

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

4. 1 概説

港湾コンクリート構造物、とくに、栈橋の上部工においてコンクリートの塩害が見られるようになり、これを防止する対策法がいろいろと考えられている。

コンクリート中鉄筋の腐食は2. 3 (2) で述べたように外部からの塩化物イオンがコンクリート中へ浸入し、ある一定量に達するとコンクリート中の鉄筋の不動態皮膜が破壊することから始まる。不動態皮膜の破壊に伴い鉄筋には錆の生成が起り、錆の生成物の膨張によりコンクリートにひびわれを発生させて大きい劣化に至る。

コンクリート構造物の塩害に対する補修対策は、ひびわれやコンクリートの剝離部分を局部的に補修材料により補修する方法や、塩化物イオンで汚染されたコンクリートを除去して新しいコンクリートで断面修復する方法が検討されている。また、除塩しない海砂の使用によってコンクリート中に塩化物が混入されている場合には、すでにコンクリート中の鉄筋に腐食が進行していることが考えられるので、上述した方法では鉄筋の腐食を一時的に抑制することはできても防止することは困難であり、より確実な防食法の開発が必要である。

一方、新設のコンクリート構造物では、塩害対策のためにかぶりの増加、エポキシ樹脂塗装鉄筋の適用、さらに塩化物イオンの浸入を抑えるためのコンクリート表面へのライニング等が考えられている。しかし、これらの対策法はそれなりに効果はあると思われるが、施工後まだ新しく長期的な耐久性や防食効果を確認するには今後かなりの時間が必要であり、早急に塩害を防止する対策法の確立が急務とされている。

このような背景から、近年最も有効な対策法として、コンクリート中鉄筋の腐食を電気化学的に停止させる電気防食法が注目を集めている。電気防食法は原理的に信頼性の高い防食を期待でき、北米のハイウエー等に主に適用されているが、この工法を港湾環境で適用するには、その環境に見合った施工や設計を考慮しておく必要がある。

本章では、港湾コンクリート構造物の電気防食に関する現状の課題として取り上げられている以下の事項を検討する目的のために、海水飛沫を直接受ける環境を模擬した曝露試験場に供試体を曝露し、試験を実施した。

4. 2 では流電陽極方式の電気防食を適用した際に維持管理の重要な事項と考えられる環境要因が電位および電流に与える影響について検討した。

4. 3 ではコンクリート中の鉄筋にアノード部およびカソード部が形成されている条件下へ電気防食（外部電源方式）を実施した際に、アノード部およびカソード部へ流入する電流の割合や分極量（防食基準）、腐食の程度について検討した。

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

(1) 概要

電気防食法は第2章で述べたように外部電源方式と流電陽極方式の2つの方式に分けられる。このうち流電陽極方式はコンクリートが高抵抗であり十分な防食電流を供給することが難しいという理由で陸上構造物にはあまり適用されていないようである。しかし、港湾への流電陽極方式の適用は以下のような有利性がある。

- ①塩化物が混入しているコンクリートは電気抵抗が小さい。
- ②港湾環境下のコンクリートは常に湿潤状態にあり電気抵抗は小さい。
- ③施工後の維持管理が容易である。
- ④電源を必要としない。
- ⑤極性を間違わない。

この方式では電流の流れはコンクリート中の鉄筋と陽極間の電位差によって生じるので、電位や電流量は現場の環境やコンクリートの条件に大きく影響されることが考えられる。そのため、施工や設計の面から環境要因が電気防食（流電陽極方式）の電位や電流に及ぼす影響を検討しておくことが必要である。港湾構造物の電気防食適用の部位はコンクリート上部工の下側で常に海水飛沫を直接受ける環境である。

流電陽極方式に関する既往の研究には、主に電位測定から分極量を求め防食基準によって防食効果を評価している^{2, 3)}。しかし、環境要因と電気防食の電位や電流との関係についての報告は積雪寒冷地の凍結融解に関する報告⁴⁾程度で、温度や天候等が電位や電流に及ぼす影響について明らかにされていないのが現状である。したがって、流電陽極方式の電気防食を適用していくには温度や天候等を考えた場合に、これらの環境要因と電位、電流がどのように影響するかを明らかにしておく必要がある。本節では環境要因として温度と天候を取り上げ基礎的な傾向について検討した。

(2) 試験内容

本項で検討した事項は以下の通りである。

- ①海水シャワー環境と陸上自然環境の電流密度の経日変化
- ②一日の環境変化に伴う電流および電位の検討
- ③天候と電位および電流の検討
- ④温度と電位および電流の検討
- ⑤亜鉛陽極の観察

電気防食試験は供試体に亜鉛シート陽極を取り付けてコンクリート中の鉄筋へ通電を行い実施した。曝露環境は海水シャワー環境（以下、海水シャワー環境と

呼ぶ)と陸上の自然環境(以下、陸上自然環境と呼ぶ)とした。その後、暴露試験の間、定期的に電流、電位および供試体中の温度を測定し、天候、暴露条件および温度等と電位および電流の関係について検討した。

a) 供試体

図-4.1に示すように試験に使用した供試体は縦40cm×横40cm×高さ10cmで、コンクリート中には縦に3本、横に5本のφ13mmのあらかじめサンドブラスト処理したホワイトメタル状の鉄筋(丸鋼、材質SS400)が埋設されている。コンクリート

表面(陽極材取付側)と鉄筋とのかぶりは2.5cmである。供試体内部には基準電極(Ag/AgCl)が取り付けられている。陽極材料には亜鉛シートを用い、縦30cm×横38cm×厚さ2mmのものを図-4.1に示すように取り付けた。亜鉛シート陽極から電流がコンクリート中の鉄筋へ容易に流れるように、亜鉛シート陽極とコンクリート面の間には厚さ約10mmのバックフィルを充填した。バックフィルは亜鉛シート陽極とコンクリート面の空隙を埋め、導電性を良くする役目を有する。

コンクリートの配合は表-4.1に示すとおりで、水セメント比55%、配合強度240kgf/cm²とした。

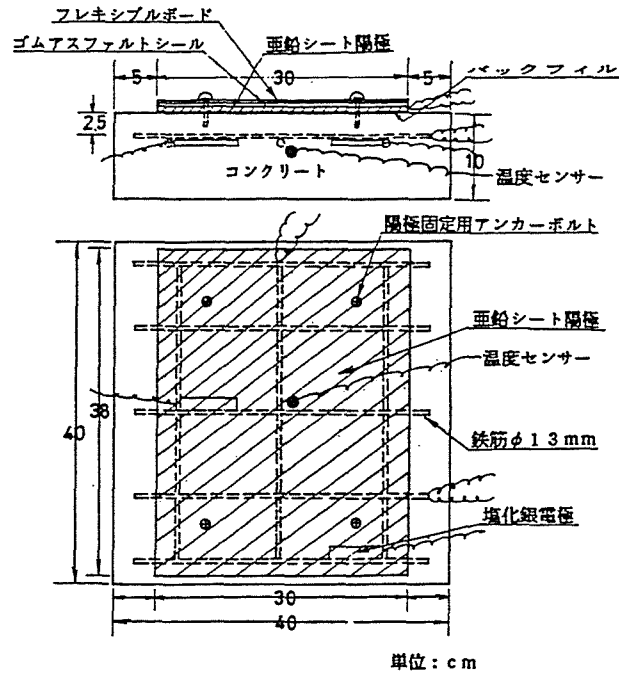


図-4.1 供試体の形状寸法および鉄筋配置図

表-4.1 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	重量 (kg/m ³)			
	セメント	粗骨材 (最大寸法20mm)	細骨材	混和剤
55	295	1024	824	0.74

b) 暴露試験

暴露試験は写真-4. 1 に示す港湾技術研究所内の護岸沿いに位置する野外暴露試験場で行った。試験場の環境条件は図-4. 2 に示すように港湾の飛沫帯を想定して、1日に2回一定時間（昼間の午前中1回、夜間1回3.5hrずつ）海水シャワーがかかる環境と、海水シャワーがかからない陸上自然環境の2つの環境とした。海水シャワーがかかっていない時間は雨天を除いて乾燥状態となる。



図-4. 2 海水シャワー環境のサイクル

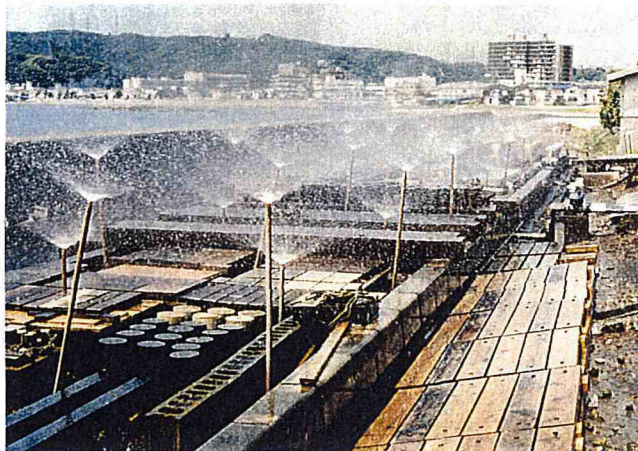


写真-4. 1 試験を実施した海水シャワー環境のシャワー状況

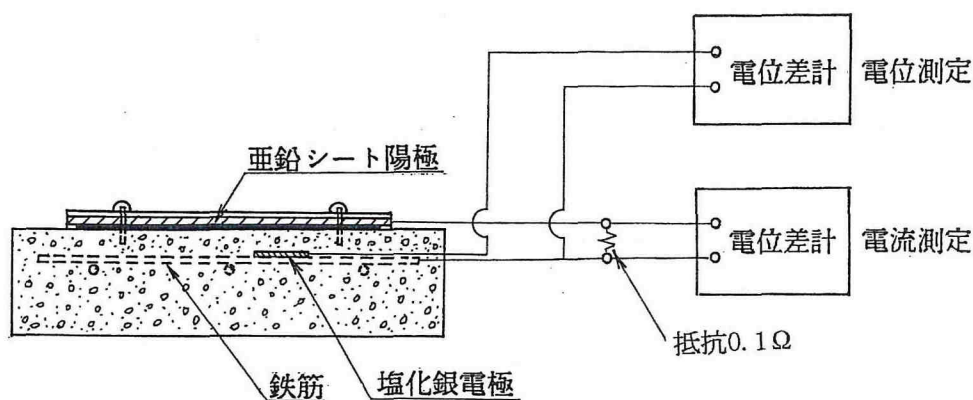


図-4. 3 通電回路および電流、電位測定方法

c) 通電方法および測定方法

電流は図-4. 3に示すように亜鉛シート陽極の端部より出ているリード線と鉄筋より出ているリード線を短絡して、その間に0.1Ωの固定抵抗を挿入して電圧降下法により測定した。電位は基準電極 (Ag/AgCl) で、温度は温度センサーを用いて測定した。

(3) 環境変化に伴う電流および電位の変化

a) 電流の変化

図-4. 4は海水シャワー環境および陸上自然環境の一日の電流変化を示す。海水シャワー環境では電流は海水シャワーが始ると増加し、シャワー継続時にはほぼ一定値である。シャワー停止後は電流は減少するがほぼ一定である。その後、夜間では気温の低下とともに電流はゆっくり低減し、シャワーのかからない4時~6時にかけて最も電流量は小さくなる。雨天(破線)の場合の電流量は晴天に比べて小さかった。

陸上自然環境の晴天の場合には、電流の増減は朝から昼間にかけて次第に増加し14時~15時頃にピークが見られ、朝方の6時頃が最も小さくなる。昼間の午後は気温やコンクリートの温度が最も高くなるため亜鉛シート陽極からの発生電流が増加する。これに対し雨天のときの電流変化は、晴天で見られる大きい電流の増加(昼間の14時~16時頃)は見られずほぼ5mA/m²であった。

以上のことから、亜鉛シート陽極の発生電流は温度に影響されることが考えられる。

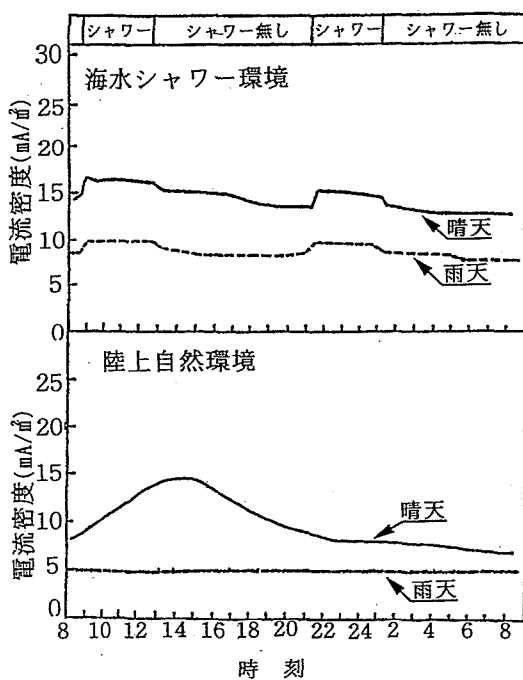


図-4. 4 各環境における一日の電流変化

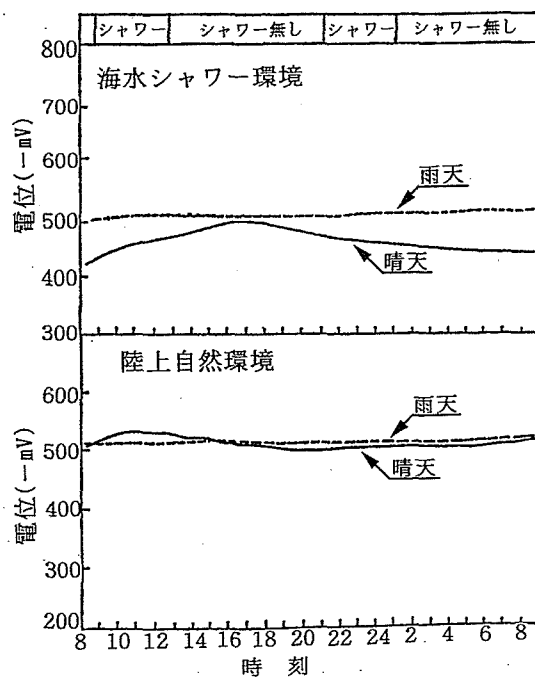


図-4. 5 各環境における一日の電位変化

b) 電位の変化

図-4. 5に海水シャワー環境と陸上自然環境の一日の電位変化を示す。海水シャワー環境の晴天の条件では、16時~17時頃に電位が最も卑な値を示した。これは、この時間帯にコンクリートが乾燥することと、コンクリート中の温度が高くなったので亜鉛シート陽極が活性化したためと思われる。電位変化も電流と同様に温度やコンクリートの表面状態に影響される。陸上自然環境（晴天の条件）では、11時~12時頃に最も卑な電位になり、その後緩やかに貴な方向へ進むのでやはりコンクリート中の温度の影響と考えられる。海水シャワー環境と陸上自然環境とで卑な電位を示す時間帯が異なるのは、海水シャワー環境では海水シャワーの影響を受けてコンクリートの乾燥が遅れるためと考えられる。雨天の電位変化を見るとピークは見られず一日を通してほぼ一定状態であった。これは雨天のために晴天のときほど気温が上がらないことと、コンクリート表面が湿潤状態になっているためと思われる。

c) 温度と電流、電位の関係

図-4. 6は陸上自然環境の天候が晴天で昼間の時間帯に気温が高くなる場合、天候が曇りで供試体中の温度がそれほど上がらない場合の、電流と供試体中温度との関係を示す。供試体中温度の増減と電流が対応している。図-4. 7は供試体中温度と電位の関係であるが、電位と温度とが対応していることがいえる。なお、図-4. 1に示すように温度センサーの埋め込み位置は供試体のほぼ中心であり、深さは3.5cmである。

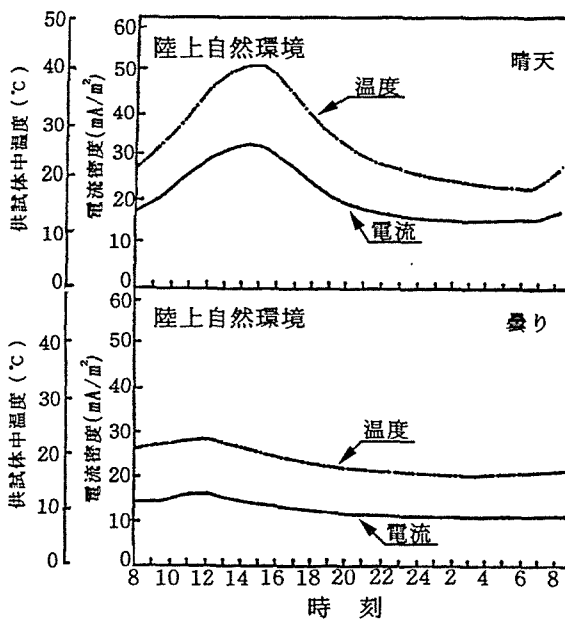


図-4. 6 供試体温度と電流の関係

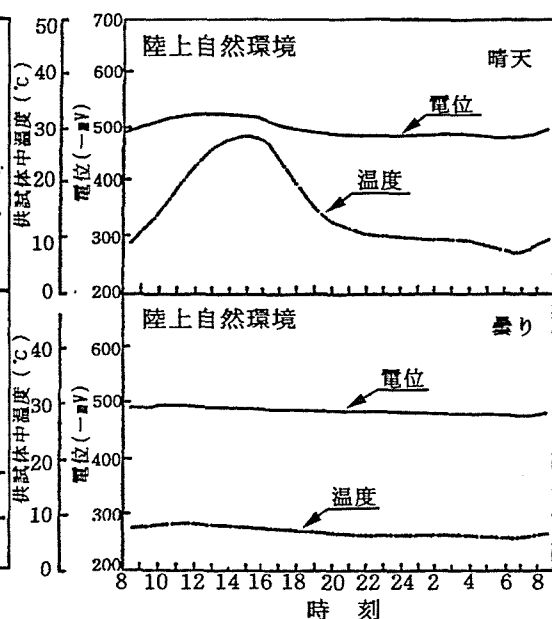


図-4. 7 供試体温度と電位の関係

(4) 電流密度の経日変化

図-4.8および図-4.9に各環境の防食電流の経日変化を示す。

図-4.8の海水シャワー環境の破線は昼間の海水シャワー開始直前の値であり、実線は海水シャワー開始直後の値を示す。ここで、海水シャワー開始直前と開始直後を測定したのは、前述したように海水シャワー開始直前には電流が低減している時間であることと、開始直後では最も増加することから、両者を測定しておけば電流の範囲を把握できるためである。なお、ここでの値は昼間の時間帯のものである。通電当初から2ヶ月程度まで20~50mA/m²と大きい電流が流れたが、時間の経過とともに減少し120日以降では20~25mA/m²以下となった。

図-4.9の陸上自然環境の供試体では、実線は1日の最大値を示し、破線は最小値を示す。最大値はおおむね昼間の午後に、最小値は夜間に認められた。電流は海水シャワー環境と同様、通電当初には、最大値で60~70mA/m²、最小値で35mA/m²を示したが、時間の経過とともに減少して120日~150日頃より安定した値(15~20mA/m²)となった。なお、図-4.8および図-4.9の240日~360日頃

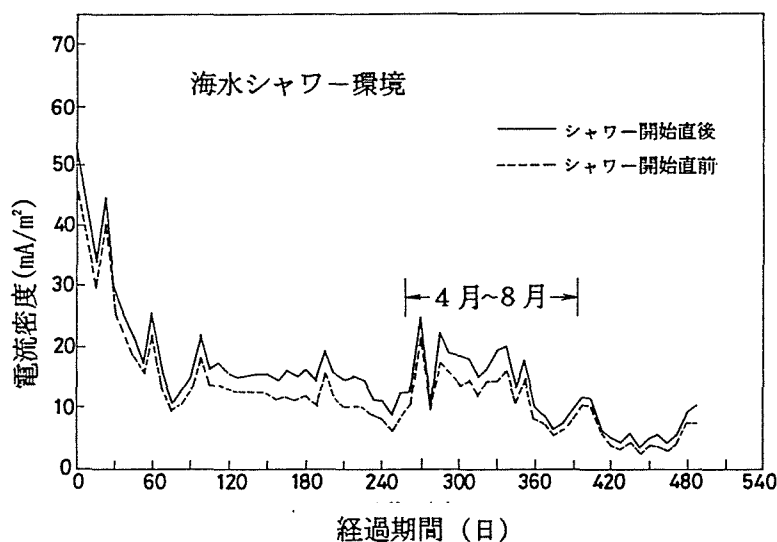


図-4.8 電流の経時変化 (海水シャワー環境)

の電流密度がやや大きくなっているが、この期間は4月~8月にあたり気温が高かったためである。電流密度が低減するのは電気防食を行うとカソード側(鉄筋側)に水素イオンが集まり、その結果水の生成が行われ酸素の透過性が減少することと、電流を流すとコンクリート中の鉄筋と亜鉛シート陽極の電位差が小さくなるためである。海水シャワー環境の電流は60日以降で安定してきているが、陸上自然環境では120日以降である。これは海水シャワー環境では海水によって電流の通りが陸上自然環境に比べてよいので分極が早く進んだためと考えられる。

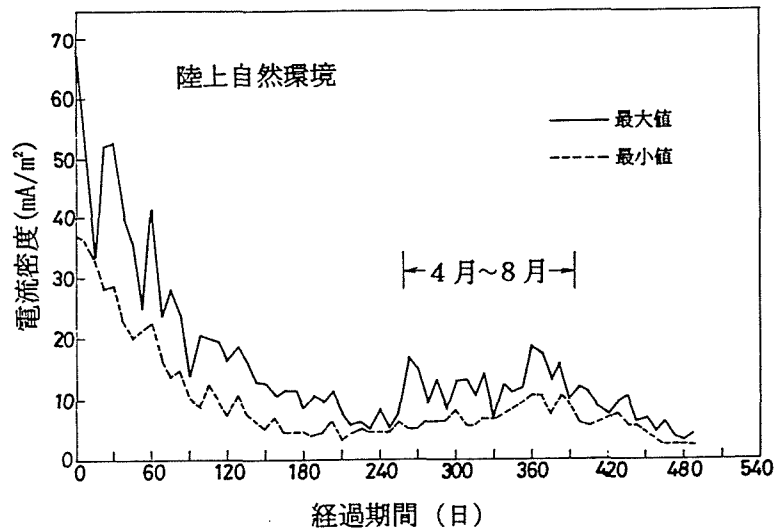


図-4. 9 電流の経時変化 (陸上自然環境)

図-4. 10は供試体中温度と発生電流との関係であるが、発生電流は温度の上昇とともに増加する。この図から、コンクリート表面の湿潤状態やコンクリートの置かれた環境条件とも関係はするが、供試体中の温度を知ることによってコンクリート中の鉄筋へ流れる発生電流を推定できる。なお、ここで整理した資料は陸上自然環境で得られたものである。

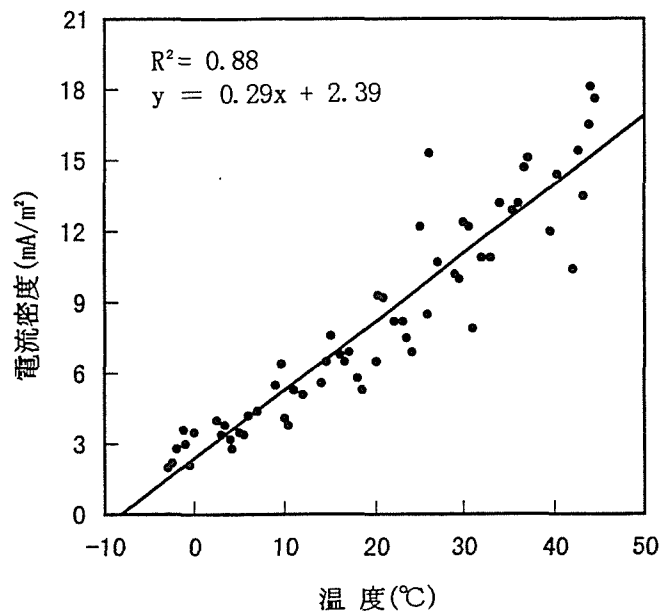


図-4. 10 供試体温度と発生電流の関係

(5) 亜鉛シート陽極の観察

表-4. 2は陽極の消耗量を示したものであるが、供試体を回収して亜鉛シートを剥がし、亜鉛シート陽極に生成した腐食生成物を除去し重量測定から求めたものである。亜鉛シート陽極の消耗量は海水シャワー環境に曝露されたものが陸上自然環境のものよりもやや大きかった。これは海水シャワー環境の方が電流量が大きかったためである。年間の消耗量は海水シャワー環境で40g、陸上自然環境では30gであった。海水シャワー環境に曝露した供試体は亜鉛シート陽極の端部や隅角部は直接海水の接触があったのでその部分の腐食が大きかった。この腐食を防ぐには、たとえば端部や隅角部をモルタルで被覆して直接海水が接触しないようにする必要がある。また、波しぶきのかかる環境で施工する場合には、直接亜鉛シート板が露出しないように十分考慮して施工することが望ましい。

表-4. 2 各環境における陽極の消耗量測定結果

暴露環境	供試体No.	初期重量(g)	試験後重量(g)	消耗量(g)	年間消耗量(g)
海水シャワー	1	1655	1600	55	41.7
陸上自然	2	1635	1595	40	30.3

4. 3 コンクリート中鉄筋の防食電流密度

(1) 概要

港湾コンクリート構造物に電気防食を適用する際に、新設の構造物や比較的新しい構造物のコンクリート中の鉄筋へ流す電流密度はおおむね数mA/m²程度で十分である。しかし、長期間経過しているコンクリート構造物においては多くの塩化物イオンが内部に浸入している。この条件下ではコンクリート中の鉄筋の不動態皮膜が塩化物イオンにより破壊されてマクロ腐食セルが形成されている。

マクロ腐食セルの大小はアノード部、カソード部の面積比に支配される。コンクリート中の鉄筋に大きな腐食が発生している条件下で電気防食を実施するには大きな防食電流密度が必要であり、腐食の程度によって必要電流量は変わってくる考えられる。そのため、電気防食の十分な防食効果を確保するにはマクロ腐食電流に見合った適切な防食電流を流す必要がある。マクロ腐食の大小に見合った適切な防食電流密度を検討するには、流した電流がどのような割合でアノード部およびカソード部へ流入するか、また、その流入量によるアノード部およびカソードの分極状況を把握する必要がある。

コンクリート中の鉄筋のアノード部とカソード部の間に発生するマクロ腐食電流に関する既往の研究として、守分等⁶⁾による研究と井川等⁶⁾による研究が発表されている。守分等は断面補修部と既設コンクリートの境界に発生するマクロ腐食の防止を目的に、電気防食の適用性を検討している。それによると、電気防食による大部分の電流は既設のコンクリートへ流入することが示されている。また、井川等は供試体中の鉄筋を2層に分けて、上層には無塩コンクリートを下層には塩分混入のコンクリートの供試体を作成し、両者間のマクロ腐食電流を測定し電気防食の効果を検討し、一定の電流量で電気防食を実施した場合、防食に必要な電流密度は $20\text{mA}/\text{m}^2$ 程度であることを示している。しかし、上記の二つの研究ではマクロ腐食電流の測定や電気防食による防食効果については明らかにされているものの、いずれの研究においても防食電流のアノード部およびカソード部へ流入する割合、分極量および腐食の程度に見合った適切な防食電流密度等については検討されていない。

そこで本節においては、上記の研究では明らかになっていない事項である塩化物イオンが多量に浸入しマクロセルを形成している条件下のコンクリート構造物へ電気防食を適用する際の以下の3項目について検討を行った。

- ①コンクリート中の鉄筋のアノード部面積に対するカソード部面積の比（以下 A_a/A_c と呼ぶ）によるマクロ腐食電流の傾向および電流量
- ②電気防食を実施した場合のアノード部、カソード部へ流入する電流量
- ③マクロ腐食を停止させるのに必要な電流密度や分極量

（2）試験内容

a) 試験に使用した供試体

アノード部とカソード部の面積比を変えてマクロ腐食の大小を作るために、表-4. 3に示すようにアノード部面積 (A_a) /カソード部面積 (A_c) を変えた供試体模型を製作した。図-4. 11はその一例で $A_a/A_c=1/5$ のものである。また、コンクリート中の鉄筋をアノード部、カソード部に分けるために直接接触しないように分けて設置し、電位や電流測定にはアノード部またはカソード部の鉄筋に接続しているリード線によった。使用した鉄筋は $\phi 13\text{mm}$ の丸鋼で、鉄筋表面は前もってサンドブラスト処理したホワイトメタル状のものとした。アノード部の鉄筋はサンドブラスト処理後、鉄筋に海水を散布して鉄筋表面に薄い錆が散見される状態のものを使用した。電気防食の方式は外部電源方式で、各供試体には図-4. 12に示す寸法のチタンメッシュ陽極材をコンクリート表面より2cmの深さに埋設した。

供試体No. 7、No. 8（無防食供試体）は無防食のまま暴露環境に設置しマクロ腐食の傾向を直接調べた。

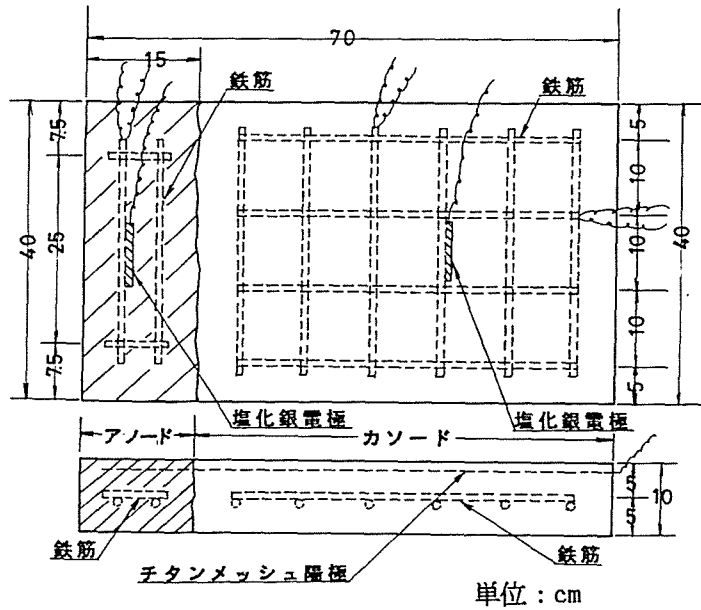


図-4. 11 供試体の形状寸法 (Aa/Ac:1/5)

表-4. 3 供試体の条件

電気防食の有無、供試体No.	電気防食用供試体						無防食供試体	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Aa/Ac	1/10	1/5	1/2	1/1	5/1	10/1	1/10	1/1

*アノード部コンクリートへはNaClを15kg/m³混入
 **カソード部コンクリートへはNaCl混入なし

表-4. 4 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)
20	12	4±1	50	47
単 位 量(kg/m ³)				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (cc)
180	360	814	932	450

コンクリートの配合は表-4. 4示すように、水セメント比50%、スランプ12cm、配合強度240kgf/cm²である。なお、コンクリート中の鉄筋のアノード部を作るために、アノード部のコンクリートには15kg/m³のNaClを練り混ぜ水に混入して使用した。NaClを15kg/m³混入した理由は、この量が20年程度経過したコンクリー

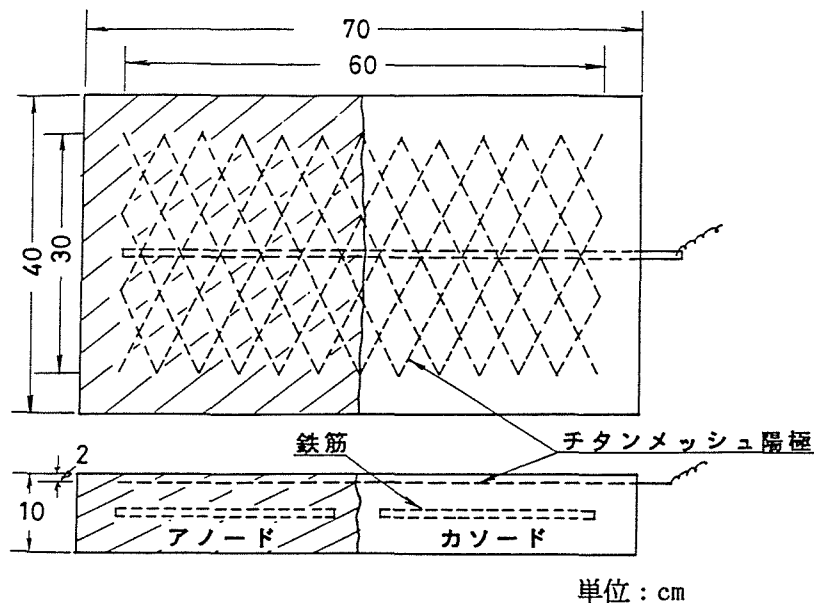


図-4. 12 チタンメッシュ陽極の配置状況

ト構造物の飛沫帯に浸入している量に相当するためである⁷⁾。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。供試体は前節の海水シャワー環境と同じ場所に曝露した。

b) 測定項目

まず、電気防食用供試体 (No. 1~No. 6) は電気防食による通電試験を開始する前に、アノード部およびカソード部にそれぞれ取り付けている基準電極

(Ag/AgCl) によって両極の単極電位を測定した。その後、アノード部とカソード部を短絡して図-4. 13に示すようにアノード部からカソード部へ流れるマクロ腐食電流および両極の短絡電位を測定した。この無防食の短絡状態を約6ヶ月間続けた後、一度開路状態にして両極における開路電位を測定した。なお、後述するように、ここで測定された開路電位 (自然電位) は通電後の分極量を求める自然電位として用いた。開路電位が安定した時点でアノード部およびカソード部を再び短絡してチタンメッシュ陽極を用いて通電試験を実施した。通電試験は、一定の電流密度の電流を流す定電流法によって行った。電流は、当初小さい電流密度で流して順次電流密度を大きくしていき、各々の電流密度に対する各供試体のアノード部およびカソード部へ流入する電流量と電位を測定した。ここに、通電時の電流密度はコンクリート中铁筋の表面積当たりの値で示す。

図-4. 14はアノード部およびカソード部の通電回路間に0.1Ωの固定抵抗を挿入し通電時のアノード部およびカソード部へ流入する電流測定の要領を示す。電位の測定は図-4. 13に示す方法と同じである。分極量は安定したアノード部およびカソード部の開路電位と通電中のインスタントオフ電位 (一時、通電を切った直後1~2秒間に測定される電位) の差から求めた。また、コンクリート中に温度センサーを埋設し温度を測定した。

無防食供試体 (No. 7, No. 8) は暴露期間中マクロ腐食電流および短絡電位を測定し、試験終了時に供試体を解体して鉄筋の腐食状況を観察した。

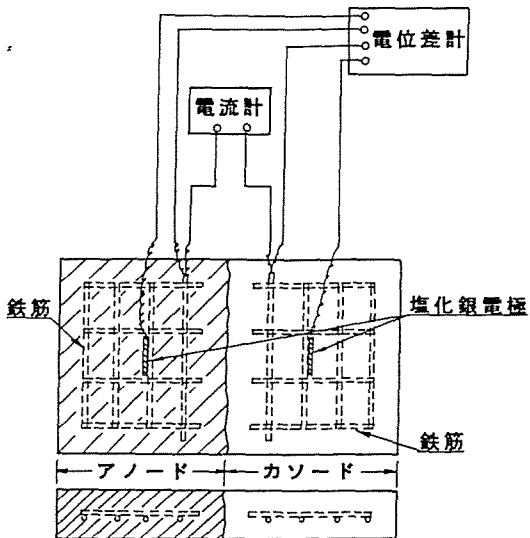


図-4. 13 マクロ腐食電流
および電位の測定要領図

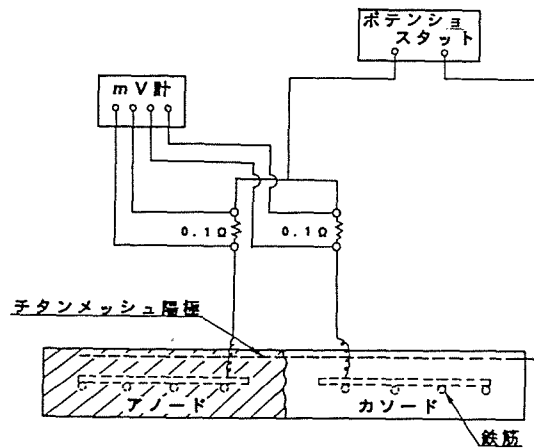


図-4. 14 アノード部、カソード部
流入電流の測定要領図

(3) 無防食時のマクロ腐食電流と電位

a) マクロ腐食電流の経日変化

図-4. 15は各供試体における無防食時のアノード部から流出するマクロ腐食電流の流出傾向を示したものである。Aa/Acに対するマクロ腐食電流は、Aa/Acが小さい場合に多量の腐食電流が流出する。Aa/Acが1/10のNo.1では $0.7 \sim 1.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の流出が見られ、1/5のNo.2では $0.5 \sim 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、1/2のNo.3では $0.25 \sim 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であった。Aa/Acが逆に大きい5/1のNo.5や10/1のNo.6では、流出する電流密度は非常に小さく $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下であった。したがって、Aa/Acが小さい程アノード部から流出するマクロ腐食電流密度は大きい。

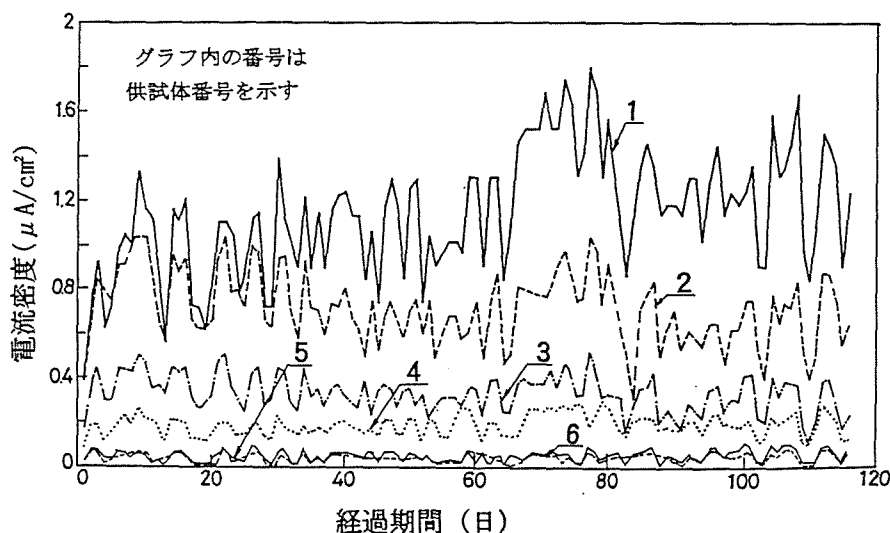


図-4. 15 マクロ腐食電流の経時変化

図-4. 16は図-4. 17に示す15時頃の値をプロットしたものであり、 A_a/A_c とマクロ腐食電流の関係を示したものであるが、次式の(8)~(10)によって腐食速度と電流密度には比例関係がある。図-4. 16から、 A_a/A_c が1/10のNo.1と1/1のNo.4とを比較すると、約4~7倍No.1の方が大きいことがわかる。また、図中の腐食速度はマクロ腐食電流を用いてファラデーの法則に基づいて次式⁸⁾により算出したものである。

$$(A)=\text{腐食量 (g/cm}^2\text{/hr)} = 1 \text{ 化学等量} \times \text{腐食電流 (A/cm}^2) / 26.8\text{A}\cdot\text{hr} \dots (8)$$

$$(B)=\text{侵食量 (cm/hr)} = (A)/7.86 \text{ (g/cm}^3) \dots (9)$$

$$\text{腐食速度 (mm/y)} = (B) \times 24 \times 365 \times 10 \dots (10)$$

ここに、

鉄の1化学等量：27.92g

26.8A·hr：1ファラデー（1化学等量を腐食するために発生する電気量）

7.86(g/cm³)：鉄の密度

以上により A_a/A_c が小さいとアノード部に大きい腐食が発生する。

b) 一日の環境変化に伴う

マクロ腐食電流の変化

一日の環境変化に伴うマクロ腐食電流の流出傾向を図-4. 17、図-4. 18に示す。図-4. 17は晴天の条件である。 A_a/A_c が1/10、1/5、1/2、1/1では14時~15時にかけて流出する電流量が大きくなる。この時間帯は最も気温が上がり供試体の温度も15時頃に最も高い値を示し

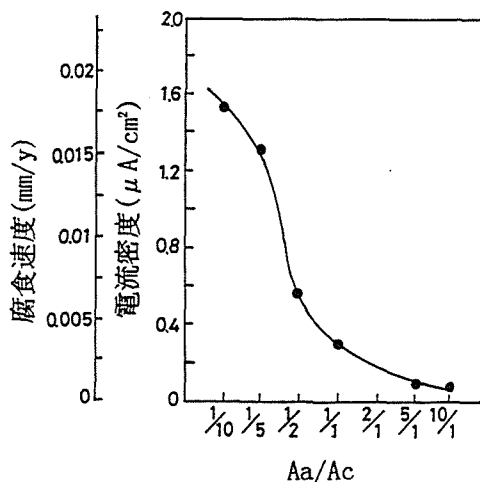


図-4. 16 A_a/A_c とマクロ腐食電流の関係

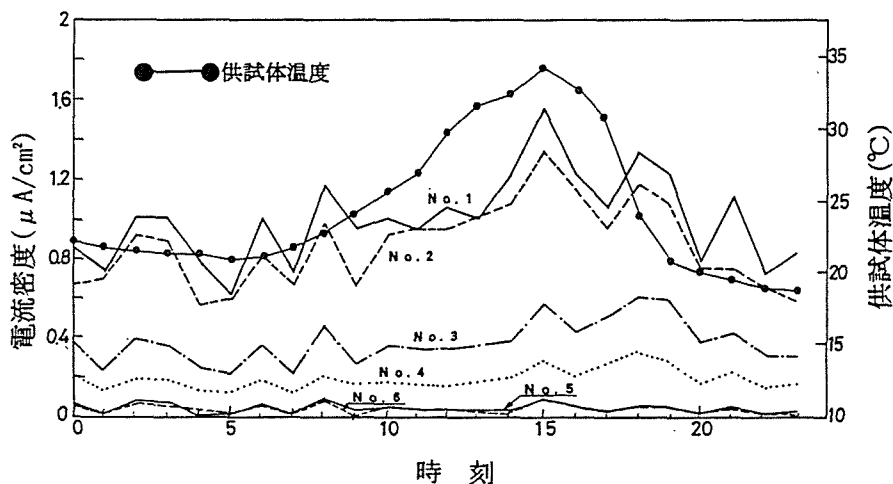


図-4. 17 各供試体のマクロ腐食電流の一日の変化（晴天）

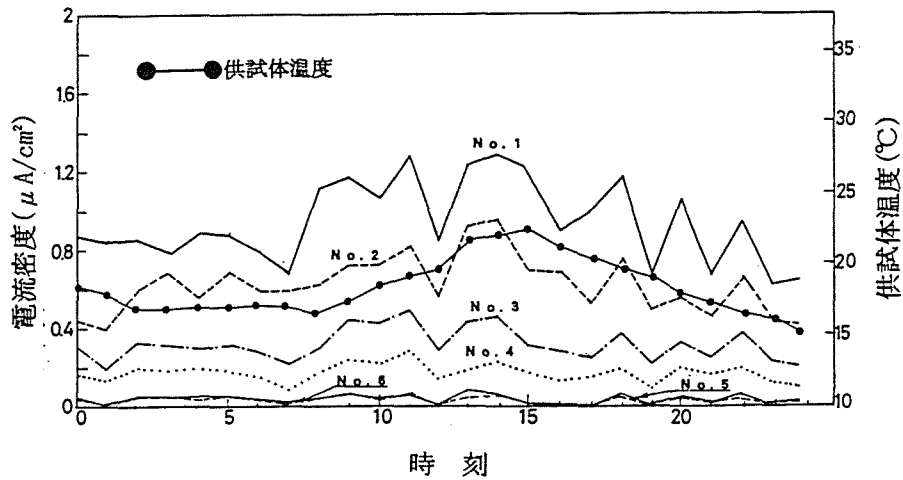


図-4. 18 各供試体のマクロ腐食電流の一日の変化 (雨天)

た。しかし、朝方や夜間で気温が低いと電流量は小さい。したがって、マクロ腐食電流の増減は温度に影響される。これに対して、図-4. 18は雨天で温度が低いとマクロ腐食電流の増加は見られない。この傾向は前述した4. 2の流電陽極方式による電流変化と類似していた。

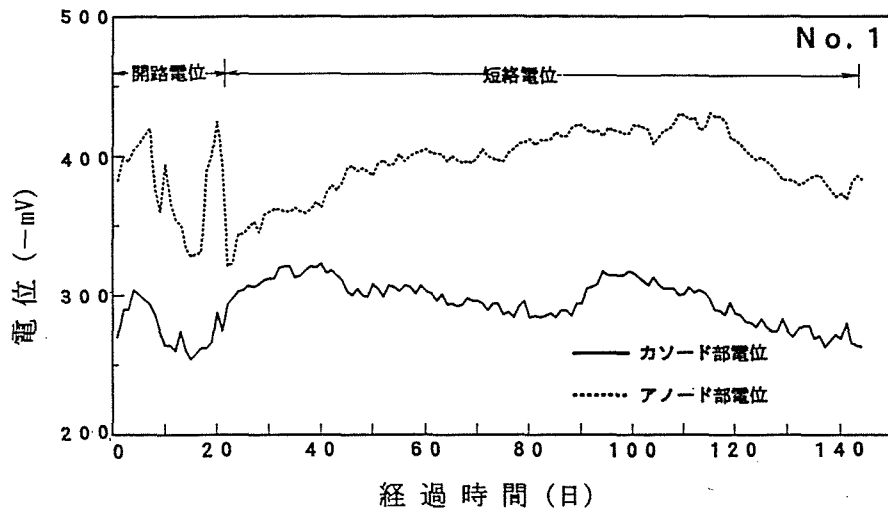


図-4. 19 電位の経時変化 (供試体No.1)

c) 単極電位および短絡電位

図-4. 19にアノード部、カソード部の単極電位と短絡電位の一例(供試体No.1)を示す。アノード部の単極電位は $-330 \sim -410\text{mV}$ の値で、カソード部では $-250 \sim -300\text{mV}$ であった。アノード部のコンクリートには前述したようにNaClを混入したことで、コンクリート中の鉄筋の表面に薄い錆を発生させたのでカソード部の鉄筋よりも卑な電位を示したと考えられる。この傾向はいずれの供試体にも認められた。供試体No.1のアノード部、カソード部を短絡した直後の短絡電位は、アノード部では -310mV 程度に、カソード部では -300mV 程度に変化した。時間の経過とともに電位差は大きくなり最終的には 100mV 程度となった。アノード

部とカソード部の電位差の傾向はAa/Acが小さい程大きく供試体No. 1が最も大きかった。

(4) アノード部およびカソード部へ流入する電流の割合

通電試験は午前中の海水シャワー開始30分後に行い、各電流密度のアノード部およびカソード部へ流れる電流量を測定した。図-4. 20はその結果であるが供試体No. 1およびNo. 2のようにAa/Acが小さく流す電流量が少ない場合

(たとえば $5\text{mA}/\text{m}^2$) に防食電流は優先的にカソード部へ流入し、アノード部への流入は見られずアノード部からカソード部へ腐食電流が流出した。たとえば、供試体No. 1でアノード部の電流が $8\text{mA}/\text{m}^2$ 以下では負になり、アノード部からカソード部へマクロ腐食電流が流出している。また、No. 2では $7\text{mA}/\text{m}^2$ 程度である。

このように、電気防食により通電していても、コンクリート中の鉄筋のマクロ腐食電流が電気防食による電流量よりも大きいと電気防食が不十分となる。すなわち、Aa/Acが小さくアノード部から大きいマクロ腐食電流を流出している状態では、少ない防食電流を流して電気防食を行ってもアノード部への電流の流入が見られない。アノード部へ防食電流を流入させるにはマクロ腐食電流を停止させるだけの量の電流を流す必要があり、 $8\text{mA}/\text{m}^2$ 程度以上であると考える。

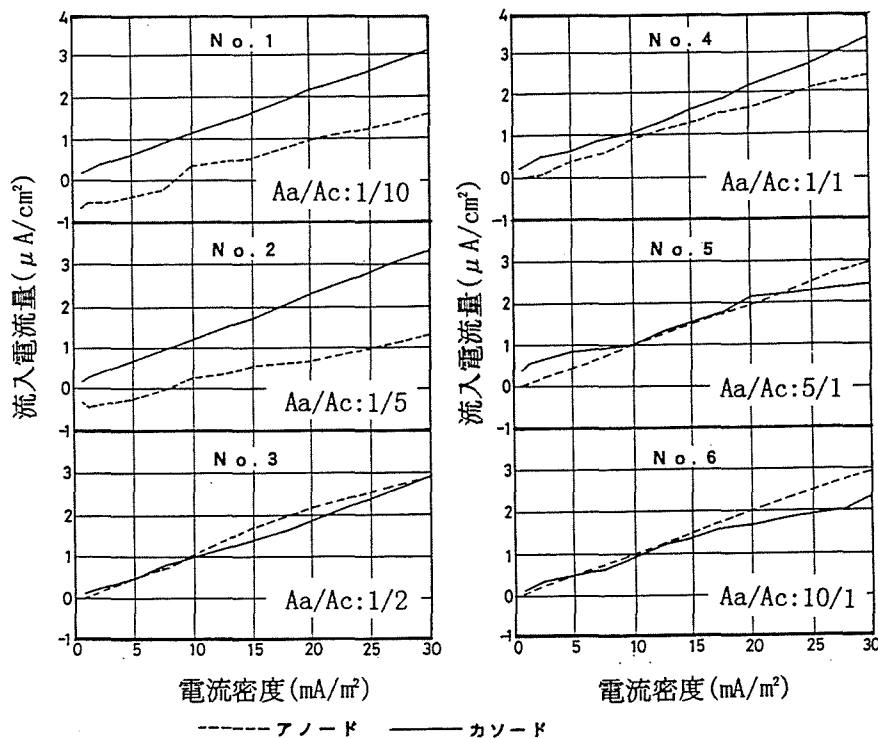


図-4. 20 各電流密度における流入、流出電流量 (流入：+、流出：-)

なお、通電試験において供試体No. 3～No. 6では、供試体No. 1やNo. 2のようにアノード部からカソード部へマクロ腐食電流が流出しなかったが、これはマクロ腐食がNo. 1やNo. 2ほど大きくなかったためである。

したがって、電気防食を行いカソード部の電位がアノード部の電位になるまで分極できる程度、あるいはそれ以上の電流を流さないとアノード部への電流の流入は見られない。これはアノード部から流出するマクロ腐食電流の停止を意味し、電気防食が正常に作動することになる。

(5) アノード部およびカソード部の分極量

図-4. 21はアノード部、カソード部の分極量すなわち通電前の安定した自然電位（アノード部およびカソード部）とインスタントオフ電位の差を示したものである。この分極量はコンクリート中の鉄筋の防食判定基準として適用され、100mV以上あれば防食されていると判定され100mV復極基準といわれる。

図-4. 21からカソード部ではいずれの供試体も1～4mA/m²の電流密度で100mV以上の分極量を達成したが、アノード部では供試体No. 1のようにAa/Acが1/10と小さい場合には30mA/m²程度の電流を必要とする。このときのカソード部の分極量は300mV程度であることから、アノード部に大きい腐食が発生している場合の防食基準（分極量）は300mV程度を必要とする。図-4. 21から供試体No. 1～No. 3ではアノード部、カソード部の両極が100mV以上の分極量を得るに必要な電流密度は22～29mA/m²で、供試体No. 4～No. 6では9～12mA/m²である。すなわち、Aa/Acが1/1以下だと大きい電流密度が必要であるが、Aa/Acが1以上ではそれほど大きい電流密度を必要としないことがわかる。

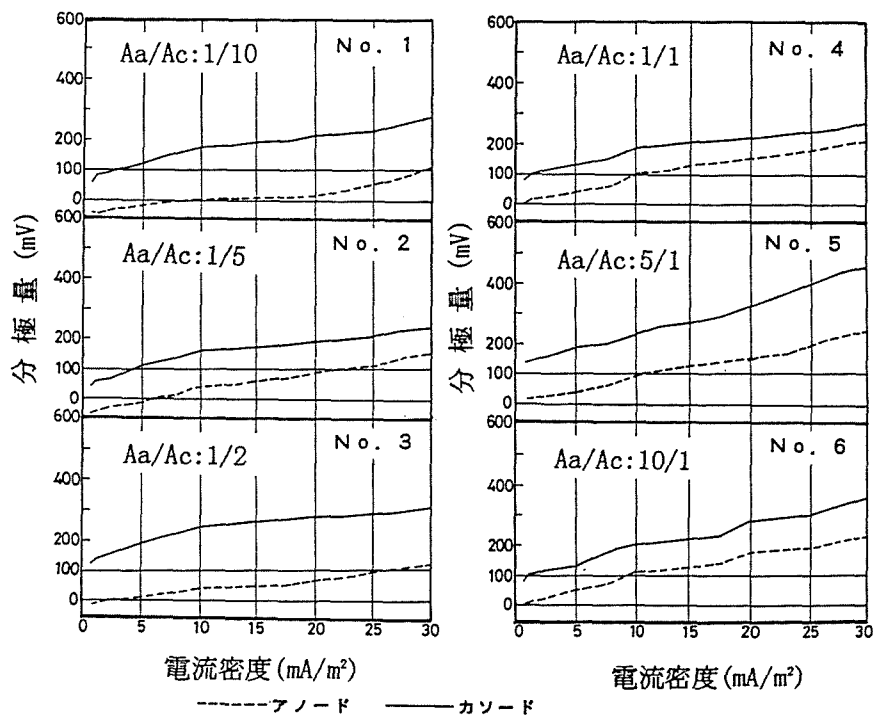


図-4. 21 各電流密度における分極量

(6) 無防食供試体の腐食状況

a) マクロ腐食電流

図-4. 22はNo. 7およびNo. 8の無防食供試体のマクロ腐食電流の経日変化を示したものである。経日変化は通電用供試体とほぼ同様の傾向を示した。供試体No. 7(Aa/Ac:1/10)のマクロ腐食電流はNo. 8(Aa/Ac:1/1)に比べて、250日程度までは約4倍で、350日程度から5~6倍であった。

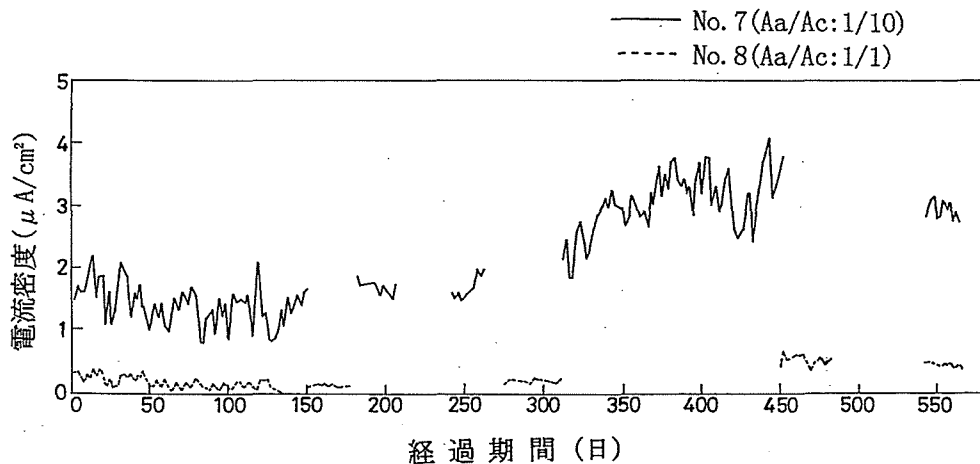


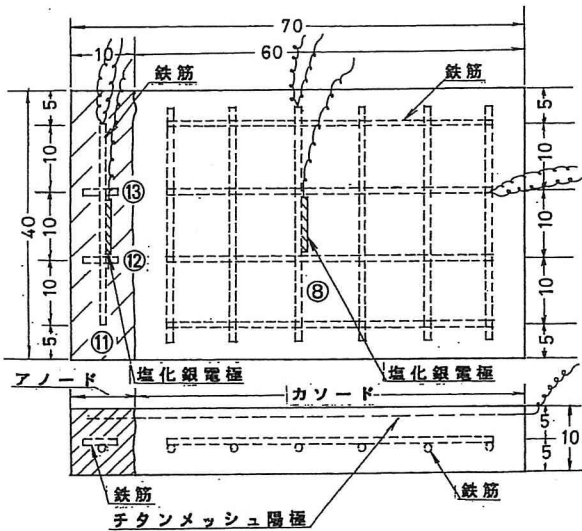
図-4. 22 無防食供試体のマクロ腐食電流の経時変化

b) コンクリート中鉄筋の腐食状況

供試体を解体しコンクリート中の鉄筋の腐食状況を観察した。写真-4. 2は一例として供試体No. 8の腐食を例示したものである。供試体No. 7、No. 8ともアノード部において鉄筋に腐食が見られたが、カソード部では塩化銀電極と接触する鉄筋表面にわずかに錆が認められただけである。供試体No. 7では図-4. 23の⑧、供試体No. 8では図-4. 24の⑤の各鉄筋である。この腐食は異種接触腐食で鉄筋表面が塩化銀電極と接触している部分がアノードを形成して腐食したと考える。

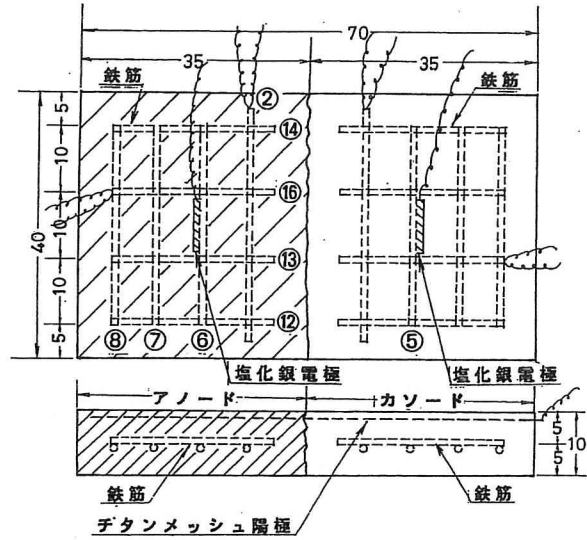
表-4. 5は回収した鉄筋を脱錆処理後、重量測定から鉄筋の腐食速度を示す。鉄筋の番号は図-4. 23、図-4. 24の丸数字で示したものである。供試体No. 8の鉄筋の腐食減量からみると、アノード部の鉄筋の腐食はカソード部に近い鉄筋に集中している。これは、コンクリートの電気抵抗の関係でマクロ腐食が発生しているとカソード部に近いアノード部に腐食が集中するためと思われる。そのため、カソード部に近いアノード部の鉄筋腐食には注意する必要がある。なお、重量減量より求めた腐食速度とマクロ腐食電流より求めた腐食速度を比較

(図-4. 16)すると、同じAa/Ac (供試体No. 1:1/10、No. 4:1/1) であるが、マクロ腐食電流より求めた方が小さくなっている。これは供試体が異なることも考えられるが、マクロ腐食電流はある一定の時間に測定した値で算出したので小さく求められたと考える。重量減量から求めた腐食速度はトータルな値として算出されたものである。



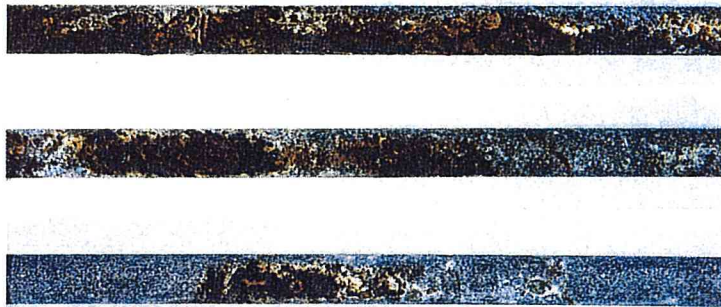
単位：cm

図-4. 23 腐食量測定鉄筋の配置
(供試体No. 7)



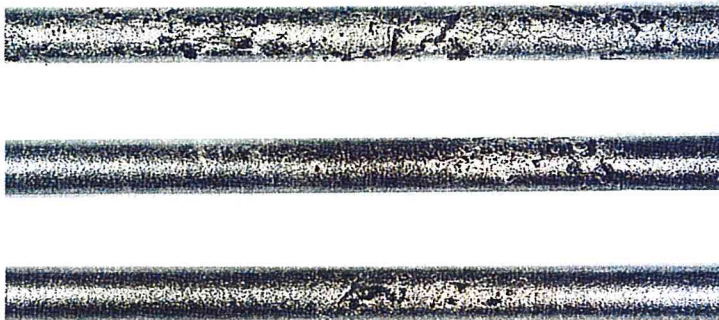
単位：cm

図-4. 24 腐食量測定鉄筋の配置
(供試体No. 8)



8-② }
アノード部
8-⑯ }
8-⑤ カソード部

(脱錆前)



8-② }
アノード部
8-⑯ }
8-⑤ カソード部

(脱錆後)

写真-4. 2 供試体No. 8のアノード部鉄筋の腐食状況
およびカソード部の電極取付位置の腐食状況

表-4. 5 重量減量から求めたアノード部鉄筋の腐食速度

No. 7供試体 (Aa/Ac:1/10)			No. 8供試体 (Aa/Ac:1/1)		
鉄筋 No.	重量減量 (g)	腐食速度 (mm/y)	鉄筋 No.	重量減量 (g)	腐食速度 (mm/y)
⑪	15.25	0.120	②	20.05	0.137
⑫	0.61	0.026	⑥	14.86	0.118
⑬	0.11	0.005	⑦	0.92	0.073
			⑧	0.84	0.067
⑧*	1.52	0.093	⑫	1.86	0.018
			⑬	1.36	0.013
			⑭	1.46	0.014
			⑯	1.28	0.012
			⑤*	0.24	0.002

* : カソード側の腐食を示す

(7) 防食基準について

現在、電気防食の防食効果を判定する基準に前述した100mV復極基準が広く用いられている。この方法は①～③に述べるような利点があげられる。

- ①電位の絶対値を必要としないこと。
- ②基準電極の影響をあまり受けないこと。
- ③極端に分極量が大きくないので過防食に対して心配する必要がない。

しかし、100mV復極基準は本来土中に埋設されたパイプラインの電気防食の防食基準をそのまま適用しているのので、この基準でどの程度まで港湾環境に位置するコンクリート中鉄筋へ適用できるかが問題である。新設や比較的新しいコンクリート構造物ではマクロ腐食が小さいと考えられるので、少ない電流密度で容易に100mV以上の分極が得られ、この基準を適用することで防食効果は満足することになると考える。しかし、塩化物イオンが多量に浸入している既設構造物にはマクロ腐食の形成により大きい腐食が進んでいる。大きい腐食が進んでいる条件での分極量は本節の検討結果から塩化物イオンの含有量やAa/Acの差によるマクロ腐食の大小により異なることが確かめられた。それ故、大きいマクロ腐食が形成されている場合には100mV復極基準の適用は難しく、カソード部で100mV以上の分極量が得られてもアノード部で達成されない場合が認められた(図-4. 21)。すなわち、100mV復極基準はコンクリート中鉄筋の腐食の状況によっては適用できない場合が考えられる。防食基準はより安全なものが必要であり、大きいマクロ腐食が発生している条件で適切な防食効果を考慮した場合にアノード部でも100mV以上の分極量を得る必要がある。そのためには本節で得られたように分極量を300mV程度にすることが適当と考える。

したがって、防食基準は、新設あるいは建設後経過期間の短い構造物で塩化物イオンが少ない場合には100mV復極基準を適用し、長期間経過し塩化物イオンが多量に浸入し、大きい腐食が発生していると考えられる場合には300mVの分極量が必要である。

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するため付着強度の低下をもたらすという報告^{9, 10, 11)}がある。さらに、アルカリ反応性骨材を用いたコンクリートに電気防食を行った結果、通常の電流密度(5~10mA/m²程度)よりも大きい電流を通電した場合には、少なからず電流の影響を受けアルカリ骨材反応が助長されるといわれている¹²⁾。そのため、実際に電気防食法を鉄筋コンクリート部材に適用する際には通常の電流密度(5~10mA/m²程度)よりも大きくなるように十分注意する必要がある。

4. 4 結語

以上に述べたように、4. 2では亜鉛シート陽極を用いた流電陽極方式の電気防食に関して天候、温度、曝露環境条件等に対する電流、電位の傾向について検討した。

4. 3ではAa/Acとマクロ腐食電流および電位の傾向、また外部電源方式による電気防食におけるアノード部およびカソード部へ流入する電流密度や分極量および無防食供試体の腐食傾向について検討した。

これらを取りまとめて結語とする。

流電陽極方式の電気防食に及ぼす環境要因の影響では以下の事項が明らかとなった。

- (1) 電流および電位は温度および天候に影響され、電位変動は晴天で認められるが雨天では認められず、電流は温度の高い晴天では大きく雨天では小さいことが認められた。また、防食電流密度は冬季で小さく夏季において大きいことが認められた。これは温度が高いと亜鉛シート陽極が活性化し、流れる電流が増加するためと考える。
- (2) 安定した防食電流密度は海水シャワー環境では20mA/m²程度、陸上自然環境では15mA/m²程度であったので、陸上環境や海水が直接かかる環境への防食設計を行う際にはこれらの値を用いて陽極の寿命等を検討することができる。

コンクリート中鉄筋の防食電流密度では以下の事項が明らかとなった。

- (3) マクロ腐食電流密度はAa/Acが小さい程大きく、その場合アノード部はカソード部に近い部分で大きな鉄筋腐食が生じることを明らかにした。
- (4) 大きなマクロ腐食が発生しているところへ電気防食を行うと、防食電流はカソード部に優先的に流入するため防食電流がマクロ腐食電流よりも小さ

いと防食効果が期待できないことを明らかにし、マクロ腐食電流を停止させるには $8\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の防食電流密度が必要であることを示した。

- (5) アノード部の分極量はカソード部に比べて小さく、カソード部で 100mV 以上の分極量を示してもアノード部では 100mV を達成できない場合が認められた。そのため、アノード部で 100mV 以上の分極量を得るためには $30\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電流密度が必要であることを示した。
- (6) 防食基準としては、新設および比較的新しい構造物には 100mV の分極量でよいが、長期間経過して多量の塩化物イオンが浸入していると考えられる構造物では、 300mV の分極量が必要であることを提案した。

参考文献

- 1) (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、pp36～56、1989.
- 2) 三田俊一郎、武藤一雄、井川一弘、加納伸人：コンクリート構造物における流電陽極方式による電気防食法の実用化に関する試験、コンクリート工学年次論文報告集、1088、12-1、pp20-1～20-4、1990.
- 3) 荻原正将、阿部忠行：コンクリート構造物における電気防食、土木学会第46回年次学術講演会、V-170、pp356～357、1991.
- 4) 堺 孝司、大越 威、千葉丈夫、小熊文雄、加納伸人：積雪寒冷地における流電陽極方式による鉄筋の電気防食、土木学会第46回年次学術講演会、V-180、pp376～377、1991.
- 5) 守分敦郎、長滝重義、大即信明、宮里心一：マクロセル腐食の防止を目的とした電気防食の適用性に関する基礎的研究、土木学会第50回年次学術講演会、V-163、pp326～327、1995.
- 6) 井川一弘、篠田吉央、加納伸人、田中健一郎：コンクリート構造物の電気防食試験、コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集、26、pp159～164、1994.
- 7) 濱田秀則、R. N. Swamy：種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透に関する一考察、港湾技研資料、No. 810、pp13～22、1995.
- 8) H. H. ユーリック、R. W. レヴィー：腐食反応とその制御（第3版）、産業図書（株）、pp6～8、1989.
- 9) 石井浩司：学位論文（早稲田大学）、プレテンション方式プレストレストコンクリート部材への電気防食の適用に関する研究、p75、1996.
- 10) 上田隆雄、井上 普、宮川豊章、藤井 学、芦田公伸：デサリネーションが鉄筋の付着挙動に与える影響、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、pp270～271、1993.
- 11) 黒井登起雄：電流作用を受けた硬化ペーストの諸特性、第44回セメント技

術大会講演集、pp846～851、1990.

- 1 2) 西林新蔵、林 昭富、王 鉄成、鎌田隆志：アルカリ骨材反応に及ぼす電流場の影響に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 14、No. 1、pp201～206、1992.

第5章 電着工法に関する現地試験

5.1 概説

海水や淡水などカルシウムイオンやマグネシウムイオンを含む環境中で金属を電気防食するとき、金属面は時間の経過とともに石灰質皮膜（電着物と呼ばれる）で覆われる。この皮膜が良好であれば防食電流の分布をよくし必要な防食電流密度を低減させることができ、電気防食法の施工に対して有益である。

電着工法とは、図-5.1に示すように海水中に存在するカルシウムやマグネシウム等の陽イオンを海水中での電解によって、炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）および水酸化マグネシウム（ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ）を主成分とする無機物を陰極表面に一樣に厚く析出させコンクリート状の構造物を形成する工法である。この工法は施工性をはじめ多くの優れた特徴を有していることから、港湾および海洋鋼構造物の防食工法およびコンクリート構造物の補修法としての適用が考えられる。

本章では室内試験によって鋼材表面、コンクリート表面およびコンクリートのひびわれ部の電着物の析出量と電流密度の関係について検討した結果^{1, 2)}、現地構造物への適用の見通しがついたので本工法の適用性を検討する目的のために現地試験を実施した。5.2では鋼構造物また5.3ではコンクリート構造物への適用性、および室内試験を行って付着強度について検討した結果を示す。

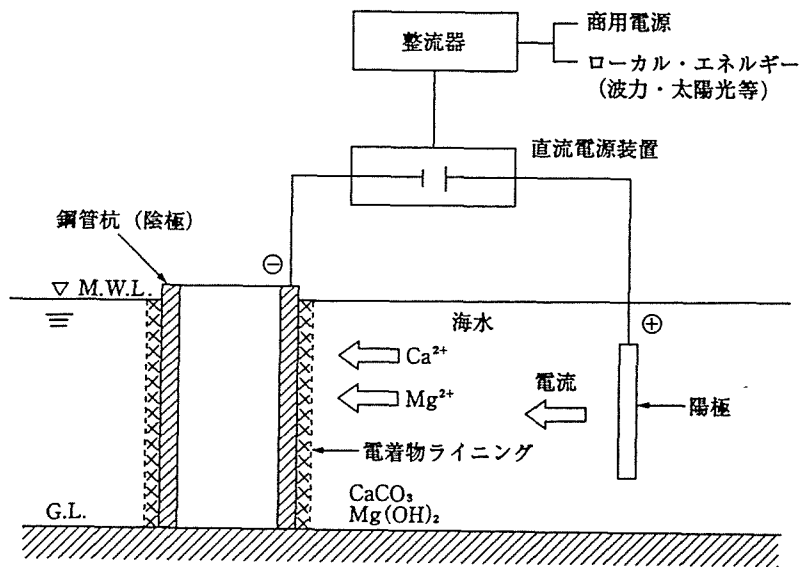


図-5.1 鋼構造物への電着工法の概念図

表-5.1に示すように電気防食法と電着工法の違いは、電着工法での電流量は電気防食法の5~30倍と大きく、生成する皮膜の厚さは電気防食では100~200 μm 程度であるのに対し電着工法では鋼材で、5~10mm程度、またコンクリートで1~2mm程度と厚いことである。また、電着工法は電着物がある厚さに達

表-5. 1 電着工法と電気防食の比較

工 法	電流密度 (A/m ²)	皮膜の厚さ (mm)	防 食 方 法
電気防食法	0.1程度	0.1~0.2	常に電流を流し続ける。
電着工法 (鋼材)	1~3程度	5~10	一定期間電流を流した後通電を停止し被覆によって防食する。
電着工法 (コンクリート)	0.5~0.8程度	1~2	

表-5. 2 電着物の析出反応

電 気 化 学 反 応	液 相 反 応
<u>アノード反応</u>	$MgCl_2 \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2Cl^-$
$2Cl^- \rightarrow Cl_2 \uparrow + 2e^-$ (1)	$CaCl_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2Cl^-$ (6)
$2H_2O \rightarrow O_2 \uparrow + 4H^+ + 4e^-$ (2)	$H_2CO_3 \rightleftharpoons HCO_3^- \rightleftharpoons Na^+ + H^+ + CO_3^{2-}$ (7)
<u>カソード反応</u>	$NaHCO_3 \rightleftharpoons Na^+ + HCO_3^-$
$2H + 2e^- \rightarrow H_2$ (3)	$\rightleftharpoons Na^+ + CO_3^{2-}$ (8)
$1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ (4)	$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \downarrow$ (9)
$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 \uparrow + 2OH^-$ (5)	$Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2 \downarrow$ (10)

した後は通電を止めて、被防食体を電着物で被覆して防食する工法であるのに対し、電気防食は電流を流し続けて防食する。

海洋構造物へ電着工法を適用した場合の電着物の析出反応は、

表-5. 2に示すように電気化学反応過程と液相反応過程に分けることができる。電気化学反応では通電することにより陽極および陰極界面に(1)~(5)式の反応が起こる。これらの電気化学反応により図-5. 2に示すように陰極界面の極く近傍

(0.05~0.1mm)でアルカリ雰囲気形成されpHの変化が生じる。

このpHの変化により(6)~(10)式に示す液相反応が生じ電着物

(CaCO₃、Mg(OH)₂)が析出沈殿する。

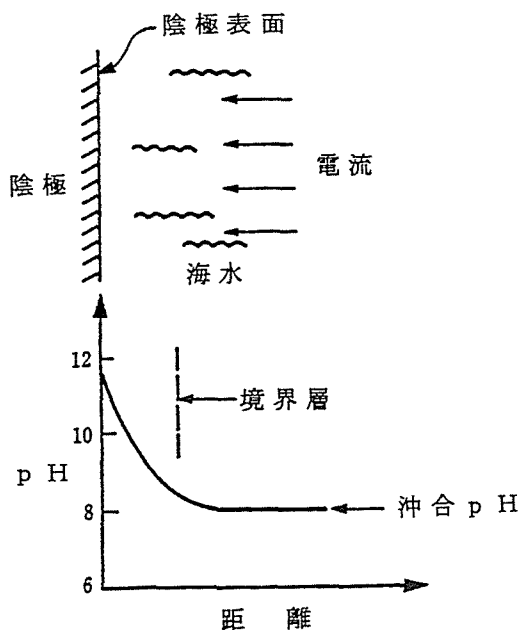


図-5. 2 陰極界面におけるpHの変化³⁾

CaCO₃の析出はpH8~9以上、Mg(OH)₂の析出はpH9~10以上といわれている³⁾。

5. 2 鋼構造物に対する現地試験

(1) 試験内容

試験の手順は、まず鋼管杭へ約3.6ヶ月間通電し電着物の析出状況を調べ、その後電着物を採取して各種の物性試験を行うとともに電着物による防食効果を確認するために鋼管杭の肉厚測定を実施した。

a) 現地試験の場所および試験鋼管杭

試験場所は3. 4で示した波崎海洋研究施設砕波帯棧橋である。試験に使用した鋼管杭は図- 3. 18に示したもののうち岸側の観測室から約100m沖方向に位置する杭No. 9、10、11の3本でいずれも直径600mm、肉厚16mmである。

図- 5. 3に示すように3本の鋼管杭のうちNo. 9、10には亜鉛メッキ金網（針金直径1.1mm、網目7mm）を水深-1.0m~+2.0mの範囲に巻き付け、金網を取り付けていないNo. 11と比較して表

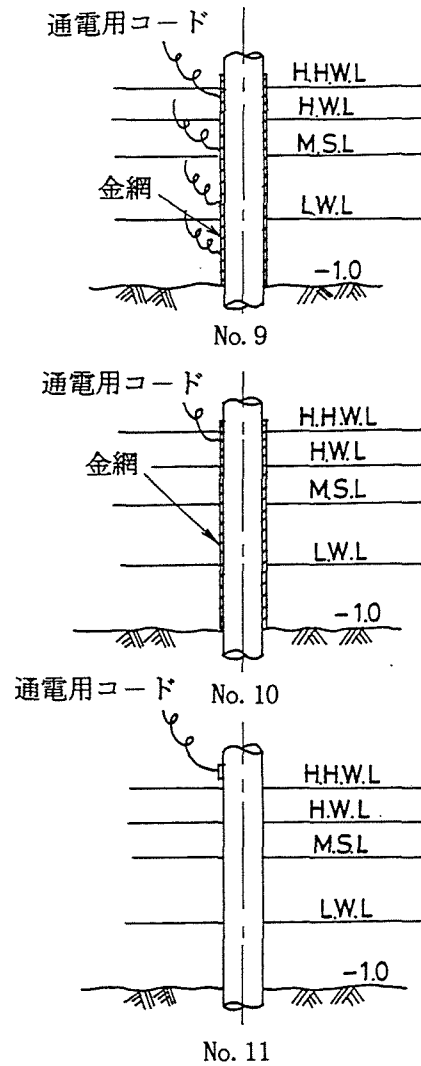


図- 5. 3 試験杭への金網および通電用コードの取付位置

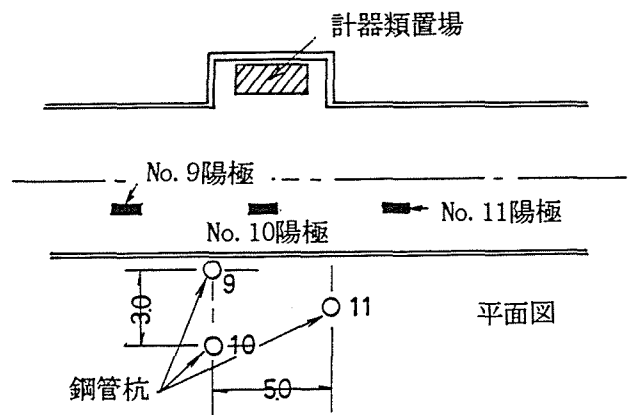
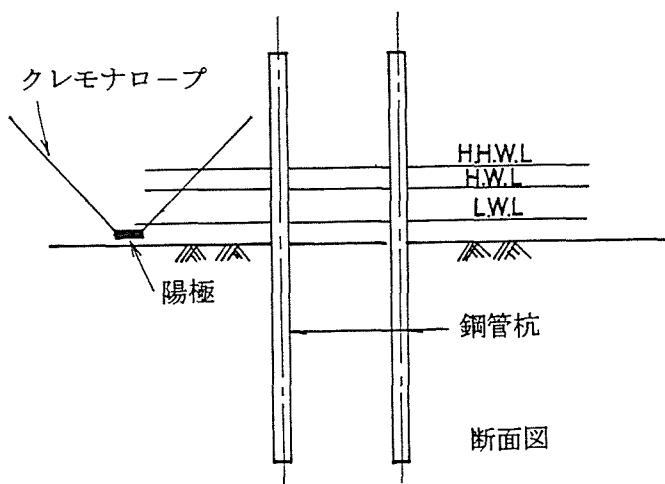


図- 5. 4 陰極（鋼管杭）と陽極との距離・配置関係

面状態と電着物の付着性を調べた。この3本の鋼管杭を陰極とするため、鋼管杭および金網に通電用のコードを取り付けて、それぞれ直流電源装置の負極側に接続した。

外部電源方式による陽極材として白金（許容電流密度： $\leq 100\text{mA}/\text{cm}^2$ ）、Pb-Ag合金（許容電流密度： $\leq 30\text{mA}/\text{cm}^2$ ）、黒鉛（許容電流密度： $\leq 1\text{mA}/\text{cm}^2$ ）等があるが、いずれも高価である。そこで安価で容易に入手でき、しかも様々な形状に加工できる長さ1mの軟鋼の型钢を用い図-5.4に示すように3本の陽極材をそれぞれ対応する陰極と数m離し、-0.5mの海水中に吊り下げた。この陽極材を通電用ケーブルで直流電源装置の陽極側に接続した。

b) 測定項目および通電方法

試験場所が鹿島灘に面した海象条件の厳しい海域であるので、潮の干満、波浪等によって海水に浸かる鋼管杭の面積が異なるので、定電流制御による通電では電流が不足する可能性が考えられる。そのため、本試験では定電圧制御によって対象鋼管杭へ通電を行い、負荷電流（定電圧制御）の変化を記録した。定電圧制御は、その電圧を維持するために必要な電流が環境の変化によって調整される方法である。また、各鋼管杭の電着物の付着状況の観察と電着物を採取し、電着物の化学分析およびビッカース硬さの測定を行い物性を検討した。さらに、鋼管杭の肉厚測定を実施した。

(2) 電圧および電流の傾向

通電中の電圧、電流、通電時間を表-5.3に示す。通電期間を通して杭No.9の電流が最も大きく、消費電力も他の杭に比べて1.6~2倍と大きい。これは図-5.4に示すように杭No.9の陽極の位置が最も近くその影響と考えられる。各杭の電流密度は1~4Aの範囲であった。最大電流は水深が最も深い満潮時に、最小電流は水深が最も浅い干潮時に見られた。図-5.5に示すように大潮と小潮

表-5.3 各鋼管杭への電圧、電流および通電期間

杭 No.	No. 9			No. 10		No. 11	
電圧 (V)	3.5	4.5	6.0	4.0	4.5	4.0	3.0
電流 (A)	16~ 26.5	21.5 ~28	16.5~ 30.5	9~ 18	8~ 18.5	8.5~ 16.5	11~ 15
通電期間 (日)	61.5	15.5	34	61.5	49.5	61.5	49.5
水深 (m)	-1.5~-3.5			-1.5~-3.5		-1.5~-3.5	
電流密度 (A/m ²)	1.2~3.7			1.0~1.9		1.8~3.9	
消費電力 (kWhr)	240			150		120	

の干満差による電流の変化は、例えばNo. 9では大潮の満潮時（4時頃）では30A程度に対し干潮時（11時頃）で25A程度と変動は大きいですが、小潮での変動は少ない。

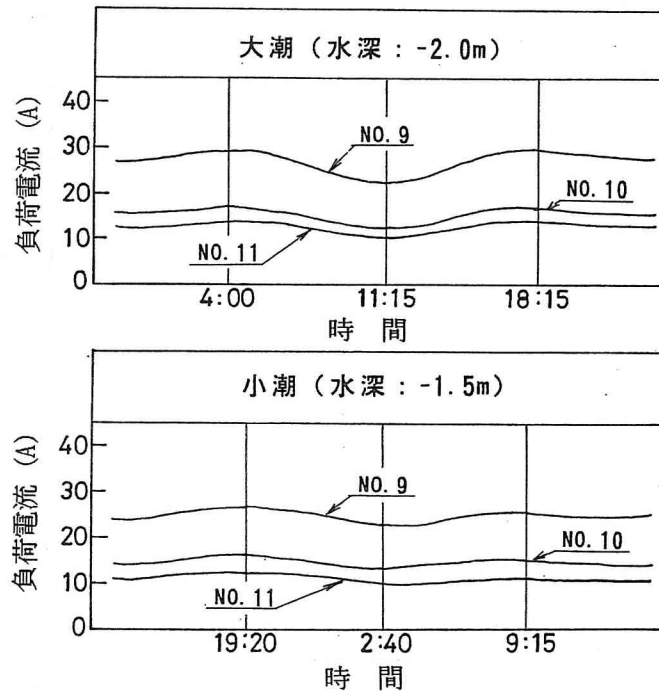


図-5. 5 大潮と小潮の干満差による電流の変化

(3) 電着物の付着状況

通電中、試験鋼管杭には電着施工していないほかの鋼管杭と同様に海洋生物（藻類、貝類）が鋼材表面に多数付着し成長した。試験開始から約1ヶ月後に藻類の付着、2ヶ月頃からムラサキイガイの稚貝が多く付着し、その後著しく繁殖し海水面下約2mの深さまで30~50mm厚さの緻密なムラサキイガイの層が形成された。しかし、海洋生物を除去すると鋼管杭表面と巻き付けた金網には図-5. 6に示す厚さの電着物が付着していたので海洋生物が付着していても問題ないことが明らかとなった。写真-5. 1は通電初期の電着物の析出状況を示すが水面上50~60cm程度ま



写真-5. 1 鋼管杭表面の電着物の析出状況

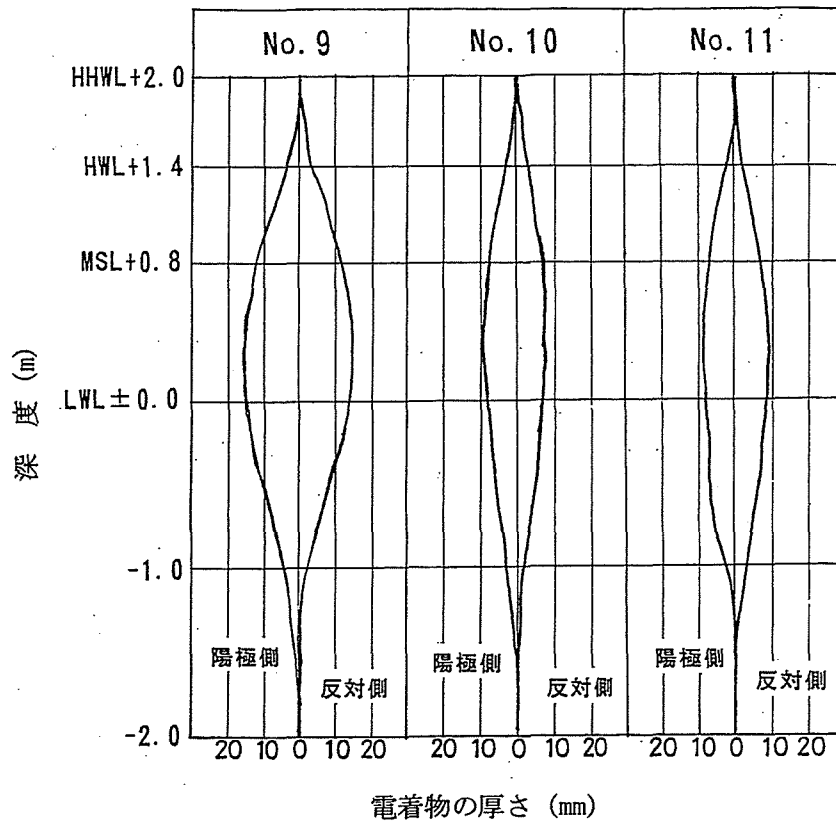


図-5.6 各鋼管杭表面の電着物厚さの分布 (通電終了直前)

で金網を包み込むように白色の石灰質皮膜が認められる。

つぎに、採取した電着物から各鋼管杭表面に付着した電着物の厚さの分布を図-5.6に示す。試験場所が砂の移動、砂の巻き上げ、潮の干満、潮流や波浪等厳しい海象条件下で、しかも海洋生物が付着繁殖する条件下であったが、各鋼管杭の表面および金網に電着物が10~15mm付着することが明かとなった。しかし、試験海域の水深が砂の移動によりLWL付近から-2.2m付近の範囲にわたって変動するので、陰極が砂に埋没している間は電着物は析出されない。したがって、LWL付近以深においては電着物の厚さは一様ではなく、徐々に薄くなり平均海底面(-1.0m付近)で2~5mm程度の厚さであった。干満帯についても同様でHHWL(+2.0m)付近まで電着物が付着するものの、HWL(+1.4m)付近においては2~5mm付着することが確認された。とくに、表-5.3および図-5.5に示すようにNo.9は電流密度が高いときの通電時間が長かったので、ほかの鋼管杭に比べて電着物が最も厚く形成された。

電着物の厚さを方向で見ると陽極と対向した側と裏側との位置によってその厚さが若干異なっていた。これは陽極の数や極間距離の影響で陰極の鋼管杭表面における電位が均等に分布しなかったためと考えられる。しかし、杭の被覆防食を考えた場合に通常の被覆材(有機ライニング)の厚さは1~3mm程度であるので本試験で析出された厚さは防食には十分と考える。

(4) 電着物の組成および硬さ

a) 電着物の組成

写真-5. 2に各鋼管杭の海面近傍 (MSL付近)、LWL付近および-0.5m 付近から通電停止2.4ヶ月後に採取した電着物の表側と裏側の外観を示す。No. 9およびNo. 10ではいずれの深度でも電着物が金網によく固着していることがわかる。電着物の裏側に赤錆の付着が一部見られるが、これは電着前に生じていた鋼管杭表面の錆が電着物を採取する時に電着物と一緒に剥離したものである。

図-5. 7は電流密度、組成比率および硬さの関係³⁾を示す。図-5. 7

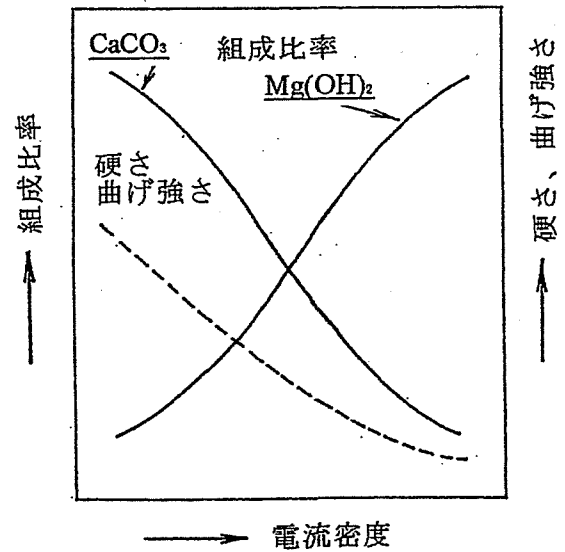


図-5. 7 電着物の組成比率、硬さ、曲げ強さと電流密度の関係³⁾

表-5. 4 各鋼管杭の電着物採取位置と電着物の化学組成

杭No.	位置	CaCO ₃	Mg(OH) ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
9	上	35.8	32.3	15.7	5.5	1.8
	中	30.4	34.7	18.4	6.1	1.6
	下	39.9	32.8	13.1	4.4	2.3
10	上	36.8	27.5	16.1	5.5	6.7
	中	34.2	29.2	17.3	6.1	4.3
	下	38.5	15.8	20.7	6.0	12.7
11	上	43.3	27.8	14.3	4.5	2.0
	中	31.6	37.1	17.8	5.2	2.0
	下	39.1	14.1	33.4	6.0	1.7

単位：%、上：海面近傍、中：中央部、下：海底近傍

に示すように、一般に電流密度が高くなるとMg(OH)₂の比率が増加し、析出速度は高くなるが比較的柔らかい電着層が形成される。電流密度が低いとCaCO₃の比率が増加して析出速度は低下するが、比較的硬い電着層が形成される。

写真-5. 2に示す各電着物について化学分析を行なった。表-5. 4は化学分析結果であるが、電着物の化学成分はCaCO₃、Mg(OH)₂およびSiO₂がほとんどでほかにAl₂O₃とごく微量のFe₂O₃を含んでいることがわかる。試験海域は砂の動き


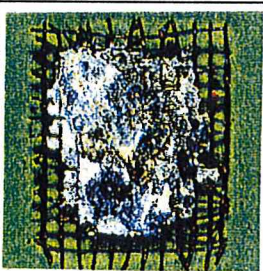
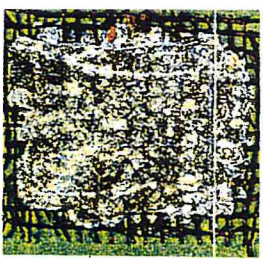
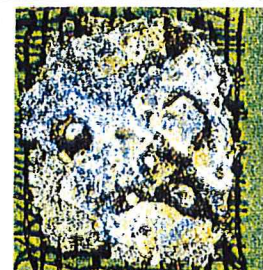

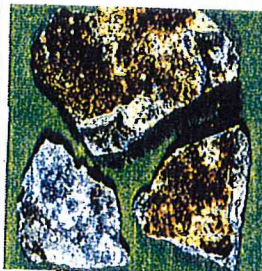
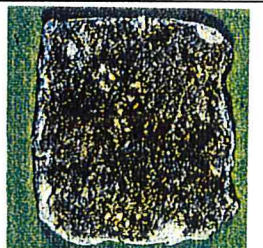
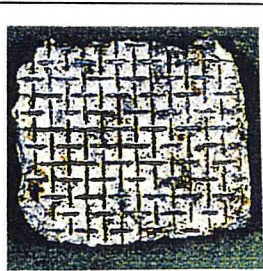
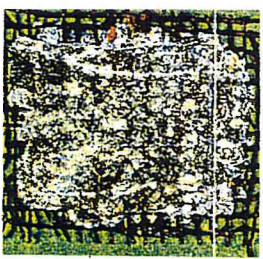
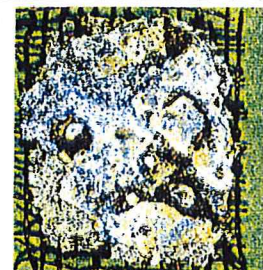
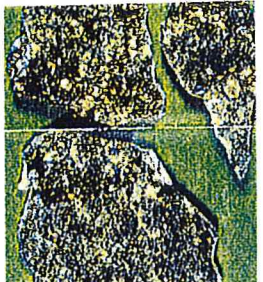
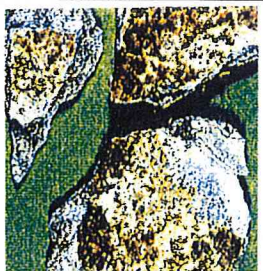
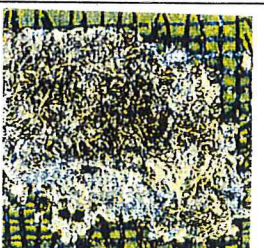

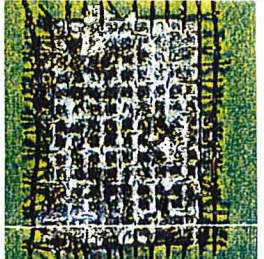

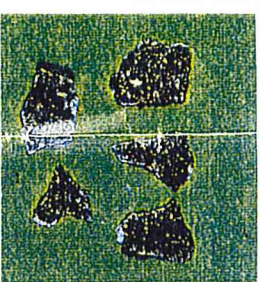
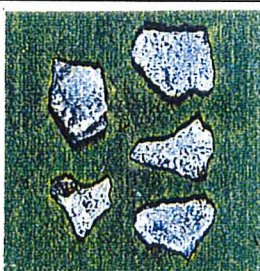
	No. 9		No. 10		No. 11	
	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面
海面近傍						
中央部						
海底近傍						

写真-5. 2 電着物の外觀状況

が激しいので比較的柔らかいMg(OH)₂の多い電着物の中へ砂が多量に混じるので、分析結果では砂の成分であるSiO₂やAl₂O₃が多くなったものと思われる。

電着物の主成分であるCaCO₃、Mg(OH)₂と電着物の採取位置との関係を図-5.8に示す。図-5.8に示すようにCaCO₃は海面近傍と海底近傍で多く、中央部で少ない。Mg(OH)₂はCaCO₃と逆に海面近傍と海底近傍で少なく、中央部において多い。これは海面近傍、中央部および海底近傍において電位分布が異なり中央部に電流密度が大きく、海面近傍と海底近傍では電流密度が小さくなったためと思われる。

したがって、電着層の組成を均一に保つためには電位分布が均等になるように陽極の配置や個数を調整することが必要である。

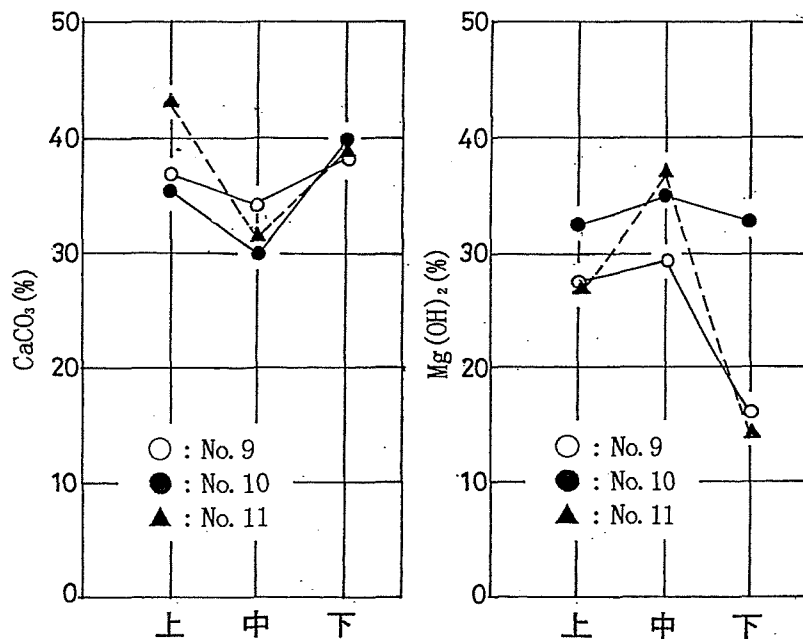


図-5.8 各鋼管杭の電着物採取位置とCaCO₃、Mg(OH)₂の関係
(上：海面近傍、中：中央部、下：海底近傍)

b) 電着物の硬さ

写真-5.3は各鋼管杭から採取した電着物の断面状況であるが、電着物の断面は白色部分(電着物：CaCO₃、Mg(OH)₂)とやや黒い斑点状のもの(砂粒)および繊維状のポーラスな部分(海藻と砂粒)とが混在していて一部にはムラサキイガイの混在も認められた。写真からわかるように、電着物の断面はマクロ的に均質ではない。電着物断面についてマイクロビッカース硬度計(荷重：300g)で厚さ方向の硬さを測定した結果を図-5.9に示す。電着物断面には海草類の混入によって測定できない部分もあったので、図中にはその部分を除いて測定した硬さを順に記入した。図-5.9より電着物の硬さは硬い部分と柔らかい部分との





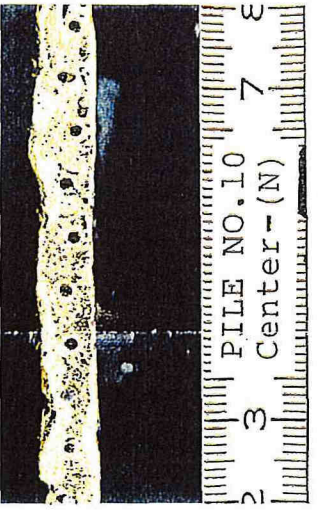



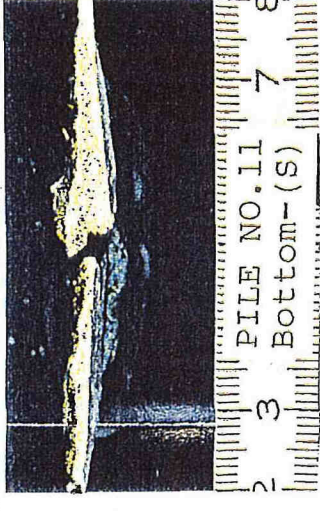
	No. 9	No. 10	No. 11
海面近傍	 <p>PILE NO.9 Top-(S)</p>	 <p>PILE NO.10 Top-(N)</p>	 <p>PILE NO.11</p>
中央部	 <p>PILE NO.9 Center-(N)</p>	 <p>PILE NO.10 Center-(N)</p>	 <p>PILE NO.11 Center-(N)</p>
海底近傍	 <p>PILE NO.9 Bottom-(S)</p>	 <p>PILE NO.10 Bottom-(S)</p>	 <p>PILE NO.11 Bottom-(S)</p>

写真-5. 3 電着物の断面状況

差が非常に大きくバラツキがあったが、その原因は種々の物質が混在したと考えられるので、今後、波浪海域での電着施工については均質な電着物が生成できるように陰極表面を筒状の物で覆う等の工夫が必要であるとする。

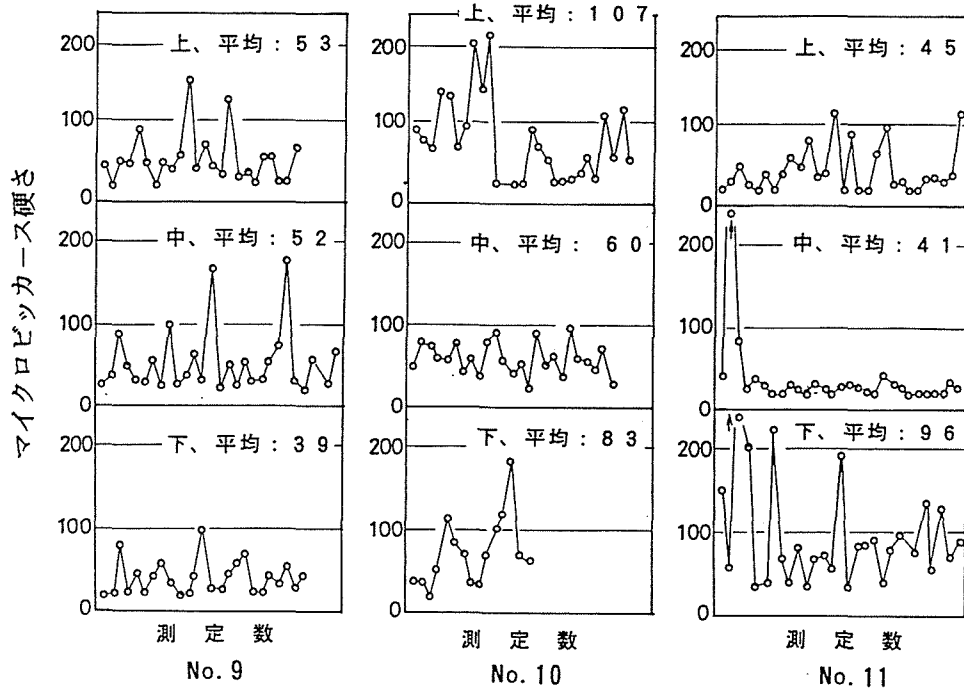


図-5. 9 各鋼管杭から採取した電着物の硬さ
(上：海面近傍、中：中央部、下：海底近傍)

(5) 電着物の耐久性および防食効果

a) 電着物の耐久性

試験場所は鹿島灘に面した海象条件の厳しい海域で碎波帯に近いこともあって、試験杭には常に波浪が打ち寄せている。その上、砂の動きの大きい場所なので3. 4で述べたように鋼管杭のサンドエロージョンが考えられる。

この環境下で形成された電着物の耐久性を検討するために通電停止後約5ヶ月および1年7ヶ月経過した時点で観察を行った。通電停止後5ヶ月経過した時点では金網を巻き付けたNo. 9、10の鋼管杭の電着層には何等損傷を受けた形跡は認められなかったが、鋼管杭に直接電着施工したNo. 11の電着層はLWL～HWLの沖合い側の一部に剥離が見られた。

通電停止後1年7ヶ月経過時では、いずれの鋼管杭も海底近傍から海面近傍までムラサキイガイによって表面は覆われていた。そのため、電着層全面にわたっては観察できなかったが、ムラサキイガイを剥した電着層の状態は通電停止後5ヶ月経過した時点とほとんど同程度であった。

電着物は金網等の陰極を包みこむようにして析出、形成されるので、たとえば、

衝撃、衝突によって電着物にひびわれや剥離を生じても再度通電することで容易に損傷箇所を復元することができる。しかし、No. 11のように陰極の表面が平滑であると、No. 9、10の金網を巻き付けたものよりも電着物の付着強度は弱く剥離しやすい。したがって、外部から衝撃を受けるような場所で電着物を形成するには剥離を防止するためにも鋼管杭に金網を巻くなどの措置が望ましい。

b) 鋼管杭の防食効果

電着施工後1年7ヶ月経過した各鋼管杭の+1.3mおよび+0.3mの深度の電着物を除去して鋼材表面の観察を行った。その結果、電着層で覆われていた表面はいずれも金属光沢が見られ平滑で腐食らしいものは認められなかった。また、黒く見られる部分が散見されたが、これは黒色酸化皮膜で鋼管杭の表面が電着施工によってアルカリ性になるために生成したものと考えられる。黒色酸化皮膜は赤錆の酸化物と異なり安定した酸化物皮膜で鋼材に対して防食効果を保つ。

各鋼管杭および比較の意味で無防食のNo. 6の杭について超音波厚み計

で肉厚測定を行い電着物による防食効果を評価した。測定深度は+1.3mおよび+0.3mである。表-5. 5は肉厚測定結果であるが、電着施工なしのNo. 6の鋼管杭は約2mmの肉厚減量が認められたのに対し電着施工した鋼管杭は施工前の規格板厚16mmに対し変化なく防食効果が認められた。

表-5. 5 各鋼管杭の肉厚測定結果 (mm)

杭No.	深度(m)	初期肉厚	1.6年経過後	肉厚減量
6	+2.0	16	13.8	2.2
	+1.3	16	14.1	1.9
	+0.3	16	14.3	1.7
9	+1.3	16	16.1	0
	+0.3	16	16.2	0
10	+1.3	16	16.2	0
	+0.3	16	16.2	0
11	+1.3	16	16.1	0
	+0.3	16	16.1	0

5. 3 コンクリート構造物に対する現地試験

(1) 試験内容

電着工法のコンクリート構造物への適用の概念図を図-5. 10に示す。海水中に配置した陽極からコンクリート構造物中の鉄筋(陰極)へ直流電流を流しコンクリート表層部およびひびわれ部に電着物を析出させ、より緻密なコンクリートに仕上げるものである。図-5. 11や写真-5. 4に示すように電着物はコンクリート表面に析出するとともにひびわれ部にも充填される。

試験の手順は、まず通電中、コンクリート表面に析出する電着物の析出状況を調査した。通電終了後、コンクリートコアを採取して電着物の組成分析、ひびわ

れ部への充填効果、コンクリートの透水試験および塩化物イオン量の測定等を行いコンクリートに対する補修や改質効果を評価した。さらに、コンクリートと鉄筋の付着強度および電着物とコンクリート表面の接着力を明らかにするため室内試験を併せて行った。

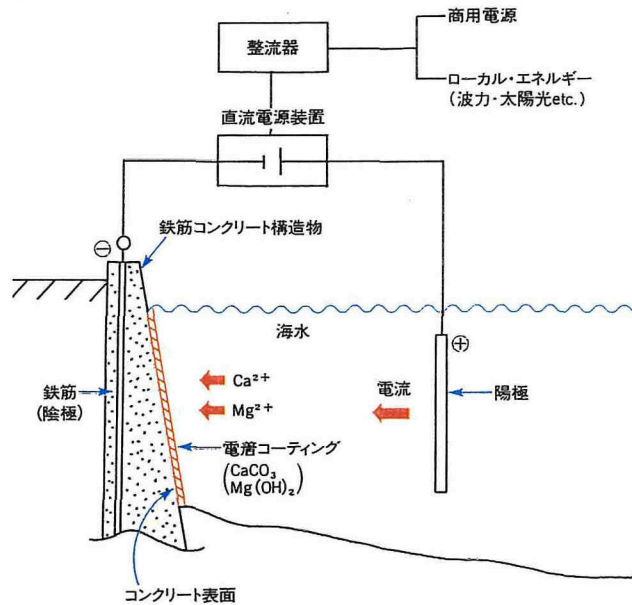


図-5. 10 コンクリート構造物への電着工法の概念図

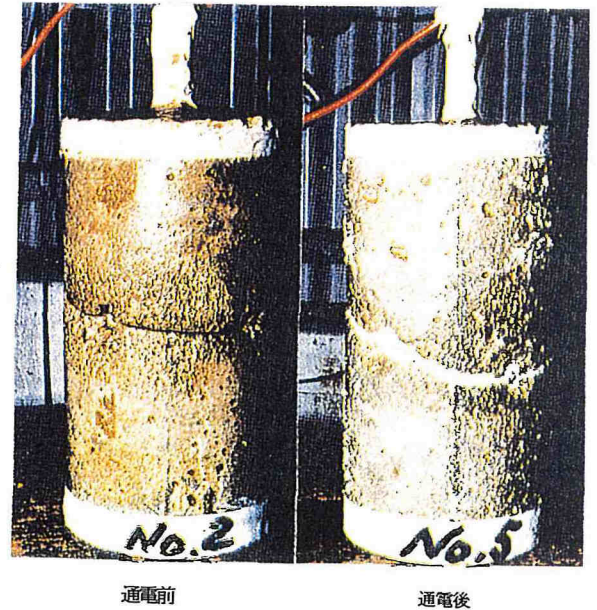


写真-5. 4 電着物の析出、充填状況

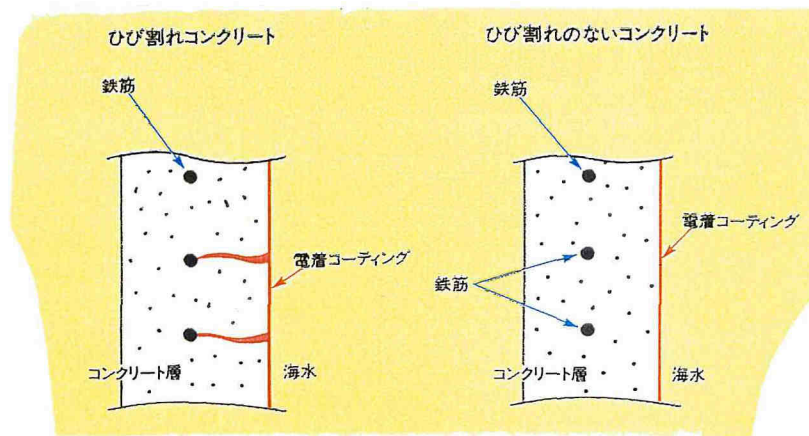


図-5. 11 電着物の析出および充填

a) 現地試験の場所および対象構造物

試験対象構造物は松山港の大可賀埠頭2号岸壁のコンクリートケーソンである。図-5. 12は対象岸壁構造物の位置図と断面図である。構造は鉄筋コンクリート製で幅4m×奥行き8m×高さ9mのものが14個設置されている。その中のケーソン No. 13を用いて試験を実施した。

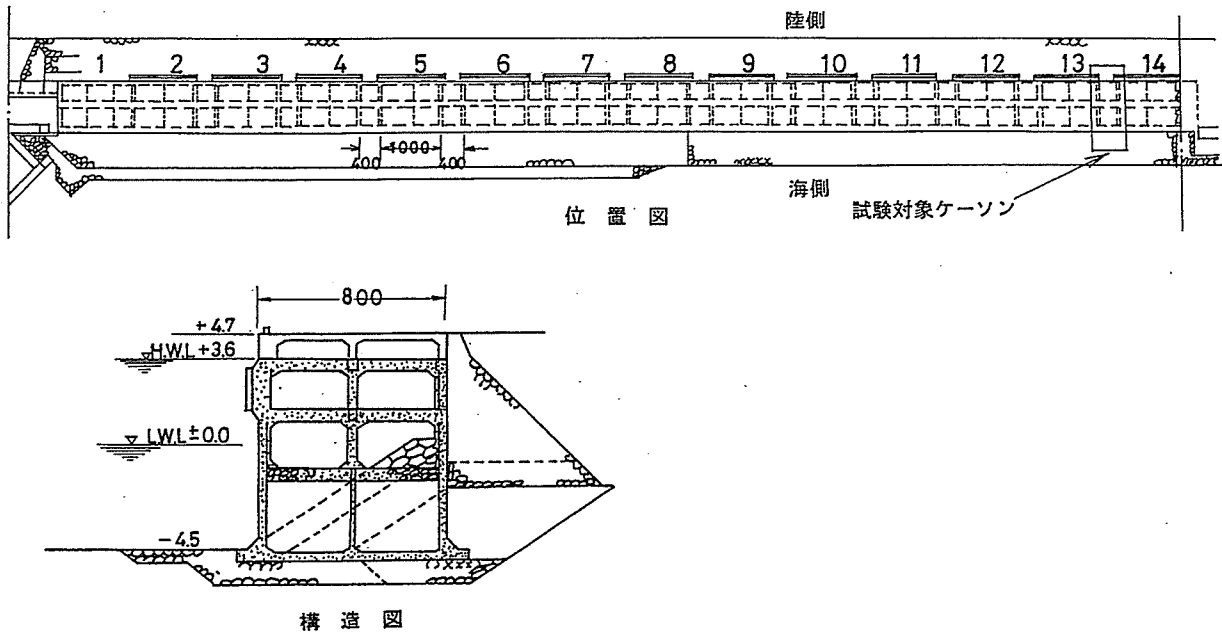


図-5. 12 試験対象構造物

この岸壁の竣工は昭和30年代後半で試験実施時まで約25年を経過している。上部工スラブ部分は塩害による剥離箇所が認められた。

b) 実構造物の事前調査

試験前に構造物の外観調査を行った。まず、コンクリート表面に付着している付着物の除去を行いコンクリート表面に発生しているひびわれの有無および発生状況等の調査と同時に通電前のコンクリート表面の写真撮影を行った。調査結果より対象ケーソンの劣化度の判定を劣化防止・補修マニュアル(案)⁴⁾の劣化基準によって判定した。その結果、上から二段目の梁の下面(+1.0m)を境界として、それより上を水上部、下を水中部とすると表-5. 6のように判定された。

表-5. 6 No.13ケーソンの劣化度の判定

項目	劣化度	
	水上部	水中部
鉄筋の腐食	IV 浮き錆多し	II 一部に錆汁が見られる
ひびわれ	IV ひびわれ幅数 mm 以上のひび割れ多し	II ひびわれ多し
かぶりコンクリートの剥離、剥落	III 一部に剥離、剥落が見られる	II 一部に浮きがみられる

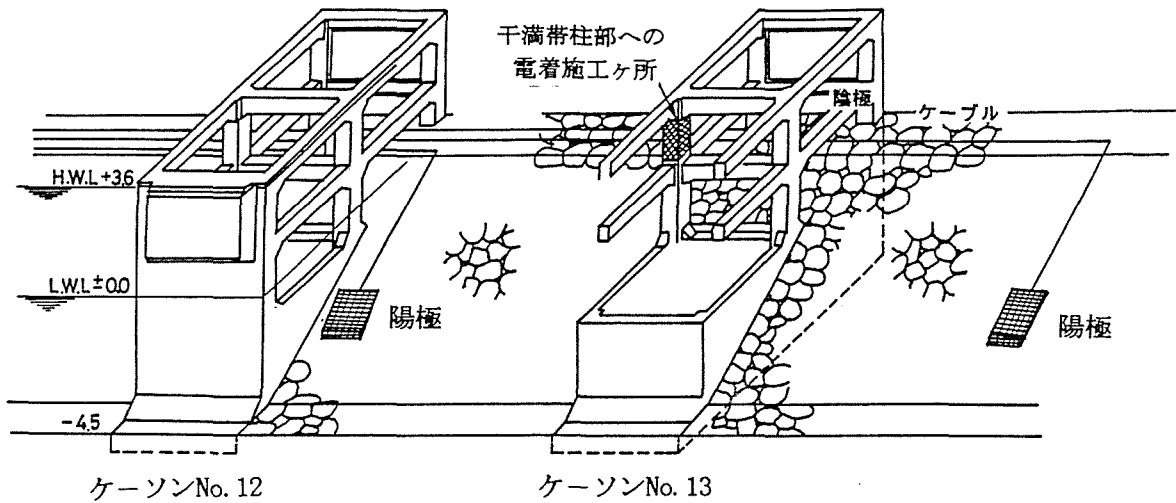


図-5. 13 試験対象ケーソン構造図および陽極配置概略図

すなわち、水上部では鉄筋の腐食、ひびわれは劣化度IV、かぶりコンクリートの剥離・剥落は劣化度IIIであった。水中部ではいずれも劣化度IIであった。また、干満帯に位置する柱および壁との接合付近の梁にひびわれが多く見られ、ひびわれ部には錆汁が見られた。通電前にはコンクリートのコアを採取し透水試験と塩化物イオン量の分析を行った。

c) 通電方法

図-5. 13は試験対象ケーソン構造図および陽極配置概略図である。陽極は不溶性の酸化膜を有するメッシュ状のチタン板を対象ケーソンの両サイド（距離約9m、水深約-3m）の位置と干満帯の柱部の周囲4面に取り付けた。試験期間中の電流密度はおおむねコンクリート表面積当たり $0.5A/m^2$ となる時の電圧8.6Vとした。図-5. 14に示すように干満帯部の柱は北側の柱1本について実施した。干満帯の補修部が干潮時にも常時海水に接するように水中ポンプで海水を供給する

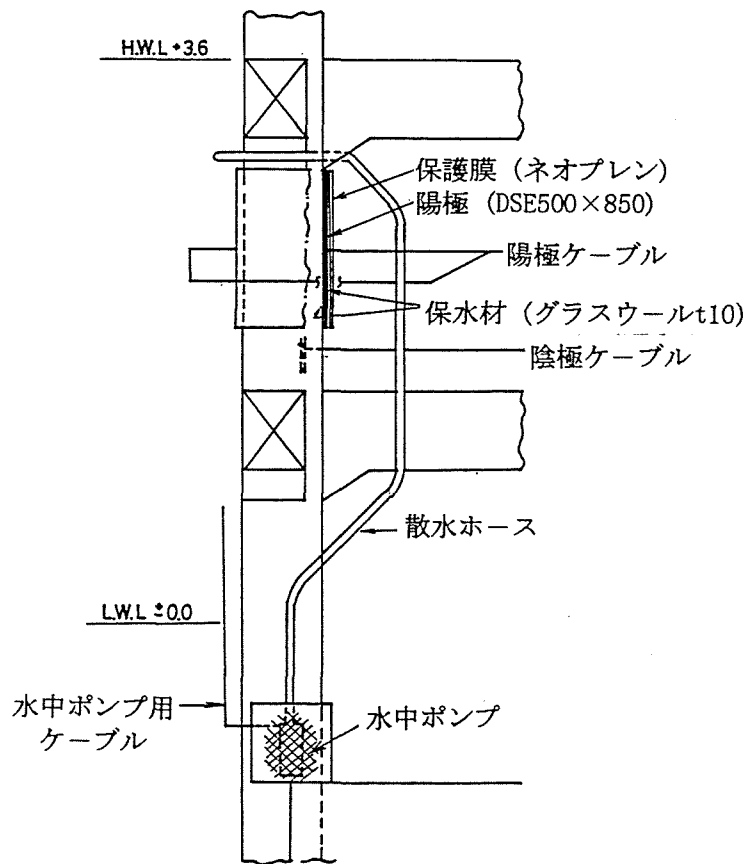


図-5. 14 干満帯柱部への電着施工要領図

試験期間中の電流密度はおおむねコンクリート表面積当たり $0.5A/m^2$ となる時の電圧8.6Vとした。図-5. 14に示すように干満帯部の柱は北側の柱1本について実施した。干満帯の補修部が干潮時にも常時海水に接するように水中ポンプで海水を供給する

設備を取り付けた。施工後の干満帯部の柱は常時海水で浸漬されているので定電流制御（電流一定）による通電を行った。実際の設定値は柱4面の総面積約1.74m²に対して電流密度0.5A/m²（30日間）、0.7A/m²（95日間）を採用した。

d) 調査および測定項目

実構造物への現地試験では、以下に示すイ～ニの項目を調査、測定した。

イ. 電着物の析出状況調査

ケーソン本体における電着物の析出状況の経時的な変化を調査するために、約1月半～2ヶ月ごとに主として目視観察を行い、また、カメラやビデオによる撮影を行った。ケーソン本体の水中部、干満帯部のコンクリート表面の正常な部分とひびわれ等の劣化部分からコンクリート表面に析出した電着物をケレンによって剥離しノギスで析出厚さを測定した。干満帯の柱は約1月半～2ヶ月ごとに電着物の保護カバーを取り外して柱の表面の状況を観察した。

ロ. 電着物の組成分析

通電期間中と通電終了時にケーソン本体および干満帯の柱に析出した電着物を採取し組成分析を行った。

ハ. コンクリートの透水試験

通電によるコンクリート表面のコーティングおよびコンクリート中の空隙充填効果を把握するために、コンクリートのコアを採取して透水試験を行った。透水試験用供試体は構造物から採取した直径10cmの表面から2cmまでのコンクリート切片（φ10cmの円板状）である。試験方法は圧力水を加えてその浸透流量を測定して透水性を求める方法（アウトプット法、図-5.15）によった。透水係数は次式から計算した。

$$K = w \cdot \frac{h}{p} \cdot \frac{Q}{A} \quad \dots (11)$$

ここに、K = 透水係数 (cm/s)

w = 水の単位体積重量 (kg/cm³)

h = 供試体の高さ・厚さ (cm)

p = 水圧 (kgf/cm²)

Q = 流出量 (ml/s)

A = 供試体の断面積 (cm²)

ニ. コンクリートの塩化物イオン量

鉄筋腐食の原因となる塩化物イオンがコンクリート内部にどのように分布しているかを把握する目的で、通電前と通電終了後にコアを採取し塩化物イオン量を測定した。塩化物イオン量の分析は（社）日本コンクリート工学協会から提案さ

れている「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の分析方法」に準拠して行った。

各種試験のためのコンクリートコアの採取位置を図-5.16に示す。

(2) 試験期間中の電圧、電流量

表-5.7は通電条件および試験期間中の電圧、電流量、また、

図-5.17に潮位と電流密度の関係を示す。図-5.17に示すようにケーソン本体への電流密度は潮位によって変動し、干潮時には目標の電流密度より大きくなり満潮時には小さくなる傾向が認められた。これは予期しなかったことではあるが、満潮時になると海水に浸かるコンクリートの面積が大きくなったためと考えられる。干満帯の柱の電流密度は当初目標の $0.5A/m^2$ を満足していた。

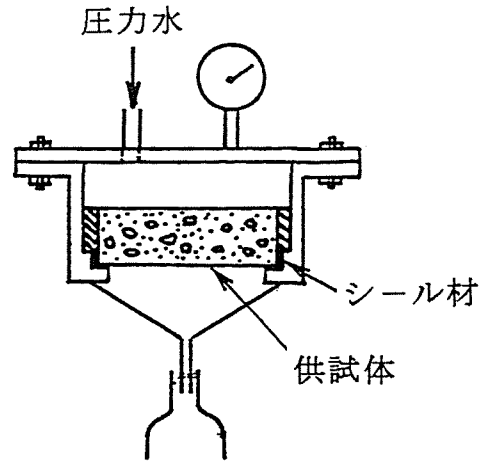


図-5.15 円盤型供試体を用いた透水試験 (アウトブット、外圧方式)

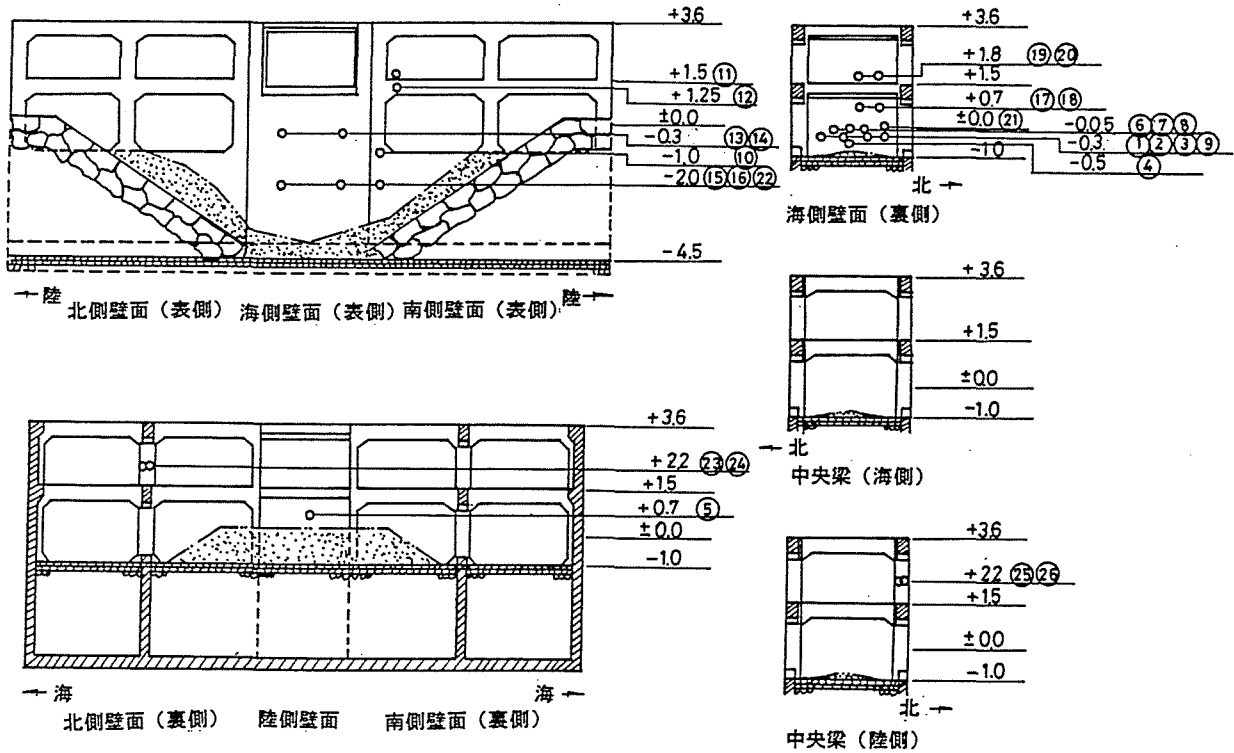


図-5.16 コンクリートコアの採取位置 (○数字箇所)

表-5. 7 通電条件および試験期間中の電圧、電流値の測定結果

項目	ケーソン本体	干満帯柱部		
目標電流密度	0.5A/m ²	0.5A/m ²	0.7A/m ²	
制御方法	電圧制御	電流制御		
設定値	8.6V *	0.85A **	1.20A ***	
測定結果	電圧	8.6±0.2V	3.9~10.3V	3.9~13.6V
	電流	35.5~54A	0.85A	1.2±0.02A
	通電日数	145日間	30日間	95日間

* 潮位+1.5mの時、コンクリート表面積93m²、0.5A/m²にするための電流値46.5Aの時の電圧値
 ** 柱周囲4面の総面積1.7m²、0.5×1.7=0.85A
 *** 柱周囲4面の総面積1.7m²、0.7×1.7=1.2A

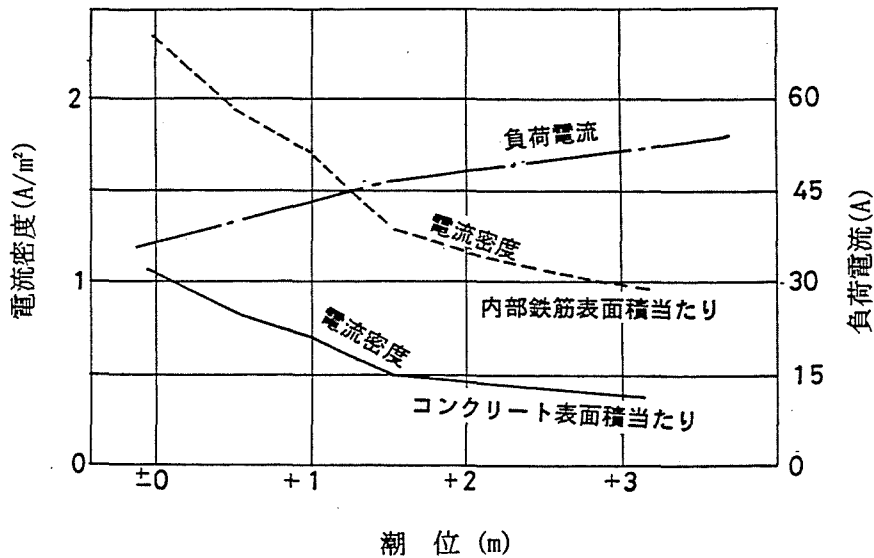


図-5. 17 ケーソン本体における潮位と電流密度の関係

(3) 電着物の析出状況

a) ケーソン本体正常部への析出状況

ケーソン本体正常部は通電3ヶ月後で-1m以下の海側壁面、陽極に面した南北壁面の表面に約1mmの膜状の電着物が確認された。通電5ヶ月後では陸側壁面+1.0m付近まで約1mmの電着物が認められるようになった。構造物全体への析出分布は、図-5. 18に示すように陽極に面した北側壁面表側、南側壁面表側（平均厚さ2mm）および海側壁面表側（平均厚さ1.5mm）に析出量が多い。一方、海側壁面裏側、陸側壁面および南北壁面の裏側への析出量は平均厚さ1mm以下で陽極の反対側

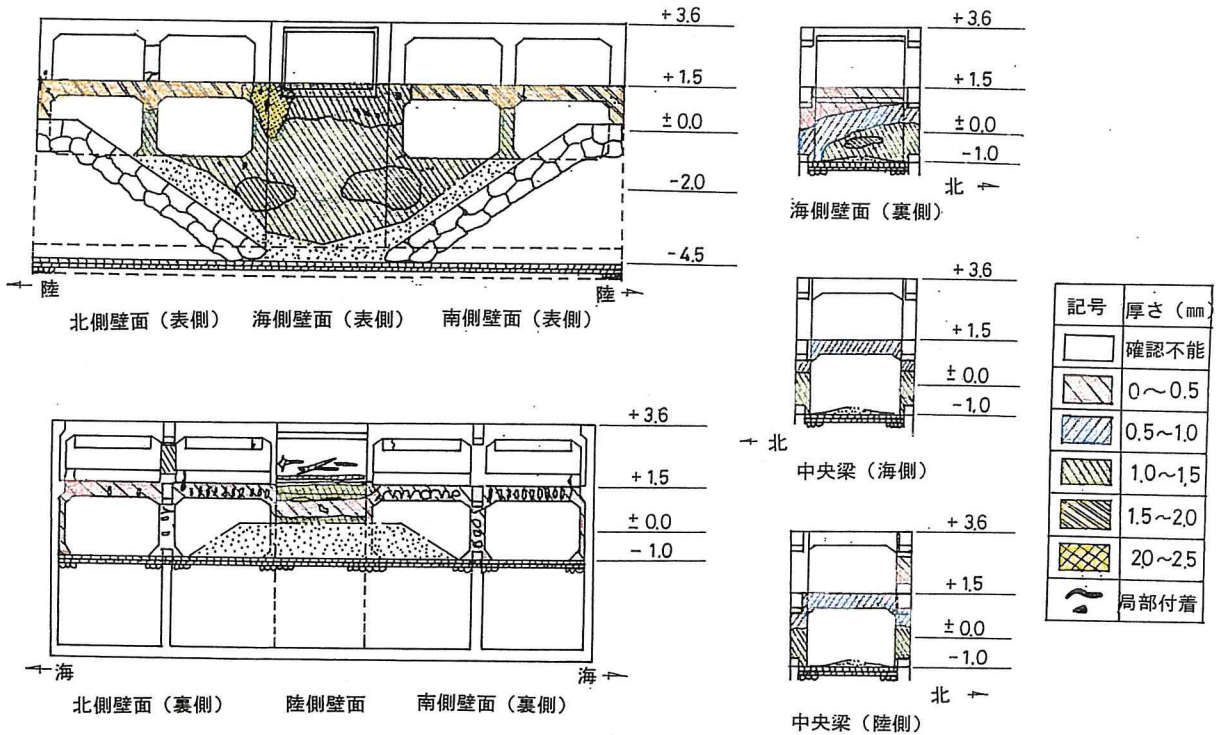


図-5. 18 ケーソンへの電着物の析出分布図 (通電5ヶ月)

には電着物の析出量が少なかった。

これは陽極の配置 (図-5. 13 参照) に影響されて、近い部分は析出量が多く離れるにしたがい少ない傾向がある。したがって、電流分布のバラツキを少なくするためには、5. 2でも述べたように対象構造物と陽極間が均等になるように検討する必要がある。

深さ方向の電着物の析出状況をみると水中部で析出量が多い。+1.5mを境に上の部分では析出量は急激に減少している。これは、潮位の変動による浸水時間 (通電時間) の差と考えられる。また、コンクリートの打ち継ぎ目の窪み (横方向) に電着物が析出する (写真-5. 5) ことが認められコンクリート構造物の不連続面の充填効果も高められる。



写真-5. 5 電着物の带状析出 (陸側壁面+1.5m、通電5ヶ月)

b) ケーソン本体ひびわれ部への析出状況

通電開始後1月半の比較的早い時期に、あらかじめ目視で確認されたひびわれ部のほかに当初はダイバー等の目視による劣化調査では確認されなかったひびわれ部にも電着物が析出し、通電後3～5ヶ月には厚さ3mm以上の電着物がひびわれ部を覆うように成長するのが確認された(写真-5.6)。このひびわれ部における電着物の析出箇所は水中部をはじめ+3m付近の干満帯上部にも見られた。このことから本技術は劣化の程度の把握にも利用が可能である。ひびわれ部には干満帯を含む広い範囲に比較的早い時期から電着物の析出が認められたが、これは、ひびわれ部はひびわれのない正常部に比べて陰極となる内部鉄筋までの電気抵抗が小さいので電流の通りが良かったためと考えられる。

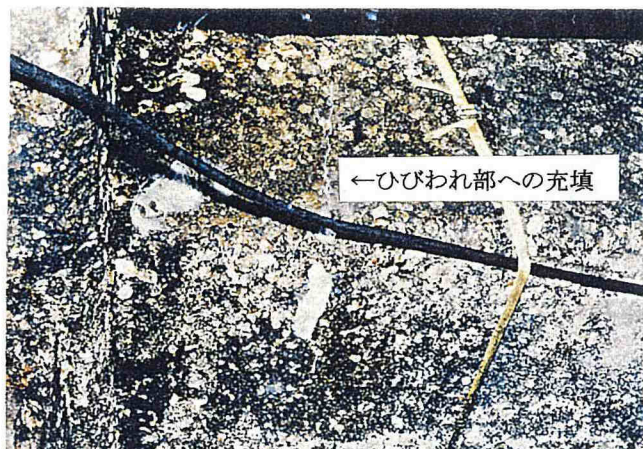


写真-5.6 ケーソン本体ひびわれ部への電着物の析出状況 (北側梁+1.5m)



写真-5.7 干満帯柱部への電着物の析出状況 (南側柱)

c) 干満帯の柱部への析出状況

陽極および保水材を干満帯の柱に巻き付けてポンプによって海水を補給しながら電着施工を行った結果、通電後1月半では電着物の析出は明瞭ではなかったが通電後3ヶ月では柱の表面に最大1mm程度の膜状の電着物が対象面積の40%程度の範囲で認められた。そして、通電後5ヶ月の調査では柱の表面に直接巻き付けた保水材をコンクリート表面に密着させるように電着物が析出していた。析出量は対象面積のほぼ全面にわたり厚さ1mm程度の比較的硬い電着物が確認された(写真-5.7)。

(4) 電着物の組成

表-5.8は電着物の組成分析結果であるが、ケーソン本体の正常部とひびわれ部を比較すると電着物の組成はひびわれ部の方が CaCO_3 が少ない反面 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ が

表-5.8 電着物の化学組成分析結果 (単位:重量%)

試料区分	ケーソン本体正常部 海側壁面表側 -2.0m	ケーソン本体ひび割れ部 北側中央梁 +1.5m		干満帯柱部 +2.2m
	通電5ヶ月	通電3ヶ月	通電5ヶ月	通電5ヶ月
CaCO ₃	53.6	8.49	17.3	68.5
Mg(OH) ₂	31.1	86.8	76.2	19.8
ig. loss	40.7	33.2	36.0	31.3
Ca/Mg比*	1.72	0.10	0.23	3.46

*Ca/Mg比とはCaCO₃/Mg(OH)₂比である。

表-5.9 電着物の組成例⁵⁾

各成分 の比率 (%)	電流密度 (A/m ²)			
	0.54	1.08	1.85	4.31
Na	0.72	0.85	0.78	1.03
Fe	3.78	3.46	2.60	2.12
Si	0.65	1.77	1.30	0.41
Cl	0.44	0.84	0.76	0.55
CO ₃	44.62	32.64	29.66	14.70
Ca	28.91	20.88	17.54	6.73
Mg	6.51	13.53	18.00	29.47
Sr	0.14	0.06	0.04	0.006
OH	8.37	18.18	23.55	38.52
Total	94.14	92.19	94.03	93.536

多く、CaCO₃/Mg(OH)₂比 (以下Ca/Mg比と呼ぶ) が小さい。ケーソン本体の正常部および干満帯柱部に析出したCa/Mg比は1.7~3.5であるのに対し、ひびわれ部のCa/Mg比は0.2と小さい。Ca/Mg比が場所によって変化するのは、CaCO₃はpH8~9以上、Mg(OH)₂はpH9~10以上で析出するが、高い電流密度で通電するとコンクリート表面のpHが増加しMg(OH)₂の析出する割合が多くなるためである³⁾。

Humble⁵⁾ は鋼材に付着する電着物の組成について表-5.9に示すように電流密度が大きくなるほどMgやOHの成分が多く、逆に電流密度が少ないとCaやCO₃の成分が多く生成することを示している。すなわち、ひびわれ部ではひびわれによって電気抵抗が減少し電流密度が正常部に比べて高くなり、その結果Ca/Mg比の小さい電着物が生成したものと考えられる。以上のことから、Ca/Mg比の大きい電着物を析出させるには電流密度を低く抑えるよう電流制御を行うことが必要であると

いえる。

(5) コンクリートの透水性

表-5. 10は表面から2cmまでのコンクリートの透水試験結果であるが通電前の透水係数は約 1×10^{-9} cm/sであった。これに対して、3ヶ月通電後では 1.25×10^{-10} cm/sと約1/8に、5ヶ月通電後では 2.68×10^{-11} cm/sと約1/40にそれぞれ透水性が小さくなっていった。通電前、通電3ヶ月、通電5ヶ月の透水係数を比較すると図-5. 19のようになる。通電5ヶ月の深度別の透水係数を比較すると

表-5. 10 透水試験結果

区分	コア採取箇所	透水係数 (cm/s)
通電前	海側壁面裏側-0.3m(1)	1.08×10^{-9}
	海側壁面裏側-0.3m(2)	1.18×10^{-9}
	海側壁面裏側-0.3m(3)	7.04×10^{-10}
	平均値	9.88×10^{-10}
通電3ヶ月後	海側壁面裏側-0.05m(6)	9.65×10^{-11}
	海側壁面裏側-0.05m(7)	1.05×10^{-10}
	海側壁面裏側-0.05m(8)	1.73×10^{-10}
	平均値	1.25×10^{-10}
通電5ヶ月後	海側壁面表側-0.3m(13)	3.22×10^{-11}
	海側壁面表側-0.3m(14)	2.13×10^{-11}
	平均値	2.68×10^{-11}
	海側壁面裏側+0.7m(17)	4.57×10^{-11}
	海側壁面裏側+0.7m(18)	2.03×10^{-11}
	平均値	3.30×10^{-11}
	海側壁面裏側+1.8m(19)	5.47×10^{-11}
	海側壁面裏側+1.8m(20)	8.85×10^{-11}
	平均値	7.16×10^{-11}
	干満帯柱部+2.2m(23)	3.73×10^{-11}
干満帯柱部+2.2m(25)	6.80×10^{-11}	
平均値	5.27×10^{-11}	

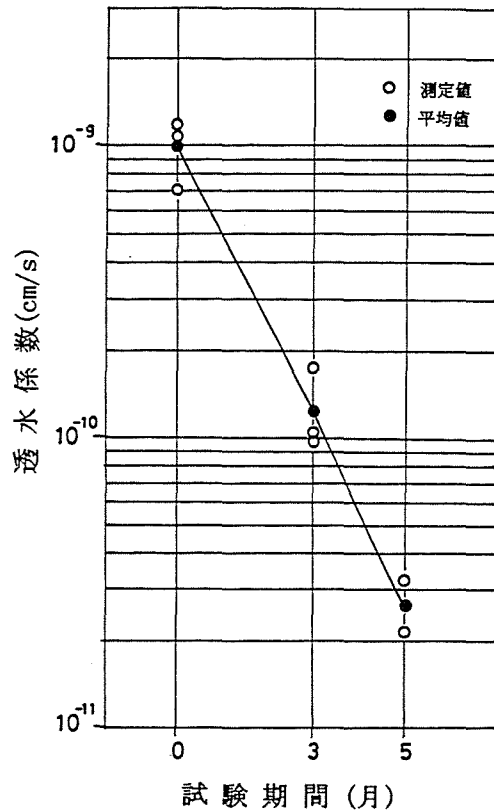


図-5. 19 通電前、通電後のコンクリートの透水係数

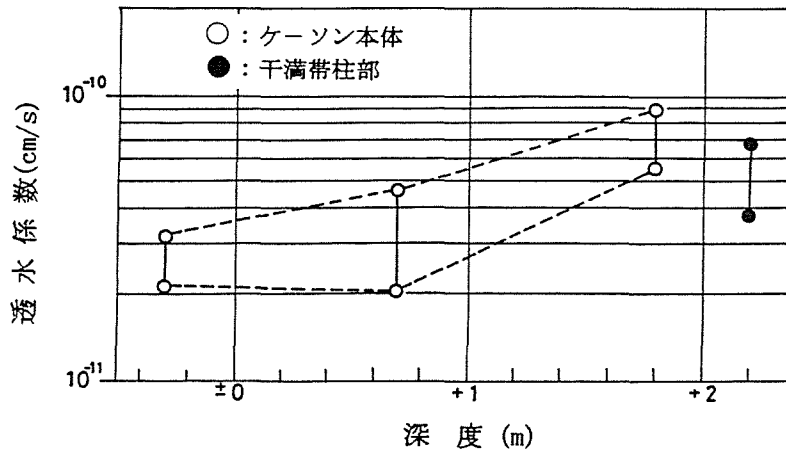


図-5. 20 潮位とコンクリートの透水係数の関係 (通電5ヶ月)

図-5. 20のようになる。+1.8mの箇所と-0.3mの箇所では-0.3mの方が透水係数が小さいが、これは海水の浸漬時間の違いによる電着物の析出量の差と考えられる。一般にコンクリートの透水係数の大小を判断するものに表-5. 11や表-5. 12に示す値が報告^{6,7)}されているが、表-5. 10によると-0.3mの海側壁面から採取した通電前のコンクリートの透水係数は約 1×10^{-9} cm/sであったので、この透水性は普通にランクされ、表-5. 12でみるとスリップフォーム法で気乾状態の場合あるいは高品質のコンクリートの中間程度である。これに対して3ヶ月通電後では 1.25×10^{-10} cm/sと約1/8に、5ヶ月通電の場合には 2.68×10^{-11} cm/sと約1/40に透水性が低減しているので、表-5. 12でみると高品質コンクリートあるいは超高品質コンクリートに区分される。電着通電したコンクリートの切片を回収して細孔径分布を調べると、コンクリート内部(コンクリート表面~5mm)では50%細孔径が430Å程度で全空隙量が $92 \text{ mm}^3/\text{g}$ に対して電着物そのものの50%細孔径は150Å、全空隙量が $70 \text{ mm}^3/\text{g}$ と小さいことから、透水性の低減は主にコンクリート表面に析出した電着物によるものと考えられる。

表-5. 11 コンクリートの透水係数代表例(1)⁶⁾

コンクリートの透水性	透水係数 (cm/s)
低い(Low)	$< 10^{-10}$
普通(Average)	$10^{-10} \sim 10^{-8}$
高い(High)	$> 10^{-8}$

表-5. 12 コンクリートの透水係数代表例(2)⁷⁾

コンクリートの区分	透水係数 (cm/s)
スリップフォーム法によるコンクリートで気乾状態の場合	1×10^{-8}
高品質のコンクリート	1×10^{-10}
超高品質のコンクリートで湿潤養生された場合	1×10^{-12}

また、表-5. 10で干満帯の透水係数は常時海水に浸漬している箇所に比べると低下率は小さいものの、浸漬時間の短い干満帯でも透水係数の低減が認められ、たとえば、+1.8m付近の透水係数は通電5ヶ月後には $7.16 \times 10^{-11} \text{cm/s}$ となり、LWL付近(-0.3m)の $2.68 \times 10^{-11} \text{cm/s}$ に比べるとやや大きいものの、通電前の $1 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ に対して1/14となり透水性の改善が認められた。ポンプで常時海水を供給した干満帯(+2.2m)の柱の透水係数は、海水供給に伴う電着コーティングの効果がみられ $5.3 \times 10^{-11} \text{cm/s}$ と透水性が改善されたものと考えられる。コンクリート表面に電着層が形成されると、コンクリートの透水係数は低下することが明らかになった。

(6) コンクリート中の塩化物イオン量

図-5. 21はコンクリート中の塩化物イオン量の分析結果である。通電前の塩化物イオン量はコンクリートの表層部において最も多く、深くなるに従い減少していることから建設後外部から多量の塩化物イオンが浸入したことがわかる。鉄筋付近の塩化物イオン量は通電3ヶ月で約14%の減少が見られ、通電5ヶ月では約50%に減少した。塩化物イオン量が減少する理由はコンクリート中鉄筋に通電を行うとNaイオンおよびKイオンの陽イオンはカソードとなるコンクリート中の鉄筋の方向に移動し、Clイオンの陰イオンは陽極の方向に移動するためである。このような傾向は脱塩処理による方法⁸⁾でも確認されている。

したがって、電着工法はコンクリート中へ浸入した塩化物イオンを取り除く効果があり、コンクリート中の塩化物イオンの除去方法としても利用できるものと考えられる。

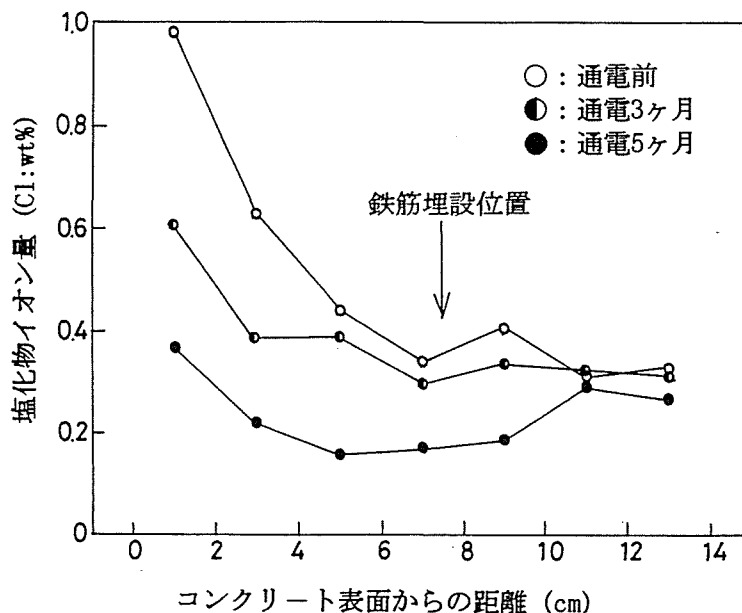


図-5. 21 コンクリート中の塩化物イオン量の分布状況

(7) 鉄筋の付着強度

コンクリート中の鉄筋へ比較的大きい電流を流すと付着強度が低下するという報告⁹⁾がある。電着通電が鉄筋とコンクリートとの付着強度に及ぼす影響を調べるために、供試体を作成し内部の鉄筋を陰極として所定の電流密度で所定期間通電を行った後に付着強度試験を実施し、積算電流量と付着強度との関係を検討した。

図-5. 22に示すように直径15cm、高さ15cmの供試体の中心に実構造物をシミュレートする意味から、JIS G 3112「コンクリート用棒鋼」に定める異形棒鋼SD30、D16を埋設したものを供試体とした。なお、松山港大可賀埠頭ケーソンの鉄筋とコンクリートとの表面積比は0.46なので、これに合わせてとともに露出している鉄筋へ電流が流入しないように、図に示すように供試体側面のうち幅2.7cm、高さ15cm(4箇所)を除く全てのコンクリート面および鉄筋の露出表面にエポキシ樹脂塗装(2回塗り)を施した。コンクリートの示方配合を表-5. 13に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、骨材はアルカリ骨材反応性試験(モルタルバー法)の結果、無害と判定されたものを用いた。なお、コンクリート中へNaClを添加したものと無添加のものを作成し、添加の有無と付着強度との関係についても検討した。

通電は常時海水が交換できる水槽に供試体を浸漬し、不溶性陽極(チタン材)を対極として実施した。表-5. 14に示すように供試体へ流す設定電流密度は0.5A/m²、0.75A/m²、1.0A/m²、2.0A/m²の4種類とし、通電期間は約60~120日間で各供試体の電流密度が積算電流量の値になるまで通電

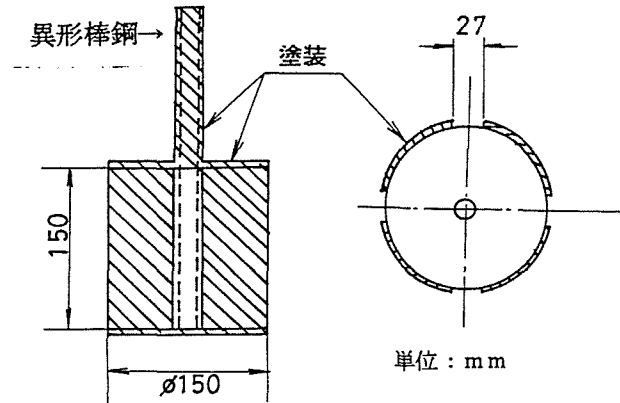


図-5. 22 付着強度試験に使用した供試体の形状寸法

表-5. 13 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 Sa (%)
20	8±2	5±1	55	44.8
単 位 量 (kg/m ³)				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤(cc) 減水剤
174	317	783	983	CX0.25%792 ホヅリスNo8imp
測 定 結 果				
スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		
8.6*	4.3*	428*		
7.9**	4.7**	428**		

* NaCl添加なし。
** NaCl3kg/m³添加。

した。

付着強度試験は、(社)土木学会から提案されている規準「引き抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」JSCE-G-503-1988. に準じて行った。

付着強度は次式により求めた。

$$\tau = \frac{P}{\pi D l} \dots (12)$$

ここに、

τ : 付着強度 (kgf/cm²)

P : 最大引っ張り荷重 (kgf)

D : 鉄筋の直径 (公称直径 : 1.59cm)

l : 鉄筋の埋め込み長さ (cm)

表-5. 14に鉄筋の単位表面積当たりの積算電流量およびそのときの付着強度を示す。

NaCl無添加の場合、0.5~2.0A/m²の設定電流密度で積算電流量が1,500~6,400A·hr/m²と変化させて試験した。その結果、たとえば、無通電の場合は表-5. 14から83kgf/cm² (供試体3体の最小値)の付着強度が確保できると考えられる。しかし、0.5~2.0A/m²と設定電流密度を大きくした場合に、得られたデータの最小値と比較してみると付着強度は約76、71、65、68kgf/cm²と低下傾向を示した。すなわち、0.5~2.0A/m²の電流密度で積算電流量が1,600~6,400A·hr/m²の場合には無通電に対して10~20%程度の低下が認められる。

一方、NaClを添加した場合は設定電流密度0.5~0.75A/m²で積算電流量が1,600~4,600A·hr/m²と変化させて付着強度を測定した結果、無通電の場合は65kgf/cm² (供試体5体の最小値)、0.5 A/m²では60kgf/cm²、0.75A/m²の場合には66kgf/cm²となり、無通電に対し10%程度低下するものがみられる。

大きい電流を流した場合の付着強度低下の原因は、鉄筋周辺にアルカリ金属イオン (NaイオンやKイオン) が集積するためペーストの軟化が起こり、軟化部分のペーストの結晶組織が細かく破壊され、100Å以下のゲル細孔が減少し、これより孔径の大きい細孔径が増大するためといわれている¹⁰⁾。写真-5. 8に無通電および電流密度2.0A/m² (積算電流量6,383A·hr/m²)の付着強度試験後の鉄筋周辺のコンクリートの状況を示す。無通電では変色は見られないが電流密度2.0A/m²では鉄筋周辺に変色が認められ、アルカリ金属イオンの集積のため軟化が起こっていると考えられる。

既往の付着強度に関する研究では、石井¹¹⁾は0.8A/m²の電流密度で積算電流量21,000A·hr/m²では20%の低下が認められたと報告している。黒井⁹⁾は3A/m²の電流

表-5. 14 付着強度試験一覧
および付着強度試験結果

供試体No	設定電流密度	積算電流量	付着強度		NaClの添加、無添加
	(A/m ²)	(A·hr/m ²)	(kgf/cm ²)		
1	0	0	93.1	平均	NaCl 無添加
2	0	0	83.2		
3	0	0	88.1		
4	0.5	1,596	76.7		
5	0.5	3,061	78.8		
6	0.75	2,394	71.5		
7	0.75	4,592	74.8		
8	1.0	1,517	85.3		
9	1.0	2,250	65.2		
10	1.0	3,192	75.6		
11	1.0	6,122	77.3		
12	2.0	3,035	94.9		
13	2.0	4,500	80.7		
14	2.0	6,383	68.9		
15	0	0	65.5	平均	NaCl 3kg/m ³ 添加
16	0	0	77.2		
17	0	0	80.9		
18	0	0	76.1		
19	0	0	76.1		
20	0.5	1,596	60.0		
21	0.5	1,596	63.9		
22	0.5	3,061	93.1		
23	0.75	1,570	69.9		
24	0.75	1,570	67.2		
25	0.75	2,394	66.3		
26	0.75	2,394	74.5		
27	0.75	4,592	84.3		

密度で積算電流量600A·hr/m²では20%低下、積算電流量2,000A·hr/m²では25%低下の報告がある。さらに、上田等^{1,2)}は5A/m²の電流密度で積算電流量6,720A·hr/m²では20%低下すると報告している。いずれの研究でもコンクリート中の鉄筋に外部から電流を流すことにより付着強度は低下することが明らかにされている。その

ため、電着工法での適用電流密度は0.5~0.75A/m²程度であるが、この範囲の電流密度を適用して積算電流量4,600A・hr/m²の場合には、本試験結果からみても10%程度の付着強度の低下のあることを考慮しておく必要がある。なお、本試験では大きい電流と付着強度との関係およびNaClの添加の影響に関する資料は少なく明確な傾向は得られていないので、この事項に関しては今後の課題と考えている。また、4.3(7)で示したように反応性骨材を含むコンクリートの場合には通電に伴う鉄筋近傍へのアルカリ金属イオンの集積およびOH⁻の生成によりアルカリ骨材反応を促進することも懸念されるので注意が必要である¹³⁾。



無通電



電流密度2.0A/m²
(積算電流量：6,383A・hr/m²)

写真-5.8 付着強度試験後の鉄筋周辺の状況

(8) 接着強度

コンクリート表面に析出した電着物の接着力を測定するために幅70cm、長さ100cm、高さ20cmの接着力試験用供試体を製作し電流密度0.65A/m²の条件で96日間通電を行い通電後の接着力試験を実施した。なお、鉄筋はSD30、D16を用い100mmメッシュとした。通電停止後1年間無通電のまま海水中に浸漬したものを回収して接着力試験に供した。接着力試験は建研式接着力試験器を用い供試体の6地点で行った。また、析出した電着物の組成分析を行った。接着力はアタッチメントがコンクリートから剥離した時の圧力(剥離数値)を読み取り次式によって1cm²当たりの接着力を求めた。

$$\text{接着力 (kgf/cm}^2\text{)} = \frac{\text{剥離数値 (kgf)}}{\text{アタッチメントの面積 (cm}^2\text{)}} \quad \dots(13)$$

試験結果を表-5.15に示す。接着強度の平均値は26.5kgf/cm²であった。この値は通常のコンクリート表層部の引っ張り強度にほぼ相当している¹⁴⁾。また、電着物とコンクリート表層部との破断状況も図-5.23および表-5.15に示す。これよりわかるとおり、表層部内で剥離している面積の割合が45~87%であった。さらに表-5.16に示す化学組成の分析結果によるとCa/Mg比が1.44および1.97であった。これより本試験で適用した電流密度の0.65A/m²は必要な硬さをもつ電着物を析出するためにほぼ適当な値と考えられる。

測定点No.	A	B	C	D	E	F
破断状況						

←コンクリート表面と電着物間の剥離
 ←コンクリート表層部内での剥離

図-5. 23 接着力試験における破断状況

表-5. 15 電着物とコンクリートとの接着力試験結果

測定点No	剥離数値 (kgf)	接着力 (kgf/cm ²)	破断*の割合 (%)
A	445	27.8	45
B	445	27.8	44
C	480	30.0	70
D	420	26.3	67
E	450	28.1	87
F	300	18.8	73
平均	423	26.5	—

* コンクリート表層部内での破断の割合を示す。

表-5. 16 電着物の化学組成分析結果

分析項目	分析(1)*	分析(2)**
ig. loss	33.3%	40.6%
CaCO ₃	60.7%	52.7%
Mg(OH) ₂	30.8%	36.3%
Ca/Mg	1.97	1.44

* : 通電停止時に分析

** : 通電停止後1年間海水中へ浸漬後分析

5. 4 結語

鋼管杭の防食法としての電着工法の適用性について観測栈橋で実施し、また、電着工法によるコンクリート構造物の補修効果や適用性について実構造物試験および室内試験を実施し、その結果以下の事項が明らかとなり、電着工法が実構造物へ適用できる見通しを得ることができた。

鋼構造物の現地試験では以下の事項が明らかとなった。

- (1) 一定電流を長期間流すことにより鋼材表面に電着物が析出するが、鋼管杭に1~4A/m²の電流を3.6ヶ月間流したところ電着物はHHWL(+2.0m)から海底面(-2.2m)の範囲にかけて析出し、LWL付近に最も厚く付着

(厚さ10～15mm)し、陽極と対向した側が厚く裏側ではやや薄い傾向がみられた。

- (2) 電着物の主成分は CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ および SiO_2 で、そのほか Al_2O_3 や Fe_2O_3 も含まれていた。また、電着層は砂粒、海藻および貝類を巻き込んで形成されることが認められた。電着物の硬さは主要成分によって異なり流す電流密度が大きければ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の多い柔らかい電着物が析出し、小さければ CaCO_3 の多い硬い電着物が析出することが認められた。
- (3) 金網を巻き付けた鋼管杭の電着層には剥離等の損傷は見られなかったが、金網を巻いていない鋼管杭の海面近傍において電着層が一部剥離したところが認められた。電着工法を実施する際には金網を巻き付ける等の対策が有効であると考えられる。
- (4) 通電停止1年7ヶ月後に電着工法適用鋼管杭の肉厚を測定した結果、肉厚の減少はみられなかったことから、電着工法の鋼材に対する防食効果が認められた。

コンクリート構造物への現地試験では以下の事項が明らかとなった。

- (5) 鉄筋コンクリート構造物に $0.5\sim 0.7\text{A}/\text{m}^2$ の電流を5ヶ月間流した結果、コンクリート表面に電着物が析出し、ひびわれ部に充填することが確認された。ケーソン本体の陽極に近い部分には平均 $1\sim 2\text{mm}$ の厚さで析出したが、陽極から遠い部分での析出は平均 1mm 以下であった。この電着物の析出厚さの相違は陽極の配置による極間距離の差によるものと考えられる。
- (6) ひびわれ部には正常部に比べ通電後の早い時期から電着物が認められたが、電流密度が大きかったため、析出した電着物は $\text{Mg}(\text{OH})_2$ が多く正常部よりも力学的強度は小さかった。
- (7) コンクリート表面に析出した電着物によりコンクリートの透水性が低減すること、鉄筋周辺の塩化物イオン量が減少することが明らかとなった。
- (8) 電着物とコンクリート表層部との接着力は通常のコンクリート表層部の引っ張り強度とほぼ同程度であった。
- (9) 電着工法で適用する範囲の電流密度を長期間通電すると鉄筋とコンクリートとの付着強度が10%程度低下がみられたので電流密度の設定には十分留意する必要があるといえる。

参考文献

- 1) 横田 優、浮田和明、熊田 誠：電着技術を利用したコンクリート構造物の防食および補修法について、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、V-233、pp504～505、1987。
- 2) 重松俊一、横田 優、熊田 誠、三浦建蔵、佐々木晴敏：電着技術を利用

- した鉄筋コンクリート構造物の防食と補修、第34回腐食防食討論会予稿集、C-308、pp223～226、1987.
- 3) W. H. Hartt, C. H. Culberson and S. W. Smith : Calcareous Deposits on Metal Surfaces in Seawater-A Critical Review, Corrosion, Vol. 40, No. 11, pp609～618, 1984.
 - 4) (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) 、 p136、1987.
 - 5) H. A. Humble: Corrosion, Vol. 4, No. 7, p358、1948.
 - 6) Report of Concrete Society Working Party Final draft: Permeability Testing of Site Concrete - A Review of Methods and Experience, Permeability of Concrete and its control, Paper for a one-day Conference, London, 1985.
 - 7) R. D. Browne: Mechanisms of Corrosion of Steel in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures. ACI SP-65, pp169～204, 1980.
 - 8) 芦田公伸、石橋孝一 : 電気化学的補修法によるコンクリート中鉄筋の状態変化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 1、pp823～828、1994.
 - 9) 黒井登起雄 : ペーストの軟化に起因する鉄筋コンクリートの付着強度特性、第43回セメント技術講演集、pp796～801、1989.
 - 10) 黒井登起雄 : 電流作用を受けた硬化ペーストの諸特性、第44回セメント技術大会講演集、pp846～851、1990.
 - 11) 石井浩司 : 学位論文 (早稲田大学) 、プレテンション方式プレストレストコンクリート部材への電気防食の適用に関する研究、p75、1996.
 - 12) 上田隆雄、井上 普、宮川豊章、藤井 学、芦田公伸 : デザリネーションが鉄筋の付着挙動に与える影響、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、pp270～271、1993.
 - 13) 西林新蔵、林 昭富、王 鉄成、鎌田隆志 : アルカリ骨材反応に及ぼす電流場の影響に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 14、No. 1、pp201～206、1992.
 - 14) 笠井芳夫、長野基司、佐藤孝一、菅 一雅 : 表層部コンクリートの品質判定方法に関する研究、第11回コンクリート工学年次論文報告集、pp177～182、1989.

第6章 結論

本研究では、海洋および港湾構造物の腐食を現地観測により調査し、腐食を防止するための対策法として電気化学的な原理を用いた防食および補修法について現状の課題として提起されている事項について検討した。

鋼構造物の電気防食で取り上げた事項は、①汚染海域と清浄海域とに区分する方法の提案、②汚染海域、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、③波浪海域の波高と電位および電流の関係、被覆防食と電気防食との併用効果およびサンドエロージョンに対する電気防食の防食効果等である。

コンクリート構造物では、①環境要因が電位および電流へ及ぼす影響、②コンクリート中鉄筋の腐食程度と適切な防食電流密度の検討、を取り上げ、供試体による野外試験を実施した。

さらに、防食および補修法として電着工法に着目し鋼製およびコンクリート製の実構造物において試験を行い、その適用性を検討した。

本研究で得られた主要な結果を以下にとりまとめる。

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においては、以下の事項を明らかにした。

(1) 水質と防食電流密度では、電気防食調査から、水質と防食電流密度との関係について検討し電気防食の汚染海域と清浄海域とに区分する方法を提案した。

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。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100mA/m²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120~150mA/m²を必要とすることを示した。

(2) 汚染海域における深さ方向の防食電流密度については、汚染海域、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。

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。さらに、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30mA/m²必要であるが、それよりも深い部分では10mA/m²で防食可能であることを示した。

(3) 波浪海域での電気防食試験では、波浪海域の波高と電流、電位の関係、電気防食と被覆防食の併用効果およびサンドエロージョンの防食効果について検討

した。

まず、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。しかし、干満帯を被覆防食して電気防食と併用すると、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。

つぎに、海底面付近のサンドエロージョンに対する防食効果については不明な点が多く明らかにされていなかったが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。

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。

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においては、以下の事項を明らかにした。

(1) **流電陽極方式の電気防食に及ぼす環境要因の影響**では、亜鉛シート陽極を用いた流電陽極方式の電気防食について、天候、温度、曝露環境条件等と電流、電位との関係を検討した。

電流および電位は温度および天候に影響され、電位変動は晴天では認められるが雨天では認められず、電流は温度の高い晴天では大きく雨天では小さいことが認められた。また、防食電流密度は冬季で小さく夏季において大きいことが認められた。これは温度が高いと亜鉛シート陽極が活性化し、流れる電流が増加するためと考えられる。安定した防食電流密度は海水シャワー環境では20mA/m²程度、陸上自然環境では15mA/m²程度であったので、陸上環境や海水が直接かかる環境への防食設計を行う際にはこれらの値を用いて陽極の寿命等を検討することができる。

(2) **コンクリート中鉄筋の防食電流密度**では、 A_a/A_c に対するマクロ腐食電流の傾向、電気防食（外部電源方式）のアノード部、カソード部へ流入する電流密度や分極量、および無防食供試体の腐食傾向について検討した。

マクロ腐食電流密度は A_a/A_c が小さい程大きく、その場合アノード部はカソード部に近い部分で大きな鉄筋腐食が生じることを明らかにした。大きなマクロ腐食が発生しているところへ電気防食を行うと、防食電流はカソード部に優先的に流入するため防食電流がマクロ腐食電流よりも小さいと防食効果が期待できないことを明らかにし、マクロ腐食電流を停止させるには8mA/m²程度の防食電流密度が必要であることを示した。

アノード部の分極量はカソード部に比べて小さく、カソード部で100mV以上の分極量を示してもアノード部では100mVを達成できない場合が認められた。そのため、アノード部で100mV以上の分極量を得るためには30mA/m²程度の電流密度が必要であることを示した。以上により、防食基準としては、新設および比較的新しい構造物には100mVの分極量でよいが、長期間経過して多量の塩化物イオンが浸入していると考えられる構造物では、300mVの分極量が必要であることを提案した。

第5章 電着工法に関する現地試験においては、以下の事項を明らかにした。

(1) 鋼構造物に対する現地試験では、鋼材表面への電着物の析出状況や鋼材に対する防食効果について調査し、実構造物への適用性を検討した。

鋼管杭に1~4A/m²の電流を3.6ヶ月間流したところ電着物はHHWL(+2.0m)から海底面(-2.2m)の範囲にかけて析出し、LWL付近に最も厚く付着(厚さ10~15mm)し、陽極と対向した側では厚く裏側ではやや薄い傾向がみられた。電着物の主成分はCaCO₃、Mg(OH)₂およびSiO₂で、そのほかAl₂O₃やFe₂O₃も含まれていた。また、電着層は砂粒、海藻および貝類を巻き込んで形成されることが認められた。電着物の硬さは主要成分によって異なり流す電流密度が大きければMg(OH)₂の多い柔らかい電着物が析出し、小さければCaCO₃の多い硬い電着物が析出することが認められた。

金網を巻き付けた鋼管杭の電着層には剥離等の損傷は見られなかったが、金網を巻いていない鋼管杭の海面近傍において電着層が一部剥離したところが認められた。電着工法を実施する際には金網を巻き付ける等の対策が有効であると考えられる。通電停止1年7ヶ月後に電着工法適用鋼管杭の肉厚を測定した結果、肉厚の減少はみられなかったことから、電着工法の鋼材に対する防食効果が認められた。

(2) コンクリート構造物への現地試験では、コンクリート表面およびひびわれ部への電着物の析出、充填状況、電着物の組成および透水性について調査を行い、実構造物への適用性を検討した。また、コンクリートと鉄筋の付着強度について室内試験を行って検討した。

鉄筋コンクリート構造物に0.5~0.7A/m²の電流を5ヶ月間流した結果、コンクリート表面に電着物が析出し、ひびわれ部に充填することが確認された。ケーソン本体の陽極に近い部分には平均1~2mmの厚さで析出したが、陽極から遠い部分での析出は平均1mm以下であった。この電着物の析出厚さの相違は陽極の配置による極間距離の差によるものと考えられる。また、ひびわれ部には正常部に比べ通電後の早い時期から電着物が認められたが、電流密度が大きかったため、析出した電着物はMg(OH)₂が多く正常部よりも力学的強度は小さかった。このほかコンクリート表面に析出した電着物によりコンクリートの透水性が低減すること、鉄筋周辺の塩化物イオン量が減少することが明らかとなった。電着物とコンクリート表

層部との接着力は通常のコングリート表層部の引っ張り強度とほぼ同程度であった。しかし、電着工法で適用する範囲の電流密度を長期間通電すると鉄筋とコンクリートとの付着強度が10%程度低下することが付着強度試験で認められた。電流密度の設定には十分留意する必要があるといえる。

以上、電気防食の原理を応用した電着工法の実構造物への適用性を検討した結果、まだ未解決の事項も多く残されているものの、鋼構造物の防食法、コンクリート構造物の補修法として本工法が適用できる見通しを得ることができた。

以上に示したように、鋼構造物およびコンクリート構造物への電気防食法および電着工法による防食および補修対策に関して得た知見は、今後の海洋および港湾構造物への防食および補修法の設計や施工に広く反映できるものと考えられる。とくに、本研究に示した汚染海域における電気防食に関する成果および波浪海域での試験結果は、すでに「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（改訂版）」

（1997年4月発行）に取り入れられており実用に供されている。また、コンクリートの電気防食の試験結果は電気防食を適用したコンクリート構造物の維持管理に対する基礎的な資料として活用できるものと考えられる。さらに、電着工法については実構造物への適用性が確認され、鋼構造物に対しては本四架橋の橋脚の基礎外板の防食法として実用化を目的に目下現地試験を進めているところである。

謝 辞

本論文を結ぶにあたり、本研究を遂行する上でご指導およびご協力をいただいた多くの方々に対し感謝の意を表します。

鳥取大学工学部土木工学科教授上田茂博士には、本研究の遂行および論文の取りまとめに関し、終始誠意をもってご指導ご鞭撻ご激励を賜りました。厚く御礼申し上げます。

鳥取大学工学部土木工学科教授西林新蔵博士には、コンクリート構造物の電気防食、電着工法に関して、多くのご教示を賜りました。とくに、これらの工法とコンクリートの付着強度に関して細部にわたりご指導いただきました。厚く御礼申し上げます。

鳥取大学工学部物質工学科教授江坂享男博士には、本研究に関する電気化学的理論について懇切丁寧なご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。

また、鳥取大学工学部土木工学科助教授井上正一博士には、コンクリート構造物の耐久性と維持補修に関して多くのご教示を賜り厚く御礼申し上げます。

筆者が、海洋および港湾構造物の腐食と防食に関する研究に着手したのは、運輸省港湾技術研究所に奉職してからで、当初から元主任研究官善一章博士

(現(株)ナカボー・テック)のご指導を得ました。本研究の主要な部分である電気防食調査については、長年にわたり実施してきたもので、この間元構造部長横井聰之博士(現(株)ピーエス)、元材料研究室長関博博士(現早稲田大学)をはじめ、材料研究室の方々の多大なご協力を得ました。とくに、現材料研究室長福手勤博士および主任研究官濱田秀則氏には、多忙の時期にもかかわらず、論文の取りまとめに時間的配慮を与えていただきました。また、元所長の渡邊具能氏および野田節男博士、故元構造部長稲富隆昌博士、現構造部長岩上淳一氏には、筆者が研究成果を学位論文として取りまとめることにご理解をいただき、このような機会を与えていただき、かつご激励を賜りました。これらの方々には心から御礼申し上げます。

汚染海域の現地試験では、共同研究を実施しています電気防食工業会の関係各位には試験の実施に際しご協力を賜りました。また(財)横浜港埠頭公社の関係各位には施設の提供にご協力をいただきました。(株)ナカボー・テック吉野朗宣氏には水質調査を実施していただくとともに汚染海域における貴重な資料を提供していただきました。

波浪海域における電気防食試験では沿岸開発技術研究センターおよび鋼管杭協

会の多くの方々にご協力をいただきました。とくに、日本防蝕工業（株）清水一夫氏、（株）ナカポー・テック山本郁雄氏には電気防食に関する現地計測にご協力をいただきました。運輸省港湾技術研究所主任研究官柳島慎一氏および主任研究官栗山喜昭氏には海象観測に関する貴重な資料を提供していただくとともに波浪に関する多くのご教示を賜りました。

電着工法に関しては、山口大学教授熊田誠博士、三井造船（株）佐々木晴敏氏および四国総合研究所横田優博士ならびに運輸省第三港湾建設局松山港工事事務所の関係各位には現地試験のご指導とご協力を賜りました。

また、材料研究室田中順技官および野村年世さんには本論文を仕上げるにあたり協力していただきました。

以上の方々のご指導とご協力に関しここに記して心から御礼申し上げます。

付録A

本文において用いる用語について説明する。

(1) 係船岸

岸壁は大型の係船岸（水深4.5m以上）をいい、それ以下のものを物揚場という。両者を合わせて係船岸というが、係留施設ともいう。

(2) 潮位

・H.W.L（さく望平均満潮面）

さく望の日から5日以内に現れる各月の最高満潮位を平均した水面の高さ。通常High Water Levelと呼んでいる。

・M.S.L（Mean Sea Water Level、平均水面）

ある期間（実用上は1ヶ年）の平均の水面の高さ。

・M.L.W.L（平均干潮面、Mean Low Water Level）

平均低潮面とも言う。干潮時の潮位を平均した水面の高さ。

・L.W.L（さく望平均干潮面、Low Water Level）

さく望の日から5日以内に現れる各月の最低干潮位を平均した水面の高さ。

(3) 腐食環境

・飛沫帯

Splash Zoneとも呼び、干満帯上部の波浪飛沫の含まれる領域。

・干満帯

干潮位と満潮位との間の領域をいう。

(4) 腐食関係用語

・腐食

金属がそれを取り囲む環境によって、化学的、電気化学的に浸食される現象。

・アノード

陽極。電流が電極から溶液に向かって流れる極、酸化反応が行われる。

・カソード

陰極。電流が溶液から電極に向かって流れる極、還元反応が行われる。

・腐食電池

電気化学的腐食が進行するための構成要素となるアノードとカソードとからなる電気化学系の総称。

・腐食電流

腐食電池のアノードとカソードの間に流れる電流。

・局部腐食

腐食が表面全体に均一に進行せず、局部的に集中しておきた状態を言う。腐食電池のアノードの位置が固定される場合に生じる。

・孔食

局部腐食が孔状に進行する腐食の形態。

- ・全面腐食
金属表面全体にほぼ均一に生じる腐食。
- ・マクロ腐食
局部腐食の一種で、局部電池を構成するアノード部分とカソード部分が肉眼でも判断できる程度の場合をいう。
- ・ミクロ腐食
局部電池を構成するアノード部分とカソード部分が肉眼では判断できない程度に小さい場合をいう。
- ・通気差電池
局部的に酸素の濃度が濃くなるために生じる腐食電池、酸素濃淡電池ともいう。
- ・卑
電極電位の負方向を指す。負または低いともいう。
- ・貴
電極電位の正方向を指す。正または高いともいう。
- ・集中腐食
鋼材が干満帯から海水中まで連続して存在する場合、平均干潮面直下からL.W.L付近にかけての部分が集中的に著しく腐食する現象をいう。腐食関係では一般には使われていないが、港湾においては用いられている。
- ・腐食速度
腐食の進行する速度で、単位時間当たりの鋼材肉厚の減少量か重量の減少量のいずれかで表される。通常はmm/yで表す。
- ・サンドエロージョン
波浪等で漂砂現象が発生するところでは、砂により錆層が除去され大きい腐食が発生する。この現象をサンドエロージョンという。

(5) 電気防食関係用語

- ・電気防食
金属を電気化学的に安定な電位領域に変化させて腐食を停止させること。
- ・分極
電極に出入りする電流によって、電位に変化が生じる現象。
- ・分極量
分極の変化量
- ・復極
分極の原因を除去し、分極を減少または消滅させることをいう。
- ・不動態
卑な金属が本来の活性を失って、貴金属のような挙動を示し溶解しなくなる状態をいう。金属表面に形成された薄い緻密な皮膜（主に酸化物）が関与してい

る。

- ・ 自然電位

金属の置かれた環境における固有の電位。自然電極電位あるいは腐食電位ともいう。

- ・ 防食電位

電気防食（カソード防食）において、腐食を停止させるために到達すべき最低限必要な電位。

- ・ 防食電流

防食電位を保つために、被防食体に対して流す電流。

- ・ 防食電流密度

防食電位を保つために必要な単位面積当たりの電流、通常mA/m²で表す。

- ・ 基準電極

絶対的な電位は一般に求めることができないので、基準となる電極の電位との電位差で表す。この基準となる電極を基準電極または照合電極という。基準電極には甘こう電極、銀塩化銀電極、硫酸銅電極、亜鉛電極、鉛電極等がある。

- ・ エレクトロコーティング

海水中で電気防食された鋼材表面に高pHのために析出する炭酸カルシウムや水酸化マグネシウムの混合した石灰質皮膜をいう。電着工法では電着物と言う。

- ・ 有効電気量

AI陽極がもっている理論発生電気量から自己腐食による電気量を除いた、流電陽極として有効に働くことができる電気量をいう。

付録B 港湾鋼構造物の構造形式

港湾構造物の構造材料として用いられる鋼材は、鋼矢板および鋼管杭が主要な材料である。その他には鋼板がある。これらの鋼材を用いた構造物は係船岸および護岸が主なものである。ただし、護岸も構造的には係船岸と同じである。

鋼構造の係船岸の構造形式には次のような種類がある。

- ・ 矢板式（付図－1）

鋼矢板を用いるものが大部分であるが、鋼管杭矢板の場合もある。また、控えの形式にも数種類あり、控えを有しない自立式のものもある。

- ・ たな式（付図－2）

矢板背後にたなを有するもので矢板係船岸の一形式と言ってもよい。

- ・ 棧橋（付図－3、4）

設置位置によって突堤式の棧橋と陸岸に平行な横棧橋がある。構造には直杭と斜め組杭式がある。杭は鋼管杭がほとんどである。

- ・ セル式（付図－5）

直線矢板を用いた鋼矢板式と鋼板を用いた鋼板セル式とがある。係船岸ではセルのアーチ部の前面には杭を打ち上部のたなを支えるが、護岸ではその必要はない。

- ・ドルフィン（付図－６）

海中に群杭あるいは柱状体を設置して船舶に係留するもので、杭式がほとんどであるがセル式もある。この形式は大水深のシーバースに多い。構造的には栈橋あるいはセルに準ずる。

- ・デタッチトピア（付図－７）

橋形クレーン等の基礎として陸岸から離して設置される杭式の構造物で、構造的には栈橋に類する。

- ・浮き栈橋（付図－８）

内部が空洞となっている箱形の構造物であり、鋼板やコンクリートによって作られる。

- ・係船浮標（付図－９）

ブイ式の係留施設で、陸揚げが可能である。

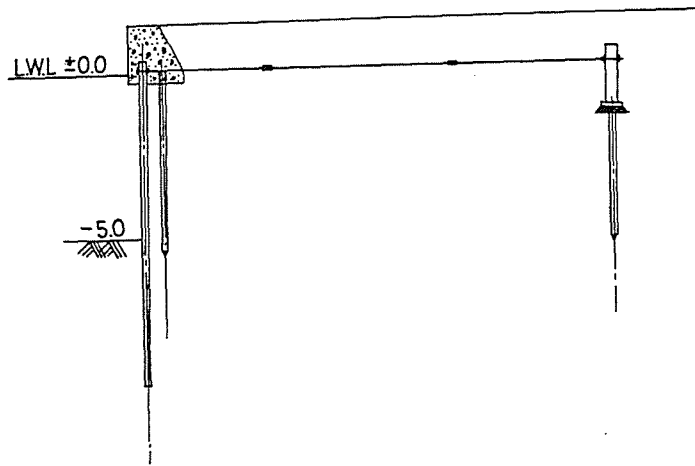
鋼構造物の護岸には矢板式、セル式があるが、特殊なものとしてジャケット式鋼製護岸（付図－１０）がある。これは鋼管や形鋼等によって組み立てられたジャケットとそれを支える鋼管杭とからなる構造で、軟弱地盤や大水深を対象としている。

防波堤はコンクリート構造物がほとんどであり（付図－１１）¹⁾ 鋼構造物は特殊形式に属し比較的波の小さいところに用いられる。それらにはカーテンウォール式防波堤、鋼管矢板式防波堤、二重矢板式防波堤等がある。

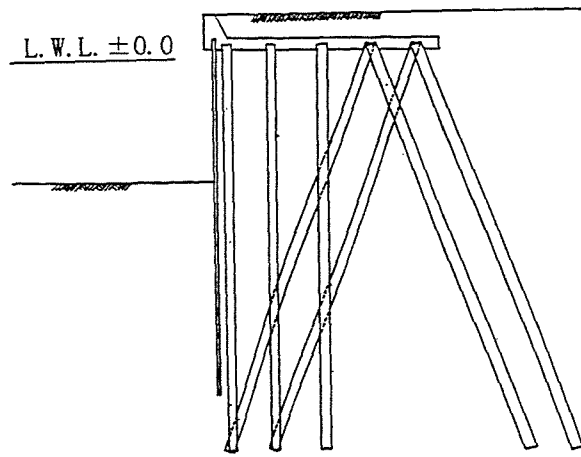
その他には閘門や導流堤等にも鋼材は用いられている。

参考文献

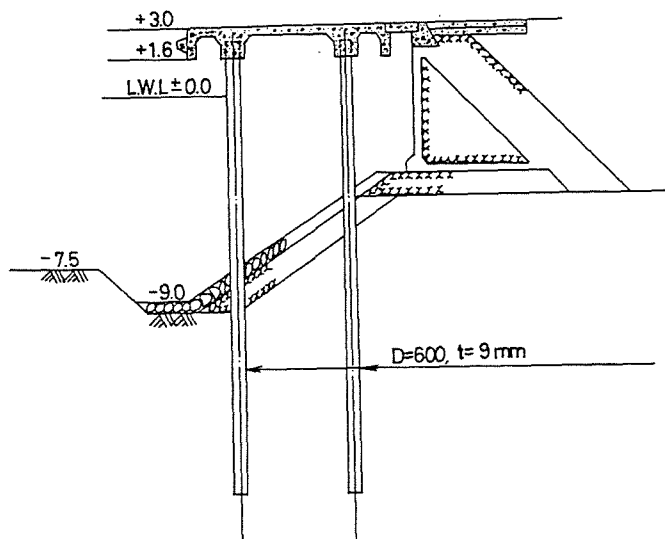
- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、pp7-10、1979.



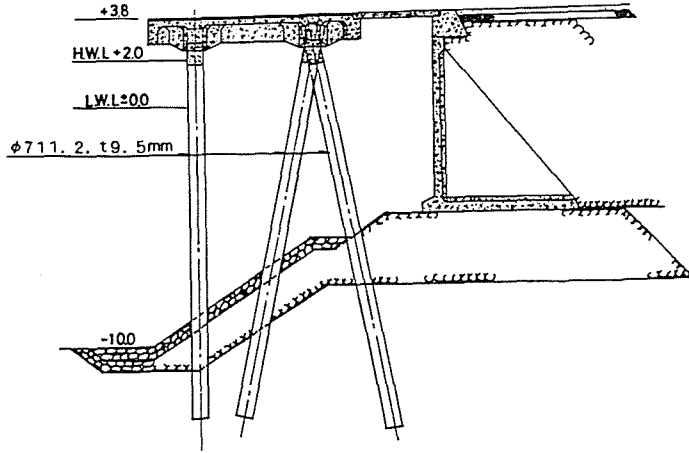
付図-1 矢板式係船岸



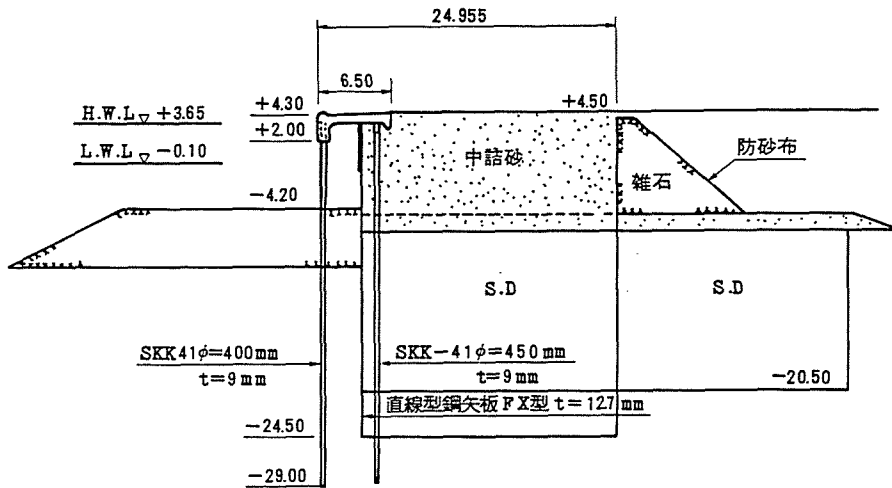
付図-2 たな式係船岸



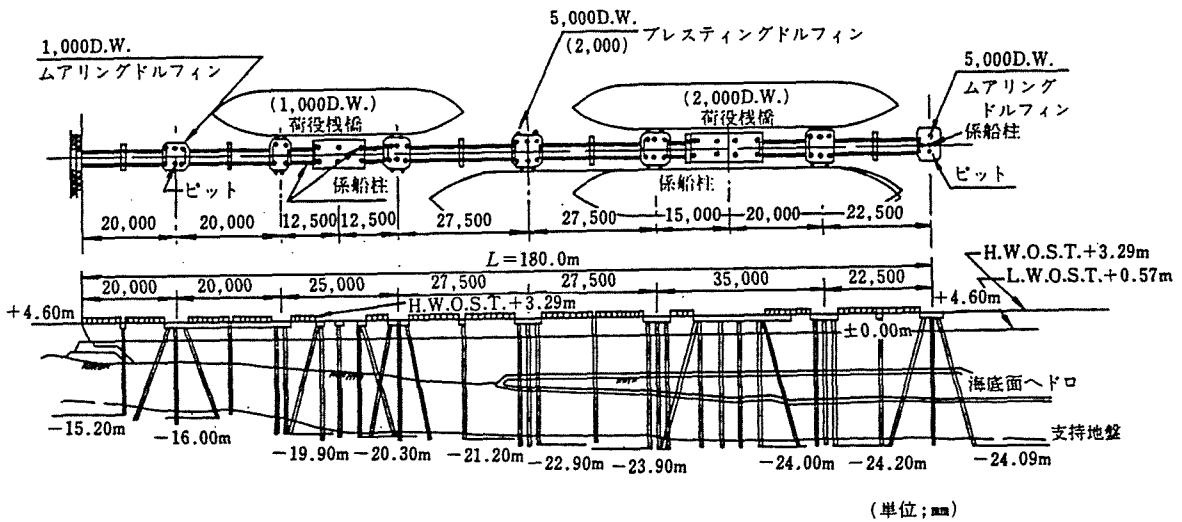
付図-3 直杭式棧橋



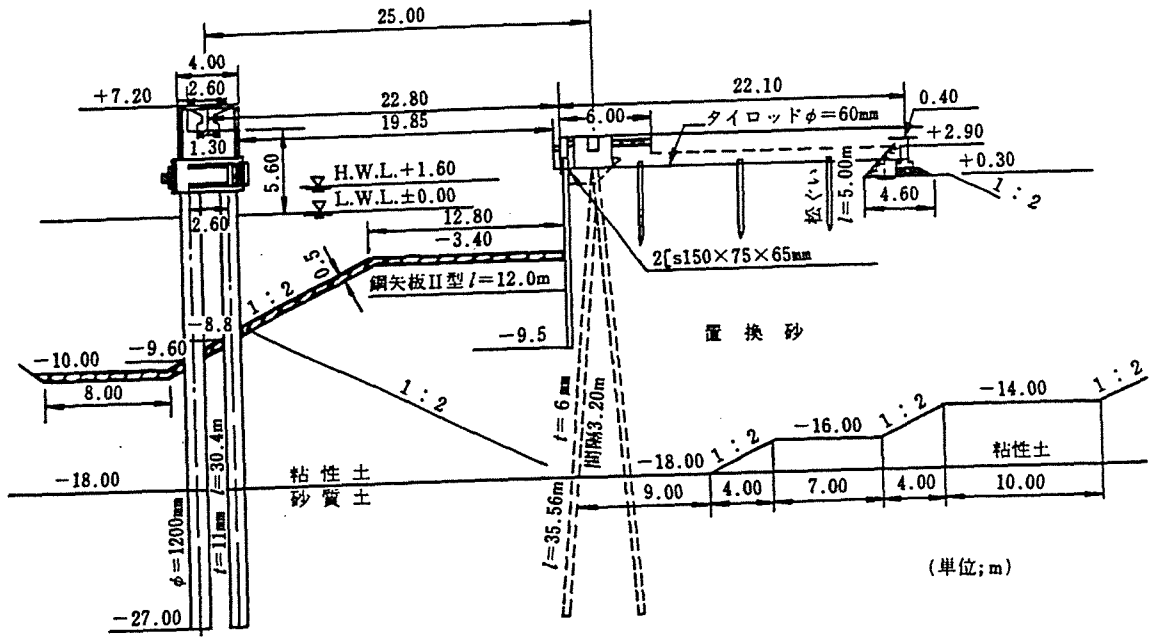
付図-4 組杭式棧橋



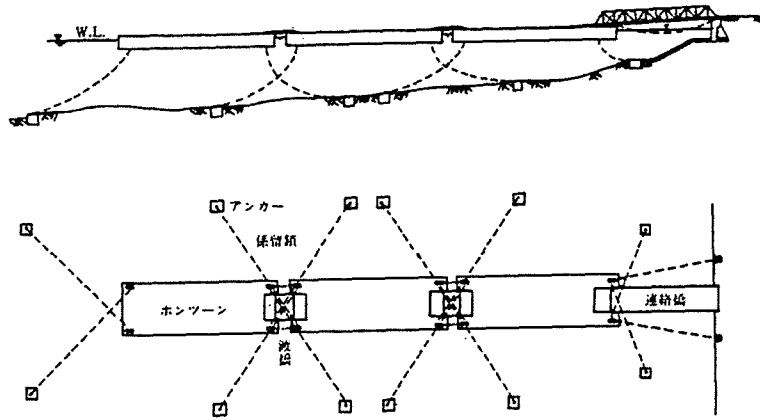
付図-5 セル式係船岸



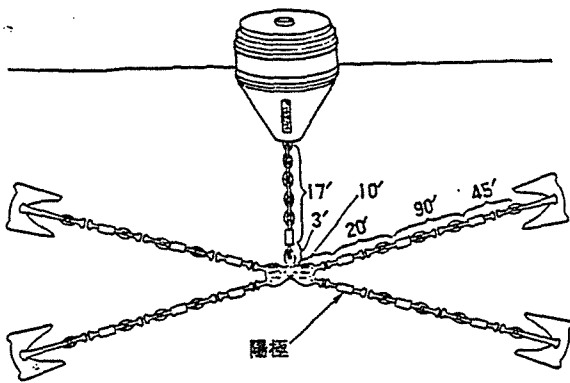
付図-6 杭式ドルフィン



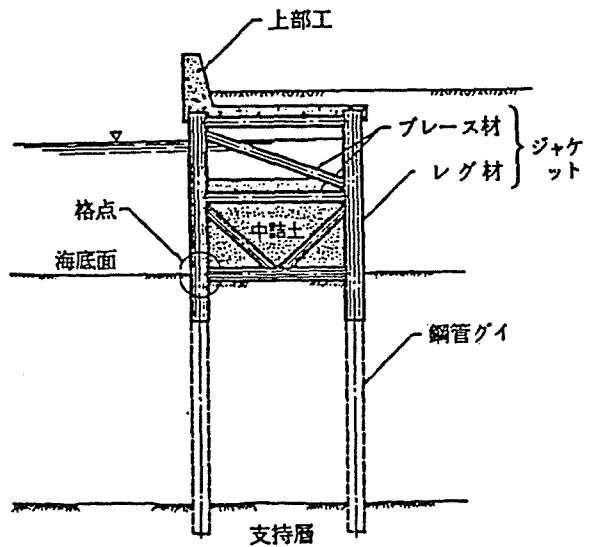
付図-7 デタッチドピア-



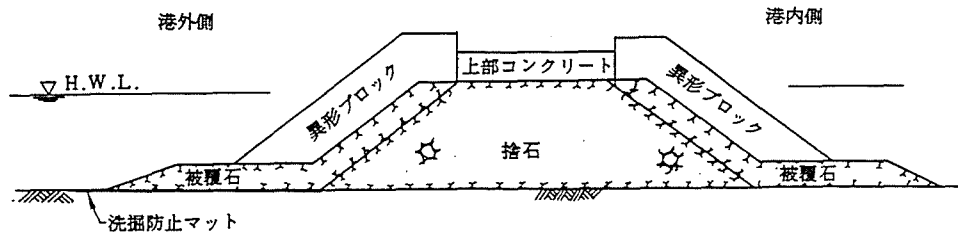
付図-8 浮き棧橋



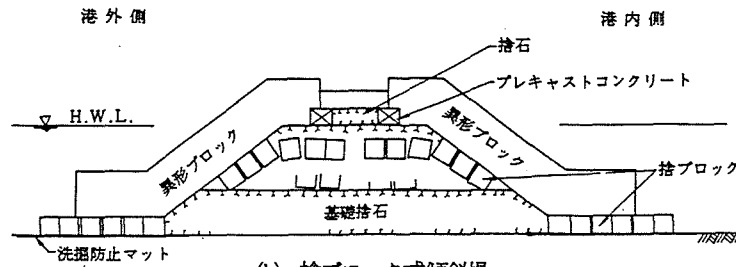
付図-9 係船浮標



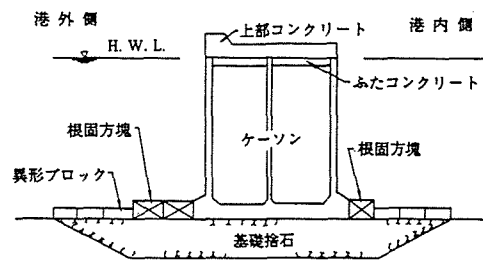
付図-10 ジャケット式鋼製護岸



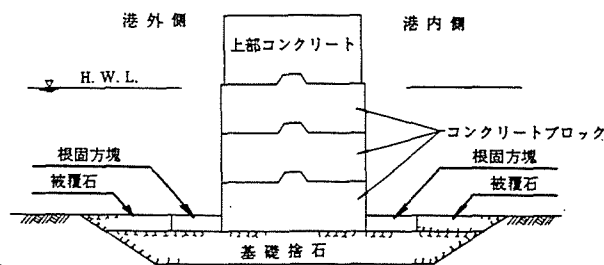
(a) 捨石式傾斜堤



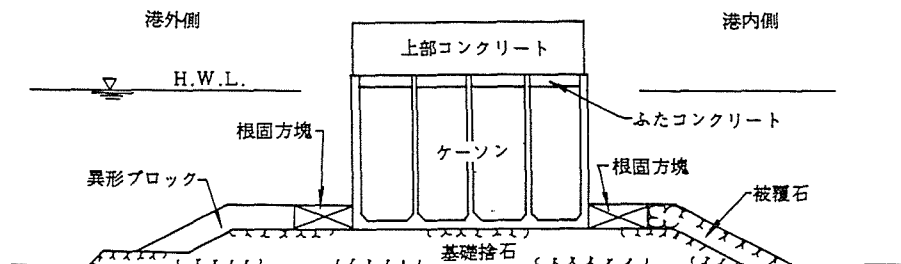
(b) 捨ブロック式傾斜堤



(c) ケーソン式直立堤



(d) コンクリートブロック式直立堤



(e) ケーソン式混成堤 (砂地盤)

付図-11 コンクリート製防波堤の形式