

# 海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食

—各種のセメントを用いたコンクリートの暴露試験—

竹田 宣典 十河 茂幸  
芳賀 孝成

## Penetration of Chloride Ions into Various Concretes and Corrosion of Reinforcing Bars in Marine Environments

—Exposure Test in Marine Environments of Concrete Using Various Cements—

Nobufumi Takeda Shigeyuki Sogo  
Takashige Haga

### Abstract

Exposure tests of various concretes in marine environments were conducted over a period of six years to investigate the durability of concrete structures. The coefficient of diffusion of chloride ions into concrete is determined based on diffusion theory, long-term permeation quantities are predicted, and the results of examinations for influences of types of cements or environmental conditions on progress of reinforcing bar corrosion are described in this paper. The following results were obtained. ① It is possible that permeation of chloride ions into concrete is restrained in case of using blast-furnace slag or silica fume. ② As for reinforcing bar corrosion, environmental conditions are severest in the order of parts in the splash zone, underwater, and in air offshore. ③ Corrosion often progresses from cracks and construction joints

### 概 要

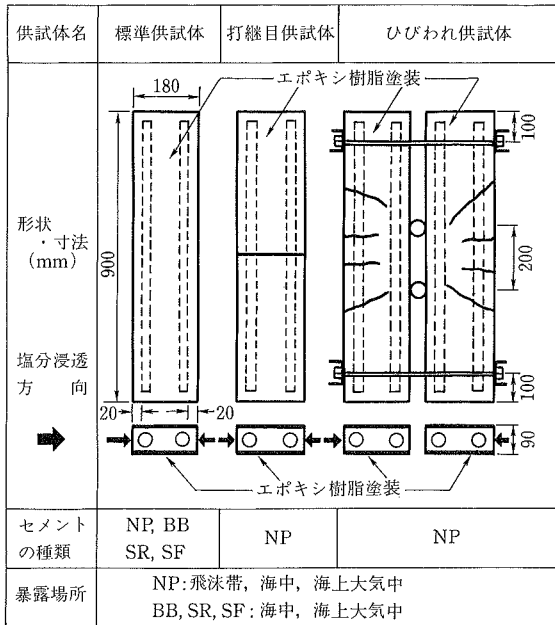
海洋環境下におけるコンクリート構造物の耐久性を把握することを目的として、飛沫帯、海上大気中、海中等の海洋環境条件において6年間、種々のコンクリートの暴露試験を実施した。この結果、以下のことが明らかになった。① 高炉スラグおよびシリカフェームの使用により、塩化物イオンの浸透の抑制が可能である。② 飛沫帯、海中、海上大気中の順に、鉄筋腐食に対して厳しい環境条件である。③ 海洋環境下では、ひびわれ・打継目の部分より腐食が進行する場合が多い。本報告では、拡散理論に基づき塩化物イオンの拡散係数を求め、浸透量の長期的な予測解析を行ない、環境条件およびセメントの種類が、鉄筋腐食の進行に及ぼす影響について検討した結果について述べる。

### 1. はじめに

沿岸地域、海中および飛沫帯等の種々な海洋環境下に建設されたコンクリート構造物には、建設後時間の経過につれて、外部より塩化物イオンが浸入し蓄積する。コンクリート中の塩化物イオンは、鉄筋腐食の進行に影響を与える重要な要因の一つであり、その浸入状況は構造物の耐久性に影響を及ぼす。よって、海洋環境下におけるコンクリート構造物の耐久性を判定するためには、塩化物イオンの浸透速度および鉄筋の腐食の進行状況を把握することが重要である。しかしながら、塩化物イオンの浸透状況、鉄筋の腐食状況はセメントの種類、使用環境条件、施工条件などによって異なっており、コンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響は、今だ十分に解明されていない。

海洋環境下におけるコンクリート構造物の耐久性を考慮した合理的な設計方法を確立するためには、コンクリート構造物の耐久性を把握し、コンクリート中の塩化物イオンの浸透、鉄筋腐食、コンクリートの品質変化の長期的な予測を行なう必要がある。このためには、実際の海洋における暴露試験あるいは長年月供用した構造物の調査によるデータの集積が必要であるが、様々な海洋条件下での暴露試験による塩分浸透・鉄筋腐食などの測定が系統的に行なわれている例は少ない。

そこで、筆者らは実際の海洋暴露試験を行ない、その測定データに基づいた塩分浸透・鉄筋腐食の長期的予測を行ない、コンクリート構造物の耐久性を把握することを試みた。昭和59年より清水港（静岡県清水市）において種々のコンクリート供試体を自然暴露しており、暴露開始から6年間の測定結果について報告するものである。



\* NP: 普通セメント, BB: B種高炉セメント, SR: 耐硫酸塩セメント  
SF: シリカフェーム混入セメント (NPの15%をシリカフェームに置換)

図-1 供試体の種類および形状・寸法

今回の報告内容は以下の通りである。

- ① 各種のセメントを用いたコンクリートの品質変化・塩分浸透・鉄筋の腐食状況
- ② 塩分浸透解析による長期的な塩分浸透量の予測値
- ③ ひびわれ・打継目が塩分浸透・鉄筋腐食に及ぼす影響

## 2. 実験方法および解析方法

### 2.1 供試体

供試体の形状は、鉄筋を挿入した長さ 90 cm の梁および直径 15 cm、長さ 15 cm の円柱とした。図-1 に供試体の種類と形状・寸法を示す。梁供試体は、かぶり 2 cm の位置に直径 19 mm の異形棒鋼を配置したもので標準供試体の他に、打継目を設けた供試体とひびわれを導入した供試体も作成した。打継目供試体での打継目は中央部に設け、材令7日で打継面をワイヤブラシで削り、同一配合のコンクリートを打継いだ。ひびわれ供試体では、ひびわれを導入した面が外側を向く様にし、ボルトにより曲げ応力を生じさせ、表面のひびわれ幅を 0.05~0.1 mm 程度とした。円柱供試体は、塩化物イオンの分析用とした。いずれの供試体も、塩化物イオンが一方のみから浸透する様に周面をエポキシ樹脂で塗装した。供試体に使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。コンクリートの配合は、普通ポルトランドセメント (NP), B種高炉セメント (BB), 耐硫酸塩ポルトランドセメント (SR) を用いたもの、および普通ポルトランドセメントの約15%をシリカフェームに置換したもの (SF) の4種類とした。表-2 にセメントの化学組成を示す。表-3 に使用材料の物性値・内容を示す。

表-1 コンクリートの配合

コンクリート配合の略号	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m³)			AE減水剤 (ℓ/m³)	高性能減水剤 (kg/m³)	スランパ (cm)	空気量 (%)
				W	C	SF				
普通 (NP)	15	50.0	48.0	168	332	—	0.83	—	12.0	5.0
B種高炉 (BB)				162	324	—	0.81	—	10.5	4.4
耐硫酸塩 (SR)				166	332	—	0.83	—	13.0	4.1
シリカフェーム (SF)				166	282	50	—	6.48	10.0	4.6

表-2 セメントの化学組成

セメントの種類	性状	比重	比表面積 (ブレン) (cm²/g)	化学成分 (%)							
				Ig.loss	Insol.	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₂
普通ポルトランドセメント		3.15	3,300	0.6	0.3	21.7	5.3	3.0	64.7	1.3	2.2
B種高炉セメント		3.04	3,440	0.9	0.5	25.2	7.3	2.2	57.5	2.8	1.7
耐硫酸塩ポルトランドセメント		3.18	3,370	0.8	0.1	22.1	4.1	4.6	64.3	1.0	1.9

表-3 使用材料の特性値・内容

使用材料	物性値・内容
シリカフェーム	比重2.25, 平均粒径0.36μm, SiO₂ 92.6%
細骨材	木更津産山砂, 比重2.58, F.M. 2.67, 吸水率1.64%
粗骨材	八王子産砕石, 比重2.66, Gmax=15mm, 吸水率1.09%
A E 減水剤	リグニンスルホン酸系
高性能減水剤	リグニンスルホン酸系・ナフタリン系の高縮合物

表-4 暴露実験場の環境条件

区分	環境条件
A 海上大気中 (堤防上)	L.W.L.+5.0 M位置, 強風時, 波しぶきを受ける
B 飛沫帯 (堤防側面)	H.W.L.+1.7 Mと L.W.L.+0.0 Mの中間位置
C 海中 (水深11m)	平均海水温度18.4℃; 平均pH 8.29 塩素イオン濃度 18.4 ‰ 溶存酸素量 7.98 ppm

表-5 測定項目・測定方法

測定項目	試験方法
鉄筋の自然電位	ASTM C 876, 照合電極には飽和硫酸銅電極を使用
鉄筋の発錆状況	展開図に腐食状況を写しとり腐食面積率で評価
塩分量分析	塩素イオン選択性電極を用いた電極差滴定法による全塩分定量
コンクリートの品質変化	圧縮強度, 超音波縦波速度 (P波), 中性化深さ

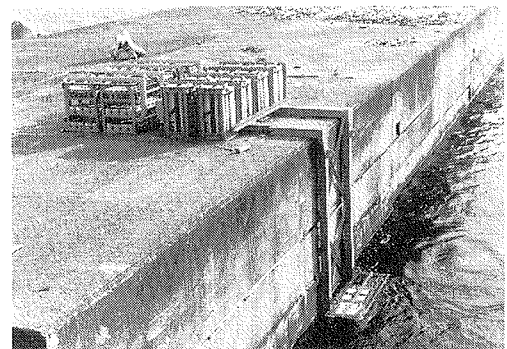


写真-1 暴露状況

## 2.2 暴露環境条件

供試体は、防波堤上の海上大気中 (A)、潮の干満作用を受ける飛沫帯 (B)、防波堤内側の水深約 11 m の海中 (C) に暴露した。表-4 に暴露実験場の環境条件を示す。写真-1 に暴露状況を示す。

## 2.3 測定項目・測定方法

測定は、暴露期間 1 年、3 年、6 年 (SF は 5 年) において実施した。表-5 に測定項目および測定方法を示す。コンクリート中の塩化物イオン量の分析は、円柱供試体の表面から深さ 2 cm おきに採取したコンクリートの粉末を用いた。鉄筋の発錆状況は、梁供試体を解体し、鉄筋の腐食面積率を測定することにより評価した。

## 2.4 塩化物イオン浸透解析方法

一般に、コンクリート中での塩化物イオンの拡散は、Fick の法則により式(1)のように表わされる<sup>1)</sup>。

暴露期間 3 年および 6 年において測定した塩化物イオン量より、最小二乗法によって、式(1)における表面の塩化物イオン濃度 (以下  $C_0$  と略称) および塩化物イオンの拡散係数 (以下  $D_c$  と略称) を算出した。

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$x$  : 表面からの深さ (cm)

$t$  : 経過時間 (sec)

$C$  : 表面からの深さ  $x$  での塩化物イオン濃度 (%)

$C_0$  : 表面部 ( $x = 0$ ) での塩化物イオン濃度 (%)

$D_c$  : 塩化物イオンの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数  $\operatorname{erf}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x e^{-t^2} \cdot dt$

## 3. 試験結果および解析結果

### 3.1 コンクリートの品質変化

図-2 に圧縮強度の経年変化を示す。いずれのセメントを用いたコンクリートも、標準養生を行なった場合、圧縮強度は材令 1 年まで増加し、材令 6 年での強度低下は認められない。海中部に暴露した場合の暴露期間 3 年までの圧縮強度は、普通ポルトランドセメント、B 種高炉セメント、耐硫酸塩ポルトランドセメントを用いたコンクリート (以下それぞれ NP, BB, SR と略称する) 共、標準養生の場合と同程度であるが、暴露期間 6 年での圧縮強度は暴露期間 3 年に対して NP で 10%、BB で 9%、SR で 5% 低下した。また、海上大気中に暴露した場合においても、暴露期間 3 年の圧縮強度は、標準養生の場合に比べて同等以上であるが、暴露期間 6 年の圧縮強度は、NP で 8%、BB で 6%、SR で 6% 低下した。

普通ポルトランドセメントの一部をシリカフェームに置換したコンクリート (以下 SF と略称する) については、標準養生の場合に比べて海中部、海上大気中の圧縮強度は小さく、暴露期間 6 年の圧縮強度は、暴露期間 3 年に対して海中部で 7%、海上大気中で 3% 低下した。

海洋環境下では、暴露期間 3 年までは、セメント硬化体中のアルミン酸三石灰 ( $C_3A$ ) と海水中の硫酸塩との反

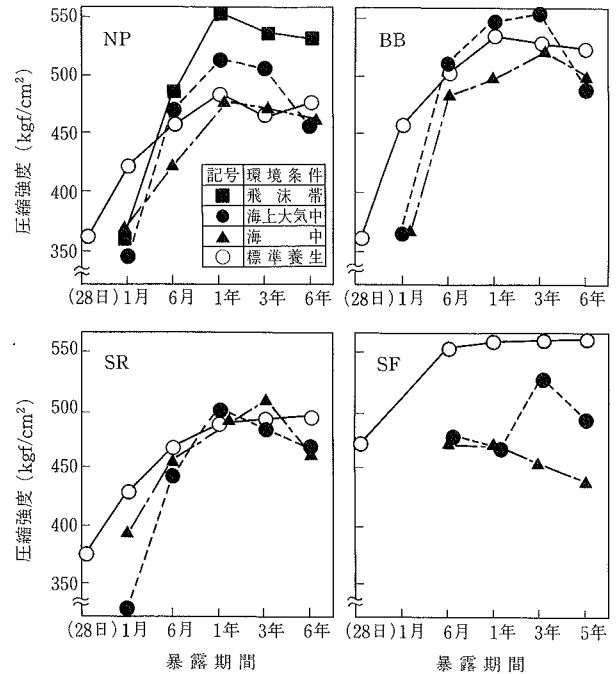


図-2 圧縮強度の経年変化

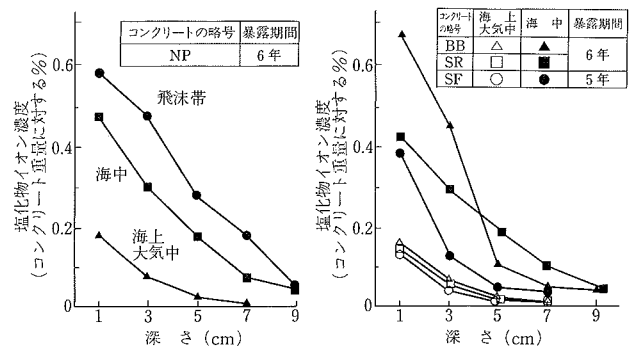


図-3 塩化物イオンの浸透量

応により、エトリンガイトが生成し、内部の空隙が充填され組織が緻密になり、強度増大に寄与するものと考えられる。暴露期間 3 年以降は、いずれのコンクリートも海中部において強度が低下する傾向が見られた。これは、 $C_3A$  の多い普通セメントで顕著であることからエトリンガイトの膨張が一要因と考えられる。また、海上大気中における暴露期間 6 年での中性化深さは、NP, BB は約 1 mm, SR は 2 mm であり、内陸における大気中放置の場合と同程度であった。

### 3.2 塩化物イオンの浸透状況

図-3 に暴露期間 6 年における各種コンクリートの塩化物イオンの浸透量を示す。NP の塩化物イオンの浸透量は、飛沫帯、海中、海上大気中の順に大きい。NP の表面部の塩化物イオン濃度は、海上大気中での値を基準にして、海中で 2.5 倍、飛沫帯で 3 倍程度である。環境条件の影響は、BB, SR, SF についても、NP と同様の傾向であった。

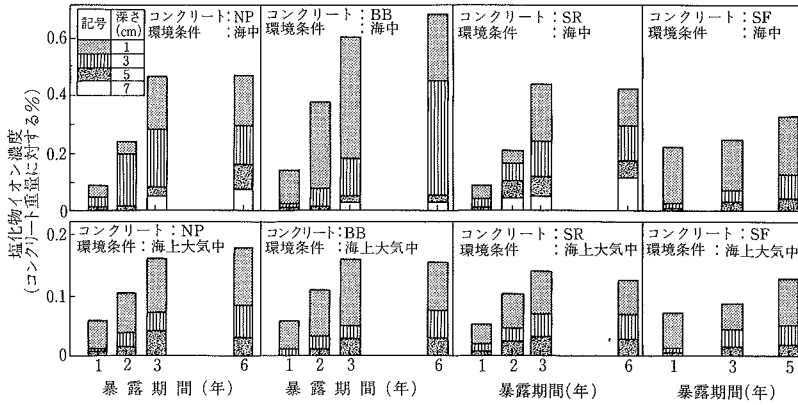


図-4 塩化物イオンの浸透量の経年変化

表-6 表面塩分量および拡散係数

配合	環境条件	表面塩分量Co (%)			拡散係数 Dc ( $\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ )		
		3年	6年	平均	3年	6年	平均
NP	A	0.20	0.24	0.22	3.2	1.2	2.2
	B	0.74	0.70	0.72	4.9	4.5	4.7
	C	0.61	0.57	0.59	3.9	3.1	3.5
BB	A	0.20	0.21	0.21	2.7	1.5	2.1
	C	0.76	0.87	0.82	2.2	2.1	2.2
SR	A	0.17	0.16	0.17	4.7	1.6	3.2
	C	0.55	0.50	0.53	4.7	4.0	4.4
SF	A	0.11	0.19*	0.15	4.0	1.2*	2.6
	C	0.32	0.39*	0.36	1.9	1.8*	1.9

\*: 暴露期間5年の測定結果からの計算値

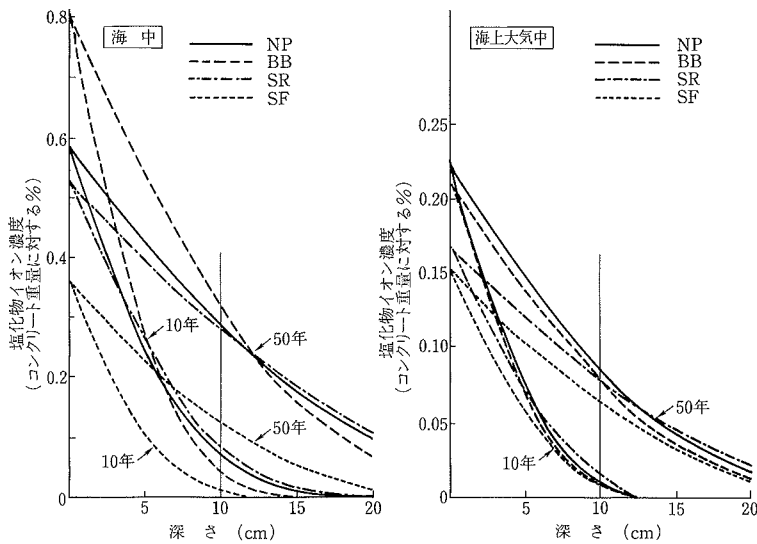


図-5 10年後、50年後の塩化物イオンの浸透状況

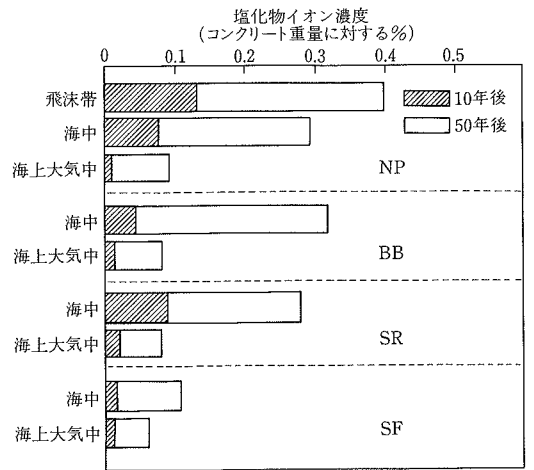


図-6 塩化物イオン量の推定値 (深さ 10 cm)

図-4に塩化物イオンの浸透量の経年変化を示す。海中、海上大気中いずれにおいても、NP、BB、SRの表面部の塩化物イオン量は暴露期間3年までは増加し、3年以降はほぼ一定となる傾向にある。SFでは暴露期間5年まで増加する傾向にある。

海中部においては、BBの塩化物イオン量は、NPと比較して、表面部より約3cmまでは多く、それより深い位置では少ない。SRは表面から内部までNPとほぼ同等であり、SFは、NPに比べて表面から内部まで少ない。また、海上大気中においては、セメントの種類にかかわらず塩化物イオンの浸透量は同程度である。

このように、塩化物イオンの浸透量は、海中においてはセメントの種類の影響が大きいが、海上大気中においては大差ないことが明らかになった。

### 3.3 塩化物イオンの浸透解析結果

暴露期間3年および6年(SFは5年)における塩化物イオンの浸透量をFickの方程式に代入して得られた表面の塩化物イオン濃度(Co)と拡散係数(Dc)を表-6に示す。Coは、いずれの環境においても、暴露期間3年

と6年とで大差ないが、Dcは、海上大気中において差異がある。海上大気中では、波しぶきや風向きの影響を受けるために、環境条件が安定している海中に比べて変動が大きくなるものと考えられる。

NPのCoとDcは、両者とも、飛沫帯、海中、海上大気中の順に大きい。海上大気中を基準にした場合、NPのCoは、飛沫帯で3.3倍、海中で2.7倍程度であり、NPのDcは飛沫帯で2.1倍、海中で1.6倍程度である。よって、飛沫帯では他の環境に比べて著しく塩化物イオンの浸透は速いと考えられる。

また、BB、SR、SFの海中部でのCoは、いずれも海上大気中の3~4倍であった。Dcは海上大気中に比べて、海中のほうが大きい傾向にあるが、その比率はセメントの種類によって異なる。

次に、セメントの種類によるCo、Dcの差異について見ると、海上大気中ではCo、Dcともに、セメントの種類による差は少ないが、海中ではセメントの種類によって差があり、CoはBB、NP、SR、SFの順に大きく、DcはSR、NP、BB、SFの順に大きい。よって、高炉スラ

グおよびシリカフュームを混入したコンクリートの Dc は小さく、塩化物イオンの浸透を抑制する効果が認められた。

### 3.4 塩化物イオンの浸透量の長期的予測

表-6 に示した Co, Dc を用いて、10年後あるいは50年後の塩化物イオンの浸透量を推定した結果を図-5 に示す。

海上大気中においては、セメントの種類による Co, Dc の差が小さいため、10年後、50年後のコンクリート中への塩化物イオンの浸透性状に大差はない。しかし、海中部では、BB および SF では、NP に比べて Dc が小さいため、コンクリートの内部まで同一量の塩化物イオンが浸入するのに時間を要すると推定される。

図-6 に10年後および50年後における深さ 10 cm の位置の塩化物イオン量を示す。10年後の深さ 10 cm の位置の塩化物イオン量は、NP を基準として、海上大気中では BB は0.83, SR は1.58, SF は0.92 であり、海中部では BB は0.59, SR は1.21, SF は0.17 である。海洋環境下で10年経過した場合も、高炉スラグやシリカフュームによる塩化物イオンの浸透の抑制効果が期待される。50年経過した場合は、NP を基準として、海上大気中では、BB は0.93, SR は0.94, SF は0.74 となり、海中部では、BB は1.09, SR は0.98, SF は0.45 となる。50年後の深さ 10 cm の位置においては、BB, SR とともに、NP と同程度の塩化物イオンが浸透すると予測される。

NP を用いた場合、海上大気中の塩化物イオン量を基準とすると、10年経過後では海中で6倍、飛沫帯で11倍となり、50年経過後では海中で3.4倍、飛沫帯で4.6倍となると予測される。以上のことより、長期的なコンクリート中への塩化物イオンの浸透は、セメントの種類、環境条件によって大きく異なると予測され、構造物の耐久性を考える上で、これらの要因を考慮してかぶりを決定する必要がある。

### 3.5 鉄筋腐食の進行状況

図-7 に打継目・ひびわれのない梁供試体中の鉄筋の腐食面積率とかぶり部分の塩化物イオン量を示す。NP については、飛沫帯では、暴露期間1年より腐食が認められ、暴露年数とともに腐食面積は著しく広がっている。海中部では、塩化物イオン量がコンクリート中で約 7 kg/m<sup>3</sup> (塩化物イオン濃度0.3%) 以上になると腐食面積は多くなるが、暴露期間3年から6年までは腐食面積の増加は少ない。飛沫帯では酸素および塩化物イオンの供給が十分であるため、腐食の進行が速いが海中では酸素供給量が少ないために腐食の進行は遅くなるものと考えられる。海上大気中においては、かぶり部分の塩化物イオン量は 1.0~2.0 kg/m<sup>3</sup> であり、いずれのコンクリートも発錆していなかった。以上のことにより、鉄筋の腐食に対しては、飛沫帯、海中部、海上大気中の順に厳しい環境条件であると考えられる。

また、BB, SF のかぶり部分の塩化物イオン量は、暴露期間6年あるいは5年での海中部において 7 kg/m<sup>3</sup>

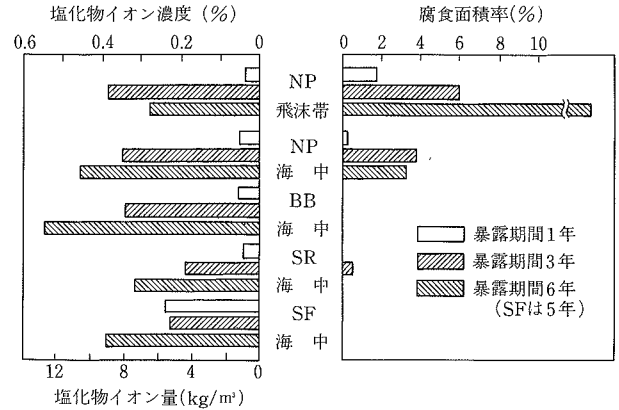


図-7 梁供試体の腐食面積率と塩化物イオン量

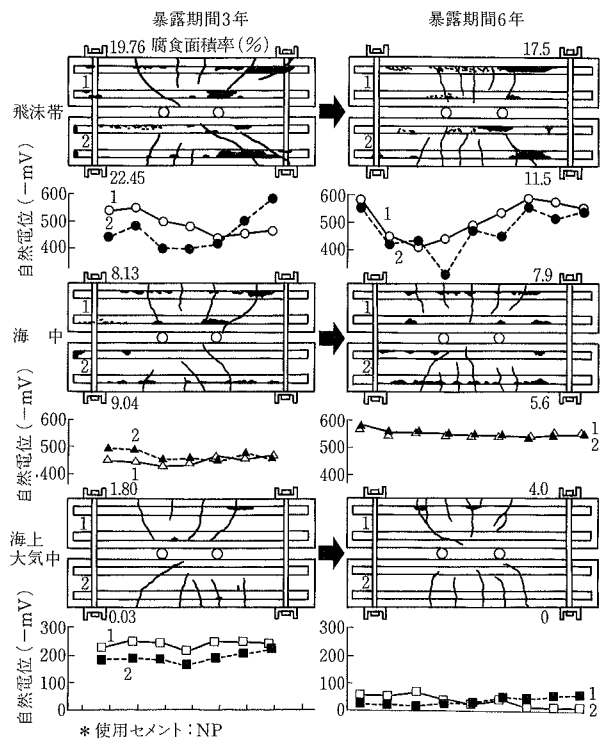


図-8 ひびわれ部の鉄筋腐食状況

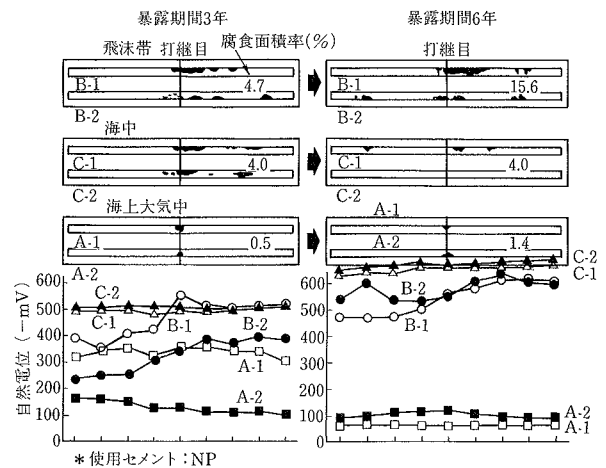


図-9 打継部の鉄筋腐食状況

以上と多いが、鉄筋の発錆は認められず、高炉スラグおよびシリカフェームによる鉄筋の防錆効果が確認された。

### 3.6 ひびわれ、打継目が鉄筋腐食に及ぼす影響

図-8に暴露期間3年と6年におけるひびわれ供試体中の鉄筋の腐食状況を示す。いずれの環境においても鉄筋の腐食は、ひびわれの位置から進行しており、海中部および海上大気中では、コンクリートの表面側の部分のみの発錆にとどまっているが、飛沫帯では鉄筋の全周にわたり発錆している部分がある。

図-9に暴露期間3年と6年における、打継目供試体中の鉄筋の腐食状況を示す。いずれの環境においても打継目の部分より発錆が始まり、その部分より発錆が進行する傾向がみられる。また、発錆箇所は、コンクリート内部が湿潤状態である場合、自然電位を測定することにより、ある程度推定することが可能である。

図-10にひびわれおよび打継目供試体のかぶり部分の塩化物イオン濃度および鉄筋の腐食面積率の経年変化を示す。いずれの環境においても、ひびわれが存在する場合は、腐食開始時期が早くなる。ひびわれ供試体の塩化物イオン量は、ひびわれのない供試体と大差ないことから、ひびわれを通じて酸素や塩化物イオンが直接鉄筋位置まで浸入するため、腐食の開始が早まったものと考えられる。また、ひびわれ幅の大きな変化はなかった。

海中部では、ひびわれ供試体は標準供試体に比べて腐食面積は大きい、その増加率は少ない。海中部において腐食の進行が緩やかになるのは、酸素の供給量が少ないためと考えられる。海上大気中でも、腐食面積の増加は緩やかであるが、この理由は、塩化物イオンの浸透量が少なく、鉄筋の不動態被膜が存在するためと考えられる。

打継目供試体は、0.05~0.1 mm 程度のひびわれを導入した供試体に比べて、腐食面積率は少ない傾向にある。飛沫帯・海中における腐食面積率は、打継目の有無で大差ないが、海上大気中においては打継目がある場合に腐食が認められた。ひびわれあるいは打継目がある場合の腐食程度は、ひびわれ・打継目がない場合と同様に、飛沫帯、海中、海上大気中の順に大きいものとみなされる。

## 4. 結論

以上の研究により得られた結論を以下に示す。

① 飛沫帯、海中、海上大気中いずれの環境条件においても、材令3年までは、圧縮強度が増大するが、材令3年以降は、海中部において圧縮強度が低下する傾向がみられる。

② 海洋暴露試験によって得られた塩化物イオンの浸透量より、塩化物イオンの拡散係数を求めた結果、高炉スラグおよびシリカフェームを混入したコンクリートの拡散係数は小さく、塩化物イオンの浸透を抑制すること

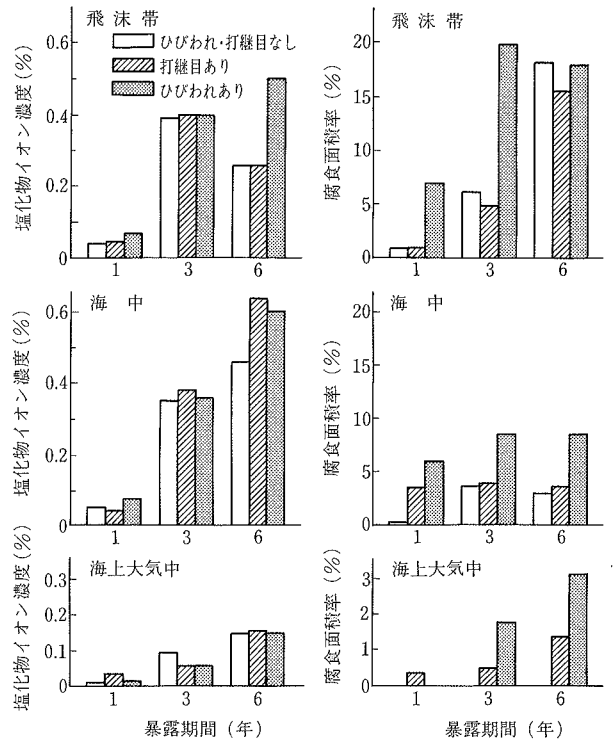


図-10 ひびわれ・打継目供試体の腐食面積率と塩化物イオン濃度

が認められた。また、いずれのセメントを用いたものも、飛沫帯、海中、海上大気中の順に塩化物イオンの浸透は早いことが明らかになった。

③ コンクリート中の鉄筋の腐食程度を腐食面積で評価した場合、飛沫帯、海中、海上大気中の順に腐食の進行は速いことが明らかになった。また、高炉スラグおよびシリカフェームによる鉄筋の防錆効果が確認された。

④ 海洋環境下において、コンクリートにひびわれや打継目が存在する場合の鉄筋の腐食は、ひびわれや打継目がない場合に比べて早期にその部分より開始する。海上大気中においては、暴露期間6年における腐食程度は、ひびわれや打継目がない場合に比べて腐食面積が大きくなる傾向が認められた。さらに長期的な暴露試験による腐食の進行を調査する必要があるが、ひびわれや打継目は使用環境条件によっては防食上の弱点となるため、施工上注意を要すると考えられる。

今後、暴露期間10年において、コンクリートの品質変化、塩化物イオンの浸透、鉄筋腐食状況に関する調査を行ない、予測解析結果との照査を行なう予定である。

### 参考文献

- 1) R. D. Browne: Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP-65, (1980)