論文 海洋コンクリートの塩化物イオン拡散予測パラメータに関する考察

網野 貴彦^{*1}·岩波 光保^{*2}·忽那 惇^{*3}·大塚 邦朗^{*4}

要旨:本稿では,普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を使用したコンクリート供試体を用い て室内および海洋暴露試験を行い,海洋コンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数,表面塩化物イオ ン濃度について検討した。その結果,海洋コンクリートでは,海中,干満帯,飛沫帯,海上大気中の環境区 分によって,これらのパラメータが大きく異なることがわかった。また,海洋コンクリートの塩害耐久性設 計に用いる見掛けの拡散係数を設定する際には,電気泳動試験による実効拡散係数に環境区分を考慮できる 新たな補正係数が必要となる可能性を示した。

キーワード:海洋コンクリート,見掛けの拡散係数,実効拡散係数,表面塩化物イオン濃度,海洋環境区分

1. はじめに

海洋コンクリートの海洋環境区分(以下,環境区分) は、海中、干満帯、飛沫帯、海上大気中の4つに大別さ れるが、塩化物イオン拡散予測に用いる見掛けの拡散係 数(以下, D_{ap})および表面塩化物イオン濃度(以下, C_0)はそれぞれの環境区分によって異なり^{1),2)}、材齢に よっても変化することが指摘されている^{3),4)}。

一方,2012 年制定コンクリート標準示方書【設計編】 ⁵⁾(以下,示方書)には, D_{ap} に対してはセメント種類と 水セメント比を考慮できる式が, C_0 に対しては飛沫帯に 対する一定値 13.0kg/m³が示されている。また,2012 年 制定コンクリート標準示方書改訂資料【基本原則編・設 計編・施工編】^のによれば,示方書に示される D_{ap} は JSCE-G571-2013「電気泳動法によるコンクリート中の塩 化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)」により得られ た実効拡散係数(以下, D_e)に補正係数 $k_1 \cdot k_2$ (セメント 種類と水セメント比を考慮した式)を乗じて導かれてい ることが述べられている。この場合,海塩粒子の飛来, 波しぶきの飛沫,さらには干満による海水の直接の接触 による乾湿繰返しの影響,材齢等を考慮できていないた め,海洋コンクリートの塩害耐久性設計に用いる D_{ap} や C_0 として適切かどうかは定かでないと考えられる。

そこで本稿では、温度、塩水浸漬時間を制御した室内 試験にて干満帯および海中を模擬し、塩水浸漬時間、材 齢が D_e , D_{ap} , C_0 に及ぼす影響を把握した。また、供用 中の桟橋上部工の下部空間における海上大気中、飛沫帯、 干満帯に長期暴露したコンクリート供試体より得られた D_{ap} , C_0 と示方書に基づくこれらの計算値を比較し、海 洋コンクリートの塩害耐久性設計において今後検討が必 要と思われる D_{ap} の設定方法について考察した。

2. 試験概要

本研究では,温度,塩水の浸漬繰返し時間を制御した 室内試験と,供用中の桟橋上部工の下部空間を利用した 海洋暴露試験の2つの試験を行った。

2.1 室内試験

(1) 使用材料・配合

室内試験に用いた供試体の使用材料およびコンクリート配合を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランド セメント(以下,N),高炉セメント B 種(以下,BB) を使用し,水セメント比(以下,W/C)は0.50とした。

(2) 供試体

室内試験に用いた供試体を図-1 に示す。寸法は 100 ×100×200mm とし、コンクリートの打込み方向に対し て側面となる型枠面の2面を試験面(暴露面)とした。 なお供試体は,表-2に示す各ケースに対し2体作製し、 打込み2日後に型枠を取り外し、Nを使用した供試体(以 下、N供試体)は3日間、BBを使用した供試体(以下、 BB供試体)は5日間標準養生を行った。その後、試験 面以外の4面をエポキシ樹脂にて被覆し、図-1に示す 向きに供試体を設置して表-2 に示す環境に暴露した。 また、暴露約6ヶ月、22カ月後に、図-1に示すように 厚さ50mmと150mmに切断し、2.1(4)の試験を行った。

(3) 暴露環境

室内試験では、塩水の作用を受けない条件として温度 20℃、相対湿度 60% (N供試体では 95%も検討)の大気 中と、塩水の乾湿繰返しの影響の把握を目的に 3%NaCl 水溶液中への浸漬時間と大気中での乾燥時間をパラメー タとしたケースを設定した。なお本試験では、海洋環境 における実際の潮の干満(2 周期/日程度)を考慮し、1 周期が 12 時間となるように表-2 のように設定した。

*1 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター新材料・リニューアル技術グループ リーダー 博士(工学) (正会員) *2 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系 教授 博士(工学) (正会員) *3 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター新材料・リニューアル技術グループ 研究員 (正会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

(4) 測定項目

室内試験では,暴露 6,22ヵ月後の D_eと,22ヵ月後 の干満帯・海中を模擬した供試体の C₀, D_{ap}を求めた。

図-1に示す厚さ 50mm の試験片は、JSCE-G 571-2013 に準じた D_e の測定に供した。また、厚さ 150mm の試験 片は暴露面から深さ方向に 1cm 幅でスライスし、各スラ イス片中の全塩化物イオン濃度を JIS A 1154 に準じて測 定した。得られた深さ方向の塩化物イオン濃度分布を式 (1) に近似させることにより D_{ap} , C_0 を求めた。

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

ここに、C(x, t):深さx (cm),時刻t(年)における 塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_0 :コンクリート表面にお ける塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 D_{ap} :見掛けの塩化物イ オン拡散係数($cm^2/$ 年)、erf:誤差関数を表す。

なお,以降に示す D_eや塩化物イオン濃度分布は各ケース2体の平均値で整理している。

副今	配合条件					単位量(kg/m ³)					
名称	セメント の種類	W/C	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W	С	S	G	Ad	備考
N50	Ν	0.50	43	8.0	4.5	157	314	784	1,075	1.88	安内县電
BB50	BB	0.50	42	8.0	4.5	153	306	769	1,098	1.84	王门來路
N55	Ν	0.55	44	12.0	4.5	165	300	806	1,040	1.20	海洋環境
BB55	BB	0.55	44			164	294	788	1,056	2.94	暴露

表-1 使用材料およびコンクリート配合

※N:普通ポルトランドセメント(比重 3.16), BB:高炉セメントB種(スラグ混入率 40~45%, 比重 3.04), S:君津産山砂(表乾比重 2.61), G:北海道上磯郡峩朗町産砕石 2005(表乾比重 2.70), Adl: AE 減水剤標準形(I種)

町人々も			測定項目			
配合名称 主 _1 参照	大気中		干満帯・	暴露 6,22 カ	暴露 22 ヵ月	
衣一 参照	温度(℃)	湿度 (%)	浸漬時間-	月後の D _e	後の C ₀ , D _{ap}	
	20	60	_	0	—	
N50	20	95	_	0	—	
			0.5h-5.5h(8%浸漬)	・温度 20℃の室内	0	0
			1.5h-4.5h(25%浸漬)	(湿度制御はなし)	0	0
			3.0h-3.0h(50%浸漬)	・3%NaCl 水溶液に	0	0
			常時浸漬(100%浸漬)	て浸漬	0	0
	20	60	_	0	—	
BB50		_	0.5h-5.5h(8%浸漬)	・温度 20℃の室内	0	0
			1.5h-4.5h(25%浸漬)	(湿度制御はなし)	0	0
			3.0h-3.0h(50%浸漬)	・3%NaCl 水溶液に	0	0
			常時浸漬(100%浸漬)	て浸漬	0	0

表-2 実験ケース(室内試験)





2.2 海洋暴露試験

(1) 使用材料·配合

海洋暴露供試体の使用材料,コンクリート配合を表-1 に示す。なお,ここでは長期暴露となるため港湾構造 物で一般に用いられる W/C の上限値 55%を採用した。

(2) 供試体

海洋暴露供試体を図-2に示す。寸法は直径 10cm,高 さ 10cm の円柱であり,暴露面以外の面を全てエポキシ 樹脂,塩ビ管にて被覆した。また,打込み後約1週間は 20℃の室内で封緘養生し,その後に海洋暴露を開始した。

(3) 暴露環境

海洋暴露供試体はすべて,横須賀市に位置する桟橋上 部工の下部空間を利用して,図-3に示す海上大気中, 飛沫帯,干満帯(H.W.L.,M.W.L.付近)に,図-2に示 すように暴露面が下向きになるように設置した。

なお、海水の飛沫等が頻発する際の異常波浪時におけ る波の主方向は桟橋法線に対しほぼ直角である。また、 海上大気中では海水は直接作用せず暴露面は常に乾燥し た状態、飛沫帯では稀(数日に数回)に粒径の大きい水 塊が飛沫する状態、干満帯(H.W.L.)では高潮満潮時の 年に数回海水に浸漬する状態(海水飛沫の頻度は多い)、 干満帯(M.W.L.)では1日の半分が海水に浸漬する状態 である。桟橋上部工下部空間の1年間の計測結果では、 気温は5~23℃、相対湿度は50~100%であった。

(4) 測定項目

海洋暴露試験では,N供試体は暴露1,2,3,4年後に,

BB 供試体は暴露 2, 3, 9 年後に回収し, 2.1(4)に示す方 法により D_{ap}, C₀を推定した。

3. 実験結果

3.1 塩水浸漬時間, 材齢が Deに及ぼす影響(室内試験)

図-4に、電気泳動試験によって得られた暴露 22ヵ月 後の供試体における陽極側セルの塩化物イオン濃度の経 時変化を示す。これを見ると、暴露条件によらず、BB 供試体のほうがN供試体よりも単位時間あたりの陽極側 セルの塩化物イオン濃度の増加割合(図中の勾配)は小 さく、セメント種類の違いが明瞭に見られている。しか し、電気泳動試験前の暴露条件の違いによって、陽極側 セルに塩化物イオンが通過する時間や通過後の濃度の増 加割合(勾配)が異なっている様子も確認できる。

図-5 に、すべての曝露材齢および塩水浸漬時間に対 する D_e の整理結果を示す。N、BB 供試体ともすべての 条件において暴露材齢が長くなるほど D_e は小さくなっ た。文献 3) では暴露材齢が長くなるにつれ D_{ap} は小さ くなると述べられているが、 D_e も同様であった。また、 乾湿繰返し (8, 25, 50%浸漬) を与えた供試体の D_e は、 N、BB 供試体とも、大気中や常時浸漬(100%浸漬)よ りも大きくなった。この理由として、塩水との直接の接 触により水和が促進され表面が緻密になった一方で、溶 脱⁷⁾や乾湿繰返し⁸による影響も複雑に影響した可能性 が考えられる。なお本結果では、大気中における相対湿 度 60%と 95%の違いは D_e に影響していなかった。



3.2 塩水浸漬時間が Dap に及ぼす影響(室内試験)

図-6に、暴露22ヵ月後における干満帯・海中を模擬 した供試体中の塩化物イオン濃度分布を示す。この結果 によれば、N供試体では深さ2.0~3.0cm,BB供試体で は深さ1.0~2.0cmの範囲まで塩化物イオンが浸透してお り、図-5に示した D_eの結果と同様、BBのほうが塩分 浸透抵抗性は優れていた。一方、深さ0~1.0cmの範囲の 塩化物イオン濃度は、N、BB供試体とも常時浸漬(100% 浸漬)が他の条件よりも小さくなっている。既往の知見 ⁴⁾では、乾湿繰返しを受けるとコンクリート表層部にて 塩化物イオンの濃縮が生じると述べられており、今回の 結果においてもこの現象が生じたものと考えられる。

図-6の分布から推定した C₀および D_{ap}をそれぞれ図 -7,図-8に示す。なお、図-8には示方書⁵⁾に示され る式(2),(3)により計算した D_{ap},図-5に示した D_e を用いて式(4)~(6)により算出した D_{ae}も併記した。

$\log_{10} D_{ap} = 3.0(W/C) - 1.8$	(Nの場合)	(2)
$\log_{10} D_{ap} = 3.2(W/C) - 2.4$	(BB の場合)	(3)
$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e$		(4)



 $k_1 \cdot k_2 = 0.21 \cdot \exp\{1.8 \cdot (W/C)\}$ (N の場合) (5)

 $k_1 \cdot k_2 = 0.14 \cdot \exp\{3.1 \cdot (W/C)\}$ (BB の場合) (6)

ここに、 D_{ap} :塩化物イオンの見掛けの拡散係数($cm^{2}/$ 年)、 D_{ae} :電気泳動試験による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数($cm^{2}/$ 年)、 D_{e} :電気泳動試験による実効拡散係数($cm^{2}/$ 年)、 k_{1} :コンクリート表面における陽極側、陰極側の溶液それぞれの塩化物イオン濃度のつり合いにかかわる係数、 k_{2} :セメント水和物中への塩化物イオンの固定化現象にかかわる係数、W/C:水セメント比($0.3 \leq W/C \leq 0.55$)を表す。

図-7を見ると、乾湿繰返し(8, 25, 50%浸漬)を与 えた供試体の C_0 は塩化物イオン濃縮の影響⁴⁾により常 時浸漬(100%浸漬)より大きくなった。また、図-8に おいて、 D_e から算出した D_{ae} と式(2),(3)による D_{ap} の計算値を比較すると、N、BB 供試体とも、暴露 6ヵ月 後の大気中のケースで両者が比較的近い値を示した。一 方、乾湿繰返しを与えた供試体と常時浸漬供試体の D_{ae} を比較すると、N、BB 供試体とも常時浸漬のほうが他の 条件よりも小さくなったが、図-6の分布から求めた D_{ap} は25%浸漬のN供試体を除いて常時浸漬のほうが大きく なっており、 D_{ae} と D_{ap} は逆の傾向を示していた。

このことは、環境条件が考慮されない現状の補正係数 $k_1 \cdot k_2 \ge D_e$ から推定される見掛けの拡散係数 D_{ae} は、海洋 コンクリートの見掛けの拡散係数 D_{ap} を適切に推定でき ていない可能性を示唆しているものと考えられる。



図-8 見掛けの拡散係数 [室内試験]

3.3 実環境下における C₀, D_{ap}の調査結果(海洋暴露)

図-9, 図-10 に, 図-3 に示す海洋環境下に暴露し た供試体中の塩化物イオン濃度分布を示す。海上大気中 (H.W.L.+1.85m)では、塩化物イオンの供給が少ないた

め、N、BB供試体とも、暴露材齢の増加とともに表層部 (深さ0~1.0cmの範囲)の塩化物イオン濃度は緩やかに 増加し, BB 供試体では暴露3から9年後にかけても増 加している。一方,飛沫帯(H.W.L.+0.75m)や干満帯

(H.W.L., M.W.L.) では、1 から2 年後の暴露開始初期 から表層部の塩化物イオン濃度が高く,暴露1~3年程度 でほぼ収束した傾向を示している。

図-11, 図-12 に, C₀, D_{ap}の経時変化を示す。これ によると、海上大気中における Coおよび Dap はセメント 種類の違いによらずほぼ同じ値で推移しているのに対し, 海水の飛沫や繰返し作用を受ける飛沫帯や干満帯では C₀, D_{an}ともセメント種類の違いが明瞭に見られた。

なお、今回の海洋暴露試験では、飛沫帯に暴露した N 供試体の Co が示方書に示される 13kgm³と,飛沫帯およ び干満帯に暴露した BB 供試体の D_{ap}は式(3) による計 算値とほぼ一致していた。ただし、飛沫帯、干満帯に暴

20

海上大気中(H.W.L.+1.85m)

表面からの深さ(cm)

畝 20

30

25

20

15

10

5 0

植 行 を ん よ ン 識 辰 (kg/m³)

45

25

20

15

10

5 0

0

表面塩化物イオン濃度

0.0

N, W/C=0.55,

10

N, W/C=0.55

飛沫帯 (H.W.L.+0.75m)

露した BB 供試体の C₀は 13kg/m³よりも相当に高い値で あり, 乾燥の影響をより強く受ける飛沫帯のほうが表層 部における塩化物イオンの濃縮の影響⁴⁾ が顕著になって いる。また,飛沫帯に暴露した N 供試体の Dap は式(2) による計算値よりも大きく,図-8に示した Dap が式(2) による計算値より大きかった結果と一致していた。

以上より,海洋コンクリートの塩害耐久性設計に用い るC₀やD_{ap}を電気泳動試験による実効拡散係数から推定 する場合には、セメント種類と水セメント比を考慮した 補正係数 k₁・k₂に加えて,環境を考慮できる新たな補正 係数が必要と考えられる。海洋コンクリート構造物の今 後の維持管理において得られる塩化物イオン濃度調査の 結果を環境区分に応じて体系的に整理し、新たな補正係 数を検討していくことが重要と思われる。





40

3.0

4. 海洋コンクリートの C₀, D_{ap}の設定方法に関する考察 図-13 に、室内および海洋暴露試験により得られた D_{ap} と W/C の関係を示す。なお本図には、式(2) および 式(3) による計算値(実線)と、その計算値を 1.5 倍したもの(点線)も付記した。

これによると、Nを使用し環境区分が海中、飛沫帯、 干満帯に位置する場合には、式(2)を1.5倍した値(点線)と比較的一致していた。一方、BBを使用し飛沫帯、 干満帯に位置する場合は、式(3)で推定できているが、 海水の浸漬時間が長くなる M.W.L.以深では式(3)に補 正を加える必要があるものと思われる。また、塩化物イ オンの供給が少ない海上大気中に関しては、図-11、図 -12に示したように N、BBとも C₀, D_{ap}の収束に相当の 時間を要しているため本稿にて示方書式との関係性を論 じることは難しいが、海上大気中における見掛けの拡散 係数は示方書式よりも相当に小さい可能性が考えられる。

なお、図-13の点線で示した1.5倍という数値は、現 状では十分に精査できていないため、環境区分を考慮す るための適切な補正係数とは言いきれない。ここでは、 概念として、このような補正係数を設定できれば海洋コ ンクリート構造物の耐久性設計を合理的に行える可能性 を示したにすぎず、今後、研究や調査結果の蓄積と補正 に対する考え方の整理を進める必要があると考えられる。 また、表面塩化物イオン濃度も環境区分やセメント種類 によって異なるため、見掛けの拡散係数の補正係数の検 討と併せて、表面塩化物イオン濃度の設定方法について も検討していく必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 電気泳動試験により得られる実効拡散係数は材齢 が長いほど小さくなった。また、塩水浸漬時間が短いほど実効拡散係数は大きくなった。
- (2) 3%NaCl 水溶液浸漬による塩化物イオン濃度分布か ら得た見掛けの拡散係数は塩水浸漬時間が長いほど 大きくなり,実効拡散係数と逆の傾向を示した。
- (3)海洋環境下に長期暴露した供試体の表面塩化物イオン濃度および見掛けの拡散係数の調査結果から、海洋コンクリートでは、環境区分によってこれらパラメータが大きく異なることを示した。
- (4)海洋コンクリートの塩化物イオン拡散予測に用いる 見掛けの拡散係数の設定にあたっては、電気泳動試 験による実効拡散係数に海洋環境区分を考慮できる 新たな補正係数が必要となる可能性を示した。

参考文献

1) (社) 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・



同解説, p.488, 2008.7

- 2) 網野貴彦,大即信明,斎藤豪,羽渕貴士:桟橋上部 工の空間的位置の違いが塩化物イオン浸透性状お よび鉄筋の腐食速度に与える影響,コンクリート工 学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.779-784, 2010.7
- 竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三, 出光隆: 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, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp.91-104, 1998.8
- 丸屋剛, Tangtermsirikul Somnuk, 松岡康訓: コンク リート表層部における塩化物イオンの移動に関す るモデル化, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.79-95, 1998.2
- 5) (公社) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示 方書設計編, pp.154-157, 2013.3
- 6) (公社) 土木学会:コンクリートライブラリー138
 2012 年制定コンクリート標準示方書改訂資料 基本原則編・設計編・施工編, pp.74-82, 2013.3
- 7) 久田真,河野広隆:溶脱したコンクリートの塩化物 イオン浸透抵抗性に関する考察,コンクリート工学 年次論文集, Vol.25, No.1, pp.749-754, 2003.7
- 8) 佐伯竜彦,嶋毅,長瀧重義:等価拡散係数を用いた コンクリートの塩分浸透予測手法の検討,コンクリ ート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.859-864, 1998.7