

土木研究所資料

電気防食の設計法に関する研究

—— 海域鋼構造物への電気防食の適用の現状と課題 ——

昭和56年3月

建設省土木研究所
地質化学部 化学研究室

Copyright © 55年度 by P.W.R.I.

All rights 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 of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

ま え が き

海域における土木構造物は、潮風や海水飛沫の海水などにたえずさらされる過酷な腐食環境にある。しかも、近年、海域に構築される土木構造物は大型化しておりしかも恒久的構造物となる傾向があるためにいっそうその防食対策を考慮しなければならなくなってきた。

さて、電気防食法は海水没水部や海岸土中部での鋼材の腐食に最も適する防食法のひとつである。しかしこれまでその適用は、護岸工事・プラットホーム・船舶等であって、土木構造物のための設計基準等公的規格は無い現状である。

そこで、土木構造物を対象として新しく、電気防食設計・施工指針を作成する必要性があり、現在、指針を作成するための技術資料を得るための各種実験を、建設省土木研究所と財団法人土木研究センターとで共同研究を進めている（電気防食の設計法に関する研究）。

本資料は、共同研究の活動の一部として、電気防食技術の現状についてとりまとめたものである。

目

次

I 電気防食の現状	1
1. 海岸および海域での鋼材の腐食傾向	1
2. 電 気 防 食	2
(1) 電気防食方法と効果	2
(2) 電気防食の設計	4
3. 電気防食に関する規格および基準	5
4. 特定海域における電気防食	10
(1) 埋立地と汚濁海域	10
(2) 高潮流下の海域	11
(3) 波浪等，高印加応力の海域	12
5. 新しい電気防食技術	13
(1) 鉄筋コンクリート構造物への電気防食	13
(2) 塗装を併用した電気防食	15
6. 電気防食の維持管理（モニタリング）	17
7. 電気防食方式の種類と比較	19
8. ま と め	20
II 電気防食の課題	23

I 電気防食の現状

1. 海岸および海域での腐食傾向

海岸には、埋立地を含む。腐食の観点からすれば海域は、海洋大気中、飛沫帯、干満帯、海中部、海底、土中に分けることができる。

よく知られているように、海域での鋼材は陸上環境よりはるかに激しい腐食をうけるが、その中でも、最も腐食傾向が著しいのは、飛沫帯と干満帯である。海中部では、これらに較べると、腐食傾向はやや小さくなるが、それでも年間平均腐食速度はほぼ 0.2 mm/y といった激しい腐食を生ずる。しかも、これらの数値は平均値で、孔食の生じた場合はこの数倍に達することもある。実際の構造物の大部分は、水中部、土中部にあることから、この部分の防食対策はきわめて重要である（図1）。

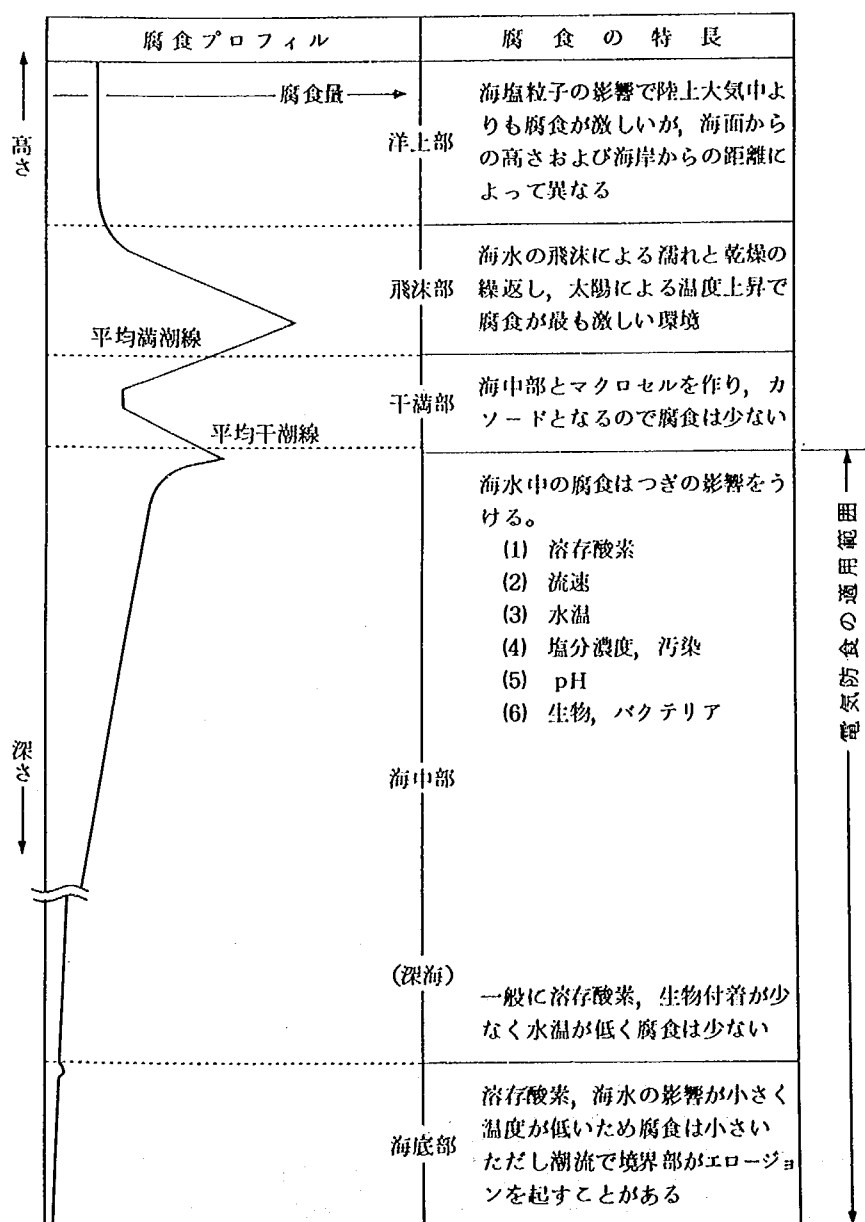


図1 海洋構造物の腐食形態と特長

さて海中部と土中部での防食方法には表1に示すものがあり、またこれらを併用して使用する場合もある。なかには、防食されないままの構造物もあるが、土木構造物の重要性およびそれらに期待される長寿命の観点から防食は不可欠であろう。

電気防食は既設構造物に対しても施工可能で、比較的長寿命であること、船舶、パイプライン、機械装置などの分野においての実績があることなどから、このような環境において最も期待できる防食法である。

表1 海中部および土中部における各種防食法の比較

	海 中 部		海 岸 土 中 部	
	新設構造物	既設構造物	新設構造物	既設構造物
塗 装	○	×	○	×
ライニング	○	△	○	×
コンクリート巻	△	×	△	×
耐食性金属被覆	△	×	△	×
電 気 防 食	◎	◎	◎	◎

◎施工可能有効

○施工可能かなり有効

△施工可能あまり効果的ではないが
経済的に得策でない

×施工不能

2. 電 気 防 食

(1) 電気防食方法と効果

海水中および海土中の鋼の腐食が電気化学反応であることから、水中から鋼へ積極的に微弱な電流を流入させることによって、腐食を基本的に抑制する原理に基づくものである。海洋環境で電気防食を施工した場合、陰極表面上にCa, Mgを主としたスケールが生成する。この電解被覆をエレクトロコーティングといい、 CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, MgCO_3 , FeCO_3 などからなる。このコーティングは電気防食特有のもので、防食上および防食維持電流の減少に有利である。

実際には、電流を流入させる方法として、外部電源法と犠牲陽極法との2つの方法が現在広く行なわれているが原理的には全く同一である(図2)。

しかし、設計、電極の種類、その配置、施工、維持管理などの面で事情が異なることから、国内においては犠牲陽極方式が圧倒的に実績を有し、外国(英国、米国など)においては外部電源方式が多く、技術的蓄積を有しているが、最近では大型のドリリングプラットフォームなどで犠牲陽極方式の適用例が増加している。外部電源方式と犠牲陽極方式のいずれが有利であるかの判断を下すことは実際の設計に最も重要な選択のひとつであるがまだ定まったルールはない。各々の長所および短所は一般には表2のようであるとされる。

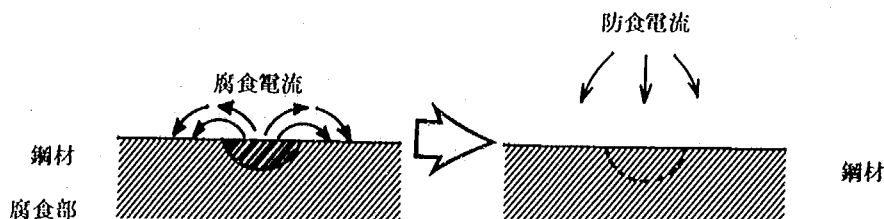


図2(1) 電 気 防 食 の 原 理

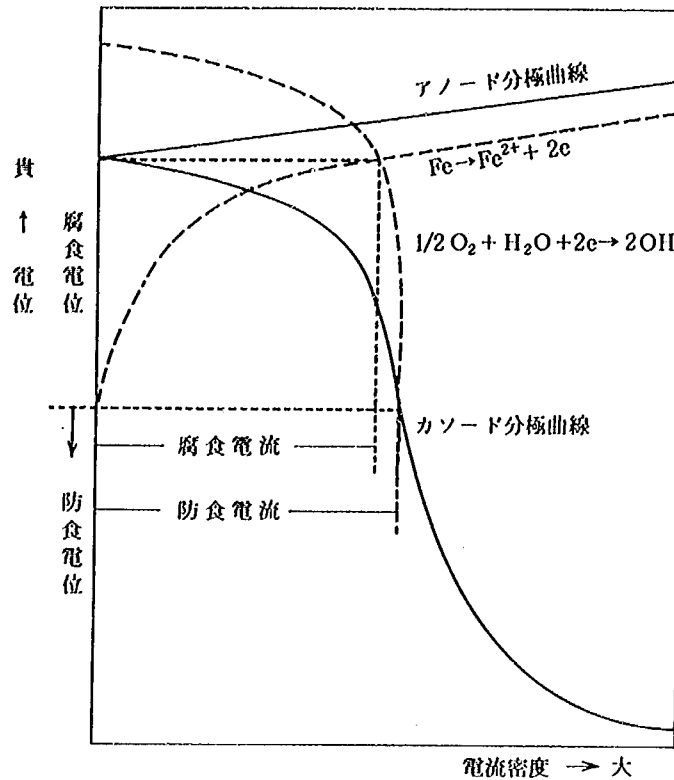


図2(2) 陰極防食の原理

表2 外部電源方式と犠牲陽極方式の比較

犠 牲 陽 極 方 式	外 部 電 源 方 式
電源を得られない場所に適用できる。 維持電力費不要。 小規模の施設では費用が安くすむ。 比抵抗の高いところでは費用が高価となる。 陽極寿命が比較的短く取替えを要する。 隣接構造物に干渉を与えるおそれが少ない。 防食電流の調整がほとんどできない。 維持管理が簡単である。	電源を得がたい場所では実施困難である。 維持電力費を要する。 大規模の施設でも比較的費用がかからない。 比抵抗が高くても容易に防食電流を流せる。 防食装置の寿命が長く長年月、取替えを要しない。 隣接構造物に対する干渉防止対策を考慮せねばならない。 防食電流の調整が可能である。 維持管理を要する。

表3 各種構造物に対する電気防食適用状況

分類	構 造 物	回答総数 (A)	電気防食数 (B)	B/A (%)	流電陽極	流電+外電	外部電源	塗 装 併 用	
								流 電	外 電
1	リグ及びプラットフォーム	21	13	62	4		1	8	
2	シーバース及び繫留ブイ	46	41	89	17	6	7	10	1
3	海中展望塔・アクアボリス他	6	4	66.6	1			3	
4	観測塔・灯標・ブイ	15	5	30	3		1	1	
5	海底パイプライン	※ 26	26	100				5	21
6	沈埋トンネル	4	3	75	1				2
合 計		※ 118	92	82.7	26	6	9	27	24

※シーバースに含まれている海底管は海底パイプラインの項目に追加した。

国内における各種構造物についての電気防食の方式別適用状況についての調査結果がある（表3）。

この表によれば、大部分の海域構造物はほとんど犠牲陽極方式（それもAI陽極を使用）であることが分かる。この理由は、犠牲陽極方式の場合、施工が容易なことと保守管理が殆んど不必要なこと、システム自体の故障がないことによるもので、AI陽極を利用すると、経費と寿命の点で一般的に有利とされるためである。けれども、この方式はシンプルである反面、人為的な調整、調節が不可能なだけに、環境の大きな変化に対し即応できない不利な点がある。

現在予想される海域土木構造物においては、沖合の清浄な海域に設置されることは稀であり、その多くは人口や工場の密集した都市に接する内海、湾や河口などに設置され、しかも、多数の人命に関わるだけに高度の耐久性を長期に亘って求められることになる。このような観点からすれば、在来の防食技術、防食設計方法、考え方をそのまま踏襲できるかは疑問である。

電気防食についての意見についての調査結果を表4に示す。

表4 電気防食についての意見（空欄は回答なし）

※対象分類		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
（機能と効果）	良好である		41	1	1		2	故障多い							不 明	3			2		1
（維持費）	安 い		23	1	1		3	高 い		2			1		わからない	3	2		1		
（記録書類）	あ る		34	1	1			な い	2			2			わからない	1			1		3
（防食担当者）	い る		30	1				いない	2			3			不明確		2		1		3

※表3の構造物分類に該当する。

このうち、効果が不明との答が土木構造物を対象にする場合に比較的多いのも、このような疑問点と併せて考える必要がある。たとえば、沈埋トンネルの土中における電気防食効果、明石海峡のような高潮流海域での防食効果、埋立地での鋼杭の防食効果などがある。また、構造物の寿命に見合った長期の防食技術が確立されているとは言い難い。

このような未解決の問題が残されているが、電気防食の効果については多くの報告がある。たとえば適切に電気防食を行なった場合には、鋼材の腐食量は非防食の場合の1/10以下になる。腐食量が小さくなるだけでなく、構造物にとりわけ有害な局部腐食（応力集中を受けやすくなる）を消滅させる効果もまた大きい。また、前述の如く既設、新設構造物に対しても施工が可能で、海域での海水中部、土中部で多少の問題は残されているが、電気防食の効果が認められている。

土木研究所で行なった東京湾内での鋼管杭の電気防食試験結果でも図3のような良好な結果が得られている。

(2) 電気防食の設計

土木構造物は多種多様であり、鋼矢板岸壁、鋼杭栈橋、ドルフィン、ブイなど港湾施設に属するもの、橋脚、沈埋函トンネル、浮防波堤、海上空港、洋上台場などがあるが、防食設計に当ってはこれら防食対象物について、次のような点を明らかにする必要がある。

- 1) 防食対象物の構造、設置位置、面積
- 2) 防食対象物への防食被覆の有無

塗覆装，有機ライニング，モルタルライニングなどの種類，厚さおよびこれらの有効寿命

3) 腐食環境

海水，土壌の pH や比抵抗率，汚濁の程度，流速など

上記の条件に基づいて，電気防食の設計に必要なデータとして次の項目を決定する必要がある。

1) 水，土壌の比抵抗率

2) 防食電流密度（初期および維持防食電流密度）

3) 防食寿命（犠牲陽極方式のみ必要）

次に犠牲陽極方式について設計手順を示す。

1) 防食対象面積の算出

防食条件が異なる部分別に面積を算出する。海水表面では十分な防食効果が及ぶのは M. W. L（平均潮位）までであるが，電流は M. W. L 以上にも流入するので，M. W. L までの面積と M. H. W. L（平均満潮水位）までの面積に大きな差を生じる場合は，これらを考慮する必要がある。

2) 防食電流の算出

防食条件別に算出した各々の面積に初期防食電流密度をかければ所要防食電流が得られる。

3) 所要犠牲陽極の個数および配置

上記した所要防食電流を犠牲陽極の発生電流で割れば，所要犠牲陽極の個数が求められる。陽極発生電流は，陽極接水抵抗，犠牲陽極と防食対象物との間の有効電位差および実測から求めたものであり，干渉作用のため，取付数が少なくなれば増加し，取付数が多くなれば減少する。

犠牲陽極配置は，できるだけ防食対象に均等に配置し，最も電位の悪い部分と最も良い部分との差をできる限り小さくする考慮が必要である。

4) 陽極の取付方法

海域の波浪状況，流速などを考慮し，十分な強度を保ち得るような取付方法を採用する。例えば，犠牲陽極の芯金の取付金具を直接，防食対象に水中溶接にて取付ける工法が主体であるが，その他の工法として犠牲陽極の芯金に丸鋼を溶接し，フックシャツクルで吊り下げたりする工法もある。

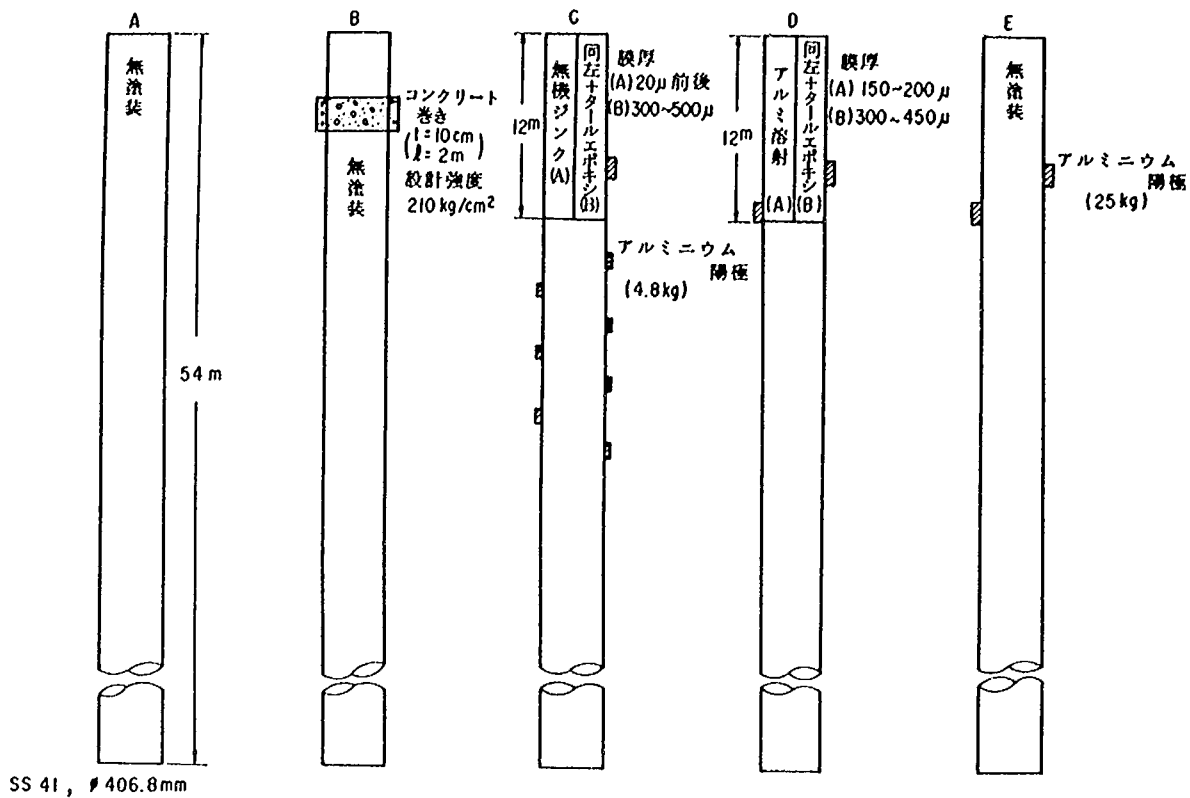
外部電源方式の設計も犠牲陽極方式とほぼ同様であるが，直流電流の供給源としての整流器とケーブルおよび耐久性の電極が必要である。

3. 電気防食に関する規格および基準

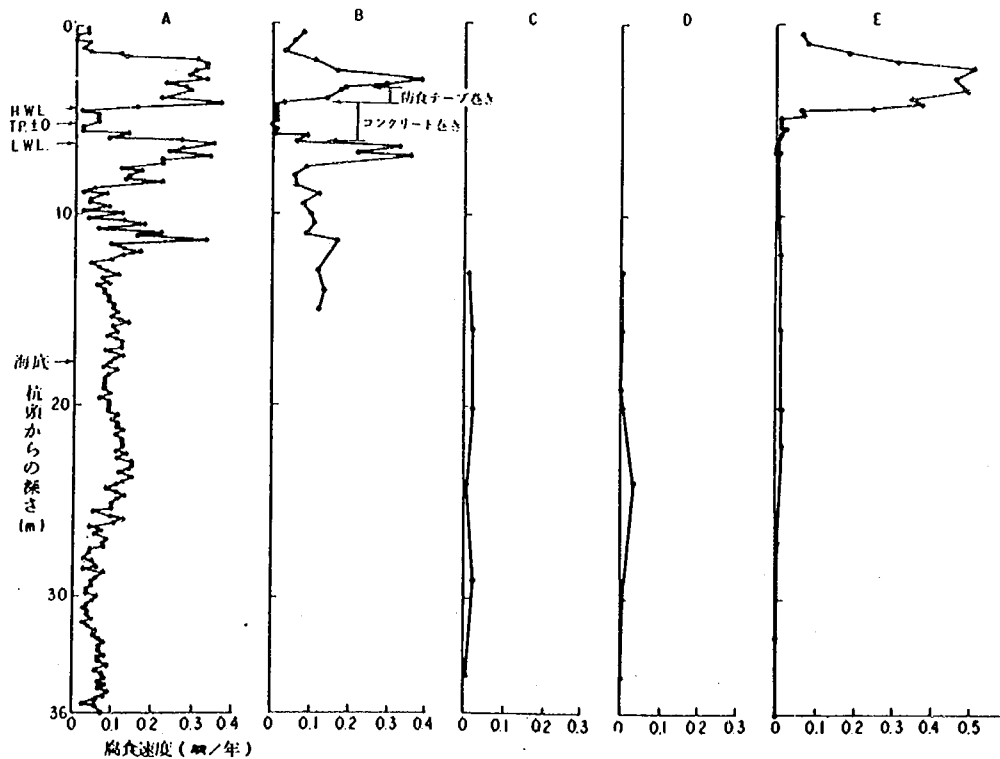
我国における電気防食に言及した公的基準としては，電気事業法（昭和39年法律第170号）に規定されているが流電陽極方式による電気防食については規定しておらず，主に外部電源方式の安全性のために電気防食施設について規定しているために今回対象とする土木海域構造物の電気防食に関する設計基準としては役立たない。

我国の港湾構造物の電気防食に係る基準としては，運輸省港湾局，港湾建設局，港湾技術研究所編集による港湾構造物設計基準（昭和42年発行）の第3編2.5「防食」に規定されている。

まず，2.5.1において港湾における鋼材のこれまでの一般的な腐食速度が示されている。これによると，



(1) 試験杭



(2) 超音波厚さ計による測定結果

図3 東京湾内での鋼管杭の電気防食試験結果 (建設省土木研究所)

港湾における腐食環境別に示されており、「海水中においては、H. W. L 以上で 0.3 mm/Yr, H. W. L と海底間で 0.2 mm/Yr, 海底泥層中で 0.05 mm/Yr, 土中においては、残留水位以上で 0.05 mm/Yr, 残留水位以下で 0.03 mm/Yr となっているが、場所によってはこれらの値以上になることもあり得るので注意しなければならない」としている。

次に、2.5.2において電気防食法に関して規定している。「適用範囲としては M. W. L 以下」と規定している。そして、防食達成の基準としては防食電位で規定しており、「飽和甘コウ電極基準で -770 mV , 人工海水塩化銀電極基準で -780 mV , 飽和硫酸銅電極基準で -850 mV の防食電位に管理することを標準としなければならない」としている。しかしながら、この基準においては防食電流密度に関して規定していない。

その他のものとしては、運輸省港湾局編集による港湾工事共通仕様書（昭和51年発行）がある。これでは、17章4節「防食」において電気防食に関して規定しており、流電陽極方式による電気防食について取扱っている。

主なこととしては、「電流密度及び耐用年数は特記仕様書の定めによる。陽極の材質は原則として電気防食用アルミニウム合金とし、陽極の効率は80%以上」などを規定している。防食達成の基準は前記した港湾構造物設計基準とまったく同様に防食電位によって規定し、それぞれの電極基準による値もまったく同じである。

以上、国内における港湾構造物の電気防食に係る2つの基準について述べたが、どちらも防食電流密度については規定していない。しかしながら、前にも述べた如く電気防食を実施するに当たっては、防食電流密度を決定することはひじょうに重要なことである。従って、今後は防食電流密度に関する基準の作成が急務となり、必要になるものと思われる。

一方、外国における海域構造物の電気防食に関する4つの基準を述べる。

米国においては、NACE Standard RP-01-76「石油掘削用鋼製固定式プラットフォームの防食」に規定されている。この基準は、海域構造物が暴露される環境を大気中、飛沫帯、海水中の3つに分け、海水中における電気防食に関して規定している。

まず、電気防食における防食達成基準としては、第4節「電気防食基準」に述べており、

「(1) 海水中における構造物の電位は、塩化銀電極基準で少なくとも -0.8 V より卑とする。この電位は、防食電流を流して測定する。

(2) 防食電流を流すことによって、最小の卑への電位変化を 300 mV とする。この電位変化は、塩化銀電極基準で測定する。」

の2つを挙げており、防食電位としては、「飽和硫酸銅電極基準で -0.85 V より卑の電位、高純度亜鉛電極基準で $+0.25\text{ V}$ より卑の電位であること」としている。また、「塩化銀電極は海水の比抵抗に影響を受けて電位が変化する。一般的には、海水の比抵抗を $20\ \Omega\text{-cm}$ として防食電位を規定しているが、海水の比抵抗が $100\ \Omega\text{-cm}$ となる場合には、塩化銀電極基準では防食電位が -0.83 V となることを注意しなければならない。しかし、他の照合電極においては変化はない」ことを注意事項として述べている。

電気防食を実施するときの設計基準としては、第5節「電気防食装置の設計」において規定されており、

海水中における代表的な防食電流密度は、世界における6つの代表的な場所から求めている。これを表5に示す。これによると、「海水中における防食電流密度は $5 \sim 15 \text{ mA/ft}^2$ ($54 \sim 161 \text{ mA/m}^2$)」としている。一方、「海土中における防食電流密度は $1 \sim 2 \text{ mA/ft}^2$ ($11 \sim 22 \text{ mA/m}^2$)」としている。

表5 電気防食システムの設計基準

	環 境 因 子 ⁽¹⁾				設計電流密度 ⁽²⁾	
	比 抵 抗 ($\Omega\text{-cm}$)	水 温 ($^{\circ}\text{C}$)	波 浪 作 用	潮 流	(mA/ft^2) ⁽³⁾	(mA/m^2)
メキシコ湾	20	22	中	中	5 ~ 6	54 ~ 65
アメリカ西部海岸	24	15	中	低	7 ~ 8	76 ~ 86
アラスカ湾入江	50	2	低	高	35 ~ 40	380 ~ 430
北 海	26	12	高	中	8 ~ 15	86 ~ 162
ペルシャ湾	15	30	中	低	7 ~ 10	76 ~ 108
インドネシア	19	24	中	高	5 ~ 6	54 ~ 65

(1) 河口から離れた平均的条件に基づいた代表的数値。

(2) 通常の海水中では、表中の設計電流密度によって分極が達成し、石灰質皮膜が形成すると、構造物を防食電位に保持するには設計値より小さい電流密度で十分である。(注意) 暴風雨で復極を生ずることがある。

(3) $1 (\text{mA/ft}^2) = 10.8 (\text{mA/m}^2)$

英国では、BSI (British Standards Institution) の CP 1021 「電気防食のための実施要綱」に規定されている。

まず、電気防食における防食達成基準としては、第2章2.3.2「電気防食基準」に述べられている。ここでは、防食電位によって規定している。これを表6に示す。この表6については、「電解質に対する金属の電位が表6に定められた値またはそれより負な状態が続けば電気防食は完成される。また、電位はすべて0.05 Vの倍数で表わしているが、電解質が海水の場合のそれぞれの電極の値は、海水がきれい、希釈されておらず、溶存酸素が十分である場合の正しい値である。そして、特に鉄および鋼の電位は表6の値に分極させることが必要である」と述べ、注意を勧告している。

第6章においては、船舶を除く浸漬構造物つまり鋼杭、鋼橋、ムアリング、ドルフィン、荷役ドルフィン、鋼矢板、採油プラットフォーム等の海域構造物の電気防食の設計基準について規定している。

まず、防食電流密度としては、「防食電流密度は、 $0.25 \Omega\text{-m}$ の比抵抗を有する海域における裸の鋼杭のような構造物において、水中部で最大 100 mA/m^2 の初期平均電流密度を必要とし、長期間のうちには石灰質の沈殿物が形成されるために、この値は $30 \sim 70 \text{ mA/m}^2$ に低下するであろう。さらに、杭の土中部ではその環境により、通常 $10 \sim 30 \text{ mA/m}^2$ の値が要求される。」と述べ、そして、「電流密度に対して影響を与え

表6 防 食 電 位 [V]

金 属 ま た は 合 金	照 合 電 極			
	硫 酸 銅	海 水 塩 化 銀	飽 和 KCl 塩 化 銀	亜 鉛
鉄および鋼 a) 好気性環境	-0.85	-0.8	-0.75	+0.25
	-0.95	-0.9	-0.85	+0.15
鉛	-0.6	-0.55	-0.5	+0.5
銅 合 金	-0.5 ~ -0.65	-0.45 ~ -0.6	-0.4 ~ -0.55	+0.6 ~ +0.45

る主要因子としては、流速、塩分、温度があり、河口付近では水の移動のため高電流密度が必要である。また、特に淡水によって海水が希釈され、2種類の水が層になっている場合には、電流の分布を変えることもある。」と述べ、注意が必要である。さらに、「平均潮位面以下の杭を被覆している場合には、使用する被覆の種類および使用中に受ける損傷の程度によって所要電流がかなり減少する。たとえば、コールタール/エポキシを円筒形の鋼杭に0.2 mmの厚さで適用したとき、水中部と土中部を完全に防食するためには、全体で約5 mA/m²の電流密度を与えればよい。しかしながら、被覆は時とともに劣化するので、電気防食装置は適当な余裕をもって設計すべきである。」としている。

次に、ノルウェー船級協会による電気防食基準が挙げられる。この基準は、腐食環境を大気中、飛沫帯、海水中の3つに分け、「一般的には、流電陽極方式あるいは外部電源方式による電気防食がすべての海底パイプライン、その立上り部分と立上り部分を保持する部分には必要である。」と述べている。

電気防食の防食達成基準としては、第6節6.4.2「装置の設計」に述べられており、「鉄鋼においては、塩化銀電極基準で少なくとも-0.80 Vより卑の電位でなければならない。他の照合電極を使用するときでも、塩化銀電極基準に換算した電位に等しい。嫌気性状態にパイプラインが埋設されているときには、塩化銀電極基準で-0.90 Vより卑の電位とする。」としている。所要電流密度については、「それぞれの環境によって選択すべきである。」としている。

特殊な海域における構造物に対する電気防食基準の一例として、北海における電気防食基準が挙げられる。この基準は、北海における海域構造物を実際に電気防食した経験から規定したものである。

まず、「電気防食を行なうに当っては、メキシコ湾における海域構造物に対する電気防食基準を参考とした。メキシコ湾における電気防食設計基準は、

- (1) 海水の比抵抗 20 Ω-cm
- (2) 設計電流密度 54~65 mA/m²
- (3) 海水の温度 22℃

であり、北海における電気防食設計基準は、

- (1) 海水の比抵抗 25 Ω-cm
- (2) 設計電流密度 80~100 mA/m²
- (3) 海水の温度 10℃

とした。しかしながら、上記の電気防食基準では北海においては、不十分であることがわかり、1973年に電気防食を施したときには、

- (1) 海水の比抵抗 25 Ω-cm
- (2) 海水中での設計電流密度 86 mA/m²
- (3) 海土中での設計電流密度 22 mA/m²

の設計基準で行なった。また、陽極にはアルミニウム-水銀の合金を使用した流電陽極方式を用い、防食電位は塩化銀電極基準で-800 mVとした。」と述べている。そして、北海の環境について、溶存酸素、温度、比抵抗等による基本的な情報やこれらの電気防食に及ぼす影響について述べ、

- (1) 腐食形態と環境データ

(2) 分極と電流密度のデータ

(3) ライニングとコーティングのデータ

(4) 陽極の特性データ

の4つの問題に対して検討している。

最終的には、「北海における実際に必要な防食電流密度は $100 \sim 130 \text{ mA/m}^2$ であり、メキシコ湾における電気防食基準が必ずしも北海において適用することはできない。」としている。つまり、海域によって電気防食基準もそれぞれ異なるということである。なお、「陽極の発生電流の計算、電流分布に関係する陽極配置を決定する場合には、特別な注意が必要である。」としている。

以上、国内における土木海域構造物の電気防食に関する基準を述べてきたが、我国の基準は諸外国の基準に比較してもわかるように不十分なところがあることは否めない。

防食電位については、上記したすべての基準における値は一致している。しかし、土木海域構造物の耐用年数を守るという観点からみるならば、必ずしも上記の防食電位を維持するということは断定する必要はないであろう。たとえば、NACE Standard RP-01-76 で一部規定しているような自然電位からの電位変化量とかいうような決め方も考えられる。従って、さらに種々のデータを蓄積してより効果的かつ合理的な土木海域構造物に対する電気防食基準が規定されるべきであると考えられる。

4. 特定海域における電気防食

(1) 埋立地と汚濁海域

海岸や埋立地に建設される土木構造物は腐食環境が季節的に変化したり、経年的に変化するので、注意を要する。

特に埋立地においては、埋立初期の土壌の比抵抗は海水の影響を受けて比較的低いですが、雨水等により徐々に時間の経過と共に比抵抗率は高くなる。したがって、埋立地において土木構造物に対し電気防食を適応させる場合、陽極の接地抵抗が増大し、十分な防食電流を構造物に供給することができなくなるので、土壌の比抵抗変化を十分事前調査し、電気防食の設計を行なう必要があるが、またデータの蓄積も少ないので、これからの課題となろう。

海水の汚濁による鋼の腐食は複雑な現象を示す。汚濁は種々の原因で起るが、腐食との関係は次の如く考えられる。工場、生活排水に含まれる種々の有機物を分解するために水中に溶存している酸素が消費される。これは化学的酸素要求量 (C. O. D) および生物化学的酸素要求量 (B. O. D) が高くなる。又、排出される窒素や磷を栄養として、光合成により有機物が生成する。この合成の際、酸素は表層水で飽和および過飽和になるが、海中および底層では、プランクトンの死骸を分解するために溶存酸素が消費される。

汚濁していると言われている海域の多くは、腐水海域と清浄海域の中間的な汚濁海域である。この海域では、冬期は温度差によって表層の海水と底層の海水が入れ換わる。所謂、循環期になるために溶存酸素は飽和している。しかし温度が高くなり成層期になると共に硫酸塩還元細菌の繁殖も活発になり、さらに、光合成により赤潮の発生もみられるようになる。この海域における鋼の腐食は夏季に多くなる事もあれば、冬季に多くなることもあり複雑なパターンを示す。この汚濁状態と思われる海域における鋼の腐食と防食電流の変化

表7 汚染海水と清浄海水の比較

場 所	汚 染 海 水 中 の 腐 食						清 浄 海 水 中 の 腐 食			
	隅 田 川 河 口				羽 田		鹿 島 港			
					海 中	へ ド ロ				
試験期間(day)	105	105	105	105	1,420	1,420	105	105	105	105
侵食度(mm/Yr)	0.245	0.179	0.199	0.373	0.155	0.139	0.118	0.138	0.104	0.124

を表7および図4に示した。

硫酸塩還元細菌は海洋性のものであってNaCl 3%前後、温度から20℃から30℃で最大の発育を示す。このような状態では、電気防食の達成条件も異なり、一般的に言われている防食電位 -0.77V では不十分で -0.90V まで分極して、完全防食状態が得られる。 $(-0.80\text{V}$ では防食率は80%を示す)。

汚濁海域では、防食電流密度も清浄海域より20~50%増を考えれば良いが、汚濁の程度によっては、さらに大きくする必要がある(表8)。

(2) 高潮流下の海域

日本近辺の海域で最も高い流速を示す鳴門海峡を含めれば、最大 6m/sec 程度までの潮流速を考える必要がある。

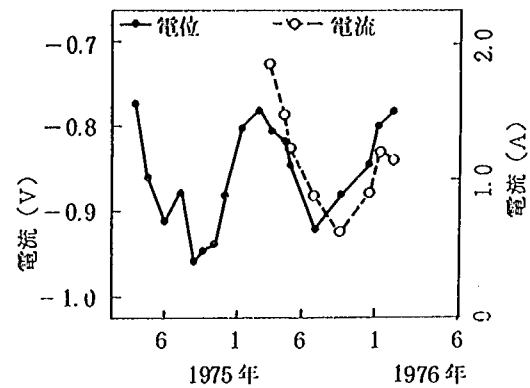


図4 四日市における栈橋の電位と防食電流の変化

表8 海中鋼構造物の防食電流密度(初期値)

海 域	対 象	防食電流密度(mA/m^2)
清 浄 海 域	海水中(裸鋼材)	100
	石積部(")	50
	海土中(")	20
汚 染 海 域		上記値の20~50%増※
高潮流海域(2m/sec)	海水中	300

※汚染の程度によってはこれより大きい値とすることがある。

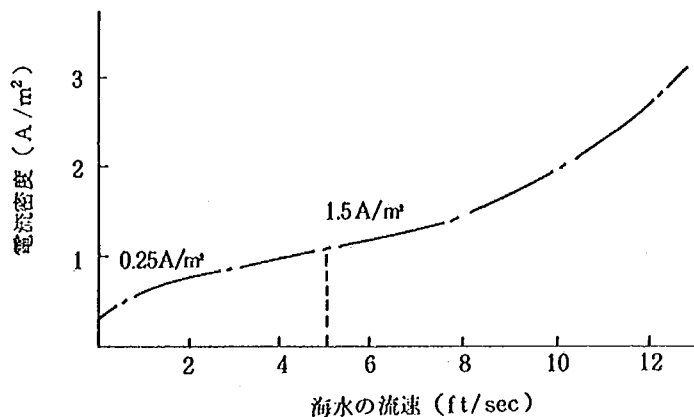


図5 防食電流密度と海水流速の関係

実海水中での潮流の影響については、2ヶ月に亘って本四架橋電気防食研究会が調査している。それによると、明石海峡での潮流速は最大2 m/secであった。この場合、鋼の腐食は通常の2～3倍としている。この条件下で初期防食電流密度は約300 mA/m²、平均維持電流密度は150 mA/m²を必要とする。そして、構造物の上部と下部は波浪、砂によるエロージョン等の影響を考慮し、陽極を多く配置することになる。

たとえば、図5は海水流速下で-850 mVまでに分極させるのに必要な防食電流密度であるが、海水流速のある場合、復極作用が大きく、しかも海砂をまきこむエロージョンなども生じ、所要電気防食電流が増加する(図5)。

このような電流増加に対しては、犠牲陽極方式のみでは対応しきれないと考えられ、流速の影響を減らすために耐食合金や良質の塗装の併用が必要となる。

しかし、潮流速6 m/sec程度の場合についての電気防食効果については未解決であり、今後の課題となろう。

(3) 波浪等、高応加応力の海域

海域土木構造物は、ある特殊の部分を除いてほとんど引張強さ50 kg/mm²以下の鋼が使用されている。この程度の強さの鋼は、海水環境では応力腐食割れは起らないとされている。土木構造物は、波浪等により、その使用期間中にかなりの繰返し応力を受ける。その数は20年間に10⁸程度、周波数にして0.1回/secである。一般的に言われているように、電気防食は疲労に対しても有効とされる。

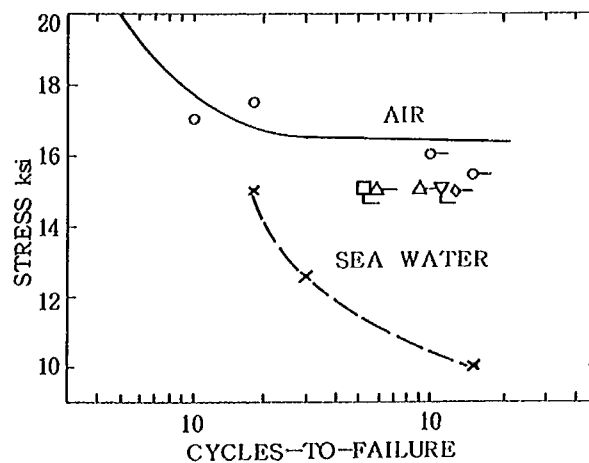


図6 鋼 (AISI 1020) の空気中および人工海中水におけるS-N曲線
33.3 Hz

△ = -0.787 V ▽ = -2.0 V

□ = ロ紙をノッチにかぶせたもの

◇ = ゴムバンドをノッチにかぶせたもの

電流規制下での電気防食をほどこした炭素鋼の疲労試験を行なった結果をまとめると、その効果は通電電流密度によって決まり、腐食疲労強度が空中疲れ強度まで回復するには、通常の電気防食範囲では十分に期待できない。

つまり応力の加わる場合には、より厳格な防食設計が必要となる。その理由には

- ① 破断は孔食によって開始される。このような孔食を防ぐには完全防食を必要とする。
- ② 応力により鋼表層が変化し腐食域でのより低い電位への移行が生じて、必要な電気防食電位が低下する

の2点があげられる。

また防食電流密度も、電気防食皮膜の応力による損傷のために低減しにくくなる。

鋼材の腐食疲労は鋼表面でのき裂の発生に基づくものでありその進行速度は、き裂の進展速度といっている。

電気防食では、き裂の発生を抑制することが可能である。では、き裂の進展速度への電気防食効果は期待できるであろうか。

電気防食下でのHY-80鋼の食塩水中のき裂速度は図7、図8の通りである。

電位が卑になる程、き裂速度が増加し、繰返し速度が増加し、繰返し速度が低速へなる程、その影響は著しい。

この材料は水素脆化を受け易いとされるが、き裂速度の大きい場合の実験であり、き裂速度の遅い場合の構造部材としてのデータとしては問題が多いと考えられる。

現在陰極電流と鋼の脆化に関しては、腐食防食協会（重野華太会長）の8-3分科会にて検討されている。

しかし、疲労防食現象については、まだ不明の点が多く研究は始まったばかりのようであり、試験方法も統一されてはいない。

このような疲労腐食に関しては、実構造物におけるき裂の検出や、もしそれが可能であったとしても、その部分の鋼材の交換などは実際に不可能である。このため、鋼材の疲労防食強度の低下率を構造設計に組み入れることが必要となるであろう。とはいえ、十分に防食が行なわれていれば、強度低下の度合いも少ないことから、電気防食のより効果的な利用を考慮すべきである。

5. 新しい電気防食技術

(1) 鉄筋コンクリート構造物への電気防食

コンクリート中の鉄筋の腐食防食に関しては、最近特に注目されるようになり、コンクリート中の鉄筋の電気防食についても、その防食効果がすぐれていることが明らかにされつつある。

たとえば、国内においては、建設省土木研究所において、基礎実験および現地試験が行なわれている。

鉄筋コンクリート供試体を用いた実験結果（表9）では、海水中やたえず湿潤な環境にある厳しい腐食条件下のコンクリート中の鋼材に対しても電気防食は低電圧、小電流で防食効果が得られることを確かめている。

また、東京湾内川崎港沖での現地試験では、実際にコンクリート大型模型を沈めて長期にわたる防食電流

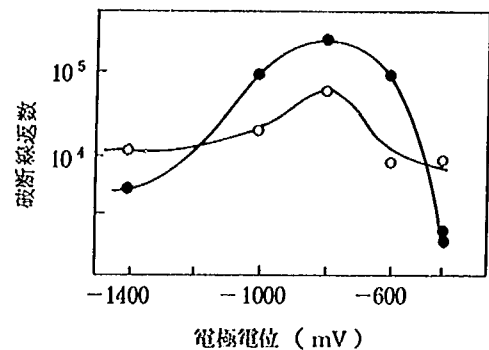


図7 カソード電位-寿命曲線
(4340鋼, 1% NaCl中, $f = 0.023 \text{ Hz}$)

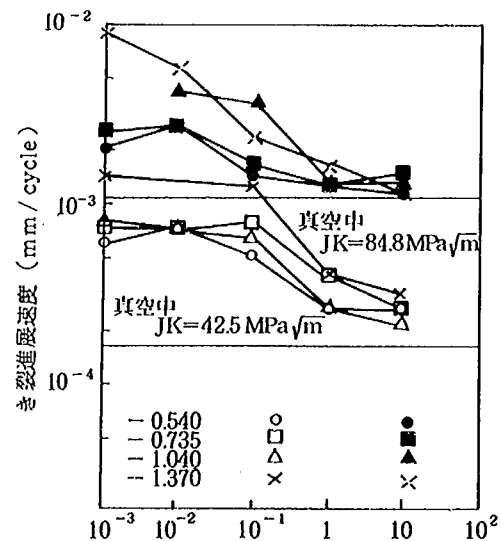


図8 き裂進展速度とカソード電位との関係
(HY-80鋼, 3.5% NaCl中)

表9 鉄筋コンクリートへの電気防食

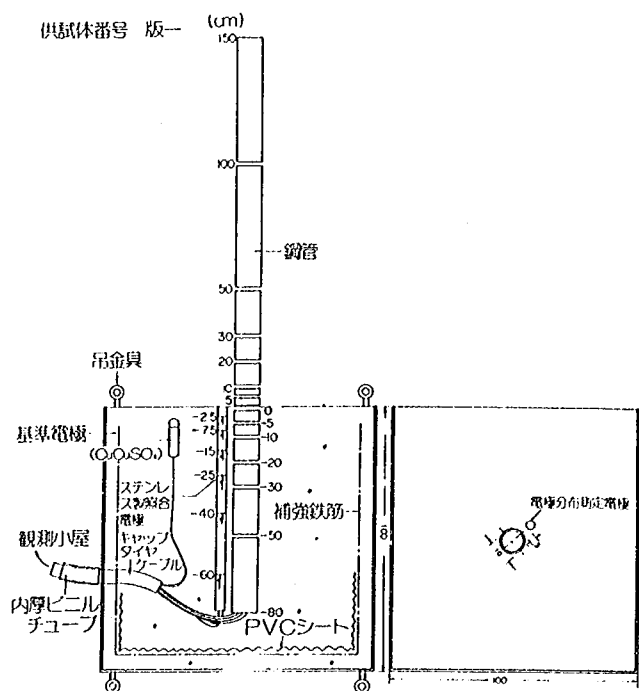
	条 件 A	条 件 B
1) 環 境 条 件	海水中の鉄筋コンクリート	海面上の湿潤な鉄筋コンクリート
2) 防 食 電 位	-1.0 V ~ -1.5 V	-1.0 V ~ -1.5 V
3) 防 食 電 位	8 ~ 60 mA/m ²	10 ~ 90 mA/m ² (時間的変動がある)
4) 電気防食方式	外部電源方式、犠牲陽極の両方式でも可能であるが、陽極は海水中に設置する。	外部電源方式では不溶性陽極を用いる。 犠牲陽極方式では陽極はコンクリートに直接接しないようにバックフィル材等を用いる。
5) 防 食 効 果	かぶりの薄いコンクリートやひびわれ入りのコンクリートに即しても防食効果があった。	

密度を測定した（図9）。

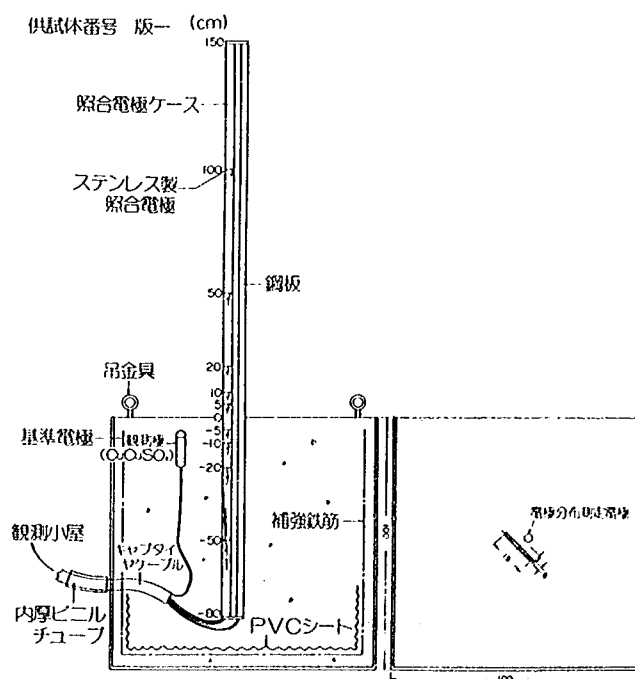
国外では、様々な手法で鉄筋コンクリート構造物への電気防食が行なわれており（米国、カナダ、ノルウェーなど）、また開発研究も盛んである。

Henze は北海のコンクリート製海洋構造物に対して電気防食を適用した。防食電位を -0.85 V (Ag/AgCl) , 防食電流密度を 2 mA/m^2 としている。

Gjorv は -850 mV における防食電流密度を 1.2 mA/m^2 としている。また陰分極を増せばコンクリートの密着力が増加することを示している（図10）。しかし過度の過防食にすると発生する水素により密着力は低下するので注意が必要である。



(a) 鋼板型



(b) 鋼管型

図 9 (1) 供試体の形状 (東京湾内川崎沖現地試験)

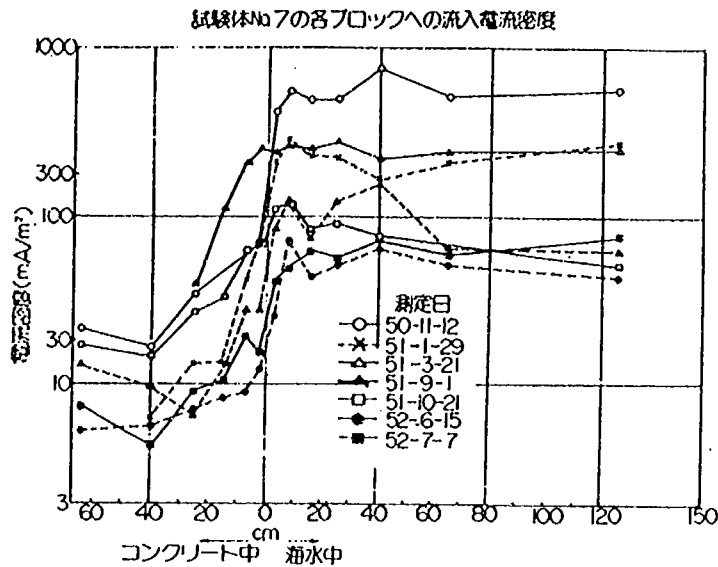


図9(2) 電気防食電流分布 (東京湾内川崎沖現地試験)

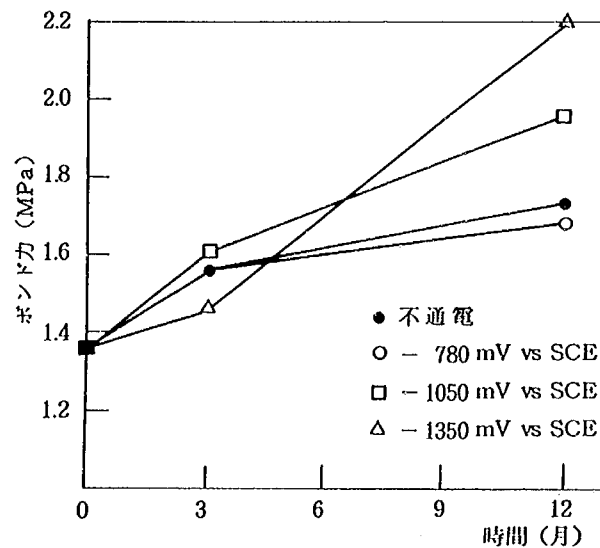


図10 電位とボンド力

(2) 塗装と電気防食の併用

鋼材に素地調整を行ない塗装を施し電気防食を行なうことは、かなりのコストアップになる。しかし、防食維持電流を大巾に節減することが可能となる。たとえば、塗装を施さず、エレクトロコーティングの自然生成を待つ（この間、多大の初期電流が流れる）場合は、維持電流は30～60%の減少しか見込めない。また、設置環境によっては良質のエレクトロコーティング層の発達生成が見込めない場合もある。

塗装を併用すれば90%以上の電流節減効果が期待でき、ランニングコストの減少、システムの軽量化が期待出来ることから初めて長期の防食が可能となる。電気防食の立場からみると、塗装の併用は上述の利点だけでなく、生物付着の防止(防汚塗料) システムの機能障害の防止などの有用の効果を伴ないまた、塗装の側からすると、電気防食によって塗膜の耐久性自体を向上させる利点がある。すなわち、塗装と電気防食との

併用は、従来の電気防食とは異なる電気防食法といってよいであろう。勿論、解決すべき問題点も多い。

そのひとつは、通常の塗装系と異なり、耐アルカリ性、水中での付着性や透水遮断性能の優れた塗装系が必要となることである。これは、塗膜欠陥を生じて素地の鉄が海水にふれると海水の電気分解が生じ、強いアルカリ性物質を生じ（pH 10～12）、そのアルカリによって塗膜が分解したり、フクレ、ハガレを生ずるなどの劣化部分を生ずることがあるためである。

また、塗装に悪影響を及ぼさない電位の設定を必要とする。防食電位－電流－発生するアルカリ度の間には、相関関係がある。一方、実際の設計にあたっては腐食環境や構造物の条件によって電位が決定されることになりより厳しい電位が必要な場合には、塗装に、ふくれの生成、遊離アルカリによる劣化、水素発生による劣化などが生ずることを考慮しなければならない。つまり、電気防食に適する塗装の選択が肝要であると共に、その塗膜に対しても、局部的に過大電圧が加わることなく、なるべく一様に所要最小限の防食電位がかかるような設計施工が必要である。

造船研究協会では、塗装と電気防食の併用した試験結果を表10のように発表している。表10から塗装による適正許容電位は、

油性系	－ 800 ～－ 900 mV
ビニル系	－ 800 ～－ 950 mV
塩化ゴム系	－ 800 ～－ 950 mV
エポキシ系	－ 800 ～－ 1,000 mV
タールエポキシ系	－ 800 ～－ 1,000 mV

と考えられるが、いずれの場合でも塗膜に欠陥を生じないように、－ 800 ～－ 900 mV の範囲に分極させておくことが望まれる。

表10 塗装と電気防食併用試験結果（造船研究協会）

ブ ラ イ マ ー (S / P)	上 (A / C) 塗	電 気 防 食 試 験		塗 装 工 程		
		－ 860 mV	－ 1010 mV	S / P	A / C	A / F
長バク用ウオッシュ ブ ラ イ マ ー	油 性 系	○	×	1	2	1
	塩 化 ゴ ム 系	◎	△	1	2	1
	ビ ニ ル 系	◎	△	1	4	1
	エ ポ キ シ 系	◎	△	1	2	1
	タ ー ル エ ポ キ シ 系	◎	△	1	2	1
エポキシジンクリッチ ブ ラ イ マ ー (92%)	油 性 系	△	×	1	2	1
	塩 化 ゴ ム 系	◎	△	1	2	1
	ビ ニ ル 系	◎	△	1	4	1
	エ ポ キ シ 系	◎	○	1	2	1
	タ ー ル エ ポ キ シ 系	◎	○	1	2	1
エポキシジンクリッチ ブ ラ イ マ ー (80%)	油 性 系	◎	×	1	2	1
	塩 化 ゴ ム 系	◎	○	1	2	1
	ビ ニ ル 系	◎	○	1	4	1
	エ ポ キ シ 系	◎	◎	1	2	1
	タ ー ル エ ポ キ シ 系	◎	◎	1	2	1

(備考) 片受引はいづれも金属表面に達するクロスカットを入れたものを用いた。

◎ 欠陥なし ○ ほとんど欠陥なし △ 欠陥あり × 不可

米国海軍の研究機関での塗装と併用した電気防食試験結果を表11に示す。

表11 米国軍における海中浸漬試験結果

- | |
|--|
| 1) -1000 mV 維持の場合に良好な塗装系 |
| 1. ビニル系 A/C + ビニル系 A/F (20 mil および 10 mil) |
| 2. ホットプラスチック系 (32 mil) |
| 3. ホーロ・エナメル + ビニル系 A/F (4 ~ 17 mil) |
| 4. ビニル系 A/C + 試作サラン A/F (11.5 mil) |
| 5. ビニル系 A/C + コールドプラスチック系 A/F (12 mil) |
| 6. 塩化ゴム系 (11.5 mil) |
| 2) 電極周辺用の高電圧に耐える塗装系 |
| 1. クロロプレン・シート + ビニル系 A/F (125 mil) |
| 2. ガラス補強したエポキシ系積層類 (常温型) + ビニル系 A/F (65 mil) |
| 3. ニボキシ・ポリサルファイド共重合物 (コテ塗り, 常温型) + ビニル系 A/F (85 mil) |

カナダ海軍の研究機関の試験では、浸漬試験の結果においてはビニル系が良好であったが同時に行なった電気防食との併用試験では、電位が -840 mV (Ag/AgCl) に維持される塗装では障害が起こらないが、 $-1,000\text{ mV}$ に達すると塗膜を害する。亜鉛プライマー (20μ) + エポキシ (200μ) + 防汚塗料 (76μ) の塗装系の水素発生電位を調べたところ、 -1.1 V (Ag/AgCl), $560\mu\text{ A/ft}^2$ であった。この塗装系と -1.6 V の外部電源法による併用試験では、1カ月でトップコートにふくれが生じた。さらに米国 NBS による大規模な実海水環境下での鋼杭の腐食試験がありこの中で電気防食も試験されている。これは、電気防食とマリーナスチール、コーラルエポキシ樹脂塗装、亜鉛めっきとを併用した鋼杭を8年間海水中に暴露したものである (図11)。

6. 電気防食の維持管理 (モニタリング)

電気防食施行後の防食状態を良好に維持管理することは重要である。特に最近電位測定あるいは電流測定を連続的または断続的に自動測定または自動制御するモニタリングへの関心が高まっている。

防食対象物の電位および防食電流監視の二つの機能を持ったモニタリングシステムが開発された。電位モニタリングでは亜鉛および銀・塩化銀電極をペアにした基準電極を取付け (図12) 防食基準電位からの偏差分を表示するランプにより電気防食システムの正常・異常が監視できる警報装置である。電流モニタリング

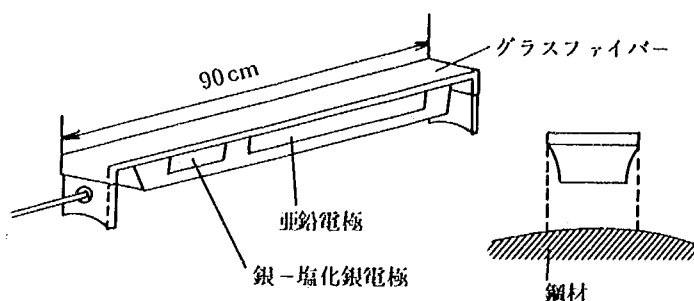
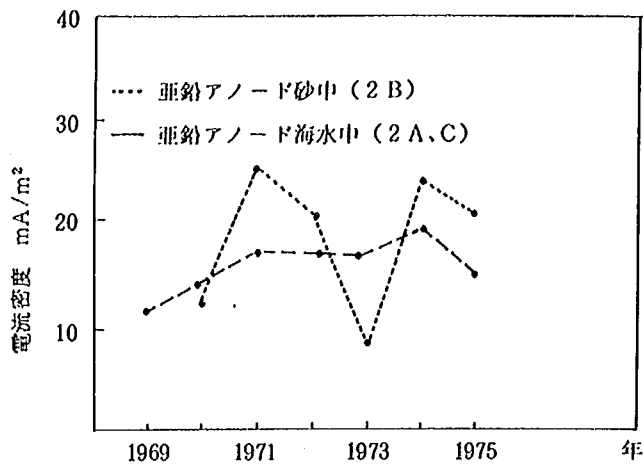
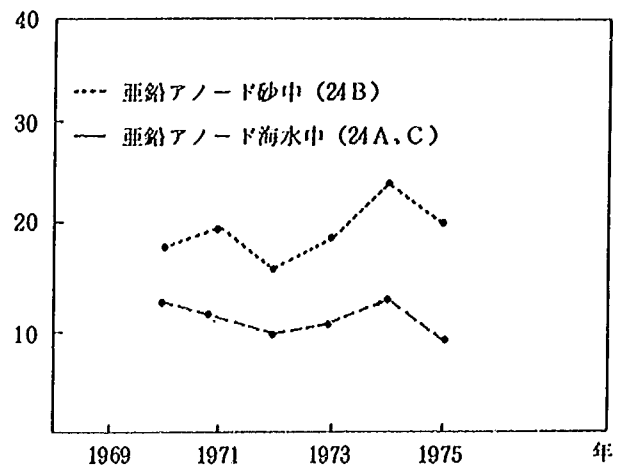


図12 電位モニタリング用基準電極

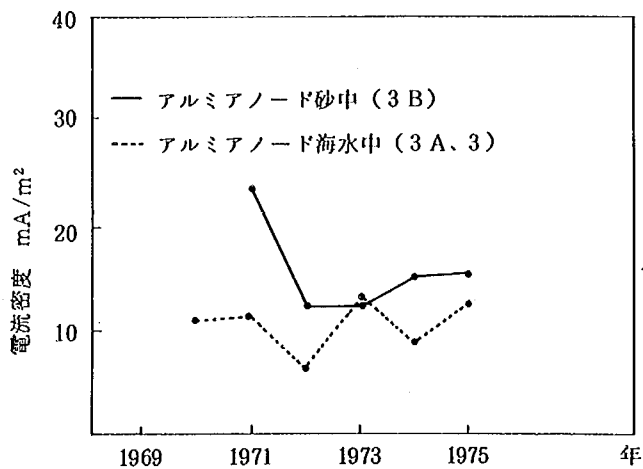
(1) 裸炭素鋼 (亜鉛アノードの取付有)



(2) 裸マリナースチール (亜鉛アノード取付有)

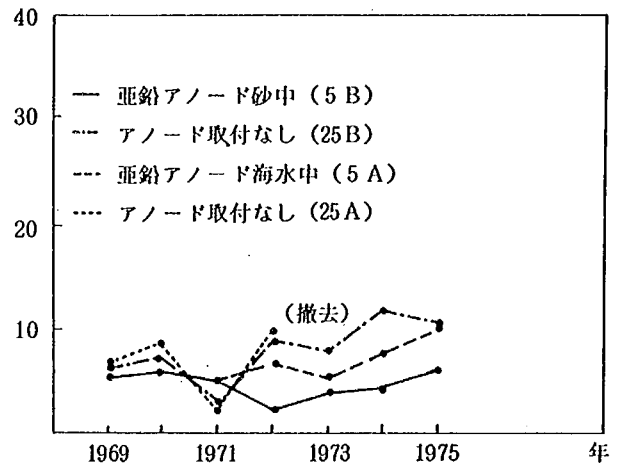


(3) 裸炭素鋼 (アルミアノードによる防食)



(4) コールタールエポキシ塗装炭素鋼

(亜鉛アノードの取付有: 無)



(5) 溶融亜鉛メッキ鋼 (亜鉛アノードの取付有)

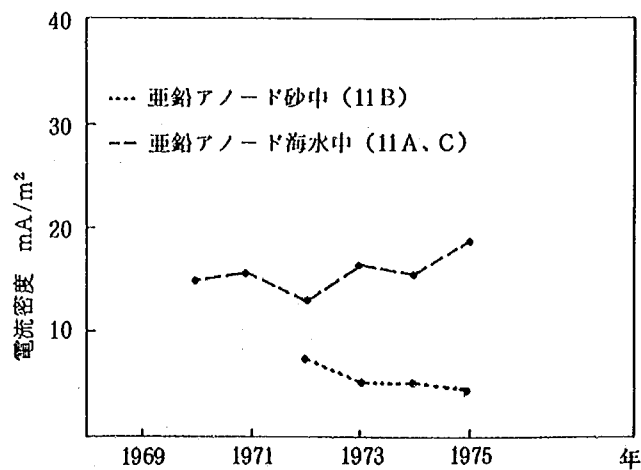


図11 鋼管杭の電気防食試験 (米国NBS)

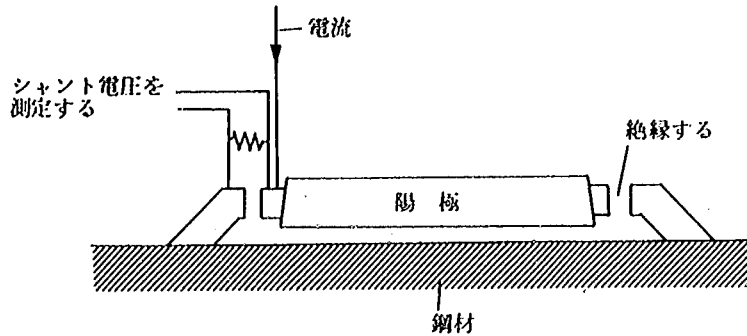


図13 電流モニタリングの方法

は、陽極の発生電流をシャントにより測定することができるが（図13）、より正確に測定する場合には、零抵抗電流計を使用する。

電気防食システムの良否をモニタするダイバーレスモニタリング方法もある。水深が大きくなればダイバーによる測定が困難となるために、水中部分面積の大きい構造物や調査回数が多い構造物にとってこの方法は有利となる。2本の平行なガイドケーブルを海上3mから海底面まで渡し照合電極を上下させる。メキシコ湾の水深44mのプラットフォームに設置された例がある。ダイバーによる場合に較べて、モニタリング装置による電位測定値の方が20～50 mV 卑で一層正確な測定値が得られた。

7. 電気防食方式の種類と比較

(1) 電気防食方法の経済性

防食電流密度として、コンクリートの鉄筋10～20 mA/m²，裸面（海水中）100 mA/m²，塗覆部20～100 mA/m²，海土中25 mA/m²を採用して、アルミニウム陽極による流電陽極方式及び流電陽極方式と外部電源方式とを併用した場合について比較検討した。寿命30年として、塗装の劣化を考慮に入れると、裸で流電陽極方式と外部電源方式を併用したものが一番安価であった。これらの価格の比較を表12に示す。

表12 電気防食方式の経済比較

	鋼構造物の状態	電気防食	モニタリング	価格（ポンド）
1	裸	流電法	有	411,750
2	裸	流電外電	〃	247,000
3	塗装有	流電	〃	189,750
4	塗装有	流電外電	〃	206,000

（3,4は塗装価格350,000ポンドを除外している。）

(2) 人工島での電気防食

またブラジル沖合に建造された海洋ターミナルの人工島における含銅鋼シートパイルの電気防食例が紹介された。構造物の大気暴露部は塗装で、無機質ジンクリッチプライマー、エポキシ中塗りさらにビニル系の上塗りからなっている。タイダルおよびスプラッシュゾーンは、エポキシポリアミドコンパウンドを使用した。海水中、海底土中は流電陽極方式と外部電源方式との併用による電気防食法を採用した。流電陽極方式はアルミニウム合金陽極を使用し、外部電源方式はグラファイト電極、Pb－Sb－Ag電極、Fe－Si－Cr

電極を使用した。現在まで海中ターミナルの防食システムとして良好な防食効果を示している。流電陽極方式では、重量 330 kg の陽極をボルト締めクランプで取り付け、溶接で電氣的に導通させている。これら人工島の鋼構造物はすべて電氣的に接続されている。

(3) 外部電源方式での施工例

ニニアン海南方におけるプラットホームの設計施行例がある。プラットホームの鉄塔（スプラッシュ部はコールタールエポキシ塗装をし、残りは裸のまま）の電気防食を行ない、白金メッキニオブ電極を使用した外部電源方式を採用した。この方法の優位性として、鉄塔の浮揚重量がより低くなること、低コストであることなどをあげている。

外部電源方式に使用される電極も大いに進歩し、以前はグラフェイトと鉄であったが Fe-Si-Cr 陽極が台頭し、さらに Pb-Ag 電極が、また最近でも高電流密度で使用可能な Pt-Ti や Pt-Nb 電極が使用されている。海土中においては陽極のケーブルは損傷を受けやすいが、陽極におけるトラブルは、陽極を取付ける支持物に問題があることがわかりプラスチック製ホルダーを用いるなどして解決されている。

これまでは、断線とか陽極材とかにトラブルを生じやすかったために電気防食系自体の耐久性が保証できず、流電陽極方式を用いた例が多かったが、最近では外部電源方式を再度見直す動きもある。特に大規模な構造物、水深の大きい地点での構造物では、流電陽極方式では、陽極が多量にまた 1 個あたりの重量も大きくなることから死荷重が増えることになる。

このため、陽極数が少なくすみ、また陽極自体が海水中で溶け難い性質を活かした外部電源方式が有利とされる。ただし、外部電源方式の積極的な採用にあたっては、陽極材の電氣的性質や機械強度等も十分に検討しなければならない。また、設計法についても従来の設計の手法とは異なる点がある。電流分布等の試算式を改良しなければならないであろう。

8. ま と め

1) 海岸および海域での腐食傾向

海中部での鋼の平均腐食速度はほぼ 0.2 mm/Y の値を示す。土木構造物の重要性およびそれらに期待される長寿命の観点から防食は是非とも必要である。

電気防食は、海水環境において最も期待できる防食法である。すなわち実際の腐食状態は複雑であり、むしろ局部腐食となるのが一般的であることから局部腐食対策には、平均腐食速度から防食対策を講ずる腐食しろの考え方では十分でなく、電気防食の適用がどうしても必要となる。(ここでのいう局部腐食とは孔食を含み、この場合の侵食度は平均侵食度の数倍～十数倍に達することもある。)

2) 電 気 防 食

大部分の土木構造物の電気防食は、施工が容易なこと、保守管理が殆んど不必要で故障も少ないので、Al 陽極を使った犠牲陽極方式である。

土木構造物を対象とする関係者にとって電気防食は必ずしも良く理解されている防食法ではない。

構造物の寿命に合った長期の防食技術等未解決の問題は残されているが、電気防食の効果は認められている。

電気防食の設計に当っては、

- ① 防食対象物の構造、設置位置、面積
- ② 防食対象物への防食被覆の有無、種類
- ③ 腐食環境の条件を的確に把握する必要がある。

3) 電気防食に関する規格および基準

防食電位は経験上、 -0.77 V (SCE) より卑とされている。国外規定等においては、好気性環境、嫌気性環境別に防食電位を規定したり、地域別に防食電流密度を規定している。我国の規格・基準は諸外国（米国、英国、ノルウェー）に比べ、かなり立ち遅れている。

4) 特定海域における電気防食

海岸や埋立地に建設される土木構造物は腐食環境が季節的、経年的に変化するので、注意を要する。

海水の汚濁によって、嫌気状態となる。嫌気状態の程度によって、鋼の腐食速度や防食電流密度が季節的および場所的に変化する。防食率80%以上を得るには電位も -0.8 V 以下、防食電流密度も清浄海水中の20～50%増となる。

有機物、金属腐さいを含有した海岸地帯の浮泥、いわゆる“ヘドロ”中の鋼材に対する電気防食の施工はやや特異な分野に属する。

腐食防食の観点から見ると鉄鋼の自然電位は、ヘドロ中の方が海水中よりも数10mV 卑になる傾向がある。また通常の陰分極曲線を作成すると、分極立上りが遅く防食電流密度が大きく、さらに鉄鋼表面上に硫化物の生成と剥離が繰り返される場合では防食電流密度が大きく変化する。腐食形態は、溶存酸素が極端に少ないため通常の酸素消費型とは異なった腐食を生ずる。従って、電気防食の適用に当っては十分検討した上で設計を行なう必要がある。

潮流速最大 2 m/sec では、鋼の腐食度は通常の2～3倍となり、平均維持電流密度は 150 mA/m^2 で十分防食できる。しかし、最大潮流速は 6 m/sec 程度を考える必要がある。この場合についてはまだ未解決である。

波浪等の繰返し応力による鋼の疲労腐食に対して有効で、空気中の疲れ限界まで引き上げることができる。繰返し数も1日に数回となる場合には、腐食に対し保護性を有する錆層が破壊され、応力集中部の腐食が促進される。この場合にも電気防食は有効と考えられてはいるが、適切な電位等を詳しく明らかにする必要がある。

5) 複合電気防食

塗装を併用しより信頼性の高い、さらに長寿命を目的とする電気防食（複合電気防食）は構造物のトータルのメンテナンスコストを低減する優れた方法と考えられる。しかも、塗膜の劣化を防ぐ効果も電気防食にはあるようであり、相互の長所をのばす相乗効果も期待できる。

早急に、塗装を併用した場合の適切な防食電位、防食電流の節減効果を各種の環境で確かめる必要がある。

これらの試験結果によっては、高潮流条件下や河川水の流入する河口域等、在来の電気防食ではすぐれた防食効果の得難い海域においても電気防食の利用が可能となる。

6) モニタリング

これまでの電気防食の考え方には、防食状態を良好に維持管理する手法が積極的には盛り込まれていないようであるが、構造物の寿命を考慮しての、防食電位や電流などの日常的な点検（モニタリング）は、不可欠である。モニタリング機器や手法も早期に確立されなければならない。

II 電気防食の課題

1. 土木構造物への電気防食の適用

海域に構築される土木構造物（橋脚基礎杭など）においても電気防食が適用されている場合とそうでない場合とがある。まだ土木分野において電気防食法の防食効果が認知されているとはいえない。

土木構造物を対象とした、腐食要因、電気防食設計要因、長期間の試験結果等を明らかにした調査が必要であり、現在防食会社の協力のもとに調査結果は蓄積されつつあるが、さらに詳細な計画のもとに現地調査を行ない将来の指針にすべきであろう。

当面国内において建設が予定されている土木構造物は清浄で一般的な海域（沖合）であることは少なく、海岸や沿岸等いわゆる特殊な海域がその殆んどであって、これまでの電気防食設計方法がそのままあてはまるとは考え難い。

また、土木構造物は公共財であり、長期の供用と安全性が要求されることから、その効果と経済性との関係を十分に明らかにすることが、その防食設計においても要求される。

これらの点を考慮すると、土木構造物に適用するためには、電気防食設計に関する新しい基準規格を作るべきであると考えられる。

2. 規格基準について

新しく作成する電気防食に関する基準においては、設計・施行・維持管理についても含めるべきである。

また、電気防食の防食設計年数は構造物の寿命と同程度の防食性能の持続を要する。また、海岸に近い構造物においては周囲の腐食性の大巾な季節変化および年変化が予想される。

これらを考慮すると

① 外部電源方式の見直し

（陽極寿命は半永久的であり、大電源を流すことが出来ることから軽量化が図られしかも腐食性の変化対応出来る等の利点がある）

② 塗装と電気防食との併用

（電流密度の大巾な節減と特殊環境での防食効果の向上が図れる利点がある）

③ 犠牲陽極と外部電源方式との併用

（仮設期間の長期化に対応出来る）

等の試験調査結果に基づいて、電気防食方式の選定が必要である。

また、当面の経済性だけでなく省資源省エネルギーの立場からの判断をも基準に盛り込む必要があろう。

(1) 防食電位

電気防食の効果は防食電位値によって決まることは明らかにされているが、防食電位の決定には、防食率の議論を踏まえるべきであって、また腐食環境によって防食電位領域（上限および下限のいずれをも必要である）を決めるべきである。

本基準に、防食電位値を含めるには、まだデータが不足しており、種々のデータの蓄積と検討、試験の追加が必要である。

(2) 防食電流密度

防食電流密度は防食電位によって一義的に決まるわけではなく、腐食環境によって異なる。このため、腐食性の調査（事前調査）を必要とし、季節変化を含めた、仮通電試験をも必要となるであろう。

さらに防食電流密度を積極的に低減するための方法も検討すべきである。

(3) 特殊な海域

埋立地、海岸、河口、潮流の影響を受ける海域等についての電気防食の試験調査例が少なく、長期にわたる電気防食の設計に反映出来るデータはきわめて少ない。早急に室内試験および現地試験を通して、データの蓄積を必要とする。

海洋環境においては、鋼材の材質面から耐食性を検討した低合金鋼や、耐海水性鋼の使用増加も考えられるが、この場合においても、海水中、海土中では電気防食法を適用（併用）して十分な防食効果を目差すべきであろう。

あ と が き

巨大土木プロジェクトである，本州四国連絡橋，東京湾岸道路，東京湾横断道路，伊勢湾岸道路などはいずれも海岸や海域に計画されている。

腐食環境としてもきわめて苛酷な地点に建設されることから，既に，重防食塗装，耐食鋼，防食鋼管杭等，新しく開発されたすぐれた防食技術が適用され，土木構造物の耐久性を向上させている。

電気防食も，新しい防食技術であり，しかも，この防食効果も，非常にすぐれたものと期待されることから，本資料で明きらかとなった課題を早急に解決し，積極的に利用することが望まれる。

なお，資料の収集やとりまとめにあたっては，大日本塗料株式会社，中川防食工業株式会社，日本防食工業株式会社の御協力を得た。厚く謝意を表するものである。

電気防食の設計法に関する研究

I S S N0386-5878

土木研究所資料第1689号

マイクロフィルム第 号

昭和56年3月(1981)

片脇 清

キーワード：海域，鋼構造物，鉄筋コンクリート構造物

電気防食，塗装，防食

要旨 土木構造物を対象として新しく電気防食設計・施工指針を作成するための技術資料を得ようとして各種実験を建設省土木研究所と財団法人土木研究センターとで共同研究を進めている。本資料は，共同研究の一部として電気防食技術の現状についてとりまとめたものである。



郵便はがき

四
十
円
切
手
を
は
い
さ

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
化学研究室 御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. _____

No. _____

土研資料1689号

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第1689号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名 印