

港湾技研資料

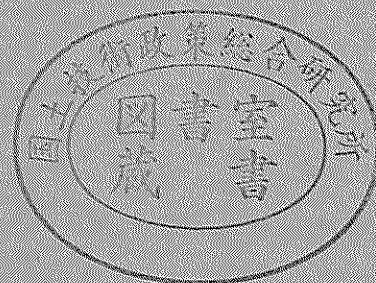
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 740 Sept. 1992

港湾における鉄筋コンクリート構造物への流電陽極方式による
電気防食法の適用に関する基礎的試験

阿	部	正	美
福	手		勤
濱	田	秀	則
三	浦	幸	治

運輸省港湾技術研究所



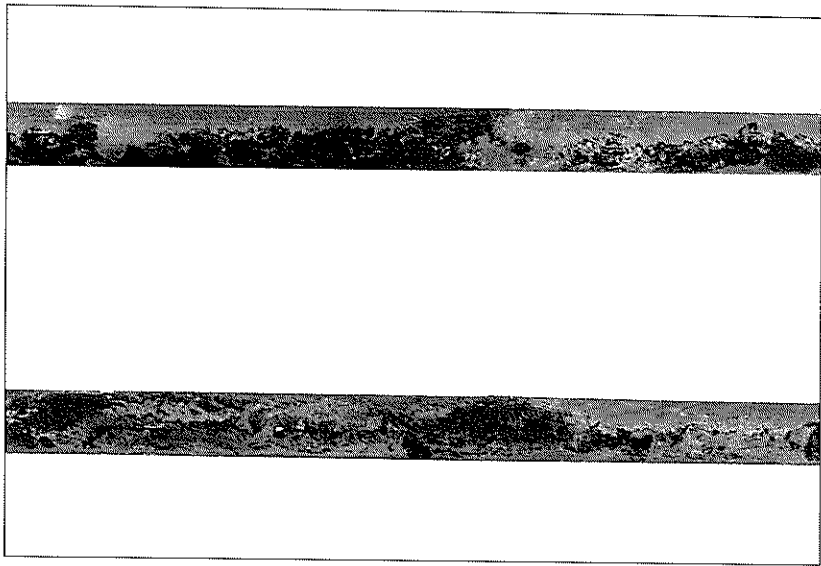
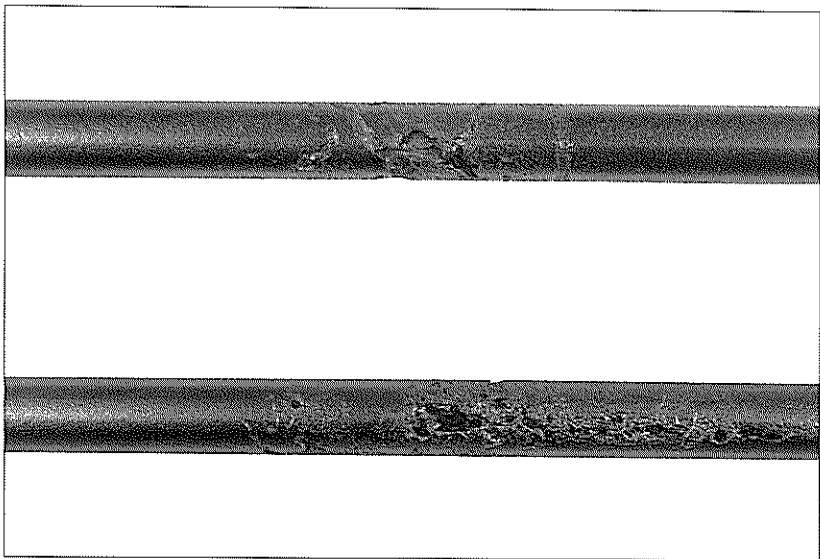


写真-4 鍍発生鉄筋の表面状況
(上：電気防食，下：無防食)



表

裏

写真-5 孔食の発生状況 (鉄筋 No.5-5)

目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 試験方法	5
2.1 試験の内容	5
2.2 試験に使用した供試体	6
2.3 試験場所および暴露環境	7
2.4 供試体への通電方法, 電流, 電位および供試体の温度測定方法	7
3. 試験結果および考察	8
3.1 防食電流	8
3.2 電位	10
3.3 天候による電流, 電位の変化	12
3.4 温度と電流, 電位の関係	13
3.5 復極試験	14
3.6 供試体温度と発生電流密度の関係	15
3.7 回収供試体の観察	17
4. 結論	23
5. あとがき	23
6. 参考文献	23

Experiment Tests on Cathodic Protection by Galvanic Anode System for Reinforced Concrete Structures at Marine Environments

Masami ABE *

Tsutomu FUKUTE **

Hidenori HAMADA ***

Kouji MIURA ****

Synopsis

For corrosion prevention method of embedded steel bars in concrete by salt attack of marine concrete structures, a cathodic protection method has been suggested.

This test was conducted to examine the corrosion prevention effect of reinforcement in marine concrete structures. The concrete specimens protected and unprotected by cathodic protection method were exposed in field exposure testing place and various measurements were carried out.

Major findings are as follows:

- (1) Cathodic protection by the galvanic anode system in which zinc sheet anode is used has provided adequate protection.
- (2) Also, it showed good result for concrete specimen in which crack induced and occurred the rust in concrete steel bars. In addition, it was recognized that be effective of the prevention of pitting corrosion.
- (3) The current density and protective potential influenced by temperature, weather and moisture condition of concrete surface.
- (4) Protective current density was about 3~15mA/m²(in concrete surface).
- (5) Protective potential was -400~-800mV at sea water splashing environment and -400mV ~600mV at natural on land environment.
- (6) It was satisfied 100mV shift criterion that the polarized "off" potential was 100mV more negative than the original (corroding) potential.

KeyWords : Cathodic Protection, Reinforcement Concrete, Marine Environment

* Senior Reserch Engineer., Structural Engineering Division

** Chief of Materials Lab., Structural Engineering Division

*** Senior Reserch Engineer., Structural Engineering Division

**** Member of Materials Lab., Structural Engineering Division

港湾における鉄筋コンクリート構造物への流電陽極方式による電気防食法の適用に関する基礎的試験

阿部 正美*
福手 勤^{2*}
濱田 秀則^{3*}
三浦 幸治^{4*}

要 旨

港湾コンクリート構造物の塩害による劣化防止策として、電気防食による方法が検討されている。

本資料は電気防食法（流電陽極方式）によるコンクリート中の鉄筋の防食効果を検討するために、野外の暴露試験場に供試体を暴露して試験を実施し、その結果を取りまとめたものである。

得られた主な点は以下の通りである。

- 1) 亜鉛シートを陽極材とした流電陽極方式による電気防食はコンクリート中の鉄筋への防食方法として効果のあることが認められた。
- 2) コンクリートにひびわれが発生し、内部の鉄筋に錆が見られる場合でも、錆を抑制する効果のあることが分かった。その上、孔食の防止効果も認められた。
- 3) 防食電流密度や電位は温度、天候およびコンクリートの表面状態に影響されることが分かった。
- 4) 防食電流密度は3～15mA/m²程度であった。
- 5) 通電時の電位は、海水シャワー環境において-400mV～-800mV (vsAg/AgClEL), 陸上自然環境で-400mV～-600mV (vsAg/AgClEL) 程度であった。
- 6) コンクリート中の鉄筋はいずれも100mV以上の分極量を示し、防食効果の判定法としての100mVシフト基準を満足していた。

キーワード：電気防食、鉄筋コンクリート、海洋環境

1. まえがき

港湾におけるコンクリート構造物の塩害による劣化が見られるようになり、コンクリート構造物への劣化に対する各種の補修方法や防止対策方法が検討されてきている。

コンクリートの塩害による劣化の原因は外部からコンクリート内部へのCl⁻イオンの浸透や酸素拡散によるコンクリート中の鉄筋の腐食によるものである。すなわち、コンクリート構造物を施工後、まだ新しい時期において

はコンクリート中の鉄筋は高アルカリ (pH12～13) で覆われており、鉄筋の表面は不動態膜を形成し防食されている。しかし、港湾環境におかれたコンクリート構造物は海水の飛沫や海塩粒子を直接浴びるために非常に厳しい腐食環境の中に暴露されていることになる。時間の経過とともに、このような厳しい腐食環境では外部からコンクリート内部へのCl⁻イオンの浸透、品質の悪いコンクリートやコンクリートかぶり厚さの不足等によりコンクリート中の鉄筋の腐食が起りやすくなっていく。Cl⁻イオンの浸透に伴いコンクリート中の鉄筋は不動態膜を

* 構造部 主任研究官（防食担当）

^{2*} 構造部 材料研究室長

^{3*} 構造部 主任研究官（コンクリート耐久性担当）

^{4*} 構造部 材料研究室

破壊され、水と酸素の作用により腐食が起り始める。腐食が進み、腐食生成物（錆）が多くなると錆の膨張圧によりコンクリートのひびわれが発生する。このひびわれを通して、外部から腐食要因が進入しやすくなり、ますます鉄筋の腐食を助長することとなる。最終的にはコンクリートの剥離に至り、コンクリート構造物の寿命を短くする結果となる。

したがって、コンクリートの劣化を防止する対策法としてはコンクリート中の鉄筋をいかにして腐食から守るかということになる。

電気防食は港湾鋼構造物の防食法として海水中に存在する鋼材に広く適用されている。しかし、ここ数年より、干満帯や飛沫帯におけるコンクリート中の鉄筋の腐食を防止するために電気防食法が検討されてきている。例えば、従来より適用されている劣化の防止方法としてはコンクリートの表面に塗装材を吹き付けて塩分の浸透を防止する表面処理工法やひびわれ表面またはコンクリート劣化箇所をはつり、補修材を充填する充填工法等がある²⁾が、これらは物理的な方法によるものである。電気防食法はこれらの工法と異なり電気化学的に劣化を防止するものである。鉄筋の腐食はコンクリート中の鉄筋にアノード、カソードが形成されることにより始まる。この電気防食法はコンクリート表面に陽極を取り付けてコンクリート中の鉄筋へ微弱な直流電流を流すことによりコンクリート中の鉄筋のすべてのアノードや腐食した部分をカソードに置き換えて防食状態を達成する方法である。電気防食法はコンクリート中に塩化物が含有している状態でも防食出来ることのほか、電気防食を行うことによりコンクリート中の鉄筋周辺の塩化物を除去する効果も認められている。²⁾

なお、電気防食法の経済性については、表-1に示すように米国の実績から得た電気防食と他の補修工法のコスト比較例³⁾に見られるように、コスト（ドル/m²）は高いが耐用年数を考えた場合には他の補修工法と比較しても十分対応出来るものと考えられる。

電気防食法には外部電源方式と流電陽極方式との2つの方式がある。両方式の概略図を図-1、図-2に示す。外部電源方式は図-1に示すようにコンクリート表面付近に不溶性の陽極材を取付け、コンクリート中の鉄筋（陰極）、外部電源および陽極とで電気回路を作り、陽極からコンクリート中の鉄筋へ直流電流を流し防食する方法である。また、流電陽極方式とは図-2に示すように、コンクリート表面にバックフィルを介して犠牲陽極を取り付けて陽極とコンクリート中の鉄筋との電位差を利用して犠牲陽極から電流をコンクリート中の鉄筋へ流して

表-1 電気防食法と他工法のコスト比較例

工 法	コスト (ドル/m ²)	耐用年数 (年)	平均耐用年数 (年)	コスト (ドル/m ² ・年)
パッチング	5.4~32.2	1~5	3	6.3
シーラー	10.7~42.9	2~4	3	8.9
塗 装	32.2~64.4	4~8	6	8.1
コンクリート オーバーレイ	42.9~75.1	8~12	10	5.9
電気防食*	75.1~	25~	25	3.0

* 外部電源方式

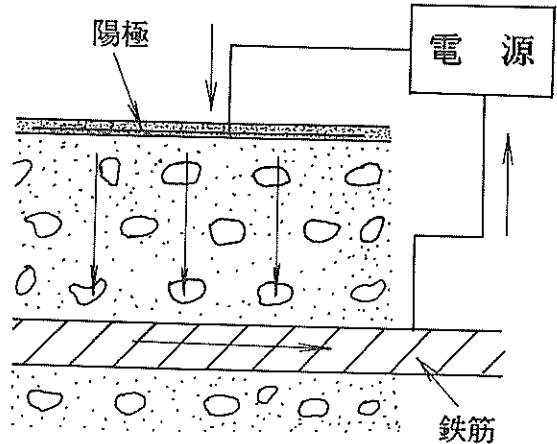


図-1 外部電源方式の概略図

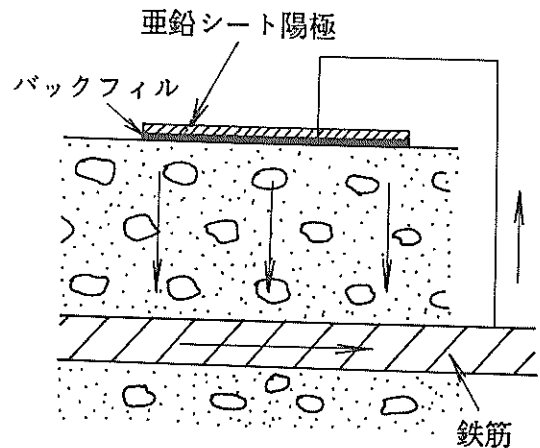


図-2 流電陽極方式の概略図

防食する方法である。流電陽極方式は電源となる犠牲陽極をコンクリートの表面へ取り付けてしまうために、外部電源方式のように電源を必要としないですむことや、電源までの配線が必要でないこと等、外部電源方式より

も簡単な方式であると言える。

本試験は流電陽極方式による電気防食法で試験を実施し、環境条件による電流、電位の傾向やコンクリート中の鉄筋の表面状態の差による防食効果等、基礎的な資料を得る目的のために実施した。

2. 試験方法

2.1 試験の内容

試験は図-3および表-2に示す条件により実施した。表-2に示すように供試体は、ひびわれ無し供試体、ひびわれ有り供試体の2つの条件を作り、電気防食用供試体と防食効果を比較する目的のために無防食供試体を作り、併せて暴露試験を実施した。ひびわれ有り供試体についてはひびわれが供試体の中心付近に出来るように、曲げ載荷によってひびわれ幅が約0.3~1.0mmのものを作った。供試体のひびわれ状況を図-4に示す。なお、ひびわれは供試体のおもて面のみに導入された。

試験の一連の流れは表-2に示すように、電気防食のために亜鉛シート陽極を取り付ける前に無防食のまま約5か月間海水のシャワーがかかる環境と陸上の自然環境に暴露された。

その後、ひびわれ有り供試体についてはコンクリート中の鉄筋が腐食している状態における電気防食試験を行うことを考慮して、図-5に示すようにひびわれ有り供試体を水槽中に浸漬して供試体中鉄筋を陽極とし、対極(陰極)にはステンレス板を用いて電食させて鉄筋の腐食を促進させた。電食は対極のステンレス板の電位を-1,000mV (Ag/AgClE.L.基準)に設定して約48時間分極させた。供試体は電食実施後、再び暴露環境に暴露さ

れた。その2か月後に電気防食用供試体に亜鉛シート陽極を取り付けて電気防食試験を開始した。

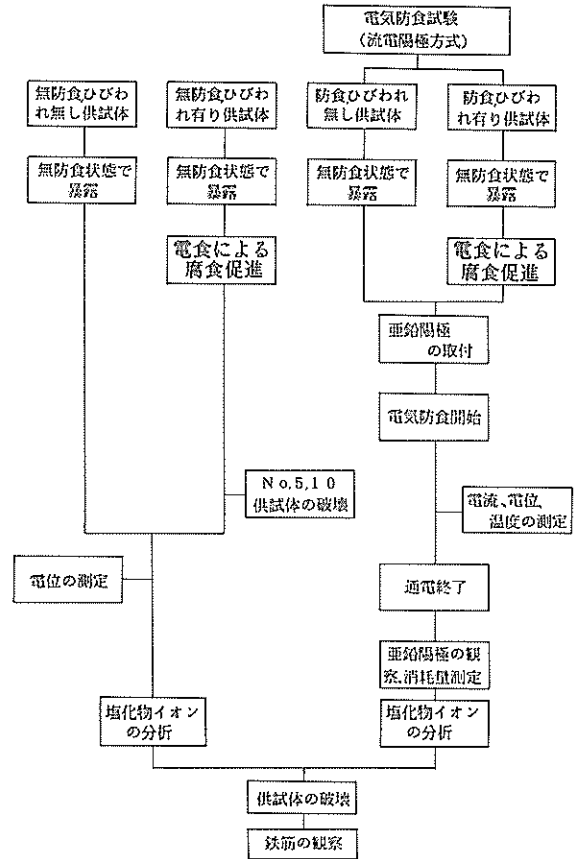


図-3 試験のフロー図

表-2 供試体の試験条件

●：電食 ▲：電気防食開始 ■：供試体破壊

環境	電気防食の有無	ひびわれの有無	供試体 No.	暴露期間(月)																							
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
海水シャワー	有	有	1	暴露	●	暴露▲																					■
	有	無	2	暴露																							■
	無	有	3	暴露	●																						■
	無	無	4																								■
	無	有	5	暴露	●	暴露▲																					■
陸上自然	有	有	6	暴露	●	暴露▲																					■
	有	無	7	暴露																							■
	無	有	8	暴露	●																						■
	無	無	9																								■
	無	有	10	暴露	●	暴露▲																					■

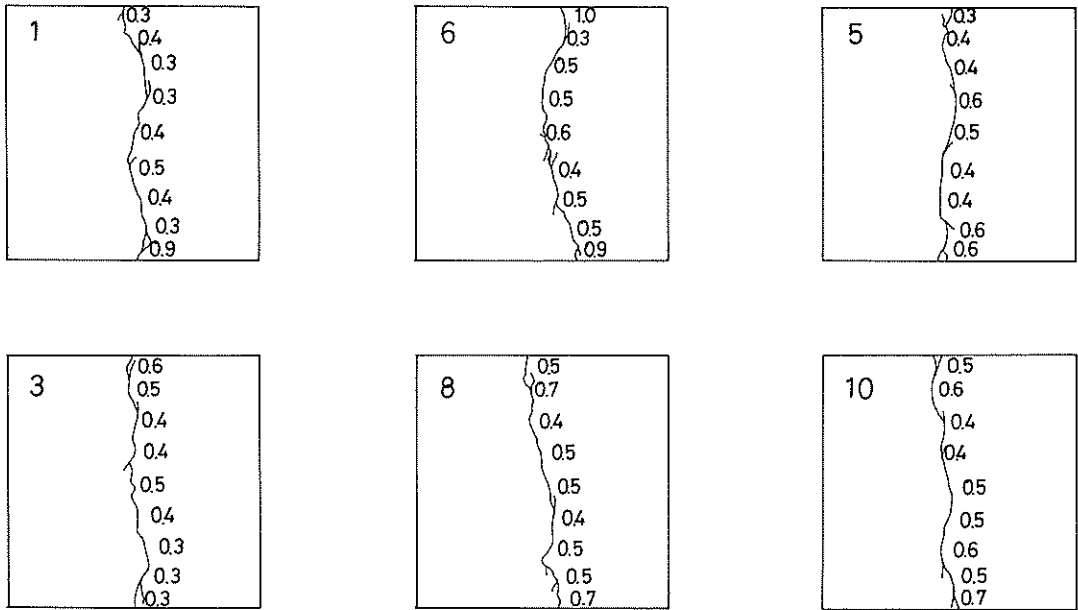


図-4 供試体のひびわれ発生状況図 (左上 No. は供試体の No. を示す)

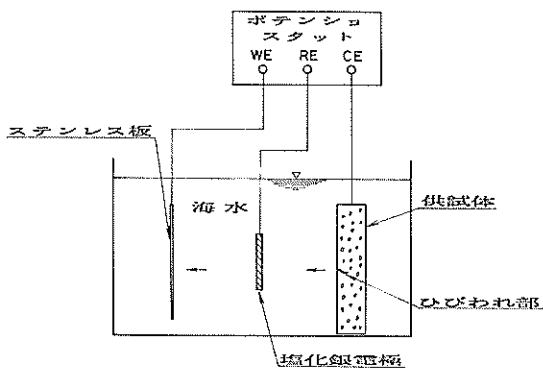


図-5 電食の概略図

また、表-2に示すように供試体 No. 5および No. 10については電食実施3カ月後に、供試体を破壊して初期の錆状況の観察および錆の発生率を求めた。また、同時に塩化物イオン量の初期の含有量を把握しておくために分析用の試料を採取した。

暴露試験の間、電気防食を実施した供試体については定期的にコンクリート中の鉄筋へ流れる電流、鉄筋の電位および供試体中の温度を測定した。また、無防食供試体については定期的にコンクリート中の鉄筋の自然電位を測定した。

試験終了時には通電回路を切り、電気防食用供試体の

開路電位を測定して各供試体の鉄筋電位の復極状況を調べた。また、塩化物イオン量の分析を行うためにひびわれ無しの供試体より試料を採取した。

その後、すべての供試体を破壊して供試体中の鉄筋状態を観察するとともに電気防食用供試体については亜鉛シート陽極の消耗状況や亜鉛シートの内面に充填されているバックフィルの状態を観察した。

表-3に主な測定および観察項目を示す。

2.2 試験に使用した供試体

試験に使用した供試体は図-6に示すように縦40cm×横40cm×高さ10cmの版状の供試体である。コンクリート中には縦に3本、横に5本のφ13mmの鉄筋(丸鋼、材質SS41)を埋設している。鉄筋は表面を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ものを使用した。供試体内部には鉄筋の電位を測定するために基準電極(Ag/AgClE.L.)を2本取り付けた。電気防食用供試体の陽極材料には亜鉛シート陽極を用い、縦30cm×横38cm×厚さ2mmのものを図-6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バックフィルを充填した(厚さは約10mm)。また、パテ状のバックフィルが亜鉛シート陽極の横からはみ出さないようにウレタンシールテープで端部をせき止めた。ここで用いられたバックフィルはベントナイト、

表-3 測定および観察項目

測定、観察項目	電気防食用供試体	無防食供試体
防食電流	○	
電位	○	○
塩化物イオン量の分析	○	○
亜鉛陽極の観察 消耗量の測定	○	
供試体の 温度測定	○	
鉄筋の観察	○	○

表-4 コンクリートの配合 (kg/m³)

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
25	12		55	45.0				
単位量 (kg/m ³)								
				混和材料				
				混和材	混和剤			
162	295	824	1024	0.738				

生石灰、硫酸マグネシウムを主成分とする導電性のパテ状の材料である。亜鉛シート陽極は図-6に示すようにアンカーボルトにより固定した。アンカーボルトで固定することにより亜鉛シート陽極とコンクリート面に充填されているバックフィルは圧力で変形して亜鉛シート陽極とコンクリート面の空隙を埋めることとなり、導電性の低下を防ぐ状態となる。なお、亜鉛シート陽極の上部（コンクリート面と接しない面）はゴムアスファルトシート（厚さ1mm）で覆い、その上にセメント系保護板（フレキシブルボード、厚さ6mm）を取り付けて、亜鉛シート陽極の上部からの溶解を防ぐようにした。コンクリート表面（陽極材取付側）と鉄筋との距離は約2.5cmである。

コンクリートの配合は表-4に示す通りである。水セメント比は55%、呼び強度240kgf/cm²とした。

供試体の数は表-2に示すように電気防食用供試体4体（ひびわれ有り2体、ひびわれ無し2体）、無防食供試体6体（ひびわれ有り4体、ひびわれ無し2体）である。

2.3 試験場所および暴露環境

供試体を暴露した試験場所は神奈川県横須賀市の港湾

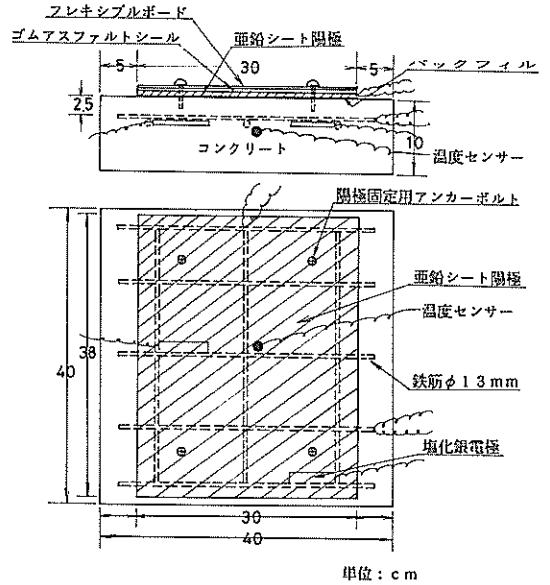


図-6 供試体の形状寸法および鉄筋配置図

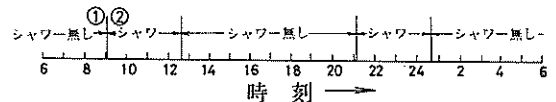


図-7 一日の環境サイクル（海水シャワー環境）

技術研究所内の久里浜湾沿いに位置する野外試験場である。試験場の環境条件としては図-7に示すように海水シャワーが供試体に一定時間かかる環境（以下、海水シャワー環境と呼ぶ）と海水シャワーのかからない陸上の自然環境（以下、陸上自然環境と呼ぶ）の2つの環境にそれぞれ供試体を暴露した。すなわち、図-7に示すように、海水シャワー環境に置かれた供試体は一日に2回（昼間の午前中1回、夜間1回）海水のシャワーをあげるサイクルを繰り返す条件である。シャワーの時間は1回につき約3時間30分である。シャワーのかかっていない時間は雨の日を除いて乾燥状態となる。また、陸上自然環境は、海水シャワー環境の位置に隣接した潮風の当たる場所である。

2.4 供試体への通電方法、電流、電位および供試体温度の測定方法

図-8に電気防食用供試体への通電回路図および電流、電位測定方法を示す。

電流の測定方法は亜鉛シート陽極の端部より出ている

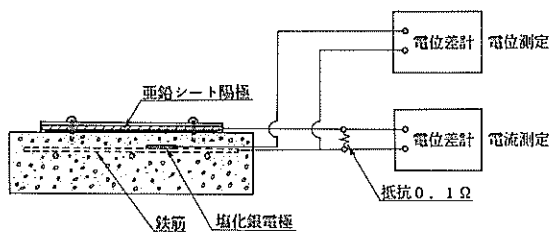


図-8 通電回路および電流、電位測定図

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。鉄筋の電位は供試体中に埋設されている基準電極を用いて測定した。また、供試体の温度はコンクリート打設時に温度センサー（熱電対）を図-6に示す位置に埋設し、その温度センサーを用いて測定した。

3. 試験結果および考察

電気防食用供試体に通電を行ってから暴露試験を約1年5ヶ月間実施した。この間、コンクリート中の鉄筋へ流入する電流量の変化、電位の変化およびコンクリート中の温度変化等について測定を行い、暴露時間、天候等に伴う電流、電位の変化やコンクリート中の温度変化に伴う電流、電位の影響等について調べた。以下にそれらの試験結果を示し、併せて考察を述べる。

3.1 防食電流

(1)防食電流の経時変化

図-9（ひびわれ無し供試体）、図-10（ひびわれ有り供試体）は海水シャワー環境における防食電流の経時変化を示す。図中の点線は昼間の海水シャワー開始直前の値であり、実線は同じく海水シャワー開始直後の値を示す。図-9、図-10とも実線の海水シャワー開始直後の値のほうが大きい傾向を示している。このことは(2)で詳しく述べる。

図-9のひびわれ無し供試体は通電当初から2カ月程度まで $20\sim 50\text{mA}/\text{m}^2$ と大きい電流が流れたが、時間の経過とともに電流は減少傾向を示し、100日程度以降よりほぼ安定した値を示した。120日以降では $20\text{mA}/\text{m}^2$ 以下の値であった。また、図-10に示すひびわれ有りの供試体では、通電当初、 $60\sim 70\text{mA}/\text{m}^2$ と非常に大きい電流が流れたが、60日以降ではひびわれ無しの供試体と同様に時間の経過とともに電流は減少傾向を示し $20\text{mA}/\text{m}^2$ 以下の電流を示した。図中の240日～360日頃で、電流量がやや大きくなっているがこの期間は丁度4月から8

月頃あたり気温が高くなったために発生電流が増加したと思われる。

図-11（ひびわれ無し供試体）および図-12（ひびわれ有り供試体）の陸上自然環境の供試体では、実線は一日の最大値を示し、点線は最小値を示す。最大値はおおむね昼間の午後を示し、最小値は夜間に認められた。図-11および図-12の電流の傾向は同じような傾向を示し、通電当初、最大値で $60\sim 70\text{mA}/\text{m}^2$ 程度、最小値で $35\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の値を示したが、時間の経過とともに減少してゆき、120日～150日頃より安定した値（ $5\sim 20\text{mA}/\text{m}^2$ 程度）を示した。

防食電流が時間の経過とともに減少する傾向を示したのは、亜鉛シート陽極からコンクリート中の鉄筋へ電流を流すことにより亜鉛シート陽極の電位と鉄筋の電位との電位差が次第に減少してきたためであろう。電位差が大きければ大きい程大きな電流が必要となってくるのに対して電位差が小さくなってきたために流れる電流も小さくなり、その結果、時間とともに流れる電流量が小さくなったものと考えられる。また、海水シャワー環境で安定した電流が早い時期に認められるようになったのは、海水シャワー環境では海水のシャワーにより電流の通りが陸上自然環境に比べて良かったためと考えられる。特に、この傾向はひびわれ有りの供試体で顕著に見られた。また、この低減効果は電気防食を行うことによりカソード側（鉄筋側）には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ためとも言われている³⁾。

(2)一日の環境変化に伴う電流の変化

図-13に海水シャワー環境における一日の環境変化に伴う電流の変化を示す（天候は晴の条件である）。

電流は海水のシャワーが開始するとひびわれ有り、ひびわれ無しの供試体とも電流の増加が見られ、その後、シャワーが続いている間、電流はほぼ増加したままの電流量を維持する。シャワー停止後では、電流は減少するが天候が晴の条件であると電流は横ばい傾向を示す。その後、夜に入り、海水のシャワーがかかると昼間の場合と同様に電流の増加が認められる。シャワー停止後、電流はゆっくり低減してゆきシャワーのかからない4時から6時にかけて最も電流量は小さくなる。ひびわれ有りの供試体はひびわれ無しの供試体と同じような傾向を示すが、全体的にひびわれ無しの供試体に比べ電流量は大きい。その差は $2\sim 6\text{mA}/\text{m}^2$ 程度である。この原因としてはひびわれ有りの供試体では海水のシャワーがかかるとコンクリートのひびわれ部より海水が容易に内部まで浸透していくために、海水の浸透とともに電流も流れ易く

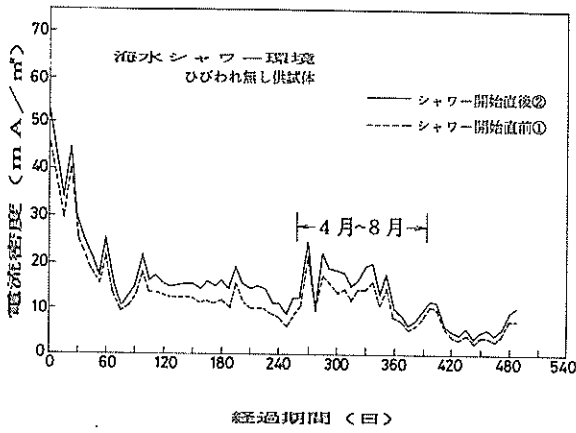


図-9 電流の経時変化 (1)

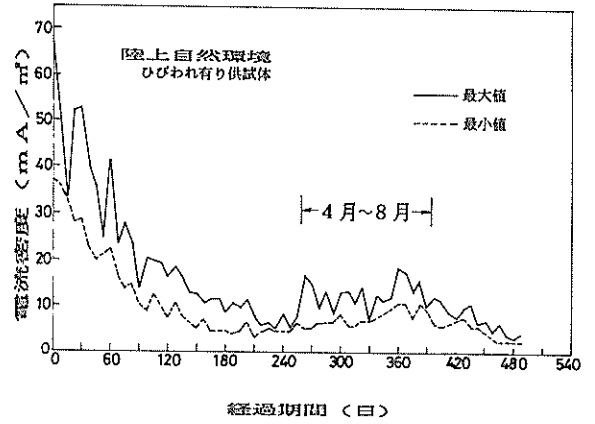


図-12 電流の経時変化 (4)

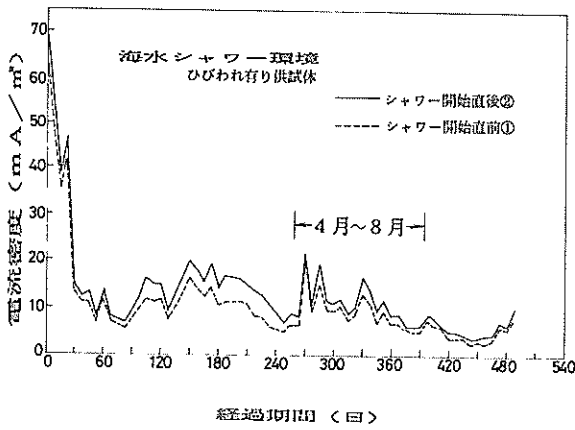


図-10 電流の経時変化 (2)

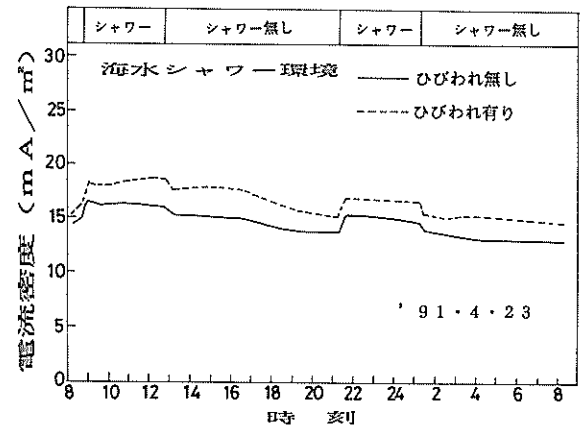


図-13 一日の環境サイクルに伴う電流変化(1), (天候:晴)

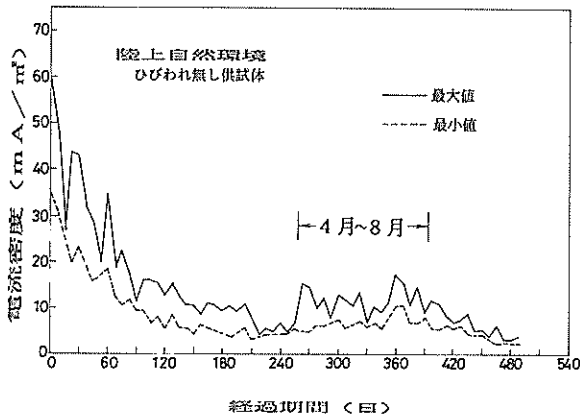


図-11 電流の経時変化 (3)

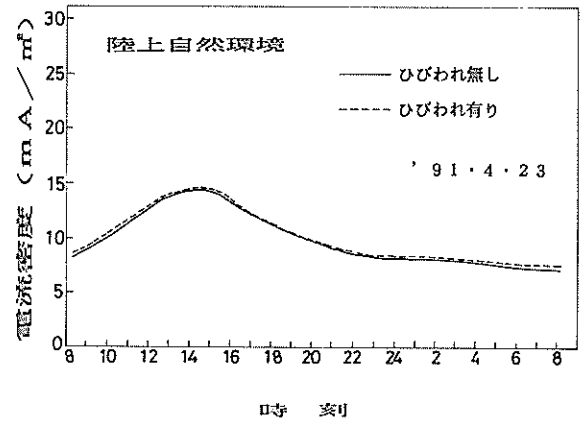


図-14 一日の環境サイクルに伴う電流変化(2), (天候:晴)

なったことが考えられる。

図-14に陸上自然環境での一日の電流変化を示す（天候は晴の条件である）。

電流の傾向は朝から昼間にかけて次第に増加してゆき、いずれも14時から15時頃にかけて電流のピークが見られ、朝方の6時頃が最も電流量が小さくなる。また、ひびわれ有り、ひびわれ無しの供試体の間には、海水シャワー環境のような大きい差は見られなかった。昼間の午後に電流のピークが見られることは、丁度、この時間帯に気温やコンクリートの温度が最も高くなるために、それに伴い、亜鉛シート陽極からの発生電流量も増加したものと考えられる。したがって、亜鉛シート陽極の発生電流量はかなり温度に影響されることが考えられる。

3. 2 電位

(1)電位の経時変化

図-15～図-18に電位の経時変化を示す。測定値は海水シャワー開始直後（am9：00）の値である。

図-15は陸上自然環境における電気防食用供試体の通

電時の電位の経時変化を示す。90日頃では-700mV 前後の値を示していたが、時間の経過とともにゆっくり貴な方向へ向かい、300日頃では-500mV 前後の値を示した。特に、ひびわれ有りの供試体はひびわれ無しの供試体に比べて暴露期間を通して若干貴な値を示した。その差は約50mV 前後であった。この理由としては、陸上自然環境ではひびわれを生じていることにより酸素の透過性が良くなることと、コンクリート中の鉄筋は電食により錆が存在する。その錆を還元する必要があるため、ひびわれ無しの条件よりも分極が十分に行なえなかったためと思われる。

図-16は海水シャワー環境における電気防食用供試体の通電時の電位の経時変化を示す。ひびわれ有りの供試体では通電期間を通して-600mV～-800mV 程度の値を示した。ひびわれ無しの供試体では、通電開始後、80日～100日頃では-800mV 程度の値を示していたが、時間の経過とともに電位は貴の方向へ向かい、おおむね-400mV～-600mV の値を示した。180日以降よりひびわれ有りの供試体の方がひびわれ無しの供試体に比べて全般

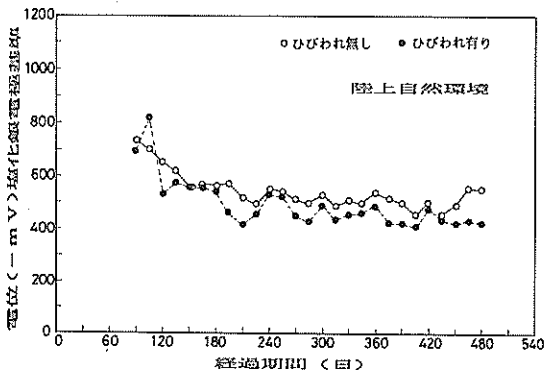


図-15 電位の経時変化（1）電気防食供試体

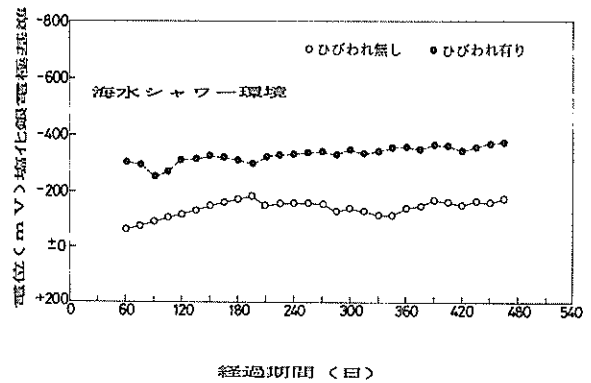


図-17 電位の経時変化（3）無防食供試体

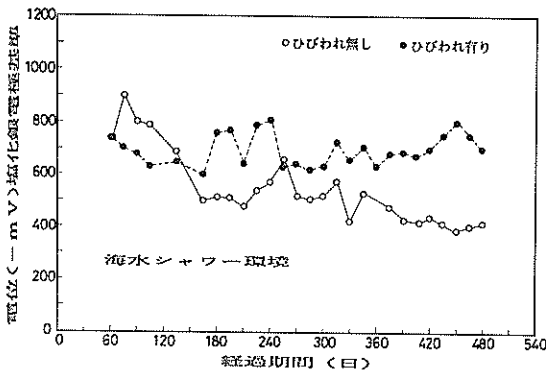


図-16 電位の経時変化（2）電気防食供試体

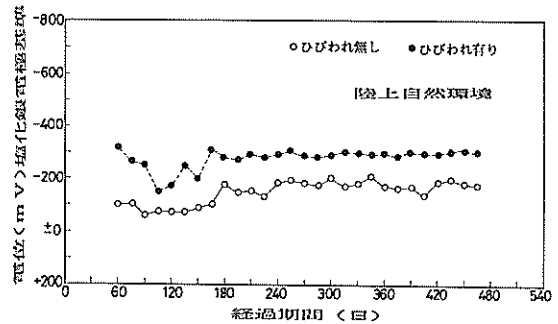


図-18 電位の経時変化（4）無防食供試体

に卑な値を保持していた。この原因としては海水シャワー環境で、亜鉛シート陽極よりコンクリート中の鉄筋へ電流が流れる場合にはひびわれが有ることにより電気抵抗が小さくなり、ひびわれ部分より海水を通して容易に電流が鉄筋まで流れるために電位がひびわれ無しの供試体に比べて卑な値を示したものと思われる。これに対して、ひびわれ無しの供試体ではひびわれ有りの供試体に比べて電気抵抗が高いために、ひびわれ有りの供試体のように電位が卑の方向へ移行しなかったものと思われる。

海水シャワー環境での電位はばらつきが大きい、陸上自然環境ではばらつきは小さい傾向を示した。これは海水シャワーの有無に起因しているものと思われる。

図-17(海水シャワー環境)および図-18(陸上自然環境)は無防食供試体の電位の経時変化を示す。

図-17ではひびわれ無しの供試体は暴露期間を通して-200mVよりも貴な値を示した。これに対して、ひびわれ有りの供試体の電位は-300mV~-380mV程度の値であった。このことは、コンクリート中の鉄筋へ電食を行なったために、すでに錆の発生が認められるためである。この値はASTMの腐食劣化判定基準⁵⁾により評価してみると錆の発生可能な電位であることが分かる。

図-18のひびわれ無しの供試体は-200mVより貴な値を示した。ひびわれ有りの供試体では-300mV前後の値を示し、この値も上述したように錆発生の可能性を示す値である。しかし、陸上自然環境では海水シャワー環境ほど腐食環境としては厳しくないせいか、暴露期間中はほぼ電位は横ばい状態であった。

(2)一日の環境変化に伴う電位の変化

図-19および図-20に電気防食用供試体の一日の環境変化に伴う電位の変化を示す。

図-19の海水シャワー環境において、ひびわれ有りの

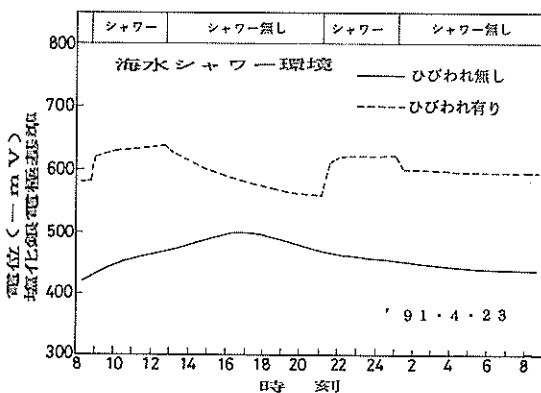


図-19 一日の環境サイクルに伴う電位変化(1), (天候:晴)

供試体は一日の電流変化と同様(図-13)に、海水のシャワーがかかると電位は卑の方向へ移行して、シャワーのかからない時は貴な電位を示す。その電位差は約50mV~60mVであった。ひびわれ無しの供試体では、ひびわれ有りの供試体と電位変化の傾向は異なり、16時~17時頃に電位が最も卑な値を示した。この原因としては、丁度、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ために亜鉛シート陽極がより活性化したためと思われる。ひびわれ無しの供試体では温度やコンクリートの表面状態に大きく影響を受けているのに対して、ひびわれ有りの供試体では、その電位の変化は温度よりも、むしろひびわれ部分からコンクリート内部へ浸透する海水の影響の方が支配的であるものと考えられる。

図-20の陸上自然環境における場合には、ひびわれ有り、ひびわれ無しの供試体とも11時から12時頃に卑な電位になる傾向が見られた。その後、緩やかに貴な方向へ進んでいく。この傾向は図-19の海水シャワー環境におけるひびわれ無しの供試体と同様にコンクリートの温度変化の影響によるものと思われる。また、図-19と図-20では卑の傾向を示す時間帯が異なるのは図-19では海水の影響によるものである。すなわち、11時頃~12時頃は海水のシャワーがかかっている時間帯であり、コンクリートの乾燥が遅れるためと考えられる。

陸上自然環境において、ひびわれ有りの供試体の方がひびわれ無しの供試体よりも貴な電位を示している理由としては、ひびわれ有りの供試体は電食を行っているのでコンクリート中の鉄筋は腐食している箇所が見られる。腐食している箇所はより活性化(錆やすい)しているので、ひびわれ無しの供試体の鉄筋の表面状態と異なる。そのため、同じ電流量を与えても腐食している部分を還元するために電流が使われるので、ひびわれ無しの供試

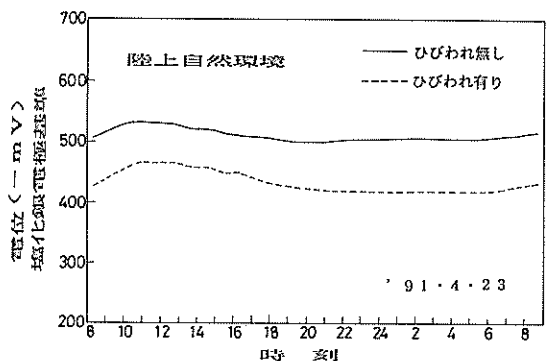


図-20 一日の環境サイクルに伴う電位変化(2), (天候:晴)

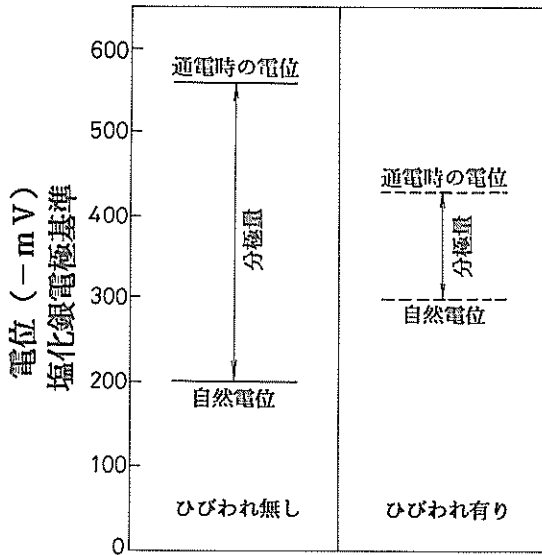


図-21 ひびわれ有り、ひびわれ無し供試体の分極量の差 (陸上自然環境)

体ほど分極が進まず貴な傾向を示したものとされる。すなわち、図-21に示すようにひびわれ無しの供試体は自然電位が-200mV程度で通電による分極量は360mV程度であるが、ひびわれ有りの供試体では自然電位が-300mV程度で通電による分極量は130mV程度である。したがって、通電時におけるひびわれ有りの供試体はひびわれ無しの供試体よりも貴な電位を示していることとなる。

既設構造物に電気防食を施工した場合に、その防食電位は一般的には-300mV~-400mV程度であると言われている⁹⁾。このことは、上述したようにコンクリート中の鉄筋が多少なりとも腐食している箇所がその構造物に有る場合には、その総合的な電位に対して、電流を流し分極するには鉄筋表面が錆のないホワイトメタル状 (図-20、ひびわれ無し供試体) の場合と異なる。錆の部分を選元する必要が生じてくるために、分極量に差が出てくる。それに伴い電位も変化するものと思われる。

3.3 天候による電流、電位の変化

天候が晴の場合には、図-13に示すように海水シャワー環境においてはシャワーがかかると電流は増加する傾向を示した。図-22に示すように天候が雨の場合にも図

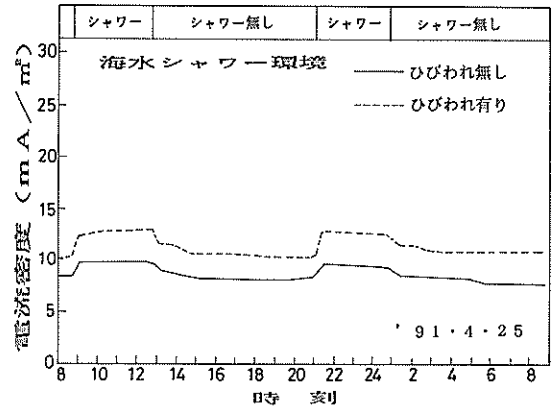


図-22 天候が雨の場合の電流変化 (1)

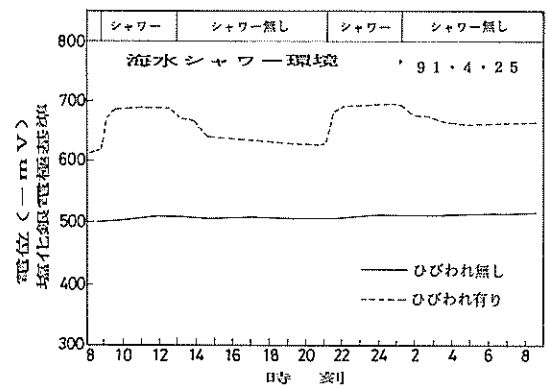


図-23 天候が雨の場合の電位変化 (1)

図-13と類似した傾向を示したが、電流量は晴の場合に比べて小さかった。

また、図-23の雨の場合の電位変化を見ると、ひびわれ有りの供試体では天候が雨であっても海水のシャワーがかかると電位は卑の方向へ移行し、シャワーのかかっていない時間帯では貴な値を示している。ひびわれ無しの供試体では図-19に示すように天候が晴の場合には、電位が卑になるピークが認められたが、図-23に示すように天候が雨の場合には、そのピークは見られず一日を通してほぼ横ばい状態であった。このことは、天候が雨であるために気温が上がらず、その上、雨によりコンクリート表面が湿潤状態に保たれていることからコンクリート表面が乾燥している状態よりも酸素の透過性が減少しているために、このような傾向を示したものと思われる。

図-24の陸上自然環境における天候が雨の場合の電流

* 分極とは電流が流れている場合の電位を E_1 、流れていない場合の電位を E_0 とすると、 $E_1 - E_0 = E$ を分極と言い、陽分極は陽極面に現れる E を言う。

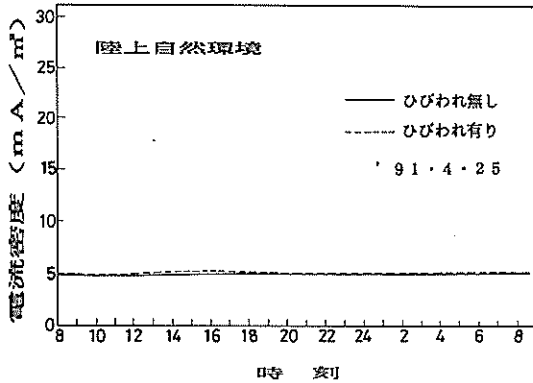


図-24 天候が雨の場合の電流変化 (2)

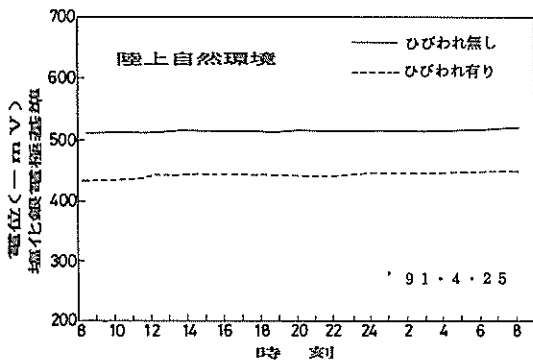


図-25 天候が雨の場合の電位変化 (2)

の変化では、図-14で見られたような14時から16時頃の間電流の増加傾向は見られず、電流量も晴の場合と比べて小さく約5mA/m²であった。

また、電位の傾向は図-25に示すように晴の場合と異なりひびわれ有り、ひびわれ無しの供試体ともほぼ横ばい傾向を示している。この環境において電流、電位の大きい変化が認められなかった理由としては海水シャワー環境と同様に雨によりコンクリート表面の湿潤状態に伴い、酸素の透過性の減少と気温が晴の場合のように高くならなかったためと思われる。

3.4 温度と電流、電位の関係

図-26は陸上自然環境における、天候が晴の条件で、昼間の時間帯になると気温が高くなる場合の電流と供試体の温度との関係を示したものである。ひびわれ有り、ひびわれ無しの供試体とも供試体の温度が高くなるに従い電流量も増加する傾向を示し、供試体の温度が低くなると電流量は減少した。従って、電流量の増減は温度に

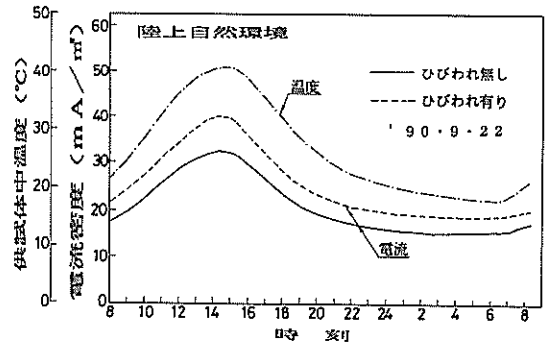


図-26 供試体温度と電流の関係 (天候：晴)

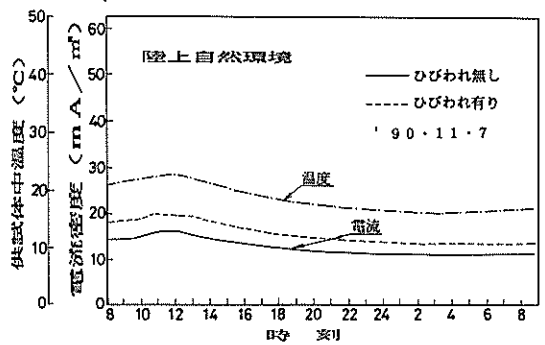


図-27 供試体温度と電流の関係 (天候：曇り)

影響を受けることが分かる。この図では15時頃に供試体の温度のピークが見られ、そのピークに合わせて電流のピークが認められる。温度が高くなるに従い亜鉛シート陽極がより活性化するために発生電流も増加するものと思われる。

図-27は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温度と電流の変化を図示したものである。この場合には供試体の温度があまり高くないと電流量の増加は見られない。

このように温度の上昇に伴う電流の増加の傾向は外部電源方式による定電位法で電気防食を行った場合にも同様な傾向が認められ、温度の上昇に伴い設定電位を維持するために電流の増加が見られた²⁾。

また、プレストレストコンクリートへの流電陽極方式の適用の際にも同様な傾向が認められた⁷⁾。

図-28、図-29は供試体の温度と電位の関係を示した図である。図-28 (天候：晴) では電流の場合と同様に温度が高くなるに従い電位もすこしづつ単なる方向へ移行し、温度の低下とともに貴な方向へ移行する傾向を示し

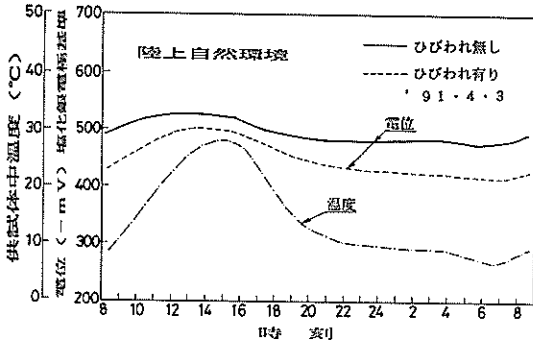


図-28 供試体温度と電位の関係 (天候：晴)

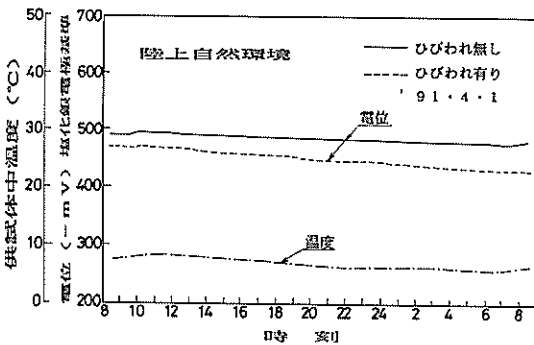


図-29 供試体温度と電位の関係 (天候：曇り)

ている。しかし、図-29の天候が曇りの条件で温度が高くない場合には、電位に変化は見られず、ほぼ横ばい状態を示した。

したがって、電流、電位の変化は天候や温度によってかなり影響を受けることが明かとなった。天候、温度と電流、電位の関係を整理してみると表-5のようになる。すなわち、天候が晴で温度が高くなると電流は増加し、電位は卑の方向へ移行する。天候が雨で温度が低い場合には電流の増加は見られず、電位も卑の方向への移行は認められない。

3.5 復極試験

図-30および図-31は亜鉛シート陽極からコンクリート中の鉄筋へ電流を流している回路を切った後の、鉄筋の電位の復極状況を示した図である。

図-30の海水シャワー環境における復極状況は、ひびわれ無しの供試体では復極が急速に進み、ほぼ10時間後には安定した電位を示した。しかし、ひびわれ有りの供試体では24時間後でも安定した値を示さず、復極は非常

表-5 天候、温度と電流、電位の関係

天候, 温度 電流, 電位	天 候		温 度	
	晴	雨	高い	低い
電 流	大	小	大	小
電 位	貴→卑	貴	貴→卑	貴

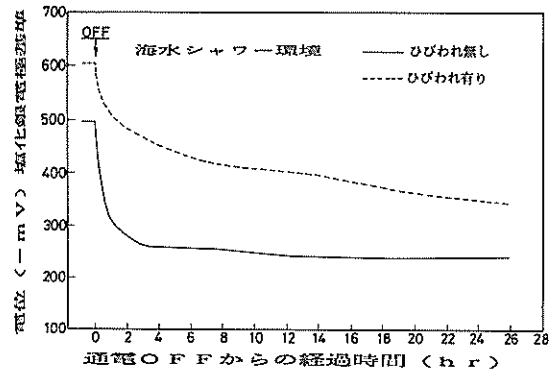


図-30 開路電位変化 (1)

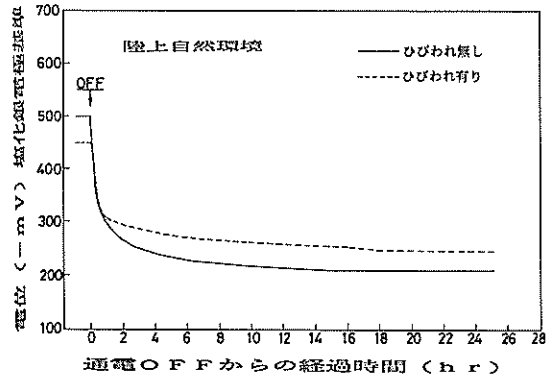


図-31 開路電位変化 (2)

に遅かった。

図-31の陸上自然環境での復極状況はひびわれ有り、ひびわれ無しのいずれの供試体も復極は速やかに進み、いずれの供試体も10時間後程度では安定した値を示した。

コンクリートの電気防食の防食効果を判定する基準の一つとしてよく用いられるものに、100mVシフト基準による方法⁹⁾がある。この方法は図-32に示すように、まず、分極試験を行い、試験終了後、電流を切った直後のインスタントOFF電位を測定する。その後、4時間

経過後の自然電位を測定する。この4時間経過後の自然電位がインスタントOFF電位よりも100mV以上の差が認められる場合には電気防食の防食効果が期待出来るとし、100mV以下では防食が不十分であるとする基準である。

この基準を照合して各供試体のインスタントOFF電位と4時間後の電位を整理すると表-6のようになる。いずれの供試体も100mV以上の分極量を示しており、100mVシフト基準を満足していた。

しかしながら、両環境におけるひびわれ有りの供試体ではひびわれ無しの供試体に比べて、分極量は少ない傾向を示した。この理由としては、コンクリート中の鉄筋の表面状態の差（錆の有無）と供試体がひびわれを生じているために、通電を切ってから無通電状態になるとひびわれ部に露出した鉄筋が腐食反応を示し始めるためと考えられるが、ハッキリした原因は分からない。

3. 6 供試体の温度と発生電流密度の関係

コンクリート中に埋設されている温度センサーにより供試体の温度をある一定期間、1時間毎に測定した。その値とその時間における電流量を求め、供試体の温度と発生電流密度との関係を整理してみると表-7および図

-33, 図-34のようになる。なお、電流の測定値は通電の初期には大きい電流が流れるために、流れる電流がある程度安定した通電5カ月後から1年間の電流の発生傾向を求めた。また、環境としては海水シャワー環境では海水の影響が入ってくるので、海水の影響の無い陸上自然環境の供試体のひびわれ有り、ひびわれ無しの2供試体について整理した。

図-33は月毎における電流量の平均値を図示した。図-33より発生電流量は季節的な影響が見られ、12月、1月、2月、3月では供試体の温度がマイナスを示した時もあり、発生電流量はとくに1月、2月に少ない傾向を示した。当然ながら夏期には温度は高く、それに伴い発生電流量も多くなっている。しかし、夏期の9月と秋期の11月は6月から8月に比べて発生電流量が全般に小さい傾向を示した。その理由としては、9月、11月には雨の天候が非常に多かったためである。9月および11月の雨の日はそれぞれ18日間、19日間であった。前述したように天候が雨の場合には、コンクリート表面が湿润状態となり電流量の増加傾向が認められないためである（図-24）。

図-34は1年間を通しての供試体の温度と発生電流量との関係を示したものである。温度の上昇とともに電流量は増加していくことが分かる。このことはコンクリート表面の湿润状態やコンクリートの置かれた環境条件とも関係してくると思われるが、亜鉛シート陽極の温度変化による発生電流量をある程度推定することが出来る。例えば、供試体の温度が $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ の範囲では平均発生電流密度は $3.4\text{mA}/\text{m}^2$ 程度であり、供試体の温度が $40^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ の範囲では $15.1\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電流が発生している。また、供試体の温度が低い場合には、亜鉛シートの活性化が減少するものと思われるが、図-15に示す

表-6 インスタントOFF電位と4時間後の電位

条 件	インスタントOFF電位 (mV)	4時間後の電位 (mV)	分極量 (mV)
海水シャワー ひびわれ有り	-597	-450	147
海水シャワー ひびわれ無し	-489	-258	231
陸上自然 ひびわれ有り	-444	-280	164
陸上自然 ひびわれ無し	-494	-245	249

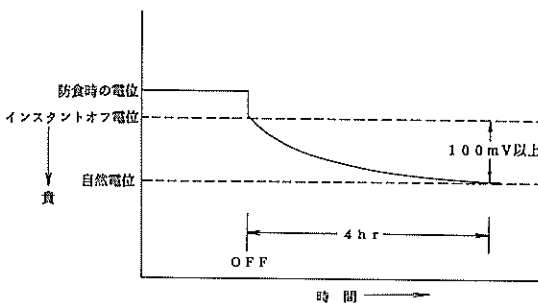


図-32 100mVシフトの概略図

表-7 供試体の温度と発生電流量

供試体中温度範囲 (°C)	電 流 密 度 (mA/m ²)		
	平均値	最大値	最小値
-5.0~ 0.0	3.35	5.31	2.13
0.1~ 5.0	4.20	9.38	2.75
5.1~10.0	5.28	10.13	3.44
10.1~15.0	5.72	12.06	4.06
15.1~20.0	6.99	14.38	4.94
20.1~25.0	8.88	16.75	6.13
25.1~30.0	10.37	18.75	7.50
30.1~35.0	11.91	18.13	8.88
35.1~40.0	13.75	20.00	11.88
40.1~45.0	15.14	18.38	14.87

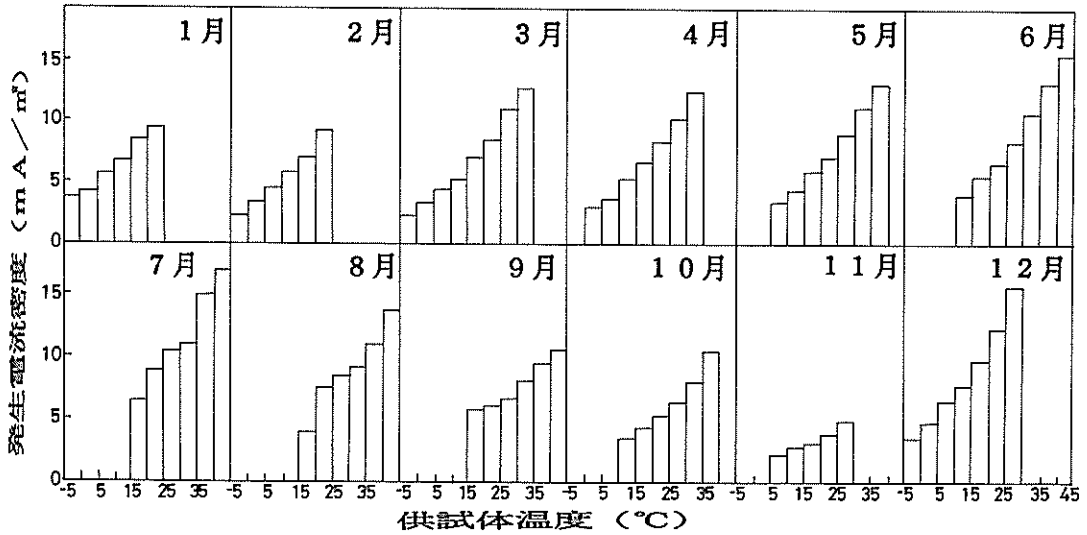


図-33 供試体温度と月別発生電流量の関係 (陸上自然環境)

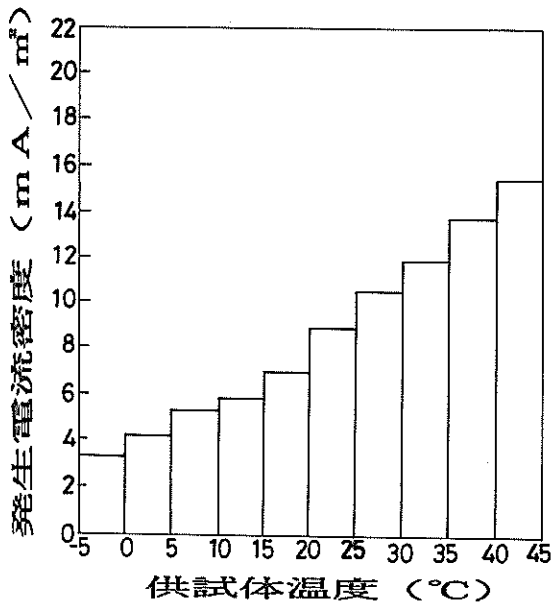


図-34 供試体温度と発生電流量の関係(陸上自然環境)

ように試験期間中の通電時の電位は約-400mVより卑な値を示していることより、温度が低くても図-31の開路電位の4時間後の自然電位の値と比較すると100mV以上の電位差を保っており、供試体中温度が非常に低い場合(マイナスの温度)の電流密度でも十分防食出来る電流量であることがわかる。また、堺等による報告⁹⁾でも供試体中温度が-20°C程度と低温になっても流電陽

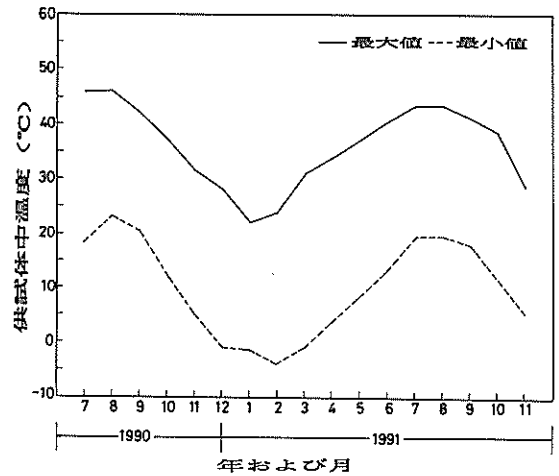
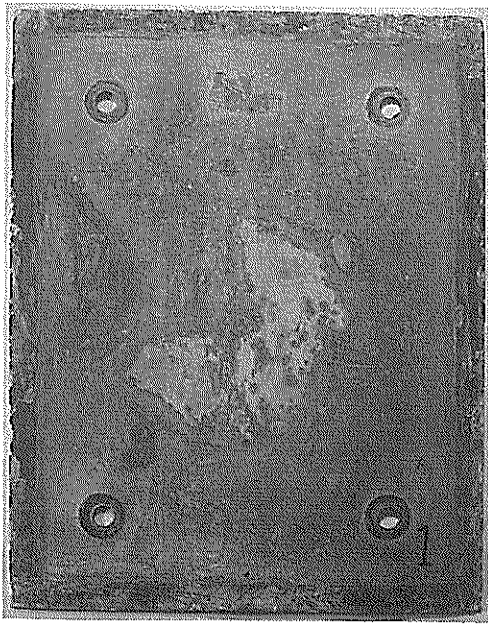
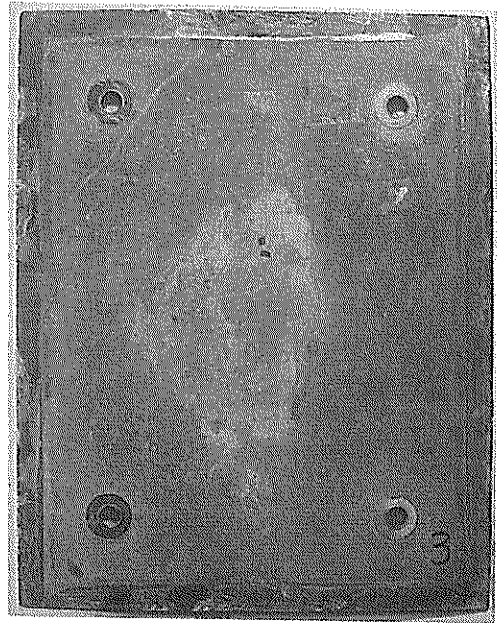


図-35 試験期間中の供試体温度

極方式では低温時の防食電位は高温時の電位とあまり変化なく正常な防食電流を発生し防食効果が認められたとしている。すなわち、腐食電流に見合った防食電流を供給することが電気防食の経済的な考え方とするならば、温度が高ければ高いなりに電流密度が大きくなり、温度が低ければ低いなりに電流密度が抑えられ、温度の変化に応じて電流が変化する、この流電陽極方式は合理的な防食方法であると言える。なお、図-35に試験期間中における供試体の最大および最小温度を示す。最大は1990年8月の46.0°C、最小は1991年2月の-4.3°Cであった。

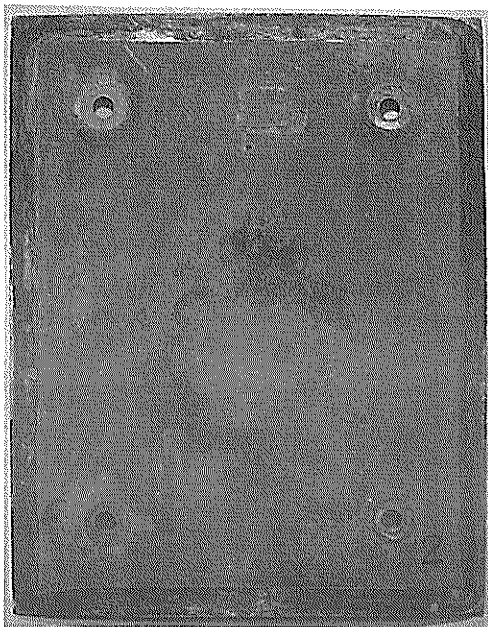


供試体 No.1

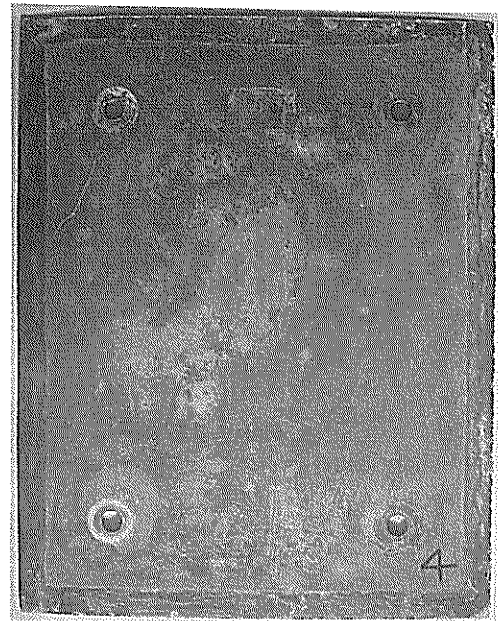


供試体 No.3

海水シャワー環境



供試体 No.2



供試体 No.4

陸上自然環境

写真-1 試験後の陽極板（亜鉛シート）の表面状況

3.7 回収供試体の観察

(1)亜鉛シート陽極の消耗状況およびバックフィルの状況
供試体回収時に亜鉛シートを剥して、亜鉛シート陽極

の消耗状況およびコンクリート表面と亜鉛シート陽極の間に充填されているバックフィルの状態を観察した。
亜鉛シート陽極の消耗状況を写真-1に示す。また、

亜鉛シート陽極に生成した腐食生成物を除去して、重量測定により亜鉛シート陽極の消耗量を求めた。その結果を表-8に示す。亜鉛シート陽極の消耗状況は通電試験期間が約1年5ヶ月と短かったために極端に消耗しているような状態ではなかった。しかし、写真-2に示すように海水シャワー環境に暴露されていた供試体では亜鉛シート陽極の端部や角部において亜鉛シート陽極の腐食の大きい箇所が見られた。端部はウレタンシールテープで仕切をしているが、直接海水の接触があったために、この部分の腐食が大きくなったものと思われる。従って、このような状態を防ぐには、例えば、端部や角部をモルタル等で被覆して直接海水の接触を防ぐ等の対策が必要である。特に、現場で波しぶきのかかるような環境における施工では直接亜鉛シートの材料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-8の重量測定結果より亜鉛シート陽極の消耗量を見ると、海水シャワー環境に暴露されていた方が陸上自然環境に暴露されているものより消耗量はやや多かった。このことは流れる電流量が海水シャワー環境の方がやや全般的に大きかったことによるものと思われる。陽極の消耗量から、この施工でコンクリート中の鉄筋を防食し続けた場合の、おおまかな亜鉛シート陽極(2mm厚)の総寿命を推定してみると、いずれの供試体でも40年以上防食出来ることが推定される。

亜鉛シートを剥して、バックフィルの状態を観察した。その結果、いずれの供試体ともバックフィルは十分湿潤状態にありバックフィルそのものが乾燥したり、固化したようなものはなかった。また、バックフィルの充填状況も良好で、空洞化しているような箇所は認められなかった。その上、バックフィルを除去したコンクリート表面は十分に湿っている状態であり電流を流すには良好な表面状態を保っていた。したがって、この試験に用いたバックフィル材は水分の保水性については十分に優れていたものと考えられる。その状況を写真-3に示す。

表-8 亜鉛陽極の消耗量測定結果

暴露環境および供試体の条件	供試体 No.	初期重量 (gr)	試験後重量 (gr)	消耗量 (gr)
海水シャワー ひびわれ有り	1	1660	1604	56
海水シャワー ひびわれ無し	2	1655	1600	55
陸上自然 ひびわれ有り	6	1660	1610	50
陸上自然 ひびわれ無し	7	1635	1595	40

(2)供試体破壊後の内部鉄筋の観察

試験終了後、供試体を回収してコンクリート中の鉄筋の錆の状況を観察し、錆の発生率を求めた。その結果を表-9および図-36~図-39(各鉄筋の展開図)に示す。なお、錆発生率は供試体中のすべての鉄筋の表面積に対する百分率で表示した。図-36~図-39の錆の発生観察で、鉄筋の方向と位置は図-40に示す鉄筋 No.1~No.5の右側、鉄筋 No.6~No.8の下側が図-36~図-39の右側にそれぞれ位置する。したがって、供試体に丁度ひびわれが発生している下の鉄筋は No.7の位置となる。そのため、ひびわれ有りのいずれの供試体も No.7の鉄筋に最も錆の発生部分が多かった。これに対して、No.1~No.5はひびわれが横切る鉄筋部分が錆ている。No.6,8はひびわれから離れているので錆はわずかであった。

表-9によると、海水シャワー環境および陸上自然環境とも供試体にひびわれの無いものについては電気防食を実施した供試体、無防食供試体ともにコンクリート中の鉄筋には錆の発生は認められなかった。また、ひびわれ有りの供試体は暴露試験を開始する前に、前述したようにコンクリート中の鉄筋の錆の存在下における防食試験を行うため、鉄筋の電食を行い、腐食を促進させてから暴露試験を実施したため、試験開始より錆が認められていたこととなる。当初、電気防食を実施する前の錆の状況ある程度把握しておく目的のために同一条件で電食を行った供試体 (No.5, No.10) を表-2に示すように8ヶ月後に回収し破壊した。破壊後コンクリート中の鉄筋の錆の状態を観察し錆発生率を求めた。ここで観察された供試体 No.5 (海水シャワー環境) および供試体 No.10 (陸上自然環境) のコンクリート中鉄筋の錆

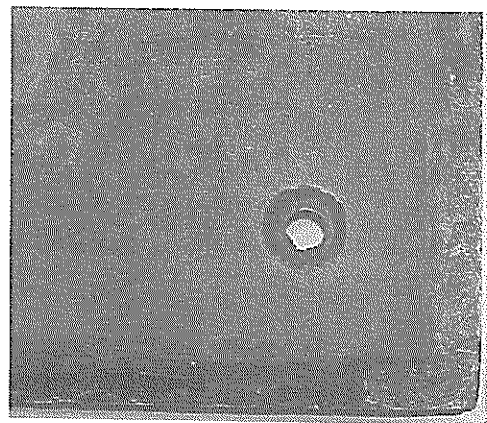


写真-2 陽極板(亜鉛シート)端部の腐食状況
(海水シャワー環境)

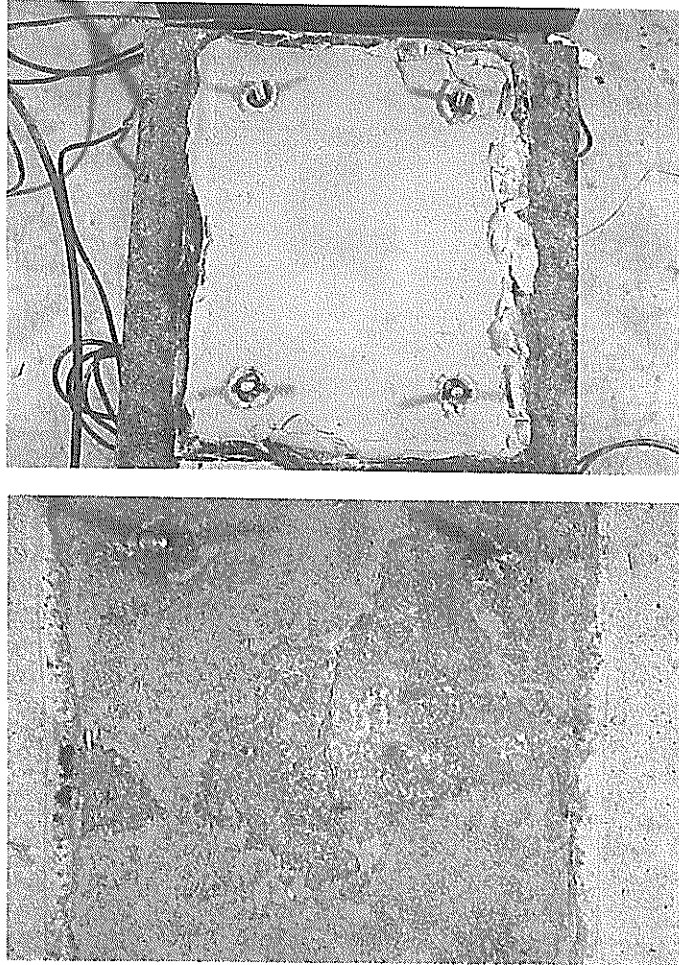


写真-3 バックフィルの充填状況（上）およびバックフィル除去後のコンクリート表面状況（下）

表-9 各供試体中鉄筋の錆発生率

環境	電気防食の有無	ひびわれの有無	供試体 No.	錆発生率 (%)
海水 シャワー	有	有	1	7.8
	有	無	2	0
	無	有	3	14.4
	無	無	4	0
	無	有	5*	12.6
陸上 自然	有	有	6	7.0
	有	無	7	0
	無	有	8	13.8
	無	無	9	0
	無	有	10*	10.1

*：供試体 No. 5, 10は初期の錆発生率を示す。

の発生率を初期値として暴露試験後の供試体の鉄筋の錆の発生率と比較して防食効果等を検討するものとした。初期の錆の発生率が供試体やひびわれの状況により多少なりとも異なるものと考えられるが、ひとつの目安とした。その初期値の錆の発生状況を図-41～図-42および表-9に示す。

表-9より、この初期の錆発生率と暴露試験後の鉄筋の錆の状況を環境別に比較してみた場合、錆発生率は海水シャワー環境（供試体 No.1, No.3）、陸上自然環境（供試体 No.6, No.8）とも無防食の場合には2～3%程度錆発生率が増加していることが分かる。しかし、電気防食を行った供試体については、錆発生率は初期のもの（供試体 No.5, No.10）より減少していた。このことは、電気防食を行ったことにより電食により鉄筋表面の不動態膜の破壊された部分が防食されたことを意味

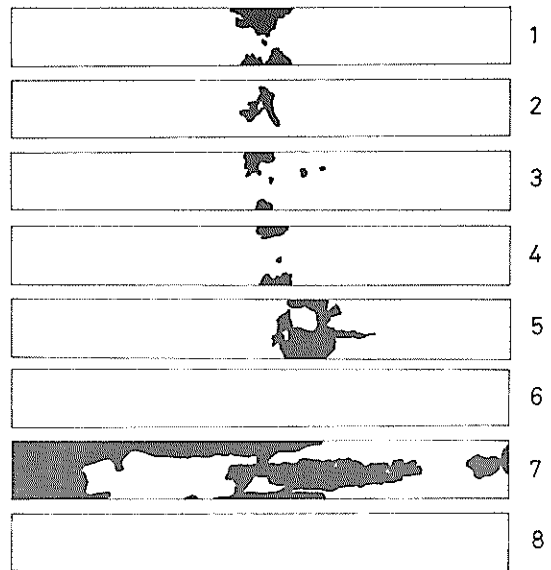
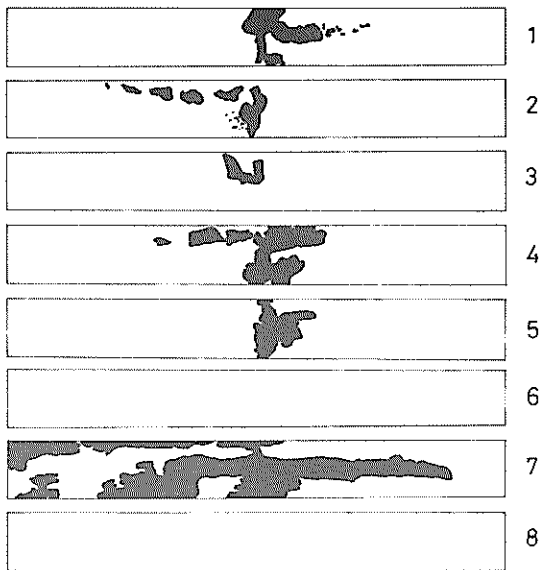


図-36 鉄筋の錆発生観察結果 (供試体 No.1, 防食)
 黒色部：錆発生箇所

図-38 鉄筋の錆発生観察結果 (供試体 No.6, 防食)
 黒色部：錆発生箇所

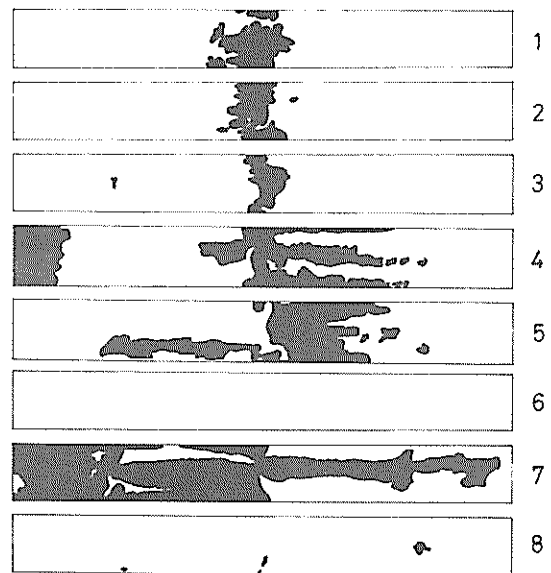
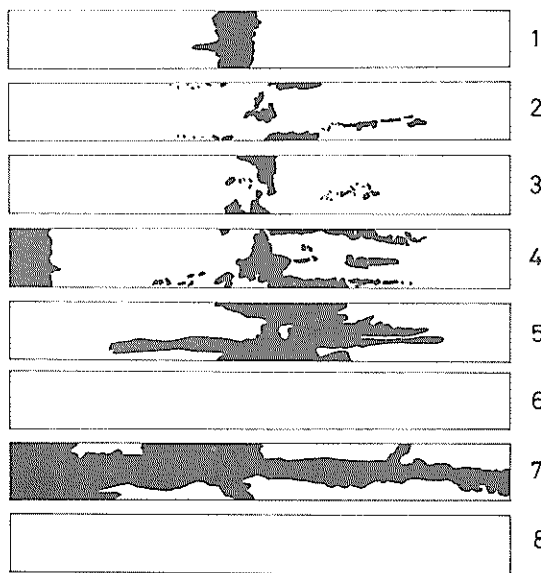


図-37 鉄筋の錆発生観察結果 (供試体 No.3, 無防食)
 黒色部：錆発生箇所

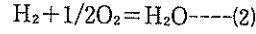
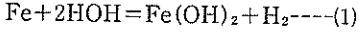
図-39 鉄筋の錆発生観察結果 (供試体 No.8, 無防食)
 黒色部：錆発生箇所

する。すなわち、電食を行った時点で、鉄筋のある部分では電流の流出とともに不動態膜が破壊されてはいるがまだ錆に至っていない部分がある。その部分へ電気防食を行うことにより錆の発生を防止したものと推定される。これに対して、無防食の場合にはその部分が時間の経過

とともに外部からのClイオンの浸透や酸素透過により腐食反応を示し、錆の生成がみられるようになってものと考えられる。

また、写真-4に示すように電気防食を実施した鉄筋の錆と無防食の場合の鉄筋の錆を比較した場合に、電気

防食を行った鉄筋の錆の色は黒色であるのに対して無防食の鉄筋の錆の色は通常見られる茶褐色の錆であった。電気防食を行った鉄筋の黒色の錆は次の化学式に示される通常の水酸化第二鉄の前段階の水酸化第一鉄 (Fe(OH)₂) と思われる。すなわち、鉄が酸化する場合には次のような化学式で酸化していくと言われている¹⁰⁾。



(1)と(2)式の反応が同時におこり、次に Fe(OH)₂の水酸化第一鉄が水に溶けて鉄面を離れたところで、さらに水と酸素で酸化されて、水に不溶な水酸化第二鉄に変わる。

$$\text{Fe}(\text{OH})_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} + 1/4\text{O}_2 = \text{Fe}(\text{OH})_3 \text{---(3)}$$

茶褐色の錆の色は水酸化第二鉄を主成分とし、水酸化第一鉄が若干混ざっているものである。このことを考慮した場合に電気防食を行った鉄筋の錆の黒色の大部分は水酸化第二鉄の前段階の水酸化第一鉄であることが分かる。電気防食を行ったことにより3価の鉄イオン (Fe⁺⁺⁺) から2価の鉄イオン (Fe⁺⁺) に変化し水酸化第二鉄の錆が還元された結果によるものと思われる。したがって、電気防食は錆の発生している鉄筋においてもその錆を還元させる作用を有していることとなり、錆の存在している鉄筋においても防食効果が認められることがわかる。また、鉄筋周辺は還元反応を示すことにより、その部分は再び高アルカリの雰囲気復活する。

通電試験は約1年5ヶ月と短い期間ではあったが、無防食供試体のひびわれ有りの供試体では錆発生率が初期の状態よりもやや増加したことから判断すると、さらに無防食の状態暴露した場合にはコンクリート中の鉄筋の腐食はますます広がるものと思われる。

また、海水シャワー環境における無防食供試体 (ひびわれ有り供試体) の鉄筋には写真-5に見られるように、

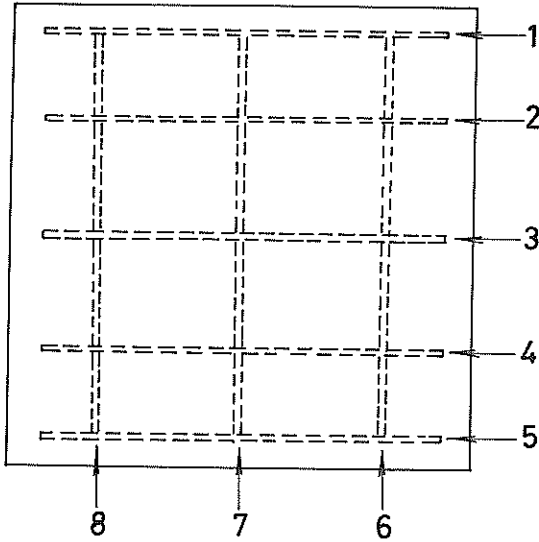


図-40 鉄筋の位置および No.

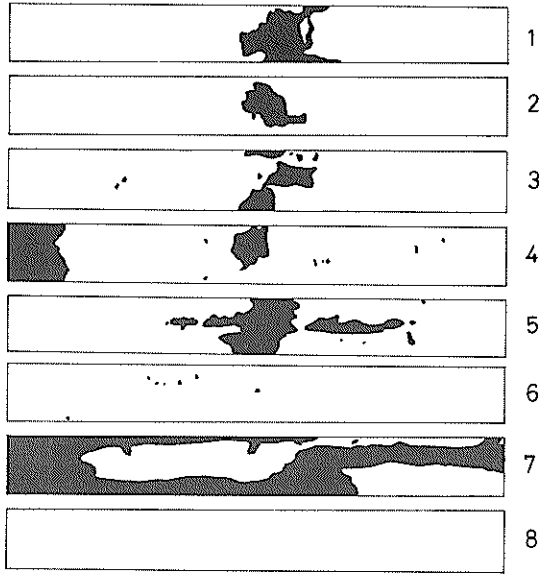


図-41 鉄筋の錆発生観察結果 (供試体 No. 5, 無防食)
 黒色部：錆発生箇所

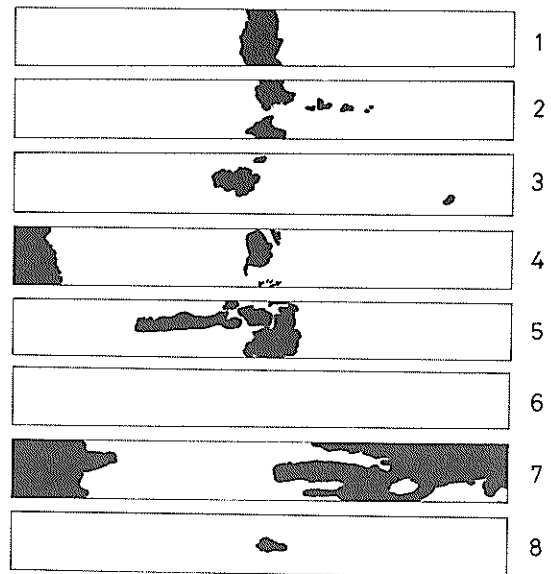


図-42 鉄筋の錆発生観察結果 (供試体 No. 10, 無防食)
 黒色部：錆発生箇所

局部的に腐食が孔状に進行する孔食が認められた。孔食の位置はひびわれ部直下の鉄筋表面に見られた。このような孔食は他の供試体では見られなかったことから判断すると、このような深い孔食が発生した原因は、海水シャワー環境でのかなり過酷な環境とひびわれ有りの供試体の条件が重なり、孔食の発生部分がアノードを形成し、その他の部分がカソードを形成する大きなマクロ腐食が発生したためと思われる。すなわち、アノードの面積に対してカソードの面積が非常に大きい場合には、アノードからカソードへ流れる腐食電流は非常に大きくなる。その結果、このような深い孔食が発生したものと思われる。孔食の深さは最大2.2mmであった。腐食速度をこの値で計算すると1.4mm/yrとなり、ここで用いた鉄筋

の直径が13mmであることを考えると10年未満で鉄筋は直径に到達してしまうこととなる。このような鉄筋への孔食の発生は鉄筋の断面を減少させることになり、コンクリート構造物にとっては耐力の低下につながってくるので非常に危険なことである。電気防食を実施した同じ条件下の供試体ではこのような孔食は見られなかったことより、電気防食は孔食を防止するためにも効果のあることが認められた。

(3)コンクリート中の塩化物イオン量

コンクリート中に浸透した塩分を測定するために分析用の試料を採取した。試料は、まずコンクリート中にある暴露試験前の塩化物イオン量を測定して暴露試験後のものと比較をするために、表-2に示すNo.5およびNo.10の供試体より供試体を破壊する時点で試料を採取した。また、暴露試験後には各環境とも電気防食用供試体と無防食供試体のひびわれ無しの供試体 (No.2, No.4, No.7, No.9) より試料を採取した。図-43に示すように試料の採取位置は供試体の角部分4cm×4cmの交点であり、深さはコンクリート表面より1cmないし2cmピッチで7cmの深さまで採取した。塩化物イオン量の分析方法は(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」(7)に準拠して行った。塩化物イオン量の分析結果を表-10に示す。表-10に示すように陸上自然環境では電気防食を実施した供試体と無防食の供試体は暴露試験前の供試体No.10の塩化物イオン量とあまり大きな差は見られなかった。しかし、海水シャワー環境の供試体では無防食の供試体 (No.4) は暴露試験前の供試体 (No.5) と比べて3~5倍と塩化物イオン量が多くなっていることが分かる。電気防食を行った供試体は暴露試験前の供試体と大差なく、電気防食によりコンクリート中の塩化物イオンの浸透が抑えられたものと思われる。すなわち塩化物イオン量が少ない原因は、陰イオンであるClイオンは亜鉛シート (陽極) 付近へ集まる傾向を示すのでコンク

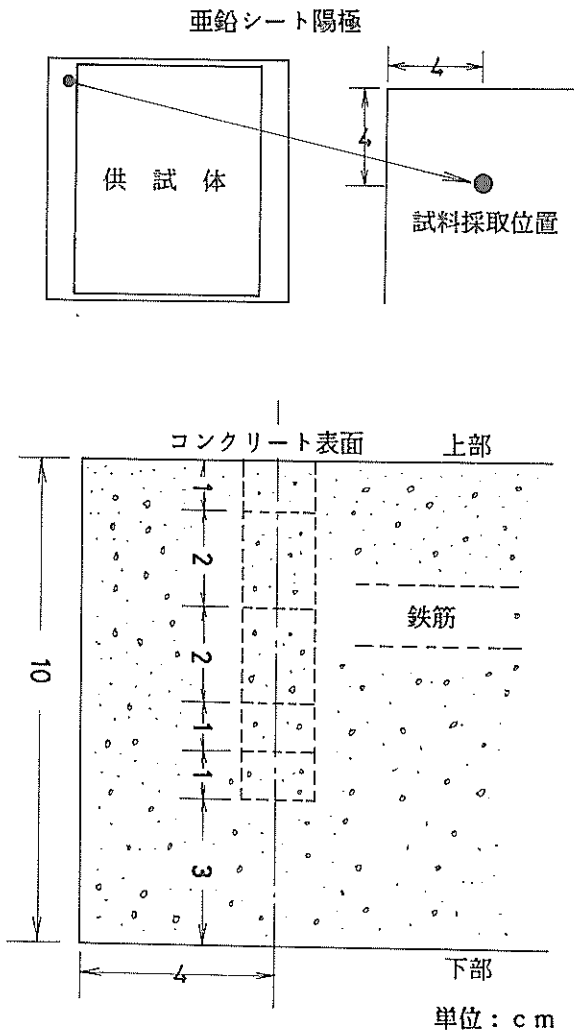


図-43 塩化物イオン量分析のための資料採取位置

表-10 塩化物イオン量の分析結果 単位: Wt%

表面からの距離 (cm)	海水シャワー環境			陸上自然環境		
	電気防食	無防食		電気防食	無防食	
	No.2	No.4	No.5	No.7	No.9	No.10
0~1	0.168	0.327	0.114	0.168	0.128	0.093
1~3	0.030	0.109	0.034	0.028	0.030	0.033
3~5	0.020	0.152	0.026	0.020	0.030	0.027
5~6	0.020	—	—	0.020	—	—
6~7	0.024	—	—	0.020	—	—

リート内部への浸透が阻止されたこととなる。この傾向は外部電源方式による電気防食試験²⁾でも確認されているが、流電陽極方式においても同様の傾向のあることが確認された。

4. 結論

亜鉛シートを陽極として用いた流電陽極方式による電気防食試験を実施した結果、以下に示す事柄が明らかとなった。

1) 亜鉛シートを陽極材とした流電陽極方式による電気防食はコンクリート中の鉄筋への防食方法として効果のあることが認められた。また、コンクリートにひびわれがあり、内部の鉄筋に錆の認められる場合にも、防食効果のあることが分かった。その上、電気防食は孔食の防止効果も認められた。

2) 防食電流密度はコンクリート中の温度により変化し、温度が高いと防食電流密度は増加し、温度が低いと減少する傾向を示した。年間を通しての防食電流密度は3~15mA/m²程度であった。

3) 海水シャワー環境では天候が晴の場合には、海水のシャワーがかかると防食電流は増加し、海水のシャワーが停止すると減少する傾向を示した。天候が雨の場合にも晴と同様な傾向を示したが、防食電流量は晴の場合に比べて小さかった。

4) 陸上自然環境において、天候が晴の場合には朝から気温が高くなるにつれて防食電流は増加してゆき、昼間の午後増加のピークを示し夜間に入ると減少した。また、天候が雨の場合には晴の場合のような電流の増加するピークは見られず、ほぼ横ばい状態であった。

5) 海水シャワー環境における通電時の電位は、ひびわれ無しの供試体では-400mV~-600mV (vsAg/AgClE.L.) 程度の値であり、ひびわれ有りの供試体では-600mV~-800mV (vsAg/AgClE.L.) 程度であった。ひびわれ有りの供試体で単な電位を示した理由は、ひびわれ部より海水を通して電流が容易にコンクリート中の鉄筋へ流れたためと思われる。

6) 陸上自然環境での通電時の電位はひびわれ有り、ひびわれ無しとも大きな差はなかったが、ひびわれ有りの方がやや貴な電位を示した。電位は-400mV~-600mV (vsAg/AgClE.L.) 程度の値であった。

7) 無防食供試体の電位は、ひびわれ有りの供試体では海水シャワー環境で-300mV~-360mV (vsAg/AgClE.L.) 程度、陸上自然環境では-300mV 前後を示し錆の発生可能な値であった。ひびわれ無しの供試体では両環境とも-200mV より貴な値であった。

8) 各供試体の通電停止4時間後の電位は両環境とも、ひびわれ有り、ひびわれ無しのいずれの供試体も100mV以上のシフトが見られた。しかし、海水シャワー環境におけるひびわれ有りの供試体ではその復極速度は他の供試体に比べて遅かった。

9) 流電陽極方式による電気防食では、供試体の温度の高い場合には大きい電流を発生し、温度の低い場合にはより小さい電流を発生することが分かった。また、コンクリート中の温度がマイナスを示すような低温時の場合でも陽極の性能には問題無く防食電流は十分流れることが認められた。したがって、腐食の活性化に比例して電流の増減が行われることが分かった。

10) 亜鉛シート陽極の陽極消耗状況は試験期間が1年5ヶ月(通電期間)と短かったために、あまり消耗量としては大きくなかったが、今回用いた、厚さ2mmの陽極材では推定総寿命は40年以上維持出来るものとする。また、亜鉛シート陽極とコンクリート面との間に充填されていたバックフィルの状態は乾燥や固化しているものは無く、電流を流すのに良好な状態であった。

11) 流電陽極方式においても外部電源方式と同様にコンクリート中の鉄筋周辺のCl⁻イオンを除去する効果のあることが分かった。

5. あとがき

今回の試験では通電期間が1年5ヶ月と短い期間であったために電気防食を実施した供試体と無防食供試体との比較を行い、その防食効果については必ずしも十分満足のいく資料を得ることは出来なかったが、少なからず流電陽極方式による電気防食の防食効果や環境条件による電流や電位の変化についての資料を得ることが出来たものとする。

今後は、劣化度の異なるコンクリートへ電気防食を行う場合の所要防食電流密度と電位の関係やコンクリート中の鉄筋のアノード、カソードの面積比の差による所要防食電流密度や電位等電気防食の設計法に関する資料を得るための試験を実施したいと考えている。

(1992年6月30日受付)

6. 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：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，p36~84，1989.
- 2) 阿部正美，福手 勤，濱田秀則，山本邦夫：海水飛沫を受ける鉄筋コンクリート構造物への電気防食工法の適用に関する基礎的研究，港湾技術研究所資料，

- No. 695, 1991.
- 3) K.B.Pithouse: The Cathodic Protection of steel reinforcement in concrete, p113~119, Corrosion Prevention & Control, 1986.
 - 4) C.J.Mudd 他: Cathodic Protection of Steel in Concrete, p18~24, Material Performance, 1988.
 - 5) ASTM.C876-77: Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete.
 - 6) 中村 豊, 池田辰男, 長田雅人, 善 一章, 千葉丈夫: 港湾コンクリート構造物への電気防食の本格的適用, コンクリート工学, Vol.22, No.2, 1991.
 - 7) 関 博, 福手 勤, 阿部正美, 千葉丈夫, 井川一弘, 石井浩司: プレストレストコンクリート港湾構造物への電気防食の適用に関する基礎実験, 第37回腐食防食討論会講演集, B-101, 1990.
 - 8) (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), p30~33, 1983.
 - 9) 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, 1991.
 - 10) 山本洋一: 金属防食技術の実際, オーム社, p65~66, 1961.

港湾技研資料 No.740

1992.9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 阿部写真印刷株式会社

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

Copyright ©(1991) by P.H.R.I

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

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