

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

1998年3月

阿部正美

## 目 次

第1章 序論	1
1. 1 研究の目的	1
(1) 研究の背景	1
(2) 研究の目的および対象	3
1. 2 本論文の構成	4
参考文献	5
第2章 港湾構造物の腐食傾向および電気防食法	6
2. 1 腐食機構の電気化学的解釈	6
(1) 腐食の分類	6
(2) 腐食の機構	6
(3) 腐食に影響を与える要因	7
2. 2 港湾鋼構造物の腐食傾向	10
(1) 腐食環境と腐食傾向	10
(2) 集中腐食と主な環境要因	12
2. 3 港湾コンクリート構造物の塩害による劣化	14
(1) 塩害による劣化の状況	14
(2) 塩害による腐食	15
2. 4 港湾鋼構造物の電気防食法	17
(1) 電気防食法の原理	17
(2) 電気防食法の分類	18
(3) 防食基準	18
(4) 港湾鋼構造物の電気防食の実施の経緯	19
(5) 港湾鋼構造物の電気防食法の課題	20
2. 5 港湾コンクリート構造物の電気防食法	21
(1) 電気防食法の原理	21
(2) 電気防食方式の種類	21
(3) 防食基準	24
(4) コンクリート構造物の電気防食の実施の経緯	25
(5) 港湾コンクリート構造物の電気防食法の課題	26
参考文献	28
第3章 海洋および港湾鋼構造物の電気防食法に関する試験	31
3. 1 概説	31
3. 2 水質と防食電流密度	31
(1) 概要	31
(2) 試験内容	31

(3) 陽極の発生電流および消耗量	34
(4) 水質と防食電流密度の関係	35
(5) 水質判定手法の確認のための電気防食調査	38
(6) 汚染海域における防食電流密度	40
3. 3 汚染海域における深さ方向の防食電流密度	41
(1) 概要	41
(2) 試験内容	41
(3) 深さ方向の電流密度と電位の傾向	42
(4) Al陽極の消耗量	44
(5) 水質調査	46
(6) 水質の汚染程度による設計防食電流密度の区分	47
3. 4 波浪海域での電気防食試験	48
(1) 概要	48
(2) 試験内容	49
(3) 波高と電流および電位の関係	
ならびに被覆防食との併用効果	52
(4) サンドエロージョンに対する防食効果	55
3. 5 結語	59
参考文献	60
<b>第4章 港湾コンクリート構造物の電気防食法に関する試験</b>	<b>62</b>
4. 1 概説	62
4. 2 流電陽極方式の電気防食法に及ぼす環境要因の影響	63
(1) 概要	63
(2) 試験内容	63
(3) 環境変化に伴う電流および電位の変化	66
(4) 電流密度の経日変化	68
(5) 亜鉛シート陽極の観察	70
4. 3 コンクリート中鉄筋の防食電流密度	70
(1) 概要	70
(2) 試験内容	71
(3) 無防食時のマクロ腐食電流と電位	74
(4) アノード部およびカソード部へ流入する電流の割合	77
(5) アノード部およびカソード部の分極量	78
(6) 無防食供試体の腐食状況	79
(7) 防食基準について	81
4. 4 結語	82
参考文献	83

第5章 電着工法に関する現地試験	85
5.1 概説	85
5.2 鋼構造物に対する現地試験	87
(1) 試験内容	87
(2) 電圧および電流の傾向	88
(3) 電着物の付着状況	89
(4) 電着物の組成および硬さ	91
(5) 電着物の耐久性および防食効果	95
5.3 コンクリート構造物に対する現地試験	96
(1) 試験内容	96
(2) 試験期間中の電圧、電流量	101
(3) 電着物の析出状況	102
(4) 電着物の組成	104
(5) コンクリートの透水性	106
(6) コンクリート中の塩化物イオン量	108
(7) 鉄筋の付着強度	109
(8) 接着強度	112
5.4 結語	113
参考文献	114
第6章 結論	116
謝辞	120
付録. A	122
付録. B 港湾鋼構造物の構造形式	124
参考文献	125

# 第1章 序論

## 1.1 研究の目的

### (1) 研究の背景

昭和初期の港湾施設は、対象船舶が小型で施設が小規模であったこと、および地盤条件が良かったことから、コンクリートブロックなどを用いた構造様式などの重力式構造が主であった。しかし、昭和30年代後半から40年代の高度経済成長期においては船舶が大型化し、そのため大水深岸壁が必要とされ、地盤条件も比較的良好でない海域に施設立地が余儀なくされた。このような条件での新しい構造様式として鋼杭栈橋が開発され、表-1.1<sup>1)</sup>に示すように国が実施する直轄工事において鋼矢板や鋼管杭が港湾構造物の建設に大量に使用されるようになった。港湾構造物の建設材料としての鋼材の利用は、高強度であること、コンクリートに比べて施工が容易で工期の短縮が図れること、また軟弱地盤にも比較的容易に適用できること、などの長所により高度経済成長期における急速な港湾整備の要請に応えるものであった。

鋼材には錆びる、つまり腐食するという致命的な欠点があり、とくに港湾環境が腐食に対して厳しいので、港湾鋼構造物の腐食に対してはこれまで一応の対策が講じられてきた。

昭和30年代の港湾鋼構造物の防食は、表-1.2<sup>2)</sup>に示す「港湾工事共通仕様書解説」<sup>2)</sup>(1964年)にあるように、電気防食法(外部電源方式)と防食塗装(油性塗料)が紹介されているが、電気防食法については装置の説明程度で詳細な解説の記述はなく、そのため、電気防食法は広く普及していなかった。その後、「港湾構造物設計基準」<sup>3)</sup>(1967年)では、鋼材の腐食環境に応じて腐食速度を規定し、腐食しろによる方法が基準化された。また、電気防食法に流電陽極方式が紹介されその適用範囲が示された。被覆材ではセメント硬化体、タールエポキシ樹脂塗料が示された。

しかし、このように電気防食法が紹介されてはいたにもかかわらず、この当時までの主な防食法は腐食しろによる方法で、耐用年数に見合った腐食量の分だけあらかじめ鋼材の肉厚を厚くしておく方法であった。電気防食法の普及が進まなかったのは、施設完成後の電気防食の適正な作動

表-1.1 直轄施工鋼構造物建設年度別施設数<sup>1)</sup>

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

表-1. 2 腐食および防食に関する各基準および解説の内容

基準、解説等の名称	港湾工事共通仕様書解説 (1964年3月)	港湾構造物設計基準 (1967年4月)	港湾の技術上の基準・同解説 (1979年3月)
制定機関	日本港湾協会	日本港湾協会	日本港湾協会
防食法	<p>電気防食法の紹介 主に外部電源方式の電源発生装置、電極装置、配管装置の紹介。 防食電流密度（外部電源方式） 海水中：100mA/m<sup>2</sup> 海土中：20mA/m<sup>2</sup> 陸土中：10mA/m<sup>2</sup></p> <p>防食塗装（油性ペイント） 防食テープ</p>	<p>電気防食法 適用範囲をMVL以下とする。 基準電極の防食電位の規定。 外部電源方式の電流消費量削減する電源装置の説明。 流電陽極方式のZn陽極より寿命の長いAl陽極の紹介。</p> <p>被覆（セメント硬化体、タールエポキシ塗料、Zn系塗料） 腐食しるが十分にとれる場合は電気防食を適用しない。</p>	<p>電気防食法 適用範囲をMSL以下とする。 基準電極の防食電位の規定。 防食電流密度 海水中：100mA/m<sup>2</sup> 石積部：50mA/m<sup>2</sup> 海土中：20mA/m<sup>2</sup> 陸土中：10mA/m<sup>2</sup> 長寿命Al陽極の開発によりAl陽極の適用が主となる。</p> <p>被覆（セメント硬化体、重防食塗料、金属ライニング） 腐食しるが十分にとれる場合は電気防食を適用しない。</p>
腐食に対する事項		<p>鋼材の腐食環境における腐食速度の規定。</p>	<p>鋼材の腐食環境における腐食速度の規定。 MLWL直下部分の集中腐食の指摘。</p>

に関する防食電流密度や防食電位の定期的な点検等の維持管理に対する認識が十分でなく、また経費不足のために適切な電気防食がなされなかったためである。

しかし、昭和50年代終わりに横浜港山下埠頭棧橋の鋼管杭が、大きな腐食を受けコンクリート上部工の陥没が起こったのを契機に、昭和30年代から40年代にかけて施工された鋼構造物の腐食の問題がにわかに顕在化した。すなわち、従来、鋼材の防食を腐食しろで対応してきたが、腐食しろでは対応できない程大きな集中腐食がMLWL直下付近に発生し鋼構造物に大きな被害が認められるようになったことから、鋼構造物の防食対策が大きな問題となった。そのため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>4)</sup> (1979年)にMLWL直下付近の集中腐食が取り上げられ、電気防食法の流電陽極方式における防食電流密度が示された。また、被覆材ではセメント硬化体、重防食塗装が示された。

このようなことから、海水中の鋼構造物の防食法としての電気防食法に対する認識が深まり、集中腐食に対する原因究明が課題として取り上げられた。集中腐食はいわゆる汚染海域での特有の現象としてとらえられ、汚染海域における適切な防食電流密度の検討が急務とされた。

これとは別に、漂砂等海底面付近の砂の変動がある海域に位置する鋼構造物において、通常海水腐食よりも数倍大きい砂の摩耗によって起こる腐食（サンドエロージョン）がみられたことから、このような海域における防食電流密度の検討もまた重要な課題として認識された。

以上は鋼構造物の腐食についてであるが、同じ時期に日本海沿岸の橋梁や沖縄の海岸に近い道路橋および港湾施設のコンクリート上部工底面のコンクリートの劣化が顕在化した。コンクリート構造物は耐久性に優れ、本来維持管理の必要がないと考えられていたが、塩害に起因するコンクリート中の鉄筋の防食および補修法を早急に確立することが急務となった。とくに、コンクリート中の鉄筋の電気防食法に関して、塩化物イオンを多く含んだ既設コンクリート構造物の所要防食電流密度および防食基準の分極量の検討が重要課題とされた。また、流電陽極方式の電流密度および電位と気温、天候およびコンクリートの湿潤状態などの環境要因との関係を明らかにすることも重要な課題となった。

さらに、通電により鋼材またはコンクリート表面に電着物が析出することを利用した新しい電気防食法すなわち電着工法が注目され、この実用化のための研究が必要とされた。

以上のように港湾施設の機能を良好な状態で維持していくために港湾鋼構造物の防食対策を講じることや、コンクリート構造物の塩害による劣化を防止するための対策法を早急に確立しておくことが極めて重要な課題として認識された。

## (2) 研究の目的および対象

以上のことから、本研究においては鋼矢板式係船岸や鋼管杭式棧橋等の鋼材お

よび鉄筋コンクリート上部工を主要構造部材とした港湾構造物の腐食の実態を把握し、電気化学的な原理を用いた防食法および補修法に関する研究を行うことを目的とする。研究の具体的内容は以下に示すとおりである。

まず、鋼構造物の電気防食法については、水質と電流密度の関係、汚染海域や海底土中部への適正な防食電流密度の検討、波浪海域の波高に対する電位や電流密度の変化およびサンドエロージョンに対する防食対策等について検討する。

コンクリート構造物の電気防食法に対しては、塩化物イオンを多量に含んだ条件での適正な防食電流密度、防食基準および環境要因が電位や電流に与える影響について検討する。

さらに、電着工法に対しては、電流密度と電着物の析出状況、電着物の組成およびコンクリートの透水性について検討する。

以上に基づいて、本研究で明らかになった事項を電気防食法に反映するための提言を行う。

## 1. 2 本論文の構成

本論文は6章よりなる。以下にその内容を示す。

**第1章 序論**では、本研究の背景と目的を述べた。

**第2章 港湾構造物の腐食傾向および電気防食法**では、電気化学的な腐食機構、港湾鋼構造物の腐食調査によって明らかになった腐食の基本的な傾向、および港湾コンクリート構造物の塩害による劣化の状況および原因を述べる。ついで、これまで港湾構造物に適用されてきた電気防食法の原理および経緯について述べ、問題点を示し、第3章以降に示す本研究の調査や試験の背景を明示する。

**第3章 海洋および港湾鋼構造物の電気防食法に関する試験**では、実構造物における電気防食調査を行い水質と防食電流密度との関係について検討し、電気防食に対する清浄海域と汚染海域とに区分する方法を提案する。また、汚染海域および海底土中部の深さ方向の適正な防食電流密度を示す。さらに、波浪海域における波浪、海底断面変動およびサンドエロージョンなどの外的要因と防食電流密度および電位との関係について明らかにする。

**第4章 港湾コンクリート構造物の電気防食法に関する試験**では、気温や天候および湿潤状態などの環境要因と電位や電流密度との関係について明らかにする。また、塩化物イオンを多く含んだコンクリート構造物の所要防食電流密度と分極量との関係について試験を行い、適正な分極量（防食基準）を示す。



第5章 電着工法に関する現地試験では、鋼材の防食あるいはコンクリートの防食および補修法として電気防食法を応用した電着工法の実用化のため、既設の鋼構造物とコンクリート構造物で試験を実施しその適用性を検討する。また、室内試験を行ってコンクリートの付着強度についても検討する。

第6章 結論では、前章までの検討によって明らかになった事項をとりまとめ、電気防食法に反映するための提言を行い結論とする。

#### 参考文献

- 1) 横井聰之：学位論文（大阪大学）、港湾鋼構造物の腐食の実態と対策に関する研究、p15、1988.
- 2) 日本港湾協会編：港湾工事共通仕様書解説、pp153～164、1964.
- 3) 日本港湾協会編：港湾構造物設計基準、pp3-2-7～3-2-9、1967.
- 4) 日本港湾協会編：港湾の施設の技術上の基準・同解説、pp3-9～3-20、1988.

## 第2章 港湾構造物の腐食傾向および電気防食法

### 2.1 腐食機構の電気化学的解釈

#### (1) 腐食の分類

金属の腐食とは、金属がその置かれている環境の作用を受け化学的あるいは電気化学的な反応によって表面が変化する現象であり、それらは図-2.1のように分類できる。乾食は水分の存在しない状態で金属が高温にさらされる場合に起こる腐食で、主としてガスによる作用で進行するのに対して、湿食は水分の存在する状態で金属のイオン化から始まる現象である。湿食は一般的なイオン化による自然腐食と、主に迷走電流の電解によって起こる電食、およびキャビテーション作用による機械的腐食に分けられる。

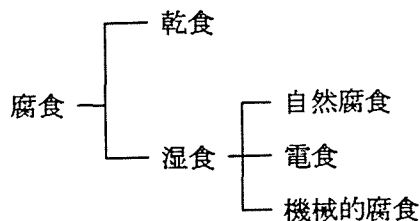


図-2.1 腐食の分類

腐食はその発生形態からみると全面腐食と局部腐食に分けられる。全面腐食 (General Corrosion) は金属が一様に腐食している状態をいい、環境条件の腐食作用が一様な場合に生じるものである。港湾環境においては海上大気中や海底土中部がこれに該当する。これに対して、局部腐食 (Local Corrosion) は腐食の状態が一様ではなく、部分的に深い孔状または溝状の腐食を生じるもので環境作用の部分的な差異または材質の不均一や異種金属の接触等によって起こる。港湾環境では主として干満帯および海水中において発生する傾向がある。

海洋環境における腐食は湿食の内の自然腐食にあたるので、以下にその腐食機構等について述べる。

#### (2) 腐食の機構

鋼材の表面をミクロ的に見ると、ミルスケールの不均一性や表面の凹凸等の鋼材そのものに関するものと、鋼材表面の乾湿の差のような環境状態の変化に関するものの2つの原因により鋼材表面の電位が不均一である。その結果、アノード部とカソード部が形成される。

鉄に対する一般的な腐食の機構は以下のように説明できる。すなわち、水分または水の存在下において、鉄には図-2.2に示すアノード反応の(1)式によって鉄イオン $Fe^{++}$ が溶出し、カソード部では(4)～(6)式の反応により、水酸化イオン $(OH^-)$ が生じる。これが腐食電池形成の第一段階である。ついで、 $Fe^{++}$ と $OH^-$ が(2)式に示すように結合し、さらに(3)式のように溶存酸素によって酸化されて錆となる。

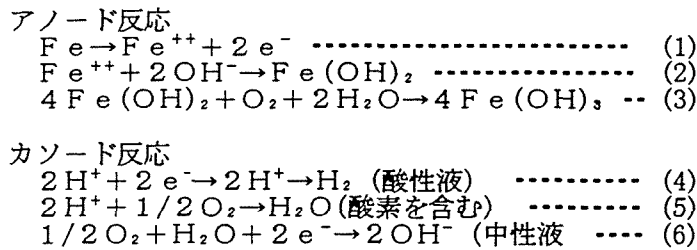
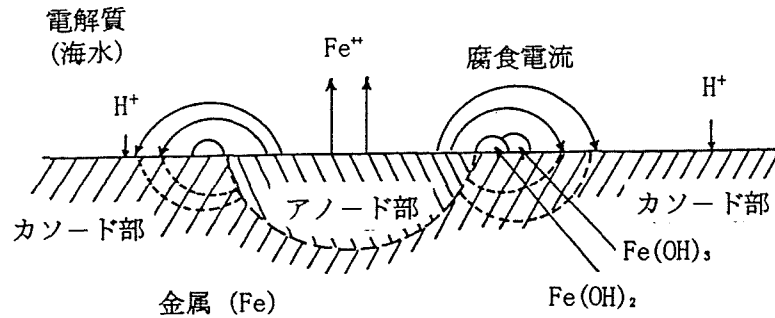


図-2. 2 局部電池腐食の形態

図-2. 3に示すような粘土と砂の二つの異なる環境へ鉄の試験片 (A1、B1、A2、B2、C) を埋設したとする。A1およびB1のように同一の環境に試験片が埋設されると、それらの表面には目に見えない微小なアノード部とカソード部が発生してマイクロ腐食電池が形成される。このとき、マイクロ腐食電池の微小なアノード部およびカソード部は腐食反応の進行に伴って刻々その位置を変えるので鋼材は全面腐食となる。これに対して、試験片Cのように粘土と砂の異種環境にまたがって試験片が埋設されている条件や、試験片A2、

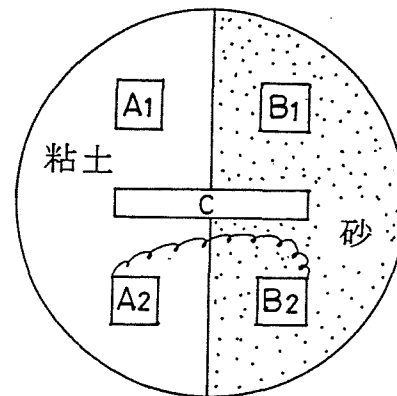


図-2. 3 環境差による腐食の大小例

B2のように電氣的に接続するとマクロ腐食電池が発生する。環境差による腐食は、相対的に溶存酸素濃度の多い環境中すなわちB2やCの砂環境部がカソード部となり、溶存酸素濃度の少ない環境中すなわちA2やCの粘土環境部がアノード部となる。アノード部では酸化反応が、またカソード部では還元反応が起こる。

### (3) 腐食に影響を与える要因

腐食に影響を与える要因には温度、溶存酸素濃度、流速およびpH等があり、それらの腐食への影響は以下のとおりである。

#### a) 温度

図-2. 4<sup>1)</sup>に示すように、密封容器中では腐食速度は温度に比例して増加する。しかし、開放容器中では、約80℃までは温度上昇とともに腐食速度は増加するが、80℃以上では溶存酸素濃度の著しい低下のために腐食速度は極端に低下する。

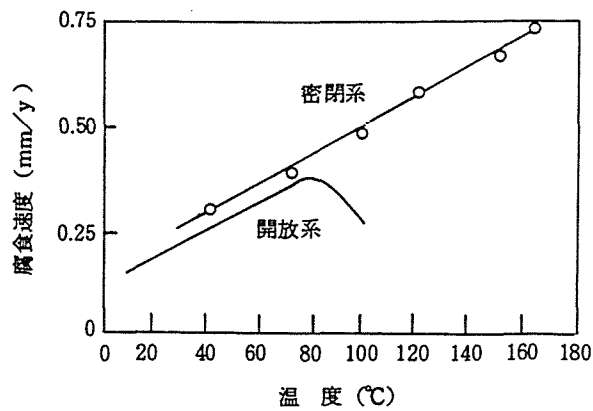


図-2. 4 溶存酸素を含む水中での鉄の腐食に対する温度の影響<sup>1)</sup>

b) 塩分

鋼材の腐食に対するNaCl濃度の影響は図-2. 5<sup>2)</sup>に示すようにNaCl濃度の増加とともに腐食速度が増加し10g/l程度で最大となる。さらにNaCl濃度が増加すると溶液中の溶存酸素濃度がNaCl濃度に反比例して減少するために腐食速度は減少する。

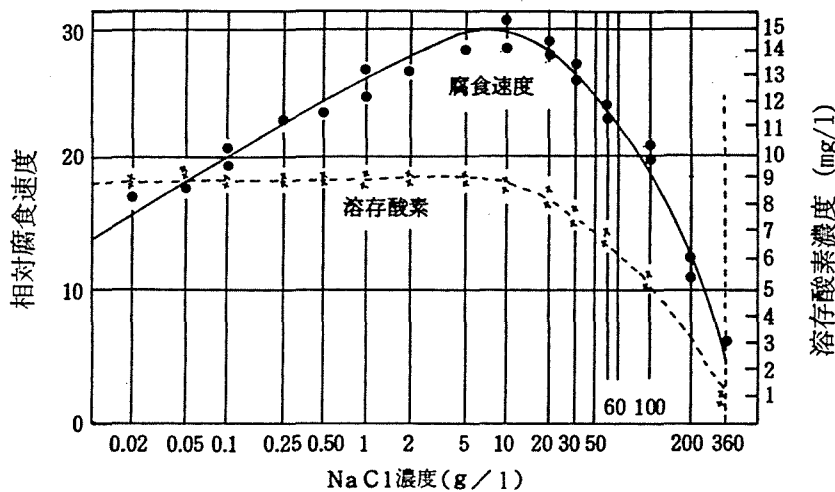


図-2. 5 NaCl濃度、溶存酸素濃度と鋼の腐食速度との関係<sup>2)</sup>

c) 流速

図-2. 6<sup>3)</sup>は海水中の鋼の腐食に対する流速の影響であるが、一般に流速が大きくなると腐食速度は大きくなる傾向があり、6m/sになるとほぼ一定値になる。

d) 溶存酸素濃度

定常状態では拡散により鋼材表面に供給される酸素量は溶液中の溶存酸素濃度に比例するので、中性の水の中では鋼材の腐食速度は溶存酸素濃度に比例して増加する。図-2. 7<sup>4)</sup>はその代表例である。

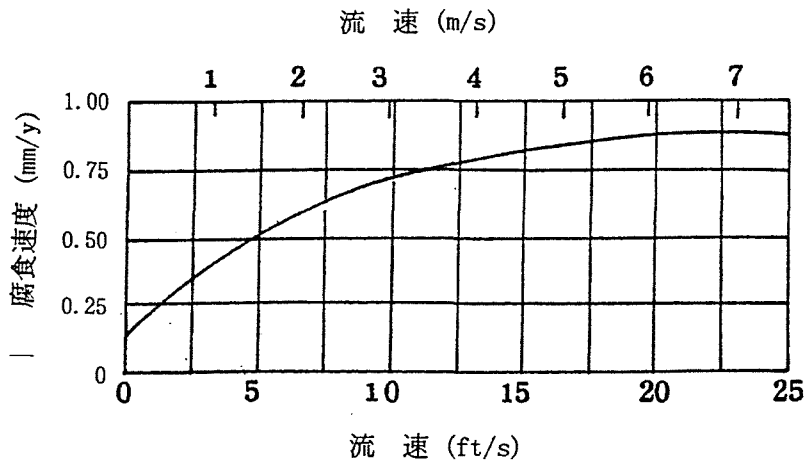


図-2.6 海水中での鋼の腐食に対する流速の影響<sup>3)</sup>

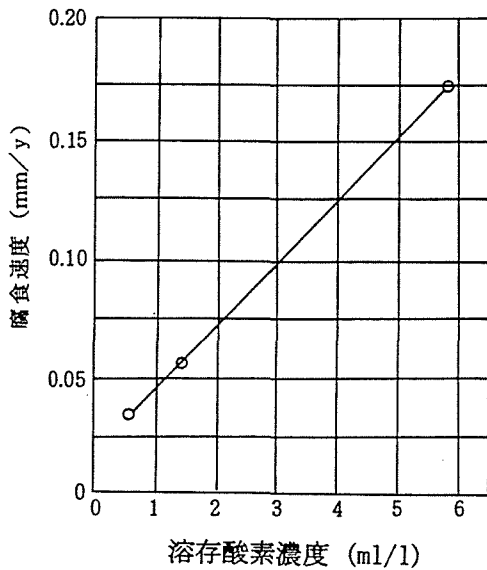


図-2.7 軟鋼の腐食に対する溶存酸素濃度の影響<sup>4)</sup>

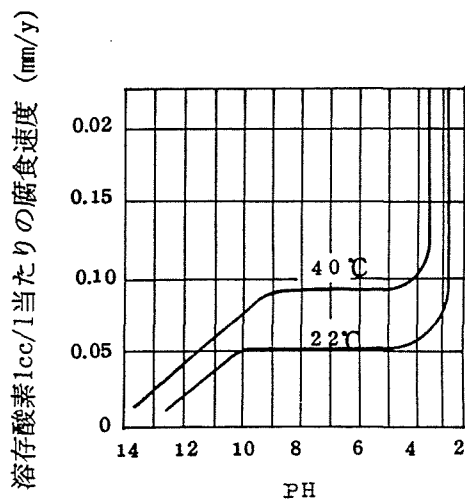


図-2.8 鋼の腐食に対するpHの影響<sup>5)</sup>

### e) pH

鋼の腐食に対するpHの影響は、図-2.8<sup>5)</sup>に示すようにpHが約4~10の場合には腐食速度はpHに無関係で、むしろ鋼の表面に拡散してくる溶存酸素濃度および温度に依存する。pHが10以上の場合はpHの増加に対し腐食速度は減少する。これはアルカリと溶存酸素の存在下において鋼の不動態化の傾向が増すためである。pH4以下の酸性領域では、腐食反応はもはや溶存酸素濃度によって決定されず部分的に水素の発生速度に依存して進行する。

以上のように、一般的にいわれている各要因が腐食に影響する傾向について述べたが、本研究では港湾環境下での腐食を問題にするので、上記のうち温度に対しては高温になるようなことはないこと、pHについては通常7~8程度の値であるので、この2項目の影響は考えない。しかし、NaCl濃度は河川水の流入と腐食速

度の関係、溶存酸素濃度は汚染水との関係から、これらの要因について検討する。

## 2. 2 港湾鋼構造物の腐食傾向

### (1) 腐食環境と腐食傾向

港湾鋼構造物の位置する環境は、図-2. 9に示すようにつぎの腐食環境に区分される。すなわち鉛直方向に海上大気中、飛まつ帯、干満帯、海水中、海底土中部の5項目である。

図-2. 9は港湾鋼構造物の一般的な腐食傾向図であるが、この図から、腐食の大きい部位は飛まつ帯と平均干潮面直下付近である。各腐食環境における腐食の傾向は以下のとおりである。

a) 海上大気中の腐食速度は0.1mm/y程度でさほど大きくはない。また、鋼杭式栈橋や鋼矢板式構造物のような係船岸はコンクリート上部工によって覆われているので、通常鋼材が露出することはない。

b) 飛まつ帯は海水の飛沫を絶えず受ける部分で、海水および酸素の供給が多く、さらに、波の作用による鋼材表面の錆層の物理的な破壊が生じるので、腐食が最も激しい環境である。通常、この環境の腐食速度は0.3mm/y程度といわれている<sup>6)</sup>。

c) 干満帯では潮の干満により周期的に海水の浸水と水面露出を繰り返す部分である。干満帯はMSL付近の腐食が小さく、MLWL直下付近の腐食が大きいが、これは干満帯のMSL付近がカソード部にMLWL直下付近がアノード部になり、マクロ腐食電池が形成されるためである。MLWL直下付近の腐食速度は場合によっては飛まつ帯よりも大きくなることもある。この現象を集中腐食と呼んでいる。図-2. 10は集中腐食の発生している鋼管杭を回収して各深度より試験片を切り取った断面を示したものである。この図から、水深+0.6m~±0.0m付近では肉厚が極端に減少していることがわかる。これに対して、MSL付近(+0.7~+1.0m付近)での肉厚の減少はあまり認められない。+0.6m~±0.0m付近がアノード部、MSL付近がカソード部となり、集中腐食が発生していたことを示している<sup>7)</sup>。なお、鋼管杭の内面は時間の経過とともに無酸素状態となるので図-2. 10に見られるようにほとんど腐食は認められない。

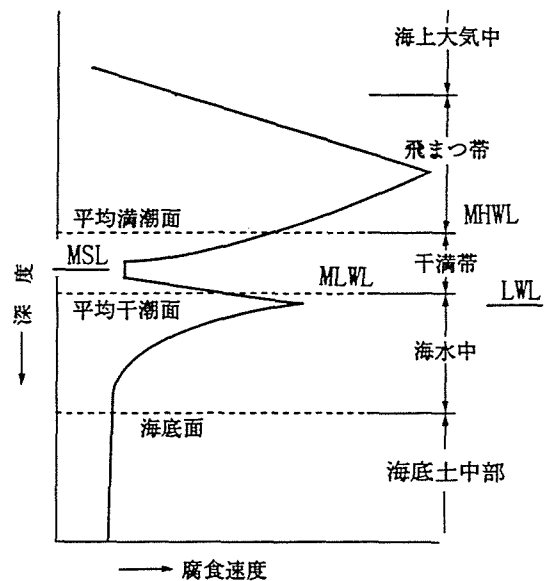


図-2. 9 港湾鋼構造物の腐食傾向図

d) 海水中における腐食の傾向は、MLWL直下付近の著しい集中腐食の部分を除けばほぼ一様である。腐食調査結果<sup>8)</sup>によれば、-1m付近より以深の海水中の腐食速度は0.1~0.2mm/y程度である。

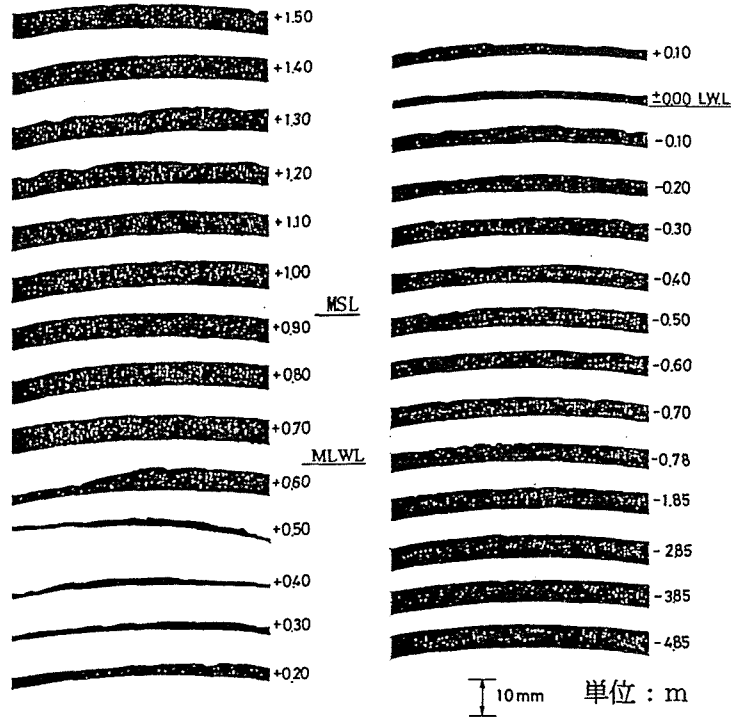


図-2. 10 切り取り試験片の断面状況

e) 海底土中部においては海水中よりも酸素の供給はわずかなので、腐食速度はさらに小さく0.03~0.05mm/y程度である。

なお、200数例の施設の調査結果よりHWL下の腐食傾向を整理すると図-2. 11のように大きく三つのパターンに分類することができる<sup>8)</sup>。鋼矢板式構造物および鋼管杭式構造物では、パターンaはMLWL直下付近に大きい集中腐食が発生する場合で、パターンbはパターンaと同様に集中腐食が発生するが、パターンaほどは大きくない場合である。さらに、パターンcはa

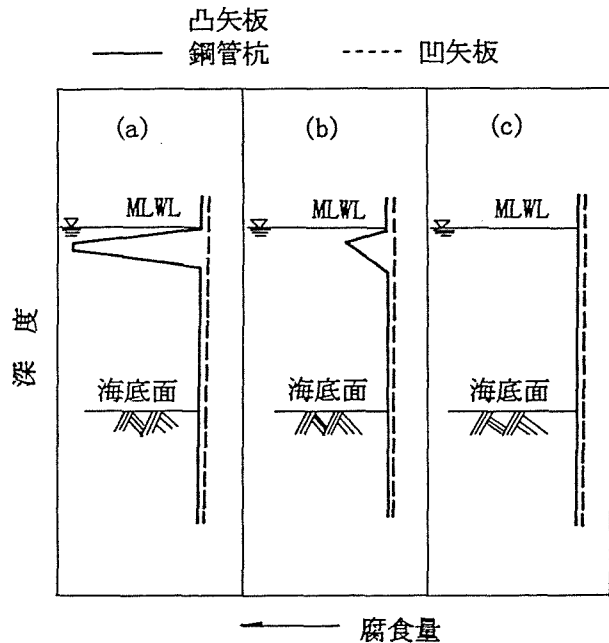


図-2. 11 鋼矢板、鋼管杭構造物の腐食パターンの分類

やbのように集中腐食は発生せずに、その箇所の腐食速度も0.1mm/y程度かそれ以下の場合である。

以上のように、港湾鋼構造物の腐食については、図-2.9のHWL上の飛まつ帯、MLWL直下付近に見られるマクロ腐食セルの形成による集中腐食の発生が重要である。

## (2) 集中腐食と主な環境要因

### a) 集中腐食とその被害

港湾鋼構造物の腐食による被害のうち、とくに集中腐食の発生に伴う鋼材の肉厚の減少、および穴の発生等により構造物が陥没する被害が甚大である。

図-2.12、図-2.13は集中腐食による鋼矢板式構造物、鋼管杭式構造物の被害の様子を模式的に示したものである。図-2.12の鋼矢板式構造物ではMLWL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の流出が起こり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には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-2.13の鋼管杭式構造物では、MLWL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コンクリート上部工を支えきれなくなり、その結果岸壁そのものが陥没する。

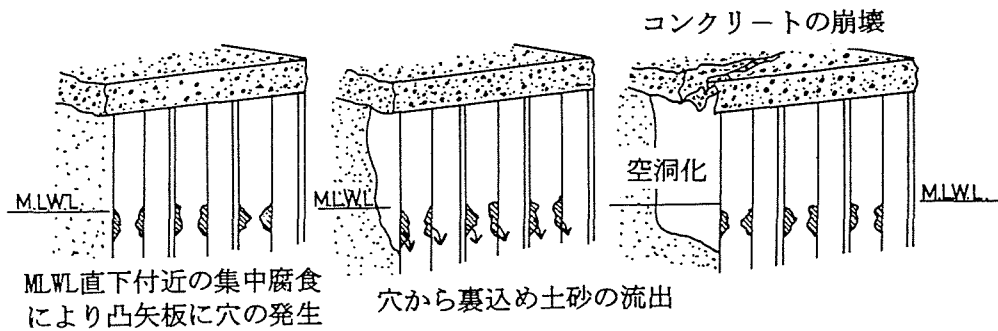


図-2.12 鋼矢板構造物の集中腐食による被害

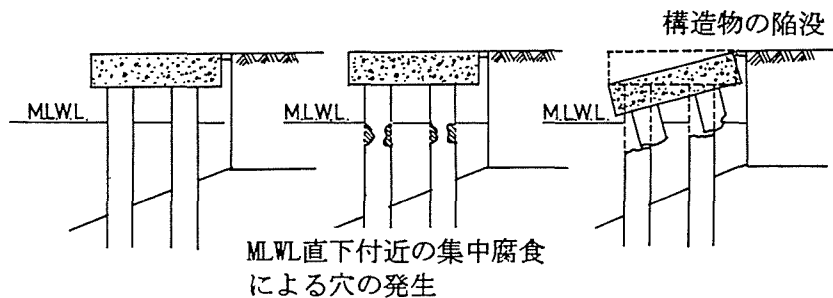


図-2.13 鋼管杭構造物の集中腐食による被害

### b) コンクリート上部工下端位置の影響

コンクリート上部工下端とMSL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MLWL直下付近とMSL付近の面でマクロセルを形成する



ために生じる現象であるから、カソード部になるMSL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、MLWL直下付近から流出するマクロ腐食電流を鋼材露出の状態のとき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。図-2. 14はコンクリート上部工下端とMSLの位置関係と腐食の発生の頻度を整理したものであるが、集中腐食の発生頻度は、コンクリートの上部工下端がMSLより上にある場合には多く、逆にコンクリート上部工下端がMSLより下にある場合には少ないことがわかる。

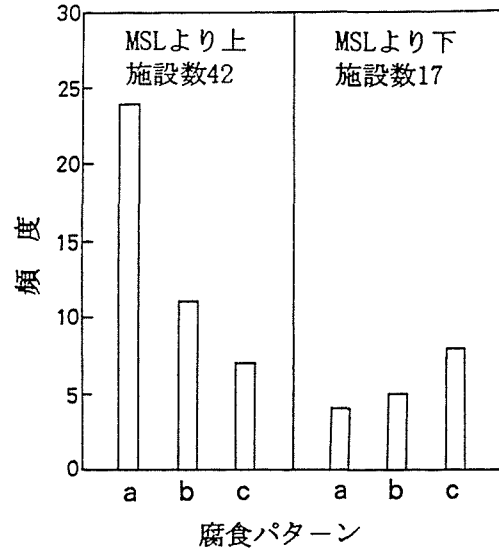


図-2. 14 コンクリート上部工下端深度に対する腐食パターンの区分

c) 河川水の影響

河口港のように淡水の流入するところでは、その影響によって鋼構造物に集中腐食が発生することがある<sup>9)</sup>。一般に河川水は海水よりも比重が小さいので、淡水が上層、また海水が下層となる塩水クサビが形成され、このような条件では淡水中にある鋼材の電位 (-550mV程度) が海水中にある鋼材の電位

(-600~-650mV程度) よりも貴な値を示す。その結果、図-2. 15に示すよ

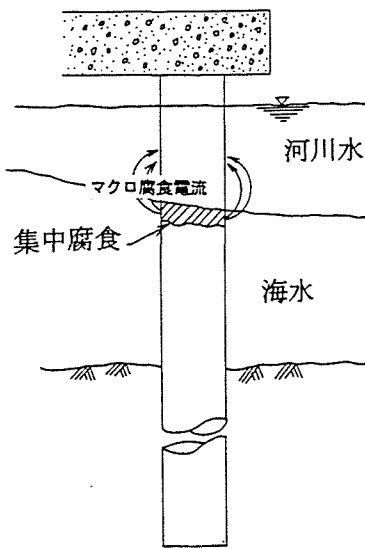


図-2. 15 河口付近の集中腐食の状況

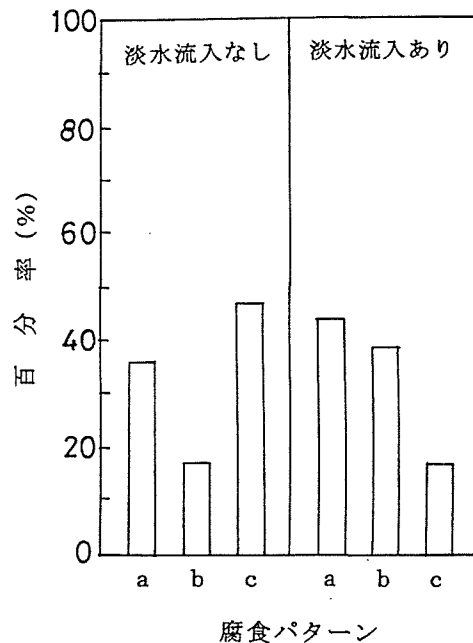


図-2. 16 淡水の有無による腐食パターンの区分

注. (腐食パターンは図-2. 11参照)

うに淡水中にある鋼材がカソード部、また海水中にある鋼材がアノード部となり、この間に大きな電位差が生じマクロ腐食セルを形成し、淡水層直下の海水中の鋼材に激しい集中腐食が起こる。図-2. 16<sup>8)</sup>は淡水の流入の有無と集中腐食の傾向との関係を示したものであるが、淡水の流入する構造物では集中腐食の頻度(図-2. 11のa、bのパターン)が多く、河川水の流入しない場合には集中腐食の少ない傾向(cのパターンが多い)が見られる。

このほかに構造形式のアノード/カソード面積比<sup>10)</sup>が極端に小さくなると集中腐食を起こす原因になるともいわれている。

### 2. 3 港湾コンクリート構造物の塩害による劣化

コンクリート構造物の塩害による劣化は塩化物イオンによってコンクリート中の鉄筋の不動態皮膜を破壊されることにより腐食が始まり、錆の膨張圧によりひびわれが発生して劣化を促進させることである。ここでは、コンクリート構造物の被害状況と塩害による腐食について述べる。

#### (1) 塩害による劣化の状況

運輸省港湾局では、昭和59年度に全国の約500の係船岸を対象とした構造物の劣化の目視調査を行った<sup>11)</sup>。

図-2. 17は栈橋上部工の塩害による被害程度をコンクリートのひびわれ発生程度で、3段階に分類し建設年度別に整理したものである。この図を見ると、建設後15~20年程度経過した構造物にひびわれ発生が多いことがわかる。また、塩害による被害がみられる栈橋

の部位はコンクリート上部工の下部の床版や桁の下面で、表-2. 1に示すようにとくに桁に多い。これは、桁が床版よりも海水面に近いことにより海水の飛沫を多く浴びるためである。また、塩害による劣化の顕著な箇所は標準的な横栈橋でも場所によって異なり、例えば、図-2. 18で栈橋背後の土留壁によって波が反射され海水の飛沫が直接当たる斜線部分の桁や、床版①に、塩害による劣化が多いのに対し②の部位では少ない。また、図-2. 19は①、②の部位の塩化

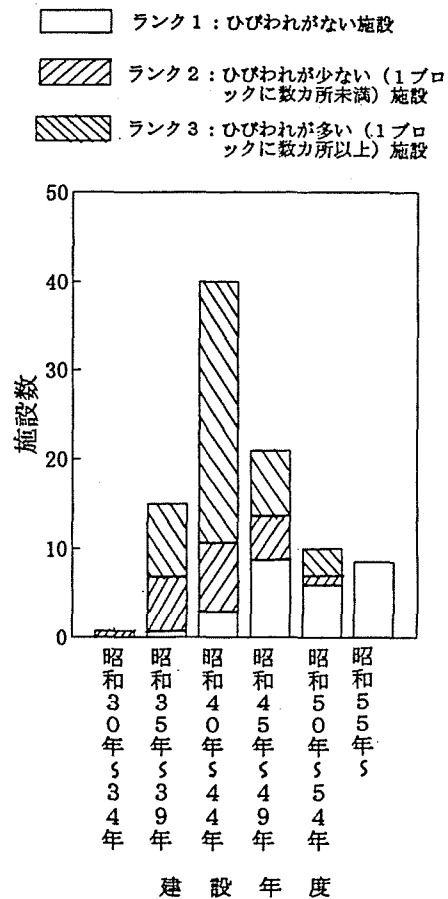


図-2. 17 建設年度別によるコンクリート上部工の劣化程度

物含有量の測定結果であるが、部位①の方が②よりも含有量の多いことが特徴である。図に示す塩化物含有量の単位はコンクリートに対するNaClの重量%である。

表-2. 1 棧橋上部工の被害の状況 (単位: 施設数)

劣化状況 部材名	無劣化施設	劣化施設			
		鉄筋の腐食		コンクリート自体の劣化	外力による損傷
		塩害	かぶり不足		
桁	22	27	8	41	31
床版	45	6	16	32	4

注 施設数は全体で95施設。  
劣化施設については、その原因が複数個ある場合には各々に計上されており、累計は95にならない。

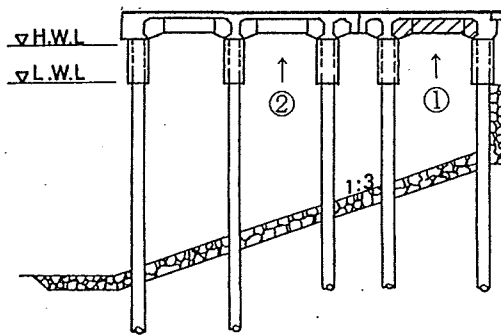


図-2. 18 横棧橋の断面図

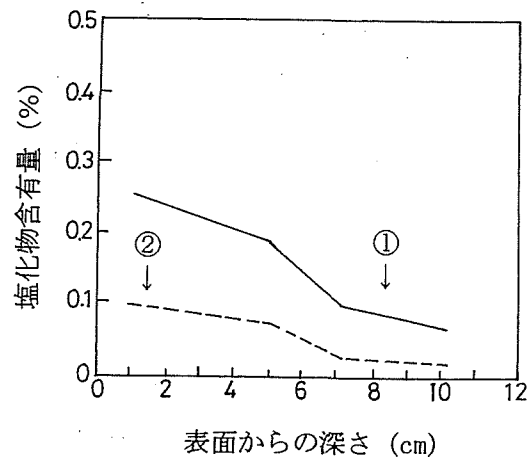


図-2. 19 横棧橋の部位別の塩化物含有量

## (2) 塩害による腐食

港湾コンクリート構造物は、施工後比較的新しい時期ではコンクリート中の鉄筋は水酸化イオン (OH<sup>-</sup>) の豊富な高アルカリ (pH12~13) で覆われており、鉄筋の表面は水酸化イオンと結合  $[Fe+3(OH)^- = 2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O + 3e^-]$  して、緻密な不動態皮膜 (20~60Å厚の薄い酸化皮膜) を形成しているため腐食作用から保護されている。しかし、海水の飛沫や海塩粒子を直接浴びて時間の経過とともにpHが低下したり、また外部からコンクリート内部へ鉄筋の不動態皮膜を破壊する有害な成分が浸入しやすくなる。有害成分にはハロゲンイオン (Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>)、硫酸イオン (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) や硫化物イオン (S<sup>-2</sup>) 等の陰イオンがある。このうち塩化物イオ

ンの作用が最も強い。塩化物イオンの浸入があると、低品質コンクリートやかぶりが不足すると早期にコンクリート中の鉄筋の腐食が起こりやすくなる。コンクリート中の塩化物イオン量が $0.9\sim 1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度になると不動態皮膜が破壊されるといわれている。また、コンクリートの練り混ぜ時に混入したNaClはひとまず塩化物イオンとナトリウムイオンに解離し、このうちセメント重量の約0.4%に相当する量の塩化物イオンがFriedel氏塩として固定化されるものの、これを越える量の塩化物イオンは細孔溶液中に存在し鉄筋の不動態皮膜を破壊する<sup>12)</sup>。さらに、コンクリート中の塩化物イオン量と水酸化イオン量の比が0.6以上になると

( $\text{Cl}^-/\text{OH}^- > 0.6$ ) 不動態皮膜が破壊される。塩化物イオンによって不動態皮膜が破壊された部分がアノード部、破壊されていない部分がカソード部となり、マクロ腐食電池が形成され腐食が生じる。腐食が進み腐食生成物（錆）が多くなると錆の膨張圧（錆の体積は元の鉄の体積の2.5倍と言われている）によってコンクリートのひびわれが発生する。このひびわれを通して外部から腐食要因（酸素、水、塩化物イオン）が一層侵入しやすくなり、鉄筋の腐食を促進し、ついにはコンクリートの剥離に至る。図-2. 20はコンクリート中の鉄筋の腐食の過程を示したものである。写真-2. 1は栈橋のコンクリート上部工の塩化物イオンの浸入による劣化状況（塩害）である。

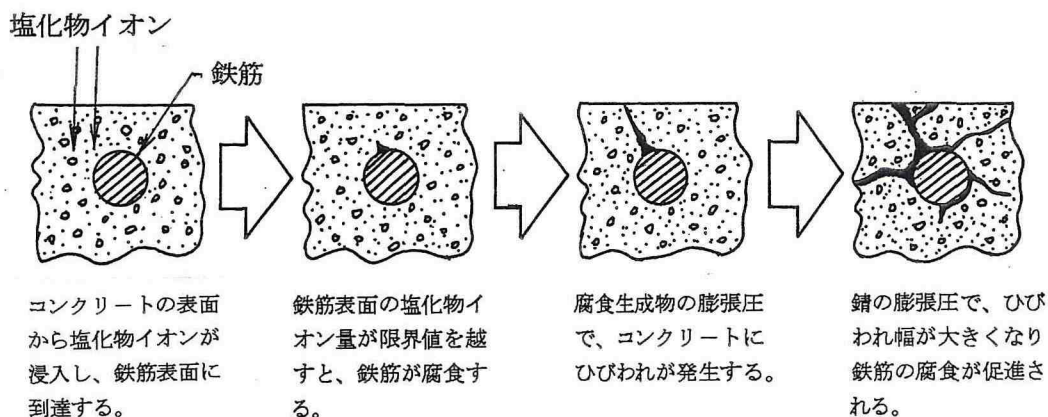


図-2. 20 コンクリート中の鉄筋の腐食過程

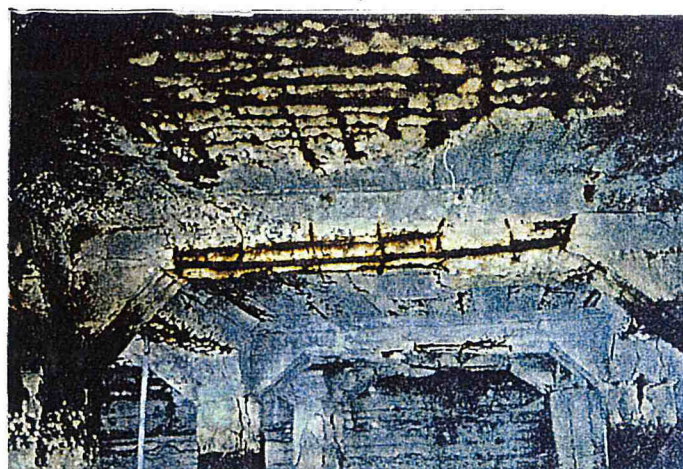


写真-2. 1 コンクリート構造物の塩害による劣化状況

なお、コンクリートの劣化に影響を及ぼす海水中に溶存するイオンには、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ および $\text{Mg}^{2+}$ 等が考えられ、これらの塩化物はセメント水和生成物と反応し易く、これらイオンを含む塩化物のコンクリートに及ぼす作用は、硫酸塩とクリンカー鉱物中の $\text{C}_3\text{A}$ とが反応して生成する膨張性物質のエトリンガイトによるものである。エトリンガイトは海水中の硫酸塩、とくに $\text{MgSO}_4$ もしくは $\text{Na}_2\text{SO}_4$ がセメントの水和物である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応して石膏( $\text{CaSO}_4$ )を生成し、この石膏が $\text{C}_3\text{A}$ の水和物と反応してエトリンガイト( $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )を生成する。このエトリンガイトは多量の結晶水を含むため膨張を示し、その膨張圧が拘束される場合は内部組織が破壊されて劣化をもたらす<sup>13)</sup>。その他に直接 $\text{Cl}^-$ の作用としては海水中より供給される $\text{NaCl}$ や $\text{MgCl}_2$ がセメント水和生成物と反応し $\text{CaCl}_2$ や $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を生成し、海水とセメントの反応生成物である $\text{CaCl}_2$ と $\text{C}_3\text{A}$ が反応してクロロアルミネート( $\text{C}_3\text{A}\cdot \text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )の結晶化が進み、膨張を示す。さらに、クロロアルミネートは海水中の $\text{SO}_3^{2-}$ と反応してエトリンガイトを生成する。

## 2. 4 港湾鋼構造物の電気防食法

### (1) 電気防食法の原理

電気防食は図-2. 21のPourbaixによる簡略化した鉄の電位とpHの関係図<sup>14)</sup>より説明できる。この図から、電気防食法として二通りが考えられる。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陽極防食と言う。いま一つは直流電流によって金属表面の局部電池の陰極と陽極の電位差を消滅させ鋼材の電位をC部の金属の安定領域に保持する方法で陰極防食と言う。しかし、陽極防食は高い電位を保持することが非常に困難であるので実際にはあまり適用されていない。したがって、一般に陰極防食を電気防食と呼んでいる。

図-2. 22に示すように腐食が進行している鋼材の電位はアノード部( $E_a$ )とカソード部( $E_c$ )に分かれているが、アノード部と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、腐食電流( $i_{\text{corr}}$ )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。この腐食を停止させるには、アノード部またはカソード部のいずれかをなくして腐食電池を形成させなければよい。すなわち、図-2. 22のカソード電位( $E_c$ )をアノード電位( $E_a$ )まで分極するように外部から電流( $i_p$ )を流せばよい。ここに、 $i_p$ は所要防食電流密度、 $E_a$ は防食電位である。

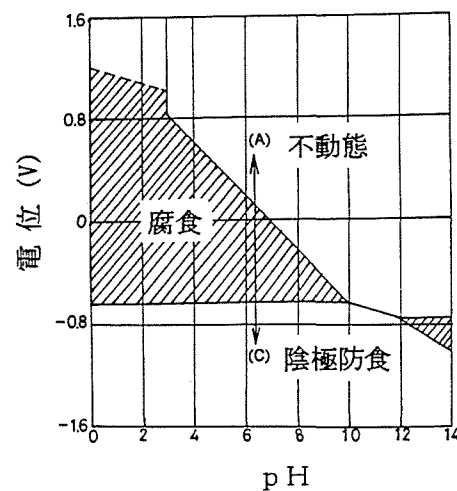


図-2. 21 鉄の電位とpHの関係図<sup>14)</sup>

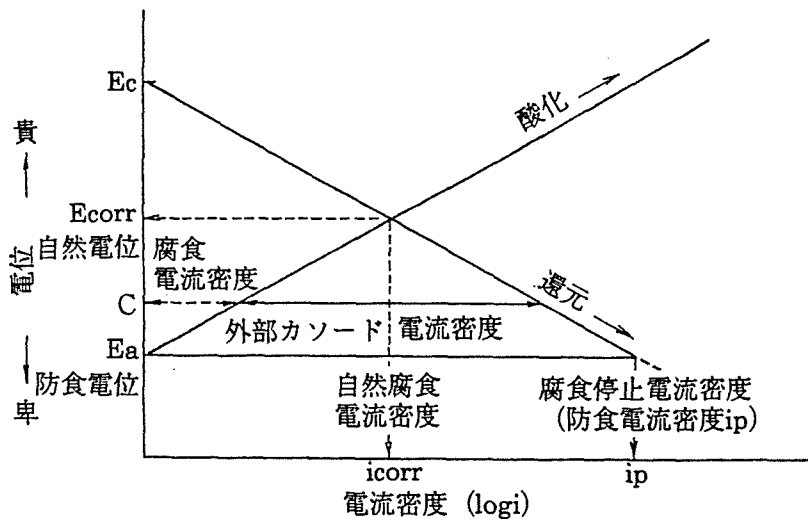


図-2.22 電気防食の概念図

### (2) 電気防食法の分類

電気防食法の方式には、外部電源方式と流電陽極方式がある。外部電源方式は、図-2.23に示すように直流電源装置の(-)側に鋼材からの端子を、また補助電極の端子を(+)側に接続して直流電源装置より防食電流を流す方法である。これに対して流電陽極方式は、図-2.24に示すように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。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。鋼材に対する陽極には亜鉛、アルミニウム、マグネシウム等の合金が用いられる。このうち港湾鋼構造物には一般にAl陽極が用いられている。

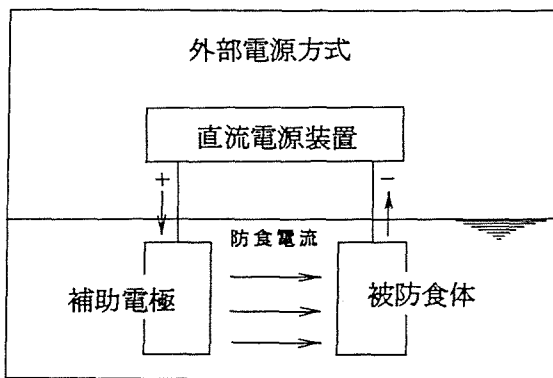


図-2.23 外部電源方式の概念図

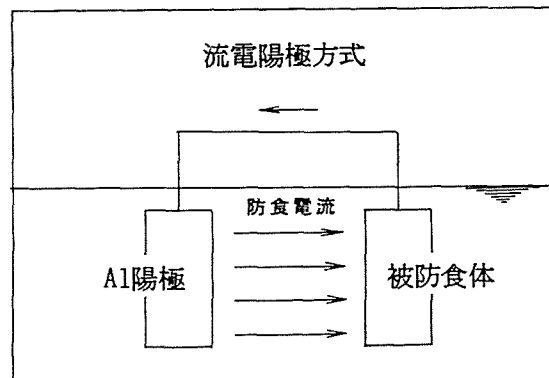


図-2.24 流電陽極方式の概念図

### (3) 防食基準

電気防食法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り評価できる。たとえば、表-2.2<sup>15)</sup>に示す各基準電極の防食電

位より電位の測定値が卑であれば防食効果があると判定できる。

表-2. 3<sup>15)</sup>は清浄海域における鋼材を防食するために必要な設計防食電流密度でおおむねこれらの値を流せば防食電位に達する。しかし、防食電流密度は水質によって影響されることがわかっており、汚染海域では経験的に少し大きくしている。

表-2. 2 電気防食の各種基準電極  
に対する防食電位<sup>15)</sup>

基準電極	防食電位
飽和甘こう電極 (SCE)	-770mV
人工海水塩化銀電極 (Ag/AgCl)	-780mV
飽和硫酸銅電極 (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	-850mV

表-2. 3 電気防食  
の設計防食電流密度<sup>15)</sup>

環境	防食電流密度
海水中	100mA/m <sup>2</sup>
石積部	50mA/m <sup>2</sup>
海底土中部	20mA/m <sup>2</sup>

#### (4) 港湾鋼構造物の電気防食の実施の経緯

わが国における港湾鋼構造物の電気防食法の施工は、1953年（昭和28年）尼崎港防潮堤の水門扉でMg合金陽極を用いたものが最初である。同港では1954年に開門鋼矢板式岸壁に対しても外部電源方式による電気防食が実施されている。この時期は外部電源方式による施工が大半を占めていた。その後、外部電源方式の直流配線距離を極力短くするために、電源装置を小型簡素化して対象施設に分散設置し、一ヶ所において調整する方式が開発された。

昭和37年頃から、それまで主に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、各地で試験施工した結果、経済的に外部電源方式に匹敵し、耐久性に富み、維持管理をほとんど必要としないことなどの理由から、次第に流電陽極方式が外部電源方式にとって代わるようになった。

昭和40年代に入りAl陽極の需要が急速に伸びた。これは主としてわが国の経済成長に伴い港湾施設の新設と大型化が進み、また、いままでの外部電源方式に代わって発生電流の大きなAl陽極の経済性が評価され、流電陽極方式が多く採用されるようになったためである。当時Al陽極の取り付け方法はつり下げ式であったが、昭和45年頃から水中溶接法が開発されて安全性および工期が大幅に短縮された。

その後、海洋・港湾施設の長期耐用の一環として、電気防食の設計および保守管理に関する基準作りが運輸省、建設省で独自に行われた。そして、昭和51年

(1976年)に運輸省が、新設の港湾鋼構造物に対する電気防食 (Al陽極) の適用を設計基準に明記し、昭和61年 (1986年)には既設の鋼構造物についても補修工法として電気防食を適用することとした。一方建設省は、昭和58年 (1983年)に海洋鋼構造物の防食設計指針案をまとめ、昭和66年 (1991年)に改訂版「海域に

設置される土木鋼構造物の電気防食設計指針案・同解説」を提示し、電気防食の適用を明文化した。

今日、港湾鋼構造物への電気防食の方式は、100%流電陽極方式（AI陽極）である。その理由は一度設置してしまえば外部電源方式のように電源を必要とせず、また電力費が必要なく、定期的に電位を測定することにより点検や管理ができるので、維持管理の面で外部電源方式に比べ有利なことである。

#### （５）港湾鋼構造物の電気防食法の課題

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、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。また、維持管理についても定期的な実施し、防食状態にあるかどうか現状を常に把握しておくことが重要である。電気防食の調査や実鋼構造物の維持管理を行ってきた結果、以下のような事項が課題として上げられる。

##### ①汚染海水中における設計防食電流密度の設定

近年、港湾環境における海水の汚染が進んできていて、港湾鋼構造物に電気防食の設計防食電流密度が適切でないために、施工後にその構造物の電位が防食電位に達せず陽極の追加や取付方法を再検討する等の事例がしばしば生じている。これは施設前面の水域の水質の影響によるもので、水質の汚染度によっては設計防食電流密度を通常の場合よりも大きくとる必要がある。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100mA/m<sup>2</sup>とされている。しかし、汚染海域では100mA/m<sup>2</sup>では不足するようで、清浄海域よりも大きくとる必要があると考えられ、電気防食に対する汚染海域と清浄海域を判定するための適切な指標を与え、設計防食電流密度を適切に設定する必要がある。

##### ②海底土中部の設計防食電流密度

海底土中部の深度方向における設計防食電流密度は通常20mA/m<sup>2</sup>とされていて、水深の浅い部位から深い部位まで一律に設置され深度別の区分はとくに設定されていない。しかし、根入れの長い鋼管杭式構造物等においては、浅い部位と深い部位とでは適切な防食電流密度が異なると考えられるので、海底土中部における深度方向の防食電流密度を明らかにすることは防食設計上重要である。

##### ③サンドエロージョンに対する電気防食の適用性

波浪海域や波除堤等の海底面付近において砂の移動に伴う摩耗作用によって大きい腐食が発生し、肉厚6mmのものが10年で穴のあいた事例がある。砂の摩耗作用による腐食現象はサンドエロージョンといわれ、これを防止するための適切な対



策が早急に望まれている。海底面付近では被覆防食の施工が困難であるので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い。さらに、波浪海域における波浪と電気防食の電位および電流の変動についても明らかにし、防食効果を検討する必要がある。

## 2. 5 港湾コンクリート構造物の電気防食法

### (1) 電気防食法の原理

コンクリート中の鉄筋の防食法としては、たとえば、コンクリートの表面に塗装材を塗装し塩化物イオンの浸入を防止する表面処理工法や、ひびわれの発生している表面または劣化箇所をはつり、パテ状エポキシ樹脂、樹脂モルタル、セメントモルタル等を充填する充填工法等、各種の防食および補修工法が検討されている<sup>16)</sup>。しかし、図-2. 25に示すようにすでに多くの塩化物イオンがコンクリート中に浸入してしまっている場合には、部分的に補修を行っても、ほかの部分で再び鉄筋の腐食が起こることがある。

このように、従来から行われてきた物理的な補修工法は腐食の抑制効果はあるものの腐食を停止させるには十分ではない。そこで、コンクリート中の鉄筋の腐食を完全に停止させる対策法として電

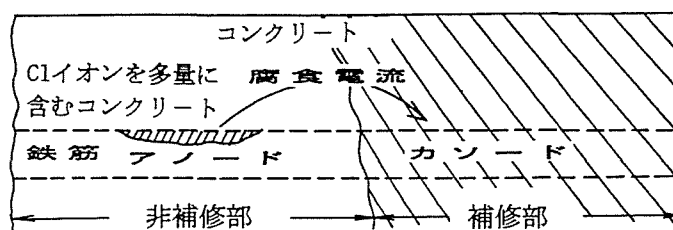


図-2. 25 コンクリート中の鉄筋のマクロ腐食発生の概略図

気防食法を適用する。鉄筋コンクリートにおける電気防食の基本原理は鋼構造物と全く同じであり、腐食環境のもとで、金属が保持する電位を外部の電流によって強制的に変化させ、腐食の生じない電位まで移行させればよい。すなわち、コンクリート表面に陽極を取り付けてコンクリート中の鉄筋へ微弱な直流電流を流すことにより腐食は防止する。

### (2) 電気防食方式の種類

電気防食法の方式には、鋼構造物と同様に外部電源方式と流電陽極方式の二つの方式がある。図-2. 26に外部電源方式、図-2. 27に流電陽極方式の概略図を示す。

#### a) 外部電源方式

外部電源方式は、コンクリート表面付近に不溶性の陽極材を埋設して、コンクリート中の鉄筋、直流電源装置、および陽極材とで電気回路を作り、陽極材から直流電流をコンクリート中の鉄筋へ流すことによって防食する方法である。外部

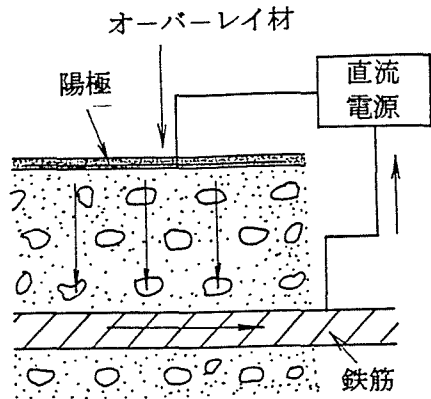


図-2. 26 外部電源方式の概略図

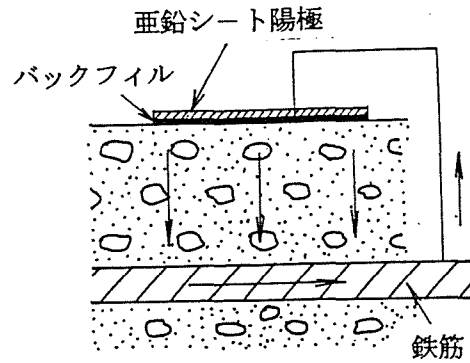


図-2. 27 流電陽極方式の概略図

電源方式は、防食電流や電位を任意に調整できるためにいろいろな環境への適用が可能である。しかし、電源装置、防食を維持するための電力費や定期的な維持管理が必要である。

外部電源方式には定電流法と定電位法の二つがある。前者は常に一定の電流をコンクリート中の鉄筋へ流す方法である。また、後者はコンクリート中へ基準電極を埋設してコンクリート中の鉄筋の電位を設定した電位に常に保つようにする方法である。通常は定電流法によって防食を行っている。

外部電源方式は使用する陽極材の種類によって分類されるが、現在、わが国では代表的なものとして以下に示す二つの方式が実用化されており、実際の港湾構造物に施工されている。

### イ. チタンメッシュ方式

陽極材には導電性の高い白金系金属の酸化物皮膜を施したチタンのエキスパンドタイプのメッシュ状のものを用いる。このチタンメッシュ陽極材をコンクリート表面に固定用のピンを用いて固定し、その上にオーバーレイ材を被覆する。オーバーレイ材には主に無収縮モルタルが用いられる。オーバーレイ材の厚みは約10mm～15mm程度が必要である。電気回路は図-2. 26の通りである。チタンメッシュ方式の構成を図-2. 28に示す。

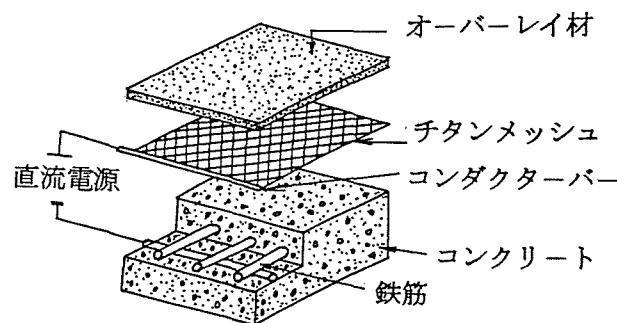


図-2. 28 チタンメッシュ陽極方式の構成

## ロ. 導電性塗料方式

この方式による電気防食は一次陽極と二次陽極とによる。図-2. 29のようにまず一次陽極はコンクリート表面に一定の間隔(数10cm)をとって溝を切り、白金メッキしたチタン線を溝の中に固定し、ついで、導電性塗料あるいはバックフィル材(流電陽極方式で用いる)を溝の中へ充填する。また、二次陽極として、カーボンが混入されている導電性塗料をコンクリート表面に塗装する。そして、その上に保護被覆材として耐候性に優れた上塗り塗料を塗装する。上塗り塗料の塗膜は絶縁性で通気性を有するものを用いる。電流は直流電源からまず一次陽極の白金チタン線に流れ、つぎに二次陽極の導電性塗料に伝わりコンクリートの全面に流れる。この方式の特徴は施工が容易であること、および導電性塗料や上塗り塗料の塗り替えが簡単にできることである。また、上塗り塗料の色を替えることができるので美観にも優れている。

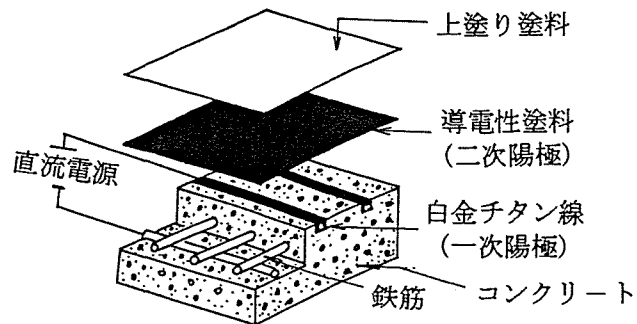


図-2. 29 導電性塗料方式の構成

## b) 流電陽極方式

流電陽極方式は、海水中の鋼材の防食法と同様に鉄よりも電位が卑な金属を陽極材として用いるもので、図-2. 27の概略図に示すように、亜鉛シート板とコンクリート中の鉄筋とを短絡して亜鉛と鉄筋との電位差を利用して防食する方法である。亜鉛シート板から鉄筋へ電流が流れる原理は以下の理由による。

表-2. 4は水素電極を基準とした金属の活性系列<sup>17)</sup>を示したものであるが、この表の上に位置する金属のイオン化傾向が大きい。すなわち、Feよりもイオン化傾向の大きい材料を陽極として用いれば防食できることとなる。例えば、Fe (-440mV) とZn (-763mV) の電位差は-323mVとなり、FeとZnを短絡するとZnがアノード部、Feがカソード部を形成してZnからFeへ電流が流れてFeは防食される。一般には亜鉛シート板が用いられている。

亜鉛シート板はコンクリート表面側になる面は露出したままにしておき、別の面は保護カバーで覆い空気中に亜鉛シート板が露出しないようにする。そして、亜鉛シート板をコンクリートに打ち込まれたアンカーボルトによって固定し、コンクリート表面との間にパテ状のバックフィル材を充填する。このバックフィル材はコンクリート表面への密着性を良くするとともに、バックフィル材によってコンクリート表面は常に湿潤状態が保たれるため、安定した防食電流を長期間に

わたってコンクリート中の鉄筋へ供給することができる。バックフィル材には石膏、ベントナイト、硫酸ナトリウムを水で混ぜたものが用いられる。

この方式の特徴は、亜鉛シート板そのものが電源となるので、外部からの電源が不要で電気工事を必要とせず、電力費が必要ないことである。一体成形化している亜鉛シート板のパネルを取り付けるだけで済むので施工が容易である。

### c) 電気防食法の特徴

鉄筋コンクリート構造物に対する電気防食法の特徴は以下のとおりである。

①鉄筋は電気化学的反応により腐食するので酸素や水分を遮断しなくても十分な防食電流をコンクリート中の鉄筋へ流すことによって腐食を防止することができる。

②通常、物理的な補修方法ではコンクリート中の塩化物イオンを完全に除去するか酸素を遮断しないとコンクリート中の鉄筋の腐食を停止させることができない。しかし、電気防食法の場合にはコンクリート中に塩化物イオン

が存在していても問題はない。また、物理的な強度や付着を失った部分だけをはつり、補修するだけですむるので補修部分が最小限ですむ。

③電気防食を行うことによってコンクリート中の塩化物イオンを陽極側へ移動させることができるので塩化物イオンの除去方法としても利用できる。

なお、大きい電流をコンクリート中の鉄筋へ流し続けるとアルカリ金属イオンが鉄筋周辺へ集積し付着強度を低下させるので注意が必要である。

### (3) 防食基準

現在適用されている防食基準は表-2.5に示すとおりである。表-2.5では、いずれの制定機関でも100mV復極基準を防食効果の判定に適用している。この方法は通電前後の電位変化を基準として防食状態を管理するものであり、電源を切った直後の鉄筋電位（インスタント・オフ電位という）と、不通電状態で数時間から数日間放置した後安定した自然電位を測定し、この差が100mV以上あれば防食状態にあると判定される。図-2.30に100mV復極基準の概略図を示す。電流密度の基準は与えられてはいないが、一般にはコンクリート表面積に対して10~20mA/m<sup>2</sup>程度とされている。しかし、既設構造物で塩化物イオンが多量にコン

表-2.4 金属の活性系列<sup>1)</sup>

金属	標準電極電位 (V)	反応の有無
K Na Li Sr Ca Mg	-2.925 -2.714 -3.045 -2.890 -2.866 -2.363	酸、水に反応する
Al Zn Fe Pb Sn	-1.662 -0.763 -0.440 -0.126 -0.136	酸と反応する
H	0.000	
Cu Hg Ag	0.337 0.789 0.799	強い酸化剤と反応する
Pt Au	1.20 1.50	酸、酸化剤に侵されない

表-2.5 コンクリート構造物の電気防食法による各種の防食基準

制定機関	防食基準	対象構造物	制定年度	基準、報告書等の名称
(財) 沿岸開発技術研究センター	100mV復極基準	常時大気中にある新設および既設の港湾コンクリート構造物	1987	港湾構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書 <sup>19)</sup>
建設省	100mV復極基準	橋脚、橋桁、橋床版等のコンクリート構造物	1988	コンクリート構造物中の電気防食要領(案) <sup>20)</sup>
(社) 日本コンクリート工学協会	①海中の構造物の電位を-850mV(CSE)より卑に設定。 ②大気中の構造物は100mV復極基準	新設の海洋コンクリート構造物	1990	海洋コンクリート構造物の防食指針(案)、改訂版 <sup>22)</sup>
NACE (米国腐食工学協会)	①100mV復極基準 * ② 自然電位分布より防食電位を設定する。 ③ ElogI試験から防食電流を設定。	大気中にある新設および既設コンクリート構造物	1990	Standard Recommended Practice Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures <sup>21)</sup>

\* ①～③のいずれかを用いる。

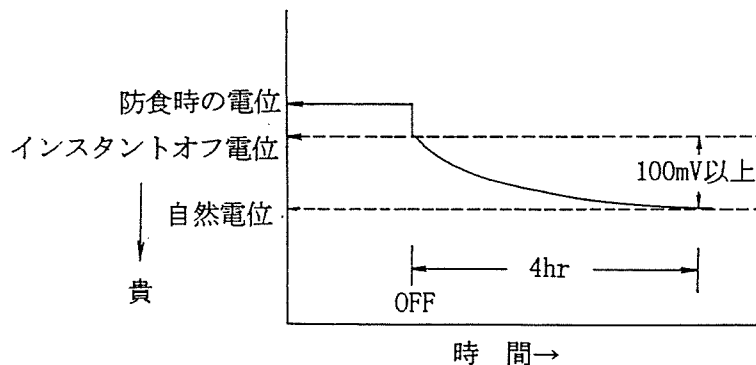


図-2.30 100mV復極基準の概念図

クリート中に浸入している場合には、この2倍程度の電流密度が必要とされている。

#### (4) コンクリート構造物の電気防食の実施の経緯

コンクリート構造物への電気防食は、最初に米国やカナダにおいて路面凍結防止用の塩の散布によるコンクリート中の鉄筋の腐食を防止する対策として試みられた。その後、十数年間の研究と現地試験によって効果が認められ、電気防食法は塩害に対する腐食防止対策法として採用されてきている。1976年には米国のFHWA(連邦道路管理局)の補修指針に電気防食が採用された。さらに1982年にはFHWAから『塩化物イオン量の如何にかかわらず、塩で汚染された鉄筋コンクリー

ト橋床版の腐食を止めることが確認された唯一の補修方法は電気防食である』という公式見解も出されている<sup>18)</sup>。また、1990年には、米国腐食工学協会 (NACE:National Association of Corrosion Engineers) により、大気中にあるコンクリート構造物に対する電気防食の実施要綱が示された。

わが国においては、1980年頃から主として日本海沿岸部や沖縄県の海岸に近い道路橋およびその他のコンクリート構造物の塩害が社会問題となり、ついで港湾コンクリート構造物についても顕在化してきたところから、これを契機として建設省および運輸省において各種の腐食防食試験が行われ、これらのコンクリート構造物の補修ならびに防食に関する基準が作成された。そして1983年に「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」(日本コンクリート工学協会編)において、海洋コンクリート構造物中の鋼材への有効な防食法として、また1987年には「港湾構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書」(財)沿岸開発技術研究センター<sup>19)</sup>がとりまとめられ、常時大気中にあるコンクリート構造物に対する劣化防止法として電気防食法が取り上げられた。

建設省は1988年に「コンクリートの耐久性向上技術の開発」<sup>20)</sup>の報告書の中で、

「コンクリート構造物中の電気防食要領(案)」を示し、電気防食の実用化への検討を始めた。わが国のコンクリート構造物への電気防食法の施工の実績は

表-2. 6 (1992年6月現在)に示す通りで、港湾や橋梁で合計30の施工件数が見られる。施工面積は5174m<sup>2</sup>で、このうち港湾施設は4420m<sup>2</sup>と橋梁等に比べて多い。

表-2. 6 わが国のコンクリート実構造物への電気防食法の施工実績

施工場所	件数	施工面積 (m <sup>2</sup> )
港湾施設	19	4420
橋梁	11	644
その他	3	110
合計	33	5174

また、表-2. 7は港湾コンクリート構造物への適用の事例であるが、わが国の港湾コンクリート構造物への最初の適用は清水港富士見埠頭である<sup>23)</sup>。

#### (5) 港湾コンクリート構造物の電気防食法の課題

コンクリート構造物への電気防食法の適用に関しては、わが国ではこの工法が開発されてからまだ日も浅く、信頼性の高い防食法にしていくには解決しておかなければならない事項が多く残されていて、コンクリートあるいは防食関係の研究を実施している研究機関等で電気防食法に関する研究が数多く行われている。また、コンクリート工学協会によって電気防食法に関する検討委員会<sup>24)</sup>も行われている。前述したように、この工法は北米のハイウエー等に主に適用されていたが、その防食の基本的な考え方は同じでも、この工法を港湾環境で適用する場合にその環境に見合った施工や設計を考える必要がある。現状の課題としては以下に示す事項が考えられる。

表一2. 7 港湾構造物への電気防食法の施工事例

適用施設名	四日市港 南埠頭 -14m岸壁		清水見埠頭		川崎港 千鳥町地区 -10m岸壁		横浜港		東京埠頭	
	電気防食 の方式	流電陽 極方式	外部電 源方式	流電陽 極方式	流電陽 極方式	外部電 源方式	外部電 源方式	外部電 源方式	外部電 源方式	流電陽 極方式
陽極材	亜鉛シ ート板	亜鉛シ ート板	チタン 導電性塗料	亜鉛シ ート板	亜鉛シ ート板	チタン 導電性塗料	チタン 導電性塗料	チタン 導電性塗料	チタン 導電性塗料	亜鉛シ ート板
適用場所	棧橋下部 の梁	棧橋下部の 床版、梁	棧橋下部の 床版、梁	棧橋下部の 床版、梁	棧橋下部の 床版、梁	棧橋下部 の床版	棧橋下部の 床版、梁	棧橋下部の 床版、梁	棧橋下部の 床版、梁	棧橋下部の 床版、梁
新設、補修 の区分	新設に伴い 電防の実施	補修施工	補修施工	補修施工	補修施工	補修施工	補修施工	補修施工	補修施工	補修施工
適用面積 (㎡)	14	6	6	1691* 6632*	52	35	136* 2343*	60* 2393*	72* 2323*	
施工年 (年)	1988	1987	1989	1990 1991	1989	1988	1990 1993	1990 1993	1990 1993	

\* : 1990年施工、2\* : 1991年施工、3\* : 1993年施工

### ①環境要因に対する電位、電流の傾向（主に流電陽極方式）

港湾環境において塩害を受けやすい場所は棧橋等のコンクリート上部工の下面である。この部位は常に海水飛沫や多量の海塩粒子を直接受け、腐食には非常に過酷な環境である。このような環境へ電気防食を実施する際には温度、天候およびコンクリートの湿潤状態等の環境要因に対する電位や電流の影響を把握しておく必要がある。

### ②港湾構造物に対する防食基準の考え方

現在、防食基準としては100mV復極基準が広く適用されている。新設の構造物や塩化物イオンの浸入の少ない比較的新しい構造物に対しては、コンクリート中の鉄筋の腐食は少ないので100mVの分極量（100mV復極基準）で十分対応できるものと考えられる。しかし、長期間経過した既設のコンクリート構造物において、すでに多量の塩化物イオンが浸入している場合には塩化物イオンの作用によってコンクリート中の鉄筋の不動態皮膜が破壊されてマクロ腐食が発生していると考えられる。コンクリート中に多量の塩化物イオンを含んだ既設構造物へ電気防食を実施する場合に、はたして100mV復極基準の適用が可能か検討する必要がある。すなわち、塩化物イオンを多量に含んだ既設構造物のコンクリート中の鉄筋にはマクロ腐食が発生しているので、電流量が不足するとカソード部のみが防食されてアノード部が防食されない場合が考えられるので両極を確実に防食できる適正な防食電流密度や分極量を検討する必要がある。

この他に、コンクリート上部工の下面は潮位や波浪の影響で施工時間が制約される場所なので、施工性および耐久性の良い工法の開発が必要である。とくに、陽極材や付属材料の長期間における耐久性を検討しておくことが必要である。さらに、プレストレストコンクリート港湾構造物が増加しているところから、プレストレストコンクリートへの適用性についても検討しておく必要がある。また、アルカリ骨材反応による劣化は膨張ひびわれを原因とするために鋼材腐食についても検討する必要がある。

以上のように港湾コンクリート構造物に対して電気防食を実施する場合の現状の課題を示した。本研究では、ここに提示した事項のうち、〔環境要因が電位、電流に及ぼす影響〕と〔腐食程度による防食電流密度や分極量〕について検討するため試験を実施し、課題の解決を検討する。

### 参考文献

- 1) F.N.Speller:Corrosion Causes and Prevention,,McGraw-Hill Co., New York, p168, 1951.
- 2) A.Hache:Revue de Metallurgie, Vol. 53, No. 1, p76, 1956.
- 3) F.LaQue:Corrosion Hand Book (H.H.Uhlig), p391, Wiley, New York, 1948.



- 4) F. M. Reinhart, J. F. Jenkins: The Relationship between the Concentration of Oxygen in Seawater and The Corrosion of Metals, Proceedings of 3rd International Congress on Marine Corrosion and Fouling, pp562~577, 1972.
- 5) W. Whitman, R. Russell, V. Altier: Industrial Engineering Chemistry, Vol. 16, p665, 1924.
- 6) 阿部正美、横井聰之、大即信明、山本邦夫：港湾鋼構造物の腐食調査（函館港、横浜港、神戸港および平良港）、港湾技研資料No. 601、pp35~42、1987.
- 7) (財) 沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（改訂版）、pp17~18、1997.
- 8) 阿部正美、横井聰之、大即信明、山本邦夫：港湾鋼構造物の腐食調査資料集、港湾技研資料No. 628、pp254~256、1988.
- 9) 善一章、阿部正美：東京港および小名浜港における鋼管杭の腐食調査、港湾技研資料No. 190、pp1~15、1974.
- 1 0) 阿部正美：第38回腐食防食討論会講演集、港湾鋼構造物の集中腐食に関する研究、D-210、pp351~354、1991.
- 1 1) 大即信明：コンクリートの劣化に関する最近の研究、港湾技術研究所講演会講演集、pp161~171、1987.
- 1 2) 宇野祐一、小林一輔：塩化ナトリウムの混入がモルタルの諸性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp465~470、1990.
- 1 3) 国民科学社：最新コンクリート工学（岡田 清編）、p48、1986.
- 1 4) 産業図書：腐食反応とその制御、p417、1989.
- 1 5) 前出7)、pp53~54.
- 1 6) (社) 日本コンクリート工学協会：鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術、pp36~84、1989.
- 1 7) 日刊工業新聞社：金属防食技術便覧（腐食防食協会編）、p847、1979.
- 1 8) Federal Highway Administration、US Memorandum:Brige Decks Deterioration、A1981 Perspective、Office of Research、1981.
- 1 9) (財) 沿岸開発技術研究センター：港湾構造物の劣化・補修に関する技術調査報告書、1987.
- 2 0) 建設省：コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書、第1編、1988.
- 2 1) NACE:Standard Recommended Practice Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures、NACE Standard PR 0290-90、1990.
- 2 2) (社) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針（案）、改訂版、1990.

- 2 3) 阿部正美：コンクリートの防食（電気防食法）、作業船WORKVESSEL、  
（社）日本作業船協会、pp29～35、1995.
- 2 4) （社）日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究  
委員会報告書、1994.

## 第3章 海洋および港湾鋼構造物の電気防食法に関する試験

### 3.1 概説

海洋および港湾鋼構造物の海水中および海底土中部に対する防食法として、電気防食（流電陽極方式）が一般に適用されてきている。電気防食はすでに長期間の実績があり、その効果は認められている。しかし、電気防食が十分にその効果を発揮するためには、その環境に対応した適切な設計、施工および管理が必要である。

本章では、現在海洋および港湾鋼構造物に対する電気防食法の検討課題として取り上げられているいくつかの事項について、現地試験および調査を実施した結果をとりまとめる。

まず、3.2では実構造物における電気防食調査を行い水質と防食電流密度との関係について検討し、電気防食に対する清浄海域と汚染海域とに区分する方法を提案し、水質の違いによる設計防食電流密度について検討する。

3.3では河川水や生活排水の流入する汚染海域における深度方向に対する防食電流密度や電位の傾向を把握するとともに、海底土中部の深度方向における適正な設計防食電流密度を検討する。

3.4では波浪海域に位置する鋼構造物の電気防食法に対する波浪、海底断面変動および砂による鋼材表面の摩耗と防食電流密度や電位の関係について検討する。

### 3.2 水質と防食電流密度

#### (1) 概要

電気防食の設計においては、防食電流密度は水質等の環境条件により相当変化することが考えられるので、設計防食電流密度の値を適切に設定することが重要である。しかし、設計において水質の条件を考慮して適切な設計防食電流密度を設定しようとしても、それを可能とする技術が確立しておらず現行の設計法においても概略値を示しているのみである。そのため、水質の汚染度を判定する指標を定め、その指標と防食電流密度との関係を明らかにする必要がある。

本節では全国的な規模で電気防食調査<sup>1~4)</sup>を実施し、電気防食法の実態を把握するとともに、水質と電流密度との関係を解析して電気防食に対する汚染海域と清浄海域を判定するための方法を提案し、その適用性を設計防食電流密度が明らかな施設の水質分析と電位測定結果に基づいて確認する。

#### (2) 試験内容

まず、電気防食を実施している構造物の実態を把握するために電気防食調査を

実施した。調査は陽極調査、構造物調査および水質調査よりなる。調査結果から水質と防食電流密度の関係について検討を行い、電気防食の設計のための清浄海域と汚染海域とに区分する方法を検討した。

a) 調査対象構造物

電気防食調査の調査対象構造物は表-3.1に示す27構造物である。

表-3.1 調査対象構造物一覧

No	港名	構造形式	鋼材種類	水深(m)	陽極			電気防食経過年数(年)
					重量(Kg)	初期発生電流(A)	設計寿命(年)	
1	小樽	セル式	鋼管杭		96.2	2.5	20	12.1
			鋼矢板	-10	96.2	2.5	20	12.1
2	苫小牧	矢板式	鋼矢板	-9	94.4	3.1	20	16.3
3	室蘭	矢板式	鋼矢板	-10	200.5	3.5	30	7
4	塩釜(仙台)	矢板式	鋼管矢板	-12	59.5	3.0	10	10
5	千葉	棧橋式	鋼管杭	-10	59.4	3.0	10	12
6	千葉(船橋)	矢板式	鋼管矢板	-7.5	59.5	3.0	10	6
7	東京	矢板式	鋼管矢板	-4.5	115.2	3.0	20	6
8	横浜(大黒)	棧橋式	鋼管杭	-12	41.0	1.9	10	9
9	横浜(本牧)	矢板式	鋼矢板	-12	111.5	3.0	20	11.8
					60.0	2.5	12	3.3
10	田子の浦	矢板式	鋼矢板	-4	26.3	2.5	5	4.3
11	伏木富山(富山)	矢板式	鋼矢板	-10	63.8	2.2	20	13.9
12	伏木富山(伏木)	矢板式	鋼矢板	-10	94.4	3.1	20	15.5
13	衣浦	セル式	鋼管杭		74.0	2.6	20	12.8
			鋼矢板	-10	74.0	2.6	20	12.8
14	名古屋(空見)	矢板式	鋼矢板	-5.5	95.1	3.2	20	15.8
15	名古屋(金城)	矢板式	鋼管矢板	-10	85.5	2.84	20	9
16	舞鶴	棧橋式	鋼管杭	-10	115.2	3.0	20	11.0
17	堺泉北(堺)	セル式	鋼管杭	-10	76.8	2.0	20	12.8
			鋼矢板	-10	76.8	2.0	20	12.8
18	尼崎	棧橋式	鋼管杭	-10	103.0	3.15	20	12.8
19	小松島	棧橋式	鋼管杭	-10	111.5	3.0	20	12.8
20	岡山	矢板式	鋼矢板	-4	103.3	3.5	20	13.8
21	境	棧橋式	鋼管杭	-9	43.0	2.5	10	12.8
			鋼矢板	-5	60.9	3.0	10	19.0
22	下関	棧橋式	鋼管杭	-10	115.2	3.0	20	10.2
23	北九州(門司)	矢板式	鋼管杭	-10	109.0	2.8	25	15.8
			鋼矢板					
24	北九州(洞海)	矢板式	鋼矢板	-10	96.2	2.5	20	10.3
25	苅田	棧橋式	鋼管杭	-10	98.7	2.8	20	13.2
26	佐伯	棧橋式	鋼管杭	-10	96.2	2.5	20	7.5
27	那覇	矢板式	鋼矢板	-11	115.2	3.0	20	10.0

表中の港名欄の括弧内は港区または埠頭名を示す。構造形式は鋼矢板式、鋼管矢板式、鋼管杭式栈橋および鋼矢板式セル構造物である。電気防食の経過期間は4年程度の短いものがあるが、ほとんどは10年以上経過した構造物である。10年以上とした理由は、図-3.1に示すように防食電流は2~3年経過後に定常値になること、また陽極の設計寿命を20年としているものが多いので精度が良いと考えられるためである。

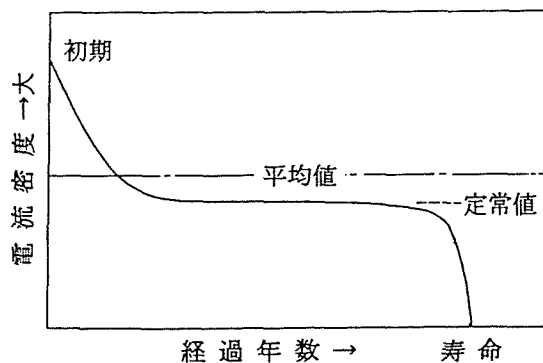


図-3.1 防食電流の経時変化

b) 測定項目および方法

測定項目は、Al陽極の発生電流および重量、構造物の電位、水質である。Al陽極の発生電流および重量測定は、平均値を求めるために一構造物について4~6個の陽極について行った。深度方向の陽極の取り付け数は構造物によって異なり1~5であるので、構造物ごとに各深度からほぼ同じ数だけの陽極を選んだ。

発生電流は図-3.2に示すように、陽極を構造物に固定している上下の2つの芯金のうち、片方の芯金を切断し陽極と構造物との間に防水型のシャント抵抗 (5A, 50mV) を接続して電圧降下法により測定した。なお、測定は陽極表面に付着している付着物を除去する前に行った。

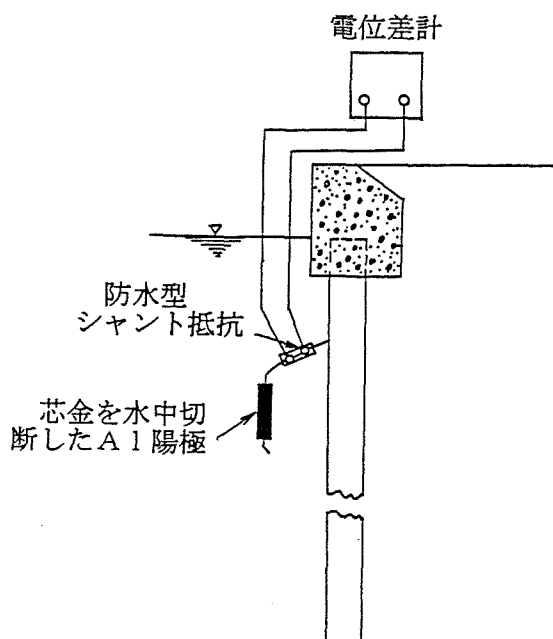


図-3.2 発生電流測定要領図

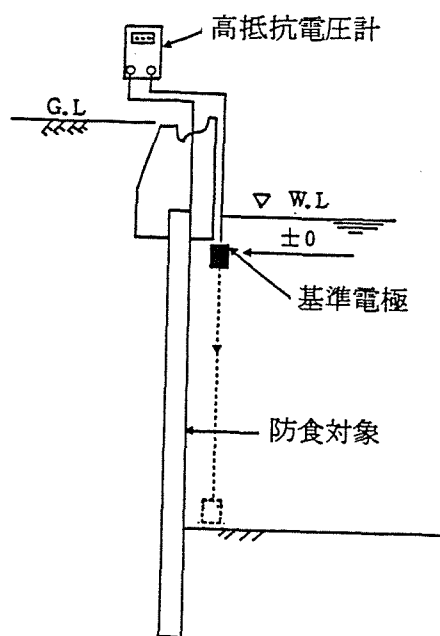


図-3.3 電位測定要領図

陽極の重量は、発生電流測定後に陽極を陸上に回収し、付着物を十分除去してから台ハカリで測定し、初期重量（カタログ値）と残存重量（測定値）の差より消耗量を求めた。構造物の電位は、構造物法線上を約50m間隔に水深1mごとに測定した。測定の方法は図-3.3に示す通りである。

水質分析試験用の試料は、調査構造物の前面において、上、中、下の3深度から干潮時、満潮時に海水を採水した。分析項目は、水温、pH、酸化還元電位、比抵抗、塩素イオン濃度、溶存酸素濃度、アンモニウムイオン濃度、硫黄イオン濃度および懸濁物質である。なお、水質の分析項目の選定および分析方法は腐食防食協会8.1分科会の資料<sup>5)</sup>によった。

調査の時期は10月後半から3月始めの冬季の間で、一構造物当たりの調査日数は2~3日間であった。ただし、全体の調査は多年度にわたっている。

### （3）陽極の発生電流および消耗量

#### a) 陽極の発生電流

表-3.2に陽極の発生電流から求めた防食電流密度を示す。陽極の発生電流は図-3.1に示すように、当初は酸化している鋼材を還元するため必要があるために大きい電流が必要であるが、その後時間の経過とともに次第に減少する。

図-3.1に示す平均値は陽極総寿命に対する値で、定常値は低減期間が過ぎて安定した状態になってからの値である。

電気防食開始当初の発生電流は測定していないが、定常値はほとんどが設計値の50%以下で、とくに20~40%のものが多かった。通常、清浄海域における定常値は設計値の40%程度と言われていることから、調査時点での発生電流はおおむね定常値まで低減していると考えることができる。ただし、発生電流は水質等の条件によって変化するので短期的な変動がある。表-3.2に示すように防食電流密度の値は15~70mA/m<sup>2</sup>の範囲に分布し、30mA/m<sup>2</sup>前後の値が最も多かった。

なお、付着物を除去する前の陽極の電位はおおむね-842~-1094mV

(Ag/AgCl基準、以下同様)の範囲にあったが-1000~-1050mVのものが多かった。-800mV台のものが1例あり鋼材との電位差が小さいことが認められた。また、付着物除去後の値はいずれも-1025mV程度に回復したことからAl陽極の性能に問題はないと考える。

#### b) 陽極の消耗量

陽極の消耗量は同一施設では陽極ごとの差が小さく、平均値に対して10~20%前後の範囲であった。

つぎに、陽極の消耗量から、次式によって電気防食実施期間中の平均発生電流を求めて防食電流密度に換算した。

$$\text{平均発生電流 (A)} = \frac{\text{陽極消耗量 (kg)} \times \text{陽極有効電気量 (A \cdot y / \text{kg})}{\text{電気防食経過期間 (y)}} \dots (7)$$

Al合金陽極の有効電気量=2,300 (A·hr/kg)

(7)式より求めた平均発生電流は、前項で述べたような測定時の一時的な変動の影響はないが、電気防食開始当初の大きな発生電流の影響があるので、一般的には発生電流の測定値よりは大きいと考えられる。

表-3. 2に陽極の重量測定から求めた防食電流密度を示すが、これらは発生電流の測定値から求めた値よりもおおむね10mA/m<sup>2</sup>程度大きい。

### c) 構造物の電位

図-3. 4は構造物の電位を図示したものであるが、構造物の電位はおおむね-840~-1040mVの範囲にあって2例を除きすべて防食電位(-780mV)を上廻っていた。上記2例のうちの1例は、電位は上層部で貴になっていて、また下層部でも防食電位にわずかに足りなかった。これは、淡水の流入の影響を受ける構造物であったためと考える。もう1例は、下層部で電位が貴になっていたが、これは調査地点周辺の陽極に脱落したものがあつたためである。

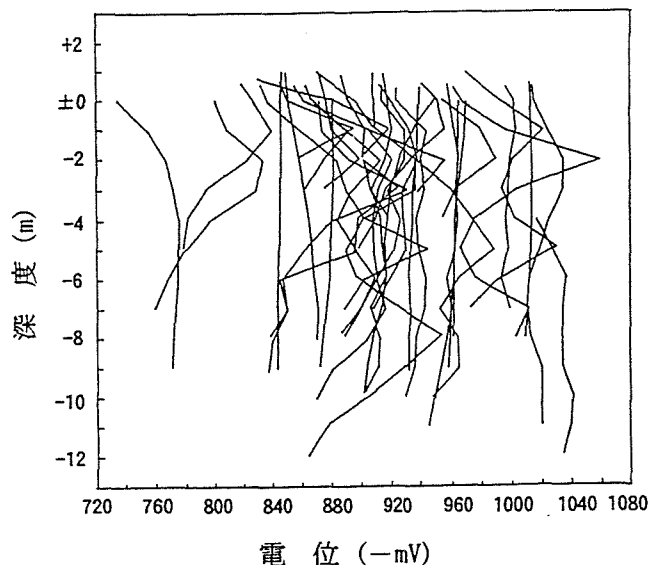


図-3. 4 構造物の電位測定結果

### (4) 水質と防食電流密度の関係

表-3. 2に示した防食電流密度の測定値は広い範囲に分布している。防食電流密度に影響を及ぼす要因と

しては水質、流れ、波浪等があげられるが、調査構造物は係船岸であることから防食電流密度に及ぼす流れや波浪には差異がないと考えられることから、この分布幅の原因は水質であると考えられる。水質の差をもって、清浄海域と汚染海域に分類することができるが、その定義については明確ではなく、実際電気防食の設計においては清浄海域における設計防食電流密度を海水中で100mA/m<sup>2</sup>としているが、水質が悪い場合には過去の経緯等からみて100mA/m<sup>2</sup>では十分に防食効果を発揮しないおそれがあるとみられるのでこれより大きくしている。調査例の中でも100mA/m<sup>2</sup>より大きい値で設計していると思われるものが東京港、横浜港本牧、田子の浦港など二、三例あつた。

表-3. 2 各港の水質試験結果および防食電流密度

港名	水質分析項目			防食電流密度	
	Cl <sup>-</sup>	DO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	発生電流	重量測定
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(mA/m <sup>2</sup> )	(mA/m <sup>2</sup> )
小樽	19750	7.7	0.07	36	46
小樽				36	48
苫小牧	18500	9.1	<0.1	25	32
室蘭	17083	9.0	0.14	33	42
塩釜 (仙台)	18366	8.3	<0.01	15	21
千葉	18166	8.3	1.1	52	48
千葉 (船橋)	17550	3.3	0.31	65	53
東京	14667	7.0	0.18	28	72
横浜 (大黒)	17133	6.4	0.47	30	56
横浜 (本牧)	17333	8.4	0.74	53	
田子の浦	14290	3.1	0.11	50	65
伏木富山 (富山)	17550	6.4	<0.01	23	31
伏木富山 (伏木)	12583	7.6	0.32	27	42
衣浦	17417	7.8	0.29	44	42
衣浦				28	52
名古屋 (空見)	16350	4.2	0.21	45	49
名古屋 (金城)	17300	8.8	0.21	39	49
舞鶴	17250	6.7	<0.1	32	60
堺泉北 (堺)	16766	5.6	0.55	33	62
堺泉北				72	76
尼崎	17800	7.2	0.97	40	70
小松島	17683	8.1	0.11	32	34
岡山	14833	7.4	0.07	25	43
境	16017	6.8	0.04	12	29
境	14667	7.8	0.25	43	44
下関	19567	7.3	0.15	34	57
北九州 (門司)	15416	8.4	0.21	25	62
北九州 (洞海)	18533	8.2	0.85	26	47
荏田	17667	8.3	<0.01	16	41
佐伯	18850	9.9	0.06	29	28
那覇	19833	6.8	<0.1	14	39

\*水質分析結果は満潮時、干潮時の上、中、下を合わせた平均値を示す。



そこで以下に水質と防食電流密度の関係を分析する。ただし、水質は同一場所でも常に一定とは限らず、水質分析試験の各分析項目が防食電流密度に及ぼす影響についての機構が十分にわかっていないことから、防食電流密度と水質の関係を詳細に求めることは困難である。そこで、ここでは工学的に意味がある範囲で両者の関係を求めることとし、通常の水質と、水質が悪いために設計防食電流密度を通常よりも大きくとる必要のある水質と、大きく二つに分類する。水質の分析項目のうち腐食に大きい影響を及ぼす項目として溶存酸素濃度、塩素イオン濃度およびアンモニウムイオン濃度に着目しこれらと防食電流密度の関係を検討した。表-3.2に各港の水質調査結果を示す。なお、ここに示す値は満潮時および干潮時の海水の表層、中層、下層の分析値の平均値である。

溶存酸素濃度の平均値は3~10ppmに分布していて6ppm以下のものが4例あった。清浄海域での溶存酸素濃度はおおむね6~8ppmであるが、汚染海域ではこれより減少するといわれている。

塩素イオン濃度は通常18,000ppm程度であるが、河川水や排水等の流入があると減少する。海水の塩素イオン濃度が増加すると電気伝導度が増加し腐食速度が増加するが、先に図-2.5に示したように溶存酸素濃度は塩素イオン濃度の高い領域では減少するため、腐食速度はNaCl濃度が10g/l(1%)程度で最大となる。したがって、海水が河川水によって若干希釈されると腐食速度は増加する。

アンモニウムイオンはチッ素を含む有機化合物が腐敗して生じる。例えば、発電所の復水器管に腐食が生じ、冷却水を分析してみるとアンモニウムイオン濃度が高い事例が報告されている<sup>6,7)</sup>。

以上のように、塩素イオン濃度の減少とアンモニウムイオン濃度の増加は腐食を促進させる傾向があり、また、溶存酸素濃度の減少は汚染に関係するといえる。

一般に腐食を促進させる海域で電気防食を実施した場合には清浄海域に比べて防食電流密度は大きくなるといわれている。通常、清浄海域の防食電流密度

(定常値)は40mA/m<sup>2</sup>以下といわれているので、40mA/m<sup>2</sup>以上の大きい防食電流密度を示しているものは塩素イオン濃度の減少とアンモニウムイオン濃度の増加および溶存酸素濃度の減少のいずれかが関与していることが考えられる。

そこで、表-3.2の発生電流から求めた防食電流密度のうち40mA/m<sup>2</sup>以上のものを取り上げ水質と対比してみると、塩素イオン濃度では千葉港の18,166ppmを除き14,290~17,800ppmであり清浄海域で示される18,000ppmよりも小さい。つぎに溶存酸素濃度は3.3~8.4ppmであるが6ppm以下のものが4例みられいずれも45mA/m<sup>2</sup>より大きい。また、アンモニウムイオン濃度は0.11~1.1ppmである。つぎに重量測定から求めた防食電流密度の大きい(50mA/m<sup>2</sup>以上)ものを取り上げて水質と対比させると、塩素イオン濃度では下関港の19,567ppmを除き14,290~17,800ppmであった。溶存酸素濃度は3.1~8.4ppmを示し6ppm以下のものが3例みられる。また、アンモニウムイオン濃度は舞鶴港の0.1ppm以下を除いて0.11ppm以上である。

以上の結果から、防食電流密度が大きい海域では、塩素イオン濃度は清浄海域の18,000ppmよりも小さく、アンモニウムイオン濃度は大きく、溶存酸素濃度は少ないという傾向が見られる。しかし、塩素イオン濃度、溶存酸素濃度、アンモニウムイオン濃度のそれぞれ単独では防食電流密度の大小、すなわち汚染海域と清浄海域の区別ができない場合がある。

そこで当該海域の水質が、塩素イオン濃度が17,800ppm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電流密度が通常より大きいといえる。そのため、上記の方法を汚染海域と清浄海域とに区分する方法として提案し、汚染海域では設計防食電流密度の100mA/m<sup>2</sup>の電流密度より大きくとることを提示する。

### (5) 水質判定手法の確認のための電気防食調査

前項において、防食電流密度と水質の関係から清浄海域と汚染海域を判定する

表-3. 3 調査対象構造物の一覧表

No	港名	施設名	鋼材の種類	水深(m)
1	(ア) 横浜港	横浜海上防災基地棧橋	鋼管杭	-12
2	(イ) 横浜港	神奈川地区岸壁	鋼管杭	-10
3	(ウ) 横浜港	本牧地区岸壁、第3バース	鋼管杭	-11
4	(エ) 横浜港	山下地区岸壁、第10バース	鋼管杭	-11
5	(オ) 横浜港	山下地区岸壁、第6バース	鋼矢板	-10
6	(カ) 横浜港	山下地区岸壁、第5バース	鋼矢板	-10
7	(キ) 横浜港	山下地区岸壁、第4バース	鋼矢板	-10
8	(ク) 横浜港	横浜海上防災基地棧橋、A部	鋼管杭	-12
9	(ケ) 横浜港	横浜海上防災基地棧橋、C部	鋼管杭	-12
10	(コ) 川崎港	東扇島地区岸壁、	鋼管杭	-12
11	(サ) 川崎港	千鳥町地区岸壁 第3バース	鋼矢板	-5
12	(シ) 横須賀港	米軍横須賀基地6、7バース	鋼管杭	-12
13	(ス) 横須賀港	長浦地区4護岸	鋼管杭	-2~-3
14	(セ) 横須賀港	長浦地区棧橋	鋼管杭	-7.5
15	(ソ) 千葉港	船橋地区-5.5m岸壁	鋼矢板	-5.5
16	(タ) 木更津港	富津地区-7.5m岸壁	鋼管矢板	-7.5
17	(チ) 木更津港	-7.5m岸壁	鋼管矢板	-7.5
18	(ツ) 那珂湊港	作業基地岸壁	鋼矢板	-5
19	(テ) 小名浜港	第1、2号岸壁	鋼矢板	-10
20	(ト) 小名浜港	3号埠頭2号岸壁	鋼矢板	-12
21	(ナ) 相馬港	2号埠頭岸壁	鋼管矢板	-12
22	(ニ) 塩釜港	仙台港区岸壁	鋼管杭	-12
23	(ノ) 塩釜港	仙台港区防波堤	鋼管矢板	-12
24	(ヘ) 釜石港	-7.5m岸壁	鋼管杭	-7.5
25	(フ) 大船渡港	-13m岸壁	鋼管杭	-13
26	(ホ) 久慈港	検潮所施設	鋼管杭	-6
27	(ヘ) 八戸港	-5m岸壁	鋼矢板	-5
28	(フ) 青森港	油川地区岸壁	鋼矢板	-4.5
29	(ハ) むつ 小川原港	鷹架地区岸壁	鋼管矢板	-7.5

方法を示した。しかし、その調査では当初の設計防食電流密度が不明なものが多かったため、ここでは設計防食電流密度（すべて100mA/m<sup>2</sup>）が明らかな構造物を対象とし、水質調査と電位測定から汚染海域と清浄海域を判定する方法の適用性を確認する。

調査は表-3.3に示す関東および東北地方の太平洋側の29の鋼管杭式および鋼矢板式係船岸で実施した。それらの設計防食電流密度はすべて100mA/m<sup>2</sup>である。

#### a) 水質調査結果

表-3.4に示した水質調査結果をみると、塩素イオン濃度が17,800ppm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項目が該当する施設は川崎港および横浜港に位置していた。両港ではとくにアンモニウムイオン濃度が多く0.3~0.77ppmを示した。この場所の周辺地区は工場等が密集し人口が多く工場排水や生活排水の流出があり、また河川水が流入している。その他の港で塩素イオン濃度が17,800ppm以下の場所は小名浜港、相馬港であったがアンモニウムイオン濃度と溶存酸素濃度は上述した3項目のうちに該当しない。また、那珂湊港でアンモニウムイオン濃度が0.22ppmの値を示したが、そのほかの項目は3項目に該当しなかった。そのほかの港では塩素イオン濃度は18,000ppm以上、アンモニウムイオン濃度は0.1ppm以下の範囲で清浄海域と考えられる値であった。

#### b) 調査施設の電位と水質の関係

図-3.5は各施設における電位の測定結果である。ここでの最貴電位と最卑電位は各施設の個々の測定点での最貴電位または最卑電位の平均値である。

これによると横浜港および川崎港において電位が貴な方向に位置しており最貴電位については防食電位（-770mV、SCE基準、以下同様）を下廻る値も認められる。しかし、その他の施設においては最貴電位でも-800mVより卑な値を示してお

表-3.4 各港の水質試験結果

港名 (地区名)	分析項目		
	Cl <sup>-</sup>	DO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
	(ppm)	(ppm)	(ppm)
横浜港 海上防災基地	15,950	7.0	0.47
横浜港 神奈川地区	14,120	7.1	0.77
横浜港 本牧地区	15,940	7.6	0.51
横浜港 山下地区	15,400	7.0	0.39
川崎港 東扇島地区	15,100	6.6	0.30
川崎港 千鳥町地区	16,880	5.7	0.77
横須賀港	18,250	7.6	0.1
千葉港	17,900	7.0	0.12
木更津港	18,020	7.8	0.1
那珂湊港	18,200	6.1	0.22
小名浜港	17,580	8.1	0.03
相馬港	17,060	8.3	0.07
塩釜港	18,170	8.5	0.06
釜石港	18,370	8.3	0.08
大船渡港	19,370	7.8	0.02
久慈港	19,090	7.8	0.02
八戸港	18,100	8.5	0.06
青森港	18,200	8.4	0.08
むつ小川原港	18,010	8.2	0.06

り、防食電位を十分に上廻っていた。すなわち、汚染されている海域では設計防食電流密度を $100\text{mA}/\text{m}^2$ として設計しても、良好な防食を維持していくために必要な $-900\text{mV}\sim-1000\text{mV}$ 程度の卑な電位を保つことができない。

以上のことから、提案した本方法は電気防食のための清浄海域と汚染海域を判定する有効な方法と考えられる。

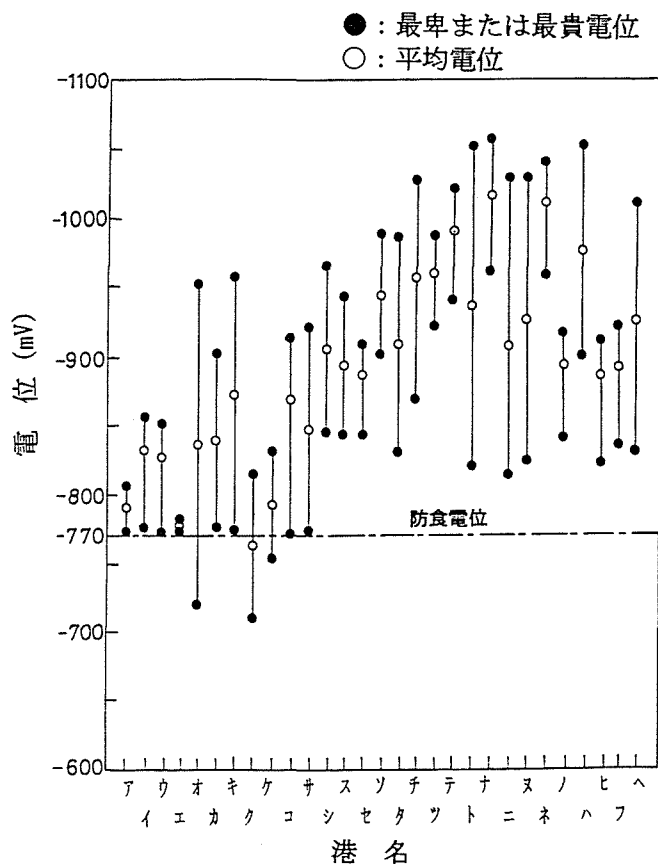


図-3.5 各施設における電位測定結果

表-3.5 汚染海域の設計値 (推定値)

港名	設計値 (mA/m <sup>2</sup> )
千葉	106
東京	144
横浜	112
田子の浦	130
衣浦	104
舞鶴	120
堺泉北	124 152
尼崎	140
下関	114
門司	124

### (6) 汚染海域における防食電流密度

定常電流密度が大きな値を示す海域は汚染海域と考えられる。定常値は設計値の1/2程度以下になることから、それを1/2として、表-3.2の重量測定から求めた防食電流密度のうち $50\text{mA}/\text{m}^2$ を越えるものについて整理すると、表-3.5に示すように11例中7例が $120\sim150\text{mA}/\text{m}^2$ の範囲に入る。この結果から、汚染海域における設計防食電流密度は清浄海域に対して20~50%増し ( $120\sim150\text{mA}/\text{m}^2$ ) にするのが適当と考える。

図-3.6は横浜港大黒埠頭棧橋で実施した電気防食試験結果である。本海域は汚染海域と考えられるので、設計防食電流密度 $130\text{mA}/\text{m}^2$ 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 $-860\text{mV}$ 程度、また最卑電位は $-940\text{mV}$ 程度、平均電位は $-920\text{mV}$ と、防食電位 ( $-770\text{mV}$ ) を大きく上廻っていた。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。

以上の調査結果から、清浄海域および汚染海域における設計防食電流密度は清浄海域では $100\text{mA}/\text{m}^2$ が妥当であり、汚染海域では $120\sim 150\text{mA}/\text{m}^2$ が適当と考える。電気防食を実施する際には、当該施設の前面の水質調査を行い塩素イオン濃度、溶存酸素濃度およびアンモニウムイオン濃度に着目して、その海域が汚染海域か清浄海域かを判定することが望ましい。水質調査が難しい場合には各都道府県単位で調査されている地域の最新の水質調査結果を用いることができる。将来は各地域の電気防食に対する汚染海域と清浄海域を示したマップを作成することも必要である。

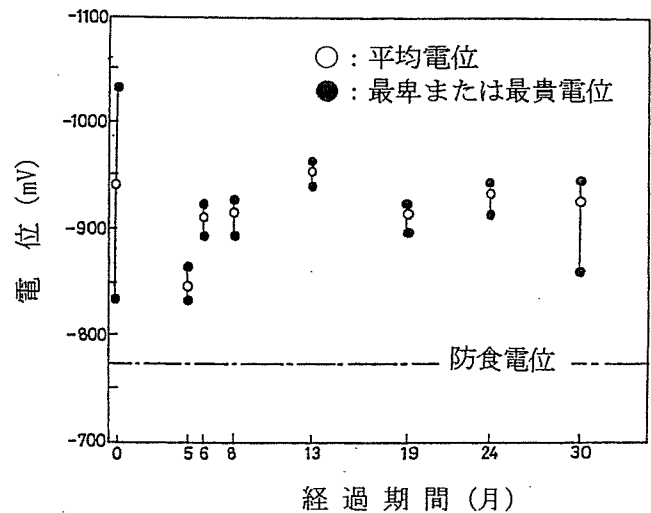


図-3.6 試験期間における電位測定結果

### 3.3 汚染海域における深さ方向の防食電流密度

#### (1) 概要

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ものと考えられる。しかし、港湾鋼構造物の電気防食の現地試験に関する既往の研究では、海水中の深さ方向の防食電流密度の分布については明らかにされていない。

一方、海底土中部の設計防食電流密度は従来清浄海域では一律に $20\text{mA}/\text{m}^2$ が、また汚染海域では $30\text{mA}/\text{m}^2$ が用いられているが、海底土中部においても深さ方向に差があるものと考えられる。本節では汚染海域と考えられる海域において、3.2で示した汚染海域に見合った防食電流密度で設計した構造物について、深さ方向の防食電流密度の分布および陽極の消耗量について調査した。

本試験に適用した電気防食の設計値は海水中 $130\text{mA}/\text{m}^2$ 、海底土中部 $30\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度とし、陽極寿命20年で設計した。

#### (2) 試験内容

試験の実施場所は図-3.7に示す横浜港大黒埠頭C3バースである。この海域はすでに示す水質試験から明らかのように鶴見川の河口があるので、河川水や生

活排水等の影響をかなり受けて海水の汚染の進んだ海域である。試験は鋼管杭に試験片を深さ方向に取り付けて、試験片へ流入する防食電流密度を測定する方法と、鋼管杭に取り付けているAl陽極の発生電流を測定して消費量を求める二つの方法で実施した。また、試験期間中の水質試験を併せて実施した。

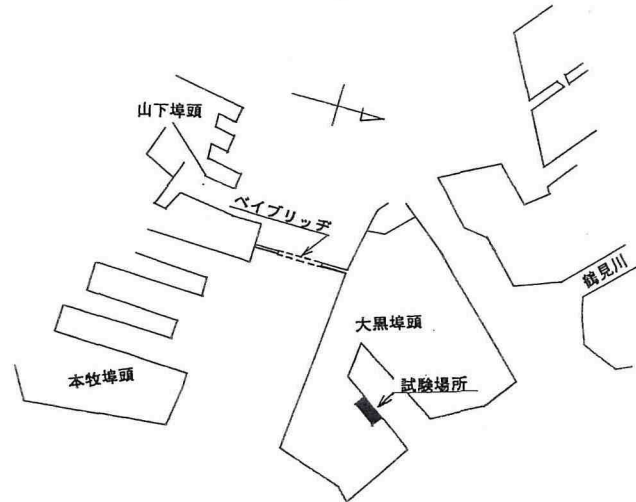


図-3.7 現地試験位置図

### (3) 深さ方向の電流密度 と電位の傾向

写真-3.1、写真-3.2に示すように、新設栈橋の鋼管杭の



写真-3.1 鋼管杭への試験片の取付状況

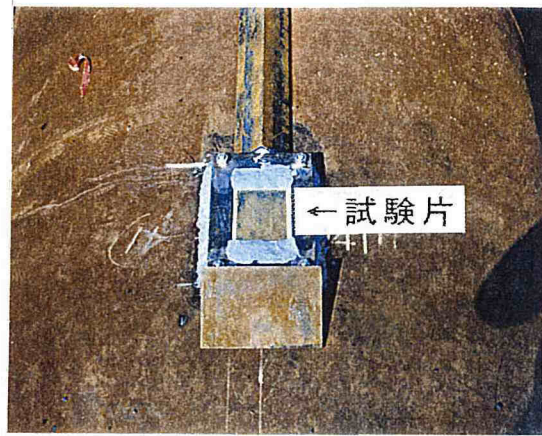


写真-3.2 試験片の拡大

打設前に試験片を各深度に取付け鋼管杭に取付けてあるAl陽極から試験片に電流が流れるようにし、各試験片へ流入する防食電流密度を測定した。試験片は10cm×10cm×厚さ2mmの軟鋼板で取付深度は、図-3.8に示すように海水中2深度(-2.8、-8.3m)、海底土中部4深度(-19、-28、-36、-41m)である。

測定項目は電流および電位で、電流は試験片から立ち上げているリード線とAl陽極からのリード線の間にはシャント抵抗(0.01Ω)を挿入し、電圧降下法によって測定した。また、電位測定には亜鉛基準電極を使用した。

#### a) 海水中の電流密度の傾向

図-3.9は、試験期間2年および3年経過時の防食電流密度を深さ方向に示したものである。2年経過時の電流密度は、上層部(-2.8m)で200mA/m<sup>2</sup>程度の大きい値を示し、中層部(-8.3m)では76mA/m<sup>2</sup>程度であった。3年経過時では上層

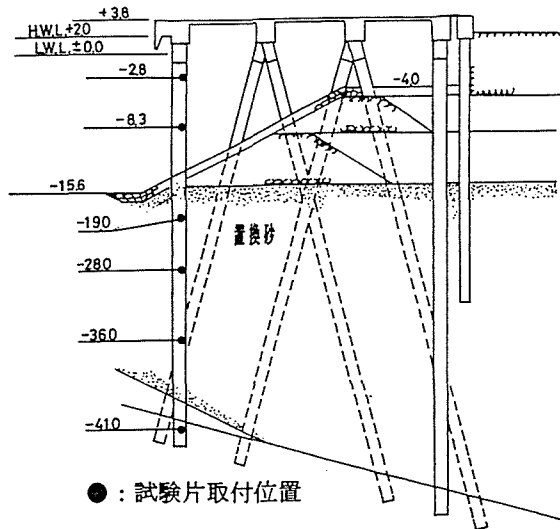


図-3. 8 栈橋断面図および試験片の取付深度 (m)

部で $220\text{mA}/\text{m}^2$ 程度、中層部では $80\text{mA}/\text{m}^2$ 程度であった。上層部では中層部の2~2.5倍程度大きい電流密度が必要である。この結果海水中の電流密度は深さ方向に差があることが認められた。上層部で電流密度が大きいのは、表-3. 6に示すように上層部では下層部に比べてアンモニウムイオン濃度が多く、塩素イオン濃度が少ないためと考える。

#### b) 海底土中部の電流密度の傾向

図-3. 10は海底土中部の2年および3年経過時の防食電流密度を深さ方向に示したものである。海底面に最も近い $-19\text{m}$  (海底面から $3.6\text{m}$ 程度下)の2年および3年経過時の電流密度は $13\text{mA}/\text{m}^2$ 程度であった。それ以深では $2\sim 5\text{mA}/\text{m}^2$ を示し極めて小さい値であった。そのため、海底土中部でも深さ方向で電流密度に差があることが認められ、海底面下 $-10\text{m}$ までとそれよりも深い部位とで区分してもよいと考える。海底土中部の防食電流密度は海水中に比べて $1/10\sim 1/20$ と小さい、これは海水中と異なり鋼材の表面が乱されず、酸素の供給が少なく、分極し易いためである。

#### c) 深さ方向の電位の傾向

図-3. 11に深さ方向の電位の傾向を示す。2年経過時の海水中の電位は上層部で $-920\text{mV}$  (Ag/AgCl基準、以下同様)程度、中層部で $-1000\text{mV}$ よりも卑な値

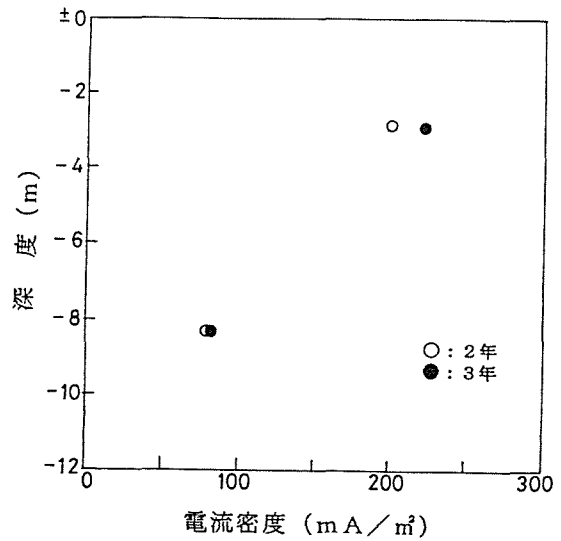


図-3. 9 海水中の深さ方向による電流密度

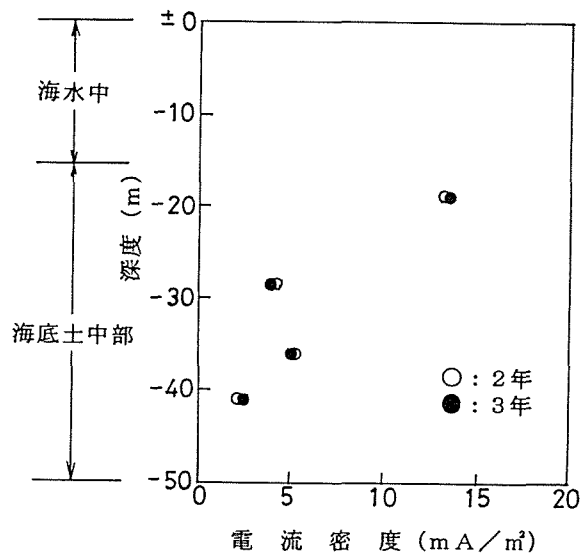


図-3. 10 海底土中部の深さ方向による電流密度

を示した。また、3年経過時ではいずれの深度も $-1000\text{mV}$ 程度かそれよりも卑な値であった。上層部と中層部で差が見られるが、この原因は上層部で水質が悪いので中層部ほど分極が進まなかったためと思われる。海底土中部では海水中よりも電位は貴な傾向を示し、2年、3年経過時でおおむね $-800\sim-900\text{mV}$ の範囲であった。しかし、いずれも防食電位よりも卑な値なので防食性には問題ない。

#### (4) Al陽極の消耗量

陽極の発生電流を測定しAl陽極の消耗量を求めた。図-3. 12に示すようにAl陽極は深さ方向( $-2\text{m}$ 、 $-6\text{m}$ 、 $-10\text{m}$ の3深度)に取り付けた。

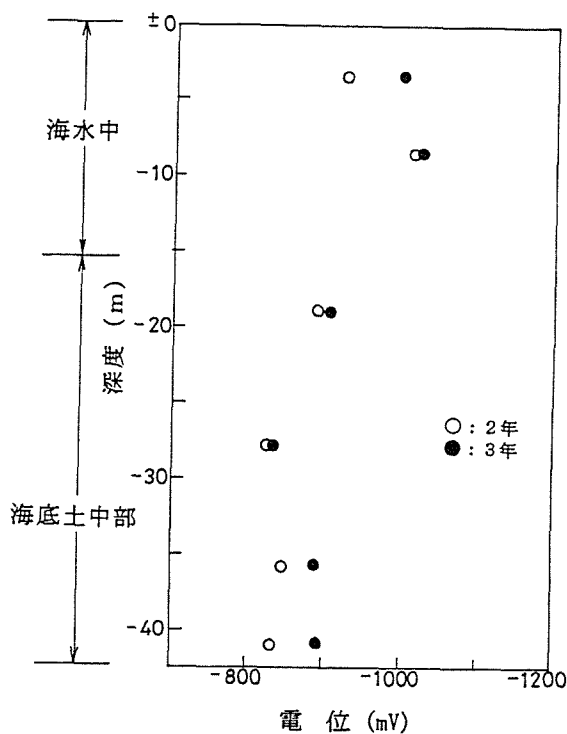


図-3. 11 深さ方向の電位の傾向

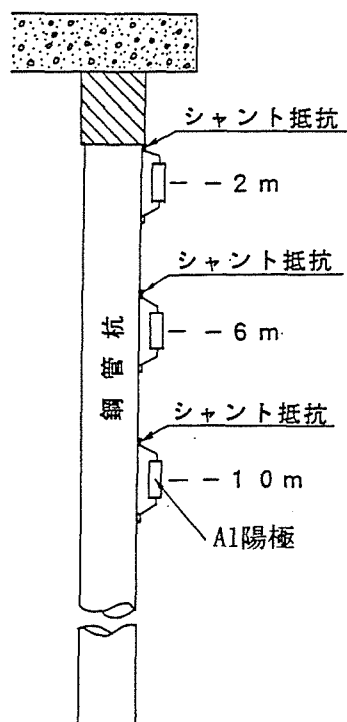


図-3. 12 Al陽極の取り付け位置

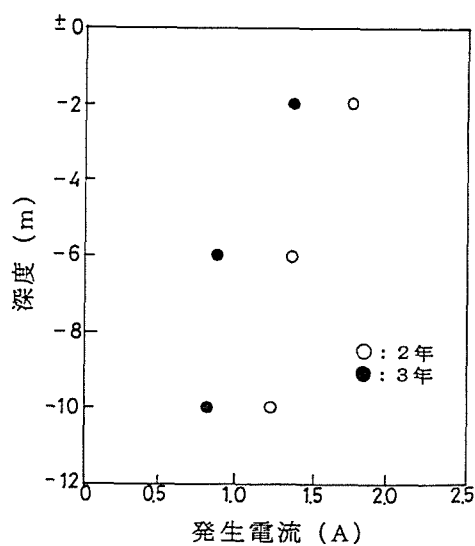


図-3. 13 各深度におけるAl陽極の発生電流



発生電流はAl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求めた。

図-3.13に深さ方向に対するAl陽極の発生電流の傾向を示す。2年経過時の-2mでは1.7Aであるのに対して、-6、-10mでは1.2~1.3Aであり0.5A程度-2mの方が大きい。3年経過時では全体に減少傾向が見られ、-2mでは1.4Aであるのに対して、-6、-10mでは0.8Aであった。2年経過時と3年経過時では3年の方が発生電流は低減しているが、深さ方向の傾向は2年経過時と同様である。いずれも海水中の電流密度と同様に上層部で大きく水質に影響されているものとする。

各深度の陽極の発生電流から半年毎の消耗量を(7)式から求め、経過期間と消耗量の関係を図-3.14に示す。1年以前では-2mと-10mで大きい消耗量が見られ-2mで4.3~4.7kg、-10mで4.6~5.4kgであった。-10mで大きい消耗量を示したのは、当初海底土中部へ流入する電流が多いためである。1~2年では-2mで大きく2.7~3.4kgの範囲であった。しかし、そのほかではいずれも2kg台で-2mの位置に比べて消耗量は小さい。3年以降では-2mで1.8~2.2kg、そのほかでは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で消耗量はほかの位置よりも大きい。また、低減傾向は-10mでは直線的であるが、-2m、-6mでは変動幅の大きい状態で低減していく。とくに-2mでその傾向が顕著であり、-10mの位置に比べて鋼材表面は不安定な状態と考えられる。

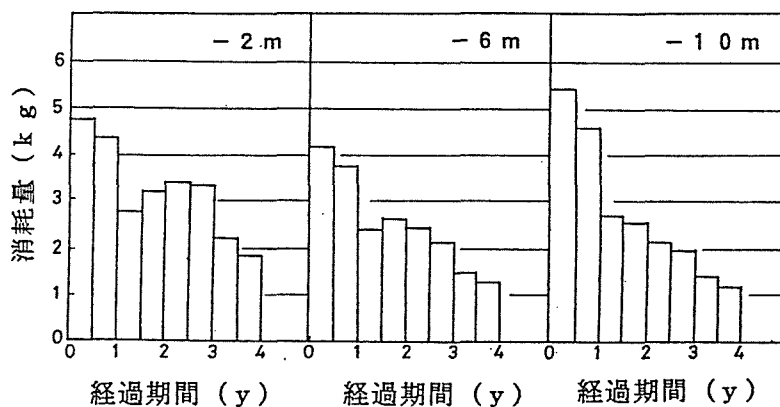


図-3.14 各深度におけるAl陽極の消耗量変化

図-3.15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で大きいことから上層部で大きい防食電流密度が必要であることがわかる。

したがって、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。本試験のように上層部の陽極

(-2m位置)は-6、-10mに比べて早い時期に消耗が考えられるので施工の際には

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。

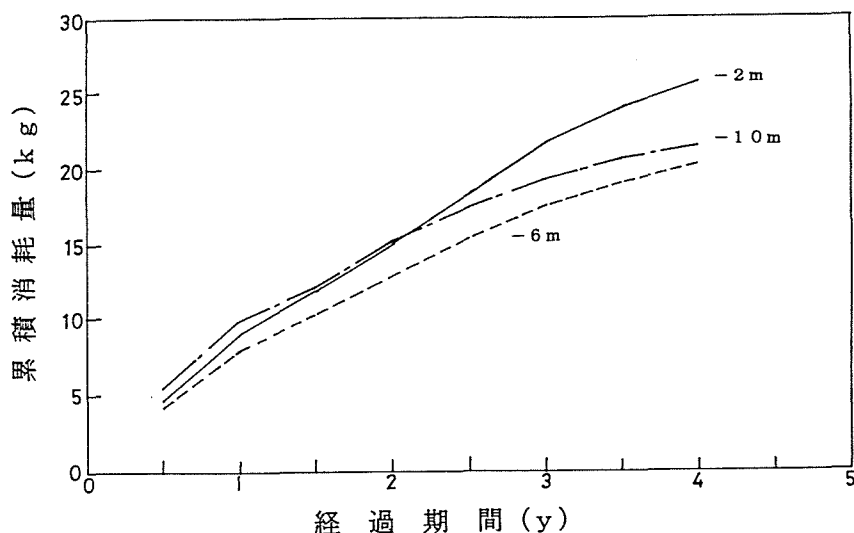


図-3.15 各深度におけるAl陽極の累積消耗量

### (5) 水質調査

水質調査は試験実施海域の表層（-1m）、中層（-5m）、下層（-10あるいは-14m）から海水を採取し、比抵抗、水温、濁度、pH、塩素イオン濃度、溶存酸

表-3.6 水質分析結果

分析項目	水深 (m)	測定期間 (日)							
		180 (冬)	390 (夏)	570 (冬)	730 (夏)	900 (冬)	1110 (夏)	1290 (冬)	1470 (夏)
Cl <sup>-</sup> (ppm)	-1	17,000	13,800	16,300	14,000	17,800	16,000	17,000	16,000
	-5	17,400	13,800	16,500	16,000	19,000	17,000	18,000	17,000
	-10	17,500	15,400	16,800	18,000	21,400	18,000	18,000	18,000
	-14	17,600	16,600	17,100	18,000	21,600	18,000	18,000	18,000
DO (ppm)	-1	8.3	6.4	8.2	7.2	7.5	6.5	9.8	6.4
	-5	7.5	6.1	7.8	4.5	6.5	6.4	8.7	2.7
	-10	7.1	6.1	7.1	3.3	6.5	6.2	8.2	0.9
	-14	6.4	5.3	6.4	3.3	5.9	6.2	8.2	0.2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (ppm)	-1	0.60	1.96	0.40	0.64	0.44	0.55	0.66	0.43
	-5	0.40	0.98	0.29	0.24	0.35	0.37	0.43	0.39
	-10	0.40	0.23	0.31	0.47	0.29	0.30	0.40	0.36

素濃度、アンモニウムイオン濃度、硫黄イオン濃度の分析を行い、季節による変化と防食電流密度との関係を調査した。水質の調査は夏季、冬季の年2回実施した。

水質の分析結果から試験期間中の水温は冬季で10℃前後、夏季で19～28℃でありpHは7～8の範囲であった。表-3. 6に示すように溶存酸素濃度はほとんどが6～9ppmの範囲で、4年経過時に-10mおよび-14m地点で0.2～0.9ppmと小さい値を示した。硫黄イオンは夏季、冬季ともほとんど検出されなかった。アンモニウムイオン濃度は0.23～1.96ppmの範囲で、表層部で大きい。塩素イオン濃度は表層部で少ない傾向が見られた。夏季と冬季を比較すると夏季は塩素イオン濃度、溶存酸素濃度が少なくアンモニウムイオン濃度が多い。冬季では塩素イオン濃度、溶存酸素濃度が多くアンモニウムイオン濃度が少ない傾向があり、夏季において水質が汚染されることが認められた。

### (6) 水質の汚染程度による設計防食電流密度の区分

以上、試験結果より海水中の防食電流密度は深さ方向で差のあることが明らかとなり陽極の発生電流も中層部、下層部に比べて上層部で大きいことが認められた。

したがって、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-3. 16のように清浄海域では左の図のように防食電流密度を100mA/m<sup>2</sup>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120mA/m<sup>2</sup>とし中～下層部を清浄海域で採用される100mA/m<sup>2</sup>を用いる。上層部～下層部まで汚染が

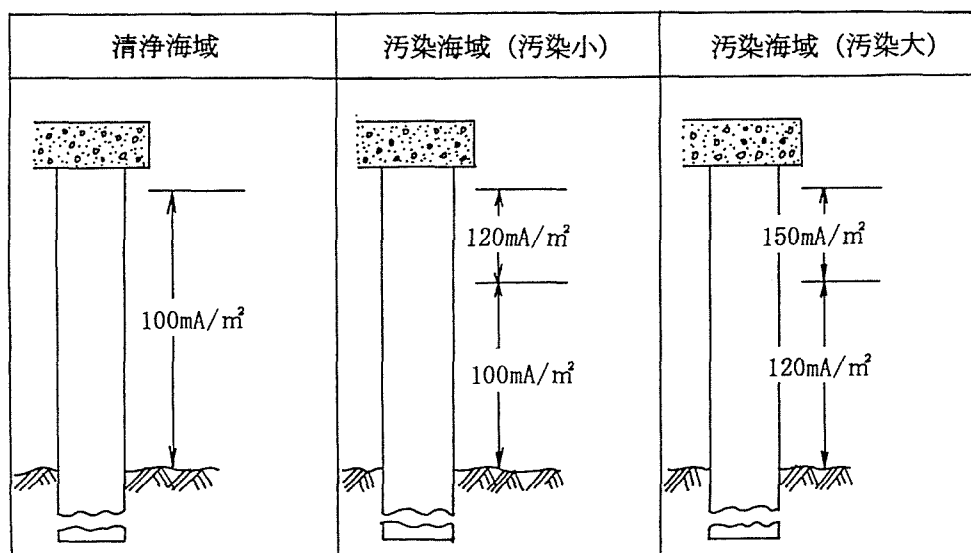


図-3. 16 水質の汚染程度による防食電流密度の区分例

大きい場合には右の図のように上層部を150mA/m<sup>2</sup>、中～下層部を120mA/m<sup>2</sup>で設計することが考えられる。

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。

### 3. 4 波浪海域での電気防食試験

#### (1) 概要

波浪海域に位置する鋼構造物の電気防食法に影響を及ぼす要因は、波高、海底の砂の移動に伴う海底面の変動、砂の移動による鋼材表面の摩耗等である。砂による鋼材表面の摩耗作用による腐食現象は2. 4で示したようにサンドエロージョンと言う<sup>8, 9)</sup>。しかし、これらの要因と電気防食法の電流密度や電位の関係について検討した資料は少なく、十分に検討されていないのが現状である。

和田等<sup>10)</sup>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。また、著者等は屋外水槽における試験で、水位変動する部位を被覆防食することにより電流密度の低減効果を確認している<sup>11)</sup>。しかし、これらの研究は潮位変動による試験結果であり、波浪海域での波高に対する電位や電流密度について検討した資料ではない。

サンドエロージョンの既往の研究には米国のパームビーチにおける調査結果がある。それによると海底の砂層面の腐食速度は2.97mm/yと非常に大きい値が報告されている<sup>9)</sup>。日本では沖縄で腐食速度が0.72mm/y以上の調査例がある。著者等は水槽試験において鋼材の一部を定期的にくすって表面の錆を落としたりしたところ、その部分がアノードを形成して腐食速度が著しく大きくなることを確認している<sup>12)</sup>。いずれもサンドエロージョンは通常の海水腐食に比べて数倍大きいことを示している。電気防食効果については、斉藤等が室内試験<sup>13, 14)</sup>によって流速と砂濃度の関係について検討し、流速が遅い場合には電気防食により防食は可能であるが流速が早くなると機械的な摩耗も随伴することを示している。

以上のように、現地での実鋼構造物による電気防食の防食効果を検討した事例はなく、波浪海域に位置する鋼構造物の電気防食法に対して波高に対する電流や電位の変化、被覆防食を併用した場合の防食効果、およびサンドエロージョンに対する電気防食効果等に関しては十分に検討されていない。

そのため、図-3. 17に示す以下の項目について現地試験を実施し、これらについて明らかにしようとした。

- ①波浪に対する防食電流および電位の変化
- ②被覆防食と電気防食の併用効果
- ③サンドエロージョンに対する電気防食効果

(2) 試験内容

本試験では、「波浪および被覆防食との併用効果に対する試験」および「サンドエロージョンに対する試験」の二つの試験項目に分けて取りまとめている。なお、図-3.17に示した①の波浪に対する電位および電流の変化については、「波浪および被覆防食との併用効果に対する試験」と併せて実施した。

a) 試験対象構造物

現地試験を行った鋼構造物は、鹿島灘に面した茨城県波崎町に位置する波崎海洋研究施設砕波帯観測用栈橋（以下観測栈橋と呼ぶ）で海岸線に直角に沖合へ

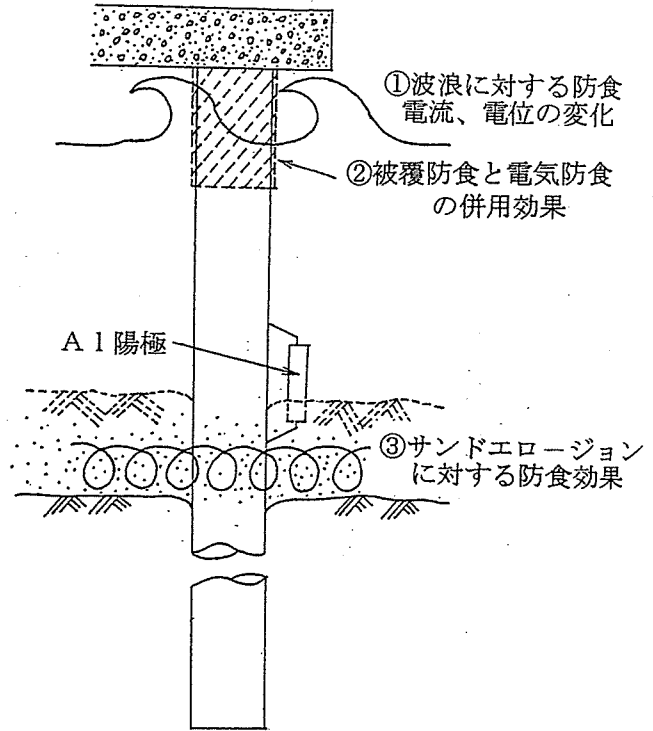


図-3.17 波浪海域における電気防食の検討課題

延びている。観測栈橋の全体図は図-3.18に示す通りで、全長427m、先端の水深は約-5mである。図-3.19は断面図で、直径800mmの鋼管杭の上にコンクリート上部工があり、その上にPC桁を乗せた構造である。この場所は波浪が大きいことと潮流が速く砂の動きが大きいと予想されたので鋼管杭には図-3.19に示す長さ4.5mの鋼製の摩耗カバーを取り付けている。

電気防食試験を実施している鋼管杭は、鋼管杭35本中、図-3.18に示す杭No.22、23、26および30の4本である。

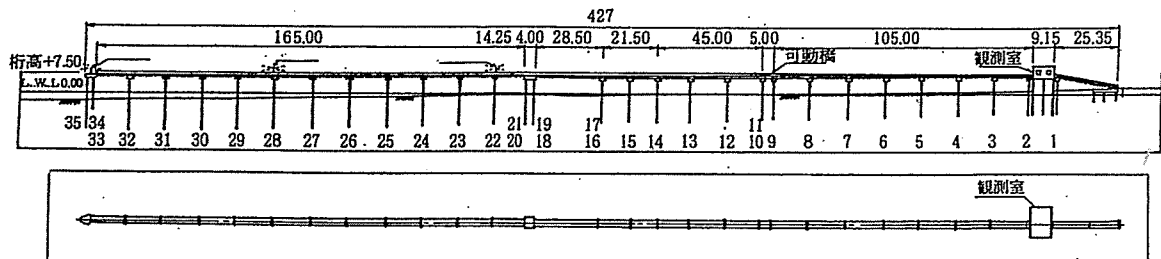


図-3.18 栈橋の全体図

## b) 試験場所の海象条件

この場所の海象条件はHWLが+1.4m、設計波高は換算沖波波高6.3m、周期14s、潮流の平均流速は50cm/s程度である。波浪の影響によって、海底面は3~4m程度変動する。写真-3. 3は波浪のやや大きい時期の栈橋の状況である。

各試験に適用した杭No.と測定項目を表-3. 7に示す。電流密度の測定は図-3. 12に示した方法で実施した。電位は亜鉛基準電極を-1m、-3mおよび-4mの位置に取り付け測定した。

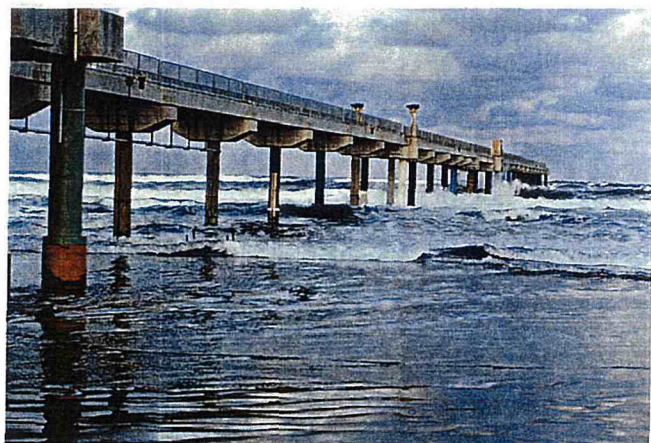


写真-3. 3 現地試験に使用した観測栈橋

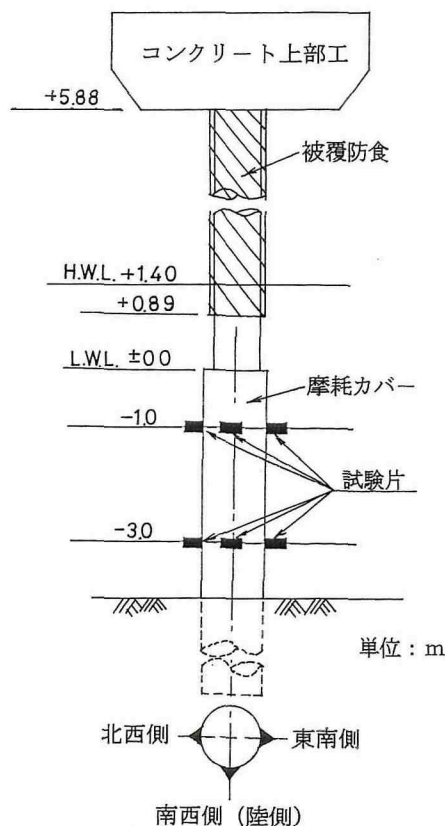


図-3. 19 栈橋の断面図  
および試験片取付位置

## c) 波浪および被覆防食との

### 併用効果に対する試験方法

試験に使用した鋼管杭は表-3. 7に示す杭No. 22、23およびNo. 26である。杭No. 22の+0.89mより上部については被覆材によって防食を行っているが、杭No. 23、26は被覆していない。試験期間中に鋼管杭の電位、電流、潮位および波高(有義波高)を測定した。試験は波浪と電位および防食電流密度との関係を調べるのを目的とするので、比較的波浪が平穏な8月頃から荒天の時期の台風時期にあたる10月までの約3ヶ月行った。また、杭No. 22、No. 23に取り付けてあるAl陽極を回収して重量測定から陽極の寿命を比較した。

## d) サンドエロージョンに対する試験方法

試験片を図-3. 19に示すように杭No. 22の水深-1m、-3mの2深度へ鋼管杭の陸側(南西)および両サイド(北西側、東南側)の3方向へ取り付けた。試験片は電気防食用試験片のほかに無防食の試験片も取り付けた。図-3. 20に示すように試験片はすべて筒状の長さ50×φ20×厚さ5mm(材質:SS400)である。また、図-3. 21に示すように無防食試験片を長さ115×φ42.7×厚さ2.3mmの

表-3.7 試験項目、対象鋼管杭No. および測定項目

試験項目	対象杭 No.		測定項目
	被覆あり	被覆なし	
波浪および被覆防食との併用効果に対する試験	22	26	電位、電流密度、有義波高、潮位
	22	23	
サンドエロージョンに対する試験	被覆あり		電位、海底面の変動重量、有義波高
	22*		

\* : 杭No. 22へ試験片を取り付けて実施

鞘管の中に固定したものも取り付け、砂の摩耗の影響を受けないときの腐食速度を求めた。電気防食用試験片は鋼管杭に取り付けてある陽極から防食電流が流入するように接続し、無防食用試験片は防食電流が流れないように電気的な接続を遮断して取り付けた。試験期間中に試験片近傍の鋼管杭の電位測定を行った。これは電気防食用試験片が防食電位を上廻っていることを確認するためである。試験終了後、試験片を回収して表面観察を行い、その後重量測定から腐食速度を求めた。試験は約1年間行った。

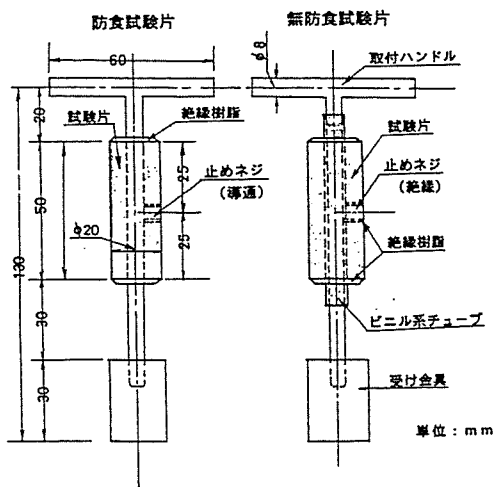


図-3.20 試験片の形状寸法

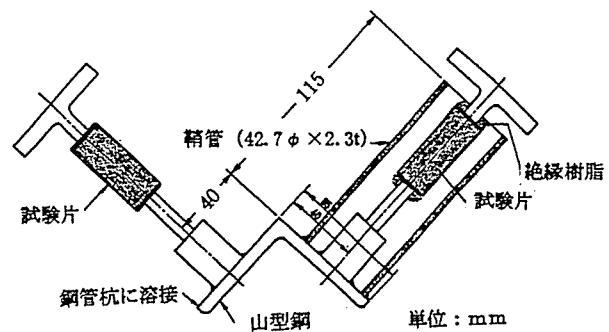


図-3.21 試験片の取付図

### e) 電気防食の設計

鋼構造物に電気防食を実施する場合には、設計防食電流密度や陽極の重量、寿命等を検討して適切な方法で防食するための設計が必要である。流電陽極方式による電気防食の設計は図-3.22に示す設計の手順で行う<sup>15)</sup>。

まず、防食面積を環境別に求める。次に環境別に設計防食電流密度を決定する。ここでは外海であるため海水の汚染の影響はないものと考えて通常の清浄海域に適用されている海水中100mA/m<sup>2</sup>、海底土中部20mA/m<sup>2</sup>の値とした。所要防食電流密度は防食面積に各環境の設計防食電流密度をかけて求めた。その結果、ここで適用されたAl陽極の標準発生電流は3.0A、陽極重量は32.0kg、陽極寿命5年とし鋼管杭1本当たり1個取り付けた。

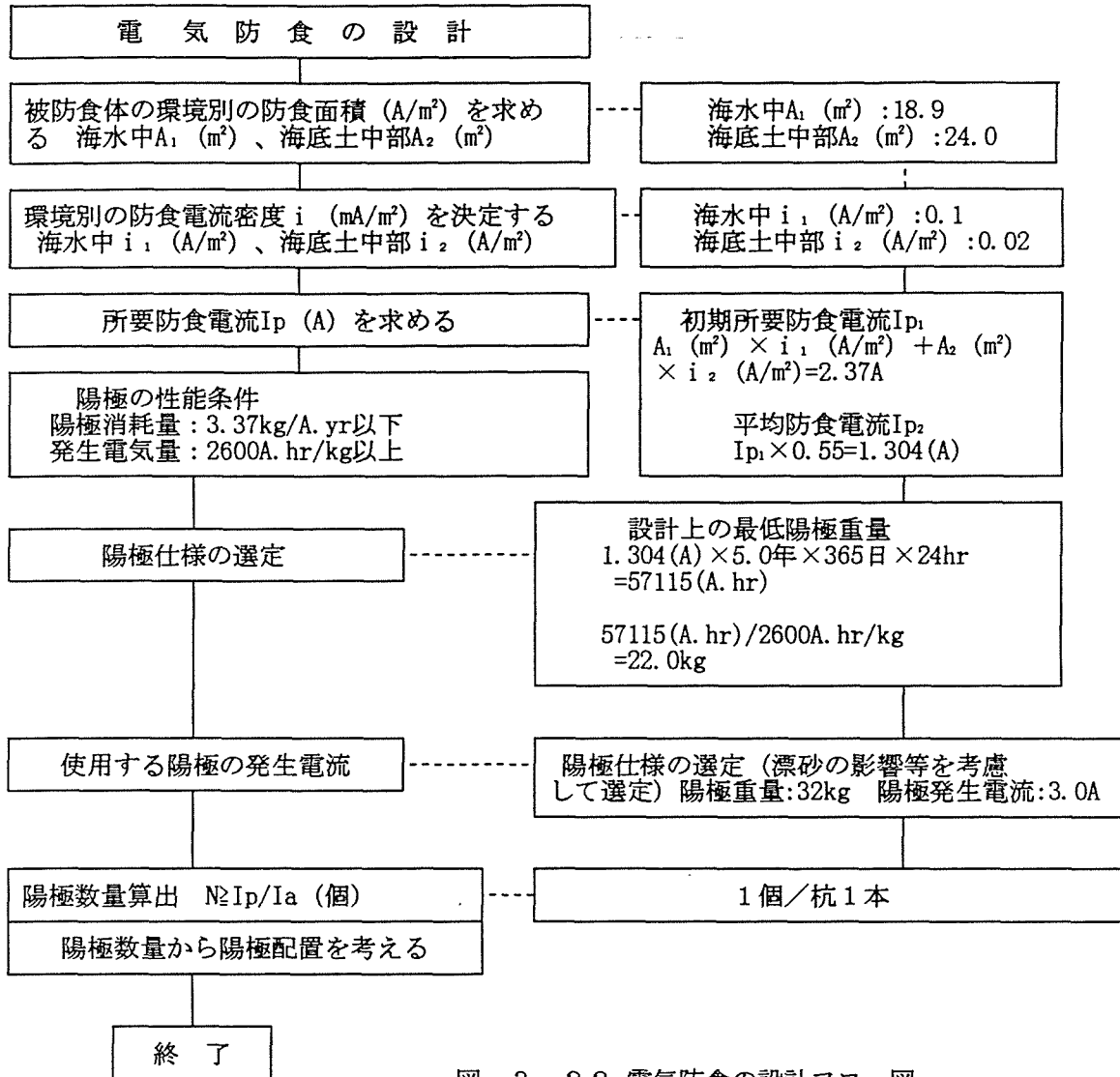


図-3. 22 電気防食の設計フロー図

### (3) 波高と電流および電位の関係ならびに被覆防食との併用効果

#### a) 波高と電流密度の関係

図-3. 23は試験期間中の波高(有義波高)の傾向を取りまとめたものである。試験期間中の8月10日~9月4日頃では比較的波高は小さく、平均するとおおむ



ね100cm程度と思われる。しかし、9月9日～10月24日頃にかけて荒天が続き波高は大きく、この時期の最大波高は300cm程度を示した。したがって、8月10日～9月4日頃の波高の小さい時期を平穏期、9月9日～10月24日頃の波高の大きい時期を荒天期と区分した。

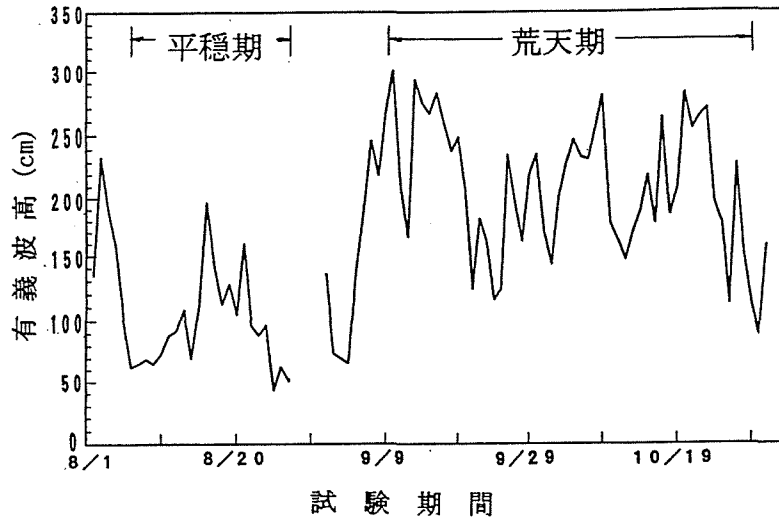


図-3. 23 有義波高の測定結果

図-3. 24は杭No. 22およびNo. 26の防食電流密度の傾向を示したものである。杭頭を被覆した杭No. 22では電流の変動は見られず、ほぼ20~40mA/m<sup>2</sup>の電流密度を示した。これに対して、杭頭を被覆していない杭No. 26の電流密度は平穏期では40mA/m<sup>2</sup>程度であったが、荒天期では40~96mA/m<sup>2</sup>であった。これは常時海水中に位置する所ばかりでなく、荒天期には干満帯の上部まで海水によって濡れを生じ、その部分は海水中の鋼材より貴な電位を示すので、干満帯の鋼材の有効電位差が大きくなり発生電流が増加するためである。

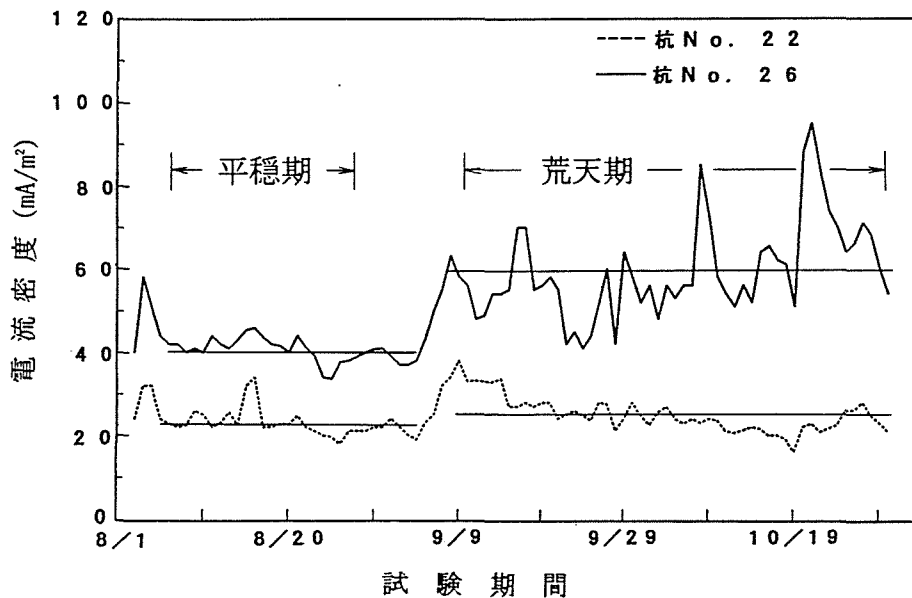


図-3. 24 試験期間中の電流の傾向

### b) 波高と電位の関係

図-3. 25は杭No. 22、No. 26の電位の傾向を示したものであるが、杭No. 22の電位は大きな変動がなく $-1020\sim-1050\text{mV}$  (SCE基準、以下同様) の範囲である。これは被覆防食との併用効果の結果と思われる。これに対して杭No. 26の電位は平穩期で $-950\sim-970\text{mV}$ 、荒天期では全体に貴な方向へ移行し、 $-920\sim-850\text{mV}$ の範囲で変動も大きかった。

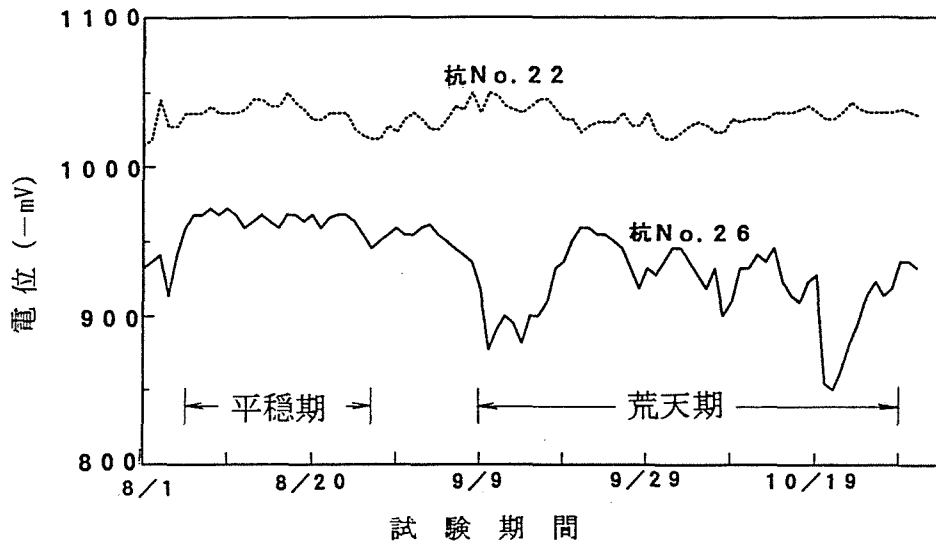


図-3. 25 試験期間中の電位の傾向

### c) 潮位と電位の関係

この測定は干満帯への影響がない平穩期に行った。図-3. 26は被覆杭No. 22の一日における潮位と電位の関係を示した図であるが、潮位の変動があっても電位に変動は見られず $-1\text{m}$ 付近で $-1040\sim-1050\text{mV}$ の値で、また $-4\text{m}$ 付近でも $-1060\sim-1070\text{mV}$ と、より卑な電位を示した。しかし、被覆なしの杭No. 26では図-3. 27に示すように $-1\text{m}$ 付近、 $-4\text{m}$ 付近ともに潮位が低くなると電位は卑の方向に移行し、また潮位が高くなると貴の方向へ移行し、その差は $50\text{mV}$ 程度であった。

### d) 電気防食と被覆防食との併用効果

表-3. 8に被覆杭No. 22と被覆なしの杭No. 23のAl陽極の消費量を示すが、杭No. 23の消費量は杭No. 22の1.4倍であった。干満帯を被覆防食した場合には、荒天期における大きい波高の影響をほとんど受けず安定した電位と電流値が得られるので、その結果、被覆なしの杭に対し $40\sim60\%$ 程度の電流密度で防食できることが明らかとなった。

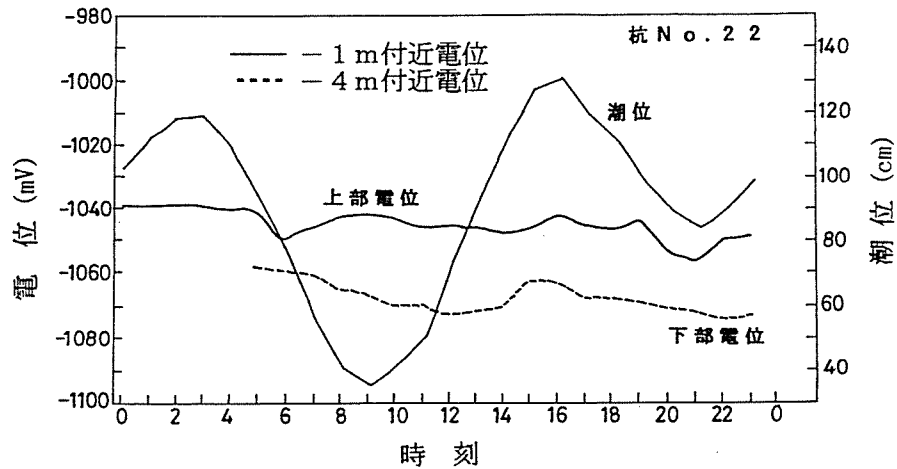


図-3. 26 潮位と電位の関係 (杭No. 22、被覆あり)

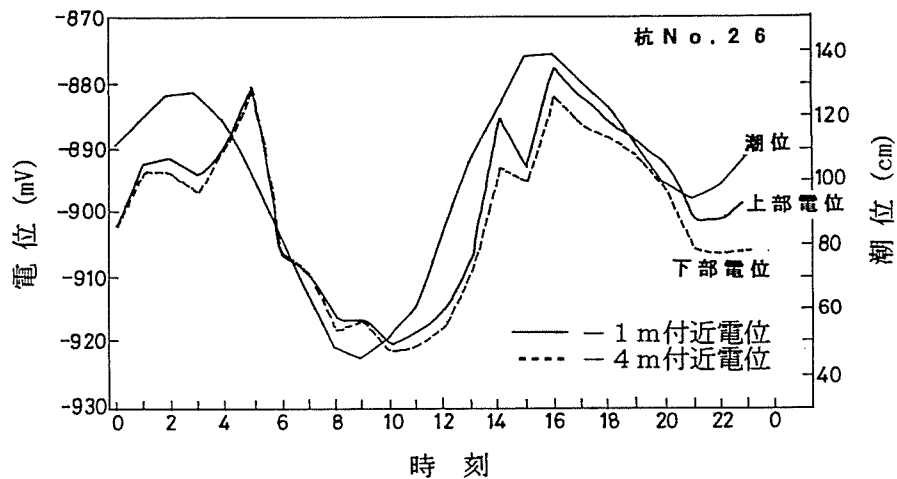


図-3. 27 潮位と電位の関係 (杭No. 26、被覆なし)

表-3. 8 陽極の消耗量測定結果

杭 No.	設計寿命 (y)	陽極重量 (kg)	消耗量 (kg)	年間消耗量 (kg/y)	残り寿命 (y)	推定総寿命 (y)
22	5	32	17.1	3.41	4.38	9.38
23	5	32	23.9	4.78	1.69	6.69

#### (4) サンドエロージョンに対する防食効果

##### a) 海底面の変動状況

図-3. 28に1993年7月～1994年6月の杭No. 22付近における海底の変動状況と試験片取付深度を示す。海底の断面は大きいところで1～2mの変動が認められる。-3mの取付位置では海底の変動幅の中に位置し、ときには砂の中に埋没することがある。しかし、-1mでは常時海水中に位置している。

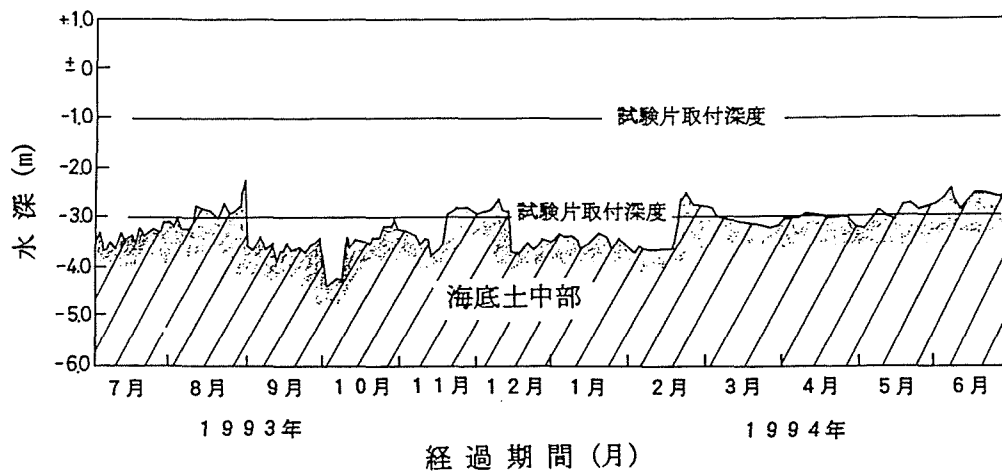


図-3. 28 海底面の変動測定結果

**b) 鋼管杭の電位**

杭No. 22の上部 (-1m)、中間部 (-3m)、下部 (-4m) における電位測定結果を図-3. 29に示す。図-3. 29から電位は上部で-1020mV程度、中間部で変動が大きく-900~-1020mV、下部で-1000~-1050mVで、いずれも防食電位を上廻っていた。したがって、取り付けした試験片(電気防食用)も良好な防食状態を示していた。中間部で電位変動の大きいのは基準電極の取付位置が-3mで海底面近傍に位置するので、砂による摩耗の影響が電位に直接現れたものと考えられる。

図-3. 30は1994年1月~2月にかけての海底面付近(-3m)の電位と波高の関係を示したものであるが、波高が大きくなると電位は貴に移行する傾向が認められる。これは波高が小さいと鋼材表面に石灰質皮膜の生成が行われ安定した状態になるが、波高が大きくなると砂の移動が激しく起こり、生成された皮膜を砂が除去するので電位が貴の方向に移行すると推察される。

**c) 試験片の腐食速度および表面観察**

無防食試験片および電気防食試験片の腐食速度を図-3. 31に示す。無防食試験片の鞘管の無い条件では、-1mで0.2mm/y程度に対して-3mでは0.3~0.4mm/yと大きい。これに対して、鞘管を取り付けた試験片の-1mと-3mの腐食速度は差がないことから、海底面近傍ではサンドエロージョンによる影響のあることが認められる。試験片の取付方向による腐食速度の差は試験期間が1年程度と短いために

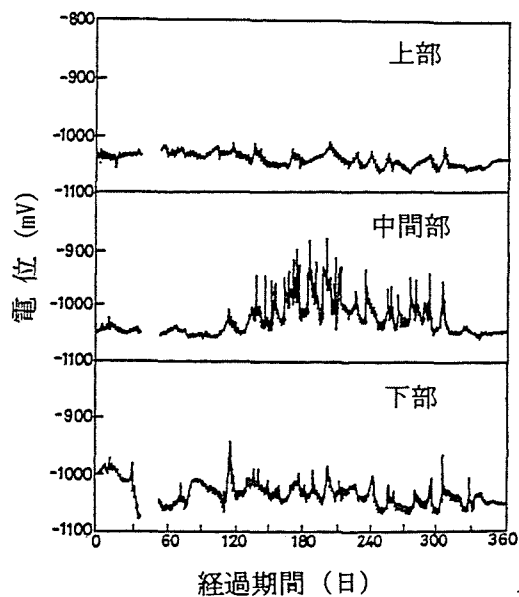


図-3. 29 電位の測定結果

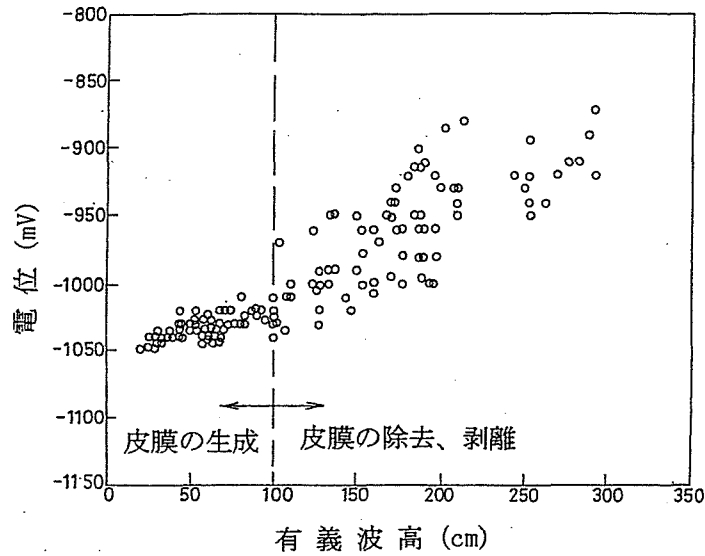


図-3. 30 有義波高と電位の関係

明確な差は認められなかったが、-3mの位置では、陸側0.304mm/yに対し、北西側0.400mm/yと東南側0.388mm/yは大きかった。この理由は汀線直角方向への波の作用に伴い砂の移動が生じたことと一致している。しかし、ここでの腐食速度は前述したパームビーチや沖縄の調査例のような大きい値ではなかった。これは試験期間中に試験片が海底面の変動によって砂の中に埋没している期間があったことによる。それ故、試験期間中、常時海底面付近に位置していれば腐食速度は現状の値よりも大きくなったと考えられる。

一方、電気防食試験片の腐食速度は-1m深度で0.0025~0.0031mm/y、-3m深度で0.0008~0.0027mm/yと小さく電気防食の効果が認められた。

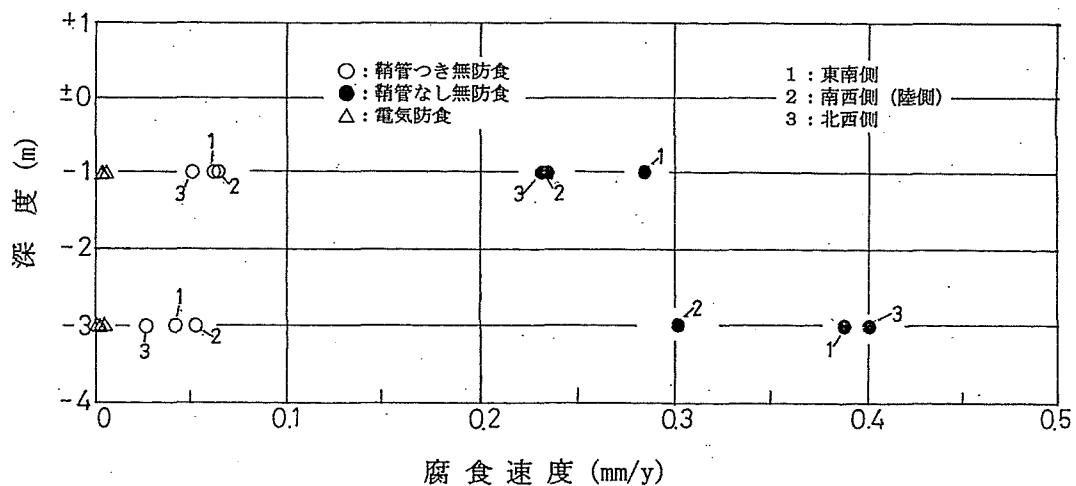


図-3. 31 試験片の深度別の腐食速度

写真-3. 4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る孔食が多く見られるのに対し、電気防食試験片には孔食は認められず平滑であった。

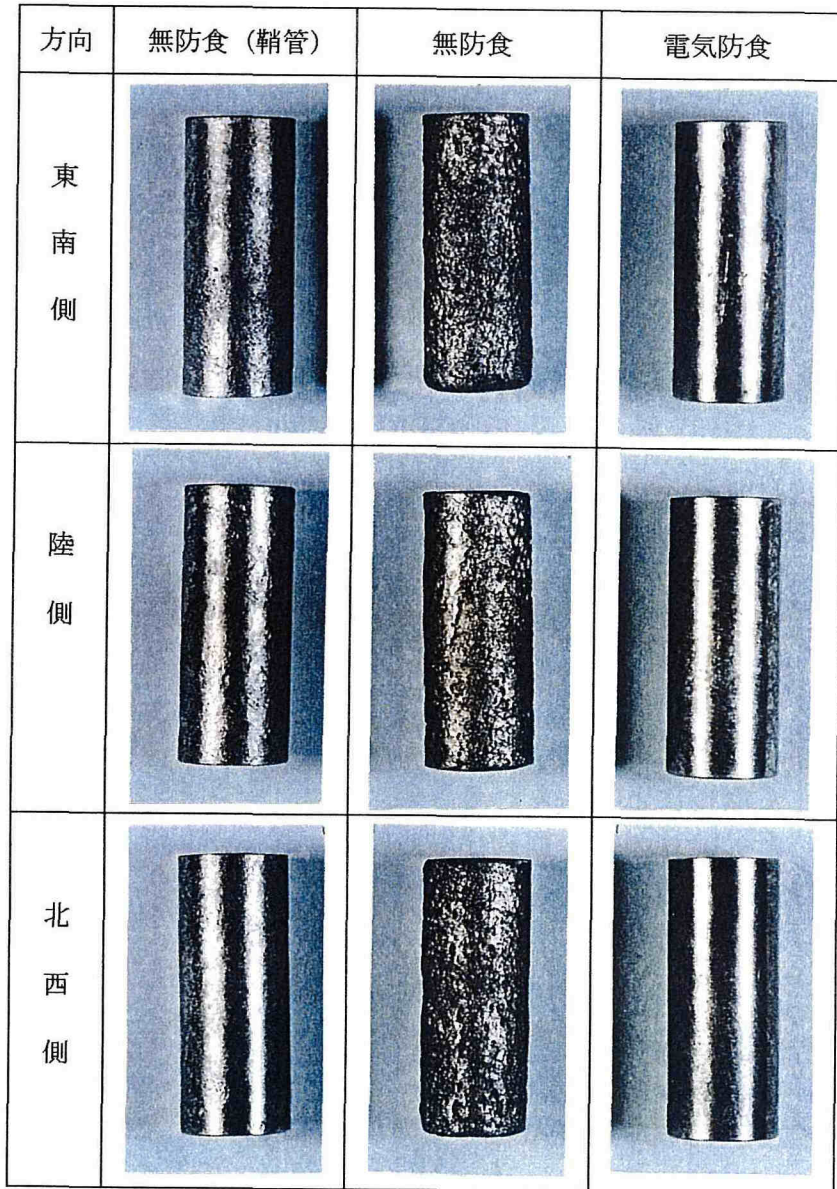


写真-3. 4 試験片表面状況 (-3m)

つぎに、本海域は波浪海域なのでサンドエロージョンのほかに砂による機械的な摩耗作用について考慮する。斉藤等<sup>13, 14)</sup>は室内試験で砂濃度が50g/lのときに流速が6m/s (約12ノット) までは鋼面上の付着錆を除去することによる電気化学的な腐食促進だけで電気防食で防食できるが、10m/s以上では機械的な摩耗も随伴することを示している。しかし、本海域における荒天時の岸沖平均流速は最大80cm/s程度である<sup>16)</sup>ことを考慮すると、この環境では鋼材の素地に対する機械的な摩耗作用はほとんど無いものと考えられる。

さらに、陽極の取り付け数によっては陽極が海底土中部に埋没することがあるが、図-3. 32に示すように陽極の埋没率が50%以上になると発生電流が低減し防食電位に達しない場合が認められた。そのため、海底面の変動の大きい海域への陽極の取り付けに際しては、事前に海底面の変動幅を調査して取付位置等を十分に考慮する必要がある。

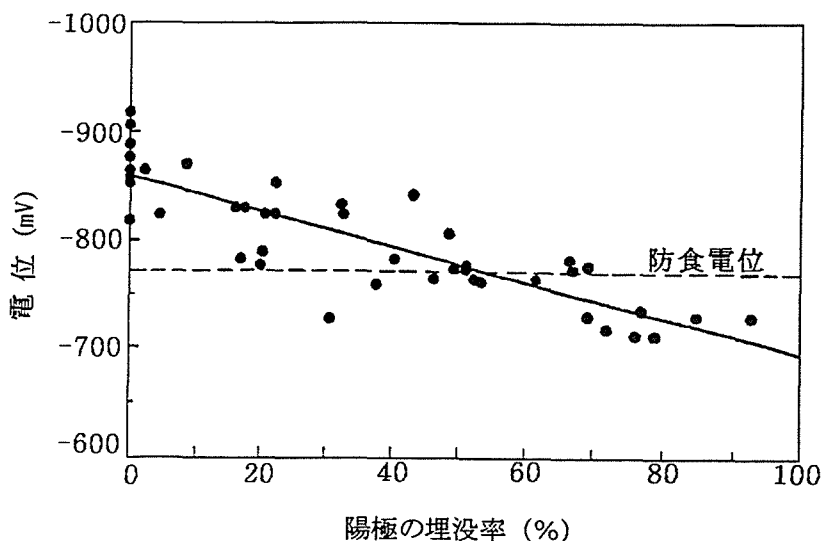


図-3. 32 陽極の埋没率と電位の関係

電気防食を長期間モニタリングするための基準電極として、本観測栈橋で一連の試験に適用したZn基準電極は、長期間（約13年間）大きい波浪や砂の移動の発生する海域においても良好な耐久性を示し、性能的にも満足するものであった。

### 3. 5 結語

以上に述べたように、3. 2では電気防食調査を行い水質と防食電流密度について検討し、電気防食における汚染海域と清浄海域とに区分する方法を提案した。

3. 3では汚染海域の海中および海底土中部の深さ方向の防食電流密度および陽極の発生電流の傾向について検討した。

3. 4では波浪海域における鋼構造物の防食電流密度と波浪との関係、被覆防食と電気防食の併用効果、およびサンドエロージョンによる腐食の傾向およびそれに対する電気防食の防食効果について検討した。

これらを取りまとめて結語とする。

水質と防食電流密度については以下の事項が明らかとなった。

- (1) 水質の調査の結果に基づいて、電気防食における汚染海域と清浄海域とに区分する方法として、塩素イオン濃度が17,800ppm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項目中2項目が該当する場合には汚染海域とすることを提案した。

- (2) 汚染海域における設計防食電流密度は通常清浄海域で適用される $100\text{mA}/\text{m}^2$ では不足し、また陽極の設計寿命も満足しない場合が認められたので、現地観測の結果 $120\sim 150\text{mA}/\text{m}^2$ を必要とすることを示した。

汚染海域における深さ方向の防食電流密度については以下の事項が明らかになった。

- (3) 海水中の防食電流密度は深さ方向に差があり上層部は中層部に対して2~2.5倍ほど大きいことが認められた。これは淡水の流入により上層部の塩素イオン濃度が中層部より小さくなるためと考えられる。したがって、汚染の程度によって深さ方向に設計防食電流密度を変える必要があるといえる。
- (4) 海底土中部の設計防食電流密度は海底面から10m程度までは $30\text{mA}/\text{m}^2$ 必要であるが、それよりも深い部分では $10\text{mA}/\text{m}^2$ で防食可能であることを示した。

波浪海域での電気防食試験では以下の事項が明らかとなった。

- (5) 電気防食の電位および電流は波高の影響を受け、波高が大きいと電位は貴の方向に移行し電流の変動も大きいことを確認した。
- (6) 干満帯を被覆防食して電気防食に併用すると防食電流密度を低減することができ、陽極の延命効果が期待できることが認められた。
- (7) 海底面付近のサンドエロージョンに対して電気防食の効果が認められた。ただし、海底面の変動が著しく大きい場所では陽極の埋没率が50%程度以上になると防食電位を下廻る場合がある。
- (8) 海底面付近の鋼材表面の電位は波浪に伴って生じる浮遊砂に影響され、波高が小さい場合には電位の変動がなく石灰質皮膜の生成が行われるが、波高が大きい場合には電位の変動が認められ、そのため石灰質皮膜が生成されず、また、すでに生成されていた石灰質皮膜が浮遊砂によって除去されることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 善 一章、阿部正美：港湾構造物の所要防食電流に関する調査、港湾技研資料、No. 365、pp3~51、1980。
- 2) 善 一章、阿部正美、横井聰之：港湾構造物の電気防食調査（その1）、港湾技研資料、No. 475、pp3~38、1984。
- 3) 横井聰之、阿部正美：港湾構造物の電気防食調査（その2）、港湾技研資料、No. 502、pp3~33、1984。
- 4) 横井聰之、阿部正美：港湾構造物の電気防食調査（その3）、港湾技研資料、No. 532、pp3~44、1985。
- 5) 小林豊治：汚染海域における鋼の電気防食（8.1分科会報告）、腐食防食協会、'77春季学術講演大会予稿集、p. 161、1977。



- 6) 大津武通、田中礼次、佐藤史朗：復水器管の汚染水腐食、防食技術、Vol. 11、No. 6、p26、1962.
- 7) 山本昇三：汚染海水による復水器管の腐食、防食技術、Vol. 11、No. 6、p24、1962.
- 8) 産業調査会：海洋基礎、p262、1983.
- 9) A. C. Rayner and C. W. Ross: Durability of Steel Sheet Pilings in Shore Structures、Tech、Memo、No. 12、Beach Erosion Board、Corps of Engineers、U. S. Army. p339～342、1952.
- 10) 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、p61～68、1991.
- 11) 阿部正美、横井聰之：被覆工と電気防食との併用効果に関する実験、港湾技研資料、No. 537、p3～28、1985.
- 12) 善 一章、阿部正美：港湾鋼構造物の腐食調査（昭和53～56年調査）、港湾技研資料、No. 413、p30～31、1982.
- 13) 斉藤明夫、重野隼人、梅林正気、熊谷年男：流動食塩水中における軟鋼の腐食と砂混入の影響、防食技術、Vol. 19、No. 9、p4～8、1970.
- 14) 斉藤明夫、重野隼人、熊谷年男：流動食塩水中の砂による軟鋼のエロージョン腐食、防食技術、Vol. 21、No. 3、p118～123、1972.
- 15) (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、p2-17、1986.
- 16) 栗山善昭、加藤一正、柳嶋慎一、村上裕幸：荒天時における岸沖方向漂砂量と断面変化、第8回水産工学研究推進全国会議報告書、p13～16、1989.