# 論文 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

亀田 浩昭\*1・青山 敏幸\*2・石井 浩司\*3・鳥居 和之\*4

要旨:積雪寒冷地の道路橋などでは,RC床版の疲労に加えて凍結防止剤による塩害劣化が多数報告されている。塩害が生じたRC床版の延命化対策として,高速道路で使用された塩害進展期の撤去RC床版に流電陽極 工法を適用し,通電から約220日までの結果をもとに鋼材の腐食緩和の効果および使用した流電陽極材の寿 命予測を行った。その結果,塩害進展期レベルのRC床版では,流電陽極の配置間隔を500mm以内にするこ とで鋼材の腐食緩和の効果があること,また亜鉛重量の50%が消耗した段階を流電陽極材の寿命としても, 10年以上の耐久性があるものと推定された。

キーワード: 塩害, 既設 RC 床版, 流電陽極材, 腐食緩和

## 1. はじめに

高度成長期に建設された鋼橋の RC 床版は,疲労によ る損傷に加えて凍結防止剤などの散布に起因した上面の 塩害劣化が報告されている<sup>1)</sup>。塩害で劣化した床版では, 通行車両を規制した大規模な断面修復やプレキャスト PC 床版への更新等で補修コストが大幅に増加するため, LCC の観点からは早期に対策を行うことが重要である。

塩害に対する補修工法のひとつに、外部電源方式によ る電気防食工法があり、床版の下面に陽極を配置した場 合にも上筋の防食が可能であることを確認している<sup>2)</sup>。 しかし、床版の疲労等により貫通ひび割れ等が生じてい る場合には、ひび割れを通じ床版下面への漏水が原因と なり、電流分布が不均一になる可能性があること、また 鋼材の防食基準<sup>3)</sup>を満たすには陽極材量が多くなり、そ れに伴い施工費が高くなるといった課題も生じた。著者 らは、ひび割れによる漏水の影響を受けにくく、部分的 な補修にも対応が可能で、流電陽極材の取替も容易な流 電陽極工法を開発し、施工性確認試験、通電試験を実施 した<sup>4)</sup>。

本稿では,実際の高速道路で使用された撤去 RC 床版 に流電陽極方法を適用し,鋼材の腐食緩和の効果および 流電陽極材の寿命予測の結果を論じたものである。

#### 2. 流電陽極材の概要

本試験では,設置方法の異なる2種類の流電陽極材を 使用した。

内部挿入型の流電陽極材の概要図を図-1 に示す。本 方式は, RC 床版下面に均等な間隔で削孔した孔の最奥 部に設置したあと施工アンカーに防食亜鉛を接続した後

\*1 国土開発センター 設計事業部 設計1部 (正会員) \*2 ピーエス三菱 技術本部技術部メンテナンス技術グループ (博)工 (正会員) \*3 ピーエス三菱 技術本部技術部 工博 (正会員) \*4 金沢大学理工研究域環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)

に,防食亜鉛と鋼材を導通させて防食電流を供給し腐食 を緩和する工法である。流電陽極は,防食亜鉛や全ネジ ボルトからなる防食亜鉛ユニットと層状バックフィルや 円筒状バックフィルで構成された容易に取り替え可能な 状態で設置する。円筒状バックフィル材には,飽和水酸 化リチウム水溶液に浸漬させたスポンジ材料を,層状バ ックフィル材には,石膏とベントナイトと水酸化リチウ ムを混ぜた材料を使用した。



図-1 内部挿入型の流電陽極の概要図





図-3 RC 撤去床版の概要図

表面設置型の流電陽極の概要図を図-2 に示す。本方 式は、床版のコア削孔径を小さくしつつ上筋の腐食緩和 を期待して、 ¢26mm、深さ 140mm の削孔を行った後、 最奥部にあと施工アンカーを設けて M6 の全ネジボルト、 ¢110mm×厚さ 5mm の防食亜鉛をセットする。その後、 全ネジボルトおよび防食亜鉛のまわりにバックフィル材 を充填する。バックフィル材には、ベントナイトに内部 挿入型で使用した水酸化リチウム(以下、表面設置型 (LiOH)と称す)および亜硝酸リチウム水溶液を添加し た(以下、表面設置型(LiNO<sub>2</sub>)と称す)2種類を使用し た。

#### 3. 試験概要

## 3.1 撤去 RC 床版試験体

## (1) 試験体概要

今回の試験で使用したRC 床版は,積雪寒冷地の鋼橋 で使用されたものであり,供用開始より38 年が経過して いる。撤去RC 床版は,冬期の凍結防止剤による塩害劣 化が発生し,繊維補強コンクリートによる上面増厚や床 版防水等も行われてきた。撤去RC床版は,現地から金沢 大学敷地内の暴露施設に運搬し,その後に試験を開始し た。

# (2) 試験体の形状・寸法

試験に用いたRC 床版の形状・寸法を図-3に示す。本 試験体は、片側2車線のRC床版の半分を使用する。橋軸 直角方向の寸法は約4.3m,橋軸方向の寸法は2mであり、 橋軸直角方向に対しては約3mを試験対象区間とした。ま た建設時の床版厚は200mmであったが、上面増厚時に 10mm切削して50mmの繊維補強コンクリートを増厚し ていることから、版厚は約240mmであった。鋼材は、橋 軸方向、橋軸直角方向ともD19が使用され、橋軸方向の 上筋は約300mm,下筋は150mm,橋軸直角方向の上筋は 250mm,下筋は125mmピッチで配置されている。

### (3) 床版の外観観察

床版下面のひび割れ発生状況を図-3の青色線にて示 す。床版下面には、乾燥収縮が原因と推測される橋軸直 角方向のひび割れが等間隔に発生している状況であった。 ひび割れから著しい遊離石灰や錆汁などの塩害劣化によ る鋼材腐食の兆候は確認できなかった。

# (4) 塩化物イオン濃度

RC 床版の鋼材の自然電位の測定により,相対的に卑 (マイナス側)な値を示す箇所について,直径 50mm の 貫通コア2本を削孔した後にコアをスライスし,電位差 滴定法により各試料の塩化物イオン濃度を測定した。

床版下面からの距離とコア2本の平均の塩化物イオン 濃度の関係を図-4 に示す。床版下面近傍位置を除き, 腐食発錆限界濃度の1.2kg/m<sup>3</sup>以上の塩化物イオンが認め られた。また,路面上面部から凍結防止剤を多量に含む 路面排水が床版上面より浸透していたため,床版上面に 近い方が,下面と比較し若干大きい傾向にあった。ただ し,今回使用した撤去 RC 床版は,床版防水と,繊維補 強コンクリートによる上面増厚が施されていたことから, 塩化物イオン濃度はそれほど多くない状況にとどまって いたと考えられる。

#### (5) 鋼材の自然電位

補修前の試験体の鉄筋の腐食状況を評価するために, 床版下筋および上筋の自然電位の測定を行った。自然電 位は,可搬式の飽和銀塩化銀照合電極(以下 SSE と称す) を用いて,試験対象区間の主鉄筋と配力筋の交差位置を 測定した。上筋の自然電位は,繊維補強コンクリートの 影響を取り除くため,測定用の孔(直径 25mm のドリル にて深さ約 5cm のドリル削孔)を設け,その位置に照合 電極を差し込んで測定した。自然電位による鋼材の腐食 状況の判定は,ASTM C8765<sup>5)</sup>の基準に基づき評価した。

ASTM の基準を SSE に換算したものを表-1 に示す。 また,表-1 に示す基準をもとに,上筋および下筋の鉄 筋腐食の可能性をそれぞれの全測定点数に対する割合で 示したものを図-5 に示す。

90%以上の確率で腐食ありと判定された箇所は、上筋 で約11%、下筋で約27%、不確定と判定された箇所は上 筋で約59%、下筋で約44%、90%以上の確率で腐食なし と判定された箇所は上筋、下筋とも約30%であった。ま た、上筋の自然電位の平均値は-121mV(vs.SSE)、下筋 の自然電位の平均値は-139mV(vs.SSE)であった。コン クリート中の塩化物イオン濃度、鋼材の自然電位の測定 結果から、今回の撤去 RC 床版は、潜伏期から進展期に 該当するものと推定される。

### 3.2 流電陽極材の設置箇所

内部挿入型および表面設置型の流電陽極材の設置箇所 を図-3に示す。

内部挿入型は、図-3 に示す試験体の床版橋軸方向の 上側の約 lmの区間とし、流電陽極材を合計で14 個を設 置した。表面設置型は、床版橋軸方向の下側の約 lmの 区間とし、橋軸直角方向の両端部は表面設置型(LiNO2) を合計で7箇所、中央部は表面設置型(LiOH)を合計で 6箇所設置した。

内部挿入型は2017年4月27日から,表面設置型は2017 年5月25日から通電を開始した。

#### 3.3 測定項目

通電期間中は,鋼材のインスタントオフ電位,電流遮 断24時間後の電位,陽極からの発生電流量,暴露環境の 気温を測定した。鋼材の復極量は,インスタントオフ電 位と電流遮断24時間後の電位の差とした。陽極からの発 生電流量,気温に関しては,データロガーを用いて3時 間に1回の連続測定を行った。

## 4. 試験結果と考察

#### 4.1 鋼材の復極量

電気防食工法では,鋼材の防食基準として 100mV 以上 の復極量の管理<sup>3)</sup>が行われている。一方,吉田<sup>6)</sup>の研究 では,比較的劣化環境が穏やかな条件において LCC を勘 案し,腐食速度を低下させる目的で流電陽極工法を適用 する場合の基準として復極量 50mV が提案されている。 また大谷らの研究<sup>7)</sup>でも、25mV、50mV、100mV の復極 量を維持するように電流値を設定した電気防食に対して



口派电位					建設存合の可能性
(mV vs SSE)					<b><u> </u> </b>
-80 <e< td=""><td>9</td><td>0%以上の確率で腐食なし</td></e<>				9	0%以上の確率で腐食なし
-230 <e≦-80< td=""><td></td><td>不確定</td></e≦-80<>					不確定
	E≦-230				0%以上の確率で腐食あり
70				_	■90%以上の確率で腐食なし
\$ 60	<u>ΣN=184</u> 点				□不確定
் கா					■90%以上の確率で腐食あり
影 50					ΣN=218点
ю 40					
」 存 30		-			
上 低 20					
121 三月 101 101 101 101 101 101 101 101 101 10					
<₩ -0					
U	床版上筋				
図-5 ASTM C876 による腐食の可能性					

防食効果を検討した結果,いずれの復極量においても腐 食速度は低減すると報告されている。以上の報告をもと に、今回の実験では 50mV 以上の復極量を腐食緩和の目 安とし、流電陽極材の距離と復極量の測定結果を整理し た。

床版下筋と上筋それぞれについて,流電陽極-鋼材の 距離と復極量の関係を図-6 および図-7 にそれぞれ示 す。ここで,流電陽極-鋼材の距離は平面的な距離を示 している。また今回の方式を一般的な RC 床版に適用す る場合の流電陽極の配置間隔は,400~500mm 程度を想 定していることから,流電陽極-鋼材の距離が流電陽極 の配置間隔の半分の 250mm までの範囲に対してどの程 度の復極量が確保できるかについて考察した。

図-6 に下筋の復極量の結果から、内部挿入型は流電 陽極-鋼材の距離が 250mm 以下では全般的には 50mV 以上の復極量が確保されており、流電陽極の間隔が 500mm 以下であれば鋼材の腐食緩和の効果があるもの と考えられる。また流電陽極-鋼材の距離が 250mm 以 下で復極量が 50mV 未満の箇所は、床版の端部に集中し ていた。この箇所は、流電陽極材が片側にしか配置いな かったためであると考えられる。また、表面設置型(LiOH) の場合も、流電陽極-鋼材の距離が 250mm 以内で、復



図-8 通電期間中の鋼材のインスタントオフ電位および電流遮断 24 時間後電位の測定結果

極量が 50mV 未満の箇所が生じていた。この理由は,次 節で述べるように鋼材の電位が卑化したことが要因であ ると考えられる。

図-7 に示す上筋の復極量の結果から、内部挿入型では、流電陽極-鋼材の距離が 250mm 以下の箇所ではほぼ全ての箇所で 50mV 以上の復極量を確保した。一方、表面設置型(LiNO2および LiOH)は、内部挿入型に比べて 250mm 以下の箇所でも 50mV の復極量が確保できない箇所が存在した。この理由は、下筋で復極量が確保できなかった理由に加え、表面設置型の場合は内部挿入型に比べて上筋までの距離が長くなるため、防食電流が内部挿入型に比べて流れにくくなることが考えられる。

RC 床版のように,上筋の鋼材の腐食緩和を期待する 場合には,内部挿入型の方が腐食緩和の効果が高いもの と考えられる。

## 4.2 鋼材の電位

通電期間中の鋼材のインスタントオフ電位(以下 Eio

と称す)および電流遮断24時間後電位(以下Eofと称す) の測定結果を図-8 に示す。ここで内部挿入型,表面設 置型それぞれの鋼材電位は,図-3 に示す各陽極の防食 範囲における鋼材電位の平均値で代表させた。

図より、内部挿入型、表面設置型ともに、通電日数の 増加に伴い、Eio、Eofともに卑に移行している。特に、 表面設置型(LiOH)についてはその傾向が顕著であり、 通電開始から159日経過後のEioは-763mV(vs.SSE)、 Eofは-681mV(vs.SSE)であった。この理由は、後述す るように流電陽極からの発生電流が他の陽極に比べて大 きいこと、ひび割れ部からの漏水により鋼材周辺が湿潤 環境となったためと考えられる。また、山本らの研究<sup>8)</sup> では、湿潤環境では復極に必要な酸素の供給速度が遅い ため復極に長い時間を要すること、電位-730mV(vs.SSE) より卑では防食効果があるとの考えから考えると、表面 設置型(LiOH)でも50mV未満の復極量の箇所でも腐食 緩和の効果はあるものと考えられる。



## 4.3 陽極からの発生電流量

内部挿入型および表面設置型における通電日数と発 生電流量および外気温の関係を図-9 に示す。図中に示 す値は、図-3に示す流電陽極の値を示す。

内部挿入型については,通電日数約50日までは大きな 電流が流れているが,通電100日程度を境に,外気温の 下降とともに発生電流量も小さくなる傾向にあった。表 面設置型(LiNO<sub>2</sub>)の場合は,内部挿入型,表面設置型

(LiOH)と比較して初期の発生電流量は小さいが,通電 期間全般を通して安定的に電流が流れている。表面設置 型(LiOH)の場合は,内部挿入型,表面設置型(LiNO<sub>2</sub>) と比較して,通電期間全般を通して発生電流が大きい傾 向にあった。更に,他の流電陽極と比較して,外気温の 変動に対しての電流量の変化も大きい傾向にあった。そ の原因については明確になっていない。

# 4.4 流電陽極材の寿命予測

流電陽極材の耐用年数の検討において, 亜鉛の質量減 少量の理論値は,式(1)に示すファラデーの電気分解の第 1法則を用いて算出できる。

$$m = M \cdot i \cdot t / (z \cdot F) \tag{1}$$

ここに, m: 質量減少量 (g), M: 亜鉛の原子量 (=65.4mol/L), *i*: 電流量(A), *t*: 時間(s), *z*: 亜鉛の電 荷数(=2), F:ファラデー定数(=96500c/mol)である。

(1)式を用いて,今回使用する亜鉛が全消耗すると仮定 した場合の積算電流量は,内部挿入型,表面設置型でそ れぞれ 311,278(A・hr)となる。

次に、図-9 に示す結果から、通電日数と積算発生電 流量の関係を算出した結果を図-10 に示す。内部挿入型 の場合,通電日数が 50 日以降の積算発生電流量の傾きが 変化しているため、50 日以降のデータを対象として通電 日数と積算電流の関係を簡便的かつ積算電流量が大きく なるよう安全側に線形近似することで傾きと切片を算出 し、亜鉛が消耗する時間を予測した。表面設置型の流電 陽極材も、同様な方法により亜鉛が消耗する時間を予測 した。

宮口<sup>9</sup>は,既存の埋設型犠牲陽極材を用いた電流出力 効率(陽極の消耗率)として85%を用いて陽極材の耐久 性を評価していること,吉田<sup>9</sup>は,約10年間既存の埋設 型犠牲陽極材を用いた陽極材について EPMA 分析から 推定された亜鉛の消耗率は約71%であったと報告して いることから,ここでは亜鉛の消耗率が50%から100% の範囲において流電陽極材が限界値に達するものとして, 流電陽極材の寿命を算出した。

内部挿入型および表面設置型の陽極の消耗率と流電 陽極材の寿命の関係を図-11に示す。



図-11 流電陽極材の寿命予測

亜鉛の消耗率が 50%を寿命とした場合,内部挿入型は 約 13~16年,表面設置型(LiNO<sub>2</sub>)は約 13~22年,表 面設置型(LiOH)は約 4~7年の寿命と推定された。ま た亜鉛の消耗率が 85%を寿命とした場合,内部挿入型は 約 22~28年,表面設置型(LiNO<sub>2</sub>)は約 22~38年,表 面設置型(LiOH)は約 7~11年の寿命と推定された。

以上の結果から,塩害進展期の RC 床版に対しては, 腐食緩和の効果および流電陽極材の寿命の観点から内部 挿入型が最適であるものと推定された。

#### 5. まとめ

塩害が生じた RC 床版の延命化対策として,高速道路 で使用された塩害進展期と想定された撤去 RC 床版に流 電陽極工法を適用し,通電から約 220 日までの結果をも とに鋼材の腐食緩和の効果および流電陽極材の寿命につ いて検討した。以下に本試験にて得られた結果を示す。

- (1) 塩害潜伏期から進展期と想定される RC 床版につい ては,流電陽極の間隔を500mm 以内とすることで鋼 材の復極量は多くのエリアで 50mV 以上確保でき, 腐食緩和の効果が認められた。
- (2) 内部挿入型の流電陽極は、表面設置型の流電陽極に 比べて床版上筋に対しての腐食緩和の効果が高い傾 向にあった。
- (3) 流電陽極材のバックフィル材に、水酸化リチウムを 用いた場合には、亜硝酸リチウム水溶液を用いた場 合に比べて発生電流が大きくなる傾向にあった。
- (4)発生電流量の結果をもとに、流電陽極材の寿命を予 測した結果、内部挿入型、表面設置型(LiNO2)は、 亜鉛の消耗率が50%を流電陽極材の寿命としても10 年以上の耐用年数があるものと推定された。

# 謝辞

本研究は, 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ージメントの開発」の一環として実施したものである。ここに関係各位に感謝申し上げる次 第である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:道路橋床版の維持管理マニュアル, 2002.
- 2) 浦修造,鴨谷知繁,石井浩司,鳥居和之:塩害劣化に 対応したRC 床版の外部電源電気防食工法の技術開 発,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16 巻, pp.269-274,2016.
- 3) 土木学会: 電気化学的防食工法設計施工指針(案),2001
- 4) 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.
- ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, Jan.1999
- 6) 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
- 7) 大谷俊介, Muhammad Akbar Caronge, 山本大介, 濵田 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 工学論文集, 第28巻,pp.25-33,2017年
- 8) 山本悟,田代賢吉,立林喜子,石井浩司,関博:湿潤 環境にあるコンクリート中鋼材の電気防食基準に関 する検討,コンクリート工学論文集,第22巻3 号,pp.1-11,2011年9月
- 9) 宮口克一:塩素固定化材を用いた断面修復材と犠牲陽 極材を併用した断面修復工法の鉄筋防食性能に関す る研究,京都大学博士論文,2015