

No.44 2004

NAKABOH REPORT



株式会社 ナカボーテック
NAKABOHTEC CORROSION PROTECTING CO. LTD.

NAKABOH REPORT

第44号 2004年11月

— 目 次 —

- 持続型社会への転換に向けた防食技術の役割
代表取締役社長 土屋 義弘 1
- 腐食研究雑感
技術顧問 小玉 俊明 3
- 港湾・海洋鋼構造物の長期耐用に関する留意点
技術顧問 阿部 正美 5
- 護岸の腐食防食の現状と防食施工例
港湾・橋梁事業部 田中 一弘 17

持続型社会への転換に向けた防食技術の役割

株式会社ナカボーテック
代表取締役社長 土屋 義弘



世界の人口は毎年約 9 千万人増加しており、現在 60 億人に達しています。

このまま全世界の人間が物質的な成長（大量生産・大量消費）を求め続け、発展途上国が先進国並みの生活水準でエネルギーを消費したと仮定した場合、化石燃料やウランなどのエネルギー資源は数年で枯渇してしまうともいわれています。一般に資源の枯渇時期予測は、新規に発見される地下資源埋蔵量や、精製・精錬技術の発展に伴って先延ばしされていますが、いずれ限界に達するのは必至であり、今後はエネルギー資源として、太陽、風力、地熱、バイオマスなどの利用率を高め、枯渇が危惧されるエネルギー資源を有効利用していく必要があると言われております。また、土木構造物や機械・自動車などに幅広く使用されている金属も地下資源として有限であり、リデュース、リユース、リサイクルの課題とともに、防食技術の有用性はますます高まっています。

さらに、今後は「大量消費・大量廃棄型社会」から「質を重視した持続型社会」への転換の時代となり、環境面でCO₂の発生量の少ないエネルギーの利用や、環境を配慮した製品設計などが求められる中で、防食技術や防食材料の開発においても、経済性評価に加え、資源の有効利用と環境対応が求められると考えられます。

1. 経済面での防食技術の役割について

一般に、防食技術は経済効果の視点で議論されており、2000 年 5 月に公表された「わが国における腐食コスト」（腐食防食協会と日本防錆技術協会が共同で実施）においても、腐食による日本の経済損失は、腐食対策費（耐食材料、防食材料、防食研究費等）の積み上げ方式による集計結果で 3 兆 90 百億円、産業分野別に投資されている腐食コストの集計結果で 5 兆 26 百億円と報告されています。

腐食コストとは、腐食した部品の修理・交換費用等の直接損失、腐食が原因で生産ラインを停止することによって生じる間接損失、腐食を

防止する腐食対策費を合計したものです。

したがって、防食効果のレベルを上げると腐食損失額は低下するものの、腐食対策費が増大するため、経済面から防食技術を考えた場合、防食対象物の種類や重要度に応じた経済的な防食技術の適用による腐食コストのミニマム化が求められています。

アルミニウム合金陽極などの流電陽極（犠牲陽極）を鋼材に取り付ける方式の電気防食では、陽極は海水中で鋼材に電流を供給して防食効果を発揮すると同時に陽極自体は消耗します。

海水中の鋼材の防食にアルミニウム合金陽極を使用した場合、無防食時の鋼材腐食損失質量とアルミニウム合金陽極消耗質量の比は 1 : 0.2 程度です。また、鋼材とアルミニウム地金の価格比は 1 : 2.5 程度ですから、金属材料としてだけの経済比較で前者と後者の比は 1 : 0.5 程度となります。単純に考えると、腐食による鋼材自体の損失額よりアルミニウムの消耗費用の方が安価であるといえます。

これは平均的な腐食を想定した場合のことですが、実際の鋼構造物の腐食は不均一にかつ集中的に生じる場合が多々あります。流電陽極による電気防食工法は、単に腐食を軽減するだけでなく不均一腐食の防止にも極めて有効であることから、構造物や設備の安全性と安定操業の確保（間接損失の防止）による腐食コストのミニマム化対策として広く採用されるようになりました。

2. 資源の有効活用面での防食技術について

資源とは「経済的に取り出し可能」であることが条件であり、採取には膨大なエネルギーを必要とします。腐食はこのエネルギーを投入した金属材料が元の状態に戻ることを放置した場合の現象であり、資源を有効利用していることになりません。散逸した錆を集めて再利用することは不可能なので、防食技術は資源の枯渇を抑制する技術ともいえます。

一方、防食材料についても、塗料、被覆材料

など石油製品から製造される高分子材料や、金属被覆材料、電気防食金属などの金属資源が利用されています。

塗料や被覆材料の原料供給元である石油化学産業における資源の枯渇問題は、化石燃料の枯渇問題を抱えたエネルギー問題に包含されるため、ここでは金属資源、特に電気防食で鋼材を防食する際に広く使用されているアルミニウムについて考えると、可採年数（経済的に取り出し可能な品位の鉱石埋蔵量と採掘量から算出した耐用年数）は鉄の約3倍であること、電気防食に使用されるアルミニウムの量は他産業での使用量と比較するとわずかであることなどから、アルミニウム合金を使用して鋼材を防食する価値があるという考え方は妥当と判断されます。

3. 環境面での防食技術について

現在、各種の工業原料に対して、製造時のエネルギー量をCO₂に換算したCO₂原単位（製品1kgを製造する際に使用されるエネルギーで発生するCO₂量を炭素量換算した質量kg）が示されており、製品選択による地球環境問題への対応が求められており、また製品の使用時や廃棄後における地域的な環境問題に対応した環境配慮型製品の開発が求められています。

防食技術は、工業原料などの保管・輸送に使用される貯蔵タンクや埋設配管の腐食を防止し、容器中の物質が外部に拡散しないように維持するものであり、修繕や補償などの経済リスク回避技術であると同時に環境汚染リスク回避技術といえます。

一方、防食材料自体の環境への配慮という視

点では、非鉛系塗料やノンタール系塗料への移行や、発生するVOC量の削減など、塗料の環境配慮が進められています。

また、合成樹脂を製造する際に使用するエネルギーのCO₂原単位は、低いもので低密度ポリエチレンの0.76 (kg-CO₂/kg)、高いものではポリアミド12の9.88 (kg-CO₂/kg) などがあり、今後は、塗料や被覆材料の原料となる合成樹脂も、防食効果や経済性評価の他に、CO₂原単位の低い材料選択という環境配慮も必要となってくるものと思われる。

CO₂原単位から電気防食を考えた場合、鉄鉱石から鋼材（溶接鋼管）を、ボーキサイトからアルミニウムをそれぞれ生産するためのエネルギーをCO₂換算した場合の原単位比率は1:5.2ですが、前述の無防食時の鋼材腐食質量と防食用アルミニウム合金陽極の質量比が1:0.2程度であることから考えると、その比はほぼ1:1となり、両金属のCO₂影響度はほぼ変わらないといえます。

以上のように、防食技術は、金属の腐食を防止するという自体で、防食対象物の経済性、資源保護、環境対策のすべてに関与しており、以前から「持続型社会への転換」に貢献してきた技術といえます。

今後は、防食技術や防食材料自体の省エネ・省資源対応や環境配慮性の追求も防食技術に課せられた課題として受け止め、浪費なき成長と持続型社会への貢献度を高めていきたいと考えています。

腐食研究雑感

株式会社ナカボーテック
技術顧問 小玉俊明



私は昭和44年 科学技術庁金属材料技術研究所（金材研）に入所以来、35年にわたって金材研、物質材料研究機構（物材機構）において、腐食防食研究を続けてきた。当時の科学技術庁は傘下に原子力研究所や動燃事業団をかかえており、原子力開発が最大の課題であったことをうけ、金材研・腐食防食部の最大の研究課題も原子力の安全性研究にあり軽水冷却原子炉の配管の応力腐食割れ研究が盛んに行われていた。そのような環境のなかで私自身も本庁で原子力安全研究の企画、あるいは安全審査に関与するとともに、研究としては主に核燃料サイクル分野での腐食研究を行ってきた。しかし私の研究では原子力以外のことが多く、いわば雑多な腐食研究に関与を行ってきた。ここで思い当たるいくつかのトピックスについて経験を述べてみたい。

1. アルミニウム合金アノード

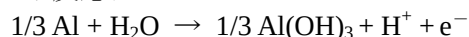
私の腐食研究は、大学の卒業研究でアルミニウム-インジウム、アルミニウム-錫合金のアノード材料としての特性を調べるよう命ぜられたことに始まった。錫、インジウムを純アルミニウムに0.02%程度添加すると、電気防食アノードとして十分な程度に溶解電位は卑化する。錫、インジウムとも重要なのは添加量ではなく、固溶体としてのアルミニウム中に固溶している濃度であることを明らかにした。特にインジウムは現在に至るまでアルミニウム・アノード材料の主要な添加元素である。実用に供されるとき、これらの添加元素はアルミニウムに過飽和に溶けている。幸いなことに、インジウムは鋳込み状態で過飽和状態が得られるようである。したがってアノード製造時に加工や熱処理を必要としなくとも、十分な性能が得られる。錫はインジウムより資源的に確保しやすい金属であるにもかかわらず、アノード材料として錫系合金が主流にならなかったのは、鋳込み状態のみでは過飽和状態が得られにくく、再現よく卑な電位が得られないためであると考えられる。もし、十分な処理が行われたならば、Al-Inにも勝る性能のアノードが得られるとも考えられる。

産業であり用途がなかったインジウムであるが、ここに来て、液晶ディスプレイ用透明導電体材料（インジウム錫酸化物）、無鉛はんだなどの素材として需要が急増しつつあり、将来は供給が緊迫する恐れもありうる。この場合、アノード材料としてアルミニウム-錫系をもう一度考えていく必要があるかもしれない。

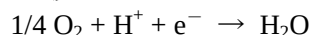
2. 電気防食にともなう海水の水質変化

海水の電気防食では時間経過と共に海水水質が変化することが知られる。特にバラストタンクのように閉鎖された海水でその効果は顕著である。流電陽極としてアルミニウム合金を用いたとき防食とともにpHは4.0程度に低下する。一方亜鉛アノードを用いたときにはpH7程度で安定化する。1例として簡単な電気防食反応を考えてみる。

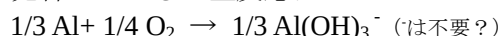
アノード反応は



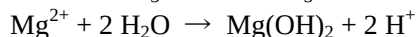
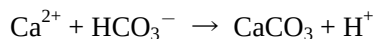
カソード反応は



ここでアノードおよびカソードで e^- の生成と消費は見合っている。全反応は



となるから、 H^+ や OH^- の生成や消費がない。このため溶液全体としてpHの変化は基本的にはないはずである。しかし、カソードあるいはアノード表面など局所的にpHの変化は起こる。カソード表面ではpHが上昇し炭酸カルシウムなど、エレクトロコーティング生成が副反応として起こる。



エレクトロコーティングは電気化学反応でなく、電子の授受のようにアノード、カソードでのバランスを考える必要はない。エレクトロコーティングの場合これに見合う分だけ H^+ が生産され、全体として海水は酸性化される。どこまでpHが低下するかは用いるアノードにより異なる。アルミニウム系アノードでは $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{Al}^{3+}$ の緩衝作用のため、pH低下は抑制され、pH4付近で安定化する。

同様に亜鉛アノードを用いたときpH 7に落ち着く。不溶性アノードを用いた外部電源方式では海水のpHは3程度まで低下する。アノードで発生した塩素が海水に溶解し次亜塩素酸と塩化物イオンを生成する。 $\text{Cl}_2/\text{HClO}/\text{Cl}^-$ の3物質が形成する緩衝作用が、pH 3を作り出していると考えられる。

また海水では用いられないがマグネシウムアノードを用いるとpHは逆に上昇する。水酸化アルミニウムとなり海水あるいは淡水で水酸化マグネシウム $\text{Mg}(\text{OH})_2$ は不飽和度が大きく、マグネシウムはアノード溶解により塩基性の強い Mg^{2+} が生産されるためである。

私のこの報告を引用して、建築設備に電気防食を施すと水が酸性化し、設備に新たな腐食を誘発するといった警戒論が出されたこともあった。建築設備によく用いられるマグネシウムアノードによる防食の場合、むしろアルカリ化が起こることを見てもこのような警戒論は的を得ていない。

以上の電気防食によるpH変化は、限られた空間に閉じ込められた、限られた容量の海水での電気防食についての話であり、開放された海水環境では電気防食によるpH変化は問題になることはない。

3. 東南アジアと腐食研究事情

物材機構が金属材料技術研究所であったころ1989-97年の前後7年間、私は東南アジアとの技術協力に関与していた。これは当時の国際協力事業団(JICA)のプロジェクトである日本-ASEAN(アセアン)科学技術協力材料科学研究の一環とするものであった。当時アセアンは6ヶ国がメンバーであり、各国と対応して国立研究所が対となり材料に関するプロジェクト組んでいた。

当時の建設省建築研究所および運輸省港湾技術研究所が幹事となりシンガポールのプロジェクトを進めていたが、ナカボーテックもシンガポール・プロジェクトには専門家を派遣して協力しておられた。私が金材研でこれに関与していたのはフィリピンとタイを相手国とする大気腐食研究についてである。

プロジェクトの動機は東南アジア地域での大気腐食データが世界の腐食マップから欠落していたこと、高温多湿な環境下では日本などと比べてとてつもなく大きな腐食速度が得られるのではないかといった期待感からであった。

結果は単純であった。金属の大気腐食については温度や湿度より、海から運ばれてくる塩粒子量や、汚染因子としての亜硫酸ガス濃度あるいは窒素酸化物濃度のほうが影響大であるということである。

バンコクから750km北の内陸にチェンマイというタイ第2の都会がある。第2の都会といっても人口25万人であり、バンコクの20分の1以下であり、田舎町の感がある。ここでは朝晩は霧が立ち込め涼しいが、東京と違って日中の日射は強烈である。それにもかかわらず、チェンマイでの主な金属の大気腐食速度は東京の半分以下であった。海塩量が少なく大気汚染も少ないこの町では大気腐食速度は極めて低いのである。

バンコクは交通渋滞でも有名な町であるが、ここを走る車の80%は日本車(正しくは現地アセンブルの日本ブランド車)である。ある日本の車部品メーカーから依頼を受けて、フィールド試験を行ったことがある。このメーカーが言うには、車のクーラーの寿命が日本に比べてはるかに短い、これは交通渋滞による大気汚染が犯人であるに違いないということであった。

バンコクの路上で大気の捕集と分析を実施した。結果、バンコクの最大渋滞路でも、硫黄酸化物や窒素酸化物濃度が特に高くはなかった。結論として、常時真夏の熱帯地域では自動車クーラーは1年中使用されており、使用頻度が日本の3-4倍も長いことであることとした。偏見にもとづいて予測を行うととんでもない結論を導きかねないという例である。

金属の大気腐食は気温より、汚染あるいは海塩の影響が大きいことは確かであるが、防食に使用される塗装の劣化になるとやはり気温や日射量の影響が甚大である。特に太陽からの紫外線の影響が大きく、東南アジアの塗膜劣化速度は日本の倍程度はある。さらにタイの遺跡や寺院を訪れると石造建造物がカビや菌類および樹木のようなマクロ生物によっても侵食される姿を見かけることがある。現地の研究者から材料の生物劣化についての共同調査研究をしようと誘われたこともあった。

このように考えると、熱帯地域は構造物やインフラが損傷劣化しやすい過酷な環境であることは間違いない。同時に、その対策に当たっては日本とは異なる要因を考えておく必要があると考えている。

港湾・海洋鋼構造物の長期耐用に関する防食の留意点

株式会社ナカボーテック
技術顧問 阿部正美



1. はじめに

国土交通省の港湾局で2001年9月に実施した公共港湾施設の老朽化実態調査によると、防波堤、航路、岸壁、臨港道路等の各港湾施設において老朽化が進んでおり、特に岸壁については、飛まつ帯や海水中の下部構造の老朽化が著しいという調査結果が示された。ここでいう下部構造の老朽化とは主に平均干潮面直下付近に発生する集中腐食である。集中腐食とは干満帯の平均水面付近がカソード部に、平均干潮面直下付近がアノード部となる大きいマクロ腐食セルが形成される腐食現象を言う。

図-1のように鋼矢板式構造物では平均干潮面直下付近の集中腐食によって凸矢板に穴があき、その穴から裏込め土砂が流出し矢板背面が空洞化する。このような状態の所へ大型車両等が乗り入れた場合、コンクリート上部工が崩壊し大きい事故につながる。また、図-2の鋼管杭式構造物では平均干潮面直下付近の集中腐食によって鋼管杭の肉厚が急減したり穴が発生して鋼管杭自体がコンクリート上部工を支えきれなくなり岸壁そのものが陥没する。

このように、鋼材の腐食が進み構造物に被害をおよぼすようになると、構造物の供用ができなくなり、港のサービスレベルの低下とともに改造に経済的負担がかかる。その上、改造中は船舶の接岸、荷役作業の停止を余儀なくされ間接的な損失もまねくことになる。

この老朽化した構造物は主に高度経済成長期に建設されたものであり、これらの多くの構造物は耐用年数（港湾構造物では50年としている）に近づく。構造物が50年を越え始める2010年頃から、急激に港湾施設の高齢化が進み2030年台には全体の5割以上を占めることになる。

図-3⁽¹⁾は、栈橋式係船岸の近い将来の整備予想例で、これらの施設をすべて改造するには膨大な経済的負担と多くの労働力が必要で、これを改善するには寿命を延ばして分布を平均化し、改造する施設数を何とか減らしていくことが必要である。これらのことは、港湾鋼構造物全般についても共通して言えると考えられている。

そこで、港湾局では厳しい財政事情を勘案すると港湾に求められる高度化、多様化に対応し

ていくには、既存の港湾施設ストックの効用を最大限に発揮させるための取り組みを推進する必要がある。特に必要な施設を新たに造るだけではなく、老朽化したものや機能的に利用者の要請に合致しなくなった施設についてスクラップや他の用途への転用等を図ったうえで、真に必要な施設の機能の増強等を進めるといった「既存のものを大切に使い、できるだけ長持ちさせる」発想が重要となってくるとしている⁽²⁾。

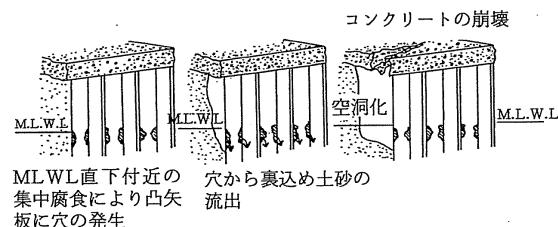


図-1 鋼矢板式構造物の集中腐食による被害

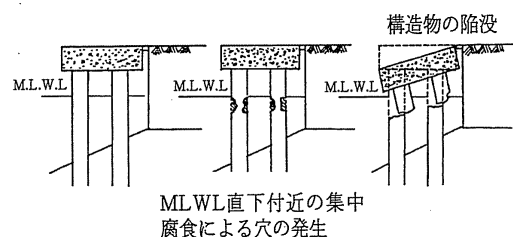
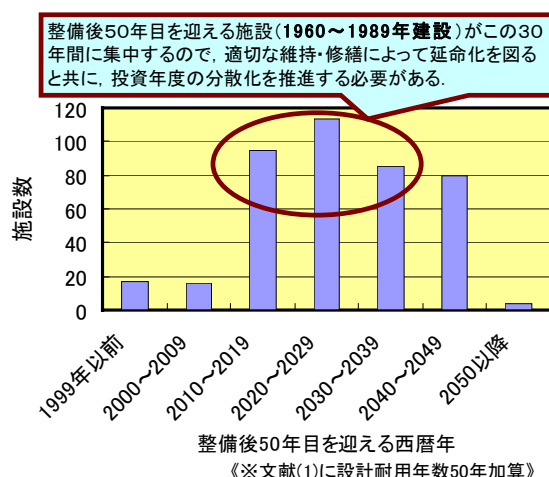


図-2 鋼管杭式構造物の集中腐食による被害



このような状況に鑑み、今後、港湾構造物に限らず構造物全般の維持管理の重要性がより一層認識されてくる。来るべき維持管理時代への対応を図るには、これからの港湾施設に求められる防食対策は長期にわたる耐久性を保持しつつ、LCC（ライフサイクルコスト）ミニマム化にも貢献できる技術が要望される。

すなわち、新設構造物の防食にだけ目を向けるのではなくして、既設構造物にも目を向けて港湾施設の防食効果をさらに高め構造物の長寿命化を図る手段としての防食対策を検討する必要がある。それには現状の防食対策等をもう一度見直し確認、改善、改良すべき点を見つけ出し、適切な防食設計を考えていくことが必要である。

そこで、ここでは現在適用されている電気防食に関連する防食技術をもう一度見直し、適切な防食設計を行ううえでいくつかの留意すべき点について述べる。

2. 防食対策の留意点

前述したように港湾環境に位置する鋼構造物を無防食の状態で長期間放置しておくとも腐食により大きい被害が発生する。港湾施設を大切に使い、できるだけ長持ちさせるには腐食から構造物を守るための適切な防食対策が必要となってくる。一般に港湾鋼構造物の防食対策は干満帯以上には各種耐久性の良い被覆防食を、海水中および海底土中部には電気防食を適用する。しかし、前述したように高度経済成長期に建設された構造物は、腐食しるによる対応だけで防食らしい防食はしておらず無防食の状態のものがまだ数多く見られる。これらについては早急に防食対策を講じる必要がある。

2. 1 適切な防食電流密度の設定

港湾鋼構造物の海水中および海底土中部における電気防食効果を左右するのは、港湾鋼構造物の置かれた環境において適正な防食電位を維持することであり、そのためには、必要かつ十分な防食電流を供給することである。すなわち、設計防食電流密度の決定が重要である。

防食電流密度の選定は、当該海域の施工実績を設計に反映させるか、海象条件の調査結果や海域の腐食性の解析結果に基づいて防食電流密度を推定し、陽極の取り付け数量等を算出する必要がある。防食電流密度は構造物が設置されている海域での鋼材の腐食特性を反映し、腐食速度の大きい海域では大きい防食電流密度が必要である。鋼材の腐食特性に影響をおよぼす環境要因には、波浪、潮汐、潮流、pH、水温、溶存酸素、塩化物イオン、アンモニウムイオンおよび嫌気性の硫酸

塩還元バクテリアに起因する硫化物等がある。この中でも特に汚染海域では溶存酸素、塩化物イオン、アンモニウムイオンの各要因に有意差が認められる。

通常、清浄海域における鋼構造物に対する設計防食電流密度は、海水中では 100mA/m^2 を、海底土中部へは 20mA/m^2 である。汚染海域では清浄海域で適用される 100mA/m^2 では不足するので海水中 $130\sim 150\text{mA/m}^2$ を、海底土中部には 30mA/m^2 を採用している。したがって、電気防食効果を期待するためには、水質の汚染程度によって適正な設計防食電流密度を適用することが重要である。

ここで、汚染海域では $130\sim 150\text{mA/m}^2$ が適正であることを実証するため横浜港大黒埠頭棧橋（汚染海域）で実施した試験結果によると、設計防食電流密度 130mA/m^2 を採用して電位測定をしたところ経過期間30ヶ月における最貴電位は -860mV 程度、また最卑電位は -940mV 程度、平均電位は -920mV と、防食電位を大きく上廻っていた⁽³⁾。このことから汚染海域においても、その水質環境に見合った適正な設計防食電流密度を設定すれば防食効果は十分に期待できることがわかる。

陽極発生電流を1個の陽極が分担する防食面積で割り算すると初期設計防食電流密度であるが⁽⁴⁾、この値は自動車に喩えれば走行距離当りのガソリン消費量に相当し、これが過少だと目的地に到達できなくなり、逆に余裕があれば安心して更に遠くまで行き着ける。電気防食の場合は、良好な防食状態の確保と効果持続期間（陽極寿命）が目的地であり、陽極寿命を左右する環境条件は車の使用条件（道路状況、積荷、運転方法等）に対応するものと考えて良い。

2. 2 汚染海域と清浄海域との判定方法

電気防食のための清浄海域と汚染海域をどう判定するかという問題があるが、その区分方法として以下のように提案する⁽⁵⁾。

電気防食を実施している構造物の電気防食調査を全国的規模で実施し、水質と防食電流密度の関係について検討した結果、汚染海域と清浄海域との区分方法として、当該海域の塩素イオン濃度が $17,800\text{ppm}$ 以下、溶存酸素濃度が 6ppm 以下、アンモニウムイオン濃度が 0.1ppm 以上の3項目のうち2項目に該当する場合には汚染海域と判定し、設計防食電流密度を $130\sim 150\text{mA/m}^2$ にする必要がある。

図-4に提案した方法による汚染海域と清浄海域とに区分する手順と適正な設計防食電流密度を示す。なお、図-5は提案した区分方法により東京湾における汚染海域と清浄海域の傾向を示したものである。湾の奥にいくにしたがい水質

の良くないことが認められる。横浜、川崎、東京、船橋港等に位置する鋼構造物に電気防食を適用する場合には汚染海域と判定して防食電流密度を $130\sim 150\text{ mA/m}^2$ にとる必要がある。一方、横須賀、木更津、館山港は清浄海域で、 100 mA/m^2 で設計して十分防食効果が期待できる。なお、ここで示したものは東京湾のものであるが、他の海域においても同様なマップを作成することにより採用する設計防食電流密度を容易に得ることができる。

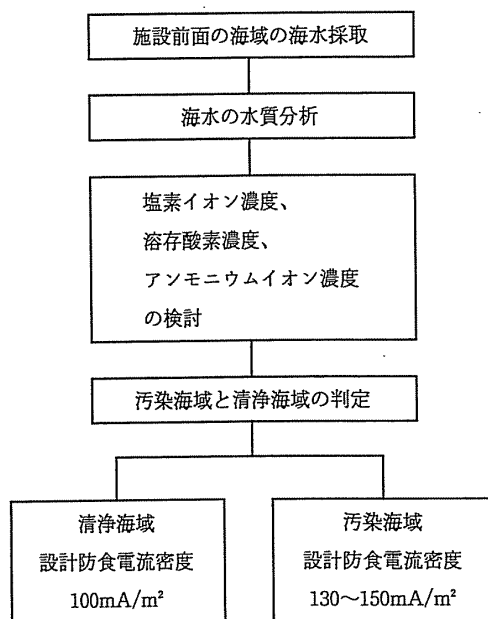


図-4 汚染海域の判定法

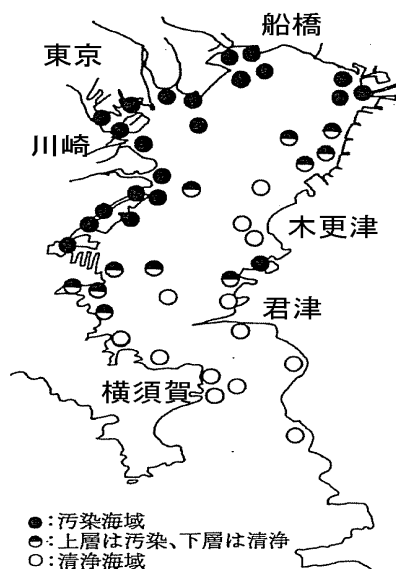


図-5 東京湾における汚染海域と清浄海域の傾向図

2.3 適正な防食電位

防食効果の判定は塩化銀電極を使用した場合には -780 mV （防食電位）よりも卑であれば防食されていることになる。しかし、防食電位すれすれの値であるとか何かの関係で無防食状態になる場合があるので実用上少なくとも -800 mV よりも卑な値を示すことが必要である。この値を防食管理電位と言う。理想的には防食電位が -900 mV 台を示していることが防食電流密度の低減のためにも望ましい。例えば、電位変化により防食電流密度の低減を確認するために防食電位を -800 mV と -900 mV に設定した場合の所要防食電流密度を波崎観測棧橋の鋼管杭を利用して調べた結果、図-6に示すように設定電位を -800 mV にした場合に 120 mA/m^2 の電流密度が必要であるのに対し -900 mV では 80 mA/m^2 程度であった⁽⁶⁾。電流密度の低減は陽極消耗量の低減につながるため、防食電位が -900 mV 台かそれよりも卑な電位を維持するように設計することが望ましい。

この理由は電位を $-900\sim -1000\text{ mV}$ 台にすると図-7に示すように陰極（鋼材）界面の極く近傍（ $0.05\sim 0.1\text{ mm}$ ）でアルカリ雰囲気形成され、 pH の変化が生じる。この pH の変化により鋼材表面には石灰質皮膜（主成分は CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ でエレクトロコーティングと呼ばれる）が作られ、析出沈殿する。 CaCO_3 の析出は $\text{pH}8\sim 9$ 以上、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の析出は $\text{pH}9\sim 10$ 以上と言われている⁽⁷⁾。この石灰質皮膜がアルカリ雰囲気の中で防食被膜となり酸素の透過を抑制し、防食電流密度を低減させる。写真-1は苫小牧港のシーバースの鋼管杭表面に厚く生成された石灰質被膜を示す。ここでの防食電流密度は当初 100 mA/m^2 で設計したが、現在 20 mA/m^2 程度に低減し、陽極の寿命は大幅にのびている⁽⁸⁾。

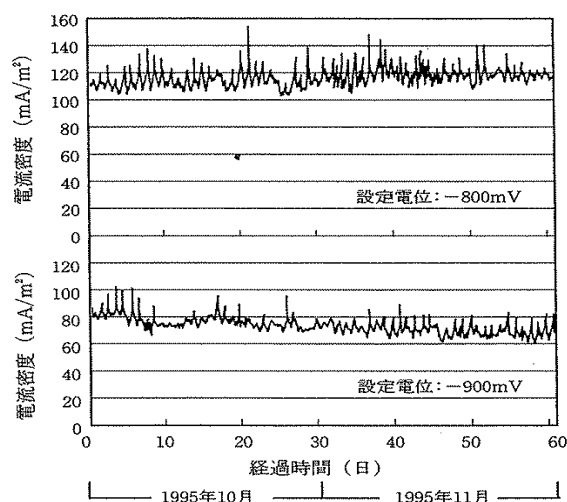


図-6 設定電位と防食電流密度の傾向

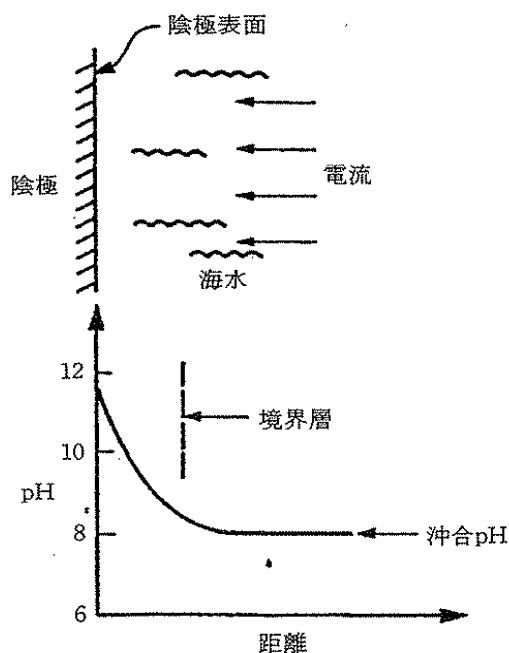


図-7 陰極界面における pH の変化

写真-1 電気防食による鋼材表面
への石灰質皮膜の生成状況

2. 4 環境の差による陽極の消耗量

(1) 深さ方向による陽極の消耗量のちがい

汚染海域においては深度によって汚染の度合いが異なるため防食電流密度に差が生じ陽極の消耗量に影響する。横浜港大黒埠頭の鋼管杭に取り付けられている陽極について発生電流を測定した事例を以下に示す。

陽極は深さ方向（-2m, -6m, -10mの3深度）に取り付けているが、図-8⁽⁹⁾は陽極消耗量を累積したものであるが、当初はいずれの深度でも大差ないが3年以降では-2mで大きくなっている。したがって、汚染海域では上層部の陽極の消耗量が最も大きくなる。陽極はいずれの深度でも平均的にバランスよく消耗するのが理想的である。一部の深度で早い時期に消耗するようでは電流分布に問題が残る。本岸壁の上層部の陽極（-2m位置）は-6, -10mに比べて早い時期に消耗すると考えられるので水質の影響を考慮し

て施工の際には陽極の数量を上層部に多く取り付けることや配置および陽極の寿命に十分注意する必要がある。

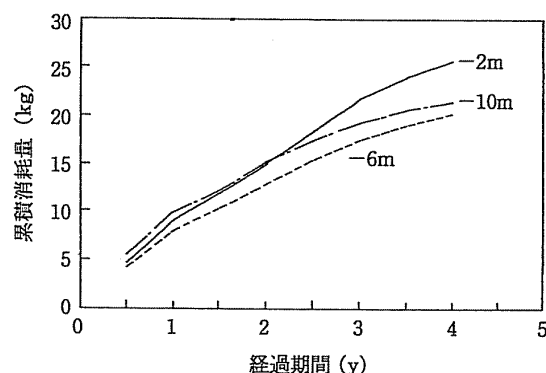
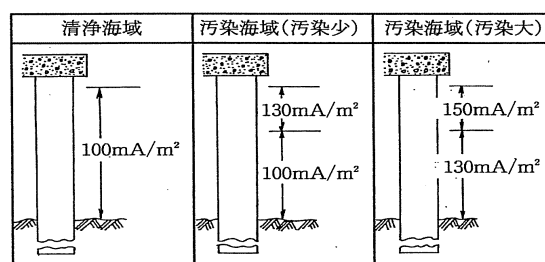


図-8 各深度における Al 陽極の累積消耗量

汚染海域においては、海域の水質調査を行い、上, 中, 下層部ともにバランスよく陽極が消耗するように十分考慮した防食設計が必要である。たとえば、上層部が汚染されて発生電流が中～下層部に比べて大きい場合には設計値を上層部と中～下層部とを分けるのが適当と考える。

図-9のように清浄海域では図の左のように防食電流密度を 100 mA/m^2 とする。汚染海域で上層部の汚染が中～下層部に比べて大きい場合には中央の図に示すように上層部を 130 mA/m^2 とし中～下層部を清浄海域で採用される 100 mA/m^2 を用いる。上層部～下層部まで汚染が大きい場合には図の右のように上層部を 150 mA/m^2 、中～下層部を 130 mA/m^2 で設計することを推奨する。ここで、汚染の程度（汚染, 大, 小）については現段階では定量的に判定することは困難である。防食設計をより合理的に行うためには汚染程度と防食電流密度の関係を明らかにすることは今後に残された重要な課題である。そのため、既設鋼構造物について、さらに水質調査を行い、また防食電流密度を測定し、それらの関係を求める必要がある。

図-9 水質の汚染程度による
防食電流密度の区分例

(2) 船舶等のスクリューの海水攪拌による陽極の消耗傾向

まず陽極の消耗傾向を説明する前に、フェリーのスクリュー（海水攪拌）の影響により集中腐食が促進された結果、岸壁に大きい被害が発生した事例⁽¹⁰⁾について説明する。

構造物は無防食で、水深-9mの鋼管杭式栈橋である。図-10に示すように法線方向に杭列4本で1ブロックとなっている。この栈橋は1961～1962年にかけて建設されたが、約20年後の1981年に鋼管杭の腐食により上部工が陥没した。事故発生後、鋼管杭の目視観察および肉厚測定を行った。その結果、栈橋上部工の陥没は図-10に示す杭列21～24のブロックで生じた。なお、鋼管杭No.21～No.24のA列杭は変形（つぶれ）していた。16本の杭に集中腐食による穴が認められ、穴のあいている杭はバース中央部から左側（海側から見て）に集中し、海側の杭が多い。穴の深度はすべて+0.5～±0m付近であり、方向は海側であった。平均干潮面直下付近の腐食速度が0.45mm/y程度であるから初期肉厚9mmだと20年で鋼管杭に穴があくことになる。特に栈橋の付け根からフェリーが煩雑に（30分/回程度）航行しているために、その航跡波が海水面付近の鋼管杭に作用して集

中腐食が促進されたものと考えられる。

上記のように、無防食構造物の場合には船舶等のスクリューにより定期的に海水面付近を攪拌すると集中腐食が促進される。このような環境へ電気防食を適用した場合にスクリューによる海水攪拌の影響を受けやすい部位の陽極の消耗量が大きくなる。以下にその事例⁽¹¹⁾を示す。

図-11に示す栈橋はAl陽極により電気防食が行われていた岸壁である。陽極の寿命がなくなると推定されたためにバースの各ブロック（①から⑩）の電位測定をした結果、各ブロックでは電位に大きな差がみられた。その電位差は同一バース内でも腐食環境が異なることを示している。①、②、⑨、⑩のブロックの電位は-710～-750mVで無防食状態の電位を示し、ダイバーを入れて陽極の確認を行った結果、これらのブロックの陽極は完全に消耗していた。しかし、④～⑦ブロックでは-850～-950mVの値を示していた。さらに、③、⑧ブロックの陽極はまだ残存しており電位も半分程度は防食電位を上回っていたが、残りの半分の陽極は残っておらず電位も防食電位以下と無防食状態であった。①、②、⑨、⑩ブロックで、④～⑦ブロックに比べて陽極の消耗が大きかったので、その原因を検討した結果、船舶の接岸

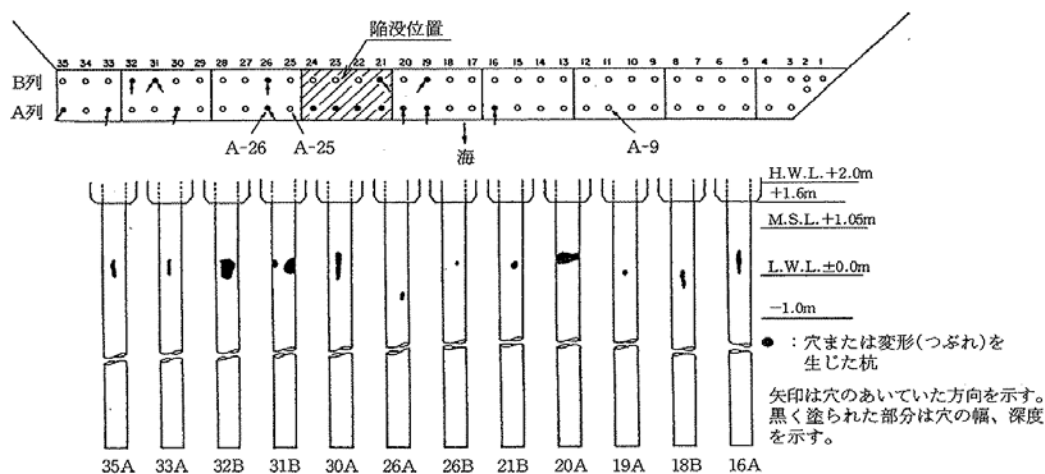


図-10 2号栈橋鋼管杭の集中腐食による穴の位置

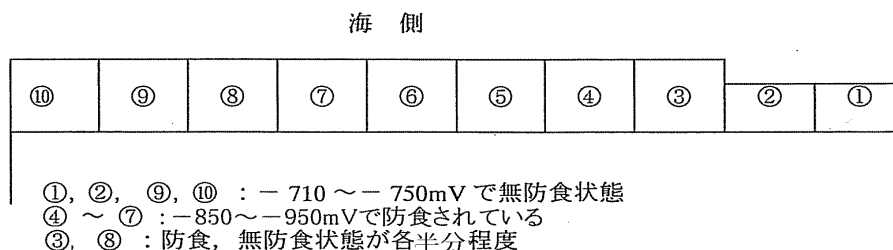


図-11 船舶スクリューの攪拌と電気防食状態に対する影響例

時および離岸時におけるスクリューによる海水の攪拌が常時同じ場所で行われていたためであることが分かった。このような事例は他でも見られ大型フェリーの接岸する12m岸壁で陽極を3深度にとりつけた場合にスクリューで海水が攪拌される水面に近い部位の陽極の消耗が著しく大きかったという例も見られる。そのため、定期的あるいは特定の部位で船舶のスクリュー等による海水の攪拌が煩雑に行われる場所への陽極の取り付けには十分考慮して設計する必要がある。なお、栈橋等の鋼管杭が無防食の場合に、船舶のスクリューによる海水攪拌が起るとキャビテーションコロージョンが発生する場合があります、その時の腐食速度は海水中の腐食よりも数倍大きくなるので電気防食による防食を早急に行う必要がある。

2.5 海底面近傍のヘドロ部への必要な防食電流密度⁽¹²⁾

嫌気性の硫酸塩還元菌が繁殖する海域では、硫化物の影響により海底土中部（ヘドロ層）の鋼材に激しい局部腐食が発生する場合があります、電気防食を行う場合、ヘドロ層の防食電流密度は少なくとも海水中と同程度の値が必要とされている。それを実証するため横浜港で試験を実施した。その結果、海底面直下海泥中に流入する防食電流密度は海水中の値（定常値）と同様に40～60 mA/m²であり、海底面近傍のヘドロの存在する環境での設計防食電流密度は海水中と同程度の値とする必要がある。また、電位を-950mVより卑な値に維持するとヘドロ層の環境でも鋼材表面に石灰質皮膜が形成される。

2.6 海底土中部での陽極埋没の影響⁽¹³⁾

海底面の変動が大きい場所では陽極が海底土中部に埋没する場合があります。陽極が海底土中部に埋没する埋没率が50%以上になると陽極を取り囲む環境の違い等の影響で発生電流が減少して図-12に示すように防食電位に達しない場合

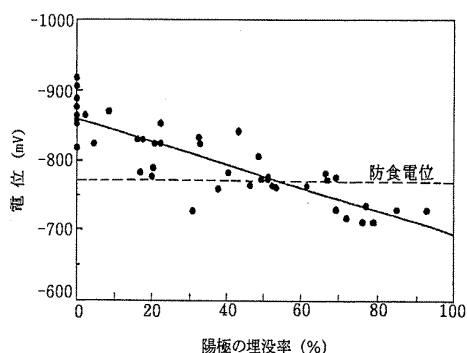


図-12 陽極の埋没率と電位の関係

がある。そのため、このような場所の構造物へ陽極を取り付ける場合には、事前に海底面の変動幅を調査して取り付け位置等を十分に考慮する必要がある。なお、海底面の変動に伴い海水中の防食面積が変化するので、設計の際には海底面の変動幅を考慮した防食面積の算出が必要であり、海水中の防食面積を算出する際には、過去の海底面の変動幅を調べて最も深くなる部位までを海水中の面積として設計することが望ましい。

2.7 被覆防食と電気防食の併用効果

無防食の構造物に発生する集中腐食被害の主な環境要因にはコンクリート上部工下端位置の影響があり、コンクリート上部工下端と平均水面との位置関係によってマクロ腐食セルの形成に差異がみられる。集中腐食は平均干潮面直下付近と平均水面付近でマクロセルを形成するために生じる現象であるから、カソード部として働く平均水面付近をコンクリートで被覆して電気抵抗を大きくすると平均干潮面直下付近から流出するマクロ腐食電流は鋼材露出の状態よりも小さくすることができ、集中腐食の発生を抑えることができる。

上記のことから干満帯を裸の状態にしておくと集中腐食が発生し易くなり、この条件で海水中に電気防食を適用した際には干満帯へ大きな防食電流が流れるので陽極の消耗が大きくなる。これを防止するには干満帯へ被覆防食を適用して陽極からの防食電流の流入を抑えることが必要である。この方法を電気防食と被覆防食の併用効果と呼んでいる。以下に併用効果の調査事例を紹介する。

(1) 鋼矢板式構造物への適用事例

和田等⁽¹⁴⁾は、港内の潮位の変動に伴う電位や電流密度の傾向について鋼矢板式構造物について調べている。図-13に示すように鋼矢板式構造物の干満帯を被覆防食した場合としない場合の鋼材の電位と陽極の発生電流を測定している。

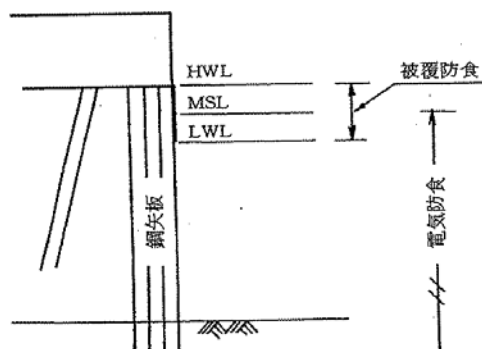


図-13 鋼矢板式構造物の被覆防食と電気防食の適用範囲

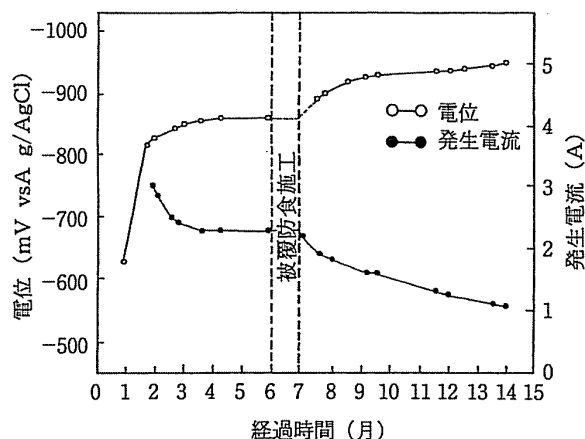


図-14 干満帯への被覆防食施工前後の電位と発生電流の傾向

図-14に示すように、干満帯を被覆防食することにより発生電流の低減が認められる。電位は被覆防食しない条件よりも卑な値を示している。発生電流の低減は陽極の消耗量の低減であり、陽極の延命効果が期待できる。

[2] 鋼管杭式構造物の事例〔波崎観測栈橋〕

干満帯の被覆防食の有無による電位と電流密度の関係⁽¹⁵⁾を図-15に示す。被覆防食を併用している杭〔被覆杭、ここでは平均水面より上部に被覆防食を適用〕では卑な電位と低い電流密度を示しているのに対し、裸杭では貴な電位と変動の大きい電流密度を示している。干満帯に被覆防食をしていない場合には、荒天期に電流は増大して電位は貴の方向へ移行する。しかし、干満帯が被覆防食されていると荒天期における大きい波浪の影響をほとんど受けず安定した電位と電流を示した。その結果、被覆防食と電気防食との併用効果が期待でき裸の杭に対し40～60%の電流密度で防食できるので、表-1に示すように干満帯以上を被覆防食することは陽極の消耗量を低減できることから経済的である。被覆防食をさらに下部まで〔例えば干潮面付近〕下げればさらに電流は低減したと思われる。

すなわち、干満帯以上に被覆防食を行ったものと（被覆杭）、裸（裸杭）の2つの条件の発生電流および電位の傾向を整理すると図-16のような概念図として示される。裸の条件に比べて干満帯を被覆（A）することは電位を卑な方向へ移行し、発生電流を低減させる。その結果、発生電流の低減は陽極の消耗量を低減するので、図-17に示すように陽極の延命効果(②)につながる。

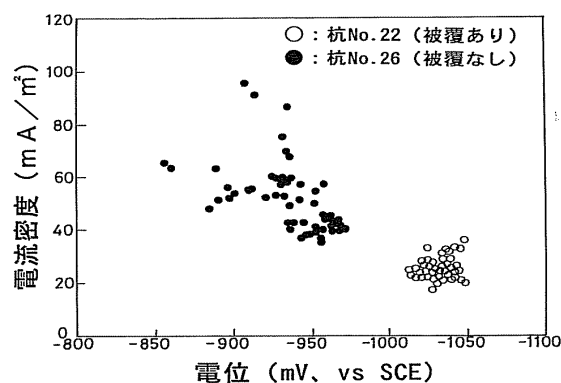


図-15 干満帯の被覆防食の有無と電位-電流密度の関係

表1 陽極の消耗量測定結果

条件	設計寿命 (yr)	陽極重量 (kg)	消耗量 (kg)	年間消耗量 (kg/yr)	残り寿命 (yr)	推定総寿命 (yr)
被覆杭	5	32.0	17.1	3.41	4.38	9.38
裸杭	5	32.0	23.9	4.78	1.69	6.69

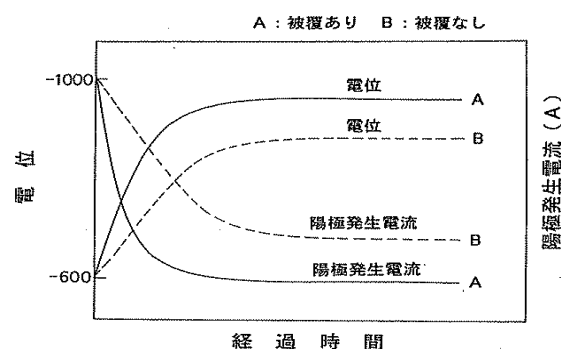


図-16 干満帯の被覆防食の有無と電位-電流密度の概要

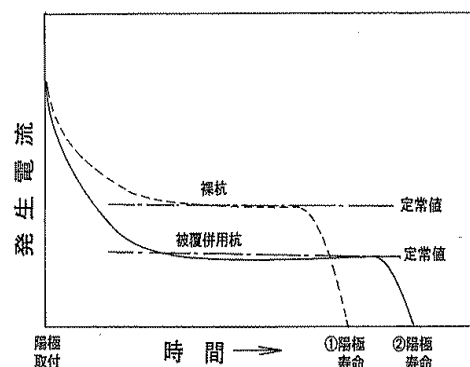


図-17 干満帯の被覆防食の有無と陽極寿命の概念

以上のように被覆をなるべく下部までさげることは防食性能面と経済的(陽極の消耗量の低減)な面から望ましいことであり適切な防食方法と考えられる。ただし、被覆材に何らかの事故で劣化が発生した場合には、裸杭と同様に防食電流は波浪の影響を受けることが考えられるので、早急に補修対策を行う必要がある。

さらに海底土中部のみ裸で、海水中から上をポリエチレンライニングで被覆した条件で電気防食を適用した場合の発生電流と電位の傾向について示すと図-18ようになる。電気防食施工当初の発生電流は3Aと大きかったがその後1A程度で推移し小さい値を示した。この値を防食電流密度に換算すると25 mA/m²程度であるが、この値は電気防食実施後8ヶ月であることを考えると、時間の経過とともにさらに減少する。

関西国際空港連絡橋の場合でも図-19に示すようにフーチング部および橋脚部に被覆防食を行い海底土中部の鋼管杭のみが裸の条件で電気防食を適用した場合に、15年経過時に陽極の消耗調査を行った結果⁽¹⁶⁾、表-2に示すように陽極寿命30年のものが70年近くもつことが分かり、これも電気防食と被覆防食の併用効果の一例である。このように電気防食と被覆防食とを上手く使うことにより、たとえ塗膜等に劣化が生じても劣化部へ陽極から防食電流が流れるので防食効果に問題はなく、電気防食と被覆防食を併用した防食法は理想的な方法といえる。

なお、最近ジャケット構造の港湾施設がみられるようになった。ジャケット部の防食対策として、長期耐用を目的として高耐食性ステンレスライニングを適用している。このステンレスライニング部の設計防食電流密度は、佐藤等⁽¹⁷⁾の試験によると平均水面までを防食対象にすると100mA/m²程度は必要であるとしている。干満帯部を金属ライニングで防食する場合には海水中の陽極から防食電流が干満帯へも流入することを考慮して適切な設計防食電流密度を採用することが大切である。

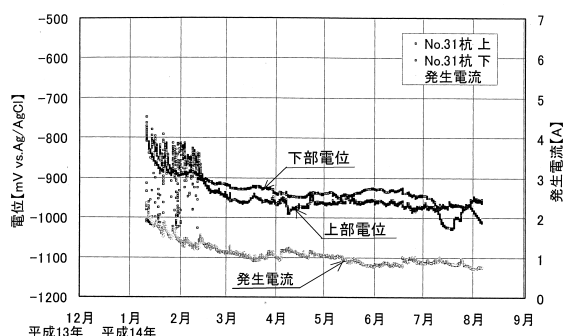


図-18 海底土中部のみ裸条件で電気防食した場合の電位及び陽極発生電流の経時変化

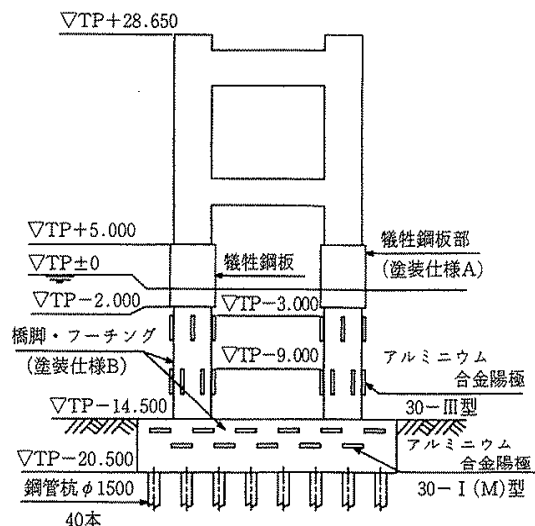


図-19 橋脚部・フーチング部断面および陽極位置

表-2 各施設の陽極の平均消耗量と寿命

陽極取付箇所	陽極の型式	陽極質量 (kg)		年間消耗量 (kg/年)	年間経過期間 (平均) (年)	陽極の残存寿命 (年)
		取付時	調査時			
橋脚部	30-III型	181.6	144.2	37.4	2.71	13.8
フーチング部	30-III型	181.6	142.1	39.5	2.88	13.7
緩衝施設部	30-II型	136.9	93.3	43.6	3.25	13.4

2. 8 電気防食効果の確認

(1) サンドエロージョンに対する防食効果

波浪海域や波除堤等の海底面近傍において波の影響により砂の移動が激しく起こり鋼材表面への摩耗によって大きい腐食が発生する。海底面近傍の砂による鋼材表面の摩耗作用で生じる腐食現象をサンドエロージョンと言う。

サンドエロージョンの作用は図-20に示すように波高が小さく穏やかな時期には鋼材表面には酸素と海水の存在下において腐食が起こる。その結果、腐食生成物である錆層が鋼材表面に作られる。その後、天候が悪化して波高が大きくなると、海底面近傍の砂の移動が激しくなるので、砂の粒子が鋼材表面へ衝突することを繰り返す。衝突の繰り返しによって鋼材表面に生成されていた錆層は除去、剥離を繰り返して次第に鋼材表面の錆が除去されて新しい表面が露出する。その後、天候が穏やかになり波高が小さくなると砂の動きがなくなるので再び新しい鋼材表面は腐食により錆が生成する。

上記のような作用が波浪海域等に位置する鋼構造物の海底面近傍では常に繰り返されている。このサンドエロージョンは以下の試験結果から電気防食によって防止できる。

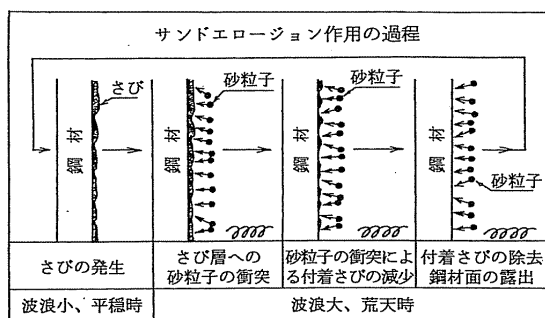


図-20 サンドエロージョン作用の過程概念図

海底面近傍では被覆防食の施工が困難なため電気防食が適当と考えられるが、その効果は明らかにされていなかったため、試験片（電気防食実施および無防食）を波浪海域に位置する波崎観測栈橋の鋼管杭（図-21）の海底面近傍（-3m）と海水中（-1m）に曝露（1年間）して電気防食の効果を検討した⁽¹⁸⁾。

その結果、図-22に示すように無防食試験片

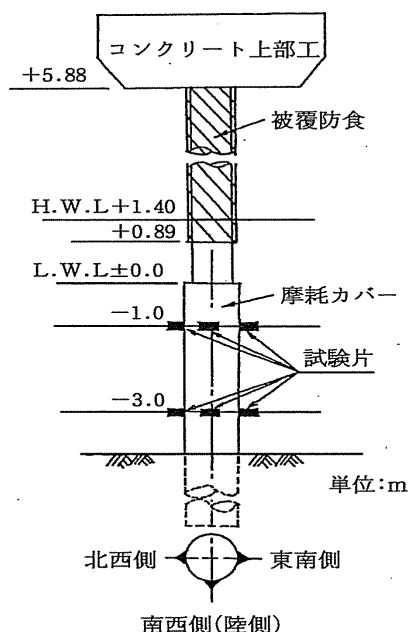


図-21 試験片の取り付け位置

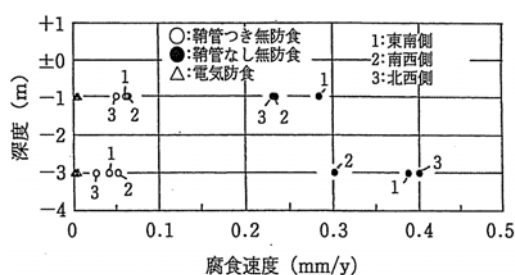


図-22 試験片の深度別の腐食速度



無防食試験片 電気防食試験片

写真-2 無防食試験片と電気防食試験片の比較

の腐食速度は、-1mで0.2mm/y程度に対して-3mでは0.3~0.4mm/yと大きい。一方、電気防食試験片の腐食速度は0.0008~0.0031mm/yと非常に小さく電気防食の効果が認められた。

写真-2に-3mから回収した試験片の表面状況を示すが、無防食試験片にはサンドエロージョンによって試験片の原型を止めない程の大きい腐食が認められたが、電気防食試験片には孔食さえ認められず平滑であった。したがって、サンドエロージョンは電気防食で防止できる。

なお、サンドエロージョンの作用を受ける部位の鋼材表面（電気防食適用）に生成されている石灰質被膜は、図-23に示すように波高が大きくなると砂の衝突により除去される。その結果、鋼材表面の電位は貴の方向へ移行するので、この部位へ流入する防食電流は通常の海水中よりも大きくなることが考えられることから設計の段階で留意する必要がある。現状では流入する防食電流はどの程度であるかは明かにされていないので、今後の検討課題の一つである。

(2) 海生生物付着下の防食効果⁽¹⁹⁾

電気防食を実施している鋼構造物の鋼材の肉厚測定を行った際に、しばしば鋼材表面に孔食の発生が見られる。電気防食を実施しているのに、このような孔食が認められることは電気防食の効果が無いのではないかと懸念が一部

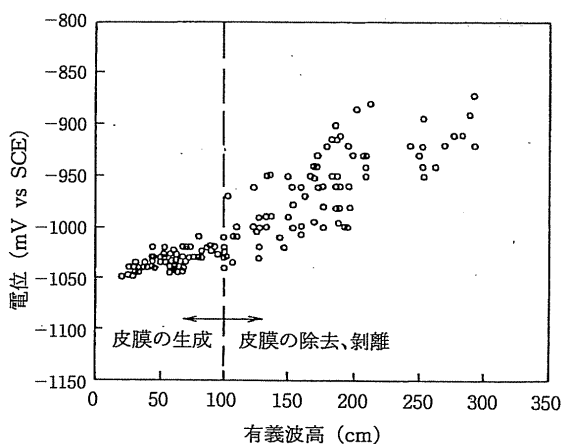


図-23 有義波高と電位の関係

の港湾管理者にもたれていた。本来、電気防食を行い鋼材の電位が防食電位よりも卑な電位を維持するようにすれば問題なく防食され、生物付着下の腐食は無視し得るとというのが常識的な見解である。しかし、孔食の発生が、はたして防食レベルの不足によるものなのか、あるいは構造物の施工期間（無防食期間）に発生したものなのか不明な点が残っていたので実構造物を用いて現地試験を実施した。

試験結果より鋼材が無防食の状態にある場合には海生生物付着下では付着物の付着状況によって、1～2mm程度の孔食が発生することが認められた。構造物を建設する際、鋼管杭を打設後、約1年間無防食状態にし、孔食の発生した特定の鋼材表面を写真撮影した結果、写真-3（左側）に示すように大きい孔食が発生していた。その後この無防食杭に適切な電気防食を実施し、電気防食実施1年後に同一カ所の付着物等を除去した後の状態を写真-3（右側）に示す。写真から明らかにように電気防食実施後には新たに発生したと思われる孔食はなく、無防食時に発生した孔食の形状にも変化はないことから電気防食はその後の腐食を停止させることが認められた。すなわち、海生生物の付着している状態で電気防食を実施した場合には、適切な防食電流密度と電位を維持するように管理すれば海生生物付着下でも海生生物の付着していない鋼材表面と同様に孔食の発生を防止できる。無防食時に孔食を発生させないためには鋼材の打設時に仮の陽極を取り付けておく等なるべく早い時期に防食施工を実施することが大切である。

なお、構造物の建設当初から電気防食を適用するのが理想的であるが、無防食状態の既設鋼構造物に対して途中から適用した場合は、図-24に示すように適用時点からの腐食は抑止可能である。肉厚測定によると当然のことながら図-25のように鋼材の肉厚減量は電気防食の適用が早ければ早い程小さいことが認められ、構造物にとって良い効果を与えることも確認されている。

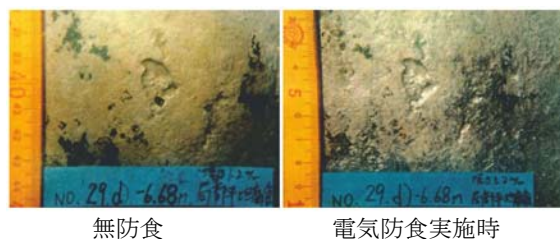


写真-3 無防食時と電気防食実施時における鋼材表面の状況

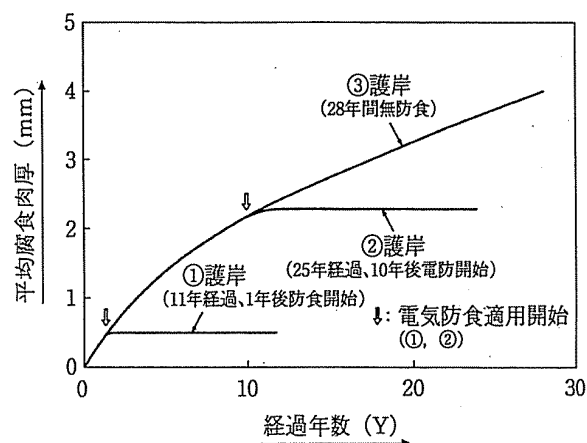


図-24 電気防食の適用時期と腐食肉厚の関係

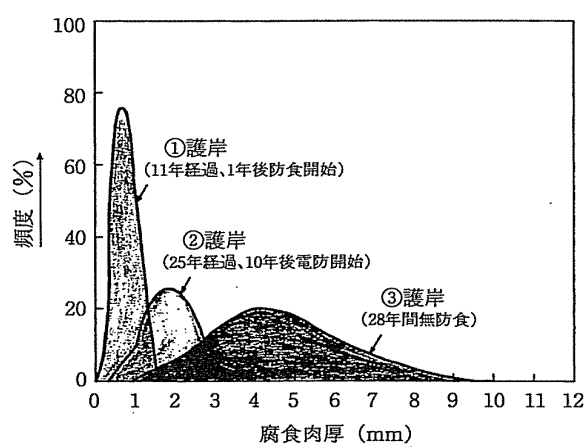


図-25 電気防食の適用時期と腐食肉厚分布図

2.9 陽極更新のタイミング

以上、港湾鋼構造物へ電気防食を適用する場合、適切な防食対策として留意すべき点について示したが、図-26に示すように最初に取り付けた陽極が寿命近くなり再取り付けを行う場合には、取り替えるタイミングも重要である。図中の①の時点で取り替えることが大切である。②で取り替えた場合には、無防食状態に入ってしまうので再取付時には鋼材表面を還元するための大きい電流が必要となり、その分だけ陽極の消耗量が大きくなるので不経済である。

なお、陽極が寿命を迎える直前の陽極の発生電流と電位の挙動について波崎観測棧橋で測定を試みた結果⁽²⁰⁾、図-27のように発生電流が0.5～1.3A程度ではまだ防食電位を上回っているが、0.1～0.2Aと小さくなると無防食状態に入ることが分かる。図から5月30日～6月中旬頃まで防食電位を維持していたのは鋼材表面に生成されていた石灰質皮膜の被覆効果と考えられる。したがって、陽極が消耗してから鋼材が防食電位を保持している期間は、せいぜい1ヶ月程度

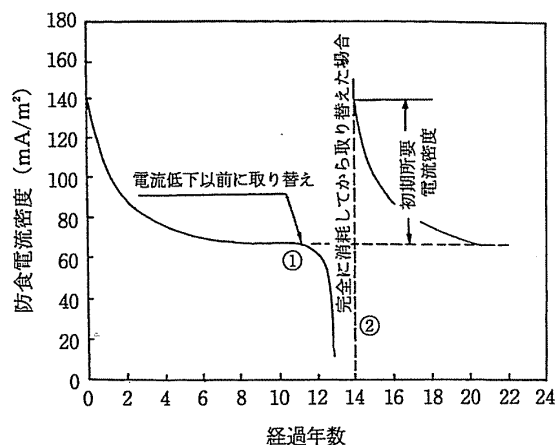


図-26 陽極取替え時のタイミング

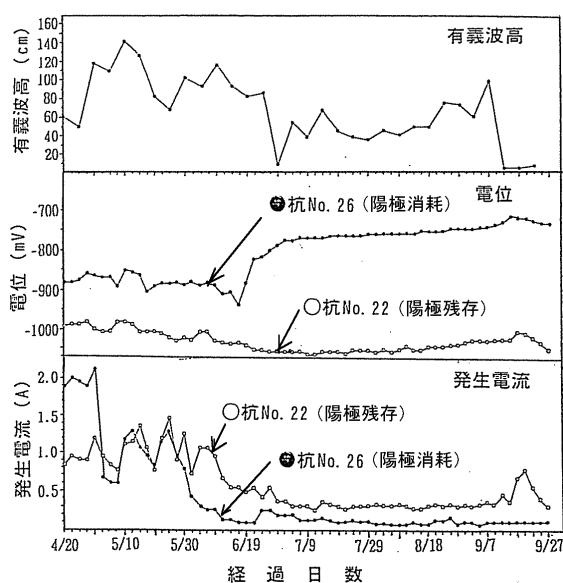


図-27 陽極の消耗末期の電位と発生電流の挙動

と予想される。

このようなことがあるので陽極の消耗に伴い再取り付けを行う場合には図-26に示すように完全に消耗してからではなく、その前に交換、再取り付けを行うことが大切である。なお、陽極寿命の標準品には10、20、30、40、50年のものがあるが、当初から50年ものの陽極を取り付けるのではなく、最初に20年あるいは30年ものを取り付け20年、30年後にもう一度当該海域の水質の汚染程度を見直し設計電流密度の見直しや施設の利用計画を再考し、施設を今後さらに使用していくのか、そのための再防食か、施設の改修あるいは新設等を検討して陽極の再取り付けを検討することも留意すべき点である。

まとめ

以上、電気防食の設計に関して幾つかの留意す

べき点について述べたが、確認事項としては以下のことが言える。

確認事項

- ・汚染海域と清浄海域の区分は提案した手法で簡単にできる。
- ・ヘドロ層への設計防食電流密度は海水中と同程度とする。
- ・海底面の変動の大きい場所への陽極取付には注意する。
- ・電気防食でサンドエロージョンを防止できる。
- ・電気防食は、海生生物付着下も効果がある。
- ・既設の無防食構造物へも電気防食を適用することにより、その後の腐食は防止できる。
- ・陽極の交換は消耗してしまう前に行うと経済的である。
- ・干満帯へ金属ライニングを適用する場合には平均水面までを電気防食の防食対象とする。

また、防食により構造物の長期耐用を考慮した場合のLCCミニマム化に寄与するためのフロー図として図-28が考えられる。

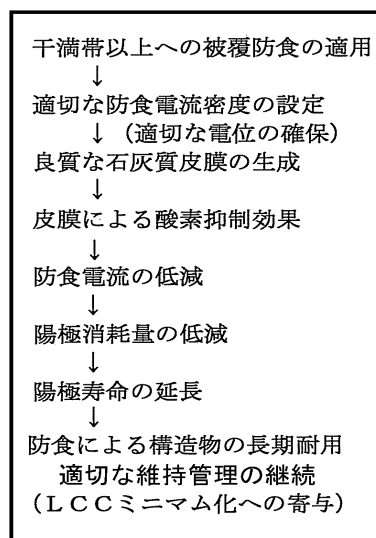


図-28 電気防食がLCCミニマム化に寄与するためのフロー図

図に示すこれらの事項について十分留意することが構造物を防食によって長期に維持していくうえで必要と思われる。ごく当たり前のことを当たり前に実施すればよいわけであり、これらのことを実行することによりLCCの低減と鋼構造物の長期耐用に寄与できるものと考えられる。なお、構造物の長期耐用には定期的な点検・調査と適切な維持管理を継続することが大切であることを付記しておく。

参考文献

- (1) 禮田英一, 深海正彦: 既存棧橋における維持管理工法の決定支援に関する一考察, コースタルテクノロジー2004, 沿岸センター研究論文集No.4, p.77, (2004).
- (2) 伊藤博信: 既存の港湾施設ストックの現状と課題, 港湾, Vol. 79, No. 8, p.10 ~ 13, 2002.
- (3) 阿部正美, 福手勤, 玉利昭一, 戸村寿一: 汚染海域における港湾鋼構造物の電気防食法に関する現地試験, 港湾技術研究所資料, No. 852, p.18~34, 1996.
- (4) 眞弓勝彌, 高城信彦: 電気防食用アルミニウム合金陽極の設計寿命と現場調査データ解析, 材料, Vol.53, No.11, p.1198 ~1203, 2004.
- (5) 阿部正美: 学位論文 (鳥取大学), 海洋及び港湾構造物における防食及び補修法に関する研究, p.31~41, 1998.
- (6) 阿部正美, 福手勤, 清水一夫, 山本郁雄: 波浪海域における定電位法による電気防食試験 (その1), 第16回防錆防食技術発表大会講演予稿集 103, p.19~24, 1996.
- (7) W.H.Hartt, C.H.Culberson and S.W.Smith: Calcareous Deposits on Metal Surfaces in Seawater-A, Critical Review, Corrosion, Vol.40, No.11, p.609~618, 1984.
- (8) Takash Tanaka, Tadahiro Tsuda, Haruo Yamamoto, Takashi Tukada, Corrosion Protection for Offshore Berth, Proceeding of EVALMAT89, p.445~453, 1989.
- (9) 前出 (3)
- (10) 阿部正美: 海洋鋼構造物の腐食と防食対策, (社)日本防錆技術協会, p.19~20, 1998.
- (11) 阿部正美, 花岡 健, 春日正巳, 志賀正恩: フィードバックコントロールを用いた外部電源方式による電気防食システムの現地試験, 第20回防錆防食技術発表大会予稿集, 206, p.117~120, 2000.
- (12) 阿部正美, 濱田秀則, 永田利明, 樋口忠正, 吉田倫夫, 桜井 清: 海底面直下海泥中の電流密度試験, 材料と環境, A-108, p.23 ~26, 2002.
- (13) 阿部正美, 福手勤, 清水一夫, 山本郁雄: 陽極の埋没率が電位, 電流に及ぼす影響, 第39回腐食防食討論会講演集, B-105, p.155~158, 1992.
- (14) 和田啓, 塩田啓介, 四宮秀夫, 堀之内義夫: 港湾鋼構造物の腐食とメンテナンス, 川崎製鉄技報, Vol.23, No.1, p.61~68, 1991.
- (15) 阿部正美, 福手勤, 山本郁雄, 清水一夫, 眞壁昌司: 波浪海域に位置する鋼構造物の電気防食法に関する現地試験, 港湾技術研究所資料, No.921, p.20~21, 1998.
- (16) 山田金喜, 伊関英彦, 金井浩一, 清水一夫, 岡田圭市: 関西国際空港連絡橋の電気防食の防食効果, 防錆管理, Vol.48, No.8, p.9~15, 2004.
- (17) 佐々木信博, 佐藤弘隆, 石田雅巳, 阿部正美: ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性 (その1), 104, p.23~26, 2001.
- (18) 阿部正美, 上田 茂, 清水一夫: 波浪海域のサンドエロージョンに対する電気防食の防食効果, 材料と環境, Vol.47, No.1, p.36~41, 1998.
- (19) 阿部正美, 西林新蔵, 上田 茂: 海生生物付着下の電気防食の防食効果に関する現地試験, 材料と環境, Vol.47, No.1, p.65~69, 1998.
- (20) 阿部正美, 濱田秀則, 清水一夫, 西澤信二, 眞壁知大: 波浪海域の実鋼構造物へ取り付け付けた Al 陽極の消耗量試験, 第20回防錆防食技術発表大会予稿集, 204, p.109 ~112, 2000.

護岸の腐食防食の現状と防食施工例

港湾・橋梁事業部

港湾技術部技術第二課 田中 一弘

1. はじめに

港湾の鋼構造物施設において護岸は、栈橋、岸壁等と比べ、耐力がなくなり護岸の機能を失った場合でも背後施設への影響が軽微な場合が多いことから、ほとんどの施設が無防食状態であるのが現状である。

東京港において、港湾施設の延長は200km以上であり、そのうち鋼製施設の延長は150kmを超えており⁽¹⁾、その多くが鋼材の防食についての各種基準が改訂される以前の腐食対策により施工された、補修を必要とする経年施設である⁽²⁾。特に昭和40年～昭和50年前半に建設された護岸は、腐食により鋼材肉厚がかなり減肉していることが予測され、関東大震災級の大地震が発生した場合、甚大なる被害を受ける恐れがあった。

そのため、東京都港湾局では、平成7年及び平成13年に海岸保全施設（水門取付提護岸、防潮提護岸、内部護岸）の詳細な腐食調査を行い、各施設の健全度調査⁽³⁾が行われた。その結果、多くの施設について腐食対策を含めた補修対策を行う必要があることがわかった。特に、護岸の中でも水門取付提護岸は、施設の要となる運河上の水門・排水機に隣接して設置されており、構造的に耐力不足のまま放置し被災した場合、他防潮施設に比べ背後地の広範囲にわたり被害を及ぼすことが考えられることから、適切な腐食対策を行うことで、施設の維持および延命をはかる必要があった。

本稿において、この調査結果を元に実施された取付提護岸の腐食対策検討と防食施工例について報告する。

2. 東京港の腐食環境

東京港は、東京湾の最奥部に位置し、隅田川をはじめとする都市河川より流入する有機物が停滞しやすい環境にある。気象・海象の特性として、夏季に南風、冬季に北風が卓越した地域により高い波高が記録されている。

鋼材の腐食環境は、各所で異なるが、孔食の腐食事例もあり、腐食速度は比較的大きいといえる。東京港の水質は、図1⁽⁴⁾、図2⁽⁵⁾に示すとおり、昭和40年後半からBODは減少しているものの、CODは横ばい傾向にあることから、河川の汚染レベルは改善されているものの

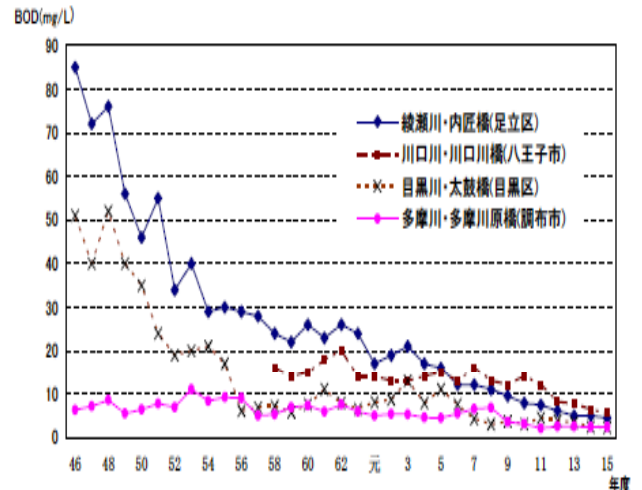


図1 代表的な河川の水質経年変化（年度平均値）

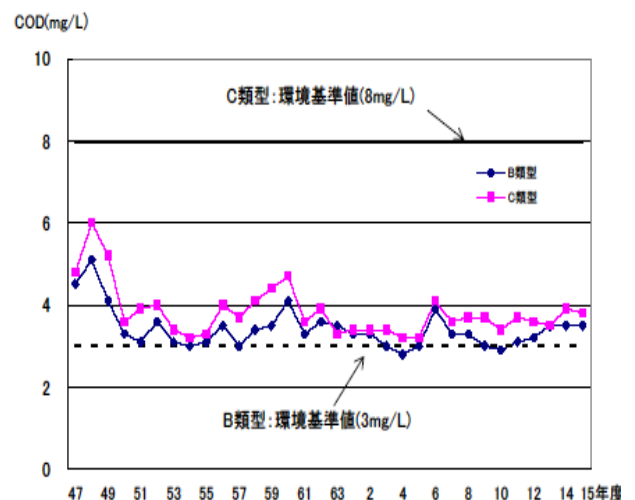


図2 海域の水質経年変化（年度平均値）

海域の汚染レベルは昭和50年以降ほとんど変化がないことがわかる。また、多くの河川水が流入することから、海水抵抗率は通常値より高く、平均 $35\Omega \cdot \text{cm}^{(6)}$ である。電気防食における定常電流密度は、図3⁽⁷⁾に示すとおり、 $65\text{mA}/\text{m}^2 \sim 75\text{mA}/\text{m}^2$ 程度であり、初期防食電流密度を、定常電流密度の2倍とすれば、 $130 \sim 150\text{mA}/\text{m}^2$ となる。現在、東京都港湾局においては、 $140\text{mA}/\text{m}^2$ が、東京港埠頭公社では、 $130\text{mA}/\text{m}^2$ が採用されている。

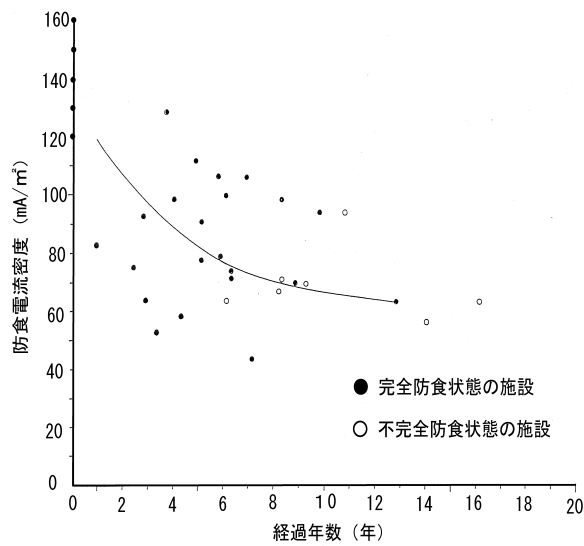


図 3 東京港における電流密度の経年変化

3. 新砂水門取付堤の概要

今回補修の対象となった新砂水門取付堤（写真1）は、東京都江東区新砂3丁目8番地先に位置し、都民の生命と財産を守る高潮防災施設として、昭和51年～52年にかけて、50年対応として設計・施工された柵式（止水矢板護岸）である。施設の概要は下記の通りである。

- 1) 施設名 新砂水門取付堤
- 2) 総延長 799.4m
- 3) 建設年月 昭和52年
- 4) 矢板種別 FSP-ⅢA型
- 5) 天端高 A.P. +9.2m～A.P. +10.45m

4. 腐食対策検討

本施設の腐食対策を検討するにあたっては、平成10年に作成された東京港腐食対策手引書（改訂版）（以下手引書）に基づき、施設のライフサイクルに亘る全てのプロセス（構造物の状況に応じて環境条件・期待耐用年数・施工性・経済性等）を考慮し信頼度の高い工法を選定する事とした。

手引書において「海上大気中から L.W.L.-1.5m までは、塗覆装を施し、それ以下の海水中および海土中については、電気防食を標準とする。」とあることから、この指針に基づき防食対策について検討を行った。

塗覆装の種類としては、既設構造物の塗覆装防食の中でも、実績が多く、20年の期待耐用年数が期待できるペトロラタムライニング工法とした。また、電気防食工法については、施設の許容年数と経済性を勘案して 3.5A×20 年型を選定した。

5. 工事施工

(1) ペトロラタムライニング工法

ペトロラタムライニング工法は、図4のフローの通り行った。

1) 準備工

本施設は、護岸上部工天端が+9.20mとかなり高く、陸上から作業を行うことが難しいため、台船を用いた作業を行う必要があった。台船は、図5のように配置し、通行船舶の妨げにならないよう留意した。



写真 1 新砂水門取付堤全景

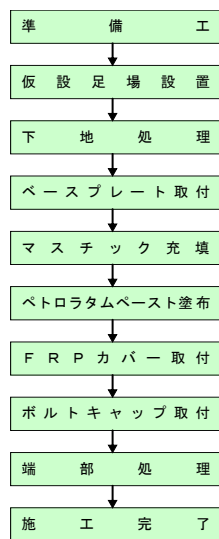


図 4 ペโตรラタムライニング施工フロー

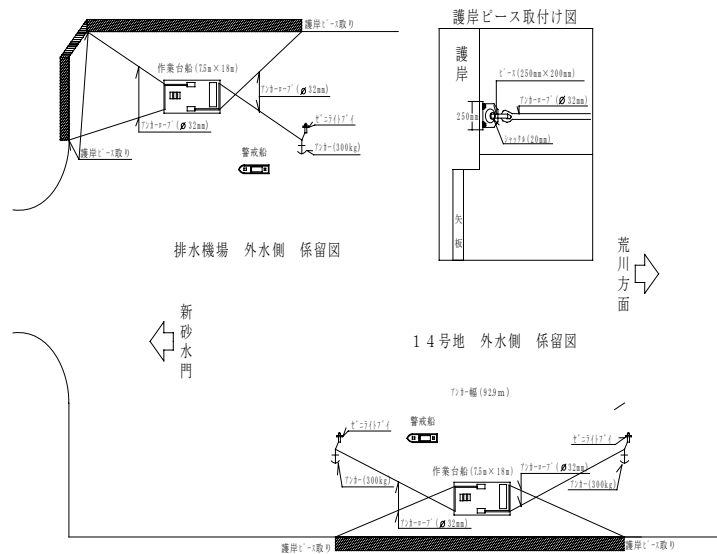


図 5 台船配置図

2) 下地処理

コンクリートコーピング下端から被覆下端までの鋼矢板表面に付着している、海洋生物や浮錆等をジェットウォッシャーにより除去し、素地調整を ISO St2 以上に仕上げた。

3) ベースプレート取付

潜水士が、鋼矢板凹凸にそれぞれ 2 枚、ベースプレート(スタッドボルト付)を水中溶接にて取付けた。

4) ペトマスチック充填

鋼矢板グリップ部の隙間の腐食を防ぐため、ペトマスチック(ペโตรラタム防食材を粘土状に固形化したもの)を充填した。今回、厚みがあり加工しにくいブロック上のタイプから、薄くて加工しやすく、鋼材への密着性が良い、シート状のペトマスチックを採用することで、施工改善をはかった。

5) ペโตรラタムペースト塗布

FRPカバー裏面のペトシートの上にペโตรラタムペーストを $0.5\text{kg}/\text{m}^2$ の割合でまんべんなく、できるだけ均一に塗布を行った。

6) 保護カバー取付

ペโตรラタムペーストを塗り終えた保護カバーを潜水士へクレーン等より吊り下ろし、保護カバーを水中で鋼矢板に密着させ、ナット・ワッシャーで締め付け固定した。

7) カバー上下端部処理

水中硬化型エポキシ樹脂の主材と硬化材を 1 : 1 の割合で混合し、練り終えたエポキシ樹脂を水中の潜水士へ渡し、カバー上下端部の隙間部に充填した。



写真 2 下地処理状況



写真 3 ベースプレート取付状況



写真 4 ペトマスチック充填状況



写真5 ペトマスチック
(向って左：従来品, 右：今回納入品)



写真6 ペースト塗布状況



写真7 保護カバー取付



写真8 端部処理状況

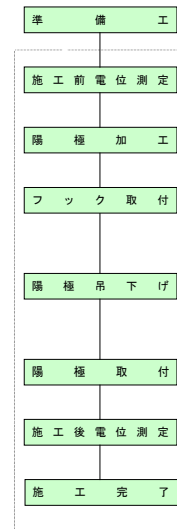


図6 電気防食施工フロー

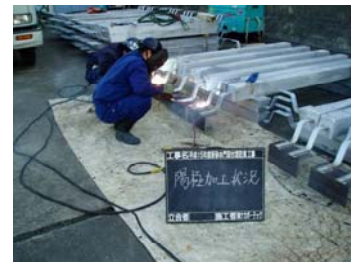


写真9 陽極加工状況



写真10 陽極吊下げ状況

(2) 電気防食工法

鋼矢板の電気防食工法は、図6のフローの通り行った。

1) 陽極加工

アルミニウム合金陽極に陽極取付金具(山形鋼)を陸上溶接により取付けた。

2) フック取付

潜水士(フーカー式：2名/組)にて陽極を水中に吊り下げるためのフックを鋼矢板凸部に水中溶接にて取り付けた。

3) 陽極吊下げ

アルミニウム合金陽極を護岸上からクレーンを用いて水面まで吊り下げ、潜水士が運搬用フロートと陽極を接続し、陽極を所定位置まで運搬した。陽極心金に設置した鉄線の輪を水中のフックに引っ掛けた後、陽極を水中に降ろし、陽極とフロートを切り離して陽極を水中に吊り下げた。

4) 陽極取付

吊り下げた陽極の心金または取付金具が当たる部分の鋼矢板表面の付着物を除去し、水中溶接にて陽極を鋼矢板に固定した。

5) 電位測定

防食効果の確認のため、陽極取付前及び取付後に鋼矢板の電位測定を行った。測定は、水面～海底面までを1m間隔で行った。施工前後の電位測定結果を表1、表2に示す。また、最も淡水流入の影響が懸念される取付堤排水機場外水側の被覆下端直下の電位について、自動計測装置により常時データ採取を行った。施工後4ヶ月経過時における電位測定結果を、図7に示す。施工後及び4ヶ月後とも、防食基準電位を十分満足しており、適切な防食対策だったことが確認された。



写真11 陽極取付状況（水中溶接）



写真12 電位測定状況



写真13 施工前全景



写真14 施工完了全景

単位:mV Ag/Ag·Cl

	排水機場内水側				排水機場外水側			
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4
水面	-1000	-981	-972	-975	-974	-997	-993	-981
海底	-1101	-972	-1018	-996	-987	-1038	-1017	-964

表1 施工後電位測定結果

単位:mV Ag/Ag·Cl

	排水機場内水側				排水機場外水側			
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4
水面	-632	-644	-647	-652	-655	-656	-656	-648
海底	-633	-650	-648	-656	-655	-656	-657	-652

表2 施工前電位測定結果

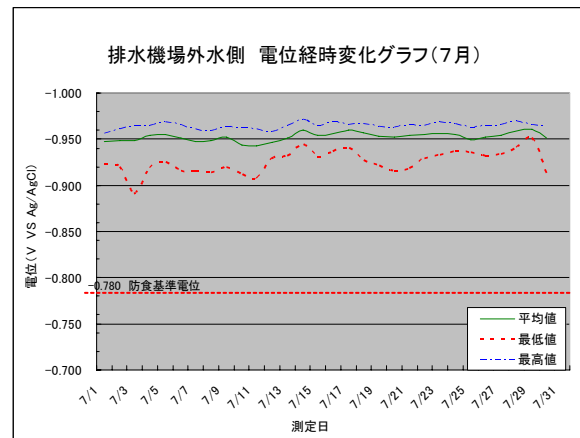


図7 電位測定経時変化図 (2004年7月)

5. まとめ

今回は、無防食の既設護岸の健全度調査結果を受けて、施設が供用されている途中の段階からの延命化対策として、ペトロラタムライニングと電気防食を組み合わせた防食施工事例を紹介した。

腐食は長い年月をかけてゆっくり進行するので、日ごろの維持管理を疎かにしていると異常に気付かない場合が起り得る。安全性よりもコスト削減にウェイトが置かれがちな昨今であるが、何気ない小さな異常やトラブルを敏感に察知して、大事故に繋がらないように事前に対処する事が肝要である。

そのためにも、腐食・防食技術のスペシャリストとして適正な調査を行い、最善の腐食対策を提案・施工することで、施設の安全と社会的損失の未然防止に貢献することが、我々に与えられた使命であると考えている。

謝 辞

本書を作成するにあたり、東京都港湾局東京港防災事務所施設補修課の高原丈夫氏および南秀太郎氏には、貴重な資料を提供していただき、また、腐食対策検討、施工の対して多大なるご協力を賜りました。ここに記して心から感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 阿部正美：海洋鋼構造物の腐食と防食対策 p. 7, 2003
- (2) 東京都港湾局：東京港腐食対策手引書（改訂版），p. 4, 1998
- (3) 東京都港湾局：平成 13 年度港・港南地区ほか海岸保全施設健全度調査委託報告書, 2003
- (4) 東京都環境局：平成 15 年度公共用水域及び地下水の水質調査結果プレス発表, 2004
- (5) 前出, (4)
- (6) 東京都港湾局：東京港腐食対策手引書（改訂版）別冊資料, p. 92, 1998
- (7) 前出, (6), p104

《編集後記》

環境と調和した循環型経済社会の構築、地球資源とエネルギー浪費の忌避、地球環境保全など、21 世紀に入ってから過去に善とされた大量生産・大量消費の考え方にブレーキをかけつつ経済成長は実現したという難しい時代になりました。

鉄鋼の生産と消費の拡大は近代化の象徴でもあります。鉄の防食を主業にする当社においては、このような潮流を真摯に受け止めて防食技術を通して社会貢献したいと考えております。今回は、『防食技術と省資源問題、自然環境保全、防食コスト削減など』に編集テーマを絞り、当社で考えている今後の防食技術の指向するところを紹介しました。

NAKABOH REPORT

No.44, 2004 年 10 月 25 日発行

編集発行人 池谷 充

（非売品、無断転載を禁ず）

発行所 株式会社ナカボーテック

技術統括部

〒104-0033

東京都中央区新川 2 丁目 5 番 2 号

Tel. 03-5541-5814

Fax. 03-5541-5835



株式会社ナカボーテック
NAKABOHITEC CORROSION PROTECTING CO., LTD.