

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 852

Dec. 1996

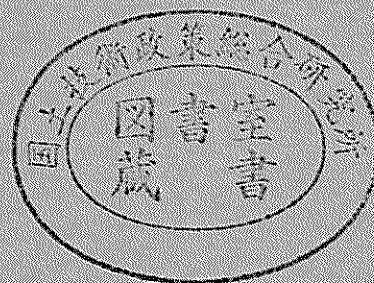
汚染海域における港湾鋼構造物の電気防食法に関する現地試験

阿 部 正 美

福 手 勤

玉 利 昭 一

戸 村 寿 一



運輸省港湾技術研究所

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 生物付着下の防食効果に対する確認試験	6
2. 1 試験の目的	6
2. 2 試験の方法	6
2. 3 試験結果および考察	9
3. 汚染海域や海泥中環境に対する適正な防食電流密度の検討試験	16
3. 1 試験の目的	16
3. 2 試験の方法	18
3. 3 試験結果および考察	20
3. 4 清浄海域および汚染海域における設計電流密度の考え方	29
4. まとめ	34
5. あとがき	34
参考文献	35
付 録	35
1. 港湾鋼構造物における電気防食の歴史	35
2. 電気防食法の原理	35
3. 電気防食法の方式および防食基準	37

The Site Tests for Cathodic Protection of
Marine Steel Structures in Contaminated Sea Water

Masami ABE*
Tsutomu FUKUTE^{2*}
Shoichi TAMARI^{3*}
Juich TOMURA^{4*}

Synopsis

Cathodic protection has been applied for corrosion prevention method of submerged and mud zone in steel structures at marine environment. However, there are number of unclarified points regarding the protective effectiveness of under adhesion marine growths, to examine adequate protective current density of contaminated sea water and mud zone.

Therefore, site tests were conducted in order to clarify unsolved problems regarding aforementioned matters.

Major findings are as follows;

- (1) The cathodic protection can stop the corrosion generated during of no protection.
- (2) Adhesion of sea growths on steel surface were harmless to protective effectiveness of cathodic protection.
- (3) The protective current density for upper part of submerged zone in contaminated sea water is 1.5~2 times larger than in clean sea water.
- (4) The required current density of mud zone was about 30 mA/m² between sea bottom and 10m below sea bottom, and was about 10 mA/m² in the deeper zone than below 10m.
- (5) Also, application method of adequate protective current density was proposed which based the pollution index of sea water.

Key Word: Marine Environment, Steel Structure, Cathodic Protection, Marine Growth, Contaminated Sea, Clean Sea, Current Density

* Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

^{2*} Chief of Materials Lab., Structural Engineering Division

^{3*} Japan Association of Cathodic Protection

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

阿部正美*
福手勤^{2*}
玉利昭^{—3*}
戸村寿^{—4*}

要 旨

港湾鋼構造物の海水中、海泥中環境の防食には現在電気防食法が適用されている。しかしながら、生物付着下の防食効果、汚染海域や海泥中環境の適切な防食電流密度等については十分に検討がなされていない。そのため、これらの事項を明らかにする目的のために実構造物を使用して汚染海域において現地試験を実施した。

試験結果から以下に示す事項が明らかとなった。

- (1) 海洋生物が付着した鋼材表面の孔食は、無防食期間に発生する。
- (2) 電気防食は無防食時に発生した腐食の進行を防止できることが確認された。
- (3) 鋼材表面への海洋生物の付着は電気防食の防食効果に悪影響を及ぼさないことが明らかとなった。
- (4) 汚染海域における海水中の防食電流密度は上層部で大きい傾向を示した。その値は清浄海域の1.5~2倍程度であった。
- (5) 本海域における海泥中の防食電流密度は海底面から10m程度までは30mA/m²程度必要であった。しかし、それよりも深い部分では10mA/m²程度で十分防食出来ることが明らかとなった。
- (6) 陽極の発生電流は中、下層部に比べて上層部(—2m)で大きい傾向を示した。その結果、上層部の陽極は他の深度よりも早い時期に消耗することが考えられるために、その対策が必要である。
- (7) 汚染指標値に準拠した清浄海域と汚染海域に対する防食電流密度の取り方について提案した。

キーワード：港湾環境、鋼構造物、電気防食、海洋生物、清浄海域、汚染海域、電流密度

* 構造部 主任研究官(防食担当)

2* 構造部 材料研究室長

3* 電気防食工業会

1. はじめに

わが国の港湾においては建設材料として鋼矢板が昭和の初期から使用されている。鋼材は、港湾環境においては常に腐食に対する問題があるため、主要な施設ではあまり利用されず、地方の小規模な港で使われていた。しかし、表-1に示すように昭和30年代後半から40年代における経済の高度成長と相まって鋼杭工法の開発に伴い、鋼管杭や鋼矢板が海洋鋼構造物の建設に大量に使用されるようになった。

鋼材はコンクリートに比べて施工の容易さや工期の短縮等の利点がある。しかし、鋼材は錆びるという宿命的な欠点があり、長期間その構造物を維持していくには腐食から鋼材を守るための防食対策が必要となってくる。

港湾鋼構造物を長期間無防食の状態にしておくMLWL直下付近に発生する集中腐食と呼ばれる腐食によって大きい被害が起こる場合がある¹⁾。鋼矢板構造物の集中腐食による被害は穴の発生である。その穴から裏込め土砂が流出し、流出箇所の空洞化とともに空洞化した箇所へ大型車等の重量物が乗った場合にコンクリート版がその重量を支えきれずに破壊する被害が発生する。また、鋼管杭構造物の場合には栈橋そのものが破壊するという例が現実に見られ、集中腐食の被害の大きいことが見受けられる。このことは鋼構造物に対して防食対策がいかに大切であるかを示すものである。図-1に鋼矢板および鋼管杭構造物の集中腐食による被害の模式図を示す。また、写真-1(鋼矢板構造物)および写真-2(鋼管杭構造物)に被害例を示す。岸壁の破壊により、埠頭の供用ができなくなれば、埠頭の改造に経済的負担がかかる。その上、改造している期間は船舶の接岸、荷役作業の停止をよぎなくされ、間接的な損失をまねくこととなる。しかしながら、MLWL直下付近に発生する、この集中腐食は適切な電気防食法を適用することによって防食出来ることが確認されている²⁾。また、近年、海洋開発が提唱されるにつれて海洋環境における鋼材の利用度が増大するにしたいが鋼材の防食に関する問題が一層重要となってきた。

さらに、現在では、現存する鋼構造物を適切に維持管理して耐用年数まで良好な状態で稼働させていく方向へ比重を置くようになってきている。このような現状においては、今後、ますます構造物の防食、補修ならびに維持管理が大きな課題となってくるものと考えられる。長期間良好な状態で構造物を維持管理していくには、腐食に対する適切な防食技術および補修法を確立しておくこ

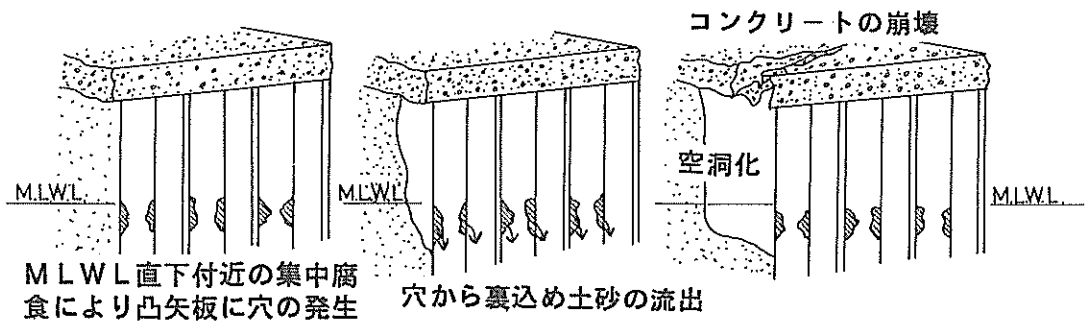
とが必要である。そのためには、実際の鋼構造物での長期間における防食や維持管理に対する試験を実施して、現状の防食に対する設計法をさらに適切なものとしていくことや、試験から得られた成果を適切に維持管理に反映させることが大切である。

このような観点から、本稿では港湾鋼構造物の防食法として海水中、海泥中の環境へ適用されている電気防食法についての現地試験を取り上げた。電気防食法は実績も長く、その効果も評価されている。その一般的な設計法についてはほぼ確立されているものと思われる。しかしながら、鋼材表面の海洋生物付着下の防食効果、汚染海域や海泥中環境に対する適切な防食電流密度等については、まだ十分に検討がなされていないのが現状である。

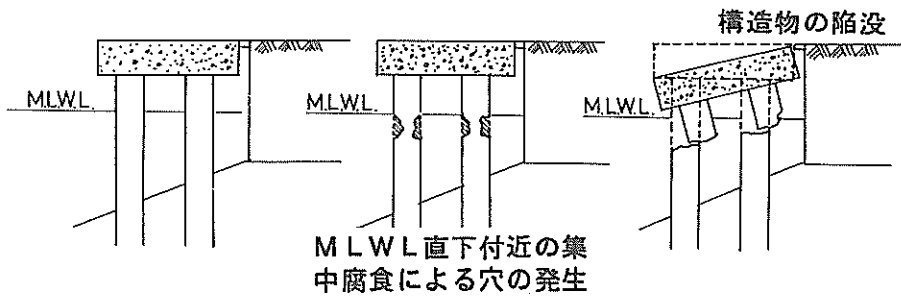
このような背景より、これらの事項を明らかにし、その成果を電気防食法の設計や施工法に反映させることを目的に実鋼構造物を利用して現地試験を実施した。本稿はこれらの試験結果を取りまとめたものである。

表-1 直轄施工鋼構造物建設年度別施設数

建設年 (年)	施設数
昭和20以前	16
昭和21～25	2
昭和26～30	4
昭和31～35	15
昭和36～40	108
昭和41～45	167
昭和46～50	104
昭和51～55	83
昭和56～59	45
合計	544



鋼矢板構造物の集中腐食による損傷例



鋼管杭構造物の集中腐食による損傷例

図-1 鋼矢板および鋼管杭構造物の集中腐食による被害の模式図



写真-1 鋼矢板構造物の集中腐食による被害例



写真-2 鋼管杭構造物の集中腐食による被害例

2. 生物付着下の防食効果に対する確認試験⁴⁾

2.1 試験の目的

海水中の鋼材表面への海洋生物の付着が腐食を加速するか遅らせるかについては、意見が分かれている^{5, 6)}。これは付着生物の種類の違い、付着状況の違いによるものであり、腐食の傾向は酸素濃淡電池の形成に起因しているためと言われている^{7, 8)}。

電気防食を実施している鋼構造物の腐食調査を行った際に、しばしば鋼材表面に孔食の発生した部位が見られる。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防食効果がないのではないかと懸念がもたれている。

本来、電気防食を行い鋼材の電位が防食電位 (-780mV vs Ag/AgCl) よりも卑な電位を維持すること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する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。この不明な点を明らかにしておくことは海洋生物付着下の鋼構造物を電気防食によって防食する際の設計、施工に対して重要な問題であると考えられる。

このような背景から、鋼材表面に付着する海洋生物付着下の電気防食による防食効果を明らかにするために実鋼構造物を用いて現地試験を実施した。

なお、電気防食の防食効果の判定法としては付録の「3. 電気防食の方式および防食基準³⁾」に示すように、

電気防食を実施している鋼構造物の電位を測定することによって判定することができる。測定値が防食電位 -780mV (Ag/AgCl 基準) よりも卑な値を示している場合には防食効果があると定義できる。

2.2 試験の方法

(1) 試験場所および手順

試験場所は図-2に示す横浜港大黒埠頭C3パースの棧橋である。断面図を図-3に示す。試験は図-3に示す対象試験杭2本 (P-1、P-2) と図-4に示すように試験対象杭に取り付けた試験用鋼管4本 (A1、A2、B1、B2) について実施した。対象試験杭と試験用鋼管の本数と名称を表-2に示す。

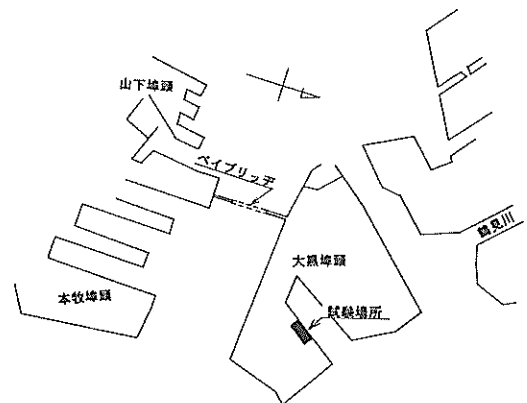


図-2 現地試験位置図

表-2 試験対象杭および試験用鋼管の本数と名称

試験対象杭	試験用鋼管	
	電気防食	無防食
P-1	A1	B1
P-2	A2	B2

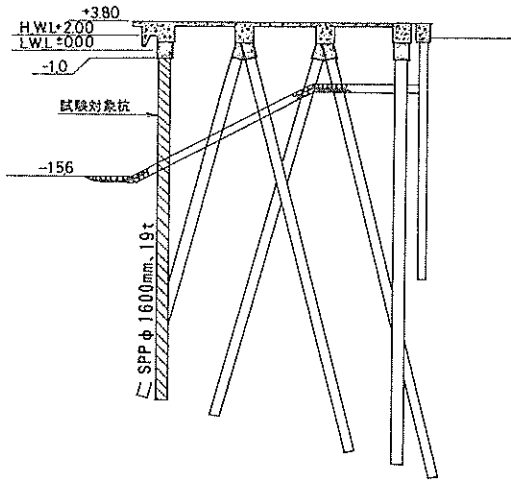


図-3 試験に使用した栈橋構造断面図

(2) 試験対象杭による試験

図-3の海側に位置する試験対象杭(直杭)2本を対象に試験を行った。試験対象杭はS.P.P.、 $\phi 1600$ mm、厚さ19mmである。

試験対象杭による試験の手順は図-5に示すように、試験は杭打ち前の杭の表面状態をまず観察し、杭打ち後、電気防食を実施するまでの期間(13ヶ月間)の鋼材表面の観察を行い、孔食の状況を調べておく。その後、電気防食実施後の鋼材表面の観察を行い、孔食の発生状況や電気防食による孔食に対する防止効果等を調べる。これによって、電気防食を実施してからの孔食発生の有無や進行状況等を明らかにする。

(3) 試験用鋼管による試験

実構造物では鋼材の切り出し等を行うことができないので、詳細な試験ができるように、試験用鋼管を試験対象杭に各2本ずつ(無防食用1本、電気防食用1本)、図-4のように回収の可能な状態にして取り付け付けた。無防食用鋼管(B1、B2)は試験対象杭に取り付けた際、防食されないように電気回路を遮断して取り付け付けた。また、防食用鋼管は鋼管杭と電気回路を作りアルミニウム合金陽極(以下A1陽極と呼ぶ)からの電流が鋼管を取り付けたと同時に流入するように無防食の期間がないようにした。使用した試験用鋼管は材質STPG38で、形状は $\phi 48.6 \times$ 長さ10,400mmである。試験用鋼管の取付深度は-1m~-12mの範囲である。

試験の手順は図-5に示すように、鋼管は2年間暴露試験された。暴露試験後、鋼管を回収してから30分後に、鋼管に付着している海洋生物の付着量を各水深(1mピッチ)の上下20cmの範囲の鋼管面全周の海洋生物を採取して、その湿質量を秤量した。また、鋼管表面の海洋生物の着生状況および種類の目視観察を行い、各深度の海洋生物の種類の出現頻度を調べた。その後、海洋生物を除去して鋼管表面の孔食の位置、大きさ、数等を調べた。さらに、鋼管の腐食速度を求

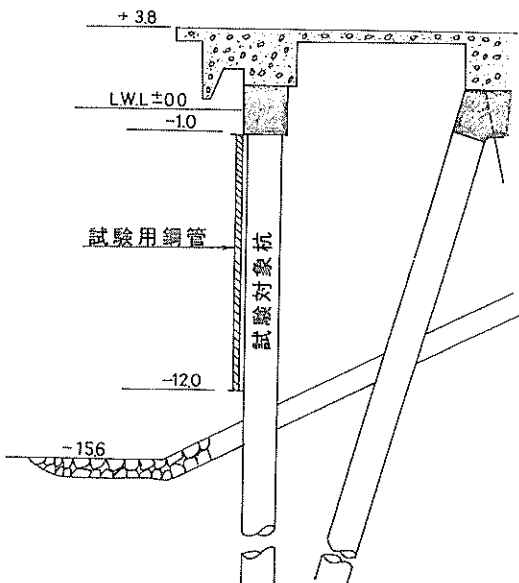


図-4 試験用鋼管の取付位置

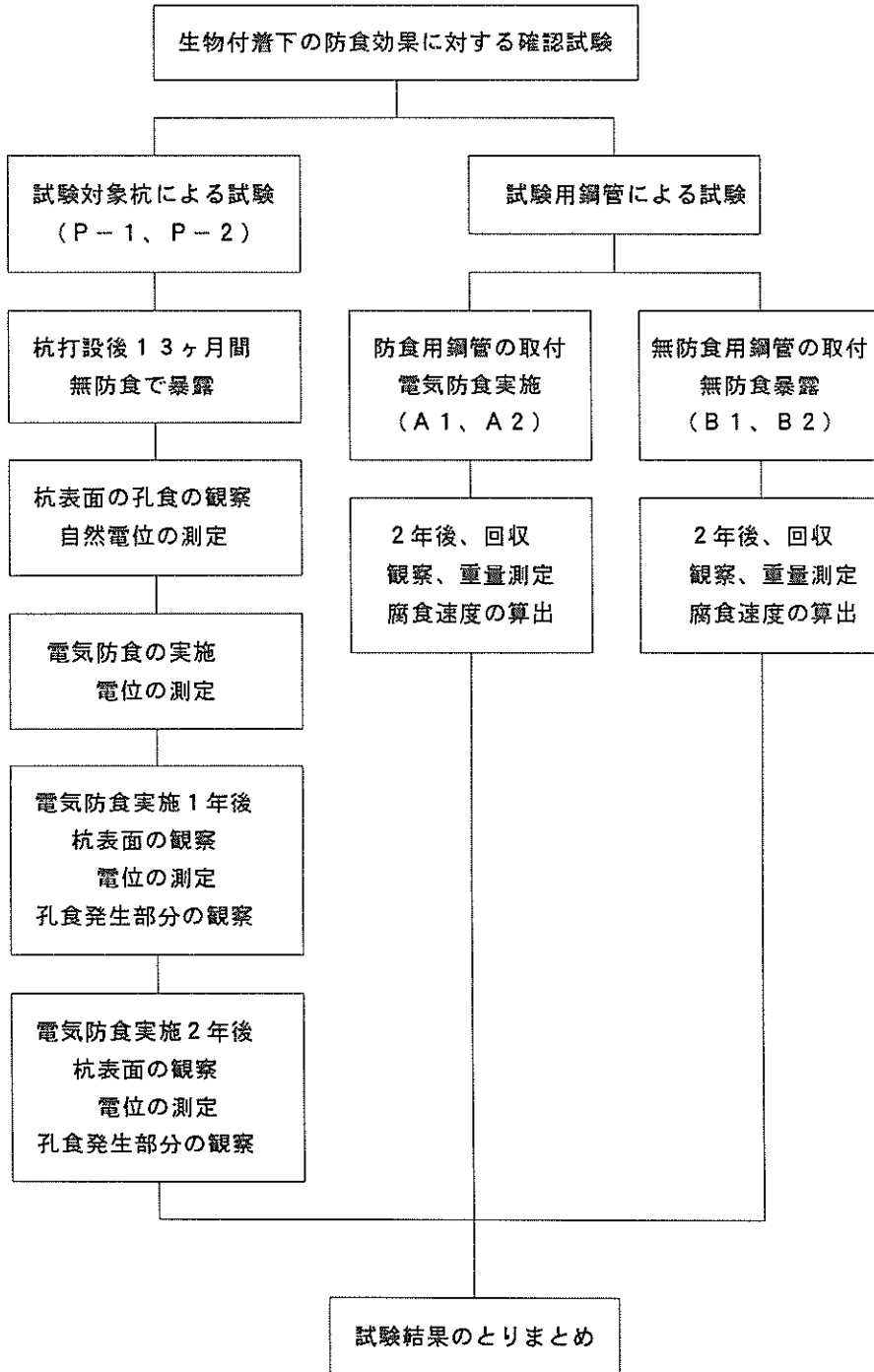


図-5 試験の手順

めるために、1m毎に長さ10cmの試験片を切り出した。試験片は酸処理後に質量測定を行った。質量測定から腐食速度を次式で求めた。

$$\text{腐食速度 (mm/yr)} = \frac{\text{減量 (g)} \times 10}{7.86 \text{ (g/cm}^3\text{)} \times S \text{ (cm}^2\text{)} \times \text{暴露期間 (yr)} \dots (1)$$

2. 3 試験結果および考察

(1) 試験対象杭による試験

図-6 (試験対象杭の展開図、A~E) に試験対象杭P-1の-4.5m~-8.0m間における無防食時の孔食の発生状況を示す。無防食期間13カ月間で試験対象杭P-1、P-2ともに0.5mm~1.3mm程度の孔食が多く認められた。発生の部位は杭全体にわたっているが、試験対象杭P-1では-4m~-8mに、試験対象杭P-2では-3m~-7mの深度に多かった。

電気防食実施1年後の鋼材表面の観察結果では無防食時とほとんど変化はなく、新たに発生したと思われる孔食は認められず腐食の進行は認められなかった。電気防食実施2年後の鋼材表面の観察結果 (図-7) では若干、孔食の幅が広がったのではないと思われる箇所が見られたが、これは鋼材表面を観察する際に表面に生成した石灰質皮膜をケレンした際に発生した傷によるものである。電気防食を実施してから2年目においても新たに発生したと思われる孔食はなく、孔食を型取りできるほどの大きい孔食部についてもほとんど変化がなかった (写真-3)。

また、試験対象杭P-1の電気防食実施時における電位の傾向は図-8に示すように、常時-900mV (防食電位-780mVよりもマイナス方向に位置していれば防食効果があると判定できる) よりも卑な値を示していたことから電気防食の効果が認められた。試験対象杭P-2においても、P-1と同様に電位は-900mVよりも卑な値を示し防食状態は良好であった。それ故、各杭に取り付けた試験用鋼管 (A1、A2) も同様に良好な防食状態にあった。

(2) 試験用鋼管による試験

a) 海洋生物の付着量と種類

表-3に試験用鋼管に付着した付着物の量を示す。また、試験対象杭P-1に取り付けた試験用鋼管に付着した海洋生物の付着量を整理すると図-9のようになる。海洋生物の付着量は-4mで最も多く、以下水深が深くなるにつれて少なくなっている。全体的には電気防食を実施した鋼管の方が無防食鋼管よりもやや付着量は多い傾向が見られた。

表-4、表-5に水深別海洋生物の種類と出現頻度および着生量を示す。生物出現頻度の表示は5段階表

示法⁹⁾を採用して整理した。各試験用鋼管とも着生した海洋生物の種類はほとんど同じであった。最も多く着生した生物 (優占種) はムラサキイガイとマガキであり海洋生物の重量の大半を占めていた。その深度は-1m~-8mの範囲である。また、一般的な清浄海域で観察できる海藻類やフジツボ類は、この海域では観察されなかった。-7m以深では管棲多毛類やホヤ類が多かった。イソギンチャク類やユレイボヤ類は少量ではあるが各水深で観察された。マガキ、ムラサキイガイ、管棲多毛類、シロボヤ類の大半は試験用鋼管表面に直接着生していた。ホヤ類、イソギンチャク類およびカイメン類はマガキやムラサキイガイ殻面に着生していた。写真-4に各深度における海洋生物の付着状況を示す。

全面腐食	全面的な凹凸腐食	
局部腐食	局部凹凸腐食	
	孔食	

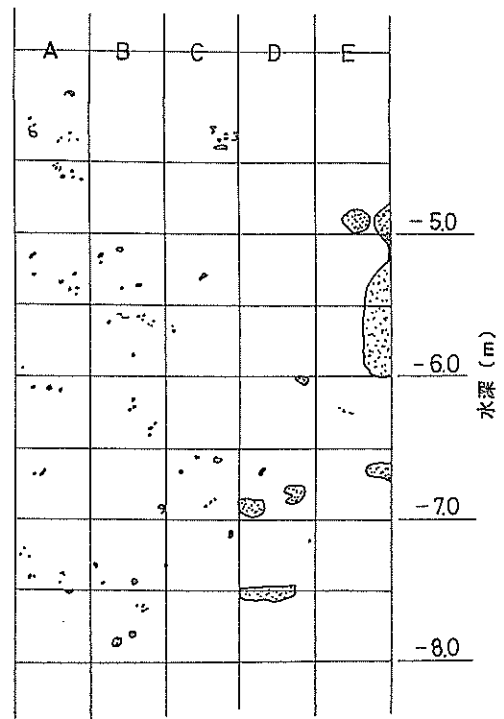


図-6 無防食時の孔食の発生状況

本試験における海洋生物の付着量を検討するために、他の場所で実施された海洋生物の付着状況等の調査結果を示すと次のようなものがある。まず、茨城県鹿島港内シーバースの鋼管杭の調査結果¹¹⁾をみると海洋生物の付着量は平均値で $520\sim 560\text{g}/\text{dm}^2$ である。同様に、神奈川県平塚市沖の波浪観測塔の鋼製レグの調査¹¹⁾では、海洋生物の付着量は水深 $-1\text{m}\sim -14\text{m}$ の範囲で平均値 $379\sim 436\text{g}/\text{dm}^2$ であることが示されている。鹿島港内シーバースの鋼管杭および平塚市沖の波浪観測塔の鋼製レグの海域は、いずれも清浄海域である。これらの値は横浜港と比べて約1.5倍と大きい。深度方向では -14m 付近まで多量の海洋生物の付着が認められた。したがって、横浜港大黒埠頭の場合には清浄海域に比べて海洋生物の付着量は少なく、多量に付着している深度も上記の2例よりも浅いことが分かる。横浜港における付着量は平均で $200\sim 300\text{g}/\text{dm}^2$ である。これは海水の汚染も考えられるが、コンクリート上部工の下に試験対象杭や試験用鋼管があるために太陽光線が水深の深いところまで届かなかったことにも影響しているものと推察される。すなわち、海水の汚染や太陽光線の届く範囲や時間が少ないために海洋生物の生育が悪いために付着量が少なかったものと考えられる。

全面腐食	全面的な凹凸腐食	
局部腐食	局部凹凸腐食	
	孔食	

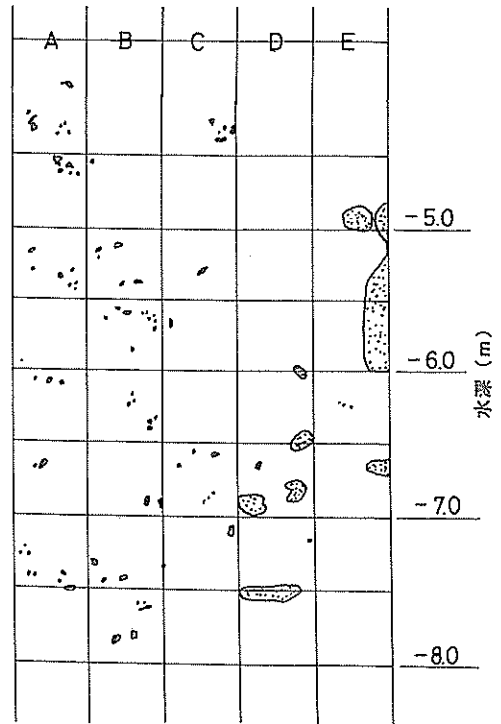
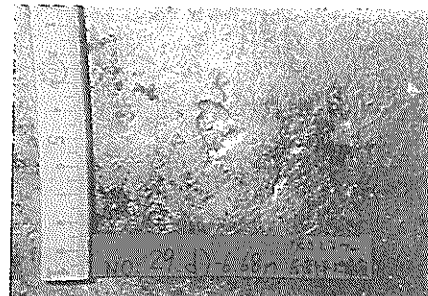


図-7 電気防食実施2年後の鋼材表面状況



無防食



電気防食実施時

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

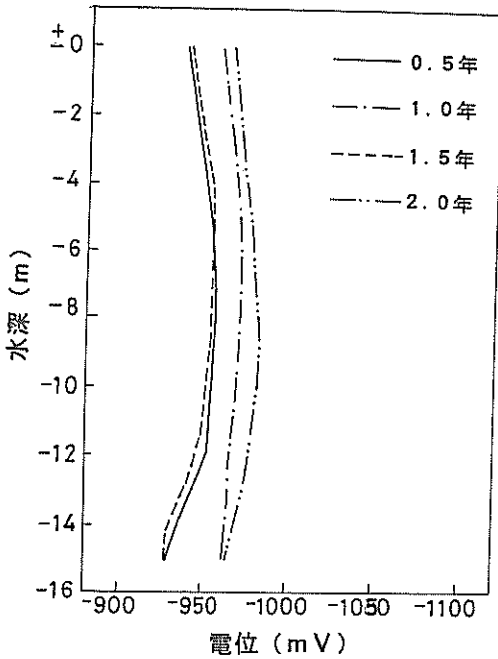


図-8 電位の傾向

表-3 試験用鋼管に付着した生物量

鋼管 No.	防食の 有無	付着生物量 (g/d m ²)		
		最大値	平均値	最小値
A 1	電気防食	805	301	36
A 2	電気防食	521	259	33
B 1	無防食	625	245	52
B 2	無防食	586	201	39

* A 1、B 1 は試験対象杭 P-1 へ取り付けた試験用鋼管
A 2、B 2 は試験対象杭 P-2 へ取り付けた試験用鋼管

b) 鋼材表面の観察

回収した試験用鋼管の表面観察を行った結果、電気防食を実施した鋼管の表面は平滑で腐食による凹凸もなく、孔食も見られなかった。すなわち、海洋生物の付着があっても電気防食の効果は十分得られていた。無防食の鋼管では、腐食による凹凸がほぼ全面に確認された。孔食の発生頻度や孔食数は図-9に示すように、-7mより浅い部分で数多く発生しており、

水深が深くなるにつれて減少している。孔食の発生数と海洋生物の付着量を比較すると、海洋生物の付着量の少ない所では孔食の数も少ないことが認められた。孔食の幅は平均で縦22×横17mm程度で最大では縦52mm×横42mmであった。孔食の最大深さは2.60mmであり、最大侵食度に換算すると1.30mm/yrと非常に大きい値となる。

図-10に2年間無防食状態で暴露されていた試験用鋼管(B 1、B 2)の孔食発生深度と孔食深さを示す。図-10に示すように孔食深さは1~2mmが大半を占めていた。また、孔食の発生深度は-1~-7mの範囲で多い傾向が認められる。すなわち、無防食で2年程度放置しておくとも深さ1~2mm程度の孔食が発生することを示している。

c) 質量測定結果

図-11に試験対象杭 P-2 に取り付けた無防食鋼管の質量測定より求めた各深度毎の腐食速度を示す。この図より、上層部で腐食が大きく、特に、-2m付近の腐食速度が大きく0.33mm/yr程度の値である。他の箇所では0.1~0.2mm/yr程度である。一方、電気防食を実施した鋼管の腐食速度は0.0098mm/yr~0.0099mm/yrで電気防食の防食効果は十分得られていた。写真-5に防食、無防食鋼管から切り出した試験片の表面状況を示す。無防食鋼管には腐食による多くの孔食が認められるが、防食した鋼管の表面は平滑で腐食は認められなかった。

以上、本章では、試験結果から鋼材が無防食の状態では鋼材表面に海洋生物が付着すると孔食の発生することが分かった。また、海洋生物の付着量の多い箇所では孔食の数も多いことが認められた。しかしながら、海洋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防食電位よりも卑な値を示す電位を維持するように管理を上手く行えば、海洋生物付着下では海洋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ことが確かめられた。無防食時に孔食を発生させないためには鋼管杭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電気防食の施工を実施することが大切である。

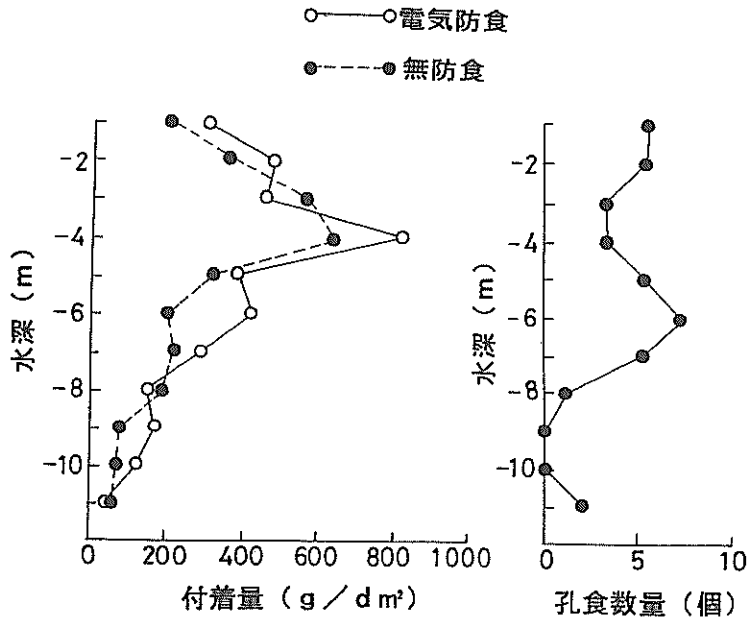


図-9 海洋生物の付着量および孔食の数量

表-4 付着物の種類と出現頻度および着生量 (試験対象杭P-1 取付鋼管)

水深 (-m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	B
A 1 電気防食												
カイメン類	-	rr	rr	r	rr	rr	rr	-	-	-	-	-
イソギンチャク類	CC	CC	r	C	+	r	r	r	r	r	C	CC
コケムシ類	-	-	rr	-	r	r	r	-	-	-	-	-
管棲多毛類	-	rr	rr	rr	rr	r	r	C	CC	CC	C	+
ムラサキイガイ	CC	CC	r	+	+	rr	rr	rr	-	-	-	-
マガキ	rr	C	+	CC	+	C	rr	-	-	-	-	-
ユウレイボヤ	-	rr	rr	-	-	C	C	+	CC	C	rr	rr
シロボヤ	-	-	-	-	-	rr	rr	rr	r	r	CC	CC
エボヤ	-	-	rr	-	-	rr	r	C	C	C	-	-
着生量 (g/dm²)	305	462	435	805	383	422	288	139	160	121	36	59
B 1 無防食												
カイメン類	rr	rr	rr	rr	rr	rr	-	-	-	-	-	-
イソギンチャク類	r	C	CC	C	+	rr	rr	r	rr	+	r	C
コケムシ類	-	-	-	rr	rr	rr	rr	rr	rr	-	-	-
管棲多毛類	-	rr	rr	rr	rr	rr	r	+	CC	+	+	+
ムラサキイガイ	+	CC	CC	+	r	-	rr	-	-	-	-	-
マガキ	-	C	C	C	C	r	+	-	-	-	-	-
ユウレイボヤ	-	rr	r	r	r	rr	r	+	+	+	rr	rr
シロボヤ	-	-	-	-	-	-	rr	rr	rr	rr	C	r
エボヤ	-	-	rr	-	-	-	-	r	r	r	-	-
着生量 (g/dm²)	196	363	563	625	321	203	210	193	84	67	52	59

※ CC:極めて多い, C:多い, +:Cとrの間, r:少ない,
rr:極めて少ない, -:無着生

表-5 附着生物の種類と出現頻度および着生量 (試験対象杭P-2取付鋼管)

水深 (-m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	B
A 2 電気防食												
カイメン類	-	r	rr	rr	rr	r	rr	-	-	-	-	-
イソギンチャク類	CC	CC	CC	C	+	r	r	r	C	C	C	CC
コケムシ類	-	-	rr	rr	rr	rr	rr	rr	-	-	-	-
管棲多毛類	-	rr	rr	rr	r	r	C	C	+	CC	C	+
ムラサキイガイ	C	C	+	+	C	r	rr	rr	rr	-	-	-
マガキ	-	-	rr	CC	C	r	+	cc	-	-	-	rr
ユウレイボヤ	-	rr	rr	+	r	+	+	+	C	r	r	rr
シロボヤ	-	-	-	-	-	rr	rr	rr	rr	rr	CC	C
エボヤ	-	-	-	-	rr	-	r	C	C	r	-	-
着生量 (g/d m ²)	408	521	452	347	334	87	136	498	98	123	33	33
B 2 無防食												
カイメン類	-	rr	rr	rr	rr	rr	rr	-	-	-	-	-
イソギンチャク類	rr	+	C	C	r	r	C	r	r	r	r	rr
コケムシ類	-	-	r	r	rr	rr	r	rr	-	-	-	-
管棲多毛類	-	rr	-	rr	rr	rr	rr	C	C	C	C	C
ムラサキイガイ	+	CC	CC	CC	C	r	rr	-	-	-	-	-
マガキ	-	+	C	CC	cc	r	r	-	-	-	-	-
ユウレイボヤ	-	-	r	r	+	rr	C	+	r	r	rr	rr
シロボヤ	-	-	-	-	rr	rr	rr	rr	rr	r	C	C
エボヤ	-	-	-	rr	rr	-	r	rr	r	-	-	-
着生量 (g/m ²)	8	478	324	586	48	247	422	69	70	59	39	56

※ CC:極めて多い, C:多い, +:Cとrの間, r:少ない,
rr:極めて少ない, -:無着生

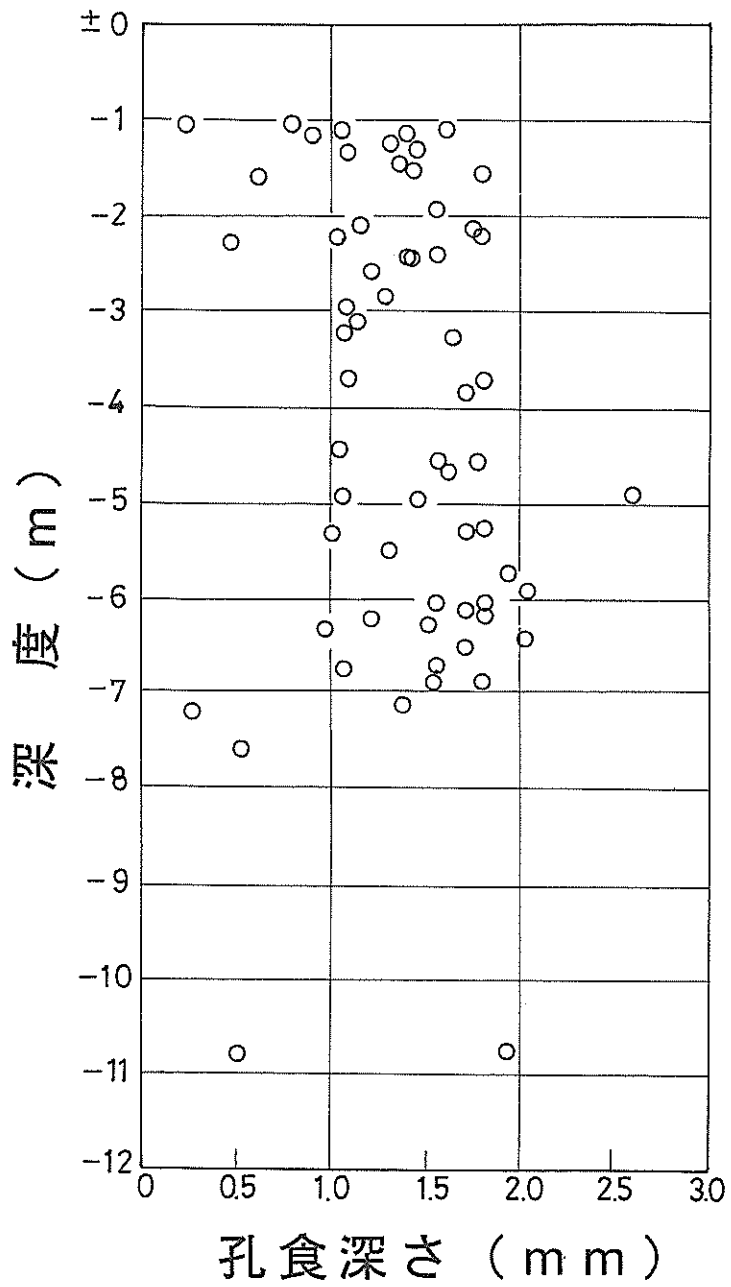


図-10 無防食試験用鋼管の孔食発生深度と孔食深さ



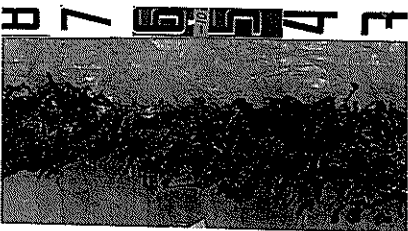
- 2 m



- 4 m



- 8 m



- 10 m

写真-4 試験用鋼管の表面状況

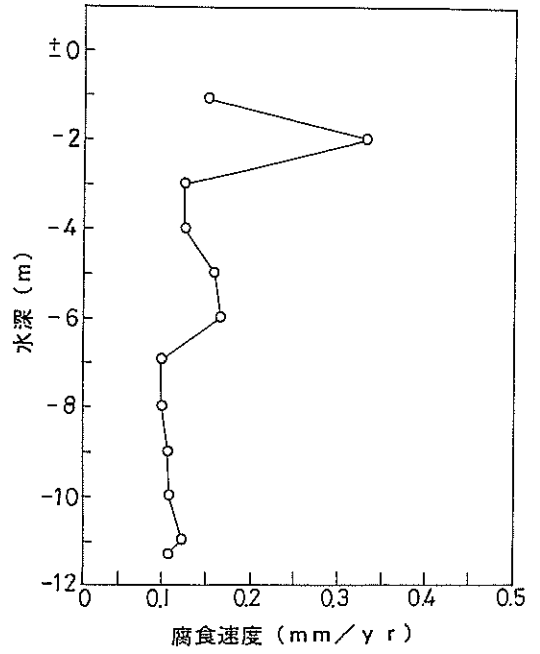


図-11 無防食試験用鋼管の腐食速度

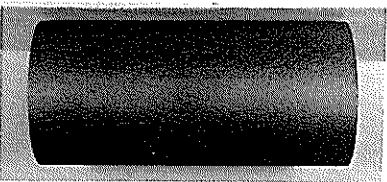
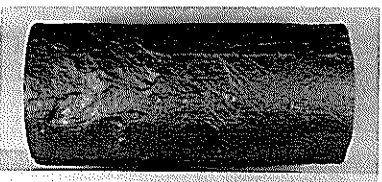
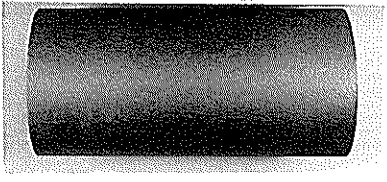
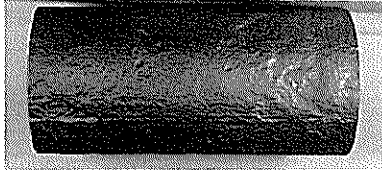
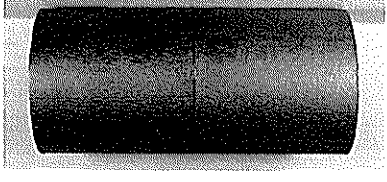
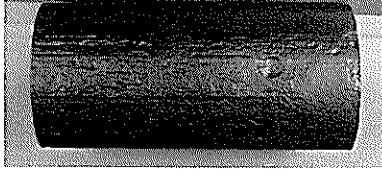
深 度 (m)	電 気 防 食 実 施 鋼 管	腐 防 食 鋼 管
- 2 m		
- 6 m		
- 11 m		

写真-5 試験用鋼管の表面状況

3. 汚染海域や海泥中環境に対する適正な防食電流密度の検討試験¹²⁾

3.1 試験の目的

近年、港湾環境における海水の汚染が進み港湾鋼構造物に電気防食を適用する際にも海水の汚染が問題となっている。一般に港内は防波堤等で囲まれており、広い港内には経年とともに多数の大型施設が増設され、かつ複雑に入り込んで配置されているところが見られる。さらに、陸上の周辺地区には、いずれも工場等が密集し、人口が多く、河川水が流入している等の共通条件を有している。そのため、近くの海域は工場排水、生活排水ならびに河川水が多く流入し、また、流入水の拡散効果が悪く、外海の清浄海水との交換（清浄化）も弱い状況にある。その結果、汚染物質が次第に滞留して汚染が進むものと考えられる。清浄海水と汚染海水の水質を比較したものとして表-6に示すものがある。この表を見ると汚染海水は清浄海水に比べて比抵抗が大きく塩素イオン濃度が少ない。また、硫黄イオン、アンモニウムイオン

が検出され、溶存酸素が少ない傾向を示す。特に、この傾向は表層水で顕著に表れる。

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 $100\text{mA}/\text{m}^2$ の値が適用される。しかし、汚染海域では現行の $100\text{mA}/\text{m}^2$ では不足する場合が現実として生じており、この防食電流密度の取り方について問題が提起されている。汚染海域においては通常の $100\text{mA}/\text{m}^2$ の値よりも20~50%増しにすることが経験的に行われているが、深度方向に対しての電流分布の傾向、AI陽極の発生電流の経時変化および深度方向に対する陽極の溶解量等を検討した例は少なく不明な点が多い。したがって、これらの事項を明確にしておくことは汚染海域への電気防食法の適用に際して設計の面で陽極の配置や溶解量との関係からも必要なことである。

また、海泥中の環境における適正な防食電流密度については、従来からの設計値としては一律に $20\text{mA}/\text{m}^2$ （汚染海域では $30\text{mA}/\text{m}^2$ を採用）の防食電流密度が提示されている。しかし、根入れの深い部分への防食電流の流入状況や電位との関係等についてはほとんど研究された資

料もなく、海泥中の深い部分でも設計値を同じ値としているのが現状である。海泥中においても海水中と同様に浅い部分と深い部分とでは酸素量の差等によって環境が異なるものと考えられる。そのため、適切な防食設計を行うためには、海泥中の深度方向における適正な防食電流密度を明らかにしておくことが必要である。

このような観点より、本章では河川水や生活排水等の流入によって汚染した海域や海泥中環境へ電気防食を実施した場合の防食電流密度や電位の傾向を把握して適切な設計防食電流密度を検討する目的のために現地試験を実施した。

表-6 清浄海水と汚染海水の水質の比較例

	清浄海水(鹿島港)		汚染海水(東京港芝浦)	
	表層水	海底水	表層水	海底水
水温 (°C)	23.5	22.0	26.0	25.5
抵抗率 ($\Omega\text{-cm}$)	22.4	22.5	105	29.0
pH	8.2	8.3	7.3	7.7
Cl ⁻ (ppm)	18,000	19,000	3,800	15,500
S ²⁻ (#)	~0	~0	2.0	0.8
NH ₄ ⁺ (#)	~0	~0	7.0	2.0
溶存酸素 (#)	7.5	8.2	0.3	0
COD (#)	23	20	37	25
Eh (mV)	429	417	56	71
SRB細菌 (菌数/ml)	3	7	1.1×10 ⁶	4.5×10 ⁴

腐食防食協会 8・1 分科会資料

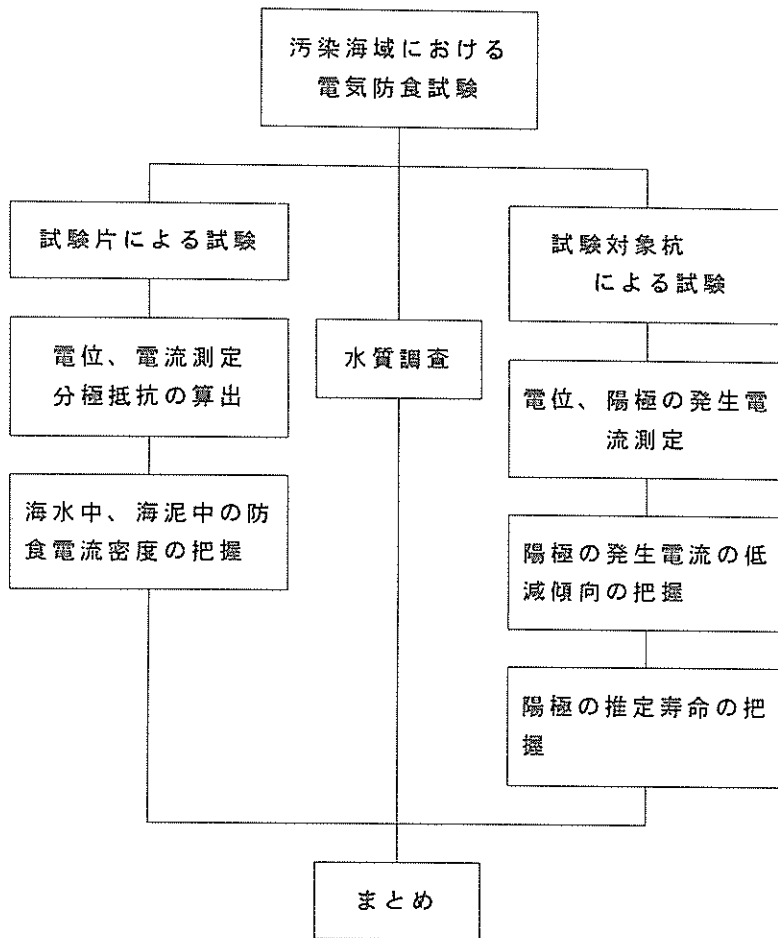


図-12 現地試験の手順

3. 2 試験の方法

試験の実施場所は第2章で試験を実施した場所と同一箇所（横浜港大黒埠頭C3バース）である。この場所は付近に河口があるので河川水や生活排水等の影響を大きく受けて海水の汚染のひどい場所である。試験は試験片による試験と試験対象杭による試験の2つの方法で実施した。その手順を図-12に示す。試験片による試験では試験対象杭の各深度に試験片を取付けて試験片に流入する電流、電位を測定し、海水中、海泥中へ流入する防食電流密度を調べた。また、試験対象杭による試験では試験対象杭に取付けてあるAl陽極の発生電流を測定して陽極の推定寿命等を調べた。

(1) 試験片による試験

岸壁を新設する際に、試験対象杭に試験片を各深度

に取付固定した後、試験対象杭を打ち込み、岸壁が完成した後に各深度に取付た試験片へ試験対象杭に取付けてあるAl陽極から電流が流れるように電気防食を行い試験を実施した。測定項目は電流および電位であり、測定を定期的に行い時間変化による傾向を調べた。試験に使用した試験片は図-13に示すように、10cm×10cm×厚さ2mmの軟鋼板を亜鉛基準電極と組み合わせたものを用いた。亜鉛基準電極は試験片の電位を測定するための電極である。試験対象杭2本に対してそれぞれ海水中2深度（-2.8m、-8.3m）、海泥中4深度（-19m、-28m、-366m、-41m）に試験片を取り付けた。図-14の断面図に試験片の取付位置を示す。試験対象杭への試験片の取付状況を写真-6に示す。

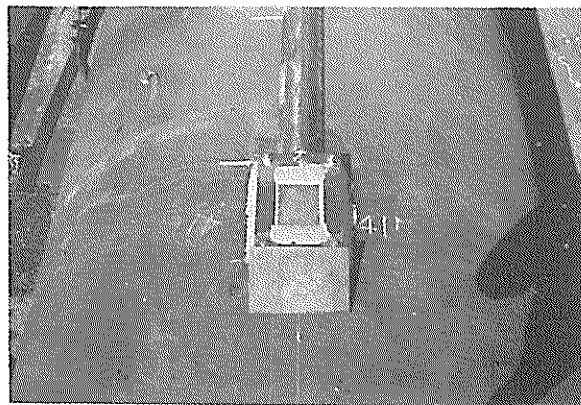
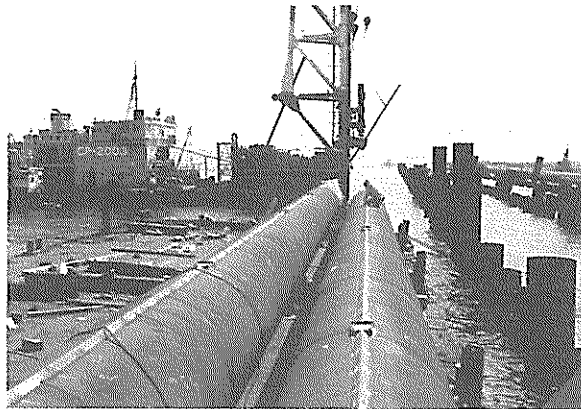


写真-6 鋼管杭への試験片の取付け状況

(2) 試験対象杭による試験

試験対象杭による試験では、図-14に示す断面図の海側に位置する直杭について電位測定および陽極の発生電流の測定を行った。電位測定は電気防食施工前に自然電位を測定した。また、電気防食施工後は年2回(夏、冬)電位測定を行い、水深方向の電位分布、電位変化状況を調査した。測定は岸壁上部から照合電極(vs Ag/AgCl)を水深方向に降下させながら1m毎に測定した。陽極の発生電流の測定は図-15に示すように試験対象杭1本について-2m、-6m、-10mの位置に取り付けてあるA1陽極の発生電流の経時変化を測定した。発生電流の測定方法は図-16に示すようにA1陽極の芯金両端を鋼管杭本体と絶縁して取付け、芯金上端に0.01Ωのシャント抵抗を挿入して電圧降下法によって電流値を求めた。

なお、本試験に適用した電気防食の設計値は、本海域は汚染海域と考えられるので海水中は $130\text{mA}/\text{m}^2$ 、海泥中は $30\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度とし、陽極寿命20年で設計した。

(3) 水質調査

水質調査は試験実施海域の表層、中層、下層から海水を採取し、比抵抗、水温、濁度、DO、pH、Cl⁻、S²⁻、NH₄⁺の分析を行った。水質の調査は夏季、冬季の年2回実施した。なお、水質の分析は腐食防食協会8・1分科会の資料に準拠して行った。

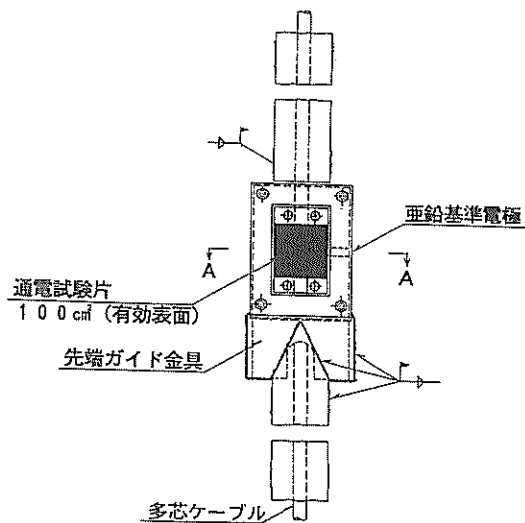


図-13 試験に使用した試験片および取付状況

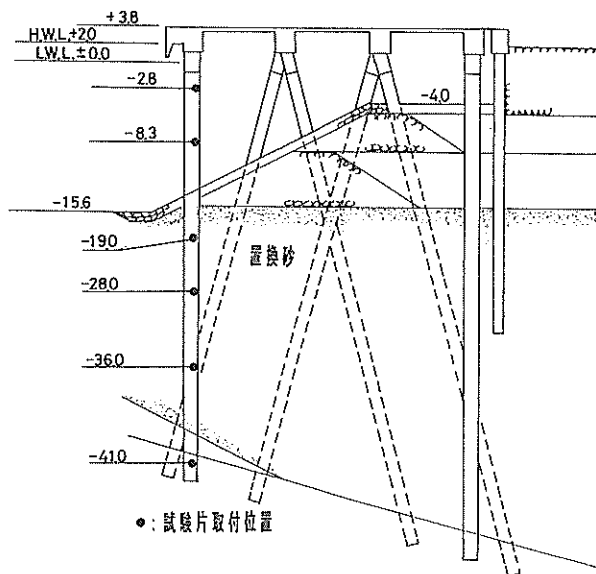


図-14 試験片の取付位置

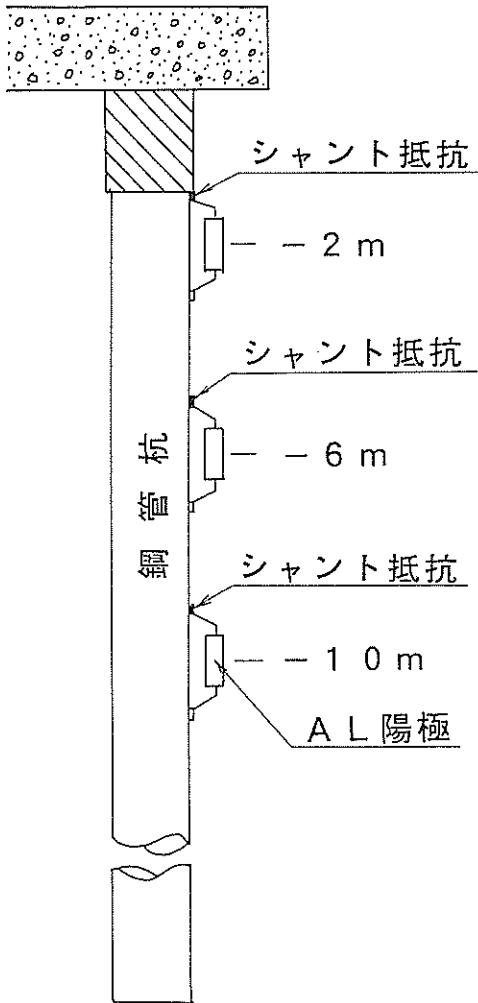


図-15 Al陽極の取付け位置

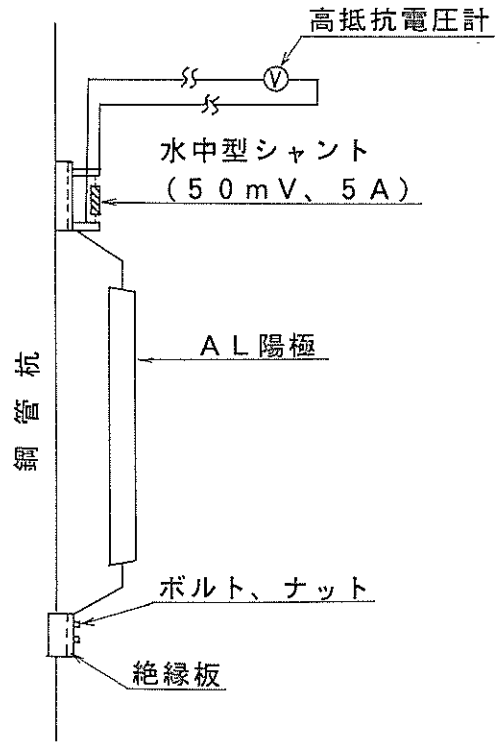


図-16 電圧降下法による電流測定方法

3.3 試験結果および考察

(1) 水質調査

水質の分析結果を表-7に示す。調査結果から、試験期間中の水温は冬季で10°C前後、夏季で19~28°Cであり、pHは7~8、比抵抗は22~30.5 $\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲であった。また、DOは0.2~8.3の範囲で、4年経過時に-10mおよび-14m地点で0.2~0.9 (ppm) と非常に小さい値を示した。 S^{2-} は夏季、冬季ともほとんど検出されなかった。 NH_4^+ は0.2~1.96 (ppm) の範囲で、上層部において大きい傾向を示した。

水質の傾向を夏季と冬季を比較すると、夏季は Cl^- 、DOが低く NH_4^+ が多い。冬季では Cl^- 、DOが多く NH_4^+ が少ない傾向があり、夏季において汚染状態がさらに悪くなることが認められた。さらに、汚

染指標値として提案されている NH_4^+ (ppm) + 1 / Cl^- (%) は0.8以上(一箇所0.77)であった。この汚染指標値は NH_4^+ (ppm) + 1 / Cl^- (%) を計算することによって、その海域が清浄海域か汚染海域かを判定するものである¹³⁾。汚染指標値が0.8未満では清浄海域と判定し、0.8以上では汚染海域と判定する。それ故、本海域は表-7に示すように汚染指標値は、前述したように0.8以上がほとんどであるために汚染海域と判定できる。特に、汚染指標値は水深の浅い部位で大きかった。

項目	水深	H.3 7/19 (晴)	H.4 1/30 (晴)	H.4 3/26 (晴)	H.4 8/5 (晴)	H.5 1/31 (晴)	H.5 8/8 (晴)	H.6 2/6 (晴)	H.6 9/4 (晴)	H.7 2/26 (晴)	H.7 8/27 (晴)
水 温 (°C)	±0 m	24.7 (+1 m)	11.0	11.7	24.3	10.5	21.4	9.6	28.0	9.7	27.2
	-5 m		11.2	11.6	23.0	10.7	20.4	9.8	26.2	9.8	25.4
	-10 m		11.2 (-7)	11.4	18.9	10.8	17.9	9.7	23.3	9.7	23.0
	-14 m		11.4	11.5	18.9	10.9	17.4	9.7	21.9	9.5	20.0
pH (°C)	±0 m	7.9 (+1 m)	8.11	7.85	7.88	7.88	8.12	8.10	8.20	8.36	7.95
	-5 m	7.84	8.11	7.88	7.45	7.84	7.86	8.18	8.18	8.45	7.87
	-10 m	7.64	8.15 (-7)	7.92	7.92	7.83	7.87	8.22	7.99	8.50	7.87
	-14 m		8.16	7.84	7.92	7.82	7.78	8.06	7.94	8.50	7.78
抵抗率 (Ω・cm)	±0 m	23.4 (+1 m)	29.0	34.0	28.7	30.5	28.7	28.0	24.6	30.8	21.6
	-5 m	22.1	28.4	33.0	28.4	30.2	24.6	26.3	23.5	30.0	20.0
	-10 m	20.7	28.2 (-7)	31.0	25.9	28.7	21.0	23.6	22.5	30.0	20.0
	-14 m		28.0	31.0	25.1	29.2	20.1	23.3	22.5	29.7	20.0
Cl ⁻ (ppm)	±0 m		17,000	16,000	13,800	16,300	14,000	17,800	16,000	17,000	16,000
	-5 m		17,400	17,000	13,800	16,500	16,000	19,000	17,000	18,000	17,000
	-10 m		17,500 (-7)	18,000	15,400	16,800	18,000	21,400	18,000	18,000	18,000
	-14 m		17,600	18,000	16,600	17,100	18,000	21,600	18,000	18,000	18,000
DO (ppm)	±0 m	1.35 (+1 m)	6.33	6.79	6.4	8.2	7.2	7.5	6.5	9.8	6.4
	-5 m		7.49	6.39	6.1	7.8	4.5	6.5	6.4	8.7	2.7
	-10 m		7.08 (-7)	5.48	6.1	7.1	3.3	6.5	6.2	8.2	0.9
	-14 m		6.36	5.38	5.3	6.4	3.3	5.9	6.2	8.2	0.2
溶 度 (ppm)	±0 m	30.0 (+1 m)	10	14.0	30	12	6.0	5.0	15	2	8
	-5 m		9	14.0	30	15	5.0	6.0	9	2	10
	-10 m		9 (-7)	14.0	30	15	7.0	7.0	10	5	10
	-14 m		9	17.0	35	19	9.0	10.2	15	5	10
* Cl ⁻ (ppm)	±0 m	14,600	17,000	15,900	14,200	16,600	14,300	17,300	15,400	17,700	16,100
	-5 m	16,400	17,400	16,700	13,600	17,400	15,700	18,100	16,900	18,300	16,600
	-10 m	17,000	17,500	17,500	18,400	17,600	18,000	18,000	17,600	18,500	17,400
	-14 m										
* S ²⁻ (ppm)	±0 m	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	-5 m	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	-10 m	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	-14 m										
* NH ₄ ⁺ (ppm)	±0 m	1.60	0.6	1.00	1.96	0.40	0.64	0.44	0.55	0.66	0.43
	-5 m	0.46	0.4	0.80	0.98	0.29	0.24	0.35	0.37	0.43	0.39
	-10 m	0.47	0.4	0.60	0.23	0.31	0.47	0.29	0.30	0.40	0.36
	-14 m										
NH ₄ ⁺ /Cl ⁻ (%)	±0 m	2.28	1.19	1.63	2.66	1.00	1.34	1.02	1.20	1.22	1.00
	-5 m	1.07	0.97	1.40	1.72	0.86	0.88	0.92	0.96	0.95	0.99
	-10 m	1.03	0.97	1.16	0.77	0.87	1.03	0.85	0.87	0.94	0.98
	-14 m										

表-7 試験期間中における水質分析結果

(2) 試験片による試験

a) 海水中的の電流密度の傾向

図-17に海水中的の試験片における電流密度の経時変化を示す。図-17の海水中的における電流密度の傾向は当初350~450mA/m²程度の大きい値を示したが、時間の経過とともに次第に低減している。上層部(-2.8m)においては1年後に100mA/m²を切る値が測定された。しかし、その後、500~1000日の間では200mA/m²程度の大きい値で推移していたが、1300~1450日の期間では低減傾向を示し1450日の測定では75mA/m²程度の値を示した。一般に防食電流の経時変化は図-18に示すように時間の経過とともに減少してゆき2~3年程度で定常値に入ると言われている。通常、清浄海域においては初期の設計防食電流密度の100mA/m²が定常値では40~50mA/m²程度に減少する。しかし、ここでの値はかなり大きい値(75mA/m²)であった。電流密度が上層部で、このように大きかった理由は前述したように、水質試験結果からNH₄⁺が試験期間を通して検出されたことと塩素イオン濃度が清浄海水に比べてやや少ないなど、河川水と生活排水等の流入による海水の汚染の影響が顕著に表れたものと思われる。中層部(-8.3m)では初期を除いて200日以降1100日程度までは70~90mA/m²程度

で推移し、1300~1450日の期間では30~50mA/m²と電流密度は小さくなる傾向が認められた。中層部において、上層部よりも電流密度が小さい傾向を示した理由は、中層部~下層部にかけて海水の水質が上層部ほど悪くなかったためと思われる。

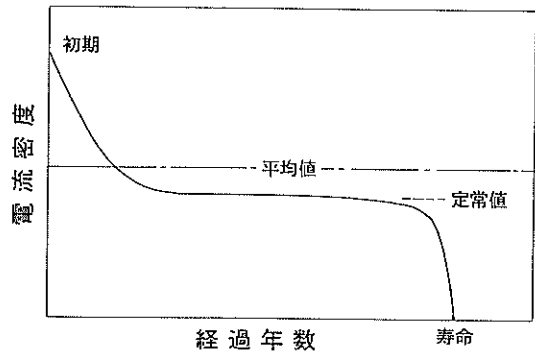


図-18 防食電流の経時変化

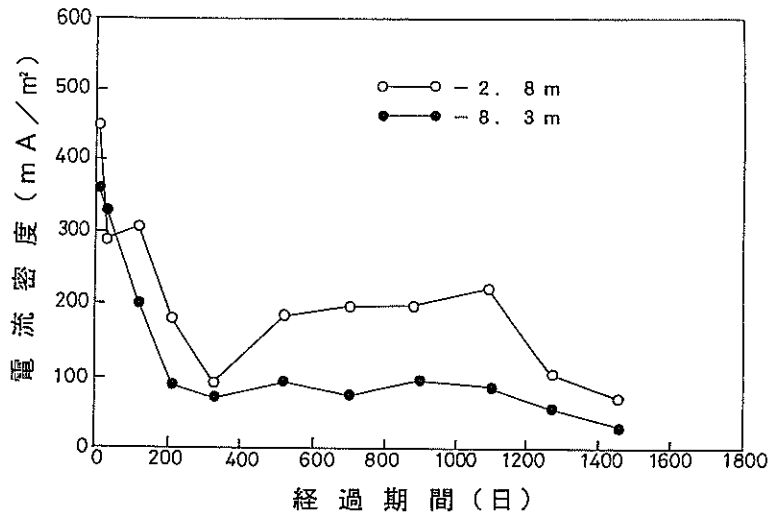


図-17 海水中試験片の電流密度の経時変化

清浄海域と汚染海域との定常電流密度の違いは表-8に示すように汚染海域では電流密度が大きく、清浄海域では小さい傾向を示す。清浄海域では腐食性物質が少なく写真-7のように鋼材表面に容易に石灰質皮膜が形成されるので皮膜が防食膜となって、その後の電流を低減できる。しかし、汚染海域では腐食性物質が多く清浄海域と同じ程度の電流密度では容易に石灰質皮膜が形成できず、鋼材表面はいつまでも不安定な状態が続き石灰質皮膜を形成するには大きい電流密度を必要とする。本海域は汚染海域である

ために、防食電流密度は表-8の汚染海域における電流密度と同様に清浄海域に比べて大きな値を示したものである。特に、上層部において防食電流密度の大きい傾向が認められ、変動も大きかった。

また、今回、下層部へは試験片を取付けずに試験したが、後述するように陽極の発生電流（取付位置-10m）は-6mに取り付けた陽極の発生電流と同程度かやや小さい値を示していたことから、下層部においての電流密度は中層部（30~50mA/m²）と同程度の値と思われる。

写真-7 電気防食による鋼材表面への石灰質皮膜の生成状況



表-8 国内各地の定常電流密度

港名	定常電流密度 (mA/m ²)	港名	定常電流密度 (mA/m ²)
* 苫小牧	35.9	衣浦	52.0
* 鹿島	47.0	四日市	60.8
船橋、市川	47.0	尼ヶ崎	67.5
* 袖ヶ浦	36.0	大阪	58.4
* 木更津	50.0	福山	49.3
* 姉ヶ崎	33.4	神戸	70.0
東京	83~90	* 和歌山	46.0
横浜	62.0	* 坂出	46.4
川崎	81.0		

* 清浄海域
・その他は汚染海域

b) 海泥中の電流密度の傾向

図-19に海泥中の試験片における電流密度の経時変化を示す。図-19の海泥中における電流密度の傾向は、通電当初各深度によってその値は大きく変動していたが、通電100日後における測定では分極が容易に進み、試験片へ流入する値は非常に小さくなっていった(2~3mA/m²程度)。その後、海底面に最も近い-19m(海底面から3.6m程度下)では時間の経過とともに増加傾向を示した。特に、1100日以降で20~30mA/m²と海泥中の環境としては大きい値を示した。1450日の測定時に30mA/m²程度の大きい値を示したのは、水質調査結果からこの時期の海水中の中~下層部にかけての溶存酸素量が極めて小さい(0.2~0.9ppm)値を示し腐食性の大きい環境となったためと考えられる。また、海底面上に多量のヘドロが堆積しているような場合には硫酸塩還元細菌の活動が活発なために、少なくとも海水中と同程度の電流密度が必要とされている¹¹⁾。そのため、このような傾向が海底面の近傍で始まっていることも考えられる。それ故、今後この環境で電流密度がどのように変動していくかを、さらに長期間見守る必要がある。その他の試験片の値は10mA/m²以下の値で推移していた。この

ように小さい値を示した理由は、海水中に比べて海泥中の深い部位では分極し易く鋼材の表面が乱されないことや酸素の供給が少ないことによるものと思われる。

したがって、海泥中における防食電流密度の取り方としては一般に海泥中を単一層とみなし、通常20mA/m²の電流密度を採用しているが、今回の試験結果から考えると、本海域においては、少なくとも海底面付近で海水の影響を受けると考えられる部位とそれよりも深い部位とを区分して考える必要がある。海泥中の防食電流密度を区分すると電流密度に差が認められる-19mと-28mの間、すなわち、-25m付近(海底面下10m)までと、それ以深に分けられる。防食電流密度は海底面から下10m程度までは20~30mA/m²(初期30mA/m²)程度、それ以下の層では7~8mA/m²(初期10mA/m²)程度と考えられる。

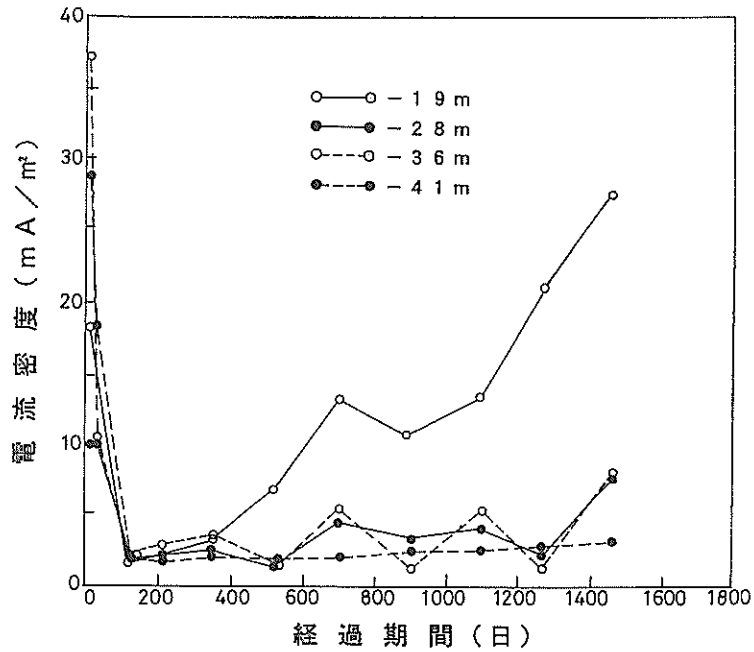


図-19 海泥中試験片の電流密度の経時変化

c) 海水中の電位の傾向

図-20に海水中の試験片における電位の経時変化を示す。図-20における電位の傾向は当初-800~-900mV程度であったが、900日頃に-8.3mでやや貴になっているのを除けば時間の経過とともに卑の方向に移行してきている。上層部と中層部と比較してみると

やや上層部の電位が貴の傾向が認められた。この原因も上層部で水質が悪いため中層部ほど分極が進まなかった結果によるものと思われる。しかしながら、1100日以降では、いずれの深度においても測定値は-1000mV程度かそれよりも卑な値を示していることから十分な防食効果が示されている。

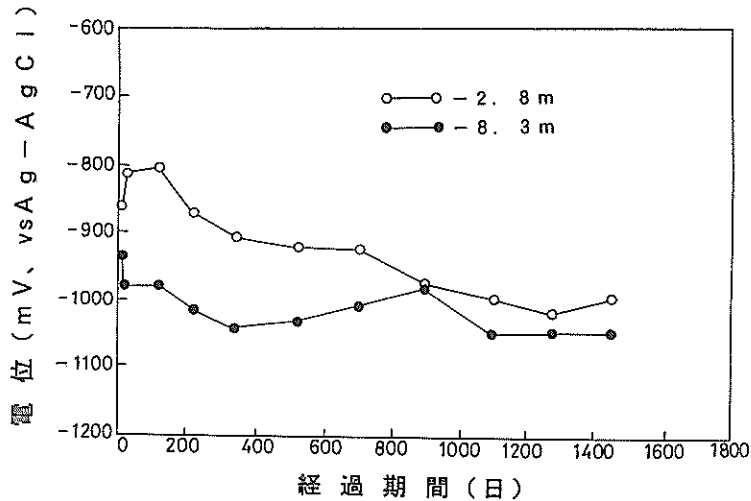


図-20 海水中試験片の電位の経時変化

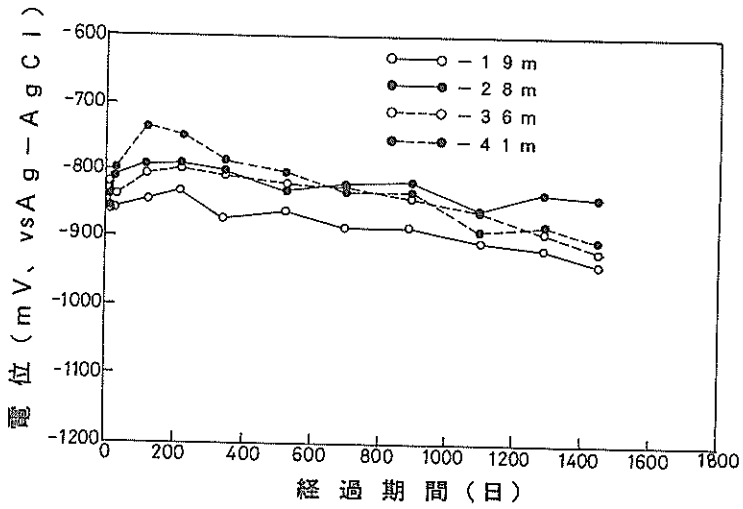


図-21 海泥中試験片の電位の経時変化

d) 海泥中の電位の傾向

図-21に示すように、当初-800~-850mVの値であったが、100~200日ではやや貴な-740~-840mVへ移行した。その後、全体的に卑の方向に徐々に移行し、最終的には-840~-940mVの範囲を示した。1450日測定 of 4深度のうち最も貴な電位は-28mの-840mV、最も卑な電位は-19mの-940mVであった。い

ずれも防食電位よりも卑な値を示し防食効果は良好であった。そのため、海底面付近が十分な防食状態であれば、それより深い部位では問題なく防食されることとなる。

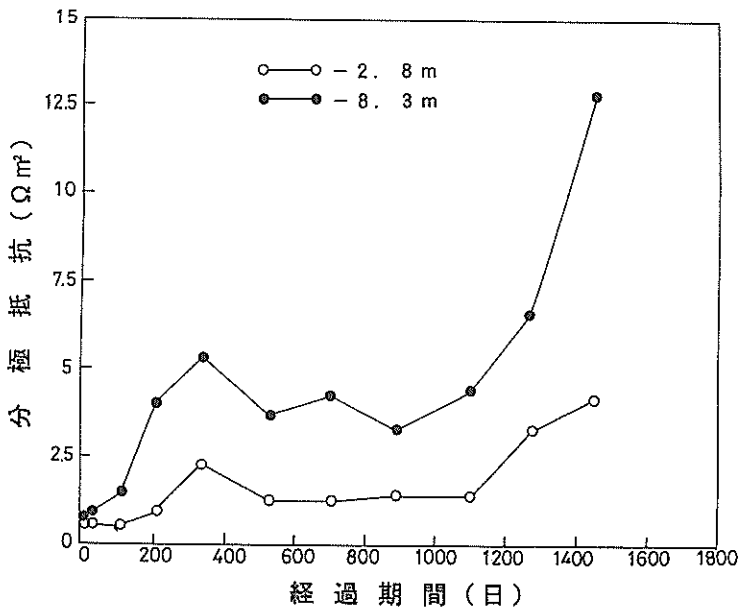


図-22 海水中試験片の分極抵抗の経時変化

e) 海水中および海泥中試験片の分極抵抗

分極抵抗 (R) は次式で求められる。

$$R = E (\text{分極量}) / I \dots (3)$$

ここで、分極量 (E) は通電前の鋼材の自然電位と通電後の鋼材電位の差 (mV) で示される。I は試験片へ流入した電流密度 (mA/m²) を示す。分極しやすい傾向は R が增大することを意味する。

図-22に海水中の試験片に対する分極抵抗の傾向を示す。-2.8mでは1100日程度までは横ばい状態であるが、1100日以降増加傾向を示している。また、-8.3mでは、おおむね900日以降までは横ばい状態であるが、900日以降増加傾向を示している。それ故、-2.8mでは1100日程度以降、-8.3mでは900日程度以降から鋼材表面が安定な状態に入ってきたものと考えられる。図-17に示した電流密度も、その頃から低減していることを考慮すると、分極抵抗が大きくなると電流密度が低減する傾向を示すことが考えられる。したがって、この時期から防食電流密度の低減を促すと考えられる鋼材表面への石灰質の皮膜の安定したものが生成されてきたものと思われる。

海泥中における各試験片の分極抵抗を整理すると図-23のようになる。海泥中の浅い-19mではそれよりも深い部分と比較して分極抵抗値は小さくなっている。しかし、海水中の分極抵抗値が1~13Ω m²程度 (図-22) であることを考えると、海泥中では2~200Ω m²と大きい値であり、海水中の環境に比べて容易に分極しやすいことが分かる。-41mでは-36mよりも分極抵抗値が小さいのは図-14に示すように土質の環境差と思われる。

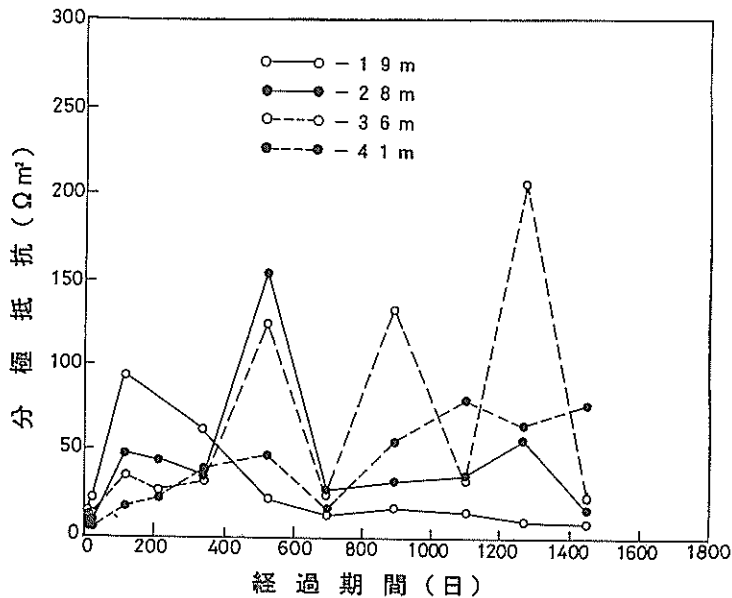


図-23 海泥中試験片の分極抵抗の経時変化

(3) 試験対象杭による試験

a) 電位分布

図-24に示すように電位は -900mV よりも卑な状態を維持し、水深方向の電位差も小さかった。測定値は1年目と2年目は逆転しているが時間の経過とともに卑な方向に移行している。特に、4年目の測定ではいずれの水深においても -1000mV より卑な値を示し良好な防食状態であった。

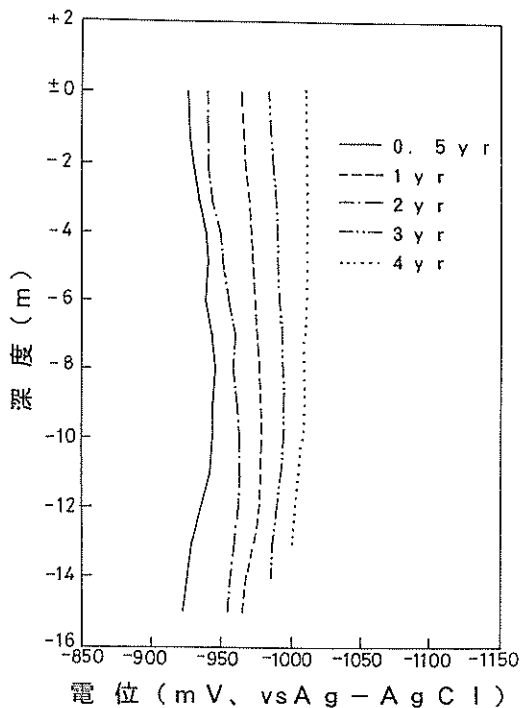


図-24 試験対象杭の電位の傾向

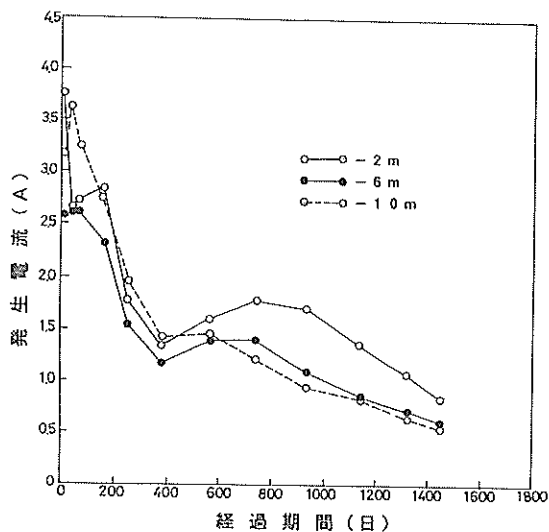


図-25 Al陽極の発生電流の経時変化

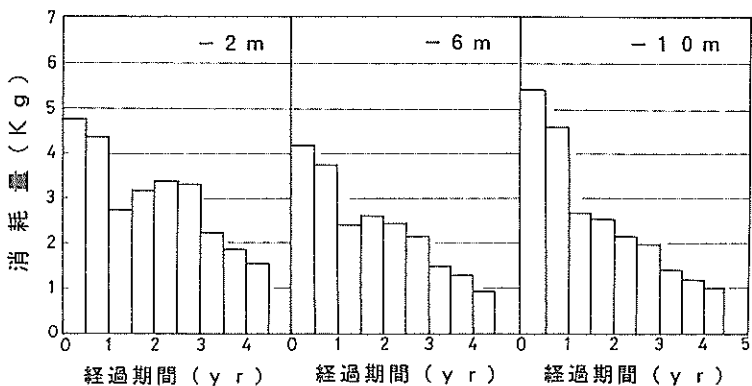


図-26 各深度におけるAl陽極の消耗量の傾向

b) A1陽極の発生電流

図-25にA1陽極の発生電流の経時変化を示す。通電開始時における各深度(-2m、-6m、-10m)に取り付けたA1陽極の発生電流(初期発生電流は3.5A)は2.6~3.8A程度と変動が大きかったが、その後380日程度まで急減している。しかし、その後、-2m、-6mでは730日程度まで増加傾向を示した。また、全般に-2mでは-6m、-10mの値よりも1.5~2倍程度大きくなっている。大きい傾向を示したのは上層部で海水の汚れが大きかったためと考えられる。1450日では、-2mで0.85A、-6mで0.61A、-10mで0.59Aと初期の値に比べて1/4~1/5に低減した。

したがって、汚染海域においては発生電流の大きい上層部に取り付けた陽極の消耗量が最も大きくなることが考えられる。陽極の消耗はいずれの深度に取り付けた陽極も平均的にバランスよく消耗することが理想的である。一部の深度が早い時期に消耗するような片寄った状態では、その電流分布に問題がでてくる。今回のように上層部の陽極(-2m位置)は-6m、-10mに比べて早い時期に消耗が考えられることから、施工の際には陽極の数量や配置および陽極の寿命に十分注意して取付けることが必要である。

各深度に取り付けた陽極の発生電流から半年毎の消耗量を推定し、経過期間との関係を図-26に示す。1年以前では-2mと-10mの位置で大きい消耗量が見られ、-2mでは4.3~4.7kgであり、-10mで4.6~5.4kgであった。1~2年では-2mで大きく2.7~3.4kgの範囲であった。しかし、その他の位置ではいずれも2kg台(1.96~2.7kgの範囲)で-2mの位置に比べて消耗量は小さい傾向を示した。3年以降では-2mで1.8~2.2kg、その他で1.2~1.5kgと低減している。-10mの1年以前を除き、いずれも-2mで消耗量は他の位置よりも大きい傾向が見られた。また、図に見られるように低減傾向は-10mでは直線的であるのに対して-2m、-6mでは山や谷の変動のある曲線で低減し、定常値に入っていく傾向を示している。特に-2mではその傾向が顕著であった。

したがって、今回のような汚染海域では、海域の水質調査等を行い上層部で大きい発生電流が必要となる場合には陽極の消耗量を考えて上、中、下層部ともに上手くバランス良く陽極が消耗するように設計の際には十分考慮する必要がある。例えば、上層部で発生電流が中~下層部に比べて1.5~2倍程度大きいので設計値を上層部と中~下層部を図-27のように分けて考えることや、図-28のように上層部に淡水の流

入があり発生電流の大きいものが必要な場合には上層部を被覆防食によって防食して中~下層部のみを電気防食する方法も経済性を考えた場合に良い方法と思われる。

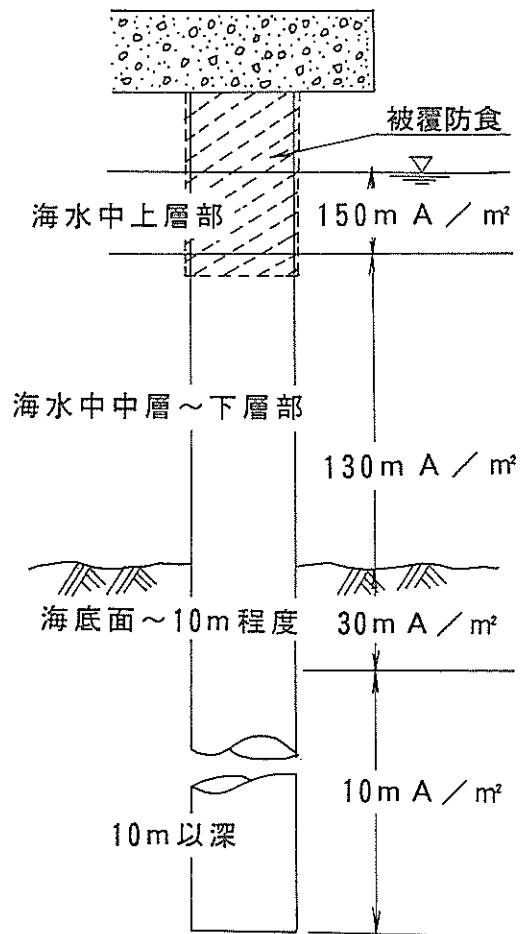


図-27 防食法の設計例

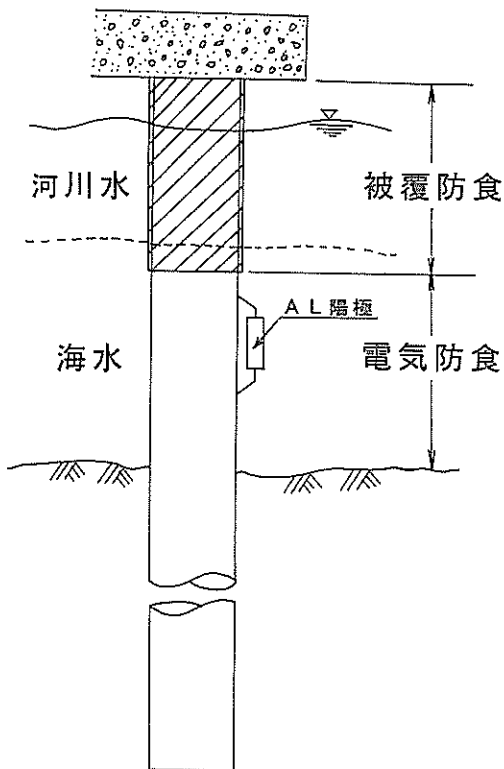


図-28 被覆防食と電気防食による複合防食

3. 4 清浄海域および汚染海域における設計電流密度の考え方

(1) 汚染指標値

港湾環境に位置する鋼構造物に電気防食を実施する際には、適切な防食電流密度や陽極の数量等を決定するための設計防食電流密度の検討がまず必要である。その方法は図-29に示す左側の実線で囲まれた条件に従い設計を行う。この際、清浄海域における海水中の防食電流密度を決定する場合には、このフローに従い海水中の電流密度を $100\text{mA}/\text{m}^2$ として設計することによって過去の実績等から考えて問題は無い。しかしながら、防食電流密度は水質に影響されることが確認され、水質の悪い場合には通常の条件よりも多くの電流が必要となる。海水が汚染海域と考えられる場合には、その水質の判定を行い水質に見合った適切な防食電流密度を設定する必要がある。しかし、従来電気防食を実施する際の防食電流密度の設計については、その場所の実績等を参考にして行ってきたために電気防食に対する清浄海域や汚染海域を判定するための指標は確立されていなかった。

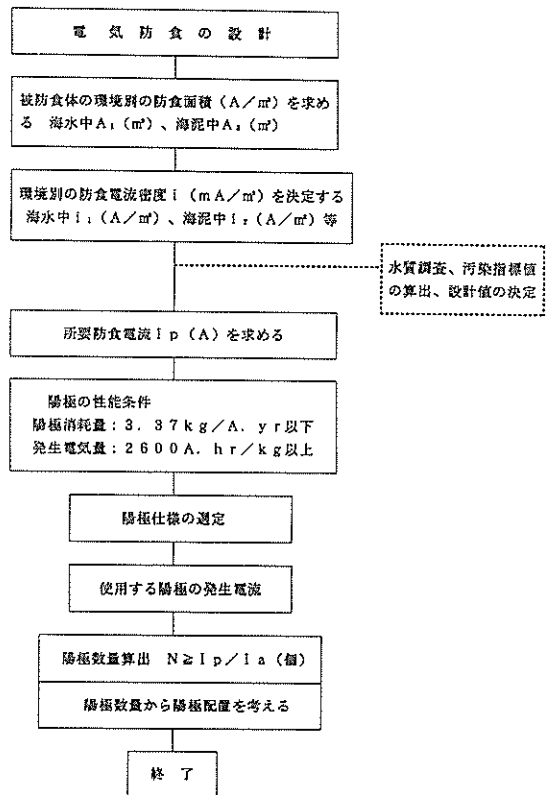


図-29 電気防食の設計手順

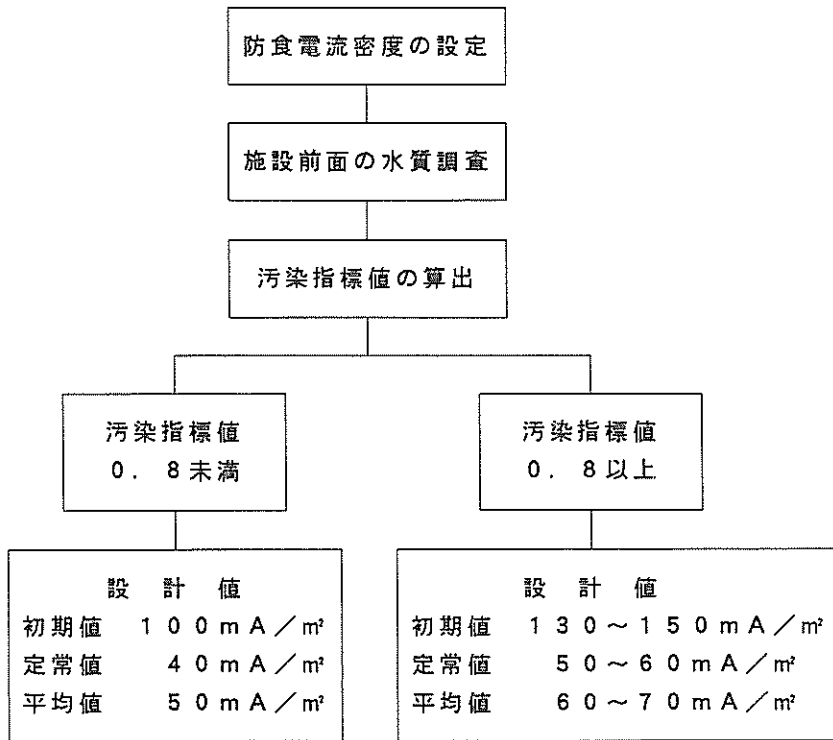


図-30 設計防食電流密度の設定方法

この清浄海域と汚染海域を判定する方法として前述した汚染指標値の事項を提案した¹⁴⁾。

すなわち、電気防食を施工する施設の前面の水質調査を行い、アンモニウムイオンと塩素イオンに着目して、次式から汚染指標値（平均値）を算出する。

$$\text{汚染指標値} = \text{NH}_4^+ (\text{ppm}) + 1 / \text{Cl}^- (\%) \dots(4)$$

既往の調査結果¹⁴⁾からこの汚染指標値が0.8未満では清浄海域とみなし、0.8以上では汚染海域と判定している。このように、汚染指標値を求めることによって当該施設への設計防食電流密度を決定するための目安とするものである。そのため、適用する適切な防食電流密度の設計を行うには図-29の右側の点線で囲った部分を実線で示す既往の設計フローの中へ取り込む必要がある。すなわち、施設の位置する海域の水質を調査し、その結果、汚染指標値が0.8未満の場合には現行の清浄海域で適用されている100mA/m²の防食電流密度で問題ないためにこの値を採用する。0.8以上では汚染海域とみなし設計値を図-30のようにとることを提案した¹⁵⁾。

また、各地域の水質調査を行い汚染指標値を算出することによって図-31のように電気防食に対する汚染指標のマップを作成し、該当する地域の汚染指標値から設計電流密度の目安を把握することも出来る¹⁵⁾。なお、水質調査が難しい場合には、例えば、各県単位で調査されている地域の水質調査結果を用いて汚染指標値を算出して判定することも可能である。

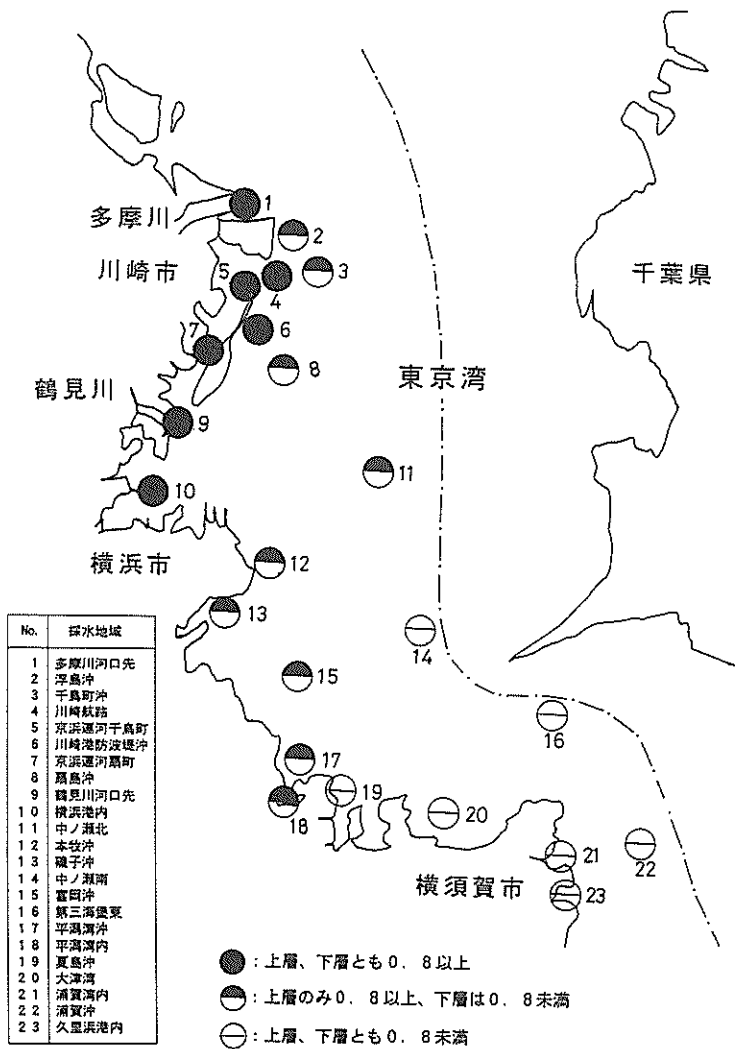


図-31 汚染指標のマップ例

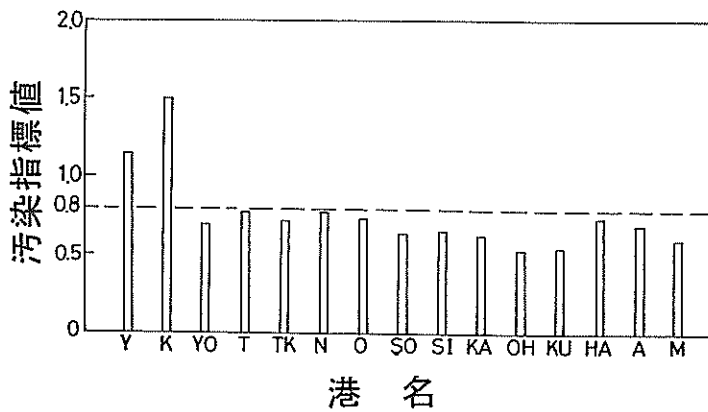


図-32 各港における汚染指標値の傾向

(2) 水質条件による防食電流密度の取り方（海水中）

阿部、吉野¹¹⁾は、設計電流密度 $100\text{mA}/\text{m}^2$ を適用している施設の電位変化と水質の条件について検討し、汚染海域では清浄海域で適用される $100\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度では十分な防食効果が期待できないことを示している。すなわち、図-32は関東および太平洋側の東北地方における電気防食を実施している港湾施設29例を選び、各港の水質調査を行い汚染指標値を求め整理したものである。また、図-33は、それらの施設の電位測定結果である。図-32からYおよびK港は明らかに0.8を越えており汚染海域と判定される。その他はいずれも0.8未満であった。図-33の電位測定結果をみると、Y、K港（汚染海域）においては電位が貴な方向に位置していることが分かる。その上、最貴電位については防食電位（ -770mV vs SCE ）を下回る値も認められる。しかし、その他の施設（清浄海域）

においては最貴電位でも -800mV より卑な値を示しており防食電位を上回っていた。したがって、汚染指標値が0.8以上の場合には現行の防食電流密度（ $100\text{mA}/\text{m}^2$ ）では清浄海域のように $-900\text{mV} \sim -1000\text{mV}$ の卑な電位を期待できないことが考えられる。

一般に汚染海域とみなせる海域の防食電流密度は、表-9¹¹⁾に示す値を採用している。このような設計電流密度を採用している場所では電位の測定結果を見ると、いずれも -900mV 程度よりも卑な値を示し、良い防食効果を示している。それ故、水質の条件によって十分な防食効果が期待できるだけの設計電流密度を適用することが必要である。

水質や環境条件によって海水中の適切な設計防食電流密度の取り方を考慮すると、図-34に示すように深度方向によって分けて設計値を考えることも必要である。

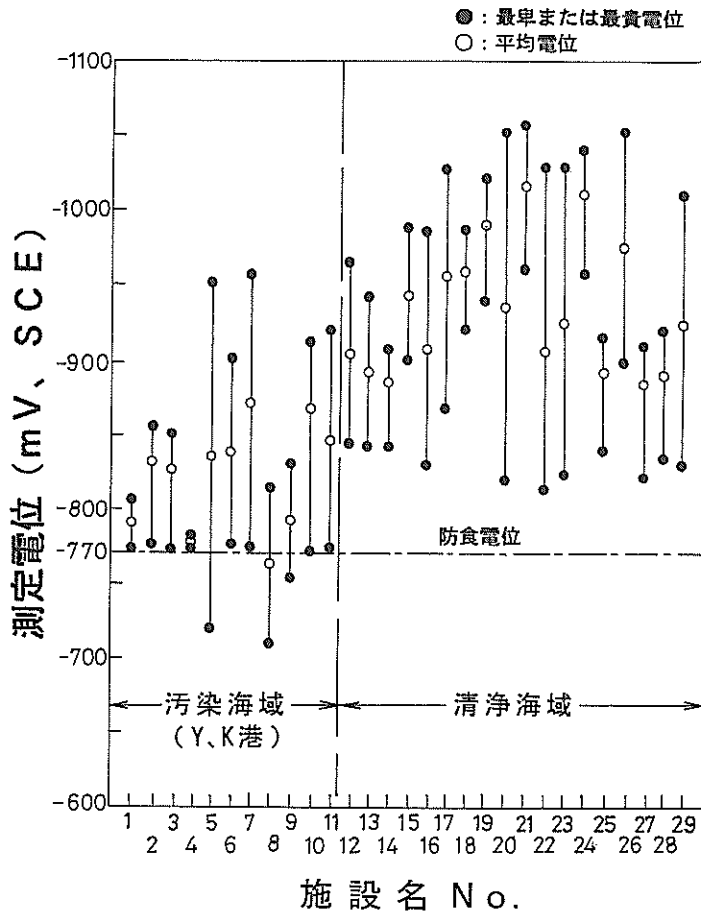


図-33 各施設における電位測定結果

すなわち、図-34の左の図(a)は汚染指標値が0.8未満で清浄海域の場合である。この場合には $100\text{mA}/\text{m}^2$ を適用することで問題は無い。しかし、水質試験の結果汚染指標値が上層部で0.8以上、中～下層部では0.8未満のような条件の場合には真ん中の図(b)のように上層部を汚染海域で適用される $130\text{mA}/\text{m}^2$ を適用し、中～下層部は $100\text{mA}/\text{m}^2$ を適用する。さらに、水質が中～下層部においても汚染がひどい場合には右の図(c)に示すように条件によって上層部を $150\text{mA}/\text{m}^2$ 、中～下層部を $130\text{mA}/\text{m}^2$ の値を適用することが望ましい。また、鋼構造物の位置する場所が河口部のような条件では、上層部に河川水や汚染水の流入が鋼構造物に作用してくる。このような環境への防食対策としては右の図(d)のように、河川水等が影響する上層部へは被覆防食を行い、それより深い部位には電気防食を行い被覆防食を併用した防食対策が望ましい。すなわち、淡水や汚染水の流入する上層部の範囲に何か耐久性の良い被覆防食を施工して中～下層部を電気防食で防食する方法である。このような防食法を適用することによって陽極の溶解量の大きい上層部を被覆防食するために経済的に有利になるものと思われる。

表-9 汚染海域における設計電流密度

港名	電流密度 (mA/m^2)
東京	130～150
横浜	130が多い
名古屋	100*
大阪	130
神戸	130

*：陽極重量を30%増し

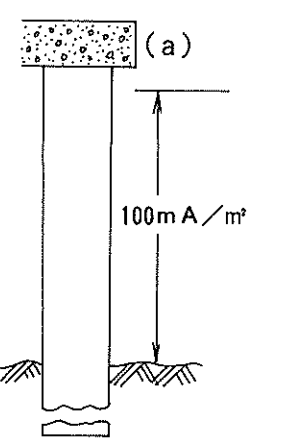
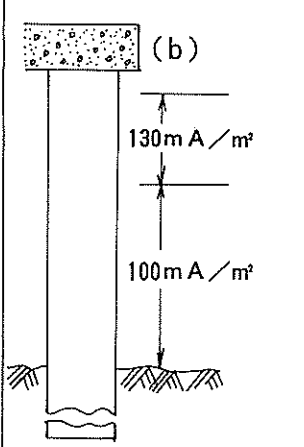
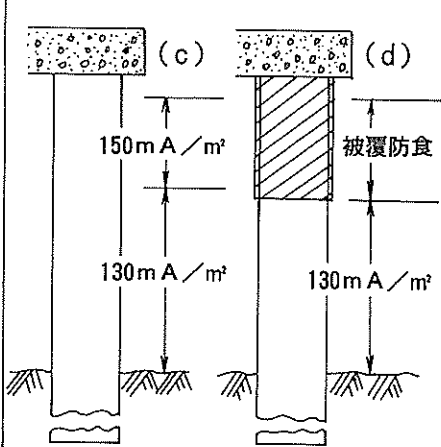
清浄海域	汚染海域 (汚染小)	汚染海域 (汚染大、河口部)
指標値：0.8未満	指標値：上層部0.8以上、 中～下層部0.8未満	指標値：0.8以上
 <p>(a)</p> <p>$100\text{mA}/\text{m}^2$</p>	 <p>(b)</p> <p>$130\text{mA}/\text{m}^2$</p> <p>$100\text{mA}/\text{m}^2$</p>	 <p>(c)</p> <p>$150\text{mA}/\text{m}^2$</p> <p>$130\text{mA}/\text{m}^2$</p> <p>(d)</p> <p>被覆防食</p> <p>$130\text{mA}/\text{m}^2$</p>
上～下層部まで $100\text{mA}/\text{m}^2$	上層部のみ $130\text{mA}/\text{m}^2$ 、 それより下は $100\text{mA}/\text{m}^2$	上層部 $150\text{mA}/\text{m}^2$ 、中～下層部 $130\text{mA}/\text{m}^2$ または上層部を被覆防食、中～下層部 $130\text{mA}/\text{m}^2$

図-34 水質および環境条件による防食電流密度の設定法

(3) 海泥中における防食電流密度の取り方

海泥中の防食電流密度は、通常、清浄海域における海水中の20% ($20\text{mA}/\text{m}^2$) あるいは汚染海域では $30\text{mA}/\text{m}^2$ としている。しかし、試験結果から海泥中における防食電流密度は深度によって防食電流密度に変動のあることが分かった。それ故、本海域では図-27に示すように海底面から-10m程度までは $30\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電流密度が必要であったが、それよりも深い場所では $10\text{mA}/\text{m}^2$ 以下で防食できることが明らかとなった。そのため、上記の値は栈橋構造等の根入れの深い条件において参考となる資料である。ただし、鋼矢板構造物のように根入れの浅い構造物には海泥中全体に対して $30\text{mA}/\text{m}^2$ で設計する必要がある。

以上、本章では試験片および試験対象杭による汚染海域における電流密度や電位の測定結果より、海水中の電流密度は清浄海域に比べて非常に大きいことがわかった。特に上層部においては中層部の1.5~2倍程度の電流密度が必要であり、陽極の発生電流も中層部、下層部に比べて大きく陽極の消費量の大きいことが推察された。そのため、A1陽極の配置等にも十分考慮する必要がある。また、本海域の海泥中の防食電流密度を整理すると、海底面から下10m程度までは設計値 $30\text{mA}/\text{m}^2$ が必要と考えられる。しかし、それよりも深い所では初期値として $10\text{mA}/\text{m}^2$ 程度で防食は可能であることが明かとなった。

また、水質調査結果から汚染指標値を算出して清浄海域か汚染海域を判定することによって防食電流密度の設計値の考え方を提案した。

4. まとめ

以上、汚染指標値が0.8以上である汚染海域における港湾鋼構造物の電気防食法の現地試験を実施して、以下に示す事項が明らかとなった。

生物付着下の防食効果に対する確認試験では、海洋生物付着下の孔食の調査や電気防食実施後の孔食の状況等について検討した。

- (1) 海洋生物の付着下に発生する鋼材表面の孔食は、無防食期間に発生する。
- (2) 通電後の孔食の進行調査や試験用鋼管による結果から、孔食が発生している状態へ電気防食を実施した場合に、防食電位 (-780mV) よりも卑な値を維持していれば腐食を防止できることが確認された。
- (3) 鋼材表面への海洋生物の付着は電気防食の防食効果には悪影響を及ぼさないことが明らかとなった。

(4) 試験用鋼管による孔食は水深の浅い部位と、付着物の付着量の多い所で多かった。

(5) したがって、孔食の発生をなくすには鋼構造物の建設直後、なるべく早い時期に電気防食を施工することが望ましい。

汚染海域や海泥中環境に対する適正な防食電流密度の検討試験では、深度方向による防食電流密度や陽極の発生電流の傾向等について検討した。

- (1) 汚染海域における海水中の防食電流密度は上層部で大きい傾向を示した。その値は清浄海域の1.5~2倍程度であった。
- (2) 本海域における海泥中の所要防食電流密度は海底面から10m程度までの範囲は $30\text{mA}/\text{m}^2$ 程度必要であるが、それよりも深い部分では $10\text{mA}/\text{m}^2$ 程度で十分防食できることが明らかとなった。
- (3) 本試験では設計電流密度を $130\text{mA}/\text{m}^2$ として設計したが、試験対象鋼管杭の電位は -900mV よりも卑な状態を示し、陽極の発生電流も十分低下していることから設計値として適切な値と思われる。
- (4) 陽極の発生電流は中層部、下層部に比べて上層部 (-2m) で大きい傾向を示した。その結果、上層部の陽極は他の深度よりも早い時期に消耗することが考えられるために、その対策が必要である。
- (5) 汚染指標に準拠した海水に対する電流密度の設計方法について提案した。

5. あとがき

電気防食に対する海洋生物付着下の防食効果、汚染海域や海泥中環境への防食電流密度の検討試験を実施し、多くの知見を得ることが出来た。ここで明らかになった研究成果を電気防食の設計に広く反映させていきたいと考えている。また、汚染海域や海泥中環境への適正な防食電流密度の試験では、現状では試験期間が4年程度であるために、本試験はここで終わらせることなく継続して調査、測定を実施していく考えである。そして、水質の変動や海底面付近の状況および海泥中への電流の流入や電位測定を行い、電位や電流が環境変化に対してどのように変動していくかを今後とも検討していくことを予定している。

最後に、本試験については横浜港埠頭公社の施設を利用させていただき、電気防食工業会との共同研究によって実施したものである。本研究を行うにあたり多くの方々にご協力いただいた。ここに関係各位に感謝の意を表します。

(1996年9月30日受付)

- 1) 阿部正美：港湾鋼構造物の集中腐食に関する研究、第38回腐食防食討論会講演集、D-210、1991。
- 2) 善 一章、阿部正美：集中腐食に対する電気防食の適用性、港湾技術研究所報告、Vol.22、No.2、1983。
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食マニュアル、1986。
- 4) 阿部正美、福手 勤、玉利昭一、星 明、戸村寿一、松田史朗、土井一幸：汚染海域における鋼構造物の電気防食効率に関する現地試験、—海洋生物付着の影響—、腐食防食'96、C-312、1996。
- 5) N.D.Tomashov:Theory of Corrosion and Protection of Metals,The Macmillan Company,1967.
- 6) W.V.Baekmann & W.Schwenk: Handbook of Cathodic Protection,Portcullis Press Ltd,1971.
- 7) G.H.Koch,J.A.Beavers & W.E.Berry:Marine Corrosion,Treaties on Materials Science and Technology,Vol.28,No.4,1988.
- 8) 伊藤伍郎：腐食科学と防食技術、コロナ社、1969。
- 9) 桑 守彦、山本郁雄、千葉丈夫、戸村寿一、野村和徳：潮間帯での電気防食鋼材面の付着生物の着生、付着生物研究 (Marine Fouling)、Vol9、1992。
- 10) 伊藤信夫、梶原 武：海洋構造物における付着生物 (第3報) —平塚市沖の波浪観測塔の生物—、海洋科学技術研究センター試験研究報告、JAMSTECTR14、1985。
- 11) 伊藤信夫、梶原 武：海洋構造物における付着生物 (第4報) —茨城県鹿島港シーバースの生物—、海洋科学技術研究センター試験研究報告、JAMSTECTR14、1985。
- 12) 阿部正美、福手 勤、玉利昭一、星 明、戸村寿一、松本洋祐：汚染海域における鋼構造物の電気防食効率に関する現地試験、腐食防食'95、A-201、1995。
- 13) 横井聡之、阿部正美：電気防食調査に基づく防食電流密度の検討、港湾技術研究所報告、Vol.25、No.1、1986。
- 14) S.N.Smith and H.R.Hanson:Desing of Cathodic Protection for Deep-Water Offshore Structures,Corrosion,No.75,1987.
- 15) 阿部正美、吉野朗宣：港湾鋼構造物の電気防食に対する汚染海域への防食電流密度の検討、腐食防食'95講演集、A-204、1995。
- 16) 阿部正美：港湾鋼構造物の電気防食法に関する現地試験、平成7年度港湾技術研究所講演会講演集、1995。

1. 港湾鋼構造物における電気防食の歴史

電気防食の始まりは、1824年にSir Humphrey Davyが銅の腐食を実験室的に調べていて、銅に鉄または亜鉛を接触させることによって銅が保護されることを見だし、このアノードを用いたのが始まりとされている。

わが国の港湾施設に電気防食が初めて施工されたのは、1952年に、運輸省第三港湾建設局尼崎港工事事務所の港湾施設 (開門、鋼矢板) である。この当時の防食方式は主に外部電源方式が採用されている。その主な理由は大規模な鋼構造物では、流電陽極方式と比較して経済的に有利であると考えられていたためである。

流電陽極方式の陽極材としてMg陽極、Zn陽極が主に用いられていたが、これらの材料ではアンペア・アワー当たりの価格が外部電源方式に比べ、割高となるため小規模の施設 (ドルフィン等) に用いられているだけであった。しかし、1961年頃、船舶のバラストタンクに使用されていたAl陽極の優れた性能が着目され、Al陽極 (流電陽極方式) の港湾施設への適用が検討されはじめた。1960年代半ばまでは、外部電源方式が主流であったが、高効率で性能の良いAl陽極 (発生効率2300Ah/kg以上) が開発され、その上、施工方法の改良も検討された。その結果、港湾施設の電気防食は維持管理費が少なく、かつ、耐久性に優れたAl陽極を用いた流電陽極方式が主流となり現在に至っている。その間、高効率 (2600Ah/kg) のAl陽極が世界各国で開発され、現在でも開発が進められている。また、1970年頃より水中溶接法の開発が行われて鋼材への陽極の取付施工等に水中溶接が採用され、工期が大幅に短縮された。その当時のAl陽極の寿命は10~20年ものが多かったが、最近では40~50年の長寿命陽極も設計されるようになってきている。

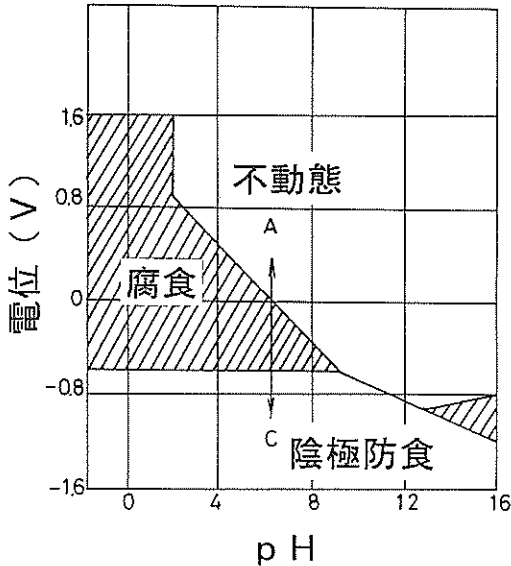
2. 電気防食法の原理

鋼材は水中、土中の環境条件や表面状態の変化等によって、鋼材の表面に無数の電位の不均衡が生じて腐食が発生する。電気防食の防食方法は付図-1に示すPourbaixの簡略化した鉄の電位とpHの関係図より説明出来る。

この図から電気防食を考えると、電気防食法は二つに分けられる。一つは鋼材の電位をA部に保持して、金属表面を不動態化させる方法である。この電気防食法を陽極防食と言う。また、別の方法は鋼材の電位をC部の金属の安定領域に電位を保持する方法であり、この方法を

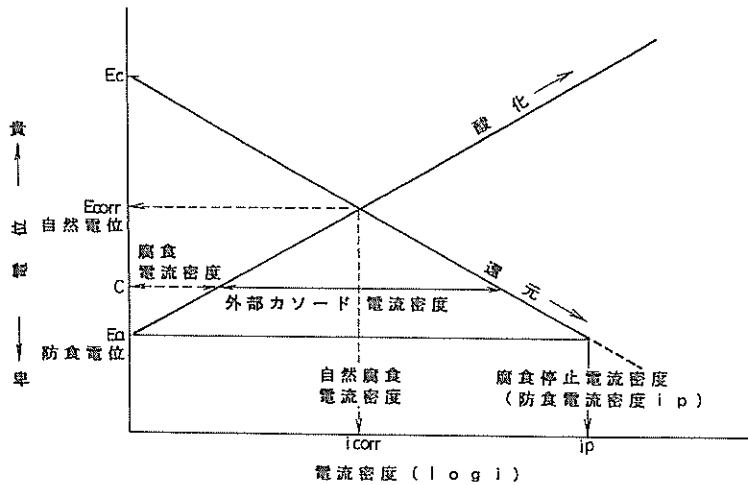
陰極防食と言う。しかし、鋼材の電位をA部に保持する陽極防食は電位を保持するためのコントロールが非常に難しい点があり、実際にはあまり適用されていない。一般には鋼材をC部に維持する陰極防食を電気防食と呼んでいる。

電気防食は、腐食機構に基づき直流電流によって鋼材表面の局部電池の陰極と陽極の電位差を消滅させる方法である。



付図-1 鉄の電位、pH図

付図-2に示すように腐食している鋼材の電位はアノード部 (E_a)、カソード部 (E_c) と分かれているが、アノード部、カソード部が電氣的に短絡されているので腐食電池を形成して、自然電位 (E_{corr}) でバランスをとっている。この時点で腐食電流 (i_{corr}) がアノード部からカソード部へ流れアノード部が腐食している。このアノード部の腐食を停止させるには、アノード部、カソード部のいずれかをなくすことにすれば腐食電池が形成されず腐食は起こらないこととなる。すなわち、カソード電位 (E_c) をアノード電位 (E_a) まで分極するように外部から電流 (i_p) を流すことにすれば腐食は停止する。 i_p が電気防食を達成させるに必要な所要防食電流であり、また、 E_a が所要防食電位である。すなわち、腐食電流を消滅させるだけの電流を外部から与えることによって腐食は停止する。これが電気防食の原理である。



付図-2 電気防食の概念図

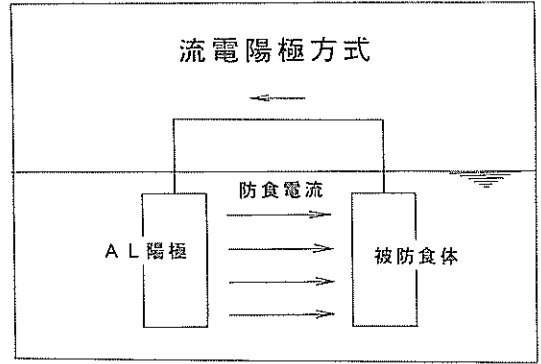
3. 電気防食法の方式および防食基準

電気防食の方式には、前述したように外部電源方式、流電陽極方式の二つの方式がある。外部電源方式は付図-3に示すように直流電源装置と補助陽極が必要である。電気回路は直流電源装置の(-)側に鋼材からの端子を接続し、補助陽極の端子を直流電源装置の(+)側に接続する。直流電源装置より防食電流を流出し、補助陽極(電極)を通して鋼材へ防食電流が流入する。その結果、鋼材が防食されることとなる。

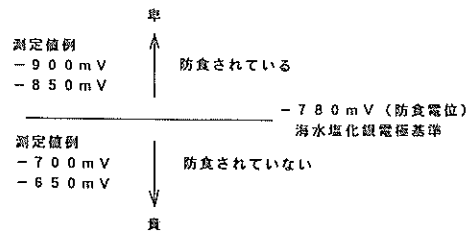
流電陽極方式は防食する鋼材を陰極にして、鋼材よりも電位が卑な金属を陽極として電池を完成させ、両極間の電位差によって防食電流を流す方法である。その概要を付図-4に示す。陽極は溶解して防食する金属の犠牲となるために犠牲陽極方式とも言われる。鋼材に対する陽極材としては亜鉛、アルミニウム、マグネシウム等の合金が用いられる。このうちAl陽極が一般に港湾鋼構造物に適用されている。

なお、港湾鋼構造物への電気防食の方式は、現在では100%流電陽極方式(AI陽極)によっている。

一般的な防食基準は、付表-1および付表-2に示すように防食電流密度と防食電位によって、その基準を決めている。電気防食の防食効果の判定は、電気防食を実施している鋼構造物の電位を測定することによって評価できる。例えば、付表-2における各基準電極の防食電位が決められているが、付図-5に示すように、その値(防食電位)より測定値が卑な値を示す場合には、その鋼構造物は電気防食による防食効果があると判断できる。また、海水が汚染されている場合には、防食電流密度は清浄海域で適用されている $100\text{mA}/\text{m}^2$ の20~50%増しにするように言われている。



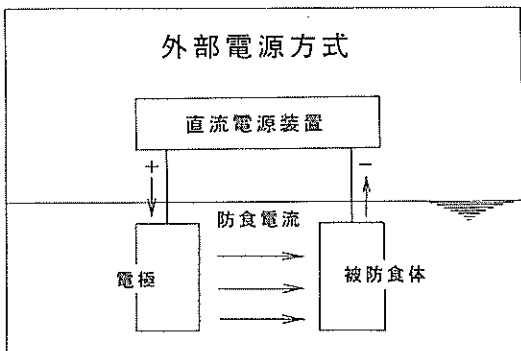
付図-4 流電陽極方式の概念図



付図-5 防食効果の判定法

付表-1 電気防食の防食電流密度

環境	防食電流密度
海水中	$100\text{mA}/\text{m}^2$
石積部	$50\text{mA}/\text{m}^2$
海泥中	$20\text{mA}/\text{m}^2$



付図-3 外部電源方式の概念図

付表-2 電気防食の防食電位

防食電位	照合電極
-770 mV vs S. C. E.	(飽和甘こう電極基準)
-780 mV vs Ag / AgCl	(人工海水銀塩化銀電極基準)
-850 mV vs Cu / CuSO ₄	(飽和硫酸銅電極基準)

港湾技研資料 No. 852

1996. 12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research
Institute Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright ©(1996)by P.H.R.I

All right reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of. P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。