

論文 鉄筋の防食状態を把握したコンクリート構造物の電気防食管理方法

板屋 隼人^{*1}・大谷 俊介^{*1}・若林 徹^{*2}・望月 紀保^{*2}

要旨: 干満部より上部のコンクリート構造物に対する電気防食は、復極量 100 mV を基準とする管理方法が採用されている。しかし、干満部においては基準となる復極量が得られ難いという問題点がある。また、大気部においては鉄筋の再不働態化が進行し、腐食速度が十分低減しているにもかかわらず 100 mV 基準を確保しなければならないとする不経済な面もある。本試験では、復極量が 100 mV 未達時における鉄筋の防食状態の評価法を考案しその確認試験を行うとともに、考案した評価法を取り入れた新たな電気防食の維持管理評価方法を構築し、その適用性を検討した。

キーワード: 電気防食, 維持管理, 評価フロー, 腐食速度

1. はじめに

干満部より上部のコンクリート構造物の電気防食は、復極量 100 mV の有無から防食状態の良否を判定している。復極量の解釈は、鉄のアノード反応のターフェル勾配を 100 mV/decade と仮定した場合、腐食速度が約 1/10 以下に低減されることを意味している¹⁾。しかしながら、干満部のような湿潤環境においては、防食状態が良好であるにもかかわらず鉄筋表面への溶存酸素の供給速度が小さいために 100 mV 基準を満たさないことも有り得る。この場合、電流密度を増大することで 100 mV 基準を満たす調整が行われている。過剰な電流密度での通電は鉄筋の腐食速度は十分低減されるものの、鉄筋の再不働態化機能の消失や陽極およびその周囲の充填モルタルなどの劣化を招く恐れがあり、電気防食システムが早期に劣化することも考えられる。湿潤環境における電気防食の管理方法として、防食基準電位を -850 mV vs. CSE²⁾ または -770 mV vs. CSE³⁾ とする絶対値管理による方法が提案されているが、絶対値管理を行うべき電気化学的条件が十分には整理されていない。

一方、大気部では干満部と異なり溶存酸素の供給速度が大きい。電気防食を行うと鉄筋周囲の環境改善が進行し再不働態化が進行する⁴⁾。NACE 規格では再不働態化した鉄筋(自然電位が -200 mV vs. CSE より貴電位である)においては、復極量 100 mV 基準は適用されないとしている⁵⁾。しかしながら、現状は 100 mV 基準の確保を前提とした通電電流調整が行われており、過度な電流密度の通電による不経済な電気防食となっている。

著者らは、復極量が 100 mV 未達時における鉄筋の防食状態を判定する方法として、電気防食適用下の腐食速度を直接評価する方法を考案した。そして、本評価法を取り入れた新たな電気防食維持管理評価フローを考案し

た。本試験では、モルタル試験体を用いて電気防食適用下の腐食速度評価法の妥当性を検討するとともにコンクリート試験体を用い、考案した電気防食維持管理評価フローの適用性についても通電試験により検討した。

2. 電気防食適用下の腐食速度評価法の確認試験

2.1 試験体

図-1(a) にモルタル試験体の形状を示す。試験体は $\phi 50$ mm, 高さ 100 mm の円柱で、W/C = 0.5, [Cl] = 15 kg/m³ として作製した。鉄筋は長さ 100 mm の炭素鋼(みがき丸鋼 SS400, $\phi 16$ mm)を用いて供試長さ 60 mm(供試面積 30.1 cm²)となるように両端を絶縁処理して埋設した。通電用の陽極には亜鉛テープを使用し、電解質ゲルを介して試験体表面に貼り付けた。試験体は打設した翌日に脱型し上下面を樹脂被覆した後、材齢 5 日から通電試験を開始した。

2.2 電気防食適用下の腐食速度評価試験

表-1 に試験条件を示す。通電試験は有意な質量減を

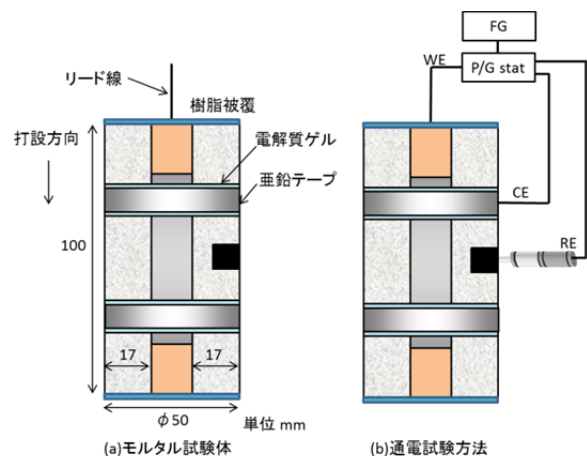


図-1 モルタル試験体の形状 (a) と通電試験方法 (b)

*1 (株)ナカボーテック 技術開発センター (正会員)

*2 (株)ナカボーテック 技術開発センター

得る目的で、鉄筋の自然電位に対して 10～50 mV カソード分極する電流密度で定電流通電を行った。100 mV カソード分極した場合、鉄筋の防食状態は良好であり腐食の進展は生じないと判断できることから、分極量 100 mV 未満の 3 水準を選定した。各水準の試験体数は 2 体とした。図-1 (b)に通電試験方法を示す。ポテンショガルバノスタット(P/G stat.)にファンクションジェネレータ(FG)を接続した。通電試験は、40℃・70%R.H.の恒温恒湿槽内で行い、試験期間中、任意の間隔で電気防食適用下の腐食速度を測定した。その後、測定した腐食速度の経時データを台形則により積分し、電気防食適用下の腐食量を算出した。この値と、鉄筋の質量減から求めた実腐食量を比較することで本評価法の妥当性を検討した。

図-2 に電気防食適用下における腐食速度測定概念図を示す(以下、電気防食適用下の腐食速度を $i_{\text{corr,CP}}$ と称する)。 $i_{\text{corr,CP}}$ は、電気防食適用下の分極曲線を測定することで求めた。まず $i_{\text{corr,CP}}$ の測定前に、各設定分極量での通電時のオン電位(E_{on})、インスタントオフ電位(E_{io})、通電電流(I)を測定した。その後、開始電位を通電時のオン電位、掃引速度 100 mV/min でアノード方向に電位掃引することで電気防食適用下の分極曲線を測定した。終了電位は、カソード電流からアノード電流に切替わる電位(自然電位: E_{corr})から 120 mV 分極した電位とした。式(1)に基づき環境抵抗 R_s を算出し、この値と分極試験時の印加電流を用いて測定した分極曲線の IR 補正を行い真の分極曲線を得た。

$$R_s = \frac{|E_{\text{on}} - E_{\text{io}}|}{I} \quad (1)$$

ここで、 E_{on} : 通電時のオン電位、 E_{io} : 通電時のインスタントオフ電位、 I : 通電電流である。 $i_{\text{corr,CP}}$ は、 E_{corr} から 50～80 mV 分極した電位-log 電流密度データの直線近似線をターフェル直線として評価し、通電時のインスタントオフ電位に対応する電流密度を腐食速度として図より読み取った。電位は飽和 KCl 銀塩化銀電極を用いて測定した。試験開始から 112 日後に通電を停止し、はつり出した鉄筋を塩酸と腐食抑制剤の混合溶液に浸漬させ、錆層を除去した後の試験前後の鉄筋の質量減から実腐食量を求めた。

表-1 試験条件

試験体No.	目標分極量[mV]
1	50
2	
3	25
4	
5	10
6	

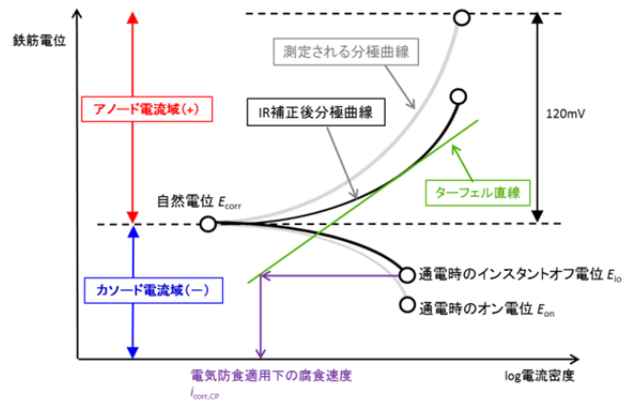


図-2 電気防食適用下の腐食速度測定方法

2.3 結果と考察

図-3 に本評価法から求めた推定腐食量と質量減から求めた実腐食量との関係を示す。両者は、相対比 r (推定腐食量/実腐食量)が 1 の直線に近似でき、ほぼ 1:1 の比例関係であることが確認できた。以上から、本評価法は電気防食適用下の腐食速度を良好に評価しているものと考えられる。

本評価法を用いることで鉄筋の防食状態の判定が可能となり、過度な電流を供給することがなくなると考えられる。

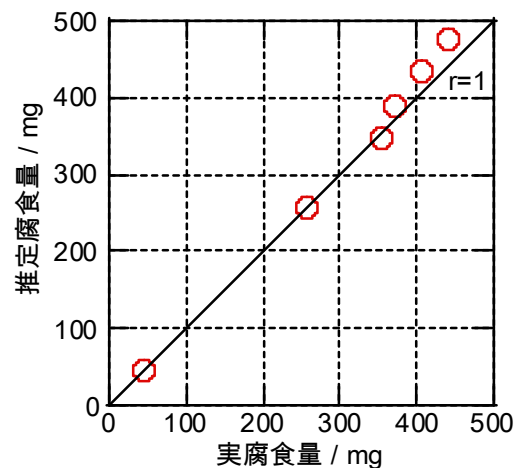


図-3 電気防食適用下の腐食速度評価法から求めた推定腐食量と質量減から求めた実腐食量との関係

3. 電気防食維持管理評価フローの構築

前章の結果より、電気防食適用下の腐食速度評価法を取り入れることで、従来にない新たなコンクリート構造物の電気防食維持管理方法が可能と考えられる。図-4 に考案した電気防食維持管理評価フローを示す。以下に評価フローの考え方を述べる。

[STEP 1]: 鉄筋の自然電位による判定

通電を停止してから 24 時間後の鉄筋の自然電位が

-200 mV vs. CSE より貴電位の場合、鉄筋は不働態化していると評価される⁶⁾。この場合、復極量が 100 mV 基準未達の場合においても通電電流調整は不要とする⁵⁾。一方、復極量が 100 mV 以上の場合には電流密度を低減させる。鉄筋は不働態状態にあることから、電流密度を低減することで不働態皮膜機能の低下を抑制することを考慮した対応である。

[STEP 2]：復極量による判定

STEP 1 において、自然電位が-200 mV vs. CSE より卑電位の場合には、復極量により防食状態を判定する。土木学会基準では、復極量 100 mV 以上を評価基準として設けている。150 mV より大きな復極量が得られた場合には電流密度を低減し、100 mV 以上 150 mV 以下の場合には電流調整を不要とした。コンクリート中鉄筋の電気防食において、大きな復極量(150 mV 以上)が得られたということは、環境改善による再不働態化への移行が確実に進展したとの考え方から、本評価フローでは電流密度を低減する閾値を復極量 150 mV とした。上記の考え方は、腐食環境を問わず、同一腐食環境下で復極量の増加が生じたということは、鉄筋のアノード分極特性の増大、すなわち再不働態化が進行したという考えに基づいている。

[STEP 3]：鉄筋の自然電位による再判定

復極量が 100 mV 基準未達の場合は、電流密度を増大して対応するのが一般的な方法となる。しかし、復極量の未達要因が鉄筋表面への溶存酸素供給速度の低下、すなわち濃度分極に起因する場合には、電流密度の増大はかえって復極量の減少を招く恐れがある⁷⁾。そこで、コンクリート中において、溶存酸素の濃度分極の影響が現れると考えられる条件を把握するために、内部カソード分極曲線のシミュレーションを式(2)、式(3)に基づき行った^{8), 9)}。

$$E_{eq} = 1.228 - 0.059\text{pH} + 0.015 \log P_{O_2} \quad (2)$$

$$i_c = i_0 \left(1 - \frac{i_c}{i_{L,c}} \right) \exp \left(\frac{-(1-\alpha)nF}{RT} (E - E_{eq}) \right) \quad (3)$$

ここで、式(2)における E_{eq} ：平衡電位、 P_{O_2} ：酸素分圧(= 0.2 atm)、pH は 12.4 とし、式(3)における i_c ：電流密度、 i_0 ：交換電流密度(= $10^{-4} \mu\text{A}/\text{cm}^2$)、 $i_{L,c}$ ：拡散限界電流密度(= 2, 5, 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)、 α ：移動係数(= 0.88)、 n ：反応電荷数(= 4 eq/mol)、 F ：ファラデー定数(= 96500 C/eq)、 R ：気体定数(= 8.314 J/K mol)、 T ：絶対温度(= 298 K)、 E ：電極電位である。

シミュレーション結果を図-5 に示す。コンクリート中において、濃度分極の影響を受けはじめる電位は $i_{L,c}$ が大きいほど卑化するが、おおむね-400 mV vs. CSE より卑な電位域では濃度分極の影響を受けるものと考えられ

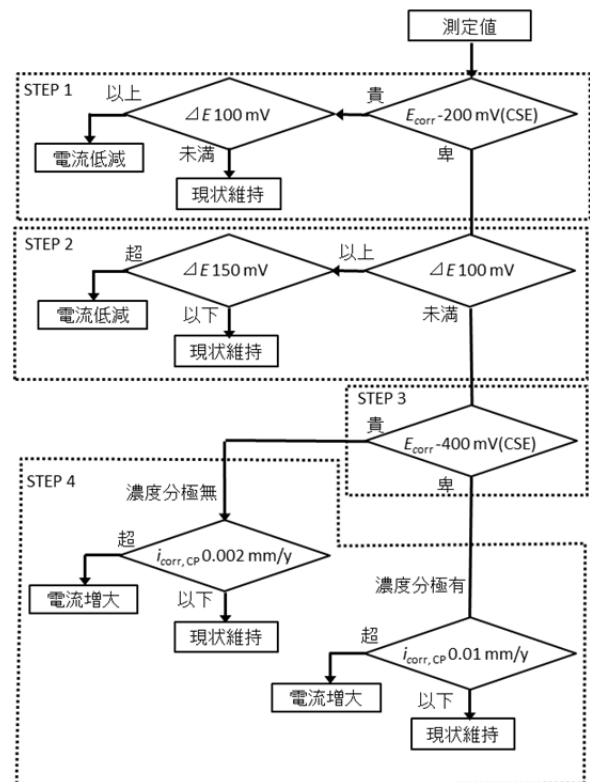


図-4 電気防食維持管理評価フロー (E_{corr} ：自然電位、 ΔE ：復極量、 $i_{corr,CP}$ ：電気防食適用下の鉄筋腐食速度)

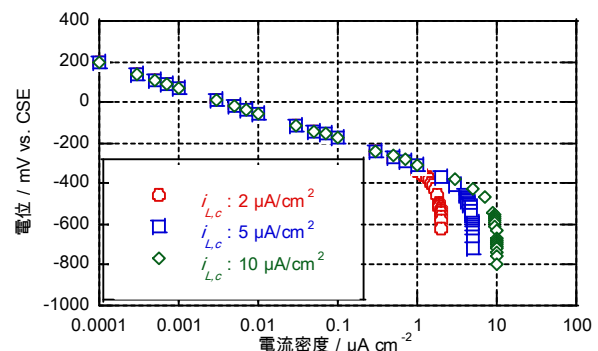


図-5 溶存酸素の内部カソード分極曲線シミュレーション結果

る。本評価フローにおいては、復極量未達の要因が溶存酸素の濃度分極に起因すると判断するための基準として、自然電位-400 mV vs. CSE を設定した。

[STEP 4]：電気防食適用下の腐食速度による判定

復極量が 100 mV 基準未達時の鉄筋の防食状態は、前章で検討した電気防食適用下の腐食速度評価試験から判定することとする。

STEP 3 において、測定された自然電位が-400 mV vs. CSE よりも貴な場合、復極量の基準値未達の要因は濃度分極の影響とは考え難く、供給する電流密度の不足に起因していると思われる。しかし、電気防食により鉄筋表面の環境改善が進行し、経時的な自然腐食速度の低減が

生じているならば復極量が 100 mV 未満でも電気防食効果は十分達成されていると考えられる。

一方、判定電位よりも卑な場合は、濃度分極に起因する復極量の低下である可能性が高い。この場合、電流密度の増大は復極量のさらなる低下を招く恐れがある。しかし、濃度分極により鉄筋表面への酸素供給速度が小さければ、必ずしも 100 mV 基準にこだわる必要は無く 100 mV 基準以下の運用でも十分に防食効果は得られると思われる¹⁰⁾。本評価フローでは、濃度分極の有無で評価基準とする電気防食適用下の腐食速度をそれぞれ以下の考えに基づき設定した。

一般的に、分極抵抗を用いると腐食電流密度(腐食速度)は式(4)、式(5)から求められる⁸⁾。

$$i_{corr} = \frac{K}{R_p} \quad (4)$$

$$K = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad (5)$$

ここで、 i_{corr} ：腐食電流密度、 R_p ：分極抵抗、 K ：比例定数、 β_a および β_c ：アノード、カソード反応のターフェル勾配である。不動態状態において、 β_a は ∞ となるため、 β_c を 120 mV/decade とすると K 値は 52 mV となる。また、このときの鉄筋の分極抵抗は 130 から 260 $k\Omega cm^2$ 以上である¹¹⁾。分極抵抗値を 260 $k\Omega cm^2$ として式(4)を用いて腐食電流密度を算出すると 0.2 $\mu A/cm^2$ 、腐食速度では 0.002 mm/y が得られる。すなわち、0.002 mm/y 以下の腐食速度では、腐食の進展は生じないと判断できる。

濃度分極の影響が生じる場合には、鉄筋界面における溶存酸素濃度は非常に小さくなるため、腐食形態はコンクリート中においても全面腐食形態へと移行することから、管理腐食速度としては海水中鋼材に対する防食基準である 0.01 mm/y 以下で運用することで実用上の防食は可能と考えられる。以上の理由から、腐食速度の基準値として自然電位が -400 mV vs. CSE より貴電位である場合は 0.002 mm/y、卑電位である場合は 0.01 mm/y をそれぞれ設定した。

4. 電気防食維持管理評価フローの適用性の検討

前章で述べた電気防食維持管理評価フローに関して、コンクリート試験体を用いて通電試験を行い、評価フローに基づく通電電流調整を実施することでその適用性を検討した。

4.1 試験体

図-6(a)にコンクリート試験体の形状を示す。試験体は 100×100×200 mm の角柱とし、W/C=0.55、[Cl⁻]=5 kg/m³ として作製した。鉄筋は長さ 230 mm の炭素鋼(み

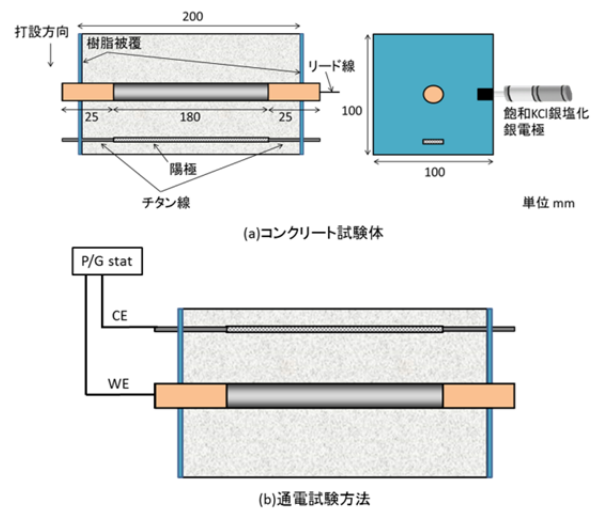


図-6 コンクリート試験体の形状(a)および通電試験方法(b)

が丸鋼 SS400, $\phi 16$ mm)を用いて供試長さ 180 mm(供試面積 90.4 cm^2)となるように両端を絶縁処理して埋設した。試験体は材齢 26 日まで湿布養生を行い両端を樹脂被覆した後、材齢 28 日から 40℃・70%R.H.の恒温恒湿槽中で腐食促進養生を行い、材齢 56 日より定電流通電試験を開始した。

4.2 通電試験

(1) 試験条件

表-2 に試験条件を示す。通電試験は室内で行い大気環境を模擬した。図-6(b)に通電試験方法を示す。通電試験は、ポテンショガルバノスタット(P/G stat.)を用いて定電流通電を行った。図-7に通電試験フロー図を示す。維持管理評価フローに基づく通電電流調整を実施する前に、無通電試験体を除く試験体 2 体に関しては 28 日間の初期通電期間を設けた。初期通電期間中は、試験開始時に 150 mV 分極する電流密度を分極曲線から決定し、18 日間の通電を行った。その後、一旦通電を停止し復極量を求めた後、式(6)¹²⁾に基づき 150 mV 分極する電流密度を算出しさらに 10 日間の通電を行った。

$$I_c = I_0 \times \frac{\Delta E_0}{\Delta E_m} \quad (6)$$

ここで、 I_c ：調整する電流、 I_0 ：現在流れている電流、 ΔE_0 ：目標の電位変化量(復極量)、 ΔE_m ：測定された電位変化量(復極量)である。

通電試験開始後 28 日目からは、2 章の手順に従い電気防食適用下の腐食速度を測定した後に通電を停止し、No. 1 試験体については図-4に示した維持管理評価フローに基づく通電電流調整を、No. 2 試験体については式(6)に基づき 150 mV を目標値とする通電電流調整を任意

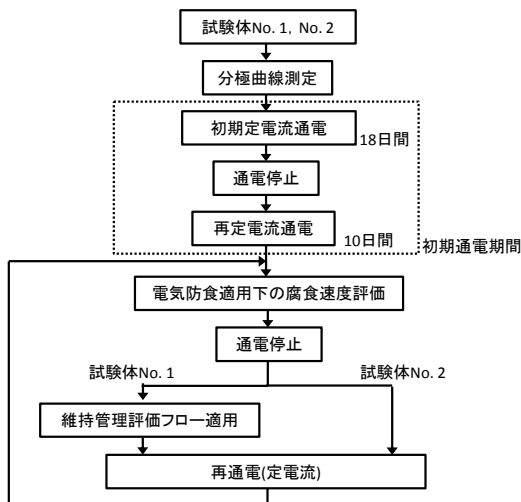
表－2 試験条件

試験体No.	通電電流調整方法	試験環境
1	評価フロー使用	大気
2	(6)式適用($\angle E_0 = 150 \text{ mV}$)	
3	無通電	

の間隔で実施した(現行の通電電流調整方法を模擬)。維持管理評価フローに基づく通電電流調整は、測定された復極量に基づき、後述する方法で必要とするカソード電流密度(補正後の電流密度 $i_{p,comp}$)を求め、その値に調整した。カソード電流密度は鉄筋面積当りの値とし、システムの安定性を確保するために、カソード電流密度には上限値(50 mA/m^2)、下限値(1 mA/m^2)を設定した。電位は飽和 KCl 銀塩化銀電極を用いて測定し、式(7)より飽和硫酸銅電極基準(CSE)に換算した。

$$E_{CSE} = E_{SSE} - 120.1 - 2.00 \times (t - 25) \quad (7)$$

ここで、 E_{CSE} ：飽和硫酸銅電極基準の電位、 E_{SSE} ：飽和 KCl 銀塩化銀電極基準の電位、 t ：測定時の気温($^{\circ}\text{C}$)である。



図－7 通電試験フロー図

(2) 通電電流密度の補正

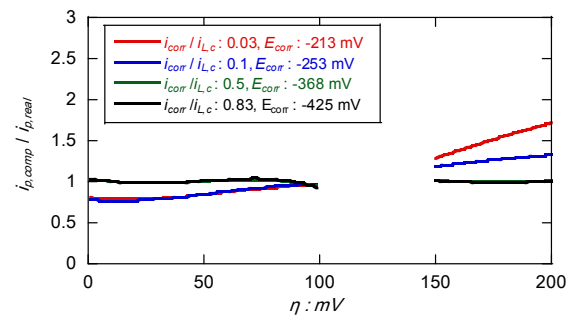
式(6)は、外部カソード分極特性をインスタントオフ電位 E_{io} と復極後のオフ電位 E_{off} とを結ぶ直線(直線分極)で定義し、比例配分により電流密度を決定する方法である。しかし、本来非線形である分極特性を線形で近似した場合の誤差の影響を考慮する必要がある。種々の条件下で外部カソード分極曲線をシミュレーションし、直線近似した場合に評価される電流密度 $i_{p,lin}$ と真の分極曲線より求まる電流密度 $i_{p,real}$ を比較すると、分極量(復極量)と $i_{corr}/i_{L,c}$ が分かれば、 $i_{p,lin}/i_{p,real}$ を一意的に求められることが分かった。実際の系では $i_{corr}/i_{L,c}$ を評価することは容

易ではないため、 $i_{corr}/i_{L,c}$ に代わるパラメータとして E_{corr} を適用し表－3 に示す補正式にまとめた。本補正式を適用した場合の評価電流密度 $i_{p,comp}$ と $i_{p,real}$ の比は図－8 に示すように 1 近傍の値となり、妥当な補正ができていると判断できる。なお、シミュレーションの詳細および補正式導入過程については紙面の関係上省略する。

表－3 直線分極により求められる電流密度の補正式

$E_{corr} [\text{mV vs. CSE}]$	測定された分極量(復極量): η [mV]	
	$0 < \eta < 100$	$150 \leq \eta$
$-200 < E_{corr} \leq -250$	$\gamma = 0.0000664 \cdot \eta^2 - 0.00826 \cdot \eta + 1.19$	$\gamma = -0.000544 \cdot \eta + 1.17$
$-250 < E_{corr} \leq -300$	$\gamma = 0.0000738 \cdot \eta^2 - 0.0137 \cdot \eta + 1.66$	$\gamma = -0.00267 \cdot \eta + 1.27$
$-300 < E_{corr} \leq -400$	$\gamma = 0.00015 \cdot \eta^2 - 0.0314 \cdot \eta + 2.70$	$\gamma = -0.00319 \cdot \eta + 1.20$
$E_{corr} \leq -400$	$\gamma = 0.0001 \cdot x^2 + 0.0087 \cdot x + 1.0217$	$\gamma = -0.00325 \cdot \eta + 1.17$

$E_{corr} \leq -400 \text{ mV}$ は腐食速度管理のため説明変数は $x [x = (\text{設定分極量}) - \eta]$



図－8 補正後の電流密度 $i_{p,comp}$ と真の値 $i_{p,real}$ との比較

4.3 結果と考察

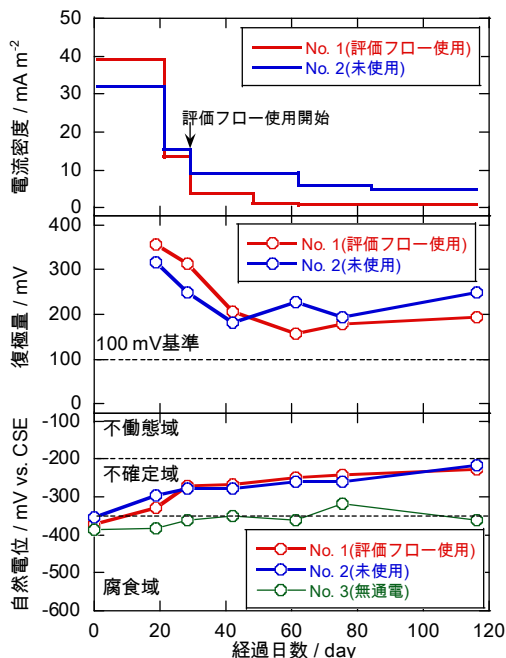
図－9 に各試験体の電流密度、復極量および自然電位の経時変化を示す。初期の自然電位はいずれも -350 mV vs. CSE よりも卑電位であり、ASTM 規格によれば腐食域となる電位を示した。試験開始時の 150 mV の電位変化量を得るための電流密度は No. 1 試験体の方が大きかったが、評価フローによる管理に移行後は、No. 1 試験体は No. 2 試験体と同様に 100 mV 基準を上回る復極量を満足しながら電流密度が低減した。また、いずれの試験体においても自然電位の貴化が進行し良好な防食状態を示した。

No. 1 試験体の 28 日後のデータを例に、図－4 に示した維持管理評価フローの見方を説明する。まず、自然電位は -200 mV vs. CSE よりも卑電位であるため、STEP 2 復極量による判定に移行する。復極量は 313 mV を示し、この値は 150 mV 以上であることから、「電流密度の低減」という評価になる。以降も、同様にして維持管理評価フローに従った通電電流調整を実施した。

28 日後の通電電流調整の結果、No. 1, No. 2 試験体の電流密度は大きく異なり、それぞれ 3.9 mA/m^2 , 9.2 mA/m^2 を示した。その後、両試験体ともに電流密度の経時的な低減が図れたが、116 日後の電流密度は No. 1, No. 2 試験体でそれぞれ 1 mA/m^2 , 4.7 mA/m^2 を示した。しかし、電流密度を小さく運用した No. 1 試験体においても、維

持管理評価フローの適用以降も復極量は 100 mV 基準を満足した。自然電位は両試験体ともに同程度の貴化傾向を示した。一方、無通電試験体である No. 3 は、75 日後に一時的な貴化が認められるが、その後電位は卑化したことから経時的な自然電位の貴化は生じていないと判断できる。通電を行った No. 1、No. 2 試験体における自然電位の貴化現象は、鉄筋周囲の環境改善に起因しており、電気防食が良好に機能していることを意味する。

本試験では、維持管理評価フロー中の STEP 2：復極量による判定のみの評価に留まる結果とはなったものの、現行の維持管理方法に比べて電流密度を抑えた効率的な運用を行える可能性が示唆された。今後は STEP 1、STEP 4 での適用性の評価を行う必要はあるが、本評価フローを用いることで鉄筋の防食状態に応じた適切な電気防食の維持管理が可能になると考えられる。



図－9 各試験体の電流密度、復極量および自然電位の経時変化

5. まとめ

本試験では、復極量が 100 mV 未達時における鉄筋の防食状態を評価する手法として、電気防食適用下の腐食速度評価法を考案し、その妥当性を検討した。また、上記評価法を取り入れた新たな電気防食維持管理評価フローを考案し、その適用性を検討した。

- 1) 電気防食適用下の腐食速度から評価した推定腐食量と質量減から求めた実腐食量とは、ほぼ 1 : 1 の比例関係が得られた。
- 2) 電気防食適用下の腐食速度評価法は、100 mV 基準未達時における鉄筋の防食効果判定手法として適

用が可能であることが示唆された。

- 3) 電気防食適用下の腐食速度評価法を取り入れた電気防食維持管理評価フローの考え方を提案した。
- 4) 電気防食維持管理評価フローは良好に機能し、電流密度を抑えつつ、既存の復極量に頼る調整方法と同等の電気防食効果が得られた。
- 5) 電気防食維持管理評価フローを用いることで、鉄筋の防食状態に応じた適切な維持管理が可能になることが示唆された。

参考文献

- 1) 望月紀保：コンクリート中鉄筋のカソード防食について，材料と環境，Vol. 59，pp. 121-128，2010.
- 2) 山本悟ほか：湿潤環境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，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 3，2011.
- 3) 小林浩之ほか：塩害を受けたコンクリート構造物の電気防食特性と維持管理，材料，Vol. 64，No. 12，pp. 976-980，2015.
- 4) 大谷俊介，小林浩之，若林徹，望月紀保：鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No.1，pp. 1030-1035，2012.
- 5) NACE，Standard Practice 0290，2007.
- 6) ASTM C 876-91：Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete，Annual Book of ASTM Standards，Vol. 03. 02，pp-457，1999.
- 7) 板屋隼人，大谷俊介，篠田吉央，望月紀保：大気暴露コンクリート中鉄筋が低カソード分極特性を示す要因特定とその際の電気防食維持管理方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38，No. 1，pp. 1179-1184，2016.
- 8) 腐食防食協会編：材料環境学入門，丸善，1993.
- 9) 大谷俊介，小林浩之，若林徹，望月紀保：コンクリート中鋼材のカソード分極特性と電気防食に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，No. 1，pp. 1063-1068，2013.
- 10) 篠田吉央，望月紀保，高久豊広，小林浩之：湿潤環境下コンクリート電気防食の防食評価方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 1，pp. 1157-1162，2011.
- 11) CEB Working Party V/4.1：Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft4) BBRI-CSTC-WTCB，1997.
- 12) 土木学会編：電気化学的防食工法設計施工指針(案)，土木学会，2001.