

# 論文 ケイ酸塩系表面含浸材を施工したコンクリートのスケーリング抵抗性の基礎的評価

遠藤 裕丈\*1・田口 史雄\*2・小野 俊博\*3・登 靖博\*4

**要旨**：本研究では、ケイ酸塩系表面含浸材による凍害・塩害の複合劣化抑制効果について実験的に検討を行った。ケイ酸塩系表面含浸材は、種類にもよるが、性能が損なわれないレベルのスケーリングを許容する一方で劣化の進行を遅延化させたい部材への適用が適していると考えられる。また、本研究の範囲ではあるが、一項目の実験結果と他の効果を関連付けて説明できない場合があり、評価に際しては個々の性能に対する効果がひと目で理解できるレーダーチャートを活用する等、工夫が必要であるように思われる。

**キーワード**：ケイ酸塩系表面含浸材、プルオフ強度、細孔量、拡散係数、スケーリング

## 1. はじめに

今後、コンクリート構造物の多くが老朽化を迎える。2025年には、新設構造物への投資が減少し、構造物の維持管理・更新費がこれを上回ることが予想されている<sup>1)</sup>。厳しい財政事情下において、全てのコンクリート構造物を更新することは極めて難しく、劣化抑制対策工を適用する等してコンクリート構造物の延命を図り、ストックされているコンクリート構造物を長く使いこなし、社会的な負担を軽減していくことが将来的に重要となる。

寒冷地のコンクリート構造物は、凍害単独および塩害との複合劣化を受けやすい厳しい環境下に曝されている。このため、スケーリングによる断面減少と塩分浸透速度の増加による鉄筋腐食の助長が懸念される。このような凍害ならびに塩害の主な原因は、コンクリート表面からの水や塩化物イオンの浸透である。そのため、劣化因子の浸透を抑えることによって、劣化の発生・進行を遅らすことができると考えられる。

その方法の一つに、表面含浸材によるコンクリート表層の改質が考えられる。この工法は、材料、施工といった初期コストが比較的安価で工期が短く、施工後も構造物の質感を変化させない等の長所を有している。最近では、寒冷地

においても、部材性能の保持・持続を期待して、道路橋の地覆等に表面含浸材が施工される事例が増えている。しかしながら、表面含浸材の最適な選定・使用方法、評価方法、効果の持続性に関する明確な基準が整備されていない等、課題も残されている。

この状況をふまえ、実際の寒冷地における表面含浸材の効果の明確化と性能評価手法の開発を目標とし、筆者らは、室内試験と曝露試験および北海道内の道路橋において試験施工・追跡調査を行っている。

表面含浸材は、コンクリート表層の細孔壁に疎水分子を固着させることで吸水を抑えるシラン系と、コンクリートの細孔を無機の結晶体で充填させるケイ酸塩系に大別される<sup>2)</sup>。シラン系については過年度より試験を先行的に行っている<sup>3)</sup>が、引き続きケイ酸塩系の効果についても検討を行うこととした。

本研究では、ケイ酸塩系表面含浸材による凍害・塩害の複合劣化抑制効果について調べた基礎的な室内試験の結果について報告する。

## 2. 試験概要

### 2.1 コンクリートの材料・配合

表-1に配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（以下、普通ポルト）と高炉セ

\*1 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 研究員（正会員）

\*2 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員（正会員）

\*3 国土交通省 北海道開発局 建設部 道路維持課 開発専門官（非会員）

\*4 国土交通省 北海道開発局 建設部 道路建設課 橋梁係長（非会員）

メントB種（以下，高炉B種）を使用した。水セメント比は45%とした。スランプは8cm，空気量は4.5%を目標値とした。細骨材は除塩処理済の海砂（密度2.70g/cm<sup>3</sup>），粗骨材は碎石（密度2.67g/cm<sup>3</sup>，最大寸法25mm）を使用した。

## 2.2 表面含浸材の種類

表-2 に実験で使用した表面含浸材を示す。材料は，市販されているケイ酸塩系表面含浸材の中から7種類を選定した。材料の内訳は，ナトリウム系が6種類（No.1～6），リチウム系が1種類（No.7）である。No.6以外は，粘度を下げる理由から，材料と水を併用して施工することがメーカー仕様で定められている。

各材料のカタログ・技術資料には，材料の化学組成や成分の含有量については殆ど触れられていないが，ゲルが生成され，やがて結晶体へ成長し，コンクリートの細孔を充填する改質機構が解説されていた。

## 2.3 供試体

供試体の寸法は220×220×100mmのブロック体とした。材齢7日まで打設面（220×220mm）

を湿った麻布で覆って養生を施し，その後は温度20℃，湿度60%の恒温恒湿室に静置した。表面含浸材の塗布は材齢14日に実施した。塗布面は打設面とし，塗布作業は各メーカーから指定された方法に準じて行った。図-1 に塗布

表-1 コンクリートの配合

使用セメント	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
普通	45.0	8	4.5	140	311	826	1079
高炉B				144	320	814	1062

表-2 使用した表面含浸材

記号	分類		塗布時における水の使用有無	
	ケイ酸ナトリウム系	ケイ酸リチウム系	使用	不要
無塗布	—	—	—	—
No.1	○		○	
No.2	○		○	
No.3	○		○	
No.4	○		○	
No.5	○		○	
No.6	○			○
No.7		○	○	

【備考】 No.5は粉体で，水と混練後，塗布  
残りのNo.1～No.5およびNo.7は無色透明の液体



【備考】 No.2, 5, 7は，主材（材料1）と補助剤（材料2）の2種類を使用

図-1 表面含浸材の塗布工程

工程を示す。塗布後、試験開始まで恒温恒湿室に再び静置した。

## 2.4 試験内容

本研究では、プルオフ強度、細孔量、塩化物イオンの実効拡散係数、スケーリングの4試験を行った。スケーリングは、塩分環境下にあるコンクリート構造物で多くみられる凍害劣化で、構造物の美観保持、かぶりの確保、塩害の助長抑制の観点から、寒冷地では特に留意すべき劣化の一つである。いずれの試験も試験開始材齢は28日とした。

プルオフ強度試験は、打設面に100×100×5mmの鋼製プレートをエポキシ樹脂で接着し、1kgf/cm<sup>2</sup>/secで真上へ引っ張り、打設面が破断した際の強度（プルオフ強度）を求めた。細孔量の測定は、打設面から深さ10mmの層を切り出し、水銀圧入法により行った。実効拡散係数の測定は、φ10cmのコアを切り出し、JSCE-G571に準じて行った。スケーリング試験は、ASTM-C 672に準拠して打設面に土手を据え付け、3%濃度の塩化ナトリウム水溶液を深さ6mm程度張り、-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、打設面に発生するスケーリング量を測定した。なお、プルオフ強度試験とスケーリング試験は、3体の平均値を測定値とした。

## 3. 試験結果・考察

### 3.1 プルオフ強度

図-2にプルオフ強度を示す。表面含浸材の塗布によって全体的に0.05~0.45N/mm<sup>2</sup>の増加が認められた。この傾向は、普通ポルトの方が顕著であった。ケイ酸塩系表面含浸材は、コンクリート中の水酸化カルシウムと反応することで結晶化する材料であるが、一般にカルシウム量は普通ポルトの方が多く<sup>4)</sup>、このことが影響しているように思われる。

No.5のプルオフ強度は、無塗布に比べると減少している。写真-1にプルオフ強度試験後の破断面(100×100mm)を示す。No.5を除く7体は、破断面に引張破壊やひびわれ痕が視認できるのに対し、No.5は比較的滑らかな状態で、

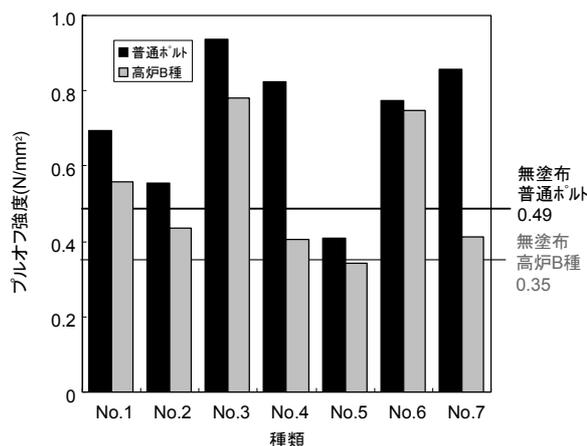


図-2 プルオフ強度

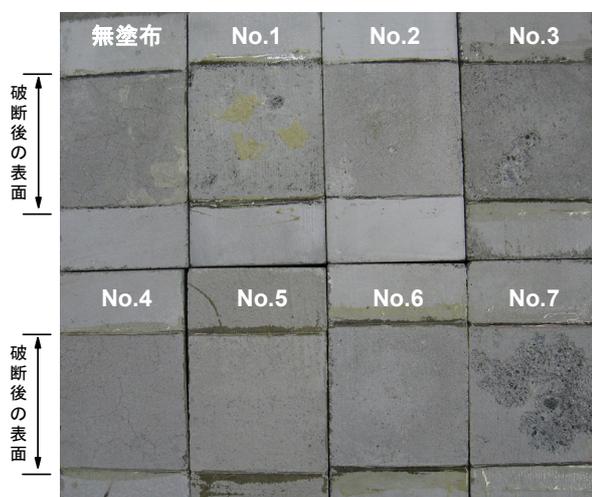


写真-1 プルオフ強度試験後の破断面（普通ポルト）

損傷が見受けられない。No.5以外は液体状の表面含浸材であるが、No.5はケイ酸塩成分がブレンドされた粉体と水を混練して作製したペースト状の塗布材を打設面に上塗りし、成分のみをコンクリートに含浸させるタイプの材料である。このため、塗布材自体とコンクリートの間にはコールドジョイントが生ずる。No.5は、コンクリートの表面強度ではなく、界面の付着力が測定された可能性がある。

### 3.2 細孔量

図-3に累積細孔量を示す。普通ポルトでは、全ての種類において細孔の減少が確認され、No.2は5%、No.4は29%、それ以外の種類は11~19%の細孔低減効果が認められた。一方、高炉B種は、No.4では25%の減少効果がみられたものの、普通ポルトに比べると量的には小さい傾向にあった。No.5は、プルオフ強度は

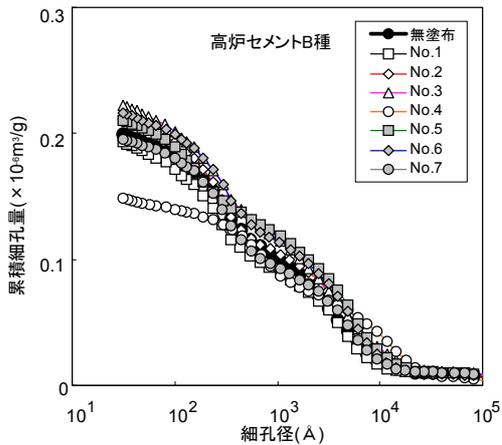
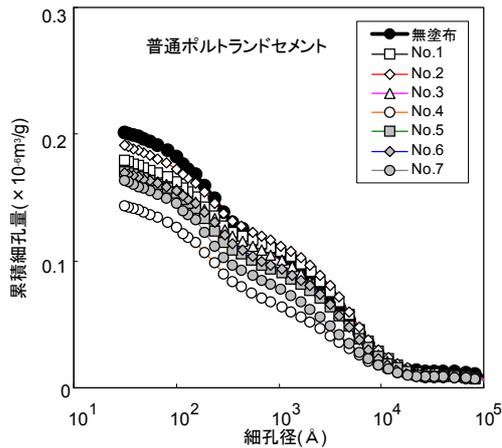


図-3 累積細孔量

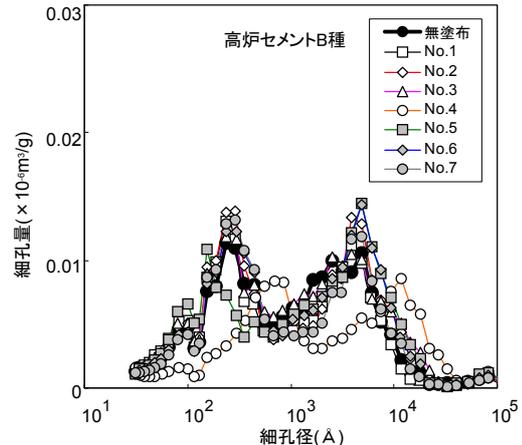
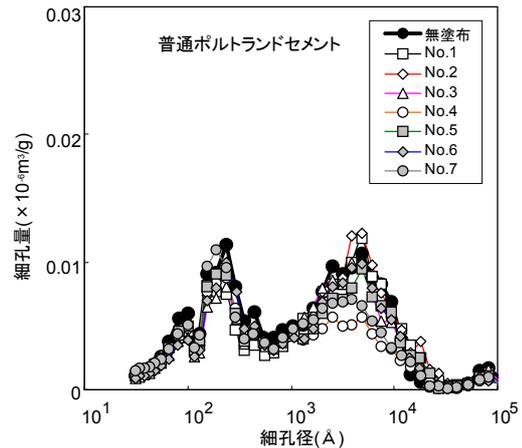


図-4 細孔分布

小さく表示されている (図-2) が、塗布材に含まれる成分はコンクリートに含浸し、細孔の充填に貢献していることが見てとれる。よって、コンクリートの改質に対してプラスの効果が付与していると評価できる。図-4 に細孔分布を示す。細孔の減少は特定の径間ではなく、全径間で生じていることが確認された。

### 3.3 プルオフ強度と細孔量の関係

図-5 にプルオフ強度の増加量と細孔の減少量との関係を示す。明瞭な比例関係はみられないが、細孔の減少効果が概ね同じであるのに対し、プルオフ強度の増進については効果に開きがあるシリーズが幾つか見受けられる。このことは、細孔量の変化は小さくとも、細孔壁への結晶の固着等、組織の固化効果は得られている場合があることを示している。

### 3.4 遮塩性

図-6 に塩化物イオンの実効拡散係数を示す。No. 6 以外においては、実効拡散係数の低減が認められた。普通ポルトにおける実効拡散係数

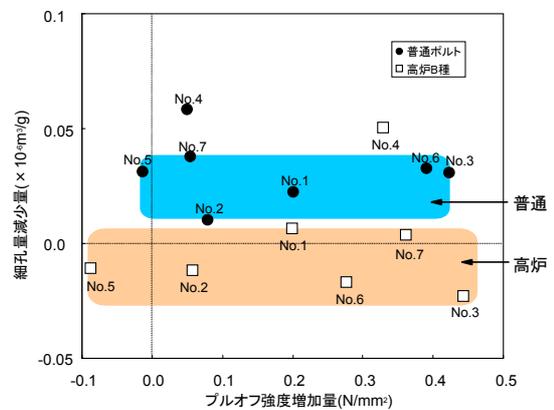


図-5 プルオフ強度増加量と細孔量減少量との関係 (付記 No は種類)

の低減率は、No. 3, 4, 7 では 24~36%, No. 1, 5 では 65~66%であった。一方、高炉 B 種は、表面含浸材を塗布しなくても、普通ポルトに比べて実効拡散係数は小さいが、No. 1, 3, 4 では 45~68%の低減効果が認められた。

### 3.5 スケーリング抵抗性

図-7 にスケーリング試験の途中結果を示す。普通ポルトは、スケーリング抵抗性が比較的高

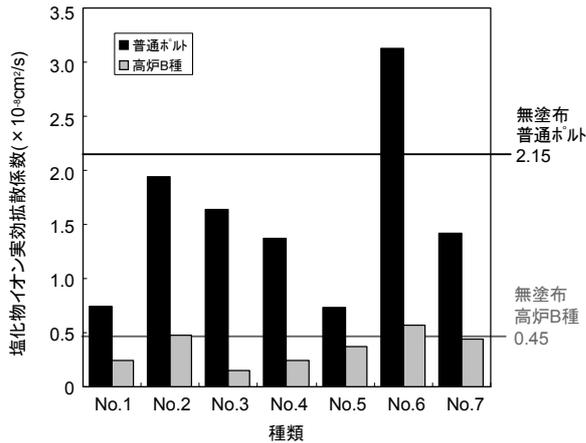


図-6 塩化物イオン実効拡散係数

い<sup>5)</sup> 関係もあり、150 サイクルの段階では大きなスケーリングが見られていない。高炉 B 種は、スケーリングを完全に抑える効果は見受けられなかったが、No. 3, 4, 5, 7 においてはスケーリングの進行を遅らせる効果が確認された。このことから、ケイ酸塩系表面含浸材は、種類にもよるが、性能が損なわれないレベルのスケーリングを許容する一方で劣化の進行を遅延化させたい部材に適すると考えられる。

しかし、種類によっては、無塗布との差が明瞭に表れないものもあった。ケイ酸塩系の場合、結晶の生成というプラスの効果がある一方で、施工時に用いる水による飽水度の上昇というマイナスの効果もあり、耐凍害性は双方のバランスで決定されると考えられる。また、今回は測定していないが、改質深さが浅い場合や生成された結晶自体の耐久性が小さい場合は下層からの氷の押し上げ圧に対する抵抗力の低下も懸念される。これら多くの要因が結果に影響したものと思われる。

### 3.6 試験結果の整理・評価

ここで、高炉 B 種の実験データをレーダーチャートで整理した。本研究では、図-8 に示すように、無塗布の実験値を 1 とし、各々の実験値をその比で表示した。プルオフ強度は 1 以上、それ以外は 1 以下が望ましいことになる。スケーリングは試験途中であるが、ここでは現時点で最長の 150 サイクルのデータを用いた。

図-9 に結果を示す。効果がみられた種類に着目すると、プルオフ強度は平均 1.56 倍 (No. 5

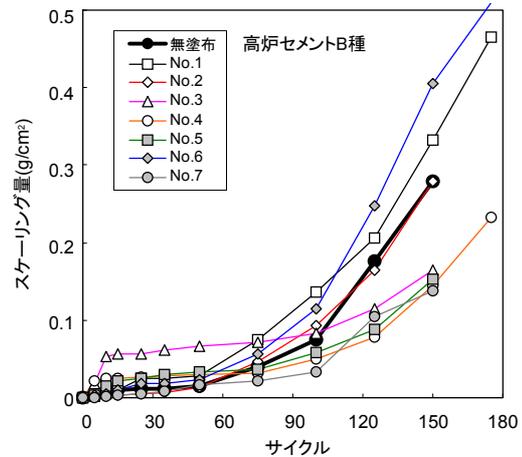
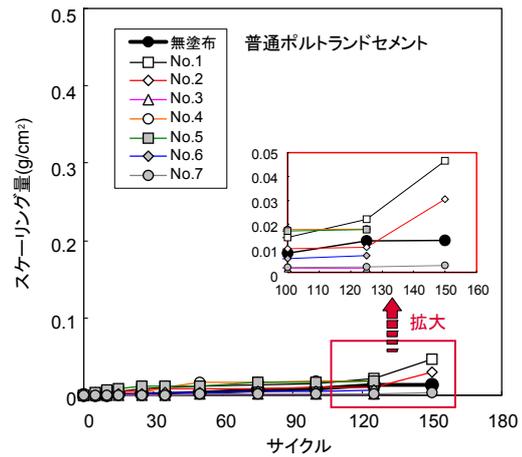


図-7 スケーリング試験結果

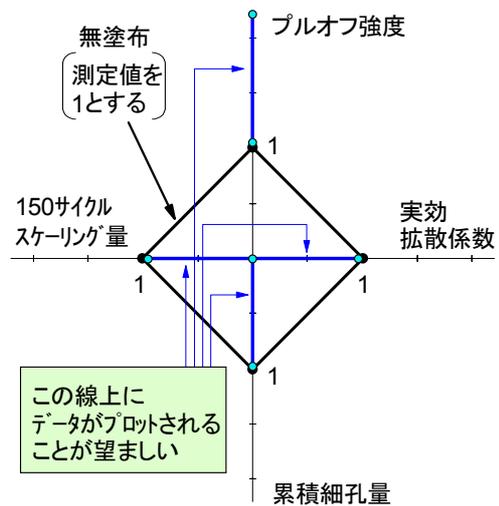


図-8 レーダーチャートの見方 (図-9)

除く) の増進、細孔量、実効拡散係数、スケーリング量は平均 0.89 倍 (No. 2, 3, 5, 6 除く)、0.56 倍 (No. 2, 6, 7 除く)、0.54 倍 (No. 1, 2, 6 除く) の低減が認められた。No. 4, 7 はいずれの項目も満足な値を示し、No. 3 は細孔量を

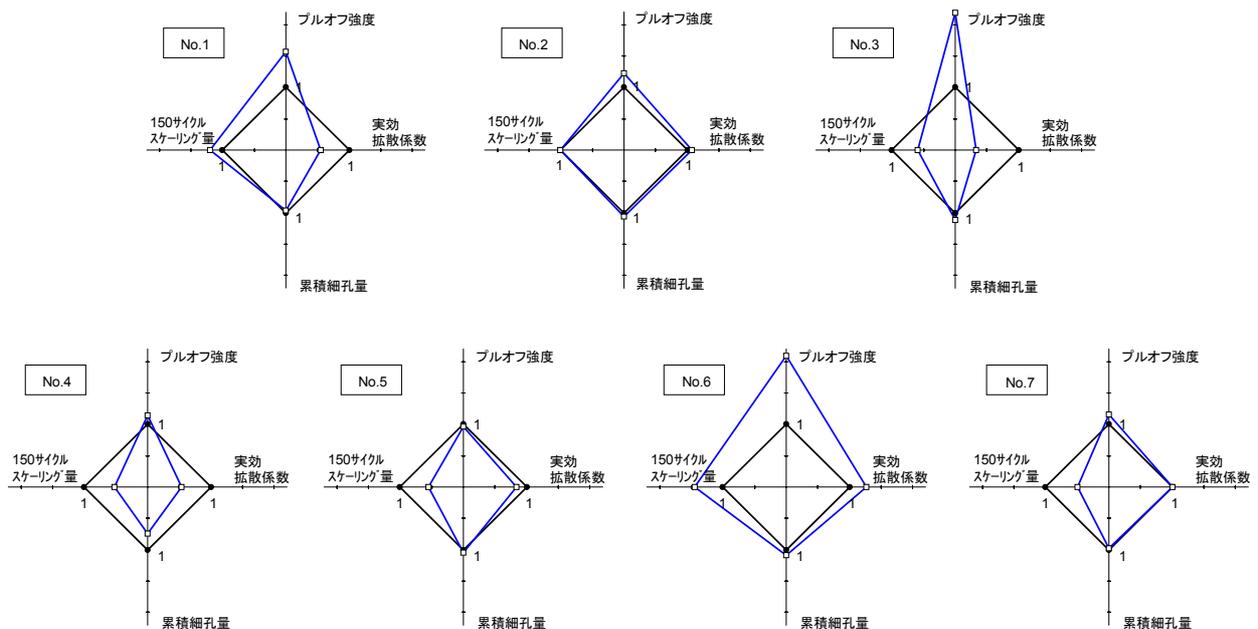


図-9 試験結果のレーダーチャート（ここでは高炉B種のみ表示）

除いては良好な結果であった。

一方、No. 1, 2, 6 のように、ブルオフ強度は増進しているが、スケーリング低減効果は小さかった種類もあった。このように、一項目の実験結果と他の効果に関連付けて説明できない場合は、個々の性能に対する効果がひと目で理解できるレーダーチャートの活用も有効と思われる。今後は、レーダーチャートと現在、並行して進めている試験施工の追跡調査の結果との関係を調べていきたいと考えている。

また、高炉B種のブルオフ強度は、塗布によって  $0.4\text{N/mm}^2$  から最大  $0.8\text{N/mm}^2$  に増加している（図-2）。しかし、スケーリングを厳しく抑制するには  $3\sim 4\text{N/mm}^2$  以上要求される<sup>5)</sup>。このことから、ブルオフ強度の大きな増進に有効な表面含浸材の開発・品質改良も望まれる。

#### 4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に記す。

- (1) ケイ酸塩系表面含浸材は、種類にもよるが、性能が損なわれないレベルのスケーリングを許容する一方で劣化の進行を遅延化させたい部材への適用が適する。
- (2) 適用性の評価にあたっては、レーダーチャートを活用する等、工夫が必要であると思われる。

謝意：今回の実験にあたり、材料の提供等ご協力をいただきましたアイロード、アイビス、アストン、ABC 商会、札幌ペック、三生化工、ジャパンザイペックス、中大実業、飛松建設、ビーブレイン、美和テック、リナック（50 音順）の関係各位に対し、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き(案), 北海道土木技術界コンクリート研究委員会コンクリート維持管理小委員会報告書, 2006. 3
- 2) 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, pp. 146, 2005. 4
- 3) 例) 遠藤裕丈, 田口史雄, 小野俊博: 美幌橋におけるシラン系表面含浸材試験施工 2 年目の評価, 第 50 回北海道開発局技術研究発表会, 2007. 2
- 4) コンクリート技術の要点'99, pp. 3-10, 日本コンクリート工学協会
- 5) 遠藤裕丈, 田口史雄, 嶋田久俊: スケーリング劣化抵抗性の予測・判定手法の一提案, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 23-30, 2006. 12