

# 報告 電気防食における鋼材電位の評価について

堀越 直樹\*1・小林 俊秋\*1・中村 雅之\*2

**要旨：**コンクリート構造物の電気防食は、必要な防食電流による鋼材電位の適切な制御が重要である。電気防食中の鋼材電位はモニタリング装置である照合電極を用いて測定され、所要の分極、復極量を満たすような防食電流が設定される。筆者らは塩害環境下にある鉄筋コンクリート橋脚に外部電源方式の電気防食工を施工したが、照合電極の設置位置や個数の決定に課題が残り、試験的に外付け型の照合電極を用いて防食範囲全面にわたる電位測定を実施した。その結果、電気防食の効果を視覚的に把握できたとともに、埋込み型照合電極に重点をおく維持管理の課題を提示した。

**キーワード：**電気防食, 照合電極, 自然電位, 復極量, ニッケル被覆炭素繊維シート

## 1. はじめに

電気防食工法では、所定の防食電流が防食対象に対し均等に伝達されることが必要不可欠であり、その防食効果を適切に維持管理することが極めて重要である。一般には、コンクリートかぶり部に埋め込んだ照合電極を用い、鋼材電位の分極、復極量を測定することで防食効果を評価している。土木学会等の規準では、鋼材電位の変化量が100mV以上を満たすことで、防食効果が達成されるとみなしている。

しかし、照合電極の埋込み位置や数量的な制約などから、埋込み型照合電極からの測定値はその埋込み位置周辺の情報に限定されることが想定されるため、防食範囲が広い場合や通電回路の状況によっては、構造物全体の代表値として管理することの妥当性、すなわち、設計で想定した防食効果が十分に得られているかどうかについて検証しておく必要があると考えられた。さらに、電気防食の効果確認を目的に、防食範囲全体にわたって電位測定を行った報告はほとんど見られない。

このようなことから、2007年に電気防食工法による補修工事が行われた橋梁を対象とし、その維持管理の一環において鋼材の電位測定を実施した。具体的には、埋込み型照合電極による鋼材の電位測定に加え、外付け型の照合電極を用いて防食範囲全体の鋼材電位をコンクリート表面から測定した。

本報告は、高知県に位置する橋梁で行った上記に関わる測定結果から防食効果を評価するとともに、電気防食工法における現行維持管理の妥当性について述べるものである。

## 2. 対象橋梁について

### 2.1 構造形式および劣化状況

対象橋梁は高知県内の漁港に架かる6径間プレテンシ

ョン方式単純T桁橋および鋼桁橋であり、1973年に竣工した。橋脚の構造は、鉄筋コンクリート単柱式および壁式である。鉄筋のかぶりは60mmから100mm程度であるが、写真-1に示すような鉄筋の腐食が顕在化し、コア抜きによる調査によっても鉄筋位置で1.2kg/m<sup>3</sup>を大きく上回る塩化物イオン量が測定された。また、構造物表面からの中性化深さは20mmであった。全体一般図を図-1に示す。



写真-1 鉄筋の腐食

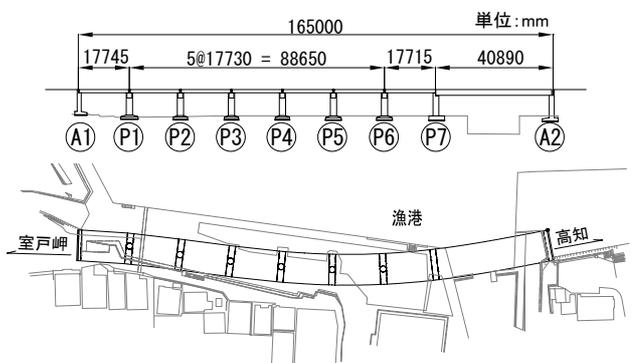


図-1 全体一般図

\*1 オリエンタル白石 (株) 技術研究所 (正会員)

\*2 極東鋼弦コンクリート振興 (株) 技術部 (正会員)

## 2.2 電気防食の概要

対象橋梁のP3からP7橋脚は、電気防食工法による補修工事が実施されている。防食範囲は写真-2に示すように橋脚梁部であり、陽極装置にはニッケル被覆炭素繊維シート（以下、Ni/CFSと記す）方式が採用されている。Ni/CFSは幅60mm、厚さ0.25mmの帯状陽極であり、高アルカリ性の高分子を含んだバックフィルに包囲され、保護トレイ内に収容されている（写真-3）。トレイはFRP製で、チタンネジを用いて橋脚梁部に水平に固定されている。陽極装置の配置間隔は365mmであり、鉄筋位置は探査していないが、これまでの実験や施工実績をふまえて決定した。照合電極はP3,P5,P7の3箇所を設置されている。

## 2.3 測定対象橋脚

P7橋脚は対象橋梁の中で電気防食の施工面積、陽極配置段数が最大である。そのため、鉄筋などの電位測定箇所を多くでき、防食効果の評価に適していると考えられ測定対象に選定された。橋脚梁部の全面に陽極が設置されているが、陽極が分断されず均等配置されたA1側を測定箇所を設定した。P7橋脚A1側の陽極配置を図-2に、電気防食外観を写真-4に示す。

照合電極は、耐久性に優れた二酸化マンガン電極（以下、MNOと記す）が1箇所埋設されている。その埋込み場所は、コンクリート表面にひび割れが生じ、鉄筋の腐食が激しいと判断された箇所、構造物の中心に近いことなどを考慮し選定された。

また、電源装置から陽極への通電箇所は、陽極材の電気抵抗による電圧降下や陽極の負荷低減を考慮し、橋脚梁部の中央に設けた通電点から左右へ電流を流している。防食電流は0.5A、電流密度は $1.8\text{mA}/\text{m}^2$ に設定されている。

なお、P7橋脚A1側の一部はコンクリートが剥落するほどの劣化が生じており、電気防食に先がけて断面修復工法による補修を実施した。鉄筋をはつりだし、腐食部をワイヤーブラシで清掃後、低電気抵抗タイプの高強度セメントモルタルをこて塗りしている。さらに、一部に漏



写真-2 電気防食の外観

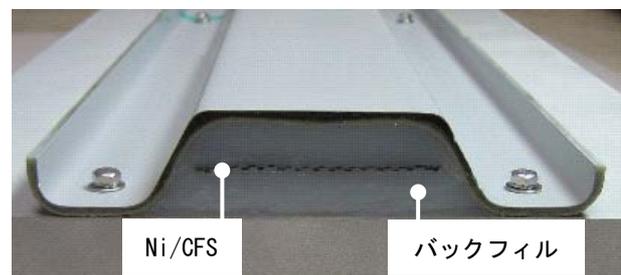


写真-3 陽極装置の断面

水を伴う0.2mm幅のひび割れが生じており、超微粒子セメントによるひび割れ注入を行っている。

## 3. 鉄筋電位の測定方法について

### 3.1 測定箇所

鉄筋電位の測定は、埋込み型照合電極に加え、Ni/CFS陽極保護トレイの間に露出するコンクリート表面において実施した。図-3に示すように、10段に配置された各陽極の間を対象とし、水平方向の測定間隔を300mmに設定し、全293箇所の測定位置を決定した。鉄筋位置は考慮していない。

地上から測定箇所までの高さは8m程度あるが、写真-5に示すように照合電極を長尺ロッドの先端に取付けた治具を製作し、地上から測定作業を行った。

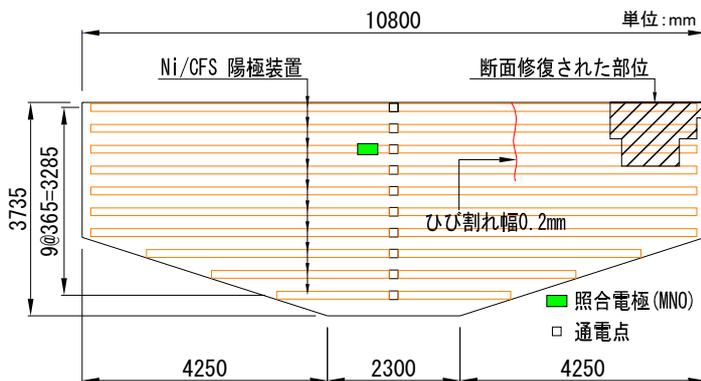


図-2 P7 陽極装置の配置図



写真-4 P7の電気防食装置

### 3.2 照合電極による測定値の換算

外付け型照合電極は銀塩化銀照合電極（以下、SSEと記す）を使用した。照合電極からのすべての測定値は、標準水素電極を基準とした温度補正を加味し、銅硫酸銅照合電極（以下、CSEと記す）電位へ換算した。換算式を(1)、(2)に示す<sup>1)</sup>。

$$Y_{25}^{CSE} = X_t^{SSE} - 120.1 - 1.10 \times (t - 25) \quad (1)$$

$$Y_{25}^{CSE} = X_t^{MNO} + 85.5 - 1.76 \times (t - 25) \quad (2)$$

$Y_{25}^{CSE}$  : CSEへの換算電位(mV vs. CSE)

$X_t^{SSE}$  : SSEによる測定電位(mV vs. SSE)

$X_t^{MNO}$  : MNOによる測定電位(mV vs. MNO)

$t$  : 温度(°C)

### 3.3 鉄筋電位の測定項目

#### (1) 自然電位

電気防食の通電開始前、コンクリート表面にSSEを当て鉄筋の自然電位を測定した。自然電位の評価は、表-1に示すとおり、米国材料試験協会（以下、ASTMと記す）に基づく判定基準を用いた<sup>2)</sup>。

#### (2) オフ電位

オフ電位は通電停止から十分な時間が経過した後に測定する鉄筋電位である。通電開始前の自然電位と比較することで、防食された鋼材の環境変化を捉えることが可能と考え、SSEによる測定を行った。本測定では、通電停止から14時間から19時間後の電位を測定した。

#### (3) インスタントオフ電位

電圧降下の影響を排除するため、防食電流を一時的に遮断した瞬間の鉄筋電位をインスタントオフ電位と呼ぶ。インスタントオフ電位とオフ電位の差を復極量として算出し、100mVの電位変化量を確認した。

#### (4) 分極試験

分極試験は適切な防食電流を決定するための試験である。電源装置の電流量を徐々に増加させ、コンクリート表面積あたりの電流量（以下、電流密度と記す）と鉄筋分極量との関係を把握する。マイナス方向への分極量が100mVに達したときの電流が防食基準を満足する。通電開始前に必須の試験であるが、防食効果の確認や電流調整のため点検時にも実施されている。なお、分極試験についての測定値は、埋込み型照合電極のみを使用したものである。

これらの電位測定、試験には、100MΩ以上の高入力抵抗を有する直流電圧計を使用した。また、外付け型照合電極を用いた鉄筋電位の測定に先立ち、測定対象のコンクリート表面を予め30分間程度散水し湿潤させた。

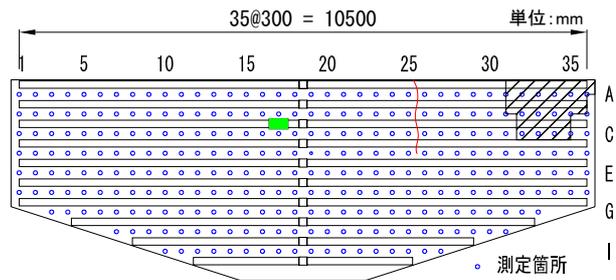


図-3 SSEによる測定位置



写真-5 測定器具

表-1 自然電位による鉄筋腐食の確率

自然電位 (mV vs. CSE)	腐食の確率
$E > -200$	90%以上の確率で腐食なし
$-200 \geq E > -350$	不確定
$-350 \geq E$	90%以上の確率で腐食あり

### 3.4 測定時期

P7橋脚の多点を対象とした各電位測定は、電気防食の通電開始時を初めとし、通電から74日目、通電から272日目の3回実施した。表-2に測定時期と項目を示す。表中の気温は、測定作業中8時から17時までの平均値である。現場では、インスタントオフ電位を測定した後に通電を停止し、翌日にオフ電位の測定、分極試験を実施した。

表-2 測定時期および項目

		通電累計 (日)	測定項目 および試験	気温 (°C)
世 工 測	通電前	-	自然電位	16.8
	通電開始	0	分極試験	10.3
		4	インスタントオフ電位	10.7
築 地	第1回測定	74	オフ電位	20.6
	第2回測定	272	分極試験	11.8

#### 4. 測定結果および考察

P7橋脚A1側における各電位の測定結果を濃淡図に表示する。図-3で示したように、測定位置は上からA, B, C行, 左から1,2,3列で管理している。濃淡図内の赤淡線は断面修復された部位, 赤丸はMNO照合電極の埋設位置を示す。表-3は各測定時におけるMNOによる測定値をCSEへ換算した電位である。これらの値によると鋼材電位の復極量は100mVを満たしており, MNO埋設位置においては, 所要の電気防食効果が得られていると考えられる。以下すべての電位はCSEへの換算値である。

##### 4.1 自然電位およびオフ電位

図-4(A)は通電前の自然電位分布である。緑色で示している-200mVから-100mV程度の電位分布が多くを占めている。梁部先端の上部では, -250mV以下の分布が見られ, 特に, モルタルによる断面修復を実施した付近の鉄筋電位は-300mV以下と低くなっている。これは, 断面修復された部位は, 使用材料や材齢などが既設コンクリートと異なっているためであると考えられる。断面修復から通電までの期間は1ヶ月程度であった。また, ASTMの判定基準によると, 鋼材腐食の確率は, 不確定とされる範囲である。MNOは-138mV, SSEによるその近傍は-160mVとなり, 差は22mVであった。MNOとSSEの測定値に差が生じる要因は, 電極から鋼材までの距離がかぶり厚分異なっていることが挙げられ, より鋼材に近いMNOの方が精度的に優れていると考えられる。

図-4(B)は通電から74日目のオフ電位分布である。電位がプラス方向へ変化した範囲が増える一方で, 断面修復された部位に接する左側領域を中心に, -350mVから-250mVの比較的低い電位が発生した。この傾向は, 図-4(C)に示す通電から272日目のオフ電位分布においても見られ, 30列の電位低下は-390mVと大きくなっている。また, ひび割れおよび漏水の見られた測点25列付近の電位についてもマイナス方向へ大きくなる傾向となった。

断面修復された部位では, その修復に用いた材料成分など, 電位に関わる環境が既設コンクリートと異なっていると考えられ, 既設コンクリートとの境界付近ではマクロセルが形成され, 鉄筋の腐食しやすい状況にあると考えられる。

断面修復された以外のほとんどの測点においては, 電位がプラス方向へ変化する傾向となっている。これは, ASTM判定基準によると腐食確率が小さくなった現れであり, 防食電流が鉄筋に対し有効に作用した結果であると判断できる。

MNOの換算値は74日目で-151mV (-130mV vs. SSE), 272日目で-132mV (-140mV vs. SSE)であり, MNOとの差は20mV程度となった。

表-3 MNOによる測定値

自然電位	: -138	4日	74日	272日
インスタントオフ電位		-296	-271	-242
オフ電位		-151	-151	-132
復極量		145	120	110

単位:mV vs. CSE

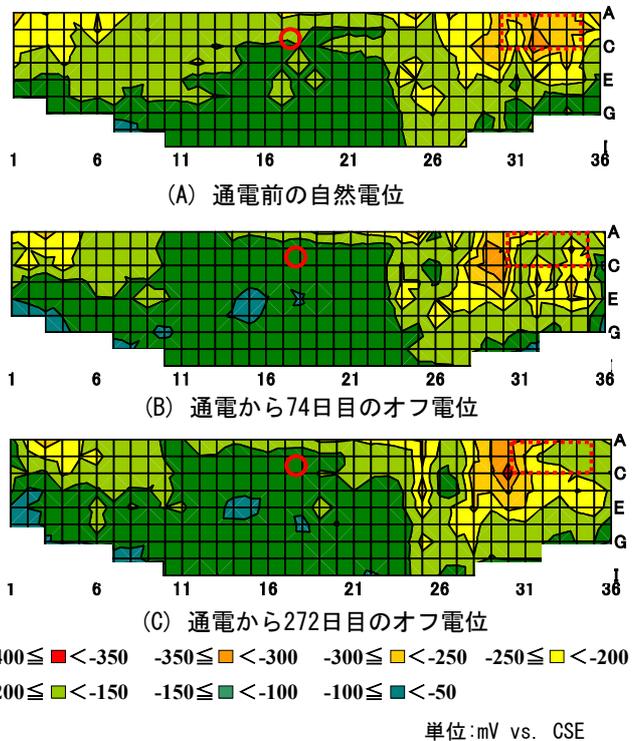


図-4 鉄筋の自然電位およびオフ電位

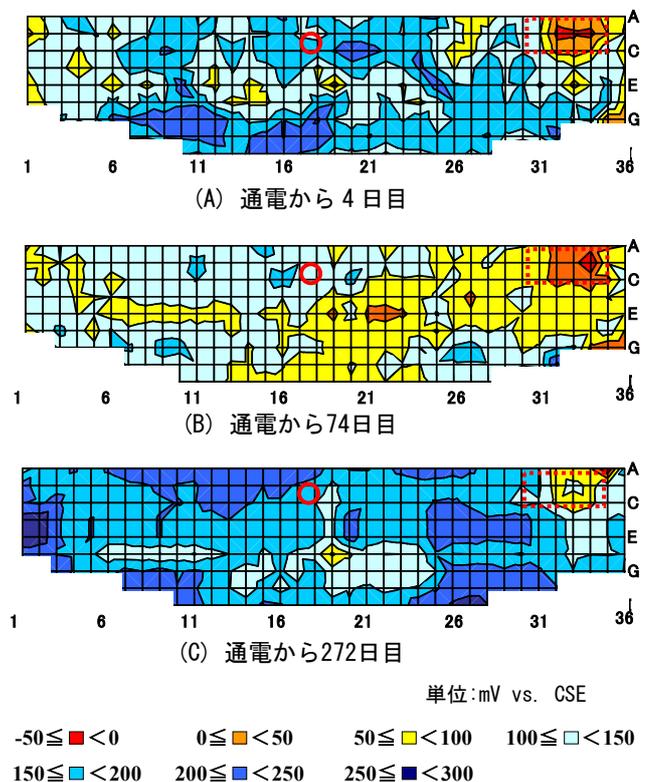


図-5 鉄筋の復極量

## 4.2 復極量

図-5に復極量の分布を示す。通電から4日目(A)では、ほとんどの測点において防食基準であるプラス方向へ100mVの分極量が達成されている。しかし、断面修復された部位では最大50mV程度の復極量に留まった。

通電から74日目(B)では、多くの測定点において復極量の低下が見られ、50%の測点が100mVの復極量を満足しない。しかし、MNO近傍では140mV、MNOによる測定では120mVの復極量を生じる結果となった。

通電から272日目(C)では、96%の測点で100mVの復極量を確認できたが、断面修復された部位については、80mV程度の復極量に留まった。MNO近傍では-150mV、MNOによる測定では-110mVの復極量であり、40mVの差となっている。

図-6は通電74日目と272日目の復極量を断面修復の影響を受けないと思われた測定箇所(D)行を抽出して比較したものである。横軸は測定箇所を表す。各日数においてばらつきは見られるものの、端部に向かうほど分極、復極量が低下するなどの傾向は見られない。所要の防食電流は陽極の通電点から端部まで十分に伝達していると考えられる。

## 4.3 分極試験

分極試験の比較を図-7に示す。通電から273日目の分極曲線の勾配は、通電開始時および74日目に比較して緩くなっており、所定の分極までに大きな電流密度を必要としている。このとき、防食電流の変更を検討したが、復極量については概ね100mVの変化量を満たしたことから、今後の点検において再度検証することとしている。

## 5. 維持管理の課題

照合電極の配置については、土木学会の現行規準等に記されており、1回路あたり2箇所以上必要とされている。また、埋設位置については飛来塩分量などの環境条件を考慮することが要求されている。本橋梁の防食回路は規準に基づき、P3からP7までの1回路あたり3箇所の照合電極が埋設されている。しかし、橋脚のように構造物の配置や形状によって防食範囲が不連続、環境差が大きいと考えられる場合、さらに、断面修復やひび割れ注入などを施した部位については、積極的にモニタリング装置の追加を検討すべきだと考える。

本橋梁の電位測定では、断面修復された部位やひび割れ注入を行った箇所において、復極量が基準値に満たない傾向やオフ電位がマイナス方向へ移行する傾向が見られた。これらは材料や材齢、塩化物イオン量などが既設コンクリートと異なっていることが関係し、マクロセルによる鋼材腐食が進行しやすい状況であると考えられる。

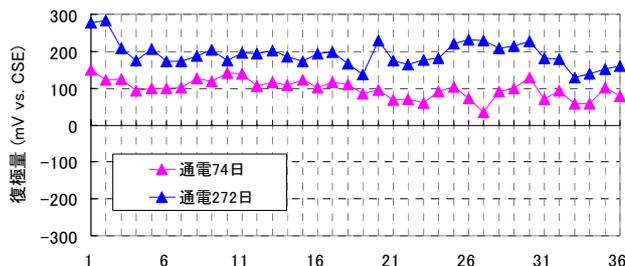


図-6 復極量の比較

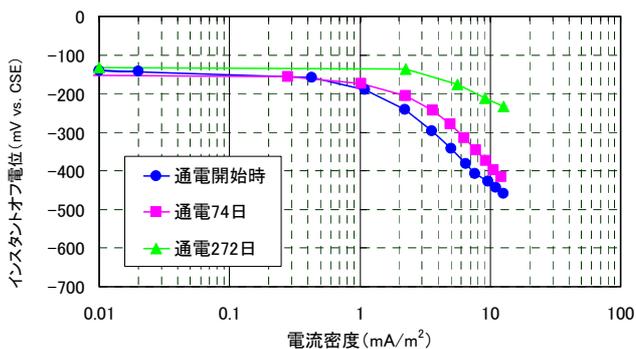


図-7 分極試験の比較

このような領域を、埋込み型照合電極のみで精度良く把握することは困難であると思われ、測定現場の状況にもよるが、外付け型の照合電極を用いたモニタリングは構造物の維持管理精度を高める上で有効と考える。

## 6. まとめ

- (1) 鉄筋電位の多点測定によって、電気防食の効果を視覚的に捉えることができた。
- (2) 埋込み型照合電極による測定と外付け型照合電極による測定において、最大40mV程度の差が生じた。
- (3) Ni/CFS陽極装置において、通電点からの距離による電気防食効果の低下は見られなかった。
- (4) 断面修復などを行った部位については既設箇所との電位差が大きくなる可能性があり、照合電極の設置を検討するか外部からの測定を検討し、適切な防食電流を設定する必要がある。

謝辞：本橋梁の電気防食工および電位測定にあたっては、(株)ナカボーテックをはじめ関係各位から多大なご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 腐食防食協会：腐食・防食ハンドブック 2000
- 2) ASTM C876: Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel Concrete

