

論文 寒冷環境下におけるシラン系表面含浸材によるコンクリートの保護効果に関する基礎的研究

遠藤 裕丈^{*1}・田口 史雄^{*2}・谷本 俊充^{*3}

要旨：寒冷地のコンクリート構造物は凍害、凍・塩害による複合劣化の被害を受けやすい。このため、コスト縮減の観点から施工が容易で効果が持続する経済的な劣化抑制対策工が求められている。近年、その一つとして表面含浸材の有効性が注目されているが、寒冷地の土木構造物での実績やデータが少なく、さらには効果の持続性を照査する方法も確立されていない。そこで効果の評価法や性能設計法の構築に向け、凍・塩害の複合劣化に着目した室内試験と試験施工を行った。本報では効果の持続性と表面含浸材浸透深さ、透水比、有効成分量に密接な関係があったシラン系の試験結果について報告する。

キーワード：表面含浸材、シラン、寒冷地、スケーリング、塩分浸透、複合劣化

1. はじめに

寒冷環境下におけるコンクリート構造物の特徴的な劣化には、凍害および凍・塩害による複合劣化（スケーリング等）が挙げられる。コンクリート構造物の長寿命化が求められる今日、維持管理の必要性は高まっているが、少子高齢化による労働力の低下や投資余力の減少が将来的に予想されることから、劣化抑制対策工法には施工が容易で効果が持続する経済的な技術が求められる。

その技術の一つとして近年、コンクリート表層の組織を改質させる浸透性の保護材（表面含浸材）が注目されている。表面含浸材は、表層に撥水・吸水抑制機能を付与するシラン系と、表層を固化させるケイ酸塩系の2タイプに大別される¹⁾。凍害と塩害は水や塩分の浸透の影響が大きく、劣化因子の浸透抑制機能を表層へ付与する表面含浸材の有効性は高いと考えられる。しかし、これらを用いた寒冷地の土木構造物での実績や耐久性に関するデータは少なく、性能や効果の評価および照査する方法も確立されていないのが現状である。

そこで、筆者らは、主に寒冷環境下での耐

久性保持効果の確認および性能評価法の構築を目的に室内試験と試験施工を実施している。現在はシラン系とケイ酸塩系の両材料を用いて試験を行っているが、本報ではシラン系の表面含浸材を使用した室内試験結果および試験施工1年目の評価の一部について述べる。

2. 試験に用いた表面含浸材

表-1に試験で使用した表面含浸材を示す。本報では、既往の試験²⁾で使用された28種類の表面含浸材の中から、浸透深さと撥水性が良好と見受けられた5種類をまず選び、それに北海道内の橋梁での実績を有する1種類を加えた計6種類を用いた。いずれも撥水性を有するシラン系で、内訳は水系3種類、溶剤系2種類、

表-1 評価に用いた表面含浸材

No	系別	成分比率(%)		
		有効成分量		水Kor溶剤
		シラン類	他成分	
1	水系	20	22	58*
2		32	11	57
3		80	-	-
4	溶剤系	11.5	-	-
5		26**	-	74
6	無溶剤系	90	-	-

【備考】 - は未確認、* は「特殊無機溶液」と表示
** はフッ素が混入されている

*1 独立行政法人 北海道開発土木研究所 材料研究室 研究員（正会員）

*2 独立行政法人 北海道開発土木研究所 材料研究室 室長（正会員）

*3 北海道開発局 建設部 道路維持課 開発専門官（非会員）

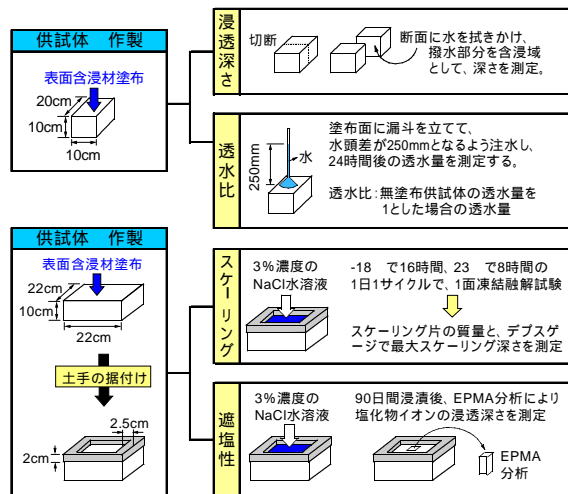


図-1 室内試験の項目および方法

表-2 表面含浸材の塗布工程

No.	工程 (□は塗布作業で数値は塗布量(kg/m ²)を表す)	塗布量kg/m ²
1	開始 0.10 3h静置 0.10 終了	0.20
2	開始 0.15 4h静置 0.15 終了	0.30
3	開始 0.20 終了	0.20
4	開始 0.15 3h静置 0.15 終了	0.30
5	開始 0.20 終了	0.20
6	開始 0.40 終了	0.40

無溶剤系1種類である。成分の比率については、製品カタログの表示値もしくは各メーカーから掲載の承諾が得られた範囲の値を示した。

3. 室内試験の概要

(1) コンクリートの配合

水セメント比は、後述する試験施工の橋梁地覆配合時の平均的な45%とした。セメントには、スケーリングが比較的生じやすいとされる高炉セメントB種を用いた。スランブは8±2.5cm、空気量は4.5±1.0%を目標とした。粗骨材には小樽産の砕石(密度2.67g/cm³,最大径25mm)、細骨材には苫小牧産の除塩処理済の海砂(密度2.70g/cm³)を使用した。

(2) 供試体および試験項目

図-1に試験項目を示す。供試体は、JSCE-K-571に準拠した表面含浸材浸透深さ、透水比試験を行うための10cm×20cm×10cmと、ASTM-C-672³⁾に準拠したスケーリング試験、遮塩性試験を行うための22cm×22cm×10cmの2種類を作製した。打設後は材齢7日まで供試体の表面を

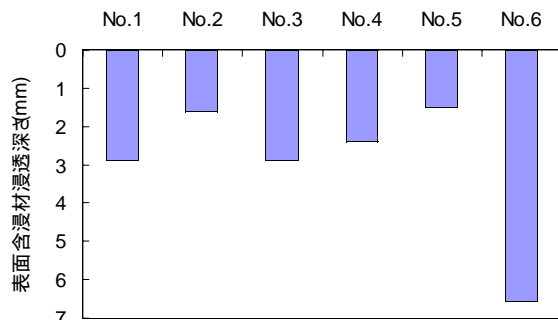


図-2 表面含浸材浸透深さの測定結果

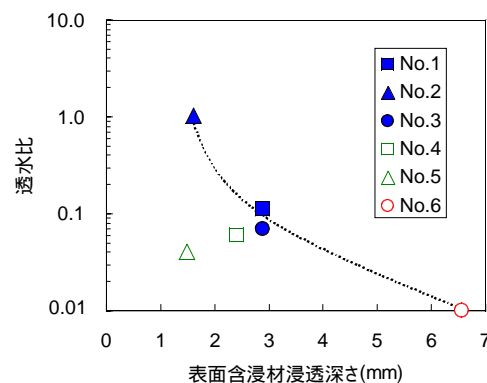


図-3 表面含浸材浸透深さと透水比

養生マットで覆い、その後は試験開始材齢の28日まで温度20℃、湿度60%の気中に静置させた。表面含浸材は材齢14日に塗布した。表-2に表面含浸材の塗布工程を示す。塗布面は打設面とした。本研究が表面含浸材そのものの評価ではなく、工法として評価することを目的としている性格上、統一の仕様は設けず、各メーカーから推奨の施工方法(塗布方法と塗布量)を提示してもらい、この方法に準じて塗布を行った。

3.1 室内試験の結果

(1) 表面含浸材浸透深さ

図-2に表面含浸材浸透深さの測定結果を示す。いずれも表層には明確な吸水防止層が形成されていることが確認された。浸透深さは、No.1~No.5は概ね2~3mmで、No.6は6mm以上の値を示した。

(2) 透水比

図-3に表面含浸材浸透深さと透水比の関係を示す。透水比は対数軸で表示している。水系(No.1, 2, 3)、無溶剤系(No.6)をみると、

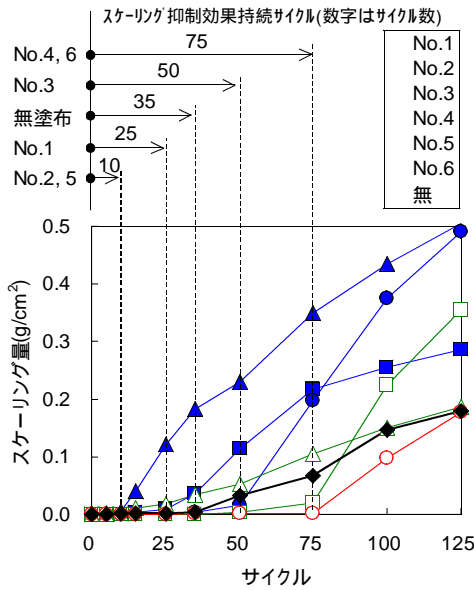


図-4 スケーリング試験結果

浸透深さが大きくなるに従い、透水比は小さくなる傾向が示された。この傾向は、既往の文献²⁾に一致している。一方、溶剤系 (No.4, 5) は、同一の浸透深さにおいて水系よりも透水比が小さい結果となった。考えられる要因としては、表面含浸材に含まれる溶剤、シランの種類や成分などが挙げられるが、理由に関してはデータを増やし、更に検討を進めていく必要がある。

(3) スケーリング抵抗性

図-4にスケーリング試験結果を示す。あるサイクルまでスケーリングが極めて少ない状態で推移した後、無塗布はスケーリング量が概ね一定割合で増え続けているのに対し、塗布した供試体は吸水防止層が薄板状に大きく剥がれ (写真-1)、急速にスケーリングが進行する、過年度⁴⁾の試験と同様の挙動を示した。

この理由については一私見として、表面から圧入もしくは欠陥部から浸透した試験水が吸水防止層の裏面に潜り込み、浸漬環境下で裏面が飽和状態に達した後、過大な凍結水圧を発生し、吸水防止層を押し出したとする推察を過年度に述べた⁴⁾。図-5にスケーリング量と最大スケーリング深さの関係を示す。表面含浸材浸透深さが最も大きいNo.6に着目すると、スケーリング量は少ないが、スケーリン

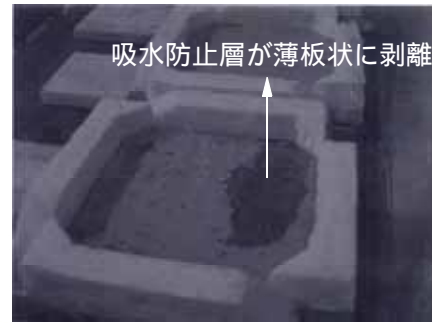


写真-1 No.3の90サイクルの試験面の状況 (試験中の低温室内で撮影)

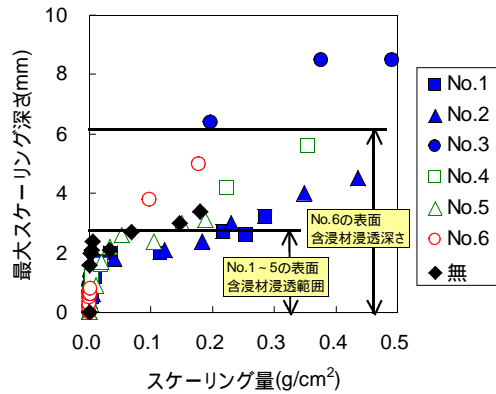


図-5 スケーリング量とスケーリング深さ

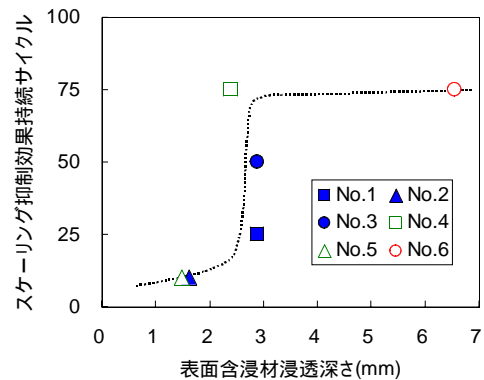


図-6 表面含浸材浸透深さと抑制効果持続サイクル

グが顕在化し始めた直後 (スケーリング量が $0.1 \sim 0.2 \text{ g/cm}^2$) のスケーリング深さは比較的大きく、吸水防止層の押し出しと思われる。

(4) スケーリング抑制効果に関する考察

ここで、スケーリング量が急増へと転ずる変曲点までの期間を、仮にスケーリング抑制効果持続サイクルと呼ぶこととする (図-4)。

図-6に表面含浸材浸透深さとスケーリング抑制効果持続サイクルの関係を示す。浸透深さ2~3mmでは値に開きがみられたが、浸透深さは大きいほど効果的な傾向が見受けられる。

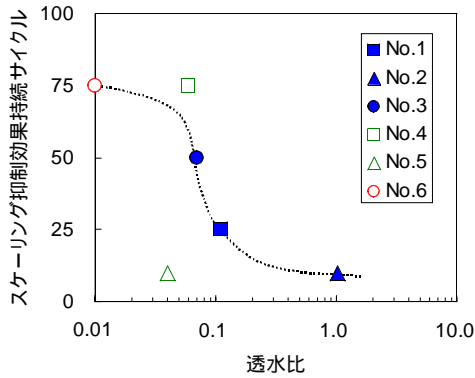


図-7 透水比と抑制効果持続サイクル

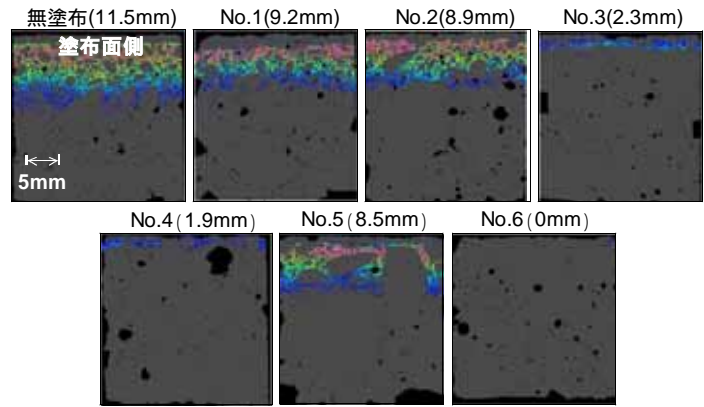


図-9 塩化物イオン浸透深さ測定結果(EPMA画像)

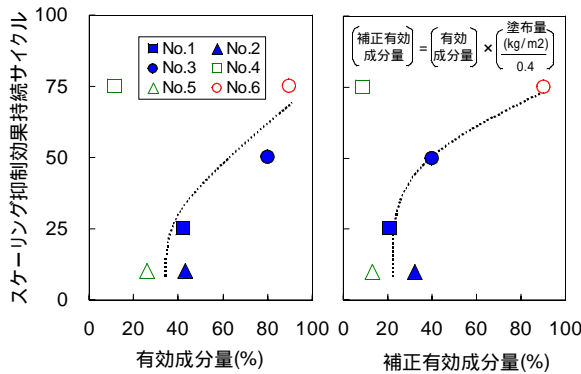


図-8 有効成分量と抑制効果持続サイクル

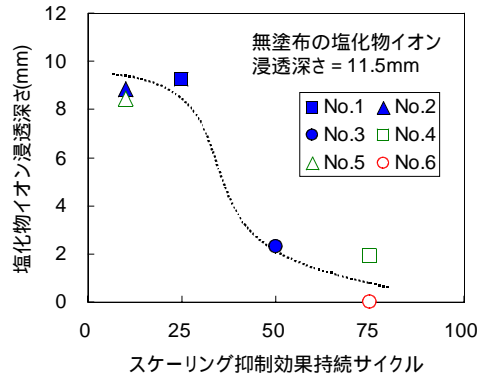


図-10 抑制効果持続サイクルと塩化物イオン浸透深さ

図-7に透水比とスケーリング抑制効果持続サイクルの関係を示す。透水比が0.1以下の表面含浸材では持続サイクルが大きくなる傾向がみられる。しかしながら、溶剤系のNo.5のように透水比が0.1以下であるにも関わらず持続サイクルが小さい結果も一部で認められた。

図-8に表-2の有効成分量および補正有効成分量とスケーリング抑制効果持続サイクルの関係を示す。全般的には相関が示されたが、溶剤系のNo.4は成分量が比較的少ないものの持続サイクルが長い結果となっている。

これらを総合すると、傾向と異なる結果を示した一部のデータについては表面含浸材の成分の種類を勘案した詳細な検討が必要であるが、基本的には、表面含浸材浸透深さ、透水比、有効成分量の3者と持続サイクルは関連性が高いと考えられる。

(5) 遮塩性

図-9に浸漬90日後の塩化物イオン浸透深さを調べたEPMA画像を示す。塩化物イオンの浸

透深さは無塗布が11.5mmであるのに対し、塗布供試体はそれよりも小さかった。特にNo.6は塩化物イオン浸透が殆ど確認されなかった。

図-10にスケーリング抑制効果持続サイクルと塩化物イオン浸透深さの関係を示す。両者の相関は良好であった。このことは、スケーリング劣化要因の一つであるNaCl3%水溶液の浸透を強く抑えることで、より高いスケーリング抑制効果が得られることを意味している。

4. 試験施工

性能の評価方法を確立するには実環境下でデータを取得し、室内試験データとの対比を行い、室内試験の結果が持つ意味を明確に整理することが不可欠である。そこで、北海道内の国道に架かる橋梁にて試験施工を行った。

(1) 現地の概要、施工および調査方法

図-11に位置図と施工部位を示す。試験は北海道の国道に架かるM、B、Kの3橋で実施した。施工部位はスケーリングが発生しやすい地覆

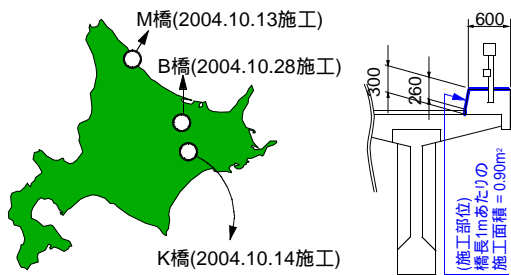


図-11 橋梁位置図・試験施工日・施工部位

表-3 地覆コンクリートの配合

橋梁	セメント記号	Gmax (mm)	W/P (%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	打換年月
M橋	BB	20	43.2	8	6.0	2004.7
B橋	N	40	51.4	8	4.5	2004.8
K橋	H	25	46.5	8	5.0	2002.10

〔備考〕 混和材はセメントと膨張剤、呼び強度は3橋とも24セメントは、BB...高炉B種、N...普通ポルト、H...早強を指す

とした。表-3に地覆コンクリートの配合を示す。M, B橋は試験施工2~3ヶ月前に地覆全体が打換えられ、凍結融解履歴は未だ受けていない。K橋は地覆打換えから2冬経過している。また、交通量が多いB橋と山間部に位置するK橋では凍結防止剤の散布が行われている。

試験施工は、地覆を6ブロックに分けし、メーカー1社に1ブロックを割り当て、メーカーの担当者が表-2の推奨方法に基づいて行った（B橋のみNo.1~4, 6の5種類を施工）。1ブロックの区間長はM, B橋は4m, K橋は5mである。

調査は、撥水性、透水比、超音波速度、シュミットハンマー、スケーリング面積率の測定は1年間隔で、コア採取を伴う調査（凍害深さ、塩分量、中性化）は5年間隔で行う計画である。

本報では、調査の結果を代表して、凍結防止剤が散布されている新設地覆のB橋の施工1年目のスケーリング抑制効果および室内試験結果とを対比した考察について述べる。B橋の冬期間の環境については、図-12の通りである。

(2) 施工1年目のB橋のスケーリング面積率

図-13に施工1年後のB橋のスケッチを示す。無塗布面はスケーリングが斑点状に発生していたが、塗布面では現在のところスケーリングは殆ど見受けられず、1年と短期ではあるがスケーリング抑制効果がみられた。No.2区間は垂直面の一部に剥離が集中的にみられたが、

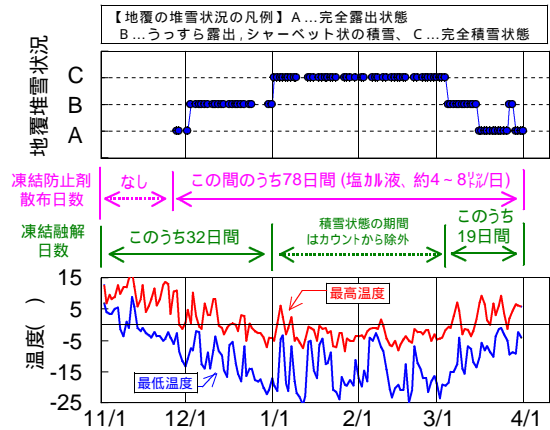


図-12 B橋の冬期環境(2004.11.1~2005.4.1)

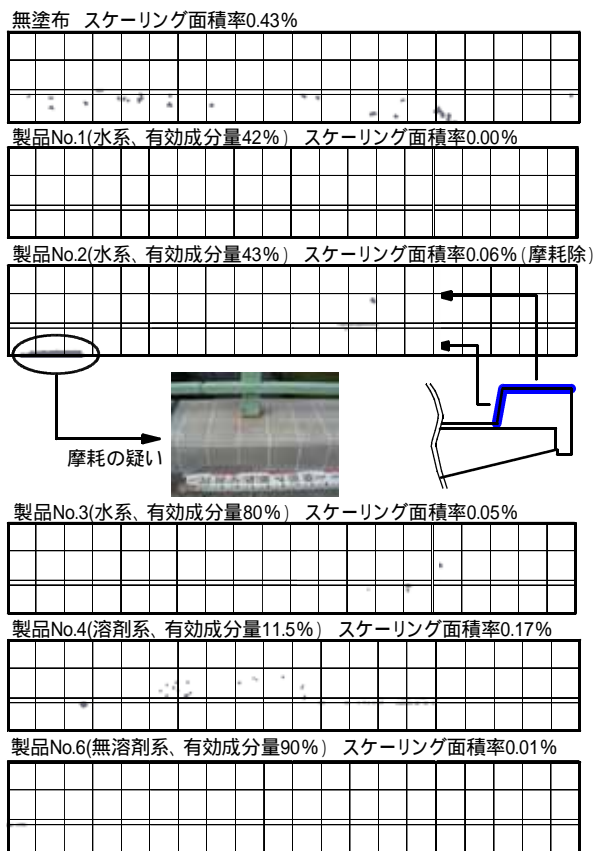


図-13 施工1年後スケーリングスケッチ(B橋)

他の面にスケーリングは殆どみられず、コンクリートの品質や物体間接触を伴う摩耗の影響が推察されるが原因特定には至らなかった。

(3) スケーリング抑制効果に関する考察

図-14にスケーリング抑制持続期間(室内試験)と試験施工1年目のB橋のスケーリング面積率の関係を示す。室内試験では持続サイクルに差はあったものの、実環境下での1年目はいずれもスケーリング抑制が認められたが、No.

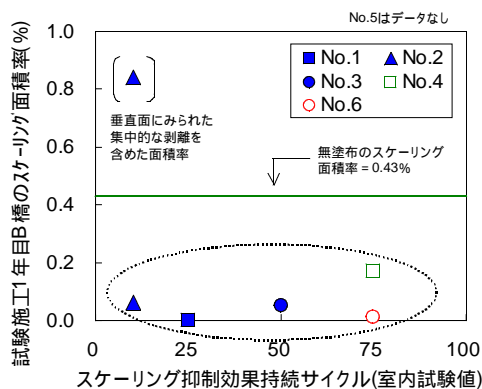


図-14 抑制効果持続サイクル(室内)と面積率(B橋)

4の面積率が若干高めのようなのである。ただ、面積率0.43%を図-4のスケーリング量に換算すると0.002g/cm²と極めて微小のため、抑制効果の強さの評価は次年度以降の課題としたい。

図-15は表面含浸材の有効成分量(表-2)と施工1年後のB橋のスケーリング面積率の関係である。ここで見られた特徴として、No.4に着目すると、室内試験の結果(図-8)とは対照的に相関を示したことである。室内試験は塗布後、試験開始までの間、環境的に安定している恒温恒湿室に14日間静置しているのに対し、試験施工は冬期を迎えるまでの間、雨や紫外線といった環境の影響を受けていることから、これらの環境作用がNo.4が有する耐候性能に影響を及ぼした可能性が推察される。表面含浸材に含まれる溶剤、シランの種類や成分がどのような影響を受けたのか、そのメカニズムについては今後更に検討を進めていく必要があるが、実構造物への適用にあたっては、耐候性に関する評価法も確立させる必要があると言える。

5. まとめ

本報で得られた知見を以下に示す。

- (1) スケーリング抑制効果の持続性と表面含浸材浸透深さ、透水比、有効成分量には密接な関係が見受けられた。
- (2) スケーリング抑制効果持続サイクルと遮塩性とは相関が高かった。
- (3) B橋での試験施工1年目においては、スケ-

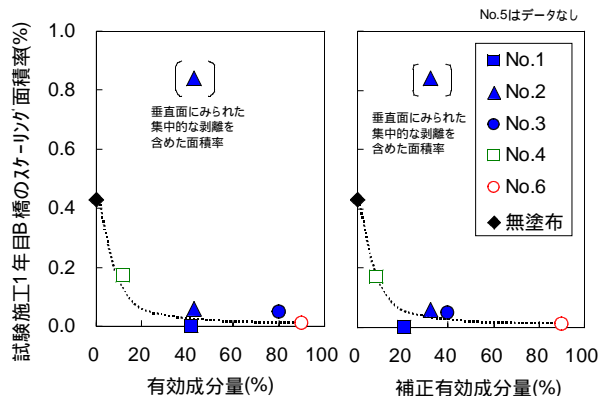


図-15 表面含浸材有効成分量と面積率(B橋)

リング抑制効果が確認された。

- (4) 実環境下での適用性を検討するにあたっては、(1)で述べた項目に加え、耐候性に関する評価も必要である。

最後になりましたが、本試験の実施にあたり、アトミックス(株)、荒井建設(株)、カジマリノベイト(株)、住友精化(株)、ダイキン工業(株)、日本ペイント(株)(50音順)からは表面含浸材の提供、現地での施工にご協力頂きました。

試験施工、冬期環境の記録にあたっては、北海道開発局の関係各位に大変お世話になりました。末筆ながら謝意を表します。

参考文献

- 1) 表面保護工法設計施工指針(案), 工種別マニュアル編, コンクリートライブラリー119, 土木学会, 2005.4
- 2) 林大介, 守屋進, 杉田好春: 各種浸透性コンクリート保護材の性能に関する実験的検討, 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シンポジウム論文集 p. 45-54, 2004.2,
- 3) Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals, ASTM Standard C 672
- 4) 遠藤裕丈, 田口史雄, 林大介, 坂田昇: 浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートのスケーリング特性, コンクリート工学年次論文集Vol.26, p.987-992, 2002.6