

報告 沿岸部におけるコンクリート道路橋の下部構造の塩害劣化の特徴に関する検討

新倉 功也*1・江泉 翔太*2・中村 浩士*1・中村 英佑*3

要旨: 本報告では、沿岸部のコンクリート道路橋の下部構造の表面変状や塩化物イオン浸透状況、鉄筋の腐食状態を調査し、下部構造の塩害劣化の特徴について検討した。この結果、上部構造よりにもかぶり大きい下部構造においても、コンクリート内部に浸透した塩化物イオンの影響で最外縁鉄筋が腐食し、鉄筋付近でコンクリート表面と平行方向に剥離状のひび割れが進展することによって、かぶりコンクリートの浮きが生じた事例が確認された。また、この変状はコンクリート表面に兆候が表れにくいため、定期点検ではかぶりコンクリートの変状の有無や塩化物イオン浸透状況を適切に把握することが重要であることが分かった。

キーワード: 塩害、鉄筋腐食、コンクリート道路橋、下部構造、ひび割れ

1. はじめに

従来、コンクリート道路橋の塩害による内部鋼材の腐食を防止する方法として、所定のかぶりを確保する方法が多く採用されてきた。現行の道路橋示方書¹⁾²⁾では、沿岸部の最も厳しい塩害環境に位置するコンクリート道路橋において、塩害による劣化を防止するため、上部構造で 70mm、下部構造で 90mm の最小かぶりが規定されている。下部構造の最小かぶりは、上部構造のものよりも大きく規定されている。しかし、下部構造の現行の最小かぶりは 2002 年に規定されたが³⁾、これ以前は現行よりも小さく規定されていた⁴⁾。従って、2002 年以前に建設された下部構造は、2002 年以降に建設された下部構造よりも塩害による劣化が生じるリスクが高い可能性がある。

沿岸部のコンクリート道路橋の塩害による劣化は、上部構造において確認されることが多くあったが、過去の調査では下部構造でも確認されつつある⁵⁾。今後は下部構造においても塩害による劣化が顕在化する可能性がある。しかし、コンクリート道路橋の下部構造の塩害による劣化の特徴に関する知見は十分に蓄積されていない。

そこで、本報告では、沿岸部に位置する 2 橋のコンク

リート道路橋の下部構造において、コンクリート表面の変状やコンクリート内部の塩化物イオン浸透状況、鉄筋の腐食状態を調査し、コンクリート道路橋の下部構造の塩害による劣化の特徴について検討した。

2. 調査方法

2.1 調査橋梁の概要

調査対象は、日本海の沿岸部に位置するコンクリート道路橋（A 橋、B 橋）の下部構造である。A 橋は、1996 年に竣工し、調査時点で 27 年が経過した橋梁である。B 橋は、1971 年に竣工し、調査時点で 52 年が経過した橋梁である。両橋とも、日本海の沿岸部の海岸線から 100m までの範囲に位置しており、現行の道路橋示方書では最も厳しい塩害対策区分で供用されてきた。

A 橋の橋梁全景を写真-1 に、調査箇所を写真-2 に示す。写真-2 に示すとおり、対象橋脚西側の A-1 と、同一橋脚東側の A-2、A-2f の計 3 か所で調査を行った。また、A 橋では 2019 年度の定期点検において下部構造の一部で約 1.9m² の浮きの変状が確認されていた。このため、浮きが確認された範囲と他の範囲における鉄筋の



写真-1 橋梁全景 (A 橋)



写真-2 調査箇所 (A 橋)

*1 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員 (正会員)
 *2 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員 (正会員)
 *3 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員



写真-3 橋梁全景 (B 橋)



写真-4 調査箇所 (B 橋)

表-1 調査項目

調査項目	A-1	A-2	A-2f	B-1	B-2
外観変状 (目視・打音)	○	○	○	○	○
外観変状 (赤外線カメラ)	—	○	○	—	—
圧縮強度 (JSCE-G504-2013)	○	○	—	○	○
中性化深さ (JIS A 1152 : 2018)	○	○	—	○	○
塩化物イオン濃度 (JIS A 1154 : 2020)	○	○	—	○	○
鉄筋の腐食状態 (目視)	○	○	○	○	—
最外縁鉄筋の実かぶり (ノギス)	○	○	○	○	—

※ ○ : 実施 — : 未実施

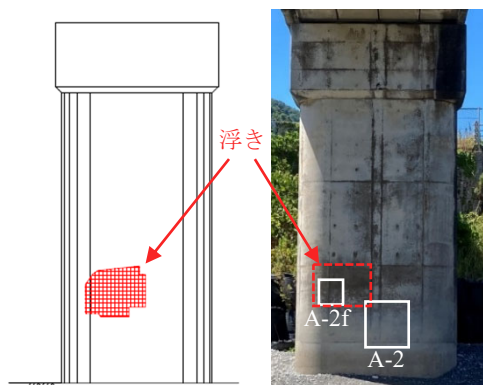


図-1 定期点検で確認された浮き (A-2・A-2f)

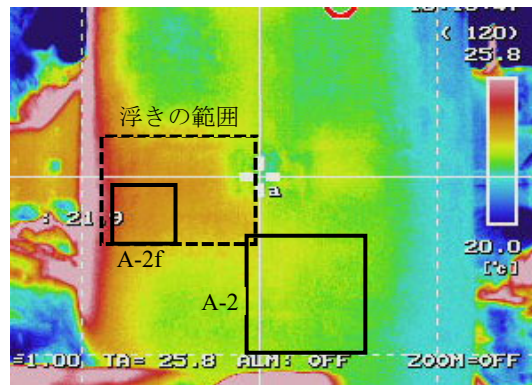


図-2 赤外線カメラの撮影結果 (A-2・A-2f)

状態を確認するために、浮きの範囲内 (A-2f) と浮きの範囲外 (A-2) において鉄筋の腐食状態の調査を行った。

次に、B 橋の橋梁全景を写真-3 に、調査箇所を写真-4 に示す。写真-4 に示すとおり、調査対象は撤去済みの旧橋橋台であり、B-1、B-2 の 2 か所で調査を行った。

各箇所で行った調査項目の内容を表-1 に示す。各調査項目の詳細を以下に記載する。

2.2 外観変状の調査

外観変状の調査では、下部構造の全体において、近接目視によるひび割れ等の変状の確認、点検ハンマーを用いた打音による浮きの確認を行った。

前述のとおり過去の定期点検で浮きが確認されていた A 橋では、浮きの有無や範囲を確認するために、赤外線カメラを用いて A-2f と A-2 を含む範囲のコンクリートの表面温度を可視化した画像を撮影した。

2.3 圧縮強度の推定

テストハンマーを用いて反発度を測定することにより圧縮強度を推定した。反発度の測定は JSCE-G504-2013

に準拠し、文献 6) の推定式を用いて圧縮強度を推定した。

2.4 中性化深さの測定

中性化深さの測定では、JIS A 1152 : 2018 に準拠して、後述する塩化物イオン濃度の測定箇所である直径 20mm のドリル孔で測定を行った。水洗いにより孔内を洗浄した後、フェノールフタレイン溶液を噴霧し、コンクリート表面から赤紫色に発色した領域までの深さを中性化深さとした。ドリル孔 1 か所につきノギスで 1 点を測定し、ドリル孔 3 か所の平均を中性化深さとした。

2.5 塩化物イオン濃度の測定

塩化物イオン濃度の測定については、JIS A 1154 : 2020 に準拠し、電位差滴定法により行った。直径 20mm のドリルを用いて隣接する 3 か所で試料を採取し、同深度の試料を混合して 1 試料とした。A 橋では、コンクリート表面から深さ 60mm までを 10mm 間隔、深さ 60mm から 160mm までを 20mm 間隔に分け、それぞれの深度における塩化物イオン濃度を測定した。B 橋では、コンクリート表面から深さ 160mm までを 20mm 間隔に分け、それ

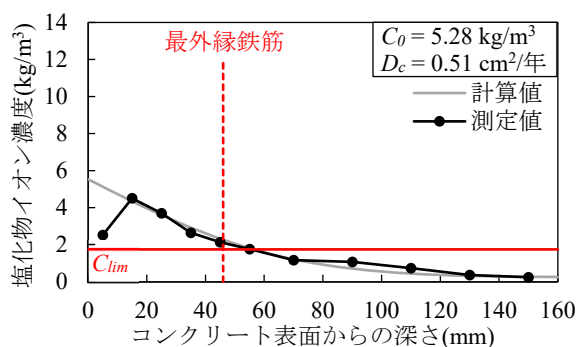


図-3 塩化物イオン濃度の測定結果 (A-1)

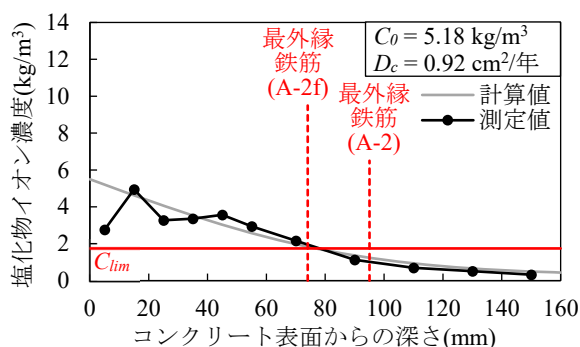


図-4 塩化物イオン濃度の測定結果 (A-2)

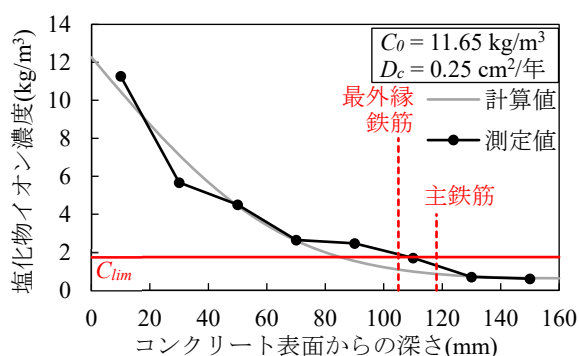


図-5 塩化物イオン濃度の測定結果 (B-1)

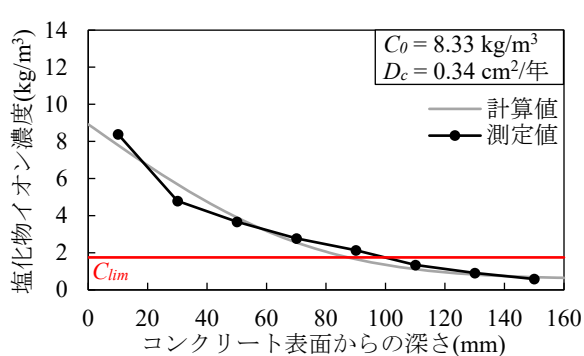


図-6 塩化物イオン濃度の測定結果 (B-2)

それぞれの深度における塩化物イオン濃度を測定した。なお、A-2fでは、浮きの影響により適切に試料を採取できなかったため、塩化物イオン濃度の測定を行っていない。

2.6 鉄筋腐食状態と実かぶりの調査

かぶりコンクリートをコアドリルとコンクリートブレーカで除去し、鉄筋の腐食状態とコンクリート内部の鉄筋周囲のひび割れの有無を目視で観察した。また、最外縁鉄筋の実かぶりを測定した。

3. 調査結果

3.1 外観変状の調査結果

図-1にA橋の定期点検で確認された浮きの範囲、図-2にA橋の赤外線カメラの撮影結果を示す。A橋では、近接目視でひび割れ等の外観の変状は確認されなかった。点検ハンマーによる打音の確認では、A-1、A-2付近に異常は見られなかったが、図-1に示すA-2fの周囲で浮きによるものと思われる鈍い音が確認された。また、赤外線カメラの撮影結果では、A-2付近に異常は見られなかったが、図-2に示すとおり、A-2fの周囲においてコンクリート表面の温度が周囲より0.5～1.0℃ほど高くなっていた。コンクリート内部に存在する浮きの影響によるものと推測される。

一方、B橋では、近接目視と打音確認によってひび割れや浮き等の変状は確認されなかった。

3.2 圧縮強度の推定結果

圧縮強度の推定結果は、A-1で36.2N/mm²、A-2で35.0N/mm²、B-1で49.6N/mm²、B-2で49.9N/mm²であった。これらの推定結果から、一般的な下部構造の設計基準強度24～30N/mm²と比較して、基準以上のコンクリートの圧縮強度が得られていると考えられる。

3.3 中性化深さの測定結果

中性化深さの測定結果は、A-1で2.0mm、A-2で1.0mm、B-1で4.1mm、B-2で1.8mmであった。一方、各調査箇所における最外縁鉄筋までの実かぶりは、A-1で46mm、A-2で95mm、B-1で105mmであった。これらの測定結果から、中性化深さの測定値は最大でも4.1mmであり、実かぶりと比較して十分小さいため、中性化による鉄筋腐食は生じていないと考えられる。また、B-2では実かぶりの測定を行っていないが、B-1と同等であると仮定すると、中性化の影響は十分小さいと推測される。

3.4 塩化物イオン濃度の測定結果

各調査地点の塩化物イオン濃度の測定結果を図-3～図-6に示す。これらの図では、塩化物イオン濃度の測定値に加えて、式(1)による塩化物イオン濃度の分布、見掛けの拡散係数、表面塩化物イオン濃度の計算値を示した。A-1とA-2の最表層の塩化物イオン濃度の値は、中性化の影響が疑われたため除外したうえで計算を行った。

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right\} + C_i \quad (1)$$



写真-5 鉄筋の腐食状態 (A-1)

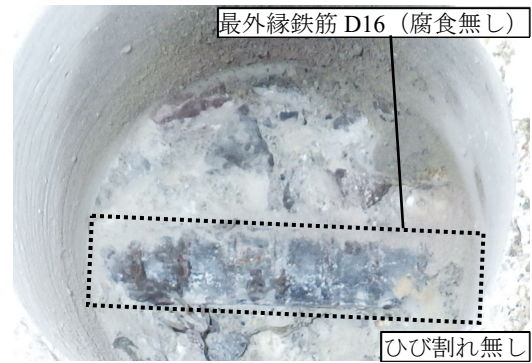


写真-6 鉄筋の腐食状態 (A-2)



写真-7 鉄筋の腐食状態 (A-2f)

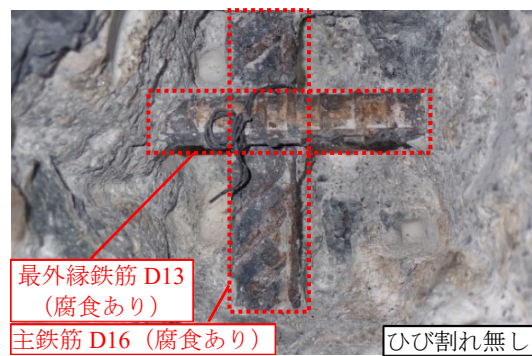


写真-8 鉄筋の腐食状態 (B-1)

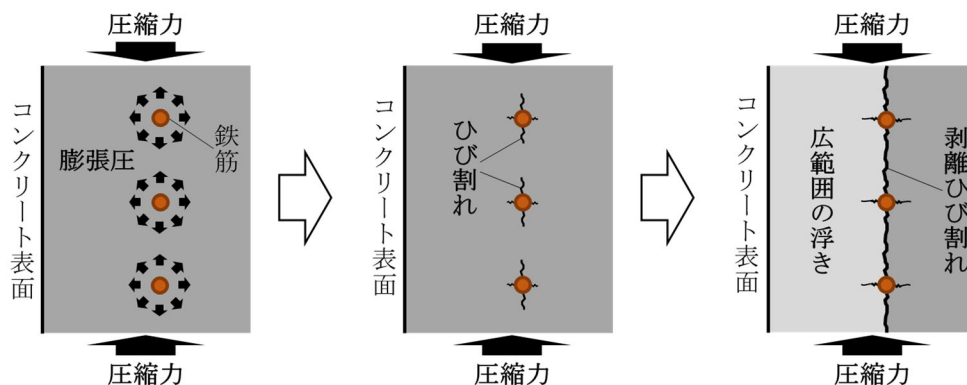


図-7 剥離ひび割れの発生メカニムのイメージ図

ただし、 C ：塩化物イオン濃度(kg/m³)

C_0 ：表面塩化物イオン濃度(kg/m³)

D_c ：見掛けの拡散係数(cm²/年)

t ：経過時間(年)

x ：コンクリート表面からの深さ(cm)

C_i ：初期塩化物イオン濃度(kg/m³)

図-3～図-6には、最外縁鉄筋の実かぶりの測定結果も示した。同一橋脚のA-1、A-2、A-2fで実かぶりが異なるが、当時の設計を踏まえると、施工時に鉄筋が躯体形状に対して傾いて設置されていた可能性がある。また、前述のとおりA-2fでは浮きの影響により塩化物イオン濃度測定用の試料を採取できなかったため、A-2と併せて実かぶりの測定結果を示した。B-2では実かぶりの測定を行っていないため測定結果を示していない。

さらに、これらの図では、式(2) ⁷⁾による腐食発生限界塩化物イオン濃度の計算値を示した。計算にあたっては、セメントの種類を普通ポルトランドセメント、水セメント比を55%と仮定した。

$$C_{lim} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad (2)$$

ただし、 C_{lim} ：腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m³)

W/C ：水セメント比

図-3と図-4によると、A橋では、A-1とA-2fにおいて鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回っていたが、A-2では下回っていた。また、図-5と図-6によると、B橋では、B-1における鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度と同等となっていた。

次に、表面塩化物イオン濃度の計算値については、A

橋に比べてB橋で大きくなった。一方、見掛けの拡散係数の計算値はA橋に比べてB橋で小さくなった。これらの計算結果によると、両橋とも日本海の沿岸部で供用されてきたが、A橋に比べてB橋の塩害環境が厳しい可能性があること、A橋に比べてB橋のコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性が高い可能性があることが分かる。

3.5 鉄筋腐食状態の調査結果

A橋の鉄筋腐食状態を写真-5～写真-7に示す。最外縁鉄筋は水平方向の帯鉄筋であり、間隔はA-1付近で平均186mm、A-2、A-2f付近で平均196mmである。A-1とA-2fでは最外縁鉄筋の腐食が確認されたが、A-2では腐食は確認されなかった。この傾向は、前述した鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食発生限界塩化物イオン濃度の関係と一致する。また、A-1とA-2fでは、コンクリート内部の最外縁鉄筋の周囲のコンクリートにひび割れが見られた。前述のとおり、外観変状の調査ではコンクリート表面にひび割れは確認されなかったが、コンクリート内部では最外縁鉄筋付近においてコンクリート表面と平行方向に剥離状のひび割れが進展していた。このひび割れ（以下、剥離ひび割れ）がかぶりコンクリート内部で進展することによって、図-1に示したA-2f付近の浮きが生じたと考えられる。また、A-1では、打音による調査で異常は見られなかったが、A-2f付近と同様に鉄筋腐食と剥離ひび割れが生じていることから、将来的には浮きに進展する可能性があると考えられる。

B橋の鉄筋腐食状態を写真-8に示す。B-1付近の最外縁鉄筋の間隔は平均298mmである。B-1では、最外縁鉄筋である帯鉄筋と主鉄筋のどちらも表面に軽微な腐食が確認されたが、A橋と異なり、かぶりコンクリートに剥離ひび割れ等の変状は見られなかった。A橋に比べてB橋の最外縁鉄筋の腐食の程度が軽微だったことや、最外縁鉄筋の鉄筋間隔が大きいことが原因として考えられる。

3.6 剥離ひび割れの発生原因

A橋の鉄筋腐食状態と塩化物イオン浸透状況を比較すると、前述のとおり、塩化物イオン濃度が腐食発生限界を超過していたA-1とA-2fの最外縁鉄筋において腐食が生じていた。また、同箇所においてかぶりコンクリートに剥離ひび割れが生じていた。従って、A橋では、塩化物イオンの浸透に起因する鉄筋腐食により、かぶりコンクリートの剥離ひび割れが生じたと考えられる。

剥離ひび割れの発生メカニズムのイメージ図を図-7に示す。一般に、下部構造には鉛直方向の圧縮力が常時作用している。鉄筋腐食が生じるとコンクリート内部に腐食生成物による膨張圧が生じるが、常時作用する圧縮力によって水平方向へのひび割れの進展が抑制された可能性が高いと考えられる。このため、鉛直方向にひび割れが進展、連続して剥離ひび割れとなり、かぶりコンク

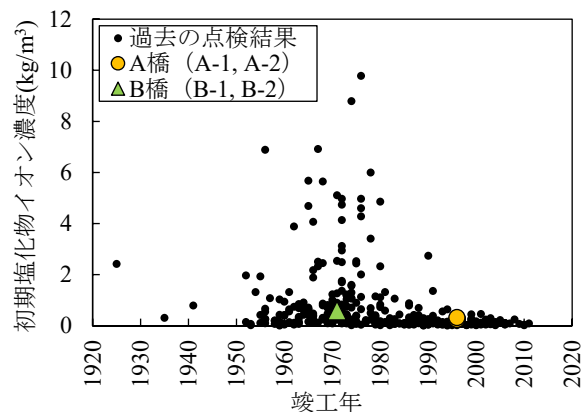


図-8 初期塩化物イオン濃度の比較結果

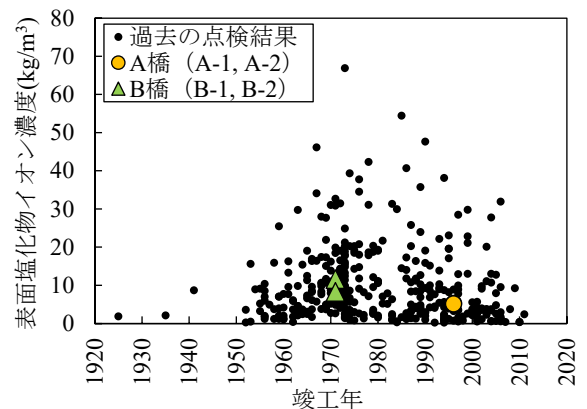


図-9 表面塩化物イオン濃度の比較結果

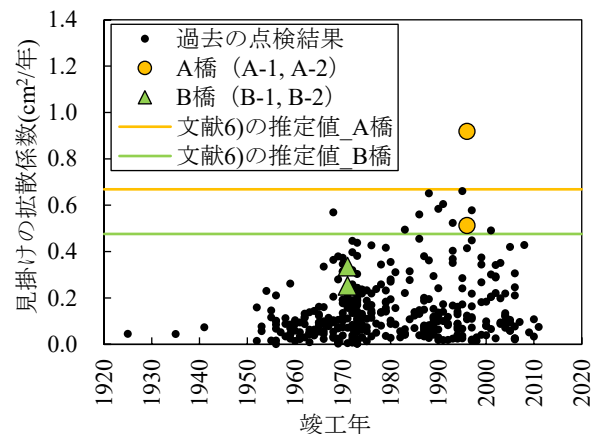


図-10 見掛けの拡散係数の比較結果

リートの浮きが生じたと考えられる。また、過去に供試体を用いて行われた実験⁸⁾では、コンクリートのかぶりが大きく、鉄筋間隔が小さい状態になると、ひび割れが鉄筋間で連続して進展することが確認されている。従って、A橋では、コンクリート内部に塩化物イオンが浸透し最外縁鉄筋の腐食が生じたこと、及び最外縁鉄筋の間隔がB橋と比較して小さいことにより、コンクリート表面と平行方向にひび割れが進展、連続し、剥離ひび割れとなったと考えられる。

以上のことを踏まえると、下部構造の塩害による劣化では、鉄筋腐食により生じたコンクリート内部のひび割

れがコンクリート表面と平行方向に進展して剥離ひび割れとなる場合があるため、コンクリート表面に兆候が表れにくいという特徴がある。このため、定期点検の際には、外観目視だけでなく打音調査や赤外線カメラ等の複数の方法を併用し、かぶりコンクリートの異音や温度変化等の変状を検知することが重要であると考えられる。

3.7 過去の点検結果との比較

過去の点検結果との比較を行うために、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）」⁹⁾に基づく点検が行われたコンクリート道路橋の下部構造の分析結果¹⁰⁾と本報告の調査結果を比較する。初期塩化物イオン濃度、表面塩化物イオン濃度、見掛けの拡散係数の比較結果を図-8～図-10に示す。

A 橋については、過去の点検結果の傾向と比較して初期塩化物イオン濃度、表面塩化物イオン濃度に明確な差は見られなかった。一方、見掛けの拡散係数は、図-10に示す過去の点検結果や土木学会コンクリート標準示方書¹¹⁾の推定式より算出した拡散係数（水セメント比を 55%と仮定）と比較して、大幅に大きくなっていた。初期塩化物イオン濃度や表面塩化物イオン濃度が大きくない場合でも、かぶりコンクリートの品質が低く、見掛けの拡散係数が大きいと、竣工から 27 年の段階で塩化物イオンの浸透に起因する鉄筋腐食が生じることがあると考えられる。

一方、B 橋については、過去の点検結果の傾向と比較して初期塩化物イオン濃度、表面塩化物イオン濃度に明確な差は見られなかった。また、見掛けの拡散係数も A 橋と比較して小さい値となっており、過去の点検結果の値と同程度であった。しかし、竣工から 50 年以上経過したことにより、最外縁鉄筋の鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度と同等となり、鉄筋の表面に軽微な腐食が生じていたと考えられる。

以上のことを踏まえると、A 橋のようにかぶりコンクリートの品質が低いと、十分なかぶりが確保されている場合であっても、最外縁鉄筋の鉄筋位置に塩化物イオンが浸透し、最外縁鉄筋の腐食に加えて、剥離ひび割れが生じる可能性があると考えられる。これらの劣化は、目視による外観調査だけでは早期の検知が困難と考えられる。従って、下部構造の塩害による劣化を早期に検知するためには、定期点検の際に、かぶりコンクリートの変状の有無や塩化物イオンの浸透状況を適切に把握することが重要であると考えられる。

4. まとめ

本報告では、沿岸部に位置する 2 橋のコンクリート道路橋の下部構造において、コンクリート表面の変状やコンクリート内部の塩化物イオン浸透状況、鉄筋の腐食状

態を調査し、コンクリート道路橋の下部構造の塩害による劣化の特徴について検討した。本調査の範囲内で得られた知見は以下のとおりである。

- ・上部構造よりもかぶりが大きい下部構造においても、コンクリート内部の最外縁鉄筋の鉄筋位置に塩化物イオンが浸透し、腐食発生限界塩化物イオン濃度を超えると、鉄筋腐食が生じる。
- ・下部構造の最外縁鉄筋が腐食すると、最外縁鉄筋付近でコンクリート表面と平行方向にひび割れが進展し、剥離状のひび割れが生じて浮きとなる可能性がある。
- ・下部構造の塩害劣化を早期に検知するためには、定期点検でかぶりコンクリートの変状の有無や塩化物イオン浸透状況を適切に把握することが重要である。

謝辞

本調査では、国土交通省東北地方整備局酒田河川国道事務所および北陸地方整備局高田河川国道事務所の関係各位の協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，pp.85-89，2017.11
- 2) 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.183-187，2017.11
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，pp.169-172，2002.3
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，pp.150-163，1996.12
- 5) 木村嘉富，田中良樹：塩害に対する PC 道路橋の維持管理と設計へのフィードバック，プレストレストコンクリート，Vol.52，No.2，pp.43-48，2010.3
- 6) 社団法人日本材料試験協会 実施コンクリート強度判定法委員会：シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法指針（案），材料試験，Vol.59，No.7，pp.426-430，1958.8
- 7) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.164-170，2022
- 8) 田森清美，丸山久一，小田川昌史，橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.505-510，1988
- 9) 国土交通省道路局：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案），2004
- 10) 川井菜緒，内田雅一，中村英佑：道路橋下部構造における塩害に対する耐久性の傾向分析，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.24，pp.633-636，2024