

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1339**      March 2018

長期海洋暴露試験および実構造物調査に基づくコンクリートの  
塩化物イオン拡散性状に関する検討

与那嶺 一秀  
山路 徹  
加藤 絵万  
川端 雄一郎

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 塩化物イオン浸透メカニズムおよび見かけの拡散係数に関する既往の知見 .....	4
2.1 塩害の進行過程 .....	4
2.2 コンクリート内部への塩化物イオン浸透メカニズム .....	5
2.3 見かけの拡散係数の評価に関する留意点 .....	7
2.4 塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する予測手法 .....	8
2.5 まとめ .....	9
3. 長期海洋暴露試験に基づく塩化物イオン拡散メカニズムに関する検討 .....	10
3.1 はじめに .....	10
3.2 試験概要 .....	10
3.3 試験結果および考察 .....	11
3.4 まとめ .....	13
4. 長期海洋暴露試験および実構造物調査により得られた見かけの拡散係数の実態調査 .....	13
4.1 はじめに .....	13
4.2 長期海洋暴露試験の概要 .....	13
4.3 実構造物調査の概要 .....	15
4.4 試験体および実構造物における見かけの拡散係数の実態 .....	15
4.5 まとめ .....	16
5. 塩化物イオン拡散係数の特性値の提案 .....	16
5.1 はじめに .....	16
5.2 拡散係数の特性値の導出 .....	17
5.3 まとめ .....	18
6. 結論 .....	18
7. おわりに .....	18
付 録 .....	21
付録A 試験体の塩化物イオン濃度分布一覧 .....	21
付録B 試験体2（製作：各地方整備局等）の配合および試験結果一覧 .....	24
付録C 実構造物の塩化物イオン濃度分布一覧 .....	28
付録D 塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査手法の現状の課題および対応方針案 .....	30
付録E 鉄筋腐食開始時期の試算例（かぶり70mmの場合） .....	35
付録F 設計供用期間50年を満足するかぶりの試算例 .....	41

# Study on chloride ion diffusion property of concrete based on long-term exposure test and investigation to real structure

Kazuhide YONAMINE\*  
Toru YAMAJI\*\*  
Ema KATO\*\*\*  
Yuichiro KAWABATA\*\*\*\*

## Synopsis

In this study, at first, mechanism of chloride ion diffusion was investigated based on the long term marine exposure test. Next, equations to calculate characteristic values were derived based on the actualities of  $D_{ap}$ , the apparent diffusion coefficients obtained from specimens and real structures. The characteristic values are used for prediction of corrosion start time. The main findings are shown in the following;

(1) Resistance for chloride ion penetration improved with increase of replacement level of ground granulated blast-furnace slag. Alternatively, penetration front was stationary even with lapse of time.

(2) It was recognized that  $D_{ap}$  showed steady state after about 5 years of exposure duration.

(3)  $D_{ap}$  of real structures were about 0.1 ~ 1.6 cm<sup>2</sup>/year for ordinary Portland cement and about 0.1 ~ 0.8 cm<sup>2</sup>/year for blast furnace slag cement type B.

(4)  $D_k$ , characteristic values of diffusion coefficient used for prediction of corrosion start time, are proposed as follows.

OPC

$$\log_{10}D_k = 3.4(W/C) - 1.9$$

BB

$$\log_{10}D_k = 2.5(W/C) - 1.8$$

**Key Words:** exposure test, investigation of real structures, concrete, chloride ion, apparent diffusion coefficient, characteristic value of diffusion coefficient

---

\* Researcher, Materials Group  
\*\* Head of Group, Materials Group  
\*\*\* Head of Group, Structural Mechanics Group  
\*\*\*\* Senior Resercher, Structural Mechanics Group  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5103 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:yonamine-k@pari.go.jp

# 長期海洋暴露試験および実構造物調査に基づくコンクリートの 塩化物イオン拡散性状に関する検討

与那嶺 一秀<sup>1</sup>・山路 徹<sup>2</sup>・加藤 絵万<sup>3</sup>・川端 雄一郎<sup>4</sup>

## 要 旨

本検討では、まず、長期海洋暴露試験を基に、コンクリートの塩化物イオン拡散メカニズムに関する検討を行った。次に、試験体および実構造物から収集した見かけの拡散係数  $D_{ap}$  の実態を基に、鉄筋腐食開始時期の予測時に用いる塩化物イオン拡散係数の特性値を算出する式の導出を行った。得られた主な知見を以下に示す。

(1) 高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに、塩化物イオン浸透抵抗性が向上した。また、時間が経過しても浸透フロントが停滞する傾向が観察された。

(2) 暴露期間が5年程度経過すると、 $D_{ap}$  は定常値を示す傾向が確認された。

(3) 実構造物の見かけの拡散係数は、普通ポルトランドセメントでは  $0.1\sim 1.6\text{cm}^2/\text{年}$  程度、高炉セメント B 種では  $0.1\sim 0.8\text{cm}^2/\text{年}$  程度の値を示していた。

(4) 鉄筋腐食開始時期の予測時に用いる塩化物イオン拡散係数の特性値  $D_k$  として、以下の式を提案した。

OPC の場合

$$\log_{10}D_k = 3.4(W/C) - 1.9$$

BB の場合

$$\log_{10}D_k = 2.5(W/C) - 1.8$$

キーワード：暴露試験，実構造物調査，コンクリート，塩化物イオン，見かけの拡散係数，  
拡散係数の特性値

---

1 構造研究領域 材料研究グループ 研究官

2 構造研究領域 材料研究グループ グループ長

3 構造研究領域 構造研究グループ グループ長

4 構造研究領域 構造研究グループ 主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5103 Fax：046-844-0255

e-mail:yonamine-k852a@pari.go.jp

## 1. はじめに

海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物における最も大きな課題の一つが塩害である。塩害とは、コンクリート内部に侵入した塩化物イオンにより生じる鉄筋腐食部の体積膨張が、内部圧力をもたらしてコンクリートに亀裂・剥落を生じさせる劣化現象である。塩害が顕著に見られる代表的な港湾構造物として、栈橋上部工が挙げられる。図-1.1は塩害が生じた栈橋上部工の一例であるが、はりに本来存在したコンクリートが剥落しており、腐食した鉄筋が露出している。

塩害の進行は耐力の低下など部材の性能の低下をもたらすため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(国土交通省港湾局, 2007. 以下, H19 基準)では、鉄筋腐食が開始する時期が、設計供用期間以降であることを確認する。設計供用期間中に鉄筋が腐食することが予測される場合には、塩害の発生を予め防ぐための対策を取るか、塩害による性能の低下に対応するための維持管理計画を立てることとされている。

この確認手法の精度向上は、港湾の鉄筋コンクリート構造物の維持管理における重要な課題の一つと位置付けられており、そのためには、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透メカニズムを把握する必要がある。これまで、実構造物や試験体から、塩化物イオンの浸透速度の指標である見かけの拡散係数(2章にて説明)の調査や、浸透メカニズムに関する検討などが行われてきた。しかし、長期材齢のコンクリートに対する調査結果の不足、コンクリート配合、施工条件、養生条件等の情報の不足、浸透性状に対する影響因子の多さによる各因子の影響度の分離評価の困難さなどの理由が、浸透メカニズムの解明を困難なものとしている。

そこで本検討では、まず、長期海洋暴露試験を基に、コンクリートの塩化物イオン拡散メカニズムに関する検討を



図-1.1 栈橋上部工はり部材における塩害の様子

行った。次に、コンクリート試験体および実コンクリート構造物における見かけの拡散係数  $D_{ap}$  の実態調査を行った。最後に、試験体および実構造物から収集した見かけの拡散係数の実態を基に、鉄筋腐食開始時期の予測時に用いる塩化物イオン拡散係数の特性値を算出する式の提案を行った。

なお、上記で提案した拡散係数の特性値に基づく鉄筋腐食開始時期の試算例を付録Eに、同様の手法に基づき、設計供用年数50年を満足するかぶりの試算例を付録Fに掲載した。

## 2. 塩化物イオン浸透メカニズムおよび見かけの拡散係数に関する既往の知見

本章では、塩害の進行過程とコンクリート中への塩化物イオンの浸透メカニズムおよびその速度の指標となる「見かけの拡散係数」について説明するとともに、既往の知見を整理する。また、H19 基準における塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する予測手法について述べる。

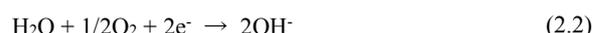
### 2.1 塩害の進行過程

塩害によって生じる鉄筋の腐食とコンクリートの剥落の進行過程を図-2.1に示す。

#### (1) 鉄筋の腐食

##### a) 鉄の腐食

酸素が存在する一般的な環境下での鉄(Fe)の腐食は、以下の二つの反応によって説明される。



式(2.1)は鉄の溶解反応(酸化反応)であり、式(2.2)は酸素の還元反応である。両者を合わせると以下の反応式となる。



更に、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ が酸素と反応することによって、水和酸化鉄である $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (赤さび)となる。このように、鉄が腐食するためには酸素と水の両方が必要であり、酸素または水的一方でも不足する場合には鉄の腐食は進行しないことを意味する。

##### b) コンクリート内部における鉄の腐食

一方、鉄が強いアルカリ環境下に置かれた場合、鉄の表面には不動態皮膜と呼ばれる緻密な酸化皮膜が形成され、腐食速度は低下する。したがって、強アルカリ環境であるコンクリート内部の鉄筋は、一般的な環境とは異なり、酸素や水があっても腐食は生じにくい(図-2.1, ①)。ただし、鉄筋周りに一定量以上の塩化物イオンが存在した場合には、不動態皮膜は破壊され、腐食速度が増加する(図-2.1, ②)。

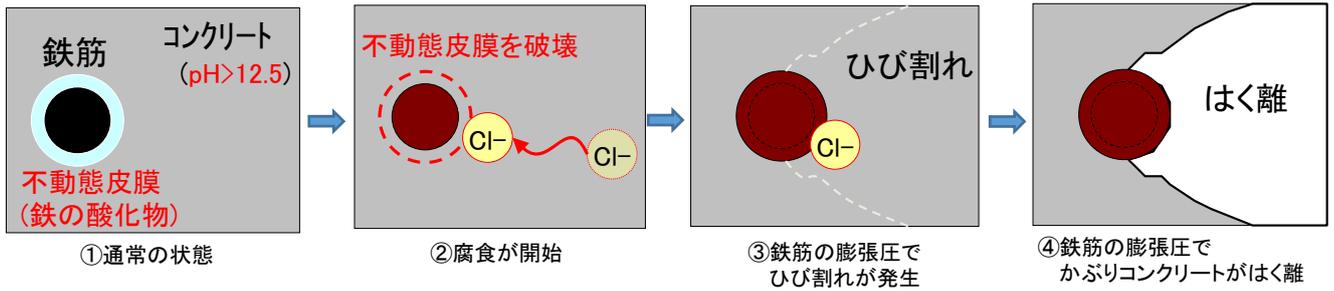


図-2.1 塩害の進行過程イメージ

コンクリートは骨材とセメントペースト（セメント＋水）で構成されており、セメントペースト中には細孔が存在している。この細孔内部に水がある程度存在する場合には、濃度拡散によって塩化物イオンの内部への移動が可能となる。一定以上の塩化物イオンが鉄筋表面に浸透し、不動態皮膜が破壊されることで鉄筋の腐食速度が増加すると考えられる塩化物イオン濃度を、「鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度 ( $C_{lim}$ )」と呼ぶ。RC部材の設計、維持管理においては、塩化物イオンによる鉄筋腐食の開始時期を予測する場合には、鉄筋位置における塩化物イオンが  $C_{lim}$  に至るまでに必要な期間を予測することが一般的である。

なお、この不動態皮膜は先述のとおり強アルカリ環境でなければ生じないため、二酸化炭素との反応やカルシウムの溶脱による中性化が鉄筋表面に至れば、不動態皮膜は消失する。しかし、海水がコンクリート表面に大量に供給される港湾構造物の場合、コンクリートが湿潤しているため中性化の進行速度が遅くなることから、不動態皮膜が消失する最たる原因として塩化物イオンの鉄筋表面への到達を考える場合が多い。

#### (2) コンクリートのひび割れと剥離

鉄筋に生じる錆の体積は、元の鉄の体積と比べて2倍以上に膨張するため、コンクリート内部に圧力が生じる。この内部圧力に対して、コンクリートには引張応力が発生し、コンクリートが負担しうる引張応力限界を超えるとコンクリートにひび割れが生じる（図-2.1, ③）。さらに、ひび割れから酸素・水・塩化物イオンがより多く浸透するようになるため、鉄筋腐食が進行し、最終的にはかぶり剥離する（図-2.1, ④）。

## 2.2 コンクリート内部への塩化物イオン浸透メカニズム

2.1において、鉄筋腐食開始時期は、鉄筋周りのコンクリートに含まれる塩化物イオン濃度が  $C_{lim}$  に到達するのに必要な期間を指すことを説明した。その予測を行うためには、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透メカニズムと、その速度の情報を取得する必要がある。本節では浸透

メカニズムを、コンクリート内部の細孔構造とコンクリート内部における塩化物イオンの形態という側面から説明する。なお、ひび割れ箇所における塩化物イオンの浸透メカニズムについては、本検討では議論しない。

### 2.2.1 コンクリート中での塩化物イオンの形態

#### (1) 自由塩化物イオン

コンクリートの細孔内部に水が存在し、かつ濃度勾配が存在する場合には、塩化物イオンは濃度拡散する。濃度拡散の駆動力はブラウン運動と呼ばれる。水分子が衝突することで溶質（溶解している物質）が一見ランダムな軌道で動く現象である。ブラウン運動自体には濃度の高い方から低い方へ移動するという指向性はないが、濃度の高い方から低い方へブラウン運動により移動する溶質の和が多いため、濃度拡散という現象として現れる。このように、溶媒中であって吸着（後述）されていない状態の塩化物イオンを「自由塩化物イオン」と呼ぶ。自由塩化物イオンは最終的に鉄筋位置に到達し、不動態皮膜を破壊して塩害をもたらす。

#### (2) 固定化塩化物イオン

「固定化塩化物イオン」には、塩化物イオンが細孔内部を通過する際、細孔壁面に吸着したカルシウムに引き寄せられ、細孔壁面に吸着するものと、細孔周囲のアルミネート (Al) 系水和物中の水酸化物イオン ( $\text{OH}^-$ ) や硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) と交換されることによって水和物中に取り込まれるもの（たとえば大門ら, 2009）とがあるとされている。水和物内部への固定化によって生じる代表的な物質として、クーゼル氏塩 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1/2\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) やフリーデル氏塩 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) が挙げられる。固定化塩化物イオンは鉄筋表面において不動態皮膜を破壊する反応には寄与できないと考えられている。

### 2.2.2 コンクリートの微細構造

#### (1) 細孔構造

コンクリートは多孔質材料である。そのため、コンクリートにおける塩化物イオンの浸透性状は、そのコンクリートが持つ細孔径の傾向から説明されることが多い。

図-2.2 は水銀圧入法によって求めたコンクリートの細

孔径分布の一例である。水銀圧入法とは、5mm程度に砕いて粗骨材を除去した試料に水銀を段階的に圧入し、加えた圧力に該当する径の細孔に侵入した水銀量から、細孔容積を測定する手法である。図-2.2から、10nm (=0.01  $\mu\text{m}$ ) ~30nm (=0.03  $\mu\text{m}$ ) においては試験体 A の、10nm 以下では試験体 B の細孔の容積（以下、細孔容積）が大きいことがわかる。このことから試験体 B のほうが試験体 A より細孔構造が緻密と言える。なお、細孔径の影響をより理解するためには、電気二重層について知る必要がある。

### (2) 細孔壁面の電気二重層

電気二重層は、溶媒中の物質の表面付近に、表面電荷とは正負が逆のイオンが多く分布することで形成される。図-2.3に電気二重層の概略図を示す。コンクリートの細孔における内壁はセメント水和物であり、これは負に帯電している。そのため、水和物のすぐ外側の溶媒中には、カルシウムなどの陽イオンが水和物表面に吸着することにより、固定層と呼ばれる陽イオンに富んだ層が形成される。さらにその外側には、水和物から離れるにつれて陽イオンが減少していく、拡散層と呼ばれる層が形成される。この二層は合わせて電気二重層と呼ばれ、各種イオンの移動に影響を与えるとされ、様々な検討が行われてきた（たとえば後藤ら、1982）。

塩化物イオンも電気二重層の影響を受けるとされる。陰イオンである塩化物イオンは、溶媒中における固定層以外の部分を濃度拡散すると考えられる。したがって、細孔径が小さくなるほど径内に占める電気二重層の割合が大きくなり、塩化物イオンは移動しにくくなると考えられる。この塩化物イオンの移動しにくくなる細孔径の閾値の考え方として、一例を紹介する。電気二重層の厚みは3nm程度と考えられている（岩浅ら、2010）。また、塩化物イオンは水分子255個を引き連れたクラスター状で移動するとされ、その大きさは2~3nmとされる（S. J. Stuart. et.al, 1996a, 1996b）。したがって、電気二重層がクラスター状で移動する塩化物イオンの両側に存在すると考えれば、その和は約10nmとなる。この値は塩化物イオンが浸透しづらいとされているゲル空隙（水和物であるCSH層の間に形成される結晶内空隙）の径（日本コンクリート工学協会、2008）と一致する。この考え方をもとに10nmを閾値と考えれば、図-2.2における10~30nmの細孔容積が多い試験体 A は、試験体 B よりも塩化物イオンが浸透しやすいと考えることができる。

なお、ここでは10nmを閾値とする考え方を紹介したが、この考え方だけでは十分に説明できない点もあるため、継続した検討が必要である。

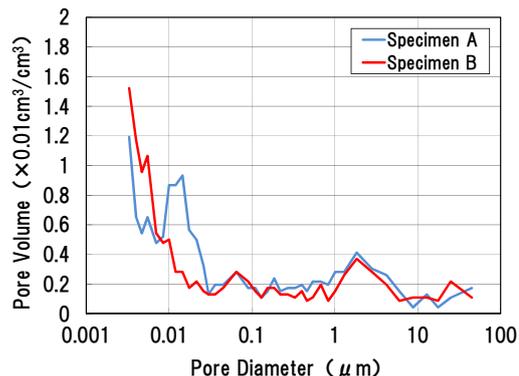


図-2.2 細孔径分布の一例、縦軸：細孔容積、横軸：細孔径、青線：試験体 A、赤線：試験体 B

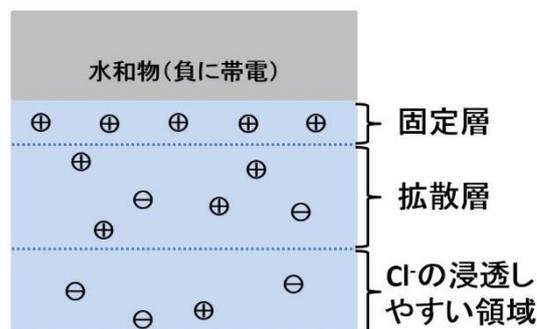


図-2.3 電気二重層（固定層+拡散層）の概略図

### (3) 骨材界面の遷移帯

骨材界面付近には塩化物イオンが浸透しやすいとされる、「遷移帯」と呼ばれる細孔構造の比較的粗な領域が存在するとされている。遷移帯の平均厚さについて、たとえば内川ら（1993）は、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの細孔径分布の差から遷移帯の容積を推定した計算結果と電子顕微鏡の結果を比較し、モルタルでは25  $\mu\text{m}$ 程度、コンクリートでは30  $\mu\text{m}$ 程度と報告している（ $W/C = 0.5$ の場合）。一方、遷移帯はそれらが相互に連結することにより、塩化物イオンの浸透しやすい経路となると考えられており、その影響の評価やモデリングの研究もなされている（たとえば加藤ら、2000）。

### 2.2.3 塩化物イオン浸透の停滞現象

高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの、遮塩性を高める効果を有する混和材を用いた場合に、コンクリート中における塩化物イオンの浸透が、時間の経過に係わらず、途中から進まなくなる現象が報告されている。この現象は二つに分類され、浸透した塩化物イオンの先端部分（以降、浸透フロント）が進まなくなる場合と、それだけでなく塩化物イオン濃度分布自体が変化しなくなる場合とが確認されている。たとえば高橋ら（2010）は後者を報告している。このような停滞現象の発生条件やメカニズムについては必ずしも明確ではないため、検討する必要がある。

### 2.3 見かけの拡散係数の評価に関する留意点

鉄筋腐食開始時期を予測するためには、鉄筋周りの塩化物イオン濃度を予測する必要があることは2.1において述べた。本来であれば、鉄筋腐食に関係するとされる、自由塩化物イオン濃度から予測すべきである。しかし、自由塩化物イオンのみを抽出することは極めて困難であるため、自由塩化物イオン濃度を用いた予測手法は確立できていない。そこで実際には、自由塩化物イオンと固定化塩化物イオンの和である「全塩化物イオン」濃度から算出される「見かけの拡散係数  $D_{ap}$ 」が、塩化物イオンの分布の浸透性状を表す指標として一般的に用いられている。本節では、 $D_{ap}$ の算出方法と、試験条件が  $D_{ap}$  に及ぼす影響について述べる。

#### 2.3.1 見かけの拡散係数の算出方法

$D_{ap}$  は、「塩化物イオン濃度分布」から算出される、塩化物イオンのコンクリート内部への浸透速度に該当する係数である。塩化物イオン濃度分布とは図-2.4のように、コンクリート表面からの距離と、その位置においてコンクリート内部に存在する全塩化物イオンの濃度との関係をグラフ化したものである。

塩化物イオン濃度分布に対し、Fickの拡散方程式の解である式(2.4)をフィッティングさせることにより、 $D_{ap}$  は求められる。

$$C = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1c}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right) \quad (2.4)$$

ここで、 $C$ ：塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_0$ ：コンクリート表面において想定される塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $c$ ：かぶり (mm)、 $t$ ：暴露期間または供用期間 (年)、 $\operatorname{erf}(s)$ ：誤差関数である。誤差関数は以下の通りである。

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \quad (2.5)$$

ただし、溶脱、炭酸化または侵入した硫酸イオンによるセメント水和物の変化によって、表層付近の固定化された塩化物イオン濃度が再度自由塩化物イオンに戻る現象が生じる。その一例を図-2.5に示す。表層付近で塩化物イオン濃度が低下した箇所が存在する場合には、JSCE-G 573-2013では、中性化範囲に10mmを加えた深さまでの塩化物イオン濃度分布を除いた部分で計算を行うこととされている。本来、Fickの拡散方程式は、ブラウン運動を駆動力とする濃度拡散に対してのみ適用されるべきものである。しかし、全塩化物イオン濃度分布から求められる拡散係数には、固定化塩化物イオンだけでなく、水の流れと共に塩化物イオンが移動する移流と呼ばれる現象の影響なども含まれているため、本来の意味における拡散係数とは言えない。このため、固定化塩化物イオンを含めた見かけ上の拡散係数という意味合いから「見かけの拡散係数」と呼ばれている。

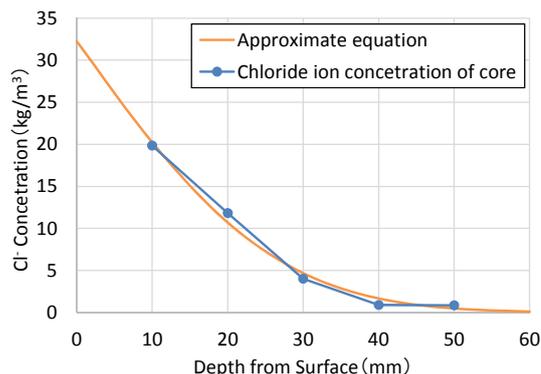


図-2.4 塩化物イオン濃度分布に対するFickの拡散方程式の解によるフィッティング、縦軸：塩化物イオン濃度、横軸：表面からの距離、橙線：Fickの拡散方程式の解、青線：塩化物イオン濃度分布

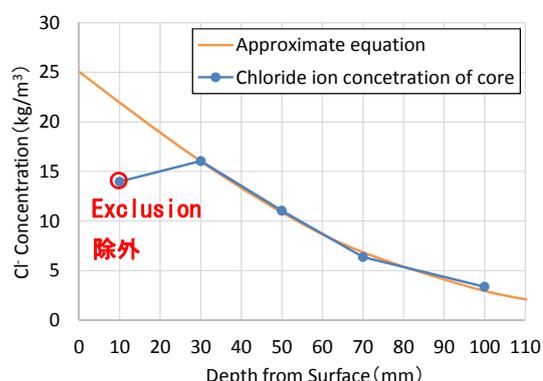


図-2.5 表層の塩化物イオン濃度が低下した場合におけるFickの拡散方程式の解によるフィッティング、縦軸：塩化物イオン濃度、横軸：表面からの距離、橙線：Fickの拡散方程式の解、青線：塩化物イオン濃度分布

なお、 $C_0$ および  $D_{ap}$  は、濃度分布の回帰計算により両者が1つの組として求められる値であり、結果として、完全な独立変数でない。そのため、 $D_{ap}$  は、コンクリートの品質のみを直接的に表す指標ではなく、他の影響要因（暴露条件等）も含んだ指標である。よって、本来としては、 $C_0$ と共に議論すべきである。ただし、同一な暴露条件において、コンクリートの品質（塩分浸透性）を相対比較する際には、指標として非常に簡便かつ有用な指標である。また、 $D_{ap}$ に関する既往の知見も相当蓄積されている。そのため、本検討では、コンクリートの塩分浸透性を比較検討する際には、基本的には  $D_{ap}$ のみを用いて議論することとする。

#### 2.3.2 試験条件の違いが見かけの拡散係数に及ぼす影響

$D_{ap}$  は実構造物や試験体が置かれた暴露環境や期間の影響を受ける。そこで、暴露環境や期間等が  $D_{ap}$  に与える影響を既往の知見を用いて紹介する。

##### (1) 溶液の違いによる影響

コンクリート内部に塩化物イオンを浸透させるために浸

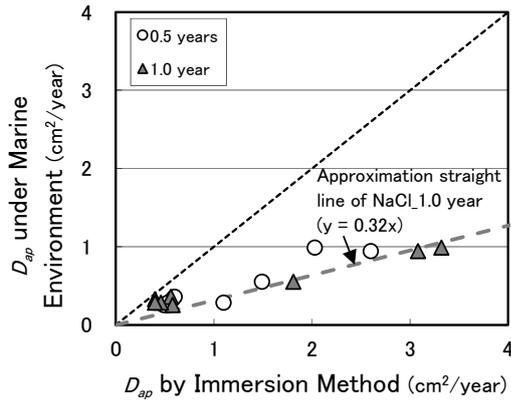


図-2.6 NaCl 浸漬および実海洋環境暴露から得られた  $D_{ap}$  の比較 (山路ら, 2009), 縦軸: 実海洋環境暴露による  $D_{ap}$ , 横軸: 浸漬法による  $D_{ap}$ , 丸: 暴露 0.5 年, 三角: 暴露 1.0 年

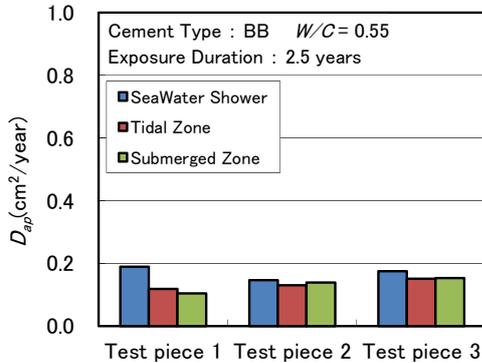


図-2.7 暴露環境の違いによる  $D_{ap}$  の比較, 縦軸:  $D_{ap}$ , 横軸: 各試験体, 青: 海水シャワー噴霧の環境, 赤: 干満環境, 緑: 海中環境

漬させる溶液として, 実海水または NaCl 溶液が一般的に用いられている。しかし, 溶液の違いは  $D_{ap}$  に影響を与えることが知られている。一例として図-2.6 に, 土木学会規準「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)」(JSCE-G 572-2013) に記載されている濃度 10% の NaCl 溶液への浸漬から得られた  $D_{ap}$  と実海洋環境に暴露して得られた  $D_{ap}$  を示す。NaCl 溶液における  $D_{ap}$  は, 実海洋環境 (実海水) における  $D_{ap}$  の 3 倍程度となった。この原因として, NaCl 溶液の塩化物イオン濃度が実海水の塩化物イオン濃度よりも高く設定されていたことや, 実海水に含まれる多様なイオンがセメント水和物の組成変化や塩化物イオンの浸透速度に影響をもたらした可能性が考えられる。

#### (2) 温度の違いによる影響

濃度拡散の駆動力であるブラウン運動は, 温度が高いほど活発になるため, 試験体または実構造物が設置されてい

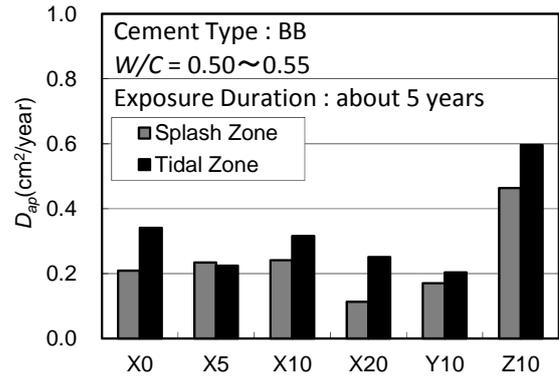


図-2.8 拡散係数の比較 (H.W.L., M.S.L.) (T.Yamaji et.al, 2010), 縦軸:  $D_{ap}$ , 横軸: 試験体番号

る場所の気温は  $D_{ap}$  に影響を与えると考えられる。西田ら (2003) は,  $5 \times 5 \times 0.5 \text{mm}$  の微小な試験片において濃度 3% の NaCl 溶液を用いた拡散セル試験を行い, 温度の上昇に伴い拡散係数が上昇することを確認している。

#### (3) 塩化物イオンの供給方法の違いによる影響

図-2.7 は, 同一配合の試験体を, 飛沫環境 (3 時間の海水散水と 9 時間の乾燥の繰り返し), 干満環境, 海中環境を模擬した暴露試験場に設置し, 得られた  $D_{ap}$  を比較したものである。多少のばらつきはあるものの,  $D_{ap}$  はほぼ同じ数値となった。また, 図-2.8 は, 3 港の H.W.L. 付近, M.S.L. 付近に試験体を設置し,  $D_{ap}$  を求めた結果である (T.Yamaji et.al, 2010)。H.W.L. 付近と M.S.L. 付近では明確な環境の違いによる影響は認められなかった。これらのことから, コンクリート表面に十分な海水が供給される環境においては,  $D_{ap}$  に明確な差は生じにくいと考えられる。これは, コンクリートの細孔内部に塩化物イオンが濃度拡散するのに十分な水が存在するためと考えられる。

#### (4) 期間の違いによる影響

$D_{ap}$  は時間が経過するにしたがって低下することが知られている。たとえば, 図-2.9 において竹田ら (1998) は, 海中部, 干満帯, 大気中における  $D_{ap}$  は, 時間経過に従い減少し, 収束する傾向がみられることを報告している。

同様の結果は, 山路ら (2014) によっても確認されている。図-2.10 は飛沫帯における実海洋暴露試験の結果であり,  $D_{ap}$  は暴露後 3 年程度までは変化が大きい, 3 年から 5 年の変化は小さく, 5 年以降については, ほぼ収束した。

## 2.4 塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する予測手法

$D_{ap}$  は, コンクリート内部の鉄筋腐食が供用期間内に生じないことを確認するために用いられている。H19 基準に記載されている内容を以下に簡潔に示す。

(1) 鉄筋腐食に関する照査

鉄筋腐食が設計供用期間内に開始するか否かは、鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計値  $C_d$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) が腐食発生限界塩化物イオン濃度  $C_{lim}$  ( $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ ) に達しているかで判定される。したがって、腐食が開始しないと判定されるためには、 $C_d$  は以下の式を満足する必要がある。

$$\gamma_i C_d / C_{lim} \leq 1.0 \quad (2.6)$$

ただし、 $\gamma_i$ ：構造物係数で、一般に 1.0 としてよい。

(2) 鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計値  $C_d$  の算出

設計供用期間経過時における  $C_d$  は次式により求められる。

$$C_d = C_0 \left( 1 - \text{erf} \left( \frac{0.1c}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right) \quad (2.7)$$

ここで、 $C_0$ ：コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $c$ ：かぶりの設計値 ( $\text{mm}$ )、 $D_d$ ：設計拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $t$ ：設計供用期間 (年)、 $\text{erf}(s)$ ：誤差関数である。

$$\text{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \quad (2.8)$$

また、コンクリートの表面、即ちかぶり位置  $0\text{mm}$  において想定される塩化物イオン濃度は「表面塩化物イオン濃度  $C_0$ 」と呼ばれ、栈橋のコンクリート上部工で、海水面 (H.W.L.) と部材下面の距離が  $0.0\sim 2.0\text{m}$  程度の場合には以下の式で求めることができる。

$$C_0 = -6.0x + 15.1 \quad (2.9)$$

ただし、 $x$ ：海水面 (H.W.L.) から部材下面までの距離 ( $\text{m}$ )。ただし  $0.0 \leq x \leq 2.0$  とする。また、 $C_0$  は  $6.0\text{kg}/\text{m}^3$  を下回らないものとする。

(3) 塩化物イオンに対する設計拡散係数  $D_d$  の算出

実構造物においては、構造部材に曲げひび割れが生じる可能性があるため、曲げひび割れを考慮した塩化物イオンの拡散性状を示す数値を設定する必要がある。そのため、拡散係数の特性値  $D_k$  ( $\text{cm}^2/\text{年}$ ) に、施工性や材料品質および曲げひび割れによる影響を考慮した項や係数が加えた、 $D_d$  が次式によって定められている。

$$D_d = \gamma_c D_k + \left( \frac{w}{l} \right) \left( \frac{w}{w_a} \right)^2 D_0 \quad (2.10)$$

ただし、 $\gamma_c$ ：コンクリートの材料係数。一般に 1.0 としてよい、 $w$ ：ひび割れ幅 ( $\text{mm}$ )、 $l$ ：ひび割れの間隔 ( $\text{mm}$ )、 $w_a$ ：ひび割れ幅の限界値 ( $\text{mm}$ )、 $D_0$ ：コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響の定数。一般に、 $200\text{cm}^2/\text{年}$ 。

(4) 塩化物イオンに対する拡散係数の特性値  $D_k$  の算出

$D_k$  とは、 $D_{ap}$  を  $W/C$  の関数として求められるようにした特性値であり、式 (2.11) ~ 式 (2.13) として定められている。

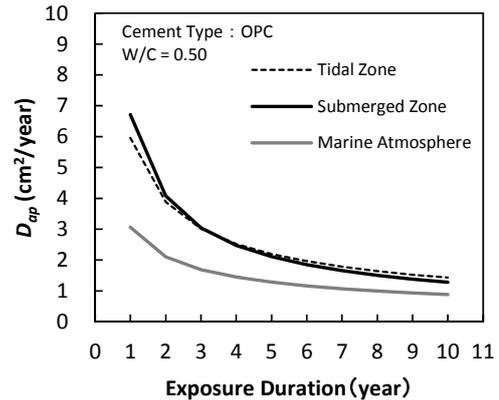


図-2.9  $D_{ap}$  の時間変化 (竹田ら, 1998), 縦軸： $D_{ap}$ , 横軸：暴露期間, 点線：干満帯, 実線 (黒)：海中中部, 実線 (灰)：海上大気中

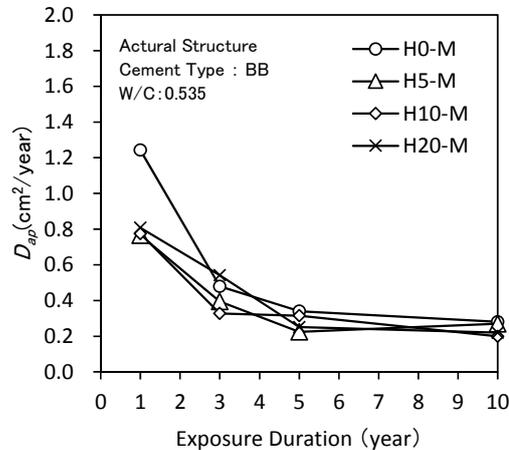


図-2.10  $D_{ap}$  の時間変化, 縦軸： $D_{ap}$ , 横軸：暴露期間, 各線 (形状の違い)：試験体

$$D_k = \gamma_p \alpha D_p \quad (2.11)$$

ただし、 $\gamma_p$ ： $D_p$  の精度に関する安全係数。一般に 1.0 としてよい、 $\alpha$ ：普通ポルトランドセメントでは一般に 0.65、高炉セメントでは一般に 1.0。

$D_p$  については、普通ポルトランドセメント (OPC) および高炉セメント B 種 (BB) それぞれを以下のように定めている。

OPC の場合

$$\log_{10} D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (2.12)$$

BB の場合

$$\log_{10} D_p = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (2.13)$$

なお、 $D_{ap}$  は曲げひび割れといった損傷の無い実構造部材や試験体から取得するため、その特性値である  $D_k$  もひび割れなどの劣化がない状態での拡散性状を示す。

## 2.5 まとめ

本章における既往の知見から、本検討ではコンクリート

内部への塩化物イオン浸透性状を把握するため、見かけの拡散係数を用いる方針とした。次章以降では、見かけの拡散係数を用いた塩化物イオン浸透性状の検討や、鉄筋腐食開始時期の予測手法に用いる拡散係数の特性値の提案を行う。

### 3. 長期海洋暴露試験に基づく塩化物イオン拡散メカニズムに関する検討

#### 3.1 はじめに

2章で述べたように、海洋環境下での塩化物イオンの拡散メカニズムは非常に複雑であり、必ずしも明確とはなっていない。特に、港湾構造物で一般的に用いられている高炉セメントを用いたコンクリートの場合に不明確な点が多い。例えば、最近の知見として、時間が経過しても、塩分の浸透が停滞する場合があることが報告されている(小柳ら, 2015)。

また、塩化物イオンの拡散は時間の影響を大きく受けるため、試験期間については、できるだけ長期で実施する必要がある。また、コンクリートが接する溶液の種類によっても影響を受けるため、暴露環境については自然海水が供給される環境の方が望ましい。

よって、本章では、長期海洋暴露試験に基づき、コンクリートの塩化物イオン拡散メカニズムに関する検討を行った。

#### 3.2 試験概要

##### (1) 試験体 (試験体 1)

本試験体の配合および暴露期間を表-3.1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>)、高炉セメントB種(密度: 3.04g/cm<sup>3</sup>)を用い、一部については置換率を調整するため石膏を添加した高炉スラグ微粉末(密度: 2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 4460cm<sup>2</sup>/g)を用いた。なお、置換率は20, 40, 60, 80%とした。細骨材は静岡県大井川水系陸砂(表乾密度: 2.66 g/cm<sup>3</sup>)、粗骨材は東京都青梅産砂岩砕石(表乾密度: 2.66 g/cm<sup>3</sup>)である。試験体の概略図を図-3.1に示す。φ100mm×175mmの円柱試験体で、打設面から25mm上端は切断し、一方向からのみ塩化物イオンが浸透するよう1面を残し、他はエポキシ樹脂で被覆した。

##### (2) 暴露環境

暴露環境については、以下の2種類とした。

##### a) 海水循環水槽 (海中部・干満帯)

屋外に設置された、海中部・干満帯を模擬する試験施設である。外観写真を写真-3.1、干満サイクルを図-3.2に示す。干満はポンプにより1日2回行われ、給水のたびに久里

表-3.1 試験体1の配合および暴露期間

番号	セメント			W/C (%)				単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )				高炉スラグ置換率 (%)				暴露期間 (年)		
	OPC	BB		40	50	60		145	160	175	20	40	50	60	80	1.0	5.7	7.9
OPC 40 160	●			●				●								1体	1体	
OPC 50 160	●			●				●								1体	1体	1体
OPC 60 160	●			●				●								1体	1体	
BB 40 160		●		●				●								1体	1体	
BB 50 160		●		●				●								1体	1体	
BB 60 160		●		●				●								1体	1体	
OPC 50 145	●			●				●								1体	1体	
OPC 50 175	●			●				●								1体	1体	
BB 50 145		●		●				●								1体	1体	
BB 50 175		●		●				●								1体	1体	
B20 50 160	●			●				●			●					1体	1体	1体
B40 50 160	●			●				●			●					1体	1体	1体
B50 50 160	●			●				●			●					1体	1体	1体
B60 50 160	●			●				●			●					1体	1体	1体
B80 50 160	●			●				●			●					1体	1体	1体
OPC 40 160 Sp	●			●				●								1体	1体	
OPC 50 160 Sp	●			●				●								1体	1体	
OPC 60 160 Sp	●			●				●								1体	1体	
BB 40 160 Sp		●		●				●								1体	1体	
BB 50 160 Sp		●		●				●								1体	1体	
BB 60 160 Sp		●		●				●								1体	1体	

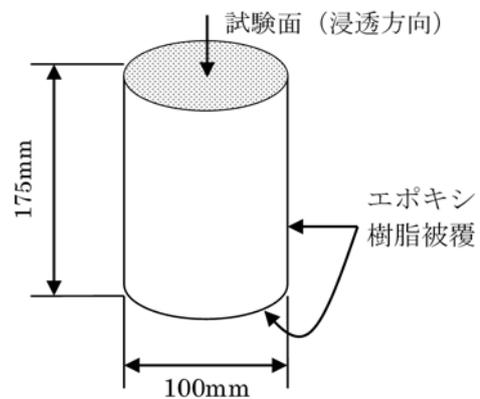


図-3.1 試験体1の概略図

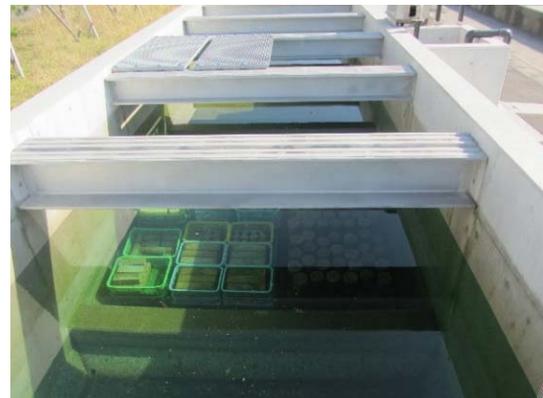


写真-3.1 海水循環水槽 (海中部・干満帯を模擬) の外観

浜湾から新しい海水を採取する。

##### b) 海水シャワー場 (飛沫帯)

屋外に設置された、飛沫帯を模擬する試験施設である。外観写真を写真-3.2に示す。図-3.2に示すように、当施設は海水循環水槽と連動しており、ポンプにより水槽から排水される海水を試験体へ散水する仕組みである。3時間の実海水の散水と9時間の乾燥を1日に2回繰り返す環境である。なお、表-3.1では該当する試験体の番号にSpと記載している。

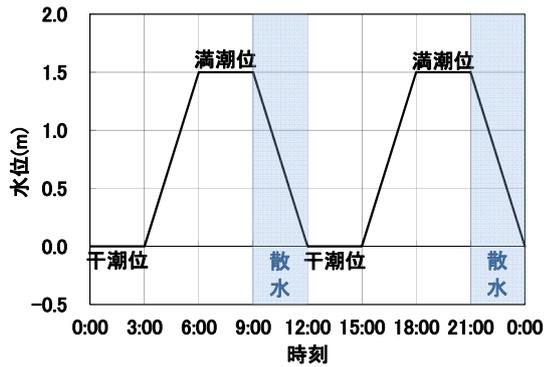


図-3.2 暴露試験施設の干満・散水サイクル



写真-3.2 海水シャワー場（飛沫帯を模擬）の外観

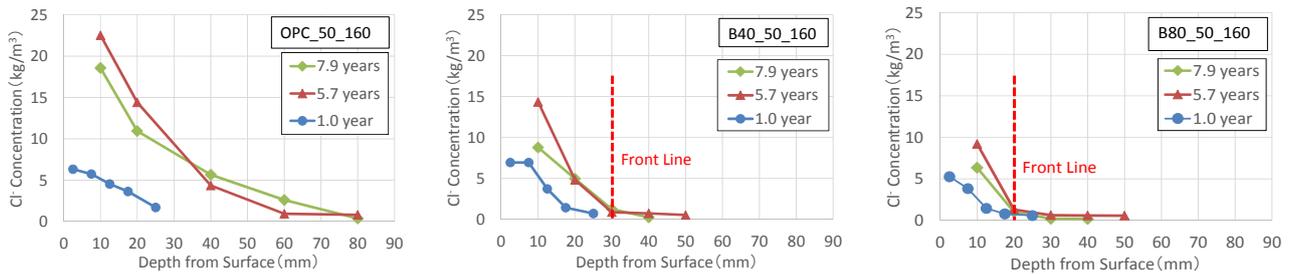


図-3.3 試験体1の塩化物イオン濃度分布の一例，縦軸：塩化物イオン濃度，横軸：表面からの距離，各実線（色の違い）：暴露期間，点線：浸透フロント

### (3) 試験項目

#### a) 塩化物イオン濃度分布

塩化物イオン濃度分布および塩化物イオン濃度分布から求められる見かけの拡散係数  $D_{ap}$  を，JSCE-G 573-2013 に準拠して求めた。本検討における塩化物イオン濃度の定量下限値は約  $0.2\text{kg/m}^3$  である。

#### b) 細孔径分布

高炉スラグ微粉末の置換率が異なる供試体を粗粉碎し，粗骨材を取り除いたモルタル部を  $2.5\sim 5\text{mm}$  に粒度調整したのに対し，水銀ポロシメーターを用いて測定した。

### 3.3 試験結果および考察

試験体1の全ての塩化物イオン濃度分布を付録Aに，一部を図-3.3に示す。各塩化物イオン濃度分布から求めた  $D_{ap}$  を基に議論を行う。

#### (1) $W/C$ および単位水量による影響

$D_{ap}$  と  $W/C$  の関係を図-3.4に示す。 $W/C$  の増加と共に， $D_{ap}$  は増加する傾向を示した。これは，セメントペーストにおけるセメントの割合が低下したことにより，セメントペーストの細孔構造が粗くなったため，塩化物イオンが浸透しやすくなったと考えられる。

一方，図-3.5は  $W/C=0.5$  の場合における  $D_{ap}$  と単位水量の関係を示したものである。明確な傾向は見られないことから， $W/C$  が同じであれば，コンクリート中におけるペ

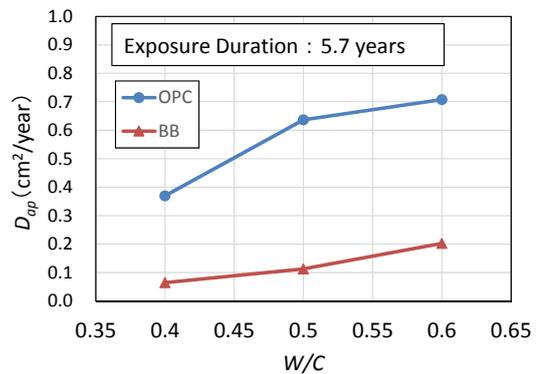


図-3.4  $W/C$  と  $D_{ap}$  の関係，縦軸： $D_{ap}$ ，横軸： $W/C$ ，青：OPC，赤：BB

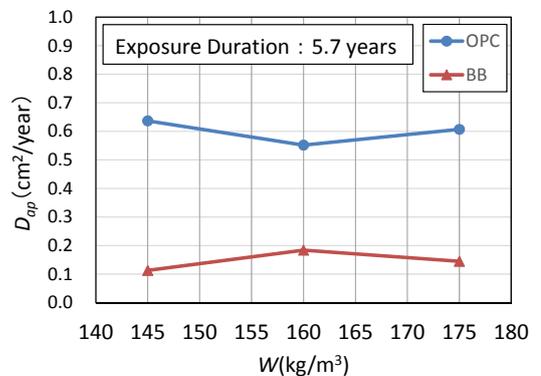


図-3.5 単位水量と  $D_{ap}$  の関係 ( $W/C=0.5$ )，縦軸： $D_{ap}$ ，横軸：単位水量，青：OPC，赤：BB

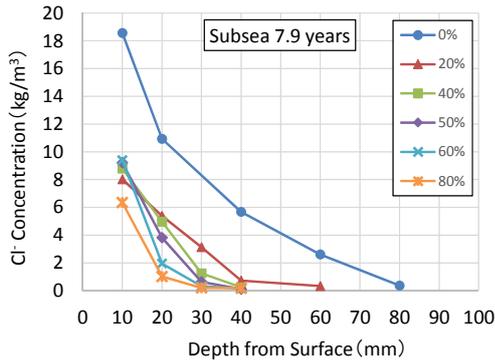


図-3.6 置換率の塩化物イオン分布に対する影響，縦軸：塩化物イオン濃度，横軸：表面からの距離，各線（色の違い）：高炉スラグ微粉末の置換率

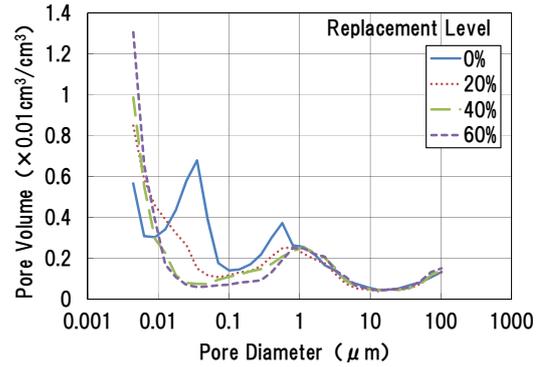


図-3.8 置換率と細孔径分布の関係，縦軸：細孔容積，横軸：細孔径，各線（色の違い）：高炉スラグ微粉末の置換率

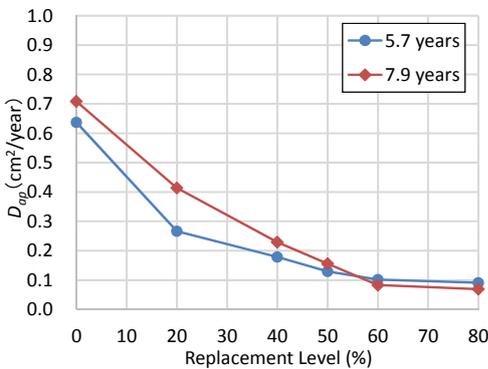


図-3.7 置換率による  $D_{ap}$  への影響，縦軸： $D_{ap}$ ，横軸：高炉スラグ微粉末の置換率，各線（色の違い）：暴露年数

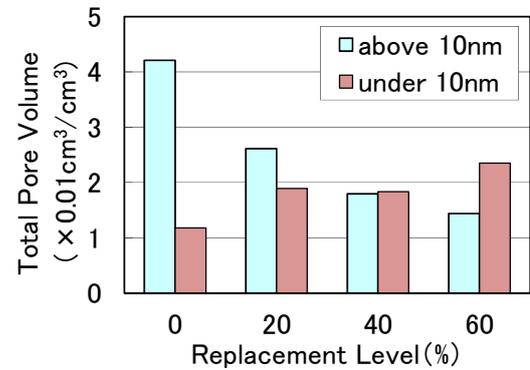


図-3.9 置換率と細孔容積の関係，縦軸：総細孔容積，横軸：置換率，青棒：10nm 以上の総細孔容積，赤棒：10nm 以下の総細孔容積

ースト量の増加による塩化物イオンの浸透性状への影響の程度は大きくないと考えられる。

#### (2) 高炉スラグ微粉末の置換率の影響

図-3.4 および図-3.5 では、OPC に比べ BB の  $D_{ap}$  は非常に小さくなる傾向を示した。これは、高炉スラグ微粉末の混和による影響であり、置換率の変化が塩化物イオンの浸透性状に及ぼす影響についての検討結果を以下に記す。

図-3.6 は、普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末に 0, 20, 40, 50, 60 および 80% で置換させた場合の塩化物イオン濃度分布を示したものである。置換率 0% が普通ポルトランドセメント、40, 50, 60% が高炉セメント B 種に該当する。なお、通常の高炉セメント B 種は 40~45% である。置換率の増加に伴い、表面から遠い位置での塩化物イオン濃度は低下する傾向にあった。また、図-3.7 に示す置換率と  $D_{ap}$  の関係では、置換率の増加に伴い、 $D_{ap}$  が減少する傾向が明確に現れた。

置換率の増加に伴って上述のように遮塩性が向上する原因を調査するため、細孔径分布を測定した。その結果を図-3.8 に示す。置換率の違いによる影響は、 $1\mu\text{m}$  以下の細孔径分布で特に認められた。次に、2.2.2(2)における電気

二重層の考え方に基づき、細孔径 10nm を閾値とし、図-3.8 から総細孔容積を求めたものが図-3.9 である。置換率の増加に伴い、10nm 以上の範囲での容積が減少する傾向から、塩化物イオンが浸透しやすい細孔が減少（細孔構造が緻密化）していると考えられる。

また、高炉スラグ微粉末の混和により普通ポルトランドセメント量が低下すると、ペースト中のカルシウム濃度が減少し、初期における  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  生成量が低下する結果、遷移帯が薄くなるという見解（内川，1995）もある。上述の 10nm 以上の範囲における細孔容積の減少には、この影響も含まれている可能性が考えられる。

#### (3) 暴露期間による影響

図-3.10 は  $D_{ap}$  の経時変化を示したものである。暴露 1 年目から 5.7 年目において  $D_{ap}$  は大きく減少していることがわかる。その原因の一つとして、暴露期間の長期化に伴い、セメントの水和が進むことで、細孔構造が緻密化したことが考えられる。一方、5.7 年目から 7.9 年目において  $D_{ap}$  はほとんど変化しない結果となり、2.3.2(4) に示した過去の知見と一致した。

また、置換率の増加とともに、浸透フロント（2.2.3 参

照) が浅くなる傾向にあった。W/C が 0.5 の場合、置換率 40%以上では、5.7 年から 7.9 年にかけて塩化物イオンの浸透が停滞していると考えられた。(2)において述べた細孔構造の緻密化と電気二重層が浸透フロントに影響しているとは考えられるものの、フロントの停滞を十分に説明できるものではない。この点については、試験体内部の含水量に原因があるとする考察(たとえば高橋ら, 2012)などもあり、今後の検討が必要である。

### 3.4 まとめ

本章では、長期海洋暴露試験を基に、コンクリートの塩化物イオン拡散メカニズムに関する検討を行った。主な知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに、塩化物イオン浸透抵抗性が向上した。この理由としては、1) 細孔構造の緻密化に伴い、電気二重層の影響を強く受ける微細な細孔が増加したこと、2) 骨材界面の遷移帯の厚さが減少したこと、等が考えられた。
- (2) 高炉スラグ微粉末の置換率の増加は、浸透フロントの停滞に寄与すると考えられた。
- (3) 今回の実験の範囲において、既往の知見と同様に、見かけの拡散係数  $D_{ap}$  は 5.7 年目から 7.9 年目にかけて定常値となる傾向が確認された。

## 4. 長期海洋暴露試験および実構造物調査により得られた見かけの拡散係数の実態調査

### 4.1 はじめに

見かけの拡散係数  $D_{ap}$  は、使用材料や配合だけでなく、施工条件(養生方法等)、コンクリートの暴露環境など様々な要因の影響を受け、結果として、値が大きくばらつくことが知られている。

本章では、実構造物および長期海洋暴露試験に供した試験体における  $D_{ap}$  を収集し、 $D_{ap}$  の実態把握を試みた。

### 4.2 長期海洋暴露試験の概要

本調査のため、全国の港湾工事におけるコンクリート打設時のコンクリートを使用した試験体を製作し、長期暴露試験に供し、塩化物イオン濃度分布および  $D_{ap}$  を取得した。また、3章の試験体 1 および過去の知見である後述する複数の異なるシリーズの試験体における  $D_{ap}$  を加えて考察を行った。調査結果である塩化物イオン濃度分布は付録 A に示す。また、 $D_{ap}$  は 4.4.3 に実構造物の調査結果と共に示す。

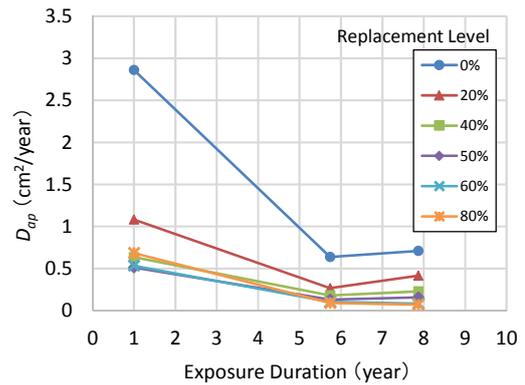


図-3.10  $D_{ap}$  の経時変化, 縦軸:  $D_{ap}$ , 横軸: 暴露期間, 各線 (色の違い): 高炉スラグ微粉末の置換率

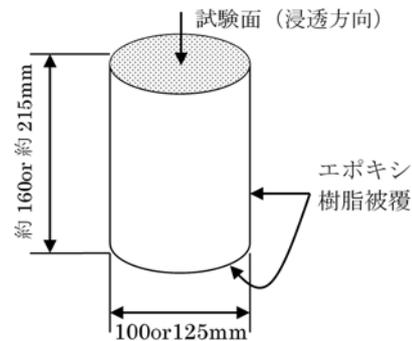


図-4.1 試験体2の概略図

表-4.1 試験体2のコンクリート配合等

試験体番号	セメント		W/C	単位量 (kg/m³)				暴露期間(年)					
	OPC	BB		W	C	S	G	0.99	1.16	5.60	5.81	6.20	
No.31		●	0.64	153	239	837	1100		1体		1体		
No.33		●	0.51	167	329	763	1011		1体		1体		
No.38		●	0.59	149	253	747	1178		1体		1体		
No.40	●		0.64	157	245	827	1085		1体		1体		
No.42		●	0.46	156	339	740	1063		1体		1体		
No.44		●	0.54	174	323	880	888		1体		1体		
No.48	●		0.54	139	257	832	1314		1体		1体	1体	
No.56		●	0.47	173	372	718	1037	1体		1体			
No.64		●	0.45	167	372	742	1037	1体		1体			
No.65		●	0.48	151	316	786	1093	1体		1体			
No.66		●	0.47	137	291	748	1098	1体		1体			
No.70.71		●	0.50	163	326	754	1066	2体		2体			
No.74		●	0.48	165	344	746	1031	1体		1体			
No.75		●	0.54	168	312	806	1017	1体		1体			

#### 4.2.1 全国の港湾工事時に採取した試験体(試験体 2)

本試験体は  $D_{ap}$  の収集と、 $D_{ap}$  の全国的傾向の把握を目的として、各地方整備局等で実施された港湾施設建設におけるコンクリート打設時に製作された管理供試体(円柱)を収集したものである。

本試験体の概略図を図-4.1に示す。収集した管理供試体の上・下両端約 20mm を切断後、一方向からのみ塩化物イオンが浸透するよう 1 面以外をエポキシ樹脂で被覆した。収集した管理供試体は OPC が 22 種類、BB が 71 種類であり、詳細を付録 B に示す。2.3.2(4)の通り  $D_{ap}$  取得時の暴露年数が 5 年以上であることが望ましく、その条件を満たすものは OPC が 2 種類、BB が 12 種類であった。それらの

配合および暴露期間等を表-4.1 に示す。

試験体の暴露環境については、3 章同様に、神奈川県横須賀市に位置する、港湾空港技術研究所所有の長期暴露施設「海水循環水槽」における「海中部」とした。なお、本試験条件の特徴を以下に示す。

1) 溶液が自然海水であり、実環境と同様な暴露環境を再現可能

2) 常時海水中に浸漬させることで、試験期間中、一定の状態を保持することが可能

3) 年間平均気温は 16°C 程度（神奈川県三浦市での気象庁データ）であり、我が国の中で平均的な気象環境に位置する。

#### 4.2.2 港湾空港技術研究所で製作した試験体（試験体 3～6）

##### (1) 試験体 3

本試験体は普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用い、 $W/C$  を 0.47~0.52 とした  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱試験体である。細骨材には川砂（表乾密度：2.63 g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.63%），粗骨材には砕石（表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>，吸水率 0.60%）を用いた。試験体 1 や試験体 2 とは異なり、塩化物イオンの浸透をエポキシ樹脂によって遮断していないため、円柱側面から塩化物イオンが浸透する。そのため、 $D_{ap}$  は、円柱座標系を用いて計算した（審良ら，2005）。コンクリート配合を、 $D_{ap}$  を含めて表-4.2 に示す。本試験体は 3.2 の海水循環水槽（干満帯を模擬）に約 10 年間設置された。

##### (2) 試験体 4

本試験体は普通ポルトランドセメントを用い、 $W/C$  を 0.55 とした 600×900×600mm のコンクリートブロックである。細骨材には千葉県木更津産山砂（表乾密度：2.61 g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.74%），粗骨材には北海道上市磯町産砕石（表乾密度：2.70 g/cm<sup>3</sup>，吸水率 0.33%）を用いた。 $\phi 100\text{mm}$  のコアを試験体上面から採取し、塩化物イオン濃度分布から  $D_{ap}$  を求めた。試験体の配合を表-4.3 に、 $D_{ap}$  を含めて示す。本試験体は 3.2 の海水シャワー場（飛沫帯を模擬）に 5.4 年間設置された。

##### (3) 試験体 5

本試験体は 5 種のセメント（普通ポルトランドセメント，高炉セメント A・B・C 種，フライアッシュセメント B 種）を用いて、 $\phi 150 \times 300\text{mm}$  の円柱試験体を製作した。本試験体の概略図を図-4.2 に示す。なお、 $W/C$  は 0.45 と 0.55 の 2 種類である。細骨材は川砂（表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.82%），粗骨材は川砂利（表乾密度 2.76g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.10%）を用いた。粗骨材の最大寸法は 20mm である。また、混和剤として、AE 減水剤および AE 剤を用いた。試験

表-4.2 試験体3のコンクリート配合等

試験体番号	セメント		W/C	単体量(kg/m <sup>3</sup> )				暴露期間	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /年)
	OPC	BB		W	C	S	G		
1	●		0.515	170	330	831	977	1体	0.74
2	●		0.500	165	330	836	985	1体	0.69
3	●		0.470	155	330	847	1001	1体	0.50
4	●		0.515	170	330	923	964	1体	0.63
5		●	0.527	174	330	810	972	1体	0.12
6		●	0.500	165	330	821	985	1体	0.17
7		●	0.470	155	330	831	1001	1体	0.077
8		●	0.515	170	330	907	964	1体	0.068

表-4.3 試験体4のコンクリート配合等

試験体番号	セメント		W/C	単体量(kg/m <sup>3</sup> )				暴露期間	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /年)
	OPC	BB		W	C	S	G		
N	●		0.55	158	288	786	1094	1体	0.36

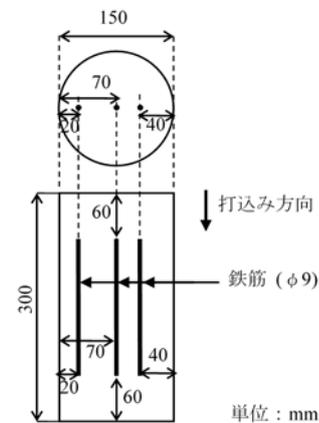


図-4.2 試験体5の概略図

表-4.4 試験体5のコンクリート配合等

試験体番号	セメント		W/C		単体量(kg/m <sup>3</sup> )				暴露期間	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /年)
	OPC	BB	0.45	0.55	W	C	S	G		
OPC 0.45	●		●		162	360	738	1110	1体	0.43
OPC 0.55	●			●	165	302	826	1056	1体	0.49
BB 0.45		●	●		160	355	736	1108	1体	0.10
BB 0.55		●		●	162	295	793	1099	1体	0.22

表-4.5 試験体6のコンクリート配合等

試験体番号	セメント		W/C	単体量(kg/m <sup>3</sup> )				暴露期間	$D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /年)
	OPC	BB		W	C	S	G		
37-20	●		0.37	178	481	609	1080	1体	0.12
50-35 No.1	●		0.50	165	330	804	1061	1体	0.53
50-35 No.2	●		0.50	165	330	804	1061	1体	0.72

体の配合を表-4.4 に、 $D_{ap}$  を含めて示す。なお、本検討では普通ポルトランドセメント，高炉セメント B 種の結果のみを使用した。また、試験体 1 と同様に、塩化物イオンは円柱側面から浸透するため、 $D_{ap}$  は円柱座標系を用いて計算した（審良ら，2005）。本試験体は 3.2 の海水循環水槽（干満帯を模擬）に約 15 年間設置された。

##### (4) 試験体 6

本試験体は普通ポルトランドセメントを用いて、 $W/C$  を 0.37 および 0.50 とした 150×150×800mm の角柱試験体で

ある。細骨材は台湾産川砂（表乾密度：2.66 g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.17%），粗骨材は酒匂川産砕石（表乾密度：2.76 g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.06%）である。φ68mm のコアを採取し，JCI-SC4 に準拠して塩化物イオン濃度分布および  $D_{ap}$  を求めた。試験体の配合と  $D_{ap}$  を表-4.5 に示す。

暴露環境は沖縄県那覇港の橋桁下（D.L.+6~7m）で，常時波しぶきや潮風の影響を受けるため，飛沫帯に近い環境である。暴露期間は約 15 年間である。

### 4.3 実構造物調査の概要

実構造物の  $D_{ap}$  の実態を把握するため，過去に実構造物を対象に実施された調査結果から， $D_{ap}$  を収集した。本検討に使用した施設の一覧を表-4.6 に示す。セメント種類の不明なものについては，後述する方法によりセメント種類を推定した結果を示す。

#### 4.3.1 港湾空港技術研究所で実施した調査

過去に実施された現地調査結果（山路，2011）から  $D_{ap}$  を取得した。調査対象施設は A-1~A-5 港である。いずれもセメント種類が不明であった。そこで，BB に混和されている高炉スラグ微粉末に硫黄が含まれていることに着目し，塩酸で溶解させ，硫化水素が発生した場合には BB，発生しない場合は OPC と推定することとした。また，A-1 港および A-2 港については別途 SEM-EDS 分析も実施し，セメント種類を OPC と推定した。

#### 4.3.2 地方整備局で実施した調査

各地方整備局が作成した維持管理計画書および劣化状況点検診断調査結果に記録された塩化物イオン濃度分布から， $D_{ap}$  を計算した。調査対象施設は B-1~B-5 港である。B-1 港についてはセメント種類が不明であったため，4.3.1 の硫化水素の発生の有無を確認する手法を用いてセメント種類を推定した。セメント種類推定のための試料は，山路ら（2006）の手法に倣い，図-4.3 に示すように現地からφ30×30mm のコアを，栈橋上部工のコンクリートと一体であることを確認した箇所から取得した。また，別途 SEM-EDS 分析を実施し，セメント種類を OPC と推定した。

### 4.4 試験体および実構造物における見かけの拡散係数の実態

#### 4.4.1 試験体における調査結果

本検討で得られた試験体の塩化物イオン濃度分布を付録 A に示す。また， $D_{ap}$  は後述の図-4.7 および図-4.8 に示す。

#### 4.4.2 実構造物における調査結果

本検討で得られた実構造物の塩化物イオン濃度分布を付録 C に，一部を一例として図-4.4，図-4.5 に示す。供用開始から 30 年以上経過した場合には，表面付近の塩化物イオ

表-4.6 調査対象とした港湾施設の一覧

施設	セメント種類	W/C	供用期間	セメント種類の推定方法	
				塩酸による検査	SEM-EDS 分析
A-1港	OPC*	-	35年	○	○
A-2港	OPC*	-	39年	○	○
A-3港	OPC*	-	19年	○	-
A-4港	OPC*	-	21年	○	-
A-5港	OPC*	-	39年	○	-
B-1港	OPC*	-	46年	○	○
B-2港	OPC	-	26年		
B-3港	OPC	-	31年		
B-4港	BB	0.536	11年		
B-5港	BB	0.500	12年		

※セメント種類の推定結果

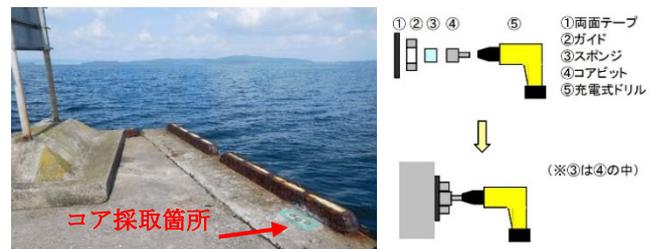


図-4.3 コア採取箇所と概略図

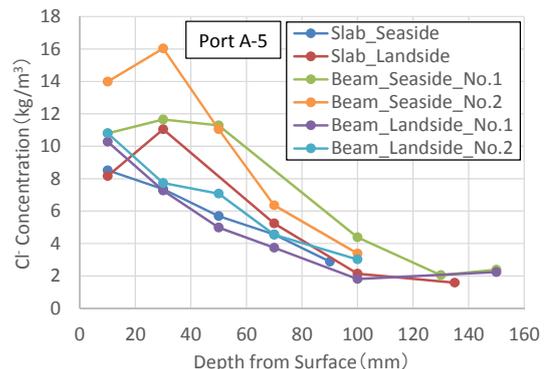


図-4.4 OPC(推定)の塩化物イオン濃度分布の一例，縦軸：塩化物イオン濃度，横軸：表面からの距離，各線（色の違い）：コア採取箇所

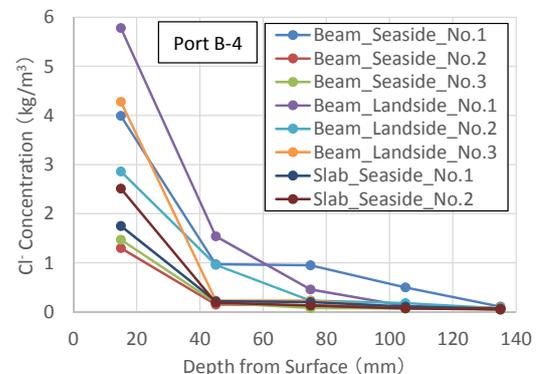


図-4.5 BBの塩化物イオン濃度分布の一例，縦軸：塩化物イオン濃度，横軸：表面からの距離，各線（色の違い）：コア採取箇所

ン濃度が低下しているケースが多く確認された。この場合には 2.3.1 において述べたように、低下した部分を除いて  $D_{ap}$  を求めた。図-4.6 は付録 C に示した実構造物の塩化物イオン濃度分布から得られた  $D_{ap}$  の累積度数分布を示したものである。OPC では  $0\sim 0.8\text{cm}^2/\text{年}$  が全体の 67% を、BB では  $0\sim 0.8\text{cm}^2/\text{年}$  が全体の 94% を占めた。また、OPC の  $D_{ap}$  が  $0\sim 1.6\text{cm}^2/\text{年}$  まで幅広く分布するのに対し、BB は  $0.8\text{cm}^2/\text{年}$  以上のデータは一点のみであった。 $D_{ap}$  の平均値および中央値は、OPC では  $0.67\text{cm}^2/\text{年}$  および  $0.54\text{cm}^2/\text{年}$ 、BB では  $0.51\text{cm}^2/\text{年}$  および  $0.48\text{cm}^2/\text{年}$  であった。このように、セメント種類の違いによる影響が実構造物においても確認された。

#### 4.4.3 見かけの拡散係数と W/C の関係

試験体 1 (3 章)、4.2 および 4.3 において得られた  $D_{ap}$  と W/C の関係について、OPC を図-4.7、BB を図-4.8 に示す。なお、実構造物において、W/C が不明なデータが多い。この場合の W/C については、以下の方法により仮定する。図-4.9 は、1974 年度に栈橋施設に対して実施された劣化実態調査結果である (大即ら, 1988)。この結果より、大半が W/C = 0.50 である。よって、実構造物において、W/C が不明なデータについては、W/C = 0.50 と仮定する。

試験体は W/C の増加に伴い  $D_{ap}$  が増加していることが確認された。一方、実構造物は試験体に比べてばらつきが大きい結果となった。また、実構造物における  $D_{ap}$  の平均値は OPC が  $0.67\text{cm}^2/\text{年}$ 、BB が  $0.51\text{cm}^2/\text{年}$  であるから、OPC はほぼ試験体と同程度の数値であり、BB は試験体よりも高い数値であった。

#### 4.5 まとめ

本章では試験体と実構造物から取得した見かけの拡散係数を比較した。以下に得られた知見を記す。

- (1) 実構造物の見かけの拡散係数は、普通ポルトランドセメントでは  $0.1\sim 1.6\text{cm}^2/\text{年}$  程度、高炉セメント B 種では  $0.1\sim 0.8\text{cm}^2/\text{年}$  程度であった。
- (2) 実構造物から得られた見かけの拡散係数は、試験体から得られた見かけの拡散係数よりもばらつきが大きくなることが示された。

### 5. 塩化物イオン拡散係数の特性値の提案

#### 5.1 はじめに

本章では、4 章で収集した見かけの拡散係数  $D_{ap}$  の実態を基に、鉄筋腐食開始時期の予測時に用いる塩化物イオン拡散係数の特性値  $D_k$  の導出を行う。

なお、H19 基準における、塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する予測手法の課題と、それに対する対応方針の

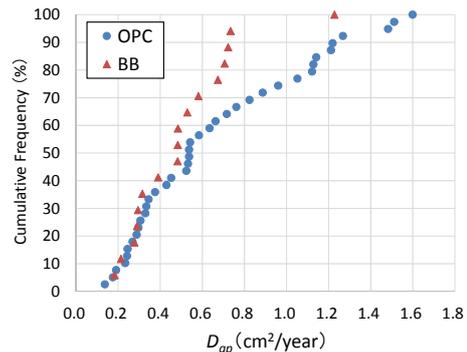


図-4.6 OPC の  $D_{ap}$  の累積度数分布、縦軸：累積度数、横軸： $D_{ap}$ 、青点：OPC、赤点：BB

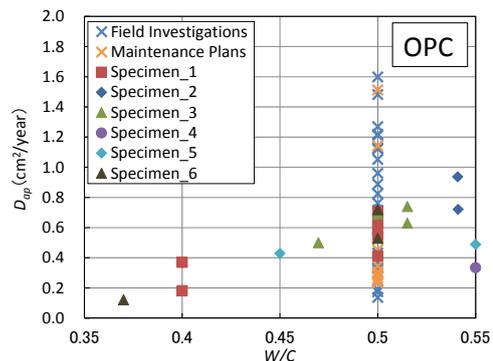


図-4.7 OPC における  $D_{ap}$  と W/C の関係、縦軸： $D_{ap}$ 、横軸：W/C、×：実構造物、その他：試験体

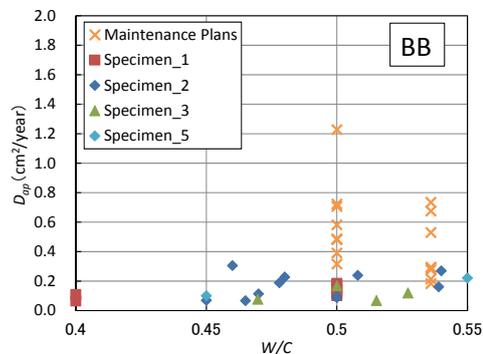


図-4.8 BB における  $D_{ap}$  と W/C の関係、縦軸： $D_{ap}$ 、横軸：W/C、×：実構造物、その他：試験体

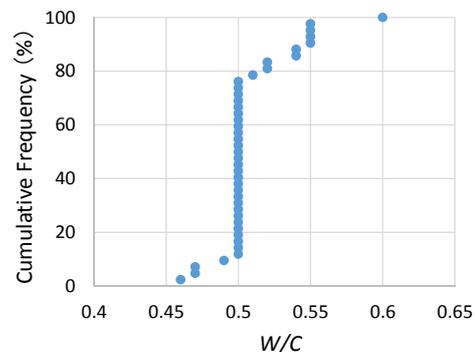


図-4.9 栈橋上部工の W/C の累積度数分布 (大即ら, 1988)、縦軸：累積度数、横軸：W/C

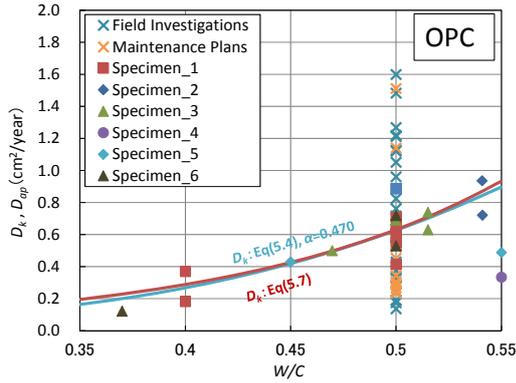


図-5.1 OPC の  $D_k$  提案値，縦軸： $D_k, D_{ap}$ ，横軸： $W/C$ ，青線： $\alpha=0.470$  の式(5.4)，赤線：式(5.7)，×：実構造物の  $D_{ap}$ ，その他：試験体の  $D_{ap}$

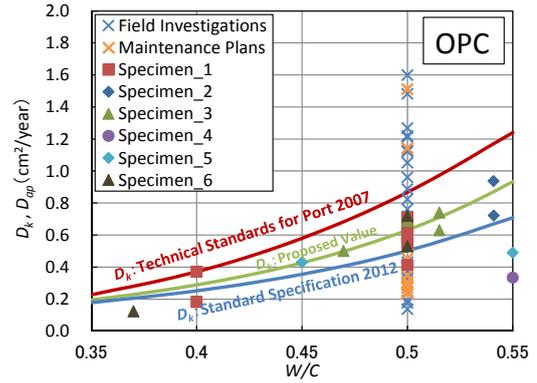


図-5.3 OPC における  $D_k$  の比較，縦軸： $D_k, D_{ap}$ ，横軸： $W/C$ ，青線：示方書 2012 の  $D_k$ ，緑線：式(5.7)，赤線：H19 基準の  $D_k$ ，×：実構造物の  $D_{ap}$ ，その他：試験体の  $D_{ap}$

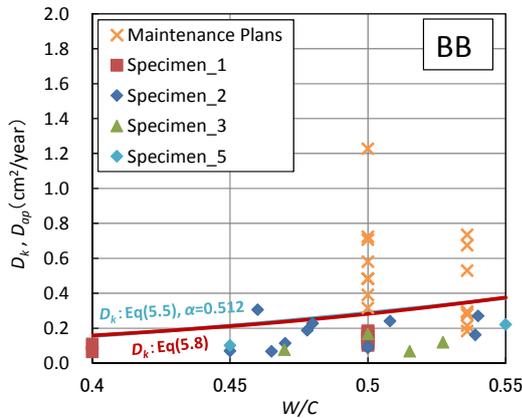


図-5.2 BB の  $D_k$  提案値，縦軸： $D_k, D_{ap}$ ，横軸： $W/C$ ，青線： $\alpha=0.512$  の式(5.5)，赤線：式(5.8)，×：実構造物の  $D_{ap}$ ，その他：試験体の  $D_{ap}$

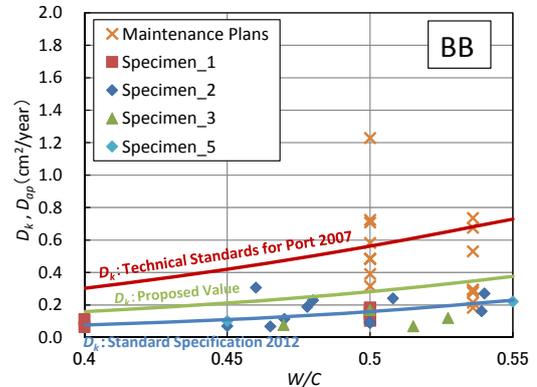


図-5.4 BB における  $D_k$  の比較，縦軸： $D_k, D_{ap}$ ，横軸： $W/C$ ，青線：示方書 2012 の  $D_k$ ，緑線：式(5.8)，赤線：H19 基準の  $D_k$ ，×：実構造物の  $D_{ap}$ ，その他：試験体の  $D_{ap}$

概要を付録Dに整理した。また、本章で提案した塩化物イオンの拡散係数の特性値を用いた鉄筋腐食開始時期の試算例（かぶり70mmの場合）を付録Eに、設計供用期間50年を満足するかぶりの試算例を付録Fに記載した。

## 5.2 拡散係数の特性値の導出

本章では、4章で得られた、試験体および実構造物における  $D_{ap}$  の調査結果に基づき、 $D_k$  を提案する。

$D_k$  に関する提案値は、図-4.7 および図-4.8 における  $D_{ap}$  の分布を基に、下記の手順で導出した。式(5.1~5.3)はH19基準における  $D_k$  の式である。

$$D_k = \gamma_p \alpha D_p \quad (5.1)$$

OPC の場合

$$\log_{10} D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (5.2)$$

BB の場合

$$\log_{10} D_p = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (5.3)$$

ただし、 $D_p$  に関する安全係数  $\gamma_p$  は一般的な数値である1.0とする。

式(5.1)を式(5.2)および式(5.3)に代入すると、式(5.4)および式(5.5)が得られる。

OPC の場合

$$\log_{10}(D_k/\alpha) = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (5.4)$$

BB の場合

$$\log_{10}(D_k/\alpha) = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (5.5)$$

図-4.7 および図-4.8 に示す  $D_{ap}$  と、式(5.4)および式(5.5)との誤差が最小となるよう換算係数  $\alpha$  を計算した結果、 $\alpha$  は OPC では 0.470、BB では 0.512 であった。なお、H19 基準においては、 $\alpha$  は OPC では 0.65、BB では 1.0 であった。

次に、式の形態の簡素化のため、式(5.4)および式(5.5)を一次関数に変更する。式(5.6)を基本式、係数  $a$  および  $b$  を変数として、式(5.4)および式(5.5)の  $\alpha$  に OPC は 0.470、BB は 0.512 を代入した式との誤差が最小となるよう  $a$  および  $b$  を求めた。ただし、 $a, b$  は有効数字を小数第一位とする正数とした。算出された  $a, b$  を式(5.6)に代入し

たものが、式 (5.7) および式 (5.8) である。以降、提案値と呼ぶ。

$$\log_{10}D_k = a(W/C) - b \quad (5.6)$$

OPC の場合

$$\log_{10}D_k = 3.4(W/C) - 1.9 \quad (5.7)$$

BB の場合

$$\log_{10}D_k = 2.5(W/C) - 1.8 \quad (5.8)$$

式 (5.4) および式 (5.7)、式 (5.5) および式 (5.8)、4 章で得られた  $D_{ap}$  の関係を図-5.1 および図-5.2 に示す。

図-5.3 および 図-5.4 には  $D_{ap}$  と提案値の位置関係を示し、参考として H19 基準およびコンクリート標準示方書設計編 2012 年度版 (土木学会, 2012. 以降, 示方書 2012) における  $D_k$  も併示した。提案値はどちらも H19 基準と示方書 2012 の間に位置した。各式を以下に示す。

OPC の場合

・ H19 基準

$$\log_{10}D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (5.9)$$

・ 示方書 2012

$$\log_{10}D_k = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (5.10)$$

BB の場合

・ H19 基準

$$\log_{10}D_k = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (5.11)$$

・ 示方書 2012

$$\log_{10}D_k = 3.2(W/C) - 2.4 \quad (5.12)$$

### 5.3 まとめ

試験体および実構造物から得られた見かけの拡散係数から求めた、拡散係数の特性値の提案値を以下に記す。

OPC の場合

$$\log_{10}D_k = 3.4(W/C) - 1.9$$

BB の場合

$$\log_{10}D_k = 2.5(W/C) - 1.8$$

ただし、本式の基となった見かけの拡散係数は飛沫帯・干満帯・海中部に位置するコンクリートから取得されたものであるため、本式は海洋環境のうち飛沫帯・干満帯・海中部に位置する鉄筋コンクリートを主に想定している。

## 6. 結論

本検討では、まず、長期海洋暴露試験を基に、コンクリートの塩化物イオン拡散メカニズムに関する検討を行った。主な知見を以下に示す。

(1) 高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに、塩化物イオン浸透抵抗性が向上した。この理由としては、1) 細孔

構造の緻密化に伴い、電気二重層の影響を強く受ける微細な細孔が増加したこと、2) 骨材界面の遷移帯の厚さが減少したこと、等が考えられた。

(2) 高炉スラグ微粉末の置換率の増加は、浸透フロントの停滞に寄与すると考えられた。

(3) 今回の実験の範囲において、既往の知見と同様に、見かけの拡散係数  $D_{ap}$  は 5.7 年目から 7.9 年目にかけて定常値となる傾向が確認された。

次に、試験体および実構造物から見かけの拡散係数を取得し、実態の把握を行った。その結果を以下に記す。

(4) 実構造物の見かけの拡散係数は、普通ポルトランドセメントでは  $0.1\sim 1.6\text{cm}^2/\text{年}$  程度、高炉セメント B 種では  $0.1\sim 0.8\text{cm}^2/\text{年}$  程度であった。

最後に、試験体および実構造物から収集した見かけの拡散係数の実態を基に、鉄筋腐食開始時期の予測時に用いる塩化物イオン拡散係数の特性値を算出する式の導出を行った。その式を以下に記す。

(5) OPC の場合

$$\log_{10}D_k = 3.4(W/C) - 1.9$$

BB の場合

$$\log_{10}D_k = 2.5(W/C) - 1.8$$

ただし、本式の基となった見かけの拡散係数は飛沫帯・干満帯・海中部に位置するコンクリートから取得されたものであるため、本式は海洋環境のうち飛沫帯・干満帯・海中部に位置する鉄筋コンクリートを主に想定している。

## 7. おわりに

本検討では、試験体と実構造物との見かけの拡散係数の傾向の違いが確認された。各地方整備局から提供された管理供試体を元に製作した試験体 (試験体 2) は、該当する実港湾構造物が現存し、かつコンクリートの情報は把握している。これらに対する調査を行うことで、見かけの拡散係数の傾向の違いとその原因について検討を進める予定である。また、得られた見かけの拡散係数をもとに、塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査手法の精度向上を図る予定である。

(2017年11月2日受付)

## 謝辞

本検討に使用した試験体の一部は北海道開発庁・各地方整備局・沖縄総合事務局からご提供いただいた。また、実構造物の情報の一部は、北海道開発庁・各地方整備局が作

成された維持管理計画書に記載されたものであり、国土技術政策総合研究所からご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 審良善和, 濱田秀則, 大即信明, T. U. Mohamed (2005) : 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.
- 岩浅瑛大, 名和豊春, 福島浩樹, Y. Elakneswaran (2010) : セメント硬化体中の塩化物イオン拡散モデリング, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.338-345.
- 内川浩 (1995) : セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.33, No.9, pp.5-17.
- 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介 (1993) : 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, 4巻, 第2号, pp.1-8.
- 大即信明, 原茂雅光, 濱田秀則 (1988) : 栈橋コンクリート上部工劣化実態概略調査報告, 港湾技術研究所資料, No.617, pp.10-11.
- 加藤佳孝, 魚本健人 (2000) : 遷移帯の特性に着目した硬化体の物質移動特性のモデル化, 土木学会論文集, No.655, V-48, pp.13-21.
- 国土交通省港湾局 (2007) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, pp.486-489.
- 後藤誠史, 茂啓二郎, 高木達雄, 大門正機 (1982) : セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散, セメント技術年報, No.36, pp.49-52.
- 小柳翔平, 高橋佑弥, 石田哲也 (2015) : 高炉スラグ微粉末及びフライアッシュを混和したセメント硬化体の材料物性・塩分浸透性状の経時変化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.109-114.
- 大門正機, 坂井悦郎 (2009) : 「社会環境マテリアル-セメント系材料の使命と持続可能な社会-」, 技術書院, pp.93-94.
- 高橋佑弥, 石田哲也, 岸利治 (2012) : 低水セメント比領域に着目したコンクリート中の塩分浸透および液状水移動に関する熱力学連星解析の高度化, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.796-801.
- 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治 (2010) : 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.803-808.

竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三, 出光隆 (1998) : 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.

土木学会 (2013) : コンクリート標準示方書設計編, pp.149-150.

土木学会 (2009) : 土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[栈橋上部工編], コンクリートライブラリー116, p.65.

西田孝弘, 大即信明, Wanchai Yodsudjai, 丸山真一, Marieta C.L. Castillo (2003) : 温度がコンクリート中微小領域の塩化物イオン拡散係数に及ぼす影響, 日本材料学会第52期学術講演会講演論文集, Vol.52, pp.369-370.

日本コンクリート工学協会 (2008) : セメント系材料の時間依存性挙動に関する研究委員会報告書, pp.6-19.

山路徹, 与那嶺一秀, 審良善和, 浜田秀則 (2014) : 海洋暴露試験に基づくコンクリート中の塩化物イオン拡散性状の時間依存性に関する検討, 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, Vol.14, pp.213-220.

山路徹 (2011) : 海洋に位置するコンクリート構造物の耐久性照査手法に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1232, pp.85-95.

山路徹, 審良善和, 濱田秀則 (2009) : 異なる試験方法により求めた銅スラグ細骨材コンクリートの塩化物イオン拡散係数の比較, 土木学会, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究に関するシンポジウム, pp.433-440.

S. J. Stuart and B. J. Berne (1996a) : Effects of polarizability on the hydration of the chloride ion, J. Phys. Chem. 100, pp. 11934-11943.

S. J. Stuart and B. J. Berne (1996b) : Surface curvature effects in the aqueous ionic salvation of the chloride ion, J. Phys. Chem. A103, pp. 10300-10307.

T. Yamaji, Y. Akira and H. Hamada (2010) : Effect of the exposure environments and period on chloride diffusion in concrete with inhibitor, 2nd International conference on Durability of concrete structures, pp.311-319.

## 記号表

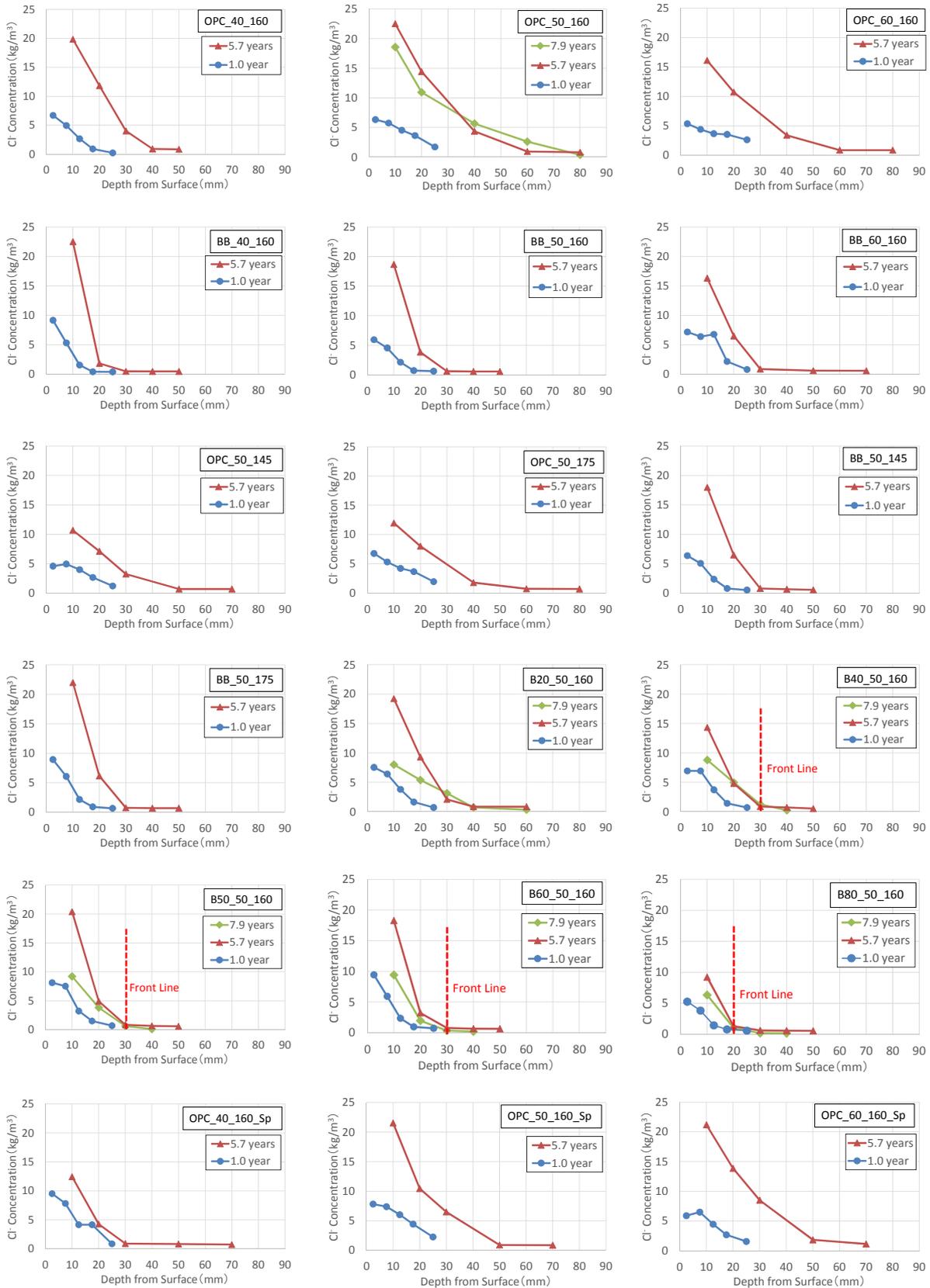
$A_s$	: 鉄筋の断面積 (mm <sup>2</sup> )
$b_w$	: 部材の腹部幅 (mm)
$c$	: かぶり (mm)
$C$	: 単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )

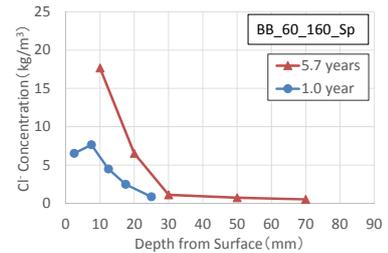
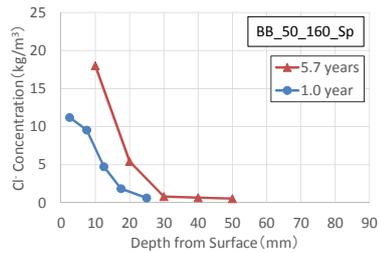
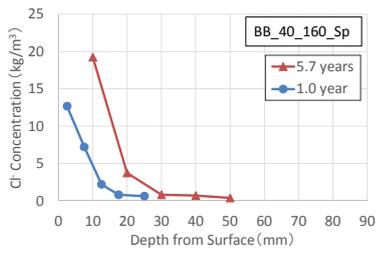
- $C_0$  : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $C_d$  : 鉄筋位置における塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $C_i$  : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $C_{lim}$  : 腐食発生限界塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $C_s$  : 鉄筋の中心間隔 (mm)  
 $d$  : 有効高さ (mm)  
 $D_0$  : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響の定数 (cm<sup>2</sup>/年)  
 $D_{ap}$  : 見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)  
 $D_d$  : ひび割れの影響を考慮した拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)  
 $D_k$  : 拡散係数の特性値 (cm<sup>2</sup>/年)  
 $D_p$  : コンクリートの拡散係数の予測値 (cm<sup>2</sup>/年)  
 $E_c$  : コンクリートのヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>)  
 $E_s$  : 鉄筋のヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>)  
 $f'_c$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $G$  : 単位粗骨材量 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $k$  : 中立軸比  
 $k_1$  : 鉄筋の表面性能がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数  
 $k_2$  : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数  
 $k_3$  : 引張鉄筋の段数の影響を表す係数  
 $l$  : ひび割れ間隔 (mm)  
 $M_d$  : 仕様限界状態検討時の曲げモーメントの設計用値 (kN・m)  
 $n$  : ヤング係数比  
 $p_w$  : 鉄筋比  
 $S$  : 単位細骨材量 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $t$  : 暴露年数 (年)  
 $w$  : ひび割れ幅 (mm)  
 $w_a$  : ひび割れ幅の限界値 (mm)  
 $W$  : 単位水量 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $W/C$  : 水セメント比  
 $x$  : H.W.L.から部材下面までの距離 (m)  
 $\alpha$  : 換算係数  
 $\gamma_c$  : コンクリートの材料係数  
 $\gamma_{Cl}$  : 鉄筋位置における塩化物イオン濃度のばらつきを考慮した安全係数  
 $\gamma_i$  : 構造物係数  
 $\gamma_p$  :  $D_p$ の精度に関する安全係数  
 $\varepsilon'_{csd}$  : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値  
 $\phi$  : 引張鉄筋径で、最小鉄筋の公称径 (mm)  
 $\sigma_{se}$  : 表面に近い位置にある鉄筋応力度の増加量 (N/mm<sup>2</sup>)

## 付録 A 試験体の塩化物イオン濃度分布一覽

### 【試験体 1】

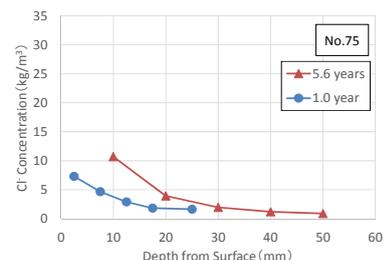
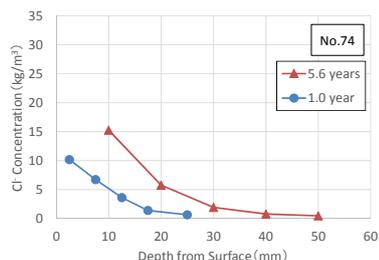
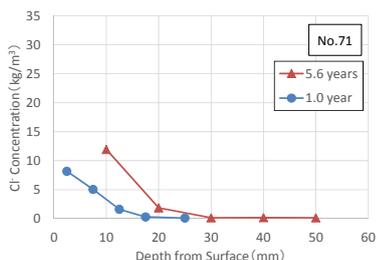
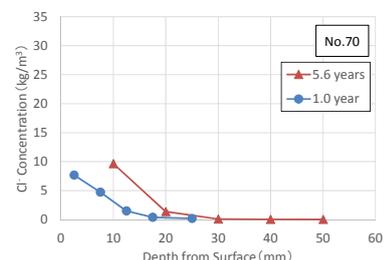
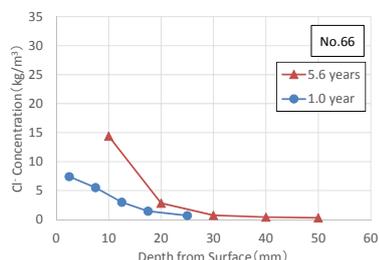
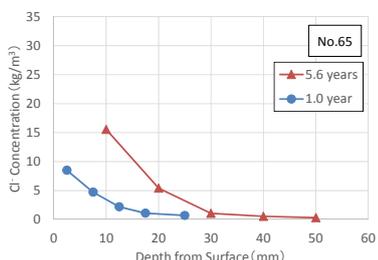
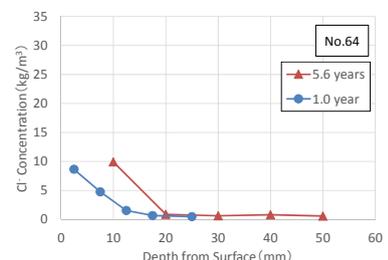
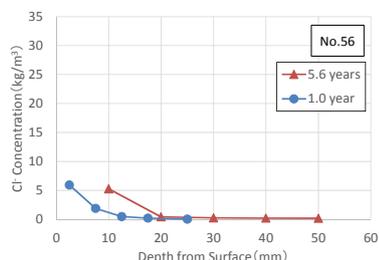
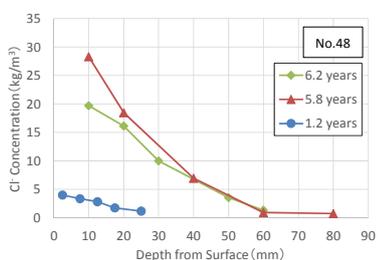
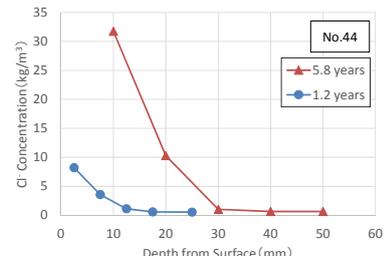
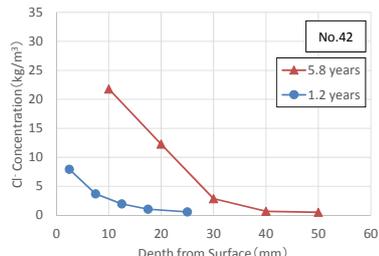
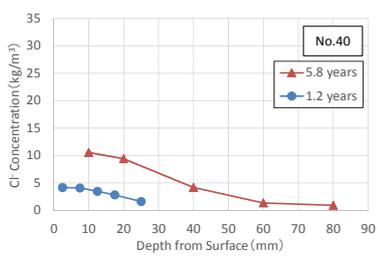
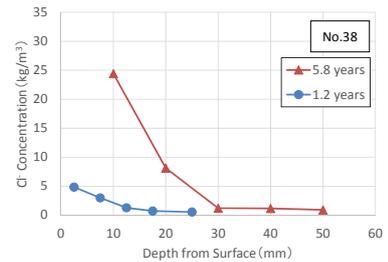
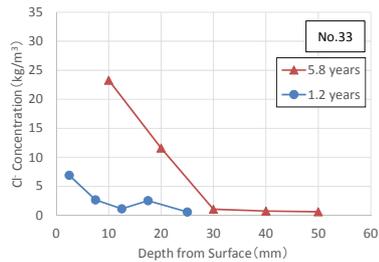
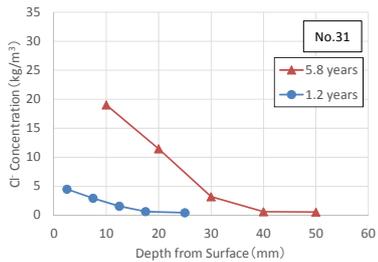
縦軸：塩化物イオン濃度、横軸：表面からの距離、各線（色・形状の違い）：暴露期間、点線：浸透フロント





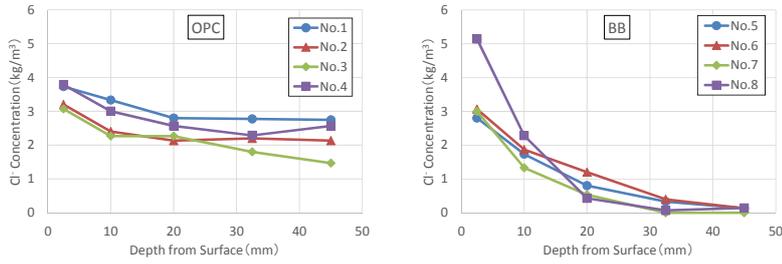
**【試験体 2】**

縦軸：塩化物イオン濃度、横軸：表面からの距離、各線（色・形状の違い）：暴露期間



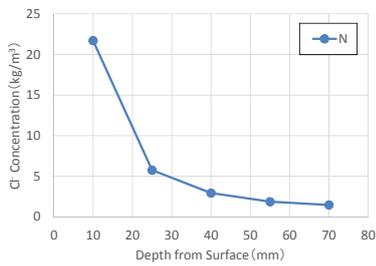
**【試験体3】**

縦軸：塩化物イオン濃度、横軸：表面からの距離、各線（色・形状の違い）：試験体番号



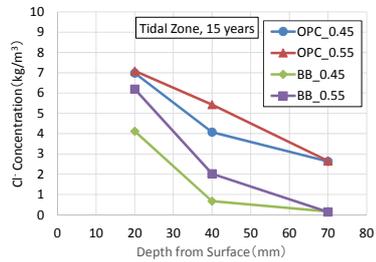
**【試験体4】**

縦軸：塩化物イオン濃度、横軸：表面からの距離



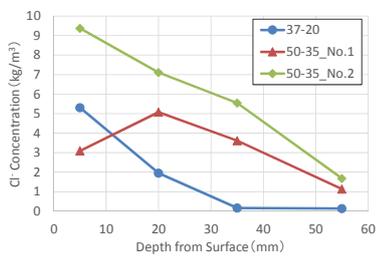
**【試験体5】**

縦軸：塩化物イオン濃度、横軸：表面からの距離、各線（色・形状の違い）：セメント組成\_W/C



**【試験体6】**

縦軸：塩化物イオン濃度、横軸：表面からの距離、各線（色・形状の違い）：試験体番号



付録B 試験体2(製作:各地方整備局等)の配合および試験結果一覧

暴露環境 : 海中部 (海水循環水槽)

No.	打設時の気温(°C)	打設日	セメント種類	呼び強度(N/mm <sup>2</sup> )	Gmax(cm)	W/C(%)	s/a(%)	W(kg/m <sup>3</sup> )	スランプ <sup>o</sup> (cm)	空気量(%)	養生日数(日)	養生方法	使用部位	暴露 1.0~1.15 年		暴露 4.60~6.17 年	
														D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /年)	C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (cm <sup>2</sup> /年)	C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
1	27	2007/5/18	N	18	40	64	40.6	143	9.5	4.1	6	室内	防波堤上部工	5.83	6.24		
2	22	2007/6/6	BB	24	20	53	46.2	163	13	4.5	7	現場	ケーソン	0.35	20.7		
3	21	2007/5/21	BB	24	20	54.8	44.6	167	11.5	4.3	28	現場	ケーソン	0.62	14.2		
4	24	2007/6/20	BB	21	40	60	41	147			7	現場	消波ブロック 50t型	0.57	7.11		
5	24	2007/6/18	BB	18	40	64	43.1	146	8.5	5.3	7	現場	消波ブロック 25t型	0.67	10.2		
6	24	2007/6/5	BB	24	20	54.8	44.6	167	12.5	4.2	28	現場	ケーソン	0.39	16.5		
7	27	2007/6/25	BB	27	20	50.5	54.5	164	13	4	7	現場		0.37	25.8		
8	23	2007/6/7	BB	24	20	53.5	39.6	173	12.5	4.8	12	現場	ケーソン	0.32	22.9		
9	20	2007/6/26	BB	27	40	46.6	42.4	157	11.5	3.9	7	現場	ケーソン	0.45	9.86		
10	17	2007/7/7	BB	24	40	48.1	36.4	153	12	4.4	7	現場	ケーソン	0.45	18.7		
11	22	2007/5/22	BB	27	20	53	45.1	167	13	5	30	現場	上部工	0.81	22.8		
12	17	2007/5/21	BB	21	40	63	43.3	152	8.5	4.5	7	室内	根固方塊	0.16	19.3		
13	24	2007/5/21	BB	21	40	63	43.3	152	8	5	7	室内	被覆ブロック	0.29	19.6		
14	21	2007/5/21	BB	21	40	63	43.3	152	7	4.2	7	室内	蓋コンクリート版	0.30	12.7		
15	21	2007/5/21	BB	21	40	63	43.3	152	8	4.5	7	室内	上部ブロック	0.25	14.1		
16	25	2007/7/19	BB	27	20	54	47	164	12.5	4.6	7	現場	ケーソン(岸壁)	0.32	19.2		
17	28	2007/7/19	BB	18	40	60	41	166	6.5	4.1	7	現場	護岸本体ブロック	0.42	16.4		
18	26.5	2007/7/19	BB	18	40	64.5	41.9	154	8	4.8	7	現場	上部コンクリート	0.92	6.74		
19	27	2007/7/23	BB	21	40	59	40.6	158	9	4.9	5	現場	消波ブロック	0.66	10.8		
20	21	2007/5/16	BB	27	20	52	45	172	13.5	4.2	7	現場 1, 室内 6	ケーソン	0.35	9.52		
21	23	2007/6/7	BB	21	40	63	43.1	155	8		7	現場 1, 室内 6	上部工	1.97	7.08		
22	31	2007/8/24	BB	27	20	49	44.9	163	11	4.1			ケーソン躯体	0.59	11.8		
23	25	2007/7/31	BB	18	40	63	42.1	148	7	4.8	28	現場	16t型テトラ ポット	2.16	7.05		
24	25	2007/9/5	BB	18	40	60	760	160	8	3.9	6	現場	上部工	1.05	6.93		
25	30	2007/9/3	BB	18	40	62.8	40	151	8	4.5	3	現場	被覆ブロック	0.73	11.1		
26	30	2007/9/3	BB	18	40	62.8	40	151	8	4.5	3	現場	被覆ブロック	0.77	13.3		
27	28	2007/9/3	BB	24	20	55	20	165	12.5	5.2	7	現場	ケーソン	0.42	9.26		

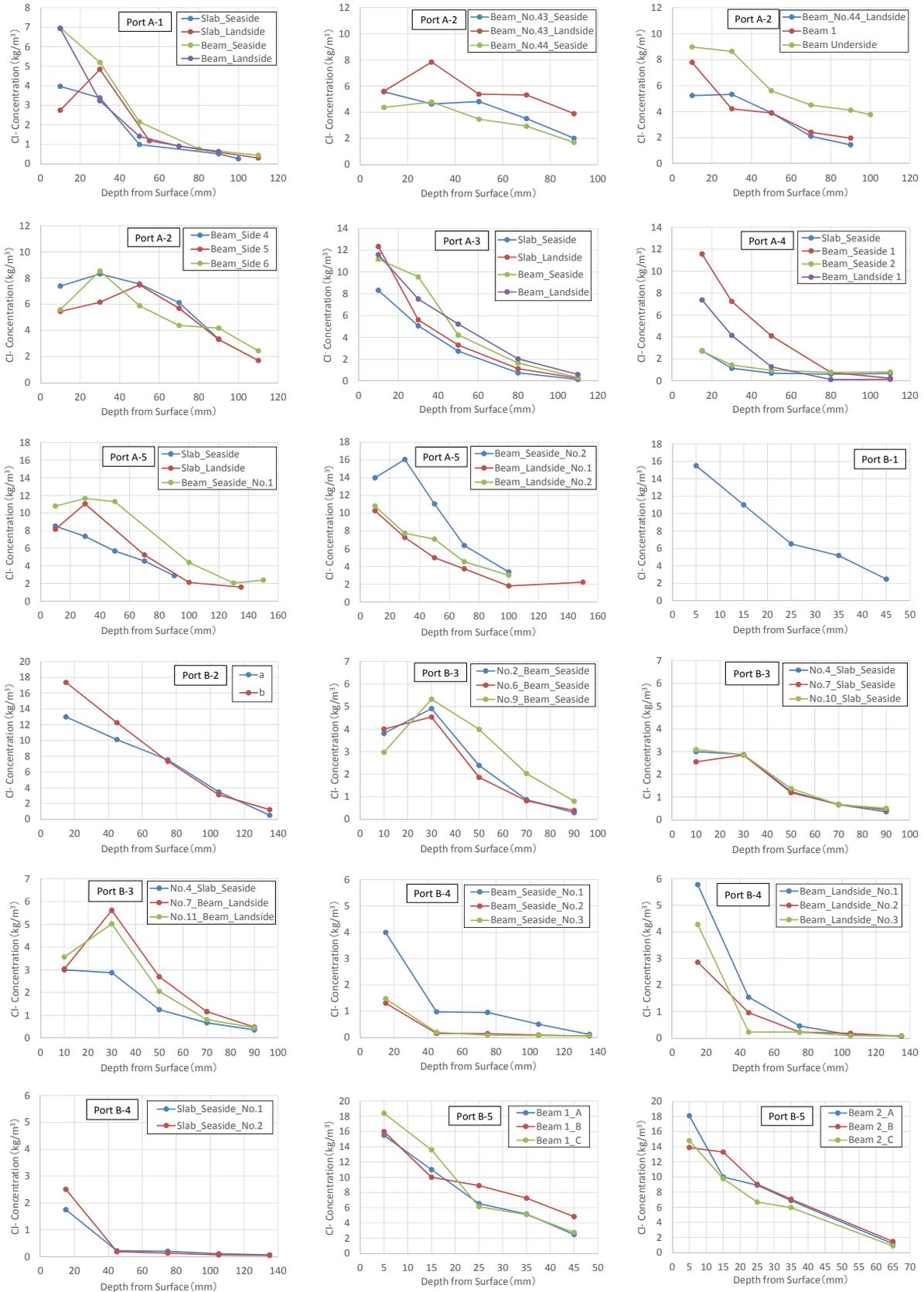
28	26	2007/9/13	N	30	25	47.5	42.9	170	12	4.2	5	現場	ケーソン	0.69	6.08		
29	28	2007/9/6	BB	21	40	61	45.6	152	8	4.2	28	室内	ケーソン	0.25	13.4		
30	27	2007/9/3	BB	27	20	52	45.6	166	12	5.4	28	室内	被覆・根固工 根固方塊	0.43	7.44		
31	26	2007/10/4	BB	21	40	64	44.3	153	8.5	5.1	7	現場	消波ブロック	2.81	6.51	0.34	31.7
32	24	2007/9/13	BB	30	25	42.3	37.9	172			3	現場	本体工	0.33	12.5		
33	24	2007/10/18	BB	24	20	50.8	43.7	167	12.5	4.2	3	現場	スリットケーソン			0.24	43.1
34	12	2007/10/30	N	30	25	49.8	45.9	164	10.5	4.2	2	現場	本体工	1.84	4.96		
35			HEPC		20	33.5	45.6	150				現場	PC床版	0.44	5.90	0.34	47.4
//																0.36	25.5
36			HEPC		20	33.5	45.6	150				現場	PC床版	0.50	5.77	0.29	29.3
//																0.32	24.5
37	23	2007/9/27	BB	18	40	58.5	39.5	161	9	4	41	現場	蓋コンクリート 上部コンクリート	1.12	13.8		
38	15	2007/11/14	BB	21	40	59	39.4	149			7	現場	均しコン	2.49	7.17	0.17	51.0
39	13	2007/11/15	BB	18	40	64.5	40.5	149	9	4.9	6	現場	-				
40	14	2007/11/12	N	18	40	64	44.2	157	8.5	5.2	7	現場	被覆工、根固工	2.72	5.45	1.08	16.4
41	24	2007/9/13	BB	30	25	46	40.1	166	12	4.5	7	現場	ケーソン製作、 指定部分以外	0.77	6.88		
42	10	2007/12/21	BB	30	25	46	42	156	13.5	5.5	6	室内	-	1.92	12.2	0.31	37.3
43	11	2007/12/20	BB	18	40	59	41.3	158	9.5	4.8		現場	蓋コンクリート	1.03	5.55		
44	6	2008/1/12	BB	24	20	54	50.3	174	19	3.8	12	現場	上部工	1.31	14.4	0.16	68.3
45	21	2008/1/22	N	18	40	64	43.4	150	9.5	4.8	5	現場	上部工	28.4	3.62		
46	16	2007/11/7	BB	27	20	52	45	172	11.5	4.8	7	現場 1, 室内 6	ケーソン	1.17	6.25		
47	13	2007/11/15	BB	21	40	63	43.1	155	9	4.2	7	現場 1, 室内 6	根固ブロック 上部ブロック	1.20	6.77		
48		2008/2/4	N	21	40	54.1	38.8	139	8	4.5	7	室内	テトラポッド 40t・50t 重量型	2.15	4.50	0.72	38.5
//																0.94	26.7
49	1	2008/2/4	N	21	40	54.9	40	137	8.5	4.5	7	現場	消波ブロック	4.54	6.80		
50	19.1	2007/11/14	BB	24	20	55	45.4	169	12.5	5.6	12	現場	上部工	2.53	6.75		
51	13	2008/3//1	BB	18	40	60	41.5	153	8.5	3.4	6	室内	蓋コンクリート・ 上部コンクリート	0.44	10.2	0.06	41.9
52	23	2007/9/13	BB	18	40	62.7	41.6	147	7.5	5.7	6	現場	上部コン	2.52	7.59	0.96	16.7
53	12	2007/10/6	BB	30	25	50	47.5	147	12.5	4.7	6	現場	ケーソン	0.36	10.8		
54		2008/1/10	BB	27	20	52	46.3	169	12	5.5	42	海中	上部工			0.69	22.2
55	9	2008/3/6	BB	21	40	63	43.1	155			7	現場 1, 室内 6	上部・蓋	1.07	6.42	0.44	16.6
56	19	2008/6/12	BB	30	25	46.5	41.8	173	12.5	4.5	4	室内	ケーソン	0.20	8.59	0.07	21.0

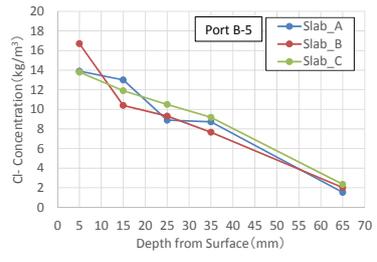
57	19	2008/6/9	BB	18	40	64.7	44.9	146	7	3.9	8	現場 1, 室内 7	上部コンクリート	0.82	10.6	0.52	23.6
58		-											-	6.37	6.49		
59		-											-	5.16	7.07		
60	30	200/6/25	N	18	40	64	45.6	150	4.8	8	6	室内	消波工	5.54	4.41		
61	31	2008/6/20	N	27	20	51	46.5	169	10	4.4	7	現場	床版	2.91	4.79		
62	20	2008/6/24	N	18	40	65	41.3	153	8	5.2	3	現場	被覆ブロック	4.19	5.41		
63	20	2008/6/30	N	27	20	54	47	164	12	4.1	7	現場	ケーソン	0.35	8.91		
64	25	2008/7/1	BB	30	20	45	42.3	167	13	4.9	7	現場	上部コン	0.41	11.2	0.07	38.2
65	14	2008/6/30	BB	27	40	47.8	41.6	151	12	3.9	9	現場	ケーソン	0.53	10.4	0.19	31.6
66	16	2008/7/3	BB	27	40	47	39	137	4.5	6	7	現場	根固ブロック	0.90	8.91	0.11	38.1
67	24	-	BB	18	40	59	46.4	147	8	4.5	7	現場	被覆ブロック	0.96	7.43		
68	29	2008/7/14	BB	18	40	63	44	156	8.5	4.7	7	現場	蓋・上部コン	0.58	9.97	0.32	29.1
69	26	2008/7/24	N	30	25	47.1	41.8	170	11.5	4.5	4	現場	本体工	1.42	5.84		
70		2008/7/15	BB	27	20	50	42.3	163			9	水中	上部コン	0.44	9.95	0.09	30.5
71		2008/7/15	BB	27	20	50	42.3	163			9	水中	上部コン	0.44	10.6	0.09	36.0
72	24	2008/7/31	BB	33	20	49.2	38.2	167			7	現場	ケーソン	0.59	6.81		
73	24	2008/7/16	BB	33	20	49.5	42.4	160	12	5.3	7	現場	-	0.69	8.38		
74	25	2008/8/6	BB	30	25	48	42.5	165	11.5	4.5	5	現場	本体工	0.71	12.4	0.23	28.5
75	29	2008/7/29	BB	24	20	54	44.7	168	11	5.1	7	現場	本体工 直立消波ブロック	1.13	8.07	0.27	18.5
76	29	2008/8/1	BB	18	40	64.5	41.7	147	8	4.2	7	現場	上部工上部 コンクリート版	0.75	7.11	0.26	19.6
77	22	2008/6/10	BB	27	20	52	45	172	12	4.7	7	現場 1, 室内 6	ケーソン				
78	24	2008/6/18	BB	27	20	52	45	172	12.5	5	7	現場 1, 室内 6	ケーソン				
79	24	2008/6/13	BB	21	40	63	43.1	155	9	4	7	現場 1, 室内 6	ブロック				
80	33	2008/8/18	N	27	20	51	46.5	169	14	4.7	7	現場	上部コンクリート				
81		2008/8/8	BB	27	20	50	42.3	163			21	水中	上部コンクリート				
82	24	2008/8/27	BB	18	40	64	40.9	148	8	4.1	3	現場	被覆ブロック				
83	26	2008/8/26	BB	21	40	57.5	42.3	150	7	4.2	7	現場	ディンプル 35t・ クリンガー60t型			0.38	16.5
84	27	2008/7/9	BB	18	40	65	42.7	152	8	5.2	7	現場	消波ブロック				
85	23	2008/8/58	BB	24	20	53	46.1	168	12.5	4.7	7	現場	ケーソン・セルラ ーブロック				
86	21	2008/8/28	BB	18	40	63.1	42	145	9	4	5	現場	被覆ブロック			0.44	16.7
87	26	2008/9/1	N	30	25	46.5	41.5	169	11.5	4.6	3	現場	ケーソン				

88	25	2008/7/4	BB	21	40	62	43.9	152	9	4.3	7	現場	上部ブロック・被覆ブロック				
89	24	2008/8/27	BB	30	25	46	43.9	161	13	4	7	現場	ケーソン				
90	25	2008/11/5	N	18	40	64	43.8	151	7.5	4.2	5	現場	-			4.14	8.85
91	6	2008/12/11	N	18	40	62	43.5	151	8	4.5	7	現場	消波ブロック			2.90	17.9
92	10	2009/1/10	N	18	40	64	43.8	151	7	3.8	10	水中	-				
93	6	2009/1/13	BB	21	40	59	37.7	149	9	4.5	9	現場	消波ブロック（80t型）				
94	16	2009/11/11	N	18	40	62.5	40.3	160	8	4.1	9	水中	クリンガー政策20t型				
95	14	2009/11/10	N	18	40	63.8	42	160	8	5.2	9	水中	テトラポッド製作（16t型）			1.58	19.6
96	21	2009/1/6	N	18	40	63.5	44.9	151	7	3.4	28	水中	-				
97	3	2009/2/4	N	33	20	49.4	38.9	166	11	4.9	4	給油養生	ケーソン				
98	14	-	N	21	40	58	42.5	150	9.5	4.7	28	水中	上部コンクリート			1.80	8.67
99	19	2008/3/19	N	21	20	63.5	42	154	8	4.5	7	水中	3.2tテトラポッド			2.34	16.5
//																3.20	10.8
100	8	2008/12/12	BB	27	20	52.5	44.8	164	8	4.5	109	水中	上部工			0.24	29.1
//																0.13	26.8

## 付録 C 実構造物の塩化物イオン濃度分布一覧

・縦軸：塩化物イオン濃度、横軸：表面からの距離、各線（色・形状の違い）：コア採取箇所





## 付録 D 塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査手法の現状の課題および対応方針案

ここでは、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下、基準）<sup>1)</sup>」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手法」について、まずは現状の課題を整理し、その課題に対する対応方針案について述べる。この際、照査の対象とする構造物と、照査手法自体に分けて述べた。

なお、この付録 D の 2.2 に示した提案手法（平成 30 年度に改訂予定の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における手法）および 5 章で提案した拡散係数の特性値に基づく鉄筋腐食開始時期の試算例を付録 E に、同様の手法に基づき設計供用年数 50 年を満足するかぶりの試算例を付録 F に掲載した。

### 1. 照査対象とする構造物に関する課題および対応方針案

H19 基準では、塩害劣化の進行に伴う性能低下が生じている事例が多い「栈橋上部工のみ」が対象となっている。しかし、栈橋上部工以外の構造物でも、塩害劣化が顕在化している場合がある。スリット式ケーソンでの塩害劣化の例を付図-D.1 に示す。この場合、栈橋上部工の場合よりもさらに点検や補修の実施が容易ではない。このように、塩害劣化が顕在化した場合に確認が容易でない場合や、性能回復のための対策が講じにくい場合においては、予め十分な耐久性を確保することで、設計供用期間中の性能を確保することが望ましい。

そのため、照査の対象とする構造物としては、栈橋上部工に限定せず、「塩害劣化に起因する鉄筋腐食により、設計供用期間中に部材の性能低下が生じることが懸念される構造部材」とすることを提案する。



付図-D.1 スリットケーソンでの塩害事例

## 2. 照査手法に関する課題および対応方針案

### 2.1 H19 基準の照査手法の課題

H19 基準における照査手法の概要は、本文 2.4 に示されている。照査に用いられる各パラメータに関して、以下に示す(1)～(5)のような課題が挙げられる。

#### (1) ばらつきの影響の明確化

栈橋上部工のコンクリート中における塩化物イオン濃度は、同一の栈橋上部工内においても相当にばらつくことが知られている<sup>例え ば 2)</sup>。後述するが、H19 基準の照査手法において、この塩化物イオン濃度のばらつきの影響は主に  $C_0$  と  $D_{ap}$  の設定値の中に含まれている。

一方、他の照査手法に関して、「2012 年制定 コンクリート標準示方書 設計編（以下、示方書 2012）」では、「鋼材位置の塩化物イオン濃度の設計値  $C_d$  のばらつきを考慮した安全係数  $\gamma_{cl}$ 」という形で、計算される鋼材位置の塩化物イオン濃度の値全体に対して、ばらつきの影響を反映させるようにしている<sup>3)</sup>。

#### (2) 初期塩化物イオンへの配慮

レディーミクストコンクリートには、少量ではあるが塩化物イオンが含まれている（セメントや化学混和剤に由来）。なお、フレッシュコンクリートに関しては、塩化物イオン含有量の上限として  $0.3\text{kg/m}^3$  が設定されている。しかし、H19 基準の照査手法においては、この練混ぜ時に混入される塩化物イオン（初期塩化物イオン）の影響は考慮されていない。

一方、他の照査手法に関して、示方書 2012 では、初期塩化物イオン濃度  $C_i$  という形で考慮されている<sup>3)</sup>。

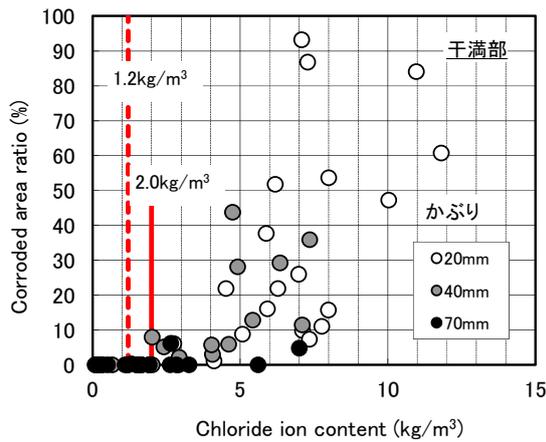
#### (3) 腐食発生限界濃度 $C_{lim}$ の影響因子への配慮

H19 基準の場合、使用材料や環境がどのような条件においても、 $C_{lim}$  については一律  $2.0\text{kg/m}^3$  としている。その根拠の 1 つとなっている試験結果が付図-D.2 (a) であり、干満環境に暴露した試験体の鉄筋表面における塩化物イオン濃度と鉄筋腐食面積率の関係を示したものである。塩化物イオン濃度が  $2.0\text{kg/m}^3$  程度より大きいと腐食が開始する傾向が見られた<sup>4)</sup>。

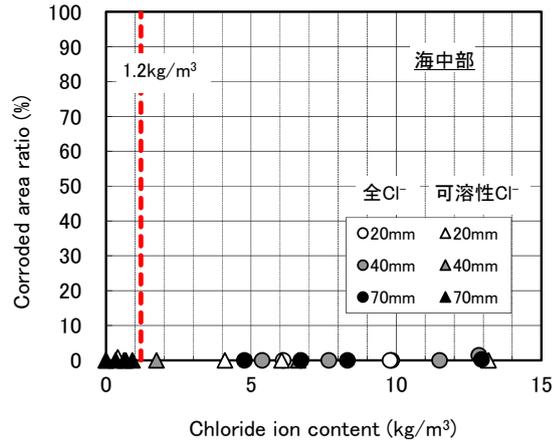
$C_{lim}$  は、腐食が開始する塩化物イオン濃度の限界値であり、コンクリート中の pH によって変わるとされる。最近の知見では、 $C_{lim}$  をセメント種類および W/C によって変化させる考え方もある。これは、コンクリート内の細孔溶液中の pH がセメント種類や W/C によって変わることを反映させたものである。示方書 2012 における  $C_{lim}$  の設定値を式 (D.1) ～ (D.2)<sup>3)</sup> および付図-D.3 に示す。

OPC を用いた場合

$$C_{lim} = -3.0W/C + 3.4 \quad (D.1)$$

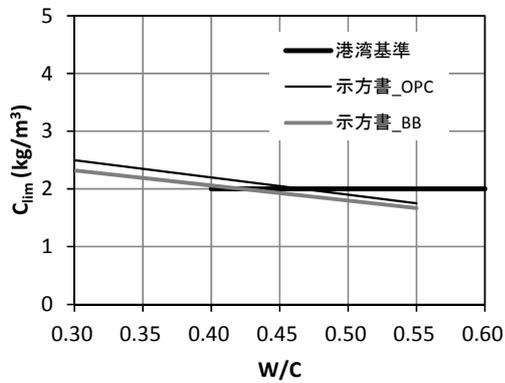


(a)干満環境



(b)海中環境

付図-D.2 長期暴露試験体における鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係<sup>4)</sup>



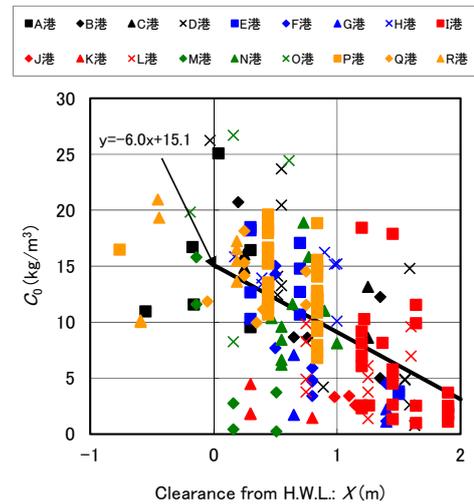
付図-D.3 基準および示方書における  $C_{lim}$  の比較

BB 相当を用いた場合

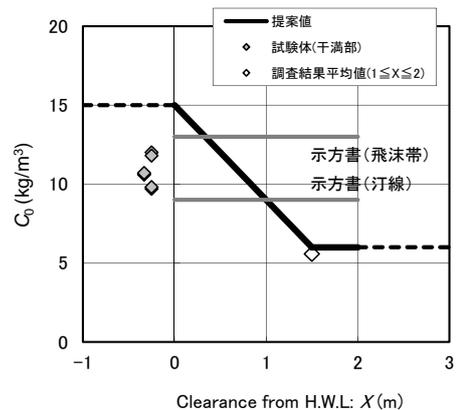
$$C_{lim} = -2.6W/C + 3.1 \quad (D.2)$$

付図-D.3 において、示方書 2012 の  $C_{lim}$  は、港湾コンクリート構造物において一般的な W/C である 0.5 付近においては、 $2.0 \text{ kg/m}^3$  程度の値となっている。

また、 $C_{lim}$  は環境によっても見かけ上値が変わるとされる<sup>例え</sup><sup>4)</sup>。例えば、海中においては、鋼材の腐食反応に必要な酸素の供給量が非常に少なく、鋼材の腐食が進行しにくいため、実質として明確な値が存在しないことが報告されている<sup>4)</sup>。付図-D.2(b)は、海中環境に暴露した試験体の鉄筋表面における塩化物イオン濃度と鉄筋腐食面積率の関係を示したものである<sup>4)</sup>。この場合、 $10 \text{ kg/m}^3$  を上回っても腐食傾向が確認されなかった。このように、腐食発生には暴露環境も影響していることになる。なお、海中から大気中の間では、コンクリート中の鋼材に供給される酸素も連続的に変化すると考えられるため、結果として、 $C_{lim}$  の値についても連続的に変化すると推測される。

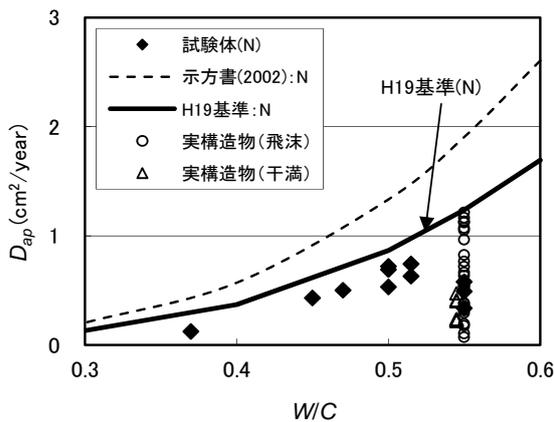


付図-D.4 H.W.L.からの距離と  $C_0$  の関係<sup>4)</sup>

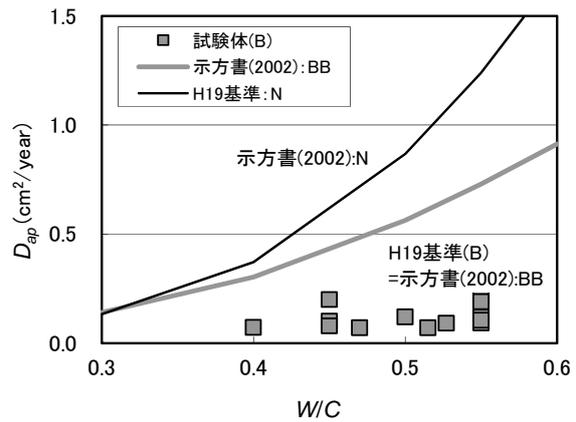


付図-D.5 H19 基準での  $C_0$  の設定値<sup>4)</sup>

(4) 表面塩化物イオン濃度  $C_0$  の影響因子への配慮  
 $C_0$  はコンクリート表面における塩化物イオン濃度であ



(a)普通ポルトランドセメント



(b)高炉セメント B 種

付図-D.6 長期暴露試験および実構造物調査から得られた見かけの拡散係数と W/C の関係<sup>4)</sup>

り、塩害環境の厳しさを表す指標となる。C<sub>0</sub>は主に環境条件によって大きく異なる。港湾構造物に関する既往の調査結果<sup>5)6)</sup>において、栈橋上部工の塩害による劣化程度は海水面からの距離の影響を大きく受けることが報告されている。そこで、全国の栈橋上部工(計17港)におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布データを収集し、C<sub>0</sub>と海水面(H.W.L.)からの距離との関係を調べた結果<sup>4)</sup>を付図-D.4に示す。ばらつきは大きい、海水面から離れるにつれてC<sub>0</sub>が小さくなる傾向が見られた。

本文2.4の式(2.9)に示すように、H19基準におけるC<sub>0</sub>の設定値に関しては、上述の結果を基に、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が提案されている。設定値を付図-D.5に示す。比較として、示方書2012の値も掲載した。

このC<sub>0</sub>は基本的に環境により変化するものであるが、材料によって変わるとの報告もある<sup>例え7)</sup>。一般に高炉セメントB種など、高炉スラグ微粉末が多量に含んだセメントを用いたコンクリートの場合に、普通ポルトランドセメントの場合と比較して、C<sub>0</sub>が大きくなるとされる<sup>例え7)</sup>。しかし、H19基準ではこの影響は考慮されていない。

(5) 塩化物イオン拡散係数の設定値の改善

本文2.4の式(2.10)に示すように、H19基準における塩化物イオン拡散係数の設定値(設計拡散係数D<sub>d</sub>)は、a) ひび割れの影響を含まない項と、b) ひび割れの影響を表す項の和で表されている。以下、a)とb)に分けて述べる。

a) ひび割れの影響を含まない場合の特性値D<sub>k</sub>

H19基準において、実測データを基に、セメント種類ごとにD<sub>k</sub>の推定式が示されている。以下その設定根拠を説明する。

長期暴露試験および実構造物調査から得られた見かけの

拡散係数とW/Cの関係をセメントの種類ごとに整理したものを付図-D.6に示す<sup>4)</sup>。図中には「2002年制定 コンクリート標準示方書 設計編(以下、示方書2002)<sup>8)</sup>」の推定式も示した。なお、実構造物のデータについては、セメント種類およびW/Cが不明であるため、セメント種類を普通ポルトランドセメント、W/Cを0.55(文献9)に示された上限値)と仮定した。

普通ポルトランドセメント(OPC)においては、試験体のデータは、示方書2002の式よりも大きく下回っている。この理由としては、この式は港湾構造物以外の多様な種類のデータを含んでいることが考えられる。一方、図に掲載している港湾実構造物のデータはW/Cが不明であった。そこで、設定値が安全側の値となるように、実構造物データの上限値を通る値を拡散係数の設定値としていた。なお、この際、換算係数α(値を補正する係数)を導入し、示方書2002の式を0.65倍した値を設定値としている。

一方、高炉セメントB種(BB)においては、データ数不足のため、前述のように、港湾構造物以外の多様な種類のデータを含んでいる示方書2002の推定式を引用していた。なお、この結果は、図に示すように、試験体における実験値と比べるとかなり安全側の評価であった。

上記のように、いずれのセメント種類においても、拡散係数の設定値に関して改善の余地が残されていた。

b) ひび割れの影響を表す項における課題

H19基準におけるひび割れの影響を表す項については、示方書2002を参考に設定されていたが、文献10)において、以下のような課題が指摘されていた。

- ・使用性の照査を行う段階で、ひび割れの開口は限界値以下に抑えられていることから、改めてひび割れの開口の影響に対して制限をかける(w/wa)<sup>2</sup>は必ずしも必要ではない

と考えられる。また、ひび割れ幅が拡散係数に及ぼす影響  $(w/w_a)^2$  の値は 1.0 に近くなることが多く、最終的な見かけの拡散係数の算定結果への影響が小さい。

・  $w/l$  はひび割れ幅の最大値  $w$  についてはひび割れ幅の平均値の 1.5 倍程度、ひび割れ間隔の最小値については、ひび割れ間隔の平均値の 0.5 倍程度を見込めばよいと考えられたため、 $w$  と  $l$  のいずれに対しても平均値を考えた場合の 3 倍 (1.5/0.5 倍) が採用された。しかし、3 倍にしたことにより、 $w/l$  本来の物理的意味ではなくなっている。

・  $D_0$  はひび割れ部分での塩化物イオンの拡散係数であるが、算定が難しいことから、水中における拡散係数に置き換えられている。ただし、その数値は本来  $400\text{cm}^2/\text{年}$  であるが、実用上不都合をもたらさないように、パラメトリックに変化させた検討を行い、 $200\text{cm}^2/\text{年}$  とした。そのため、本来の物理的意味と異なっている。

## 2.2 照査手法の課題に対する対応方針案

前節 2.1 で示した照査手法の課題に対する対応方針案を以下(1)～(5)に示す。なお、ここで提案した対応方針案の全体の流れ及び詳細については付録 E に記載されている。

### (1) 鋼材位置の塩化物イオン濃度の設計値 $C_d$ のばらつきを考慮した安全係数 $\gamma_{cl}$ の導入

前述のように、栈橋上部工コンクリート中の鋼材位置の塩化物イオン濃度には、諸要因の影響によるばらつきが必ず含まれる。また、このばらつきの影響については、構造物の施工要因などによっても影響される可能性がある。そのため、H19 基準のように各パラメータ ( $C_0$  や  $D_k$  など) の設定値の中にばらつきの影響を暗に含めるよりも、より明確な形で計算値 (設計値  $C_d$ ) の中に反映される方が望ましいと考えられる。よって、ばらつきに関する安全係数  $\gamma_{cl}$  として、設計値  $C_d$  の算定式中に導入することを提案する。

$\gamma_{cl}$  の値に関しては、示方書 2012 等の既往の知見を参考に、一般的な構造物においては 1.3 とすることを提案する。なお、高い施工精度が確保される場合 (例: プレキャストコンクリート部材など) には 1.1 とすることを提案する。

ここで、上記のように、ばらつきの影響を安全係数  $\gamma_{cl}$  として別途考慮する場合、ばらつきを含んでいるパラメータ  $C_0$  および  $D$  の設定値については、 $C_0$  の設定値のように、「平均値」を基に設定することを基本とするのが良いと考えられる。

### (2) 初期塩化物イオン濃度 $C_i$ の導入

前述のように、少量ではあっても、実態として初期塩化物イオンが存在するため、考慮する方が望ましいと考えられる。

よって、鋼材位置の塩化物イオン濃度を算定する際に、

初期塩化物イオン濃度  $C_i$  を追加することを提案する。なお、 $C_i$  の設定値については、実測データにより定めることが望ましいが、実測データが無い場合は  $0.3\text{kg}/\text{m}^3$  (フレッシュコンクリートの上限値) とすることを提案する。

### (3) $C_{lim}$ の設定値 (変更なし)

コンクリート中の pH がセメント種類や、W/C によって変わることを踏まえ、 $C_{lim}$  をセメント種類、W/C によって変化させる考え方もある<sup>3)</sup>。しかし、これは室内試験での結果を基に設定されたものである。一方、H19 基準の  $2.0\text{kg}/\text{m}^3$  は実環境相当の暴露試験結果を基に設定されたものである。上記を踏まえ、H19 基準から変更しないこととした。

なお、 $C_{lim}$  に及ぼす環境の影響については、データ数も少なく、新たな設定値を提案することは難しいため、今回は考慮しないこととした。

### (4) $C_0$ の設定値 (変更なし)

H19 基準において、まずは実測データを採用することを重視している。 $C_0$  は構造形式、環境によって大きく異なる値であるため、この方向性を踏襲するのが良いと考えられる。

前述した、 $C_0$  の設定値に及ぼす高炉セメント B 種の影響については、実態として、普通ポルトランドセメントの場合よりも大きくなる傾向が報告されている<sup>例え7)</sup>。ただし、その影響程度が不明であることから、今回も考慮しないこととした。

### (5) 塩化物イオン拡散係数の設定値の変更

#### a) ひび割れの影響を含まない場合の特性値 $D_k$ の変更

前述のように、H19 基準の特性値  $D_k$  にはいくつかの改善の余地が残されていた。そのため、以下の 3 つの調査を基に、設定値の見直しを検討することとした。

① 港湾空港技術研究所で製作したコンクリート試験体の長期暴露試験 (本文: 試験体 1, 試験体 3~6)

② 各地方整備局等の工事に用いられたコンクリートから製作した試験体の長期暴露試験 (本文: 試験体 2)

③ 実構造物データの収集 (主に、栈橋に関する維持管理計画書<sup>11)</sup> に記載されたコンクリート中の塩化物イオン濃度分布のデータを活用)

本文 5 章においては、この調査結果を基に、拡散係数の特性値  $D_k$  の評価式を提案し、その評価式の提示に至る経緯についても記載されている。

#### b) ひび割れの影響を表すパラメータの変更

ひび割れの影響を表すパラメータについて、前述の課題に対して、示方書 2012 では下記の対応が取られている<sup>3)</sup>。

・  $(w/w_a)^2$  は 1.0 として取扱い、評価式からは削除する。

・  $w/l$  は平均値を用いて算出することとし、乗じていた係数

である3を削除し、後述する $\lambda$ へ反映させる。

・ $D_0$ の定義を水中における塩化物イオン拡散係数の概算値とし、その数値を400cm<sup>2</sup>/年とする。数値が0.5倍になることについては、後述する $\lambda$ へ反映させる。

・新たに係数 $\lambda$ を、ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数として導入する。その数値は、 $w/l$ の算定式に乘じられていた係数3と $D_0$ が0.5倍になることを受け、係数1.5(=3×0.5)とした。

### 3. まとめ

照査に必要な各パラメータの設定値を検討する際には、実構造物で得られたデータを基に行うのが理想であるが、実港湾構造物におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度のデータ取得は容易ではなく、また、実構造物に使用された材料や配合も不明な場合が多い。今後については、以下のような実構造物でのデータが増えることで、照査に必要な各パラメータの設定値の改善が図られると考える。

(1) 使用したセメント種類および水セメント比が既知な場合の塩化物イオン濃度分布に関する調査結果

表面塩化物イオン濃度  $C_0$  および拡散係数の算定式の改善に資する。なお、本文で述べているように、過去に各地方整備局等から、工事時に使用したコンクリートから採取した管理供試体を収集し、暴露試験を実施している。この際、使用材料および配合に関する情報も収集している。将来的に、この情報を活用することで、照査手法の改善に資することが可能となると考える。

(2) 腐食が顕在化していない港湾コンクリート構造物における鉄筋腐食状況と鉄筋位置の塩化物イオン濃度に関する調査結果

$C_{lim}$  の設定値の精度向上に資する。なお、この調査の対象構造物においても、使用材料および配合が既知なものが

望ましい。

### 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，pp.486-489，2007.
- 2) 加藤絵万，岩波光保，山路徹，横田弘：建設後30年以上経過した栈橋上部工から切り出したRC部材の劣化性状と構造性能，港湾空港技術研究所資料，No.1140，2006.9.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書，設計編，2012.
- 4) 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，土木学会論文集E，Vol.64，No.2，pp.335-347，2008.
- 5) 浜田秀則：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，Vol.38，No.2，pp.299-393，1999.
- 6) 小牟禮建一，浜田秀則，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，Vol.41，No.4，pp.3-37，2002.
- 7) 網野貴彦，岩波光保，忽那淳，大塚邦朗：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.685-690，2017.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編2002.
- 9) 文献1，p.447.
- 10) 土木学会：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，コンクリートライブラリー138，pp.74-81，2012.
- 11) 国土交通省港湾局：港湾の施設の維持管理計画策定ガイドライン，2015.

付録 E 鉄筋腐食開始時期の試算例（かぶり 70mm の場合）

付録Dの2.2に示した提案手法（H30年度に改訂予定の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における手法）および本文で提案した拡散係数の特性値 $D_k$ (式(5.7)および(5.8))を用い、鉄筋腐食開始時期の試算を行った。また、参考対象としてH19基準と示方書2012において求められる鉄筋腐食開始時も後記する。なお、本試算において、設計拡散係数 $D_d$ を式(E.7)により求める際の曲げひび割れに関する諸条件については、「土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[栈橋上部工編]」（土木学会，2009. 以下，設計計算例）に記載された一事例を対象として試算した結果に過ぎない。実存する構造物に対して鉄筋腐食開始時期を計算する場合には、対象となる構造物における数値を計算に用いなければならない。

(1) 鉄筋腐食開始時期の算出式

算出式には、式(E.1)を $t$ が左辺になるように移項した式(E.2)を用いた。

$$C_d = \gamma_{ci} C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1c}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right) + C_i \quad (E.1)$$

$$t = \frac{c^2}{400D_d \left\{ \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_d - C_i}{\gamma_{ci} C_0} \right) \right\}^2} \quad (E.2)$$

ここで、 $t$ ：鉄筋腐食開始時期（年）、 $c$ ：かぶり（mm）、 $D_d$ ：曲げひび割れの影響を考慮した拡散係数（ $\text{cm}^2/\text{年}$ ）、 $\operatorname{erf}(s)$ ：誤差関数、 $\operatorname{erf}^{-1}(s)$ ：誤差関数の逆関数、 $C_d$ ：鉄筋位置の塩化物イオン濃度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $C_{lim}$ ：腐食発生限界塩化物イオン濃度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $C_i$ ：初期塩化物イオン濃度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $\gamma_{ci}$ ：鉄筋位置における塩化物イオン濃度のばらつきを考慮した安全係数（一般に1.3）、 $C_0$ ：コンクリート表面において想定される塩化物イオン濃度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）である。

本試算で用いた値は以下のとおりである。

- $c = 70 \text{ mm}$
- $C_d = C_{lim} = 2.0 \text{ kg}/\text{m}^3$
- $\gamma_{ci} = 1.3$
- $C_i = 0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$
- $D_d$ ：式(7.7)および式(7.8)
- $C_0$ については式(E.3)を用いた。

$$C_0 = -6.0x + 15.1 \quad (E.3)$$

ただし、 $x$ ：海水面（H.W.L.）から部材下面までの距離（m）である。本試算においては、 $x$ を0、0.5、1.0、1.5mとしたため、それぞれ15.1、12.1、9.1、6.1  $\text{kg}/\text{m}^3$ である。

なお、本計算をExcelで行う場合、誤差関数の逆関数は、

付表-E.1 試算に使用した数値

記号	数値		単位
	H19基準	示方書2012 及び提案値	
$w/l$	0.00197	0.00066	
$\sigma_{se}$	0.101	0.101	N/mm <sup>2</sup>
$M_d$	4910	4910	kN・m
$A_s$	29001	29001	mm <sup>2</sup>
$j$	0.887	0.887	
$k$	0.340	0.340	
$n (=E_s/E_c)$	8	8	
$p_w$	0.011	0.011	
$b_w$	1400	1400	mm
$d$	1890	1890	mm
$E_s$	200	200	kN/mm <sup>2</sup>
$E_c$	25	25	kN/mm <sup>2</sup>
$\epsilon'_{csd}$	$150 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	
$w/w_a$	1.0	-	
$w$	0.245	-	mm
$k_1$	1.0	-	
$k_2$	1.04	-	
$f'_c$	24	-	
$k_3$	1	-	
$c$	70	-	mm
$C_s$	100	100	mm
$\phi$	32	32	mm
$w_a$	0.245	-	mm
$\lambda$	-	1.5	
$D_0$	200	400	cm <sup>2</sup> /年

「normsinv」を用いて式(E.4)で表されるため、これを式(E.2)に代入することにより得られる、式(E.5)を用いた。

$$\operatorname{erf}^{-1}(s) = \frac{\operatorname{normsinv} \left( \frac{s+1}{2} \right)}{\sqrt{2}} \quad (E.4)$$

$$t = \frac{c^2}{200D_d \operatorname{normsinv}^2 \left( 1 - \frac{C_d - C_i}{2\gamma_{ci} C_0} \right)} \quad (E.5)$$

(2) 設計拡散係数 $D_d$ の計算方法

曲げひび割れの影響を考慮した拡散係数である $D_d$ は、H19基準においては式(E.6)で、示方書2012においては式(E.7)で求められる。

$$D_d = \gamma_c D_k + \left( \frac{w}{l} \right) \left( \frac{w}{w_a} \right)^2 D_0 \quad (E.6)$$

$$D_d = \gamma_c D_k + \lambda \left( \frac{w}{l} \right) D_0 \quad (E.7)$$

ただし、 $\gamma_c$ ：コンクリートの材料係数。一般に1.0としてよい、 $w$ ：ひび割れ幅（mm）、 $l$ ：ひび割れ間隔（mm）、 $w_a$ ：ひび割れ幅の限界値（mm）、 $D_0$ ：コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響の定数、 $\lambda$ ：ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数。

式(E.6)と式(E.7)から算出される数値は、 $w/w_a$ が1.0のとき等しくなる。そのため、本試算に用いた設計計算例

の事例では  $D_d$  は同じ数値となった。提案値の計算では式 (E.7) を使用したが、その理由については付録-D の 2.1(5)b) および 2.2(5)b) に記載している。本試算に使用した数値を付表-E.1 に、数式を以下に記す。

ひび割れ幅とひび割れ間隔の比  $w/l$  の計算には、H19基準では式 (E.8) を、示方書2012および提案値では式 (E.9) を用いた。

$$w/l = 3 \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (E.8)$$

$$w/l = \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (E.9)$$

表面に近い位置にある鉄筋応力度の増加量  $\sigma_{se}$  (N/mm<sup>2</sup>) は断面が弾性範囲にあるとして、次式により求めた。

$$\sigma_{se} = \frac{M_d}{A_s j d} \quad (E.10)$$

ただし、

$M_d$  : 仕様限界状態検討時の曲げモーメントの設計用値 (kN・m)

$A_s$  : 鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$j$  :  $1 - k/3$

$k$  : 中立軸比 ( $= \sqrt{2np_w + (np_w)^2} - np_w$ )

$n$  : ヤング係数比 ( $= E_s/E_c$ )

$p_w$  : 鉄筋比 ( $= A_s/(b_w d)$ )

$b_w$  : 部材の腹部幅 (mm)

$d$  : 有効高さ (mm)

$E_s$  : 鉄筋のヤング係数 ( $= 200\text{kN/mm}^2$ )

$E_c$  : コンクリートのヤング係数。コンクリートの設計圧縮強度が  $24\text{kN/mm}^2$  のとき、 $25\text{kN/mm}^2$  としてよい。

$\varepsilon'_{csd}$  : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値。一般のコンクリートは  $150 \times 10^{-6}$  としてよい。

ひび割れ幅  $w$  (mm) は次式により算出した。

$$w = 1.1k_1k_2k_3[4c + 0.7(C_s - \phi)] \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (E.11)$$

ただし、

$k_1$  : 鉄筋の表面性能がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数 (異型鉄筋の場合 = 1.0)

$k_2$  : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数で、以下の式で計算される。

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7 \quad (E.12)$$

ただし、

$f'_c$  : コンクリートの圧縮強度で、一般に設計圧縮強度を用いてよい。

$k_3$  : 引張鉄筋の段数の影響を表す係数。引張鋼材の応力度を重心位置で算定するため、1.0 とする。

$c$  : かぶり (mm)

$C_s$  : 鉄筋の中心間隔 (mm)

$\phi$  : 引張鉄筋径で、最小鉄筋の公称径 (mm)

$w_a$  : ひび割れ幅の限界値 (mm) は、特に厳しい腐食性環境の場合には、 $0.0035c$  とする。

なお、PC部材のように曲げひび割れが入らないと想定される場合には、式 (E.6) および (E.7) の曲げひび割れの影響を表す項を0とした式 (E.13) を用いた。

$$D_d = \gamma_c D_k \quad (E.13)$$

この場合、 $\gamma_c$  は一般に1.0と考えることから、曲げひび割れを考慮しない場合には  $D_d = D_k$  として計算することになる。

付図-E.1～付図-E.4に、設計拡散係数  $D_d$  の計算結果を示す。参考としてH19基準および示方書2012も併示した。OPC およびBBのどちらにおいても、提案値はH19基準と示方書2012の間に位置した。

### (3) 試算結果

#### a) 普通ポルトランドセメント (OPC) での試算結果

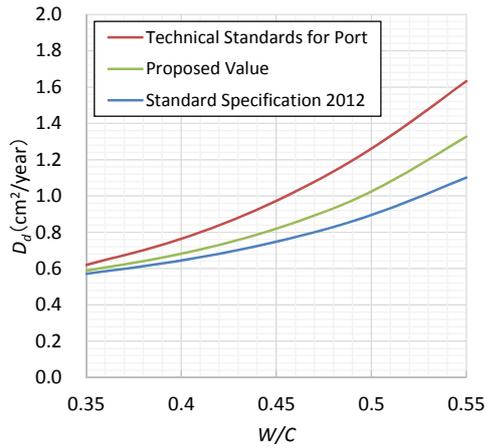
図-E.5は、曲げひび割れを考慮する場合 (RC構造物を想定) における鉄筋腐食開始時期の試算結果の一例である。港湾のRC構造物の一般的なW/Cである0.5程度において比較する場合、H.W.L.からの距離が1.0mの時、提案値の鉄筋腐食開始時期はH19基準と比べて2年程度短くなった。

図-E.6は、曲げひび割れを考慮しない場合 (PC構造物を想定) における鉄筋腐食開始時期の試算結果の一例である。PC構造物の一般的なW/Cである0.35～0.4において比較する場合、提案値はH19基準と比べて、鉄筋腐食開始時期は短くなる傾向にあった。H.W.L.からの距離が1.0mの時、W/C = 0.4の場合での差は4年程度となった。

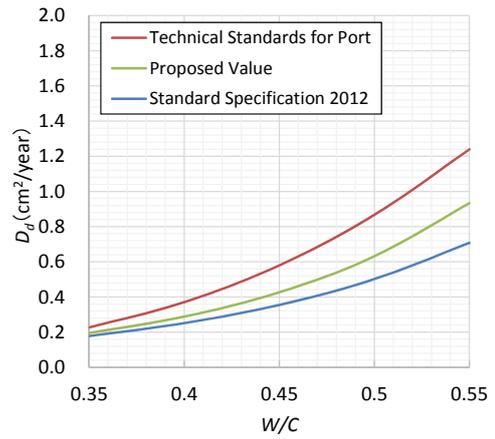
#### b) 高炉セメントB種 (BB) での試算結果

図-E.7は、曲げひび割れを考慮する場合 (RC構造物を想定) における鉄筋腐食開始時期の試算結果の一例である。港湾のRC構造物の一般的なW/Cである0.5程度において比較する場合、H.W.L.からの距離が1.0mの時、提案値とH19基準との差はほとんどなかった。

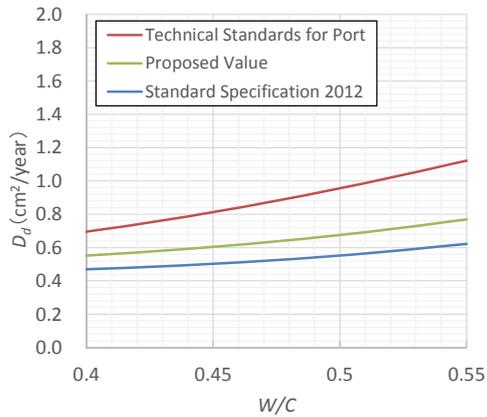
図-E.8は、高炉スラグ微粉末の比表面積の大きいものを混和材としてPC部材に適用した場合を想定した、鉄筋腐食開始時期の試算結果の一例である (PC部材に対し、一般的な高炉セメントB種は適用されない)。この場合は曲げひび割れを考慮しない。PC構造物の一般的なW/Cである0.4程度の場合において比較する場合、提案値の鉄筋腐食開始時期はH19基準と比べて18年程度長くなった。



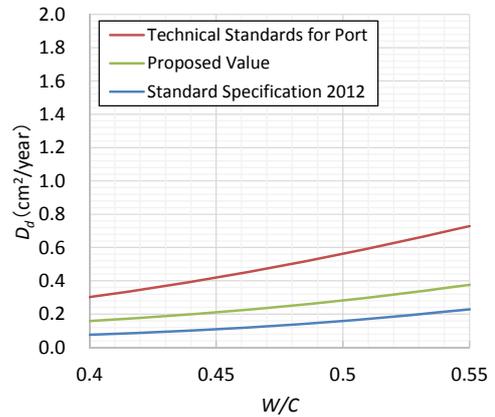
付図-E.1 曲げひび割れを考慮した場合のOPCの $D_d$ , 縦軸：鉄筋腐食開始時期, 横軸：W/C, 青線：示方書2012, 緑線：提案値, 赤線：H19基準



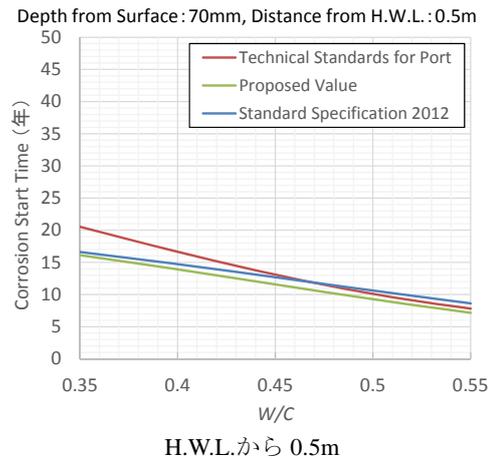
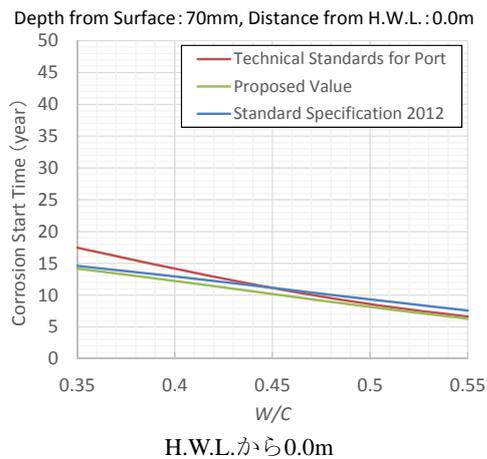
付図-E.2 曲げひび割れを考慮しない場合のOPCの $D_d$ , 縦軸：鉄筋腐食開始時期, 横軸：W/C, 青線：示方書2012, 緑線：提案値, 赤線：H19基準



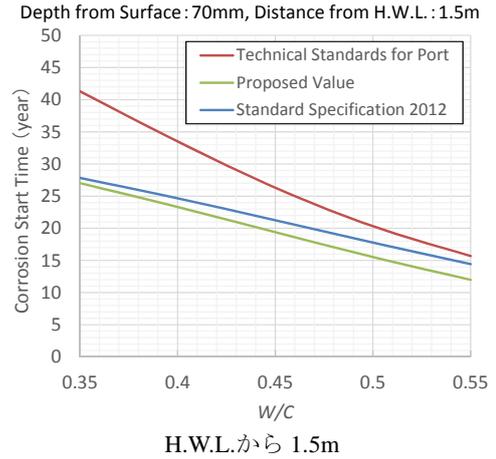
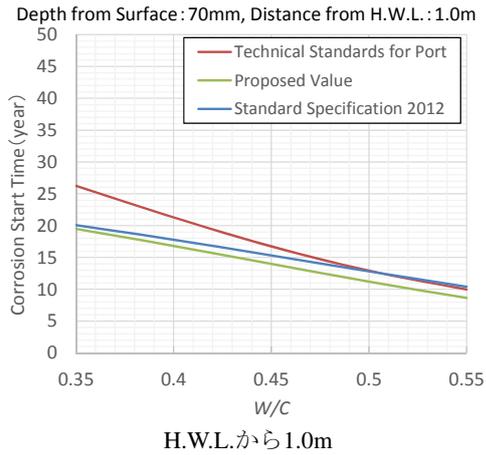
付図-E.3 曲げひび割れを考慮した場合のBBの $D_d$ , 縦軸：鉄筋腐食開始時期, 横軸：W/C, 青線：示方書2012, 緑線：提案値, 赤線：H19基準



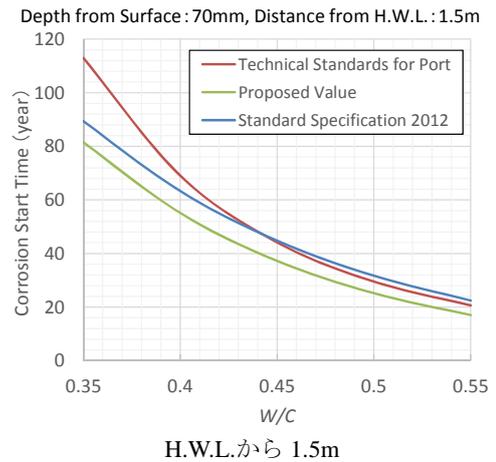
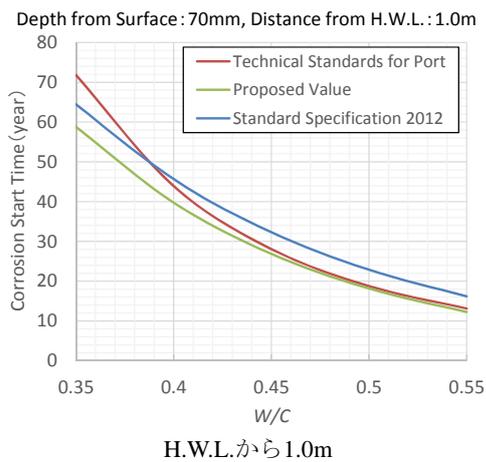
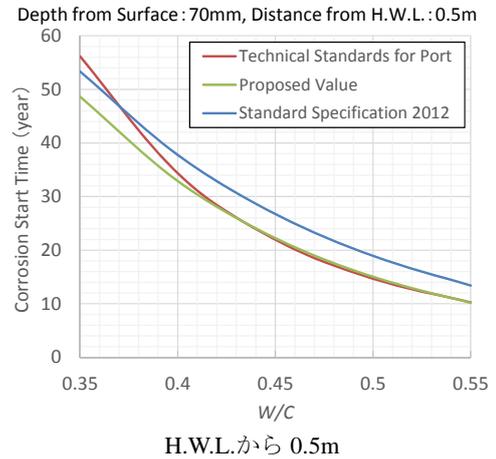
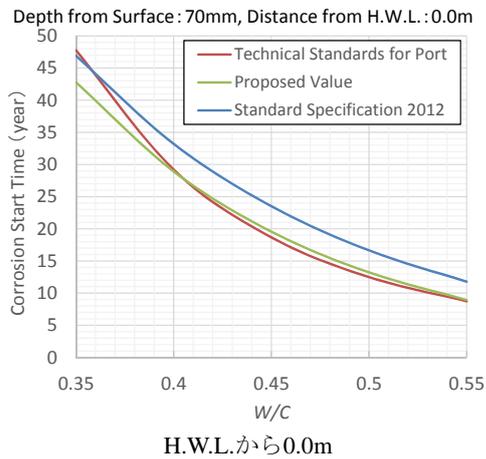
付図-E.4 曲げひび割れを考慮しない場合のBBの $D_d$ , 縦軸：鉄筋腐食開始時期, 横軸：W/C, 青線：示方書2012, 緑線：提案値, 赤線：H19基準



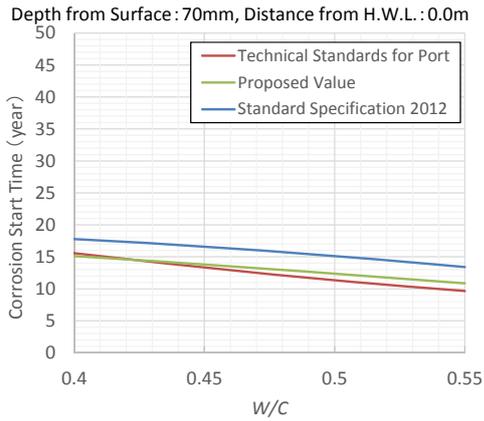
付図-E.5 その1 OPCにおける鉄筋腐食開始時期（曲げひび割れを考慮する場合）  
縦軸：鉄筋腐食開始時期, 横軸：W/C, 青線：示方書2012, 緑線：提案値, 赤線：H19基準



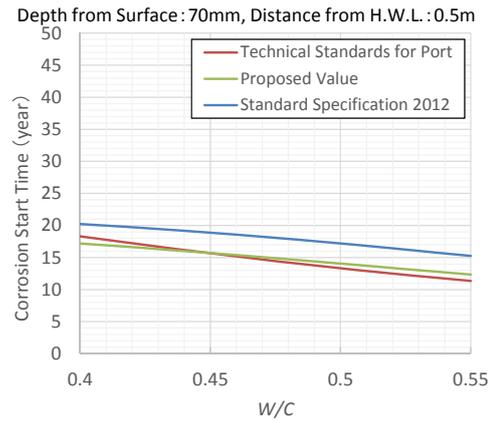
付図-E.5 その2 OPCにおける鉄筋腐食開始時期（曲げひび割れを考慮する場合）  
 縦軸：鉄筋腐食開始時期，横軸：W/C，青線：示方書 2012，緑線：提案値，赤線：H19 基準



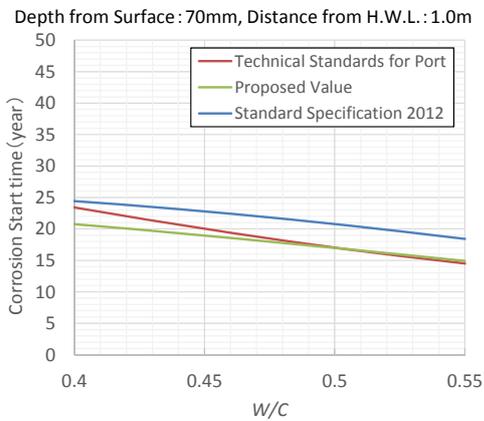
付図-E.6 OPCにおける鉄筋腐食開始時期（曲げひび割れを考慮しない場合）  
 縦軸：鉄筋腐食開始時期，横軸：W/C，青線：示方書 2012，緑線：提案値，赤線：H19 基準



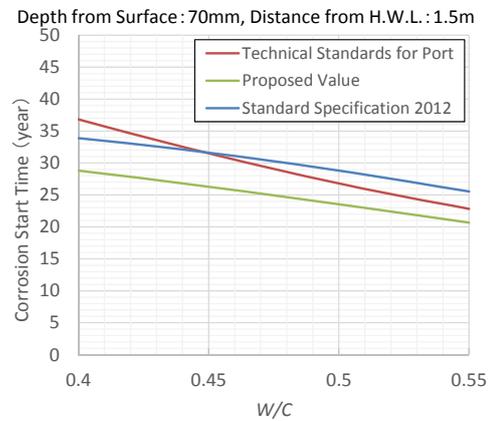
H.W.L.から0.0m



H.W.L.から0.5m

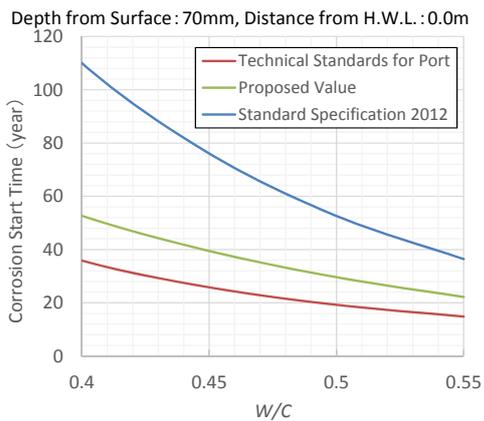


H.W.L.から1.0m

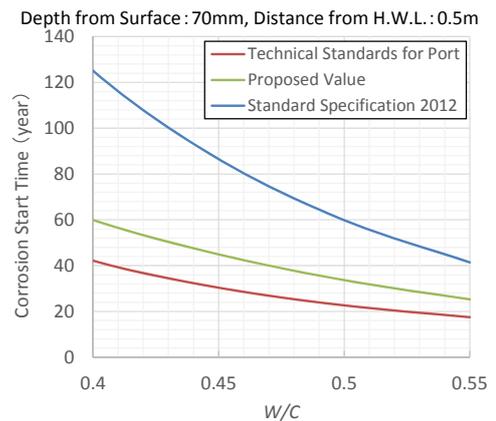


H.W.L.から1.5m

付図-E.7 BBにおける鉄筋腐食開始時期（曲げひび割れを考慮する場合）  
縦軸：鉄筋腐食開始時期，横軸：W/C，青線：示方書2012，緑線：提案値，赤線：H19基準

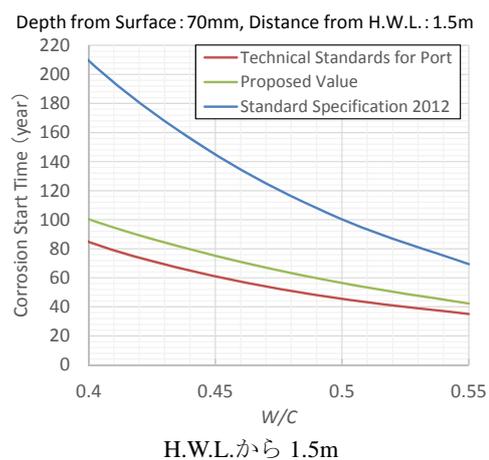
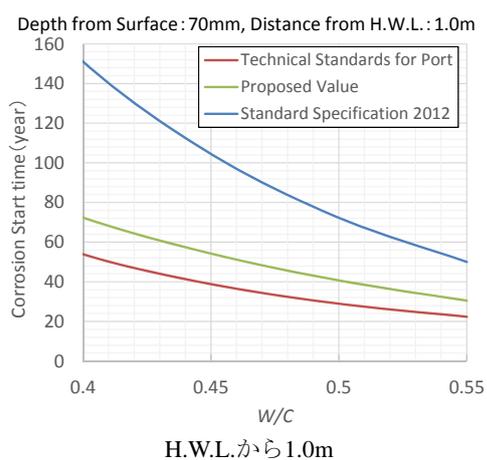


H.W.L.から0.0m



H.W.L.から0.5m

付図-E.8 その1 BBにおける鉄筋腐食開始時期（曲げひび割れを考慮しない場合）  
縦軸：鉄筋腐食開始時期，横軸：W/C，青線：示方書2012，緑線：提案値，赤線：H19基準



付図-E.8 その2 BBにおける鉄筋腐食開始時期（曲げひび割れを考慮しない場合）  
 縦軸：鉄筋腐食開始時期，横軸：W/C，青線：示方書2012，緑線：提案値，赤線：H19基準

## 付録F 設計供用期間50年を満足するかぶりの試算例

### 1. 設計供用期間を満足するかぶりの算出式

付録Dの2.2に示した提案手法（平成30年度に改訂予定の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における手法）および本文で提案した拡散係数の特性値 $D_k$ （式（5.7）および（5.8））を用い、供用設計期間50年を満足するかぶりの設計値を、式（F.1）を用いて試算した。これは、式（E.1）を $c$ が左辺になるように移項したものである。

$$c = 20\sqrt{D_a t} \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_d - C_i}{\gamma_{cl} C_0}\right) \quad (\text{F.1})$$

ここで、 $t$ ：設計供用期間（年）、 $c$ ：設計供用期間を満足するために必要なかぶり（mm）、 $D_a$ ：設計拡散係数（ $\text{cm}^2/\text{年}$ ）、 $\operatorname{erf}(s)$ ：誤差関数、 $\operatorname{erf}^{-1}(s)$ ：誤差関数の逆関数、 $C_d$ ：鉄筋位置の塩化物イオン濃度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $C_{lim}$ ：腐食発生限界塩化物イオン濃度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $C_i$ ：初期塩化物イオン濃度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $\gamma_{cl}$ ：鉄筋位置における塩化物イオン濃度のば

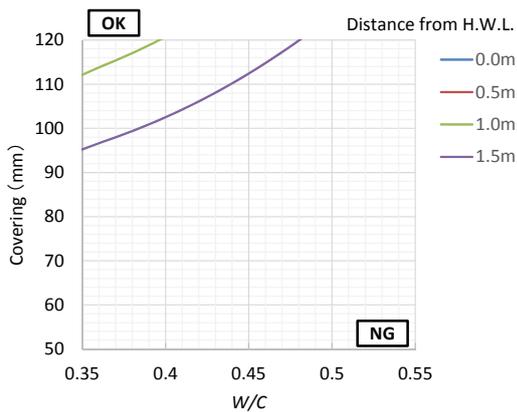
らつきを考慮した安全係数（一般に1.3）、 $C_0$ ：コンクリート表面において想定される塩化物イオン濃度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）である。設計供用期間 $t$ には、一般的な期間である50年を採用した。

本試算では、設計供用期間である50年が経過した際に鉄筋腐食が開始するかぶり $c$ を求めるものである。よって、 $C_d = C_{lim}$ であり、その値は $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ を用いた（付録D参照）。また、 $\gamma_{cl}$ を1.3、 $C_i$ を $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ とした。 $C_0$ は付録E同様、H.W.L.からの距離 $x$ を0.0、0.5、1.0、1.5mとしたため、それぞれ15.1、12.1、9.1、 $6.1\text{kg}/\text{m}^3$ である。

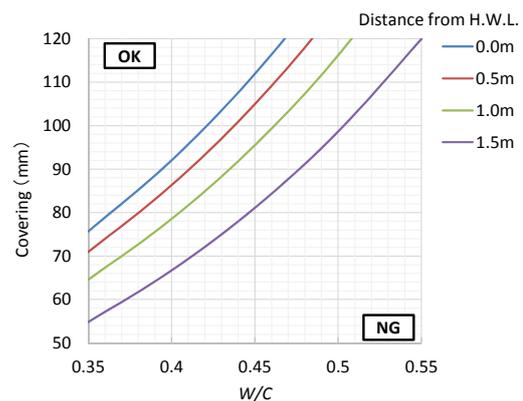
なお、本試算をExcelで行う場合には、誤算関数の逆関数は、「normsinv」を用いた式（F.2）を用いて計算が可能である。

$$c = 10\sqrt{2D_a t} \operatorname{normsinv}\left(1 - \frac{C_d - C_i}{2\gamma_{cl} C_0}\right) \quad (\text{F.2})$$

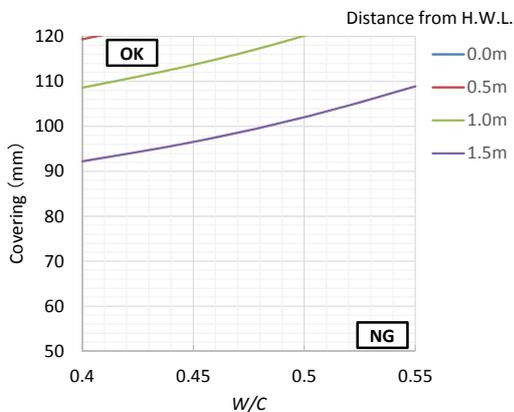
本試算において、設計拡散係数 $D_a$ を式（E.7）により求める際の曲げひび割れに関する諸条件については、「土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[栈橋上部工



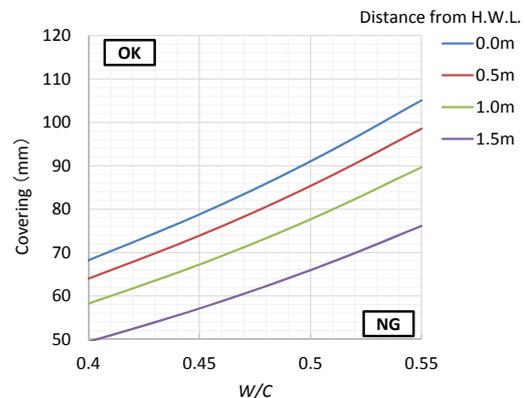
付図-F.1 曲げひび割れを考慮する場合の OPC における設計供用期間 50 年を満足するかぶり試算結果、縦軸：かぶり、横軸：W/C、各線（色の違い）：H.W.L.からの距離



付図-F.2 曲げひび割れを考慮しない場合の OPC における設計供用期間 50 年を満足するかぶり試算結果、縦軸：かぶり、横軸：W/C、各線（色の違い）：H.W.L.からの距離



付図-F.3 曲げひび割れを考慮する場合の BB における設計供用期間 50 年を満足するかぶり試算結果、縦軸：かぶり、横軸：W/C、各線（色の違い）：H.W.L.からの距離



付図-F.4 曲げひび割れを考慮しない場合の BB における設計供用期間 50 年を満足するかぶり試算結果、縦軸：かぶり、横軸：W/C、各線（色の違い）：H.W.L.からの距離

編]」（土木学会，2009．以下，設計計算例）に記載された一事例を対象として試算したものである．実存する構造物に対して鉄筋腐食開始時期を計算する場合には，対象となる構造物における数値を計算に用いなければならない．

## 2. 供用設計期間50年を満足するかぶりの試算結果

### (1) 普通ポルトランドセメント（OPC）での試算結果

付図-F. 1は，曲げひび割れを考慮する場合（RC部材を想定した場合）の必要なかぶりの試算結果である．なお，図中の曲線の左上であれば，設計供用期間内に腐食が生じないため，「OK」と示しており，曲線の左下であれば設計供用期間内に腐食が生じるため，「NG」と示している．この結果より，セメントにOPCを用い，W/CをRC部材で一般的な0.5とした場合，かぶりのみで設計供用期間50年にわたり腐食を生じさせないことは困難であることがわかる．

付図-F. 2は，曲げひび割れを考慮しない場合（PC部材を想定した場合）の試算結果である．この結果より，セメントにOPCを用い，W/CをPC部材で一般的な0.4とした場合，かぶりのみで設計供用期間50年にわたり腐食を生じさせないためには，H.W.L.から部材までの距離が1.5mの場合だと，最低でも約66mm以上が必要であることがわかる．

### (2) 高炉セメントB種（BB）での試算結果

付図-F. 3は，曲げひび割れを考慮する場合（RC部材を想定した場合）の必要かぶりの試算結果である．この結果より，セメントにBBを用い，W/CをRC部材で一般的な0.5とした場合，かぶりのみで設計供用期間50年にわたり腐食を生じさせないためには，H.W.L.から部材までの距離が1.5mの場合だと，最低でも約102mm以上が必要であることがわかる．

一方，付図-F. 4は，高炉スラグ微粉末の比表面積の大きいものを混和材としてPC部材に適用した場合を想定したものである（PC部材に対し，一般的な高炉セメントB種は使用されないため）．この場合は曲げひび割れを考慮しない．W/CをPC部材で一般的な0.4とした場合，かぶりのみで設計供用期間50年にわたり腐食を生じさせないためには，H.W.L.から部材までの距離が0.0mの場合だと約68mm以上，1.5m以上の場合であれば約50mm以上が必要であることがわかる．

港湾空港技術研究所資料 No.1339

2018.3

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 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 株式会社シーケン

Copyright© (2018) by MPAT

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

この資料は、海上・港湾・航空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、複写は海上・港湾・航空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。