

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

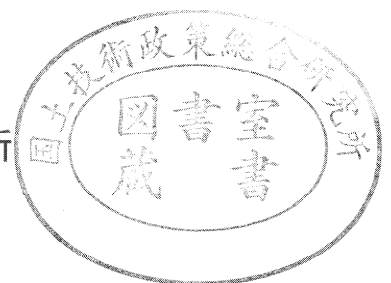
No. 810 Sep. 1995

種々の海洋環境下におけるコンクリート中への
塩化物イオンの浸透に関する一考察

浜田 秀則

R. N. Swamy

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	3
2. 収集したデータの概要	4
3. データ整理の方法	4
3. 1 コンクリート中の塩分含有量の単位の統一	4
3. 2 海洋環境の定義	5
3. 3 拡散係数の概念を用いた収集データの解析	5
4. 収集データの整理の結果および考察	6
4. 1 海中部に暴露された場合	6
4. 2 干満部に暴露された場合	11
4. 3 飛沫部に暴露された場合	13
4. 4 陸上／飛沫部に暴露された場合	16
4. 5 陸上部に暴露された場合	16
5. コンクリート中の塩分含有量に及ぼす異なる環境条件の影響に関する考察	19
5. 1 塩分含有量の最大値曲線の経時変化	19
5. 2 最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化	20
5. 3 コンクリート表面の塩分含有量の経時変化	21
6. 得られた知見	22
あとがき	22
参考文献	23

A Discussion on the Chloride Penetration into Concrete in Various Marine Environment

H. Hamada (Senior Research Engineer, Structural Engineering Division) *
R.N.Swamy (Professor The University of Sheffield, England, U.K.) **

Abstract

The aim of this paper is to obtain a better understanding of the Process of chloride penetration into hardened concrete exposed to the various zones in marine environments. Chloride content in the concrete is one of the main factors that dictate the initiation, magnitude and rate of steel corrosion in concrete. Although extensive data are available on the chloride content in hardened concrete under various marine environment, they are scattered in literature, the variables involved are many and there is no unifying approach to correlate this information and formulate a rational basis to explain how the process of chloride contamination develops under marine environments. This research work is the initial stage of a long term study to provide a realistic mathematical model for chloride penetration into concrete exposed to real environments.

Keywords : marine environments, chloride ion, chloride penetration, diffusion, steel corrosion

種々の海洋環境下におけるコンクリート中への 塩化物イオンの浸透に関する一考察

浜田秀則*

R.N.Swamy**

要 旨

本研究の目的は、海洋環境の様々な部分に暴露されたコンクリート中への塩化物イオンの浸透過程および浸透量について考察することである。

コンクリート中の塩分含有量は、コンクリート内部の鉄筋の腐食の開始、腐食の規模および速度を支配する主要な要因の一つである。様々な海洋環境下におけるコンクリート中の塩分含有量に関しては、これまでに多くの研究データが得られている。しかし、それらを記述している文献は広範囲にばらついており、またそれらの文献が取り扱っている変数も多様であるのが実情である。このような広範囲の情報を関連づけ、海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透過程および浸透量に関して総合的に考察しようとする試みはこれまでには報告されていない。

本研究は、これまでに多くの研究論文において示されてきた海洋環境下におけるコンクリート中の塩分含有量のデータを総合的に取りまとめ、それを基に海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透過程および浸透量について考察するものである。

キーワード：海洋環境、塩化物イオン、浸透、拡散、コンクリート中の鉄筋の腐食

1. はじめに

コンクリート中への塩化物イオンの浸透に起因する内部鉄筋の腐食は沿岸コンクリート構造物、海洋コンクリート構造物の劣化の主要な原因となっている。コンクリートは元来、内部鉄筋の腐食に対して良好な防食効果を有していることが知られている。すなわち、高アルカリ性のセメントペーストは鉄筋表面に不動態被膜を形成し腐食を防止する。しかし、必要量以上の塩化物イオンが鉄筋表面に存在すると、アルカリ性を呈するコンクリート中であっても鉄筋は腐食する。鉄筋腐食に塩化物イオン

が及ぼす影響、あるいは塩化物イオン、コンクリートおよび鉄筋腐食の関連性を十分に把握するためには、コンクリート中の塩分含有量に関する情報が重要となる。これまでの多数の研究により、コンクリート中の塩分含有量はコンクリート中の鉄筋の腐食の開始、腐食の規模、速度を支配する主要な要因の一つであることがほぼ明らかになっている。

一方、構造物の合理的な維持管理を行うためには、構造物に視覚的に認められる劣化現象が生じる前に構造物の状況を評価することが望まれる。そのためには、コンクリート中の塩分含有量に関する情報が不可欠とな

* 構造部，主任研究員

** The University of Sheffield, England, U.K., Professor

表一 1 暴露期間ごとのデータの構成

暴露期間	～0.5	～1	～2	～5	～10	～20	～30	～40	～50	50～
データの数	89	159	151	423	213	16	101	5	13	21

る。その理由として、現実的にはコンクリートにひびわれや剥離が生じる前に、塩分浸透に起因した腐食の有無を予知することが非常に難しいためである。すなわち、時間の経過に伴う塩分含有量の変化の履歴に関する情報を得ることは、最初の劣化現象がいつ頃発生するのかを予知することにもつながるのである。

コンクリート中への塩化物イオンの浸透およびコンクリート中の塩分含有量に関しては、世界中の主要な文献の中にながりの量の情報が存在するものの、これらの文献はそれ自体がばらついており、これらの情報を総合的に取りまとめた例はない。このような情報は、海洋環境下におけるコンクリート構造物が設計寿命の期間において良好な状態を保持するための対策を考慮する際に極めて重要となってくる。

本研究は、これまでに多くの研究論文において発表されてきた海洋環境下におけるコンクリート中の塩分含有量のデータを総合的に取りまとめ、海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透、拡散過程および含有量について有意義な知見を得ることを目的としている。

2. 収集したデータの概要

コンクリート中の塩分含有量のデータの収集に際しては可能な限り幅広く文献を収集することを心掛け、国内のみならず国際的に発表されている実験データおよび調査データを対象とした。なお、論文発表の年代としては、1980年以降に発表された文献を収集した〔1～51〕。表一1～表一3に収集したデータの構成を示す。表中に示すように、合計1191個のデータを収集した。表一1は、暴露期間ごとの収集データの構成を示している。表一2は、暴露環境ごとの収集データの構成を示している。これらの暴露環境は大まかに、海中部、干満部、飛沫部、陸上／飛沫部および陸上部に分類している。これらの暴露環境の定義については後述する。表一3にコンクリートの表面被覆の有無を要因としたデータの構成を示す。表面被覆を施した場合は308データであり、施していない場合は883データであった。

表一 2 暴露環境ごとのデータの構成

暴露期間	海中部	感潮部	飛沫部	陸上／ 飛沫	陸上部
データの数	164	136	161	404	326

表一 3 コンクリートの表面被覆の有無によるデータの構成

暴露期間	有	無
データの数	308	883

3. データ整理の方法

3. 1 コンクリート中の塩分含有量の単位の統一

収集したデータのコンクリート中の塩分含有量の単位を統一するために以下に示す計算上の仮定を設定した。

1. 「水溶性塩分含有量」は「酸可溶性塩分含有量」の70%とする。

すべてのデータについてこの仮定が正しいとは言えないが、これまでに発表されている研究結果〔2〕,〔3〕,〔19〕,〔23〕,〔25〕,〔26〕,〔31〕,〔33〕,〔35〕,〔39〕に基づき、上記の仮定を設定した。

2. 練り混ぜ時のコンクリートの配合を基に、「コンクリートに対する塩分含有量」を「セメントに対する塩分含有量」に換算できる。

本仮定もすべてのデータについて正しいとは言えないが、異なる研究者により用いられている塩分含有量の定義および単位を統一するために上記の仮定を設定した。

また、いくつかの文献中においては「全塩化物含有量」という言葉が使用されていたが、本研究中においては、「全塩化物含有量」を「酸可溶性塩化物含有量」に統一した。

3. 2 海洋環境の定義

既往の研究〔51〕によると、海洋環境の分類の一つの方法として、海面大気中、飛沫部、干満部、海中部という分類がある。本研究においても基本的には上記の分類に従い、それに加えて陸上／飛沫部という分類も加え、5つの部分に分類した。各環境の定義を以下に示す。

1) 海 中 部

本環境において、コンクリートはL.W.L. (Low Water Level) よりも下部に位置し、常に海水中に没している。

2) 干 満 部

本環境において、コンクリートはL.W.L.とH.W.L. (High Water Level) の間に位置し、海水の干満作用により、コンクリートの表面近傍では毎日乾湿の繰り返しを受けている。

3) 飛 沫 部

本環境において、コンクリートはH.W.L.の直上に位置し、常に海水飛沫の影響を受けている。

4) 陸上／飛沫部

本環境において、コンクリートは飛沫部と陸上部の中間に位置しており、強風下あるいは波浪の激しい時は海水飛沫を受けるが、風が比較的弱い時や波の静かな時は海水飛沫を受けることはない。

5) 陸 上 部

本環境において、コンクリートは海岸線から10~20 m程度の距離に位置し、塩分を含んだ潮風に直接さらされている。しかし、海水飛沫を受けることは極めて少ない。

3. 3 拡散係数の概念を用いた収集データの解析

コンクリート中への塩化物イオンの浸透過程は複雑であり、一般的には、海水の浸透現象、塩化物イオンの濃度拡散現象およびコンクリートの水和生成物による塩化物イオンの固定化現象より成っていると考えられている。しかし、これらの現象を一つのモデルで説明することは極めて複雑になること、また、本研究の目的はコンクリート中への塩化物イオンの浸透量を予知することである点を考慮し、本解析においては、海水の浸透および塩化物イオンの固定化も拡散現象に含めて取り扱うこととした。

コンクリート中への塩化物イオンの拡散を表す拡散方程式としては、式(1)に示すFickの第2法則が一般的に用いられている。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここに、 C : コンクリート中の塩分含有量
 t : 暴露期間
 x : コンクリート表面からの距離
 D : 拡散係数

この式(1)を下記の条件の基に解くと式(2)を得る。

$$\begin{aligned} \text{初期条件} : C(x, 0) &= 0 \\ \text{境界条件} : C(0, t) &= C_0 \quad (C_0 = \text{一定}) \end{aligned}$$

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

ここに、 C_0 : コンクリート表面における塩分含有量

(=一定)

erf : 誤差関数

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (3)$$

式(2)は以下に示す3つのパラメーターにより構成されている。

C : $(x \cdot t)$ におけるコンクリート中の塩分含有量
 x : コンクリート表面からの距離
 t : 暴露期間

したがって、ある一つの塩分分布に対して式(2)をあてはめることにより、その分布に対して最適な拡散係数を算出することができる。なお、この場合に求める拡散係数は暴露期間を通して一定とみなすことになる。一つの塩分分布に対して最適な拡散係数を求める比較的簡便な方法は参考文献〔1〕に示されている。その方法は、以下の(4)式に示される誤差関数と正規分布関数の関係を利用してはいる。

$$\frac{1}{2} (1 - \operatorname{erf}(z)) = 1 - \Phi(\sqrt{2}Z) \quad (4)$$

ここに、 $\operatorname{erf}(z)$: 誤差関数
 Φ : 正規分布関数

この方法によると、正規確率紙を用いることにより比較的容易に拡散係数を求めることができる。

一例として、図-1～図-5に示す海中部に暴露されたコンクリート中の塩分含有量について拡散係数の算出方法を示す。図-1～図-5の図中においては、以下に示す2つの要因について得られたデータを分類している。

1. セメントの種類

調査した文献中にセメントの種類が明記されている場合は図中にそれを示している。図中にセメント種が記されていないものについては文献中に明記されていないものである。

2. 水セメント比

水セメント比は10%ごとに分類している。

また、得られたデータはすべてコンクリートの表面からの距離、および暴露期間を指標として整理した。図-1は暴露期間が6ヶ月以下の場合のデータ、図-2は暴露期間が6ヶ月から1年のデータ、図-3は暴露期間が1年から2年のデータ、図-4は暴露期間が2年から5年のデータおよび図-5は暴露期間が20年から56年のデータである。いくつかの図中において一般的な傾向から大きく外れているデータが少数存在するが、これらのデータは以下に述べる一連の解析からは除外した。また各図中においては、「最大値曲線」も示している。ここで最大値曲線と呼んでいるものは、収集データの各かぶり厚さに対する最大値を曲線(包絡線)で結んだものである。図-1～図-5よりわかるとおり、暴露期間が長くなるに従ってデータのばらつきは徐々に大きくなるという傾向がある。本解析においては、各図中に示されている最大値曲線に対して最適な拡散係数を求め、その絶対値、経時変化等に関して考察を行った。

図-1～図-4に示す最大値曲線に最適な拡散係数の求め方を以下に簡潔に述べる。先にも述べたが、文献[1]に示されている手順は式(4)に示す誤差関数と正規分布関数の関係を利用するものである。式(2)を式(4)に代入しさらに変換すると、以下に示す式(5)を得る。

$$\frac{C}{2C_0} = 1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \quad (5)$$

- ここに、 C : コンクリート中の塩分含有量
- C_0 : コンクリート表面の塩分含有量
- Φ : 正規分布関数
- D : 拡散係数

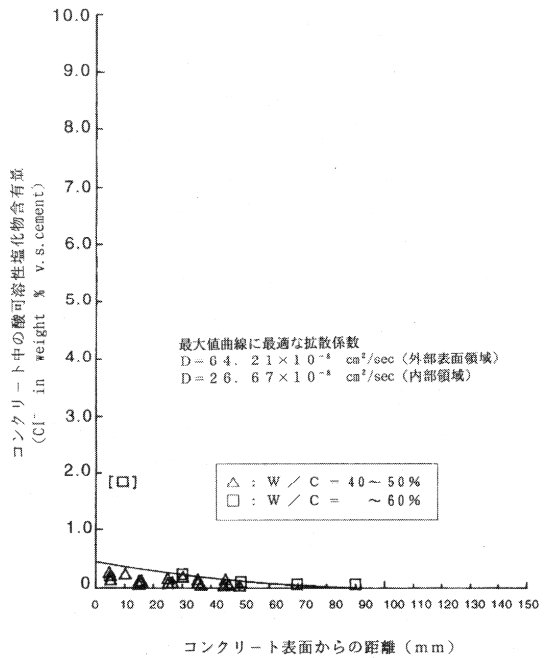


図-1 コンクリート中の塩分含有量(海中部、6ヶ月以下)

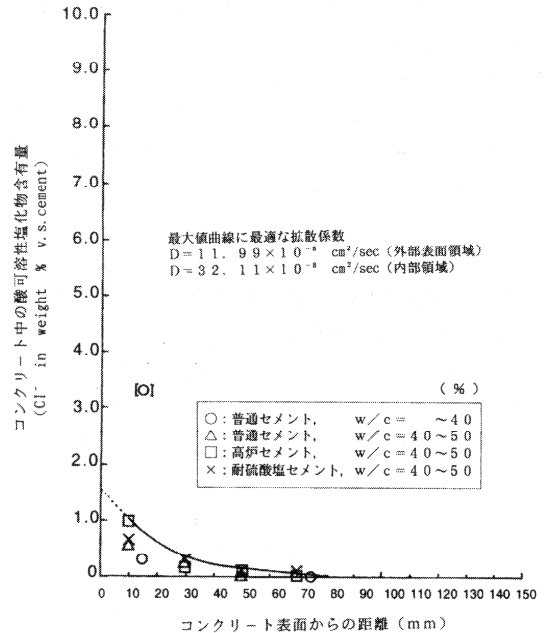


図-2 コンクリート中の塩分含有量(海中部、6ヶ月～1年)

- t : 暴露期間
- x : コンクリート表面からの距離

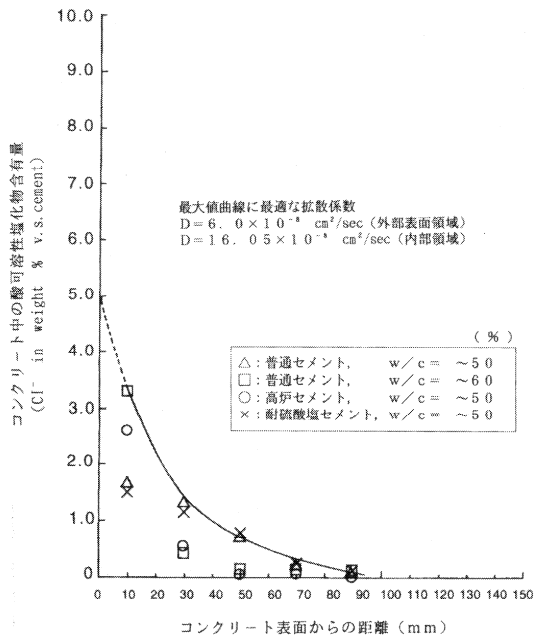


図-3 コンクリート中の塩分含有量 (海中部、1年～2年)

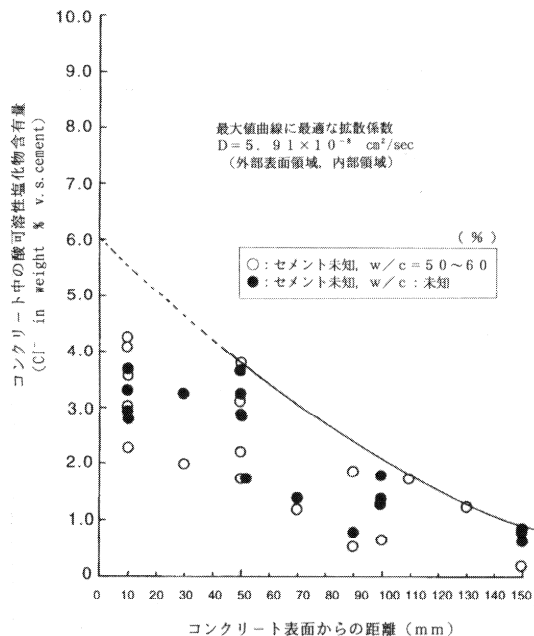


図-5 コンクリート中の塩分含有量 (海中部、20年～50年)

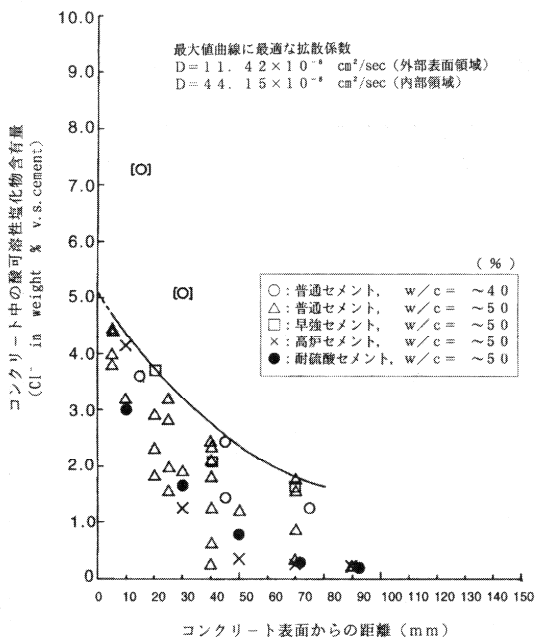


図-4 コンクリート中の塩分含有量 (海中部、2年～5年)

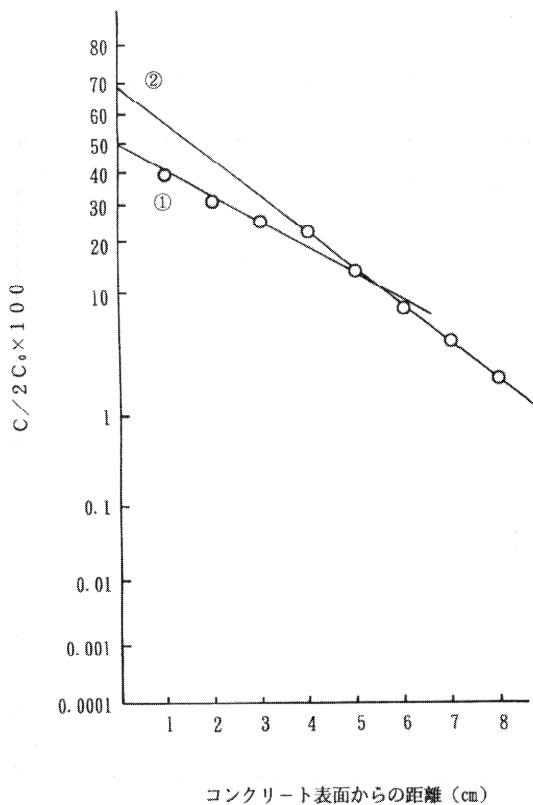


図-6 正規確率紙にプロットした結果 (海中部、6ヶ月以下)

この式より、正規確率紙の横軸をコンクリート表面からの距離とし、縦軸を $(C / 2 C_0 \times 100)$ として、データをプロットし、両者の関係を直線表示すると、その傾きは $(1 / 2 \sqrt{D \cdot t})$ となる。

表-4 $C/2C_0 \times 100$ の算出結果 (海中部, 6 ヶ月以下)

コンクリート表面からの距離 (cm)	C (%)	$C/2C_0 \times 100$
1	0.35	38.9
2	0.28	31.1
3	0.22	24.4
4	0.20	22.2
5	0.12	13.3
6	0.07	7.8
7	0.04	4.4
8	0.02	2.2
9	0	-

表-6 $C/2C_0 \times 100$ の算出結果 (海中部, 1年~2年)

コンクリート表面からの距離 (cm)	C (%)	$C/2C_0 \times 100$
1	3.3	33
2	2.15	21.5
3	1.35	13.5
4	1.025	10.3
5	0.7	7.0
6	0.5	5.0
7	0.3	3.0
8	0.175	1.8
9	0.1	1.0

表-5 $C/2C_0 \times 100$ の算出結果 (海中部, 6 ヶ月~1年)

コンクリート表面からの距離 (cm)	C (%)	$C/2C_0 \times 100$
1	1.1	34.4
2	0.7	21.9
3	0.45	14.1
4	0.3	9.4
5	0.2	6.3
6	0.125	3.9
7	0.05	1.6
8	0.01	0.3
9	0	-

表-7 $C/2C_0 \times 100$ の算出結果 (海中部, 2年~5年)

コンクリート表面からの距離 (cm)	C (%)	$C/2C_0 \times 100$
1	4.4	43.1
2	3.75	36.8
3	3.2	31.4
4	2.75	27.0
5	2.35	23.0
6	2.05	20.1
7	1.85	18.1
8	1.65	16.2

表-4~表-7に ($C/2C_0 \times 100$) の算出結果, また図-6~図-9にそれらを正規確率紙にプロットし

た結果を示す。図-6~図-9に示すとおり, コンクリートの比較的表面的部分 (以後, 外部表面領域と称する)

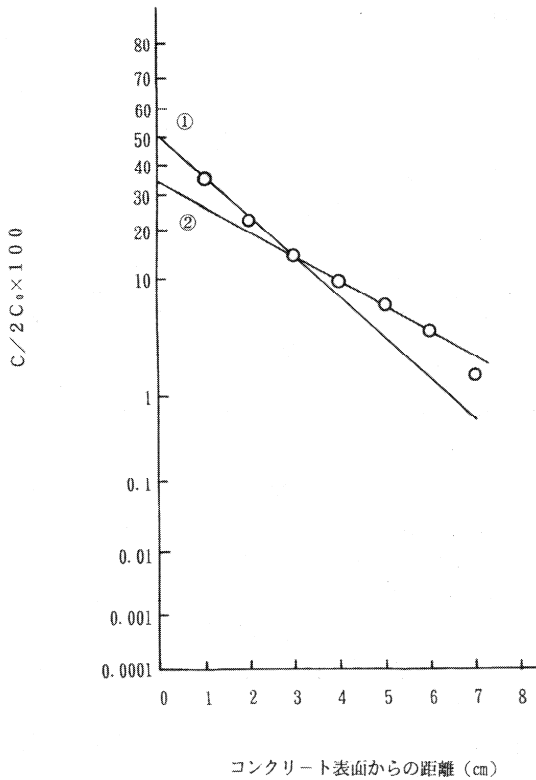


図-7 正規確率紙にプロットした結果(海中部、6ヶ月~1年)

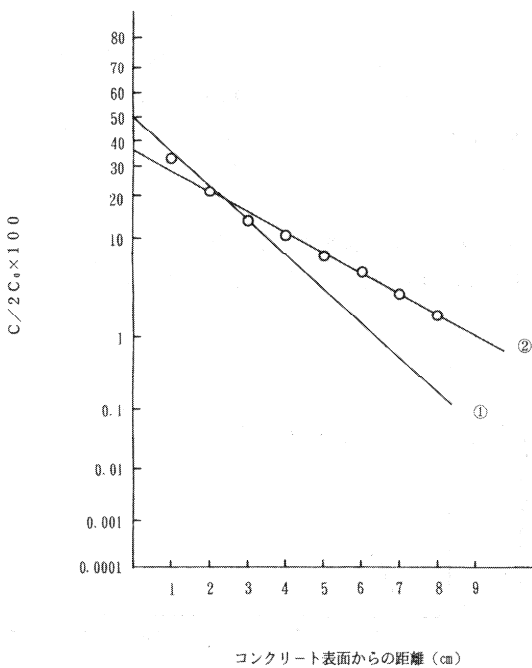


図-8 正規確率紙にプロットした結果(海中部、1年~2年)

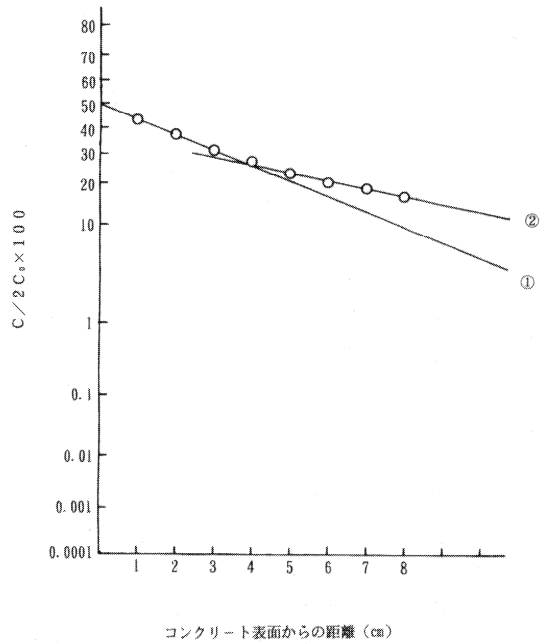


図-9 正規確率紙にプロットした結果(海中部、2年~5年)

と比較的内部的部分(以後、内部領域と称する)とで正規確率紙上の近似直線の傾きが異なるものとなった。すなわち、外部表面領域と内部領域で最適な拡散係数は異なる結果となった。おおよそ、コンクリートの表面からの距離で30~50mm程度が外部表面領域と内部領域の境界であった。図-6の場合、直線①の傾きより外部表面領域の拡散係数 $D=64.21 \times 10^{-8} (\text{cm}^2/\text{sec})$ が求まり、直線②の傾きより、内部領域の拡散係数 $D=26.67 \times 10^{-8} (\text{cm}^2/\text{sec})$ が求まる。図-7~図-9の場合も図-6と同様であり、直線①の傾きより外部表面領域の拡散係数が求まり、直線②の傾きより内部領域の拡散係数が求まる。後章でも詳述するが、このことはコンクリートの外部表面領域と内部領域とで塩化物イオンの浸入メカニズムが異なってくることを示唆しているものと考えられる。

4. 収集データの整理の結果および考察

4.1 海中部に暴露された場合

前述のとおり、図-1~図-5に海中部に暴露された場合のコンクリート中の塩分含有量を示している。いずれの図中においても、コンクリート中の塩分含有量の最大レベルを示す最大値曲線を示し、その最大値曲線に最適な拡散係数も併せて示している。また、図-1~図-5に示す最大値曲線をまとめて、その経時変化を示したも

のが図-10である。なお、図-5に示された最大値曲線の経過年数を「29年」と示しているのは、最大値曲線に相当するデータが材令29年のものであったためである。この図より以下に述べるいくつかの特徴を読み取ることができる。暴露期間が比較的短い初期の段階、この場合は暴露2年程度まではコンクリートの外部表面領域の塩分含有量が主に増加している。しかし、暴露期間がさらに長くなると、コンクリートの外部表面領域の塩分含有量の増加の速度は鈍り、コンクリートの内部領域の塩分含有量が主に増加してくる傾向が認められる。図-11に最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化を示す。図中の実線は、外部表面領域の拡散係数を示しており、点線は内部領域の拡散係数を示している。図-11よりわかるとおり、外部表面領域と内部領域とでは拡散係数の値も経時変化の傾向も異なる。外部表面領域の拡散係数は暴露6ヶ月で最大値を取り、暴露1年時にかけて急減する。しかしその後大きな変化はなく、暴露30年に至るまではほぼ一定である。一方、内部領域の拡散係数は暴露5年時に最大値を取りその後減少する。この海中部に暴露されたコンクリートの場合、暴露30年時において外部表面領域の拡散係数と内部領域の拡散係数はほぼ同一となる。この拡散係数の経時変化より考察すれば、暴露開始直後はコンクリートの外部表面領域において塩化物イオンの浸透が生じ、そのために拡散係数が大きく算出されるが、1～2年後には浸透現象がおさまってくるものと考えら

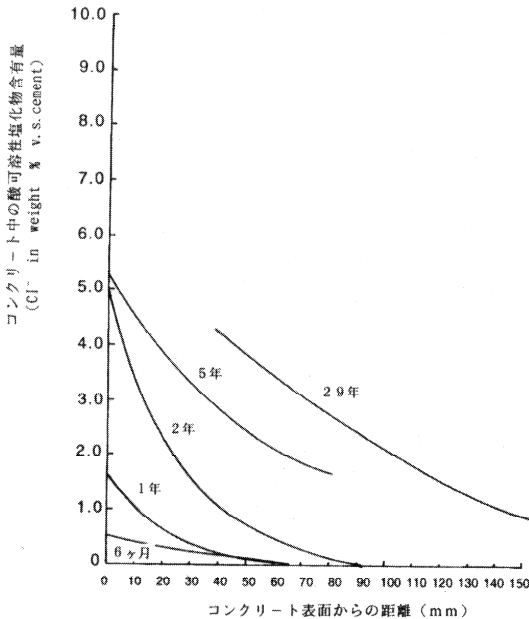


図-10 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線の経時変化(海中部)

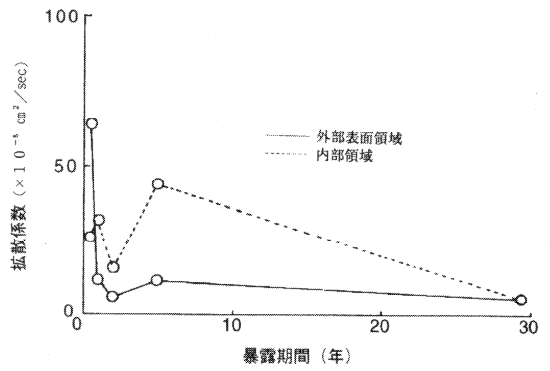


図-11 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化

れる。一方、コンクリートの内部領域においては、暴露開始後5年程度において塩化物イオンの拡散が最も活発となるが、その後徐々に拡散速度も小さくなり、次第に定常状態に落ち着いていくものと考えられる。暴露期間が20年～30年以上のかなり長期間を経過すると、外部表面領域から内部領域まではほぼ定常の拡散状態となるものと考えられる。

図-12に、コンクリート表面の塩分含有量の最大値の経時変化を示す。ここで示すコンクリート表面の塩分含有量の最大値とは、外部表面領域の最大値曲線をコンクリート表面まで外捜することにより得られたコンクリート表面での塩分含有量のことである。なお図-12においてはx軸のスケールはコンクリートの暴露期間の平方根としている。本図よりわかるとおり、暴露2年まではコンクリート表面の塩分含有量と暴露期間の平方根はほぼ線形の関係にあるが、それ以降においてはコンクリート表面の塩分含有量はほぼ一定となる。

4. 2 干満部に暴露された場合

図-13～図-17に、干満部に暴露されたコンクリート

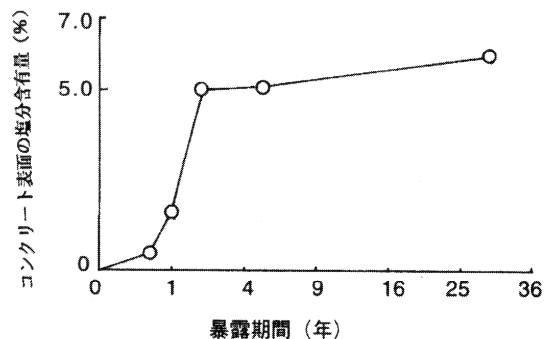


図-12 コンクリート表面の塩分含有量の最大値の経時変化(海中部)

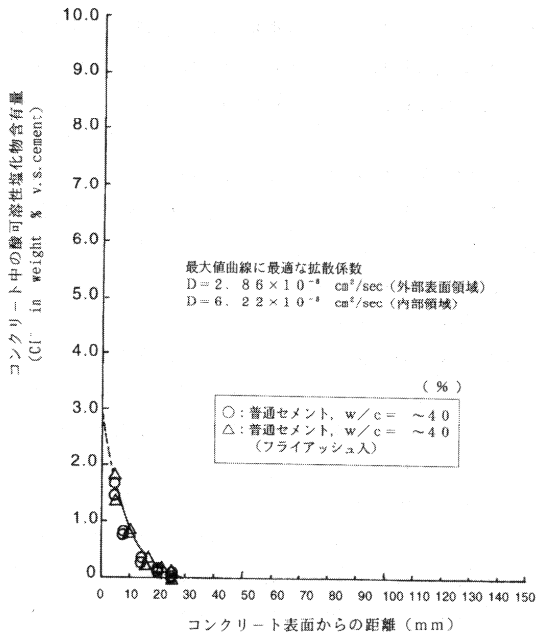


図-13 コンクリート中の塩分含有量 (干満部、6ヶ月以下)

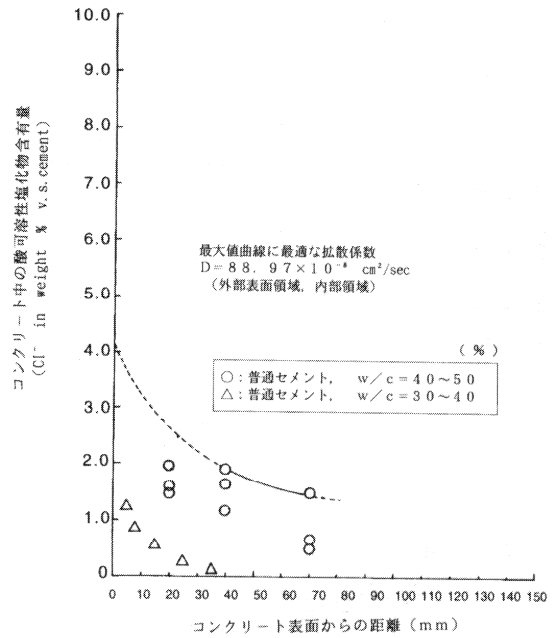


図-15 コンクリート中の塩分含有量 (干満部、2年～5年)

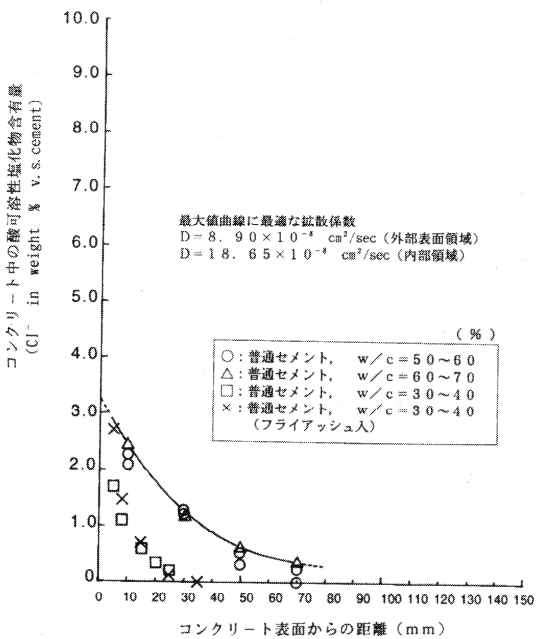


図-14 コンクリート中の塩分含有量 (1年～2年)

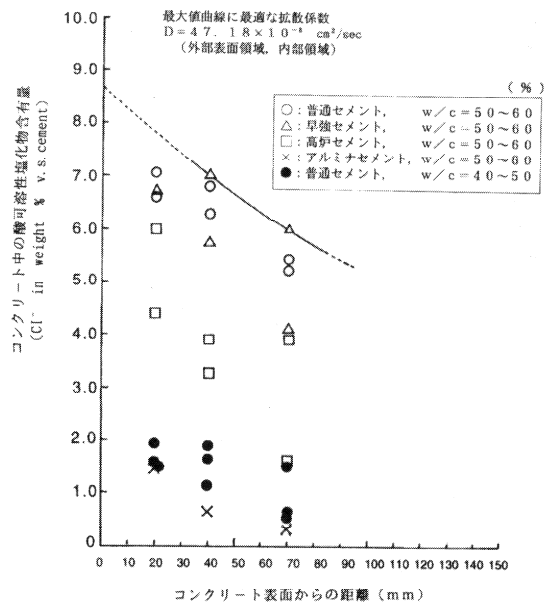


図-16 コンクリート中の塩分含有量 (5年～10年)

中の塩分含有量を示す。暴露期間の区分は、6ヶ月以下、1～2年、2～5年、5～10年および20～30年である。図-13～図-16に示されている塩分含有量の単位は「セメントに対する酸可溶性塩分 (Cl⁻) の重量パーセント」

であるが、図-17のみ「コンクリートに対する酸可溶性塩分 (Cl⁻) の重量パーセント」で示している。その理由は、暴露期間が20年以上の長期にわたるデータがセメント重量に対する濃度表示では得られなかったが、コン

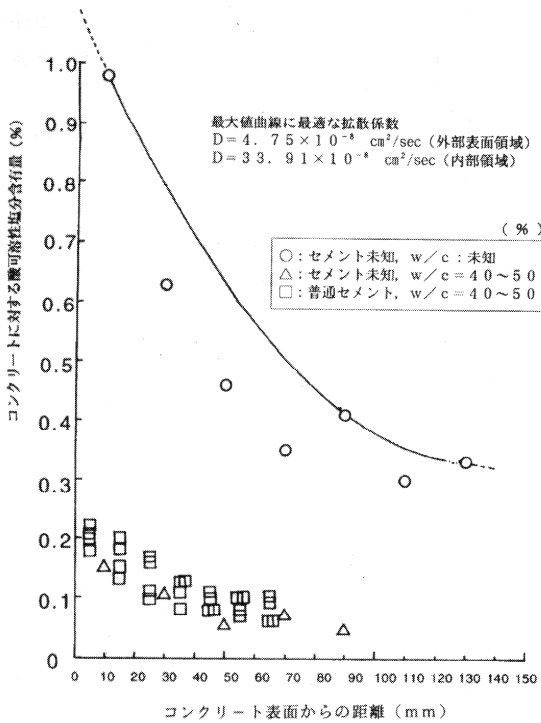


図-17 コンクリート中の塩分含有量 (干満部, 20年~30年)

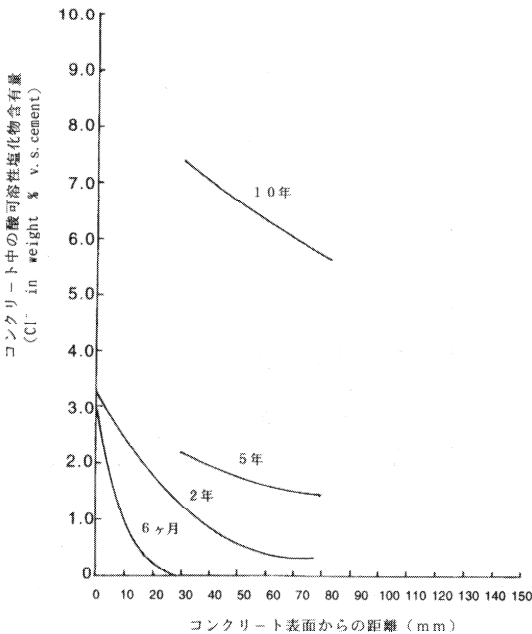


図-18 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線の経時変化 (干満部)

クリートに対する濃度表示では得られたためである。し

かしながら、コンクリート重量に対する濃度表示より算出される拡散係数は、セメント重量に対する濃度表示より算出される拡散係数と絶対値の比較をすることは可能である。

図-13~図-17中において、最大値曲線に対して最適な拡散係数の値も併せて示している。前項において述べた海中部に暴露された場合と同様に干満部の場合も最大値曲線に最適な拡散係数は、コンクリート表面からの距離と暴露期間により異なるものとなった。

また、図-13~図-16に示す最大値曲線をまとめて、その経時変化を示したものが図-18である。暴露5年から10年にかけての5年間の増加量が極めて大きくなっているが、この理由は明確ではない。本図は筆者が可能な限り収集したデータに基づいており、その範囲内で得られたグラフである。暴露期間が5年の範囲内でその経時変化を見てみると、暴露初期の段階では外部表面領域の塩分含有量が主に増加しており、暴露期間が長くなるにつれて内部領域における塩分含有量が増加してくる傾向にある。この傾向は、前項において述べた海中部の場合と同様である。図-19に最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化を示す。図中の実線は外部表面領域の拡散係数を示しており、点線は内部領域の拡散係数を示している。この図よりわかるとおり、外部表面領域の拡散係数は暴露初期から暴露後期（この場合は暴露約25年）に至るまで大きな変化を示さず、ほぼ一定値を取り、その値は約 $5.0 \times 10^{-8} (\text{cm}^2/\text{sec})$ 程度である。一方、内部領域の拡散係数は比較的大きな経時変化を示す。すなわち、暴露約5年において最大値 ($90 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$) を取り、その後暴露期間が経過するに従い徐々に減少する。しかし、暴露25年時においても外部表面領域の拡散係数と内部領域の拡散係数は大きく異なっている。このことより、以下のことが考察される。すなわち、干満部に暴露され

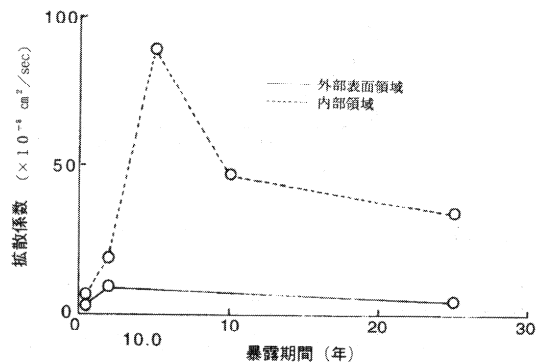


図-19 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化 (干満部)

た場合、コンクリートの外部表面領域と内部領域とで塩化物イオンの浸透メカニズムおよび浸透速度は異なるものであり、この違いは暴露期間がかなり長くなった時点まで継続するようである。

図-20に、コンクリート表面の塩分含有量の経時変化を示す。この図より、コンクリート表面の塩分含有量は暴露時間の経過とともに徐々に増加していく傾向が認められ、データが得られている範囲で考察すれば暴露期間の平方根とコンクリート表面の塩分含有量とはほぼ線形の関係にあると言える。

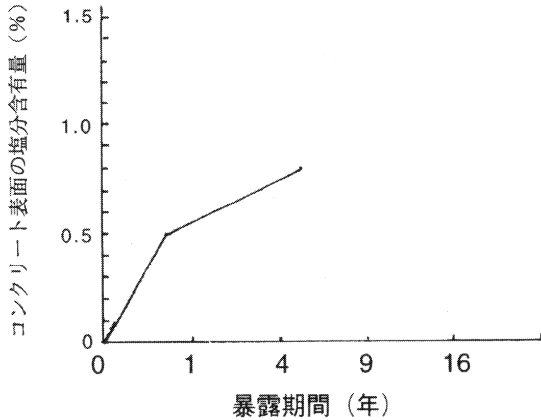


図-20 コンクリート表面の塩分含有量の最大値の経時変化(干満部)

4. 3 飛沫部に暴露された場合

図-21～図-25に飛沫部に暴露されたコンクリート中の塩分含有量を示す。暴露期間の区分は、6ヶ月以下、6ヶ月～1年、1年～2年、2年～5年、5年～20年および20年～30年である。各図中には最大値曲線およびその最大値曲線に最適な拡散係数を示している。図-21に示す暴露期間が6ヶ月および1年の場合は、コンクリートの外部表面領域と内部領域とで最適な拡散係数は異なるものとなった。しかし、図-22～図-25に示す暴露期間が2年以上の場合になると、コンクリートの外部表面領域と内部領域とで最適な拡散係数は同一の値を示した。飛沫部に暴露された場合も先に述べた海中部および干満部に暴露された場合と同様に、最大値曲線に最適な拡散係数は暴露期間の経過とともに変化している。

図-21～図-25に示す最大値曲線をまとめて、その経時変化を示したものが図-26である。これによると、暴露6ヶ月程度の比較的短期間で、コンクリート表面からの距離が60mm程度まで塩分が浸入していることがわかる。暴露6ヶ月時点での塩分含有量を海中部および干満部に

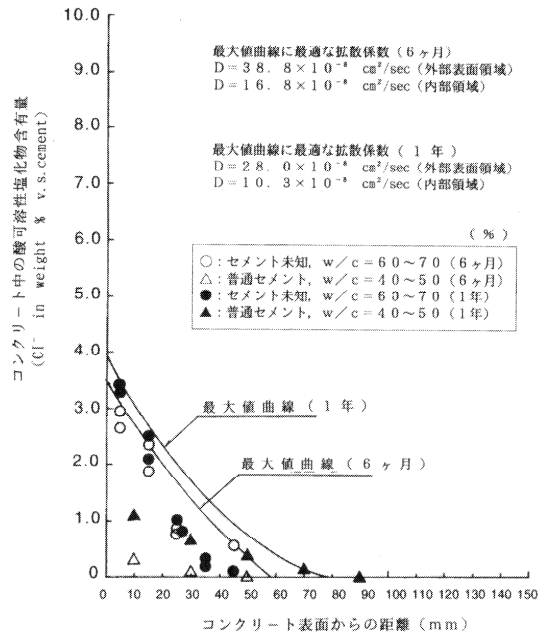


図-21 コンクリート中の塩分含有量(飛沫部、6ヶ月以下、6ヶ月～1年)

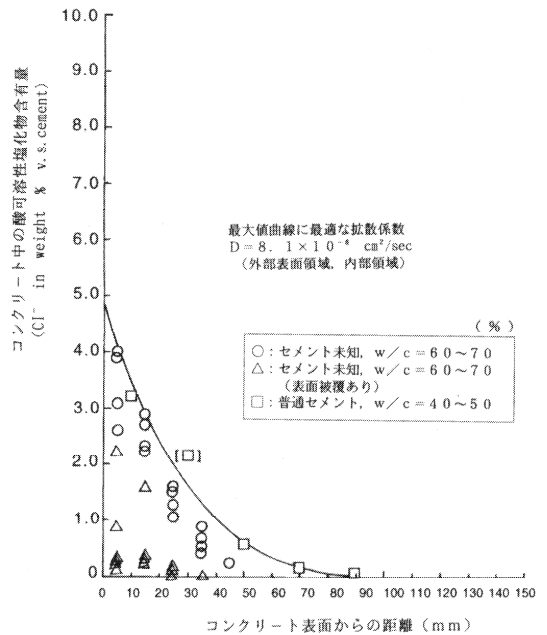


図-22 コンクリート中の塩分含有量(飛沫部、1年～2年)

暴露された場合と比較してみると、飛沫部に暴露された場合の方が大きくなっている。また、この図より明らかとなり、暴露期間が18年以下においては、コンクリート表面からの距離が100mm以下の外部表面領域の塩分含

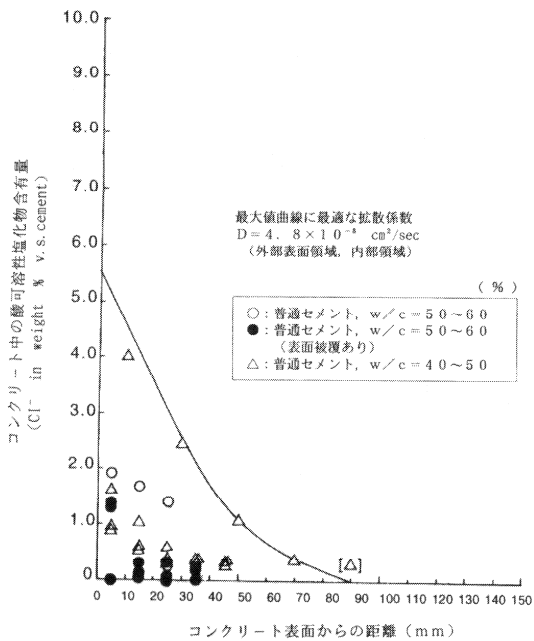


図-23 コンクリート中の塩分含有量(飛沫部, 2年~5年)

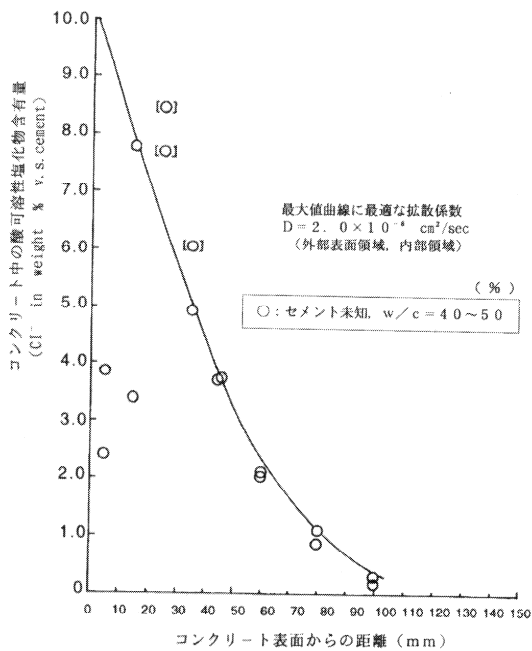


図-24 コンクリート中の塩分含有量(飛沫部, 5年~20年)

含有量が増加しているが, 暴露期間がさらに長くなると, コンクリート表面からの距離が100mm以上の内部領域において塩分含有量が増加している。

図-27に最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化を示

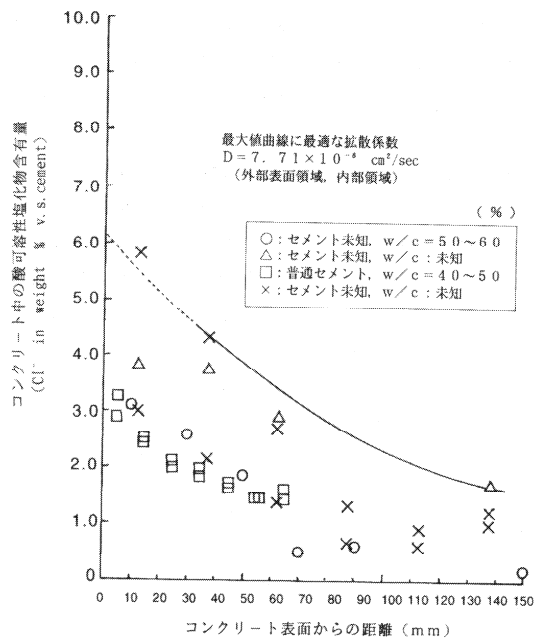


図-25 コンクリート中の塩分含有量(飛沫部, 20年~30年)

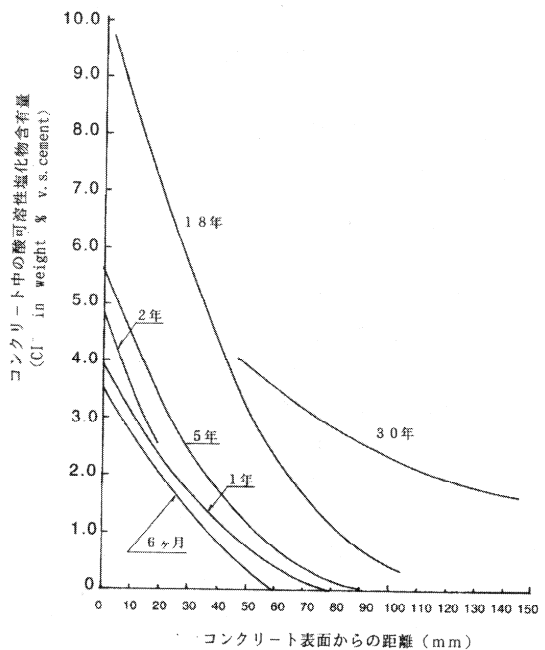


図-26 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線の経時変化(飛沫部)

図中の実線は外部表面領域の拡散係数を示しており, 点線は内部領域の拡散係数を示している。これによると, 暴露期間が1年以下の極めて初期の段階において, 外部表面領域の拡散係数および内部領域の拡散係数はともに

最大値を示す。この間の両拡散係数を比較してみると、外部表面領域の拡散係数の方が内部領域の拡散係数より大きな値を取っている。本図に示す飛沫部暴露の場合の拡散係数の値を図-11および図-19に示す海中部暴露および干満部暴露の場合の拡散係数と比べてみると、全体的に飛沫部暴露の場合の方がその値は小さい。しかし、コンクリート中の塩分含有量そのものは飛沫部暴露の方が大きくなっている。このことより、拡散係数の大小と塩分含有量は必ずしも一致するものではないということ、また、飛沫部暴露の場合の塩化物イオンの浸入メカニズムは海中部あるいは干満部暴露の場合とはかなり異なるものであることが推察される。

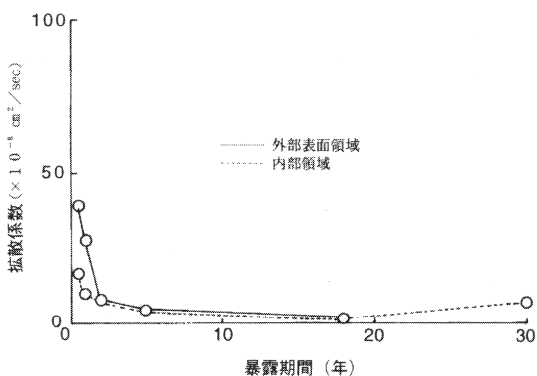


図-27 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化(飛沫部)

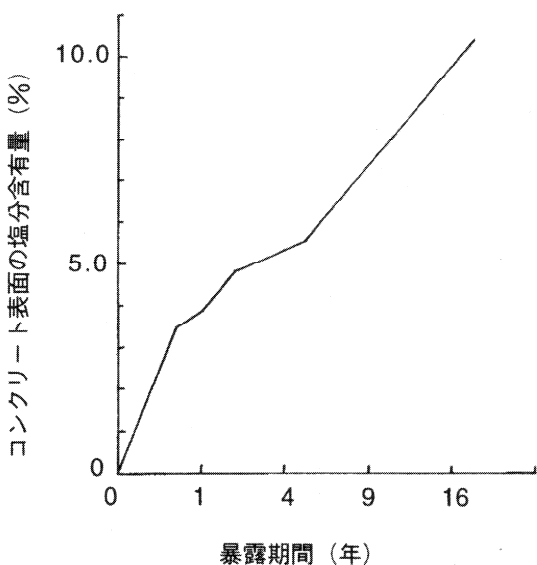


図-28 コンクリート表面の塩分含有量の最大値曲線の経時変化(飛沫部)

図-28に、飛沫部に暴露された場合のコンクリート表面の塩分含有量の経時変化を示す。この図より、データが得られている暴露期間約20年まではコンクリート表面の塩分含有量と暴露期間の平方根とはほぼ線形の関係にあることがわかる。

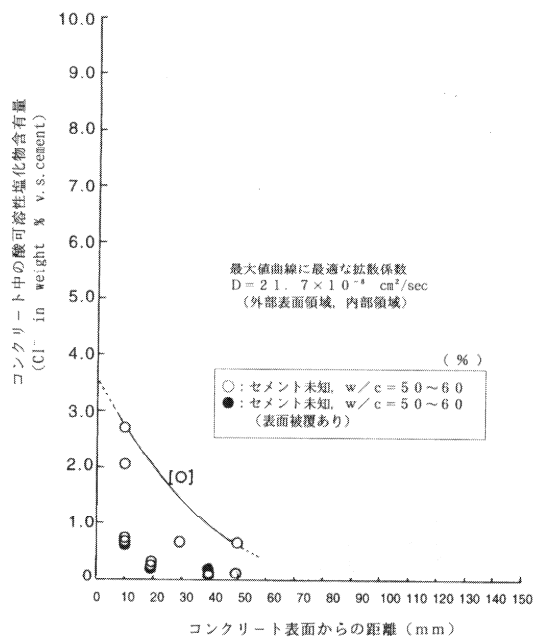


図-29 コンクリート中の塩分含有量(陸上/飛沫部、6ヶ月~1年)

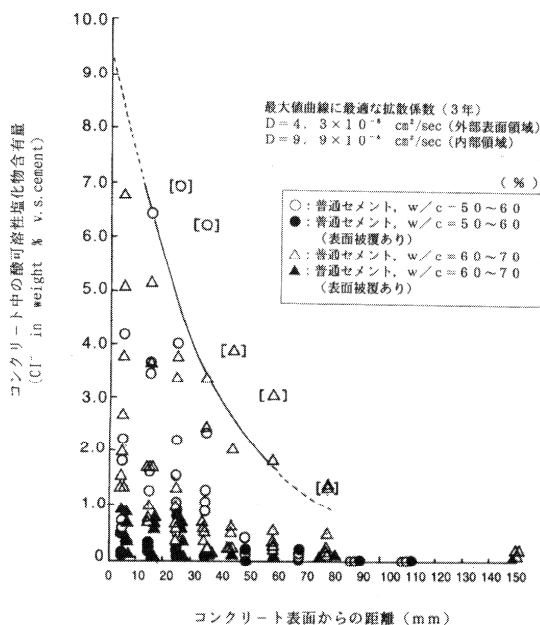


図-30 コンクリート中の塩分含有量(陸上/飛沫部、2年~5年)

4. 4 陸上/飛沫部に暴露された場合

先にも述べたが、陸上/飛沫部とは飛沫部と陸上部の中間に位置する環境のことである。この陸上/飛沫部に暴露されたコンクリート中の塩分含有量に関するデータ

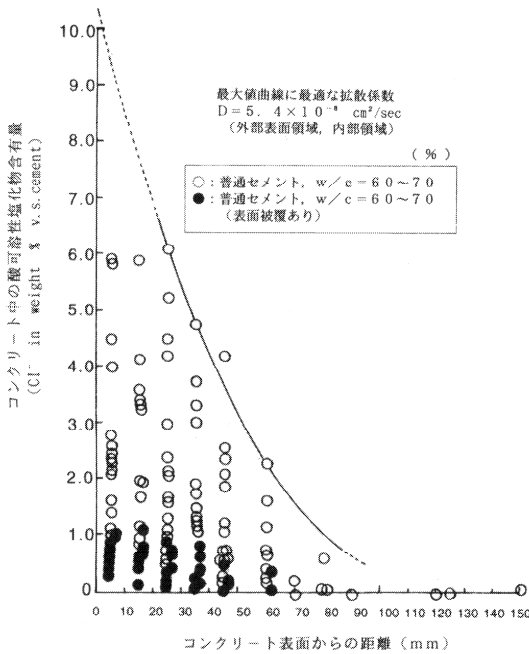


図-31 コンクリート中の塩分含有量 (陸上/飛沫部、5年~7年)

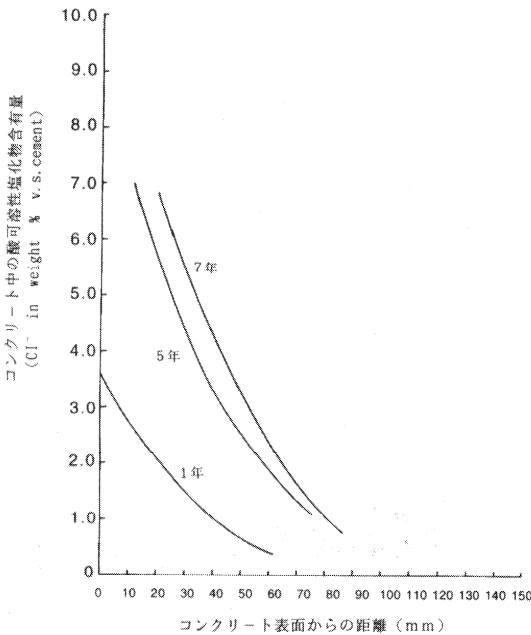


図-32 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線の経時変化 (陸上/飛沫部)

の大部分は参考文献 [7~13] に示されているものであり、暴露期間は最長で7年である。

図-29~図-31に陸上/飛沫部に暴露されたコンクリート中の塩分含有量を示す。暴露期間の区分は、6ヶ月~1年、2~5年および5~7年である。各図中には最大値曲線を示しており、その最大値曲線に最適な拡散係数も示している。また、図-29~図-31に示す最大値曲線をまとめて、その経時変化を示したものが図-32である。暴露1年時において既にかなり大きな塩分含有量を示している。この図の範囲内で考察すれば、塩分含有量の増加量は暴露初期の段階の方が大きく、暴露5年時から7年時にかけての増加量は比較的小さいと言える。

図-33に最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化を示す。暴露期間が1年、5年、7年の時点と比較してみると、暴露1年において拡散係数は最大となり、暴露期間が5年、7年と経過するに従い徐々に小さくなっている。この拡散係数の経時変化の傾向は、図-27に示す飛沫部暴露の場合の拡散係数とはほぼ同様である。このことより考察して、今回敢えて分類した陸上/飛沫部は環境条件としては飛沫部に近いものと考えられる。したがって、本環境におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸入のメカニズム、量は飛沫部の場合と類似の結果を示しているものと考えられる。

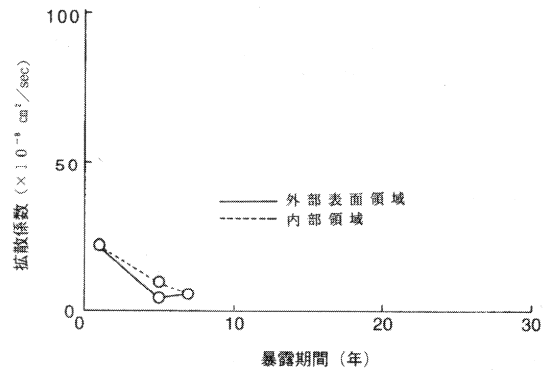


図-33 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化 (陸上/飛沫部)

図-34に、陸上/飛沫部に暴露された場合のコンクリート表面の塩分含有量の経時変化を示す。この図より、データが得られている暴露7年までの範囲内においてはコンクリート表面の塩分含有量と暴露期間の平方根はほぼ線形の関係にあることがわかる。

4. 5 陸上部に暴露された場合

図-35~図-39に陸上部に暴露されたコンクリート中

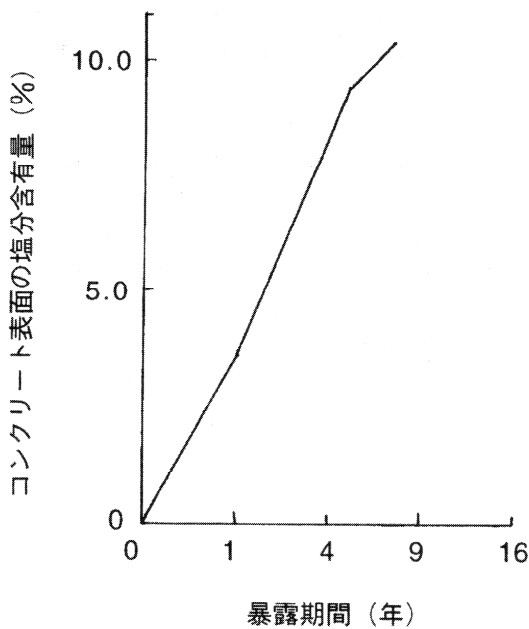


図-34 コンクリート表面の塩含有量の最大値の経時変化(陸上/飛沫部)

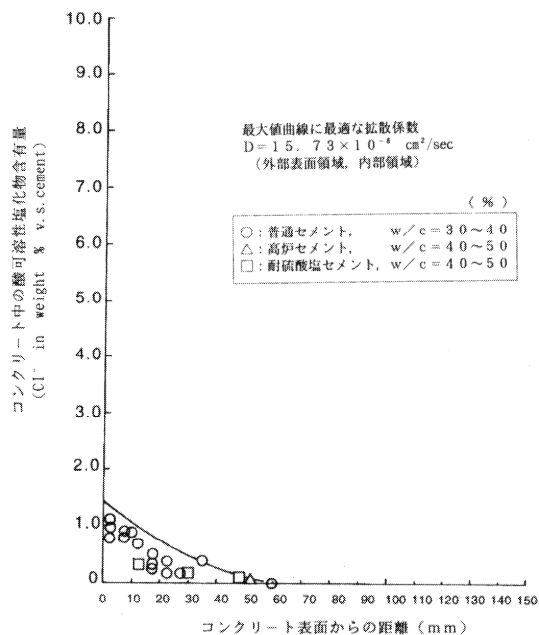


図-36 コンクリート中の塩含有量(陸上部、6ヶ月~1年)

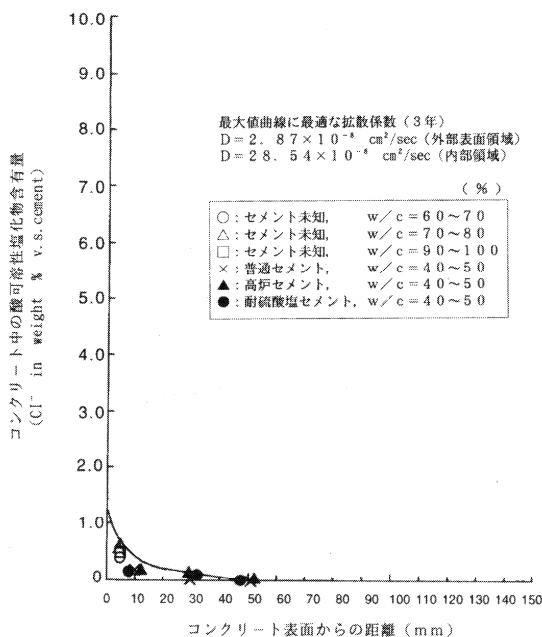


図-35 コンクリート中の塩含有量(陸上部、6ヶ月以下)

の塩含有量を示す。暴露期間の区分は、6ヶ月以下、6ヶ月~1年、1年~2年、2年~5年、5年~58年である。各図には最大値曲線を記しており、その最大値曲線に最適な拡散係数も示している。これらの図を見てわ

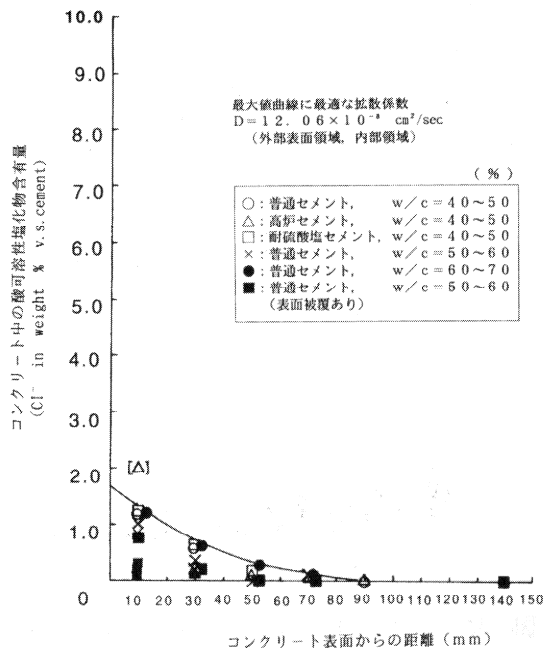


図-37 コンクリート中の塩含有量(陸上部、1年~2年)

かるとおり、前項までに示されている海中部、干満部、飛沫部、陸上/飛沫部に暴露された場合に比べて陸上部に暴露された場合の塩分含有量の絶対量はかなり小さい。

また、図-35~図-39に示す最大値曲線をまとめて、

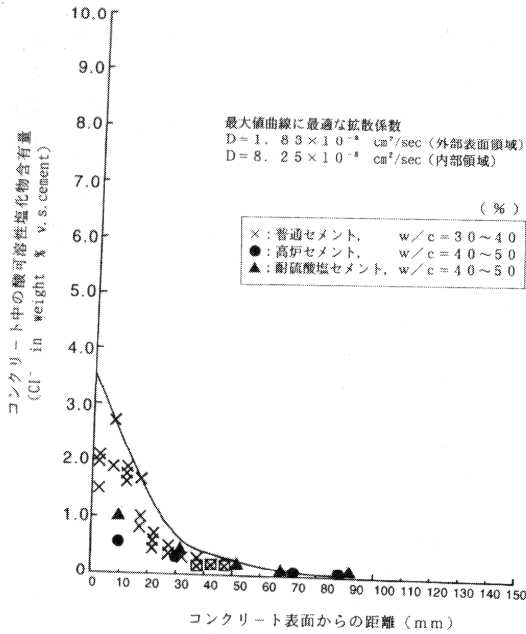


図-38 コンクリート中の塩分含有量(陸上部、2年~5年)

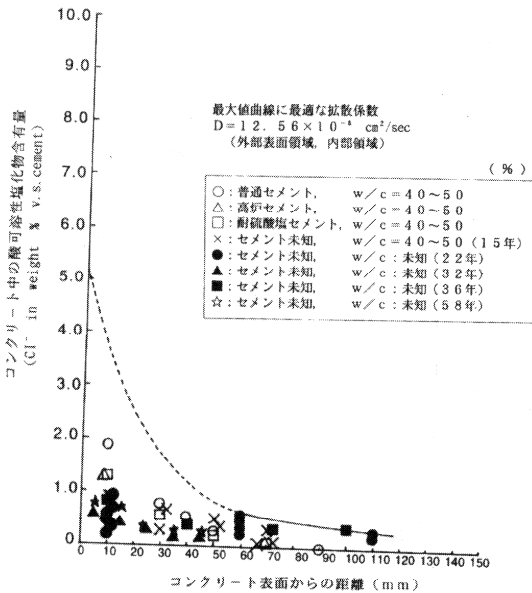


図-39 コンクリート中の塩分含有量(陸上部、5年~58年)

その経時変化を示したものが図-40である。

なお、図-39に示された最大値曲線の経過年数を「22年」としているのは最大値曲線に相当するデータが材令22年のものであったためである。この図より、暴露初期、この場合は暴露5年以下ではコンクリートの外部表面領域の塩分含有量が徐々に増加し、さらに暴露期間が長く

なるとコンクリートの内部領域において塩分含有量が増加している。図-41に最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化を示す。暴露6ヶ月時および5年時に、外部表面領域の拡散係数と内部領域の拡散係数が相違しているが、暴露1年時および2年時には両者は同一の値を取っている。定性的には両拡散係数はほぼ等しい値をとるものと考えられる。この傾向は、図-27に示した飛沫部の場合と図-33に示した陸上/飛沫部の場合と一致している。このことより、陸上部暴露の場合のコンクリート中の塩化物イオンの浸入メカニズムは飛沫部および陸上/飛沫部の場合と類似のものであることが推察される。

図-42に陸上部に暴露された場合のコンクリート表面

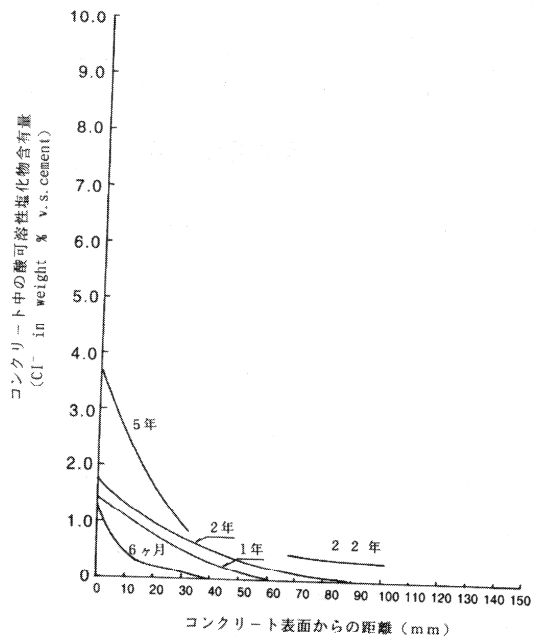


図-40 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線の経時変化(陸上部)

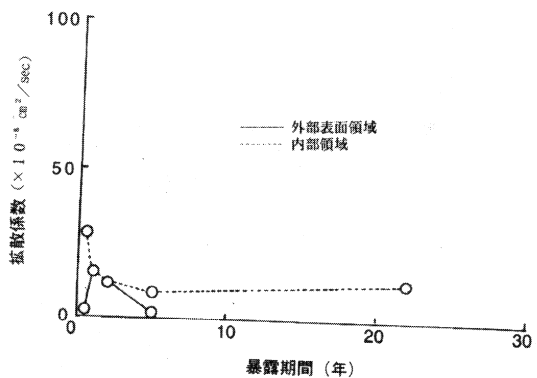


図-41 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化(陸上部)

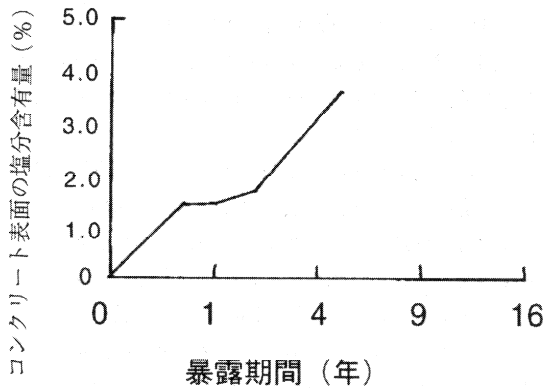


図-42 コンクリート表面の塩分含有量の最大値の経時変化(陸上部)

の塩分含有量の経時変化を示す。コンクリート表面の塩分含有量自体は、他の環境の場合に比べて小さいがその経時変化の傾向はほぼ同様である。すなわち、データが得られている暴露5年時までは、コンクリート表面の塩分含有量と暴露期間の平方根とはほぼ線形の関係にある。

5. コンクリート中の塩分含有量に及ぼす異なる暴露条件の影響に関する考察

5.1 塩分含有量の最大値曲線の経時変化

図-43～図-48に暴露期間ごとに、海中部、干満部、

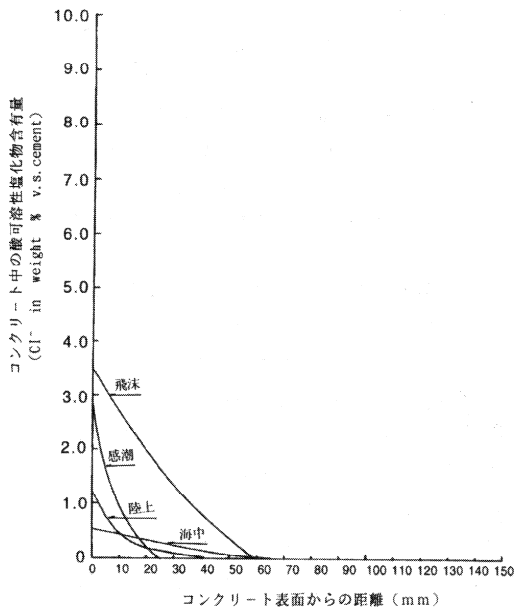


図-43 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線(暴露期間6ヶ月以下)

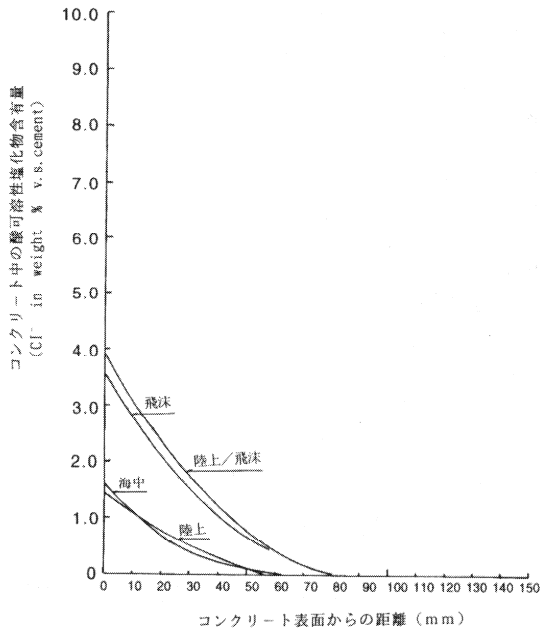


図-44 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線(暴露期間6ヶ月～1年)

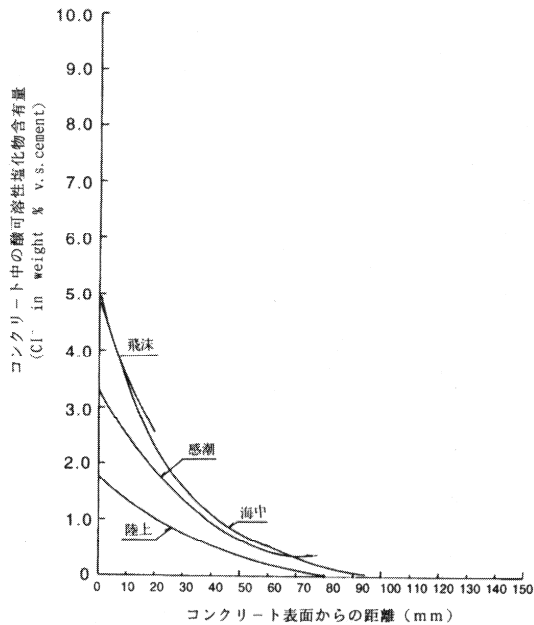


図-45 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線(暴露期間1年～2年)

飛沫部、陸上/飛沫部、陸上部の最大値曲線を比較した結果を示す。暴露期間の区分は、6ヶ月以下、6ヶ月～1年、1年～2年、2年～5年、5年～10年および20年以上である。これらの図を比較することにより、以下の傾向を読み取ることができる。コンクリート中の塩分含

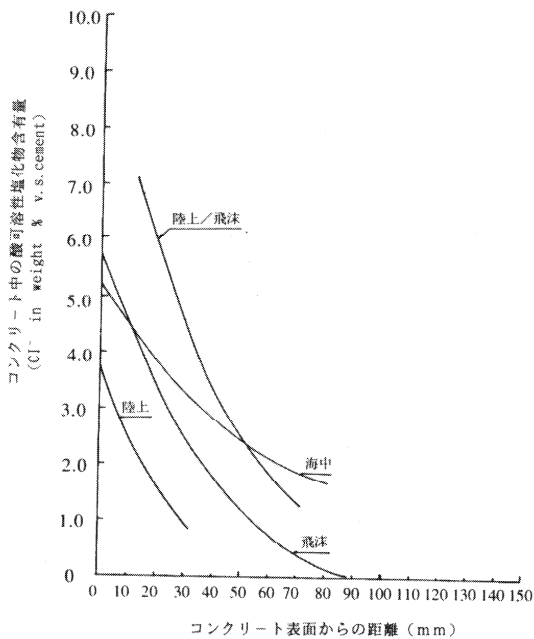


図-46 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線（暴露期間2年～5年）

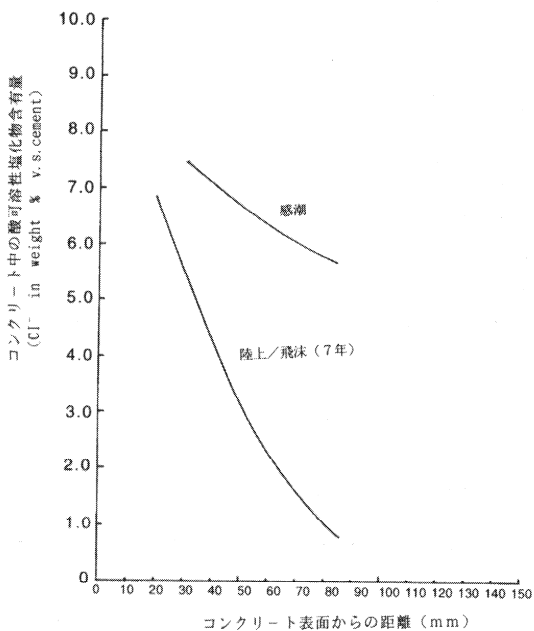


図-47 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線（暴露期間5年～10年）

有量は暴露5年目までは飛沫部および陸上/飛沫部において他の暴露環境にある場合よりも大きくなる。さらに暴露期間が経過すると、海中部および干満部に暴露された場合のコンクリート中の塩分含有量が飛沫部および陸

上/飛沫部に暴露された場合の塩分含有量に近づいてくる。図-48に示す暴露20年以上の場合で見ると、海中部と飛沫部でコンクリートの内部領域における塩分含有量はほぼ同等である。

以上の結果より次のことが考えられる。暴露環境を大きく、海中部と干満部、飛沫部と陸上/飛沫部、陸上部の3環境に分類できる。暴露期間が約10年程度までは、飛沫環境において塩化物イオンは最も多くコンクリート中に浸入する。しかし、暴露期間がさらに長くなってくると、海中および干満環境のコンクリート中の塩分含有量が飛沫環境の場合と同程度となってくる。陸上環境の場合は他の環境に比べてコンクリート中の塩分含有量はかなり少ない。

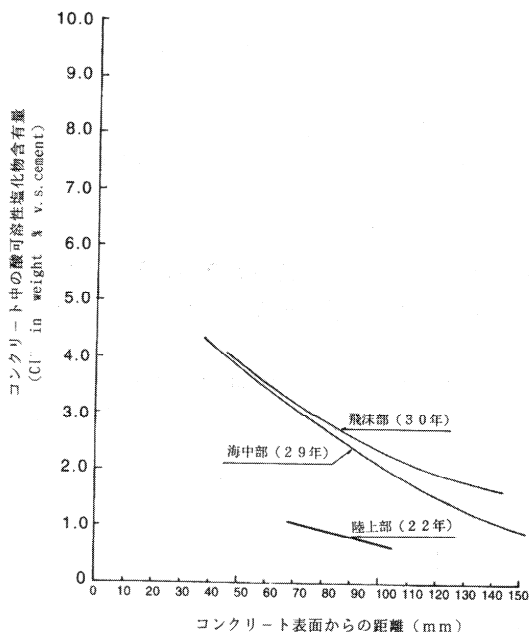


図-48 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線（暴露期間20年以上）

5. 2 最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化

図-49に海中部、干満部、飛沫部および陸上部に暴露されたコンクリートの外部表面領域の塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化を示す。暴露の初期（暴露1～2年程度）においては各暴露条件ごとに差があり、同一の暴露条件でも変動しているが、暴露3～5年が経過すると同一の暴露条件での変動はなくなりほぼ一定の値を取るようになる。また、暴露条件の差異もさほど小さくなく、いずれの拡散係数も 10×10^{-8} (cm²/sec) 以下の値となる。暴露条件の相違を見てみると、海中部の拡散係数が最も大きく、次いで干満部、飛沫部、

陸上部の順となっている。これより、コンクリートが海水に接する時間が長い環境条件ほど拡散係数が大きくなっているものである。先にも述べたが、拡散係数の大小とコンクリート中の塩分含有量の大小とは直接には関係していない。むしろ、拡散係数は塩化物イオンの浸入メカニズムと関係していると考えられる。すなわち、コンクリート表面が海水に接触している時間と浸入メカニズムが密接な関係にあるものと思われる。

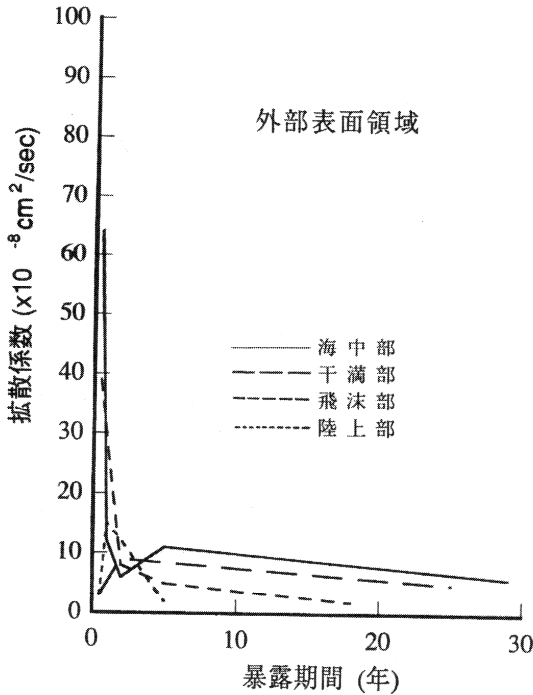


図-49 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化 (外部表面領域)

図-50に海中部、干満部、飛沫部および陸上部に暴露されたコンクリートの内部領域の塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化を示す。図-49において示した外部表面領域の場合とは対照的に、本図に示される内部領域の拡散係数は異なる環境条件ごとに異なる値および異なる経時変化の傾向を示している。この場合は、外部表面領域の場合のようにきれいに序列がつかないが、大まかに、海中、干満環境と飛沫、陸上環境に分類できる。拡散係数の値は海中、干満環境において大きく、飛沫、陸上環境において小さい。また、海中、干満環境の場合、暴露5年程度で最大値を取るといった経時変化の傾向を示しているが、飛沫、陸上環境においてはそのような傾向は見られない。しかし、暴露30年において海中部の拡散係数と飛沫部の拡散係数がほぼ

等しくなっていることより、暴露期間がさらに長くなればこれら4環境の拡散係数はほぼ等しくなっていくことが推察される。以上の結果より、外部表面領域の場合と同様に、内部領域においてもコンクリートが海水に接する時間がコンクリートの内部領域の塩化物イオンの浸入メカニズムに影響を及ぼしているものと考えられる。そして、それは暴露期間が約10年程度までが最大で、その後徐々に小さくなるものと考えられる。暴露30年を超える暴露期間になるとその影響はほぼなくなるものと思われる。

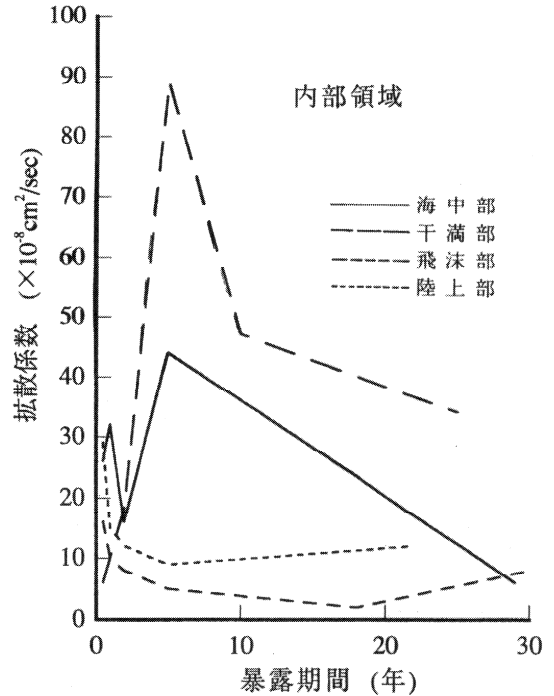
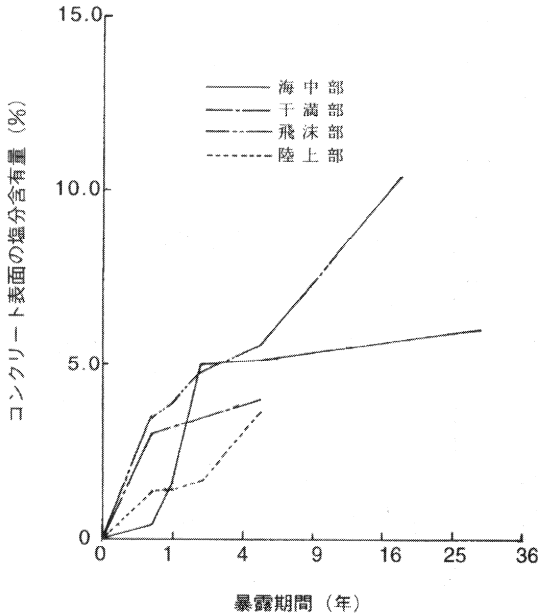


図-50 コンクリート中の塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化 (内部領域)

5.3 コンクリート表面の塩分含有量の経時変化

図-51に海中部、干満部、飛沫部、陸上部に暴露された場合のコンクリート表面の塩分含有量の経時変化を示す。本図に示すコンクリート表面の塩分含有量とは、先に示した塩分含有量の最大値曲線のコンクリート表面位置における値のことである。いずれの環境条件に暴露された場合も、ある暴露期間まではコンクリート表面の塩分含有量と暴露期間の平方根の間にはほぼ線形の関係が認められ、その傾きは海中部、感潮部、飛沫部において大差はなく、陸上部の場合はそれよりも小さくなる。海中部に暴露された場合は、暴露2年以降ほぼ一定値を取

るようになる。飛沫部の場合、この線形関係は暴露約20年まで継続している。これより、コンクリート表面の塩分含有量もコンクリート表面が海水に接触している時間の影響を受けるものと考えられる。干満部および陸上部の5年以降の傾向を明確にするためにはさらなるデータの収集、蓄積が必要である。



図—51 コンクリート表面の塩分含有量の最大値の経時変化

6. 得られた知見

コンクリート中の塩分含有量に関する文献を可能な限り多数収集整理し、その解析、考察を行った。以上の研究により得られた主要な知見を以下にまとめる。

- 1) コンクリート中の塩分含有量は、種々の環境条件、すなわち、海中部、干満部、飛沫部、陸上／飛沫部、陸上部ごとに異なる値、異なる傾向を示した。以上の5環境を大まかに分類すれば、海中・干満環境、飛沫・陸上／飛沫環境、陸上環境に分類できる。
- 2) 同一の環境条件下であってもコンクリート中の塩分含有量はかなりのバラツキを示す。すなわち、同一の環境条件内であってもさらに細かく見れば条件の相違がある。しかし、その環境条件内のばらつきは海中部においては他の環境よりも小さかった。
- 3) コンクリート中の塩分含有量の経時変化は、異なる環境条件ごとに異なる傾向を示す。しかし、いずれの環境条件の場合も共通している傾向は、暴露初期の段

階においてはコンクリート中の外部表面領域の塩分含有量が主に増加し暴露時間の経過とともにコンクリートの内部領域の塩分含有量が徐々に増加していくという点である。

- 4) 海中部および干満部に暴露されたコンクリートの場合、塩分含有量の最大値曲線に最適な拡散係数は、コンクリートの外部表面領域と内部領域とで異なる値を示す。すなわち、コンクリート表面からの距離が30～50mmの領域を境にして塩化物イオンの浸入メカニズムが変化するものと考えられる。
- 5) いずれの環境条件の場合でもコンクリートの外部表面領域の拡散係数は、暴露約5年時以降ほぼ一定の値を示すようになる。この時の拡散係数の値は、コンクリート表面が海水と接触する時間の影響を受ける。
- 6) コンクリートの内部領域の拡散係数は、異なる環境条件ごとに異なる値を示す。しかし、大まかに見て、海中・干満環境は拡散係数が大きく、飛沫・陸上／飛沫環境はそれに比べると拡散係数は小さい。
- 7) 異なる環境条件におけるコンクリート中の塩分含有量の相違は、主にコンクリート表面の塩分含有量とコンクリートの内部領域における拡散係数であると考えられる。
- 8) 本研究より得られたデータを基に、海洋環境にあるコンクリート中の塩分含有量のある程度推定することが可能である。

あとがき

コンクリート中の鉄筋の腐食に起因するRC建造物の劣化、いわゆる塩害の問題は今では新しい問題ではなくなってきた。しかしながら、鉄筋の腐食に大きな影響を及ぼすコンクリート中の塩分含有量についてはその絶対量、濃度分布の経時変化等について十分に把握されているとは言い難い。以上の状況に鑑み、本研究は海洋環境下に存在するコンクリート中の塩分含有量を定式化するための1ステップとして実施したものである。得られたデータは全体的にかなりのばらつきがあった。しかしながら、その最大レベルに着目して考察を行うことにより、いくつかの有意義な知見を得ることができた。本研究の成果は、これまでに建設された港湾、沿岸構造物、あるいは今後ますます増加することが予想される海洋構造物においてコンクリート中の塩分含有量を推定し、それに基づき維持、管理を行う際に大変有用な資料となるものと考えられる。

本文は、著者の一人が科学技術庁パートギャランティ

在外研究員としてシェフィールド大学に滞在した際に実施した研究の一部を取りまとめたものである。本研究の遂行に際しては、材料研究室の福手室長、構造部の阿部主任研究官および材料研究室の三浦研究員（現在：第四港湾建設局、鹿児島港工事事務所）に大変お世話になりました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

（原稿受理 1995年6月29日）

参考文献

- 1) 永野宏雄, 内藤隆史: 飛沫帯にあるコンクリート中への塩素浸透に関する拡散理論の応用, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, 1985
- 2) 米澤敏男, V. Ashworth, R.P.M. Procter: セメント水和物によるモルタル細孔溶液中のC 1-固定のメカニズム, コンクリート工学年次論文報告集, 10.2, 1988
- 3) 関根信哉, 増田 隆, 吉岡博幸: 硬化コンクリート中の全塩分と可溶性塩分の関係, 土木学会第44回年次学術講演会(平成元年10月)
- 4) 横田 優, 佐々木晴敏, 福手 勤: 電着工法による港湾コンクリート構造物の補修と防食について, コンクリート工学年次論文報告集, 14.1, 1992
- 5) 大即信明, 森 好生, 下沢 治: 海洋環境におけるコンクリートの塩素含有量, セメント・コンクリート, No.421, 1982
- 6) 大即信明, 森 好生, 関 博: 海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第322号, 1983
- 7) 大城 武, 伊芸誠一, 上津 敏: 鉄筋コンクリート橋の塩害について, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, 1984
- 8) 大城 武, 谷川 伸, 永井健太郎: 鉄筋コンクリート構造物の暴露試験について, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集
- 9) 大城 武, 堀園義昭, 谷川 伸, 永井健太郎: コンクリート中への塩素イオンの浸透に関する実験的及び解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, 1987
- 10) 大城 武, 谷川 伸, 永井健太郎: 鉄筋コンクリート構造物の暴露実験, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, 1988
- 11) 大城 武, 谷川 伸: 塩害による鋼材腐食に関する暴露実験, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, 1989
- 12) 大城 武, 谷川 伸: 塗膜によるRC構造物の保護について, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, 1990
- 13) 大城 武, 谷川 伸: 塩害環境下におけるRC構造物の暴露実験について(暴露7年目の試験結果), コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992
- 14) 星野富夫, 小林一輔: 各種防食方法を適用した鉄筋コンクリートの5年間の海洋暴露実験, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, 1989
- 15) 星野富夫, 小林一輔: コンクリート用浸透材の塩化物遮蔽効果, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, 1990
- 16) 天沼邦一, 榊田佳寛, 根本 徹, 瀬上光男: 表面被覆材および浸透性吸水防止材による鉄筋コンクリート造の塩害防止抑制効果に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, 1990
- 17) 榊田佳寛, 天沼邦一, 吉崎芳郎, 御所窪邦男: コンクリートの乾湿にともなう塩化物の移動について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992
- 18) 武若耕司: しらすの利用によるコンクリートの耐久性改善に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, 1989
- 19) 小間井孝吉, 鳥居和之, 川村満紀: 海洋環境に暴露したコンクリート梁中の塩分濃度の測定と鉄筋の腐食, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, 1991
- 20) 金子誠二, 水野宏雄, 桜井 宏, 安 伸二: 海洋環境下のコンクリートの塩素含有量とセメント水和鉱物, 第6回コンクリート工学年次講演会論文報告集, 1984
- 21) 川上英男: 鉄筋コンクリートの環境塩害荷重の推定, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, 1984
- 22) 渡辺 明, 高山俊一, 助清満昭: 海岸および内陸放置による海砂使用コンクリート中の鋼材腐食に関する研究, 第4回コンクリート工学年次講演会論文集, 1982
- 23) 和美広喜, 木村敬三, 吉信正弘, 小泉博義: コンクリート構造物の塩害の実態調査, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, 1985
- 24) 迫田恵三, 十河茂幸, 竹田宣典: 海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986
- 25) 長内 進, 宮本幸始: 塩分浸透を受けたコンクリート構造物の実態調査, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986
- 26) 尾崎 一, 松谷正憲: 60年間海洋環境下にあったコンクリートについて, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986
- 27) 森本登志也, 小堀光憲, 高木兼士: 塩分を含んだコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, 1987
- 28) 國府勝郎, 片脇清士, 町田 武: 防食性能に対する

- コンクリート品質の影響, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, 1987
- 29) 石橋輝樹, 田藤 毅, 竹田宣典, 青木 茂: 長年月海洋環境下において供用された水路の耐久性調査, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, 1987
- 30) 迫田恵三, 竹田宣典, 十河茂幸: 海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食の進行状況, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, 1988
- 31) 角 徹三, 熊谷伸一: R Cプリズム中における塩分の蓄積と鉄筋の腐食の経時変化, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, 1988
- 32) 杉田英明, 御手洗泰文, 永松武教, 藤本 浩: 海洋環境下に2年間暴露したコンクリートの性状について, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, 1990
- 33) 太田利隆, 佐々木慎一, 堺 孝司, 高柴保明: 海岸に暴露したコンクリートへの塩分浸透について, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, 1991
- 34) 竹田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸: 海洋暴露試験に基づく各種コンクリートの塩分浸透量の推定, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, 1991
- 35) 堤 知明, 本橋賢一, ミスラ スディール, 山本明雄: 若材令で海水に接するコンクリート中の鉄筋腐食に関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, 1991
- 36) 今井富士夫, 中沢隆雄, 枝元宏彰, 赤木正見: 既存鉄筋コンクリート橋の劣化・損傷について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No1, 1992
- 37) P.S.Mangat and Kribanandan Gurusamy : CHLORIDE DIFFUSION IN STEEL FIBRE REINFORCED MARINE CONCRETE, CEMENT and CONCRETE RESERCH Vol.17, 1987
- 38) P.S.Mangat and Kribanandan Gurusamy : CHLORIDE DIFFUSION IN STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE CONTAINING PEA, CEMENT and CONCRETE RESERCH Vol.17, 1987
- 39) R K Dhir, M R Jones and H E H Ahmed : DETERMINATION OF TOTAL AND SOLUBLE CHLORIDES IN CONCRETE, CEMENT and CONCRETE RESERCH Vol.20, 1990
- 40) Roger D.Browne : Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures, American Concrete Institute, SP 65-11
- 41) Y.Takagishi, H.Ichikawa, H.Tabuchi, and A.Moriwake : An Experimental Study on Deterioration and Repairing of a Marine Concrete Structure, American Concrete Institute, SP 109-12
- 42) Frorinda B.Coggins and Catherine W.French : Chloride Ion Distribution in Twenty-Year-Old Prestressed Bridge Girders, ACI MATERIALS JOURNAL, September-October, 1990
- 43) P.C.LIU : Damage to Concrete Structures in A Marine Environment, Materials and Structures, 1991, 24
- 44) Wei-Ming Lin and Tzu-Wang Jou : Corrosion of Reionforced Concrete Structures in Taiwan, Materials Performance, March 1991
- 45) Oladis T.de Rincon, Migual A.Sanchez G., Orlando Perez, Daniel Conteras and Octabio Garcia : A Study of Practical Cases of Steel Corrosion in Reinforced Concrete - Causes and Solutions -, Materials Performance, August 1991
- 46) K.C.Liam, S.K.Roy and D.O.Northwood : Chloride Ingress Measurements and Corrosion Potential Mapping Study of A 24-year-old Reinforced Concrete Jetty Structute in A Tropiccil Marine Environment, Magazine of Concrete Research, 1992, 44, No160
- 47) 浜田純夫, 日野伸一, 兼行啓治, 長谷川博: 海岸付近の飛塩調査とコンクリートに浸透する塩分, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986
- 48) 高橋正行, 外門正直, 志賀野吉雄: 乾・湿繰返し作用がコンクリートの耐久性におよぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, 1989
- 49) 丸屋 剛, 宇治公隆: コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, 1989
- 50) 角 徹三, 安達 極: 気象因子とコンクリート中に蓄積された塩分量との関連について, コンクリート工学年次報告集, 11-1, 1989
- 51) 大即信明, 長滝重義, 福手 勤, 中下兼次: 港湾での鉄筋コンクリートの塩害に及ぼす海洋環境の影響に関する基礎的検討, 土木学会論文集, No472/V-20, 1993.8

港湾技術資料 No. 810

1995. 9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 あんざい

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1995) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所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。