

研究委員会 電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会

山口 明伸*1・加藤 佳孝*2・皆川 浩*3・審良 善和*4・福山 智子*5・吉田 隆浩*6

要旨: 本研究委員会は、各種電気化学的手法を効果的かつ持続可能な維持管理手法として活用するために必要となる技術的な情報を整理することを目的とした。報告書では、コンクリートの遮塩性の評価方法として、特に非定常法電気泳動試験を対象にラウンドロビン・テストを実施し、結果に基づき今後の展望について纏めた。鉄筋腐食の測定については、実構造物の事例を活用して留意点、熟練者のノウハウ等を取り纏めた。電気防食工法については、将来のあるべき姿としての性能照査型設計手法を提案するとともに、調査、施工、維持管理に関する技術およびその課題について取り纏めた。

キーワード: 電気化学測定、遮塩性、非定常法電気泳動、電気抵抗率、性能規定、電気防食工法

1. はじめに

既存コンクリート構造物の維持管理では、他分野で開発された技術を応用・活用する場面が増えてきている。比較的古くから活用されている技術に電気化学手法がある。本研究委員会の前身の位置付けとなる「物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会」では、各種電気化学的計測手法をコンクリート構造物に適用する際に考慮すべき物理化学的理論を体系的に整理するとともに、信頼性の高い測定の実施とその解釈方法に関するノウハウなどをとりまとめた¹⁾。この講習会を通して、コンクリート工学分野での電気化学的手法のニーズの高さを認識したが、同時に、実構造物の維持管理の場面で、より実践的・効果的に電気化学的手法を活用するための技術的な諸課題の整理と対策をとりまとめることに対するニーズが高いことも把握した。

この様な状況に鑑み、本委員会は、新たに各種電気化学的手法を効果的かつ持続可能な維持管理手法として活用するために必要となる技術的な情報を整理することを目的とし、2016年度から2年間活動した。具体的には、性能診断WGと劣化対策WGを設け、主に、遮塩性評価

手法、電気化学的手法の留意点、性能規定型の電気防食工法の設計等について検討した。本報告では、活動成果を取り纏めた報告書の概要を示すが、詳細については報告書を是非参照いただきたい。

2. コンクリートの遮塩性の評価手法

2.1 はじめに

電気化学的手法を用いたコンクリートの遮塩性評価手法としては、既に土木学会で規準化されているJSCE-G 571:電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法がある。JSCE-G 571は定常法電気泳動試験に分類される試験方法である。海外に目を転じると、NT BUILD 492: Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments, Nordtest, 1999Rといった非定常法電気泳動試験や、AASHTO T 277-89 および ASTM C 1202-91: Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) のように単にコンクリートの断面透過クーロン量により遮塩性を評価するものがある。さらには、AASHTO T358: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of

委員構成 委員長：山口明伸（鹿児島大学学術研究院）幹事長：加藤佳孝（東京理科大学）幹事：皆川浩（東北大学大学院）、審良善和（鹿児島大学学術研究院）、福山智子（立命館大学）、吉田隆浩（西日本旅客鉄道）
委員（50音順）：大谷俊介（ナカボーテック）金田尚志（日鉄住金テクノロジー）、兼松学（東京理科大学）、河合慶有（愛媛大学大学院）、佐々木巖（土木研究所）、佐々木崇（デンカ）、染谷望（港湾空港技術研究所）、竹子賢士郎（日本防蝕工業）、田中亮一（東亜建設工業）、津田崇弘（日揮）、中村英佑（土木研究所）、星芳直（東京理科大学）、宮里心一（金沢工業大学）、山本悟（日本防蝕工業）、山本誠（住友大阪セメント）

- *1 鹿児島大学学術研究院 理工学域工学系教授 博（工）（正会員）
- *2 東京理科大学 理工学部教授 博（工）（正会員）
- *3 東北大学大学院 工学研究科准教授 博（工）（正会員）
- *4 鹿児島大学学術研究院 理工学域工学系准教授 博（工）（正会員）
- *5 立命館大学 理工学部准教授 博（工）（正会員）
- *6 西日本旅客鉄道（株） 米子支社施設課課長代理 博（工）（正会員）

Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration のようにコンクリートの電気抵抗率に基づいてコンクリートの遮塩性を評価する方法もある。ここでは、これらの活用事例を収集するとともに、例えば AASHTO T358 に規定される遮塩性のグレーディングの決定プロセスに至るまでをレビューし、それらの情報を体系的に取り纏めた。

また、国内でも長らく検討されてきた非定常法電気泳動試験について、委員会内でラウンドロビン・テストを実施し、同試験の信頼性ならびに規準化に向けた課題を整理した。また、新規に制定された土木学会規準 JSCE-G 581: 四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法（案）の妥当性も併せて検証した。

最後に、電気化学的手法を用いた遮塩性評価試験の活用法の展望について示した。

2.2 電気化学的手法を用いた品質確認の事例

(1) 試験方法の種類と海外での適用事例

遮塩性に関する室内実験の概要を整理するとともに、電気化学的手法を用いた品質確認の事例として、非定常法電気泳動試験と電気抵抗率試験の活用事例を紹介する。

表-1 はコンクリートの遮塩性を評価するための試験方法の例である。報告書では、これらの試験方法の特徴、遮塩性に優れたコンクリートへの適用にあたっての留意点、海外で先行して規準化されている試験方法との関係について整理している。電気泳動試験や電気抵抗率試験は、海外では塩害環境で供用されるコンクリート構造物において、配合選定時にコンクリートの遮塩性を迅速に評価する場合や、打込み後のコンクリートの遮塩性を簡便に確認する場合に活用されている。報告書では、北米、北欧、シンガポール、中国での活用事例をについて紹介している。

(2) 米国での事例（AASHTO T358）

米国では、コンクリートの塩分浸透に対する抵抗性を

推定する方法として、AASHTO T 277-89 および ASTM C 1202-91 といった Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) が制定されている。報告書では、コンクリート中への塩化物イオンの透過性を迅速に測定する方法として空隙水中のイオンの電気泳動を利用した上記の方法のコンセプト、開発の経緯、適用性について紹介している。これらの方法は電気泳動試験によってコンクリートを通過するクーロン量（電荷量）から遮塩性を評価する方法で、遮塩性をクーロン量に応じて 5 段階で評価している。

一方、AASHTO T358 でも、コンクリート供試体の電気抵抗率に応じて遮塩性の評価を 5 水準に分けて示している。報告書では、この閾値の設定の経緯とその問題点についても説明している。端的に言えば、AASHTO T358 の閾値は、本質的には AASHTO T 277-89 で用いられている規格値に対応するように設定されており、両者の整合性が図られている。しかし、AASHTO T277-89 のグレーディング自体が、キリの良いクーロン量に基づいていること、塩分透過抵抗性をグレード分けするために使用された供試体種類は、アメリカ連邦高速道路局（FHWA）から提供された床版から抜き出したわずかに 10 種類のコア試料（各配合につき 1 試験体）であること、配合種類は水セメント比を 3 水準（0.4, 0.5, 0.6）のみであること、ラテックスやポリマーを使用したコンクリートを対象としていること、遮塩性の各グレードにおいて 1~4 ケースのデータでの検証に留まること等、十分な検証がなされているとは言い難い。したがって、当該規格値を正しく使用するためには、電気抵抗率と遮塩性を示す指標との関連性を確立することが必須であることを報告書内で指摘した。

(3) 国内の動向

前述のように、AASHTO T358 における遮塩性のグレーディングには問題があるものの、電気抵抗率によって

表-1 コンクリートの遮塩性を評価するための試験方法の例

試験方法	特徴	試験期間の目安※
浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）（JSCE-G 572）	供試体を塩化ナトリウム水溶液に一定期間浸せきし、浸せき後の供試体内部の塩化物イオン濃度分布を測定して、この濃度分布を用いて塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めて遮塩性を評価する。	3 ヶ月程度以上
電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）（JSCE-G 571）	飽水状態とした供試体に通電を行い、塩化物イオンの移動流速が一定となった時点定常状態とみなし、定常状態での塩化物イオンの実効拡散係数を求めて遮塩性を評価する。	1~3 ヶ月程度
非定常法電気泳動試験	飽水状態とした供試体に一定期間の通電を行い、通電後の供試体の割裂面に硝酸銀溶液を噴霧して塩化物イオン浸透深さを測定し、この測定値を用いて塩化物イオン拡散係数を求めて遮塩性を評価する。	数日程度
電気抵抗率試験（JSCE-G 581）	含水状態が飽水状態あるいは均一となるように調整されたコンクリートの電気抵抗率を測定し、この測定値を用いて遮塩性を間接的に評価する。	数分程度

※この試験期間は遮塩性に優れたコンクリートを想定している

コンクリートの遮塩性を評価すること自体は有用であることに変わりはない。電気抵抗率は他の遮塩性評価試験と比較して、圧倒的に簡便かつ即時的に評価結果が得られるからである。しかし、供試体を対象として電気抵抗率を測定する場合、電極の設置の仕方によって評価結果が異なってしまうことがある。これは、次式で定義されるセル定数 k を正しく適用することで解決できる。

$$k = R/\rho \quad (1)$$

ここで、 k :セル定数 (m^{-1})、 R :測定される電気抵抗 (Ω)、 ρ :電気抵抗率 (Ωm)。

このような観点から、土木学会では、従来から標準化されてきた四電極法 (JSCE-K 562) と非破壊試験として広く流通している Wenner 法 (4 プローブ法) を一つの試験規準としてまとめ、それぞれに適切なセル定数を定められるような規定を設けた試験方法を JSCE-G 581:四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法 (案) として標準化している。委員会ではこの試験方法の妥当性をラウンドロビン・テストで確認し、さらに、AASHTO T358 の遮塩性の規格値を同試験方法によって得られる電気抵抗率に換算して示した。

2.3 非定常法電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数の評価手法のラウンドロビン・テスト

(1) 非定常法電気泳動試験の特徴とラウンドロビン・テストで対象とした試験方法

JSCE-G571 にて標準化されている電気泳動試験は定常法に分類されるものであり、コンクリートを透過する Cl^- の時間変化が一定になったときの Cl^- の流速を基に塩化物イオン拡散係数を算出する。一方、非定常法はコンクリート中を Cl^- が透過する前に通電を停止し、そのときの Cl^- 浸透深さから塩化物イオン拡散係数を算出する。したがって、非定常法の方が短時間で試験結果が得られることになる。代表的な非定常法電気泳動試験としては NT BUILD 492 が知られている。しかし、NT BUILD 492 は、拡散係数を算出する際に境界条件となる塩化物イオン濃度を与える必要があり、このことが最大の課題となっていた。この課題を解決する方法として、国内で複数の通電時間で試験 (図-1) を行った供試体に対して硝酸銀溶液噴霧法を用いて通電後の供試体内部の塩化物イオン浸透深さを測定し (図-2)、塩化物イオン浸透深さの測定値と通電時間が線形関係にあると仮定して回帰分析によって K を求め (図-3)、 K を式(2)に入力して塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を算出する方法が研究²⁾されている。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} K \quad (2)$$

この方法であれば、NT BUILD 492 のような境界条件の問題が回避され、より一般性が高まると考えられる。



図-1 電気泳動セルと通電時の状況の例

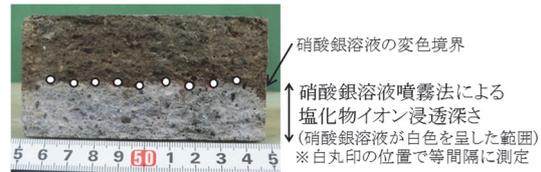


図-2 塩化物イオン浸透深さの測定例

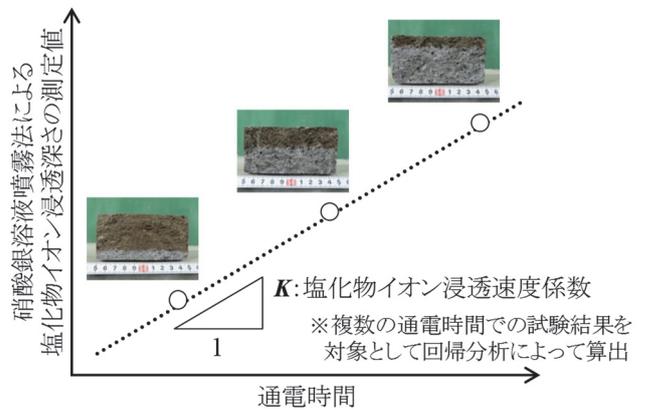


図-3 塩化物イオン浸透速度係数の求め方

(2) ラウンドロビン・テストの結果

この非定常法電気泳動セル試験の信頼性を検証するために、ある一機関で同日・同バッチで作製した複数の供試体を 6 機関に配付し、ラウンドロビン・テストを実施した。さらに、参加機関から提出された試験結果を分析し、非定常法電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数の評価に際しての留意点を抽出し、標準化に向けて規定すべき内容を整理した。

ラウンドロビン・テストに供したコンクリートの配合は、表-2 に示す 6 水準である。ラウンドロビン・テストの結果から明らかに試験手順を誤ったデータを除いて変動係数を求めたところ、水準毎の変動係数は最小で 4%、最大で 27% となり、平均すると 14% となった。既往の研究^{3),4)}によると、スランブの個人差による誤差は変動係数で評価すると 3~16%、同様に空気量の変動係数は 7~22% (空気量の平均値は) 程度である。また、同一の配 (調) 合のレディーミクストコンクリートを 1 日のうちに 15~20 m^3 毎に 1 回の割合で 15 回サンプリングし、そのサンプルに対して促進中性化試験を行い、各試

表-2 ラウンドロビン・テストの供試体の概要

結合材	細骨材	粗骨材	W/B(%)
OPC	砕砂	碎石	35
OPC	BFS	碎石	35
OPC+GGBS	BFS	碎石	35
OPC	山砂	碎石	40
OPC	山砂	碎石	50
OPC	山砂	碎石	60

OPC：普通ポルトランドセメント，GGBS：高炉スラグ微粉末，BFS：高炉スラグ細骨材

験の平均値の変動係数を評価した事例⁵⁾では、試験結果の変動係数は4.1～7.7%であることが示されている。これらを踏まえ、変動係数の観点から評価した非定常法電気泳動セル試験の信頼性は、これらの試験と同等であると確認できる。なお、既往の調査⁵⁾によって得られた中性化深さ（平均値で11～29mm）の変動係数に対して、今回のラウンドロビン・テストの塩化物イオン拡散係数の変動係数が大きめとなるケースが、特に遮塩性の高い配合で認められた。遮塩性が高いと塩分浸透深さが小さくなり（数mm～10mm程度）、塩分浸透深さの測定結果にばらつきが生じやすくなる。そのため、高い遮塩性の配合で変動係数が大きくなったと考えられた。したがって、同試験方法を規準化するには、10mm程度以上の塩分浸透深さを確保できる通電条件を設定することで、試験方法の信頼性を確保することが重要であることが認識された。

2.4 非定常法電気泳動試験と各種遮塩性評価試験の関連性

今回評価した非定常法電気泳動試験は試験期間の短縮を図ることができるとともに、塩化物イオン拡散係数を定量的に算出することが可能であり、さらに一定の信頼性も確認できたことから、今後は規準化に向けた取り組みが望まれる。しかし、規準化に向けては、他の試験方法との整合性について確認を取る必要がある。非定常法電気泳動試験は実績が浅く、十分なデータ量が蓄積されていない状況ではあるが、現存データを可能な範囲で収集して整理し、これを報告書に記載した。一般的な傾向としては、土木学会規準 JSCE-G 572 のように塩水浸せき試験から得られる拡散係数と比較して、非定常法電気泳動試験で得られる拡散係数は大きくなる傾向にある。

2.5 電気化学的手法を用いた遮塩性評価試験の活用方法の展望

今回ラウンドロビン・テストにて信頼性を評価した非定常法電気泳動試験では、拡散係数を得るための試験期間を大幅に短縮できる。特に遮塩性が高いコンクリートを評価する場合の試験期間の短縮効果は極めて大きく、浸せき法であれば数年、定常法電気泳動試験であれば数

週間から数か月かかる試験期間を数日にまで短縮することが可能になる。既存の構造物を更新するにあたっては、より耐久性が高いコンクリートが望まれることは確実であり、その場合、効率よく設計のための物性値を取得することが望まれる。非定常電気泳動試験はそのようなニーズに合致した試験方法であると思われる。

一方、コンクリートの遮塩性の日常的な品質管理にあつては、非定常電気泳動試験といっても運用コストが大きくなることは否めない。そのような場合には海外の事例にもあるように、即時的かつ極めて簡便に測定が可能な電気抵抗率を用いた管理が有用であると考えられる。その場合、電気抵抗率の測定結果をアラートの用に、品質の劣る可能性のあるコンクリートをスクリーニングして継続的にモニタリングする、あるいは、構造物の点検頻度を上げるなどして、評価結果を維持管理に利活用するといった方法が考えられる。また、品質が劣る可能性をいち早く検出できるので、使用材料や製造・施工の見直しを早期に実施でき、より確実なモノづくりのツールになると期待される。

3. コンクリート構造物に電気化学的手法を適用するときの留意点の整理

3.1 電気化学測定を行う際の一般的な留意点

自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗などの電気化学的指標はコンクリート構造物を対象に広く用いられているが、測定やデータ解釈における熟練者のノウハウは明文化されていないものが多い。また、電気化学測定は、仮に不適切な適用の場合であっても測定すればデータが得られることから、原理を理解した上で用いなければ誤った診断につながる危険がある。報告書では、この様な現状に鑑み、測定や構造物の健全性診断時の留意点を、実測結果を交え実務的・学術的観点から説明している。

実構造物を対象とした作業手順を 1) 事前準備、2) 測定時、3) データ整理時の各段階に分け、測定位置の選定の際の考慮事項や機器等の事前準備について紹介した。特に、コンクリート工学分野の技術者にとってなじみの薄い測定機器の校正、ケーブルの構成や長さ調整、端子の選択基準などは実務者にとって有益な情報になるものと思われる。また、照合電極の仕組み・電極反応を説明し、構成部品のメンテナンスの重要性と方法・原則を示すことで、データの信頼性が向上すると考えられる。

測定時のデータ変動要因としては、コンクリートへの散水や印加電圧の大きさの影響などが考えられ、測定中にも環境（温度、湿度、日射など）は変動する。測定開始時と終了時に自然電位を測定することでこのような変動の有無をチェックするテクニックがある。これは、測定対象に過大な電圧を印加することで鉄筋の状態を大き

く変えてしまっていないかの確認にもなる。

データ整理時には、季節変動や温度の影響を考慮する必要があり、セル定数もプローブと鉄筋の幾何学的配置（かぶりと鉄筋の径）により決まるため、一律にはできないことに留意する必要がある。

3.2 一般的なコンクリート構造物に電気化学的手法を適用する際の留意点

ここでいう「一般的なコンクリート構造物」とは、「補修を施していない（一様なコンクリートで構成されている）構造物」を指し、解説の対象とする電気化学的指標は、自然電位、鉄筋の分極抵抗、コンクリートの電気抵抗である。報告書では、コンクリート構造物を構成する材料を「コンクリート」と「鉄筋」に大別し、コンクリートについては、含水率、セメント種類、劣化による化学組成の変化の影響と、ひび割れなどの幾何学的な変化の影響を考慮し、実務者が留意すべき点について解説している。

また、鉄筋についてはエポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋、溶融亜鉛めっき鉄筋といった特殊な鉄筋を取り上げ、自然電位や分極抵抗を測定した事例を集めて整理し、電気化学測定の適用性について理論的な観点から本委員会の見解を示した。

3.3 一般的なコンクリート構造物を対象とした電気化学測定事例

これまでに整理してきた留意点を踏まえて、報告書では、栈橋上部工から切り出した RC 床板を具体例として用い、電気化学測定を実施する箇所を選定方法や、コンクリートへの散水時間が自然電位と分極抵抗の測定結果に与える影響について説明している。さらに、コンクリートの抵抗が非常に大きく、信頼性が低いと考えられる測定データの取り扱いについて、計測誤差や導通の有無を考慮することにより設けた閾値によるデータ整理方法についても説明を加えている。

また、プレストレストコンクリート橋への自然電位法の適用事例にもとづき、自然電位の測定結果を整理する際の留意点も示した。自然電位の測定を、夏期（約 30℃）と冬期（約 6℃）の 2 度、せん断補強鉄筋の直上のコンクリートで行った事例からは、自然電位の測定結果を整理する際には自然電位の分布形状の把握が重要であることが示唆された。

3.4 補修を施されたコンクリート構造物に電気化学的手法を適用する際の留意点

補修を施されたコンクリート構造物は、補修材と母材の電気化学的特性が異なることが多いため、多層あるいは複合材料と見なすことができる。報告書では、このような多層／複合材料を対象とした電気化学測定の事例について、まずは電気化学分野の事例を紹介し、続いて補

修材料の種類別（電荷の移動経路の違い）に留意点を解説している。

まず、複合材料として二元系合金を取り上げ、ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析）による溶解した金属イオンの定量分析手法を紹介した。また、多層材料の評価としては GD-OES（グロー放電発光分析装置）による半導体材料の深さ方向のプロファイル解析を対象としている。さらに、高抵抗材料の測定事例として 3D インピーダンス法（通常の交流インピーダンス法に時間軸情報が付加される）による鉄鋼材料の表面に形成された高抵抗クロメート皮膜の溶解とその修復速度の解析事例を示している。

コンクリート構造物の補修材料が電気化学測定を困難にしている主な原因は、補修材料に樹脂などの非導電体の材料あるいはセメント硬化体の電気抵抗率を低下させる亜硝酸リチウムなどの混和材が使用されることがあるためである。報告書では、各種補修材を複合材料（表面含浸材、繊維、防錆剤など）と多層・多相材料（断面修復材、ひび割れ注入材など）の 2 種に分類し、事例を取り上げながら、これら補修材が測定時の電荷挙動に及ぼす影響について概説した上で測定時の留意点を示している。

4. 電気化学的補修工法

4.1 はじめに

今後、劣化したコンクリート構造物の増加が懸念される中で、電気化学的補修工法の適用が増加すると考えられる。現状の電気化学的補修工法の設計施工指針⁶⁾は、ある程度確立されたものであるものの、仕様規定型の指針であるため、適用される施設や環境によっては適切な管理ができない可能性がある。さらに、電気化学的補修工法について十分な理解ができていない土木技術者が未だに多いこともあり、適用事例の増加に伴い不適切な施工や維持管理が実施される危険性が高くなることが危惧される。そこで、電気化学的補修工法のうち適用実績が最も多く、かつ将来的にも施工実績が増加する可能性の高い電気防食工法に焦点を当て、各分野（道路、鉄道、港湾、海外プラント）の構造物の特徴と電気防食工法を適用する際の留意事項について整理し、課題を抽出した。本稿では、これらの成果のうち、一般と港湾の概略を記載する。さらに、これらの課題を踏まえて、将来の電気防食工法設計のあるべき姿として性能照査型設計手法を提案するとともに、調査、施工、維持管理に関する技術について取り纏めた。

4.2 各分野における電気防食工法の考え方の違いと考慮すべき事例

(1) 一般

電気防食工法は、防食期間中に継続して防食電流を供給し続けることが基本である。なお、防食効果の判定には、防食基準として「鉄筋の電位をマイナス方向に 100 mV 以上変化させること (100 mV シフト基準)」を基本としている⁹⁾。これは、海外の基準やこれまでの実績および安全性を考慮し決定されたものである。しかし、これまでの研究報告^{例えば 7), 8)}では、厳しい腐食環境下の構造物の場合には、150~200 mV 以上の電位変化量が必要であるとの見解もある。

100 mV シフト基準を満足させるために必要な防食電流密度は、これまでの実績として、コンクリート表面積あたり 10~20 mA/m² 程度であることが多いが、本来は鉄筋の腐食状況や鉄筋量などにより適切な防食電流密度を決定する必要がある。具体的には、防食開始前に通電試験(カソード分極試験)を実施し、100 mV シフト基準を満足する電流密度を設定する方法が考えられる。しかし、得られた値は、あくまでも鉄筋近傍に埋め込まれる照合電極位置で確認されるものであり、それによって構造物全体の防食状態を確認できたとは言い難く、部材形状や環境条件等の違いによる電流分布のばらつきを考慮して、例えば複数の位置に照合電極を設置し、これらの結果を総合して防食状態を確認する等の対応が必要である。また、防食電流を対象範囲内の鉄筋へ均一に供給するためには、陽極やディストリビュータの配置、回路の面積、通電点および配流点の配置などの電気防食回路を適切に設計することが重要となる。なお、防食電流密度の増加は、直流電源や陽極などに負荷を与えたとともに、**図-4**に示すようなアノードプロダクトの発生など、陽極システムの著しい性能低下を招く恐れがあるため、適切な電流管理が必要となる。

(2) 港湾

港湾構造物は、非常に厳しい環塩害境下に置かれるため、長期間安全性を確保するためには鉄筋を防食することが極めて重要である。一般的に、海洋コンクリート構造物に電気防食工法を適用する場合は、常時大気中の構造物に対しては外部電源方式を、常時海水中の構造物に対しては流電陽極方式を適用することが標準である⁹⁾。港湾構造物への電気防食工法の適用実績は、橋梁および栈橋がほとんどであるとともに、海上に建設される構造物であるため、維持管理を行う上で第三者に対する影響は少なく、鉄筋腐食に伴う構造性能の低下を防ぐための対策として用いられることがほとんどである。したがって、ある程度劣化が進行した構造物に対して、塩害対策の最終手段として電気防食工法が適用されるケースが多い。



図-4 線状陽極に発生したアノードプロダクト

ここでは、港湾構造物特有の問題に対して、電気防食工法を適用する際の注意事項、設計および維持管理上の留意点と課題を整理した。特有の条件としては、海水(波浪を含む)の作用を直接受けること、また、コンクリート構造物が潮位変動の影響を受ける干満帯に設置される場合があることである。

a) 高い耐久性を有する陽極システムの選定

海水作用を受ける構造物であるため腐食性の高い環境下での通電となり、また、波浪による衝撃や漂流物の衝突等による配管・配線等の脱落に対する対策も必要で、これらを考慮した耐久性の高い陽極システムを選定し施工する必要がある。

b) 環境差による電気防食システムの回路分け

電気防食の適用範囲が飛沫帯から干満帯にまたがる場合に同一回路で防食電流を供給すると、コンクリートの含水率が高い範囲(抵抗の低い範囲)に防食電流は集中し、コンクリートの含水率が低い範囲(抵抗の高い範囲)の防食効果は低下する。そのため、飛沫帯と干満帯とで回路を分割し、それぞれ独立した直流電源装置によって防食電流を供給する方法が取られる。

c) 下部鋼構造物の影響

下部工(鋼管杭・鋼矢板など)には、アルミニウム合金陽極を用いた流電陽極方式電気防食が適用されているため、干満帯のコンクリート中铁筋には、没水時に犠牲陽極からの防食電流が流入することになる。この流入電流によって防食効果が向上することが実験的に確認されているが¹⁰⁾、一方で、電気防食工法を適用したコンクリート構造物の点検では、アルミ合金陽極から流入する電流によって復極量などを正確に測定できない場合があるため注意が必要である。

d) 湿潤環境下(干満帯含む)における防食基準

コンクリートが湿潤状態にある場合、復極に必要な酸素の供給が遅いため、復極するまでに長時間を要する。そのため、点検で通常実施されている通電停止後 24 時間の電位では自然電位まで復極できていないことが多く、その場合は 24 時間後の測定結果で防食効果を正しく評価できなくなる。完全に復極するまでの時間を確保する方法も考えられるが、必要な通電中断期間が数か月に及

ぶこともあり現実的には困難を伴う。したがって、このような場合には、復極量以外の何らかの指標を用いて防食効果を評価する必要がある。復極量以外の指標としては次のような研究報告等がある。山本ら¹¹⁾は、「鉄筋電位を-850 mV vs CSE よりも卑」で管理することで防食効果が得られることを確認し、また実構造物において同基準と「復極量-100 mV 以上」を併用することで防食効果が得られたことを報告している。また、小林ら¹²⁾は、「インスタントオフ電位が-650 mV vs SSE (おおよそ-770 mV vs CSE) 以下」という評価基準が有効であることを示している。なお、ISO 規格¹³⁾では、湿潤環境の防食判定基準として「-790mV vs CSE 以下」が設けられている。

いずれにしても、鉄筋電位の測定値を用いて防食効果を評価する場合には、電位を測定するための照合電極の信頼性が重要となるため、照合電極の点検方法が重要となる。今後も湿潤環境下における防食基準に関する検討事例の蓄積および検証は必要と考えられるが、実効的な維持管理を実践するためにも照合電極の点検手法の確立が望まれる。

4.3 性能照査型設計に向けた一提案

(1) 腐食速度論を用いた性能照査型設計手法

コンクリート中鉄筋の腐食および電気防食については、図-5 に示すコンクリート中鉄筋の電流密度 (i) と電位 (E) の関係 (Evans 図) を用いて説明することができる。自然腐食状態では、自然電位 (E_{corr}) でアノードとカソードの電流密度 (i_{corr}) が釣り合う状態にあり、Evans 図ではアノード分極曲線とカソード分極曲線の交点となる。この電流は内部電流と呼ばれ、鉄筋表面でやり取りされる電流である。したがって、この交わる点によって、自然電位 (E_{corr}) および腐食速度 (電流密度 (i_{corr})) を求めることができる。一方、電気防食 (カソード防食) 適用時は、陰極側に分極させることになる。現在の電気防食では、通電試験により得られるカソード分極曲線から、100mV シフト基準を満足する電流量を設定し通電することになるが、電気防食時の腐食速度は図中に示すアノード分極曲線の電気防食時の電位との交点により求めることができる。

現状の電気防食工法の設計では、前述したとおり電位変化量 100 mV の仕様を満たすように運用しているが、これは、電気防食工法適用時点の鉄筋の腐食速度を基準として腐食速度を低減させる方法である。本来、コンクリート構造物は、設計耐用期間にわたり安全性や使用性等の要求性能を満足するように維持管理されるべきである。これは性能規定に基づく考え方であり、塩害の場合、構造物の設計耐用期間中の鉄筋の腐食量が、構造物の重要度、維持管理区分等を考慮して予め設定した腐食限界量を上回らないように維持管理することを意味する。し

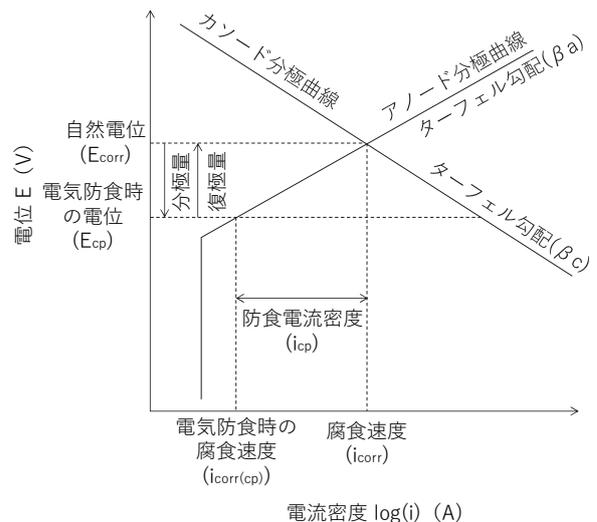


図-5 電流密度と電位の関係

たがって、電気防食工法の設計を性能規定化する場合、防食電流を供給することで、設計耐用期間中の鉄筋の腐食量が腐食限界量を上回らないよう、鉄筋の腐食速度を適切に制御すればよいことになる。性能照査型設計が実現すれば、現状の 100 mV の電位変化量といった仕様規定にしばられることなく、多様な電気防食設計手法を取り入れることができる。なお、設計耐用期間終了時点での鉄筋の腐食量は、構造物の供用期間中の鉄筋の腐食量の累積であり、式(3)で示す Faraday の法則から求めることができる。

$$\Delta W = \frac{i \cdot S \cdot \Delta t \cdot M}{n \cdot F} \quad (3)$$

ここに、 ΔW : 腐食減量 (g), i : 電流密度 (A/cm^2), S : 鉄筋表面積 (cm^2), Δt : 期間 (s), M : 鉄の原子量 (55.85 g/mol), n : 価数 (2 eq/mol), F : ファラデー定数 (96500 A-s/eq) である。この腐食減量は、腐食反応にともなう電流密度と供用期間の関数として表され、電流密度は腐食速度と等価である。そのため、設計耐用期間終了時点で鉄筋の腐食量を限界腐食量以下にするためには、供用期間にわたり鉄筋の腐食速度を設計値以下に制御すればよい。

設計では、調査等によって得られる構造物の腐食速度 (i_{corr}) と、電気防食時の腐食速度の設計値 ($i_{corr(cp)}$) およびコンクリート中鉄筋のアノードターフェル勾配 (β_a) を設定することで、防食に必要な電流量および分極量を求めることができる。なお、電気防食時の分極量または復極量は式(4)により求めることができる。

$$\Delta E = \beta_a \cdot \log_{10}(i_{corr}/i_{corr(cp)}) \quad (4)$$

ここに、 ΔE ：必要な分極量 (V)、 β_a ：アノードターフェル勾配 (V/decade)、 i_{corr} ：鉄筋の腐食速度 (A/m^2)、 $i_{corr(ep)}$ ：電気防食適用時の腐食速度の設計値 (A/m^2) である。

表-3 に電気防食工法における現行の仕様規定型設計法と性能照査型設計法に移行した場合の利点および課題の例を示す。電気防食工法を性能規定に移行することで、電気防食システムの劣化も抑制され、これまで以上に経済的かつ効率の良い電気防食を長期間にわたって運用できる可能性がある。しかし、コンクリート中鉄筋の腐食の進行は、温度や湿度、水分や塩化物イオン等の供給など環境からの作用力によって異なり、たとえ同じ構造物であっても一定にはならない。そのため、コンクリート構造物の設計耐用期間にわたって鉄筋腐食量が限界腐食量以下であることを満足させることに加え、経済性も考慮して電気防食システムにかかる負荷を低減させる設計（例えば、回路分け、陽極面積（間隔）、防食電流密度、モニタリング位置など）を実現することは容易ではない。また、当然ながら、高度な電気化学の知識と経験が必要となるため、これまで通りの復極量による合否判定による管理だけでは不十分な場合も想定される。

(2) 性能照査型設計を実現するための技術的課題

実際のコンクリート構造物中の鉄筋の腐食速度は均一でない。そのため、電気防食時の腐食速度の設計値は、電気防食が適用される範囲で最大の腐食速度に基づいて設定する必要がある。したがって、電気防食工法の適用範囲内における鉄筋の腐食速度の分布を把握することが重要であり、適切な事前調査の方法を定める必要がある。

式(4)によって「必要な分極量」 ΔE を設定するためには、アノードターフェル勾配 β_a が必要であるが、既往の研究成果⁸⁾等によれば、 β_a は 100~250 mV/decade の範囲にあるとされている。現状の 100 mV シフト基準で考えると、 β_a が 100 mV/decade であれば防食率 90%の比較的高い防食効果が得られていることになるが、 β_a が 250 mV/decade の場合には防食率は 60%まで低減することになる。したがって、性能照査型設計のためには、必要な分極量の設定に大きく影響するコンクリート構造物中の鉄筋のアノードターフェル勾配を求める方法を規準化するなどの対応も必要となる。

性能照査型設計を実現するための技術的課題は多いが、電気防食工法は補修工法の中で唯一鉄筋の腐食を制御できる技術であり、膨大なインフラストックの実効的維持管理手法の確立のためには、今回提案したような性能規定型の設計手法の確立が望まれる。そのためには、個々の技術を精査するだけでなく、設計に用いる特性値や限界値、安全係数の考え方を明確にする必要がある。

(3) 通電時の維持管理

一般的な防食管理は、コンクリート内部に設置された

表-3 電気防食工法における仕様規定型設計法と性能照査型設計法の比較

仕様規定型設計法	性能照査型設計法
<p>[利点]</p> <ul style="list-style-type: none"> 100mV の電位変化量によって防食の可否を判定するため、わずらわしさが無い。 	<p>[利点]</p> <ul style="list-style-type: none"> 通電期間中にわたり鉄筋の腐食速度を電気防食によって制御することができる。 要求性能に応じた電気防食システムを構築することができる。
<p>[課題]</p> <ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の腐食状態にかかわらず 100mV の電位変化量を得るための防食電流を供給してしまう。 通電時の腐食速度を定量的に評価することはできない。 	<p>[課題]</p> <ul style="list-style-type: none"> 構造物の腐食速度を適切に設定しなければならない。 専門性が高度化し、設計・管理が複雑化する。 適切な位置（腐食が厳しい位置）での防食管理が必要である。

照合電極でモニタリングした鉄筋の電位に基づいて行われる。しかし多くの場合、照合電極は、鉄筋裏までは取り取った後の内部鉄筋に固定されるため、断面修復によって不動態化し腐食環境が大幅に改善された鉄筋の状態をモニタリングすることで、構造物全体の防食管理がなされていることになる。当然ながら、モニタリング対象の鉄筋は、腐食環境にある既存コンクリート内の鉄筋とは異なる挙動を示し、鉄筋の分極量は大きめに、また、インスタントオフ電位も貴側に評価される可能性がある。この問題を回避するためには、鉄筋周辺の環境を乱さない状況下でのモニタリングが理想であるが、断面修復部に照合電極を設置しなければならない場合は、少なくとも既存コンクリートとの界面にできるだけ近い位置に設置し、既存コンクリート内部の鉄筋をモニタリングすることで防食管理を行うことが重要であると考えられる。

電気防食工法適用後の維持管理は、コンクリート構造物に要求される性能を維持することを目的に維持管理計画を策定し、定期的にコンクリート構造物の外観や鉄筋の防食効果、電気防食装置の確認を行う必要があり、それらの点検結果は記録、保存しなければならない。電気防食の点検は、専門家により有償で行われることが多く、構造物の管理者の都合により、文献⁹⁾で推奨する頻度（1年目は季節ごとに4回/年、2~3年目に1回の頻度）では行えない場合がある。点検の頻度を画一的に定めておくことは、実務では一つの有効な手段であると思われる

が、重要なことは設計耐用期間にわたりコンクリート構造物の要求性能を満足することであり、構造物の重要度、維持管理区分、環境作用、耐久性等を考慮し、構造物の管理者にとって適切な点検頻度を設定することも可能である。一方、内部鉄筋の状態に応じて点検頻度を設定する考え方もあり得る。例えば、適切な電気防食管理を行った場合、鉄筋の再不動態化に伴って、電気防食適用初期に比べて経時的に鉄筋のオフ電位が貴化する傾向にあることが知られている。大気環境中（溶存酸素が鉄筋へ供給される環境）の電気防食による鉄筋の再不動態化は、鉄筋表面におけるカソード反応により水酸化物イオンが生成されて pH が上昇することと、塩化物イオンが陽極側へ移動して鉄筋表面の濃度が低下するといった鉄筋近傍の環境改善効果によるものと考えられている。その結果、必要とされる防食電流密度が小さくなり、電気防食システム（陽極や陽極周りのモルタルなど）の劣化を抑えることができる。このような場合は、状況に応じて点検の頻度を変更することも可能であると考えられる。いずれにしても、電気防食工法の採用にあたっては、運用後の適切な時期に点検を行う維持管理が重要となる。

性能規定に基づき電気防食を維持管理する場合、点検時に電気防食時の鉄筋の腐食速度を測定し、設計耐用期間終了時に鉄筋の腐食限界量以下になっていることを確認する必要がある。しかし、電気防食時の鉄筋の腐食速度の測定は、それに適した機器や専門知識が必要であり、測定を専門者に頼らざるを得ない状況にある。そこで、合理的な点検診断システムを構築するためには、設計時に設定した防食時の腐食速度を満足する電気変化量を決定し、現行の電気変化量（復極量）をもとにした判定によって防食性能を評価し、復極量で評価できない場合にのみ電気防食時の鉄筋の腐食速度を測定することとする維持管理方法が現実的であると考えられる。通電時の腐食速度の評価方法に関しては、未だ確立されていないが、文献¹⁵⁾のように、直流電源装置を用いて鉄筋の分極曲線を測定することで、電気防食時の鉄筋の腐食速度を推定できるとする報告もある。これは、カソード側からアノード側まで電位を掃引させて分極曲線を得る方法であり、アノードのターフェル直線とインスタントオフ電位の交点から電気防食適用時の腐食速度を推定するものである。いずれにしても、このような新しい手法が確立されれば、電位変化量による管理と電気防食時の鉄筋の腐食速度による管理を併用した維持管理方法も可能となる。

5. おわりに

本研究委員会では、委員会名称に掲げたように、コンクリート構造物の実効的維持管理手法の確立をめざし、電気化学的手法に着目し検討した。遮塩性の評価および

性能規定型の電気防食工法では、今後、進むべき方向やそのために必要となる技術的な課題を示すことができたと思う。また、現状の維持管理でも活用されている自然電位法に代表されるような電気化学的手法については、実構造物での計測事例等を活用して計測前、計測時、計測結果の活用場面での留意点、特に、熟練者のノウハウを報告書にとりまとめており、今すぐに実務で活用されることが期待される。ただし、現状で一般的に用いられている手法だけでは必ずしも必要十分な情報を得られるとは限らず、この問題の解決は容易なことではない。このような状況に鑑み、他分野で活用されている電気化学的手法等についても報告書に取り纏めており、今後の技術開発の参考にして頂ければ幸いである。

なお、本研究委員会の成果報告会は、関連論文のシンポジウムと併せて、2018年9月21日（金）、千代田区立内幸町ホールにて開催予定である。

最後に、本報告書を取り纏めるに当たりご協力いただいた各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会報告書、DVD、2015
- 2) 中村英佑，皆川浩，宮本慎太郎，久田真，古賀裕久，渡辺博志：通電後の塩化物イオン浸透深さをを用いたコンクリートの遮塩性能の評価，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.72，No. 3，pp.304-322，2016
- 3) 竹田宣典，十河茂幸：スランプおよび空気量試験における誤差に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部，Vol.40，pp.21-22，1985
- 4) （財）建材試験センター中央試験所：工業標準化法 JNLA 制度における測定の不確かさの推定及び技能試験用試料開発に係る調査 委託業務成果報告書，2005
- 5) 押田文雄，和泉意登志：コンクリートの中性化深さのばらつきについて，日本建築学会大会学術講演概要集（近畿），pp.251-252，1987
- 6) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー107，2001
- 7) 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.139-159，1994
- 8) 武若耕司，馬庭秀士：コンクリート構造物の塩害対策における電気防食の適用性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.13，No.1，pp.573-578，1991
- 9) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造

- 物の防食指針（案）－改訂版－，JCI-R1，1990
- 10) 上野萌，山本悟，石井浩司，関博：干満帯における鉄筋コンクリート部材の電気防食効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1163-1168，2011
 - 11) 山本悟，田代賢吉，立林喜子，石井浩司，関博：湿潤環境下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 卷，第 3 号，pp.1-11，2011
 - 12) 小林浩之，山路徹，審良善和，大谷俊介，濱田秀則：湿潤環境下における RC 電気防食基準への電位の適用に関する基礎的検討，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 14 卷，pp.7-10，2014
 - 13) ISO 12696:2012, Cathodic protection of steel in concrete.
 - 14) 審良善和，山路徹，小林浩之：干満帯に長期暴露したコンクリート中鉄筋の分極特性，材料と環境討論会，2011
 - 15) 板屋隼人，大谷俊介，若林徹，望月紀保：電気防食化におけるモルタル中鉄筋の腐食速度評価に関する検討，土木学会第 72 回年次学術講演会，pp.1179～1180，2017