

論文

積雪寒冷地に建設された塩害 RC 床版に対する流電陽極材を用いた鋼材腐食緩和の試み

亀田浩昭*, 青山敏幸**, 石井浩司***, 鳥居和之****

*金沢大学自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒924-0838 石川県白山市八束穂 3 丁目 7 番地)

** 博士 (工学), (株) ピーエス三菱 (〒104-8572 東京都中央区晴海 2 丁目 5 番 24 号)

*** 工博, (株) ピーエス三菱 (〒104-8572 東京都中央区晴海 2 丁目 5 番 24 号)

**** 工博, 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 特任教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

積雪寒冷地に建設された RC 床版は、凍結防止剤に含まれる塩化物イオンがコンクリート内部に浸透し、塩害が生じていると数多く報告されている。その劣化部は、局部的にしかも散在しているため、橋面からの維持管理は困難である。著者らは流電陽極材を橋梁下面から施工し、かつ容易に流電陽極材を取り替えることが可能な鋼材腐食緩和工法を開発した。本論文は、開発した腐食緩和工法の概要と施工方法、腐食緩和効果について述べる。

キーワード：凍結防止剤 RC 床版 流電陽極 腐食緩和

1. まえがき

現在、維持管理されている道路橋床版の劣化損傷原因には、大型車両の繰り返し走行による疲労損傷と建設地域の環境条件による劣化があると報告され、その環境条件に起因する劣化要因として塩害、凍害、中性化、アルカリシリカ反応が挙げられている¹⁾。著者らは積雪寒冷地に建設された道路橋 RC 床版 (以下、床版と称す) の塩害に注目し、劣化対策工法を開発し実構造物に適用した事例を報告するものである。

凍結防止剤の散布による塩害劣化は、塩分を含んだ水がひび割れ内部へ浸透し床版上面の鋼材腐食が発生する進展期、床版上面の腐食膨張によるひび割れが発生する加速期、床版上面コンクリートの部分剥離と土砂化の発生と床版下面コンクリートのはく離が生じる劣化期をたどるとされている¹⁾。また、このような劣化は床版全面に生じているわけではなく、部分的に、かつ、散在していることが特徴として挙げられる。

この塩害対策としては、通行規制を伴う断面修復工法、部分打換工法やプレキャスト床版への更新などが挙げられるが、マクロセル腐食の促進に起因した再劣化、長期間通行規制によるコスト増といった課題があり、更新ともなればさらなる多額の費用が必要となる。より確実な補修工法を開発し、早期に適用することで床版の延命化と維持管理に係る費用の平準化に寄与するものと考えられる。

そこで著者らは、電気化学的に鋼材腐食を抑制する電気化学的補修工法に注目した。電気化学的補修工法には

脱塩工法、外部電源方式および流電陽極方式電気防食工法が挙げられる。脱塩工法は主としてコンクリート表層に位置する鋼材周りの塩化物イオンを低減させる工法であるため、床版上下面からの施工と長期間の通行規制が必要となり高額な対策費用となる。一方、外部電源方式電気防食工法は床版下面からの施工で床版上面の鋼材を防食することは可能であるが多量の陽極材、大きな防食電流が必要となり、更に床版上面からの漏水により防食電流の均一な分布に影響を与えるために良好な防食効果が期待できない²⁾。しかし、流電陽極方式電気防食工法は漏水の影響を受けることなく腐食抑制効果を発揮することが可能²⁾であるが床版下面から床版上面の鋼材に防食電流を通電させるだけの浴電圧はない。そこで、新たに開発した流電陽極材を用いた補修工法は、床版の維持管理費用の平準化を念頭に置き、鋼材腐食を完全に抑制させる電気防食工法ではなく、床版更新まで腐食緩和させ 10~20 年程度の延命によるコスト削減を可能にする考え方から鋼材腐食緩和工法とした。本工法は床版下面から施工し、床版上面の鋼材も腐食抑制することが可能で、さらに容易に消耗した流電陽極材を取替えることができる特徴を有しており、既にも実験室レベルならびに撤去床版で、その有効性を報告している³⁾。本工法を積雪寒冷地に建設された塩害環境の厳しい実構造物に適用し、施工性やその効果について検証することを本論文の目的とするものである。

2. 流電陽極材による腐食緩和工法の開発

2.1 工法概要

本工法は以下に示すキーワードを念頭に開発を行った。

- ①床版下面からの施工,
- ②床版上面からの漏水による影響を受けない,
- ③各流電陽極材が単独で通電,
- ④代表する流電陽極材の通電の有無を維持管理,
- ⑤流電陽極材の取替が容易.

開発した腐食緩和工法の概要図を図-1に示す。本工法はアンカー、流電陽極材、バックフィル材、抑えプレート、収納カバーから構成されている。アンカーは流電陽極材の直径40mmのコア内部への固定を目的としており、流電陽極材は全ネジボルトに直径30mmの層状の防食亜鉛を鑄込んだもので、長さはコア深さが床版の中立軸以下となる深さに合わせている。バックフィル材はLiOHを混入したベントナイトとLiOH水溶液を含んだ特殊スポンジからなるもの（以後、ベントナイトタイプと称す）と、モルタル材にLiOHを混入したもの（以後、モルタルタイプと称す）の2種類を準備した。なお、収納カバーは流電陽極材の保護と通電有無の測定端子の収納を目的としている。

2.2 腐食緩和工法の補修効果

電気防食による防食基準として「100mV以上の復極量」が広く採用されている。流電陽極工法を電気防食工法とした場合には、同じ防食基準を採用する必要がある。しかし、床版のLCCを考慮して、電気防食工法の防食効果と比較し腐食緩和工法のそれを低下させることで施工コストの縮減が可能となる。

復極量100mVを確保した時の防食効果に対する各復極量における防食効果の比率を防食率と定義し、過去の研究成果⁴⁾⁵⁾⁶⁾を表-1に示す。試験条件で相違するものの復極量25mVで防食率は0.9程度、復極量50mVのそれは0.9以上と復極量100mVを確保しなくとも十分な防食率を有していると考えられる。吉田らは穏やかな環境下で流電陽極工法を適用する場合、構造物のLCCを勘案し、復極量50mVを確保すれば良いと提案している⁷⁾。そこで本論文においては過去の研究成果や吉田らの提案を参考に復極量50mVを目安に鋼材腐食が緩和されていると判定することにした。

3. 実構造物への適用

3.1 構造物の概要

対象構造物は、写真-1に示す北陸自動車道（金沢西IC～金沢東IC区間）に架かる金沢高架橋のうち、上り線のP34～P35間とした。本橋は1978年に供用が開始され、金沢市内を東西に結ぶ日交通量2万7千台を有する重要幹線高速道路で既に40年が経過している。対象の床版

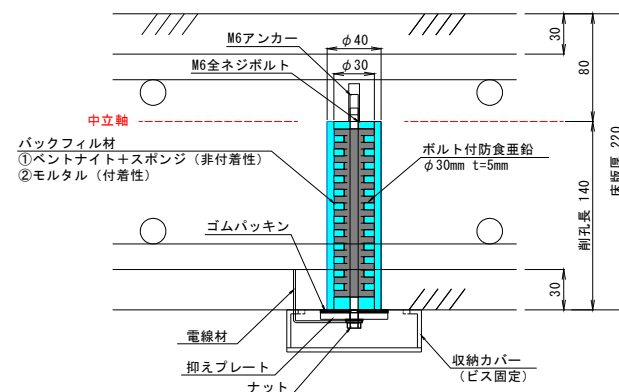


図-1 腐食緩和工法の概要図



写真-1 対象構造物の状況

の床版厚は220mmである。

3.2 床版の劣化状況

試験範囲は、図-2に示すG2～G3間で中間対傾構をはさんだ床版、約20m²とした。試験範囲の床版には疲労によるひび割れは確認されなかったが、図-2、写真-2に示すように白色析出物が散在していた。白色析出物発生箇所、健全箇所からそれぞれ2本のコアを採取し、塩分分析に供した。その結果を図-3に示す。散布された凍結防止剤が路面水と共にコンクリート中に浸透した結果、床版下面からの距離が大きくなるに従い塩化物イオン量は大きくなる傾向にあった。また、白色析出物発生箇所

表-1 防食率の研究成果

研究者	試験条件			防食率※)	
	C1-(kg/m ³)	環境	試験期間(日)	復極量25mV	復極量50mV
千葉ら ⁴⁾	—	乾湿繰返	534	—	0.99
大谷ら ⁵⁾	2, 5, 10	恒温恒湿	250	0.86-0.92	0.92-0.97
JCI ⁶⁾	7.5	乾湿繰返、乾燥、湿潤	400	—	乾湿繰返: 0.84、乾燥・湿潤: 0.88

※) 防食率: 復極量100mVを確保した時の防食効果に対する各復極量における防食効果の比率

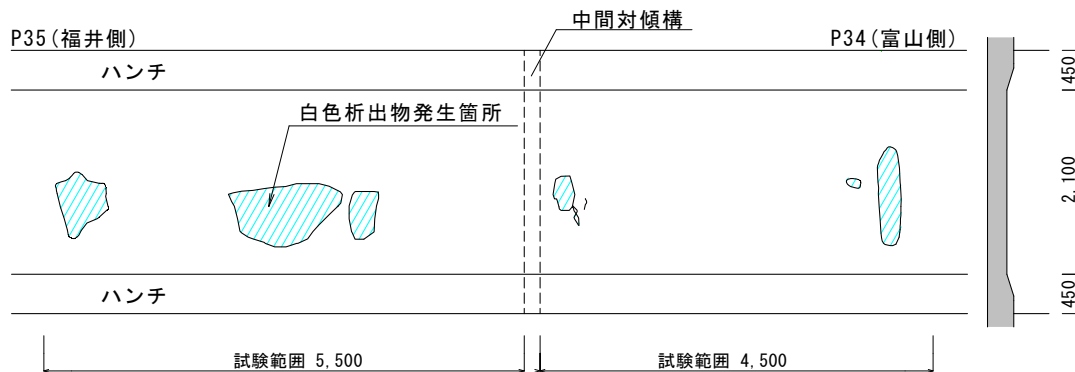


図-2 試験範囲

所の塩化物イオン量は健全箇所のそれと比較すると大きい傾向にあった。床版下面の鉄筋位置の塩化物イオン量は0.3から0.5kg/m³と少なく腐食発生限界塩化物イオン

量である1.2kg/m³を下回っていたが、塩化物イオン量分布から推定すると白色析出物発生箇所における床版上面の鉄筋位置では1.2kg/m³を超え、鋼材腐食が発生している可能性が考えられた。



写真-2 床版の状況

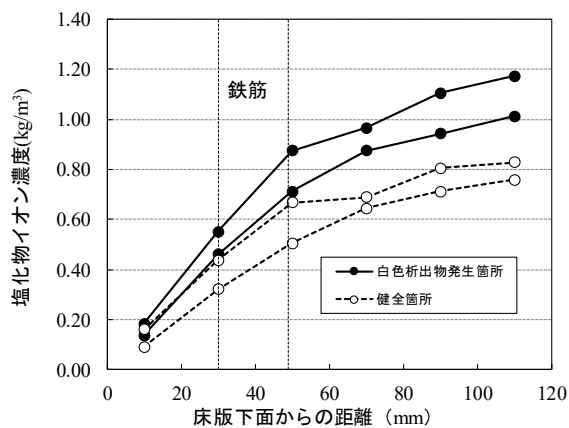


図-3 塩化物イオン分析結果

図-4に床版下面の鉄筋の自然電位の分布を示す。なお、本論文における鉄筋電位は飽和銀塩化銀照合電極（以下SSEと称す）を基準とし表記する。図-4はASTM C 876⁸⁾の鉄筋腐食判定基準を準拠し、鉄筋電位を-80mVより貴（90%以上の確率で腐食なし）、-230mV～-80mV（不確定）、-230mVより卑（90%以上の確率で腐食あり）のカテゴリに分類し、それぞれ青色、黄色、赤色で区別し整理した。更に、図中には白色析出物発生箇所を同時に示した。白色析出物発生箇所の鉄筋電位は健全箇所と比較して卑な電位を示しており、不確定のカテゴリに分類される傾向にあった。この原因として白色析出物発生箇所のコンクリートは塩化物イオン量や水分が多い傾向にあることが推定された。以上の結果から、試験範囲内の床版は潜伏期から進展期の段階にあるものと推定された。

3.3 流電陽極材の施工方法

図-5に流電陽極材の施工フロー図を示す。

①事前調査・マーキング工

RCレーダー等を用いて鉄筋位置を非破壊調査し、鉄筋位置、流電陽極材設置位置、モニタリングセンサー設置位置のマーキングを行う。

②コア削孔工

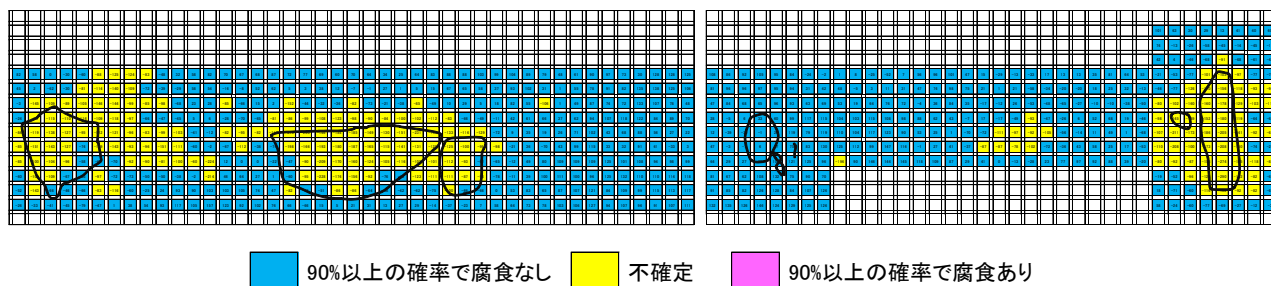


図-4 床版下面の鉄筋の自然電位分布

流電陽極材を納入するΦ40mmのコアを削孔する。

③流電陽極材設置工

削孔したコアの最深部にアンカーを設置し、写真-3に示す流電陽極材をアンカーに固定する。バックフィル材として非付着性タイプを用いる場合、写真-4に示すように予め流電陽極材にベントナイトを取付けた後に、コアに挿入する。一方、モルタルタイプを用いる場合、流電陽極材をコアに固定後、写真-5、写真-6に示すようにパッキン設置後にモルタルを注入する。

引き続き、設置した流電陽極材の近くに位置する鉄筋に電線を取り付け、その電線を流電陽極材と接続する。本試験工事では、流電陽極間を電線で接続し、別途、鉄筋に接続した電線と結線した。

④モニタリングセンサー設置工

流電陽極材、鉄筋の電位を計測するためにモニタリ

ングセンサーを設置する。本試験工事ではモニタリングセンサーとして写真-7、写真-8に示すチタンワイヤーセンサー⁹⁾(以後 TW センサーと称す)を使用しコンクリート中へ埋設した。

⑤配線・配管工

モニタリングするために電線を配線・配管する。本試験工事ではモニタリングだけでなく、流電陽極材間を電線により接続したことにより写真-9に示すように、実際より多くの配線・配管を行った。

3.4 流電陽極材とモニタリングセンサーの設置と計測項目

流電陽極材の設置間隔は、鉄筋量、鉄筋腐食程度、コンクリートの抵抗等に影響されるものと考えられる。本試験工事に先立ち、床版に対する流電陽極材の適用性を小型試験体による室内実験²⁾、大型試験体による暴露試験¹⁰⁾、撤去床版による確認試験³⁾を通じて段階的に実施してきた結果、鋼材腐食緩和の目安である50mV程度の復極量を確保できる流電陽極材の設置間隔は400mm前後であった。そこで、本試験工事では、構造物の配筋間隔を考慮し橋軸方向に500mm、橋軸直角方向に450mm間隔で設置することにした。この流電陽極材を使用した補修工法の利点として、床版全面に設置する必要はなく、劣化部とその周囲に設置するだけでよいことが挙げられる。その利点から考えると図-2の白色析出物発生箇所

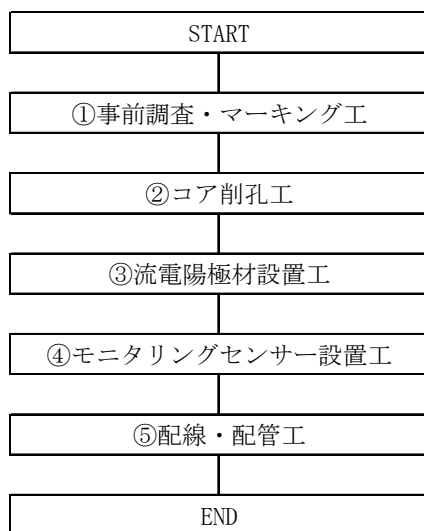


図-5 施工フロー図



写真-3 流電陽極材



写真-4 ベントナイトの取り付け



写真-5 パッキン取り付け

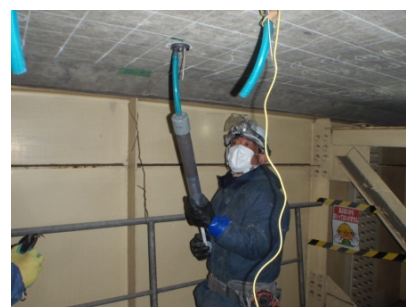


写真-6 モルタル材の注入



写真-7 TW センサー



写真-8 TW センサー設置



写真-9 配線・配管状況

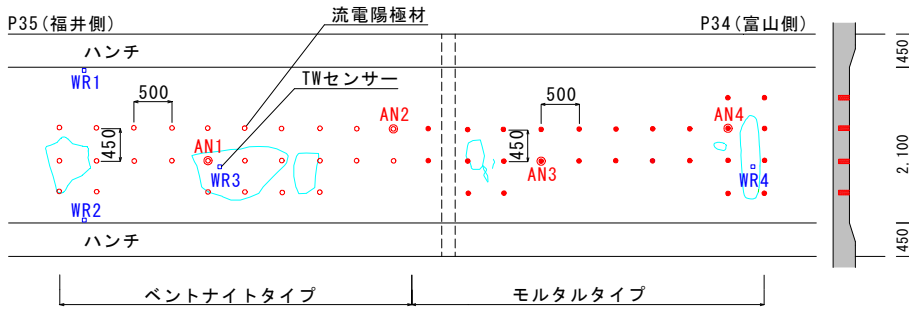


図-6 流電陽極材と TW センサーの設置位置図

とその周辺のみを設置となるが、本試験工事では健全部も含めて設置することにした。設置位置図を図-6に示す。

本工法の性能把握のために流電陽極材の発生電流量、鉄筋電位を TW センサーを用いて計測した。その計測位置を図-6に示す。TW センサー WR1, WR2 は、本工法適用範囲外の床版下面で健全な箇所の鉄筋電位を、WR3, WR4 は本工法を適用した白色析出部の床版上面、下面の鉄筋電位を計測した。また、流電陽極材 AN1~AN4 の発生電流量、可搬式照合電極を用いて復極量の分布を計測した。

3.5 電流、電位および腐食緩和の傾向

図-7 に流電陽極材の発生電流量の経時変化を示す。白色析出物発生箇所に設置した流電陽極材の発生電流量は、健全箇所に設置した流電陽極材のそれより大きい傾向を示し、更に両者は外気温の変化とともに増減を繰り返す傾向にあった。これは腐食速度が大きい場合、それを抑制するために大きな防食電流を発生させる流電陽極材の性質を示したものである。

図-8 に流電陽極材からの通電開始1週間後の床版下面の鉄筋の復曲量の分布を示す。通電初期は外気温が低く鋼材の腐食反応が抑えられるため、復極量が小さくなる傾向にある。

流電陽極材近傍の復極量は 100mV 以上を確保しているが、離れるに従い復極量 30mV~50mV と 50mV を若干であるが下回る傾向にあり、表-1 から腐食は抑制していると考えられるが本稿で定めた腐食緩和の目安を満足しない箇所があった。モルタルタイプを使用した場合に、それが多く認められた。その原因の一つに、通電後、時間を要していないこと、図-7に示したようにベントナイトタイプと比較してモルタルタイプは発生電流量が

小さいことなどが考えられる。

表-2 に TW センサーを用いて通電92日後の電位を計測した結果を示す。計測位置 WR1, WR2 の鉄筋電位は-80mV, -112mV と図-4における健全な箇所の鉄筋電位とほぼ同じであった。計測位置 WR3, WR4 における復極量は、上面鉄筋でそれぞれ 33mV, 42mV, 下面鉄筋で 33mV, 37mV であつた。

図-8 の同じ位置の下面鉄筋のそれが、ほぼ 40mV であることから犠牲陽極からの発生電流で鋼材の分極が進んでいないようである。

また、流電陽極材からの発生電流の影響が無くなると考えられる通電遮断 24 時間後の電位を自然電位と考えると、WR3, WR4 位置の上面鉄筋の自然電位は-277mV, -315mV, 下面鉄筋のそれは-270mV, -250mV と上面鉄筋の自然電位が卑な傾向を示しており、ASTM 基準から 90%以上の確率で腐食ありのカテゴリに分類される結果となった。図-4 の下面鉄筋の自然電位分布における同じ位置のそれと比較すると 20mV~50mV 程度相違していた。図-4 に示す可搬式照合電極で測定した電位は、コンクリート中の含水比の影響を受けるため、電位が貴側であったことが推測される。両測定位置付近の下面鉄筋を目視観察した結果を写真-10 に示す。写真より軽微な腐食が確認され、自然電位測定結果と一致するものである。

今後は、継続して復極量、電流量、電位を計測し、腐食緩和の効果を検証していく予定である。

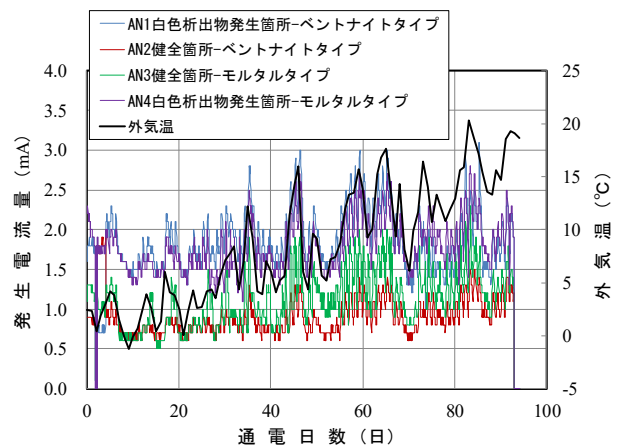


図-7 流電陽極材の発生電流量の経時変化

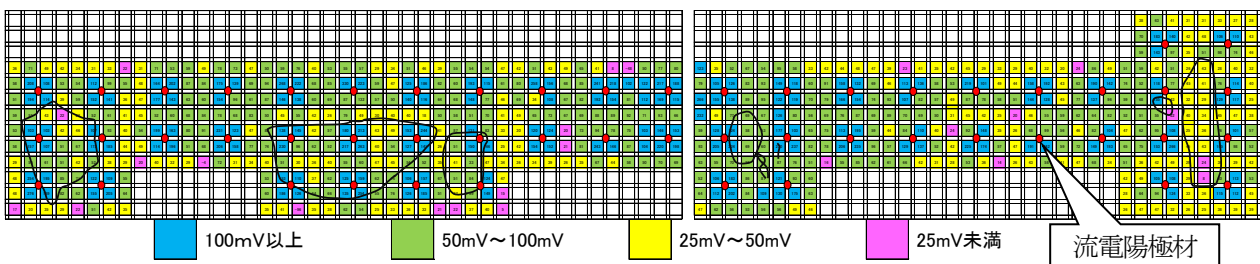


図-8 復極量の分布

表-2 通电 92 日後の TW センサーの鉄筋電位

チタンワイヤー センサーNo.	鉄筋位置	電位の種類	測定値 (mV, SSE)
WR1	下面鉄筋	自然電位	-80
WR2	下面鉄筋	自然電位	-112
WR3	上面鉄筋	IO電位	-310
		OFF24電位	-277
		復極量	33
	下面鉄筋	IO電位	-303
		OFF24電位	-270
		復極量	33
WR4	上面鉄筋	IO電位	-357
		OFF24電位	-315
		復極量	42
	下面鉄筋	IO電位	-287
		OFF24電位	-250
		復極量	37

ここで、IO電位：通电遮断直後の電位
OFF24電位：通电遮断24時間後の電位

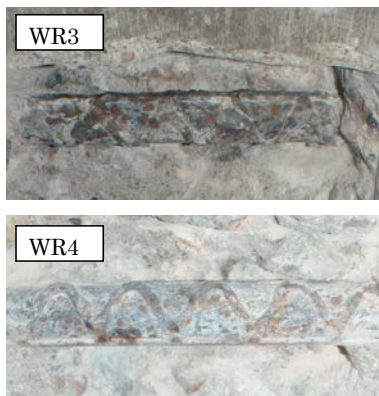


写真-10 白色析出部の鉄筋の腐食状況

4. まとめ

本研究では、これまで試験体や撤去床版で鋼材の腐食緩和効果が確認されていた流電陽極材を用いた腐食緩和工法を実構造物である北陸自動車道の金沢高架橋にて試験施工を行い、本工法の実用性とその効果を検証した。以下に試験施工で得られた成果を示す。

- (1)対象とした床版は疲労によるひび割れは確認されず、白色析出物が確認された。上面ほど塩化物イオンが多くなる分布から潜伏期から進展期の段階にあるものと推定された。
- (2)供用中である高速道路に架かる床版下面より流電陽極材を設置した結果、足場が確保できれば撤去床版試験体と大差なく順調に施工することが可能であった。
- (3)白色析出物位置の下面鉄筋の電位は、他の場所より卑な電位を示した。また、同位置の上面鉄筋の電位は下面位置のそれより卑な傾向を示した。
- (4)流電陽極材を 450～500mm 間隔で設置した結果、陽極材近傍では概ね 50mV 以上の復極量が確保され、腐食緩和の目安を満足する結果となった。
- (5)陽極材から離れるに従い復極量 30～50mV と腐食は抑制していると考えられるが、腐食緩和の目安を満足しない結果となった。その傾向はバックフィル材として

モルタルタイプを使用した場合に多い傾向にあった。

謝辞

本工法は SIP 戦略的イノベーション創造プログラム、インフラ維持管理・更新・マネジメント技術、「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発」の一環として開発したものである。本試験施工にあたり中日本高速道路株式会社金沢支社のご協力を頂いた。ここに関係各位に感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル 2016, pp.86-95
- 2) 浦 修造, 鴨谷知繁, 石井浩司, 鳥居和之：塩害劣化 RC 床版に対応した取替えが容易な流電陽極工法の開発と通電性状に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.673-678, 2017.7
- 3) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之：塩害が生じた撤去 RC 床版への流電陽極工法を用いた鋼材の腐食緩和対策に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.753-758, 2018.7
- 4) 千葉丈夫, 関 博, 阿部正美, 石井浩司：コンクリート中鉄筋の防食基準の検証, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, pp.33-38, 1994.10
- 5) 大谷俊介, Muhammad Akbar Caronge, 山本大介, 濱田秀則：電気防食下におけるコンクリート中鉄筋の復極量と防食効果に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, pp.25-33, 2017
- 6) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法 研究委員会報告書, pp.140-159, 1994.10
- 7) 吉田隆浩：流電陽極法を用いた鉄筋コンクリート構造物の維持管理に関する研究, 京都大学博士論文, 2015
- 8) ASTM C 876-91(Reapproved 1999):Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol03.02, pp.457-462, 1999
- 9) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之：チタンワイヤーセンサーを用いた鉄筋計測に関する実験的検討, 第 27 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2018.10 (投稿中)
- 10) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之：積雪寒冷地に建設された塩害劣化 RC 床版の電気化学的補修工法の適用性, 第 18 回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, 2018.10 (投稿中)

(2018 年 7 月 20 日受付)