平成22年度

シラン系表面含浸材の適用による費用対効果の一試算

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　耐寒材料チーム　　田口　史雄
北海道大学大学院　工学研究院　　名和　豊春

筆者らはこれまで、吸水抑制効果が期待される簡易的な対策技術の一つであるシラン系表面含浸材によるスケーリングおよび塩害の抑制効果について、多くの検討を重ねてきた。本論文では、試験施工を行った一般国道に架かる道路橋（凍結防止剤散布）地覆コンクリートをモデルとし、鉄筋の腐食防止を要求性能に設定して、これまで得た研究成果の範囲内でシラン系表面含浸材の適用によってもたらされる費用対効果について試算を行った。その結果、吸水防止層の性能を保持するための路面排水性の管理および再塗布のインターバルの設定を適当に行うことで費用対効果が得られる等の知見が得られた。

キーワード：コンクリート、スケーリング、塩害、シラン系表面含浸材、費用対効果

1. はじめに

凍結融解と塩化物の複合作用を受けやすい寒冷地のコンクリート構造物では、スケーリングの促進や鉄筋の腐食速度の増加による耐久性の早期低下が懸念される。今後、構造物の劣化・老朽化による維持補修費の増加が予想されるが、社会基盤整備への投資額は年々減少傾向にあり、財政事情は厳しい状況にある。このため、ライフサイクルコストが最小となる費用対効果の高い適切な設計および維持管理に努めていく必要がある。

筆者らは、吸水抑制効果が期待される簡易的な対策技術の一つであるシラン系表面含浸材（以下、シランと記す）によるスケーリングおよび塩害の抑制効果について実環境下で種々の調査・実験を行い、多くの検討を重ねてきた[1)~4)]。これらの研究成果は北海道開発局道路設計要領[5)]等にとりまとめられ、社会に広く還元されているが、実務においては部材の性能保持性に対する満足度を勘案し、投じたコストが得られる便益・価値に見合っているかを総合的に評価することも大事である。

そこで本論文では、これまでに行った研究で得た成果・知見の範囲内でシランの適用によってもたらされる費用対効果について試算・評価を行ったので、その結果を報告する。

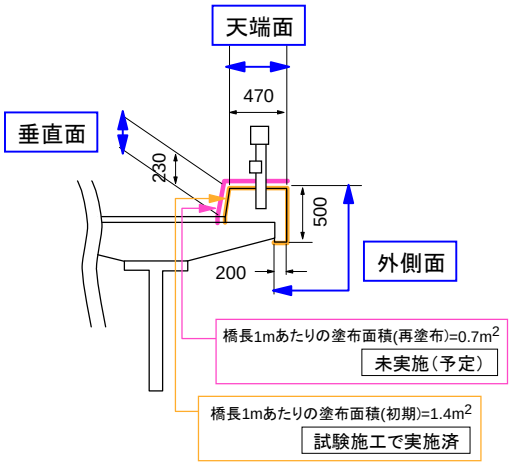

図-1　試算のモデルとした地覆の詳細図（橋長は73m）

表-1　地覆コンクリートの配合

水粉体比(%)	使用セメント	単位量(kg/m³)				
		水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材
51.4	普通	145	252	30	713	1144

粗骨材の最大寸法は40mm

2. 試算モデル

試算は、シランの試験施工を行った北海道美幌町内の一般国道39号（凍結防止剤散布路線）に架かる道路橋の地覆コンクリートをモデルに行った。**図-1**に詳細図、**表-1**にコンクリートの配合を示す。橋長は73mで、打設・養生終了後、**表-2**に示す5種類のシランの塗布作業が垂直面、天端面、外側面で実施されている（1種類あたりの施工延長は4m）。最小かぶりは5cmである。

Hirotake Endoh, Fumio Taguchi, Toyoharu Nawa

表-2　試験施工で用いたシランの仕様

	系別	有効成分 (%)	塗布量 (g/m^2)
No.1	水系	42	200
No.2	水系	43	300
No.3	水系	80	200
No.4	溶剤系	11.5	300
No.5	無溶剤系	90	400

3. 試算方法

(1) 計算手順

ここでは、鉄筋腐食の防止を要求性能とし、シランを塗布した場合、塗布しなかった場合の費用対効果をそれぞれ算出し、双方の比較を行った。

図-2 に示すパフォーマンス曲線をもとに計算手順を整理する。供用開始から任意の年数 T_x までに得られる便益を E_x（図の面積部分）、T_xにおける構造物の費用価値を C_xで定義する。C_xは式(1)より算出される[6]。

$$C_x = C_i + \sum\left[C_r \times \frac{1}{(1+n)^u}\right] - C_s \times \frac{1}{(1+n)^w} \qquad (1)$$

ここに、C_iは初期費用、C_rは T_xまでに費やした修復費、C_sは T_xにおける残存価値、nは割引率（0.04）、uは修復を実施した時の年数、w は評価を行う時点の年数（T_x）である。

残存価値は、性能の復旧に費やされる修復費は構造物の価値に含めず、構造物の価値はあくまでも初期費用のみで決定され、性能低下に伴って比例的に減少すると考え、式(2)で定義する。

$$C_s = C_i \times (1 - P_{de}) \qquad (2)$$

ここに、P_{de}は T_xにおける性能低下度（$0 \leqq P_{de} \leqq 1$）である。

ここでは鉄筋腐食の防止を要求性能としているので、深さ 5cm の塩化物イオン量が 1.2kg/m^{3}に達するまでを最大許容レベルとし、性能低下度を式(3)で定義することとした。

$$P_{de} = \frac{C(5,t)}{1.2} \qquad (3)$$

ここに、$C(5, t)$は年数 t における深さ 5cm の塩化物イオン量(kg/m^3)である。

式(1)より C_x、式(2)から得られる P_{de}の積分値（**図-2**）より E_xが得られる。よって、T_xにおける無塗布に対する塗布した場合の費用対効果の比率は式(4)から求めることができる。

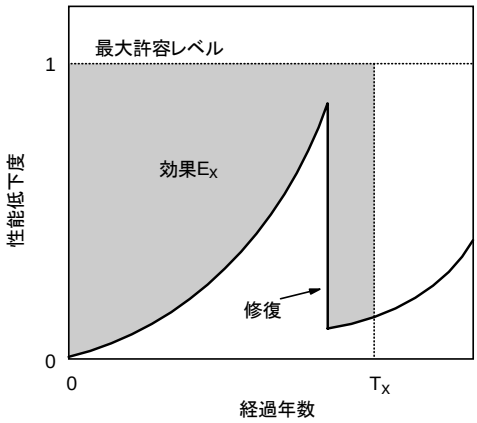

図-2　パフォーマンス曲線のイメージ

表-3　費用対効果の試算に用いた工事費

作業項目	地覆		シラン	
	新規建設	打換え	初期塗布	再塗布 (垂直, 天端)
金額(千円)	9900	19000	1600	880

・工事費はL側とR側の両地覆での作業に要する費用で仮設費、安全費、現場管理費、一般管理費等を含む

$$R_{E/C} = \left(\frac{E_x}{C_x}\right)_{coat} \Big/ \left(\frac{E_x}{C_x}\right)_{uncoat} \qquad (4)$$

ここに、$R_{E/C}$は費用対効果の比率、$(E_x/C_x)_{coat}$は塗布した場合の費用対効果、$(E_x/C_x)_{uncoat}$は無塗布における費用対効果である。

$R_{E/C}$＞1 であれば、塗布した方が費用対効果は有利であることを示す。

(2) 計算条件

a) 初期費・修復費

表-3に計算に用いた工事費を示す。地覆コンクリートの建設・修復（打換え）費は、橋梁を管轄する道路事務所が積算した工事費をもとに設定した。シランの材工費は、試験施工で使用した各製品から取り寄せた見積価格が2400～3500円/m^{2}であったことから、最大の3500円/m^{2}に設定した。

b) 塩化物イオンの浸透予測

図-3はシラン塗布後の遮塩性の評価方法の概念を示している。経過年数をt、t年後における深さxの塩化物イオン量(kg/m^3)を$C(x,t)$、コンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m^3) をC_0、コンクリート表面からの深さ(cm)をx、コンクリートにおける塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm^2/年)をD_c、吸水防止層における塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm^2/年)をD_h、吸水防止層の厚さすなわちシランの含浸深さ(cm)を t_hとすると、無塗布の場合、塗布した場合の塩化物イオン量の浸透予測式は、それぞれ式(5)および式(6)で表される[7]。

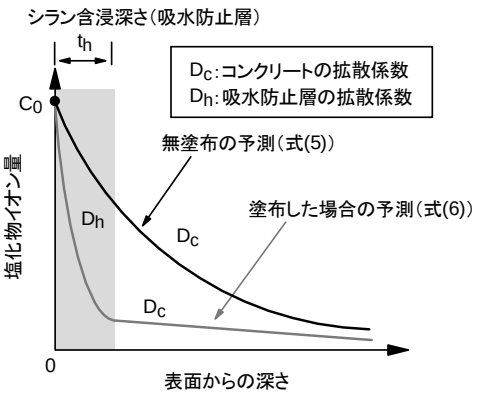

図-3　垂直面のスケーリング面積率の経年変化[7), 8)]

写真-1　5年経過時の3月に撮影した地覆全景（垂直面は露出しているのに対し、天端面は土砂で覆われている）

1) 無塗布の場合

$$C(x,t) = C_0\left(1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}}\right)\right) \tag{5}$$

2) 塗布した場合

$$C(x,t) = C_0\left(1 - erf\left(\frac{1}{2\sqrt{t}}\left(\frac{t_h}{\sqrt{D_h}} + \frac{(x - t_h)}{\sqrt{D_c}}\right)\right)\right) \tag{6}$$

（ただし、$x > t_h$）

ここに、*erf*は誤差関数である。

ここでは式(5)、式(6)により塩化物イオン量の予測を行った。計算に必要なパラメータについては後述する。

c) 試算対象のシランの選定

前述 b)の理論は、吸水防止層の品質が保持されていることを前提としている。このため、スケーリングによる吸水防止層の欠損を抑える観点から、スケーリング抵抗性に優れるシランの適用が望ましい。

図-4は試験施工後の追跡調査において調べたスケーリングの発生状況のトレースの一例、**図-5**は表面が外気に露出しやすく（**写真-1**）、車両通過時の飛沫を受けやすいスケーリングの程度が比較的大きかった垂直面のスケーリング面積率（施工面積に占めるスケーリングの面積の割合）の経年変化を示している。

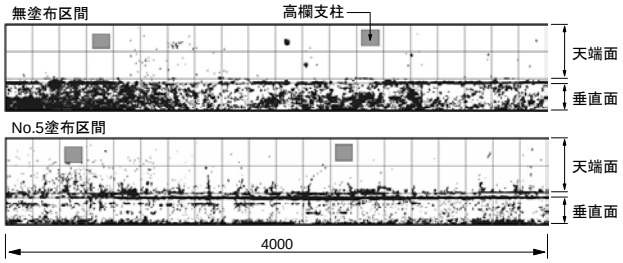

図-4　スケーリングの発生状況のトレース（5年経過）

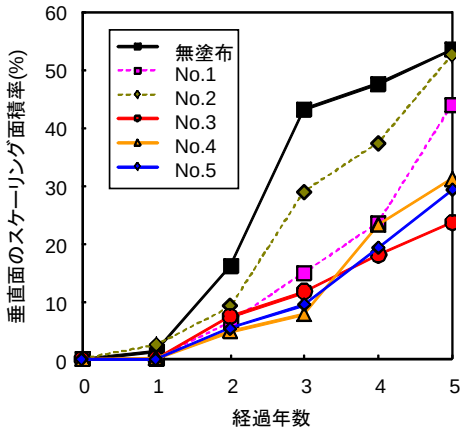

図-5　垂直面のスケーリング面積率の経年変化

写真-2　排水マスの状況（5年経過時の3月に撮影）

スケーリングの抑制効果はシランの種類によって異なり、追跡調査ではNo.3～No.5において比較的良好な結果が得られている。このうちNo.5については、これまでの研究において、材料の含浸性能と遮塩性能が最も良好であることを実験的に確認している[2), 3)]。

垂直面のトレースをみると、無塗布はスケーリングが全面的に生じているのに対し、No.5は舗装面近傍の下部にスケーリングが集中し、それより上の部分はスケーリングが比較的少ない。**写真-2**は、5年経過時の3月に撮影した路側の排水マスである。マスには土砂が堆積しており、排水性能の低下によって路面水が舗装面に溜まりやすくなり、垂直面下部が路面水と長時間接触しやすい状

表-4　無塗布区間の表面塩化物イオン量の実測値および見かけの拡散係数（追跡調査５年目に測定）

表面塩化物イオン量 C_0	6.2kg/m^3
見かけの拡散係数 D_c	0.17cm^2/年

写真-3　No.5 塗布区間から採取したコアの側面に水を拭きかけた状態（6 年経過時に採取）

態になったために集中的に被害を受けたと考えられる。

ここでは、材料の含浸性能と遮塩性能が最も良好[2),3)]で、排水性能の向上を図ることでスケーリングの進行抑制がさらに期待される No.5 を試算の対象とした。なお、これまでの研究において、シランの再塗布を定期的に繰り返すことでスケーリングの進行を大きく抑制できることを確認している[4)]。そこで、スケーリングの進行を極力抑える観点から、供用期間中はシランの再塗布を定期的に実施すると仮定して試算を行うこととした（図-5 では再塗布は実施していない）。再塗布箇所はスケーリングが進行しやすい垂直面および天端面の 2 箇所とした。

d) 塩化物イオンの浸透予測に用いたパラメータの設定

式(5)、式(6)のC_0、D_cは、無塗布の地覆から採取したコアから調べた実測値を用いた。表-4に実測値を示す。写真-3はNo.5塗布区間から採取したコアの側面に水を拭きかけた状態を示している。表面から深さ0～10mmの組織には水が付着せず、厚さ10mmの吸水防止層が表層に形成されていることがわかる。この実際の値をもとに、t_hは10mmとした。D_hについては、これまでに行った室内実験および沿岸部での暴露実験において、D_cとD_hの比は室内実験で得られる無塗布の拡散係数$D_{c\text{-}lab}$と吸水防止層の拡散係数$D_{h\text{-}lab}$の比と概ね対応する結果を得ている[3)]ことから、式(7)により求めることとした。

$$D_h : D_c = D_{h-lab} : D_{c-lab} \tag{7}$$

ここでは過年度に得た研究成果（$D_{h\text{-}lab}/D_{c\text{-}lab}$=0.011[3)]）を用いて D_h=0.17×0.011=0.002cm^2/s とした。

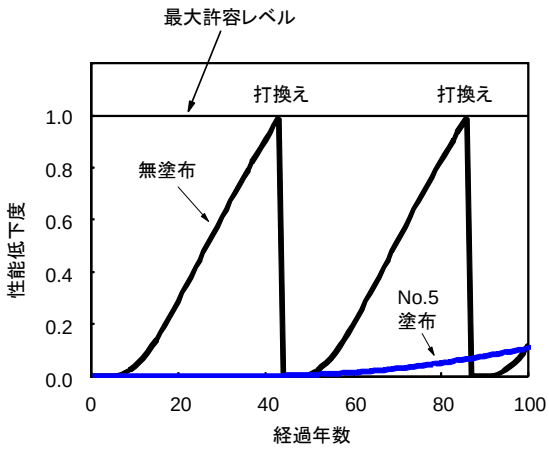

図-6　パフォーマンス曲線の算出結果

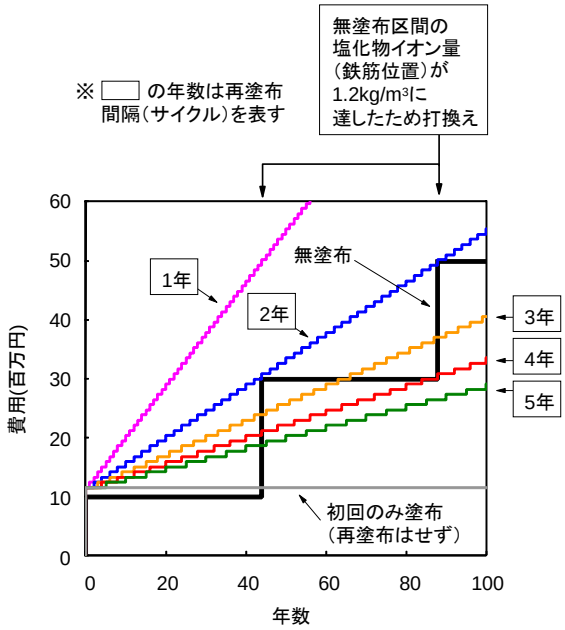

図-7　ライフサイクルコストの算出結果

4. 試算結果および考察

(1) パフォーマンス曲線

図-6にパフォーマンス曲線の算出結果を示す。無塗布は供用開始から44年後に鉄筋位置の塩化物イオンの蓄積量が1.2kg/m^{3}を上回り、性能低下度が最大許容レベルに達した。44年目に打換えの実施によって性能低下度は一旦0に回復するものの、性能低下度の増加・回復が44年周期で繰り返される予測結果が示された。

これに対して、塗布した場合は塩化物イオンの蓄積量の増加速度が大きく抑えられる結果が示された。最大許容レベルに達するまでの期間を式(6)より計算したところ317年となり、無塗布に比べて7.2倍の性能保持効果が期待される予測結果となった。

(2) ライフサイクルコスト

図-7にライフサイクルコストの試算結果を示す。44年に1回、打換えが実施される無塗布では、44年ごとに19000千円が加算される形の階段状のグラフが示された。一方、塗布した場合は、吸水防止層の性能保持のために実施されるシランの再塗布のインターバルによって結果が異なり、インターバルを1～2年に設定した場合は再塗布に要する費用が1～2年ごとに880千円加算され、高い割合でコストが年々直線的に増加し、ライフサイクルコストは無塗布を上回る予測結果となった。これに対してインターバルを3年に設定した場合は、再塗布に要する費用の経年増加の割合が緩やかになり、88年目以降は無塗布以下の費用で推移する予測結果が示された。インターバルを4～5年目とした場合、ライフサイクルコストの縮減効果はさらに大きくなり、44年目以降に要する費用は無塗布を下回る結果となった。

なお、塗布は初回のみとし、それ以降は再塗布を行わないとした場合、初期コストが無塗布に比べて1600千円高いために44年目までは無塗布に比べて価格が不利な傾向となっているが、それ以降は無塗布の費用が上回り、さらに再塗布に要する費用が発生しないために打換えまでの間（計算上は317年）、他の塗布ケースのように経年的なコストの増加が発生せず、大きなライフサイクルコスト縮減効果が期待される計算結果が示された。このことは、**写真-2**で示した排水マスの管理を入念に行い、路面水の滞留の防止に努めることでスケーリングの進行を遅らせ、再塗布のインターバルを長く設定する対応が極めて有効であることを示している。

(3) 費用対効果

図-8に費用対効果の比率の試算結果を示す。当初はいずれも初期コスト増の影響が卓越し、比率は0.2程度と小さかったが、その後は**図-6**で示した性能の保持効果が評価され、費用対効果の比率は増加の傾向を示した。再塗布のインターバルを1～2年に設定した場合は、ライフサイクルコスト増の影響が響き、費用対効果は1.0を上回らず、無塗布の方が有利となる結果となった。これに対してインターバルを3～5年とした場合は30～40年において1.0を上回り、費用対効果はシランを用いた方が高いことが示された。44年目、88年目において無塗布の性能が改善されたことに伴い、比率は一時的に減少してはいるものの1.0を下回っておらず、費用対効果が期待されることが明確に示された。

なお、無塗布はスケーリングによる表層欠損の影響を無視して試算を行っている。このため、スケーリングの影響を考慮すると、費用対効果の発現年数はさらに早まるものと考えられる。

(4) 再塗布面を垂直面のみとした場合

これまで再塗布面を垂直面と天端面とした場合の試算結果について述べてきたが、追跡調査では**図-4**で示したようにスケーリングの進行は垂直面で特に大きく、天端面は比較的緩慢であることを確認している。これは、天端面を覆っている土砂（**写真-1**）が保護の役割を果たしたものと考えられる。そこで、このような状況が今後も持続すると考え、再塗布面をスケーリングのリスクが比較的大きい垂直面のみとした場合のライフサイクルコストおよび費用対効果について試算してみた。再塗布面を垂直面のみとした場合の再塗布費は380千円で、**表-3**で示した値に比べると500千円小さい。

図-9、10に結果を示す。塗布面積の減少によってライフサイクルコストの縮減効果、費用対効果は再塗布面を垂直面と天端面とした場合に比べると大きくなり、再塗布のインターバルを2年に設定しても費用対効果が1.0を

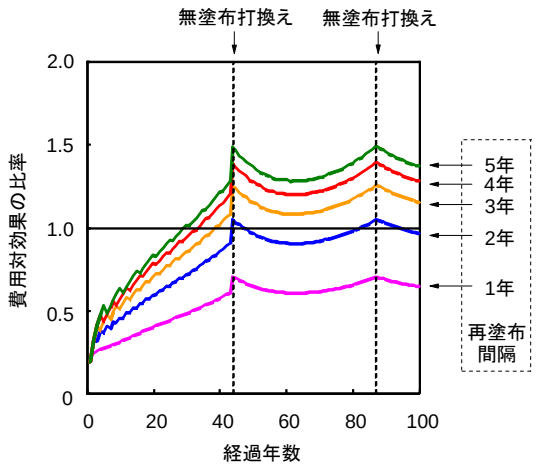

図-8　費用対効果の比率の算出結果

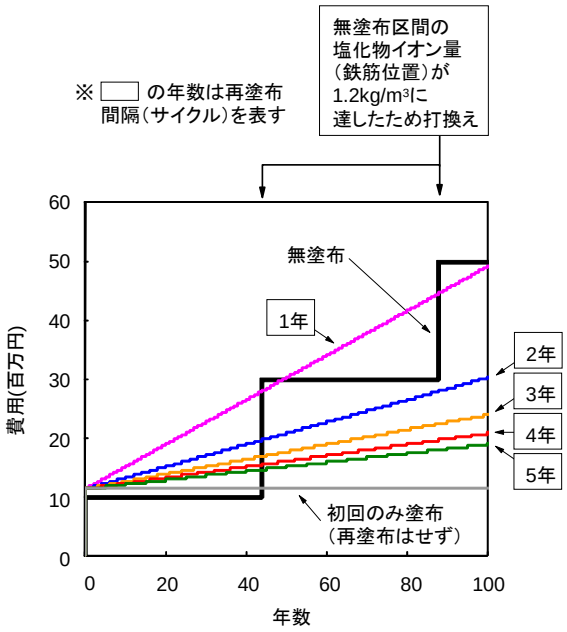

図-9　ライフサイクルコストの算出結果
（再塗布面を垂直面のみとした場合）

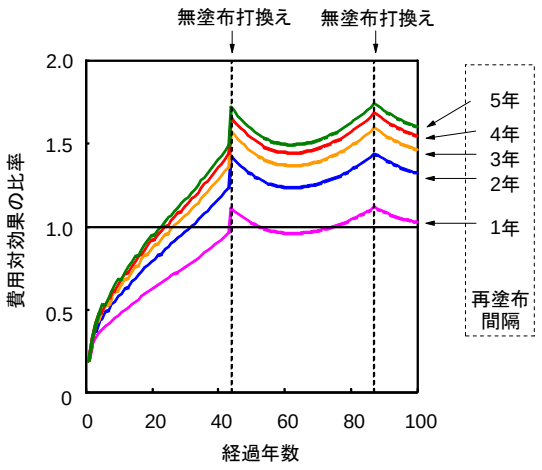

図-10　費用対効果の比率の算出結果
（再塗布面を垂直面のみとした場合）

上回る結果が示された。再塗布箇所をリスクが大きい面に限定する等、実態に即した効率的な維持管理に努めることでさらに費用対効果を高めることができることがわかった。

5. まとめ

本論文では、シランの試験施工を行った一般国道に架かる道路橋（凍結防止剤散布）の地覆コンクリートをモデルとし、鉄筋の腐食防止を要求性能に設定して、これまでに行った研究で得た成果・知見の範囲内でシランの適用によってもたらされる費用対効果について試算・評価を行った。

今回、試算の対象に選定したシランを用いた場合において得られた成果を以下に列挙する。

(1) 吸水防止層の性能を保持するための路面排水性の管理および再塗布のインターバルの設定を適当に行うことで費用対効果が得られる。

(2) 再塗布面をスケーリングの進行が特に懸念される垂直面に限定すると、費用対効果はさらに大きくなる。

6. おわりに

本論文では、シランを塗布する主な目的が凍害、塩害の防止であることに鑑み、鉄筋腐食防止を要求性能に設定し、塩化物イオン量をパロメータに費用対効果の評価を行った。もちろん、構造物に求める要求性能の種類および供用予定年数によって費用対効果は変わるため、本論文の内容はあくまでもケーススタディに過ぎないが、構造物の維持管理・耐久性の重要性が高まっている昨今においては、劣化予防・補修対策に投じたコストに対して得られる便益に関する評価は益々重視される傾向にあり、評価システムの充実に向け、より合理的な費用対効果の評価法の検討に資するデータの蓄積が今後も望まれる。

参考文献

1) Endoh, H. and Taguchi, F. : The Effect of Using Surface Penetrate Materials (Silane Type) to Control the Scaling of Wheel-Guard Concrete on Highway Bridges, *The 6th International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, Vol.2, pp.1149-1156, 2010.6

2) 遠藤裕丈，田口史雄：シラン系表面含浸材の含浸性状とコンクリートの品質との関係，平成 18 年度土木学会北海道支部論文報告集，第 63 号（CD-ROM），2007.1

3) 遠藤裕丈，田口史雄，小野俊博：表面含浸材を施工したコンクリートの塩化物イオンの拡散予測に関する基礎的研究，第 51 回（平成 19 年度）北海道開発局技術研究発表会発表概要集（CD-ROM），2008.2

4) 遠藤裕丈，田口史雄，谷本俊充：寒冷環境下でのシラン系表面含浸材の試験施工 1 年目の評価，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・浸透性吸水防止材に関する論文，コンクリートライブラリー68, pp.237-254，2006.4

5) 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

6) Hudson, W. R., Haas, R. and Uddin, W.（訳者：笠原篤，池田拓哉，菊川滋，田村亨，八谷好高）：Infrastructure Management（社会資本マネジメント，維持管理・更新時代の新戦略），森北出版，pp.282-284，2001.6

7) 北海道土木技術会 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：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)，2006.3

8) 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 No.68，2006.4