

第3回 コンクリート構造物の電気防食のしくみと施工事例

講師：渡辺 寛*1, 石井 浩司*2, 穴沢 雅明*3

1. はじめに

20世紀初頭からわが国において、コンクリート構造物が建設され始め、メンテナンスフリーとの認識で高度成長期以降、多くの構造物が建設されてきました。これら建設された構造物は、土木分野に限らず建築分野においても重要な社会基盤を構築しています。

しかし、1970年代以降になると十分に洗浄されていない海砂を使用したコンクリート構造物や、海岸近くで飛来塩分が多量に供給される構造物において、コンクリート中の鋼材が腐食する現象が顕在化しました。これらは、予定していた構造物の寿命よりも著しく早く損傷が開始しており、塩害とよばれました。

当初、損傷を受けた箇所の断面を復旧し、現状より塩分が浸透しないようにコンクリート表面にエポキシ樹脂の塗装を行っていましたが、数年後には、錆汁、ひび割れなどが観察されました。これは、鋼材腐食を完全に抑制できなかった結果であり、この原因として、

① 塩化物を含んだコンクリートを完全に除去できなかった。

② 塩化物を含んだコンクリートと含まない断面修復材との間の環境相違による鋼材腐食が生じた。

などが考えられ、抜本的な塩害対策工法が求められるようになってきました。

電気防食は、電気化学反応を利用した抜本的な防食技術であり、鋼構造物の防食技術として長い歴史を有しています。コンクリート構造物へは1970年代、アメリカにおいて橋梁床版に適用されたのが最初で、わが国においては、1980年代に日本海沿岸に位置する鉄筋コンクリート橋に初めて適用されました²⁾。

電気防食工法は、有望な工法として注目を集め、さまざまな研究機関が研究・開発を開始しました。室内試験や長期暴露試験の結果から電気防食の良好な防食効果が確認され、その結果、橋梁や栈橋などのさまざまなコンクリート構造物に試験的に採用されるようになりました。

現在では、本体工事として電気防食が数多く採用されるようになり、また、さまざまな方式の電気防食工法が開発

されるようになってきました。それを受けて土木学会から電気防食の設計施工指針(案)³⁾が出版されるまでに至っております。

本文は、塩害対策工法として電気防食工法を取り上げ、そのしくみ、施工事例などについて説明します。

2. 電気防食のしくみ

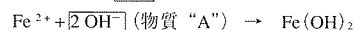
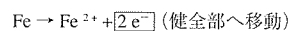
2.1. 電気防食の原理

電気防食の原理を説明する前に、コンクリート中の鋼材腐食を電気化学的に説明します。図-1は、鋼材腐食を模式的に説明した図です。図-1(a)に示すように鋼材表面に塩化物が到達するまでは、鋼材は不動態皮膜とよばれる保護皮膜で覆われ、腐食から守られています。このとき、鋼材の中では、鉄と電子が手を取り合って安定していますが、図-1(b)に示すように塩化物が鋼材表面に到達すると、その部分の不動態皮膜が破壊され、不安定となり鉄と電子が分かれてしまいます。分かれた電子は鉄筋中を移動し、コンクリート中の水、酸素と反応し、生成物“A”が生成されます。

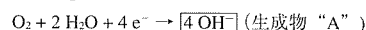
一方、分かれた鉄はコンクリート中に存在する物質“A”(生成物“A”と同じ)と反応し、生成物“鉄A”が生成されます。腐食部では物質“A”が消費され、健全部では生成物“A”が生成していますので、あたかも物質“A”が健全部から腐食部に移動したかのように見えます(脚注1)。このように腐食部と健全部の間には、「電子の移動」と「物質の移動」により回路が形成されたように見えます。これが腐食回路とよばれるものです。電流は電子の流れと逆の方向に流れますから、図-1(c)に示すように腐食部から健全部へとコンクリート中に腐食電流が流れます。腐食電流が大きいことは、活発に電子が移動、物質“A”が移動

脚注1

【腐食部反応】



【健全部反応】



*1 Hiroshi WATANABE：(株)ピーエス三菱 土木本部 メンテナンス部

*2 Kouji ISHII：(株)ピーエス三菱 土木本部 メンテナンス部

*3 Masaaki ANAZAWA：(株)ピーエス三菱 土木本部 メンテナンス部

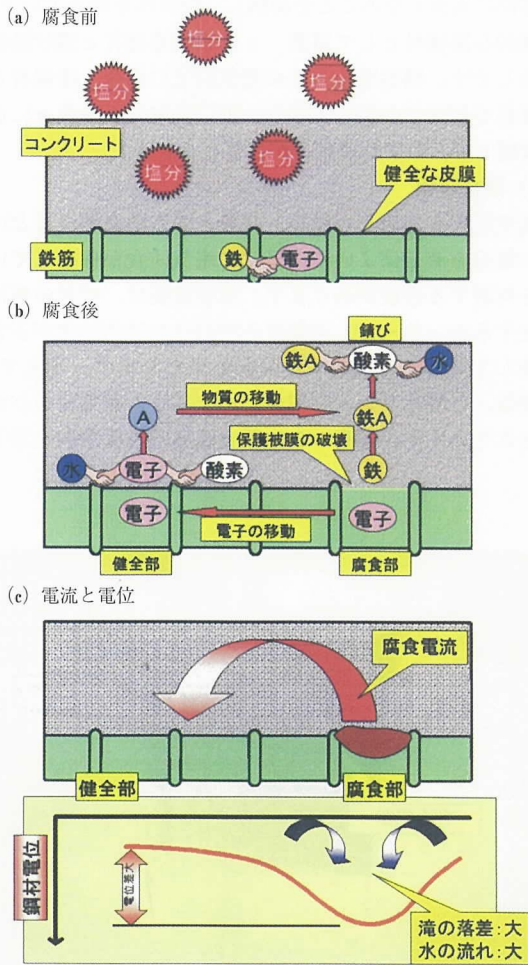


図 - 1 鋼材腐食の電気化学的説明

し、活発に錆びが生成されていることを意味します。すなわち腐食速度が大きいことを意味します。

腐食部の鋼材電位は、鉄と電子が分かれた時点からマイナス方向に大きくなる性質を有しています。したがって、腐食部と健全部との鋼材電位の差は大きくなります。鋼材の電位差を滝の落差、腐食電流を滝に流れる水と考え、鋼材の電位差が大きくなれば、滝の落差が大きくなり、水の流れは早くなります。すなわち、腐食電流が大きくなり、腐食速度が大きいと考えれば理解しやすいと思います。

図 - 2 に電気防食工法の原理を示します。電流を鋼材に流すと、鋼材電位はマイナス方向に大きくなり、その程度は腐食部と健全部とは、後者が大きくなる性質を有しています。図 - 2 (a) はコンクリート表面から少しの電流を流した場合で、鋼材電位の赤色線は、電流を流さない場合の電位の分布を、黄色線は、少しの電流を流した場合を示しています。腐食部と健全部の鋼材の電位差は、マイナス方向へ大きくなる程度の相違から、電流を流さない場合と比較して小さくなります。電位差という滝の落差が小さくなり、水の流れ、すなわち腐食速度も小さくなる（腐食が抑制されている）ことは理解できると思います。図 - 2 (b) は、さらに電流を流した場合を示しています。鋼材電位の分布は図中の青色線となります。腐食部と健全部の鋼材電位差が非常に小さくなり、滝に水が流れませんので腐食速

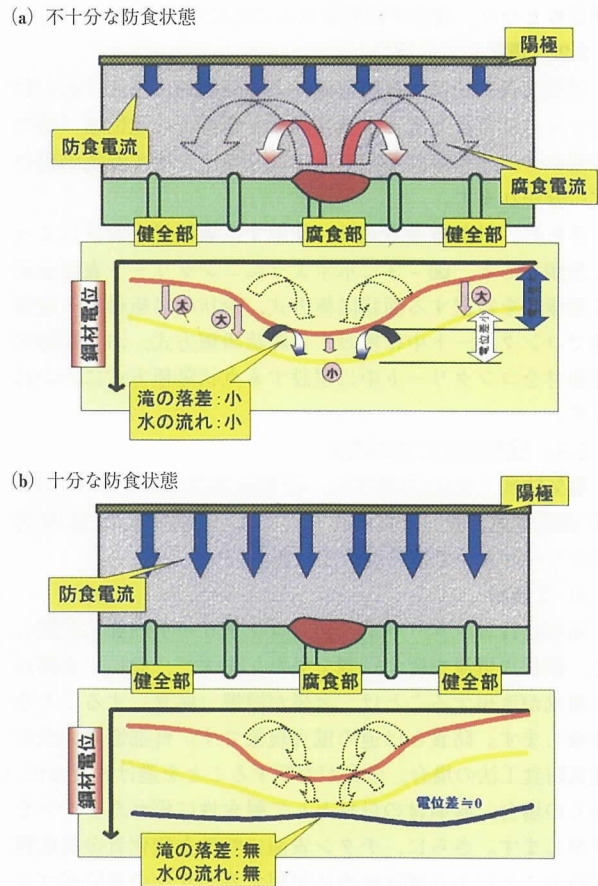


図 - 2 電気防食工法の原理

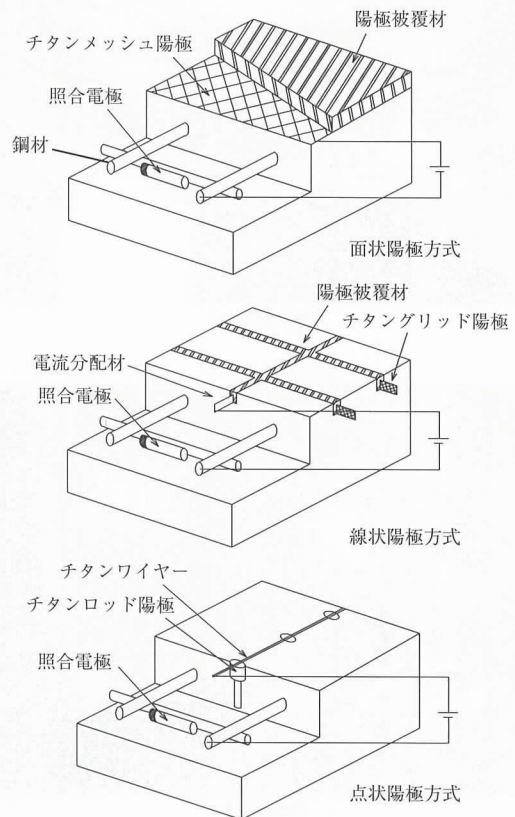


図 - 3 電気防食工法の種類

度は0となり、腐食が抑制されることとなります。

2.2. 電気防食の種類

電気防食工法は、直流電源により強制的に電流を流し防食する外部電源方式と、犠牲陽極と鋼材との電位差（滝の落差による水の流れと同じ）により電流を流す流電陽極方式に分かれます。

さらに、外部電源方式は、使用する陽極材の形状によって分類すると、図 - 3 に示すようにコンクリート表面全面に陽極材を設置する面状陽極方式、帯状の陽極材を一定間隔でコンクリート中に埋設する線状陽極方式、および棒状陽極材をコンクリート中に埋設する点状陽極方式に分かれます。

2.3. 電気防食工法の構成

電気防食工法は①陽極材、②照合電極、③配線・配管、④直流電源装置（流電陽極方式では④直流電源装置は必要ありません）で構成されています。

a) 陽極材

陽極材はコンクリート表面、コンクリート内部に設置して、鋼材に電流を流す役割を果たします。一般に、金属から電流が流出することは、金属が溶解（腐食）することを意味します。防食とは逆の電食現象です。外部電源方式の電気防食工法の場合、金属が溶解することを避けるために、多くの場合、陽極材の母材として耐食性に優れたチタンを使用します。さらに、チタン表面に特殊な酸化貴金属皮膜を施すことにより電流流出に起因するチタンの電位がプラ



帯状陽極材



網状陽極材

写真 - 1 代表的な陽極材

ス方向に大きくなることを抑制し、耐久性を高めています。代表的な陽極材として写真 - 1 に帯状陽極材と網状陽極材を示します。犠牲陽極方式の電気防食の場合、陽極材として亜鉛を使用するケースが多く、電食現象により徐々に亜鉛は消耗して、いずれ取替えが必要となります。

b) 照合電極

電気防食を適用した場合、対象とする防食箇所にとどの程度の電流を流せばよいか、正常に電気防食が作動しているかを判断する必要があります。照合電極は、鋼材の電位を測定するセンサーで、通電する電流量や電気防食が正常に作動しているかを判断する役割を果たします。現在では、鉛電極、二酸化マンガ電極、ハフニウム銀電極などが使用されています。写真 - 2 に照合電極の設置事例を示します。

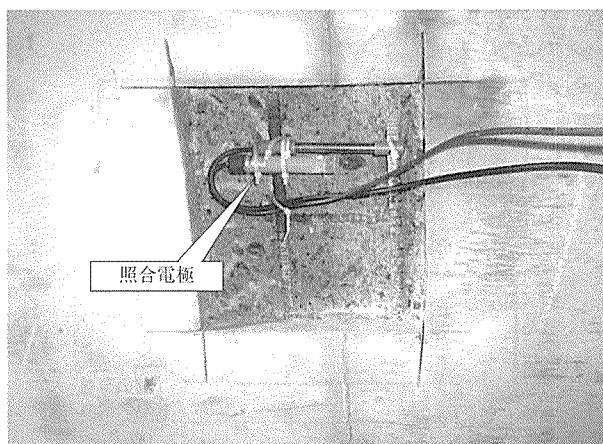


写真 - 2 照合電極の設置事例

c) 配線・配管

電気防食対象箇所からは、通電点（陽極材に接続し、電流を供給させる箇所）、排流端子（鋼材に接続し、陽極から供給された電流を直流電源に戻す役割を果たす）、照合電極、計測端子（鋼材に接続され、照合電極との間で電圧を測定する役割を果たす）の電線がコンクリート表面に露出します。これら電線を直流電源装置まで配線し、保護のために配管材を使用します。配線材として、600 V 架橋ポリエチレン絶縁ケーブルや制御用ビニル絶縁シースケーブルが、配管材として、合成樹脂可とう電線管が使用される場合が一般的です。

写真 - 3 に配線・配管状況を示します。

d) 直流電源装置

直流電源装置は、直流電源と測定回路盤から構成されており、ステンレス製または樹脂製のボックスに収納されています。測定回路盤は、鋼材電位、電源電流および電圧を測定しやすいように基盤上にまとめたものです。写真 - 4 に示すように電気防食を適用した場合、1～2回/年の頻度で現地にて電位などの測定が必要となります。近年、測定業務の簡略化のために遠隔監視・制御システムを導入する事例もあります。



写真 - 3 配線・配管



写真 - 4 直流電源装置と測定状況

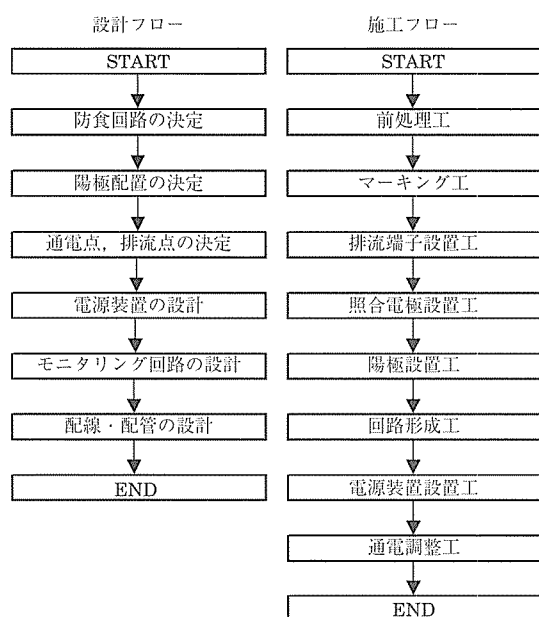


図 - 4 設計・施工フロー

3. 電気防食の設計と施工

線状陽極方式電気防食工法の設計・施工フローを図 - 4 に示します。

3.1. 電気防食の設計

a) 防食回路の決定

防食回路数を決定する場合、防食面積、外部環境、経済性などを考慮して定めます。土木学会³⁾では1回路あたりの防食面積を500 m²以下と定めています。これを参考に回路数を仮定します。続いて同一回路内に、環境が大きく変化するところはないかを考慮します。たとえば、高電気抵抗を有した断面修復材で補修した箇所やコンクリートが常時、濡れている箇所などは回路を分けた方が望ましい場合があります。さらに、回路を分ければ施工費は高価になるので、経済性を考慮する必要があります。これらを考慮して防食対象箇所の防食回路分けを行います。

b) 陽極配置の決定

コンクリート中の鋼材に均一に防食電流を通电させ、耐久性に影響を及ぼさないように陽極材を配置します。そもそも電気防食工法は、コンクリート中の鋼材に電流を流す工法ですので、設計防食電流量の決定には鉄筋量を考慮する必要があります。また、鉄筋量は同一防食回路内においても相違するので、鉄筋量の多い箇所における設計防食電流量を、その回路の設計防食電流量とします。また、いずれの陽極材でも同じですが、陽極材には許容防食電流量があります。その電流量以上を流すと陽極材表面での電気化学反応が変化して陽極材の耐久性が損なわれます。設計防食電流量、許容防食電流量を考慮して、陽極材の量や配置を決定します。必要であればFEM解析を用いて、電流分布を解析します。

c) 通電点の決定

通電点の位置は、鋼材への電流分布に影響を与えます。陽極材は電気抵抗を有するので、防食電流によって電圧降下が生じます。電圧降下が大きくなれば、電流が流れがたくなります。したがって、陽極材の電圧降下を小さくするように通電点を定めます。土木学会³⁾では、電圧降下を300 mV以下と定めています。

d) 電源装置の設計

電源装置の設計では、主として直流電源の定格出力を決定します。設計防食電流量、通电による配線材等の電圧降下などを考慮して決定します。

e) モニタリング回路の設計

モニタリング回路の設計では、防食状態を確認するための照合電極の設置位置や数量を決定します。土木学会³⁾では、照合電極の設置数量は2個以上/回路と定めています。設置する位置は、環境などを考慮して決定します。

f) 配線・配管の設計

配線・配管の設計では、配線・配管の種類やその経路を決定します。電気を流す配線材は、通电による電圧降下を考慮して導体の断面積を決定します。配管材は、通線する配線材の総断面積、通線した後の配管材の空隙率を考慮して電線管の径を決定します。また、配管の種類によっては、

紫外線劣化が生じる可能性があるため、その経路には注意が必要です。

3.2. 電気防食の施工

a) 前処理工

陽極材の設置前に、良好な電気防食の作動に影響を及ぼす要因を除去します。要因として、コンクリートの浮きや剥離、露出鋼材、錆汁発生箇所などが挙げられます。コンクリートの浮きや剥離箇所では、空気が絶縁体となり防食電流が流れません。また、コンクリート中の鋼材と電気的な導通がある露出金属は、それに電流が集中的に流れ、防食したい鋼材に電流が流れにくくなります。電気的導通がない鋼材には、電食現象が生じてそれが強制的に腐食してしまいます。そのために、これらの要因を除去して断面を修復します。

b) 排流端子、計測端子および照合電極設置工

排流端子や計測端子は、図 - 5 に示すように鋼材に溶接し取り付けます。照合電極は、防食電流の鋼材への流入を妨げないように設置する必要があります。設置終了後、断面修復を行います。排流端子、計測端子を設置した後、それぞれに電気的導通が確保されていることを確認します。照合電極は、設置後に鋼材電位を測定し、正常に作動することを確認します。

c) 陽極設置工

コンクリート表面に所定の寸法の溝を切削します。溝の寸法は、図 - 6 に示すように設置方法により相違します。切削は、工期短縮のために写真 - 5 に示すように専用の切削機を使用します。溝内に結束線などの金属があった場合、陽極材とコンクリート中の鋼材とが短絡し、良好な電気防食の作動に影響を及ぼします。そこで、溝切削後に溝内に露出金属がないことを確認し、陽極材を設置します。溝を修復した後に、陽極材と鋼材との絶縁の確認を行います。

d) 回路形成工と電源設置工

配管は、埋設した照合電極や陽極材を損傷させないように、樹脂製ピンなどを使用して行います。これは鋼製ピンを用いた場合、防食電流がそれに流れ、電食現象を生じさせ、腐食する可能性があるためです。電源装置を所定の位

置に設置し、配線材料をそれにつなぎ込みます。

e) 通電調整工

通電調整試験は、通電する電流量を決定するために行います。直流電源装置を作動させ、電流値を徐々に大きくします。それと同時に、各通電電流における鋼材の通電遮断直後の電位を測定しておきます。通電していない時の電位と通電遮断直後の電位の差が 100 mV 以上となる電流値を通電電流値として決定します。

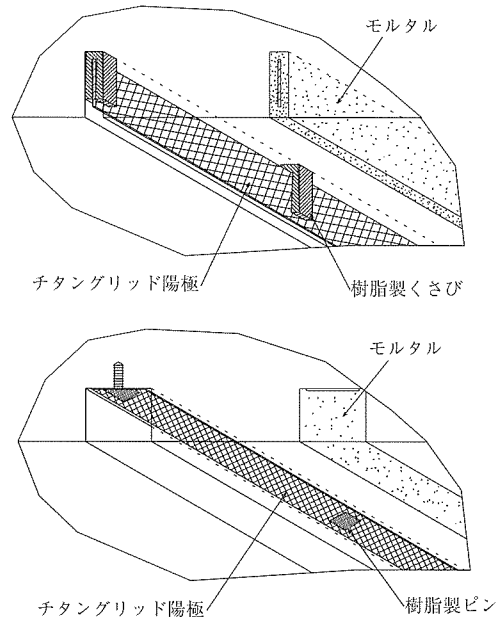


図 - 6 陽極の配置方法

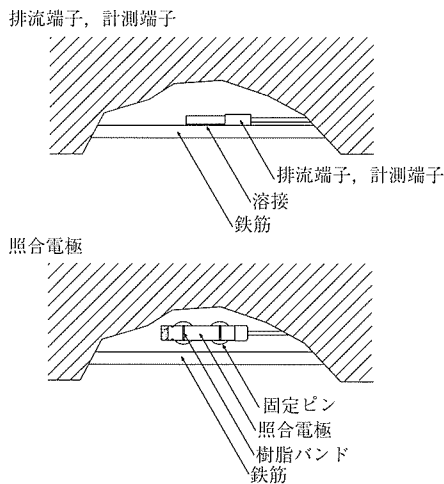


図 - 5 排流端子、計測端子、照合電極の設置概念図

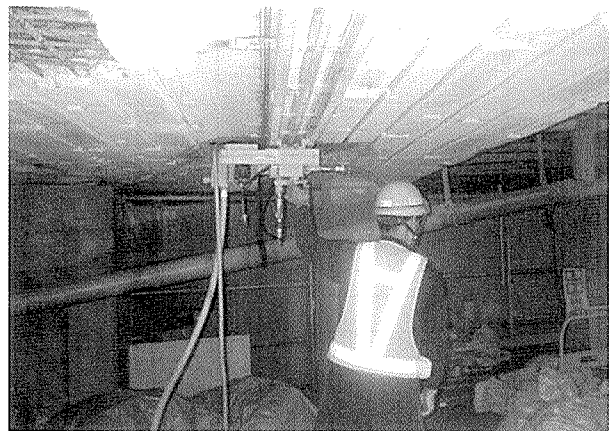


写真 - 5 専用溝切削機による切削状況

4. 電気防食の施工事例

線状陽極方式電気防食の施工事例を以下に示します。

4.1. プレテンション方式 T 桁橋への適用

a) 構造物概要

- ・ 上部工形式：プレテンション方式単純 T 桁橋
- ・ 桁 長：19 980 m
- ・ 竣 工：1971 年
- ・ 損傷原因：飛来塩分

・補修履歴：1987年（断面修復+樹脂塗装）

b) 損傷状況と施工

1995年に施工した電気防食は再補修であり、事前調査では写真-6に示すようにPC鋼材の腐食が目立っていた。そこで、樹脂塗装の除去、損傷状況の把握、PC鋼材間と配力筋間の電氣的導通が確保されていることを確認した後に施工した。PC構造物への電気防食の適用に際して、PC鋼材の水素脆化が懸念されていたので本橋では、PC鋼材位置に照合電極を設置して、モニタリングを行った。施工7年後の状況を写真-7に示します。



写真-6 損傷状況

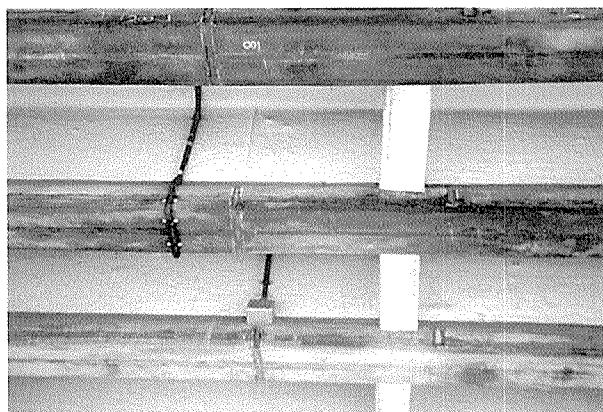


写真-7 電気防食の施工箇所状況（施工7年後）

c) 作動状況と防食効果

防食電流密度は、通電初期では $15 \text{ mA/m}^2 \sim 20 \text{ mA/m}^2$ （コンクリート表面積あたり）程度でしたが、作動期間が長くなるとともに低下して、 2 mA/m^2 程度まで低下しました。通電遮断直後の鋼材電位と遮断24時間後のそれとの差である復極量は、電気防食の作動期間を通じて 100 mV 以上確保されており、土木学会³⁾によると良好な防食状態を維持していると推定されます。写真-7、写真-8に同時期に施工し、7年後の電気防食施工箇所と従来工法施工箇所の状況をそれぞれ示します。従来工法による施工箇所には、コンクリートの剥落などの再劣化が認められたが、電気防食による施工箇所には再劣化が認められず鋼材腐食が抑制さ

れていることを示す結果と考えられます。

4.2. ポストテンション方式T桁橋への適用

a) 構造物概要

- ・上部工形式：ポストテンション方式単純T桁橋
- ・桁 長：46 000 m
- ・竣 工：1981年
- ・損傷原因：飛来塩分

b) 損傷状況と施工

1997年に電気防食を施工する前の損傷状況を写真-9に示します。PC鋼材の腐食は認められなかったが、一部、シースが腐食により溶解してなくなっている状態であった。PC鋼材、シース、配力鉄筋の電氣的導通は確保されていたが、鋼製スペーサーがコンクリート表面に露出していたために、除去してから、施工した。



写真-8 従来補修工法箇所状況（施工7年後）



写真-9 損傷状況

c) 作動状況と防食効果

電気防食の作動期間を通じて、 100 mV 以上の復極量を確保しており、良好な防食状態を維持している。写真-10に、

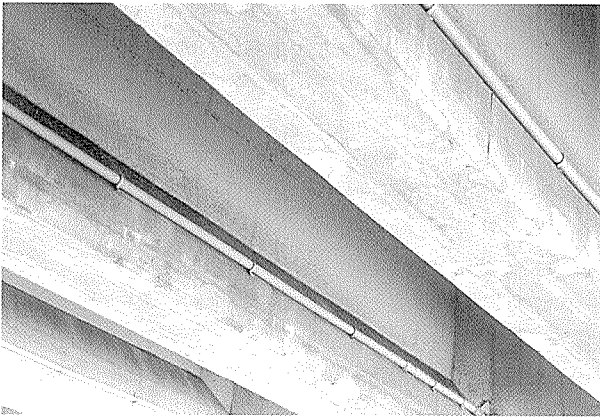


図 - 10 電気防食の施工箇所状況（施工 6 年後）

施工 6 年後の状況を示します。4.1 と同様に電気防食を施工した箇所には再劣化は認められず、鋼材腐食が抑制され

ているものと考えられます。

5. あとがき

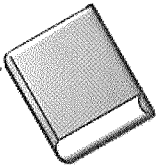
電気防食工法は、電気化学的に鋼材腐食を抑制する手法ですが、われわれ、土木技術者にとってなじみの薄い分野です。本文が、本工法の理解の手助けとなれば幸いです。

参考文献

- 1) Concrete Society : Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Technical Report No.36, P9, 1989.
- 2) 山本 悟・田中柳之助・坂本浩之：実橋のコンクリート桁における電気防食試験，鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術に関するシンポジウム，PP 111-116, 1989.
- 3) 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針（案），コンクリートライブラリー 107

【2003 年 7 月 4 日受付】

● 刊行物案内



- PC斜張橋・エクストラードズド橋
設計施工規準(案)
- PC吊床版橋設計施工規準(案)
- PC橋の耐久性向上マニュアル

(平成12年11月)

頒布価格：3点セット 会員特価 6 000 円〈非会員価格 7 200 円〉(送料はいづれも 600 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会