

塩害を受けたRC部材の断面修復に併用する埋設型亜鉛陽極の適用方法に関する一考察：異なる陽極の時間差適用について

濱田, 秀則
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門：教授

山本, 大介
大分工業高等専門学校 都市環境工学科

ASTUTI, Pinta
Department of Civil Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

RAFDINAL, Rafmita Sari
Maintenance Engineering Group, P.S. Mitsubishi Construction, Co. Ltd.

<https://hdl.handle.net/2324/6791122>

出版情報：Journal of the Society of Materials Science, Japan. 72 (4), pp.273-279, 2023-04. The Society of Materials Science, Japan

バージョン：

権利関係：©The Society of Materials Science, Japan

塩害を受けた RC 部材の断面修復に併用する埋設型亜鉛陽極の適用方法に関する一考察 —異なる陽極の時間差適用について—

濱田 秀則* 山本 大介** P. Astuti*** R. S. Rafdinal****

A Discussion on Utilization of Zinc Anode Applied in Cross-section Repair of RC Member Damaged by Chloride Attack - Time-Lag Application of Different Zinc Anodes -

by

Hidenori HAMADA*, Daisuke YAMAMOTO**, Pinta ASTUTI*** and Rafmita Sari RAFDINAL****

This paper discusses the effectiveness of zinc anode cathodic protection applied to RC beam specimens severely damaged by chloride attack. Based on the experiment, that is, the zinc anode cathodic protection is applied to the 41-year-old RC beam specimens exposed to natural marine environments, suitable application method of zinc anode is discussed. In the experiment, repair was performed in three stages. In the first stage, polymer-modified mortar was cast to replace existing concrete in the middle tensile part with zinc anodes embedded in the repair mortar. After protective current became stable value, the anodes were disconnected from steel bars for a year defined as the second stage. During the one year of second stage, the steel bar in the repair area remained be passive state, without any sign of corrosion. As for the third stage, additional zinc anodes were installed in the existing concrete part in order to protect the steel in old chloride contaminated concrete. From one-year observation after the application of zinc anodes in old concrete part, it is confirmed that “time lag application” could stop the corrosion of steel bar in both parts.

Key words:

Steel corrosion, Corrosion prevention, Zinc anode, Patch repair, Chloride attack, Marine condition, Time-lag application

1 緒 言

塩害による鉄筋コンクリート中の鋼材の腐食は、海洋環境下などにおける鉄筋コンクリートの劣化の主要因となる。鉄筋の表面において腐食発生限界塩分濃度を超える塩分が存在すると、鉄筋表面の不動態被膜が破壊されて腐食が始まる¹⁾。十分な酸素と水分の供給の下で鉄筋の腐食が進行し、コンクリートのひび割れ、かぶりコンクリートのはく離・はく落、鉄筋の断面減少が生じ、最終的には部材耐力の低下へとつながる。このため部材の安全性あるいは供用性能が低下し、設計供用期間を満足できなくなる事態に陥る²⁾。

塩害により損傷を受けている RC 部材の補修方法の一つに断面修復工法がある。BS 規格 (British Standard of Design Manual for Road and Bridge)³⁾によると、コンクリート中の塩分濃度がセメント質量に対して 0.3% を超えている場合、もしくは鉄筋の自然電位が -350mV (v.s. SCE) 以下である場合はその部分のコンクリートを除去して、新しく断面を修復することが規定されている。一般に、劣

化箇所のコンクリートを除去し新しく修復する方法は困難かつ高価である⁴⁾。一方、近年において電気化学的な補修工法の技術が向上しており、埋設型亜鉛陽極を用いる電気防食工法は断面修復部分の鉄筋の腐食を抑制する工法として実用化されされている⁵⁾。

断面修復工法に埋設型の亜鉛陽極を併用する方法は、コンクリート中の塩分含有量が大きい場合や鉄筋の腐食速度が大きい場合、あるいはコンクリート表面に変状が認められる場合などに適用されている⁶⁾。しかし、長期間の補修効果を検証した試験などは未だ極めて少ない。筆者らは、自然環境下で 41 年間暴露された RC 試験体の断面修復を行う際に、修復箇所と隣接する旧コンクリート箇所の双方に亜鉛陽極を埋設する方法を適用し、その補修効果(防食効果)を確認する実験を行った⁷⁾。その結果、異なる種類の亜鉛陽極を埋設する場合、双方の陽極から発生する電流が交互に阻害することを抑制するために時間差をつけて埋設する必要があることを確認したので本文で報告する。

† 原稿受理 令和 4 年 9 月 9 日 Received Sep. 9, 2022 ©2023 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 九州大学大学院 工学研究院 〒819-0395 福岡市西区元岡
Faculty of Engineering, Kyushu University, Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395.

** 大分工業高等専門学校 都市環境工学科 〒870-0152 大分市大字牧1666番地
Department of Civil and Environmental Engineering, National Institute of Technology, Oita College, Maki, Oita, 870-0152.

*** Department of Civil Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Tamantirto, Kasihan, Bantul, DIY, Indonesia, 555-183, Indonesia.

**** Maintenance Engineering Group, P.S. Mitsubishi Construction, Co. Ltd., Harumi, Chuo-Ku, Tokyo 104-8215, Japan

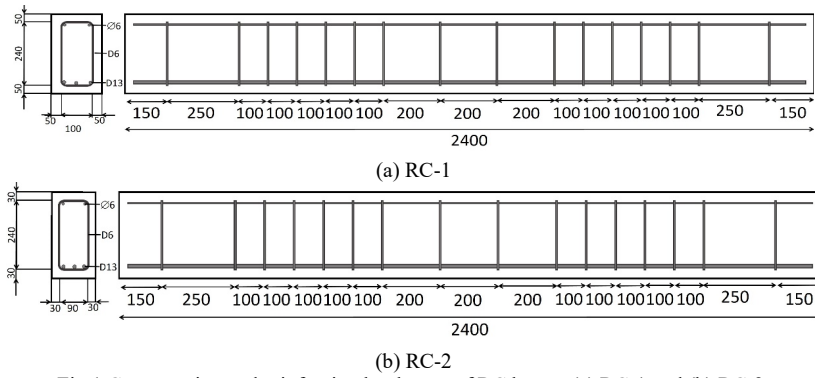


Fig.1 Cross section and reinforcing bar layout of RC beams (a) RC-1 and (b) RC-2.

Table 1 Mix proportion of existing concrete.

MSA (mm)	Slump (mm)	Air (%)	w/c (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Adm.
20	12±2	4±1	68	47	204	300	793	964	1.2

MSA: maximum size of coarse aggregate; W: water; C: cement; S: sand; G: gravel; Adm.: admixture

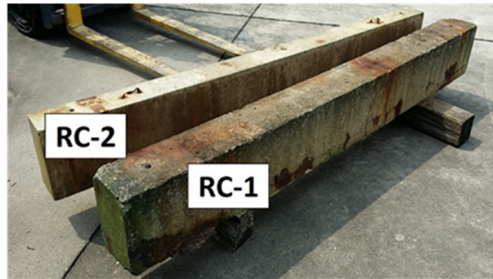


Fig. 2 Defective appearance of RC beams.

2 実験の概要（補修の手順）

2.1 試験に用いた RC はり試験体の概要

試験に用いた RC はり試験体の長さは 2400mm, 断面寸法は 200×300mm と 150×300mm の 2 種類である. 以後, 前者を RC-1, 後者を RC-2 とする. 引張主鉄筋のかぶりは 50mm (RC-1) と 30mm (RC-2) である. 引張主鉄筋は異型棒鋼であり, その公称直径は 13mm, 引張強度は 363MPa である. 圧縮主鉄筋とスターラップには直径 6mm の丸鋼が使用されており, スターラップの間隔は 100mm である. はりの断面形状と鉄筋の配置を Fig. 1 に示す.

はり試験体の製作には普通ポルトランドセメント (OPC), 骨材には細骨材として川砂 (密度 2.25 g/m³, 粗粒率 2.84) および粗骨材として砕石 (密度 2.75 g/m³, 粗粒率 6.63) が用いられている. コンクリートの配合を Table 1 に示す. コンクリート打設後 1 日の脱型まで湿布養生とし, 脱型後は実験室内での気中養生とした. 試験体は初期の 20 年間 (1975~1995) は山形県酒田港の干満帯に暴露され, その後 15 年間 (1995~2010) は港湾空港技術研究所 (神奈川県横須賀市) の実験室に静置されていた^{8), 9)}. 2010 年に九州大学伊都キャンパスに移送し, キャンパスの屋外環境にて 2016 年まで静置され通算材齢 41 年目で本試験に用いた.

2.2 材齢 41 年時の補修直前における試験体の調査

コンクリート表面のひび割れおよび錆汁などの劣化を示す外観的特徴を Fig. 2 に示す. 同一の履歴の試験体を材

齢 41 年時点で調査した Dasar らによる試験結果では, 50 × 100mm 寸法のコア試験体の圧縮強度と静弾性係数は 30.0 MPa および 27.0 GPa であった¹⁰⁾. これらの値は 28 日材齢における φ100×200mm 試験体を用いた品質管理データの圧縮強度 30MPa, 静弾性係数 22GPa と同等以上であることからコンクリートの圧縮強度と弾性係数の低下は生じていないと推察された. Fig. 3 は, 試験体表面のひび割れの様子と内部鉄筋の自然電位の分布を示したものである. 両方のはり試験体において, 引張領域内ではり軸方向と横断方向の双方にひび割れが生じている. はり軸方向のひび割れは引張鉄筋に沿ったものであり, その最大ひび割れ幅は RC-1 において 1.9mm, RC-2 において 2.2mm であった. 一方, かぶりコンクリートのはく落は両試験体ともに生じていなかった. 自然電位の分布を ASTM C 876 に準拠して評価すると, RC-1 において「腐食あり」が 77%, 「不確定」が 23% であり, RC-2 においては, 「腐食あり」が 94%, 「不確定」が 6% であった. また, 表面付近におけるコンクリート中の塩化物含有量は, RC-1 において 4.65kg/m³, RC-2 において 4.75kg/m³ であった. この塩化物含有量は, 一般的に鋼材腐食発生限界塩分含有量とされる 1.2~2.4kg/m³ よりも大きな値である. これらの試験体の劣化度は, 土木学会のコンクリート標準示方書 [維持管理編 2018] に基づいて判定すると「劣化度 II-1 (加速期前期)」となる. 同示方書によると, これらの試

験体に対する補修工法として、表面被覆、断面修復、電気防食、電気化学的脱塩などが示されている。

2.3 本実験の先行実験の概要について

本実験は、Rafidinal¹¹⁾およびAstuti¹²⁾による先行実験の継続実験として実施したものである。本節では先行実験の概要と結論を説明し、本実験に至った経緯を示す。

Rafidinal は、本実験で用いた試験体 RC-1 および RC-2 を用いて、断面修復部への亜鉛陽極の埋込実験を行った。詳細は Rafidinal の学位論文¹¹⁾に記述しているが、RC-1 に埋設された亜鉛陽極の個数 9 個は、はり試験体中に存在する鉄筋の全表面を防食の対象とした場合に必要とされる電気量から求めた最小個数である。一方、RC-2 に埋設された亜鉛陽極の個数 1 個は、断面修復箇所が存在する鉄筋の表面を防食対象とした場合に必要となる電気量から求めた最小個数である。Rafidinal は当初、RC-1 においてははり試験体全体を亜鉛陽極で防食する設計とし、RC-2 では断面修復部分のみを防食対象として実験を行った。ちなみに、亜鉛陽極の製造・供給元の技術書に記載されている標準使用個数は、RC-2 のように断面修復箇所に対して必要とされる電気量を供給するための個数である。結果は、RC-1 および RC-2 とともに断面修復箇所の両側の母

材コンクリート部分への電流の供給はほぼゼロであり、陽極の個数を増やして発生電気量を増大させても、亜鉛陽極による防食範囲は断面修復箇所に限定されることが明らかとなった。この理由として、旧コンクリートと断面修復に用いたポリマーセメントモルタルの境界において電気的な高抵抗状態が形成されているためと考えられた。

Rafidinal の結果を受けて、Astuti は母材コンクリート中の鉄筋の防食のために、母材コンクリートに対しても埋込み型の亜鉛陽極を設置する実験を行った¹²⁾。Rafidinal の実験と Astuti の実験の間隔はほぼ 3 年でありその間は断面修復箇所の陽極と鉄筋の接続を遮断した状態で試験体を実験室内で静置した。Astuti は、断面修復箇所における亜鉛陽極の電流の発生と母材コンクリート部分に埋設した亜鉛陽極からの電流発生を同時に開始した。結果として、断面修復箇所の亜鉛陽極、母材コンクリート中の亜鉛陽極の双方から微量の電流しか発生しなかった。この理由として、比較的距離が小さな場所で異なる亜鉛陽極を同時に作動させる場合、何らかの電気的要因で電流発生が阻害されるものと考えられた。

以上の Rafidinal と Astuti による先行実験を経て、本文中で報告する時間差を設けた亜鉛陽極の適用実験を行うこと

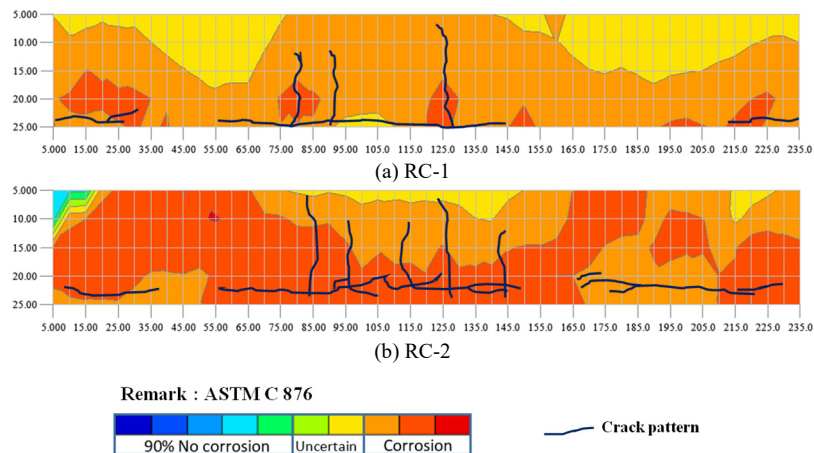


Fig. 3 Half-cell potential and crack pattern, (a) RC-1 and (b) RC-2, before repair.

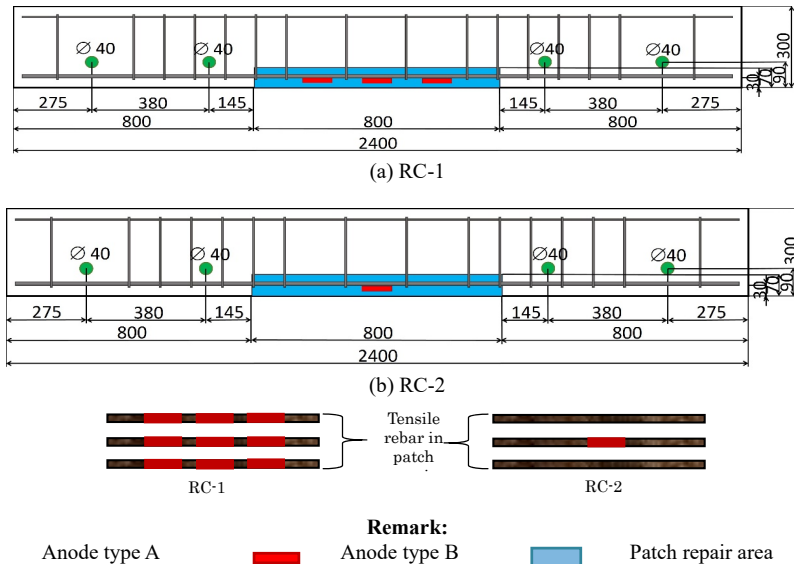


Fig. 4 Repair design, (a) RC-1, (b) RC-2 and (c) anode setting position in patch repair.

とした。隣接する異なる環境に異なる種類の亜鉛陽極を埋設して鉄筋を防食する場合の最適な防食方法を見出すことが本実験の目的である。

2.4 補修の設計

事前の外観調査により、引張側中央に複数本のひび割れが生じていることから、内部鉄筋はすでに腐食が進行していることが明らかであった。そのため、断面中央において断面修復を行い、併せて埋設型の亜鉛陽極を適用することとした。埋設する亜鉛陽極の個数は、RC-1 において 9 個、RC-2 において 1 個のみである。また、断面修復箇所周囲の旧コンクリート箇所に対しても埋設型の亜鉛陽極を適用し、その部分の鉄筋の腐食を抑制することとした。断面修復内および旧コンクリートにおける亜鉛陽極の埋設箇所を Fig.4 に示す。

補修は 3 段階で実施した。ステージ I において、亜鉛陽極を設置し断面修復を行い、通電を行った。ステージ II においては、通電を止めた状態で 1 年間静置した。ステージ III において断面修復部周囲の母材コンクリート部においても亜鉛陽極を埋設して通電を行った。併せて補修部の通電も再開した。

断面修復用の材料として、材齢 28 日における圧縮強度が 40.5MPa、曲げ強度が 8.6MPa のポリマーセメントモルタルを使用した (Fig. 5(a))。また、旧コンクリートとの界面処理材としてポリマーエマルジョンを使用した (Fig. 5(b))。埋設用の亜鉛陽極として、市販の 2 種類、すなわち Type A (旧コンクリート部へ適用) と Type B (断面修復部へ適用) を用いた (Fig. 5(c) (d))。断面修復部に埋設した亜鉛陽極 (Type B) のサイズは、厚さ 13mm、幅 45mm、長さ 140mm である。また、母材コンクリート部に埋設した亜鉛陽極 (Type A) は、直径 30mm、長さ 130mm のリブがついた円柱型である。Type B の陽極自体は亜鉛ベースの合金であり、水酸化リチウムを含むモルタルで包まれた構造である。一方、Type A はドリル削孔穴に水酸化リチウムを含むモルタルを用いてコンクリートに埋め込んだ。いずれのタイプにおいても水酸化リチウムはモルタルの高湿度を維持することで亜鉛陽極を活性化するために混入されている¹³⁾。

2.5 計測項目

(1) 発生電流密度

亜鉛陽極から発生する電流を高抵抗電流計により定期的に計測した。BS 規格 (ES 12696)¹⁴⁾によると、防食効果を有する電流密度の最小値として $0.2\mu\text{A}/\text{m}^2$ (防食対象鋼材表面積に対して) が示されている。

(2) 自然電位

鉄筋の自然電位の測定は ASTM C876-15 (2015) に準じて実施した。参照電極として飽和カロメル電極 (SCE) を用いて計測を行い、銅硫酸銅電極 (CSE) 基準値に換算した。測定に際しては、コンクリート表面に 50 mm 間隔の計測点を定め、その点で電位を計測した。結果を電位分布図で表示した。

(3) 復極量試験

亜鉛陽極による防食効果を判定するために復極量試験を行い、復極量 100 mV を一つの基準として結果の考察を行った。通電時のオン電位 (E_{on}) を定期的に計測し、通電遮断直後のインスタントオフ電位 (E_{off}) と通電遮断 24 時間後の電位 (E_{rest}) の差を復極量とした。なお、通電遮断後 24 時間における電位を自然電位として取り扱った。

3 実験の結果および考察

3.1 断面修復部分に埋設した亜鉛陽極の挙動

ステージ I における断面修復の際に、亜鉛陽極を RC-1 において 9 個、RC-2 において 1 個ポリマーセメントモルタルに埋設したが、この埋設方法などの詳細は既往の文献 (Rafidinal¹¹⁾ and Astuti et al.^{12), 15)} に詳述している。通電開始後 2 か月までの鉄筋の電位の経時変化を Fig.6 および Fig.7 に示す。インスタントオフ電位および自然電位の計測結果より、亜鉛陽極の影響範囲は比較的狭い範囲に限定されていることがわかる。RC-1 と RC-2 を比較すると、埋設している亜鉛陽極の個数の多い RC-1 の方が RC-2 よりも影響範囲は広いものの、RC-1 においても亜鉛陽極の影響範囲は断面修復内に限られており、断面修復周囲の旧コンクリート部分まで及んでいない。また、RC-2 においては、亜鉛陽極の影響範囲は断面修復内でもさらに限定された部分のみとなっている。この結果は他の研究者による報告 (Yoshida et al.¹⁶⁾) と一致するものである。

3.2 断面修復部分における通電の一時停止

ステージ I において 200 日間通電を継続し、その後 1 年間通電を停止した状態を維持した。この通電停止期間をステージ II とする。この段階においては、試験体は実験室内の気中暴露とした。Fig. 8 に通電停止期間中の鉄筋の自然電位の経時変化を示す。これより、断面修復部分の鉄筋の自然電位の貴側へのシフトが周囲の旧コンクリート部分の鉄筋の自然電位の貴側へのシフトよりも大きくなっていることがわかる。特に、RC-1 において断面修復部分の鉄筋の自然電位の貴側へのシフトが大きい。この電位のシフトは亜鉛陽極による通電の効果であると考え

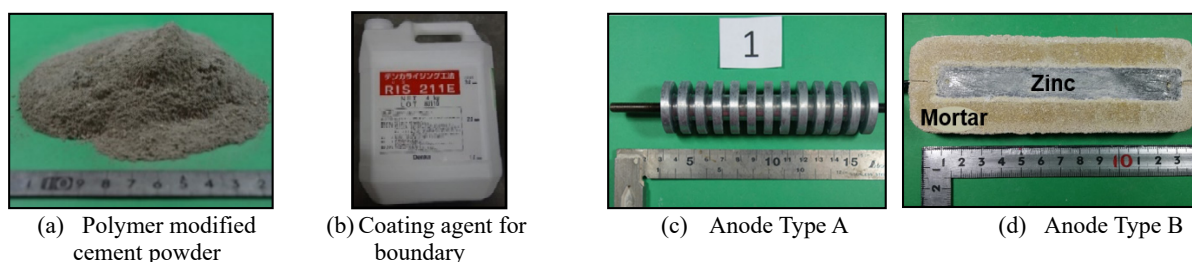


Fig.5 Materials used for repairing.

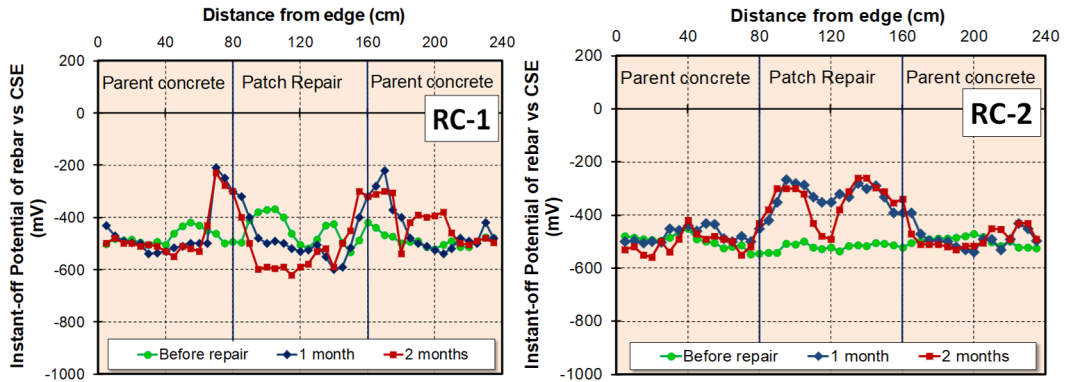


Fig. 6 Instant-off potential of rebar (sacrificial anodes were in patch repair, Stage I).

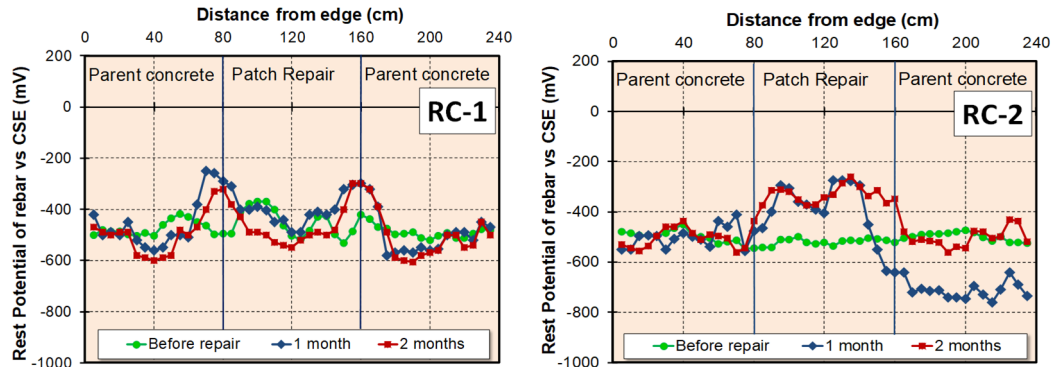


Fig. 7 Rest potential of rebar (sacrificial anodes were in patch repair, Stage I).

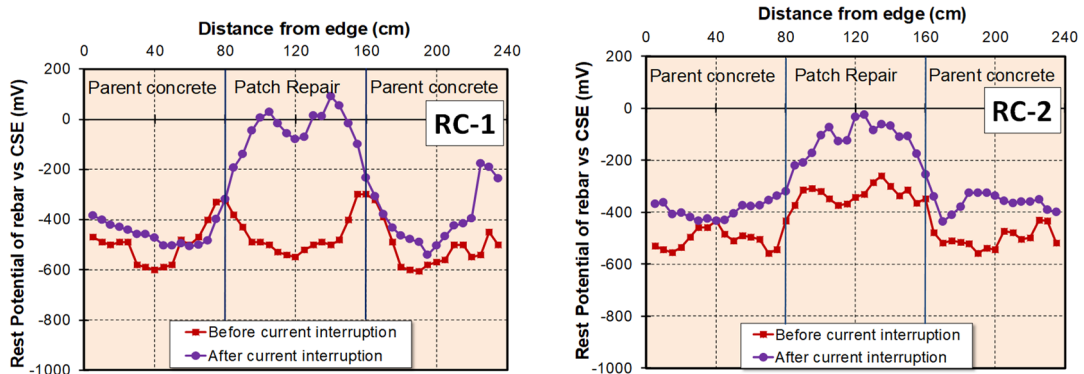


Fig. 8 Rest potential of tensile steel bar before and after one-year current interruption, Stage II.

られる。RC-1 および RC-2 とともに、シフトした後の自然電位は、ASTM 基準では「90%の確率で腐食なし」と評価される領域である。この自然電位の貴化は塩分を含んでいないポリマーセメントモルタルに接していることも理由の一つと考えられる。

3.3 旧コンクリート箇所における亜鉛陽極の埋設

ステージ III において、旧コンクリート部分に4個の亜鉛陽極を埋設し、旧コンクリート部分の鉄筋の防食を行った。また、旧コンクリート部分の通電開始後2か月が経過した時点で断面修復箇所の亜鉛陽極の通電を再開した。旧コンクリート部分に埋設した亜鉛陽極からの発生電流密度はRC-1, RC-2ともに $10\sim 20\text{ mA/m}^2$ であった。この値はBS EN ISO 1269613において防食効果を得るための最小値として示されている値にほぼ等しい値である。旧コンクリート箇所のインスタントオフ電位、自然電位、および復極量の通電1年までの経時変化をFig. 9, Fig. 10お

よびFig. 11に示す。Fig. 11には100mV防食基準も示している。これらの図に示されている結果より、亜鉛陽極を用いて通電することによりインスタントオフ電位が卑側にシフトしていることがわかる。また、鉄筋の通電時の電位(オン電位)は -750 mV (v.s. CSE)よりも卑の値を示した。これらの結果から、一つの亜鉛陽極の影響範囲は両側に約200mmであると推察され、埋設する陽極間の距離は約400mmが適正であると考えられる。

24時間の復極量試験はほぼ1か月に一度の間隔で実施した。RC-1, RC-2でほぼ同様に、通電開始から約3か月で復極量が100mVに達し、通電12か月までそれが維持された。亜鉛陽極の通電範囲にある鉄筋の自然電位は貴側にシフトする傾向を示した。この電位シフトの理由として、鉄筋とコンクリートの界面の状況の改善、具体的には鉄筋表面のpHの増大および塩化物イオン濃度の低減が考えられる。さらには、一種の電着作用による界面の空隙

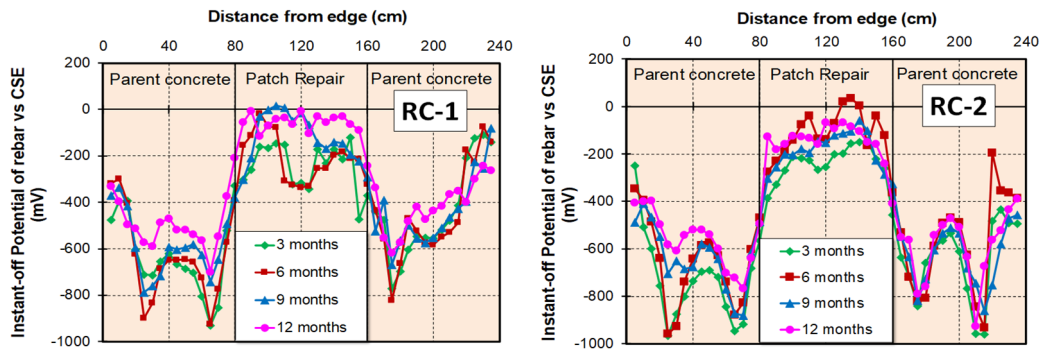


Fig. 9 Instant-off potential of tensile rebar in RC-1 and RC-2, Stage III.

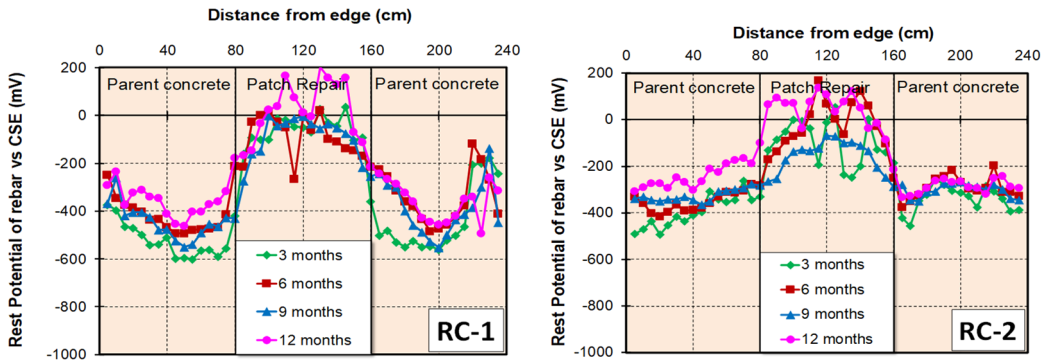


Fig. 10 Rest potential of tensile rebar in RC-1 and RC-2, Stage III.

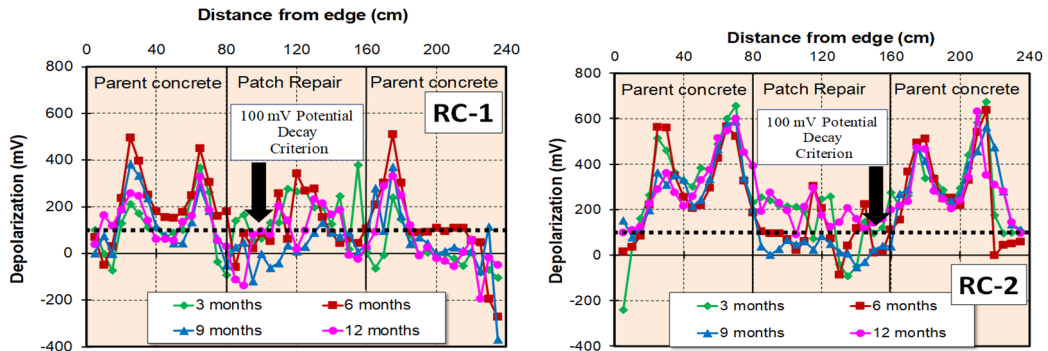
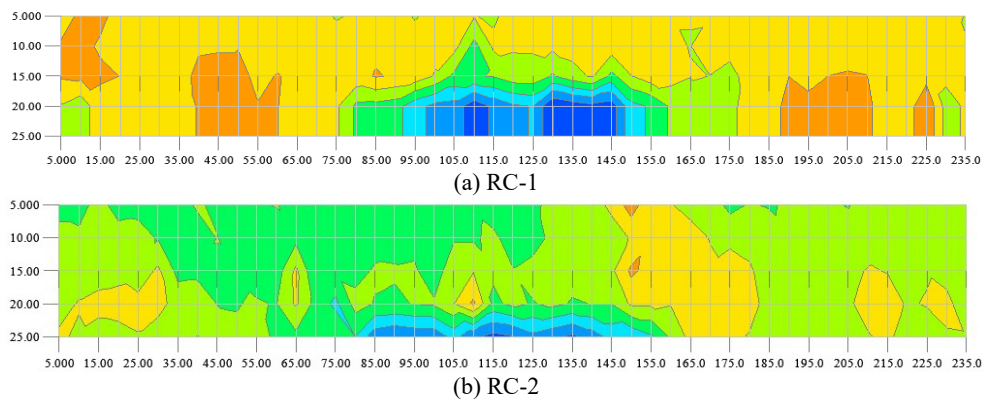


Fig. 11 Depolarization test value of tensile rebar in RC-1 and RC-2, Stage III.



Remark:

Fig. 12 Rest potential at the end of the test (1 year after the second anode application).

の充填なども生じているものと考えられる。鉄筋表面の酸素量は低減していることを考えても、通電による副次的効果により鉄筋が再不動態化することで自然電位の貴側へのシフトが生じていると考えられる^{17),19)}。

Fig. 12 は通電開始後1年時の自然電位の分布図である。この図に示されるように、試験体のすべての領域が「90%の確率で腐食なし」もしくは「不確定」と判定された。このことから、亜鉛陽極による通電で鉄筋の表面状態が

改善されていることを確認できた。断面修復箇所の鉄筋の自然電位は、旧コンクリート部分よりもさらに貴側にシフトしている。断面修復部分に比べて旧コンクリート部分の自然電位は卑側ではあるものの、腐食が抑制されていると判断できる電位レベルである。

6 結 言

筆者らが行った塩害により劣化した RC 部材の断面修復時に併用する亜鉛陽極の防食効果に関する実験的検討から得られた結論を以下に示す。

(1) 亜鉛陽極から電流を供給することにより、鉄筋の自然電位の経時的な貴化が生じる。このことから、通電により鉄筋の防錆能力が向上していることが推察される。

(2) ポリマーセメントモルタルによる断面修復を行った箇所の鉄筋は、亜鉛陽極からの通電を停止した後も高い防錆性能を維持することができる。

(3) 断面修復箇所に埋設した亜鉛陽極の場合でも、旧コンクリート部分に埋設した亜鉛陽極の場合でも、十分な電流を供給するための隣接する陽極の適正な間隔は 400mm 程度と考えられる。

(4) 断面修復部分と旧コンクリート部分が隣接する箇所において双方に亜鉛陽極からの電流を供給するためには、本実験で実施した時間差法、すなわち電流供給の開始時をずらす方法が適正な方法の一つであると考えられる。

(5) 今回用いた補修方法の場合、供用期間中に発生電流などをモニタリングすることで防食効果を維持し、構造物の供用期間を延長できると考えられる。

本実験で用いた亜鉛陽極は、デンカ㈱および㈱ピーエス三菱よりご提供いただいたものを使用しました。両社のご厚意に心よりお礼申し上げます。また、本実験の遂行から本文の作成に際して支えていただきました九州大学コンクリート研究室の教職員、学生諸君に心からのお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) G. Glass and N. Buenfeld, "The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete." *Corrosion Science*, Vol. 39, pp. 1001-1013 (1997).
- 2) H. W. Song, H. J. Kim, V. Saraswathy and T. H. Kim, "A Micro-mechanics based Corrosion Model for Prediction of Service Life in Reinforced Concrete Structures." *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 2, pp. 341-354 (2007).
- 3) Design Manual for Road and Bridges., "Inspection and repair of concrete highway structures departmental standard." United Kingdom: highways England. Vol. 3, Section 3, Part BA 35/1990 (1990).
- 4) Christodoulou, C. M. Alexanders, "Electrochemical treatments of corroded reinforcement in concrete." in Eds. *Concrete repairs, rehabilitation, and retrofitting II - Proceeding of 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR-2)*, Cape Town 24-26 November 2008. United Kingdom: Taylor & Francis Group, pp. 297-298 (2008).
- 5) NACE International Publication, "Sacrificial cathodic protection of reinforced concrete elements - A State of the Art report." V01 01105, No. 24224, Houston: NACE International (2005).
- 6) A. Cheaitani, "Cathodic Protection criteria and Practical Completion Issues for CC of Reinforced Concrete Structures." *Corrosion2000 - NACE (National Association of Corrosion Engineer)*, Texas: NACE International. No. 00805 (2000).
- 7) P. Astuti, R. S. Rafdinal, D. Yamamoto, V. Andriamisa-harimanana and H. Hamada, Effective Use of Sacrificial Zinc Anode as a Suitable Repair Method for Severely Damaged RC Members Due to Chloride attack, *Civil Engineering Journal*, Vol. 8, No.07 (2022).
<https://www.civilejournal.org/index.php/cej/article/view/3780>
- 8) H. Hamada, N. Otsuki and M. Haramo, "Durability of concrete beams under marine environments exposed in port of Sakata and Kagoshima (after 10 year's exposure)." *Technical Note of the Port and Airport Research Institute*, No. 614, pp.3-43 (1988).
- 9) H. Yokota, T. Akiyama, H. Hamada, A. Mikami and T. Fukute, "Effect of degradation of concrete on mechanical properties of reinforced concrete beams exposed to marine environment (for 20 years in Sakata)." *Report of the Port and Airport Research Institute*, Vol. 38, No.2 (1999).
- 10) A. Dasar, H. Hamada, Y. Sagawa and D. Yamamoto, "Deterioration Progress and Performance Reduction of 40-year-old reinforced concrete beams in natural corrosion environment." *Construction and Building Materials*, No. 147, pp. 690-704 (2017).
- 11) Rahmita Sari Rafdinal, Life-extension of RC Structure by Cathodic Protection Using Zinc Sacrificial Anode Embedded in Concrete, Doctoral Thesis of Faculty of Engineering, Kyushu University, September (2016).
<eng2599.pdf> (kyushu-u.ac.jp)
<https://doi.org/10.15017/1785399>
- 12) Pinta Astuti, A Study on Repair Strategy of Severely Damaged RC Structure by Using Sacrificial Anode Cathodic Protection, Doctoral Thesis of Faculty of Engineering, Kyushu University, September (2020).
<eng3014.pdf> (kyushu-u.ac.jp)
- 13) Rincon, Environmental Influence on Point Anode Performance in Reinforced Concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp. 494-503 (2008).
- 14) British Standards Institute, "ISO EN 12696 - Cathodic protection of steel in concrete." London: British Standards Institute (2016).
- 15) P. Astuti, R. S. Rafdinal, H. Hamada, Y. Sagawa and D. Yamamoto, "Application of sacrificial anode cathodic protection for partially repaired RC beams damaged by corrosion." 4th International Symposium on Concrete and Structures (CSN2019), Kanazawa, Japan 17-19 June 2019. Kanazawa: Kanazawa Institute of Technology, pp. 284-291 (2019).
- 16) T. Yoshida, Y. Watanabe, N. Nomura and S. Aramaki, "Cathodic Protection Range of the Embedded Sacrificial Zinc Anode for RC Member Deterioration by Carbonation and Mixed Chloride, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.19, pp. 785-795, July (2021).
- 17) G. Glass and C. Christodoulou, "Towards rendering steel reinforced concrete immune to corrosion." *Australasian Corrosion Association 2012 Annual Meeting*, Melbourne, 11-14 November 2012. New York: Red Hook, NY Curran Associates, Inc., No. 159, pp. 1-11 (2012)
- 18) G. Glass and J. R. Chadwick, "An investigation into the mechanism of protection afforded by a cathodic current and the implications for advances in the field of cathodic protection." *Corrosion Science*, Vol. 36, pp. 2193-2209 (1994).