

道路設計要領の目安を満足するシラン系表面含浸材を用いたコンクリートのスケーリング抵抗性の評価

寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈
 寒地土木研究所 道南支所 吾田 洋一
 函館開発建設部 道路課 伊藤 憲章

市販のシラン系表面含浸材のカタログを収集し、カタログに記載されている試験値が道路設計要領に掲載されている選定目安を満たしている製品を4製品選定し、それらを塗布したコンクリートのスケーリング抵抗性について評価を行った。いずれの種類も表面含浸材の浸透深さと遮塩性は良好であったが、スケーリング抵抗性は種類によって異なることがわかった。さらに、実環境下での効果の持続性を評価するため、一般国道278号鹿部町新常路川橋の地覆において試験施工を実施した。施工1年後に行った追跡調査では、いずれの塗布区間でも良好な吸水抑制効果が確認された。

キーワード：コンクリート、凍結融解、塩化物イオン、シラン系表面含浸材、試験施工

1. まえがき

寒冷地のコンクリート構造物は、凍結融解と塩化物イオンの複合作用による劣化（以下、複合劣化と記す）を受けやすい厳しい環境下に曝されている。これらの被害は温度変化が大きく、融雪水や凍結防止剤の供給を直接的に受けるコンクリートの表層に集中しやすく、スケーリングによる断面欠損や、鋼材の早期腐食が懸念される。

複合劣化の抑制が期待される簡易的な対策工の一つに、シラン系表面含浸材（以下、表面含浸材と記す）をコンクリートの表面に塗布する表面含浸工法がある。この工法は、材工費が比較的安価で施工性に優れる、材料が無色透明のためコンクリートの質感が保持される、水蒸気透過性を有し、コンクリートの内部に滞留する水分によって生じる劣化の抑制が期待できる、などが長所にあげられる。しかし、その効果は製品によって異なり、設計段階で製品選定の妥当性が判断しにくいことが問題となっている。

北海道開発局道路設計要領では、複合劣化を受ける環境下での製品の選定目安として、RC-I相当（水セメント比55%）のコンクリートに対して、表面含浸材の浸透深さは6mm以上、塩水浸漬試験による塩化物イオンの浸透深さは3mm以下という数値が設定されている¹⁾。近年は製品の開発・改良が進み、選定目安を満たす製品も多く市販されているが、効果がどの程度期待されるかは十分明らかになっていない。

そこで、道路設計要領の目安を満たす製品の中から、代表して4製品選定し、室内実験を行ってスケーリングに対する抵抗性を調べた。さらに、実際の環境下での効

表-1 室内実験のコンクリートの配合

セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				空気 (%)
			W	C	S	G	
高炉B	55	45	145	264	872	1049	4.5

果を評価するため、函館開発建設部管内の一般国道の橋梁地覆（新設橋）において試験施工を行った。

2. 室内実験の概要

(1) コンクリートの配合

表-1にコンクリートの配合を示す。スケーリングが進行しやすい条件に設定するため、セメントは高炉B種を使用した。水セメント比は55%とした。細骨材は苫小牧産海砂（表乾密度2.68g/cm³、除塩処理済）、粗骨材は小樽産砕石（表乾密度2.64g/cm³、最大粒径25mm）を使用した。空気量は4.5%とした。混和剤はAE減水剤（リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体）とAE助剤（変性ロジン酸化合物）を使用した。

(2) コンクリートの養生

打設後、材齢7日まで、供試体の打設面を水で湿らせた麻布で覆い、湿潤養生を施した。その後、材齢28日まで温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室に静置した。表面含浸材は材齢14日に塗布した。塗布面は打設面とした。

(3) 表面含浸材

表-2に試験に用いた表面含浸材を示す。市販の表面含

表-2 試験に用いた表面含浸材

種類	系別	有効成分 (%)	材料の状態	塗布量 (g/m ²)
I	無溶剤	90	ジェル状	400
I-1				1000
II	無溶剤	95~99	ジェル状	200
III	水	65	クリーム状	300
IV	無溶剤	95以上	液状	0.6 [※]

※IVのみ、塗布量の単位はkg/m²

浸材のカタログを収集し、カタログに記載されている試験値（表面含浸材の浸透性、遮塩性）が道路設計要領の目安を満たしている製品を4製品選定した（以下、I、II、III、IVと記す）。なお、Iは、過年度から継続的に行っている暴露試験²⁾と別の試験施工³⁾でも使用している。内訳は、1製品が水系、3製品が無溶剤系である。有効成分量は、IIIが65%であるが、I、II、IVは90%以上の高い値となっている。I、II、IIIはジェル状もしくはクリーム状の材料で、液だれに対する配慮がなされている。塗布量は、工法として評価するため統一の仕様は設けず、各製品の標準塗布量にあわせているが、塗布量を増加した場合の効果を検討する目的で、Iについては標準量の400g/m²に加えて1000g/m²（I-1と記す）の2ケースを設定した。

(4) 試験項目

試験項目を以下に示す。

a) 表面含浸材の浸透深さ

供試体の寸法は100×100×400mmとした。材齢28日に供試体をコンクリートカッターで切断し、切断面（100×100mm）に墨汁を含ませた水をふきかけて、黒く発色しなかった部分を表面含浸材の浸透範囲とみなし、打設面からの浸透深さをノギスで測定した。

b) 塩水浸漬試験

供試体の寸法は100×100×400mmとした。材齢21日に3%の塩化ナトリウム水溶液（以下、NaClと記）を張るための枠を打設面に設置した。枠は断熱材で作製し、エポキシ樹脂とシリコンで取り付けた。材齢28日にNaClを深さ6mm張って63日間静置した。その後、コンクリートカッターで切断し、切断面（100×100mm）にカーボン蒸着を施してEPMA分析を行い、塩化物イオンの浸透深さを画像から求めた。

c) ASTM C 672（湛水法）に準じたスケーリング試験

供試体の寸法は220×220×100mmとした。材齢21日に枠を試験面（打設面）に取り付け、材齢28日より試験を開始した。NaClを厚さ6mm張り、-18℃で16時間、23℃で8時間の1日1サイクルの凍結融解作用を与え、スケーリングの進行性を調べた。写真-1に試験状況を示す。



写真-1 ASTM C 672に準じた供試体



写真-2 CDF試験機

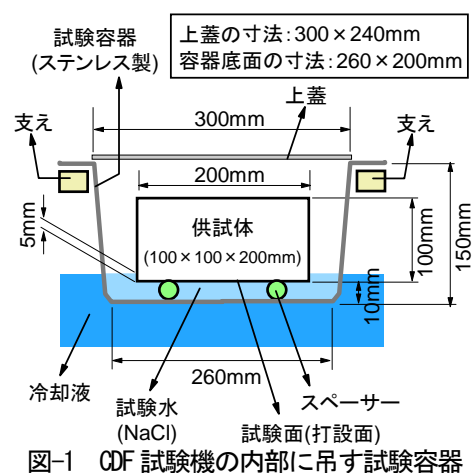


図-1 CDF試験機の内部に吊す試験容器

d) CDF（毛管浸透法）に準じたスケーリング試験

スケーリング抵抗性の評価については、各地域で様々な試験法が規格化されている⁴⁾。

写真-2はRILEMで規格化されているCDF試験機である。CDFはCapillary suction of De-icing solution and Freeze thaw testの略で、図-1に示すように試験面を下に向け、NaClを毛管浸透させる方式の試験である。我が国での実績は多くないが、ASTM C 672に比べて試験期間が短く省力的であること、スケーリングの許容値（28サイクルで0.15g/cm²以下⁵⁾）が定められていることが特徴的である。そこで、ASTM C 672の試験結果との比較を行うため、CDF試験もあわせて行った。

供試体の寸法は、100×100×400mmを切断して作製した100×100×200mmとした。切断は材齢10日に行い、材齢21日に打設面以外の5面をエポキシ樹脂でコーティングした。試験はRILEM⁶⁾に準じ、はじめに材齢28日の供試体を試験容器に納め、NaClを7日間毛管吸収させた後、凍結融解試験を行った。凍結融解サイクルは、20℃から-20℃まで10K/hの速度で4時間冷却 → -20℃を3時間保持 → 10K/hの速度で20℃まで4時間加熱 → 20℃を1時間保持の12時間1サイクルとし、ここでは56サイクルまで行った。試験はI-1以外の5ケース（無塗布含む）について行った。

表-3 表面含浸材の浸透深さの測定結果

I	I-1	II	III	IV
6.54	8.48	6.26	5.61	7.04

※深さの単位は mm

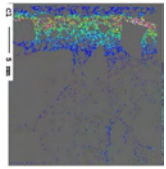
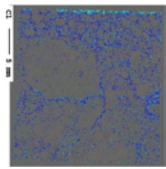
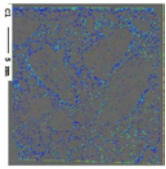
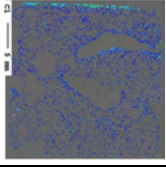
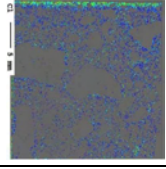
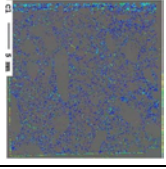
無塗布	I	I-1
		
8mm	1mm未満	1mm未満
II	III	IV
		
1mm未満	1mm未満	1mm未満

図-2 塩化物イオン浸透深さの測定結果 (EPMA)

3. 室内実験の結果・考察

(1) 道路設計要領の目安との対応

表-3に表面含浸材の浸透深さを示す。IIIが5.61mmで目安を僅かに下回ったが、全体的に6mm以上の値が示された。図-2に塩水浸漬試験における塩化物イオンの浸透深さを示す。無塗布は深さ8mmまで浸透していたのに対し、表面含浸材を塗布したシリーズはいずれも1mm未満であった。本研究で選定した表面含浸材は、概ね選定目安の範囲にあった。

(2) スケーリング抵抗性の評価

図-3にCDF試験の前に行った7日間の毛管吸水における吸水量の経時変化を示す。無塗布は24時間以内の吸水量が大きく、2日目以降は緩やかな吸水挙動を示した。一方、塗布した供試体の吸水量は無塗布の0.05倍と極めて少なく、表面含浸材による毛管吸水抑制効果は極めて高いことが示された。

図-4にCDFによるスケーリング量の測定結果を示す。スケーリングが最も多かったのは無塗布で、28サイクルのスケーリング量は 0.15g/cm^2 を上回った。一方、塗布した供試体は28サイクルのスケーリング量が 0.15g/cm^2 以内におさまり、スケーリング抑制効果が示された。28サイクルのスケーリング量はIとIIが 0.01g/cm^2 であるのに対し、IIIとIVは約 0.06g/cm^2 と前者の6倍となっている。いずれも選定の目安を概ね満たし、吸水抑制効果も高いが、複合劣化環境下での効果の程度は製品によって異なることが示された。

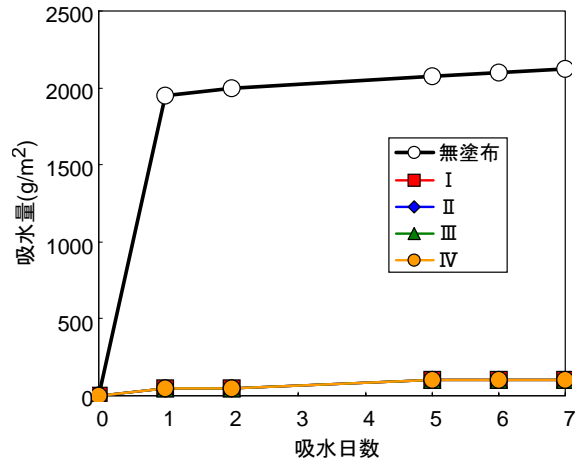


図-3 吸水量の経時変化 (CDF)

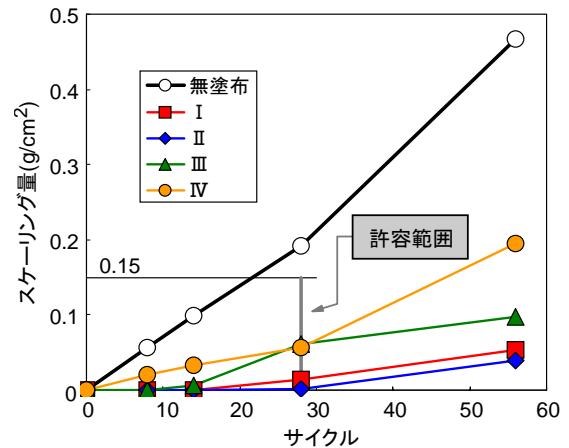


図-4 スケーリング量の測定結果 (CDF)

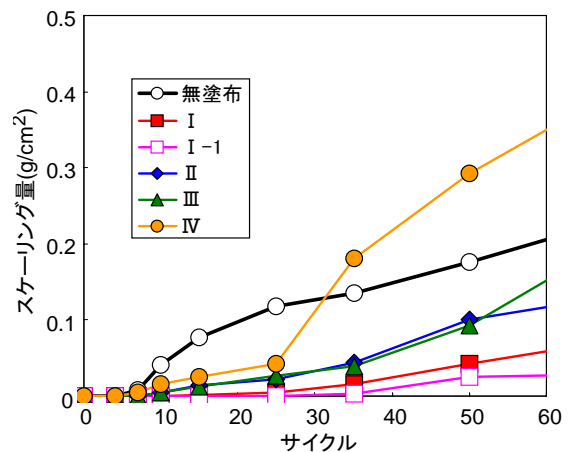


図-5 スケーリング量の測定結果 (60サイクルまで、ASTM C 672)

図-5はASTM C 672によるスケーリング量の測定結果を、図-4と同じスケールで表示したものである。図-4と比較すると、無塗布のスケーリングはASTM C 672の方が少ない傾向にあった。ASTM C 672の50サイクルのスケーリング量はCDFの約50%にとどまり、室温で温度制御を行うASTM C 672に比べて、試験容器を直接、冷却液に接触させる方式のCDFの方がスケーリングは促進されやすいことがわかった。塗布した供試体のスケーリン

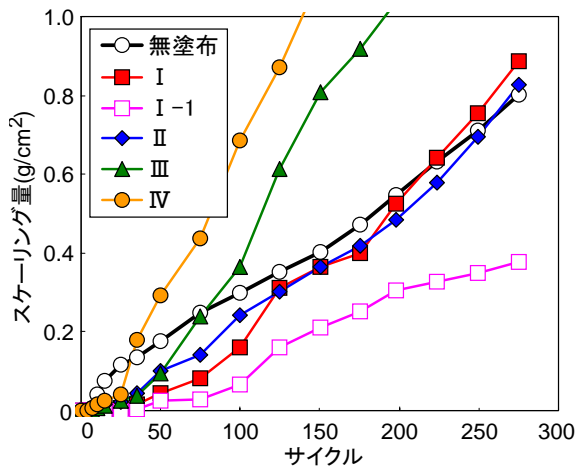


図-6 スケーリング量の測定結果 (全サイクル、ASTM C 672)

量はIVがやや多く、CDF試験と同じ結果が得られた。なお、IVは25サイクル経過後、グラフが大きく変曲し、スケーリングが急増に転ずる特異な傾向を示した。

図-6はASTM C 672の結果を全サイクル示したものである。塗布した供試体は、初期サイクルではスケーリングが少なかった。これは、シラン系表面含浸材による吸水抑制効果が表れたことを示している。この傾向は、いずれの種類でもみられ、図-2の結果と良く一致するものであった。しかしながら、凍結融解を長く与え続けたところ、スケーリングが増大に転ずる結果が示された。シラン系表面含浸材は細孔の充填には寄与しないことから、試験面の上方から氷圧が繰り返し作用したことで、表層にNaClが圧入され、さらに、表層はシランで疎水化されていることから、凍結時に生ずる表層でのNaClの毛管流動に対する抵抗性が増大し、流動圧が高まったことでスケーリングが突発的に顕在化したものと類推される。このことは、コンクリートが常時湛水環境下であり、氷圧による水の強制圧入が懸念される部位での適用は厳しいことを示している。

今回の実験では、I、II、I-1が比較的良好な結果を示したが、これと同程度の効果を期待するには、CDFにおける28サイクルのスケーリングの許容値は 0.01g/cm^2 以下に厳しく設定する必要があると言える。また、IとI-1を比較すると、試験終了時のI-1のスケーリング量はIの約半分となっており、塗布量の増加は吸水抑制層の品質向上をもたらすことが示された。

4. 試験施工の概要

前章では、室内実験によりスケーリング抵抗性の相对比较を行ったが、室内実験の環境と構造物が曝される環境は同一とは限らない。また、環境外力の程度も部材によって異なる。このため、室内実験の成果を設計へ反映させるには、実環境下での評価もあわせて行う必要がある。



図-7 現場の位置図⁶⁾

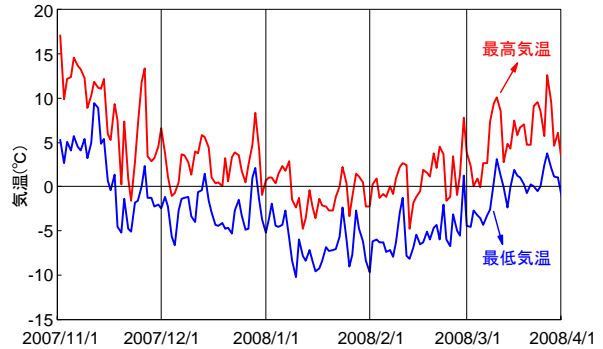


図-8 気温変化⁷⁾ (2007年11月1日～2008年4月1日)

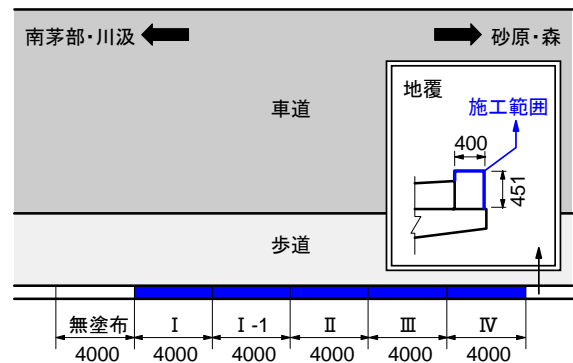


図-9 表面含浸材試験施工一般図 (新常路川橋)

このことを鑑み、本研究では函館開発建設部管内の沿岸部に架かる橋梁の地覆コンクリート (新設) を調査箇所を選定し、試験施工を行った。

(1) 試験施工橋梁および冬期の環境

試験施工は、一般国道278号鹿部町新常路川橋にて行った。図-7に位置図を示す。新常路川橋は、橋長52mのコンクリート橋 (PC単純箱桁橋) で、内浦湾に面しており、塩害の影響を受けやすい地区に位置している。

図-8は現場から最も近い川汲のアメダス⁷⁾を示している。2007年度の冬期の最低気温は -10.2°C であった。最低気温がコンクリートの凍結温度とされる -2°C ⁸⁾以下で、最高気温が 2°C より高い日を凍結融解日として、凍結融解日数の合計を求めたところ、79日であった。また、最低気温と最高気温がともに -2°C 以下である凍結持続日の



写真-3 表面含浸材の塗布状況 (2007年12月12日)



写真-4 追跡調査の状況 (2008年10月7日)

表-4 表面含浸材浸透深さ

I	I-1	II	III	IV
7.72	13.5	4.07	5.31	7.26

※深さの単位はmm

表-5 追跡調査1年目の調査項目

項目	調査方法
透水比測定	地覆に漏斗を立て、高さ250mmまで注水して地覆に吸水を与え、24時間後の透水量を測定
表面水分率測定	透水比測定前と測定後に、表面水分計を地覆(漏斗を立てた箇所)にあて、深さ10mm、20mmの水分率を測定
超音波伝播速度測定	地覆に20×20cmのメッシュ線をチョークで引き、交点間に発・受振子をあてて、交点間の伝播速度を測定。

※ スケーリングの調査は、スケーリングが確認されなかったため、実施せず。

日数は13日であった。

(2) 試験施工

コンクリートの打設(普通ポルト使用、W/C=44.9%)を2007年11月26日に、表面含浸材の塗布を2007年12月12日に行った。図-9に施工一般図、写真-3に表面含浸材の塗布状況を示す。試験施工は、日射面である歩道側の地覆で行った。試験施工の延長は無塗布区間を含めた24mで、この区間を6ブロックに分けて(1ブロック4m)、表面含浸材1種類に対して1ブロックを割り当てた。表-4はテストピースで調べた表面含浸材の浸透深さを示している。セメントの種類と水セメント比が異なる表-3とは一概に比較できないが、塗布量を増やしたI-1は13.5mmと最も大きく、それ以外は4~8mmの範囲にあった。

(3) 追跡調査

表-5に追跡調査1年目の調査項目を示す。当初はスケーリングの調査も予定していたが、1年目は無塗布を含めて、いずれの区間もスケーリングが認められなかった

表-6 透水比の測定結果

無塗布	I	I-1	II	III	IV
1.0	0.09	0.09	0.09	0.25	0.31

表-7 表面水分率の測定結果

	深さ10mm			深さ20mm		
	透水比測定前	透水比測定後	差	透水比測定前	透水比測定後	差
無塗布	5.6	11.8	6.2	4.9	6.9	2.0
I	4.6	5.0	0.4	3.8	4.2	0.4
I-1	4.2	4.4	0.2	3.3	4.0	0.7
II	4.5	4.6	0.1	3.9	4.1	0.2
III	4.2	4.5	0.3	3.5	3.9	0.4
IV	4.5	4.8	0.3	3.9	4.2	0.3

※表面水分率の単位は%

ため、吸水抑制効果の確認を主に行った。調査は透水比、表面水分率、超音波伝播速度の測定を行った。表面水分率は、高周波式コンクリート水分計(20MHz)を使用して測定した。超音波伝播速度は、1ブロックにつき104点のデータを取得し、その平均を求めた。写真-4は追跡調査の状況を示している。なお、試験施工日以降、追跡調査1年目までの期間の凍結融解日数を調べたところ、66日であった。

5. 追跡調査1年目の結果・考察

(1) 吸水抑制効果

表-6に透水比を示す。透水比は、無塗布区間の透水量を1.0とした場合の塗布区間の透水量である。塗布区間はいずれも1.0以下で、最も小さかったのはI、I-1、IIの0.09であった。表-7は透水比の測定前・後に行った表面水分率の調査結果を示している。透水比測定前の無塗布区間の水分率は、塗布区間に比べて1~1.6%高かった。透水比測定後の水分率は、無塗布区間が深さ10mmで6.2%、深さ20mmで2.0%上昇したのに対し、塗布区間の

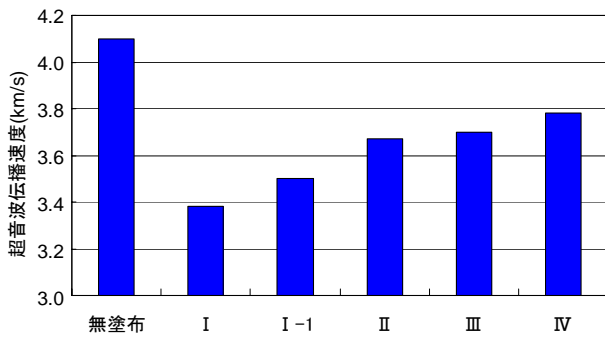


図-10 施工1年後の超音波伝播速度の測定結果

上昇量は極めて小さい。表面含浸材による吸水抑制効果は、1冬経過後も保持されていることが確認された。

(2) 超音波伝播速度

図-10に超音波伝播速度の測定結果を示す。施工1年後の速度は、全体的に無塗布区間 (4.1km/s) に比べて塗布区間 (3.4~3.8km/s) の方が小さく、既報の追跡調査³⁾と同様の傾向を示した。一般に超音波伝播速度は水分の影響を受けやすく、コンクリートの水分率が高いほど速度は大きくなる⁹⁾。塗布区間の水分率は無塗布区間よりも小さく (表-7)、表面含浸材の効果でコンクリートの含水率が小さくなったことが、超音波伝播速度低下の一因と考えられる。

なお、表-7で示した深さ10mmの水分率は、塗布区間ではIが最も大きく、図-10とは対応していない。一方で、透水比 (表-6) と図-10とは概ね対応している。さらに、表-6と表-7を比較すると、透水比はIII、IVが比較的大きいが、その傾向は表面水分率の結果には明確に反映されておらず、両者の相関は小さい。このことから、塗布区間では深さ10mm未満の極表層の表面水分率が敏感に変化していることが示唆される。すなわち、超音波は深さ10mm未満の極表層における表面水分率の影響を受けていると類推される。現時点ではIの吸水抑制効果が比較的大きい結果が示されたが、僅か1年目の評価であるため、今後も追跡調査を継続し、経年変化を調べていく必要がある。

6. まとめ

市販のカタログをもとに道路設計要領の選定目安を満たすことが期待される表面含浸材を4製品選定し、スケールリング抵抗性について実験的に評価を行った。さらに、実環境下での効果の持続性を評価するため、一般国道278号鹿部町新常路川橋の地覆で試験施工を行い、1冬経過後に追跡調査を行った。本研究で得られた知見をまとめると、以下のようになる。

1) 本研究で使用した表面含浸材は、塩水浸漬試験による塩化物イオン浸透深さが1mm未満で、遮塩効果は

極めて高かった。

- 2) 表面含浸材による毛管吸水抑制効果は高い。
- 3) CDF試験における28サイクルのスケールリング量は、いずれの表面含浸材もRILEMの許容範囲 (0.15g/cm²以下) は満足したが、効果の程度は製品によって異なる。
- 4) ASTM C 672の結果は、CDF試験の結果と良く対応しており、表面含浸材を塗布したコンクリートのスケールリング抵抗性を省力的に評価できる可能性が示された。
- 5) 地覆での試験施工では、表面含浸材による吸水抑制効果は1冬経過後も保持されていた。

7. 今後の課題

室内実験では、スケールリング抑制効果の程度が製品によって異なることが示された。一方、試験施工では、わずか1冬経過の評価ではあるがスケールリングは認められず、いずれの製品も良好な吸水抑制効果を示した。今後は、室内実験の結果をもとに現場での効果の持続性を予測・評価できる設計法の確立に向け、新常路川橋での追跡調査・データ収集を継続するとともに、並行して行っている別現場での追跡調査データ³⁾もあわせて、実環境下での効果の持続性を総合的にとりまとめていく必要がある。

参考文献

- 1) 平成20年度北海道開発局道路設計要領, pp.3-B1-3-B13
- 2) 遠藤裕丈, 田口史雄, 小野俊博, 登靖博: シラン系表面含浸材で保護されたコンクリートの塩化物イオン浸透予測—暴露試験2年目の評価—, 寒地土木研究所月報, No.662, pp.2-10, 2008.7
- 3) 遠藤裕丈, 田口史雄, 河上聖典, 藤田裕司, 村中智幸: シラン系表面含浸材による道路橋地覆コンクリートのスケールリング抑制効果—追跡調査3年目の評価—, 寒地土木研究所月報 (投稿中)
- 4) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書, pp.168-225, 2008.8
- 5) RILEM Recommendation: CDF TEST —Test method for the freeze-thaw resistance of concrete— test with sodium chloride solution (CDF), 1996
- 6) 昭文社: 北海道道路地図
- 7) 気象庁: 2007.11~2008.4アメダスデータ
- 8) 日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点'99, p.155, 1999.9
- 9) 林田宏, 田口史雄, 遠藤裕丈, 草間祥吾: 超音波伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究, 寒地土木研究所月報, No.656, pp.10-15, 2008.1