コンクリート中鉄筋のカソード防食について

望 月 紀 保*

* 株式会社 ナカボーテック

Cathodic Protection for Rebars in Concrete

Noriyasu Mochizuki*

* Nakabohtec Corrosion Protecting Co., Ltd.

There has been a growing demand of cathodic protection (CP) for the rehabilitation of salt damaged concrete structures. A brief introduction is given for the major CP systems used for concrete structure and the criteria of protection. In the present paper discussion is also given on the mechanism of protection, materials flow and electrical conduction within concrete, a solid system with low mobility and high electrical resistivity placed in atmosphere.

Cathodic polarization protects steel reinforcement not only by shifting the metal potential in cathodic direction but also by modifying the environment factors favorable for steel protection such as an increase in pH and a decrease in chloride ion in the vicinity of metal surface resulting in protection conditions that satisfy the criteria. The environmental modification is thought to be the principal effect of CP.

It is not seldom in concrete CP that a system that has been in operation below the criteria in the early stage would be changed to be satisfactory after long run owing to the modified environments. It is thus required to establish design and maintenance criteria in consideration of chronic changes.

Key words : concrete, cathodic protection, cathodic protection mechanism, pH, chloride-ion concentration, Nernst-Planck relation

1. は じ め に

コンクリート中鉄筋の塩害に対して 1960 年代当初米国において行われた補修(防食)対策は、劣化部のはつり⇒鉄筋の除錆と防錆処理⇒モルタル復旧⇒塗装である。この手法は、施工技術や補修材料の改善改良を進めながら現在も行われているが、当初の補修は打ち継ぎ面の剥離や補修部と非補修部間における新たなマクロセル腐食の発生などにより、多少の延命効果はあったものの塩分を取り込んだコンクリート中鉄筋の腐食の進行を止めることは非常に困難で、数年後に再度手直しという補修工事が繰り返し行われた。

カソード防食を実構造物に対して最初に適用したのは Stratfull¹⁾ で、1973 年カリフォルニアの実橋で実施した。この時の方法は、導電性被覆方式と呼ばれ、床板上に高ケイ素鉄電極を分散配置し、その上に厚さ 50 mm の導電性アスファルトを敷き詰めたものである。同時期、エポキシ塗装鉄筋²⁾ やインヒビター³⁾ による防食方法も試みられたが、腐食の進行を止める決定的な方法にはならず、FHWA (Federal Highway Administration) は 1982 年、「塩分量の如何にかかわらず、塩分で汚染された鉄筋コンクリート橋床版の腐食を止めることが確認された唯一の補修方法はカソード防食である」との公式見解を出した⁴⁾。コンクリート中鉄筋に対する防食方法としてカソード防食法は公的に認知され、溝切り非被覆方式⁵⁾ や導電性塗料方式⁶⁾ など各種方法が出現したが、1984 年チタン系網目状陽極が開発 (1985 年に適用⁶⁾) されてからは、コンクリート表面をチタン系網目状電極 (Ti 表面

に IrO₂ などを主成分とする複合酸化物層をコーティングした酸化物電極、以後 MMO (Mixed Metal Oxide) 電極と称する) で覆い、セメントコンクリートまたはポリマーコンクリートでオーバーレイする方法 (チタンメッシュ電極法) が主流となり、適用件数も急激に増加した。

日本においては、1986 年 (米国に遅れること約 10 年) に初のカソード防食試験施工が新潟県の実橋に対して行われた (旧建設省)⁶⁾。方式は、外部電源導電モルタル方式、外部電源導電塗料方式の 2 方式である。現在、我が国のカソード防食施工実績は、コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会の調査⁷⁾ によれば、2008 年の時点で 382 件、208 千 m² で、施工件数も増加傾向にあるのが現状である。

本稿では、はじめに現在適用されている主なカソード防食方式と防食効果の判定基準を紹介し、その後、コンクリート環境下におけるカソード防食特性について、従来の中性環境下に適用されているカソード防食法に対する考え方と対比して解説する。

2. カソード防食方式の特徴と防食効果判定基準

現在適用されている主なカソード防食方式とその特徴を表 1⁸⁾ に示す。主流は外部電源方式で、現場の立地条件や鉄筋の腐食状況に合わせて適当な方式が選択されている。陽極は MMO 電極が使われることが多い。流電陽極法は Zn および Al 陽極をバックフィルを介してコンクリート表面に取り付ける方法が取られている。バックフィルは、陽極界面の水分を保持し陽極の低電位、低分極特性を維持するためのものである。直感的には、コンクリートは高抵抗環境であるため、流電陽極法の適用が困難なようにも思えるが、十分適用は可能である⁹⁾。

例えば、コンクリート表面に流電陽極材を面電極とし

* 〒362-0052 上尾市中新井 417-16 (417-16, Nakaarai, Ageo, 362-0052 Japan)

表1 コンクリート構造物に適用される主なカソード防食方式とその特徴

方式の名称と概念図	施工概要	特徴
<p>【チタンメッシュ陽極方式】</p>	陽極設置面の下地処理 ↓ チタンメッシュ陽極の取り付け ↓ チタンメッシュ間をチタンバーで結線 ↓ オーバーレイ材による被覆 ↓ 陽極および鉄筋を電源装置に配線接続	①防食電流分布が均一 ②電極が高耐久性 ③美観に優れる ④被覆材により死荷重が増加する ⑤陽極の適用電流密度に対する配慮が必要
<p>【チタン溶射方式】</p>	陽極設置面の下地処理 ↓ チタン溶射 ↓ 溶射皮膜および鉄筋を電源装置に配線接続 ↓ 一定電圧を印加した状態でチタン表面に触媒液を塗布し、チタン表面を酸化物電極とする	①防食電流分布が均一 ②電極が高耐久性 ③美観上の上塗り塗装も可能 ④死荷重の増加がない ⑤複雑な構造物にも適用できる ⑥陽極の適用電流密度に対する配慮が必要
<p>【チタンリボンメッシュ陽極方式】</p>	所定の間隔でコンクリート表面に陽極設置用の溝切りを行い、溝中にリボン陽極を設置 ↓ リボン陽極間をチタンバーで結線 ↓ 溝をセメント系モルタルで充填 ↓ 陽極および鉄筋を電源装置に配線接続	①鉄筋配置に応じた陽極設置が可能である。 ②電極が高耐久性 ③陽極の浮きやはく離の危険性が少ない。 ④施工性に優れ死荷重の増加が少ない ⑤コンクリート表面の下地処理が不要 ⑥陽極の適用電流密度に対する配慮が必要
<p>【チタンロッド方式】</p>	陽極取り付け位置に孔を開ける ↓ 孔の内部にバックフィル材とチタンロッド陽極を挿入 ↓ 各チタンロッド陽極をチタンワイヤーで結線 ↓ 陽極および鉄筋を電源装置に接続	①局所的な防食および内部鉄筋の防食に効果的である。 ②コンクリート表面の下地処理が不要 ③陽極の施工が比較的容易である。 ④死荷重の増加がない ⑤電極が高耐久性 ⑥陽極の適用電流密度に対する配慮が必要
<p>【亜鉛陽極方式】</p>	防食板取り付け位置を決定し、アンカーボルトを設置 ↓ 保護板、Znシート、バックフィルから構成されている防食板をアンカーボルトおよびボルトキャップで固定 ↓ 陽極と鉄筋の短絡	①電源装置が不要 ②防食電流分布が良好 ③陽極の電気化学特性が安定している ④陽極近接部のコンクリートに対する中性化の影響が小さい ⑤表面塗装が施されている場合を除きコンクリート表面の下地処理が不要 ⑥死荷重が増加する ⑦美観的に劣る
<p>【アルミ陽極方式】</p>	防食板取り付け用レール(アルミ製)をコンクリート表面に設置 ↓ Alシートと電解ジェルから構成されている防食板をレールにリベットで固定 ↓ 陽極と鉄筋の短絡	①電源装置が不要 ②防食電流分布が良好 ③陽極の電気化学特性が安定している ④陽極近接部のコンクリートに対する中性化の影響が小さい ⑤表面塗装が施されている場合を除きコンクリート表面の下地処理が不要 ⑥Zn陽極方式より死荷重の増加が少ない ⑦複雑な形状への対応が難しい

表2 各種団体により規格化されたカソード防食に関する適用基準

制定機関	土木学会	NACE	ISO
規格の名称	電気化学的防食工法 設計施工指針（案）	NACE Standard RP0290-2000	ISO/DIS12696（EN12696：2000）
制定年度	2001年11月	2000年6月	2005年9月
適用範囲	・コンクリート構造物の塩害・中性化による腐食防止対策 ・干満帯部を含む大気中にあるコンクリート構造物 ・新設構造物の予防保全対策	・大気中に暴露された既設・新設のコンクリート構造物（PC構造物を除く）	・大気中に暴露された既設・新設のコンクリート構造物（PC構造物を含む） ・鉄筋は有機系の被覆材の有無に関係なく適用可能
防食方式	外部電源方式，流電陽極方式	外部電源方式に限定	外部電源方式，流電陽極方式
防食基準	・防食電流を流す前の電位に対し，100mV以上卑方向に電位変化させる ・PC鋼材は下限電位を-1000mV（CSE）とする	・通電前の電位が最も卑な部分で，0.1V以上の分極または復極 ・復極後の電位が-200mV（CSE）より貴電位の場合，鉄筋は不動態化しているため0.1V分極（復極）基準は要求されない ・E-logI試験（分極曲線測定）が，初期防食電流の決定に使われる	・24時間以内の復極量が100mV以上 ・24時間を越える長期間（一般的には7日以上）の復極量が150mV以上 ・-720mV [*] より卑電位 ・普通鉄筋は-1100mV [*] ，PC鋼材は-900mV [*] を下限電位とする。

*) Ag/AgCl/0.5MKCl 基準電位

て適用した場合，陽極/鉄筋間の極間抵抗は平板電極間の抵抗として近似できるため，コンクリート抵抗率が20 000 Ω cm，鉄筋のかぶり厚さが5 cmの場合，1 m²当たりの極間抵抗は10 Ω である．コンクリート中鉄筋の防食電流密度としては大きい値である30 mA/m²を通電しても極間抵抗によるオーム損は300 mVで，後述するカソード分極による電圧消費（100 mV分極）を加えても400 mVである．このことは，流電陽極材のアノード分極を適度に抑制できれば，印加電圧（防食対象物と流電陽極材の自然電位の差が）数百 mV程度でカソード防食が可能であるということを意味し，流電陽極法の適用が可能であることが分かる．

実際適用されている流電陽極法は，陽極近傍の保水性を確保し，アノード分極を抑制する処置が施されているため，大気中のコンクリート構造物に対するカソード防食法としては理にかなった方法で，過酷な塩害条件下では流電陽極法の方が優れていると考えることもできる．

外部電源法における主たる陽極の分極低減対策は，チタンメッシュ方式やチタン溶射方式などに代表される陽極面積の増大による低電流密度化である．大気環境下における通電では，過剰な電流密度は陽極近傍の水分の枯渇を招く恐れがあるため，おおむね20～30 mA/m²以下の仕様^{10) - 12)}が定められている．外部電源方式の場合，防食対象物のみならず陽極の電位管理にも注意を払う必要がある．

防食効果の判定基準は，表2に示すように種々の団体^{10) - 12)}によって規格化されているが，いずれの規格にも共通な評価基準は復極量管理（「復極量100 mV以上」）である．これは，コンクリート中鉄筋の場合，ステンレス鋼などと同様，防食電位に環境依存性があるため絶対電位での管理が難しいことが主たる理由と考えられる．具体的には，日本の場合，主に土木学会基準が適用されており，図1に示すように，防食電流オフ直後の電位（インスタントオフ電位）とオフ24時間後の電位の差が

図1 通電オフ時の陰極電位の減衰カーブと復極量（概念図）

100 mV以上であれば防食効果は良好，未満であれば不良と判定される．

復極量100 mVに対する電気化学的解釈は以下のよう
に考えられている．

図2に示すように腐食している鉄筋のアノード反応に対するターフェル勾配を自然腐食状態におけるそれと同等と考え60 mV/decadeとすると，カソード防食によって100 mV卑電位であったことは，腐食速度が約1/50に抑制されていたことを意味する．腐食している鉄筋のアノード反応のターフェル勾配は，通常100 mV/decade以下¹³⁾であることから復極量100 mV以上は防食率90%以上のカソード防食が施されていたと評価することができる．

一方，Glass¹⁴⁾は，電位シフト値の持つ意味を，速度論を用いて以下のように説明している．一定防食電流 i_{appl} を通電している場合，カソード反応が拡散律速の条件下にある場合，(1)，(2)式より電位シフト値は防食時の腐食速度に関連付けられ，カソード反応が活性化支配の場合は，(3)式より自然腐食速度に結びつけられるパラメータであるとしている．

図2 100 mV シフト (復極量 100 mV) 基準の概念

$$i_{\text{appl}} = i_L [1 - \exp(-2.3\eta/\beta_a)] \quad (1)$$

$$i_a = i_{\text{corr}} \cdot \exp(-2.3\eta/\beta_a) = i_L \cdot \exp(-2.3\eta/\beta_a) \quad (2)$$

$$i_{\text{appl}} = i_{\text{corr}} [\exp(2.3\eta/\beta_c) - \exp(-2.3\eta/\beta_a)] \quad (3)$$

ここで、

i_{appl} : 通電電流密度 i_L : 拡散限界電流密度

β_a : アノード反応ターフェル勾配

β_c : カソード反応ターフェル勾配

η : 電位シフト値 i_{corr} : 自然腐食速度

i_a : アノード反応速度 i_c : カソード反応速度

具体的なシミュレーション結果を図3に示す。コンクリート環境下のカソード防食では上限に近い防食電流密

(a) カソード反応が拡散支配の腐食系

(b) カソード反応が活性化支配の腐食系

図3 電位シフト値と腐食速度の関係

度である 20 mA/m^2 で 100 mV シフトしている場合を考えると、酸素の拡散律速の場合はカソード防食の適用により腐食速度は 0.44 mA/m^2 に低減していることを示しており、活性化支配の場合は鉄筋の自然腐食速度が 3.1 mA/m^2 で、不動態に近い状態になっていることを示している。いずれの場合も 100 mV シフトで十分な防食効果が得られていることが分かる。このシミュレーションは、電位シフト値を具体的な腐食速度に結びつける考え方として有効に利用できる可能性がある。

3. コンクリート中鉄筋のカソード防食特性

3.1 腐食速度と防食電流

防食電流密度 i_p と平均腐食速度 i_{corr} との関係は、腐食反応の支配形態によって異なる。すなわち、図4に示すように、平均腐食速度が酸化剤の拡散限界電流密度にほぼ等しい腐食系(a)では $i_{\text{corr}} \approx i_p$ 、カソード反応が活性化支配の腐食系(b)では、 $i_{\text{corr}} < i_p$ となる¹⁵⁾。いずれにしても防食初期においては、腐食速度以上の防食電流密度を必要とするのがカソード防食の基本である。しかし、コンクリート中鉄筋のカソード防食では、腐食速度よりも小さい防食電流密度であっても継続して通電することにより十分な防食効果が得られる場合がある。

図5¹⁶⁾はその一例で、塩化物イオンを2% (セメント質量比) 含有する鉄筋コンクリート試験体 ($\phi 100 \times 250 \text{ mm}$) に対して、干満帯を想定した乾湿繰り返し試験 (0.5時間人工海水浸漬, 11.5時間気相環境暴露を1サイクルとする) の中で、湿潤状態の時のみ定電流のカソード防食を行う試験を約1年間実施した時の試験体の表面状況を示している。当初 58 mA/m^2 の腐食速度を示していた鉄筋も積算平均電流密度 6.2 mA/m^2 (腐食速度より

(a) カソード反応が拡散支配の腐食系

(b) カソード反応が活性化支配の腐食系

図4 平均腐食速度と防食電流密度の関係

図5 塩化物イオンを含有した鉄筋コンクリート試験体に間欠通電によるカソード防食を1年間実施した時の試験体表面

小さい電流密度)でコンクリートにひび割れが生じることなく十分な防食効果が得られている。積算平均電流密度とは、通電電流量を試験期間で除したときの電流密度である。十分な防食効果が得られた要因は、カソード電流による鉄筋表面の環境改善効果によるところが大きいと考えられている。すなわち、本試験では、防食効果が認められた試験体は、図6¹⁶⁾に示すように自然電位が経時的に貴化傾向を示したことから、カソード電流の供給により鉄筋表面のpHが経時的に上昇し、かつ塩化物イオン濃度の減少が生じたことにより鉄筋の再不動態化が誘起されたとしている。

この現象の分極曲線による解説を図7¹⁷⁾に示す。図中では、一連の腐食試験より得られた、鉄筋の自然電位 E_{corr} と腐食速度 i_{corr} の関係式 $E_{\text{corr}} = -126 \cdot \log(i_{\text{corr}}) - 192$ を鉄筋のカソード分極曲線とし、カソード防食適用前の腐食速度を 30 mA/m^2 とした場合を一例として示している。アノード分極曲線は単に概念図として描かれている。この条件下では、 40 mA/m^2 のカソード電流を供給してもカソード分極は 30 mV 程度で、腐食速度は 15 mA/m^2 にしか低減しない。陰極表面のpHが増大し、塩化物イオン濃度が低減することによりアノード分極が増大し、自然電位が 200 mV 貴化すると自然腐食速度は 0.8 mA/m^2 に低減し、 10 mA/m^2 より小さい電流密度で 150 mV の電位シフトが可能となり、腐食速度は 0.5 mA/m^2 まで低下する。

このように、カソード電流によって鉄筋表面の環境が

図6 防食電流遮断後8時間経過した時点の鉄筋自然電位経時変化

図7 カソード防食の適用により生じる自然電位貴化現象の解釈

高pH、低塩化物イオン濃度方向に経時的に変化していくという特性は、防食電流の低減につながるため、気相環境下のコンクリート構造物に対しては、カソード防食の適用を可能とする大きな要因になっている。また、防食電流供給時の電位も卑化しないことから水素脆性が懸念されるPC鉄筋に対するカソード防食に対しても有効であると考えられる。

一方、このような特性を現場的にどのように評価するかという点については、自然電位の経時的な変化が貴方向に移行するか否かによって判定されていることが多い。

図8¹⁸⁾はTay Road Bridgeにカソード防食(防食電流密度 $7 \sim 10 \text{ mA/m}^2$)を適用した際の自然電位分布の変遷を示したものである。平均値は12ヵ月で約 80 mV 貴化し、カソード防食の適用による鉄筋表面の環境改善作用が良好に機能していると評価することができる。

3.2 カソード電流による陰極表面のpHおよび塩化物イオン濃度変化

カソード防食の適用により陰極表面のpHがどの程度上昇し、塩化物イオン濃度がどの程度低減するかについて、本稿では理論的に解析された2例を紹介することにする。

図8 カソード防食された橋脚の鉄筋自然電位分布経時変化の一例(自然電位は防食電流遮断24時間後に測定)

図9 各種電流密度でカソード防食した際の陰極表面の定常水酸化物イオン濃度 (Nernst-Plank 式によるシミュレーション, 25℃, バルク濃度 10^{-7} M)*1

陰極表面の定常 pH は、カソード反応により陰極表面で生成する OH^- 量が電気泳動および拡散で陰極表面から離れていく量と釣り合ったところで定常化するとし、(4)式に示す陰極面に垂直な一軸 (x) 方向の Nernst-Plank 式を解くことによって求められた通電電流密度と陰極表面の OH^- 濃度の関係を図9に示す¹⁹⁾。但し、解法ではバルクの濃度を 10^{-7} M とし、バルクと金属表面との距離 δ における濃度勾配および電位勾配は線型であると仮定している。従って、電極間の距離 δ における電位勾配はカソード電流密度を i 、環境抵抗率を ρ とすると $i\rho\delta$ と表すことができる。

$$\frac{i}{zF} = -vC \frac{dE}{dx} - D \frac{dC}{dx} = -\frac{DzF}{RT} C \frac{dE}{dx} - D \frac{dC}{dx} \quad (4)^{*2}$$

但し、 i : カソード電流密度 z : 荷電数

F : ファラデー定数 v : 当該イオンの移動度

C : 濃度 E : 環境の内部電位 D : 拡散定数

小さい電流密度で大きな pH 上昇を得るためには、電極間の距離を大きくし、拡散定数を小さく、抵抗率を小さくすることが重要である。しかし、現実的には、拡散定数と抵抗率の両方の低下は一般的には困難である。種々のパラメータにおけるシミュレーションによれば、抵抗率より拡散定数の低下を重視することの方が得策である。

塩化物イオン濃度の場合は、 Cl^- が電気泳動により陰極から離れて行く量と拡散により陰極表面に近づいていく量が釣り合った時に定常化するとし、(4)式の左辺をゼロとしたときの Nernst-Plank 式を解けばよく、結果として(5)式を得る²⁰⁾。

$$\Delta E = \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{C_1}{C_0} \right) \quad (5)$$

ここで、 C_0 , C_1 はそれぞれ陰極近傍、バルクの塩化物イオン濃度を、 ΔE はバルクを基準とした場合の環境内

の電位勾配 (IR ドロップ) を表している。陰極近傍の塩化物イオン濃度をバルクの $1/10$ に抑制したい場合、約 59 mV の電位勾配をつける通電方法を選択することにより可能となる。小さい電流密度で塩化物イオン濃度の低減を大きくするためには、電極間の距離 (ΔE を定義する物理的距離) を大きく、環境抵抗率 ρ も大きくする方が陰極表面の定常塩化物イオン濃度は小さくなる。

水酸化物イオン濃度の上昇と塩化物イオン濃度の低下を低電流密度で可能にするためには、陽極を防食対象物からある程度離して取り付けることが重要である。また、断面修復を行う場合は、拡散定数の小さい材料を適用することが望ましいと考えられる。

3.3 電位・電流の経時変化特性

カソード防食系における防食対象物 (陰極) の電位、電流密度 (または電流) 経時変化を電位・電流密度平面上にプロットすると、図10の◇で示すように、およそ次の2パターンに分類される²¹⁾。パターン1は、陰極 (炭素鋼) のカソード分極抵抗 h_c が経時的に増加する場合の挙動で、カソードの電位・電流は左下がり (電位の卑化と共に防食電流も低下する) 方向に変化する。このような挙動はカソード防食としては理想的な挙動とされており、エレクトロコーティングが生成する海水中のカソード防食で認められる。パターン2は、陰極のカソード分極抵抗に大きな変化はなく、主として陽極 (Mg 陽極) のアノード分極抵抗 h_a や環境抵抗率 ρ の変化によって回路電流が変化した場合の挙動である。この場合は、通電電流の減少と共にカソード電位は貴化する挙動が現れる。これは、初期のカソード分極曲線上を (電位、電流密度) プロットが移動する挙動で、防食電流の低減はカソード防食効果の低下につながり、一般に好ましい状況にないと判断される。

しかし、コンクリート構造物に対するカソード防食では、パターン1の挙動が認められる場合もあるが、多くはパターン2の挙動をとる。一般的には好ましくないとされる挙動を取っているにもかかわらず防食効果が向上するという従来の電気防食の常識からすると不可解な挙動が認められる。

例えば、図11は実構造物に適用されたカソード防食に対して、約10年、電位、電流の経時変化を追跡調査したデータを陰極の電流密度/電位軸上にプロットしたものである²²⁾。プロット値は、それぞれの電流密度 (i_c) における、インスタンタノフ電位 (E_{io})、オフ24時間後の電位 (E_{off}) である。矢印は経時的な変化方向を示す。 E_{io} , E_{off} とともに左上がりの傾向を示しており、パターン2の挙動を示している。これは鉄筋のカソード分極抵抗に経時的な増大は認められないこと示しているため、防食電流を低減させて、かつ防食条件である E_{io} と E_{off} との差 (復極量) を 100 mV 以上維持しようとするならば、 E_{off} の貴化が必要であることを示唆するものである。本防食においては E_{off} が経時的に貴化しており、これがカソード防食効果の向上、すなわち電位が貴化しているにもかかわらず防食電流を低減させたカソード防食に結びついていることが分かる。 E_{off} の貴化は、上述しているように、カソード防食の適用により鉄筋表面の pH の上昇および塩化物イオン濃度の減少が生じ、鉄筋

*1 原文の ρ の単位を $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ に変更した。

*2 原文の右辺第1項に対し -1 を乗じた。

(a) シミュレーション条件 (分極特性に直線分極を適用)

(b) h_c が変化した場合の挙動 (c) h_a が変化した場合の挙動 (d) ρ が変化した場合の挙動

図10 発生電流を支配する各種パラメータの変化が電極の電位・電流特性に及ぼす影響

のアノード分極を増大させた結果であると考えられる。

図11 実際のコンクリート構造物にカソード防食を適用した際の陰極 (防食対象物) の電位, 電流密度プロットの一例

4. おわりに

大気環境下におけるコンクリート中鉄筋のカソード防食では、カソード分極効果のみで継続した防食効果を維持することは難しい。現実に防食基準をクリアする復極値が得られているのは、カソード電流の供給による鉄筋表面の環境改善、すなわち pH の上昇および塩化物イオン濃度の減少によって自然腐食速度が低減している影響が大きい。この点において、従来の中性環境下のカソード防食特性とは大きく異なる挙動が現れることを十分理解する必要がある。

コンクリート中鉄筋のカソード防食においては、当初防食基準未達であっても、経時的に防食基準を満たすことが十分考えられる。今後、防食の設計および維持管理方法について経時的な変化も考慮した方法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) R. F. Stratfull, Transportation Research Record, No. 500, 1 (1974).
- 2) 小林一輔, 土木施工, 25, 45 (1984).
- 3) K. C. Clear and Y. P. Virmani, Solving Rebar Corrosion Problems in Concrete, No. 4, Chicago (1982).
- 4) FHWA, FHWA Position on Cathodic Protection Systems, Memorandum (1982).
- 5) T. Chiba, Boshoku-Gijutsu (presently Zairyou-to-Kankyo), 35 [3] 189 (1986).
- 6) 鋼材倶楽部防せい特別委員会, 鉄筋コンクリート構造物の防食と補修, 防食技術セミナー [IV], (1989).
- 7) コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会, 第13回定時総会資料 (2009).
- 8) CP工法研究会, ホームページ, 工法概要.
- 9) H. Kobayashi, K. Ikawa, T. Takaku, Y. Shinoda, H. Tobishima and K. Tanaka, Proc. JSCE Materials and Environments 2009, p.393 (2009).
- 10) 土木学会, 電気化学的防食工法設計施工指針 (案), (2004).
- 11) ISO, DIS 12696 (EN 12696:2000) (2005).
- 12) NACE, Standard RP0290 (2000).
- 13) Y. Amemiya, T. Fukute and N. Mochizuki, Proc. JSCE Materials and Environments 2008, p.297 (2008).
- 14) G. K. Glass, Corrosion, 55 [3] 286 (1999).
- 15) 小林豊治, 第2回エンジニアのための腐食防食工学入門講習会テキスト, p.78, 腐食防食協会 (1976).
- 16) G. K. Glass and A. M. Hassanein, The Journal of Corrosion Science and Engineering, 4, 7 (2003).
- 17) G. K. Glass, A. M. Hassanein and N. R. Buenfeld, Corrosion

- Science*, **43**, 1111 (2001).
- 18) G. K. Glass, *Materials Performance*, **35** [2] 36 (1996).
- 19) G. K. Glass and J. R. Chadwick, *Corrosion Science*, **36** [12] 2193 (1994).
- 20) G. K. Glass, J. Z. Zhang and R. N. Buenfeld, *Corrosion*, **51** [9] 721 (1995).
- 21) 望月紀保, 第 43 回技術セミナー資料, p.1, 腐食防食協会 (2007).
- 22) H. Fuda, Y. Matsuda and Y. Shinoda, Proc. 50th Jpn. Conf. Materials and Environments, p.411 (2009).
- (2009 年 11 月 13 日受理)

要 旨

コンクリート中鉄筋の塩害による腐食防止対策としてカソード防食が適用されている。本稿では、現在適用されている主な通電方式と防食基準、および大気環境下という防食電流の供給が困難な状況下で有効に機能している原因について解説した。

コンクリート環境下において防食基準をクリアする十分な防食効果が得られているのは、カソード電流の供給による鉄筋表面の環境改善、すなわち pH の上昇および塩化物イオン濃度の減少によって自然腐食速度の低減効果によるところが大きい。

コンクリート中鉄筋のカソード防食においては、当初防食基準未達であっても、経時的に防食基準を満たすことが十分考えられる。防食の設計および維持管理方法についても経時的な変化も考慮した手法を検討する必要がある。

キーワード コンクリート, カソード防食, 防食メカニズム, pH, 塩化物イオン濃度, Nernst-Plank 式