

報 告

[1138] 積雪寒冷地における RC 桁橋への導電性被覆電極方式による電気防食の適用

正会員 堺 孝司 (北海道開発局開発土木研究所)

大越 威 (北海道開発局開発土木研究所)

正会員○石川光男 (日本防蝕工業 技術研究所)

正会員 山本 悟 (日本防蝕工業 エンジニアリング部)

1. まえがき

近年、鋼材の腐食によるコンクリート構造物の劣化が社会的にも大きな問題になっており、様々な補修工法が試みられている。これらの補修工法のうち、現在最も一般的に実施されている断面補修やライニング法等は、塩害による劣化に対して、抜本的な対策としての信頼性に欠け、より確実な防食方法の開発が望まれている。

最近、この塩害によるコンクリート構造物の劣化に対して、抜本的な対策となりうる可能性のある方法として電気防食法が検討されており、国内の状況を加味した有効性の検証が強く求められている。

電気防食法は、米国やカナダの積雪寒冷地の凍結防止剤による塩害対策として、橋梁上面に施工された実績が最も多いが、我が国における積雪寒冷地(北海道)では凍結防止剤の使用は比較的少なく、飛来塩分による塩害が主で、この種の被害は橋梁下面に集中している。

これらの状況を踏まえ、これまで我が国における積雪寒冷地のコンクリート構造物の塩害による劣化状況を考慮した電気防食法の適用に関する実験・研究を実施してきた[1], [2], [3]。本報告は、これら一連の研究のうち、導電性被覆電極方式による実構造物への適用実験について述べるものである。

2. 補修構造物の概要

2. 1 補修対象構造物

電気防食法を適用した構造物は、昭和30年代に建設され、更に昭和46年拡幅された図1に示す鉄筋コンクリート橋で、日本海に面し、海岸から約200mに位置している。今回の試験施工は、本橋梁の海側から2番目の旧コンクリート桁とそれに接する横桁を対象とした。

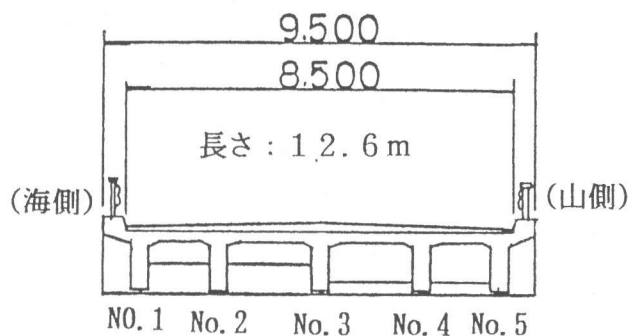


図1 補修対象の橋梁

2. 2 補修前調査結果

電気防食の対象はNo. 2桁とそれに接する横桁であり、比較としてNo. 3桁の一部について、以下の項目について補修前調査を実施した。

(1) 目視観察および叩き検査

コンクリートの劣化状況を目視観察および叩き検査により行った。その結果を図2の展開図に示す。留萌方面に多くのジャンカが見られた。クラックは比較的少なく幅も0.2mm以下であった。コンクリートの浮きは留萌方面の海側の底面付近に見られた。横桁の底面には露出鉄筋が見られ、鉄筋が腐食していたが、外見的には本橋梁の劣化程度は低いと判断された。

コンクリートが浮いた部分に対してはコンクリートをはつり取り、鉄筋を露出させて鉄筋の腐食状態を観察した。鉄筋はコンクリート工学協会の評価でⅢランクであり鉄筋外側が断面欠損していた[4]。

なお、No. 3の主桁の劣化状況はNo. 2の劣化状況と同程度であった。

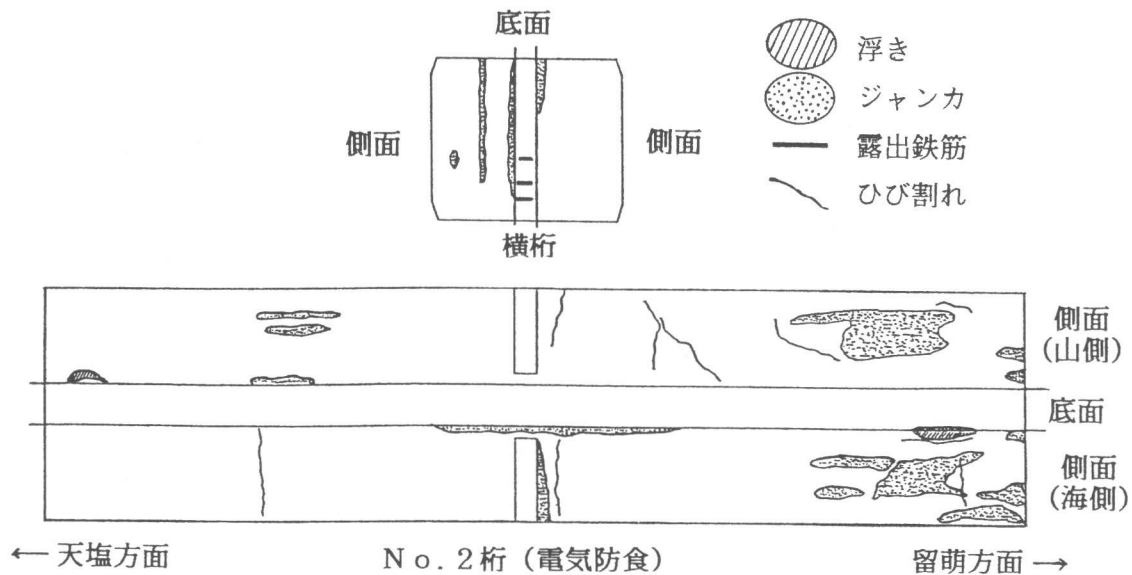


図2 劣化調査結果

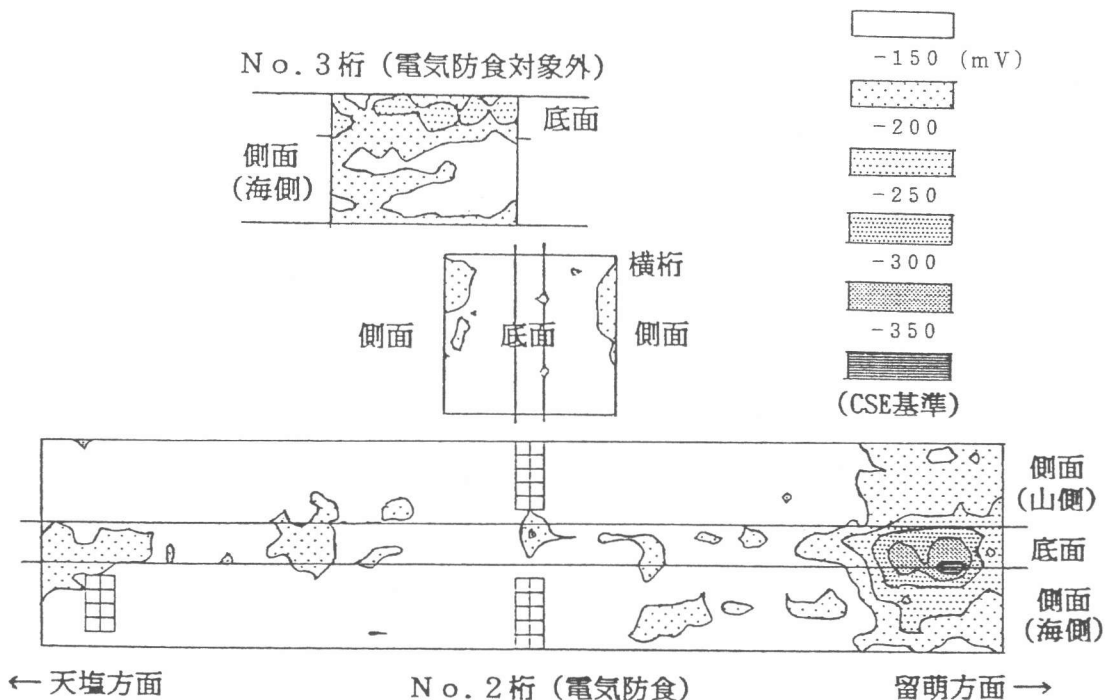


図3 自然電位分布

(2) 自然電位測定

鉄筋の自然電位は以下の手順により測定した。

- ①測定器接続用の鉄筋をはつり出した。
- ②測定間隔を15cmとし、測定部全面にマークを付けた。
- ③コンクリート表面に水道水を散布し、コンクリートを湿潤状態にした。
- ④回転式電位センサ付腐食診断計を用い自然電位を測定した。

得られた自然電位分布を図3に示す。No.2の主桁では、留萌方面の桁底面を中心に卑な自然電位を示す領域が見られるが、図2の劣化調査における浮き部に対応している。ASTMの評価基準では-200~-350mV（飽和硫酸銅電極(CSE)基準、以下略）で腐食確率は不確定とされているが、No.2主桁の観察結果（一部で）からは-250mV程度の電位で軽微な腐食状態にあったので、他のNo.2、No.3主桁の-250mVより卑な電位領域でも鉄筋が軽微な腐食状態にあると考えられる。また電位が卑なほど鉄筋の腐食は著しいとされていることから、浮き部では鉄筋がやや激しい腐食状態にあると推定される。

(3) コンクリート中の塩分分析

かぶり部のコンクリートをはつり取り、JCIの硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析法に準じ可溶性塩分を測定した。その分析結果を表1に示す。コンクリート表面には7.43~12.9kg/m³（Cl⁻換算）、鉄筋近傍のコンクリートには0.13~7.52kg/m³の塩分が含まれていた。浮き部で自然電位が卑な値を示した部分では高濃度の塩分が検出された。これらのことから、本橋梁は塩害を受けていると判断された。

表1 コンクリート中の塩分量 (Kg/m³)

測定位置	表面	鉄筋部	備考
No.1	8.99	1.04	電気防食部
No.3	9.87	0.13	電気防食部
No.4	7.43	1.45	非電気防食部
No.5	12.9	7.52	浮き部

※ 測定位置No.は図6に対応

3. 電気防食法および施工方法

3.1 電気防食法

コンクリート構造物を対象とした電気防食法としては①溝方式、②導電性樹脂線状電極方式、③導電性被覆電極方式、④チタンメッシュ方式、⑤流電陽極方式等があり、①~④は外部電源法であり、⑤は犠牲陽極法である。我国においては主に③~⑤の方式が目されている。ここでは、これらのうち導電性被覆電極方式を上記橋梁に適用した。本方式の特徴を以下に示す。

- (i) 施工性がよいことから大面積の防食対象になるほど有利となる。
- (ii) 外部電源方式であることから防食管理が容易である。
- (iii) 部分補修が可能である。

3.2 施工方法

本方式の施工概要を図4、施工手順のフローチャートを図5に示す。また、使用した陽極材料の仕様および特徴、使用した材料および機器について表2および表3に示す。補修材は構造物の補強効果と共に防食電流を妨げない材料であることを考慮し無機系の材料を選定した。

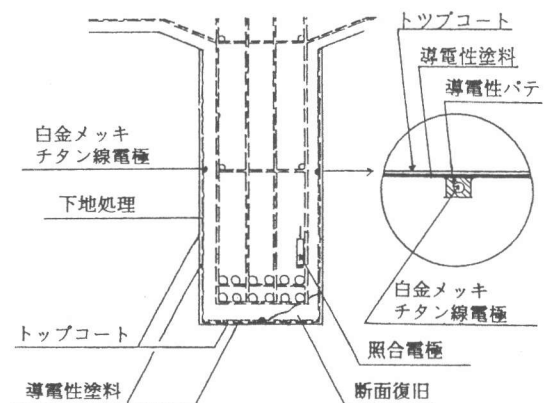


図4 電気防食施工概要

電気防食工事はフローチャートに従い、No. 2桁と横桁について行った。その施工概要を以下に示す。

- ①施工面積：30m²
- ②コンクリートはり：約10m²
- ③白金メッキ：対象桁の側面と底面の3面で長手方チタン線 向に溝を切り、導電性パテと共に取り付けた。
- ④導電性塗料：30m²の防食対象に対してリスタとトップコート ガンあるいはエアレス吹付機を用いて吹き付けた。
- ⑤照合電極：防食対象桁には3カ所、非防食対象桁には1カ所に鉛照合電極を埋設した。
- ⑥配線・配管：鉄筋（陰極）、白金メッキチタン線（陽極）、照合電極、温度センサと電源ボックス間の配線・配管を行った。

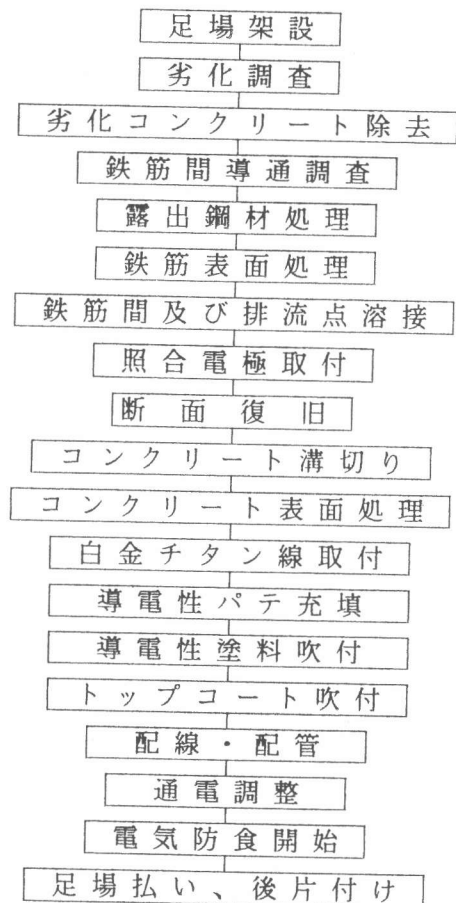


図5 導電性被覆方式の施工手順

表2 陽極材料

材料名	標準仕様および特徴
白金チタン線	寸法: 1.5mmφ 白金付着量: 1μ
導電性パテ	バインダー: 水溶性アクリル樹脂 主成分: 特殊加工導電性カーボ 固形分: 80% その他: ペースト状、通気性あり
導電性塗料	バインダー: 水溶性アクリル樹脂 主成分: 特殊加工導電性カーボ 固形分: 75% 粘性: 6000~10000pcs その他: 通気性あり
トップコート	バインダー: 水溶性アクリル樹脂 固形分: 50% 粘性: 2500~5000pcs その他: 通気性あり

表3 使用材料および使用機器

下地処理	サンダー コンクリートカッター ウォータージェット
断面修復	セメント系補修用モルタル
陽極材	白金メッキチタン線(φ1.5mm) 同固定ピン 導電性パテ、導電性塗料 トップコート
照合電極	鉛照合電極
温度センサ	白金抵抗式
直流電源	定電圧定電流電源 出力18V, 1A

4. 通電試験結果

4.1 防食条件

最適な防食効果が得られる条件を選定するために以下に示す手順で分極試験を行った。

- ①通電前の鉄筋の電位を測定する。
- ②所定の電流密度で5分間保持する。
- ③通電状態の電位 (E_{on}) を測定する。
- ④通電電流を遮断し、その直後の電位 (インスタントオフ電位 E_{ioff}) を測定する。

- ⑤電流密度を0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10, 20mA/m² に変化させ、②～⑤を繰り返す。

ここで、E_{on}とE_{ioff}を測定するのはコンクリートの抵抗率が高く、測定電位に誤差が生じるためである。

測定位置は図6に示すNo. 1～3の埋設鉛照合電極位置の合計3カ所である。ただし、No. 4の照合電極は非電気防食の桁に埋設したものである。

No. 1～3に対応する鉄筋の分極特性を図7に示す。図では、通電による測定誤差を避けるため、通電電流を遮断した直後に測定した電位(E_{ioff})で示されている。

防食条件を自然電位から100mV以上陰分極する値とし、これに対応する電流密度は1.58～1.84mA/m²でNo. 1が最も大きな値であった。これより、電流密度を2mA/m²とすることによりすべての位置において100mV以上の分極が得られることから、この値で初期の防食電流とし通電を開始した。

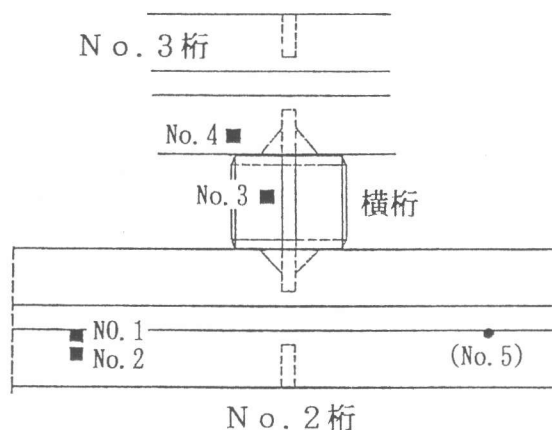


図6 照合電極の埋設位置

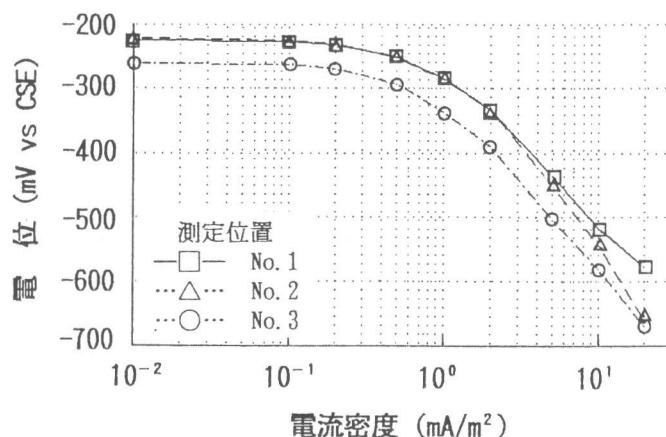


図7 鉄筋の分極特性

4. 2 防食効果の経時変化

一般に、通電効果により鉄筋錆びの還元、鉄筋周囲のコンクリート環境の改善（鉄筋表面よりCl⁻が離れる）等から防食電流は低下し、分極量は増加する傾向がある。従って、通電開始後の防食効果の確認には以下の手順で測定をする必要がある。

- ①通電時の電位および電流を測定する。
- ②通電電流を遮断し、インスタントオフ電位を測定する。
- ③通電電流を遮断状態で十分に復極した電位を測定する。（通常、4時間以上）

両者の差が目標の100mV以上であれば防食効果が維持されていると評価する。

通電開始後の防食電流および防食電位の経時変化を図8および図9に示す。通電当初から防食電流密度は大幅に低下し、2カ月後には0.27mA/m²と約1/8の値になった。これに対し、位置No. 1における鉄筋の電位はインスタントオフ電位で-487→-305mVへ、電流を遮断し18時間後の電位は-279～-182mVに変化し、分極量は100mV以上を維持していた。その値もいずれの場所においても同程度でありバランスも良くなっており、良好な通電状況にあると判断される。

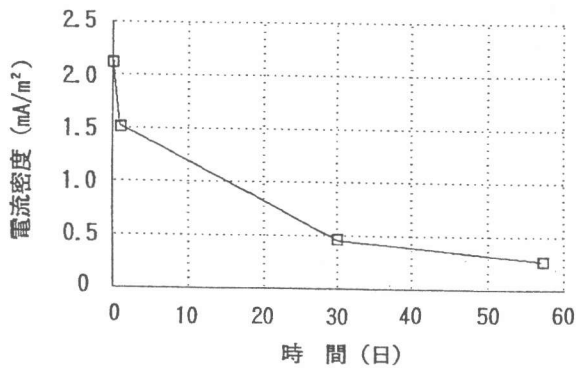


図8 防食電流の経時変化

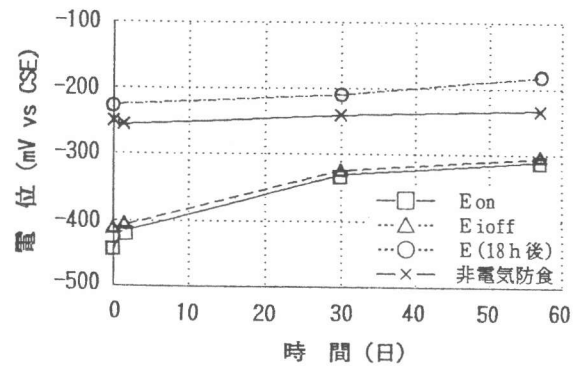


図9 防食電位の経時変化

一方、非電気防食区の自然電位は若干貴化し約 -230 mVになった。電位測定時のコンクリート内温度は埋設温度センサを用いて測定した。通電開始後からの電位測定時の温度は 10.7 、 8.2 、 7.6 、 0.53°C と大きく低温側に変化した。自然電位の貴方向への変化は、季節変化に伴う温度の低下によるものと考えられる。供試体を用いた凍結誘拐試験においても観察された現象であるが、鉄筋の自然電位は温度に依存し低温時に数十mV程度貴な値になる[1]。

5. まとめ

積雪寒冷地を対象とした電気防食法をコンクリート構造物に適用すべく、実橋試験を実施したが、まだ経過年数も短く十分な結論を得るに至っていない。しかし、供試体による490サイクルの凍結融解試験に十分な耐久性を示したことから、供試体による積雪寒冷地における2.5年の暴露試験（留萌、試験継続中）の状況から判断し、我国における積雪寒冷地のコンクリート構造物の防食法として導電性被覆電極方式も十分に適用可能であると考えられる[1]。

終わりに、本実橋試験の実施に当たり多大なるご協力をいただいた北海道鋼橋防錆協会の近藤博二氏に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 堺 孝司・大越 威・石川光男・竹田定雄：積雪寒冷地における導電性塗料方式による鉄筋の電気防食、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.374-375、1990.9
- [2] 堺 孝司・大越 威・川俣孝治・峰松敏和：積雪寒冷地においてチタンメッシュ方式による鉄筋の電気防食、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.372-373、1990.9
- [3] 堺 孝司・大越 威・千葉丈夫・小熊文雄・加納伸人：積雪寒冷地において流電陽極方式による鉄筋の電気防食、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.376-377、1990.9
- [4] 樫野紀元：コンクリート中の鉄筋の腐食状況評価手段の一試案、海洋コンクリート構造物の防食指針（案）、pp.103-106、1986.2