

論文 凍結防止剤による塩害を受けた道路鋼橋 RC 床版の鉄筋腐食の実態と自然電位測定の実用性に関する研究

石川 裕一*1・村上 祐貴*2・畔柳 昌己*3・青山 實伸*4

要旨: 本研究は、北陸地域の高速道路の鋼橋 RC 床版について取替えに至った事例から約 250kg の異形鉄筋を採取し、鉄筋腐食に関する一連の調査を行った。また RC 床版下面からの鉄筋腐食診断法として、自然電位の測定を行い、鉄筋腐食による質量減少率と自然電位との相関を調べた。結果、凍結防止剤により塩害を受けた RC 床版は下側鉄筋より上側鉄筋の方が腐食し、同一の鉄筋では上面より下面に腐食が広がっていた。さらに RC 床版下面からの自然電位により上側鉄筋の腐食を推定できることを明らかにし、実橋 RC 床版においても床版下面からの自然電位測定を適用して評価できることを確かめた。

キーワード: 凍結防止剤, 鋼橋 RC 床版, 鉄筋腐食, 腐食量, 走査型電子顕微鏡 (SEM), 自然電位測定

1. はじめに

凍結防止剤により塩害や、凍害を受けた道路鋼橋の鉄筋コンクリート床版 (RC 床版) は、1960 年代から米国で多く報告されている¹⁾。我が国では 1990 年代後半から凍結防止剤により塩害を受けた RC 床版の劣化が報告されている²⁾。近年では積雪寒冷である北海道などにおいて凍害を受けた RC 床版の劣化もみられる³⁾。凍結防止剤による塩害を受けた RC 床版は、冬期における凍結防止剤の散布により塩化物イオンが床版上面から内部に浸透し、鉄筋を腐食させる。さらに鉄筋の腐食生成物が約 2.5 倍に体積膨張すると、鉄筋とコンクリートとの付着状況が変化し⁴⁾、腐食の程度により鉄筋とコンクリートがはく離する⁵⁾。その後、ひび割れが進展すると路面にポットホールが多発し、さらに床版下面への溶出消石灰が多くみられ劣化進展が早くなる⁶⁾。

高速道路における RC 床版の維持管理は、外観変状を主体に点検でグレーディングしている⁷⁾。しかし凍結防止剤による塩害を受けた RC 床版の場合、変状が生じた段階では塩害劣化がかなり進行しているため、これより早い時期に塩化物イオン濃度分布や鉄筋腐食の範囲を的確に把握することが重要となる。

本研究は、北陸地域の高速道路において取替えに至った RC 床版 (取替床版) の事例から腐食した異形鉄筋 (D19) を約 250kg 採取し、鉄筋腐食に関する一連の調査を行う。また走査型電子顕微鏡 (SEM) により、鉄筋付近におけるコンクリートの細孔径分布を観察し、鉄筋腐食の形態とコンクリートの細孔径分布の影響を調べる。さらに取替床版を用いた自然電位を測定し、鉄筋腐食による質量減少率と自然電位の相関を調べ、実橋 RC 床版における自然電位法の実用性を確かめる。

2. 調査対象の概要

2.1 調査対象

調査対象の取替床版は、北陸地方の高速道路の鋼橋非合成鋼桁の RC 床版 (設計基準強度 24MPa) である。この RC 床版は、供用後 24 年で図-1 に示す鋼繊維補強超硬コンクリートによる床版上面増厚工法 (増厚) で補強されたが再劣化が進行し、供用後 31 年で取替えに至っている。この取替床版の事例における供用条件は、大型車の日断面交通量が約 7,500 台/日で大都市近郊の重交通路線に比べ少なく、凍害危険度⁸⁾ が最も低い危険区域 (危険度 0) にある。また塩化物イオンの供給は、飛来塩分は極めて少ないが 1 冬期あたりの凍結防止剤の散布量は 19t/km/一方向である。

2.2 取替床版の劣化状況

図-2 は取替床版の劣化状況を示す。床版上面はコンクリートの浮きや、鉄筋腐食および鉄筋の断面欠損が見られ、床版下面は溶出消石灰を伴う二方向ひび割れが生じている。図-3 は直径 55mm のコアを取替床版から採取し、10mm 間隔でスライスカットし JIS A 1154 の電位差滴定法で塩化物イオン濃度分布の測定した結果を示す。床版上面の浮き部分で採取したコア 1 は、床版内部 (床版下面から 25-145mm の位置) で塩化物イオン濃度が鋼材腐食限界量 1.2kg/m³ を大きく超えている。特に、下側鉄筋

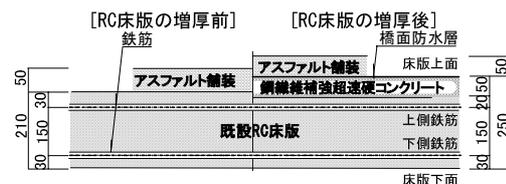


図-1 床版上面増厚の概要図

*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 構造技術課係長 工修 (正会員)

*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 助教 博 (工) (正会員)

*3 中日本高速道路 (株) 金沢支社 技術検査部 品質検査・技術管理チーム サブリーダー

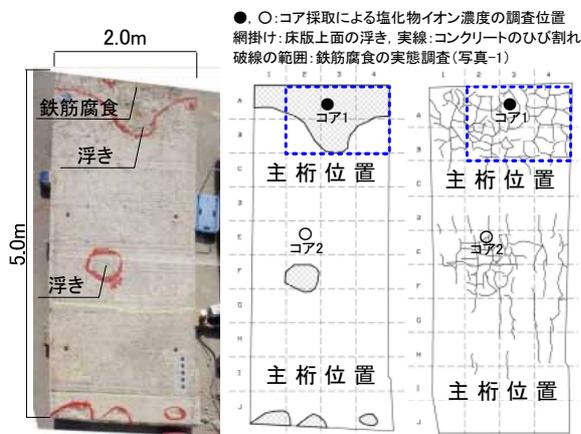
*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 金沢支店 道路技術部長 工博 (正会員)

位置の付近（床版下面から 25-65mm）は、塩化物イオン濃度が 3.6kg/m^3 以上と多く、路面に散布された凍結防止剤の塩化物イオンが下側鉄筋位置まで浸透していることがわかる。コア 1 の下側鉄筋位置で塩化物イオン濃度が高い原因は、凍結防止剤を含む路面水が床版を貫通するひび割れを流下したためと考えられ、床版下面で塩化物イオン濃度が低い原因は中性化による塩化物イオンの移動が推察される。次にコア 1 から約 2m 離れた床版上面に浮きがない代表的な部分のコア 2 の塩化物イオン濃度分布を図-3 に示す。コア 2 の塩化物イオン濃度分布は、床版上面から濃度勾配があり上側鉄筋位置では鋼材腐食限界量 1.2kg/m^3 を超えている。

このことから、凍結防止剤の塩化物イオンは床版上面から浸透し RC 床版を塩害させ、床版に貫通ひび割れが生じている場合は、凍結防止剤の塩化物イオンが流下し、床版下面を塩害させることがわかる。

3. 鉄筋腐食の実態調査

鉄筋腐食の実態調査は、取替床版を人力はつりで丁寧に鉄筋露出させ、腐食した異形鉄筋を約 250kg 採取する。鉄筋腐食は、目視による腐食グレード⁹⁾ の分類や、腐食生成物を除去し非接触 3D スキャンによる断面測定¹⁰⁾ および鉄筋腐食による質量減少率を測定する。



(a) 床版上面の状況 (b) 床版上面変状 (c) 床版下面変状

図-2 取替床版の劣化状況の一例

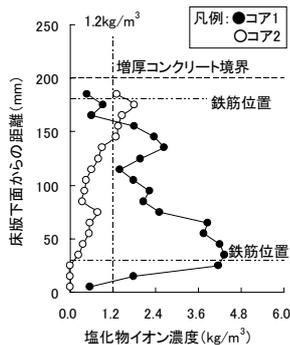


図-3 取替床版の塩化物イオン濃度分布

3.1 目視による腐食グレード調査

鉄筋腐食の目視調査は、写真-1 のように取替床版から採取した上側と下側鉄筋のそれぞれ上面と下面を、表-1 の腐食グレードで分類する。凍結防止剤による塩害を受けた RC 床版は、下側鉄筋に比べ上側鉄筋の腐食範囲が広く腐食グレードも大きい。また下側鉄筋の腐食範囲は、床版の貫通ひび割れ位置に影響を受けて局部的なものとなる。図-4 は、写真-1 の鉄筋の格子間による上面と下面の腐食グレードの頻度をバブル図で示す。同一の鉄筋では、鉄筋上面に比べ下面の腐食が進行している。

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	断面欠損が生じている。

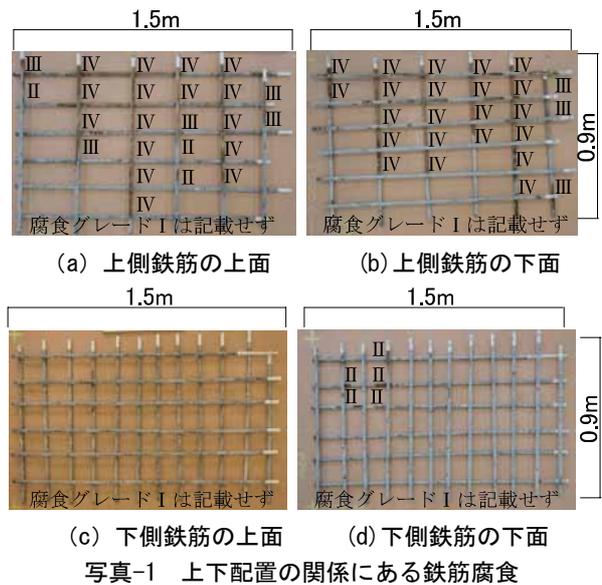


写真-1 上下配置の関係にある鉄筋腐食

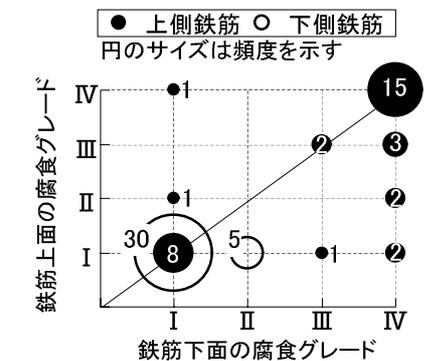


図-4 鉄筋の上面と下面の腐食グレード

3.2 鉄筋腐食による断面減少率の測定

鉄筋腐食による断面減少率の測定は、JCI-SC1¹¹⁾に準拠し10%クエン酸二アンモニウム溶液（60℃）に数日間浸せきした後、ゴム製の用具により除錆を行い、腐食後に残存する鉄筋断面を非接触3Dスキャンにより評価する。

非接触3Dスキャンによる鉄筋腐食の測定は、取替床版の上側鉄筋から腐食が著しいものを任意で抽出し、表-2の測定条件で鉄筋の長さ600mm範囲を、上面と下面の2面でスキャンし、腐食鉄筋の断面減少率を測定する。

図-5は断面減少率にふし間隔（約25mm）を乗じて算出する体積減少率を示している。鉄筋腐食による体積減少率は、鉄筋の軸方向で変化し、その平均値は8.8%、変動係数は3.5%である。図-6は、図-5で腐食が著しいふし間である2番位置の3Dスキャンによる鉄筋表面の形状と、その断面状況を示したものである。鉄筋断面における腐食形態は、3Dスキャンによる表面形状から孔食が見られ、また断面腐食に偏りが見られる。以上より凍結防止剤による鉄筋腐食は、軸方向や断面方向で不均一となり、断面腐食の偏りは鉄筋の上面と下面に顕著に表れている。

表-2 3Dスキャンによる測定条件

測定機	非接触三次元デジタルレンジ5 (レンズ: RANGE7 WIDE)
使用ソフト	測定ソフト: RANGE VIEWER Ver1.3 評価ソフト: Rapid form XOV2

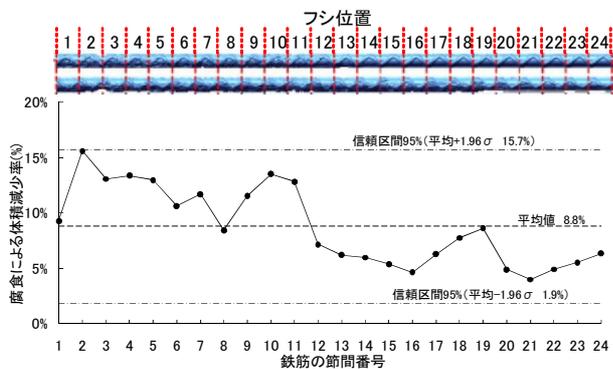
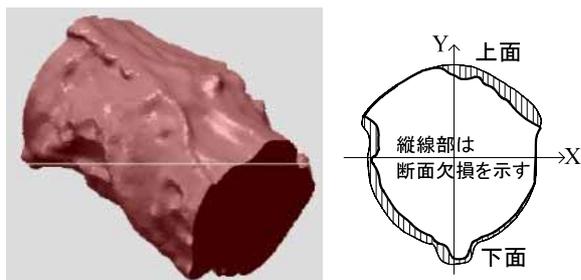


図-5 鉄筋軸方向の腐食による体積減少率



(a) 3Dスキャンの表面形状 (b) 節番号2の断面形状

図-6 鉄筋断面の腐食による減少状況（節番号2）

3.3 鉄筋腐食の質量減少率の測定

鉄筋腐食による質量減少率は、取替床版から採取した約250kgの異形鉄筋を前節3.2と同様に10%クエン酸二アンモニウム溶液（60℃）で除錆し、約100mmの長さに細分してノギス測定による残存径や、質量測定を行う。腐食前の鉄筋の質量は、長さ×断面積×鋼材の密度を乗じた計算上の質量とする。また腐食前・後の質量差から鉄筋腐食による質量減少率を算出する。

図-7はノギス測定で最小となる残存径から算出した断面積¹²⁾に長さ×鋼材の密度を乗じて求める質量減少率と、質量計測から求める質量減少率の関係を示す。ノギス測定による質量減少率は、鉄筋腐食による質量減少率に関係なく約13~15%と大きい測定値になり、測定精度が良くない。この原因は、ノギス測定では異形鉄筋のふし断面が変化することを評価できず、また腐食による孔食の凹凸が評価できないことによるものと考えられる。このため以降は、鉄筋の質量計測結果により鉄筋腐食の質量減少率を評価する。

図-8は上下配置の関係にある100mm当りの鉄筋の腐食による質量減少率を示す。上側鉄筋の腐食による質量減少率は最大15%で、下側鉄筋の腐食による質量減少率は5%未満の小さなものが多い。このことから凍結防止剤によるRC床版の塩害は上側鉄筋で顕著な腐食となる。これは凍結防止剤による塩化物イオンが床版上面から浸透し、最初に上側鉄筋を腐食環境に曝され、その期間が下側鉄筋に比べて長いことや、次章に述べる鉄筋付近のコンクリート空隙が大きいことが原因と考える。

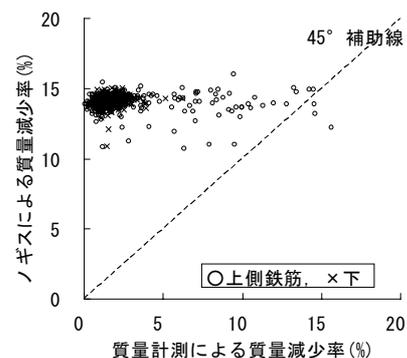


図-7 ノギスと質量測定による質量減少率の関係

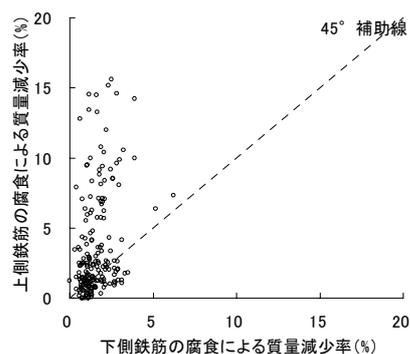


図-8 上下配置の関係にある鉄筋の腐食率の関係

4. 鉄筋付近のコンクリート細孔径分布の観察

鉄筋近傍におけるコンクリートの細孔径 (40 μm 以下) の分布を観察し、同一鉄筋の上面より下面に腐食が多い要因を考察する。コンクリート細孔径分布の観察は、走査型電子顕微鏡 (SEM) の反射電子画像を用いて、コンクリートの空隙面積率で評価する。

4.1 試料作製

取替床版から鉄筋を含むコンクリートコア (コア径 100mm \times 長さ 200mm) を採取し、図-9 (a) に示すコア中の上側や下側鉄筋付近から観察用試料 (寸法 5mm 程度) を切出す。試料はエタノールを用いた傾斜溶媒置換法によりコンクリート中の水分を除去し、t-ブチルアルコールで置換後に凍結真空乾燥する。次にエポキシ樹脂に試料を含浸させ、研磨紙 (#1200, #2400, #4000) およびダイヤモンドスラリーで研磨し、金-パラジウム蒸着を行い、走査型電子顕微鏡の観察用試料とする。

4.2 反射電子観察

走査型電子顕微鏡 (加速電圧 25kV) を用い、倍率 500 倍で 1 試料あたり 5 断面の反射電子像を任意抽出し、グレースケールに基づき 2 値化する。図-9 (b) はコンクリート空隙の 2 値化した反射電子画像例で、図中の白色で表現された箇所がコンクリートの空隙を示す。なお 1 画像は 1148 \times 1000 画素 (1 画素の長さ 0.221 μm) である。

4.3 コンクリート細孔径分布と鉄筋腐食形態

反射電子像解析により空隙のみを抽出し、コンクリートの細孔径分布を調べる。細孔径分布とは、空隙断面を面積の等しい円としてその直径別の分布より、コンクリートの空隙面積率を得る。

図-10 は 5 断面の反射電子像観察から、コンクリート空隙面積率の平均値と信頼区間 95% の範囲を示した結果である。異形鉄筋付近のコンクリートの空隙面積率は、下側鉄筋に比べ上側鉄筋の付近で大きく、同一の鉄筋では上面に比べ下面のコンクリート空隙面積率が大きい。これは RC 床版を打設時のブリージングの影響と考えられる。特に上側鉄筋の下面はコンクリートの空隙が大きくなり、鉄筋は腐食しやすい環境にあることがわかる。

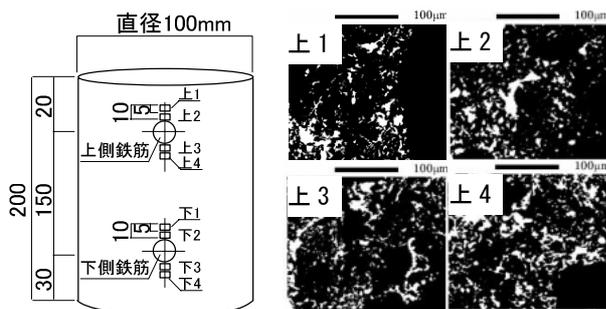


図-9 鉄筋付近のコンクリート細孔径分布

5. 自然電位測定による鉄筋腐食評価

5.1 取替床版での自然電位測定の評価

(1) 評価方法

自然電位測定は、JSCE-E601-2000¹³⁾ に準拠し飽和銅硫酸銅電極 (以下、CSE) を用いて、取替床版の下面から格子状に 100mm 間隔で測定する。なお、照合電極からのリード線は下側鉄筋に結線している。コンクリート中の鉄筋の腐食は、図-11 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 (一側) 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。また自然電位による鉄筋腐食の評価は、コンクリートのかぶり部分の性状 (含水率、温度、中性化深さ等) で自然電位測定値を補正し¹⁴⁾、-350mVvsCSE より卑の範囲で 90% 以上の確率で腐食があると推定する。

(2) 評価結果

図-12 は取替床版の下面からの自然電位測定した結果と鉄筋腐食による質量減少率の等高線を示している。自然電位による等高線は、上側鉄筋の腐食による質量減少率の等高線と同じ傾向にあることが見られる。RC 床版下面からの自然電位測定することにより床版の上側鉄筋の腐食範囲を推定できることがわかる。

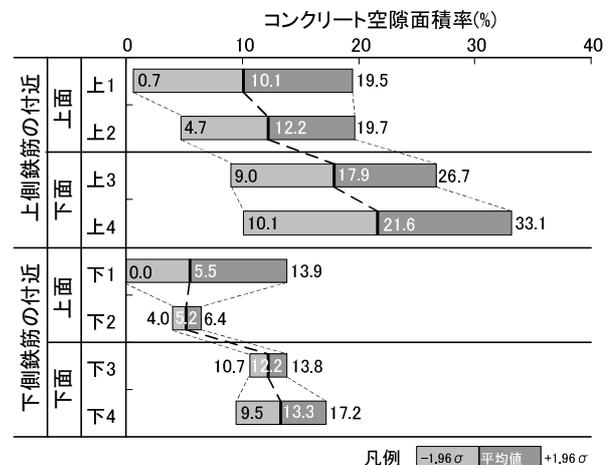


図-10 鉄筋近傍におけるコンクリート空隙面積率

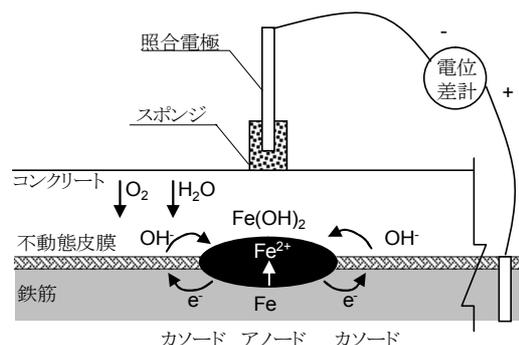
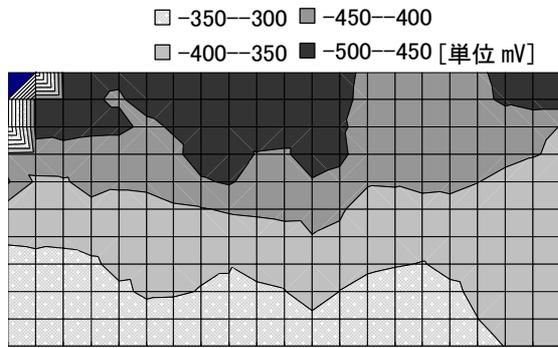
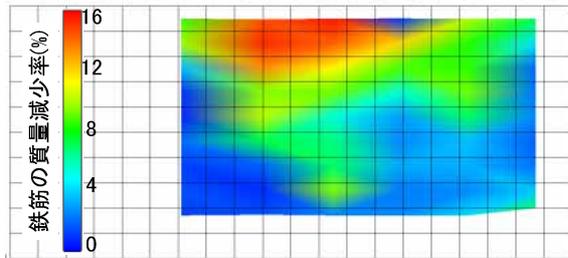


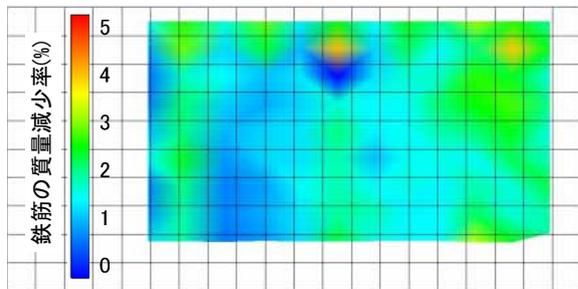
図-13 は取替床版による自然電位測定と、その位置における腐食鉄筋の質量減少率の関係を示す。床版の下面からの自然電位の測定値は、上側鉄筋の質量減少率に関係が見られ相関係数 0.5 である。このことから、塩害劣化が懸念される供用中の RC 床版の調査では、床版下面からの自然電位測定により上側鉄筋を含む床版内部の鉄筋腐食の範囲を推定できると評価される。



(a) 自然電位の等高線



(b) 上側鉄筋（主筋）の質量減少率の等高線



(c) 下側鉄筋（主筋）の質量減少率の等高線

図-12 取替床版における自然電位と質量減少率

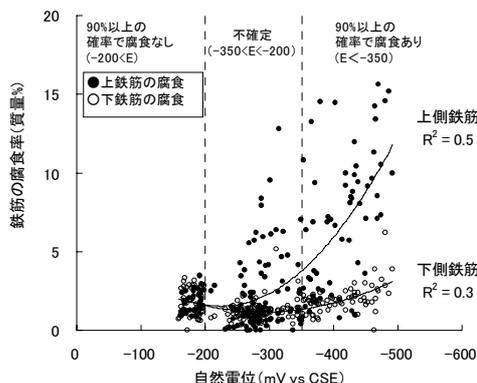


図-13 鉄筋腐食による質量減少率と自然電位の相関性

5.2 実橋 RC 床版での自然電位測定の評価

(1) 実橋 RC 床版での自然電位測定

実橋 RC 床版の自然電位測定は、床版下面から下側鉄筋（1 箇所/1 径間）をはつり出し、下側鉄筋にリード線を巻付け、前項 5.1 と同様に JSCE-E601-2000 に準拠して行う。自然電位の飽和銅硫酸銅電極を床版下面の表面に接触させ、格子状に約 500mm 間隔で測定する。

(2) 実橋 RC 床版での評価結果の概要

図-14 に実橋 RC 床版での自然電位測定の結果を示す。自然電位測定値を補正¹⁴⁾が-350mV vs CSEより卑の範囲は、ポットホールが発生している A1-P1 径間の中央パネル（主桁 G2-3 間）に確認される。図-15 は、図-14 の調査 No.1 や No.2 において床版から採取した径 55mm のコアの塩化物イオン濃度分布を示す。

自然電位測定で鉄筋腐食が 90%以上の確率となる A1-P1 径間の No.1 では、上側鉄筋位置や床版下面で塩化物イオン濃度が高い。No.1 の床版下面は、溶出消石灰を伴うひび割れが確認され、凍結防止剤の塩化物イオンが流下している。一方、自然電位で 90%以上の確率で腐食がない P2-A2 径間の No.2 では、床版への塩化物イオンの浸透がみられない。なお No.1 と No.2 の下側鉄筋は、目視により鉄筋腐食が軽微であることを確認している。

このことから、自然電位測定による鉄筋腐食が 90%以上の確率となる No.1 では、凍結防止剤による塩害を受け上側鉄筋が腐食していると推察する。実橋 RC 床版の調査結果から、床版下面からの自然電位測定や、下側鉄筋の目視観察および床版の塩化物イオン濃度分布などにより、早期に RC 床版の凍結防止剤による塩害劣化を把握できると評価する。

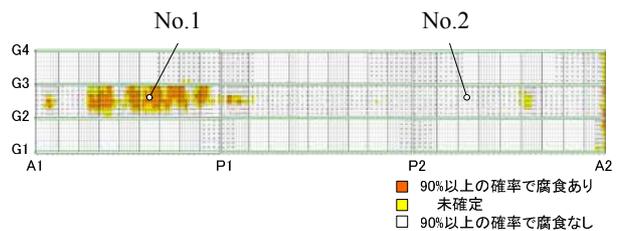
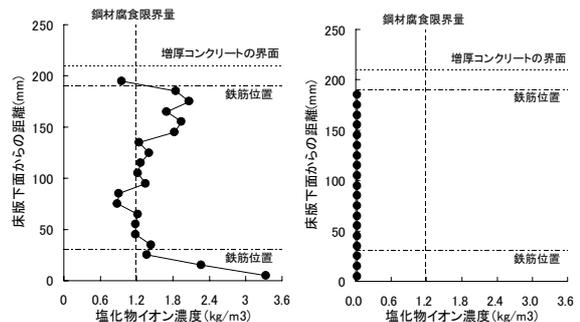


図-14 実橋 RC 床版の自然電位測定



(a) 調査 No. 1

(b) 調査 No. 2

図-15 実橋 RC 床版の塩化物イオン濃度分布結果

6. まとめ

鉄筋の腐食実態や、自然電位測定の評価に関する研究を整理すると次のようになった。

- (1) 目視による腐食グレード調査から下側鉄筋に比べ上側鉄筋の腐食範囲が広く、腐食グレードも大きい。また同一の鉄筋では、鉄筋上面に比べ下面で腐食が進行していた。
- (2) 3D スキャンによる鉄筋腐食の断面減少率測定から、凍結防止剤による塩害を受けた鉄筋は、軸方向や断面で不均一な腐食をしていた。腐食による体積減少率は平均値 8.8%で、変動係数は 3.2%であった。
- (3) ノギス測定による質量減少率は、鉄筋のふし形状や孔食の影響を受け、推定の精度は良くなかった。
- (4) 上下配置の関係にある鉄筋腐食による質量減少率の関係から、下側鉄筋に比べ上側鉄筋の質量減少率が大きいことが分った。上側鉄筋の質量減少率は最大 15%であった。
- (5) 走査型電子顕微鏡による鉄筋付近のコンクリート観察から、上側鉄筋付近のコンクリートに空隙面積率が大きいことが分った。特に上側鉄筋の上面に比べ下面のコンクリート空隙面積率が大きく、上側鉄筋の下面は腐食しやすい環境にあった。
- (6) 取替床版での自然電位測定の評価から、床版下面からの自然電位は上側鉄筋の腐食による質量減少率の等高線と同じ傾向となり、床版下面の自然電位測定により腐食範囲を推定できた。
- (7) 取替床版や実橋 RC 床版の調査から、床版の貫通ひび割れの発生により溶出消石灰が析出する場合、凍結防止剤の塩化物イオンが床版下面に達していた。
- (8) 凍結防止剤を使用する地域では、RC 床版下面に溶出消石灰が析出した段階で鉄筋腐食などの塩害劣化が進行している。このことから、当該地域における RC 床版の点検は、外観変状を主体とするものに加えて、必要に応じた塩化物イオン濃度の調査や、鉄筋腐食の範囲推定を行い、補修対策を計画することが重要だと提案された。

謝辞

本研究における、鉄筋腐食の実態調査は長岡工業高等専門学校環境都市工学科コンクリート工学研究室の学生の方、ならびにコニカ・ミノルタセンシング㈱にご協力を頂きました。また走査型電子顕微鏡による鉄筋付近のコンクリートの細孔径分布の観察は、金沢大学 理工学域環境デザイン学類 五十嵐心一教授ならびに Dang Giang Hoang 氏（当時は大学院生）に多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Transportation Research Board: Durability of Concrete Bridge Decks, NCHRP Synthesis of Highway Practice, pp.1-8, May.1979
- 2) 土井俊二, 笹井幸男: 特集 補修・補強の新技術 床版撤去敷設機による床版の取換え (古川渡 (ふるかわど) 橋), 橋梁と基礎, Vol.28, No.8, pp.117-118, 1994.8
- 3) 三田村浩, 佐藤京, 本田幸一, 松井繁之: 道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響, 土木学会 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1420-1431, 2009.3
- 4) 村上祐貴, 大下英吉, 鈴木修一, 堤知明: 鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究, 土木学会 論文集 E, Vol.64, No.4, pp.631-649, 2008.12
- 5) 松島学, 横田優, 関博: 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No2, pp.1669-1674, 2004.7
- 6) 石川裕一, 青山實伸, 倉戸伸浩, 西尾守広: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1393-1398, 2010.7
- 7) 東・中・西日本高速道路(株): 保全点検要領, pp.90-98, 2006.5
- 8) 長谷川寿夫, 藤原忠司: 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
- 9) (社) 土木学会 コンクリート委員会: コンクリート標準示方書 [維持管理編], p.109, 丸善, 2007.3
- 10) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 飯島亨: 実構造物の調査結果に基づく腐食鉄筋の力学性状の評価, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.143-155, 2007.3
- 11) 日本コンクリート工学協会: 海洋コンクリート構造物の防食指針 (案) -改定版-, p.165, 1990.3
- 12) 小林孝一, 松岡慎一郎: 塩害による腐食が鉄筋の力学的性状に与える影響, コンクリート工学論文集, 第 19 巻第 3 号, 2008.9
- 13) (社) 土木学会: コンクリート標準示方書 [基準編], pp.175-177, 丸善, 2007.3
- 14) 立松英信, 佐々木孝彦, 高田潤: 塩害による鉄筋腐食の診断と抑制に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.2, pp.11-20, 2000.5