

実橋における有機系表面被覆材の遮塩性に関する一調査事例の紹介

Report on Investigation of Chloride Resistance by the Organic Surface Coating in existing bridge

(株) ドーコン ○正会員 小林 竜太 (Ryuta Kobayashi)
 (株) ドーコン 正会員 井上 雅弘 (Masahiro Inoue)
 (独) 北海道開発土木研究所 正会員 小尾 稔 (Minoru Obi)
 (独) 北海道開発土木研究所 正会員 田口 史雄 (Fumio Taguchi)
 (独) 北海道開発土木研究所 正会員 嶋田 久俊 (Hisatoshi Shimada)
 北海道開発局小樽開発建設部 非会員 萬 直樹 (Naoki Yorozu)

1. はじめに

海岸線に位置する既設道路橋のコンクリート部材は、飛来塩分の影響を受けるため塩害による早期劣化が問題となっている。特に北海道の日本海岸に位置する構造物は、寒冷な気候に加えて冬季の季節風による飛沫や飛来塩分の影響を受ける過酷な自然環境下にあることから、適切な維持管理が求められている。一方、塩害劣化対策としては、コンクリート中への塩分浸透量が比較的小さい場合には表面保護工が有効とされているものの、実構造物に適用する場合にはその遮塩性や耐久性を時間軸で適切に評価し得るデータの蓄積が乏しいのが現状である。

今回、北海道の日本海岸に位置し桁製作後約 20 年が経過したコンクリート橋に対して、塩害対策として用いた有機系表面被覆材の遮塩性に着目した調査を実施する機会を得たので、ここに一事例としてその調査結果の概要について報告する。

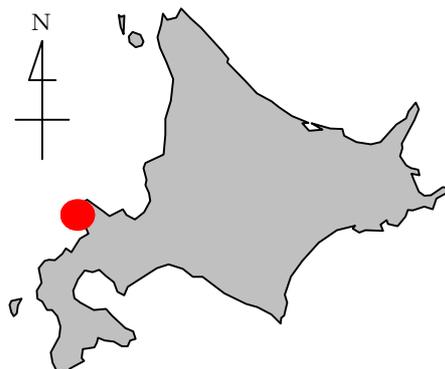


図-1 調査対象橋梁の位置図

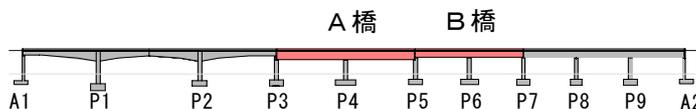


図-2 橋梁側面図および調査箇所 (A 橋, B 橋)

2. 有機系表面被覆工を施した橋梁の概要

2.1 橋梁諸元

本橋は図-1に示すように日本海岸の海岸線上に架橋されており、寒冷でかつ冬季には季節風による波浪の飛沫が直接橋体にかかる厳しい塩害環境下にある。図-2には橋梁側面図を示している。上部工施工は昭和 56 年 (1981 年) に着工し、5 年後の昭和 60 年 (1985 年) に完成しているが、工事途中で発刊された「道路橋の塩害対策指針 (案)」 (日本道路協会 : S59 年 2 月) の仕様を一部取り込んだ諸元となっている。

すなわち、表-1に示すように昭和 59 年の指針発刊の年に製作した A 橋に関しては、当初から主桁にエポキシ樹脂塗装鉄筋を採用しており、桁製作後 14 年間無塗装暴露の後、翌年に表面被覆を実施している。従って、本調査を実施するまでに 6 年が経過している。

一方、昭和 59 年の指針発刊の前年に製作した B 橋に関しては、主桁が無塗装鉄筋であることから、主桁製作後 3 年間無塗装暴露の後に、塩害対策として初回の表面被覆を実施して 14 年間経過した後の翌年に重ね塗りを含む塗装塗替を実施している。従って、本調査までに 4 年間、塗装期間合計 18 年が経過している。

表-1 橋梁諸元と本調査時期との関係

	A 橋	B 橋
構造形式	2 径間連続 PC 合成桁	2 径間連続 PC 合成桁
支間	2@44.6m	2@34.6m
幅員	全幅員 8.2m, 有効幅員 7.0m	
コンクリート	主桁 : $\sigma_{ck} = 40\text{N/mm}^2$	
主桁鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋	無塗装鉄筋
製作・架設	桁製作 : S59(1984) 桁架設 : S60(1985)	桁製作 : S58(1983) 桁架設 : S59(1984)
補修履歴	初回塗装 H10(1998) エポキシ樹脂塗装	初回塗装 S61(1986) ビニルエステル樹脂塗装 塗替塗替 H12(2000) エポキシ樹脂塗装
本試験 H16(2004)	桁製作後 20 年経過 無塗装期間 14 年間 塗装期間 6 年間	桁製作後 21 年経過 無塗装期間 3 年間 初回塗装期間 14 年間 塗替塗装期間 4 年間 塗装期間合計 18 年間

2. 2 上部工の塗装仕様

表-2に上部工（主桁）の塗装仕様を示す。

表-2 調査対象とした主桁の塗装仕様

	塗装系等	塗装工程
A 橋	初回塗装 H10(1998)施工 エポキシ樹脂系 仕様: 塩害対策 C 種 ¹⁾	プライマー: エポキシ樹脂プライマー パテ: エポキシ樹脂パテ 中塗: 柔軟形エポキシ樹脂中塗塗料 (160μm×3層=480μm) 上塗: ポリウレタン樹脂系上塗塗料 (30μm)
B 橋	初回塗装 S61(1986) ビニルエステル樹脂系 仕様: 土木学会北海道支部 塗装材調査委員会 ²⁾	プライマー: 一液性ポリウレタン樹脂プライマー パテ: ビニルエステル樹脂パテ 中塗: 厚膜型ビニルエステル樹脂中塗塗料 (ガラスフレーク入り) (200μm×3層=600μm) 上塗: フッ素樹脂系上塗塗料 (30μm)
	塗替塗装 H12(2002)施工 エポキシ樹脂系 仕様: 塩害補修 1 種 ³⁾	プライマー: エポキシ樹脂プライマー パテ: エポキシ樹脂パテ 中塗: 柔軟形エポキシ樹脂中塗塗料 (60μm×3層=180μm) 上塗: ポリウレタン樹脂系上塗塗料 (30μm)

A 橋の初回塗装は平成 10 年度に実施されており、「道路橋の塩害対策指針（案）」の C 仕様¹⁾（中塗り膜厚 350μm）を満足する仕様である。

次に、B 橋の初回塗装は昭和 61 年度に実施されており、以下の通り寒冷地における塩害対策の仕様である。

本コンクリート橋は寒冷地に位置し、また冬季の季節風の強い日本海岸の海上に架橋されるなど厳しい塩害環境下にあること、「道路橋の塩害対策指針（案）」の発刊に前後して上部工事が着工進捗すること等から、建設初期からの塩害対策の実施が逼迫の課題であった。このため、小樽開発建設部では昭和 58 年度から 60 年度にかけて土木学会北海道支部に調査・検討を委託し、同支部は塗装材料の選定・施工方法の検討を目的として「大森大橋塗装材質調査委員会」を発足させた。そして、塗装材料の性能基準に関する検討、塗装材料の選定、凍結融解試験による塗膜とコンクリートのはく離調査、現地試験塗装等を行い、塗装物性、耐候性、遮塩性、耐摩耗性、耐凍害性等を総合的に判断し、エポキシ樹脂系とビニルエステル系（ガラスフレーク入り）の 2 種類を選定し、

昭和 61 年度塗装工事に着工した²⁾。寒冷地における塩害対策の特徴としては、2 種類とも中塗の膜厚を 600μm の厚塗りとすることを求めている点にある。

最後に、B 橋の塗替塗装は総プロ耐久性向上技術の開発による「塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）」の 1 種を満足する仕様³⁾である。

3. 有機系表面被覆材の遮塩性に関する調査

3. 1 調査位置と試験内容

外観上健全と見なせる表面被覆材およびその内部のコンクリートをφ75mm のコンクリートコアとして採取し、試験試料とした。この際、コア採取位置は表面被覆材に錆汁、膨れ、変色等の外観上の変状が認められなかったため任意の横断位置とし、図-3に示す海側・山側における両外桁の下フランジ外側の側面を調査箇所とした。

コア表面の表面被覆材では電子線マイクロアナライザー（以下、EPMA）により膜厚内部の塩素イオンに着目し、カラーマッピングによる面分析および定量分析を実施した。なお、コアは JIS A 1154 に基づいてかぶり深さ方向に 7 深度の塩化物イオン含有量試験を全塩分について実施した。

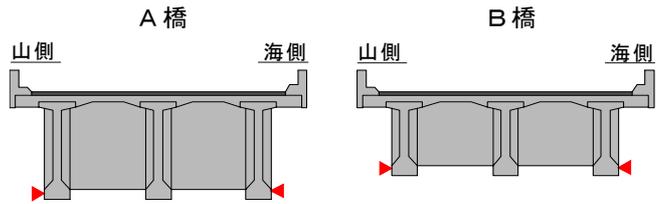


図-3 コンクリートコアの採取位置

3. 2 表面被覆材内の塩素に着目した EPMA 分析

表面被覆材の EPMA 分析は海側、山側両外桁にて実施しているが、コアの塩化物イオン含有量が相対的に高い側（次項 3.3 参照）の塩素 (Cl) に着目した EPMA 分析結果を図-4、5に示す。

各々左の図が二次電子像であり、画像上の境界面を点線で示し塗装工程等の解説を付記した。カラーマッピング図においても二次電子像の点線を複写して境界線の識別を容易とした。また、カラーマッピング図上方の平均塩素濃度の分布はマッピング図の水平方向の定量値を高さ方向に集計した平均濃度を示している。

(1) 塗装 6 年後の A 橋 (図-4 参照)

無塗装 14 年を経てエポキシ樹脂系塗装が施工され、その後 6 年を経過する A 橋では、塗膜表面付近の中塗 2~3 層目間 (a 点) および塗膜深部のコンクリート境界付近 (b 点) の塩素濃度が部分的に突出しているものの、中塗 3 層およびパテ部は平均してほぼ 0.10% 弱の濃度である。a, b 点の塩素濃度の突出部は施工時に表面に付着した塩分が封じ込められたものと想定され、また中塗 3 層およびパテ部の塩素はほぼ一定の濃度を示すことから、使用したエポキシ樹脂の組成中に含有される塩素に起因するものと推察される。

(2) 塗装 18 年後の B 橋

(図-5 参照)

無塗装 3 年を経てビニルエステル樹脂塗装 (旧塗膜) が施工され、14 年経過後に塗替塗装としてエポキシ樹脂塗装が重塗りされ、その後 4 年を経過する B 橋では、塗替塗膜の中塗 (c 点) や旧塗膜の中塗～上塗界面 (d 点) の塩素濃度が部分的に突出しているものの、旧塗膜中塗部は平均してほぼ 0.07% 程度の濃度である。

c, d 点の突出部は施工時に表面に付着した塩分が封じ込められたものと想定され、また旧塗膜の中塗部の塩素はほぼ一定の塩素濃度を示すことから使用したビニルエステル樹脂の組成中に含有される塩素に起因するものと想定される。

(3) 表面被覆材の遮塩効果

以上、A 橋、B 橋の EPMA 分析結果からは、塗膜の外側から供給された塩分が塗膜中に浸透した形跡が認められず、また、施工時に封じ込められた塩素もカラーマッピングの赤～黄色の点として一部に存在するものの、塗膜内での移動は認められない。このため、A 橋の初回塗装であるエポキシ樹脂系塗膜は 6 年の供用期間において、また B 橋の初回塗装であるビニルエステル樹脂は 14 年 (塗重ね期間を含めると 18 年)、重塗りしたエポキシ樹脂塗膜は 4 年の供用期間において、十分な遮塩効果を有していると判断できる。

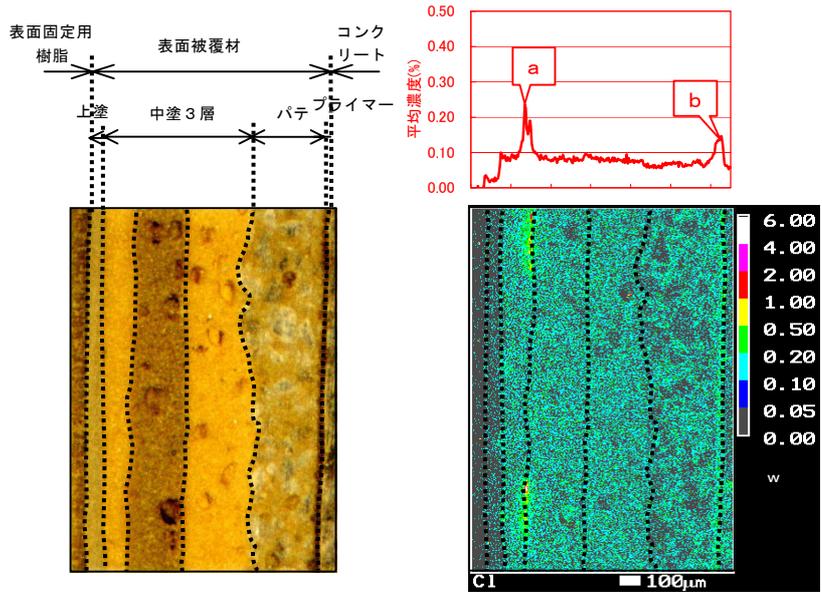


図-5 A 橋 EPMA 分析 (2 次電子像と Cl カラーマッピング)

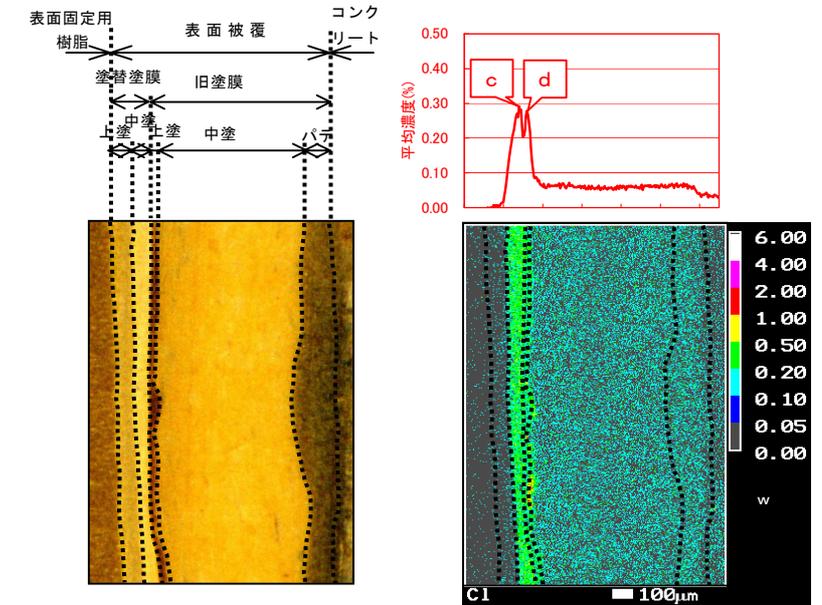


図-5 B 橋 EPMA 分析 (2 次電子像と Cl カラーマッピング)

3.3 コアの塩化物イオン含有量試験結果

塩化物イオン含有量の測定結果を図-6の■□印 (A 橋: 無塗装 14 年+被覆 6 年を■印, B 橋: 無塗装 3 年+被覆 18 年を□印) に示す。ここに、塩化物イオン含有量の測定は海側、山側両外桁にて実施しているが、相対的に含有量の高い側を代表して示している。また、●印は A 橋にて無塗装 14 年+被覆 1 年の時点で実施された既往調査結果⁴⁾ による塩化物イオン含有量の測定結果を合わせて示している。

3.4 塩化物イオンの浸透予測

塩化物イオンの浸透を予測する上で必要となる外部から供給される塩分量に相当する表面塩化物イオン含有量 (C_0)、塩化物イオンの浸透速度に相当する見掛けの拡散係数 (Dc) を設定する。ここでは、A 橋の既往調査

結果である無塗装 14 年+被覆 1 年 (図-6の●印) の塩化物イオン含有量分布を無塗装 14 年後の含有量分布と仮定して、フィックの拡散方程式の解に近似する C_0 , Dc を回帰計算から定めると、 $C_0=11.4\text{kg/m}^3$, $Dc=0.41\text{cm}^2/\text{年}$ となり、この回帰曲線を図-6の赤線に示す。B 橋については、飛来塩分環境環境が A 橋と同じと考えられること、工事記録による示方配合²⁾ が A 橋と同じ水セメント比 ($W/C=0.37$) であることから、A 橋で定めた C_0 , Dc と同一と仮定する。

このようにして定めたフィックの拡散則を支配する定数 C_0 , Dc を与条件として、表面被覆施工以降の塩分浸透予測を差分法により解析⁵⁾ する。表面境界条件は、無塗装期間内では $C_0=11.4\text{kg/m}^3$ (一定値)、表面被覆施工以降は「3.2(3) 表面被覆材の遮塩効果」に従い、表面被覆材が完全に塩分の供給を遮断すると仮定し

$C_0=0\text{kg/m}^3$ (一定値) とする。

数値解析による予測線を実測値である ■□印に重ねて図-6に示すが、A 橋無塗装 14 年+被覆 6 年後の予測線が青実線、B 橋無塗装 3 年+被覆 18 年後の予測線が薄青実線であり、双方とも実測値の若干上方ではあるがほぼ近似していることが分かる。このことから、表面被覆材が完全に塩分の供給を遮断できるというフィックの拡散則適用上の仮定は妥当であるものと判断される。

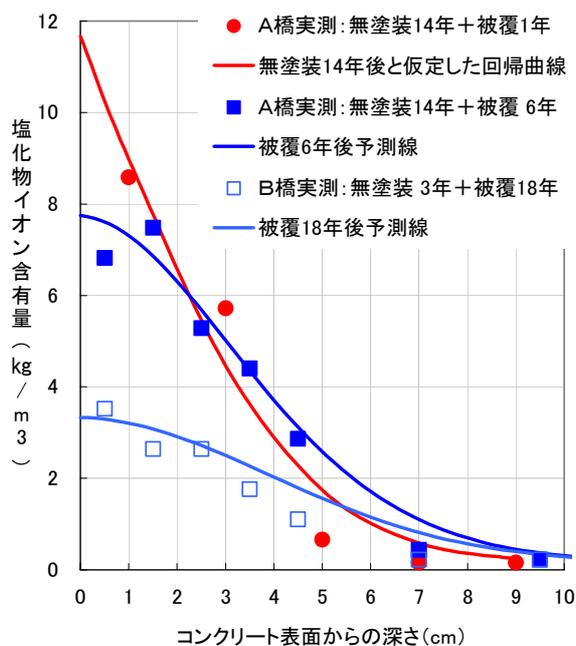


図-6 塩化物イオン含有量の実測値と表面完全遮塩による予測線

3.5 結論

桁製作後約 20 年の実橋暴露環境下において、外観上健全であると認められる表面被覆材の EPMA 分析を行った結果では、外部から塩化物イオンが表面被覆材に浸透した形跡は認められなかった。このため表面被覆後 6 年、18 年の経年期間において表面被覆材が完全に塩分の供給を遮断出来ると仮定し、フィックの拡散則に基づいて塩化物イオンの浸透予測を行った結果、浸透予測曲線はコンクリート中の塩化物イオン含有量の実測値をほぼ近似できることが分かった。

すなわち、塩害対策用の有機系表面被覆材の遮塩性能をフィックの拡散則に従い評価する場合には、外観上耐久性の低下が認められない範囲において、表面からの塩化物イオンの供給を完全に遮断する効果があるものと判断される。

本調査はある種の塩害対策用表面被覆材の実橋暴露環境下における一調査事例ではあるものの、表面被覆後の経年が異なる橋梁において現在の塩化物イオン含有量を比較的精度良く予測できたことは、境界条件の設定方法を含めてフィックの拡散則の適用性を示した一つの知見であるといえる。

4. おわりに

コンクリート部材の塩害による早期劣化が問題となり、北海道開発局においては塩害環境下にあるコンクリート構造物を予防保全の観点から適切に維持管理することを目的として、塩化物イオン含有量を定期的に測定する「コンクリート橋の塩害に関する特定点検」⁶⁾を平成16年度から実施している。

塩害劣化に限定すれば鋼材腐食による変状が外観上に表れる前に、その進行を予測する簡便な手法がコンクリート標準示方書⁷⁾により普及しており、点検や詳細調査から得られた情報を元に適切な対処方針を設定できる段階にある。一方、塩害補修対策としてはコンクリート中に浸透した塩化物イオン含有量が比較的少ない場合には、表面保護工を施すことにより鋼材の発錆を回避あるいは遅延させることが可能であるものの、現在、表面保護工に求められる遮塩性、耐凍害性や耐久性等の性能を時間軸上で適切に評価できる基礎資料の蓄積が求められている段階にある。

本報告が、寒冷かつ厳しい塩害環境下に置いて建設されるコンクリート構造物の耐久性向上策として、また既存構造物の長寿命化策の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：コンクリート塗装の設計・施工・品質基準（案）・同解説，道路橋の塩害対策指針（案）・同解説付属資料2，pp.53，1984.2
- 2) 服部健作，小林仁，豊田義明：海岸 PC 橋梁の塩害対策，一般国道 229 号・大森大橋の施工，道路とコンクリート，No.77，pp.20-30，1987.9
- 3) (財)土木研究センター：塩害を受けた土木構造物の補修指針（案），建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果），pp.72，1989.5
- 4) 船山健次，真田達夫，嶋田久俊，山口光男，朝倉啓仁：コンクリート道路橋の塩害劣化予測に関する一考察，土木学会第 57 回年次学術講演会，pp.551-552，2002.9
- 5) 朝倉啓仁，田口史雄：差分法による数値解析を用いたコンクリート部材の塩分浸透解析，土木学会北海道支部，平成 16 年度論文報告集第 61 号，2005.2
- 6) 国土交通省道路局国道・防災課：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案），2004.3
- 7) 土木学会：2002 年制定，コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.24，2002.3