

論文 高炉セメント B 種を用いた港湾コンクリートの塩化物イオン拡散係数および表面塩化物イオン濃度について

審良 善和^{*1}・山路 徹^{*2}・岩波 光保^{*3}・横田 弘^{*4}

要旨: 本研究は、全国の港湾工事（コンクリート打設工事）の際に作製される管理供試体を収集し、実海水を用いた暴露試験および 10%NaCl 水溶液を用いた浸漬試験を実施し、それぞれのコンクリートの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を調査した。その結果、自然海水に暴露した供試体の見掛けの拡散係数は、ほとんどの場合、土木学会提案式よりも小さな値となった。また、10%NaCl 水溶液に浸漬した供試体の見掛けの拡散係数は自然海水に暴露したものより大きくなり、精度良く拡散係数を算出するためには補正係数を乗じるなどの補正が必要であることが明らかとなった。

キーワード: 塩化物イオン拡散係数, 表面塩化物イオン濃度, 高炉セメント B 種, 港湾構造物, 全国調査

1. はじめに

港湾構造物は、通常、長期間（50 年もしくはそれ以上）にわたって、要求される性能を保持しつつ供用されなければならない。しかし、港湾構造物は、海水の影響を受けやすい厳しい環境下にあるため、長期にわたって性能を十分に確保することは容易ではない。そのような中、港湾 RC 構造物においても、2007 年に「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（以下、港湾基準）¹⁾が改訂され、栈橋上部工に関して、塩化物イオンの侵入に伴う鉄筋腐食に関する照査を行うこととなった。

RC 構造物中への塩化物イオンの浸透に伴う鉄筋腐食に関する照査を行うにあたって、塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度は重要な値である。見掛けの拡散係数はコンクリートの品質によって異なり、また、表面塩化物イオン濃度はコンクリートの置かれた環境条件によって異なる²⁾。見掛けの拡散係数は土木学会コンクリート標準示方書や港湾基準などによって、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントを使用したコンクリートに対して予測する式が示されている¹⁾³⁾。これらは、既往の塩化物イオン濃度分布調査結果をもとに作成されたものであり、信頼性の高い提案式であると考えられるが、暴露期間や暴露条件等が異なるためばらつきが大きい。より精度の高い見掛けの拡散係数を設定するためには、実構造物に適用され、また使用材料や配合などが既知なコンクリートを用いて、統一した条件下で暴露試験を実施し見掛けの拡散係数を求め、コンクリートの品質（セメントの種類や水セメント比など）との関係を把握することが望ましいと考えられる。

また、コンクリートの塩化物イオン拡散係数の設定方法として、電気泳動法や浸漬法を用いた室内実験がある。これは、用いる材料、配合に対して実効拡散係数または見掛けの拡散係数を直接求めることができる利点がある。しかし、JSCE - G572 - 2003「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に規定されている浸漬法の場合、濃度の高い塩水中に短期間浸漬し見掛けの拡散係数を算出するため、見掛けの拡散係数の時間的な変化や暴露環境の違いなどを考慮できない。これら促進試験の有効性を高めるためには、実環境における試験結果との整合を図る必要があると考えられる。

以上のことから、本研究においては、全国の港湾工事（コンクリート打設工事）の際に作製される管理供試体を収集し、実海水を用いた暴露試験および 10%NaCl 水溶液を用いた浸漬試験を実施し、それぞれのコンクリートの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を調査した。同一環境で暴露するため環境差による試験結果のばらつきは生じず、港湾工事で使用されるコンクリートの塩化物イオンの浸透に関する特性値を的確に評価できると考えられる。なお、本論文では、現在までに収集したコンクリートについて、港湾工事で使用されるコンクリートの現状を整理し、所定の暴露期間が終了した供試体（高炉セメント B 種を用いたコンクリート）の結果を報告する。

2. 収集されたコンクリートの品質

供試体は、国土交通省の各地方整備局等に依頼し、港湾工事（コンクリート打設工事）の際に作製される管理

*1（独）港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造・材料研究チーム 研究官 博士（工学）（正会員）

*2 関西国際空港（株） 建設事務所 工修（正会員）

*3（独）港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造・材料研究チームリーダー 博士（工学）（正会員）

*4（独）港湾空港技術研究所 LCM 研究センター長 博士（工学）（正会員）

供試体を収集した。形状は、粗骨材最大寸法を考慮してφ100mm×200mm またはφ150mm×300mm である。なお、収集して用いた供試体は、港湾のコンクリート打設工事から無作為に選ばれたコンクリートである。現時点で 91 工事のコンクリートを収集しているが、沖縄を除く各地域において、高炉セメント B 種を用いたコンクリートが多く、全体の約 8 割を占めた。これは、コンクリート中への塩化物イオンの浸透を抑制できるといった利点や環境問題、産業副産物利用などの観点から、高炉セメント B 種が多く使用されたものと考えられる。

供試体の養生は、実際の構造物の養生と同様な方法および期間を基本としたが、一部水中養生のものも含まれている。養生期間は図-1 に示すように 7 日が 50% と最も多いが、2 日～30 日のばらつきがある。

水セメント比と呼び強度の関係を図-2 に示す。セメントの種類に関わらず、ほとんどの場合において港湾 RC 構造物は呼び強度 24～30 のコンクリートが、また無筋コンクリートの場合は 18～21 が用いられている。いずれの呼び強度のコンクリートも、水セメント比には 10% 程度のばらつきがある。この水セメント比の違いは、骨材などの使用材料が異なることやコンクリートの打込み箇所が異なること、耐久性などから指定される水セメント比の上限値が異なることなどが考えられる。

コンクリートの空気量は、図-3 に示すように RC 構造物、無筋構造物ともに、ほとんどの場合 4～6% 程度に分布している。ただし、空気量が 8% と大きな場合もあり、この空気量のばらつきが塩化物イオンの浸透に影響を与える可能性もあると考えられる。また、スランプは無筋構造物の場合 8cm 程度、RC 構造物の場合 12cm 程度に設定されている。このスランプの差は、RC 構造物の場合に施工性を向上させるためであると考えられる。

図-4 に単位水量と水セメント比の関係を示す。港湾工事で使用されるコンクリートは、コンクリート標準示方書で標準とされている上限値 175kg/m³ 以下で製造されている⁴⁾。また、水セメント比が大きくなるにつれて単位水量は減少する傾向を示している。これは、無筋コンクリートに使用されている水セメント比 60% 程度の配合の場合、単位水量はおおよそ 150kg/m³ 程度で、最大および最小の単位水量は 15kg/m³ 程度かい離した。一方、RC 構造物に使用されるコンクリートの場合、同一水セメント比での単位水量の最大および最少のかい離幅は 25kg/m³ 程度と大きくなった。これらは、ワーカビリティの確保や骨材、化学混和剤などの使用材料が異なることなどが影響したものと考えられるが、単位水量はコンクリートの品質や耐久性に影響を与えるため、塩化物イオンの浸透性状と単位水量との関係を把握する必要があると考えられる。

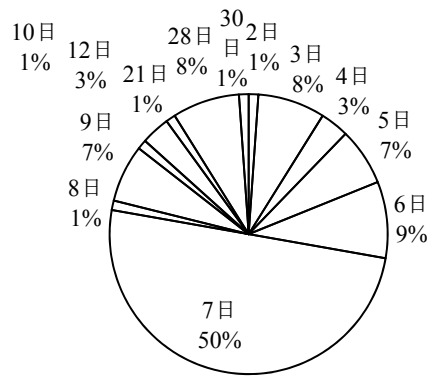


図-1 供試体の養生日数

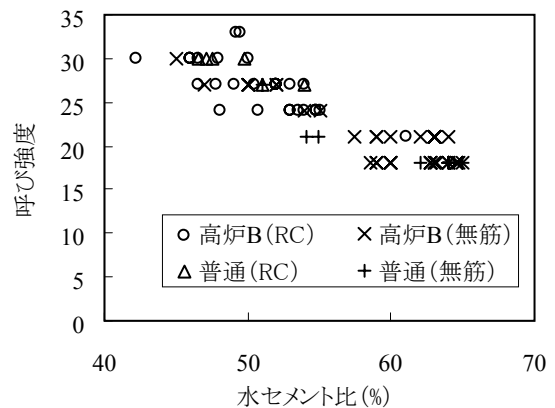


図-2 水セメント比と呼び強度の関係

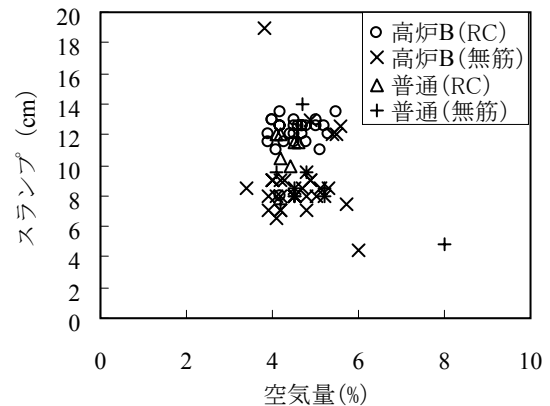


図-3 スランプと空気量の関係

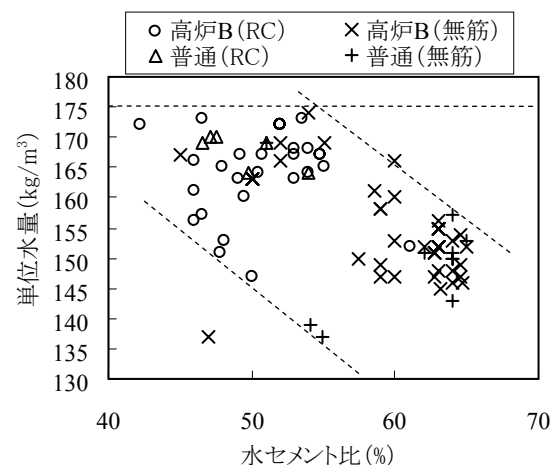


図-4 単位水量と水セメント比の関係

3. 実験概要

3.1 実験供試体

2.で示した実際に港湾工事で打設されたコンクリートで配合が既知である供試体を、構造物と同様な方法で養生を行ったものを暴露試験供試体に用いた。

供試体の前処理は、供試体に異物がある場合は取り除き、打設面から約25mmを切断した。これを試験面とし、残りの側面および底面をエポキシ樹脂で被覆した。なお、運搬、保管および前処理時に供試体が乾燥するため、予め20℃の水中に3日間浸漬し、その後、暴露試験を実施した。

3.2 暴露環境および期間

供試体は、港湾空港技術研究所内の自然海水を利用した暴露施設（海中部）および10%NaCl水溶液に浸漬暴露させた。浸漬の状況を写真-1に示す。いずれの試験も供試体は横置きとして、試験面は必ず海水に接するように設置した。

自然海水暴露は、神奈川県久里浜湾の自然海水を用いた暴露試験で、供試体は常時海水に没した状態となる。また、1日に2回、海水を交換することで海水中の塩化物イオン濃度を久里浜湾の自然海水と同じになるように調整している。なお、本施設の海水中の塩化物イオン濃度は平均16.5g/L、水温は平均19℃である。また、10%NaCl水溶液暴露は、JSCE-G572-2003「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に準拠し、20℃室内に試験槽を設置し行った。暴露期間は、いずれの供試体も自然海水暴露試験は1年、10%NaCl水溶液暴露試験は0.5年とした。なお、高炉セメントB種を用いたコンクリートで暴露試験が終了したものは、自然海水暴露試験が28供試体、10%NaCl水溶液暴露試験が22供試体である。表-1にこれらの供試体の配合条件と暴露条件を示す。

3.3 見掛けの拡散係数算出方法

所定の暴露期間が終了した後、JIS A 1154 : 2003「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠しコンクリート中の全塩化物イオン濃度の定量を行った。コンクリート表面から深さ方向に5mmまたは10mmに切断した試料片を粉碎し、コンクリート中の全塩化物イオン濃度を電位差滴定法により定量した。なお、粉碎した試料はいずれの供試体も5深度準備した。

見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度は、式(1)に示すFickの拡散方程式の解（境界条件：表面塩化物イオン濃度一定）を用いて回帰分析により算出した。

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



自然海水暴露

10%NaCl水溶液暴露

写真-1 供試体の暴露状況

表-1 見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を算出したコンクリートの配合条件

No.	W/C (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	暴露条件	
				海水	10% NaCl
1	46.0	156	42.0		○
2	46.6	157	42.4	○	○
3	48.1	153	36.4	○	○
4	49.0	163	44.9	○	
5	50.5	164	54.5	○	○
6	50.8	167	43.7		○
7	52.0	172	45.0	○	○
8	52.0	172	45.0		○
9	52.0	166	45.6	○	○
10	53.0	167	45.1	○	○
11	53.0	163	46.2	○	○
12	53.5	173	39.6	○	○
13	54.0	164	47.0	○	
14	54.0	174	50.3		○
15	54.8	167	44.6	○	
16	54.8	167	44.6	○	
17	55.0	165	46.7	○	
18	59.0	149	39.4		○
19	59.0	158	40.6	○	
20	59.0	158	41.3		○
21	60.0	147	41.0	○	
22	60.0	166	41.0	○	○
23	60.0	160	41.0	○	
24	61.0	152	45.6	○	○
25	62.8	151	42.5	○	
26	62.8	151	42.5	○	
27	63.0	148	42.1	○	○
28	63.0	155	43.1	○	○
29	63.0	152	43.3	○	
30	63.0	152	43.3	○	
31	63.0	152	43.3	○	
32	63.0	152	43.3	○	
33	64.0	146	43.1	○	○
34	64.0	153	44.3		○
35	64.5	149	40.5		○
36	64.5	154	41.9	○	○

ここで、 $C(x,t)$ は距離 x (cm)、期間 t (年) における全塩化物イオン濃度 (kg/m³)、 C_0 は表面塩化物イオン濃度、 D_{ap} は見掛けの拡散係数 (cm²/年)、 $\operatorname{erf}(s)$ は誤差関数である。なお、見掛けの拡散係数を算出する際に、使用材料や養生条件などから混入する初期の全塩化物イオン濃度の影響は考慮しなかった。

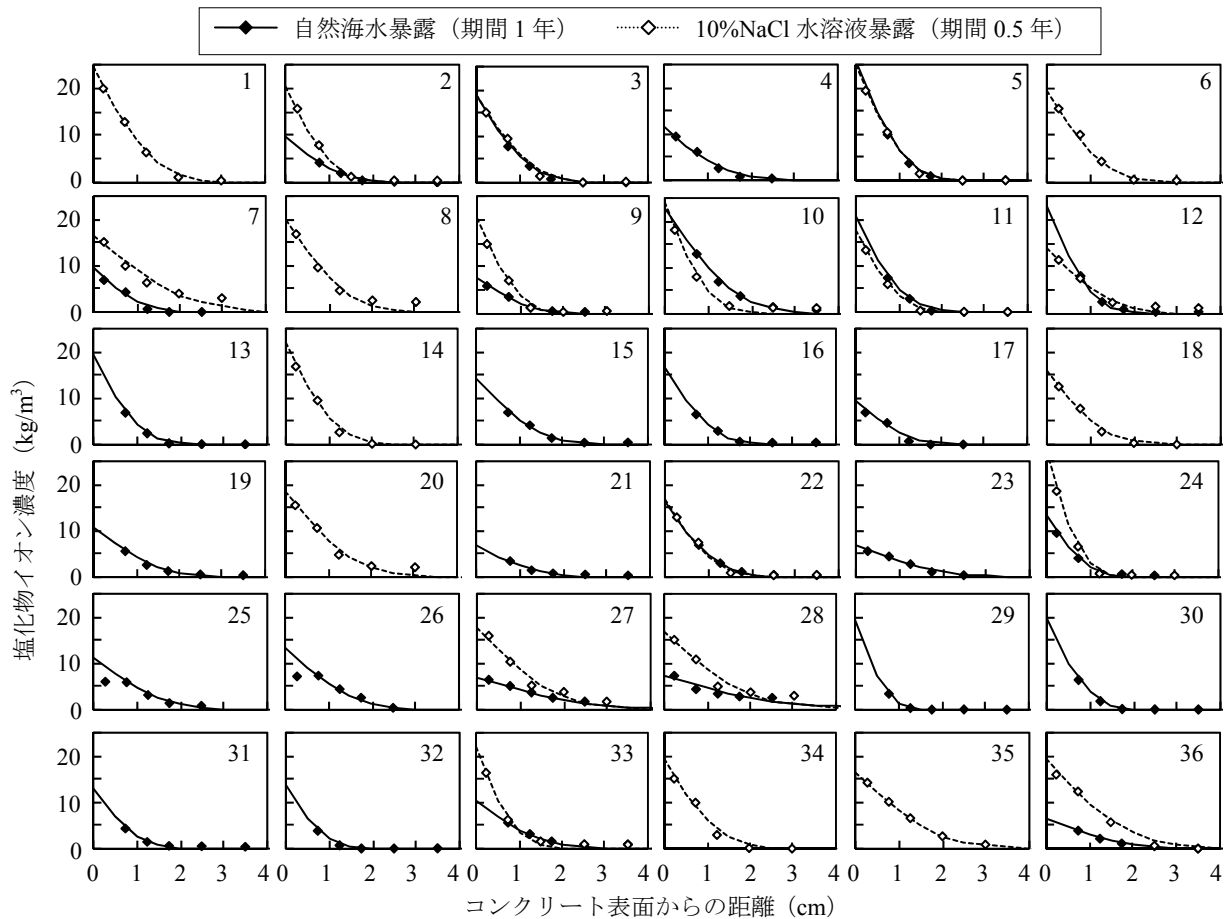


図-5 塩化物イオン濃度分布

4. 結果および考察

4.1 塩化物イオン濃度分布

図-5に自然海水暴露試験および10%NaCl水溶液暴露試験によって得られた全塩化物イオン濃度分布を示す。それぞれ配合が異なるため、塩化物イオンの浸透にばらつきは大きい、少なくとも表面から10mm以上は塩化物イオンがコンクリート内部に浸透している。また、自然海水暴露試験に用いた高水セメント比の供試体のうち数本で表層部の塩化物イオン濃度が低下しているものもあったが、ほとんどの供試体で表層部の塩化物イオン濃度の低下は認められなかった。これは、まだ暴露期間が1年と短いためであると考えられる。

いずれにしても、これらの塩化物イオン濃度分布を用いて回帰分析を行う場合、3点以上の測定点を確保できると考えられることから、これらの分布から塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を算定した。

4.2 見掛けの拡散係数

図-6に自然海水暴露試験および10%NaCl水溶液暴露試験結果から得られた見掛けの拡散係数と水セメント比の関係を示す。見掛けの拡散係数は、水セメント比が大きくなるにつれて値が大きくなり、ばらつきも大きく

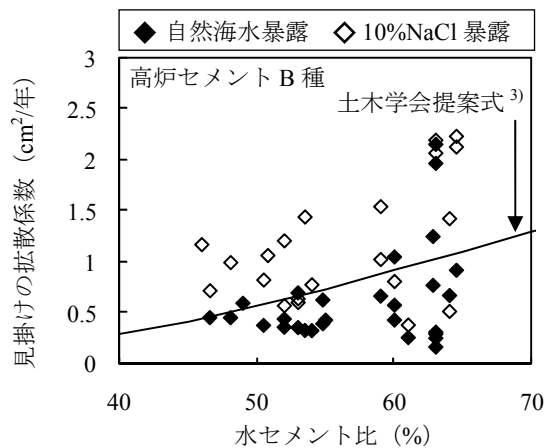


図-6 見掛けの拡散係数と水セメント比の関係

なる傾向にある。高水セメント比の見掛けの拡散係数には、低水セメント比の値と同程度のものもあるが、自然暴露試験結果において、見掛けの拡散係数が $2\text{cm}^2/\text{年}$ 程度 (No.27およびNo.28) と非常に大きなものもあった。これは、使用材料や施工状況、養生条件などの違いが影響していると考えられる。養生期間の違いが見掛けの拡散係数に及ぼす影響について、図-7に土木学会コンクリート標準示方書に示されている湿潤養生期間の標準⁵⁾で

区分した水セメント比と見掛けの拡散係数の関係について示す。いずれの試験の見掛けの拡散係数もばらつきが大きいので十分な評価は難しいが、標準の養生期間より日数が少ない場合は、見掛けの拡散係数は大きくなる傾向にあることが分かる。したがって、養生期間も見掛けの拡散係数のばらつきの一要因であることが分かる。しかしながら、自然海水暴露試験結果において、養生が十分であっても、見掛けの拡散係数が非常に大きな値を示す場合もあり、不明な点も多い。これについては、今後の課題である。

試験方法および暴露期間の違いについては、図-6に示すように、ばらつきはあるものの10%NaCl水溶液暴露試験結果の見掛けの拡散係数は土木学会提案式³⁾に比べ大きな値となり、ほとんどの自然海水暴露試験結果の見掛けの拡散係数は土木学会提案式³⁾より小さな値となった。今回の自然海水暴露試験の暴露期間は1年で、実構造物の腐食発生までの期間と比べると短期間であるが、突出した2データを除いた自然海水暴露試験結果の見掛けの拡散係数の上限値と現行の土木学会提案式は同程度の値となった。これは、RC構造物中への塩化物イオンの侵入に伴う鉄筋腐食を照査する上で安全側の判定となるため、本試験結果から土木学会提案式の妥当性が示される。しかしながら、見掛けの拡散係数は時間の経過に伴い小さくなること⁶⁾を考えると、今回の実験結果の上限値はさらに小さくなる。この場合、土木学会提案式よりもさらに小さく設定できる可能性がある。現在の港湾基準では、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの場合、土木学会提案式に換算係数 $\gamma_p = 0.65$ を乗じ見掛けの拡散係数を小さく設定している¹⁾。本試験結果から、高炉セメントB種を使用した場合も同様に換算係数を用いるなどして特性値を予測できる可能性があるが、予測値の信頼性を考えると長期間の暴露試験結果などが必要であるため、今後の課題である。

4.3 試験方法が異なる場合の見掛けの拡散係数の補正

10%NaCl水溶液暴露試験結果から求めた見掛けの拡散係数は、明らかに自然海水暴露結果の見掛けの拡散係数より大きい。これは、10%NaCl水溶液暴露試験の浸漬期間が短期間であることなどが影響していると思われる。このような促進試験によって求めた見掛けの拡散係数を用いて耐久性を照査した場合には、見掛けの拡散係数が大きく見積もられ、過度に安全側の設計になる恐れがある。図-8に両方の試験を実施した供試体から得られたそれぞれの見掛けの拡散係数の相関を示す。ばらつきはあるものの、10%NaCl暴露試験結果は、自然海水暴露試験結果の2倍程度大きな拡散係数を与えると予想される。図-6の結果を図-8の近似結果である式(2)で補正したものを図-9に示す。

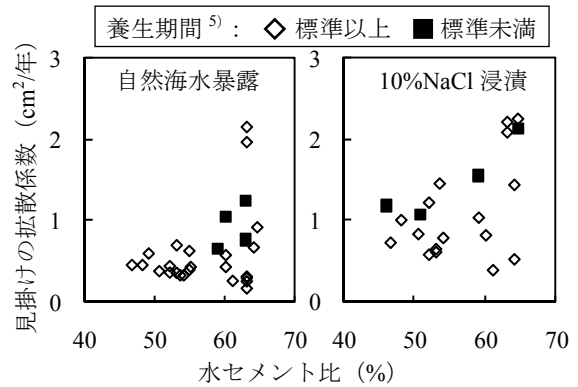


図-7 養生期間の違いが見掛けの拡散係数に及ぼす影響

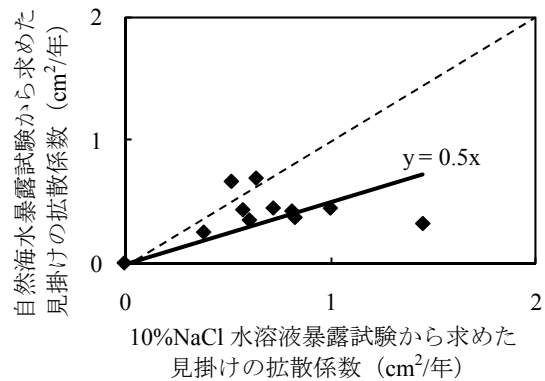


図-8 見掛けの拡散係数の相関

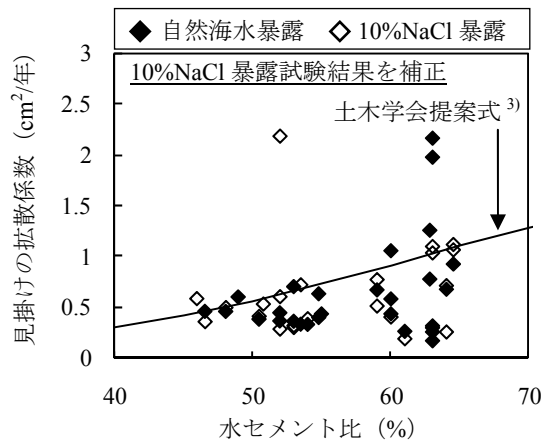


図-9 見掛けの拡散係数の相関（補正後）

$$D_{seawater} = k \cdot D_{NaCl} \quad (2)$$

ここで、 $D_{seawater}$ は自然海水暴露試験結果から得られた見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 D_{NaCl} は10%NaCl水溶液暴露試験結果から得られた見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 k は補正係数である。なお、今回は試験結果から $k=0.5$ とした。この結果、自然海水暴露試験結果と比べると、10%NaCl水溶液暴露試験のみ実施していた供試体も1/2程度の値となるものが増える傾向にあると考えられる。このように、JSCE-G572-2003で標準化された浸漬法によって見掛けの拡散係数を算出する場合は、補正係

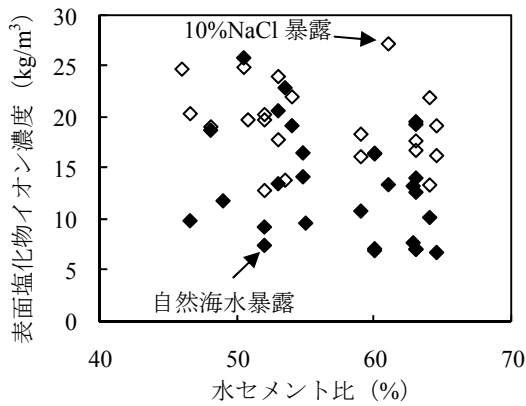


図-10 表面塩化物イオン濃度と水セメント比の関係

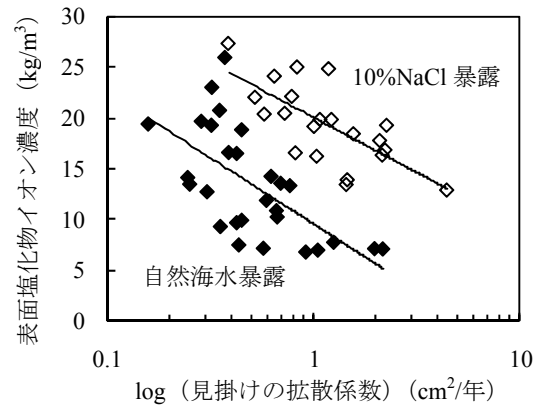


図-11 表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数の関係

数等を用いて修正する必要があると考えられる。なお、本試験結果においては、補正係数は0.5となった。なお、この補正係数に関しても、自然海水暴露の見掛けの拡散係数の経時変化も考慮して決定する必要があると考えられる。

4.4 表面塩化物イオン濃度

図-10 に表面塩化物イオン濃度と水セメント比の関係を示すが、両者に良い相関は得られなかった。しかし、全般的にみると浸漬溶液中の塩化物イオン濃度の高い10%NaCl水溶液暴露試験の表面塩化物イオン濃度の方が自然海水暴露結果より値が大きくなる傾向にあった。

図-11 に表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数の関係を示す。いずれの試験結果も見掛けの拡散係数が大きくなるにつれて表面塩化物イオン濃度が減少する傾向が認められた。これは、両試験とも暴露期間が短く、塩化物イオンが比較的浸透しやすいコンクリートの場合は塩化物イオンがコンクリート内部に移動し、拡散係数が小さいコンクリートの場合には表面付近で塩化物イオンが蓄積したためであると考えられる。したがって、長期的には暴露期間の経過に伴い表面塩化物イオン濃度は変化すると考えられる。

5. まとめ

本研究では、全国の港湾工事で使用されたコンクリートの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度について調査を行った。得られた結果を以下に示す。

1) 自然海水暴露試験結果から求めた見掛けの拡散係数は、ほとんどが土木学会提案式よりも小さな値を示し、土木学会提案式は測定結果の上限値に近い値となった。したがって、RC構造物中への塩化物イオンの侵入に伴う鉄筋腐食の照査では安全側の判定になり、土木学会提案式の信頼性は高いと考えられる。しかし、見掛けの拡散係数は時間の経過に伴い小さくなる傾向にあることを考えると、特性値を小さな値に設定で

きる可能性がある。

- 2) 10%NaCl水溶液暴露試験で得られた見掛けの拡散係数は、自然海水暴露結果よりも大きな値となった。したがって、JSCE-G572-2003で規準化された試験によって見掛けの拡散係数を算出する場合には、補正係数等を用いて修正する必要があると考えられる。
- 3) 自然海水暴露試験および10%NaCl水溶液暴露試験とともに、表面塩化物イオン濃度は見掛けの拡散係数が大きくなるにつれて減少した。

謝辞

国土交通省港湾局、各地方整備局、北海道開発局および内閣府沖縄総合事務局の関係各位には、供試体の提供など多大なるご協力をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

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，pp.487-489，2007
- 2) 山路徹，横田弘，中野松二，濱田秀則：実構造物調査および長期暴露試験結果に基づく港湾RC構造物における鉄筋腐食照査手法の検討，土木学会論文集 E，Vol.64，No.2，pp.335-347，2008
- 3) (社)土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，p.55，2008
- 4) (社)土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.85-86，2008
- 5) (社)土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.127-128，2008
- 6) 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