

シラン・シロキサン系表面含浸材の開発 および長期耐久性の実証

林 大介*1・坂田 昇*2・松田芳範*3・遠藤裕丈*4

概要 シリコン分子のモノマーであるシランとポリマーであるシロキサンを主成分とし、分子量や主成分濃度、性状などを適切に調整することによって初期性能に優れたシラン・シロキサン系表面含浸材を開発した。このシラン・シロキサン系表面含浸材について、様々な環境条件で最長15年間の暴露試験を行った。その結果、このシラン・シロキサン系表面含浸材によるコンクリートの吸水防止効果が15年間以上にわたって持続すること、コンクリート中の塩化物イオン浸透量が大きく低減すること、沿岸域ではコンクリートの含水量が低下することによって中性化が進行するものの、鉄筋腐食抑制に有効である可能性が高いことが明らかとなった。

キーワード：シラン系表面含浸材、長期耐久性、塩化物イオン浸透抑制、中性化抑制、鉄筋腐食抑制、耐凍害性

1. はじめに

表面含浸工法は、コンクリート表面に所定の効果を発揮する材料（表面含浸材）を含ませて、表層部の改質を図る工法である。表面被覆工法に比べて施工が簡易でコストが低く、無色透明で維持管理性に優れる特長を有していることから、コンクリート構造物の予防保全対策や経年劣化に対する補修工法として広く適用されている。

表面含浸材として分類される材料は、主に建築分野で30年以上前から適用されている。土木分野については、2005年4月に、「土木学会：表面保護工法設計施工指針（案）」¹⁾が発刊され、表面含浸工の設計施工マニュアルおよび表面含浸材の試験方法（案）（JSCE-K571-2004）²⁾が示されたことにより、適用されるようになったものと考えられる。また、「土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状（2004年2月）」³⁾と、それに続く「土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告（2006年4月）」⁴⁾の2期にわたる委員会報告により、材料の分類や、技術的な課題、新たな性能評価試験方法の案などが整理され、さらに適用が拡大した。

著者らは、こうした土木分野の動向と時を同じくして、シラン系表面含浸材の中でも、シリコン分子のモノマーであるシランと、ポリマーであるシロキサンが調整されているシラン・シロキサン系と称される材料を研究開発し、実構造物への適用を図っている。この過程では、表

面含浸材による高い効果を付与するための概念に基づいた材料の調整から、室内試験による初期性能の評価、さらには暴露試験による長期耐久性の実証を進めてきた。本稿では、暴露試験の期間が15年間に達したことを機会として、これらの一連のシラン・シロキサン系表面含浸材の研究開発を総括する。

2. シラン・シロキサン系表面含浸材の特徴

2.1 材料開発の概念

シラン系表面含浸材は、コンクリート表面に塗布することにより、主成分であるシリコン分子が浸透して、表層部に水の浸透を抑制する層を形成する材料である。この層を拡大して見ると、シリコンの疎水基がコンクリート表面と細孔表面に並び、細孔が充填されないため、外部からの水の浸透を抑制しつつ、コンクリート内部の水分を蒸散させる機能が付与される^{2),3)}。こうした機能は、あたかもアウトドア衣類などに使われる防水透湿性素材をイメージさせるものであるが、この効果によって、外部からの水の浸透の影響が大きい遮塩性の向上や、さらにはコンクリート中の水分の影響を受ける耐凍害性の向上、アルカリシリカ反応抑制、鉄筋腐食抑制などを行うことができる。その一方で、水中に供用される構造物への適用については、水圧によって水が浸透してしまうため、適さない⁴⁾。

シラン系表面含浸材は、シリコン分子の種類や濃度、性状などによって性能が異なるものであるが、シラン・シロキサン系については、シリコン分子の種類や、シランとシロキサンの混合割合、シリコン分子としての濃度などを変えることで性能をコントロールすることができる。例えば、既往のシラン系表面含浸材の中には、分子量の小さなシランを5～7%程度と有機溶剤を中心に調整されているものなどがあつたが、このような材料

*1 はやし・だいすけ/鹿島建設(株)技術研究所 土木構造グループ長 (正会員)

*2 さかた・のぼる/鹿島建設(株)土木管理本部 執行役員・土木技術部長 (フェロー会員)

*3 まつだ・よしのり/東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター マイスター (正会員)

*4 えんどう・ひろたけ/国研)土木研究所 寒地土木研究所 主任研究員 (正会員)

では、もともとの有効成分が少ない上に、塗布直後の揮発によって有効成分が失われるために複数回の塗布が必要となり、また長期耐久性についても課題があると考えられる。それに対して、分子量を約 250 以上とするシリコン分子を選定し、水を溶媒とした上に、シランとシロキサンを混合して 80% 以上の濃度に高めたシラン・シロキサン系表面含浸材を調整した。分子量の大きなシリコン分子を適用することには、高い初期性能を付与するのみでなく、長期間にわたって効果を持続させる意図があり、例えばドイツにおけるミュンヘンオリンピック選手村の事例では、40 年以上の長期間にわたって効果が持続することが確認されている²⁾。また、シランとシロキサンを混合して適用することには、大きさの異なる分子の分布とすることでコンクリートの様々な細孔に深くまで含浸させる意図がある。このシラン・シロキサン系表面含浸材を 1 回で 200 g/m² 塗布する場合の初期性能について、表面含浸材の試験方法 (JSCE-K571-2013) を適用した結果、含浸深さは 4.6 mm となった。また、その他の各試験結果について、シラン・シロキサン系表面含浸材を塗布しない原状試験体との比率で表すと図-1 に示すようになり、高い初期性能を有することが確認された。

また、コンクリート構造物にひび割れが発生している場合におけるシラン・シロキサン系表面含浸材の有効性を確認するために、図-2 に示すように、水セメント比が 60% のコンクリート供試体を組み合わせてひび割れを模擬した透水試験を行った⁵⁾。その結果、図-3 に示すように、幅が 0.2 mm 未満のひび割れについては透水を抑制できることが確認された。このような微細なひび割れがコンクリート構造物に生じた場合、一般的にひび割れ注入工法などの補修は行われませんが、シラン・シロキサン系表面含浸材を適用しておくことにより、高い耐久性を確保できるものと考えられる。

2.2 施工性に関する検討

表面含浸材としての基本的な性能については、上記のとおり、有効成分であるシリコン分子によるところが大きいが、実構造物で性能を発揮させるためには、さらに

材料の性状の調整が必要である。すなわち、実施工においては、常に下向きに塗布するわけではなく、横向きや上向きに塗布する場合もある。その際、塗布した表面含浸材が流れ落ちることなく、コンクリート表面に付着して含浸することが必要とされる。そこで、シラン・シロキサン系表面含浸材の実用化にあたっては、増粘成分を加え

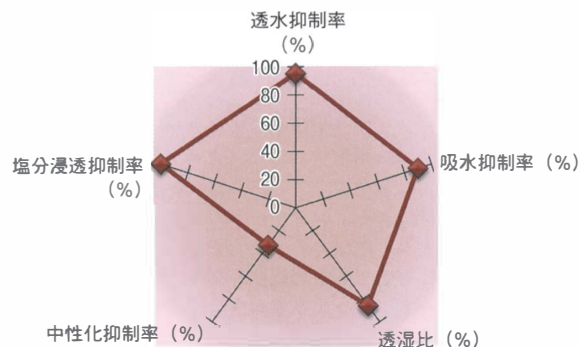


図-1 シラン・シロキサン系表面含浸材の初期性能

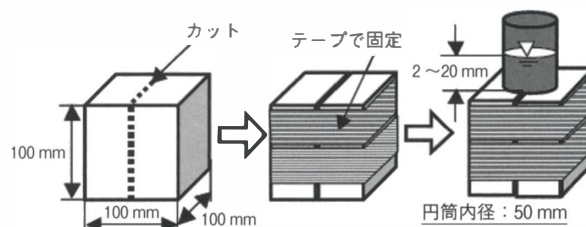


図-2 ひび割れを模擬した透水試験の概要⁵⁾

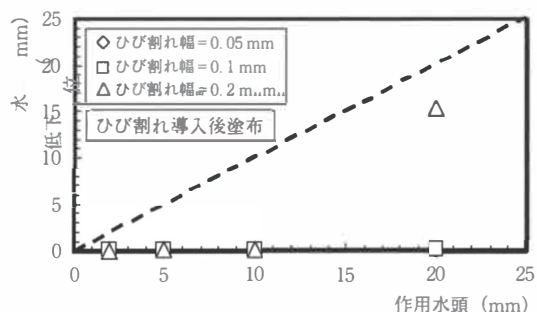


図-3 シラン・シロキサン系表面含浸材を塗布したコンクリートのひび割れにおける透水試験結果⁵⁾

Development of Silane-and-Siloxane-Based Surface Penetrant and Demonstration of its Long-Term Durability

By D. Hayashi, N. Sakata, Y. Matsuda and H. Endoh

Concrete Journal, Vol.57, No.10, pp.777~784, Oct. 2019

Synopsis A silane-and-siloxane-based-surface penetrant with excellent early performance characteristics has been developed. It consists mainly of silane, a monomer comprised of silicon molecules, and siloxane, a polymer. This silane-and-siloxane-based surface penetrant was subjected to exposure tests for up to 15 years under various environmental conditions. The water absorption prevention effect of the silane-and-siloxane-based surface penetrant was found to last 15 years or longer, and while in coastal areas, carbonation progresses as the moisture content of concrete decreases, this penetrant is highly likely to have potential for inhibiting rebar corrosion.

Keywords : Silane-based surface penetrant, long-term durability, suppression of chloride ion ingress, carbonation suppression, rebar corrosion inhibition, frost resistance



写真-1 シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) の性状

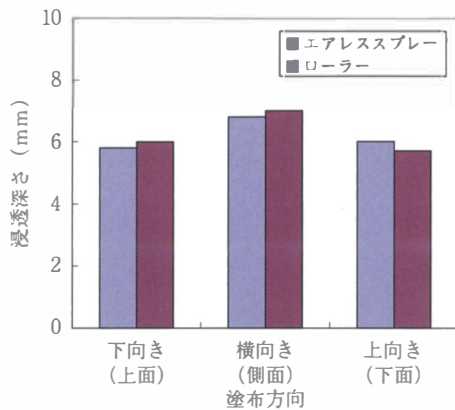


図-4 シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) の塗布方向と含浸深さ⁶⁾



写真-2 シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) の施工例

粘性を付与し、ローラーやエアレススプレーなどの機器によって、下向きのみでなく横向きや上向きにも塗布できるように性状の調整を行った。こうした検討の結果、シラン・シロキサン系表面含浸材は、写真-1に示すように、あたかもマヨネーズのような性状に調整され、図-4に示すように、塗布方向によらず、効果を発揮できる材料として実用化された⁶⁾。このシラン・シロキサン系表面含浸材（以下、記号をMRと表記）の実構造物における施工例を写真-2に示す。なお、製品化したシラン・シロキサン系表面含浸材については、有機溶剤を使用せず、水を溶媒としたため、作業環境についても良好である。

2.3 低水セメント比および過酷環境への適用拡大

シラン・シロキサン系表面含浸材については、施工対象とするコンクリート構造物および環境条件に応じた多様化のための研究開発も行われている。土木分野に表面

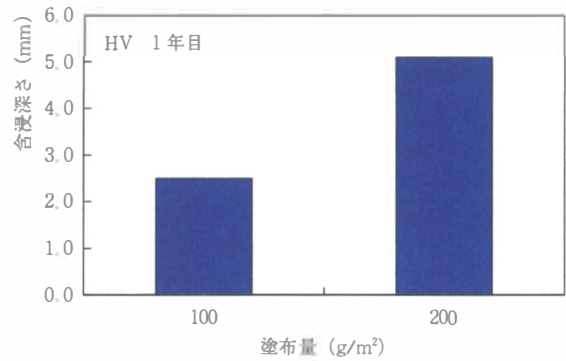


図-5 シラン・シロキサン系表面含浸材 (HV) の含浸深さ⁹⁾

含浸材が適用され始めた頃、最もニーズが高かったのは、経年劣化したコンクリート構造物の補修用途であった。そのため、シラン・シロキサン系表面含浸材の研究開発では、その適用先として、建設から数十年を経過して表面が劣化しているコンクリートや、そもそも施工当初から緻密ではなく、経年劣化してしまうコンクリートが想定されていた。しかし、その後、表面含浸材の耐久性向上効果や適用性が広く認識されることとなり、新設構造物にも適用範囲を広げていった。また、寒冷地におけるスケーリング対策など、より厳しい環境条件における適用性評価が進められた⁷⁾。その結果、水セメント比が低い新設のプレストレストコンクリートや、より高い含浸性が求められる寒冷地仕様のコンクリート⁸⁾にも表面含浸材のニーズが生まれることとなった。そこで、より大きな分子量のシリコーン分子を選定し、シランとシロキサンに占めるシランの割合を高め、シラン・シロキサンとして95%以上の濃度としたシラン・シロキサン系表面含浸材（以下、記号をHVと表記）を新たに調整した。この材料は、水を溶媒とし、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) よりも粘性を低くしてチキソトロピー性を付与しており、図-5に示すように、水セメント比が42%の緻密なコンクリートに対しても5mm以上の含浸深さが得られることが確認されている⁹⁾。一方で、水セメント比が50%前後のコンクリートや、経年劣化したコンクリートを対象とした場合、このような高い性能を有する材料を適用することは経済的でない側面もあることから、シラン系表面含浸材の用途に合わせて、材料の種類や塗布量などの様々なメニュー化を図ることが必要と考えられる。

3. 暴露試験による長期耐久性の評価

3.1 暴露試験方法

(1) 暴露試験の概要

シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) の性能を評価し、実環境における長期耐久性を実証することを目的として、凍害および塩害の複合劣化環境（以下、複合劣化環境下）である北海道の沿岸部における暴露試験と、塩害環境（以下、塩害環境下）である岡山県の沿岸部における暴露試験を行った。また、凍害環境（以下、凍害環

表-1 コンクリートの使用材料

暴露環境	項目	記号	摘要
複合劣化環境 (北海道)	水	W	上水道水, 密度: 1.0 g/cm ³
	セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16 g/cm ³
	細骨材	S1	新十津川産川砂, 表乾密度: 2.58 g/cm ³ , 粗粒率: 2.75, 吸水率: 2.26%
	粗骨材 1	G1	昆砂別産碎石, 表乾密度: 2.66 g/cm ³ , 実積率: 58.8%, 吸水率: 1.60%
	粗骨材 2	G2	昆砂別産碎石, 表乾密度: 2.65 g/cm ³ , 実積率: 58.3%, 吸水率: 1.57%
	膨張材	E	エトリンガイト系
	混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤 (変性リゲニンスルホン酸系)
塩害環境 (岡山県)	水	W	工業用水/上澄水, 密度: 1.0 g/cm ³
	セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16 g/cm ³
	細骨材 1	S1	倉敷市堅場島沖産除塩海砂, 表乾密度: 2.54 g/cm ³ , 粗粒率: 2.61
	細骨材 2	S2	総社市新本字高本産山砂, 表乾密度: 2.54 g/cm ³ , 粗粒率: 2.67
	粗骨材	G1	倉敷市福江産碎石, 表乾密度: 2.65 g/cm ³ , 粗粒率: 6.23
	混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-2 コンクリート配(調)合

暴露環境	Gmax (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Ad (C×%)	
						W	C	E	S1	S2	G1		G2
複合劣化環境	40	8	44.3	5.5	43.5	138	312	30	765	-	477	583	1.00
塩害環境	15	18	55	4.5	50.1	189	344	-	668	168	869	-	0.75

境下) に供用される RC 高架橋の防音壁を対象とした暴露試験を行った。

(2) コンクリートの使用材料および配(調)合

複合劣化環境下における暴露試験と、塩害環境下における暴露試験の使用材料および配(調)合を、それぞれ表-1 および表-2 に示す。また、凍害環境下の防音壁については材料および配(調)合が明らかではないものの、使用されたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用い、設計基準強度 24 N/mm²、粗骨材の最大寸法 25 mm、目標スランブ 12±2.5 cm、目標空気量 4.0±1.0% および耐久性から定まる水セメント比 53.0% のものである。

(3) 供試体形状寸法

複合劣化環境下における暴露試験では、径 125 mm および高さ 250 mm の円柱供試体を用い、コンクリートの打込み後、28 日間の湿潤養生を行い、表面水分率が 5.0% 以下になってから全面に 200 g/m² のシラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布した。

また、塩害環境下における暴露試験では、径 100 mm および高さ 200 mm の円柱供試体を用い、コンクリートの打込み後、28 日間の湿潤養生を行い、表面の水分を拭き取った後、全面に 200 g/m² のシラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布した。

凍害環境下における暴露試験では、供用開始から 23 年が経過した防音壁の高さ 2.0 m×幅 5.0 m の範囲を対象として、200 g/m² のシラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) をエアレススプレーによって塗布した。塗布に際しては、コンクリート表面を硬質スポンジで洗浄後、表面水分率が 5.0% 以下であることを確認した。

表-3 試験項目および方法

項目	試験方法
供試体の外観	目視による観察
供試体の重量	現地における重量測定 (複合環境下のみ)
含浸深さ	割裂面に水を噴霧し、濡れ色にならない範囲を測定
塩化物イオン量	表面より 10 mm 間隔の全塩化物イオン量を JIS A 1154 に準じて測定
中性化深さ	JIS A 1154 に準じて測定

(4) 試験項目および方法

複合劣化環境下および塩害環境下における暴露試験項目および方法を表-3 に示す。ここで、現地における供試体重量の測定については、スケーリングによる重量の減少が想定される複合劣化環境下のみで行った。また、塩化物イオン量の測定について、複合劣化環境下の暴露試験では、供試体側面をエポキシ樹脂で被覆して浸透方向を一方向に制御したが、塩害環境下の暴露試験では、エポキシ樹脂による被覆を行わなかった。よって、塩害環境下の暴露試験で測定される塩化物イオン量には、側面より浸透した量も含まれる。

凍害環境下における実構造物の防音壁を対象とした暴露試験では、吸水量試験のみを実施した。試験方法としては、内径 80 mm×厚さ 20 mm の円形の吸水性試験器具をコンクリート表面に設置し、試験器内を水で満たした後、1 時間が経過するまで、10 分間隔でコンクリートへの吸水量を求めるものとした。

(5) 暴露試験の環境条件

複合劣化環境下における暴露試験については、2002 年

11月に、北海道の日本海側に位置する石狩市浜益区の沿岸部に、シラン・シロキサン系表面含浸材（MR）を塗布した供試体と塗布しない供試体を設置し、暴露を開始した。供試体設置箇所は、写真-3に示すように、急勾配の小規模河川の河口に位置しており、汀線より数メートルの距離にある。また、海からの強風による風雨および風雪があり、多量の飛来塩分が推察される環境にある。浜益区の2002年から2017年までの15年間における年平均と合計の凍結融解回数、降水量および日照時間¹⁰⁾を表-4に示す。

塩害環境下における暴露試験については、2000年12月に、岡山県倉敷市の沿岸部に位置する橋脚のフーチング上面に、シラン・シロキサン系表面含浸材（MR）を塗布した供試体と塗布しない供試体を設置し、暴露を開始した。供試体設置箇所は、写真-4に示すように、H.W.Lよりも高い位置にあり、波が穏やかな環境にある。

凍害環境下における暴露試験については、1979年に建



写真-3 複合劣化環境下における供試体設置箇所

表-4 浜益区における2002～2016年の凍結融解回数、降水量の合計および日照時間¹⁰⁾

集計	最低気温ごとの凍結融解回数				降水量の合計 (mm)	日照時間 (h)
	-5～0℃	-10～-5℃	-10℃以下	合計		
年平均	50.9	18.7	6.2	75.7	1 227.5	1 495.7
合計	764	280	93	1 136	18 413.0	22 435.1



写真-4 塩害環境下における供試体設置箇所

設された鉄道高架橋の場所打ち鉄筋コンクリート製の高さ2mの防音壁を対象とし、2001年9月より暴露を開始した。防音壁の外観については写真-5に示すとおりであり、豪雪地域に位置し、冬期には線路内の積雪の除去を目的とした散水が行われるため、防音壁の表面には直接水が作用する環境にある。

3.2 試験結果および考察

(1) 供試体外観

複合劣化環境下において15年間暴露を行った供試体を目視で観察した結果、シラン・シロキサン系表面含浸材（MR）を塗布した供試体および塗布しなかった供試体ともに、ひび割れ、ポップアウトおよびスケーリングは認められなかった。この供試体に水を噴霧した際の状況を写真-6に示す。同写真に示すように、シラン・シロキサン系表面含浸材（MR）を塗布した供試体の表面の撥水性は、暴露15年目においてほとんど認められなかったが、コンクリート内部への吸水を抑制している状況が確認された。これまでの調査結果も含めると、表面の撥水性は、暴露2年目まで若干認められたが、それ以降は、ほとんど認められなかった。塩害環境下における暴露試験においても同様の傾向であり、表面の撥水性は、暴露2年目まで若干認められ、それ以降、ほとんど認められなかった。

ここで、複合劣化環境下の暴露試験では、供試体設置場所に隣接する橋梁の側面にシラン・シロキサン系表面含浸材（MR）が塗布されており、塗布後5年目に目視で確認した際には、供試体と同様、撥水性が認められなかった。しかし、表面の一部を紙やすりで磨いたところ、



写真-5 凍害環境下の場所打ちコンクリート製の防音壁の外観



写真-6 複合劣化環境下における15年目の供試体状況（左：シラン・シロキサン系の塗布あり、右：塗布なし）

写真-7に示すように、撥水性が認められ、内部に含浸層が存在することが確認された。

(2) 供試体重量

複合劣化環境下における暴露試験の供試体の重量測定結果を図-6に示す。同図に示すように、暴露15年目までの全ての測定において、シラン・シロキサン系表面含浸材(MR)を塗布した供試体の方が、塗布しない供試体よりも70~150g程度軽い結果となった。これは、コンクリートに含まれる水分量の違いによるものと考えられる。すなわち、各測定において、シラン・シロキサン系表面含浸材(MR)を塗布しない供試体は比較的湿潤した状態にあったが、塗布した供試体では、外部からの水の浸透が抑制され、内部の水分が水蒸気として放出されていたことが考えられる。

(3) 含浸深さ

含浸深さの測定結果を図-7に示す。同図には、上面および底面の平均値を示した。同図より、複合劣化環境下の供試体では、暴露15年目まで3mm程度の含浸層が確認された。また、塩害環境下の供試体では、暴露10年

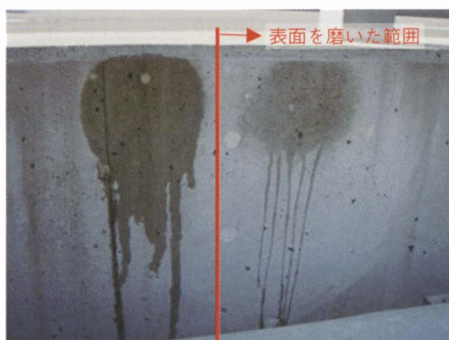


写真-7 複合劣化環境下における5年目の橋梁の状況

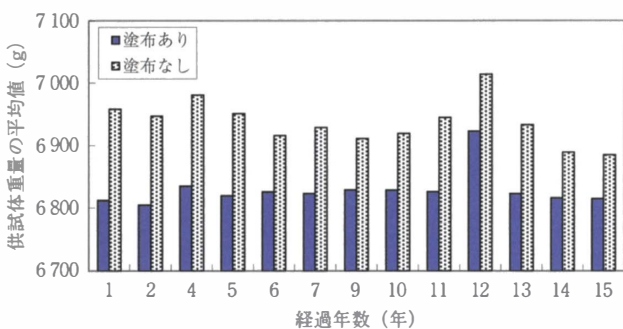


図-6 複合劣化環境下における供試体重量の測定結果

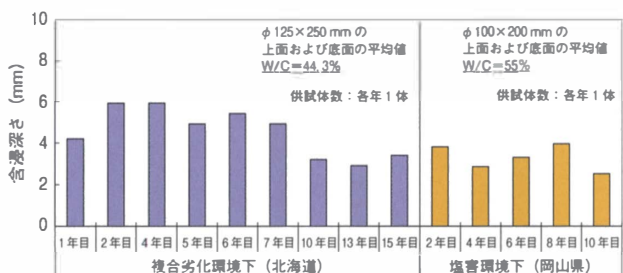


図-7 含浸深さの測定結果

目まで2.5mm程度の含浸層が確認された。複合劣化環境下の供試体の方が、塩害環境下の供試体よりも、水セメント比が低いにも関わらず含浸深さが大きくなったのは、塗布時にコンクリートの表面水分率を管理したためと考えられる。また、含浸深さの経時変化については、複合劣化環境下の1年目の値が小さいことから分かるように、ばらつきが含まれる結果となった。

(4) 塩化物イオン量

複合劣化環境下および塩害環境下の供試体の塩化物イオン量測定結果を、それぞれ図-8および図-9に示す。複合劣化環境下の測定結果では、シラン・シロキサン系表面含浸材(MR)を塗布した供試体の塩化物イオン量の方が、塗布しない供試体よりも少なくなった。暴露13年目までの結果を比較すると、シラン・シロキサン系表面含浸材(MR)を塗布しない供試体では、深さ5mmの3.4kg/m³から深さ35mmまで浸透している傾向が認められるのに対し、塗布した供試体では、深さ5mmにおいて0.6kg/m³でありそれより内部にはほとんど浸透していなかった。この結果より、シラン・シロキサン系表面含浸材(MR)を塗布した供試体では、深さ4~6mmの含浸層よりも内部への水の浸透が抑制されたことに伴い、塩化物イオンの浸透が抑制されたことが考えられる。

また、塩害環境下の測定結果では、全体的に暴露8年目までに浸透した塩化物イオン量が少ないものの、シラン・シロキサン系表面含浸材(MR)を塗布した供試体

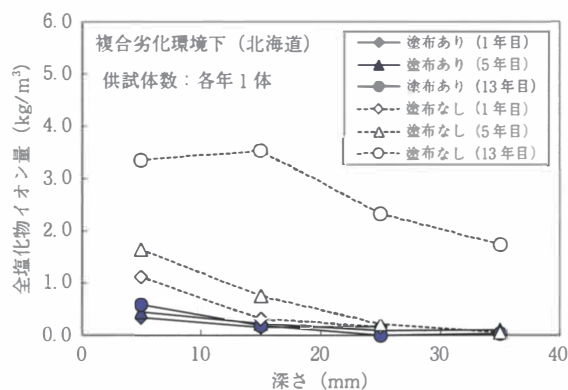


図-8 複合劣化環境下における全塩化物イオン量の測定結果

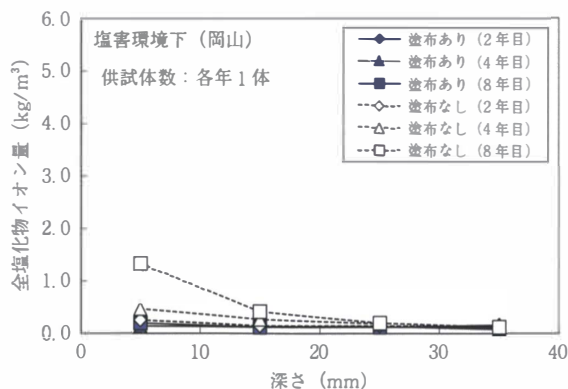


図-9 塩害環境下における全塩化物イオン量の測定結果

の塩化物イオン量の方が、塗布しない供試体よりも少ない結果となった。

複合劣化環境下の供試体の方が、塩害環境下の供試体よりも多量の塩化物イオンが浸透した理由として、海からの強風を受ける複合劣化環境の方が、風が穏やかな塩害環境よりも飛来塩分量が多量であったことの影響が考えられる。

(5) 中性化深さ

複合劣化環境下および塩害環境下の供試体の中性化深さ測定結果を、それぞれ図-10 および図-11 に示す。同測定では、供試体の側面を対象とし、割裂面における上面および底面より各 20 mm の範囲を測定対象外として、さらに粗骨材の影響で値が大きい箇所を除外した。これらの図には、中性化深さが時間の 0.5 乗に比例するものとした回帰式を示した。同図より、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布した供試体の中性化深さは、おおむね暴露 4～5 年目で含浸深さよりも大きな値となった。コンクリートが中性化することにより、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) の含浸層におけるアルカリによる加水分解が進みにくくなると考えられることから、暴露 15 年目を以降も、さらに長期間にわたって効果が持続することが推察される。既往の事例¹¹⁾によれば、中性化が進行したコンクリート構造物にシラン系表面含浸材を塗布し、その後 20 年が経過した時点で調査した結果、含浸層が良好な状態にあったとの報告もある。

また、いずれの暴露試験においても、シラン・シロキ

サン系表面含浸材 (MR) を塗布した供試体の中性化深さの方が、塗布しない供試体よりも大きな値となり、回帰式の定数である中性化速度係数が 2.5～3.1 倍程度の値となった。この理由として、前述のとおり、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布したことによってコンクリートに含まれる水分量が減少し、結果として、中性化が進行しやすい含水量になったことが推察される。この結果について、さらに考察するため、複合劣化環境下で 5 年間暴露した供試体を回収し、91 日間の水浸漬後、表面の水分を拭き取って重量測定を行った。その後、21 日間の 105℃ 炉乾燥を行い、重量測定を行った。水中浸漬後の含水量を 100% とし、105℃ 炉乾燥後の含水量を 0% とし、現地における含水量の割合を算出すると、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布した供試体と塗布しない供試体の値は、それぞれ 46.3% および 76.2% となった。この結果を基に、既往の研究¹²⁾で得られている平衡含水率曲線を用いて相対湿度を逆算すると、それぞれ 40.8% および 82.1% となり、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布しない供試体の相対湿度の逆算値は、沿岸部において、おおむね妥当と考えられる範囲になった。一方、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布した供試体の含水量は、相対湿度が比較的高い条件であるにも関わらず、相対湿度 40% 程度に相当する量となった。既往の研究¹³⁾によれば、コンクリートの中性化速度係数は、相対湿度 40～50% 程度の場合を最大値として、それよりも相対湿度が高くなるに従って低い値となる。例えば、水セメント比が 55% のモルタルの試験結果では、相対湿度 40% の中性化速度係数が相対湿度 80% の値の 2.5～2.6 倍程度となり、本試験の結果とおおむね一致する傾向となる。以上のことより、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布したコンクリートでは、中性化が進行しにくいと考えられる 80% 程度の相対湿度環境下に置かれた場合でも、含水量が、相対湿度 40% 程度の場合に相当する量となり、中性化が進行することが考えられる。その一方で、コンクリートの含水量が相対湿度 40% 程度と平衡する量になる場合、鉄筋腐食や凍害、アルカリシリカ反応に対して、抑制効果が得られることが考えられる。中性化に伴う鋼材腐食については、2017 年制定の土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] において、水と酸素の供給によって腐食が進行するという考え方が導入されている¹⁴⁾。また、既往の研究¹⁵⁾において、相対湿度が中性化による鉄筋腐食速度に及ぼす影響を検討した結果によれば、相対湿度 40% の場合、温度 20～30℃ および酸素濃度 20% の条件では、ほとんど腐食しない。実際に、鉄道高架橋について統計的な整理を行った事例によれば、コンクリートの中性化が進行していても、雨掛かりがない箇所ではほとんど鉄筋腐食による剥落が生じていないことが報告されている¹⁶⁾。

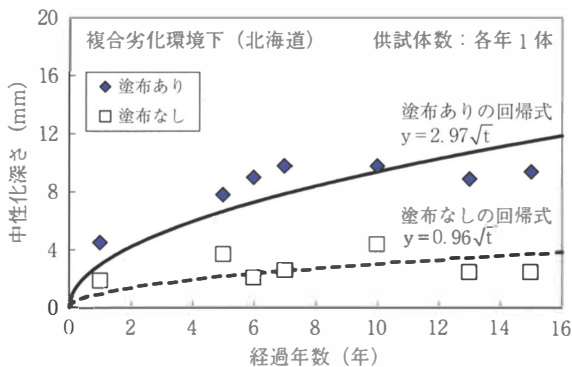


図-10 複合劣化環境下における中性化深さの測定結果

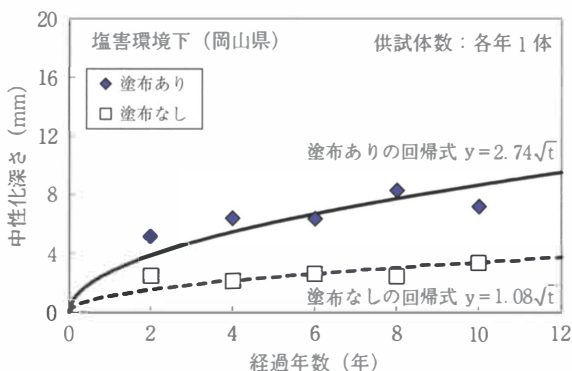


図-11 塩害環境下における中性化深さの測定結果

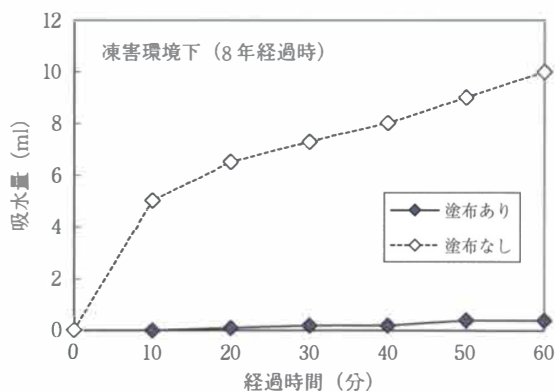


図-12 凍害環境下における吸水量試験結果

(6) 実構造物における吸水量

凍害環境下における吸水量の試験結果を図-12に示す。シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布していない箇所では、試験開始後 10 分程度の間で急激に吸水し、その後、吸水量が漸増して 60 分後には 10.0 ml 程度となった。一方で、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布した箇所では試験開始から 60 分後までほとんど吸水しない結果であり、8 年を経過しても、高い吸水防止効果を保持していることが明らかになった。

(7) 暴露試験によって明らかになったこと

これらの暴露試験を通じて得られた知見は、大別すると 2 つに集約される。まず、一つ目の知見は、分子量や主成分濃度、性状などが適切に調整されたシラン・シロキサン系表面含浸材をコンクリートに適用すると、実環境において 15 年間以上にわたって効果を持続できるということである。現状では、実構造物への表面含浸材の適用性を評価する際、シラン系およびけい酸塩系ともに、初期の性能を試験 (例えば、JSCE-K571-2013 や JSCE-K572-2012 の試験方法がある) しているにすぎず、実環境において、どの程度の期間にわたって効果が持続するのかについては評価されていなかった。シラン系表面含浸材は、一般に、コンクリートに含まれるアルカリによって加水分解して効果が失われる可能性があり、長期耐久性の実証が必要とされていたため、これらの暴露試験結果は有用なデータになるものと考えられる。

二つ目の知見は、シラン・シロキサン系表面含浸材の実環境における性能が明らかにされたことである。コンクリート中への吸水を抑制し、塩化物イオンの浸透を低減できることは初期の性能試験より推察されるが、コンクリート中の水分が制御されることによる中性化への影響や、鉄筋腐食抑制に対する有効性の推察については、実環境において長期間をかけてデータを取得しなければ明らかにされないことである。実際に、中性化については、前掲の図-1 のとおり、養生直後の供試体で促進試験を行うと、シラン・シロキサン系表面含浸材 (MR) を塗布することによって中性化が抑制される傾向が得られる。

4. おわりに

本論で述べたように、新材料の研究開発では、実構造物で効果を得るための概念に基づいた材料の調整から、初期性能の評価に基づいた実用化・実適用が行われ、さらには、これらに並行して長期耐久性の実証が必要とされる。シラン・シロキサン系表面含浸材については、一つ一つのデータを積み上げて性能を確認し、その適用性を明らかにして実用化を図るとともに、15 年間にわたる長期耐久性を実証したことにより、研究開発としては一つの区切りになるものと考えている。また、このシラン・シロキサン系表面含浸材は、これまでに、補修材料・工法や維持管理に関する数多くの研究開発に使用され、同分野の発展に寄与する先導的な役割を果たしてきたことを付記したい。最後に、シラン・シロキサン系表面含浸材は 1500 000 m² 以上の実績を積み重ねており、今後も、その特性を活かしてコンクリート構造物の耐久性向上に貢献していくことを期待したい。

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, 2005. 4
- 2) 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状，コンクリート技術シリーズ 58, 2004. 2
- 3) 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告，コンクリート技術シリーズ 68, 2006. 4
- 4) 林 大介・坂田 昇・三村俊幸・神澤 弘：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集，Vol.22, No.1, pp.301~306, 2000. 7
- 5) 安田和弘・渡邊賢三・横関康祐・坂田 昇：シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材によるコンクリートの耐久性向上に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.705~710, 2002. 6
- 6) 林 大介・坂田 昇・三村俊幸・神澤 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. 6
- 7) 遠藤裕丈・田口史雄・宮本修司・村中智幸・後藤浩之・林 大介・坂田 昇・名和豊春：シラン系表面含浸材による寒地コンクリート構造物の耐久性向上効果，土木学会論文集 E2, Vol.67, No.1, pp.69~88, 2011
- 8) 国土交通省北海道開発局：平成 20 年度北海道開発局道路設計要領，2009
- 9) 林 大介・橋本 学・室野井敏之・遠藤裕丈：シラン・シロキサン系表面含浸材を用いたコンクリートの積雪寒冷環境下における長期耐久性に関する研究，土木学会第 70 回年次学術講演会，第 V 部門，pp.1029~1030, 2015. 9
- 10) 気象庁ホームページ，<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 11) 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効果，コンクリート構造物の補修・補強アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.5, pp.185~188, 2005. 10
- 12) 秋田 宏・藤原忠司・尾坂芳夫：乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法，土木学会論文集，No.490/V-23, pp.101~110, 1994. 5
- 13) 鄭 載東・平井和喜・三橋博三：モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.1, No.1, pp.85~94, 1990. 1
- 14) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書，2018. 3
- 15) 森永 繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学学位論文，1986. 11
- 16) 石橋忠良・古谷時春・浜崎直行・鈴木博人：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集，No.711/V-56, pp.125~134, 2002. 8