

港湾技研資料

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

No. 921 Dec. 1998

波浪海域に位置する鋼構造物の電気防食法に関する現地試験

阿	部	正	美
福	手		勤
山	本	郁	雄
清	水	一	夫
真	鍋	昌	司

運輸省港湾技術研究所

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 試験の概要	4
2. 1 試験対象構造物	5
2. 2 試験場所の海象条件	6
2. 3 各試験に使用した鋼管杭，測定項目および電流，電位測定方法	6
2. 4 電気防食の設計	9
3. 試験結果および考察	9
3. 1 波浪および被覆防食との併用効果に対する試験	9
3. 2 サンドエロージョン・コロージョンに対する試験	14
4. 結論	22
5. あとがき	23
参考文献	23

Site Test on Cathodic Protection Method for Steel Structures in Severe Wave Condition

Masami ABE *
Tsutomu FUKUTE^{2*}
Ikuo YAMAMOTO^{3*}
Kazuo SHIMIZU^{3*}
Syouji MANABE^{4*}

Synopsis

Site test on cathodic protection method for steel structures located in severe wave condition was carried out.

One of purpose of this test is to clarify the influence of wave action of sea water on steel potential and protective current density of cathodic protection. Another purpose is to examine protective effectiveness of cathodic protection for steel located at sea bottom with affects of sand erosion corrosion.

From test results, following conclusions are obtained.

- (1) The protective current density was about 40mA/m² under clement weather and low waves. However, under inclement weather and high wave condition, it was ranged from 40 to 90mA/m², and relatively large change in current density was observed.
- (2) It was found that the protective coating applied to tidal range could reduce the required current density to the level of 40 to 60% compared to it without protective coating.
- (3) It was recognized that steel surface near the sea bottom was affected by sand erosion corrosion.
- (4) The corrosion rate due to sand erosion corrosion was more than 0.46 mm/y.
- (5) It was found that the cathodic protection had an protective effectiveness against the corrosion caused by sand erosion corrosion near the sea bottom.

Key words : Marine Environment, Cathodic Protection, Corrosion Rate, Protective Coating, Sand Erosion Corrosion, Significant Wave Height

* Senior Reseach Engineer,Structural Engineering Division,Port and Harbour Reserch Institute

2* Chief of Materials Lab,Structural Engineering Division Port and Harbour Reserch Institute

3* Japan Association of Pipe Piles

4*Coastal Development Institute of Technology

1-1,3-chome,Nagase,Yokosuka

Tel:0468-44-5033;Fax:0468-44-0255;Email:abe@cc.phri.go.jp

波浪海域に位置する鋼構造物の電気防食法に関する現地試験

阿 部 正 美¹
福 手 勤^{2*}
山 本 郁 雄^{3*}
清 水 一 夫^{4*}
真 鍋 昌 司^{4*}

要 旨

波浪海域に位置する鋼構造物の電気防食法の現地試験を実施した。試験の目的は波浪が電気防食の電位、電流密度に与える影響を明らかにすることと、海底面付近に発生するサンドエロージョン・コロージョンに対する電気防食の効果を検討することである。

試験結果から以下の事項が明らかとなった。

- (1) 防食電流密度は、天候が平穏な時には $40\text{mA}/\text{m}^2$ 程度で、荒天時では $40\sim 90\text{mA}/\text{m}^2$ の範囲で変動が大きかった。
- (2) 干満帯を被覆防食した鋼管杭は裸の鋼管杭に対して $40\sim 60\%$ の電流密度で防食できることが明らかとなった。
- (3) 海底面付近の鋼材表面はサンドエロージョン・コロージョンにより変化することが認められた。
- (4) サンドエロージョン・コロージョンによる腐食速度は $0.46\text{mm}/\text{y}$ 以上であった。
- (5) 電気防食はサンドエロージョン・コロージョンに対して防食効果のあることが認められた。

キーワード：海洋環境，電気防食，腐食速度，被覆防食，サンドエロージョン・コロージョン，有義波高

* 港湾技術研究所構造部主任研究官
2* 港湾技術研究所構造部材料研究室長
3* 鋼管杭協会
4* 沿岸開発技術研究センター
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1
TEL:0468-44-5033;Fax:0468-44-0255;E-mail:abe@cc.phri.go.jp

1. まえがき

最近、海洋鋼構造物の施工に関しては、港内のように海象条件のおだやかな場所ばかりではなく条件の厳しい波浪海域等への展開が考えられるようになった。波浪海域に鋼構造物を建設し長期間良好な状態で機能させていくには鋼材を腐食から守るための防食対策が必要である。

一般に海洋環境に位置する鋼構造物の海水中への防食法として電気防食法が適用されている。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環境要因は、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で生じる腐食現象をサンドエロージョン・コロージョンと言う^{1, 2)}。波浪海域へ電気防食を施工する場合、環境要因に対する電位や電流密度の傾向を明らかにして適切な電気防食法の設計や施工法を検討しておくことが重要である。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³⁾は、港内の潮位の変動に伴う電位や電流密度の傾向を鋼矢板式構造物を対象として調べている。また、著者等は屋外水槽における試験で、水位が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⁴⁾。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・コ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²⁾。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⁵⁾。いずれもサンドエロージョン・コ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。サンドエロージョン・コロージョンに対する電気防食効果については、斉藤等が室内試験^{6, 7)}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

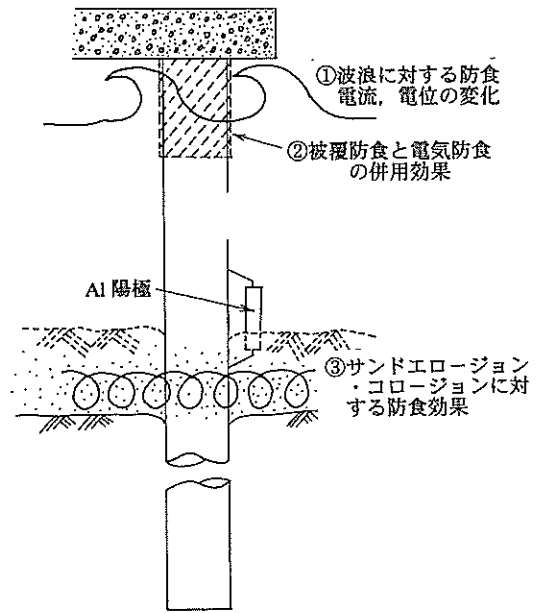


図-1 波浪海域における電気防食の検討事項

ドエロージョン・コ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-1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、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・コロージョンに対する電気防食効果

2. 試験の概要

図-2に電気防食の現地試験における全体の構成および試験フロー図を示す。

図-2に示すように本試験では、「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・コ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。

波浪および被覆防食との併用効果に対する試験では、電気防食を実施している鋼構造物において、天候が荒天時の場合には大きい波高を鋼構造物が直接受けることになる。このような時には、干満帯や飛沫帯へは大きい波高によって陽極からの防食電流が大きくなることが予想されるので、荒天時および平穏時において波高が電位や電流に与える影響等について検討した。また、干満帯には被覆防食を、海水中に対して電気防食を行った場合の被覆防食と電気防食の併用効果についても検討した。

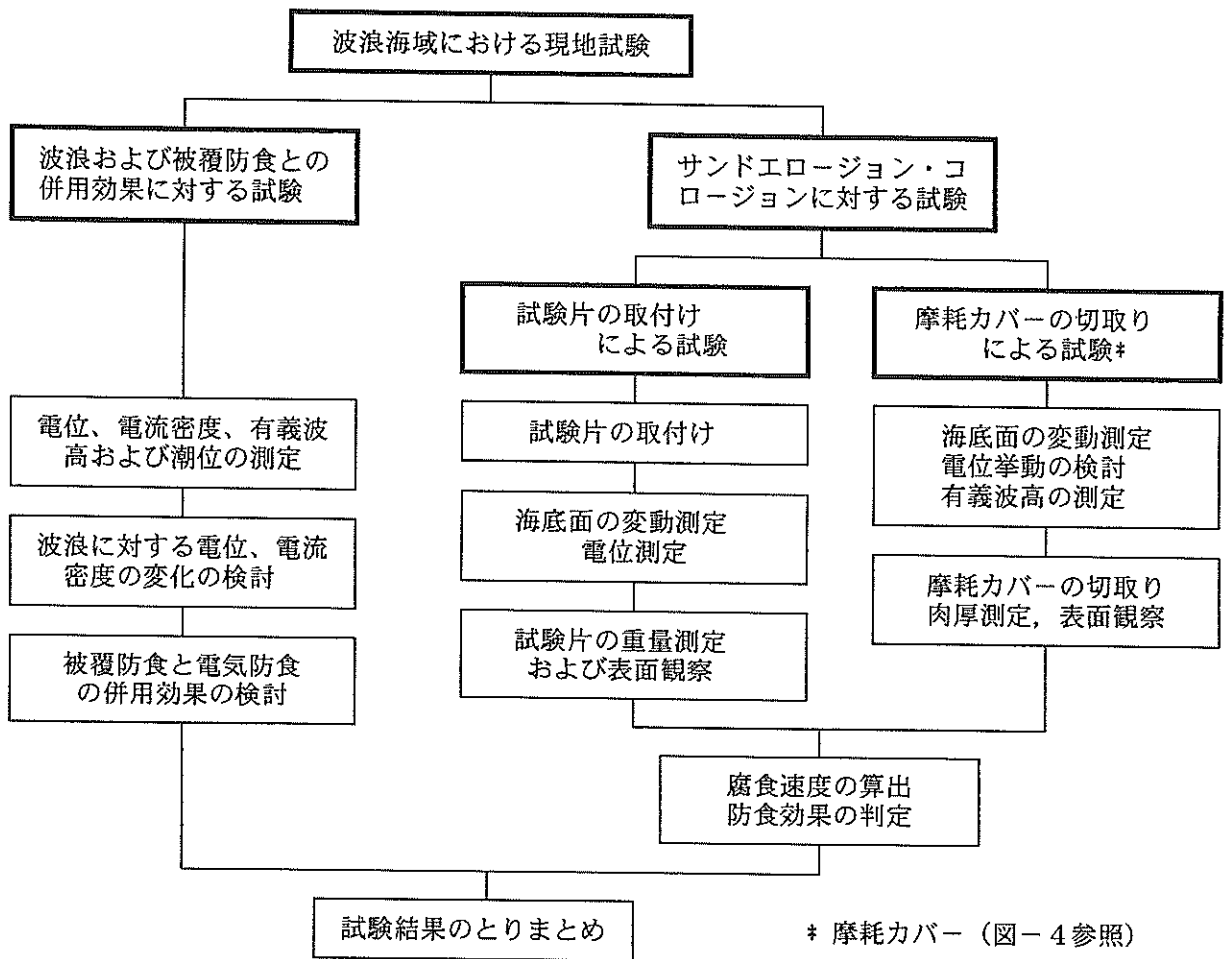


図-2 現地試験の構成および試験フロー図

サンドエロージョン・コロージョンに対する試験では、波浪の影響による海底面付近の砂の移動に伴い、鋼構造物の海底面付近の鋼材は砂による磨耗で腐食の促進が考えられる。そのため、砂による磨耗に対する腐食の傾向や電気防食の防食効果について検討した。

2.1 試験対象構造物

現地試験に用い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棧橋（以下棧橋と呼ぶ）である。この棧橋は海岸線と直角に位置し沖合へ延びている。棧橋の全体図は図-3に示す通りで、全長427m、先端の水深は約-5mである。図-4に示すよ

うに直径600~800mmの鋼管杭の上にコンクリート上部工があり、その上にPC桁を乗せた構造となっている。この場所は波浪が大きいことと潮流の速い海岸線ということで砂の動きが大きいと予想されたので摩耗カバー（鋼製、長さ4.5m）を各杭の海底面付近に取り付けている（図-4）。

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に示す杭No.22, 23, 26および30の4本である。なお、電気防食を実施していないその他の鋼管杭には図-4に示すように干満帯より上部に対し、各種の被覆防食工法を施工して被覆材の耐久性および防食効果の試験を

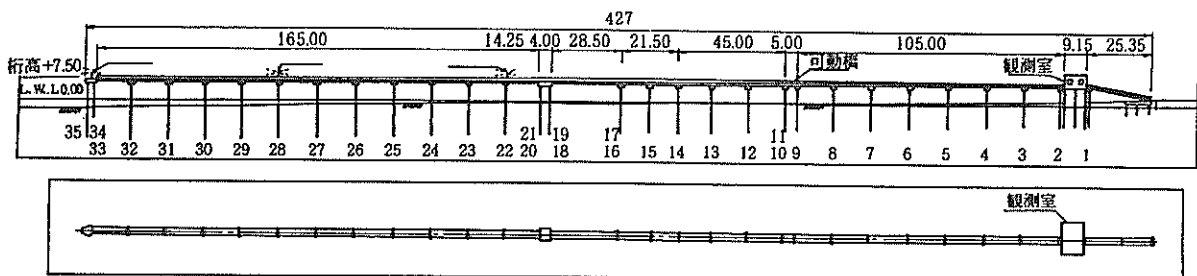


図-3 棧橋の全体図

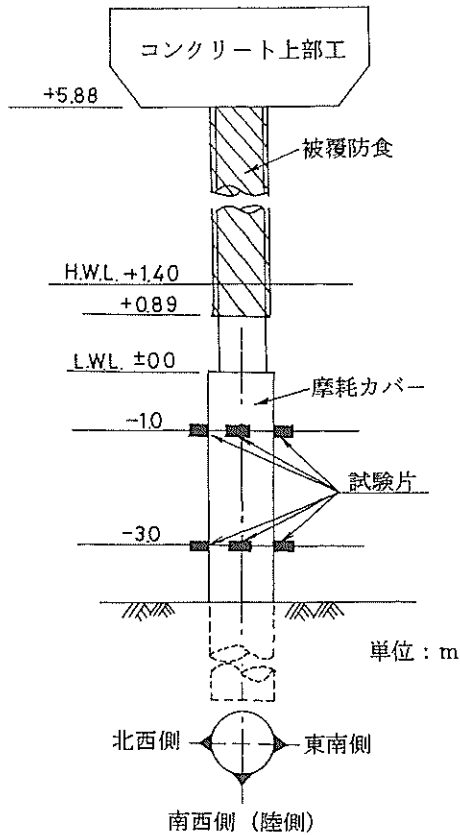


図-4 棧橋の断面図および試験片取付け位置

実施している^{8, 9)}

2.2 試験場所の海象条件

この場所の海象条件はH.W.L.が+1.4m, 設計波高は概算沖波波高で6.3m, 周期14sec, 潮流の流速は0~50cm/s

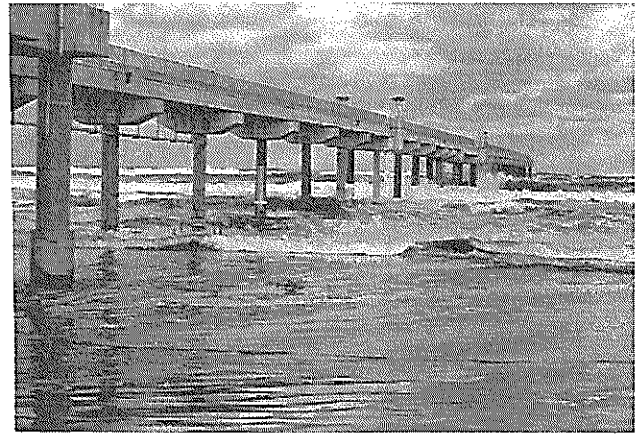


写真-1 現地試験に使用した観測棧橋

程度である。波浪の影響によって、全体的に年間の海底面の深さは変動が激しく3~4m変動する。図-5に海底面の年間の変動幅の例を示す¹⁰⁾。図中の黒く塗られた部分が変動幅を示す。写真-1に波浪のやや大きい時期の棧橋の状況を示す。

2.3 各試験に使用した鋼管杭, 測定項目および電流, 電位測定方法

各試験に適用した杭No.と測定項目を表-1に示す。

陽極の発生電流の測定は図-6に示す陽極芯金と取付け金具間に挿入した水中型シャント抵抗(10mΩ)の端子電圧を測定し電圧降下法によって測定した。また、電位は図-7に示すようにZn基準電極を鋼管杭面に設置して測定した。

表-1 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	陽極消耗量
サンドエロージョン・コロージョンに対する試験	試験片の取付けによる試験	被覆あり	電位, 海底面の変動重量減量, 有義波高
		22*	
	摩耗カバーの切取りによる試験	22	海底面の変動電位**, 肉厚測定
		17***	

*: 杭No. 22へ試験片を取り付けて実施

** : 杭No. 22のみ

***: 杭No. 17は無防食

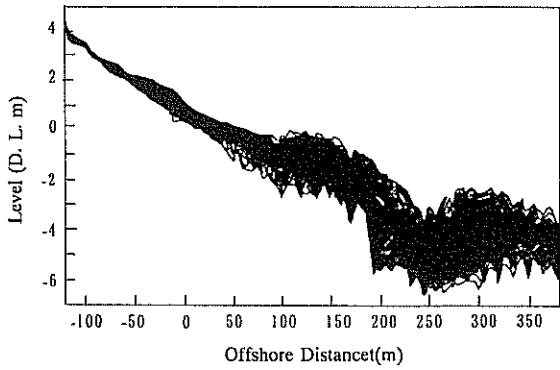


図-5 海底断面の変動状況例

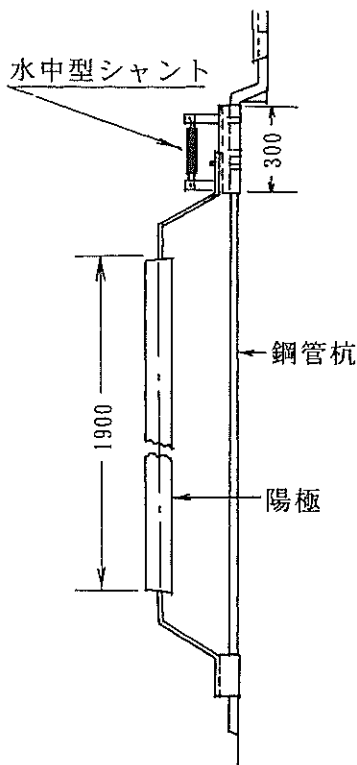


図-6 水中型シャント抵抗の取付け状況

(1) 波浪および被覆防食との併用効果に対する試験
 試験に使用した鋼管杭は表-1に示すように、杭No. 22、23およびNo. 26である。図-4に示すように杭No. 22は+0.89mより上部を被覆材（ペトロラタム防食工法）により防食している。杭No. 23, 26は裸の条件である。試験期間中に鋼管杭の電位、電流、潮位および波高（有義波）の測定を行った。試験期間は波浪と電気防食実施時の電位、電流の関係を検討するために天候が平穏および荒天の時期にまたがる期間が必要であり、比較的波浪の

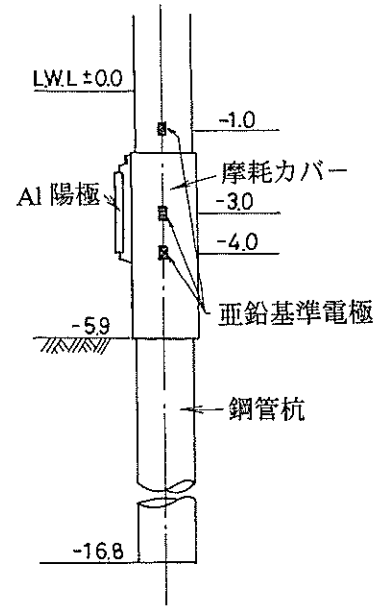


図-7 Zn基準電極の取付け位置

平穏な8月から荒天の時期の台風時期にあたる10月までの約3ヶ月間試験を行った。また、杭No. 22およびNo. 23は試験終了後にAl陽極を回収して重量測定から陽極の推定総寿命を比較した。

(2) サンドエロージョン・コロージョンに対する試験

サンドエロージョン・コロージョンに対する試験では、試験片を鋼管杭に取付けての試験と摩耗カバーから試験片を切取った試験との2つの方法で実施した。

まず、「試験片の取付けによる試験」に使用した鋼管杭はNo. 22である。この鋼管杭に図-4に示すように水深-1m、-3mの2深度の位置へ各試験片を取り付けて試験を実施した。試験片は、防食効果を検討するために電気防食用試験片の他に無防食の試験片も併せて取付けた。図-8に示すように試験に使用した試験片は筒状の長さ50×φ20×厚さ5mmの試験片（材質：SS400）である。また、無防食試験片は長さ115×φ42.7×厚さ2.3mmの鞘管の中に固定したタイプのものも取付けた（図-9の右図）。これは鞘管を試験片に取り付けることによりサンドエロージョン・コロージョンの影響を受けないようにしサンドエロージョン・コロージョンの有無による腐食速度を検討するためである。試験片の断面方向の取付位置（図-4参照）は鋼管杭の陸側（南西）および両サイド（北西側、東南側）の3方向として方向による影響を併せて検討した。電気防食用試験片は鋼管杭に取付けてある陽極から防食電流を流入できるように接続し、無防食用試験片は防食電流が流れないように鋼管杭との電気

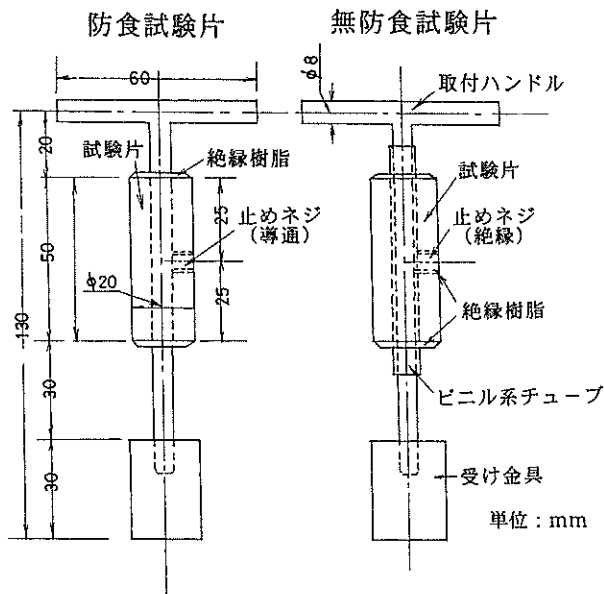


図-8 試験片の形状寸法

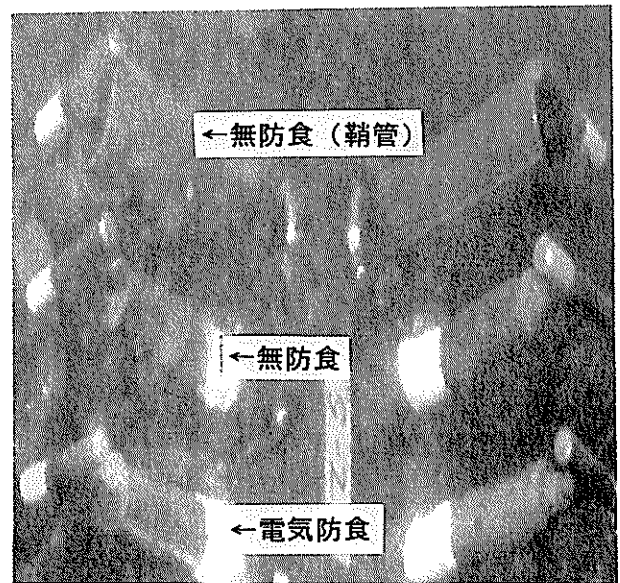


写真-2 試験片の取付け状況

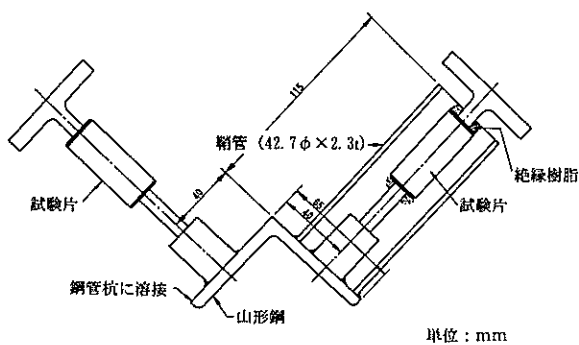


図-9 試験片の取付図

的な接続を遮断して取付けた。また、電気防食用の試験片が防食電位より卑であることを確認するとともに、海底面近傍の鋼材表面の状況を知るために鋼管杭の電位測定を行った。さらに、試験終了後、試験片を回収し表面観察および重量測定から腐食速度を求めた。試験片は約1年間曝露した。写真-2に鋼管杭へ取付けた試験片の状況を示す。

次に、「磨耗カバーの切取りによる試験」では杭No.17(無防食杭)およびNo.22(電気防食実施杭)の杭について実施した。各杭における切取り箇所を図-10に示す。杭No.17は磨耗カバーの-1mと-3.1mの深度から切取りを行った。杭No.22についても杭No.17と同一深度からの切取りを予定していたが、切取り時に海底面を調査したところ海底面は-0.9m程度と浅くなっていたために、杭No.17と同一深度からは切取りができず-0.5、-0.9お

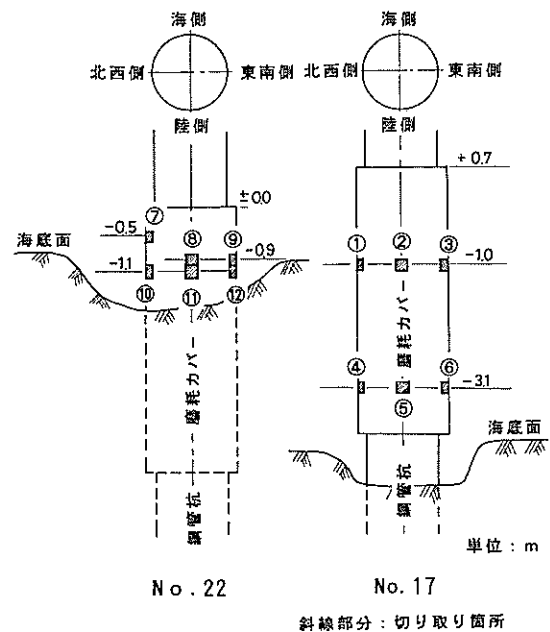


図-10 各杭の試験片切取り箇所

よび-1.1mの3深度で切取りを行った。切取りの断面方向は図-4に示すように「試験片の取付けによる試験」と同様に陸側(南西)および両サイド(北西側、東南側)の3方向とした。切取り試験片は各杭とも計6枚である。一箇所からの切取り寸法は縦10cm×横15cm程度である。

切取りを行った試験片は表面観察を行い、その後、10%クエン酸二アンモニウム溶液に浸漬し鋼材表面の錆を

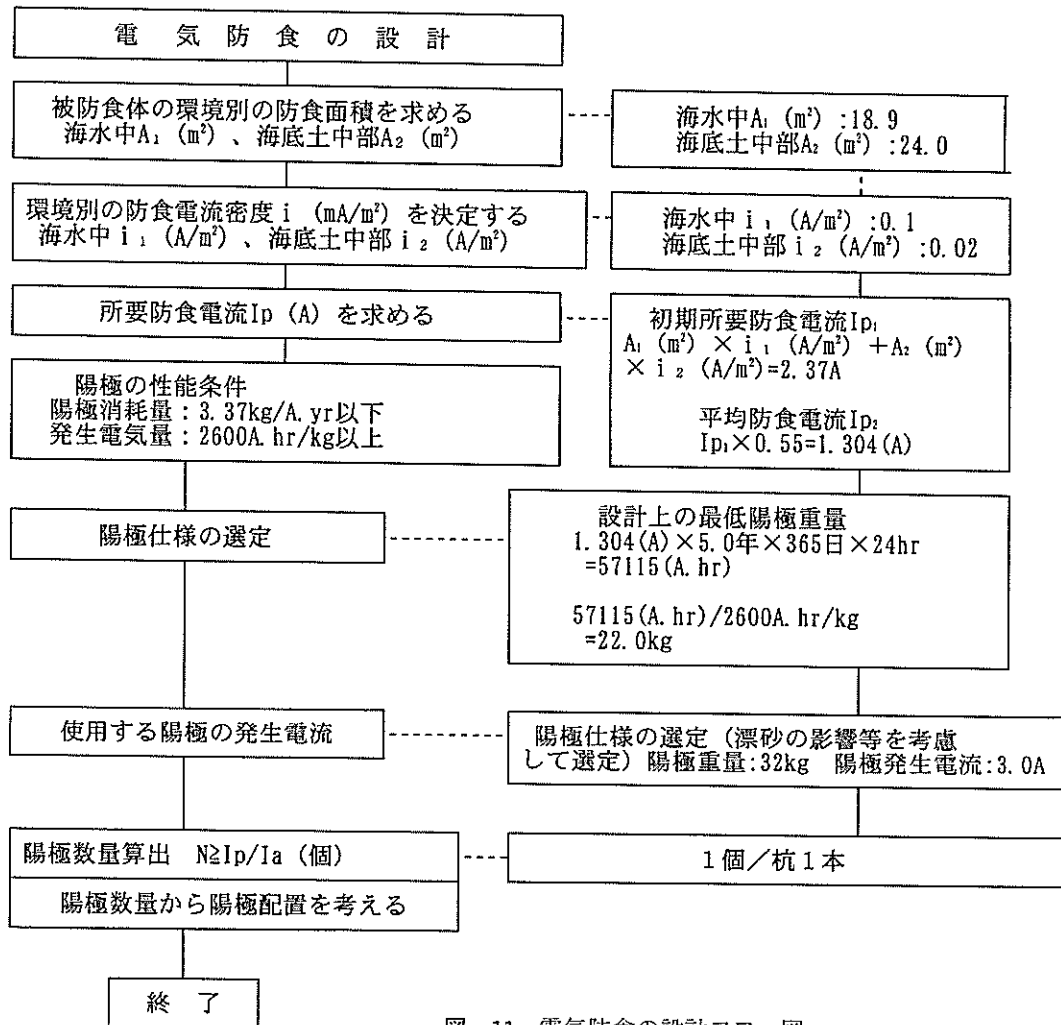


図-11 電気防食の設計フロー図

除去した。錆の除去後、鋼材表面の写真撮影を行うとともに、ポイント型マイクロメータで肉厚測定を行い腐食速度を算出した。

電気防食を実施している杭No. 22については鋼管杭の電位を定期的に測定し防食効果の確認を行った。その他に、杭No. 17およびNo. 22付近の海底面の変動を調査した。なお、杭No. 17とNo. 22付近は、砕波帯に位置し海底面付近の砂の移動の大きい場所である。

2. 4 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、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となってくる。流電陽極方式による電気防食の設計は図-11に示す設計の手順に従い行われる¹¹⁾。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等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/m²、海底土中部20mA/m²

の値とした。所要防食電流密度は防食面積に各環境の防食電流密度を乗じて求めた。その結果、ここで適用されたAl合金陽極の標準発生電流は3.0A（海水抵抗率 $\rho = 30 \Omega \cdot \text{cm}$ ）、陽極重量は32.0kg、陽極寿命5年ものを鋼管杭1本当たり1個取付けた。

3. 試験結果および考察

3. 1 波浪および被覆防食との併用効果に対する試験

(1) 有義波高に対する電流の傾向

図-12は試験期間中の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日頃は平穏で比較的有義波高は低かった。しかし、9月9日～10月24日頃にかけて荒天が続き有義波高は高かった。この時期の最大有義波高は310cm程度を示した。ここで、8月10日～9月4日頃は平穏期、9月9日～10月24日頃を荒天期と呼ぶ。荒天期と

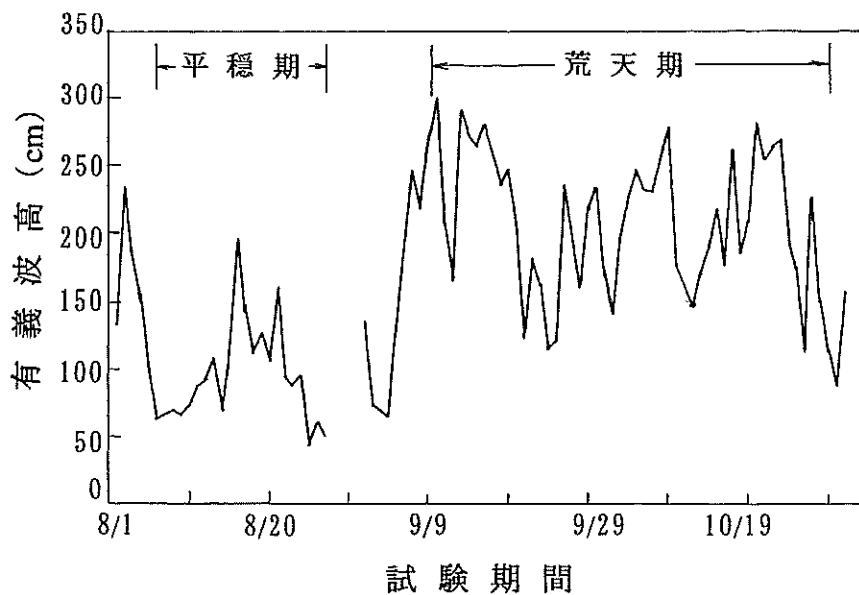


図-12 有義波高の測定結果

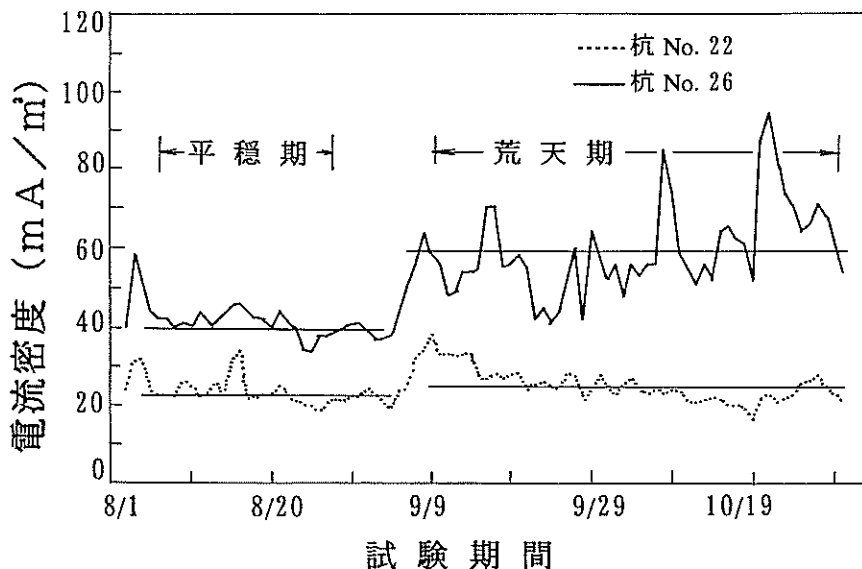


図-13 試験期間中の電流密度の傾向

平穩期とでは2m程度の波高差が認められた。

図-13は試験期間中の杭No.22およびNo.26の電流密度の傾向を示す。杭No.22では試験期間中大きい電流密度の変動は見られず、ほぼ18~37mA/m²で推移した。9月9日以降の荒天期でさえも大きい変動は見られなかった。この理由は、杭No.22は前述したように+0.89mより上部を被覆防食しているため波浪による影響が少なかったためと考えられる。これに対して、杭No.26では、電流密度は平穩期で40mA/m²程度の値を示していたが、荒天期では有義波高が高くなるに伴い増加傾向を示し、40~96

mA/m²と大きく変動し増加した。増加の理由は、荒天期には防食対象面積が常時海水中に位置する所ばかりでなく干満帯の上部まで海水によって濡れを生じるためである。濡れを生じた部分は海水中に位置する鋼材に比べてより貴な電位を示すので優先的に、かつ大きい電流がその部分へ流入するためである¹²⁾。すなわち、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したためと考えられる。

(2) 有義波高に対する電位の傾向

図-14に試験期間中における杭No.22, No.26の電位の傾向を示す。杭No.22では試験期間中の電流密度と同様に大きな変動は認められず、 $-1020 \sim -1050\text{mV}$ (vs, SCE以下同様)の値を示した。このように卑な電位を示したことは被覆防食との併用効果のためと思われる。干満帯を被覆防食することは裸の状態に比べて荒天期においも平穏期とあまり変わらない比較的安定した卑な電位および少ない電流密度を示すことが明らかとなった。杭No.26の平穏期における電位は $-950 \sim -970\text{mV}$ の値であった。しかし、有義波高が高くなった荒天期の電位は全体に貴な方向へ移行し $-920 \sim -850\text{mV}$ の値を示し、変動も大きかった。干満帯を被覆防食していない杭の荒天期における電位は平穏期に比べ $70 \sim 80\text{mV}$ 貴の方向へ移行することが認められた。それに伴い、荒天期では有効電位差が大きくなるので電流密度も平穏期に比べ $20 \sim 30\text{mA/m}^2$ 増加したものと考えられる。

(3) 潮位と電位の関係

図-15は杭No.22の一日における潮位と電位の関係を示すが、潮位の変動が大きくなっても電位の変動は見られず上部では $-1040 \sim -1050\text{mV}$ を、下部では $-1060 \sim -1070\text{mV}$ とより卑な電位を示した。この杭は干満帯に被覆防食を行っているために、電位は潮位の変動にはあまり影響されないようである。しかし、図-16の杭No.26では上部、下部ともに潮位の変動に伴い電位が変化していることがうかがえる。潮位が低くなると電位は卑の方向へ移行し、高くなると貴の方向へ移行する。その差

は 50mV 程度であった。潮位が高くなると電位が貴になる理由は、干満帯の鋼材表面の電位が海水中よりも貴な値を示すためである。なお、この測定については潮位変動と電位の関係をみるために荒天期では干満帯への大きい影響があるために平穏期に行なった。

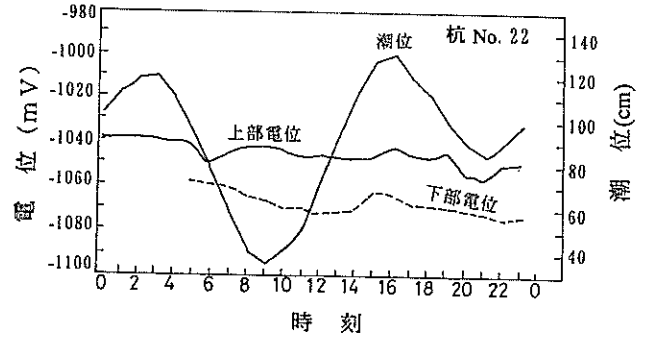


図-15 潮位と電位の関係(杭No.22,被覆あり)

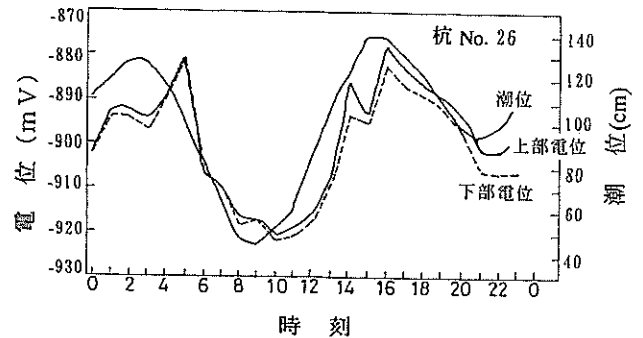


図-16 潮位と電位の関係(杭No.26,被覆なし)

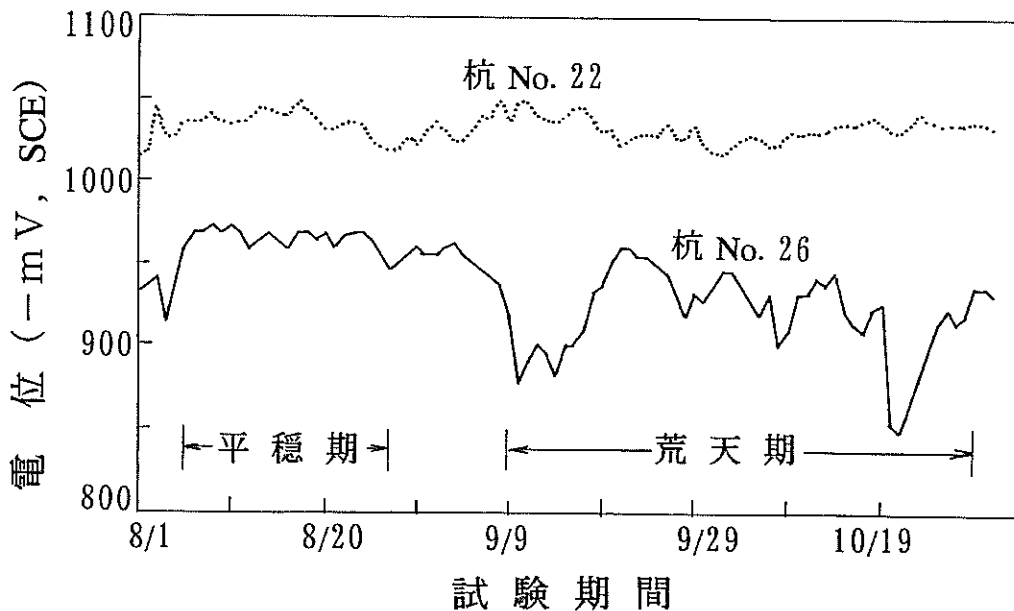


図-14 試験期間中の電位の傾向

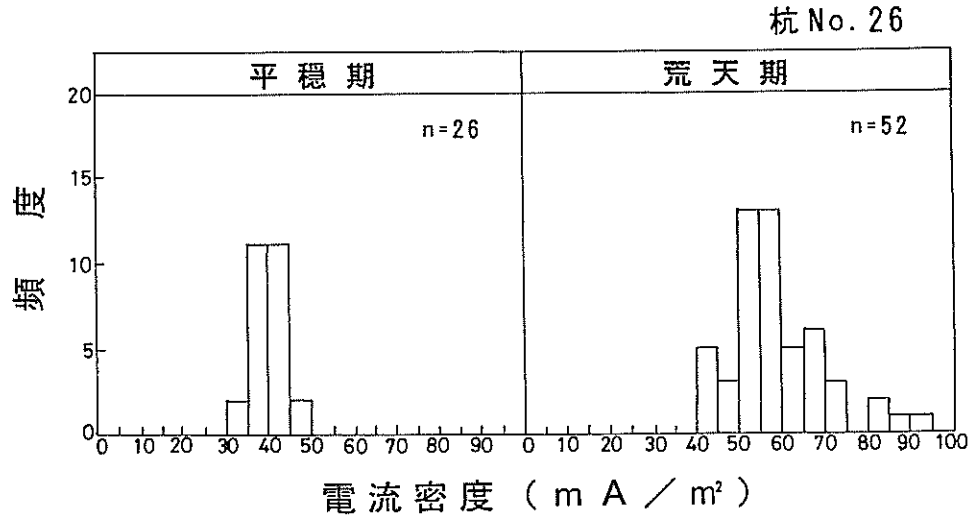


図-17 平穩期および荒天期における電流密度の度数分布 (1)

(4) 被覆防食との併用効果

(1) および (2) で述べたように杭No. 22のように干満帯を被覆防食している条件での電流は、波高が高くなっても大きい変動が認められなかった。また、電位も波高によって影響を受けずに安定した単な値を維持していた。すなわち、干満帯を被覆防食することによって、その部分への電流の流入を抑えることができるので、被覆防食と電気防食の併用効果が認められる。また、干満帯を被覆防食することは安定した単な電位を維持することと、電流密度は低減することが明らかとなった。

なお、試験期間中における杭No. 22およびNo. 26の電流密度の度数分布を平穩期と荒天期とに分けて整理してみると図-17、図-18のようになる。図-17より杭No. 26では平穩期におけるピークは35~45mA/m²の位置であり横への広がり小さい。しかし、荒天期でのピークは50~60mA/m²に位置して横の広がりも平穩期に比べて広く、その範囲は40~95mA/m²であった。したがって、干満帯が裸の状態では平穩期に比べて荒天期では電流密度の変動の大きいことが確認できる。一方、図-18の杭No. 22では平穩期のピークは20~25mA/m²に位置し荒天期の分布の広がり15~40mA/m²とやや平穩期に比べて広いが、そのピークは平穩期と同様に20~25mA/m²と変わらず被覆防食の効果が明らかである。

干満帯の被覆防食の有無による電位と電流密度の関係を図-19に示す。被覆防食を併用している杭No. 22では単な電位と低電流密度を示しているのに対し、杭No. 26 (裸杭) では貴な電位と変動の大きい電流密度を示している。

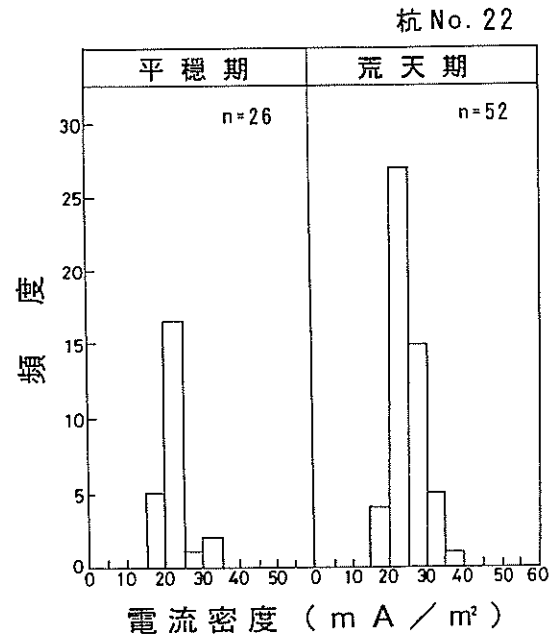


図-18 平穩期および荒天期における電流密度の度数分布 (2)

(5) 陽極の消耗量の比較

表-2に示すように杭No. 22とNo. 23に取付けたAl陽極の消耗量を比較した。干満帯が裸の杭No. 23の消耗量は杭No. 22より1.4倍と大きいことがうかがえる。一方、杭No. 22では杭No. 23に比べて消耗量は小さく残り寿命も長かった。

また、図-20に杭No. 22, 23, 26およびNo. 30における発生電流の経時変化の傾向を示す。通電当初における発生電流は4~6Aの大きい値であった。しかし、時間の

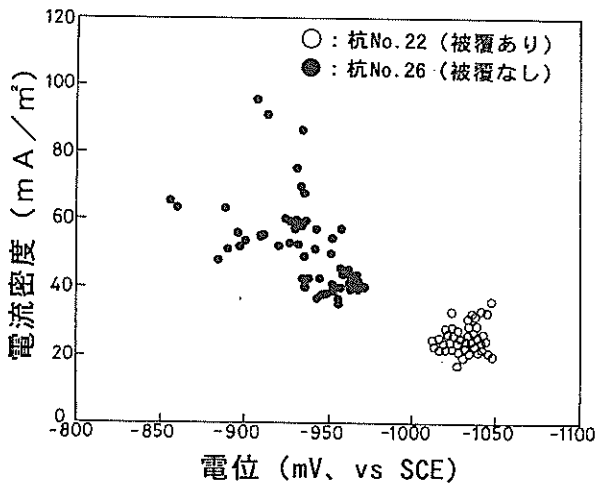


図-19 電位と電流密度の関係

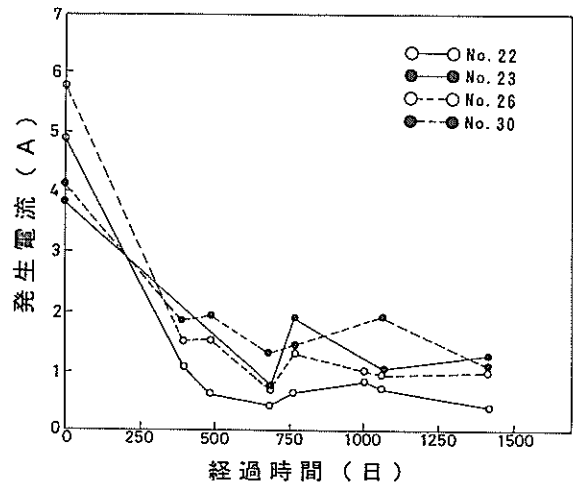


図-20 各杭の発生電流の経時変化

表-2 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)	推定総寿命 (y)
22	5	32	17.1	3.41	9.38
23	5	32	23.9	4.78	6.69

経過とともに各杭の陽極の発生電流は低減傾向を示し、おおよそ500日から安定してきている。この図からも被覆防食を併用した杭 (No. 22) の発生電流は最も小さく、1400日頃では0.5A程度であった。これに対して裸杭 (No. 23, 26, 30) では1A以上の値を示している。このように、発生電流が小さいことは陽極の消耗量も少なくすむことから被覆防食を併用した杭は裸の杭よりも陽極の延命効果が期待できる。すなわち、干満帯の被覆防食の有無に対する発生電流および電位の傾向を示すと図-21 のようになる。干満帯を被覆防食することによって電位は卑な傾向を示し発生電流は低減するために図-22の②のように陽極寿命の延命効果が期待できる。

以上、波浪海域の鋼構造物へ電気防食試験を実施し、波高の変動によって電位や電流は変化することが明らかとなった。波浪に対する電位および電流密度の傾向を整理すると表-3 のようになり、干満帯に被覆防食をしていない場合には、荒天期に電流は増大して電位は貴の方向へ移行する。しかし、干満帯が被覆防食されていると荒天期における大きい波浪の影響をほとんど受けず安定した電位と電流を示した。その結果、被覆防食と電気防食との併用効果が期待でき裸の杭に対し40~60%の電流密度で防食できることが明らかとなった。

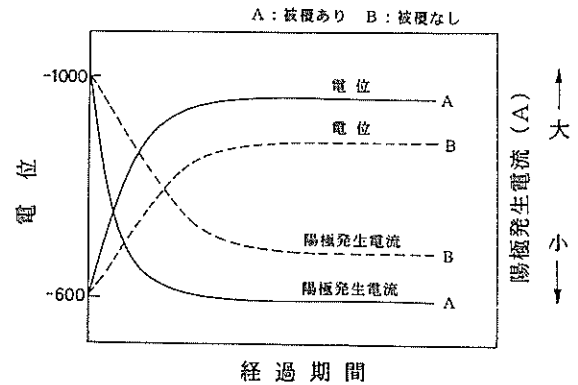


図-21 被覆を併用した杭と裸杭との発生電流および電位の傾向

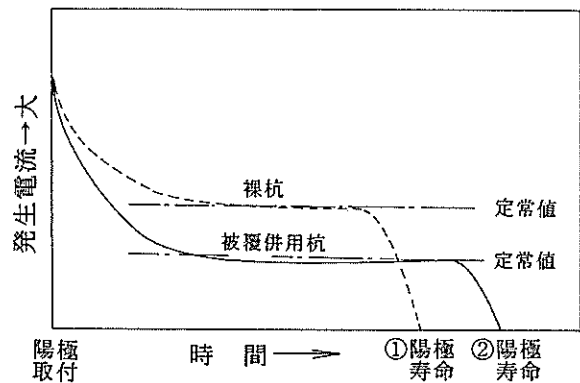


図-22 被覆を併用した杭と裸杭との陽極寿命の概念図

表-3 被覆併用杭と裸杭の電位、電流密度の傾向

杭No.	No. 26 (裸杭)		No. 22 (被覆併用杭)	
	平穩期	荒天期	平穩期	荒天期
電位 (mV)	-950~-970	-850~-920	-1020~-1050	
	変動が小さい	変動が大きい	変動が小さい	
電流密度 (mA/m ²)	40	40~96	22	18~37
	変動が小さい	変動が大きい	変動が小さい	

3.2 サンドエロージョン・コロージョンに対する試験

(1) 試験片の取付けによる試験

a) 海底面の変動状況

図-23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け深度を示す。図-23に示すように、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の試験片は海底の変動幅の中に位置し、時には砂の中に埋没する場合が見られ、試験期間中の砂中への埋没は37%であった。しかし、-1mの試験片では試験期間中、常時海水中に位置していた。

b) 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表-4および図-24に示す。無防食試験片の鞘管の無い条件では、-1mで0.23~0.28mm/yに対して-3mでは0.3~0.4mm/yと大きい。これに対して、-1mと-3mに取付けた鞘管付きの試験片の腐食速度は0.04~0.06mm/yと差がな

いことから、海底面近傍ではサンドエロージョン・コロージョンによる影響のあることが推測される。試験片の取付け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明確な差は認められなかったが、-3mの位置では陸側(南西側)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(37%)があったことも一因であろう。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ていったと考えられる。また、本試験では無防食試験片が設置深度に独立して存在するため、鋼管杭のように深度方向に連続している鋼構造と異なり、深度方向のマクロセルの影響が除外されていることも腐食速度の小さくなった原因と考

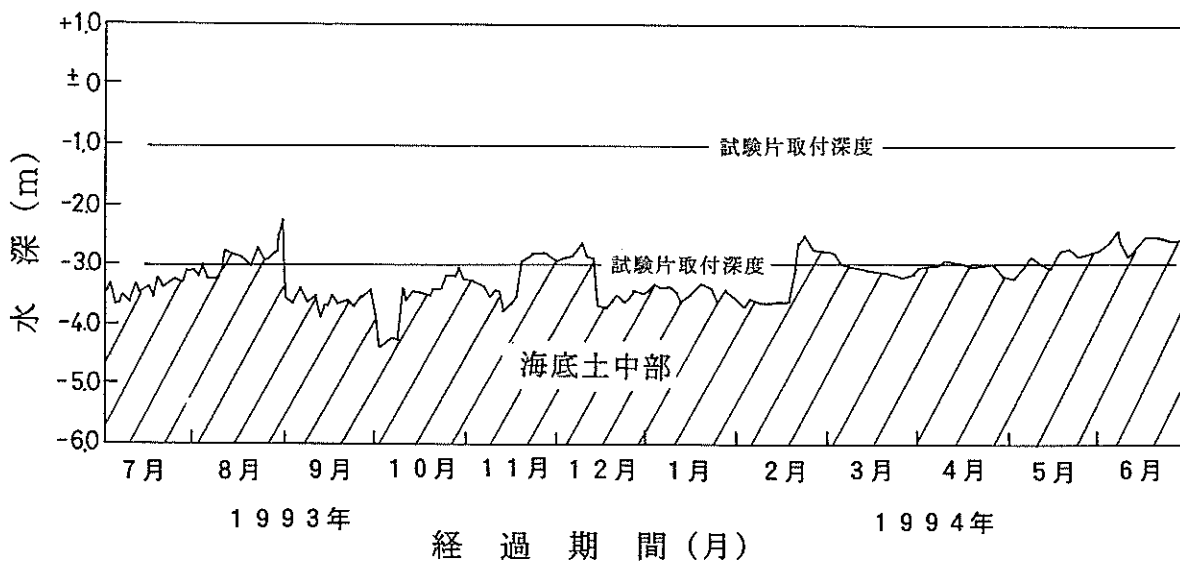


図-23 海底面の変動測定結果

表-4 試験片の重量測定結果

取付け深度 (-1m)		取付け方向			平均値 (mm/y)
取付け条件	測定項目	東南側	南西側	北西側	
無防食 (鞘管あり)	初期重量(g)	92.7112	93.2281	93.1317	
	試験後重量(g)	91.1324	91.6699	91.8579	
	重量減量(g)	1.5788	1.5582	1.2738	
	腐食速度(mm/y)	0.0654	0.0645	0.0528	0.0609
無防食 (鞘管なし)	初期重量(g)	93.3002	92.6085	93.2218	
	試験後重量(g)	86.4038	87.0220	87.6259	
	重量減量(g)	6.8964	5.5865	5.5959	
	腐食速度(mm/y)	0.2857	0.2314	0.2318	0.2496
電気防食	初期重量(g)	93.2649	93.3274	93.2742	
	試験後重量(g)	93.1905	93.2674	93.2095	
	重量減量(g)	0.0744	0.0600	0.0647	
	腐食速度(mm/y)	0.0031	0.0025	0.0027	0.0027
取付け深度 (-3m)		取付け方向			平均値 (mm/y)
取付け条件	測定項目	東南側	南西側	北西側	
無防食 (鞘管あり)	初期重量(g)	95.6572	93.1680	92.4747	
	試験後重量(g)	91.6224	91.8751	91.8348	
	重量減量(g)	1.0348	1.2929	0.6399	
	腐食速度(mm/y)	0.0429	0.0536	0.0265	0.0410
無防食 (鞘管なし)	初期重量(g)	93.2747	93.2747	93.1796	
	試験後重量(g)	83.8999	85.9360	83.5184	
	重量減量(g)	9.3748	7.3387	9.6612	
	腐食速度(mm/y)	0.3884	0.3040	0.4002	0.3642
電気防食	初期重量(g)	92.5915	92.5674	93.2311	
	試験後重量(g)	92.5718	92.5164	93.1667	
	重量減量(g)	0.0197	0.0510	0.0644	
	腐食速度(mm/y)	0.0008	0.0021	0.0027	0.0019

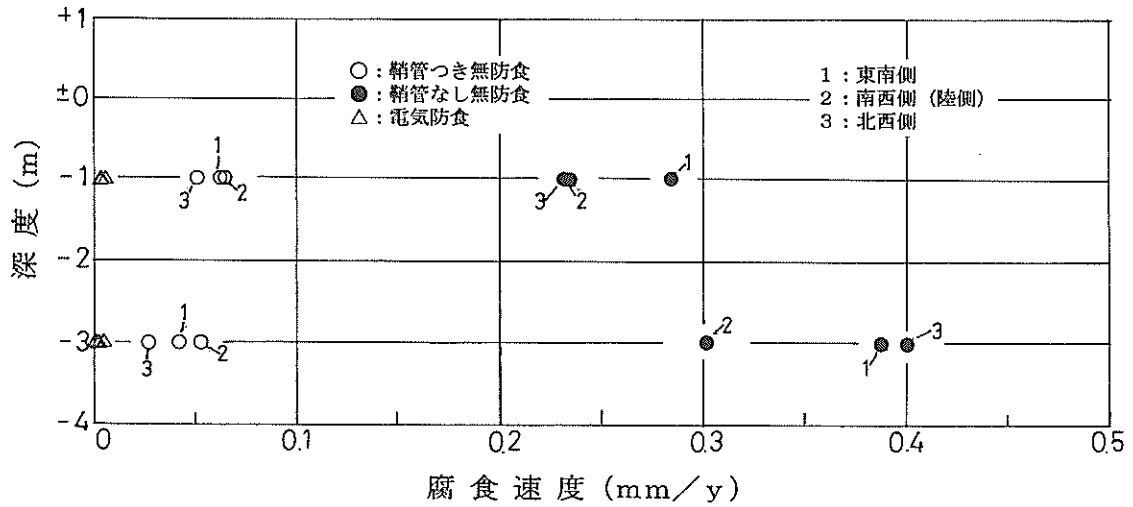


図-24 試験片の深度別の腐食速度

えられる。

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

写真-3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・コ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。

つぎに、本海域は波浪海域なのでサンドエロージョン・コ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。齊藤等^{6,7)}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¹³⁾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する。

(2) 摩耗カバーの切り取りによる試験

a) 海底面の変動状況

図-25に1986年~1996年の10年間における杭No.17およびNo.22付近の海底面の変動状況を示す。図-25に示すように、海底面は大きいところで3m程度の変動が認められる。杭No.17の-3.1mの試験片切り取り位置では海底の変動幅の中に位置し、海底面上や時には砂の中に埋没することとなる。しかし、-1mの位置はほぼ常時海水中に位置していることがわかる。また、杭No.22の切り取り深度-0.5~-1.1mは時々海底面付近に位置するが、おおむね海水中に位置していた。

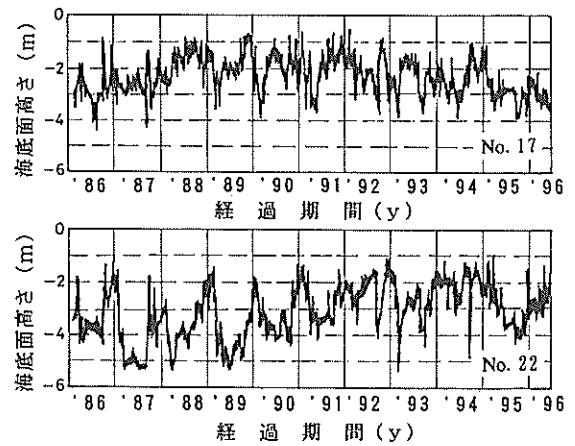


図-25 1986~1996年の海底面の変動状況

b) 切り取り試験片の表面観察

切り取り試験片の表面観察をした結果、無防食試験片(杭No.17)は腐食による肉厚減量が肉眼でも明確に認められた。特に-3.1mの位置から切り取りを行った試験片は写真-4に見られるように、通常海水だけの腐食に見られる大きな孔食や凹凸の激しい腐食は見られずに直径が2mm前後、深さ0.5mm以下の窪み状の腐食が鋼材表面に連なるように全体を占めていた。-1mから切取った試験片には-3.1mで認められた腐食の形態は見られず、一般的な海水腐食であった。-3.1mで見られた腐食の形態は砂の磨耗によるサンドエロージョン・コロージョンの影響と思われる。また、-3.1mの断面方向陸側から切り取

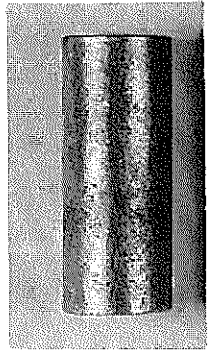
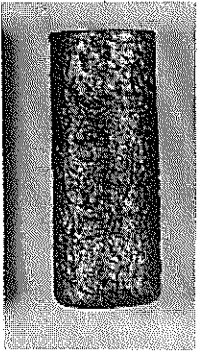
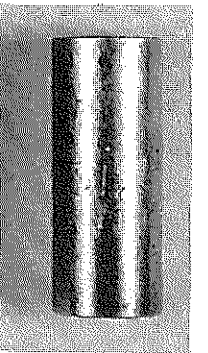
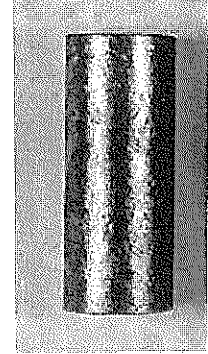
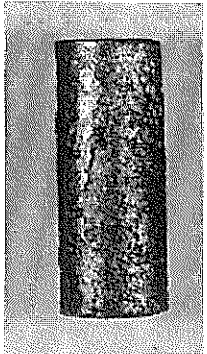
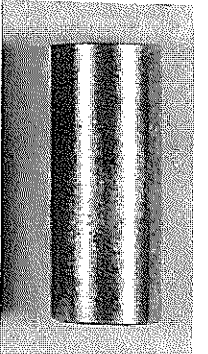
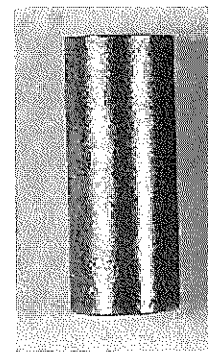
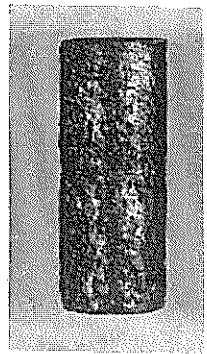
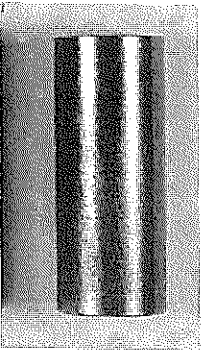
方向	無防食（鞘管）	無防食	電気防食
東 南 側			
陸 側			
北 西 側			

写真-3 試験片表面状況 (-3m)

った試験片はサンドエロージョン・コロージョンの大きい腐食のために穴の発生が認められた（写真-5）。なお、写真-6に平穏期における杭No.17の海底面付近の状況を示す。海底面から上1m程度までの範囲は海洋生物の付着はあまり認められず赤橙色の錆が認められる。したがって、この部位では波浪が大きい場合には浮遊砂が鋼材表面へ衝突することにより鋼材表面に生成された錆が除去されるものと思われる。

一方、電気防食を実施していた鋼管杭（杭No.22）から切り取りをした試験片の鋼材表面は石灰質皮膜で被覆され良い防食状態を維持していた。写真-7は付着物を除去した鋼材表面を示すが、電気防食により生成される白

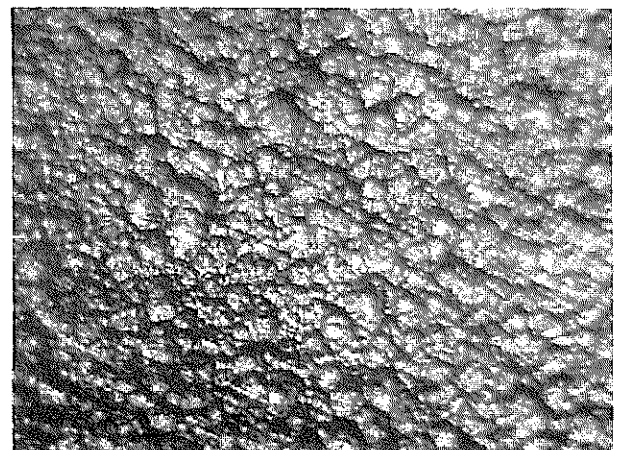


写真-4 切り取り試験片 (-3.1m) の鋼材表面

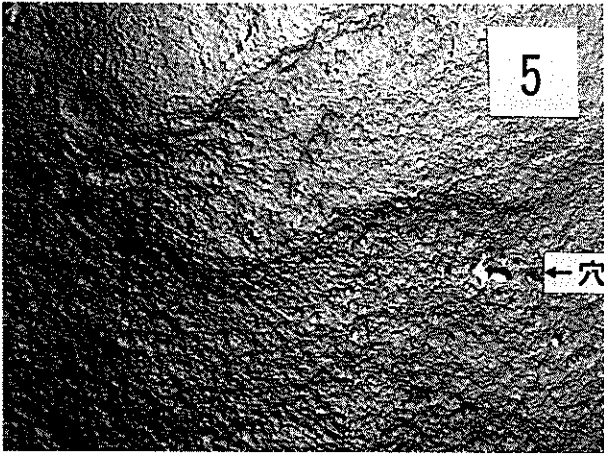


写真-5 切取り試験片 (-3.1m) の腐食状況



写真-6 海底面付近の鋼管杭の腐食状況 (杭No.17)



写真-7 電気防食実施鋼管杭の鋼材表面状況 (杭No.22)

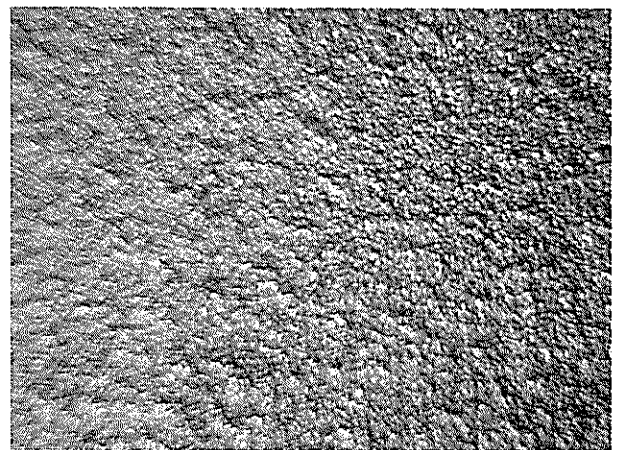


写真-8 切取り試験片 (電気防食実施) の鋼材表面

い石灰質皮膜で覆われている。これは、図-26の電位測定結果からも推察でき鋼管杭の電位は -1000mV ～ -1020mV であり、曝露期間中防食電位より卑な値で推移しており良好な防食状態であったことを示す。また、写真-8に示すように脱錆後の鋼材表面は大きい腐食は見られずに比較的平滑な状態であった。

c) 試験片の肉厚測定結果

切取り試験片の肉厚測定結果を表-5に示す。表-5から無防食杭No.17の腐食速度を図-27に示す。図-27から -1m の腐食速度は $0.05\sim 0.06\text{mm/y}$ (平均値)であった。一般に海水中の腐食速度は $0.1\sim 0.2\text{mm/y}$ であることを考慮すると、この値は小さい。 -3.1m では $0.16\sim 0.29\text{mm/y}$ (平均値)であり、海水中の腐食速度としてはやや大きい傾向を示した。 -1m に比べて -3.1m では3～5倍大きい傾向が見られた。なお、 -3.1m の陸側で最大腐食速度 0.46mm/y 以上 (調査時にすでに穴の発生が認められた) と大きい箇所も認められた。

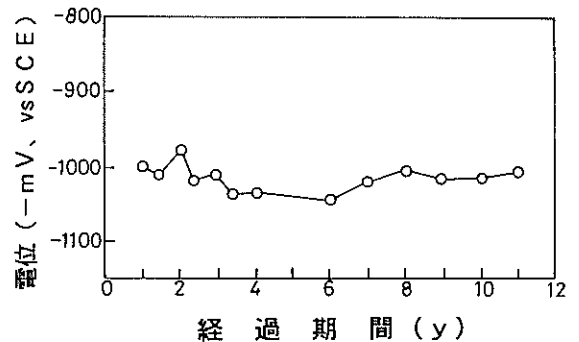


図-26 電気防食実施杭の電位の経時変化

通常、海水中においては水面付近の方が水深の深い部位よりも溶存酸素濃度の影響で腐食速度は大きくなるのが普通である¹⁴⁾。しかし、ここでは -1m 付近で腐食速度が小さく、 -3m 付近で大きかったのは海底の砂の鋼材表面への磨耗作用が大きく影響したためと思われる。す

表-5 切取り試験片の腐食速度(肉厚測定)

杭No. 防食の有無	切取り片 No.	切取り 方向	切取り 深度 (m)	腐食速度 (mm/y)			標準偏差 (mm)
				最大値	最小値	平均値	
No. 17 無防食	①	北西側	-1.0	0.074	0.045	0.061	0.104
	②	陸側	-1.0	0.109	0.046	0.059	0.213
	③	東南側	-1.0	0.065	0.040	0.051	0.088
	④	北西側	-3.1	0.382	0.054	0.276	1.167
	⑤	陸側	-3.1	0.462*	0.066	0.287	1.455
	⑥	東南側	-3.1	0.302	0.040	0.164	1.068
No. 22 電気防食	⑦	北西側	-0.5	0.084	0.018	0.037	0.225
	⑧	陸側	-0.9	0.046	0.014	0.024	0.084
	⑨	東南側	-0.9	0.034	0.028	0.029	0.040
	⑩	北西側	-1.1	0.038	0.018	0.027	0.063
	⑪	陸側	-1.1	0.057	0.014	0.026	0.093
	⑫	東南側	-1.1	0.042	0.017	0.026	0.062

*: 調査時には、すでに穴があいていたので腐食速度は0.462mm/y以上である。

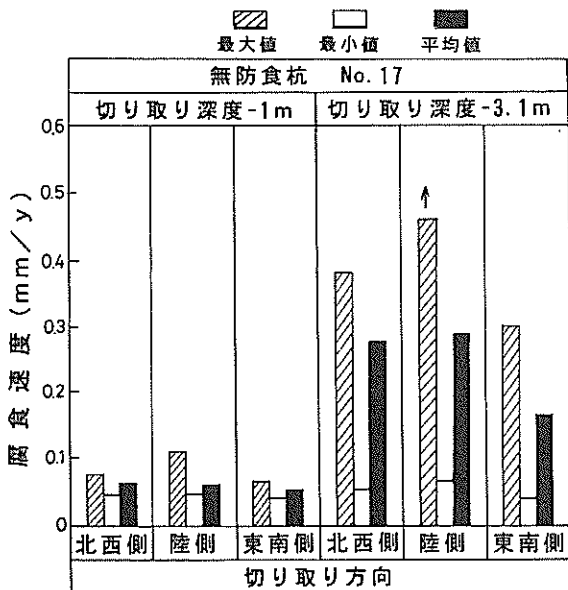


図-27 無防食杭の腐食速度(肉厚測定による)

なわち、図-28に示すように、砂による磨耗で鋼材表面が活性となり、-3m付近がアノード部、-1m付近がカソード部となるマクロセル腐食を形成してアノード部からカソード部へマクロ腐食による電流が流入することにより腐食速度はアノード部で大きく、カソード部で小さくなったと推察される。

なお、無防食杭No.17の切取り断面(肉厚)の比較を図-29に示す。-1mの深度よりも-3.1mの深度で肉厚が極端に薄く腐食の大きいことが明らかである。

次に、電気防食を実施している杭No.22から切取りを行った試験片の肉厚測定結果を表-5に示す。各試験片の腐食速度に大きい変動は見られず、0.026~0.037mm/y(平均値)であった。最大値(0.084mm/y)、最小値(0.014mm/y)とも大きな変動は見られず、標準偏差も無防食杭No.17に比べて小さかった。一般に電気防食を実施している鋼構造物の肉厚測定を行い腐食速度を算出してみると0.03mm/y程度の値が報告されている¹⁵⁾。本調査でも腐食速度の若干大きいものも見られたが、これは鋼管杭を打ち込み電気防食の施工を行うまでに約2年の無

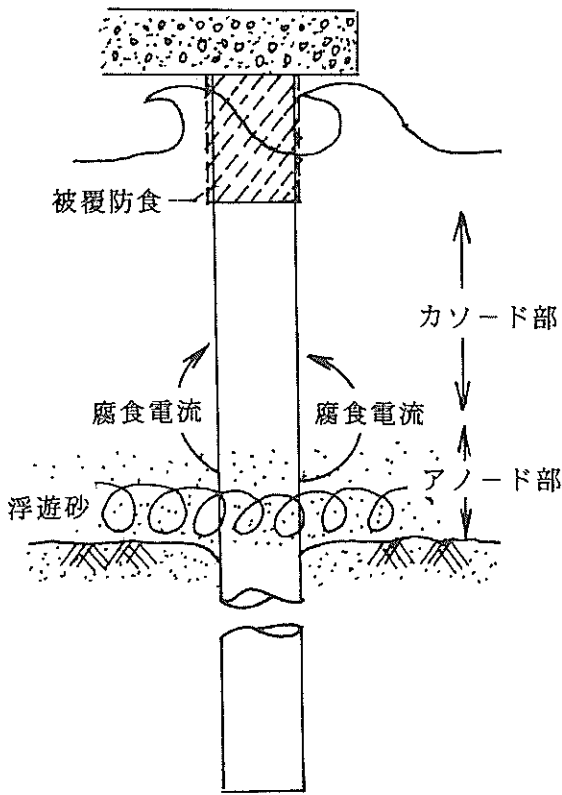


図-28 サンドエロージョン・コロージョンによるアノード部、カソード部の区分概念図

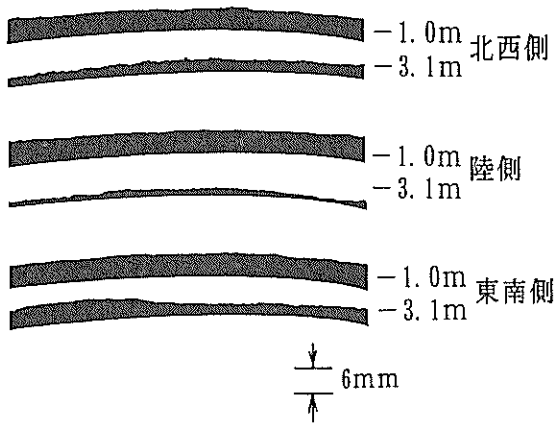


図-29 切取り試験片の断面比較

防食期間があったために、その期間に生じた腐食と思われる。したがって、図-26に示す電位測定の結果(-950mVよりも卑な値)や試験片の表面観察(石灰質皮膜の生成、写真-7)および試験片の肉厚測定等から考えて、当初の無防食の2年間に腐食が発生したが、その後の腐食はほとんど進んでいないものと思われる。

(3) 有義波高と電位の関係

図-30は1994年の1月~2月にかけての有義波高と各

深度の電位変化を示す。図-30から有義波高の最小は20cm、最大は293cmであった。測定が冬季のために全体に波浪の大きい傾向がうかがえる。鋼管杭の電位は、-1mの深度で-1020mV程度、-3m(海底面付近)の深度で変動が大きく-870~-1050mV、-4mの深度で-970~-1050mVであった。いずれも防食電位を十分上廻っていた。すなわち、有義波高の大小によって電位は大きく変化した。本海域においては有義波高が200~250cmになっても防食電位(-770mVよりも卑な値)を上廻っていたことから、この程度の波高でも防食効果は期待できる。

図-30によると、波浪が大きい条件では-1m、-4mの深度に比べ-3mの深度で電位の変動の大きいことがうかがえる。これは丁度この深度が海底面付近に位置するので砂による摩耗の影響が電位に直接表われたものと思われる。有義波高が大きいと海底面付近において砂の移動が激しく行われるために、砂による鋼材表面の摩耗作用によって鋼材表面が活性化し電位を変化させているためと思われる。

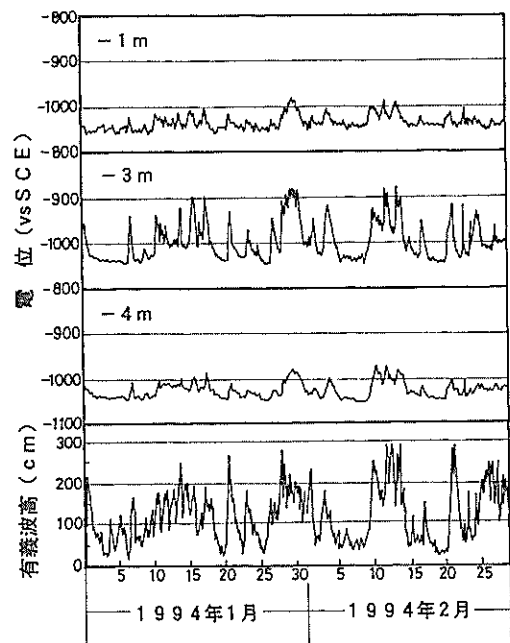


図-30 有義波高と各深度における電位の関係

(4) 有義波高と海底面付近の電位の関係

鋼管杭の電位測定の結果、電位の変動が特に海底面付近において顕著に認められた。それ故、波高の大小による海底面付近の砂の移動に伴う鋼材の電位変化を検討するために波高と電位の関係について整理した。図-31は有義波高と海底面付近(-3m深度)の電位をプロットした図である。この図から有義波高が高くなると電位は貴に移行する傾向が認められる。例えば、有義波高が250cm

程度になると電位は-900mV程度まで移行する。図-31から電位の変動は海域によって異なると思われるが、本海域では有義波の100cm程度がその境界となっている。有義波高が100cm未満では-1000mVよりも卑な電位を示し変動も少ないのに対して、100cm以上になると電位の変動が大きくなり貴の方向に移行する傾向が見られる。したがって、海底面付近においては波浪の大きい条件では鋼材表面の電位が貴な値を示すことによってAl陽極と鋼材との有効電位差が大きくなるため、この部位への電流の流入は他の部位よりも大きくなることが予想される。

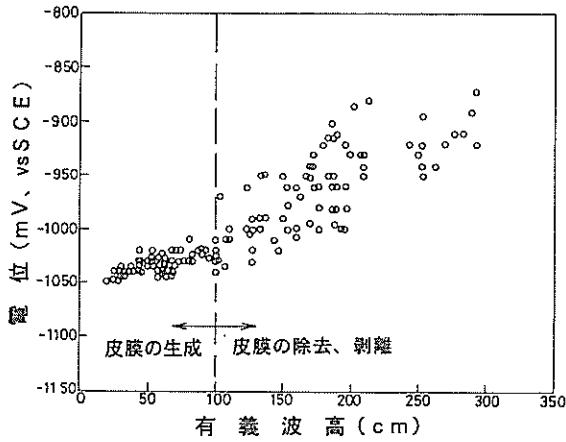


図-31 有義波高と電位の関係

(5) 有義波高と海底面付近の鋼材表面の変化

波浪の大小による海底面付近に作用するサンドエロージョン・コロージョンの挙動を推察すると、以下のような現象が考えられる。

図-32に示すように無防食の場合には、波高が小さく穏やかな時期には鋼材表面は酸素と海水の存在下において腐食が起こる。その結果、腐食生成物である錆層が鋼材表面に作られる。しかし、天候が悪化して波高が大きくなると、海底面付近の砂の移動が激しくなるので、

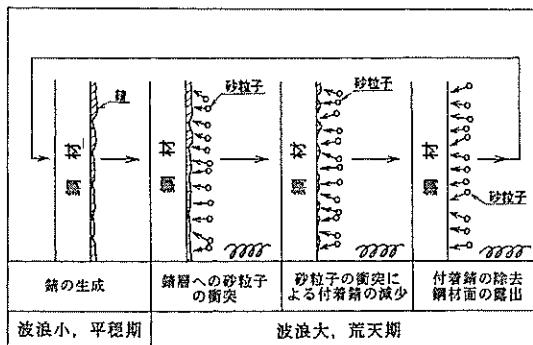


図-32 サンドエロージョン・コロージョン作用の概念図

砂の粒子が鋼材表面へ衝突することを繰り返す。衝突の繰り返しによって鋼材表面に生成されていた錆層は除去、剥離を繰り返して次第に鋼材表面の錆が除去されて新しい鋼材表面が露出する。その後、天候が穏やかになると再び鋼材表面は腐食による錆が生成する。上記のような作用が波浪海域に位置する鋼構造物の海底面付近では常に繰り返されているものと思われる。

一方、電気防食を実施している場合には図-33に示すような現象が大小の波高によって繰り返えされているものと思われる。波高が小さい条件では砂の移動があまり起こらず、電気防食による鋼材表面への石灰質皮膜の生成がおこなわれる。その結果、石灰質皮膜が酸素拡散を阻止することによって安定した卑な電位を維持している。しかし、波高が大きい条件では砂の激しい動きが生じて鋼材表面は砂による摩耗作用が始まる。砂が鋼材表面へ衝突して生成されていた皮膜を除去すると鋼材表面への酸素の到達が容易になるので、図-31に示すように電位は貴の方向に移行したものと推察される。

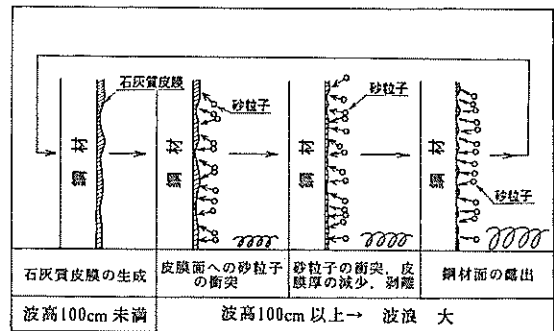


図-33 電気防食実施時における波高と鋼材表面変化の概念図

また、斉藤等のサンドエロージョン・コロージョンに対する室内試験⁷⁾では、砂を浮遊させることによって自然電位は貴になり、砂の濃度の増加とともに電位は貴になる傾向を示すと述べていることから上記の現象がうかがえる。すなわち、海底面付近の鋼材表面は波高の大きい条件では砂の摩耗作用を受け、安定した石灰質皮膜が取り除かれるが、波高の小さい条件では砂による摩耗作用がないので鋼材表面に石灰質皮膜が生成する。

電気防食を実施している鋼構造物の海底面付近の鋼材表面は波高の大小によって上記のような現象がたえず繰り返されているものと思われる。

以上、サンドエロージョン・コロージョンによる腐食や電気防食効果に対する検討を行い、波高の大きい条件では海底面付近で砂の移動が大きく作用して鋼材表面を

変化させることが明らかになった。その部位は砂の摩耗作用により通常の海水腐食よりも大きく、穴の発生も認められ腐食速度の大きいことが確認された。しかし、電気防食の防食効果は十分期待できることが明らかとなった。また、電気防食を実施している条件での波高の大小による電位変化から鋼材表面の状況を推察することができた。

さらに、写真-9や図-34に示すように陽極が海底土中部に埋没した場合、埋没率が50%以上であると発生電流が低減して防食電位に達しない場合が認められた¹⁶⁾。そのため、このような海域で陽極を取付ける場合には、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。なお、海底面の変動に伴い海水中の防食面積が変化することが考えられるために、設計の際には海底面の変動幅を考慮した防食面積の算出が必要である。

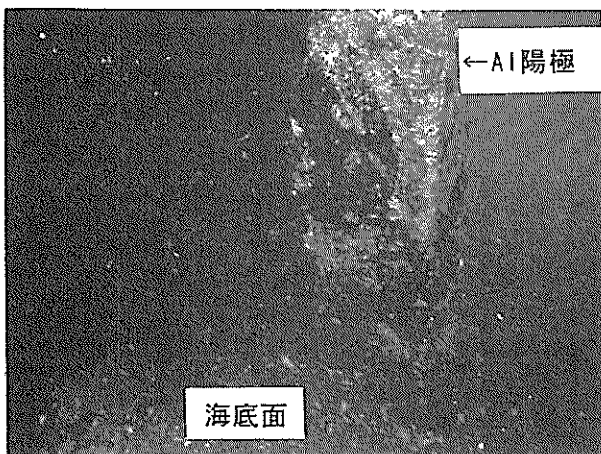


写真-9 陽極の海底土中部への埋没状況

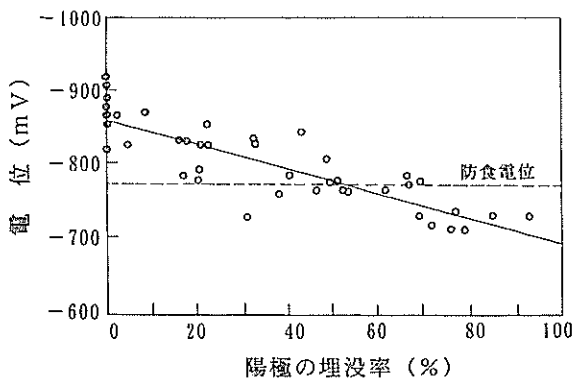


図-34 陽極の陽極埋没率と電位の関係

また、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適当なものがなかったが、本棧橋で電気防食

に関する一連の試験に使用した電位測定用の基準電極は、安定した固有電位の維持が可能な組成を有するZn基準電極であり、長期間(約13年間)大きい波浪や砂の移動の行われる厳しい環境において十分な耐久性を示し、性能的にも満足する結果が得られている。それ故、本海域で使用したZn基準電極は電気防食によって鋼構造物を長期間維持管理していく場合の電位測定に対するモニタリング用の基準電極として十分活用できるものとする。

4. 結論

波浪海域に位置する鋼構造物へ電気防食試験を実施し、波高に対する電位、電流の変化、被覆防食との併用効果およびサンドエロージョン・コロージョンに対する腐食の傾向や電気防食効果について検討し、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 波浪海域における防食電流密度は、平穩期では 40mA/m^2 程度で、電位は $-950\sim-970\text{mV}$ の値を示し大きい変動は見られなかったが、荒天期では増大し $40\sim90\text{mA/m}^2$ の範囲で変動も大きく、電位は平穩期に比べ貴の方向へ移行した。
- (2) 干満帯に被覆防食を施して電気防食を併用すると荒天期における大きい波浪の影響をほとんど受けず安定した単なる電位と低電流を示し、裸の杭に対して $40\sim60\%$ の電流密度で防食できることが明らかとなった。
- (3) 干満帯を被覆防食した杭の陽極寿命は裸の杭に比べて長くなることが明らかとなった。
- (4) 潮位と電位の関係は干満帯が裸の鋼管杭では潮位の変動に伴い電位も変化するが、干満帯を被覆防食すると大きい電位の変動は見られなかった。
- (5) 試験片の腐食速度は、鞘管を取付けた試験片で $0.04\sim0.06\text{mm/y}$ 、鞘管を取付けていない試験片で $0.3\sim0.4\text{mm/y}$ であったことより海底面付近ではサンドエロージョン・コロージョンによる影響が大きく作用していることが認められた。
- (6) 電気防食を実施した取付け試験片の腐食速度は $0.0008\sim0.0031\text{mm/y}$ の範囲で、電気防食効果が認められた。
- (7) 切り取り試験片(無防食)による海水中上部の腐食速度は比較的小さく $0.05\sim0.06\text{mm/y}$ (平均値) であり、海底面付近では $0.16\sim0.29\text{mm/y}$ (平均値) で、最大腐食速度は 0.46mm/y 以上と大きかった。

- (8) 電気防食を実施した鋼管杭の腐食速度は0.02～0.04mm/y(無防食2年間を含む)で、適正な防食電位を維持することで腐食を防止できることが明らかとなった。
- (9) 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も大きく変動するので、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は浮遊砂によって除去されることが明らかとなった。
- (10) 陽極が海底に埋没し、その埋没率が50%以上になると電位は防食電位を下廻る値を示し十分な防食効果が期待できないことがわかった。海底面の変動の激しい場所へ電気防食を適用する際には、陽極の埋没を考慮して取付位置や陽極の形状を決める必要がある。

5. あとがき

本試験では主に波高に対する電気防食の電位および電流の挙動ならびに海底面付近のサンドエロージョン・コロージョンに対する腐食や電気防食の効果について検討を行った。これらの検討事項についてはある程度の成果をあげることができたと思われる。しかし、電気防食実施中において鋼材表面に直接砕波するゾーンや海底面付近において、どの程度の電流が流入するのか等については未解決である。それ故、今後はこれらの事項についても現地試験を実施して明らかにしていきたいと考えている。

最後に、本試験は運輸省港湾技術研究所、(財)沿岸開発技術研究センターおよび鋼管杭協会の3者による共同研究の一環として実施したものである。また、有義波高および海底面の変動の測定は運輸省港湾技術研究所の漂砂研究室によって計測された資料を利用させて頂いた。本試験を行うにあたり多くの関係各位にご協力いただいた。ここに感謝の意を表します。

(1998年9月30日受付)

参考文献

- 1) 産業調査会：海洋基礎，1983,p262.
- 2) A.C.Rayner and C.W.Ross:Durability of Steel Sheet Piling in Shore Structures, Tech, Memo, No.12, Beach Erosion Board, Corps of Engineers, U.S.Army, 1952, pp339～342.

- 3) 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, 1991, pp61～68.
- 4) 阿部正美，横井聡之：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, 1985, pp3～28.
- 5) 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, 1982, pp30～31.
- 6) 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, 1970, pp4～8.
- 7) 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, 1972, pp118～123.
- 8) 阿部正美，福手 勤，山本邦夫：鋼管杭の防食工法に関する現地試験(中間報告)，港湾技研資料，No.675, 1990, pp1～131.
- 9) (財)沿岸開発技術研究センター：鋼管杭の防食法に関する研究—総括報告書—，1995, pp1～227.
- 10) 加藤一正：みなとの防災，No.94, 1987, pp23～32.
- 11) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食マニュアル，1986, pp2～17.
- 12) 善 一章，阿部正美：集中腐食に対する電気防食の適用性，港湾技術研究所報告，Vol.22, No.2, 1983, pp383～402.
- 13) 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，1989, pp13～16.
- 14) 阿部正美，横井聡之，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, 1988, pp250～256.
- 15) 横井聡之，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, 1984, pp3～33.
- 16) 阿部正美，福手 勤，清水一夫，山本郁雄：陽極の埋没率が電位，電流に及ぼす影響，第39回腐食防食討論会講演集，B-105, 1992, pp155～157.

港湾技研資料 No. 921

1998. 12

編集発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 あんざい

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

Copyright © (1998) by P.H.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 General of P.H.R.I.

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