

報 告

[1095] 積雪寒冷地における鉄筋コンクリート構造物への電気防食法の適用

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 峰松敏和（住友セメントセメントコンクリート技術開発センター）

正会員 川俣孝治（住友セメントセメントコンクリート技術開発センター）

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となっており、すでに、様々な補修工事が実施されている。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修復やライニング方法等は、コンクリート中に塩化物が含まれる場合に生じる塩害による劣化に対しては、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得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、この種の被害は、橋梁下面に集中しており、飛来塩分による塩害が凍結融解作用によって促進されていると考えられる。

これらの現状を踏まえ、我が国における積雪寒冷地のコンクリート構造物の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、その効果と問題点を把握することとした。

実験の内容は、①電気防食を施した供試体による凍結融解試験、②実環境における曝露実験、③実構造物への適用実験、の3種類とし、また、防食方法としては、我が国において実構造物への適用事例を有する3種類の電気防食法を検討することとした [1], [2], [3]。

本報告は、これらの一連の研究のうち、実構造物への適用実験について述べるもので、チタンメッシュを陽極とする方式の施工状況と通電調整試験およびこれまでに明らかとなった追跡試験の結果について報告する。

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28年に建設された図-1に示す形状の鉄筋コンクリート橋で、日本海に面し、海岸から約10mに位置しており、海風の影響による鉄筋の腐食と凍結融解による劣化が顕著であった。今回の試

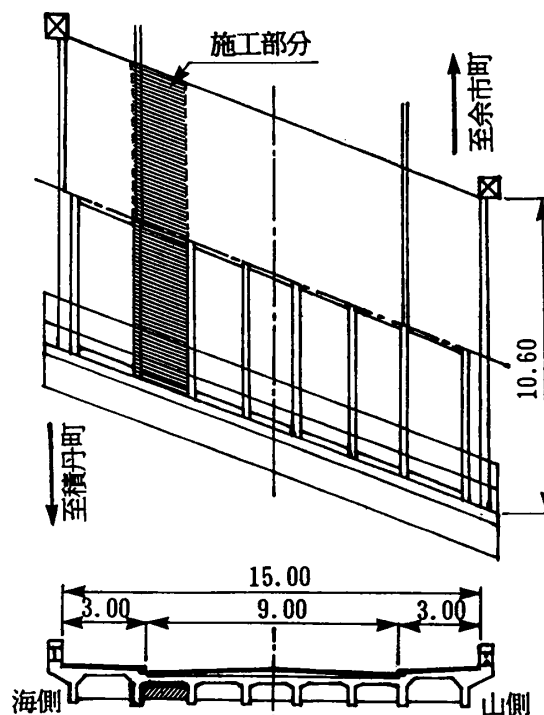


図-1 電気防食対象構造物の形状寸法

験施工は、本橋梁のうち、外観上、最も劣化程度の激しい海側から2番目の桁および床版の下面（約40m²）を対象とした。なお、この部分の上床版は、車道の水勾配端部となっており、この影響もあり、劣化程度が最も激しかったと推察される。

2. 2 補修前調査結果

防食対象とする部位の劣化状況を把握することを目的として、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点検：

調査結果を図-2に示す。この図からも明らかなように、本橋梁は、桁側面下部に鉄筋腐食によるコンクリートの剥落や剥離およびひびわれ（最大幅5mm）が発生しており、桁側面には、せん断鉄筋の露出や凍結融解作用によるスケーリングが生じていた。また、床版下面には、鉄筋の露出、コンクリートの剥離、スケーリング、遊離石灰、ひびわれの発生等が認められ、一部のひびわれからは出水していた。

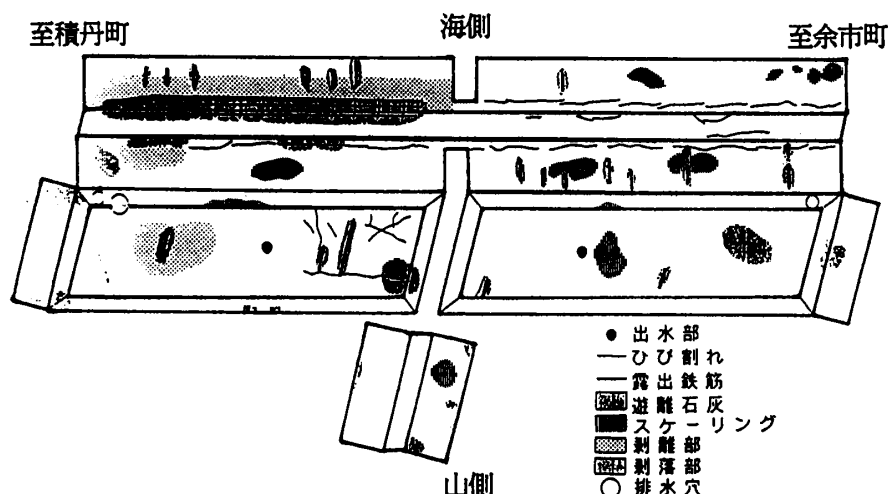


図-2 目視観察および叩き点検調査結果

② 自然電位測定：

ASTM C 876に準

じて実施した補修前の自然電位分布を図-3に示す。なお、測定には、鉛照合電極を用い、15cmピッチで実施した。この結果によると、床版の一部に-200~-350mV (CSE換算) の腐食不確定領域が存在するが、それ以外はいずれも非常に卑な電位を示しており、この橋梁の腐食は、今回の施工対象の全体に進行していると推察される。

③ 含有塩分量試験：

かぶり部のコンクリートをハツリ取り、これを試料として、電位差滴定法で含有塩分量を測定した。その結果、コンクリート中には、6.13~6.48kg/m³ (Cl⁻) とかなり多量の塩化物を含んでおり、塩化物含有量からも鉄筋腐食が激しい環境にあることが理解できる。

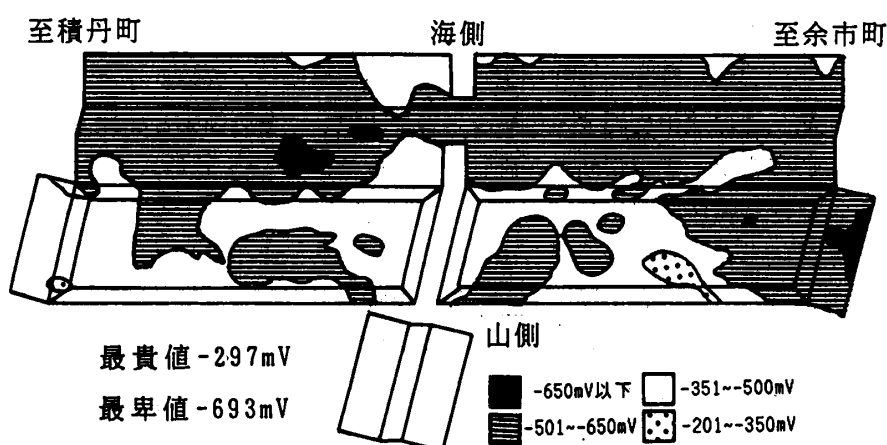


図-3 自然電位測定結果

3. 防食方法および施工方法

3. 1 電気防食方法

我が国において実構造物を対象とした施工実績を有する電気防食方法としては、①溝方式、②導電性樹脂線状電極方式、③導電性塗料方式、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、⑤は犠牲陽極法である。これらのうち、①は、防食電流の均一性に問題があり、②は、現在、導電性樹脂線状電極が生産されていないため、これらを除く3種類の防食方法を全体としての検討の対象としているが、ここでは、これらのうち、チタンメッシュを陽極とする方式を上記橋梁へ適用することとした。本方式に用いる陽極は、耐食性、安定性、導電性、強度等に優れた高純度チタンをエキスパンドメタル状に加工し、これに電気化学的触媒としてルテニウムやイリジウム等のレアメタルの酸化物を焼付けコーティングした陽極であり、塩素ガス等の発生がなく、電位分布や陽極電流密度長期耐久性等に優れた陽極である。

3. 2 施工方法および使用材料

図-4に施工断面図を、図-5に施工手順のフローチャートを示す。また、表-1に使用材料および使用機器の一覧を、表-2に断面修復材およびオーバーレイ材の配合を示す。断面修復材は、構造物に対する補強効果を考慮し、ガラス繊維補強モルタルを、オーバーレイ材は、耐久性、遮塩性、付着性等を考慮し、ポリマーモルタルを吹付けで施工することと

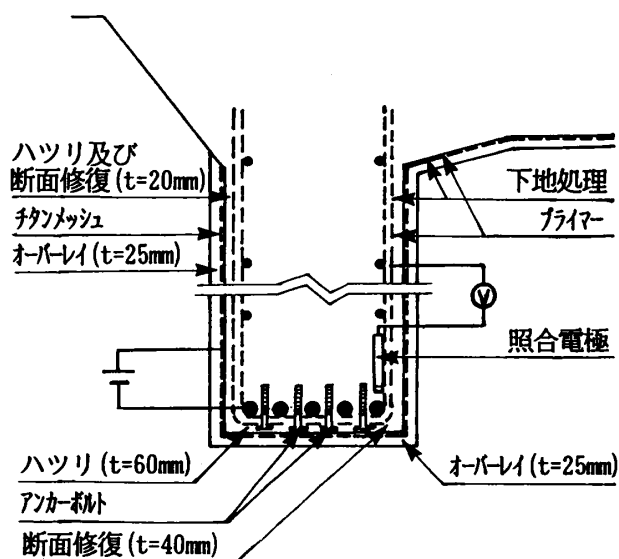


図-4 施工断面図

表-1 使用材料および使用機器

下地処理	サンドブラスト アクリル系プライマー 超速硬セメント
照合電極	銀塩化銀電極
アンカーボルト	樹脂製 (φ8mm, L100mm)
断面修復	耐アルカリガラス繊維 超速硬セメント ブレバック砂
陽極材	チタンメッシュ (3.5*7.0cmメッシュ) 接続用チタンバー (B12mm, t1mm) メッシュ固定用プラスチック釘
オーバーレイ	アクリル系ポリマー 超速硬セメント ブレバック砂
直流電源	定電圧定電流電源 出力 16V, 1A
モニター	直流電圧計 入力抵抗= 100MΩ

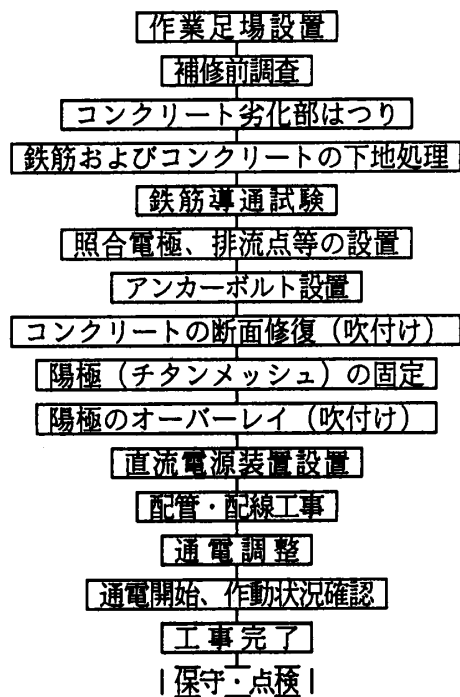


図-5 施工手順のフローチャート

表-2 断面修復材およびオーバーレイ材の配合

項 目	施 工 法	W/C	S/C	Vf	P/C	単位量 (kg/m ³)				
						C	S	W	GF	P
断面修復材	ガラス繊維補強超速硬吹付けモルタル	45%	3	1.5%	-	510	1530	230	41	-
オーバーレイ材	超速硬吹付けポリマーモルタル	45%	3	-	11%	518	1554	173	-	57.5

した。また、積雪寒冷地における電気防食法の適用に当っては、使用する材料および工法の凍結融解抵抗性を事前に把握する必要性があり、施工に先立ち、オーバーレイ材の凍結融解試験を実施した。試験方法は、ASTM C 666の急速水中凍結融解法を用い、両端板をはずした10×10×40 cmの鋼製型枠に吹付けを行う方法で作製した供試体で実施した。試験結果を図-6に示す。その結果、良好な凍結融解抵抗性が得られ、寒冷地における当電気防食工法のオーバーレイ材として適用可能であると判断した。

表-3に施工時に品質管理試験として実施した強度試験結果を示す。試験は、吹付け母型から切り出した4×4×16cmの供試体を用い、材令7日で実施した。

また、補修工事においては、必ず新旧の打継ぎ目が存在し、この打継ぎ目が完全でない場合には、凍結融解による新旧の剥離が懸念される。この打継ぎ目の改善方法として、ブラスト処理とエマルジョン系のプライマーに超速硬セメントを添加した打継ぎ目処理剤を塗布することとした。なお、この打継ぎ目処理剤は、ポリマーエマルジョン系であるため、通電による電位のシフトや通電停止後の複極に時間がかかることも懸念されたが、耐凍害性の向上を優先し、適用することとした [1]。

4 通電試験結果及びその検討

4.1 防食電位の設定

防食電位の設定に関しては、これまでの研究結果および施工事例を参考とし、先ず、E log I 試験を行い、この結果に基づいて初期の防食電流密度を設定、その後、分極試験を経て、所定の防食電位で管理することとした。なお、通電は、寒冷地であることを考慮し、定電圧法で実施した。すなわち、凍結したコンクリートの電気抵抗は大きくなり、防食電流が流れにくくなるが、低温時の腐食反応速度は非常に小さく、鉄筋の腐食も小さくなることおよび定電流法とした場合には、凍結時のコンクリート抵抗の大きさの程度によっては、電源装置の許容電圧を越えること

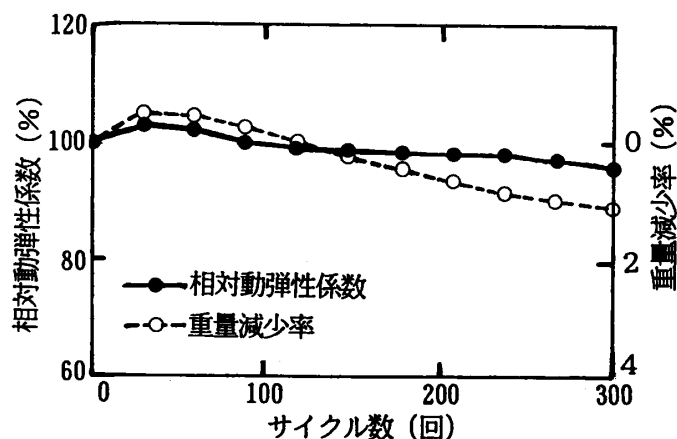


図-6 オーバーレイ材の凍結融解試験結果

表-3 品質管理試験結果

	試験項目	1	2	3	平均
断面修復材	曲げ強度	72	116	108	99
	圧縮強度	339	342	470	383
		314	359	471	
オーバーレイ材	曲げ強度	74	76	70	73
	圧縮強度	368	418	372	396
		415	412	391	

も考えられるためである。

4. 2 E log I試験

図-7に示す位置に設置した照合電極(Ag/AgCl)を用い、初期の通電電流密度を決定するための試験としてE log I試験を実施した。

試験は、

- ①通電前の照合電極電位の測定。
 - ②1mA通電し、3分間以上保持。
 - ③通電状態での電位(Eon電位)の測定。
 - ④通電を停止し、その直後の電位(Eoff電位)の測定。
 - ⑤電流を2, 4, 6, 8, 10, 20 ~ 2000mAに変化させ、②~④の繰り返し。
- の手順で行った。

図-8にIRドロップを考慮したE log I試験結果(Eoff電位)を示す。また、表-4に、この結果に基づいて設定した電流密度における各々の照合電極の電位とシフト量を示す。電流密度の設定に当っては、最もシフト量の少ない照合電極においても100mV以上のシフトが得られるように決定した。なお、このシフト量は、通常、通電の経過にともない増加する傾向にある。

4. 3 分極試験および防食電位の経時変化

図-9に通電開始後の照合電極電位の経時変化を示す。すなわち、通電開始後約1か月で分極試験を実施したが、分極速度が非常に遅く、約1か月間の分極試験を実施し、その後再通電を行った。

この結果に基づくと、通電開始後、鉄筋の電位は、かなり卑化し十分な防食範囲内に存在していると推察される。また、分極試験においては、分極速度はかなり遅いが、1か月後では180~320mVのシフト量が得られており、確実な防食効果が得られていると推察される。その後の通電による経時変化においては、照合電極電位がさらに卑化しているが、これには、温度の低下や凍

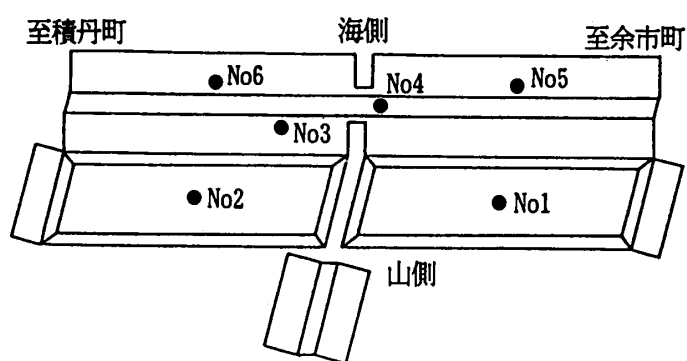


図-7 照合電極設置位置

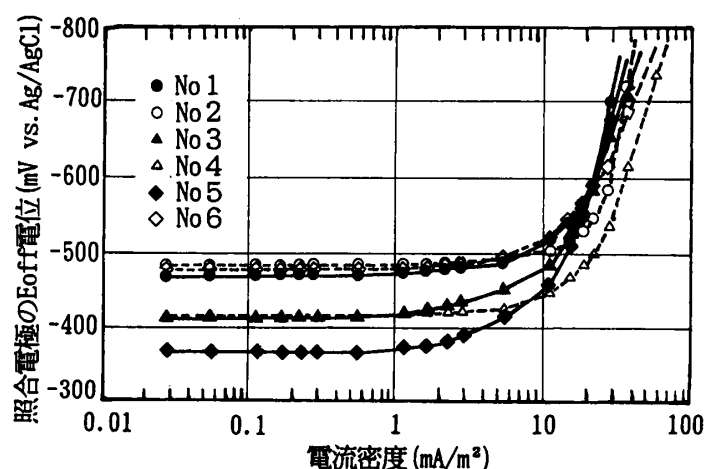


図-8 通電電流密度とEoff電位との関係

表-4 通電調整試験結果および通電電流密度の設定

照合電極番号	通電前電位 (mV)	100mVシフトに必要な電流量		設定電流量=1050mA 設定電流密度=26.7mA/m² 設定時電圧=1.67V (mV)		
		電流量 (mA)	電流密度 (mA/m²)	Eon	Eoff	シフト
No 1	-470	760	20.0	-725	-697	227
No 2	-484	990	26.1	-617	-612	128
No 3	-412	610	16.1	-672	-651	239
No 4	-417	960	25.3	-554	-534	117
No 5	-368	650	17.1	-700	-665	297
No 6	-480	870	22.9	-650	-617	137

結等の影響が加味されていると推察される。なお、この試験工事における防食電位の管理は、武若らの提案に基づき、設定防食電位をIRドロップを考慮した値で $-550 \sim -1000 \text{ mV (vs. Ag/AgCl)}$ の範囲に管理することを基本とし通電中である [4]。

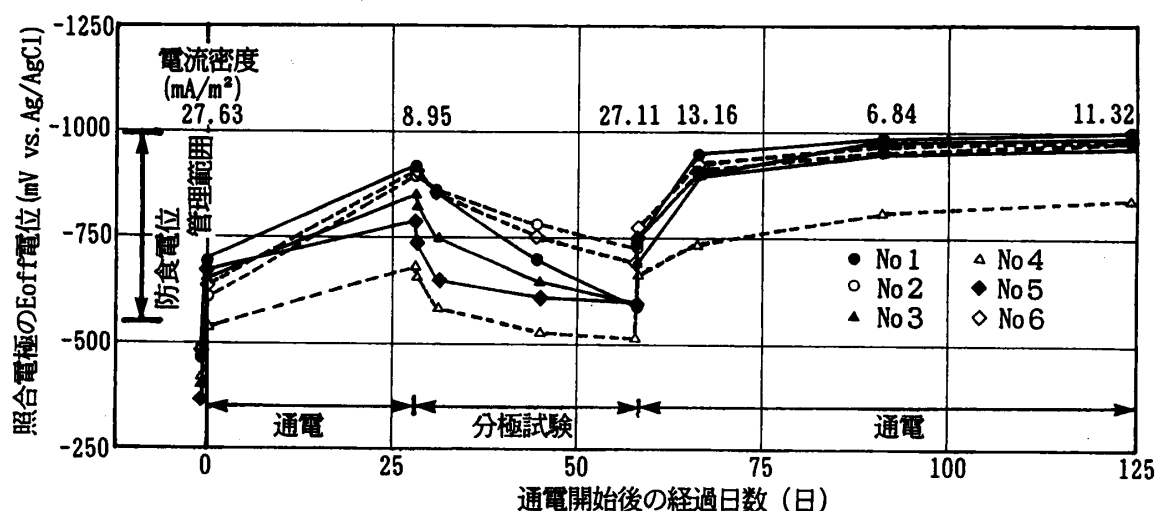


図-9 通電および分極試験による照合電極電位の変化

5. まとめ

我が国における積雪寒冷地の鉄筋コンクリート構造物を対象として電気防食法を適用するための一連の研究のうち、実構造物に対する施工とこれまでに判明した結果について述べたが、いまだ経過年数も短く、防食効果を十分に議論するまでには至っていない。しかし、本試験における結果に基づくと、電気防食法は、凍結融解抵抗性を十分に加味した材料および工法を採用することで、我が国における積雪寒冷地の劣化状況や環境に十分に対応できる防食効果と耐久性が得られると考えられる。

今後、本施工例の追跡調査を継続するとともに、別途実施中の室内試験や暴露試験の結果も加味し、総合的に寒冷地における電気防食法を検討する計画である。

参考文献

- 1) 川俣孝治・峰松敏和・川田秀夫・高橋久衛：電気防食法による港湾コンクリート構造物中の鋼材の防食、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp.511-516、1990
- 2) 三田俊一郎・武藤一雄・井川一弘・加納伸人：コンクリート構造物における流電陽極方式による電気防食法の実用化に関する試験、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp.517-520、1990
- 3) 長沼洋・笹井幸男・新野孝紀・三田俊一郎：道路橋における電気防食工法の試験施工について、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp.521-526、1990
- 4) 武若耕司・峰松敏和・内田美生・荒瀬圭介：外部電源法によるコンクリート中の鉄筋の電気防食に関する研究、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論文集、pp.95-102、1990