

表面含浸材によるコンクリートの透水抑制効果に関する研究

田中 博一 滝本 和志 栗田 守朗
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Water Permeability of Concrete Treated with Surface Treatment Materials

by Hirokazu Tanaka, Kazushi Takimoto and Morio Kurita

Abstract

This study examined the water permeability of concrete treated with silane, sodium silicate, or mortar type surface treatment materials. The penetrating depths of the surface treatment materials were examined using SEM and EPMA. The results show that the concrete's water content when the surface treatment materials are applied and the water pressure on the surface influence its water permeability. Moreover, the penetrating depth of the silane type surface treatment material penetrate could be measured using EPMA. However, the penetrating depth of the sodium silicate type surface treatment material could not be measured using SEM.

概要

コンクリートの耐久性向上を目的として表面含浸材による透水抑制効果を把握することを目的とした。シラン系表面含浸材、けい酸塩系表面含浸材および無機質系表面含浸材を塗布したコンクリートの透水抑制効果を透水試験により評価した。また、含浸深さを SEM による観察および EPMA 面分析により検討した。その結果、塗布時のコンクリートの含水状態、塗布面に作用する水圧などにより透水抑制効果が異なること、シラン系表面含浸材は EPMA により含浸深さを評価できること、けい酸塩系表面含浸材は SEM による観察で含浸深さは評価できなかったこと、無機質系表面含浸材は SEM により針状結晶が観察されなかったことからほとんど含浸していない可能性が高いことなどを明らかにした。

§ 1. はじめに

表面含浸材は、コンクリート表面に塗布することで、コンクリート内部に含浸し、コンクリート表層部を改質して、透水抑制効果を発揮し塩化物などの劣化因子がコンクリート表面から内部に浸透することを抑制することにより、コンクリート構造物の耐久性を向上させることを期待できる材料である。そのため、まだ劣化していない構造物に対して予防保全として適用したり、劣化した構造物を対象とした事後保全として適用することを期待できる。しかし、表面含浸材は、塗布時のコンクリートの含水状態や塗布面に作用する水圧などにより透水抑制効果に影響を受けると考えられる。そこで、本研究では、シラン系、けい酸塩系および無機質系の表面含浸材を塗布した場合の透水抑制効果を把握することを目的として、透水試験を室内および現地において実施した。さらに、表面含浸材の含浸深さを走査型電子顕微鏡（以下 SEM とする）および電子線マイクロアナライザ（以下 EPMA とする）により検討した。

シラン系表面含浸材はコンクリート表層部に撥水層を形成することにより、けい酸塩系表面含浸材はコンクリート中に含浸して水酸化カルシウムと化学的に結合して細孔内部をゲル状またはガラス状の結晶で充てることにより、無機質系表面含浸材はコンクリート中の毛細管空隙に浸透し結晶化して緻密化することにより、透水抑制効果が得られるものである。

§ 2. 実験概要

室内試験は、PC 上部工の防水効果を向上させるために表面含浸材を適用した場合の透水抑制効果を評価するために実施した。対象としたのは、ひび割れなどがない健全部および鉛直打継ぎ部である。

現地試験は、塩害および中性化に対する抑制効果を評価するために建設後約25年が経過した海洋環境下にある橋脚に対し3年前に試験施工された表面含浸材を対象として実施した。

表-1 基板コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
36	45.0	8.0±2.5	4.5	165	458	760	942

2.1 室内試験

2.1.1 健全部における透水抑制効果の評価

1) 要因と水準

要因は表面含浸材の種類、塗布前の基板コンクリートの含水状態および透水試験時の水頭差とした。

表面含浸材の種類は、シラン系（主成分：シラン・シロキサン系化合物）、けい酸塩系1（主成分：けい酸ナトリウム）、けい酸塩系2（主成分：コロイド状けい酸ナトリウム）、無機質系（主成分：ポルトランドセメント、触媒性化合物、シリカサンド）の計4種類とした。塗布前の基板コンクリートの含水状態は、気中乾燥状態と湿潤状態の2種類とした。表面含浸材塗布面に作用する水圧による影響を把握するために、透水試験時の水頭差は250mmと3000mmとした。

2) 使用材料および配合

基板コンクリートの使用材料として、セメントには早強ポルトランドセメント（密度3.14g/m³）、細骨材には山砂（密度2.62g/m³、吸水率1.35%）、粗骨材には硬質砂岩碎石（密度2.66g/m³、吸水率0.68%）、混和剤には高性能AE減水剤を使用した。コンクリートの配合を表-1に示す。水セメント比、スランプおよび空気量は、実際建設されたPC上部工と同じとした。

3) 試験体作製方法

基板コンクリートは、形状を300mm×300mm×100mmの平板とし、打込み後材齢1日で脱型して材齢10日まで封かん養生した。その後、基板コンクリートの含水状態を調整するために気中乾燥および湿潤環境下に静置した。気中乾燥は、20℃、60%RHの恒温恒湿室内で1週間乾燥させ、湿潤は、20℃の水中に1週間静置させた。含水状態調整後、打込み面（300mm×300mm）に各表面含浸材を塗布した。塗布方法および塗布量は表-2に示す通りである。塗布後、4週間養生した後、透水試験を実施した。

4) 試験項目

試験項目は、基板コンクリートの圧縮強度試験（JIS A 1108、材齢28日、標準養生）、漏斗を用いた透水試験（以下、漏斗法透水試験とする）および加圧透水試験とした。漏斗法透水試験は、写真-1に示すように表面含浸材の試験方法（案）（JSCE-K 571）で示されている透水量試験に準拠し、口径75mmの漏斗をコンクリート表面に設置して水頭高さを250mmとして透水量

表-2 表面含浸材の塗布方法、塗布量

種類	下地処理	塗布方法	塗布量
シラン系	なし	刷毛	0.2kg/m ²
けい酸塩系1	水洗い	刷毛	0.3kg/m ²
けい酸塩系2	高圧水洗浄	高圧噴射	0.21L/m ²
無機質系	処理剤塗布	刷毛	1kg/m ²

注) 下地処理、塗布方法、塗布量はメーカー推奨方法



写真-1 漏斗法透水試験状況



写真-2 加圧透水試験状況

を測定した。加圧透水試験は、写真-2に示すように加圧面を直径75mmとした円筒状の容器に水を入れ、コンプレッサを用いて加圧した。加圧する圧力は0.3MPa（水頭差3000mmに相当）とし、加圧開始から1時間ごとに0.05MPaずつ加圧し、0.3MPaに達した後は一

定とした。

2. 1. 2 鉛直打継ぎ部における透水抑制効果の評価

1) 要因と水準

要因は表面含浸材の種類と表面含浸材の塗布箇所とした。表面含浸材の種類は2. 2. 1と同じ4種類とした。表面含浸材の塗布箇所は、コンクリートを打ち継いだ後、打継ぎ上面から塗布する場合と打継ぎ前に先行コンクリートの打継ぎ面に塗布する場合の2種類とした。

2) 使用材料および配合

コンクリートの使用材料および配合は、2. 1. 1と同様とした。

3) 試験体作製方法

試験体の形状は、150mm×150mm×150mmの鉛直打継ぎを有した立方体とした。なお、比較のために打継ぎを設けない試験体も作製した。まず、型枠内中央部に仕切り板を設置し、先行コンクリートを打ち込んだ。表面改質剤を打継ぎ上面に塗布する試験体は、1週間後に後行コンクリートを打ち込んだ。先行コンクリートの材齢2週において、表面含浸材を打継ぎ上面および先行コンクリートの打継ぎ面に塗布した。打継ぎ上面に塗布する場合には、打ち継ぎ箇所を含めて上面全面(150×150mm)に塗布した。打継ぎ面を塗布する場合には、打継ぎ面全面(150×150mm)に塗布した。なお、鉛直打継ぎ目であることを考慮し、打継ぎ面に塗布する場合には、打継ぎ面が鉛直面になるようにした。打継ぎ面に塗布して2日後に後行コンクリートを打ち込んだ。表面含浸材を塗布した後、けい酸塩系1および無機質系は4週間湿空養生し、シラン系およびけい酸塩は20℃、60%RHの室内で4週間養生した。

4) 試験項目

試験項目は、漏斗法透水試験とした。漏斗法透水試験は、写真-3に示すように、口径75mmの漏斗をコンクリート表面に設置して水頭高さを250mmとして透水量を測定した。なお、透水試験の対象は打継ぎ箇所を中心として30mm幅とし、透水試験対象箇所および底面を除いてエポキシ樹脂にてシールした。

2. 2 現地試験

瀬戸内海にある建設後約25年が経過した海洋構造物の橋脚を対象として、塩害および中性化に対する抑制効果を評価するために、海面からの高さが5m程度で冬季には季節風により波がかかる位置に表面含浸材を3年前に試験施工した。対象構造物のコンクリートは、高炉セメントB種を使用し、水セメント比は57.1%、単位セメント量は280kg/m³である。試験施工した表面含浸材の種類は、シラン系、けい酸塩系3(主成分：けい酸ナトリウム)、けい酸塩系4(主成分：けい酸ナト

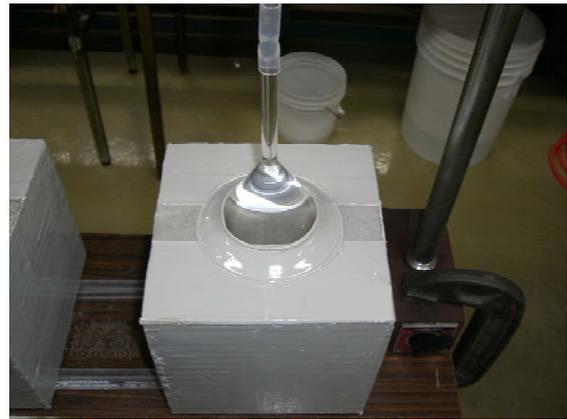


写真-3 打継ぎ箇所における漏斗法透水試験状況

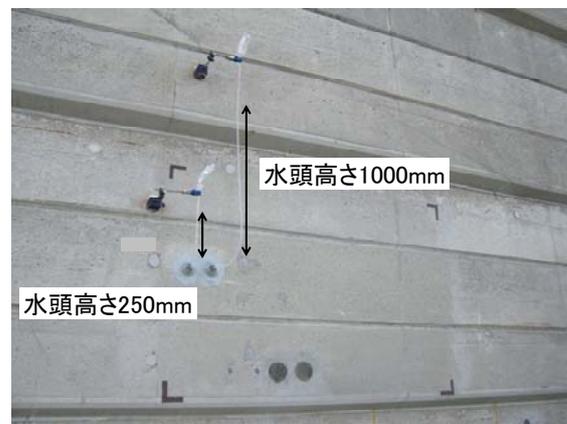


写真-4 現地透水試験状況

リウム)、無機質系の計4種類である。なお、現地試験で用いた表面含浸材のうちシラン系および無機質系は室内試験と同じものであるが、けい酸塩系は異なるものである。

試験施工箇所において、表面含浸材の透水抑制効果を把握するために現地で透水試験を実施した。透水試験は、口径75mmの漏斗を用いた漏斗法透水試験とし、表面含浸材塗布面に作用する水圧による影響を把握するために、水頭高さを250mmおよび1000mmとした。現地透水試験状況を写真-4に示す。また、試験施工箇所から採取したφ100のコアを用いて、中性化深さ、塩化物イオン含有量を測定し、表面含浸材の含浸深さを評価するためにEPMA面分析(シラン系を対象)およびSEMによる観察(けい酸塩系および無機質系を対象)を実施した。なお、SEMによる観察はメーカーヒアリングから含浸していると考えられる深さ10mm程度までを対象とした。中性化深さは、コア切断面にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧して測定した。塩化物イオン含有量は、コアから切断採取した試料を微粉碎し、JIS A 1153に準拠して電位差滴定法により全塩化物イオン量を測定した。測定位置は、深さ方向に0~20mm、20~40mm、40~60mm、60~80mm、100~120mm、120~140mm

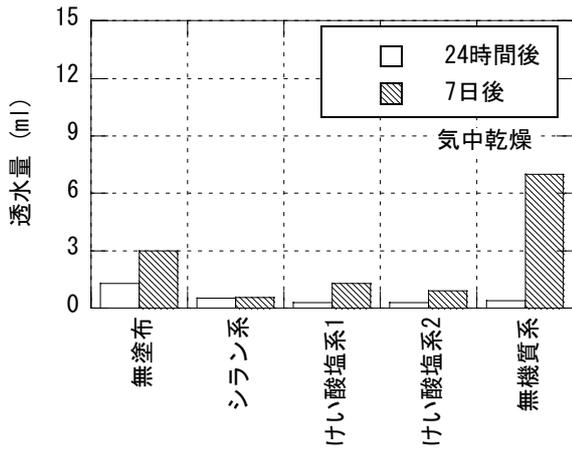


図-1 透水試験結果（漏斗法、気中乾燥）

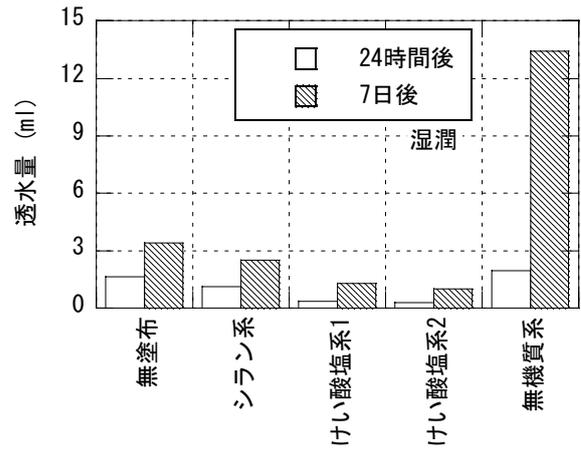


図-2 透水試験結果（漏斗法、湿潤）

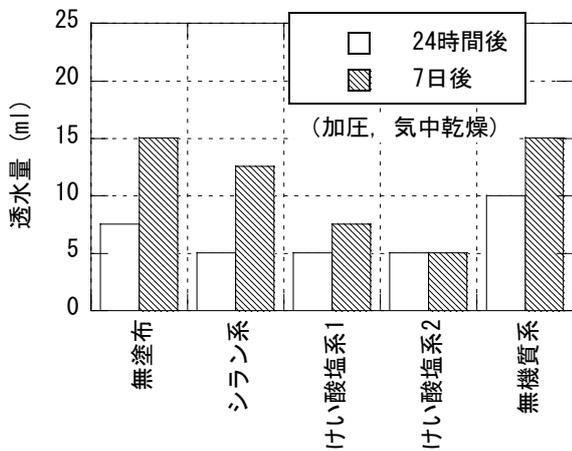


図-3 透水試験結果（加圧、気中乾燥）

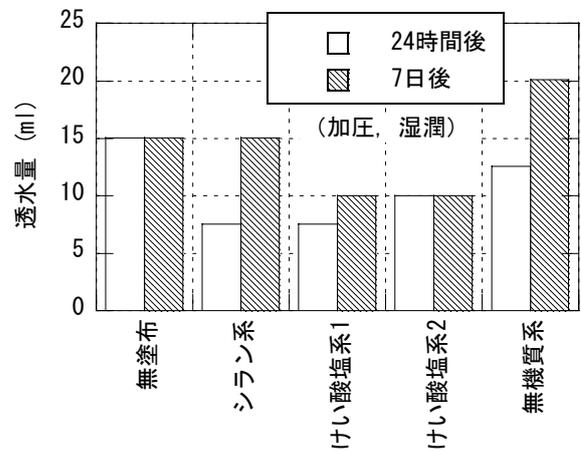


図-4 透水試験結果（加圧、湿潤）

の6箇所とした。

§ 3. 結果および考察

3.1 室内試験

3.1.1 基板コンクリート

基板に用いたコンクリートは、スランプ8.5cm、空気量4.9%、材齢28日の圧縮強度は54.2N/mm²であった。

3.1.2 健全部における透水抑制効果の評価

基板コンクリートが気中乾燥状態で塗布した場合および湿潤状態で塗布した場合の漏斗法透水試験結果を図-1および図-2に示す。

気中乾燥状態で塗布した場合、無塗布と比較して無機質系は透水量が大きい結果となったが、シラン系、けい酸塩系については、無塗布と比較して透水量が小さくなっており、表面含浸材による透水抑制効果が認められた。透水試験開始から7日後の透水量は、シラ

ン系が最も小さく無塗布と比較して80%低減された。無機質系の透水量が大きくなったのは、無機質系表面含浸材をコンクリート表面より除去した後に実施した透水試験では透水量が低減されている結果が得られたことから、基板コンクリート表面に約1mm厚に塗布した無機質系表面含浸材自身が吸水したためと考えられる。

湿潤状態で塗布した場合、気中乾燥状態の場合と同様に、無塗布と比較して無機質系の透水量は大きくなったが、シラン系およびけい酸塩系の透水量は小さくなり、透水抑制効果が認められた。

気中乾燥と湿潤を比較した場合、けい酸塩系は透水量の差が小さく、塗布時の基板コンクリートの含水状態の影響が小さい結果となった。一方、シラン系については、湿潤の場合、気中乾燥と比較して透水量が大きくなる結果となった。これは、基板コンクリート表面が湿潤である場合、シラン系の表面含浸材がコンクリート内部に含浸しにくくなるためと考えられる²⁾。

加圧透水試験結果を図-3 および図-4 に示す。0.3MPa で加圧した場合、7日後では気中乾燥、湿潤ともに、無塗布と比較して、けい酸塩系の透水量は小さくなったが、シラン系および無機質系の透水量は同等となる結果となった。シラン系の場合、0.3MPa 程度（水頭差3000mm）の圧力がかかる場合、透水抑制効果が小さくなるものと考えられる。

3.1.3 鉛直打継ぎ部における透水抑制効果の評価

表面含浸材を打継ぎ上面に塗布した場合および打継ぎ面に塗布した場合の漏斗法透水試験結果を図-5 および図-6 に示す。

打継ぎ上面に塗布した場合、いずれの場合においても、無塗布と比較して透水量が著しく小さくなっており、表面含浸材による打継ぎ箇所における透水抑制効果が認められた。特に、シラン系およびケイ酸塩系2については、打継ぎがない無塗布の場合と透水量が同等以下となり、透水量が非常に小さい結果となった。

打継ぎ面に塗布した場合、無機質系を除いて、無塗布と比較して透水量が大きくなる結果となった。無機質系は無塗布と同等であった。打継ぎ上面に塗布した場合には、改質された層がコンクリート表面にあることから表面からの透水抑制効果が認められたが、打継ぎ面に塗布した場合には、表面付近が十分に改質されないことから、表面からの透水を抑制する効果が得られなかったものと考えられる。さらに、無塗布と比較しても透水量が多くなっていることから、含浸材を塗布することにより打継ぎ面の一体性が低下している可能性も考えられる。

以上より、鉛直打継ぎ部に表面含浸材を塗布する場合には、打継ぎ面より打継ぎ上面に塗布する方が有効であると考えられる。

3.2 現地試験

3.2.1 中性化深さ

建設後約22年で塗布して3年後の中性化深さ測定結果を図-7 に示す。けい酸塩系4を除いて、ほぼ同等となった。なお、塗布時に測定した中性化深さは平均で9.9mmであった。塗布後3年では、表面含浸材による中性化抑制効果は明確には認められなかった。今後、さらに長期的な調査を継続する予定である。けい酸塩系4の中性化深さが他の場合より小さくなっているが、これは現状では原因不明である。

3.2.2 塩化物イオン含有量

塩化物イオン含有量の測定結果を図-8 に示す。なお、無機質系については、コンクリート表面に存在する厚さ1mm程度の無機質系表面含浸材を除去しないで測定した。いずれの場合においても、塩化物イオン含有量は、表面から深さ50mm程度までは外部塩化物が浸透し

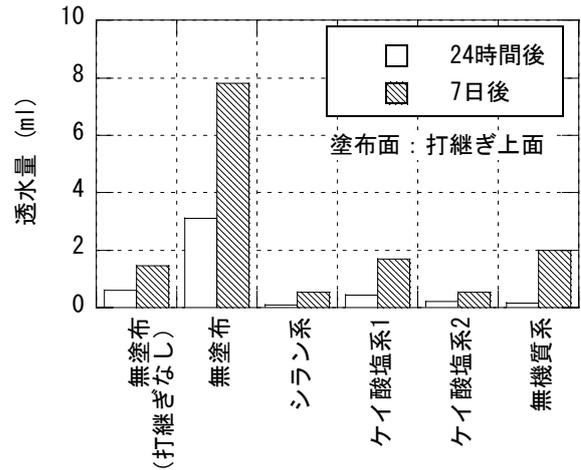


図-5 透水試験結果（塗布面：打継ぎ上面）

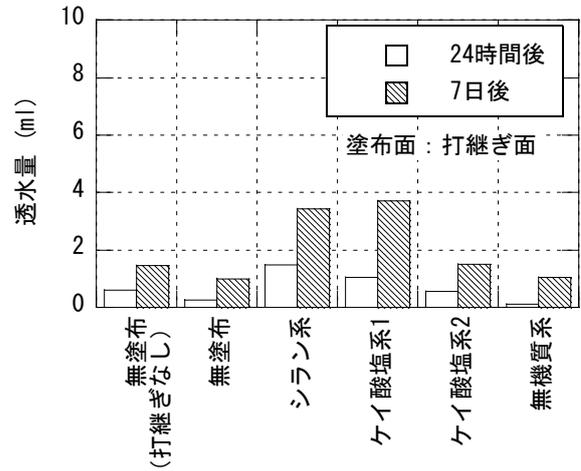


図-6 透水試験結果（塗布面：打継ぎ上面）

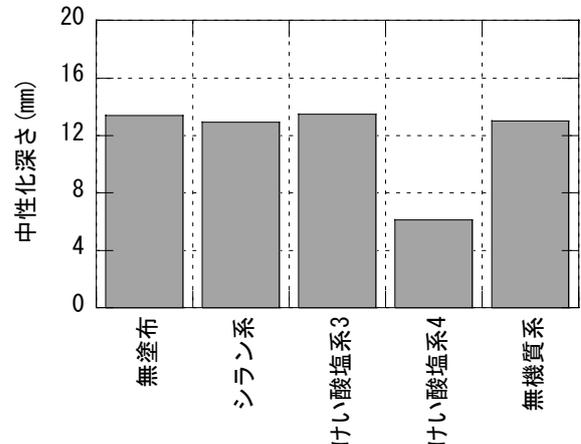


図-7 中性化深さ

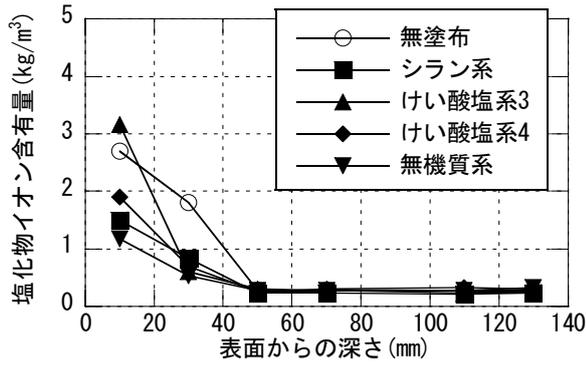


図-8 塩化物イオン含有量

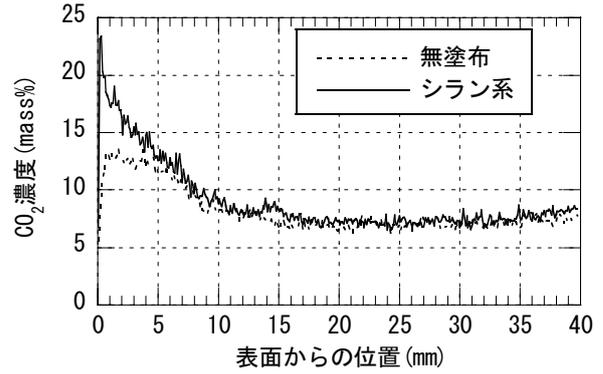


図-10 炭素濃度プロファイル (シラン系)

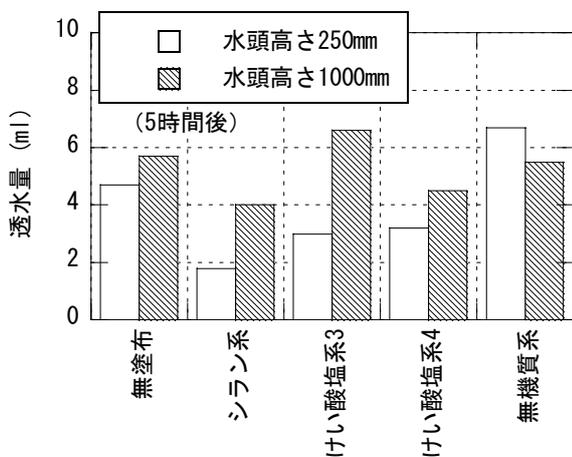


図-9 現地透水試験結果

ているが、50mmより深い箇所においては、塩化物イオン含有量は小さく一定となる結果となった。50mmより深い箇所の塩化物イオン含有量は 0.3kg/m^3 以下であり、建設時に混入されていた初期含有塩化物イオン含有量と考えられる。無塗布と比較すると、表面含浸材を塗布した場合、けい酸塩系3の0~20mmを除いて、0~20mmおよび20~40mmの塩化物イオン含有量が小さくなった。これは、表面含浸材の透水抑制効果により外部からの塩化物イオンの浸透が抑制されたためと考えられるが、塗布後3年後の結果であるため、今後長期的に調査を継続していく必要があると考えられる。

3.2.3 透水試験

水頭高さ250mmおよび1000mmで実施した透水試験結果を図-9に示す。水頭高さ250mmの場合、無塗布と比較して、シラン系、けい酸塩系の透水量が小さくなっており透水抑制効果が認められた。一方、無機質系は無塗布より透水量が大きくなった。シラン系の透水量は無塗布より60%程度低減された。水頭高さ1000mmの場合、無機質系を除いて、水頭高さ250mmの場合と比較して透水量が大きくなる結果となった。無機質系

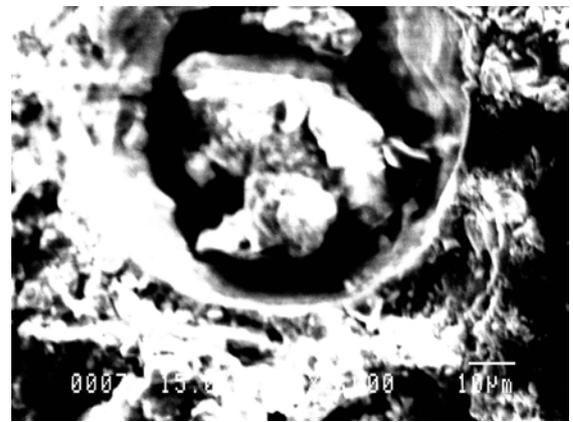


図-11 SEM観察結果例 (けい酸塩系3、1000倍、観察位置：表面から2mm程度)

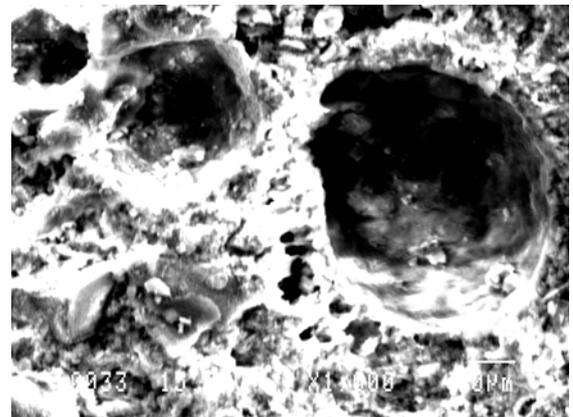


図-12 SEM観察結果 (無機質系、1000倍、観察位置：表面から2mm程度)

で水頭高さ250mmが水頭高さ1000mmより透水量が大きくなったのは、コンクリート表面に約1mm厚に塗布した無機質系表面含浸材自身が吸水したためと考えられる。無塗布と比較して、シラン系およびけい酸塩系4の透水量が小さくなっており透水抑制効果が認められた。無塗布の透水量と比較してシラン系で30%、けい酸塩系4で20%程度透水量が小さくなった。

3.2.4 含浸深さ

シラン系表面含浸材の主成分は炭素とけい素であり、けい素に比べ炭素の割合が多いため、コンクリート中に含浸した場合、炭素濃度が高くなるものと考えられる。したがって、無塗布と比較して炭素濃度が高い範囲がシラン系表面含浸材の含浸深さと判断できると考えられる³⁾。シラン系の表面含浸材を塗布した場合に、EPMA 面分析で得られた結果を表面からの深さ方向に平均化して算出した炭素濃度プロファイルを図-10 に示す。いずれにおいても、表面から 15mm 程度までの範囲で内部よりも炭素濃度が高くなった。無塗布については、炭酸化によるものと考えられ、コア採取時に測定した中性化深さが 13mm 程度であった結果とほぼ一致する。一方、シラン系については、表面から 5mm 程度までは無塗布と比較して明らかに炭素濃度が高くなっている。これは、炭酸化の影響だけでなく、シラン系表面含浸材が含浸している影響であると考えられる。したがって、シラン系表面含浸材の含浸深さは 5mm 程度であると考えられる。

けい酸塩系表面含浸材は、けい酸ナトリウムを主成分とする水溶液であり、コンクリート中に含浸して水酸化カルシウムと化学的に結合して C-S-H 系の結晶をコンクリート細孔内部に形成し、ゲル状またはガラス状でコンクリート細孔を充てんしているものと考えられる。SEM により細孔中を観察した 1 例として、けい酸塩系 3 を塗布した場合の表面から深さ 2mm 程度の直径 50 μm 程度の細孔中を SEM により観察した結果を図-11 に示す。表面から 0~2mm、4~6mm、8~10mm の位置で約 2 \times 2mm 範囲の 10~100 μm 程度の毛細管空隙を観察したが、いずれの細孔中にもゲル状もしくはガラス状の結晶は観察されなかった。けい酸塩系 4 についても同様であり、けい酸塩系表面含浸材は含浸していることが確認できなかった。既往の研究⁴⁾では、けい酸塩系の塗布したモルタル表面にガラス質の膜が生成していることが SEM により観察されている。一方、本研究の透水試験の結果からは透水抑制効果が得られていることから、けい酸塩系表面含浸材は、ごく表層部を改質している可能性も考えられる。

無機質系表面含浸材は、コンクリート中の毛細管空隙に浸透し結晶化することで緻密化するものと考えられるため、結晶化した針状結晶（エトリンガイト）が SEM により細孔中に確認されれば含浸していると判断できる⁵⁾。SEM により細孔中を観察した 1 例として、無機質系を塗布した場合の表面から深さ 2mm 程度の直径 40 μm 程度の細孔中を観察した結果を図-12 に示す。表面から 0~2mm、4~6mm、8~10mm の位置で約 2 \times 2mm

範囲の 10~100 μm 程度の毛細管空隙を観察したが、いずれの細孔中にも針状結晶は観察されなかった。透水試験の結果から透水抑制効果が認められず、今回の試料については、無機質系表面含浸材はほとんど含浸していなかった可能性が高いと考えられる。

§ 4. おわりに

本研究のまとめを以下に示す。

- 1) 健全部にシラン系、けい酸塩系表面含浸材を塗布した場合、透水抑制効果が認められたが、塗布時の基板コンクリートの含水状態が高い場合や塗布面に 0.3MPa の圧力が作用する場合に、効果が小さくなる結果となった。一方、無機質系表面含浸材は透水抑制効果が認められなかった。
- 2) 鉛直打継ぎ打継ぎ上面に表面含浸材を塗布した場合、シラン系およびけい酸塩系 2 については、打継ぎがない無塗布の場合と透水量が同等以下となり、透水量が非常に小さい結果となった。
- 4) 鉛直打継ぎ面に表面含浸材を塗布した場合、いずれにおいても、無塗布と比較して透水量が同等以上となり透水抑制効果が認められなかった。
- 5) シラン系の含浸深さは EPMA による炭素濃度プロファイル結果から 5mm 程度と考えられる。
- 6) けい酸塩系表面含浸材は、SEM による観察では含浸深さを評価できなかった。
- 7) 無機質系表面含浸材は、SEM により結晶が観察されなかったこと、透水抑制効果が認められなかったことから、ほとんど含浸していない可能性が高いと考えられる。

なお、表面含浸材によるコンクリート構造物の耐久性向上に対する効果や評価方法については、明確でないのが現状であり、表面含浸材を適用する際には、実構造物において試験施工を行い、その効果を確認することが望ましいと考えられる。

謝辞

本報告は、財団法人海洋架橋・橋梁調査会からの受託研究の成果の一部をまとめたものである。神戸本部橋梁課中元氏には多大なご協力を頂きました。また、C&R コンサルタント小野氏、木村技術士事務所木村氏には貴重なアドバイスをいただきました。末筆ながらここに感謝の意を申し上げます。

<参考文献>

- 1) 土木学会：“表面保護工法設計施工指針（案）”、コンクリートライブラリー119、pp.15-17、2005
- 2) 林大介ほか：“シラン・シロキサン系撥水材の塗布方法に関する一実験”、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.415-420、2001
- 3) 山崎大輔ほか：“施工後 20 年を経過した反応性シラン系表面含浸材の撥水効果”、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、第 5 巻、pp.185-188、2005.10
- 4) 審良善和ほか：“表面改質材を用いたコンクリート構造物の劣化抑制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.26、No.1、pp.1719-1724、2004
- 5) 日本建築学会：“建築工事標準仕様書・同解説 JASS8 防水工事”、pp.311-316、2000