

論文 コンクリート構造物干満帯部への電気防食法の適用に関する研究

川俣孝治*¹・福手勤*²・阿部正美*³・峰松敏和*⁴

要旨：過酷な塩害環境下にあるコンクリート構造物に対し電気防食法は有効な防食方法であるが、これまで飛沫帯から大気中部の構造物を対象として検討されてきた。本研究では、コンクリート構造物干満帯部へ電気防食法を適用するため、新たにパネル陽極による電気防食法を提案するとともに、この電気防食供試体による干満水槽暴露試験を実施し、干満帯部に適用した場合の分極性状、通電性状等について大気中部や海中中部と比較検討した。その結果、パネル陽極方式は干満帯部の電気防食の施工に有効な方法であること、干満帯部での電位は潮位変動による影響を受けることなどが明らかとなった。

キーワード：塩害、腐食、電気防食法、干満帯、チタンメッシュ陽極

1. はじめに

近年、港湾コンクリート構造物中の鋼材の塩害による腐食が大きな問題となっており、その補修対策が各方面で検討されている。これらの補修工法のうち、電気防食法は、厳しい塩害環境下でも確実な防食効果が得られる方法であり、これを我が国の劣化環境に応じた工法として確立するための検討や開発が進められている[1]。

この電気防食法の大気中や飛沫帯の構造物への適用に関しては、これまで報告されているように、何ら問題なく適用可能であることが明らかとなっている[2, 3]。しかし、腐食対策を必要とする港湾コンクリート構造物の中には干満帯に属する柱や桁下部が多数存在しているにも拘わらず、これらの部位が満潮時に水没するため、従来工法を含めた各種補修工法の適用に困難を極めているのが現状である。一方、この干満帯部に電気防食法を適用する場合には、気中部や飛沫帯と施工環境や施工後の通電環境が異なることから、干満帯部への陽極材料を含めた施工方法の開発と適用後の通電特性についての検討が必要である[4]。

本研究は、鉄筋コンクリート構造物干満帯部の腐食防食対策としての電気防食法の確立を目的としたものであり、干満帯部においても適用可能な電気防食システムを提案するとともに、干満水槽暴露実験を実施し、干満が分極特性や通電特性に及ぼす影響を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 パネル陽極方式の概要

干満帯部へ電気防食法を適用する場合には、大気中部や飛沫帯部とは異なり、短時間に補修対象部位が水没してしまうため、このような条件下で施工可能となる施工システムの検討が必要である。

今回検討した施工システムは、陽極をパネルに固定したパネル陽極を施工対象部位に取り付け、

* 1 住友大阪セメント(株) 建材事業部技術開発部、工修(正会員)

* 2 運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室室長、工博(正会員)

* 3 運輸省港湾技術研究所構造部主任研究官、(正会員)

* 4 住友大阪セメント(株) 建材事業部製品営業課課長、工博(正会員)

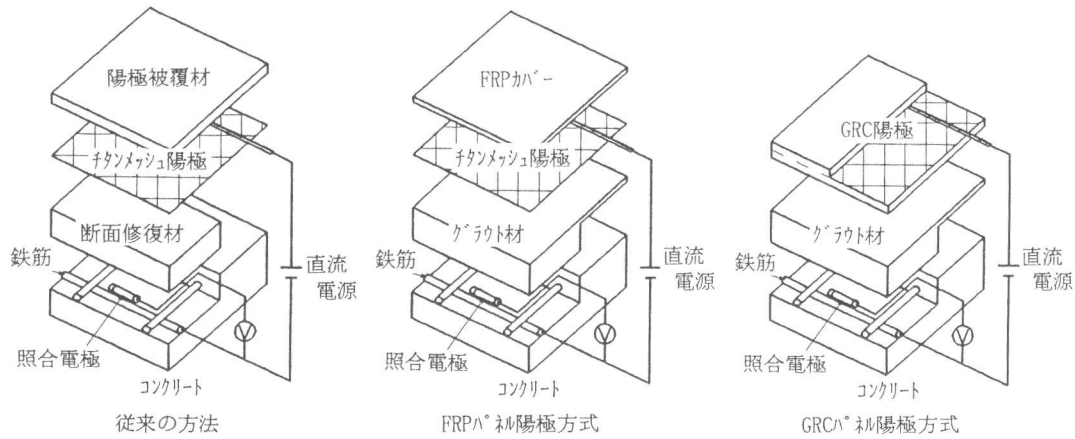


図-1 各パネル陽極方式の概要

パネル陽極とコンクリートとの隙間を無収縮系のセメントモルタル（以下、気中注入材）で注入するものである。各パネル陽極システムの概要を従来の方法と比較して、図-1に示す。この施工システムでは、パネル陽極を設置し注入することにより、断面の修復、陽極の固定、陽極の被覆が一体で行えるため、電気防食の施工前に断面欠損部の修復を行う必要もなくなり、施工性が大きく改善できる[5]。したがって、干満帯部のような施工可能な時間に制約を受ける場合には、有効な方法である。また、注入材を水中不分離性モルタル（以下、水中注入材）とすることにより、パネル陽極設置後に水没した場合にも適用可能となる。

なお、陽極材料としては幾つかのものが提案されているが、今回のパネル陽極方式の場合には任意形状に切断加工する必要があることから、チタンメッシュ陽極を用いることとした。また、この施工システムに用いるパネルの材質は、FRPとGRCの2種類とし、FRPの場合には内側にフックによりチタンメッシュ陽極を固定する方法とした。また、GRCの場合は、パネル製造時にチタンメッシュ陽極をパネル内部に組み込む方法[5]とした。

2.2 供試体の作製

各パネル陽極を取り付ける母材となるコンクリート部は、図-2に示すような900×600×100mmの鉄筋コンクリート版である。なお、コンクリート部には練混ぜ時に塩化物イオン量で5kg/m³のNaClを添加している。このコンクリートの配合を表-1に示す。

この母材コンクリートは、約1カ月間の養生後、断面欠損部を想定して中央部をはつりだし、このはつり部に照合電極を取り付けた。その後、各パネル陽極を母材コンクリートと10mmの間隔を保

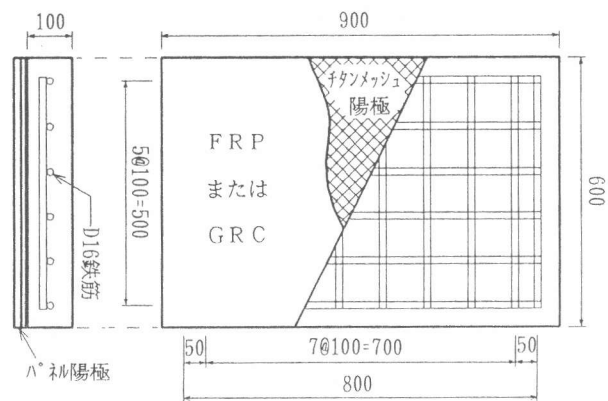


図-2 供試体の形状

表-1 コンクリートとモルタル材の配合と圧縮強度

	配合	σ_c
コンクリート	W/C=60% s/a=45% スラング°=10cm W=161kg/m ³ Cl ⁻ =5.0kg/m ³	260
左官材	W/C=36% C:S=1:1 スラング°:6cm	714
気中注入材	W/C=38% C:S=1:1 J14ロト流下値:8秒	550
水中注入材	W/C=45% C:S=1:2 スラング°70~:70cm 水中混和剤:C×0.4%	327

水中混和剤:水中不分離性混和剤 σ_c :28日圧縮強度(kgf/cm²)

つように弾性シール材と支保材で固定し、表-2に示すパネル陽極と注入材料の組み合わせに基づき、大気中部暴露用供試体には気中注入材で、また干満帯部暴露用供

試体には水中注入材で断面欠損部およびパネル陽極とコンクリートとの隙間を充填した。なお、水中注入材を用いる場合には、その注入部位を水道水で満たし水中注入とした。また、比較のため、左官材により断面欠損部を修復後、チタンメッシュ陽極を設置しこれを被覆する一般的な方法も検討した。

表-2 供試体の要因の組み合わせ

供試体 No.	パネル材				注入材			暴露位置			防食回路
	左官材	FRP	GRC	無防食	左官材	気中材	水中材	大気中	干満帯	水中	
1	●				●			●			1
2	●				●				●		1
3		●				●		●			1
4		●					●		●		1
5			●			●		●			1
6			●				●		●		1
7			●				●		●	●	2
8				●					●		なし

表-1には、注入材および比較のために用いた左官材の配合についても示してある。さらに、パネル材に用いたFRPおよびGRCの構成材料を表-3に示す。

表-3 パネルの構成材料

FRPパネル		GRCパネル	
樹脂	: イソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂	セメント	: GRCセメント
繊維	: Eガラス	繊維	: 耐アルカリガラス
重量比	: 65:35 (樹脂:繊維)	配合	: W/C=37% 繊維量=5%

なお、供試体の作製に先立ち、透明の亚克力板にチタンメッシュ陽極を取り付けたパネル陽極により供試体作製時と同じ条件での注入実験を実施した。その結果、気中注入材ならびに水中注入材とも充填状況は良好であることを確認した。その充填状況を写真-1に一例として示す。

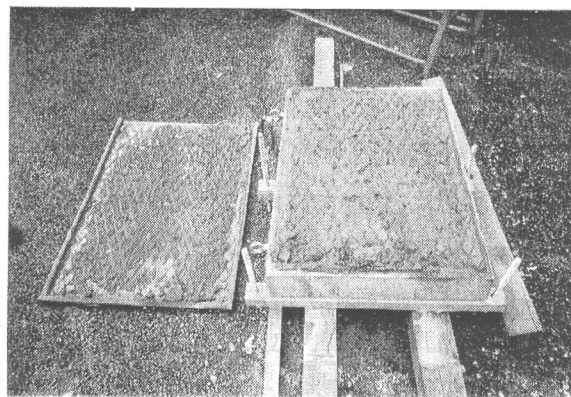


写真-1 注入材の充填状況の一例（水中注入材）

2.3 干満水槽暴露試験

各供試体は、パネル陽極の取り付け1カ月後、海岸線に位置する干満水槽に設置した。供試体の設置状況を図-3に示す。干満帯部の供試体は、満潮時には供試体が完全に水没し、干潮時には気中に露出するように、ブロックにより高さを調整した。なお、2つの陽極パネルを取り付けたNo.7の供試体は、海中部と干満帯部の通電性状を比較できるように他の供試体とは異なり縦向きに設置した。

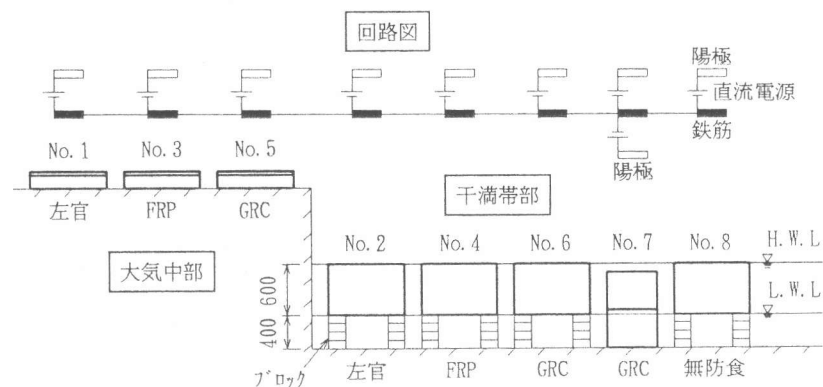


図-3 干満暴露試験の概要

この干満水槽は、図-4に示すサイクルで1日2回の干満を繰り返すように天然海水の給排水をポンプとタイマーにより制御している。

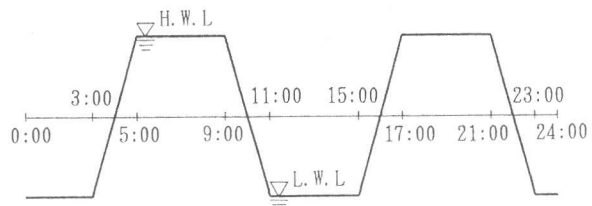


図-4 干満の1日周期

防食回路の構成は、実際の構造物を想定して、大気中部、干満帯部、海中部ともに鉄筋は一体で

ある（図-3の回路図に示すように、供試体間の鉄筋は電氣的導通がある）とし、各供試体ごとに単独の電源で通電（独立回路）した。また、各供試体は、分極試験を行った後に、定電流並びに定電圧により通電し、それぞれ復極量の測定を行った。なお、電位の測定は、潮位変動による電位変化の様子を観測するため、データロガーを用いて10分間隔ごとに連続的に測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋の自然電位に干満の及ぼす影響

自然電位の経時変化の一例を図-5に示す。この結果より、大氣中に暴露した供試体は、多少の電位の変動が認められるが、その変化は緩やかである。一方、干満水槽に暴露した供試体は、大氣中とは明らかに異なり、潮位の変動に対応した自然電位の変化が認められる。また、この潮位変動による自然電位の変化の様子はその暴露条件により異なり、干満帯部にある供試体の自然電位は、満潮時に貴となり、干潮時には卑となった。一方、海中部にある供試体はこれとは逆に、満潮時に卑となる傾向を示した。また、干満帯部にある供試体の自然電位は、海中部や大氣中部に比べ相対的に卑な値を示した。

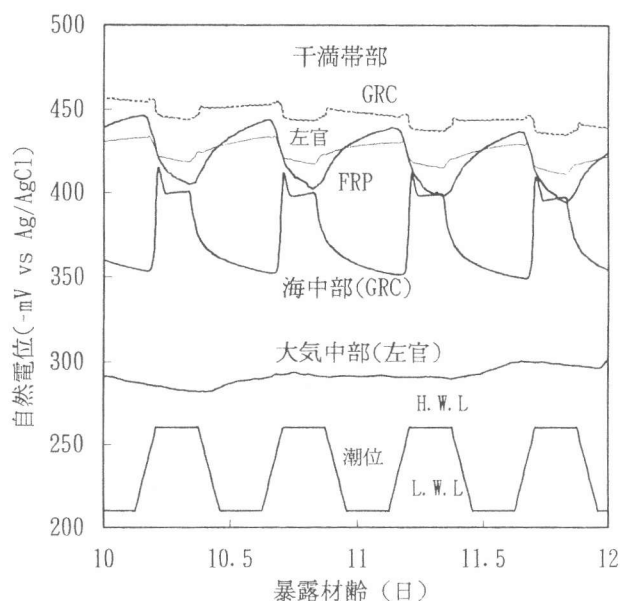


図-5 自然電位の経時変化の一例

干満帯部および海中部に設置されている供試体の鉄筋がすべて電氣的に接続されていることから、上記の結果は、干満帯部供試体をアノード、海中部供試体をカソードとするマクロセルの形成を予想させる。この場合の各部の自然電位は、通常、図-6に示すように、コンクリートによる電圧降下によってアノード反応とカソード反応の交点Aより電流密度の小さい点でつり合っているが、満潮時には干潮時よりコンクリートの抵抗が低下するため、カソード部（海中部）は卑化し、アノード部（干満帯部）は貴化したものと考えられる。

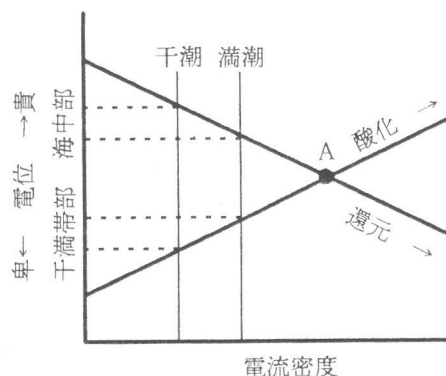


図-6 マクロセルの概念図

3.2 鉄筋の分極特性に及ぼす干満の影響

干満の影響が分極特性に及ぼす影響を検討するため、大氣中および満潮時にE-logI試験を行った。なお、試験は、先ず大氣中で行い、次に、満潮の状態で1週間放置した後に実施した。

図-7に分極量と電流密度の関係を示す。また、図-8には、試験時に測定した直流電源の電源電圧と電流密度との関係を示す。

これらの結果より、所要の分極量を得るために必要な電流密度は、満潮時と大氣中時に差異が認められず、ほぼ同様な傾向を示すことがわかる。一方、

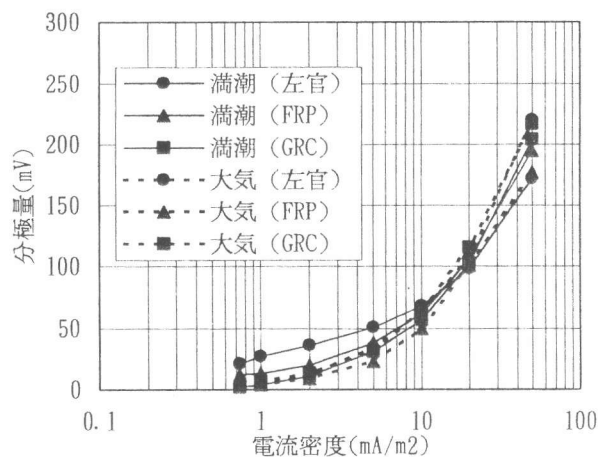


図-7 干潮時および満潮時の分極曲線

電源電圧は、満潮時が大気中時に比べて同一の電流密度で小さくなる。これはコンクリートの含水率による影響と考えられ、満潮時には大気中時に比べ含水率が増加し、その結果、コンクリートの抵抗が減少したものと考えられる。

また、適用したパネル陽極材の通電性を電源電圧により比較すると、パネル内部に陽極を埋設したGRCパネルを用いた場合が他に比べ同一電流通電時に大きくなる。しかし、所要の分極量を得るに必要な電流密度は、各パネル材および左官材による差は認められない。

3.3 定電流通電時の防食システムの通電特性

通電試験結果に基づき、100~150mVのシフト量の得られる電流密度として30mA/m²を選定し、定電流方式により通電を開始した。通電後7日までの通電時の電位の経時変化を図-9に示す。

これより、大気中部の供試体の電位は通電中ほぼ一定の値を示したが、海中部および干満帯部の電位は干満に同調して変化し、干満部では満潮時に貴化し、海中部では逆に卑化した。また、無防食供試体も海中部と同様に満潮時に卑化する傾向が認められる。さらに、干満帯部の鉄筋では通電の継続により電位が徐々に卑化する傾向にあり、一方、Depolarization試験時の復極速度は大気中部に比べて遅かった。

これらのことを考え合わせると、干満帯部に定電流方式により通電した場合、干満帯部の供試体に供給した防食電流の一部が満潮時に海水中に流出し、海中部および無防食供試体に流入している可能性が高い。また、干満帯部の供試体は、干満の繰り返しのよって、次第にコンクリートの含水率が高くなりコンクリート中の酸素拡散性が低下するため、電位が徐々に卑化したものと考えられる。

3.4 定電圧通電時の防食システムの通電特性

図-10に定電圧通電時の鉄筋電位と出力電流の経時変化を示す。なお、設定電圧は、大気中、干満帯および海中部とも1.5Vとした。

これより、定電圧通電の場合も潮位の変動による鉄筋電位の変化が認められるが、先の定電流通

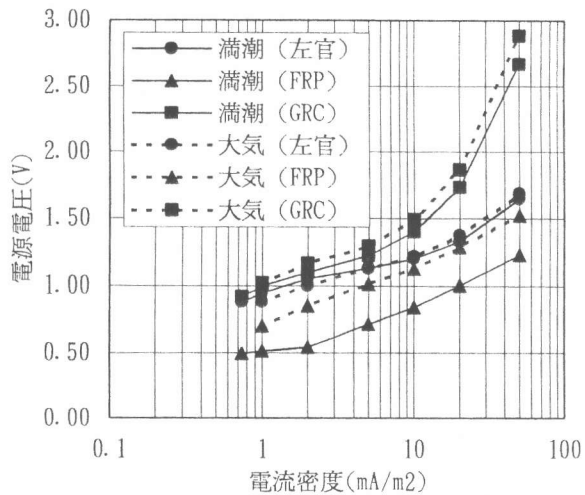


図-8 干潮時および満潮時の電源電圧

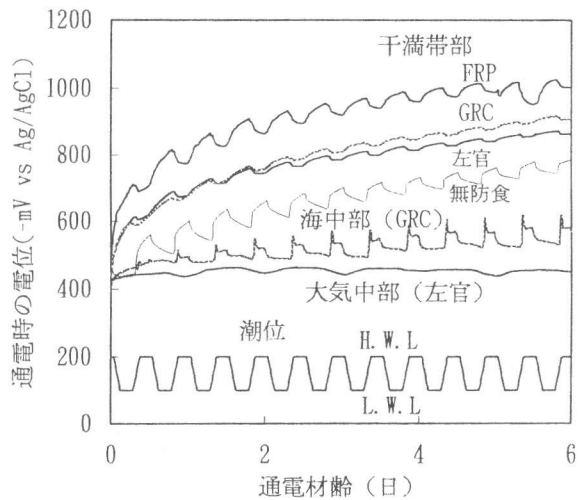


図-9 定電流通電時の電位の経時変化

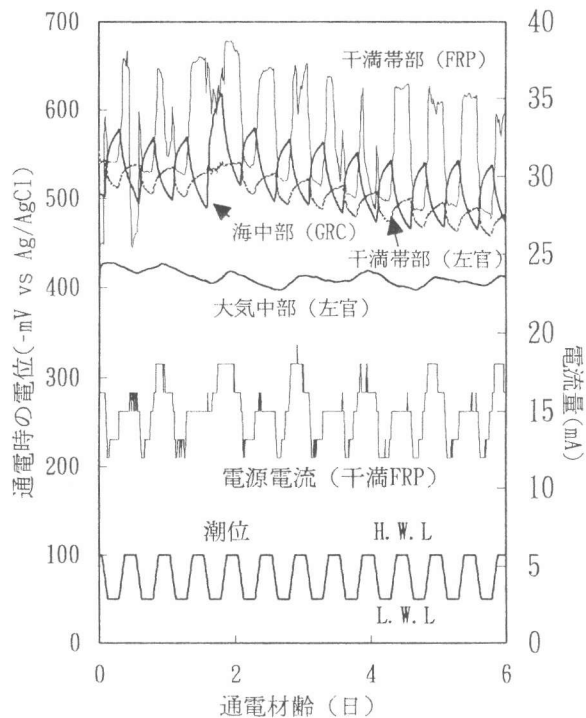


図-10 定電圧通電時の経時変化

電の場合とは逆に、満潮時に干満帯部が卑化し海中部が貴化する傾向が見られる。これについては、干満帯部では満潮時にコンクリートの抵抗が減少するため、定電圧の場合、この抵抗の変化によって電流量も大きく増加したことによるものと思われる。なお、定電圧通電の場合の干満帯部の電位変化は、定電流通電時に比べ電位の変動幅が大きくなるようである。これは、設定電圧によっては、満潮時には目標分極量を上回るのに対し、干潮時では不足を生じる可能性があることを示唆している。ただし、定電流通電時の干満帯部鉄筋で見られたような経時的に電位が卑変していく傾向は認められなかった。

3.5 パネル陽極材による影響

今回検討した、FRP、GRCおよび左官材のそれぞれの陽極材ごとに干満帯時での通電性状を比較すると、FRPが干満の変動の影響を最も受けやすく、次に、GRC、左官材の順となった。干満時の通電電位の変化は満潮時の防食電流の流出入と考えられるが、FRPの電氣的絶縁性が最も高いのに対し、先の結果は相反するものである。この原因として、今回の一連の実験では供試体のコンクリート面が海水に接していたためにこの面からも電流の漏洩があったためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリート干満帯部への電気防食法としてパネル陽極による方法を提案し、干満水槽暴露試験により干満帯部の電気防食性状に関する検討を行った。

本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) パネル陽極と水中不分離性注入材との組み合わせにより、施工の省力化と水中施工が可能となるため、電気防食法を干満帯に適用する場合には有用な方法である。
- (2) 自然電位の測定結果から、干満帯部をアノード、海中部をカソードとするマクロセルの形成が認められる。
- (3) 定電流通電時は、干満帯部の電位が経時的に卑化する傾向が認められる。
- (4) さらに、定電流通電では、満潮時に防食電流が海中部や無防食部に流出する。
- (5) 定電圧通電は干満により防食電流の増減があるため、設定電圧によっては分極量に過不足が生じる可能性がある。ただし、経時変化による電位の卑化は、認められない。

参考文献

- 1) 例えば、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委員会報告書、1994
- 2) 川俣孝治、峰松敏和、川田秀夫、高橋久衛：電気防食による港湾コンクリート構造物への電気防食法の適用、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12, No. 1, 1990
- 3) 川俣孝治、大城武、成底佐一郎、峰松敏和：沖縄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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 1, pp. 749-754, 1993
- 4) 峰松敏和、福手勤他：干満帯におけるコンクリート構造物の電気防食に関する一考察、土木学会第48回年次学術講演会概要集第5部、pp278-279, 1993
- 5) 川俣孝治、武若耕司、大越威：永久型枠式陽極を用いた電気防食工法による塩害劣化構造物の補修、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 2, pp. 101-106, 1995