

報告 断面修復を伴わないコンクリート用犠牲陽極工法の開発と課題

小野田 基^{*1}, 小林 孝一^{*2}

要旨: 通常の断面修復を伴う鉄筋腐食対策工法にかわり, 日常点検時に簡易的に施工でき, その耐用年数が5年以上であるため, 維持管理を施工前までと同様に5年サイクルのままで実施し続けても構造物の安全性を高いレベルで確保することが可能な犠牲陽極工法を開発した。断面修復を伴わないことで, 不必要なはつりによる産業廃棄物の低減や大がかりな仮設構造物, 人材を必要としない利点が得られた一方, 効率的な現場設置作業や施工条件には課題も残っている。

キーワード: 犠牲陽極材, 簡易防食工法, 鉄筋腐食

1. はじめに

今日では社会基盤であるインフラ構造物の老朽化が進み, 適切な維持管理により延命を計ることが重要な課題となっている。橋梁等の構造物は5年に1度の近接目視による点検を行い, 必要であれば補修を行うことにより老朽化対策としているが, 高騰する人件費や補修費用, そして5年毎である点検サイクル間における劣化の進行が問題となっている。現状では日常点検で不具合が発見された場合, 次回の定期点検に併せて根本的な対策を実施する計画とし, その時まで劣化の進行を抑制することを目標とした簡易的・暫定的な対策を行うことも多い。鉄筋腐食の場合の暫定的な対策としては, 浮きが確認されたコンクリート部は叩き落とし, 露出した鉄筋に防錆剤を塗布することが実施されるが, 環境によっては数か月しか防錆効果が持続しない場合もあり, 次回の定期点検に併せた根本的な対策の実施までに鉄筋腐食やその周辺部の劣化が進行してしまうことが問題となっている。そこで, 簡易的な犠牲陽極工法を開発することとなり, その際, 日常点検の延長として設置施工が可能であることを目標として, 断面修復を伴わない工法を考案し¹⁾, 試験施工を行った。

2. 工法概要

2.1 工法の特徴

電気化学的防食工法²⁾の一つである犠牲陽極工法は, コンクリート中の鉄筋との金属的接続, および, 鉄筋-陽極間におけるコンクリート中のイオン移動により防食回路を形成するが, 本開発工法はコンクリートやモルタルによる断面修復を伴わない方法にて防食回路を維持し, 対象鉄筋の防食を行うものである。

2.2 施工工程

施工工程は鉄筋露出工程, 下地処理工程, 犠牲陽極材設置工程, 防水材塗布工程からなる。鉄筋露出工程では既に鉄筋が露出している場合はその状態を保持し, コン

クリートの浮きがある場合はそれを除去する。下地処理工程とは犠牲陽極材設置箇所および防水材塗布範囲のコンクリート表層の汚れや脆弱部を除去する工程をいう。犠牲陽極材設置工程は犠牲陽極材をコンクリート表面に設置し鉄筋と金属的接続を行う工程をいう。防水材塗布工程とは防食範囲内の部材表面に防水材を塗布して表面被覆する工程をいう。

(1) 使用材料

表-1 に使用材料の一覧と概要を示す。

犠牲陽極材は亜鉛をコアとし水酸化リチウムを酸化安定剤として使用している。コンクリート用犠牲陽極材にはイオン化傾向の大きな亜鉛を使用するのが一般的であるが, 水酸化リチウムの働きにより鉄筋を腐食させることなく亜鉛のみを腐食させることで防食電流を供給する。水酸化リチウムは pH14 と強アルカリ性であるが, 亜鉛はアルカリ性環境においても腐食する特徴を持ち, 逆に鋼材の腐食要因となることはない。

導電性ゲルシートは吸水性に優れたゲルシートで, フィルムによって保護されたパック状のものを使用した。この導電性ゲルシートをコンクリート躯体あるいは鉄筋と犠牲陽極材との間に挟み込むことで, 犠牲陽極材を鉄筋やコンクリート表面に密着させ, かつ, 犠牲陽極材と鉄筋やコンクリートとの間の通電やイオン移動を可能とする。

防水材は耐久性の高い材料であればポリウレタンやポリウレア樹脂, エポキシ樹脂系など素材は問わないが, ここでは透明度のあるアクリル系防水材を使用した。

表-1 使用材料

材料	概要
犠牲陽極材	亜鉛+水酸化リチウム
導電性ゲルシート	シート状ゲルシート
防水材	アクリル系防水材

*1 クリディエンス株式会社 代表取締役 (学生会員)

*2 岐阜大学工学部社会基盤工学科 教授 博 (工) (正会員)

(2) 犠牲陽極材の設置

防食回路を形成するにあたり、犠牲陽極材をコンクリート表面または鉄筋上に設置し、鉄筋との金属的接続を行う。犠牲陽極材は防食対象とする鉄筋上、その横、または有効範囲（後述）内の任意のコンクリート表面に設置する。鉄筋上に設置した場合は防食電流が接続鉄筋周辺に集中し、鉄筋から離して設置すると防食電流は広範囲に分散する傾向があるため、これらを考慮して設置箇所を選定することとなる。鉄筋上に配置する場合、鉄筋との間に導電性ゲルシートを介して設置されるが、犠牲陽極材と鉄筋との付着面積が小さく設置が不安定となるため、コンクリート表面へ設置することが望ましい。

コンクリート表面へ設置する場合にも、導電性ゲルシートにて接着することによって行う。コンクリート表面の凹凸に応じ、ゲルシートを数枚重ねることで犠牲陽極材とコンクリートを密着させることによって、防食回路を形成し、イオン移動が確実に行われるように配慮する。なお、ゲルシートの代わりにモルタルやその他導電性材料にて接着することもできる。

(3) 防水材塗布

犠牲陽極材の設置および鉄筋への電気的接続が完了した後、犠牲陽極材、対象鉄筋、その周辺コンクリートを覆うように防水材を塗布し、表面被覆する。犠牲陽極材、鉄筋が大気中から絶縁された防食範囲コンクリート内にて防食電流回路を形成維持するために絶縁性の高い防水材を塗布する。使用される防水材は壁面への施工性および経過観察を考慮し、施工時に粘性が高く、硬化後に透明度のあるアクリル系樹脂を使用した。

防水材にて施工範囲を表面被覆することにより、犠牲陽極材、鉄筋からの放電を防ぐことができ安定した電気防食環境となり、防食電流回路が形成維持される。図-1に設置概要図を示す。

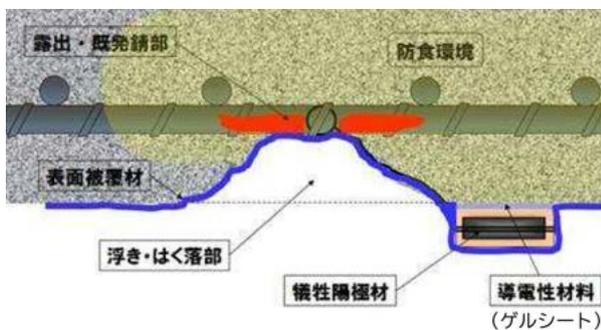


図-1 設置概要図

3. 試験施工の概要

3.1 施工前の状況

1974年6月に供用開始した自動車専用道の橋台に対し

て、2015年5月に施工し、その後3年間防食電流等の計測を行った。試験設置箇所はA1、A2の2箇所、設置計測を行った。(表-2、図-2~5)

なお、施工時のコンクリート中の塩分濃度の分布を図-6に示すが、鉄筋位置付近となる深さ30-50mm程度の塩分量が非常に多く、一般的に鋼材腐食発生限界値とされる³⁾1.2kg/m³以上となっていたため、A1、A2部の劣化の原因は塩害であると推察される。

表-2 試験施工状況

	面積	中性化深さ	状況写真
A1	1.4m ²	13mm	図-2, 3
A2	1.7m ²	21mm	図-4, 5



図-2 A1 補修部全体



図-3 A1 補修部叩き落し後 近接



図-4 A2 補修部全体



図-5 A2 補修部叩き落し後 近接

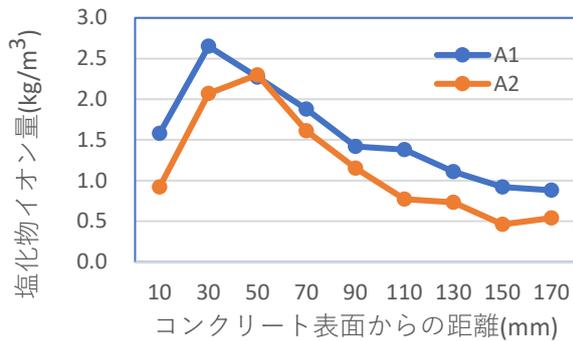


図-6 塩化物イオンの分布

3.2 施工方法

(1) 照合電極設置

照合電極は埋設型の二酸化マンガ照合電極 (MNO) を使用した (図-7)。

(2) 犠牲陽極材設置

犠牲陽極材の設置間隔は、犠牲陽極材製造者の設計要領 (表-3) に従えば、鉄筋密度と塩分濃度より 400mm となるが (ただし、防食範囲内の鉄筋がすべて電氣的に接続されていることが前提)、実際の鉄筋間隔を考慮し約 300mm 間隔にて設置することとした。各犠牲陽極材の防食半径は製造者からの情報により 266mm として設計、施工を行った (図-8~11)。

犠牲陽極材は、その底面に 2, 3 枚程度の導電性ゲルシートをあらかじめ接着しておき、上記の設置間隔 300mm でコンクリート表面に設置した。通常は犠牲陽極材を個別にそれぞれ鉄筋と結束し、通電確認 (抵抗値確認) を行うが、今回は防食電流の測定を目的に犠牲陽極を被覆銅線にて直列に接続したうえで端部をジャンクションボックスを介して鉄筋と結束し、端部のみで通電確認した。これは予防保全の目的で健全なコンクリート中の鉄筋腐食を抑制する際に使用される接続方法であるが、各犠牲陽極材とその近傍の鉄筋間で防食回路が形成されるため、防食電流の分布は個別接続の場合と変わらない。



図-7 埋設型照合電極設置状況

表-3 犠牲陽極材設置間隔表

塩分量がセメント比 0.8%未満
(セメント量 300kg/m³ と仮定した場合 2.4kg/m³未満)

鉄筋密度 / m ²	XP	XP2	XP4
≤ 0.3	—	650mm	750mm
0.31-0.6	—	500mm	700mm
0.61-0.9	—	400mm	550mm
0.91-1.2	—	350mm	475mm
1.21-1.5	—	300mm	425mm
1.51-1.8	—	250mm	375mm
1.81-2.1	—	225mm	350mm

※XP, XP2, XP4 は犠牲陽極の種類で、今回は XP2 を使用。



図-8 犠牲陽極材取付状況 A1

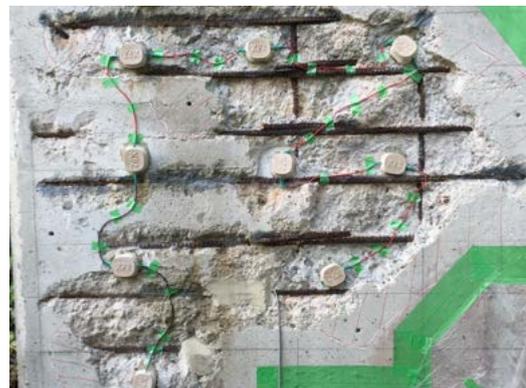


図-9 犠牲陽極材取付状況 A2

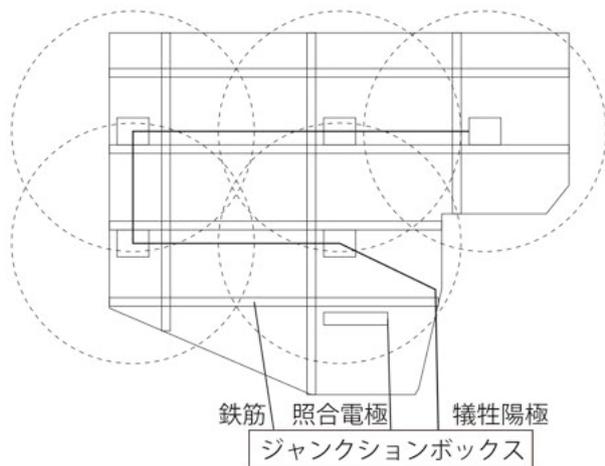


図-10 犠牲陽極有効範囲 A1 (円が各犠牲陽極の防食範囲 (半径 266mm) を表す)

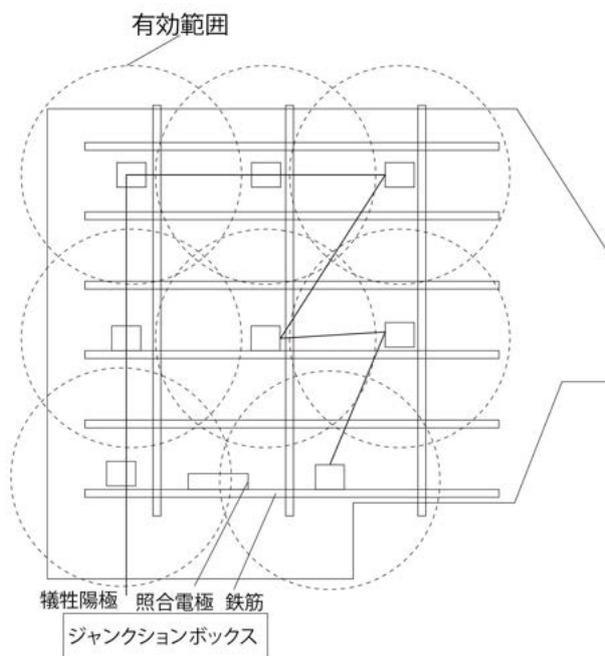


図-11 犠牲陽極有効範囲 A2 (円が各犠牲陽極の防食範囲 (半径 266mm) を表す)

(3) 防水材塗布

本試験施工では、施工後の対象鉄筋状況の目視確認を容易にするため、可視化可能な防水材を選定した(図-12、図-13)。

4. 施工後の状況

目視確認、打音確認、防食電流量測定、復極量測定を1か月ごとに15か月間、その後3か月ごとに36か月経過まで実施した。

4.1 外観

7か月経過後より一部の犠牲陽極材上の防水塗膜に変状が見え始めた。その後変状は進行し、12か月後には犠牲陽極材と防水塗膜間に浮きが確認された箇所もあった。



図-12 防水材塗布後 A1



図-13 防水材塗布後 A2

18か月経過後には鋼材の腐食が原因と思われる防水材の破断(図-14)が1箇所確認された。次節で述べるように、犠牲陽極材の直列接続の端部にあるジャンクションボックスにて防食電流を計測することができていたため、A2全体としての防食回路は維持されていたと考えられる。そのため、鉄筋背面に空隙が存在することによって局所的に鉄筋に電流が供給されない箇所が存在した可能性、または防水塗膜の欠陥を起点として鋼材の腐食が生じ、その膨張圧で防水塗膜が割れた可能性も考えられるが詳細は不明である。

24か月経過後より犠牲陽極材からの白い析出物が多く確認されるようになった。36か月後(図-15、16)には多くの犠牲陽極材から白い析出物が確認された。白色析出物は犠牲陽極材中に含まれていた水酸化リチウムである。また1箇所のみであるが犠牲陽極上での防水塗膜の破断がみられた。水酸化リチウムの高アルカリ成分により犠牲陽極材上の防水塗膜に亀裂が発生した可能性がある(図-17)。そのように推測した理由は、過去に断面修復材のかぶり厚が10mm程度で躯体中の水分が多い場合に、水酸化リチウムがモルタル表面まで染み出し表面のウレタン防水層を侵したことがあったためである。本検討においても、A1部ではコンクリートよりエフロレンスの析出が見られ、コンクリートに多くの水分の供給があることが推測される。その過剰な水分の存在も犠

犠陽極材から水酸化リチウムを析出させた要因の一つであると考えられる。



図-14 鋼材腐食に伴う防水塗膜の破断 (A2)



図-15 36か月経過後 (A1)



図-16 36か月経過後 (A2)



図-17 犠陽極上の防水塗膜破断

施工箇所に対してたたき調査を実施したところ、施工範囲内と周辺でかぶりコンクリートが残存している箇所における新たなコンクリートの浮きは確認されなかった。また、施工時に浮き音が確認されたにもかかわらず叩き落すことができなかつたためにそのまま施工した箇所についても、浮きの範囲の拡大はなかつた。かぶりのない箇所についても、鉄筋背面で腐食が進行して腐食膨張圧で鉄筋がコンクリートから浮き上がるような現象も見られなかつた。また、防水材にて保護されているため、剥落の兆候も見られなかつた。

4.2 防食電流

ジャンクションボックスで計測された防食電流量を鉄筋表面積あたりの密度として図-18 に示すが、犠陽極材から鉄筋への防食電流の供給を確認できた。設置後約2か月で一度大きな電流密度を計測し、その後は気候や気温、湿度などの影響により変動していると考えられる。

なお、鉄筋表面積あたりの防食電流密度 0.2mA/m^2 であればマクロセル腐食を防ぐことができる (cathodic prevention) とされている⁴⁾。ここでは季節変動により A1 では低温期にわずかに 0.2mA/m^2 を下回るものの、概ね防食効果が期待できる結果であるといえる。

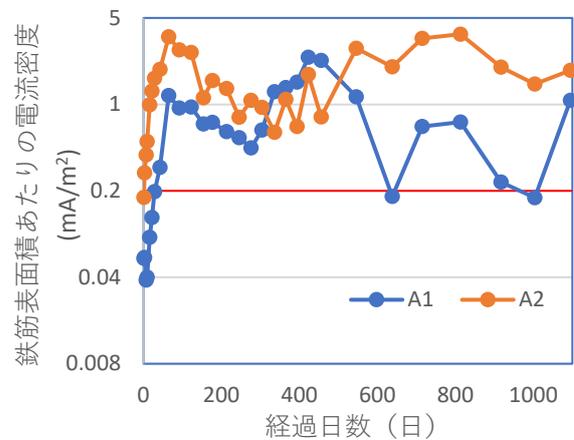


図-18 防食電流量

4.3 復極量

通電回路切断直後のインスタントオフ電位、およびその約24時間後に測定したオフ電位から復極量を算出し、図-19 に示す。犠陽極方式では防食電流量を任意に設定することができず、ここでの復極量は外部電源方式の電気防食にて一般に防食管理基準とされる 100mV に満たず、腐食の進展を完全に防いではいない可能性がある。ただし、環境の変化に応じ電流密度 (図-18) と連動し増減していることから、ある程度の防食効果があったと考えられる。

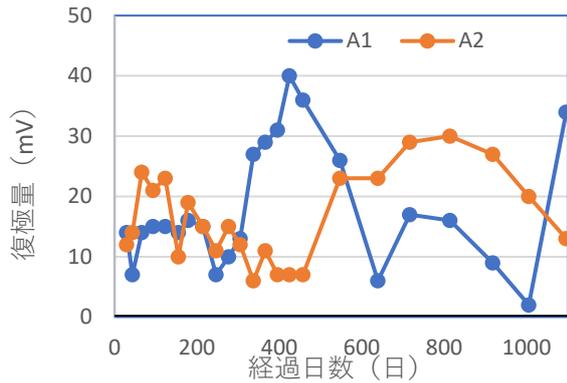


図-19 復極量

5. まとめ

断面修復を伴わず、日常点検で不具合が発見された場合に簡易的に鉄筋コンクリート構造物に設置、施工できる犠牲陽極工法を開発し、試験施工を行った。5年間の維持管理サイクルの間に劣化を進展させないことを目的とし、施工後の状況を現在まで約3年間追跡調査した。その結果、本工法は防食システムとして機能することが確認された。

以下、得られた結果をまとめる。

- (1) 犠牲陽極材、導電性ゲルシート、および防水材からなる、断面修復をともなわない簡易的な防食工法を開発した。
- (2) この工法を適用した場所において、補修部および未補修部にてマクロセルによるかぶりの浮きが進展することはなかった。
- (3) 1か所で鋼材腐食に伴う防水塗膜の破断がみられたが、A2側全体としての防食回路は正常に機能していた。鉄筋表面側の腐食に限定されていたと考えられる。
- (4) 犠牲陽極材に用いられている水酸化リチウムに起因すると考えられる防水材の破断が発生した。
- (5) 約 $0.2\text{mA}/\text{m}^2$ から $3.5\text{mA}/\text{m}^2$ の防食電流密度が計測され、マクロセル腐食は抑制できているものと考えられる。
- (6) 復極量は小さいものの、必要に応じ増減していることから、ある程度の防食効果があったと考えられる。一方、以下には本工法の留意点や、本検討から明らか

となった課題を述べる。

- ・設置条件として犠牲陽極材設置箇所のコンクリート面が平滑でない場合には、コンクリート表面の凹凸に応じ、導電性ゲルシートを数枚重ねることによって犠牲陽極材とコンクリートを密着させ、確実に防食回路が形成され、イオン移動が行われるように配慮する必要がある。場合によってはゲルシートに代わってモルタルや他の導電性材料の使用も検討すべきである。
- ・露出鉄筋と躯体コンクリートに空隙がある場合、モルタル等にて充填しなければ防食回路が形成されず、一部鉄筋を防食できないこともあると予想される。
- ・防水材の選定にも課題が残った。犠牲陽極材に含まれる水酸化リチウムの高アルカリ成分により犠牲陽極材上のアクリル系防水塗膜に亀裂が発生したと考えられるため、高耐久の代替の防水材の選定が求められる。
- ・本試験施工によって得られたデータを基に、既存の断面修復を行う通常の犠牲陽極工法とのデータ比較を行うことで、本工法の防食効率を把握することも必要である。

謝辞

本工法の開発および試験施工を実施するにあたり、西日本高速道路株式会社関西支社からは試験施工の場をご提供頂きました。また、西日本高速道路メンテナンス関西株式会社からは、本工法開発の方向性を決定する多くのご意見を頂いた上、データ採取および現場の管理等、多大なご協力をいただきました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 特許 6393601 : 犠牲陽極材を用いた断面修復を伴わない鉄筋コンクリート構造物の簡易補修方法および簡易修復構造, 2018.08.31
- 2) 土木学会コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法設計施工指針(案), 2002.
- 3) 臨海コンクリート設備の塩害に関する維持管理手引, 1995.2
- 4) EN 12696:2012 Cathodic Protection of Steel in Concrete, 2012.