

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検討

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
 北海道開発局 建設部 道路維持課 小野 俊博

1. まえがき

近年、耐久性の低下に伴い、補修・更新を必要とするコンクリート構造物は増加傾向にある。積雪寒冷地のコンクリート構造物は特に凍害および凍害・塩害の複合劣化を受けやすい厳しい環境下におかれていることから、補修・更新費の増大が予想されている。このことから、事後的な維持管理から予防保全的な維持管理への転換や構造物の延命化を図って補修・更新費を最小化させる等、ライフサイクルコストに配慮した検討が一層強く求められており、コンクリート構造物の合理的・効率的な維持管理は道路行政における重要な課題である。

凍害および凍害・塩害の複合劣化を抑制する技術はいくつかあるが、その一つに、シラン系表面含浸材による対策工がある。これは、吸水抑制効果を発揮する材料をコンクリートの表層に含浸させ、水や塩分等の劣化因子の浸透を抑制することで部材の延命化を図る工法である。この材料の特徴として、①材工費が比較的安価で施工が容易である、②材料が無色透明のため構造物の美観が損なわれず、施工後も表面の状況を観察できる、③浸透性の材料であるためコンクリート内部では紫外線劣化がほとんどない、④被覆材とは異なり水蒸気透過性が付与されるため、コンクリート内部に滞留する水分に起因する劣化の抑制が期待できる、等が挙げられる¹⁾。

このようなことから、北海道開発局の管轄橋梁における平成 18、19 年度の本工法の施工件数は約 140 橋、施工面積は地覆や剛性防護柵を中心に約 29,000m²に及んでおり、対策工の一つとして広く普及しつつある。さらに、2005 年 4 月に表面保護工法設計施工指針(案)²⁾の発刊、2007 年 4 月に北海道開発局道路設計要領への「道路橋での表面含浸材の適用にあたっての留意事項」³⁾の収録等、規準類の整備も進められている。

一方、耐久性の照査に関しては、室内試験における初期性能の評価や現場での実績等を参考に、大まかな見通しを立てて対応しているのが現状である。このため、実際の環境下における耐久性の照査に関しては、定量的に評価できていない状況にあり、寒冷地における合理的な耐久設計の実現に向けて、照査手法の整備が求められている。

本研究では、耐久性の照査手法の確立に向けた検討の一環として、シラン系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して基礎的な検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 検討の概要

現在、コンクリート中への塩化物イオンの浸透性については、Fick の第 2 法則の解

である式(1)に基づいて照査が行なわれている。

$$C(x,t) = C_o \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right) \quad (1)$$

ここに、 $C(x,t)$ は t 年後における深さ x の塩化物イオン量(kg/m^3)、 C_o は表面塩化物イオン量(kg/m^3)、 erf は誤差関数、 x はコンクリート表面からの深さ(cm)、 D_c は塩化物イオンの見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 t は経過年数である。

図-1は表面保護工法を適用した場合の塩化物イオンの浸透モデルの概念を示している⁴⁾。表面含浸材を施工すると、表面付近には吸水抑制層が形成される。

この吸水抑制層と表面含浸材が浸透していないコンクリート部分は、塩化物イオンの見かけの拡散係数が互いに異なるため、検討に際しては、拡散係数をそれぞれ分けて設定する必要がある。ここで、吸水抑制層における塩化物イオンの見かけの拡散係数を $D_h(\text{cm}^2/\text{年})$ とすると、コンクリート表面から深さ x の塩化物イオン量をFickの第2法則の解の形で表現すると、式(2)のようになる。

$$\begin{cases} \text{i) } 0 \leq x \leq t_h \text{ の場合} \\ C(x,t) = C_o \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_h \cdot t}} \right) \right) \\ \text{ii) } x > t_h \text{ の場合} \\ C(x,t) = C_o \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{t_h}{\sqrt{D_h}} + \frac{(x-t_h)}{\sqrt{D_c}} \right) \right) \right) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 t_h は吸水抑制層の厚さ、すなわち表面含浸材の含浸深さ(cm)である。

また、表面保護材による塩化物イオンの浸透抑制効果をコンクリートのかぶり厚さに置き換え、等価かぶりで評価する考え方も提案されている。既往の文献では、等価かぶりは式(3)で示されている⁵⁾。

$$t_{hc} = t_h \times \sqrt{\frac{D_c}{D_h}} \quad (3)$$

ここに、 t_{hc} は等価かぶり(cm)である。 t_{hc} には t_h も含まれており、 t_{hc} から t_h を差し引いた値が、表面含浸材によってもたらされたかぶりの増量効果となる。

なお、これらの概念を設計要領に組み入れるには、吸水抑制層の厚さはもとより、吸水抑制層における塩化物イオンの見かけの拡散係数 D_h を把握できることが不可欠である。しかし、 D_h の算出方法について検討がなされた事例は殆ど見当たらない。表面含浸材の試験方法を定めたJSCE-K 571-2005には、塩化物イオンの浸透深さの測定

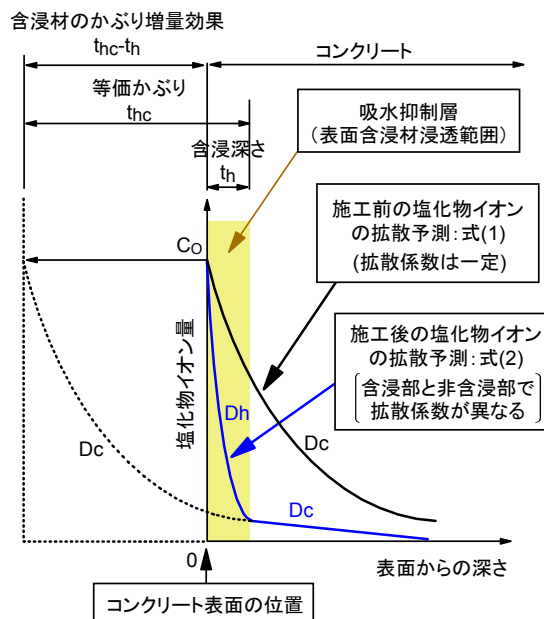


図-1 塩化物イオン浸透モデル概念⁴⁾

方法は記載されているが、 D_h の算出方法には触れられていない。

そこで、本研究では、まず D_h の算出方法について検討するため、室内試験を行った。次に、室内での検討結果の検証を行うため、日本海沿岸に位置する増毛暴露実験場にて暴露試験を行った。なお、表面含浸材の効果の検討にあたっては、本来、吸水抑制層の経時的な性能低下の影響も考慮する必要があるが、現段階ではこれらに関する耐久性検討が不十分であることから、この報告では、検討段階の初期性能を保持したという仮定に基づいて検討を行っている。

3. 室内試験

3.1 試験概要

(1) 使用材料

表-1 に供試体のコンクリート配合を示す。水セメント比は、既報⁶⁾で報告した試験施工橋梁の地覆の配合の平均をとって45%とした。セメントは北海道の道路構造物で広く使用されている高炉セメントB種を用いた。細骨材は苫小牧市錦岡産の海砂（密度 2.70g/cm^3 、吸水率 0.89%）、粗骨材は小樽市見晴産の砕石（密度 2.68g/cm^3 、吸水率 1.07%、最大粒径 25mm）を使用した。

表-2 は試験で使用した表面含浸材を示している。いずれもシラン系で、内訳は、水系が3種類、溶剤系が2種類、無溶剤系が1種類である。表面含浸材は材齢14日に塗布した。なお、本検討では、材料のみの評価ではなく、施工法を含めた工法としての評価を目的としているため統一の仕様は設けず、各メーカーの推奨仕様に基づいて塗布を行っている。

(2) 供試体・試験方法

供試体は $10\times 10\times 40\text{cm}$ 、 $22\times 22\times 10\text{cm}$ の2種類を作製し、それぞれの打設面に表面含浸材を塗布した。試験は、表面含浸材の含浸深さ測定と塩化物イオン浸透試験を行った。試験はいずれも材齢28日より行った。表面含浸材の含浸深さは、コンクリートカッターを用いて、 $10\times 10\times 40\text{cm}$ を打設面に対して垂直方向に切断し、切断面に水を拭きかけ、撥水を呈している部分を表面含浸材の浸透範囲と判断し、含浸深さを測定した。一方、塩化物イオン浸透試験は、図-2に示すように、 $22\times 22\times 10\text{cm}$ の打設面に枠（幅 2.5cm、高さ 2cm）を設置し、3%塩化ナトリウム水溶液を厚さ 6mm 溜めることで塩化物イオンを浸透させた。浸透日数は、林らの研究⁷⁾を参考に90日に設定した。その後、試料を切り出し、塩化物イオンの浸透深さおよび塩化物イオン量を測定した。塩化物イオンの浸透深さはEPMAにより求めた。塩化物イオン量の測定はJCI-SC

表-1 供試体のコンクリート配合

W/C (%)	セメント	単用量 (kg/m^3)			
		W	C	S	G
45	BB	140	320	820	1073

表-2 試験に用いた表面含浸材

記号	系別	総塗布量 (kg/m^3)
No.1	水系	0.20(2回塗り)
No.2		0.30(2回塗り)
No.3		0.20(1回塗り)
No.4	溶剤系	0.30(2回塗り)
No.5		0.20(1回塗り)
No.6	無溶剤系	0.40(1回塗り)

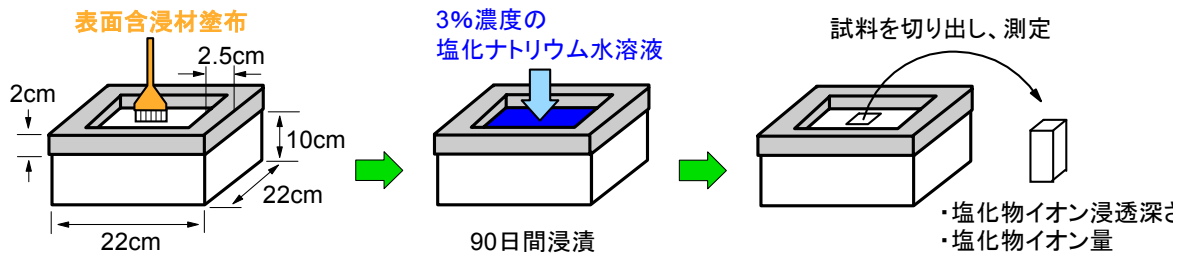


図-2 塩化物イオン浸透試験の方法

4 (硝酸銀滴定法) に準じた。

3. 2 試験結果・考察

(1) 表面含浸材の含浸深さ

図-3 に表面含浸材の含浸深さの測定結果を示す。いずれの材料も、表層には吸水抑制層が形成されていた。その深さは、No.6 は約 6.5mm と最も大きく、それ以外は約 1.5~3mm であった。

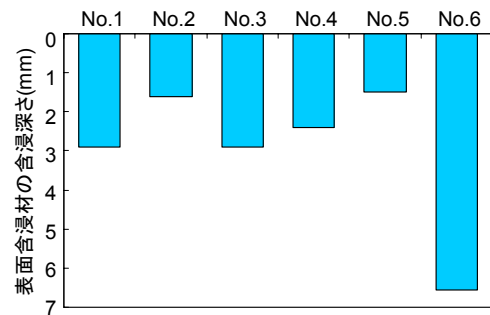


図-3 表面含浸材の含浸深さ

(2) 塩化物イオンの浸透深さ

図-4 に EPMA 画像から求めた塩化物イオンの浸透深さを示す。画像の寸法は 20×20mm である。塗布した供試体の浸透深さはいずれも 10mm 未満で、No.6 は 1mm 未満と極めて小さかった。

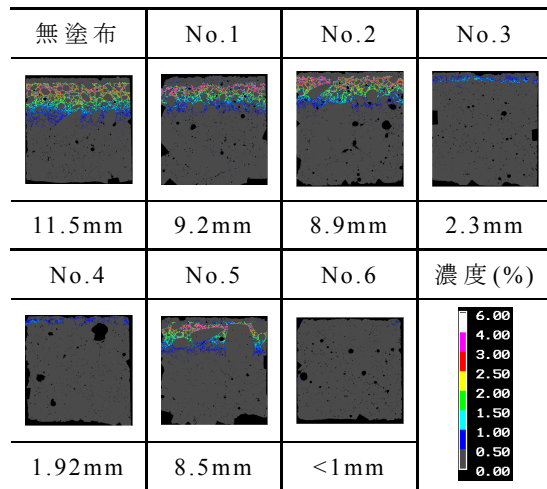


図-4 塩化物イオンの浸透深さ

(3) 拡散係数の算出に関する検討

見かけの拡散係数は、深さ方向に概ね 10~20mm 間隔でコンクリートをスライスし、各々のスライス片に含まれる塩化物イオン量を測定して深さ方向の塩化物イオン量の分布をグラフ化し、式(1)の Fick 式にあてはめて算出するのが一般的である⁸⁾。しかし、図-4 で示したように表面含浸材を塗布した供試体の塩化物イオンの浸透深さは 10mm 未満と極めて浅く、このスライス法の適用は困難である。

そこで、本研究では、図-5 に示す方法で拡散係数の算出を試みた。はじめに、厚さ 10mm で試料をスライスし、スライス片に含まれる塩化物イオン量を求める。ここで、塩化物イオン量の測定値を $C\text{kg/m}^3$ 、塩化物イオンの浸透深さを $d\text{mm}$ (図-4) とする。測定で得た塩化物イオン量は、スライス片に万偏なく浸透しているものではなく、深さ $0\sim d\text{mm}$ の範囲に集中的に蓄積されている。よって、深さ $0\sim d\text{mm}$ の範囲の塩化物イオン量は体積補正により $10C/d\text{kg/m}^3$ となる。ここで、 $d\text{mm}$ より深い位置の塩化物イオン量を 0kg/m^3 と仮定し、塩化物イオンの濃度分布を便宜上、直線で近似できるとみなすと、図-5 の右に示すグラフが得られ、最も浅い深さの測定位置 (ここで

厚さ 10mm で試料をスライスし、スライス片に含まれる塩化物イオン量を求める。ここで、塩化物イオン量の測定値を $C\text{kg/m}^3$ 、塩化物イオンの浸透深さを $d\text{mm}$ (図-4) とする。測定で得た塩化物イオン量は、スライス片に万偏なく浸透しているものではなく、深さ $0\sim d\text{mm}$ の範囲に集中的に蓄積されている。よって、深さ $0\sim d\text{mm}$ の範囲の塩化物イオン量は体積補正により $10C/d\text{kg/m}^3$ となる。ここで、 $d\text{mm}$ より深い位置の塩化物イオン量を 0kg/m^3 と仮定し、塩化物イオンの濃度分布を便宜上、直線で近似できるとみなすと、図-5 の右に示すグラフが得られ、最も浅い深さの測定位置 (ここで

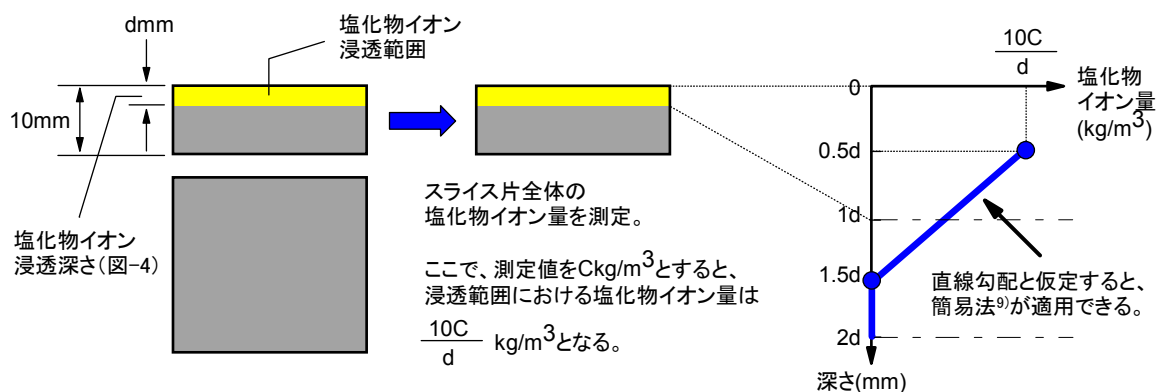


図-5 本研究で検討した吸水抑制層の見かけの拡散係数の算出方法の考え方

は $0 \sim d$ mm の中間をとり $0.5d$ mm) を仮想表面とし、この位置の測定値 $10C/d \text{ kg/m}^3$ を式(2)の i) 式の C_0 とし、 D_h に任意の値を代入して仮想表面からそれぞれの深さ (ここでは $0.5d \sim 1.5d$ mm 間) の塩化物イオン量を計算で求め、実測値 (ここでは直線上の値) との残差平方和が最小になるまで D_h を変化させる方法で拡散係数を決定する簡易法⁹⁾が適用できると考えた。本研究ではこの考え方によって吸水抑制層の拡散係数 D_h を算出する簡易的な計算プログラム (図-6:ただし単位は深さが cm、拡散係数が $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ になっている) を独自に作成し計算を行った。

なお、図-5 のグラフは 2 点を直線で結んだもので、厳密には Fick 式に従うと、直線の内側 (原点側) に弧を描く形の分布となるが、直線分布は Fick 式の分布に比べて安全側の評価を行っていると判断し、直線分布から得られる値を D_h とした。また、No.1、2、5 は、塩化物イオンの浸透範囲が吸水抑制層の厚さを上回っているが、ここでは濃度分布は一律直線と仮定しているので、吸水抑制層内の濃度分布も傾きが同じ直線分布となる。よって、これらについても直線分布から求められる計算値を D_h とすることとした。

表-3 にスライス片の塩化物イオン量の測定結果、拡散係数および等価かぶりの算

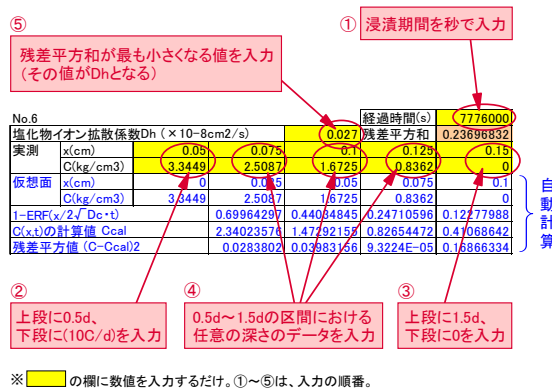


図-6 本研究にて作成した D_h の簡易計算プログラムの画面の一例

表-3 拡散係数および等価かぶり

種類	C	D_h	D_c	t_h	t_{hc}
無	12.3	—	0.85	—	—
No.1	10.5	0.73	0.85	0.29	0.31
No.2	10.8	0.66		0.16	0.18
No.3	2.7	0.04		0.29	1.28
No.4	2.0	0.03		0.24	1.24
No.5	8.6	0.60		0.15	0.17
No.6	0.3	0.01		0.66	6.41

C: スライス片の塩化物イオン量 (kg/m^3)

D_h : 吸水抑制層における拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

D_c : 非含浸部における拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

t_h : 吸水抑制層の厚さ (cm)

t_{hc} : 等価かぶり (cm)

出結果を示す。なお、No.6の d 値は便宜上、1mmとしている。吸水抑制層の拡散係数は非含浸部よりも小さく、No.1、2、5は非含浸部に比べて14～29%、No.3、4、6は94～98%小さい。ここで、等価かぶりから含浸深さを差し引くと、今回の室内試験では、No.3、4はかぶりを約1cm、No.6は約6cm増厚した場合に相当する効果が得られることが認められた。その効果は、吸水抑制層の厚さが大きいほど高いことがわかる。

4. 暴露試験

次に、室内での検討結果の検証を行うため、実環境下にて暴露試験を行った。

4.1 試験概要

暴露試験は、増毛暴露実験場（増毛町）において2005年11月より開始した。この実験場は、一般国道231号沿いの日本海沿岸部に位置し、冬期の最低気温はおおよそ -10°C で、強い季節風が吹きやすく、凍害・塩害の複合劣化を受ける厳しい環境下に立地している。

供試体の寸法は $10\times 10\times 40\text{cm}$ とした。配合、表面含浸材の塗布面、塗布方法は前述した室内試験に同じである。ここでは、飛来塩分の供給面を打設面に限定するため、打設面以外はエポキシ樹脂でコーティングしている。なお、エポキシ樹脂は毎年1回、塗り替えを行っている。材齢28日経過後、増毛暴露実験場の架台に供試体を据え付けた（図-7）。架台は鉄筋コンクリート製で厚さが10cm、幅が25cm、長さは5mである。暴露試験は、長期耐久性の検討を目的に実施しており、現在も継続している。

本研究では、暴露2年目における塩化物イオン量の測定結果について述べる。打設面から深さ方向へ1cm間隔でコンクリートをスライスし、JCI-SC4（硝酸銀滴定法）に準じて深さ0～4cm区間の塩化物イオン量を測定した。

4.2 試験結果・考察

図-8は暴露2年目の供試体の塩化物イオンの総蓄積量を示している。無塗布の総蓄積量を1とすると、No.2の総蓄積量は1であったが、No.1は0.8、No.3は0.4、No.4は0.6、No.5は0.8、No.6は0.1と無塗布を下回っており、塗布の効果が認められた。

図-9は室内での検討結果（図-5、表-3）をもとに算出した暴露2年目の塩化物

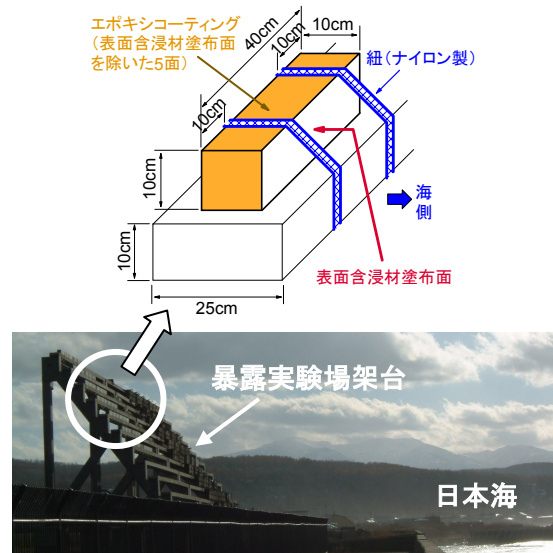


図-7 増毛暴露実験場
および供試体の据付け方法

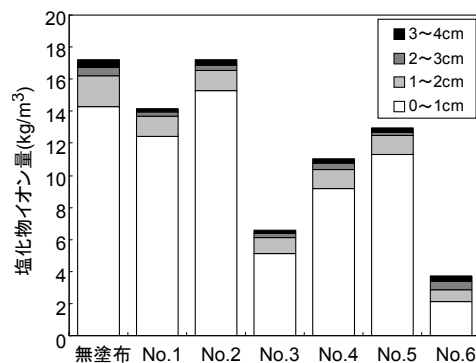


図-8 塩化物イオンの総蓄積量

イオン量の予測値である。式(1)、式(2)の C_0 、 t については、 C_0 は 31kg/m^3 (増毛暴露実験場での実測値)、 t は 2 年を代入している。図-10 は暴露 2 年目の供試体の深さ方向の塩化物イオンの濃度分布の実測値を示している。図には予測値(図-9)も実線で重ね合わせて示した。予測値は、全体的に実測値よりも大きく、2 年経過の評価ではあるが、室内で検討した考え方(図-5)は、実環境下での耐久性を概ね安全側に評価していた。しかし、No.6 以外の比率(実測値/予測値)は、深さ 0.5cm で 0.4~0.9、深さ 1.5cm で 0.1~0.3 と安全率は全体的に高めであった。無塗布の供試体の見かけの拡散係数は、室内での予測値は $0.85\text{cm}^2/\text{年}$ で、示方書の回帰式から得られる値 ($0.42\text{cm}^2/\text{年}$)¹⁰⁾ に比べるとやや高めだが、暴露試験における実測値はこれらよりも小さい $0.11\text{cm}^2/\text{年}$ であった。これは、気中に曝す暴露試験に比べて、3%塩化ナトリウム水溶液に常時浸す室内試験の方が環境的に厳しかったことが関係しているように思われる。

そこで、式(4)により吸水抑制層の見かけの拡散係数ならびに予測値の補正を試みた。

$$D_h' = D_h \times \frac{D_c'}{D_c} \quad (4)$$

ここに、 D_h' は吸水抑制層の見かけの拡散係数の補正值 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 D_c' は暴露試験における無塗布の供試体の見かけの拡散係数の実測値 ($\text{m}^2/\text{年}$) である。

図-10 の破線 (No.1~6) は補正後の予測値を示している。No.3、4、6 の深さ 0.5cm を除いて、補正した予測値は実測値に近い値を示した。深さ 0.5cm のデータは、深さ 0~1cm のスライス片全体の平均値を表しているが、No.3、4、6 は室内試験では塩化

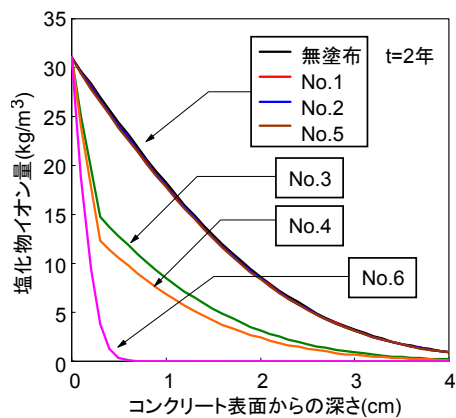


図-9 室内試験から求めた予測値

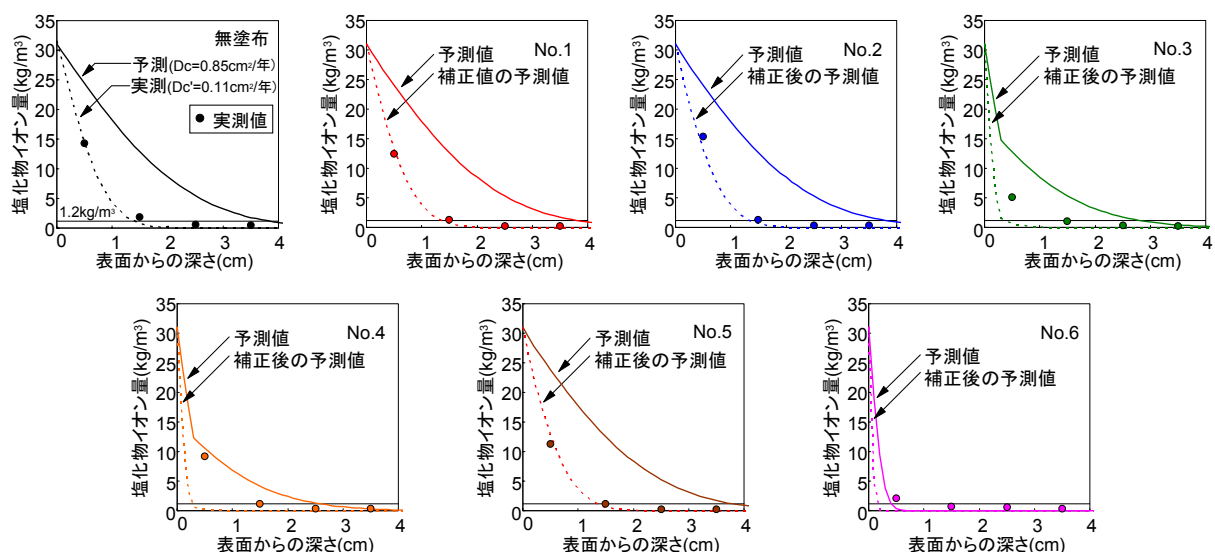


図-10 暴露供試体の暴露 2 年目における深さ方向の塩化物イオン量の分布

物イオンの浸透深さが極めて小さかった種類であり（図-4）、深さ 0～1cm に万偏ではなく、深さ数ミリの表面薄層に塩化物イオンが蓄積されている可能性が考えられる。

5. まとめ

シラン系表面含浸材を施工したコンクリートの耐久性照査手法の確立に向けた検討の一環として、塩化物イオンの拡散予測に関する基礎的な検討を行った。検討結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 塩化物イオンが浸透している深さ数ミリ層の塩化物イオン量(kg/m^3)を算出し、その直下の層の塩化物イオン量をゼロと仮定して濃度分布を直線とみなし、簡易法⁹⁾を適用して吸水抑制層の拡散係数を算出する考え方を提案した。
- (2) 吸水抑制層の拡散係数は、非含浸層に比べて小さい値となった。表面含浸材によるかぶりの増量効果は、最も大きいもので約 6cm であった。また、かぶりの増量効果は吸水抑制層の厚さが大きいほど高い傾向にあった。
- (3) 室内での検討結果をもとに暴露 2 年目の供試体の深さ方向の塩化物イオンの濃度分布を予測したところ、実測値よりも高めの値が示された。ここで、無塗布の供試体の拡散係数の比率（実測値/予測値）を各々の吸水抑制層の拡散係数に乘じ、各々の予測値の補正を試みたところ、概ね実測値に近い値が示された。

今後は、補正の考え方や吸水抑制層の性能低下を考慮した予測方法の検討を行い、耐久性の照査手法をとりまとめ、現在の要領³⁾のフォローアップを図る考えである

参考文献

- 1) 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 68，p.4，p.126，2006.4
- 2) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー119，2005.4
- 3) 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」，pp.3-コ-B-1～3-コ-B.13，2007.4
- 4) 文献 2) pp.113-114，
- 5) 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)，p.5-27，2006.3
- 6) 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
- 7) 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，コンクリート技術シリーズ 59 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，pp.45-54，2004.2
- 8) 文献 5)，pp.3-28-3-29
- 9) 小林豊治，米澤敏男，出頭圭三：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 3 鉄筋腐食の診断，森北出版，p.181，1993
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，p.80，2001.1