

論文 表面改質材を用いたコンクリートの耐久性向上に関する基礎的研究

田中 博一*1・滝本 和志*2・栗田 守朗*3

要旨: 主成分濃度が80%以上の4種類のシラン系表面改質材を塗布したコンクリートの耐久性向上効果について実験的に検討した。含浸深さ試験, 透水量試験, 中性化および塩化物イオン浸透性に対する抵抗性試験を実施した結果, 含浸深さは5mm~13mm程度であり, 透水抑制効果および塩化物イオン浸透抑制効果が著しく高いこと, 中性化進行抑制効果は塗布時の含水状態によって異なることなどを明らかにした。さらに, 水中浸漬により割裂面の撥水層から測定した含浸深さとEPMAによる炭素濃度分布から測定した含浸深さはほぼ同等であることを明らかにした。

キーワード: シラン系, 表面改質材, 含浸深さ, EPMA, 透水, 塩化物, 中性化

1. はじめに

中性化, 塩害, アルカリ骨材反応あるいは凍害などの劣化に対してコンクリート構造物の耐久性を向上させる方法の一つに表面含浸工法がある。表面含浸工法は, 表面改質材をコンクリート表面に塗布することでコンクリート表層部を緻密化したり, 表層部に撥水性を付与することなどにより, コンクリート構造物の耐久性を向上させる工法である¹⁾。そのため, 予防保全を前提とした新設構造物への適用, あるいは事後保全として既設構造物への適用が考えられる。

表面含浸工法に用いられる表面改質材は, その主成分に応じてシラン系とケイ酸塩系に大別される。このうちシラン系表面改質材は, 浸透性吸水防止材ともいわれ, コンクリート表層部に含浸することにより撥水性を付与して吸水防止層を形成し, 外部からの水分や塩化物イオンの浸入を抑制する。シラン系表面改質材を用いた表面含浸工法の長所には, 施工が容易でありコストが安価であること, 施工後もコンクリート構造物の外観を変えないために点検がしやすいこと, さらに再施工が容易であることなどがあげられる。しかし, シラン系表面改質材の改質効果やその耐久性については, 十分に解明されていないのが現状である。

一方, 従来のシラン系表面改質材の主成分濃度は20%~40%程度のもので主流であったが, 最近, 主成分濃度が80%を越えるものが市販されており, その改質効果の改善が期待されている²⁾。そこで, 本研究では, 主成分濃度が80%以上の4種類のシラン系表面改質材を用いた場合のコンクリートの耐久性向上に関する基礎的な検討を行うために, シラン系表面改質材の種類および塗布時のコンクリートの含水状態を試験要因として, 含浸深

さ試験, 透水量試験, 中性化および塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験を実施した。

2. 試験概要

2.1 試験要因と水準

試験要因と水準を表-1に示す。試験要因はシラン系表面改質材の種類と塗布時のコンクリートの含水状態とした。検討したシラン系表面改質材を表-2に示す。シラン系表面改質材は, 市販品のうち主成分濃度が80%以上の高濃度のものとした。塗布時のダレを抑制するために改質材Aはクリーム状, 改質材Bはジェル状となっている。改質材Cと改質材Dは, 主成分濃度がほぼ100%であり, さらに, 改質材Dはアミノ基を含んでおりシランの反応遅延効果により高含浸性を付与したものである。塗布量は各改質材の標準的な量を目安とした。塗布時のコンクリートの含水状態は, 封かん養生直後の湿潤状態および封かん養生後気中乾燥させた乾燥状態の2種類とした。塗布時の表面水分率(高周波容量式水分計)は湿潤状態で10%程度, 乾燥状態で5%程度であった。

2.2 コンクリートの使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³), 細骨材には山砂(密度2.62g/cm³, 吸水率1.35%), 粗骨材には硬質砂岩碎石(密度2.66g/cm³, 吸水率0.68%), 混和剤にはAE減水剤を使用した。コンクリートの配合を表-3に示す。

2.3 試験体の作製方法

試験体は, コンクリート打設後1日で脱型して材齢4週まで温度20°C, 湿度60%の室内で封かん養生した。塗布時のコンクリートの含水状態を湿潤状態とするケースについては, 材齢4週まで封かん養生した直後に表-2

*1 清水建設(株) 技術研究所生産技術センター副主任研究員 工修(正会員)

*2 清水建設(株) 技術研究所安全安心技術センター主任研究員 博(工)(正会員)

*3 清水建設(株) 技術研究所安全安心技術センターグループ長 博(工)(正会員)

に示すシラン系表面改質材を塗布面（試験体側面）を上に向け、刷毛により所定量を塗布した。乾燥状態で塗布するケースについては、材齢4週まで封かん養生した後、温度20℃、湿度60%の室内でさらに4週間気中乾燥させて含水状態を調整した後、シラン系表面改質材を塗布した。塗布時には高周波容量式水分計を用いて表面水分率を測定してコンクリートの含水状態を確認した。塗布後は、温度20℃、湿度60%の室内でさらに2週間気中養生し、その後各種試験を実施した。なお、比較のために同一養生条件とした改質材を塗布しない無塗布試験体も作製した。

2.4 試験項目

試験項目を表-4に示す。

(1) 含浸深さ試験

試験体の形状は100×100×100mmとした。表面改質材の試験方法（案）（JSCE-K 571）の含浸深さ試験に準じて試験体の含浸面を2分割するように割裂し、1分間水に浸漬した。水中浸漬後に割裂面の撥水している部分の厚さをノギスにより測定した。さらに乾燥状態で塗布した試験体については、同じ試験体を用いて電子線マイクロアナライザ（以下 EPMA とする）による面分析を実施し、得られた炭素濃度分布結果より表面から深さ方向に骨材や空隙を除いた部分を平均して炭素濃度プロファイルを算出した。なお、比較のために EPMA による分析は無塗布試験体についても実施した。シラン系表面改質材の主成分は炭素とケイ素であり、ケイ素と比較して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、内部より炭素濃度が高い範囲がシラン系表面改質材の含浸深さであると考えられる^{5),6)}。

(2) 透水量試験

試験体の形状は100×100×100mmとした。表面改質材の試験方法（案）（JSCE-K 571）の透水量試験に準じて、シラン系表面改質材を含浸した含浸面に口径75mmの漏斗をエポキシ樹脂により固定し透水量試験を実施した。水頭高さは250mmおよび1000mmとし、試験期間は7日間とした。なお、比較のために無塗布試験体についても実施した。

(3) 中性化に対する抵抗性試験

試験体の形状は100×100×400mmとした。シラン系表面改質材を含浸した100×400mmの2側面以外をシールし、JIS A 1153に準じて、温度20℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5%の条件下で促進中性化した。促進期間28日および91日後に、JIS A 1152に準じて試験体の割裂面にフェノールフタレインを噴霧して着色しない領域を中性化深さとしてノギスにより測定した。なお、比較のために無塗布試験体についても実施した。

表-1 要因と水準

要因	水準
シラン系表面改質材の種類	改質材 A、改質材 B、改質材 C、改質材 D
塗布時のコンクリートの含水状態	湿潤状態（表面水分率約10%） 乾燥状態（表面水分率約5%）

表-2 検討したシラン系表面改質材

種類	主成分	主成分濃度	塗布量 (g/m ²)	外観
改質材 A	アルキルトリアルコキシシランおよび反応性ポリシロキサン	80%	200 (1回塗布)	クリーム状
改質材 B	アルキルアルコキシシランおよびシロキサン	90%以上	400 (2回塗布)	ジェル状
改質材 C	アルキルトリアルコキシシラン	98%以上	250 (2回塗布)	液状
改質材 D	アルキルトリアルコキシシラン	95%以上	500 (3回塗布)	液状

表-3 コンクリート配合

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
53	15	4.5	45.0	160	302	825	1027

表-4 試験項目

項目	試験方法	備考
含浸深さ試験	水中浸漬による方法 (JSCE-K 571)	100×100×100mm
	EPMAによる方法	測定範囲 40×40mm 炭素濃度分布 乾燥状態塗布のみ実施
透水量試験	JSCE-K 571	100×100×100mm 水頭高さ 250, 1000mm 試験期間 7日間
中性化に対する抵抗性試験	JIS A 1153	100×100×400mm
塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験	JSCE-K 571	100×100×100mm 3%NaCl水溶液に63日間浸漬 乾燥状態塗布のみ実施

(4) 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験

試験体の形状は100×100×100mmとした。表面改質材の試験方法（案）（JSCE-K 571）の塩化物イオン浸透に

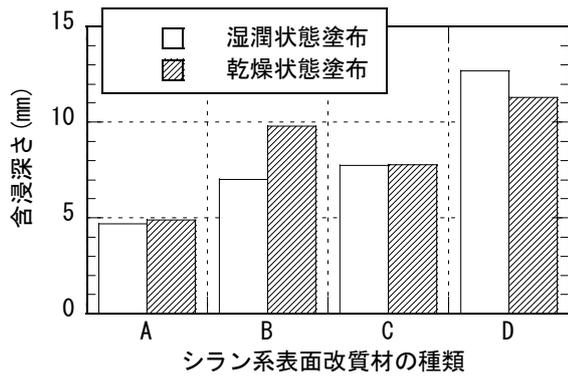


図-1 含浸深さ（水中浸漬による）

対する抵抗性試験に準じて、シラン系表面改質材を含まない 100×100mm の 2 側面を除いた 4 面をシールした試験体を 3% 塩化ナトリウム水溶液に試験体の含浸面が側面になるように浸漬した。63 日間浸漬させた後に EPMA により塩化物イオンの浸透深さを測定した。塩化物浸透に対する抵抗性試験は、乾燥状態で塗布した試験体を用いて実施した。なお、比較のために無塗布試験体についても実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 含浸深さ試験

コンクリートの圧縮強度は、湿潤状態塗布時（材齢 28 日，20℃封かん養生）において 31.3N/mm²，乾燥状態塗布時（材齢 56 日，20℃封かん養生）において 32.7N/mm² であり，シラン系表面改質材を塗布する際のコンクリートの圧縮強度は，含水状態によらずほぼ同等であった。

水中浸漬後に割断面の撥水している部分から測定したシラン系表面改質材の含浸深さを図-1 に示す。本研究で用いたシラン系表面改質材の含浸深さは 5mm～13mm 程度となった。含浸深さは改質材 D が最も深く 11～13mm 程度，改質材 B は 7～10mm 程度，改質材 C は 8mm 程度，改質材 A は 5mm 程度であった。塗布時のコンクリートの含水状態が含浸深さに及ぼす影響は小さく，改質材 B を除いて，含浸深さは塗布時の含水状態によらずほぼ同等となった。改質材 B については乾燥状態で塗布した場合が，湿潤状態よりも含浸深さは 1.4 倍程度大きくなった。シラン系表面改質材の含浸深さは，塗布時のコンクリートの含水状態に影響を受け，乾燥状態の方が湿潤状態より大きくなると報告されている^{3),4)}。既往の報告では，試験体を水中養生した後に含水状態を調整しているが，本研究における湿潤状態は，実構造物の脱型時の含水状態を想定し，封かん養生直後としている。そのため，本研究の湿潤状態は，既往の報告と比較してコンクリートの含水率が小さくなり，塗布時のコンクリートの含水状態が含浸深さに及ぼす影響が小さくなったものと考えられる。

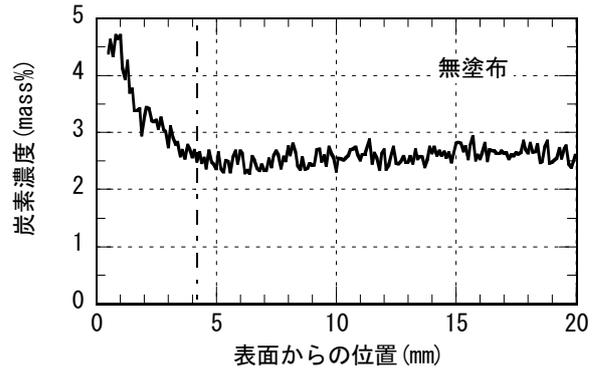


図-2 炭素濃度プロファイル（無塗布）

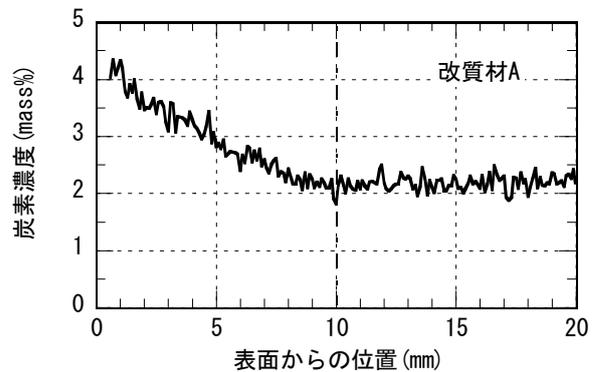


図-3 炭素濃度プロファイル（改質材 A）

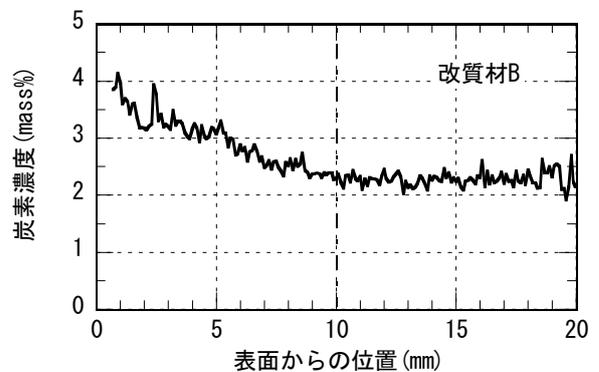


図-4 炭素濃度プロファイル（改質材 B）

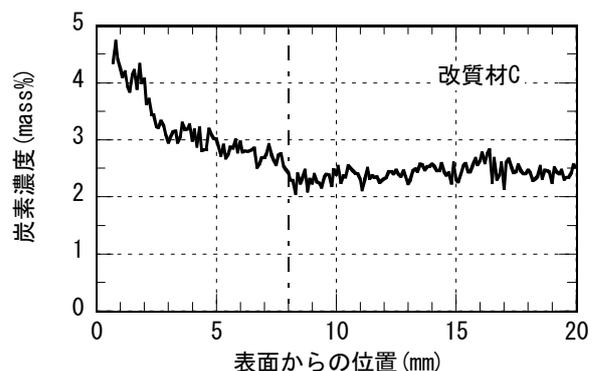


図-5 炭素濃度プロファイル（改質材 C）

乾燥状態で塗布した試験体の EPMA 面分析より得られた表面から深さ方向に平均化した炭素濃度プロファイルを図-2～図-6 に示す。無塗布については、表面から 4mm 程度までの炭素濃度が内部より高くなっている。これは、試験体を作製して含浸深さ試験を実施するまでに中性化が進行したためと考えられる。なお、フェノールフタレイン溶液により測定した無塗布の中性化深さは 2.3mm であった。一方、シラン系表面改質材を含浸させた場合、無塗布同様に表面から 4mm 程度までは中性化による影響を受けているものと考えられるが、改質材 A および改質材 B については表面から 10mm 程度、改質材 C については 8mm 程度、改質材 D については 12mm 程度までの炭素濃度が内部より高くなっている。これは、シラン系表面改質材が含浸している影響であると考えられる。

水中浸漬により得られた含浸深さと EPMA により得られた含浸深さとの比較を図-7 に示す。改質材 A を除いて、水中浸漬による含浸深さと EPMA による含浸深さがほぼ同等となり、EPMA によりシラン系表面改質材の含浸深さが測定できることが明らかになった。改質材 A の場合は、EPMA の方が水中浸漬より 2 倍程度含浸深さが大きくなったが、現状では原因は不明であり、今後の課題である。

3.2 透水量試験

試験期間 7 日における透水量を図-8 および図-9 に示す。湿潤状態および乾燥状態ともに、水頭高さによらず、無塗布と比較してシラン系表面改質材を用いた場合には、透水量が著しく小さくなった。無塗布の透水量を 1 とした場合の透水比は、水頭高さ 250mm の場合では 0.05 以下、水頭高さ 1000mm の場合では乾燥状態で塗布した改質材 D を除いて、0.1 以下となり、優れた透水抑制効果が認められた。乾燥状態で塗布した改質材 D については、水頭高さ 1000mm において他の改質材と比較して透水比が大きくなった。これは、後述する塩化物イオン浸透についても、浸透深さは小さいものの、浸透した塩化物イオン濃度の最大値が他の改質材より大きくなっていることから、改質材 D については表面から 1mm 程度未満の表層付近の改質効果が小さいために透水抑制効果が小さくなった可能性が考えられる。改質効果が小さくなった理由については現状では不明であり今後の課題である。

3.3 中性化に対する抵抗性試験

促進期間 91 日までの促進中性化試験結果を図-10 および図-11 に示す。湿潤状態で塗布した場合、無塗布と比較してシラン系表面改質材を用いた場合に中性化深さが小さくなり、中性化進行抑制効果が認められた。促進期間 91 日における無塗布の中性化深さを 100% とした場合の中性化深さ比は、改質材 A で 55%、改質材 B で 54%、改質材 C で 73%、改質材 D で 49% であった。ただし、

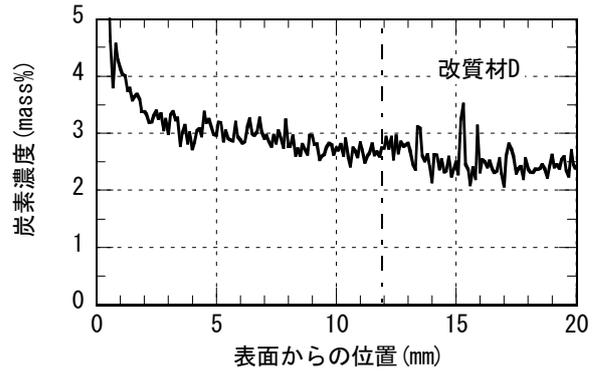


図-6 炭素濃度プロファイル (改質材 D)

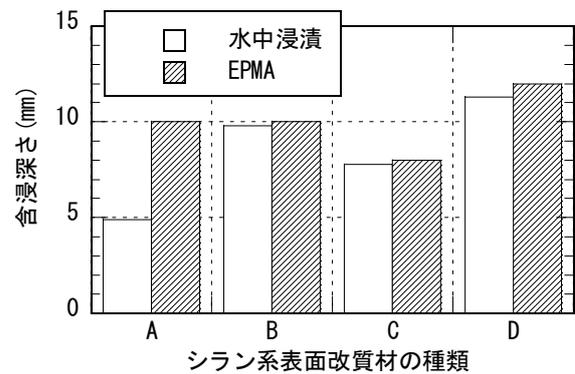


図-7 含浸深さの比較 (乾燥状態塗布)

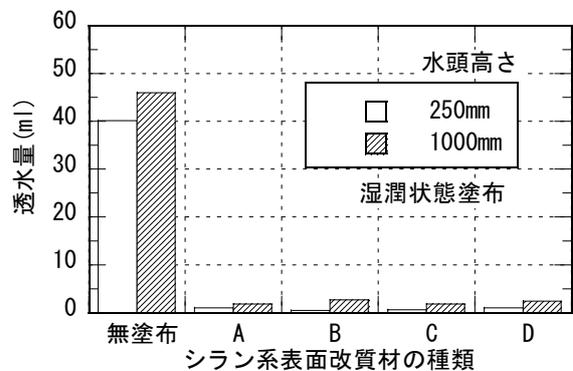


図-8 試験期間 7 日における透水量 (湿潤状態塗布)

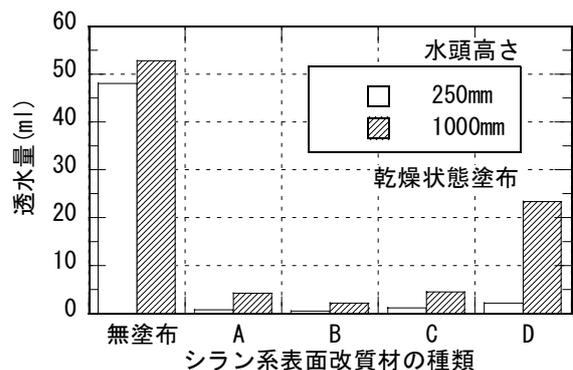


図-9 試験期間 7 日における透水量 (乾燥状態塗布)

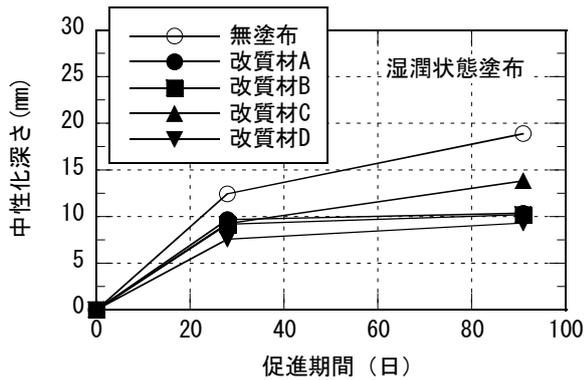


図-10 促進中性化試験結果 (湿潤状態塗布)

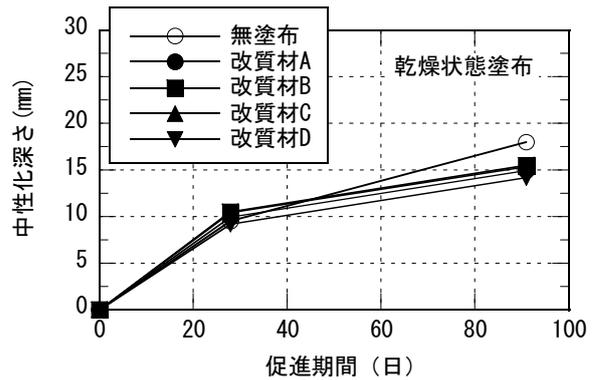


図-11 促進中性化試験結果 (乾燥状態塗布)

フェノールフタレイン溶液により中性化深さを測定する場合、撥水層ではフェノールフタレイン溶液をはじくことにより赤色に呈色しないことが考えられる。シラン系表面改質材の含浸深さは 10mm 程度であり、促進期間 91 日における中性化深さとほぼ一致していることから、中性化深さはさらに小さい可能性も考えられる。

一方、乾燥状態で塗布した場合、無塗布と比較してシラン系表面改質材を用いた場合、促進期間 91 日における中性化深さは小さいものの、湿潤状態で塗布した場合よりもその差は小さくなった。促進期間 91 日における中性化深さ比は、改質材 A で 83%、改質材 B で 86%、改質材 C で 86%、改質材 D で 79% であった。中性化の進行は、コンクリート中の含水状態が高い場合、多くの細孔が水分で満たされるために二酸化炭素の拡散が阻害されて遅くなる⁷⁾。湿潤状態で塗布した場合、シラン系表面改質材の透湿性が無塗布より小さくなる⁸⁾ため、無塗布と比較してコンクリート中の湿度が高いことが影響して、中性化進行抑制効果が顕著になったものと考えられる。したがって、シラン系表面改質材を用いた場合、塗布時のコンクリートの含水状態によって中性化に対する抑制効果が異なることが考えられ、さらに長期的な検討が必要であると考えられる。また、乾湿繰返しを受ける実環境下においては、シラン系表面改質材を用いた場合の方が、コンクリート中の乾燥が進行する⁹⁾こともあるため、中性化の進行速度も速くなる可能性も考えられることから、シラン系表面改質材の中性化に対する抵抗性を評価するには、試験条件等をさらに検討する必要があると考えられる。

3.4 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験

乾燥状態で塗布した試験体を 3%塩化ナトリウム水溶液に 63 日間浸漬した後、EPMA により算出した塩化物イオン浸透深さを図-12~図-15 に、塩化物イオン浸透深さの比較を図-16 に示す。無塗布については、塩化物イオン浸透深さは表面から 25mm 程度となり、塩化物イオン濃度は表面から 4mm 程度で最大となった。これは、中性

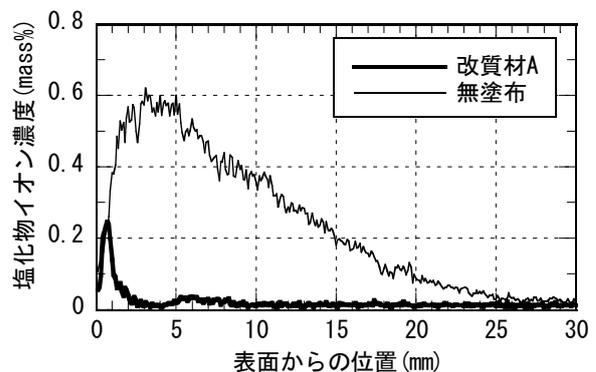


図-12 塩化物イオン浸透深さ (改質材 A)

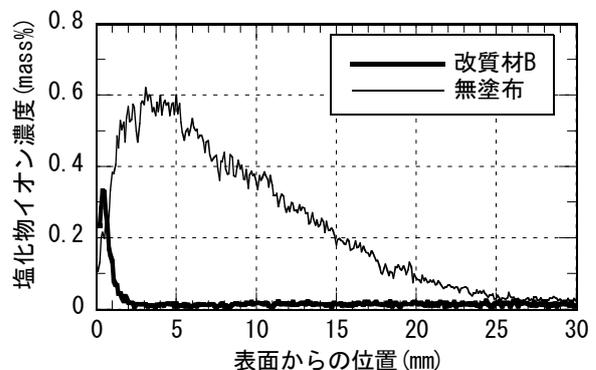


図-13 塩化物イオン浸透深さ (改質材 B)

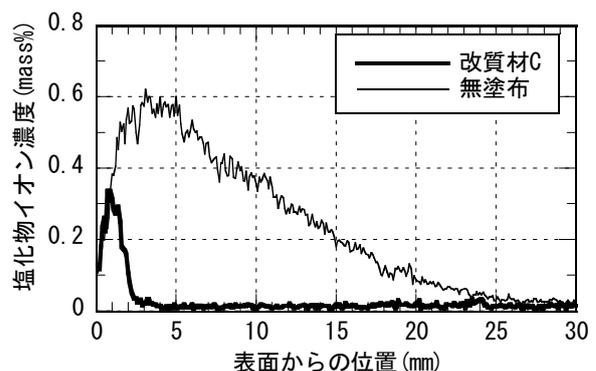


図-14 塩化物イオン浸透深さ (改質材 C)

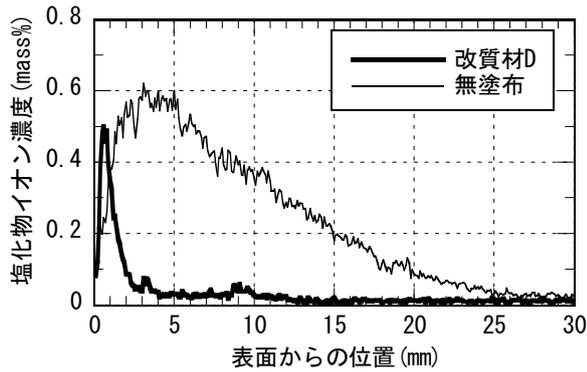


図-15 塩化物イオン浸透深さ (改質材 D)

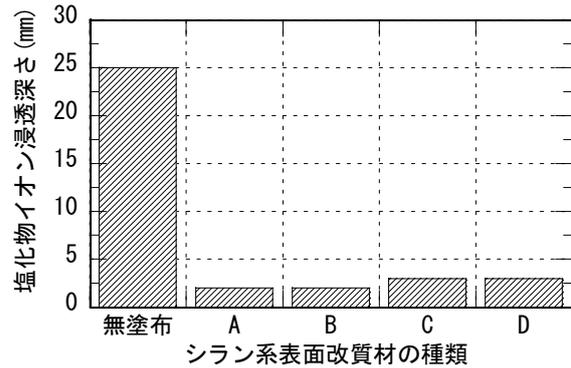


図-16 塩化物イオン浸透深さの比較

化の影響による塩化物イオンの濃縮現象であると考えられる。一方、シラン系表面改質材を用いた場合の塩化物イオン浸透深さは、無塗布と比較して 10 分の 1 程度となり、高い塩化物イオン浸透抑制効果が認められた。塩化物イオン濃度の最大値については、無塗布が 0.6%程度に対し、改質材 A が 0.24%、改質材 B が 0.33%、改質材 C が 0.34%、改質材 D が 0.50%となった。改質材 A、改質材 B および改質材 C については塩化物イオン濃度の最大値についても抑制効果が認められたが、改質材 D については他のシラン系表面改質材と比較して塩化物イオン濃度が高くなった。したがって、改質材 D については、表面から 1mm 未満程度の表層部の改質効果が小さくなっている可能性が考えられる。

4. まとめ

主成分濃度 80%以上のシラン系表面改質材を用いた場合の耐久性向上について実験的に検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で用いた表面改質材の含浸深さは 5~13mm であった。
- (2) 改質材 A、改質材 C および改質材 D は、塗布時のコンクリートの含水状態が含浸深さに及ぼす影響は小さい。改質材 B は湿潤状態より乾燥状態で塗布した場合の方が含浸深さは大きくなる。
- (3) 水中浸漬により割裂面の撥水層から測定した含浸深さと EPMA による炭素濃度分から測定した含浸深さは、改質材 A を除きほぼ同等であった。
- (4) 透水抑制効果については、改質材を用いた場合、水頭高さ 250mm において無塗布に対する透水比は 0.05 以下、水頭高さ 1000mm において透水比は 0.1 以下となり、高い透水抑制効果が認められた。
- (5) 中性化に対する抵抗性については、湿潤状態および乾燥状態いずれの場合においても、無塗布より中性化深さが小さくなり、中性化抑制効果が認められた。

- (6) 塩化物イオン浸透に対する抵抗性については、無塗布に対する浸透深さは 10 分の 1 程度となり、高い塩化物イオン浸透抑制効果が認められた。

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) 今野拓也・細田暁・小林薫・松田芳範：コンクリートの養生条件・材齢が表面含浸材の吸水防止効果に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.541-546, 2007
- 3) 久保善司・服部篤史・栗原慎介・宮川豊章：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, pp.799-805, 2000.7
- 4) 林大介・坂田昇・三村俊幸・神沢弘：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
- 5) 山崎大輔・奥田俊男・江口和雄・国枝稔・小柳治：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性効果，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
- 6) 田中博一・中元雄治・小野定・木村克彦：表面含浸材を塗布したコンクリートの透水抑制効果に関する研究，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 7 巻, pp.219-224, 2007.11
- 7) 日本コンクリート工学協会：炭酸化研究委員会報告書, pp.33-40, 1993.3
- 8) 田中博一・宮川豊章・藤井学・堀耕次：シラン含浸コンクリートのはっ水性の評価，材料, Vol.47, No.7, pp.699-705, 1998.7
- 9) 久保善司・堀耕次・服部篤史・宮川豊章：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，コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.873-878, 1996