

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

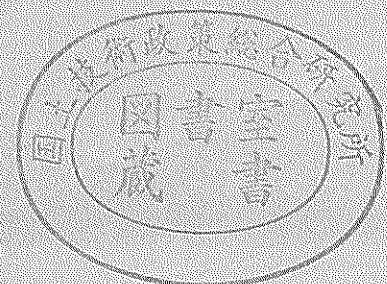
REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL.38      NO.2      June 1999

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第38巻 第2号 (Vol.38, No.2), 1999年6月 (June 1999)

## 目次 (CONTENTS)

1. 潮位変動および密度の非一様性を考慮した砂浜海岸地下水の非定常過程に関する数値解析  
.....内山雄介..... 3  
(Numerical Analysis on Groundwater Flow in Sandy Beaches Considering Tidal Fluctuation and Density Distribution  
.....Yusuke UCHIYAMA)
2. 久里浜湾の流れ特性と生態系に関する研究  
.....日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一..... 29  
(Current Field Characteristics and Ecosystem Investigations in Kurihama Bay  
...Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Dan-o NISHIMORI, Yasushi HOSOKAWA and Hiroichi TSURUYA)
3. 海水交換型防波堤の透過量評価手法の提案  
.....西守男雄・日比野忠史・豊田政史・細川恭史・石原弘一・森下正志・鶴谷広一..... 63  
(Estimation of Water Mass Exchanged through Water Exchangeable Breakwater  
.....Dan-o NISHIMORI, Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Yasushi HOSOKAWA,  
Hirokazu ISHIHARA, Masashi MORISHITA and Hiroichi TSURUYA)
4. 粘性土のセメンテーションによる強度発現メカニズム  
.....土田 孝・湯 怡新..... 99  
(Strength Mobilization due to Cementation of Clay  
..... Takashi TSUCHIDA and Yi Xin Tang)
5. 港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例  
.....土田 孝..... 131  
(Development and Use of Foamed Treated Soil in Port and Airport Project  
..... Takashi TSUCHIDA)
6. 海洋環境 (酒田港20年) に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響  
.....横田 弘・秋山哲治・濱田秀則・三上 晃・福手 勤..... 169  
(Effect of Degradation of Concrete on Mechanical Properties of Reinforced Concrete Beams  
Exposed to Marine Environment (for 20 years in Sakata)  
.....Hiroshi YOKOTA, Tetsuji AKIYAMA, Hidenori HAMADA, Akira MIKAMI and Tsutomu FUKUTE)
7. 鋼直杭式棧橋の地震時保有耐力に関する実験および解析  
.....横田 弘・川崎 進・菅原 亮・Hazem El-Bakry・川端規之..... 223  
(Ultimate Structural Performance of Steel-Pile Supported Wharves  
... Hiroshi YOKOTA, Susumu KAWASAKI, Ryo SUGAWARA, Hazem El-Bakry and Noriyuki KAWABATA)
8. 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第二報) - アンカーワイヤ方式の水力模型実験による検討 -  
.....米山治男・白石 悟・名里健吾・高橋英俊..... 257  
(Development of Automatic Installation System of Breakwater Caisson (2nd Report)  
- Evaluation of Anchor Wire System by Hydraulic Model Experiments -  
..... Haruo YONEYAMA, Satoru SHIRAIISHI, Kengo NAZATO and Hidetoshi TAKAHASHI)
9. 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  
.....濱田秀則..... 299  
(Quantitative Evaluation of Environmental Factors Related to Chloride Attack of RC Harbor Structures  
.....Hidenori HAMADA)

10. 破壊確率を考慮した防波堤のライフサイクルコストと許容破壊確率  
.....長尾 毅・松渕 知..... 395  
(Studies on Life-Cycle Cost and Allowable Failure Probability of Breakwaters  
..... Takashi NAGAO and Satoru MATSUBUCHI)
11. 係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意志決定支援システムの構築に関する基礎的研究  
.....松渕 知・横田 弘..... 423  
(Life-Cycle Cost Analysis of Berthing Facilities and Development of A Decision Support System  
during their Maintenance Work  
..... Satoru MATSUBUCHI and Hiroshi YOKOTA)
12. 大規模地震時におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がりに関する模型実験  
.....江頭隆喜・山本俊介・田邊俊郎・中島 晋・菅野高弘・宮田正史・柏崎昭宏・金山維史..... 475  
(Experiment on Uplifting of Legs of Container Cranes under Strong Earthquakes  
..... Takaki ETOU, Shunsuke YAMAMOTO, Toshiro TANABE, Susumu NAKASHIMA・  
Takahiro SUGANO, Masafumi MIYATA, Akihiro KASHIWAZAKI and Tadafumi KANAYAMA)

## R C 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

濱 田 秀 則\*

### 要 旨

我が国において、鉄筋コンクリート港湾構造物、特に栈橋上部工の塩害による劣化が顕在化している。このため、塩害を受けている既存構造物の補修設計法、および塩害を受けることが想定される環境に今後建設される新設構造物の耐久設計法の確立が望まれている。これらの設計法を確立するためには、構造物が置かれている環境条件を定量的に評価することが必要不可欠であるものの、このテーマに関する研究はこれまでにあまりなされていない。このような状況に鑑み、本研究においては、R C 港湾構造物の塩害に係わる環境要因を定量的に評価することを目的としている。本研究は、鉄筋を埋設した比較的小型のモルタル供試体の全国規模の暴露試験およびその解析に基づく環境要因の定量的評価、ならびにその結果の耐久設計への応用法について検討したものである。

本文に述べられている本研究の主要な内容は以下のとおりである。

- (1) R C 構造物の塩害環境に関する既往の研究を整理し、明らかにされている知見および未だ明らかにされていない事項を整理した。
- (2) 反応エネルギー論および電気化学的理論に基づいた、コンクリート中鉄筋の腐食速度・腐食量の理論式に基づく環境条件の評価方法を考察した。
- (3) コンクリート中鉄筋の電気化学的計測（分極抵抗試験、定電位ステップ試験）に関する基礎実験を行い、電気化学的計測のデータ構造について考察した。
- (4) モルタル中鉄筋の腐食量を推定するための腐食量指標を提案し、この腐食量指標と発錆面積率の間にはよい相関性が認められることを明らかにした。
- (5) 暴露を実施した港湾の環境要因がモルタル中への塩化物イオンの浸透速度、モルタル中鉄筋の不動態の状態、ならびにモルタル中鉄筋への酸素供給量に及ぼす影響度について検討した。
- (6) コンクリート構造物の耐久設計の基本的考え方を考察し、本研究成果の耐久設計への応用方法について考察した。

キーワード：R C 港湾構造物、塩害、環境条件、耐久設計、補修設計

\* 構造部 材料研究室 室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 電話：0468-44-5033 FAX:0468-44-0255 E-mail:hamada@cc.phri.go.jp

## Quantitative Evaluation of Environmental Factors Related to Chloride Attack of RC Harbor Structures

Hidenori HAMADA

### Synopsis

In Japan, many RC structures are damaged by chloride attack under marine environments. Based on this serious condition, studies on "Repair Design System" and "Durability Oriented Design System" are in progress. The indispensable information in these design systems is a quantitative evaluation of environmental conditions related to chloride attack. However, enough research data on this topic are not obtained.

The objective of this study is to evaluate the environmental factors related to chloride attack of RC harbor structures. In this study, 2 years' exposure test of small size mortar specimens in 19 ports located from Hokkaido to Okinawa was carried out. From test results and their analysis, quantitative evaluation of environmental factors and their application to "Durability Oriented Design" are discussed.

Main contents of this study described in this paper are summarized as follows.

- (1) Existing research data of environmental factors related to chloride attack of RC structures are collected and analyzed.
- (2) Research method based on electrochemical theory and reactive energetic theory on corrosion rate is discussed.
- (3) Fundamental experiments on electrochemical measurements of steel bars embedded in mortar are carried out.
- (4) "An index of corrosion amount of steel bar" is proposed, and relatively clear relationship between this index and actual corroded area is found.
- (5) Relationship between environmental factors of exposure ports and the index of corrosion amounts are analyzed.
- (6) An application of environmental evaluation results into the durability oriented design system is discussed.

**Key Words** : RC Harbor Structure, Chloride Attack, Environmental Condition,  
Durability Oriented Design, Repair Design

---

\* Chief of Materials Laboratory, Structural Engineering Division

〒239-0826 3-1-1, Nagase, Yokosuka, tel:0468-44-5033, FAX:0468-44-0255 E-mail: hamada@cc.phri.go.jp

## 目次

要 旨 .....	299
1. 序論 .....	303
1.1 研究の背景 .....	303
1.2 研究の概要 .....	303
参考文献 .....	305
2. RC構造物の塩害に係わる環境要因に関する既往の研究 .....	306
2.1 序節 .....	306
2.2 海岸部に位置する構造物への飛来塩分量に関して .....	306
2.3 モルタル中への塩化物イオンの浸透に関して .....	307
2.4 コンクリート中への塩化物イオンの浸透に関して .....	307
2.5 潜伏期間の推定に関して .....	316
2.6 港湾環境における環境要因に関して .....	317
2.7 まとめ .....	317
参考文献 .....	318
3. 環境要因の定量的評価手法および試験方法に関する検討 .....	321
3.1 序節 .....	321
3.2 コンクリート中鉄筋の腐食量・腐食速度理論 .....	321
3.3 本研究における環境要因の定量的評価手法 .....	324
3.4 暴露対象港の概要および供試体の暴露方法 .....	326
3.5 モルタル供試体の概要および試験方法 .....	329
3.6 電気化学的計測に関する基礎実験の概要と結果 .....	334
3.7 まとめ .....	338
参考文献 .....	338
4. モルタル中鉄筋の腐食量指標に関する検討 .....	340
4.1 序節 .....	340
4.2 RC部材の塩害進行過程と取得データの基本的関係 .....	340
4.3 試験結果および考察 .....	341
4.4 モルタル中鉄筋の腐食量指標の算出 .....	346
4.5 まとめ .....	350
参考文献 .....	350
5. 腐食量指標に及ぼす環境要因の影響度に関する検討 .....	351
5.1 序節 .....	351
5.2 暴露を実施した港の海水成分分析 .....	351
5.3 暴露を実施した港の気象条件および波浪条件について .....	351
5.4 本研究で実施した多変量解析の手順 .....	353
5.5 多変量解析の対象とした項目の標準化データの算出 .....	354
5.6 環境要因の項目に関する主成分分析 .....	354
5.7 環境要因と腐食量指標に関する重回帰分析 .....	356

5.8 まとめ	359
参考文献	360
6. 環境要因の定量的評価の試みおよび耐久設計への応用に関する検討	361
6.1 序節	361
6.2 環境要因の定量的評価試案	361
6.3 耐久設計への応用	370
6.4 まとめ	373
参考文献	373
7. 結論	375
7.1 本研究のまとめ	375
7.2 本研究の問題点と今後の課題	377
謝 辞	377
付 表	378

# 1. 序論

## 1.1 研究の背景

四方を海洋に囲まれた我が国は、海を隔てた諸外国と活発に交易を行うことにより国家の発展、国民生活の向上を進めてきた。有史以来、主要都市の近傍に港湾を配置し、港湾を通じて生活資材あるいは産業関連物資の搬入および搬出を行ってきた。

港湾を形成する施設、いわゆる港湾施設は種々多様である。防波堤およびけい船岸はその最も代表的なものである。港湾施設の建設のための材料として、古くは自然材料である石材<sup>(註1)</sup>あるいは木材が用いられていた。しかし、徐々にセメント・コンクリートが多用されるようになった。特に、鉄筋コンクリート（RC）形式が発明されて以来、港湾構造物においても鉄筋コンクリート形式の構造物の建設が飛躍的に増加した。昭和30年代後半から40年代までの、いわゆる「高度経済成長期」と呼ばれる10数年間に港湾施設は極めて急ピッチで整備され、その大部分は現在でも供用が継続されている。しかし、昭和50年代以降、全国の多数のRC製港湾構造物において劣化の進行が確認されるようになった。この事態を重視した運輸省港湾局は昭和59年に全国規模の劣化実態調査を実施しその結果を取りまとめている<sup>1) 2) 3)</sup>。それによると、港湾コンクリート構造物のうちで劣化が著しいのは栈橋形式の構造物であり、コンクリートのひびわれ、コンクリート表面への錆汁の溶出、かぶりコンクリートの剥離・剥落といった塩害の典型的な劣化状況が確認されている。

コンクリート中の鉄筋の腐食が原因となる劣化、いわゆる塩害は比較的早くから認識されており、多くの研究が継続されてきている。陸上構造物の場合の塩害は、未洗浄の海砂の使用が原因となるような、コンクリートの練り混ぜ時から塩化物が存在することにより引き起こされる場合も多い。しかし、港湾構造物の場合の特徴は、構造物自体が海水の影響を直接受ける極めて厳しい海洋環境下に存在することであり、そのために外部環境から硬化後のコンクリート中へ浸入する塩化物の量が極めて多くなる<sup>4)</sup>。したがって、塩害に対する対策も陸上構造物とは異なる独自の考え方が求められる<sup>1) 4)</sup>。

先にも述べたとおり、我が国の存立基盤は諸外国との物資の交流であり、その搬入・搬出を円滑に遂行しているのが全国各地の港湾施設である。数年後に迎える21世紀にかけて、今後も長期的に我が国の繁栄を支えるためには、港湾施設を構成する港湾構造物を良好な状態で、

しかも経済合理的に使用していくことが極めて重要である。本研究は、港湾コンクリート構造物の塩害に関する一連の研究の一部をなすものであり、その位置づけは次節（1.2研究の概要）において述べる。

注1：石材は現在でも捨て石マウンド用材料などとして使用されている。ただし、構造物材としての使用は現在ではほとんどない。

## 1.2 研究の概要

### 1.2.1 研究の位置づけおよび目的

前節において述べたとおり、港湾コンクリート構造物のうち、特に栈橋形式の構造物において塩害による劣化が顕在化している。港湾技術研究所においても、外部環境からの浸入塩化物に対する対策方法を確立すべく精力的に研究を進めている。図-1.1に港湾技術研究所における塩害に関する研究の流れを示す。研究の発端は栈橋形式の構造物における劣化の顕在化であった。研究の第一段階として実態調査が行われ、劣化の現状および劣化に影響を及ぼす種々の要因の検討が行われた。研究の第二段階として劣化メカニズムに関する研究が行われ、劣化

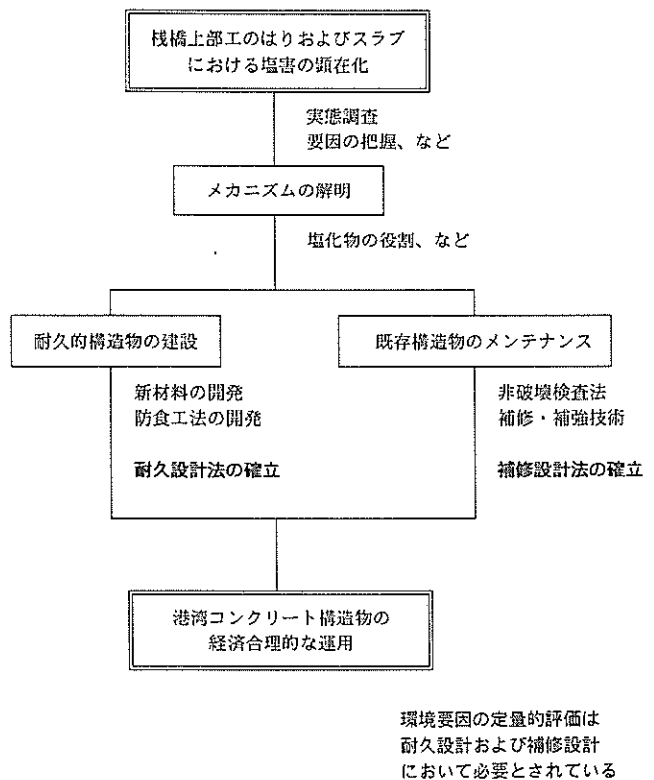


図-1.1 港湾技術研究所における塩害に関する研究の流れおよび本研究の位置づけ



に及ぼす塩化物の役割などが明らかにされた。さらに研究の第三段階として、高耐久性を有する構造物を建設するための新しい材料の開発あるいは防食技術（工法）の開発等のハード技術の開発に取り組んでいる。一方、既存の構造物に対して合理的なメンテナンスを実施していくために、非破壊検査技術の開発あるいは補修・補強材料の開発にも取り組んでいる。また、ハード技術の開発に加えて、ソフト技術である耐久設計<sup>(註2)</sup>あるいは補修設計についても検討を続けている。この両設計において共通して必要とされる情報が構造物の置かれている環境条件の定量的な評価である。

塩害を端的に表現すれば、「コンクリート中の鋼材の腐食に起因するコンクリート部材あるいはコンクリート構造物の劣化である」と定義される。一方、鉄を含めた鋼材の腐食を次のように定義する場合もある。すなわち“Corrosion is the degradation of a metal by an electrochemical reaction with its environment”である<sup>5)</sup>。この定義によると、鋼材の腐食は環境と一体となって進行するとされている。すなわち、異なる環境条件下においては腐食の規模、速度なども当然異なってくる。コンクリート構造物が塩害を受ける場合も、環境条件が異なれば劣化の進行速度、規模などが異なってくる。合理的な耐久設計および補修設計を確立するためには構造物の置かれる環境条件を定量的に評価し、それに応じた設計をすることが重要である。しかしながら、環境条件の定量的評価に関する研究は少なく、この種の問題に関する情報は決して十分とは言えない。

以上の状況に鑑み、本研究においては港湾コンクリート構造物の塩害に係わる環境要因の定量的評価を試みる。比較的寸法の小さな円柱形のモルタル供試体を環境条件の異なる全国の19の港湾内に2年間暴露し、その後供試体の各種性状を試験した。その結果の解析に基づき環境要因の定量的評価を試みる。また、その結果を現在提唱されている耐久設計に応用する一つの考え方を提案するものである。

注2：耐久性設計と耐久設計の用語の区別にはなっておらず、今後の学協会等での議論を待つ必要がある。現在のところ、土木学会が耐久設計を使用していることを考慮し、本文においては耐久設計という用語を統一して使用することとした。

### 1.2.2 本文の構成

本文の構成を図-1.2に示す。本文は1章から7章までの七つの章より構成されており、各章の概要は以下に示

すとおりである。

1章において、本研究の背景および目的、ならびに本文の構成を示す。

2章において、鉄筋コンクリート（RC）構造物の塩害に係わる環境要因に関する既往の研究の整理結果を示す。それをもとに、これまでに明らかにされている知見および明らかにされていない事項を示し本研究の意義を明確にする。

3章において、本研究における環境要因の定量的評価の手法を示す。評価の基本的考え方、評価の手順、供試体の暴露方法、暴露後の供試体に関する試験の項目およびその方法について述べる。また、電気化学的計測データの解釈を明確化することを目的に実施した基礎実験の概要と結果を取りまとめる。

4章において、暴露後の供試体に関する各種の計測結果を取りまとめる。その結果に基づき、モルタル中鉄筋の腐食量を推定する腐食量指標を提案する。

5章において、暴露対象港の海水成分、気象条件および波浪条件と4章において提案した腐食量指標の関係について検討し、同指標に及ぼす環境要因の影響度を考察する。

6章において、5章の結果に基づく環境要因の定量的評価試案を提案する。また、その評価試案を現在提唱されている耐久設計法案に応用する一つの考え方を示す。

7章において、本研究で得られた結論を総括するとともに、本研究の問題点および今後の課題に言及する。

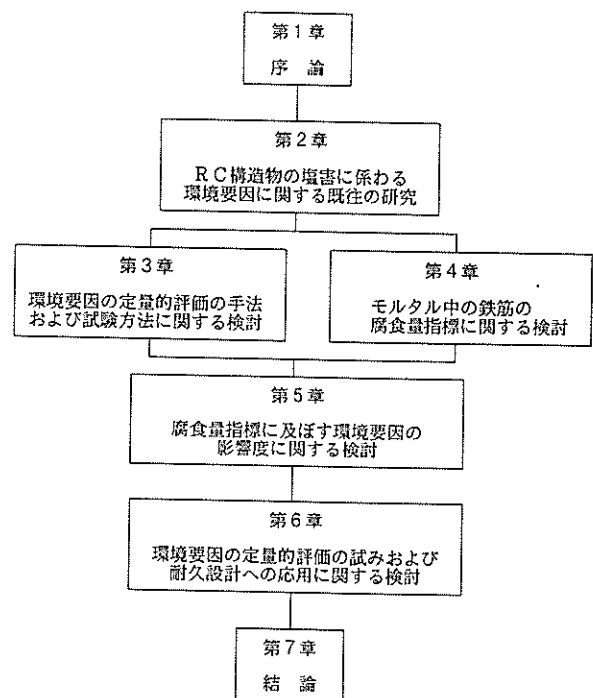


図-1.2 本論文の構成

参考文献

- 1) 大即信明：港湾構造物における被害の実態，コンクリート工学，Vol. 25, No. 11, pp. 63～67, 1987
- 2) 大即信明・原茂雅光・浜田秀則：棧橋コンクリート上部工劣化実態概略調査報告，港湾技研資料，No. 617, June 1988
- 3) 大即信明・原茂雅光・浜田秀則：棧橋コンクリート上部工劣化実態詳細調査報告，港湾技研資料，No. 627, Sept. 1988
- 4) 大即信明：コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究，港湾技術研究所報告，第24巻，第3号，pp. 183～283, 1985. 9
- 5) Kenneth R Tretheway and John Chamberlain：Corrosion, Longman Scientific & Technical, Essex CM20 2JE, England, 1988

## 2. R C 構造物の塩害に係わる環境要因に関する既往の研究

### 2.1 序節

R C 構造物の塩害に係わる環境要因について検討するためには、環境要因の項目を予めある程度選定しておくことが必要である。本章においては、既往の研究を収集・整理することにより、R C 構造物の塩害に影響を及ぼすと考えられる各種の環境要因について、これまでに明らかにされている知見および明らかにされていない事項を明確にする。既往の研究の整理項目として、1) 海岸部に位置する構造物への飛来塩分量、2) モルタル中への塩化物イオンの浸透、3) コンクリート中への塩化物イオンの浸透、4) 潜伏期間の推定、5) 港湾環境における環境要因の選定、の5項目を取り上げた。

本章の2.2~2.6において上に挙げた5つの検討項目の整理結果をまとめ、最終項である2.7においてこれまでの研究より明らかにされている知見および明らかになっていない事項を総括するとともに、本研究の意義を示す。

### 2.2 海岸部に位置する構造物への飛来塩分量に関して

#### (1) 浜田、日野、兼行、長谷川の研究<sup>1)</sup>

浜田らは山口県の小串海岸および青海島において、海からの風によって運ばれる海塩粒子の量をガーゼ法により実測している。その結果、海岸線から約20mの距離において、ガーゼに付着する塩分量（すなわち飛来塩分量）と風速の間には次式に示すような関係があるという知見を得ている。

$$C = 0.20 \cdot W$$

ここに、C：付着塩分量 (g/m<sup>2</sup>/hr)

W：風速 (m/sec)

#### (2) 横田、浮田、重松、藤枝の研究<sup>2)</sup>

横田らは四国内の異なる5つの地点の海岸部に位置するコンクリート構造物を対象にして、表面付着塩分量とコンクリート中の塩化物含有量の実測を行っている。その結果、表面付着塩分量は、海岸からの距離が大きくなるほど、また海面からの高さが高くなるほど低下していくことを明らかにしている。また、横田らはコンクリート中の塩化物含有量の分布に拡散理論を適用し見かけの拡散係数を求めている。そして、その見かけの拡散係数を用いることにより異なる地域の塩分汚染環境を評価するという考え方を提案している。

#### (3) 角、安達の研究<sup>3)</sup>

角と安達は愛知県渥美半島（三河湾側）において、海からの風によって運ばれる飛来塩分量をガーゼ法で実測している。その結果、海側から35mの距離にある採取地点における採取塩分量（飛来塩分量）は降雨時および無降雨時に分けた場合の積算風速に規定されるという知見を得、採取塩分量と積算風速の関係式として次式を示している。

$$\log Y = C_R \cdot W_R + C_N \cdot W_N$$

ここに、Y：期間採取塩分量

$W_R$ ：降雨時の期間積算風速

$W_N$ ：無降雨時の期間積算風速

$C_R, C_N$ ：定数

飛来塩分量は海風の風速に影響されるという知見は前出の浜田らの研究[1]において得られている知見と同様である。

#### (4) 加藤、宝島、佐伯の研究<sup>4)</sup>

加藤らは新潟県沿岸の15地点で飛来塩分量を採取し、その採取量と気象条件等の関係を分析している。また、同じ場所にモルタル製の円柱供試体を暴露し、表面付着塩分量と飛来塩分量の関係を分析している。その結果、飛来塩分量は海からの強風（風速が10m/s以上）の出現頻度と極めてよく対応していること、また、風速(C)をパラメータとして飛来塩分量が推定できることを示し、飛来塩分量は、 $C^2 / \exp(1/C)$ の関数で表わされるという知見を得ている。それに加えて、モルタルの表面付着塩分量は飛来塩分量より推定できることも報告している。海風の風速が飛来塩分量を規定するパラメータであるという知見は前出の浜田らの研究[1]および角らの研究[3]の結果と同様である。

#### (5) 大城・山田・谷川の研究<sup>5)</sup>

大城らは沖縄県の海岸部に実物大のR C造の試験施設を設置し、飛来塩分量の測定および解析、ならびにコンクリート中への塩化物イオンの浸入の経時的調査および解析を行っている。その結果、海岸部における飛来塩分量は、海風の風速積算とよく対応していること、また、経年的にコンクリート中へ浸入・蓄積される塩化物イオンの量は飛来塩分量が多いほど多くなっていることを示している。これらの結果は、前出の浜田らの研究<sup>1)</sup>、角らの研究<sup>3)</sup>、加藤らの研究<sup>4)</sup>により示されている結果と同様である。

#### (6) 山田、大城、栢田、伊部の研究<sup>6)</sup>

山田らは、沖縄県（沖縄本島）の4地点の海岸において飛来塩分量を計測し、海風風速との関係を解析している。なお、山田らの飛来塩分量の計測地点は満潮時の海岸線から約20m内陸側、また海面位置より約4.5mの高さ

の場所である。その結果、山田らは飛来塩分量は海風平均風速の二乗に比例するという知見を得ている。飛来塩分量が海風の風速により決定されるという結果は、浜田らの研究<sup>1)</sup>、角らの研究<sup>2)</sup>、加藤らの研究<sup>3)</sup>、および大城らの研究<sup>4)</sup>において示されている結果と同様である。

(7) 星野、魚本、守屋の研究<sup>5)</sup>

星野らは、静岡県伊東市の伊豆海洋公園内における暴露実験場において3年間にわたり継続的に飛来塩分量を計測している。なお、星野らの計測位置は海岸線より約10m内陸側の場所である。その結果、暴露実験場の飛来塩分量は年平均で約400C1mg/dm<sup>2</sup>であること、また、以下の式で定義される搬塩指数と飛来塩分量の間には相関関係が認められるという知見を得ている。

$$\text{搬塩指数} \quad C \cdot C \cdot I = P \cdot V \cdot t$$

ここで、 $P$ は風向頻度、 $V$ は平均風速、 $t$ は海上大気中に含まれる塩分量である。このように、飛来塩分量が海からの風速により決定されるという知見は、前出の浜田らの研究<sup>1)</sup>、角らの研究<sup>2)</sup>、加藤らの研究<sup>3)</sup>、大城らの研究<sup>4)</sup>、および山田らの研究<sup>6)</sup>において示されている結果と同様である。また、星野らは、同実験場に暴露されたコンクリート供試体への塩化物イオンの浸透性状も継続的に試験している。その結果、暴露初期のコンクリートへの塩分浸透量は搬塩指数と関係しているものの、材齢の経過とともにその関係は弱くなっていくという知見を得ている。

2.3 モルタル中への塩化物イオンの浸透に関して

(1) Moukwaの研究<sup>8)</sup>

Moukwaはモルタル供試体を用いた室内実験により、海水の温度がモルタル中への塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を調べている。Moukwaの実験では、供試体として水セメント比が50%のモルタルを使用し、浸せき溶液として人工海水を使用している。20℃および-1℃にコントロールされた人工海水中での供試体の浸せき、および-7℃と12℃を繰り返す凍結融解(2サイクル/日)作用を、いずれの場合も100日間継続し、その後モルタル中の塩化物含有量を測定している。その結果、-1℃の海

水に浸せきした場合と凍結融解サイクルを実施した場合がほぼ同程度の塩化物含有量を示し、また、20℃の海水に浸せきした場合と比較すると、モルタル表面からの深さが0~4mmで約6~7倍、深さが8~12mmで約2~3倍の含有量であるという知見を得ている。この理由として、低温環境の方が水酸化カルシウムの溶出が多くなる可能性が高くなるためという考察を行っているが、それを裏付けるデータは示されていない。

2.4 コンクリート中への塩化物イオンの浸透に関して<sup>9)10)</sup>

(1) 序項

海洋環境下に位置するコンクリート中の塩化物含有量に関してはこれまでに多くの調査・研究がなされており、世界中の主要な文献中にかなり多くの情報が存在している。しかし、これらの文献はそれ自体が分散しており、これらの情報を総合的に取りまとめた例は少ない。本節で示す検討においては、これまでに多くの研究論文において発表されている海洋環境下におけるコンクリート中の塩化物含有量のデータを総合的に取りまとめ、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関する新た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化物含有量のデータの収集に際しては可能な限り幅広くかつ多くの文献を収集することとし、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収集した。なお、発表年代としては、1980年以降に発表されたデータを収集した<sup>11)12)~53)</sup>。表-2.1~2.3に収集したデータの構成を示す。これらの表に示すとおり、合計1191個のデータを収集した。表-2.1は暴露期間ごとのデータの構成を、また、表-2.2は暴露環境ごとのデータの構成を示している。表-2.2よりわかるとおり、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。なお、これらの環境の定義については後述する。また、表-2.4は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している。

表-2.1 暴露期間ごとのデータの構成

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

表-2.2 暴露環境ごとのデータの構成

暴露環境	海中部	干満部	飛沫部	陸上/飛沫部	陸上部
データ数	164	136	161	404	326

表-2.3 コンクリートの表面被覆の有無によるデータの構成

表面被覆の有無	表面被覆あり	表面被覆なし
データ数	308	883

表-2.4  $C/(2C_0) \times 100$  の算出結果の一例  
(海中部, 6ヶ月~1年)

コンクリート表面からの距離 (mm)	C (%)	$C/(2C_0) \times 100$
1	1.10	34.4
2	0.70	21.9
3	0.45	14.1
4	0.30	9.4
5	0.20	6.3
6	0.13	3.9
7	0.05	1.6
8	0.01	0.3
9	0.00	

(3) データ整理の方法

a) コンクリート中の塩化物含有量の単位の統一

収集したデータ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。

仮定1: 「水溶性塩化物含有量」は「酸可溶性塩化物含有量」の70%とする。

すべての実験データについてこの仮定が正しい訳ではないが、これまでに発表されている研究結果<sup>12) 13) 29) 31) 35) 36) 41) 43) 45) 49)</sup>をもとに仮定1を設定した。

仮定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化物含有量」を「セメントに対する塩化物含有量」に換算する。

仮定2もすべての実験データについて正しい訳ではないが、異なる研究者により用いられている塩化物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」という用語が使用されているが、本検討においては「全塩化物含有量」と「酸可溶性塩化物含有量」は同一であるとみなした。

b) 海洋環境の定義

既往の研究<sup>62)</sup>によると、海洋環境の分類の一つの考え方として、海面大気中、飛沫部、干満部、海中部という分類が示されている。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

加えた。これは、位置的には陸上部に位置するものの、海水飛沫の影響を受けることが多く、陸上部に分類すべきか飛沫部に分類すべきかが現時点で判断できない環境のことである。各々の環境の定義は以下に示すとおりである。

海中部: コンクリートは「Low Water Level (干潮位, 最低潮位)」よりも下方に位置し、常時海水中に没している。

干満部: コンクリートは「Low Water Level」と「High Water Level (満潮位, 最高潮位)」の間に位置し、干満作用によりコンクリートの表面近傍では毎日2回の乾湿繰り返しを受けている。

飛沫部: コンクリートは「High Water Level」よりも若干高い場所に位置し、常に海水飛沫の影響を受けている。

陸上/飛沫部: コンクリートは位置的には陸上部にあるが、強風時あるいは波浪の激しい時は海水飛沫を受け、風が比較的弱い時や波の穏やかな時は海水飛沫を受けることはないが、塩分を含んだ潮風にさらされている。

陸上部: コンクリートは海岸線より数メートルから数十メートルの距離に位置し、塩分を含んだ潮風にさらされている。しかし、海水飛沫を受けることはほとんどない。

c) 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入過程は極めて複雑であると考えられている。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がコンクリート中で進行し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には現象が複雑であること、また、本検討の主目的はコンクリート中への塩化物イオンの浸入量に関する知見を得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、すなわち拡散理論にすべての現象を含めて考察することとした。コンクリート中での塩化物イオンの拡散を表す基礎方程式としては、(2.1)式に示すFickの第2法則が広く用いられている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

ここに、 $C$ : コンクリート中の塩化物含有量

$t$ : 暴露期間

$x$ : コンクリート表面からの距離

$D$ : 拡散係数

(2.1)式を、初期条件:  $C(x, 0) = 0$ , および、境界条件:  $C(0, t) = C_0$ ,  $C_0$  = 一定, のもとに解くと(2.2)式を得る.

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.2)$$

ここに,  $C_0$  : コンクリート表面における塩化物含有量 (=一定)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

誤差関数の定義は(2.3)式に示されるとおりである.

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (2.3)$$

(2.2)式は以下の三つの変数より構成されている.

$C$ : ( $x, t$ )におけるコンクリート中の塩化物含有量

$x$ : コンクリート表面からの距離

$t$ : 暴露期間

したがって、ある時点における塩化物含有量の深さ方向の分布に対して(2.2)式をあてはめることにより、その分布に対して最も適する拡散係数を求めることができる。なお、その最適な拡散係数は暴露期間を通して一定とみなすことにより求めるものである。ある塩化物含有量の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<sup>11)</sup>に示されている。その方法は、(2.4)式において示される誤差関数と正規分布関数の関係を利用するものである。

$$\frac{1}{2}(1 - \operatorname{erf}(z)) = 1 - \Phi(\sqrt{2} \cdot z) \quad (2.4)$$

ここに,  $\operatorname{erf}(z)$ : 誤差関数

$\Phi$  : 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-2.1~2.5に示す海中部に暴露されたコンクリート中の塩化物含有量の最大値曲線に最適な拡散係数の算出方法を以下に述べる。なお、図-2.1~2.5においては、以下に示す2つの要因について収集データを区別・分類している。

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た。図中に示す

「OPC」は普通ポルトランドセメント, 「BFS」は高炉スラグセメント, 「SRC」は耐硫酸塩ポルトランドセメント, 「HESPC」は早強ポルトランドセメントを示している。

水セメント比: 水セメント比は10%ごとに区分して示している。

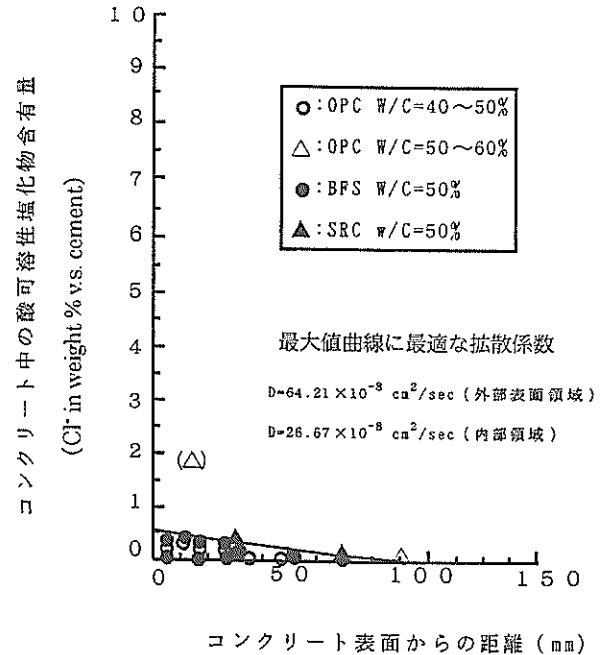


図-2.1 コンクリート中の塩化物含有量 (海中部暴露, 暴露6ヶ月以内)

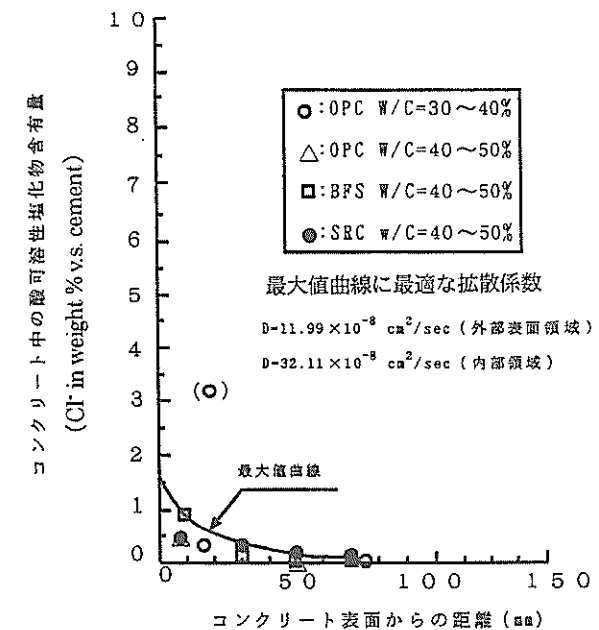


図-2.2 コンクリート中の塩化物含有量 (海中部暴露, 暴露6ヶ月~1年)

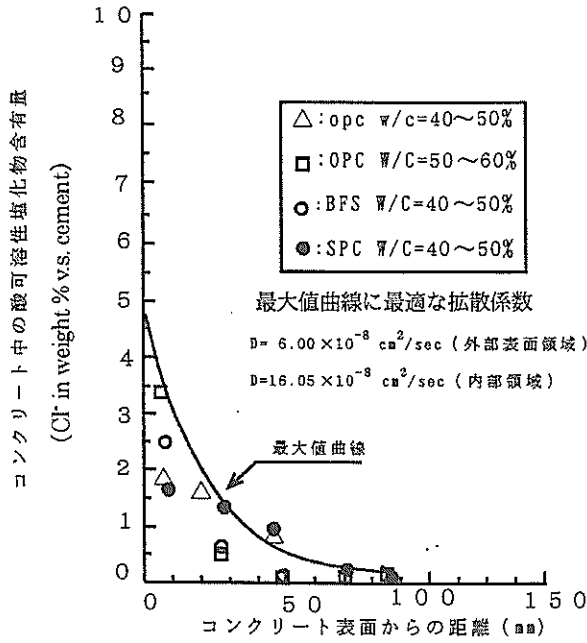


図-2.3 コンクリート中の塩化物含有量  
(海中部暴露, 暴露1年~2年)

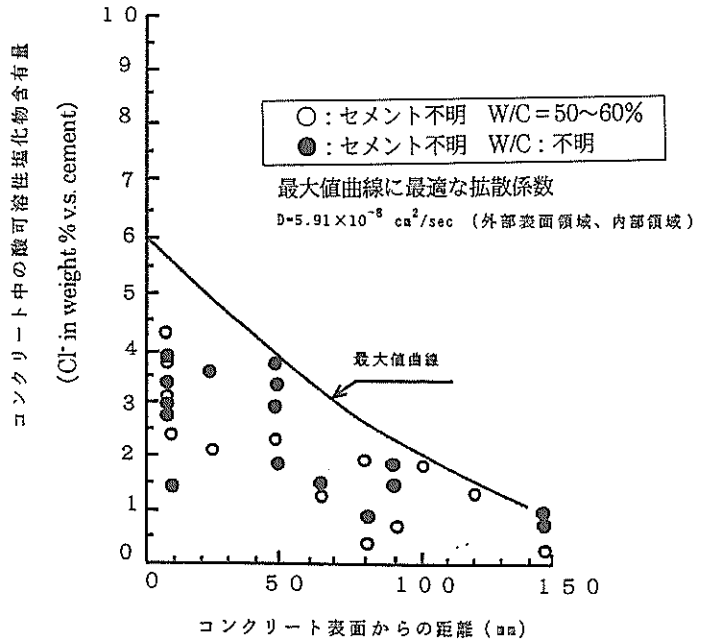


図-2.5 コンクリート中の塩化物含有量  
(海中部暴露, 暴露期間~56年)

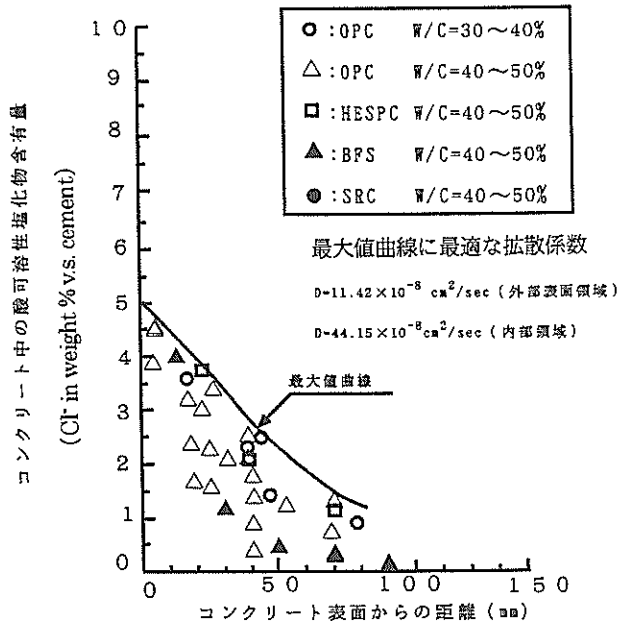


図-2.4 コンクリート中の塩化物含有量  
(海中部暴露, 暴露2年~5年)

また、収集したデータはすべてコンクリート表面からの距離および暴露期間をパラメータとして整理している。図-2.1は暴露期間が6ヶ月以下、図-2.2は暴露期間が6ヶ月から1年、図-2.3は暴露期間が1年から2年、図-2.4は暴露期間が2年から5年、図-2.5は暴露期間が20年から56年のデータを示している。図-2.1および図-2.2において括弧をつけて示しているように、一般的傾向から大きく外れているデータが少数存在するが、これらのデータは一連の解析からは除外している。また各図中において「最大値曲線」と称するものを示している。この最大値曲線とは、収集したデータの各深さにおける最大値を曲線(包絡線)で結んだものである。図-2.1~2.5よりわかるとおり、暴露期間が長くなるにしたがい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ものの、いずれの暴露期間においてもほぼ明確な最大レベルが存在する。本検討においてはこの最大レベルに着目して考察を行った。すなわち、各図中に示されている最大値曲線に対する最適な拡散係数を求め、その絶対値および経時変化に関して考察を行った。

図-2.2に示す暴露期間が6ヶ月~1年のデータを例に取り、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。

(2.2)式を(2.4)式に代入しさらに変換すると(2.5)式を得る。

$$\frac{C}{2C_0} = 1 - \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right) \quad (2.5)$$

ここに、 $C$  :  $(x, t)$ におけるコンクリート中の塩化物含有量

$C_0$  : コンクリート表面の塩化物含有量

$\Phi$  : 正規分布関数

$D$  : 拡散係数

$t$  : 暴露期間

$x$  : コンクリート表面からの距離

(2.5)式より、正規確率紙において横軸をコンクリート表面からの距離、縦軸を  $(C/2C_0) \times 100$  としてデータをプロットし、両者の関係が直線表示できる場合、その傾きは、 $1/(\sqrt{2Dt})$ となる。表-2.5に  $(C/2C_0) \times 100$ の算出結果を、図-2.6にそのデータを正規確率紙にプロットした結果を示す。図-2.6よりわかるとおり、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）と内部の部分（以後、内部領域と称する）とで近似直線の傾きが異なる傾向を示した。すなわち、外部表面領域と内部領域とで最適な拡散係数は異なる値を示した。図-2.1~2.5に示すデータの場合、いずれの場合もコンクリート表面からの距離約30~50mmが外部表面領域と内部領域の境界となった。図-2.6の場合、直線①の傾きより外部表面領域の拡散係数「 $D=11.99 \times 10^{-8}(\text{cm}^2/\text{sec})$ 」が計算され、直線②の傾きより内部領域の拡散係数「 $D=32.11 \times 10^{-8}(\text{cm}^2/\text{sec})$ 」が計算される。後述するが、この拡散係数の違い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いることを示唆していると考えられる。

(4) 収集データの整理の結果および考察

a) 海中部に暴露された場合

図-2.1~2.5は海中部に暴露されたコンクリート中の塩化物含有量を示しており、それらの図中の最大値曲線をまとめて示したものが図-2.7である。なお、図-2.5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齢29年のものであったためである。この図-2.7に示す最大値曲線の経時変化に関して以下に示すようないくつかの特徴を読み取ることができる。すなわち、暴露開始後比較的初期の時点、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化物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化物含有量の増加の速度は鈍り、逆にコンクリートの内部領域の塩化物含有量が主に増加してくる。図

表-2.5 Initiation Period (潜伏期間) の推定結果

W/C	暴露条件	コンクリート表面からの距離 (mm)		
		35	55	70
45%	海中部	3.3	(7.4以上)	(4.9以上)
	干満部	2.2	(5.8以上)	(5.3以上)
	飛沫部	3.9	(18.0以上)	(22.0以上)
	陸上部		(88.3以上)	(65.8以上)
60%	海中部	1.6	2.1	2.0
	干満部	1.0	1.6	2.1
	飛沫部	1.8	5.1	8.7
	陸上部		25.0	26.3
75%	海中部	0.5	1.0	1.2
	干満部	0.3	0.8	1.3
	飛沫部	0.6	2.4	5.5
	陸上部		11.8	16.4

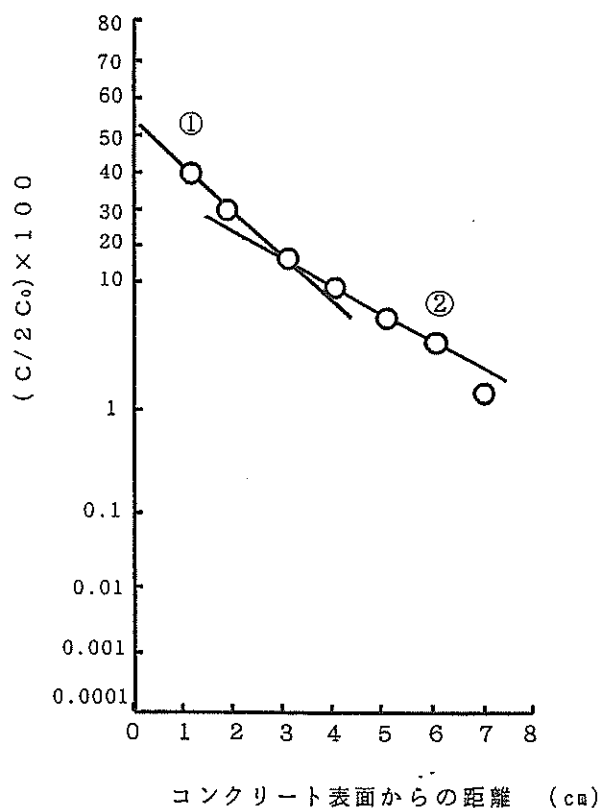


図-2.6 正規確率紙上のデータプロット  
(海中部暴露, 暴露6ヶ月~1年)

-2.7にこれらの最大値曲線に対する最適な拡散係数も併せて示しているが、この拡散係数が示す最も大きな特徴は、外部表面領域と内部領域で異なる値、および異なる経時変化の傾向を示す点である。外部表面領域の拡散係数は暴露6ヶ月時に最大値を取り、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年に至るまでほぼ一定となる。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していく。そして、暴露30年時においては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の値を取る。このような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、暴露開始1～2年後には浸透現象が収まってくるものと考えられる。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なっていくものと考えられる。暴露期間が20～30年以上のかなり長い期間を経過すると、外部表面領域から内部領域に至るまでほぼ定常の拡散状態となるものと考えられる。

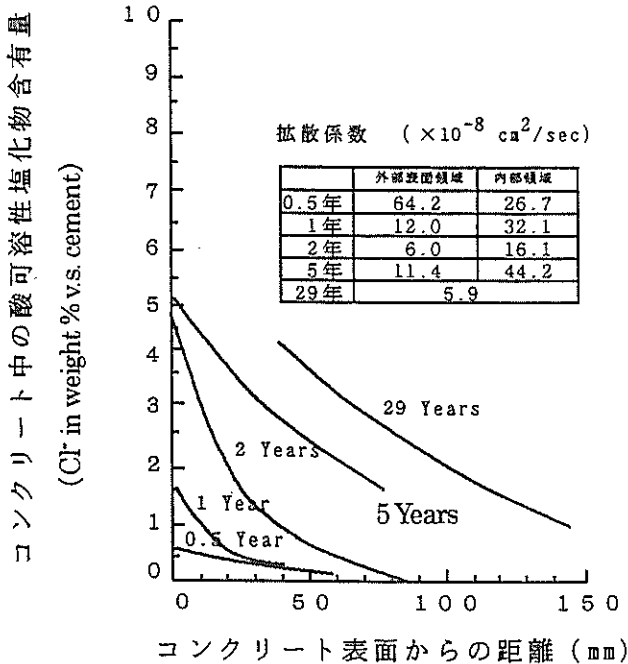


図-2.7 塩化物含有量の最大値曲線の経時変化 (海中部暴露)

図-2.8にコンクリート表面の塩化物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化物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挿することにより得られる塩化物含有量のことである。なお、図-2.8のx軸のスケールは暴露期間の平方根で示している。この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化物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化物含有量はほぼ一定となる。

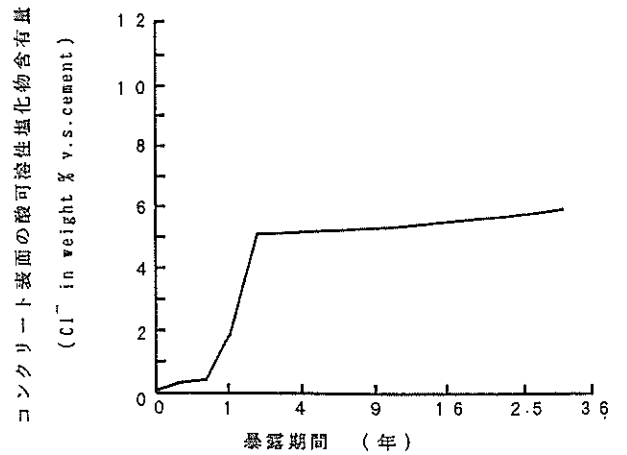


図-2.8 コンクリート表面の塩化物含有量の経時変化 (海中部暴露)

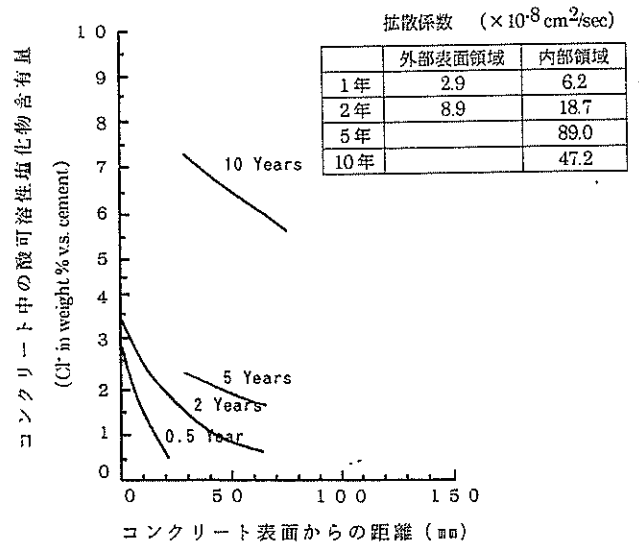


図-2.9 塩化物含有量の最大値曲線の経時変化 (干満部暴露)

b) 干満部に暴露された場合

前項において述べた海中部に暴露された場合と同様に、干満部に暴露された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。図-2.9に干満部に暴露されたコンクリート中の塩化物含有量の最大値曲線の経時変化を示す。この図によると、暴露5年時から10年時にかけての5年間の塩化物含有量の増加量が極めて大きくなっている。図-2.9は可能な範囲で収集したデータに基づいて作成したグラフであるため、この5年間の急増に関する理論的説明は不可能である。したがって、暴露期間が5年以内での経時変化を考察する。それによると、暴露初期の段階

では外部表面領域の塩化物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化物含有量が増加してくる傾向にある。図-2.9に最大値曲線に対する最適な拡散係数も併せて示している。外部表面領域の拡散係数は暴露初期の値のみしか得られていないものの、その値はさほど大きくない。一方、内部領域の拡散係数は暴露5年時に $89.0 \times 10^{-8} (\text{cm}^2/\text{sec})$ という極めて大きな値を取る。この拡散係数の傾向より、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および浸入速度は異なるものであり、この違いは暴露期間が比較的長い時点まで継続するものと考えられる。

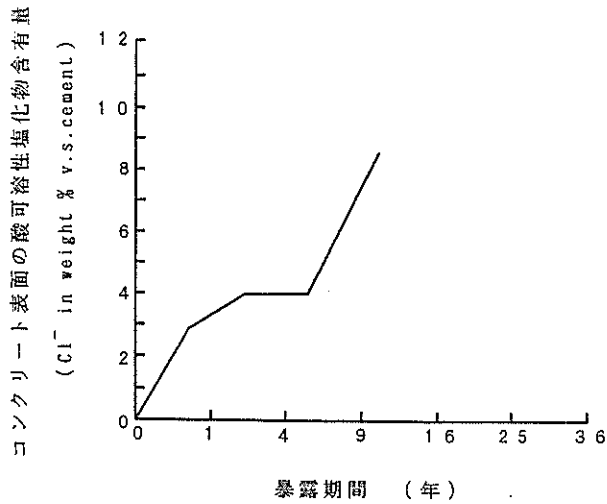


図-2.10 コンクリート表面の塩化物含有量の経時変化 (干満部暴露)

図-2.10にコンクリート表面の塩化物含有量の経時変化を示す。図-2.10よりわかるとおり、コンクリート表面の塩化物含有量は暴露期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、暴露約10年時まではコンクリート表面の塩化物含有量と暴露期間の平方根はほぼ線形の関係にあると思われる。

c) 飛沫部に暴露された場合

図-2.11に飛沫部に暴露されたコンクリート中の塩化物含有量の最大値曲線の経時変化を示す。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50mm程度まで塩化物イオンが浸入している。また、図-2.11よりわかるとおり、暴露期間が18年以下においては、外部表面領域の塩化物含有量が主に増加しているが、暴露期間がさらに長くなると、内部領域において主に塩化物含有量が増加している。図-2.11に最大値曲線に最適

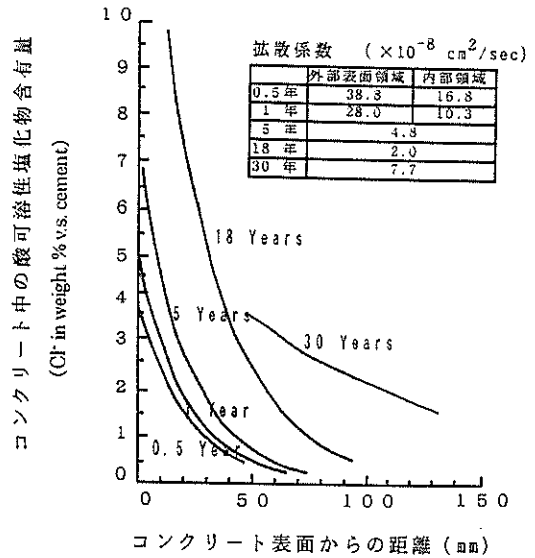


図-2.11 塩化物含有量の最大値曲線の経時変化 (飛沫部暴露)

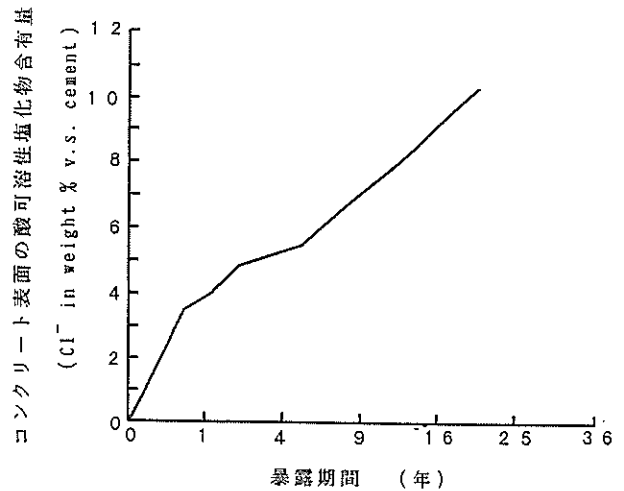


図-2.12 コンクリート表面の塩化物含有量の経時変化 (飛沫部暴露)

な拡散係数も併せて示している。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。この間の外部表面領域と内部領域の拡散係数を比較してみると、外部表面領域の拡散係数が内部領域の拡散係数よりも大きな値を示している。図-2.11に示す飛沫部の場合の拡散係数の値を、図-2.7および図-2.9に示す海中部および干満部の場合の拡散係数と比較してみると全体的に飛沫部の方がその値は小さい。しかし、コンクリート中の塩化物含有量そのものは飛沫部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化物含有量の大小は必ずしも一致するものではないこと、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および干満部暴露の場合とは幾分異なっていること、が推察される。

図-2.12に飛沫部に暴露された場合のコンクリート表面の塩化物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化物含有量と暴露期間の平方根とはほぼ線形の関係にあると考えられる。

d) 陸上/飛沫部に暴露された場合

b) 海洋環境の定義において述べたとおり、陸上/飛沫部とは飛沫部と陸上部のどちらに分類するかが現時点で判断できない環境である。この陸上/飛沫部に暴露されたコンクリート中の塩化物含有量に関するデータの大部分は、参考文献<sup>17)~23)</sup>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-2.13に陸上/飛沫部に暴露されたコンクリート中の塩化物含有量の最大値曲線の経時変化を示す。図-2.13に示されるとおり、暴露1年時において既にかかなりの量の塩化物イオンがコンクリート中に浸入している。また、塩化物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。図-2.13に個々の最大値曲線に最適な拡散係数も併せて示している。暴露期間が1年、5年、7年の時点の拡散係数を比較してみると、暴露1年において最大値を取り、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-2.11に示す飛沫部暴露の場合の拡散係数のそれとほぼ同様である。このことより考察して、本文中に示す陸上/飛沫部は環境条件としては飛沫

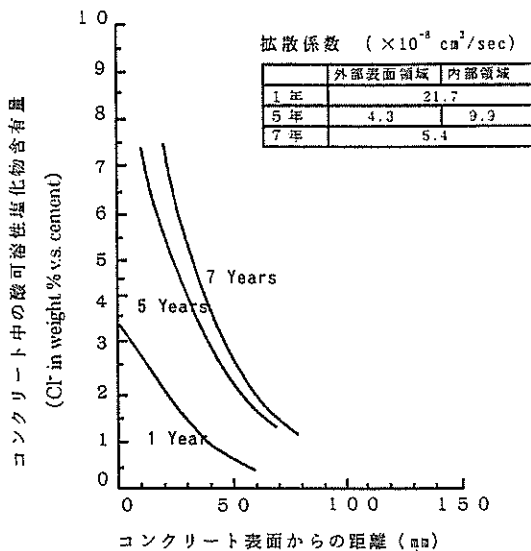


図-2.13 塩化物含有量の最大値曲線の経時変化 (陸上/飛沫部暴露)

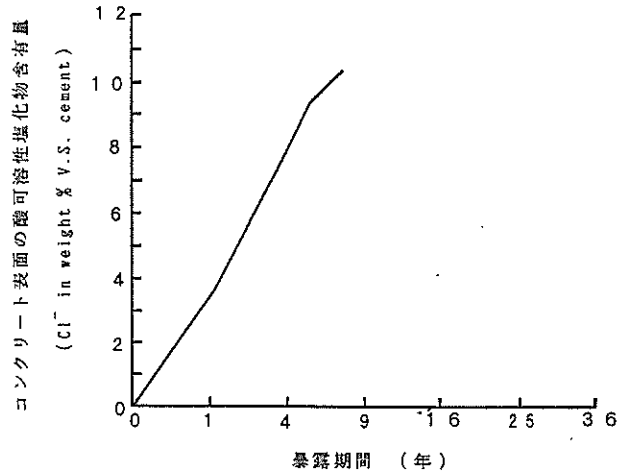


図-2.14 コンクリート表面の塩化物含有量の経時変化 (陸上/飛沫部暴露)

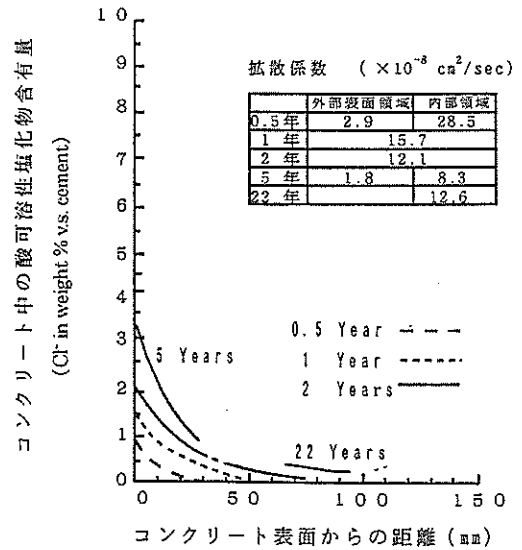


図-2.15 塩化物含有量の最大値曲線の経時変化 (陸上部暴露)

部に近いものと考えられ、そのためにコンクリート中への塩化物イオンの浸入メカニズム、浸入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-2.14にコンクリート表面の塩化物含有量の経時変化を示す。図-2.14より、暴露7年まではコンクリート表面の塩化物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。

e) 陸上部に暴露された場合

図-2.15に陸上部に暴露されたコンクリート中の塩化物含有量の最大値曲線の経時変化を示す。図-2.15よりわかるように、暴露5年以下の比較的初期の段階ではコンクリートの外部表面領域の塩化物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ける塩化物含有量が徐々に増加するようになる。図-2.15に最大値曲線に最適な拡散係数も併せて示す。暴露6ヶ月および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、2年時および22年時において両者は同一の値を取っている。この傾向は図-2.11に示した飛沫部の場合と図-2.13に示した陸上/飛沫部の場合とほぼ一致している。このことより、陸上部暴露の場合のコンクリート中へ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。

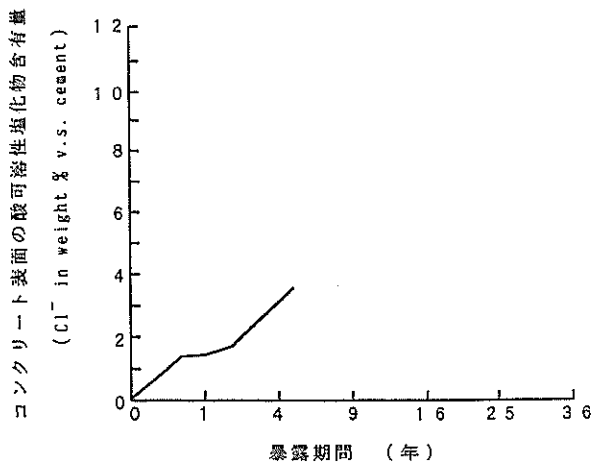


図-2.16 コンクリート表面の塩化物含有量の経時変化 (陸上部暴露)

図-2.16にコンクリート表面の塩化物含有量の経時変化を示す。コンクリート表面の塩化物含有量自体は他の環境の場合に比べてかなり小さいが、その経時変化の傾向は他の環境の場合とほぼ同様である。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化物含有量と暴露期間の平方根はほぼ線形の関係にある。

(5) コンクリート中の塩化物含有量に及ぼす環境条件の影響に関する考察

a) 最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化に関して

図-2.17に海中部、干満部、飛沫部、陸上部に暴露されたコンクリートの外部表面領域の塩化物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。なお、陸上/飛沫部は飛沫部と同等であることを考慮し、本図においては除外している。図-2.17に示されるように、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かかなりの差があり、同一の暴露条件内においても変動が見られる。しかし、暴露3~5年が経過すると同一の

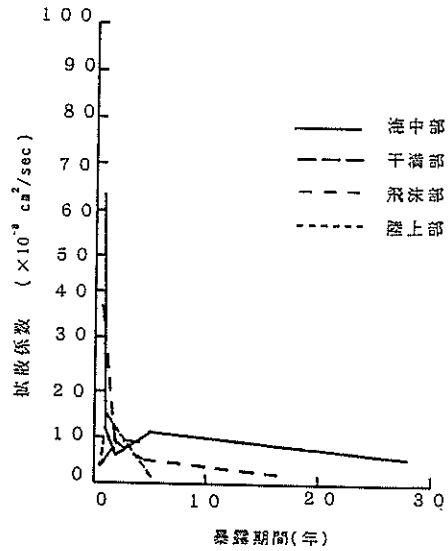


図-2.17 最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化 (外部表面領域)

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、暴露条件間の差も小さくなり、いずれの暴露条件においても拡散係数の値は $10 \times 10^{-8}$  (cm<sup>2</sup>/sec) 以下となる。暴露条件間の相違を見てみると、海中部の拡散係数が最も大きく、飛沫部、陸上部の順となっている。なお、干満部の場合、暴露期間が長期になった際の拡散係数は得られていない。この拡散係数の傾向より、コンクリート表面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と言える。先にも述べたが、拡散係数の大小とコンクリート中の塩化物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ものと考えられる。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は密接に関係しているものと考えられる。

図-2.18に海中部、干満部、飛沫部、陸上部に暴露されたコンクリートの内部領域の塩化物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-2.17において示した外部表面領域の場合とは対比的に、図-2.18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。拡散係数の値は海中部および干満部において大きく、飛沫部および陸上部において小さい。また、海中部および干満部の場合、暴露5年程度で最大値を取るという経時変化の傾向を示しているが、飛沫部および陸上部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

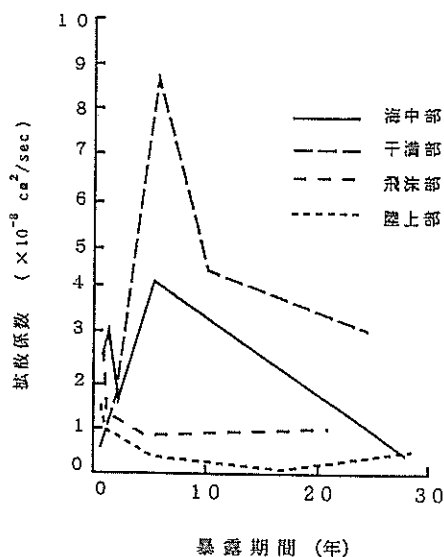


図-2.18 最大値曲線に最適な拡散係数の経時変化 (内部領域)

っていることより、暴露期間が30年以上という長期の場合はこれら4環境の拡散係数はほぼ等しくなってくるのが推察される。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。その影響は暴露期間が約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、30年を越えるような長期の暴露期間になるとその影響はほぼなくなってくるものと考えられる。

b) コンクリート表面の塩化物含有量の経時変化に関して

図-2.19に、海中部、干満部、飛沫部、陸上部に暴露されたコンクリート表面の塩化物含有量の経時変化を示す。本図に示されるとおり、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化物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、干満部、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。飛沫部の場合は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化物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ていることが推察される。

(6) 外部表面領域と内部領域の相違に関する考察

上述したように、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ることが考えられる。コンクリートの表面部分(約30~50mmの深さまで)は大気

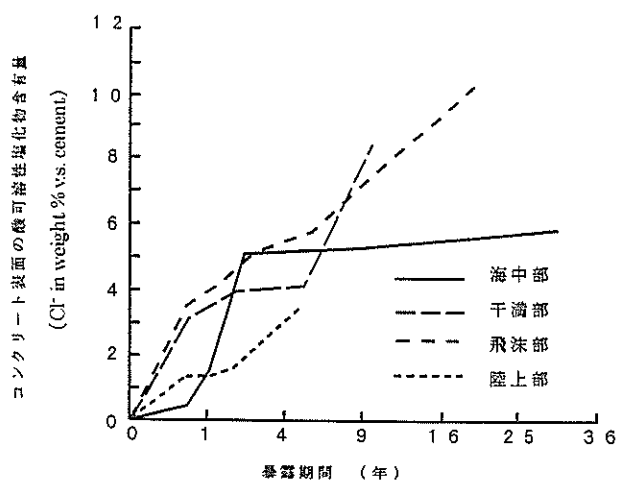


図-2.19 コンクリート表面の塩化物含有量の経時変化

に接することにより比較的乾燥しやすいが、それより内部では乾燥しにくいと考えられる。乾燥状態にあるコンクリートに海水が接する場合、海水は浸透現象によりコンクリート内部に浸入していき、海水に含まれる塩化物イオンも比較的容易にコンクリート内部に浸入すると思われる。一方、乾燥していないコンクリートの内部は細孔溶液により満たされているため浸透現象は起こり得ない。したがって、塩化物イオンの浸入は濃度拡散によることになる。このように、コンクリートの乾燥状態の相違により、塩化物イオンの浸入メカニズムが異なっており、そのために外部表面領域と内部領域とで見かけの拡散係数が異なっているものと考えられる。

(7) 陸上/飛沫部に関して

上述の解析において、陸上/飛沫部という環境区分を適用した。データ整理の結果を見ると、塩化物イオンの浸入に関してはほぼ飛沫部と同様の環境であると判断できる。したがって、3章以降で述べる実験においては、陸上/飛沫部という環境区分は飛沫部に含めて取り扱うこととする。

2.5 潜伏期間の推定に関して

(1) 横田の研究<sup>39)</sup>

横田は前出の参考文献<sup>39)</sup>で示した見掛けの拡散係数と計算により求めたコンクリート表面の塩化物含有量を用いて潜伏期間の推定を試みている。それによると、構造物の設置箇所が飛沫帯大気中、コンクリートの付着塩分量が1.0mg/dm<sup>2</sup>/day、見掛けの塩分拡散係数が3.0×10<sup>-9</sup>wt%/cm<sup>2</sup>/sという条件下での潜伏期間を、コンクリートの水セメント比と鉄筋のかぶり厚さをパラメーターとして示している。

(2) 浜田, 福手, R. N. Swamy, 谷川, J. C. Laiwの研究<sup>60) 61)</sup>

浜田(筆者)らは塩害進行過程におけるInitiation Period(潜伏期間)の長さの推定を試みている。スラブ供試体を用いた乾湿繰返し塩化物浸透促進試験および文献調査に基づく既往の塩化物浸透促進試験データの収集整理を併行して行い、これらの結果を基にInitiation Period(潜伏期間)の推定を試みている。表-2.6に推定結果を示す。表-2.6に示されるように、コンクリートの水セメント比が小さくなるほど潜伏期間が長くなっており、構造物の耐久性向上のためには富配合のコンクリートを用いることが重要であることが定量的に示されている。また、海中部、干満部、飛沫部の三環境を比較した場合、飛沫部の潜伏期間が最も長く算出されている。この算出結果は次節(2.6)で述べる大即らの研究において得られている結果と一致している。

表-2.6 Initiation Period(潜伏期間)の推定結果  
(年)

W/C	暴露条件	コンクリート表面からの距離(mm)		
		35	55	70
45%	海中部	3.3	(7.4以上)	(4.9以上)
	干満部	2.2	(5.8以上)	(5.3以上)
	飛沫部	3.9	(18.0以上)	(22.0以上)
	陸上部		(88.3以上)	(65.8以上)
60%	海中部	1.6	2.1	2.0
	干満部	1.0	1.6	2.1
	飛沫部	1.8	5.1	8.7
	陸上部		25.0	26.3
75%	海中部	0.5	1.0	1.2
	干満部	0.3	0.8	1.3
	飛沫部	0.6	2.4	5.5
	陸上部		11.8	16.4

2.6 港湾環境における環境要因に関して

(1) 大即, 長滝, 福手, 中下の研究<sup>62) 63)</sup>

大即らは、横浜港および川崎港内の7つの異なる地点を選択し、その地点の海面大気中(陸上部)、飛沫部、干満部、海中部において、内部に鉄筋を有するモルタル供試体を1年間暴露し、その性状を調べることにより環境条件の評価を試みている。なお、大即らの研究においてはモルタルへの塩化物の付着・侵入のみならず、モルタル内部の鉄筋の腐食状況も試験している。また、暴露地点の環境条件を鉛直方向の環境条件と水平方向の環境条件に分類して評価し、以下に示すような知見を得ている。

鉛直方向の環境条件について、海中部および干満部においてはコンクリート中の鋼材表面の不動態は破壊され

やすいが酸素の供給が制限されるため腐食速度は小さい。飛沫部においては不動態が破壊される時期は海中部および干満部よりも遅いが、酸素の供給が十分であるため最も早期劣化が生じやすい。陸上部では他の環境と比較すると不動態が破壊されるまでの時間が長くなる。また、水平方向の環境条件に関しては飛沫部を検討の対象として取り上げ、モルタル中の可溶性塩化物含有量に対して供試体に作用する波エネルギーが大きく影響していることを明らかにし、モルタル中の可溶性塩化物含有量を海風の吹送距離とかえり波の有無より求める計算式を重回帰分析より求めている。

大即らの研究は本論文で述べる研究との共同研究である。比較的小型のモルタル供試体を用いて環境条件の評価を行うという基本的考え方は同一である。大即らの研究では、モルタル供試体を横浜港および川崎港という比較的狭い範囲に暴露しその結果を考察しているが、筆者の研究では暴露対象港を全国に広げ、広範囲の気象条件の影響を検討することも目的としている。

2.7 まとめ

(1) 既往の研究より得られている知見

2.2~2.6において取りまとめた既往の研究より明らかにされている事項を整理し以下に列挙する。

- 1) 陸上部(海岸付近, 海上大気中)において、飛来塩分量を決定する最も重要な要因は海風の風速である。
- 2) 飛沫部において、コンクリート中へ浸入する塩分量を決定する最も重要な要因は波のエネルギーである。
- 3) 海中部, 干満部, 飛沫部, 陸上部という鉛直方向の異なる環境を比較した場合、陸上部が他の3環境よりも潜伏期間(鉄筋の腐食が開始されるまでの時間)がかなり長い。また、飛沫部よりも海中部および干満部の方が潜伏期間は短い。
- 4) コンクリート中の塩化物含有量に関しては、海中部・干満部, 飛沫部および陸上部の三環境に大まかに分類できる。また、同一の暴露環境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、その同一の暴露環境内における塩化物含有量のばらつきは海中部においては他の環境よりも小さいようである。
- 5) コンクリート中の塩化物含有量の経時変化は、異なる暴露環境においては異なる傾向を示す。しかし、いずれの暴露環境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の外部表面領域の塩化物含有量が主に増加し、暴露期間の経過とともにコンクリートの内部領域の塩化物含有量が徐々に増加していくという点である。

- 6) コンクリート中の塩化物含有量の分布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。
- 7) 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。この一定になった拡散係数の値は、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。また、コンクリートの内部領域の拡散係数は、異なる暴露環境ごとに異なる値を示す。海中部および干満部ではその値が大きく、飛沫部および陸上部ではそれに比べると小さな値を示す。
- 8) 異なる暴露環境におけるコンクリート中の塩化物含有量の相違は、コンクリート表面の塩化物含有量とコンクリートの内部領域における拡散係数の相違に起因するものである。

#### (2) 残されている課題

R C 構造物の塩害に係わる環境要因に関してこれまでに得られている知見を2.7 (1) にまとめた。2.7 (1) において列挙したような知見が得られているものの、不足していると考えられる項目もある。不足していると考えられる項目を以下に示す。

- 1) コンクリート中の塩化物含有量に関する情報はかなりそろっており、潜伏期間の推定の試みも既に行われている。しかし、それに続く進展期間以降に関する情報は十分とは言えない。また、コンクリート中（セメント硬化体中）の塩化物イオンの挙動の詳細については未だ不明な点も多い。
- 2) 海洋環境の鉛直方向の分類、すなわち海中部、干満部、飛沫部、陸上部の各々の特長は把握できつつある。しかし、水平方向の分類についての情報はほとんど得られていない。
- 3) 陸上部において海風の風速が重要な要因である点、および飛沫部において波浪のエネルギーが重要な要因である点は既に明らかにされているが、それ以外の気象条件および海象条件が及ぼす影響の有無、程度に関してはほとんど知見が得られていない。
- 4) 上述の1) とも関連するが、コンクリート中への塩化物イオンの浸入に関する検討事例は豊富であるが、コンクリート中の鉄筋の腐食までを含めた検討事例は十分ではない。
- 5) 環境条件の評価結果を、耐久設計において応用することに関しては、一部で考え方の提案がなされているものの十分に検討されているとは言い難い。

このように、取り組むべき課題は多く残されているのが現状である。3章以降において述べる本研究においては、これらの課題に対して答えを出していくことを基本的な目的としており、かつこれが本研究の意義である。

#### 参考文献

- 1) 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，pp. 85~88，1986
- 2) 横田優・浮田和明・重松俊一・藤枝正夫：拡散理論に基づいた海岸部塩分汚染環境評価，コンクリート工学年次論文報告集，9-1，1987
- 3) 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論文報告集，11-1，pp. 609~614，1989
- 4) 加藤恭浩・宝島由治・佐伯竜彦：新潟県沿岸部における塩害環境の定量的把握，土木学会第50回年次学術講演会，pp. 194~295，平成7年（1995）9月
- 5) 大城武・山田義智・谷川伸：厳しい環境下での実大R C 建物の長期暴露試験について，コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 17, No. 1, pp. 961~966，1995
- 6) 山田義智・大城武・柘田佳寛・伊部博：海岸から飛来する塩分量の数値解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 1, pp. 945~950，1996
- 7) 星野富夫・魚本健人・守屋正裕：海洋暴露環境の評価に関する検討，土木学会第52回年次学術講演会，1997. 9
- 8) M. Moukwa: Penetration of Chloride Ions from Sea Water into Mortars under Different Exposure Conditions, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol. 19, pp. 894~904, 1989
- 9) 濱田秀則・R. N. Swamy：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入過程および浸入量に関する一考察，コンクリート工学論文集第7巻 第1号，pp. 11~pp. 22，1996年1月
- 10) 濱田秀則・R. N. Swamy：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，港湾技研資料 No. 810, Sep. 1995
- 11) 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
- 12) 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Cl<sup>-</sup>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
- 13) 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, 1989年10月
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 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, 1986
- 19) 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
- 20) 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
- 21) 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
- 22) 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
- 23) 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
- 24) 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
- 25) 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
- 26) 天沼邦一・柗田佳寛・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
- 27) 柗田佳寛・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. 15, No. 1, 1992
- 28) 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
- 29) 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
- 30) 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鉍物, 第6回コンクリート工学年次講演会論文報告集, 1984
- 31) 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
- 32) 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
- 33) 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
- 34) 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
- 35) 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
- 36) 尾崎言刃・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
- 37) 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
- 38) 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
- 39) 石橋輝樹・田摩毅・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
- 40) 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
- 41) 角徹三・熊谷伸一：RC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
- 42) 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
- 43) 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
- 44) 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
- 45) 堤知明・本橋賢一・ミヌ ステイル・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
- 46) 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, No. 1, 1992
- 47) P. S. Mangat and Kribanandan Gurusamy : CHLORIDE DIFFUSION IN STEEL FIBRE REINFORCED, CEMENT and CONCRETE RESERCH Vol. 17, pp. 385-396, 1987
- 48) P. S. Mangat and Kribanandan Gurusamy : CHLORIDE DIFFUSION IN STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE CONTAINING PEA, CEMENT and CONCRETE RESEARCH Vol. 17, pp. 640-650, 1987
- 49) 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, pp. 579-590, 1990
- 50) Roger D. Browne : Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspction and Repair of Offshore and Coastal Structures, American Concrete Institute, SP 65 -11
- 51) 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 109-102
- 52) Frorinda B. Coggins and Catherine W. French : Chloride Ion Distribution in Twenty-Year-Old Prestressed Bridge Girders, ACI MATERIALS JOURNAL, 1990
- 53) P. C. LIU : Damage to concrete structures in a marine environment, Materials and structures 1991, 24, 302-307
- 54) Wei-Ming Lin and Tzu-Wang Jou : Corrosion of Reionforced Concrete Structures in Taiwan, COATING and LININGS 1991
- 55) Oladis T. de Rincon・Migual A. Sanchez G. Orlando Perez・Daniel Conteras and Octabio Garcia Cesar Vezga : A Study of Practical Cases of Steel Corrosion in Reinforced Concrete- Causes and Solutions, COATING and LININGS 1991
- 56) 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 structure in a tropical marine environment, Magazine of Concrete Research, 1992, 44, No. 160
- 57) 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
- 58) 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
- 59) 横田優：既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程により評価される寿命について，研究期報一四国電力株式会社，No. 65, 1995. 12
- 60) 浜田秀則・福手勤・R. N. Swamy・谷川伸・J. C. Laiw : 鉱物質混和材の混入およびコンクリート表面被覆の塩害防止効果の定量的評価に関する研究，土木学会論文集 No. 538/V-31, pp. 169~181, 1996. 5
- 61) R. N. Swamy・H. Hamada・T. Fukute・S. Taniwa and J. C. Laiw : Chloride Penetration into Concrete Incorporating Mineral Admixtures or Surface Coating Material under Chloride Environments, Proceedings of the International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC ' 95, Sapporo, Japan, 1995
- 62) 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，No. 472/V-20, pp. 59~68, 1993. 8
- 63) 中下兼次：海洋コンクリートの鋼材腐食に対する環境条件評価，東京工業大学，理工学研究科（土木工学専攻），修士論文，1991年3月

### 3. 環境要因の定量的評価手法および試験方法に関する検討

#### 3.1 序節

構造物の環境条件を評価する手法には多くのものがあると考えられる。考え得る方法として、例えば実構造物の調査と解析に基づく方法、実環境に供試体を暴露する方法、あるいは実験室レベルで精密にコントロールされた環境で供試体の劣化試験を行う方法などがある。また、それに加えて既存の多くの研究成果を収集し、データの再整理およびその解析を行う方法も有力な方法と考えられる。2章において取りまとめた既往の研究においてもいくつかの異なる方法が用いられている。本研究においては、供試体の形状・寸法および使用材料が全く同一のモルタル供試体を環境条件がそれぞれ異なる全国の港に一定期間暴露するという方法を採用した。そして、一定期間の暴露後に供試体を暴露場所から引き揚げ、その性状試験を行うことにより暴露環境の評価を試みた。そのような方法を選択した理由は、港湾技術研究所の利点として、運輸省港湾建設局、総理府沖縄総合事務局および北海道開発庁開発局の港湾工事事務所の協力を得ることができ、ほぼ全国規模の暴露試験が可能であったということ、また、多様な実構造物の調査をするよりも一定品質の供試体を用いた方がデータの収集解析が行いやすいと判断したためである。また、供試体レベルでのコンクリート中鉄筋の腐食に関する各種の試験技術が急速に進歩してきていることも有力な理由の一つである。このような諸々の条件を考慮した場合、供試体を幅広い環境に暴露する方法が、取り得る手法の中で最も合理的かつ信頼性も高いと判断した。

本章においては、まず環境要因の定量的評価の方法を明示する。次に供試体の暴露を実施した港の概要を述べる。さらに暴露後の供試体に関する試験の項目および試験の方法について説明し、最後に電気化学的計測の信頼性向上のために筆者が実施した基礎実験の概要と結果を取りまとめる。コンクリート中の鉄筋の腐食に係る各種の試験方法はかなり進歩してきている。特に、電気化学的手法の進歩は著しい。しかし、電気化学的計測により得られたデータの解釈およびその考察を精度のよいものにするためには、解決しておくことが望まれる問題点も存在する。本研究の一環として、分極抵抗試験ならびに定電位ステップ試験に関する基礎実験を実施した。その基礎実験の概要と結果を3.6において取りまとめる。

#### 3.2 コンクリート中鉄筋の腐食量・腐食速度理論

##### 3.2.1 腐食量算出の考え方

鉄筋の腐食量は基本的には(3.1)式に基づき計算されるものと考えられる。

$$W_{corr} = \int_{t_1}^{t_2} \sigma \cdot dt \quad (3.1)$$

ここで、 $W_{corr}$  : 腐食量

$\sigma$  : 腐食速度

$t_1$  : 腐食が開始される時刻

$t_2$  : 腐食量を求める時刻

すなわち、腐食速度を腐食期間で積分したものが腐食量と定義される。(3.1)式よりわかるように、基本的に腐食量は状態量ではないため電気化学的理論に基づき直接計測することは不可能である。一方、腐食速度は状態量であるため電気化学的に計測することは可能であると考えられる。

##### 3.2.2 反応エネルギー論に基づく腐食速度の考え方

鉄の腐食反応に伴うエネルギー変化は図-3.1に示すように説明されている<sup>1)</sup>。図-3.1によると、精製前の鉄鉱石はエネルギー的には低エネルギーの状態にあるが、この鉄鉱石を精製したいわゆる製鉄は高エネルギーの状態にある。鉄の腐食(酸化)とは高エネルギー状態の鉄が低エネルギー状態に移行することであり、外部から製鉄へのエネルギーの供給がなければ鉄の腐食は自然に進行することになる。ただし、製鉄が腐食生成物(錆、酸化

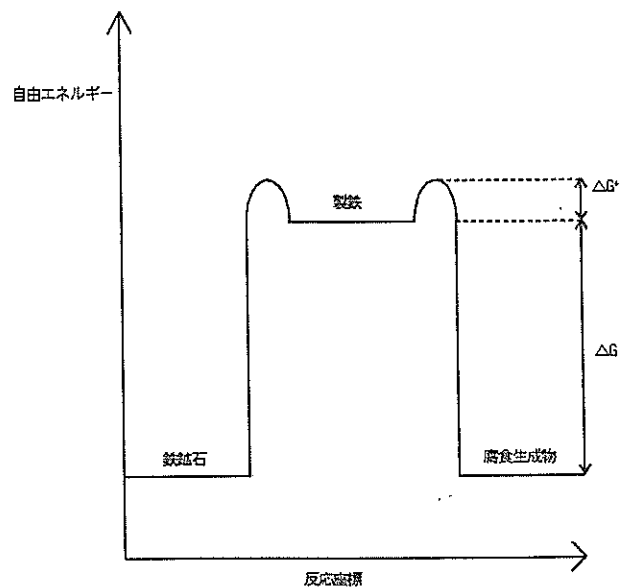


図-3.1 鉄の腐食に関するエネルギー変化

鉄) に変化するためには製鉄時のエネルギー状態よりさらに  $\Delta G^*$  だけエネルギーの高い状態を経なければならないとされており、この  $\Delta G^*$  を自由エネルギーバリア (free energy barrier) と称している。この  $\Delta G^*$  は鉄の腐食速度を決定する一つのパラメータであると考えられ、腐食速度に関して以下に示す (3.2) 式が提唱されている<sup>3)</sup>。

$$v = k_{corr} \cdot [\text{reactants}] \quad (3.2)$$

ここに、 $v$  : 腐食速度  
 $k_{corr}$  : 速度定数  
 $[\text{reactants}]$  : 反応物質の濃度  
 また、速度定数 ( $k_{corr}$ ) は次式で与えられている。

$$k_{corr} = A \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G^*}{RT}\right) \quad (3.3)$$

ここに、 $A$  : 定数  
 $R$  : 気体定数  
 $T$  : 絶対温度

(3.2) 式および (3.3) 式において示されているのは、自由エネルギーバリア ( $\Delta G^*$ ) が大きいほど腐食速度が小さくなり、絶対温度 ( $T$ ) が大きいほど腐食速度が大きくなるという傾向である。一方、図-3.1において示される  $\Delta G$ 、すなわち製鉄のエネルギーと腐食生成物のエネルギーの差は腐食速度とは関係せず腐食傾向を示すパラメータであるとされている。すなわち、 $\Delta G$  が負であればその反応は自然 (自発的) に進行し、その絶対値が大きいほど反応が進行する傾向が大きくなると言われている。

(3.2) 式に示されているとおり、鉄の腐食速度は反応物質の濃度 (供給量) にも左右されることがわかる。鉄の腐食の場合、後述するようにカソード部分において水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) と酸素 ( $\text{O}_2$ ) が消費される。したがって、この両者の鉄筋表面への供給量が腐食速度に影響を及ぼすことになる。コンクリート中の鉄筋の場合、水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) の供給よりも酸素 ( $\text{O}_2$ ) の供給の方が制限される場合が多いと考えられることから、酸素 ( $\text{O}_2$ ) の供給量が支配要因になると考えられる。

### 3.2.3 腐食速度に関する電気化学理論

#### (1) 鉄の腐食理論

鉄の腐食とは、鉄筋を形成する金属鉄が鉄イオンとなり、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$  などの錆を形成する反応をさす。図-3.2に、鉄筋の表面に不動態が存在しない場合の腐食反応の概略を示す<sup>3)</sup>。金属鉄はアノード部において鉄イオンとなり溶解する ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ )。この時生じた電子は金属中をカソード部へ移動し水と酸素と反応し水酸イオンを形成する ( $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ )。水酸イオンはコンクリート中をカソード部からアノード部へ移動し、 $\text{Fe}^{2+}$  イオンと反応し、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$  を形成する。 $\text{Fe}(\text{OH})_2$  は酸素と反応し、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  あるいは  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  を形成する。このような酸化鉄がいわゆる錆と呼ばれている。

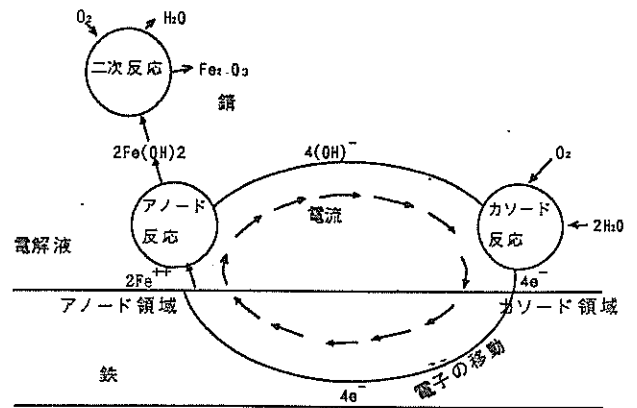


図-3.2 腐食反応の概略

#### (2) 電極反応の反応速度理論<sup>3)</sup>

本項においては、電極反応に関与する化学種が制約を受けない場合の電極反応速度の電気化学理論をレビューする。図-3.3に電極反応のカソード電流とアノード電流の模式図を示す。図中の  $\phi_{eq}$  は平衡時に電極が示す電位をさしている。また、 $i_0$  を交換電流 (交換電流密度で表示する場合もある) と称し、 $i_0 = i_a = i_c$  ( $i_a > 0$ ,  $i_c > 0$ ) となる。なお、添字  $a$  はアノード電流を意味し、添字  $c$  はカソード電流を意味する。鉄の腐食系を考える場合は  $i_0$  を  $I_{corr}$  (腐食電流) と表示することが多い。

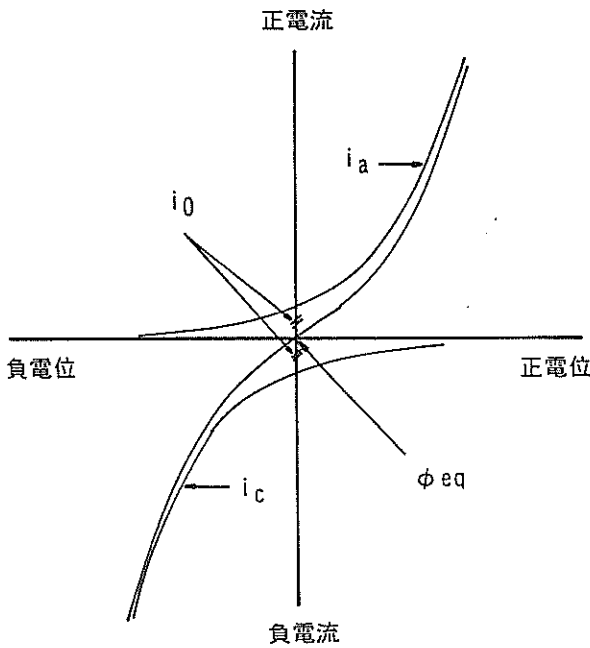


図-3.3 電極反応のカソード電流とアノード電流の模式図

電極反応速度は、電位、反応物および生成物の濃度、圧力、湿度などの関数となる。ここで、Tafel定数と呼ばれるものが(3.4)式および(3.5)式で定義されている。

$$\alpha_a = -\frac{R \cdot T}{F} \left( \frac{\partial \ln i_a}{\partial \phi} \right)_{a_k, T} \quad (3.4)$$

$$\alpha_c = \frac{R \cdot T}{F} \left( \frac{\partial \ln i_c}{\partial \phi} \right)_{a_k, T} \quad (3.5)$$

ここで、 $\alpha$  : Tafel定数  
 $R$  : 気体定数  
 $T$  : 絶対温度  
 $F$  : ファラデー定数  
 $a_k$  : 全化学種の活量(濃度)を一定に保つことを意味する

Tafel定数は電極反応により生じる電流の電位依存性を示すパラメーターである。

また、化学種 $k$ の反応次数と呼ばれるものが(3.6)式および(3.7)式で定義されている。

$$Z_{k,a} = \left( \frac{\partial \ln i_a}{\partial \ln a_k} \right)_{\phi, a_l, T} \quad (3.6)$$

$$Z_{k,c} = \left( \frac{\partial \ln i_c}{\partial \ln a_k} \right)_{\phi, a_l, T} \quad (3.7)$$

添字 $a_l$ は $k$ 以外の反応に関与する化学種の活量(濃度)を一定に保つことを意味する。反応次数は電極反応により生じる電流の濃度依存性を示すパラメーターである。

このTafel定数および反応次数を用いて、反応速度、すなわちアノード電流とカソード電流を(3.8)式および(3.9)式で与えている。

$$i_a = k_a \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_a \cdot F \cdot \phi}{R \cdot T}\right) \cdot \prod_k a_k^{z_{k,a}} \quad (3.8)$$

$$i_c = k_c \cdot \exp\left(\frac{\alpha_c \cdot F \cdot \phi}{R \cdot T}\right) \cdot \prod_k a_k^{z_{k,c}} \quad (3.9)$$

ここで、 $k_a$ および $k_c$ は速度定数と呼ばれているが、(3.3)式で示されている速度定数とは異なる。 $\phi = \phi_{eq}$ において $i_a = i_c = i_0$ 、 $\eta = \phi - \phi_{eq}$ を(3.8)式および(3.9)式に代入することにより(3.10)式を得る。

$$i = i_0 \left[ \exp\left(\frac{\alpha_c \cdot F \cdot \eta}{R \cdot T}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_a \cdot F \cdot \eta}{R \cdot T}\right) \right] \quad (3.10)$$

ここで、 $\eta = \phi - \phi_{eq}$ が、 $|\eta| \ll RT / \alpha_a \cdot F$ 、ならば、 $|\eta| \ll RT / \alpha_c \cdot F$ 、であれば(3.10)式の指数項を展開し高次項を省略することにより(3.11)式を得る。

$$i = \frac{i_0 \cdot F \cdot (\alpha_c + \alpha_a)}{R \cdot T} \eta \quad (3.11)$$

ここで、電荷移動抵抗あるいは分極抵抗と呼ばれるものが(3.12)式で定義されている。

$$R_p = \frac{\eta}{i} \quad (3.12)$$

(3.11)式および(3.12)式より(3.13)式を得る。

$$R_p = \frac{R \cdot T}{F(\alpha_a + \alpha_c) \cdot i_0} \quad (3.13)$$

(3.13)式よりわかるとおり、分極抵抗 $R_0$ は電極反応速度 $i_0$ と関係しているパラメータであり、何らかの方法で $R_0$ を求めることができれば(3.14)式により $i_0$  (腐食電流に相当)を求めることができる。

$$i_0 = \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R \cdot T}{F(\alpha_a + \alpha_c)} \quad (3.14)$$

電気化学における電極反応速度に関する理論の概要は以上のように説明されている。これより、(3.3)式で示される速度定数 $k_{corr}$ は、電気化学的には分極抵抗と密接な関係にあるものと考えられる。

### 3.3 本研究における環境要因の定量的評価手法

#### 3.3.1 評価手法の基本的考え方

モルタル供試体を用いた環境要因評価の基本的な考え方を図-3.4に示す。図-3.4に示すように、内部に鉄筋を埋設した円柱形のモルタル供試体を異なる環境下に一定期間暴露し、その後供試体の変化を数種の観点から試験する。その試験結果を解析することにより環境要因の定量的評価を行うものである。すなわち、暴露環境の影響を供試体に吸収させて、一定期間の暴露の後に供試体が吸収した環境条件の情報を種々の試験を通じて取り出すという考え方である。本研究においては、供試体を全国の19の港湾内に2年間暴露した後にその性状を、モルタル中への塩化物イオンの浸入、鉄筋の腐食および鉄筋への酸素供給量の3つの観点から調べた。その結果をもとに環境条件の定量的評価を試みた。

#### 3.3.2 本研究における「系」「環境」「境界」の定義

通常、対象とする系(system)が存在する場合に、その系を囲む周囲を環境(surroundingまたはenvironment)と

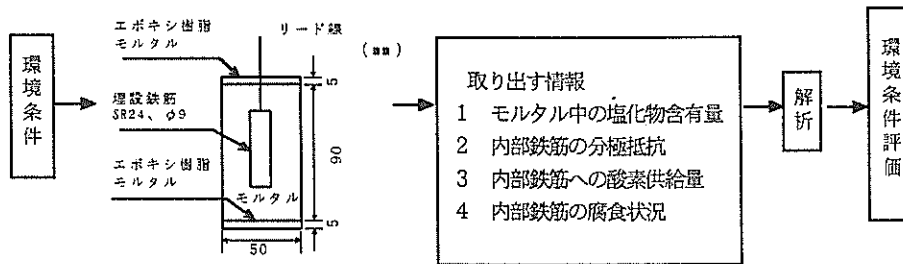


図-3.4 環境条件評価の基本的な考え方およびモルタル供試体の概要

呼んでいる。また、系と環境の接触面を境界(boundary)と呼ぶ。本研究において論を進めるためにはこの三者をはっきりと定義しておくことが必要である。図-3.5に本研究で用いたモルタル供試体の場合の境界に関する三つ考え方を示す。一つ目は同図中において「境界①」で示されるように、鉄筋とモルタルの接触面を境界とする考え方である。この考え方は、鉄筋の腐食のみを実験の対象とする場合に適用される考え方であり、モルタルの品質(透水性、かぶり厚さなど)、モルタル中の塩化物含有量なども環境条件の中に含まれることになる。二つ目は、図中において「境界②」で示されるようにモルタル表面と外部との接触面を境界とするものである。この場合は、厳密に言えばモルタル表面に付着している塩化物は環境に含まれることになる。いま一つは、「境界③」で示されるようにモルタル表面からわずかに外側に存在する仮想面を境界とするものである。本研究においてはモルタル表面の付着塩分も系を含めて取り扱うことを考慮し、「境界③」すなわちモルタル表面のわずかに外側の仮想面を本研究における境界と定義することとする。

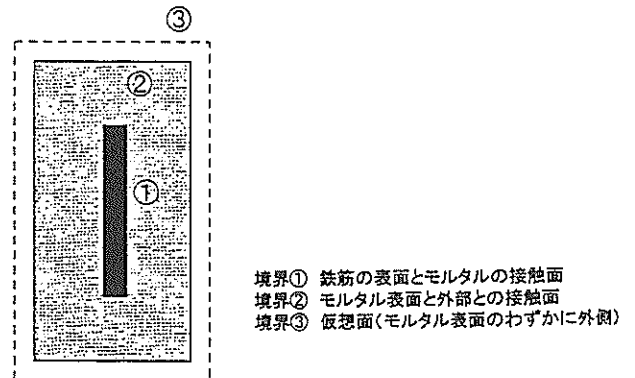


図-3.5 境界に関する3つの考え方

### 3.3.3 環境要因の定量的評価の手順

本研究において実施した環境要因の定量的評価の手順を以下に示す。まず、暴露後の供試体の試験結果をもとに、モルタル中の鉄筋の腐食量を推定するための腐食量指標を検討した。次に、腐食量指標の構成要素と気象条件、波浪条件、海水成分条件との相互関係について検討を行った。その結果をもとに環境条件の総合的な評価の方法について検討した。各々の内容を順次以下に示す。

#### (1) 腐食量指標の検討

腐食量算定の基礎式は(3.1)式に示すように、腐食速度と腐食進行期間の2つのパラメータより構成されている。また、腐食速度の基礎式は(3.2)式で示されるように、速度定数と反応物質の濃度(供給量)の積で示される。コンクリート中の鉄筋の場合、腐食進行期間はコンクリート中の塩化物含有量によりほぼ決定されると考えられる。また、速度定数は鉄筋表面の不動態の状況に大きく影響されると考えられ、反応物質の濃度は酸素の供給量が支配要因になるものと考えられる。したがって、これら3つのパラメータに関する情報を供試体より取得し、それに基づき腐食量指標を考察した。最終的には実際の腐食量と腐食量指標を比較検討し、その妥当性を確かめた。図-3.6に上記手順のフローを示す。図-3.6に示すように、モルタル中の塩化物含有量より腐食進行期間を推定する。また、分極抵抗より速度定数に関する情報を、定電位ステップ試験より酸素供給量に関する情報を得る。そして、分極抵抗の結果と定電位ステップ試験の結果を総合的に評価することにより、腐食速度に関する情報とする。そして、腐食進行期間と腐食速度の両者を加味した腐食量指標を考察する。以上が腐食量指標の考察の一連の手順である。この腐食量指標決定の詳細に関しては4章において詳述する。

#### (2) 腐食量指標と環境要因の相互関係の検討

前項(1)において述べたように、まず腐食進行期間および腐食速度より構成される腐食量指標を考察する。この腐食量指標は、モルタル中の塩化物含有量、モルタル

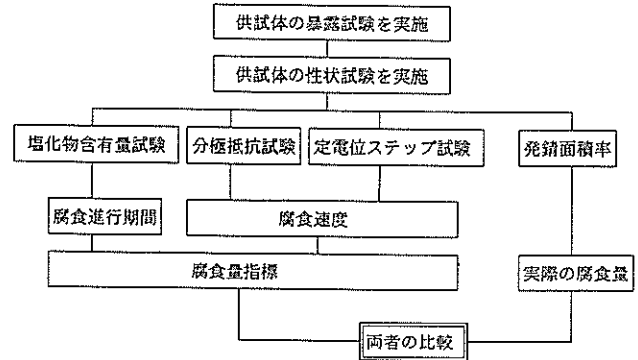


図-3.6 腐食量指標の検討手順

中鉄筋の分極抵抗、および定電位ステップ試験の計測結果より構成されている。したがって、次のステップとして各種の環境要因とこれらの試験結果の相互関係を検討する。検討の基本的考え方を図-3.7に示す。図に示すように、塩化物含有量試験、分極抵抗試験および定電位ステップ試験の各計測結果と環境要因との相互関係について検討する。この検討結果をもとに、腐食進行期間に影響を及ぼす環境要因、モルタル中鉄筋の不動態の状態に影響を及ぼす環境要因、ならびにモルタル中鉄筋への酸素供給量に影響を及ぼす環境要因について考察する。この検討の詳細は5章において詳述する。

#### (3) 最終的な環境条件の評価法の検討

前項(1)(2)の結果をもとに、最終的な環境条件の評価方法を検討する。その検討の手順を図-3.8に示す。まず初めに構造物が設置される場所の環境要因に基づき、腐食進行期間(腐食開始時刻より求める)、鉄筋表面の不動態の状態および酸素供給量を推定する。次に鉄筋表面の不動態の状態と酸素供給量より腐食速度を推定し、腐食速度と腐食進行期間とを併せて考察することにより腐食量(腐食量指標)を推定する。最後に、腐食量の推定結果に基づいた総合的な環境条件の評価を行うというものである。この検討手順および検討結果の詳細については6章において詳述する。

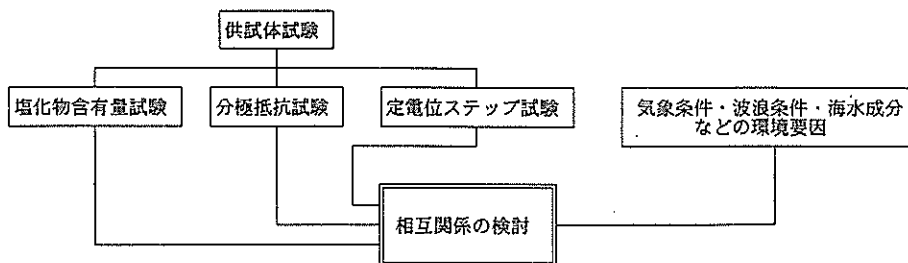


図-3.7 環境要因と腐食量指標構成要素の相互関係の検討

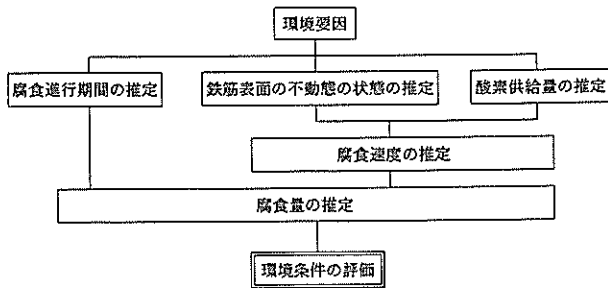


図-3.8 環境要因の評価法の検討手順

### 3.4 暴露対象港の概要および供試体の暴露方法

#### 3.4.1 暴露対象港一覧および暴露実施時期

表-3.1および図-3.9に供試体の暴露を実施した港の一覧を示す。実環境18ヶ所、人工環境1ヶ所の合計19ヶ所である。図-3.9よりわかるとおり、港の選択に際しては日本全国をほぼ網羅するように留意した。また、暴露を実施した各港には運輸省港湾建設局、北海道開発庁開発局および総理府沖縄総合事務局の港湾工事事務所が配置されており、供試体の暴露を行う際にはそれぞれの事務所の協力を得た。

表-3.1 暴露を実施した港の一覧

地域	面している海洋	港名	飛沫部のかえり波の有無
北海道	日本海	小樽	
	太平洋	苫小牧	
東北	日本海	秋田	無
	太平洋	宮古	
		塩釜	無
北陸	日本海	伏木富山	無
関東	太平洋	横浜	無
東海	太平洋	清水	無
		名古屋	無
関西	日本海	舞鶴	
	瀬戸内海	神戸	有
四国	太平洋	小松島	
中国	瀬戸内海	広島	無
九州	日本海	北九州	無
	太平洋	油津	無
		鹿児島	無
沖縄	太平洋 (東シナ海)	那覇	有
		石垣	無
人工環境		港湾技術研究所 (循環水槽)	

空欄は情報なし

図-3.10に供試体の暴露を実施した時期を示す。1989年10月に供試体を各港の暴露場所に設置し暴露を開始した。6ヶ月供試体はその後1990年3月に、1年供試体は1990年10月に、2年供試体は1991年10月にそれぞれ暴露場所より引き揚げ、港湾技術研究所に搬送し各種の試験を実施した。

#### 3.4.2 暴露方法の標準

図-3.11に供試体の暴露方法の標準を示す。図に示すように栈橋施設を設置場所の対象とし、「飛沫部」はHigh Water Level (満潮位, 最高潮位) より50cm上方, 「干満部」はMean Water Level (平均潮位) 近傍, 「海中部」はLow Water Level (干潮位, 最低潮位) より1m下方を暴露場所の標準とした。ただし、各港の暴露を実施した施設の構造条件がそれぞれ異なるため、実際の暴露方法は各港ごとに幾分異なるものとなった。また、「陸上部」は港湾区域内において潮風(海風)の影響は受けるものの、波しぶきは直接受けけない場所を暴露場所の標準とした。

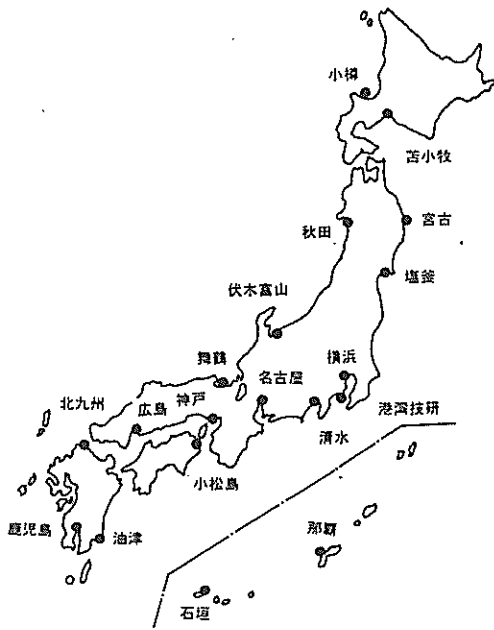


図-3.9 供試体の暴露を実施した港の配置

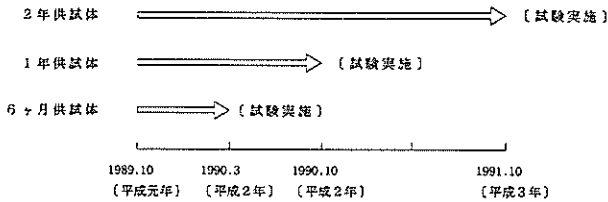


図-3.10 供試体の暴露を実施した時期

### 3.4.3 各港の気象・海象条件

#### (1) 各港の気象条件<sup>1)~27)</sup>

暴露を実施した大部分の港においては気象庁の定常観測地点が存在したが、塩釜港、清水港、北九州港および小松島港には気象庁の観測地点が存在しなかった。これらの港に関しては最寄りの観測地点、すなわち塩釜港の

場合は石巻、清水港の場合は御前崎、北九州港の場合は下関、小松島港の場合は徳島における気象観測データをそれぞれ用いた。情報収集を行った気象条件の項目ならびにその定義を以下に示す。

#### a) 月間平均気温

一日24回の計測データの平均値を日平均気温と定義し、日平均気温の月間の平均値を月間平均気温と定義している。単位は「℃」である。

#### b) 日最高気温の月間平均

一日の任意時刻の最高気温を日最高気温と定義し、日最高気温の月間の平均値を日最高気温の月間平均と定義している。単位は「℃」である。

#### c) 月間平均湿度

一日24回の計測データの平均値を日平均湿度と定義し、日平均湿度の月間の平均値を月間平均湿度と定義している。単位は「%」である。

#### d) 月間平均風速

一日の計測結果、すなわち一日の全行程の観測データの平均値を日平均風速と定義し、日平均風速の月間の平均値を月間平均風速と定義している。単位は「m/s」である。

#### e) 月間最大風速

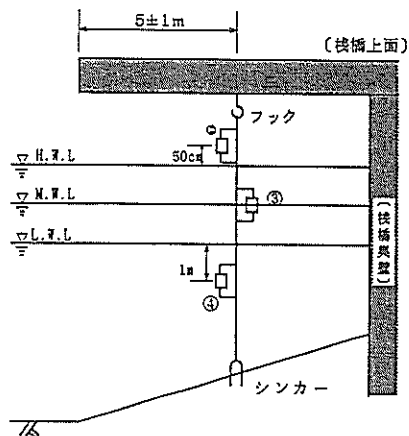
10分間ごとの最大風速の中で、日間最大値を日最大風速と定義し、その中のさらに月間の最大値を月間最大風速と定義している。単位は「m/s」である。

#### f) 月間日照時間

一日の日照時間の月間合計を月間日照時間と定義している。単位は「時間」である。

#### g) 月間降水量

一日の合計降水量の月間合計を月間降水量と定義している。単位は「mm」である。



#### 設置位置

- (I) ステンレスロープ  
桟橋先端より 5 ± 1 m とする
- (II) 飛沫部②  
H.W.L.より 50cm上方 とする
- (III) 干潮部③  
M.W.L.とする
- (IV) 海中部④  
L.W.L.より 1m下方 とする

図-3.11 供試体の暴露方法の標準



表-3.2 各港の気象条件

	期間 (月)	気温 (°C)		湿度 (%)	風速 (m/s)		日照 時間 (時間)	降水量 (mm)
		平均	最高		平均風速	最大風速		
小樽	24	229.6	318.2	1697.0	63.6	242.4	3552.6	2288.0
苫小牧	24	208.8	301.6	1826.0	75.3	282.9	3622.8	2582.3
秋田	24	294.4	384.3	1737.0	103.2	363.1	3175.9	3801.5
宮古	24	276.1	391.0	1728.0	54.7	227.5	3716.5	3161.0
塩釜 (石巻)	24	295.7	387.2	1809.0	93.9	341.2	3826.6	2382.0
伏木富山	24	344.0	436.3	1792.0	65.1	249.3	3132.8	3965.5
名古屋	24	391.1	502.1	1617.0	72.0	270.5	4188.8	3628.0
清水(御前崎)	24	399.0	479.3	1727.0	114.0	364.7	4457.6	4629.3
横浜	24	390.0	481.9	1647.0	87.2	300.7	3864.6	3649.0
舞鶴	24	357.2	469.8	1822.0	54.2	262.8	3019.6	3686.1
北九州 (下関)	24	403.7	474.7	1632.4	82.7	320.7	3516.0	3590.5
広島	24	399.6	506.8	1601.7	95.4	358.8	3941.8	3510.0
神戸	24	394.7	493.6	1577.6	84.2	329.8	3898.7	2522.0
鹿児島	24	444.4	548.1	1652.9	61.6	239.5	3868.1	4621.5
油津	24	441.2	534.1	1707.1	112.7	393.3	3917.2	5186.0
小松島 (徳島)	24	406.3	502.1	1553.9	74.4	277.4	4080.4	3302.0
石垣島	24	583.0	642.6	1787.9	117.3	326.8	3786.1	4432.5
那覇	24	556.0	620.8	1700.9	133.6	393.9	3591.3	3668.5

表-3.3 海水の成分分析方法の規準一覧

項目	分析方法
比重	JIS K 2249 I形浮きはかり法
PH	JIS K 0102 ガラス電極法
Na	JIS K 0102 フレーム光度法
K	JIS K 0102 フレーム光度法
Ca	JIS K 0102 原子吸光法
Cl <sup>-</sup>	JIS K 0102 滴定法
SO <sub>4</sub>	JIS K 0102 重量法
Mg	JIS K 0102 原子吸光法

表-3.2に各港の気象条件を示す。なお、表-3.2は上述した観測項目の24ヶ月間(1989.10~1991.9)の合計値を示している。

(2) 各港の海水の成分

表-3.3に各成分の分析方法の規準一覧を示す。各成分の分析方法は表-3.3に示す規準に明記されているため本文中においてはその詳細の説明は割愛する。なお、分析に用いるための海水試料としては港内の岸壁近傍より1リットル程度採取したものをを用いた。表-3.4に各港の海水の成分分析結果を示す。海水の成分分析は1991年1月(冬季)、1991年4月(春期)、1991年7月(夏期)、1991年10月(秋期)の4回実施した。表-3.4に示す分析値はこれらの4データの平均値である。

(3) 各港の波浪条件

a) 暴露地点におけるかえり波の有無

前出の表-3.1に各港の暴露地点における「かえり波」

の有無についても示している。大部分の港においてはかえり波を受けない場所に暴露されたが、鹿児島港と那覇港の場合は岸壁の壁面に供試体を設置したために、かえり波というよりもむしろ砕波による飛沫の影響を受ける環境であった。

b) 各港の波浪の観測記録

波浪に関する情報は文献<sup>28)~30)</sup>より求めた。港湾技術研究所においては全国の代表港よりいくつかの港を選定し定常波浪観測を実施している。モルタル供試体を暴露した港の波浪データが存在する場合はそのデータを集め、供試体を暴露した港に波浪データが存在しない場合はその最寄りの港における観測データを集めた。表-3.5に波浪データの取得状況を示す。表中に示す一次データとは暴露対象港における波浪観測記録が存在するものであり、苫小牧港、秋田港、宮古港、神戸港、油津港、鹿児島港、および那覇港においてデータが得られている。一方、二次データとは暴露を実施した港の最寄りの港における波浪データが存在するものであり、小樽港(留萌港観測)、塩釜港(仙台港観測)、横浜港(浜金谷港観測)、清水港(御前崎観測)、舞鶴港(福井港観測)、小松島港(御坊沖観測)、および北九州港(玄界灘観測)においてデータが得られている。なお、二次データの信頼性は未知であるため、後述する解析においては一次データの補助的な役割を果たすものと位置づけている。

表-3.6に波浪データを取りまとめたものを示す。文献<sup>28)~30)</sup>においては観測対象港において20分ごとに観測した有義波に関する記録が総括されている。波に関する諸量

表-3.4 海水の成分分析の結果

	比重	PH	海水成分 (ppm)					
			Na	K	Ca	Mg	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub>
秋田	1.005	7.4	2877.5	95.2	140.7	432.8	4907.5	711.8
伏木富山	1.012	7.7	5401.0	195.9	230.5	614.6	9715.0	1409.5
横浜	1.021	7.9	8942.0	314.0	363.5	1115.0	15825.0	2227.5
塩釜	1.023	7.9	9765.0	341.8	399.0	1177.5	17225.0	2462.5
宮古	1.020	7.6	8952.5	308.5	382.8	1135.8	15675.0	2252.5
広島	1.020	7.8	8490.0	287.0	363.8	1065.5	14870.0	2095.0
小松島	1.021	8.1	9237.0	313.5	385.5	1105.0	15975.0	2282.5
神戸	1.021	8.0	9062.0	316.3	384.5	1122.5	16125.0	2315.0
舞鶴	1.022	8.1	9400.0	329.3	389.8	1122.5	16575.0	2362.5
北九州	1.024	8.2	10167.5	366.5	423.0	1240.0	18125.0	2597.5
鹿児島	1.024	8.2	10080.0	365.5	416.8	1215.0	18175.0	2570.0
油津	1.024	8.2	10575.0	380.8	420.3	1267.5	18900.0	2677.5
名古屋	1.012	7.3	5682.5	194.8	255.9	797.8	9940.0	1439.8
清水	1.014	7.6	6557.5	210.5	296.8	895.3	10917.5	1570.0
小樽	1.022	7.9	9342.5	334.3	391.0	1185.3	16800.0	2417.5
苫小牧	1.023	7.8	9872.5	360.8	399.0	1195.0	17700.0	2535.0
那覇	1.024	8.1	10575.0	382.8	419.5	1272.5	19150.0	2695.0
石垣	1.025	8.3	10800.0	392.5	424.8	1292.5	19625.0	2757.5
港湾技術 研究所 (循環水槽)	1.023	7.8	9345.3	343.8	351.0	1142.3	17189.3	2350.0

表-3.5 波浪データの取得状況

一次データ	苫小牧港	秋田港	宮古港	神戸港	油津港	鹿児島港	那覇港
二次データ	小樽港 (留萌港観測)	塩釜港 (仙台港観測)	横浜港 (浜金谷港観測)	清水港 (御前崎港観測)	舞鶴港 (福井港観測)	小松島港 (御坊沖観測)	北九州港 (玄界灘観測)
データなし	伏木富山港	名古屋港	広島港	石垣港			

表-3.6 各港の波浪記録 (波高/周期)

		24ヶ月の合計値	
		最大有義波	平均有義波
一次データ	苫小牧	8.94	2.58
	秋田	11.59	4.46
	宮古	5.88	1.83
	神戸	7.17	2.75
	油津	9.33	3.49
	鹿児島	6.64	1.02
	那覇	9.49	3.59
二次データ	小樽 (留萌)	10.29	4.31
	塩釜 (仙台)	6.81	2.33
	京浜 (浜金谷)	8.05	2.64
	清水 (御前崎)	7.62	2.97
	舞鶴 (福井)	9.54	3.70
	小松島 (御坊崎)	10.26	3.47
	北九州 (玄海灘)	10.21	4.35

のうちで特に重要な項目は波高と頻度 (回数) であると考えられる。本研究においては対象波高として最大有義波 ( $H_{max1/3}$ : 単位m) と平均有義波 ( $H_{1/3}$ : 単位m) を取り上げた。また、波浪の頻度 (回数) は周期 ( $T_{1/3}$ : 単位S) の逆数で表わすことができる。したがって、波浪の影響の程度を表す指標として、波高を周期で除した値 ( $H/T$ ) を採用した。表-3.6は最大有義波および平均有義波の  $H/T$  の各月における計算値を24ヶ月間で合計した値を示している。

### 3.5 モルタル供試体の概要および試験方法

#### 3.5.1 供試体の概要

##### (1) 形状および寸法

前出の図-3.4にモルタル供試体の形状および寸法を示している。暴露を行ったモルタル供試体は、寸法がφ50×100mmの円柱型供試体である。モルタル部分の長さは90mmであり、モルタルの上下両端は厚さ5mmのエポキシ樹脂モルタルのカバーを接着している。エポキシ樹脂モルタルの材料の混合比率は、エポキシ樹脂：豊浦標準砂

表-3.7 セメントの物理的性質および化学的性質

比重	比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	圧縮強さ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )			MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Ig. Loss (%)	塩素 (%)
		3日	7日	28日				
3.16	3180	140	238	420	1.4	2.1	0.7	0.006

表-3.8 鉄筋の化学的性質

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
0.012	0.02	0.049	0.0020	0.0021

表-3.9 供試体に関する試験項目

モルタルに関して	1. 塩化物含有量試験 (拡散係数の算出) 2. モルタルの電気抵抗試験
埋設鉄筋に関して	1. 分極抵抗試験 2. 定電位ステップ試験 3. 発錆面積率試験

が質量比で 1 : 3 である。上下両面にエポキシ樹脂モルタルを接着した目的は、海水の浸入面を供試体の側面に限定するためである。また、図-3.4 に示すように、供試体の中央部に、リード線をハンダ付けした  $\phi 9\text{mm}$ 、長さ 50mm の丸鋼 (SR235) を埋設した。なお、埋設鉄筋は予めクエン酸二アンモニウム溶液に浸せきし黒皮を除去した後、光沢の出ている状態で埋設した。また、電流の漏えいを防止するために鉄筋へのリード線のハンダ付け部分をエポキシ樹脂により保護した。

(2) モルタルの製作に使用した材料

モルタルの製作に使用した材料は、セメントが普通ポルトランドセメント (比重 3.16, 比表面積  $3180 \text{ cm}^2/\text{g}$ )、細骨材が豊浦標準砂、練混ぜ水が水道水である。モルタルの配合は、「セメント : 砂 : 水」の質量比が「1 : 1.8 : 0.5」である。材齢 7 日における圧縮強度は  $377 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 、曲げ強度は  $76.4 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  である。使用したセメントの物理的性質および化学的性質を表-3.7 に、また使用した鋼材の化学的性質を表-3.8 に示す。

3.5.2 試験項目および試験方法

(1) 試験項目

2 年間の暴露後のモルタル供試体に関する試験項目を表-3.9 に示す。試験項目はモルタル自身に関するものと埋設鉄筋に関するものの 2 種類に大別される。モルタルに関する試験は、モルタル中の塩化物含有量試験およびモルタルの電気抵抗試験の 2 項目である。一方、モルタル中に埋設された鉄筋に関する試験項目は、分極抵抗試験、定電位ステップ試験、および供試体を割裂し目視により観察した発錆面積率試験である。

(2) 塩化物含有量試験

まず、円柱供試体を鉄筋軸方向に割裂し、鉄筋の周囲 (かぶり厚が約 20mm) およびモルタルの表層近傍 (かぶり厚が 0~5mm) からモルタル塊を採取した。採取したモルタル塊の粉碎微粉末を試料とし、JCI (日本コンクリート工学協会) 法<sup>31)</sup>に準拠して、全塩化物含有量 (酸可溶性塩化物含有量) の定量分析を行った。JCI に示されている手順は以下のとおりである。微粉末試料 0.2~1.0g に硝酸溶液 (2N) を加え、溶液の pH を 3 以下とする。その溶液に過酸化水素水 (30%) を 1ml 加え、加熱煮沸して全塩分を溶解する。その後、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定装置を使用し、1/200N (規定濃度) の硝酸銀標準液で滴定する。なお、本研究において用いた塩化物含有量の単位はセメントに対する塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) の質量パーセントである。

(3) 塩分拡散係数の算出

モルタル中の塩化物含有量の実測値 (6ヶ月時, 12ヶ月時, 24ヶ月時の計測値) をもとに見掛けの塩分拡散係数を算出した。拡散係数の算出に際しては無限円柱の熱伝導 (熱拡散) の理論を応用した。以下にその理論の概要を示すが、詳細は参考文献<sup>32)</sup>などに明記されているものである。

円柱の長さは半無限であると仮定し、塩分分布が長さ方向で一様、かつ任意の断面内の分布形状は図-3.12 に

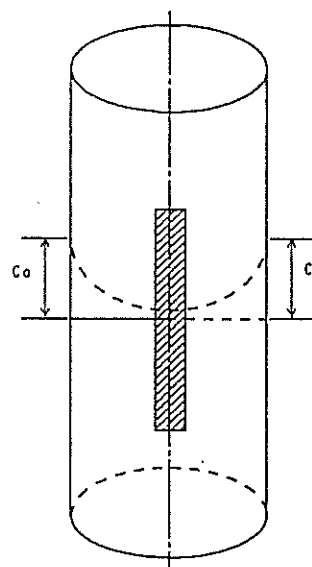


図-3.12 拡散係数算出の際の塩分分布の仮定

に示すようであると仮定すると、塩分分布形状は以下の(3.15)式で表わすことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (3.15)$$

ここに、C : (r, t)におけるモルタル中の塩化物含有量

$\kappa$  : 拡散係数

t : 時間 (暴露期間)

r : 円柱の中心からの距離

ただし、(3.15)式は座標系として円筒座標系を用いている。以下、若干の複雑な解法を必要とするが、その詳細は本文では割愛する。(3.15)式の解は(3.16)式で与えられる。

$$C = C_0 - 2C_0 \sum_{\alpha} \frac{1}{\alpha J_1(\alpha)} e^{-\frac{\alpha^2}{a^2} t} J_0\left(\frac{\alpha}{a} r\right) \quad (3.16)$$

ここに、 $C_0$  : モルタルの表面部分の塩化物含有量

a : 円柱の半径 (=2.5cm)

(3.16)式中の $J_n(x)$ はn次の第1種ベッセル関数と呼ばれるものであり、その定義は(3.17)式で示される。

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{n+2k} \quad (3.17)$$

図-3.13に $J_0(x)$ と $J_1(x)$ の関数形を示す。図-3.13に示されるように、xが大きくなるにしたがってyは零に収束していく。この(3.16)式を用いて拡散係数( $\kappa$ )を求めた。拡散係数の算出に際してはコンピュータプログラムを作成し、図-3.14に示す計算手順で拡散係数を求めた。すなわち、ある範囲の拡散係数と表面塩化物含有量を順次(3.16)式に代入し実際の塩化物含有量と計算値の誤差(差の平方和)が最小となるような拡散係数と表面塩化物含有量を求めた。なお、全体的に誤差の最小値(二乗値)は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ のオーダーであった。また、計算の際に

は(3.16)式における $\alpha$ は、 $\alpha_1 \sim \alpha_{16}$ までの16個を使用した。

#### (4) モルタルの電気抵抗試験

モルタルの電気抵抗の計測システムを図-3.15に示す。計測を実施する前に予め供試体を24時間水道水に浸せきした。水道水に浸せきした供試体中の鉄筋とステンレス鋼板間の抵抗をLCRメータを用いて計測した。なお、計測時のLCRメータの交流電流の周波数は100Hzである。本測定法によれば、厳密にはモルタルの抵抗と水道水の抵抗の和を計測していることになるが、本研究においてはこのシステムで計測した抵抗値をモルタルの抵抗値として取り扱った。

#### (5) 分極抵抗試験

本研究における分極抵抗の計測システムを図-3.16に示す。図に示すように、計測システムは3電極方式であり、照合電極として飽和カロメル電極、対極としてステンレス鋼板を使用した。計測装置としてポテンシオスタット、信号発生装置としてファンクションジェネレータ、記録装置としてX-Yレコーダを用いた。また、計測時の供試体の浸せき溶液として水道水を使用した。

計測の手順は以下のとおりである。まず、供試体を24時間水道水に浸せきした。その後、自然電位の計測を行いその自然電位を起点として $\pm 5\text{mV}$ 、すなわち、[自然電位]  $\rightarrow$  [自然電位+5mV]  $\rightarrow$  [自然電位-5mV]  $\rightarrow$  [自然電位]という順序で電位を掃引し、掃引時に鉄筋に流出入する電流を計測した。なお、電位の掃引速度は40mV/secと設定した。図-3.17に分極抵抗の計測結果の一例を示す。図に示すように、計測結果がリニアな形状を示す場合とそうでない場合とがあった。分極抵抗が小さい場合、すなわち計測される分極抵抗が約1000 $\Omega$ 以下の場合にはリニアではない結果を示した。この場合、分極抵抗の計算方法が難しくなるが、本研究においては $\Delta V=5\text{mV}$ における電流値を $\Delta I$ とし、 $R_p = \Delta V / \Delta I$ を分極抵抗として計算した。

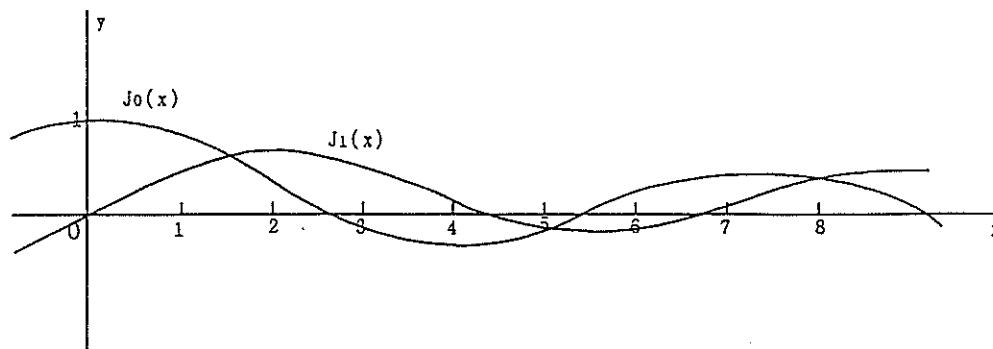


図-3.13 第1種ベッセル関数の $J_0(x)$ と $J_1(x)$ の形状

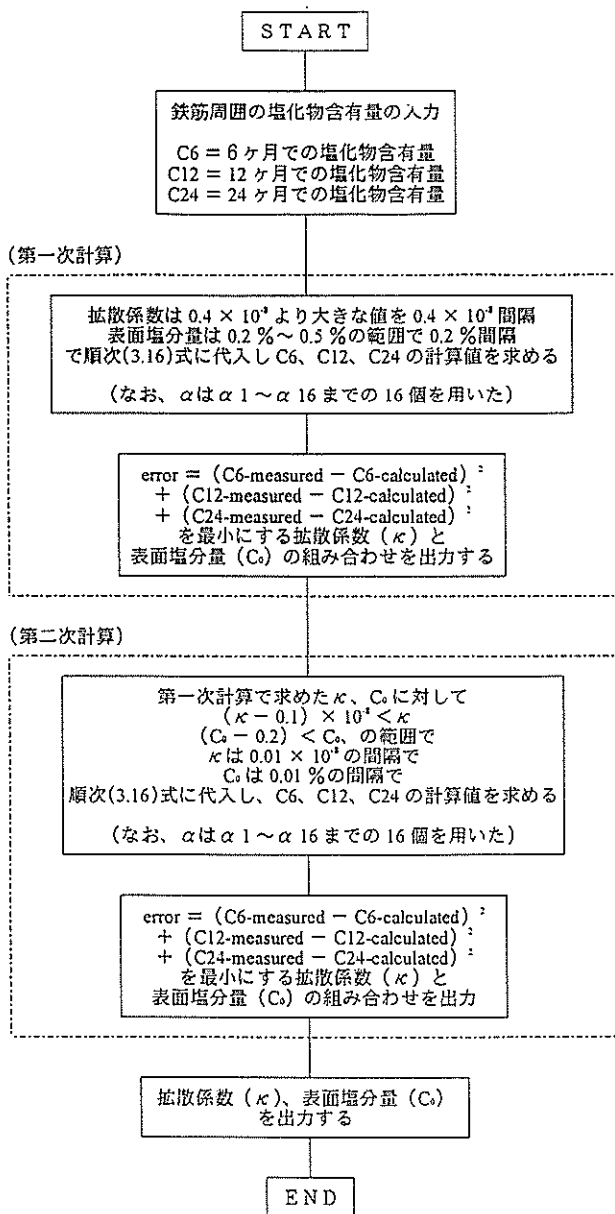


図-3.14 拡散係数算出の手順

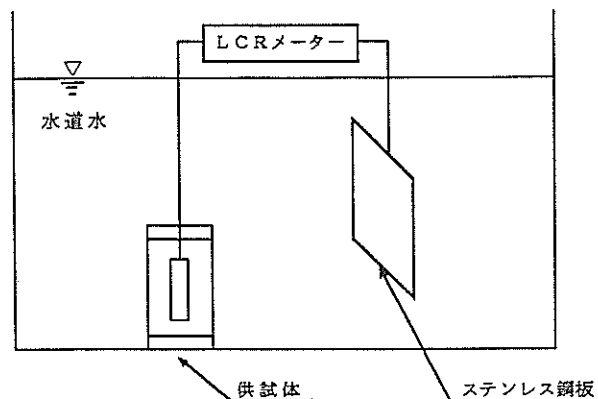


図-3.15 モルタルの電気抵抗の計測システム

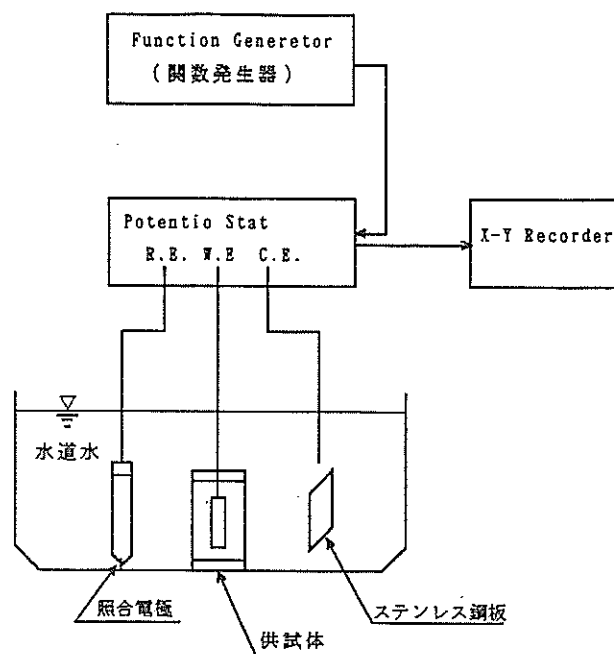


図-3.16 分極抵抗試験および定電位ステップ試験の計測システム

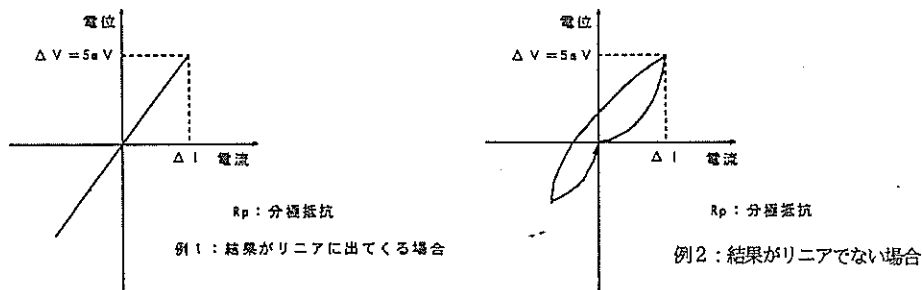


図-3.17 分極抵抗計測の計測結果の一例

以下に、分極抵抗と腐食速度の具体的関係に関する既往の知見を簡潔にまとめる。3章の3.2.3において示したように、分極抵抗は鋼材の腐食速度と密接に関連しているパラメータの一つであり、コンクリート中に存在する鉄筋の場合でも分極抵抗は腐食速度に関して極めて有意な情報を提供することが多数報告されている<sup>33)34)35)</sup>。腐食回路に占める分極抵抗の位置づけを模式的に示せば図-3.18のようになる<sup>36)</sup>。すなわち、鉄筋とコンクリートの界面は電気を蓄えるコンデンサー的な役割を果たす部分と、鉄イオンの溶出を規定する抵抗の役割を果たす部分が無数に並列に存在すると考えられている。そして、その並列部分とコンクリートの抵抗が直列に接続されて全体の腐食回路が形成されていると考えられており、この $R_p$ に相当する部分が分極抵抗に相当すると言われている。

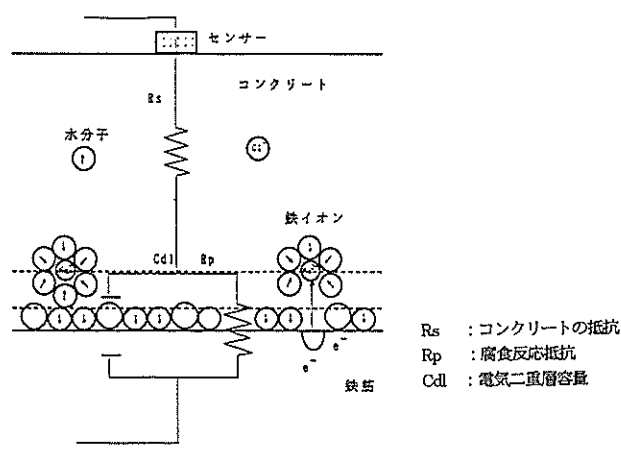


図-3.18 コンクリート中铁筋の腐食系の等価電気回路モデル

SternとGearyの提案によれば、分極抵抗と腐食電流（腐食速度）の関係は(3.18)式で表される<sup>36)</sup>。(3.18)式中の $K$ は(3.19)式で示されており、(3.19)式は(3.13)式のTafel定数をTafel係数（Tafel線の勾配）で置換することにより求められる。

$$I_{corr} = \frac{K}{R_p} \quad (3.18)$$

$$K = \frac{\beta_a \cdot \beta_b}{2.303(\beta_a + \beta_b)} \quad (3.19)$$

ここで、 $I_{corr}$  : 腐食電流 (A/cm<sup>2</sup>)

$K$  : 定数 (V)

$\beta_a$  : アノード・ターフェル係数

$\beta_b$  : カソード・ターフェル係数

$R_p$  : 分極抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )

この定数 $K$ は金属の種類あるいは環境条件により決定される。横田はコンクリート中の鉄筋の $K$ 値に関して実験的検討を行い、腐食電流が0.85~15.4  $\mu\text{A}$ の範囲に対して $K$ 値は約17~39mVであると報告している<sup>36)</sup>。以上が分極抵抗と腐食速度の具体的関係に関する現在までに得られている知見である。

(6) 定電位ステップ試験

本研究における定電位ステップ試験の計測システムは図-3.16に示す3電極方式である。分極抵抗試験の場合と同様に計測を実施する前に供試体を24時間水道水に浸せきした。鉄筋の電位を自然電位から瞬間的に照合電極に対して-1000mVに移行し、その後電位を-1000mVに保持した。そしてその間に鉄筋から流出する電流を継続的に計測した。定電位ステップ試験において得られる計測結果の模式図を図-3.19に示す。図に示すように、電位

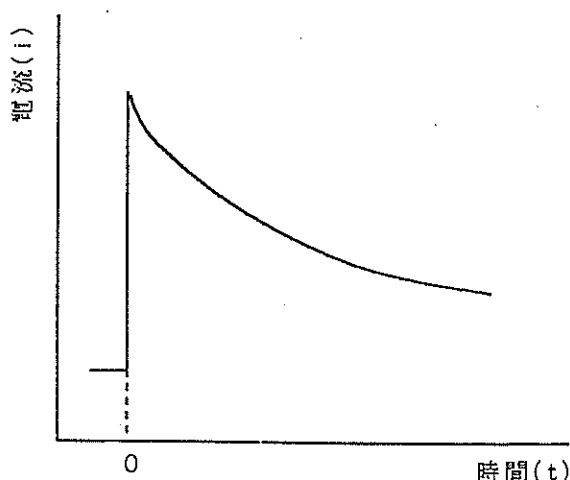


図-3.19 定電位ステップ試験により得られる電流-時間曲線の模式図

を-1000mVに移行した瞬間に電流は最大値を取り、時間の経過とともに徐々に減少し、ある程度時間が経過した後にはほぼ一定値に収束する。基本的にはこの時間-電流曲線は鉄筋への酸素の供給量に規定される。電気化学理論によれば、モルタル中での酸素の拡散が(3.20)式で示されるFickの第二法則に従い、鉄筋表面では酸素がただちに消費され濃度が0%であるという境界条件の下では、時間-電流曲線はCottrellの式と呼ばれる(3.21)式で表される<sup>37)</sup>。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.20)$$

$$I = nFDC \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (3.21)$$

- ここに、I : 電流 (A)  
 n : 反応に関与する電子の数  
 F : ファラデー定数  
 (9.6485 × 10<sup>4</sup> C · mol<sup>-1</sup>)  
 D : 酸素拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec)  
 C : 計測開始前の鉄筋表面の酸素濃度  
 (mol)  
 もしくは、拡散層の外側の酸素濃度  
 (mol)  
 この場合は、モルタル周囲の接触液  
 の酸素濃度 (mol)  
 t : 経過時間 (sec)

(3.21)式によれば電極反応の速度、すなわち鉄筋表面での酸素の消費量は t<sup>1/2</sup> に反比例する。時間が十分経過すると電流値がある一定値に収束するが、この電流値は鉄筋表面への酸素の供給量、すなわち酸素の供給が定常状態になった時の酸素の拡散係数により決定されるものと考えることができる。

(7) 発錆面積率試験

(4)～(6)までの計測がすべて終了した後に、モルタル供試体を割裂し埋設鉄筋を取り出した。取り出した直後に鉄筋表面の目視観察を行い腐食が生じている場合はその状況をスケッチした。そのスケッチ図を用いて発錆面積を測定し、鉄筋の全表面積に対する発錆面積率を求めた。

3.6 電気化学的計測に関する基礎実験の概要と結果

3.6.1 分極抵抗試験に関する基礎実験<sup>37)</sup>

(1) 序項

本研究に限らず、コンクリート中もしくはモルタル中の鉄筋に関して電気化学的計測を行う場合、計測システム上の誤差が生じる。計測データに誤差が生じる大きな要因として以下の2点が挙げられる。

1) コンクリートの内部に位置する鉄筋とコンクリートの外部に位置する照合電極との間の電位差。この電位差は主に自然電極電位の計測値に影響を及ぼすと考えられる。

2) コンクリートの内部に位置する鉄筋とコンクリートの外部に位置する対極(ステンレス鋼板)との間の電気抵抗。この電気抵抗は主に分極抵抗の計測値に影響を及ぼすと考えられる。

本項においては、モルタルの電気抵抗、すなわちモル

タル内部の鉄筋と対極(ステンレス鋼板)の間の電気抵抗が分極抵抗の計測値に及ぼす影響を把握するために、拡散セルのシステムを用いて実施した基礎実験について取りまとめる。モルタル中の鉄筋の分極抵抗を直線分極抵抗法により計測する場合の基本的問題点は、鉄筋と対極の間に比較的大きな電気抵抗(最大で1000Ω程度までの抵抗)が介在するために計測される分極抵抗の誤差が大きくなることである。本項で述べる実験は鉄筋と対極間に存在する電気抵抗が分極抵抗の計測値に及ぼす影響を定量的に把握し、計測値の補正方法を検討することを目的としている。

(2) 計測システム

図-3.20に本実験で用いた拡散セルの形状・寸法を示す。拡散セルの中央には厚さが20mm(円柱供試体のかぶり厚に相当)のモルタル製の板を配置している。このモルタルの配合は本研究で用いた円柱供試体のモルタルの配合と全く同一である。拡散セルの両端にはステンレス鋼板を配置し、この両端のステンレス鋼板間の電気抵抗をLCRメータで計測し、その計測値をこのシステムにおける電気抵抗として取り扱った。

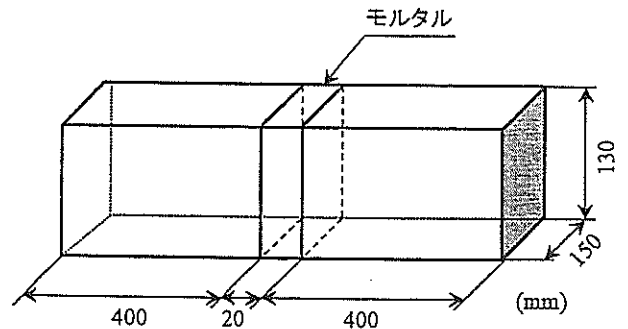


図-3.20 使用した拡散セルの形状寸法

図-3.21に拡散セルを用いた場合の分極抵抗の計測システムを示す。拡散セルの一方の溶液中に鉄筋を浸せきし、もう一方の溶液に照合電極を浸せきする。また、照合電極側のステンレス鋼板を対極として利用する。

図-3.22に拡散セル両側の溶液の組み合わせを示す。図-3.22に示すように、溶液の組み合わせとして3種類の組み合わせを用いた。一つは「海水—海水」の組み合わせ、二つ目は「海水—水道水」の組み合わせ、三つ目は「水道水—水道水」の組み合わせである。「海水—海水」の場合が液間抵抗、液間電位差ともに最小となり、「水道水—水道水」の場合が液間抵抗、液間電位差ともに最大となる。なお、「水道水—海水」の場合は両者の中間となる。また、「水道水—海水」の場合は鉄筋をど

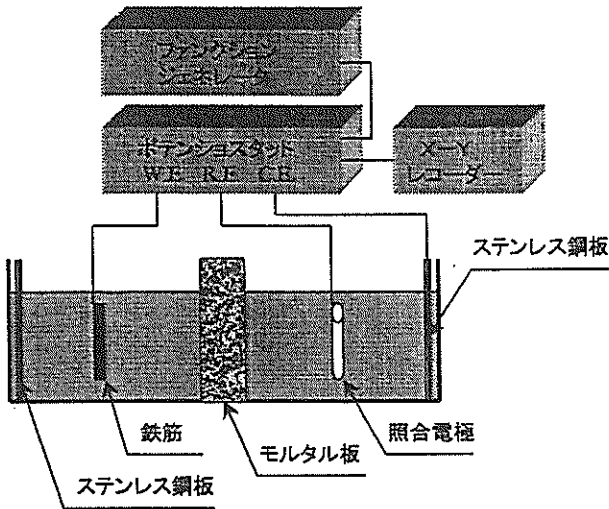


図-3.21 拡散セルシステムを用いた分極抵抗の計測方法

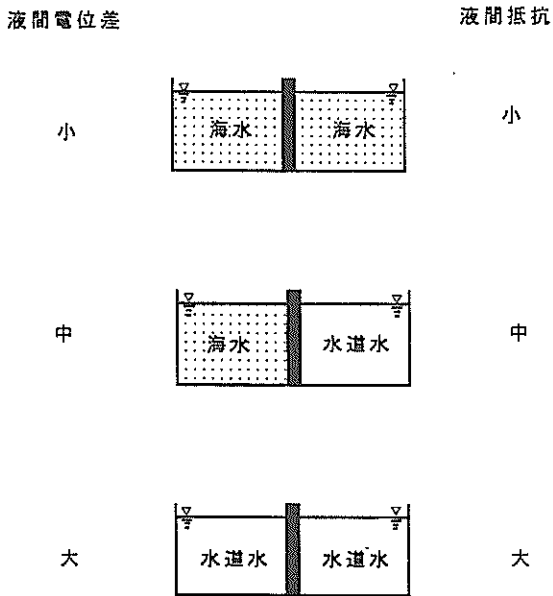


図-3.22 拡散セル両側の溶液の組み合わせ

これらの溶液に浸せきするかにより2種類の計測条件が得られるため、3種類の組み合わせにより合計4種類の異なる計測条件が得られることになる。

実験の具体的手順は以下のとおりである。ある一つのシステムにおいて一本の鉄筋の分極抵抗を計測し、その後直ちに鉄筋の表面に付着している溶液を脱脂綿でふき取り、すぐに別のシステムで同様の計測を行った。したがって、計測をしている鉄筋自体はほぼ同一のものであると考えてよく、システム間で生じる計測値のずれは、計測システムの相違、すなわち、1) 鉄筋周囲が水道水に囲まれているか海水に囲まれているか、2) 鉄筋と対

極間の電気抵抗値の相違、に起因するものであると考えることができる。

(3) 実験結果および考察

図-3.23に試験を実施した10本の鉄筋に関する、モルタルの電気抵抗と計測された分極抵抗の関係を示す。図-3.23より明らかなように、計測された分極抵抗の値は前述した2つの要因の影響を受けている。また、図-3.23よりモルタルの電気抵抗と分極抵抗の関係は(3.22)式および(3.23)式で示す一次関数で表すことが可能であり、海水浸せきの場合と水道水浸せきの場合でその傾きはほぼ同一の値を取ることがわかる。

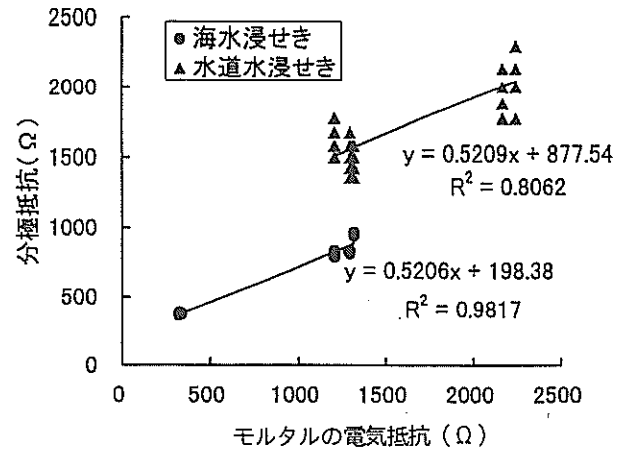


図-3.23 モルタルの電気抵抗と分極抵抗の関係

$$y = ax + b_{tapwater} \quad (\text{水道水浸せきの場合}) \quad (3.22)$$

$$y = ax + b_{seawater} \quad (\text{海水浸せきの場合}) \quad (3.23)$$

ここに、y : 計測された分極抵抗値 (Ω)

x : モルタルの電気抵抗 (Ω)

a : 直線の傾き (≒ 0.52)

b<sub>tap water</sub> : 切片 (≒ 877.5)

b<sub>sea water</sub> : 切片 (≒ 198.4)

これより、4章以降において述べる本研究においては、(3.22)式および(3.23)式において示される関係式を用い計測時のモルタルの電気抵抗に対して計測された分極抵抗を補正した。その補正方法は、モルタルの電気抵抗が1000Ωの場合にすべての計測データを統一した。すなわち、得られた分極抵抗値をx(Ω)、計測時の供試体のモルタルの電気抵抗がy(Ω)の場合の補正分極抵抗値x'(Ω)は次式で求めた。

$$x' = x + 0.52 \cdot (1000 - y) \quad (3.24)$$



4章以降においては、(3.24)式に基づいて補正を行った分極抵抗補正值を用いて試験結果の考察を行っている。

### 3.6.2 定電位ステップ試験に関する基礎実験

#### (1) 実験の概要

本項で述べる実験は上述の分極抵抗の場合とは異なり拡散セルは使用していない。本項において述べる実験は定電位ステップ試験の計測値とモルタルの含水率の関係について考察することを目的としている。本章の3.5.2において述べたように定電位ステップ試験とはモルタル中の鉄筋への酸素の供給の難易を電気化学的に調べるものである。一般的には、モルタル中への酸素の供給量とモルタルの含水率にはある程度の相関関係があることが推察される。本項において述べる基礎実験はその関係について考察することを基本的目的としている。

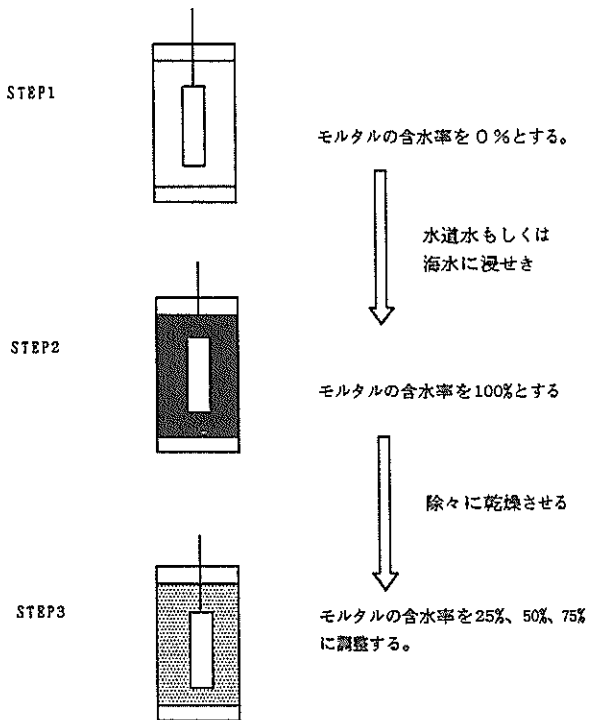


図-3.24 モルタル供試体の含水率の調整手順

モルタル供試体を用いた定電位ステップ試験の計測システムは、図-3.16に示すような3電極方式のシステムである。図-3.24に本実験におけるモルタル供試体の含水率の調整方法を示す。絶乾状態(含水率0%)と飽水状態(含水率100%)における供試体の重量を計測し、それをもとにモルタルの含水率が25%、50%、75%となるように調整した。なお、モルタル供試体を浸せきする溶液として、水道水および海水の2種類を用いその違いも検討した。このように含水率を調整したモルタル供試

体を用いて定電位ステップ試験を行った。なお、定電位ステップ試験を実施する際の供試体の浸せき溶液は、本研究の計測システムと統一するために水道水を使用した。

#### (2) 実験結果および考察

図-3.25に定電位ステップ試験の計測結果の代表的形状を示す。計測開始後、計測される電流量は徐々に増加し、ある最大値に到達した後徐々に減少していく。そして、ある程度時間が経過した後にほぼ一定値に収束する。最大値に到達するまでの時間(以後、ピーク到達時間と称する)は計測開始時のモルタルの含水率、モルタルへの水分の浸透速度などにより決定されると考えられる。

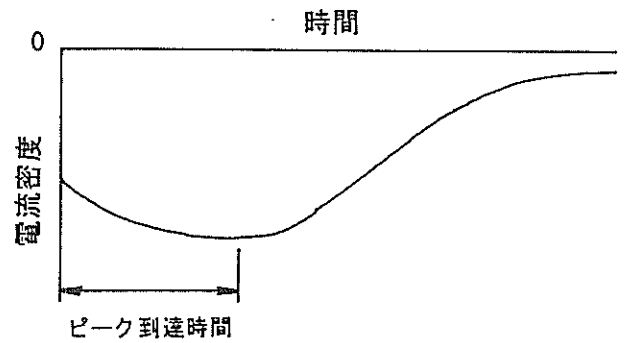


図-3.25 定電位ステップ試験の計測結果の代表的形状(含水率25%、50%、75%)

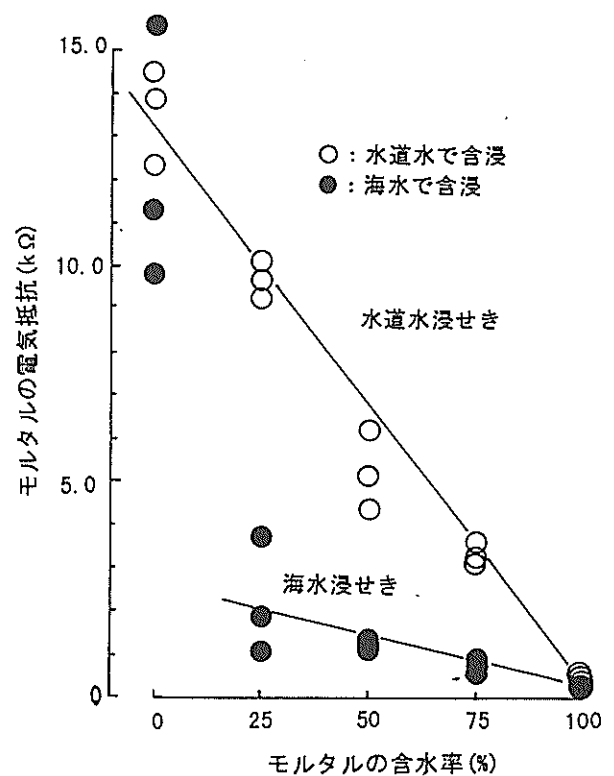


図-3.26 モルタルの含水率と電気抵抗の関係

図-3.26に、定電位ステップ試験計測時のモルタルの含水率とモルタルの電気抵抗の関係を示す。なお、電気抵抗の計測は図-3.15に示す方法で計測したものである。図-3.26に示されるとおり、水道水を含浸させた場合と海水を含浸させた場合とでその傾向が明確に二分されているものの、いずれの場合も含水率が25%以上の領域において含水率と電気抵抗は一次的な関係を有する。このように、モルタルの含水率と電気抵抗の間には比較的確な関係があるため、モルタルの電気抵抗の計測値よりモルタルの含水率をある程度推定することは可能であると考えられる。

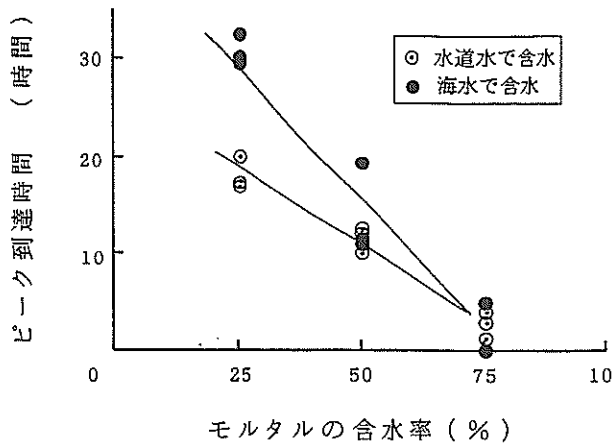


図-3.27 計測開始時のモルタルの含水率とピーク到達時間の関係

図-3.27に計測開始時のモルタルの含水率とピーク到達時間の関係を示す。図-3.27よりわかるとおり、海水で含浸した場合と水道水で含浸した場合とでは傾向が若干異なるものの、いずれの場合もモルタルの含水率が25%~75%の範囲において含水率とピーク到達時間は一次的な関係にあり、含水率が大きくなるほどピーク到達時間は短くなる。なお、含水率が100%の場合は、計測開始時がすなわちピークとなる。このピーク、すなわち電流値が最大になる時刻はモルタルの含水率がほぼ100%になった時刻を示しているものと考えられる。

図-3.28に予め海水を含浸させておいた供試体の場合の定電位ステップ試験の計測時間と電流密度の関係を示す。計測時間が24時間の場合、含水率が50%の方が25%より電流密度が大きくなっているが、計測時間が36時間の場合はその大小は逆転する。すなわち、初期の含水率が小さいほど電流密度は大きな値となっている。そして、その傾向は48時間においても同様である。本図には記していないが、計測時間が96時間近くになると初期の含水率によらず、いずれの供試体も $1.0 \mu A/cm^2$ 以下の極めて

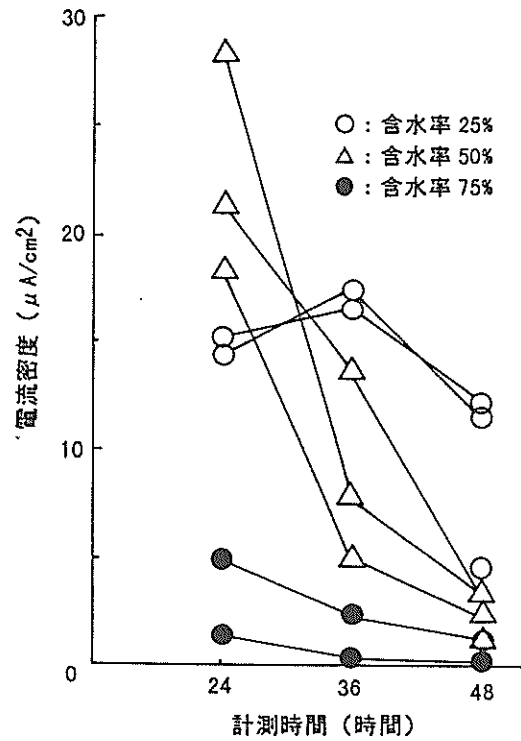


図-3.28 計測時間と電流密度の関係 (予め海水で浸せきした場合)

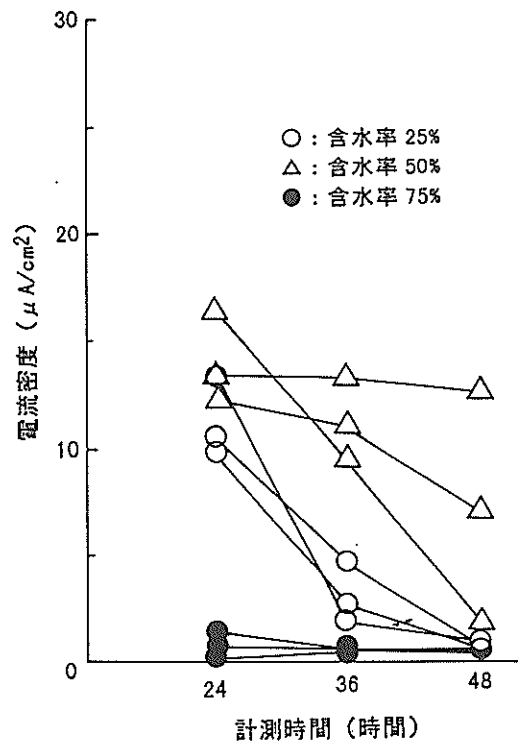


図-3.29 計測時間と電流密度の関係 (予め水道水で浸せきした場合)

小さな電流密度に収束する。

図-3.29に予め水道水を含浸させておいた供試体の場

合の定電位ステップ試験の計測時間と電流密度の関係を示す。この場合は図-3.28に示した海水を含浸させておいた場合と大きな相違がある。すなわち、含水率の大小と電流密度の大小との間には必ずしも明確な関係はないという点である。初期の含水率が50%の場合と25%の場合を比較してみると、含水率が50%の方が電流密度が大きくなっている。この傾向は計測時間が48時間まで継続している。ただし、本図中には記していないが、計測時間が96時間近くになると初期の含水率にかかわらずいずれの供試体の場合も $0.5 \mu A/cm^2$ 以下の極めて小さな電流密度に収束する。このような結果を示すメカニズムを明確に説明することは困難であるが、両図の結果をもとに考察すれば、モルタル中への海水の浸入量が多い場合はモルタルの含水率と酸素拡散性は相関関係を有するが、海水の浸入量が少ない場合は両者に明確な相関関係は存在せず、含水率がおよそ50%において酸素の拡散性が最も大きくなる領域が存在するとも考えられる。

本研究における暴露後の供試体の計測においては、暴露場所から引き上げてきた供試体をまず水道水中に24時間浸せきした後に定電位ステップ試験の計測を開始し、計測開始後10時間の電流値を計測値として取り扱っている。これは本項で述べた基礎実験の計測時間のほぼ36時間に相当する。本項において既に述べたとおり、モルタル中の塩化物含有量が多い場合はモルタルの含水率と酸素の拡散性は比較的良好な相関性があると考えられるが、モルタル中の塩化物含有量がさほど多くない場合はこの関係は必ずしも存在しないものと考えられる。したがって、本研究において計測したモルタルの電気抵抗は必ずしもモルタルの酸素拡散性と一次的には対応しておらず電気抵抗のみから酸素拡散性を評価することは難しいものと考えられる。

### 3.7 まとめ

本章においては、まず反応エネルギー論および電気化学理論に基づいたコンクリート中鉄筋の腐食量・腐食速度理論について述べた。そして、その理論式に基づいて考案した本研究における環境要因の評価手法を示した。また、暴露後のモルタル供試体において実施した各種の試験の試験方法を明記した。その中で、鉄筋の不動態の状態を評価するための分極抵抗試験ならびにモルタル中鉄筋への酸素供給量を評価するための定電位ステップ試験の2種類の電気化学的計測を実施している。これら2種類の電気化学的計測の計測データの構造および意味を明らかにすることを目的に基礎実験を実施し、その結果より以下のような知見を得ることができた。

分極抵抗試験（本研究の場合は直線分極抵抗試験）の計測値に影響を及ぼす要因は、計測の対象とする鉄筋と対極間の電気抵抗、ならびに計測の対象とする鉄筋の環境の相違、である。計測を行う際に、計測システムにおける鉄筋と対極間の電気抵抗が計測可能であれば、それに基づき計測値を補正することは可能である。本研究においては、分極抵抗の計測値に対して、鉄筋と対極間の電気抵抗による計測誤差の補正を行った。

定電位ステップ試験に関して実施した基礎実験の結果より、モルタル中への海水の浸入量が多い場合はモルタルの含水率と酸素拡散性の間に相関関係が認められるが、海水の浸入量がほとんどない場合は両者に明確な相関性を認めることはできないことが明らかとなった。モルタル中への海水の浸入量がほとんどない場合は、含水率が50%程度で酸素の拡散性が最も大きくなる可能性が示唆された。いずれにせよ、モルタルの電気抵抗からモルタルの酸素拡散性を評価することは難しいことが明らかとなった。

### 参考文献

- 1) Kenneth R Tretheway and John Chamberlain : Corrosion, Longman Scientific & Technical, Essex CM20 2JE, England, 1988
- 2) 例えば、大即信明：コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する考察，港湾技術研究所報告，第24巻，第3号，1985・9
- 3) 喜多英明・魚崎浩平：電気化学の基礎，技報堂出版，1983
- 4)～27) 気象庁月報・平成元年10月全国気象表～平成3年9月全国気象表
- 28) 小舟浩治・亀山豊・永井紀彦・菅原一晃・橋本典明：沿岸波浪観測年報（1989），港湾技研資料，No. 712, June. 1991
- 29) 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井正・平野隆幸：沿岸波浪観測年報（1990），港湾技研資料，No. 721, Mar. 1992
- 30) 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井正：全国港湾海洋波浪観測年報（NOWPHAS 1991），港湾技研資料，No. 745, Mar. 1993
- 31) コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案），（社）日本コンクリート工学協会，1987
- 32) 例えば，近藤次郎・高橋磐郎・小林竜一・小柳佳勇・渡辺正：微分方程式，フーリエ解析，工科の数学シリーズ，pp. 171, 昭和56年

- 33) 例えば, 大即信明: コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究, 港湾技術研究所報告 第24巻 第3号, 1985・9
- 34) 例えば, 横田優: 交流インピーダンス法に基づくコンクリート中の鉄筋の腐食評価に関する研究, 徳島大学学位論文, 1995年3月
- 35) 例えば, 武若耕司: 鋼材腐食, コンクリート工学 Vol. 33, No. 3, 1995. 3
- 36) 横田優: コンクリート中の鉄筋腐食速度評価におけるStern-Geary式中の比例定数B値について, 第51回セメント技術大会講演要旨 1997
- 37) 濱田秀則・福手勤・横田弘・阿部正美: 直線分極抵抗測定におけるコンクリート比抵抗の影響に関する基礎的検討, 第41回日本学会材料研究連合講演会前刷集, 1997. 9

#### 4. モルタル中鉄筋の腐食量指標に関する検討

##### 4.1 序節

前章において述べたように、本研究においてはモルタル供試体を環境条件の異なる全国の19の港湾内に2年間暴露し、その後モルタルおよび内部の鉄筋に関して数種の試験を実施した。環境要因の影響を定量的に評価するにあたり、暴露後の供試体より以下の3種類の情報を取得した。一つは内部鉄筋の分極抵抗試験より得られる鉄筋表面の不動態の状態に関する情報、一つは定電位ステップ試験より得られるモルタル中鉄筋への酸素の供給量に関する情報、そして今一つは、モルタル中の塩化物含有量より求められる内部鉄筋の腐食進行期間に関する情報である。

本章においてはまず宮川らが示すRC部材の塩害進行過程について述べ、前述のモルタル供試体に関する試験項目の塩害進行過程における位置づけを示す。次に、本研究において実施した試験の結果およびその考察を総括する。また、モルタル中の塩化物含有量の計測結果より発錆開始時刻を算出し、暴露2年時までに実際に腐食が進行した期間を求める。また、内部鉄筋の分極抵抗試験および定電位ステップ試験の結果に基づき、各供試体中の鉄筋の腐食速度を相対的に比較するための腐食速度指標を提案する。最後に、腐食速度指標と腐食進行期間より暴露2年時の腐食量を相対的に比較するための腐食量指標を提案し、その腐食量指標と実際の腐食量を比較す

ることにより提案した指標の妥当性を検討するものである。

##### 4.2 RC部材の塩害進行過程と取得データの基本的関係

###### (1) RC部材の塩害進行過程

図-4.1に宮川らによって提案されているRC部材の塩害劣化の進行過程モデルを示す<sup>1)</sup>。宮川らによると、塩害の進行過程は四つの期間に区分され、それぞれ「潜伏期」、「進展期」、「加速期」、「劣化期」と称されている。また、K. Tuttiも塩害の進行過程について独自の考え方を示しており、その期間を「Initiation Period」と「Propagation Period」の二つの期間に区分している<sup>2)</sup>。宮川による「潜伏期」とK. Tuttiによる「Initiation Period」は全く同一の期間を指しており、これらの期間は供用開始時からコンクリート中の鉄筋の腐食が始まるまでの期間と定義されている。鉄筋が腐食を開始する時刻を特定するのは難しいが、これまでの研究結果より鉄筋周囲の塩化物含有量がある臨界値を越えると鉄筋の腐食が開始されるとする考え方が現在のところ最も一般的である。そして、その臨界濃度はセメントに対する塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)の質量比で0.4%近傍であるとの研究報告がある<sup>3)</sup>。したがって、実際の構造物において潜伏期の長さを決定するのはコンクリート中への塩化物イオンの浸入速度であると考えられる。

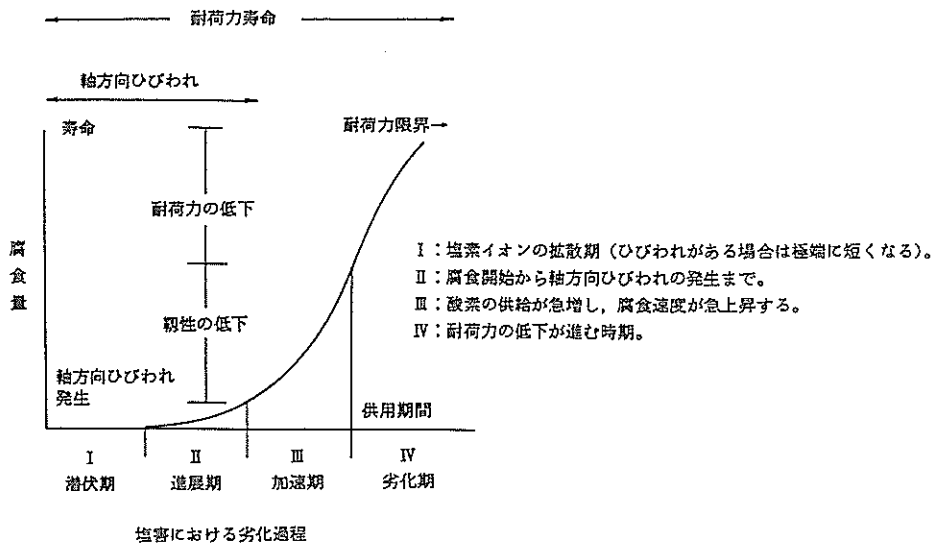


図-4.1 宮川による塩害劣化のモデル

潜伏期に続く進展期は内部鉄筋の腐食開始から、かぶりコンクリートにひびわれが発生するまでの期間と定義される。実際の構造物において進展期の長さを決定するのは内部鉄筋の腐食速度、対象とするRC部材の形状・寸法およびコンクリートの強度であると考えられる。

本研究はモルタル供試体を2年間暴露した範囲内で得られる情報を基に構成しており、本文中において議論の対象とするのは潜伏期および進展期である。それに続く加速期および劣化期は本研究では対象としないこととする。

(2) モルタル供試体試験項目の塩害進行過程における位置づけ

図-4.2にモルタル供試体の試験項目の塩害進行過程における位置づけを示す。潜伏期に影響を及ぼす塩化物イオンの浸入速度に関する試験項目は「塩化物含有量試験(拡散係数の算出)」である。進展期に関係するものとして「鉄筋の不動態の状態」と「鉄筋表面への酸素の供給量」があり、前者に関する試験項目は「分極抵抗試験」である。また、後者に関する試験項目として「定電位ステップ試験」および「モルタルの電気抵抗試験」がある。また、鉄筋の腐食量を示す指標として本研究においては「発錆面積率」を用いた。

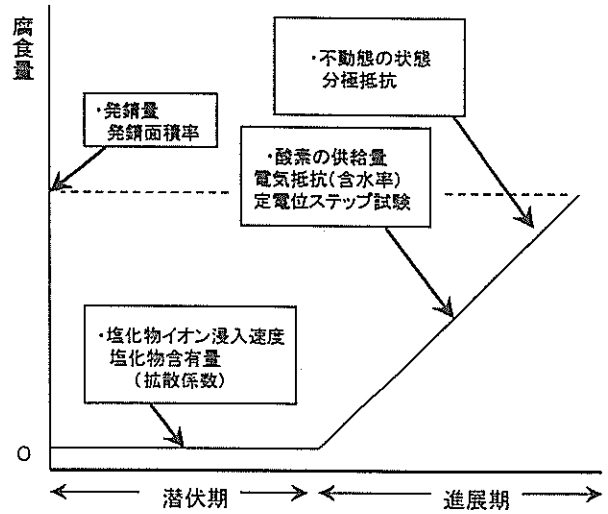


図-4.2 塩害進行過程における試験項目の位置づけ

4.3 試験結果および考察

(1) モルタル中の塩化物含有量

図-4.3に暴露2年後における鉄筋周囲(かぶり厚さ約20mm)のモルタル中の塩化物含有量を示す。暴露部位の違いによるデータの傾向を見てみると、海中部および干満部において塩化物含有量が多く、飛沫部の場合は海中

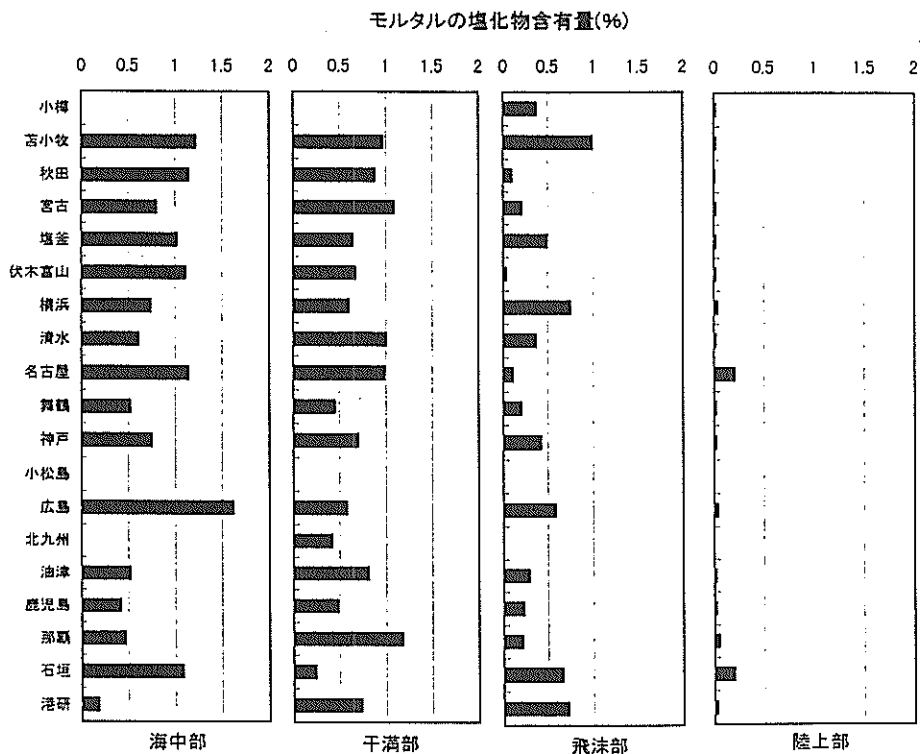


図-4.3 モルタル中の塩化物含有量(暴露2年後)

部および干満部よりも塩化物含有量は少ない。また、陸上部の場合は他の三部位に比べて塩化物含有量はかなり小さい。暴露港の相違によるデータのばらつきを各部位ごとに見てみると、海中部、干満部、飛沫部いずれも暴露港間の相違がある。これより、各部位とも各港間で環境条件に相違があることが明らかである。図-4.3よりわかるように、陸上部の場合は塩化物イオンの浸入は暴露2年程度ではほとんど進行しておらず、鉄筋周囲の塩化物含有量も鉄筋腐食を発生させるに十分な含有量には達していなかった。このため、陸上部に関しては環境要因を評価することは難しいと判断し、以後述べる腐食量指標の考察からは陸上部を除外している。

(2) 塩分拡散係数とモルタル表面の塩化物含有量

図-4.4に計算により求めた見掛けの塩分拡散係数を、また図-4.5に同じく計算により求めたモルタル表面における塩化物含有量を示す。塩分拡散係数を暴露部位ごとに比較してみると、海中部および干満部において最も大きく、次いで飛沫部、陸上部の順になっている。暴露港の相違によるデータのばらつきは、海中部、干満部、飛沫部いずれにおいても認められる。一方、図-4.5に示されるように、モルタル表面における塩化物含有量は飛沫

部において最も大きく、海中部および干満部は飛沫部よりは小さく両者はほぼ同程度の含有量を示している。塩分拡散係数およびモルタル表面における塩化物含有量の傾向より判断して、海中部と干満部は塩化物イオンの浸入に関して類似の環境条件であると考えられ、飛沫部および陸上部はそれとは異なる環境条件であると考えられる。この結果は2章における既往の研究の整理より得られた知見と一致している。図-4.4および図-4.5の結果より、海中部および干満部の場合は各港の環境要因が主に見掛けの塩分拡散係数に影響を及ぼし、飛沫部の場合は各港の環境要因が主に表面部分の塩化物含有量に影響を及ぼしていると考えられる。

(3) 分極抵抗

図-4.6に暴露2年後におけるモルタル中鉄筋の分極抵抗の計測結果を示す。なお、本図は(3.24)式に基づき計測時のモルタルの電気抵抗に起因する誤差の補正を行った値を示している。暴露部位ごとにデータを比較してみると、海中部および干満部においてほぼ同程度の値を示しており、それらは飛沫部および陸上部に比べて分極抵抗は小さい。飛沫部の場合は海中部および干満部よりも全体的に分極抵抗は大きく、陸上部の場合は飛沫部よ

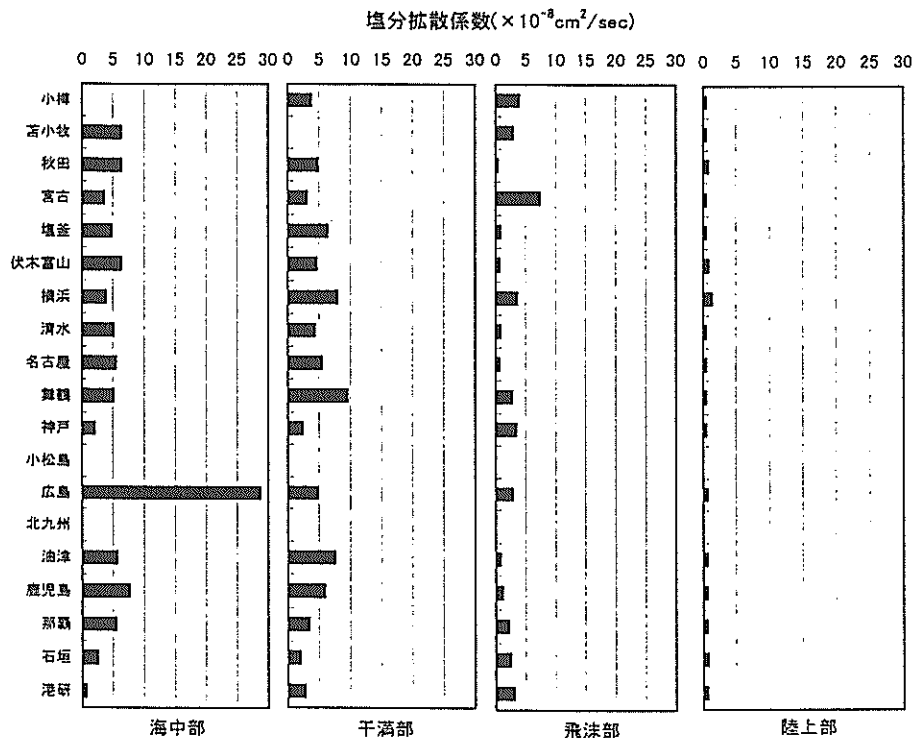


図-4.4 計算により求めた塩分拡散係数

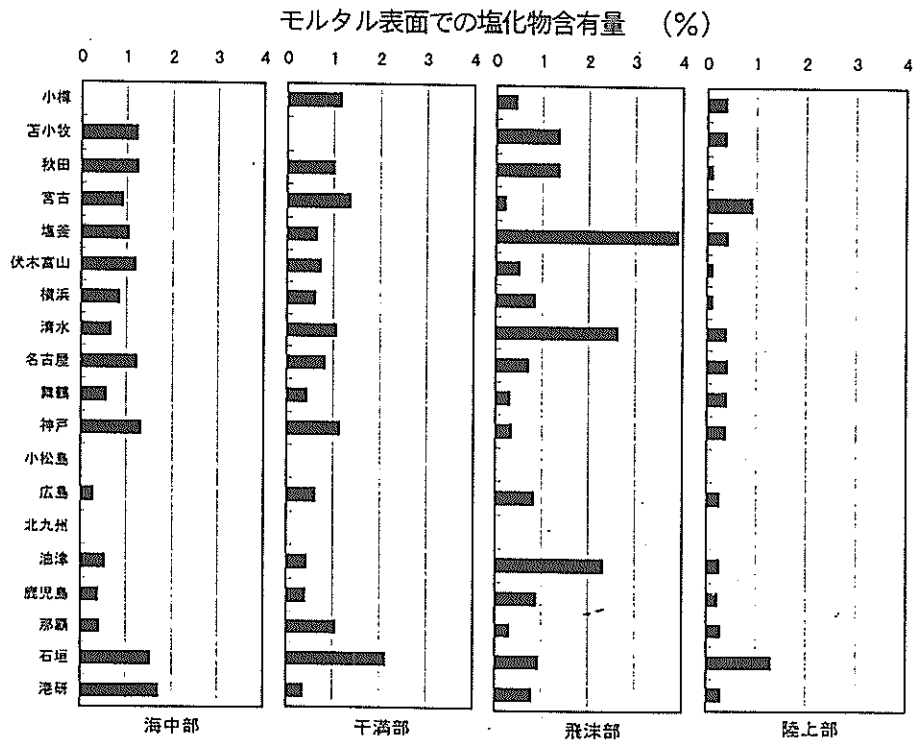


図-4.5 計算により求めたモルタル表面での塩化物含有量

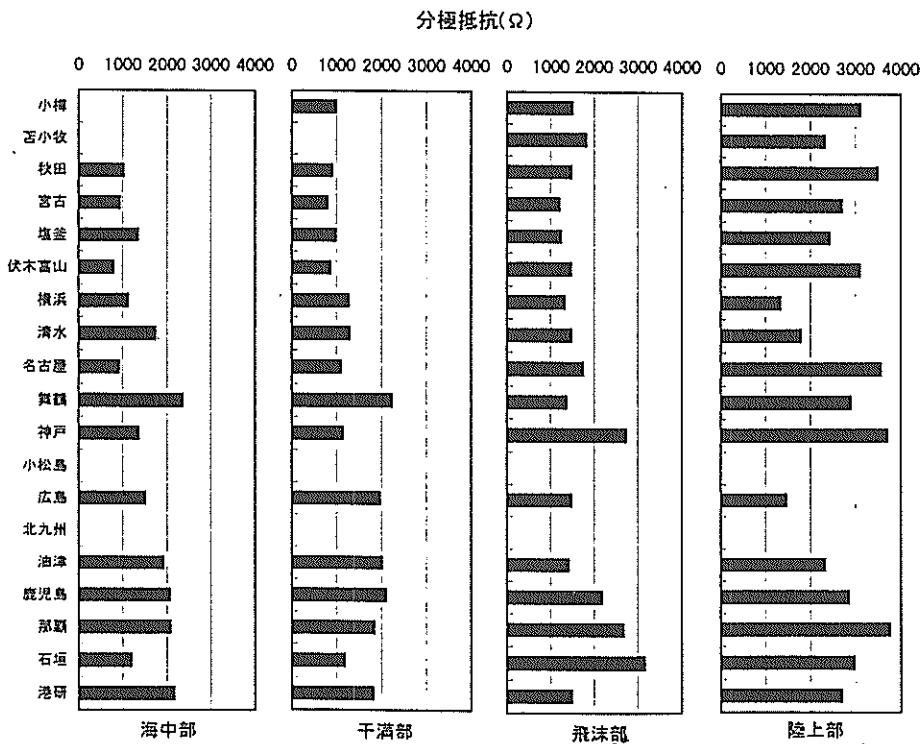


図-4.6 分極抵抗の計測結果 (暴露2年)



りもさらに大きな値を示している。これより、海中部および干満部に暴露された場合は飛沫部および陸上部に暴露された場合に比べて鉄筋表面の不動態皮膜が破壊されやすい環境であると判断される。飛沫部の場合は海中部および干満部に比べると不動態の状態はよいと判断され、陸上部の場合は飛沫部よりもさらに不動態の状態はよいと言える。

また、いずれの暴露部位の場合も暴露港の相違によるデータのばらつきが認められることより、モルタル中の鉄筋の不動態に影響を及ぼす環境条件も各港間で異なっていることが明らかである。

(4) モルタルの電気抵抗

3章の3.6において述べた定電位ステップ試験に関する基礎検討の結果より、モルタルの含水率（電気抵抗で示される）とモルタルの酸素の拡散性は必ずしも相関性を有しないことがわかっている。したがって、本項ではモルタル中の酸素拡散性の一参考指標という位置づけでモルタルの電気抵抗の計測結果を示す。なお、前項において示した分極抵抗値は、本項で示す電気抵抗の計測値に基づいて補正を行っているものである。

図-4.7に暴露2年後におけるモルタルの電気抵抗の計測結果を示す。暴露部位の違いによるデータの傾向を見てみると、海中部および干満部においてモルタルの電気抵抗が最も小さく、次いで飛沫部、陸上部の順に大きくなっている。モルタルの電気抵抗はモルタル中の含水率

と密接な相関性を有することより、海中部および干満部に暴露されている場合がモルタルの含水率は最も大きく、飛沫部に暴露されている場合は海中部および干満部の場合よりもモルタルは乾燥しており、陸上部の場合はそれよりもさらに乾燥していることが理解される。また、海中部、干満部、飛沫部、陸上部いずれの場合も暴露港間の相違が認められることより、各港ごとに環境条件が異なっていることが明らかである。

(5) 定電位ステップ試験

図-4.8に暴露2年後の定電位ステップ試験の計測結果を示す。なお、図中のデータは計測開始後10時間における電流値を鉄筋表面積で除した電流密度で表示している。暴露部位の相違によるデータの傾向を見てみると、海中部および干満部のデータがほぼ同様の傾向を示しており、飛沫部および陸上部に比べて暴露港間のばらつきも大きい。飛沫部の場合は海中部および干満部よりも平均的には値が大きいものの、陸上部に比べると小さい。また、飛沫部の暴露港間のばらつきは海中部および干満部よりは小さい。陸上部の場合は飛沫部に比べて全体的に値が大きい。暴露港間のばらつきの傾向は飛沫部の場合とよく似ている。この暴露部位ごとのデータの傾向は図-4.7に示すモルタルの電気抵抗（含水率）の示す傾向と比較的似ているようであり、モルタルの含水率と定電位ステップ試験は不完全ながらも相互の関係が存在することが推察される。

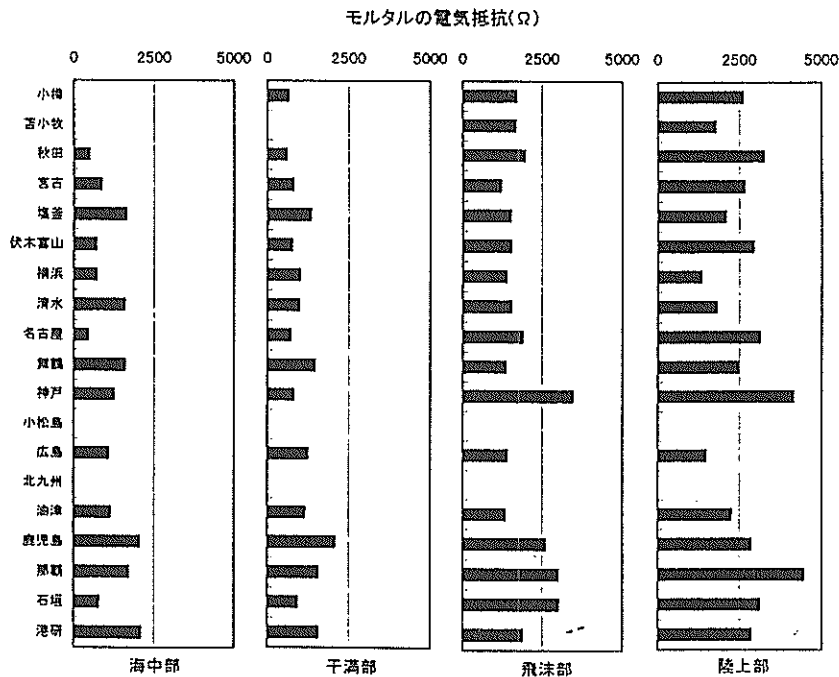


図-4.7 モルタルの電気抵抗の計測結果（暴露2年）

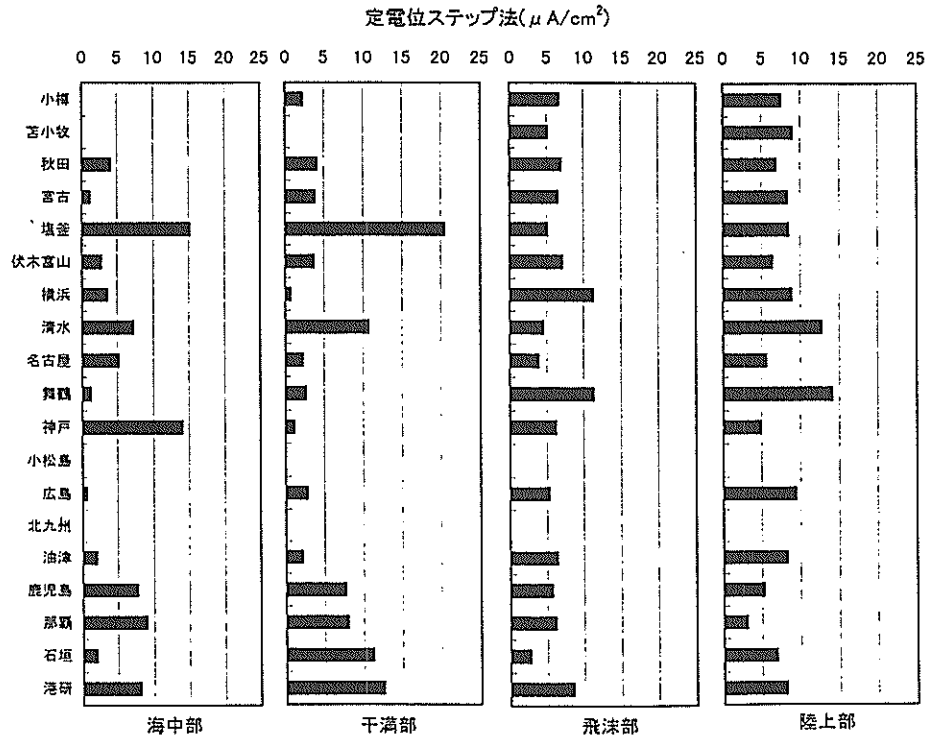


図-4.8 定電位ステップ試験の計測結果 (暴露2年)

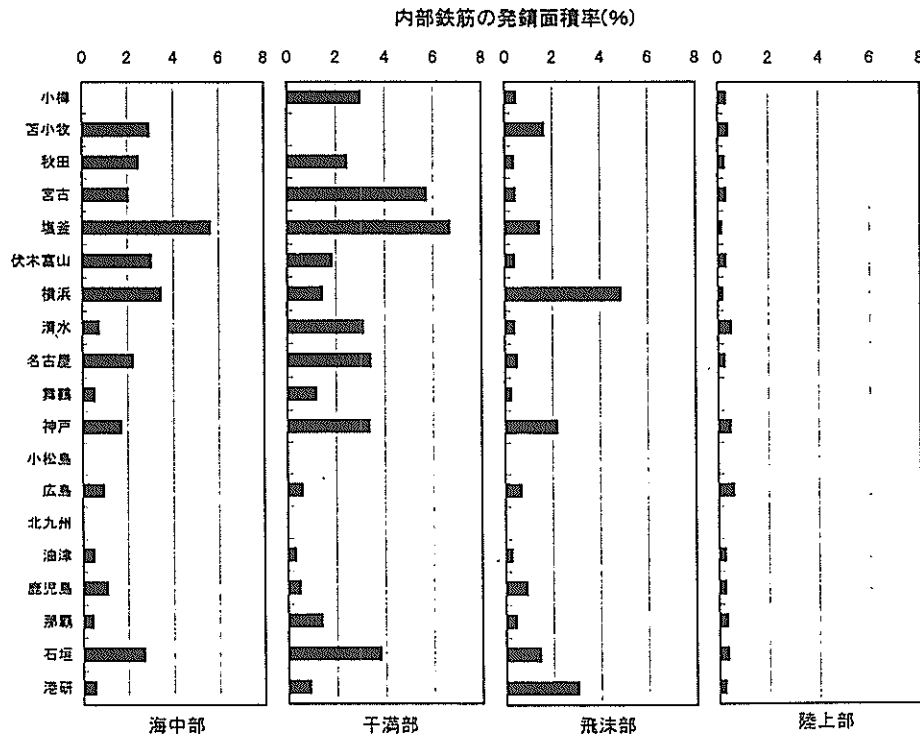


図-4.9 内部鉄筋の発錆面積率 (暴露2年)

(6) 鉄筋の発錆面積率

図-4.9に内部鉄筋の発錆面積率の計測結果を示す。暴露部位によるデータの傾向を見てみると、干満部に暴露された場合が発錆面積率が最も大きく、次いで海中部、

飛沫部、陸上部の順になっている。暴露港の相違によるデータのばらつきを見てみると、海中部および干満部の場合は比較的北に位置する港において発錆面積率が大きいという傾向が見られる。一方、飛沫部の場合も暴露港

間のばらつきが認められるものの、特に地理上の傾向は認められない。陸上部の場合は発錆面積率自体が極めて軽微であり、暴露港間のばらつきはほとんど認められない。

4.4 モルタル中鉄筋の腐食量指標の算出

(1) 腐食量算出の基本的考え方

(3.1)式に基づき、本実験におけるモルタル中の鉄筋の腐食量は基本的には(4.1)式により計算される。

$$W_{corr} = \int_{t_1}^{2\text{year}} \sigma \cdot dt \quad (4.1)$$

ここで、 $W_{corr}$  : 腐食量  
 $\sigma$  : 腐食速度  
 $t_1$  : 腐食開始時刻

すなわち、腐食速度を腐食開始時から暴露2年までの期間で積分したものが腐食量であり、(4.1)式の中で未知量は、腐食開始時刻“ $t_1$ ”と腐食速度“ $\sigma$ ”である。この2つの未知量をモルタル供試体の試験データに基づき定めることができれば腐食量が求められることになる。以下の項においてモルタル供試体の試験データに基づいた腐食量指標の算出方法および算出結果を述べる。

(2) 発錆開始時刻の算出方法および算出結果

前述したように、コンクリート中(モルタル中)の鉄筋の腐食開始時刻を明確に特定することは極めて難しい。本研究においてはモルタル中の塩化物含有量がセメント質量に対して0.4% (in weight percent) になった時点で鉄筋の腐食が開始されたと仮定した。また、鉄筋周囲のモルタル中の塩化物含有量が0.4%に達する時刻は、先に求めた塩分拡散係数“ $D_c$ ”とモルタル表面部分における塩化物含有量“ $C_0$ ”より求めた。その求め方は、2章において述べた「拡散係数の概念を用いた収集データの解析方法」を応用した。すなわち、正規確率紙の横軸をコンクリート表面からの距離、縦軸を $(C/2C_0) \times 100$ とし、両者の関係を直線表示すると、その傾きは $1/(\sqrt{2Dt})$ となることを利用した。これらの式の中で“ $C_0$ ”および“ $D_c$ ”は既に求めている。ここで、モルタル表面からの距離が20mm(埋設鉄筋の表面の位置)において $C=0.4\%$ であるとする、未知量は“ $t$ ”のみとなる。これより、“ $t$ ”すなわち発錆開始時刻を求めた。

図-4.10に海中部、干満部および飛沫部の発錆開始時刻の算出結果を示す。なお、陸上部は塩化物含有量が0.4%に達していなかったため、発錆開始時刻を計算することができなかった。図-4.10より明らかなように、

海中部および干満部の場合はいずれの港の場合も暴露開始後約5ヶ月で発錆が始まっている。また、暴露港間のばらつきも極めて小さいのが特徴である。一方、飛沫部の場合にはそれよりも発錆開始時刻は遅く、かつ暴露港間のばらつきも大きい。表-4.1に発錆面積率と腐食進行期間の間で求めた相関係数を示す。なお、この場合の腐食進行期間とは、暴露期間(6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月)より発錆開始時刻を差し引いた値のことである。6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月と分けて相関係数を求めた場合、いずれもさほど大きな相関係数は示されていない。6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月を総合して相関係数を求めてみると幾分相関係数は高くなるものの、両者の間に必ずしも明確な線形関係が存在する訳ではない。

表-4.1 発錆面積率と腐食進行期間の相関性

	(相関係数)		
	海中部	干満部	飛沫部
6ヶ月	0.29	0.35	
12ヶ月	0.43	0.59	
24ヶ月	0.41	0.23	0.57
総合	0.63	0.68	0.57

(3) 腐食速度指標の算出

(3.2)式に示されるように、鉄の腐食速度は速度定数“ $k_{corr}$ ”と反応物質の濃度“[reactants]”の積で表される。コンクリート中の鉄筋の場合、速度定数は鉄筋表面の不動態の状態に規定されるものと考えられ、反応物質の濃度は鉄筋表面への酸素供給量が支配要因になるものと考えられる。筆者は過去の研究において、コンクリート中の鉄筋の腐食量を定電位ステップ試験の結果と不動態のグレイドの総合評価値で推定することを試みている<sup>4)</sup>。不動態のグレイドとは分極曲線より鉄筋の不動態の状態を推定する一手法であり、大即により提案されているものである<sup>5)</sup>。不動態のグレイドと分極抵抗は両者とも鉄筋表面の不動態に関する情報を与えている点において共通している。参考文献<sup>4)</sup>において示す評価法は、定電位ステップ試験の計測結果を不動態のグレイドと同様に6段階に分類し、この両者の積を評価値とするものである。この評価値と腐食量の相関係数を求めてみたところ、参考文献<sup>4)</sup>に示す実験においては0.55、0.62および0.84という結果を得ている。このことも考慮し、本研究においては腐食速度を評価する腐食速度指標を次式のように与えた。

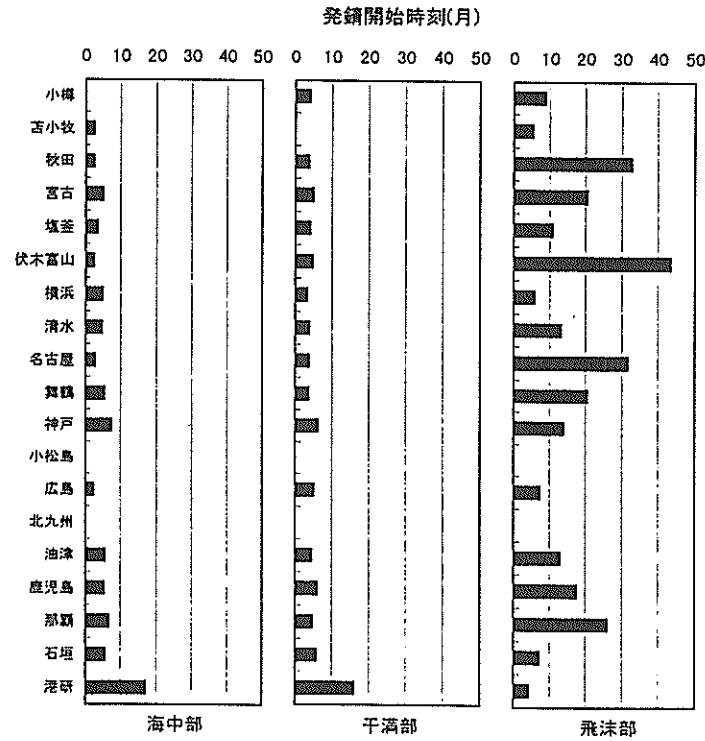


図-4.10 発錆開始時刻の算出結果

(3) 腐食速度指標の算出

(3.2)式に示されるように、鉄の腐食速度は速度定数“ $k_{corr}$ ”と反応物質の濃度“ $[reactants]$ ”の積で表される。コンクリート中の鉄筋の場合、速度定数は鉄筋表面の不動態の状態に規定されるものと考えられ、反応物質の濃度は鉄筋表面への酸素供給量が支配要因になるものと考えられる。筆者は過去の研究において、コンクリート中の鉄筋の腐食量を定電位ステップ試験の結果と不動態のグレイドの総合評価値で推定することを試みている<sup>1)</sup>。不動態のグレイドとは分極曲線より鉄筋の不動態の状態を推定する一手法であり、大即により提案されているものである<sup>2)</sup>。不動態のグレイドと分極抵抗は両者とも鉄筋表面の不動態に関する情報を与えている点において共通している。参考文献<sup>3)</sup>において示す評価法は、定電位ステップ試験の計測結果を不動態のグレイドと同様に6段階に分類し、この両者の積を評価値とするものである。この評価値と腐食量の相関係数を求めてみたところ、参考文献<sup>3)</sup>に示す実験においては0.55、0.62および0.84という結果を得ている。このことも考慮し、本研究においては腐食速度を評価する腐食速度指標を次式のように与えた。

$$\text{腐食速度指標} = A \cdot (\text{定電位ステップ試験の結果}) \cdot (1 / \text{分極抵抗}) \quad (4.2)$$

定電位ステップ試験の結果、すなわち鉄筋表面への酸素の供給量を示す指標と分極抵抗の逆数、すなわち鉄筋表面の不動態の状態を示す指標の積にある定数“A”を乗じたものを腐食速度指標として与えた。図-4.11に腐食速度指標から定数Aを除いているもの、すなわち(定電位ステップ試験の結果) × (1/分極抵抗)の計算結果を示す。海中部および干満部においては一部に突出して大きな値を示すデータがあるが、飛沫部の場合はそのような突出したデータは見られない。暴露港間のばらつきは干満部において最も大きく、次いで海中部であり、飛沫部において最も小さい。いずれの部位においても暴露港間でばらつきが存在することより、各港ごとに環境条件が異なっていることが明らかである。表-4.2に発錆面積率と腐食速度指標の間で求めた相関係数を示す。海中部および干満部において相関性の存在がわずかに示唆されているが、飛沫部の場合には相関性の存在を認めるこ

表-4.2 発錆面積率と腐食速度指標の相関性

	(相関係数)		
	海中部	干満部	飛沫部
12ヶ月	0.89	0.02	-0.05
24ヶ月	0.53	0.66	0.33
総合	0.65	0.51	-0.01

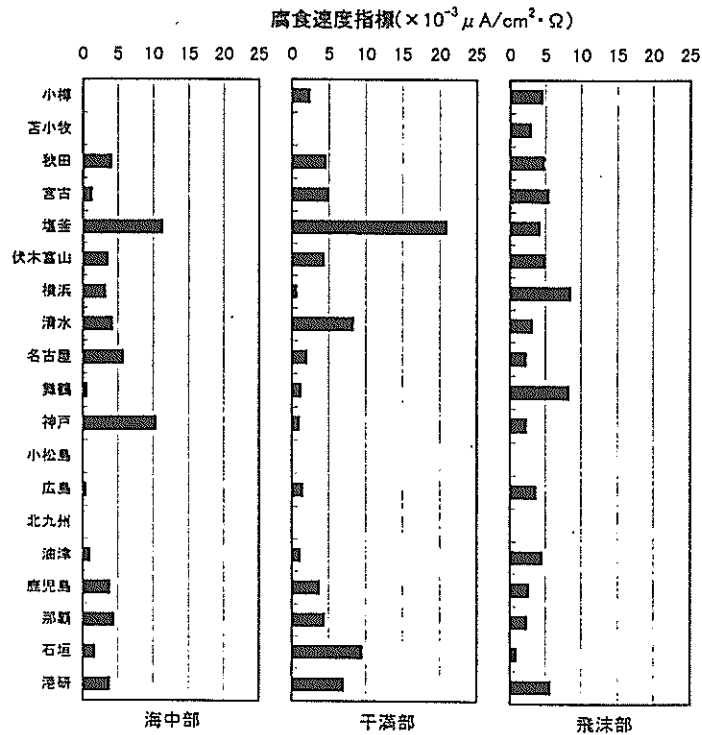


図-4.11 腐食速度指標の算出結果

とはできない。したがって、本項において提案した腐食速度指標は腐食量（発錆面積率）を推定する腐食量指標とはなり得ないことが明らかである。

(4) 腐食量指標の提案および発錆面積率との相関性

前項および前々項において述べたとおり、腐食進行期間のみ、あるいは腐食速度指標のみでは腐食量指標とはなり得ないことがわかった。したがって、腐食進行期間と腐食速度指標の両者を加味する腐食量指標を図-4.12に示すように与えた。図-4.12に示す腐食量指標の定義は(4.3)式で示される。

腐食量指標

$$= A \cdot [ (24\text{ヶ月時の腐食速度指標}) \times (12\text{ヶ月}) + (12\text{ヶ月時の腐食速度指標}) \times (6\text{ヶ月}) + (6\text{ヶ月時の腐食速度指標}) \times (6\text{ヶ月} - t_1) ] \quad (4.3)$$

なお、 $t_1$ が6ヶ月以降の場合は(4.3)式の第3項が不要となり、 $t_1$ が12ヶ月以降の場合は第2項も不要となる。また、(4.3)式中に示される定数Aは、(4.2)式中の定数Aが経時変化をしない場合は同一値を取るが、経時変化をする場合には両者は異なる値を取るようになる。

図-4.13に定数Aを除く腐食量指標の算出結果を示す。

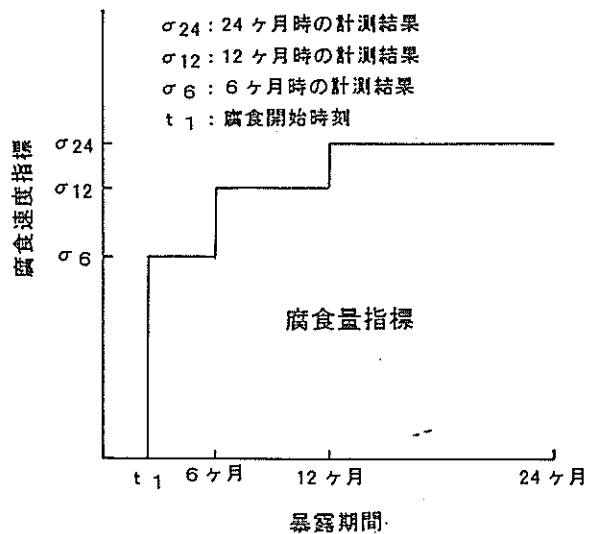


図-4.12 腐食量指標の考え方

指標値自体は干満部において最も大きく、次いで海中部、飛沫部となっている。また、いずれの暴露部位の場合も暴露港間のばらつきが存在する。表-4.3に発錆面積率と腐食量指標の間で求めた相関係数を示す。12ヶ月暴露時、24ヶ月暴露時の相関係数を見てみると、干満部の12ヶ月時を除いて0.6~0.9程度の相関係数を示しており相関性の存在が示唆される。また、12ヶ月暴露時と24ヶ月暴露

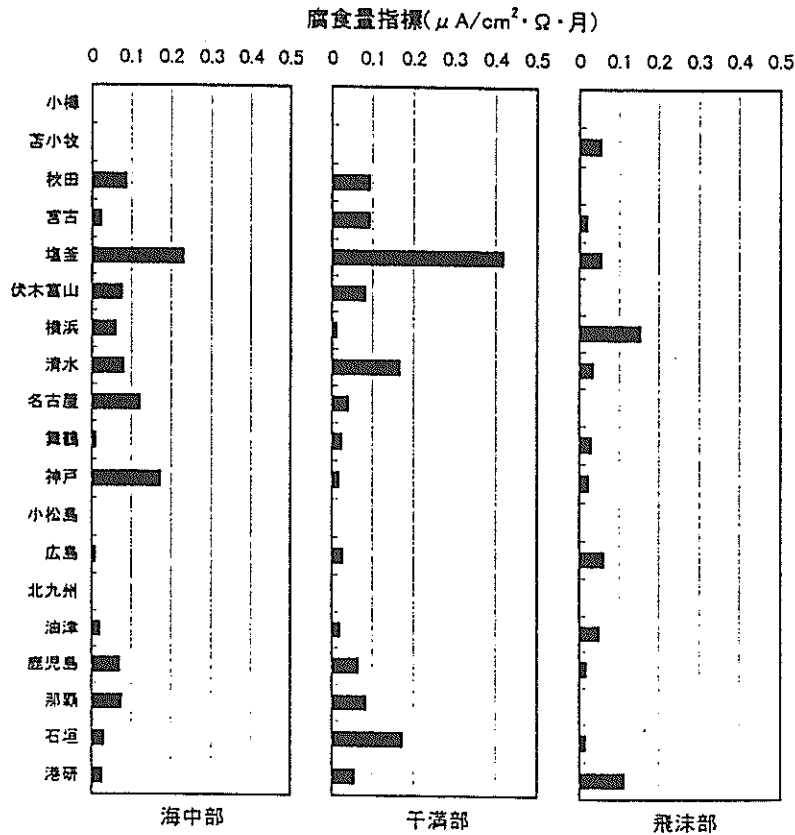


図-4.13 腐食量指標の算出結果

表-4.3 発錆面積率と腐食量指標の相関性

		(相関係数)		
		海中部	干満部	飛沫部
12ヶ月		0.93	0.23	0.62
24ヶ月		0.64	0.72	0.82
総合		0.78	0.74	0.80

時の合計で相関係数を求めてみると、海中部、干満部、飛沫部のいずれの場合も相関係数が0.74~0.80を示しており、比較的高い相関性を認めることができる。

図-4.14~4.16に、海中部、干満部、飛沫部の場合の発錆面積率と腐食量指標の関係を示す。また、同図中に最小二乗法により求めた近似直線も併せて示す。近似直線の傾きは暴露部位ごとに異なる値を示しているが、海中部と干満部では比較的近い値を示している。この近似直線の傾きの違い、すなわち腐食量指標中の定数“A”は暴露部位の違いにより異なってくるものと推察される。このことは、腐食量指標と実際の腐食量の対応関係が暴露部位ごとに異なることを示しており、この定数は鉛直方向の環境条件を示す一つの有力なパラメータであると考えられる。表-4.3および図-4.14~4.16よりわかると

おり、海中部、干満部、飛沫部のいずれの場合においても、本項で提案した腐食量指標と発錆面積率の間には比較的良い相関性が認められる。このことより、本章において提案した腐食量指標は概ね妥当な指標であると考えられる。

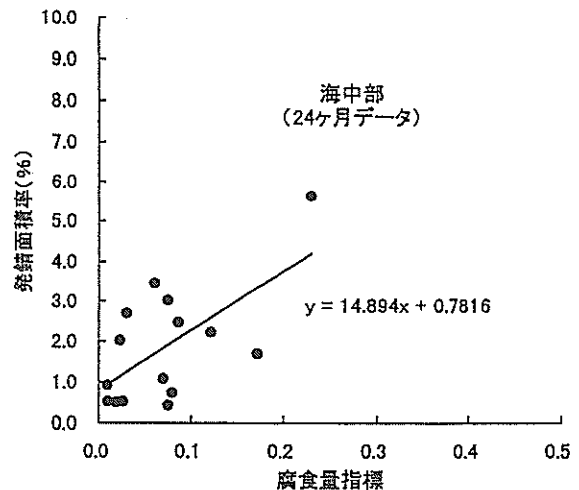


図-4.14 発錆面積率と腐食量指標の関係 (海中部)

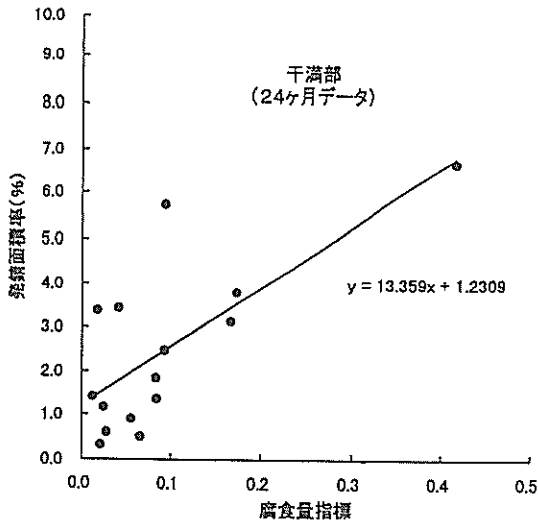


図-4.15 発錆面積率と腐食量指標の関係（干満部）

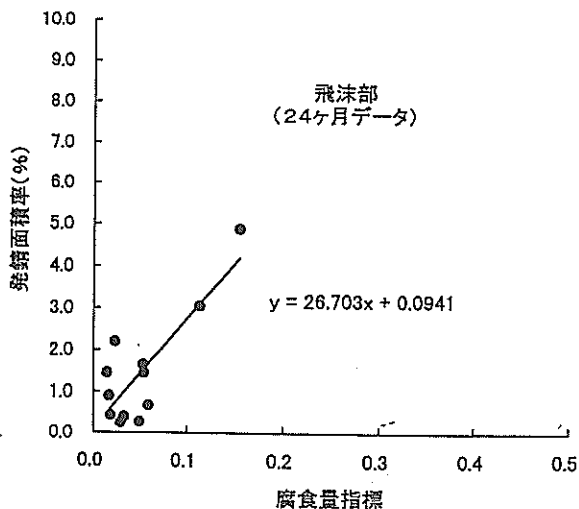


図-4.16 発錆面積率と腐食量指標の関係（飛沫部）

#### 4.5 まとめ

本章においては、まず2年間の暴露後に実施したモルタル供試体に関する各種の試験結果を総括した。その結果をもとに、モルタル中铁筋の腐食量を試験データより推定する腐食量指標を提案した。腐食量指標を構築する過程において腐食進行期間を求め、またそれに加えて腐食速度指標を提案したが、この両者と実際の発錆面積率との間には明確な相関性を認めることはできなかった。しかし、腐食進行期間と腐食速度指標を総合的に考慮することにより求めた腐食量指標に関しては以下に示すような知見を得ることができた。すなわち、モルタル中の塩化物含有量より求めた腐食進行期間、分極抵抗の逆数および定電位ステップ試験の計測結果の3者の積により構成される腐食量指標と発錆面積率の間には相関係数で

0.7~0.8程度の比較的良好な相関性が認められた。また、腐食量指標と発錆面積率の関係を一次式で近似した場合、その係数は海中部、干満部、陸上部ごとに異なる値となった。この係数は海中部と干満部でほぼ同程度であり、飛沫部の場合は海中部および干満部に比べて約2倍の値を示した。このことは海中部、干満部、飛沫部ごとに腐食量指標と腐食量の対応関係が異なっていることを示すと同時に、この係数の値は鉛直方向の環境条件の相違を示しているものと考えられる。すなわち、海中部と干満部は類似の環境条件であり、飛沫部はそれとは異なる環境条件であることを示しているものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 宮川豊章・小林和夫・藤井学：塩分雰囲気中におけるコンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計，コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集，1984. 4, pp. 47~54
- 2) K. Tutti: Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel, ACI Special Publication No. 65, 1980, pp. 223~236
- 3) 例えば, D. W. Pfeier・W. F. Perenchio and W. G. Hime: A Critique of the ACI 318 Chloride Limits, PCI JOURNAL, Vol. 37, No. 2, March-April 1992, pp. 68~71
- 4) 大即信明・浜田秀則・原茂雅光：各種補修を施したコンクリート梁の促進海水養生試験，港湾技研資料，No. 631, Dec. 1988
- 5) 大即信明：コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究，港湾技術研究所報告 第24巻 第3号，1985・9

## 5. 腐食量指標に及ぼす環境要因の影響度に関する検討

### 5.1 序節

4章においてモルタル中鉄筋の腐食量指標について検討した。その結果、モルタル中への塩化物イオンの浸入速度をもとに求めた腐食進行期間、モルタル中の鉄筋表面への酸素供給量の指標となる定電位ステップ試験の計測結果、および鉄筋表面の不動態の状態を示す指標となる分極抵抗の計測結果に基づいた腐食量指標を提案した。

本章においては、暴露港の気象条件、波浪条件および海水成分条件のどの要因が腐食量指標に影響を及ぼしているのかを検討する。そのために、腐食量指標を構成する3要素、すなわち、腐食進行期間（発錆開始時刻）、分極抵抗の逆数および定電位ステップ試験の結果と各種の環境要因の関係を検討する。前章において述べた腐食量指標の検討においては、あらかじめ指標の形を想定した上でそれを検証するという方法を採用した。しかし、本章における検討では予め両者の関係の形を想定することは基本的に不可能であるため多変量解析の手法を用いた。本検討において用いた多変量解析は主成分分析と重回帰分析であり、2回の主成分分析と1回の重回帰分析により構成されている。最終的には、腐食量指標構成要素3項目を従属変数、環境要因を独立変数とする重回帰式を求め、腐食量指標の構成要素に及ぼす各種の環境要因の影響度を明らかにするものである。

### 5.2 暴露を実施した港の海水成分分析

各港の海水の成分分析結果は3章の表-3.4に取りまとめている。これらの分析項目のうち、以後の解析の対象とする項目を選定するために各項目間の相関性を検討した。表-5.1に各項目間で求めた相関係数を示す。表-5.1よりわかるとおり、比重と他の項目間に相関性は認められないが、pHと他の海水成分間には相関性（相関係数：0.75～0.85）が認められる。一方、成分分析の対象とした6つの成分間にはほぼ完全な相関性が認められる。したがって、これらの6つの成分項目のうち塩化物イオン（Cl<sup>-</sup>）濃度を以後の解析の対象として選定した。すなわち、海水成分の検討項目として、比重、pHおよび塩化物イオン濃度の3項目を選定した。

### 5.3 暴露を実施した港の気象条件および波浪条件について

各港の気象条件は3章の表-3.2に取りまとめている。これらの気象条件の中で解析の対象とする項目を選定す

るために各項目間の相関性を検討した。また、気象条件と海水成分の相関性、気象条件と波浪条件の相関性についても検討した。

#### 5.3.1 気象条件の各項目間の相関性の検討

表-5.2に気象条件の各項目間で求めた相関係数を示す。なお、表中の相関係数は24ヶ月間の合計値を用いて計算した結果である。表-5.2に示されるように、平均気温と平均最高気温（相関係数：0.99）、および平均風速と最大風速（相関係数：0.92）に関して相関性が認められる。このため、気温および風速に関しては、平均気温および平均風速のみを以後の解析の対象とした。したがって、気象条件の項目として、平均気温、湿度、日照時間、降水量、平均風速を検討項目として選定した。またそれに加えて、気温に関して気温偏差という項目も気象条件の一つに加えた。この気温偏差とは各港の気温と全体平均値の差の絶対値を示している。気温偏差を検討項目として加えた理由は、寒冷地域と熱帯地域を同等に評価する必要がある場合の指標とするためである。

#### 5.3.2 気象条件と海水成分の相関性の検討

表-5.3に気象条件項目と海水成分項目間で求めた相関係数を示す。海水のpHと平均気温の間にわずかな相関性（相関係数：0.55）が示唆されるものの強い相関ではない。全体的に見て、気象条件と海水成分の間に相関性は認められない。したがって、以後の解析においては気象条件の各項目と海水成分の各項目は独立として取り扱うこととした。

#### 5.3.3 気象条件と波浪条件の相関性の検討

##### (1) 波浪データの各項目間の相関性

波浪の観測データの整理結果は3章の表-3.6にまとめている。表-5.4に平均有義波のH/T（波高／周期）と最大有義波のH/T間の相関係数を示す。一次データの場合も二次データの場合も各項目間に比較的高い相関性（相関係数：0.90, 0.91）が認められる。したがって、以後の解析においては平均有義波高に関するH/Tの24ヶ月の合計値を波浪データの代表値とすることとした。

##### (2) 気象条件と波浪条件の相関性

海面上の波は一般的には海面上の風によって発生し、有義波高を決定する支配要因は風速と吹送距離であることがすでに示されている<sup>1)</sup>。ここで、波浪観測より得られた波浪データ（有義波高／周期）と気象観測より得られた風に関するデータ（風速）の関係を検討した。図-5.1に（有義波高／周期）で示される波浪データと風速で



示される気象データの関係を示す。データの絶対数が少ない点是否めないが、波浪の一次データに関しては両者に高い相関性が認められる。一方、二次データについてはそのような相関性を認めることはできない。

これより、二次データの信頼性はさほど高くなく、すなわち暴露対象港の波浪条件と最寄りの港の波浪条件が

ら推定することはできないと判断される。一次データのみに着目して考察すると、各港の波浪条件は気象観測より得られる風に関するデータより推定することが可能であると考えられる。したがって、以後の解析においては、風に関するデータ（風速）を波浪条件を示す指標として用いることとした。

表-5.1 海水成分の各項目間の相関係数

(相関係数)

	pH	海水成分					
		Na	K	Ca	Mg	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub>
比重	-0.32	-0.10	-0.09	-0.08	-0.04	-0.09	-0.09
pH		0.82	0.83	0.79	0.76	0.83	0.82
Na			0.99	0.99	0.99	1.00	1.00
K				0.97	0.98	1.00	1.00
Ca					0.99	0.98	0.98
Mg						0.98	0.98
Cl <sup>-</sup>							1.00

表-5.2 気象条件の各項目間の相関係数

(相関係数)

		気温 最高	湿度	風速		日照時間	降水量
				平均	最大		
気温	平均	0.99	-0.26	0.59	0.44	0.27	0.61
	最高		-0.31	0.51	0.39	0.29	0.63
湿度				0.02	-0.05	-0.50	0.02
風速	平均				0.92	0.28	0.37
	最大					0.22	0.29
日照時間							0.15

表-5.3 気象条件と海水成分間の相関係数

(相関係数)

		平均気温	平均湿度	平均風速	日照時間	降水量
海水成分	比重	0.11	-0.27	-0.15	0.36	-0.02
	pH	0.55	-0.06	0.19	-0.07	0.22
	Cl <sup>-</sup>	0.33	0.00	0.07	0.11	-0.08

表-5.4 平均有義波と最大有義波の相関係数

(相関係数)

		一次データ		二次データ	
		24ヶ月		24ヶ月	
		最大有義波	平均有義波	最大有義波	平均有義波
24ヶ月	最大有義波		0.90		0.91

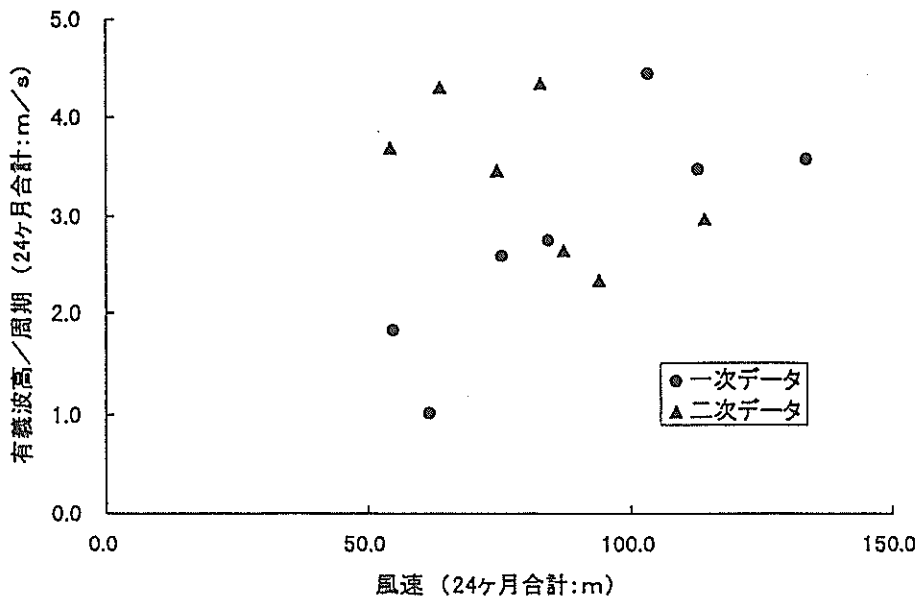


図-5.1 有義波高/周期と風速の関係

5.4 本研究で実施した多変量解析の手順

多変量解析という言葉は極めて広く使用されている用語であり、その定義は種々ある。また、多変量解析に関する参考書も多数出版されている。本研究を遂行するにあたり、筆者が参考にした文献は参考文献<sup>21-27</sup>である。これらの参考文献において多変量解析の定義を記しているものは参考文献<sup>21</sup>のみである。それによると多変量解析を「統計とコンピューターの使用を前提として、多くの要因が複雑に絡み合った現象を解明し、本質的な骨組みを描き出す手法の群、それを多変量解析という」と定義している。

多変量解析は数学の一分野であり、種々ある解析手法を解説し例題を示している参考書は多い。しかし、ある特定の未解決の問題に対してどの解析手法を用いるべきかの判断を示してくれる参考書はなく、その判断は問題の当事者によることになる。すなわち、解析により得られた答えが有意か無意かは解析手法の用い方に大きく依存することになる。

図-5.2に本研究において実施した多変量解析の手順を示す。まず初めに多変量解析の対象としたデータの標準化を行った。なお、データの標準化手法としては、1) 最大を1にする、2) Z得点にする、3) 平均を1にする、4) -1から+1の範囲に変換する、5) 標準偏差を1にする、6) 0から1の範囲に変換する、などがある<sup>21</sup>。本研究においてはZ得点を用いる方法を採用した。Z得点とは、あるデータのグループを平均値が0、標準偏差が1となるようにデータの変換を行うことである。

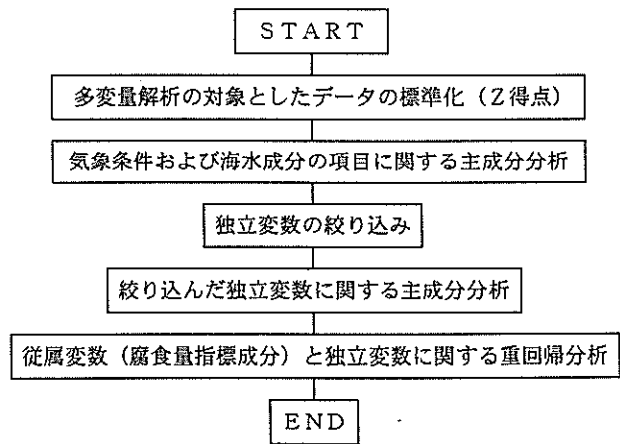


図-5.2 本研究で実施した多変量解析の手順

次に、気象条件および海水成分の項目に関して主成分分析を実施し、変数（独立変数）の絞り込み（変数選択）を行った。この最初の主成分分析により数を絞った変数（気象条件および海水成分の項目）について再度主成分分析を実施した。なお、主成分分析を再度実施したのは、投入する変数が異なれば得られる結果も異なってくるためであり、主成分座標は選択した変数のみの主成分分析より求める方がよいと判断したためである。

上述したように、多変量解析の利点は主観を排除することであるものの、その適用は逆に主観による点は、解析結果の判断をする際に十分留意しておく必要があると考えられる。次に、主成分分析により絞り込んだ項目を独立変数、腐食量指標の構成要素を従属変数とする重回

表-5.5 腐食量指標の構成要素の標準化データ (Z得点)

	分極抵抗の逆数			定電位ステップ試験の結果			発錆開始時刻		
	海中部	干満部	飛沫部	海中部	干満部	飛沫部	海中部	干満部	飛沫部
秋田	0.81	1.09	0.39	-0.28	-0.28	0.29	-1.21	-0.82	1.38
伏木 富山	1.86	1.28	0.40	-0.56	-0.35	0.37	-1.21	0.25	2.35
横浜	0.47	-0.11	0.86	-0.39	-0.92	2.19	0.33	-1.44	-1.04
塩釜	-0.10	0.78	1.18	2.08	2.81	-0.52	-0.54	-0.58	-0.58
宮古	1.16	1.64	1.36	-0.91	-0.32	0.08	0.36	0.36	0.29
広島	-0.41	-1.12	0.38	-1.02	-0.52	-0.45	-1.27	0.53	-0.89
小松島									
神戸	-0.13	0.19	-1.56	1.84	-0.85	-0.04	1.77	1.78	-0.31
舞鶴	-1.31	-1.36	0.73	-0.90	-0.56	2.20	0.54	-1.02	0.28
北九州									
鹿児島	-1.08	-1.26	-0.98	0.50	0.41	-0.27	0.55	1.68	0.01
油津	-0.95	-1.17	0.58	-0.73	-0.65	0.02	0.66	0.00	-0.39
名古屋	1.24	0.31	-0.26	-0.04	-0.63	-1.07	-0.99	-0.85	1.28
清水	-0.74	-0.17	0.38	0.38	0.97	-0.78	0.17	-0.77	-0.38
小樽		0.80	0.32		-0.63	0.14		-0.59	-0.77
苫小牧			-0.40			-0.51	-1.20		-1.09
那覇	-1.09	-1.00	-1.51	0.77	0.45	-0.06	1.34	0.16	0.77
石垣	0.27	0.11	-1.87	-0.73	1.07	-1.59	0.71	1.31	-0.92

帰分析を実施した。その結果を、腐食量指標の構成要素に及ぼす環境要因の影響度の定量的評価とみなした。

5.5 多変量解析の対象とした項目の標準化データの算出

表-5.5に腐食量指標の構成要素、すなわち分極抵抗の逆数、定電位ステップ試験の計測結果、および発錆開始時刻のZ得点(標準化データ)を示す。また、表-5.6および表-5.7に気象条件および海水成分の各項目のZ得点を示す。

表-5.6 海水成分の標準化データ (Z得点)

	海水成分		
	比重	pH	Cl <sup>-</sup> 濃度
秋田	-2.71	-1.72	-2.64
伏木富山	-1.42	-0.68	-1.43
横浜	0.24	0.02	0.12
塩釜	0.60	0.02	0.48
宮古	0.05	-1.02	0.08
広島	0.05	-0.33	-0.12
小松島	0.05	0.71	0.16
神戸	0.05	0.37	0.20
舞鶴	0.42	0.71	0.31
北九州	0.79	1.06	0.70
鹿児島	0.79	1.06	0.72
油津	0.79	1.06	0.90
名古屋	-1.42	-2.06	-1.37
清水	-1.05	-1.02	-1.12
小樽	0.42	0.02	0.37
苫小牧	0.60	-0.33	0.60
那覇	0.79	0.71	0.96

5.6 環境要因の項目に関する主成分分析

5.6.1 主成分分析の方法

主成分分析に関しては多数の参考文献が存在するため、その説明は本文においては割愛する。筆者が参考にした文献<sup>3)~7)</sup>においても、それぞれに主成分分析の説明がなされている。主成分分析の定義について一例を挙げると、「主成分分析とは、多くの変量の値をできるだけ情報の損失なしに1個または少数個の総合的指標(主成分)で代表させる方法である。p変量(p次元)の観測値をm変量(m次元)の主成分に縮約するという意味で、次元を減少させる方法と言うこともできる」と説明されている<sup>3)</sup>。本研究における分析では、海水成分の項目(pH, Cl<sup>-</sup>濃度, 比重)と気象条件の項目(気温, 気温偏差, 湿度, 風速, 日照時間, 降水量)の合計9項目に関して主成分分析を実施した。本研究において主成分分析を実施する目的は、いくつかの主成分を求めることではなく、主成分に対する環境要因の各項目の寄与度を求め、それに基づき類似の項目を明確にすることにより必要最小限の項目を選択することである。なお、分析には市販の多変量解析プログラム(SPSS ver. 7.5 for Windows)を使用した。

表-5.7 気象条件の標準化データ (Z得点)

	気象条件項目					
	気温	気温偏差	湿度	風速	日照時間	降水量
秋田	-0.86	0.20	0.42	0.75	-1.51	0.26
伏木富山	-0.36	-0.58	1.07	-0.89	-1.63	0.46
横浜	0.12	-0.94	-0.63	0.06	0.36	0.07
塩釜	-0.85	0.18	1.26	0.35	0.26	-1.49
宮古	-1.05	0.48	0.32	-1.34	-0.04	-0.53
広島	0.22	-0.79	-1.16	0.41	0.57	-0.10
小松島	0.28	-0.69	-1.72	-0.49	0.95	-0.35
神戸	0.17	-0.87	-1.44	-0.07	0.46	-1.32
舞鶴	-0.22	-0.79	1.42	-1.36	-1.94	0.12
北九州	0.26	-0.73	-0.80	-0.14	-0.58	0.00
鹿児島	0.68	-0.09	-0.56	-1.04	0.37	1.27
油津	0.64	-0.14	0.07	1.16	0.51	1.97
名古屋	0.13	-0.93	-0.98	-0.60	1.25	0.05
清水	0.21	-0.80	0.31	1.21	1.98	1.28
小樽	-1.53	1.21	-0.05	-0.96	-0.49	-1.60
苫小牧	-1.74	1.54	1.46	-0.45	-0.29	-1.24
那覇	1.82	1.66	0.00	2.06	-0.38	0.10
石垣	2.10	2.08	1.02	1.35	0.15	1.04

5.6.2 第一次主成分分析の結果

図-5.3および図-5.4に主成分分析より得られた因子負荷量の平面プロットを示す。なお、図-5.3は第一主成分と第二主成分が座標軸であり、図-5.4は第一主成分と第三主成分が座標軸である。両図よりわかるとおり、検討対象の9項目の中には比較的傾向の似ている項目が存在する。例えば、降水量と風速、あるいは海水のpHとCl<sup>-</sup>濃度と比重は第一主成分から第三主成分への寄与の傾向が似ている。一方、湿度と日照時間は、両者とも第一主成分への寄与がほとんどなく、第二主成分と第三主成分への寄与が相反するという傾向を示している。この結果をもとに、重回帰分析の対象とする気象条件および海水成分の項目を表-5.8に示す5つの項目に絞った。すなわち、海水成分を代表する項目として海水中のCl<sup>-</sup>濃度、波浪条件および風条件を代表する項目として風速、環境温度を代表する項目として気温および気温偏差、環境の乾燥・湿潤状態を代表する項目として湿度、の合計5項目である。

5.6.3 第二次主成分分析の結果

前述したとおり、第一次主成分分析の結果に基づき、重回帰分析において独立変数として用いる環境要因を5項目に絞った。この5項目について再度主成分分析を実施した。その結果を図-5.5および図-5.6に示す。図-5.5は第一主成分と第二主成分を座標軸とした因子負荷量の平面プロットであり、図-5.6は第一主成分と第三主成分

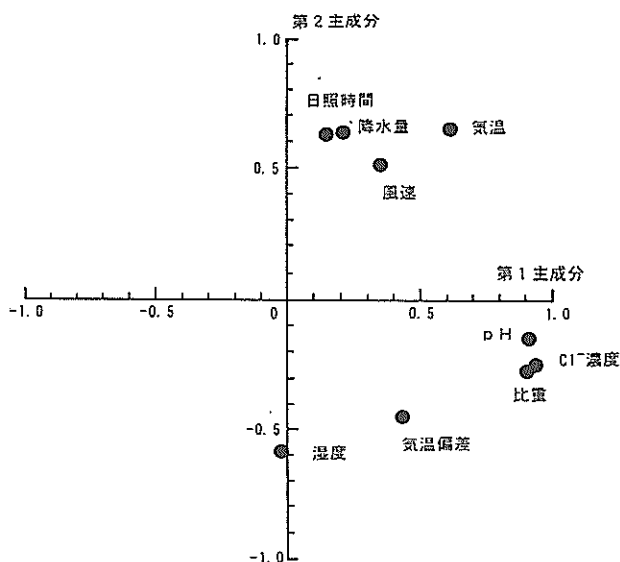


図-5.3 因子負荷量の平面プロット (第一主成分と第二主成分)

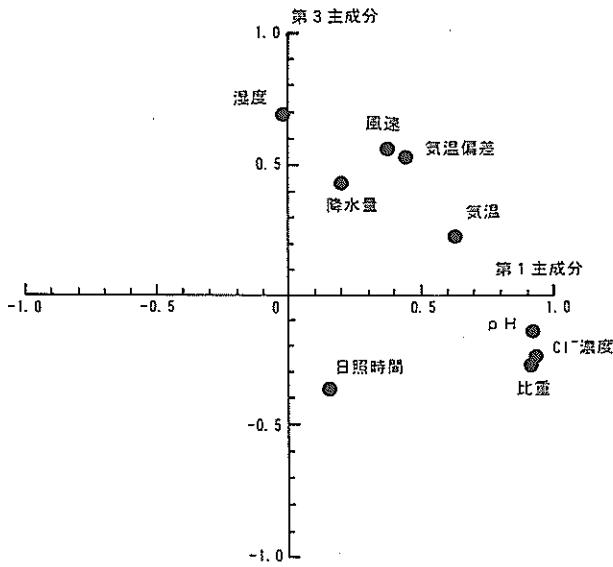


図-5.4 因子負荷量の平面プロット  
(第一主成分と第三主成分)

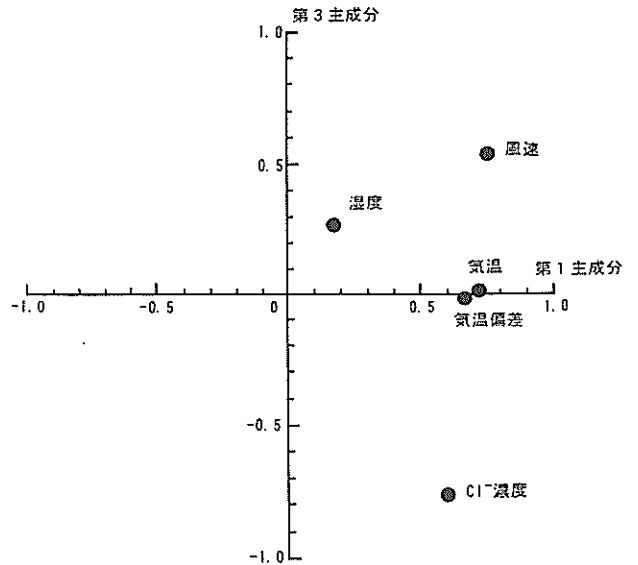


図-5.6 因子負荷量の平面プロット  
(第一主成分と第三主成分)

表-5.8 第一次主成分分析により抽出した環境条件項目

項目	備考
海水中のCl <sup>-</sup> 濃度	海水成分
風速	波浪条件、風条件
気温、気温偏差	環境温度
湿度	環境の乾燥・湿潤状態

を座標軸とした因子負荷量の平面プロットである。この両図よりわかるように、これらの5項目の中には、第一主成分から第三主成分への寄与が一致している項目はなく、すべての項目が主成分座標上において異なる傾向を示している。

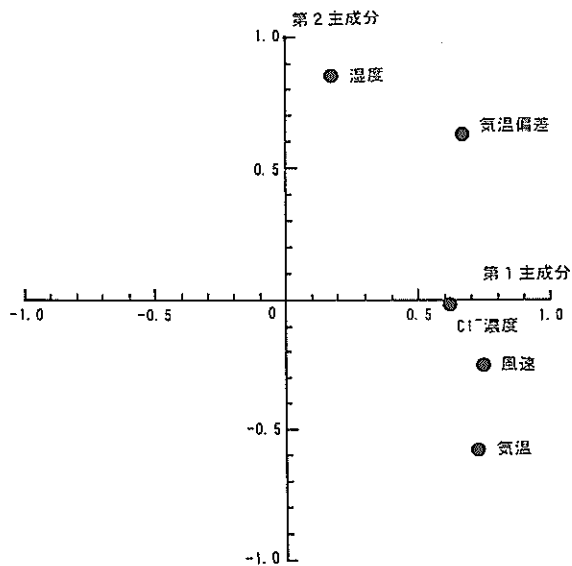


図-5.5 因子負荷量の平面プロット  
(第一主成分と第二主成分)

## 5.7 環境要因と腐食量指標に関する重回帰分析

### 5.7.1 独立変数の形状に関する検討

前節において述べたように、第一次主成分分析の結果に基づき、環境要因の項目のうち気温、気温偏差、湿度、風速および海水中のCl<sup>-</sup>濃度の5項目を重回帰分析における独立変数として選択した。しかし、これらの項目が一次的に関係を有するのか、あるいは重回帰モデルにおいて独立変数の累乗値を用いる方がよりよいモデルが得られるのかは未知である。そこで、重回帰分析を実施する前の事前検討として上記項目の二乗値および平方根と腐食量指標構成要素の間の相関係数を求めてみた。なお、その結果は本文では割愛するが、その結果によると、直接データ（一次データ）で求めた相関係数よりも二乗値で求めた相関係数あるいは平方根で求めた相関係数の方が大きくなる場合もある。しかし、その場合でも相関係数が $10^{-2}$ のオーダーの差であり、著しく相関係数が大きくなるケースは認められなかった。このことより判断して、重回帰分析の独立変数としてはいずれの項目の場合も直接データ（一次データ）を用いることとした。

5.7.2 重回帰分析の方法

主成分分析の場合と同様に重回帰分析に関しても多数の参考文献が存在するためその説明は本文では割愛する。重回帰分析の定義としては、例えば「ある変数 y (目的変数または従属変数) と、それに影響すると考えられる変数 x<sub>i</sub> (説明変数または独立変数) の間の関係式を求め、それに基づいて x<sub>i</sub> の値から y の値を予測したり、その際の x<sub>i</sub> の影響の大きさを評価する分析を回帰分析と呼ぶ。特に、説明変数が 1 つの場合を単回帰分析、2 つ以上の場合を重回帰分析という」と説明されている<sup>2)</sup>。

本研究においては、次式で示すような線形重回帰モデルを想定し分析を行った。

$$y_i = a_{i1} \cdot x_1 + a_{i2} \cdot x_2 + a_{i3} \cdot x_3 + a_{i4} \cdot x_4 + a_{i5} \cdot x_5 + b_i + \varepsilon \quad (5.1)$$

- ここで、y<sub>i</sub> : 腐食量指標の構成要素
- x<sub>1</sub> : 海水中のCl<sup>-</sup>濃度
- x<sub>2</sub> : 平均風速
- x<sub>3</sub> : 平均気温
- x<sub>4</sub> : 平均湿度
- x<sub>5</sub> : 気温偏差
- a<sub>ii</sub> ~ a<sub>i5</sub> : 回帰係数
- b<sub>i</sub> : 定数項  
(標準化データを用いる場合はb<sub>i</sub>=0)
- ε : 誤差

分析に用いたコンピュータプログラムは主成分分析に用いたものと同様のSPSSであり、重回帰分析プログラム中の変数減少法を用いた。この方法は、まず初めに5つの説明変数すべてをモデルに投入して回帰式を求めたおのこの回帰係数の信頼度の比較を行い、信頼度の最も低い説明変数を順次除去していき残った変数で再度回帰式を求めるという方法である。本分析における変数選択の基準は分散比 (F 値) であり、分散比が0.1を越える変数のうち最もF値が大きな変数を順次除外していくというものである。なお、筆者が行った分析においては、得られた数種の重回帰式のうち自由度調整済みの重相関係数が最も大きくなるモデルを最適モデルであるとみなした。

5.7.3 重回帰分析の結果

(1) 分極抵抗の逆数を目的変数とした場合

表-5.9および表-5.10に分極抵抗の逆数を目的変数とした場合の重回帰分析結果を示す。表-5.9はすべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数を示し

表-5.9 すべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数 (分極抵抗の逆数を目的変数とした場合)

	海中部	干満部	飛沫部
海水中のCl <sup>-</sup> 濃度	-0.669	-0.494	0.141
気温	-0.144	-0.467	-0.662
気温偏差	0.562	0.538	-0.626
湿度	-0.195	-0.007	0.345
風速	-0.414	-0.111	0.232

ている。また、表-5.10には自由度調整済みの重相関係数を基準とした場合の最適モデルを示している。なお、本分析においては標準化データを用いて分析を行っているため定数項は0となっている。

海中部の場合、鉄筋表面の不動態にとって不利な環境は、Cl<sup>-</sup>濃度が低い海水、低い気温、大きな気温偏差、低い湿度、小さい風速 (弱い波浪) となる。また、最適モデルの説明変数として、海水中のCl<sup>-</sup>濃度、気温偏差および風速が選定された。3つの説明変数の中で影響度が最も大きい変数は、海水中のCl<sup>-</sup>濃度である。気温偏差と風速の影響度は海水中のCl<sup>-</sup>濃度の影響度より小さい。

干満部の場合、鉄筋表面の不動態にとって不利な環境は海中部の場合と全く同一であった。これより考察すれば、鉄筋の不動態にとっては海中部と干満部はほぼ同一の環境であるとも考えられる。最適モデルの説明変数としては、海水中のCl<sup>-</sup>濃度、気温偏差および気温が選定された。気温偏差と気温が説明変数として同時に選定されるのは若干奇異な印象を受けるが、これについては以下のように解釈できる。すなわち、一般的傾向として気温が低い方が鉄筋の不動態にとっては厳しい環境と言えるが、逆にかなり気温が高い場合も不利であると解釈できる。3つの説明変数のうちでは、気温の影響度が最も大きく、気温偏差、海水中のCl<sup>-</sup>濃度と続いているが、これら3項目の影響度に大きな相違はない。

飛沫部の場合、鉄筋表面の不動態にとって不利な環境は、Cl<sup>-</sup>濃度が高い海水、低い気温、小さな気温偏差、高い湿度、大きな風速 (強い波浪) となる。また、自由度調整済みの重相関係数が最大となった場合の説明変数は、湿度、気温および気温偏差となる。ところが、気温と気温偏差の重回帰係数がともに負であることの合理的説明を行うことは難しい。したがって、この二つの変数のうちの一方が説明変数からはずれた場合のモデルをこの場合の最適モデルとみなした。このような考え方を基に求めた説明変数として気温のみが選定された。

上述したように、鉄筋の不動態の状態に関しては、海中部と干満部は環境条件が極めて似ていると考えられる

表-5.10 重回帰分析により得られた最適モデル

暴露環境	回 帰 式
海中部	$Y = -0.691$ (海水中的 $Cl^-$ 濃度) $+0.422$ (気温偏差) $-0.423$ (風速) $R^* = 0.358, R = 0.712$
干満部	$Y = -0.460$ (海水中的 $Cl^-$ 濃度) $+0.504$ (気温偏差) $-0.539$ (気温) $R^* = 0.502, R = 0.780$
飛沫部	$Y = -0.622$ (気温) $R^* = 0.343, R = 0.622$

$R^*$  : 自由度調整済みの重相関係数

$R$  : 重相関係数

が、飛沫部はそれとは異なる環境条件であると言える。

(2) 定電位ステップ試験の結果を目的変数とした場合

表-5.11および表-5.12に定電位ステップ試験結果を目的変数とした場合の重回帰分析結果を示す。表-5.11はすべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数を示しており、表-5.12は重回帰分析より得られた最適モデルを示している。

表-5.11 すべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数 (定電位ステップ法を目的変数とした場合)

	海中部	干満部	飛沫部
海水中的 $Cl^-$ 濃度		0.149	0.259
気温	モデル化	-0.099	-0.106
気温偏差	不可	-0.023	-0.567
湿度		0.559	0.255
風速		0.365	-0.141

海中部の場合は回帰式でモデル化することができなかった。このことは、分析の対象とした環境要因の項目のみでは定電位ステップ試験の結果、すなわち海中部におけるモルタル中鉄筋への酸素供給量の相違を十分に説明することはできないことを意味している。

干満部の場合、モルタル中鉄筋への酸素供給量が多くなる環境条件は、 $Cl^-$ 濃度の大きな海水、低い気温、小さ

な気温偏差、高い湿度および大きな風速 (強い波浪) となる。また、最適モデルの説明変数としては風速および湿度が選定された。湿度と風速の影響度を比較してみると、湿度の影響度の方が大きく、風速の影響度の約2倍となっている。

飛沫部の場合、モルタル中鉄筋への酸素供給量が多くなる環境条件は干満部の場合とはほぼ同様であるが、風速のみ傾向が異なる。すなわち、風速が小さい方、あるいは波浪の弱い方が酸素の供給量が多くなる。すなわち、干満部と飛沫部の環境の相違は風の影響もしくは波浪の影響によるものであることが推察される。また、最適モデルの説明変数として、湿度および気温偏差が選定された。しかし、このモデルの重相関係数は0.464にすぎず、適合性に優れたモデルであるとは言い難い。

干満部の場合も飛沫部の場合も最適モデルから風速が除外されていること、および風速以外の独立変数の重回帰係数の符号がすべて一致していることより、酸素の供給に影響を及ぼす環境条件は干満部および飛沫部では近いものであると考えられる。

(3) 発錆開始時刻を目的変数とした場合

表-5.13および表-5.14に発錆開始時刻を目的変数とした場合の重回帰分析の結果を示す。表-5.13はすべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数を示しており、表-5.14は重回帰分析より得られた最適モデルを示している。

表-5.12 重回帰分析により得られた最適モデル

暴露環境	回 帰 式
海中部	モデル化ができなかった
干満部	$Y = 0.562$ (湿度) $+0.312$ (風速) $R^* = 0.316, R = 0.643$
飛沫部	$Y = 0.281$ (湿度) $-0.512$ (気温偏差) $R^* = 0.095, R = 0.464$

$R^*$  : 自由度調整済みの重相関係数

$R$  : 重相関係数

表-5.13 すべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数（発錆開始時刻を目的変数とした場合）

	海中部	干満部	飛沫部
海水中のCl <sup>-</sup> 濃度	0.371	0.075	-0.894
気温	0.589	0.537	0.631
気温偏差	-0.218	0.326	0.185
湿度	0.093	-0.327	0.190
風速	-0.152	-0.436	-0.510

海中部の場合、発錆開始時刻が早くなる環境条件はCl<sup>-</sup>濃度が低い海水、低い気温、大きな気温偏差、低い湿度、大きな風速（激しい波浪）となる。また、最適モデルの説明変数として、気温および海水中のCl<sup>-</sup>濃度が選定された。この両者の影響度に大きな差はないが、気温の影響度の方が若干大きな値を示している。

干満部の場合、発錆開始時刻が早くなる環境条件は、Cl<sup>-</sup>濃度の低い海水、低い気温、小さな気温偏差、高い湿度、大きな風速（激しい波浪）となる。また、自由度調整済みの重相関係数が最大となる最適モデルの説明変数としては、気温、湿度、気温偏差および風速の4項目が選定された。しかし、気温および気温偏差の重回帰係数がともに正である、すなわち気温が低くかつ気温偏差が小さい方が発錆開始時刻が早いという結果を合理的に説明することは困難である。したがって、変数減少法の過程においてこれらの2変数のうちのどちらか一方が説明変数から除外された時のモデルをこの場合の最適モデルとみなした。その時の説明変数としては、気温および風速が選定された。この両者の影響度を比較してみると、気温の影響度の方が大きく、風速の影響度の約1.5倍となっている。

飛沫部の場合、発錆開始時刻が早くなる環境条件は、Cl<sup>-</sup>濃度の大きな海水、低い気温、小さな気温偏差、低い湿度、大きな風速（激しい波浪）である。最適モデルの説明変数として、気温、湿度、Cl<sup>-</sup>濃度および風速が選定

された。この4項目の影響度を比較してみると、海水中のCl<sup>-</sup>濃度の影響度が最も大きく、次いで気温、風速と続き、湿度の影響度が最も小さい。

表-5.13および表-5.14よりわかるとおり、発錆開始時刻に関しては海中部、干満部および飛沫部ごとに影響を及ぼす環境要因がそれぞれ異なる。その中で、共通しているのは気温が低いほど発錆開始時刻が早くなるという点と風速が大きくなるほど、すなわち波浪が激しくなるほど発錆開始時刻が早くなるという点である。

5.8 まとめ

本章においては、暴露を実施した港の環境要因と腐食量指標の構成要素（腐食進行期間、分極抵抗、定電位ステップ試験の結果）の関係を検討した。その結果、以下に示すような知見が得られた。

環境要因および海水成分の項目に関して主成分分析を行った結果、環境要因の項目を以下の5項目、すなわち、

- 1) 海水成分を代表する項目として、海水中のCl<sup>-</sup>濃度
- 2) 波浪条件および風の条件を代表する項目として、風速
- 3) 環境温度を代表する項目として、気温
- 4) 同じく環境温度を代表する項目として、気温偏差
- 5) 環境の乾湿・湿潤状態を代表する項目として、湿度

に絞ることができた。

分極抵抗の逆数と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、独立変数が以下のように選定された。すなわち、海中部の場合は海水中のCl<sup>-</sup>濃度、気温偏差および風速である。その3項目の中では、海水中のCl<sup>-</sup>濃度の影響度が最も大きく、気温偏差および風速の影響度は海水中のCl<sup>-</sup>濃度の影響度の約70%であった。干満部の場合は気温、気温偏差および海水中のCl<sup>-</sup>濃度が独立変数として選定され、その3項目の影響度はほぼ等しいレベルであった。飛沫部の場合は気温のみが説明変数として選定

表-5.14 重回帰分析により得られた最適モデル

暴露環境	回帰式
海中部	Y = 0.444 (気温) + 0.320 (海水中のCl <sup>-</sup> 濃度) R* = 0.311、R = 0.640
干満部	Y = 0.683 (気温) - 0.401 (風速) R* = 0.168、R = 0.536
飛沫部	Y = 0.598 (気温) - 0.811 (海水中のCl <sup>-</sup> 濃度) - 0.442 (風速) + 0.260 (湿度) R* = 0.479、R = 0.786

R\* : 自由度調整済みの重相関係数

R : 重相関係数



された。重回帰分析の結果より考察すれば、鉄筋の不動態の状態に関しては、海中部と干満部はほぼ同様の環境条件であると判断された。

定電位ステップ試験の結果と環境要因 5 項目について重回帰分析を行った結果、海中部の場合のみ最適なモデルが得られなかった。干満部および飛沫部については独立変数が以下のように選定された。すなわち、干満部の場合は湿度および風速が選定された。この 2 項目の中では、湿度の影響度の方が大きく、風速の影響度はその約 60% であった。飛沫部の場合は湿度および気温偏差が選定された。その 2 項目の中では、気温偏差の影響度が大きく、湿度の影響度はその約 60% であった。干満部と飛沫部に共通している環境要因は湿度であり、湿度が高いほどモルタル中鉄筋への酸素供給量は多くなるという傾向を示した。

発錆開始時刻と環境要因 5 項目について重回帰分析を行った結果、重回帰式における独立変数が以下のように選定された。すなわち、海中部の場合は気温および海水中の  $Cl^-$  濃度が選定された。その 2 項目の中では、気温の影響度の方が大きく、海水中の  $Cl^-$  濃度の影響度はその約 80% であった。干満部の場合は気温および風速が選定された。その 2 項目の中では、気温の影響度の方が大きく、風速の影響度はその約 60% であった。飛沫部の場合は風速、湿度、気温および海水中の  $Cl^-$  濃度が選定された。その 4 項目の中では、海水中の  $Cl^-$  濃度の影響度が最も大きく、次いで気温の影響度、風速の影響度、湿度の影響度の順であった。湿度の影響度は、海水中の塩化物イオンの影響度の約 30% 程度であった。海中部、干満部および飛沫部に共通している環境要因は気温と風速であり、気温が低いほど、また風速が大きいほど発錆開始時刻は早くなるという傾向であった。

#### 参考文献

- 1) 佐藤昭二・合田良実：海岸・港湾一わかり易い土木講座，17，p.110，彰国社，1972.3
- 2) 測定値の統計的処理（電気学会大学講座），電気学会，昭和43年2月
- 3) 田中豊・垂水共之・脇本和昌編：パソコン統計ハンドブックⅡ（多変量解析）共立出版，1984.9
- 4) 藤沢偉作：楽しく学べる多変量解析法，現代数学社，1985.6
- 5) 大村平：多変量解析の話，日科技連出版，1988.2
- 6) 新村秀一：パソコンによるデータ解析，講談社，1995.11
- 7) 清水誠：データ分析はじめての一步，講談社，1996.10

## 6. 環境要因の定量的評価の試みおよび耐久設計への応用に関する検討

### 6.1 序節

4章においてモルタル中の鉄筋の腐食量指標について考察し、以下の3項目、すなわち鉄筋の分極抵抗の逆数、定電位ステップ試験の計測結果および腐食進行期間の積が腐食量指標となり得ることを示した。また、5章において、これらの3つの腐食量指標構成要素と環境条件（気象条件、波浪条件、海水成分）の関係を考察し、最終的には重回帰式を求めた。本章においては、上記の結果に基づき本研究の主題である環境要因の定量的評価を試みる。そして、その結果を耐久設計に応用する考え方について考察するものである。

本研究の基本的な目的は、ある港湾環境にRC構造物が新規に建設される場合あるいは既に建設されている場合に、その環境が構造物の塩害に及ぼす影響の程度を定量的かつ総合的に評価することである。さらに、その定量的評価が耐久設計あるいは補修設計に応用可能であることが望ましい。本研究における環境条件の評価の手順は3章の3.3（図-3.8）において既述している。その手順は、まず構造物が立地する地点の環境要因の項目を個別に評価し、その評価値をもとに発錆開始時刻、鉄筋表面の不動態の状態および鉄筋表面への酸素の供給量を推定評価する。そして、この三者を総合的に評価することにより、腐食速度および腐食量を推定し、それに基づき総合的な環境条件の評価を行うというものである。言い換えれば、環境要因項目から腐食量を推定するというものである。そして、この環境条件の総合評価を耐久設計および補修設計に応用していく必要がある。

耐久設計および補修設計についてはこれまでに学協会あるいは学術論文においていくつかの案が示されている。しかし、これらの設計法は現時点では十分にオーソライズされていない。本章においては、これまでに学協会あるいは学術論文などで発表されている耐久設計法の案を取りまとめ、それらに共通する基本的考え方を整理した上で耐久設計の基本的枠組みについて考察する。そして、土木学会より提案されている耐久設計法の案に対して本研究の成果を応用する一つの考え方を示す。

### 6.2 環境要因の定量的評価試案

#### (1) 評価の手順

1章ならびに前節においても述べたように、環境要因の定量的評価の目的は耐久設計あるいは補修設計に資することである。表-6.1に筆者のイメージによる総合的な

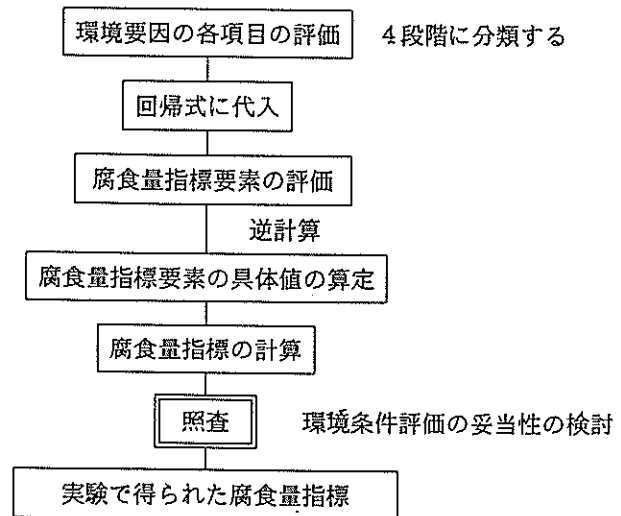


図-6.1 環境条件評価の手順およびその確認

環境条件評価表を示す。また、図-6.1に環境条件の評価手順を示す。基本的な考え方は、環境要因の項目である「気温」「湿度」「風速」「海水中のCl<sup>-</sup>濃度」「気温偏差」をおのおのまず個別に評価する。そして、その評価結果を前章において求めた重回帰式に代入することにより、腐食量指標の構成要素を評価する。その評価より腐食量指標の構成要素の具体的値を逆に求め、さらに腐食量指標値を算出する。そして、求めた腐食量指標値を用いて、海中部、干満部、飛沫部ごとに総合評価を行うという手順である。

総合評価を何らかの方法により試みた場合、その総合評価が妥当なものであるかを確認することが必要であるが、本検討においては、図-6.1に示すように、環境要因の評価より求めた腐食量指標値と暴露実験より得られた腐食量指標値を比較することにより、環境条件評価の妥当性を検討する。

#### (2) 環境要因の評価試案

##### a) 標準偏差に基づく評価

あるデータのグループが存在する場合、そのグループ内のデータのばらつきを示す統計値として分散あるいは標準偏差が多用されている。また、標準偏差は品質管理を行う際にも重要な役割を果たしている。この標準偏差を用いて各項目の評価を試みた。その基本的考え方を図-6.2に示す。図に示すように、4段階の評価を行うこととし、その境界を「平均値 (m)」、「平均値+標準偏差 (m+σ)」、「平均値-標準偏差 (m-σ)」とするものである。そして、「m-σ」より小さい範囲に属するものを「穏やか」と判定し「-1.5点」を与える。「m-σ」と「m」の範囲に属するものを「やや穏や

表-6.1 筆者による環境条件評価の考え方

港	気象・海象条件の評価					総合評価		
	気温	湿度	風速	海水中のCl <sup>-</sup> 濃度	気温偏差	海中部	干満部	飛沫部
l								
i	+1.5	+0.5	+1.5	-0.5	-1.5	IV	II	III
n								

注：表中の数字は仮想数字であり、特に意味を有しない

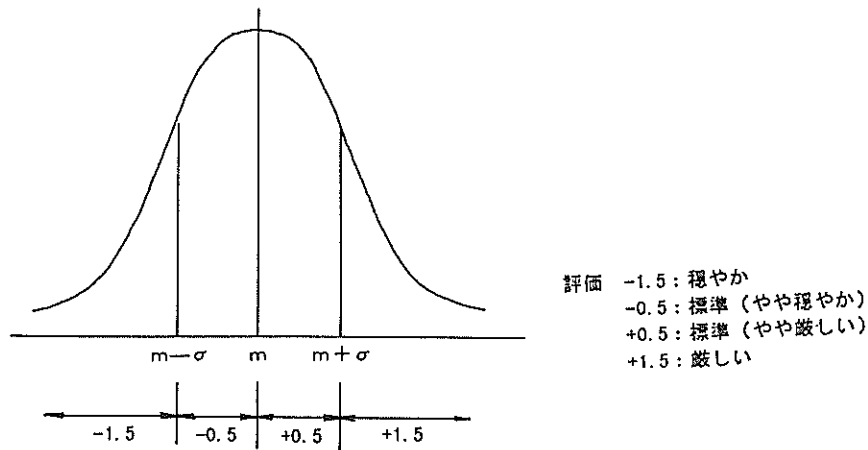


図-6.2 標準偏差を用いた各要因の評価（分類）の考え方

表-6.2 標準偏差を用いた環境要因の評価

	海水中のCl <sup>-</sup> 濃度	気温	気温偏差	湿度	風速
秋田	-1.5	-0.5	0.5	0.5	0.5
伏木富山	-1.5	-0.5	-0.5	1.5	-0.5
横浜	0.5	0.5	-0.5	-0.5	0.5
塩釜	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5
宮古	0.5	-1.5	0.5	0.5	-1.5
広島	-0.5	0.5	-0.5	-1.5	0.5
小松島	0.5	0.5	-0.5	-1.5	-0.5
神戸	0.5	0.5	-0.5	-1.5	-0.5
舞鶴	0.5	-0.5	-0.5	1.5	-1.5
北九州	0.5	0.5	-0.5	-0.5	-0.5
鹿児島	0.5	0.5	-0.5	-0.5	-1.5
油津	0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5
名古屋	-1.5	0.5	-0.5	-0.5	-0.5
清水	-1.5	0.5	-0.5	0.5	1.5
小樽	0.5	-1.5	1.5	-0.5	-0.5
苫小牧	0.5	-1.5	1.5	1.5	-0.5
那覇	0.5	1.5	1.5	0.5	1.5
石垣	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

か」と判定し「-0.5点」を与える。「m」と「m+σ」の範囲に属するものを「やや厳しい」と判定し「+0.5点」を与える。そして、「m+σ」より大きいものを「厳しい」と判定し「+1.5点」を与えるものである。

このように4段階の分類を考えたのは、さらに細分する場合その信頼性を十分に確保できると考えにくいこと、一方、3段階の分類では若干粗いという感じを認めないためである。現時点では、4段階の分類でほぼ妥当であると考えた。なお、上述のように4段階の分類に対して-1.5点、-0.5点、+0.5点、+1.5点を与えた理由は、以後に続く計算をスムーズに進めるためにZ得点による標準化データと同等の意味を持たせるためである。

b) クラスタ分析による評価

多変量解析の一手法としてクラスタ分析と呼ばれる分析がある。これは、あるグループ内のデータを分類する、あるいは多数のグループを分類する際に用いる手法である。なお、クラスタ分析手法の中でも、分類の対象とするデータあるいはグループの類似度の尺度をどのように定めるかでいくつかの種類がある。本研究においては、クラスタ分析手法を用いて環境要因の各項目の分類も試みた。分析は前出の多変量解析プログラムSPSSを用いて行い、その際データの類似度（非類似度）の尺度としてユークリッドの平方距離を採用した。なお、クラスタ分析においても前項において述べた標準偏差を用いた分類と統一するために4段階の分類を試みた。このように、クラスタ分析を適用することにより、合理的に各項目を分類することができる。しかし、この方法によると分類の境界を明確に数値で示すことは困難となる。したがって、クラスタ分析による分類結果は前項(1)で述べた標準偏差を用いた評価（分類）の妥当性

を確認するためのものと位置づけた。

c) 評価の結果および考察

表-6.2に標準偏差を用いて実施した環境要因の評価（分類）の結果を示す。また、図-6.3～図-6.7に標準偏差による分類とクラスタ分析による分類の比較を示す。これらの図よりわかるとおり、海水中のCl<sup>-</sup>濃度および気温偏差において両者の不一致があるが、その他の項目は両評価値が比較的よく一致している。図-6.3および図-6.7のように両者の不一致が多い場合でも、大部分のデータは一分類ずつずれていることがわかる。したがって、図-6.3および図-6.7の場合でも定性的には両手法による分類は同一の答えを示しているとも考え得る。これより、標準偏差を用いた分類は概ね妥当な分類であると判断した。

(3) 環境要因評価に基づく腐食量指標構成要素の評価

a) 海中部の場合

表-5.10、表-5.12、表-5.14に示される重回帰分析の結果を(6.1)式および(6.2)式に示す。

$$\begin{aligned} \text{(分極抵抗の逆数)} = & \\ & -0.691 \text{ (海水中のCl}^{-}\text{濃度)} + 0.422 \text{ (気温偏差)} \\ & -0.423 \text{ (風速)} \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \text{(発錆開始時刻)} = & \\ & +0.444 \text{ (気温)} + 0.320 \text{ (海水中のCl}^{-}\text{濃度)} \end{aligned} \quad (6.2)$$

なお、海中部の場合、定電位ステップ試験の結果に関しては最適な重回帰式を得ることができなかった。表-6.2に示す環境要因の評価結果を(6.1)式および(6.2)式に代入することにより、分極抵抗の逆数と発錆開始時刻の評価値を求めた。その算出結果を表-6.3に示す。表-6.2

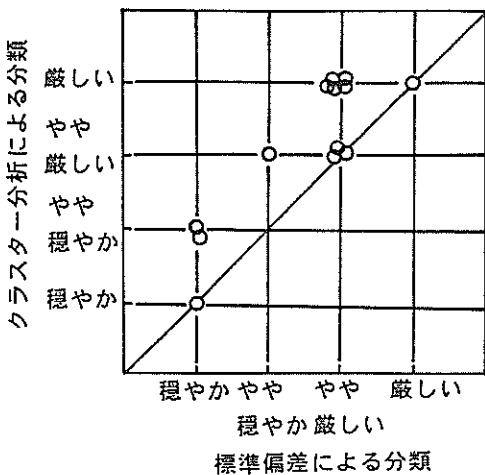


図-6.3 二分類の比較（海中のCe濃度）

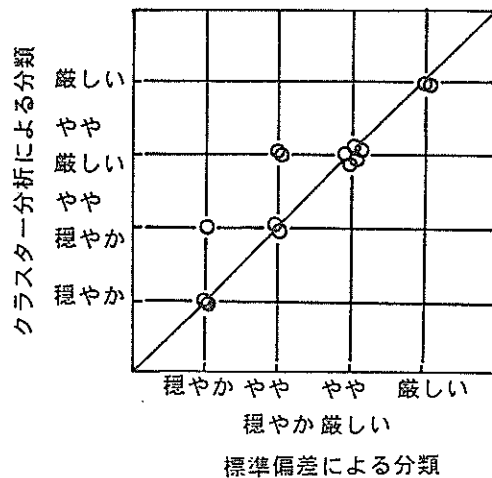


図-6.4 二分類の比較（気温）

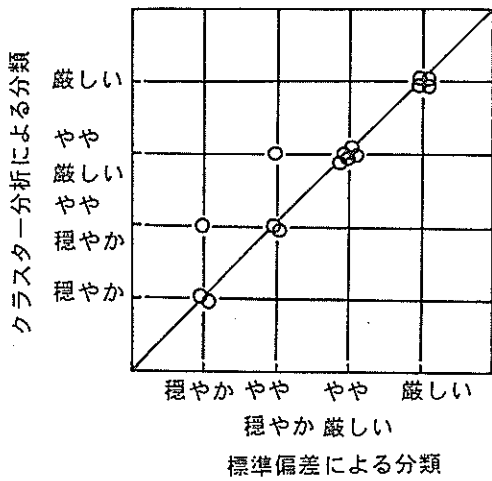


図-6.5 二分類の比較 (湿度)

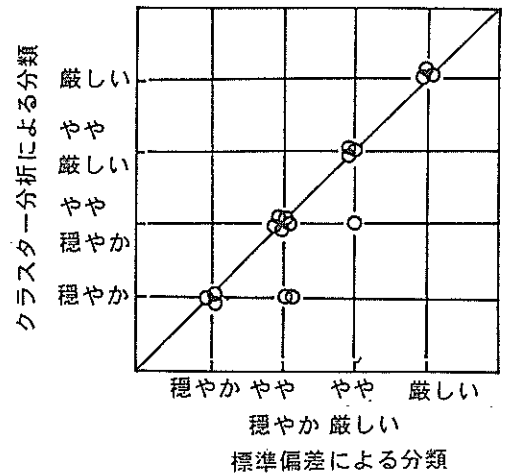


図-6.6 二分類の比較 (風速)

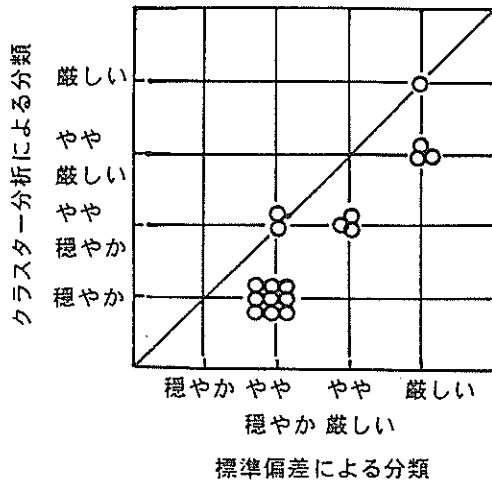


図-6.7 二分類の比較 (気温偏差)

に示す評価値は性質上 Z 得点と考えることができること、また、(6.1)式および(6.2)式は標準化データに対して求めた重回帰式であることより、表-6.3に示す計算結果も性質上標準化データと考え得る。

b) 干満部の場合

表-5.10, 表-5.12, 表-5.14に示されている重回帰分析の結果を(6.3)式~(6.5)式に示す。

$$\begin{aligned} \text{(分極抵抗の逆数)} = & \\ & -0.460 \text{ (海水中のCl}^-\text{濃度)} + 0.504 \text{ (気温偏差)} \\ & -0.539 \text{ (気温)} \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \text{(定電位ステップ試験の結果)} = & \\ & +0.562 \text{ (湿度)} + 0.312 \text{ (風速)} \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} \text{(発錆開始時刻)} = & \\ & +0.683 \text{ (気温)} - 0.401 \text{ (風速)} \end{aligned} \quad (6.5)$$

表-6.2に示す環境要因の評価結果を(6.3)式~(6.5)式に代入することにより、腐食量指標の構成要素の評価値を求めた。その算出結果を表-6.4に示す。表-6.4に示されている評価結果も性質上標準化データと考え得る。

c) 飛沫部の場合

表-5.10, 表-5.12, 表-5.14に示されている重回帰分析の結果を(6.6)式~(6.8)式に示す。

$$\begin{aligned} \text{(分極抵抗の逆数)} = & \\ & -0.622 \text{ (気温)} \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} \text{(定電位ステップ法の結果)} = & \\ & +0.281 \text{ (湿度)} - 0.512 \text{ (気温偏差)} \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \text{(腐食開始時刻)} = & \\ & +0.598 \text{ (気温)} - 0.811 \text{ (海水中のCl}^-\text{濃度)} \\ & - 0.442 \text{ (風速)} + 0.260 \text{ (湿度)} \end{aligned} \quad (6.8)$$

表-6.2に示す評価結果を(6.6)式~(6.8)式に代入し、腐食量指標の構成要素の評価値を求めた。その算出結果を表-6.5に示す。表-6.5に示されている評価結果も性質上標準化データと考え得る。

(4) 構成要素の評価に基づく腐食量指標の算出

表-6.3~6.5に示す腐食量指標の構成要素の評価値は、性質上標準化データ (Z 得点) と考え得る。なお、標準化データ (Z 得点) の定義は(6.9)式によるものであり、この式を用いて標準化データから原データを計算することも可能である。

$$Z = \frac{x - m}{\sigma} \quad (6.9)$$

ここで、 $Z$  : 標準化データ (Z得点)  
 $m$  : 母集団 (グループ) の平均値  
 $\sigma$  : 母集団 (グループ) の標準偏差  
 $x$  : 原データ

この(6.9)式に表-6.3~6.5に示す腐食量指標の構成要素の評価結果を代入することにより腐食量指標の構成要素の値を逆に求めた。この算出結果を表-6.6~6.8に示す。なお、算出する際に平均値と標準偏差が必要であるが、この両値は第4章でまとめた暴露実験結果の平均値および標準偏差を用いた。また、表-6.6~6.8にこれら構成要素より求めた腐食量指標値も併せて示す。なお、腐食量指標は暴露2年時を対象として計算しているため、腐食進行期間は、「24ヶ月一発錆開始時刻」より算出したものである。なお、上述したとおり、海中部の場合は定電位ステップ試験については評価が不可能であったため、表-6.6において示している腐食量指標は分極抵抗の逆数と腐食進行期間を掛け合わせたものに、定電位ステップ試験の実験値の平均値を乗じたものを便宜上用いている。

図-6.8~6.10に上記の手順で環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標の比較を示す。干満部および飛沫部に比べて海中部の方が若干不一致が

大きいようである。この理由として、海中部の場合は定電位ステップ試験を評価していないためとも考えられる。図-6.8~6.10に示されるとおり、環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標が比較的良好一致しているデータもあるが両者が一致していないデータも存在する。干満部および飛沫部の場合は大まかな傾向はつかめているが、両者が完全に一致している訳ではない。一部のデータで両者の不一致が大きいデータも存在する点は極めて重要であり、このことは、本研究で取り上げた環境要因のみでは十分に評価することができないほど厳しい環境も存在するというを示している。図-6.8~6.10における実線は両指標値が一致するラインを示し、点線は環境要因評価から求めた腐食量指標よりも実験から求めた腐食量指標が0.05だけ大きくなるラインを示している。一つの考え方ではあるが、環境条件評価を行う際に実線で示すラインではなく点線で示すラインで評価を行えば、ほぼすべてのデータを安全側で評価することができることになる。この考え方はあくまでも一案にすぎず、また、評価の精度の問題も残されているが、一つの考え方であると考えている。

(5) 最終的な環境条件評価試案

a) 環境要因の評価基準試案

前項までに述べたように、環境要因の各項目の評価に

表-6.3 環境要因評価に基づく腐食量指標構成要素の評価 (海中部)

	分極抵抗の逆数	定電位ステップ試験結果	発錆開始時刻
秋田	0.61	評 価 が 不 可	-0.70
伏木富山	0.62		-0.70
横浜	-0.77		0.38
塩釜	-0.77		-0.06
宮古	0.50		-0.51
広島	-0.50		0.06
小松島	-0.77		0.38
神戸	-0.77		0.38
舞鶴	-0.34		-0.06
北九州	-0.77		0.38
鹿児島	0.08		0.38
油津	-1.19		0.38
名古屋	0.62		-0.26
清水	-0.23		-0.26
小樽	0.50		-0.51
苫小牧	0.50		-0.51
那覇	-0.35		0.83
石垣	-1.04	1.15	

表-6.4 環境要因評価に基づく腐食量指標構成要素の評価（干満部）

	分極抵抗の逆数	定電位ステップ試験結果	発錆開始時刻
秋田	0.71	0.44	-0.54
伏木富山	0.20	0.69	-0.14
横浜	-0.75	-0.13	0.14
塩釜	-0.21	1.00	-0.54
宮古	0.83	-0.19	-0.42
広島	-0.80	-0.69	0.14
小松島	-1.26	-1.00	0.54
神戸	-1.26	-1.00	0.54
舞鶴	-0.72	0.38	0.26
北九州	-1.26	-0.44	0.54
鹿児島	-0.75	-0.75	0.94
油津	-0.75	0.75	-0.26
名古屋	-0.34	-0.44	0.54
清水	-0.34	0.75	-0.26
小樽	1.33	-0.44	-0.82
苫小牧	1.33	0.69	-0.82
那覇	-0.28	0.75	0.42
石垣	-0.74	1.31	0.42

表-6.5 環境要因評価に基づく腐食量指標構成要素の評価（飛沫部）

	分極抵抗の逆数	定電位ステップ試験結果	発錆開始時刻
秋田	0.31	0.40	0.83
伏木富山	0.31	1.19	1.53
横浜	-0.31	0.12	-0.46
塩釜	0.31	0.68	-0.54
宮古	0.93	-0.12	-0.51
広島	-0.31	0.35	0.09
小松島	-0.31	0.35	-0.28
神戸	-0.31	0.35	-0.28
舞鶴	0.31	1.19	0.35
北九州	-0.31	0.63	-0.02
鹿児島	-0.31	0.12	0.43
油津	-0.31	0.40	-0.64
名古屋	-0.31	0.63	1.61
清水	-0.31	0.91	0.98
小樽	0.93	-0.91	-1.21
苫小牧	0.93	-0.35	-0.69
那覇	-0.93	-0.63	-0.04
石垣	-0.93	-0.35	-0.59

表-6.6 構成要素の評価より求めた腐食量指標値（海中部）

	分極抵抗の逆数 ( $\times 10^{-3} / \Omega$ )	定電位ステップ試験 ( $\mu A/cm^2$ )	発錆開始時刻 (月)	腐食量指標 (月・ $\mu A/cm^2 / \Omega$ )
秋田	0.93	評 価 不 可  平均値 5.40	3.26	0.10
伏木富山	0.93		3.26	0.10
横浜	0.57		5.06	0.06
塩釜	0.57		4.32	0.06
宮古	0.90		3.59	0.10
広島	0.64		4.53	0.07
小松島	0.57		5.06	0.06
神戸	0.57		5.06	0.06
舞鶴	0.68		4.32	0.07
北九州	0.57		5.06	0.06
鹿児島	0.79		5.06	0.08
油津	0.45		5.06	0.05
名古屋	0.93		4.00	0.10
清水	0.71		4.00	0.08
小樽	0.90		3.59	0.10
苫小牧	0.90	3.59	0.10	
那覇	0.68	5.79	0.07	
石垣	0.50	6.32	0.05	

表-6.7 構成要素の評価より求めた腐食量指標値（干満部）

	分極抵抗の逆数 ( $\times 10^{-3} / \Omega$ )	定電位ステップ試験 ( $\mu A/cm^2$ )	発錆開始時刻 (月)	腐食量指標 (月・ $\mu A/cm^2 / \Omega$ )
秋田	0.99	7.91	4.09	0.16
伏木富山	0.85	9.23	4.47	0.15
横浜	0.59	4.94	4.73	0.06
塩釜	0.74	10.88	4.09	0.16
宮古	1.02	4.61	4.20	0.09
広島	0.58	1.96	4.73	0.02
小松島	0.46	0.31	5.11	0.00
神戸	0.46	0.31	5.11	0.00
舞鶴	0.60	7.58	4.84	0.09
北九州	0.46	3.29	5.11	0.03
鹿児島	0.59	1.64	5.49	0.02
油津	0.59	9.56	4.35	0.11
名古屋	0.71	3.29	5.11	0.04
清水	0.71	9.56	4.35	0.13
小樽	1.16	3.29	3.82	0.08
苫小牧	1.16	9.23	3.82	0.22
那覇	0.72	9.56	5.00	0.13
石垣	0.60	12.53	5.00	0.14



表-6.8 構成要素の評価より求めた腐食量指標値（飛沫部）

	分極抵抗の逆数 ( $\times 10^{-3} / \Omega$ )	定電位ステップ試験 ( $\mu A/cm^2$ )	発錆開始時刻 (月)	腐食量指標 (月・ $\mu A/cm^2 / \Omega$ )
秋田	0.67	7.21	26.55	-0.01
伏木富山	0.67	9.01	34.36	-0.06
横浜	0.56	6.57	12.27	0.04
塩釜	0.67	7.85	11.40	0.07
宮古	0.77	6.05	11.69	0.06
広島	0.56	7.10	18.40	0.02
小松島	0.56	7.10	14.30	0.04
神戸	0.56	7.10	14.30	0.04
舞鶴	0.67	9.01	21.24	0.02
北九州	0.56	7.73	17.19	0.03
鹿児島	0.56	6.57	22.10	0.01
油津	0.56	7.21	10.25	0.06
名古屋	0.56	7.73	35.23	-0.05
清水	0.56	8.37	28.29	-0.02
小樽	0.77	4.25	3.89	0.07
苫小牧	0.77	5.53	9.67	0.06
那覇	0.46	4.89	16.90	0.02
石垣	0.46	5.53	10.77	0.03

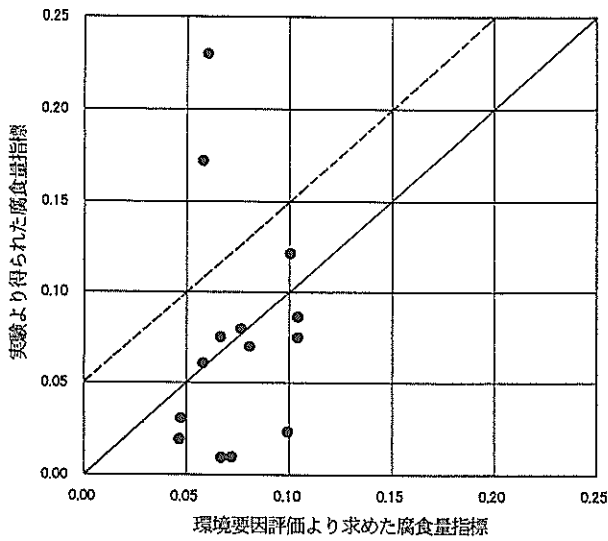


図-6.8 環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標の比較（海中中部）

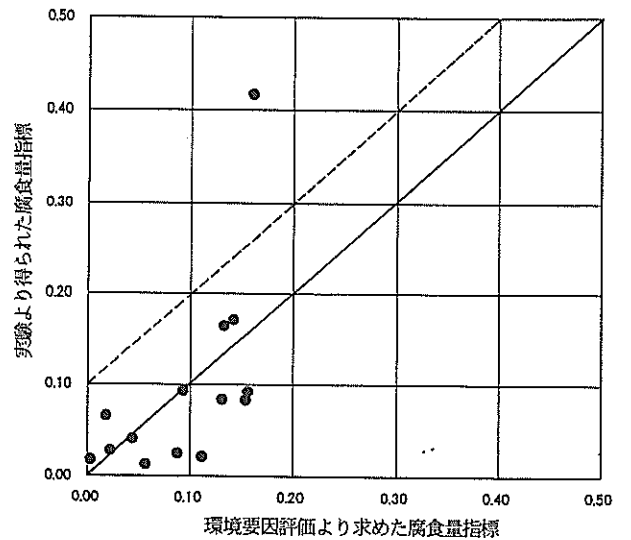


図-6.9 環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標の比較（干満部）

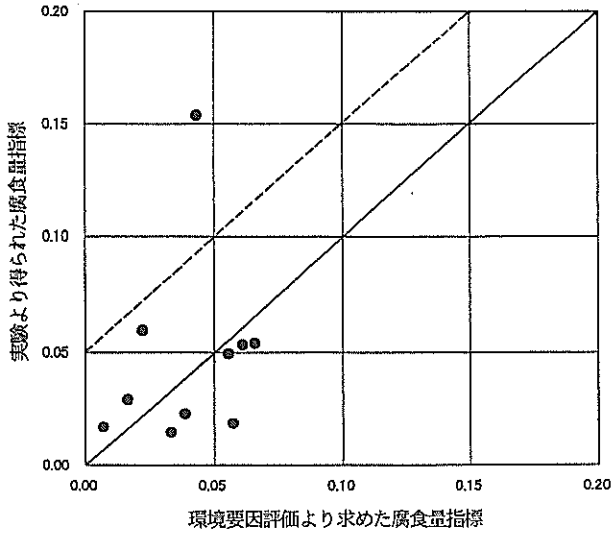


図-6.10 環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標の比較（飛沫部）

において標準偏差を用いることによりほぼ妥当な評価を行うことが可能であることがわかった。そこで、環境要因の各項目の評価基準として表-6.9に示すような基準試案を考えた。表-6.9に示す試案は各項目を4段階に評価するものであり、その境界を「 $m-\sigma$ 」、「 $m$ 」、「 $m+\sigma$ 」としている。なお、この平均値および標準偏差は本研究において収集した各港の気象データに基づくものである。

表-6.9 環境要因の評価基準試案

	評価値			
	-1.5	-0.5	+0.5	+1.5
海水中のCl <sup>-</sup> 濃度 (ppm)	~11398.3	~15345.8	~19293.3	19293.3~
月間平均気温の年間合計 (°C)	~140.6	~189.3	~238.0	238.0~
月間平均湿度の年間合計 (%)	~807.7	~850.5	~893.2	893.2~
月間平均風速の年間合計 (m/s)	~31.3	~42.9	~54.5	54.5~
月間気温偏差の年間合計 (°C)	~3.9	~35.8	~67.7	67.7~

b) 腐食量指標の評価基準 (案)

表-6.9に示す評価基準試案に基づき環境要因の各項目を評価し、その評価結果に基づき腐食量指標を算出することになるが、その次のステップとして、算出した腐食量指標をある考え方にに基づき評価することが必要である。その腐食量指標の評価がすなわち最終的な環境条件の評価となる。本研究においては腐食量指標の評価方法を以下のように考えた。

4章の図-4.14~4.16に示す発錆面積率と腐食量指標の関係を示す一次の近似式は以下の(6.10)式~(6.12)式に示すとおりである。

海中部

$$(\text{発錆面積率}) = 14.9 \times (\text{腐食量指標}) + 0.8 \quad (6.10)$$

干満部

$$(\text{発錆面積率}) = 13.4 \times (\text{腐食量指標}) + 1.2 \quad (6.11)$$

飛沫部

$$(\text{発錆面積率}) = 26.7 \times (\text{腐食量指標}) + 0.1 \quad (6.12)$$

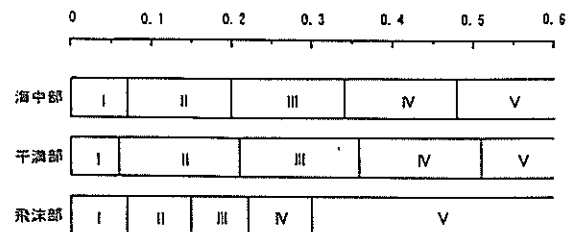
図-4.14~4.16に示されているデータは暴露期間が2年の場合であり、腐食面積率が最大の場合で約8%を示している。したがって、暴露2年では腐食が最も進んだ場合でも約10%程度が最大であると推定し、発錆面積率を指標にして、0~2%を最も穏やかな条件の場合であると判定し評価値「I」、2~4%に対して評価値「II」、4~6%に対して評価値「III」、6~8%に対して評価値「IV」、8~10%を最も厳しい条件であると判定し評価値「V」を与えるという評価方法を考えた。そして、このような発錆面積率の区分に対応する腐食量指標を、海中部、干満部、飛沫部おのおのに対して求めた。その結果を表-6.10および図-6.11に示す。表-6.10および図-6.11に示すものが本研究における最終的な環境条件評価となる。

図-6.11よりわかるとおり、腐食量指標の分類(評価)は海中部、干満部、飛沫部ごとに異なるものとなる。海中部および干満部は比較的近い分類となっているが、

表-6.10 腐食量指標の評価基準試案

	発錆面積率				
	0~2%	2~4%	4~6%	6~8%	8~10%
	I	II	III	IV	V
海中部	~0.07	0.07~	0.20~	0.34~	0.48~
干満部	~0.06	0.06~	0.21~	0.36~	0.51~
飛沫部	~0.07	0.07~	0.15~	0.22~	0.30~

環境要因評価より求めた腐食量指標



表中の数値は評価値を示す

図-6.11 腐食量指標の評価基準試案

飛沫部はそれとは大きく異なる。その特徴は、腐食量指標が同じ値であれば、海中部および干満部に比べて飛沫部の方が厳しい環境条件と評価されることである。すなわち、長期の暴露期間を想定した場合、例えば5年、10年、20年といった場合の腐食量指標を想定すると、暴露期間が長くなるにつれて飛沫部の環境条件の評価値と海中部および干満部の環境条件の評価値の差がさらに大きくなることになる。

### 6.3 耐久設計への応用

以上、6.2までに本研究に基づく環境条件評価試案を述べた。次に、この環境条件評価試案を耐久設計に応用する考え方について考察する。

設計という用語は極めて広く使用されており、設計にも多くの種類がある。港湾工学に関する分野では、たとえば耐震設計とは地震に対して構造物を安全に設計する技術のことをさし、耐波設計とは防波堤、海岸堤防あるいは海洋構造物などを高波に対して安全でかつ合理的に設計する方法のことをさす<sup>1)</sup>。また、構造設計とは種々の外力に対して、建設する構造物が耐え得るように構造体の設計をすることと言え、その手法別に許容応力度設計法あるいは限界状態設計法などに分類される。

耐久設計という言葉は比較的新しい用語と言え、定義自身がまだ曖昧であり、学協会で議論が進められているのが実状である。本項においては、他の研究者の耐久設計に対する考え方を取りまとめつつ、港湾構造物の耐久設計の基本的考え方を考察し、本研究の成果である環境条件の定量的評価を耐久設計へ応用する方法について考察する。

#### (1) 耐久設計法に関する既往の提案

##### a) 土木学会の提案 1<sup>2)3)4)</sup>

この提案によれば、耐久設計の定義は、「所望の期間メンテナンスフリーでその後所定の期間の維持管理が容易に行えるように、コンクリートの品質、施工方法ならびに構造物の詳細を環境その他に対して総合的に設計すること」とされている。耐久性の照査は、 $T_p$  (耐久指数)  $\geq S_p$  (環境指数)、という式を用いて行うとしている。耐久指数 ( $T_p$ ) の決定ファクターとして、コンクリート材料に関して7項目、コンクリートおよび補強材に関して8項目、設計ひびわれに関して2項目、鉄筋詳細・形状・図面に関して8項目、コンクリート工に関して6項目、鉄筋工・型わく・支保工に関して4項目、の計35項目を挙げている。

一方、環境指数 ( $S_p$ ) の決定ファクターとして、塩分の影響、凍結融解作用、の2項目が挙げられている。耐

久指数の精緻さに比べた場合環境指数が若干粗いという感じは否定できないが、この分野の研究データが十分に存在しないことを示していると考えられる。

この提案の大きな特徴は、設計における照査の方法を限界状態設計法の照査式に近い形で表現しようとしている点であると考えられ、これは上に示したように耐久性の照査を極めて簡便な式で実施しようとしている点に現れている。

##### b) 土木学会の提案 2<sup>4)</sup>

この提案によれば、耐久性の照査は、耐久限界期間 ( $T_s$ )  $\geq$  設計耐用期間 ( $T_d$ )、という式を用いて行うことになっている。そして、耐久限界期間 ( $T_s$ ) は供用開始から鉄筋腐食が開始されるまでの期間 ( $T_{cr}$ ) と鉄筋腐食開始後からコンクリートに腐食ひびわれが発生するまでの期間 ( $T_{ck}$ ) の和で表わされるとされている。この  $T_{cr}$  と  $T_{ck}$  をあらかじめ設計段階で推定することを提案し、算定式が提示されている。照査式より理解されたとおり、この考え方は構造物の耐久性上の限界状態を腐食ひびわれの発生時と考えている。この提案は、上述の土木学会の提案 1 に比べて、塩害過程により則した考え方と言える。この提案の重要な点は、 $T_{cr}$  と  $T_{ck}$  を精度よく推定できるかという点である。

##### c) 日本コンクリート工学協会の提案<sup>5)</sup>

この提案によれば、鉄筋コンクリート構造物の内部鉄筋の腐食を考慮した場合の限界状態を、鉄筋の腐食が発生した時、と考えている。この限界状態の設定は若干厳しすぎると思われるが、このような考え方も一つの考え方としてはあり得るものと思われる。そして、耐久性の照査を、等価かぶり厚さ ( $C$ )  $\geq$  劣化深さ ( $C_{de}$ )、という式を用いて行うとしている。

本提案によると、等価かぶり厚さを決定する要因として、設計かぶり厚さ、施工誤差、仕上げ材の有無、を挙げている。一方、劣化深さを決定する要因として、環境係数 (中性化、塩害)、品質係数 (材料、設計、施工)、設計耐用期間、の3項目を挙げている。

この考え方は上記の土木学会の提案 2 の考え方に比較的近いが、構造物の限界状態の設定が土木学会の提案 2 とは異なっている。

##### d) V. C. Li の提案<sup>6)</sup>

V. C. Li は繊維補強コンクリートの開発を出発点として、その応用を促進する意味もあり「Performance Driven Design」という考え方を提示している。議論の出発点が上記の学協会の提案法とは異なるが、この「Performance Driven Design」の考え方も耐久設計と深く関連するものであるため、その概要をここで述べる。

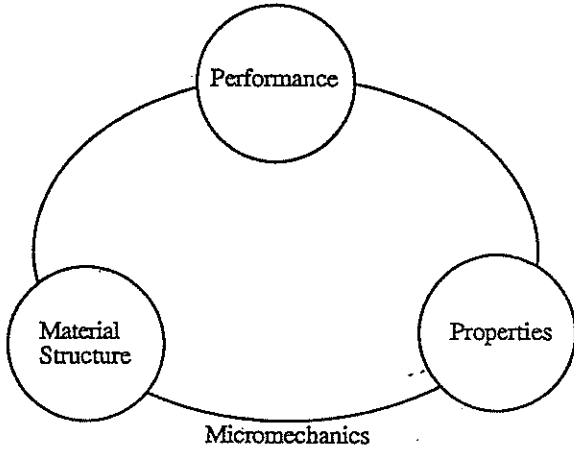


図-6.12 Liが提案する「Performance Driven Design」の基本的な考え方

図-6.12にその基本的考え方を示す。「Performance Driven Design」とは、まず与えられた構造物あるいは構造部材に要求される挙動 (performance) あるいは機能 (functionality) を決定し、その要求機能を満足させ得るような性質を有する材料を選定すると同時に、材料の構造を設計するというものである。この「Performance Driven Design」の特徴は、構造物に要求される挙動と材料の構造を直接定量的に関係づけるという点である。

Liは構造物側からの要求性能として「Durability (耐久性)」を取り上げ、材料側の性質として「Crack Width (ひびわれ幅)」の制御を考慮し、繊維補強コンクリートの材料構造を設計することによりひびわれ幅を制御するという考え方を提案している。その基本的考え方を図-6.13に示す。この考え方は耐久設計の一つの考え方ととらえることが可能である。Liの提案は、材料開

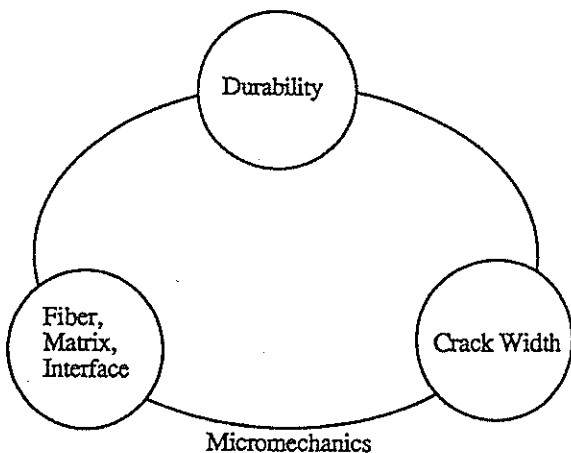


図-6.13 耐久性の確保を主眼とした場合の「Performance Driven Design」

発を起点としている点で純粋な耐久設計の範疇に入らないかもしれないが、構造物の設計時に耐久性を考慮した材料の設計手法を確立することをLiは主張している。しかしながら、耐久性の照査をどのように行うかという点にまではLiは言及していない。

(2) 港湾構造物の耐久設計に関する関・大即の提案<sup>7)</sup>

港湾構造物を対象を絞って耐久設計を論じているのはおそらくこの関・大即の提案が最初のものであると思われる。関・大即による耐久設計の考え方は、「設計耐用年数内にはできるだけ劣化しないよう設計・施工するが、ある程度の劣化は許容し、計画的な維持管理によって耐用年数の低下がないようにする。やむをえない場合には、補修あるいは補強を行う」というものである。目標耐用年数、あるいは実現可能な耐用年数を、ケーソンのように壁が主体のものでは100年、棧橋上部工のようにはりや床版が主体のものでは50年、と設定している。このような耐用年数を実現するために、設計・施工の段階において講じる配慮を耐久設計であるとしている。

関・大即の提案においては、材料に関する配慮として以下の項目を挙げている。すなわち、第1種防食法として、高炉セメントの使用、低水セメント比コンクリートの使用、低単位水量コンクリートの使用、混和材の使用、ボゾラン反応性物質の混入、ポリマーセメントの使用、鋼繊維補強コンクリートの使用を挙げている。第2種防食法として、コンクリートの表面処理 (表面塗装, 含浸塗装, モルタル被覆, 永久型枠), 鋼材への防食性の付与 (被覆防食, 電気防食, 耐塩性鉄筋) を挙げている。

設計上の配慮として以下の項目を挙げている。すなわち、構造型式に関するものとして、壁部材を主体とした構造、波しぶきの影響を受けない構造、単純かつ表面積の小さい形状の部材設計を挙げ、部材設計に関するものとして、許容ひびわれ幅の設定、構造細目に関するものとして、かぶり厚の最小値の設定を挙げている。

関・大即の提案の主要な部分は以上のとおりである。構造物の耐久性向上のための具体的な手法がまとめられている。しかし、耐久性の具体的な照査手法に関しては言及されていない。環境条件の定量的評価に関するデータが不十分であるために、照査式の提案までには至っていないと思われる。

(3) 耐久設計の基本的考え方

前項においてまとめたように、耐久設計に関して学協会あるいは学術論文においていくつかの設計法案が提案されている。これらの考え方を基本にして耐久設計のあり方を考察してみると、「構造物に求められる耐久性を当該構造物が有するように材料、構造の設計を行い、何

らかの方法でその耐久性の照査を行うこと」が、耐久設計と定義づけられるようである。図-6.14に、現時点で考え得るところの耐久設計の基本的考え方を示す。この考え方がさらに改良され、耐久設計が実用化される日も近いと思われるが、そのためには以下の項目に関して、さらなる検討が求められる。

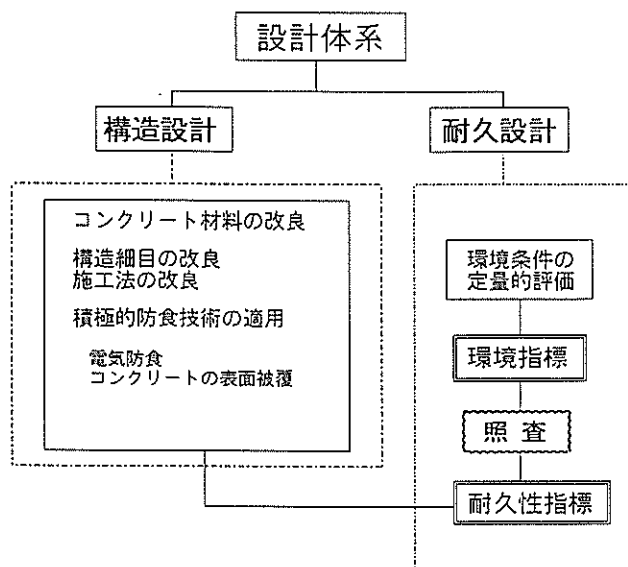


図-6.14 耐久設計の基本的な考え方

- 1) 関・大郎が取りまとめているような各種防食法の効果の定量的評価。この定量的な評価が、構造物の耐久性の定量的評価、すなわち耐久性指標につながる。
- 2) 構造物が置かれている環境条件の定量的評価。この定量的評価が環境指標につながるとともに、真に合理的な耐久設計が可能になる。
- 3) 耐久性の照査方法の確立。設計はサイエンスではなくアートであると言われることもある。構造設計も近年、許容応力度設計法から限界状態設計法に移行しつつある。両設計法は構造解析がベースになっている点は同じであるが、いわば照査の考え方が異なる。耐久設計の場合も照査の考え方は種々考案できるものと思われる。

(4) 環境条件評価の耐久設計への応用に関する一試案

前項までに耐久設計の考え方について考察した。学協会などから提案されているいくつかの方法を取りまとめたが、これらの方法に共通して必要とされているのは、構造物が置かれている環境条件の定量的な評価である。ここでは、前述の土木学会の提案1を例にとり、この設計法の考え方の中で本研究の成果を応用する一つの考え

方を述べる。また、土木学会の提案2に対する応用法についても言及する。

a) 土木学会の提案1への応用法試案

6.3 (1) においても述べたが、土木学会の提案1においては、耐久性の照査を(6.13)式で行うことになっている。

$$T_p \geq S_p \quad (6.13)$$

ここで、 $T_p$  : 耐久性指数

$S_p$  : 環境指数

また、(6.13)式中の環境指数を(6.14)式で与えている。

$$S_p = S_0 + \sum (\Delta S_p) \quad (6.14)$$

ここで、 $S_0$  : 標準的な環境条件における環境指数値

$\Delta S_p$  : 塩分や凍結融解作用の影響が厳しい環境条件における環境指数の増分値

塩分の影響が著しい場合は $\Delta S_p$ を10~70の範囲で設定するとされている。この $\Delta S_p$ を設定する際に本研究の成果が応用される。本研究の成果は表-6.10に示すように環境条件を5段階に区分するものである。この5段階の評価を例えば表-6.11のように応用する。ここで、環境区分「V」に対しては $\Delta S_p$ を70以上に設定しているが、これは以下の理由による。すなわち、本研究の結果でも明らかなように、一部の港湾環境においては、環境要因の評価よりも実験データの方がかなり大きな腐食傾向を示す場合がある。このような厳しい環境は、本研究において取り上げた環境要因項目のみでは十分に評価することができなかった。したがって、これまでの経験、あるいは既存構造物の劣化状況などから明らかに厳しい劣化環境であると判断される場合には、環境条件区分Vを適用し $\Delta S_p$ を70もしくはそれ以上の値に設定する方がよいと考えたためである。

以上が土木学会の提案1への本研究成果の応用方法の一つの考え方である。

表-6.11 土木学会の提案1への応用法試案

本研究に基づく評価	I	II	III	IV	V
$\Delta S_p$ 設定の一つの考え方	10~20	30~40	40~50	60~70	70~

b) 土木学会の提案2への応用について

6.3 (1) においても述べたとおり、土木学会の提案2

は宮川が示すモデルの潜伏期間 ( $T_{cr}$ ) と進展期間 ( $T_{ck}$ ) を推定し、それに基づき耐久性の照査を行うものである。本提案によれば  $T_{cr}$  および  $T_{ck}$  の算定式を次式のように与えている。

$$T_{cr} = \frac{(C_c - \alpha_1)^2 \cdot Q_{cr}}{E_{cr}} + T_a \quad (6.15)$$

ここで、 $C_c$  : 等価かぶり (cm)  
 $\alpha_1$  : 塩害が対象の場合は0  
 $Q_{cr}$  : 腐食開始期間にかかわるコンクリートの品質係数  
 $E_{cr}$  : 腐食開始期間にかかわる環境係数  
 $T_a$  : 表面仕上げ材の耐用期間

$$T_{ck} = \frac{\alpha_{ck} \cdot C_c \cdot Q_{ck}}{E_{ck}} \quad (6.16)$$

ここで、 $\alpha_{ck}$  : コンクリートの圧縮強度と鉄筋径により与えられる係数  
 $C_c$  : 等価かぶり (cm)  
 $Q_{ck}$  : ひびわれ発生時間にかかわるコンクリートの品質係数  
 $E_{ck}$  : ひびわれ発生時間にかかわる環境係数

(6.15)式と(6.16)式において、環境条件を  $E_{cr}$  と  $E_{ck}$  という係数で評価することになっている。 $E_{cr}$  は腐食開始期間にかかわる環境条件を示すものであり、この係数を決定する際に本研究の成果である表-6.3~6.5に示す発錆開始時刻の評価結果が応用されるものと考えられる。また、 $E_{ck}$  はひびわれ発生時間にかかわる環境条件を示すものであり、この係数を決定する際に本研究の成果である表-6.3~6.5に示す分極抵抗の評価結果および定電位ステップ試験の結果が応用されるものと考えられる。 $E_{cr}$  および  $E_{ck}$  の具体的な決定方法については本文では十分な考察を行うまでに至っていないが、本研究の成果を応用できるものと考えている。

#### 6.4 まとめ

本章においては、5章までに得られた結果をもとに環境条件評価の評価方法を提案し、その評価結果の妥当性を検討した。また、評価結果の耐久設計への応用方法について一試案を示した。本章における要点は以下のとおりである。

4章での成果である腐食量指標と5章での成果である重回帰式をもとに、環境要因評価の一つの考え方を提案した。また、環境要因評価より求めた腐食量指標と暴露実験より得られた腐食量指標を比較し、環境要因評価結果の妥当性を検討した。環境要因評価より求めた腐食量指標は当然のことながら、ある程度の誤差を含んだ値を示す。したがって、実験で得られた腐食量指標と完全に一致するわけではないが、図-6.8~6.10に示すようにある程度の傾向はつかめていると判断できる。したがって、環境要因評価より求まる腐食量指標を解釈する際に、例えば図-6.8~6.10に示すように安全側のラインで評価することにより、ある程度有意な環境条件の評価を行うことができるものと考えられる。

また、これまでに学協会、学術論文等で提案されている耐久設計の考え方を整理し、港湾構造物を含めたコンクリート構造物の耐久設計の基本構造について考察した。いずれの提案法においても、構造物の置かれた環境条件に対して構造物が適切な耐久性を有するように設計するというのが基本的考え方であり、耐久設計法を確立するためには信頼性のある環境条件の評価が不可欠とされている。本章においては、土木学会の提案する耐久設計法案に対して、本研究の成果を応用する一つの考え方を示しているが、それ以外の提案法に対する応用方法については具体的な考え方の提示を行うまでには至らなかった。しかし、いずれの提案法に対しても本研究成果を応用することが可能であると考えている。この点に関しては今後の課題としたい。

#### 参考文献

- 1) 合田良実：耐波設計，土木学会誌，1997 February Vol. 82, pp. 15~pp. 19
- 2) 岡村甫：コンクリート構造物の耐久性設計の考え方—土木構造物の場合—，コンクリート工学，Vol. 26, No. 11, Nov. 1988
- 3) コンクリート構造物の耐久設計指針（試案），コンクリートライブラリー，第65号，土木学会，1991年
- 4) コンクリート構造物の耐久設計指針（案），コンクリートライブラリー，第82号，土木学会，1996年
- 5) 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方，社団法人日本コンクリート工学協会，鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計法研究委員会，1991年5月
- 6) V. C. Li：Performance Driven Design of Fibre Reinforced Cementitious Composites, Fibre Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of

the Fourth International Symposium held by  
RILEM and organized by the Department of  
Mechanical and Process Engineering, University  
of Sheffield, U.K. July, 1992

- 7) 関博・大即信明：コンクリート構造物の耐久性設計  
の考え方 — 港湾・海洋構造物の場合 —, コンクリ  
ート工学, Vol.26, No.11, Nov. 1988

## 7. 結論

### 7.1 本研究のまとめ

本研究においては、RC港湾構造物の塩害に係わる環境要因を定量的に評価することを目的に、モルタル供試体の全国規模の暴露試験およびその解析を行った。その結果に基づき、環境条件の定量的評価を試み、その評価結果を耐久設計へ応用する考え方を考察した。

本研究の内容および得られた結論を各章ごとに以下に総括する。

1章においては、本研究の背景および目的について述べた。

2章においては、既往の研究を収集・整理することにより、RC構造物の塩害に影響を及ぼすと考えられる各種の環境要因が有する影響の有無および程度についてこれまでに明らかにされている知見を明確にした。既往の研究より得られている知見は以下のとおりである。

- 1) 陸上部（海岸付近、海上大気中）において、飛来塩分量を決定する最も重要な要因は海風の風速である。
- 2) 飛沫部において、コンクリート中へ浸入する塩分量を決定する最も重要な要因は波のエネルギーである。
- 3) 海中部、干満部、飛沫部、陸上部という鉛直方向の異なる環境を比較した場合、陸上部が他の三環境よりも潜伏期間（鉄筋の腐食が開始されるまでの時間）がかなり長い。また、飛沫部よりも海中部および干満部の方が潜伏期間は短い。
- 4) コンクリート中の塩化物含有量に関しては、海中部・干満部、飛沫部および陸上部の三環境に大まかに分類できる。また、同一の暴露環境内にあってもさらに細かく見れば条件の相違がある。しかし、その同一の暴露環境内における塩化物含有量のばらつきは海中部においては他の環境よりも小さいようである。
- 5) コンクリート中の塩化物含有量の経時変化は、異なる暴露環境においては異なる傾向を示す。しかし、いずれの暴露環境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化物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化物含有量が徐々に増加していくという点である。
- 6) コンクリート中の塩化物含有量の分布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。

- 7) 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。この一定になった拡散係数の値は、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。また、コンクリートの内部領域の拡散係数は、異なる暴露環境ごとに異なる値を示す。海中部および干満部ではその値が大きく、飛沫部および陸上部ではそれに比べると小さな値を示す。
- 8) 異なる暴露環境におけるコンクリート中の塩化物含有量の相違は、主にコンクリート表面の塩化物含有量とコンクリートの内部領域における拡散係数の相違に起因するものである。

3章においては、まず反応エネルギー論および電気化学理論に基づいたコンクリート中鉄筋の腐食量・腐食速度理論について述べ、その理論式に基づいて考案した本研究における環境要因の評価手法を示した。また、暴露後のモルタル供試体において実施した各種の試験の試験方法を示した。その中で、鉄筋の不動態の状態を評価するための分極抵抗試験ならびに定電位ステップ試験の2種類の電気化学的計測を実施しており、これら2種類の電気化学的計測値のデータの構造および意味を明らかにすることを目的に基礎実験を行った。その基礎実験の結果より以下に示すような知見を得ることができた。

分極抵抗試験（本研究の場合は直線分極抵抗試験）の計測値に影響を及ぼす要因は、計測の対象とする鉄筋と対極間の電気抵抗、ならびに計測の対象とする鉄筋の環境の相違、である。計測を行う際に、計測システムにおける鉄筋と対極間の電気抵抗が計測可能であれば、それに基づき計測値を補正することは可能である。本研究においては、分極抵抗の計測値に対して、鉄筋と対極間の電気抵抗に起因する計測誤差の補正を行った。

定電位ステップ試験に関して実施した基礎実験の結果より、モルタル中への海水の浸入量が多い場合はモルタルの含水率と酸素拡散性の間に相関関係が認められるが、海水の浸入量がほとんどない場合は両者に明確な相関性を認めることはできないことが明らかとなった。モルタル中への海水の浸入量がほとんどない場合は、含水率が50%程度で酸素の拡散性が最も大きくなる可能性が示唆された。

4章においては、まず2年間の暴露後に実施したモルタル供試体に関する各種の試験結果を総括した。その結果をもとに、モルタル中鉄筋の腐食量を試験データより



推定する腐食量指標を提案した。腐食量指標を構築する過程において腐食進行期間を求め、またそれに加えて腐食速度指標を提案したが、この両者と実際の発錆面積率との間には明確な相関性を認めることはできなかった。しかし、腐食進行期間と腐食速度指標を総合的に考慮することにより求めた腐食量指標に関しては以下に示すような知見を得ることができた。

すなわち、モルタル中の塩化物含有量より求めた腐食進行期間、分極抵抗の逆数および定電位ステップ試験の計測結果の三者の積により構成される腐食量指標と発錆面積率の間には相関係数で0.7~0.8程度の比較的よい相関性が認められた。そして、腐食量指標と発錆面積率の関係を一次式で近似した場合、その係数は海中部、干満部、陸上部ごとに異なる値となった。この係数は海中部と干満部でほぼ同程度であり、飛沫部の場合は海中部および干満部に比べて約2倍の値を示した。このことは海中部、干満部、飛沫部ごとに腐食量指標と腐食量の対応関係が異なっていることを示すと同時に、この係数の値は鉛直方向の環境条件の相違を示しているものと考えられる。すなわち、海中部と干満部は類似の環境条件であり、飛沫部はそれとは異なる環境条件であることを示しているものと考えられる。

5章においては、暴露を実施した港の環境要因と4章において提案した腐食量指標の構成要素（腐食進行期間、分極抵抗、定電位ステップ試験の結果）の関係を検討した。その結果、以下に示すような知見が得られた。

環境要因および海水成分の項目に関して主成分分析を行った結果、環境要因の項目を以下の5項目、すなわち、海水成分を代表する項目としての海水中のCl<sup>-</sup>濃度、波浪条件および風の条件を代表する項目としての風速、環境温度を代表する項目としての気温および気温偏差、環境の乾湿・湿潤状態を代表する項目としての湿度、に絞ることができた。

分極抵抗の逆数と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、独立変数が以下のように選定された。すなわち、海中部の場合は海水中のCl<sup>-</sup>濃度、気温偏差および風速である。その3項目の中では、海水中のCl<sup>-</sup>濃度の影響度が最も大きく、気温偏差および風速の影響度は、海水中のCl<sup>-</sup>濃度の影響度の約70%であった。干満部の場合は気温、気温偏差および海水中のCl<sup>-</sup>濃度が独立変数として選定され、その3項目の影響度はほぼ等しいレベルであった。飛沫部の場合は気温のみが説明変数として選定された。重回帰分析の結果より考察すれば、鉄筋の不動態の状態に関しては、海中部と干満部はほぼ

同様の環境条件であると判断された。

定電位ステップ試験の結果と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、海中部の場合のみ最適なモデルが得られなかった。干満部および飛沫部については独立変数が以下のように選定された。すなわち、干満部の場合は湿度および風速が選定された。この2項目の中では、湿度の影響度の方が大きく、風速の影響度はその約60%であった。飛沫部の場合は湿度および気温偏差が選定された。その2項目の中では、気温偏差の影響度が大きく、湿度の影響度はその約60%であった。干満部と飛沫部に共通している環境要因は湿度であり、湿度が高いほどモルタル中铁筋への酸素供給量は多くなるという傾向を示した。

発錆開始時刻と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、重回帰式における独立変数が以下のように選定された。すなわち、海中部の場合は気温および海水中のCl<sup>-</sup>濃度が選定された。その2項目の中では、気温の影響度の方が大きく、海水中のCl<sup>-</sup>濃度の影響度はその約80%であった。干満部の場合は気温および風速が選定された。その2項目の中では、気温の影響度の方が大きく、風速の影響度はその約60%であった。飛沫部の場合は風速、湿度、気温および海水中のCl<sup>-</sup>濃度が選定された。その4項目の中では、海水中のCl<sup>-</sup>濃度の影響度が最も大きく、次いで気温の影響度、風速の影響度、湿度の影響度の順であった。湿度の影響度は、海水中の塩化物イオンの影響度の約30%程度であった。海中部、干満部および飛沫部に共通している環境要因は気温と風速であり、気温が低いほど、また風速が大きいほど発錆開始時刻は早くなるという傾向であった。

6章においては、5章までに得られた結果をもとに環境条件評価の評価方法を提案し、その評価結果の妥当性を検討した。また、評価結果の耐久設計への応用方法について一試案を示した。本章における要点は以下のとおりである。

4章での成果である腐食量指標と5章での成果である重回帰式をもとに、環境要因評価の一つの考え方を提案した。また、環境要因評価より求めた腐食量指標と暴露実験より得られた腐食量指標を比較し、環境要因評価結果の妥当性を検討した。環境要因評価より求めた腐食量指標は、当然のことながらある程度の誤差を含んだ値を示す。したがって、環境要因評価より求めた腐食量指標と実験で得られた腐食量指標が完全に一致するわけではないが、ある程度の傾向はつかめていると判断できた。したがって、環境要因評価より求まる腐食量指標を解釈

する際に若干工夫をすることにより、耐久設計に応用するに際してある程度有意な環境条件の評価を行うことができるものと考えられる。

また、これまでに学協会、学術論文等で提案されている耐久設計の考え方を整理し、港湾構造物を含めたコンクリート構造物の耐久設計の基本構造について考察した。いずれの提案法においても、構造物の置かれた環境条件に対して構造物が適切な耐久性を有するように設計するというのが基本的考え方であり、耐久設計法を確立するためには信頼性のある環境条件の評価が不可欠とされている。

本章においては、土木学会の提案する耐久設計法案に対して、本研究の成果を応用する一つの考え方を示すことができたが、それ以外の提案法に対する応用方法については具体的考え方の提示を行うまでには至らなかった。しかし、いずれの提案法に対しても本研究成果を応用することが可能であると考えている。この点に関しては今後の課題としたい。

## 7.2 本研究の問題点と今後の課題

本研究においては、港湾環境におけるモルタル供試体の2年間の暴露試験に基づき論を進めた。実際のコンクリート構造物の塩害による劣化進行過程の長さを考慮した場合、2年間の暴露期間では短いという印象を受ける。この点に関しては以下のように考えている。

- 1) モルタル供試体の寸法を小さくし、鉄筋のかぶり厚さを20mmと小さく設計したため2年間の暴露試験でも供試体の劣化は進行している。2年間の暴露後、大部分の供試体において内部鉄筋に腐食が生じていた。
- 2) 暴露試験を通じて環境要因の影響を供試体に吸収させ、暴露後にその情報を供試体より取り出すという当初の基本的考え方に立てば、2シーズンを経過することにより、ほぼ環境要因の影響は吸収されていると考えられる。
- 3) 本研究においては宮川の示すモデルにおける潜伏期および進展期を議論の対象としており、それに続く加速期、劣化期は議論の対象とはしていない。

上述した理由により、2年間という比較的短い暴露期間でも有意な知見は得られているものと考えている。

暴露試験、鋼材腐食および電気化学的計測はいずれも比較的多くのばらつきを包含していると考えられる。本研究においては、それらのばらつきをある程度認めた上で環境条件評価を行い、新たな知見を得ることができた。一方、本研究で得られた知見のみでは十分に説明ができ

ないデータも存在しており、本研究ではこれらに関しては十分な考察を加えることができなかった。したがって、本研究で提案した環境条件評価、また、その耐久設計への応用も十分な精度を有しているとは言い難い。今後、実構造物の調査などを実施し本研究成果の妥当性を十分検討する必要がある。その結果を待って初めて本研究成果の信頼性の評価ができるものと考えている。

設計法を実用化するためには、その精度を定量的に評価しかつ妥当性を十分に検討することが不可欠である。また、設計法あるいはその体系を構築するためにはその理論的背景を確立することも重要である。本文の6章において、本研究成果の耐久設計への応用方法について一試案を述べたが、理論的背景は必ずしも十分であるとは言い難い。耐久設計を実用化するためには、理論的背景の評価が不可欠であり、今後も検討を継続していきたいと考えている。この点は本研究に続く今後の研究課題としたい。

本論文の結語として以上の点を明記する。

(1999年3月31日受付)

## 謝 辞

本研究で実施しましたモルタル供試体の暴露試験は、昭和63年度から平成2年度にかけて組織されました「運輸省港湾局・研究協議会・補修工法技術開発ワーキンググループ」の活動の一環として実施したものであります。供試体の暴露作業を快く引き受けていただきました、運輸省港湾建設局、北海道開発庁開発局、総理府沖縄総合事務局の皆様にご心よりお礼申し上げます。

本研究の発端は昭和63年に遡ります。本研究で用いた手法で環境条件の評価を行うことを発案されたのは当時の港湾技術研究所材料研究室室長大即信明博士（現東京工業大学開発システム工学科教授）であります。ここに記してお礼申し上げます。

また、本論文をとりまとめるに際しましては、九州大学建設都市工学科の松下博通教授にご指導を賜りました。ここに記してお礼申し上げます。

付表-1 暴露を実施した港の気象条件一覧

	期間 (月)	気温 (℃)		平均 湿度 (%)	風に関して		日照 時間 (時間)	降水量 (mm)	
		平均	最高		平均風速 (m)	最大風速 (m)			
小樽	合計	6	16.2	34.8	401.0	16.1	56.7	607.7	635.0
		12	114.4	158.4	848.0	29.5	113.5	1738.1	1155.0
		24	229.6	318.2	1697.0	63.6	242.4	3552.6	2288.0
	平均	6	2.7	5.8	66.8	2.7	9.5	101.3	105.8
		12	9.5	13.2	70.7	2.5	9.5	144.8	96.3
		24	9.6	13.3	70.7	2.7	10.1	148.0	95.3
苫小牧	合計	6	13.3	38.2	432.0	18.6	73.3	888.0	477.5
		12	103.9	150.0	921.0	37.4	142.6	1799.2	1463.3
		24	208.8	301.6	1826.0	75.3	282.9	3622.8	2582.3
	平均	6	2.2	6.4	72.0	3.1	12.2	148.0	79.6
		12	8.7	12.5	76.8	3.1	11.9	149.9	121.9
		24	8.7	12.6	76.1	3.1	11.8	151.0	107.6
秋田	合計	6	33.1	53.6	426.0	26.5	90.9	547.5	740.0
		12	147.4	192.3	869.0	50.4	172.3	1623.9	1868.0
		24	294.4	384.3	1737.0	103.2	363.1	3175.9	3801.5
	平均	6	5.5	8.9	71.0	4.4	15.2	91.3	123.3
		12	12.3	16.0	72.4	4.2	14.4	135.3	155.7
		24	12.3	16.0	72.4	4.3	15.1	132.5	158.4
宮古	合計	6	33.2	62.5	391.0	13.4	48.0	883.8	398.0
		12	137.9	195.3	866.0	25.6	100.7	1867.0	1238.5
		24	276.1	391.0	1728.0	54.7	227.5	3716.5	3161.0
	平均	6	5.5	10.4	65.2	2.2	8.0	147.3	66.3
		12	11.5	16.3	72.2	2.1	8.4	155.6	103.2
		24	11.5	16.3	72.0	2.3	9.5	154.9	131.7
塩釜 (石巻)	合計	6	36.2	59.6	437.0	21.0	70.5	882.9	300.0
		12	148.4	193.7	904.0	45.4	155.2	1946.7	1010.5
		24	295.7	387.2	1809.0	93.9	341.2	3826.6	2382.0
	平均	6	6.0	9.9	72.8	3.5	11.8	147.2	50.0
		12	12.4	16.1	75.3	3.8	12.9	162.2	84.2
		24	12.3	16.1	75.4	3.9	14.2	159.4	99.3
伏木富士	合計	6	48.4	70.7	434.0	16.1	58.4	571.8	1020.5
		12	174.6	221.1	872.0	31.5	122.1	1710.8	1731.5
		24	344.0	436.3	1792.0	65.1	249.3	3132.8	3965.5
	平均	6	8.1	11.8	72.3	2.7	9.7	95.3	170.1
		12	14.6	18.4	72.7	2.6	10.2	142.6	144.3
		24	14.3	18.2	74.7	2.7	10.4	130.5	165.2

付表-1 暴露を実施した港の気象条件一覧

	期間 (月)	気温 (°C)		平均 湿度 (%)	風に関して		日照 時間 (時間)	降水量 (mm)	
		平均	最高		平均風速 (m)	最大風速 (m)			
名古屋	合計	6	59.8	87.0	383.0	18.3	63.3	1036.4	459.5
		12	196.5	252.1	789.0	36.6	139.1	2178.8	1693.5
		24	391.1	502.1	1617.0	72.0	270.5	4188.8	3628.0
	平均	6	10.0	14.5	63.8	3.1	10.6	172.7	76.6
		12	16.4	21.0	65.8	3.1	11.6	181.6	141.1
		24	16.3	20.9	67.4	3.0	11.3	174.5	151.2
清水 (御前崎)	合計	6	70.1	91.3	386.0	28.7	86.3	1024.7	698.8
		12	202.5	242.0	852.0	53.8	184.3	2183.4	2103.3
		24	399.0	479.3	1727.0	114.0	364.7	4457.6	4629.3
	平均	6	11.7	15.2	64.3	4.8	14.4	170.8	116.5
		12	16.9	20.2	71.0	4.5	15.4	182.0	175.3
		24	16.6	20.0	72.0	4.8	15.2	185.7	192.9
横浜	合計	6	62.4	84.7	378.0	23.9	74.6	930.9	641.5
		12	195.1	240.6	822.0	45.5	148.3	1944.3	1630.5
		24	390.0	481.9	1647.0	87.2	300.7	3864.6	3649.0
	平均	6	10.4	14.1	63.0	4.0	12.4	155.2	106.9
		12	16.3	20.1	68.5	3.8	12.4	162.0	135.9
		24	16.3	20.1	68.6	3.6	12.5	161.0	152.0
舞鶴	合計	6	50.8	77.2	408.0	13.8	67.4	599.0	866.1
		12	180.2	237.6	867.0	27.1	135.8	1648.9	1746.1
		24	357.2	469.8	1822.0	54.2	262.8	3019.6	3686.1
	平均	6	8.5	12.9	68.0	2.3	11.2	99.8	144.4
		12	15.0	19.8	72.3	2.3	11.3	137.4	145.5
		24	14.9	19.6	75.9	2.3	11.0	125.8	153.6
北九州 (下関)	合計	6	68.8	86.1	335.4	21.3	71.3	778.8	450.5
		12	205.8	241.7	775.4	42.4	150.8	2002.4	1616.0
		24	403.7	474.7	1632.4	82.7	320.7	3516.0	3590.5
	平均	6	11.5	14.4	55.9	3.6	11.9	129.8	75.1
		12	17.2	20.1	64.6	3.5	12.6	166.9	134.7
		24	16.8	19.8	68.0	3.4	13.4	146.5	149.6
広島	合計	6	61.9	90.8	342.7	25.9	79.0	950.6	441.5
		12	201.6	256.6	752.7	48.4	166.3	2198.5	1687.5
		24	399.6	506.8	1601.7	95.4	358.8	3941.8	3510.0
	平均	6	10.3	15.1	57.1	4.3	13.2	158.4	73.6
		12	16.8	21.4	62.7	4.0	13.9	183.2	140.6
		24	16.7	21.1	66.7	4.0	15.0	164.2	146.3

付表-1 暴露を実施した港の気象条件一覧

		期間 (月)	気温 (°C)		平均 湿度 (%)	風に関して		日照 時間 (時間)	降水量 (mm)
			平均	最高		平均風速 (m)	最大風速 (m)		
神戸	合計	6	61.5	85.3	327.6	20.2	76.8	953.5	390.5
		12	197.0	246.4	755.6	40.3	156.7	2063.1	1308.5
		24	394.7	493.6	1577.6	84.2	329.8	3898.7	2522.0
	平均	6	10.3	14.2	54.6	3.4	12.8	158.9	65.1
		12	16.4	20.5	63.0	3.4	13.1	171.9	109.0
		24	16.4	20.6	65.7	3.5	13.7	162.4	105.1
鹿児島	合計	6	79.0	108.1	340.9	14.6	51.3	993.4	635.5
		12	223.2	277.0	779.9	30.4	102.8	2086.6	2381.5
		24	444.4	548.1	1652.9	61.6	239.5	3868.1	4621.5
	平均	6	13.2	18.0	56.8	2.4	8.6	165.6	105.9
		12	18.6	23.1	65.0	2.5	8.6	174.1	198.5
		24	18.5	22.8	68.9	2.6	10.0	161.2	192.6
油津	合計	6	78.8	106.1	347.1	28.6	85.6	1007.6	759.0
		12	219.8	267.5	814.1	55.4	192.1	2135.0	2683.0
		24	441.2	534.1	1707.1	112.7	393.3	3917.2	5186.0
	平均	6	13.1	17.7	57.9	4.8	14.3	167.9	126.5
		12	18.3	22.3	67.8	4.6	16.0	177.9	223.6
		24	18.4	22.3	71.1	4.7	16.4	163.2	216.1
小松島 (徳島)	合計	6	66.1	90.2	316.9	19.3	63.4	997.6	411.0
		12	204.2	252.8	740.9	38.2	141.1	2205.0	1482.5
		24	406.3	502.1	1553.9	74.4	277.4	4080.4	3302.0
	平均	6	11.0	15.0	52.8	3.2	10.6	166.3	68.5
		12	17.0	21.1	61.7	3.2	11.8	183.8	123.5
		24	16.9	20.9	64.7	3.1	11.6	170.0	137.6
石垣島	合計	6	125.6	140.7	387.9	29.2	69.7	595.5	1107.0
		12	287.3	316.6	876.9	60.2	175.2	1745.2	2729.5
		24	583.0	642.6	1787.9	117.3	326.8	3786.1	4432.5
	平均	6	20.9	23.5	64.7	4.9	11.6	99.3	184.5
		12	23.9	26.4	73.1	5.0	14.6	145.4	227.5
		24	24.3	26.8	74.5	4.9	13.6	157.8	184.7
那覇	合計	6	117.6	133.6	353.9	31.5	76.0	686.2	611.0
		12	274.6	306.9	822.9	67.1	174.9	1667.2	1844.5
		24	556.0	620.8	1700.9	133.6	393.9	3591.3	3668.5
	平均	6	19.6	22.3	59.0	5.3	12.7	114.4	101.8
		12	22.9	25.6	68.6	5.6	14.6	138.9	153.7
		24	23.2	25.9	70.9	5.6	16.4	149.6	152.9

付表-2 各港の波浪記録一覧

		(m/sec)					
		6ヶ月		12ヶ月		24ヶ月	
		最大 有義波	平均 有義波	最大 有義波	平均 有義波	最大 有義波	平均 有義波
一次データ	苫小牧	2.11	0.60	4.29	1.25	8.94	2.58
	秋田	3.15	1.25	5.76	2.09	11.59	4.46
	宮古	1.72	0.50	3.04	0.89	5.88	1.83
	神戸	1.88	0.65	3.51	1.27	7.17	2.75
	油津	1.88	0.81	4.50	1.65	9.33	3.49
	鹿児島	1.60	0.24	3.32	0.51	6.64	1.02
	那覇	2.38	1.02	4.25	1.70	9.49	3.59
二次データ	小樽(留萌)	2.98	1.35	4.96	2.04	10.29	4.31
	塩釜(仙台)	1.41	0.50	3.42	1.2	6.81	2.33
	京浜(浜金谷)	2.21	0.71	4.54	1.35	8.05	2.64
	清水(御前崎)	1.86	0.83	3.77	1.51	7.62	2.97
	舞鶴(福井)	2.87	1.22	4.81	1.92	9.54	3.70
	小松島(御坊崎)	2.32	0.81	5.17	1.66	10.26	3.47
	北九州(玄海灘)	2.64	1.24	4.80	2.12	10.21	4.35

付表-3 モルタル中の塩化物含有量一覧

		%											
		海中部			干満部			飛沫部			陸上部		
部位	期間(月)	6	12	24	6	12	24	6	12	24	6	12	24
秋田		0.47	0.99	1.14	0.22	0.64	0.88	0.05	0.04	0.10	0.00	0.02	0.01
伏木富山		0.44	0.97	1.11	0.17	0.47	0.67	0.03	0.02	0.04	0.00	0.01	0.02
横浜		0.16	0.43	0.74	0.30	0.56	0.60	0.14	0.39	0.75	0.01	0.02	0.04
塩釜		0.27	0.63	1.02	0.23	0.48	0.64	0.10	0.11	0.49	0.01	0.02	0.02
宮古		0.20	0.39	0.80	0.21	0.49	1.09	0.11	0.14	0.21	0.01	0.02	0.02
広島		0.23	0.36	1.62	0.14	0.36	0.58	0.07	0.28	0.58	0.01	0.02	0.04
小松島					0.22	0.37		0.11	0.53		0.01	0.02	
神戸		0.12	0.26	0.75	0.17	0.27	0.70	0.07	0.14	0.42	0.01	0.02	0.02
舞鶴		0.24	0.29	0.52	0.24	0.38	0.45	0.01	0.12	0.20	0.01	0.02	0.02
北九州		0.22	0.27		0.16	0.26	0.42	0.11	0.23		0.01	0.01	
鹿児島		0.23	0.25	0.42	0.19	0.24	0.48	0.01	0.03	0.23	0.01	0.02	0.02
油津		0.18	0.38	0.52	0.20	0.33	0.81	0.01	0.02	0.29	0.01	0.02	0.02
名古屋		0.45	0.76	1.14	0.31	0.49	0.98	0.04	0.03	0.11	0.01	0.01	0.21
清水		0.22	0.38	0.61	0.21	0.61	1.00	0.03	0.03	0.37	0.01	0.01	0.02
小樽		0.16	0.31		0.21	0.57		0.10	0.18	0.37	0.01	0.02	0.02
苫小牧		0.47	0.91	1.22	0.45	0.83	0.97	0.14	0.48	0.99	0.01	0.01	0.02
那覇		0.18	0.23	0.47	0.23	0.39	1.18	0.02	0.07	0.21	0.01	0.01	0.05
石垣		0.22	0.37	1.08	0.11	0.41	0.24	0.04	0.28	0.66	0.02	0.02	0.20
港湾技術研究所		0.05	0.05	0.18	0.07	0.10	0.73	0.09	0.29	0.72	0.01	0.02	0.03

付表-4 計算により求めた塩分拡散係数一覧

 $(\times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec})$ 

	海中部	干満部	飛沫部	陸上部
秋田	6.34	4.71	0.47	0.85
伏木富山	6.34	4.65	0.71	0.87
横浜	3.91	7.91	3.59	1.43
塩釜	4.71	6.33	0.79	0.52
宮古	3.60	3.11	7.30	0.53
広島	28.71	4.71	2.82	0.71
小松島				
神戸	2.09	2.45	3.38	0.51
舞鶴	5.14	9.51	2.76	0.52
北九州				
鹿児島	7.62	5.91	1.11	0.71
油津	5.59	7.51	0.82	0.71
名古屋	5.51	5.51	0.71	0.52
清水	5.11	4.31	0.81	0.52
小樽		3.80	3.91	0.52
苫小牧	6.31		2.92	0.51
那覇	5.51	3.51	2.18	0.71
石垣	2.52	2.02	2.52	0.79
港湾技術 研究所	0.76	2.80	3.11	0.71

付表-5 計算により求めたモルタル表面の塩化物含有量一覧

(%)

	海中部	干満部	飛沫部	陸上部
秋田	1.23	1.01	1.35	0.11
伏木富山	1.19	0.73	0.50	0.11
横浜	0.84	0.61	0.84	0.11
塩釜	1.03	0.64	3.90	0.42
宮古	0.91	1.36	0.20	0.91
広島	0.28	0.62	0.82	0.26
小松島				
神戸	1.31	1.14	0.35	0.38
舞鶴	0.56	0.43	0.31	0.40
北九州				
鹿児島	0.38	0.41	0.89	0.22
油津	0.53	0.44	2.32	0.26
名古屋	1.21	0.82	0.70	0.42
清水	0.65	1.06	2.62	0.39
小樽		1.15	0.43	0.39
苫小牧	1.21		1.36	0.38
那覇	0.41	1.06	0.31	0.28
石垣	1.52	2.11	0.93	1.30
港湾技術 研究所	1.70	0.36	0.78	0.29

付表-6 分極抵抗一覧(補正值)

(Ω)

期間(月)	海中部			干満部		
	6	12	24	6	12	24
秋田	631.5	787.4	1019.2	667.7	824.8	906.0
伏木富山	642.3	820.1	795.4	736.3	818.7	866.2
横浜	877.8	1238.6	1122.4	747.9	1569.2	1279.1
塩釜	836.4	1252.5	1346.8	758.1	1234.8	979.9
宮古	828.3	1213.1	932.0	808.6	1380.9	800.3
広島	989.6	1505.9	1516.9	1211.4	1643.1	1954.7
小松島				1075.7	1551.1	
神戸	1051.4	1227.8	1362.0	1073.8	1468.5	1157.0
舞鶴	1055.0	1526.9	2364.9	961.8	1828.5	2237.2
北九州	1042.5	1698.4		1253.7	1606.3	
鹿児島	1129.3	1898.4	2062.0	1000.7	2085.2	2104.6
油津	1194.4	1984.6	1924.6	1044.8	2063.0	2005.6
名古屋	545.3	837.8	913.9	818.3	1327.1	1116.8
清水	1054.6	1254.7	1743.2	646.7	1185.9	1303.2
小樽	843.6	1527.6		771.6	1555.5	975.8
苫小牧	536.6	832.3		597.2	1336.0	
那覇	846.0	1435.6	2078.5	968.5	1691.8	1838.8
石垣	918.5	1163.3	1189.8	991.7	1273.0	1187.1
港研	1410.6	2583.3	2166.6	1224.1	2905.1	1814.0

期間(月)	飛沫部			陸上部		
	6	12	24	6	12	24
秋田	769.9	1400.5	1479.8	739.4	2197.4	3494.3
伏木富山	831.6	1070.5	1475.5	668.4	3172.1	3101.4
横浜	660.1	2152.3	1334.6	656.5	1608.4	1335.2
塩釜	703.3	1330.5	1248.5	647.8	1582.6	2434.6
宮古	686.4	1047.3	1206.2	662.0	1257.4	2705.5
広島	673.4	1652.9	1482.4	674.6	1846.7	1463.9
小松島	791.1	1702.5		680.7		
神戸	693.8	2291.8	2732.1	695.2	3306.4	3704.6
舞鶴	776.6	1541.4	1370.1	712.6	2703.9	2896.7
北九州	1062.5	1504.8		706.9	1806.9	
鹿児島	700.0	1932.0	2185.8	671.1	2953.5	2855.7
油津	655.5	1009.3	1416.0	644.5	1672.3	2322.4
名古屋	671.0	1819.9	1748.2	653.2	3916.5	3559.9
清水	684.1	1072.5	1482.2	624.6	1861.6	1793.5
小樽	694.1	1464.5	1503.5	664.1	1976.9	3109.5
苫小牧	845.5	1640.2	1818.9	593.5	1778.4	2327.8
那覇	279.6	1883.2	2678.6	428.9	1922.7	3755.9
石垣	649.0	1638.7	3157.9	516.5	1471.8	2964.4
港研	942.0	1549.0	1493.3	541.8	2462.5	2698.8



付表-7 モルタルの電気抵抗一覧

(Ω)

期間(月)	海中部			干満部		
	6	12	24	6	12	24
秋田	668.2	692.5	492.0	551.6	596.5	585.5
伏木富山	617.7	808.5	706.0	476.4	767.0	754.5
横浜	668.8	1182.5	729.0	841.6	1216.0	997.0
塩釜	737.7	1161.5	1636.0	680.5	1159.0	1340.5
宮古	858.0	1322.0	876.0	824.9	1367.5	799.5
広島	980.6	1555.0	1090.5	975.1	1447.0	1240.0
小松島				881.4	1347.0	
神戸	902.1	1185.0	1250.0	908.1	1075.0	799.0
舞鶴	817.3	1207.0	1604.0	724.4	1376.0	1465.0
北九州	878.9	1582.0		839.0	1483.0	
鹿児島	895.6	1718.5	2051.0	740.0	1950.5	2081.5
油津	880.0	1547.0	1145.0	770.6	1652.0	1146.5
名古屋	789.9	735.0	454.0	739.8	1282.5	712.0
清水	646.0	1151.5	1590.0	713.0	1067.5	977.5
小樽	805.5	1433.5		828.8	1263.5	646.5
苫小牧	795.0	1009.0		859.2	1352.0	
那覇	924.0	1369.0	1714.5	1125.1	1546.5	1561.0
石垣	1032.8	1310.0	784.0	1026.6	1464.5	918.0
港研	1056.5	1609.0	2094.0	1010.4	1731.5	1550.0

期間(月)	飛沫部			陸上部		
	6	12	24	6	12	24
秋田	438.7	1377.0	1973.5	578.1	1990.5	3246.5
伏木富山	601.7	1051.0	1535.5	601.2	2880.5	2932.0
横浜	585.4	2073.5	1383.5	454.8	1304.0	1341.0
塩釜	447.5	1275.0	1511.5	448.6	1407.5	2097.0
宮古	432.8	1058.0	1201.5	347.2	1256.0	2652.0
広島	475.2	1753.0	1407.0	447.0	2151.5	1469.5
小松島	654.7	1487.5		364.1		
神戸	630.2	2223.5	3455.5	441.0	3481.0	4132.5
舞鶴	568.2	1443.5	1357.5	596.0	2578.0	2466.0
北九州	851.9	1346.5		415.6	1766.5	
鹿児島	472.1	1888.5	2595.5	593.1	2662.5	2850.5
油津	329.8	895.5	1335.5	383.8	1911.0	2255.0
名古屋	445.2	1855.0	1890.0	444.9	3564.5	3129.0
清水	475.7	1238.5	1538.0	321.1	1719.0	1813.5
小樽	500.9	1276.0	1700.0	642.2	1965.5	2614.5
苫小牧	647.1	1727.5	1668.5	582.8	1429.0	1784.0
那覇	1614.2	2025.5	2994.0	1226.1	2202.5	4457.0
石垣	872.1	1791.0	3004.0	899.0	1397.5	3105.0
港研	1026.9	1723.0	1887.0	915.8	2526.0	2846.5

付表-8 定電位ステップ法の計測結果一覧

 $(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ 

期間(月)	海中部			干満部		飛沫部		陸上部		
	6	12	24	12	24	12	24	6	12	24
秋田		4.70	4.09	10.76	4.14	11.97	6.96	33.15	7.54	6.90
伏木富山		4.20	2.77	1.67	3.74	9.19	7.14	36.70	8.84	6.46
横浜		1.46	3.58	1.57	0.75	4.43	11.28	4.71	8.04	8.87
塩釜	22.07	4.81	15.13	2.30	20.46	9.20	5.14		15.50	8.52
宮古	20.15	1.30	1.14	4.10	3.90	10.35	6.50		13.33	8.36
広島		5.27	0.65	3.29	2.83	5.30	5.29	3.25	8.75	9.38
小松島				2.03		6.96		1.01		
神戸		1.32	14.04	2.12	1.12	5.22	6.22	21.13	5.40	4.93
舞鶴		1.95	1.21	5.33	2.66	11.85	11.30	21.78	7.87	14.13
北九州	17.55	8.12		8.45		8.94			10.16	
鹿児島		6.44	7.73	8.10	7.75	5.86	5.70	16.25	10.51	5.31
油津		8.70	1.99	5.72	2.15	12.09	6.35	2.21	11.28	8.28
名古屋	9.10	2.34	5.20	2.16	2.24	8.80	3.89		6.34	5.65
清水	8.45	2.11	7.21	2.05	10.71	8.96	4.55	1.43	8.00	12.75
小樽	9.10	4.98		4.42	2.28	8.23	6.64		8.03	7.52
苫小牧		19.18		8.58		8.35	5.16	4.23	8.00	9.01
那覇	14.95	0.94	9.01	7.39	7.99	4.07	6.17		5.15	3.12
石垣		6.46	1.98	10.34	11.24	5.46	2.70	1.37	9.10	6.90
港湾技術 研究所	10.40	6.53	8.09	6.16	12.62	6.37	8.48		6.84	8.16

付表-9 モルタル中の鉄筋の発錆面積率一覧

(%)

期間(月)	海中部			干満部		
	6	12	24	6	12	24
秋田	0.415	1.600	2.475	0.052	0.525	2.475
伏木富山	0.226	1.175	3.025	0.259	0.425	1.850
横浜	0.043	0.575	3.450	0.079	0.700	1.425
塩釜	0.034	1.375	5.625	0.196	0.975	6.675
宮古	0.058	0.525	2.025	0.082	0.125	5.725
広島	0.134	0.225	0.925	0.086	0.100	0.600
小松島	0.000			0.119	0.525	
神戸	0.043	0.200	1.700	0.083	0.225	3.375
舞鶴	0.157	0.525	0.525	0.205	0.325	1.175
北九州	0.073	0.100		0.162	0.050	
鹿児島	0.081	0.075	1.075	0.091	0.050	0.500
油津	0.116	0.375	0.500	0.119	0.125	0.325
名古屋	1.197	1.825	2.225	0.082	0.375	3.425
清水	0.276	0.200	0.725	0.123	0.825	3.125
小樽	0.070	0.400		0.128	0.225	3.025
苫小牧	0.311	4.800	2.967	0.210	1.025	
那覇	0.190	0.100	0.425	0.059	0.100	1.375
石垣	0.174	1.475	2.700	0.069	0.225	3.800
港研	0.113	0.025	0.525	0.074	0.000	0.900

期間(月)	飛沫部			陸上部		
	6	12	24	6	12	24
秋田	0.085	0.275	0.375	0.069	0.325	0.275
伏木富山	0.138	0.150	0.400	0.163	0.075	0.325
横浜	0.059	0.375	4.875	0.197	0.050	0.175
塩釜	0.028	0.125	1.450	0.019	0.100	0.150
宮古	0.024	0.175	0.425	0.034	0.025	0.325
広島	0.011	0.050	0.675	0.010	0.125	0.625
小松島	0.108	0.050		0.013	0.050	
神戸	0.055	0.000	2.200	0.031	0.125	0.500
舞鶴	0.072	0.150	0.250	0.083	0.000	0.275
北九州	0.088	0.050		0.240	0.375	
鹿児島	0.074	0.000	0.900	0.194	0.150	0.400
油津	0.026	0.050	0.275	0.035	0.050	0.275
名古屋	0.114	0.050	0.500	0.132	0.025	0.233
清水	0.099	0.100	0.400	0.023	0.150	0.525
小樽	0.060	0.125	0.475	0.031	0.050	0.325
苫小牧	0.586	2.600	1.650	0.043	0.225	0.400
那覇	0.055	0.150	0.425	0.047	0.325	0.325
石垣	0.133	0.300	1.450	0.063	0.100	0.375
港研	0.064	0.075	3.050	0.088	0.025	0.250

付表-10 発錆開始時刻の算出結果および発錆進行期間一覧

(月)

期間(月)	海中部				干満部				飛沫部			
	発錆開始時刻	発錆進行期間			発錆開始時刻	発錆進行期間			発錆開始時刻	発錆進行期間		
		6	12	24		6	12	24		6	12	24
秋田	2.42	3.58	9.58	21.58	3.83	2.17	8.17	20.17	32.70			
伏木富山	2.42	3.58	9.58	21.58	4.83	1.17	7.17	19.17	43.44			
横浜	4.97	1.03	7.03	19.03	3.24	2.76	8.76	20.76	5.83	0.17	6.17	18.17
塩釜	3.54	2.46	8.46	20.46	4.05	1.95	7.95	19.95	10.94		1.06	13.06
宮古	5.01	0.99	6.99	18.99	4.94	1.06	7.06	19.06	20.56			3.44
広島	2.32	3.68	9.68	21.68	5.10	0.90	6.90	18.90	7.42		4.58	16.58
小松島												
神戸	7.35		4.65	16.65	6.27		5.73	17.73	13.93			10.07
舞鶴	5.32	0.68	6.68	18.68	3.64	2.36	8.36	20.36	20.46			3.54
北九州												
鹿児島	5.33	0.67	6.67	18.67	6.18		5.82	17.82	17.52			6.48
油津	5.52	0.48	6.48	18.48	4.60	1.40	7.40	19.40	13.02			10.98
名古屋	2.79	3.21	9.21	21.21	3.80	2.20	8.20	20.20	31.61			
清水	4.70	1.30	7.30	19.30	3.87	2.13	8.13	20.13	13.18			10.82
小樽					4.04				8.84			
苫小牧	2.44	3.56	9.56	21.56		6.00	12.00	24.00	5.26	0.74	6.74	18.74
那覇	6.63		5.37	17.37	4.75	1.25	7.25	19.25	25.90			
石垣	5.60	0.40	6.40	18.40	5.83	0.17	6.17	18.17	7.16		4.84	16.84
港湾技術研究所	16.99			7.01	16.02			7.98	4.15	1.85	7.85	19.85

発錆進行期間は、暴露24ヶ月を対象にして計算している

付表-11 腐食速度指標一覧 (定数 A は除く)

 $(\times 10^{-3} \mu A/cm^2/\Omega)$ 

	海中部			干満部		海中部	
	6ヶ月	12ヶ月	24ヶ月	12ヶ月	24ヶ月	12ヶ月	24ヶ月
秋田		5.97	4.01	13.05	4.57	8.55	4.70
伏木富山		5.12	3.48	2.04	4.32	8.59	4.84
横浜		1.18	3.19	1.00	0.59	2.06	8.45
塩釜	26.39	3.84	11.23	1.86	20.88	6.92	4.12
宮古	24.33	1.07	1.22	2.97	4.87	9.88	5.39
広島		3.50	0.43	2.00	1.45	3.21	3.57
小松島				1.31		4.09	
神戸		1.08	10.31	1.44	0.97	2.28	2.28
舞鶴		1.28	0.51	2.92	1.19	7.69	8.25
北九州	16.83	4.78		5.26		5.94	
鹿児島		3.39	3.75	3.88	3.68	3.04	2.61
油津		4.38	1.03	2.77	1.07	11.98	4.48
名古屋	16.69	2.79	5.69	1.63	2.01	4.84	2.23
清水	8.01	1.68	4.14	1.73	8.22	8.35	3.07
小樽	10.79	3.26		2.84	2.34	5.62	4.42
苫小牧		23.04		6.42		5.09	2.84
那覇	17.67	0.65	4.34	4.37	4.35	2.16	2.30
石垣		5.55	1.66	8.12	9.47	3.33	0.86
港湾技術 研究所	7.37	2.52	3.73	2.12	6.96	4.11	5.68

付表-12 腐食量指標一覧

(月・ $\mu\text{A}/\text{cm}^2/\Omega$ )

	海中部			干満部		海中部	
	6ヶ月	12ヶ月	24ヶ月	12ヶ月	24ヶ月	12ヶ月	24ヶ月
秋田		0.05718	0.08660	0.10658	0.09216		
伏木富山		0.04906	0.07515	0.01463	0.08277		
横浜		0.00829	0.06070	0.00876	0.01217	0.01270	0.15357
塩釜	0.06491	0.03249	0.22985	0.01481	0.41653	0.00733	0.05377
宮古	0.02408	0.00749	0.02323	0.02096	0.09289		0.01854
広島		0.03388	0.00929	0.01382	0.02736	0.01469	0.05917
小松島							
神戸		0.00500	0.17163	0.00827	0.01716		0.02293
舞鶴		0.00853	0.00956	0.02437	0.02421		0.02920
北九州							
鹿児島		0.02263	0.06999	0.02261	0.06562		0.01690
油津		0.02841	0.01911	0.02052	0.02080		0.04924
名古屋	0.05357	0.02572	0.12068	0.01335	0.04052		
清水	0.01042	0.01228	0.07983	0.01405	0.16543		0.03321
小樽							
苫小牧		0.22030		0.07707		0.03431	0.05316
那覇		0.00352	0.07530	0.03167	0.08365		
石垣		0.03554	0.03062	0.05012	0.17204	0.01613	0.01440
港湾技術 研究所			0.02617		0.05552	0.03228	0.11273

付表-13 第一次主成分分析の結果

## 主成分分析により得られた各項目の固有値

主成分	初期の固有値		
	合計	変数のパーセント	累積パーセント
1	3.258	36.201	36.201
2	2.179	24.213	60.414
3	1.585	17.611	78.025
4	0.962	10.690	88.715
5	0.506	5.624	94.339
6	0.293	3.259	97.598
7	0.149	1.654	99.253
8	0.060	0.717	99.969
9	0.003	0.031	100.000

## 主成分分析により得られた因子負荷行列

	主成分		
	1	2	3
PH	0.907	-0.139	-0.139
Cl <sup>-</sup> 濃度	0.927	-0.252	-0.242
比重	0.906	-0.273	-0.268
気温	0.615	0.644	0.229
湿度	-0.011	-0.576	0.688
風速	0.349	0.513	0.560
気温偏差	0.439	-0.448	0.529
日照時間	0.150	0.635	-0.362
降水量	0.201	0.638	0.431

付表-14 第二次主成分分析の結果

## 主成分分析により得られた各項目の固有値

主成分	初期の固有値		
	合計	変数のパーセント	累積パーセント
1	1.896	37.925	37.925
2	1.526	30.516	68.442
3	0.942	18.841	87.283
4	0.389	7.788	95.071
5	0.246	4.929	100.000

## 主成分分析により得られた因子負荷行列

	主成分		
	1	2	3
Cl <sup>-</sup> 濃度	0.605	0.066	-0.761
気温	0.714	-0.579	0.050
湿度	0.167	0.857	0.267
風速	0.748	-0.243	0.537
気温偏差	0.658	0.626	-0.031



付表-15 一次データ, 二乗値, 平方根の相関係数

## 腐食進行期間 (腐食開始時刻)

		海中部	干満部	飛沫部
気温	一次データ	-0.58	-0.61	0.08
	二乗値	-0.32	-0.54	0.11
	平方根	-0.58	-0.64	0.05
湿度	一次データ	0.23	0.45	-0.07
	二乗値	0.24	0.46	-0.06
	平方根	0.23	0.45	-0.07
風速	一次データ	-0.23	-0.10	0.22
	二乗値	-0.28	-0.13	0.18
	平方根	-0.20	-0.09	0.24
気温偏差	一次データ	0.12	0.25	-0.22
	二乗値	0.17	0.27	-0.26
	平方根	0.09	0.26	-0.18
海水中の Cl <sup>-</sup> 濃度	一次データ	-0.59	-0.12	0.64
	二乗値	-0.60	-0.13	0.61
	平方根	-0.58	-0.12	0.64

## 定電位ステップ法の結果

		海中部	干満部	飛沫部
気温	一次データ	-0.03	0.15	-0.23
	二乗値	-0.03	0.19	-0.28
	平方根	-0.03	0.13	-0.20
湿度	一次データ	0.49	0.32	0.06
	二乗値	0.50	0.31	0.06
	平方根	0.49	0.32	0.06
風速	一次データ	0.18	0.36	-0.36
	二乗値	0.16	0.36	-0.34
	平方根	0.20	0.35	-0.36
気温偏差	一次データ	0.00	0.36	-0.39
	二乗値	-0.03	0.32	-0.40
	平方根	0.01	0.39	-0.38
海水中の Cl <sup>-</sup> 濃度	一次データ	0.13	0.20	-0.03
	二乗値	0.13	0.23	-0.05
	平方根	0.13	0.19	-0.02

付表-15 一次データ, 二乗値, 平方根の相関係数

分極抵抗の逆数

		海中部	干満部	飛沫部
気温	一次データ	-0.42	-0.58	-0.62
	二乗値	-0.38	-0.52	-0.68
	平方根	-0.44	-0.61	-0.58
湿度	一次データ	0.04	0.23	0.24
	二乗値	0.04	0.22	0.23
	平方根	0.04	0.23	0.24
風速	一次データ	-0.32	-0.26	-0.35
	二乗値	-0.35	-0.28	-0.37
	平方根	-0.30	-0.25	-0.35

付表-16 発錆面積率を目的変数とした場合の重回帰分析の結果

すべての独立変数を含む回帰式における標準化係数

	海中部	干満部	飛沫部
海水中の塩化物イオン濃度	-0.002	0.039	モデル化が不可
気温	-0.462	-0.541	
気温偏差	0.129	0.297	
湿度	0.141	0.131	
風速	0.088	0.125	

重回帰分析より得られた最適モデル

	回帰式
海中部	Y = -0.423 (気温) R* = 0.116, R = 0.423
干満部	Y = -0.488 (気温) + 0.387 (気温偏差) R* = 0.150, R = 0.521
飛沫部	モデル化が不可