電気防食下におけるコンクリート中鉄筋の 復極量と防食効果に関する基礎的検討

大谷俊介*1・Muhammad Akbar Caronge*2・山本大介*3・濱田秀則*4

概要：コンクリート中鋼材に対する電気防食は、鋼材電位を卑側に分極させることによる腐食電流の低減のほか、鋼材表面近傍のOH⁻イオンの生成によるpH上昇と塩化物イオン濃度の減少などの副次的効果を発揮する防食法である。しかし、コンクリート中の鋼材への電気防食の適用の歴史は浅く、防食効果の正確な評価法も確立されているとはいえない。そこで本研究では、塩化物イオン濃度が異なるコンクリート試験体中の鋼材に対して25mV、50mV、100mVの復極量を維持するように電流値を設定した電気防食を行い、鋼材の腐食速度をもとに防食効果を検討した。その結果、いずれの復極量においても通電時の鋼材の腐食速度は不動態状態である1.0mA/m²程度にまで低下したことから、電気防食基準である100mVを下回る復極量を設定して通電しても腐食速度は低減することを確認できた。

キーワード：鉄筋コンクリート、電気防食、復極量、鋼材の腐食速度、防食基準

1. はじめに

コンクリート中の鋼材に対する電気防食では、防食基準として100mV以上の復極量管理が行われている。しかしながら、鋼材の腐食状態やコンクリートの環境条件によっては100mVの復極量を確保するために多くの通電電流を必要とすることがあり、この場合、増加させた通電電流が陽極周囲に充填されているモルタル材や陽極自身を早期に劣化させる恐れがある。

電気防食の効果は、鋼材表面に生じたアノードとカソード間の電位差を解消し、腐食電流を抑制することにより発揮されることはよく知られている¹⁾。しかし、もう一つ重要な効果（ここでは副次的効果と呼ぶ）として溶存酸素の還元反応による鋼材表面近傍のOH⁻イオンの生成によるpH上昇²⁾と電気泳動効果による塩化物イオン濃度の減少が挙げられる³⁾。pHの上昇は、鋼材の不動態化を促進し腐食速度低減に寄与する。また、塩化物イオンの減少は不動態皮膜を破壊する因子が減少することになる。したがって、コンクリート内に置かれた鋼材の場合、これらの副次的効果によって鋼材表面近傍の環境が徐々に変化し、腐食が生じにくい環境に変わることになる。この電気防食による副次的効果をコンクリート中の鋼材に対する“環境改善効果”と呼ぶことにする。現

在の防食基準である100mV以下の設定であっても、通電電流の供給による環境改善効果は得られることから、長期間で考えた場合、腐食の進行が問題とならないような鋼材の不動態を維持する状態に達することも考えられる。このような環境改善効果を報告した事例もある⁴⁾。しかし、100mV以下の復極量を設定した電気防食を施した場合の鋼材の腐食速度を評価した事例はほとんど報告されていない。

コンクリート中鋼材は、港湾鋼構造物などとは異なり、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から100mVの復極量管理を行っている⁵⁾。これまでの実績より100mVの復極量管理でコンクリート中鋼材の腐食の進展は抑止、抑制されるが、冒頭で述べたように100mVの復極量を確保するために大きな通電電流を供給することで陽極システムの早期劣化を招く場合がある。そこで、本研究では、コンクリート試験体に対して100mV以下の復極量を設定した電気防食試験を実施し防食効果の検討を行った。

2. 試験方法

2.1 コンクリート試験体

コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは普通ポ

*1 (株) ナカボーテック 技術開発センター 博士(工) (正会員) 〒362-0052 埼玉県上尾市中新井 417-16

*2 Hasanuddin University 博士(工) Jl. Perintis Kemerdekaan Km.10 Makassar, 90245, Sulawesi Selatan, Indonesia

*3 九州大学大学院 工学研究院 修士(理) (正会員) 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

*4 九州大学大学院 工学研究院 教授 博士(工) (正会員) 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

表-1 コンクリートの配合

水セメント比	細骨材率	単位量					
		水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	AE 減水剤 <i>AEWR</i>	AE 剤 <i>AE</i>
(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(mL/m ³)
55	49	190	345	841	956	1.08	1036

図-1 コンクリート試験体の形状・寸法

図-2 電食の方法

ルトランドセメント、細骨材は水洗いした海砂、粗骨材は碎石（骨材の最大寸法 10mm）を用いた。目標スランブは $10 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。コンクリートには、練混ぜ時に塩化ナトリウムを用いて 2, 5, 10kg/m^3 の塩化物イオンを混入した。

コンクリート試験体の形状を図-1 に示す。コンクリート中に、リード線を取り付けた鋼材 (D19) 1 本と線状チタン製ラス材電極（以下、MMO 電極とする）を 2 本埋設した。ここで、鋼材は、コンクリートに埋設する前に黒皮を除去する処理を施した。黒皮の除去は、鋼材を 10% のクエン酸二アンモニウム溶液に 7 日間浸漬するこ

とで実施した。MMO 電極は、1 本を電気防食用の陽極として、もう 1 本を電気化学的測定用の対極とした。打設後のコンクリートは 24 時間後に脱型し、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温槽で湿布養生を 28 日間行った。なお、本実験では、ブリーディング水が鋼材表面に溜まるのを防止するため、鋼材を立てた状態でコンクリートを打設した。また、コンクリート表面には電位測定用の穴（ $\phi 10\text{mm}$ 、深さ 10mm）を 1 箇所設けた。この測定穴は、照合電極の液絡部を差し込むためのものであり、水道水を溜めることで常に安定した電位を測定できるようにした。なお、電位測定時以外は測定穴をゴム栓で塞いだ。

2.2 電食による鋼材の腐食促進

電気防食の通電に先立ち、全てのコンクリート試験体中の鋼材を電食により腐食させた。電食とは、土中を流れる迷走電流による埋設金属体の腐食として知られているが、本稿では、埋設した鋼材を腐食させる通電処理方法として用いた。電食の方法を図-2 に示す。養生後のコンクリート試験体と対極にしたステンレス板を、プラスチック製容器内の 3% 塩化ナトリウム水溶液中に設置した。コンクリート中鋼材を直流電源のプラス端子に、ステンレス板をマイナス端子に接続し、既往の実験⁶⁾を参考にして鋼材表面積当たり 1.33A/m^2 の電流密度の電流を流した。電食中の鋼材電位は、一旦は貴側に变化したがその後は卑側に大きく变化した。この卑化挙動は、鋼材腐食が発生することにより生じたと考えられることから、電食期間中は、飽和銀塩化銀照合電極 (SSE) を設置し定期的に鋼材電位を測定し、卑化挙動が生じた時点で電流を停止した。なお、電位測定にはインスタントオフ電位差計を用いた。インスタントオフ電位差計とは、通電電流 I と溶液抵抗 R の積に相当する電圧降下分 (IR ドロップ) を除去したインスタントオフ電位を測定するための機器であり、本試験では、当該機器を用いて通電時の電流を遮断して 0.3ms 後のインスタントオフ電位を計測した。各コンクリート試験体の電食期間は、塩化物イオン濃度 2kg/m^3 と 5kg/m^3 のコンクリート試験体で 14 日間、 10kg/m^3 のコンクリート試験体で 6 日間であった。電食終了後のコンクリート試験体は、3~12 日間、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60%RH の室内に静置後に通電試験に供した。

塩化物イオン濃度別コンクリート試験体の電食後の鋼材の腐食状態の一例を写真-1 に示す。電食による鋼材腐食はいずれのコンクリート試験体においても生じてお

写真-1 塩化物イオン濃度別コンクリート試験体の電食後の鋼材腐食状態の一例

表-2 コンクリート試験体の一覧

塩化物イオン濃度 (kg/m³)	目標復極量 (mV)	試験体名称	試験期間 (日)
2	-	CI 2-No CP	250
	25	CI 2-25	
	50	CI 2-50	
	100	CI 2-100	
5	-	CI 5-No CP	250
	25	CI 5-25	
	50	CI 5-50	
	100	CI 5-100	
10	-	CI 10-No CP	250
	25	CI 10-25	
	50	CI 10-50	
	100	CI 10-100	

試験体名称の凡例：CI ○-○

○ 目標復極量
- 塩化物イオン濃度

り、腐食面積は塩化物イオン濃度が高いほど大きくなっていることを外観観察より確認した。塩化物イオン濃度 2kg/m³ の試験体では、腐食が局所化する傾向にあり、下端面近傍に腐食が集中する傾向を示した。

2.3 電気防食の通電条件

コンクリート試験体の一覧を表-2 に示す。試験では、塩化物イオン濃度が異なるコンクリートごとに、無通電試験体 (No CP) と 3 種類の目標復極量 (25mV, 50mV, 100mV) の通電試験体の合計 4 体の試験を行った。

電気防食の通電は定電流方式で行い、直流電源装置のプラス端子に MMO 電極 1 を、マイナス端子に鋼材を接続して、MMO 電極 1 から鋼材へ電流が流入するようにした。定期的に復極量を測定し、復極量が目標値に近づくように通電電流を調整した。

2.4 測定項目

通電中の試験体は、温度 20±2℃、相対湿度 60%RH

図-3 通電停止時の鋼材の腐食速度推定方法

図-4 通電時の鋼材の腐食速度推定方法

の恒温恒湿室に静置した。通電期間に実施した測定の項目およびその方法を以下に示す。

(1) 鋼材電位

コンクリート試験体側面に設けた測定穴に SSE を差し込み、定期的に鋼材電位を測定した。インスタントオフ電位の測定では、IR ドロップは補正されている。なお、SSE で測定した電位を飽和硫酸銅電極基準 (CSE) に換算して示した。

(2) 鋼材の復極量

通電試験体は定期的に通電を停止して、通電停止直後のインスタントオフ電位と停止してから 24 時間経過後のオフ電位の差を復極量とした。

(3) 通電停止時の鋼材の分極曲線

通電を停止してから 24 時間経過後の鋼材のアノードおよびカソード分極曲線を測定した。測定方法は以下のとおりである。すなわち、直流電源装置の電流を任意に変化させた時のインスタントオフ電位を測定し、各測定点を曲線でグラフ化した。各電流における保持時間は 4 分間とした。分極曲線の測定は、アノード分極曲線、カソード分極曲線の順で行った。また、得られた分極曲線から、図-3 に示す方法で鋼材の腐食速度を推定した。アノード分極曲線では、自然電位から 40~60mV 分極時の接線の傾きを求めた。腐食速度は、アノード分極曲線から推定したが、自然電位に近い領域ではカソード反応の影響を受けて鋼材の腐食速度に相当するアノード電流密

図-5 鋼材の復極量の経時変化

度が真値とは異なることが知られている⁷⁾。本試験では、測定値から鋼材の腐食速度を推定した既往の研究⁸⁾を参考にした。その研究では、自然電位から40～60mV分極させた鋼材電位と電流密度の曲線に対する接線は、鋼材の腐食反応を示すアノード分極曲線に近似するとされている。また、その接線の傾きはおおよそ60～100mV/decade⁹⁾であった。なお、本稿では腐食速度を電流密度で表記した。これは、腐食反応の速度は腐食電流密度と等価であることによる。

(4) 通電時の鋼材の分極曲線

通電試験体においては、試験終了時の250日目に通電状態から鋼材電位を貴方向に変化させることにより分極曲線を測定した。測定方法として、直流電源による通電電流を段階的に小さくしていき、電流がゼロに達した後は、直流電源装置の極性を変えて、鋼材がアノード分極するように通電電流を増大させた。各通電電流の保持時間は4分間とした。既往の研究⁸⁾では、測定した分極曲線の極性が変わる点(酸化還元の変曲点)から40～60mVアノード分極させた鋼材電位と電流密度の曲線に対する接線は、鋼材の腐食反応を示すアノード分極曲線に近似するとされている。そのため、図-4に示すように得られた通電時の電位に相当するアノード分極曲線の電流密度を通電時の腐食速度とした。

3. 試験結果

3.1 鋼材の復極量

通電中の試験体の鋼材の復極量の経時変化を図-5に示す。ここでは、コンクリートの塩化物イオン濃度が10kg/m³の通電試験体について示している。通電は目標とした復極量(目標復極量)が得られるように通電電流の調整を繰り返したが、図に示す程度の復極量の変動は避けられなかった。この復極量の変動は、2kg/m³および5kg/m³の塩化物イオン濃度の試験体においても同様であった。各通電試験体の復極量の加重平均値を表-3に示す。各試験体の加重平均値は、図-5に示した鋼材の復極量と経過期間の積分値を試験期間である250日で除すことで

表-3 各試験体の鋼材復極量の平均値

試験体名称	復極量の加重平均値 (mV)
CI 2-25	21
CI 2-50	63
CI 2-100	117
CI 5-25	37
CI 5-50	59
CI 5-100	121
CI 10-25	36
CI 10-50	57
CI 10-100	120

(a) 塩化物イオン濃度 2kg/m³

(b) 塩化物イオン濃度 5kg/m³

(c) 塩化物イオン濃度 10kg/m³

図-6 通電電流密度の経時変化

図-7 鋼材のインスタントオフ電位と
通電電流密度の関係

求めた。復極量の加重平均値と目標復極量の差は4～21mVであった。このような差が生じたのは、本試験で使用したコンクリート試験体中の鋼材のオフ電位の変動が大きいことと、通電電流密度の変化にともなう鋼材の通電時の電位変化が大きく、その結果として復極量の変動が大きくなったものと推測されるが、概ね目標復極量に近い復極量管理ができていると考えられる。

3.2 通電電流密度

通電試験体の鋼材面積当たりの通電電流密度の経時変化を図-6に示す。いずれの試験体においても目標復極量が大きいほど通電電流密度は大きくなり、その序列は通電期間を通して変わらなかった。また、いずれの試験体においても通電電流密度は経時的に低下する挙動を示し、100日を超えた頃から変化が小さくなり安定挙動を示した。塩化物イオン濃度が異なるコンクリートを比較すると、2kg/m³の試験体は、他の試験体に比べて通電電流密度が試験期間を通して小さい値を示す傾向にあった。5kg/m³と10kg/m³の試験体の通電電流密度を比べた場合には大きな違いはないものの、5kg/m³の試験体の方が通電電流密度は小さい値を示す傾向にあった。通電電流密度の低下は、鋼材の腐食速度の低下が影響していると考えられる。鋼材の腐食速度の経時変化については図-9において後述する。

3.3 通電電位と通電電流密度の関係

鋼材の通電電位（インスタントオフ電位）と通電電流密度の関係を図-7に示す。ここでは、塩化物イオン濃度10kg/m³の試験体を例として示す。いずれの試験体においても経時的に左上がりの挙動を示し、鋼材の通電電位の貴化にともない、通電電流密度が小さくなった。また、目標復極量が小さな試験体ほど鋼材の通電電位は貴な値を示し、通電電流密度は小さくなる傾向にあった。鋼材の通電電位の貴化は、次節で述べるオフ電位（自然電位）の経時的な貴化が影響しているものと考えられる。目標復極量を得るための通電電流密度が小さくなることは、陽極や周辺モルタル材への負担も軽減できるため、効率的に電気防食が機能していることになる。なお、本試験

(a) 塩化物イオン濃度 2kg/m³

(b) 塩化物イオン濃度 5kg/m³

(c) 塩化物イオン濃度 10kg/m³

図-8 鋼材のオフ電位の経時変化

における効率的な電気防食とは、小さな通電電流密度で目標の復極量を得られることとしている。この経時的な左上りの挙動は、塩化物イオン濃度が異なる他の試験体においても同様に見られた。

3.4 鋼材のオフ電位

無通電試験体と通電試験体のオフ電位の経時変化を図-8に示す。図中には、参考としてASTM C876の腐食確率を示した。コンクリートの塩化物イオン濃度が5kg/m³と10kg/m³の試験体は、通電の有無に係わらず、50日頃までに大きく電位が貴化し、その後は変化が小さくなったものの試験期間を通して貴化が継続した。試験終了時点の電位は、ASTM基準で「90%の確率で腐食なし」の領域であった。これは、無通電試験体においても同様であった。

(a) 塩化物イオン濃度 2kg/m³

(b) 塩化物イオン濃度 5kg/m³

(c) 塩化物イオン濃度 10kg/m³

図-9 通電停止時の鋼材の腐食速度

コンクリートの塩化物イオン濃度が 2kg/m³ の試験体では、CI 2-100 を除き 150 日を超えた頃から電位の貴化挙動が緩慢になり、試験終了時点においても腐食確率が「不確定領域」にあった。一般的にコンクリート中の塩化物イオン濃度が低いほど電位は貴化するが、本試験ではそれとは異なる結果であった。塩化物イオン濃度が 2kg/m³ の試験体は、無通電試験体 (CI2-No CP) においても 250 日目の時点で 5kg/m³ や 10kg/m³ の試験体 (CI5-No CP, CI10-No CP) よりも卑なオフ電位 (自然電位) を示していた。そのため、塩化物イオン濃度が 2kg/m³ の通電および無通電試験体のオフ電位が低かったのは、電気防食の影響に加えて、コンクリートの緻密性や含水率などの性能の違いによる影響などが考えられるが、本研究で

表-4 鋼材の腐食速度 (250 日目)

試験体名称	通電停止時 腐食速度 (mA/m²)	通電時 腐食速度 (mA/m²)	腐食速度 低減率 ¹⁾ (%)
CI 2-No CP	0.6	—	—
CI 2-25	0.35	0.24	60
CI 2-50	0.28	0.21	65
CI 2-100	0.25	0.18	70
CI 5-No CP	0.9	—	—
CI 5-25	0.66	0.30	67
CI 5-50	0.65	0.30	67
CI 5-100	0.45	0.28	69
CI 10-No CP	2.8	—	—
CI 10-25	1.6	0.95	66
CI 10-50	1.4	0.80	71
CI 10-100	1.1	0.65	77

1) 腐食速度低減率

$$= (1 - \text{通電時腐食速度} / \text{No CP のオフ時腐食速度}) \times 100(\%)$$

はその要因を明確にすることは出来なかった。しかしながら、図-9 で後述する通電停止時の腐食速度の評価では、塩化物イオン濃度が 2kg/m³ の試験体は、5kg/m³ や 10kg/m³ の試験体に比べて試験期間を通して腐食速度が小さいという結果であった。

3.5 通電停止時の鋼材の腐食速度

通電停止時の鋼材の腐食速度を図-9 に示す。図中には、不動態/活性態の閾値¹⁰⁾を 1.0mA/m² として表示した。試験開始時点では、いずれの試験体も電気防食開始前は腐食速度が活性域にあったが、時間の経過とともに低下し、塩化物イオン濃度が 2kg/m³ と 5kg/m³ の試験体では 1.0mA/m² を下回り、不動態領域に到達した。これは、無通電試験体においても同様であった。その一方で、10kg/m³ の試験体では、無通電および通電試験体ともに 250 日目でも不動態領域には至らなかった。しかし、いずれの塩化物イオン濃度の試験体においても試験終了時の 250 日目には、通電試験体と無通電試験体の鋼材の腐食速度に違いが生じ、電気防食による鋼材の腐食速度の低減効果が明確になった。これは、電気防食による環境改善効果が本試験条件では 250 日の通電期間を経て顕著に現れた結果であると考えられる。通電条件別に比較した場合には、試験終了時の 250 日目において目標復極量が大きな試験体ほど鋼材の腐食速度は小さくなる傾向にあったが、本試験では目標復極量が異なっても試験期間を通して鋼材の腐食速度には大きな違いは見られなかった。

3.6 通電時の鋼材の腐食速度

試験終了時 (250 日目) において通電停止前に鋼材の腐食速度を計測した。また、通電停止後においても腐食速度を計測した。通電停止時 (オフ時) および通電時の

(a) C/ 2-No CP (b) C/ 2-25 (c) C/ 2-50 (d) C/ 2-100
写真-2 試験後の状態観察 (塩化物イオン濃度 2kg/m³)

(a) C/ 5-No CP (b) C/ 5-25 (c) C/ 5-50 (d) C/ 5-100
写真-3 試験後の状態観察 (塩化物イオン濃度 5kg/m³)

(a) C/ 10-No CP (b) C/ 10-25 (c) C/ 10-50 (d) C/ 10-100
写真-4 試験後の状態観察 (塩化物イオン濃度 10kg/m³)

図-10 鋼材の腐食減量

鋼材の腐食速度と腐食速度低減率を表-4 に示す。腐食速度低減率とは、無通電試験体の腐食速度に対する各通電試験体の通電時の腐食速度の低減率である。

通電時の腐食速度は、通電停止時の腐食速度に比べて小さくなり、C/ 10-25 の試験体においても不動態／活性態の閾値とした 1.0mA/m² の腐食速度を下回った。通電時の腐食速度は、塩化物イオン濃度が大きくなるほど大きくなり、目標復極量が大きいほど小さくなる傾向にあった。腐食速度低減率で評価すると、いずれの場合も 60～77% の範囲内にあり、塩化物イオン濃度の違いによる影響は小さいが、目標復極量が大きい試験体ほど腐食速度低減率は大きくなる傾向にあった。なお、電気防食により鋼材の自然電位から 100mV 卑側にシフトさせた場合には、電気防食を行わない状態の腐食速度に比べて理論値として最大で 1/50 に低減すると考えられている⁵⁾。しかし、鋼材が不動態化したような状態ではアノード分極曲線の傾き (ターフェル勾配) が大きくなるため、鋼材電位を同じだけ卑側にシフトさせても鋼材腐食が活性な状態に比べて腐食速度の低減効果は小さくなる。本試験では、最大で約 1/5 の腐食速度の低減効果 (C/10-100

の腐食速度低減率 77%) であり、理論値と異なる値であったが、これは、通電試験を開始してから 250 日後の試験体に対して評価したことが影響したもの、さらには図-4 に示す推定方法に起因すると考えられる。鋼材の腐食速度の推定精度を高度化するには、鋼材の分極曲線測定 of 各電流の保持時間や接線の設け方など更なる検討が必要であると考えられる。

3.7 試験体の状態観察と鋼材腐食減量

250 日の通電試験後にコンクリート試験体を割裂して内部の鋼材の腐食状態を観察した。塩化物イオン濃度 2kg/m³, 5kg/m³, 10kg/m³ の各コンクリート試験体の状態を写真 2～4 に示す。いずれの試験体においても鋼材に腐食が観察された。これは、通電試験前に実施した電食による影響と考えられる。また、通電条件別に比較した場合でも腐食程度の違いは明確には観察されなかった。コンクリートは、写真-1 に示した電食後の状態に比べて乾燥していることが外観から確認できた。本試験では、温度 20±2℃、相対湿度 60%RH の一定環境において 250 日間の試験を実施したため、経時的にコンクリートの含水率が低下したことで、無通電試験体においても鋼材の

腐食速度が低下したものと推測された。つまり、本試験条件ではコンクリートの乾燥にともない鋼材の腐食速度が低下したために電気防食による鋼材の腐食速度の低減効果が250日目までの間に判別しにくかったものと考えられる。

250日間の通電後に計測した鋼材の腐食減量を図-10に示す。鋼材の腐食減量は、塩化物イオン濃度が高い試験体ほど大きい傾向にあったが、通電試験前に比べて顕著な増加はなかった。また、通電条件別に比較した場合においても明確な違いは見られなかった。

試験後の鋼材の腐食状態と腐食減量には、通電の有無に係わらず違いが見られず、図-9に関する考察を裏付ける結果とはならなかった。しかしながら、通電により鋼材の環境改善効果が生じたとすると電気化学的な手法は、わずかな腐食状態の違いを判別できることを示唆するものと考えられる。

4. 試験結果の考察

本試験の250日目の時点では、目標復極量を100mVで通電することにより、無通電の場合に比べて鋼材の腐食速度は69～77%低減された。また、25～50mVの目標復極量で通電した場合においても、腐食速度は60～71%低減された。この結果は、現行の電気防食基準である100mVを下回る復極量で通電しても、目標復極量が100mVの電気防食と同程度に鋼材の腐食速度を低減することを示唆するものである。但し、本試験は温度20±2℃、相対湿度60%RHの一定の環境で試験を行ったために腐食環境としては穏やかであったと考えられる。一定環境で試験を行うことで、温湿度の変化にともなう測定値の変動を考慮しなくてもよいが、コンクリート中鋼材の腐食の進展は、乾湿繰り返し環境に比べて抑制されるものと考えられる。乾湿繰り返しを受ける環境では、150～200mVの復極量が必要といった報告¹¹⁾もあり、コンクリート構造物のさらされる環境、コンクリート中の塩化物イオン濃度、鋼材の腐食速度によっては、適用初期に100mV以上の復極量が必要になる場合も想定される。しかしながら、電気防食の適用後に腐食速度が低下した後は、100mV以下の復極量の管理に移行しても十分な防食効果が得られることも考えられる。目標復極量を小さくして通電電流密度を小さくすることが可能となれば、陽極や周囲のコンクリートへの負担も軽減できるといった利点があり、効率的な電気防食の運用につながるものと期待される。

5. まとめ

腐食したコンクリート中鋼材に対して、目標復極量を25mV、50mV、100mVの3水準とした場合の電気防食効

果を実験的に確認した。得られた結果を以下にまとめる。なお、以下の知見は、温度20±2℃、相対湿度60%RHの一定環境において行った試験結果をまとめたものである。

- 1) 目標復極量が大きくなるに従って通電電流密度は大きくなるが、経時的にはいずれの通電試験体も通電電流密度が低下する傾向が見られた。
- 2) 通電試験体の鋼材インスタントオフ電位は、通電電流密度が経時的に低下するとともに貴化した。これは、通電停止時のオフ電位（自然電位）が経時的に貴化したことが要因として考えられる。
- 3) 無通電試験体の鋼材電位は、通電試験体の鋼材オフ電位と同様に貴化したが、250日目における腐食速度は通電試験体の方が小さな値を示し、電気防食効果を確認した。
- 4) 試験終了時の250日目では、目標復極量を100mVとした試験体の腐食速度は、目標復極量50mVおよび25mVとした試験体の腐食速度に比べて小さくなった。また、目標復極量100mVで通電した場合の腐食速度低減率は69～77%であり、目標復極量25～50mVでも、腐食速度低減率は60～71%であることから、現行の電気防食基準である100mVを下回る復極量で通電しても腐食速度は低減することを確認した。
- 5) 本試験では、通電250日目において通電条件別に比較した場合の鋼材の腐食状態や腐食減量に違いは見られなかった。

参 考 文 献

- 1) 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），pp.53-54，2001
- 2) 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研究委員会報告書，pp.9-15，1994
- 3) 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研究委員会実験報告書，pp.20-21，1995
- 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) 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，59，pp.121-128，2010
- 6) 山本悟，田代賢吉，立林喜子，石井浩司，関博：湿潤環境にあるコンクリート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，Vol.22，No.3，pp.1-11，2011.9
- 7) 石原顕光，太田健一郎：原理からとらえる電気化学，裳華房，2006
- 8) 塚本英晃，香川勇樹，小林浩之，望月紀保：分極曲線を用いた電気防食効果の判定手法に関する検討，材料と環境 2014 講演集，pp.351-352，2014.5
- 9) 雨宮佑太，福手勤，望月紀保：コンクリート中鉄筋の電気防食効果評価基準に対する考察，材料と環境 2008 講演集，pp.297-300，2008.5
- 10) G.K.Glass：The 100-mV Potential Decay Cathodic Protection Criterion，Corrosion，March，pp.286-290，1999

Fundamental Study on Depolarization Value and Protection Effects
of Steel in Concrete under Cathodic Protection

By Shunsuke Otani, Muhammad Akbar Caronge , Daisuke Yamamoto and Hidenori Hamada

Concrete Research and Technology, Vol.28, 2017

Synopsis: Cathodic protection controls the corrosion current of steel in concrete by polarizing the steel potential in the less noble direction. Furthermore, cathodic protection is accompanied by spin-off reactions such as increase in pH by the generation of OH^- ion and decrease in chloride ion concentration near the steel surface. In this study, a cathodic protection test was conducted to maintain depolarization values of 25 mV, 50 mV, and 100 mV for the steel in concrete specimens with different levels of chloride ion concentration. The protection effect was examined on the basis of the corrosion rate of the steel bars in concrete. The corrosion rate of the steel bars under cathodic protection was observed to decrease to less than 1.0 mA/m^2 , indicating a passive condition. The results also showed that the corrosion rate of steel decreases under cathodic protection even for depolarization values of less than 100 mV, which is the standard value under cathodic protection conditions.

Keywords: Reinforced Concrete, Cathodic Protection, Depolarization Value Management, Corrosion Rate