

# 論文 電気防食を適用した鉄筋のインスタントオフ電位に関する研究

田中 一弘\*1・小玉 俊明\*2・篠田 吉央\*1

**要旨:** 電気防食の防食効果確認方法として、電流遮断直後の電位を計測する必要があるが、測定値がばらつきやすく、一般的な電位差計では判読困難な事例がみられる。今回、複数のモデルケースや実橋梁によるインスタントオフ電位の測定を行うことで、電気化学的視点から電位の測定に必要な条件について検証した。

また、新たに開発した携帯型の電位差計を用い、その有効性について検証した。

**キーワード:** 塩害, 電気防食, 維持管理, 電位, インスタントオフ電位, 電流遮断法

## 1. はじめに

塩害対策の一つとして適用される電気防食は、塗装やめっき等の環境遮断法とは異なり、その市場と用途は限定されているが、場合によっては、卓越して有効な方法であるとされる。電気防食では腐食電流を打ち消すよう構造物に外部電源等を用いて電流が印加されている。図-1に電気防食システムの等価回路を示す。

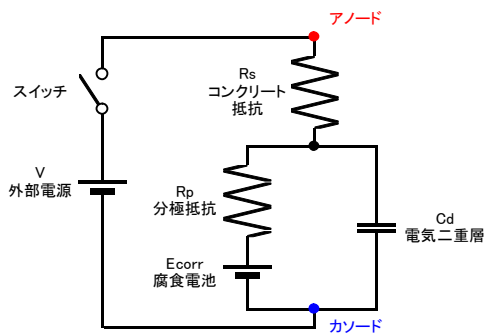


図-1 電気防食系の等価回路モデル

通電がオフの状態では、鉄には腐食電流が存在する場合があります。腐食が進行するが、通電を開始すると防食電流により打ち消され腐食は事実上停止する。電気防食の防食効果確認として、鉄筋の電位の測定が行われる。測定される通電時の電位は、コンクリートを介して防食電流を鋼材に供給するため、コンクリートの抵抗と防食電流の積によって生じる電圧降下(便宜上 IR ドロップと呼ぶ)が加算された電位となる。IR ドロップは防食効果に寄与しておらず、この部分を除去した電位(インスタントオフ電位)の測定が必要となる。インスタントオフ電位の測定として電流遮断法(カレントインタラプト法)が一般に用いられている<sup>1), 2), 3)</sup>。これは防食電流の通電を遮断した直後、IR ドロップは瞬時に応答するのに対し電気化学反応による応答は遅いということから両者を区別することができる。しかし、原理は簡単であ

るが、構造物防食の現場測定では困難を伴うことも多い。また単発のパルス測定を扱うものであること、さらに高抵抗環境を取り扱うことから、電源や環境からノイズの影響を受け易く、測定値がばらつきやすい。1994年の報告<sup>4)</sup>においても理論的には測定は電流遮断後からの時間が短いほうがよいが、測定器および測定技術の関係で短時間測定は困難な場合が多いとされている。

そこで、電流遮断直後の電位変化について電気化学的に検証した。また、新たに開発した電位差計の評価を行い、コンクリート中のインスタントオフ電位の測定の条件について検証した。

## 2. 電流遮断後の電位変化について

図-2は図-1に示される電気防食系の模擬開路を作成し、電気二重層(Cd)と分極抵抗(Rp)の条件を変えながら通電状態から電流遮断時に移行したときの電位の経時変化を示す。IR ドロップ分  $E_{Ohm} = IR_s$  は瞬時に応答し、図-2では、垂直な線分として表される。その後、ごく短時間で電気化学反応に起因する降下分が式(1)に示すように指数関数的に変化する。緩和時間と呼ばれ図-1に示される回路ではRpとCdの積(=RpCd)に等しい。

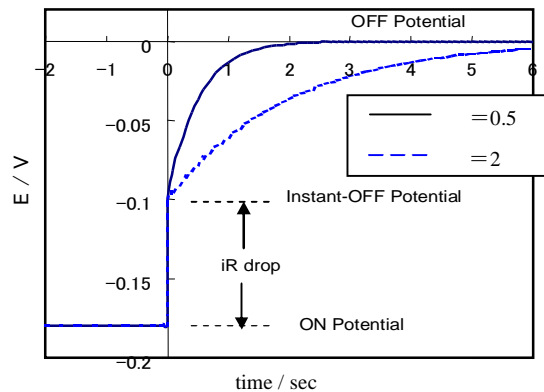


図-2 電流遮断後の電位の経時変化

\*1 (株)ナカボーテック 事業統括部 RC 推進部 (正会員)

\*2 (株)ナカボーテック 技術研究所 工博

$$E = E_{\text{Farad}}(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (1)$$

$E$  : 電気化学反応に起因する電位  
 $E_{\text{Farad}}$  : 過電圧の定常値  
 $t$  : 電流遮断直後からの時間  
 $\tau$  : 緩和時間 (時定数) =  $R_p \cdot Cd$

ここで重要なことは、IR ドロップは電気防食の立場からは無効な成分であるが、電気化学反応による電圧降下分は防食に有効に利用できる電位ということである。淡水のような水溶液中では、緩和時間 ( $\tau$ ) は 100msec から sec のオーダーもあり通電を遮断した直後の電位を一般の電位差計を用い、目視で読み取ることができるとされている。しかし、大気中、没水中に関わらずコンクリート中では鉄筋の界面に誘電率が非常に大きい水分子が十分供給されないため、電気二重層容量 ( $Cd$ ) は水中に比べて小さく、その緩和時間は短いことが予測された。

### 3. 検証内容

#### 3.1 実橋によるインスタントオフ電位の測定

日本海にある某橋梁において、外部電源方式による電気防食が実施されていた。直流電源装置は、電源トランスとシリコンダイオード・ブリッジから構成されていた。防食電圧の調整はトランスの巻き線比の切り替えにより可能となっていた。測定は、その中の第 2 系統について実施した。直流電源装置に付属する電流および電圧計はそれぞれ 1.27A および 1.98V を示した。通電時電位の波形記録は携帯用オシロスコープにより行い、インスタントオフ電位の記録にはペンレコーダーを用いた。また、電流のオン・オフのスイッチングは直流電源装置に設置してある電源スイッチを用いた。

防食された鉄筋の電流遮断後の電位の時間変化のうち図-3 で示す比較的遅い部分、数秒後以後では  $\tau t$  に比例して電位は減衰する。いわば放物線則的变化である。これは、中性化の  $\tau t$  則と同様に反応が拡散律速であることを示唆している。コンクリート電位の過渡現象測定に

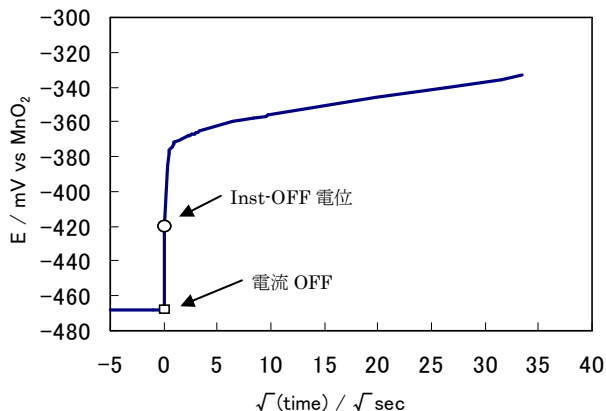


図-3 某橋梁における電流遮断後の電位の経時変化

おいて放物線則的变化は、溶存酸素の拡散影響と考えられた。電気防食状態では鉄筋表面近傍は酸素欠乏状態にあったものが、電流遮断と同時に鉄筋への酸素拡散が開始される。しかしコンクリート中での酸素の拡散速度が遅いため、定常な酸素濃度に達するのに時間がかかり、電位安定化するのに長時間を要する。ここで過電圧は時間の関数として式(2)のように表せ<sup>5)</sup>、アメリカの腐食・防食指針である Nace Standard では、酸素の拡散速度は電化移動に比べさらに緩慢なプロセスであることを認めている<sup>3)</sup>。

$$E \propto C(L.t)/C_0 = 2\zeta \sqrt{Dt/L^2} \quad (2)$$

- $E$  : 鉄筋の復極電位  
 $C$  : 酸素濃度  
 $C_0$  : 初期酸素濃度  
 $L$  : コンクリート表面からの距離  
 $t$  : 電流遮断直後からの時間  
 $Dt/L^2$  : 緩和時間 (時定数)

それより早い時間での変化は、電位の指数関数的変化と考え、十分時間が経過した時の定常電位 ( $E_{\text{Farad}}$ ) と復極電位 ( $E$ ) の差分を  $\ln(E_{\text{Farad}} - E)$  として、 $t$  の関数としてプロットし直したものを図-4 に示す。電流遮断後の極めて短時間における電位変化は指数関数型減衰を示し、式(1)で示される直線式に概略一致した。また、ペンレコーダーによる測定のため、十分正確な測定値は得られないが、このときの緩和時間 ( $\tau$ ) は、0.05sec 以下である。これらのことから、界面が図-1 に示すモデルで構成されていることを示唆していた。減衰は緩和時間 ( $\tau$ ) が短いほど速く、長いほど遅い。そのため、図-3 や図-4 に示すように減衰時間が速いコンクリート中では緩和時間が短いことを示唆した。

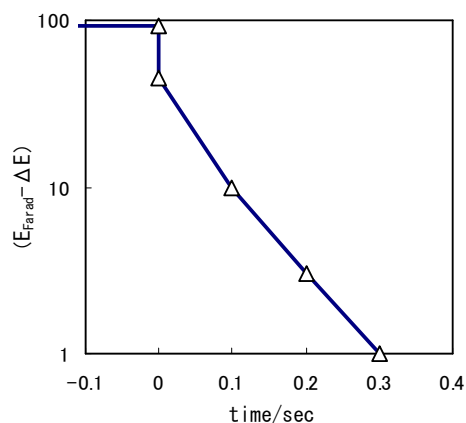


図-4 電流遮断後の電位の経時変化 (片対数)

従来、インスタントオフ電位の測定は電流遮断後 0.1 から 1sec に行えば数%の誤差測定できると考えられていた<sup>4)</sup>。しかし短時間で起こる指数関数的に変化する電圧

降下は、すでに収束しており、誤差範囲が大きくなる可能性を示唆した。

### 3.2 電位差計の評価

開発した電位差計は、電子制御技術によって緩和時間より十分短い時間 1 万分の 1 秒 (0.1msec) 程度で電流遮断直後の電位を測定表示する計器である。回路は a) ON/OFF 時間およびその比が可変な周期的パルスの発生、b) 制御信号に応答する形で直流電源を周期的に ON/OFF することができる電流スイッチング回路および c) 防食電流 OFF 時の電位を高速 AD 変換し、これをメモリーに書き込み必要な演算をする要素から構成される。複雑な処理は全て電子制御される。制御信号としては図-5 で示される防食電流スイッチング (CP Current) と電位サンプル (E-Sample) の 2 種のパルス信号を与える。このとき電流遮断時間を通電時間に比べて十分小さくすれば (すなわち  $t_{off} \ll t_{on}$ ) 通電時に計測される電位は通常に通電時電位とみなせる。このように適切なタイミングでサンプリングすることにより通電時電位とインスタントオフ電位の同時測定を可能としている。測定された電位は複数回繰り返してサンプリングされ、その平均値がインスタントオフ電位として液晶画面表示される。

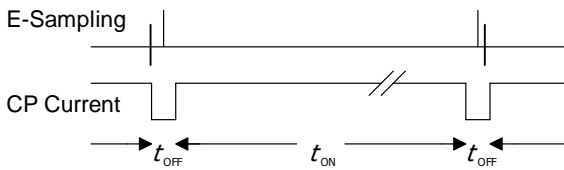


図-5 制御信号のタイミングの一例

電気防食で使用する直流電源装置は、塩害地域といった非常に厳しい環境のため、耐久性のある装置が望まれており構造が単純な全波整流電源を使用しているケースが多い。ここでは、電位差計がこのような電流に含まれる脈動成分 (リップル) を含む直流電源装置において正しく機能するか図-6 に示す模擬回路により検証した。

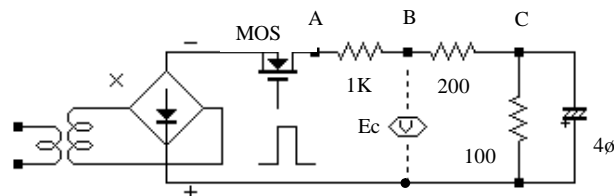


図-6 模擬回路

図-7 は点 B における電位 ( $E_c$ ) と電位差計の示すインスタントオフ電位 (Inst-Off E) を示す。電位差計による電流遮断時のタイミングは直流電源電圧の波形と同期させていない。その場合でも、電流遮断時にサンプリングさ

れた電位は波の山の頂点の電位にほぼ等しく、正確にインスタントオフ電位を計測していることを示していた。

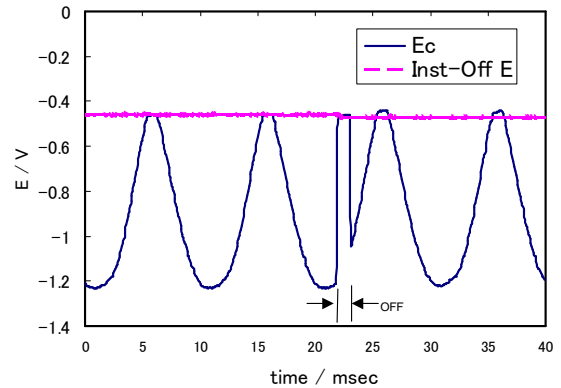


図-7 全波整流波形のインスタントオフ電位

### 3.3 淡水モデル実験

コンクリート中に比べ緩和時間が長いと思われる淡水中の鋼材についてインスタントオフ電位の測定を行った。実験は、水道水に浸漬された炭素鋼板を用いた。対極は白金めっきチタン線を用い、照合電極は飽和塩化銀照合電極 (SSE) を用い、鋼板の表面積は  $10\text{cm}^2$  とした。インスタントオフ電位は開発した電位差計を使用した。また電気化学定数を求める目的から淡水中の鋼板、腐食電位における電気化学インピーダンス測定を行った。図-8 は炭素鋼板のインスタントオフ電位測定に伴う電位変化のオシログラフである。電流遮断直後のオフ時間を  $0.3\text{msec}$  とし、測定は通電復帰の直前に行っている。このように緩和時間が十分に大きい場合、 $0.3\text{msec}$  の電流遮断時間であれば、異なる通電電流密度であっても遮断時間範囲において電位は平坦であり、インスタントオフ電位として十分正確な値を示していると考えられた。

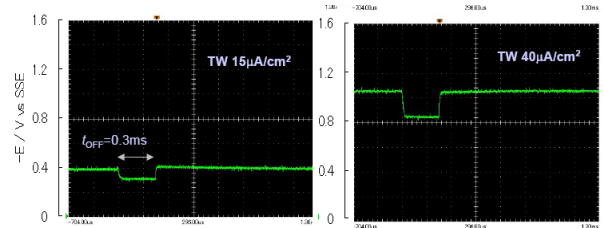


図-8 淡水モデルのインスタントオフ電位測定

図-9 は淡水中で測定された炭素鋼の電気化学インピーダンス測定結果である。炭素鋼の表面状態の違いによる緩和時間 ( $\tau$ ) の変化を確認するため、試料 A は照合電極を鋼表面から約  $5\text{cm}$  の位置 (遠距離) に置いた場合、試料 B は表面のごく近傍 (近距離) に置き、測定の直前に酸洗を行なったものをそれぞれ測定した。試料 A において距離を離れたのはプロットする際、グラフが重ならないようにするためである。図に示すように、低周波数側

の折れ点周波数はいずれも 0.1Hz 以下であった。このため、淡水モデルによる炭素鋼板の電気化学反応の緩和時間( )は 10sec 以上になることを示唆しており、電流遮断時の瞬時変化値を目読して計測しても安定的に測定できると考えられた。

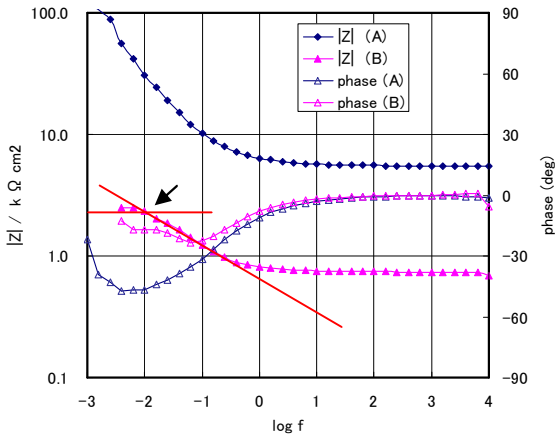


図-9 淡水モデルの電気化学インピーダンス

### 3.4 鉄筋コンクリートモデル実験

鉄筋コンクリート試験体と開発した電位差計の検定計測系を図-10に示す。コンクリート試験体には 13 (mm) の鉄筋を 4 (本) 配筋し、その寸法は 220×220×110 (mm) , Cl 濃度は 15 (kg/m<sup>3</sup>) とした。使用された鉄筋はあらかじめ乾湿繰り返し試験機で発錆させた。コンクリート試験体表面にアルミニウム板を粘着性導電性高分子膜で貼り付け電気防食用陽極とした。照合電極はガラス管に挿入された SSE を用い、先端液絡部には高分子ゲルを充填した。SSE 先端を鉄筋になるべく近づけ、IR ドロップを低下させる目的から、コンクリート試験体にドリルで 2 地点(A および B)を穿孔し、SSE 先端を挿入した状態で測定を繰り返し行った。この状態での測定を便宜上内部電位測定と呼ぶ。直方体の一頂点を O として、ここから図に示される方向に(x, y)座標(mm 単位)をとると、穿孔位置 A および B はそれぞれ(108, 109)および、(70, 114)で表された。なお電源は直流定電流装置を用いた。

図-11 は電位差計により電流遮断時間を 0.3msec とし、通電復帰したときの鉄筋の電位の過渡変化を示している。電流遮断時の電位は十分平坦であり、安定した読み取り値が得られていた。通電復帰時の電位の overshoot は定電流装置に起因するものである。定電流装置はそれが正常に動作しているときは閉回路を構成していなければならない。インスタントオフ電位を測定する時は強制的に回路を短時間遮断するのであるが、この遮断期間、定電流装置はいわばコントロールを失った状態にある。電流遮断から通電開始状態に戻すと定電流装置の制御回路は正常な状態に復帰しようと高い電圧を印加する。これが通

電復帰時の overshoot として現れるのであるが、インスタントオフ電位の読み取りは定電流装置のコントロール状態とは無関係に行われるため、測定値に影響を与えない。

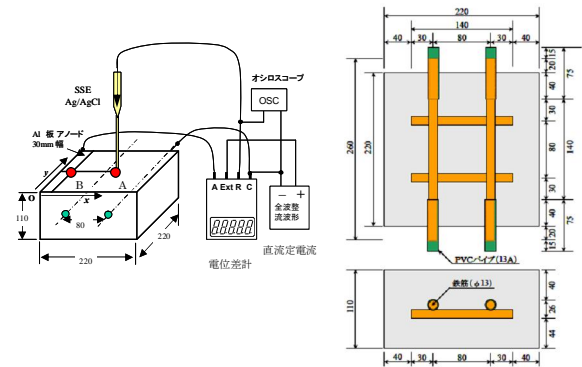


図-10 コンクリート試験体の電気防食におけるインスタントオフ電位測定

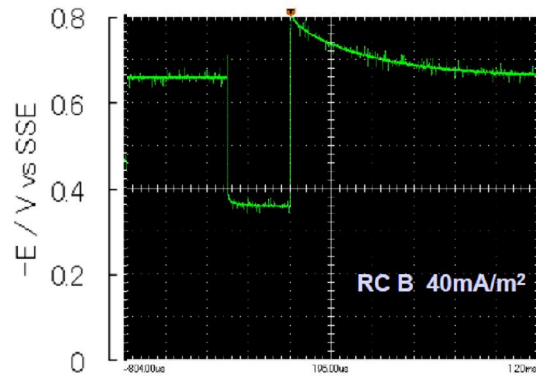


図-11 測定点 B における内部電位の時間変化

図-12 は鉄筋コンクリートモデルで測定された鉄筋の電気化学インピーダンス測定結果である。

照合電極地点 A および B に対するいずれの地点でも低周波数域で現される Rp に相当する電荷移動域あるいは容量性インピーダンス領域は現れなかった。低周波数域の  $\partial \log Z / \partial \log f$  はかろうじて -0.14 から -0.17 であると評価された。この傾きは物質拡散に起因する Warburg インピーダンスの傾き -0.5 よりさらに小さく、このインピーダンス軌跡のみでは、拡散抵抗あるいは二重層に起因する電荷移動抵抗など、この因子を識別できず電気化学反応の解釈は十分できなかった。これは、Macdonald<sup>9)</sup>らが、電気二重層を基本として伝送線モデルとして複合化した系としたモデルでも解釈が出来ないほど低周波数域の  $\partial \log Z / \partial \log f$  が小さく、低周波域のインピーダンス変化がコンクリート抵抗に埋没してしまうからであると考えられた。しかし、インスタントオフ電位の決定の目的は通電時電位からの IR ドロップ除去にあり、電流遮断時から読み取りの時間をできるだけ短くすることが好まし

いと考えられた。

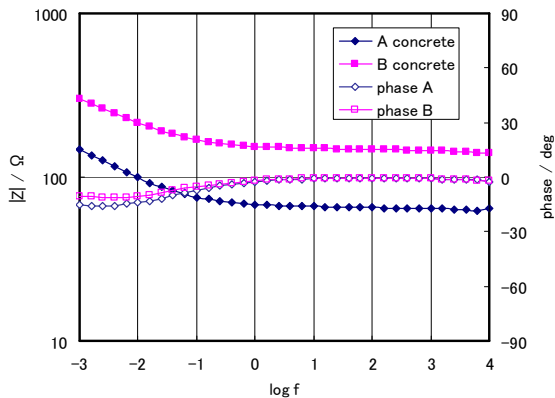


図-12 鉄筋コンクリートモデルの電気化学インピーダンス

### 3.5 実構造物における測定

太平洋沿岸にある橋梁では、外部電源方式により電気防食が施行されている。電源はSCR位相制御（交流電流の周期毎におけるON時間の割合をシリコン制御整流子により変化させることで出力電圧を連続的に制御する方式）が採用された定電流装置で、防食条件は極間電圧4.8V、防食電流1.2Aであった。単純には極間抵抗4.0Ωと評価できた。また通電時における二酸化マンガン照合電極(MnO<sub>2</sub>)基準による鉄筋の電位は-1.65Vであった。このとき通電を遮断した後の電位経時変化を、図-13のオシログラフに示す。従来、このような場合、インスタントオフ電位は-0.64V vs. MnO<sub>2</sub>と計測されていた。

図-14は図-13の電位経時変化のうちごく初期部分の時間軸を拡大したものである。この図からmsecオーダーでの電位変化を捉えればIRドロップが分離できることがわかる。さらにIRドロップに対応した電位の瞬時変化後、電位は指数関数的変化をしている。この場合、インスタントオフ電位は-1.25V vs. MnO<sub>2</sub>、IRドロップは0.35Vであると判定された。

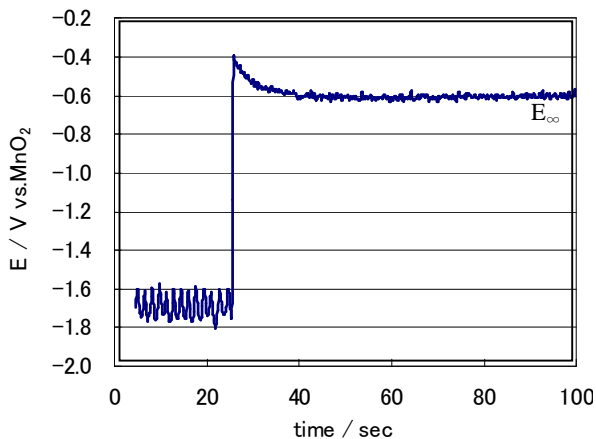


図-13 防食電流をオフした後の電位経時変化

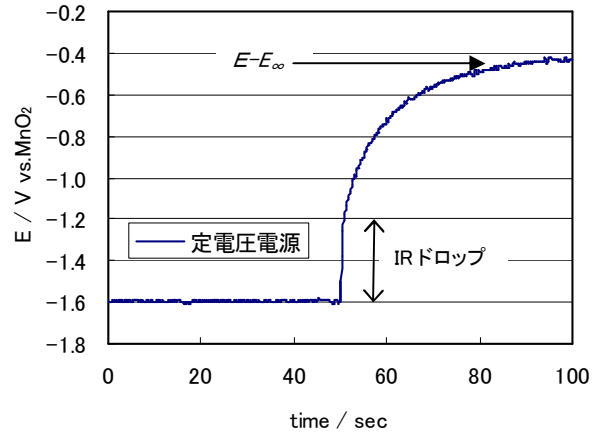


図-14 電流遮断後の電位初期時間変化

図-15は図-14の電位の指数関数的変化部分を十分時間が経過した時の電位定常値( $E_{\infty}$ )と経時における電位( $E$ )との差を $\ln(E_{\infty}-E)$ に換算して $t$ の関数としてプロットし直したものである。式(1)から式(3)を得ることができ、この関係と図-15の傾きから緩和時間として12msecを得た。このことから、この系でインスタントオフ電位を測定するためには、電流遮断後、数msec以内に測定を完了しなければならないことが結論される。

$$\ln(E_{\infty} - E) = \ln(E_{\infty} - E_0) - t / (2.3 \tau) \quad (3)$$

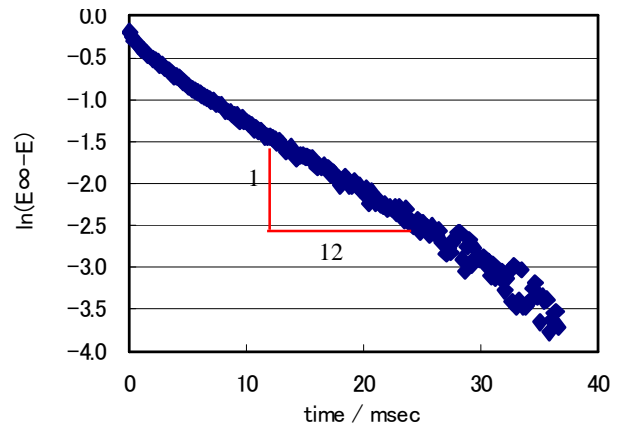


図-15 オフ電位初期時間変化の片対数プロット

開発した電位差計のオシログラフを図-16、図-17に示す。両者は同一測定結果であるが、図-17は図-16の時間軸を拡大したものである。

図-16は100msecで繰り返し電流遮断と電位の測定を繰り返していることを示している。インスタントオフ電位は電流遮断直後の値が測定され、次のON/OFFまで測定値がホールドされている。この周期的なON/OFF繰り返しにより、測定値も安定している様子が見える。なお、

この時点では開発中であったため、積分による平均化を行っていないが、インスタントオフ電位は安定して測定されており、開発した電位差計の基本的な設計は間違っていないことが確認された。

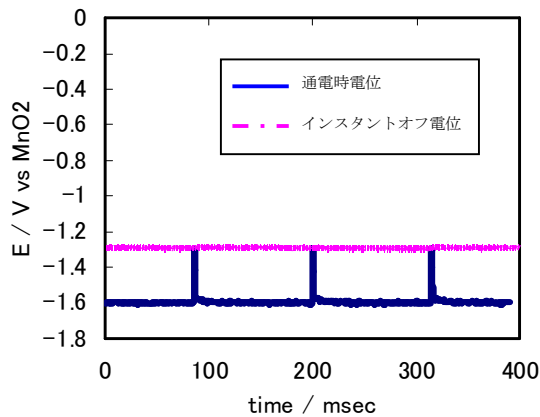


図-16 繰り返しによるインスタントオフ電位測定時の電位変化

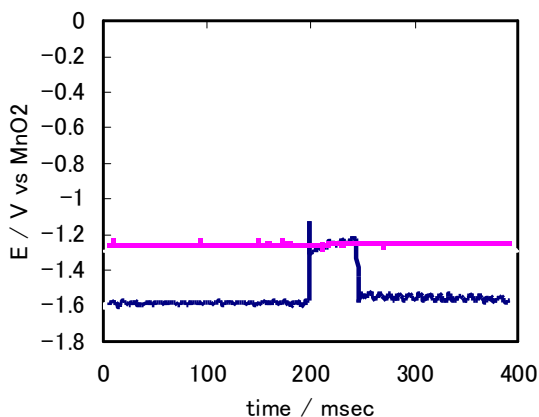


図-17 インスタントオフ電位測定時の電位変化

#### 4. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 実橋による電流遮断直後の電位変化は、IR ドロップ後、電気防食に寄与する電気化学的反応による指数関数的減衰から放物線則による減衰へと移行していると考えられた。また、指数関数的に変化する電位変化はごく短時間で完了しており、緩和時間が短いことが示唆された。
- (2) 開発した電位差計は、模擬回路実験から全波整流波形であっても正確にインスタントオフ電位を計測していることを示していた。
- (3) 淡水モデルによる炭素鋼板の電気化学反応の緩和時間( )は 10sec 以上になることを示唆しており、人の

読み取りによってもインスタントオフ電位を正確に測定できると考えられる。

- (4) 鉄筋コンクリートモデルにおいては、電荷移動域あるいは容量性インピーダンス領域は現れなかった。また、明瞭な形での拡散抵抗も認めることができなかった。しかし、当該試験体で鋼の腐食速度は拡散に支配されていると推定された。開発した電位差計は緩和時間の短い場合においても、IR ドロップの除去は十分行っており、安定して測定できると考えられた。
- (5) 実橋による測定では、鉄筋コンクリートモデルと同様に緩和時間が大変短く、これらを見逃した場合、インスタントオフ電位は大きな誤差が生じることがわかった。そのため、緩和時間の短い系におけるインスタントオフ電位の測定は、0.1msec〜数 msec のうちに完了させる必要があると考えられる。また、開発した電位差計を使用することで安定的に測定できることが確認できた。
- (6) 一般的な測定方法では、正確なインスタントオフ電位の測定が十分でなく、防食対象にとって正しい評価をしていない可能性がある。現在の防食基準は、これらの誤差のある程度、許容した判定値であると思われるが、長期にわたる適切な維持管理のためにはより精度の高い測定をすることが望ましい。

#### 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)，pp91-92
- 2) BS EN 12696:2000  $\delta$ Catodic Protection of Steel in Concrete $\delta$ ,2000
- 3) Nace Standard RP0290-2000 : Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures,2000
- 4) 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，pp122-124,1994.10
- 5) 小玉俊明,小林浩之,若林 徹,望月紀保,仲谷伸人:鉄筋のオフ電位変化に及ぼすコンクリート中の溶存酸素拡散の影響，第 57 回材料と環境討論会講演集，pp407,2010
- 6) D. D. Macdonald, Y. A. El-Tantawy, R. C. Rocha-Filho, M. Urquidi-Macdonald :  $\delta$ Evaluation of Electrochemical Impedance Techniques for Detecting Corrosion on Rebars in Reinforced Concrete $\delta$ , SHRP-ID/URF-91-524, Strategic Highway Research Council, National Research Council, Washington D.C (1994)