

# 実構造物調査および長期暴露試験結果に基づいた港湾RC構造物における鉄筋腐食照査手法に関する検討

山路 徹<sup>1</sup>・横田 弘<sup>2</sup>・中野 松二<sup>3</sup>・濱田 秀則<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 (独) 港湾空港技術研究所 材料研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail:yamaji@pari.go.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 (独) 港湾空港技術研究所 LCM 研究センター (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

<sup>3</sup>正会員 ショーボンド建設(株) 近畿圏支社 (元(独) 港湾空港技術研究所 依頼研修生)  
(〒536-0022 大阪市城東区永田 3-12-15)

<sup>4</sup>正会員 九州大学大学院准教授 工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

海洋環境下に位置する港湾RC構造物を対象を限定し、塩害に起因する鉄筋腐食照査を行う際に必要なパラメータである腐食発生限界塩化物イオン濃度 $C_{lim}$ 、表面塩化物イオン濃度 $C_0$ および見かけの塩化物イオン拡散係数 $D_{ap}$ について、実構造物調査および長期暴露試験による検討を行った。 $C_{lim}$ については、干満帯と海中部を再現した屋外水槽における長期暴露試験結果より、比較的湿潤した環境に位置している港湾RC構造物(栈橋上部工)においては $2.0\text{kg/m}^3$ とすることを提案した。 $C_0$ については、栈橋上部工を対象を限定し、H.W.L.からコンクリート表面までの距離とともに直線的に変化させることを提案した。拡散係数については、普通ボルトランドセメントの場合、土木学会コンクリート標準示方書における予測値 $D_p$ に0.65を乗じた値を用いることを提案した。

**Key Words :** port reinforced concrete structures, critical chloride concentration for initiation of corrosion, chloride ion concentration at the concrete surface, apparent diffusion coefficient

## 1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書[施工編]<sup>1)</sup>(以下、土木学会示方書と呼ぶ)において、塩化物イオンの侵入に起因する鉄筋腐食照査を行う際に必要なパラメータは、腐食発生限界塩化物イオン濃度 $C_{lim}$ 、コンクリート表面での塩化物イオン濃度 $C_0$ および見かけの塩化物イオン拡散係数 $D_{ap}$ である。

港湾RC構造物においては、これまで設計時において、通常は上記の鉄筋腐食に関する照査は行われていなかった。しかしながら、2007年度に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に基づき、栈橋上部工においては鉄筋腐食に関する照査を行うことが義務付けられた。その際、上述したパラメータを、適宜設定することが求められる。なお、構造物の設計供用年数は50年であることが多い。

港湾RC構造物において、特に塩害が問題となるのは、栈橋式構造物の上部工(以下、栈橋上部工)である。栈橋上部工は海面のやや上に位置しているために塩化物イオンの供給だけでなく、鉄筋腐食反応に必要な酸

素の供給も十分に行われる。一方、塩害が問題となる上部工の下面は、杭や鉄筋コンクリート部材に囲まれた閉鎖的な空間であり、海水に接触する機会が多いことと、常時日陰であることから、コンクリート自体は比較的湿潤な状態にある。前述のパラメータ $C_{lim}$ 、 $C_0$ および $D_{ap}$ は、それぞれへの影響度の程度の違いこそあれ、外部の環境やコンクリートの含水状況の影響を受ける。すなわち、栈橋上部工の場合の各種パラメータの実態は、他の陸上構造物における値と異なる傾向を示す可能性がある。

そこで本研究では、前述のパラメータ $C_{lim}$ 、 $C_0$ および $D_{ap}$ について、実構造物(港湾RC構造物)での調査および長期暴露試験を行うことにより検討を行った。なお、 $C_{lim}$ については長期暴露試験、 $C_0$ については実構造物での調査、 $D_{ap}$ については実構造物での調査および長期暴露試験を基に検討を行った。そして、得られたデータを基に、栈橋上部工を主対象とし、塩化物イオンの侵入に起因する鉄筋腐食に対する照査を行う際のこれらのパラメータの設定値の提案を行った。

## 2. 本研究における塩化物イオン浸透に関する考え方

本研究では、塩化物イオンの拡散を表す式として、Fick の第二法則を「コンクリート表面での塩化物イオン濃度が一定」として解いて得られる式(1)を用いている。この考え方は、土木学会示方書と同様である。

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

ここで、 $C(x, t)$ : 時間 (経過年数)  $t$ , 表面からの距離  $x$  における塩化物イオン濃度,  $C_0$ : コンクリート表面における塩化物イオン濃度,  $D_{ap}$ : 見かけの塩化物イオン拡散係数,  $\operatorname{erf}(s)$ : 誤差関数, である。なお, 材料などから混入する塩化物イオンはここでは考慮していない。

この式が成立するのは、コンクリート表面での塩化物イオン濃度が一定、すなわち  $C_0$  が時間とともに変化しない場合である。このことに関しては、港湾 RC 構造物が位置する海中部や干満帯では、海水すなわち塩化物イオンの供給がほぼ常時行われていると考えられるため、 $C_0$  を一定とみなす式(1)が成り立つとしている報告が多い<sup>2)</sup>。一方、飛沫帯や海岸付近では、飛沫や海塩粒子として飛来することによって塩化物イオンが供給されるため、コンクリート表面での塩化物イオン濃度は時間とともに増加するとしている報告も多い<sup>2,3,4)</sup>。 $C_0$  を一定とみなすか、時間とともに変化するのかは、本研究を進める上で根本となるため、まず  $C_0$  の時間変化に関して考察を行う。

図-1 は、防波堤ケーソンの壁面の飛沫帯から採取したコンクリートコアにより求めた  $C_0$  の時間変化を示したものである。なお、採取時の経過年数  $t$  と H.W.L.からの距離  $X$  も図中に併記した。 $X$  は各港内ではほぼ同様な範囲内にある。この  $C_0$  の算出の際は、塩化物イオン濃度分布に対して、 $C_0$  一定の場合の解である式 (1) を用いて回帰分析を行って求めた。経過年数  $t$  が同じものは、同一ケーソンから採取したコア 2 本に関する測定値の平均値である。一方、経過年数  $t$  が異なるものは、同一港内で近接するケーソンから採取したコア 2 本に関する測定値の平均値である。そのため、同じ防波堤でも経過年数によってコンクリート配合は若干異なる可能性がある。しかしながら、 $C_0$  に関しては環境条件の影響の方が卓越するため、 $C_0$  の時間変化を検討する際には、コンクリート配合が若干異なっても大きな問題は生じないと考えられる。図-1 の各経過年数  $t$  において、厳密には  $X$  が同じでない場合もあるが、 $C_0$  は時間とともに増加するという傾向は見られず、むしろ若材齢時は増加するが

I港		II港		III港		IV港		V港	
$t$	$X$	$t$	$X$	$t$	$X$	$t$	$X$	$t$	$X$
5	0.47	8	0.38	11	0.80	5	0.30	8	0.76
10	0.45	14	0.03	20	0.30	10	-0.07	12	0.76
15	0.36			24	0.30	15	0.10		
						20	0.26		

$t$ : 経過年数(年),  $X$ : H.W.L.からの距離(m)

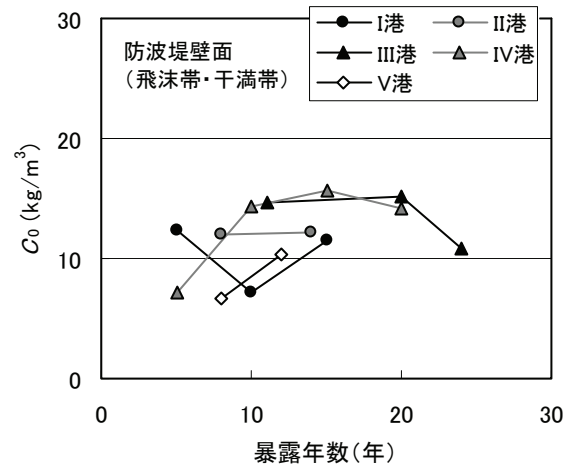


図-1 飛沫帯における  $C_0$  の時間変化例



写真-1 栈橋式構造物 (標準的な形式)

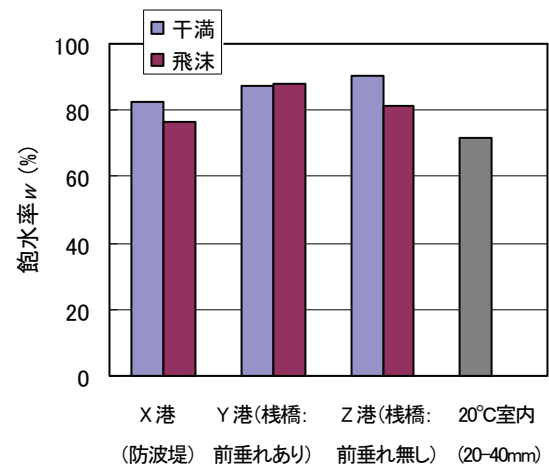


図-2 試験体における飽水率  $w$   
(試料採取箇所: 表面から 50~70mm 付近)

る程度時間が経つと一定値となるという傾向が見られた。

港湾 RC 構造物のうち、鉄筋腐食に関する照査を行う必要があるとされている構造物は、飛沫帯あるいは干満帯に位置する栈橋上部工である。この構造物は写真-1 に示すように、比較的海面に近い箇所に位置している。また、塩害を受ける上部工の下面は常に日陰に存在しており、また閉鎖的空間であるため、比較的乾燥しにくい環境にある。さらには、通常、前垂れと呼ばれる、漂流物が侵入するのを防ぐためのコンクリート部材が設けられていることが多い（写真-1 参照）。すなわち、この栈橋上部工のような構造物の場合、位置する環境が飛沫帯であっても、海上大気中のような乾燥しやすい環境よりもむしろ、干満帯のような乾燥しにくい環境に近いと推測される。図-2 は、3 港の構造物近傍に  $\phi 150 \times 300\text{mm}$  の試験体を設置<sup>5)</sup>し、5 年経過時にコンクリートの飽水率  $w$  を測定したものである。設置環境は飛沫帯と干満帯である。また、試料採取位置は表面から 50～70mm の位置である。なお、図中の「20℃室内」の場合は、室内 20℃・湿度 80～90%の環境に試験体を設置<sup>6)</sup>し、40 週経過時に測定したもので、試料採取位置は表面から 20～40mm の位置である。

飽水率  $w$  は以下の式により求めた。

$$w = \frac{W - W_d}{W_s - W_d} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $W$ ：採取（解体）直後の質量、 $W_s$ ：飽水質量（水道水中に浸漬して十分吸水させた状態の質量）、 $W_d$ ：絶乾質量（一定質量になるまで 105℃で乾燥させた状態の質量）である。なお、採取量は X～Z 港の場合 25～43g 程度、室内の場合 12g 程度である。

X 港および Z 港では、飛沫帯の方が若干飽水率は低くなる傾向にある。しかしながら、前垂れのある Y 港では、ほとんど同じである。一方、湿度 80～90%環境の室内における測定値は 70%程度と比較的低い値を示した。これは、湿度は高くても外部からの水の供給がないためであると考えられる。これらの測定結果は、試料の採取量も少なく、データ数も少ないが、一般的な栈橋上部工が位置する環境の場合、コンクリート内部における飽水率はかなり高いことを示唆するものである。

以上のことを踏まえ、供用年数が 50 年程度と比較的長く、かつ比較的湿潤した環境に位置している栈橋上部工を主対象とした本研究では、 $C_0$  を一定とみなし、塩化物イオンの浸透予測の際、あるいは回帰計算により  $C_0$  および  $D_q$  を算出する際には式 (1) を用いることとする。以降では、長期暴露試験および実構造物調査から得た  $C_0$  および  $D_q$  の結果をまとめ、設計時における設定値を提案する。また、長期暴露試験結果に基づき、腐食発生限界塩化物イオン濃度  $C_{lm}$  についても検討を行う。

表-1 コンクリート配合

セメント	W/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		W		C	S	G
N	0.45	水道水	162	360	738	1110
	0.55		166	302	826	1056
	0.45	海水	165	367	732	1102
	0.55		168	305	823	1051
B-A	0.45	水道水	158	351	758	1094
	0.55		158	287	820	1092
	0.45	海水	160	356	756	1091
	0.55		162	295	812	1081
B-B	0.45	水道水	160	355	736	1108
	0.55		162	295	793	1099
	0.45	海水	162	360	733	1103
	0.55		164	298	789	1094
B-C	0.45	水道水	162	360	714	1120
	0.55		164	298	770	1112
	0.45	海水	164	364	710	1114
	0.55		166	302	767	1107
F-B	0.45	水道水	158	351	738	1110
	0.55		160	291	792	1097
	0.45	海水	160	356	733	1103
	0.55		162	295	790	1096

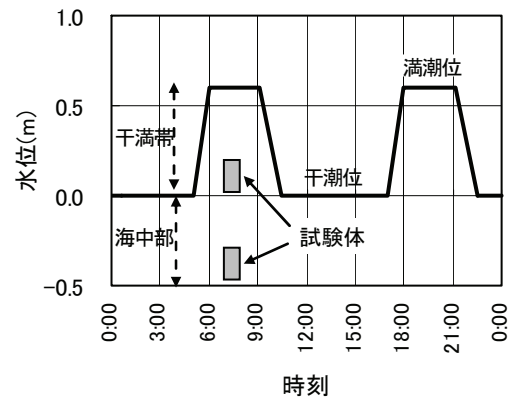


図-3 干満サイクルおよび暴露位置

### 3. 港湾 RC 構造物における鉄筋腐食照査に必要なパラメータ ( $C_0$ , $D_q$ , $C_{lm}$ ) に関する調査結果

#### (1) 腐食発生限界塩化物イオン濃度 $C_{lm}$

##### a) 概要

$C_{lm}$  は鉄筋腐食発生時期に関連する非常に重要な要因である。この値については諸説あり、試験方法や環境によって大きく異なることが報告されているが、一般的には 1.2～2.4kg/m<sup>3</sup>程度であると考えられている。ここでは、港湾空港技術研究所内の暴露施設（海水循環水槽）に 15 年間暴露された試験体に関する調査結果<sup>7)</sup>を用いて、 $C_{lm}$ について検討を行う。

##### b) 調査内容

##### 1) 使用材料および試験体

セメントは、普通ポルトランドセメント（表-1 中では N）、高炉セメント A 種（B-A）・B 種（B-B）・C 種（B-C）、フライアッシュセメント B 種（F-B）の計 5



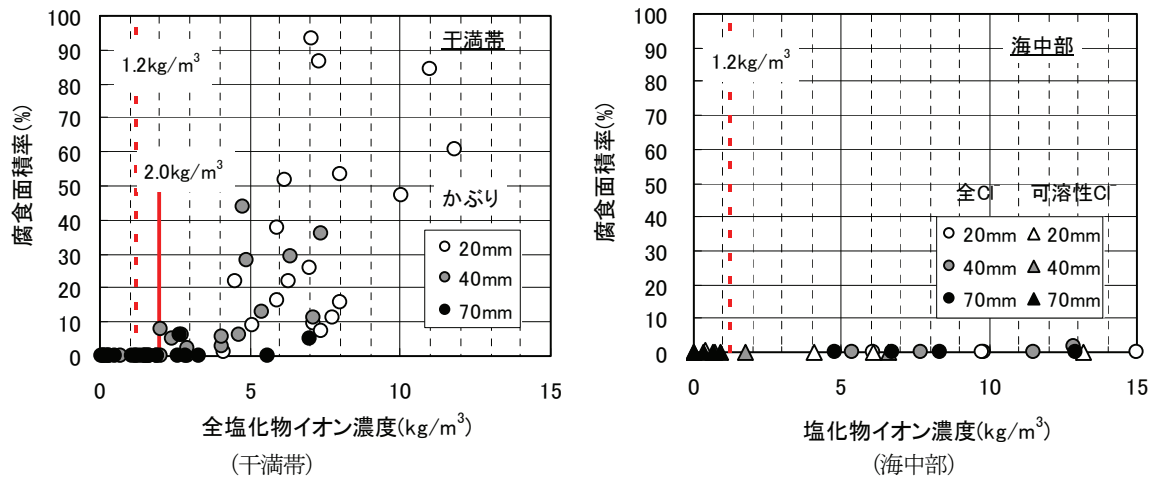


図-4 鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係

種類を用いた。骨材は、細骨材として神奈川県産の川砂（表乾密度  $2.64\text{g/cm}^3$ ，吸水率  $1.82\%$ ），粗骨材として神奈川県産の川砂利（表乾密度  $2.76\text{g/cm}^3$ ，吸水率  $1.10\%$ ）を用いた。また、練混ぜ水として水道水・海水（久里浜湾から採取。塩化物イオン濃度は  $17\text{g/L}$ ）の2種類を用いた。コンクリートの配合を表-1に示す。水セメント比は  $0.45$ ， $0.55$  の2種類である。なお、本配合は、目標スランプ  $8\pm 1\text{cm}$ ，目標空気量  $4\pm 1\%$  として定められたものである。

製造した試験体の形状は  $\phi 150\times 300\text{mm}$  の円柱で、内部に鉄筋（ $\phi 9\text{mm}$  丸鋼）がかぶり  $20$ ， $40$  および  $70\text{mm}$  で埋設されている。

## 2) 暴露環境

海水循環水槽における干満帯および海中部に暴露を行った。図-3に干満サイクルおよび暴露位置を示す。

## 3) 試験項目

暴露 15 年が経過した時点で試験体を解体後、鉄筋に生じた腐食面積率および鉄筋位置における全塩化物イオン濃度あるいは可溶性塩化物イオン濃度を測定した。前者は鉄筋における腐食部分（目視で明確に判別できる部分）を透明フィルムに写し取り、鉄筋表面積に対する割合として求めた。後者は JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準拠して求めた。

## c) 試験結果

図-4に干満帯と海中部における鉄筋位置での塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係をかぶり深さ別に整理したものを示す。また、図中の  $1.2\text{kg/m}^3$  は土木学会示方書における  $C_{lm}$  の値である。干満帯の方は全塩化物イオン濃度が  $2.0\text{kg/m}^3$  付近から腐食の傾向が見られ始め、さらに濃度が大きくなると明確な腐食傾向が見られる。また、かぶりの影響も見られ、かぶりが比較的大きな  $70\text{mm}$  の場合は鉄筋位置の全塩化物イオン濃度が大きくても腐食が生じていないのが目立つ。このことは他の文献<sup>8)</sup>でも報告されており、原因としてはかぶりが大きいこと

で鉄筋表面への酸素供給量が減少していることが考えられる。

一方、海中部の方は鉄筋位置における塩化物イオン濃度が干満帯と同等もしくは多いにもかかわらず、ほとんど腐食が生じていなかった。これは海中部のため、外部からの酸素の供給量およびコンクリート内部を透過する量が少なかったためと考えられる。

今回の干満帯および海中部の結果において、 $C_{lm}$  は  $1.2\text{kg/m}^3$  よりも見かけ上大きくなっているようである。これは、腐食の要因である酸素の拡散性状はコンクリートの飽水率の増加とともに小さくなるため<sup>9)</sup>、鉄筋の腐食反応速度が緩やかとなり、仮に鉄筋表面の塩化物イオン濃度が高濃度となって鉄筋表面の不動態皮膜が破壊されていたとしても腐食が顕在化しておらず、見かけ上  $C_{lm}$  が大きくなっている可能性が考えられる。

## d) $C_{lm}$ の設定値に関する提案

干満帯と海中部を再現した海水循環水槽において、15 年間の暴露試験を行った結果、この干満帯において、 $C_{lm}$  の下限値は  $2.0\text{kg/m}^3$  程度であると推測された。また、 $C_{lm}$  がかぶりの影響を受けていることも確認された。一方、海中部においては、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高くなってもほとんど腐食は生じていなかった。

本研究で主対象としている栈橋上部工が位置する環境は飛沫帯である場合が多い。一方、今回の試験結果は飛沫帯でなく、干満帯におけるものである。しかしながら、図-2に示すように、一般的な栈橋上部工の場合、飛沫帯であっても、コンクリートの飽水率  $w$  の値は比較的大きく、干満帯における値と同様のようである。

以上より、塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査を行う際の  $C_{lm}$  の設定値として、比較的大きな環境に位置している港湾コンクリート構造物（特に栈橋上部工）においては、干満帯において実施された本試験結果を参考に  $2.0\text{kg/m}^3$  とすることを提案する。なお、この値には、コンクリートの飽水率が大きいことにより、

鉄筋腐食の開始が見かけ上遅くなった影響も含まれていると推測される。

## (2) コンクリート表面の塩化物イオン濃度 $C_0$

### a) 概要

過去の調査などから、栈橋上部工の塩害による劣化の進行状況は、海水面からの距離の影響を大きく受けていることが明らかになっている<sup>10)</sup>。例えば、図-5に示すような2種類の栈橋上部工で、経過年数が同じであった場合、海面から上部工までの距離が近い場合は劣化が激しく、遠い場合は少なくなる傾向にある。これは、距離が近い方が海水の供給が多くなり、その結果、 $C_0$ が大きくなるのが主な要因と考えられる。

この  $C_0$  に関して、土木学会示方書においては、飛沫帯で  $13\text{kg/m}^3$ 、汀線で  $9\text{kg/m}^3$  と、2種類の値が設定されている。しかしながら、実際の  $C_0$  値は多種多様であり、暴露環境をより詳細に考慮した  $C_0$  の定量的評価手法が必要である。

また、文献 11) では L.W.L. (朔望平均干潮面) からコンクリート表面までの距離から  $C_0$  の値を評価しようと試みている。しかしながら、サンプル数は十分であるとは言えず、また、測定された  $C_0$  の値のばらつきも非常に大きい。

本論文では全国各地の実構造物での  $C_0$  の調査結果<sup>12)</sup> を多数収集し、暴露環境から  $C_0$  値を定量的に評価する手法の検討を行った。

### b) 調査内容

港湾コンクリート構造物に対してコンクリートコアを採取して塩化物イオン濃度分布を調査した結果を収集した。この結果を、式 (1) で回帰計算を行って  $C_0$  を求め、図-5に示すような海面 (H.W.L. および L.W.L.) からの距離との関連性を検討した。なお、一部の港については、著者らがコンクリートコアを採取し、同様の方法で  $C_0$  を求めた。この際、以下の条件に適合するもののみを採用した。

- i) 栈橋上部工のみを対象とした (防波堤、重力式係船岸は対象から除いた)。
- ii) 経過年数が特定できるもの。
- iii) コンクリートコアの採取位置 (高さ) が特定できるもの。
- iv) 健全な箇所からコアを採取したと推測されるもの (例えば、「コア採取箇所付近にはひび割れなどが確認された」といった記録が残されている場合は対象から除いた)。
- v) 式 (1) を用いた回帰計算に使用可能な塩化物イオン濃度の測定結果が3点以上存在しているもの。
- vi) 表面に貝類の付着が無いもの。

その結果、計 18 港の栈橋上部工から、計 175 点のデータが得られた。全構造物において、使用材料および配合は不明である。一般的に、 $C_0$  にはセメントの種類が影響するとされているが、ここでは全て普通ポルトランドセメントであると仮定した。

### c) 調査結果

塩化物イオン濃度分布の測定例を図-6に示す。この場合、栈橋上部工のはりおよびスラブの両部材からコアを採取し、さらに陸側、海側、その中間部の3箇所から採取している。海側や中間部よりも、陸側から採取したコアの場合に表面付近の塩化物イオン濃度が高くなっている。これは、波が土留め壁で反射し、コンクリート表面への海水の供給量が多くなっているためと推測される。次に、スラブとはりを比較すると、同じ場所で比較した場合、常にはりの方が表面付近の塩化物イオン濃度は高くなっている。これは、はりの方が海面からの距離が近いと推測される。以上のように、同一栈橋内でも塩化物イオンの浸透現象は大きくばらつくのが実状である。これは同一栈橋内でも波浪状況が場所によってばらつくためであると考えられる。

図-7は、海水面からコア底面 (コンクリート表面) までの距離と  $C_0$  の関係についてまとめたものである。

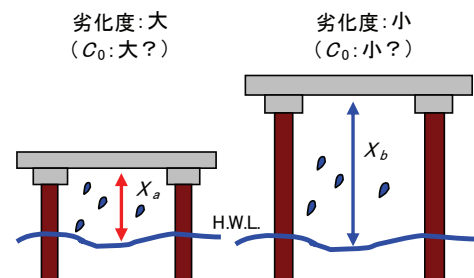


図-5 実構造物 (栈橋上部工) の劣化度と海水面からの距離の関係

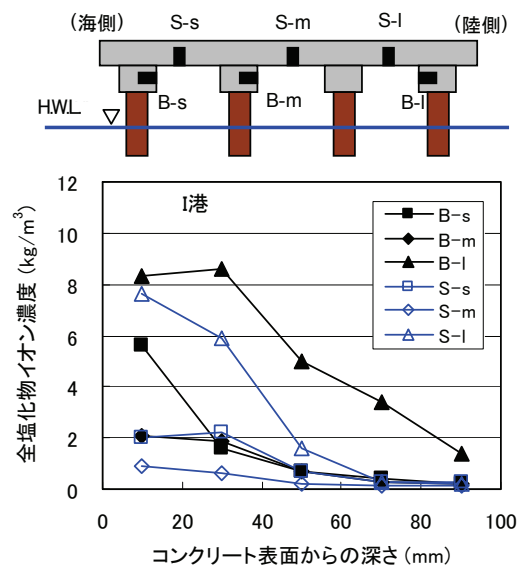


図-6 塩化物イオン濃度分布例

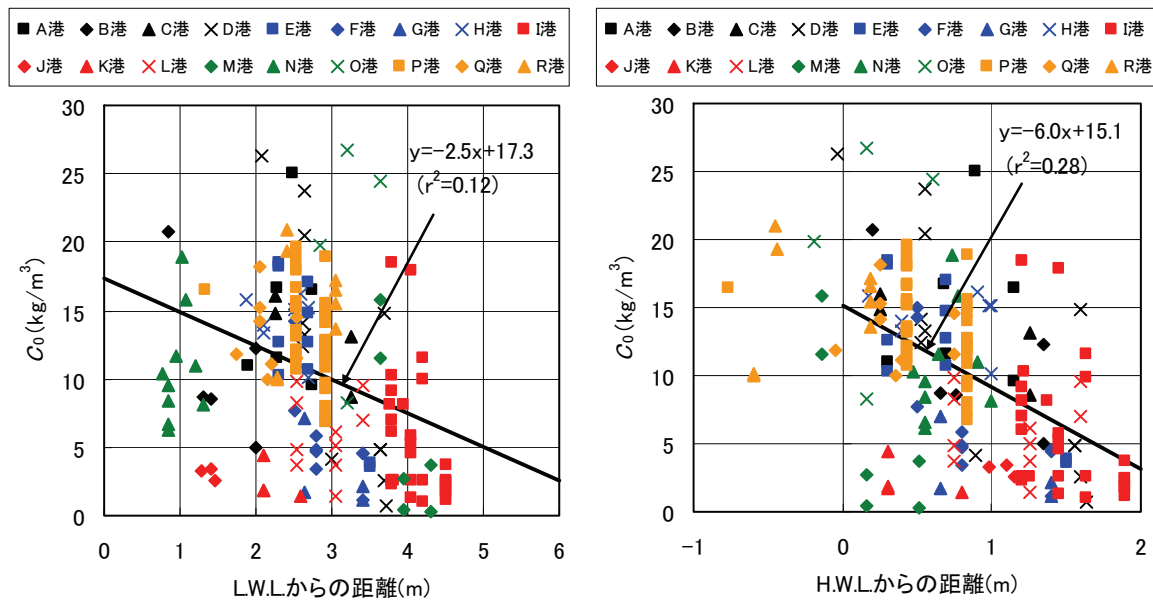


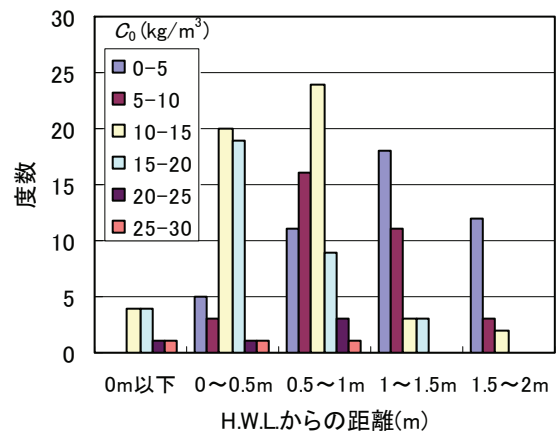
図-7 海水面からコア底面までの距離 (左図: L.W.L., 右図: H.W.L.)

なお、海水面を L.W.L. と H.W.L. (朔望平均満潮面) の 2 種類設定した。いずれもばらつきをもちながら、海水面から離れるにつれて  $C_0$  が低下する傾向が見られる。また、相関係数 (図-7 中の  $r$ ) で比較すると、H.W.L. の場合の方が比較的相関が高くなっているため、以後、H.W.L. の場合に注目して検討を進める。

図-8 は、各 H.W.L. からの距離別に  $C_0$  の度数分布をまとめたものである。H.W.L. からの距離が比較的遠い 1~1.5m や 1.5~2.0m の場合は  $C_0$  が 0~5kg/m<sup>3</sup> と値の小さいデータが多いが、0.5~1.0m になると 10~15kg/m<sup>3</sup> のデータが増え、0~0.5m の場合はさらに大きい 15~20kg/m<sup>3</sup> のデータが増えていることがわかる。すなわち、H.W.L. から遠ざかるにつれて、 $C_0$  はある最頻値と分布を持ちながら小さくなっている傾向が分かる。さらにこの分布は正規分布に従っているようにも見える。ここで、各度数分布が正規分布に従っている場合、実際の測定値から求めた累積確率と、実際の測定値から求めた平均値と標準偏差から計算した累積確率が等しくなる。そこで、両者の比較をしたものが図-9 である。実際の測定値から求めた累積確率 (図-9 中の点) と実測値から計算した平均値と標準偏差 (図-9 中に併記) を正規分布を表す式に代入して計算した累積確率 (図-9 中の曲線) には比較的良い相関が見られた。すなわち、各位置でのばらつきは正規分布に従っているとみなせることになる。ここで  $C_0$  の度数分布が正規分布となる原因としては、H.W.L. からの距離が同程度であっても、波浪状況が適当にばらついて、そのばらつきの状態が正規分布に近い状態となっていたためと推測される。

#### d) 累積確率を考慮した $C_0$ の算定例

図-9 のように  $C_0$  のばらつきが正規分布とみなせた場合、そのばらつき、すなわち前述の累積確率  $P_r$  を考慮


 図-8 H.W.L. からの距離別の  $C_0$  度数分布

	H.W.L.からの距離				
	0m以下	0~0.5m	0.5~1m	1~1.5m	1.5~2m
平均値 $\mu$	16.21	13.37	11.05	6.28	4.86
標準偏差 $\sigma$	5.12	5.05	5.41	4.62	4.08

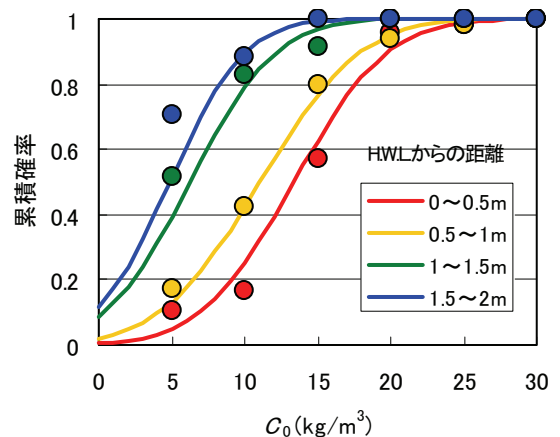
 単位: kg/m<sup>3</sup>


図-9 実際の累積確率分布と正規分布に基づく累積確率分布の比較 (点: 実際の値, 曲線: 計算値)

した  $C_0$  の算定が可能となる。性能照査時に平均的な  $C_0$  を設定する場合は、平均値すなわち累積確率  $Pr=0.5$  の値を用いればよい。また、対象構造物が位置する波浪条件が通常よりも厳しい場合や構造物の重要度が高い場合など、より大きな  $C_0$  を設定する方が合理的と考えられる場合には、 $Pr=0.8$  あるいは  $0.9$  といったより高い  $Pr$  を設定して  $C_0$  を算定することも可能である。このように  $Pr$  を設定して  $C_0$  を求めた例を図-10 中に折れ線として示した。なお、 $C_0$  算定の際は図-9 中に併記した  $\mu$  と  $\sigma$  を用いた。 $Pr=0.5$  の場合は図-7 の近似直線とほぼ一致していることがわかる。すなわち、図中の近似曲線（式（3））を用いて各位置における平均的な  $C_0$  を算出することが可能となる。

$$C_0 = -6.0X + 15.1 \quad (3)$$

ここで、 $X$ : H.W.L.からコンクリート部材位置までの鉛直距離(m)である。なお、 $X$  の適用範囲については、今回調査で多くのデータが得られた  $0 \leq X \leq 2$  m の範囲のみとする。他の範囲については今後のデータの蓄積が必要である。

一方、図-10 中の  $Pr=0.8$  と  $0.9$  の場合は近似直線とほぼ同じ傾きを有しており、また、 $Pr$  が増すとともに近似直線から離れている。

以上のように、各位置での  $C_0$  のばらつきが正規分布とみなせる場合、 $C_0$  のばらつき、すなわち累積確率を考慮した  $C_0$  の算定も可能となる。ただし、ばらつきの根拠が不明確な現時点において、必ずしもデータ数は十分であるとは言えない。累積確率を用いて  $C_0$  のばらつきを評価する手法の信頼性をより高めるためには、さらなるデータの蓄積およびばらつきの要因の解明が必要である。

#### e) $C_0$ 設定手法に関する提案

塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査を行う際の  $C_0$  の設定値として、図-11 に示す値を提案する。図中には土木学会示方書に示されている飛沫帯および汀線位置の値と、汀線位置からの高さ変化も示した。なお、ここでは汀線位置を H.W.L. ( $X=0$  m) と仮定した。凡例の「文献 13) 試験体(干満)」とは、前述の海水循環水槽(干満帯)における試験体(セメントは普通ポルトランドセメント)での調査結果である<sup>13)</sup>。「調査結果平均値( $1 \leq X \leq 2$ )」とは、今回調査結果における  $1 \leq X \leq 2$  m の範囲の平均値である。「文献 2) 平均値(海中/干満)」は、本研究と同様に  $C_0$  に関する調査を行っている文献 2) における  $C_0$  の平均値である。なお、位置  $X$  は不明であるため、 $X=-1$  m とした。

$0 \leq X \leq 2$  m 程度の範囲については、本調査結果から得られた平均的な値である式（3）を提案する。ただし、

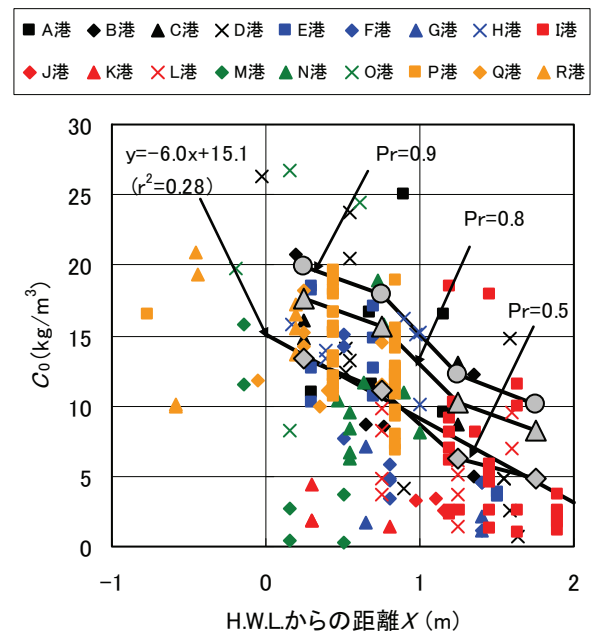


図-10 累積確率を考慮した  $C_0$  の算定例

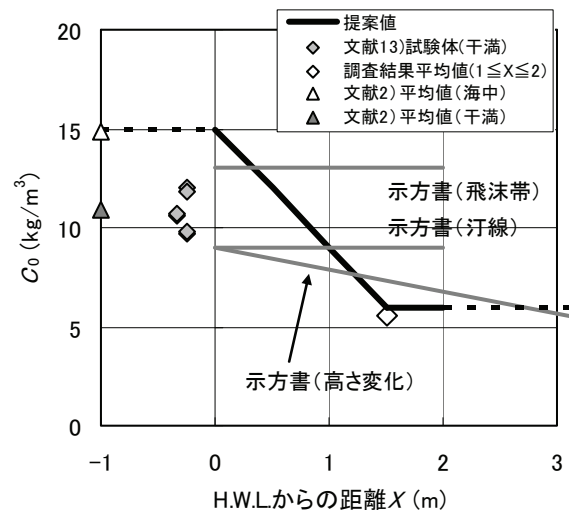


図-11 今回提案する  $C_0$  の設定値

その下限値としては、 $6\text{kg/m}^3$  を提案する。下限値を設定した理由は以下の2つである。(i)  $C_0$  を過小に評価することは危険側の設計となる。(ii) 図-11 の「調査結果平均値 ( $1 \leq X \leq 2$ )」における  $C_0$  が  $6\text{kg/m}^3$  程度 ( $5.57$ ) であった。以上の理由から、式（3）で得られる  $C_0$  値に下限値 ( $6\text{kg/m}^3$ ) を設けることとした。また、鉄道・道路構造物においては、 $X$  が今回の範囲より大きくても、かなり大きな  $C_0$  値を示すことがある<sup>3,4)</sup>。栈橋上部工の場合、船を係留して荷役を行うための構造物であるために、波浪条件は比較的穏やかな場所に位置し、さらには杭や前垂れ（写真-1 参照）に囲まれた閉鎖的な環境に位置している。また、その影響を受けて、コンクリートに乾湿の繰り返しが比較的生じにくい環境であると推測される。一方、鉄道・道路構造物は、波浪の静穏度を確保する必要が無く、また風や飛沫を遮るものは無い場合が多いと



推測される。そして、乾湿の繰り返しが生じやすい環境であると推測される。そのため、鉄道・道路構造物においては、 $X$ が今回の範囲より大きくても、かなり大きな  $C_0$  値を示すことがあると推測される。以上のことから、本研究で提案している対象は、比較的湿潤した環境に位置する栈橋上部工に限定されと考える。

$X < 0$  m の範囲については、さらにデータが少なく、現状では値は設定し難いが、ここでは  $X=0$  m の  $C_0$  値を採用することを提案する。この理由は以下の通りである。

(i) 図-11 中の「文献 13 試験体(干満)」および「文献 2 調査結果」における  $C_0$  は  $10 \sim 15 \text{ kg/m}^3$  程度の値であった。  
(ii) 多数の  $C_0$  データについて整理を行っている文献 14) における調査結果においても、飛沫帯に比べて干満帯や海中部の方が  $C_0$  は小さくなる傾向にあった。飛沫帯で  $C_0$  が大きくなる原因としては、コンクリートが乾燥と湿潤の繰り返し作用を受けることによって塩化物イオンの浸透が促進されることが考えられる。しかしながら、具体的にどのような環境の場合はどの程度  $C_0$  が増加し、あるいは減少するのかは現時点では明確ではない。よって、 $X < 0$  の場合は、 $X=0$  m の  $C_0$  値を採用することをここでは提案する。

### (3) 見かけの塩化物イオン拡散係数 $D_{\text{app}}$

#### a) 概要

ここでは、まず試験体および実構造物における  $D_{\text{app}}$  に関する調査結果<sup>15)</sup>について述べる。そして、水セメント比から拡散係数を設定する手法について検討を行う。

#### b) 調査内容

##### 1) 試験体における調査

港湾空港技術研究所内の暴露施設である海水循環水槽および海水シャワー暴露場と那覇港に試験体を暴露した。なお、海水シャワー暴露場とは、自然海水を 1 日 2 回 (1 回約 3 時間) 散布可能な施設である。海水循環水槽は干満帯と海中部、海水シャワー場は飛沫帯を模擬していると想定している。以下に試験体概要を示す。試験体概略を表-2 に、配合を表-3 に示す。

##### i) 試験体 1

3 (1) と同じ試験体であるため、説明は割愛する。なお、練混ぜ水として海水を使用した結果は対象外とした。

##### ii) 試験体 2<sup>15)</sup>

普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いて、 $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  のコンクリート試験体を作成した。W/C は 0.40 および 0.55 の 2 種類である。暴露環境は海水循環水槽 (干満帯) および海水シャワー暴露場であり、暴露期間は約 2.5 年である。

##### iii) 試験体 3<sup>15)</sup>

普通ポルトランドセメントを用い、 $600 \times 900 \times 600 \text{ mm}$

のコンクリートブロックを作成した。W/C は 0.55 であり、暴露環境は海水シャワー暴露場であり、暴露期間は約 5 年である。

##### iv) 試験体 4<sup>15)</sup>

普通ポルトランドセメントを用いて、 $150 \times 150 \times 800 \text{ mm}$  の角柱試験体を作成した。W/C は 0.37 と 0.50 である。暴露環境は沖縄県那覇港の海上大気中(DL+6~7m)であり、暴露期間は約 15 年である。

##### v) 試験体 5<sup>13)</sup>

普通ポルトランドセメントを用いて、 $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$  の円柱試験体を作成した。W/C は 0.47~0.52 程度である。暴露環境は、海水循環水槽 (干満帯) である。暴露期間は約 10 年である。

$D_{\text{app}}$  算出の際には、コンクリート中の塩化物イオン濃

表-2 試験体一覧

No.	暴露場所	暴露期間(年)	セメント*
1	海水循環水槽 (干満帯)	15	N
			BA
			BB
			BC
			F
2	海水循環水槽 (干満帯・海中部)・ 海水シャワー場(飛沫帯)	2.5	N BB
3	海水シャワー場(飛沫帯)	5.4	N
4	那覇港(海上部)	15	N
5	海水循環水槽 (干満帯)	10	N

\*N: 普通ポルトランドセメント

BA・BB・BC: 高炉セメントA種・B種・C種

F: フライアッシュセメントB種

表-3 配合

No.	名前	W/C	単位量( $\text{kg/m}^3$ )			
			W	C	S	G
1	N1	0.45	162	360	738	1110
		0.55	166	302	826	1056
	BA1	0.45	158	351	758	1094
		0.55	158	287	820	1092
	BB1	0.45	160	355	736	1108
		0.55	162	295	793	1099
	BC1	0.45	162	360	714	1120
		0.55	164	298	770	1112
	F1	0.45	158	351	738	1110
		0.55	160	291	792	1097
2	N2	0.55	172	313	767	1041
	BB2	0.55	172	313	764	1041
		0.40	172	430	658	1041
3	N3	0.55	158	288	786	1094
4	N4	0.37	178	481	609	1080
		0.50	165	330	804	1061
5	N5	0.52	170	330	831	977
		0.50	165	330	836	985
		0.47	155	330	847	1001
		0.52	170	330	923	964



度を 3～5 点測定し、式(1)を用いて回帰分析して求めた。なお、試験体が円柱の場合、浸透面が円であることを考慮し、座標系を円柱座標系として計算を行った<sup>13)</sup>。

## 2) 実構造物における調査

(2) の実構造物における調査時には  $C_0$  を求めているため、同時に  $D_p$  も得られている。なお、以下の場合に該当する場合は、 $D_p$  データを採用しなかった。その結果、採用されたデータ数は計 132 個である。

- i)  $C_0 < 1 \text{ kg/m}^3$  の場合 (回帰計算の精度が十分で無いと考えられるため)
- ii) コア採取箇所周辺にひび割れなどの変状がある場合 (記録が残されていた場合)。
- iii) 同一構造物内での他のコアの調査結果と比較して、塩化物イオン濃度分布形状が著しく異なる場合。
- iv) 塩化物イオン濃度分布形状が異常な場合 (表面から内部まで値が同様な場合など)。

また、(2) の調査対象港 18 港のうち 6 港の 7 つの栈橋式構造物では、著者らが実構造物からコンクリートコアを計 43 本採取し、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布から  $D_p$  を求めている。この際、一部のコア採取は、現地で解体した部材を研究所内に搬入した後で実施した。なお、浮きやひび割れなどの変状が見られる箇所からコアを採取することは極力避け、変状が見られる箇所から採取したコアや、採取後のコアに変状が確認された場合は採用しなかった。その結果、採用されたデータ数は計 35 個である。

## c) 調査結果

### 1) 試験体における調査結果

図-12 は  $W/C$  と  $D_p$  の関係を示したものである。なお、図中の曲線は土木学会示方書における拡散係数の予測値  $D_p$  の値である。

普通ポルトランドセメント (N) の場合：

$$\log_{10} D_p = -3.9 (W/C)^2 + 7.2 (W/C) - 2.5 \quad (4)$$

高炉セメント (B) の場合：

$$\log_{10} D_p = -3.0 (W/C)^2 + 5.4 (W/C) - 2.2 \quad (5)$$

今回得られた結果は、各種暴露環境にかかわらず、セメントが N, B いずれの場合も、予測値  $D_p$  の推定式(4)(5)と比べて約半分程度の小さな値を示した。

### 2) 実構造物における調査結果

図-13 は  $W/C$  と  $D_p$  の関係を示したものであり、図-12 の暴露試験体の値に加えて、実構造物での調査結果も追記したものである。なお、図中に掲載したのは、著者らが直接採取したコアにおける調査結果 (計 35 個。 (3)

b) 2) に記載) のみとした。この理由は以下の通りであ

る。 $D_p$  は、 $C_0$  の場合と比べて、コンクリート内部に生じたひび割れなどの変状 (アルカリ骨材反応に起因するものも含む) の影響を受けやすい。しかしながら、著者らが直接採取していないものは、コアの状態を実際に目視等で確認できておらず、不確定な要因が多いため、図中には掲載しなかった。なお、上記のデータ 35 個のうち、飛沫帯のデータは 27 個、干満帯のデータは 8 個である。

また、図中に掲載した実構造物のデータについても、セメントの種類および  $W/C$  が不明である。ここでは、セメント種類については普通ポルトランドセメント、 $W/C$  については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の初版<sup>16)</sup>に示された、鉄筋コンクリート構造物における最大  $W/C$  の特性値 (0.55) と仮定した。この仮定条件を元に整理した結果、実構造物におけるデータは飛沫帯、干満帯のいずれも、全て式 (4) を下回っていた。

### d) 拡散係数の特性値 $D_k$ 設定手法に関する提案

比較的湿潤した環境に位置する栈橋上部工において、鉄筋腐食に関する照査を行う際の拡散係数の特性値  $D_k$  の値として、図-13 に示す式を提案する。セメントが普

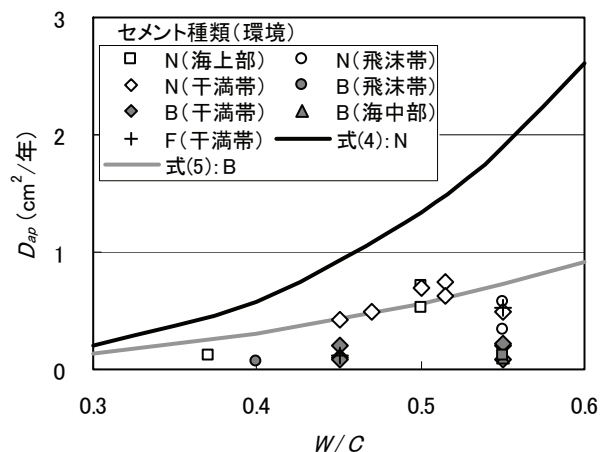


図-12  $W/C$  と  $D_p$  の関係 (試験体)

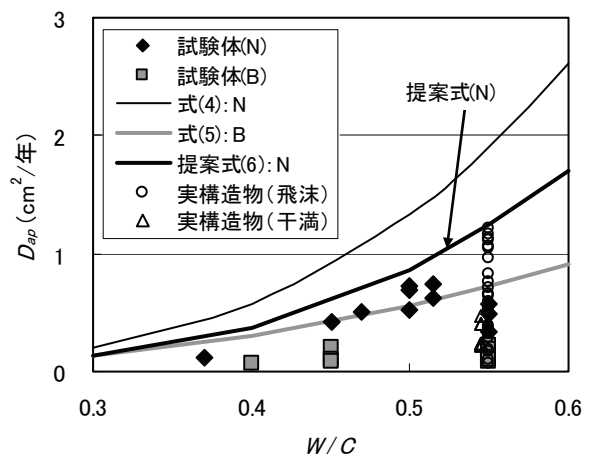


図-13 今回提案する  $D_p$  の推定値

通ポルトランドセメントの場合については、土木学会示方書における式(4)で得られる  $D_p$  の値に 0.65 を乗じた値を用いることを提案する。この理由は、今回得られた試験体および実構造物に関する調査結果の上限値と概ね一致すると推測されるためである。なお、文献 17) においても、0.65 を乗じることで概ね実構造物における調査結果と一致することが示されている。

図-14 は文献 3)における青森県の日本海側に位置する道路構造物での調査結果において、式 (1) を用いて求めた  $D_{ap}$  値を追記したものである。なお、水セメント比は 0.5~0.6 の範囲と記述されていたため、0.50, 0.55, 0.60 と仮定して値を掲載した。0.60 の場合は全て提案式を下回り、0.50 および 0.55 の場合もほとんどの値が下回っている。なお、文献 3)の対象構造物が位置する環境は、本研究で主対象としている飛沫帯ではなく、海上大気中の方がむしろ近い。そのため、厳密な比較とはなり得ない。しかしながら、この比較の結果は、本提案式が、海上大気中のような環境下においても適用できる可能性も示している。

また、表-4 は、式 (4) に  $W/C=0.55$  を代入し、0.65 を乗じた場合の  $D_{ap}$  (1.24  $\text{cm}^2/\text{年}$ ) と、全実構造物の  $D_{ap}$  ( (3) b) 2)の条件 i)~iv)を満たすもの。計 132 個) を比較し、 $D_{ap}$  が 1.24 以下の場合の度数と累積確率を示したものである。変状などが生じている可能性も十分に考えられる不確定なデータを多数含んでいるにもかかわらず、84%のデータが提案式で求めた値を下回っていた。

一方、高炉セメントの場合については、式 (5) をそのまま用いることを提案する。この理由は以下の 2 つである。(i)現時点では実構造物におけるデータ数が非常に

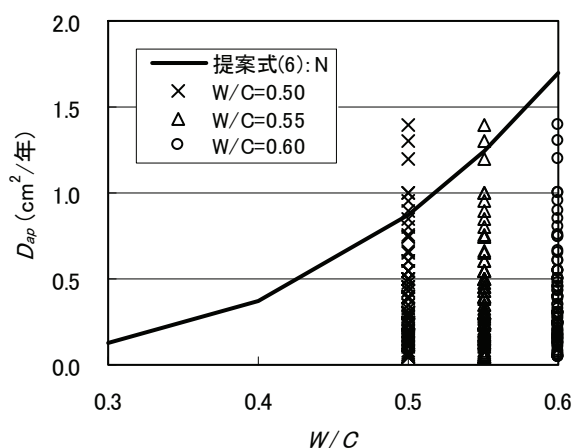


図-14 提案式と文献 3)における調査結果の比較

表-4 提案式の値と実構造物データの比較

	$D_{ap} < 1.24^*$	$1.24^* < D_{ap}$	計
度数	111	21	132
累積確率	0.84	-	

\*式(4)(6)に  $W/C=0.55$  を代入した際の値

少ない。(ii)高炉セメントの場合、一般的に  $C_0$  が普通ポルトランドセメントの場合より増大する傾向にある<sup>7)</sup>。しかしながら、現状では具体的にどの程度大きくなるかは明確でない。そのため、 $D_{ap}$  を過小に設定しないこととした。

以上の結果より、港湾コンクリート構造物の場合において、塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査を行う際に用いる見かけの塩化物イオン拡散係数の特性値  $D_k$  の算定式として、以下の式を提案する。

$$D_k = \alpha D_p \quad (6)$$

ここで、 $\alpha$  : 換算係数で、普通ポルトランドセメントを使用する場合には一般に 0.65、高炉セメントの場合には一般に 1.0 を用いることとする。 $D_p$  : 見かけの塩化物イオン拡散係数の予測値( $\text{cm}^2/\text{年}$ )である。

#### 4. 塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査の試算例

##### (1)概要

ここでは、3 (1) の腐食発生限界塩化物イオン濃度  $C_{lm}$ 、3 (2) のコンクリート表面での塩化物イオン濃度  $C_0$ 、3 (3) の見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  に関する調査結果を用いて、港湾コンクリート構造物における、塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査の試算を行う。なお、照査手法については、土木学会示方書に準拠したものである。ここでは、各種影響因子の設定値あるいは設定手法について、本研究での調査結果を主に用いている。また、各種安全係数については全て 1.0 としたため、本文中では触れないことにする。

##### (2)試算条件

実際に港湾コンクリート構造物が建設される条件を想定し、以下のように設定した。計算条件一覧をまとめたものを表-5 に示す。なお、ここでは、かぶりを 2 種類に固定し、設計供用期間中に鉄筋腐食が開始しない最大の見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  を計算し、それに対応する  $W/C$  をセメント種類毎に求めた。

- 設計供用期間は 50 年とした。
- 塩化物イオン浸透予測は式(1)を用いた。
- 鉄筋腐食開始時期は、鉄筋位置の塩化物イオン濃度  $C(x,t)$  が腐食発生限界塩化物イオン濃度  $C_{lm}$  に到達した時期とした。なお、 $C_{lm}$  は 3 (1) で提案した値である 2.0  $\text{kg}/\text{m}^3$  とした。
- コンクリート表面での塩化物イオン濃度  $C_0$  は 3 (2) で提案した手法を採用し、H.W.L.から部材位置までの距離  $X$  を以下の 3 通りに設定して算出した。

表-5 計算条件一覧

パラメータ		設定値
$C_{lim}$ (kg/m <sup>3</sup> )		2.0
$C_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	i) $X=0.35$ (m)	13
	ii) $X=1.0$ (m)	9.1
	iii) $X=1.5$ (m)	6.1
かぶり $c$ (mm)	i)	70
	ii)	100

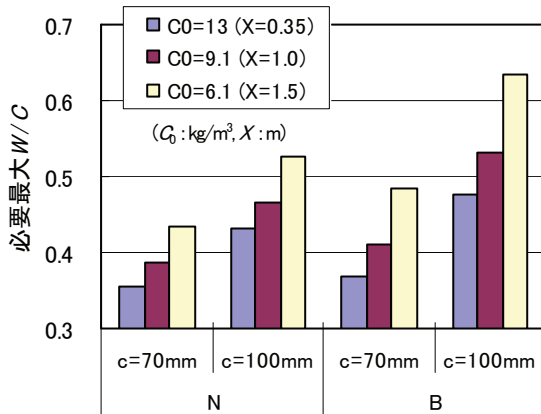


図-15 必要最大水セメント比の試算例

(N: 普通ポルトランドセメント, B: 高炉セメント)

- i)  $X=0.35$  m ( $C_0=13\text{kg/m}^3$  となり, 土木学会示方書における飛沫帯の値に相当)
- ii)  $X=1.0$  m ( $C_0=9.1\text{kg/m}^3$  となる)
- iii)  $X=1.5$  m ( $C_0=6.1\text{kg/m}^3$  となる)
- e) かぶり  $c$  は以下の 2通りの値を設定した.
- i) 70 mm
- ii) 100 mm
- f) 設計供用期間中に鉄筋腐食が開始しない最大の見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_q$  に対して, 3 (3) で提案した式を用いて, セメント毎 (普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント) に  $W/C$  を求めた. なお, 土木学会示方書では, 作用荷重によりコンクリートに生じたひび割れの影響を考慮し,  $D_q$  を平均的に大きく設定する手法がとられるが, ここでは簡便のため作用荷重によりコンクリートに生じたひび割れの影響は考慮しなかった.

### (3) 試算結果

設計供用期間中に鉄筋腐食を生じさせないために必要な最大  $W/C$  を試算した結果を図-15 に示す.  $C_0=9.1\text{kg/m}^3$  の場合, セメントが普通ポルトランドセメント (N) では, かぶり 70mm で最大  $W/C$  を 0.39 程度, かぶり 100mm で 0.47 程度まで低減させる必要がある結果となる. 一方, セメントが高炉セメント (B) では, かぶり 70mm で最大  $W/C$  を 0.41 程度, かぶり 100mm で 0.53 程度まで低減させればよい結果となる.

## 5. まとめ

海洋環境下に位置する港湾 RC 構造物, 特に栈橋上部工を対象を限定し, 塩害に起因する鉄筋腐食照査手法を行う際に必要なパラメータである腐食発生限界塩化物イオン濃度, コンクリート表面での塩化物イオン濃度および見かけの塩化物イオン拡散係数について, 実構造物での調査および長期暴露試験による検討を行った. その結果を以下にまとめる.

### 1) 腐食発生限界塩化物イオン濃度

干満帯と海中部を再現した屋外水槽において, 15 年間の暴露試験を行った結果, この干満帯において,  $C_{lim}$  は  $2.0\text{kg/m}^3$  程度であると推測された. また,  $C_{lim}$  がかぶりの影響を受けていることも確認された. 一方, 海中部においては, 鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高くなってほとんど腐食は生じていなかった. 以上より, 塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査を行う際の  $C_{lim}$  の設定値として, 比較的湿潤した環境に位置している港湾 RC 構造物においては  $2.0\text{kg/m}^3$  とすることを提案した. なお, この値には, コンクリートの飽水率が大きいことにより, 鉄筋腐食の開始が見かけ上遅くなった影響も含まれていると推測される.

### 2) コンクリート表面の塩化物イオン濃度 $C_0$

塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査を行う際の  $C_0$  の設定値に関して, H.W.L. からコンクリート表面までの距離  $X$  とともに, 直線的に変化させる算定式を提案した.

なお, 上記算定式は, 実構造物調査から得られた平均的な  $C_0$  の値である. ここで,  $X$  の適用範囲としては,  $0 \leq X \leq 2$  m 程度の範囲とする. また,  $C_0$  の下限値として  $6.0\text{kg/m}^3$  を提案した. なお, この式が適用可能な構造物は, 栈橋上部工のように, 波浪条件が比較的穏やかな場所に位置し, さらには杭や前垂れに囲まれた閉鎖的な環境に位置している構造物に限定され则认为する.

### 3) 見かけの塩化物イオン拡散係数

港湾 RC 構造物の場合において, 塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査を行う際に用いる見かけの塩化物イオン拡散係数の特性値  $D_k$  の算定式として, 土木学会示方書における拡散係数の予測値  $D_p$  に換算係数  $\alpha$  を乗じた式を提案した. また,  $\alpha$  の値としては, 普通ポルトランドセメントを使用する場合には 0.65, 高炉セメントの場合は 1.0 を用いることを提案した. なお, 主な適用対象構造物は栈橋上部工とする.

本報告における提案内容は, 全て実構造物 (港湾 RC 構造物) あるいは試験体における調査結果に基づいたものである. また, 実構造物においては材料特性が不明で



あったため、多くの仮定を設定して議論を進めている。そのため、より議論を深めるべき内容やより詳細な検討を進めなければならない内容も多数残されている。これらについては、今後さらに検討を進める必要がある。

**謝辞：**本文に掲載した現地調査の実施に当たっては、国土交通省各地方整備局の方々にご協力頂いた。また、長期暴露試験結果については、歴代の材料研究室に在籍された諸先輩の方々によって長期間にわたって引き継がれてきた貴重な暴露試験体を使用することで得られた成果である。皆様に対して、この場を借りて厚く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002.
- 2) 前田聡，武若耕司，山口明伸：塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.109-120，2004.5.
- 3) 藤田弘昭，上原子晶久，津村幸三，石澤徹：青森県日本海沿岸における RC 橋梁の塩害に関する調査，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp.330-340，2006.5.
- 4) 川村力，谷村幸裕，曾我部正道，鳥取誠一，長谷川雅志，東川孝治：鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究，土木学会論文集，No.781/V-663，pp.193-204，2005.2.
- 5) 山路徹，タレク ウディン モハメッド，濱田秀則，平崎敏史：栈橋上部工コンクリート中の鉄筋の自然電位に及ぼす海水浸漬時間の影響，第 57 回セメント技術大会講演要旨，pp.126-127，2003.
- 6) 川島徹，山路徹，濱田秀則，渡邊和重，山本悟，木村道夫：防錆剤を用いたコンクリート中の鉄筋の防錆効果に及ぼすセメント種類の影響，土木学会第 59 回年次学術講演会，5-263，pp.523-524，2004.
- 7) 山路徹，Tarek Uddin Mohammed，青山敏幸，濱田秀則：海洋コンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境およびセメント種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.577-582，2001.
- 8) 例えば，武田均，丸屋剛：鉄筋腐食による劣化を考慮した補修後のかぶり，土木学会第 55 回年次学術講演会，pp.670-671，2000.9.
- 9) 例えば，福手勤，山本邦夫，濱田秀則：海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究，港湾技術研究所報告，第 29 巻，第 3 号，pp.57-93，1990.9.
- 10) 小牟禮建一，濱田秀則，横田弘，山路徹：RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発，港湾空港技術研究所報告，第 41 巻，第 4 号，pp.3-37，2002.12.
- 11) 守分敦郎，羽瀧貴士，村松道雄，北澤真：栈橋上部工の耐久性照査に用いる表面塩化物イオン量について，第 44 回日本学術会議材料連合講演会講演論文集，Vol.22，No.1，pp.11-14，2000.9.
- 12) 山路徹，中野松二，濱田秀則：港湾コンクリート構造物における塩害環境の定量的評価手法に関する検討，港湾空港技術研究所報告，第 44 巻，第 3 号，pp.39-75，2005.9.
- 13) 審良善和，濱田秀則，大即信明，T. U. Mohammed：円柱供試体側面から浸透した塩化物イオンの拡散係数の算出方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.613-618，2005.
- 14) 濱田秀則：RC 港湾構造物の塩害に係わる環境要因の定量的評価に関する研究，港湾技術研究所報告，第 38 巻，第 2 号，pp.299-393，1999.6.
- 15) 山路徹，中野松二，濱田秀則：港湾 RC 構造物における塩化物イオン拡散係数調査結果および簡易推定手法に関する検討，港湾空港技研資料，No.1141，2006.9.
- 16) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.3-25，1979.3.
- 17) 古玉悟，田邊俊郎，横田弘，濱田秀則，岩波光保，日比智也：栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発，港湾技研資料，No.1001，2001.6.

(2007. 10. 18受付)

STUDY ON THE VERIFICATION OF STEEL CORROSION IN PORT  
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BASED ON SITE SURVEY AND  
LONG TERM EXPOSURE TEST

Toru YAMAJI, Hiroshi YOKOTA, Shoji NAKANO and Hidenori HAMADA

For the verification of steel corrosion in upper deck of wharf type structure, a critical chloride concentration for initiation of steel corrosion ( $C_{lim}$ ), a chloride ion concentration at the concrete surface ( $C_0$ ) and an apparent diffusion coefficient ( $D_{ap}$ ) were investigated based on site survey and long term exposure tests. For  $C_{lim}$ ,  $2.0 \text{ kg/m}^3$  is proposed in port reinforced concrete structures, based on long term exposure test in the pool which tidal and submerged conditions were simulated. For  $C_0$ , it is proposed that  $C_0$  is varied linearly with the distance between H.W.L. and concrete surface. For  $D_{ap}$ , it is proposed that characteristic value of diffusion coefficient is obtained by multiplying the estimation equation of 'JSCE standard specification for concrete structures' by 0.65 in case of normal portland cement.