

# 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（その2）

——10年暴露試験に基づく塩分浸透予測と鉄筋腐食に関する検討——

竹田 宣典 十河 茂幸  
相原 功

## Penetration of Chloride Ions into Various Concretes and Corrosion of Reinforcing Bars in Marine Environments (Part 2)

——A Examination for Estimation of Chloride Penetration and Corrosion of Reinforcing Bars Based on 10-year Exposure Tests——

Nobufumi Takeda Shigeyuki Sogo  
Isao Aihara

### Abstract

Exposure tests of concrete in marine environments were conducted over a period of ten years to establish the rational durability design for concrete structures. In these tests, penetration of chloride ions, corrosion of reinforcing bars and changes in the quality of concrete were investigated. The following results were obtained: ① It is possible to estimate the penetration of chloride ions using diffusion coefficients of chloride ions and surface chloride ions obtained from the exposure tests. ② As for reinforcing bar corrosion, environmental conditions are severest in the following places: the splash zone, underwater, and in air offshore. ③ The reinforcing bar corrosion progress is not accelerated by good construction joints or cracks under 0.05mm wide in ten years after the start of exposure.

### 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考慮した合理的な設計方法を確立することを目的として、海洋環境において10年間のコンクリートの暴露試験を行い、塩化物イオンの浸透、鉄筋腐食、コンクリートの品質変化に関する調査を行った。その結果、以下のことが明らかになった。① 暴露試験によって得られた塩化物イオンの拡散係数および表面塩分量を用いることにより、塩化物イオンの浸透予測が可能である。② 海洋環境下での鉄筋の腐食に対しては、飛沫帯、海中、海上大気中の順に厳しい環境である。③ 良好に処理された打継目やひび割れ幅が0.05 mm以下であるコンクリートは、暴露後10年の範囲では、鉄筋の腐食の進行を著しく促進させるものではない。

### 1. はじめに

海洋環境下におけるコンクリート構造物では、建設後外部より浸入する塩分による鉄筋腐食が原因となる劣化現象が、構造物の耐久性を考慮する上で問題である。したがって、耐久性を考慮して海洋における構造物を設計する場合、コンクリート中への塩分の浸透速度および鉄筋腐食の進行程度について把握することが重要である。

コンクリート中への塩分浸透については、拡散理論を適用し、環境条件や使用材料などに応じた拡散係数を用いることにより、予測解析が可能であると考えられるが、実測に基づくデータが少ないために、精度良く予測を行うことは難しい。また、鉄筋腐食については、環境条件

による腐食の進行程度の差異、ひび割れや打継目などの施工条件の影響については、十分に解明されていない。そこで本研究では、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ことを目的として、海洋環境において10年間の暴露試験を行い、塩化物イオンの浸透、鉄筋腐食、コンクリートの品質変化に関する調査を行った。

本報告では、以下の項目についての検討結果を述べる。

- ① コンクリートの物理的性質の経年変化
- ② 拡散理論による塩分浸透量の予測方法に関する検討
- ③ ひび割れや打継目が塩分浸透および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

暴露を行った供試体は、鉄筋の腐食状況を把握するためのRC供試体と圧縮強度試験用および塩分浸透分析用の3種類とした。RC供試体の形状・寸法および種類を図-1に示す。RC供試体は、断面9×18 cm、長さ90 cmの直方体とし、曲げひび割れを導入したもの（ひび割れ供試体）、打継目があるもの（打継目供試体）、および打継目もひび割れもないもの（標準供試体）とした。いずれの供試体も、かぶり2 cmの位置に異形棒鋼（JIS G 3112 適合；SD 295, D 19, 横ふし型）を配置した。また、塩化物イオンが一方のみから浸透するように図-1に示す塩分の浸透面以外の表面を厚膜型エポキシ樹脂を用いて塗装を行った。

打継目供試体では、打継目を供試体中央部に設け、材齢7日で打継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ち継いだ。ひび割れ供試体は、一体当り4～5本の曲げひび割れをあらかじめ導入し、表面部で0.05 mm程度のひび割れ幅となる様に治具で締め上げた。

圧縮強度試験用供試体は、直径10 cm、高さ20 cmの円柱とし、塩分浸透分析用供試体は、直径15 cm、高さ15 cmの円柱とした。なお、塩分浸透分析用供試体の周面は、厚膜型エポキシ樹脂を用いて塗装を行い、塩化物イオンの浸透方向を一方向とした。

使用材料を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は山砂を、粗骨材は碎石を用い、混和剤はAE減水剤を用いた。

コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果を表-2に示す。海洋における使用を考慮して、水セメント比は50%、単位セメント量は332 kg/m<sup>3</sup>とした。スランプは12.0 cm、空気量は5.0%であった。

コンクリートの打設から暴露開始までの供試体の作製工程を図-2に示す。コンクリート打設後、材齢14日まで湿布養生を行い、その後、乾燥させ所定の面の塗装を行い、気中乾燥後、材齢50日において暴露を開始した。

### 2.2 暴露環境条件

暴露場所は、静岡県清水港内の防波堤とした。暴露環境条件として、海洋環境においては、潮の干満作用を受ける飛沫帯(A)、堤防上で波しぶきを受ける海上大気中(B)、水深約11 mの海中(C)の3箇所とし、その他に内陸部の東京都清瀬市(D)とした。防波堤における供試体の暴露位置を図-3に、暴露試験場の環境条件を表-3に示す。

### 2.3 測定項目・測定方法

測定項目および測定方法を表-4に示す。暴露後1, 3, 6, 10年において供試体を暴露試験場より回収し、測定を行った。塩化物イオン量の分析は、コンクリート表面から2 cmの深さごとにドリルでせん孔した時に生じるコンクリート粉末を試料とした。鉄筋の発錆状況は、鉄筋の腐食面積率により評価した。

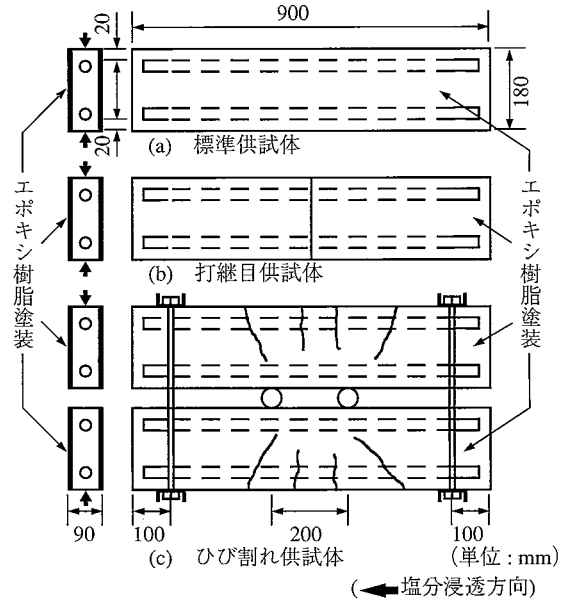


図-1 供試体の形状・寸法・種類 (RC 供試体)

表-1 使用材料

使用材料	性質
普通ポルトランドセメント	比重: 3.15, 比表面積: 3,300 cm <sup>2</sup> /g, CaO: 64.7%
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	八王子産碎石, 比重: 2.66, Gmax: 15mm, 吸水率: 1.09%
AE減水剤	リグニンスルホン酸系

表-2 配合・フレッシュコンクリートの性質

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				フレッシュコンクリート		
			W	C	S	G	AE減水剤	スランプ (cm)	空気量 (%)
15	50.0	48.0	168	332	847	935	1.04	12.0	5.0

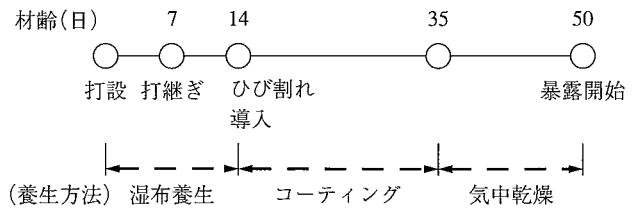


図-2 供試体の作製工程

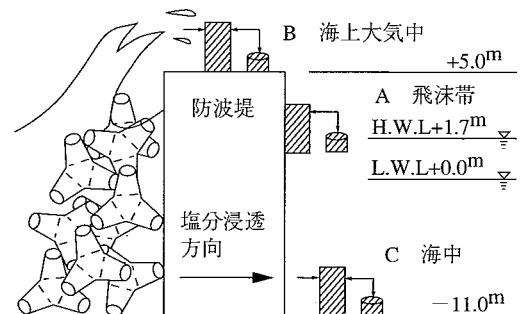


図-3 供試体の暴露位置

### 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>。各暴露期間において、測定され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 (s)
- 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 (cm<sup>2</sup>/s)
- erf：誤差関数  $\operatorname{erf}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x e^{-t^2} \cdot dt$

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 供試体の外観

飛沫帯における、暴露10年後の供試体の表面状態を写真-1に示す。飛沫帯および海中に暴露した供試体の表面には、貝類などの生物の付着があり、特に飛沫帯において著しい。また、飛沫帯および海中に暴露した RC 供試体では、ひび割れおよび打継目の有無にかかわらず、鉄筋腐食によるひび割れが発生しており、錆汁の発生も見られる。海上大気中および内陸に暴露した RC 供試体では、いずれもひび割れや錆汁は見られなかった。無筋の供試体については、いずれの環境においても、外観からは劣化の兆候は認められなかった。

#### 3.2 圧縮強度の変化

圧縮強度の経年変化を図-4に示す。暴露前（材齢50日）圧縮強度は約 45 MPa であった。海上大気中における圧縮強度は、標準養生とはほぼ同様の変化を示し、暴露後10年において、暴露前の圧縮強度に対して約10%増加した。飛沫帯では、暴露前の圧縮強度に対して、暴露後1年で圧縮強度は約20%増加し、暴露後10年までの変化は少ない。海中部では、暴露前の圧縮強度に対して、暴露後3年で約10%増加するが、暴露後6年で約4%低下し、暴露後10年で約8%低下した。内陸部では、暴露後10年までの圧縮強度の変化は少ない。同一材齢の標準養生の圧縮強度に対する強度比は、暴露後3年までは、内陸部を除くいずれの海洋環境においても、標準養生より大きい。暴露後10年においては、飛沫帯では1.12と大きい。海中では0.83、内陸では0.89と小さくなった。

このように、暴露環境によって、圧縮強度の経年変化は異なる。海洋環境下における圧縮強度には、暴露場所の湿潤状態の影響の他に、海水中の硫酸塩と反応して生成されるエトリングタイトの量や海水におけるカルシウムの溶出量などが複合して影響すると考えられる。

表-3 暴露試験場の環境条件

区分	環境条件	暴露場所
A	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、潮の干満作用を受ける	清水港沖 500 m
B	海上大気中 (堤防上) L. W. L +5.0 m 位置 強風時に波しぶきを受ける	年平均気温 16.0°C
C	海中 (水深11m) 海水温度18.4°C、溶存酸素量 7.98 ppm pH 8.29、塩素イオン濃度18.4‰	年間降水量 2,361 mm
D	内陸 海岸より 30 km 内陸、年平均気温15.3°C 年間降水量 1,460 mm	東京都 清瀬市

表-4 測定項目・測定方法

測定項目	測定方法
コンクリートの圧縮強度	円柱供試体 (直径 10 cm, 長さ 20 cm) を暴露終了後、付着物を除去し、JIS A 1108 に準じ試験実施
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 (硝酸銀溶液) による全塩分定量分析
鉄筋の発錆状況	RC 供試体を解体し、腐食箇所を写しとり、腐食面積率により評価
鉄筋の自然電位	ASTM C876 に準拠、照合電極に飽和硫酸銅電極を使用
コンクリートの中性化	フェノールフタレイン液を噴霧し、変色しない深さを測定



写真-1 コンクリートの表面状態

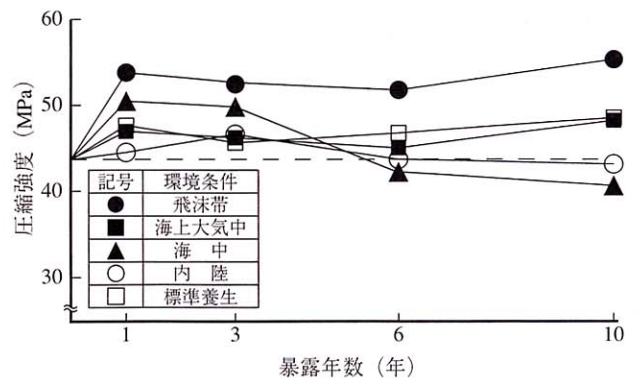


図-4 圧縮強度の経年変化

### 3.3 中性化の進行

中性化深さの測定結果を表-5に示す。暴露後10年において、飛沫帯および海中では、全く中性化しておらず、海上大気中では1.2 mm、内陸では2.0 mmの中性化深さであった。中性化の進行には、コンクリートの湿潤状態が影響しているものと考えられるが、いずれの環境においても、鉄筋位置(深さ2~4 cm)においては、アルカリ性を保持している。

### 3.4 塩化物イオンの浸透状況

各環境における暴露後10年までの塩化物イオンの浸透量の分布を図-5に示す。いずれの環境においても、暴露後3年以降は、コンクリート表面部の塩化物イオン量は大きく変化しないが、暴露期間が長くなるに従い、さらに深い部分における塩化物イオンの増加がみられる。

また、暴露後10年までは、いずれの時期においても、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く、表面部の塩化物イオン量は、海上大気中に対して海中で約3倍、飛沫帯で約3.5倍となる。

また、深さ3 cm(鉄筋の中心位置)における塩化物イオン量の経年変化を図-6に示す。いずれの環境においても、暴露後6年以降の鉄筋位置における塩化物イオン量の増加は少なく、暴露後10年における塩化物イオン量は、コンクリート重量に対して海上大気中で0.06%(1.6 kg/m<sup>3</sup>)、海中で0.34%(7.8 kg/m<sup>3</sup>)、飛沫帯で0.46%(10.5 kg/m<sup>3</sup>)であった。

また、図-7、図-8に暴露試験による塩化物イオンの実測値に基づきFickの方程式を用いて算出した表面塩分量(Co)および拡散係数(Dc)の経年変化を示す。

表面塩分量は、環境条件によって異なるが、時間的な変化は少なくほぼ一定値を示し、飛沫帯では約0.7%、海中では約0.6%、海上大気中では約0.2%であった。

拡散係数についても、環境条件の影響を受け、暴露後6年においては、飛沫帯では $4.5 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度、海中では約 $3.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度、海上大気中では $1.2 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度であった。拡散係数の値からも、飛沫帯、海中、海上大気中の順に塩化物イオンの浸透速度は速いことが明らかである。また、拡散係数は、時間の経過と共に小さくなる傾向を示し、飛沫帯および海中においては、暴露後10年の測定値より計算された拡散係数は、暴露後6年のそれに比べて2/3程度の値となった。これは、コンクリートの組織の緻密度が時間と共に変化することが影響しているものと考えられる。したがって、Fickの方程式における表面塩分量は主に環境条件によって決まる係数であり、拡散係数は環境条件およびコンクリートの物性に影響される係数であると考えられる。

暴露期間6年における測定値より計算されたCoおよびDcを用いて予測した暴露後10年における塩化物イオンの浸透量と実測値の比較を図-9に示す。拡散係数は、暴露年数とともに小さくなる傾向があるが、暴露期間6年における拡散係数を用いた場合の予測値と暴露後10年の実測値の差は小さく、良好な予測を行うことができた。

表-5 中性化深さの経年変化

環境条件	中性化深さ (mm)			
	1年	3年	6年	10年
飛沫帯	0	0	0	0
海上大気中	0	0.4	0.9	1.2
海中	0	0	0	0
内陸	0.7	1.0	1.6	2.0

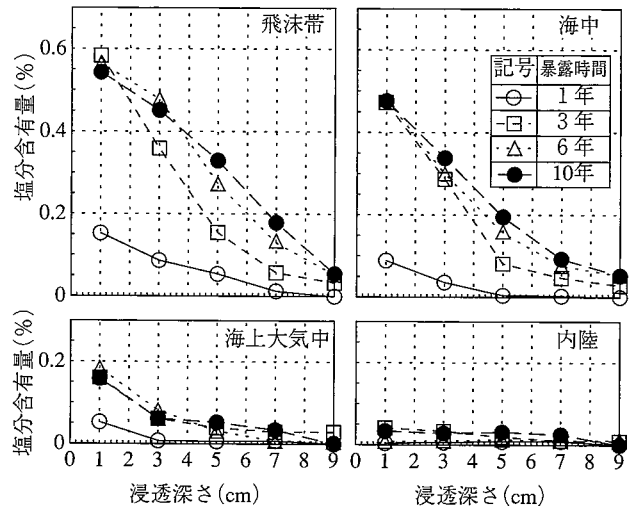


図-5 塩化物イオンの浸透量の分布状態

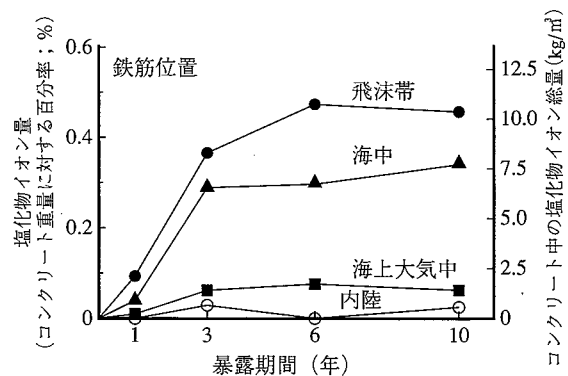


図-6 塩化物イオン量の経年変化(深さ3 cm)

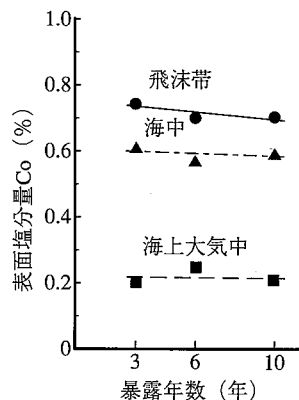


図-7 Co 経年変化

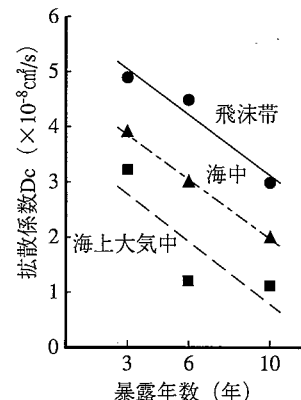


図-8 Dc の経年変化



塩化物イオンの浸透量の推定方法については、なるべく長い期間の暴露試験の結果から得られた拡散係数および表面塩分量を用いて、さらに長期の浸透量を推定する方法が、推定精度を向上させるのに有効であると考えられるが、逆に短期の浸透量を推定する場合には、浸透量が過小に計算される場合がある。したがって、10年以上の比較的長期の塩化物イオンの浸透量を予測する場合、5～6年程度の暴露試験によって得られた拡散係数を用いることは、浸透量が安全側に計算されるために、塩化物イオン量の推定方法として適切であると考えられる。

### 3.5 鉄筋の腐食の進行状況

#### 3.5.1 環境条件の影響

RC 供試体の暴露後10年までの鉄筋の腐食面積率の変化を図-10に示す。また、ひび割れ・打継目のない供試体（標準供試体）の暴露後10年における鉄筋の腐食状態を図-11に示す。腐食面積率は飛沫帯、海中、海上大気中の順に大きく、いずれの環境においても、腐食は表面部のみが発生しており、孔食は認められなかった。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進行し、暴露後10年では、腐食面積率は25%以上となった。海中部では、暴露後3年より腐食が発生するが、その後、暴露後10年までは、腐食面積率の増加は少ない。海上大気中では、暴露後10年において、初めて腐食が認められた。

鉄筋腐食の開始および進行に対しては、塩化物イオンの浸透速度および酸素供給量が大きく影響しており、両者がともに大きい環境である飛沫帯では、海上大気中、海中に比べて著しく腐食の進行が速い。海上大気中では、暴露後3年以降、1.2 kg/m<sup>3</sup>以上の塩化物イオンが鉄筋位置に浸入しているにもかかわらず、暴露後10年における腐食面積率は2%程度であった。これらより、鉄筋の腐食に対しては飛沫帯、海中、海上大気中の順に厳しい環境であると考えられる。

つぎに、鉄筋位置の塩化物イオン量と腐食面積の関係について考察する。塩化物イオン量と時間の積を式(2)に示す積算塩化物イオン量とし、鉄筋位置の積算塩化物イオン量の経年変化を図-12に示す。また、積算塩化物イオン量と腐食面積率との関係を図-13に示す。

$$TCL = \sum(Cl \cdot \Delta t) \dots\dots\dots(2)$$

TCL：積算塩化物イオン量（%・年）

Cl：塩化物イオン量（%）

Δt：時間（年）

暴露後10年における鉄筋位置の積算塩化物イオン量は、海上大気中の値に対して飛沫帯で約7倍、海中で約5倍である。積算塩化物イオン量と腐食面積率との間には、環境条件ごとに相関関係が認められ、積算塩化物イオン量が増加すれば、腐食面積率は増加する傾向を示す。

飛沫帯においては、海中に比べて同一積算塩化物イオン量の時の腐食面積率は大きくなる。これは、腐食の進行に及ぼす要因として、塩化物イオン量のほかに酸素供給量の影響も大きいことを示唆している。また、海上大気中においては、酸素供給量が多いが、積算塩化物イオ

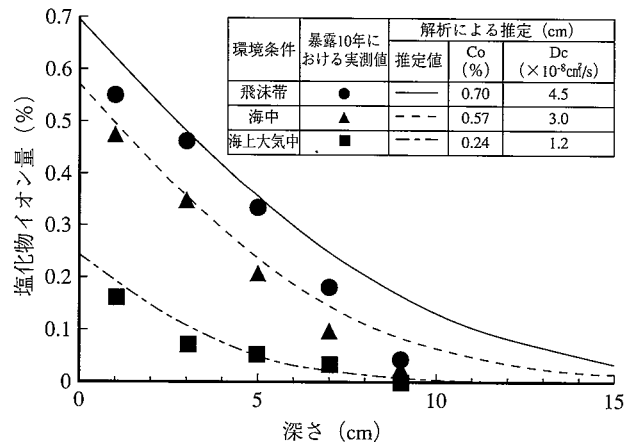


図-9 塩化物イオンの推定値と実測値の比較

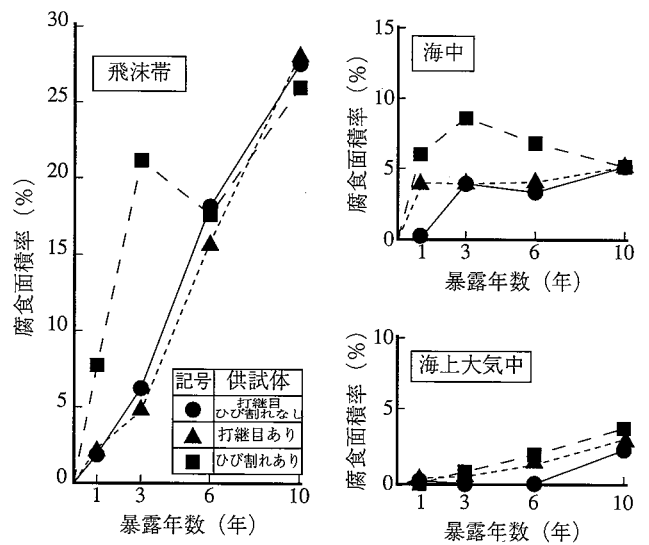


図-10 鉄筋の腐食面積率の変化

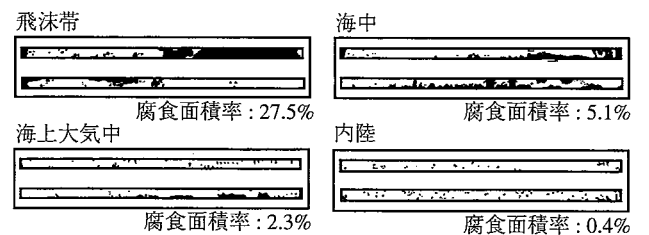


図-11 鉄筋の腐食状況（標準供試体，暴露後10年）

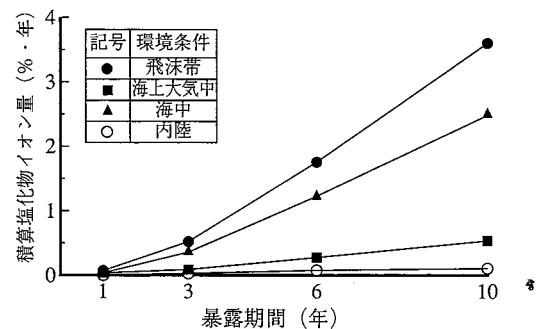


図-12 積算塩化物イオン量の経年変化

ン量が少ないため、腐食の進行が遅いと考えられる。

3.5.2 ひび割れ・打継目の影響 ひび割れのある供試体の暴露後10年における鉄筋腐食の状況を図-14に示す。ひび割れがある場合は、ひび割れがない場合に比べて、飛沫帯、海中部において腐食開始時期が早くなるが、暴露後10年においては、腐食面積率はひび割れがない場合と同程度となった。ひび割れ幅が0.05 mm程度の場合、本実験を実施したいずれの環境条件においても暴露後10年までの範囲では、ひび割れによって、腐食が著しく進行することは認められなかった。

打継目のある供試体の暴露後10年における鉄筋腐食の状況を図-15に示す。打継目がある場合は、いずれの環境においても、腐食は打継部分から開始する傾向が見られ、暴露後6年までは、打継目付近において腐食が多いが、暴露後10年においては打継目以外の部分まで腐食の範囲が広がっている。しかし、いずれの環境においても、暴露後10年における打継目がある場合の腐食面積率は、打継目のない場合と同程度であった。よって、良好に処理された打継目であれば、海洋環境下において腐食を著しく進行させる要因とはならないものと考えられる。

なお、微細なひび割れや良好に処理された打継目がある場合の鉄筋の腐食に対しても、ひび割れや打継目がない場合と同様に、飛沫帯、海中、海上大気中の順に厳しい環境であると考えられる。

#### 4. まとめ

海洋暴露試験の結果、以下のことが明らかになった。

- ① 海洋環境下におけるコンクリートの圧縮強度の推移は、暴露環境によって異なり、材齢10年においては、標準養生の圧縮強度に対して、飛沫帯では約10%増加し、海中部では約17%減少し、海上大気中ではほぼ同等であった。
- ② 暴露試験によって得られた塩化物イオンの拡散係数および表面塩分量を用いることにより、コンクリート中への塩化物イオンの浸透予測が可能である。
- ③ 海洋環境下での鉄筋の腐食の進行は、鉄筋位置の積算塩化物イオン量および酸素供給量の影響を受け、環境条件としては、飛沫帯、海中、海上大気中の順に厳しい。
- ④ いずれの海洋環境においても、良好に処理された打継目やひび割れ幅が0.05 mm以下であるひび割れは、鉄筋の腐食の進行を著しく促進させるものではない。

#### 謝 辞

本研究の実施にあたり、適切なお指導および甚大なご協力を賜りました東海大学海洋学部 迫田恵三助教授に

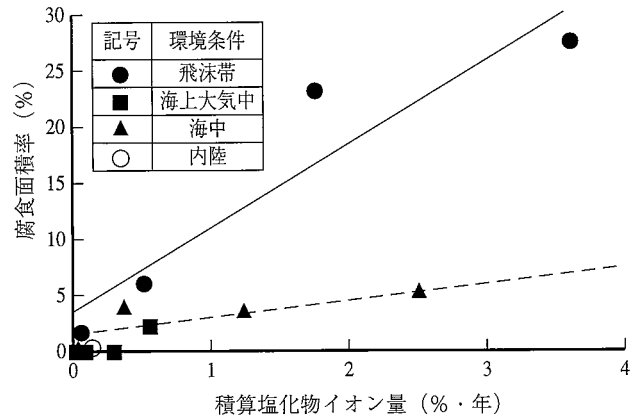


図-13 積算塩化物イオン量と腐食面積率の関係

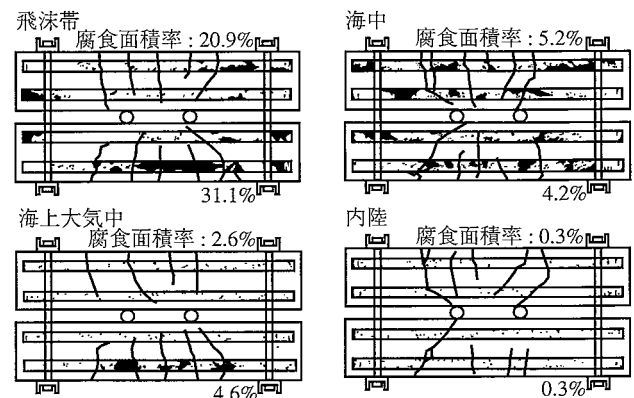


図-14 ひび割れのある場合の鉄筋の腐食状況

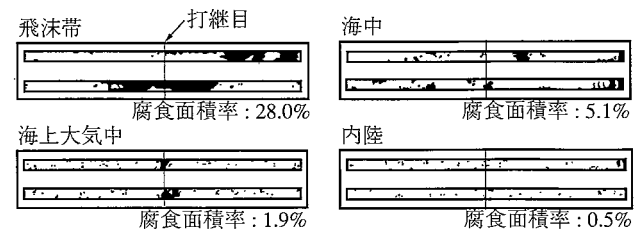


図-15 打継目のある場合の鉄筋の腐食状況

深謝いたします。

#### 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) 竹田, 十河, 芳賀: 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—, 大林組技術研究所報, No.45, p. 43~48, (1992)