

シラン系表面含浸材の試験施工を行った美幌橋 地覆コンクリートでの追跡調査15年目の評価

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 安中新太郎
北海道開発局 網走開発建設部 網走道路事務所 工務課 丹羽 敏和

寒冷地でのシラン系表面含浸材によるコンクリートの凍・塩害抑制効果を調べるため、凍結防止剤が散布される美幌橋の地覆コンクリートで試験施工を行い、追跡調査を実施している。本論文は、追跡調査15年目の結果をまとめたものである。製品によって傾向は異なるが、本調査の範囲では、吸水抑制および塩化物イオン侵入抑制効果は15年経過後も持続し、スケーリング抑制に関しては、水が溜まりやすい部位では10～15年に1回の再塗布が望ましい結果を得た。

キーワード：寒冷地、凍結防止剤、コンクリート、シラン系表面含浸材、追跡調査

1. はじめに

寒冷地では冬期間、車両の走行安全を確保するため、塩化物系の凍結防止剤が散布されている。このため寒冷地のコンクリート構造物では凍結融解と凍結防止剤の複合作用によって耐久性が損なわれぬよう、対策を講じることが基本となっている。例えば北海道開発局管轄の道路橋では、凍結防止剤が供給されやすい地覆コンクリートにシラン系表面含浸材が塗布されている。

シラン系表面含浸材は、コンクリートの表面と表層に吸水抑制機能を付与し、凍・塩害の要因である水や塩化物イオンの侵入を抑制する浸透性の保護材料である。この材料には疎水性のアルキル基が含まれており、コンクリート表面に塗布し、含浸させると、表面や内部空隙の壁面にアルキル基が固着し、含浸域が疎水化される。主な特徴として、①短期間で施工ができ、簡便で比較的安価、②表面は紫外線の影響を受けるものの、内部の含浸域は紫外線が作用しないため疎水状態が持続しやすい、③材料が無色透明で塗布後も外観が大きく変化しないため、施工後も目視点検が可能、④水滴は通さないものの、水蒸気透過性を有し、水分の蓄積に起因する劣化を抑制できる、⑤部材改修の際に発生する産業廃棄物の量が少ない、等があげられる²⁾。

一方、実際の寒冷環境に曝されるコンクリート部材におけるシラン系表面含浸材の効果の長期持続性に関しては検証データが少なく、十分明らかになっていない。そこで現在、効果の持続性を調べるための試験施工、追跡調査を北海道内の各地で行っている。その中から今回、塗布して約15年経過した美幌橋(図-1)の地覆コンクリートにおいて調査を行ったので、その結果を報告する。



図-1 美幌橋の位置



写真-1 雨天時の美幌橋の様子

2. 調査概要

(1) 調査箇所

美幌橋は昭和37年に架設された橋長73.5mの鋼桁橋で、北海道美幌町の一般国道39号に位置している。美幌橋は曲線橋で4%の横断勾配を持ち、雨天時は写真-1に示すように地覆コンクリートに水が集まりやすい。2018年の冬期の最低気温は-23℃で、冬期は凍結防止剤も散布されるといった苛酷な環境に立地している。

表-1 美幌橋地覆コンクリートの配合・品質（2004年10月打設）

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材
51.4	145	252	30	713	1144

- ・配合設計条件：呼び強度24、普通ポルトランドセメント使用、目標スランブ8cm、目標空気量4.5%
- ・気泡間隔係数（ASTM C 457）：267 μ m（供用15年目に測定）

表-2 シラン系表面含浸材の特徴、仕様、基礎性能

製品記名	特徴および仕様				実験室での基礎性能の把握の結果※	
	系別	有効成分(%)	状態	塗布量(g/m ²)	含浸深さ(mm)	塩化物イオン浸透深さ(mm)
No.1	水系	42	液状	200	2.9	9.2
No.2	水系	43	液状	300	1.6	8.9
No.3	水系	80	クリーム	200	2.9	2.3
No.4	溶剤系	11.5	液状	300	2.4	1.9
No.5	無溶剤系	90	ジェル	400	6.6	0.0
無塗布	—	—	—	—	—	11.5

- ※）各製品の性能を事前に把握するため、実験室においてコンクリート供試体（水セメント比45%、高炉セメントB種使用）を作製し、打設面に塗布後、下記の実験を実施³⁾。
- ・含浸深さ：供試体を打設面に対して垂直方向に切断し、切断面に水を噴霧し、撥水を呈した範囲を浸域と判断して含浸深さを測定。
 - ・塩化物イオン浸透深さ：供試体を濃度3%の塩水に90日間浸漬させ、浸漬後、打設面に対して垂直方向に供試体を切断し、切断面における塩化物イオン濃度分布をEPMA（電子線マイクロアナライザー）により調べ、その分布をもとに塩化物イオン浸透深さを測定。

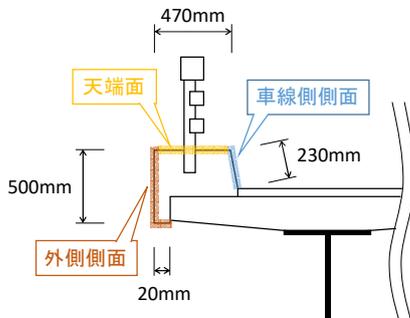


図-2 試験施工を行った部位

美幌橋の地覆コンクリートは2004年10月上旬に打ち換えられ、その14日後にシラン系表面含浸材の試験施工を実施している。表-1は地覆コンクリートの配合である。水結合材比は51.4%で、普通ポルトランドセメントが使用されている。表-2に試験施工で使用したシラン系表面含浸材の特徴と仕様および過年度に実験室で調べた基礎性能を示す。試験施工では5種類のシラン系表面含浸材を使用している。ここでは、それらをNo.1、2、3、4、5と記す。図-2に試験施工を行った部位、写真-2に試験施工の状況を示す。試験施工は、2004年10月28日に車線側側面と天端面および外側側面の3面で実施している。施工は1製品あたりの延長を4mとし、各メーカーの担当者が各社の独自仕様に基づいて行った。これは、工法とし



写真-2 試験施工の状況（2004年10月28日）

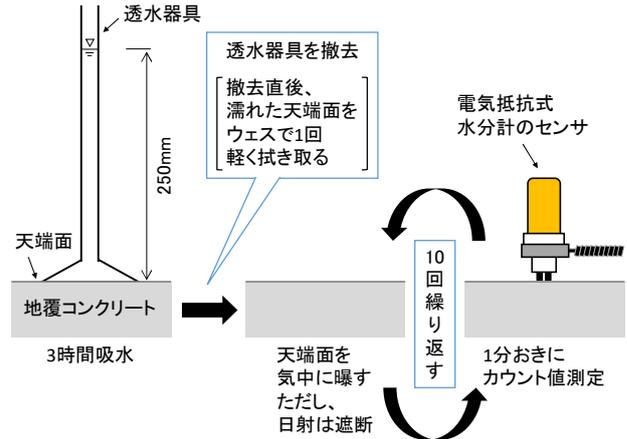


図-3 本調査での吸水抵抗性の評価方法

て評価する理由から統一の仕様を設けなかったもので、塗布量についても各製品の標準量とした。塗布はローラや刷毛で実施された。

(2) 調査内容

本調査では、塗布後15年目におけるスケーリング発生状況、吸水抵抗性、吸水防止層の状態、中性化の進行状況、塩化物イオンの浸透状況について調べた。

a) スケーリング発生状況

車線側側面と天端面において、当初の残存表面を基準として、スケーリングによる欠損深さをデプスゲージで調べた。各製品の施工延長4m区間を10cm間隔で40箇所ごとに区分けし、1箇所ずつ1点測定する割合で1製品につき車線側側面で40点、天端面で40点測定し、平均値で評価した。外側側面の状態は目視で把握した。

b) 吸水抵抗性

一般に、シラン系表面含浸材を塗布した後の吸水抵抗性は、図-3の左に示す透水器具をモルタル試験片に設置して自然吸水させ、塗布した場合の透水量を、無塗布の場合の透水量で除した透水比で評価される⁴⁾。

しかし、これまで行ってきた追跡調査では、調査年次によって透水比が大きくばらつく結果を得ている³⁾。これは、現場試験においては対象が粗骨材を含む地覆コンクリートであるため、無塗布の場合でも透水量の変化が緩やかとなり、片側交互通行規制下での調査という時間



写真3 透水器具の設置状況



写真4 電気抵抗式水分計による測定状況



写真5 コア試料採取状況

的な制約上、短時間で明確な透水比を捉えるのが難しくなることが影響しているためと考えられる。

そこで、この吸水試験の過程を見直してみることにした。シラン系表面含浸材が無塗布の場合、透水器具を設置して水を与えると、水は緩やかながら少量でもコンクリートの毛管空隙広範に浸透して深部へも行き渡る。さらに器具を撤去し、コンクリート表面を気中に曝すと、コンクリート表面は乾燥するが、内部に浸透した水分が戻ってくる。このため、表面付近の水分量の低下は抑制されると考えられる。一方、吸水防止層が残存している場合は、毛管空隙に浸透した水は主に表面近傍に留まり、透水器具を撤去した後の表面では蒸発が早く進むと考えられる。この仮説の下に、透水比に代わる評価方法として、コンクリート表面の水分の低下量により吸水抵抗性を評価する手法を考案した。

具体的には、天端面に透水器具を立てて3時間自然吸水させた後、図-3の右に示すように、透水器具を撤去して天端面をウェスで1回軽く拭き取ったのち、電気抵抗式の水分計⁹⁾を使用した10分間の表面の含水状態の計測値の経時変化から評価するものである。電気抵抗式の水分計は、センサ下面に長さ20mm、幅5mmの導電ゴム製の電極が10mm間隔で2本配置されており、コンクリート表面に電極を押し当てて電流を流し、電極間の電気抵抗が水分によって変化する原理を利用して表面の含水状態を評価する仕組みになっており、乾燥状態のときに最小40、湿潤状態のときに最大990の電気抵抗換算値（以降、カウント値と記す。乾燥しているほど値は小さい）で評価する機能が備えられている。

写真-3、4に測定状況を示す。試験実施時の天候は晴れで、気温は約17℃である。なお、電気抵抗式の水分計の測定結果に及ぼす直射日光の影響を除外するため、計測中は日光が当たらないよう配慮した。

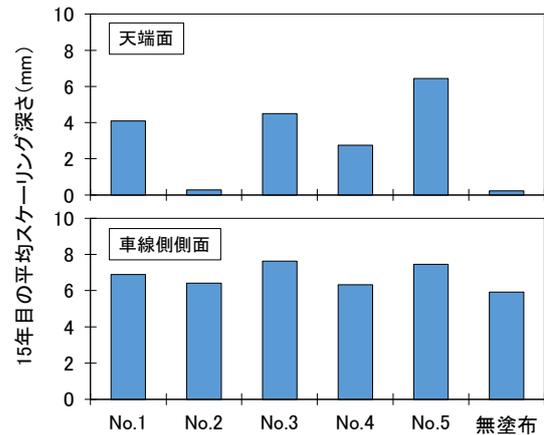


図4 15年目の天端面と車線側側面の平均スケーリング深さ

c) 吸水防止層の状態

写真-5に示すように地覆コンクリートの車線側側面からコア試料を採取し、コアに水を噴霧して撥水を呈した範囲を吸水防止層（シラン系表面含浸材が浸透して疎水化した領域）と判断し、吸水防止層の厚さを計測した。

d) 中性化の進行状況

地覆コンクリートから採取したコア（写真-5）にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し、赤紫色に着色しなかった範囲を中性化領域と判定し、表面から赤紫色に着色した部分までの距離から中性化深さを求めた。

e) 塩化物イオンの浸透状況

地覆コンクリートから採取したコア（写真-5）の車線側側面から深さ50mmの範囲をコンクリートカッターで10mm間隔にスライスして切り分け、JIS A 1154の電位差滴定法に準じて塩化物イオン量を測定し、深さ方向における塩化物イオンの濃度分布を調べた。

3. 調査結果・考察

(1) スケーリング発生状況

図-4に、塗布後15年目の天端面と車線側側面における平均スケーリング深さの測定結果を示す。天端面では、No.1、3、4、5において4mm前後のスケーリングが確認された。No.2と無塗布のスケーリングは比較的軽微であった。車線側側面の平均スケーリング深さはいずれの区間も6mm前後であった。なお、車線側側面においてはスケーリングに加えて、除雪車のグレーダーの刃による欠損も確認された。

写真-6は、スケーリング深さが大きかったNo.5塗布区間と無塗布区間の境界付近における天端面と車線側側面の外観の経年変化を示している。No.5塗布区間の車線側側面をみると、塗布4年目は無塗布に比べると明らかにスケーリングは少なく、10年目に粗骨材の露出が部分的に生じ、15年目に至り、無塗布区間と同程度にまでスケーリングが進行した。これらの理由についての考察は後

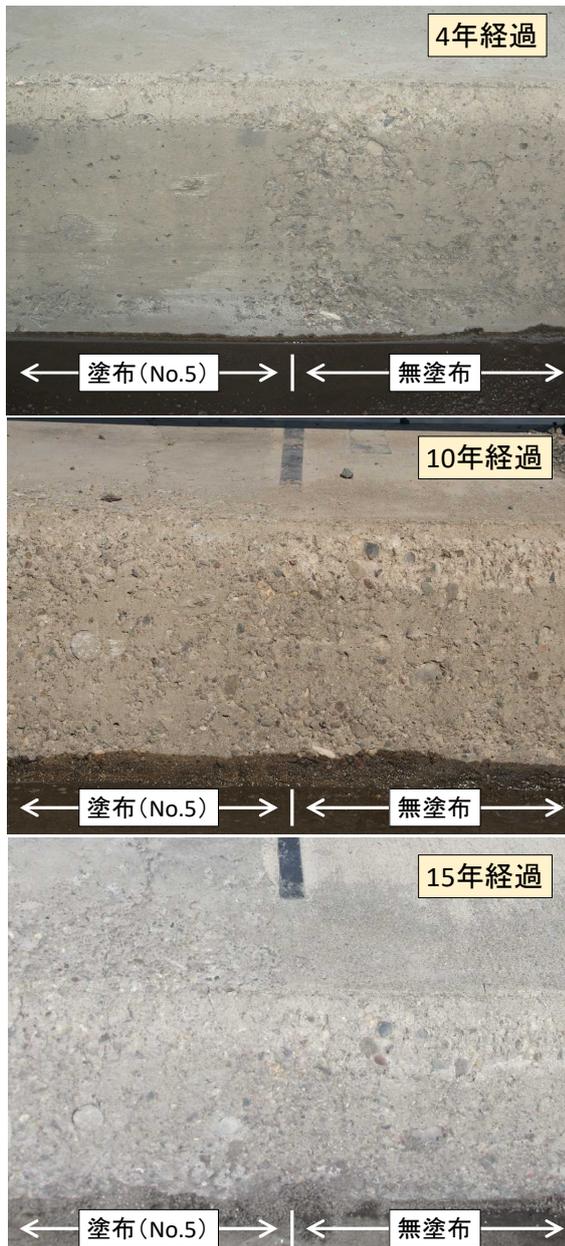


写真6 天端面と車線側側面の外観 (No.5区間と無塗布区間)

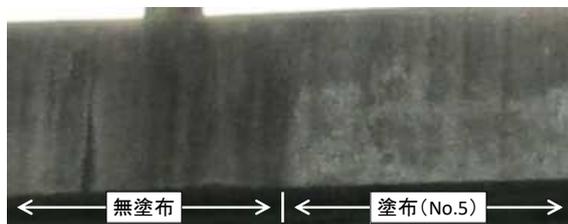


写真7 15年目の外側側面の外観 (No.5区間と無塗布区間)

述する。一方、外側側面は、写真-7に示すように塗布後15年目においてもスケーリングや粗骨材の露出が見受けられず、また、無塗布に比べると表面の汚れは少なかった。外側側面に関しては、No.5以外の塗布区間においても表面にスケーリングは確認されなかった。

(2) 吸水抵抗性

図-5に天端面で調べた透水器具撤去後に測定した電気

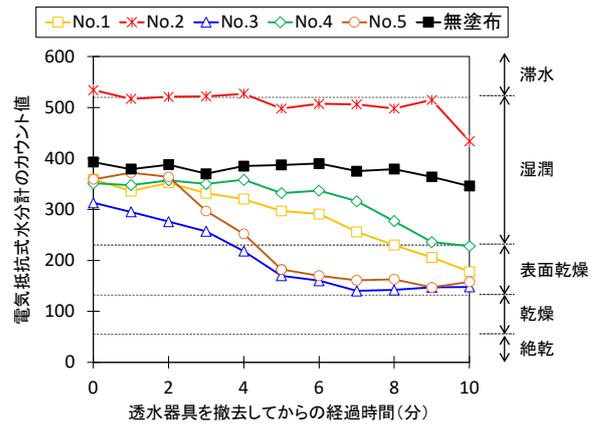


図-5 透水器具撤去後のカウント値の推移 (天端面で測定)

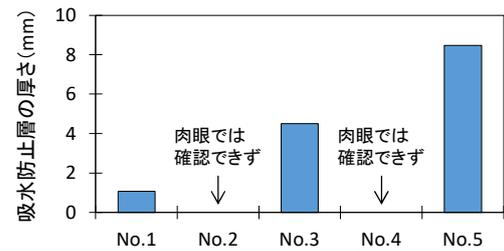


図-6 吸水防止層の厚さ (車線側側面で測定)

抵抗式水分計のカウント値を示す。図の右側に表示している表面状態は、文献5)で述べられているカウント値と表面の水分状態の関係を基に記載している。スケーリング深さが4、6mmのNo.3とNo.5は透水器具撤去後、カウント値が早い時点で低下し始め、4分後には湿潤状態から表面乾燥状態へ移行した。一方、No.1、No.2、No.4、無塗布は、これに比べるとカウント値の低下は緩やかであり、スケーリング深さが小さかった無塗布とNo.2に至っては、透水器具を撤去してから10分経過した時点でも表面は湿潤状態のままであった。これは供給された水が内部へ深く浸透しているため、透水器具撤去後、水分の蒸発が進む表面へ内部から緩やかに水の移動や水蒸気の拡散が続いていることを意味し、一方でNo.3とNo.5の吸水抑制効果がこの中で最も高いことを示している。

(3) 吸水防止層の状態

図-6に吸水防止層の厚さの測定結果、また一例として写真-8にNo.5塗布区間から採取したコアに水を噴霧した様子を示す。No.1、3、5はコアの表層に吸水防止層が確認されたが、No.2、4では確認されなかった。吸水防止層の厚さが比較的大きかったのはNo.3とNo.5で、それぞれ4mm、8mmであった。これは、吸水を受けた表面が比較的早期に乾燥に至った図-5の測定結果とも対応する。

(4) 中性化の進行状況

図-7に中性化深さの測定結果を示す。No.3とNo.5を塗布した区間における中性化深さは約9mmで、2~3mmのNo.1、2、4、無塗布に比べると大きかった。林らは沿岸での暴露実験で、塗布したコンクリートの方が中性化深

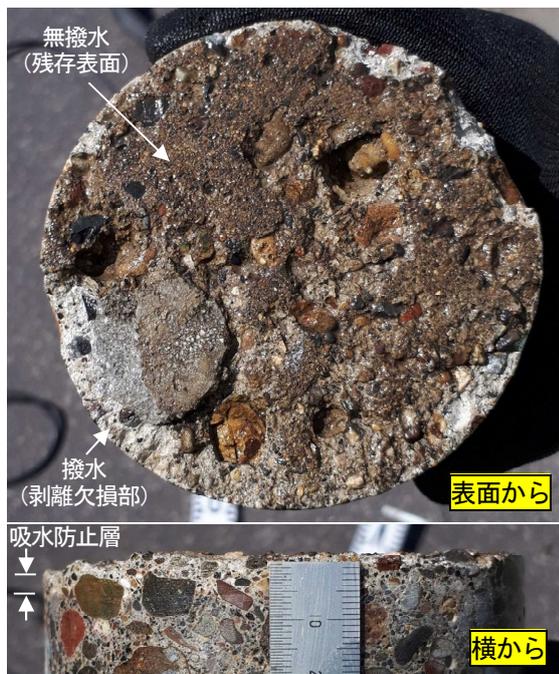


写真8 15年目にNo.5区間の車線側側面から採取したコアに水を噴霧した様子

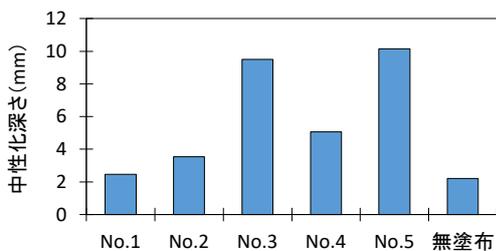


図7 中性化深さの測定結果 (車線側側面で測定)

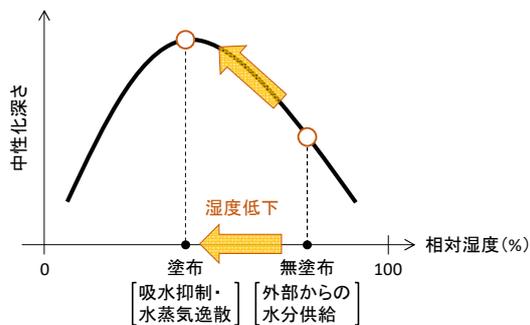


図8 中性化に及ぼす相対湿度の影響⁷⁾をもとに作成

さが大きい結果を得ており、この要因として図-8に示す概念のように、シラン系表面含浸材の塗布によってコンクリートに含まれる水分が減少し、結果としてコンクリート内部が中性化しやすい相対湿度相等の含水量になったためと考察している⁶⁾。塗布後15年目の美幌橋の地覆コンクリートの中性化深さが大きかったNo.3とNo.5は、図-5で示したように吸水抵抗性が大きいことから、林らの暴露実験と同様、長期の吸水抑制によって中性化が進行しやすい相対湿度相等の状態が長く続いたことが要因と考えられる。

中性化はアルカリ環境下で安定する鋼材表面に形成さ

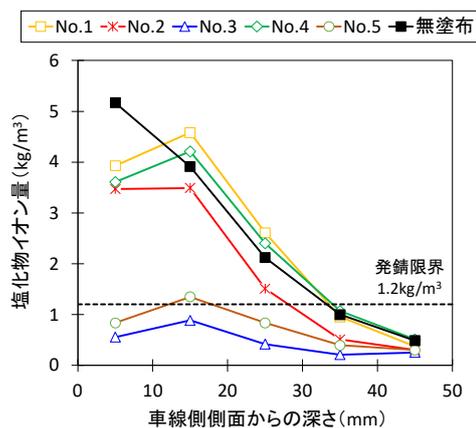


図9 塩化物イオン量の測定結果 (車線側側面で測定)

れる薄い酸化被膜 (不動態被膜) 周囲のpHを低下させる。しかしながら、鋼材腐食を支配するのは水と酸素の供給であり、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]でも、鋼材腐食に対する照査では水の浸透も考慮することとされている⁸⁾ことから、この結果が直ちに鋼材腐食に繋がるものではないと考えられるが、今後も経過を観察していく必要がある。

(5) 塩化物イオンの浸透状況

図-9に塩化物イオン濃度分布の測定結果を示す。スクレーリング深さが大きかったNo.3とNo.5を塗布した区間の塩化物イオン量は無塗布に比べると大幅に少なく、表-2で示した基礎性能の把握の結果と対応した。なお、No.4の結果は表-2と対応しなかったが、これは、図-6で示したとおり肉眼で吸水防止層が把握できず、塗布効果が働かなかつたためと考えられる。

これらの結果から、冬期環境が厳しい美幌橋でも適切な製品を選定することで15年以上、鋼材腐食に影響を及ぼす塩化物イオンの浸透抑制効果が期待できることがわかった。

ここで、図-5で示した吸水抵抗性試験結果と、塩化物イオン量の測定結果を比較すると、透水器具撤去後、カウント値が湿潤と表面乾燥の境界である230を下回るまでの時間が短いほど、塩化物イオン量は少ない傾向にある。このことから、今回考案した図-3で示した吸水抵抗性試験は、現状の塩化物イオン侵入抵抗性の把握へも応用できるものと考えられる。

(6) 塗布から15年間の経年変化の整理と考察

厳しいコンクリート劣化促進環境下 (2. (1)) にある美幌橋の地覆コンクリートの車線側側面におけるシラン系表面含浸材を塗布した部位と、無塗布の部位の15年間の経年変化の推移を整理すると図-10のようになる。

無塗布もしくは吸水抑制機能が小さい場合、供用から4年目ですでに車線側側面にスクレーリングが発生し始め、10年目ではほとんどの範囲にスクレーリングが及んでいる。また、15年が経過した現在は深部に塩化物イオンが多く

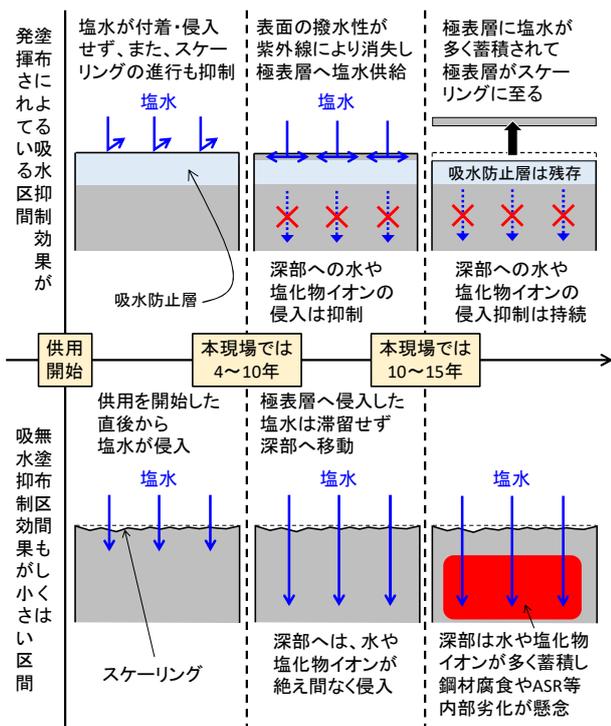


図-10 美幌橋地覆コンクリートにおけるシラン系表面含浸材の有無による経年変化の過程

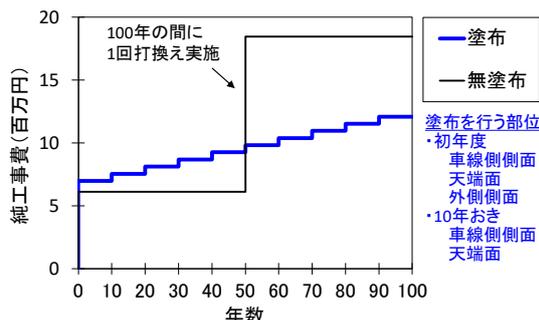


図-11 スケーリングを重視する場合の純工事費の比較

侵入しており、将来的に塩水の侵入に起因する鋼材腐食やASRなど内部劣化が懸念される。

一方、塗布による吸水抑制効果が発揮されている区間では、供用開始から4～10年間は凍結防止剤が溶け込んでいる融雪水（以下、塩水と記す）の侵入がほとんどなくスケールは抑制される。その後、15年目にかけて紫外線の影響で撥水機能が消失した極表層へ塩水が集中的に溜まり、極表層にスケールが生じ、無塗布範囲と同等もしくはそれ以上のスケールに至った。ただし、吸水防止層のほとんどは健全で、鋼材腐食を促進させる水や塩化物イオンの侵入抑制に関しては、15年を経ても効果は持続する。

著者らは、美幌橋以外の道路橋でも同様の試験施工を行っている³⁾。美幌橋の地覆コンクリートは、2.で述べたようにとりわけ厳しい環境下にあるが、適切な製品を選定、施工することで、深部への塩水の侵入抑制効果は15年以上、続くことがわかった。一方、高い吸水抑制効果を発揮する製品を塗布した区間では10年目から15年目

かけて車線側側面と天端面にスケールが確認された。ここでスケールの抑制を重視する場合、再塗布を行うことが望ましい³⁾。図-11は美幌橋の地覆コンクリートをモデルに、初年度は地覆全面に塗布し、以降、10年おきに車線側側面と天端面に再塗布する場合の純工事費（管理費、経費を含まない）を試算したものである。シラン系表面含浸材の材工費は、北海道開発局公表の単価を適用した。無塗布の部材を100年に1回打換える場合に比べると、部材のライフサイクルコストの減少や部材の維持費の平準化が図れる試算結果となった。将来、補修工法として断面補修が選択されるとしても、塗布した場合、塩化物イオン量が発錆限界を超えている範囲が浅く、はつり深さを小さく抑えることができることから、補修費の縮減が期待できる。

今後は美幌橋以外の試験施工箇所³⁾でも追跡調査を行うとともに、厳しい環境でのスケール抑制と遮水・遮塩の両効果の長期持続の実現に向け、撥水機能が持続しやすい製品などを使用した実験を予定している。

4. まとめ

- シラン系表面含浸材の効果の長期持続性を調べるための試験施工を行った美幌橋の地覆コンクリートにおいて、塗布後15年目の追跡調査を行った。製品によって傾向は異なるが、得られた傾向を整理すると下記ようになる。
- (1) 鋼材腐食を促進させる水や塩化物イオンの侵入抑制効果は、15年経過後も持続していた。
 - (2) スケールの抑制に関しては、水が溜まりやすい部位では10～15年に1回の再塗布が望ましい。

参考文献

- 1) 平成 31 年度北海道開発局道路設計要領, 第 3 集橋梁, 第 2 編コンクリート, 参考資料 B「道路橋での表面含浸材の適用にあたっての留意事項」, 2019.4
- 2) 遠藤裕丈: 表面含浸工法による劣化抑制対策の現状と課題, コンクリート工学, Vol.48, No.5, pp.97-100, 2010.5
- 3) 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 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.1, pp.69-88, 2011.2
- 4) JSCE K 571「表面含浸材の試験方法(案)」
- 5) 谷倉泉, 榎園正義, 後藤昭彦: 床版防水工における水分計の適用性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1112-1123, 2013.3
- 6) 林大介, 坂田昇, 田口史雄, 遠藤裕丈: 浸透性吸水防止材を用いたコンクリートの塩害および凍害環境下における耐久性に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.649-654, 2008.7
- 7) コンクリート診断技術'02 [基礎編], p.34, 社団法人日本コンクリート工学協会, 2002.1
- 8) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], p.150, 2018.3