

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3）

—コンクリート構造物の耐久性設計のための塩分浸透・鉄筋腐食予測方法の提案—

竹田 宣典 十河 茂幸

Penetration of Chloride Ions into Various Concretes and Corrosion of Reinforcing Bars in Marine Environments (Part 3)

— A Proposal for Estimating of Chloride Ion Penetration and Reinforcing Bar Corrosion for Durability Design of Reinforced Concrete Structure—

Nobufumi Takeda

Shigeyuki Sogo

Abstract

Exposure tests of concrete in marine environments were conducted over a period of ten years to establish a rational design method that considers the durability of concrete structures. In these tests, penetration of chloride ions, corrosion of reinforcing bar and quality changes of the concrete were investigated. The following results were obtained : a) Chloride ion distribution can be predicted by using the chloride ion diffusion coefficient (D_c) and surface chloride ion density (C_o) which change over time; and b) The progress of steel bar corrosion in the concrete can be estimated by using summation of the product of chloride ion content in concrete and existing term of chloride ion.

概 要

海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計を確立することを目的として、鉄筋コンクリート供試体の10年間の海洋暴露試験を行い、塩化物イオンの浸透、鉄筋腐食について調査を行った。その結果、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中への塩化物イオンの浸透は拡散方程式により表すことができる。② 経時変化を考慮した見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量を用いることにより、コンクリート中の塩化物イオンの浸透量を予測することができる。③ 塩化物イオン量とその存在時間の累積値（積算塩化物イオン量）を用いることにより、鉄筋の腐食程度を予測することができる。

1. はじめに

海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計を行うためには、コンクリート中への塩化物イオンの浸透速度および鉄筋腐食の進行について把握することが重要である。これまでに、海洋環境下における実構造物調査や海洋暴露試験に基づくコンクリート中への塩化物イオンの浸透および鉄筋腐食に関する多数の報告^{1), 2)}がなされている。これらによると、鉄筋腐食が始まる塩化物イオン量は、 $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ 程度であるとされ³⁾、拡散方程式を用いた塩化物イオンの浸透量を長期的に推定する試みもなされている⁴⁾。また、鉄筋腐食に対しては、コンクリート中の塩化物イオン量、水分量、酸素供給量などが大きく影響し、耐久性上最も厳しい環境は、飛沫帯・干満帯であり、以下海上大気中、海中の順に厳しい環境であるとされている⁵⁾。

環境条件の異なる場合のコンクリート中への塩化物イオンの浸透について多数の調査結果を整理・分析した報

告によると、同一の環境区分とみなされる条件下においても、塩化物イオンの拡散係数は、かなりのバラツキがあることが指摘されている^{6), 7)}。海洋における環境条件は多様であり、構造物の建設位置や部位によっても異なるため、環境条件の差異が塩化物イオンの浸透速度や鉄筋腐食の進行に及ぼす影響について把握することを困難にしている。このため、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や鉄筋腐食の進行については、十分に把握されておらず、その予測方法についても確立されていないのが現状である。

筆者らは、前報^{8), 9)}において、飛沫帯、海上大気中、海中等の異なる条件の海洋環境における各種の鉄筋コンクリートの10年間の暴露試験に基づき、海洋環境下における鉄筋コンクリートの耐久性について報告した。本報告では、海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計法の確立を目的として、海洋暴露試験の結果に基づき、塩化物イオンの浸透予測および鉄筋腐食の進行予測方法について提案する。

2. 実験方法

2.1 供試体

鉄筋コンクリート供試体 (以下「RC供試体」と呼称) と塩分浸透分析用コンクリート供試体の2種類について暴露試験を行った。RC供試体の形状・寸法は、Fig. 1に示す様に、断面9×18cm、長さ90cmの直方体とし、かぶり20mmとなるよう異形棒鋼 (JIS G 3112適合; SD295, D19, 横ふし型) を配置した。また、Fig. 1に示す塩化物イオンの浸透面以外の表面は、厚膜型エポキシ樹脂を用いて塗装を行い、塩化物イオンが一方のみから浸透するようにした。塩分浸透分析用供試体は、直径15cm、高さ15cmの円柱とし、周面を厚膜型エポキシ樹脂を用いて塗装を行い、塩化物イオンが一方のみから浸透するようにした。コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性質をTable 1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、耐硫酸塩ポルトランドセメントの3種類を用い、それらのセメントを用いたコンクリートを、それぞれNP、BB、SRと記述する。いずれの配合も、海洋環境下での使用を考慮し、水セメント比を50%とし、単位セメント量を約330kg/m³とした。コンクリートのスランプは12.0±1.5cm、空気量は4.5±0.5%とした。供試体は、打込み後材齢14日まで湿布養生を行った後、所定の面の塗装を行い、材齢50日から暴露を開始した。

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。暴露試験場の環境条件をTable 2に示す。暴露環境条件として、海洋環境においては、潮の干満作用および飛沫の影響を受ける環境 (以下「飛沫帯」と呼称)、堤防上において強風時に波しぶきを受ける環境 (以下「海上大気中」と呼称)、水深約11mの海底 (以下「海中」と呼称) の3箇所とし、その他、塩分の飛来の影響がほとんどない環境 (東京都清瀬市、以下「内陸」と呼称) とした。NPは、飛沫帯、海上大気中、海中、内陸に暴露し、BBおよびSRは、海上大気中、海中に暴露した。

2.3 測定項目・測定方法

塩化物イオン量の分析は、暴露後1, 6月および1, 2, 3, 4, 6, 10年において、所定の深さより採取したコンクリートの粉末を試料とし、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により全塩化物イオン量を定量分析した。鉄筋の腐食程度は、暴露後1, 3, 6, 10年において、RC供試体を暴露試験場より回収し、コンクリート中の鉄筋を取り出し、腐食面積率により評価した。

3. 塩化物イオン浸透の解析方法

コンクリート中への塩化物イオンの移動は、拡散のみに依存するものではないが、マクロ的には拡散方程式で

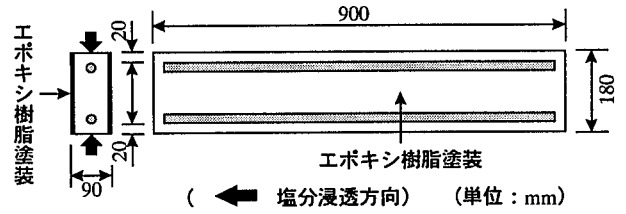


Fig. 1 RC供試体の形状・寸法
Shape of the Beam Specimen

Table 1 配合およびフレッシュコンクリートの性質
Mixture Proportion of Concrete

記号	セメントの種類	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュコンクリート	
					W	C	S	G	Ad*	スランプ (cm)	空気量 (%)
NP	普通ポルトランドセメント	15	50	48.0	166	332	847	935	1.04	12.0	5.0
BB	高炉セメントB種				162	324	851	940	1.01	10.5	4.4
SR	耐硫酸塩ポルトランドセメント				166	332	849	937	1.04	13.0	4.1

* Ad: AE減水剤

Table 2 暴露試験場の環境条件
Environment Condition of Exposure Positions

環境区分	環境条件	暴露場所
A	飛沫帯 (堤防側面) 中間位置 H.W.L.+1.7m と L.W.L.+0.0m の	清水港沖 約500m
B	海上大気中 (堤防上) 強風時に波しぶきを受ける L.W.L.+5.0m 位置	年平均気温 16.0°C 年間降水量 2361mm
C	海中 (水深11m) 平均海水温度 18.4°C, 溶存酸素量 7.98ppm pH 8.29, Clイオン濃度 18.4%	
D	内陸 海岸より約30km内陸, 年平均気温 15.3°C 年間降水量 1460mm	東京都 清瀬市

表すことが可能であるとされている。この場合、境界条件をコンクリート表面の塩化物イオン量とすると、その解は式(1)で表すことができる。コンクリート中の塩化物イオンの移動現象を、この拡散方程式によりモデル化する場合、塩化物イオンの濃縮、固定化、吸水等の現象も拡散現象に含めて取り扱うため、式(1)における拡散係数を「見かけの拡散係数」と呼ぶこととする。式(1)における表面塩化物イオン量 (以下C₀と記述) および見かけの拡散係数 (以下D_cと記述) の経時変化について、暴露後10年間調査した。C₀およびD_cは、塩化物イオン量の深さ方向の分布より、最小二乗法により算出した。

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

x: 表面からの深さ (cm), t: 経過時間 (s)

C: 表面からの深さ x (cm) における塩化物イオン量 (コンクリート質量に対する質量百分率; %)

C₀: 表面塩化物イオン量 (x=0における塩化物イオン量, コンクリート質量に対する質量百分率; %)

D_c: 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm²/s)

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

4. 環境条件およびセメントの種類が塩化物イオンの浸透および鉄筋の腐食に及ぼす影響

4.1 塩化物イオンの浸透の経時変化

4.1.1 暴露環境条件の影響 NPの各暴露環境における塩化物イオンの浸透分布をFig. 2に示す。暴露後10年までの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い。また、いずれの環境においても、暴露後3年以降は、表層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、深い部分の塩化物イオン量が増加する。

多数の構造物調査および暴露試験の結果を整理した報告によると、海中部、飛沫帯における表面塩化物イオン量(Co)は、コンクリート質量に対して0.5~1.5%程度であるとしている^{6),10)}。本実験における暴露後10年におけるCoは、飛沫帯に暴露した場合、コンクリート質量に対して0.70%(約16kg/m³)、海中では0.57%(約14kg/m³)、海上大気中では0.22%(約5kg/m³)であった。

表面塩化物イオン量(Co)の経時変化と近似曲線をFig. 3に示す。Coは、いずれの環境においても、暴露後3年までは時間経過とともに大きくなるが、暴露後3年以降の経時変化は少ない。Coの経時変化は、式(2)を用いて近似した。

$$C_o(t) = C_o^* (1 - \exp^{-\alpha \cdot t}) \dots\dots (2)$$

- C_o(t) : 暴露期間 t 年後の表面塩化物イオン量 (%)
- C_o^{*} : 最終的な表面塩化物イオン量 (%)
- α : 係数, t : 暴露期間 (年)

式(2)における最終的な表面塩化物イオン量(C_o^{*})および係数(α)は、Fig. 3中に示す値となる。係数αは環境条件による差異は比較的少ないが、C_o^{*}は飛沫帯>海中>海上大気中の順に大きく、暴露環境条件が表面塩化物イオン量に及ぼす影響が大きいことが確認された。

また、見かけの拡散係数(Dc)の経時変化と近似曲線をFig. 4に示す。Dcは、いずれの環境においても時間の経過とともに小さくなり、暴露後3年までの変化が大きく、暴露後3年以降の変化は比較的緩慢になる傾向を示した。既往の研究によると、海洋環境下におけるコンクリートのDcは、大略的に10⁻⁸~10⁻⁶ cm²/sの範囲にあることが示されている^{6),7),11)}。本実験における暴露後10年におけるDcは、飛沫帯に暴露した場合は6.7×10⁻⁸ cm²/s、海中では4.3×10⁻⁸ cm²/s、海上大気中では2.4×10⁻⁸ cm²/sであり、飛沫帯>海中>海上大気中の順にコンクリート中への塩化物イオンの浸透速度は速い。Dcの経時変化は、式(3)を用いて近似した。

$$D_c(t) = D_c^* \cdot t^{-\beta} \dots\dots (3)$$

- D_c(t) : 暴露期間 t 年後の見かけの拡散係数 (cm²/s)
- D_c^{*} : 係数, β : 係数
- t : 暴露期間 (年)

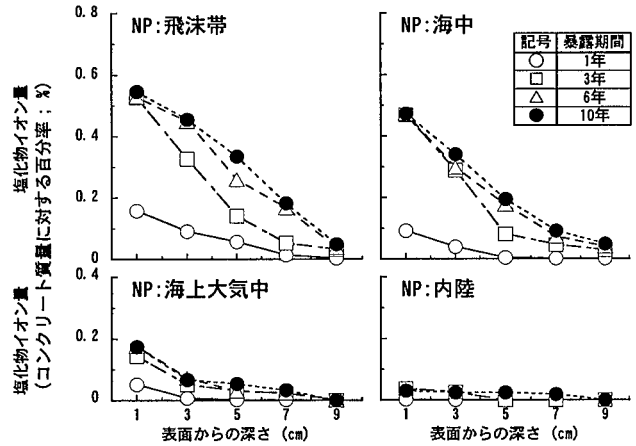


Fig. 2 塩化物イオンの浸透量の分布 (NP)
Distribution of Chloride ion Penetration (NP)

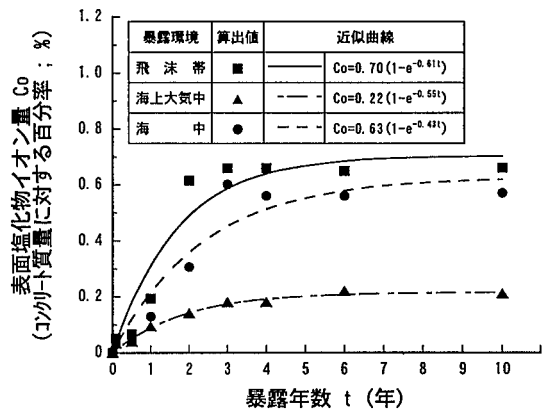


Fig. 3 表面塩化物イオン量の経時変化と近似曲線 (NP)
Change in Surface Chloride Ion Concentration Over Time

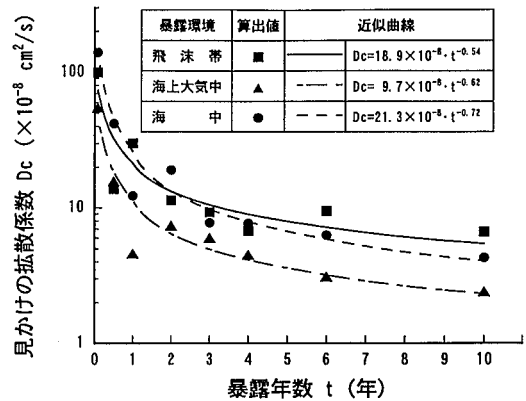


Fig. 4 見かけの拡散係数の経時変化と近似曲線 (NP)
Change in Diffusion Coefficient Over Time

式(3)における係数D_c^{*}、係数βは、Fig. 4中に示す値となる。長年月経過した後のD_cは、一定値に近づくが、飛沫帯>海中>海上大気中の順に大きく、暴露環境条件の影響を受ける。見かけの拡散係数が経時的に減少する傾向を示すことは、既往の研究¹²⁾においても報告されているが、海洋環境下においては、暴露初期での塩化物イオンの浸透量が多いことやコンクリートの組織が時間とともに緻密化することなどにより、見かけの拡散係数は経時的に減少すると推察される。

以上より、表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数は、環境条件に大きく影響され、式(2)および式(3)により近似することができる。したがって、暴露期間と環境条件を決定すれば、拡散方程式における表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数の推定が可能である。

4.1.2 セメントの種類の影響 各種のセメントを用いたコンクリートの暴露後10年における塩化物イオンの浸透分布をFig. 5に示す。海中におけるBBの塩化物イオン量は、NPに比べて表層部では多いが、3cmより深い位置では少ない。SRの塩化物イオンの浸透分布は、いずれの環境においても、NPとほぼ同様であった。

各種セメントを用いたコンクリートの表面塩化物イオン量(Co)の経時変化と近似曲線をFig. 6に示し、見かけの拡散係数(Dc)の経時変化と近似曲線をFig. 7に示す。Coは、いずれのセメントを用いた場合も、暴露後3年以降の変化は小さく、暴露後10年においては、海上大気中ではセメントの種類による差異は少ないが、海中では、NP, SRで0.60% (約14kg/m³)、BBで0.95% (約21kg/m³)であった。Dcは、いずれのセメントを用いた場合も、時間経過とともに小さくなった。Dcは、SRでは海上大気中、海中のいずれにおいても、NPと同等であり、BBでは海上大気中においてはNPと同等であるが、海中においてはNPに比べて小さく、いずれの時期においても、塩化物イオンの浸透抑制効果が認められた。

また、鉄筋位置(深さ2~4cm)における塩化物イオン量は、海中においては、NPおよびSRでは暴露後3年以降の変化は少ないが、BBでは暴露後3年以降10年まで徐々に増加する傾向が見られた。

4.2 鉄筋の腐食の進行状況

4.2.1 暴露環境条件の影響 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート中の鉄筋の腐食面積率の経時変化をFig. 8に示す。鉄筋腐食の進行は、暴露後10年までの期間においては、飛沫帯>海中>海上大気中の順に速い。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。すなわち、海中においては、塩化物イオン量が多いために発錆するまでの時間は早いですが、酸素供給量が少ないために、その後の腐食の進行は遅いと考えられる。また、海上大気中では、発錆までの時間は遅いが、酸素供給量が多いために、暴露後10年を越える長期においては、鉄筋腐食の進行は、海中に比べて速くなる可能性がある。

4.2.2 セメントの種類の影響 各種のセメントを用いたコンクリート中の鉄筋の腐食面積率の経時変化をFig. 9に示す。BBを海中に暴露した場合は、NPに比べて腐食開始時期が遅く、暴露10年後の腐食面積も小さ

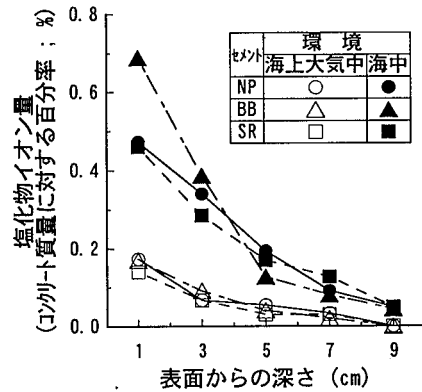


Fig. 5 塩化物イオン浸透分布(各種セメント)
Distribution of Chloride Ion Penetration

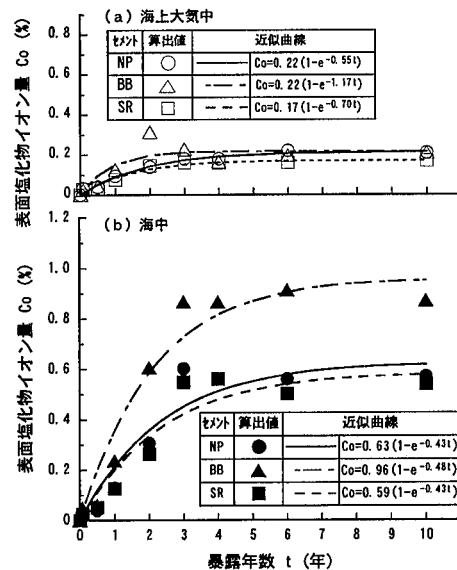


Fig. 6 表面塩化物イオン量の経時変化(各種セメント)
Change in Surface Chloride Ion Concentration Over Time

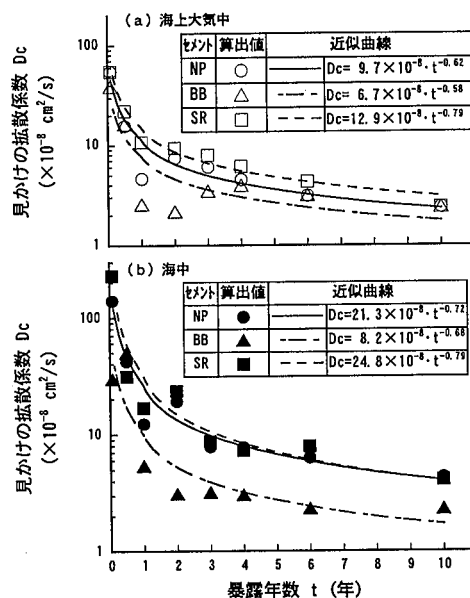


Fig. 7 見かけの拡散係数の経時変化(各種セメント)
Change in Diffusion Coefficient Over Time

いことが確認された。SRを海中に暴露した場合の腐食面積率は、暴露後6年まではNPより小さいが、暴露後10年においては同程度となった。暴露後10年の範囲では、海中におけるコンクリート中の鉄筋に対する防錆効果は、NPと比較した場合、BBでは認められたが、SRは同等であった。また、海上大気中においては、セメントの種類による暴露後10年における腐食面積率の差異は少ない。

5. 塩化物イオン浸透量および鉄筋の腐食程度の予測方法に関する検討

5.1 塩化物イオンの浸透量の予測

NPを海中に10年間暴露した場合の塩化物イオンの浸透量の予測値をFig. 10に示す。表面塩化物イオン量(Co)と見かけの拡散係数(Dc)は、式(2)および式(3)を用いて求めた。Fig. 3, Fig. 4に示すように、暴露後6年以前においては、暴露後10年における値に比べて、表面塩化物イオン量は小さく算定され、見かけの拡散係数は大きく算定されるため、暴露10年後の塩化物イオン量の予測値は、実測値との差異は大きい。暴露後6年程度以降においては、表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数がほぼ一定値に収束するため、実測値と予測値の差異は少なく比較的良い予測がなされた。

暴露後100年の海中におけるNPおよびBBの塩化物イオン浸透の予測値をFig. 11に示す。表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数は、式(2)および式(3)を用いた。かぶり75~100mmの位置に鉄筋が設置された一般的な海洋コンクリート構造物において、BBを用いた場合は、NPを用いた場合に比べて、暴露後100年においても鉄筋位置の塩化物イオン量は抑制されると予測される。

5.2 鉄筋の腐食面積の推定

飛沫帯において暴露後10年経過したコンクリートでは、腐食面積率は25%程度で、大きな断面欠損をともなう程度の鉄筋腐食は進行していなかったが、鉄筋腐食によるひび割れが発生していた。したがって、腐食面積率が比較的小さい場合においても、鉄筋コンクリートの耐久性に影響を及ぼす場合があると考えられ、鉄筋コンクリートの耐久性を評価するための指標として、鉄筋の腐食面積率を推定することを試みた。

Fig. 8, Fig. 9に示すように、鉄筋位置の塩化物イオン量が、時間的に大きく変化しない場合においても、鉄筋の腐食は進行する。これは、鉄筋の腐食程度が、単に塩化物イオン量だけでは推定できないことを示唆している。そこで、各暴露期間における鉄筋位置の塩化物イオン量の平均値と暴露時間の積の総和を、積算塩化物イオン量(TCL)と定義し、式(4)で算出した。

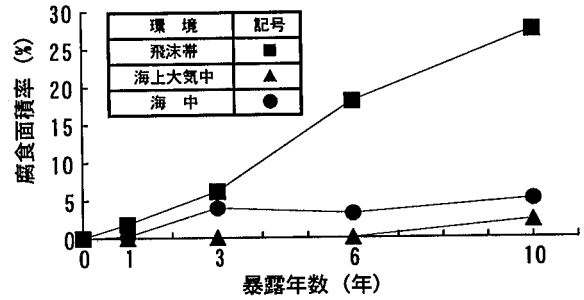


Fig. 8 鉄筋の腐食面積率の経時変化 (NP)
Changes in Corroded Area Ratio of Steel Bar (NP)

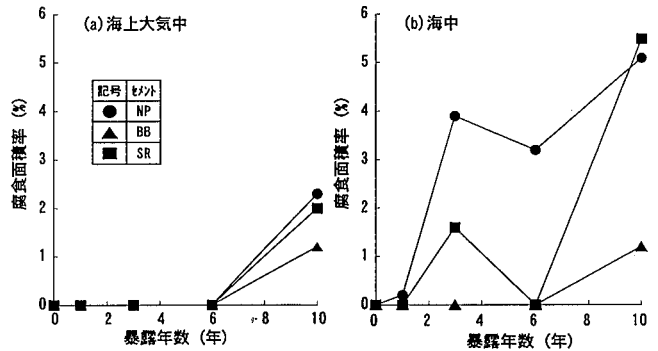


Fig. 9 鉄筋の腐食面積率の経時変化 (各種セメント)
Changes in Corroded Area Ratio of Steel Bar

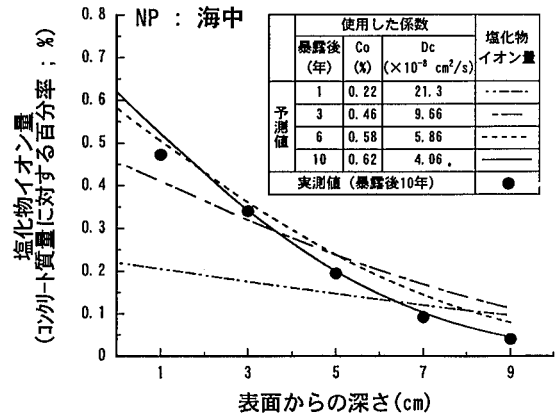


Fig. 10 暴露10年後の塩化物イオン量の予測値と実測値
Compares Measured Chloride Ion with Estimated Chloride Ion at 10 Years Exposure

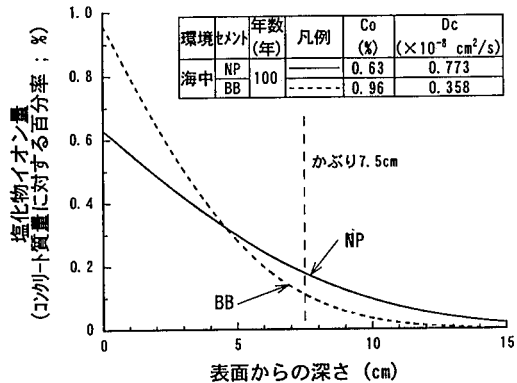


Fig. 11 100年後の塩化物イオン量の予測値
Estimated Chloride Ion Distribution after 100 Years

$$TCL = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Cl_i + Cl_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i \right) \dots \dots \dots (4)$$

TCL：積算塩化物イオン量（%・年）
 Cl_i：i回目の測定における塩化物イオン量（%）
 Δt_i：i回目の測定と(i+1)回目の測定の時間間隔(年)
 n：塩化物イオン量の測定回数

各種のセメントを用いた場合の積算塩化物イオン量と腐食面積率との関係をFig. 12に示す。NPの場合、暴露後10年における鉄筋位置の積算塩化物イオン量（TCL）は、海上大気中に対して、飛沫帯で約7倍、海中で約5倍となる。積算塩化物イオン量と腐食面積率との間には、環境条件ごとに直線的な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における腐食面積率は大きくなる。海上大気中においては、酸素供給量は多いが、積算塩化物イオン量が少ないため、腐食の進行が遅くなると考えられる。これらより、腐食の進行に及ぼす要因として、塩化物イオン量の他に、酸素供給量の影響も大きいと考えられる。腐食面積率が30%程度以下の範囲では、環境条件が定まれば、積算塩化物イオン量により、鉄筋の腐食面積率を予測することが可能であると考えられる。

6. 結論

各種の鉄筋コンクリートの10年間の海洋暴露試験より、以下のことが明らかとなり、海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に適用することができる。

- 1) 塩化物イオンのコンクリート中への浸透は、拡散方程式により表すことができる。
- 2) 拡散方程式における表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数は、暴露環境条件に大きく影響される。表面塩化物イオン量は時間経過にともない大きくなり、見かけの拡散係数は時間経過にともない小さくなる傾向を示すが、いずれも暴露後3年以降の変化は緩慢になる。
- 3) 表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数の経時変化は、近似式による予測が可能であり、暴露試験に基づいて得られた表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数を用いることにより、長期的な塩化物イオンの浸透量の予測が可能である。
- 4) 鉄筋の腐食面積率が30%程度以下の範囲では、積算塩化物イオン量（塩化物イオン量とその存在時間の累積値）により、腐食面積率の予測が可能である。

参考文献

1) 例えば、土木研究センター：コンクリートの耐久性向上技術の開発，p.39～43，(1989)

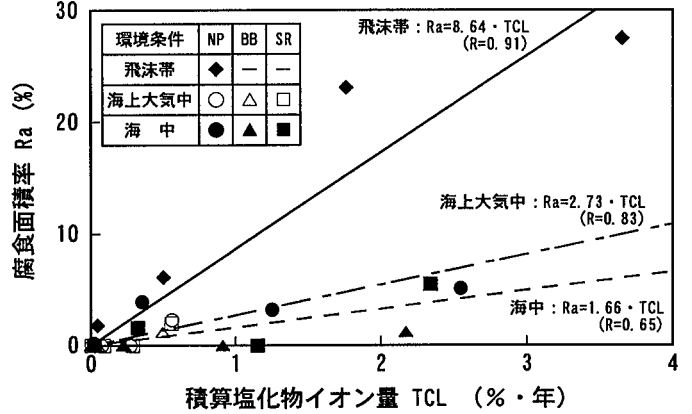


Fig. 12 積算塩化物イオン量と腐食面積率の関係
 Relationship between the Accumulative Chloride Ion Content and the Corroded Area Ratio

- 2) 例えば、大即信明，森 好生，関 博：海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察，土木学会論文報告集，第332号，p.107～118，(1983)
- 3) 大即，他：モルタル中鉄筋の不動態にぼす塩素の影響，土木学会論文集，No.360，p.111～118，(1985)
- 4) 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)
- 5) 岸谷，西澤，他編：塩害（I），コンクリート構造物の耐久性シリーズ，p.40～41，(1987)
- 6) 武若：海洋環境下のコンクリートの含有塩分量に関する既往調査結果の整理と分析，土木学会第43回年次学術講演会 概要集第V部，p.36～37，(1988)
- 7) 濱田，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入過程および浸入量に関する一考察，コンクリート工学論文集，第7巻第1号，p.11～22，(1996)
- 8) 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，大林組技術研究所報，NO.45，(1992.8)
- 9) 竹田，十河，相原：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)，大林組技術研究所報，NO.52，(1996.2)
- 10) コンクリート構造物の維持管理指針（案），土木学会 コンクリートライブラリー81，(1995)
- 11) 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の課題，土木学会 コンクリート技術シリーズ26 (1997)
- 12) 杉山，他：コンクリートの塩化物イオン拡散係数の経年変化を考慮したシミュレーション解析の一例，日本コンクリート工学協会，セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集，p.53～58，(1996)