

長期暴露試験によるコンクリート構造物の 耐久性評価に関する実験的考察

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○大谷 悟司
 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 浅井 洋
 独立行政法人 土木研究所 守屋 進

1. はじめに

現在または将来のコンクリート中への塩化物浸透量を把握することは、時期や工法選定などの塩害補修計画の立案、鋼材腐食の将来予測に重要なことである。但し現状は、Fick の第2法則として知られる拡散方程式を適切な境界条件で解き、見かけの拡散係数を算出してコンクリート中への塩化物の浸透量を把握している。コンクリート標準示方書では、既往の研究の一例として普通ポルトランドセメントや高炉セメントを用いたコンクリートの見かけの拡散係数が示されているが、多くのプレストレストコンクリートで使用される早強ポルトランドセメントについては示されていない。また、既往の研究において見かけの拡散係数の経時変化に関する知見は見あたらない。

著者らは、飛沫帯におけるプレストレストコンクリート構造物の防食技術に関する研究を目的として、1984年から海洋構造物の耐久性向上技術(大井川沖暴露試験)共同研究委員会の一環として長期暴露試験を実施している。本論文は、暴露14年までコンクリート中に浸透した塩化物量を定期的に測定した結果から、コンクリートの種類、暴露環境、暴露時間と拡散係数との関連について考察を加えたものである。

2. 実験概要

コンクリート配合は表-1に示す6配合であり、1配合あたりの試験体数を9体とした。試験体形状は、200×200×1200mmの角柱試験体である。W/C=40%試験体はプレテンションPC梁であり、他の試験体はRC梁である。試験体6~12体をまとめて井桁状に組み、駿河湾沖250mに位置する海洋技術総合研究施設に暴露した。暴露環境は主に第3デッキに配置し、一部を第2デッキに配置した。暴露環境と暴露期間を表-2に示す。定期的に試験体からコアを採取して、塩分分析に供した。暴露試験を実施している海洋技術総合研究施設を図-1に、試験体暴露状況を図-2に示す。

表-1 試験要因

セメントの種類	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	コンクリートの示方配合表 (kg/m ³)				材齢28日圧縮強度 (N/mm ²)
			C	W	S	G	
普通ポルトランドセメント(OPC)	40	38	405	162	667	1147	48.6
	50	42	308	154	780	1135	37.0
早強ポルトランドセメント(HPC)	40	38	415	166	659	1133	51.0
	50	42	316	158	772	1122	41.8
高炉セメントB種(BBC)	50	42	310	155	774	1125	30.5
早強ポルトランド+シリカフェューム(SFC)	33.7	38	415	140	667	1147	75.8

表-2 暴露環境・期間

暴露環境	第2デッキ：海面上8.9mの位置で、時々海水飛沫をかぶる環境 第3デッキ：海面上2.1mの位置で、常時海水飛沫をかぶる
暴露期間	6年 8年 10年 12年 14年

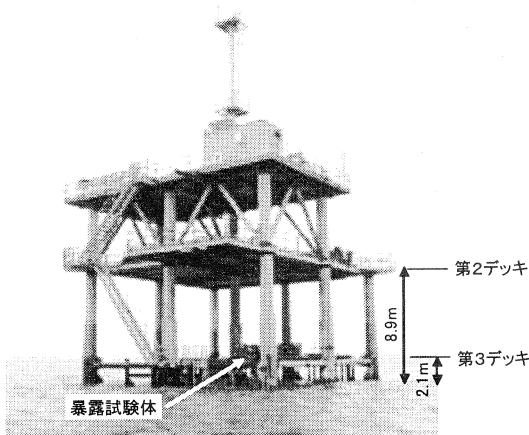


図-1 海洋技術総合研究施設

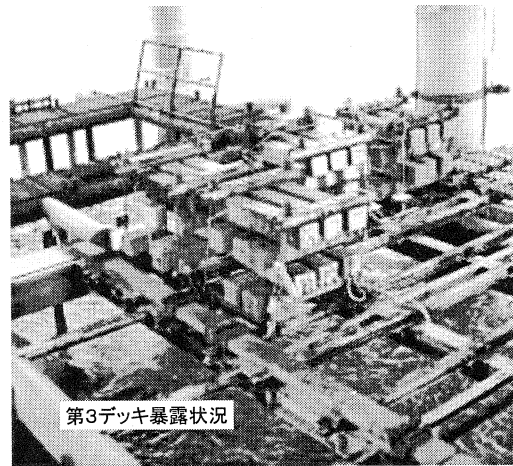


図-2 試験体暴露状況

3. 試験結果

3.1 塩化物イオン濃度分布

海面より 2.1m に位置する第 3 デッキ上に 14 年暴露した試験体の塩化物イオン濃度分布を図-3 に示す。試験体暴露状態の上面、下面および側面毎に表示した。塩化物イオン濃度はいずれの試験体も表面から深くなるに従い減少し、 0kg/m^3 に近づく傾向を示す。3 種類の配合 (OPC W/C=40%, HPC W/C=40,50%) では 2 試験体測定しており、同位置に暴露している同一配合の試験体であっても塩化物イオン濃度にばらつきが認められる。暴露面に着目すると、上面、下面および側面によって塩分量が異なる試験体も認められるが、特定の暴露面の浸透量が多いといった傾向は認められない。同一配合において、コンクリート表面近傍の塩化物イオン濃度に差が生じており、表面に付着した塩分が洗い流されたり中性化などによる影響を受けたことが原因と推察される。暴露 10 年に測定した中性化深さは、OPC-40%では 1.1mm であったのに対して、OPC-50%は 6.1mm、BBC-50%では 10mm であり、コンクリート表面近傍の塩化物イオン濃度は W/C が大きな配合ほど影響を受けていると考えられる。

3.2 見かけの拡散係数の算出

コンクリート中の塩化物イオンの拡散は、Fick の拡散方程式を解いた(1)式で与えられる。

$$C(t,X) = C_0(1 - \text{erf}(X/(2\sqrt{D \cdot t}))) \quad (1) \text{式}$$

ここに、 $C(t,X)$: 時間 t 、距離 X における塩化物量(kg/m^3) C_0 : 表面塩化物量(kg/m^3)

X : 表面からの距離(cm) t : 経過時間(年)

erf : 誤差関数 D : 見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

回帰分析により塩化物量の実測値を(1)式で回帰分析し、見かけの拡散係数と表面濃度を算出した。試験体の各面の回帰曲線を図-3 に破線で示した。また、平均値を実線で示した。コンクリート表面より 10mm の範囲では、前述した中性化等の影響と考えられる濃度低下が認められたため、回帰分析では、低下していると認められるデータを除外して算出した。測定面毎の回帰曲線はコンクリート表面近傍のデータによる影響を受け、ばらつきを生じているが、平均曲線は同一配合でほぼ同じ結果が得られている。回帰分析結果を表-3 に示す。土木学会の算定式²⁾によると OPC-40%、OPC-50%および BBC-50%の見かけの拡散係数は、それぞれ $0.57\text{cm}^2/\text{年}$ 、 $1.33\text{cm}^2/\text{年}$ および $0.56\text{cm}^2/\text{年}$ と算出され、本実験結果はその 1/4 以下であった。ここで、

表面塩化物イオン濃度に着目すると、BBCおよびSFCの値が他配合に比べ高い値となっている。表面塩化物イオン濃度は、配合による影響を受けないと考えられるのでOPCおよびHPCと同程度の値と考えられる。すなわち、BBCは表面の中性化による塩化物量の低下が著しく、これを除外して回帰したことが高くなった原因であり、SFCは浸透深さがわずかであり、回帰曲線の勾配が大きいことが原因で表面塩化物イオン濃度に差が生じたと考えられる。したがって、BBCおよびSFCの表面塩化物イオン濃度をOPCおよびHPCの平均値 12.8kg/cm^2 として算出した回帰曲線を図-3に平均2として示し、見かけの拡散係数を表-3に示す。この結果より、表面塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数を回帰分析する際に、表面近傍の実測データの取り扱い方が大きな誤差を招く恐れがある。

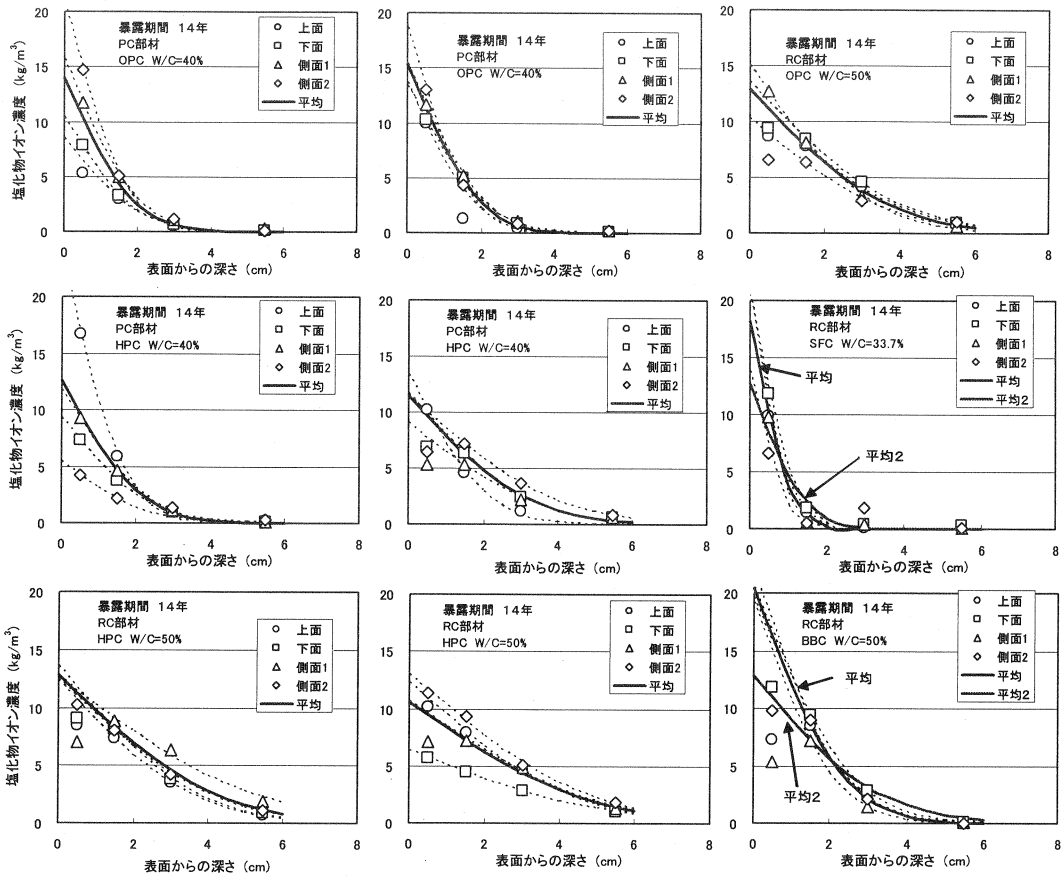


図-3 塩化物イオン濃度分布

表-3 回帰分析結果

セメントの種類	W/C (%)	表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)	見かけの拡散係数 (cm²/年)
OPC	40	* 14.6	* 0.079
	50	12.9	0.298
HPC	40	* 12.0	* 0.159
	50	* 11.7	* 0.430
BBC	50	20.4 (12.8)	0.123 (0.240)
SFC	33.7	18.2 (12.8)	0.022 (0.043)

*は2試験体の平均値を示す

()内は表面塩化物イオン濃度を 12.8kg/m^3 としたときの値

3.4 見かけの拡散係数の経時変化

図-4 および図-5 に見かけの拡散係数の経時変化を示す。OPC, HPC とも W/C が小さいほど見かけの拡散係数は低下する傾向を示し、遮塩効果が大きい結果となった。これは、W/C 低下によるコンクリート組織の緻密化が原因と考えられる。一方、セメントの種類の影響に関しては、OPC と HPC には大きな相違は認められなかったが、BBC は同じ W/C の前者と比較すると小さく遮塩効果に優れている。第2デッキの暴露試験結果から得られた見かけの拡散係数は第3デッキに比べ若干小さい傾向にある。見かけの拡散係数の経時変化に関しては、ばらつきがあるものの、暴露期間が長くなるにしたがい小さくなる傾向にある。これは、コンクリート組織の緻密化が進行したことなどが原因と考えられる。W/C が大きな配合では、見かけの拡散係数が暴露 12 年頃から増加する傾向も認められるため今後の測定において着目したいと考えている。

3.5 コンクリート表面塩化物イオン濃度

第3デッキにおける暴露期間 14 年の回帰分析により算出した表面塩化物量を図-6 に示す。OPC および HPC では $12 \sim 15 \text{ kg/m}^3$ であり、コンクリート標準示方書に示された飛沫帯の値とよく一致する。一方、BBC および SFC では、同じ位置に暴露しているにもかかわらず 15 kg/m^3 以上の高い値が得られ、前述した中性化深さが大きいことや塩化物の浸透量が少ないことが影響していると考えられる。

4. まとめ

- (1) コンクリートの配合および暴露条件が同じであっても、塩化物イオン濃度分布にはばらつきが生じる。
- (2) W/C が小さいほど見かけの拡散係数は小さく、土木学会算定式による値に比べ 1/4 以下の値が得られた。
- (3) 回帰分析の際、コンクリート表面の塩分量実測データの取り扱い方法によって見かけの拡散係数に与える影響が大きい。今後、データを蓄積する上で統一したデータ処理による整理が必要である。
- (4) 見かけの拡散係数は時間の経過とともに小さくなる傾向を示す。
- (5) 飛沫帯において想定する表面塩化物イオン濃度算定値は概ねコンクリート標準示方書に示された値と一致した。

謝辞：本暴露試験を行った海洋技術総合研究施設を長期間にわたって維持管理していただいております国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所の関係各位に謝辞を表します。

【参考文献】

- 1) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，平成 14 年 3 月

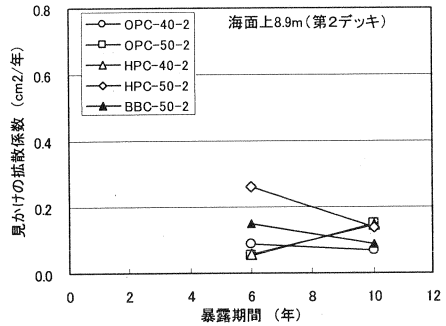


図-4 見かけの拡散係数経時変化 (第2デッキ)

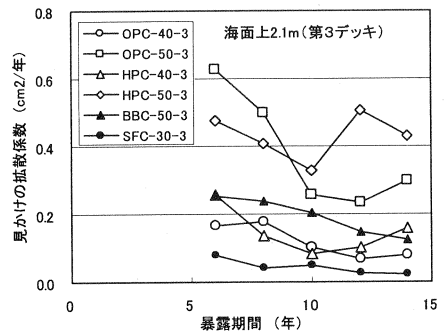


図-5 見かけの拡散係数経時変化 (第3デッキ)

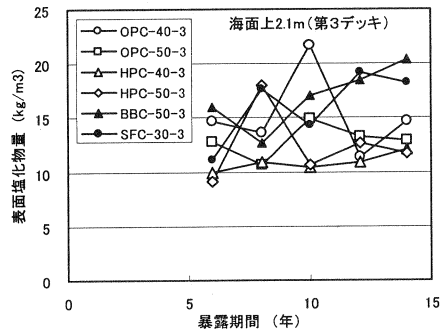


図-6 表面塩化物イオン濃度経時変化