

# 表面被覆を施工した撤去桁の塩害劣化発生要因の分析・調査

山本 将・佐藤純弥・石田雅博

## 1. はじめに

既設PC橋の塩害対策のひとつとして、予防保全を目的とした表面被覆工法（表面塗装）による補修が行われてきたが、期待される補修効果が発揮されず塩害劣化が発生していると考えられる事例が見受けられる（写真-1）。そのような劣化を抑制するには、塩害劣化が発生した橋梁にて表面被覆工法の一定年数経過後の遮塩性や、コンクリート内の塩化物イオン濃度の経年変化など、劣化要因を時間経過に着眼して調査することで劣化要因を解明し、その要因への対策を検討する必要がある。

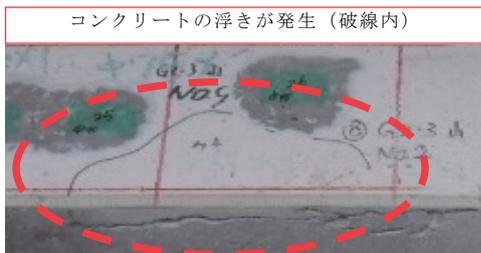


写真-1 塩害劣化発生に伴う損傷事例（PCT桁下フランジ）

本研究では過年度において、既設PC橋を対象に、表面被覆施工後に補修効果が発揮されない要因を実橋にて確認し、表面被覆の品質・施工管理等の留意事項を提案することを目的に調査を行ってきた。これまでに桁の部位ごとに塩化物イオン濃度が異なること、また損傷等が生じていない表面被覆は一定年数（10年程度）経過後も高い遮

塩性能を維持していることを確認した。本稿では、既設PC橋を対象に、表面被覆補修後におけるコンクリート内部の塩化物イオン濃度の経年変化等に着眼し、データ整理・分析及び詳細調査を実施し、施工上の留意事項を整理したのでここで紹介する。

## 2. データ整理・分析

### 2.1 概要

飛来塩分等による塩害劣化の影響が大きい地域（日本海沿岸、塩害対策区分:S）<sup>2)</sup>の既設PC橋データから、以下の条件で対象箇所を抽出し整理・分析した（表-1）。

#### 【抽出条件】

- ・表面被覆工法が実施されている。
- ・経年変化の比較が可能な塩化物イオン濃度のデータが確認されている。なお、本稿での比較が可能なデータとは、同一の径間、主桁及び部位（ウェブ、下フランジなど）における、複数年の塩化物イオン濃度のデータを指す。

### 2.2 整理・分析結果

2.1にて抽出した箇所のデータを用いて、補修後の塩化物イオン濃度の経年変化について整理・分析した結果を図-1に示す。

表面被覆施工後の塩化物イオン濃度分布について、表面付近は低下し深部では増加する内部拡散の傾向が確認された。なお、鋼材腐食発錆限界濃度（以下「 $C_{lim}$ 」という。）について、コンクリー

表-1 整理・分析対象橋梁概要

橋梁名	完成年	上部工形式	架橋種別	海岸線からの距離	橋長（支間割）	最小鋼材純かぶり（設計図上）	調査・分析対象桁	表面被覆実施年（1回目）	備考
A橋	1962年	単純PC <sup>*</sup> ステーション方式T桁×3連	渡河橋	20m程度	76.8m(24.8@3)	23.5mm	第1径間G2桁	1985年	架替え事業中
B橋	1970年	単純PC <sup>*</sup> ステーション方式T桁×4連	渡河橋	30m程度	110.0m(26.75@4)	23.5mm	第2径間G2桁	1987年	架替え事業中
C橋	1975年	単純鋼合成鉄桁＋単純PC <sup>*</sup> ステーション方式T桁×31連	その他（駐車場・海岸保全施設）	5～50m程度	991.6m(44.75+22.8+30.8@29+30.85)	ウェブ <sup>*</sup> 27.0mm 下フランジ <sup>*</sup> 35.0mm	第4径間G5桁	2007年	架替え済
							第8径間G2桁		
							第8径間G5桁		

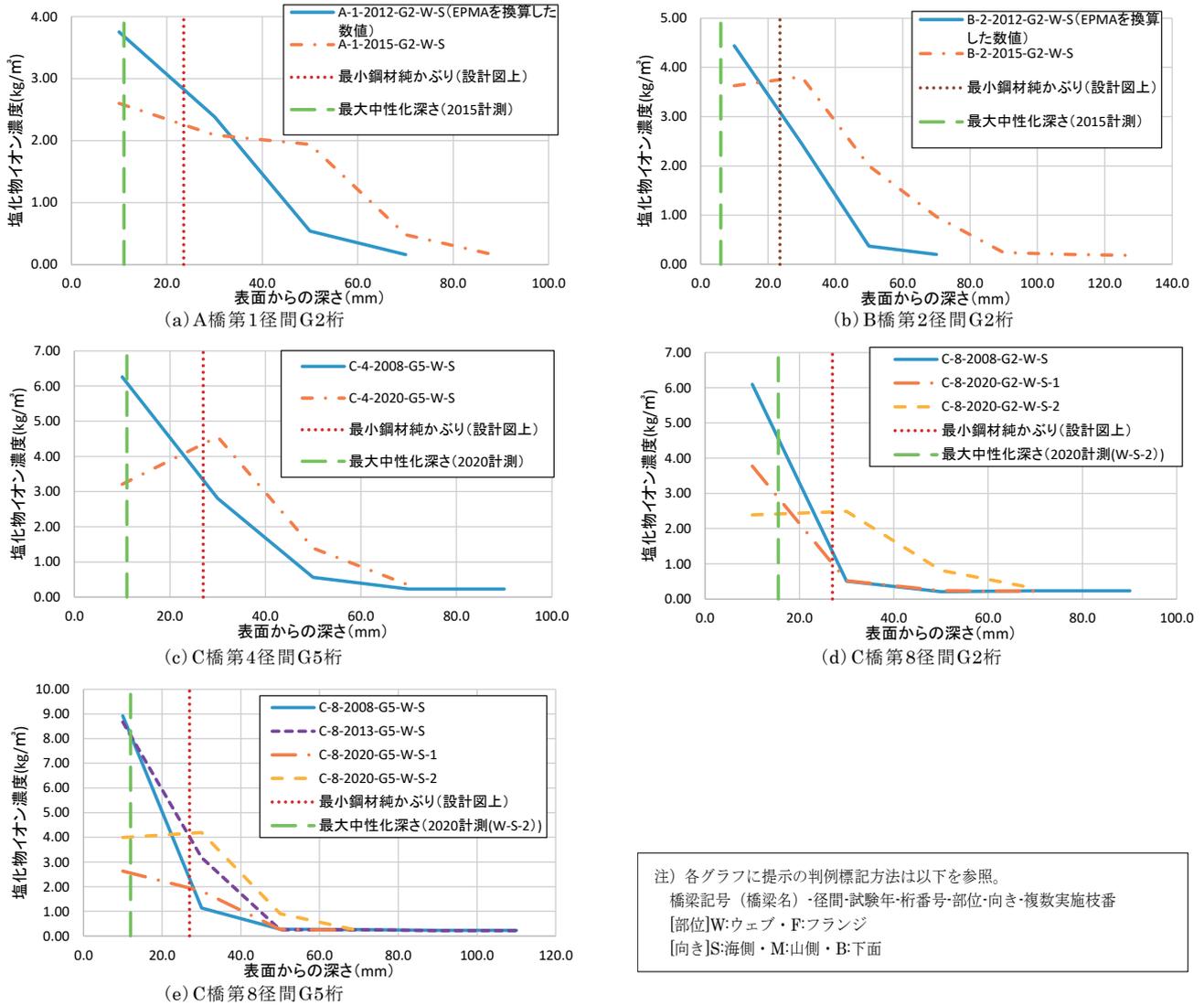
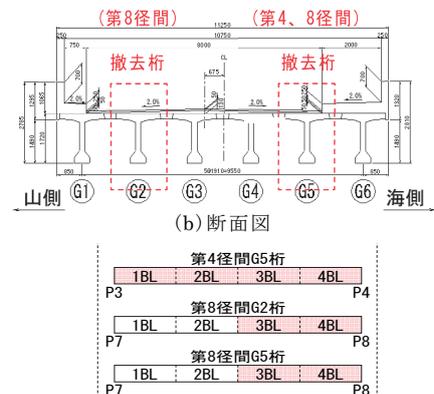
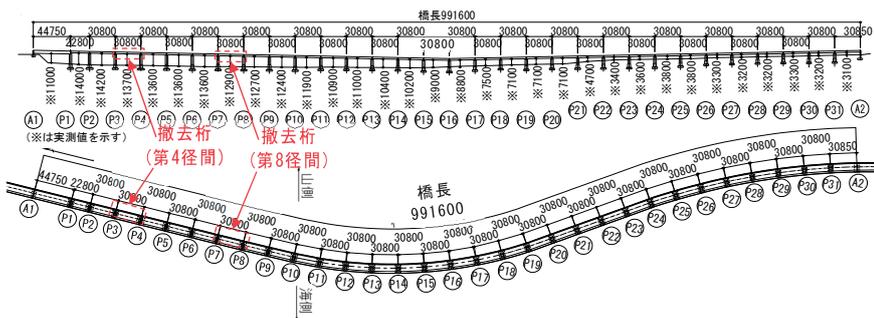


図-1 塩化物イオン濃度の経年変化

ト標準示方書<sup>3)</sup>では水セメント比が50%の場合、普通ポルトランドセメントで $1.9\text{kg/m}^3$ 、早強ポルトランドセメントで $1.5\text{kg/m}^3$ であり、補修後の鋼材付近での塩化物イオン濃度はいずれの箇所においても $C_{lim}$ を超過する傾向が確認された。また、最小鋼材純かぶり未満の深さではあるが、いずれの箇所においても中性化が確認された。

このことから、表面被覆により外部からの塩化物イオン供給が抑制できたとしても、内部拡散により塩化物イオン濃度が表面部は減少、深部である鋼材付近では増加する可能性があることが確認された。



(a) 側面図・平面図

(c) 撤去桁詳細 (着色部が受領した撤去桁)

図-2 橋梁一般図(C橋)

### 3. 詳細調査

#### 3.1 概要

本章では、内部拡散に着眼し2章で整理・分析した橋梁のうち新橋への交通切り替えに伴い撤去桁が発生したC橋(図-2)を対象に、塩化物イオン濃度、中性化深さ、最小鋼材(鉄筋)純かぶり及び、コンクリート内への塩分浸透度合い(水セメント比及び表面吸水量)について詳細調査を実施した。調査は受領した撤去桁を土木研究所まで運搬したのちに実施した(写真-2)。調査箇所(調査部位)と箇所数について、表-2及び図-3に示す。なお、今回調査した撤去桁では、1章で紹介した表面被覆性能の調査を事前に実施し、高い遮塩性能を維持していることを確認<sup>1)</sup>している。



写真-2 撤去桁 (土木研究所に運搬後の状況)

表-2 詳細調査箇所(調査部位)及び箇所数<sup>\*</sup>

調査箇所(調査部位)	調査箇所数①	調査箇所数②
全調査箇所	24	12
内訳	フランジテーパー部	7
	フランジ鉛直部	12
	ウェブ	5

※: 調査箇所数①は、塩化物イオン濃度分布、中性化深さ、最小鋼材(鉄筋)かぶり、水セメント比が対象、調査箇所数②は表面吸水量が対象。

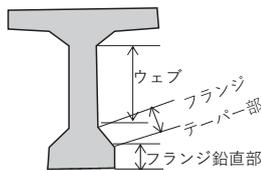


図-3 本研究における調査部位の定義

#### 3.2 調査結果

##### 3.2.1 塩化物イオン濃度と中性化の関係

内部拡散への影響を確認すべく、塩化物イオン濃度(全塩化物イオン及び可溶性塩化物イオン JIS A 1154に準じ実施)、中性化深さ(JIS A 1152に準じ実施)及び、最小鉄筋純かぶりについて調査した。なお、可溶性塩化物イオンは、コンクリートの水分中を動きやすい塩化物イオンで、鋼材近傍へ移動し鋼材腐食に関与する可能性のある塩化物イオン<sup>4)</sup>とされているため対象とした。

##### (1)塩化物イオン濃度分布(全塩化物イオン)

全調査箇所の平均について、表面からの深さ0~20mmは4.99kg/m<sup>3</sup>、表面からの深さ20mm~40mmでは5.26kg/m<sup>3</sup>であり、0~20mmよりも深部の塩化物イオン濃度が高くなる傾向が見受けられた(図-4)。なお、0~20mmより20mm以深の塩化物イオン濃度が高い箇所は13箇所を確認された(表-3)。また、調査部位別の平均ではフランジテーパー部が他の調査部位を上回っていた。

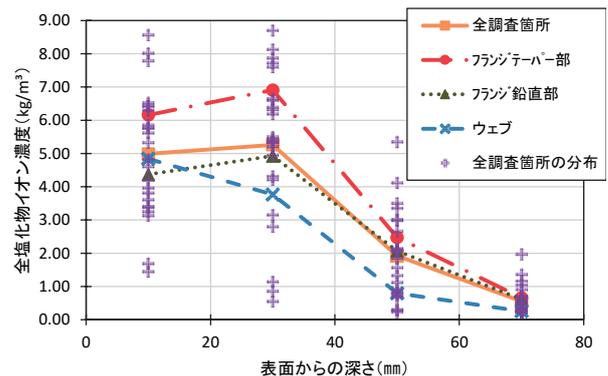


図-4 全塩化物イオン濃度分布(平均値)

表-3 20mm以深の塩化物イオン濃度が高い箇所数

調査箇所(調査部位)	箇所数	
全調査箇所	13	
内訳	フランジテーパー部	4
	フランジ鉛直部	8
	ウェブ	1

##### (2)可溶性塩化物イオン濃度の割合

全塩化物イオン濃度に対する可溶性塩化物イオン濃度の割合について、全調査箇所の深さごとの平均は0~20mmで84%と最も高く、20~40mmでは75%であった(図-5)。

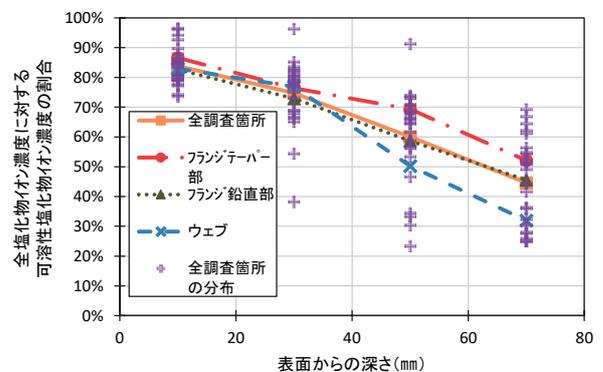


図-5 可溶性塩化物イオン濃度の割合(平均値)

##### (3)中性化深さと鋼材かぶり

中性化は全調査箇所24箇所中23箇所を確認された。全調査箇所の最大中性化深さ平均値は14.80mmであり、最小鉄筋純かぶり深さの平均値37.85mm未満であった(図-6)。最大中性化深さと

最小鉄筋純かぶりの関係では、フランジテーパー部全て、フランジ鉛直部7箇所及び、ウェブ2箇所において、純かぶりから中性化深さを差し引いた中性化残り（表-4）は25mm未満であることが確認された（図-7）。なお、ウェブ2箇所について、桁下からの高さは0.5~0.7m程度（下フランジ高約0.40m、桁高約1.72m）であり、フランジテーパー部に類似した特徴を示したと推測される。

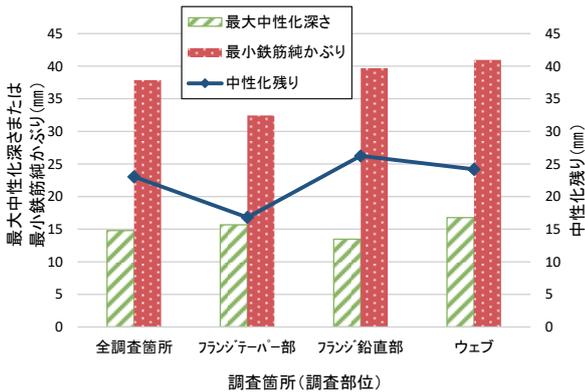


図-6 最大中性化深さと最小鉄筋純かぶり（平均値）

表-4 中性化残りについて\*

中性化残り	適用範囲等
10mm	通常環境下。
10~25mm	塩化物イオンの影響が無視できない環境。中性化残りの上限値である25mmは、あらかじめ塩化物イオンがコンクリート内に存在する場合の値であり、厳しい塩害環境に相当。

\*：土木学会：2017年制定「コンクリート標準示方書」[設計編、2017、pp.153-155をもとに作成

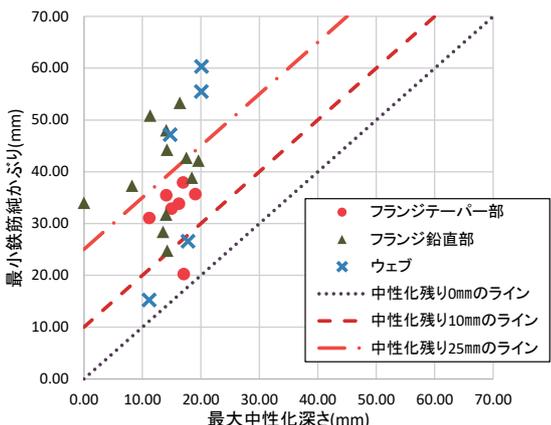


図-7 最大中性化深さと最小鉄筋純かぶりの関係

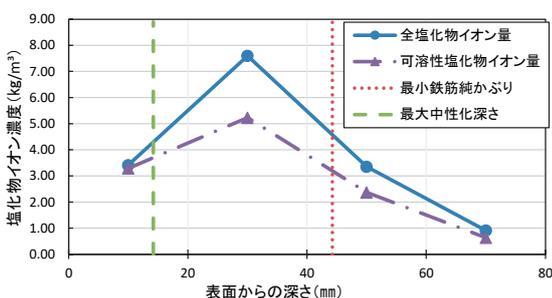


図-8 内部拡散が発生したと推察される一例

(1)~(3)より、今回の調査において、表-3の13箇所では、表面被覆施工後に中性化（炭酸化）に伴う内部拡散により深部の塩化物イオン濃度が上昇した可能性が示唆される。今回調査箇所でも内部拡散が示唆される一例を図-8に示す。

### 3.2.2 塩化物イオン濃度と鋼材かぶりの関係

鋼材かぶりが小さい部位は腐食リスクが大きいことから、塩化物イオン濃度と最小鉄筋純かぶりとの関係を整理した（図-9）。その結果、フランジテーパー部では他の調査部位に比べ、相対的にかぶりが薄く、かつかぶり位置付近の塩化物イオン濃度も高い状況であった。なお、最小鉄筋純かぶり20mm未満であるウェブ2箇所について、3.2.1(3)と同様の理由によりフランジテーパー部に類似した特徴を示したと推測される。

また、「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」（日本道路協会 1984）p12では隅角部は水平・鉛直の2方向から塩分が浸透し、他の部位より塩分量の割合が大きくなることが指摘されているが、今回調査でもフランジテーパー部のような隅角部で塩化物イオン濃度が高くなる結果となった。

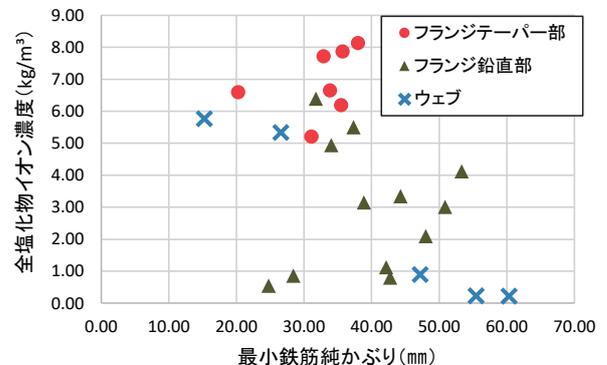


図-9 最小鉄筋純かぶりと全塩化物イオン濃度の関係

以上より、今回の調査においては、フランジテーパー部の鉄筋かぶりは相対的に薄く、最小鉄筋純かぶり位置の塩化物イオン濃度も高い状況であったことから、フランジテーパー部のような鋼材かぶり不足が発生しやすく、他の部位より塩分量の割合が大きくなる傾向がある部位は、鋼材腐食のリスクが大きいことが確認された。

### 3.2.3 コンクリート内への塩分浸透度合い

コンクリート内への塩分浸透度合いによる内部拡散への影響の程度を確認するため、配合推定試験<sup>5)</sup>にて水セメント比を推定した。配合推定試験の事前調査では、粗骨材、細骨材ともに石灰岩は確認されなかった。

また、塩分浸透度合いを多方面から確認するため、表面吸水試験<sup>6)</sup>にて表面吸水量（24時間後吸水量）を調査した。調査箇所は、試験用コア（φ100mm）の採取が可能なウェブ及びフランジテーパー部とした（表-2）。

(1)配合推定試験および表面吸水試験結果

配合推定試験における水セメント比は35%～45%（平均値：39.2%）であり、調査部位による明確な違いは確認できなかった（図-10）。また、表面吸水試験における表面吸水量は2.58g～16.68g（平均値：7.00g）であり、部位ごとの平均値ではウェブ（9.07g）がフランジテーパー部（5.52g）より大きくなった（図-11）。一方、ウェブ同士の比較では桁下からの距離が小さい調査箇所（下層部）では、相対的に水セメント比及び表面吸水量が小さくなる結果となった。

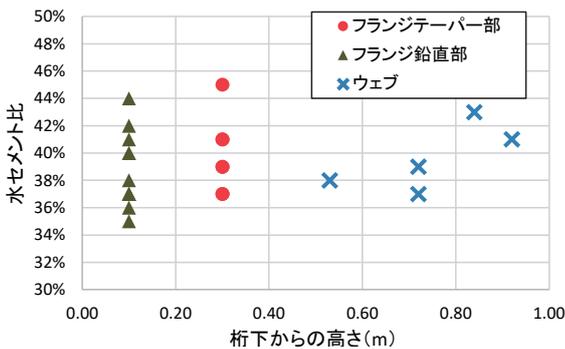


図-10 桁下からの高さ和水セメント比

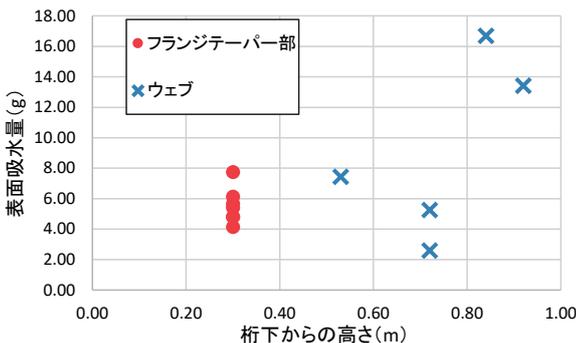


図-11 桁下からの高さと表面吸水量

道路橋示方書<sup>7)</sup>では、想定される水セメント比の目安として、工場で製作されるプレストレストコンクリート構造以外のプレストレストコンクリート構造では43%とされており、また中間部・下層部では相対的に水セメント比が減少する傾向になるという既往研究<sup>8)</sup>と同様の傾向が見受けられることから、配合推定試験結果は概ね妥当であると推察される。

(2)水セメント比と表面吸水量の関係

水セメント比が高くなると表面吸水量も高くなる傾向であることが確認された（図-12）。このことにより、配合推定試験結果は概ね妥当であると推察される。なお、ウェブで水セメント比が40%未満の箇所は、3.2.1(3)と同様の理由により、フランジテーパー部に類似した特徴を示したと推測される。

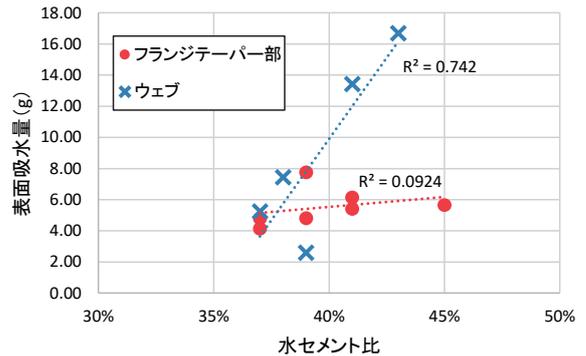


図-12 水セメント比と表面吸水量の関係

(1)～(2)より、今回の調査においては、配合推定試験結果は概ね妥当であると推察されることより、コンクリートには特段の異常は認められず、コンクリート内への塩分浸透度合いが内部拡散を促進している可能性は低いと推察される。

4. 表面被覆施工時の留意事項

本研究でのデータ整理・分析および詳細調査の結果、コンクリートに特段の異常は認められない場合、表面被覆施工後に補修効果が発揮されない要因として、施工後においても中性化（炭酸化）による塩化物イオンの内部拡散が発生し深部の塩化物イオン濃度が上昇すること及び、フランジテーパー部のような鉄筋等鋼材かぶり不足が発生しやすく他の部位より塩分量の割合が大きくなる傾向がある部位の存在があげられた。

本研究における調査結果をもとに、施工上の留意事項等を整理した（表-5）。今後土木研究所資料等に公表し、留意事項であげているリスクに着眼した調査・補修等を行うことで、補修効果を確実に発揮させることが期待される。

5. まとめ

本研究にて得られた事項を以下に示す。

- (1)表面被覆工法で補修された既設PC桁を対象に、データ整理・分析を行った結果、表面被覆によ

表-5 表面被覆工法の品質を確保するための施工上の留意事項（案）

損傷要因の詳細	施工上の留意事項	留意事項を踏まえた調査・補修例
内部拡散による塩化物イオン濃度上昇	<ul style="list-style-type: none"> <li>事前に鋼材位置の塩化物イオン濃度が <math>C_{lim}</math> 以上となっていないか要確認。<math>C_{lim}</math> 未満の場合でも、中性化が生じており表面付近の可溶性塩化物イオンの割合が大きい場合は、内部拡散による塩化物イオン濃度上昇の可能性が示唆されるため、施工前に塩化物イオンを除去することや鋼材の防錆機能を向上させる必要がある。</li> <li>また、中性化（炭酸化）による塩化物イオン濃度の上昇を抑制する手法として、可溶性塩化物イオンの生成を抑制するためにコンクリート内部の含水率を低減させる手法の検討も視野に入れる必要がある。</li> </ul>	<p>【施工前事前調査】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>内在塩分量及び中性化深さ                     <ul style="list-style-type: none"> <li>コア削孔、ドリル法など</li> </ul> </li> <li>腐食可能性                     <ul style="list-style-type: none"> <li>自然電位法など（表面が絶縁状態の場合などは要注意）</li> </ul> </li> <li>かぶり厚さ                     <ul style="list-style-type: none"> <li>電磁波レーダーなど</li> </ul> </li> </ul> <p>【補修】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>内在塩分の除去                     <ul style="list-style-type: none"> <li>はつり、断面修復材による補修（マクロセルを抑制する工法の併用など検討）</li> </ul> </li> <li>脱塩工法（PC鋼材の水素脆化など要注意）</li> <li>防錆機能の向上                     <ul style="list-style-type: none"> <li>電気防食工法</li> <li>含浸材塗布（アルカリ性回復による不導体被膜の再生など）</li> <li>（アルカリ性回復については ASR 等）に要注意）</li> </ul> </li> </ul>
鋼材かぶり不足および塩分量の割合が大きくなる部位の存在（フランジテーパー部など）	<ul style="list-style-type: none"> <li>うき、剥離・鉄筋露出の有無、かぶり厚さを確認したうえで、腐食鋼材においては錆（不純物）を確実に除去する必要がある。</li> <li>施工前に塩化物イオンを除去することや鋼材の防錆機能を向上させる必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>はつり、断面修復材による補修（マクロセルを抑制する工法の併用など検討）</li> <li>脱塩工法（PC鋼材の水素脆化など要注意）</li> <li>防錆機能の向上                     <ul style="list-style-type: none"> <li>電気防食工法</li> <li>含浸材塗布（アルカリ性回復による不導体被膜の再生など）</li> <li>（アルカリ性回復については ASR 等）に要注意）</li> </ul> </li> </ul>

り外部からの塩化物イオン供給が抑制できたとしても、内部拡散により塩化物イオン濃度が表面部は減少、深部である鋼材付近では増加する可能性があることが確認された。

(2)データ整理・分析および詳細調査の結果、コンクリートに特段の異常は認められない場合、表面被覆施工後に補修効果が発揮されない要因として、施工後においても中性化（炭酸化）による塩化物イオンの内部拡散が発生し深部の塩化物イオン濃度が上昇すること及び、フランジテーパー部のような鉄筋等鋼材かぶり不足が発生しやすく他の部位より塩分量の割合が大きくなる傾向がある部位の存在があげられた。

(3)調査結果をもとに、施工上の留意事項等を整理した。留意事項であげているリスクに着眼した調査・補修等を行うことで、補修効果を確実に発揮させることが期待される。

本研究では、施工上の留意事項を踏まえた調査・補修例として、現時点で有効と考えられる手法を提示した。今後の課題として、コンクリート内の塩分を簡易に計測できる手法や、中性化（炭酸化）に伴う可溶性塩化物イオンの生成を抑制するためにコンクリート内部の含水率を低減させる

手法の検討が必要である。

### 謝 辞

本研究は、土木研究所構造物メンテナンス研究センターとプレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究の一環として行われた。ご協力を頂いた関係各位に対し、ここに謝意を表する。

### 参考文献

- 塚崎翔太、山本将、杉江匡紀、石井智大：補修10年程度経過した既設PC橋の塗装工法に関する調査、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、Vol.29、pp.385～388、2020
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、pp.183～187、2017
- 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕、p.156、2018
- 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'15、p.184、2015
- セメント協会：コンクリート専門委員会報告F1-F18合本版、pp.353～411、1967
- 古賀裕久、渡辺博志、河野広隆、片平博：表面吸水試験を用いたコンクリート品質評価に関する基礎的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.739～744、2013
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、pp.185～186、2017
- 神田衛、吉田八郎：コンクリート打込み後の部材断面における水セメント比の分布性状、セメント・コンクリート、No.357、pp.38～43、1976

山本 将



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員  
現 中日本高速道路(株)  
YAMAMOTO Susumu

佐藤純弥



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員  
SATOU Junya

石田雅博



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員  
ISHIDA Masahiro