

論文 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

竹田宣典*¹ ・ 迫田恵三*² ・ 十河茂幸*³

要旨：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、環境条件やセメントの種類が、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及ぼす影響について考察した。その結果、以下の知見が得られた。①海中では暴露3年経過後より圧縮強度が減少する傾向が見られる。②環境条件により塩化物イオンの拡散係数、表面塩化物イオン量は異なり、これらの値を算定した。③塩化物イオンの浸透は、飛沫帯、海中、海上大気中の順に速く、鉄筋腐食に対しても、この順に厳しい環境である。

キーワード：耐久性、海洋環境、塩化物イオン、鉄筋腐食、拡散係数、暴露試験

1. まえがき

海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性を考慮した設計を行う場合、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。

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および鉄筋腐食に関しては、多数の実構造物調査[1]や暴露試験[2]の報告がなされており、鉄筋腐食に対しては塩化物イオン量、酸素量、水分量などが大きく影響し、一般に飛沫帯、海上大気中、海中の順に厳しい環境とされ[3]、鉄筋腐食が始まる限界の塩化物イオン量は、 $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ の間に閾値があるとされている[4]。また、塩化物イオンの浸透量は、Fickの拡散方程式により近似でき[5]、この式における拡散係数および表面の塩化物イオン量を用いて、長期的な塩化物イオンの浸透量を推定することも試みられている[6, 7]。しかし、種々の海洋環境条件下における塩化物イオンの浸透量について、多数の研究論文を整理・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には、かなりのバラツキがあることが指摘されている[8, 9]。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・部位によっても異なるため、このことが、環境条件の差異の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。本研究では、同一配合のコンクリートを同時にいくつかの異なる海洋環境条件に暴露し、長期的に調査した例は少ないことに鑑み、飛沫帯、海上大気中、海中の海洋環境下において10年間の暴露試験を行い、海洋における環境条件の差異がコンクリート品質、塩化物イオンの浸透、鉄筋腐食に及ぼす影響およびその経年変化について検討した結果について述べる。

2. 実験方法および解析方法

2. 1 供試体

供試体は、鉄筋の腐食状況を把握するために、図-1に示す形状の鉄筋コンクリート供試体（以下RC供試体と呼称）と無筋の圧縮

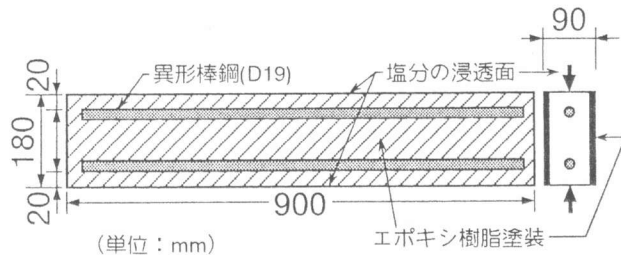


図-1 RC供試体の形状・寸法

* 1 ㈱大林組技術研究所 土木第三研究室、 工修（正会員）
 * 2 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科、 工博（正会員）
 * 3 ㈱大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員、工博（正会員）

強度試験用および塩分浸透分析用の3種類とした。RC供試体は、長さ90cmの直方体とし、かぶり20mmの位置に、黒皮付きの異形棒鋼(JIS G 3112適合;SD295,D19,横ふし型)を配置した。また、塩化物イオンが一方からのみ浸透するように、図-1に示す塩分の浸透面以外の表面をエポキシ樹脂により塗装を行った。セメント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。使用セメントの物理的性質・化学組成を表-1に示す。細骨材は山砂(比重:2.58, F.M.:2.67)を、粗骨材は碎石(比重:2.66, Gmax:15mm)を用い、混和剤はAE減水剤を用いた。

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。海洋での使用を考慮して、水セメント比は50%とし、単位セメント量は330kg/m³程度とした。スランプは12.0±1.0cm、空気量は4.5±0.5%であった。以下それぞれのセメントを用いたコンクリートをNP、BB、SRと呼称する。供試体は、打込み後材齢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日において海洋暴露を開始した。

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11m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。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2cmの深さ毎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、腐食面積率により評価した。測定された塩化物イオン量より、最小二乗法によってFickの拡散方程式(式(1))における表面塩化物イオン量(C₀)および塩化物イオンの拡散係数(D_c)を算出した。

表-1 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)	化学組成(%)							
				lg. 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		3.15	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-2 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	A d	スランプ(cm)	空気量(%)
NP	普通ポルトランドセメント	15	50	48	166	332	847	935	1.04	12.0	5.0
BB	B種高炉セメント				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

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 +1.7m と L.W.L +0.0m の中間位置	清水港沖 500 m
B	海上大気中 堤防上 L.W.L +5.0m 位置 強風時に波しぶきを受ける	年平均気温 16.0℃
C	海中 水深11m 海水温度 18.4℃、溶存酸素量 7.98ppm pH 8.29、Clイオン濃度 18.4%	年間降水量 2361 mm
D	内陸 海岸より30km内陸、年平均気温 15.3℃ 年間降水量 1460 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10cm,長さ20cm)を暴露終了後、附着物を除去し、JIS A 1108に準じ試験実施
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	塩化物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
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	水銀圧入式ポロシメーターにより、直径30Åから30μmまでの細孔径を測定

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

x : 表面からの深さ (cm)

t : 経過時間 (s)

C : 表面から深さ x での塩化物イオン量 (kg/m³)

C₀ : 表面部 (x=0) での塩化物イオン量 (kg/m³)

D_c : 塩化物イオンの拡散係数 (cm²/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、海中に暴露した供試体の表面には、貝類等の生物が付着しており、RC供試体には、鉄筋腐食によるひび割れおよび錆汁の発生が見られた。海上大気中、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。

3.2 圧縮強度の変化

暴露前の圧縮強度に対する強度比の経年変化を図-2に示す。海中におけるNPの圧縮強度は、暴露前に対して、暴露後1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。SRおよびBBの海中における圧縮強度も、暴露後3年以降、低下する傾向にあるが、暴露後10年においては、暴露前に対して約5%大きい値であった。よって、いずれのセメントも、海中における圧縮強度は、暴露後3年以降から低下する傾向にあり、BB、SRに比べてNPの低下が大きい。また、海上大気中における圧縮強度は、いずれのセメントも、暴露後10年までほとんど低下しなかった。飛沫帯におけるNPの圧縮強度は、暴露後1年において、暴露前に対して約20%増加し、暴露後10年までの変化は少なかった。

3.3 中性化の進行

中性化深さの経年変化を図-3に示す。暴露後10年において、飛沫帯、海中では、いずれのコンクリートも全く中性化しておらず、海上大気中、内陸における中性化深さは2mm程度以下であった。いずれの環境においても、鉄筋位置(深さ2~4cm)のコンクリートは中性化していない。

3.4 塩化物イオンの浸透状況

飛沫帯におけるNPの塩化物イオン量の分布を図-4に示す。暴露後3年以降は、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と共に、深い部分における塩化物イオン量が増加する。この傾向は、海中におけるいずれのセメントを用いた場合にも同様であった。

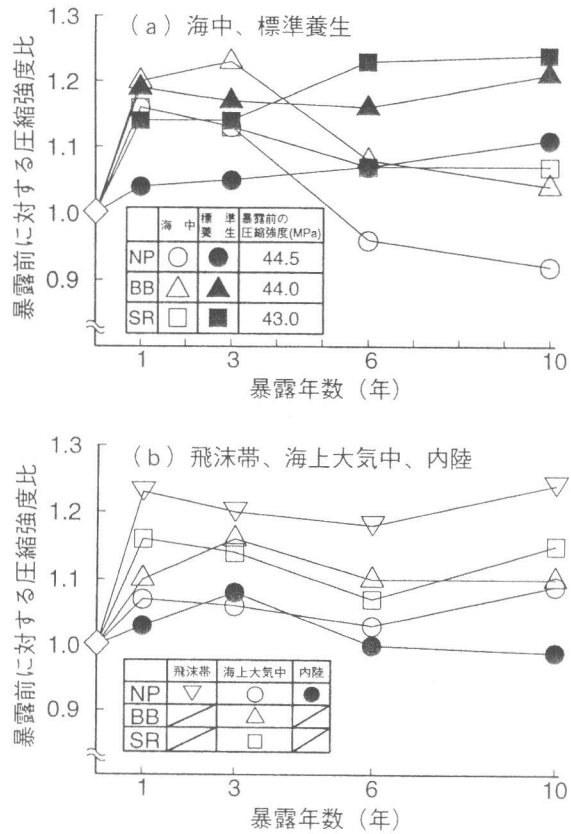


図-2 圧縮強度の経年変化

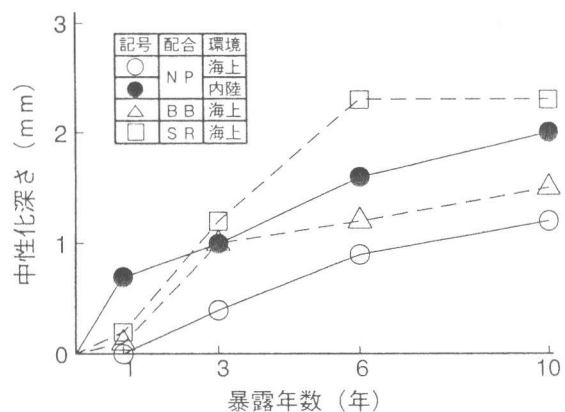


図-3 中性化深さの経年変化

暴露後10年における塩化物イオンの浸透状況を図-5に示す。いずれのコンクリートにおいても、塩化物イオンの浸透量は飛沫帯、海中、海上大気中の順に多い。海中部におけるBBの塩化物イオン量は、NPに比べて表面部では多いが、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。

測定された塩化物イオン量をFickの拡散方程式で回帰した場合の表面塩化物イオン量(Co)は、暴露3年以降における経年変化は少ないが、環境条件によって差が大きく、飛沫帯では約17kg/m³、海中では12~18kg/m³、海上大気中では4~5kg/m³であった。

また、同方程式で回帰した場合の拡散係数(Dc)の経年変化を図-6に示す。いずれの環境においても、拡散係数は時間経過と共に小さくなるが、飛沫帯と海中においては、暴露後3年までの変化が大きく、それ以降の変化は比較的緩慢になる傾向を示した。この傾向は、既往の文献[9,10]にも報告されているが、海水と接する環境においては、暴露初期での塩化物イオンの浸透が著しいためであると考えられる。暴露後10年における拡散係数は、NPの飛沫帯で約3×10⁻⁸cm²/s、海中で約2×10⁻⁸cm²/s、海上大気中で約1×10⁻⁸cm²/sであり、環境条件の影響を受けると考えられる。SRはいずれの環境においてもNPとほぼ同等であり、BBは海中で約1×10⁻⁸cm²/s、海上大気中で約0.7×10⁻⁸cm²/sとなり、NPに比べて拡散係数は小さく、BBの塩化物イオンの浸透抑制効果が認められた。

以上より、拡散方程式における表面塩化物イオン量は主に環境条件によって決まり、拡散係数は環境条件とセメントの種類の両方に影響されると考えられる。

3.5 粉末X線回折分析結果

暴露後10年におけるNPの粉末X線回折分析の結果を図-7に示す。海上大気中においては、表面部にCa(OH)₂が存在するが、飛沫帯および海中では、表面から5cmまでの範囲でCa(OH)₂が減少している。また、飛沫帯においては、表面部にフリーデル氏塩が検出された。海中における圧縮強度の低下の要因として、海水中へのカルシウムの溶出も影響していると考えられる。また、BBとSRの海中および海上大気中においても同様の傾向であった。

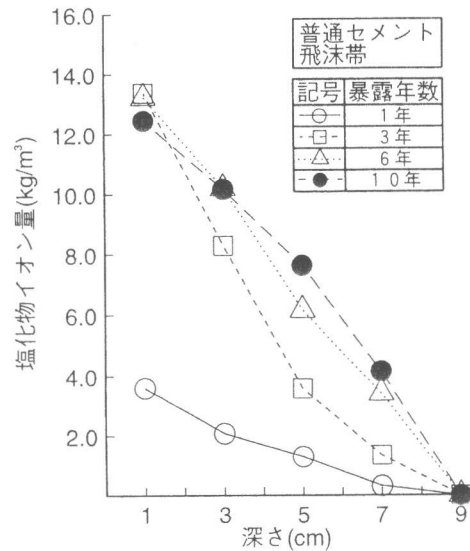


図-4 塩化物イオン浸透量の分布

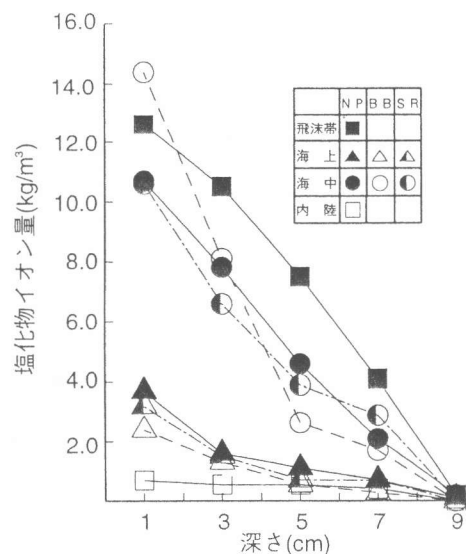


図-5 塩化物イオンの浸透状況 (暴露後10年)

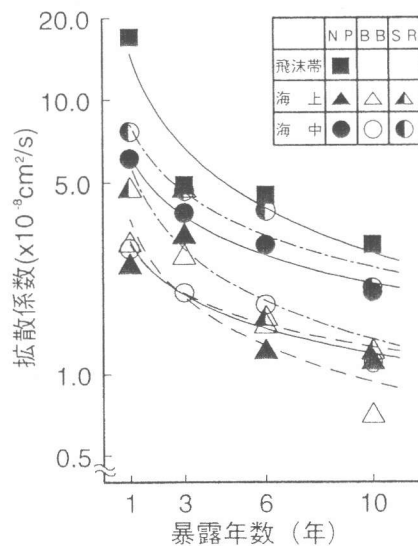


図-6 拡散係数の経年変化

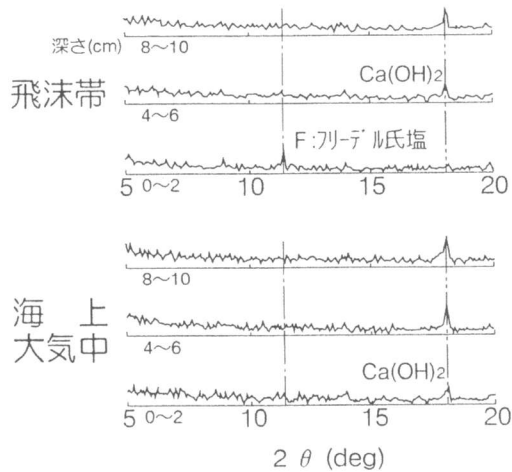


図-7 粉末X線回折分析結果

3. 6 細孔径分布

暴露後10年におけるコンクリート中の全細孔容積(30Å~30μm)を図-8に示す。海中での表面部の全細孔容積は、内部(深さ9cm)に比べて、NPで約75%、BBで約80%に減少しているが、飛沫帯、海上大気中においては、表面部の全細孔容積は内部と同程度であった。海中における表面部のCa(OH)₂の減少が、全細孔容積の増加として現れなかった理由については、海中における反応生成物の影響とも考えられるが、明らかにできなかった。

3. 7 鉄筋腐食の進行状況

暴露後10年までのRC供試体中の鉄筋の腐食面積率の経年変化を図-9に示す。NPの腐食面積率は、飛沫帯、海中、海上大気中の順に大きく、いずれの環境でも、腐食は表面部のみであり、孔食は認められなかった。NPの鉄筋腐食は、飛沫帯では、暴露後1年より認められ、暴露年数とともに進行し、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、その後の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。従って、鉄筋腐食に対しては、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。

RC供試体の鉄筋位置の塩化物イオン量の経年変化を図-10に示す。鉄筋位置の塩化物イオン量は、いずれの環境においても暴露後6年以降の増加は少なく、暴露後10年においてはセメントの種類による差は少なかった。BBは海中において、NPと同等量の塩化物イオンが浸透して

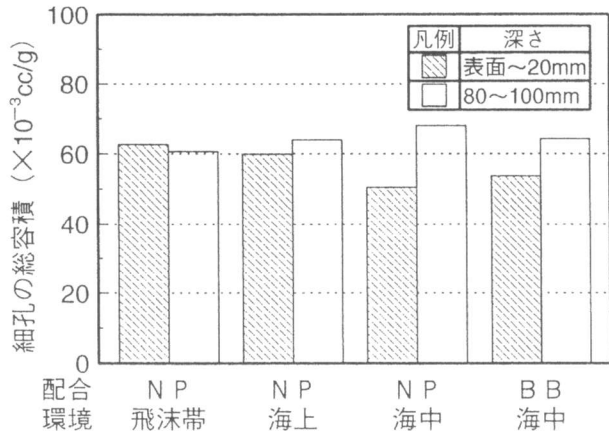


図-8 コンクリート中の全細孔量

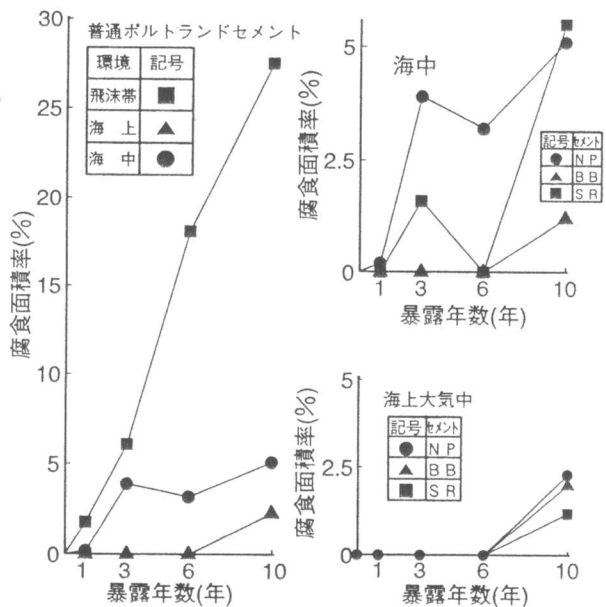


図-9 鉄筋の腐食面積の経年変化

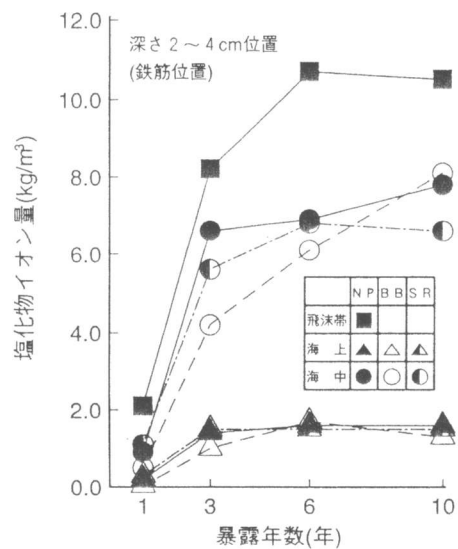


図-10 鉄筋位置の塩化物イオン量

いるが、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。

コンクリート中の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定義し、この値と腐食面積率の関係を図-11に示す。

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

TCL : 積算塩化物イオン量 (kg/m³・年)

Cl : 塩化物イオン量 (kg/m³)

Δt : 時間 (年)

NPの暴露後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倍となった。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、同一積算塩化物イオン量での腐食面積率は、飛沫帯では海中に比べて大きくなる。これは、腐食の進行に及ぼす要因として、塩化物イオン量の他に、酸素供給量の影響も大きいことを示唆している。また、海上大気中では、酸素供給量は多いが、塩化物イオン量が少ないため、腐食の進行は遅いものと考えられる。

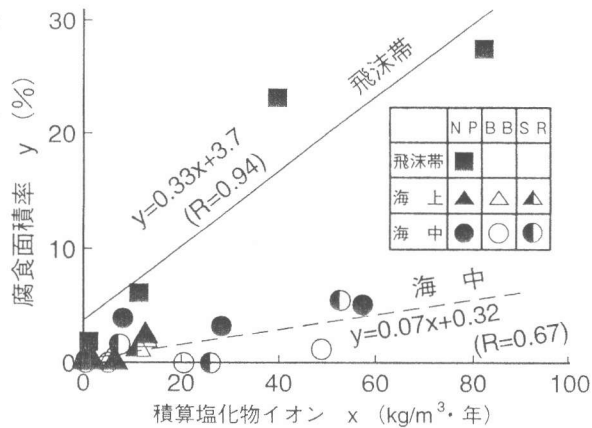


図-11 積算塩化物イオン量と腐食面積率の関係

4. まとめ

10年間の海洋暴露試験の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 海洋環境下における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) 暴露後3～10年において、Fickの拡散方程式の表面塩化物イオン量の経時変化は少ないが、拡散係数は時間の経過と共に小さくなる傾向を示す。また、表面塩化物イオン量は主に環境条件によって決まり、拡散係数は環境条件およびセメントの種類に影響されると考えられる。
- (3) 海洋環境下における鉄筋腐食に対しては、飛沫帯、海中、海上大気中の順に厳しく、それぞれの環境毎に、腐食面積率は塩化物イオン量と時間の積に相関性があることが見いだされた。
- (4) B種高炉セメント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、海中における同等量の塩化物イオンの浸透に対して、鉄筋腐食の進行は遅いことが認められた。

[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 ,pp39～43,1989.5
- [2] 例えば、大即信明他：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 332号 ,pp107～118,1983.4
- [3] 岸谷孝一、西澤紀昭他編：塩害(Ⅰ)，コンクリート構造物の耐久性シリーズ ,pp32～33,1987.1
- [4] 宮川豊章：Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学博士論文, 1985.2
- [5] 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
- [6] 丸屋剛他：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, pp597～602, 1989
- [7] 竹田宣典他：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, pp595～600, 1991
- [8] 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 ,pp36～37, 1988
- [9] 濱田秀則他：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, 1996.1
- [10] 武若耕司：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 ,pp482～483, 1987