

# 論文 劣化した道路鋼橋 RC 床版の凍結防止剤による塩分浸透特性

石川 裕一\*1・青山 實伸\*2・倉戸 伸浩\*3・西尾 守広\*4

**要旨:** 積雪・寒冷な地域では冬期路面の安全確保として凍結防止剤を散布している。道路鋼橋 RC 床版の場合、凍結防止剤中の塩分が路面水に溶け、床版に浸透することや、空中に飛散し地覆部や壁高欄に付着することでコンクリートを塩害劣化させる。本論文では、RC 床版の疲労による劣化過程において、凍結防止剤による塩害を受け取替えに至った事例を対象に、劣化状況や塩分量分布を調査し、その塩分浸透の特性やメカニズムを考察する。更に、床版疲労と凍結防止剤で塩害劣化した RC 床版の維持管理計画の方向性を示す。

**キーワード:** RC 床版, 遊離石灰, 凍結防止剤, 塩分浸透特性

## 1. はじめに

積雪・寒冷地域では冬期路面の安全確保のため凍結防止剤（主成分 NaCl）を路面に散布する。道路橋面に撒く凍結防止剤は、路面水に溶けその大部分は橋梁の排水路から流出されるが、一部は伸縮装置から漏水し上部構造の桁端部や下部構造のコンクリートを塩害劣化させる<sup>1)</sup>。また劣化した道路鋼橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）では、凍結防止剤を含む路面水が床版に浸透することや、飛散水が地覆部や壁高欄に付着し、浸透することでコンクリートを塩害劣化させる。凍結防止剤による RC 床版の塩害劣化は、国内で数例<sup>2),3)</sup>の報告があり今後も同類な劣化事例は問題になると考える。しかしながら、これまでに RC 床版の疲労過程における、凍結防止剤による塩害劣化の特徴や塩分浸透に関する研究例はほとんどなく、橋梁の維持管理のライフサイクルコストを最小化する見地から、RC 床版の計画保全における方向性を明示することが求められる。この背景から、筆者らは劣化により取替えに至った RC 床版（以下、撤去床版）を対象に、劣化の特徴を明らかにするため床版の上・下面の劣化状況や、床版および地覆部・壁高欄の塩化物イオン濃度（以下、塩分量）の分布状況を調査し、凍結防止剤の塩分浸透特性とそのメカニズムについて考察する。更に床版疲労と凍結防止剤で塩害劣化した RC 床版の維持管理計画の方向性を考える。

## 2. 調査対象の概要

調査対象の撤去床版は、表-1 に示す北陸地方の高速道路の鋼橋非合成板桁 RC 床版（コンクリートの設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>）の 2 事例である。この 2 橋は、道路供用後 22~24 年で車両の大型化と道路交通に占める大型車混入率の増大に配慮して、RC 床版を鋼繊維補強超硬

表-1 調査対象の橋梁概要

撤去床版の事例		撤去床版 A	撤去床版 B
供用開始年（経年数）		1977 年（0）	1974 年（0）
RC 床版の修繕歴	増厚と防水	1999 年（22）	1998 年（24）
	床版取替工	2008 年（31）	2009 年（35）
床版支間		2.9m	3.0m
床版厚さ	増厚前/後	220/260mm	210/250mm
舗装厚さ	増厚前/後	75 / 50mm	75 / 50mm
橋面防水層の種類		塗膜系（アスファルト加熱型）	
年平均交通量	日断面交通	2.5 万台/日	2.8 万台/日
	大型車混入	30%	25%
汀線からの距離		9.3 km	16.0 km
凍結防止剤散布量		19 t/km	19 t/km



図-1 RC 床版および増厚の構造（撤去床版 A の事例）

コンクリートによる床版上面増厚工法（以下、増厚）で補強している。RC 床版の増厚は、図-1 に示すように既設 RC 床版の上面を 10mm の深さで切削し、新たに約 100kg/m<sup>3</sup> の鋼繊維を混入した超硬コンクリート（以下、増厚コンクリート）を 50mm の厚さで打設することで曲げ耐力と押抜きせん断耐力の向上を図っている。この補強に併せて、増厚コンクリートの上面は橋面防水層が施工され、床版内に路面水が浸入することを防止している。増厚の施工は道路供用中に片側交通規制し、分割して増厚コンクリートを打設する機会が多く、今回の調査対象床版でも増厚コンクリートは走行と追越車線の境界で打継ぎ、2 段階の分割施工を行っている。

\*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株） 金沢支店 道路技術部 構造技術課（正会員）

\*2 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株） 金沢支店 道路技術部 部長 博（工）（正会員）

\*3 中日本高速道路（株） 金沢支社 保全・サービス事業部 企画統括チーム サブリーダー

\*4 中日本高速道路（株） 金沢支社 保全・サービス事業部 企画統括チーム

### 3. RC 床版の劣化形態

#### 3.1 RC 床版の劣化状況

##### (1) RC 床版上面

図-2 は撤去床版の事例の増厚後における路面ポットホール補修数の推移であり、増厚後5年頃から補修回数が急増し走行と追越車線の境界に多く発生する。写真-1 は路面ポットホールの補修跡を開削し床版上面を観察したもので、おもな劣化に増厚コンクリートと既設床版の界面はがれ、コンクリートの土砂化、滞水、鉄筋腐食がある。また、図-3 は開削調査時に採取した床版上面の堆積土を蛍光 X 線で分析し、蛍光 X 線スペクトル (K 線のみ) ごとの X 線強度で示したものである。結果、RC

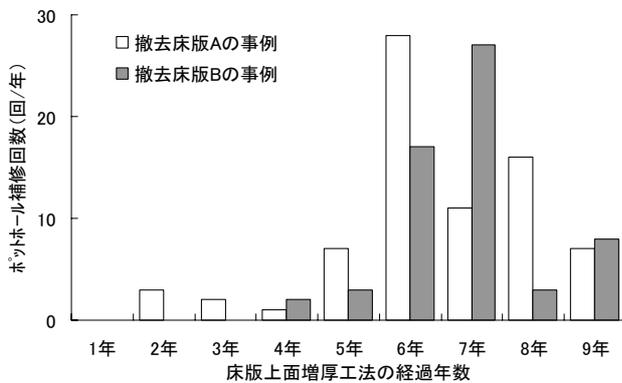


図-2 路面のポットホール補修の推移



写真-1 路面ポットホール補修箇所の開削状況

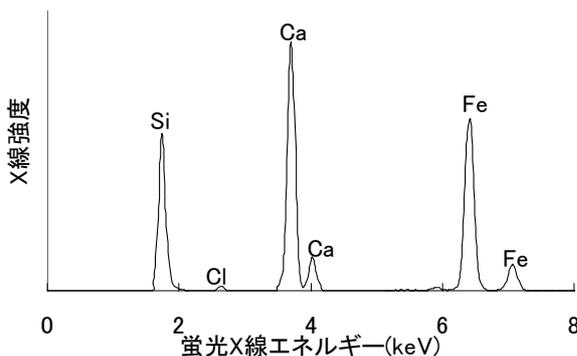


図-3 RC 床版上面に堆積物した土砂の元素分析

床版上面の堆積土は、セメント分 (Si や Ca) と鉄分 (Fe) が主成分で、若干の塩素 (Cl) を含むことがわかる。このことから、凍結防止剤の塩分は床版上面に浸透し鉄筋腐食させ、さらに床版上面の劣化に伴い路面ポットホールが繰返し発生していたと推察する。

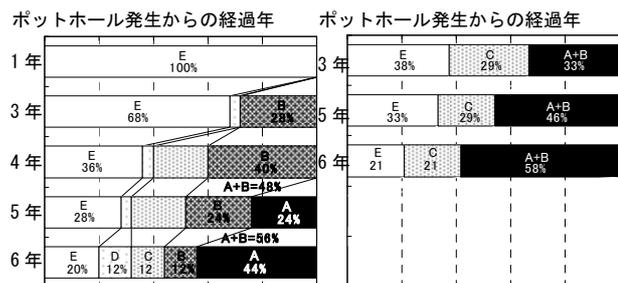
##### (2) RC 床版下面

橋軸直角方向に主鉄筋を有する一般的な道路橋 RC 床版の疲労劣化は、表-2 の D→C→B→A の過程を経て、その推移はパネル判定法で評価される。疲労劣化の過程は、床版下面に微細な乾燥収縮ひび割れが発生し、走行輪荷重の繰返し載荷でひび割れが進展し亀甲状のひび割れに至る。また、主桁付近のねじりモーメントにより床版上面もひび割れ発生し、せん断力の作用で下面側のひび割れの一部は上面のひび割れと連結し貫通する。この貫通ひび割れに路面水が浸入する場合、床版下面に遊離石灰を析出する<sup>4)</sup>。

図-4 は、路面ポットホールの発生から床版取替えまでの床版下面の劣化の推移を、表-2 のパネル判定法で示している。撤去床版の事例では、RC 床版下面の劣化が路面ポットホールの発生を引き金となり、急激な悪化へと推移し、遊離石灰が生じるパネル (パネル判定 A と B) の割合が増えている。更に、撤去床版の下面に析出する遊離石灰を蛍光 X 線で分析した結果、主成分はセメント分 (Ca) と鉄分 (Fe) であり、また塩素 (Cl) も含まれている。このことから、凍結防止剤による塩害で床版上面が劣化すると、塩分を含む路面水は床版内を容易に浸透し、その一部はひび割れを通じて下面に到達し遊離石灰を析出させる。さらに路面水は凍結防止剤が溶けている場合、その遊離石灰は塩分を含むと推察する。

表-2 床版下面の劣化過程とパネル判定

パネル判定	D	C	B	A
ひび割れイメージ図				
ひび割れ形態	一方向	二方向	亀甲状	亀甲状
遊離石灰	なし	軽微	多い	著しい



(a) 撤去床版 A の事例 (b) 撤去床版 B の事例

図-4 床版下面の劣化推移

### (3) RC 床版の劣化発生位置の特徴

図-5は、撤去床版Aの事例の劣化状況を示したものである。劣化したRC床版の上面は路面ポットホールが高い頻度で生じ、特に横断勾配が低い側や、舗装の施工継目や増厚コンクリートの分割施工の目地部に近い走行車線の右わだち位置に多く集中して発生する。また、RC床版下面の劣化の特徴は、路面のポットホールが多い箇所の直下で遊離石灰の発生が増加する傾向にあり、劣化位置はG2-G3間のコンクリートに顕著となる。この劣化状況は、撤去床版Bの事例でも同様な傾向となる。

図-6と図-7は、撤去床版A事例の撤去パネルの全数108枚の劣化の位置を集計したものである。図-6は撤去床版のコンクリート切断面を観察し、増厚コンクリートと既設床版の界面はがれ、コンクリートの土砂化、鉄筋腐食の発生位置を示すもので、撤去床版の約7割で床版上面が劣化している。また、図-7は床版下面の平面的な劣化位置を示すもので、幅員の中央であるG2-G3間パネルに劣化が多く、次に横断勾配が低い側のG1-G2間パネルと続く。RC床版の劣化が幅員中央のG2-G3間パネルに顕著となる要因は、舗装の継目や増厚コンクリート継目からの路面水の浸入の影響や、走行車線右わだち掘れ位置による大型車両の通行の影響が推察される。また路肩側のG1-G2間パネルで劣化する傾向として、横断勾配により路面水が路肩に流込む場合の影響や、走行車線左わだち掘れによる大型車両通行の影響が考えられる。

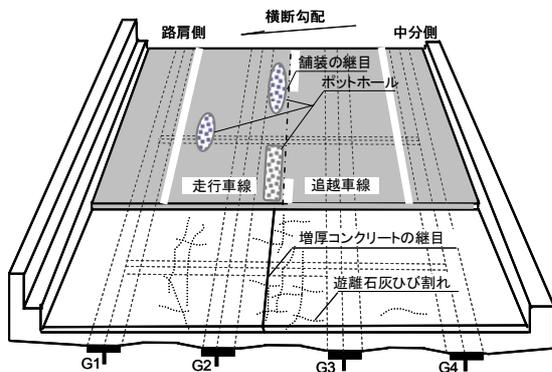


図-5 RC床版の劣化発生位置（撤去床版A事例）

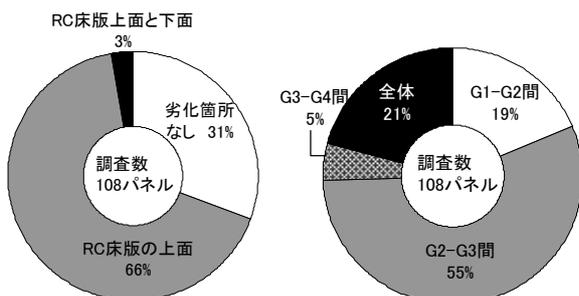


図-6 断面的な劣化位置

図-7 平面的な劣化位置

### 3.2 RC 床版上面と下面の劣化状況の相関性

RC床版上面と下面の劣化状況に相関があるか考察するため、撤去床版A事例の調査で得た劣化指標を比較する。床版上面の指標は打音の濁音範囲を考慮して1m<sup>2</sup>当りの浮き面積（以下、浮き面積率）をとり、床版下面の指標は1m<sup>2</sup>当りのひび割れの延長（以下、ひび割れ密度）や床版下面のパネル判定（表-2の評価）をとる。

図-8のようにRC床版上面の浮きとその直下のひび割れ密度は相関性に乏しいことがわかる。また、図-9は上面の浮きとその直下のパネル判定の指標の関係をバブルチャートで示す。図-9のバブルの大きさは、縦軸と横軸の関係性を示しており、上面の浮き面積率が0-24%と低い場合、その直下のパネル判定はE>D>C>B>Aと健全な評価で多く関係する傾向で、上面の浮き面積率が75-100%と高い場合はA>B>D>C>Eと逆の傾向を示す。このことから、床版上面の浮き面積率は床版下面のパネル判定と相関があると考えられる。床版上面の浮き面積率が、床版下面ひび割れ密度よりもパネル判定で相関性が優る傾向であることから、床版疲労と凍結防止剤で塩害したRC床版はパネル判定の評価が適すると考える。

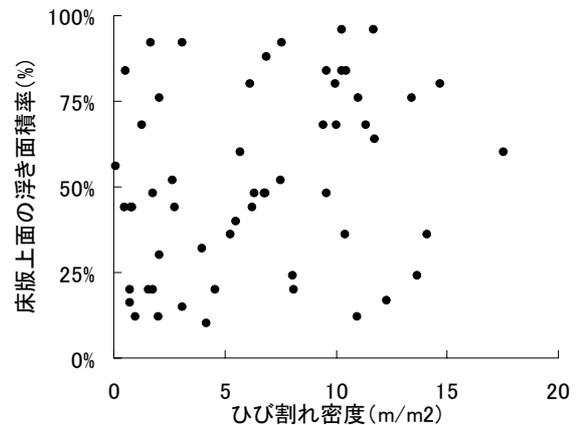


図-8 撤去床版の上面浮きとひび割れ密度の相関

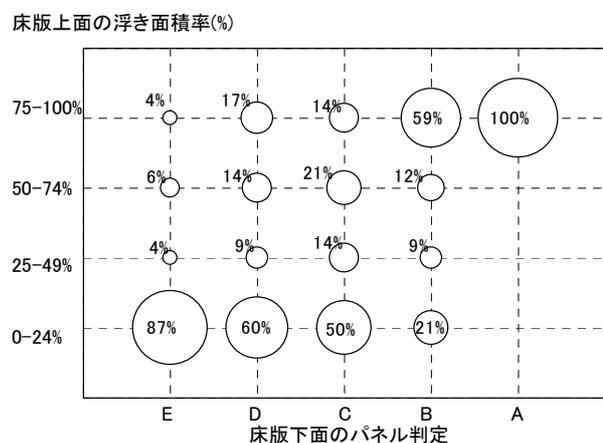


図-9 撤去床版の上面浮きとパネル判定の相関

#### 4. 劣化した RC 床版の塩分浸透特性

##### 4.1 劣化した RC 床版への塩分浸透

###### (1) 硝酸銀噴霧法とコア塩分量調査

図-10は撤去床版 A の事例において、コンクリート切断面に硝酸銀噴霧した状況と、JIS A 1154 の電位差滴定法により直径 70mm コンクリートコアの塩分量を測定した結果を示す。硝酸銀噴霧法<sup>5)</sup>とは、濃度 0.1N の硝酸銀を撤去床版のコンクリート切断面に直接噴霧し、塩分濃度の分布を変色の濃淡により目視する方法である。図-10 写真の斜線部は、硝酸銀噴霧法によりコンクリート切断面の塩分が変色反応した範囲を示したものである。図-10(a)に示す外観上で健全な床版は、硝酸銀噴霧により増厚コンクリートと既設床版の境界部が変色しており凍結防止剤の塩分が床版上面のコンクリートに浸透していることを示す。しかし、その量は  $0.6\text{kg/m}^3$  程度と少ないことが確認できる。また、図-10(b)の外観のうえで上側鉄筋の位置に水平方向のひび割れが発生する床版では、硝酸銀噴霧により床版上面と下面で塩分が分布する。さらにコンクリートコアの塩分量調査では、上側鉄筋や下側鉄筋の位置で鋼材腐食限界量  $1.2\text{kg/m}^3$  を超過している。このことから、凍結防止剤の塩分は、健全な床版の場合は路面側から浸透するものの、床版上面が劣化した場合は床版下面にも高い塩分量が分布し、特に中性化の境界部付近では塩分の移動現象が確認され、塩害と中性化で複合劣化し鉄筋腐食の環境にさせていることが推察される。

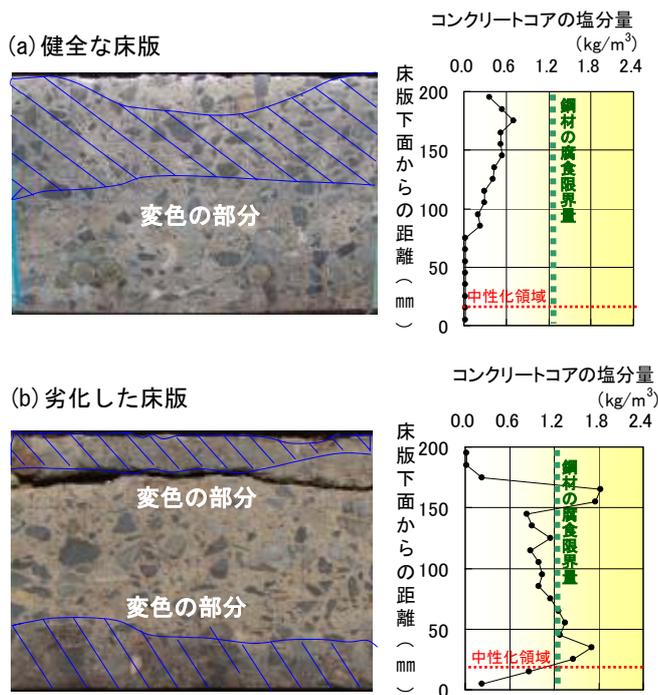


図-10 床版コンクリートの塩分量分布

###### (2) 蛍光 X 線による塩分量調査

劣化した RC 床版の塩分浸透として、床版下面に高い塩分量が分布する原因を探るため、撤去床版のコンクリート切断面に X 線を直接照射（以下、蛍光 X 線照射法）し、モルタルに含まれる塩分量を測定する。写真-2 は、床版上面が劣化した事例のコンクリート切断面を調査するもので、数値は蛍光 X 線照射法<sup>6)</sup>で得るモルタルの塩分量を示し、目安として  $1.2\text{kg/m}^3$  を超過する場合は下線を付す。結果、床版の貫通ひび割れ付近（写真中の白線）は塩分量が局所的に高くなり、床版の勾配に影響し勾配の低い側で広く分布する傾向を示す。

###### (3) EPMA による塩分の分布調査

写真-3 は、遊離石灰を伴う RC 床版の貫通ひび割れ部を対象に試料採取し、JSCE G574-2005 に従い、塩素の元素濃度分布を測定した。分析条件は、加速電圧 15kV、照射電流 40nA、プローブ径  $50\mu\text{m}$ 、ピクセルサイズ  $100\mu\text{m}$ 、計測時間 30msec/pixel である。EPMA 画像から、貫通ひび割れに沿う周辺のコンクリートの塩素濃度が  $2.0\text{kg/m}^3$  を超過する分布であることがわかる。

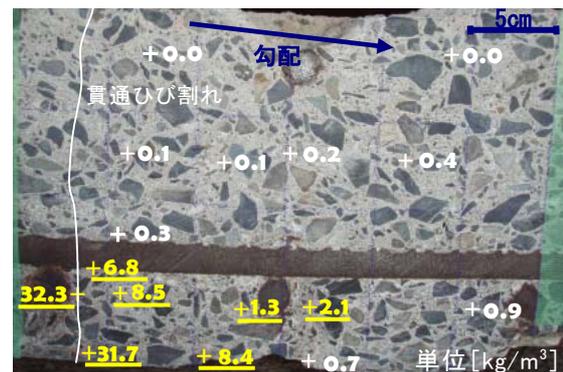


写真-2 蛍光 X 線照射法のモルタル塩分量

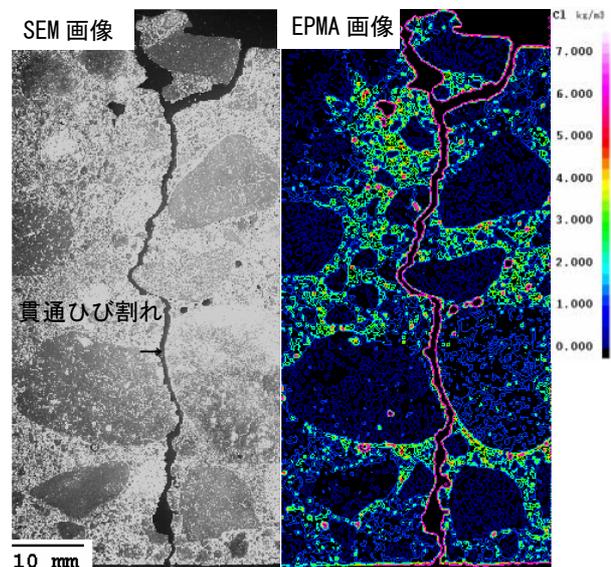


写真-3 貫通ひび割れの塩素に関する EPMA 分析

#### (4) 著しく劣化した RC 床版の塩分浸透と腐食状況

また、写真-4のような著しく劣化した RC 床版の切断面に硝酸銀噴霧すると、上側鉄筋の水平方向ひび割れや貫通ひび割れ箇所ならびに床版下側のかぶり領域で黒く変色し、塩分浸透がみられる。また、図-11 は劣化した床版のコンクリートをはつり除き、上下配置の関係にある鉄筋の 1m 当りの腐食長さの比較を示す。上下配置にある鉄筋の 1m 当りの腐食長さの比較は、45° 補助線より上域にある上側鉄筋の腐食が顕著であり、遊離石灰部では下側鉄筋も腐食する傾向にある。このことは凍結防止剤による塩害が上側鉄筋腐食に影響し、更に遊離石灰部では床版下面からの塩分浸透で下側鉄筋を腐食させる事象が推察される。

#### 4.2 橋梁地覆部の塩分浸透

写真-5 は、撤去床版事例の地覆部や壁高欄の切断面に硝酸銀噴霧した変色箇所と、ドリル法で採取した粉末の

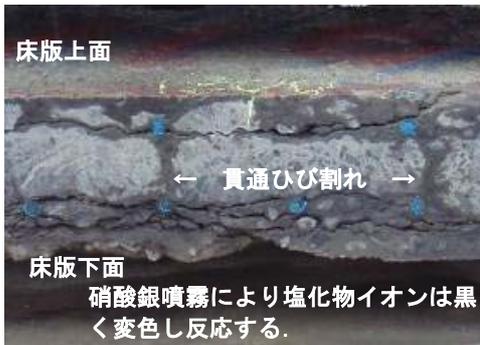


写真-4 貫通ひび割れの硝酸銀噴霧状況

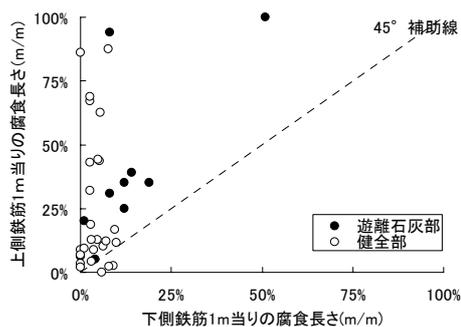


表-3 RC床版の劣化と維持管理法

RC床版の劣化形態	凍結防止剤の塩分浸透過程	考えるべき維持管理の計画
[劣化形態1] 床版上面に劣化発生がない段階	塩分浸透特性は図-12の過程1~2と推察する	橋面防水層の実施を計画する
[劣化形態2] 床版上面に劣化が進展する段階	塩分浸透特性は図-12の過程3~4と推察する	橋面防水の実施と、床版上面の部分打換えや床版増厚の実施を計画する
[劣化形態3] 密に遊離石灰が析出する段階	塩分浸透特性は図-12の過程5~7と推察する	橋面防水の実施と、部分打換えや床版取換えを計画する

## (2) RC床版の維持管理法

RC床版の劣化形態から凍結防止剤による塩分浸透のメカニズムを推察し、床版疲労と凍結防止剤で塩害したRC床版の維持管理計画の方向性を表-3に示す。

路面ポットホールの発生がない段階は、床版上面の劣化の発生はないと考える。この段階では凍結防止剤の塩分浸透は軽微と推察されることから、考えるべき維持管理法は橋面防水層の実施を計画することが重要である。

次に、路面ポットホールが軽微に発生する段階は、床版上面の劣化が進展する状態と考えるべきであり、凍結防止剤の塩分浸透は進展しその範囲は拡大すると推察できる。この段階では、既に床版上面のコンクリートが鋼材腐食限界量を超える塩分量であると想定することから、維持管理では床版上面の部分打換えや床版増厚を計画することに加え、橋面防水層の実施が必要と考える。

最後に、床版下面の遊離石灰が著しく析出する段階では、凍結防止剤の塩分が床版下面に到達し床版下面から高い塩分量が床版内部に浸透している状態と推察する。この段階では床版のコンクリート全体に塩分が浸透し、さらに上側鉄筋や下側鉄筋が腐食していると想定されることから、耐久性の確保の観点からも床版部分打換えなどの対策と橋面防水層の実施が必要と考えるべきである。なお、当然ながらライフサイクルコストの見地から劣化が軽微な段階で計画保全することが必要である。

## 6. 結論

床版疲労と凍結防止剤で塩害したRC床版について、凍結防止剤による塩分浸透とそのメカニズム、および維持管理の方向性を整理すると次のようになった。

- 凍結防止剤で塩害劣化したRC床版は、路面のポットホールが多く発生する傾向にあった。ポットホールの開削調査から床版上面の主な劣化状況は、コンクリートの脆弱化や滞水、鉄筋腐食であった。
- 路面のポットホール発生により、床版下面の劣化は急激に悪化した。また床版上面の浮き面積率と床版

下面のパネル判定の評価は相関性が見られた。

- 凍結防止剤による塩分浸透特性は床版の劣化状況で異なった。外観上で健全なものは床版上面から塩分が浸透し、外観上で劣化したものは床版上面に加え床版下面も塩分量が多い特性であった。
- 劣化したRC床版の塩分浸透は、床版の貫通ひび割れを路面水が流下し、塩分を含む遊離石灰が増大していた。床版下面の塩分浸透の範囲は、床版の勾配に影響を受け、勾配が低い側で広く分布していた。
- 劣化したRC床版の遊離石灰を伴う貫通ひび割れ付近は、塩害と中性化の複合劣化により中性化の境界付近で塩分の移動現象がみられた。下側鉄筋の位置の塩分量は、鋼材腐食限界量  $1.2\text{kg/m}^3$  を超過することもあり、鉄筋腐食やかぶりコンクリートのはく離が生じていた。
- 橋梁地覆部や壁高欄の塩分浸透は、コンクリート縁石下の敷モルタルで塩分量が高く、その付近の鉄筋は局部腐食し、張出水切り部などは塩分量が多く鋼材腐食限界量  $1.2\text{kg/m}^3$  を超過することもあった。
- RC床版下面に遊離石灰が析出する段階は、凍結防止剤の塩分が床版下面に到達し、床版の全体に塩分が浸透し劣化を進行させると考えた。このため、この段階は耐久性の確保の観点から、床版打換えなどの対策と橋面防水の実施が必要であり、ライフサイクルコストを最小化する見地から、劣化が軽微な段階において計画保全することを提案した。

## 参考文献

- 熊谷和夫, 高橋秀喜, 青山實伸: 北陸地方の橋梁けた端部のコンクリート部材の損傷特性と劣化推移, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.31-39, 2005.9
- 笹井幸男, 松本吉正, 佐藤雅則, 奥谷裕介: 中央自動車道古川渡橋における床版取換え-塩害を受けたRC床版からプレキャストPC床版へ-, 橋梁と基礎, pp.27-33, 1994.10
- 横山和昭, 本荘清司, 葛目和宏, 藤原規雄: RC床版の鉄筋腐食に伴う劣化メカニズムの解明に関する研究, 第6回道路橋床版シンポジウム論文報告書, pp.145-150, 2008.6
- 松井繁之編著: 道路橋床版-設計・施工と維持管理-, 森北出版(株), pp.9-12, 2007.10
- 大即信明, 中下兼次, Wee, T., 長瀧重義: 硬化したコンクリート中における塩素イオン量の測定に関する研究, セメント・コンクリート論文集, pp.156-161, 1989
- 金田尚志, 魚本健人: 塩化物測定用ポータブル型蛍光X線分析装置の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1095-1000, 2007.7