、底面、側面の両面とし、計 32 箇所を測定し、その平均値により求めた。

(3)含浸量：含浸後の質量変化には、処理中の水分逸散量も含まれ、含浸前後の質量変化から含浸量を求めることができないため、無処理のものと同程度とあるものと仮定して、無処理の水分逸散量から含浸前後の質量変化を差し引いたものを含浸量とした²⁾。

3. 結果および考察

本研究では、透湿度、透湿度および質量減少率を既往の研究^{1), 2)}をもとにして、次のように定義した。供試体の 2 本の平均値を用いた。

透湿度：水中環境における暴露開始時からの質量増加を吸水面積で除したものを透湿度とした。この値が小さいほど水分遮断性が大きいとされる。

透湿度：室内環境における暴露開始時からの質量減少を逸散面積で除したものを透湿度とした。この値が大きいほど水分逸散能力が高いとされる。

質量減少率：室外環境における暴露開始時か

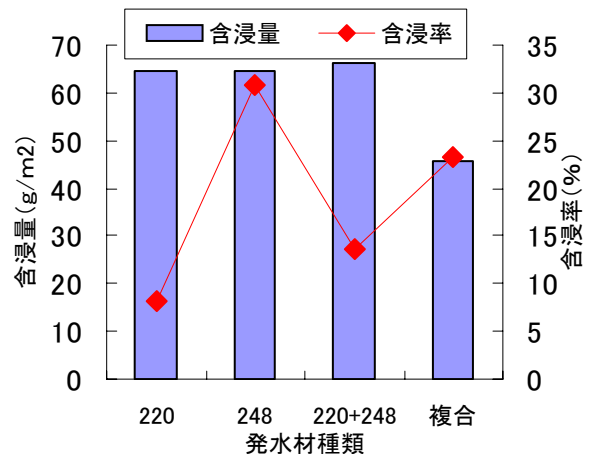


図-1 含浸量および含浸率

らの質量減少を暴露開始時の質量で除したものを質量減少率とした。この値が大きいほど発水性に優れていると考えられる。

3.1 含浸性状

含浸量を適用量で除した値を含浸率として算出した。発水材の含浸量および含浸率を図-1に示す。シラン単体で用いたものは、分子量が小さいものほど含浸率が小さくなり、既往の研究²⁾と一致した。混合タイプ(220+248)のものは、分子量 220 および 248 と同程度の含浸量となった。複合タイプのもの含浸量は他のものより小さくなった。

含浸率については、分子量 220 のものが最も小さく、分子量 248 のものは最も大きくなった。分子量の小さいものは、揮発性が大きいため、有効に含浸される量が小さくなったものと考えられる。一方、混合タイプのもは 220 よりも大きく、248 よりも小さい含浸率となった。組み合わせで適用した場合も、それぞれのシランの含浸率は変化しないものと仮定すると、それぞれの適用量に含浸率を乗じて足し合わせたものが混合タイプものの含浸量となるものと考えられ、混合タイプの含浸量は式(1)で推定される。

$$(220\text{の含浸率}) \times 400 + (248\text{の含浸率}) \times 100 = (220+248\text{の含浸量}) \quad \dots \dots (1)$$

推定された含浸量は 63g/m²程度であり、概ね測定値と一致しており、仮定が妥当であると判断される。

含浸終了後の発水層を図-2 に示す。シラン単体で適用したものは、既往の検討結果²⁾と同じ傾向を示し、分子量の小さい220の発水層は、248よりも大きい。混合タイプのもは、その中間程度の発水層となった。異なる分子量が組み合わされた場合の発水層に与えるシランの影響については、その影響の程度は適用量に比例すると仮定すると、混合タイプの発水層は式(2)で推定される。

$$\begin{aligned} & (220\text{の発水層}) \times \frac{400}{500} + (248\text{の発水層}) \times \frac{100}{500} \\ & = (220 + 248\text{の発水層}) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

式(2)より推定された発水層は4.4mm程度であり、概ね測定値と一致していた。

したがって、異なる分子量を組み合わせることにより、シラン単体での適用より優れた性能を持つ発水材の開発が可能であると考えられる。

これに対して、複合タイプのもは、適用量が小さいにもかかわらず、含浸率および発水層は大きく、シランとシロキサンを組み合わせることにより浸透性に優れ、揮発を抑えた所期の含浸性が得られているものと考えられる。異なる分子量を持つ特性を組み合わせることにより、適用量を小さく抑え、発水材の性能を制御することが可能であるものと考えられる。

3.2 発水性

(1) 透湿度

発水材の透湿度を図-3 に示す。シラン単体で用いたものは、分子量が大きいものの方が透湿度は小さく、既往の検討結果¹⁾と一致した。混合タイプのもは、シラン単体で用いたものより小さい透湿度となった。分子量を組み合わせることにより、シラン単体で用いた場合より水分遮断性の大きい発水層が形成されたものと考えられる。また、複合タイプのもは、適用量が小さいものの、分子量220と同程度の透湿度となった。複合タイプのもは、適用した材料が有効に含浸され、シロキサンが含まれているが、浸透性・水分遮断性の確保された層が形成されたと考えられる。

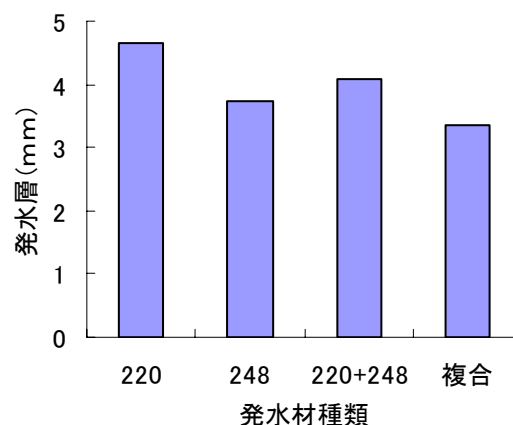


図-2 発水層

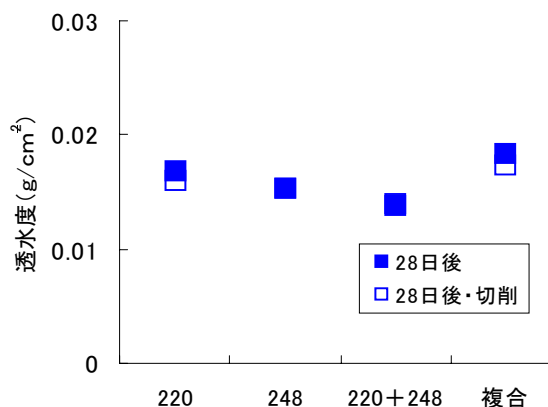


図-3 透湿度

表面の発水性の低下を模擬し表面切削を行なったものは、切削していないものと同程度の透湿度を示した。表面切削によって室外環境下における表層部の劣化を模擬するために実施したものの、切削後の表面においても表面的な発水性は損なわれず、発水層がわずかに小さくなったものと同様の状況となったため、透水性には大きな影響は与えなかったものと考えられる。

(2) 透湿度

発水材の透湿度を図-4 に示す。シラン単体で用いたものは、分子量の小さい220のもは、透湿度は若干大きく、既往の検討結果¹⁾と一致した。混合タイプのもは、シラン単体で用いたものよりも若干小さい透湿度となった。また、複合タイプのもは、分子量220のものと同程度の透湿度となった。透湿度は透湿度と同じ傾向を示しており、水分遮断性が大きいものは、透湿度が若干小さくなったものと考えられる。しかし、透湿度については顕著な違いが認めら

れないため、これらの発水性は水分遮断性に支配されるところが大きいものと考えられる。

(3) 発水性

発水材の透湿度と透湿度の関係を図-5 に示す。透湿度が小さく、透湿度が大きいものほど、透湿度/透湿度(傾き)は大きく、発水性に優れているとされている^{1),2)}。本研究で用いたものについては、透湿度/透湿度に若干の違いはあるものの、顕著な差は認められなかった。同程度の発水性を有するものと考えられる。

3.3 発水効果およびその耐久性

暴露初期(50 日後)および暴露 1 年後の質量減少率に与える影響を図-6 に示す。暴露初期では質量減少率は負の値を示した。これは、暴露開始時の表面水分率が 4.2~4.4%であり、乾燥状態であったことと、暴露開始時期が秋季であったため、水分逸散が少ない環境であったと考えられる。暴露初期と暴露 1 年後では、ほぼ同様の傾向が認められ、水分遮断性の大きなものほど質量減少率が大きい。暴露 1 年後では暴露初期より質量減少率の違いが顕著となった。発水性の違いが初期よりも明瞭となったものと考えられる。暴露 1 年間の短期の結果であり、発水層の劣化による発水性の低下は、質量減少率には認められなかった。

表層部を切削したものについては、複合タイプのもを除き、いずれにおいても質量減少率の傾向は切削していないものと同様の傾向を示した。しかし、質量減少率は、切削したものの方が小さくなった。表層部の切削により発水層の一部が失われており、切削直後の透水性には大きな影響を与えなかったものの、実環境における発水性を低下させ、同一要因のものより質量減少率が小さくなったものと考えられる。これに対して、複合タイプのものでは、暴露初期より切削したものの方が質量減少率は大きくなった。分子量の高いシロキサン成分の一部が高い濃度で含浸された部分があり、表層部の透水性・透湿度性が均一でない部分が存在し、切削によりその部分が除去されたため、切削したもの

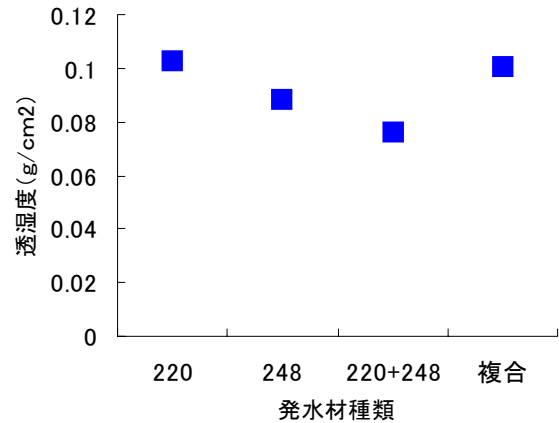


図-4 透湿度

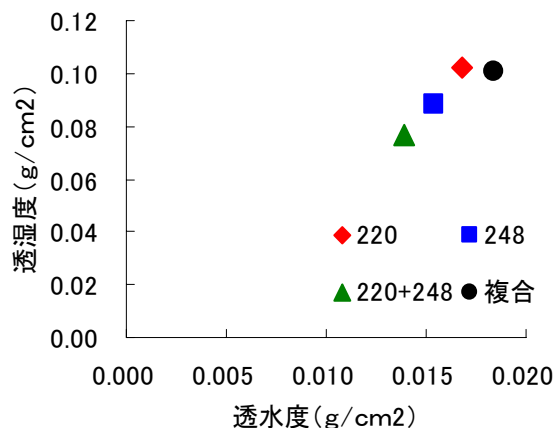


図-5 透湿度と透湿度の関係

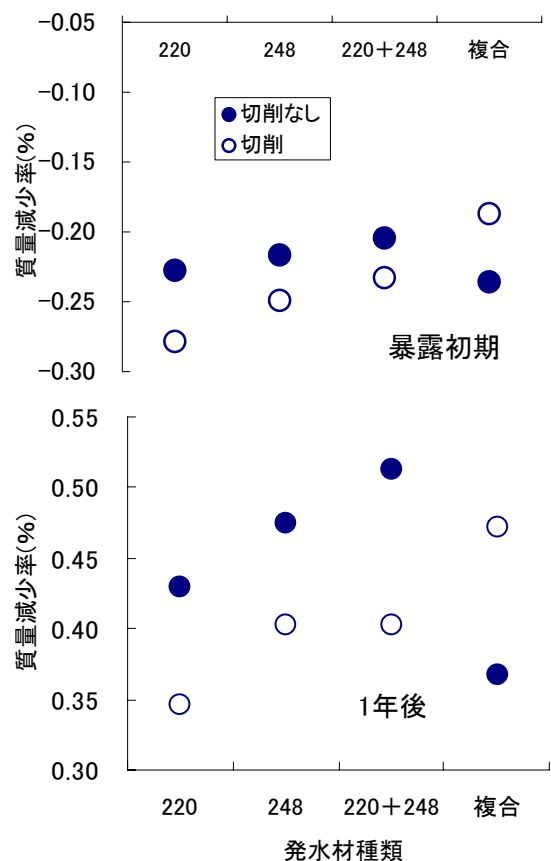


図-6 質量減少率

の方が発水性が高くなったものと推察される。あるいは、表面より内部のほうが濃度の高い発水層が形成され、それらが切削により現出した可能性も推察される。これらの原因は、切削後の透湿性や表層部の発水層（濃度分布）について更なる検討を行い、明らかにする必要がある。

室外環境における処理効果の耐久性を検討するため、暴露1年後の発水層を測定した。暴露1年後の発水層変化を図-7に示す。暴露1年後において、わずかに発水層が小さくなる傾向が認められるものの、その変化は0.2mm以下と小さく、暴露1年による発水層の消失はほぼないものと考えられる。既往の研究⁴⁾によれば、発水層の変化は、表面的な発水層の消失と内部の比較的薄く含浸されていた部分の消失によるものとされている。今回の暴露期間においては、表面的な発水性の低下は生じていたものの、内部の発水層の消失はなかったものと考えられる。

質量減少率および暴露1年後の発水層の変化から、今回の暴露期間においては、内部の発水層の劣化は顕著でなく、質量減少率の結果は、含浸処理による発水効果の違いによるものと考えられる。一方、切削の有無による違いが質量減少率に現れていることから、発水層が小さくなることにより、発水効果が小さくなることが推察される。室外環境下において、乾湿作用や酸化の影響を受け、シランの再分解などが生じることによる発水層の減少が、シラン系材料の発水性低下の原因と考えられる。よって、含浸量が大きく、大きな発水層を形成できるシランの適用、または、異なる分子量を組み合わせることで、発水性・耐久性に優れた含浸処理が可能となるものと考えられる。なお、表面的な発水性の劣化が与える影響については、検討の余地があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を述べる。

- (1) 異なる分子量を組み合わせたものの含浸性状は、組み合わせられるシラン単体の含浸性

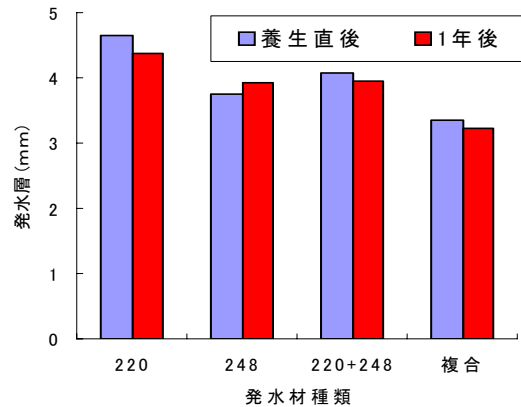


図-7 暴露1年後の発水層変化

上から推定することが可能であった。

- (2) 分子量 220 と 248 を組み合わせたものの発水性は、分子量 220 および 248 単体のものより優れていた。
- (3) 異なる分子量を組み合わせることにより、シラン単体での適用より優れた性能を持つ発水材の開発が可能となる。
- (4) 表面切削により、表面的な発水層の劣化を模擬することは困難であった。しかし、室外環境の切削の有無による違いから、シラン含浸コンクリートの発水性の低下の原因として、内部の発水層の減少にあるものと推察された。

参考文献

- 1) 田中博一：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集，Vol.17，No.1，pp.789-794，1995
- 2) 久保善司ほか：シラン含浸コンクリートの発水性能評価，材料，Vol.52，No.9，pp.1095-1100，2003
- 3) 久保善司ほか：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報告集，Vo.23，No.1，pp.421-426，2001
- 4) 林大介ほか：シラン・シロキサン系撥水材の開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.1，pp.301-306，2000