

報告 鉄道橋における塩化物イオン吸着剤を用いた断面修復工法の 20 年経過後の防錆効果と耐久性に関する実態調査結果

松尾 賢*1・堀澤 誠*2・上原 元樹*3・飯島 亨*4

要旨：塩害を受け、塩化物イオン吸着剤を用いた断面修復工法で補修した鉄道橋において、20年経過後の防錆効果及び耐久性調査を実施した。結果は、再劣化は確認されず、一般的なポリマーセメントモルタルによる断面修復工と比較して明らかに高い防錆効果を確認した。また、鉄筋周りには、防錆効果を発揮する量の亜硝酸イオンが残存し、防錆効果を引き続き継続するものと考えられる。

キーワード：塩害、塩化物イオン、亜硝酸イオン、断面修復、塩化物イオン吸着剤、耐久性

1. はじめに

海岸に近く飛来塩分が多いなどの外的塩害環境下の鉄筋コンクリート（以下 RC）構造物は、塩害に配慮したかぶり厚さで設計されており、塩害環境下でないそれら構造物のかぶりよりも厚く造られている。このため、ひび割れやかぶりコンクリートの剥落などの変状が確認された時点で鉄筋の腐食は進行しており、鉄筋の断面欠損が認められる程度に至っていることがある。また、塩害の補修工法として劣化損傷が生じた部分のコンクリートをはつり、ポリマーセメントモルタル等を用いて欠損断面を修復する断面修復工法が多く採用されてきたが、鉄筋に残留した塩化物イオンやはつり残したコンクリートに残存した塩化物イオンを十分に除去しきれないことから、再劣化が生じ維持管理に苦慮してきた。そのため、塩害を抑制することを目的とした高性能の補修材料の開発や施工方法が研究されてきており、当社では 1998 年に日本海沿岸に位置する RC 造の鉄道橋において、塩化物イオン吸着剤を用いた断面修復工法²⁾（以下 SSI 工法）を適用した。本報告では、補修から 20 年経過したことから、SSI 工法の防錆効果及び耐久性を検証した結果について述べる。

による断面修復工を上下線で実施しているが、詳細は不明である。その後、上り線では、1997 年に再び PCM による断面修復工と表面被覆工を、下り線では、1998 年に SSI 工法による断面修復工と表面被覆工を実施し、現在に至っている（図-3）。

今回、補修工事施工後 20 年経過したことから、SSI 工法の防錆効果を PCM 断面修復工と比較し、SSI 工法の耐久性を検証した。



図-1 調査対象構造物立地



図-2 調査対象構造物

2. 対象構造物と補修状況

2.1 構造物概要

対象構造物は図-1, 2 に示す通り、日本海沿岸に位置する鉄道橋で、構造形式は上下線分離の RC 単純 T 桁橋（支間長 15.9m）、主筋のかぶりは、80mm である。取得年度は 1969 年 3 月で、50 年経過している橋梁である。補修履歴については、記録が残っている範囲で 1987 年（経年 18 年）にポリマーセメントモルタル（以下 PCM）

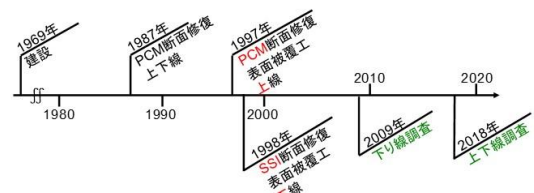


図-3 調査対象構造物

*1 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター コンクリート構造グループ 主席 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 新潟土木技術センター 助役 (正会員)

*3 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 上席研究員 GL (正会員)

*4 ジェイアール総研エンジニアリング 材料技術部 部長 (正会員)

2.2 再補修時(1998年)の下り線劣化状況

主桁下フランジに橋軸方向のひび割れや錆汁が確認されていた(図-4)。かぶりをはつり取ると図-5に示す通り、全体的に錆が生じ、最外縁のスターラップには断面欠損が生じていたが、主筋には断面欠損は生じていなかったと記録されている。



図-4 主桁のひび割れ(橋軸方向)



図-5 はつり後の鉄筋腐食状況

2.3 SSI工法と補修工事の概要

SSI工法とは、ポリマーセメントをベースに塩化物イオン吸着剤を配合し、劣化状況に応じて材料の組み合わせが選択できる方法である。塩化物イオン吸着剤は、層状構造のカルシウム・アルミニウム複合水酸化物であり、カルシウム・アルミニウムの水酸化物層が正(+)に帯電するため、負(-)に帯電した亜硝酸イオンを層間に保持する。吸着剤に塩化物イオンが接すると、イオン交換反応により亜硝酸イオンを放出し、塩化物イオンを取り込み固定化する。放出された亜硝酸イオンは、鋼材の不動態皮膜を再生し鉄筋腐食を抑制することができる。イオン交換による塩分固定化の概念図を図-6に示す。補修工事は、吊足場を設置し、変状が生じている下フランジ部分の最外縁主筋裏側までを対象とした。主な作業工程の概要は、次の通りである。

(1) はつり及び鉄筋のケレン

はつり範囲は、図-7に示す通り最外縁の主筋までとし、鉄筋は、サンドブラストによりケレンして除錆した。

(2) 防錆材の塗布

母材との界面および露出しているすべての鉄筋に、塩化物イオン吸着剤を多く含む防錆ペーストを刷毛で入念に塗布した。その後、防錆ペーストを塗布した主筋の周りに塩化物イオン吸着剤を配合した防錆モルタルを塗布

した。鉄筋周りの細かい部分は手で充填し、その他の範囲はコテ施工とした(図-8, 9)。

(3) 断面修復

残りの断面修復は、一般的なPCMにより行った。スターラップまでの範囲はコテ施工、残りの表面までの範囲は、型枠設置後に上向きに湿式吹付施工とし、最後に左官仕上げを行い、型枠を脱型した(図-10)。

(4) 表面被覆工

パテで下地処理後、表面被覆工を施工した。

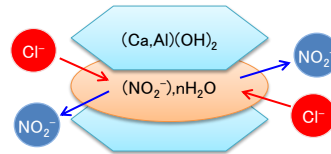


図-6 塩化物イオン吸着剤の概念図

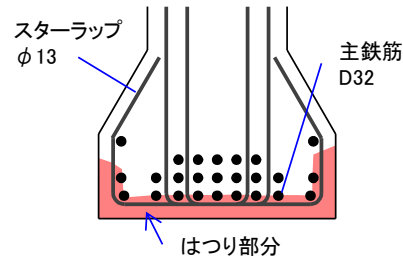


図-7 はつり調査範囲イメージ

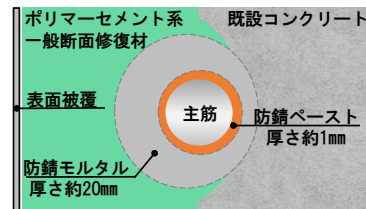


図-8 SSI工法断面修復イメージ



図-9 防錆材塗布後の状況



図-10 型枠脱型後の状況

3. 調査の方法

調査は、下記の項目で図-11、12の位置で行った。

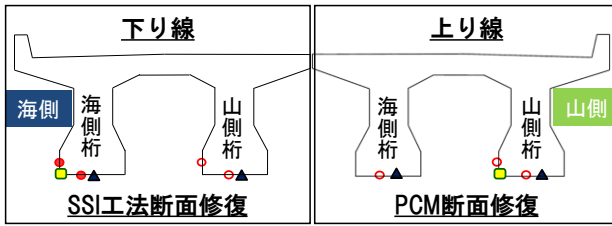


図-11 調査位置断面図

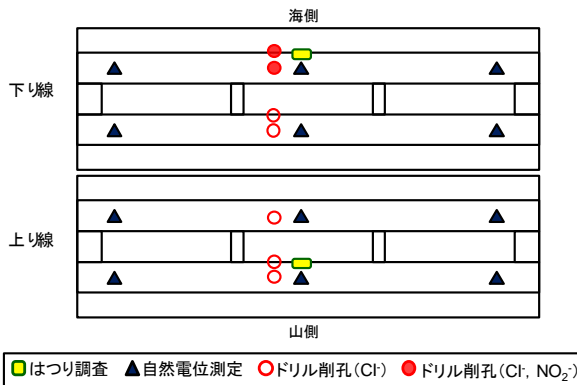


図-12 調査位置展開図

3.1 外観目視調査方法

高所作業車を使用して近接目視調査を実施した。

3.2 自然電位測定方法

JSCE-E601-2007 コンクリート構造物における自然電位測定方法により実施した。測定は、SSI 工法で断面修復した下り線（2主桁）とPCMにより断面修復した上り線（2主桁）のそれぞれにおいて、起点方、中央、終点方の下面3箇所を対象に各箇所7点測定した。

3.3 鉄筋状態目視調査方法

SSI 工法で断面修復した下り線では、表面被覆工の劣化が認められた海側桁の中央部を海側側面から下面にかけて断面修復材を一部はつり落として鉄筋状態を目視確認した。

PCMで断面修復した上り線では、劣化の激しかった山側桁の中央部を海側側面から下面にかけて断面修復材を一部はつり落として鉄筋状態を目視確認した。また、鉄筋腐食が激しい上り線では、鉄筋表面の錆びを電動工具でケレン除錆した後にノギスにより鉄筋径を測定した。

3.4 塩化物イオン量測定方法

塩化物イオン量の測定は、鉄筋間で鉄筋に当たらない箇所ドリルによりコンクリート粉を採取し「JISA 1154 硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法」により実施した。試料は、表面から 80mm 深部までは 10mm 間隔で、80~120mm までは 20mm 間隔のコンクリート粉とした。なお、下り線の海側桁（側面及び下面）においては、亜硝酸イオン測定を行うため鉄筋近傍を狙いドリル削孔し、その他は鉄筋に当たらないよう鉄筋か

ら余裕をもった離隔で削孔した。

更に、下り線の海側桁において、はつり調査した際に採取したコンクリート片は、鉄筋から 15mm 分を 5mm 毎に 3 分割して 20°C、50°C、100°C で各 30 分間水抽出して塩化物イオンをイオンクロマトグラフィにより測定した。

3.5 亜硝酸イオン量測定方法

亜硝酸イオン量の測定は、塩化物イオン吸着剤を配合した防錆モルタルで断面修復した下り線の海側桁（側面及び下面）で実施した。ドリル削孔から採取した試料は、100°C で 30 分間温水抽出して亜硝酸イオンをイオンクロマトグラフィにより測定した。また、はつり箇所鉄筋近傍から採取した試料は、鉄筋から 15 mm までの補修材を採取し、5mm 毎に 3 分割して 20°C、50°C、100°C で 30 分間、水抽出してイオンクロマトグラフィにより測定した。

4. 調査の結果

4.1 外観目視調査結果

下り線では、図-13の通り海側桁の中央部に表面被覆工が劣化し、錆汁のような汚れが認められた。コンクリート表面には、最大で 2mm 程度の橋軸方向にひび割れが認められた。この他は、表面被覆工に剥がれは生じていたが全体的には健全な状態であった。

一方、上り線では、図-14の通り断面修復した箇所は広範囲にひび割れが生じており、一部に錆汁が認められた。また、橋軸方向のひび割れは、幅 1mm~5mm 程度と非常に大きくその付近のかぶりコンクリートには浮きが生じていた。ひび割れにスケールを差し込むと深く入り、鋼材まで、到達している可能性が高いと考えられた。



図-13 下り線外観劣化状況



図-14 上り線外観ひび割れ状況

4.2 自然電位測定結果

自然電位測定の結果は、表-1および図-15の通りである。SSI工法により補修した下り線では、海側桁の起点下面において、若干卑側の要素値が計測されたが、それ以外では平均値が-300mVより貴側の値であった。一方、上り線では、山側桁の起点下面で7測点全てが貴側で平均値が-183mVと貴側の値となったが、全体的に-350mVより卑側の値であった。

また、下り線では、SSI工法による補修前の2009年に今回調査と同一位置で電位測定しているため、その経時変化を図-16に示す。海側桁の終点側で貴側に移行したことを除いて、ほぼ同程度の値であり、腐食抑制効果が保たれていると考えられる。

表-1 自然電位測定結果

線別	測定箇所	測定位置							平均値	標準偏差	
		1	2	3	4	5	6	7			
下り	海側	起点下面	-324	-377	-296	-373	-395	-293	-356	-345	40.8
		中央下面	-291	-328	-256	-280	-314	-231	-246	-278	35.8
		終点下面	-142	-146	-143	-111	-130	-146	-101	-131	18.3
	山側	起点下面	-252	-258	-289	-270	-289	-244	-284	-269	18.5
		中央下面	-210	-185	-235	-198	-202	-221	-207	-208	16.2
		終点下面	-278	-290	-246	-273	-271	-269	-267	-271	13.3
上り	海側	起点下面	-389	-355	-339	-485	-302	-408	-401	-383	58.7
		中央下面	-424	-476	-422	-421	-434	-428	-444	-436	19.6
		終点下面	-718	-713	-685	-610	-653	-544	-608	-647	63.7
	山側	起点下面	-233	-199	-188	-130	-225	-200	-103	-183	48.4
		中央下面	-515	-559	-530	-564	-511	-341	-454	-496	77.6
		終点下面	-591	-574	-578	-562	-520	-570	-578	-568	22.8

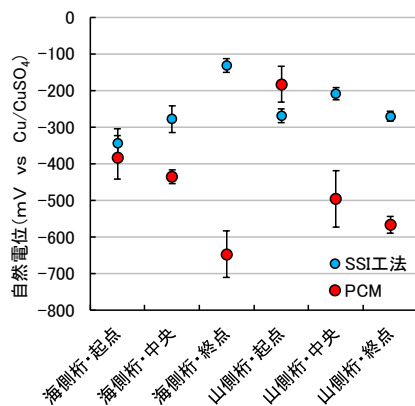


図-15 自然電位上下線比較

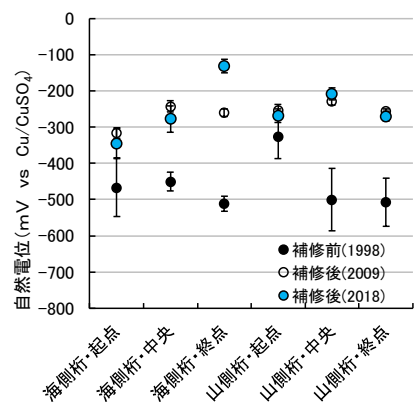


図-16 下り線自然電位変動

4.3 鉄筋状態目視調査結果

下り線では、表面被覆工に劣化が認められ、コンクリート表面に最大で2mm程度の桁方向のひび割れが認められた位置で鉄筋調査を実施した。鉄筋をはつり出すと図-17の通り鉄筋の一部に軽微な腐食が確認されたが、鉄筋には断面欠損や腐食膨張は生じていなかった。このため、コンクリート表面に生じていたひび割れは、鉄筋腐食により生じたものではなく、断面修復の際に材料を重ね継いだ境界に生じた層間剥離であると推察する。

上り線では、コンクリートのひび割れ幅が大きい箇所調査を実施した。鉄筋は節が消失しており、層状の錆びが生じて断面欠損していた(図-18)。また、かぶりコンクリートと最外縁の鉄筋の境界部を中心にひび割れや剥離が生じていた。



図-17 下り線鉄筋状態



図-18 上り線鉄筋状態

4.4 塩化物イオン量測定結果

4.4.1 ドリル削孔試料

下り線海側桁のドリル削孔により採取した塩化物イオン量の分布を図-20に示す。断面修復後に外部から塩化物イオンの浸透があり、塩化物イオン量は海側桁では下面で最大11kg/m³、山側桁では側面で最大3kg/m³となっていた。最も海側に位置する下り線の海側桁で最大値となっているが、これは季節風により日本海から供給される飛来塩分によるものと考えられる。しかし、鉄筋周囲に施した塩化物イオン吸着剤以外の断面修復は一般的なPCMであり、母材コンクリートと比較して塩分浸透抑制効果は高いと考えられるが、補修から20年経過し11kg/m³もの塩分浸透が確認された。なお、下面において表面塩化物イオン量、見掛けの拡散係数、初期塩化物イオン量を図-21の通りフィッティングするとそれぞれ20kg/m³、25mm²/year、0.2kg/m³と推定した。山側桁の下

面では深さ 50-60mm で、側面では深さ 80-100mm の主筋位置で塩化物イオン量が微増している。これは、補修時に主筋まではつり断面修復しているため、補修前の母材コンクリートに残存した塩化物イオンではなく、主筋やスターラップに残存した塩化物イオンが拡散して検出されたと考えられる。

上り線について、塩化物イオン分布を図-22 に示す。表層の塩化物イオン量が少ないことから、上り線では飛来塩分の付着が少ないと考えられる。また、山側桁の表層では、塩化物イオン量が少ないにも係わらず、塩化物イオン量が深さ 20mm 位から増加し 40-50mm で 5kg/m³ 程度と高くなっている。これは、断面修復を 20mm 程度までしか実施していない位置での試料で、それより以深は、補修前に残存した塩化物イオンが検出されたと考えられるが、当時の施工時の資料がないため定かでない。

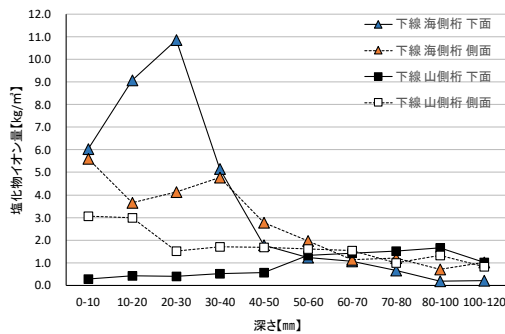


図-20 下り線塩化物イオン分布

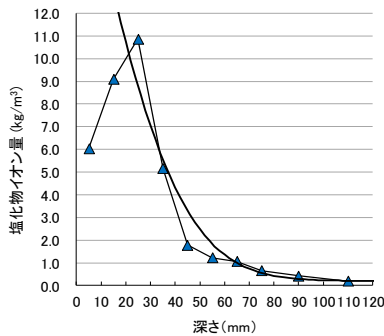


図-21 PCM 拡散係数の推定

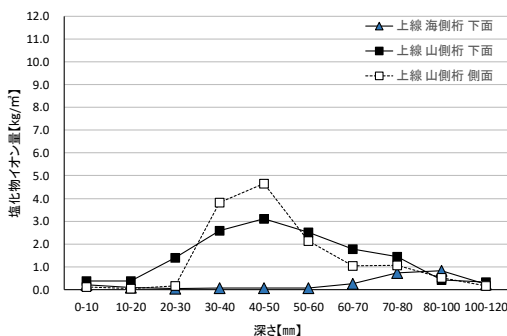


図-22 上り線塩化物イオン分布

4.4.2 はつり片試料

下り線海側桁のはつり片から採取した塩化物イオン量の分布を図-23 に示す。鉄筋から 0-5mm と 5-10mm の箇所でも可溶性塩化物イオン量は、20°C水抽出で 7kg/m³ 程度、50°C水抽出で 9kg/m³ 程度、100°C水抽出で 12kg/m³ 程度と同程度で高い。一方、10mm-15mm では、20°C水抽出で 3kg/m³ 程度、50°C水抽出で 4kg/m³ 程度、100°C水抽出で 5kg/m³ 程度に塩化物イオン量は減っていた。これは、主筋に残留した塩化物イオンが拡散したためと考えられる。

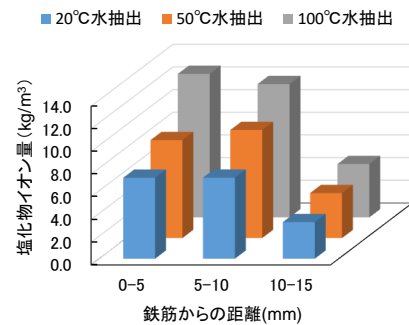


図-23 鉄筋近傍の塩化物イオン分布

4.5 亜硝酸イオン量測定結果

4.5.1 ドリル削孔試料

下り線海側桁のドリル削孔により採取した亜硝酸イオン量の分布を図-24 に示す。側面において、表面から 80-100mm の主筋位置で 6kg/m³ の亜硝酸イオンが測定されている。塩化物イオン吸着剤は、かぶり 80mm の主筋 D32 とスターラップ φ13 の周囲に約 20mm 施しており、これを考慮すると亜硝酸イオンが 70mm 程度から急増していることは、理にかなっている。また、表層から深さ 70mm まで亜硝酸イオンが漸増していることから、亜硝酸イオンが拡散していることが分かった。

一方、下面においては、同様の位置に亜硝酸イオンの検出はほとんど認められなかった。これは、削孔位置が鉄筋近傍を捉えなかったためと考えられる。

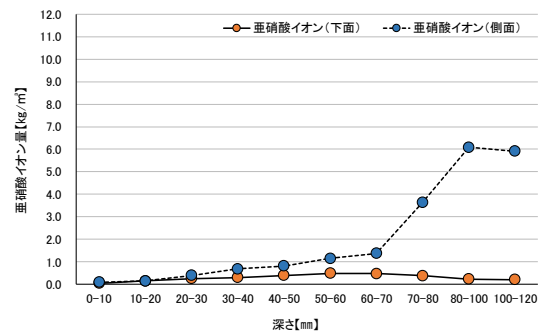


図-24 下り線海側桁亜硝酸イオン分布

4.5.2 はつり片試料

下り線海側桁のはつり片から採取した亜硝酸イオン量の分布を図-25に示す。亜硝酸イオンはいずれも $1\text{kg}/\text{m}^3$ 以下となっている。これは、断面修復材にひび割れが生じ、また、橋面排水が排水樋から掛かる位置において、はつり調査を実施しており、亜硝酸イオンがひび割れから流出していると推測される。しかし、施工から20年経過後の調査でも内部鉄筋の腐食は軽微であることが確認された。

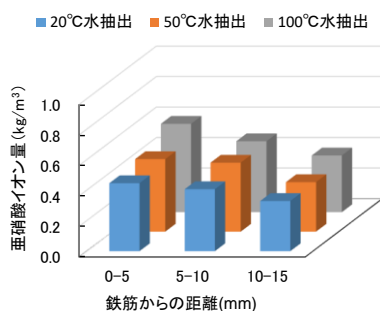


図-25 鉄筋近傍の亜硝酸イオン分布

5. まとめ

本調査で得られた結果と課題を次に記す。

- (1) 外観目視観察ではSSI工法で断面修復を実施した海側桁において、海側側面の中央部に2mm程度のひび割れが確認されたが、全体的には健全な状態であった。
- (2) 断面修復材に生じた2mm程度のひび割れは、鉄筋の腐食膨張に起因したひび割れではなく、断面修復材の層間剥離によるものであった。鉄筋には、軽微な腐食は確認されたが、断面欠損や腐食膨張などは生じておらず、内部鉄筋は健全であった。
- (3) 2009年と2018年に実施したSSI施工箇所における自然電位測定結果は、海側桁の終点側で貴側に移行していたところもみられ、全体的にはほぼ同程度の値であり、腐食抑制効果は保たれていると考えられる。
- (4) 最も海側に位置する下り線の海側桁において、最大で $11\text{kg}/\text{m}^3$ の塩化物イオン量が認められた。この値は、母材コンクリートと比較して塩分浸透抑制効果の高いPCMによる断面修復箇所としては、想定される量より高い塩化物イオン量である。また、サンドブラストにより鉄筋の残留塩分の除去を行ったが、鉄筋位置において塩化物イオン量が多く、鉄筋の発錆限界を超える塩化物イオン量がサンドブラスト処理後も残留していたものと考えられる。

(5) 鉄筋近傍箇所の試料から亜硝酸イオンが $6\text{kg}/\text{m}^3$ 検出された。亜硝酸イオンの防錆効果は、塩化物イオンとのモル比で0.6~1程度以上で得られることから、防錆効果が保たれる塩化物イオン量はモル比1の場合で $4.6\text{kg}/\text{m}^3$ となる。鉄筋位置における塩化物イオン量は、この値を大きく下回るため、鉄筋に対する防錆効果は今後も持続していくと考えられる。以上のことから、亜硝酸イオン自体が拡散するために、防錆効果の持続期間を定量的に評価することは難しいが、施工20年経過時において鉄筋周囲には、十分な亜硝酸イオンが存在していることから、塩化物イオン吸着剤によるSSI工法の防錆効果は、飛来塩分が非常に多い環境でも少なくとも20年以上の耐用年数が期待できるものと考えられる。

最後に、今後の防錆効果の継続年数を精度良く予測し、維持管理に役立てるための課題を以下に記す。

まず、防錆効果の持続期間を判断するためには鉄筋や母材コンクリートに残留した塩化物イオン量や飛来により再浸透する塩化物イオン量、そして鉄筋周囲に残存する亜硝酸イオン量といった変動量を正確に予測する必要がある。しかし、例えば、鉄筋周囲の防錆材をドリル削孔で的確に採取することは難しい。また、鉄筋周縁の断面修復材をはつりによって採取することも、防錆ペーストやモルタルが鉄筋周囲に少量かつ脆い状態で存在するため簡単ではない。加えて、SSI工法における防錆材の防錆性能も年々改善³⁾されており、施工年により、その効果を的確に判断する必要がある。このような困難事項は多いが、それらを解決するよう、数ある塩害構造物の継続可能な追跡調査方法について今後も検討していく予定である。

参考文献

- 1) 松田芳範, 石橋忠良, 豊岡昭博, 天木儀一: 塩害により損傷を受けたPC橋の補修効果に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1015-1020, 1999
- 2) 立松英信, 佐々木孝彦, 高田潤: 塩害による鉄筋腐食の診断と抑制に関する研究, コンクリート工学論文集, 第11巻第2号, pp.11-20, 2000.5
- 3) 鈴木昭仁, 水野清, 立松英信, 飯島亨: 塩分吸着剤を配合した防錆材の高性能化による効果, 土木学会第71回年次学術講演会概要集, pp.479-480, 2016.9文集, 第11巻第2号, pp.11-20, 2000.5