凍結抑制剤による塩害を受けるコンクリート橋の維持・補修に関する検討

CONSIDERATION ABOUT MAINTENANCE AND REPAIR IN THE CONCRETE BRIDGE WHERE DAMAGE FROM CHLORIDE IONS CONTAINED IN THE ANTI-FREEZING AGENT

鹿内 陽介 *・松山 公年 **・山根 誠一 **・金本 康宏 *・石原 晃一 * Yousuke SHIKANAI, Kimitoshi MATSUYAMA, Seiichi YAMANE, Yasuhiro KANEMOTO and Kouichi ISHIHARA

Ever since the prohibition in the use of studded tires in 1993, road administrators tend to increase use of anti-freezing agent for traffic safety in winter. Thus, damage of concrete bridges by chloride ions in the anti-freezing agent will become more common in the future. To clarify the damage mechanism and effective maintenance measures, we conducted a survey and study for bridges damaged by chloride in anti-freeze. The results of the investigation show that damage is affected by the anti-freezing agent spraying amount, presence of a water leak, the quality of the concrete, etc. We have proposed degradation prediction method based on the results.

Keywords: Concrete bridge, Maintenance, Salt damage, Anti-freezing agent, Preventive maintenance measures

1. はじめに

(1) 現状の課題・問題

平成 5 年のスパイクタイヤ使用禁止以降、冬期の交通安全確保のため凍結抑制剤散布量は増加傾向(平成 12 年以降は天候・気温等による増減はあるものの横ばい傾向、図-1)にある。それにより、凍結抑制剤に含まれる塩化物イオンによるコンクリート橋梁の塩害損傷が顕在化してきており(写真-1)、今後さらなる劣化進行が懸念されている。

塩害劣化は、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4段階に大きく分類され(図-2)¹⁾、一般に、損傷が顕在化する前の時点(潜伏期、進展期)で予防保全対策を実施すれば比較的簡易な対策で済む場合が多い。一方、損傷が顕在化した時点(加速期以降)では大規模な補修・補強が必要になり、多大な手間と費用を要する場合が多い。

以上のことから、塩害については予防保全的な観点から対策を実施することが、橋梁の効率的な維持管理および長寿命化の観点から極めて重要である。しかし、以下の問題があり予防保全的対応の導入の阻害となっている。

- 塩害は、塩化物イオンがコンクリート中に浸透することにより劣化が進行するが、加速期に達するまで外観に損傷が現れないため、通常の目視主体の定期点検では要対策と判定されない。
- 塩害劣化状況を把握するには、試料を採取し塩化物イオン量試験を行う必要がある。しかし、東北地整管内で

- はほとんどの橋梁で凍結抑制剤が散布されており、全ての橋梁で調査を行うには多大な手間と費用を要する。
- 海からの飛来塩分による塩害の場合には、「海岸からの 距離」により、塩害の劣化進行を把握する方法が示方 書等に示されているが、凍結抑制剤による塩害につい ては劣化進行に及ぼす影響要因が不明確でありそのよ うな劣化予測手法が一般化されていない。



図-1 凍結抑制剤散布量 (東北地方整備局管内)





写真-1 凍結抑制剤散布状況と塩害劣化状況

^{*} コンサルタント国内事業本部 仙台支店 技術第一部

^{**} コンサルタント国内事業本部 インフラマネジメント事業部 アセットマネジメント技術部

腐食発生限界塩化物イオン濃度到達 コンクリートに 腐食ひび割れ発生 鋼材の腐食開始 ĤΠ 供用期間 大規模な対策が 外観損傷が見られないた CC 大 め対策が実施されない。 劣化進行が速い ・耐荷力の低下 部村 剛性の低下 LCC /l\ ◀ 鉄筋 **温分の浸透 鉄筋** 塩分の浸透 発錆 進展期 潜伏期

図-2 塩害の劣化過程概念図

表-1 供給源の違いによる比較

| 塩分供給源 | 海 | 凍結抑制剤 |
|-------|-----------------|------------|
| 供給経路 | 飛来塩分 (水中部除く) | 抑制剤散布 (粉末) |
| 影響要因 | 海岸からの 距離等 | 凍結抑制剤散布量等 |
| 影響期間 | 1年中 | 冬季のみ |

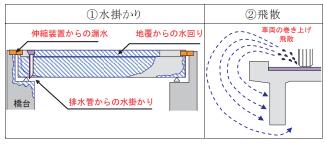
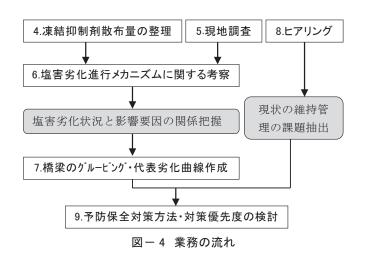
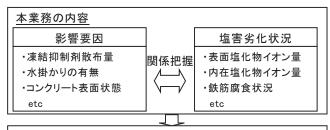


図-3 凍結抑制剤の塩分供給経路



(2) 本業務の目的

本業務では、コンクリート橋の効率的な維持管理と長寿命化に向け、東北地方整備局管内のコンクリート橋について調査・検討を行い、凍結抑制剤による塩害劣化進行要因を明らかにするとともに、簡便な劣化予測手法の開発および効果的な予防保全対策工法・範囲・時期について検討を行った。なお、本業務は、国土交通省東北地方整備局東北技術事務所から3カ年の継続業務(H23~H25年度)として委託されたものであり、当社が実施した2年目、3年目の調査・検討内容について本稿で報告を行う。



本業務の目的

- ・既往資料等から簡便に塩害劣化状況の把握、劣化予測を行えるようにする。
- ・効果的な予防保全対策工法・範囲・時期を明確にする。

2. 凍結抑制剤による塩害劣化の特徴と業務の着目点

凍結抑制剤による塩害は、海からの飛来塩分と比較して塩 化物イオンの供給経路・要因・期間等が異なる(表-1)。

特に、凍結抑制剤の塩化物イオン供給経路として、①水掛かり、②飛散の影響が考えられるが、経路により影響が大きく異なると想定されることから(図 - 3)、それらに着目して調査・検討を行った。

3. 業務の流れ

業務の流れを図-4に示す。

4. 凍結抑制剤散布量の整理

(1) 目的

凍結抑制剤による塩害劣化は、凍結抑制剤散布量が多い ほど塩化物イオン供給量が多くなり劣化進行が速くなると想定 される。そのため、まずは各橋梁における凍結抑制剤散布量 を把握し、塩害の劣化状況(外観変状、塩化物イオン浸透状 況等)との関係を把握する必要がある。

本章では上記分析の基礎資料とするため、橋梁群を含む各路線の凍結抑制剤散布量の整理を行った。

(2) 方法

東北地方整備局管内の除雪工区(41 出張所)について、

除雪日報および除雪計画書を収集・整理し、工区ごとに H18 ~ H23 年の年平均単位あたり凍結抑制剤散布量 (t/km) を 算出した。また、維持業者に対して除雪に関するアンケート・ヒアリングを実施し、その結果を踏まえ、各橋梁の単位あたり 凍結抑制剤散布量を整理した。また、凍結抑制剤散布量を地図上に整理した (図 - 6)。

5. 現地調査

(1) 目的

凍結抑制剤による塩害劣化状況(塩化物イオン浸透量、鉄筋腐食状況、腐食ひび割れ有無等)を把握することを目的として現地調査を実施した。

(2) 対象橋梁・部位

東北地方整備局管内のRCT橋、PCT橋(一部、PC床版橋含む)のうち、下記条件に該当する橋梁を対象とした。

- 海からの飛来塩分、津波の影響を受けていない橋梁(凍 結抑制剤の影響のみ受ける橋梁)
- 地上、梯子、検査路で作業が可能(作業性を考慮)
- 対象部位は、かぶりが小さく塩害の影響が特に懸念される上部工(主桁、床版)

(3) 調査項目

現地調査項目と目的を表-2に示す。なお、調査にあたっては発注者(東北技術事務所)および東北学院大学との合同現地調査を行い調査方法等についてご指導いただいた。

(4) 現地踏査

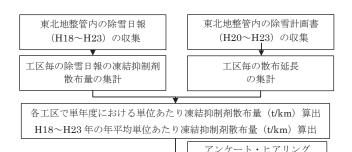
1) 方法

冬期における積雪状況、融雪水の流下状況、凍結抑制剤を含む融雪水の橋梁表面(コンクリート表面)への付着状況(水回り状況)、塩害に起因する損傷(腐食ひび割れ等)を目視調査等により確認した。

2) 結果概要

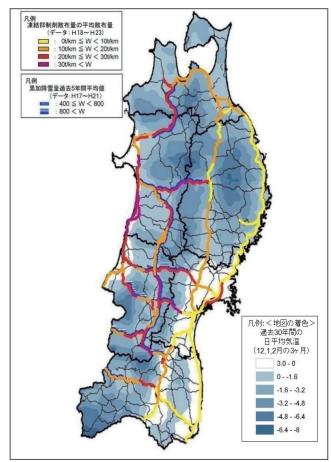
部材への水掛かりの原因として、伸縮装置からの漏水 (写真-3)、地覆 (雪堤) からの水回り、床版間詰め・上下線隙間・縦目地からの漏水、排水管・スラブドレーンの流末処理不良箇所が確認された。

- 水掛かりがある箇所は、そうでない箇所に比べて塩害 損傷(腐食ひび割れ等)が発生している割合が高い。
- 水切りが設置されている箇所は、地覆からの水回りはほとんど見られなかったが、水切りの機能が不十分で水が回り込んでいる箇所が一部確認された。
- ほとんどの橋梁で伸縮からの漏水が見られた。非排水型の伸縮装置でもバックアップ材の劣化等により漏水が生じているものが多かった。



各橋梁群毎の単位あたり平均散布量(t/km)の整理

図-5 除雪日報 (凍結抑制剤散布量) 整理の流れ



図ー6 凍結抑制剤散布量マップ



写真一2 合同調査踏査状況

表-2 現地調査項目と目的

| 表一2 現地調査項目と目的 | | | | | | | |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|--|
| 調査項目 | 目的 | | | | | | |
| 現地踏査(目視) | 凍結抑制剤(塩化物イオン)の供給経路(伸縮からの漏水、雪堤・地覆からの水回り等)の確認、 損傷状況を把握、詳細調査位置選定。 | | | | | | |
| 付着塩化物 イオン量試験 | 凍結抑制剤の車両による「 <u>飛散</u> 」により部材表面に付着する塩化物イオン量の把握(部材表面に設置したモルタル供試体を使用) | | | | | | |
| 近赤外分光 法調査 | 部材表面に付着する塩化物イオン量の縦断方向・ 横断方向の分布を非破壊で <u>連続的</u> に把握⇒対策 範囲設定根拠とする | | | | | | |
| 塩化物イオン量試験 | ・塩化物イオン量と影響要因(凍結抑制剤散布量、コンクリートの品質等)の相関分析⇒<u>橋梁のグルーピング</u>検討の材料 ・鉄筋位置塩化物イオン量と鉄筋腐食度、外観変状の相関分析⇒<u>塩害劣化過程ごとの塩化物イオン量閾値(目安値)</u>設定 | | | | | | |
| はつり調査 | ・鉄筋腐食度の把握 | | | | | | |
| 中性化試験 | コンクリートの品質、塩化物イオン浸透量との関係、 および鉄筋腐食環境の把握 | | | | | | |
| PC 床版橋 解体調査 | 供用中の橋梁では確認が困難である PC 桁端 (橋座上) および橋座面の劣化状況を把握することを目的として撤去・解体予定である B 橋の桁を対象にコア採取、塩化物イオン量試験、はつり調査を実施。 | | | | | | |





写真-3 現地踏査状況 (左)、伸縮からの漏水箇所 (右)

(5) 付着塩化物イオン量試験(モルタル供試体)

1) 供試体設置方法

H23年度(業務初年度)に、凍結抑制剤散布量の違い等を考慮し、22橋にモルタル供試体(10cm × 8cm、厚さ2cm)が設置されている。このモルタル供試体は、「飛散の影響」を把握することを目的として設置するため、水が掛からない(飛散の影響のみ受ける)構造となっている。なお、飛散塩分付着面以外の5面はエポキシ樹脂でコーティングされている。設置は、主桁側面に架台を設置し、そこにモルタル供試体をはめ込む形となっている(図 - 7参照)。

2) 回収·試験方法

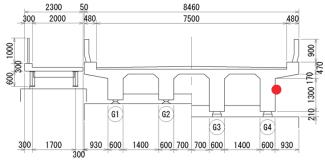
これまでに3回(H24年4月頃、H24年12月頃、H25年7月頃)供試体の回収を行い、JISA1154に準じて塩化物イオン量試験を行った。1回の回収あたり2つの供試体を回収し試験を行った。

3) 結果概要

代表例として、最も付着塩化物イオン量が多かった A 橋の 測定結果を図-8 に示す。図より以下のことが言える。

• 2回目回収時の測定値が、1回目回収時より小さな値 となっている。これは、この間は凍結抑制剤が散布さ





図ー7 付着モルタル供試体設置状況例

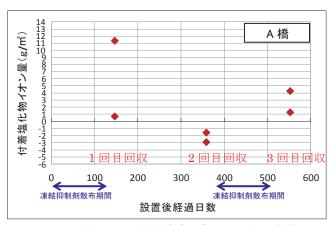


図-8 付着モルタル供試体塩化物イオン量試験結果

れていない期間で外部からの塩化物イオンの供給がなかったこと、および雨による洗い流しの影響を受けたこと等が原因として考えられる。なお、2回目塩化物イオン量がマイナスとなっているのは測定誤差の可能性があると考えられる。

- 2回目に比べて3回目に回収した供試体の塩化物イオン量が多くなっている。これは、凍結抑制剤散布の影響(飛散)により、塩化物イオンが供給されたためと考えられる。
- 凍結抑制剤散布期間 (12 月~翌年 5 月頃) に継続的に設置したモルタル供試体への飛散による塩化物イオン付着量は、最も多い供試体で 11.38g/m² (供試体塩分量 0.62kg/m³) である。この値は、鉄筋の腐食発生限界量 (1.2 kg/m³) に比べて小さい。

なお、一部の橋梁では、1回目に回収した供試体より3回目に回収した供試体の塩化物イオン量が増加していることが確認されている。このことより、経年的に表面塩化物イオン量が増加する可能性もあるため、今後もモニタリングを継続していくことが望ましい。

(6) 近赤外線分光調査

1) 対象橋梁

凍結抑制剤散布量、構造形式、縦断勾配の違い等に着目 し6橋を選定した。

2) 方法

近赤外分光法はコンクリート表面に近赤外光線を照射し、反射光のスペクトル強度を分析することで、コンクリート表面の塩化物イオン量を面的に把握する非破壊試験方法である。図-9に示すようにコンクリート表面にプローブヘッドを操作し、測線方向に連続的に計測を実施した。なお、近赤外線分光法測定結果のキャリブレーションは、近赤外線分光法測定結果から相対的に表面塩化物イオン量が多いと想定される位置、および少ないと想定される位置の各々で採取したグラインダー研磨粉の塩化物イオン量試験(JIS A1154)に基づき行った。

3) 結果概要

凍結抑制剤の影響が顕著であった C 橋の測定結果を代表例として $\mathbf{Z} - \mathbf{10}$ に示す。図より以下のことが言える。

- 横断方向の測定結果より、水掛かりのある張出し床版 部で表面塩化物イオン量が高い傾向が見られる。
- 縦断方向の測定結果より、伸縮装置からの漏水が見られる桁端部の表面塩化物イオン量が高い傾向が見られる(桁端から約2m程度まで表面塩化物イオン量が高い傾向が見られる)。
- 水掛かりの見られない箇所の表面塩化物イオンは、水 掛かりがある箇所に比べて表面塩化物イオン量が小さ い傾向が見られる。

(7) 塩化物イオン量含有量試験

主桁、床版からコアあるいはドリル削孔粉を採取(深さ方向



図 - 9 近赤外分光法調査状況例

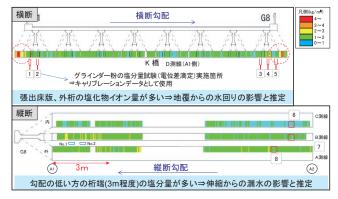


図-10 近赤外線分光法調査結果例(C橋)

2cm ごとに $3 \sim 5$ 試料)し、JIS A 1154 に準じて塩化物イオン量試験を行った。調査結果は 6 章に示す。

(8) はつり調査・中性化試験

20 cm×20 cm程度の範囲をコンクリートカッター、電動ピック等で鉄筋位置まではつりとり、鉄筋の腐食状況を確認し、写真撮影を行うとともに鉄筋径を測定した。断面欠損が見られる場合は、健全部と最も腐食が著しい箇所で径を測定した。また、はつり面にフェノールフタレインを噴霧後、中性化深さを測定した。調査結果は6章に示す。

(9) PC 床版橋解体調査

1) 対象橋梁

- 橋梁名:B橋
- 構造:単純 PC プレテン床版橋
- 竣工年: 昭和39年
- 凍結抑制剤散布量: 8.25t/km・年(H18-H23 平均)

2) 調査内容

B 橋における調査項目、調査位置、作業状況を以下に示す。

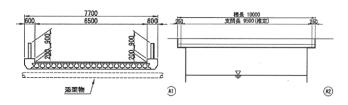


図-11 B橋断面図・側面図

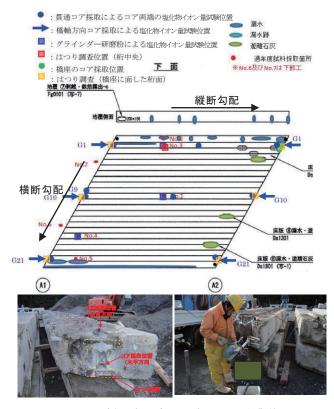


図- 12 B 橋調査内容·調査位置·作業状況

3) 調査結果概要

桁端には水が回ったことによる汚れが多く見受けられ、一部で隅角部に錆汁(写真-4の赤丸部)が見られたが、ひび割れや剥離は認められなかった。

桁端部のはつり調査結果を**写真**-5に示す。鉄筋腐食度は $I \sim II$ と軽微であり、断面欠損を伴うような顕著な腐食は見られなかった。

次に、桁端部から採取したコアの塩化物イオン量試験結果を図-13に示す。桁上面、桁端面、桁下面の順で塩化物イオン浸透量が多い傾向が見られる。14箇所中10箇所(図中の凡例を青枠で囲った箇所以外)で、表層部($0\sim2cm$)の塩化物イオン量が、一般的な鉄筋の腐食発生限界値($1.2kg/m^3$)を上回っていることが確認された。

6. 塩害劣化進行メカニズムに関する考察

凍結抑制剤による塩害劣化進行メカニズムおよび課題を概念的に整理したものを図-14に示す。

上図において、鉄筋腐食時期(進展期到達時期)の劣化 予測は、式(1)に示す Fick の拡散方程式により塩化物イオン浸透予測を行い、鉄筋位置塩化物イオン量を求める方法が一般的である¹⁾。



写真-4 桁端部(左)、桁下面(右)状況

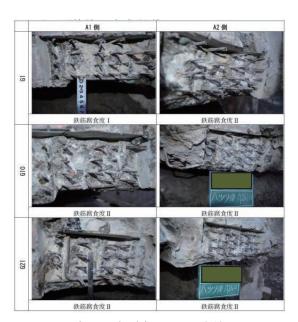


写真-5 桁端部はつり調査結果

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - erf \frac{x}{2\sqrt{Dc \cdot t}} \right) + Ci$$

ここに、

 C_0 :表面における塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_i:初期含有塩化物イオン量(kg/m³)

 D_c : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 $(cm^2/4)$

x :コンクリート表面からの深さ (cm)

t :経過時間(年)

図-15 に既設構造物の劣化予測を行う場合の一般的な流れを示す¹⁾。

しかし、東北地整管内ではほとんどの橋梁で凍結抑制剤が 散布されており、全ての橋梁で塩化物イオン量試験結果に基づく劣化予測を行うのは膨大な手間と費用を要する。

海からの飛来塩分の場合には、海岸からの距離に応じて表面塩化物イオン量 C_0 の目安値が示されており 20 、これにより塩化物イオン量試験を実施しなくとも概略の劣化予測を行うことが可能である。

凍結抑制剤についても上記と同様の方法で塩害劣化進行予測を行うには、凍結抑制剤による塩化物イオン供給経路や影響要因を明らかにしたうえで、簡便に表面塩化物イオン量 C_0

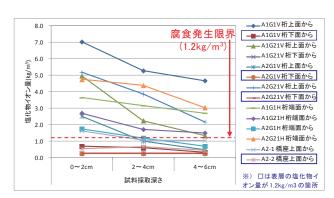


図-13 B 橋桁端部の塩化物イオン量試験結果

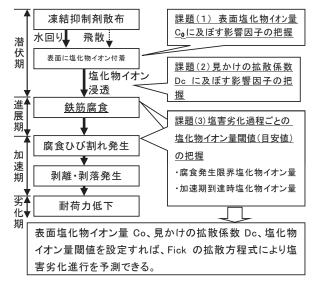


図-14 凍結抑制剤による塩害劣化進行メカニズムと課題

を設定する方法を検討する必要がある(課題1)。

また、塩化物イオンの浸透しやすさを表す見かけの拡散係数 Dc については、飛来塩分の場合と大きな違いはないと考えられるが、ひび割れの有無等により浸透しやすさが異なると考えられるため、東北地整管内の実データに基づき影響要因の考察を行い、簡便に見かけの拡散係数 Dc を設定する方法を検討する(課題 2)。

鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン量はコンクリート標準示方書に一般値が示されているが¹⁾、東北地整管内の実績を基に設定するのが望ましい。また、進展期以降の劣化予測手法については、現状で確立されたものは存在しないが、修繕計画を策定する上で参考とするため加速期到達時の鉄筋位置塩化物イオン量閾値(目安値)を設定することとした(課題 3)。

(1) 表面塩化物イオン量 C₀に及ぼす影響因子

凍結抑制剤による塩化物イオンの供給経路としては、水回り (伸縮からの漏水等)によるものが支配的であり、飛散の影響 は小さいと考えられる。以下に理由を示す。

- 付着モルタル供試体試験結果より、1冬で飛散により付着した塩化物イオン量は、最も多い供試体で11.38g/m² (供試体塩分量0.62kg/m³)と、鉄筋の腐食発生限界量(1.2 kg/m³)に比べて小さい。
- 現地踏査結果より、塩害による損傷 (錆汁等) のほと んどは、水掛かりがある箇所で発生している。
- 図-16より、水掛かりのある箇所に比べて、水掛かりの無い箇所の表面塩化物イオン量は小さく、ほとんどの 箇所で1.2kg/m³未満である。

以上より、以降の検討においては、水回りの影響に着目して検討を進める。

表面塩化物イオン量を縦軸に、凍結抑制剤散布量を横軸に

- ①実橋梁から試料を採取し塩化物イオン量試験実施
- ②深さ方向塩化物イオン量の実測値を、式(1)に最小二 乗法により近似させ、**Co、Dc、Ci**を求める。
- ③鉄筋かぶり x、予測を行いたい時期 t を式(1)に入力 し、鉄筋位置塩化物イオン量を求め、**腐食発生限界塩 化物イオン量**に達する(進展期到達)時期を予測。

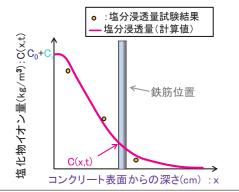


図- 15 Fick の拡散方程式(計算値)と実測値の関係

整理したものを図-17に示す。ここで、表面塩化物イオン量は、水掛かりがある箇所で採取した試料の塩化物イオン量試験結果を Fick の拡散方程式に近似させ求めた値をプロットしている。図より、以下のことが言える。

表面の粗さについては、凹凸 1mm 以上程度を「粗さ大」とし、それ未満を「粗さ中」と定義している。「粗さ中」については、既往資料(過年度点検調書の写真等)で「粗さ無」のものと判別が困難であること、表面塩化物イオン量への影響の差異が明確でないこと等から、以降、「粗さ中」は「粗さ無」として取り扱う。

(2) 見かけの拡散係数 Dc に及ぼす影響因子

次に、コンクリート表面に変状が無い場合、粗さがある場合、 ひび割れがある場合について、見かけの拡散係数を整理した ものを図-18に示す。図より、以下のことが言える。

- RC については、変状がない場合に比べて、表面の粗 さがある場合や、ひび割れがある場合に見かけの拡散 係数が大きくなる傾向が見られる。
- PC については、変状無の場合に比べて、ひび割れが ある場合に見かけの拡散係数が大きくなる傾向が見ら れる。ただし、表面粗さの影響については明確ではない。

なお、ひび割れ箇所については、見かけの拡散係数は必ずしも深さ方向で均一の傾向を示さないと考えられる。ただし、 ひび割れがある箇所は塩化物イオンの侵入が容易となると考えられことから、健全部より大きな拡散係数を便宜的に与えて劣化予測を行うことで実際の劣化状態に近い予測が可能となると考えられる。

(3) 塩害劣化過程ごとの塩化物イオン量閾値(目安値)

塩害劣化過程と鉄筋位置塩化物イオン量の関係を整理した

表一3 表面塩化物イオン量に及ぼす影響要因

| 衣一3 衣山塩化物11/2里に及は9 影音安囚 | | | | | | | | |
|-------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 影響要因 | 表面塩化物イオンとの関係 | | | | | | | |
| 水掛かり | 凍結抑制剤による塩化物イオン供給は、飛散よりも凍 結抑制剤が溶解した漏水の水掛かりの影響が大きい。 | | | | | | | |
| 凍結抑制 剤散布量 | 散布量が多いほど表面に付着する塩化物イオン量が多くなると考えられる。 | | | | | | | |
| RCとPC の違い | RC に比べて PC の方が表面塩化物イオン量が少ない傾向が見られるが、これは PC の方が水セメント比が小さくコンクリート自体が緻密であり、凍結抑制剤が溶解した水の侵入量が少なくなるためと考えられる。 | | | | | | | |
| 表面の粗さ | RCについてみると、表面の粗さ大の場合、表面塩化物イオン量が著しく大きくなる傾向が見られるが、これは表面が粗いと凍結抑制剤が溶解した水の侵入量が多くなるためと考えられる。なお、表面粗さ無のRCとPCを比較すると、PCの方が表面塩化物イオン量が多い傾向が見られる。これは、RCの方がコンクリートの緻密性が乏しいため、比較的、水掛かりが少ない(塩化物イオン浸透量が少ない)状況でも表面に粗さが生じるためと考えられる。 | | | | | | | |
| ひび割れ | RC、PCともひび割れの有無と表面塩化物イオン量の 関係性は明確ではない。 | | | | | | | |

ものを図-19に示す。図より以下のことが言える。

- 潜伏期~加速期までは、凍結抑制剤による損傷が進む に従って鉄筋位置塩化物イオン量が大きくなる傾向が 見られる。
- 加速期と劣化期では、鉄筋位置塩化物イオン量に明確な 差異は見られない。これは、コンクリート中の細孔溶液や クラックが塩化物イオンで飽和した状態になり、塩化物イ オンの増加が止まった可能性があると考えられる。塩化物 イオン量に差異は見られないのに関わらず、損傷状況に 差が見られた原因としては、塩化物イオン以外の劣化因 子(酸素、水、日射等)の関与の違いが考えられる。

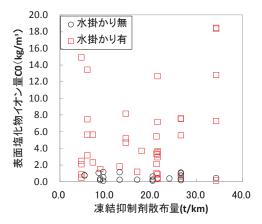


図-16 水掛かりの有無の影響

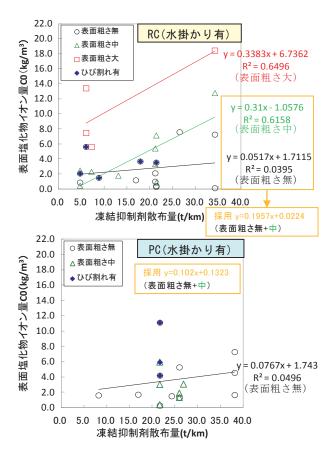


図-17 凍結抑制剤散布量と表面塩化物イオン量の関係

以上より、塩害劣化過程別の鉄筋位置塩化物イオン量の閾値を表-4のとおり設定した。なお、加速期と劣化期の閾値については、塩化物イオンによる区分が困難であること、および加速期以降は損傷を外観で確認でき橋梁定期点検で損傷の進行を把握できることから、鉄筋位置塩化物イオン量に基づく劣化予測を行う必要性は低いと判断し、加速期と劣化期の閾値の設定は行わないこととした。

なお、塩害劣化過程は、表-5に示す「外観上のグレードによる分類」および「鉄筋腐食度による分類」のうち、悪い方の評価を当該橋梁の劣化過程とした。進展期と加速期の区分例を図-20に示す。

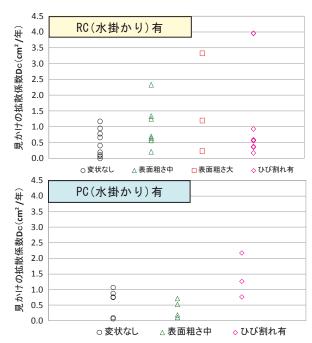


図-18 コンクリートの品質と見かけの拡散係数の関係

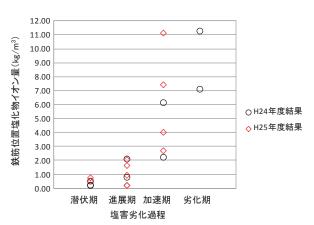


図-19 塩害劣化過程と鉄筋位置塩化物イオン量

表 - 4 塩害劣化過程別の鉄筋位置塩化物イオン量閾値 (目安値)設定結果

| 塩害劣化過程 | 鉄筋腐食度 | 鉄筋位置塩化物イオン量 |
|---------|----------|---------------|
| 潜伏期 | I | 0~1.2 kg/m3 |
| 進展期 | П | 1.2~2.2 kg/m3 |
| 加速期~劣化期 | III ~ IV | 2.2~kg/m3 |

次に、かぶり、鉄筋位置塩化物イオン量と鉄筋腐食度の関係をプロットしたものを図-21に示す。図より、鉄筋位置塩化物イオン量が多いほど、かぶりが小さいほど鉄筋腐食度が高い傾向が見られる。このことより、鉄筋位置の塩化物イオン量の増大による劣化の進行にはかぶりが大きく影響し、かぶりが小さいほど鉄筋周囲に容易に劣化因子が到達するため劣化は早く進行すると考えられる。

表 - 5 塩害劣化過程別の鉄筋位置塩化物イオン量閾値

| 劣化過程 | 外観上のグレード | | 鉄筋の腐食度 |
|------|---|----|---|
| 潜伏期 | 外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物 イオン濃度以下 | Ι | 腐食なし、または、点錆 程度の部分的な腐食 |
| 進展期 | 外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以上、腐食が開始 | П | 全体に表面的な腐食、または、表面の大部分が腐 食、部分的に断面が欠損 |
| 加速期 | 腐食ひび割れや浮きが発生、さび汁が見られる(加速期前期) | Ш | 浅い孔食等断面欠損の軽 微な腐食、または、鉄筋 全周にわたり欠損がある |
| 劣化期 | 腐食ひび割れの進展に伴 う大規模な剥離・剥落が見 られる、鋼材の著しい断面 減少が見られる、変位・た わみが大きい | IV | 断面欠損の明らかな著し い腐食、または、鉄筋の 断面が当初 2/3 ~ 1/2 位 欠損 |

| 鉄筋腐食度 | 橋梁名 | 試料 No. | 鉄筋位置塩化物 イオン量(kg/m³) | コンクリート表面 の状況 | 状況写真 |
|-------|--------------|-----------|------------------------|--|--|
| п | A 橋 (PCI) | 1 | 0.22 | 変状無 | No. |
| п | B 橋 (RCT) | 1 | 0.22 | 周辺に錆汁 | |
| п | C 橋 (RCI) | 2 | 0.81 | ひび割れ近傍 ただし、腐食した 鉄筋によるひび割 れは無 | |
| п | D 橋 (RCT) | 1 | 0.95 | 変状無(過年度試 験の鉄筋位置塩分 量が多い) | From S. No. |
| п | E 橋 (RCT) | 3 | 1.65 | ひび割れ周辺に錆 汁 ただし、確認した 鉄筋によるひび割 れではない | Soft Gr |
| п | F 橋 (RCT) | 1 | 2.07 | 変状無(過年度試 験の鉄筋位置塩分 量が多い) | |
| п | G 橋 | 2 | 2.12 | 変状無表面の荒れ | |
| п | H 橋 | 1 | 2.24 | ひび割れの上 | |
| п | I 橋 | 6 | 2.71 | ひび割れ周辺に錆 汁 | |
| п | J 橋 (RCT) | 2 | 4.03 | 錆汁近傍 | The state of the s |
| п | K 橋 | 2 | 6.16 | 錆汁近傍 | |

図 - 20 鉄筋腐食度、外観変状と鉄筋位置塩化物イオン量の 関係

7. 橋梁のグルーピング・代表劣化曲線作成

(1) 橋梁のグルーピング

6章の考察結果を踏まえ、凍結抑制剤による塩害劣化の進行性に着目して、東北地整管内の橋梁を表-6に示すようにグルーピングした。

(2) 代表劣化曲線

劣化予測を行うために、グループごとに表面塩化物イオン、 見かけの拡散係数を設定した(表 - 7、表 - 8)。表面塩化 物イオンは図 - 17に示す回帰式を基に、見かけの拡散係数 は図 - 18に示す値の平均値を採用した。Fickの拡散方程式 (式 1)にこの値を代入しグループごとに劣化予測を行った(こ こで作成した劣化曲線を代表劣化曲線と定義する)。なお、時

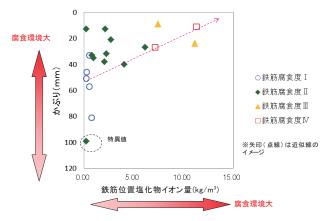


図-21 かぶり、鉄筋位置塩化物イオン量と鉄筋腐食度の関係

表-6 凍結抑制剤による塩害のグルーピング

| 構造 | 凍結抑制剤散布量 | 表面粗さ※) | ひび割れ | かぶり (mm) | |
|----|------------------|--------|--------|------------------|--|
| RC | 10t/km 未満 | 無 | 無 | 10,20,30 (3 ケース) | |
| | | 無 | 有 | " | |
| | | 有 | 無 or 有 | " | |
| | 10-20t/km | 無 | 無 | " | |
| | 10 200 Km | 無 | 有 | " | |
| | | 有 | 無 or 有 | " | |
| | 20-30t/km | 無 | 無 | " | |
| | 20 000,11111 | 無 | 有 | " | |
| | | 有 | 無 or 有 | " | |
| | 30t/km 以上 | 無 | 無 | " | |
| | 000/RM 5/12 | 無 | 有 | " | |
| | | 有 | 無 or 有 | " | |
| PC | 10t/km 未満 | - | 無 | 11 | |
| 10 | 100/1111/70/[[4] | - | 有 | " | |
| | 10-20t/km | - | 無 | " | |
| | 10 200 Km | - | 有 | " | |
| | 20-30t/km | - | 無 | " | |
| | 20 900/Km | - | 有 | " | |
| | 30t/km 以上 | - | 無 | " | |
| | 500 Am 5/1 | - | 有 | II. | |

※)「有」は、表面の凹凸が1mm以上ある箇所を指す

間 t は、本格的に凍結抑制剤散布が行われだした平成元年からの年数を、初期含有塩化物イオン濃度 C_i は、既往調査より $0.1 kg/m^3$ を使用した。

結果の一例として、RCT 橋・ひび割れ無・かぶり30mm のグループの代表劣化曲線を図-22 に示す。代表劣化曲線、実測値のプロットの色は凍結抑制剤散布量の違いを示す。図より、代表劣化曲線は、実際の調査結果(鉄筋位置塩化物イオン量)の大まかな傾向は表現できているが、個々の橋梁でみると実測値と代表劣化曲線との間に大きなばらつきがある。

表-7 表面塩化物イオン C。(kg/m³) 設定結果

| 五 , 五面面10 10 2 00 (16/11 / LDZ-117) | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|--|--|--|--|--|
| 条件 | 凍結抑制剤散布量(t/km) | | | | | | | | |
| *# | 0 ~ 10 | 30 ~ | | | | | | | |
| RC 表面の粗さ中以下 | 1.98 | 2.96 | 4.91 | 6.87 | | | | | |
| RC 表面の粗さ大 | 10.12 | 11.81 | 15.19 | 18.58 | | | | | |
| PC | 1.15 | 1.66 | 2.68 | 3.70 | | | | | |

表-8 見かけの拡散係数 Dc 設定結果

| 条件 | Dc(cm²/年) |
|------------------|-----------|
| RC ひび割れ無・表面粗さ中以下 | 0.76 |
| RC 表面粗さ大 | 1.26 |
| RC ひび割れ有 | 1.28 |
| PC ひび割れ無 | 0.52 |
| PC ひび割れ有 | 1.41 |

このため、次節(3)でこれらのばらつきの影響を定量的に評価することとした。

次に、RCとPCの違い、表面の粗さの違い、かぶりの違いを比較した代表劣化曲線を $\mathbf{Z} - \mathbf{Z}$ に整理する。図より、以下のことが言える。

- RC に比べて、PC の方が劣化速度が小さい。これは、PC の方がコンクリートが密実であり内部に浸透しにくいためと考えられる。
- RCでは、表面粗さが見られる場合には、見られない

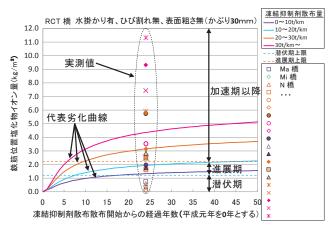


図- 22 代表劣化曲線の一例 (RCT・ひび割れ無・かぶり30mm)

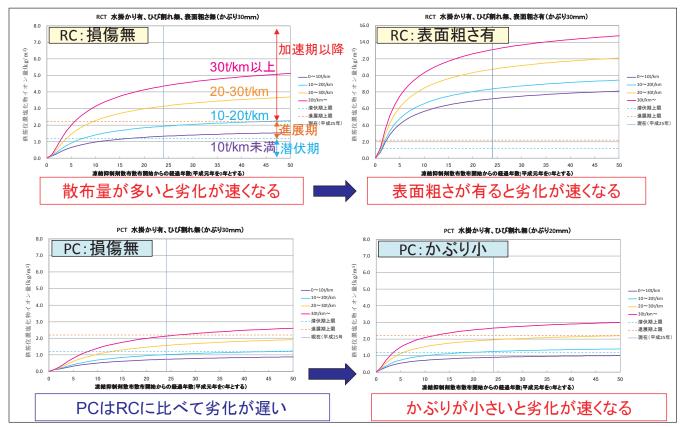


図-23 代表劣化曲線の一例(RCとPCの比較、表面粗さ・かぶりの影響)

場合に比べて、劣化速度が大きい。これは、表面に粗 さがある場合は、凍結抑制剤を含んだ水が厚く長期間 滞留するため、コンクリート内部に塩化物イオンを浸透 させやすい条件となるためと考えられる。

かぶりが小さい場合には、かぶりが大きい場合に比べて 劣化速度が大きい。これは、かぶりが小さいほど、速く 鉄筋位置の塩化物イオン量が多くなるためと考えられる。

(3) 代表劣化曲線の精度

図-22 に示したように、代表劣化曲線と実測値の間には誤差が見られる。この誤差の頻度分布、および代表劣化曲線の誤差分布の概念図を図-24 に示す。図より、誤差の標準偏差は、RCで2.51kg/m³、PCで1.30kg/m³程度あり腐食発生限界1.2kg/m³と比較して小さくないことが分かる。

以上より、代表劣化曲線は、劣化傾向の目安を把握し長期的な修繕計画策定の参考とし使用することとし、個別橋梁の詳細な対策検討等を行う場合には、塩化物イオン量試験を実施し、個別に劣化曲線を作成する必要がある。ただし、本業務で明らかにした塩害劣化進行影響要因を考慮することで、必要な調査数量を削減できると考えられる。

8. ヒアリング

橋梁診断業務実績がある団体に凍結抑制剤の影響が大きいと考えられる橋梁、部材・部位に対する対策区分判定の考え方等についてヒアリングを行った。また、東北地整管内の国道事務所に対策実施優先度の考え方等をアンケートを実施した(全12事務所)。

以上の結果を踏まえ、予防保全を推進するための仕組みに ついて検討を行った。

9. 予防保全対策方法・時期の検討

(1) 対策工法

凍結抑制剤による塩害の損傷メカニズムを踏まえ、設定した対策内容を表-9に、対策範囲を図-25に示す。工法・範囲については、凍結抑制剤を含んだ路面排水の水掛かりが劣化の主要因であることが明らかになったことから、水の供給を遮断することを基本とした。

(2) 対策時期

凍結抑制剤散布量、構造 (RC,PC)、損傷状況 (ひび割れの有無等)等を勘案して求められる劣化曲線に基づき対策 優先度を設定した。

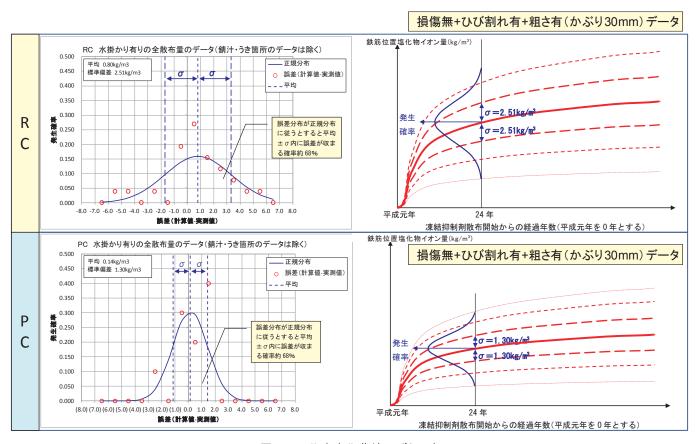
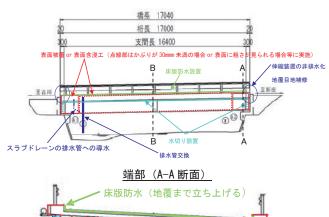


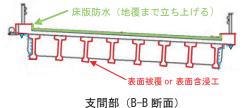
図-24 代表劣化曲線のばらつき

| | 表 9 凍結抑制剤による塩害の対策工法 | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------------------|-------------------------------|----------|--------------------------------------|---|-------------------------------|---|--------------------------------|------|--------|-----|----|
| | 計画的な予防保全 ^{※1)} | | | | | 事後保全+予防保全 ^{※1)} | | | | | | |
| 構 | 潜伏期 | | | | | 進展期 加速 | | | 期※5) | | 劣化期 | |
| 造 | 合2 | 供給を止めた場 0年以内に進展 引に到達しない | | 供給を止めても 以内に進展期に 到達する | | | | 前期 | | 後期 | | |
| | 0 | 水の供給遮断 | 0 | 水の供給遮断 | 0 | 水の供給遮断 | 0 | 水の供給遮断 | 0 | 更新 | 0 | 更新 |
| | Δ | ひび割れ補修 ※4) | 0 | ひび割れ補修 [※] ⁴⁾ | 0 | ひび割れ補修 ※4) | 0 | 断面修復 ^{※3)} (劣化部除去) | | 断面修復 | | |
| R C | Δ | 表面被覆工or 表面含浸工 | O ※2) | 表面被覆工or 表面含浸工 | 0 | 表面被覆工or 表面含浸工 | 0 | 電気防食 | 0 | 補強 | | |
| | | | Δ | 断面修復 ^{※3)} (塩分除去) | 0 | 断面修復 ^{※3)} (塩分除去) | | | | 水の供給遮断 | | |
| | | | | | Δ | 亜硝酸リチウム 塗布 | | | | | | |
| | 0 | 水の供給遮断 | 0 | 水の供給遮断 | 0 | 水の供給遮断 | 0 | 水の供給遮断 | 0 | 更新 | 0 | 更新 |
| | Δ | ひび割れ補修 ※4) | 0 | ひび割れ補修 [※] 4) | 0 | ひび割れ補修 ※4) | 0 | 断面修復 ^{※3)} (劣化部除去) | | 断面修復 | | |
| P C | Δ | 表面被覆工or 表面含浸工 | O ※2) | 表面被覆工or 表面含浸工 | 0 | 表面被覆工or 表面含浸工 | Δ | 電気防食 | 0 | 補強 | | |
| | | | Δ | 亜硝酸リチウム 塗布 | Δ | 亜硝酸リチウム 塗布 | | | | 水の供給遮断 | | |
| | | | | | Δ | 断面修復 ^{※3)} | | | | | | |

表一9 凍結抑制剤による塩害の対策工法

- ※1) ◎: 主工法として適用すべき工法
 - ○:主工法に次いで適用性の高い工法
 - △:構造物の劣化状態等に応じて適用を検討する工法
- ※2)かぶりが30mm以上でかつ表面粗さが無い(凹凸1mm未満)の場合は「△」とする。
- ※3) 塩分浸透範囲、コンクリート劣化部ははつりにより除去・断面修復するのが望ましいが、多大な手間と費用を要し、構造安定性への影響にも留意が必要であるため、橋梁の重要度、施工性、構造安定性に影響を及ぼす影響を十分検討した上で断面修復の要否・深さ等を設定する必要がある。残留塩分による影響が懸念される場合は亜硝酸リチウムや犠牲陽極の使用を検討する。
- ※4) 幅0.2mm以上の初期ひび割れを対象(塩害・中性化(鉄筋腐食)・ASR) に起因したひび割れは除く。
- ※5)加速以降の対策については、橋梁の規模によっては、補修・補強を繰り返すより更新した方がLCCが小さくなる場合もあるため、LCCの比較検討を行った上で対応を決定する必要がある。





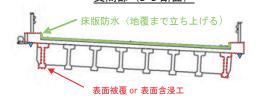


図-25 予防保全対策範囲

10. おわりに

本業務のまとめを以下に整理する。

- 現地調査結果より、コンクリート橋の凍結抑制剤による 塩害劣化は、飛散の影響は小さく、路面排水による水 掛かりの影響が大きいことが明らかになった。
- 凍結抑制剤による塩害の劣化進行は、①コンクリートの 品質(RCとPCによる区分)、②凍結抑制剤散布量、 ③ひび割れの有無、④表面の粗さ、⑤かぶりに大きく 影響を受けることが明らかになった。
- 上記①~⑤をパラメータとし Fick の拡散方程式に基づく代表劣化曲線 (60 ケース)を作成し、劣化要因と劣化の相関性の高低を確認した。
- 上記の代表劣化曲線(計算値)と実測値の誤差の分布を整理し、代表劣化曲線と実測値の標準偏差(RCで2.5kg/m³、PCで1.3kg/m³)を求めた。
- 代表劣化曲線と実測値の間のばらつきは、今後、知見 を集積し、凍結抑制剤による塩害劣化進行影響因子を 明らかにすることで乖離幅が縮小すると考えられる。
- 代表劣化曲線は、塩化物イオン試験の調査時期・採 取位置の合理化・調査数量の削減、対策優先度の設

- 定、多数ある橋梁群の修繕計画立案および必要な予 算規模の把握に活用できる。
- 凍結抑制剤による塩害に対する予防保全対策工法は、 水の供給遮断・抑制 (水切り設置、伸縮非排水化等) が重要であることを明らかにした。

11. 今後の展望

塩害による劣化は、できるだけ早期に予防保全対策を実施することが、橋梁の長寿命化・維持管理の効率化の観点から重要である。今後は、本業務で得られた知見に基づき、東北地整管内の橋梁について順次、予防保全を実施していく必要がある。また、地方自治体が管理する橋梁についても同様の対策を行っていく必要がある。

なお、今後、更なる検証・改善が必要な事項を以下に列 記する。

- 飛散の長期的な影響の把握
- 橋梁の冬季平均風向および「平均日最低気温と最高 気温の差」と部材表面の状況の関係把握

- 凍結抑制剤による塩害と凍害の複合劣化の影響の把握 (東北地整管内では、多くの橋梁で部材表面に軽度の 凍結融解作用を受けている可能性が考えられるため、 凍結融解作用による表面劣化の定量的な評価方法等 の検討も必要)
- 橋梁の個別履歴(竣工年代、供用年、交通量)の整理と部材表面の状況(粗滑)の関係把握
- 床版上面における劣化状況の把握

謝辞:本稿の作成にあたり、国土交通省東北地方整備局 東北技術事務所をはじめとする関係者の皆様には、多大なご 支援を賜りました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 土木学会:2013年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]、 2013.10
- 2) 土木学会:2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]、 20133