

種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究

竹田 宣典¹・十河 茂幸²・迫田 恵三³・出光 隆⁴

¹正会員 工修 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

²フェロー 工博 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

³正会員 工博 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科 (〒424-0902 静岡県清水市折戸3-20-1)

⁴正会員 博士(工) 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町1-1)

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、海洋環境においてコンクリートの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検討を行った。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、長期的な塩化物イオンの浸透予測が可能である。② 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量は、飛沫帯で最も多く、以下海中、海上大気中の順に多く、暴露後10年の範囲では、鉄筋の腐食はこの順に速く進行していた。③ 良好に処理された打継目やひび割れ幅が0.05～0.1mm程度のひび割れは、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。

Key Words : penetration of chloride ion, diffusion coefficient, reinforcing bar corrosion, marine environment, exposure test

1. まえがき

海洋環境下に建設される鉄筋コンクリート構造物に対して、耐久性を考慮した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り、これまでに、多数の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報告がなされている^{1), 2)}。これらの報告によると、鉄筋の腐食に対しては、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、一般に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³⁾。また、鉄筋腐食が始まる限界の塩化物イオン量は、1.2～2.5kg/m³の間にしきい値があるとする報告がなされている^{4), 5)}。さらに、Fickの拡散方程式における塩化物イオンの見かけの拡散係数と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長期的に推定することも試みられている^{6), 7), 8)}。

しかしながら、種々の海洋環境条件下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透量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、塩化物イオンの浸透量は

は、かなりのバラツキがあることが指摘されている^{9), 10)}。海洋における環境条件は多様である上に、地域や構造物の建設位置や部位によっても異なるために、環境条件の差異が塩分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と考えられる。このような理由により、海洋環境条件の差異あるいはひび割れや打継目などの施工条件が、塩化物イオンの浸透や鉄筋腐食の進行に及ぼす影響については、十分に解明されていないのが現状である。

本研究では、種々の海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物に対して、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、飛沫帯、海上大気中、海中等の異なる条件の海洋環境において、鉄筋コンクリート供試体の暴露試験を10年間実施した。この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について考察し、以下の項目に関する検討を行った。

- (1) 環境条件の差異がコンクリートの品質、塩化物イオンの浸透、鉄筋腐食に及ぼす影響の把握
- (2) セメントの種類がコンクリートの品質、塩化物イオンの浸透、鉄筋腐食に及ぼす影響の把握
- (3) ひび割れや打継目が鉄筋腐食に及ぼす影響の把握

表-1 実験条件の組合せ

ひび割れ 打継目の 有無	使用セメント	暴露環境			
		飛沫帯	海上 大気中	海中	内陸
ひび割れ 打継目 なし	普通ポルトランドセメント(NP)	○	○	○	○
	高炉セメントB種(BB)	-	○	○	-
	耐硫酸塩ポルトランドセメント(SR)	-	○	○	-
ひび割れ 有り 打継目 有り	普通ポルトランドセメント(NP)	○	○	○	○
	普通ポルトランドセメント(NP)	○	○	○	○

表-2 使用セメントの物理的性質・化学組成

セメントの 種類	性状	比重	比表面積 (ブレン) (cm ² /g)	化学成分 (%)							
				Fig.loss	Insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
普通 ポルトランドセメント		3.16	3,300	0.5	0.3	21.7	5.3	3.0	64.7	1.3	2.2
高炉セメントB種		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	4.5	64.3	1.0	1.9

表-3 使用骨材の性質

使用材料	性質
細骨材	木更津産陸砂、比重:2.58,粗粒率: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%

表-4 配合およびフレッシュコンクリートの性質

記号	セメントの種類	Gmax (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	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
	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

(2) 供試体

a) 種類・形状・寸法

供試体は、鉄筋の腐食状況を把握するための鉄筋コンクリート供試体（以下「RC供試体」と呼称）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。同供試体は、断面9×18cm、長さ90cmの直方体とし、かぶり2cmの位置に異形棒鋼（JIS G 3112適合；SD295, D19, 横ふし型）を配置し、図-1に示す塩化物イオン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い、塩化物イオンがかぶり部分の面のみから浸透するようにした。圧縮強度試験用供試体は、直径10cm、高さ20cmの円柱とした。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様にした。

実験Ⅲでは、打継目を設置したRC供試体（以下「打継目供試体」と呼称）、および曲げひび割れを導入したRC供試体（以下「ひび割れ供試体」と呼称）を用いた。打継目供試体は、打継目を供試体の中央部に設け、材齢7日において、打継面のコンクリートを0.5mm程度ワイヤブラシでけずり、表面のレイタンスを取り除き、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、荷重により一体当たり4～5本の曲げひび割れをあらかじめ導入し、塩分浸透面で0.05～0.1mmのひび割れ幅を保持する様に治具で固定した。

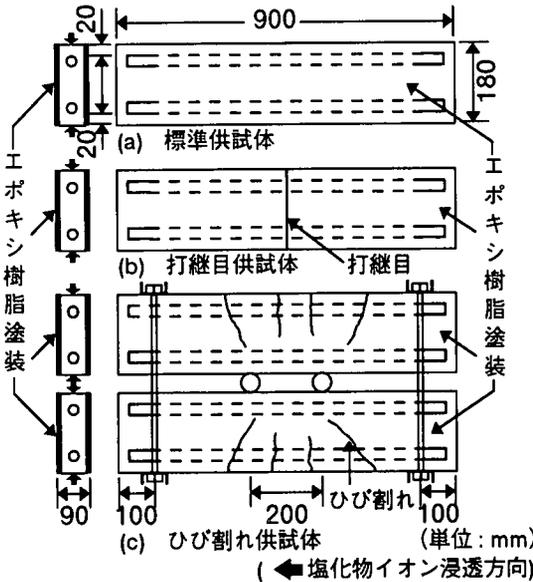


図-1 RC供試体の形状・寸法・種類

2. 実験方法および解析方法

(1) 実験概要

実験の目的により、以下の3実験に区別する。

実験Ⅰ：環境条件の差異の影響を把握する実験

実験Ⅱ：セメントの種類の影響を把握する実験

実験Ⅲ：ひび割れや打継目の有無の影響を把握する実験

いずれの実験も、鉄筋を含むコンクリート供試体を10年間、条件の異なる海洋環境下に暴露し、定期的にコンクリートの品質、塩化物イオンの浸透、鉄筋腐食の状態について調査を行い、その経年変化を調べた。表-1に供試体の暴露環境条件、使用セメント、ひび割れや打継目の有無などの実験条件の組合せを示す。暴露環境条件は、飛沫帯、海上大気中、海中および内陸の4箇所とし、使用セメントは、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種類を用いた。また、ひび割れあるいは打継目をあらかじめ設置した供試体は、普通ポルトランドセメントを用いて作製し、上記の4種類の環境条件に暴露した。

表-5 暴露試験場の環境条件

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

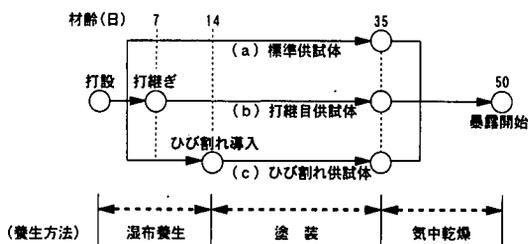


図-2 供試体の作製工程

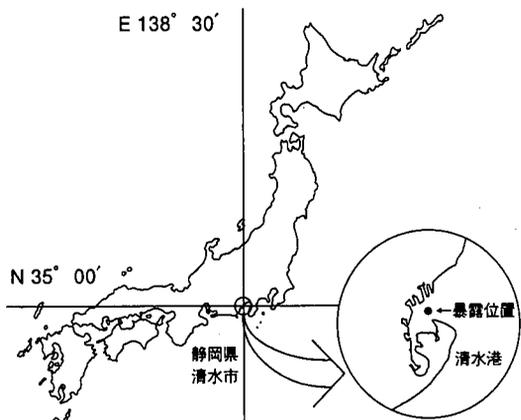


図-3 暴露場所の位置

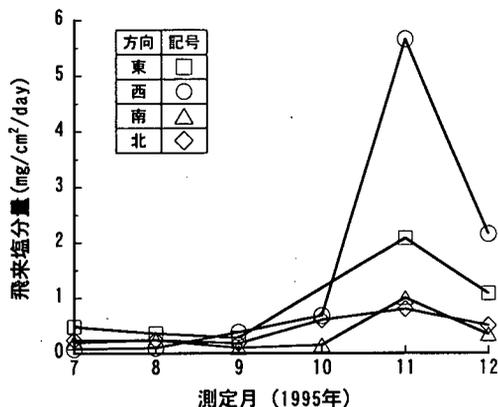


図-5 飛来塩分量の測定結果

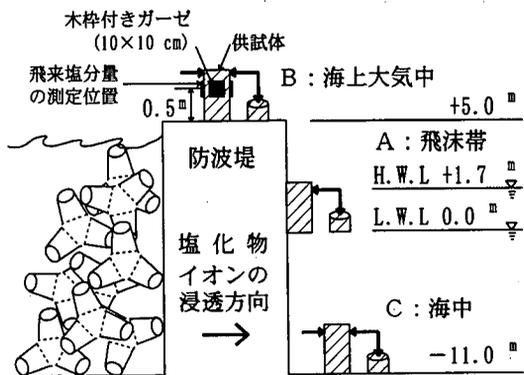


図-4 防波堤における供試体の暴露位置

b) 使用材料・配合

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種類を用いた。使用したセメントの物理的性質・化学組成を表-2に示す。また、いずれの実験においても、細骨材は陸砂を、粗骨材は碎石を用いた。使用した骨材の性質を表-3に示す。混和剤は、リグニンスルホン酸系の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性質を表-4に示す。以下、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを「NP」、高炉セメントB種を用いたコンクリートを「BB」、耐硫酸塩ポルトランドセメントを用いたコンクリートを「SR」と呼称する。

実験Ⅰ、ⅡではNP、BB、SRを用い、実験ⅢではNPのみを用いた。また、いずれの配合も海洋環境での使用を考慮し、水セメント比を50%とし、単位セメント量を約330kg/m³とした。供試体の作製時の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。

c) 供試体の作製

コンクリートの打込みから暴露開始までの供試体の作製工程を図-2に示す。供試体は、打込み後材齢14日まで湿布養生を行い、その後数日間乾燥させ、所定の面の塗装を行い、気中乾燥の後、材齢50日から、それぞれの環境において暴露を開始した。ひび割れ供試体は、材齢14日において、供試体の塩分浸透面が引張り縁となるように荷重を作用させ、曲げひび割れを発生させた。除荷後、図-1に示すように、2体の供試体を1組とし、治具で固定した後、側面に塗装した。

(3) 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。暴露場所の位置を図-3に示す。防波堤における供試体の暴露位置を図-4に示し、暴露試験場の環境条件を表-5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のみ波しぶきを受ける環境（以下「海上大気中」と呼称）、水深約11mの海底の

表-6 測定項目および測定方法

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10cm,高さ20cm)を暴露終了後、付着物を除去し、JIS A 1108に準じた試験を実施
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
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
X線回折分析	粉末X線回折法による定性分析
細孔径分布	水銀圧入式ポロソメーターにより、直径30Åから30μmまでの細孔径を測定

表-7 測定時期

測定項目	暴露期間							
	1M	6M	1Y	2Y	3Y	4Y	6Y	10Y
圧縮強度			○		○		○	○
中性化深さ			○		○		○	○
塩化物イオン量	○	○	○	○	○	○	○	○
鉄筋の腐食面積			○		○		○	○
X線回折分析								○
細孔径分布								○

環境(以下「海中」と呼称)の3箇所とし、その他に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。実験I, IIIでは、飛沫帯、海上大気中、海中、内陸の4箇所に供試体を暴露し、実験IIでは海上大気中、海中の2箇所に供試体を暴露した。

海上大気中に位置づけられる防波堤上において、図-4中に示す様に、高さ約0.5mの位置に土研式塩分捕集器¹¹⁾およびJIS Z2381「屋外暴露試験方法通則(参考3:海塩粒子量の測定)」に示される木枠付きガーゼ(寸法:10×10cm)を、降雨の影響を除くための屋根を付けて設置し、1995年の7月から12月まで1ヶ月毎に、飛来塩分量(NaCl換算量)を測定した。防波堤上の飛来塩分量の測定結果を図-5に示す。飛来塩分量は方角によって差があり、測定期間における方角別の月平均値の最大値は1.5mg/dm²/day、最小値は0.32mg/dm²/dayであり、全方向の平均値は0.77mg/dm²/dayであった。また、土研式塩分捕集器による、同時期の飛来塩分量の平均値は0.22mg/dm²/dayであった。

(4) 測定項目・測定方法

測定項目および測定方法を表-6に示し、各測定項目の測定時期を表-7に示す。圧縮強度および鉄筋の腐食程度は、暴露後1年、3年、6年、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、暴露後1月、6月、1年、2年、3年、4年、6年、10年において、供試体の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。塩化物イオン量は、コンクリート質量に対する質量百分率に

換算して表した。鉄筋の発錆状況は、RC供試体を解体し、鉄筋の腐食面積率により評価した。

(5) 塩化物イオン浸透の評価方法

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と考えられるが、マクロ的には拡散現象で表すことが可能であることが知られている。塩化物イオンの移動現象のモデル化については、多数の提案がなされているが^{7), 12), 13), 14), 15)}、Fickの拡散方程式において、境界条件をコンクリート表面の塩化物イオン量(C₀)とし、この値を一定とした場合の拡散方程式の解は式(1)で表すことができる。海洋環境下におけるコンクリート中の塩化物イオンの移動現象を、この方程式で表す場合、コンクリート中における塩化物イオンの濃縮、固定化、また吸水等の現象も、すべて拡散現象に含めて取り扱われるため、式(1)における拡散係数(D_c)は、これらの現象も含んだものとなる。そこで、以下「見かけの拡散係数」と呼ぶこととする。

本論文では、コンクリート中における塩化物イオンの移動を表す指標となる値が、長期的にどのように変化するかについて、大略的な傾向を把握するために、塩化物イオンの移動をなるべく単純化した形で取り扱い、塩化物イオンの拡散以外の移動についても、拡散現象に含めて取り扱うこととした。このような仮定の下に、式(1)における表面塩化物イオン量(以下、C₀と記述)および塩化物イオンの見かけの拡散係数(以下、D_cと記述)について、暴露後10年間の経時変化について調査した。C₀およびD_cは、各暴露期間において実測した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。しかしながら、塩化物イオンの浸透性が時間とともに変化し、見かけの拡散係数が経時的に変化すると仮定すると、この様にして求めた見かけの拡散係数は、暴露開始時より塩化物イオンの測定時期までの期間における平均的な拡散係数を表しており、その時点以前の塩化物イオンの浸透性の影響を含んでいると考えられる。

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

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

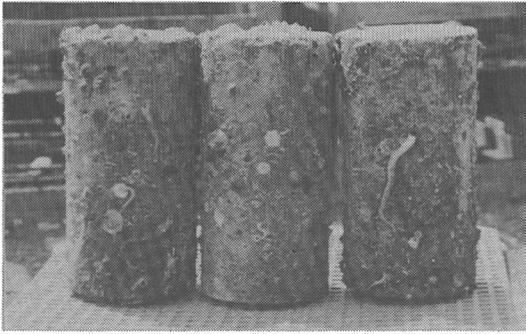


写真-1 暴露10年後の供試体の状態 (暴露位置: 飛沫帯)

3. 環境条件およびセメントの種類が海洋環境下のコンクリートの性質に及ぼす影響に関する検討

(1) 暴露環境条件の影響

a) 供試体の外観

飛沫帯における暴露10年後の供試体の状態を写真-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た。海中、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。

b) 圧縮強度の変化

普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート(NP)の圧縮強度の経時変化を図-6に示す。標準養生を行った場合の材齢10年後における圧縮強度は、暴露直前(材齢50日)に比べて約10%増加した。海上大気中における圧縮強度は、標準養生とほぼ同様の変化を示した。飛沫帯においては、暴露直前の圧縮強度に対して、暴露後1年で約20%増加し、暴露後10年までの変化は少ない。海中においては、暴露直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3年以降は減少し、暴露後6年で約4%、暴露後10年で約8%減少した。内陸部では、暴露後10年間の圧縮強度の変化は少なかった。

標準養生を行った場合の圧縮強度に対する各環境に暴露した場合の同一材齢における圧縮強度は、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大きい。暴露後10年においては、飛沫帯では約10%以上大きく、海上大気中では同等であり、海中では約20%小さく、内陸では約10%小さくなった。

このように、暴露環境によって、圧縮強度の経時変化は異なる。海洋環境下における普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの圧縮強度の推移には、暴露場

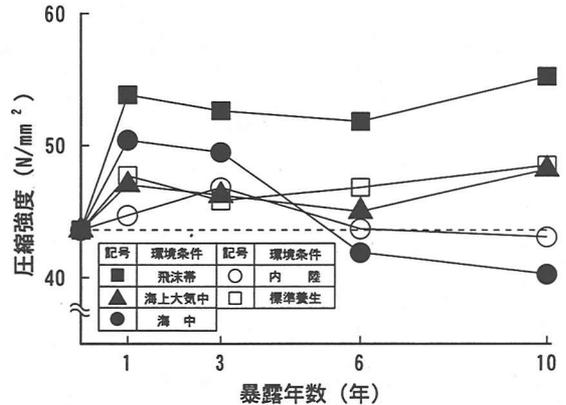


図-6 圧縮強度の経時変化 (NP)

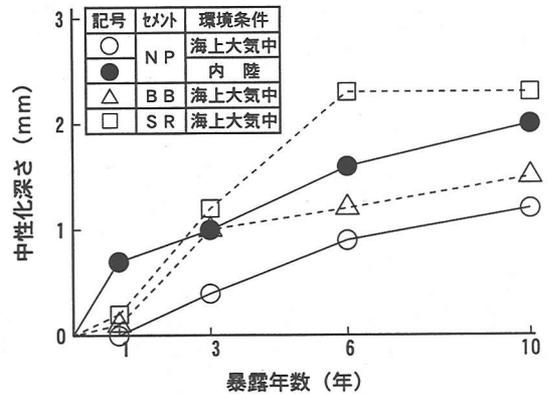


図-7 中性化深さの経時変化

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ガイトの量や海水中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推察される。

c) 中性化の進行

中性化深さの測定結果を図-7示す。NPについては、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1.2mm、内陸では2.0mm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、RC供試体の鉄筋位置(深さ2~4cm)においては、コンクリートはアルカリ性を保持していた。

d) 粉末X線回折分析

各環境条件において、10年間暴露した後のNPの粉末X線回折分析の結果を図-8に示す。飛沫帯および海中に暴露した場合の表層部(深さ0~2cm)における水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)のX線回折強度は、海上大気中および内陸に暴露した場合に比べて小さいことから、飛沫帯および海中においては、表層部のCa(OH)₂が海水中へ溶出していると考えられる。海中に暴露した場合、Ca(OH)₂

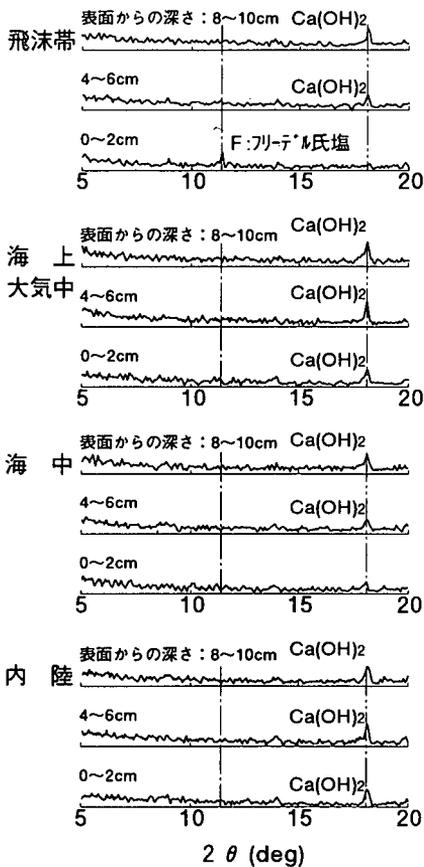


図8 粉末X線回折分析結果 (NP, 暴露10年後)

の海水中への溶出は、コンクリートの圧縮強度の低下の要因の一つであると推察される。飛沫帯においては、海中に暴露した場合と同様の傾向が示されたが、深さ2cm以内の表層部にフリーデル氏塩が検出され、またいずれの環境においても、エトリンガイトを明確に検出することはできなかった。

e) 細孔容積

暴露後10年経過したコンクリートの深さ8~10cmの部分における総細孔容積 (換算直径30Å~30μmの細孔の容積の合計) に対する表層部 (深さ0~2cm) における総細孔容積の比と暴露直前に対する暴露10年後の圧縮強度の比の関係を図-9に示す。いずれのセメントを用いたコンクリートの総細孔容積も、深さ8~10cmの部分に比べて表層部では増加する傾向があり、深さ8~10cmの部分に対する表層部の総細孔容積の比は、海上に暴露した場合に比べて海中に暴露した方が大きい。NPを海中に暴露した場合、表層部の総細孔容積は、深さ8~10cmの内部に対して約13%増加しているが、飛沫帯、海上大気中に暴露した場合は、それぞれ3%程度、5%程度増加し

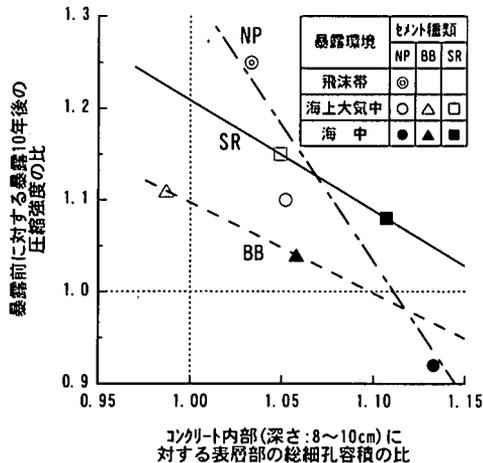


図-9 総細孔容積の比 (表層部/内部) と圧縮強度の比 (暴露10年後/暴露直前) の関係

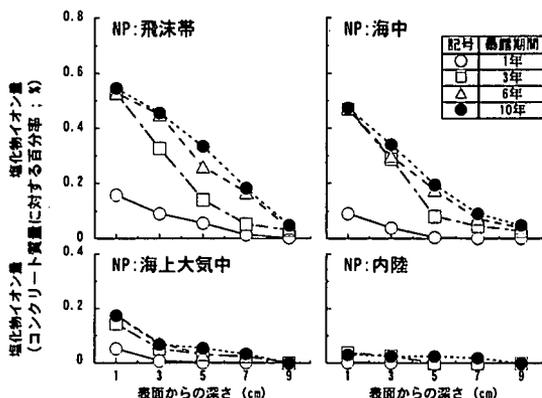


図-10 塩化物イオンの浸透量の分布 (NP)

ていた。海中に暴露した場合、コンクリート中のCa(OH)₂の溶出により、表層部の総細孔容積が増加すると考えられる。X線回折分析によると、飛沫帯においても、コンクリート中のCa(OH)₂の溶出が認められるが、深さ8~10cmの部分に対する表層部の総細孔容積の増加は少ない。これは、飛沫帯においては、比較的径の大きい細孔に、コンクリートの表面部に付着した貝類等の生物が充填することなども影響していると考えられる。

また、いずれのコンクリートも、深さ8~10cmの部分に対する表層部の総細孔容積の比が大きいほど、暴露前に対する暴露10年後の圧縮強度は低下している。細孔容積の測定結果からも、海中においては、Ca(OH)₂の溶出が圧縮強度の低下に影響を及ぼしていると考えられる。

f) 塩化物イオンの浸透の経時変化

各環境におけるNPの暴露後10年までの塩化物イオンの浸透量 (以下、コンクリート質量に対する質量百分率で示す。) の分布を図-10に示す。暴露後10年までのい

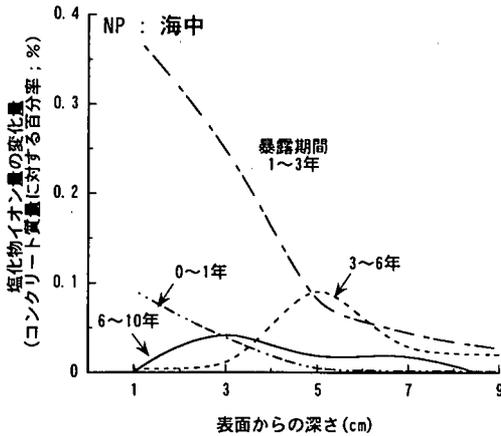


図-11 塩化物イオンの変化量(NP)

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、暴露開始から1年後、暴露後1年～3年、暴露後3年～6年、暴露後6年～10年の各期間における塩化物イオン量の変化量を図-11に示す。いずれの環境においても、暴露後3年以降は、深さ3cm程度までのコンクリート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、深い部分において塩化物イオンの増加がみられる。

塩化物イオン量の実測値から式(1)を用いて算出した表面塩化物イオン量(C_0)の経時変化と近似曲線を図-12に示す。表面塩化物イオン量は、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。暴露後10年における表面塩化物イオン量は、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。

また、表面塩化物イオン量の経時変化は、式(2)を用いて近似した。各環境における表面塩化物イオン量の経時変化を表す近似式における最終的な表面塩化物イオン量(C_0^*)および係数 α は、図-12中に示す値となる。最終的な表面塩化物イオン量(C_0^*)は、飛沫帯、海中、海上大気中の順に大きく、杉山らの報告¹⁶⁾と同様の傾向を示した。また、係数 α は環境条件による差異は比較的少ない。表面塩化物イオン量の経時変化については、既往の研究^{10, 17, 18)}においても報告されているが、本実験においても、暴露環境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。

$$C_0(t) = C_0^* (1 - \exp^{-\alpha \cdot t}) \quad (2)$$

- $C_0(t)$: 暴露期間 t 年後の表面塩化物イオン量 (%)
- C_0^* : 最終的な表面塩化物イオン量 (%)
- α : 係数
- t : 暴露期間 (年)

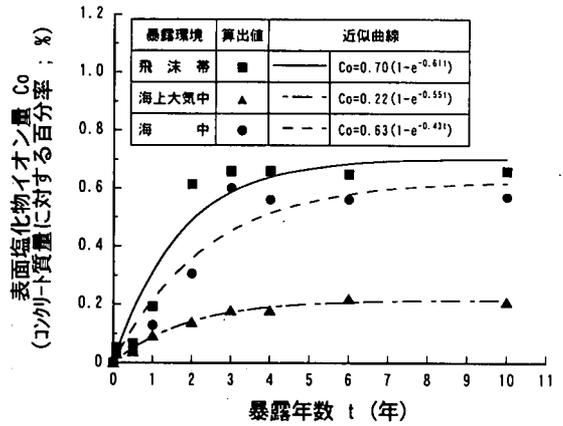


図-12 表面塩化物イオン量の経時変化と近似曲線(NP)

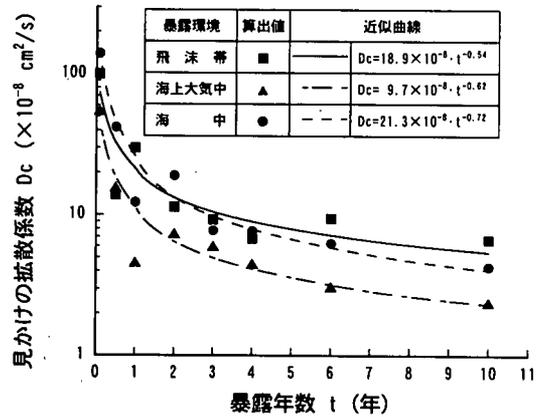


図-13 見かけの拡散係数の経時変化と近似曲線(NP)

次に、 C_0 の場合と同様にして求めた見かけの拡散係数(D_c)の経時変化と近似曲線を図-13に示す。塩化物イオンの見かけの拡散係数は、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。暴露後10年における見かけの拡散係数は、飛沫帯に暴露した場合は $6.7 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、海中では $4.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、海上大気中では $2.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 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と考えられる。

X線回折分析および細孔容積の測定結果より、海中部では、表層部において、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶出、総細孔容積の増大が見られ、ポーラスになっていると考えられるが、塩化物イオンの浸透は飛沫帯に比べて少ない。この理由は、飛沫帯においては、潮の干満による乾湿繰り返しや波しぶきによる表面部への塩化物イオンの衝突等の拡散現象以外による塩化物イオンの移動の影響を受けることにより、飛沫帯の方が海中部に比べて塩化物イオンの浸透が速く、見かけの拡散係数が大きくなるためと推察される。

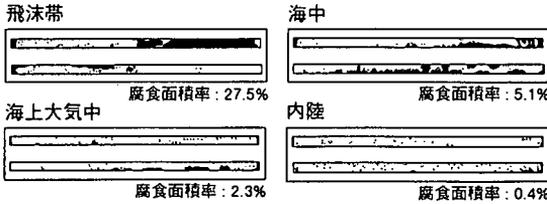


図-14 暴露後10年における鉄筋腐食の状態

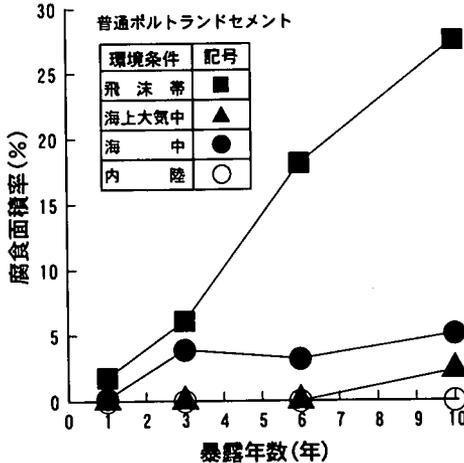


図-15 鉄筋の腐食面積率の経時変化

また、見かけの拡散係数の経時変化は、式(3)を用いて近似した。各環境における見かけの拡散係数の経時変化を表す近似式における係数 Dc^* および係数 β は、図-13中に示す値となる。長年月経過した後の見かけの拡散係数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、見かけの拡散係数も暴露環境条件の影響を受けると考えられる。見かけの拡散係数が時間とともに小さくなる傾向を示すことは、既往の研究^(10, 16, 19, 20)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の緻密度が時間とともに変化することなどが、見かけの拡散係数の経時的な減少に影響を及ぼしていると推察される。

$$Dc(t) = Dc^* \cdot t^{-\beta} \quad (3)$$

$Dc(t)$: 暴露期間 t 年後の見かけの拡散係数(cm^2/s)

Dc^* : 係数

β : 係数

t : 暴露期間(年)

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ると考えられる。また、それらの値は、式(2)および式(3)により近似することができ、

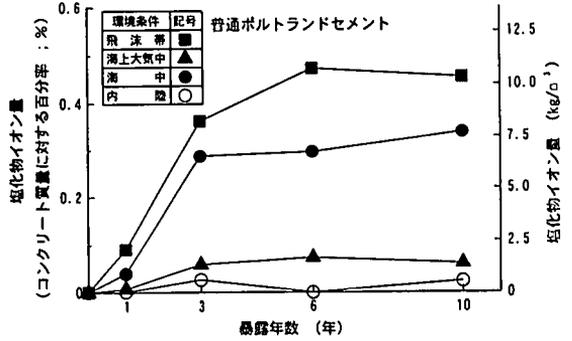


図-16 鉄筋位置における塩化物イオン量の経時変化

暴露期間と環境条件を決定すれば、表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数は、ある程度推定することが可能であると考えられる。さらに精度良く予測を行うためには、水セメント比や養生温度の影響についても考慮する必要がある。

g) 鉄筋の腐食の進行状況

ひび割れおよび打継目のないRC供試体の暴露後10年における鉄筋腐食の状態を図-14に示す。暴露後10年における腐食面積率は、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、腐食は鉄筋の表面部のみに発生しており、孔食は認められなかった。また、暴露後10年までの鉄筋の腐食面積率の変化を図-15に示す。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。

鉄筋位置(深さ2~4cm)における塩化物イオン量の経時変化を図-16に示す。いずれの環境においても、暴露後3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年の鉄筋位置における塩化物イオン量は、海上大気中において、コンクリート質量に対して0.06% (約 $1kg/m^3$)、海中では0.34% (約 $8kg/m^3$)、飛沫帯では0.46% (約 $10kg/m^3$)であった。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影響しており、両者がともに大きい環境条件である飛沫帯では、海上大気中、海中に比べて腐食の進行が速い。海上大気中では、暴露後3年以降、 $1.2kg/m^3$ 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%程度と小さい。

本実験における海洋環境条件下では、暴露後10年までの期間においては、鉄筋の腐食は、飛沫帯、海中、海上大気中の順に進行していた。海中では、塩化物イオン量が多いために発錆までの時間は早いですが、酸素供給量が少

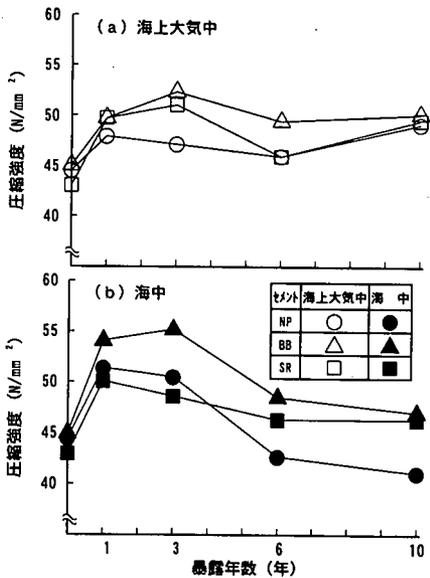


図-17 セメントの種類による圧縮強度の変化の差異

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、腐食が発生した後の進行は、海中に比べて速くなる可能性がある。

(2) セメントの種類の影響

a) 圧縮強度

NPおよび耐硫酸塩ポルトランドセメント (SR)、高炉セメントB種 (BB) の圧縮強度の経時変化を図-17に示す。SRおよびBBを海中に暴露した場合の圧縮強度も、NPと同様に暴露後3年以降から低下する傾向にあるが、暴露後10年においては、両者ともに暴露前の圧縮強度に対して5%程度大きい値であった。海中に暴露した場合、SR、BBの暴露前に対する暴露後10年の圧縮強度の低下率は、NPに比べて小さい。

b) 細孔容積、粉末X線回折分析結果

図-9に示す様に、SR、BBを10年間海中に暴露した場合の総細孔容積は、表面から2cmの表層部においては、深さ8~10cmの内部に比べて、SRでは10%程度増加し、BBでは5%程度増加した。SRの総細孔容積は、NPとほぼ同様の傾向を示すが、BBはコンクリート中の水酸化カルシウムの含有量が少なく、海中への溶出量が少ないために、表層部の総細孔容積の減少率が小さくなり、その結果、BBの海中における圧縮強度の低下率はNPに比べて小さくなったと考えられる。

また、粉末X線回折分析より、SR、BBを10年間海中に暴露した場合もNPと同様に、表層部(深さ0~2cm)

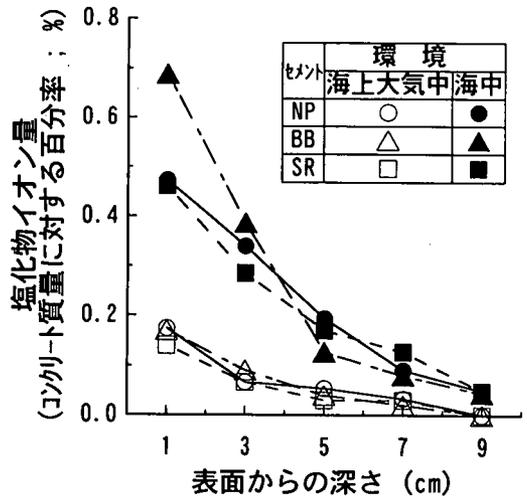


図-18 セメントの種類による塩化物イオン浸透の差異

における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の回折強度は小さく、コンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が海中へ溶出していると考えられる。

c) 塩化物イオンの浸透量

各種のセメントを用いた場合の海上大気中および海中における暴露後10年の塩化物イオンの浸透状況を図-18に示す。SR、BBの塩化物イオンの浸透量は、NPと同様に、海中の方が海上大気中に比べて多い。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くなる。また、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。

海上大気中および海中における各種のセメントを用いたコンクリートの表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数の経時変化と近似曲線を図-19、図-20に示す。いずれのセメントも、暴露後3年以降の表面塩化物イオン量の経時変化は少ない。暴露後10年における表面塩化物イオン量は、海上大気中に暴露した場合、セメントによる差異は少ないが、海中に暴露した場合、NP、SRで0.60% (約14kg/m³)であり、BBで0.95% (約21kg/m³)であった。また、見かけの拡散係数は、いずれのセメントを用いた場合も、時間の経過とともに小さくなった。暴露初期から暴露後10年までの見かけの拡散係数は、SRでは海上大気中、海中のいずれにおいてもNPとほぼ同等であり、BBでは海上大気中においてはNPと同様であるが、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。

d) 鉄筋の腐食

各種のセメントを用いたコンクリートの鉄筋位置(深さ2~4cm)の塩化物イオン量の経時変化を図-21に示す。海上大気中における塩化物イオン量は、セメントの種類による差異は少なく、海中における塩化物イオン量は、

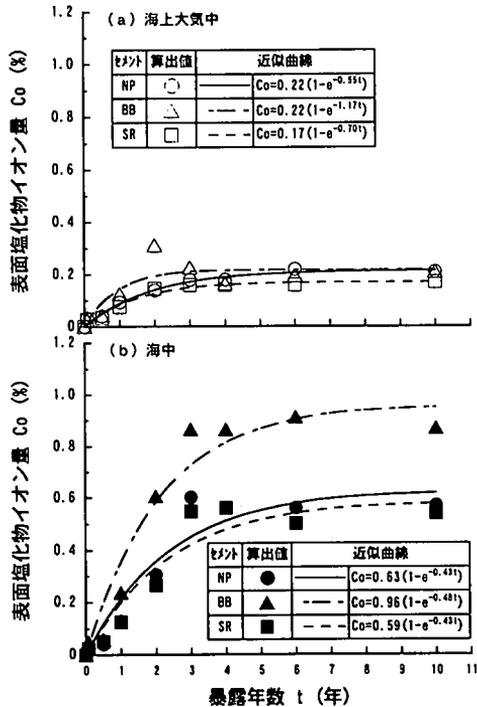


図-19 表面塩化物イオン量の経時変化(各種セメント)

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年まで徐々に増加している。

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変化を図-22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。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かった。すなわち、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。

4. 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

(1) 塩化物イオンの浸透量の予測

Fickの拡散方程式における見かけの拡散係数を、時間とともに変化しない定数であると仮定すると、コンクリートの塩化物イオンの浸透に対する物性は時間的に変化しないことになる。しかしながら、前章より見かけの拡散係数は時間とともに変化することが明らかであり、コンクリートの塩化物イオンの浸透に対する物性は時間的に変化すると考えられる。例えば、暴露開始時より暴露

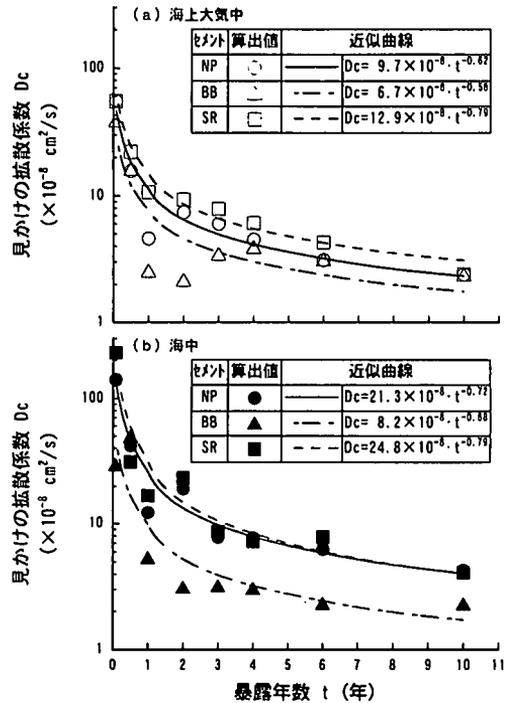


図-20 見かけの拡散係数の経時変化(各種セメント)

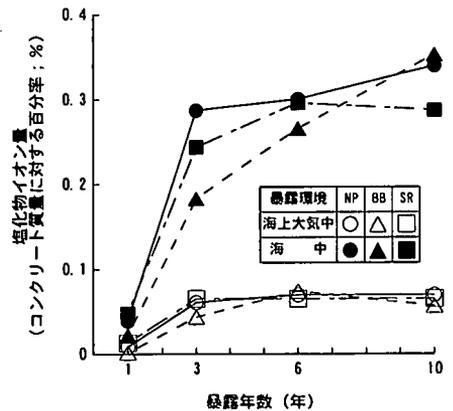


図-21 鉄筋位置における塩化物イオン量の経時変化

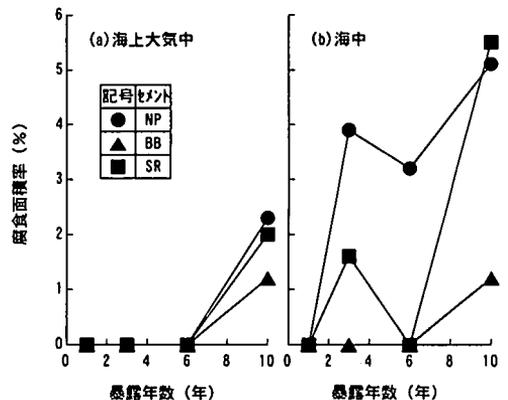


図-22 鉄筋の腐食面積率の変化(各種セメント)

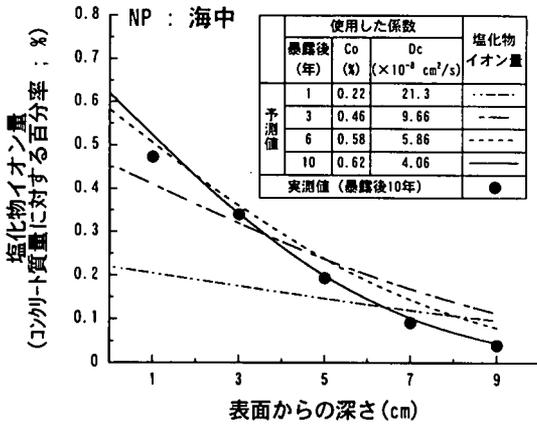


図-23 各時期における C_0 , D_c を用いて求めた塩化物イオン分布の予測値

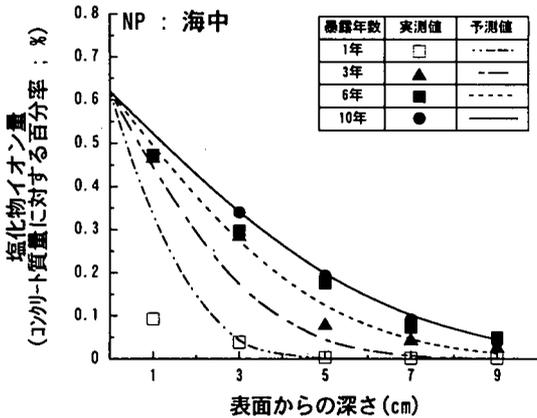


図-24 暴露後10年における C_0 , D_c を用いて求めた塩化物イオン分布の予測値

後10年までにコンクリート中に浸透した塩化物イオン量より計算された見かけの拡散係数は、暴露後10年の時点におけるコンクリートの塩化物イオンの浸透に対する物性値を表しているのではなく、暴露開始時より暴露後10年までの期間における塩化物イオンの浸透性に対する性質の平均的な値を表していると考えられる。2章で述べたが、この様にして求めた見かけの拡散係数は、暴露初期の塩化物イオンの浸透が速い時期の影響も含まれるため、見かけの拡散係数の算定に用いた塩化物イオン量の測定を行った時点以前における塩化物イオンの浸透性の影響も含んでいると考えられる。

NPを海中に暴露した場合、式(2)および式(3)を用いて計算した暴露後1, 3, 6, 10年における表面塩化物イオン量(C_0)と見かけの拡散係数(D_c)を用いて求めた暴露10年後の塩化物イオン量分布の予測値を図-23に示

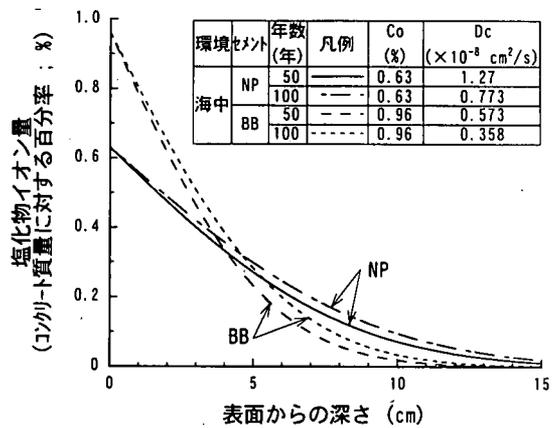


図-25 50, 100年後の塩化物イオンの浸透分布の予測値

す。各暴露期間における表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数を用いて予測した暴露10年後の塩化物イオン量は、暴露後1年あるいは3年における値を用いた場合は、予測値と実測値との差異は大きい、暴露後6年における値を用いた場合は、実測値と予測値の差異は、前者に比べて少なく比較的良好な予測がなされた。これは、図-12、図-13に示すように、式(2)、式(3)を用いる場合、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が、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は、ほぼ一定値に収束するためである。

また、暴露後10年における表面塩化物イオン量(C_0)と見かけの拡散係数(D_c)を用いて推定した暴露後1, 3, 6, 10年後の塩化物イオン量の分布を図-24に示す。暴露後1年においては、 C_0 が小さい時期であるため、推定値と実測値との差異は大きく、暴露後3~6年においては、 D_c に実際より小さい値を用いているために、塩化物イオン量は実測値に比べて小さく推定される。

したがって、塩化物イオンの浸透量を推定する場合は、できるだけ長い期間の暴露試験の結果から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て、さらに長期における塩化物イオン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。逆に、長期間の実験によって得られた見かけの拡散係数を用いて、その時点より短期における塩化物イオンの浸透量を推定する場合は、浸透量が過小に計算される場合がある。

実用的には、10年以上の比較長期的な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表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数を用いることは、その値がほぼ収束した値であり、かつ塩化物イオンの浸透量は、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。

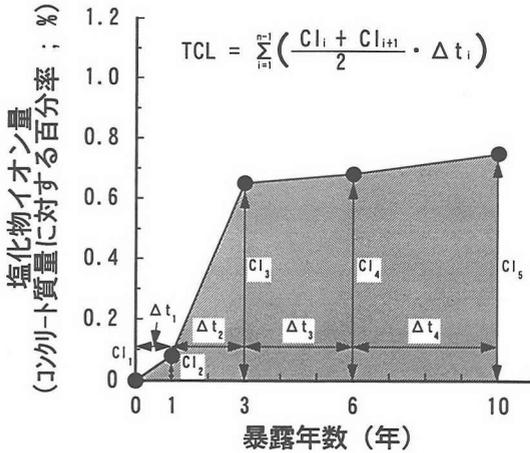


図-26 積算塩化物イオン量の算出方法

前章で示した表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数の推定式を用いて予測した暴露後50年と100年の海中における普通ポルトランドセメント (NP) および高炉セメントB種 (BB) を用いたコンクリート中への塩化物イオンの浸透分布の予測結果を図-25に示す。鉄筋がかぶり75~100mmの位置に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。

(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、鉄筋の腐食面積率を、鉄筋コンクリートの耐久性を評価するための一つの指標と考え、推定することを試みた。

前章で示した様に鉄筋位置の塩化物イオン量が、経時的にあまり増加しない場合においても、鉄筋の腐食が進行する場合がある。これは、鉄筋の腐食程度が、単にある時間における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。鉄筋腐食を推定するには、酸素供給量も考慮する必要があると考えられるが、ここでは、環境を限定し、かつ水セメント比が同じ場合、鉄筋の腐食面積を推定することとした。図-26に示す様に、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。

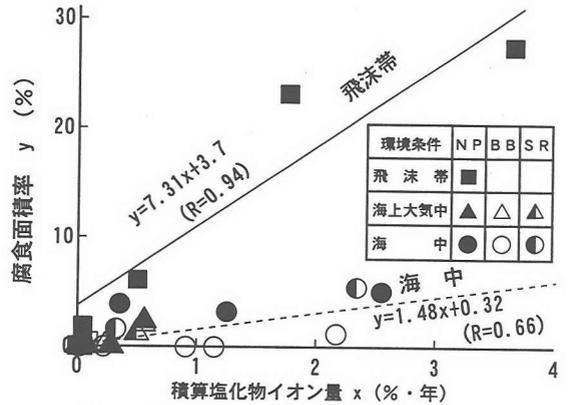


図-27 積算塩化物イオン量と腐食面積率の関係

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

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図-27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。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腐食面積率がある程度推定可能であると考えられる。

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。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。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、腐食の進行が遅いと考えられる。

5. ひび割れ・打継目が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する検討

ひび割れあるいは打継目がある場合の腐食面積率の経時変化を図-28に示す。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-29に示す。ひび割れがある場合は、ひび割れない場合に比べて、飛沫帯、海中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ない場合と同程度となっ

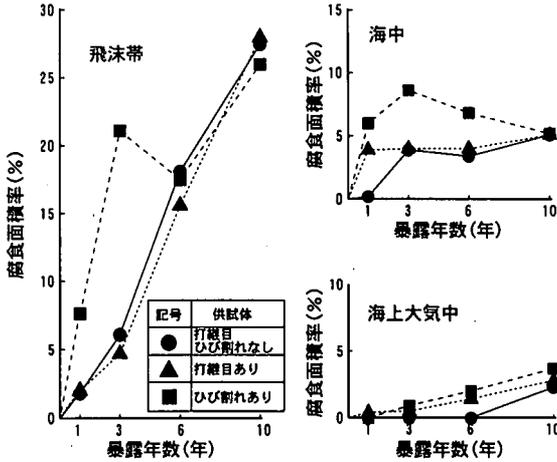


図-28 ひび割れ、打継目がある場合の腐食面積率の経時変化

た。ひび割れ幅が0.05~0.1mm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-30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、打継目付近における腐食が多いが、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、打継目がある場合の暴露後10年における腐食面積率は、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と考えられる。

また、ひび割れ幅が0.05mm~0.1mmの微小なひび割れや良好に処理された打継目がある場合においても、鉄筋の腐食に対しては、ひび割れや打継目が無い場合と同様に、暴露期間が10年の範囲においては、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。

6. 結論

各種のセメントを用いたコンクリートおよびひび割れや打継目のあるコンクリートについて、10年間の海洋暴露試験を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) コンクリートの圧縮強度は、海上大気中においては、暴露後10年の範囲での変化は少ないが、海中においては、暴露後3年以降から低下する傾向を示す。

(2) 本実験における海洋環境条件下では、コンクリート中への塩化物イオンの浸透速度は、飛沫帯で最も速く、以下海中、海上大気中の順に速いことが確認された。

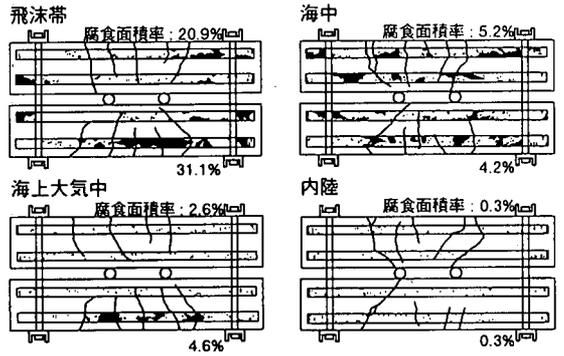


図-29 ひび割れ供試体の鉄筋腐食の状況 (暴露後10年)

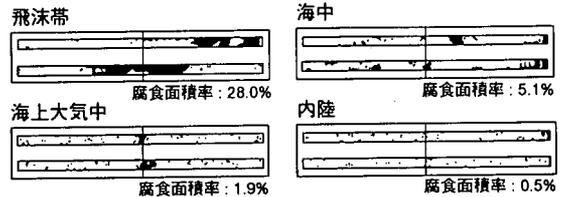


図-30 打継目供試体の鉄筋腐食の状況 (暴露後10年)

(3) 本実験における海洋環境条件下では、暴露後10年までの期間では、鉄筋の腐食は飛沫帯で最も速く進行し、以下海中、海上大気中の順に速く進行した。

(4) 高炉セメントB種は普通ポルトランドセメントに比べて、塩化物イオンの浸透が抑制され、海中において同等量の塩化物イオンが浸透した場合においても、鉄筋腐食の進行は遅いことが認められた。

(5) 拡散方程式におけ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、塩化物イオンの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年以降の変化は比較的緩慢になる。また、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。

(6) 表面塩化物イオン量および塩化物イオンの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種々の海洋環境およびセメントの種類を考慮し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、大略的に長期的な塩化物イオンの浸透量の予測が可能である。

(7) 鉄筋の腐食面積率は、環境条件ごとに、塩化物イオン量と時間の積と相関性があることが確認され、腐食面積率が30%程度以下の範囲では、この値により、鉄筋の腐食面積率の推定はある程度可能である。

(8) 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0.05~0.1mm程度であるひび割れは、鉄筋の腐食の進行を著しく促進させるものではないと考えられる。

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, pp.39-43, 1989.
- 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, pp.107-118, 1983.
- 3) 岸谷孝一, 西澤紀昭ほか編: 塩害(1), コンクリート構造物の耐久性シリーズ, pp.40-41, 1987.
- 4) 宮川豊章: Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学博士論文, 1985.
- 5) 大即信明, 藤井聡之, 下沢 治: モルタル中鉄筋の不動態にばす塩素の影響, 土木学会論文集, No.360, pp.111-118, 1985.
- 6) Browne, R.D.: Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP-65, 1980.
- 7) 丸屋 剛, 宇治公隆: コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.597-602, 1989.
- 8) 竹田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.595-600, 1991.
- 9) 武若耕司: 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, pp.36-37, 1988.
- 10) 濱田秀則, Swamy, R.N.: 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, pp.11-22, 1996.
- 11) 片脇清士, 守屋 進, 箕作光一: 飛来塩分量の特性と測定方法, プレストレストコンクリート, Vol.27, No.1, pp.68-73, 1985.
- 12) 樹田桂寛, 友澤史紀, 安田正雪, 原 謙治: コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.493-498, 1988.
- 13) 大城 武, 堀園義昭, 谷川 伸, 永井健太郎: コンクリート中への塩素イオンの浸透に関する実験的および解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.9, No.1, pp.369-374, 1987.
- 14) 山内幸裕, 片脇清士: プレストレストコンクリート構造物の腐食に関する研究—飛沫帯におけるコンクリートへの塩分浸透に関する調査結果—, 土木学会第37回年次学術講演会概要集第V部, pp.269-270, 1982.
- 15) Takewaka, K. and Matsumoto, S.: Quality and thickness of concrete based on the estimation of chloride penetration in marine environments, ACI SP-109, pp.381-400, 1988.
- 16) 杉山隆文, 長岡 覚, 橋本親典, 辻 幸和: 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, pp.53-58, 1996.
- 17) 金谷光秀, 樹田桂寛, 阿倍道彦, 西山直洋: 海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオンの拡散性状, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18, No.1, pp.747-752, 1996.
- 18) 山田義智, 大城 武, 谷川 伸, 伊部 博: 飛来塩分量とコンクリート中への塩分浸透過程に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 17, No.1, pp.973-978, 1995.
- 19) 武若耕司, 松本 進: 海洋環境下におけるコンクリート中の塩分浸透量推定に関する数値解析結果, 土木学会第42回年次学術講演会概要集第V部, pp.482-483, 1987.
- 20) 竹田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸: 海洋環境下に10年間暴露した鉄筋コンクリートの経年変化, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18, No1, pp.753-758, 1996.

(1997. 7. 29 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON PENETRATION OF CHLORIDE IONS INTO CONCRETE AND CORROSION OF REINFORCING BARS IN VARIOUS MARINE ENVIRONMENTS

Nobufumi TAKEDA, Shigeyuki SOGO, Shigemi SAKODA and Takashi IDEMITSU

Exposure tests of concrete in marine environments were conducted over a period ten years to establish the rational design considered durability of concrete structures. In this tests, penetration of chloride ions, corrosion of reinforcing bar and quality change of concrete were investigated. The following result were obtained. ① Chloride ion distribution can be predicted by using the chloride ion diffusion coefficient (Dc) and surface chloride ion density (Co) obtained from exposure tests. ② The rate of chloride ion penetration in marine environments is fastest in the splash zone, followed by submerged and atmospheric zones. ③ In marine environments, properly treated construction joints and cracks under 0.05mm to 0.1mm in width do not significantly expedite the reinforcement corrosion in this experiment up to 10 years of exposure.