

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1141

September 2006

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

山路 徹

中野 松二

濱田 秀則

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. 序論 .....	4
2. 暴露試験による調査結果 .....	5
2.1 暴露試験概要 .....	5
2.2 見かけの塩化物イオン拡散係数測定結果 .....	7
2.3 見かけの塩化物イオン拡散係数と各種要因の相関性 .....	8
2.4 まとめ .....	10
3. 実構造物における調査結果 .....	10
3.1 概要 .....	10
3.2 調査対象構造物および調査方法概略 .....	10
3.3 調査結果 .....	10
3.4 まとめ .....	11
4. 簡易な拡散係数推定手法の適用性に関する検討 .....	12
4.1 維持管理時における塩化物イオン量分布推定への適用 .....	12
4.2 初期の品質管理試験への適用 .....	12
5. 簡易な拡散係数推定手法を用いた塩化物イオン量分布推定例 .....	13
5.1 概要 .....	13
5.2 試験体 .....	13
5.3 コア採取方法 .....	13
5.4 試験項目 .....	13
5.5 試験結果 .....	14
5.6 まとめ .....	15
6. 結論 .....	15
謝辞 .....	16
参考文献 .....	16
付録	
付録A 暴露試験における調査結果一覧 .....	17
付録B 実構造物における調査結果一覧 .....	19

# Results of Apparent Diffusion Coefficient of Chloride Ion in Port Reinforced Concrete Structures and Study on its Simple Estimation Method

**Toru YAMAJI\***

**Shoji NAKANO\*\***

**Hidenori HAMADA\*\*\***

## Synopsis

The apparent diffusion coefficient of chloride ion in concrete  $D_{ap}$  is an essential parameter for the performance based design of reinforced concrete structures in which chloride induced deterioration occurs. In this study, data of  $D_{ap}$  were gathered from both concrete specimens and existing port concrete structures, the types of which are open-typewharf, quay wall, and breakwater. The effects on  $D_{ap}$  were investigated for some factors. The conclusions are as follows:

- 1)  $D_{ap}$  in port reinforced concrete structures varied widely.
- 2) Obtained  $D_{ap}$  from both concrete specimens and existing port concrete structure had a good correlation with pore volume in concrete, which was simply measured by weight measurement at the saturated and dried condition of concrete. Therefore,  $D_{ap}$  can be estimated by this simple method.

**Key Words:** port reinforced concrete structure, chloride induced deterioration,  
apparent diffusion coefficient of chloride ion and pore volume in concrete

---

\* Project Researcher, LCM Research Center for Coastal Infrastructures

\*\* Sho-bond construction Co., Ltd. (Former Trainee, LCM Research Center for Coastal Infrastructures)

\*\*\* Kyusyu University (Former Head of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-8445061 Fax : +81-46-8440255 e-mail:yamaji@pari.go.jp

# 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

山路 徹\*  
中野 松二\*\*  
濱田 秀則\*\*\*

## 要 旨

本研究では、港湾コンクリート構造物において、塩害による鉄筋腐食照査を行うために必要である見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  について、暴露試験体および実際の港湾 RC 構造物から求め、各種要因が  $D_{ap}$  に及ぼす影響について検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

(1) 実際の港湾 RC 構造物における  $D_{ap}$  の値は大きく変動していた。ただし、コンクリートの配合および使用材料に関しては不明なため、その原因について特定するのは困難である。

(2) 暴露試験体および実際の港湾 RC 構造物のいずれにおいても、質量測定により簡易に求めた空隙率と  $D_{ap}$  の間には良好な関係が見られた。すなわち、質量測定により求めた空隙率を測定することにより、簡易に実構造物における  $D_{ap}$  の予測が可能となる。

また、以上の結果を踏まえ、簡易な  $D_{ap}$  の予測手法およびコンクリート中の塩化物イオン量分布予測手法について検討した。その結果、得られた知見を以下に示す。

(3) コンクリート構造物の表面部のみから小径のコア ( $\phi$  25mm, 長さ 20mm 程度) を採取して、表面付近の塩化物イオン量  $C_o$  および空隙率の測定を行うことで、 $D_{ap}$  を推定し、 $C_o$  およびコンクリート内部の塩化物イオン量の分布の推定が可能なることを確認した。ただし、コンクリートの中性化がコアを採取した深さよりも内部まで進行していた場合は、測定精度が劣る可能性が高い。

キーワード：港湾 RC 構造物、塩害、見かけの塩化物イオン拡散係数、空隙率

---

\* LCM研究センター 特任研究官

\*\* ショーボンド建設株式会社 大阪支店 (元LCM研究センター 依頼研修生)

\*\*\* 九州大学大学院工学研究院 助教授 (前地盤・構造部 材料研究室長)

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5061 Fax：046-844-0255 e-mail:yamaji@pari.go.jp

# 1. 序論

本論文は、港湾構造物の中の鉄筋コンクリート構造物（以下、港湾 RC 構造物）における塩化物イオン拡散係数に関する調査結果を取りまとめたものである。本章では、塩害による劣化メカニズムについてまず述べ、次に港湾 RC 構造物の耐久性における塩化物イオン拡散係数の重要性とそれに及ぼす影響要因について述べ、本報告の位置づけおよび目的を明確にする。

## (1) 塩害による劣化メカニズム

港湾 RC 構造物は海水にさらされているため、塩害による劣化が生じやすい。写真-1 は供用後 30 年程度の期間が経過した栈橋上部工の床版下面の状況であるが、鉄筋腐食による膨張で既にかぶりコンクリートがはく落している。この鉄筋腐食は、海水中の塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)がコンクリート表面に供給され、コンクリート中をある速度で拡散し、鉄筋表面に到達し、ある量が蓄積された時点で開始すると考えられている(図-1 参照)。この量は、腐食発生限界塩化物イオン量と呼ばれ、「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)では、コンクリート 1m<sup>3</sup>あたり 1.2kg と設定されている。ここで、海水中からの塩化物イオンの供給量はコンクリート表面への海水の供給量(飛沫も含む)に大きく依存し、コンクリート中の塩化物イオンの拡散速度(見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$ として表現される)はコンクリート品質に大きく依存する。また、かぶりが大きいほど、鉄筋表面に到達する時間は遅くなる。よって、塩害(鉄筋腐食)の開始時期は、コンクリート表面への Cl<sup>-</sup>供給量、 $D_{ap}$ 、かぶりに大きく影響される。

## (2) 港湾コンクリート構造物における耐久性を考慮した性能設計手法の概略

土木学会示方書には、コンクリート構造物の耐久性能を新規設計時に照査する方法が明記されている。これは、式(1)を用いて海水中の塩化物イオンのコンクリート中への浸透を予測し、供用期間内に鉄筋の腐食が開始しない、すなわち鉄筋位置における塩化物イオン量が腐食発生限界塩化物イオン量(1.2kg/m<sup>3</sup>)を超えないように設計するものである(図-1 参照)。

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

ここで、 $C(x,t)$ : 時間(供用年数)  $t$ における、コンクリート表面から  $x$ 離れた位置の塩化物イオン量、 $C_0$ : 表面塩化物イオン量、 $D_{ap}$ : 見かけの塩化物イオン拡散係数、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ : 誤差関数である。

この際必要となる情報は、時間(供用年数)  $t$ 、かぶりの他に、 $D_{ap}$ と  $C_0$ の2つである。 $C_0$ はコンクリート最表面における塩化物イオン量のことであり、塩害環境の厳しさを定量的に表す指標である。 $C_0$ に関しては、文献 2)でその評価手法について検討が

なされているためここでは説明は省略する。 $D_{ap}$ については、土木学会示方書に推定式(水セメント比  $W/C$ から  $D_{ap}$ を推定)が示されており、また試験方法も定められている<sup>3)</sup>。

なお、港湾 RC 構造物に対して性能設計を行う際に耐久性能を照査する必要がある場合は、飛沫帯あるいは干満帯に位置し、鉄筋腐食の進行速度が速い栈橋上部工のような場合が多く、海中部に位置し、酸素供給量が少なく、鉄筋腐食の進行速度が遅いケーソン本体工のような場合は、耐久性能を照査する必要性は低い。

## (3) 本研究の目的

本研究では、港湾 RC 構造物において、耐久性能設計を行うために必要である  $D_{ap}$ について、まず暴露試験により、 $D_{ap}$ と水セメント比  $W/C$ 、圧縮強度、空隙率といったコンクリート品質を表す因子との相関性について検討を行った。

また、実際の港湾 RC 構造物において、どの程度の  $D_{ap}$ 値を設定できるかを把握することは、維持管理を行う上でも重要と考える。そこで、実際の港湾 RC 構造物における  $D_{ap}$ の値を把握する



写真-1 栈橋上部工における塩害劣化事例

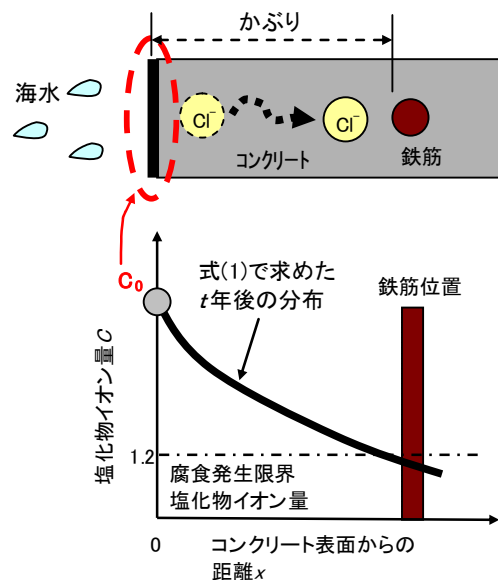


図-1 土木学会示方書における塩害劣化予測手法のイメージ図

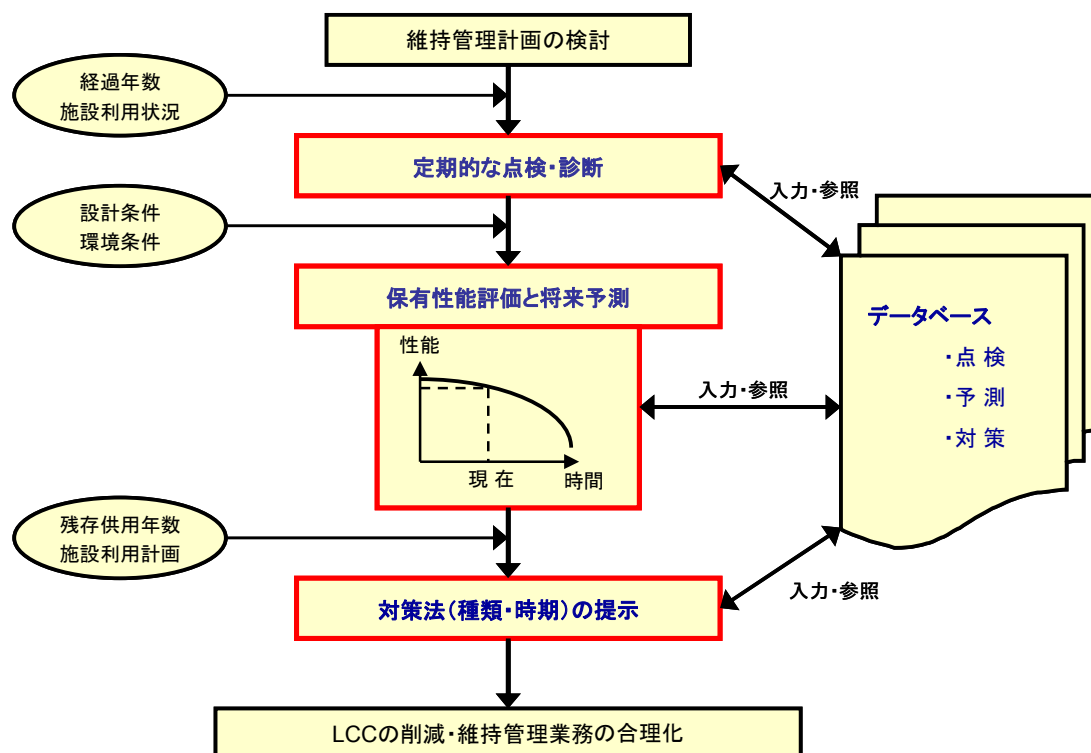


図-2 LCM (ライフサイクルマネジメント) の流れ

ことを主目的として、全国の港湾RC構造物からデータ収集を行い、この $D_{ap}$ の分布について整理した。また、暴露試験の場合同様、空隙率との相関性も検討した。

一方、塩害がしばしば起こる港湾RC構造物の維持管理においては、実構造物における $D_{ap}$ を把握することが重要である。この $D_{ap}$ は促進試験<sup>3)</sup>およびコンクリート中の塩化物イオン量分布より推定可能である。前者の場合は専門的な知識や測定装置を必要とする。後者の場合、 $D_{ap}$ を求めるためにはある程度の長さを持ったコンクリートコアを実構造物から採取する必要がある。これには、作業用の足場の設置が必要な場合が多く、また、電源、コアドリルといった機材も必要である。そこで、極力簡易に $D_{ap}$ を求める方法およびコンクリート中の塩化物イオン量分布を推定する手法についての検討も試みた。

#### (4) LCM (ライフサイクルマネジメント) における本研究の位置づけ

図-2にLCM (ライフサイクルマネジメント) の流れを示す。本研究においては、港湾RC構造物の劣化 (鉄筋腐食) に大きな影響を及ぼす $D_{ap}$ に関する調査結果をとりまとめ、さらにその予測手法について検討を行っている。図-2中において関連が深い項目は「定期的な点検・診断」「データベース」「保有性能評価と将来予測」である。

## 2. 暴露試験による調査結果

### 2.1 暴露試験概要

港湾空港技術研究所内の施設 (海水循環水槽および海水シャワー暴露場) と那覇港の2環境に暴露した試験体の結果について述べる。

#### (1) 試験体

用いた試験体は表-1のように大きく分けて4種類である。配合を表-2に示す。W/C、セメント種類、骨材種類がそれぞれ異なっている。試験体1, 3, 4については、それぞれ文献4), 5), 6)に詳細が記述されている。以下、概略を説明する。

##### ①試験体1

5種類のセメント (普通ポルトランドセメント、高炉セメントA種・B種・C種、フライアッシュセメントB種) を用いて、 $\phi 150 \times 300 \text{mm}$  のコンクリート円柱試験体を作製した。なお、W/Cは0.45と0.55の2種類である。

##### ②試験体2

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、 $150 \times 150 \times 150 \text{mm}$  のコンクリート立方体試験体を作製した。W/Cは0.40と0.55の2種類である。

##### ③試験体3

普通ポルトランドセメントを用いて、 $600 \times 900 \times 600 \text{mm}$  のコンクリートブロックを作成した。W/C=0.55であり、骨材は

表-1 試験体一覧

No.	暴露場所	暴露期間(年)	セメント*	骨材 (表乾密度(g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率(%))		試験体形状	
				細骨材	粗骨材	暴露時	採取コア
1	海水循環水槽 (干満帯)	15	N	酒匂川産 川砂 (2.64, 1.82)	酒匂川産 川砂利 (2.76, 1.10)	φ 15 × 30cm	-
			BA				
			BB				
			BC				
2	海水循環水槽 (干満帯・海中部)・ 海水シャワー場	2.5	N	栃木県 鬼怒川産 (2.59, -)	茨城県 岩間産 (2.65, -)	□ 15 × 15 × 15cm	-
			BB				
3	海水シャワー場	5.4	N	千葉県木更津産 山砂(2.61, 1.74)	北海道上磯町産 碎石(2.70, 0.33)	□ 60 × 90 × 60cm	φ 100mm
				再生骨材 (2.25, 12.3)	再生骨材 (2.50, 4.86)		
4	沖縄県那覇港(海上部)	15	N	台湾産川砂 (2.66, 1.17)	酒匂川砂産碎石 (2.76, 1.06)	□ 15 × 15 × 80cm	φ 68mm

\*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

通常の骨材と再生骨材の2種類を用いた(表-2 中で N3, NR3 と表記)。なお, 再生骨材の製造はコンクリートの解体プラントで行われた。

④試験体4

普通ポルトランドセメントを用いて, 150×150×800mm のコンクリート角柱試験体を作製した。W/Cは0.37 と0.50 の2種類である。

(2) 暴露環境

以下の2環境で暴露を行った。

a) 港湾空港技術研究所内の施設

港湾空港技術研究所内の海水循環水槽および海水シャワー場に試験体を暴露した。海水循環水槽は図-3 に示すサイクルで潮の干満が再現可能なものである。試験体1 および2 の一部は図-3 中の干満帯および海中部に設置した。海水シャワー場は, 海水循環水槽に貯められた海水をシャワー状にして1日2回(1回約3時間) 散布可能である。試験体2 の一部および試験体3 をここに暴露した。

b) 那覇港(海上部)

試験体4 は, 沖縄県那覇港の海上に位置する橋梁上部工の下側に設置された台上(DL+6~7m) に暴露した。

(3) 試験項目

以下の項目について測定を行った。

a) 塩化物イオン量

JISA 1154「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」に準拠して測定を行った。まず, コンクリートカッターを用いて, 試験体あるいは試験体から採取したコアにおける測定対象位置から厚さ10mm程度で試料を切り出した。この試料をまず約5mm以下に粗粉砕し, その後さらに粉の径が150μm以

下になるまで微粉砕した。この粉を2mol/Lの硝酸で溶解させ, 煮沸し, コンクリート中に含まれている塩化物イオンを硝酸溶液中に抽出させた。この溶液中の塩化物イオン濃度を電位差滴定装

表-2 配合

試験体	名前	W/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
			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
		0.55	172	313	764	1041
	BB2	0.40	172	430	658	1041
3	N3	0.55	158	288	786	1094
	NR3	0.55	168	305	675	975
4	N4	0.37	178	481	609	1080
		0.50	165	330	804	1061

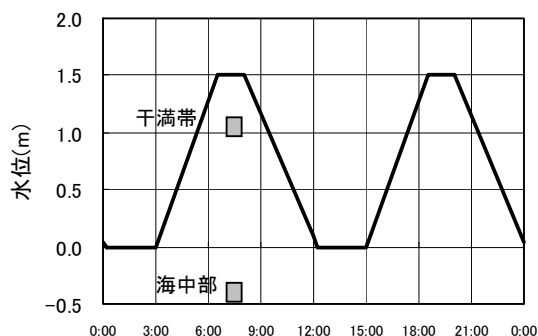


図-3 海水循環水槽の干満サイクル

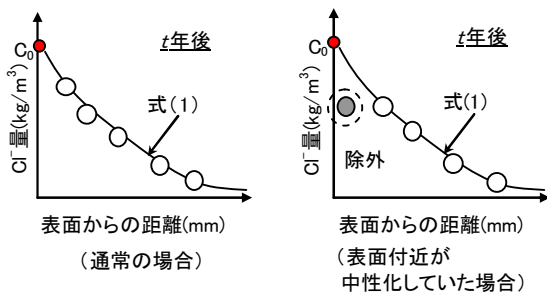


図-4 見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  の求め方

置を用いて測定し、この濃度からコンクリート  $1\text{m}^3$  当りに含まれる量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) に換算した。なお、ここで測定される塩化物イオンは、一般に「全塩化物イオン」と呼ばれ、コンクリート中に含まれる塩化物イオンの全量と考えられているものである。ここでは、この「全塩化物イオン」についても、「塩化物イオン」と表記することにする。

#### b) 見かけの塩化物イオン拡散係数

a) で求めたコンクリート内部での塩化物イオン量の分布を、物質の濃度拡散に関する「フィックの第二法則の解 (式 1)」で帰させることにより、見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  および表面塩化物イオン量  $C_0$  を計算した (図-4 参照)。なお、試験体 1 の場合は、塩化物イオンの浸透面が円柱側面であるため、座標系を直交座標系でなく円柱座標系としてフィックの第二法則の解を求め、帰算を行った<sup>7)</sup>。

また、表面付近に実際に存在する塩化物イオン量は、中性化やセメント水和物の溶出などの影響により、内部の値より低い値を示すことがある<sup>8)</sup>。このような特異なデータは帰算を行う際には削除した。また、暴露前からコンクリート中に含まれていた塩化物イオン量については考慮しなかった。

#### c) コンクリートの空隙量

以下の 2 種類の方法で求めた。なお、①水銀圧入法は、コンクリート中の全空隙量が求められると同時に、空隙径毎の空隙量分布 (細孔径分布) も求められる。一般的にコンクリート中の空隙構造を調査する際は、この方法で行われることが多い。②の方法は、①と比較すると非常に簡便にコンクリート中の全空隙量のみが求められる。

##### ①水銀圧入法

試験体から、粗骨材を取り除きながら  $5\text{mm}$  程度に砕いたモルタル片を採取し、水銀圧入法により、コンクリート中の細孔径分布を測定した。試料の採取位置は、試験体 1 においてはコンクリート表面から  $5\sim 15$ ,  $35\sim 45$ ,  $65\sim 75\text{mm}$  の深さの位置、試験体 3 においてはコンクリート内部 ( $10\text{mm}$  以深)、試験体 4 においては表面から  $0\sim 10$ ,  $50\sim 60\text{mm}$  である。なお、測定対象の空隙径の範囲は  $0.003\sim 400\mu\text{m}$  である。

##### ②質量測定による方法

コンクリートの飽和質量  $W_s$ 、乾燥質量  $W_d$  および飽和時の容積  $V_s$  を測定し、次式で空隙率  $P$  を求めた<sup>9)</sup>。

$$P = \frac{W_s - W_d}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_w} \quad (2)$$

ここで、 $\rho_w$ : 水の密度である。なお、 $W_s$  は水道水中に 7 日間以上浸せきさせた後に測定し、 $W_d$  は  $105^\circ\text{C}$  の環境に 7 日間以上放置した後に測定した。なお、試料の採取位置を付表-A.1 に示す。

#### d) 圧縮強度

円柱試験体および採取したコアに対して、JIS A 1108 に準拠して行った。

## 2.2 見かけの塩化物イオン拡散係数測定結果

図-5 に塩化物イオン量分布の測定結果の一例を示す。なお、全測定結果は付図-A.1 に示した。コンクリート内部に浸透した塩化物イオン量はセメントの影響を大きく受け、高炉セメント (BA, BB, BC) の場合に少なくなっていることが分かる。

図-6 に塩化物イオン量分布から求めた見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  を示す。なお、値の一覧は付表-A.1 に示した。 $D_{ap}$  は  $W/C$ 、セメントの種類の影響を大きく受けていることが分かる。また、一般的に知られているように、低  $W/C$  の場合や高炉セメント系の場合に  $D_{ap}$  が小さくなっていることが分かる。

図-7 に得られた  $D_{ap}$  を用いて鉄筋腐食開始時期  $t_{cor}$  を推定した結果を示す。なお、計算条件は以下のとおりである。

- ①塩化物イオン浸透予測は式 (1) を用いた。
- ②  $C_0$  は文献 1) における飛沫帯の値を参考にし、 $13\text{kg}/\text{m}^3$  と設定した。
- ③鉄筋腐食開始時期  $t_{cor}$  は、鉄筋位置の塩化物イオン量  $C$  が腐食発生限界塩化物イオン量  $C_{lim}$  に到達した時期とした。 $C_{lim}$  は港湾空港技術研究所内での実験結果<sup>4)</sup> を参考に、 $2\text{kg}/\text{m}^3$  とした。

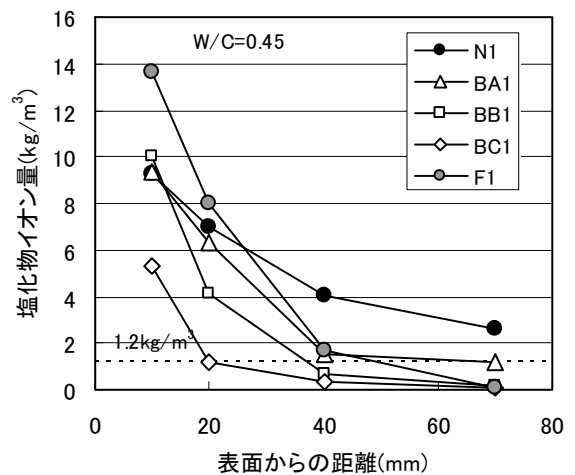


図-5 塩化物イオン量分布 (試験体 1)



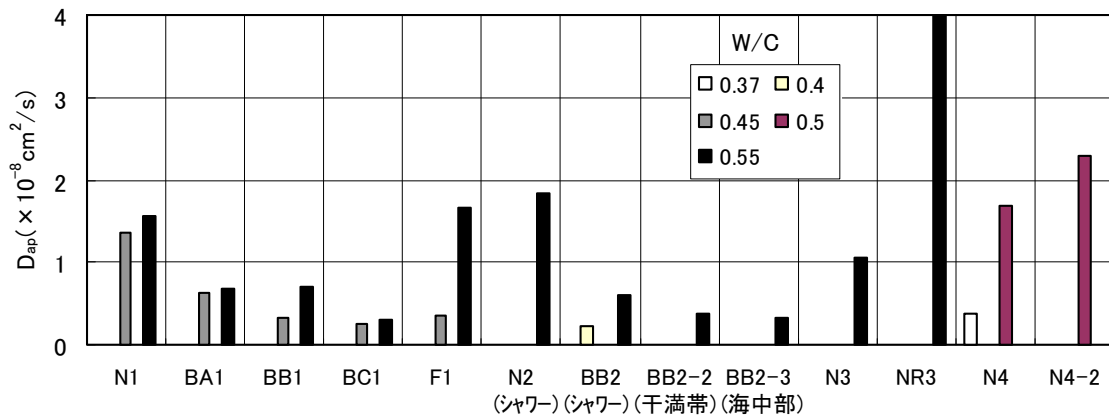


図-6 見かけの塩化物イオン拡散係数

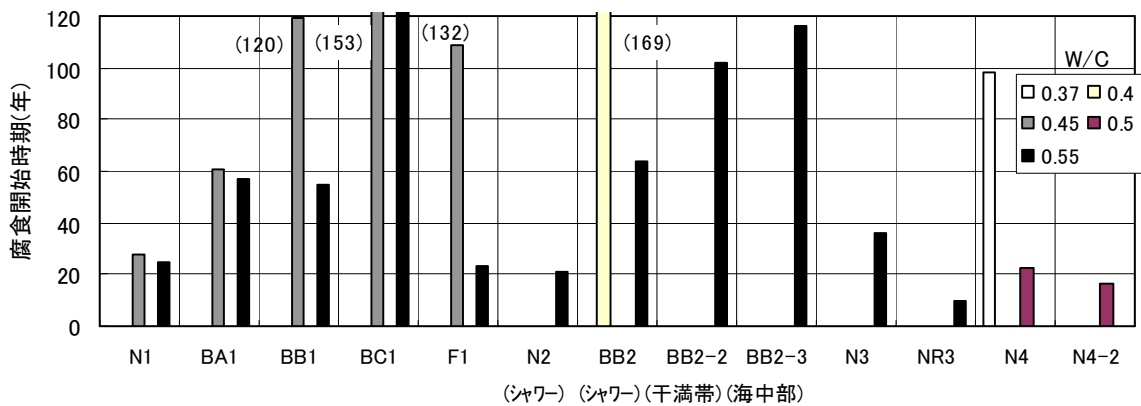


図-7 腐食開始時期推定結果

④鉄筋かぶりとは「港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>10)</sup>」を参考に、70mmとした ( $x=7(\text{cm})$ とした)。

図-7より、W/Cが小さい場合や高炉セメントの場合に  $t_{\text{corr}}$  が長くなっており、 $t_{\text{corr}}$  は  $D_{\text{ap}}$  の値に大きく依存していることが分かる。例えば、港湾 RC 構造物において一般的な配合である N2(普通ポルトランドセメント、W/C=0.55)では、上記計算条件においては20年程度と計算されるが、セメントに高炉セメントB種を用いたBB2(W/C=0.55)の場合は60年程度まで延びるといふ計算結果となる。

### 2.3 見かけの塩化物イオン拡散係数と各種要因との相関性

ここでは、コンクリートの品質を表す各種要因と見かけの塩化物イオン拡散係数との相関性を検討する。また、一般的に、コンクリート中の物質拡散性状はコンクリートの空隙構造と密接な関係があるため、特に空隙量に着目して検討を行う。

#### (1) 圧縮強度との相関性

図-8に圧縮強度と  $D_{\text{ap}}$  の関係を示す。一般的に知られているように、圧縮強度が増加するにつれて  $D_{\text{ap}}$  は減少する傾向にある。また、普通ポルトランドセメント(N)の場合と高炉セメント(B)

の場合で比較すると、圧縮強度が同程度でもBの方がNよりも  $D_{\text{ap}}$  が小さくなる。

#### (2) W/Cとの相関性

図-9にW/Cと  $D_{\text{ap}}$  の関係を示す。一般的に知られているよう

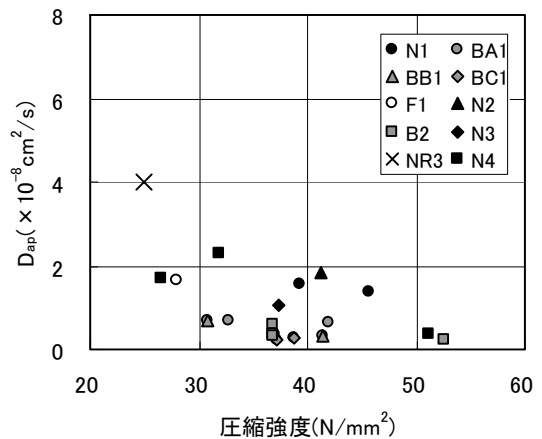


図-8 圧縮強度と  $D_{\text{ap}}$  の関係

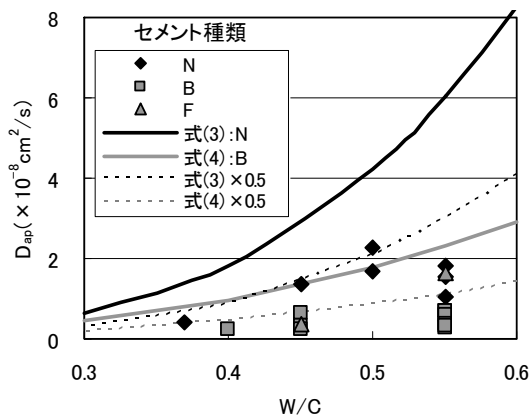


図-9 W/C と  $D_{ap}$  の関係

に、 $W/C$ が減少するにつれて  $D_{ap}$ は減少する傾向にある。また、セメント種類で比較すると、 $W/C$ が同程度でも Bの方がNよりも  $D_{ap}$ が小さくなる。なお、図中の曲線は土木学会示方書<sup>1)</sup>における  $D_{ap}$ の予測式の値であり、以下の2式で表される。

普通ポルトランドセメント(N)の場合：

$$\log_{10} D_{ap} = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (3)$$

高炉セメント(B)の場合：

$$\log_{10} D_{ap} = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (4)$$

今回の値は N, B いずれの場合においても、上記予測式の 1/2 程度の値となるものが多かった。

### (3) 空隙量との相関性

ここでは、空隙量の測定方法毎に  $D_{ap}$ との相関性を検討する。

図-10に質量測定により求めた空隙率と  $D_{ap}$ の関係を示す。セメントが N の場合、一般的に知られているように、空隙率の増加とともに  $D_{ap}$ は増加する傾向にある。セメントが B の場合も若干の増加傾向が見られる。しかしながら、N の場合と傾向が大きく異なり、同じ空隙率でも  $D_{ap}$ が大幅に小さくなっている。なお、セメントが N と B で傾向が異なる事例は、多くの既往の研究で確認されている現象である。

図-11に水銀圧入法により求めた全細孔量と  $D_{ap}$ の関係を示す。図-10同様に、セメントが N の場合については全細孔量の増加とともに  $D_{ap}$ は増加する傾向にある。しかしながら、回帰直線の相関係数(図-10~12中に記載)で比較すると、質量測定により求めた空隙率の場合に比べて相関係数は小さくなっていた。

図-12に毛細管空隙量と  $D_{ap}$ の関係を示す。ここで、毛細管空隙量とは、一般的に空隙径が 0.015~15  $\mu\text{m}$  の範囲のものを指し、コンクリートの物質拡散性状には密接な関係があるといわれている<sup>1)</sup>。しかしながら、図-11の場合と同様に、セメントが N の場合について回帰直線の相関係数で比較すると、質量測定によ

り求めた空隙率の場合に比べて相関係数は小さくなっていた。

以上のことから、コンクリート中の空隙量と  $D_{ap}$ の相関については、細孔径分布から得られる結果との相関性と、質量測定により得られる結果との相関性は、得られたサンプル数は少ないものの、少なくとも同等以上であることが見て取れる。また、セメン

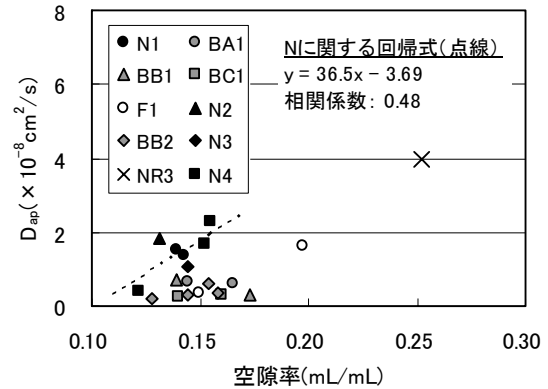


図-10 空隙率と  $D_{ap}$  の関係

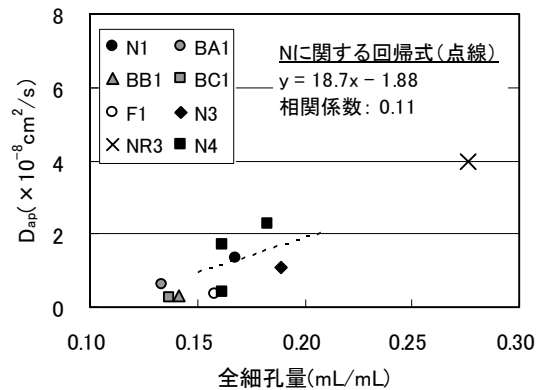


図-11 全細孔量と  $D_{ap}$  の関係

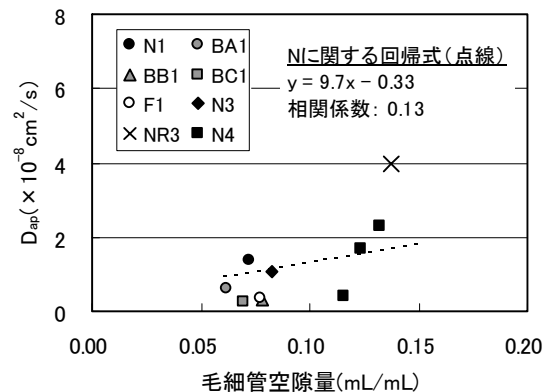


図-12 毛細管空隙量と  $D_{ap}$  の関係

トが普通ポルトランドセメント (N) の場合と高炉セメント (B) の場合で相関性が大きく異なることも確認された。

## 2.4 まとめ

海洋環境下に暴露されたコンクリート試験体における見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  を求め、 $D_{ap}$  に及ぼす諸要因の影響について検討した結果、以下のことが確認された。

(1) 一般的に知られているように、水セメント比 W/C が減少するにつれて、 $D_{ap}$  は減少した。また、普通ポルトランドセメントと高炉セメントの場合で比較すると、W/C が同じでも高炉セメントの方が  $D_{ap}$  は小さい値を示した。

(2) コンクリート中の空隙量と  $D_{ap}$  の相関については、細孔径分布から得られる結果との相関性と、質量測定により得られる結果との相関性は、得られたサンプル数は少ないものの、少なくとも同等以上であることが確認された。また、セメントが普通ポルトランドセメントの場合と高炉セメントの場合で相関性が大きく異なることも確認された。

## 3. 実構造物における調査結果

### 3.1 概要

文献 2) において、塩害環境の厳しさを表す指標である表面塩化物イオン量  $C_0$  の評価手法を検討するために、全国の港湾 RC 構造物におけるコンクリート中の塩化物イオン量に関する調査結果が収集されている。この際、見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  も同時に測定されている。また、数港の棧橋構造物における改良工事の際に解体された鉄筋コンクリート部材を港湾空港技術研究所内に搬入し、解体調査が行われている。これらの調査結果を用いて、実際の港湾 RC 構造物における  $D_{ap}$  の実態を把握する。また、2. で比較的良好な相関の見られた、コンクリートの空隙率  $P$  と  $D_{ap}$  の相関性を確認する。

### 3.2 調査対象構造物および調査方法概略

全国各地の港湾 RC 構造物で  $D_{ap}$  を求めた事例を収集した<sup>2)</sup>。一覧を付表-B.1~B.10 に示す。なお、文献 2) に掲載されている全データのうち、以下のものは掲載しなかった。1) ひび割れ等の変状が見られる箇所からコアを採取していた場合、2)  $D_{ap}$  を求める際に必要な塩化物イオン量のデータ数が 3 個未満の場合、3) 断面修復材からコアが採取されていた場合、4) 塩化物イオン量の分布が深さ方向で一様な場合、5) 塩化物イオン浸透量が少なく、表面塩化物イオン量  $C_0$  が  $1\text{kg/m}^3$  以下の場合。また、付表-B.11 については、現地で解体された部材を港湾空港技術研究所内に搬入し、コアを採取した後、各種試験を行ったものである。なお、付表-B.1~B.11 に関して、コンクリートの配合および使用材料に関する資料は全く残っていない。

以下に調査方法概略を示す。

#### (1) コア採取方法

現地の構造物からのコアの採取は、全て現地に足場を設置することにより行った。その際の作業期間の選定においては、1日当りの調査時間を極力長くするため、満潮と干潮の潮位差の大きい大潮の日周辺を選定した。まず、小型船で棧橋下に入り、目視および打音検査により構造物の劣化状況を確認した後、足場が設置可能と推測される、比較的劣化の少ない箇所を調査対象に選定し、足場を設置した。船上から電動ドリルで穴を開け、止め具を取り付け、そこにチェーンブロックを設置し、足場を所定の高さまで引き上げた。コアの採取は、足場上からコアドリル固定用の穴を開け、コアドリルを設置後、コアを採取した。コア採取後は、コア孔を無収縮モルタルで補修し、その後足場を撤去した。

現地で解体され、研究所内に搬入された部材の場合は、足場設置が不要である以外は同様である。

#### (2) コンクリート中の塩化物イオン量測定方法

2.1 と同様のため省略する。なお、文献 2) に掲載されていない塩化物イオン量分布測定結果についてのみ付図-B.1 として掲載した。

#### (3) 見かけの塩化物イオン拡散係数

2.1 と同様のため省略する。

#### (4) 空隙率

2.1 の質量測定による方法で行った。試料は、湿潤期間と乾燥期間を短くするため、コアを 10mm 程度にスライスしたものをを用いた。なお、試料はコンクリート内部から採取した。

### 3.3 調査結果

#### (1) $D_{ap}$ の分布

図-13 にオーダー別の度数分布を示す。なお、付表-B.1~B.11 において、同一構造物内から採取したコアから得られた結果につ

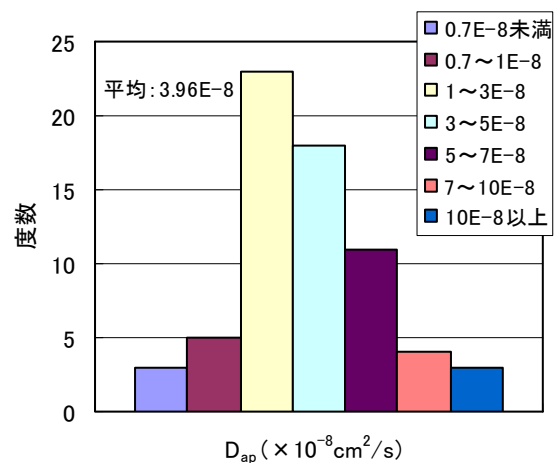


図-13 実構造物における  $D_{ap}$  の度数分布

いては、コンクリートの品質は同じと考えられるため、 $D_{ap}$ の平均値を求め、その値を採用した。これは、場所によってコア採取数が異なった場合、コア採取数が多い場所の影響が現われるのを防ぐためである。その結果、総サンプル数は64個である。

図-13において、 $D_{ap}=1\sim3\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ の度数が最大であった。また平均値は $3.96\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ であった。前述のように、コンクリートの配合および使用材料に関しては不明なため、このばらつきの原因を特定するのは困難である。ここでは、前述の図-9における  $W/C$  と  $D_{ap}$  の結果を元に、用いられていたコンクリートの品質および  $W/C$  について考察を行う。「港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>10)</sup>」において、港湾 RC 構造物の最大  $W/C$  は 0.55 が参考値として示されている。図-9 において、セメントが普通ポルトランドセメントで  $W/C=0.50\sim 0.55$  付近の  $D_{ap}$  は、 $2\sim 3\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$  付近のようである。この結果と図-13の結果より、今回測定対象となった多くの実構造物における  $W/C$  は 0.50～0.55 周辺の値であった可能性が高いと推測される。

ここで、 $D_{ap}$ の値が実際の RC 構造物における塩害劣化が開始する時期すなわち鉄筋腐食が発生する時期に対して、どの程度影響を及ぼすかを分かりやすくするために、2.2(1)と同様の方法で鉄筋腐食開始時期の推定を行う。2.2(1)と異なるのは、仮定条件④のかぶりにおいて、5, 7, 10cmの3種類に変更した点である。

図-14に腐食開始時期の推定結果を示す。なお、 $D_{ap}$ は $0.7\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ 、 $1\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ 、 $2\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ 、 $3\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$  および $5\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ の5種類を用いた。 $D_{ap}$ が $5\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ 程度であれば、かぶりが10cm確保されていても20年もしないうちに腐食が開始するという計算結果となる。一方、 $D_{ap}$ が $0.7\times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ 程度であれば、かぶりが7cm確保されていれば50年以上経過しないと腐食が開始しない。ただし、この $D_{ap}$ の場合でも、かぶりが5cmと小さければ20年程度で腐食が開始する。改めて述べるまでもないが、塩害を受ける RC 構造物の耐用年数について検討す

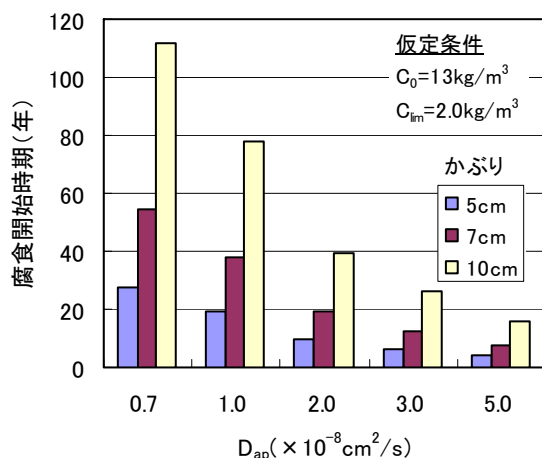


図-14 腐食開始時期の推定結果

る際は、 $C_0$ 、 $D_{ap}$ そしてかぶりをふまえた総合的な評価が必要である。

#### (2) 空隙率との相関

図-15に空隙率と $D_{ap}$ の関係を示す。なお、2.における試験体の結果も掲載した。ここで、実構造物から採取したデータに関しては、著者らが直接採取したコアに対する結果のみを用いた。この際、コア採取箇所周辺にひび割れや浮きが多く見られた場合については対象外とした。これは、ひび割れ部からの塩化物イオンの浸透が生じることで $D_{ap}$ の正確な評価が困難となるためである。また、試験体のデータに関しては、普通ポルトランドセメントの場合のみを用い、骨材が再生骨材の場合は対象外とした。図において、空隙率と $D_{ap}$ の間には、2次関数の関係で良い相関がみられた。この結果は、質量測定により求めた空隙率を測定することで、比較的簡易に実構造物における $D_{ap}$ の推定が可能であることを意味している。ただし、図-10の結果より、セメントが普通ポルトランドセメントと高炉セメントの場合で傾向が大きく異なっている。よって、図-15から $D_{ap}$ が推定可能な場合は、セメントが普通ポルトランドセメントと特定される場合のみである。

### 3.4 まとめ

港湾 RC 構造物における見かけの塩化物イオン拡散係数 $D_{ap}$ に関して調査を行った結果、得られた知見を以下に示す。

(1)  $D_{ap}$ の値は大きく変動していた。ただし、コンクリートの配合および使用材料に関しては不明なため、その原因について考察するのは困難である。

(2) 2.の暴露試験体の結果同様、 $D_{ap}$ と空隙率の間には2次関数の関係で良い相関関係が認められた。この結果は、質量測定により求めた空隙率を測定することで、比較的簡易に実構造物における $D_{ap}$ の推定が可能であることを意味している。なお、この際、セメントの種類が特定されている必要がある。

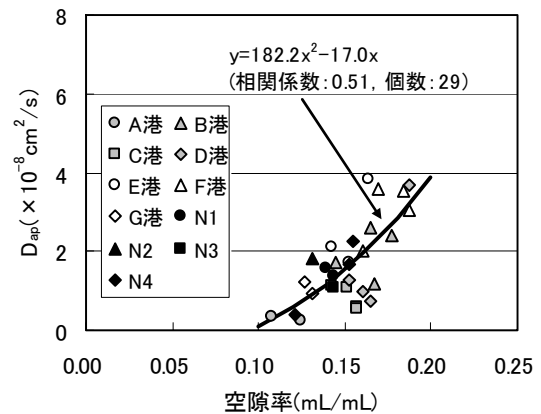


図-15 空隙率と $D_{ap}$ の関係

#### 4. 簡易な拡散係数推定手法の適用性に関する検討

これまでの結果より、質量測定から求められる空隙量と見かけの拡散係数  $D_{ap}$  の間には良好な関係が確認された。すなわち、空隙量から  $D_{ap}$  が推定可能となる。ここではこの簡易な  $D_{ap}$  の推定手法が適用可能な事例について考察を行う。

##### 4.1 維持管理時における塩化物イオン量分布推定への適用

塩害が主な劣化要因である港湾 RC 構造物の維持管理を行う際においては、コンクリートからコアを採取し、コンクリート表面の塩化物イオン量  $C_0$  および見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  を求めることや、鉄筋位置における塩化物イオン量と腐食発生限界塩化物イオン量を比較することが有効である。しかしながら、これらの検討を行うためには、通常鉄筋位置より奥までコアを採取するため、コアの長さは 100mm 以上となることが多く、また、大掛かりな足場や機材を必要とする。ここで、本手法を用いれば、表面部のみからコアを採取し、その空隙率を求めることで、 $D_{ap}$  を推定することができる。しかしながら、コンクリート内部の深さ方向で空隙率が分布する可能性もある。図-16 は 2. で用いたコンクリート内での全細孔量の分布を示したものである。コンクリートの表面と内部で若干の違いはあるものの、顕著な差が現われておらず、表面と内部の値はほぼ同程度であった。すなわち、表面付近で求めた空隙率から  $D_{ap}$  を推定することは可能であるといえる。ただし、表面部での劣化（ひび割れ、セメント水和物の溶出など）が顕著な場合は、適用が困難であると考えられる。

また、表面部から採取したコアを用いて最表面付近の塩化物イオン量を測定することも可能なため、表面塩化物イオン量  $C_0$  の推定も可能となる。この手法の詳細および検討結果については 5. で述べる。

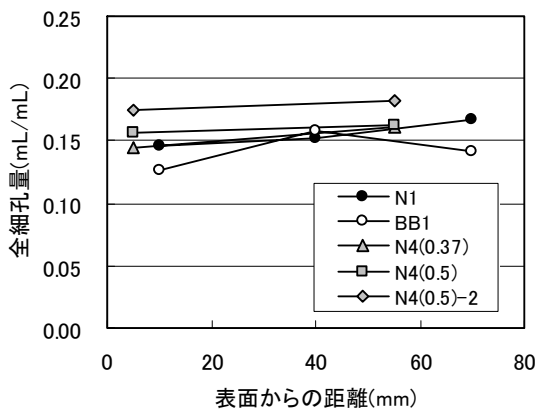


図-16 コンクリート内での全細孔量の分布

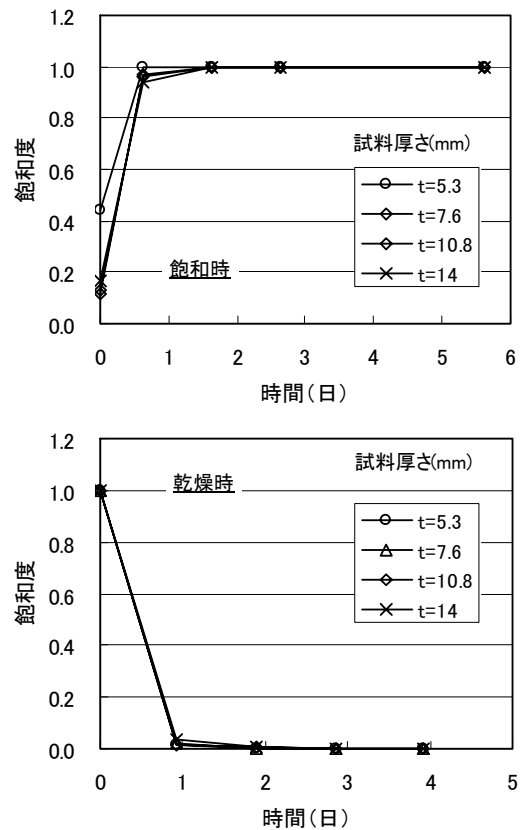


図-17 飽和度変化（上：飽和時，下：乾燥時）

##### 4.2 初期の品質管理試験への適用

本手法は、 $D_{ap}$  の推定がコンクリートの質量測定のみで行えるため、初期におけるコンクリートの品質管理にも適していると考えられる。例えば、 $\phi 100 \times 200$ mm の管理用供試体を 10mm 程度の厚さに切断し、飽和質量・容積、および乾燥質量を測定すれば、比較的短期間で  $D_{ap}$  が推定可能となる。この際、飽和質量を求めるための浸せき期間、乾燥質量を求めるための乾燥期間については適宜定める必要がある。図-17 は 3. で用いた試料の一部について、質量の時間変化を測定し、飽和度に換算したものである。なお、飽和度とは、コンクリート内の空隙中に占める水の量の割合を示す。今回用いた程度のコンクリート品質（一般的な港湾 RC 構造物に用いられるコンクリート）で、厚さ 10mm 程度であれば、試料の飽和および乾燥は両者ともに 3 日程度で定常状態となっている。よって、湿潤質量および乾燥質量を求めるための期間は 3 日程度でよいこととなる。すなわち、計 6 日程度で空隙率が測定でき、 $D_{ap}$  の推定が可能となる。

一般的な  $D_{ap}$  の評価試験として、NaCl（塩化ナトリウム）溶液中に浸せきさせる方法（浸せき法）、電気的な駆動力により促進させる方法（電気泳動法）などがある<sup>2)</sup>。しかしながら、浸せき

法は最低3ヶ月、電気泳動法は通常2週間程度要する。また、電気泳動法は得られた試験値に対する若干の補正が必要となる。精度的には今回の方法は劣るかもしれないが、簡便さと実用性の点から考えると、有効となる場合もあると考える。

## 5. 簡易な拡散係数推定手法を用いた塩化物イオン量分布推定例

### 5.1 概要

港湾RC構造物の維持管理を行う際、塩害による劣化状況の定量的把握および劣化の将来予測を行うためには、コンクリートからコアを採取し、コンクリート表面の塩化物イオン量  $C_0$  および見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  を求めることや、鉄筋位置における塩化物イオン量と腐食発生限界塩化物イオン量を比較することが有効である。これらの検討を行うためには、通常鉄筋位置より奥までコアを採取するため、コアの長さは10cm以上となることが多く、結果として大掛かりな足場や機材が必要となる。そこで本研究では、比較的簡易な機材を用いて表面部のみからコアを採取し、質量測定により空隙量を求め、 $D_{ap}$  および  $C_0$  を推定する手法を試みた。

### 5.2 試験体

試験体として、鳥取県境港の棧橋上部工の改良工事の際に撤去された鉄筋コンクリートはり部材を用いた。図-18にははり部材の断面図を示す。1965年に供用開始され、2004年に撤去が行われた(約39年経過)。なお、コンクリート材料に関する情報は全く残っていない。セメントに関しては、文献12)によれば1960年代における当該地方での高炉セメントの使用の比率(全体のセメント使用量に対する比率)は2%に満たないため、使用されたセメントは普通ポルトランドセメントである可能性が高い。鉄筋

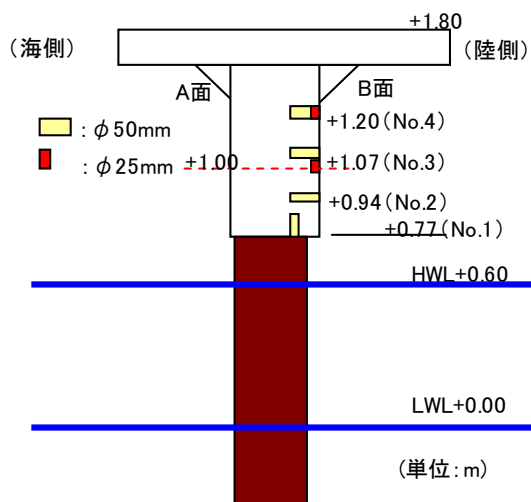


図-18 棧橋上部工(はり)断面図

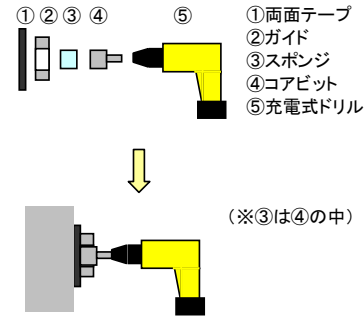


図-19 使用機材および実施状況

のかぶりの最小値(実測値)は、スターラップでは35mm(A面:海側)および85mm(B面:陸側)、主鉄筋では50mm(A面)および80mm(B面)程度であった。そのため、A面では激しい浮きが見られた。B面では腐食ひび割れが主鉄筋に沿って観察されたが、激しい浮きは観察されなかった。

### 5.3 コア採取方法

以下の2つの方法でコアの採取を行った。

#### (1) 通常の方法

アンカーを設置した後、外部電源が必要な通常のコアドリルを取り付け、 $\phi 50\text{mm}$ のコアをはり底面(コアNo.1)およびB面(コアNo.2, 3, 4)から採取した(図-18参照)。

#### (2) 表面部のみからコアを採取する方法

外部電源の確保が困難な場合もしくは通常の方法で使用する機材の準備・搬入が困難な場合を想定し、今回は小型かつ外部電源が不要である充電式ドリルを用いることとした。使用機材一式を図-19に示す。コア採取用のガイド、ガイド固定用の両面テープ、コアビット、コアビット湿潤用のスポンジ、充電式ドリルから構成されている。コア採取用のガイドを両面テープで接着した後、外径 $\phi 30\text{mm}$ のコアビット(全長35mm)を充電式ドリルに取り付け、コア径 $\phi 25\text{mm}$ 、長さ20mm程度の小径コアを採取した。この際、コアNo.3と同じ高さから小径コアを1本採取し、コアNo.4と同じ高さから小径コアを4本採取した(以下、それぞれS3, S4と表記)。なお、文献13)において、 $\phi 25\text{mm}$ 程度の小径コアを用いて塩化物イオン量測定を行う際には、コアが3本程度必要であると示されており、今回はそれを参考にした。

### 5.4 試験項目

#### (1) コンクリート中の塩化物イオン量

試料の採取位置はコアによって以下のように変更した。

$\phi 50\text{mm}$ のコアについてはコンクリート表面から5~15mm、25~35mm、45~55mm、65~75mm、85~95mmの5点の深さから試料を採取した(付図-B.1参照)。また、得られた塩化物イオン量分布から、表面塩化物イオン量  $C_0$  および見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  の算出を行った。

φ25mmのコアについては、3~11mm, 11~19mmの2点とした。なお、S3についてはコア1本から採取した試料を用い、S4についてはコア3本から採取した試料を混合した後、分析に供した。分析方法については、2.および3.で述べた方法と同様である。

(2) 空隙率

φ50mmのコアNo.2, 3およびφ25mmの小径コアS3, S4に対して測定を行った。なお、塩化物イオン量測定の際に用いたコアとは異なるコアを用いた。φ25mmの小径コアの空隙率測定の際に用いた試料の質量は、S3が10g程度、S4が30g程度である。測定方法については2.および3.で述べた方法と同様である。

5.5 試験結果

(1) 塩化物イオン量

図-20に塩化物イオン量分布を示す。φ50mmおよびφ25mmのいずれのコアにおいても、表面付近で値が減少している。これはコンクリートが中性化し、コンクリート中に存在(固

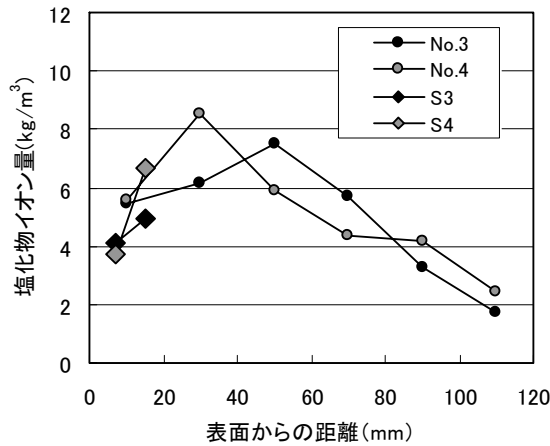


図-20 塩化物イオン量分布

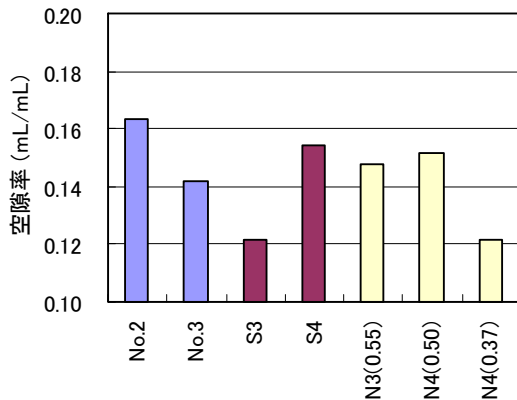


図-21 コンクリートの空隙率

定)されていた塩化物イオンが内部へ移動したためと推測される<sup>7)</sup>。φ50mmおよびφ25mmの結果を比較すると、No.3とS3, No.4とS4のいずれも概ね同様の傾向を示した。また、コア3本から採取したS4の方が比較的良く一致していた。このことから、試料は文献13)に示されているように、コア径がφ25mm程度の場合は、1箇所につき3本程度採取した方が望ましいと言える。

(2) コンクリートの空隙率および $D_{ap}$ の推定

図-21にコンクリートの空隙率を示す。なお、比較として、セメントが普通ポルトランドセメントでW/Cの異なるコンクリート試験体(2における試験体3および4)における測定結果を同図中に示した。φ50mmのコアNo.2, 3と比較すると、試料量が30g程度のS4はほぼ同程度であったが、試料量が10g程度のS3はやや小さめであった。これは、骨材分布のばらつき(粗骨材量のばらつき)の影響が現われたものと考えられる。また、図中においてS4の値はW/C=0.55であるN3(0.55)およびW/C=0.50であるN4(0.50)とほぼ同程度であった。

表-3に、3.の図-15で得られた空隙率と $D_{ap}$ の関係を用いて、コアの空隙率から $D_{ap}$ を推定した結果を示す。S4の $D_{ap}$ はNo.3とは同程度であったが、他のコアとはやや値が異なる結果となった。

(3) 表面塩化物イオン量 $C_0$ の推定

図-20の表面付近での塩化物イオン量の測定結果、表-3の $D_{ap}$ 推定結果および供用年数( $t=39$ 年)を式(1)に代入することにより、 $C_0$ の値の推定を試みる。ここでは、以下の2つの条件を仮定して、 $C_0$ を推定する。

①表面部(20mm程度)から採取したコア(S4)中で測定された塩化物イオン量の最大値を用いる場合

図-20において、コアS4中で最大値を示した深さ11~19mm(図-22中の点①)の値と、式(1)の解が一致するように $C_0$ を求める。

②実際の塩化物イオン量分布(コアNo.4)における最大値を用いる場合

図-20において、コアNo.4中で最大値を示した深さ25~35mm(図-22中の点②)の値と、式(1)の解が一致するように $C_0$ を求める。

このようにして $C_0$ 値およびコンクリート内部の塩化物イオン量分布を推定した結果を図-22に示す。推定条件①の場合は実測値の傾向と大きく異なる結果となった。これはコアS4の採取範囲(表面から20mm程度)内での塩化物イオン量の最大値(図-22中の点①)が、実際の最大値(図-22中の点②)よりも小さな値を示した影響が大きいと考えられる。すなわち、コンクリートの中性化が、コアを採取した深さよりも内部まで進行していた場合に、測定された塩化物イオン量の値を用い、今回の方法で $C_0$ を予測した際は、実際よりも小さな値が得られる可能性が高

表-3  $C_0$ ,  $D_{ap}$ および空隙率一覧

コアNo.	$C_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$D_{ap}$ (*10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	空隙量 (mL/mL)
1	10.5	4.02	-
2	11.6	3.84	0.164
3	15.8	2.10	0.142
4	11.0	3.33	-
S4	-	1.70*	0.154

\*推定値

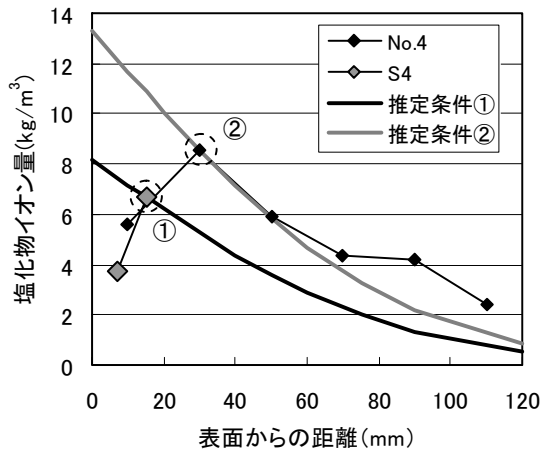


図-22  $C_0$ および塩化物イオン量分布推定結果

い。

そこで、実際の塩化物イオン量分布（コア No.4）における最大値（中性化が進行していない箇所）の値（図-22中の点②）を用いて  $C_0$  値の推測を行ったのが推定条件②の場合である。この場合はφ50mmのコアにおける実測値と概ね同様な傾向を示した。このことは、コアを採取した深さの範囲内で実際の塩化物イオン量分布における最大値が存在した場合においては、比較的良好な精度で  $C_0$  および内部の塩化物イオン量分布の推定が可能であることを示している。

今回、表面部での中性化の進行が激しく、表面部から採取したコアの結果のみを用いて  $C_0$  および内部の塩化物イオン量分布の推定した結果は、実際よりもかなり小さな値となった。しかしながら、海洋環境下に位置する RC 構造物は、水分の供給をしばしば受けるため、一般的に中性化の進行速度は極めて小さい<sup>14)</sup>。そのため、今回の手法でもある程度の精度で予測が可能であることも多いと考える。

## 5.6 まとめ

本章での検討から得られた知見を以下に示す。

コンクリート構造物の表面部のみから小径のコア（φ25mm、長さ20mm程度）を採取して、表面付近の塩化物イオン量および空隙率の測定を行うことで、見かけの塩化物イオン拡散係数

$D_{ap}$  を推定し、表面塩化物イオン量  $C_0$  およびコンクリート内部の塩化物イオン量の分布の推定が可能であることを確認した。ただし、コンクリートの中性化がコアを採取した深さよりも内部まで進行していた場合に、測定された塩化物イオン量の値を用いて  $C_0$  を予測した際は、実際よりも小さな値が得られる可能性が高い。

今回の方法は、電源もしくは通常のコア採取作業に必要な機材の確保が困難な場合、あるいは極力簡易かつ安価に塩化物イオン浸透状況の推定を行いたい場合を想定したものである。あくまで、基本は通常のコア採取方法が理想である。しかしながら、何らかの制約条件の下でそれが困難な場合、このような簡便な手法に代えて検討を行うことも可能である。

## 6. 結論

本研究では、港湾コンクリート構造物において、塩害による鉄筋腐食照査を行うために必要である見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  について、まず、コンクリート試験体を海洋環境下に暴露することにより、コンクリートの品質を表す諸指標が  $D_{ap}$  に及ぼす影響について検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

(1) 一般的に知られているように、水セメント比  $W/C$  が減少するにつれて、 $D_{ap}$  は減少した。また、普通ポルトランドセメントと高炉セメントの場合で比較すると、 $W/C$  が同じでも高炉セメントの方が  $D_{ap}$  は小さい値を示した。

(2) コンクリート中の空隙量と  $D_{ap}$  の相関については、細孔径分布から得られる結果との相関性と、質量測定により得られる結果との相関性は、得られたサンプル数が少ないものの、少なくとも同等以上であることが確認された。また、セメントが普通ポルトランドセメントの場合と高炉セメントの場合で相関性が大きく異なることも確認された。

次に、港湾 RC 構造物における  $D_{ap}$  の値を把握することを主目的として、全国の湾 RC 構造物からデータ収集を行い、この  $D_{ap}$  の分布について検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

(3)  $D_{ap}$  の値は大きく変動していた。ただし、コンクリートの配合および使用材料に関しては不明なため、その原因について考察するのは困難である。

(4) コンクリート試験体の結果同様、 $D_{ap}$  と空隙量の間には2次関数の関係で良い相関関係が認められた。この結果は、質量測定により求めた空隙量を測定することで、比較的簡易に実構造物における  $D_{ap}$  の推定が可能であることを意味している。なお、この際、セメントの種類が特定されている必要がある。



また、以上の結果を踏まえ、簡易な  $D_{ap}$  の推定手法およびコンクリート中の塩化物イオン量分布推定手法についての検討を試みた。その結果、得られた知見を以下に示す。

(5) コンクリート構造物の表面部のみから小径のコア ( $\phi$  25mm, 長さ 20mm 程度) を採取して、表面付近の塩化物イオン量および空隙率の測定を行うことで、見かけの塩化物イオン拡散係数  $D_{ap}$  を推定し、表面塩化物イオン量  $C_0$  およびコンクリート内部の塩化物イオン量の分布の推定が可能であることを確認した。ただし、コンクリートの中性化がコアを採取した深さよりも内部まで進行していた場合に、測定された塩化物イオン量の値を用いて  $C_0$  を予測した際は、実際よりも小さな値が得られる可能性が高い。

(2006年6月16日受付)

### 謝辞

本調査におけるデータ収集は、国土交通省各地方整備局および港湾管理者の大勢の皆様のご協力により実施することができました。また、平成16年度の現地調査は、塩釜港湾・空港整備事務所、新潟港湾・空港整備事務所、清水港湾整備事務所、広島港湾・空港整備事務所、境港湾・空港整備事務所の御協力により実施することができました。

非常に多くの方々にご協力を頂いており、ここに全員の御名前を記すことができませんが、御協力頂いた皆様方にこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

### 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) 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
- 3) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数の試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向，コンクリート技術シリーズ55，2003.9
- 4) 山路徹・青山敏幸・T.U.Mohammed・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
- 5) 早川健司・山路徹・濱田秀則：海洋環境下に暴露した再生コンクリートの強度特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.265-2708，2001
- 6) 山路徹・小牟禮建一・濱田秀則：塩害環境下に15年間暴露されたコンクリートの耐久性および表面被覆材による塩害防止効果，港湾空港技術研究所報告，第43巻，第2号，pp.73-109，2004.6
- 7) 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
- 8) 例えば，小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.1-14，1991.8
- 9) 久田真，大井才生，尾口本一，長滝重義：モルタルからのカルシウムの溶出に伴うセメント水和物の組成と硬化体物性の変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.223-228，2000
- 10) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上），pp.334-338，1999.4
- 11) 例えば，佐々木謙二・品田健太・佐伯竜彦：セメント系硬化体の細孔構造と塩化物イオン拡散係数の関係に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第5巻，pp.275-280，2005.10
- 12) 鐵鋼スラグ協会，鐵鋼スラグの高炉セメントへの利用（平成16年度版），p.8，2004
- 13) 例えば，伊藤始・水川靖男・野永健二・佐原晴也：小径コアによる塩化物イオン量測定方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1665-1670，2002
- 14) 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

付録

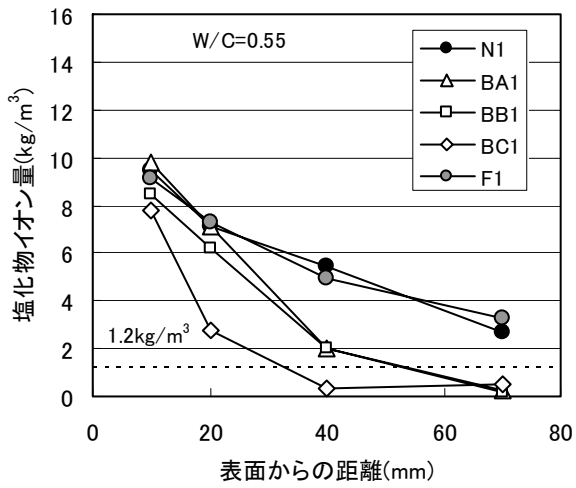
付録A 暴露試験における調査結果一覧

2.の暴露試験における調査結果一覧を付表-A.1に、塩化物イオン量分布結果を付図-A.1に示す。なお、N4、N4-2の暴露環境は沖縄県那覇港の海上部であるが、N4-2については、暴露開始後の15ヶ月間は同港の干満帯に暴露されており、その後、N4と同様の海上部に暴露された。

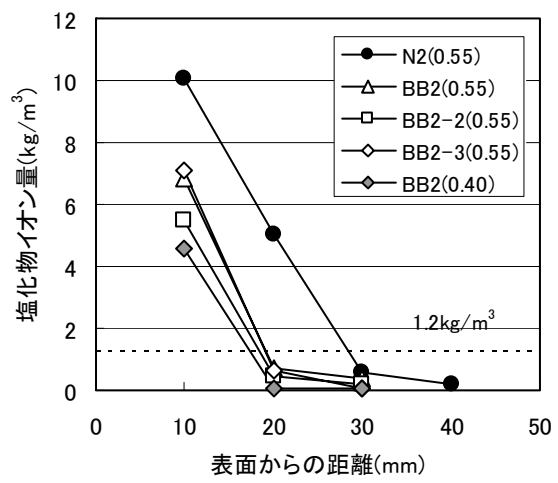
付表-A.1 暴露試験における調査結果一覧

試験体	名前	W/C	拡散係数 (*10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	空隙率(mL/mL)					圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		
				①水銀圧入法			②質量測定		暴露前	調査時	
				全細孔量	毛細管空隙量*	試料採取位置 (mm)	空隙量	試料採取位置 (mm)			
1	N1	0.45	1.36	0.168	0.072	65-75	0.143	50以深	37.5	45.7	
		0.55	1.55	-	-	-	0.139	50以深	33.1	39.3	
	BA1	0.45	0.63	0.134	0.062	65-75	0.165	50以深	38.1	41.9	
		0.55	0.67	-	-	-	0.144	50以深	32.6	32.8	
	BB1	0.45	0.32	0.141	0.078	65-75	0.173	50以深	33.5	41.4	
		0.55	0.70	-	-	-	0.139	50以深	26.9	30.8	
	BC1	0.45	0.25	0.137	0.070	65-75	0.140	50以深	29.5	37.1	
		0.55	0.29	-	-	-	0.160	50以深	25.3	38.8	
	F1	0.45	0.35	0.158	0.078	65-75	0.150	50以深	46.0	37.0	
		0.55	1.65	-	-	-	0.197	50以深	27.9	28.0	
2	N2	0.55	1.83	-	-	-	0.131	50以深	41.2	-	
	BB2	0.55	0.60	-	-	-	0.154	50以深	36.9	-	
	BB2-2(干満)		0.38	-	-	-	0.158	50以深		-	
	BB2-3(海中)		0.33	-	-	-	0.144	50以深		-	
BB2	0.40	0.23	-	-	-	0.128	50以深	52.5	-		
3	N3	0.55	1.06	0.189	0.082	内部	0.144	40-50	-	37.4	
	NR3	0.55	4.00	0.276	0.137	内部	0.252	40-50	-	25.0	
4	N4	0.50	0.37	0.39	0.162	0.116	50-60	0.122	内部	-	51.2
	N4-2		1.68	0.162	0.124	50-60	0.152	内部	-	26.5	
			2.28	0.183	0.132	50-60	0.155	内部	-	31.9	

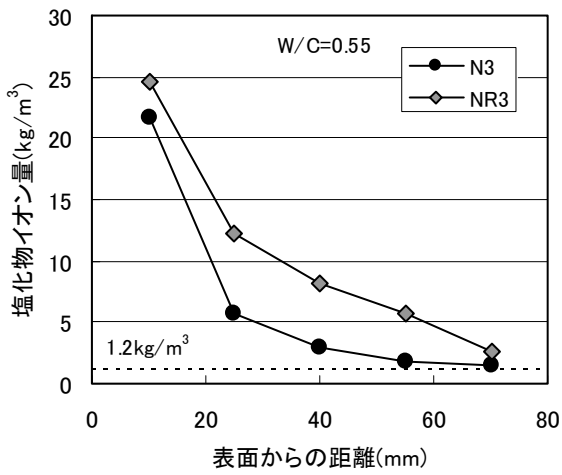
\*空隙径の対象範囲:試験体1および3(0.016~15.2μm),試験体4(0.0165~15μm)



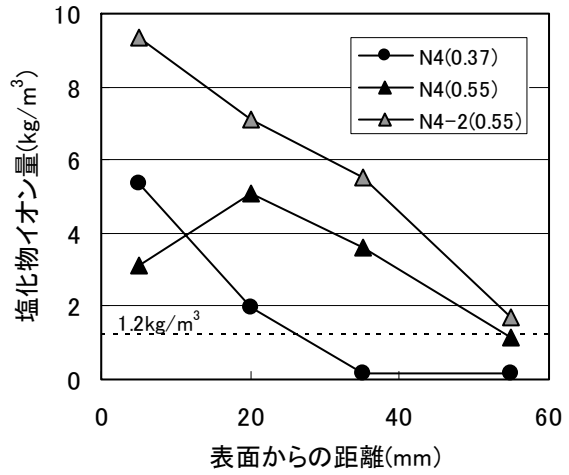
(試験体 1)



(試験体 2)



(試験体 3)



(試験体 4)

付図-A.1 塩化物イオン量測定結果

## 付録B 実構造物における調査結果一覧

各港における調査結果を付表-B.1～B.10に、解体調査結果を付表-B.11に示す。また、解体調査における塩化物イオン量分布測定結果を付図-B.1に示す。

付表-B.1 拡散係数一覧 (その1)

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)	
						高さ(m)	部位				
	苦小牧港	防波堤	1968	1999	1.50	0.00	3.30	防波堤側面	20.23	1.18E-08	-
	室蘭港	防波堤	1970	1999	1.50	0.00	2.98	防波堤天面	27.29	4.76E-08	-
※	塩釜港	栈橋	1966	2005	1.60	0.00	2.75	スラブ	9.53	3.55E-08	0.184
※							2.75	スラブ	16.43	2.01E-08	0.160
※							2.28	梁側面	16.70	3.58E-08	0.169
※							2.49	梁側面	25.06	1.66E-08	-
※							1.90	梁側面	10.94	2.27E-08	-
※							2.29	梁側面	11.56	3.05E-08	0.187
	秋田港	防波堤	1980	1985	0.50	0.00	0.97	ケーソン前面	11.82	4.49E-08	-
							0.97	ケーソン前面	12.96	4.31E-08	-
		防波堤	1975	1985	0.50	0.00	0.95	ケーソン前面	8.52	5.93E-08	-
			1975				0.95	ケーソン前面	5.94	5.72E-08	-
		防波堤	1970	1985	0.50	0.00	0.86	ケーソン前面	12.77	2.19E-08	-
			1970				0.86	ケーソン前面	10.37	4.70E-08	-
	酒田港	防波堤	1978	1986	0.50	0.00	0.88	ケーソン前面	9.87	5.07E-08	-
			1978				0.88	ケーソン前面	14.24	6.57E-08	-
		防波堤	1972	1986	0.50	0.00	0.53	ケーソン前面	11.99	3.85E-08	-
			1972				0.53	ケーソン前面	12.24	5.05E-08	-
	新潟港	防波堤	1980	1986	0.50	0.00	0.80	ケーソン前面	5.00	9.60E-08	-
							0.80	ケーソン前面	7.48	2.60E-08	-
		防波堤	1969	1986	0.50	0.00	1.30	ケーソン前面	6.23	3.67E-08	-
							1.30	ケーソン前面	12.84	4.26E-08	-
							1.30	ケーソン前面	1.17	6.25E-08	-
	直江津港	栈橋	1969	2002	0.65	0.00	0.85	前垂前面	20.71	2.67E-08	-
※		栈橋	1969	2004	0.65	0.00	2.00	スラブ	4.99	1.12E-08	0.143
※							2.00	スラブ	12.25	5.55E-09	0.157
※							1.41	梁側面	8.60	1.06E-08	0.152
※							1.30	梁側面	8.65	6.03E-09	0.157

付表-B.2 拡散係数一覧 (その2)

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)
						高さ(m)	部位			
伏木富山	防波堤	1975	1986	0.50	0.00	1.30	ケーソン前面	9.08	5.11E-08	-
						1.30	ケーソン前面	20.32	1.86E-08	-
	防波堤	1966	1986	0.50	0.00	0.80	ケーソン前面	13.12	5.05E-08	-
						0.80	ケーソン前面	17.19	3.37E-08	-
	防波堤	1962	1986	0.50	0.00	0.80	ケーソン前面	6.63	6.71E-08	-
						0.80	ケーソン前面	15.05	1.58E-08	-
金沢港	防波堤	1980	1985	0.50	0.00	0.80	ケーソン前面	6.94	7.78E-08	-
						0.80	ケーソン前面	7.28	4.16E-08	-
	防波堤	1975	1985	0.50	0.00	0.43	ケーソン前面	16.59	5.87E-08	-
						0.43	ケーソン前面	12.00	1.09E-07	-
	防波堤	1970	1985	0.50	0.00	0.60	ケーソン前面	16.72	8.68E-08	-
						0.60	ケーソン前面	14.62	8.62E-08	-
	防波堤	1965	1985	0.50	0.00	0.76	ケーソン前面	10.53	9.12E-08	-
						0.76	ケーソン前面	17.69	3.33E-08	-
福井港	防波堤	1978	1986	0.50	0.00	1.26	ケーソン前面	5.32	3.78E-08	-
						1.26	ケーソン前面	7.89	5.13E-08	-
	防波堤	1974	1986	0.50	0.00	1.26	ケーソン前面	8.47	5.60E-08	-
						1.26	ケーソン前面	12.27	5.52E-08	-
千葉港	栈橋	1970	1995	2.00	0.00	2.25	梁下面	14.83	3.37E-09	-
						2.25	梁下面	16.04	4.11E-09	-
						3.25	スラブ	13.15	6.30E-09	-
						3.25	スラブ	8.61	1.31E-08	-

付表-B.3 拡散係数一覧 (その3)

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)
						高さ(m)	部位			
千葉港	矢板式 岸壁	1981	2004	2.00	0.00	2.74	岸壁前面	21.22	9.47E-09	-
						3.00	岸壁前面	19.90	8.34E-09	-
						2.74	岸壁前面	23.03	9.82E-09	-
東京港	栈橋	1996	2004	2.10	0.00	2.62	梁	14.09	4.02E-08	-
						3.65	PC桁	4.83	2.92E-08	-
						2.65	梁	23.69	2.59E-08	-
						2.62	梁	12.41	2.84E-08	-
						3.65	PC桁	4.88	5.52E-08	-
						2.65	梁	13.25	2.81E-08	-
	栈橋	1971	2004	2.10	0.00	3.69	梁	14.79	8.65E-09	-
						2.99	スラブ	4.18	1.19E-08	-
						2.65	梁	20.45	1.30E-08	-
						3.69	スラブ	2.60	1.34E-08	-
						2.07	梁	26.24	2.46E-09	-
川崎港	栈橋	1955	2003	2.00	0.00	3.50	スラブ上面	3.79	6.37E-08	-
						3.50	スラブ上面	3.58	5.72E-08	-
	栈橋	1937	1998	2.00	0.00	2.30	梁	18.47	4.98E-09	-
						2.30	梁	18.20	8.08E-09	-
						2.30	梁	12.64	4.13E-08	-
						2.30	梁	10.28	1.49E-08	-
						2.70	スラブ	14.76	1.22E-08	-
						2.70	スラブ	17.06	7.65E-09	-
						2.70	スラブ	12.70	1.04E-08	-
						2.70	スラブ	10.68	1.27E-08	-

付表-B.4 拡散係数一覧 (その4)

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)	
						高さ(m)	部位				
横浜港	栈橋	1968	2004	2.00	0.00	2.80	不明	4.80	1.04E-08	-	
						2.80	不明	4.68	8.98E-09	-	
						2.80	不明	5.89	8.55E-09	-	
						2.80	不明	3.38	1.75E-08	-	
横浜港	栈橋	1962	2002	2.00	0.00	2.50	梁下面	14.27	1.43E-08	-	
						2.50	梁下面	15.01	1.37E-08	-	
						2.50	梁下面	7.67	4.23E-09	-	
						3.40	スラブ	4.55	7.48E-09	-	
						3.40	スラブ	4.49	6.00E-09	-	
						3.40	スラブ	1.13	9.46E-09	-	
横須賀港	栈橋	1965	2002	2.00	0.00	2.65	梁下面	1.71	1.74E-08	-	
						2.65	梁下面	7.05	3.69E-09	-	
						3.40	スラブ	1.09	2.84E-08	-	
						3.40	スラブ	2.20	8.16E-09	-	
※	清水港	栈橋	1964	2004	1.70	0.00	2.60	スラブ	16.21	2.22E-09	0.124
※						1.87	梁側面	15.84	3.25E-09	0.107	
※	清水港	栈橋	1985	2004	1.70	0.00	2.70	スラブ	10.08	1.70E-08	0.144
※						2.70	スラブ	15.19	1.19E-08	0.167	
※						2.09	梁側面	13.93	2.42E-08	0.177	
※						2.09	梁側面	13.35	2.61E-08	0.165	
		栈橋	1967	1992	1.82	0.28	2.80	梁下面	15.14	5.62E-09	-
名古屋港	栈橋	1983	2002	2.61	0.04	3.98	梁側面:海	8.14	4.31E-09	-	
						3.87	梁側面:中間	2.55	1.58E-08	-	
						3.83	梁側面:陸	10.25	4.02E-08	-	
						3.81	梁側面:陸	8.11	6.66E-08	-	
						4.25	スラブ:海	2.53	1.83E-08	-	
						4.25	スラブ:陸	9.89	1.29E-08	-	
						4.25	スラブ:陸	11.53	2.26E-08	-	
名古屋港	栈橋	1973	2003	2.60	0.00	3.80	梁下面	18.42	4.73E-09	-	
						3.80	梁下面	2.30	1.51E-08	-	



付表-B.5 拡散係数一覧 (その5)

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)	
						高さ(m)	部位				
名古屋港	(栈橋)	1973	2003	2.60	0.00	3.80	梁下面	6.98	1.42E-08	-	
						3.80	梁下面	6.06	2.43E-08	-	
						3.80	梁下面	2.55	1.34E-08	-	
						3.80	梁下面	9.16	2.49E-08	-	
						4.05	梁側面	17.89	3.76E-09	-	
						4.05	梁側面	4.51	1.28E-08	-	
						4.05	梁側面	5.78	1.39E-08	-	
				— (※前頁からの続き) —			4.05	梁側面	2.61	1.93E-08	-
						4.05	梁側面	1.32	2.94E-08	-	
						4.05	梁側面	5.25	1.70E-08	-	
						4.50	スラブ*	2.43	5.73E-09	-	
						4.50	スラブ*	1.86	1.76E-08	-	
						4.50	スラブ*	3.69	1.26E-08	-	
						4.50	スラブ*	1.68	1.89E-08	-	
						4.50	スラブ*	1.09	9.08E-08	-	
						4.50	スラブ*	2.50	1.01E-08	-	
舞鶴港	栈橋	1975	2002	0.30	0.00	1.28	スラブ*	3.31	3.90E-08	-	
	栈橋	1966	2002	0.30	0.00	1.45	スラブ*	3.39	2.49E-08	-	
						1.45	スラブ*	2.58	2.40E-08	-	
神戸港	防波堤	1982	2004	1.70	0.10	-1.395	ケーソン前面	14.14	8.01E-08	-	
						-1.390	ケーソン前面	19.50	6.34E-08	-	
						-1.390	ケーソン前面	11.68	7.56E-08	-	
	防波堤	1982	2000	1.70	0.10	-4.72	ケーソン前面	29.33	9.88E-08	-	
						2.74	ケーソン上面	31.28	3.73E-08	-	
						2.74	ケーソン上面	30.32	2.89E-08	-	
和歌山下津港	岸壁	1989	2004	1.90	0.10	1.10	前面	14.34	2.05E-08	-	
			1988				1.10	前面	15.80	1.61E-08	-
	岸壁	1994	2004	1.90	0.10	1.10	前面	16.19	1.60E-08	-	
			1995				1.10	前面	17.01	2.62E-08	-

付表-B.6 拡散係数一覧 (その6)

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)		
						高さ(m)	部位					
和歌山下津港	防波堤	1971	2004	1.90	0.10	1.10	前面	28.39	4.94E-08	-		
		1972				1.10	前面	17.43	7.49E-08	-		
		1983				1.10	前面	26.97	1.11E-08	-		
		1995				1.10	前面	13.67	1.07E-08	-		
	防波堤	1990	2004	1.90	0.10	1.10	前面	15.32	2.96E-08	-		
		1991				1.10	前面	16.61	1.35E-08	-		
		1991				1.10	前面	19.16	9.83E-09	-		
		1992				1.10	前面	17.55	2.18E-08	-		
高松港	栈橋	1975	2000	2.48	0.00	不明	1号トルフィン	14.84	1.76E-08	-		
							2号トルフィン	21.32	3.96E-08	-		
							1号PF エプロン	26.12	1.31E-08	-		
							1号PF 梁	16.39	2.13E-08	-		
							1号PF 梁	22.97	2.24E-08	-		
							1号PF スラブ	41.94	1.10E-08	-		
							3号トルフィン	31.87	1.12E-08	-		
							P3橋脚	31.47	1.01E-08	-		
							2号PF エプロン	18.21	2.70E-08	-		
							2号PF 梁	27.34	1.89E-08	-		
							2号PF 梁	38.93	1.78E-08	-		
							2号PF スラブ	19.82	9.20E-09	-		
			栈橋	1976	2000	2.48	0.00	不明	1号PF 梁	21.00	2.31E-08	-
									1号PF 梁	28.46	2.98E-08	-
							1号PF 梁	53.37	2.70E-08	-		
							1号PF スラブ	17.06	2.00E-08	-		
							2-1号トルフィン	20.45	2.99E-08	-		
							P4橋脚	14.14	4.53E-08	-		
							2号PF エプロン	11.42	4.22E-08	-		
							2号PF 梁	39.83	2.79E-08	-		
							2号PF スラブ	16.62	2.53E-08	-		
							3号トルフィン	10.15	2.84E-08	-		

付表-B.7 拡散係数一覧 (その7)

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)				
						高さ(m)	部位							
橋港	栈橋	1972	2001	1.80	0.00	2.90	スラブ上面	1.32	5.89E-06	-				
						2.10	梁側面	1.85	1.50E-07	-				
						2.60	スラブ	1.43	9.52E-07	-				
						2.10	梁	4.47	1.24E-08	-				
						2.10	梁	1.78	2.24E-08	-				
小松島港	栈橋	1971	2001	1.80	0.00	3.05	スラブ	1.36	7.65E-08	-				
						3.05	スラブ	3.74	3.23E-08	-				
						3.40	スラブ上面	6.95	7.84E-08	-				
						2.55	梁側面	4.89	4.60E-08	-				
						2.55	梁側面	3.76	3.90E-08	-				
						3.05	スラブ	6.09	2.67E-08	-				
						3.05	スラブ	5.06	2.05E-08	-				
						3.40	スラブ上面	9.58	5.41E-08	-				
						2.55	梁側面	8.25	3.26E-08	-				
						2.55	梁側面	9.86	6.70E-08	-				
						鳥取港	防波堤	1976	2004	0.47	0.10	0.72	飛沫	29.37
0.42	干満	16.21	4.23E-08	0.198										
0.42	干満	17.78	6.80E-08	-										
0.72	飛沫	20.01	9.20E-08	0.201										
	防波堤	1975	2004	0.47	0.10	0.72	飛沫	29.60	3.72E-08	-				
境港港	栈橋	1967	1999	0.30	0.00	1.03	前垂れ前面	18.89	2.55E-08	-				
						1965	2004	0.30	0.00	0.85	梁側面	6.19	4.71E-08	0.147
										0.85	梁側面	9.58	4.37E-08	0.118
										0.85	梁側面	6.62	2.61E-08	0.159
										0.85	梁側面	8.42	1.57E-08	0.147
※						1.30	スラブ	8.10	1.72E-08	0.153				

付表-B.8 拡散係数一覧 (その8)

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)
						高さ(m)	部位			
※ 広島港	栈橋	1983	2004	3.79	0.00	4.30	スラブ	3.70	9.97E-09	0.161
※						3.65	梁側面	15.79	1.30E-08	0.152
※						3.95	梁側面	2.73	3.69E-08	0.188
※						3.65	梁側面	11.58	7.43E-09	0.165
	防波堤	1969	1999	3.90	0.00	3.50	防波堤天面	20.86	1.04E-07	-
山口県柳井港	栈橋	1972	2003	3.04	0.00	2.85	梁下面	19.81	2.21E-08	-
						3.65	スラブ	24.44	3.08E-08	-
						3.20	梁側面	26.68	1.46E-08	-
						3.20	梁側面	8.24	6.96E-08	-
博多港	栈橋	1986	2002	2.16	0.07	1.40	前垂前面	16.47	8.24E-09	-
	栈橋	1964	2002	2.16	0.07	3.00	1BLスラブ	10.82	2.66E-08	-
						2.60	2BL梁	19.62	3.28E-07	-
						3.00	3BLスラブ	7.28	3.43E-08	-
						2.60	4BL梁	13.50	3.88E-08	-
						3.00	5BLスラブ	9.20	4.64E-08	-
						2.60	6BL梁	17.96	7.13E-08	-
						3.00	7BLスラブ	14.07	2.98E-08	-
						2.60	8BL梁	13.08	3.80E-08	-
						3.00	9BLスラブ	12.20	4.30E-08	-
						2.60	10BL梁	12.13	6.37E-08	-
						3.00	11BLスラブ	12.70	2.95E-08	-
						2.60	12BL梁	15.21	5.92E-08	-
博多港	栈橋	1965	2002	2.16	0.07	3.00	1BLスラブ	14.98	7.44E-08	-
						2.60	2BL梁	18.17	4.06E-08	-
						3.00	3BLスラブ	9.60	2.28E-08	-

付表-B.9 拡散係数一覧 (その9)

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)				
						高さ(m)	部位							
博多港	(栈橋)	1965	2002	2.16	0.07	2.60	4BL梁	18.86	2.96E-08	-				
						3.00	5BLスラブ*	12.10	3.64E-08	-				
						2.60	6BL梁	15.60	3.06E-08	-				
						3.00	7BLスラブ*	14.64	2.28E-08	-				
						2.60	8BL梁	11.53	1.88E-08	-				
						3.00	9BLスラブ*	11.98	1.95E-08	-				
						2.60	10BL梁	12.13	2.44E-08	-				
						3.00	11BLスラブ*	15.56	2.04E-08	-				
						2.60	12BL梁	15.27	3.53E-08	-				
						3.00	13BLスラブ*	12.20	5.62E-08	-				
						1965	2002	2.16	0.07	2.60	1BL梁	16.58	8.92E-08	-
						3.00	2BLスラブ*	6.78	6.30E-08	-				
						2.60	3BL梁	13.28	3.84E-08	-				
3.00	4BLスラブ*	11.51	3.96E-08	-										
2.60	5BL梁	10.67	8.66E-08	-										
3.00	6BLスラブ*	11.87	2.43E-08	-										
2.60	7BL梁	16.65	5.70E-08	-										
3.00	8BLスラブ*	7.95	6.41E-08	-										
2.60	9BL梁	13.54	3.82E-08	-										
3.00	10BLスラブ*	12.78	4.66E-08	-										
2.60	11BL梁	11.26	8.23E-08	-										
3.00	12BLスラブ*	18.84	7.47E-08	-										

付表-B.10 拡散係数一覧 (その10)

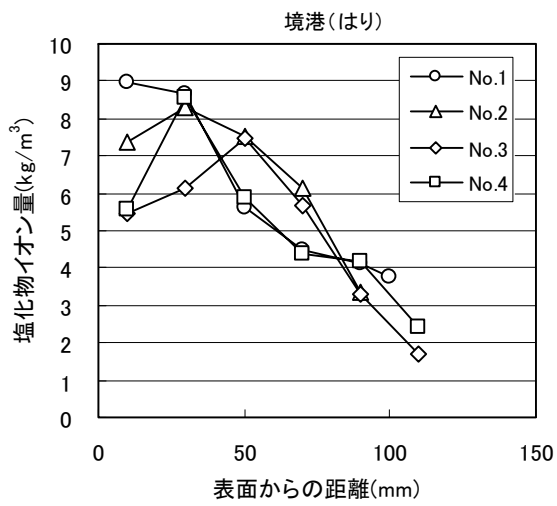
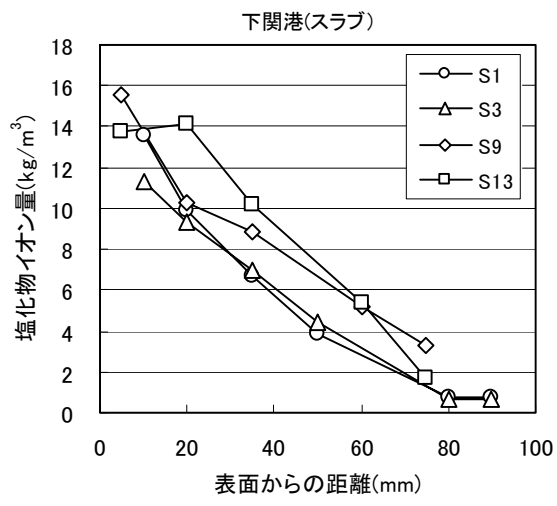
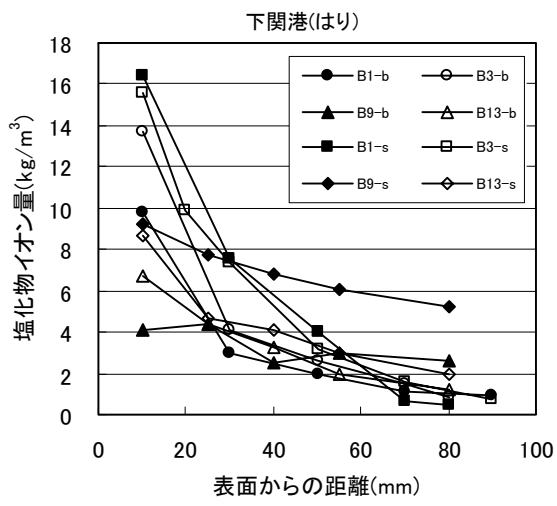
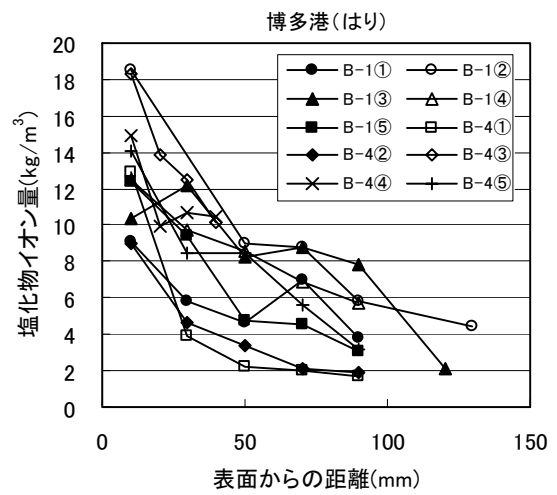
港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)
						高さ(m)	部位			
福島港	橋梁	1978	1999	3.00	0.00	不明	床版	5.42	6.33E-08	-
						不明	主桁	23.19	2.14E-08	-
						不明	桁受梁部	2.96	1.60E-07	-
						不明	橋台	17.13	3.40E-08	-
長崎港	岸壁	1969	2004	3.30	0.00	2.75	前面	21.81	1.33E-08	-
						2.20	前面	16.37	1.38E-08	-
						2.80	前面	21.75	1.35E-08	-
鹿児島港	岸壁	1966	2004	2.827	0.00	3.80	上部工上面	18.99	1.84E-08	-
						3.80	上部工上面	12.73	3.62E-08	-
						3.80	上部工上面	13.85	1.94E-08	-
	岸壁	1966	2004	2.827	0.00	3.80	上部工上面	10.00	1.28E-08	-
						3.80	上部工上面	14.30	2.50E-08	-
						3.80	上部工上面	18.10	8.91E-09	-
石垣港	栈橋	1988	2001	1.90	0.10	2.25	前垂前面	9.95	4.17E-08	-
	栈橋	1988	2002	1.90	0.10	2.15	梁側面	15.28	5.99E-07	-
						2.15	梁側面	18.14	1.97E-07	-
						2.15	梁側面	14.15	2.00E-07	-
						1.85	梁下面	11.83	2.95E-08	-
						2.65	スラブ下面	14.52	8.85E-08	-
						2.65	スラブ下面	11.54	9.52E-08	-
	栈橋	1991	2001	1.90	0.10	2.30	前垂前面	11.12	1.29E-07	-

注「※」印は著者らがコアを採取したものを示す。

付表-B.11 解体調査結果における拡散係数一覧

港名	構造形式	竣工年 (年)	調査年 (年)	HWL (m)	LWL (m)	コア採取位置		C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	空隙率 (mL/mL)
						高さ(m)	部位			
※	博多港	1965	2004	2.16	0.07	不明	はり	7.55	1.30E-07	0.188
※						不明	はり	18.64	3.87E-08	0.172
※						不明	はり	16.60	4.25E-08	-
※						不明	はり	12.95	5.31E-08	0.142
※						不明	はり	13.69	1.93E-08	0.161
※						不明	はり	17.35	3.25E-09	-
※						不明	はり	9.46	1.39E-08	0.167
※						不明	はり	20.68	1.28E-08	-
※						不明	はり	16.32	2.47E-08	-
※						不明	はり	14.86	2.31E-08	-
※	下関港	1968-1971	2001-2002	2.86	0.00	2.05	梁底面	12.00	7.08E-09	-
※						2.05	梁底面	12.00	7.36E-09	-
※						2.05	梁底面	5.50	5.02E-08	-
※						2.05	梁底面	7.90	1.26E-08	-
※						2.41	梁側面	20.95	6.90E-09	-
※						2.42	梁側面	19.32	7.47E-09	-
※						2.27	梁側面	10.00	4.89E-08	-
※						2.27	梁側面	10.14	1.50E-08	-
※						3.05	スラブ底面	16.54	9.27E-09	0.131
※						3.05	スラブ底面	13.61	1.21E-08	0.126
※						3.05	スラブ底面	15.47	1.86E-08	-
※						3.05	スラブ底面	17.21	1.82E-08	-
※	境港	1965	2004	0.30	0.00	0.77	梁下面	10.5	4.02E-08	-
※						0.94	梁側面	11.6	3.84E-08	0.164
※						1.07	梁側面	15.8	2.10E-08	0.142
※						1.20	梁側面	11.00	3.33E-08	-

注 「※」印は著者らがコアを採取したものを示す。



付図-B.1 塩化物イオン量分布



港湾空港技術研究所資料 No. 1141

2006. 9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。