

論文

[1100] 海洋暴露試験に基づく各種コンクリートの塩分浸透量の推定

正会員○竹田 宣典 (大林組技術研究所)

正会員 迫田 惠三 (東海大学海洋土木工学科)

正会員 十河 茂幸 (大林組技術研究所)

1. まえがき

海洋環境下に建設されたコンクリート構造物には、年月の経過とともに塩化物イオンが浸入し蓄積する。塩化物イオンは、鉄筋腐食の進行に関係する要因であり、その浸透速度は構造物の耐久性に影響を及ぼす。その浸透状況は、コンクリートの品質、使用環境条件および施工条件によって異なり、鉄筋腐食に及ぼす影響は、今だ十分に解明されているとは言い難い。本論文は、海洋環境における暴露試験結果により、各種のコンクリート中への塩化物イオンの浸透量の長期的な予測を行うとともに、打継目やひびわれが鉄筋腐食の進行に及ぼす影響について検討した結果を示すものである。

2. 試験方法および解析方法

2.1 供試体および暴露条件

供試体の形状は、直径15cm、長さ15cmの円柱および長さ90cmのRCはりとした。図-1にはり供試体の形状・寸法を示す。はり供試体の種類は、打継目あるいはひびわれを導入したものとしていないものとした。いずれも、かぶり2cmの位置にD19 異形棒鋼(SD30,横ふし型)を配置し、塩化物イオンが一方方向のみから浸透する様に周囲をエポキシ樹脂で塗装した。

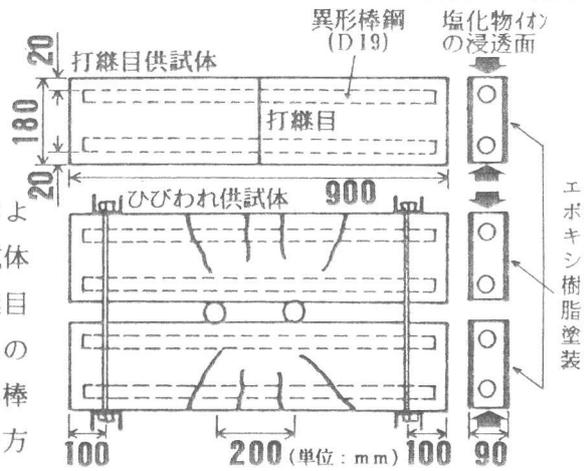


図-1 はり供試体の形状・寸法

表-1 コンクリートの配合

打継目は供試体中央部に設け、材令7日でコンクリート面をワイヤーブラシでけずり同一配合のコンクリートを打継いだ。ひびわれ供試体は、引張縁のひびわれ幅が0.05mm~0.1mm程度となる様にボルトで締め上げた。

供試体に使用した配合を表-1に示す。セメントに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)およびNPの約15%をシリカフェームに置換したものを

配合名	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)			AE減水剤 (ℓ/m³)	高性能減水剤 (kg/m³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	SF				
普通	15	50.0	48.0	168	332	-	0.83	-	12.0	5.0
B種高炉				162	324	-	0.81		10.5	4.4
耐硫酸塩				166	332	-	0.83		13.0	4.1
シリカフェーム				166	282	50	-		6.48	10.0

表-2 使用材料の性質

使用材料	記号	性質
普通ポルトランドセメント	NP	比重 3.15, フレ-ン比表面積 3300cm²/g, CaO 64.7%
高炉セメントB種	BB	比重 3.04, フレ-ン比表面積 3440cm²/g, CaO 57.5%
耐硫酸塩セメント	SR	比重 3.18, フレ-ン比表面積 3370cm²/g, CaO 64.3%
シリカフェーム	SF	比重 2.25, 平均粒径 0.36 μm, SiO₂ 92.6%
細骨材	S	木更津産山砂, 比重2.58, F.M. 2.67, 吸水率1.64%
粗骨材	G	八王子産碎石, 比重 2.66, Gmax=15mm, 吸水率1.09%
AE減水剤	WR	リグニンスルホン酸系
高性能減水剤	SP	リグニンスルホン酸系・ナフタリン系の高縮合物

(SF)の4種類とした。表-2に使用材料の性質を示す。供試体は、清水港内の防波堤において、潮の干満作用を

表-3 供試体の種類と数量

配合	環境	供試体数量	
		円柱	はり
NP	A, B, C	各	各
BB SR SF	B, C	3体	1体

受ける飛沫帯 (A), 水深約11mの海中 (B), 堤防上の海上大気中 (C) に暴露した。

表-3に供試体の種類の組合せと数量を示す。

### 2.2 測定項目

測定は暴露後1年, 3年, 6年 (SFは5年) において実施した。表-4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試料は、表面から2cmおきに採取したコンクリートの粉末とした。鉄筋の発錆状況は、はり供試体を解体することにより調査した。

### 2.3 塩化物イオン浸透解析方法

一般的に、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[1]。本論文では、暴露後3年および6年における塩化物イオン量の分析結果より、最小二乗法によって、式(1)における表面の塩分量(C<sub>0</sub>)および塩化物イオンの拡散係数(D<sub>c</sub>)を算出した。

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

x: 表面からの深さ (cm)

t: 経過時間 (sec)

C: xでの塩化物イオン濃度 (%)

C<sub>0</sub>: x=0での塩化物イオン濃度 (%)

D<sub>c</sub>: 塩化物イオンの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec)

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

## 3. 試験結果および解析結果

### 3.1 塩化物イオンの浸透状況

図-2に暴露後6年における普通セメントを用いたコンクリートの塩化物イオンの浸透量を示す。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。表面部の塩分量は、海上大気中に対して海中で2.5倍, 飛沫帯で3倍程度となる。

表-4 測定項目・測定方法

測定項目	測定方法	供試体
塩化物イオン量	塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法による全塩分定量	円柱供試体
鉄筋の発錆状況	腐食箇所を写しとり腐食面積率により評価	はり供試体
鉄筋の自然電位	ASTM C 876に準拠し照合電極に飽和硫酸銅電極を使用	供試体

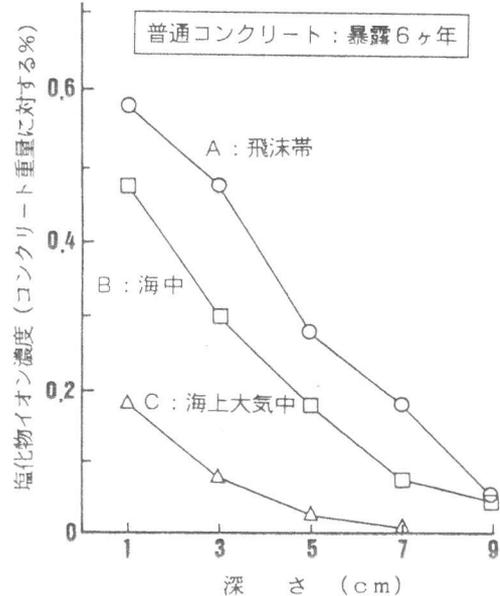


図-2 塩化物イオンの浸透量 (普通セメント)

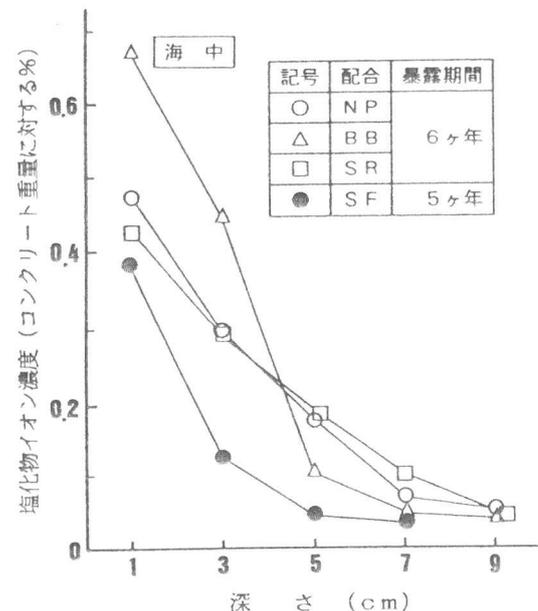
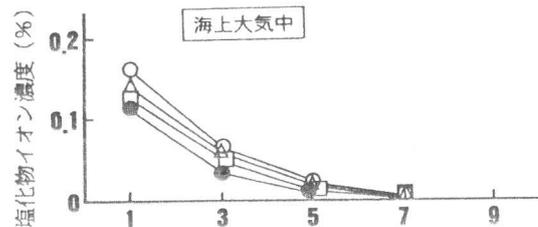


図-3 各種コンクリートの塩化物イオンの浸透量

図-3に海中および海上大気中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。

海中でのBBの塩化物イオン量は、NPと比較して表面部より3cmまでは多く、それより深い位置では少ない。また、SRはNPとほぼ同等であり、SFはNPに比べて少ない。海上大気中においては、配合にかかわらず塩化物イオンの浸透量は同程度である。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後3年までは増加するが、3年以降は一定となる傾向にある。SFは暴露後5年まで増加している。

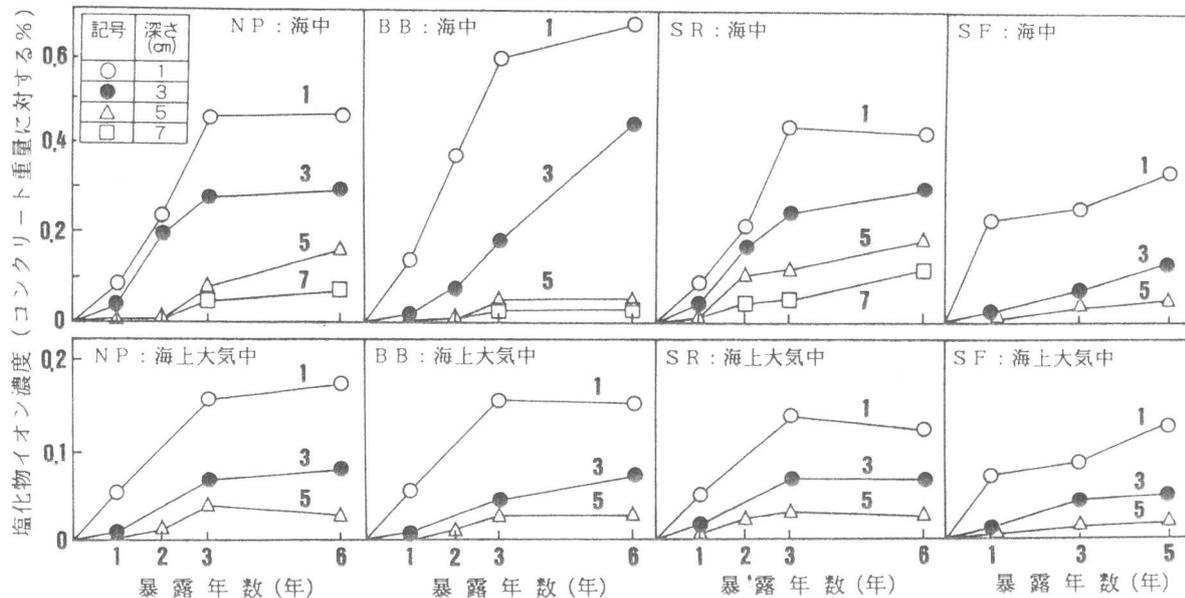


図-4 塩化物イオンの浸透量の経年変化

### 3.2 塩化物イオン浸透解析結果

暴露後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、得られた表面塩分量（ $C_0$ ）と拡散係数（ $D_c$ ）を表-5に示す。

表面塩分量は、暴露後3年と6年とで、各配合ともに大差はない。また、表面塩分量は、海上大気中では配合によって大差はなく0.15～0.21%の範囲にあるが、海中では配合により異なり、大きい順にBB, NP, SR, SFであった。海中部での表面塩分量は、同一配合の海上大気中の値の約3～4倍程度である。

拡散係数は、海上大気中では暴露後6年（SFは5年）の値は暴露後3年の値より小さい。今回、暴露

を行った海上大気中のように、波しぶきや風向きの影響を受ける場合は、拡散係数の変動は大きくなるものと考えられる。暴露後3年と6年の拡散係数の平均値は、配合によって大きな差はなく $2.6 \sim 3.2 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ であった。海中では条件が安定しているため、暴露後3年と6年（SFは5年）では大きな変動はないが、配合によって拡散係数の値は異なり、SR, NP, BB, SFの順に大きく、高炉スラグおよびシリカフェームの塩化物イオンの浸透の抑制効果が認められた。また、環境条件による差異をNPについてみると、飛沫帯では表面塩分量は0.72%、拡散係数は $4.7 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ と大きく、他の環境に比べて塩化物イオンの浸透は速い。

表-5 表面塩分量および拡散係数

配合	環境条件	表面塩分量 $C_0$ (%)			拡散係数 $D_c$ ( $\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ )		
		3年	6年	平均	3年	6年	平均
NP	A	0.74	0.70	0.72	4.9	4.5	4.7
	B	0.61	0.57	0.59	3.9	3.1	3.5
	C	0.20	0.24	0.22	3.2	1.2	2.2
BB	B	0.76	0.87	0.82	2.2	2.1	2.2
	C	0.20	0.21	0.21	2.7	1.5	2.1
SR	B	0.55	0.50	0.53	4.7	4.0	4.4
	C	0.17	0.16	0.17	4.7	1.6	3.2
SF	B	0.32	0.39*	0.36	1.9	1.8*	1.9
	C	0.11	0.19*	0.15	4.0	1.2*	2.6

\*: 5ヶ年の測定結果からの計算値

### 3.3 塩化物イオンの浸透量の長期予測

表-5 に示した値を用いて、10年経過後あるいは50年経過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。海中部では、BBおよびSFはNPに比べて拡散係数が小さいため、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。海上大気中においては、いずれの配合の表面塩分量、拡散係数ともに差が小さいため、10年後、50年後のコンクリート内部の塩化物イオン量にも大きな差は生じない。

表-6 に10年後および50年後における深さ10cmの位置の塩化物イオン量の比較を示す。NPを基準とした場合、10年後の深さ10cmの位置の塩化物イオン量は、海上大気中ではBBは 83%, SR は 158%, SFは 92%となり、海中においてはBBは 59%, SR は 121%, SFは 17%となる。海洋環境下に暴露後10年経過した場合でも、高炉スラグやシリカフェームの塩化物イオンの浸入抑制の効果が予測される。さらに、50年経過後を推定すると、同じくNPを基準とすると、海上大気中においてBBは93%, SRは94%, SFは74% となり、海中においてはBBは109%, SR はで98%, SFは45% となる。

50年後の深さ10cmの位置においては、BB, SRともにNPと比較して同程度の塩化物イオンが浸透すると予測される。しかし、SFは50年後においても、NPに比べて塩化物イオンの浸透量は25~50%少ないと予測される。

環境条件の差異については、海中での塩化物イオン量を基準にすると、NPの場合10年後では、海上大気中で約1/6、飛沫帯で約1.8 倍となり、50年後では海上大気中で約1/3、飛沫帯で約1.4 倍の値になると予測される。

表-6 塩化物イオン量の推定値

配合	環境条件	深さ10 <sup>cm</sup> における塩化物イオンの量(%)	
		10年	50年
NP	A	0.137	0.400
	B	0.076	0.293
	C	0.012	0.086
BB	B	0.045	0.320
	C	0.010	0.080
SR	B	0.092	0.287
	C	0.019	0.081
SF	B	0.013	0.133
	C	0.011	0.064

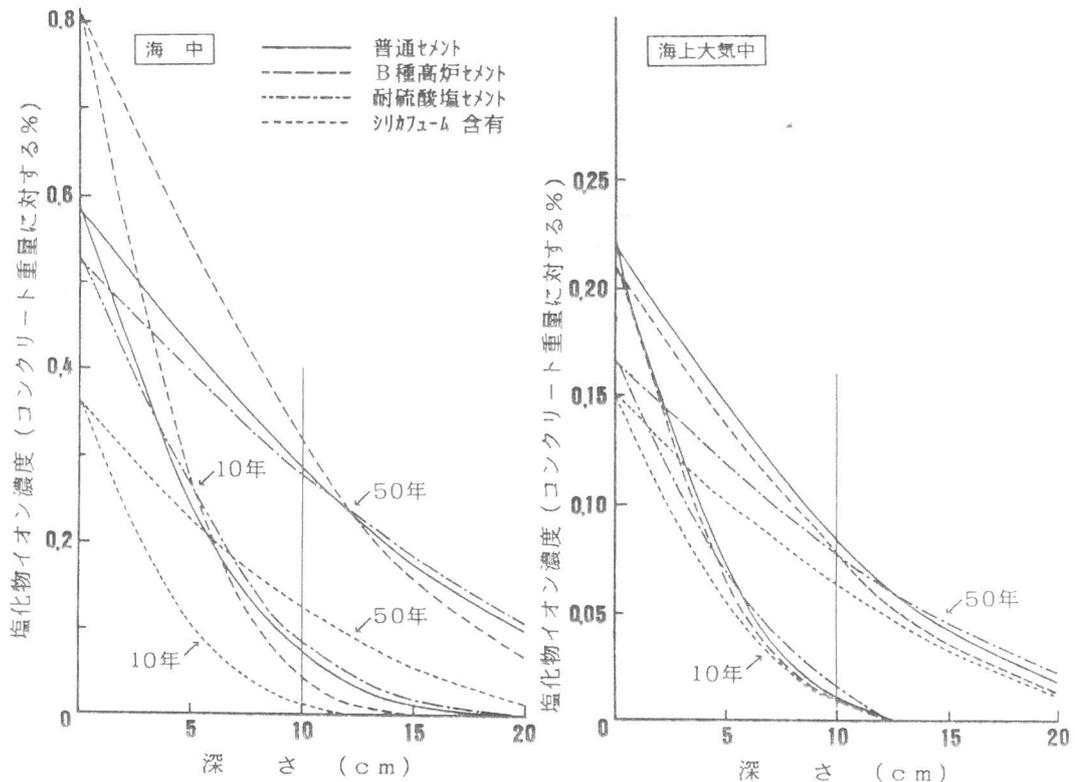


図-5 10年後、50年後の塩化物イオンの浸透状況

### 3.4 コンクリート中の鋼材の腐食の進行状況

図-6にはり供試体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。飛沫帯においては、暴露後1年より腐食が認められ、暴露年数とともに腐食は著しく進行している。一方、海中では、塩化物イオン量が約  $7\text{kg/m}^3$  (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、暴露後3年から6年までの期間には、腐食はほとんど進行していない。これは、海中では酸素供給量が少ないために腐食の進行が遅くなったものと考えられる。

また、海中における BB, SFのかぶり部分の塩化物イオン量は、暴露後6年あるいは5年で  $7\text{kg/m}^3$  以上と多いにもかかわらず鉄筋は発錆していなかった。これは、BB, SF では鉄筋の発錆が始まる塩化物イオン量の限界値がNPと比べて高いことを示唆するものである。海上大気中での塩化物イオン量は、 $1.0 \sim 2.0 \text{ kg/m}^3$  であるが、いずれの配合も発錆していないことが認められた。

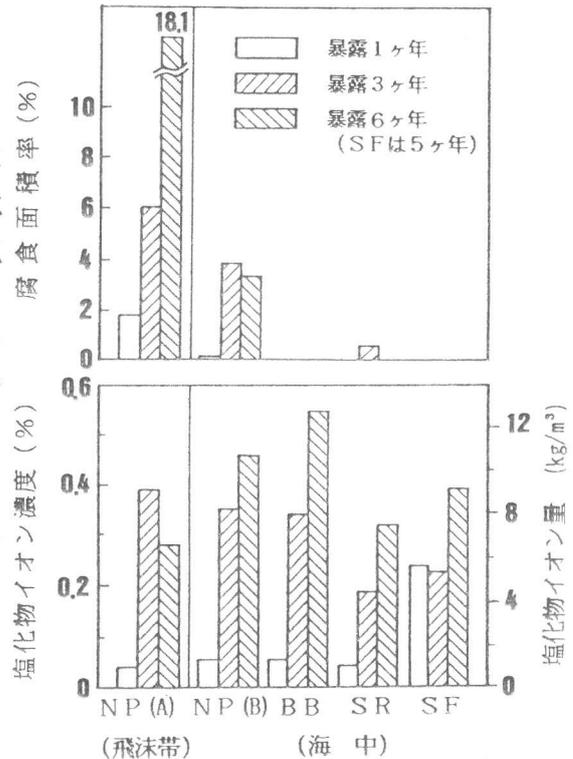


図-6 はり供試体の腐食面積率と塩化物イオン量

図-7にひびわれ部・打継部の表面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結果が得られた。ひびわれ部分の塩化物イオン量は、ひびわれのないもの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。海中においては、ひびわれのあるものはないものに比べて腐食面積率は大きい、腐食が発生してから進行は遅い。海中では、酸素の供給量が少ないため、腐食の進行が遅くなると考えられる。また、海上大気中においても、腐食の進行は遅い。これは、塩化物イオンの浸透量が少なく、鉄筋の不動態被膜が完全に破られていないためと考えられる。飛沫帯において腐食の進行が速いのは、コンクリート中に酸素および塩化物イオンが

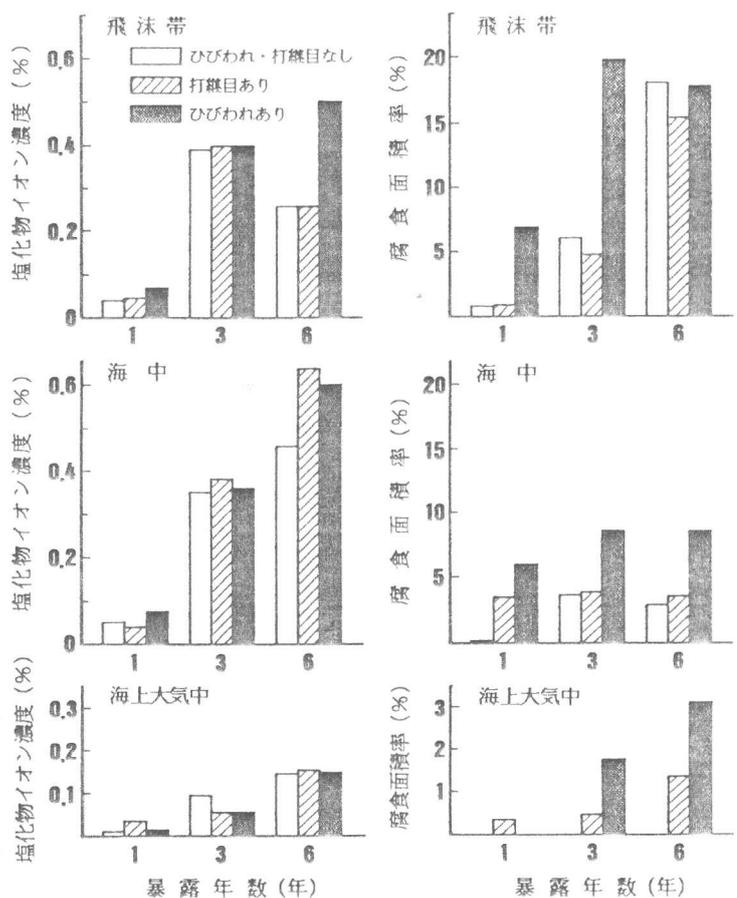


図-7 ひびわれ・打継部における腐食面積率と塩化物イオン量

十分に供給されるためと考えられる。

図-8に各環境条件におけるひびわれ部分の鉄筋の腐食状況を示す。腐食はひびわれの位置に多くに発生し、塩化物イオンの浸入する面に集中している。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と思われる。

図-9に各環境条件における打継部の鉄筋の腐食状況を示す。飛沫帯、海中においては、打継目のないものも発錆しており、打継目のある場合と比べて、その腐食面積率に大きな差はない。海上大気中においては、打継目のない場合は全く発錆していないが、打継目のある場合は、その部分より腐食が始まっている。いずれの環境においても、打継部分から腐食が開始するため、防食を考える上では、打継目は弱点になると考えられる。

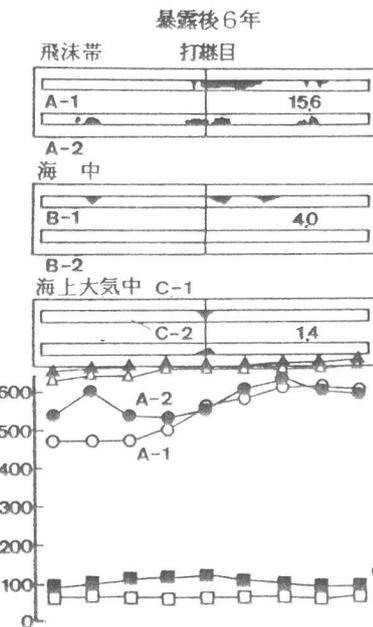


図-9 打継部の鉄筋腐食状況

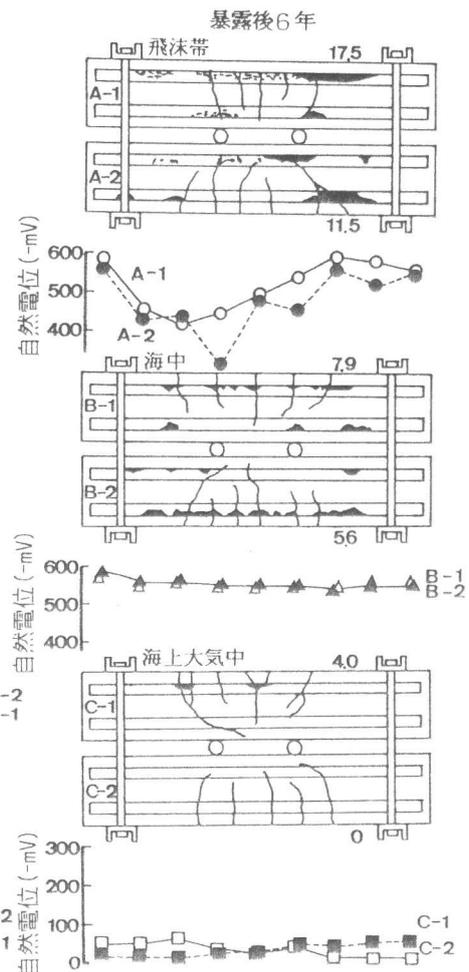


図-8 ひびわれ部の鉄筋腐食状況

#### 4. まとめ

本研究により得られた結論を以下にまとめる。

(1) 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は遅いことが認められた。

(2) 飛沫帯においては、酸素が十分に供給され、塩化物イオン浸入量が多いため、鉄筋の腐食の進行は他の環境に比べて速い。ひびわれが存在する場合は、さらに腐食の進行は顕著になる。しかし、海中、海上大気中のように、酸素および塩化物イオンのいずれか一方が十分に供給されない場合は、腐食の進行は穏やかである。

(3) 打継目が存在する場合は、その部分より発錆し、防食上の弱点となるために、打継目を設ける場合は、十分に注意して施工する必要がある。

#### 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
- 2) 迫田惠三, 竹田宣典, 十河茂幸: 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腐食の進行状況, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 2, pp. 487-492, 1988, 6