論文　道路橋 RC 床版の鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明に関する研究

横山　和昭[*1]・本荘　清司[*2]・葛目　和宏[*3]・藤原　規雄[*4]

要旨：積雪の多い山間部に建設された道路橋 RC 床版においては，凍結防止剤による塩害や漏水等の影響で内部の鉄筋が腐食する劣化現象が見られる。本研究では，これまで一般的に言われている凍結防止剤による RC 床版の塩害劣化機構に関して，鉄筋腐食に関する外観目視調査を主体とした実橋調査を実施し，その劣化要因としては，床版の貫通ひび割れ部から漏水が浸透することにより床版内部の鉄筋腐食が発生することを定性的に明らかにした。

キーワード：道路橋，RC 床版，鉄筋腐食，塩害，劣化機構，劣化要因，ひび割れ，漏水

1. はじめに

積雪地域の高速道路において冬季の雪氷期間中に散布される凍結防止剤には，一般的に塩化ナトリウムが使用されている。路面に散布された凍結防止剤の大部分は融雪水として水路等より流出するが，道路橋の RC 床版上面に残留した塩化物は，ひび割れ等を経由して RC 床版の内部に浸透する場合もある。床版上面から浸透した塩化物は床版内部の鉄筋を腐食させ，舗装路面におけるポットホール等の損傷を誘発するため，道路管理者にとって深刻な問題であり，損傷が顕著な場合には床版の取替えを行っている事例 [1)]もある。また，積雪地域の塩害対策として上面を増厚した RC 床版においても増厚後に再劣化が発生し，その損傷状態の評価や劣化要因の解明が重要な課題となっている [2)]。

中国地方の高速道路においても，冬季の路面凍結防止対策として道路管理上から凍結防止剤を頻繁に散布しているため，凍結防止剤による鉄筋腐食を伴う塩害が RC 床版の大きな劣化要因となっている [3)]。

本研究は，道路橋 RC 床版の鉄筋腐食を伴う劣化機構を解明する目的で，山間部を通過する中国地方の高速道路において鉄筋腐食を伴う劣化が特に顕著と思われる 6 橋の実橋調査を実施し，鉄筋腐食要因に関して考察を加えたものである。

2. RC 床版の実橋調査

2.1 調査概要

調査対象とした 6 橋（A～F 橋）の橋梁床版の諸元を**表－1** に示す。対象橋梁の構造形式は全て鋼連続鈑桁橋であり，F 橋以外の 5 橋は供用後 15 年程度を経過した後に床版防水工が施工されている。実施した調査内容を**表－2** に示す。調査は舗装面と床版上下面の外観目視，打音および赤外線調査を実施し，ひび割れ，浮き・剥離等の変状を記録するのに加えて，床版コンクリートの物性値を確認すべく貫通コアを採取した。また，B 橋の一部区間と D 橋の上下線の全径間においては，調査時に床版打換工事が実施されていたため，打換工事中に床版内部の鉄筋腐食状況を外観目視で確認し，その他の橋梁は床版の一部を部分的に開削して鉄筋腐食状況を確認した。

2.2 床版下面の変状の特徴と分類

(1) 変状の特徴

今回調査した 6 橋の床版下面における代表的な変状は，**写真－1** に示すように鉄筋腐食に起因すると考えられるかぶりコンクリートの広範囲な浮き・剥離および漏水であった。剥離した箇所では著しく腐食した鉄筋が露出しており，断面が大きく欠損した箇所も確認された。また，貫通コアを採取した箇所においては，**写真－2** に示すように主鉄筋のかぶりが剥落した後に，その奥の配力筋の位置でも浮き・剥離または水平方向のひび割れが進展している状況（浮き・剥離の 2 層化）も確認された。F 橋を除く A～E 橋については床版防水工が施工されているため，広範囲の浮き・剥離の発生している箇所でも床版下面は乾燥していたが，多くの箇所でその周辺に過去に漏水があったと思われる変色や白華などが見られた。床版防水が未施工の F 橋については，走行車線に位置する G2～G3 間のパネルに全長にわたって進展する漏水ひび割れが**写真－3** に示すように見られたが，浮き・剥離の発生は比較的少なかった。

(2) 変状の分類

床版下面の主たる変状である広範囲の浮き・剥離は，**表－3** に示すように 2 種類の進展傾向が見られ，**写真－4** に示すようにパネルの中央付近に発生して橋軸方向に進展する傾向（タイプ 1 と称する）と**写真－5** に示すように橋軸直角方向に進展する傾向（タイプ 2 と称する）に分類できる。タイプ 1 の浮き・剥離は，床版の標準部

*1 西日本高速道路（株）中国支社 管理事業部 改良グループサブリーダー　工修　(正会員)
*2 西日本高速道路（株）中国支社 管理事業部 改良グループリーダー　工修　(正会員)
*3（株）国際建設技術研究所　代表取締役社長　(正会員)
*4（株）国際建設技術研究所　技術部 次長　(正会員)

表－1　調査対象の橋梁床版諸元

橋名	構造形式	橋長（径間割）	床版施工年	床版支間(m)	床版厚(cm)	防水工施工年
A 橋	鋼3径間連続鈑桁（3連）	299.7m (3@33.3m)×3	1979年	2.6	20	1994 年
B 橋	鋼3径間連続鈑桁＋鋼2径間連続鈑桁	200m (40.55+41+40.55m) +(2@38.05m)	1977年	2.8	21	1998年
C 橋	鋼3径間連続鈑桁（2連）	243m (3@40.5m)+(3@40.5m)	1978年	2.9	21	1993年
D 橋	鋼3径間連続鈑桁	上り線：125.5m (46+44+34.5m)	1977年	2.8	21	1993年
	鋼4径間連続鈑桁	下り線：146.6m (31.9+2@40.8+32m)	1978年	2.6-3.0	22	不明
E 橋	鋼3径間連続鈑桁	143.15m (43m+56m+43m)	1977年	2.8	21	1993年
F 橋	鋼4径間連続鈑桁	165m (41.9+2@42m+38.05m)	1982年	2.3	22	未施工

表－2　調査内容

調査箇所	調査内容（変状および物性値）
舗装面	外観目視（ひび割れ） 打音および赤外線（浮き・剥離）
床版上面	外観目視（ひび割れ） 打音および赤外線（浮き・剥離）
床版内部	床版打換時(B橋・D橋)と部分開削時の外観目視と自然電位（鉄筋腐食状況）
床版下面	外観目視（ひび割れ・漏水・遊離石灰・鉄筋腐食状況） 打音および赤外線（浮き・剥離）
貫通コア	物性試験（圧縮強度・静弾性係数・単位容積質量・塩化物量・中性化深さ）

表－3　変状の分類

分類	変状内容（浮き・剥離の進展状況）
タイプ1	橋軸方向に進展する傾向
タイプ2	橋軸直角方向に進展する傾向

における範囲で発生し，ハンチ部や床版厚の厚い桁端のパネルでは殆ど見られない。また，橋軸直角方向には，桁間を跨いで隣のパネルまでは進展せず，隣接する桁間によって発生傾向が大きく異なる場合がある。タイプ 2 の浮き・剥離は，橋軸方向の進展は限定的で数 10cm 程度であるが，橋軸直角方向にはハンチ部や主桁を跨いで進展し，ほぼ全幅にわたって発生しているケースも見られた。なお，タイプ 1 の浮き・剥離が広範囲に及んでいる箇所では，タイプ 2 と混在しているケースも見られた。

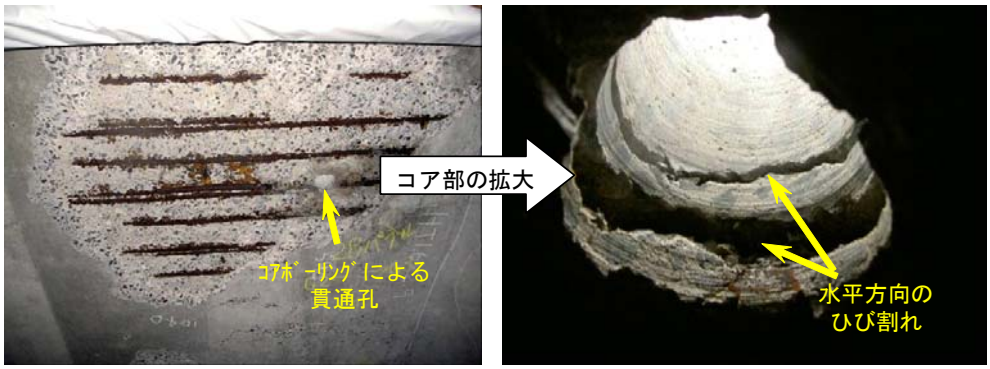
2.3 舗装面の変状との関連

床版下面に広範囲に浮き・剥離や漏水が多数発生している径間では，舗装面にも浮きやひび割れ，ポットホール補修等が多数存在する傾向にあり，両者の位置が合致しているケースも多く見られた。また，タイプ 1 の浮き・剥離は走行車線のパネルで多数発生する傾向にあり，活荷重である車両走行位置が影響因子の一つになっているのではないかと考えられるが，調査対象の 6 橋の交通量は同レベルであり，交通量の違いによる浮き・剥離への影響は確認されなかった。

(1) 床版下面の広範囲な浮き・剥離

(2) 左図拡大（主鉄・配力筋の腐食状況）

写真－1　床版下面の浮き・剥離・鉄筋腐食状況（B 橋の例）



写真－2　浮き・剥離の 2 層化状況（B 橋の貫通コア採取箇所）

さらに，**図－1** に示すように，路肩ライン付近の融雪処理溝や中央ライン付近の舗装打ち継ぎ目地がある橋梁では，浮き・剥離の発生が顕著になる傾向も見られた。

2.4 鉄筋腐食の特徴

浮き・剥離の発生した箇所の鉄筋は腐食しており，断面が大きく欠損しているものも見られた。**写真－1** で前述したように，最外縁の主鉄筋だけでなく配力筋にも激しい腐食が生じている箇所もあった。これに対して，表面のかぶりコンクリートが浮いていない箇所で開削した鉄筋には顕著な腐食は見られず，ほぼ健全または断面欠損の見られない程度の腐食状況であった。この傾向は，**写真－6** に示すように，著しく腐食した鉄筋が露出しているすぐ近傍においても同様であった。また，床版の打換工事が行われた B 橋や D 橋の鉄筋腐食状況は**写真－7** に示すように場所によって極端な差があった。D 橋では床版の打換工事の際に全ての鉄筋の腐食状況を確認したが，**図－2** に示すように下側鉄筋が腐食している箇所ではほとんどの場合，直上もしくはその近傍において上側の鉄筋にも腐食が見られた。上側鉄筋については，下側鉄筋よりも広範囲に腐食が見られ，上側だけが顕著に腐食している箇所も多数あった。なお，床版防水が未施工の F 橋において，ひび割れから多量の漏水を有しているが浮き・剥離の発生していない箇所で鉄筋をはつり出して腐食状況を確認したところ，主鉄筋および配力筋ともに浮き・剥離部のような激しい腐食は見られなかった。これは，漏水が顕著な場合は外部からの酸素が供給され難いためと考えられる。

2.5 含有塩分量と中性化深さ

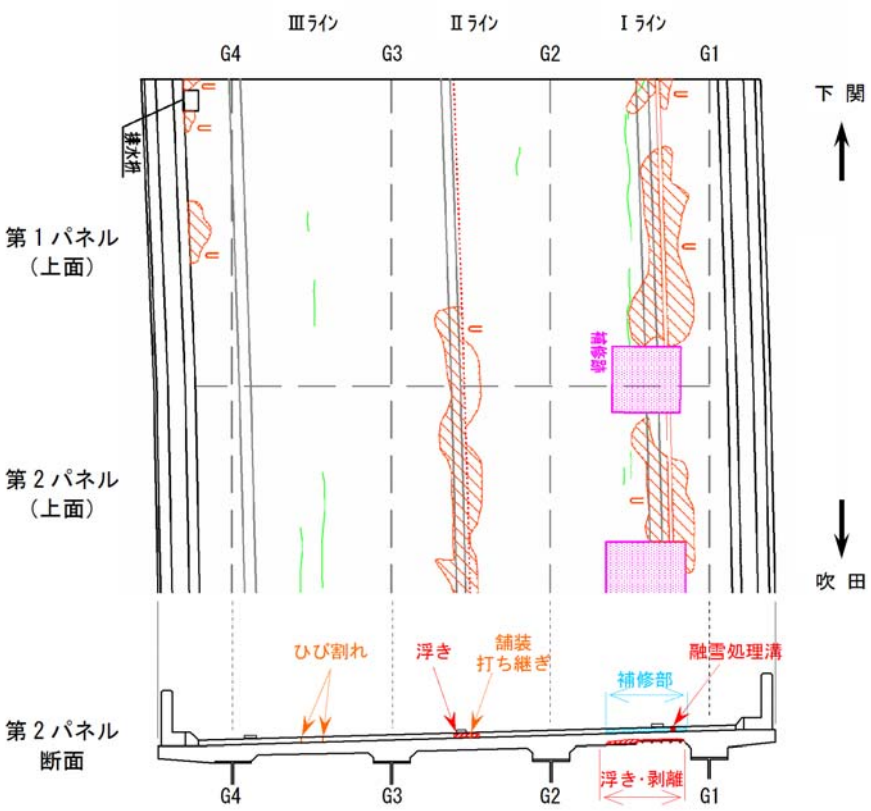
貫通コアによる物性試験では，今回調査した 6 橋のいずれも，浮き・剥離・漏水等が生じている箇所から採取した試料については，鉄筋位置において 1.2kg/m^3 を超える塩化物イオン量が検出され，一部では 5kg/m^3 以上の非常に多量の塩分が検出されていた。これは上下面とも同様であったが，塩分が多量に浸入している箇所の塩分の分布は，概ね上面側の方が多い傾向にあり，床版上面側が塩分の供給源になっていると推察される。

写真－3　漏水・ひび割れ・遊離石灰の状況（F 橋）

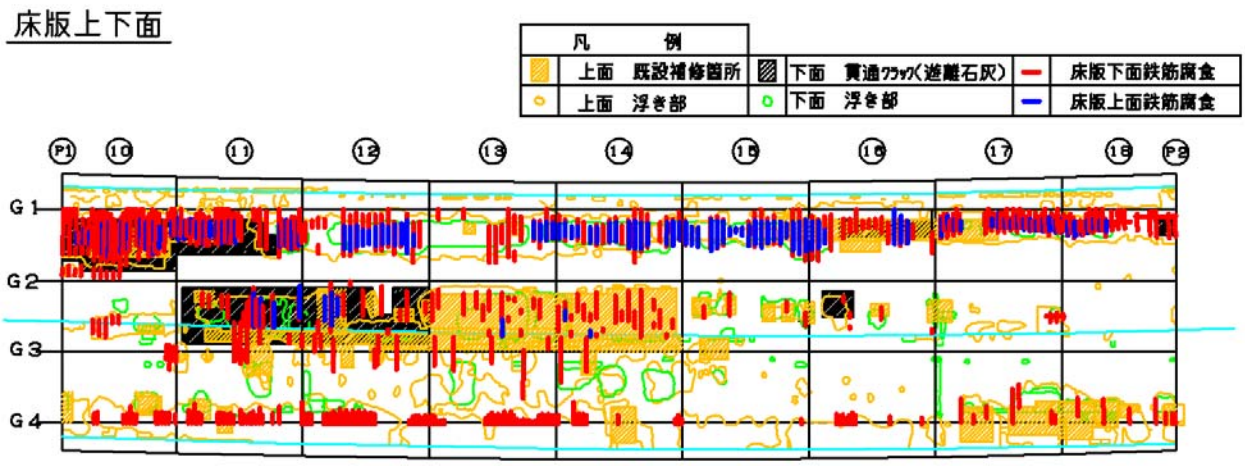
写真－4　橋軸方向剥離（タイプ 1）

写真－5　橋軸直角方向剥離（タイプ 2）

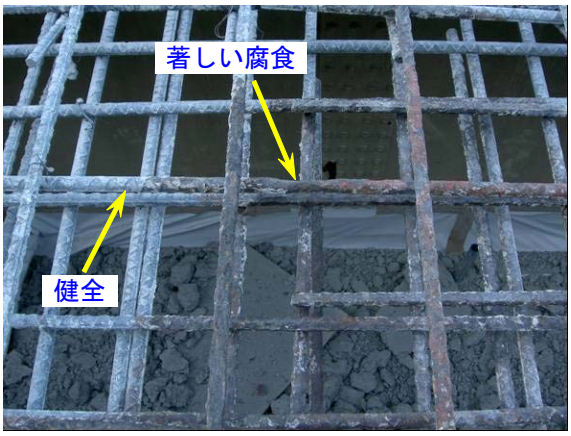
写真－6　鉄筋の腐食状況（A 橋の例）



図－1　外観目視調査例（E 橋）



図－2　鉄筋腐食位置と床版上下面の剥離部の重ね合わせ例（D 橋上り線 P1～P2 間）



写真－7　鉄筋の腐食状況（D 橋の床版打換時）

一方，上下面ともに浮き・剥離の近傍であっても，変状の生じていない箇所から採取した試料の塩化物イオン量は発錆限界以下であった。乾燥したパネルで調査した中性化深さは 18～30mm，現在も漏水のある箇所の中性化深さは 11～19mm であった。乾燥したパネルの多くは主鉄筋（純かぶり 30mm 程度）の中性化残りが 10mm を切っており，中性化の影響だけで腐食が生じる状況にあったが，浮き・剥離の発生頻度との間には明確な相関は見られなかった。

2.6 床版の構造および材料の調査結果

今回調査した RC 床版の構造諸元である橋軸直角方向の主鉄筋かぶりの実測値と材料諸元であるコンクリートの物性値をそれぞれ**表－4** に示す。

鉄筋かぶりは 6 橋のいずれも 30mm 程度の純かぶりを満足しており，かぶり不足が鉄筋腐食の直接の要因ではないと考えられる。コンクリートの圧縮強度は 6 橋において 21～35N/mm^2 程度であり，極端に低い強度は確認されなかった。静弾性係数は 15～26k N/mm^2 程度，単位容積質量は 2200～2400 kg/m^3 程度であり，コンクリートの物性値は概ね標準的な値を示しているため，コンクリートの物性が RC 床版の鉄筋腐食を伴う劣化の直接的な要因ではないと考えられる。

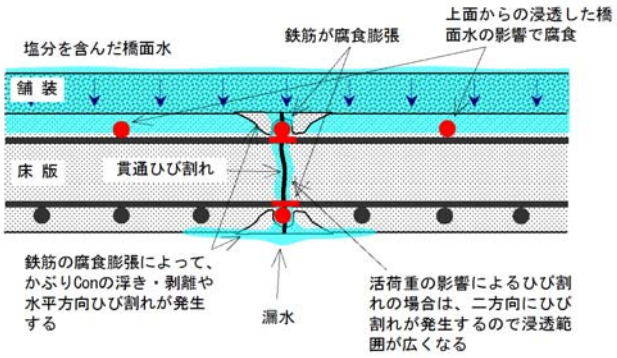
表－4　床版の構造および材料諸元

橋名		主鉄筋のかぶり (mm)	コンクリートの物性値（平均値） 圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	単位容積質量(kg/m^3)
A 橋		27～45	21.6	17.8	2408
B 橋		27～30	22.3	20.7	2422
C 橋		36～37	25.9	26.3	2282
D 橋	上	32～47	26.1	15.5	2243
	下	26～48	35.7	19.9	2251
E 橋		24～32	27.5	20.7	2291
F 橋		29～34	34.4	22.1	2272

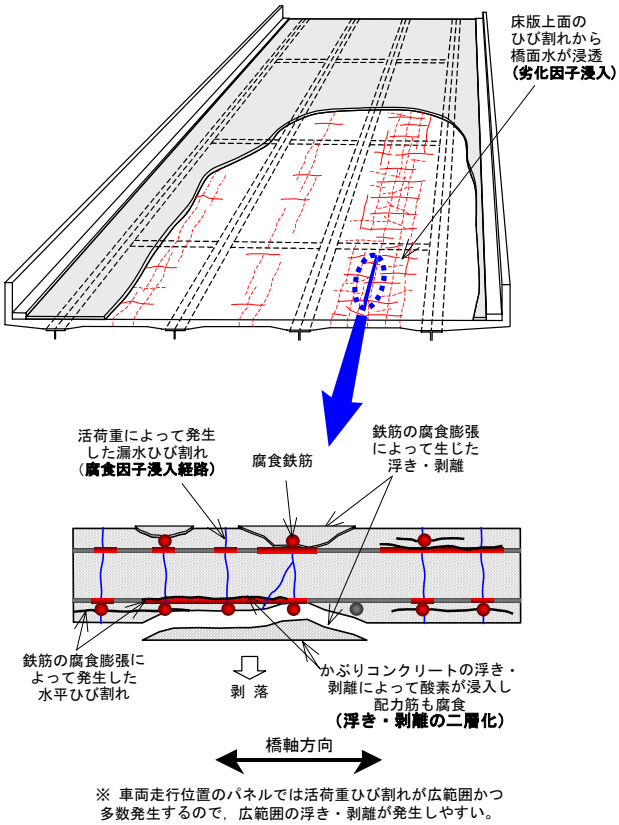
3. 鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明

調査対象橋梁における床版防水工が施工される前の点検結果では，浮き・剥離の生じている箇所においては過去に漏水が発生していたことが記録されており，塩分を含んだ橋面水が床版上面からの貫通ひび割れより床版下面まで漏水していたと想定される。よって，2 章で述べた鉄筋腐食を主体とする調査結果から総合的に判断すると，調査対象橋梁の RC 床版の劣化機構は，**図－3** に示すように凍結防止剤の塩分を含んだ橋面水が床版上面より貫通ひび割れを通じて床版内部に浸透し，鉄筋の不働態被膜を破壊して腐食させ，その腐食膨張によって**図－4** に示すように，かぶりコンクリートの剥離が発生したものと考えられる。

橋面水の浸透経路となる床版上面からの貫通ひび割れは，コールドジョイントや乾燥収縮や桁の温度伸縮の影響によって発生する橋軸直角方向ひび割れと，活荷重の影響によって発生する活荷重ひび割れが考えられる。



図－3　RC 床版の塩害による鉄筋腐食機構



図－4　RC 床版の鉄筋腐食による剥離機構

活荷重ひび割れは桁を跨いで進展はしないが格子状または亀甲状に広範囲に発生するため，これが漏水の浸透経路となって生じる浮き・剥離（タイプ 1）は橋軸方向に広範囲に進展する場合がある。

コールドジョイントや乾燥収縮ひび割れなどが漏水の浸透経路となって生じる浮き・剥離（タイプ 2）は，全幅にわたって進展する場合があるが，橋軸方向の進展は限定的で概ね数 10cm 程度である。

今回実施した調査対象の RC 床版では，両タイプのひび割れが発生しているパネルも多数あり，これらの両タイプを組み合わせた漏水ひび割れによる鉄筋腐食を伴う劣化が複合的に進行していると考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究では，既往の研究で一般的に言われてきた凍結防止剤による RC 床版の塩害劣化に関して，鉄筋腐食に着目した外観目視調査を主体に実橋調査を実施し，その劣化要因としては，床版の貫通ひび割れ部から漏水が浸透することにより床版内部の鉄筋腐食が発生することを定性的に明らかにした。

今後は，本研究で実施した詳細調査のデータを定量的に取りまとめ，鉄筋腐食を伴う劣化過程と劣化を促進させる各種影響因子（床版構造条件，交通荷重条件，床版コンクリートの物性値，水供給条件等）を定量的に把握し，鉄筋腐食を伴う塩害により劣化した RC 床版に対しての合理的かつ効率的な補修方法の立案に向けて検討する予定である。

参考文献

1) 関口武一，笹井幸男，石塚喬康：塩害を受けた RC 床版の劣化度調査と保全工事，コンクリート工学，Vol.32，No.5，pp.41-49，1994.5
2) 稲葉尚文，横山和昭：増厚された RC 床版の損傷状態の調査および評価について，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.487-492，2006.7
3) 松冨 繁，平野毅志，渡辺健次，金子雄一：塩害を受ける道路橋床版の劣化予測，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，第 3 巻，pp.371-376，2003.10