

コンクリート構造物の電気防食に用いるニッケル被覆炭素繊維シート陽極の開発 — 研究成果と現場への適用事例 —

小林 俊秋 *1・中村 雅之 *2・井川 一弘 *3・篠田 吉央 *4

1. はじめに

大気中にあるコンクリート構造物の電気防食は、1973年にアメリカ合衆国カルフォルニア州の橋梁で最初に実用化された。これは、当時、パイプラインの電気防食のもっとも一般的な方法の応用であった。高珪素鉄（Silicon iron）を橋梁の床版に配置し、コークスブリーズを混入したアスファルト（carbon cokebreeze asphalt）を全面に被覆した導電性材料被覆方式で、荷重増加や垂直面での使用不可、浸透性が高いなどの問題があったが、その経済性により多くの施工が実施された¹⁾。この成功に続いて、荷重増加を抑制するために、コンクリート表面に設けた溝に導電性ポリマーを充てんし、白金被覆線を陽極として配置する溝切非被覆方式の試みがなされた。しかし、この方式では、陽極に電流が集中して陽極反応による酸性化を抑制できず、電気防食システムが劣化する問題が生じた²⁾。陽極近傍の酸性化を抑制するため、これまで、カーボンを導電性フィラーとして配合した塗料を用いてコンクリート表面に被覆する導電性塗料被覆方式や、メッシュ状に加工したDSE（Dimensionally Stable Electrode）と呼ばれるチタン基板白金族被覆電極を用いてコンクリート表面に被覆するチタンメッシュ方式などが開発・実用化²⁾され、陽極に対して電流分散機能を有する被覆材を組合せることまたは、陽極形状に電流分散機能をもたせることで、耐久性が向上してきた。しかし、電気防食を必要とするコンクリート構造物では供用中に施工する場合が多く、時間的な制約が多いことからさらなる施工性、経済性および耐久性の向上が望まれていた。このような背景から、筆者らは、電磁波シールド材料であるニッケル被覆炭素繊維シート（以下、Ni/CFSと記す）の低コスト性、機械特性、電気特性などの性質に着目して、電気防食の陽極に使用するシステムの開発・実用化を推進してきた^{3, 4, 5)}。本稿では、その研究成果について示すとともに、現場への適用事例^{6, 7)}について報告する。

2. 実 験

2.1 開発・実用化の流れ

開発・実用化の流れを図-1に示す。まず、陽極性能上もっとも重要な要因の一つである通電可能な最大積算電流密度を推定、評価するために、実験セルを使用した促進通電実験を実施した。次に、陽極の通電特性を向上させるた

めに、各種固体電解質としてバックフィルを用いた小型モルタル供試体の促進通電実験を実施した。また、電気防食は、対象構造物によってさまざまな環境での長期使用が想定されていることから、RC実験供試体にこの陽極を組み込んだユニットを設置して、屋外の自然暴露環境で約3年間、通電実験を実施した。さらに、実構造物への施工に伴う通電試験などで、鋼材の電位測定を行い、システムの使用性能や防食効果を評価した。

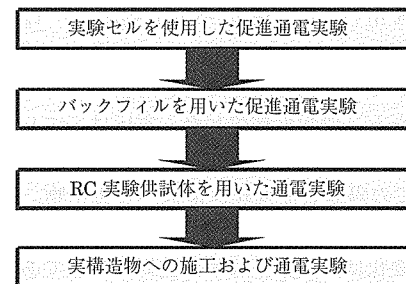


図-1 開発・実用化の流れ

2.2 実験セルの促進通電実験

米国腐食防食協会（NACE）で規格化された陽極材の耐久性試験法⁸⁾を参考にして、Ni/CFSの耐食性を評価した。ニッケルはアルカリ性水溶液中で優れた耐食性を有することから、試験液を、水酸化ナトリウム（以下NaOHと記す）水溶液とした。試験液濃度は、8% NaOHを最大濃度とし、濃度低下が通電性能に及ぼす影響を評価するため、0, 0.3, 0.5, 1.0, 4.0, 8.0% NaOHの計6種類とした。劣化促進条件として、NaOH水溶液に3% NaClを混合して試験液を調合し、電流密度は、施工実績から50 mA/m²陽極面積に対して、20 A/m²陽極面積（400倍）とし、通電期間は180日とした。実験セルの使用材料を表-1、Ni/CFSの外観を写真-1、実験セルを、図-2に示す。

表-1 実験セルの使用材料

材料	特徴・成分
実験セル容器	内径φ120×高さ123mm、容積1.0L
Ni/CFS（陽極）	PAN系、Ni被膜厚0.25μm、体積抵抗率=7.5×10 ⁴ Ω・cm
チタン製棒（陰極）	φ12×200mm

*1 Toshiaki KOBAYASHI：オリエンタル建設（株）本社技術研究所

*2 Masayuki NAKAMURA：オリエンタル建設（株）本社技術研究所

*3 Kazuhiro IKAWA：（株）ナカボーテック 技術研究所

*4 Yoshio SHINODA：（株）ナカボーテック 事業推進部

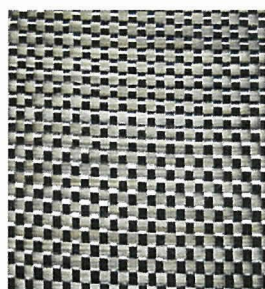


写真-1 Ni/CFSの外観

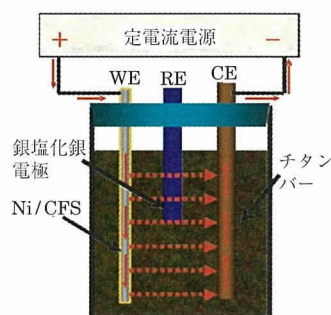


図-2 実験セル

図-2に示すように、実験セルは、試料極(WE)、対極(CE)、照合電極(RE)の3電極を容器内に配置したものを用いた。表-1、写真-1に示すようにNi/CFSは、ニッケルを被覆したポリアクリロニトリル(PAN)系炭素繊維による平織物である。なお平織物は、繊維数1万2000本の織り糸を用いて織り密度25mm幅あたり12.2本で、公称厚さが0.25mmである。Ni/CFS試験片の通電するシート面は、20cm²、試験液の浸透を防止するために気液界面間をエポキシ系樹脂で被覆した。電圧は、エレクトロメーターにより測定し、表面変化を目視により観察した。通電180日後での陽極表面変化、溶液への析出物、溶液色調の変化を表-2と写真-2に示す。4%NaOH以上では、陽極の表面に変化は、観察されず、良好な状態であることが分かった。3%NaClを混合し、過酷な通電条件にもかかわらず、十分な耐食効果があることが認められる。この実験での最大積算電流密度は、20[A/m²]×0.5[年]=10[A/m²年]である。施工実績から基準とした50mA/m²陽極面積を用いると、10[A/m²年]/50[mA/m²]=200[年]となる。防食電流が50mA/m²陽極面積では、200年に相当する電流を負荷したことになる。一方、4%NaOH未満では、表面のニッケルが酸化劣化して黒色に変色した。0.3%NaOH以下では、激しい腐食が認められ、電圧増加のため通電を中止した。

表-2 陽極表面変化、析出物、溶液色調の変化(通電180日後)

NaOH(%)	0	0.3	0.5	1	4	8
通電後	中止(2d)	中止(70d)	180d	180d	180d	180d
表面変化	黒色	黒色	黒色	黒色	変化なし	変化なし
析出物	あり(黒色)	あり(黒色)	あり(淡緑色)	あり(茶褐色)	あり(茶褐色)	なし
溶液色調	薄茶色	変化なし	変化なし	変化なし	濃茶色	濃茶色
電圧(V)	—	—	2.57	2.044	2.169	2.88

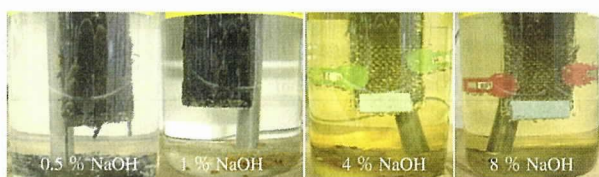


写真-2 陽極表面変化、溶液への析出物、溶液色調の変化(通電180日後)

た。

2.3 バックフィルを用いた促進通電実験

Ni/CFSを用いる陽極システムでは鋼材に電気を流すことにより酸化反応の場となる陽極とイオン伝導で電気を流す電解質(以下バックフィルと記す)との組合せにより、通電機能が保持できる。実験セルの促進通電実験より、陽極システムの構成要素であるバックフィルには、強アルカリ性と高いイオン伝導性を保持する機能が期待された。この機能は、通電の継続により低下すると考えられることから、候補材料の通電挙動の評価が重要な研究課題となった。バックフィルの有力な候補材料として、セメントモルタル、粘土鉱物、固体高分子型があげられた。セメントモルタルでは、体積変化の少ない無収縮セメントモルタルおよび付着性の高いポリマーセメントモルタル、粘土鉱物では、水との相互作用で高液性限界と膨潤特性を有するベントナイト、高吸水性高分子では、高吸水性のみならず、高保水性、高ゲル化力、耐アルカリ特性も有しており、かつ安価である架橋型ポリアクリル酸塩を候補材料に選定した。実験に用いた候補材料を表-3に示す。

表-3 実験に用いた候補材料

材 料	特徴、成分
無収縮セメントモルタル	石灰系膨張材を基材としたセメントと特殊混和材と細骨材を混合
ポリマーセメントモルタル	ポリマーエマルジョン混和剤、速硬性セメント、耐アルカリガラス繊維を混合
ベントナイト	特殊コロイド性粘土。主成分のモンモリロナイトを90%含む
高吸水性高分子	化学名：ポリアクリル酸ナトリウム、性状＝白色粉末、比重＝真比重1.5～1.7

陽極システムを設置する基材としてセメントモルタル供試体を用いた。その配合は、水セメント比34%、セメント細骨材比100%、塩化物イオン量(以下、Cl⁻と記す)=6kg/m³、普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)を使用した。供試体形状は、110×70×40mmの小判型であり、基体モルタル内に配置する陰極には、チタン製プレート(140×30×1mm)を用いた。プレートは、平行配置とし、下縁側のかぶりが10mm、型枠として用いる容器側面とのかぶりが20mmとなる位置に、容器端面に孔を設けてプレートを挿入する方法で固定した。供試体の形状を図-3、4に、供試体の製作工程を以下に示す。基体モルタル打設後3日間は、そのまま封緘養生し、3日後に開封して湿潤養生を14日間、気中養生を14日間行ったのち、陽極システムを設置して供試体とした。陽極システム部は、基体モルタル上に厚みが7mmとなるように固体電解質の1層目を充てんし、厚みの確認を行ったのち、固体電解質の1層目の上にNi/CFSを両端部が露出するように配置した。供試体外部に露出した陽極試験片端部にチタン製プレート2枚を圧着して通電点とした。ベントナイトと高吸水性高分子では、乾燥を防止するため、システム全体に樹脂フィルムを巻きつけた。小型モルタル供試体は、屋外に自然暴露とし、通電は、定電流制御で行った。

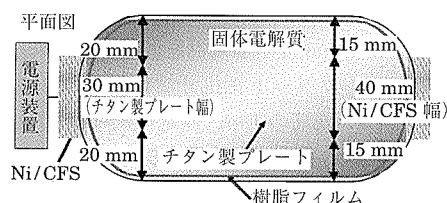


図-3 供試体の形状（平面）

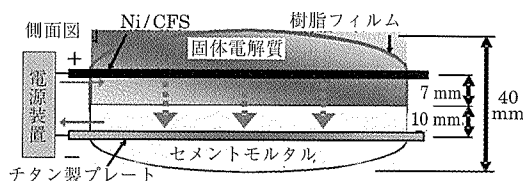


図-4 供試体の形状（側面）

表-4 実験の項目、使用材料、設定条件

項 目	使用材料、設定条件
固体電解質の種類	無収縮・ポリマーセメントモルタル、ペントナイト、高吸水性高分子
アルカリ性水溶液濃度	0 %, 4 %, 8 %, 15 % (NaOH)
通電電流密度	20, 40, 100, 200 mA/m ²

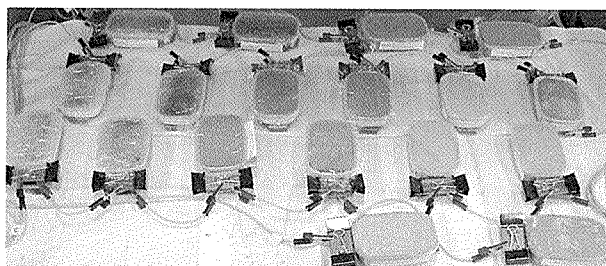


写真-3 通電状況

実験の項目、使用材料・設定条件を表-4、通電状況を写真-3に示す。電流は、20 mA/m²の通常の電気防食レベルから促進通電として10倍の200 mA/m²まで検討した。以前実施した実験¹⁾では、NaOH水溶液を電解液に使用した場合、濃度が濃くなるにつれ、陽極の耐食性能が向上する傾向が見られた。そこで電解液濃度は、0, 4, 8, 15 % NaOHとした。システム電圧は、Ni / CFS陽極と、チタン製プレート陰極間の電位差をエレクトロメーターで測定した。陽極電位は、Ni / CFS陽極と、モルタル供試体に接触させた銀塩化銀照合電極（以下、Ag/AgCl）間の電位差をエレクトロメーターで測定した。インスタントオフ電位は、通電を停止して1秒以内の電位を測定した。以下インスタントオフ電位を以下E_{io}と記す。

電流密度200 mA/m²、アルカリ濃度8 % NaOHを固定条件とし、各候補材料におけるシステム電圧の経時変化を図-5、陽極E_{io}の経時変化を図-6に示す。本項文中の電位は硫酸銅電極（以下CSE）基準に換算表示した。図-5、6から、無収縮セメントモルタルのシステム電圧は、約500

日間通電を継続した後に急激に上昇した。このようなシステム電圧の上昇は、陽極の電位変化のみに依存しており、この現象が起こるまでの通電時間が陽極の寿命として判断される。急激に電圧が上昇するまでのNi / CFSは、セメントのアルカリ性での不動態化により、電圧を保持できる。しかし、一定時間経過した後陽極反応によるpH低下、pHの低下により塩素ガス発生電位である1 041 mV（CSE）以上に電位が上昇し、Ni / CFSとの界面では、塩素ガス発生、脱不動態化が起こり、溶解する。腐食生成物の体積膨張が、膨れ、はく離を引き起こし、電圧が上昇すると推定される。ポリマーセメントモルタルは、通電直後に急激に電圧が上昇し通電不能となった。このことから電気防食には適さないことが分かった。ペントナイトでは、電圧が200日後で急激に増加した。ペントナイトには、Ni / CFSとの境界面にクラックが発生しており、水分蒸発による脱不動態化が起きたと考えられる。高吸水性高分子は、非常に高い電気伝導率を示すことが分かる。高吸水性高分子の高い電気伝導性は、高分子の高い吸水性や保水性によると考えられる。陽極E_{io}が1 041 mV（CSE）以下で安定していることは、陽極反応が酸素発生反応に基づく電気化学的反応であることを示している。

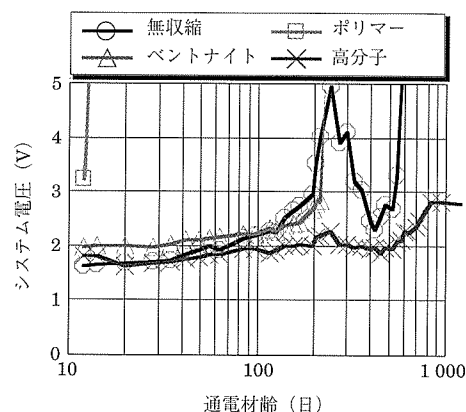
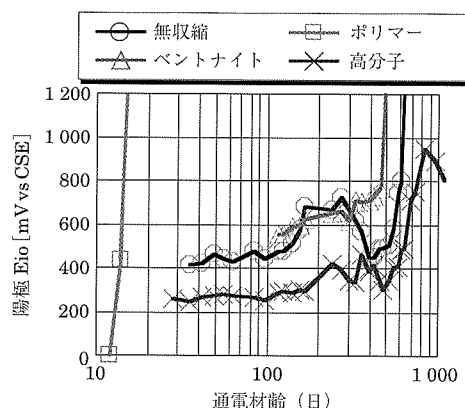


図-5 システム電圧の経時変化

図-6 陽極E_{io}の経時変化

2.4 RC 実験供試体への通電実験

本実験では、Ni / CFS は、幅 60 mm に裁断し、バックフィルは、高吸水性高分子とアルカリ性水溶液を混合して調整した。保護カバーは、陽極の保護および気密性の確保を目的とし FRP で製作した。陽極ユニットの構成材料を表 - 5、陽極ユニットの構造を写真 - 4、RC 実験供試体および陽極ユニットの配置を図 - 7 に示す。保護カバーの内側にゲル状のバックフィルを充てんした。その中央に Ni / CFS を配置してユニットを組立て、コンクリート表面にタッピングネジで定着した。図 - 7 に示すように、実験供試体は、70 cm × 40 cm × 440 cm とし、コンクリートの配合は、単位水量を 180 kg/m³、水セメント比を 65 %、Cl⁻ をセメント重量に対して 2.7 % を添加した。所定養生後、4 日間 3.5 % NaCl 水溶液の噴霧、3 日間気中養生を 1 サイクルとした腐食促進養生を 82 サイクル実施し実験に供した。陽極ユニットは、橋軸方向両側面に 2 ラインと底面に 1 ライン、計 5 ラインとした。通電試験は、定電流制御装置を用いて、陽極シート面積 1.16 m² (コンクリート表面積 7.2 m²) から鉄筋へ電流を流した。照合電極として、埋設型鉛照合電極を使用した。表 - 6 に示す実験条件で初期通電調整を行い、通電電流を 10 mA/m² (コンクリート表面積) とした。

表 - 5 陽極ユニットの使用材料

材 料	特徴, 成分
高吸水性高分子	化学名: ポリアクリル酸塩系水溶性増粘剤, 性状=白色粉末, 比重= 1.5 ~ 1.7
水酸化ナトリウム	比重= 2.130, 白色の半透明の固体
保護カバー	ガラス繊維と不飽和ポリエステル樹脂の複合材料, 厚さ= 1.5 mm

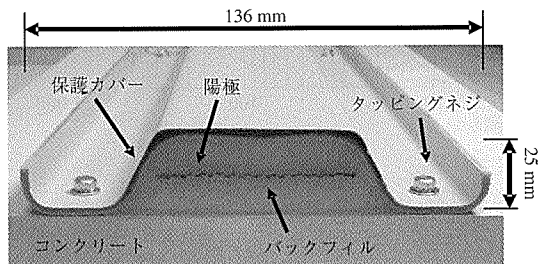


写真 - 4 陽極ユニットの構造

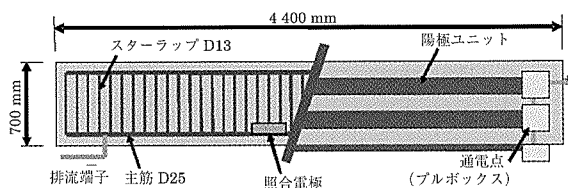


図 - 7 RC 実験供試体および陽極ユニットの配置

表 - 6 初期通電調整実験条件

環境温度 (°C)	29
陽極自然電位 (mV.vsCSE)	- 355
鉄筋自然電位 (mV.vsCSE)	- 617
鉄筋電位変化量 (mV)	100 以上
通電電流密度 (mA/m ²)	1 ~ 50

本項文中の鉄筋電位は硫酸銅電極 (以下 CSE) 基準に換算表示した。また Eio は、通電遮断直後 40 [msec] 以内の電位を測定し、コンクリート抵抗分を補正した真の鉄筋通電電位を計測した。鉄筋の Eio、通電遮断 4 時間後の鉄筋電位 (以下 Eoff4h) の経時変化を図 - 8、Eio と Eoff4h の差を取ることで求めた復極量の経時変化を図 - 9 に示す。図 - 8 より、Eio は、貴の方向に移動し、その後、卑の方向に移動して 1100 日間以上経過した時点では、- 800 [mVvsCSE] 付近になった。Cl⁻ の添加と腐食促進養生によって鉄筋は十分に腐食して、初期の鉄筋自然電位は、卑な値となり、Eio も卑な値になる。その後、通電による鉄筋の不動態化が進行して、Eoff4h および Eio が貴化する。さらに通電の継続により不動態が安定化し、Eoff4h も安定化する。しかし、不動態化によって腐食反応抵抗が増加するために、Eio は、同じ電流を流しても大きく卑化することになる。この傾向は図 - 9 の復極量の経時変化にも現れており、鉄筋腐食が激しい場合、復極量は防食効果の判定基準である 100 mV 以下となるが、通電の継続にともない、復極量は増大することが分かる。すなわち、鉄筋腐食が激しい場合、初期の復極量が不足するが、通電を継続することにより 100 mV 以上の復極量となり、鉄筋が不動態化するといえる。

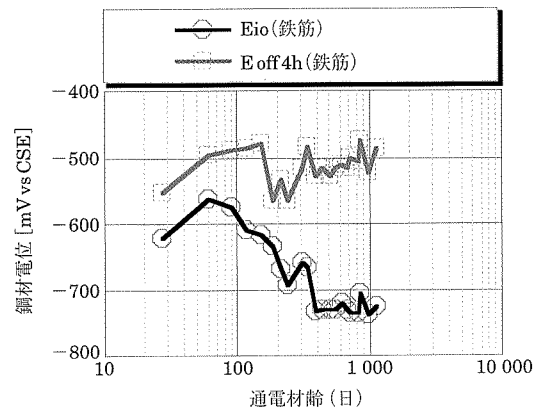


図 - 8 鋼材の Eio、通電遮断 4 時間後の鋼材電位 (以下 Eoff4h) の経時変化

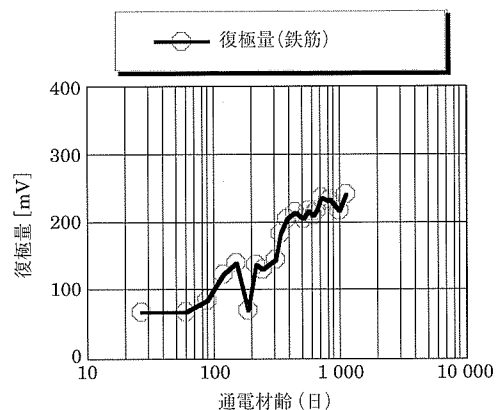


図 - 9 復極量の経時変化

3. 実構造物への適用

3.1 施工手順および品質管理試験

電気防食工事では、照合電極の作動確認、鋼材の導通および陽極・鋼材間の絶縁が非常に重要である。施工中の品質管理試験として、表 - 7 に示す 6 項目の品質管理試験を行う。実施工での施工手順を図 - 10 に示す。図中の丸数字は施工時の品質確認試験を示す。

表 - 7 品質管理試験

	項目	測定項目	基準
①	照合電極作動確認試験	排流端子とはく離はく落部の露出鉄筋間の電位差を測定	1 mV 未満
②	鋼材間導通確認試験	測定端子と照合電極間の電位差を測定	測定値が安定
③	陽極鋼材間絶縁確認試験	陽極と排流端子間の電位差を測定、あるいは交流抵抗値を測定	100 mV 以上 0 Ω 超
④	陽極間導通確認試験	各陽極間（通電点間）の電位差を測定	1 mV 未満
⑤	仮通電試験	一定電流密度で通電し、鋼材電位を測定	電位が 卑方向へ変化
⑥	通電試験	分極量試験 各電流密度通電時の鋼材電位を測定	—
		復極試験 1 週間程度通電後遮断し、鋼材電位の変化量を測定	100 mV 以上

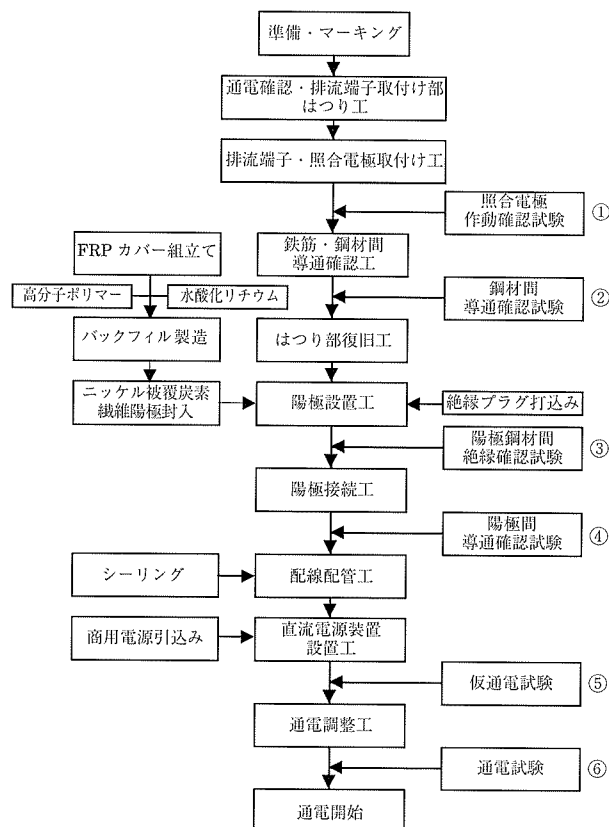


図 - 10 陽極システムの施工手順

3.2 施工事例

Ni / CFS を用いた電気防食工法は、現在までに 4 つの構造物に適用されている。① プレテンション PC ホロー桁橋、② 単柱式 RC 橋脚、③ 鋼橋 RC 床版、④ RCT 桁橋の 4 つである。各構造物の諸元を表 - 8 に示す。

以下に各構造物での概要と施工時の品質管理試験および陽極配置上の留意点について述べる。

3.2.1 プレテンション PC ホロー桁橋への適用

本橋は瀬戸海峡にかかるプレテンション PC ホロー桁橋である。プレテンション PC 桁ではスターラップと PC 鋼よ

り線の導通が確保されていない事例が多く、本橋においても防食対象鋼材の導通確認が課題であった。

(1) 施工概要

- ・ 工事名 梶島橋梁補修工事
- ・ 工事場所 熊本県上天草市龍ヶ岳町梶島地区内

図 - 11 に橋梁断面図および陽極配置図を示し、写真 - 5 に完成写真を示す。

(2) 劣化状況

塩害劣化のグレードとしては進展期に相当した。写真 - 6

表 - 8 各構造物の諸元

橋梁名	梶島（くぐしま）橋	岬大橋	安田川大橋	新川橋・塩郷橋	
所在地	熊本県上天草市	高知県室戸市	高知県安田町	島根県太田市	
構 造	プレテンション PC ホロー桁橋	単柱式・壁式 RC 橋脚	鋼橋 RC 床版	RCT 桁橋	
	8 主桁	橋脚 5 基	張出し床版	3 主桁	
建設年次	1972 年	1973 年	1970 年	新川橋 1962 年	塩郷橋 1958 年
電気防食施工年	2005 年 5 月	2005 年 2 月	2005 年 3 月	2005 年 3 月	
電気防食 対象部位	主桁下面	梁部側面	床版下面	床版下面, 主桁 側面, 主桁下面	
対象面積 m ²	64	264	235	47.9	85.5
照合電極個数	2	3	2	2	2
電流密度 m/Am ²	3.0	2.38	3.77	6.14	12.6
復極量 mA*	146	193	201	131	155
備 考	1 主桁 2 陽極配置	一部 鉛直方向配置	配置間隔 最大 453 m	無収縮モルタル断 面修復工施工	

*：平均値

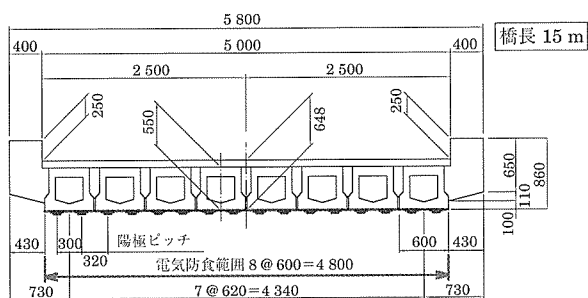


図-11 橋梁断面図・陽極配置図

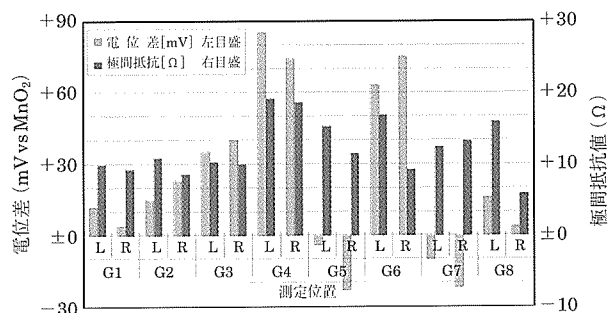


図-12 陽極鋼材間絶縁確認試験

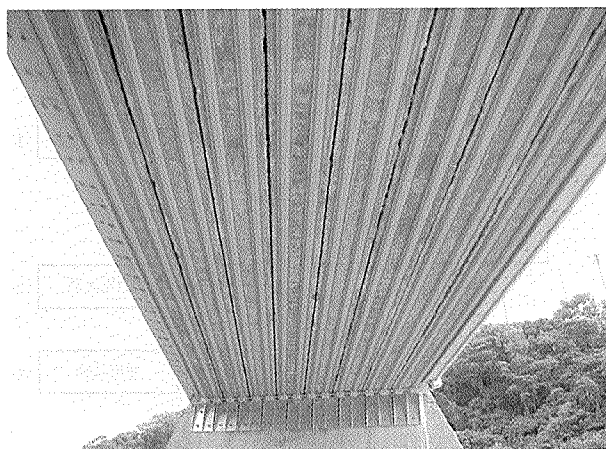


写真-5 電気防食工完成

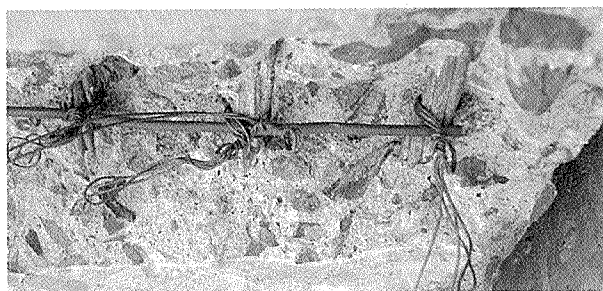


写真-6 鋼材腐食状況と鋼材導通処理

にPC鋼より線の腐食状況を示す。鋼材はPC鋼より線IS10.8 mmである。PC鋼材には軽微な腐食が認められた。コンクリート中のCl⁻量は耳桁において鋼材位置の30 mmまで、発錆限界の1.2 kg/m³以上含まれていた。

(3) 鋼材間導通確認試験および陽極鋼材間絶縁確認試験

防食対象鋼材はPC鋼より線とスターラップである。排流端子はスターラップに溶接した。PC鋼材とスターラップの導通確認をしたところ、導通していないPC鋼材が7割であった。写真-6はPC鋼より線の導通処理をしたもので、横に配置しているのが導通用の番線である。結束線でPC鋼より線に緊結した。陽極鋼材間絶縁確認試験は、照合電極の埋込み完了後、直流電圧計を用いて各陽極の通電点と排流端子の電位差を測定し、かつ、交流抵抗計を用いて抵抗を測定する。10 mV以上の電位差あるいは0 Ωを超える極間抵抗で電気的絶縁が確保されていると判断した。図-12に陽極鋼材間絶縁確認試験の結果を示す。本工法の特長

であるNi/CFS陽極と、アルカリ水溶液を含ませた高分子ポリマーによるバックフィルの組合せにより、10 mV以下値が見られる低い電位差となった。高分子ポリマー中のNi/CFS陽極電位は、コンクリート中の鋼材電位と同等であること、また陽極システムとコンクリート間の接触抵抗が小さいことから、電位差が小さくなったと考えられる。

3.2.2 RC橋脚への適用

岬大橋は高知県室戸市の漁港内に架設された、RC橋脚を有する6径間プレテンション方式単純T桁橋＋鋼桁橋である。竣工後約34年経過しており、各所で塩害劣化が発生していた。本稿では電気防食適用範囲決定のために行った塩分浸透解析の結果と照合電極確認試験について述べる。

(1) 工事概要

工事名：奈半利管内橋脚補強補修工事

工事場所：高知県室戸市室戸岬町津呂

橋脚形式：単柱式RC橋脚 (P1～P6)、壁式RC橋脚 (P7)

全体一般図と陽極配置図を図-13に示す。

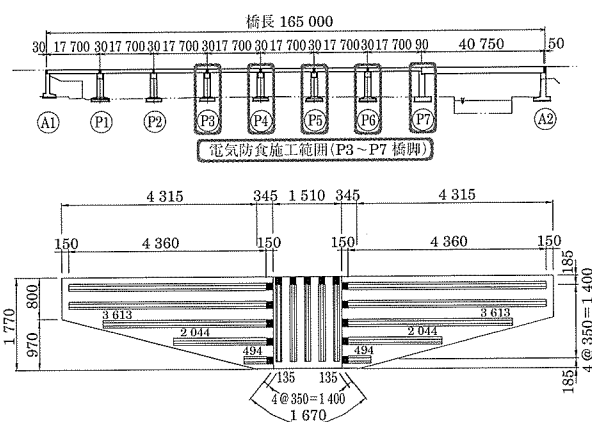


図-13 全体一般図と陽極配置図

(2) 塩分浸透解析による検討

塩化物イオン量浸透解析結果から数年内に鋼材位置のCl⁻が1.2 kg/m³ (発錆限界値)を超えると予測される橋脚 (P3～P7橋脚) について電気防食工法を適用した。図-14に塩分浸透解析結果を示す。P2橋脚では竣工後51年で、P3橋脚では37年で発錆限界値に到達する予測となった。



写真-7 電気防食工完成（手前 P4 橋脚，奥 P5 橋脚）

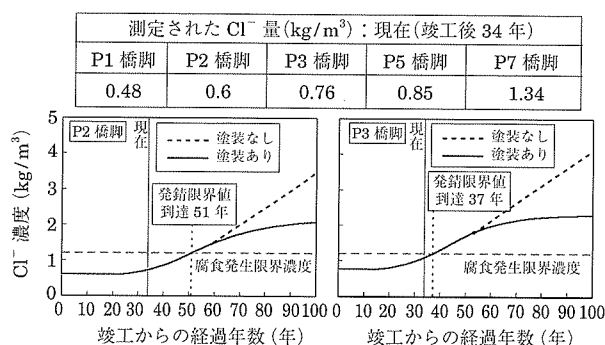


図-14 塩分浸透解析結果

(3) 照合電極作動確認試験

照合電極作動確認試験は、照合電極埋込み完了後、排流端子と照合電極間の電位差を直流電圧計を用いて測定した。電位差が安定した値が得られ、照合電極は正常に作動していると判断した。また、確認後数日間測定し、鋼材の自然電位として図-15にまとめた。

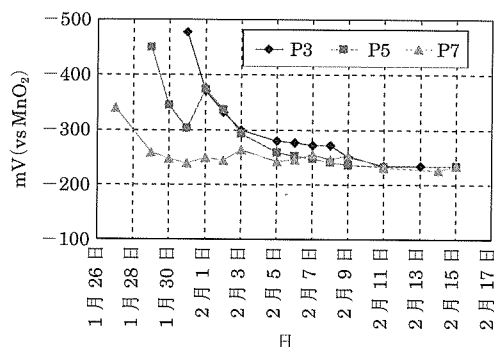


図-15 照合電極作動確認試験結果（自然電位測定結果）

3.2.3 鋼橋 RC 床版への適用

安田川大橋は高知県安芸郡安田町の太平洋に面した、国道 55 線・安田川にかかる 5 径間の鋼橋である。海岸線から 100 m 以内の塩害環境下で 37 年間供用されている。本稿では陽極配置上の留意点と仮通電試験について述べる。

(1) 工事概要

工事名: 55 号橋脚補強補修工事
工事場所: 高知県安芸郡安田町安田

橋梁形式: 単純合成鉄桁橋 2 連 + 3 径間連続非合成鉄桁橋
(2) 陽極配置上の留意点

電気防食では陽極近傍に添架物などの鋼材がある場合、電食や防食電流の鋼桁への集中などの懸念がある。鋼製配水管や鉄骨製点検路などの添架物は、防食対象鋼材との電氣的導通を確保しなければならない。電気防食範囲にある鋼製の添架物は、電気防食により防食電流が流入し、鋼材と電氣的導通がない場合には電食により腐食を引き起こす可能性がある。

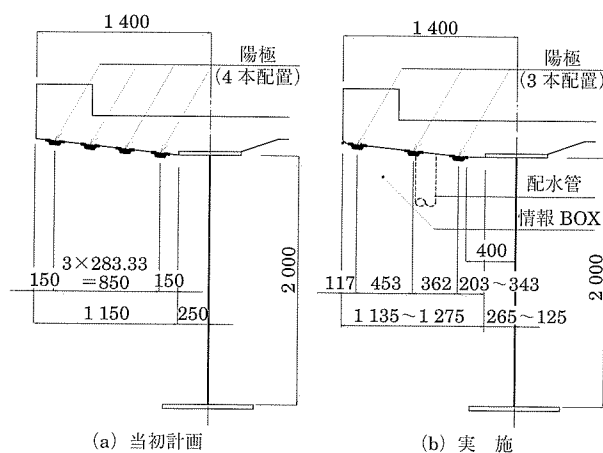


図-16 陽極配置

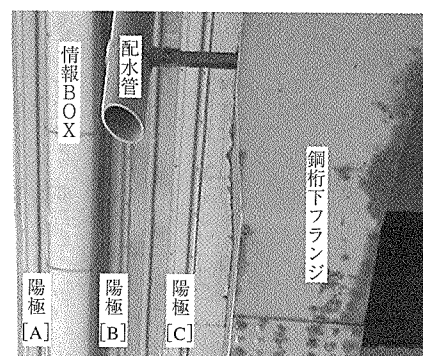


写真-8 電気防食工完成

図-16に陽極ユニットの配置図を示す。(a)が当初計画であり、(b)が実施配置である。当初計画では 300 mm 以下の等間隔で配置され、鋼桁との距離は 150 mm としていた。実施配置では添架物を避けるために 3 本配置となり、配置間隔は 453 mm と 362 mm と 300 mm 以上の配置となり、鋼桁との距離はフランジ幅の変化に伴い 203 ~ 343 mm となった。また、添架物固定金物 (ステンレス製打込みアンカーおよびフラットバー) が陽極ユニットの直近に位置する配置となった。これらの影響を確認するために 1 m の陽極を 3 本配置して、仮通電試験を行った。

(3) 仮通電試験

仮通電試験は長さ 1 m の陽極を、図-16 (b) に示す位置に設置した。通電面積は 1.25 m^2 である。通電に先立ち、劣化部の露出鉄筋と鋼桁および添架物金物の導通を確認した。確認の結果、RC 床版に配置されている鉄筋と添架物

金物および鋼桁に導通が認められた。また、陽極鋼材間絶縁確認を行い、床版鉄筋および添架物金物・鋼桁が陽極ユニットと電気的絶縁が確保されていることを確認した。仮通電試験に用いる照合電極には Ag/AgCl を用い、入力抵抗 100 M Ω の直流電圧計を用いた。排流端子と測定端子は本施工に用いるものを床版鉄筋に溶接した。通電電流密度は 9.13 mA/m² とし、通電時間は 10 分間とした。

分極量の分布を図 - 17 に示す。縦軸が分極量、横軸が床版端部からの距離である。0 が床版端部、1 400 が鋼桁位置である。床版端部において 483 mV と大きな分極量が得られた。鋼桁に近づくにつれて分極量が小さくなった。これは鋼桁のコンクリートに接する面積が大きいから、分極量が小さくなっていると考えられる。先端部は陽極ユニットに近かつ鉄筋量が少ないことから分極量が大きくなっているものと考えられる。陽極ユニットの間隔が広い部位については、最大 453 mm の測定点 ② および 362 mm の測定点 ③ において、100 mV 以上の分極量が得られている。添架物金物の分極は、203 mV と 100 mV 以上の分極量が得られている。分極量の分布を見ると、大きな乱れはないことから陽極ユニットと添架物金物や鋼桁への短絡は認められず、電食の危険はないと判断した。

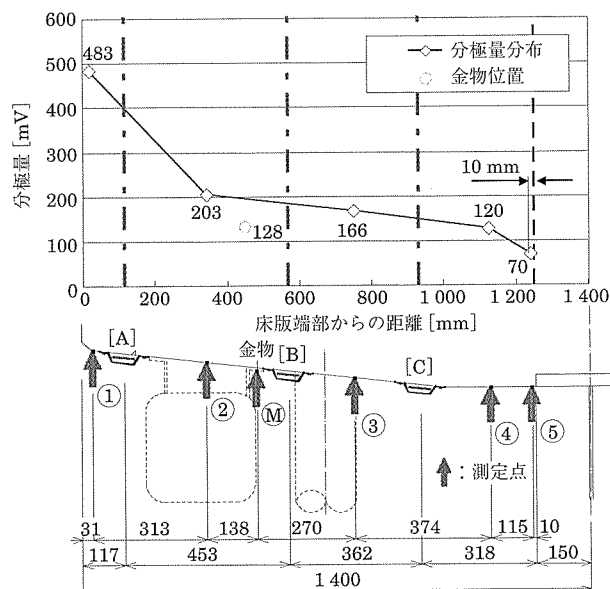


図 - 17 分極量の分布と測定位置

3.2.4 RCT 桁橋への適用

新川橋・塩郷橋は鳴き砂で有名な日本海の琴ヶ浜に隣接する橋梁であり、竣工後 44 年および 48 年が経過している。塩害による劣化が著しく、はく離はく落したコンクリートをはつり取り無収縮モルタルにて全断面補修を行った後、電気防食を施工した。本稿では通電電流を決定するための分極量試験について述べる。図 - 18 に橋梁断面図と陽極配置図を示す。

(1) 工事概要

工 事 名：大田馬路停車場線橋梁修繕工事（塩郷橋・新川橋）

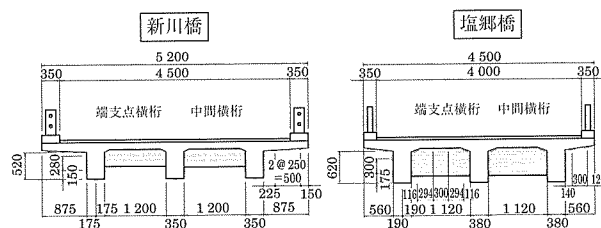


図 - 18 橋梁断面図・陽極配置図

工事場所：島根県大田市仁摩町馬路地内

橋梁形式：RCT 桁橋（単径間）

新川橋 橋長：7.8 m, 塩郷橋 橋長：10.6 m

(2) 劣化状況

内部鉄筋の腐食の進行によるコンクリートのひび割れおよび断面欠損に至っており、劣化グレードとしては、進展期から劣化期に相当した。新川橋の劣化状況を写真 - 9 に示す。写真 - 10 に電気防食工の完成写真を示す。

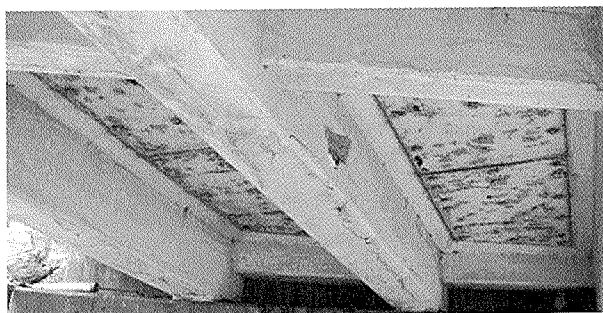


写真 - 9 劣化状況（新川橋）

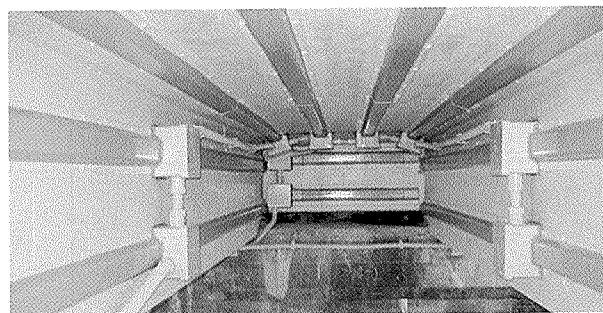


写真 - 10 電気防食工完成（塩郷橋）

(3) 分極量試験

塩郷橋の照合電極は G 1 主桁下面と G 2・G 3 間床版に設置した。主桁と床版の両部位の電位変化量 100 mV を満足する電流密度 12.6 mA/m² で通電を開始した。図 - 19 に分極量試験結果を示す。

3.3 電気防食工法の維持管理

前出のプレテンション PC ホロー桁橋の維持管理の定期点検により得られたデータについて報告する。図 - 20 に通電直後、70 日後、200 日後、400 日後までの分極曲線を示す。これを見ると分極曲線の傾きは、通電期間によって異なっていることが分かる。一般的に通電期間が長くなると分極曲線の傾きが大きくなる傾向があり、少ない電流密度

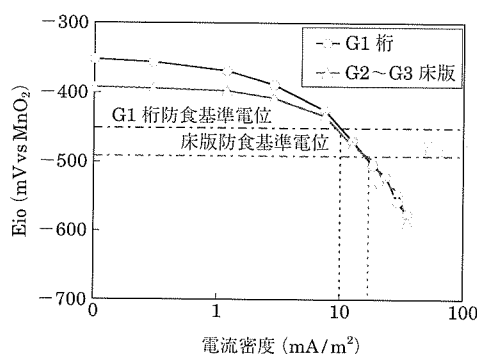


図 - 19 分極量試験結果 (塩郷橋)

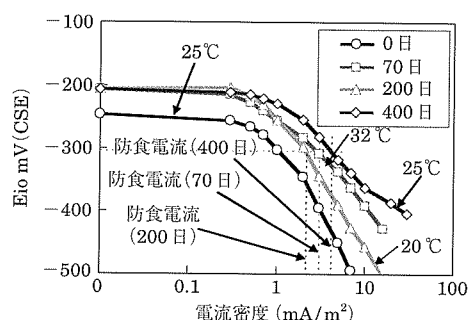


図 - 20 復極量の推移

で分極量が大きくなることを示す。得られたデータを見ると400日後の傾きが小さくなっており逆の傾向が見られる。通電初期～400日後の環境温度は、それぞれ25℃、32℃、20℃、25℃であった。環境温度の変化によって、PC鋼材の分極量が影響を受けていると考えられる。これら分極量の温度への依存度については、以下の原因が考えられる。分極に消費される正味の電流密度は、還元方向の反応による電流密度と酸化方向の反応による電流密度の差となる。温度が上昇すると酸化方向の電流密度が増大する。還元方向の電流密度は一定なので分極に消費される正味の電流密度は減少し、分極量が減少すると考えられる。

自然電位（電流密度0 mA/m²）は、通電初期では-247 mV程度と低く、腐食発生電位近くであるが、70～400日後は、-205 mV程度のプラス方向に変化しており、不動

態化電位になっている。鋼材腐食に伴う自然電位の低下が抑制されており、腐食状況が改善されたことを示している。100 mVシフト基準を得るための防食電流密度は、2～3 mA/m²で大きな変化は見られなかった。

4. おわりに

Ni / CFSを用いた電気防食工法の研究開発と実施工・維持管理の一部について報告した。本工法は陽極システムを外付けで設置することから、かぶりの少ないプレテンションPC桁等に適用しやすい。今後増加が予想される供用50年以上のPC橋¹⁰⁾の塩害対策として有望である。今後は施工性・経済性をさらに向上させて、電気防食工法を普及させていきたい。

参考文献

- 1) John P. Broomfield : Corrosion of Steel in Concrete, E&FN SPON, 1997
- 2) B.S. Wyatt, D.J. Irvine : A review of cathodic protection of reinforced concrete, Materials Performance, Dec. 1987, pp.12 - 21
- 3) 小林俊秋, 呉承寧 : ニッケル被覆炭素繊維シートの電気防食における通電性能に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.1534 - 1536 (2005)
- 4) 小林俊秋ほか : セメント系モルタル中におけるニッケル被覆炭素繊維シート陽極を用いた電気防食の通電性能に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.1, pp.1697 - 1702 (2006)
- 5) 小林俊秋, 中村雅之, 堀越直樹, 井川一弘 : RC大型実験供試体に設置した電気防食に用いるニッケル被覆炭素繊維シート陽極, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1 (2007)
- 6) 中村雅之, 小林俊秋, 井川一弘, 篠田良央 : ニッケル被覆炭素繊維シートを用いた電気防食工法の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.1573 - 1542 (2005)
- 7) 小林俊秋, 中村雅之, 星野雅彦, 堀越直樹 : ニッケル被覆炭素繊維シートを用いた電気防食の維持管理, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 6巻, pp.37 - 42 (2006)
- 8) NACE standard TM 0294 - 94 Item No.21225
- 9) Mudd, C. J.: Cathodic Protection of Steel in Concrete with Mixed Metal Oxide Activated Titanium Anode Net, Corrosion88, No.229, pp.2 - 24, March..1988
- 10) プレストレストコンクリート技術協会 : コンクリート構造診断技術, pp.12 - 13, 2007.7

【2007年9月3日受付】