

論文 塩害劣化を受けた道路橋の電気防食に関する実験的研究

根本正幸^{*1}・中嶋健治^{*2}・田中成人^{*3}・江上浩^{*4}

要旨：本報告は、沖縄特有の過酷な塩害環境下で15年間供用された高架橋(中空床版)に外部電源による網状陽極方式の電気防食工法を適用し、通電開始後42ヶ月まで定期的な追跡調査を実施した。その電気防食効果は、現行の調査方法および防食基準で確認され、さらに、コンクリートコア調査から内部鉄筋の腐食抑止と、CMAの面分析でコンクリート中の塩素イオン濃度の低下という副次的な効果をも検証できたことについて述べた。

キーワード：電気防食工法、塩害環境、中空床版、CMAの面分析、塩化物イオン

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化は、規格通りの設計・材料・施工が如何に適用されたとしても、アルカリシリカ反応、塩害、凍害、中性化および化学的腐食などの劣化要因で確実に進行するものであり、補修が必要となる場合があることを認識すべきである。そのなかで最も代表的な塩害劣化を受けたコンクリート構造物(鉄筋腐食)に対して従来の鉄筋被覆およびコンクリート被覆などの補修工法では、断面復旧した境界でのマクロセル現象と、既にコンクリート中に浸入している内部塩に対しては無防備であり、再劣化する可能性が懸念される。

このような現状において、電気防食技術は、従来の外科的処置効果とともにマクロセル現象および内部塩に対する内科的処置効果を併せ持った補修工法として脚光を浴びている。その防食効果は $E\text{-log } I$ 、復極量および自然電位などの経時変化を測定・評価・判定することで確認され、実用化が鋭意進められている [1][2][3]。しかしながら、電気防食工法は、国内において歴史が浅く長期間通電を実施したコンクリート中の内部鉄筋の腐食抑制の確認と、塩化物およびアルカリイオンの移動などは未だ充分に解明されるに至っていない。

そこで、本報告は、亜熱帯海洋性気候で、塩害劣化を受けている沖縄地方の高架橋上部工(RC中空床版)に外部電源による網状陽極方式の電気防食工法を適用し、通電後42ヶ月間の定期的な追跡調査で電気防食効果を実証するとともに、従来の中性化作用によるコンクリートの劣化現象 [4] に対して、電気防食の電気化学的作用によって生じる内部鉄筋の防食効果と、塩化物イオンおよびアルカリイオンの移動の副次的効果をCMA(コンピューター画像処理X線マイクロアナライザー、日本電子製JCMA-733)の面分析などで検証したものである。

2. 実験概要

2. 1 対象構造物

今回対象とした高架橋から、ダイヤモンドワイヤーソーでRC中空床版試験体(3.0m×2.8m、

* 1 日鉄防蝕技術開発部係長(正会員)

* 2 不動建設技術開発本部中央研究所建材研究室主任研究員、工修(正会員)

* 3 新日本製鐵建材開発技術部部長代理

* 4 日本道路公団福岡管理局沖縄管理事務所助役

高さ 900mm) 2 体を切り出した。そのうち 1 試験体は、図-1 に示すように上下両面に外部電源による網状陽極方式の電気防食工法を実施し(以下、電防試験体と記す)、同時に、もう一方の試験体は、電防試験体と比較するために、電気防食を施さずに、(以下、無電防試験体と記す)電防試験体と同一な条件下で 42 ヶ月間屋外暴露した。

2. 2 定期的な追跡調査による電気防食効果

定期的な追跡調査による電気防食効果は、平成 3 年 1 月の通電開始から 42 ヶ月間に亘り、目視による外観観察、電源電圧、防食電流密度、 $E\text{-log } I$ および復極量などで確認した。

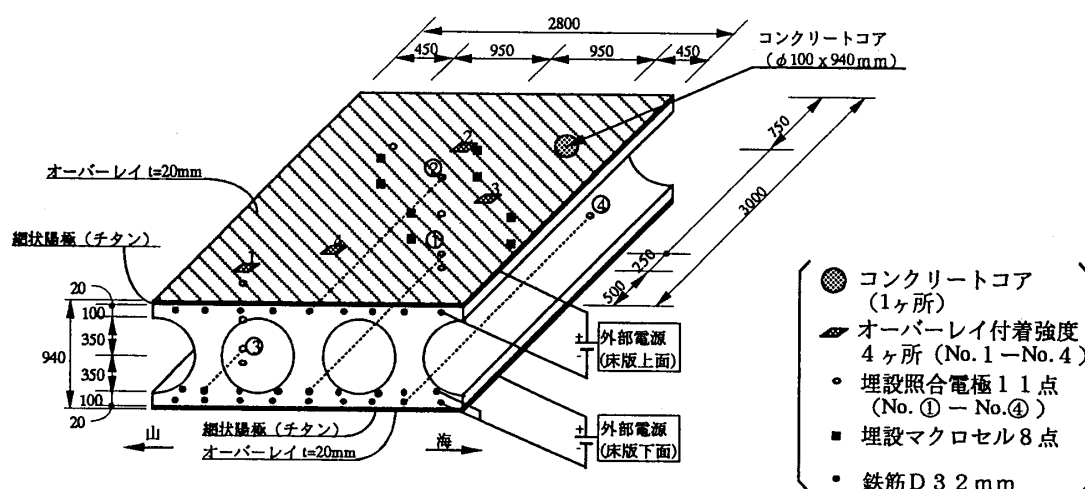


図-1 電防試験体の防食および測定部位

2. 3 コンクリートコア調査による電気防食効果

コンクリートコア (φ100mm×900mm) 調査による電気防食効果の確認は、電防および無電防試験体からそれぞれ 1 本ずつ採取した後、図-2 に示すような供試試料を、床版下面から 80mm ピッチのブロックに縦方向板状 4 分割し、① CMA の面分析による塩化物およびアルカリイオンの移動、② 塩化物イオンの化学分析(床版下面からの塩化物イオン量)、③ フェノールフタレインによる中性化試験、および④ 内部鉄筋の腐食状況観察などを行った。

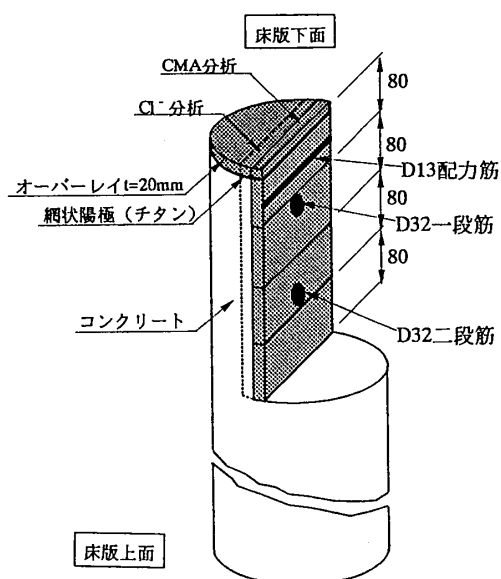


図-2 コンクリートコアの供試試料作製状況

3. 実験結果および考察

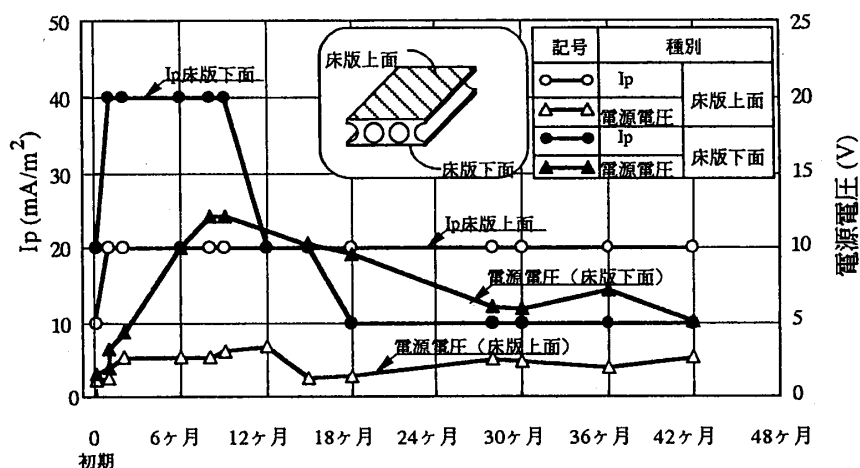
3. 1 定期的な追跡調査による電気防食効果

(1) 目視による外観観察

無電防試験体端面の鉄筋発錆状況は錆厚で 5mm 程度の著しい腐食を生じていたが、電防試験体端面の鉄筋発錆状況は、鉄筋表面に赤錆が生じている程度で良好な防食状態にあった。通電後 36 ヶ月経過した無電防試験体(床版下面)のスケーリングによるコンクリートの浮き、ひび割れ幅、およびひび割れ分布は、通電前の補修前調査時に比較してかなり増大し、劣化が進行していることが確認された[1][2]。一方、通電後 36 ヶ月経過した電防試験体のオーバーレイ面は、床版上下面とも電気防食性能に影響しない表面クラックが発生した程度であった。

(2) 防食電流密度 (I_p) 設定値および電源電圧

図-3に、目標電位シフト量 100mVを得るために、電防試験体の床版上下両面の I_p 設定値および電源電圧を示す。通電後42ヶ月経過した I_p 設定値は、通電初期の20~40mA/m²に比較して低減した10~20mA/m²を示し、同様に、42ヶ月経過した電源電圧は、3~5Vを示した。

図-3 I_p 設定値および電源電圧

(3) E-log I

図-4に、電防試験体（床版下面一段筋D32mm）のE-log I試験結果を示す。通電期間が長くなるに従いターフェル勾配が大きく、その自然電位は徐々に貴になる傾向を示した。

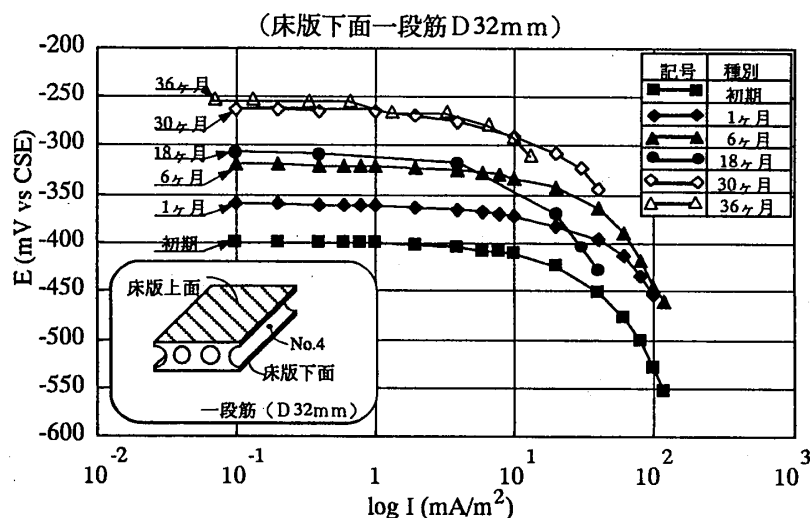


図-4 電防試験体のE-logIの経時変化

(4) 自然電位

ここでの自然電位は、銀／塩化銀照合電極で測定し、飽和硫酸銅電極に換算した値であり、図-5に、通電停止後48時間の自然電位の経時変化を示す。この結果から明らかなように、徐々に貴になる傾向を示し、良好な電気防食の効果が確認された。

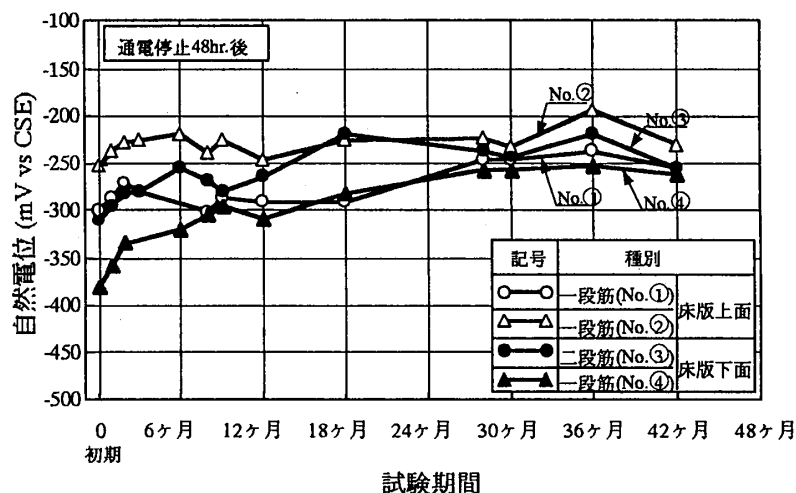


図-5 電防試験体の自然電位の経時変化

(5) 復極量 (通電停止48時間)

図-6に示すように、電防試験体の復極量 (特に、二段筋No.③) は、目標電位シフト量100mVを満足した。この結果より、網状陽極材から約20cmの距離にある鉄筋まで防食効果があることが判明した。

(6) 付着強さ

オーバーレイとコンクリート界面との付着強さの平均値16.4kgf/cm² (通電後36ヶ月) は、規格値10kgf/cm²[5]を満足した値を示した。

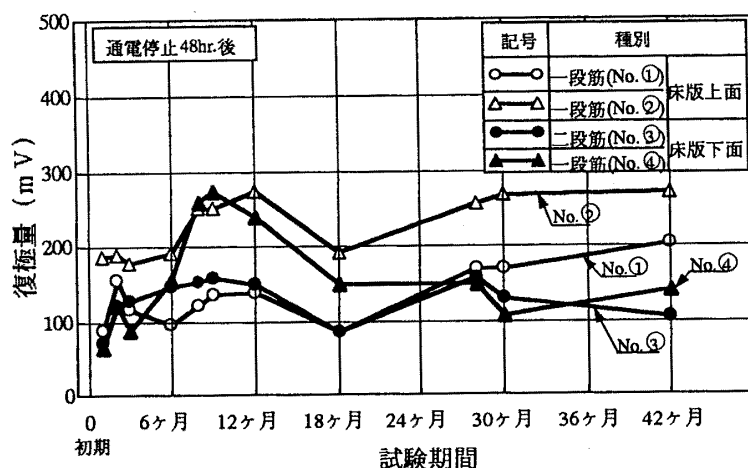
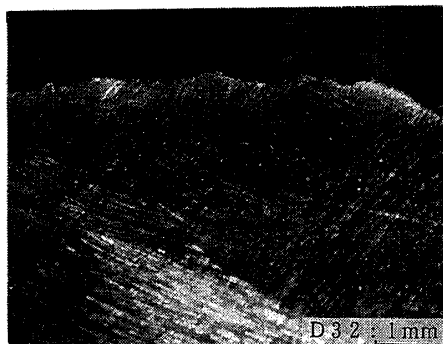


図-6 復極量の経時変化

3.2 コンクリートコアによる電気防食効果 (通電後36ヶ月)

(1) 内部鉄筋の腐食状況

写真-1に示すように、電防試験体の鉄筋表面錆厚は0.2~0.3mm程度で、横フシおよび縦リブの凸部は健全で腐食が停止していた。しかしながら、無電防試験体の同一部位では、1.5~2.0mm程度の厚い錆層を生成し、鉄筋表面の凸部は識別されなかった。特に、無電防試験体 (床版下面) の最小かぶり部の配筋筋D13mmは、その試験体の一部分において形骸もなく、錆溜まりが存在するに過ぎなかった。



(1) 電防試験体



(2) 無電防試験体

写真-1 床版下面の一段筋 (D32) の発錆状況

(2) 無電防試験体の塩化物およびアルカリイオンの分布

写真-2および図-7に示すように、無電防試験体における塩化物イオン濃度のピークは、小林ら[4]の報告と同様に非中性化領域 (最大中性化深さ50mm) の床版下面から70mmの位置で塩化物イオン量0.304%が存在し、Na⁺およびK⁺のアルカリイオン濃度のピークは、中性化領域に集中した。

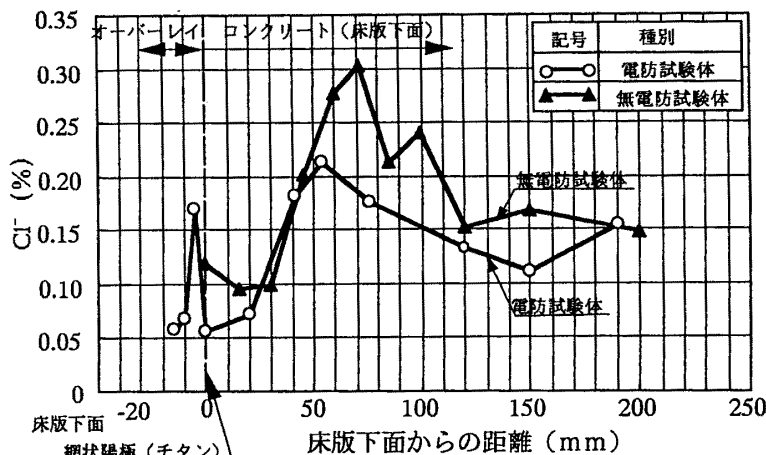
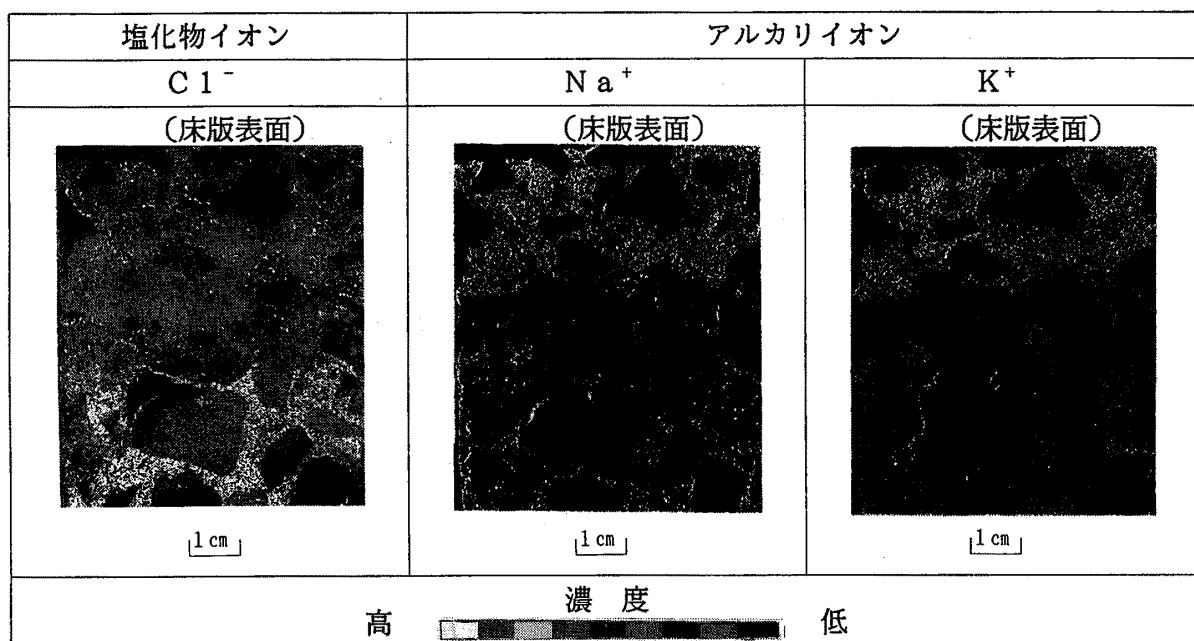


図-7 床版下面からの塩化物イオン量

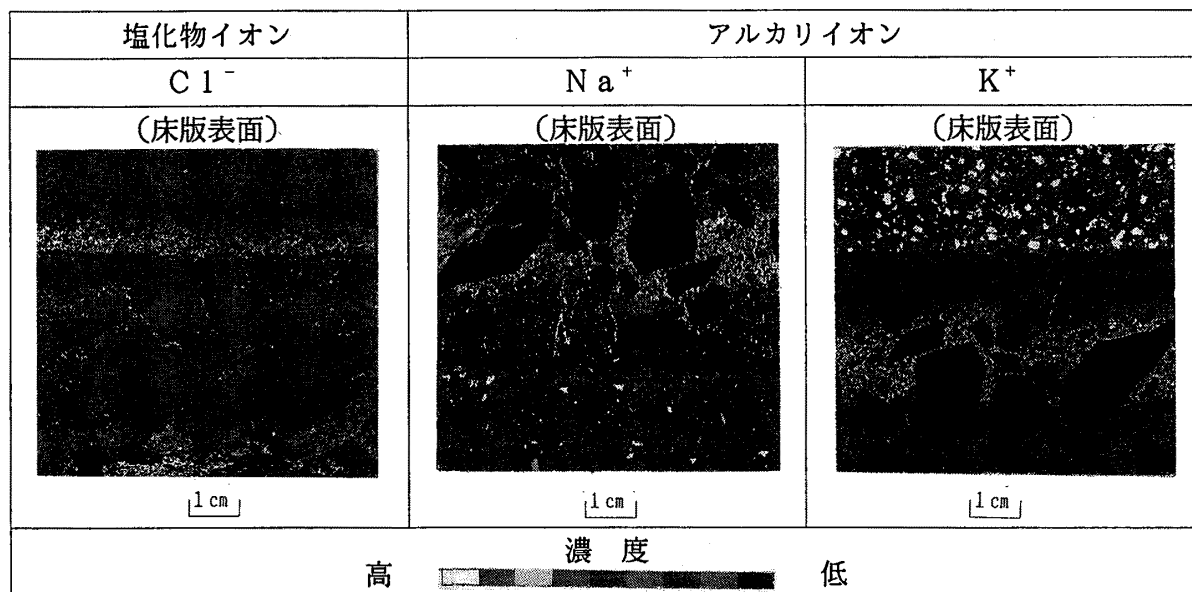


—無電防試験体（床版下面）—

写真-2 CMA面分析による塩化物およびアルカリイオンの分布

(3) 電防試験体の塩化物およびアルカリイオンの分布

写真-3および図-7に示すように、電防試験体の塩化物イオン濃度のピークは、網状陽極材付近の0.171%と、非中性化領域である床版下面から54mm（最大中性化深さ20mm）の0.213%との2ヶ所に存在した。 Na^+ および K^+ のアルカリイオンの高濃度は、中性化領域に存在し、鉄筋方向へ引き寄せられたと考える。このように網状陽極材を用いた電防試験体は、コンクリート中の塩化物イオンを網状陽極材のオーバーレイ側に引き寄せ、コンクリート中の塩化物イオン濃度を低下させるという副次的効果が確認できた。



—電防試験体（床版下面）—

写真-3 CMA面分析による塩化物およびアルカリイオンの分布

4. まとめ

本実験によって明らかになったことを要約すると以下のようである。

(1) 暴露条件下にあった無電防試験体の劣化は、コンクリートの浮きひび割れ幅、ひび割れ分布および試験体端面鉄筋の錆厚などの外観観察状況から著しく進行していた。しかしながら、通電後42ヶ月経過した電防試験体は、防食電流密度、 $E-\log I$ 、自然電位および通電停止48hr後の復極量などの調査結果から床版下端面の二段筋（陽極材から約20cm程度）まで安定した電位シフト量 100mV以上が得られ、良好な防食状態にあった。

(2) コンクリートコア調査による電防試験体の内部鉄筋腐食錆厚（0.2～0.3mm）は、無電防体の鉄筋腐食錆厚（1.5～2.0mm）の 1/5～1/10と非常に少なく、外観観察による端面鉄筋の発錆状況と同様な傾向を示した。

(3) 化学分析による無電防試験体の塩化物イオンの濃度ピークは、床版下面から70mmの非中性化領域に認められ、CMA面分析結果を裏付ける形態を示した。その Na^+ および K^+ のアルカリイオンの高濃度は、塩化物イオンとは反対に中性化領域に存在した。

(4) 網状陽極方式による電防試験体の電気化学的作用は、CMA面分析と化学分析結果からコンクリート中の塩化物イオンを網状陽極方向に引き寄せ、コンクリート中の塩化物イオンを低下させる副次的な効果を示した。 Na^+ および K^+ のアルカリイオンは、塩化物イオンと反対に非中性化領域中の鉄筋方向に引き寄せられる形態が確認された。

以上のことから、当電気防食工法の効果は、定期的な追跡調査結果と、コンクリートコア調査による内部鉄筋の腐食抑止状態から確認できた。さらに、塩化物イオンの化学分析およびCMA面分析（ Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ ）結果からコンクリート中の塩化物イオンを低下させる副次的な効果を示すことが確認できた。

今後も定期的な追跡調査を継続し、電気防食工法の効果の全容を検証してゆく所存である。最後に、本実験をまとめるに際して懇切丁寧なる御協力を戴いた日鐵テクノリサーチ㈱の伊藤薫技術主幹へ深謝致します。

参考文献

- 1) 根本正幸・今西直人・中嶋健治：チタン陽極法を適用した道路橋の電気防食実験、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集V-176, pp. 368-369, 1991. 9
- 2) 根本正幸・中嶋健治・今西直人・江上浩：チタン陽極法を適用した道路橋の電気防食実験（第2報）、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集V-339, pp. 678-679, 1994. 9
- 3) 中嶋健治・江上浩・根本正幸・今西直人：道路橋下部工に適用したチタンメッシュ陽極方式による電気防食工法、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集V-338, pp. 676-677, 1994. 9
- 4) 小林一輔・白木亮司・河合研至：炭酸化によって引き起されるコンクリート中の塩化物、硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮、コンクリート工学論文集 Vol. 1, No. 2, pp. 69-82, 1990. 7
- 5) 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小委員会編：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書、pp. 83-85, 1994. 10