

# 論文 各種要因が流電陽極方式電気防食工法の防食効果に与える影響の把握

橋本 永手\*1・染谷 望\*2・加藤 佳孝\*3

**要旨**：流電陽極方式電気防食は、かぶりコンクリートの性状や防食システムによって防食効果が大きく影響を受ける。本研究では模擬鉄筋コンクリート試験体を用いることで、鋼材表面の塩化物イオンと鉄筋・陽極間の電気抵抗が防食効果に与える影響を検討した。鉄筋表面に塩化物イオンが混入することにより、防食電流密度に対応する電位シフト量が減少した。また、陽極・鉄筋間の電気抵抗が大きくなることにより防食電流密度、電位シフト量はともに小さくなることが分かった。

**キーワード**：流電陽極方式電気防食, 分極量, 復極量, 防食電流密度, 分極曲線

## 1. はじめに

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物は、鉄筋腐食を生じ、腐食生成物の体積膨張圧により、かぶりコンクリートにひび割れが発生する。ひび割れを通して劣化因子が加速的に供給されるため腐食速度が増大し、鉄筋の断面減少やかぶりの剥落が生じる<sup>1)</sup>。このような劣化を防ぐ方法として、鉄筋腐食の進行抑制が可能である電気防食工法がある。

電気防食工法は、継続的な通電によりコンクリート中の鉄筋の腐食反応を電気化学的に制御することで、コンクリート構造物の耐久性を向上させることを目的とした工法である<sup>2)</sup>。電気防食工法は、電気の供給方法により外部電源方式（以下、外電）と、流電陽極方式（流電）の2つに大別される。外電は、直流電源装置を用いて鉄筋に電気を流すシステムである。一方、流電は、コンクリート表面に鉄筋よりも腐食性の高い金属を陽極として設置することで、鉄筋と陽極間で電池を形成し防食電流を供給する方法である。そのため、流電はかぶりの厚さ、飽和度、塩化物イオン濃度、および鉄筋の腐食程度等が防食効果に影響することが知られている<sup>3)</sup>。しかし、既往の研究成果を概観すると、これらの要因が複合した結

果しか得られず、各要因が防食効果に与える影響を分離できないため、構造物の劣化状況や環境条件に応じた適切な流電の選定が難しい状況にある。

本研究では、適切な流電の選定のための基礎的な検討として、模擬鉄筋コンクリート試験体<sup>4)</sup>を用いることで、鉄筋・陽極間の電気抵抗と鉄筋表面の塩分の有無を分離し、それぞれが防食効果に与える影響を把握することを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1 に試験体概要を示す。コンクリート中の細孔溶液を模擬した飽和酸化カルシウム水溶液（以下、CH溶液）に、鉄筋を浸せきさせた。アルカリ溶液中に鉄筋を浸せきさせているため、不動態皮膜が形成されていると考えられる。また、かぶりコンクリート版は普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比 55%、500 日以上の中水養生を施した試験体を 120mm×140mm×30mm に切り出した。なお、かぶりコンクリート版は、溶液と接するように設置した。鉄筋はφ16mm、長さ 140mm の磨き丸鋼を用いて、両端部にリード線を接続し、それぞ

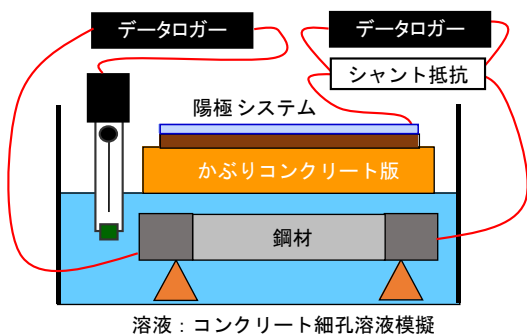


図-1 試験体概要

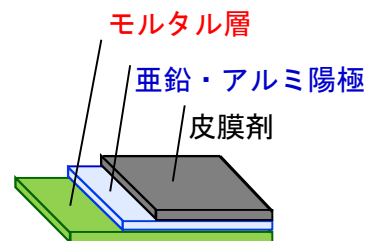


図-2 陽極システム概要

\*1 東京理科大学 理工学部土木工学科 (学生会員)

\*2 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 修(工) (学生会員)

\*3 東京理科大学 理工学部土木工学科 博(工) (正会員)

れ 20mm 程度の範囲を絶縁テープで防水処理することで、被測定面積を 50.24cm<sup>2</sup> とした。

陽極システムの概要を図-2 に示す。市販のポリマーセメントモルタルを用いて 140mm×120mm×5mm のモルタル版を作製し、亜鉛アルミ合金を厚さ 200μm で溶射した後に、皮膜材でシールした。皮膜材を施したのは、亜鉛アルミ合金の自己腐食を抑制すると同時に、合金中の細孔を埋めることで陽極性能を高めるためである。電気防食は陽極システムをかぶりコンクリート版上に設置し、鉄筋に接続したリード線と短絡させた。なお、かぶりコンクリート版と陽極システム間は、導電性ゲルを用いて接着することで接触抵抗を小さくした。

## 2.2 実験方法

流電による電気防食を 24 時間行い「電位シフト量」および「防食電流密度」、流電終了後 24 時間の静置時に「復極量」を測定した。電位変化と防食電流密度は、データロガーにより測定した。なお、防食電流密度の測定は 100Ω のシャント抵抗を用いた。鉄筋の電位測定は銀塩化銀電極を用いた。

## 2.3 実験水準

防食効果に影響する要因として、(1)鉄筋表面の塩分の有無、(2)陽極・鉄筋間の電気抵抗が挙げられる。これらの要因が流電の防食効果に与える影響を把握するため、水溶液中の塩化物イオン濃度、およびかぶりコンクリート版の飽和度を変化させた。実験水準を表-1 に示す。ここで、電気防食に影響を与える要因についてまとめる。

### (1) 鉄筋表面の塩分の有無

塩化物イオンによる鉄筋表面の不動態皮膜の有無が、防食効果に与える影響を検討するため、試験溶液は質量パーセント濃度で 1.8% となるように塩化ナトリウムを添加した。なお、試験溶液をコンクリート中の細孔溶液と見なし、コンクリートの空隙率を 10%、単位セメント量を本研究で用いたコンクリート版の配合から 318kg/m<sup>3</sup> と仮定し、既往の研究<sup>9)</sup>よりコンクリート中の全塩化物イオン濃度に換算すると 20kg/m<sup>3</sup> となる。この様に、塩分ありの水溶液に浸せきさせた鉄筋は腐食環境下にあると考えられ、実際に腐食が生じていることを確認している。

### (2) 鉄筋・陽極間の電気抵抗

かぶりの飽和度の低下により、抵抗が大きくなると考えられることから、かぶりコンクリート版の飽和度を 85、

100% (以下、乾燥版、飽和版) とした。飽和度の調整には 40°C 乾燥炉を用いた。かぶりコンクリート版の飽和度 (M<sub>i</sub>) は、試験前のかぶりコンクリート版の質量 (M<sub>0</sub>)、飽水状態の質量 (M<sub>s</sub>)、および絶乾状態の質量 (M<sub>D</sub>) を計測し、式(1)より求めた。

$$M_i = \frac{M_0 - M_D}{M_s - M_D} \times 100 \quad (1)$$

ここに、M<sub>i</sub>: 飽和度(%), M<sub>0</sub>: 試験前の質量(g), M<sub>s</sub>: 飽水質量(g), M<sub>D</sub>: 絶乾質量(g)である。

模擬鉄筋コンクリート試験体は、かぶりコンクリート版と溶液が接していることから、試験中の吸水の程度を検討した。2 日間の吸水試験の結果、飽和度は概ね 85% となり、飽和度変化も 2% 程度であった。このことから、試験期間中の吸水による電気抵抗の変化は小さいと考えられる。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 実験結果

図-3, 4 に、鉄筋電位および防食電流密度の経時変化を示す。流電は、鉄筋と陽極の電位差を起電力として通電し、鉄筋の電位が卑化することで防食される。山本ら<sup>9)</sup>は、マクロセルが発生しない環境下では、自然電位から 100mV 以上の電位シフト量の防食率は 100% に近く、50mV の電位シフト量の防食率は 50% 程度が期待できると報告している。今回の試験体はマクロセル腐食が生じていないため、この数値を参考に効果を検討する。塩分

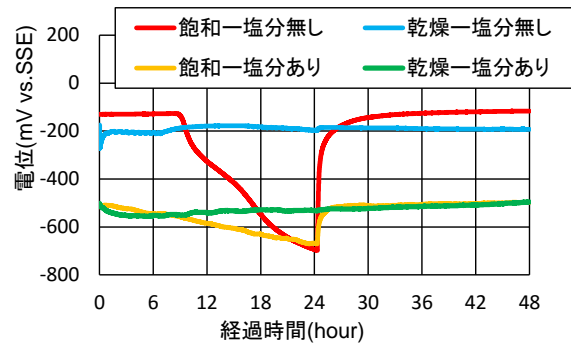


図-3 鉄筋の電位の経時変化

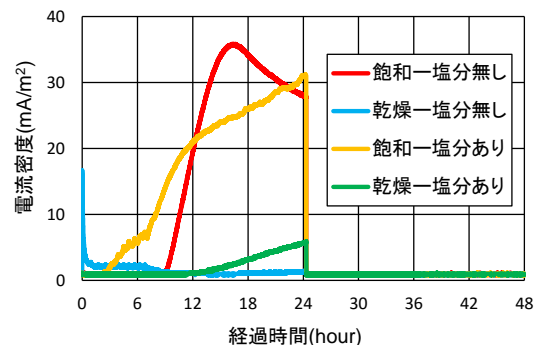


図-4 防食電流密度の経時変化

表-1 実験水準

飽和版(飽和度 100%)		乾燥版(飽和度 85%)	
塩分あり	塩分なし	塩分あり	塩分なし
(1.8kg/m <sup>3</sup> )	(0.0kg/m <sup>3</sup> )	(1.8kg/m <sup>3</sup> )	(0.0kg/m <sup>3</sup> )

なしの飽和コンクリート版の試験体は、30mA/m<sup>2</sup>程度の防食電流密度が得られ、600mV以上の卑な方向への電位シフトがあり、十分に防食効果があると考えられる。また、塩分ありの飽和コンクリート版も30mA/m<sup>2</sup>程度の防食電流密度が得られ、電位のシフト量が150mV程度となり、防食効果があると考えられる。しかし、乾燥のコンクリート版は、塩分の有無に関わらず、防食電流密度および電位シフト量ともに小さい値を示している。

### (1) 鉄筋表面の塩分の有無の影響

飽和コンクリート版の塩分の有無による電位シフト量を比較すると、塩分ありの電位シフト量は、塩分なしよりも小さくなっている。このことは、塩化物イオンの混入により、鉄筋の不動態皮膜が破壊され、アノード分極抵抗が小さくなったためと考えられる。図-5に、鉄筋のアノード分極抵抗が、電位と電流密度に与える影響を示す。塩分なしのアノード曲線は赤線、塩分ありのアノード曲線は青線とし、カソード曲線（黒線）との交点の電位を $E_{corr1}$ 、 $E_{corr2}$ とする。模擬鉄筋コンクリート試験体を用いたことにより、塩分の混入がアノード分極抵抗に与える影響のみを変化させているため、カソード分極曲線は塩分の有無に関わらず共通のものとした。図から、 $E_{corr1}$ はアノード分極抵抗が大きい貴な電位、 $E_{corr2}$ はアノード分極抵抗が小さい卑な電位となることが分かる。流電は、鉄筋の電位と陽極の電位の電位差が起電力となり防食電流を供給するため、塩分ありは鉄筋の電位が卑であることから起電力は小さくなる。また、電気防食を適用し、同一の防食電流密度が得られた場合、塩分の有無によって電位シフト量は異なることが考えられる。鉄筋の分極量 $\eta$ と防食電流密度 $i$ は式(2)のように一次関数の関係となる<sup>7)</sup>。

$$\eta = a + b \log i \quad (2)$$

ここに、 $\eta$ ：過電圧 (mV)、 $a$ 、 $b$ ：電極反応に特有な定数 (mV)、(mV/decade)、 $i$ ：電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) である。

このことから、同一の電流密度（本研究では30mA/m<sup>2</sup>程度）が得られた場合、塩分ありの電位の変化量は塩分なしと比較し小さくなる。以上のことから、図-3、4の結果で見られた同じ防食電流密度の場合、塩分を含む（分極抵抗が小さい）鉄筋は、塩分なし（分極抵抗が大きい）鉄筋と比較し電位シフト量が小さくなったと考えられる。

既往の研究より、腐食した鉄筋は電気抵抗が小さく、防食電流が流れやすい傾向にあると報告されている。しかし、本研究では腐食の有無にかかわらず同程度の防食電流密度となった（図-3参照）。このことから、防食電流密度について電流線分布の観点から考察する。図-6に、健全鉄筋（塩分なしの状況）と腐食鉄筋（塩分ありの状況）の防食電流の電流線分布を示す。腐食鉄筋に流れる防食電流は、分極抵抗の小さい錆部分に集中して流

れるため、通電面積は小さくなることが考えられる。本研究の塩分あり試験体は、腐食が発生していることから、鉄筋に流れる防食電流は鉄筋全面として求めるが、腐食部に集中して防食電流が流れており、実際の通電面積は小さくなることで、防食電流密度は過小評価されている可能性が考えられる。

### (2) 陽極・鉄筋間の電気抵抗の影響

乾燥コンクリート版を用いた水準は、塩分の有無に関わらず電位のシフト量が小さく、防食電流も非常に小さくなった。このことは、乾燥したコンクリート版は電気抵抗率が大きく、防食電流が流れにくいと考えられる。コンクリートにより生じる電気抵抗率の影響は、コンクリート抵抗 $R_s$ と、流れている電流 $I$ （防食電流）の積である $IR_s$ 分だけ電圧降下が生じることから、鉄筋に十分な防食電流が供給されないと考えられる。さらに、本研究の陽極システムは、構造物表面を皮膜材でシールしてしまうため、陽極とモルタル層界面への水分の供給は、かぶりコンクリートを經由するものに限られる。そ

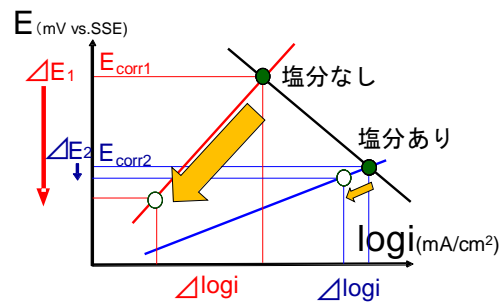


図-5 アノード分極抵抗の変化

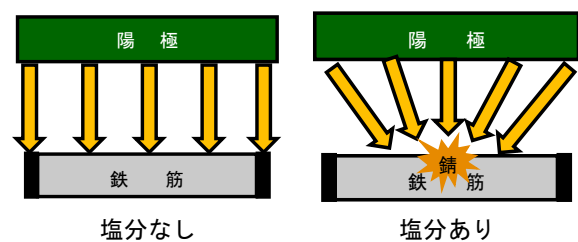


図-6 防食電流の流れ方の相違

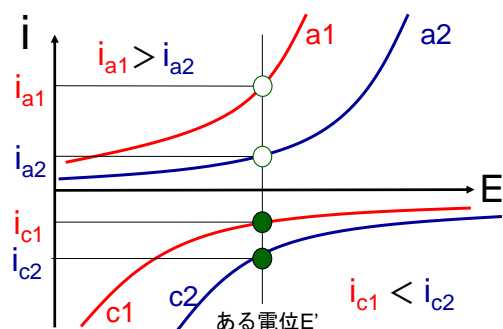
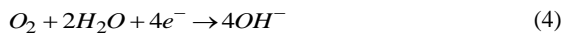
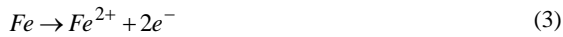


図-7 二種類の酸化還元反応の分極曲線

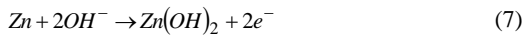
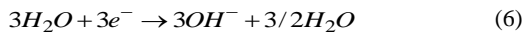
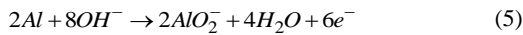
表-2 改良試験実験水準（乾燥版）

塩分有無	塩分なし				塩分あり			
モルタル種類	PCM		LiOH		PCM		LiOH	
モルタル厚さ(mm)	5	2	5	2	5	2	5	2

のため、陽極表面に水分が存在せず、陽極の腐食反応が進行しないことから防食電流が全く供給されていない可能性も考えられた。ここで、本研究で検討している陽極システムによる電気防食は、鉄の酸化、酸素の還元である式(3)および式(4)の反応に追加して、亜鉛アルミの溶解



反応（式(6)～式(8)）が同時に生じる。これらの反応は電



流密度-電位図において、分極曲線が互いに交わらないと仮定すれば、同じ電位においてアノードは貴、カソードは卑に位置する曲線の反応が卓越する。例えば、図-7に示すような2種類の酸化還元反応のみを考えると（酸化還元反応1（赤線）、2（青線））、ある電位E'においてアノード反応では反応a1が貴に位置し、カソード反応では反応c2が卑に位置する反応であることから、アノード反応はa1、カソード反応はc2が卓越する。これらのことから、式(3)～式(8)の酸化還元反応について考えると、アノード反応はアルミニウムの酸化、カソード反応では酸素の還元になると考えられる。ここで、モルタル層と陽極の間に水分が存在しない場合、陽極の反応（=溶解）が生じないため、陽極と鉄筋を短絡しても全く防食電流が供給されず、鉄筋の腐食が進行すると考えられる。

### 3.2 改良試験

#### (1) 塩分なし乾燥コンクリート版

3.1節よりPCM5mmは、乾燥したコンクリートに対して電位シフト量、通電電流密度ともに小さく防食効果が認められなかった。そこで、陽極システムのモルタル層に注目し、厚さを2mmと薄くした場合や、従来のPCMに水酸化リチウムを添加し、イオン強度を増加させることで電気抵抗を下げたモルタル<sup>8)</sup>（以下、LiOH）を用いて、乾燥したかぶりコンクリートに対する防食効果の違いを検討した。実験水準を表-2に示す。図-

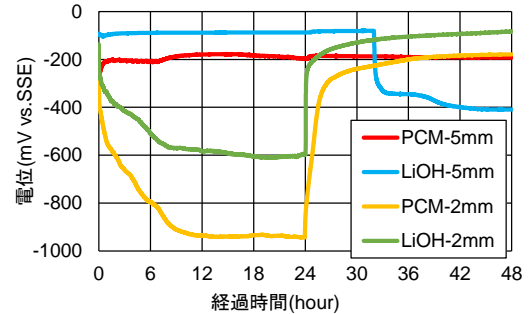


図-8 塩分なし乾燥コンクリート電位経時変化

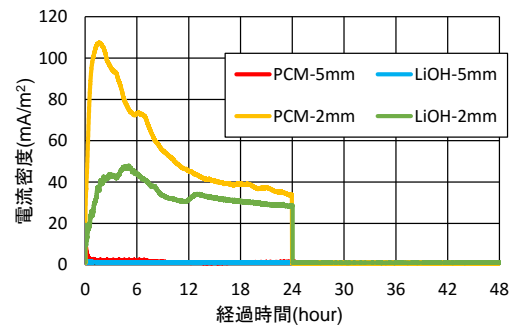


図-9 塩分なし乾燥コンクリート防食電流密度経時変化

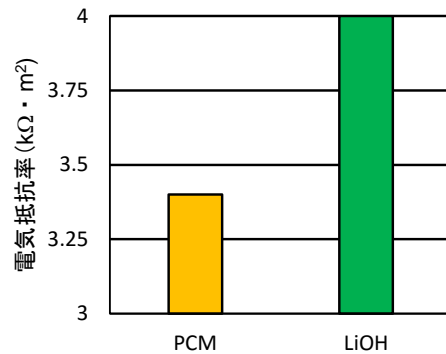


図-10 電気抵抗率測定結果

8, 9に、塩分なし乾燥版の実験結果を示す。PCM2mmは100mA/m<sup>2</sup>程度の防食電流密度が得られ、電位シフト量も600mV以上となった。LiOH2mmも40mA/m<sup>2</sup>程度の防食電流密度が得られ、電位シフト量も200mV程度となった。このことから、モルタル層の厚さは防食効果に大きく影響すると考えられ、PCM2mm、LiOH2mmはPCM5mmと比較し、防食効果が大きく改善した。なお、保水性のあるLiOHを用いたLiOH2mmは防食電流、電位シフト量ともに小さくなった。ここで、LiOHの保水

性の効果について、PCM2mm と LiOH2mm の結果から考える。PCM および LiOH の乾燥版に対して、2 電極法による電気抵抗率の測定をした。電極は 20mm×20mm の Cu 電極を用いて、200Hz における抵抗を測定した。図-10 に 2 電極法により求めた、乾燥状態の PCM2mm と LiOH2mm の電気抵抗率を示す。電気抵抗率はそれぞれ、PCM は  $3.4k\Omega\text{cm}^2$ 、LiOH は  $4.0k\Omega\text{cm}^2$  となり LiOH は電気抵抗率が大きい結果となった。このことから、乾燥状態の LiOH 版は、PCM に LiOH を加えたことで PCM 単体より電気抵抗率が大きくなり、版の抵抗による電圧降下が大きくなったため、防食電流や電位シフト量が減少したと考えられる。

## (2) 塩分あり乾燥コンクリート

図-11, 12 に、塩分あり乾燥版の結果を示す。PCM2mm は  $100\text{mA}/\text{m}^2$  程度の防食電流密度が得られ、500mV 程度の電位シフト量となった。LiOH2mm は  $20\text{mA}/\text{m}^2$  程度の防食電流密度が得られ、200mV 程度の電位シフト量も見られた。また、PCM2mm と LiOH2mm を比較すると、保水性が大きい LiOH の方が防食電流、電位シフト量ともに小さくなった。前述より、乾燥時の LiOH 版は電気抵抗率が大きいためと考えられる。なお、PCM5mm や LiOH5mm の防食効果は小さくなった。

ここで、多くの水準では分極量と同程度の復極量を得られているにもかかわらず、PCM2mm は 500mV 以上の電位シフト量を得ているが、復極は小さくなり 80mV 程度となった。これは通電期間中に鉄筋表面の環境が変化し、鉄筋の腐食電位が変化したことが原因である。このことについて、布田ら研究<sup>9)</sup>を参考に、鉄筋の分極特性から考察する。防食電流が流れている時の鉄筋（カソード）と陽極（アノード）の分極量は、線形で変化すると仮定すると式(9)、(10)が成立する。

$$E = E_c - (h_c / S_c) \cdot \log i \quad (9)$$

$$E = E_a + (h_a / S_a) \cdot \log i \quad (10)$$

ここに、 $E_a$ ：陽極の自然電位(mV)、 $E_c$ ：陰極の自然電位(mV)、 $h_a$ ：陽極の分極抵抗( $\Omega\text{m}^2$ )、 $h_c$ ：陰極の分極抵抗( $\Omega\text{m}^2$ )、 $S_a$ ：陽極の表面積( $\text{m}^2$ )、 $S_c$ ：陰極の表面積( $\text{m}^2$ ) これらを図示すると図-13 となる。図中の赤線が鉄筋（カソード）、青線が陽極（アノード）を意味する。鉄筋と陽極が短絡していない状態の電位を、鉄筋  $E_c$ 、陽極  $E_a$  とすれば、鉄筋と陽極の短絡により互いの電位は近づく。この時、コンクリートを介した回路となるため、点 A の陽極の電位にコンクリートの  $IR_s$  を加えた和と、点 B の鉄筋の電位が等しくなる電流密度  $i'$  が防食電流として流れる。この電流密度  $i'$  は、式(11)のように得ら

$$\log i' = \frac{E_c - E_a}{\frac{h_a}{S_a} + R_s + \frac{h_c}{S_c}} \quad (11)$$

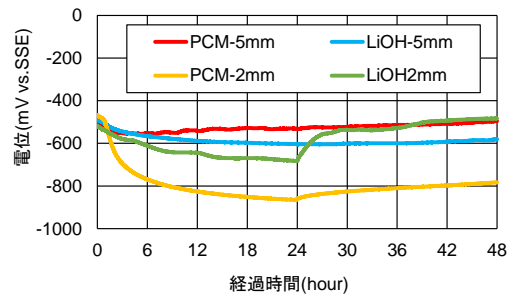


図-11 塩分あり乾燥コンクリート  
電位経時変化

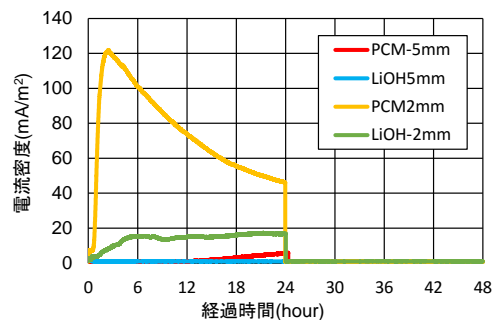


図-12 塩分あり乾燥コンクリート  
防食電流密度経時変化

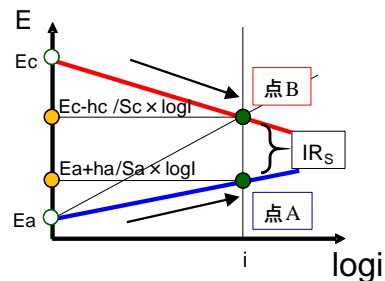


図-13 電位電流の関係

れる。

以上のことから、カソードの分極抵抗は、鉄筋の自然電位から点 B に引いた直線の傾きとなる。また、コンクリートの  $IR_s$  を無視すれば、アノード分極抵抗は陽極の自然電位から点 B に引いた直線の傾きとなる。PCM2mm の塩分ありの電位と防食電流の経時変化をプロットすると、図-14 となる。電気防食期間の電位は卑な方向に変化し、防食電流密度は小さくなった。電気防食開始直後の分極された時鉄筋の電位（図中の赤線の始点）と、電気防食されていない時の鉄筋の電位（図中鉄筋腐食電位）を結んだ直線（ $E_c$  線 1）と、電気防食の終了直前の分極された時の鉄筋の電位（図中赤線の終点）と、電気防食されていない時の鉄筋の電位を結んだ直線（ $E_c$  線 2）では、 $E_c$  線 2 の傾きが  $E_c$  線 1 と比較

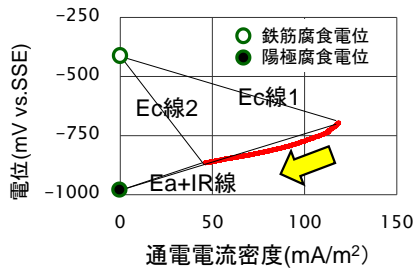


図-14 カソード分極抵抗の増加

し大きくなることから、カソード分極抵抗が増加したと考えられる。また、電気防食期間の分極された時の鉄筋の電位（赤線）と、電気防食をしていない時の陽極の電位（陽極腐食電位）を結んだ直線（Ea線）は、電気防食期間で傾きが変わらないため、アノード分極抵抗は変化していないと考えられる。カソード分極抵抗が増大すると腐食電位は卑となるため、PCM2mmでの現象と一致する。カソード分極抵抗が増加する一例として、長期的に電気防食を施したコンクリート構造物中で生じるエレクトロコーティングによる酸素の拡散障壁の生成が考えられる<sup>10)</sup>。図-15のPCM2mmの鉄筋より、鉄筋表面が白色の皮膜で覆われ、酸素の拡散障壁となっていることが考えられる。模擬鉄筋コンクリート中では、エレクトロコーティングの主成分の一つであるカルシウムイオンが多く存在するため短期間の通電でも生成したと考えられる。また、エレクトロコーティング以外の要因として、模擬鉄筋コンクリート試験体では鉄筋表面に十分な水が存在し、反応速度が速いため、溶液中の溶存酸素の消費が考えられる。溶液中の溶存酸素がカソード反応により消費されることで鋼材表面は脱気状態となり、カソード分極が増加した可能性も考えられるため、溶存酸素の影響については今後の検討が必要と考えられる。

#### 4. まとめ

1. 鉄筋表面に塩分が存在し不動態皮膜が破壊されると、得られた電流密度に対する電位シフト量が低下することが分かった。
2. 陽極・鉄筋間の電気抵抗が増加することで防食電流密度、電位シフト量ともに低下することが分かった。

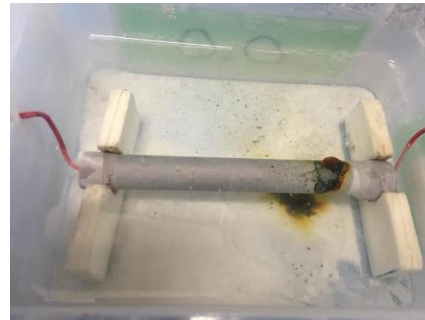


図-15 鉄筋の様子

3. 改良陽極システムとして、陽極システムを薄くすることで鉄筋・陽極間の電気抵抗が小さくなり、乾燥したかぶりコンクリート版でも防食効果を得られた。

#### 参考文献

- 1) 日本エルガード協会：コンクリート構造物の電気防食 Q&A, 2012.4.30.
- 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), p.9, 2001.11.25.
- 3) 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, 京都大学学位論文, 2015.10.
- 4) 染谷望, 加藤佳孝：模擬鉄筋コンクリートのかぶりが電気化学測定結果に与える影響の検討, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, pp.891-892, 2014.9.
- 5) 石田 哲也, Ho Thi Lan Anh：非線形固定化モデルと濃度依存型拡散則の連成による塩分浸透解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 6) 山本誠：鉄筋コンクリート構造物に用いる溶射型流電陽極方式電気防食における被膜電極の性能評価とその防食設計に関する基礎研究, 鹿児島大学学位論文, 2015.3.
- 7) 渡辺正編：基礎化学コース電気化学, 丸善, 2003.
- 8) 中村成春, 榎田佳寛, 加藤弘義, 土井宏行：水酸化カルシウム微粉末を混入したモルタル及びコンクリートの凝結及び力学特性, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.117-124, 2005.2
- 9) 布田仁美, 松田芳範, 篠田吉央, 望月紀保：コンクリート構造物における電気防食工法に関する考察, コンクリート年次論文集, vol.36, No.1pp.1186-1191, 2014.
- 10) 福沢秀刀：エレクトロコーティング（電解被覆）, 防食技術, vol36, No.10.p671-673, 1987.