

北陸地域における道路鋼橋 RC 床版の健全度評価法に関する提案

A proposal evaluation methods for damaged RC bridge decks in the Hokuriku highway

有馬直秀*, 石川裕一*, 足立嘉文**

Naohide Arima, Yuichi Ishikawa, Yosifumi Adachi

*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 (〒920-0025 金沢市駅西本町 3 丁目)

** 中日本高速道路株式会社 金沢支社 富山保全・サービスセンター (〒939-8214 富山市黒崎 439)

In Japan highways, the use of deicing salts has been increasing dramatically since the 1990s. Reinforced concrete decks (hereafter; RC decks) have been saturated with water and chlorides, resulting in the corrosion of reinforcing bars. Due to this, concrete cracking occurs. The RC decks are also subjected to high live-load stresses, including impacting vehicle forces, and a combination of both damage factors are observed. In this paper, the field investigations were conducted for five cases of damaged RC decks in the Hokuriku highway. From the field investigations, several findings regarding the corrosion of the rebars due to chloride ion penetration and fatigue mechanism of RC decks were obtained. Finally, the authors propose a evaluation and maintenace method for damaged RC decks in the Hokuriku highway.

Key words: RC deck, De-icing salt, Evaluation method, Maintenace

キーワード: RC 床版, 凍結防止剤, 健全度評価, 維持管理

1. はじめに

NEXCO 中日本(株) 金沢支社が管理する北陸自動車道は、凍害危険度 1 (ごく軽微) に区分され¹⁾、交通量の多い区間の日平均交通量は約 3 万台である。冬期路面における安全な走行性を確保するため、道路橋面に凍結防止剤 (主成分 NaCl) が散布されている。橋面に散布された凍結防止剤は、路面水に溶け、鉄筋コンクリート床版 (以下、RC 床版) 上面に浸透することで塩害劣化が生じ、床版内部の鉄筋腐食に伴う劣化により路面のポットホールが多発する事例が増えている²⁾³⁾。

凍結防止剤による塩害 (以下、塩害) と疲労を受けた RC 床版の特徴は、床版上面や床版内部の貫通ひび割れを伝い塩化物イオン (以下、塩分) が浸透することにより、床版内部の鉄筋を腐食させ、鉄筋のさびが約 2.5 倍に堆積膨張することで、RC 床版の内部に水平方向のひび割れが生じ、その耐荷力や疲労耐久性を低下させる²⁾。

本稿では、表-1 に示す北陸自動車道の塩害と疲労の劣化が疑われる 5 橋の鋼橋 RC 床版の調査結果に基づき、RC 床版に共通する劣化の特徴やその過程を整理する。さらに RC 床版の劣化状況を的確に把握するため、床版上面の調査をいくつかの非破壊調査で試行し、RC 床版の劣化状況における調査手法の適用性や特徴を整理する。これにより外観調査を主とする従来の床版下面の評

表-1 塩害と疲労を受けた RC 床版の調査対象

橋梁名	構造形式	供用開始年月	床版支間 (m)	床版厚 (cm)	主な補修履歴
a橋(上り)	非合成桁	1980年6月	2.9	21	床版防水 2003年
b橋(下り)	合成桁+合成桁	1977年12月	2.9	22	床版防水 2003年
c橋(下り)	非合成桁	1978年10月	3.0	22	補修履歴なし
d橋(上り)	非合成桁	1974年10月	3.0	21→25*	増厚・床版防水 1997年
e橋(上り)	合成桁	1980年12月	3.0	25	補修なし
	(下り)	合成桁	1980年12月	3.0	25

※21→25は、増厚前・後の床版厚を示す。

価と床版上面の評価を組合せた北陸地域における鋼橋 RC 床版の新しい健全度評価法を提案し、今後の維持管理計画の方向性を示すものである。

2. 塩害と疲労を受けた RC 床版の劣化状況

2.1 凍結防止剤による塩分浸透の特性

塩害と疲労を受けた RC 床版の塩分浸透の過程は、図-1 で示され、そのメカニズムは以下と考える。1) 塩分を含む路面水が、舗装ひび割れ等から浸透し、床版上面を湿潤させ、その後、床版内部に浸透する。塩分供給が経年的に続くことで、上側鉄筋を腐食させる。水平ひび割れが入り、床版の剛性が低下する。2) 疲労による貫通ひび割れを伝い、塩分が流れ落ちる。3) 塩分は床版下面を滞留し、面的広がりとなる。4) 塩分は床版下面

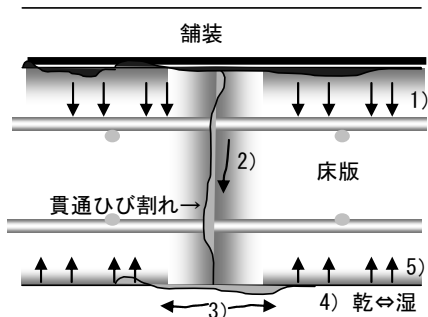


図-1 凍結防止剤の塩分が浸透する過程

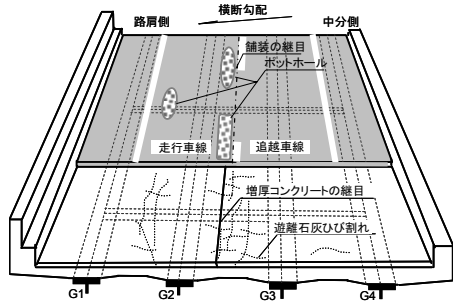


図-2 塩害と疲労を受けた RC 床版の劣化の発生位置

で乾燥・湿潤を繰り返す。高濃度化する。5) 高濃度化した塩分は、床版下面の表面から内部へと浸透し、下側鉄筋を腐食させる。RC 床版の劣化は、図-2 に示す舗装の施工目地のある主桁間 G2-G3 が顕著な傾向にある。

2.2 塩害と疲労を受けた RC 床版の調査

5 橋の 24 パネルを選定し、表-2 に示すパネル判定⁴⁾ で区分した代表箇所からコア採取による調査を行う。調査は、コア削孔から床版内部のひび割れの有無、コアの塩分濃度、圧縮強度、中性化深さを測定し、その結果を表-3 に示す。床版内部のひび割れ、塩分濃度の結果より、床版上面が床版下面より劣化進行が速い傾向にある。また、外観調査のパネル判定で、健全と判断されている D 判定以下のパネルから採取したコアにおいても、図-3 に示すように鋼材の腐食発生限界量 1.2kg/m^3 を超える高い塩分濃度分布や、上側鉄筋位置で水平ひび割れが確認されている。このため床版下面だけの評価では、塩害と疲労を受けた RC 床版の劣化状況を的確に把握することが難しく、コア採取による調査が必要である。

3. 塩害と疲労を受けた床版上面の調査

3.1 自然電位による鉄筋の腐食範囲の推定

(1) 調査概要

床版下面からの調査として自然電位測定があり、ASTM C 876 に準拠し、飽和銅硫酸銅電極（以下、CSE）を用いて格子状に 100mm 間隔で測定を行う。鉄筋の腐食は、図-4 に示すように電荷の移動を伴う電気化学的反応であり、鉄筋が腐食しているアノード部の電位は、卑側（-側）に変化することが多く、自然電位はこの負の電荷を検出する。

表-2 RC 床版下面のパネル判定

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

※E 判定：ひび割れなし、遊離石灰なし

表-3 コア調査の結果一覧

パネル判定	コアの本数	床版内部のひび割れ (箇所数)	塩分濃度 1.2kg/m^3 以上 (箇所数) JIS A1154	圧縮強度 (N/mm ²) JIS A1108	中性化深さ (mm) JIS A1152
A	6	上：有 (5/6)	上：4/6箇所	25.9	16.0
		下：有 (1/6)	下：2/6箇所		
B	2	上：有 (1/2)	上：2/2箇所	27.9	19.0
		下：有 (0/2)	下：2/2箇所		
C	9	上：有 (2/9)	上：2/9箇所	31.6	17.0
		下：有 (0/9)	下：1/9箇所		
D	3	上：有 (3/3)	上：3/3箇所	35.7	17.0
		下：有 (1/3)	下：2/3箇所		
E	4	上：有 (1/4)	上：2/4箇所	28.9	18.0
		下：有 (0/4)	下：0/4箇所		

- 注 1) パネル判定とは、床版下面から表-2 の状態に区分する。
 注 2) 床版内部のひび割れ、塩分濃度の表に示す[上, 下]は、床版の上側鉄筋位置、床版下側鉄筋位置を示す。
 注 3) 塩分濃度は、鋼材の腐食発生限界量 1.2kg/m^3 を超える塩分濃度の箇所数を示す。
 注 4) 圧縮強度、中性化深さは、各パネル判定毎の平均を示す。

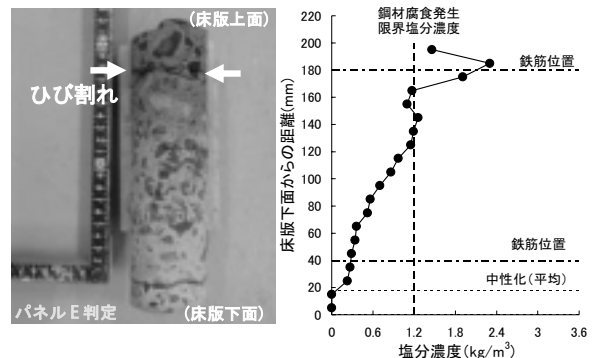


図-3 パネル判定 E のコアおよび塩分濃度分布の例

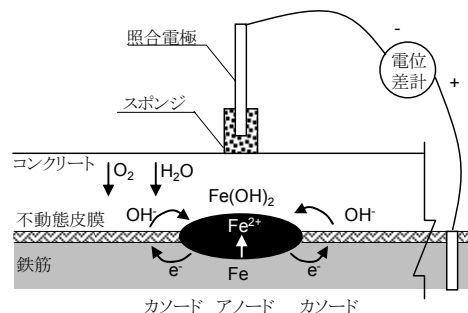


図-4 コンクリート中の鉄筋腐食と自然電位測定

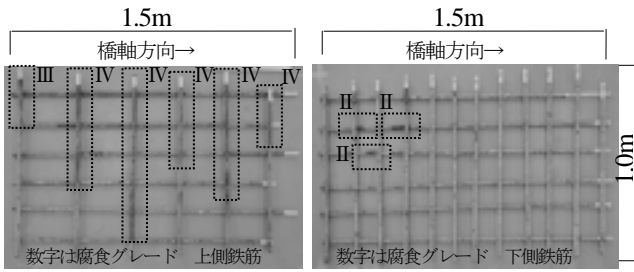


写真-1 鉄筋の腐食状況の例 (取替床版 F)

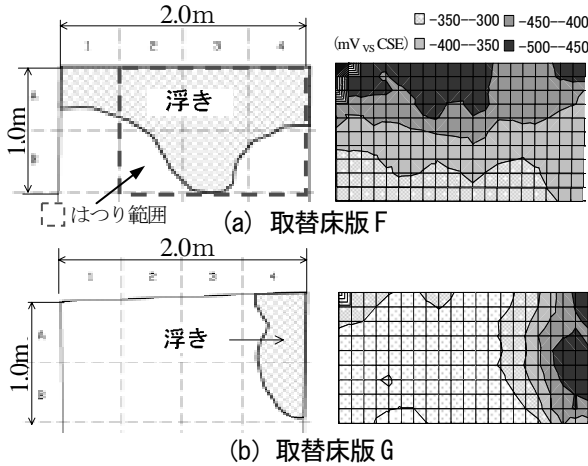


図-5 床版上面の浮きと自然電位の測定結果の例

(2) 取替床版での鉄筋腐食状況と自然電位測定の結果

塩害と疲労により複合劣化し、供用後 31 年で取替に至った実橋の RC 床版 (以下、取替床版) を用い、鉄筋の腐食状況を把握する。取替床版は 4 枚 (取替床版 F~I) を用い、外観変状が顕著な主桁間 G2-G3 を対象に調査を実施する。取替床版から人力はつりにより採取した上側鉄筋 (主鉄筋) の腐食状況を写真-1, 床版上面の打音調査結果および床版下面から自然電位測定による鉄筋の腐食範囲の調査結果を図-5 に示す。上側鉄筋の腐食グレード⁵⁾は、IV (断面欠損が生じている) の状態で、下側鉄筋に比べ広範囲である。また、床版上面の浮きと自然電位の卑な範囲が概ね一致していることから、床版上面の浮きは、鉄筋腐食を伴う傾向にあることが推察される。また上側鉄筋の腐食範囲は、床版上面の浮きや床版下面からの自然電位が卑な範囲 (一側) と、ほぼ一致していることが確認できる。

(3) 鉄筋腐食による質量減少率と床版上面浮きの関係

塩害と疲労を受けた RC 床版の鉄筋腐食による質量減少率 (以下、腐食率) を把握するため、上側鉄筋を長さ 100mm 間隔に切断し、JCI-SC1 に準拠し腐食率を求める。取替床版 4 枚 (取替床版 F~I) の腐食率と床版上面の浮きとの関係を図-6 に示す。横軸に上側鉄筋 (主鉄筋) の腐食率を示し、縦軸に浮きの有無により、各度数を各々の母数で除することで、度数の割合を示している。

床版上面の浮き有りの範囲では、上側鉄筋の腐食率が 0-5% より 5-10% の方が 3 割程度高い傾向を示している。一方、床版上面の浮き無しの範囲では、0-5% の割合が最

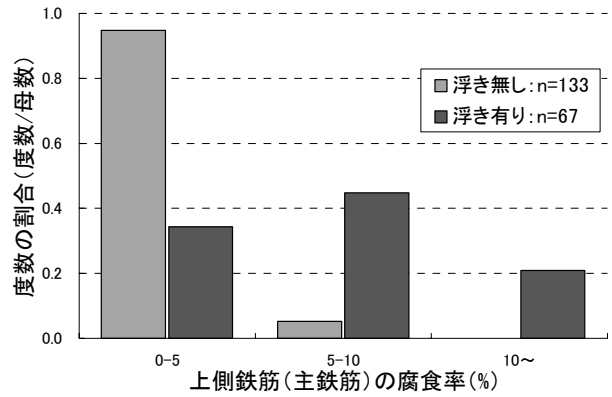


図-6 取替床版における上側鉄筋の腐食率と床版上面の浮きの関係

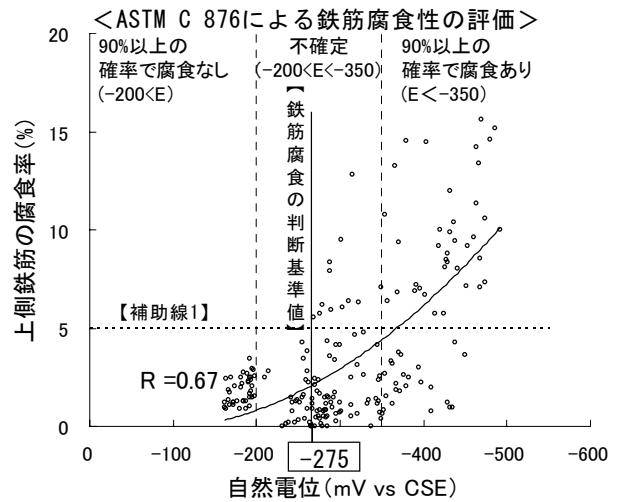


図-7 取替床版における自然電位の測定結果と上側鉄筋の腐食率の関係

も高く、上側鉄筋の腐食率が 5% 以上のものは少ない。このことより、浮きが発生している場合、上側鉄筋の腐食率が 5% 以上を超える傾向にある。

(4) 自然電位測定における鉄筋腐食の判断基準

取替床版の下面からの自然電位の測定結果と、その位置における腐食率の関係を図-7 に示す。自然電位の値と腐食率の間には相関性が見られ、相関係数は 0.67 である。このことから、塩害が懸念される RC 床版では、自然電位測定により上側鉄筋を含む床版内部の鉄筋の腐食を推定できる⁶⁾。

また、床版内部の上側鉄筋は、図-7 の上段に示す鉄筋の腐食性の評価において、不確定の範囲にも床版内部で鉄筋腐食が確認されている。RC 床版の鉄筋腐食状況を的確に把握するためには、鉄筋腐食の判断基準を設定する必要があり、次に示す手順によって鉄筋腐食の判断基準を設定する。まず、浮きが確認されている上側鉄筋の腐食率 5% に補助線 1 を設ける。次に、補助線 1 以上の範囲において、腐食率が確認される自然電位の測定値が最も貴側 (+側) となる位置を求め、その値を鉄筋の

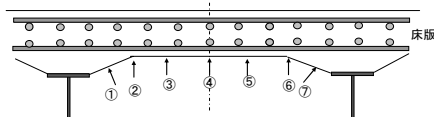


図-8 自然電位の測定箇所（橋軸直角方向）

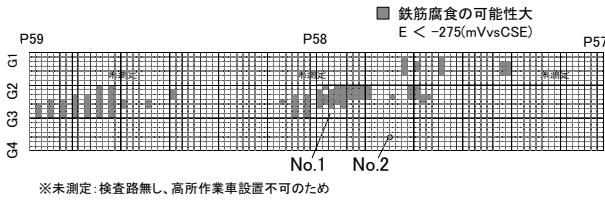
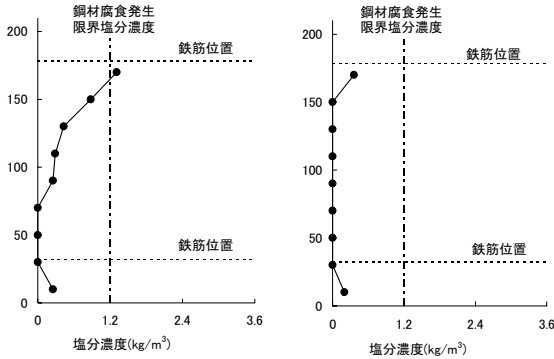


図-9 実橋 RC 床版の自然電位の測定結果の例



(a) 調査位置 No. 1 (b) 調査位置 No. 2
図-10 実橋 RC 床版の塩分濃度分布

判断基準値とする。これにより算出された基準値は、 $-275\text{mV}(\text{vsCSE})$ であり、この基準値より卑側（一側）であれば、鉄筋腐食の可能性が高いと判断する。

(5) 実橋 RC 床版での自然電位の測定結果

塩害と疲労を受けた実橋 RC 床版の鉄筋腐食の範囲を推定するため、自然電位測定を約 $4,500\text{m}^2$ で調査する。実橋 RC 床版における自然電位測定は、図-8 に示すように橋軸直角方向の測定箇所を 7 点とし、橋軸方向は、 0.5m 程度の格子状間隔で測定する。鉄筋腐食が生じていない健全なパネルは、作業の効率化を考慮し測定ピッチを間引いて測定を行っている。自然電位の測定結果の例を図-9 に示す。橙色の着色箇所は、前項の基準値 $-275\text{mV}(\text{vsCSE})$ によって、鉄筋腐食の可能性が大きいと推定しており、その部分は G2-G3 間に集中している。図-10 は、図-9 の位置 No. 1, No. 2 において採取したコアの塩分濃度分布を示す。自然電位測定より鉄筋腐食が推定される位置 No. 1 は、上側鉄筋付近で高い塩分濃度を示している。コア孔の観察によって水平ひび割れが確認されている。一方、鉄筋腐食の可能性が少ない No. 2 では、低い塩分濃度となっている。これらより床版下面からの自然電位測定により、RC 床版上面の塩害劣化の把握ができることがわかる。

3.2 舗装上面からの調査

(1) 調査概要

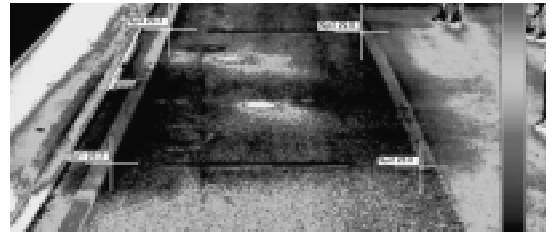
舗装面から床版上面の健全度を評価する非破壊調査



(a) 舗装面からの打音調査



(b) 多配列レーダによる調査



(c) 赤外線カメラによる調査



(d) 反発度法による調査

写真-2 舗装上面からの非破壊調査

としていくつかの調査手法があり、a 橋と c 橋において、写真-2(a) に示す打音調査と写真-2(b) に示す多配列レーダによる調査を実施し、床版上面の浮きやはく離範囲の推定を行う。一部の区間において、試行的に写真-2(c) に示す赤外線カメラによる調査や写真-2(d) に示す反発度法による調査を試行する。各調査手法の特徴を整理すると次のようになる⁷⁾。

打音調査は、点検員がセットハンマー(0.9kg)で舗装面を打撃し濁音から浮きの範囲を把握する。

多配列レーダによる調査は、地中探査用の高解像度アンテナを用いた測定機で橋面を走査し、上側鉄筋位置付近をその解析したレーダ画像を分析し、舗装面から床版上面の浮きやはく離などの劣化部を検出する。

赤外線カメラによる調査は、舗装面を撮影し、表面温度の分布状況から床版上面の浮き、はく離およびポットホールの予備群を検出する。

反発度法による調査は、跳ね返りの高さにより舗装の浮きやはく離の有無が測定者の評価に依存せず、定量的に評価ができる。

(2) 床版上面の調査手法の評価

打音調査の結果を図-11に示す。浮きやはく離が確認された範囲は、舗装の施工目地周辺や輪荷重走行位置に多い傾向があり、部分的に路面にポットホールが確認されている。浮き部は、自然電位で鉄筋腐食が推定された範囲と概ね一致している。多配列レーダによる調査結果を図-12に示す。鉄筋が健全であれば黒色の線となって現れるが、鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートに浮きやはく離が生じると、電磁波が空隙により拡散され反射波が不鮮明になる。打音調査結果と比較すると、浮き部は一致しているが、その範囲は小さく現われている。赤外線カメラによる調査は、打音調査の浮き部が確認される箇所を検出することは可能であるが、天候や気温によって検出するのが困難な場合がある。反発度法による調査は、浮き部を定量的に判定することが出来るが、広範囲の面積を調査し評価する場合は作業効率が低下する。

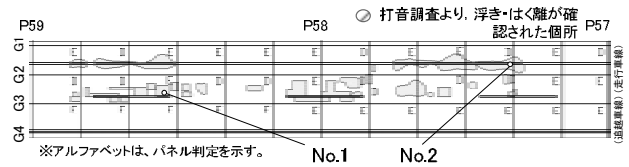


図-11 実橋 RC 床版の打音調査結果の例

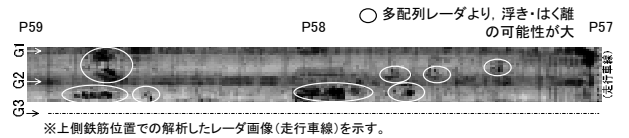


図-12 多配列レーダによる調査結果の例

3.3 床版上面の劣化状態と調査手法

床版上面の調査手法は、床版の劣化状態によって適切な調査手法を選定する必要があるが、これまでの知見や試行的な調査結果を整理すると図-13に示すようになる。まず、現地調査の前に机上調査を実施し、設計図書や補修履歴等を確認することが大切である。次に床版内部の鉄筋腐食が始める初期の段階では、自然電位測定による調査が有効である。鉄筋腐食が進行し、床版上面のはく離、ポットホールが生じる段階では、打音調査、多配列レーダ探査、および赤外線カメラ調査がある。また、床版の部分打換や床版取替の必要性を判断するため、たわみ計測を実施し、床版の剛性を検討することも有効な評価手法であると考えられる。

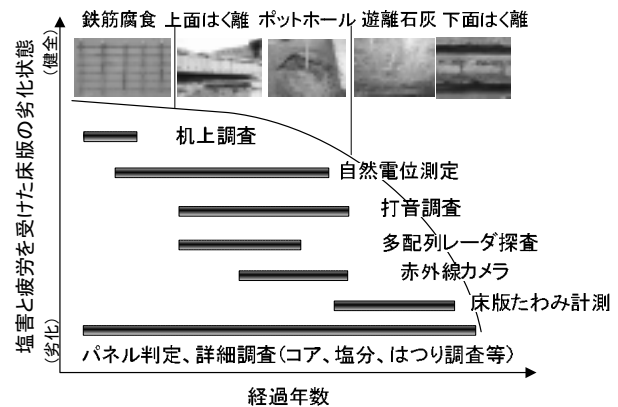


図-13 床版上面の劣化状態と調査手法

4. 塩害と疲労を受けた RC 床版の健全度評価

4.1 床版上面の評価

床版上面の評価を定量的に評価することが重要であり、表-4に示すように床版下面からの自然電位測定や舗装上面からの打音調査結果を組合せて床版上面を3段階に分けて評価することを提案する。自然電位測定では、鉄筋腐食の基準値の床版1パネルに占める割合により評価を行う。例えば、自然電位測定で、基準値の割合が30%以上の場合や、打音調査結果より床版上面に浮きが確認された場合は、床版上面の劣化度が限りなく疑われると評価し、劣化度として「D1」判定としている。

4.2 塩害と疲労を受けた RC 床版の健全度評価

塩害と疲労を受けた RC 床版は、床版上面側から床版下面側に塩分が浸透し、塩害劣化が進行するため、床版上面と床版下面を組合せた評価をする必要がある⁸⁾。図-14は、実橋 RC 床版の427パネルにおいて、床版下面と床版上面の評価を行った健全度評価をバブル図で示している。床版上面の評価で、劣化が限りなくが疑われ

表-4 床版上面の評価方法の提案

劣化度	床版の状況	自然電位の測定値	床版上面の浮きの有無
D1	床版上面の劣化が限りなく疑われる。	E < -275 (mV vs CSE) の割合が30%以上のパネル	有り
D2	床版上面の劣化が進行する。	E < -275 (mV vs CSE) の割合が3~30%のパネル	無し
D3	床版上面の劣化が少ない。	E < -275 (mV vs CSE) の割合が3%以下のパネル	無し

る「D1」と評価されるパネルは、床版下面のパネル判定で「A」が多い。一方、床版上面の評価で、「D3」と評価されるパネルは、床版下面のパネル判定で健全な「E」が多い。床版上面が塩害劣化すると床版下面の劣化進行も著しいことが確認できる。この調査結果を踏まえ、床版下面と床版上面の評価を組合せた健全度評価を図-15のように提案する。横軸に床版下面の評価（パネル判定）、縦軸に床版上面の評価を示す。表の左上に行くほど床版の劣化度が進行していることを示している。

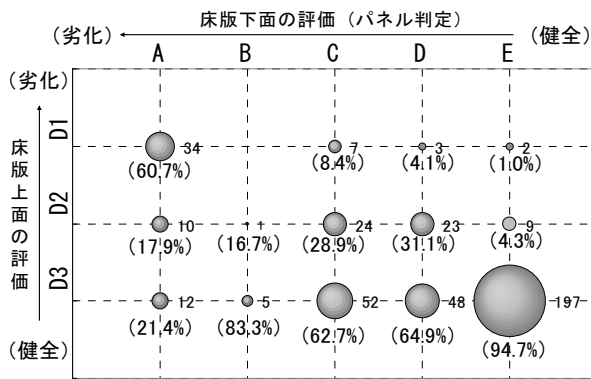


図-14 実橋 RC 床版の健全度評価の試行例

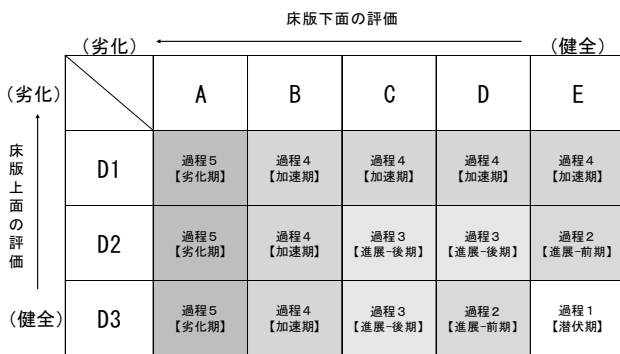


図-15 鋼橋 RC 床版の健全度評価の提案

5. 床版劣化の維持管理計画

塩害と疲労を受けた RC 床版の劣化過程を整理し、新しい維持管理計画の方向性を表-5 のように提案する。

(1) 過程 1 [潜伏期] の維持管理

路面にひび割れやポットホールがない段階は、床版上面の鉄筋腐食による劣化の発生はないと考える。この段階は凍結防止剤の塩分浸透は軽微と推察され、RC 床版の力学的特性に与える影響も少ない。維持管理法は、床版防水工の実施が重要である。

(2) 過程 2~3 [進展期 (前期) ~ (後期)] の維持管理

路面のひび割れやポットホールが軽微な段階は、RC 床版上面の鉄筋腐食により劣化が進行すると考える。路面に損傷が生じると、RC 床版内の凍結防止剤中の塩分浸透によって濃度が高くなりやすく、かつ塩分浸透の範囲は拡大すると推察する。また、RC 床版上面ではく離が生じた場合は、耐荷力への影響があると推察する。このことから、この段階の維持管理法は、塩分浸透が想定される RC 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、床版防水工の実施が必要と考える。

(3) 過程 4~5 [加速期~劣化期] の維持管理

路面のひび割れやポットホールが頻発し RC 床版下面に溶出消石灰が著しくみられる段階は、凍結防止剤の塩分が RC 床版下面にも到達していると推察する。また、RC 床版下面に到達した塩分は、下側鉄筋を腐食環境にすると推察され、かぶりコンクリートの脱落などが懸念される。この段階は、塩分浸透による耐久性の低下や、

表-5 RC 床版の劣化状況と維持管理計画の方向性

劣化過程	外観変状の項目	維持管理計画の方向性
1 潜伏期	路面水が浸透	床版防水工の実施
2 進展期 (前期)	上側鉄筋の腐食 白華減少	床版防水工の実施と 床版上面の部分打換え
3 進展期 (後期)	床版上面のはく離	床版防水工と床版上面 の部分打換えや床版増 厚の実施
4 加速期	床版上面のはく離 溶出消石灰の析出 下側鉄筋の腐食	床版防水工の実施と 床版の部分打換えや床 版取替
5 劣化期	床版上面のはく離 溶出消石灰の析出 床版下面のはく離	''

上側鉄筋や下側鉄筋の腐食による RC 床版の耐荷力の低下などが推察されることから、考えるべき維持管理法は、床版部分打換えの対策と床版防水工の実施や、床版取替が必要と考えるべきである。

なお LCC の見地から、RC 床版の劣化が軽微な段階で計画保全することが重要である。

6. まとめ

今回調査した 5 橋の RC 床版では、塩害と疲労を受けた RC 床版の特徴を示していた。外観上は比較的健全と判断されたパネルにおいても、一部の RC 床版で塩害劣化が進行し、床版上面のはく離が生じていた。このため床版内部の劣化を早期、かつ的確に把握するため、床版上面と床版下面を組み合わせた北陸地域における鋼橋 RC 床版の新しい健全度評価を提案し、今後の維持管理計画の方向性を示した。

参考文献

- 1) 岸谷考一他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害、技報堂出版、1988.2
- 2) 石川 裕一他：疲労と凍結防止剤による塩害を受けた鋼橋 RC 床版の特徴と健全度評価に関する研究、構造工学論文集、Vol.57A, pp.1263-1272, 2011.3
- 3) 横山和昭他：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、第六回道路橋床版シンポジウム論文報告書、pp.145-150, 2008.6
- 4) NEXCO 東日本、中日本、西日本、総研：設計要領第二集 橋梁保全編、pp.4-5, 平成 21 年 7 月
- 5) コンクリート標準示方書 [維持管理編]、土木学会、2007
- 6) 石川 裕一他：疲労と塩害劣化した鋼橋床版の鉄筋腐食の実態と自然電位による評価、土木学会 65 回年次学術講演会、平成 22 年 9 月
- 7) 本莊清司他：凍結防止剤による塩害で劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査、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書 第 11 巻、pp.529-536, 2011.10
- 8) 福永靖雄他：既設 RC 床版の劣化度評価について、第六回道路橋床版シンポジウム論文報告書、pp.127-132, 2008.6